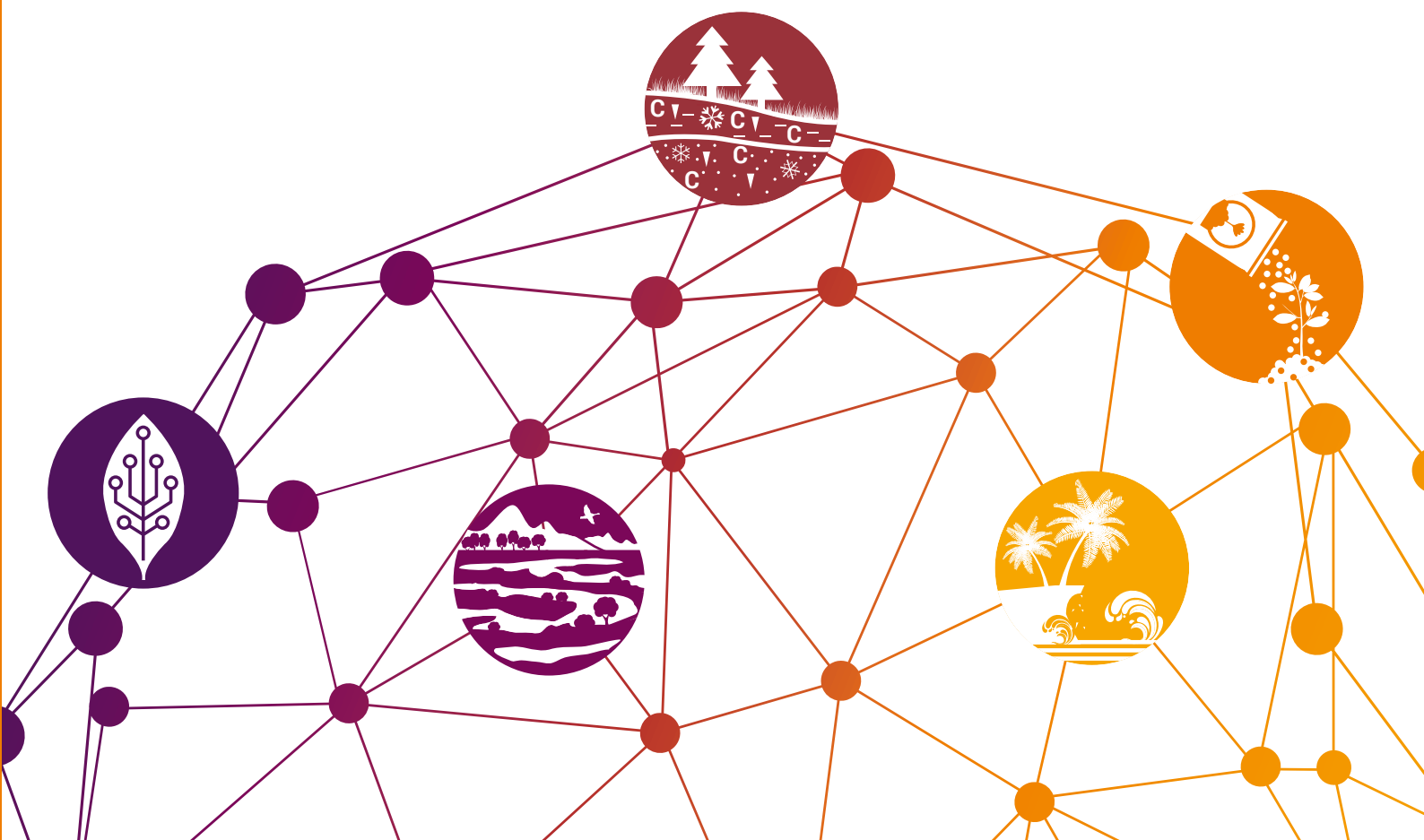


联合国
环境署



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

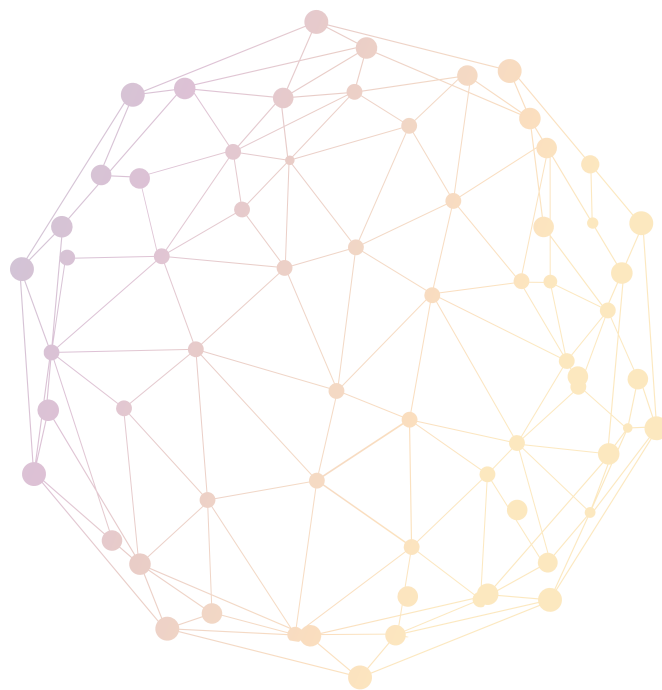
Production

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 fluid and stylized, with a long horizontal line extending from the end.

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

Marianela 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 Champer, 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

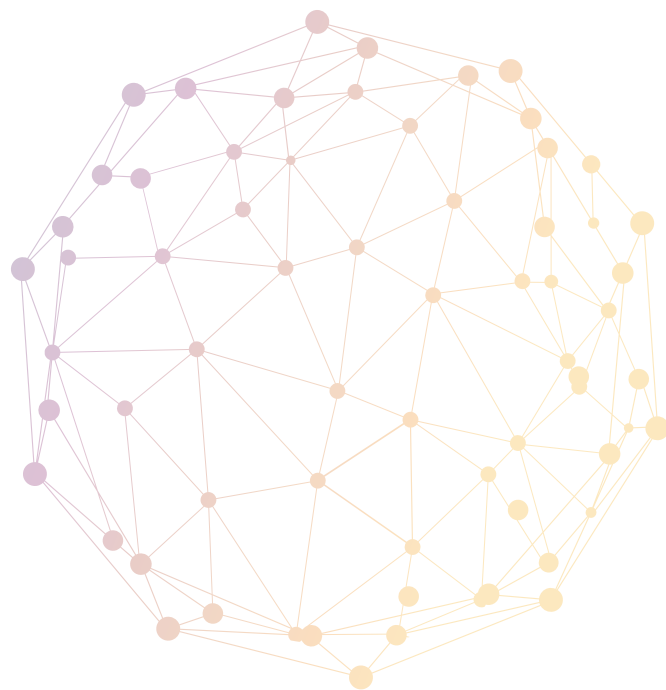
图形、设计和排版

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





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

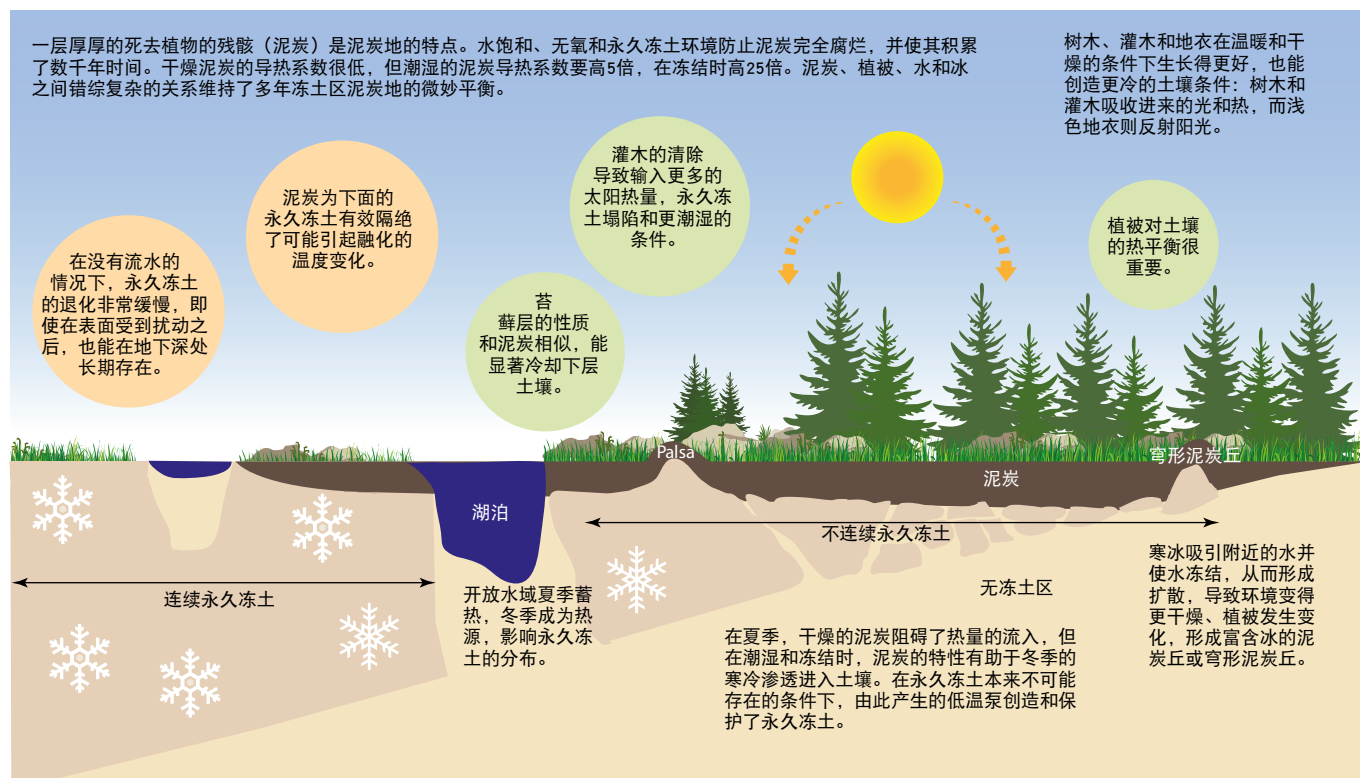
变暖，构成与永久冻土退化有关的风险。¹⁶⁻¹⁹ 广泛的永久冻土退化也将对该地区的生态系统、水文和基础设施产生巨大的直接影响。

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



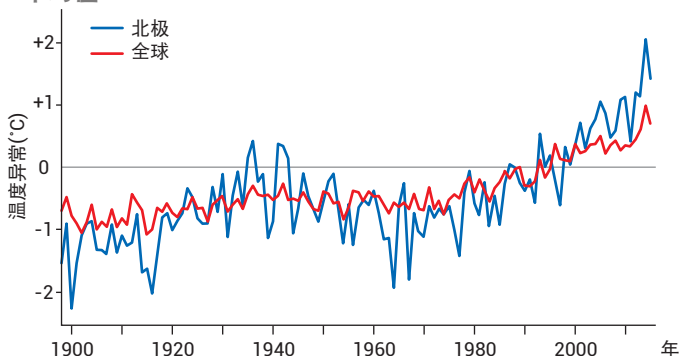
融化的永久冻土、腐烂的泥炭和复杂的相互作用

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

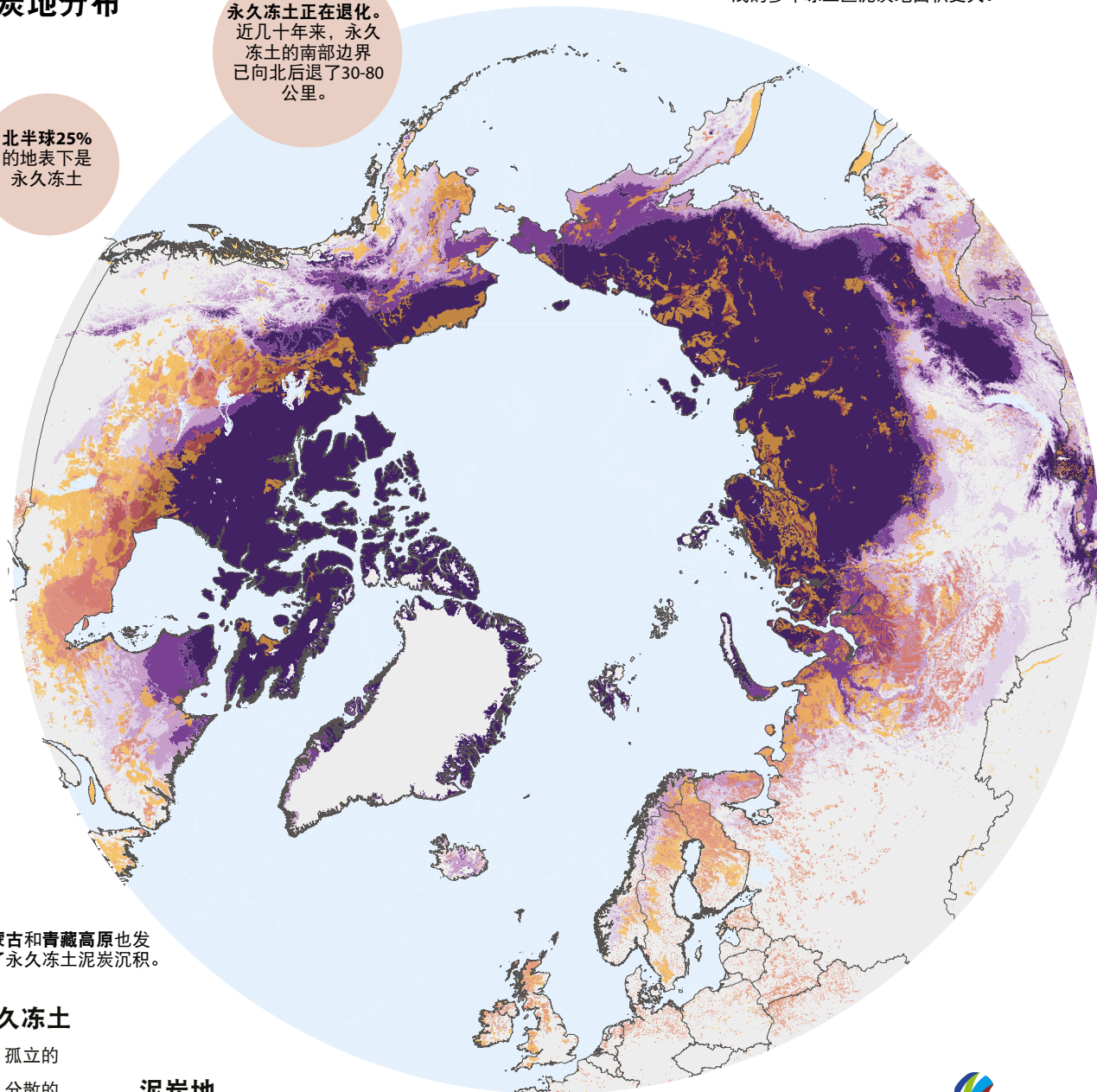
图片来源：Hans Joosten

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

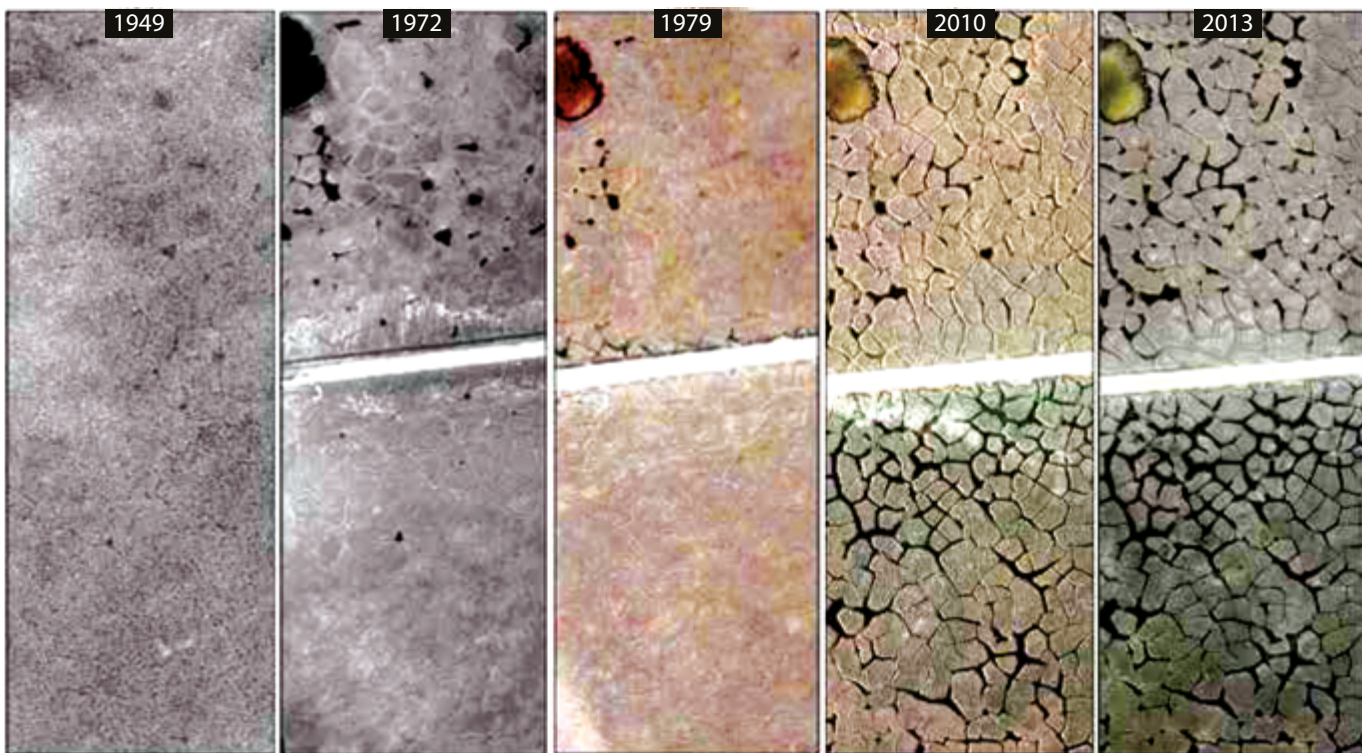
土壤有机碳可能以不同的形式流失：作为气体（二氧化碳或甲烷）被排放回大气，或作为溶解的有机碳或颗粒有机碳被输送到河流。

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}

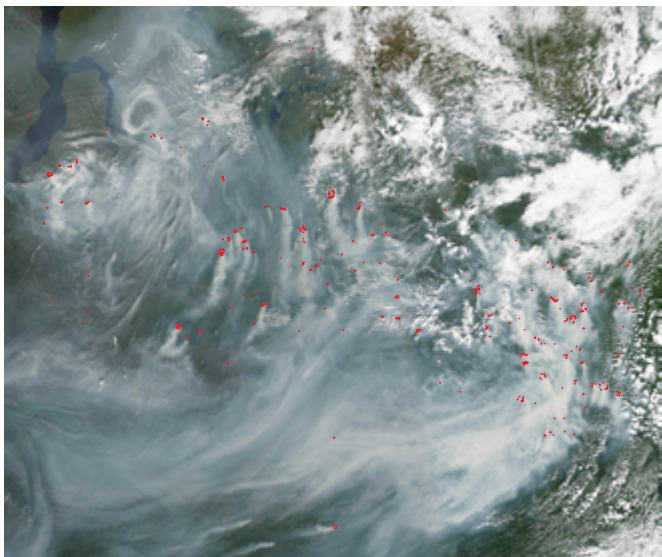
知识重点和网络扩展

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

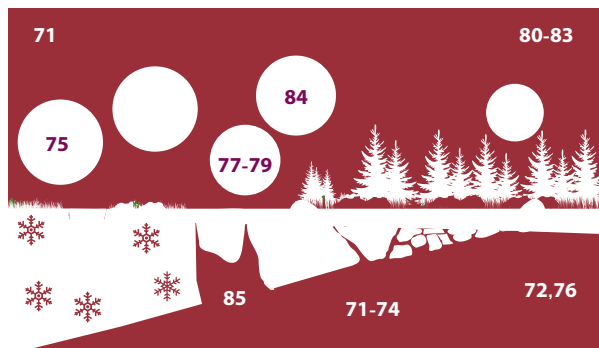
参考文献

- 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., Ferrians, 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>

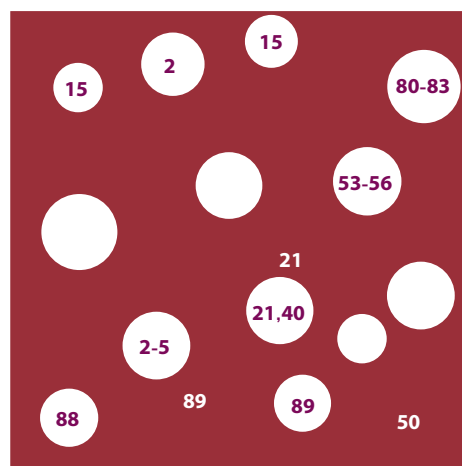
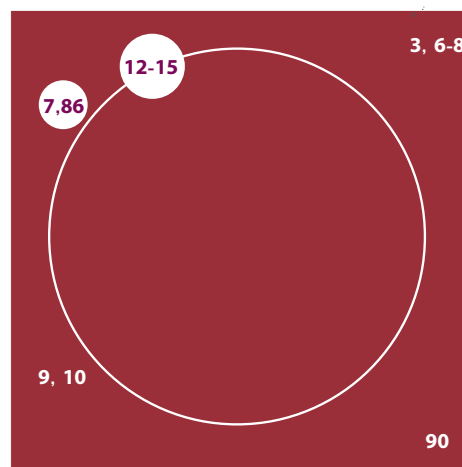
图片参考文献



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., Gryziec, 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>