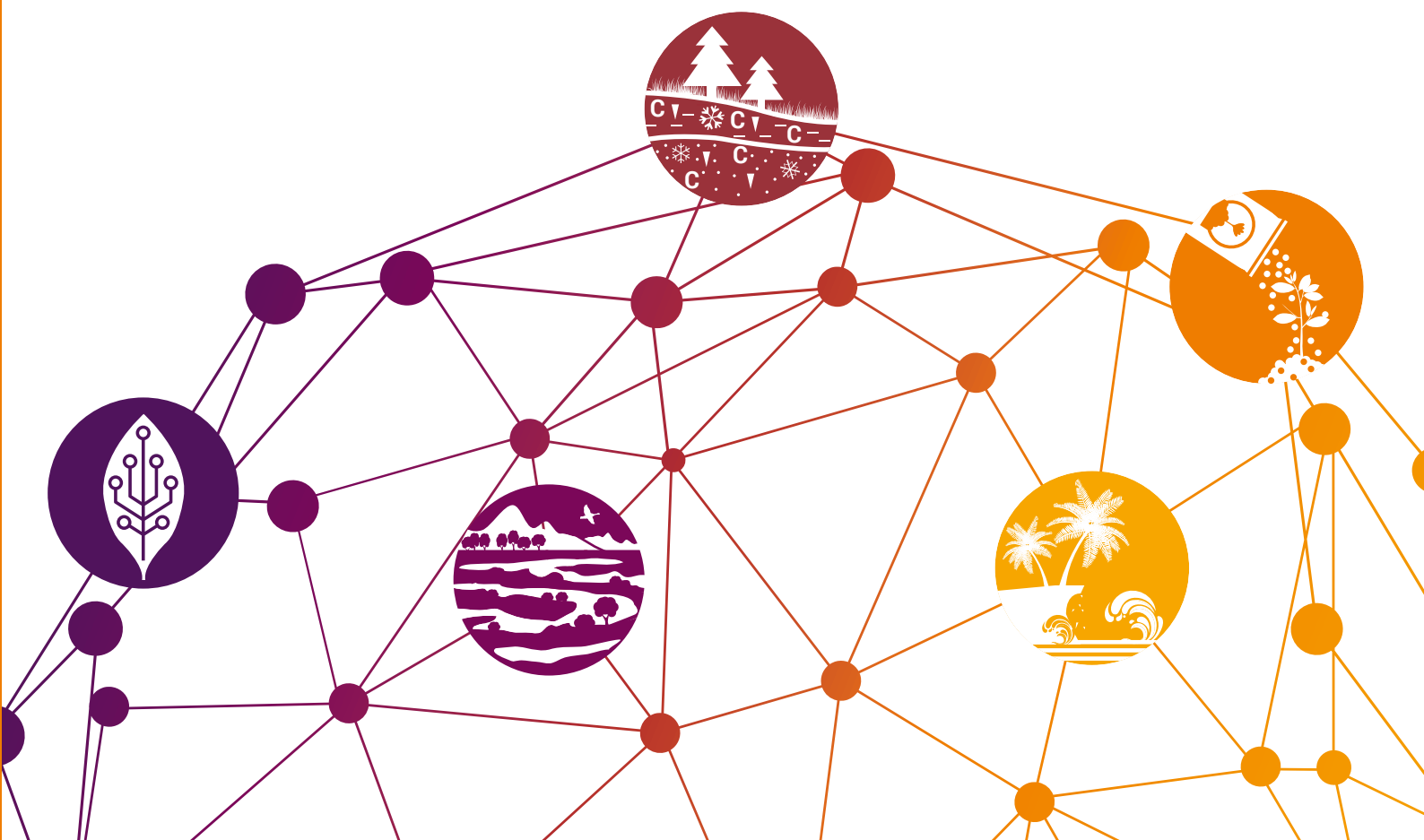


联合国
环境署



2018/19 前沿报告

全球环境的新兴问题



© 2019联合国环境署
ISBN: 978-92-807-3736-3
Job No: DEW/2220/NA

免责声明

本出版物可以全篇或部分复制，以任何形式用于教育或非营利目的，无需版权许可，但请注明来源。联合国环境署将感谢使用者向我们寄送任何使用本报告而形成的新的出版物。

未经联合国环境署事先书面许可，不得将本出版物再次出售或用于任何其他商业目的。如需申请许可，请向联合国环境署通信司司长提出申请，说明复制的目的和范围。通信地址为：P. O. Box 30552, Nairobi 00100, Kenya。

本出版物所采用的名称与材料的呈现方式并非表明联合国环境署关于任何国家、领土或城市或其当局的法律地位或其权力的任何意见，亦非关于其边界划定的任何意见。关于出版物中地图用途的一般性指导，请参阅：<http://www.un.org/Depts/Cartographic/english/htmain.htm>

本出版物中提到的商业公司或产品并不代表联合国环境署的认可。禁止在宣传或广告中使用本出版物中关于专利产品的信息。

© 地图、照片和插图来源请参照说明。

建议引用格式

联合国环境署(2019)。《2018/19年前沿报告》：全球环境的新兴问题。联合国环境署（UNEP），内罗毕，肯尼亚

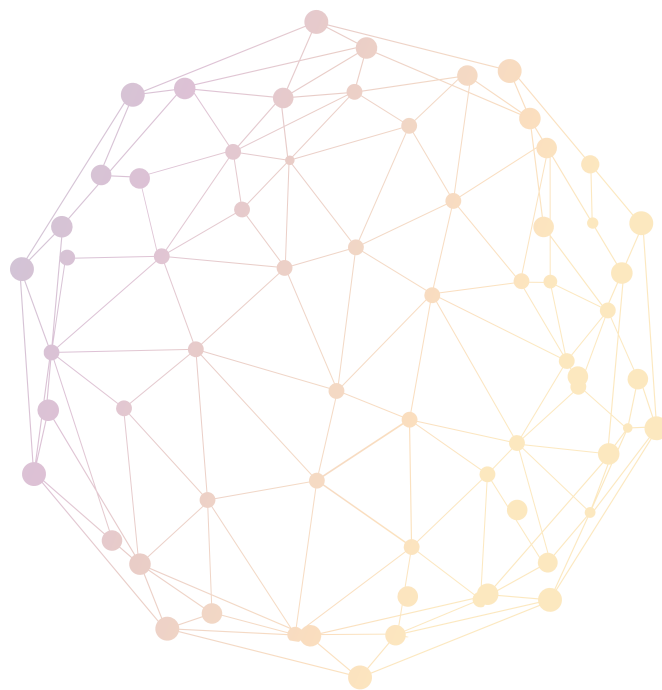
Production

Science Division
UN Environment
P.O.Box 30552
Nairobi, 00100, Kenya
电话：(+254) 20 7621234
电子信箱：publications@unenvironment.org
网站：www.unenvironment.org

联合国环境署致力于在全球倡导环保做法，并从自身行为做起。我们的出版发行政策旨在减少联合国环境署的碳足迹。





2018/19前沿报告

全球环境的新兴问题





目录

	前言	7
	致谢	8
	合成生物学：重新设计整合环境	10
	机遇和挑战	10
	重写生命代码	12
	重新定义应用：从实验室到生态系统	16
	用智慧创新	18
	参考文献	20
	生态连接度：搭建保护生物多样性的桥梁	24
	把支离破碎的生态系统重新连接起来	24
	推动破碎化的力量	26
	推广连接度解决方案	30
	为未来的连接度设定目标	32
	参考文献	34
	多年冻土区泥炭地：拯救气候变暖下不断缩减的湿地生态系统	38
	加快北极的变革	38
	融化的永久冻土、腐烂的泥炭和复杂的相互作用	40
	增进对多年冻土区泥炭地的认识	44
	知识重点和网络扩展	46
	参考文献	48
	氮固定：从氮循环污染到氮循环经济	52
	全球氮挑战	52
	氮的已知问题和已知的未知问题	54
	政策碎片化和循环经济解决方案	58
	迈向整体式的国际氮处理方法	60
	参考文献	62
	气候变化适应不良：避免陷阱	66
	定义气候变化背景下的适应和适应不良	66
	大规模适应不良	68
	在1.5°C的受限制未来避免适应不良	73
	参考文献	74



前言



在20世纪第一个十年，弗里茨·哈伯（Fritz Haber）和卡尔·博世（Carl Bosch）这两位德国化学家开发出了一种低成本、大规模生产合成氨的方法。他们的发明推动了氮肥的大规模生产，从而改变了全世界的农业。这也标志着我们开始长期干扰地球的氮平衡。现在每年估计有价值2000亿美元的活性氮损失到环境中。活性氮造成我们的土壤退化，污染我们的空气，造成“死区”蔓延和有毒的藻华在我们的水道中爆发。

难怪很多科学家认为“人类世”应该成为当前地质时代的正式名称。在短短几十年时间里，人类导致全球升温的速度比自然升温速度快170倍。我们还故意改变了地球75%以上的陆地表面，并永久改变了全世界93%以上河流的流动。我们不仅引起了生物圈的剧变，而且现在也有能力重新搭建（甚至从零开始创造）生命的构成单元。

每年，由来自世界各地的科学家、专家和机构组成的网络与联合国环境署携手合作，以确定和分析将对我们的社会、经济和环境产生深远影响的新兴问题。其中一些问题与能带来惊人应用和具有不确定风险的新技术有关，而另一些问题则是长期存在的问题，例如野生陆地景观的破碎化和长期冻土的融化问题。另一个问题——氮污染，代表了人类在生物圈中数十年的活动产生的意外后果。虽然这里分析的最后一个问题——气候变化适应不良，凸显了我们未能充分和恰当地适应我们周围不断变化的世界。

但还是要报告一些好消息。正如您稍后将看到的一样，应对氮管理全球挑战的整体式方法正在开始出现。在中国、印度和欧盟，我们正在看到减少氮肥损失和提高氮肥效率的新举措。最终，氮和其他有价值的营养素和材料的回收和再循环利用能帮助我们以清洁和可持续的方式耕种，这是真正的循环经济的标志。

前沿报告中审查的问题应该提醒我们，无论我们何时干涉自然，无论我们在全球范围还是在分子层面进行干涉，我们都在冒着使我们的地球家园遭受长期影响的风险。但通过具有远见的行动和共同努力，我们能够防患于未然，并制定能够惠及我们所有人以及子孙后代的解决方案。

A handwritten signature in blue ink, which appears to read "Joyce Msuya". The signature is stylized and fluid.

乔伊斯·姆苏亚(Joyce Msuya)
代理执行主任
联合国环境署

致谢

合成生物学：重新设计整合环境

首席作者

Bartłomiej Kolodziejczyk, H2SG Energy Pte. Ltd., 新加坡
Natalie Kofler, 耶鲁生物圈研究所, 耶鲁大学, 康涅狄格州, 美国

撰稿人和审稿人

Mariana Araya, 《生物多样性公约》, 蒙特利尔, 加拿大
James Bull, 自然科学学院, 德克萨斯大学奥斯汀分校, 德克萨斯州, 美国
Jackson Chamber, 生物统计与计算生物学系, 康奈尔大学, 纽约州, 美国
Chen Liu, 生物统计与计算生物学系, 康奈尔大学, 纽约州, 美国
Yongyuth Yuthavong, 泰国国家科学技术发展署, 巴吞他尼, 泰国

生态连接度：搭建保护生物多样性的桥梁

首席作者

Gary Tabor, 大型陆地景观保护中心, 蒙大拿州, 美国

撰稿人和审稿人

Maya Bankova-Todorova, 穆罕默德本扎耶德物种保护基金, 阿布扎比, 阿拉伯联合酋长国
Camilo Andrés Correa Ayram, 亚历山大冯洪堡生物资源研究所, 波哥大, 哥伦比亚
Leticia Couto Garcia, 马托格罗索联邦大学, 大坎普, 巴西
Valerie Kapos, 联合国环境署-世界保护监测中心, 剑桥, 英国
Andrew Olds, 科学与工程学院, 阳光海岸大学, 墨尔本, 澳大利亚
Ileana Stupariu, 地理系, 布加勒斯特大学, 罗马尼亚

多年冻土区泥炭地：拯救气候变暖下不断缩减的湿地生态系统

首席作者

Hans Joosten, 格赖夫斯瓦尔德大学 / 格赖夫斯瓦尔德大学沼泽中心, 格赖夫斯瓦尔德, 德国

撰稿人和审稿人

Dianna Kopansky, 联合国环境署, 内罗毕, 肯尼亚
David Olefeldt, 农业、生命和环境科学学院, 埃德蒙顿, 阿尔伯塔大学, 加拿大
Dmitry Streletskiy, 地理系, 乔治华盛顿大学, 华盛顿特区, 美国

氮固定：从氮循环污染到氮循环经济

首席作者

Mark Sutton, 生态与水文中心, 爱丁堡, 英国
Nandula Raghuram, 德里洲际大学, 新德里, 印度
Tapan Kumar Adhya, 卡林加工业技术研究所, 布巴内斯瓦尔, 奥里萨邦, 印度

撰稿人和审稿人

Jill Baron, 美国地质调查局, 科罗拉多州, 美国
Christopher Cox, 联合国环境署, 内罗毕, 肯尼亚
Wim de Vries, 瓦格宁根大学, 瓦宁根, 荷兰
Kevin Hicks, 斯德哥尔摩环境研究所, 约克, 英国
Clare Howard, 生态与水文中心, 爱丁堡, 英国
Xiaotang Ju, 农业资源与环境科学学院, 中国农业大学, 北京, 中国
David Kanter, 艺术与科学学院, 纽约大学, 纽约州, 美国
Cargele Masso, 国际热带农业研究所, 伊巴丹, 尼日利亚

Jean Pierre Ometto, 国家太空研究院, 圣若泽多斯坎波斯, 巴西

Ramesh Ramachandran, 国家可持续海岸管理中心, 环境、森林和气候变化部, 金奈, 印度

Hans Van Grinsven, 荷兰环境评估署, 海牙, 荷兰

Wilfried Winiwarter, 国际应用系统分析研究所, 拉克森堡, 奥地利

气候变化适应不良：避免陷阱

首席作者

Catherine McMullen, 斯德哥尔摩环境研究所, 曼谷, 泰国

撰稿人和审稿人

Thomas Downing, 全球气候适应伙伴关系, 牛津, 英国

Anthony Patt, 环境决策研究所, 苏黎世联邦理工学院, 苏黎世, 瑞士

Bernadette Resurrección, 斯德哥尔摩环境研究所, 曼谷, 泰国

Jessica Troni, 联合国环境署, 内罗毕, 肯尼亚

特别鸣谢：

Alexandra Barthelmes和Cosima Tegetmeyer, 格赖夫斯瓦尔德沼泽中心, 德国; Marin Klinger, 国家冰雪数据中心, 科罗拉多州, 美国; Salome Chamanje、David Cole、Nicolien Delange、Angeline Djampou、Philip Drost、Virginia Gitari、Jian Liu、Ariana Magini、Nada Matta、Pauline Mugo、Susan Mutebi-Richards、Shari Nijman、Andreas Obrecht、Samuel Opiyo、Moses Osani、Roxanna Samii、Rajinder Sian、Nandita Surendran和Josephine Wambua, 联合国环境署

制作顾问

Maarten Kappelle和Edoardo Zandri, 联合国环境署

制作团队

主编：Pinya Sarasas, 联合国环境署

技术支持：Allan Lelei, 联合国环境署

文字编辑：Alexandra Horton, 英国

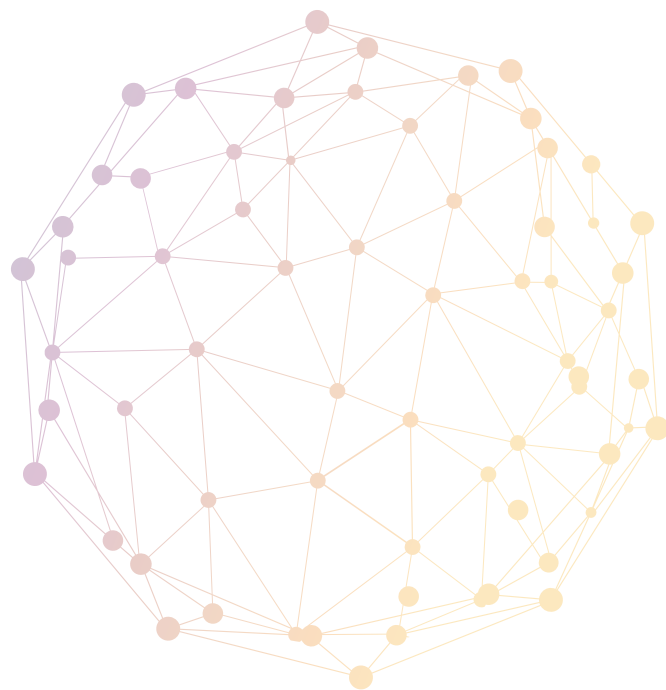
图形、设计和排版

美术设计：Audrey Ringler, 联合国环境署

制图：Jane Muriithi, 联合国环境署

印制

联合国内罗毕办事处/印刷服务科/内罗毕, ISO 14001:2004-认证





图片来源: nobeastsofierce/Shutterstock.com

合成生物学： 重新设计整合环境

机遇和挑战

在确保健康和可持续的未来方面，世界正在面临前所未有的挑战。栖息地破坏、入侵物种和过度开采正在造成生物多样性的巨大损失。¹ 不可持续的采掘业做法进一步加重了环境负担，进而加重了人类福祉的负担。通过病媒传播的疾病对全球健康构成重大威胁。² 气候的快速变化可能会扩大热带病的地理范围，进一步加大已不堪重负的物种和生态系统的压力。³

为应对这些挑战而设计的一些方法（一些已经提出，另一些已付诸实施）具有共同的战略。即它们依赖于对生物机体的基因操纵以获得自然界中不存

在的新功能，以便满足人类的需要。科学家可以通过重写它们的遗传密码来改变大肠杆菌等微生物，把它们变成生产生物燃料的活的小型工厂。⁴ 可改变面包酵母和大肠杆菌的基因结构，以生产己二酸（这是从石油衍生的化学制品，是制造尼龙的重要原料），从而为依赖石油的生产提供了替代品。^{5,6} 也可对面包酵母重新编程，以获得一种名为青蒿素的抗疟疾药物，这种药物通常来自青蒿。⁷ 这些都是被称为合成生物学的先进的基因工程技术实现的产品实例。

大多数商业化的合成生物产品的开发是为了提供现有的高价值商品的替代品，特别是那些依赖于石油供应链和不可再生资源的商品。⁸ 此外，合成替代



琥珀酸是一种高价值化学品，用于食品、制药和化学工业。如上所示的产琥珀酸巴斯夫菌 (*Basfia succiniciproducens*) 是在牛瘤胃里发现的能产生天然琥珀酸的细菌。为了实现工业规模生产，对它进行了转基因，以提高生产率。放大4000倍。

图片来源：巴斯夫

品和通常来自大自然的物质的替代品也在研究和市场空间方面取得了进展。⁹⁻¹² Urban Meadow是一家公司，发明能生产胶原蛋白的酵母，旨在提供可持续的皮革替代品，它的特性和质地类似于动物皮革。¹¹ 合成生物学也为具有新功能和新性能的先材料（例如能自行组装或自我修复的材料）开辟了一片新天地。¹³

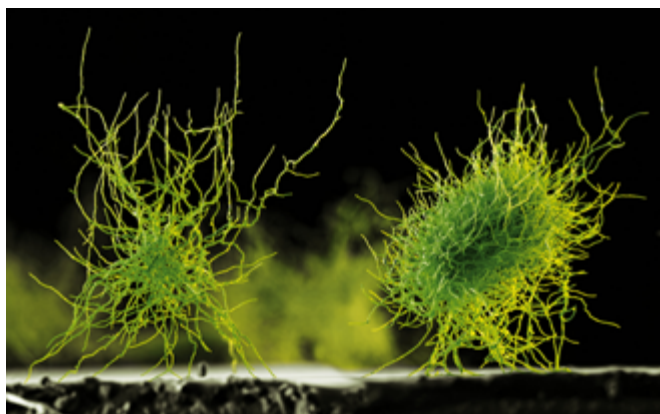
最近出现的CRISPR（发音为crisper，是“成簇的规律间隔的短回文重复序列”的缩写）基因工具使利用更精确，成本更低的方法改变单个生物体、生物系统和整个基因组的基因结构成为可能。^{14,15} 合成生物学的应用正在从实验室中对微生物的操纵转向在受控环境以外改变物种繁殖基因，以达到特定的目的。已经提出将转基因生物释放到环境中以永久改变整个目标物种种群的战略，以此作为根除疾病媒介，消灭入侵物种和为受威胁的动植物提供复原力的手段。¹⁶



《生物多样性公约》认为以下操作定义可被用作促进在《公约》及其议定书下的科学和技术审议的一个起点。

合成生物学是现代生物技术的进一步发展和新的维度，将科学、技术和工程融合在一起，以促进和加快对遗传材料、生物体和生物系统的理解、设计、重新设计、制造和/或修改。²⁰

将基因工程生物有意或无意释放到环境中可能会对人类和环境健康产生重大的负面影响。滥用这些技术和无法对意外后果负责可能会造成不可逆转的环境破坏，并构成重大的地缘政治威胁。¹⁷ 合成生物学潜在的深远影响需要治理方法和研究指南，以促进其合乎道德的、负责任的使用。^{18,19}



丝状真菌（黑曲霉）能自然产生在食品和动物饲料工业中具有重要商业意义的酶。对微生物进行基因改造以实现酶的大规模生产。放大180倍。

图片来源：巴斯夫

重写生命代码

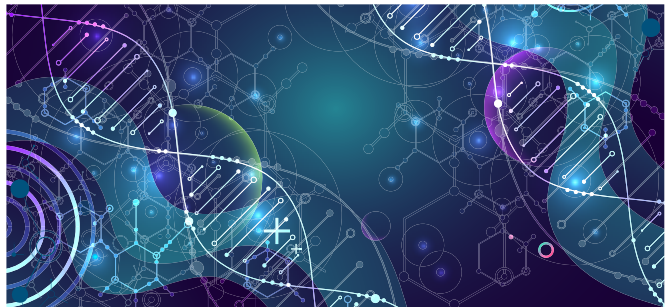
重组DNA技术在20世纪70年代的发展标志着人类控制基因组的方式发生了重大转变。²¹ 基因测序技术能让人们读取和理解DNA片段，为改变基因组结构实现新的基因表达提供蓝图。可通过删除、添加或替换片段完全重写DNA序列。现在能够通过化学方法合成和组装DNA的整个部分，从而创造出合成生命。²²

最新的基因编辑工具CRISPR-Cas9令科学界和普通大众欢欣鼓舞。关于CRISPR的描述首次出现于2012年；与之前的任何基因编辑工具相比，它速度更快、更便宜、更准确、更高效。^{23,24} 它把编辑过程从几个月缩短到了几天。^{25,26}

基因编辑技术的灵感源于某种细菌对病毒入侵的天然防御系统。^{27,28} 在自然界中，细菌可以部署Cas9酶，以切断病毒插入的侵入性基因材料，有效地阻止攻击。研究人员已修改了这种机制，以在任何特定位置切割DNA。在CRISPR-Cas9基因编辑中，科学家使用向导RNA将Cas9酶导向DNA的精确部分。

然后Cas9酶充当分子剪刀，切割或删除目标片段。通过利用DNA的天然修复过程，研究人员还可以把定制的DNA片段插入到被破坏的链中。²⁹

▶ 视频：合成生物学揭秘



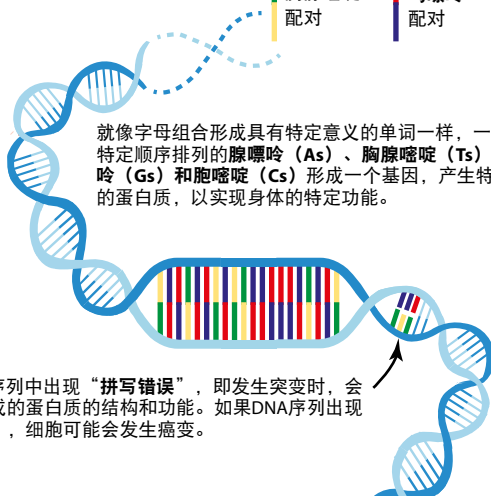
视频链接：<https://www.youtube.com/watch?v=rDSuNAMbDaQ>
图片来源：Omelchenko/Shutterstock.com

© techNyouvids

DNA 存在于每一个活生物体的蓝图之中。它指导一个生物体运转所需的蛋白质的生产。

DNA 又名脱氧核糖核酸，由四个碱基对组成。

腺嘌呤与胸腺嘧啶配对
胞嘧啶与鸟嘌呤配对



就像字母组合形成具有特定意义的单词一样，一系列以特定顺序排列的腺嘌呤 (As)、胸腺嘧啶 (Ts)、鸟嘌呤 (Gs) 和胞嘧啶 (Cs) 形成一个基因，产生特定类型的蛋白质，以实现身体的特定功能。

当DNA序列中出现“拼写错误”，即发生突变时，会影响合成的蛋白质的结构和功能。如果DNA序列出现“错误”，细胞可能会发生癌变。

科学家能通过DNA测序确定字母的精确顺序。一整套人类DNA（人类基因组）有30亿个组合或碱基对。



27亿个碱基对



6亿5100万个碱基对



1200万个碱基对



2亿7800万个碱基对



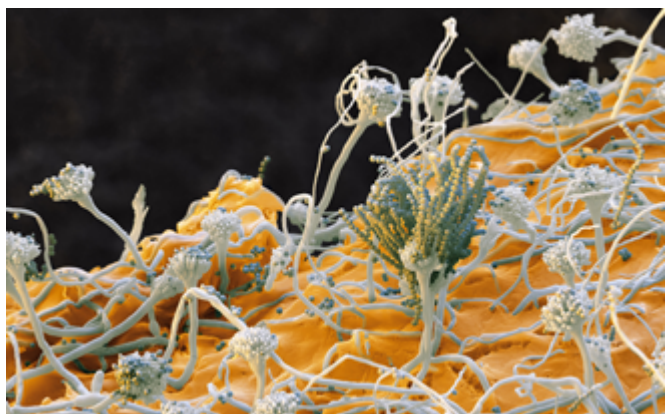
几十年来，基因工程技术一直被用于通过改变遗传物质的位置来改变生物体，例如在转基因生物 (GMO) 中，从一个物种分离出的基因被转移到一个不相关的物种中，以便在目标生物体中获得所需的性状。

合成生物学是基因工程的下一个层次：研究不再局限于操纵天然的基因材料，而是利用人工合成的DNA编程和构建新的生物系统。

2010年，科学家宣布他们在历经十年时间，从头开始学习设计、合成和组装DNA序列后，成功地创造了世界上首个合成细菌细胞。



一个科学家联盟现在正在利用天然面包酵母基因组作为蓝图，从完全合成的DNA中构建酵母细胞。



构巢裸胞壳真菌产生的球形孢子被包在一层斥水的疏水蛋白质中。负责生产疏水蛋白的基因已被引入大肠杆菌细菌中，以生产能商业应用的蛋白质。放大400倍

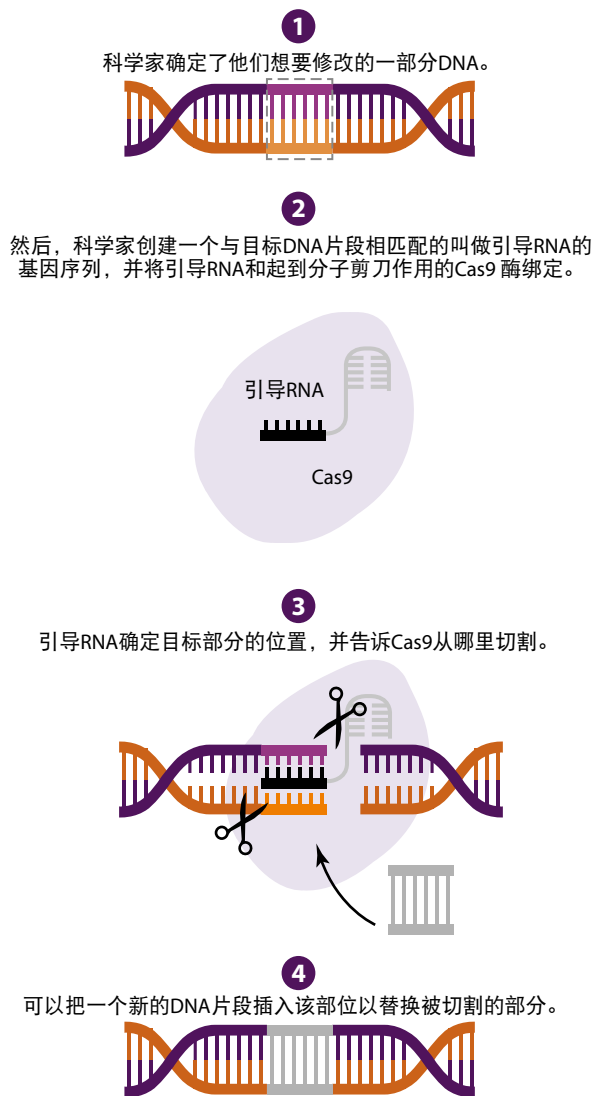
图片来源：巴斯夫

可把该编辑过程比作在文档中定位和准确剪切特定单词或句子，如果需要，还可以用新的措辞替换它。现在，CRISPR被用于修复人体中引起疾病的突变，获得作物的新性状，以及合成新的微生物。¹⁴最新的发展还包括使用CRISPR-Cas13编辑RNA，而不是DNA。³⁰

正在开展CRISPR基因编辑研究工作，目的是在人类控制环境以外改变野生生物的基因结构。基因驱动是一种合成生物学应用，它依靠CRISPR基因编辑确保在野生物种的后代中表达所需的基因编辑。³¹该过程涉及在实验室中改变生物体的基因结构，以便对基于CRISPR的基因驱动和所需的基因编辑进行编码。然后释放该生物体，使之与野生的正常群体交配，迫使其后代继承所需的基因编辑和基因驱动系统。基因驱动是自我延续的过程，只要后代与野生种群交配，这一过程就会重复。随着时间的推移，该物种的所有种群都将携带所需的基因编辑和基因驱动系统。基于CRISPR的基因驱动还能确保破坏繁殖的性状遗传，例如不育，它能在种群中传播并可能导致这种生物灭绝。基于CRISPR的基因驱动的应用最适合世代时间短的有性繁殖物种，如大多数昆虫和某些啮齿动物。³²

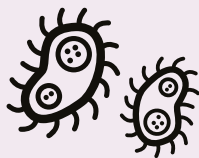
CRISPR-Cas9基因组编辑技术

CRISPR-Cas9实质上是细菌对付病毒攻击的防御和免疫策略，利用系统精确识别和切割入侵病毒的DNA，从而使攻击失效。科学家已经将CRISPR-Cas9机制用于基因组编辑，因为它提供了更精确、成本相对更低和更快的基因组修饰方法。



合成生物学

可持续应用



许多行业已利用了合成生物学。从细菌到酵母菌在内的微生物经过转基因形成小型工厂，生产更可持续的药品、疫苗、生物燃料、绿色化学品和新材料。

医药产品



大肠杆菌被改造成一种衣原体疫苗，这种衣原体对传统抗生素的抵抗力越来越强。



绿色和基于生物的化学品

日常产品中的各种化学品都来自石油。合成生物学能生产出可代替基于石油的化学品的物质。

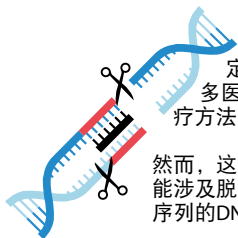
来自不可持续来源的化学品的替代品

鲨的血液是用于检测药物的细菌污染的主要生物医学商品。合成生物替代品可减少或替代从海洋中采集濒临灭绝的物种的需要。



乳酸、琥珀酸和丙二醇是转基因微生物制造的化学品，能在全球市场上买到。

CRISPR-Cas9基因组编辑技术



CRISPR-Cas9的发现改变了整个合成生物学研究的前景。它能使科学家切割所需序列的特定DNA片段，或者用新的DNA链替换该片段。许多医学研究领域都需要这种编辑精度以彻底改变治疗方法。

然而，这项技术的安全性也受到了严格审查，因为它可能涉及脱靶效应，即它无意中切断了与目标链具有相似序列的DNA，从而可能在被编辑的细胞中引发癌症。

市场和投资

139亿美元

预计到2022年，合成生物学应用的全球市场价值



19亿美元

2018年，全球对合成生物学初创公司的投资

自己动手生物学，又名“DIY生物学”

对进行合成生物学实验感兴趣的所谓“公民科学家”运动在全球大受欢迎。许多没有科学背景的生物学爱好者在车库实验室碰头，使用专门的DIY工具包和在网上找到的简单协议做实验。

一些团体拥有专业设备，并雇用专业人员帮助公民科学家、生物黑客和生物学爱好者发展他们的项目。

风险和政策考虑

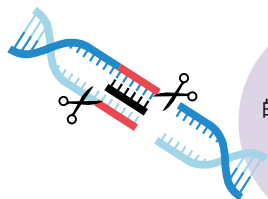
有人担心能用合成生物学重新设计现有的致病病毒，使它们变得更加危险，或只用适度的资源和组织足迹生产生化药剂。

合成生物学提出了新的挑战，需要通过政府和国际机构的联合行动加以解决。制定有效的方法来更好地管理新出现的风险对于确保技术安全至关重要。



用于保护和公共卫生的应用

基于CRISPR的基因驱动可能是应对某些全球性挑战的关键，例如通过媒介传播的疾病或入侵物种，但它们也需要多方面的社会辩论，因为它们有能力绕过进化的基本原则，修改、抑制或取代目标物种的整个种群。



CRISPR-Cas9技术的发展使基因驱动成为可能。

具有抑制意图的基因驱动可强制遗传有害的基因变异，例如不育，有把目标群体数量减少到零的可能。这种抑制驱动旨在控制环境中携带疟疾的蚊子数量。



仅把少数带有基因驱动的生物体释放到环境中能改变整个物种种群，并有可能改变整个生态系统。



物种间的遗传交叉污染和意料之外的生态破坏是一些尚未解决的合理关注。

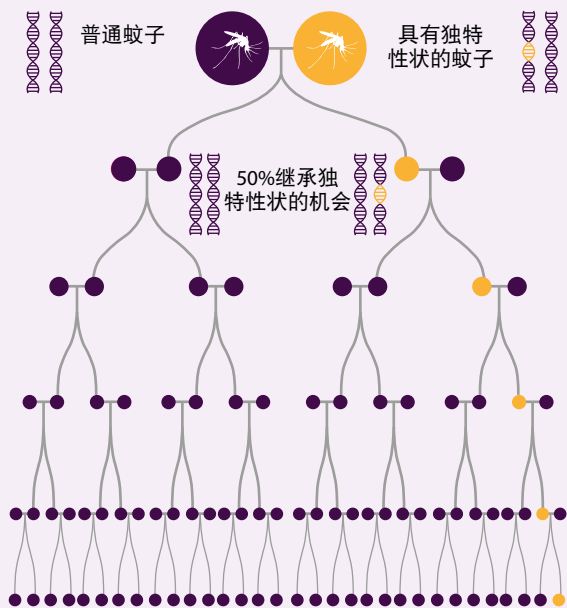


美国板栗树由于板栗树枯萎病而濒临灭绝，这是一种原产于亚洲的真菌病。可对美国板栗树进行转基因，使之抗枯萎病并在野外传播，目前还在等待监管部门的批准。

基于CRISPR的基因驱动：操纵野生动植物种群

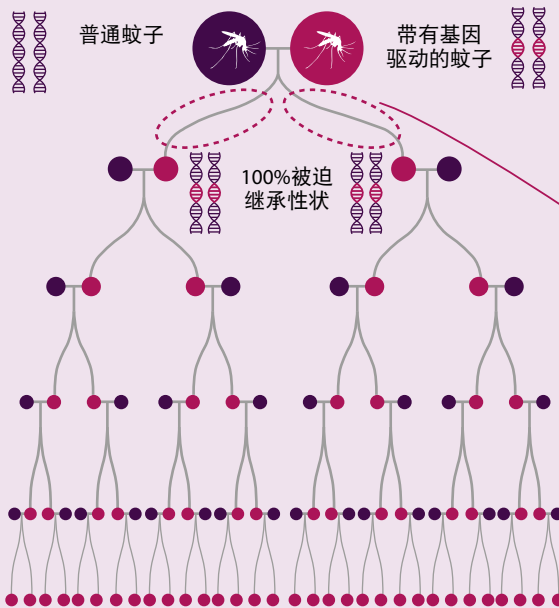
正常遗传

在有性繁殖中，每一亲本将其一半DNA传给其后代。一个亲本独特的遗传特性有50-50的机会被下一代继承。许多代以后，独特的遗传性状仍然存在于种群中，但出现的频率较低。正常遗传也适用于由正常亲本和经典转基因亲本产生的后代。



基因驱动遗传

合成基因驱动绕过了正常的基因遗传。设计这种自我延续机制是为了确保后代优先继承改良的遗传特性。随着时间推移，整个种群继承了首选的转基因性状。



在受精过程中，后代从普通亲本继承一套DNA，从转基因亲本继承一套含有CRISPR基因驱动DNA的DNA。CRISPR-Cas9在普通DNA中寻找目标位置并切割它。

当被切割的DNA试图修复损伤时，它复制了含有基因驱动的工程链。

该后代最终拥有两份传给后代的带有基因驱动能力的转基因DNA。

重新定义应用：从实验室到生态系统

通过允许研发通常来自野外的商业产品的人工替代品，合成生物学间接地令保护工作受益。例如，螫的血液是用于检测药物的细菌污染的主要生物医学商品。不可持续的捕获正在将该物种推向在全球灭绝的边缘。³³ 人们已开发出一种合成替代品，它能减少收获这种濒危螃蟹的需求，或取代这种需求。^{34,35} 同样，能生产鱼油替代品的转基因微生物和微藻可缓解数量不断减少的野生鱼群面临的压力。³⁶

最近出现的保护措施提出将该技术更直接地应用于目标物种。将转基因生物释放到环境中可以恢复受损种群的健康或增强其复原力。例如，科学家使用CRISPR之前的方法合成了通常由小麦表达的草酸氧化酶基因，并迫使美国板栗树表达这种基因。该基因能中和枯萎病分泌的毒素，这种毒素已导致该树木的功能性灭绝。^{37,38} 抗枯萎病的板栗树还在等待监管部门批准，种植这种板栗树可重建这种曾在美国东部森林中占主导地位的物种。与安全问题的主要集中在控制措施上的转基因作物不同，转基因美国板栗树经过精心设计，可以在更广阔的环境中传播和繁殖。

由于预计气候变化会加快全球物种灭绝的速度，因此CRISPR的可用性有可能会加快用于生态系统恢复的应用。³⁹ 科学家们已提出将CRISPR用于受威胁物种，例如处于海洋温度升高、酸化和污染带来的巨大压力之下的珊瑚。重写珊瑚基因组，以表达赋予珊瑚复原力的突变的CRISPR研究正处于概念验证阶段。^{40,41} 然而，尚未制定实地实施该研究成果的框架。

基于CRISPR的策略还能把入侵物种从受到它们威胁的生态系统中移除。例如，在许多太平洋岛屿，侵入性啮齿动物正在大批杀死本地鸟类种群。⁴² 通过国际合作，侵入性啮齿动物遗传生物控制计划正在开发基于CRISPR的基因驱动，以在啮齿动物中传

▶ 视频：转基因蚊子



视频链接：<https://www.youtube.com/watch?v=z1STGkDyEIM>

图片来源：Ajintai / Shutterstock.com

© biointeractive

播不育基因。^{43,44} 在新西兰，人们正在考虑用基于CRISPR的基因驱动帮助实现到2050年消灭所有入侵食肉动物的目标。⁴⁵ 在夏威夷，人们已提出用基因驱动减少由蚊子引起的鸟疟疾传播，这种疾病已导致稀有鸟类种群大幅下降。^{46,47} 然而，最近的研究表明基因驱动可能在野生蚊子种群中遇到抵抗，效果有限。^{48,49}

甚至有人提出，灭绝的物种可因其生态效益而复活，例如通过编辑血缘最近的“亲戚”——亚洲象的DNA使和猛犸象类似的动物复活。^{50,51} 关于物种去灭绝的建议不仅备受争议，而且还再次强调了解决灭绝根源的重要性。这种可能的基因干预即使没有实现，也会鼓励关于生物技术能如何支持保护目标，如何与保护目标共存或如何破坏保护目标的有效辩论。⁵²

为了减轻全球疾病负担，各种合成生物学策略直接以抑制疾病媒介种群为目标。一家名为Oxitec的公司已对蚊子进行了转基因，以表达一种合成致死基因，并将转基因蚊子释放到南美洲、东南亚和几个加勒比国家，以抑制登革热、寨卡病毒、黄热病和

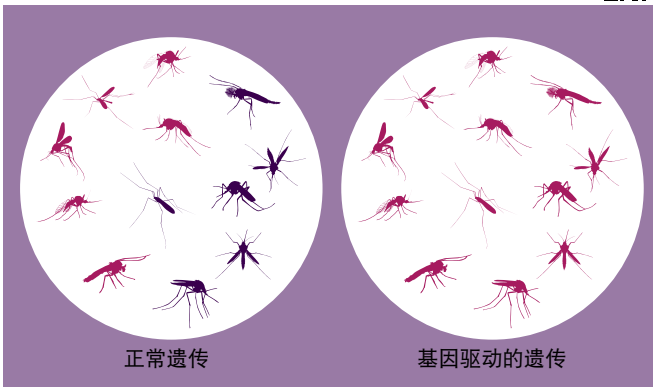


去灭绝

迄今为止，已进行了采用反向繁殖和克隆技术使最近已经灭绝或濒临灭绝的物种复活的尝试。⁵⁸⁻⁶⁰ 这些方法取决于要克隆的灭绝动物的组织，以及用于杂交繁育或作为代孕体的现存物种的可用性。^{61,62} 到目前为止，去灭绝工作都没有取得成功。使早已从地球上消失，并留下极少DNA痕迹的物种复活是一项遥不可及的任务。这将需要重建整个基因组并存在能够成功代孕的亲缘关系比较近的物种。即使有一天能克服技术难题，在灭绝物种如何在当今环境中发挥作用方面仍然存在重大挑战。基本的生态问题包括物种竞争和相互作用的不确定性；去灭绝物种对疾病和寄生虫的易感性；作为疾病媒介或自己成为入侵物种的可能性；以及从遗传多样性较低的个体建立和维持健康种群的可能性。⁶¹



视频：什么是基因驱动？



视频链接：<https://www.youtube.com/watch?v=75iP50LEHRU>

© STAT

视频：鲎的血液为什么如此昂贵



视频链接：<https://www.youtube.com/watch?v=LgQZWSILBnA>
图片来源：Lysogor Roman/Shutterstock.com

© Business Insider

基孔肯雅热的载体。^{53,54} 这些所谓的“自限制”蚊子将把一种致命基因传给后代，阻止它们存活到成年期。然而，如果不持续地把这种转基因蚊子释放到野外以保持其数量，那么这种抑制方法是可逆的。为避免这一问题，由比尔和梅林达盖茨基金会资助的国际财团瞄准疟疾 (Target Malaria) 项目正在开发基于CRISPR的基因驱动，以永久控制撒哈拉以南非洲的疟疾载体。⁵⁵ 基于CRISPR的基因驱动扩散极为迅速，因为在理论上，一次性释放几个携带基因驱动的生物就能完全抑制整个野生种群。另一个策略是使用不抑制种群而是限制蚊子传播病原体的能力的基因驱动。⁵⁶ 已经设计出基于CRISPR的基因驱动，使美国马萨诸塞州岛屿上的白足鼠对莱姆病永久免疫。⁵⁷

用智慧创新

意外或故意将转基因生物释放到环境中引起了对生物安全和不可预测后果的合理担忧。对于在封闭式研究设施或工业设施中转基因的生物体，控制程序和有关废物处理的强制性规定有助于避免逃逸，尽管这绝不是万无一失的。⁶³ 在故意释放的情况下，对物种间潜在的基因交叉污染、生态相互作用以及对生态系统及其服务的影响的担忧仍未得到很好的解决。⁶⁴ 改变疾病媒介物的基因可能会导致病原体进化，毒性变得更强，或被新载体携带。⁶⁵

迄今为止，仅在受控环境中的小种群中进行了基于CRISPR的基因驱动测试，一项最新实验在实验室中成功消灭了整个携带疟疾的蚊子种群。⁶⁶ 作为迈向更广泛试验的第一步，瞄准疟疾项目最近获得了许可，允许它在布基纳法索投放10000只转基因蚊子。将对这些样本进行转基因，以使它们不育，但没有使用基因驱动技术，以便测试它们与野生雄性蚊子的竞争情况。然而，这种用于评估基因驱动系统功效的实地试验可能会带来固有风险。^{68,69}

根据预防原则，应在开发和处理创新型合成生物学应用和产品时进行严格的风险评估，并纳入各利益攸关方的观点。^{19,70,71} 预防原则指出，当人类活动可能导致在科学上似乎可信，但不确定是否会出现的不可接受的伤害时，应采取行动避免或减少这种伤害。⁷² 实质等同性概念认为转基因生物与传统生物一样安全，此概念常和预防原则一起提及。⁷³ 一些国家制定了关于基因工程和研究的广泛政策和法规，而对其他国家而言，不起作用的监管体系、政策差距和风险评估能力是主要挑战。⁷⁴⁻⁷⁷

已经做出了确定、评价和解决合成生物学的伦理和生物安全问题的尝试。美国国家科学、工程和医学院于2016年发表了一份关于基因驱动的报告，强调有必要严格开展环境风险评估并进行审议，以捍卫人类价值观并使公众的谨慎参与成为必需。¹⁹

2017年12月，由《生物多样性公约》缔约方设立的合成生物学特设技术专家组得出结论认为，通过目前的合成生物学方法开发或正在开发的生物体，包括含有基因驱动的生物体，属于改性活生物体（LMO），由具有法律约束力的《卡塔赫纳议定书》管理。⁷⁸ 拥有171个缔约方的《议定书》采用预防方法，并要求各缔约方采取一切必要措施确保安全处理、运输和使用由此产生的改性活生物体。⁷⁹

SYNBIOSAFE是一个由欧盟资助的研究项目，旨在确定安全、安保、风险管理道德以及重要的科学-社会交汇处的关键问题，它强调公共教育和科学家、企业、政府和伦理学家之间的对话。^{80,81} 一些基因驱动开发人员也建议制定伦理研究指南，并强调有意义的公众参与的必要性。⁸² 尽管如此，有意释放转基因生物及其永久性改变野生物种和跨越国界的可能性可能会考验当前政策的界限，导致一些环保组织呼吁中止所有基因驱动研究。⁸³ 其他监管问题集中在合成生物学在军事攻击目的方面的潜在用途。^{84,85}

▶ 视频：这个非洲村庄为什么放蚊子进来？



视频链接：<https://www.youtube.com/watch?v=ooYShrGtUQ>
图片来源：Dmitry Trashchenko

© BBC News

▶ 视频：转基因老鼠能减少莱姆病吗？



视频链接：<https://www.youtube.com/watch?v=FOCNixYPsf4>

© PBS NewsHour

图片来源：Szasz-Fabian Jozsef / Shutterstock.com

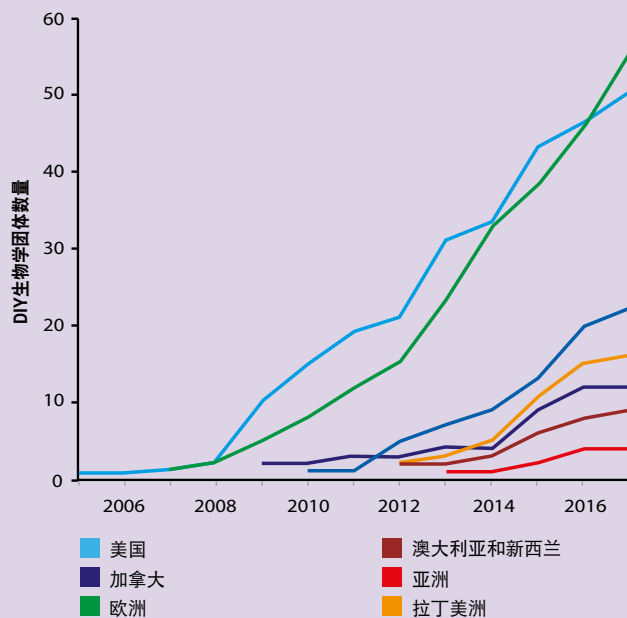
目前的伦理框架可能无法与合成生物学的快速发展及其固有的复杂性保持同步，尤其是在涉及野生物种时。⁸⁶ 普遍的环境伦理，或者大多数公民如何与非人类的自然发生联系，将形成把转基因生物释放到野外的决定。⁸⁷ 一些人认为改变野生生物的遗传密码是人类的粗暴越界，这种观点呼应了对转基因作物的担忧。其他人可能认为使用能挽救生命或恢复受损生态系统的技术是一种道德责任。⁸⁷ 这些形成鲜明对比的价值体系需要能够解决问题的负责任的决策。⁸⁹ 合成生物学应用也提出了以下问题：谁拥有改性活生物体及其基因组的所有权、脆弱社区能得到哪些保护，以及如何确保受影响最大的人有话语权。平衡而具有包容性的协商论坛应为合成生物学领域提供指导，并确保其环境应用被用于造福我们共同的地球家园中的每一个人，这一点至关重要。



公民科学家、生物黑客和车库实验室

合成生物学和基因组编辑不但引起了公司的兴趣，也激起了普通公民的兴趣。过去十年，自己动手生物学（又名“DIY生物学”），即对合成生物学实验感兴趣的“公民科学家”运动已成为一种国际现象。爱好者通常缺乏该领域的先验知识，他们在临时实验室碰头，学习生物技术速成课程并动手做实验。^{90,91} 在网上找到的简单协议和价值150-1600美元的专用工具包推动了该运动的快速扩张。

DIY生物实验室遍布大多数主要城市，到2017年，全球约有168个团体。^{92,93} 对于当局而言，管理易于获取的低成本技术（如CRISPR和基因编辑工具包）可能是一个挑战。人们越来越担心恐怖分子可能滥用这项技术，以摧毁农作物或将无害的微生物变成生物武器。⁹⁴



资料来源：布鲁金斯学会⁹³

参考文献

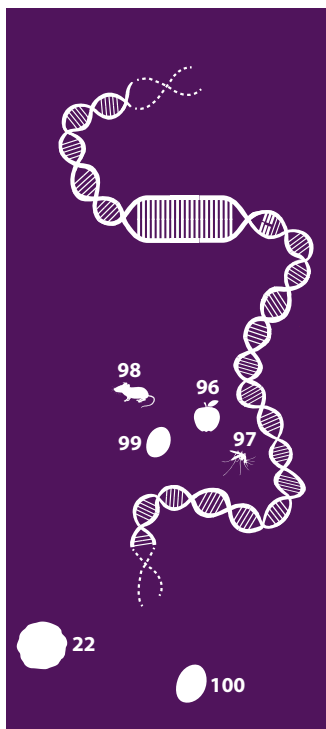
- International Union for Conservation of Nature (2018). The IUCN Red List of Threatened Species. <http://www.iucnredlist.org/>
- World Health Organization (2017). *Global vector control response 2017-2030*. Geneva. <http://www.who.int/vector-control/publications/global-control-response/en/>
- Scheffers, B.R., De Meester, L., Bridge, T.C., Hoffmann, A.A., Pandolfi, J.M., Corlett, R.T., et al. (2016). The broad footprint of climate change from genes to biomes to people. *Science* 354(6313), aaf7671. <https://doi.org/10.1126/science.aaf7671>
- Heo, M.J., Jung, H.M., Um, J., Lee, S.W. and Oh, M.K. (2017). Controlling citrate synthase expression by CRISPR/Cas9 genome editing for n-butanol production in *Escherichia coli*. *ACS Synthetic Biology* 6(2), 182-189. <https://doi.org/10.1021/acssynbio.6b00134>
- Raj, K., Partow, S., Correia, K., Khusnutdinova, A.N., Yakunin, A.F. and Mahadevan, R. (2018). Biocatalytic production of adipic acid from glucose using engineered *Saccharomyces cerevisiae*. *Metabolic Engineering Communications* 6, 28-32. <https://doi.org/10.1016/j.meten.2018.02.001>
- Averesch, N.J.H., Martínez, V.S., Nielsen, L.K. and Krömer, J.O. (2018). Toward synthetic biology strategies for adipic acid production: An *in silico* tool for combined thermodynamics and stoichiometric analysis of metabolic networks. *ACS Synthetic Biology* 7(2), 490-509. <https://doi.org/10.1021/acssynbio.7b00304>
- Peplow, M. (2016). Synthetic biology's first malaria drug meets market resistance. *Nature News*, 23 February. Doi: 10.1038/530390a. <https://www.nature.com/news/synthetic-biology-s-first-malaria-drug-meets-market-resistance-1.19426>
- Kelley, N.J., Whelan, D.J., Kerr, E., Apel, A., Beliveau, R. and Scanlon, R. (2014). Engineering biology to address global problems: Synthetic biology markets, needs, and applications. *Industrial Biotechnology* 10, 140-149. <https://www.liebertpub.com/doi/pdf/10.1089/ind.2014.1515>
- McEachran, R. (2015). Creators defend vanilla flavour made using synthetic biology. *The Guardian*, 28 May 2015. <https://www.theguardian.com/sustainable-business/2015/may/28/creators-defend-vanilla-flavour-made-using-synthetic-biology>
- Bhanawase, S.L. and Yadav, G.D. (2017). Novel silica-encapsulated Cu-Al hydroxalite catalyst: oxidative decarboxylation of vanillyl mandelic acid to vanillin in water at atmospheric pressure. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 56(45), 12899-12908. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.6b04982>
- Purcell, B.P., Williamson, D.T., Marga, F.S., Shofer, S.J. and Cassingham, D.M. (2016). Method for making a biofabricated material containing collagen fibrils. International Patent Application No. PCT/US2017/017889, filed 15 February 2017. <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2017142896&tab=PCTBIBLIO&maxRec=1000>
- Amyris (2018). *Amyris Aprinova joint venture launches pharmaceutical grade Neossance Squalane USP — opens new market among FDA regulated products*. 8 February. <http://investors.amyris.com/news-releases/news-release-details/amyris-aprinova-joint-venture-launches-pharmaceutical-grade>
- Le Feuvre, R.A. and Scrutton, N.S. (2018). A living foundry for synthetic biological materials: a synthetic biology roadmap to new advanced materials. *Synthetic and Systems Biotechnology*, 3, 105-112. <https://doi.org/10.1016/j.synbio.2018.04.002>
- Barrangou, R. and Doudna, J.A. (2016). Applications of CRISPR technologies in research and beyond. *Nat Biotechnol* 34, 933-941. <https://doi.org/10.1038/nbt.3659>
- Piaggio, A.J., Segelbacher, G., Seddon, P.J., Alphey, L., Bennett, E.L., Carlson, R.H. et al. (2017). Is it time for synthetic biodiversity conservation? *Trends in Ecology & Evolution* 32, 97-107. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.10.016>
- Redford, K.H., Adams, W., Carlson, R., Mace, G.M. and Ceccarelli, B. (2014). Synthetic biology and the conservation of biodiversity. *Oryx* 48, 330-336. <https://doi.org/10.1017/S0030605314000040>
- Esvelt, K.M. and Gemmell, N.J. (2017). Conservation demands safe gene drive. *PLoS Biology* 15, e2003850. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2003850>
- Nuffield Council on Bioethics (2012). *Emerging biotechnologies: technology, choice and the public good*. London. http://nuffieldbioethics.org/wp-content/uploads/2014/07/Emerging_biotechnologies_full_report_web_0.pdf
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2016). *Gene drives on the horizon: Advancing science, navigating uncertainty, and aligning research with public values*. Washington DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/23405>
- Convention on Biological Diversity (2016). Decision adopted by the Conference of the Parties to the Convention on Biological Diversity XIII/17 Synthetic biology. 16 December. CBD/COP/DEC/XIII/17. <https://www.cbd.int/doc/decisions/cop-13/cop-13-dec-17-en.pdf>
- Cohen, S.N., Chang, A.C.Y., Boyer, H.W. and Helling, R.B. (1973) *Construction of biologically functional bacterial plasmids in vitro*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 70, 3240-3244
- Gibson, D.G., Glass, J.I., Lartigue, C., Noskov, V.N., Chuang, R.Y., Algire, M.A. et al. (2010). Creation of a bacterial cell controlled by a chemically synthesized genome. *Science* 329(5987), 52-56. Doi: 10.1126/science.1190719. <http://science.sciencemag.org/content/329/5987/52>
- Sternberg, S.H. and Doudna, J.A. (2015). Expanding the biologist's toolkit with CRISPR-Cas9. *Molecular Cell* 58(4), 568-574. <https://doi.org/10.1016/j.molcel.2015.02.032>
- Jinek, M., Chylinski, K., Fonfara, I., Hauer, M., Doudna, J.A. and Charpentier, E. (2012). A programmable dual-RNA-guided DNA endonuclease in adaptive bacterial immunity. *Science* 337(6096), 816-821. <https://doi.org/10.1126/science.1225829>
- Kim, Y.G., Cha, J. and Chandrasegaran, S. (1996). *Hybrid restriction enzymes: zinc finger fusions to Fok I cleavage domain*. Proceedings of the National Academy of Sciences 93, 1156-1160. <http://www.pnas.org/content/93/3/1156>
- Wei, C., Liu, J., Yu, Z., Zhang, B., Gao, G. and Jiao, R. (2013). TALEN or Cas9 - rapid, efficient and specific choices for genomic modifications. *Journal of Genetics and Genomics* 40, 281-289. <https://doi.org/10.1016/j.jgg.2013.03.013>
- Horvath, P. and Barrangou, R. (2010). CRISPR/Cas, the immune system of bacteria and archaea. *Science* 327(5962), 167-170. <https://doi.org/10.1126/science.1179555>
- Rath, D., Amlinger, L., Rath, A. and Lundgren, M. (2015). The CRISPR-Cas immune system: Biology, mechanisms and applications. *Biochimie* 117, 119-128. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2015.03.025>
- Hsu, P.D., Lander, E.S. and Zhang, F. (2014). Development and applications of CRISPR-Cas9 for genome engineering. *Cell* 157(6), 1262-1278. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2014.05.010>

30. Cox, D.B.T., Gootenberg, J.S., Abudayyeh, O.O., Franklin, B., Kellner, M.J., Joung, J. *et al.* (2017). RNA editing with CRISPR-Cas13. *Science* 358(6366), 1019-1027. <https://doi.org/10.1126/science.aag0180>
31. Esvelt, K.M., Smidler, A.L., Catteruccia, F. and Church, G.M. (2014). Concerning RNA-guided gene drives for the alteration of wild populations. *eLife* 3, e03401. <https://doi.org/10.7554/eLife.03401>
32. Champer, J., Buchman, A. and Akbari, O.S. (2016). Cheating evolution: engineering gene drives to manipulate the fate of wild populations. *Nature Reviews Genetics* 17(3), 146-159. <https://doi.org/10.1038/nrg.2015.34>
33. Smith, D.R., Brockmann, H.J., Beekey, M.A., King, T.L., Millard, M.J. and Zaldivar-Rae, J. (2017). Conservation status of the American horseshoe crab (*Limulus polyphemus*): a regional assessment. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 27(1), 135-175. <https://doi.org/10.1007/s11160-016-9461-y>
34. Ding, J.L. and Ho, B. (2010). Endotoxin detection - from *Limulus* amoebocyte lysate to recombinant factor C. *Subcell Biochem* 53, 187-208. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9078-2_9
35. Zhang, S. (2018). *The last days of the blue-blood harvest*. The Atlantic, May 9. <https://www.theatlantic.com/science/archive/2018/05/blood-in-the-water/559229/>
36. Sprague, M., Betancor, M.B. and Tocher, D.R. (2017). Microbial and genetically engineered oils as replacements for fish oil in aquaculture feeds. *Biotechnology Letters* 39(11), 1599-1609. <https://doi.org/10.1007/s10529-017-2402-6>
37. Newhouse, A.E., Polin-McGuigan, L.D., Baier, K.A., Valletta, K.E.R., Rottmann, W.H., Tschaplinski, T.J. *et al.* (2014). Transgenic American chestnuts show enhanced blight resistance and transmit the trait to T1 progeny. *Plant Science* 228, 88-97. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2014.04.004>
38. Steiner, K.C., Westbrook, J.W., Hebard, F.V., Georgi, L.L., Powell, W.A. and Fitzsimmons, S.F. (2017). Rescue of American chestnut with extraspecific genes following its destruction by a naturalized pathogen. *New Forests* 48, 317-336. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016894521400079X>
39. Urban, M.C. (2015). Accelerating extinction risk from climate change. *Science* 348, 571-573. <https://doi.org/10.1126/science.aaa4984>
40. Van Oppen, M.J.H., Oliver, J.K., Putnam, H.M. and Gates, R.D. (2015). *Building coral reef resilience through assisted evolution*. Proceedings of the National Academy of Sciences 112, 2307-2313. <https://doi.org/10.1073/pnas.1422301112>
41. Cleves, P.A., Strader, M.E., Bay, L.K., Pringle, J.R. and Matz, M.V. (2018). *CRISPR/Cas9-mediated genome editing in a reef-building coral*. Proceedings of the National Academy of Sciences. <https://doi.org/10.1073/pnas.1722151115>
42. Harper, G.A. and Bunbury, N. (2015). Invasive rats on tropical islands: Their population biology and impacts on native species. *Global Ecology and Conservation*, 3, 607-6027. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2015.02.010>
43. Leitschuh, C.M., Kanavy, D., Backus, G.A., Valdez, R.X., Serr, M., Pitts, E.A. *et al.* (2018). Developing gene drive technologies to eradicate invasive rodents from islands. *Journal of Responsible Innovation* 5, 121-138. <https://doi.org/10.1080/23299460.2017.1365232>
44. The Genetic Biocontrol of Invasive Rodents (2018). GBIRD program. <http://www.geneticbiocontrol.org>
45. Predator free New Zealand (2018). Predator free NZ. <https://predatorfreenz.org>
46. Paxton, E.H., Camp, R.J., Gorresen, P.M., Crampton, L.H., Leonard, D.L. Jr. and VanderWerf, E.A. (2016). Collapsing avian community on a Hawaiian island. *Science Advances* 2(9), e1600029. <http://advances.sciencemag.org/content/2/9/e1600029>
47. Regalado, A. (2016). The plan to rescue Hawaii's birds with genetic engineering. *MIT Technology Review*, 11 May. <https://www.technologyreview.com/s/601383/the-plan-to-rescue-hawaiis-birds-with-genetic-engineering/>
48. Hammond, A.M., Kyrrou, K., Bruttini, M., North, A., Galizi, R., Karlsson, X. *et al.* (2017). The spread and selection of mutations resistant to a gene drive over multiple generations in the malaria mosquito. *PLoS Genet* 13(10), e1007039. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1007039>
49. Shaw, W.R. and Catteruccia, F. (2018). Vector biology meets disease control: using basic research to fight vector-borne diseases. *Nature Microbiology*. <https://doi.org/10.1038/s41564-018-0214-7>
50. Zimov, S.A., Zimov, N.S., Tikhonov, A.N. and Chapin, F.S. (2012). Mammoth steppe: a high-productivity phenomenon. *Quaternary Science Reviews* 57, 26-45. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.10.005>
51. Shapiro, B. (2015). Mammoth 2.0: will genome engineering resurrect extinct species? *Genome Biology* 16, 228. <https://doi.org/10.1186/s13059-015-0800-4>
52. Kaebnick, G.E. and Jennings, G. (2017). De-extinction and conservation. *Hastings Center Report* 47(4), S2-S3. <https://doi.org/10.1002/hast.744>
53. Phuc, H.K., Andreasen, M.H., Burton, R.S., Vass, C., Epton, M.J., Pape, G. *et al.* (2007). Late-acting dominant lethal genetic systems and mosquito control. *BMC Biol* 5, 11. <https://doi.org/10.1186/1741-7007-5-11>
54. Harris, A.F., McKemey, A.R., Nimmo, D., Curtis, Z., Black, I., Morgan, S.A. *et al.* (2012). Successful suppression of a field mosquito population by sustained release of engineered male mosquitoes. *Nat Biotechnol* 30, 828-830. <https://doi.org/10.1038/nbt.2350>
55. Target Malaria (2017). Our work. <http://targetmalaria.org/our-work/>
56. Hoffmann, A.A., Montgomery, B.L., Popovici, J., Iturbe-Ormaetxe, I., Johnson, P.H., Muzzi, F. *et al.* (2011). Successful establishment of *Wolbachia* in *Aedes* populations to suppress dengue transmission. *Nature* 476, 454-457. <https://doi.org/10.1038/nature10356>
57. MIT Media Lab (2017). Preventing tick-borne disease by permanently immunizing mice. <https://www.media.mit.edu/projects/preventing-tick-borne-disease-by-permanently-immunizing-mice/overview/>
58. Folch, J., Cocero, M.J., Chesné, P., Alabart, J.L., Domínguez, V., Cognié, Y. *et al.* (2009). First birth of an animal from an extinct subspecies (*Capra pyrenaica pyrenaica*) by cloning. *Theriogenology*, 71(6), 1026-1034. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2008.11.005>
59. Shapiro, B. (2016). Pathways to de-extinction: how close can we get to resurrection of an extinct species? *Functional Ecology*. <http://dx.doi.org/10.1111/1365-2435.12705>
60. Stokstad, E. (2015). Bringing back the aurochs. *Science*, 350, 1144-1147. <https://doi.org/10.1126/science.350.6265.1144>
61. Richmond, D.J., Sinding, M.H.S. and Gilbert, M.T.P. (2016). The potential and pitfalls of de-extinction. *Zoologica Scripta*, 45, 22-36. <https://doi.org/10.1111/zsc.12212>
62. Sherkow, J.S. and Greely, H.T. (2013). What if extinction is not forever? *Science* 340(6128), 32-33. <https://doi.org/10.1126/science.1236965>

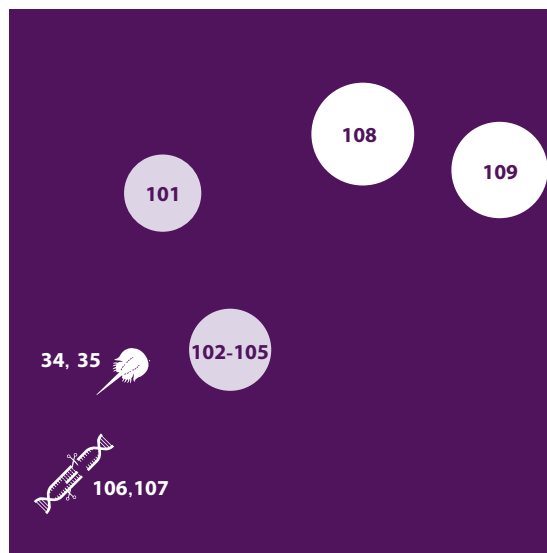
63. Moe-Behrens, G.H.G., Davis, R. and Haynes, K.A. (2013). Preparing synthetic biology for the world. *Front Microbiol* 4, 5. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2013.00005>
64. Hayes, K.R., Hosack, G.R., Dana, G.V., Foster, S.D., Ford, J.H., Thresher, R. *et al.* (2018). Identifying and detecting potentially adverse ecological outcomes associated with the release of gene-drive modified organisms. *Journal of Responsible Innovation* 5(S1), S139–S158. <https://doi.org/10.1080/23299460.2017.1415585>
65. David, A.S., Kaser, J.M., Morey, A.C., Roth, A.M. and Andow, D.A. (2013). Release of genetically engineered insects: a framework to identify potential ecological effects. *Ecology and Evolution* 3(11), 4000–4015. <https://doi.org/10.1002/ece3.737>
66. Kyrou, K., Hammond, A.M., Galizi, R., Kranjc, N., Burt, A., Beaghton, A.K. *et al.* (2018). A CRISPR–Cas9 gene drive targeting doublesex causes complete population suppression in caged *Anopheles gambiae* mosquitoes. *Nature Biotechnology*, 36, 1062–1066. <http://dx.doi.org/10.1038/nbt.4245>
67. Alliance for Science (2018). African scientists confident GMO mosquitoes will be game changer in fight to control malaria, September 13. <https://allianceforscience.cornell.edu/blog/2018/09/african-scientists-confident-gmo-mosquitoes-will-game-changer-fight-control-malaria/>
68. Akbari, O.S., Bellen, H.J., Bier, E., Bullock, S.L., Burt, A., Church, G.M. *et al.* (2015). Safeguarding gene drive experiments in the laboratory. *Science* 349(6251), 927. <https://doi.org/10.1126/science.aac7932>
69. James, S., Collins, F.H., Welkhoff, P.A., Emerson, C., Godfray, H.C.J., Gottlieb, M. *et al.* (2018). Pathway to deployment of gene drive mosquitoes as a potential biocontrol tool for elimination of malaria in sub-Saharan Africa: Recommendations of a Scientific Working Group. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene* 98(6_Suppl), 1–49. <https://doi.org/10.4269/ajtmh.18-0083>
70. Kwok, R. (2010) Five hard truths for synthetic biology. *Nature* 463, 288–290. <https://doi.org/10.1038/463288a>
71. Kaebnick, G.E., Heitman, E., Collins, J.P., Delborne, J.A., Landis, W.G., Sawyer, K. *et al.* (2016) Precaution and governance of emerging technologies. *Science* 354, 710–711. <http://dx.doi.org/10.1126/science.aah5125>
72. Kriebel, D., Tickner, J., Epstein, P., Lemons, J., Levins, R., Loechler, E.L. *et al.* (2001). The precautionary principle in environmental science. *Environmental Health Perspectives* 109, 871–876. <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/10.1289/ehp.01109871>
73. Organisation for Economic Co-operation and Development (1993) *Safety evaluation of foods derived by modern biotechnology: concepts and principles*. Paris: OECD.
74. Oye, K.A., Esvelt, K., Appleton, E., Catteruccia, F., Church, G., Kuiken, T. *et al.* (2014) Regulating gene drives. *Science* 345, 626–628. <https://doi.org/10.1126/science.1254287>
75. Douglas, C.M.W. and Stemerding, D. (2014) Challenges for the European governance of synthetic biology for human health. *Life Sciences, Society and Policy* 10, 6. <https://doi.org/10.1186/s40504-014-0006-7>
76. Trump, B.D. (2017). Synthetic biology regulation and governance: Lessons from TAPIC for the United States, European Union, and Singapore. *Health Policy* 121, 1139–1146. <https://doi.org/10.1016/j.healthpol.2017.07.010>
77. Glover, B., Akinbo, O., Savadogo, M., Timpo, S., Lemgo, G., Sinebo, W. *et al.* (2018). Strengthening regulatory capacity for gene drives in Africa: leveraging NEPAD's experience in establishing regulatory systems for medicines and GM crops in Africa. *BMC Proc.* 12(8). <https://doi.org/10.1186/s12919-018-0108-y>
78. Convention on Biological Diversity (2017). *Report of the ad hoc technical expert group on synthetic biology*. Montreal, Canada, 5–8 December 2017. CBD/SYNBIO/AHTEG/2017/1/3. <https://www.cbd.int/doc/c/aa10/9160/6c3cfed265d-bee686715016/synbio-ahteg-2017-01-03-en.pdf>
79. Convention on Biological Diversity (2018). The Cartagena Protocol on Biosafety. Convention on Biological Diversity, Montreal. <http://bch.cbd.int/protocol>
80. Schmidt, M., Torgesen, H., Ganguli-Mitra, A., Kelle, A., Deplazes, A. and Biller-Andorno, N. (2008). SYNBIOSAFE e-conference: online community discussion on the societal aspects of synthetic biology. *Systems and Synthetic Biology* 2, 7–17. <https://doi.org/10.1007/s11693-008-9019-y>
81. Schmidt, M., Kelle, A., Ganguli-Mitra, A. and de Vriend, H. (2009). *Synthetic Biology: the technoscience and its societal consequences*. Springer, Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-2678-1>
82. Emerson, C., James, S., Littler, K. and Randazzo, F. (2017). Principles for gene drive research. *Science*, 358, 1135–1136. <https://doi.org/10.1126/science.aap9026>
83. ETC Group. (2016). Reckless driving: gene drives and the end of nature, 1 September. <http://www.etcgroup.org/content/reckless-driving-gene-drives-and-end-nature>
84. Callaway, E. (2017). US defence agencies grapple with gene drives. *Nature News*, 21 July. <https://doi.org/10.1038/nature.2017.22345>
85. Defense Advanced Research Projects Agency (2018). Safe Genes program, DARPA. <https://www.darpa.mil/program/safe-genes>
86. Kaebnick, G.E., Gusmano, M.K. and Murray, T.H. (2014). The ethics of synthetic biology: next steps and prior questions. *Hastings Center Report* 44, S4–S26. <https://doi.org/10.1002/hast.392>
87. Batavia, C. and Nelson, M.P. (2017). For goodness sake! What is intrinsic value and why should we care? *Biological Conservation* 209, 366–376. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocon.2017.03.003>
88. Kaebnick, G.E. (2017). The spectacular garden: where might de-extinction lead? *Hastings Center Report* 47, S60–S64. <https://doi.org/10.1002/hast.754>
89. Kofler, N., Collins, J.P., Kuzma, J., Marris, E., Esvelt, K., Nelson, M.P. *et al.* (2018). Editing nature: Local roots of global governance. *Science* 362(6414), 527–529. <https://doi.org/10.1126/science.aat4612>
90. Ledford, H. (2010). Garage biotech: Life hackers. *Nature* 467, 650–652. <https://doi.org/10.1038/467650a>
91. Regalado, A. (2017). One man's quest to hack his own genes. *MIT Technology Review*, January 10. <https://www.technologyreview.com/s/603217/one-mans-quest-to-hack-his-own-genes/>
92. Ochoa Cruz, E.A., de la Barrera Benavidez, O.J., Giménez, M., Chavez, M. and Van Sluys, M-A. (2016). The biohacking landscape in Latin America. *BioCoder* 10, 5–12. <https://www.oreilly.com/ideas/biohacking-latin-america>.
93. Kolodziejczyk, B. (2017). Do-it-yourself biology shows safety risks of an open innovation movement. Brookings Institution, October 9. <https://www.brookings.edu/blog/techtank/2017/10/09/do-it-yourself-biology-shows-safety-risks-of-an-open-innovation-movement>

94. United Nations (2018). Terrorists potentially target millions in makeshift biological weapons 'laboratories', UN forum hears. UN News, 17 August 2018. United Nations, New York. <https://news.un.org/en/story/2018/08/1017352>
95. National Human Genome Research Institute (NHGRI). (2002). International Team of Researchers Assembles Draft Sequence of Mouse Genome. <https://www.genome.gov/10002983/2002-release-draft-sequence-of-mouse-genome>

图片参考文献



96. Daccord, N., Celton, J., Linsmith, G., Becker, C., Choisine, N., Schijlen, E., van de Geest, H., et al. (2017). High-quality *de novo* assembly of the apple genome and methylome dynamics of early fruit development. *Nature Genetics*, 49(7), 1099-1106. <https://doi.org/10.1038/ng.3886>
97. Holt, R.A., Subramanian, G.M., Halpern, A., Sutton, G.G., Charlab, R., Nusskern, D.R., Wincker, P., et al. (2002). The genome sequence of the malaria mosquito *Anopheles gambiae*. *Science*, 298(5591), 129-149. <https://doi.org/10.1126/science.1076181>
98. Cooper, G. (2000). *The Cell: A Molecular Approach*. 2nd ed. Sunderland, MA: Sinauer Associates.
99. Annaluru, N., Muller, H., Mitchell, L., Ramalingam, S., Stracquandano, G., Richardson, S., Dymond, J., et al. (2014). Total Synthesis of a Functional Designer Eukaryotic Chromosome. *Science*, 344(6179), 55-58. <https://doi.org/10.1126/science.1249252>



100. SAVI (2019). Synthetic yeast 2.0. The Science Across Virtual Institutes program. <http://syntheticyeast.org>
101. He, W., Felderman, M., Evans, A., Geng, J., Homan, D., Bourguet, F., Fischer, N., et al. (2017). Cell-free production of a functional oligomeric form of a Chlamydia major outer-membrane protein (MOMP) for vaccine development. *Journal of Biological Chemistry*, 292(36), 15121-15132. <https://doi.org/10.1074/jbc.M117.784561>
102. Woodrow Wilson Center (2019). Synthetic biology project. <http://www.synbio-project.org/cpi/applications/>
103. Reverdia (2019). Biosuccinium® sustainable succinic acid. <https://reverdia.com/biosuccinium-menu/biosuccinium/>
104. GC Innovation America (2019). Biotechnology Research & Development. <https://www.gcinnovationamerica.com/biocatalyst-rd/>
105. DuPont Tate & Lyle Bio Products Company (2019). Susterra® Propanediol. <http://duponttateandlyle.com/susterra>
106. Ihry, R.J., Worringer, K.A., Salick, M.R., Frias, E., Ho, D., Theriault, K., Kommineni, S., et al. (2018). p53 inhibits CRISPR-Cas9 engineering in human pluripotent stem cells. *Nature Medicine*, 24, 939-946. <https://doi.org/10.1038/s41591-018-0050-6>
107. Haapaniemi, E., Botla, S., Persson, J., Schmierer, B. and Taipale, J. (2018). CRISPR-Cas9 genome editing induces a p53-mediated DNA damage response. *Nature Medicine*, 24, 927-930. <https://doi.org/10.1038/s41591-018-0049-z>
108. BCC Research (2018). Synthetic Biology Global Markets to Reach \$13.9 Billion by 2022. [https://www.bccresearch.com/pressroom/bio/synthetic-biology-global-markets-to-reach-\\$139-billion-by-2022](https://www.bccresearch.com/pressroom/bio/synthetic-biology-global-markets-to-reach-$139-billion-by-2022)
109. Cumbers, J. and Bünger, M. (2019). Synthetic Biology Annual Investment Report (2018) - SynBioBeta. SynBioBeta.com. <https://synbiobeta.com/synthetic-biology-industry-strategy-reports/investment-report-2018>



图片来源: ALEX_UGALEK / Shutterstock

生态连接度： 搭建保护生物多样性的桥梁

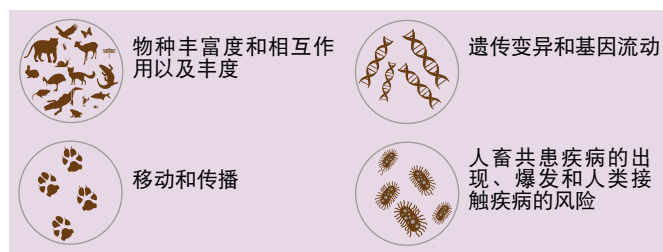
把支离破碎的生态系统重新连接起来

大自然曾经广袤无边，但在21世纪的工业化世界，情况已发生了变化。在全球范围内，陆地景观与海洋景观正在变得更加支离破碎。野生动物不再像从前那样能够自由自在地流浪，自由流动的河流越来越少。在热带海岸线沿线，曾经连绵不绝，渐次分布的红树林、海草草甸和珊瑚礁现在变得更加支离破碎，破坏了基本生产力和生态系统在自然和人为干扰后的复原力。¹ 自然陆地景观破碎化的结果是哺乳动物和其他物种现在移动的距离比以前的一半还要少。² 这种受限的迁徙、扩散、交配、觅食和茁壮成长的能力意味着野生动物陷入面临更大灭绝威胁的境地。

破碎化是陆地景观转型和破坏的典型症状。栖息地变成碎片有三个特殊效应：栖息地总面积的减少和质量的下降，小块栖息地斑块更加孤立，与栖息地碎片的人工边界相关的干扰增多，又名“边缘效应”。³⁻⁶ 孤立的，面积更小的栖息地斑块意味着每块栖息地的物种和种群较少，各栖息地斑块之间的相互作用有限。增加的碎片边缘使斑块内的种群暴露于边界沿线的外部干扰。最终，当一个斑块面积变得过小、过于孤立时，可存活的种群和物种丰富度将再也无法维持。⁵ 破碎化最终导致生态功能相继出现紊乱，呈螺旋式下跌，从食物网的瓦解，到关键的生态过程如矿物质和营养素的流失，再到物种的直接灭绝。^{3,5,7-9}

维持或恢复破碎化的栖息地或陆地景观斑块之间的连接度已被确定为抵消破碎化诸多负面影响的关键。¹⁰ 连接度可定义为陆地景观与海洋景观允许物种自由移动，生态过程毫无阻碍地发挥作用的程度。建立在岛屿生物地理学研究和物种集合种群研究基础上的科学证据压倒性地表明，相互连接的栖息地在保护物种和生态功能方面更加有效。^{11,12} 相互连接的生态群落和栖息地斑块维持着重要的生态过程，如授粉、生产力、分解以及生化和营养素循环。生态连接度还能通过加强对气候变化等破坏性威胁的生态复原力，帮助物种适应未来的环境条件并缓冲变化。¹³

虽然优势明显，但世界各国目前缺乏实施连接度保护的一致方法。评估连接度保护取得成功的最佳措施是什么？政府和环保主义者如何建立走廊，设计生态网络或确定连接度保护工作的有效性？通过指定更多或规模更大的保护区来保护未受损害的陆地景观与海洋景观是可行的，但需要在政治、社会和经济方面做出困难的选择。^{14,15} 作为保护目标的连接度要求各利益攸关方共同确定目标，以确保多方面的考虑和可实施的协调行动。公共和私营部门必须共同努力才能取得有效成果，因为无论是在社区层面，还是全球范围内，阻止生物多样性丧失和减少对生态系统的影响是这两个部门的共同责任。在许多情况下，连接度工作可以将当地社会经济问题纳入更大的保护框架。



栖息地破碎化

约40%的陆地生态系统已被转变为农业陆地景观。¹⁶ 改变土地和河流供人类使用导致栖息地的破碎化。被人类活动包围的较小、更加孤立的栖息地碎片不太可能维持动植物居民的功能和生存。栖息地破碎化会对丰富性、分布、移动、物种丰富度和相互作用，繁殖和遗传多样性产生负面影响。⁵ 它破坏物种适应新气候条件的能力。¹⁷



推动破碎化的力量

人类社会正在以前所未有的方式改变地球的生物圈并重塑其生态。最新研究表明，地球75%以上的陆地表面已被人类改变。¹⁸⁻²¹ 人口压力、发展中的城市化、农业扩张、污染和基础设施开发作为推动破碎化的力量共同发挥着作用。一些土地利用预测估计，到2050年，将清理大约10亿公顷热带土地专门用于满足农业需求。²² 海洋环境对这些趋势的免疫力更低：新研究表明在全世界的海洋中，只有13%左右仍被划为海洋荒野，远低于许多保护主义者的预期。²³

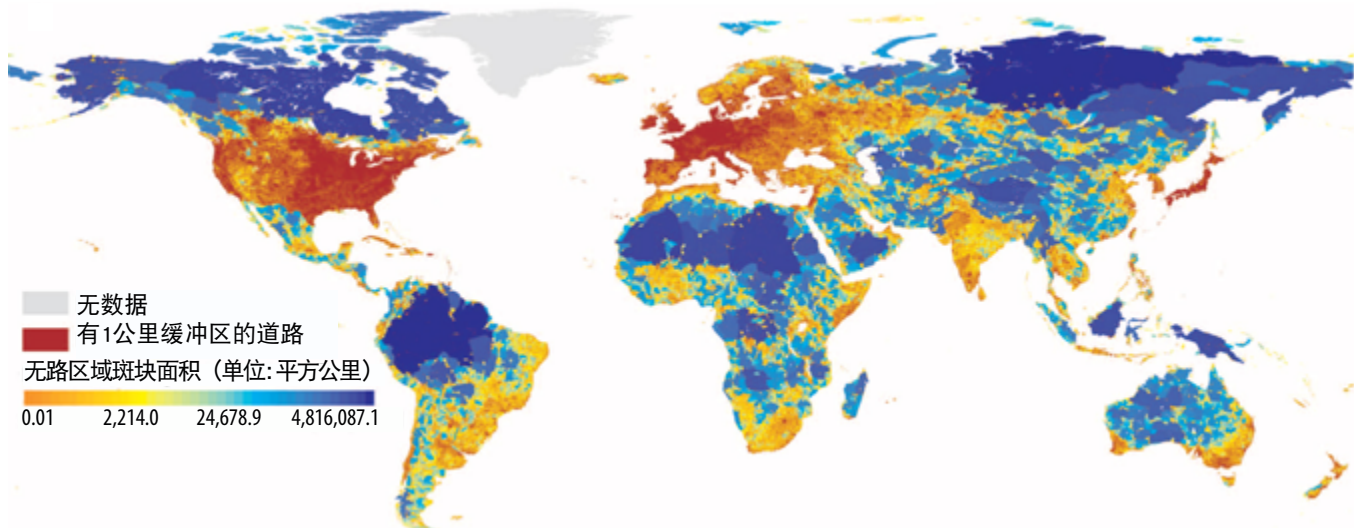
线性基础设施往往是现代发展的“矛尖”。人们正在以创纪录的速度建造公路、铁路、管道、围栏和运河，尤其是在以前未开发的偏远热带地区。预计90%的新道路建设将发在发展中国家。在发现了全世界近60%老虎种群的印度，其重要的老虎走廊受

到新规划的4300公里国道和邦道的威胁。²⁵ 到2050年，预计全球将有2500多万公里新公路，总长度比2010年现存公路增加60%。²⁶

自由流动的河流是陆地景观和河口的生态命脉，正在进行的水坝建设的大小和规模导致的破碎化使它们面临挑战。大型水坝将全球59%的河流划分为不同部分，扰乱了全球河流量93%的自然流动，近28%的流量被认为处于严格或严厉流量调节之下。²⁷ 仅在亚马逊流域，目前正在开发、建设或规划的就有400多个大坝项目。²⁸ 大坝建设、道路建设和森林砍伐共同破坏了内陆河流域的生态完整性，也给其他人类经济和娱乐活动造成了实际影响。例如，淡水连接度每年为亚马逊流域的渔业经济贡献约2亿美元，为大约20万名垂钓者提供就业机会。²⁹

河流、陆地景观和海岸线密不可分。连接度也是承认大自然作为各部分之和进行运转。水生和陆地系

道路造成的陆地景观破碎化



对含有全世界3600万公里道路的数据集的分析表明，道路已将地球陆地景观分割成60多万个斑块。在这些斑块中有一半以上处于任一条道路的1公里范围内（红色）。靠近蓝色阴影是距离所有道路更远，受到道路影响较小的陆地斑块。

资料来源：Ibisch等人(2016)³⁰

2000年和2017年的巴西北部的欣古河



2011年贝洛蒙特水电站大坝项目的建设彻底改变了欣古河。河流80%以上的流量被转移，导致大面积干涸并直接影响了该地区的土著社区和野生动植物。

图片来源: Joshua Stevens / NASA Earth Observatory

统之间的连接度对于生态完整性至关重要，但这些要素往往被作为独立的单位管理。例如，研究表明，在温带生态系统中，砾石床河流泛滥平原的足迹远远超出了河岸带。这种对地下陆地生态学项目的影响超出了可见的河道及其三角洲，延伸到海洋领域。自由流动的河流系统把从微生物到灰熊的水生、鸟类和陆地群落连接起来，对沿线陆地景观与海洋景观的生物地球化学构成影响。³¹

▶ 视频：种子传播和森林破碎化



视频链接：<https://www.youtube.com/watch?v=0m6AJWZ2p8I> © HHMI BioInteractive
图片来源：Jess Kraft / Shutterstock

陆地景观破碎化和连接度

陆地景观破碎化是将大而连续的栖息地细分成更小、更孤立的碎片或斑块。

陆地景观连接度是衡量特定陆地景观允许动物和其他生态流自由流动程度的指标。

随着气候变暖，保持不同温度区域之间的连接度能使生物体沿着**温度梯度**运动，从而使物种适应

连接度良好的空间允许物种迁移到新的栖息地，特别是当它们需要**适应气候变化**时。



河流的破碎化主要是由大坝和水库造成的，它们切断了上游和下游生态系统的联系，影响了物种扩散和迁移的途径，以及有机物和无机物的运输。

全世界计划建设**3700多座大型水电站大坝**。

道路改变了某些物种的行为。研究发现，像刺猬、响尾蛇、海龟、红松鼠和蜗牛这样的动物不会穿过道路。

公路和铁路等交通基础设施干扰了野生动物的移动。

道路宽度、交通负荷和道路弯曲等因素也会影响被杀死的物种数量。

已发现栖息地破碎化导致**顶端食肉动物**数量减少

一项全球研究发现，**177种哺乳动物**已经失去了超过**30%**的地理范围，其中**40%**的物种种群出现大幅下降。

陆地海洋连接度包括生物迁移、水文循环、营养素输送和其他气候过程，它们对沿海和全球生态系统都至关重要。

连接度增强了植物和动物间的相互作用，如授粉和种子传播。在连接更紧密的地区，植物能结出更多的果实。



到2030年，全球近**40%**的河流将出现**严重碎片化**

现代林业做法降低了陆地景观的连接度

关于亚马逊的一项主要研究得出结论认为，保护亚马逊避免人类活动影响并确保其抵御气候变化的最佳方法是建立**非常广大、广泛并且相互连接**的自然保护区。

全世界**59%**的河流流域都有大型水坝，到**2030年**这个数字将达到**75%**。

生态走廊是把栖息地连接起来的植被带，能促进动植物的运动。

“垫脚石”是分布在整个陆地景观中的相对较小的原生植被斑块，能促进物种移动和远距离扩散。

“垫脚石”允许物种在孤立的栖息地之间移动，并开拓新的栖息地。

在自然保护区之间建立走廊有助于栖息地的连接度，从而增加保护区的物种丰富度。

在巴西，一项对高度敏感的鸟类物种的研究发现，**连接度更好的森林**比连接度较差的森林拥有更多鸟类物种。

连接度良好的海洋栖息地更能适应气候变化。

连接度对于**热带和亚热带沿岸浅海**的生物体至关重要，它们依赖于在珊瑚礁、红树林、河口和河流生态系统之间的迁移。

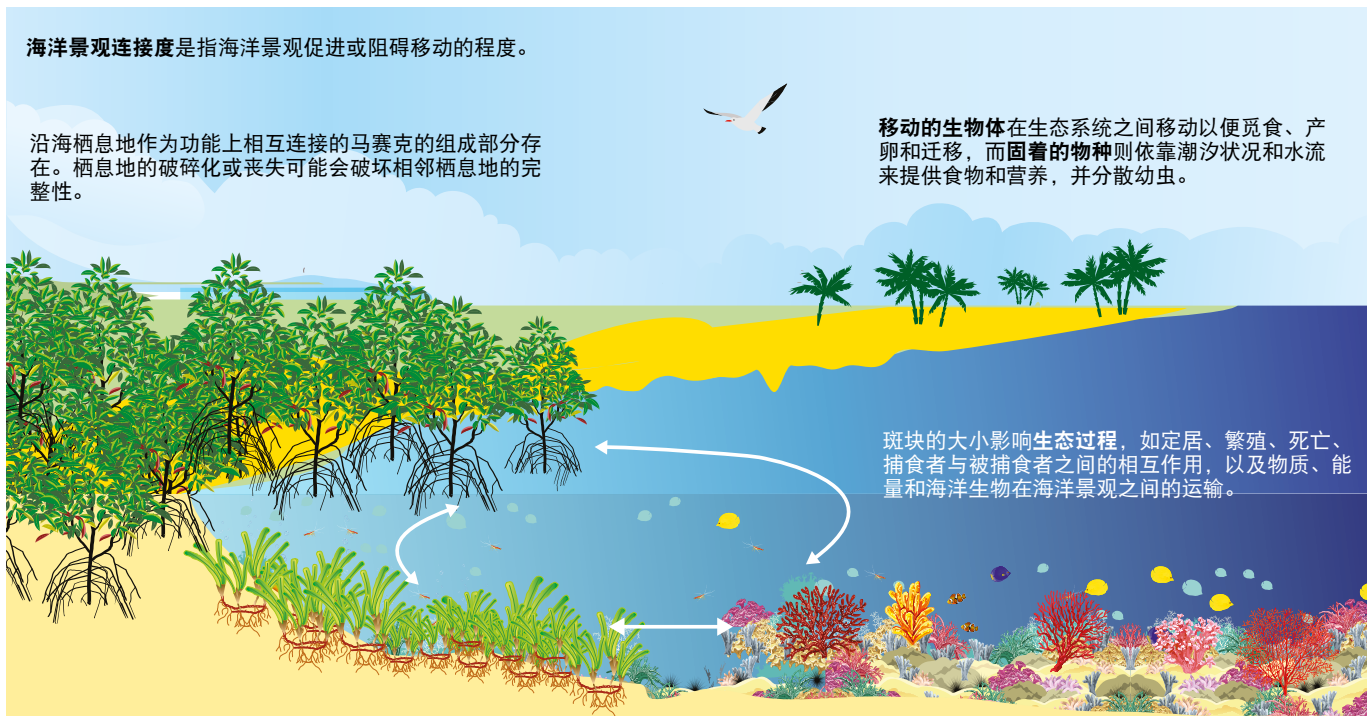
一项研究发现，在澳大利亚的摩顿湾，在与**红树林连接度更高的珊瑚礁斑块**，物种丰度高要于那些与红树林隔离开的珊瑚礁斑块。

推广连接度解决方案

连接度保护是解决破碎化问题的良药，在对自然的威胁规模达到大量消耗人力和财政响应能力的程度时，一些国家正在采取渐进式措施。在巴西，连接度保护是该国雄心勃勃的努力的基础，这些努力旨在在支离破碎的大西洋雨林（大西洋沿岸森林）中恢复可行的栖息地连接度。某些濒危物种，例如金狮面狨，始终是旨在把孤立种群连接起来的恢复项目的重点。已经证明有针对性的恢复能在曾经破碎化的森林区块中减少物种灭绝率。³² 现在，连接度已成为巴西各种生物多样性政策规定的目标。

《巴西森林法》和巴西的《原生植被保护法》明确强调连接度是陆地景观恢复和栖息地保护的重要战略。^{33,34} 萨尔瓦多政府最近建议将2021-2030年宣布为“联合国生态系统恢复十年”，旨在恢复和加强陆地景观连接度和生态功能。

海洋景观连接度



在非洲，坦桑尼亚政府最近通过了新的《野生动物保护法》，该法强调需要在其保护区内加强野生动物走廊保护。在肯尼亚，大多数野生动物生活在保护区外，而且县一级的规划工作刚刚开始。肯尼亚野生动物管理局系统地编制了该国主要野生动物走廊和扩散区目录，并制定了国家野生动物走廊政策。³⁵

在全球海洋领域内，连接度在三个维度发挥作用，因为水柱为运动生态学增加了一个额外变量。海洋本身就是连接媒介。因此，海洋连接度以多种方式表现出来，其中包括海洋和海岸的连接、海面和海底的相互作用以及作为海流动力学的一部分。³⁶ 作为海洋保护基石的海洋保护区几乎不可能在这种高度连接的环境中作为生态隔离区发挥作用。因此，海洋有助于建立生态网络，跨越时空地将关键栖息地连接起来。

此外，许多海洋物种的复杂生命历史已随着这个流动世界的运动动力学发生演变。对于许多幼小的海洋物种，海草和红树林沼泽是公认的育幼栖息地，这些物种然后往往需要前往珊瑚礁、海底山脉或其他水域发育成熟。人们强调海洋景观连接度是海洋保护和空间规划以及恢复工作的关键指导原则；然而，在实践中海洋景观连接度很少被纳入海洋保护区网络的设计之中。³⁶⁻³⁹这主要是由于在设计阶段，关于连接度多个方面的定量数据稀缺，例如不同生命阶段的关键物种的分散和运动模式，保护区内外的生态连接度，以及栖息地类型之间的生态连接度以及种群间的遗传连接度。^{10,38-40}尽管如此，关于加勒比海地区、佛罗里达群岛、所罗门群岛、摩顿湾和澳大利亚大堡礁的连接度与海洋保护区表现之间相互作用的研究证明了更好的连接度对于生态的重要意义。在这些保护区内观察到了对渔业资源量、物种丰富度和组成、补充和各种生态过程的积极影响。^{10,41-44}

国际社会已努力推广连接度解决方案。2016年，国际自然保护联盟（IUCN）成立了连接度保护专家组（CCSG），以促进和激励日益增长的连接度保护做法。CCSG由来自80个国家的约900名成员组成，致力于通过开发网络和通过科学、工程和政策方面的专业知识的融合提供指导，建立在全球实行一致的连接度保护做法的能力。

▶ 视频：什么是海洋连接度？



视频链接：<https://www.youtube.com/watch?v=MowPR5GYqKM>
图片来源：Damsea / Shutterstock

© Ifremer

▶ 视频：红蟹的幕后故事 迁徙—圣诞岛2012



视频链接：<https://www.youtube.com/watch?v=n9yl51LQ0sl>
图片来源：David Stanley

© Parks Australia

为未来的连接度设定目标

爱知生物多样性目标作为《生物多样性公约》（CBD）实施2011-2020年生物多样性战略计划的一部分得到通过，其中涵盖了陆地景观与海洋景观的连接度问题。爱知生物多样性目标11指出，全世界至少17%的陆地和内陆水域以及10%的沿海和海洋区域将得到具有良好连接度的保护区系统的保护。然而，许多科学家认为，当前的生物多样性保护应该有一个更加远大的目标。^{45,46} 保护科学界认为，平均而言，需要管理所有陆地和海洋的50%，才能支撑保持大自然和关键的行星健康阈值的生态过程，其中包括支持人类生计的生态系统服务。^{4,14,15} 对于许多具有全球生态意义的地区，更大胆的目标获得了科学上的保证及政治支持。例如，亚马逊流域需要得到更大的保护以维持这一广大流域的区域和全球水文和气候功能。陆地景观模型预测，如果亚马逊失去20%以上的森林，情况就会出现阈值翻转，转而支持热带稀树草原而不是森林，从而对全球气候模式产生影响。⁴⁷ 在实施爱知生物多样性目标时，巴西政府设立了自己的目标——保护亚马逊30%的区域，同时确保其境内的其他生物群落能够单独实现17%的目标。⁴⁸ 将于2020年10月在中国进行关于《生物多样性公约》未来十年战略计划的谈判，该计划将涵盖2021-2030年。可以把爱知生物多样性目标11设计得更加远大，并符合到2050年实现“50%用于大自然”（50% for Nature）的愿望，这令保护界满怀热情。

虽然工作的许多重点放在了实现土地、淡水和海洋的保护百分比上，但人们也认识到，在修改连接度良好的保护区的要素和其他基于区域的有效保护措施方面可以做更多工作。科学明确证明了相互连接的保护区是更有效的保护区。^{49,50} 通过生态网络把破碎化的陆地景观与海洋景观连接起来能有效地增强大自然的功能，并促进更加雄心勃勃的保护方法。



野生生物走廊是被广泛接受的保护物种迁徙的连接度战略。走廊的设计往往侧重于特定物种，例如北美的叉角羚、亚洲的老虎和南美的斑点美洲虎。根据所关注的物种和陆地景观的限制，走廊的形状和大小各异，从不连续的线性小径到一系列方便鸟类或海龟迁徙的“垫脚石”栖息地斑块。

连接区是较大的陆地景观或海洋景观区域，它们为各种物种和生态过程提供服务，以保持连接度。这些区域包括大片陆地或海洋，有利于保护区之间的分散，这一点在东非等地至关重要，因为这些地区的绝大多数野生动物都在保护区外。连接区还促进动物、物质和能量在栖息地斑块之间移动或在保护区内不同生态系统之间移动。

渗区是保护主义者使用的最大规模的概念，使用它在保护区以外人类主导区域保护连接度价值。这些区域支持物种移动和/或生态过程的季节性需求或空间范围，例如春池或特定的淡水水文流。

科学家们提出把**气候走廊**作为保护物种沿温度梯度移动的手段；这些相同的走廊往往充当“气候庇护所”。⁵¹ 一些连接度保护工作，例如澳大利亚的大东部山脉倡议，明确将气候复原力纳入其目标。⁵²

目前，全世界有14.7%的土地被保护区覆盖，其中不到一半的覆盖范围是相互连接的。⁵⁰ 正如这一统计数据所表明的那样，有很多机会改善全球保护区之间的连接度。如果全世界寻求迅速采取大规模保护行动，那么通过生态网络把保护区连接起来将带来希望。

在更广泛的保护实践中，连接度保护的应用仍处于初期阶段，要完善最佳做法还有很多东西要学习。^{53,54} 作为一种新兴的做法，生态连接度保护的实施在保护区以外面临最大挑战。对线性基础设施开发等推动破碎化的力量造成的影响加以限制，这显然是一项关键需求。教育政策制定者、政府机构和当地社区利益攸关方，让他们了解生态连接度的重要性同样至关重要。虽然一些国家可以采取监管措施来保护连接度，但绝大多数生态连接度工作将依赖于基于激励的参与性保护方法。⁵⁵ 通过把连接度目标纳入环境影响评估以及各种保护金融和税收激励方案，对现有环境政策的调整能促进连接度保护的更广泛采用。

仅靠保护区无法拯救生物多样性，也无法保护使地球上的生命得以延续的相互连接的生态功能。连接度是生态学的体现，而生态学是互相依赖的科学。这是势在必行的，因为相互连接的土地、淡水和海洋是完好无损的大自然的生命线。因此，相互连接的网络是维持和恢复生态和进化过程、避免灭绝，保护对人类和所有生命至关重要的陆地、淡水和海洋生态系统的最佳机会。连接度可以确保全世界的生态系统更具复原力，更能适应全球变化，并有能力维持生态完整性，满足当代和子孙后代的需求。按照设计，连接度保护创造了生物多样性保护安全网络，并最终为人类创造了安全网络，直至战胜造成破碎化的力量为止。

垫脚石和交叉口

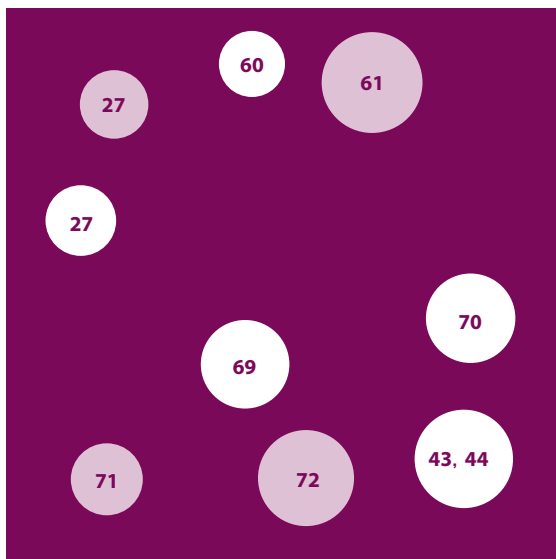


参考文献

- Cullen-Unsworth, L.C. and Unsworth, R. (2018). A call for seagrass protection. *Science* 361(6401), 446-448. <https://doi.org/10.1126/science.aat7318>
- Tucker, M.A., Böhning-Gaese, K., Fagan W.F., Fryxell J.M., Van Moorter, B., Alberts, S.C. *et al.* (2018) Moving in the Anthropocene: Global reductions in terrestrial mammalian movements. *Science* 359(6374), 466-469. <https://doi.org/10.1126/science.aam9712>
- Haddad, N.M., Brudvig, L.A., Clobert, J., Davies, K.F., Gonzalez, A., Holt, R.D. *et al.* (2015). Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. *Science Advances* 1(2), e1500052. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500052>
- Wilson, E.O. (2016). *Half-Earth: our planet's fight for life*. London: W.W. Norton & Company
- Fahrig, L. (2003) Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*. 34, 487-515. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.34.011802.132419>
- Laurance, W.F., Nascimento, H.E.M., Laurance, S.G., Ana Andrade, A., Ewers, R.M., Harms, K.E. *et al.* (2007) Habitat fragmentation, variable edge effects, and the landscape-divergence hypothesis. *PLoS ONE* 2(10), e1017. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0001017>
- Crook, D.A., Winsor, H., Lowe, W.H., Allendorf, F.W., Eros, T., Finn, D.S., Gillanders, B.M. *et al.* (2015) Human effects on ecological connectivity in aquatic ecosystems: Integrating scientific approaches to support management and mitigation. *Science of The Total Environment* 534, 52-64. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.034>
- Crooks, K.R., Burdett, C.L., Theobald, D.M., King, S.R.B., Di Marco, M., Rondinini, C. *et al.* (2017) Quantification of habitat fragmentation reveals extinction risk in terrestrial mammals. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(29), 7635-7640. <https://doi.org/10.1073/pnas.1705769114>
- Laurance, W.F., Camargo, J.L.C., Luizão, R.C.C., Laurance, S.G., Pimm, S.L., Bruna, E.M. *et al.* (2011) The fate of Amazonian forest fragments: A 32-year investigation. *Biological Conservation* 144(1), 56-67. <http://doi.org/10.1016/j.biocon.2010.09.021>
- Olds, A.D., Connolly, R.M., Pitt, K.A., Pittman, S.J., Maxwell, P.S., Huijbers, C.M. *et al.* (2015). Quantifying the conservation value of seascape connectivity: a global synthesis. *Global Ecology and Biogeography* 25, 3-15. <https://doi.org/10.1111/geb.12388>
- MacArthur, R.H. and Wilson, E.O. (1967). *The theory of island biogeography*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Gilbert-Norton, L., Wilson, R., Stevens, J.R. and Beard, K.H. (2010). A meta-analytic review of corridor effectiveness. *Conservation Biology* 24(3), 660-668. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2010.01450.x>
- Heller, N.E. and Zavaleta, E.S. (2009). Biodiversity management in the face of climate change: a review of 22 years of recommendations. *Biological Conservation* 142(1), 14-32. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocon.2008.10.006>
- Noss, R.F., Dobson, A.P., Baldwin, R., Beier, P. Davis, C.R., Dellasala, D.A. *et al.* (2012) Bolder thinking for conservation. *Conservation Biology* 26(1), 1-4. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2011.01738.x>
- Dinerstein, E., Olson, D., Joshi, A., Vynne, C., Burgess, N.D., Wikramanayake, E. *et al.* (2017). An ecoregion-based approach to protecting half the terrestrial realm. *BioScience* 67(6), 534-545. <https://doi.org/10.1093/biosci/bix014>
- Barnosky, A.D., Hadly, E.A., Bascompte, J., Berlow, E.L., Brown, J.H., Fortelius, M. *et al.* (2012). Approaching a state shift in Earth's biosphere. *Nature* 486(7401), 52. <https://doi.org/10.1038/nature11018>
- McGuire, J.L., Lawler, J.J., McRae, B.H., Nunez, T.A. and Theobald, D.M. (2016). Achieving climate connectivity in a fragmented landscape. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(26), 7195-7200. <https://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1602817113>
- Ellis, E.C., Goldewijk, K.K., Siebert, S., Lightman, D. and Ramankutty, N. (2010). Anthropogenic transformation of the biomes, 1700 to 2000. *Global Ecology and Biogeography* 19(5), 589-606. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00540.x>
- Oakleaf, J.R. and Kennedy, C.M. (2016). Comparison of global human modification and human footprint maps. *The Nature Conservancy*. http://www.conservationgateway.org/ConservationPractices/lands/science/publications/Documents/HM_HF_comparison_documentation.pdf
- Venter, O., Sanderson, E.W., Magrath, A., Allan, J.R., Beher, J., Jones, K.R. *et al.* (2016). Sixteen years of change in the global terrestrial human footprint and implications for biodiversity conservation. *Nature Communications* 7, 12558. <https://doi.org/10.1038/ncomms12558>
- Watson, J.E.M., Shanahan, D.F., Di Marco, M., Allan, J., Laurance, W.F., Sanderson, E.W. *et al.* (2016). Catastrophic declines in wilderness areas undermine global environment targets. *Current Biology* 26, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2016.08.049>
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., and Befort, B.L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108(50), 20260-20264. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116437108>
- Jones, K.R., Klein, C.J., Halpern, B.S., Venter, O., Grantham, H., Kuempel, C.D. *et al.* (2018). The location and protection status of Earth's diminishing marine wilderness. *Current Biology* 28(15), 2506-2512. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.06.010>
- Laurance, W.F., Clements, G.R., Sloan, S., O'Connell, C.S., Mueller, N.D., Goosem, M. *et al.* (2014). A global strategy for road building. *Nature* 513(7517), 229. <https://doi.org/10.1038/nature13717>
- Habib, B., Rajvanshi, A., Mathur, V.B., and Saxena, A. (2016). Corridors at crossroads: Linear development-induced ecological triage as a conservation opportunity. *Frontiers in Ecology and Evolution* 4, 132. <https://doi.org/10.3389/fevo.2016.00132>
- Dulac, J. (2013). Global land transport infrastructure requirements - estimating infrastructure capacity and costs to 2050. Paris: International Energy Agency. https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TransportInfrastructureInsights_FINAL_WEB.pdf
- Grill, G., Lehner, B., Lumsdon, A.E., MacDonald, G.K., Zarfl, C. and Liermann, C.R. (2015) An index-based framework for assessing patterns and trends in river fragmentation and flow regulation by global dams at multiple scales. *Environmental Research Letters* 10(1). <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/10/1/015001/meta>
- Fundación Proteger, International Rivers and ECOA (2018). Dams in Amazonia website. <http://dams-info.org/>
- Tundisi, J.G., Goldemberg, J., Matsumura-Tundisi, T. and Saraiva, A.C.F. (2014). How many more dams in the Amazon? *Energy Policy* 74, 703-708. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.07.013>

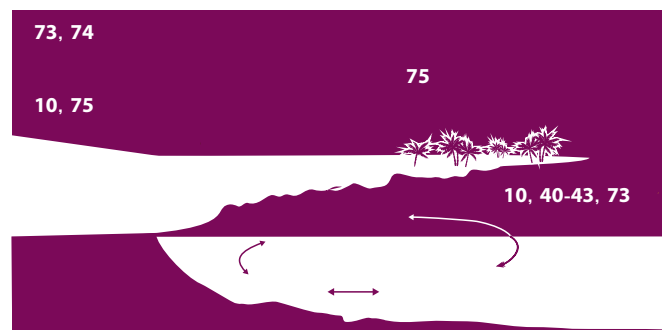
30. Ibsch, P.L., Hoffmann, M.T., Kreft, S., Pe'er, G., Kati, V., Biber-Freudenberger, L., DellaSala, D.A., et al. (2016). A global map of roadless areas and their conservation status. *Science*, 354(6318), 1423-1427. <https://doi.org/10.1126/science.aaf7166>
31. Hauer, F.R., Locke, H., Dreitz, V.J., Hebblewhite, M., Lowe, W.H., Muhlfeld, C.C. et al. (2016). Gravel-bed river floodplains are the ecological nexus of glaciated mountain landscapes. *Science Advances* 2(6), e1600026. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600026>
32. Newmark, W.D., Jenkins, C.N., Pimm, S.L., McNeally, P.B. and Halley, J.M. (2017). Targeted habitat restoration can reduce extinction rates in fragmented forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114(36), 9635-9640. <https://doi.org/10.1073/pnas.1705834114>
33. Garcia, L.C., Santos, J.S., Matsumoto, M., Silva, T.S.F., Padovezi, A., Sparovek, G. et al. (2013). Restoration challenges and opportunities for increasing landscape connectivity under the new Brazilian Forest Act. *Natureza & Conservação* 11(1), 181-185. <http://dx.doi.org/10.4322/natcon.2013.028>
34. Brancalion, P.H.S., Garcia, L.C., Loyola, R., Rodrigues, R.R., Pillar, V.P., and Lewinsohn, T.M. (2016). A critical analysis of the Native Vegetation Protection Law of Brazil (2012): updates and ongoing initiatives. *Natureza & Conservação* 14(1), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.ncon.2016.03.003>
35. Ojwang, G.O., Wargute, P.W., Said, M.Y., Worden, J.S., Davidson, Z., Muruthi, P. et al. (2017). Wildlife Migratory Corridors and Dispersal Areas: Kenya Rangelands and Coastal Terrestrial Ecosystems. Nairobi: Kenya Wildlife Service
36. Carr, M.H., Robinson, S.P., Wahle, C., Davis, G., Kroll, S., Murray, S. et al. (2017). The central importance of ecological spatial connectivity to effective marine protected areas and to meeting the challenges of climate change in the marine environment. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 27(S1), 6-29. <https://doi.org/10.1002/aqc.2800>
37. Magris, R.A., Pressey, R.L., Weeks, R. and Ban, N.C. (2014). Integrating connectivity and climate change into marine conservation planning. *Biological Conservation* 170, 207-221. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.12.032>
38. Green, A.L., Maypa, A.P., Almany, G.R., Rhodes, K.L., Weeks, R., Abesamis, R.A. et al. (2015). Larval dispersal and movement patterns of coral reef fishes, and implications for marine reserve network design. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society* 90(4), 1215-1247. <https://doi.org/10.1111/brv.12155>
39. Engelhard, S.L., Huijbers, C.M., Stewart-Koster, B., Olds, A.D., Schlacher, T.A. and Connolly, R.M. (2016). Prioritising seascape connectivity in conservation using network analysis. *Journal of Applied Ecology* 54(4), 1130-1141. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12824>
40. Foster, N.L., Paris, C.B., Kool, J.T., Baums, I.B., Stevens, J.R., Sanchez, J.A., Bastidas, C. et al. (2012). Connectivity of Caribbean coral populations: complementary insights from empirical and modelled gene flow. *Molecular Ecology* 21(5), 1143-1157. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2012.05455.x>
41. Huntington, B.E., Karnauskas, M., Babcock, E.A. and Lirman, D. (2010). Untangling natural seascape variation from marine reserve effects using a landscape approach. *PLoS ONE* 5, e12327. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0012327>
42. Valentine, J.F., Heck, K.L., Jr, Blackmon, D., Goecker, M.E., Christian, J., Kroutil, R.M. et al. (2008). Exploited species impacts on trophic linkages along reef-seagrass interfaces in the Florida keys. *Ecological Applications* 18(6), 1501-1515. <https://doi.org/10.1890/07-1720.1>
43. Olds, A.D., Pitt, K.A., Maxwell, P.S. and Connolly, R.M. (2012). Synergistic effects of reserves and connectivity on ecological resilience. *Journal of Applied Ecology* 49(6), 1195-1203. <https://doi.org/10.1111/jpe.12002>
44. Olds, A.D., Albert, S., Maxwell, P.S., Pitt, K.A. and Connolly, R.M. (2013). Mangrove-reef connectivity promotes the functioning of marine reserves across the western Pacific. *Global Ecology and Biogeography* 22(9), 1040-1049. <https://doi.org/10.1111/geb.12072>
45. Butchart, S.H., Clarke, M., Smith, R.J., Sykes, R.E., Scharlemann, J.P., Harfoot, M. et al. (2015). Shortfalls and solutions for meeting national and global conservation area targets. *Conservation Letters* 8(5), 329-337. <https://doi.org/10.1111/conl.12158>
46. Dudley, N., Jonas, H., Nelson, F., Parrish, J., Pyhälä, A., Stolton, S. et al. (2018). The essential role of other effective area-based conservation measures in achieving big bold conservation targets. *Global Ecology and Conservation* 15, e00424. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2018.e00424>
47. Zemp, D.C., Schleussner, C.F., Barbosa, H.M., Hirota, M., Montade, V., Sampaio, G. et al. (2017). Self-amplified Amazon forest loss due to vegetation-atmosphere feedbacks. *Nature Communications* 8, 14681. <https://doi.org/10.1038/ncomms14681>
48. Pacheco, A.A., Neves, A.C.O. and Fernandes, G.W. (2018). Uneven conservation efforts compromise Brazil to meet the Target 11 of Convention on Biological Diversity. *Perspectives in Ecology and Conservation* 16(1), 43-48. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.12.001>
49. Beier, P. and Noss, R.F. (1998). Do habitat corridors provide connectivity? *Conservation Biology* 12(6), 1241-1252. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.1998.98036.x>
50. Saura, S., Bastin, L., Battistella, L., Mandrici, A. and Dubois, G. (2017). Protected areas in the world's ecoregions: How well connected are they? *Ecological Indicators* 76, 144-158. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.12.047>
51. Krosby, M., Tewksbury, J., Haddad, N.M. and Hoekstra, J. (2010). Ecological connectivity for a changing climate. *Conservation Biology* 24(6), 1686-1689. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2010.01585.x>
52. Pulsford, I., Fitzsimons, J. and Wescott, G. (eds.) (2013). *Linking Australia's landscapes: Lessons and opportunities from large-scale conservation networks*. CSIRO Publishing. <https://doi.org/10.1111/1745-5871.12060>
53. Correa Ayram, C.A., Mendoza, M.E., Etter, A. and Salicrup, D.R.P. (2016). Habitat connectivity in biodiversity conservation: a review of recent studies and applications. *Progress in Physical Geography* 40(1), 7-37. <https://doi.org/10.1177%2F0309133315598713>
54. Worboys, G., Francis, W.L. and Lockwood, M. (eds.) (2010). *Connectivity conservation management: a global guide (with particular reference to mountain connectivity conservation)*. London: Earthscan
55. Watson, J.E.M., Venter, O., Lee, J., Jones, K.R., Robinson, J.G., Possingham, H.P. et al. (2018) Protect the last of the wild, 31 October. <https://www.nature.com/articles/d41586-018-07183-6>

图片参考文献



56. Didham, R. (2010). The Ecological Consequences of Habitat Fragmentation. Wiley Online Library. <https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0021904>
57. Clevenger, A. P. and Wierzechowski, J. (2006) Maintaining and restoring connectivity in landscapes fragmented by roads. In Crooks, K. R. and Sanjayan, M. (eds), Connectivity Conservation. Cambridge: Cambridge University Press, 502–535. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511754821.023>
58. Nuñez, T., Lawler, J., Mcrae, B., Pierce, J., Krosby, M., Kavanagh, D., Singleton, P. et al (2013). Connectivity Planning to Address Climate Change. *Conservation Biology*, 27(2), 407-416. <https://doi.org/10.1111/cobi.12014>
59. Proctor, S., McClean, C. and Hill, J. (2011). Protected areas of Borneo fail to protect forest landscapes with high habitat connectivity. *Biodiversity and Conservation*, 20(12), 2693-2704. <https://doi.org/10.1007/s10531-011-0099-8>
60. Bergsten, A., Bodin, Ö. and Ecke, F. (2013). Protected areas in a landscape dominated by logging – A connectivity analysis that integrates varying protection levels with competition–colonization tradeoffs. *Biological Conservation*, 160, 279-288. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.01.016>
61. Laurance, W. and Useche, D. (2009). Environmental Synergisms and Extinctions of Tropical Species. *Conservation Biology*, 23(6), 1427-1437. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2009.01336.x>
62. Morris, R. (2010). Anthropogenic impacts on tropical forest biodiversity: a network structure and ecosystem functioning perspective. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1558), 3709-3718. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0273>
63. Trombulak, S. and Frissell, C. (2000). Review of Ecological Effects of Roads on Terrestrial and Aquatic Communities. *Conservation Biology*, 14(1), 18-30. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2000.99084.x>
64. Chen, H.L. and Koprowski, J.L. (2016). Differential effects of roads and traffic on space use and movements of native forest-dependent and introduced edge-tolerant species. *PLoS ONE*, 11(1), e0148121. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0148121>
65. Shepard, D.B., Kuhn, A.R., Dreslik, M.J. and Phillips, C.A. (2008). Roads as barriers to animal movement in fragmented landscapes. *Animal Conservation*, 11, 288-296. <https://doi.org/10.1111/j.1469-1795.2008.00183.x>
66. Gurrutxaga, M. and Saura, S. (2013). Prioritizing highway defragmentation locations for restoring landscape connectivity. *Environmental Conservation*, 41(02), 157-164. <https://doi.org/10.1017/S0376892913000325>
67. Ceballos, G., Ehrlich, P. and Dirzo, R. (2017). Biological annihilation via the ongoing sixth mass extinction signaled by vertebrate population losses and declines. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(30), E6089-E6096. <https://doi.org/10.1073/pnas.1704949114>
68. Tewksbury, J., Levey, D., Haddad, N., Sargent, S., Orrock, J., Weldon, A., Danielson, B., et al (2002). Corridors affect plants, animals, and their interactions in fragmented landscapes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(20), 12923-12926. <https://doi.org/10.1073/pnas.202242699>
69. Brudvig, L.A., Damschen, E.L., Tewksbury, J.J., Haddad, N.M. and Levey, D.J. (2009). Landscape connectivity promotes plant biodiversity spillover into non-target habitats. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(23), 9328-9332. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0809658106
70. Martensen, A.C., Ribeiro, M.C., Banks-Leite, C., Prado, P.I. and Metzger, J.P. (2012). Associations of forest cover, fragment area, and connectivity with neotropical understory bird species richness and abundance. *Conservation Biology*, 26(6), 1100-1111. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2012.01940.x>

71. Fox, A.D., Henry, L-A., Corne, D.W. and Roberts, J.M. (2016). Sensitivity of marine protected area network connectivity to atmospheric variability. *Royal Society Open Science*, 3: 160494. <http://dx.doi.org/10.1098/rsos.160494>
72. Fang, X., Hou, X., Li, X., Hou, W., Nakaoka, M. and Yu, X. (2018). Ecological connectivity between land and sea: a review. *Ecological Research*, 33, 51–61. <https://doi.org/10.1007/s11284-017-1549-x>



73. Grober-Dunsmore, R., Pittman, S.J., Caldwell, C., Kendall, M.S. and Frazer, T.K. (2009). A landscape ecology approach for the study of ecological connectivity across tropical marine seascapes. In: Nagelkerken, I. (ed), *Ecological connectivity among tropical coastal ecosystems*. Springer, Dordrecht, 493–530. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2406-0_14
74. Earp, H.S., Prinz, N., Czielski, M.J. and Andskog, M. (2018). For a world without boundaries: Connectivity between tropical ecosystems in times of change. In S. Jungblut, V. Liebich and M. Bode (eds.), *YOUMARES 8 – Oceans Across Boundaries: Learning from each other*. Proceedings of the 2017 conference for YOUnG MARine RESearchers in Kiel, Germany. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93284-2_9
75. Boström, C., Pittman, S.J., Simenstad, C. and Kneib, R.T. (2011). Seascape ecology of coastal biogenic habitats: advances, gaps, and challenges. *Marine Ecology Progress Series*, 427, 191-217. <https://doi.org/10.3354/meps09051>



拥有许多陷落湖的多年冻土区泥炭地，Cape Bolvansky，俄罗斯
图片来源：Hans Joosten

多年冻土区泥炭地： 拯救气候变暖下不断缩减的湿地生态系统

加快北极的变革

位于热带地区的泥炭地因其在碳储存和缓解气候变化中的关键作用而作为全球热点备受关注。它们储存了近1200亿吨的泥炭碳，但这只占全球泥炭地锁定的所有碳的20%左右。¹最大的碳量储存在地球最北端的地区，环北极地区拥有几乎全球土壤中有有机碳的一半，主要以永久性冻结泥炭的形式存在。²⁻⁵

北半球的很多土地都会出现季节性封冻和融化，有些地方一年四季都会封冻。北方有大约2300万平方公里的土地下面是永久冻土——至少连续两年保持零度以下的土地。北极和亚北极泥炭地存在于加拿大、丹麦/格陵兰、芬兰、挪威、俄罗斯、瑞典和美

国的永久冻土带内。泥炭层厚度超过40厘米的多年冻土区泥炭地的面积超过140万平方公里，泥炭层厚度较浅的多年冻土区泥炭地面积甚至更大。^{3,6-8}在北极和亚北极以外的地区，例如蒙古和青藏高原，也有大量永久冻土泥炭沉积物，这些地方的山脉阻挡了温暖的海洋空气，使之不能进入内陆，冬季气温非常低。^{9,10}

多年冻土区泥炭地正在迅速发生变化。现在北极变暖的速度是全球平均速度的两倍。¹¹近几十年来，南部的多年冻土区边界已向北退缩了30至80公里，覆盖范围大幅减少。¹²⁻¹⁵以前埋藏在地下的封冻的有机物质的活动作用和微生物分解可能导致大量二氧化碳和甲烷的释放，这反过来又会强烈加剧全球

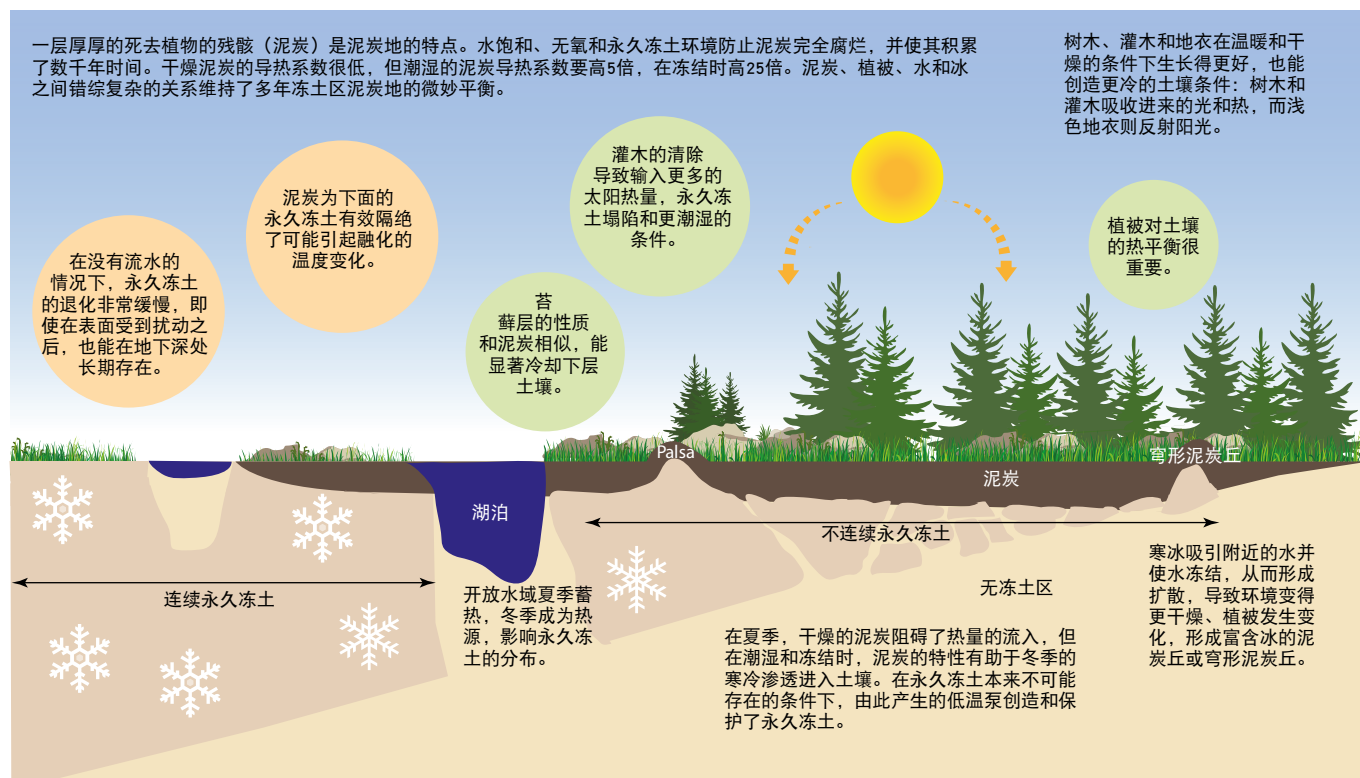
变暖，构成与永久冻土退化有关的风险。¹⁶⁻¹⁹ 广泛的永久冻土退化也将对该地区的生态系统、水文和基础设施产生巨大的直接影响。

虽然对永久冻土的深入研究已经持续了一个多世纪，但是为了更好地了解永久冻土对气候变化和人为干扰的反应，迫切需要对其分布、特征和动态进行更多研究。²⁰ 对于多年冻土区泥炭地，知识更加不完整。由于永久冻土、生态系统和气候间的相互作用非常复杂，对多年冻土区泥炭地对气候变暖的反应方式及其在全球气候变化中的共同作用的理解既不清楚也不明确。²⁰⁻²² 例如，虽然封冻（干燥）

和融化的（湿）泥炭地可能具有相似的碳封存率并且都能充当碳汇，但它们通常具有完全不同的温室气体通量特征，并可作为净排放源。²³⁻²⁵ 此外，封冻和融化的泥炭地也可随着时间和空间的变化而迅速交替。^{23,26}

永久冻土融化被视为最重要的“临界要素”之一，可能会导致难以控制的温室效应，或无法控制的“温室地球”。²⁷ 为了避免这种破坏性的情景，全世界的永久冻土及其泥炭地保持封冻并保留它们的碳沉积物至关重要。

泥炭地和永久冻土：泥炭、植物和水的作用



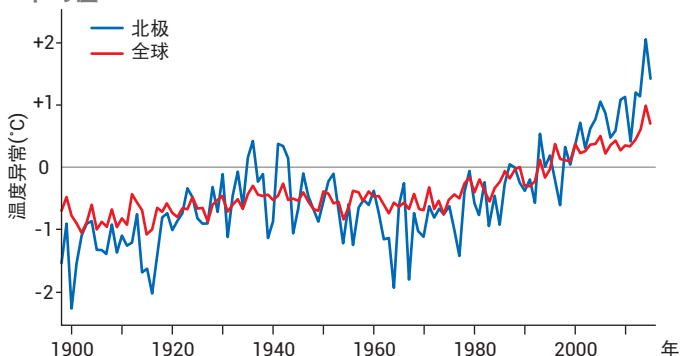
融化的永久冻土、腐烂的泥炭和复杂的相互作用

过去十年，北极地区每一年的温度都要比20世纪最暖的一年高。¹⁵ 在全球范围内，近几十年来永久冻土的温度持续上升。在北极最寒冷的地区观测到了冻土年平均温度的最大增量，而在“更温暖的”永久冻土和不连续的永久冻土带中，温度增加的幅度要小得多。在一些地方，由于最近的寒冬，永久冻土的温度略有下降。^{15,28}

随着温度升高，富含冰的永久冻土的融化或地冰的融化导致陆地景观的明显塌陷，这种现象称为热喀斯特。过去几十年，泥炭地中热喀斯特的形成速度似乎在不连续的永久冻土带中加快了。²⁹⁻³¹ 然而，在整个北极地区，长期观测并未发现全球变暖导致的热喀斯特发育呈现出统一趋势。¹⁵

当曾经的冻土因融化坍塌时，沉降就能形成小片的新水体，它们随后可以演变成湖泊。反过来，热喀斯特湖的形成也加速了永久冻土的融化，使融化

北极（60-90°N）和全球年地面气温相对于1981-2010年的平均值



资料来源：改编自美国国家海洋和大气管理局2018年北极报告卡¹

速度变得更快、深度更深。¹⁹ 另一方面，这些湖泊的扩散也能够增加排水网络的连接度，支持湖泊排水、植被再生、泥炭形成和永久冻土的重新形成。³²⁻³⁷ 这些对比鲜明的动态表明，更加有必要更好地了解变暖趋势的潜在影响。

气候变化和温度升高极大地增加了北极的野火发生率，野火的火焰会蔓延到苔原和森林-苔原的边界地区。地下的泥炭沉积物为野火提供了燃料，火灾释放出大量的碳，破坏了植被和隔离土壤层，降低了地面反照率（光反射率），从而导致泥炭地对气候变化更加敏感和广泛的热喀斯特发育。³⁸⁻⁴⁴ 即使在最保守的情景下，预计更高的温度和野火的综合影响在不连续的永久冻土带将变得尤为严重，这里的气候条件也变得更加不利于永久冻土。³¹ 这可能导致植被类型及其生产力的变化，反过来导致更大、更频繁的野火。^{45,46}

气候变化导致的变暖加剧的另一个影响是永久冻土融化会向环境中释放大量甲烷，这是一种强效温室气体。尽管对北极的甲烷排放估算存在较大差异，但目前的全球气候预测模型似乎表明北方永久冻土区的甲烷排放量仅略有增加。^{47,48} 但是，大多数模型没有包括对融化过程的充分表示。⁸



视频：永久冻土是什么？



视频链接：<https://www.youtube.com/watch?v=lxixy1u8GjY> © Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-
照片：刚钻出来的永久冻土核心样品，波多利斯克，俄罗斯 Zentrum für Polar und Meeresforschung
图片来源：Hans Joosten



热喀斯特



图片来源：Hans Joosten

热喀斯特是一种陆地景观特色，是下面有永久冻土的区域的地冰融化导致地表塌陷形成的。典型的热喀斯特构造包括多边形地形中的热喀斯特湖泊、沉洞，凹坑和槽。^{56,57} 热喀斯特广泛分布于不连续的多年冻土区。^{58,59} 在连续多年冻土区的较寒冷区域也很常见，这些区域里的冰楔使永久冻土变得不稳定。^{60,61}

热喀斯特造成的积水最初增加了获得的热量，促进了正反馈中的退化。相反，植被生长和有机质的积累逐渐限制了进一步向下融化。由于热喀斯特洼地中新出现的泥炭聚集很快，永久冻土的融化不一定会把泥炭地转化为碳源。^{22,23,62} 然而，潮湿的土壤条件可能会导致甲烷的释放。

最近一项模型研究通过考虑与最近形成的热喀斯特湖泊有关的突然融化过程，来评估永久冻土退化的长期气候后果。结果表明，在本世纪内，以甲烷（CH₄）形式释放的碳可能只占新近融化的永久冻土释放的碳的一小部分，但在新近融化的永久冻土导致的额外变暖效应中，它的占比可高达40%。⁴⁹

气候变化只是直接影响多年冻土区泥炭地变化的众多因素之一。对地表土壤的任何干扰，包括森林或苔原火灾等自然过程，以及工业和城市基础设施开发和建筑活动、采矿、旅游和农业等人为干扰都会导致永久冻土退化。^{50,51} 在多年冻土区泥炭地进行的多种形式的开发往往忽视了该地区的独特特征，造成了陆地景观破碎化，破坏了水循环。^{14,52} 在俄罗斯，15%的苔原地区已被运输活动破坏，导致永久冻土的融化、侵蚀、沉降和热喀斯特发育。⁵³ 俄罗斯北极地区约45%的石油和天然气生产地位于生态最敏感的地区，通常是泥炭地，其中包括伯朝拉地区、极地乌拉尔以及西伯利亚西北部和中部地区。^{54,55} 不断增加的对自然资源的需求以及由于温暖的条件使人更容易进入封冻地区可能将在未来导致更多的工业和基础设施活动，使对泥炭地和永久冻土的干扰不断升级。由此产生的变化也将影响土著人民，他们传统上依赖于土地（如泥炭地）利用获得食物、驯鹿、猎物和鱼类。¹⁴



蒙古永久冻土的融化和坍塌

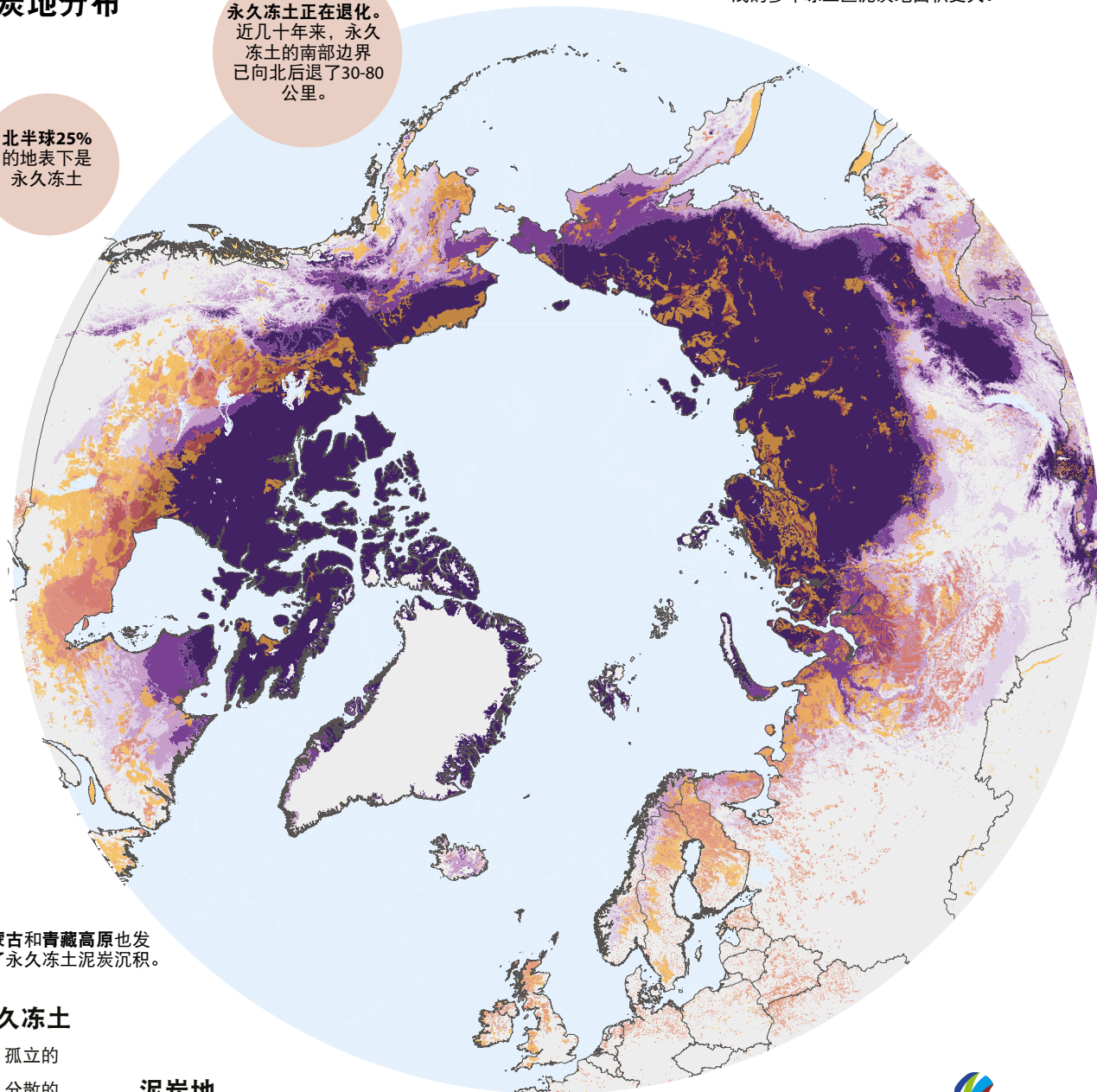
图片来源：Hans Joosten

多年冻土区 泥炭地分布

泥炭地存在于永久冻土带的广大地区。至少140万平方公里的多年冻土区泥炭地的泥炭层厚度超过40厘米，泥炭层较浅的多年冻土区泥炭地面积更大。

永久冻土正在退化。
近几十年来，永久冻土的南部边界已向北后退了30-80公里。

北半球25%的地表下是永久冻土



在蒙古和青藏高原也发现了永久冻土泥炭沉积。

永久冻土

- 孤立的
- 分散的
- 不连续
- 连续

泥炭地

- > 50%的覆盖率
- 20-50%的覆盖率



地理空间数据源：
泥炭地数据由德国格赖夫斯瓦尔德沼泽中心提供，永久冻土数据由德国不来梅港的亥姆霍兹极地海洋研究中心（AWI）阿尔弗雷德-魏格纳研究所提供。⁹⁰

北极气温的上升速度是全球平均速度的两倍

在所有陆地生态系统中，泥炭地是最大的长期有机碳库

气候模型表明，到2050年，靠近地表的永久冻土流失率为35%

灌木、树木和地衣可以通过吸收或反射阳光来保持土壤的凉爽。清除保护性植被可导致永久冻土迅速退化。

火灾清除了起隔离作用的植被、泥炭和土层，使泥炭地更容易受到气候变化的影响。

北极变暖增加了苔原和森林-苔原地区的火灾活动，导致土壤碳显著减少。

在不连续永久冻土区，气候变暖和野火的综合影响更为严重

更深的水体夏季蓄热，在冬季成为热源，影响永久冻土的局部分布。

当泥炭因永久冻土融化而不再封冻时，微生物分解变得活跃起来，开始分解有机物，导致二氧化碳和甲烷的排放。

热喀斯特是由于永久冻土融化或地冰融化而在陆地景观中形成的独特的洼地

在没有流动的地表水或地下水时，永久冻土的退化非常缓慢，并能在深层保持很长时间

热喀斯特广泛存在于不连续永久冻土区

泥炭地是地表被一层死去的植物材料（泥炭）覆盖的区域。饱和水和无氧条件阻止泥炭完全分解。

环北极的土壤含有全世界50%的土壤碳，这些碳主要储存在泥炭地中，通常作为永久冻土保存。

专家预计到2100年，永久冻土地区将成为碳源

永久冻土土壤（包括泥炭沉积物）中的汞含量是全球其余的土壤、大气和海洋中的汞含量总和的两倍

永久冻土融化会向环境释放大量的汞

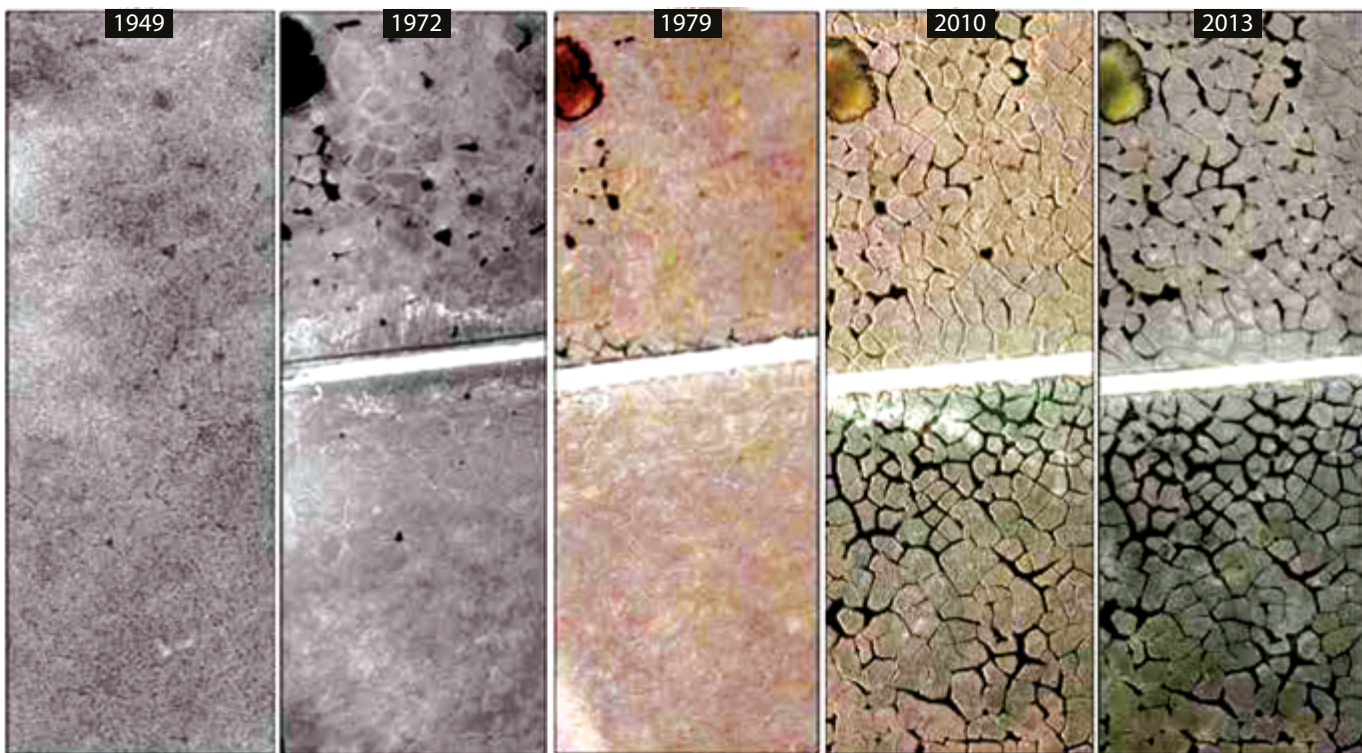
土壤有机碳可能以不同的形式流失：作为气体（二氧化碳或甲烷）被排放回大气，或作为溶解的有机碳或颗粒有机碳被输送到河流。

增进对多年冻土区泥炭地的认识

一个多世纪以来，尤其是在过去几十年中，永久冻土地区始终是研究和技术发展的主题，以应对其独特的科学和工程挑战。尽管国际永久冻土协会和全球陆地永冻土网络付出了努力，但在关于区域和栖息地的特定知识方面仍然存在巨大差距，尤其是由于极端气候条件，有限的可获得性以及复杂的地缘政治环境导致的差距。最近的一项审查表明，在与北极野外试验有关的科学文献中，所有引用的30%主要来自两个研究站的直接环境：美国阿拉斯加的图利克湖和瑞典的阿比斯库。⁶³ 这可能会使科学共识产生偏差，并导致对北极气候变化影响的不准确预测。

随着人们对气候变化和北极冰融的认识不断提高，最近的评估越来越多地试图涵盖社会生态变化、制度变迁以及人类行动在适应和转型中的作用等方面。^{64,65} 正在发展大规模研究项目，以解决永久冻土融化和退化的影响。其中包括北极发展和适应转型中的永久冻土（ADAPT）倡议，该倡议与加拿大各地的15个实验室和其他研究人员小组合作，以在加拿大北极地区开发综合的地球系统科学框架。安大略省的2010年《远北法案》等专门法律正在与新的规划举措相结合，通过与第一民族协商的土地利用规划过程开放和保护远北地区。⁶⁶

北极理事会是强有力的国际合作的实例，它特别有助于产生和增加帮助国家和国际决策的知识，例如



1949年至2013年期间，在美国阿拉斯加普拉德霍湾的一个研究地点，由于永久冻土融化导致的热喀斯特发育的进展。白线是1969年建造的主干路。
资料来源：Walker等人(2014)

2017年关于北极地区的雪、水、冰和永久冻土的报告。^{15,67} 虽然承认北极各国作为该地区的管理者发挥的关键作用，但在保护多年冻土区泥炭地和增强意识方面也需要其他行动者付出努力。一些国际组织已经越来越多地参与其中。例如政府间气候变化专门委员会通过其《气候变化中的海洋和冰冻圈》IPCC特别报告，世界气象组织和国际科学理事会通过国际北极科学委员会进行了参与，帮助提高对北极变化影响的认识和增强理解。



永久冻土融化导致俄罗斯涅涅茨自治区纳里扬马尔附近的泥炭地形成热喀斯特

图片来源：Hans Joosten



安大略省的《远北法案》和第一民族在多年冻土区泥炭地保护中发挥的作用

加拿大安大略省的远北地区位于北纬50-57°和79-94°之间，是承载着北极、寒带和温带生物群落的动态陆地景观。泥炭地在这里占主导地位，覆盖了远北地区47%，即2100万公顷的土地，并把大约360亿吨碳作为泥炭储存了起来。⁶⁸ 这相当于加拿大所有泥炭地储存的碳的四分之一。

于2010年10月提出的安大略省的《远北法案》承认远北地区在碳储存和碳封存能力方面发挥的重要作用，并把基于社区的土地利用规划作为应对气候变化的战略。^{66,69} 该法案围绕第一民族（非梅蒂斯人或因纽特人的加拿大土著人）在土地利用规划中的重要作用，包括文化、社会、生态和经济方面的考虑。

根据该法案的要求，远北土地利用战略旨在帮助制定以社区为基础的土地利用计划，同时纳入了个别规划领域以外的问题，例如土著知识。该战略中列出的四个目标包括：

1. 第一民族在规划方面的重要作用。
2. 通过把至少225000平方公里的区域纳入社区土地利用计划指定的相互连接的保护区网络，保护远北地区的生态系统和具有文化价值的区域。
3. 维持生物多样性、生态过程和功能，包括远北地区的碳储存和碳封存。
4. 实现有利于第一民族的可持续经济发展。

该战略计划于2016年完成，但这一过程仍在进行中，由感兴趣的第一民族与安大略省自然资源和林业部共同领导。一些以社区为基础的土地利用计划已获得批准，一些计划已经起草，而另外一些正在进行中，还有些尚未开始。⁷⁰ 虽然正在取得进展，但在如何实现该法案的某些目标，其中包括治理领域的目标，尤其是科学知识方面，仍存在不确定性。必须了解气候变化如何影响远北泥炭地的碳封存和储存以及相关的生态过程，以制定适当的政策和管理部门对策。

热喀斯特是一种陆地景观特色，是下面有永久冻土的区域的地冰融化导致地表塌陷形成的。典型的热喀斯特构造包括多边形地形中的热喀斯特湖泊、沉洞，凹坑和槽。^{71,72} 热喀斯特广泛分布于不连续的多年冻土区。^{73,74} 在连续多年冻土区的较寒冷区域也很常见，这些区域里的冰楔使永久冻土变得不稳定。^{75,76}

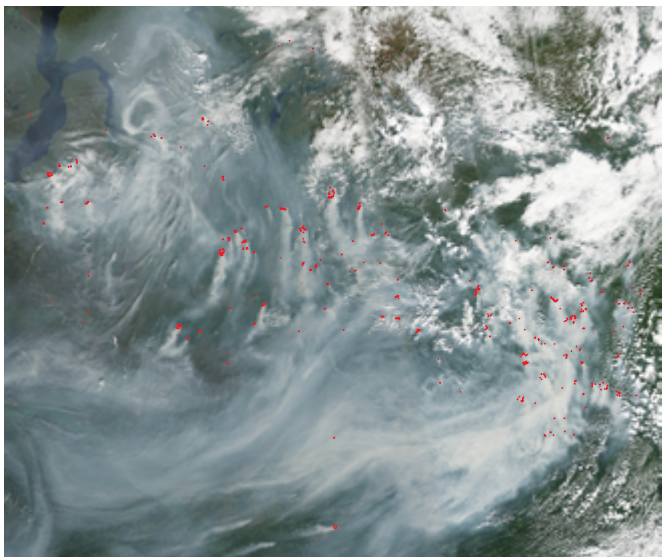
知识重点和网络扩展

关于多年冻土区泥炭地的变化速度以及这些变化将对当地和全球产生何种影响存在很大不确定性。需要开展国际合作，以便为进一步开展长期研究和制定减少脆弱性的可行战略提供资金。各国需要就一系列可实施的措施进行合作，这些措施承认传统和地方知识并对这些知识加以运用，促进与利益攸关方的接触，并建立有效的观测网络。¹⁵与此同时，有关风险、可能的影响和潜在适应方案的公众宣传和教育将是知情治理和制定政策的关键。

虽然现有的观测站网络提供了有关永久冻土变化一般趋势的信息，但站点的空间分布非常不均匀。加拿大中部和西伯利亚北极中部、格陵兰、俄罗斯远东、青藏高原和亚北极地区的网络尤其存在巨大差距。^{30,63}及时评估永久冻土的全球状况需要把现有的研究网络拓展为更全面的监测网络。将对这个

扩展网络进行优化设计，使从气候科学家到普通大众在内的所有利益攸关方都容易使用，而且它还将利用标准化测量，并包括易于访问的数据库。^{15,64}拥有广泛永久冻土带的国家将从准备适应计划中受益。这些计划评估潜在风险，并包括缓解永久冻土退化损害的策略和永久冻土退化的成本。⁶⁴

作为碳热点的多年冻土区泥炭地代表了特殊、高度多样化和动态的环境，包含土壤碳、水文、永久冻土、植被和人之间的复杂关系。主要的知识差距在于对这些过程如何相互关联理解有限以及当前的研究和模型不足。需要对多年冻土区泥炭地的确切位置，它们在如何变化以及它们的释放潜力进行更多的研究。气候模型需要包括永久冻土碳的活动作用产生的碳排放。为了更好地描述多年冻土区泥炭地对气候变化的反应和反馈的特征，使调查超越单一学科至关重要。这需要转向实地观测和回顾性（或古环境）研究、遥感和动态模拟的融合。^{22,30}多年



摄于2016年7月19日的卫星图象显示俄罗斯中北部多年冻土区泥炭地上空的浓烟。红色分界线表明可能由泥炭火引起的高地表温度。

图片来源：NASA Earth Observatory/Jesse Allen and Joshua Stevens

▶ 视频：在俄罗斯恢复泥炭地以防止火灾，缓解气候变化



视频链接：https://www.youtube.com/watch?v=QZ5qu_nPHYM

照片：俄罗斯科米共和国矮桦树苔原上的火灾

© Wetlands International
图片来源：Hans Joosten

视频：泥炭地 - 气候调节和生物多样性



视频链接：<https://www.youtube.com/watch?v=ZcxZ9gvNfSU>
俄罗斯科米共和国平坦的穹形泥炭丘

© Naturstyrelsen
图片来源：Hans Joosten

冻土区泥炭地复杂的物理性质及其退化和破坏的重大潜在风险也需要更全面的土地利用规划和管理方法，这要求为规划者和政策制定者提供更好的综合知识。

北极已开始发生巨变。即使全面执行《联合国气候变化框架公约》下的《巴黎协定》，到本世纪末，北极环境仍可能与今天完全不同。¹⁵ 加速影响的必然性使针对这些碳密集的北方生态系统的地方和区域适应战略的需求变得更加迫切。对多年冻土区泥炭地进行审慎管理将是限制温室气体排放，减少人类和生态脆弱性以及建立长期气候复原力的关键。



俄罗斯西西伯利亚诺亚布斯克附近的穹形泥炭丘永久冻土泥沼

图片来源：Franziska Tanneberger

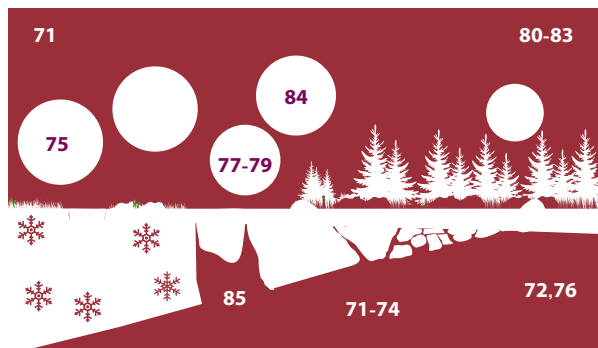
参考文献

- Leifeld, J. and Menichetti, L. (2018). The underappreciated potential of peatlands in global climate change mitigation strategies. *Nature Communications* 9, 1071. <https://www.nature.com/articles/s41467-018-03406-6>
- Tarnocai, C., Canadell, J.G., Schuur, E.A.G., Kuhry, P., Mazhitova, G. and Zimov, S. (2009). Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochemical Cycles* 23(2), 1–11. <https://doi.org/10.1029/2008GB003327>
- Hugelius, G., Strauss, J., Zubrzycki, S., Harden, J.W., Schuur, E.A.G., Ping, C.L. et al. (2014). Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps. *Biogeosciences* 11, 6573–6593. <https://doi.org/10.5194/bg-11-6573-2014>
- Schuur, E.A.G., McGuire, A.D., Schädel, C., Grosse, G., Harden, J.W., Hayes, D.J. et al. (2015). Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature* 520, 171–179. <https://doi.org/10.1038/nature14338>
- Strauss, J., Schirmer, L., Grosse, G., Fortier, D., Hugelius, G., Knoblauch, C. et al. (2017). Deep Yedoma permafrost: a synthesis of depositional characteristics and carbon vulnerability. *Earth-Science Reviews* 172, 75–86. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.007>
- Brown, J., Ferrans, O., Heginbottom, J.A. and Melnikov, E. (2002). *Circum-Arctic map of permafrost and ground-ice conditions, Version 2*. Colorado, USA: National Snow and Ice Data Center. https://nsidc.org/fgdc/maps/ipa_browse.html
- Ballantyne, C.K. (2018). *Periglacial geomorphology*. Chichester, UK: Wiley-Blackwell.
- Olefeldt, D., Goswami, S., Grosse, G., Hayes, D., Hugelius, G., Kuhry, P. et al. (2016). Circumpolar distribution and carbon storage of thermokarst landscapes. *Nature Communications* 7, 13043. <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms13043>
- Brown, R.J.E. (1960). The distribution of permafrost and its relation to air temperature in Canada and the USSR. *Arctic* 13(3), 163–177. <http://pubs.aina.ucalgary.ca/arctic/Arctic13-3-163.pdf>
- Gravis, G.F., Melnikov, E.S., Guo, D., Li, S., Li, S., Tong, B. et al. (2003). Principles of classification and mapping of permafrost in Central Asia. *8th International Conference on Permafrost 2003*. Arenson, L.U., Springman, S.M. and Phillips, M. (eds.). AA Balkema Publishers. 297–302
- Overland, J.E., Hanna, E., Hanssen-Bauer, I., Kim, S.J., Walsh, J.E., Wang, M. et al. (2017). Surface Air Temperature. Arctic Report Card: Update for 2017. <https://www.arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2017/ArtMID/7798/ArticleID/700/Surface-Air-Temperature>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 1535. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- Park, H., Kim, Y. and Kimball, J.S. (2016). Widespread permafrost vulnerability and soil active layer increases over the high northern latitudes inferred from satellite remote sensing and process model assessments. *Remote Sensing of Environment* 175, 349–358. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.046>
- Minayeva, T., Sirin, A., Kershaw, P. and Bragg, O. (2018). Arctic peatlands. In *The Wetland Book II: Distribution, Description, and Conservation*. by Finlayson, C.M., Milton, G.R., Prentice, R.C. and Davidson, N.C. (eds.). Dordrecht, NL: Springer 1–15. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4001-3_109
- Arctic Monitoring and Assessment Programme (2017a). *Snow, water, ice and permafrost in the Arctic (SWIPA) 2017*. Oslo, Norway: AMAP. <https://www.amap.no/documents/doc/Snow-Water-Ice-and-Permafrost-in-the-Arctic-SWIPA-2017/1610>
- Schuur, E.A.G., Abbott, B.W., Bowden, W.R., Brovkin, V., Camill, P., Canadell, J.G. et al. (2013). Expert assessment of vulnerability of permafrost carbon to climate change. *Climate Change* 119(2), 359–374. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0730-7>
- Koven, C.D., Schuur, E.A.G., Schädel, C., Bohn, T.J., Burke, E.J., Chen, G. et al. (2015). A simplified, data-constrained approach to estimate the permafrost carbon–climate feedback. *Phil. Trans. R. Soc. A* 373, 20140423. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0423>
- Schädel, C., Bader, M.K.F., Schuur, E.A.G., Biasi, C., Bracho, R., Capek, P. et al. (2016). Potential carbon emissions dominated by carbon dioxide from thawed permafrost soils. *Nature Climate Change* 6, 950–953. <https://www.nature.com/articles/nclimate3054>
- Walter Anthony, K., Schneider von Deimling, T., Nitze, I., Frolking, S., Emond, A., Daanen, R. et al. (2018). 21st-century modeled permafrost carbon emissions accelerated by abrupt thaw beneath lakes. *Nature Communications* 9(1), 3262. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05738-9>
- Grosse, G., Goetz, S., McGuire, A.D., Romanovsky, V.E. and Schuur, E.A.G. (2016). Changing permafrost in a warming world and feedbacks to the Earth system. *Environmental Research Letters* 11, 040201. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/11/4/040201>
- Shur, Y.L. and Jorgenson, M.T. (2007). Patterns of permafrost formation and degradation in relation to climate and ecosystems. *Permafrost and Periglacial Processes* 18, 7–19. <https://doi.org/10.1002/ppp.582>
- Swindles, G.T., Morris, P.J., Mullan, D., Watson, E.J., Turner, E., Roland, T.P. et al. (2015). The long-term fate of permafrost peatlands under rapid climate warming. *Nature Scientific Reports* 5, 17951. <https://doi.org/10.1038/srep17951>
- Gao, Y. and Couwenberg, J. (2015). Carbon accumulation in a permafrost polygon peatland: steady long-term rates in spite of shifts between dry and wet conditions. *Global Change Biology* 21(2), 803–815. <https://doi.org/10.1111/gcb.12742>
- Ström, L., Ekberg, A., Mastepanov, M. and Christensen, T.R. (2003). The effect of vascular plants on carbon turnover and methane emissions from a tundra wetland. *Global Change Biology* 9(8), 1185–1192. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00655.x>
- Turetsky, M.R., Wieder, R.K., Vitt, D.H., Evans, R.J. and Scott, K.D. (2007). The disappearance of relict permafrost in boreal North America: effects on peatland carbon storage and fluxes. *Global Change Biology* 13(9), 1922–1934. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01381.x>
- De Klerk, P., Donner, N., Karpov, N. S., Minke, M. & Joosten, H. 2011. Short-term dynamics of a low-centred ice-wedge polygon near Chokurdakh (NE Yakutia, NE Siberia) and climate change during the last ca. 1250 years. *Quaternary Science Reviews*, 30, 3013–3031. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.06.016>

27. Steffen, W., Rockström, J., Richardson, K., Lenton, T.M., Folke, C., Liverman, D. et al. (2018). Trajectories of the Earth system in the Anthropocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115(33), 8252-8259. <https://doi.org/10.1073/pnas.1810141115>
28. Hartfield, G., Blunden, J. and Arndt, D.S. (eds.) (2018). State of the climate in 2017. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 99(8), Si-5332. <https://doi.org/10.1175/2018BAMSStateoftheClimate.1>
29. Baltzer, J.L., Veness, T., Chasmer, L.E., Sniderhan, A.E. and Quinton, W.L. (2014). Forests on thawing permafrost: fragmentation, edge effects, and net forest loss. *Global Change Biology* 20(3) 824-834. <https://doi.org/10.1111/gcb.12349>
30. Carpino, O.A., Berg, A.A., Quinton, W.L. and Adams, J.R. (2018). Climate change and permafrost thaw-induced boreal forest loss in northwestern Canada. *Environ. Res. Lett.* 13, 084018. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aad74e>
31. Gibson, C.M., Chasmer, L.E., Thompson, D.K., Quinton, W.L., Flannigan, M.D. and Olefeldt, D. (2018). Wildfire as a major driver of recent permafrost thaw in boreal peatlands. *Nature Communications* 9(1), 3041. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05457-1>
32. Jones, B.M., Grosse, G., Arp, M.C., Jones, K.M., Walter, A. and Romanovsky, V.E. (2011). Modern thermokarst lake dynamics in the continuous permafrost zone, northern Seward Peninsula, Alaska. *Journal of Geophysical Research* 116, G00M03. <https://doi.org/10.1029/2011JG001666>
33. Jones, M.C., Grosse, G., Jones, B.M. and Walter Anthony, K.M. (2012). Peat accumulation in drained thermokarst lake basins in continuous, ice-rich permafrost, northern Seward Peninsula, Alaska. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences* 117, G00M07. <https://doi.org/10.1029/2011JG001766>
34. Jones, B.M. and Arp, C.D. (2015). Observing a catastrophic thermokarst lake drainage in Northern Alaska. *Permafrost and Periglacial Processes* 26, 119-128. <https://doi.org/10.1002/ppp.1842>
35. Van Huissteden, J., Berrittella, C., Parmentier, F.J.W., Mi, Y., Maximov, T.C. and Dolman, A.J. (2011). Methane emissions from permafrost thaw lakes limited by lake drainage. *Nature Climate Change* 1, 119-123. <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE1101>
36. Roach, J., Griffith, B., Verbyla, D. and Jones, J. (2011). Mechanisms influencing changes in lake area in the Alaskan boreal forest. *Global Change Biology* 17, 2567-2583. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02446.x>
37. Jepsen, S.M., Voss, C.I., Walvoord, M.A., Minsley, B.J. and Rover, J. (2013). Linkages between lake shrinkage/expansion and sublacustrine permafrost distribution determined from remote sensing of interior Alaska, USA. *Geophysical Research Letters* 40, 882-887. <https://doi.org/10.1002/grl.50187>
38. Flannigan, M., Stocks, B., Turetsky, M. and Wotton, M. (2009). Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest. *Global Change Biology* 15(3), 549-560. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01660.x>
39. Jones, B.M., Kolden, C.A., Jandt, R., Abatzoglou, J.T., Urban, F. and Arp, C.D. (2009). Fire behavior, weather, and burn severity of the 2007 Anaktuvuk river tundra fire, North Slope, Alaska. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 41, 309-316. <https://doi.org/10.1657/1938-4246-41.3.309>
40. Hu, F.S., Higuera, P.E., Walsh, J.E., Chapman, W.L., Duffy, P.A., Brubaker, L.B. et al. (2010). Tundra burning in Alaska: Linkages to climatic change and sea ice retreat. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 115, G04002. <http://dx.doi.org/10.1029/2009JG001270>
41. Hu, F.S., Higuera, P.E., Duffy, P.A., Chipman, M.L., Rocha, A.V., Young, A.M. et al. (2015). Arctic tundra fires: natural variability and responses to climate change. *Frontiers in Ecology and the Environment* 13(7), 369-377. <https://doi.org/10.1890/150063>
42. Mack, M.C., Bret-Harte, M.S., Hollingsworth, T.N., Jandt, R.R., Schuur, E.A.G., Shaver, G.R. et al. (2011). Carbon loss from an unprecedented Arctic tundra wildfire. *Nature* 475, 489-492. <https://www.nature.com/articles/nature10283>
43. Kelly, R., Chipman, M.L., Higuera, P.E., Stefanova, I., Brubaker, L.B. and Hu, F.S. (2013). Recent burning of boreal forests exceeds fire regime limits of the past 10,000 years. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 110, 13055-13060. <https://doi.org/10.1073/pnas.1305069110>
44. Rupp, T.S., Duffy, P., Leonawicz, M., Lindgren, M., Breen, A., Kurkowski, T. et al. (2016). Climate scenarios, land cover, and wildland fire. In Zhu, Z. and McGuire, A.D. (eds.), *Baseline and projected future carbon storage and greenhouse-gas fluxes in ecosystems of Alaska*. USGS Professional Paper 1826, 17-52
45. Bret-Harte, M.S., Mack, M.C., Shaver, G.R., Huebner, D.C., Johnston, M., Mojica, C.A. et al. (2013). The response of Arctic vegetation and soils following an unusually severe tundra fire. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 368, 20120490. <https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0490>
46. Arctic Climate Impact Assessment (2005). *Impacts of a warming Arctic: Arctic climate impact assessment*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
47. Riley, W.J., Subin, Z.M., Lawrence, D.M., Swenson, S.C., Torn, M.S., Meng, L. et al. (2011). Barriers to predicting changes in global terrestrial methane fluxes: analyses using CLM4Me, a methane biogeochemistry model integrated in CESM. *Biogeosciences* 8, 1925-1953. <https://doi.org/10.5194/bg-8-1925-2011>
48. Gao, X., Schlosser, C.A., Sokolov, A., Walter Anthony, K., Zhuang, Q. and Kicklighter, D. (2013). Permafrost degradation and methane: low risk of biogeochemical climate-warming feedback. *Environmental Research Letters* 8(3), 035014. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/8/3/035014>
49. Schneider von Deimling, T., Grosse, G., Strauss, J., Schirrmeyer, L., Morgenstern, A., Schaphoff, S. et al. (2015). Observation-based modelling of permafrost carbon fluxes with accounting for deep carbon deposits and thermokarst activity. *Biogeosciences* 12(11), 3469-3488. <https://doi.org/10.5194/bg-12-3469-2015>
50. Grosse, G., Harden, J., Turetsky, M., McGuire, A.D., Camill, P., Tarnocai, C. et al. (2011). Vulnerability of high-latitude soil organic carbon in North America to disturbance. *Journal of Geophysical Research* 116, G00K06. <https://doi.org/10.1029/2010JG001507>
51. Instanes, A., Anisimov, O., Brigham, L., Goering, D., Khrustalev, L.N., Ladanyi, B. et al. (2005). Infrastructure: buildings, support systems, and industrial facilities. In *ACIA: Arctic Climate Impact Assessment*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 908-944.
52. Walker, D.A., Reynolds, M.K., Buchhorn, M. and Peirce, J.L. (eds.) (2014). *andscape and permafrost changes in the Prudhoe Bay Oilfield, Alaska*. Alaska Geobotany Center Publication AGC 14-01. Fairbanks, AK: University of Alaska Fairbanks. https://www.geobotany.uaf.edu/library/pubs/WalkerDA2014_agc14-01.pdf

53. Vlassova, T. (2002). Human impacts on the tundra-taiga zone dynamics: the case of the Russian lesotundra. *Ambio Special Report*, 12, 30–36.
54. Instanes, A. (2016). Incorporating climate warming scenarios in coastal permafrost engineering design – Case studies from Svalbard and northwest Russia. *Cold Regions Science and Technology* 131, 76-87. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.09.004>
55. Shiklomanov, N.I., Streletskiy, D.A., Swales, T.B. and Kokorev, V.A. (2017). Climate change and stability of urban infrastructure in Russian permafrost regions: Prognostic assessment based on GCM climate projections. *Geographical Review* 107, 125-142. <https://doi.org/10.1111/gere.12214>
56. Jorgenson, T., Shur, Y.L. and Osterkamp, T.E. (2008). Thermokarst in Alaska. *Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost* 1, 869-876. Fairbanks, AK: University of Alaska Fairbanks
57. Kokelj, S.V. and Jorgenson, M.T. (2013). Advances in thermokarst research. *Permafrost and Periglacial Processes* 24, 108-119. <https://doi.org/10.1002/ppp.1779>
58. Jorgenson, M.T., Racine, C.H., Walters, J.C. and Osterkamp, T.E. (2001). Permafrost degradation and ecological changes associated with a warming climate in central Alaska. *Climatic Change* 48, 551–579. <https://doi.org/10.1023/A:100566742>
59. Halsey, L.A., Vitt, D.H. and Zoltai, S.C. (1995). Initiation and expansion of peatlands in Alberta, Canada. *Climate, landscape and vegetation change in the Canadian Prairie Provinces Proceedings* 45-53. Edmonton, Alberta: Canadian Forestry Service. <http://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/18992.pdf>
60. Jorgenson, M.T., Shur, Y.L. and Walker, H.J. (1998). Evolution of a permafrost-dominated landscape on the Colville River Delta, northern Alaska. *Proceedings of Seventh International Conference on Permafrost, Collection Nordicana* 57, 523–529.
61. Fortier, D. and Allard, M. (2004). Late Holocene syngenetic ice-wedge polygons development, Bylot Island, Canadian Arctic Archipelago. *Canadian Journal of Earth Sciences* 41(8), 997-1012. <https://doi.org/10.1139/e04-031>
62. Payette, S., Delwaide, A., Caccianiga, M. and Beauchemin, M. (2004). Accelerated thawing of subarctic peatland permafrost over the last 50 years. *Geophysical Research Letters* 31, L18208. <https://doi.org/10.1029/2004GL020358>
63. Metcalfe, D.B., Hermans, T.D.G., Ahlstrand, J., Becker, M., Berggren, M., Björk, R. G. et al. (2018). Patchy field sampling biases understanding of climate change impacts across the Arctic. *Nature Ecology & Evolution* 2, 1443–1448. <https://www.nature.com/articles/s41559-018-0612-5>
64. United Nations Environment Programme (2012). *Policy implications of warming permafrost*. UNEP : Nairobi. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8533>
65. Arctic Monitoring and Assessment Programme (2017b) *Adaptation actions for a changing Arctic: Perspectives from the Barents area*. Oslo, Norway: AMAP. <https://www.amap.no/documents/doc/Adaptation-Actions-for-a-Changing-Arctic-Perspectives-from-the-Barents-Area/1604>
66. Chetkiewicz, C. and Lintner, A. (2014). *Getting it right in Ontario's Far North: the need for a regional strategic environmental assessment in the Ring of Fire [Wawagajing]*. Canada: Wildlife Conservation Society Canada and Ecojustice Canada. https://www.wcscanada.org/Portals/96/Documents/RSEA_Report_WCSCanada_Ecojustice_FINAL.pdf
67. Koivuova, T. (2016). Arctic resources: Exploitation of natural resources in the Arctic from the perspective of international law. In *Research Handbooks on International Law and Natural Resources*. Morgera, E. and Kulovesi, K. (eds.) Cheltenham/Northampton: Edward Elgar Publishing. Chapter 17. 349-366. <https://www.elgaronline.com/view/9781783478323.00031.xml>
68. McLaughlin, J.W. and Webster, K. (2013). *Effects of a changing climate on peatlands in permafrost zones: a literature review and application to Ontario's Far North*. Climate Change Research Report CCRR-34. Canada: Ontario Ministry of Natural Resources. <http://www.ontla.on.ca/library/repository/mon/27008/323518.pdf>
69. Legislative Assembly of Ontario (2010). Ontario House Bill 191 2010. An Act with respect to land use planning and protection in the Far North. Ontario. <https://www.ola.org/en/legislative-business/bills/parliament-39/session-2/bill-191>
70. Government of Ontario (2018). Land use planning process in the Far North. Ontario. <https://www.ontario.ca/page/land-use-planning-process-far-north#section-1>

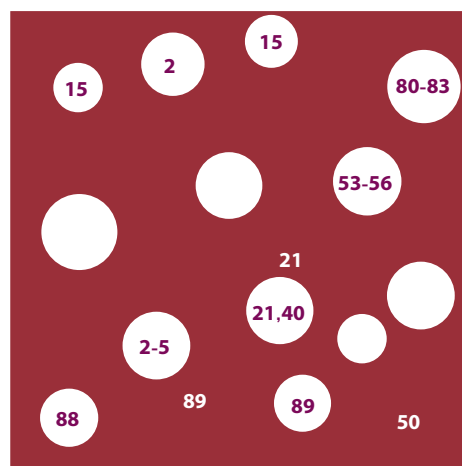
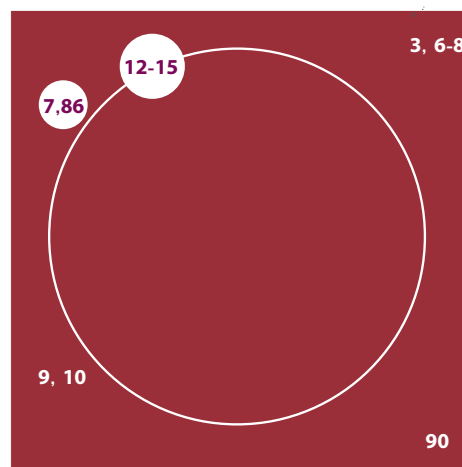
图片参考文献



71. Washburn, A.L. (1979). *Geocryology. A survey of periglacial processes and environments*. London: Edward Arnold.
72. Kujala, K., Seppälä, M. and Holappa, T. (2008). Physical properties of peat and palsa formation. *Cold Regions Science and Technology* 52, 408–414. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2007.08.002>
73. Vasil'chuk, Y.K. (2013). Syngenetic ice wedges: cyclical formation, radiocarbon age and stable-isotope records. *Permafrost and Periglacial Processes* 24(1), 82–93. <https://doi.org/10.1002/ppp.1764>
74. Harris, S.A., Brouchkov, A. and Cheng, G. (2018). *Geocryology: Characteristics and use of frozen ground and permafrost landforms*. Leiden, NL: CRC Press/Balkema.
75. Burn, C.R. (1998). The response (1958-1997) of permafrost and near-surface ground temperatures to forest fire, Takhini River valley, southern Yukon Territory. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 35(2), 184-199. <https://doi.org/10.1139/cjes-35-2-184>
76. Routh, J., Hugelius, G., Kuhry, P., Filley, T., Kaislahti, P., Becher, M. et al. (2014). Multi-proxy study of soil organic matter dynamics in permafrost peat deposits

reveal vulnerability to climate change in the European Russian Arctic. *Chemical Geology* 368, 104-117. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.12.022>

77. Soudzilovskaia, N.A., van Bodegom, P.M. and Cornelissen, H.C. (2013). Dominant bryophyte control over high-latitude soil temperature fluctuations predicted by heat transfer traits, field moisture regime and laws of thermal insulation. *Functional Ecology* 27, 1442–1454. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12127>
78. Porada, P., Ekici, A. and Beer, C. (2016). Effects of bryophyte and lichen cover on permafrost soil temperature at large scale. *Cryosphere* 10, 2291–2315. <https://doi.org/10.5194/tc-10-2291-2016>
79. Park, H., Launiainen, S., Konstantinov, P.Y., Iijima, Y. and Fedorov, A.N. (2018). Modeling the effect of moss cover on soil temperature and carbon fluxes at a tundra site in northeastern Siberia. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. <https://doi.org/10.1029/2018JG004491>
80. Chapin III, F., Sturm, M., Serreze, M., McFadden, J., Key, J., Lloyd, A. *et al.* (2005). Role of land-surface changes in Arctic summer warming. *Science* 310(5748), 657-660. <https://doi.org/10.1126/science.1117368>
81. Blok, D., Heijmans, M.P.D., Schaeppman-Strub, G., Kononov, A.V., Maximov, T.C. and Berendse, F. (2010). Shrub expansion may reduce summer permafrost thaw in Siberian tundra. *Global Change Biology* 16(4), 1296-1305. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02110.x>
82. Briggs, M.A., Walvoord, M.A., McKenzie, J.M., Voss, C.I., Day-Lewis, F. D. and Lane, J.W. (2014). New permafrost is forming around shrinking Arctic lakes, but will it last? *Geophysical Research Letters* 41(5), 1585–1592. <https://doi.org/10.1002/2014GL059251>
83. Druel, A., Peylin, P., Krinner, G., Ciais, P., Viovy, N., Peregon, A. *et al.* (2017). Towards a more detailed representation of high-latitude vegetation in the global land surface model ORCHIDEE (ORC-HL-VEGv1.0). *Geoscientific Model Development* 10, 4693–4722. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4693-2017>
84. Nauta, A.L., Heijmans, M.M.P.D., Blok, D., Limpens, J., Elberling, B., Gallagher, A. *et al.* (2015). Permafrost collapse after shrub removal shifts tundra ecosystem to a methane source. *Nature Climate Change* 5, 67-70. <https://www.nature.com/articles/nclimate2446>
85. Johansson, M., Christensen, T.R., Åkerman, H.J., and Callaghan, T.V. (2006). What determines the current presence or absence of permafrost in the Torneträsk region, a sub-arctic landscape in northern Sweden? *Ambio* 35, 190-197. [https://doi.org/10.1579/0044-7447\(2006\)35\[190:WDTCPQ\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2006)35[190:WDTCPQ]2.0.CO;2)
86. Zhang, T., Barry, R.G., Knowles, K., Ling, F. and Armstrong, R.L. (2003). Distribution of seasonally and perennially frozen ground in the Northern Hemisphere. In Phillips, M., Springman, S.M. and Arenson, L.U. (eds), *Permafrost, Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost*, Zurich, Switzerland, 21-25 July 2003, Volume 2.
87. Joosten, H. and Couwenberg, J. (2008) Peatlands and Carbon. In: Parish, F., Sirin, A., Charman, D., Joosten, H., Minayeva, T., Silvius, M. & Stringer, L. (eds.) *Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change: Main Report*, Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands International, Wageningen, 99–117. http://www.imcg.net/media/download_gallery/books/assessment_peatland.pdf
88. Abbott, B.W., Jones, J.B., Schuur, E.A.G., Chapin, F.S. III, Bowden, W.B., Bret-Harte, M.S., Epstein, H.E., *et al.* (2016) Biomass offsets little or none of permafrost carbon



release from soils, streams and wildfire: an expert assessment. *Environmental Research Letters*, 11: 034014. doi: 10.1088/1748-9326/11/3/034014

89. Schuster, P. F., Schaefer, K. M., Aiken, G. R., Antweiler, R. C., Dewild, J. F., Gryziac, J. D., Gusmeroli, A., *et al.* (2018). Permafrost stores a globally significant amount of mercury. *Geophysical Research Letters*, 45, 1463–1471. <https://doi.org/10.1002/2017GL075571>
90. Brown, J., O. Ferriars, J. A. Heginbottom, and E. Melnikov. 2002. Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground-Ice Conditions, Version 2. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center. <https://doi.org/nsidc.org/data/GGD318/versions/2>



图片来源: oticki/Shutterstock.com

氮固定： 从氮循环污染到氮循环经济

全球氮挑战

《联合国环境署2014年年鉴》强调了环境中过量活性氮的重要性。¹ 其结论令人震惊。这不仅是因为氮污染的程度和复杂性，也因为在减少氮污染方面的进展甚微。确定的解决方案很少得到扩大，而世界继续排放氮污染，很大程度上导致了空气质量下降，陆地和水生环境恶化，气候变化恶化以及臭氧层枯竭。²⁻¹⁰ 这些影响阻碍了可持续发展目标的进展，因为它们影响人类健康、资源管理、生计和经济。¹¹⁻¹⁵ 但还有希望的迹象。过去四年，氮污染管理方法发生了变化。这些方法包括消费和生产的新思路，以便认真解决氮问题。¹⁶⁻²⁴

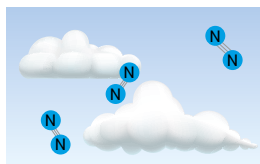
氮是地球大气中极为丰富的元素。以 N_2 分子形式出现的氮是无害的，我们呼吸的每一口空气中都有78%的氮。两个氮原子通过强的三键 ($N \equiv N$) 紧密结合，结构非常稳定并且不易发生化学反应。氮气使大气层变得安全，使生命能够在其中茁壮成长，同时避免了过多氧气容易燃烧的后果，这一切都令地球受益。对氮在环境方面的兴趣集中在将氮气 (N_2) 转化为其他能发生化学反应的形式。为简单起见，科学家将其他所有形式的氮称为“固定氮”或“活性氮” (Nr)。^{11,25} 活性氮有许多类型，效果各不相同，有的有益，有的有害——这就是使情况变得复杂之处。活性氮对地球上的所有生命都至关重要。例如，氨 (NH_3) 是氨基酸、蛋白质、酶

和脱氧核糖核酸的基础，因此是所有生命形式代谢的核心。类似地，一氧化氮（NO）是重要的生物信号传导化合物，而铵（ NH_4^+ ）和硝酸盐（ NO_3^- ）是植物生长必需的氮的主要营养素形式。这表明活性氮化合物的主要效益在于它们有助于生产食物和动物饲料。人类通过使用哈伯-博世人工“固氮”过程大规模扩大了氨、尿素和硝酸盐等化肥的生产，以维持不断增长的世界人口。²⁶ 同时，人类还受益于土壤中与豆科作物根部有关的专门细菌，它们能天然对氮气进行生物固定，使之转化为活性氮。

除了这些效益以外，还必须指出存在氨、硝酸盐、一氧化氮（NO）、氧化亚氮（ N_2O ）的大量损失和许多其他形式的氮污染，它们会对环境造成多重影响。这些污染可能在使用肥料后马上发生，而动物

粪便、人类排泄物和其他有机废物也会导致大量活性氮损失到环境。虽然人们认为从生物固氮损失到环境中的活性氮的比例小于许多从动物和人体排出后的肥料损失到环境中的活性氮的比例，但两种来源都会导致活性氮污染。活性氮也是人类活动的副产品。例如，化石燃料和生物质燃烧过程释放一氧化氮（NO）和二氧化氮（ NO_2 ），统称为氮氧化物（ NO_x ）。尽管在减少车辆和能源生产排放的氮氧化物方面付出了巨大努力，但世界上快速发展的地区的排放仍在不断增加。^{6,12} 总的来说，人类正在生产活性氮的混合物，它威胁着健康、气候和生态系统，使氮成为人类面临的最重要的污染问题之一。然而，问题的严重程度在很大程度上仍是未知的，而且未在科学界以外得到承认。

环境中不同形式的氮



氮气 (N_2)

来源

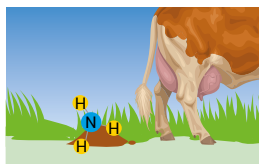
在我们呼吸的空气中，氮气含量占78%

益处

为地球的生命维持稳定的大气。它使天空呈蓝色。

影响

氮气无害，化学性质不活跃



氨 (NH_3)

来源

粪肥、尿、肥料和生物质燃烧

益处

氨基酸、蛋白质和酶的基础。氨常用作肥料。

影响

导致富营养化，影响生物多样性。它在空气中形成颗粒物，影响健康。



一氧化氮 (NO) 和二氧化氮 (NO_2)

来源

交通、工业和能源部门的燃烧。NO和 NO_2 统称为 NO_x 。

益处

NO是人体生理学不可缺少的。 NO_2 没有已知的益处。

影响

NO 和 NO_2 （或 NO_x ）是主要的空气污染物，能引起心脏病和呼吸道疾病。



硝酸盐 (NO_3^-)

来源

废水、农业和氮氧化物氧化

益处

广泛应用于化肥和炸药中

影响

在空气中形成颗粒物，并影响健康。它会导致水的富营养化。



氧化亚氮 (N_2O)

来源

农业、工业和燃烧

益处

用于火箭推进剂并作为笑气用于医疗程序

影响

氧化亚氮是一种暖化效能比二氧化碳强300倍的温室气体。它还消耗平流层臭氧。

氮的已知问题和未知的未知问题

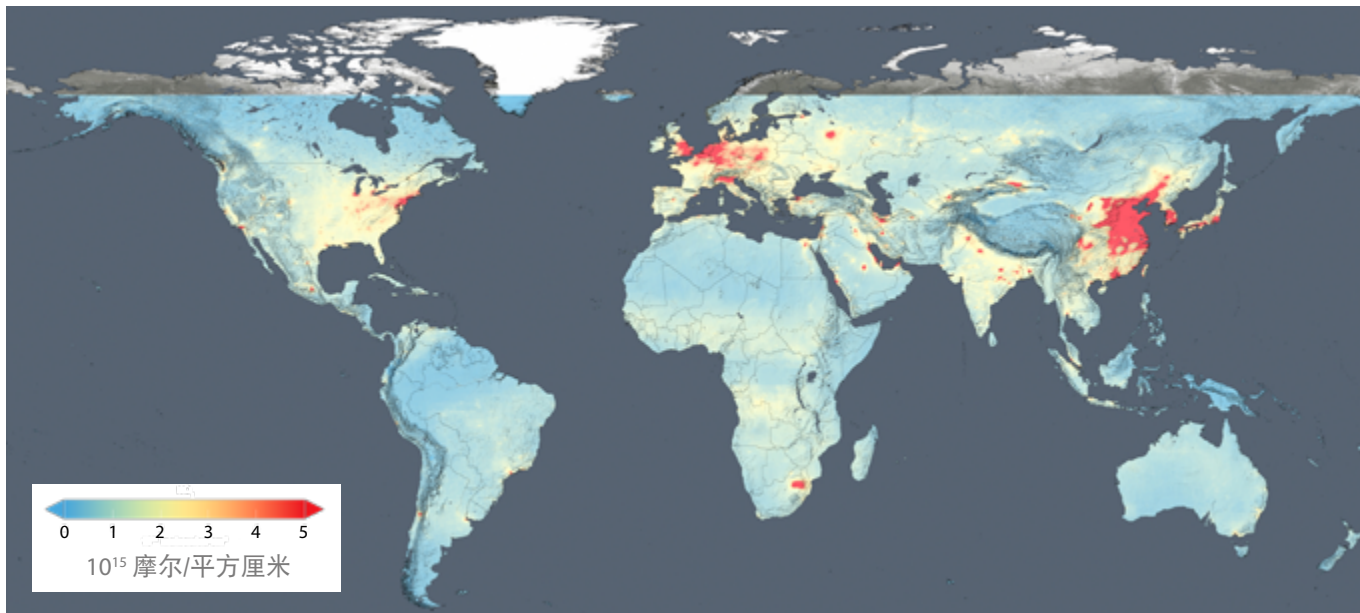
氮化合物的循环和人类的影响都有充分的文献记载。^{4,12,27,28} 然而，与碳在气候变化中的作用相比，很少有关于对氮采取行动的必要性的公开辩论。城市和农业区域上空空气中的活性氮化合物含量的增加是可测量的，例如氮氧化物、氨和细颗粒物，或PM_{2.5}。在全世界几个地区的农业区的地下水中，以及污水很少得到处理或根本没有处理的城市下游的河流中，升高的硝酸盐水平都可以量化。温室气体二氧化氮的大气浓度正在加速累积。这些都传递出明确的信息：人类正在大规模改变全球氮循环，造成多种形式的污染和影响，从地方到全球范围，活性氮成为了要解决的主要污染物。²²

欧洲氮评估确定了氮污染的五个主要威胁：水质、空气质量、温室气体平衡、生态系统和生物多样性

以及土壤质量。⁴ 它强调氮污染本身不是一个新问题，但氮管理需要成为许多现有环境问题解决方的一部分。在粮食生产方面，全世界氮的使用效率极低。^{20,29} 如果考虑整个食物链，在添加到农业的活性氮中，只有约20%最终进入了人类的食物。^{11,17} 这意味着令人担心的80%的活性氮被浪费掉了，它们以污染和氮气的形式进入了环境，表明活性氮污染是宝贵资源的巨大损失。

虽然过去的工作集中在用于不同形式的活性氮的分散方法，但把它们放在一起考虑有几个好处。首先，它能使我们开始研究活性氮效益和不同类型的活性氮污染之间的协同作用并进行权衡。其次，也是同样重要的是，它鼓励我们量化氮污染造成的所有影响的社会成本，以便为政策和公众提供信息。^{13,30} 成本估算能帮助指导缓解政策，但是，活性氮污染的真实成本实际上是已知的未知问题，因

2014年对流层中二氧化氮（NO₂）的平均浓度



二氧化氮是主要来自汽车、发电厂和工业活动排放的气体。二氧化氮和其他氮氧化物与其他空气污染物发生反应，形成有害的地面臭氧、酸雨和颗粒物。

图片来源：NASA Goddard Space Flight Center



视频：拯救大湖，使它们免受有毒藻的侵害



视频链接：<https://www.youtube.com/watch?v=b6JzL4NG26k>

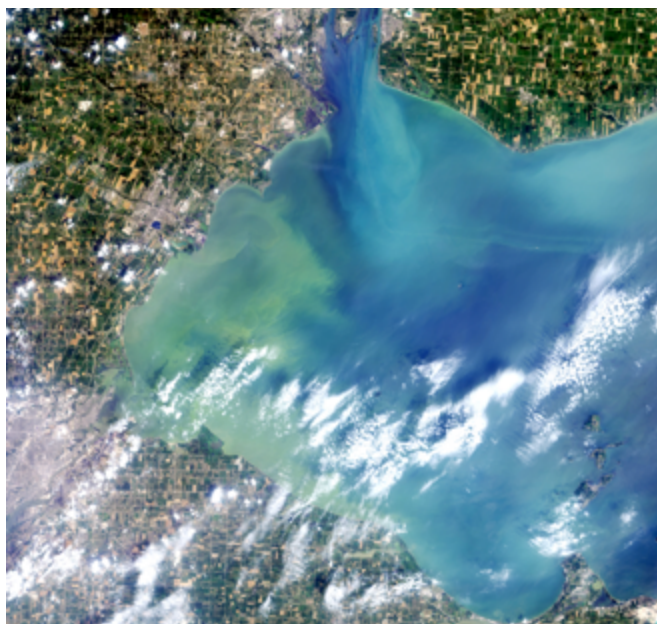
© PBS NewsHour

照片：伊利湖东南部皮利岛的藻华

图片来源：Tom Archer / Michigan Sea Grant (www.miseagrant.umich.edu)

为影响往往根本“无法同单位度量”，也就是说，很难找到一个共同的衡量标准。对健康、生态系统和气候成本进行比较就像试图比较苹果和橙子。根据人们减少活性氮污染风险的意愿或对生态系统和医疗保健服务的成本估算获得的估计值仍然能提供信息，并表明全球的成本约为每年3400亿美元至34000亿美元。¹¹

然而，一种简单得多的计算可能更有说服力。每年全球约有2亿吨活性氮资源以活性氮和氮气的形式进入环境。^{11,28} 如果我们用每公斤氮1美元的名义化肥价格乘以这个数字，那么每年的现金损失总额约为2000亿美元。这体现了采取行动的强烈动机。对于活性氮过少的地区而言，这一讯息也息息相关，例如撒哈拉以南非洲，在那里减少活性氮污染将有助于用有限的活性氮源进一步支持粮食生产。³¹ 把活性氮化合物转化回氮气（称为“反硝化作用”）没有提供避免活性氮污染的安全方法。相反，它意味着需要投入新的活性氮，这往往会增加污染。实际上，如果要提高整个经济范围内的氮利用效率（NUE），就需要减少所有的氮气和活性氮损失。



2014年8月3日，加拿大和美国之间的伊利湖西部的藻华（用奶绿色显示）。伊利湖频繁爆发的藻华是由含有肥料和粪便的农业径流、城市污水排放和大气沉降造成的氮和磷负荷导致的。

图片来源：Jeff Schmaltz / NASA Goddard Space Flight Center



视频：人类对全球空气质量的影响



视频链接：https://www.youtube.com/watch?time_continue=7&v=aMnDoXuTGS4

© NASA Goddard Space Flight Center

图片来源：Doin / Shutterstock.com

运输、能源和工业部门的化石燃料燃烧

煤、石油和天然气的高温燃烧释放出大量一氧化氮 (NO) 和二氧化氮 (NO₂) 形式的活性氮 (N_x)，统称为氮氧化物。

运输部门贡献了65%以上的氮氧化物排放量。

化石燃料燃烧占被人为固定为活性氮的氮气的13%



肥料生产

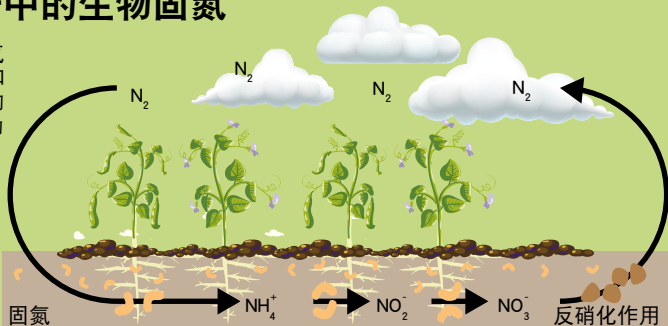
100多年前发明的哈伯-博世法满足了日益增长的大规模工业生产活性氮肥料和氨基炸药的需求。就像细菌的天然固氮一样，它人为地把大气中的氮气转变成氨 (NH₃) 固定下来。

肥料生产占被人为固定为活性氮的氮气的63%



作物栽培中的生物固氮

自然界中，氮气可以通过闪电和固氮细菌的生物固氮作用转化为活性氮

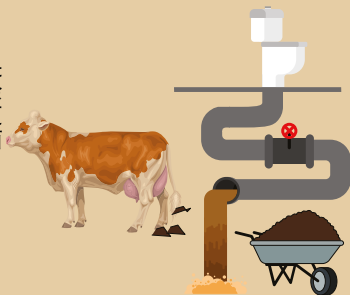


通过厌氧菌的反硝化作用，也可以将活性氮转化回氮气。这些自然过程保持了氮的平衡循环，但是增多的固氮作物（如豆类）耕种显著增加了输入的活性氮和损失到环境的活性氮。

作物生产过程中生物固氮占被转化为活性氮的氮气的24%

废物

食物生产和化石燃料燃烧是减轻活性氮排放的关键，除此之外，废物管理在防止更多活性氮逐级进入环境方面也发挥了重要的作用。



与污水和废水不同，大量的食物垃圾是可以避免的。

污水、废水和食物垃圾中含有蛋白质。约16%的蛋白质是氮。



谷物、水果、蔬菜、根茎和块茎构成了最大的食物损失和浪费。

每年全球生产的供人类食用的食物中约有1/3被损失或浪费掉

氮连锁效应

氮氧化物和氮氧化物影响城市空气质量。急性和慢性接触二氧化氮与呼吸和心血管疾病以及死亡率有关。儿童、老年人和哮喘患者容易受二氧化氮的伤害。

氧化亚氮 (N_2O) 是一种暖化效能比二氧化碳强300倍的温室气体。它还会破坏臭氧层。

空气中78%是氮气

近80%的人为氧化亚氮排放来自农业。

全球80%的氨 (NH_3) 排放来自人类活动，主要是化肥使用和畜牧业。

氨和硝酸反应在颗粒物中形成硝酸铵，增加呼吸和心脏病的风险。

活性氮的排放会与雨水混合产生硝酸雨

50%添加到农田的氮肥最终会造成污染，或者通过反硝化作用变回氮气被浪费掉了。

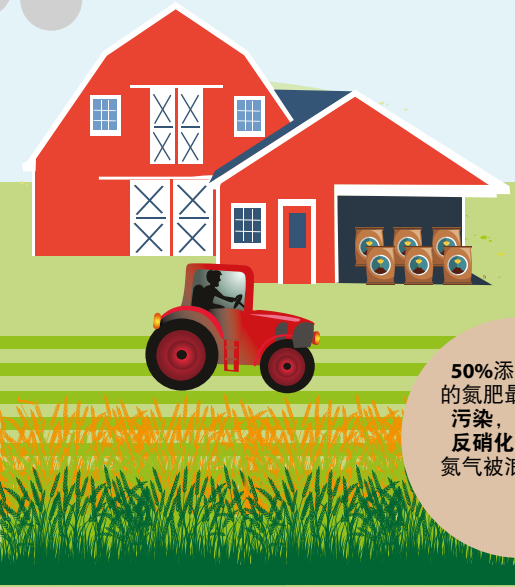
农作产生的硝酸盐 (NO_3^-) 会通过土壤渗透到地下水中，影响饮用水供应的质量，对人类健康构成重大风险

活性氮富集加剧了富营养化，导致淡水和海洋环境中出现有害的藻华、死区和生物多样性丧失。

2016年，全世界使用了1.05亿吨氮肥，相当于420万卡车肥料。

长期施用铵基肥料会使土壤变酸，对作物生产造成不利影响

氮污染导致富营养化、土壤酸化和生物体的直接毒性，降低物种丰富度和多样性。



政策碎片化和循环经济解决方案

正如环境相和各种活性氮形式已使氮科学变得支离破碎一样，氮政策也属于这种情况。活性氮的影响跨越多个政策领域，如空气污染、气候、淡水和海洋政策、生物多样性、健康和粮食安全。这种碎片化在许多国家的国内政策中广泛存在，在可持续发展目标（SDG）中也同样明显。对可持续发展目标和基本指标的审查表明，氮在几乎所有地方都是有关的，但几乎同样不显眼。目前仅在可持续发展目标14.1关于水下生命的拟议指标中制定与氮有关的指标。³² 目前尚未采纳把氮利用效率或氮损失纳入可持续发展目标指标的提案。^{20,33}

在政策权衡中可以很容易看到这种政策碎片化在整个氮循环中的后果。例如，欧盟减少水的硝酸盐污染的政策导致禁止在冬季“封闭期”内施用粪肥。然而，该政策也导致了春夏季粪肥施用量的增加，从而导致大气氨浓度峰值升高。³⁴ 仅有几个欧盟国家通过要求施用氮排放低的粪肥避免了这种时间效应。³⁵ 另一个例子涉及在室内养牛以减少与气候相关的二氧化氮排放的建议。然而，即使采用最佳技术措施减轻排放，这种做法通常也会导致氨排放增加。³⁶ 此种权衡也和燃烧源有关。例如，在20世纪90年代，为减少氮氧化物而引入的催化剂增加了一氧化二氮和氨的排放。

这些例子说明迫切需要将应对多种威胁的氮科学和政策结合起来。^{11,30,37} 例如，中国政府的2015年“肥料使用量零增长行动方案”旨在到2020年防止合成肥料的使用量增长，同时不减少粮食产量，这将限制所有形式的活性氮污染。有人建议下一步应重点关注与农场规模、创新和信息转移有关的社会经济障碍。³⁸

也很容易设想将农业中的氮循环转变为氮循环经济模型。在其中提高效率和减少肥料、生物固氮、尿液和粪便造成的损失，可使更多新鲜的氮能够到达



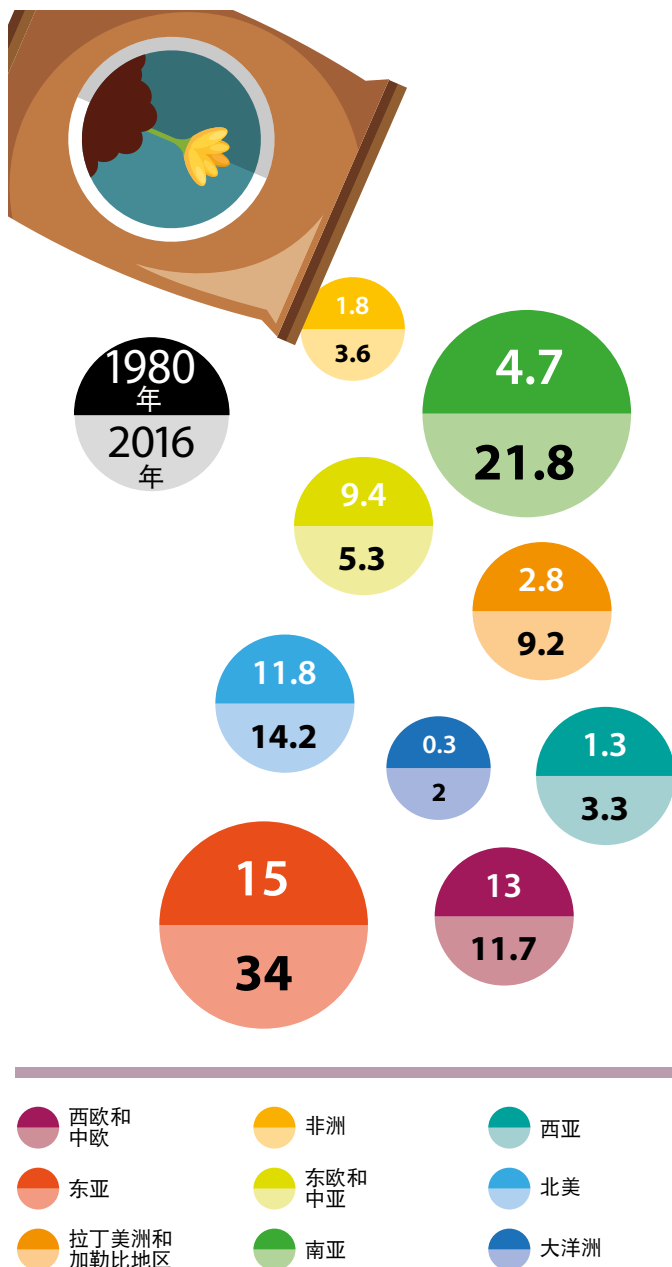
氮、营养素和循环经济

欧盟于2015年通过的循环经济一揽子计划旨在最大限度地提高包括生产、消费、废物管理和二次原材料回收在内的价值链各环节的资源利用效率。^{42,43} 该计划承认有机肥料和用废物制成的肥料的管理和贸易是回收和再利用生物营养素（如氮和磷），使它们重新回到欧盟经济中的关键。新法规鼓励使用国内可用的生物废物、动物副产品（如干燥粪肥或粪肥残渣）和其他农业残留物持续和创新地生产有机肥料。目前在欧盟内部只有5%的有机废物材料被回收利用并用作肥料。实现生物肥料的自由跨境流动将在欧盟内部创造新的二级原材料市场空间和供应链。据估计，这将创造约12万个工作岗位。预计从生物废物中回收氮会减少或替代对合成氮肥或无机氮肥的需求，这些肥料的生产具有很高的碳足迹和能量足迹。同时，这将有助于进一步减少损失到环境的活性氮。

为了氮和其他营养素的循环经济动员始于农场，在这里减少氮的损失可以更有效地提供营养素，以支持作物生长。这方面的主要需求是提供实用工具，以指导农民减少氮投入，从而减少氮污染造成的损失，这是通过实施减缓方法来实现的。应通过适当的土壤测试提供支持，以使农民有信心微调营养素水平。

然而，在生产具有附加值的、可销售的产品时增加氮和其他营养素的再利用也有巨大潜力。正如重大投资正在改变社会使之转向“低碳经济”（例如通过可再生能源）一样，氮的价值意味着通过对“氮循环经济”投资产生的重大经济机会。

1980年和2016年所有类型氮肥的区域消费量（百万公吨）



数据来源: 国际化肥工业协会 (<https://www.ifostat.org/databases/plant-nutrition>)

期望的食品和生物能源产品。与此同时, 将牲畜和人类排泄物再加工成新肥料为销售再生肥料产品提供了机会。

对于氮氧化物的燃烧源, 情况则有很大不同, 因为现有的所有技术, 例如催化还原和非催化还原, 都集中在将氮氧化物脱氮使之转化为氮气。但这意味着巨大的资源损失。如果把全球氮氧化物排放量乘以活性氮的肥料价格, 那么全球每年将获得价值500亿美元的资源, 这表明需要重新捕获氮氧化物, 以得到硝酸盐的技术。^{11,39}

在印度, 财政观点也为政府的政策提供了依据, 政策要求从2016年开始所有尿素肥料表面都涂上印度楝树油, 以减少损失到环境的活性氮和对未用于农业的尿素补贴造成的金融漏损。同样的原则也是印度总理2017年11月呼吁农民到2020年将化肥使用量减半, 以及为印度一些州的零预算自然农业(ZBNF)提供政府支持的基础。零预算自然农业运动的重点是避免从外部投入昂贵的化肥和农药, 帮助农民避免债务, 同时促进改善土壤有机质、土壤生物学和生产力的有机机会。在普拉得什邦, 法国巴黎银行(BNP Paribas)、联合国环境署(UNEP)和世界农林中心国际复合农林业研究中心之间的伙伴关系正在通过可持续印度财务基金(SIFF)支持在数千名满怀热情的农民中迅速扩大零预算自然农业的规模。政府偿还用于支持投资和扩张的贷款是这使种创新方法的基础, 因为当化肥使用量减少时, 需要的化肥补贴就要少得多。^{40,41}

迈向整体的国际氮处理方法

鼓舞人心的消息是一些国家正在试行更为综合的氮管理方法。例如，德国通过制定综合氮战略迅速对欧洲氮评估作出反应。^{23,44} 许多国家面临的困难是应对氮威胁的反应由多个部门负责，这使协调行动变得困难。例如，在巴西，农业仍在广大地区扩张，更好地把作物和动物生产与环境影响脱钩的需求尚未得到专门解决。⁴⁵ 在国际上，活性氮的跨界影响也需要明确的立法和政策行动。

国际氮倡议（INI）的成员对这些挑战进行了相当多的思考。第一步是与联合国环境署合作，以“国际氮管理系统（INMS）”的形式建立科学支持国际政策制定的协调办法。

在全球环境基金和80个伙伴组织的支持下，国际氮管理系统正在制定关于氮管理、流动和影响的融合、成本效益评估和未来氮情景的指导。国际氮管理系统还正在开展区域性多国示范，以展示整体氮管理如何提供帮助。一项关键成果是即将于2022年首次公布的《全球氮评估报告》。

视频：农业造成的空气污染



视频链接：https://www.youtube.com/watch?v=07P_wXTTusI
图片来源：[gillmar / Shutterstock.com](#)

© European Union

视频：为什么肥料对环境和您的利润很重要



视频链接：<https://www.youtube.com/watch?v=5TzzPOy1T3g>
图片来源：[Visual Generation / Shutterstock.com](#)

© Environmental Defense Fund

下一个挑战是为氮循环制定更加一致的政策框架。联合国环境大会关于氮的众多决议清楚地表明了这项工作的必要性：2/6号（巴黎协定）、2/7号（化学品和废物）、2/8号（可持续消费和生产）、2/9号（食品废物）、2/10号（海洋）、2/12号（珊瑚礁）、2/24号（土地退化）、3/4号（环境和健康）、3/6号（土壤）、3/8号（空气质量）和3/10号（水污染）。^{46,47} 第3/8号决议明确提出鼓励各国政府“利用减少空气、海洋和水污染的有效氮管理的协同效应”。

科学界和政策界最近的讨论探讨了如何更有效地协调氮政策的参与。⁴⁸ 一些可能性包括：

- 方案1：跨政策框架的氮破碎化——现状
- 方案2：现有政策框架下的氮领导。这对每一个多边环境协定的任务提出了挑战，因为现有的多边环境协定（MEA）只解决挑战的一部分。
- 方案3：应对氮挑战的新国际公约。目前对采用这种方法的准备不足。

方案4：“公约间氮协调机制”，可能在联合国环境大会的授权下为机构间氮合作提供政府间论坛。

目前缺乏协调机制，这限制了现有多边环境协定相互学习的程度，同时也无法要求国际氮管理系统单独和多个多边环境协定合作。协调机制将有助于会员国和相关多边环境协定积极参与。联合国环境署的主要团体和利益攸关方已促进了企业和民间团体的参与。应该注意的是，方案4仍然只是一个方案。各国政府应讨论哪种方法最敏捷、最有效和最具成本效益。

然而，这种讨论指向另一个好处。全球社会需要氮科学和氮政策的整体式方法，这一点正在变得越来越明显。首先，多源、多部门的观点允许考虑协同效应和权衡。这将通过为商业决策提供更加一致的基础，让农业和工业受益。其次，整体方法为形成循环经济观点奠定了基础，该观点对于动员变革至关重要。此外，这种氮处理方法也说明了未来的环境政策如何能够更有效地在问题之间进行协调。随着联合国环境署努力实现其“零污染的地球”战略，在相互作用的污染问题领域，经验教训可能更加重要。

公约间氮协调机制



视频：农业氮挑战



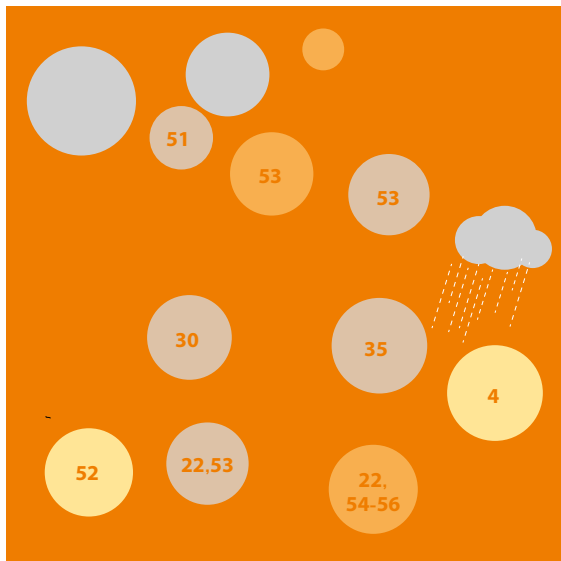
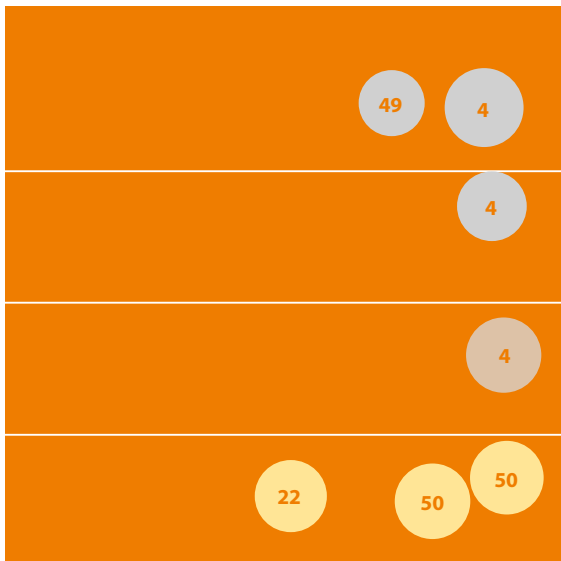
视频链接：<https://www.youtube.com/watch?v=y0IG5mOWyA> © CAFREtv
图片来源：Mark Sutton

参考文献

- United Nations Environment Programme (2014). *UNEP Year Book 2014*. Nairobi. <http://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/9240>
- Duce, R.A., LaRoche, J., Altieri, K., Arrigo, K.R., Baker, A.R., Capone, D.G. *et al.* (2008). Impacts of atmospheric anthropogenic nitrogen on the open ocean. *Science* 320, 893–897. <https://doi.org/10.1126/science.1150369>
- Voss, M., Bange, H.W., Dippner, J.W., Middelburg, J.J., Montoya, J.P. and Ward, B. (2013). The marine nitrogen cycle: recent discoveries, uncertainties and the potential relevance of climate change. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 368, 20130121–20130121. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0121>
- Sutton, M.A., Howard, C.M., Erisman, J.W., Billen, G., Bleeker, A., Grennfelt, P. van Grinsven, H. and Grizzetti, B. (eds.) (2011). *The European Nitrogen Assessment*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. <http://www.nine-esf.org/node/360/ENA-Book.html>
- Pearce, F. (2018). Can the world find solutions to the nitrogen pollution crisis? *Yale Environment 360*, 6 February. <http://e360.yale.edu/features/can-the-world-find-solutions-to-the-nitrogen-pollution-crisis>
- Liu, X., Zhang, Y., Han, W., Tang, A., Shen, J., Cui, Z. *et al.* (2013). Enhanced nitrogen deposition over China. *Nature* 494, 459–462. <http://dx.doi.org/10.1038/nature11917>
- Fowler, D., Steadman, C.E., Stevenson, D., Coyle, M. Rees, R.M. Skiba, U.M. *et al.* (2015). Effects of global change during the 21st century on the nitrogen cycle. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15, 13849–13893. <https://doi.org/10.5194/acp-15-13849-2015>
- Lelieveld, J., Evans, J.S., Fnais, M., Giannadaki, D. and Pozzer, A. (2015). The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature* 525, 367–371. <https://doi.org/10.1038/nature15371>
- United Nations Environment Programme (2013). *Drawing Down N₂O to Protect Climate and the Ozone Layer: A UNEP Synthesis Report*. Alcamo, J., Leonard, S.A., Ravishankara, A.R. and Sutton, M.A. (eds.) Nairobi. <http://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8489>
- Suddick, E.C., Whitney, P., Townsend, A.R. and Davidson, E.A. (2012). The role of nitrogen in climate change and the impacts of nitrogen–climate interactions in the United States: foreword to thematic issue. *Biogeochemistry* 114, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10533-012-9795-z>
- Sutton, M.A., Bleeker, A., Howard, C.M., Bekunda, M., Grizzetti, B., de Vries, W. *et al.* (2013). Our nutrient world: the challenge to produce more food and energy with less pollution. Edinburgh, UK: NERC/Centre for Ecology & Hydrology. <http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/500700/>
- Abrol, Y.P., Adhya, T.K., Aneja, V.P., Raghuram, N., Pathak, H., Kulshrestha, U., Sharma, C. and Singh, B. (eds.) (2017). *The Indian Nitrogen Assessment: Sources of Reactive Nitrogen, Environmental and Climate Effects, Management Options, and Policies*. UK: Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/book/9780128118368/the-indian-nitrogen-assessment>
- Van Grinsven, H.J.M., Holland, M., Jacobsen, B.H., Klimont, Z., Sutton, M.A. and Willems, W.J. (2013). Costs and benefits of nitrogen for Europe and implications for mitigation. *Environmental Science & Technology* 47, 3571–3579. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es303804g>
- Organisation for Economic Cooperation and Development (2018). *Human Acceleration of the Nitrogen Cycle: Managing Risk and Uncertainty*. Paris. <https://doi.org/10.1787/9789264307438-en>
- Brunekreef, B., Harrison, R.M., Künzli, N., Querol, X., Sutton, M.A., Heederik, D.J.J. *et al.* (2015) Reducing the health effect of particles from agriculture. *Lancet Respiratory Medicine* 3(11), 831–832. [https://doi.org/10.1016/S2213-2600\(15\)00413-0](https://doi.org/10.1016/S2213-2600(15)00413-0)
- Westhoek, H., Lesschen, J.P., Rood, T., Wagner, S., De Marco, A., Murphy-Bokern, D. *et al.* (2014). Food choices, health and environment: Effects of cutting Europe's meat and dairy intake. *Global Environmental Change* 26, 196–205. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.02.004>
- Westhoek, H., Lesschen, J.P., Rood, T., Leip, A., Wagner, S., De Marco, A. *et al.* (2015). *Nitrogen on the Table: The influence of food choices on nitrogen emissions and the European environment*. European Nitrogen Assessment Special Report on Nitrogen and Food. UK: Centre for Ecology & Hydrology. https://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/Nitrogen_on_the_Table_Report_WEB.pdf
- Springmann, M., Clark, M., Mason-D'Croz, D., Wiebe, K., Bodirsky, B.J., Lassaletta, L. *et al.* (2018). Options for keeping the food system within environmental limits. *Nature* 562, 519–525. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0594-0>
- Brownlie W.J., Howard, C.M., Pasda, G., Nave, B., Zerulla, W. and Sutton, M.A. (2015). Developing a global perspective on improving agricultural nitrogen use. *Environmental Development* 15, 145–151. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2015.05.002>
- EU Nitrogen Expert Panel (2015). *Nitrogen Use Efficiency (NUE) - an indicator for the utilization of nitrogen in food systems*. Wageningen, NL: Wageningen University. <http://www.eunep.com/wp-content/uploads/2017/03/N-ExpertPanel-NUE-Session-1.pdf>
- Sutton, M.A., Howard, C.M., Brownlie, W.J., Skiba, U., Hicks, K.W., Winiwarter, W. *et al.* (2017). The European Nitrogen Assessment 6 years after: What was the outcome and what are the future research challenges? In *Innovative Solutions for Sustainable Management of Nitrogen*. Dalgaard, T. *et al.* (eds). Aarhus, Denmark, 25–28 June. Aarhus, DK: Aarhus University and the dNmark Research Alliance. http://sustainableconference.dnmark.org/wp-content/uploads/2017/06/JYC_Final_Book-of-abstracts160617.pdf
- Reis, S., Bekunda, M., Howard, C.M., Karanja, N., Winiwarter, W., Yan, X. *et al.* (2016). Synthesis and review: Tackling the nitrogen management challenge: from global to local scales. *Environmental Research Letters* 11, 120205. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/12/120205/meta>
- Umweltbundesamt (2015). *Reactive Nitrogen in Germany: Causes and effects - measures and recommendations*. Dessau-Roßlau: The German Environment Agency (Umweltbundesamt). <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/reactive-nitrogen-in-germany>

24. Tomich T.P., Brodt, S.B., Dahlgren, R.A. and Scow, K.M. (eds.) (2016). Davis, CA: University of California Press. <http://asi.ucdavis.edu/programs/sarep/research-initiatives/are/nutrient-mgmt/california-nitrogen-assessment>
25. Galloway, J.N., Townsend, A.R., Erisman, J.W., Bekunda, M., Cai, Z., Freney, J.R. et al. (2008). Transformation of the Nitrogen Cycle: Recent Trends, Questions and Potential Solutions. *Science* 320, 889-892. <https://doi.org/10.1126/science.1136674>
26. Erisman, J.W., Sutton, M.A., Galloway, J., Klimont, Z. and Winiwarter, W. (2008). How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geoscience* 1, 636-639. <https://doi.org/10.1038/ngeo325>
27. Davidson, E.A., Davidson, M.B., David, J.N., Galloway, C.L., Goodale, R., Haeuber, J.A. . (2012). Excess nitrogen in the U.S. environment: trends, risks, and solutions. 15. The Ecological Society of America, Washington. <http://www.esa.org/esa/wp-content/uploads/2013/03/issuesinecology15.pdf>
28. Fowler, D., Coyle, M., Skiba, U., Sutton, M.A., Cape, J.N., Reis, S. (2013). The global nitrogen cycle of the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society, B* 368, 2130164. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2013.0164>
29. Bleeker, A., Sutton, M., Winiwarter, W. and Leip, A. (2013) *Economy Wide Nitrogen Balances and Indicators: Concept and Methodology*. OECD, Environment Directorate, Environment Policy Committee, Working Party on Environmental Information, Paris, France ENV/EPOC/WPEI(2012)4/REV1. Paris. <http://inms.iwlearn.org/inms-meeting-lisbon/NBalancesandIndicators.pdf>
30. Sutton, M.A., Oenema, O., Erisman, J.W., Leip, A., van Grinsven, H. and Winiwarter, W. (2011). Too much of a good thing. *Nature* 472, 159-161. <https://doi.org/10.1038/472159a>
31. Masso, C., Baijukya, F., Ebanyat, P., Bouaziz, S., Wendt, J., Bekunda, M. et al. (2017). Dilemma of nitrogen management for future food security in sub-Saharan Africa – a review. *Soil Research* 55(6), 425-434. <https://doi.org/10.1071/SR16332>
32. United Nations Statistic Division (2018). *Global indicator framework for the Sustainable Development Goals and targets of the 2030 Agenda for Sustainable Development*. New York. A/RES/71/313 E/CN.3/2018/2. <https://unstats.un.org/sdgs/indicators/indicators-list/>
33. Zhang, X., Davidson, E.A., Mauzerall, D.L., Searchinger, T.D., Dumas, P. and Shen, Y. (2015). Managing nitrogen for sustainable development. *Nature* 528, 51-59. <https://doi.org/10.1038/nature15743>
34. Sutton, M.A., Reis, S., Riddick, S.N., Dragosits, U., Nemitz, E., Theobald, M.R. et al. (2013). Toward a climate-dependent paradigm of ammonia emission & deposition. *Phil. Trans. Roy. Soc. (Ser. B)* 368, 20130166. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2013.0166>
35. Van Grinsven, H.J., Tiktak, A. and Rougoor, C.W. (2016). Evaluation of the Dutch implementation of the nitrates directive, the water framework directive and the national emission ceilings directive. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences* 78, 69-84. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2016.03.010>
36. Bittman, S., Dedina, M., Howard C.M., Oenema, O. and Sutton, M.A. (eds.) (2014). Options for Ammonia Mitigation: Guidance from the UNECE Task Force on Reactive Nitrogen. Edinburgh: Centre for Ecology and Hydrology. <http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/510206/1/N510206CR.pdf>
37. Gu, B.J., Ju, X.T., Chang, J., Ge, Y. and Vitousek, P.M. (2015). Integrated reactive nitrogen budgets and future trends in China. 112, 8792-8797. <https://doi.org/10.1073/pnas.1510211112>
38. Ju, X.T., Gu, B.J., Wu, Y.Y. and Galloway, J.N. (2016). Reducing China's fertilizer use by increasing farm size. 41, 26-32. <https://doi.org/10.1073/pnas.1806645115>
39. Mangano E., Kahr, J., Wright, P.A. and Brandani, S. (2016). Accelerated degradation of MOFs under flue gas conditions. *Faraday Discussions*, 192. <https://doi.org/10.1039/C6FD00045B>
40. Food and Agriculture Organization (2016). Zero Budget Natural Farming in India. *Agroecology Knowledge HubTrends in BiosciencesCircular Economy Package: Questions & Answers*. 2 December. http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-15-6204_en.htmClosing the loop – An EU action plan for the Circular Economy.Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regionshttps://www.eea.europa.eu/policy-documents/com-2015-0614-final
41. Bishnoi, R. and Bhati, A. (2017) An Overview : Zero Budget Natural Farming. *Trends in Biosciences* 10(46), 9314-9316
42. European Commission (2015). Circular Economy Package: Questions & Answers. 2 December. http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-15-6204_en.htm
43. European Commission (2015). Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. COM(2015) 614 final. <https://www.eea.europa.eu/policy-documents/com-2015-0614-final>
44. Sachverständigenrat für Umweltfragen (2015). *Nitrogen: Strategies for resolving an urgent environmental problem - Summary*. Berlin. https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/EN/02_Special_Reports/2012_2016/2015_01_Nitrogen_Strategies_summary.html
45. Austin, A.T., Bustamante, M.M.C., Nardoto, G.B., Mitre, S.K., Perez, T., Ometto, J.P.H.B. et al. (2013). Latin America's Nitrogen Challenge. *Science* 340, 149. <https://doi.org/10.1126/science.1231679>
46. United Nations Environment Programme (2018). *Resolutions and Decisions: UNEA 2*. Nairobi. <http://web.unep.org/environmentassembly/resolutions-and-decisions-unea-2>
47. United Nations Environment Programme (2018). *Documents: Third session of the UN Environment Assembly*. Nairobi. <http://web.unep.org/environmentassembly/node/40741>
48. Sutton, M. (2018). The global nitrogen challenge: a case of too much and too little nutrients. A presentation to the Committee of Permanent Representatives to the United Nations Environment Programme, 24 October 2018. <http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/26379/Sutton%20Global%20Nitrogen%20Challenge%20%28UNEP%20CPR%20Oct%202018%29.pdf?sequence=24&isAllowed=y>

图片参考文献



49. Zhang, R., Tie, X. and Bond, D.W. (2002). Impacts of anthropogenic and natural NO_x sources over the U.S. on tropospheric chemistry. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100(4), 1505-1509. <https://doi.org/10.1073/pnas.252763799>
50. FAO (2011). Global food losses and food waste – Extent, causes and prevention. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. <http://www.fao.org/docrep/014/mb060e/mb060e00.pdf>
51. Ussiri D., Lal R. (2013) Global Sources of Nitrous Oxide. In: *Soil Emission of Nitrous Oxide and its Mitigation*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5364-8_5
52. IFA (2018). International Fertilizer Association database (IFASTAT). International Fertilizer Association, Paris. <https://www.ifastat.org/>
53. Behera, S.N., Sharma, M., Aneja, V.P. and Balasubramanian, R. (2013). Ammonia in the atmosphere: a review on emission sources, atmospheric chemistry and deposition on terrestrial bodies. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(11), 8092-8131. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2051-9>
54. Field, C.D., Dise, N.B., Payne, R.J., Britton, A.J., Emmett, B.A., Helliwell, R.C., Hughes, S, et al. 2014. The Role of Nitrogen Deposition in Widespread Plant Community Change Across Semi-natural Habitats. *Ecosystems*, 17, 864-877. <https://doi.org/10.1007/s10021-014-9765-5>
55. Payne, R. J., N. B. Dise, C. J. Stevens, D. J. Gowing, and Begin Partners. 2013. 'Impact of Nitrogen Deposition at the Species Level'. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(3): 984–87. <https://doi.org/10.1073/pnas.1214299109>
56. Sheppard, L. J., Leith, I. D., Mizunuma, T., Cape, N., Crossley, A., Leeson, S., Sutton, M.A., Dijk, N. and Fowler, D. (2011). Dry deposition of ammonia gas drives species change faster than wet deposition of ammonium ions: evidence from a long-term field manipulation'. *Global Change Biology*, 17: 3589-3607. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02478.x>





2011年泰国曼谷的洪水
图片来源: Wutthichai/Shutterstock.com

气候变化适应不良： 避免陷阱

定义气候变化背景下的适应和适应不良

隐喻对逻辑思维至关重要。用于气候变化研究和政策的适应和适应不良这两个术语来源于进化生物学。¹基本上，遗传突变自发地出现在物种的每一代和由外部环境施加的自然选择过程中，决定了这些突变以及作为自然选择结果的物种的成败。这个概念可以应用于细菌、动植物、生态系统，甚至人类行为。成功适应的一个重要特征是可进化性，即随着周围环境的不断变化，通过进一步适应继续进化的能力。²在进化生物学中，适应不良的一个识别特征是可进化性缺失。这是一条死胡同。

虽然适应的起源来自进化生物学，但采用这个术语表示人类对环境变化做出的成功反应始于灾难管

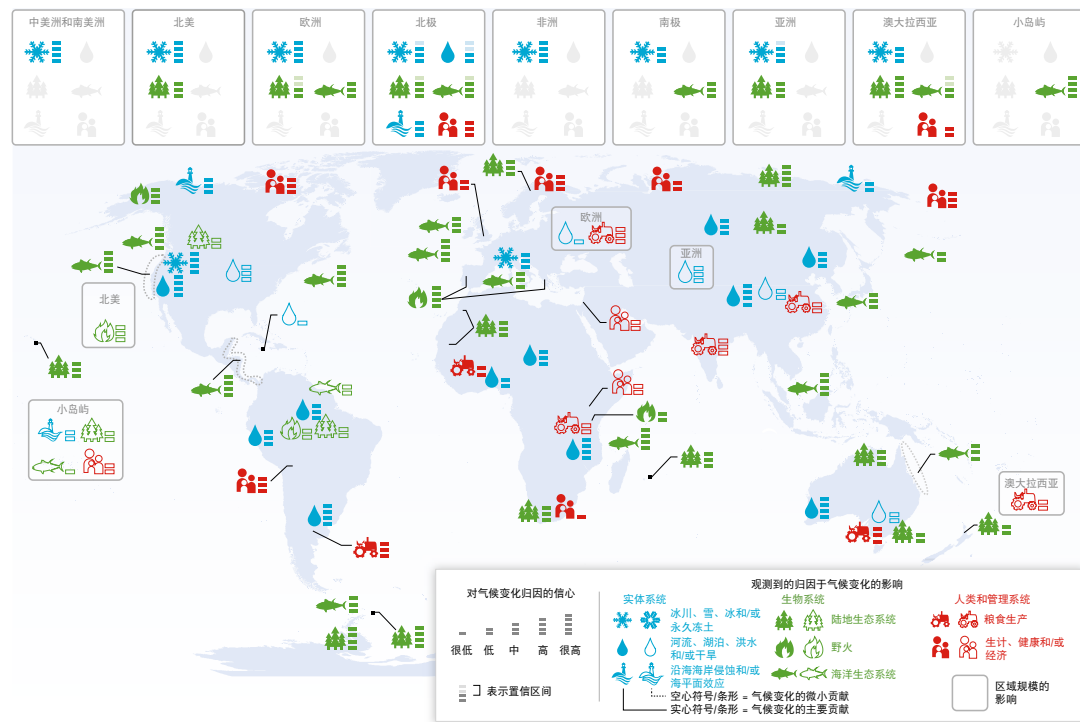
理。在这个领域，人类对灾难的所有反应都是对变化的条件的适应，其中包括努力减轻或切断灾难的源头。³在围绕《联合国气候变化框架公约》进行的谈判中实现了所谓的减轻和适应的分离。把它们分开的一个理由是，如果适应作为更容易的方案可用，那么谈判人员就会从关于减轻或减缓途径的协定上分心。⁴另一种解释是，发达国家将只支持具有全球成果的努力，如减少大气中的二氧化碳，而不会支持侧重于当地的适应目标。⁵

随着气候变化谈判的进展，研究人员研究了一些适应行动是如何失败的，以及失败的原因，特别是那些浪费了大量人力、自然资源或财政资源的行动。⁶随着这些观点的发展，联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）认识到到精确、明确的术语的重要

性。2001年，专家组为适应不良提出了一个微妙的定义，它不同于生物学或行为科学中的用法，其形式是“……一种不能成功减少脆弱性，反而增加了脆弱性的适应”。⁷ 讨论进一步侧重于适应不良和不成功的适应之间的区别。不成功的适应可能是中性的——它可能仅仅意味着行动不起作用。但是，当预期的适应导致其他群体和部门的脆弱性增加时，即使这种情况出现在未来，它也是一种适应不良。⁸ 同时，无论是不成功的适应还是适应不良都不应与虚假的适应相混淆：表现为适应的浪费性项目，例如仅为小群体利益服务的昂贵的基础设施，但实际上没有增强复原力，或减少气候变化的脆弱性。⁹

适应不良的思维仍在继续发展，一项有影响的研究根据结果考虑了这个问题，与其他替代性选择相比，确定了五类适应不良。根据这一分析，适应不良是指增加温室气体排放、不成比例地加重最脆弱者的负担、招致高机会成本、减少适应动机或设定限制后代可选择的路径的行为。⁸ 政府间气候变化专门委员会在2014年的第五次评估报告中进一步阐明和拓展了这些参数。¹⁰ 由于适应与适应不良的概念变得越来越清晰而且我们现在能更好地区分它们，管理气候变化的后果应变得不那么令人敬畏了。

观测到的气候变化影响全球模式



顶部面板中每一个实心符号表示一类系统，在相应区域，气候变化对于在该类别的至少一个系统中所观察到的变化起到了主要作用，条形图表示把这些区域范围内的影响归因于气候变化的置信区间。气候变化起到次要作用的区域规模的影响用相应区域内方框中的空心符号表示。地图上的符号表示次区域影响，位于发生影响的大致区域。受影响的区域可能各不相同，从具体位置到主要河流域等更广泛的区域。按颜色区分对实体（蓝色）、生物（绿色）和人类（红色）系统的影响。此图没有气候变化影响并不意味着这些影响没有发生。

图形和图片说明来源：政府间气候变化专门委员会第五次评估报告¹¹

大规模适应不良

面对气候变化，适应不良的概念已经从不起作用的适应发展到破坏资源、缩小未来的选择范围、使脆弱人口的问题恶化或将制定解决办法的责任转嫁给子孙后代的适应行动。如果适应行动违反了可持续发展、社会公平和消除贫困目标，特别是在给弱势群体造成不相称负担的意义上，那么这项行动就属于适应不良。¹² 在更大范围内避免适应不良的努力包括确定主要风险的研究和整个基础设施资产生命周期内的负责任的适应战略，这些战略能为规划人员和监管者、设计人员、建筑施工人员、运营商、投资者和保险公司的决策和行动提供依据。¹³ 随着行动规模的增加，适应不良带来的威胁可能会升级。回顾生物学上的可进化性的特征可以初步筛选适应不良行为，而优先保留可进化性可以预先阻止严重的错误。

通过在家庭房产周围建造防波堤大规模限制未来的选择可能被认为是适应不良，因为这将引起问题，限制邻居的选择，但这种后果通常局限于当地附近。然而，如果考虑不周的行动加剧了最初的问题，或在区域或全球范围内限制了未来的选择，那么它就成为了更加危险的适应不良。在更大范围内，这种适应不良不仅会限制可进化性，而且还会威胁生态系统的复原力、生活方式和整个社会。这种适应不良行为的规模，特别是那些增加温室气体排放或加剧生态系统退化的行为，可能会有助于生物地球物理反馈，从而推动地球系统走向全球引爆点。其中许多引爆因素是不可逆转的，例如永久冻土、珊瑚礁或亚马逊雨林的损失，这种不可逆性可能会引领我们超过行星阈值。¹⁴

IPCC的2018年《全球升温1.5°C》报告确定了有效适应的多种要求，证明了气候友好型的规划和实施在向可接受的温度升高过渡期间的重要性。¹⁵ 避免适应不良是这一转变的重要组成部分。在我们面对被气候变化破坏的未来时，许多区域性案例，无论是否自识别为气候变化应对措施，都可以作为有用的



政府间气候变化专门委员会第五次评估报告中的适应不良节略¹⁰

在政府间气候变化专门委员会2014年第五次评估报告中，负责影响、脆弱性和适应的第二工作组（WGII）将适应不良定义为“……无论是现在还是将来，可能导致与气候有关的不利结果的风险增加、气候变化脆弱性增加或福利减少的行动”。它还提供了12大类适应不良的汇总表。

第二工作组的两个类别描述了故意忽略已知情况的行动：未能预测预期的气候变化，以及未能考虑到更广泛的影响。其他类别还涉及以长期脆弱性换取短期效益，其中包括导致后期脆弱性的资源枯竭；拖延与冲动行为；安装无法持久的基础设施；以及卷入道德风险，在这种情况下，各种方案提供开销以鼓励承担风险。

进一步分类强调了宣扬一个群体（通常是精英群体）而不是其他群体的行动，警告说延续特权可能导致冲突和忽视当地知识、传统和关系的行动。然而，坚持传统但不适当的反应也被认为属于适应不良。

第二工作组还对以下行动提出了警告：设定不易纠正的路径依赖的行动；排除替代方法（例如基于生态系统适应）的行动，尤其是设计防御措施和解决方案的行动。最后，迁徙可能是恰当的适应，也可能是适应不良，或两者兼而有之，这取决于环境和结果。

调查的例子。这些案例是政府间气候变化专门委员会的第五次评估报告和其他现有文献的摘录所呈现的类别的快速样本。

根据长期复原力规划平衡短期需求

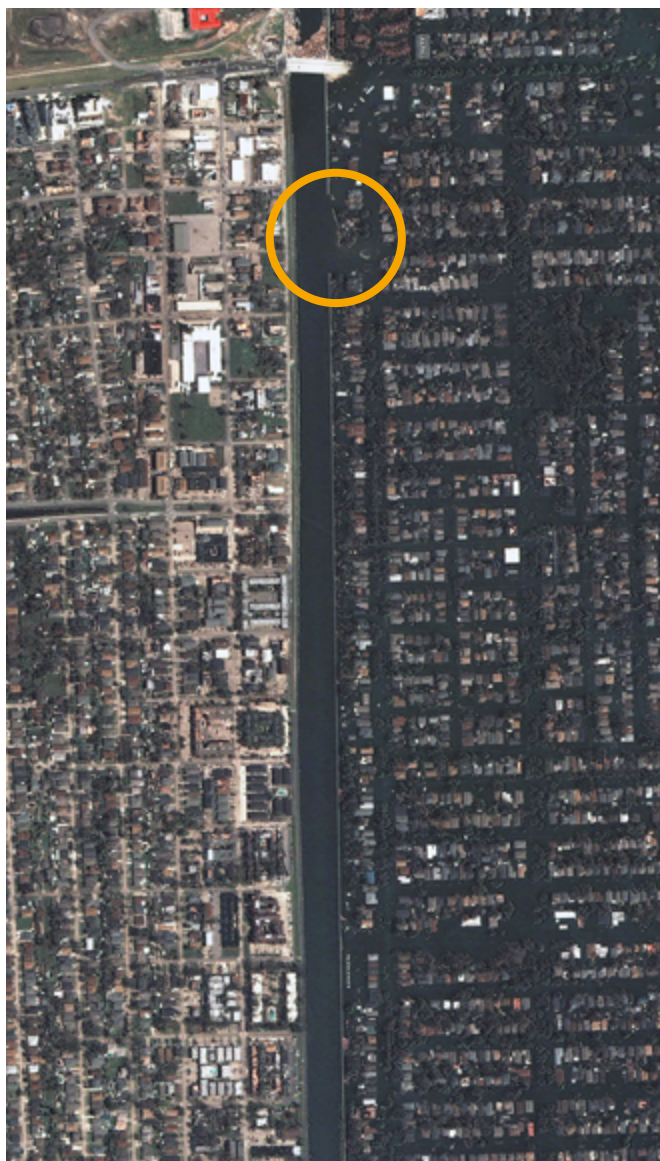
孟加拉国西南部的沿海气候复原力基础设施项目是短期和长期效益之间平衡的例子，提出该项目是为了把它作为可能的适应不良案例进行研究。¹⁶ 构成问题的条件是未来20年的适应效益与长期适应不良的成本。随着海平面上升淹没该地区，到2050年适应不良的成本将占主导地位。¹⁶ 潜在的适应不良结果包括复杂的移民问题——迁入和迁出该地区的移民问题。投资者期望，当沿海人口也许应该迁移到内陆时，新的市场和更好的道路、桥梁、排水系统和飓风庇护所将鼓励他们留下来。这些设施极有可能吸引新来者，其中可能包括达卡的一些非正式居民，他们因环境灾难而流离失所。¹⁹

不成比例地加重最脆弱者的负担

在某些情况下，试图适应多方面不断变化的条件可能会导致特定的人群适应不良。在2005年的卡特里娜飓风摧毁了美国新奥尔良和周边地区之后，建立抵御未来洪水的城市复原力的新绿化区初步计划似乎集中在获得低洼的土地上，这些土地传统上属于贫穷的非洲裔美国人，而不是其他群体。^{12,19} 这项特别的的城市改造建议未被接受。然而，十多年后的研究表明，该市许多最贫穷和最边缘化的人从未重新获得他们确实曾经拥有的哪怕很少的东西，其中很大一部分人不得不从该地区迁移出去。^{12,20}

限制未来行动的选项

石油地质学家和工程师开发了从被盖层构造封闭的地球深处的储层中提取石油和天然气的的能力。²¹ 人们认为一些枯竭的储层非常适合在几个世纪和更长时间里封存二氧化碳。²² 它们之所以适合是因为我们了解封闭储层的盖层的渗透性和质量。^{21,23} 当天然气作为缓解策略被推广时，也就是说，将天然气作为从煤和石油到可再生能源的过渡燃料时，投资出现了增长，技术得到了发展。²⁴ 但是，这一过渡带来的问题比起初预期的要多。其中很大一部分问



2005年8月的卡特里娜飓风毁坏了堤防系统的很多部分，这些堤防系统旨在保护新奥尔良这个地势低洼的城市，使它免受洪水和风暴潮的侵袭。卫星图像显示了堤坝决口（黄色圆圈）是如何让第17街运河的洪水淹没了运河东侧的居民区，造成数十亿美元的财产损失，而运河西侧却保持了干燥。

图片来源：Digital Globe (www.digitalglobe.com)

气候变化适应不良

信息图表中的案例研究显示了一系列不同规模的气候变化适应行动。由于意外的后果，有些案例变得适应不良，或者在不久的将来会变得适应不良。其他是在为避免适应不良考虑了许多因素后采取的行动。

IPCC定义的适应不良是一种有意的适应，无论是现在还是将来，它导致与气候有关的不利结果的风险增加、气候变化脆弱性增加或福利减少。

适应不良是替代方法中的糟糕选择，它增加了温室气体，不公平地加重了最脆弱者身上的负担，产生了不合理的费用，减少了适应的动机，或限制了后代的选择。

忽视科学、更广泛影响或可能产生的后果的决策

有利于一个利益集团而不是另一个利益集团的行为，为未来的冲突和损害埋下了伏笔

不明智的权衡：
短期与长期利益、风险与回报（道德风险）、过短与过久的考虑期

决定路径依赖和锁定或消除子孙后代选择的行动

使人口处于更危险环境中的重新安置

干旱

干旱将变得更加强烈、频繁和持久，对人类的所有用途和生态功能构成威胁。长期的干旱环境导致地下水过度开采，降雨到来时，含水层很少得到充分的补给。

到2025年，全球48%的土地可能变成旱地

反复发生的干旱迫使索马里70%的贫困牧民生产木炭，导致林地被清除，这加速了沙漠化，增加了脆弱性

农业

持续的极端气候变化威胁着农业生产系统。农民为自己的适应能力感到自豪，但这些极端情况的出现频率如此之高，而且持续时间如此难以预测，以至于适应成为一个受到持续关注的问题。

一些津巴布韦农民通过增加杀虫剂的使用抵消气候的不确定性。有益的昆虫往往也被消灭，使情况变得更糟。

在引进了适合特定气候的栽培品种之后，巴西开始了双作。随着降雨开始时间的变化，这些做法变得适应不良。

缺水

到2050年，57亿人可能生活在缺水地区。各地区已经通过开采地下水、限时供水或海水淡化来适应缺水。从长远来看，这些措施可能变得适应不良。

墨西哥城面临缺水。开采遥远的地下水是短期解决方案。实际的适应投资于长期解决方案，如雨水收集和污水处理和再利用。



健康

变化的气候带，极端气候事件的频率和强度的增加会产生健康后果。这种变异导致作物损失，并扩大了威胁关键动植物物种以及人类种群的疾病媒介的范围。

在预防和治疗兽医面临的挑战时，抗生素被过度使用和误用。这种通过媒介传播的疾病的适应不良加剧了抗生素耐药性的威胁。

一项研究表明，经过抗生素处理的牛粪比不含抗生素的牛粪释放出更多甲烷。抗生素残留也改变了苍蝇的肠道微生物。



海平面上升

全球海平面继续上升，对基础设施、地下水资源、天然屏障岛屿和沿海社区构成威胁。对低洼国家和小岛屿国家的威胁发展到对数百万人生活方式的威胁。

佛罗里达州的运河水位被用于补充地下水，并保持对海水的压力，避免海水侵入地下。提高运河水位以防止海水侵入地下水不经意间增加了洪水的威胁。

国家法律保证夏威夷土著为文化目的进入沿海地区，并为了自给自足的目的捕鱼。海平面上升限制了公众进入，不成比例地影响了穷人，而为了私人利益的开发仍在继续。

洪水

洪水是全球最常见的气候变化影响之一。适应过去情况的洪水和水管理系统已不足以满足现在的需求。随着气候持续变化，需要适应性管理和广泛的利益攸关方的同意，以避免适应不良。

由于缺乏规划和投资，曼谷大都市区容易发生洪水。没有计划和不协调的自主适应导致下游洪水泛滥，削弱了整个公共排水系统。2011年，官方对洪水的反应保护了富裕群体和负担沉重的弱势群体。

野火

在全球范围，从1979年到2013年，火灾季节的长度增长了19%。野火在全球生态系统中发挥着重要作用，但其造成的破坏可能会破坏社会经济系统。在某些地区，标准管理战略使情况恶化。

经过几十年的火灾扑救和五年与气候有关的干旱后，加利福尼亚的森林遍布野火的燃料。认识到转型的必要性后，该州开始用规划内烧荒来管理这种威胁。

城市

到2050年，全球70%的人口将生活在城市。在世界各地，城市已经经历了各种形式的气候变化，其中包括热浪、洪水和适应失败等。城市适应可以是政策、基础设施开发或技术性修复。补救措施很少惠及所有人，它们会威胁到一些边缘化群体。

升温 and 缺水促使澳大利亚墨尔本增加了空调和海水淡化。这些都属于适应不良：通过增加温室气体排放，它们加剧了其他系统、部门和社区的脆弱性。

社会脆弱性

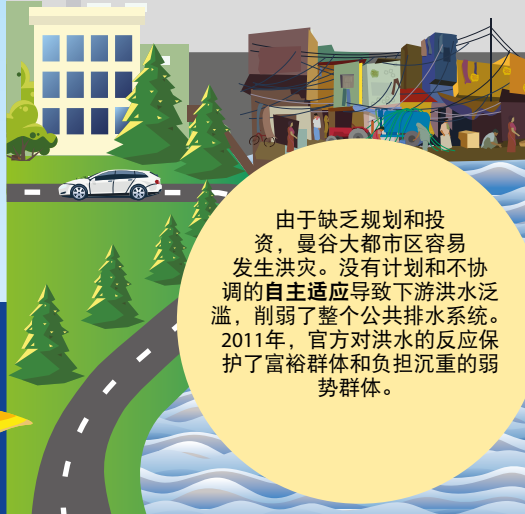
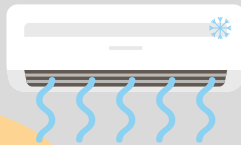
全世界的人们已经以各种方式适应气候影响：重新思考供水、保险计划、生计策略变化、自愿或强制移民以及移民安置项目。当这些善意的方方法不适合当地情况，或没有考虑问题的多个方面时，脆弱性可能会增加。

中国的气候适应移民项目提供了资金奖励，并改善了生活水平。它们也不成比例地加重了落在后面的人、已经流离失所的人和穷人身上的负担。

一些农民通过农作物保险寻求保护，免受极端气候的影响，这可能会抑制进一步的适应策略。

当保险单支持风险行为时，例如在危险地点重建，或者促成替换，而不是根据不断变化的条件重新设计时，它们就属于适应不良。随着气候威胁的加剧，保险可能会提供一种虚假的安全感。

在小岛屿国家，不断上升的潮水冲刷海岸线，破坏淡水资源和农作物。研究人员认为，劳动力流动是避免与移民安置有关的适应不良的最佳长期解决方案。



题与一种名为水力压裂的开采技术的发展有关。^{25,26} 这种技术通过注入高压水、砂和化学品的混合物，把储层压开裂缝和裂纹以释放天然气。水力压裂带来了许多环境挑战，其中包括含水层枯竭、钻井和注入所用的化学品导致的污染、甲烷泄漏到环境中以及地震活动性增加。²⁷⁻³⁰ 此外，一些人认为水力压裂可能破坏盖层密封，而正是盖层密封使枯竭的储层变得对碳封存有用。^{31,32}

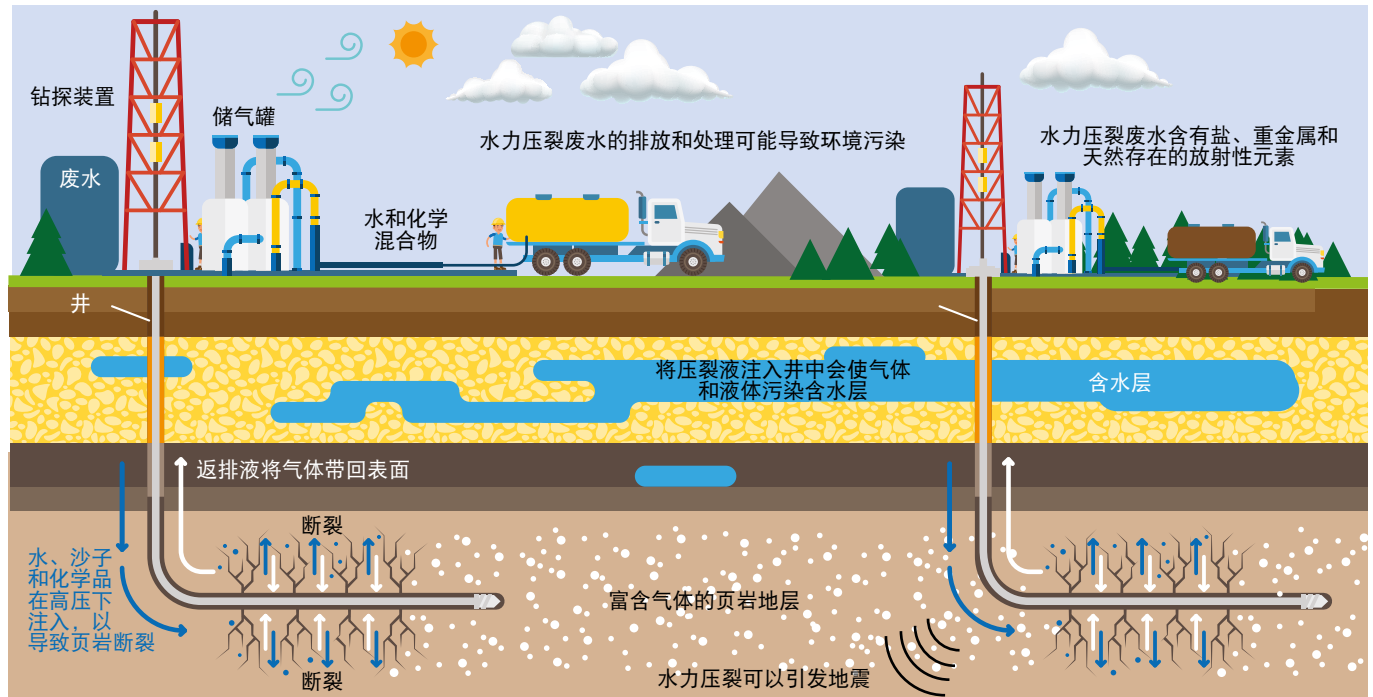
IPCC的《全球升温1.5°C》报告详细说明了两种减排和限制大气温室气体的途径，这两种途径将实现把全球平均气温较工业化前水平升幅控制在1.5°C之内的目标。这两种途径严重依赖于将碳封存在地质构造中的承诺。¹⁵ 水力压裂产业政策在两个方面表现出适应不良：为短期效益放弃长期效益的可能性，

以及通过破坏未来资源受困于路径依赖的可能性。同时，由于在整个生产周期泄漏甲烷，水力压裂增加了温室气体排放。^{26,33-35}

在1.5°C的受限制未来避免适应不良

IPCC的《全球升温1.5°C》报告提出的愿景以及把升温保持在这一水平的智慧表明，在公共部门和私营部门以及民间团体做出的决定中，需要更广泛地考虑气候变化的后果。¹⁴ 而不是把适应不良的概念缩小到以前被正式称为适应的遗憾而复杂的结果，各级以及各种机构中的政策顾问和决策者可能会扩大他们的审议范围，以避免在规划中出现气候变化适应不良的情况。

水力压裂





乔纳气田，怀俄明州，美国

图片来源：EcoFlight

1.5°C报告还强调了联合国2030年议程及其可持续发展目标，特别是关于平等和公平的目标。¹⁴ 这一应对未来气候挑战的愿景着眼于一个值得在其中生活的未来，它比今天太多人所经历过的未来更好。减少导致冲突、战争、不安全、贫穷和移民的根源是这一愿景的重要组成部分。人类总是适应不断变化的环境，我们天生就是适应性强的生物。试错学习是指导我们适应的可靠方法。但我们也是深谋远虑和未雨绸缪的物种。我们可以设计我们的未来。避免适应不良意味着我们不但要从自己的错误中学习，而且还要从世界各地的个人和社区所经历的错误中学习。深谋远虑不限于每个团体的怀疑、假设，甚至是愿望，还需要以科学证据和现实可能性为基础。

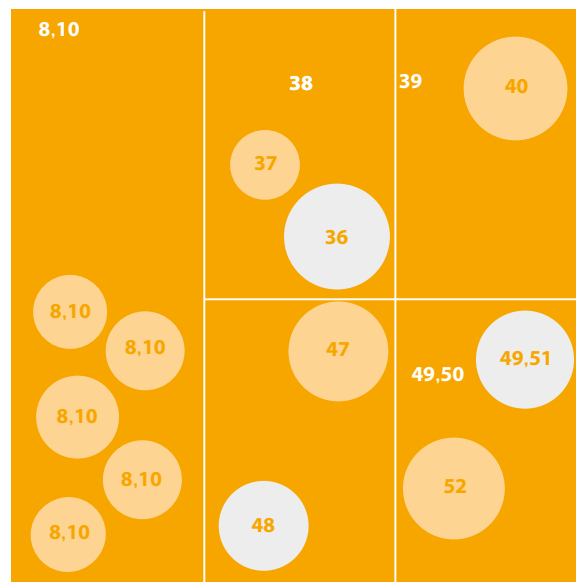
有证据表明，通过评价社会上所有群体的所有成本和效益，包括共同效益，明确谁是赢家和输家，以及如何更好地分担负担，可以避免适应不良。根深蒂固的不考虑子孙后代利益的习惯不适合将全球平均温度保持在可控制范围内的IPCC 1.5°C路径。我们现在生活的时代正是在1992年达成《气候变化框架公约》时被过分低估的未来。避免适应不良意味着要避免锁定和路径依赖，改为优化可进化性。否则，用生物学的术语来说，我们会发现自己走入了一条死胡同。

参考文献

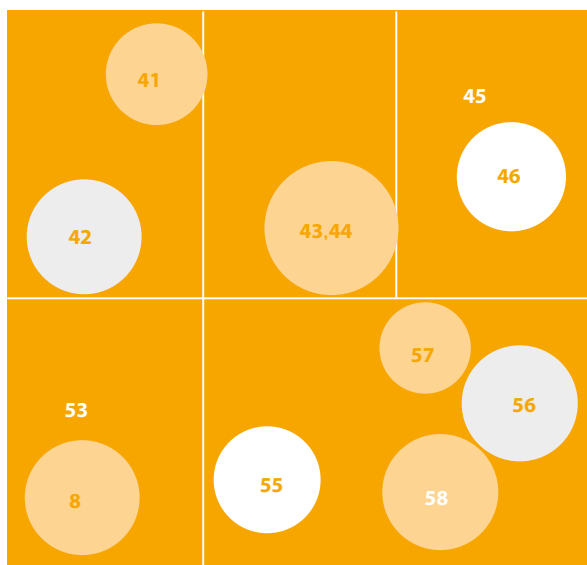
- Darwin, C.R. (1859). *On the origin of the species by means of natural selection*. London: John Murray.
- Martínez-Padilla, J., Estrada, A., Early, R. and García-González, F. (2017). Evolvability meets biogeography: evolutionary potential decreases at high and low environmental favourability. *Proceedings of the Royal Society B*, 284(1856), 20170516. <https://doi.org/10.1098/rspb.2017.0516>
- Burton, I., Kates, R.W. and White, G.F. (1993). *The environment as hazard*. New York: Guilford Press.
- Greenhill, B., Dolšák, N. and Prakash, A. (2018). Exploring the adaptation-mitigation relationship: Does information on the costs of adapting to climate change influence support for mitigation? *Environmental Communication*, 12(7), 911-927. <https://doi.org/10.1080/17524032.2018.1508046>
- Bodansky, D. (1993). The United Nations Framework Convention on Climate Change: A commentary. *Yale Journal of International Law*, 18, 451. <https://digitalcommons.law.yale.edu/yjil/vol18/iss2/2>
- Burton, I. and van Aalst, M.K. (1999). Come hell or high water: integrating climate change vulnerability and adaptation into Bank work. Environment Department working paper No. 72, Climate change series. Washington DC: World Bank. <http://documents.worldbank.org/curated/en/212171468756566936/pdf/multi-page.pdf>
- McCarthy, J.J., Canziani, O.F., Leary, N.A., Dokken, D.J. and White, K.S. (eds.). (2001). Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press
- Barnett, J., and O'Neill, S. (2010). Maladaptation. *Global Environmental Change*, 2(20), 211-213. <https://www.sciencedirect.com/journal/global-environmental-change/vol/20/issue/2>
- Dolšák, N. and Prakash, A. (2018). The politics of climate change adaptation. *Annual Review of Environment and Resources*, 43, 317-341. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102017-025739>
- Noble, I.R., Huq, S., Anokhin, Y.A., Carmin, J., Goudou, D., Lansigan, F.P. et al. (2014). Adaptation needs and options. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E. et al. (eds.). Cambridge, UK: Cambridge University Press. 833-868. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIAR5-Chap14_FINAL.pdf
- Cramer, W., Yohe, G.W., Aufferhammer, M., Huggel, C., Molau, U., da Silva Dias, M.A.F. et al. (2014) Detection and attribution of observed impacts. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E. et al. (eds.). Cambridge, UK: Cambridge University Press. 979-1037. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>
- Anguelovski, I., Shi, L., Chu, E., Gallagher, D., Goh, K., Lamb, Z. et al. (2016). Equity impacts of urban land use planning for climate adaptation: critical perspectives from the global north and south. *Journal of Planning Education and Research*, 36(3), 333-348. <https://doi.org/10.1177%2F0739456X16645166>
- Hayes, S. (2019). Adapting infrastructure to climate change: who bears the risk and responsibility? In *Asset Intelligence through Integration and Interoperability and Contemporary Vibration Engineering Technologies*. Mathew, J., Lim, C.W., Ma, L., Sands, D., Cholette, M.E. and Borghesani, P. (eds.). Proceedings of the 12th World Congress on Engineering Asset Management and the 13th International Conference on Vibration Engineering and Technology of Machinery. Switzerland: Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95711-1_24
- Steffen, W., Rockström, J., Richardson, K., Lenton, T.M., Folke, C., Liverman, D. et al. (2018). Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(33), 8252-8259. <https://doi.org/10.1073/pnas.1810141115>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2018). *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P.R. et al. (eds.). Switzerland: IPCC. <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- Magnan, A.K., Schipper, E.L.F., Burkett, M., Bharwani, S., Burton, I., Eriksen, S. et al. (2016). Addressing the risk of maladaptation to climate change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 7(5), 646-665. <https://doi.org/10.1002/wcc.409>
- Asian Development Bank (2018). *Bangladesh: Coastal Climate-Resilient Infrastructure Project*. Sovereign (Public) Project 45084-002. <https://www.adb.org/projects/45084-002/main>
- International Organization for Migration (2009). Climate Change and Displacement in Bangladesh - A Silent Crisis? <https://www.iom.int/migrant-stories/climate-change-and-displacement-bangladesh-silent-crisis>
- Kates, R.W., Colten, C.E., Laska, S., and Leatherman, S.P. (2006). Reconstruction of New Orleans after Hurricane Katrina: a research perspective. *Proceedings of the National Academy of Science*, 103(40), 14653-14660. <https://doi.org/10.1073/pnas.0605726103>
- Bleemer, Z. and van der Klaauw, W. (2017). Disaster (over-)insurance: the long-term financial and socioeconomic consequences of Hurricane Katrina. Staff Report, No. 807. New York, NY: Federal Reserve Bank of New York. https://www.newyorkfed.org/research/staff_reports/sr807
- Orr Jr, F.M. (2003). Sequestration via injection of carbon dioxide into the deep earth. In *The Carbon Dioxide Dilemma: Promising Technologies and Policies*. National Academy of Engineering and National Research Council. Washington, DC: The National Academies Press. <https://www.nap.edu/read/10798/chapter/3#17>
- Benson, S. M. and Orr, F. M. (2008). Carbon dioxide capture and storage. *MRS bulletin*, 33(4), 303-305. <https://doi.org/10.1557/mrs2008.63>
- Huppert, H.E. and Neufeld, J.A. (2014). The fluid mechanics of carbon dioxide sequestration. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 46, 255-272. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-011212-140627>

24. Weissman, S. (2016). Natural Gas as a Bridge Fuel – Measuring the Bridge. Center for Sustainable Energy, San Diego. http://energycenter.org/sites/default/files/docs/nav/policy/research-and-reports/Natural_Gas_Bridge_Fuel.pdf
25. Howarth, R.W., Santoro, R., and Ingraffea, A. (2011). Methane and the greenhouse-gas footprint of natural gas from shale formations. *Climatic Change*, 106(4), 679. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0061-5>
26. United Nations Conference on Trade and Development (2018). Commodities at a glance. *Special Issue on Shale Gas 9*. New York and Geneva: UNCTAD. https://unctad.org/en/PublicationsLibrary/suc2017d10_en.pdf
27. Chen, H. and Carter, K.E. (2016). Water usage for natural gas production through hydraulic fracturing in the United States from 2008 to 2014. *Journal of Environmental Management*, 170, 152-159. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.01.023>
28. U.S. EPA. (2016). Hydraulic Fracturing for Oil and Gas: Impacts from the Hydraulic Fracturing Water Cycle on Drinking Water Resources in the United States. United States Environmental Protection Agency/Office of Research and Development, Washington, DC. EPA/600/R-16/236Fa. <https://cfpub.epa.gov/ncea/hfstudy/recordisplay.cfm?deid=332990>
29. Drollette, B.D., Hoelzer, K., Warner, N.R., Darrah, T.H., Karatum, O., O'Connor, M.P., Nelson, R.K. et al. (2015). Elevated levels of diesel range organic compounds in groundwater near Marcellus gas operations are derived from surface activities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*, 112(43), 13184-13189. <https://doi.org/10.1073/pnas.1511474112>
30. Skoumal, R.J., Brudzinski, M.R. and Currie, B.S. (2015). Earthquakes Induced by Hydraulic Fracturing in Poland Township, Ohio. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(1), 189-197. <https://doi.org/10.1785/0120140168>
31. Elliot, T.R. and Celia, M.A. (2012). Potential restrictions for CO2 sequestration sites due to shale and tight gas production. *Environmental Science & Technology*, 46(7), 4223-4227. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es2040015>.
32. Moriarty, P. and Honnery, D. (2018). Energy policy and economics under climate change. *AIMS Energy*, 6(2): 272-290. <https://doi.org/10.3934/energy.2018.2.272>
33. Jackson, R.B., Vengosh, A., Darrah, T.H., Warner, N.R., Down, A., Poreda, R.J., Osborn, S.G., Zhao, K. and Karr, J.D. (2013). Increased stray gas abundance in a subset of drinking water wells near Marcellus shale gas extraction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(28), 11250–11255. <https://doi.org/10.1073/pnas.1221635110>
34. Omara, M., Sullivan, M.R., Li, X., Subramanian, R., Robinson, A.L. and Presto, A.A. (2016). Methane Emissions from Conventional and Unconventional Natural Gas Production Sites in the Marcellus Shale Basin. *Environmental Science & Technology*, 50, 2099–2107. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05503>
35. Osborn, S.G., Vengosh, A., Warner, N.R. and Jackson, R.B. (2011). Methane contamination of drinking water accompanying gas-well drilling and hydraulic fracturing. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(20), 8172–8176. <https://doi.org/10.1073/pnas.1100682108>

图片参考文献



36. Hartmann, I., Sugulle, A.J. and Awale, A.I. (2010). The Impact of Climate Change on Pastoralism in Salahley and Bali-gubadle Districts, Somaliland. Heinrich Böll Stiftung, East and Horn of Africa, Nairobi. https://ke.boell.org/sites/default/files/the_impact_of_climate_change_on_pastoralism_in_salahley_and_bali-gubadle_districts_-_somaliland.pdf
37. Huang, J., Yu, H., Guan, X., Wang, G. and Guo, R. (2015). Accelerated dryland expansion under climate change. *Nature Climate Change*, 6, pages166–171. <https://doi.org/10.1038/nclimate2837>
38. IPCC (2013). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
39. WWAP (2018). The United Nations world water development report 2018: nature-based solutions for water. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261424>
40. Tellman, B., Bausch, J.C., Eakin, H., Anderies, J.M., Mazari-Hiriart, M., Manuel-Navarrete, D. and Redman, C.L. (2018). Adaptive pathways and coupled infrastructure: seven centuries of adaptation to water risk and the production of vulnerability in Mexico City. *Ecology and Society*, 23(1):1. <https://doi.org/10.5751/ES-09712-230101>



41. Czajkowski, J., Engel, V., Martinez, C., Mirchi, A., Watkins, D., Hughes, J., Sukop, M. (2015). Economic impacts of urban flooding in south Florida: Potential consequences of managing groundwater to prevent salt water intrusion. Working paper no. 2015-10, Risk Management and Decision Processes Center, University of Pennsylvania. http://opim.wharton.upenn.edu/risk/library/WP201510_GWLevelsFloodClaims_Czajkowski-etal.pdf

42. Finkbeiner, E.M., Micheli, F., Bennett, N.J., Ayers, A.L., Le Cornu, E. and Doerr, A.N. (2017). Exploring trade-offs in climate change response in the context of Pacific Island fisheries. *Marine Policy*, 88, 359-364. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpol.2017.09.032>

43. Limthongsakul, S., Nitivattananon, V. and Arifwidodo, S.D. (2017). Localized flooding and autonomous adaptation in peri-urban Bangkok. *Environment and Urbanization*, 29(1), 51-68. <https://doi.org/10.1177/0956247816683854>

44. Marks, D. (2015). The Urban Political Ecology of the 2011 Floods in Bangkok: The Creation of Uneven Vulnerabilities. *Pacific Affairs*, 88(3), 623-651. <http://dx.doi.org/10.5509/2015883623>

45. Jolly, W.M., Cochrane, M.A., Freeborn, P.H., Holden, Z.A., Brown, T.J., Williamson, G.J. and Bowman, D.M. (2015). Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. *Nature Communications*, 6:7537. <https://doi.org/10.1038/ncomms8537>

46. Little, J. B. (2018) Fighting Fire with Fire: California Turns to Prescribed Burning. Yale Environment 360. Yale School of Forestry & Environmental Studies. <https://e360.yale.edu/features/fighting-fire-with-fire-california-turns-to-prescribed-burning>

47. Zinyemba, C., Archer, E. and Rother, H-A. (2018). Climate variability, perceptions and political ecology: Factors influencing changes in pesticide use over 30 years

by Zimbabwean smallholder cotton producers. *PLoS ONE*, 13(5): e0196901. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196901>

48. Pires, G.F., Abrahão, G.M., Brumatti, L.M., Oliveira, L.J.C., Costa, M.H., Liddicoat, S. and Ladle, R.J. (2016). Increased climate risk in Brazilian double cropping agriculture systems: Implications for land use in Northern Brazil. *Agricultural and Forest Meteorology*, 228: 286-298. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.07.005>

49. Bett, B., Kiunga, P., Gachohi, J., Sindato, C., Mbotha, D., Robinson, T., Lindahl, J. and Grace, D. (2017). Effects of climate change on the occurrence and distribution of livestock diseases. *Preventive Veterinary Medicine*, 137, Part B, 119-129. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2016.11.019>

50. UNEP (2016). UNEP Frontiers 2016 Report: Emerging Issues of Environmental Concern. United Nations Environment Programme, Nairobi. www.unenvironment.org/frontiers

51. UNEP (2017). Frontiers 2017: Emerging Issues of Environmental Concern. United Nations Environment Programme, Nairobi. <http://www.unenvironment.org/frontiers>

52. Hammer, T.J., Fierer, N., Hardwick, B., Simojoki, A., Slade, E., Taponen, J., Viljanen, H. and Roslin, T. (2016). Treating cattle with antibiotics affects greenhouse gas emissions, and microbiota in dung and dung beetles. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 283:20160150. <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2016.0150>

53. UN (2014). World Urbanisation Prospects: the 2014 Revision, Highlights (ST/ESA/SER. A/352). Department of Economic and Social Affairs. Population Division, New York: United Nations.

54. Ford, J.D., Labbé, J., Flynn, M., Araos, M. and IHACC Research Team (2017). Readiness for climate change adaptation in the Arctic: a case study from Nunavut, Canada. *Climatic Change*, 145(1-2), 85-100. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-2071-4>

55. Lei, Y., Finlayson, C.M., Thwaites, R., Shi, G. and Cui, L. (2017). Using Government Resettlement Projects as a Sustainable Adaptation Strategy for Climate Change. *Sustainability*, 9, 1373. <https://doi.org/10.3390/su9081373>

56. O'Hare, P., White, I. and Connelly, A. (2016). Insurance as maladaptation: Resilience and the 'business as usual' paradox. *Environment and Planning C: Government and Policy*, 34(6), 1175-1193. <https://doi.org/10.1177/0263774X15602022>

57. Bryant, C.R., Bousbaine, A.D., Akkari, C., Daouda, O., Delusca, K., Épule, T.E. and Drouin-Lavigne, C. (2016). The roles of governments and other actors in adaptation to climate change and variability: The examples of agriculture and coastal communities. *AIMS Environmental Science*, 3(3), 326-346. <https://doi.org/10.3934/environsci.2016.3.326>

58. ILO (2016). Labour Mobility and Regional Climate Adaptation. International Labour Organization Technical Note https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_protect/---protrav/---migrant/documents/publication/wcms_534341.pdf





2016年，联合国环境署推出了新的年度系列出版物《前沿：全球环境的新兴问题》。该报告指出了广泛的新兴环境问题，并提供了有关见解。这些问题要求政府、利益攸关方、决策者以及广大公众予以关注并采取行动。2016年的第一版《前沿报告》提出了以下六个新兴环境问题。

- 金融领域：推进可持续发展的关键
- 人畜共患病：突发疾病和生态健康之间的模糊界限
- 微塑料：食物链中的危机
- 损失和损害：气候变化对生态系统不可避免的影响
- 金杯毒酒：气候变化时代作物中的毒素积累
- 外来物种消费潮流：活体动物的非法贸易



2017年的前沿报告提出以下新兴问题。

- 抗菌剂耐药性：环境调查
- 纳米材料：应用预防原则
- 海洋保护区：面向可持续发展的资源保护
- 沙尘暴：应对全球挑战
- 太阳能解决方案：填补离网住区的能源缺口
- 环境造成的人口流离失所：“人类世”的人口流动

www.unenvironment.org/frontiers

联合国
环境署



United Nations Avenue, Gigiri
P O Box 30552, 00100 Nairobi, Kenya
Tel +254 20 7621234 | publications@unenvironment.org
www.unenvironment.org

