



水利水电国际资讯摘要

IWHR International Digest

中国水利水电科学研究院 主编：蒋云钟 执行主编：王妍炜 责编：何鑫 徐诗月

2026
4
总374期

英格兰数据中心用水效率研究

大气层河流引发的复合极端气候事件
导致西格陵兰湖泊突变



英格兰数据中心用水效率研究

概述

本研究探讨了英格兰数据中心对饮用水（主要来自公共供水系统）的消耗情况，旨在提供具有实际价值的信息及具体可行的政策与行业建议。研究表明，数据中心与供水行业可通过沟通协作、政策调整以及信息深度挖掘与探索来加强协同，为支持英格兰数据中心的可持续发展和增长提供建议。

研究显示，部分英格兰数据中心消耗的饮用水量不容忽视，且整体格局与美国等采用蒸发水冷技术的地区存在显著差异¹。此外，虽然未能获取完整的用水计量数据，但本研究与相关行业研究结果一致显示：大多数数据中心并不会大幅增加饮用水供给负担（67%的数据中心年饮用水消耗量低于 1000 立方米）。英格兰数据中心每年从公共供水系统取水量约为 1,879,000 立方米（占非家庭用水市场的 0.2%），且该数值呈上升趋势。用水量高度集中于少数大型用户——前六大数据中心用水量占据整个行业的 65%。在研判未来趋势时还需注意，近期有两座数据中心于 2024 年投入运营，五座为 2020 年后投入运营。

本文提出了一系列提升用水效率与支持行业可持续发展的建议，这些建议需置于供水行业持续扩张的背景下理解。数据中心既是国家重点发展的经济优先领域，同时作为关键国家基础设施和新兴行业，其用水需求尚未纳入水资源规划体系。值得注意的是，供水公司的主要关切并非数

据中心的总用水量，而是其用水需求峰值，且数据中心需求高峰极可能与受气温影响的居民用水高峰形成叠加效应。本文梳理的相关证据也印证了这一判断：数据中心峰值用水需求可能相当大，且用水量季节性波动明显——夏季用水量显著增加，与居民用水高峰期重叠。任何监管与政策调整均须兼顾尺度与公平，上述现象同样出现于其他行业，其中不乏用水量更高或用水效率更低的领域。

对现行政策与基准框架进行梳理后，本研究发现英格兰若采纳一套报告框架并实施一系列政策干预措施，可以简化数据中心用水量的基准比对流程，带来显著益处。具体而言，该框架应包括对《欧盟能效指令》所要求的指标的强制性集中报告（或至少涵盖其中部分内容），并尽可能补充其他指标以更好地比较与解读用水情况。国际政策评述表明，欧盟在制定国际公认能效标识方面处于领先地位，其提出的标识方案在综合考虑水资源与能源消耗方面具有显著优势。本研究建议英格兰效仿并采用该能耗标识体系，同时考虑已提出但尚未正式确立的最低能效标准是否适用。然而，单靠上述干预措施尚不足以充分发挥该框架作用，还需搭配一系列附加政策选项，才能应对当前问题。本报告讨论的干预措施包括：持续推进数据中心在《关键国家基础设施》名录的登记、优化规划审批流程、提升数据中心建设项目的审批透明度以及增进数据中心设计方与供水企业之间的沟通与主动协作。

¹与英国主要依赖公共供水系统不同，美国数据中心使用地下水的情况更为普遍。

针对政策规划、用水基准比对及深化研究三个方向，本报告形成若干建议。

在监测与基准比对方面，建议英格兰可强制要求数据中心集中上报《欧盟能效指令》所规定的各项指标（或至少涵盖其中部分内容）。有关部门亦可考虑将申报范围扩大至 500 千瓦以下的数据中心。上报的数据可以匿名形式公开发布，每家数据中心均需注明其所在地区、电能利用效率、可再生能源系数、IT 设备功率、总用水量、饮用水用量、直接水资源利用效率与间接用水水资源利用效率。除《欧盟能效指令》已有要求外，还可进一步要求上报以下数据：不同水源的取水量（如水源地、饮用水、再生水及雨水回用的利用量）、不同用途的用水量（如生活类用水与其他用水），以及年均饮用水用量与高峰月份饮用水用量。

在激励能效提升方面，可选的政策工具包括：设定最低能效标准（并配套落实监管措施、跟踪达标进展），针对是否采纳欧盟后续可能推出的最低能效标准进行研判，推行强制性能效标识，加入《碳中和数据中心公约》。其他政策建议还包括：规划体系改革、将数据中心纳入关键国家基础设施登记名录以及强化数据中心运营方、设计方与供水零售商及批发商之间的沟通协作，具体包括签订更具约束力的服务水平协议。

关于后续研究，重点方向如下：

- 与数据中心、供水行业、监管机构及本领域顶尖专家开展对话与协作，共同探讨如何减少并消除再生水利用面临的困难。
- 加强各方在水资源规划领域的协同合作，增进相互理解，充分认识各自在法规与监管框架下的可执行空间与现实制约。

背景介绍

在全球范围内，数据中心作为重要的行业部门，对当代社会运转具有基础性支撑作用。英国信息技术产业协会（techUK）将数据中心定义为“用于放置服务器及相关电信、网络与存储系统等计算设备的专用场所”。从数据存储（如云服务）、交易处理、社交媒体到在线新闻，当今社会各类数字化服务均依托数据中心得以实现。

数据中心在当代生活中具有关键作用，已于 2024 年正式列入英国《关键国家基础设施》名录。这使数据中心在重大突发事件期间可获得政府支援，并在规划审批中有望获得优先受理。2025 年，英国政府将数据中心纳入《2018 年网络与信息系统安全条例》管辖范畴，将其列为基本服务部门。与此同时，数据中心亦是英国政府推动经济增长的关键一环——自 2024 年 7 月以来，该领域已吸引私人投资高达 250 亿英镑。数据中心的落成不仅能吸引新机构入驻，也为既有机构的规模扩张提供了条件。尽管如此，近年来数据中心因占用大量土地、电力及水资源，正面临公众与监管层面日益严格的审查。

数据中心内部设备在运行过程中会产生大量热，因此需要及时冷却降温。若热量不能及时排出，将导致设备过热乃至损坏。同样，数据中心也需进行湿度控制：湿度过高会损坏金属部件，过低则容易积聚静电、增加火花风险。当前可用于冷却的方式多样，包括水冷、风冷以及矿物油冷却等。

在荷兰，微软公司曾因其数据中心用水量问题饱受批评。该公司 2021 年实际用水量高达 8.4 万立方米（合 8400 万升）。然而此前微软公司对外宣称的年用水量仅为 1.2 万至 2 万立方米。微软公司对此解释称，实际用水量较大是因为包含了数据中心下一阶段建设工程的施工用水，而不

仅仅是冷却水。在智利，谷歌公司拟建数据中心的计划也遭到了当地民众的强烈反对。该公司原计划采用水冷散热方案，而当时智利正经历一场持续长达 15 年的严重干旱。若安装冷却塔，预计日用水量将达 7600 立方米（合年用水量 277.4 万立方米）。爱尔兰近期刚刚解除了针对大都柏林地区数据中心建设的暂停令。当初实施该暂停令的原因在于，数据中心用电量已占到全国用电总量的约 21%。此外，荷兰也于近期禁止新建超大规模数据中心，理由同样是对能源消耗与承载力的担忧。

英国供水行业已将目光投向数据中心。据泰晤士水务公司称，一座大型数据中心日用水量可达 4000 至 19000 立方米（合 400 万至 1900 万升），相当于 5 万余户家庭的单日用水总量。为此，该公司已明确表示，将对未能有效压减用水需求的数据中心加装限流装置。安格利安水务公司也对其辖区内拟建数据中心的计划提出反对，理由是担心水源供应难以保障，且大量的排水可能造成下水道溢流。该公司同时质疑将饮用水用作冷却水的适当性。根据《2023 年环境改善计划》的要求，到 2038 年，非居民用水量须削减 9%，到 2050 年则须削减 15%。在此政策背景下，使用公共供水系统的数据中心与其他非居民用户一样，预计将持续面临来自供水商、监管机构及公众的节水减排压力。

本文摘编自 Water Efficient Data Centres ,
WRC, UC19447.03/3030250, (2026)。

大气层河流引发的复合极端气候事件 导致西格陵兰湖泊突变

北极生态系统正遭受气候加速变暖与水循环增强的双重影响。复合气候极端事件（如极端高温与强降水同时发生）可能引发强烈生态后果，导致生态系统剧变，但学界对此认识仍十分有限。本研究表明，位于长期干旱的西格陵兰地区的水生生态系统，在 2022 年秋季遭遇一系列大气层河流侵袭后（大气层河流即大气中狭长的水汽输送通道，主要表现为创纪录的高温与强降水），已发生生态转型。本研究发现，复合气候极端事件已使得北极湖泊的变化超过临界点。随着陆地与水生系统连通性增强，大量溶解性有机质与金属物质输入湖泊，铁浓度激增超过两个数量级。在不足一年的时间，湖泊由原先的蓝色状态转为褐色状态。湖水褐化致使光照穿透深度平均下降 50%。这一光照限制改变了浮游生物分布格局与群落结构，主要表现为原核生物多样性大幅降低，以及能够代谢有机碳源的藻类类群占比上升。由此，湖泊夏季由碳汇转为碳源，向大气释放的二氧化碳通量增幅超过 350%。北极湖泊生态系统如此迅速的转变，凸显了复合极端事件的叠加效应与不可预测性，也表明其发生季节至关重要，在水分收支呈负平衡的地区尤为如此。

气候变化对全球生态系统构成的一大威胁在于引发生态系统转型，此类转型涉及系统层面的整体转换，如生物群落更替（例如由灌丛演替为

草地）或生态系统状态转变。生态系统转型的发生频率正日益升高，且预计将进一步加快，这将对生物多样性及生态系统功能（包括碳循环与碳固存）产生深远影响。生态系统转型既可能源于渐进的气候变化，也可能由气候突变引发。气候极端事件及多重因素间的交互作用作为生态系统变化的关键驱动因子，正日益受到学界关注。

复合气候极端事件是指涉及多个变量的极端事件，如热浪与干旱同时发生。此类事件的复合属性可能对人类及自然系统造成难以预料的冲击。在中高纬度地区，大气层河流（ λ ）在天气尺度事件中能够同时将大量水汽与热量向极地输送，从而引发复合气候极端事件。大气层河流影响范围遍及全球诸多区域，包括北美及南美西海岸、西欧、美国东部、东亚以及极地地区。部分区域的大气层河流发生频率在过去百年间呈上升趋势，北美西海岸近十年间更是出现了前所未有的活跃期。大气层河流登陆所造成的影响规模取决于两方面因素：一是致灾因子，包括水汽与热量输送的强度，以及事件的持续时间、发生频率与季节节点；二是受灾区域的脆弱性，把包括前期环境状况（如土壤湿度）、地形地貌、土地利用方式及生态系统类型。模型预测显示，至本世纪末，北美西部、西欧、东亚、格陵兰及南极洲的大气层河流发生频率增幅可达 50% 至 290%，这进一步凸显了深入理

解此类复合极端事件及其导致生态系统转型风险的迫切性。过去十年间，学界对复合极端事件如何影响陆地及人类系统已有一些了解，但对于这些影响将如何进一步波及湖泊等淡水系统的认识仍十分有限。湖泊在淡水蓄存、饮用水供给、水力发电、维持生物多样性及碳固存等方面发挥着至关重要的生态功能。因此，深入理解大气层河流等复合极端事件对这些系统所构成的威胁显得尤为紧迫。湖泊对极端降水或极端高温等单一极端事件本就高度敏感，面对复合极端事件时自然更为脆弱。即便单一极端事件历时短暂，一旦湖泊生态系统越过某个阈值，其所受影响便可能永不可逆。

在湖泊生态学中，描述生态系统状态的一个基本分类体系是营养物-水色范式。该范式依据营养盐浓度（以总磷计）与溶解性有机质所致水色（以 455 纳米波长吸光度计）来预测湖泊生态系统生产力。同时使用这两个参数比使用单一营养

盐指标更能反映生产者可获取的资源状况。该范式表明：水色清澈（色度低， <20 铂钴色度单位）且营养盐浓度处于低至中等水平（总磷 <30 mg/L）的湖泊生产力低下，称为“蓝色”湖泊；营养盐浓度相近但水色较高（ >20 铂钴色度单位）的湖泊则为“褐色”湖泊；水色低而总磷高的湖泊，因光养生产力增强而呈现“绿色”；水色与营养盐浓度双高的湖泊则为“浑浊”湖泊。这一分类体系有助于深入理解湖泊系统中自养与异养作用的平衡，并在一定程度上与描述陆地生态系统的“绿色”（植物主导）与“褐色”（分解者主导）食物网概念相应。营养状态的平衡变化对湖泊生态系统结构（如生物多样性）与功能（如碳循环、食物网相互作用）乃至生态效用（如碳埋藏）均具有深远影响。营养物-水色框架的一大优势在于，其所依托的两项变量均为常规监测指标，因而能够快速、大范围地识别湖泊生态系统状态的转变。

湖泊是北极地貌的重要组成部分，也是陆源

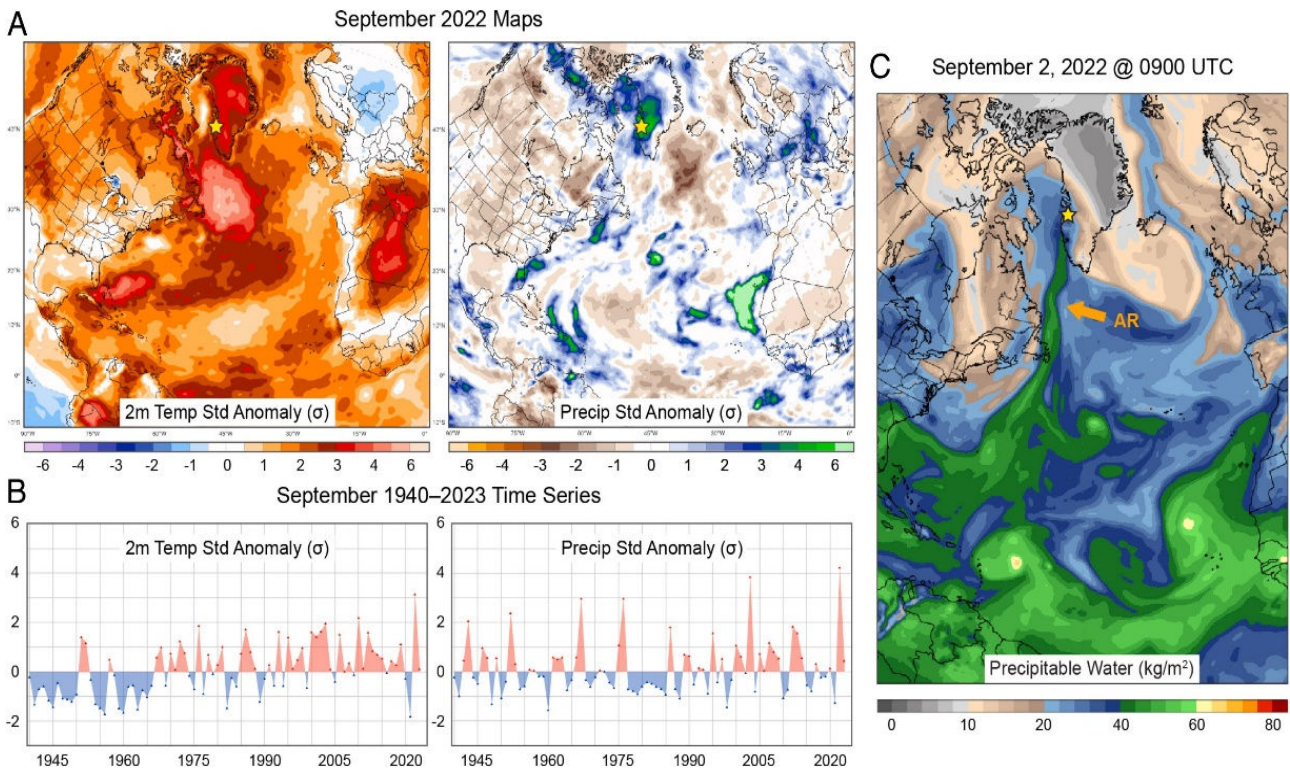


图 1. (A) 2022 年 9 月两米气温与降水量标准化异常分布图。(B) 1940 至 2023 年各年 9 月两米气温与降水量的标准化异常值时间序列。(C) 2022 年 9 月 2 日 09 时（协调世界时）可降水量分布图。

有机碳发生强烈矿化作用的场所。随着高纬度地区增温加剧，该区域超过 350 万个湖泊面临生态系统转型的风险。水生系统（尤其是受多年冻土融化影响的那些水生系统）是大气温室气体排放的重要来源，与周围的陆地环境相比，其温室气体排放量更高。北极湖泊的代谢平衡正处于敏感阈值边缘，影响其净自养与净异养状态的因素可能比目前所了解的更为多样，其时空变异性因而也更大。水文连通性（指物质以水为介质从陆地向湖泊的迁移过程）近来已成为学界公认的控制碳向淡水系统输送的关键特征。北极各地区的水文连通性存在差异，偏干旱区域的湖泊在夏季可充当二氧化碳的碳汇。由于气候、陆地-水生系统联通关系与碳动态三者关系紧密，气候变化引发的湖泊水文连通性的改变，将导致温室气体排放发生相应变化。

本研究量化了西格陵兰多个湖泊在大气层河流引发的复合极端事件（创纪录高温与强降水）发生前后的生物地球化学、物理及生物特征。根据欧洲中期天气预报中心第五代再分析数据产品，2022 年 9 月是西格陵兰自 1940 年有记录以来最暖、最湿润的九月（图 1）。首波强天气事件出现在 9 月 1 日至 3 日，整层大气可降水量异常值较 1951 至 2000 年气候基准高出逾 5 个标准差。此次大气层河流事件期间，气温异常偏高，超出气候基准 3 至 4 个标准差，致使格陵兰冰盖在夏季末发生创纪录的大范围表层融化。

其他大气层河流事件影响该区域的日期还包括：9 月 5 日、11 日、15 至 18 日、23 至 24 日及 25 至 26 日。值得注意的是，康克鲁斯瓦格实测最低气温在此期间仅有 3 天低于冰点，大部分降水因此以雨而非雪的形式降落。9 月 25 日至 26 日的事件与飓风菲奥娜的残余环流有关，其间气温偏高，致使格陵兰冰盖九月末出现前所未有的大

范围融化。此后，风暴活动短暂停歇，大气层河流于 10 月 16 至 19 日、21 至 22 日及 26 至 29 日再次向西格陵兰输送水汽。2023 年 7 月，西格陵兰再遭大气层河流引发的极端天气。再分析数据表明，该月是 1940 年以来最湿润的 7 月，气温亦属同期最暖。该月平均整层大气总可降水量较 1951 至 2000 年气候基准高出近 5 个标准差。7 月 7 日，一次与大气层河流相关的强暖潮来袭，格陵兰冰盖近半数区域气温升至冰点以上。其他大气层河流事件影响该区域的日期还包括：7 月 9 至 11 日、14 日、18 至 21 日。遥感监测显示，西格陵兰受上述风暴影响的区域范围广阔且空间分布不均，2022 年秋季与 2023 年夏季降水共同导致土壤湿度增加，归一化植被指数升高，呈现出斑块状的陆地绿化格局。据估算，受影响陆地范围内共有 7,486 个湖泊。

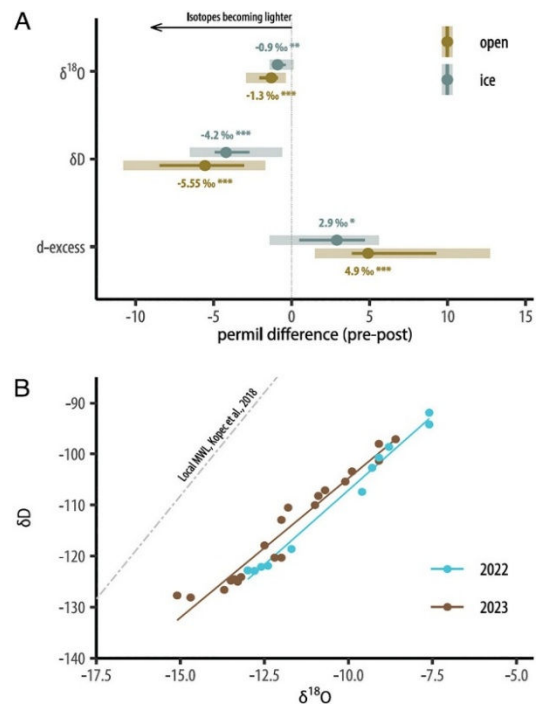


图 2. 生态系统转型前后水体稳定同位素的变化。(A) 2022 至 2023 年间，冰封期（4 月）与夏季（7 月及 8 月） $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 值的下降及氘盈余的升高。(B) 各湖泊 2022 年夏季（蓝色）与 2023 年夏季（褐色） $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 组成的变化。

研究结果

区域水文改变与陆地-水生系统联通性增强。湖泊水体的稳定同位素组成显示，2022 年 8 月（2022 年夏季无冰期）至 2023 年 4 月（冰封期）期间发生了水文转变，各湖泊 $\delta^{18}O$ 值平均降低

和 10 月，有大量贫重同位素水体输入，且蒸发作用可能有所减弱，这与该年秋季降水偏多、云量偏大的情况相符。氘盈余的升高同样反映了多年冻土环境中降雨的增强。2023 年冰消后，两种同位素进一步贫化，数值更接近大气降水的同位素组成（图 2B），反映出蒸发作用的减弱，这可能与

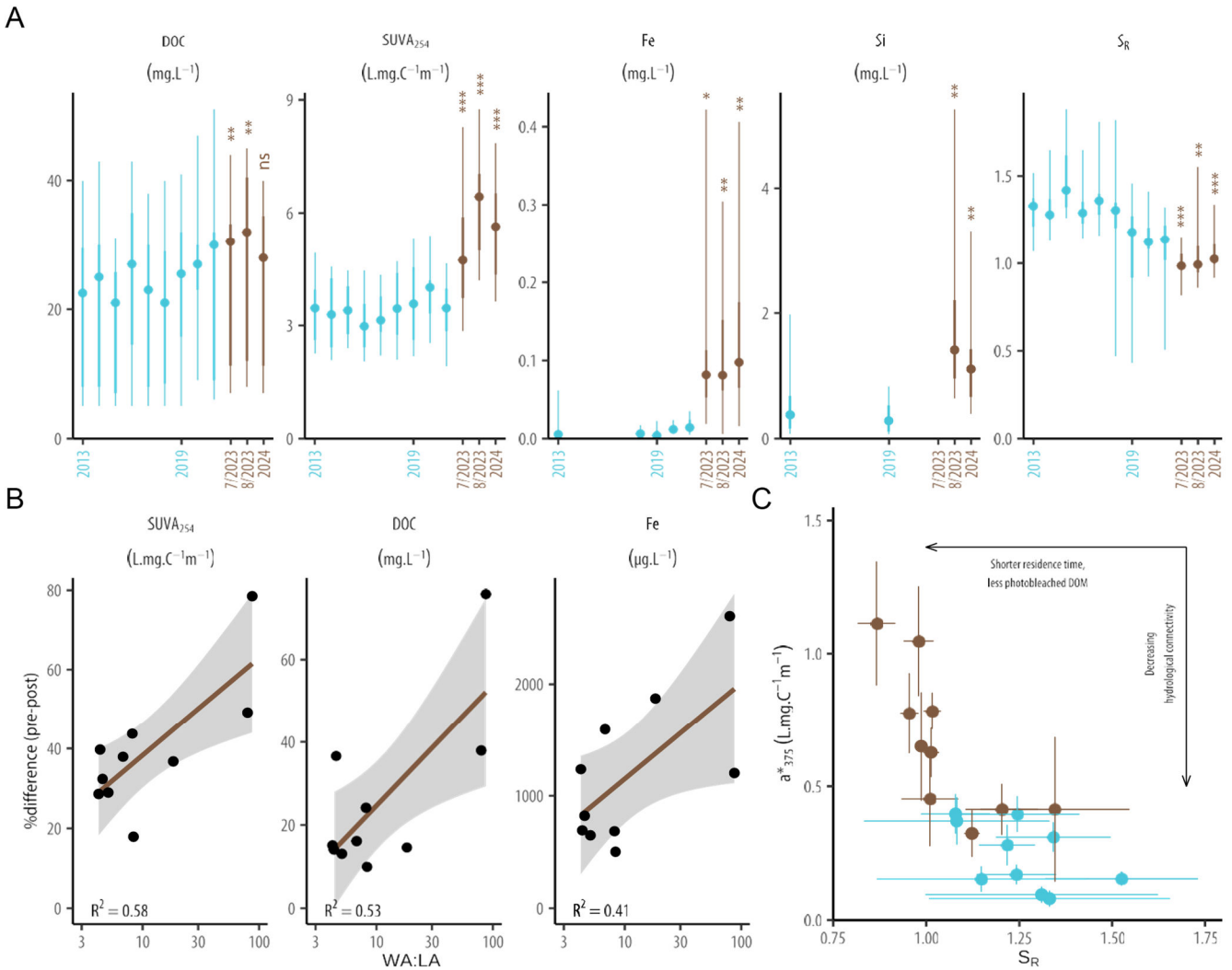


图 3. 水文连通性增强导致陆源物质向水生系统的输入增加。(A) 2023 年 7 月、8 月及 2024 年 7 月（褐色）表层水体溶解性有机碳浓度、SUVA₂₅₄、铁、溶解态硅及光谱斜率比（SR）较 2013 年以来夏季（6 至 8 月）数据（蓝色）的显著变化。(B) 6 至 7 月 SUVA₂₅₄、溶解性有机碳浓度及铁浓度的转型前后百分比变化与集水区-湖泊面积比呈线性正相关。

4.8‰， δD 值降低 0.9‰，氘盈余增加 2.9‰（图 2A）。上一无冰期的同位素信号在冰封条件下得以保存，表明在 2022 年 11 月冰封形成之前的 9 月

2023 年 5 月和 6 月云量高于平均水平有关。

该区域水文状况的改变显著增强了湖泊与其集水区之间的连通性，进而加剧了陆源物质向水

生系统的输送,这一变化在2023年7月初已十分明显。与2013至2022年相比,2023年7月初湖泊水体溶解性有机碳平均浓度上升了22%(图3A),其来源与性质也发生骤变,陆源特征更为显著。与2013至2022年相比,2023年7月初各湖泊水体在254nm波长紫外光下的吸光度(SUVA₂₅₄,代表芳香碳含量的指标)平均升高了39%,而指示溶解性有机质性质的光谱斜率比(SR)则下降了19%(图3A)。较高的SUVA₂₅₄值及较低的SR值意味着溶解性有机质更多源自土壤,且水文连通性更强。集水区面积与湖泊面积之比越大的湖泊,其SUVA升幅亦越大(图3B),这与该物质的陆源性相符。以 a_{375} (375 nm波长处吸收系数与溶解性有机碳浓度的比值)表征的溶解性有机质色度,在2023年7月初较此前所有年份(含2002年与2003年数据)高出131%(图3A和3C)。 a_{375} 值越高,表明陆源溶解性有机质输入越多,集水区与湖泊间的水文连通性越强;2023年的高值更接近于格陵兰降水偏多地区的滨海湖泊。采用液相色谱-有机碳与有机氮检测联用技术对溶解性有机质分子量组分进行的分析显示,腐殖质(相对分子质量约1000 g/mol)及高分子量生物聚合物(>20000 g/mol)均有所增加。这进一步表明2023年湖泊中来自陆地的溶解性有机质较2018年更多。各组分的碳氮比显示,2023年溶解性有机质的氮含量低于2018年,说明来自多糖和木质素的物质有所增加。同期,低分子量酸(<350 g/mol)有所减少,这可能是由于此类物质未向湖泊输送,或消耗的速率高于生成速率。整体而言,上述观测结果与惰性溶解性有机质输入湖泊增加的现象一致,表明集水区中年代久远的有机质正被活化并迁移至湖泊。

2023年7月初,各湖泊水体总铁浓度较此前升幅逾1000%(图3A),集水区与湖泊面积之比越

大的湖泊,铁浓度升幅越大(图3B)。其他金属(如铝、钴、铬、铜)浓度在湖泊中同样有所上升。湖泊水体中的溶解态硅源自集水区基岩风化,其可溶性高于铁及铝-硅酸盐-腐殖质络合物,浓度较2013年与2019年上升了448%(图3A)。近几十年来,北半球湖泊中铁与溶解性有机质浓度呈逐步上升趋势,这一变化部分归因于降水增加及随之而来的土壤氧化还原条件改变。土壤淹水频率增加营造了还原环境,促使铁与有机碳释放。鉴于多年冻土中储存着大量土壤有机质,且铁与碳循环紧密相连,气候变化所导致土壤氧化还原条件的改变,极有可能促使有机碳大量释放,进入北极地表水体。

湖泊水化学指标的变化并未改变各湖泊的酸中和能力,其中位值维持在1900至2000微克当量每升。2023年7月初,各湖泊水体pH值有所下降,从8.01降至7.88,但仍处于中性附近。

陆地与水生系统联通性显著改变的又一证据在于,2023年7月初,各湖泊营养盐浓度较2013至2022年普遍上升,其中总磷上升66%,溶解性无机氮的两种形态——硝态氮上升200%、铵态氮上升123%。在多年冻土土壤的还原条件下,微生物还原作用可使铁氧化物溶解,磷酸盐随之进入土壤孔隙水,多年冻土融化释出长期封存各类氮素,包括无机氮形态。营养盐浓度的升高不太可能是由湖泊内部营养盐循环改变所致,因此2023年湖泊的溶解氧剖面与往年相比并无差异。总磷与溶解性无机氮浓度虽有所上升,但二者比值并无变化,该比值是衡量湖泊营养盐限制状况的指标。

上述湖泊生物地球化学变化多已持续存在,部分指标更因2023年7月总降水量偏高而进一步上升。2023年夏季期间,溶解性有机碳浓度上升15%、SUVA₂₅₄上升40%、 a_{375} 值上升170%、总

磷浓度上升 15%，各指标进一步升高趋势明显。硝态氮是一个例外，其浓度基本回落至 2023 年之前的水平，这主要是由于生物生长季的吸收作用。2024 年 7 月初，研究对各湖泊再次采样。结果表明，相较于极端事件发生前，上述变化依然持续（图 3A）。尤为突出的是，溶解性有机碳浓度较此前均值高出 19.6%，铁浓度高出 1079%，光谱斜率比（SR）降低 14.9%，SUVA₂₅₄ 升高 61.2%，溶解态硅升高 243%， a_{375} 值升高 195%。

水文连通性增强驱动湖泊生态系统转型。集水区物质大量输入，深刻改变了湖泊的物理特征，

使生态系统发生转型。最显著的变化是，2013 至 2022 年间清澈的水体在短时间内转为深暗色（图 4A），这很大可能是由于溶解性有机质性质的改变及铁浓度的升高。2016 至 2022 年间，被归类为“蓝色”的湖泊中绝大多数在不足一年内即转为“褐色”，各湖泊水色平均加深 190%（图 4C）。上述湖泊在不足一年内的水色变化幅度，相当于北方湖泊长达数百至数千年的自然演变。这一水色改变至 2024 年 7 月依然持续（图 4C）。各湖泊水体透明度（以光合有效辐射衰减至 1% 的深度计）在 2023 年夏季同步下降了 49%，较 2013 至 2019

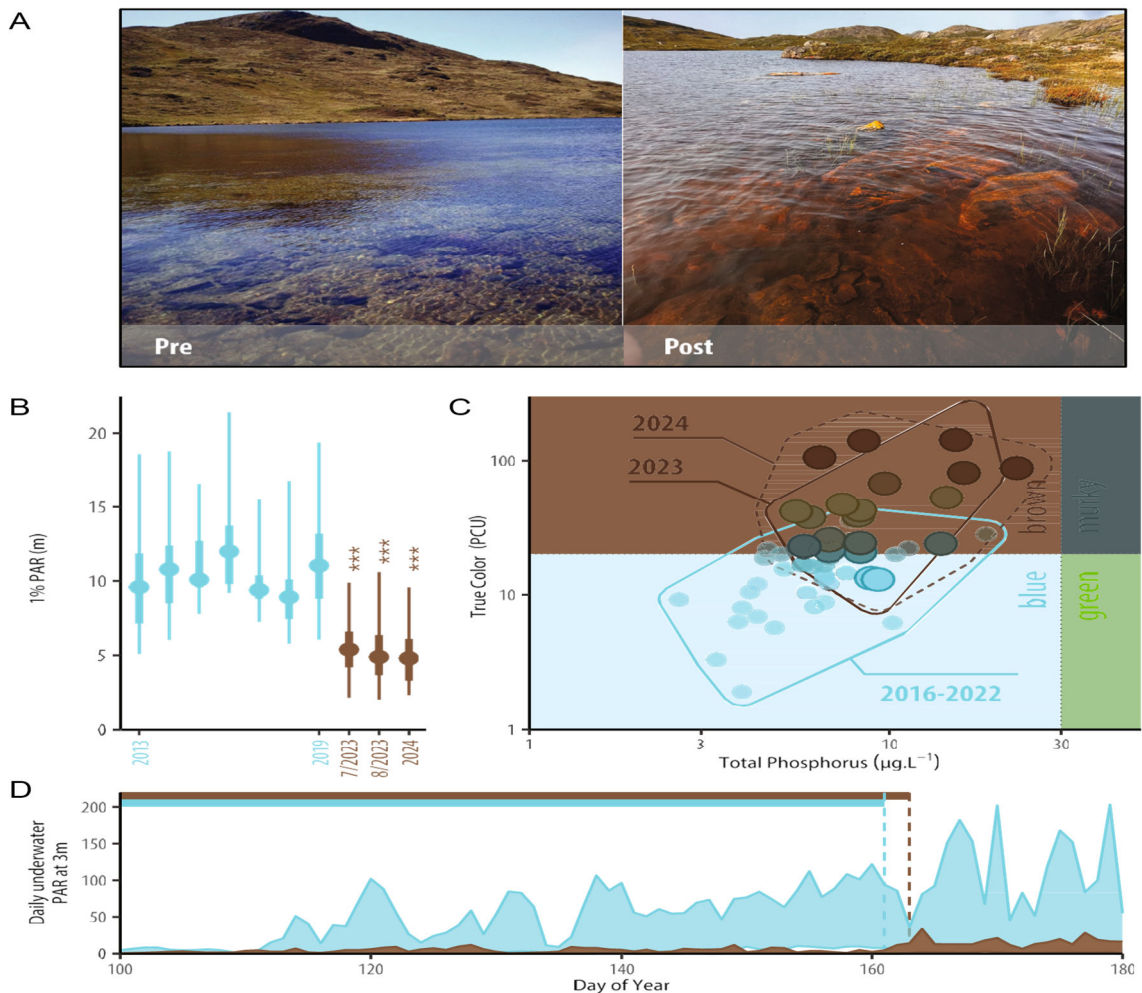


图 4. 湖泊由蓝色向褐色的转变。(A) 清澈的蓝色湖泊（2014 年夏季拍摄）于 2023 年转为深暗的褐色（2023 年夏季拍摄）。(B) 2013 年以来各年各湖泊 1% 光合有效辐射衰减深度中位数。(C) 与 2016 至 2022 年各年 7 月相比，2023 年与 2024 年 7 月各湖泊的营养物-水色状态发生迁移，向褐色象限靠拢。(D) SS85 号湖泊 2023 年（褐色）水下光照较 2022 年（蓝色）大幅减弱。

年夏季降幅明显（图 4B）；这一改变至 2024 年夏季同样持续发生。湖面以下数米处布设的原位光传感器全年逐时记录显示，水体透明度下降在 2023 年春季冰封期即已显现，并持续贯穿整个夏季（图 4D）。

水色加深及由此引发的水体透明度下降改变了湖泊内部的垂向结构与生境分布。在夏季，湖泊呈现热力分层，表层为温度较高、混合均匀的暖水层，下部为温度较低的深水层；表层厚度的变化主要受水体透明度调控，风力、冰层融化时间及气温也有一定影响。2023 年 8 月，各湖泊表层厚度中位数为 4.8 米，较此前年份浅了 31%，以施密特稳定指数衡量的分层强度增强了 68%，且

均值为 10° C），冰层消融时间亦偏晚（约 6 月 15 日），而这两项条件本应使该区域的表层更厚、分层更弱。因此，观测到的湖泊表层厚度变浅、分层强度增强，很可能缘于水体颜色加深。

湖泊的垂向生境分布也随之改变。叶绿素 a 浓度峰值是衡量浮游植物总生物量的指标，浮游植物正是浮游食物网的“绿色”基底。2023 年，各湖泊的这一峰值均由深水向浅水区迁移，与此前所有年份均不相同（图 5B 至 D）。与往年相比，2023 年 7 月初各湖泊表层叶绿素 a 上升了 217%，深层叶绿素 a 下降了 43%。上述变化至 2024 年 7 月依然持续（图 5B），表层叶绿素 a 较 2013 至 2022 年高出 165%，深层叶绿素 a 则降低 54.1%。

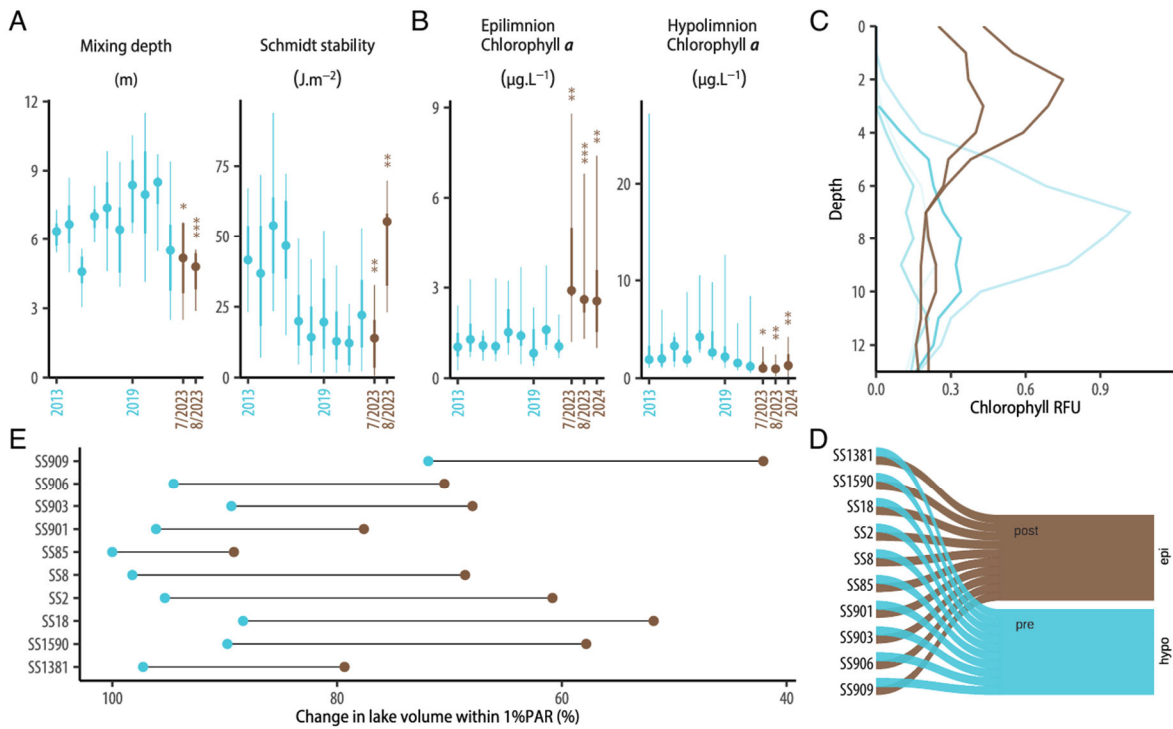


图 5. 水体透明度下降所致湖泊性质变化。(A) 湖泊热力结构指标的时间序列。(B) 表层与深层叶绿素 a 浓度时间序列。(C) SS909 号湖泊叶绿素（相对荧光单位）垂向剖面，显示叶绿素峰值由 2016 至 2022 年（蓝色）的底层水体上移至 2023 年（褐色）的表层水体。(D) 2023 年褐化事件后，叶绿素 a 最大值所在深度由深水层上移至表层。(E) 蓝色点代表 2023 年之前 1% 光合有效辐射衰减深度内的平均湖泊体积，褐色点代表 2023 年褐化后该深度内的湖泊体积。

更为稳定（图 5A）。该年夏季平均气温低于常年（2023 年 6 至 8 月平均为 9° C，1975 至 2021 年

叶绿素 a 峰值深度通常随 1% 光合有效辐射衰减深度的变化而改变，这是因为光照是浮游植物的关

键资源。湖泊中，透光带（即光合有效辐射不低于水面 1%、足以支持光合作用的水层）体积下降了 28%（图 5E）。尽管叶绿素 a 的垂向分布与透光带总体积均发生改变，但整个水样的叶绿素 a 总量在 2023 年并无变化。

湖泊物理结构与化学特征的变化改变了浮游生物的群落结构与多样性。2023 年 8 月各湖泊表层混合层的光合色素显示，与 2010 年相比，隐藻的特征色素别藻黄素、硅藻和金藻的特征色素岩藻黄素，以及甲藻共有的叶绿素 c2 均有增加（图

6A）。上述色素变化表明，混合营养型类群（即兼具自养与异养能力、能以有机碳源和细菌为食的类群）占比有所上升；相较之下，2010 年时以专性自养类群的色素为主，如蓝细菌的海胆酮与角黄素、绿藻的叶黄素。对深水区表层沉积物（汇集了多个月份的藻类残体）进行的色素分析，同样反映出浮游植物群落的上述变化。与 2014 年相比，2023 年浮游动物总多样性未见变化（图 6B），但剑水蚤类多样性有所下降，轮虫多样性则有所上升，但上述变化均未达显著水平。两个年份的轮虫群落均以微食性（即取食微生物）类群为主。各湖泊浮游动物密度变化虽不显著，但 2023 年平均总密度较往年偏低，仅捕食轮虫的剑水蚤类密度有所上升。剑水蚤类增加及轮虫群落改变的现象，在美国东北部两个湖泊长达数十年的褐化过程中亦有记录，这些变化部分归因于水体透明度及垂直生境梯度的改变。总体而言，各湖泊浮游生物消费者与生产者生物量之比未见显著变化；2014 年 8 月该比值为 3.6，2023 年 8 月为 4.1。

将 2023 年采集的湖泊表层沉积硅藻组合与 2013 年进行比较，2023 年浮游型与底栖型硅藻比值上升了 235%（图 6C），表明光照减弱已导致各湖泊底栖生境大面积丧失。与褐化引发的湖泊热力结构变化相一致，星形小盘藻（该物种通常在混合深度较浅的湖泊中更为常见）的相对丰度在各湖泊中上升了 219%（图 6C）。随着湖泊转为褐色，细菌多样性有所下降（图 6D）。在上层混合层的环境 DNA 中共鉴定出 194 个细菌分类群，覆盖所有湖泊与采样年份。2023 年鉴定出的分类群数量下降了 90%——2023 年之前各湖泊采集的样品中共检测到 191 个分类群，而 2023 年在相同点位仅鉴定出 20 个。2023 年独有的三个类群为念珠藻 PCC-73102、甲烷杆菌属和出芽菌属。淡水围隔实验同样观察到，细菌多样性随水体褐化而下降

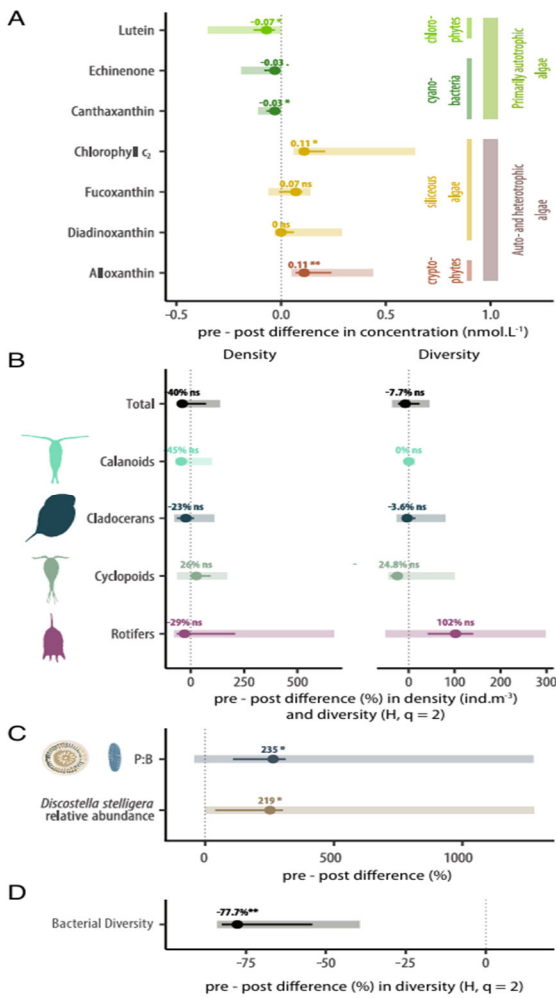


图 6. 2023 年褐化事件后湖泊的生态转型。(A) 2010 至 2011 年对比 2023 年表层水体光合色素。(B) 2014 年对比 2023 年主要浮游动物类群的密度与多样性。(C) 2013 年对比 2023 年表层沉积物硅藻。(D) 2015 年与 2019 年对比 2023 年细菌群落。

的现象。

湖泊生态系统转型对碳循环的启示。冰消期湖泊二氧化碳排放通量在上述大规模水文转变前后基本持平。然而,夏季二氧化碳通量上升了 354%,由净吸收逆转为净排放(图 7A),表明这些湖泊已从碳汇转为碳源。2023 年 8 月全部湖泊甲烷浓度较 2014 年 8 月同批湖泊的样品高出 72%(图 7B),尽管这一差异未达显著水平。2014 年,各湖泊表层与深层水体甲烷浓度相近。2023 年,甲烷浓度升高主要由表层水体甲烷增加所致,各湖泊表层甲烷浓度较 2014 年样品高出 34%至 1039%不等(图 7B)。水文连通性增强、陆源化合物输入增加以及湖泊水体滞留时间缩短,是内陆水体有机质分解的主要驱动因素。2023 年陆源碳底物的输入很可能推动了微生物过程,导致二氧化碳与甲烷生成量上升。

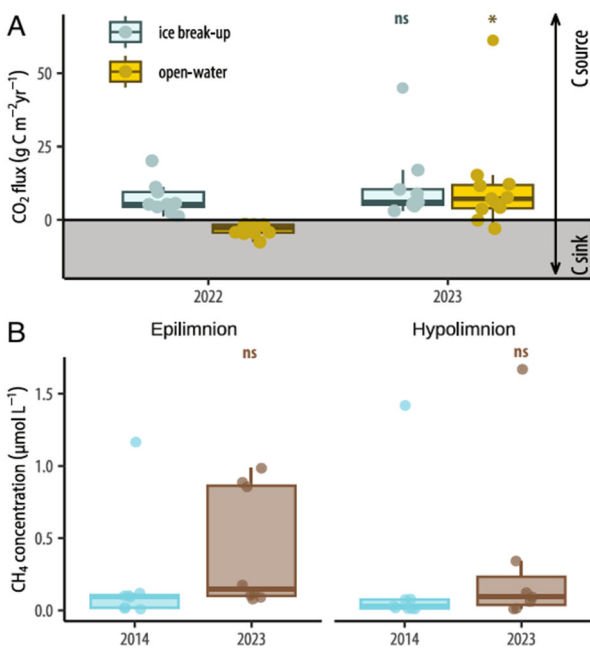


图 7. (A) 2022 与 2023 年春季冰消期(灰色)及夏季(黄色)二氧化碳通量变化。(B) 2014 年(蓝色)与 2023 年(褐色)表层及深层甲烷浓度对比。

碳循环的改变在各湖泊水样颗粒有机质的元素与同位素特征分析中也清晰可辨。各湖泊颗粒有机质碳氮比上升了 25%,从 12.2 升至 15.6;颗粒有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 均值贫化程度减弱了 25%,从 -28% 升至 -21% 。整体而言,颗粒有机质中氮的贫化及 $\delta^{13}\text{C}$ 值趋正的现象表明该物质更多来自溶解性有机质碳库,大型水生植物碳库的来源也可能有所增加,这大概率是光照穿透骤减后大型水生植物降解速率加快的后果。

讨论

2022 年秋季的复合气候极端事件从根本上改变了该区域的水文连通性,强化了陆地与水生系统之间的联通,对北极湖泊生态系统的物理、化学及生物特征产生了多重影响(图 8)。2022 年 8 月至 2023 年 7 月初期间,湖泊的诸多特征发生了转变——湖水颜色加深,湖泊类别改变,由此引发系统的连锁反应。湖水呈现深暗色,源于陆源物质大量涌入,其中包括溶解性有机碳。这些物质此前长期蓄存于陆地景观中,其水文连通性至少在数十年、甚至数百年间均极为有限。湖泊由蓝色转为褐色的一个重要后果在于,外源碳的输入导致湖泊向大气释放的二氧化碳通量增加,使湖泊在夏季从二氧化碳汇转为二氧化碳源;湖泊甲烷浓度亦随之上升。鉴于受影响区域内湖泊数量逾 7,500 个,这一转变意味着碳动态发生了区域性改变。复合气候极端事件虽难以预测,但在量化和预估北极生态系统未来演变趋势时,应当更为深入地探究并充分考虑其影响。

湖泊特征的上述变化表现出显著的一致性,进一步说明 2022 年秋季的创纪录高温与强降水对湖泊生态系统产生了剧烈的气候效应。各湖泊

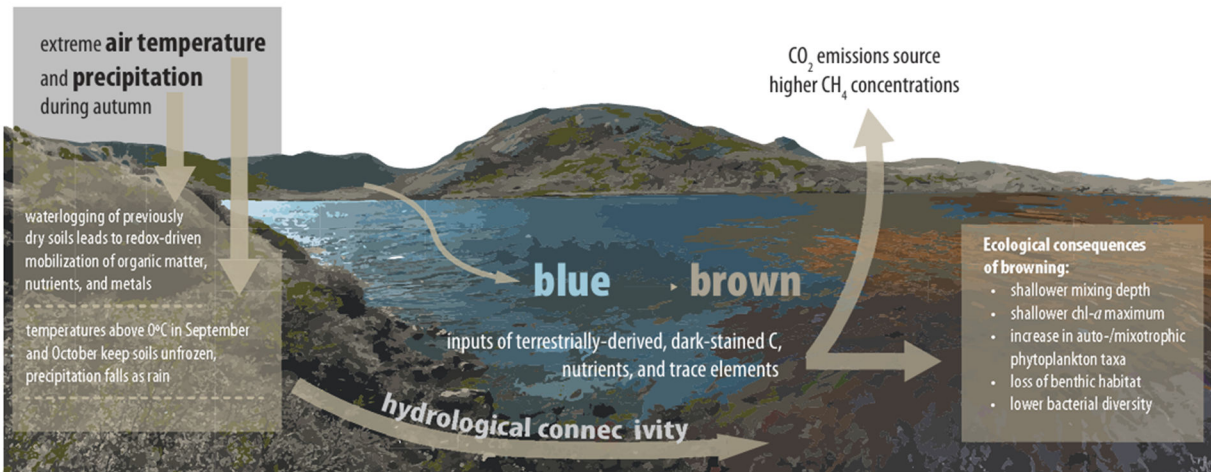


图 8. 2022 年秋季复合气候极端事件影响概览，示意创纪录高温与强降水对陆地土壤生物地球化学过程的作用、由此引发的陆-湖联通变化，以及对北极湖泊造成的生态后果。

变化趋势同步，表明大范围的影响因素在湖泊响应中发挥了关键作用。既往研究表明，反映能量输入的气候变量（如气温、太阳辐射、风速）往往使区域内湖泊生态系统的响应表现出较强的一致性，而反映物质输入的变量（如降水）则导致湖泊响应出现较大差异性。此外，各湖泊对气候作用的生物响应彼此差异较大，一致性较低，这可能是由于生态系统内部在过程上存在响应时间滞后效应。本研究发现，在大规模水文变化的影响下，各湖泊的诸多物理、化学及生物特征均表现出高度一致的变化，这凸显了高温与强降水两类极端事件叠加产生了强烈的协同效应。

溶解性有机碳的含量与性质变化表明，创纪录高温与强降水过后，该物质来自陆地的输入量有所增加。随着水文循环持续增强，这一现象在北极地区预计将更为普遍。各湖泊溶解性有机碳的性质均表现出强烈且一致性变化，这与之前文献记载的结论相符，即相较于浓度，溶解性有机碳的性质参数对气候变化更为敏感。西格陵兰湖泊在水文状况改变前，溶解性有机碳浓度已经不低，但水体色度极低，且有机碳主要来自湖泊内部，这符合半干旱地区的典型特征。因此，这些湖

泊以往受陆地影响有限，湖中积累的碳主要来自大型水生植物与藻类。由于气候变化，大量原本封存于冻土中的陆源有机碳迅速释放，导致湖泊由蓝色转为褐色，进而使这些湖泊在夏季从碳汇转为碳源。2023 年贫氮生物聚合物的增加表明，源自土壤并经过高度循环利用的惰性溶解性有机质大量涌入。同时，2023 年初夏湖泊水体营养盐（尤其是硝态氮浓度）上升，促进了微生物对营养盐类物质的降解，进而导致二氧化碳通量升高。湖泊开阔水域有效辐射衰减约 50%，这可能是上述生物变化的主要原因之一。叶绿素峰值在垂向上移向浅层，浮游型与底栖型硅藻比例的变化反映出底栖生境正在萎缩。藻类与大型水生植物等初级生产者受褐化的影响通常比浮游动物更为强烈，这主要是由于浮游动物对光照的依赖程度较低。尽管浮游植物类群与分布均发生了变化，但水样中藻类总生物量在大气层河流事件前后并无明显差异，这一结果与基于遥感分析的预测相悖。遥感预测认为，北极湖泊水文连通性增强将导致初级生产力下降。未来若能将蓝色与褐色状态下湖泊的整体代谢情况进行比较，将有助于更全面地评估褐化对湖泊生产力的影响。

随着湖泊生态系统发生转型，原核生物多样性亦大幅下降。其他研究同样发现，水体褐化与物种丰富度呈负相关关系，即为褐化抑制了微生物群落的生长。在西格陵兰的这些湖泊中，优势类群随着湖泊由蓝色转为褐色而发生改变，其中微型蓝细菌双色藻属在褐色湖泊中的分布增加。双色藻属常见于低等至中等生产力的湖泊浮游植物中，在低光照条件下更具优势。由于该类群具备产毒能力，因此北极湖泊褐化与水体毒性之间的关联值得进一步研究。

西格陵兰湖泊生态系统极易受到复合气候极端事件的影响，原因有二：一是此类事件的发生频率高且季节节点特殊，二是该区域的环境特征进一步放大了其脆弱性。西格陵兰是全球众多受大气层河流影响的区域之一，大气层河流往往在九月左右入侵该地区。九月正值秋季过渡期，即夏季消融期之后的转换阶段。此时气温通常持续下降，陆地与水生系统的生物活动也逐渐减缓，但全年溶解性有机碳以及集水区其他物质却有相当一部分在这一时期进入北极地表水体。秋季升温可使该时段的降水形态由雪转为雨，此时陆地植被已经凋萎，土壤湿度因此而增加，水文连通性增强，秋季极端高温与强降水同步发生的冲击力也更为显著。2003年9月曾出现同等量级的降水，但升温幅度较缓（图1B），当时并未观察到湖泊水色发生变化。除上述事件的发生频率与季节节点外，该地区湖泊生态系统对复合气候极端事件的高度脆弱性，还与两个长期因素的叠加效应有关：一是前期降水偏少（1975至2021年年均降水量仅224毫米，导致水文连通性长期受限），二是土壤条件（特别是连续多年冻土的存在）。因此，复合气候极端事件极有可能致使集水区中储存的大量有机碳及其他物质释放，进入与之相连的湖泊生态系统。考虑到北极水文循环正快速增强，

且北极新气候形态已呈现出秋季更暖、更湿、降水以雨为主的特征，本研究在西格陵兰观测到的2022年秋季创纪录高温与强降水所致影响，预示着北极地区将面临更普遍的湖泊生态系统变化，凸显了深入理解过渡季节气候变化生态效应的迫切性。

生态系统转型持续的时间有长有短，但其对生态与人类的影响可能十分深远。1861至1862年冬季加利福尼亚特大洪水，便是大气层河流接连引发生态系统转型并展现其巨大破坏力的典型案例。这场洪水降临前，当地已历经数十年干旱，当时加州大片地区被洪水淹没，化为褐色内陆海达数月之久。尽管这一生态系统转型最终得以逆转，但其经济损失却触目惊心——全州经济总量的四分之一毁于一旦，加州政府亦因此宣告破产。由一系列大气层河流引发的西格陵兰湖泊生态系统转型，至少持续至2024年夏季仍未消退，能否恢复蓝色状态、何时恢复都尚待观察。研究表明，处于较暗的褐色状态时，这些湖泊会释放更多的温室气体，且西格陵兰数以万计的湖泊均已受到上述复合气候极端事件的影响。湖泊转为褐色状态也对格陵兰当地社区产生影响，因为部分定居点以湖水作为饮用水源。溶解性有机碳与金属浓度升高，可引发异味问题，从而降低饮用水水质，并带来多重健康风险，其中包括消毒副产物污染、微生物暴露和金属中毒等。上述风险可通过新建水处理设施加以缓解，因此社区需要权衡治理成本与水质污染的发生频率与严重程度。受复合气候极端事件影响，西格陵兰各湖泊同步越过了临界点，因此未来的适应性计划中有必要充分考虑这类突发事件。近期学界也呼吁，气候风险评估及合理情景规划中应更充分地考虑高影响极端事件，以便更有效地预判并适应未来环境变化。

本文摘编自 PNAS 122, e2413855122 (2025)。



欢迎关注中国水科院微信公众
本刊联系方式：中国水科院国际合作处
地址：北京市海淀区复兴路甲一号
联系邮箱：dic@iwhr.com
2026年4月