



生态与农村环境学报
Journal of Ecology and Rural Environment
ISSN 1673-4831, CN 32-1766/X

《生态与农村环境学报》网络首发论文

题目: “双碳”目标下我国湖泊减污降碳协同治理路径研究
作者: 洪蕾, 于丹丹, 肖启涛, 陈萌萌, 邹长新
DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2026.0338
收稿日期: 2026-04-23
网络首发日期: 2026-07-31
引用格式: 洪蕾, 于丹丹, 肖启涛, 陈萌萌, 邹长新. “双碳”目标下我国湖泊减污降碳协同治理路径研究[J/OL]. 生态与农村环境学报.
<https://doi.org/10.19741/j.issn.1673-4831.2026.0338>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2026.0338

“双碳”目标下我国湖泊减污降碳协同治理路径研究

洪蕾¹, 于丹丹¹, 肖启涛², 陈萌萌¹, 邹长新^{1①} (1. 生态环境部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008)

摘要: 在“双碳”战略引领与生态文明建设纵深推进的新阶段, 湖泊作为陆地生态系统的重要碳库与流域污染净化的核心节点, 其减污降碳协同增效已成为破解生态治理难题、推动绿色低碳发展的关键路径。尽管我国河湖污染治理成效显著, 但受快速气候变化与高强度人类活动的双重影响, 部分湖泊仍面临水质恶化、水面萎缩、生态功能退化等严峻挑战。本文基于系统理论与协同视角, 厘清国内外政策演进脉络, 阐明湖泊减污降碳协同增效的理论内涵与内生动力, 通过构建湖泊生态治理的理论框架, 明确我国湖泊在“降碳、减污、扩绿、增长”协同推进中的功能定位。在此基础上, 依托 SWOT-CLPV 模型剖析国内外典型湖泊治理案例, 从技术、政策、机制三个层面识别共性优势与短板; 围绕筑牢生态气候韧性、完善协同治理体系、健全流域协调机制等关键维度提出针对性治理路径。研究成果可为我国湖泊实现减污降碳协同增效、推动水环境治理体系和治理能力现代化提供理论支撑与实践借鉴。

关键词: “双碳”; 湖泊; 减污降碳; 协同治理; 政策路径

Research on the Collaborative Governance Pathways for Pollution Control and Carbon Reduction for Lakes in China under the “Dual-Carbon” Goals. HONG Lei¹, YU Dan-dan¹, XIAO Qi-tao², CHEN Meng-meng¹, ZOU Chang-xin^{1*} (1.Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China; 2.Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Under the “dual-carbon” goals and in-depth advancement of ecological civilization construction, lakes, as vital carbon pools in terrestrial ecosystems and core nodes for watershed pollution purification, have made their pollution-carbon synergy a crucial pathway to address ecological governance challenges and promote green and low-carbon development. Although remarkable achievements have been made in lake governance in China, lakes still face severe challenges such as water quality degradation, surface area shrinkage, and ecological function decline, driven by the dual pressures of rapid climate change and intensity anthropogenic activities. From the perspective of systems theory and synergy, our research reviews the evolution of relevant policies at home and abroad, clarifies the theoretical connotation and driving forces of pollution-carbon synergy in lakes, and defines the functional positioning and policy support system of China’s lakes in the coordinated advancement of “carbon reduction, pollution reduction, green expansion and growth” by constructing a theoretical framework for lake ecological governance. On this basis, the SWOT-CLPV model is adopted to analyze typical lake governance cases at home and abroad, and identify common strengths and deficiencies from the technical, policy and institutional dimensions. Targeted governance pathways focusing on enhancing ecological and climate resilience, improving collaborative governance systems, and perfecting watershed coordination mechanisms have been proposed. The findings aim to provide theoretical support and practical references for achieving pollution-carbon synergy in China’s lakes and for promoting the modernization construction of water environment governance systems and governance capabilities.

Key words: dual-carbon goals; lakes; pollution-carbon synergy; collaborative governance; policy pathways

收稿日期: 2026-04-23

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项 (GYZX20260205; UTF-82025); 江苏省基础研究计划自然科学基金 (BK20220021)

① 通讯作者 Email: zcx@nies.org

引言

湖泊是地表碳循环中活跃的反应器，兼具碳源与碳汇的双重角色，其水-气界面 CO_2 交换过程对区域乃至全球碳平衡发挥着关键调节作用^[1,2]。联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）第六次评估报告着重强调湖泊等水体 CO_2 收支在全球碳循环中的重要性。据估算，全球湖泊每年向大气排放 CO_2 总量达 0.3-0.6 PgC，可抵消全球陆地碳汇的 12%-23%^[3,4]；我国内陆水体每年排放 CO_2 与 CH_4 总量相当于全国陆地生态系统碳汇总量的 14.1%-22.6%^[5]。研究指出，尽管区域气候和地理环境分异促使湖泊 CO_2 生消机制产生明显地带性，但我国湖泊整体正从 CO_2 源向汇转变^[6]。这主要得益于“河湖统领、三水统筹”的战略引领，表明“碧水保卫战”在改善水质的同时，也有效促进湖泊碳汇功能的提升。

近几十年来，受高强度人类活动和快速气候变化叠加影响，我国湖泊仍面临富营养化反复、水面萎缩、生态功能退化等突出问题^[7,8]。随着《巴黎气候协定》的签署实施以及我国“双碳”战略的持续深入，协同推进污染物与温室气体减排，已成为破解湖泊生态退化、应对气候危机的核心路径，也是实现环境效益与气候效益“双赢”的关键手段^[9-12]。因此，开展湖泊减污降碳协同治理，同步削减污染物与温室气体并提升生态碳汇势在必行^[13-15]。当前，现有研究多聚焦单一水质治理或碳汇核算，较少在湖泊尺度下实现二者系统性耦合，也缺乏对国内外典型治理模式的系统比较及制度经验提炼与借鉴^[16-18]。基于此，本文立足协同视角，系统构建湖泊生态治理的理论框架，梳理与分析国内外典型实践经验，识别治理痛点与制度障碍，探索科学可行的湖泊减污降碳政策路径。研究成果旨在为推动我国湖泊生态治理提质增效、助力“双碳”目标实现、推进美丽河湖建设提供理论支撑与实践参考。

1 减污降碳协同理论基础

工业革命以来，温室气体与大气污染物呈现“同根同源同步”特征^[19,20]。IPCC 第五次评估报告充分论证了碳污同源的科学事实，为协同推动碳减排与污染防治提供了依据；2015 年《巴黎协定》通过国家自主贡献机制将减污降碳纳入统一治理框架。由于污染物在水、气、土介质间的跨界面迁移转化过程活跃，单一介质治理模式存在明显的局限性，难以兼顾全局环境质量与经济效益优化，系统性开展多介质环境协同减污降碳至关重要^[21-23]。立足这一治理逻辑，我国明确践行该治理理念。2022 年生态环境部等 7 部委联合发布《减污降碳协同增效实施方案》，推动减污降碳由传统大气单介质模式向多介质系统治理范式跃迁。湖泊作为典型水陆交错生态系统，既是陆源污染物的主要汇集载体，也是重要的碳库与碳循环交互界面^[24-26]。21 世纪初研究发现，伴随污染加剧，藻型湖泊成为强效温室气体排放源^[27-29]。此后研究进一步估算证实，湖泊碳排放总量在陆地生态系统碳收支中占据不可忽视的地位^[30-32]。

基于湖泊富营养化与碳排放之间的正反馈关系，若仅控制外源污染而不干预湖泊生态结构，难以实现根本性治理。因而，相较于大气领域以末端治理、工程减排、能源结构优化为主导的模式，湖泊减污降碳协同治理更强调基于自然的解决方案（Nature-based Solutions, NbS），以生态系统自身结构修复与功能重塑为核心，构建可持续、低扰动、高韧性的治理体系^[8]。以水生植被为核心的 NbS 模式是实现这一协同目标的关键：一方面，通过水生植被直接吸收水体氮、磷等污染物，抑制藻华，削减内源污染负荷，实现水质提升^[33,34]；另一方面，通过植被光合作用固碳，形成生物碳汇，同时植被根系泌氧抑制厌氧分解产生的甲烷排放^[35,36]。沉水植被修复可驱动湖泊生态系统由藻型稳态向草型稳态转变，可同步实现湖体氮磷削减与碳汇提升，是当前湖泊领域落实减污降碳协同治理目标的关键技术范式^[37,38]。在此背景下，湖泊减污降碳协同增效旨在将氮、磷等污染物削减与温室气体（ CO_2 、 CH_4 等）减排及生态碳汇提升（包括植被碳汇、沉积物碳埋藏等）纳入统一框架，通过生态修复、工

程管控与政策机制多维度协同，同步实现水质改善、富营养化缓解、温室气体减排与碳汇增强，达到减污、降碳、增汇与生物多样性保护的多重效益统一，是深入落实“双碳”战略、推进美丽河湖建设的重要路径。



图 1. SWOT-CLPV 战略聚类模型
Fig.1 SWOT-CLPV Strategic Clustering Model

2 国内外湖泊协同治理实践

态势分析法包含优势（Strengths）、劣势（Weaknesses）、机遇（Opportunities）、威胁（Threats）四大维度，简称 SWOT 分析法。SWOT-CLPV 模型是传统 SWOT 分析框架的优化拓展，在原有四大维度之上，进一步引入抑制性（Constraints）、杠杆效应（Leverage）、问题性（Problems）、脆弱性（Vulnerabilities），即 CLPV 分析维度（图 1），该模型能够有效刻画多主体参与、多要素交织的复杂治理过程，广泛应用于多要素耦合情景下的战略研判^[39,40]，在生态管理领域，已被运用于区域生态资源开发、水域生态空间规划等相关场景^[41,42]。通过识别 S、W、O、T 四大要素及要素间交互作用形成的 CLPV 特征，厘清湖泊治理的成功关键与推广约束条件。基于案例研究的典型性、差异性与数据可得性遴选原则^[43-46]，本研究选取太湖、滇池、巢湖、波罗的海、乌尔米耶湖，以及维多利亚湖—鄱阳湖合作案例，共六个国内外典型湖泊治理案例开展系统评估，旨在提炼可借鉴的协同治理经验与实践启示。

2.1 典型案例概要

1. 跨域协同模式：以太湖为例

太湖作为跨域湖泊协同治理的典型代表，致力于构建水质改善、碳汇提升、气候韧性一体化治理体系。苏浙沪建立联合监测与联合执法长效机制，推行生态补偿与碳汇交易模式，推动生态效益向经济价值转化。依托中尺度涡度通量网与高精度观测系统，实现对 CO₂、CH₄ 等温室气体排放的实时追踪。创新实施“水下森林”碳汇工程，为构建功能稳定的水生植被生态系统奠定基础。2025 年监测数据显示，太湖总磷、总氮浓度分别降至 0.046 mg/L、0.99 mg/L，同比分别下降 8%、23.3%，流域物种数达 7179 种，比上一轮调查新增 280 种，且连续 3 年未发生湖泛，初步实现水质改善与碳汇能力提升协同发展^[47]。

2. 资源循环模式：以滇池为例

滇池聚焦富营养化治理与资源化利用，形成工程协同、智慧管控、藻水共治综合治理模式。2025 年全湖水质稳定达到Ⅳ类，为 1993 年以来最优水平；总磷浓度同比改善 31.5%，水体透明度提升 68.3%，营养状态由中度富营养转为轻度富营养。通过实施 4 个百万吨级治理工程，构建雨水、污水、清水三级调度体系；建成 7 座“藻水共治”一体化平台，日处理藻

水规模达 45 万立方米，采用石墨烯微滤技术，实现单次过滤去除 90%以上蓝藻级悬浮物。藻泥无害化处理后转化为生态有机肥或生物质燃料，实现藻碳闭环利用。智慧管控平台实现一网知滇池、一图管滇池，提升治理精准化与响应效率^[48]。

3. 精准修复模式：以漏湖为例

漏湖作为太湖流域重要生态前置屏障，以碳循环精准解析为基础推进靶向修复。应用涡动相关技术，结合太阳辐射、水汽交换等多维参数，系统解析漏湖碳循环规律：夏秋季以释放 CO₂ 为主，碳源特征显著；冬春季以吸收 CO₂ 为主，碳汇特征显著。春、夏、秋季昼夜碳汇、碳源变化明显。全年中，7 月碳排放量最高，为 32.61 gC/m²；11 月碳吸收量最高，为 35.14 gC/m²。2024 年，漏湖年均碳通量转为负值，成功实现由碳排放源向弱碳汇的转变。通过实施生态清淤与沉水植物修复组合方案，漏湖西岸 200 亩沉水植物带建成后，CO₂ 通量呈同步下降趋势，碳汇功能持续增强，为浅水湖泊降碳增汇提供可复制技术范式^[49]。

4. 刚性立法模式：以波罗的海为例

波罗的海为 9 国环绕的跨国界半封闭海域，1974 年沿岸国家签署《赫尔辛基公约》，成立赫尔辛基委员会，确立“共同但有区别”的治理原则。治理体系通过《波罗的海行动计划》明确阶段性治理目标与责任分配，实施刚性立法约束。其次，在《赫尔辛基公约》（Helsinki Convention）框架下的合作机制统一监测与标准协调，统一物理、化学与生物指标监测标准。同时，进一步推广 NbS 模式，规模化修复滨海湿地、水下草甸等生态系统。最新评估指出，氮、磷年均浓度分别下降了 28%和 42%。该模式以刚性立法、统一监测、联合执法为制度支撑，为跨国、跨区域湖泊减污降碳协同治理提供制度范式^[50,51]。

5. 节水降碳模式：以乌尔米耶湖为例

乌尔米耶湖受农业过度取水、上游筑坝与气候干旱化影响，水域面积大幅萎缩。自 2014 年起，在全球环境基金、联合国开发计划署以及联合国粮农组织支持下，实施节水优先、协同治理修复策略，形成政府主导、国际机构协同、社区参与的多元化治理格局。通过推进农业节水降碳，推广精准灌溉与水肥一体化技术，灌溉用水量减少 30%，化肥农药使用量降低 25%以上，作物产量增加 22.5%。同时，发展替代生计，鼓励多样化收入和可持续生计，推动农产品增值与生态旅游，并将农业用水削减 40%设为 2030 年前核心战略目标。该模式可为干旱半干旱地区湖泊生态修复提供参考^[52]。

6. 跨境合作模式：以维多利亚湖—鄱阳湖合作为例

自 2014 年起，我国鄱阳湖与维多利亚湖依托全球南南发展中心、联合国佩雷斯-格雷罗信托基金及世界生命湖泊网络平台开展跨国合作，聚焦湖泊富营养化、农业面源污染、湿地退化与贫困叠加等共性问题，探索协同治理路径。通过推广生态农业，发展生态养殖与有机种植，降低农药化肥输入，提升农户收入；推进清洁能源替代，普及节能陶土炉灶与户用沼气池，显著提升燃料利用效率；开展湿地碳汇修复，恢复湖滨植被，强化水体净化与碳封存能力。双方建立技术共享与能力建设机制，推动减污、降碳、增汇与减贫深度融合，为发展中地区湖泊协同治理提供可借鉴路径^[53]。

2.2 SWOT-CLPV 分析与治理启示

表 1 典型湖泊治理 SWOT-CLPV 分析矩阵

Table1 SWOT-CLPV analysis matrix for typical lake governance

案例	太湖 ^[47]	滇池 ^[48]	漏湖 ^[49]	波罗的海 ^[50,51]	乌尔米耶湖 ^[52]	维多利亚湖-鄱阳湖 ^[53]
优势 (S)	机制完善、成效显著	藻碳协同治理、智慧治理成效显著	精准诊断、技术可复制	刚性制度约束、构建较为成熟的 多国协调体系	多元共治基础良好、节水效益显著	多效协同、技术普及性强，易可推广

案例	太湖 ^[47]	滇池 ^[48]	巢湖 ^[49]	波罗的海 ^[50,51]	乌尔米耶湖 ^[52]	维多利亚湖-鄱阳湖 ^[53]
劣势(W)	高成本、市场化推广滞后	高投入、市场化路径未明	技术门槛高、试点规模有限	地缘政治风险、协调效率低、体系辅助性差	依赖国际资金、生态基础条件薄弱	资金依赖性强、协调难度大
机会(O)	“双碳”战略、美丽河湖建设、长三角一体化发展、智慧技术赋能	循环经济、智能技术升级	政策资源叠加、科研热点、市场需求广	跨国治理需求上升、全球 NbS 模式普及	国际基金倾斜、水-粮食-生态安全议题备受关注	南南合作框架、国际基金关注、示范标杆带动
威胁(T)	发展与生态保护矛盾、气候变化干扰	市场收益不稳、气候升温影响	环境扰动大、技术标准未统一	地缘风险波动、污染治理周期长	持续干旱加剧、民生矛盾、外资供给不稳	受援国治理能力薄弱、发展矛盾突出
杠杆效应(L)	跨省协同，政策技术、推动生态价值转化	藻碳协同治理、循环经济政策	依托技术优势、扩大试点应用	依托制度优势、输出跨界治理经验	推广节水模式、放大共治优势	依托合作平台、输出适用技术
抑制性(C)	高运维成本、机制仍处于探索期	财政压力、市场未成熟	技术门槛高、规模化推广滞后	机制复杂、阻碍经验推广	基础薄弱、制约新业态发展	平台依赖、统筹能力不足、合作规模难以扩大
脆弱性(V)	极端天气、治理成效易受干扰	易受到市场、气候变化冲击、处理成本高	水文气温变化、修复易受干扰	地缘政治风险、合作体系易受冲击	干旱加剧、水资源压缩	治理成效受区域发展制约
问题性(P)	高投入低韧性结构性矛盾、抗风险能力弱	产业可持续弱、财政压力大	标准化程度不足、规模化推广受限	协作难度大，地缘风险阻碍进展	依赖外源、长期续存能力不足	资金依赖度高、治理短板制约长效性

SWOT-CLPV 综合分析结果如表 1 所示，六个典型案例在治理模式、制度设计、技术路径等方面各具特色，治理成功经验与共性短板并存。共性优势方面：国内外湖区均因地制宜搭建专属治理体系，国内湖泊依托跨域联防联控机制破解行政分割难题，跨境湖泊借助多边法治框架统筹全域治理；同时形成覆盖蓝藻资源化处置、浅水湖泊精准修复、农业节水降碳等多元技术体系，可针对性化解内源污染、面源污染、碳汇缺口等湖泊生态问题。各类治理模式兼顾水质改善、碳汇提升与民生保障等多重目标，生态与社会效益协同凸显，示范价值较强。共性劣势方面：首先，全域湖泊治理均面临高额运维成本，国内湖泊受区域财政差距制约，跨境湖泊依赖外部援助，内生资金造血能力不足；其次，治理普遍存在“重建设、轻运营”问题，治理副产物商业化转化通道闭塞，难以形成可持续资金闭环。此外，长效治理体系不完善，高端技术与基层运维能力存在错配，叠加地缘政治、气候变化、合作意愿等外部扰动，治理稳定性难以保障。

结合 CLPV 四维度来看，治理优势构成杠杆效应，内生短板形成抑制性约束，外部环境与湖泊先天禀赋带来脆弱性风险，短期治理模式弊端构成问题性短板。结合上述分析结果，我国湖泊减污降碳可从四个方面进行优化：一是放大杠杆效应，遵循制度先行、技术适配、市场驱动、多元共治的治理思路；二是消解抑制性约束，平衡区域财政差距，完善市场化运营与基层运维体系，弱化内部短板制约；三是抵御脆弱性风险，防范跨境地缘与资金波动风险，立足湖泊生态本底开展适配性治理；四是补齐问题性短板，摒弃短期项目式治理，杜绝域外制度盲目照搬，构建长效管控机制，规避内外风险叠加引发的治理失效困境。

3 我国湖泊减污降碳的政策演进与内生动力

3.1 湖泊减污降碳政策演进

我国湖泊减污降碳政策体系历经单一污染治理、生态修复导向、协同增效整合、减污降碳深化四个阶段，实现了从水质单目标管控向统筹降碳、减污、扩绿、增汇与生物多样性保护的系统治理转型。1992-2012 年为单一污染治理阶段，以工程措施开展点源截污、清淤及富营养化治理，聚焦水质达标与污染削减，未涉及碳循环与生态碳汇，治理目标单一。2013-2017 年进入生态修复导向，《水质较好湖泊生态环境保护总体规划（2013-2020 年）》推动湖泊治理由工程治污向生态保育、湿地恢复转变；2015 年《水污染防治行动计划》出台，确立流域综合治理与水生态功能恢复方向；2017 年湖长制全面推行，强化“一湖一策”精细化管控，湖泊定位提升为重要生态功能单元。2018-2022 年为协同增效的整合阶段，在山水林田湖草沙一体化保护和系统治理理念下，《减污降碳协同增效实施方案》将水生态系统固碳、碳汇发展纳入核心内容，明确通过生态修复阻断富营养化与温室气体排放的联动关系，在控藻减污的同时提升植物固碳与沉积物碳埋藏能力。

2023 年以来进入减污降碳深化阶段，《重点流域水生态环境保护规划》推动碳汇提升与生态修复深度耦合，《美丽河湖保护与建设行动方案（2025-2027 年）》统筹水环境、水资源、水生态“三水共治”，增强蓝碳与生态碳汇功能，重点区域减污降碳协同创新示范有序推进，生态环境法治建设为湖泊减污、控碳、增汇及生物多样性保护提供坚实保障。总体来看，我国湖泊治理实现了从人工干预为主向自然恢复为主、从单目标环境管理向多目标协同治理的历史性转变。湖泊作为“双碳”目标关键载体与美丽中国重要生态单元的地位日益凸显，为全球湖泊减污降碳协同治理提供了中国方案与实践范式。

3.2 湖泊减污降碳治理的内生动力

基于环境经济学与系统论视角，整合气候、生态及社会经济系统中多污染物与多介质耦合机制，是破解发展与环境矛盾的必由之路^[54,55]。减污降碳协同治理的核心在于放大生态与气候协同效益，实现多重效益叠加与资源配置优化^[19,56]。作为生态文明建设的关键载体与核心阵地，湖泊协同治理潜力贯穿降碳、减污、扩绿、增汇四大维度，亟须通过制度耦合、技术创新，系统性、全链条释放。宏观治理路径上，湖泊减污降碳协同治理需双向发力：一方面通过控源截污、农业面源治理、内源污染控制系统性削减污染负荷；另一方面，依托湖泊碳库功能，借助水生态修复稳定提升碳封存与碳汇能力^[57,58]。作为区域生态廊道与绿色空间骨架，湖泊可通过生态缓冲带建设、湖滨带修复、生物多样性保护等措施扩大生态空间，提升生态系统的多样性、稳定性和持续性，为减污降碳筑牢生态根基。

在此基础上，坚持系统观念，统筹减污、控碳、环境健康效益及区域经济社会等多重目标^[59,60]，以此作为释放湖泊扩绿与增长维度协同价值的行动先导。依托优质生态本底，推动生态产品价值实现、生态旅游、绿色种养、湿地碳汇等多元产业发展路径，促进“绿水青山”向“金山银山”转化，实现高水平保护与高质量发展的良性互动，释放湖泊在扩绿与增长维度的协同价值。最终，以一湖之治带动流域之变，形成生态保护、气候减缓、环境改善、经济增长与社会福祉提升的多重效益共赢的治理新格局。

4 湖泊减污降碳协同治理面临的困境

4.1 湖泊减污降碳的科学挑战

近年来全球气候变暖趋势显著，极端天气事件增多，对湖泊生态系统构成严重威胁^[61,62]。据统计，气候变暖促进全球湖泊藻华爆发频率以每年 1.8% 的速率增加，2015 年后增幅达到每年 4.6%^[63,64]。我国湖库藻华风险期明显延长，湖泊脱氧趋势加剧，面积小于 10 公顷的小

型湖泊，氧气水平恶化最为严重^[65]，甚至改变食用鱼类的营养状况与毒素状况，增加汞暴露^[66,67]。在生态系统响应方面，与藻华加剧相伴的是水生植被的持续退化。湖泊生态系统正面临向以浮叶植物、藻类等主导的低效碳汇形态转变的局面，水生植被呈现结构性退化，且阻隔型湖泊水生植被退化速度为通江型湖泊的三倍^[68]。我国是全球沉水植被面积减少的主要地区，全国浅水湖泊呈现出以沉水植被退化为主、挺水植被局部缓慢扩张的趋势^[69]，严重影响固碳能力与生物多样性。因此，气候变化加剧湖泊生态系统的脆弱性，即便实施严格营养盐管控，部分湖泊仍出现“污染削减而藻华加剧”的现象。这表明，单纯依赖外源污染削减已难以遏制湖泊生态退化，亟须从减污与降碳协同视角重构治理逻辑与技术路径。

4.2 湖泊减污降碳的技术瓶颈

现有湖泊减污降碳技术体系存在协同性不足、应用滞后等问题，难以实现污染治理与碳减排的同步推进。一是传统治理技术存在高碳短板，当前湖泊生态修复工程仍以削减氮磷等营养盐为首要目标，普遍缺乏对降碳协同效应的系统性考量。在技术路径上，机械清淤、化学除藻剂等能源密集型治理手段易形成高碳足迹治理模式，与减污降碳目标相悖。二是生态友好型技术推广不足。湖泊治理实践中，传统工程措施见效快、考核易量化，但重快效轻长效倾向明显。受生态修复技术效益显现周期较长影响，湿地营建、水生植被恢复等具有碳汇提升功能的生态修复技术应用有限，基于自然的解决方案（NbS）尚未得到广泛推广，高技术门槛与人才短缺形成了有设备、无人用的困境。三是多介质污染阻断技术存在短板，传统末端治理模式针对分散性、隐蔽性、随机性强的面源污染难以奏效，如大气沉降、含化肥与农药残留地下水渗透等面源污染，缺乏有效的阻断技术手段，削弱了点源治理的成效，制约了湖泊生态修复的整体效能。

4.3 湖泊减污降碳的政策困境

湖泊减污降碳协同治理相关政策体系不完善，缺乏系统性、协同性设计，难以支撑协同治理的规范化推进。一是缺乏专项协同规划。相较于森林、海洋等生态系统，湖泊领域尚未出台针对湖泊尺度减污降碳协同增效的中长期战略规划与专项行动方案，未能将污染物与温室气体协同减排、湖泊碳汇能力提升纳入统一治理框架。二是标准体系适配性不足。《河湖健康评价规范》（SL/T 793-2025）在河湖生态系统综合评价方面实现了行业层面的更新完善，但在国家层面，现行水质标准体系仍以静态阈值框架为主，缺乏对气候变暖、极端天气事件等动态压力的适应性设计。湖泊水生生物、沉积物、重金属及新型污染物管控等方面的国家标准存在空白，难以全面、精准反馈水生态安全状况。三是空间统筹不足，部分湖泊治理规划与空间管控、区域资源承载力脱节，未能统筹考虑湖泊生态功能、生物多样性保护以及流域社会经济活动的合理空间布局，导致湖泊水体、湖滨带、入湖河流及周边陆域保护与修复被人为割裂，削弱了湖泊减污降碳协同治理的整体效能。

4.4 湖泊减污降碳的制度障碍

流域协同治理机制不完善，湖泊减污降碳协同治理“碎片化”现象明显。一是跨部门协同机制缺失，湖泊水环境管理涉及水利、水务、生态环境、住建等多个部门，各部门缺乏有效的联动与政策协同机制，执法主体权责不明、职责界限模糊，易出现污染控制与碳减排割裂的情况。二是跨区域协同管控机制不完善，湖泊上下游、左右岸的生态管控标准不统一，排污限值不一致，易造成污染跨区域转移，难以实现全流域协同减污降碳。湖泊监测网络覆盖不足，监测要素、精度、密度及实时性无法满足精准化管控需求，削弱了协同治理的科学性与有效性。三是碳汇开发与保障机制滞后，重点区域湖泊碳汇资源开发不足，关键区域湖泊碳收支基础研究薄弱、碳汇交易与生态补偿机制不健全，核算认证体系不完善。湖泊碳汇缺

乏规模化示范效应，湖泊碳收支本底不清、市场化交易机制与多元化生态补偿机制尚未有效建立，共同制约了湖泊固碳增汇潜力的释放。

5 湖泊减污降碳协同增效对策建议

基于我国湖泊减污降碳协同治理面临的困境与 SWOT-CLPV 模型分析结果，本研究紧扣跨域协同、技术集成、制度规范、市场激励、分类施策等核心逻辑，结合我国湖泊流域生态特征与治理实际，提出以下对策建议。

5.1 技术层面：坚持低碳导向，构建减污降碳协同技术体系

一是夯实学科技术支撑，深化 NbS 生态修复模式。依托湖沼学、气候学、环境科学等交叉攻关，厘清气候变化与人为干扰对湖泊碳库、碳通量的影响机理，筑牢碳汇量化评估科学根基。推进湿地营建、沉水植被重建等举措，复制漏湖碳通量精准诊断范式，搭建湖泊碳源汇动态识别技术体系，扭转“重工程、轻生态”倾向，充分释放湖泊碳汇潜力。二是淘汰高碳治理路径，推广低碳协同技术。逐步替代机械清淤、化学除藻等高能耗、高碳足迹手段，借鉴滇池藻水分离与石墨烯微滤、太湖“水下森林”、漏湖生态清淤与沉水植物修复等成熟技术模式，将降碳增汇目标全面纳入生态修复工程设计核心，实现氮磷污染管控与碳排放削减的同步增效。三是补齐面源污染与多介质污染阻断技术短板，夯实协同治理基础。借鉴乌尔米耶湖精准灌溉、水肥一体化经验，强化农业面源污染前端拦截与源头减量；构建大气沉降、地下水渗透、入湖河流输入多介质预警系统，补齐分散源、隐蔽源治理短板，形成点源一面源一内源协同控制技术链。

5.2 政策层面：强化顶层设计，完善湖泊减污降碳专项政策框架

一是编制湖泊减污降碳专项规划，构建统一治理框架。科学制定湖泊流域减污、降碳、增汇与资源循环利用中长期专项规划，将 CO₂、CH₄ 等温室气体协同控制与碳汇提升纳入刚性目标，借鉴波罗的海跨国立法与目标约束经验，形成规划引领、阶段推进、量化考核的政策体系，明确各阶段治理任务与责任主体。二是优化标准体系，提升政策适配性与治理精准度。修订现有静态水质标准，增设水温阈值、湖泊热浪、极端降水等气候适应性监测评价指标，严格对接《河湖健康评价规范》；建立湖泊新型污染物、沉积物、水生生物管控清单与配套标准，填补管控空白，提升治理精准度。三是推进全域空间统筹，破解条块分割实施矛盾。坚持流域整体性治理原则，统筹湖泊水体、湖滨带、入湖河流及周边陆域空间，科学划定湖泊生态保护红线与生态空间管控边界；建立“速效工程”负面清单，推动治理模式从人工干预向生态系统自我维持转型，实现治理措施与空间管控深度协同。

5.3 机制层面：健全流域统筹，构建跨区域跨部门协同治理机制

一是健全跨部门协同机制，消除治理“孤岛”现象。明确水利、生态环境、住建、农业农村等相关部门权责边界，依托河湖长制建立跨部门协同工作专班，推行任务清单管理与问责机制，复制太湖跨区域联合执法、协同管控模式，进一步推动污染控制与碳减排统一部署、统一监管，统一考核。二是完善跨区域联防联控机制，实现全流域标准统一。借鉴波罗的海统一监测、统一执法与太湖苏浙沪联防联控经验，统一上下游排污限值、监测指标与考核标准；整合各部门资源，构建空天地水一体化智能监测平台，打通数据壁垒，实现异常排污智能识别、精准溯源与快速处置。三是创新碳汇开发与市场化保障机制，激活增汇内生动力。系统开展青藏高原、三江源、长江流域等重点区域湖泊碳收支本底调查，推广太湖碳汇监测+碳交易、滇池藻碳资源化利用等成熟模式，建立科学规范的湖泊碳汇核算、认证与交易体系；完善生态补偿、碳汇补偿多元化激励机制，破解碳汇开发不足、市场机制缺失难题，推动生态优势向经济优势转化。

6. 结论

立足“双碳”目标与美丽中国建设纵深推进的背景，湖泊作为流域生态系统的核心载体与重要碳库，实施减污降碳协同增效是破解湖体富营养化治理瓶颈、兼顾生态保护与高质量发展的必然路径。本文系统阐释了湖泊减污降碳协同增效的理论内涵与政策演进逻辑，明确了湖泊在“降碳、减污、扩绿、增长”中的核心功能，基于典型案例剖析，分别从技术、政策、机制三个层面识别治理困境，提出适配我国湖泊禀赋特征的减污降碳协同治理路径。主要结论如下：

（1）我国湖泊治理已取得阶段性成效，但仍存在协同体系不完善、考核偏重水质指标、生态碳汇价值未能充分显现、低碳技术集成应用不足等突出问题。

（2）依托国内外典型治理案例与 NbS 理念，进一步推动湖泊治理实现三大转型：由单一控污向减污降碳协同转型、由工程驱动向制度与科技双轮驱动转型、由分段碎片化治理向全流域一体化治理转型。

（3）建议进一步夯实学科技术支撑、出台湖泊领域减污降碳协同专项政策、健全碳汇核算与生态补偿机制，进一步推动流域一体化治理，为美丽河湖建设提供长效保障。

为充分发挥湖泊在减污降碳协同增效中的潜力，未来可聚焦湖泊碳汇精准核算、跨区域生态补偿机制完善、低碳技术集成与场景应用等方向，增强湖泊气候韧性，持续完善理论体系与实践落地，以期为我国湖泊生态环境治理体系和治理能力现代化、助力“双碳”战略目标实现提供科学依据与决策支持。

参考文献

- [1] 于贵瑞, 朱剑兴, 徐丽, 等. 中国生态系统碳汇功能提升的技术途径: 基于自然解决方案. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 490-501. [YU Gui-rui, ZHU Jian-xing, XU Li, *et al.* Technological approaches to enhance ecosystem carbon sink function in China: Nature based solutions. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(4): 490-501.]
- [2] GRASSET C, MESMAN J P, TRANVIK L J, *et al.* Contribution of lake littoral zones to the continental carbon budget[J]. Nature Geoscience, 2025, 18(8): 747-752.
- [3] ZHU Z, WU H, XIAO Q, *et al.* Exploring the spatiotemporal carbon fluxes in a typical subtropical shallow lake using a modified LAKE model[J]. Water Resources Research, 2026, 62(4): e2024WR039546.
- [4] DELSANTRO T, BEAULIEU J J, DOWNING J A. Greenhouse gas emissions from lakes and impoundments: Upscaling in the face of global change[J]. Limnology and Oceanography Letters, 2018, 3(3): 64-75.
- [5] LI S, BUSH R T, SANTOS I R, *et al.* Large greenhouse gases emissions from China's lakes and reservoirs[J]. Water Research, 2018, 147: 13-24.
- [6] XIAO Q, XU X, QI T, *et al.* Lakes shifted from a carbon dioxide source to a sink over past two decades in China[J]. Science Bulletin, 2024, 69(12): 1857-1861.
- [7] YAO F, LIVNEH B, RAJAGOPALAN B, *et al.* Satellites reveal widespread decline in global lake water storage[J]. Science, 2023, 380(6646): 743-749.
- [8] ZHANG S, ARHONDITSIS G B, JI Y, *et al.* Climate change promotes harmful algal blooms in China's lakes and reservoirs despite significant nutrient control efforts[J]. Water Research, 2025, 277: 123307.
- [9] 张运林, 秦伯强, 朱广伟, 等. 论湖泊重要性及我国湖泊面临的主要生态环境问题[J]. 科学通报, 2022, 67(30): 3503-3519. [ZHANG Yun-lin, QIN Bo-qiang, ZHU Guang-wei, *et al.* On the importance of lakes and the major ecological and environmental issues of lakes in China. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(30): 3503-3519]
- [10] LOEWEN C J G. Lakes as model systems for understanding global change[J]. Nature Climate Change, 2023,

13(4): 304-306.

- [11] WANG Y, ZHAO D, WOOLWAY R I, *et al.* Algal blooms intensify in global large lakes over the past two decades[J]. National Science Review, 2025: nwaf011.
- [12] ZHAO Z, YANG J, MA Z, *et al.* Achieving urban synergistic governance of carbon, air pollution, solid waste, and water resources: lessons from 289 cities in China[J]. Carbon Footprints, 2026, 5(1).
- [13] YANG J, ZHAO Z, FANG W, *et al.* China's progress in synergetic governance of climate change and multiple environmental issues[J]. PNAS Nexus, 2024, 3(9): e351.
- [14] SUN K, JIA J, WANG S, *et al.* Real-time and dynamic estimation of CO₂ emissions from China's lakes and reservoirs[J]. The Innovation Geoscience, 2023, 1: 100031-1.
- [15] Wu F T, An S L, Liu J J, *et al.* Macrophyte restoration alters sedimentary organic matter-microbes-environment interactions and enhances carbon sequestration in lake sediment[J]. Water Research, 2026: 125658.
- [16] ZHANG G, YAO T, CHEN W, *et al.* Regional differences of lake evolution across China during 1960s—2015 and its natural and anthropogenic causes[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 221: 386-404.
- [17] LI S, XIAO X, LIU G, *et al.* Satellite images reveal reduced lake chlorophyll concentration and eutrophication in China[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2026, 232: 353-368.
- [18] ZHANG Y, SHI K, WOOLWAY R I, *et al.* Climate warming and heatwaves accelerate global lake deoxygenation[J]. Science Advances, 2025, 11(12): eadt5369.
- [19] LI S, WANG S, WU Q, *et al.* Integrated benefits of synergistically reducing air pollutants and carbon dioxide in China[J]. Environmental Science & Technology, 2024, 58(32): 14193-14202.
- [20] FU X, CHENG J, PENG L, *et al.* Co-benefits of transport demand reductions from compact urban development in Chinese cities[J]. Nature Sustainability, 2024, 7(3): 294-304.
- [21] 陆敏, 徐好, 陈福兴. “双碳”背景下碳排放交易机制的减污降碳效应[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(11): 121-133. [LU Min, XU Hao, CHEN Fu-xing. Pollution and carbon reduction effects of the carbon emissions trading mechanism in the context of the ‘dual carbon’ goals [J]. China population, resources and environment, 2022, 32(11): 121-133.]
- [22] 赵曼仪, 王科. 减污降碳协同效应综合评估的研究综述与展望[J]. 中国人口·资源与环境, 2024, 34(2). [ZHAO Man-yi, WANG, K. Comprehensive evaluations of the synergistic effects of carbon emission reduction and air pollution control: a literature review[J]. China population, resources and environment, 2024, 34(2): 58-69.]
- [23] HUANG Y, WU Y, YU X, *et al.* Cross-media Transfer Footprint Control for Sustainable Environment Management—A Perspective from Wastewater Treatment[J]. Water Research, 2025: 125093.
- [24] 姚程, 王谦, 姜霞, 等. 湖泊生态系统碳汇特征及其潜在碳中和价值研究[J]. 生态学报, 2023, 43(3): 893-909. [YAO Cheng, WANG Qian, JIANG Xia, *et al.* Review of lake ecosystem's characteristics of carbon sink and potential value on carbon neutrality. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(3): 893-909.]
- [25] 高扬, 王朔月, 陆瑶, 等. 区域陆-水-气碳收支与碳平衡关键过程对地球系统碳中和的意义. 中国科学: 地球科学, 2022, 46: 1482. [GAO Yang, WANG Shuo-yue, LU Yao, *et al.* Carbon budget and balance critical processes of the regional land-water-air interface: Indicating the earth system's carbon neutrality. Science China Earth Sciences, 2022, 52(7): 1482.]
- [26] HASHEMI M G Z, SHAAD K, GRIFFEY V, *et al.* Mapping global freshwater ecosystems to guide national restoration targets and nature-based solutions[J]. Nature Water, 2026: 1-11.
- [27] TROLLE D, STAEHR P, DAVIDSON T, *et al.* Seasonal dynamics of CO₂ flux across the surface of shallow temperate Lakes[J]. Ecosystems, 2012, 15: 336-347.
- [28] WEN Z, SONG K, SHANG Y, *et al.* Carbon dioxide emissions from lakes and reservoirs of China: A regional

- estimate based on the calculated pCO_2 [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 170: 71-81.
- [29] BARTOSIEWICZ M, MARANGER R, PRZYTULSKA A, *et al.* Effects of phytoplankton blooms on fluxes and emissions of greenhouse gases in a eutrophic lake[J]. *Water Research*, 2021, 196: 116985.
- [30] BASTVIKEN D, TRANVIK L, DOWNING J, *et al.* Freshwater methane emissions offset the continental carbon sink[J]. *Science*, 2011, 331: 50-50.
- [31] ATTERMEYER K, FLURY S, JAYAKUMAR R, *et al.* Invasive floating macrophytes reduce greenhouse gas emissions from a small tropical lake[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 20424.
- [32] PEIXOTO R B, MAROTTA H, BASTVIKEN D, *et al.* Floating aquatic macrophytes can substantially offset open water CO_2 emissions from tropical floodplain lake ecosystems[J]. *Ecosystems*, 2016, 19: 724-736.
- [33] XIAO Q, XU X, DUAN H, *et al.* Eutrophic Lake Taihu as a significant CO_2 source during 2000–2015[J]. *Water Research*, 2020, 170: 115331.
- [34] YIN Y, CI Z, QIN M, *et al.* Potential of submerged macrophytes restoration for reducing CH_4 and CO_2 emissions in a typical urban lake[J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, 380: 124919.
- [35] CHEN H, XING P, KAO S, *et al.* Macrophyte restoration promotes lake microbial carbon pump to enhance aquatic carbon sequestration[J]. *Global Change Biology*, 2025, 31(2): e70086.
- [36] WU H, HAO B, JO H, *et al.* Seasonality and species specificity of submerged macrophyte biomass in shallow lakes under the influence of climate warming and eutrophication[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 678259.
- [37] LI B, XING P, WU Q L. Synergistic alleviation of lake eutrophication and carbon emission by macrophyte restoration[J]. *The Innovation*, 2025, 6(12):101044.
- [38] HONG L, HU C, JIANG M, *et al.* Long-term carbon dioxide dynamics variability at submerged macrophyte habitat of a subtropical shallow lake[J]. *Journal of Hydrology*, 2025: 133950.
- [39] 陈敏, 黄谦, 李坎. SWOT-CLPV 矩阵在战略博弈分析中的应用[J]. *指挥控制与仿真*, 2019, 41(3): 14-18. [CHEN Min, HUANG Qian, LI Kan. Application of SWOT-CLPV matrix in strategic game analysis. *Command Control & Simulation*, 2019, 41(3): 14-18.
- [40] 徐千惠, 闻杰. SWOT-AHP-TOPSIS 分析模型应用于军事决策分析的实施流程与价值评估[J]. *科技情报研究*, 2021, 3(3): 87-102. [XU Qian-hui, WEN Jie. Implementation process and value evaluation of SWOT-AHP-TOPSIS analysis model in military decision analysis. *Journal of Intelligence and Information*, 2021, 3(3): 87-102.]
- [41] 郑明喆. 基于 SWOT-CLPV 模型的安康富硒茶区域品牌建设对策研究[J]. *湖北农业科学*, 2021, 60(9): 180-184. [ZHENG Ming-zhe. Countermeasure research on regional brand construction of Ankang selenium-rich tea based on SWOT-CLPV model. *Hubei Agricultural Sciences*, 2021, 60(9): 180-184.]
- [42] 赵祎, 王金叶. SWOT 分析法下汤河湿地旅游发展对策探讨[J]. *中南林业科技大学学报 (社会科学版)*, 2015, 9(6): 70-73. [ZHAO Yi, WANG Jin-ye. Discussion on tourism development countermeasures of Tanghe Wetland under SWOT analysis method. *Journal of Central South University of Forestry & Technology (Social Sciences)*, 2015, 9(6): 70-73.]
- [43] 杨立华, 李志刚. 公共管理案例研究方法的基本路径[J]. *郑州大学学报 (哲学社会科学版)*, 2022, 55(4): 12-18, 127. [YANG Li-hua, LI Zhi-gang. The basic path of case study method in public management. *Journal of Zhengzhou University (Philosophy and Social Sciences Edition)*, 2022, 55(4): 12-18, 127.]
- [44] 姜雅婷, 于文轩. 从追踪过程到过程追踪: 重塑公共管理纵向案例研究的旨趣[J]. *中国行政管理*, 2025(3). [JIANG Ya-ting, YU Wen-xuan. From tracing process to process tracing: reshaping the purport of longitudinal case study in public management. *Chinese Public Administration*, 2025(3).]
- [45] 李大宇, 黄欣卓. 新型案例研究的认识论与方法论[J]. *公共管理学报*, 2024(3): 162-166, 176. [LI Da-yu, HUANG Xin-zhuo. Epistemology and methodology of new type case study. *Journal of Public*

Management, 2024(3): 162-166, 176.]

- [46] 张建民, 何宾. 案例研究概推性的理论逻辑与评价体系——基于公共管理案例研究样本论文的实证分析[J]. 公共管理学报. [ZHANG Jian-min, HE Bin. Theoretical logic and evaluation system of generalizability in case study: an empirical analysis based on sample papers of public management case studies. Journal of Public Management.]
- [47] 江苏省生态环境厅. 2025 年太湖治理成效显著 [EB/OL]. (2026-04-20)[2026-04-20]. http://sthjt.jiangsu.g-ov.cn/art/2026/4/20/art_84028_11759969.html.
- [48] 昆明日报. 多项主要指标改善显著 滇池水质创 1993 年来最好水平 [EB/OL]. (2026-02-09)[2026-04-20]. <https://www.km.gov.cn/c/2026-02-09/5056498.shtml>.
- [49] 江苏省生态环境厅. 太湖碳源转碳汇精准治理实践 [EB/OL]. (2025-09-23)[2026-04-20]. http://sthjt.jiangsu.gov.cn/art/2025/9/23/art_84025_11645996.html.
- [50] HELCOM. COMBINE Manual[EB/OL]. [2026-04-20]. <https://helcom.fi/baltic-sea-trends/monitoring-and-assessment/monitoring-programmes-and-guidelines/combine-manual/>.
- [51] 王碧玥, 孟梦, 孟延春, 等. 欧盟跨边界合作倡议对波罗的海地区环境治理空间尺度重构的影响[J]. 国际城市规划, 2023, 38(5):12-21. [WANG Bi-yue, MENG Meng, MENG Yan-chun, *et al.* The influence of European transnational cooperation initiatives on the spatial rescaling of environmental governance in the Baltic Sea Region. Urban Planning International, 2023, 38(5): 12-21]
- [52] UNDP. Joint effort for conservation of Iranian wetlands project[EB/OL]. [2026-04-20]. <https://www.u-ndp.org/iran/news/story-joint-effort-conservation-iranian-wetlands-project>.
- [53] 中国网. 中非两大湖“牵手”合作入选联合国南南合作优秀案例[EB/OL]. (2026-03-24)[2026-04-20]. [h-ttp://cn.chinagate.cn/environment/2026-03/24/content_118398460_11.shtml](http://cn.chinagate.cn/environment/2026-03/24/content_118398460_11.shtml).
- [54] ZHANG M, HE H, ZHANG L, *et al.* Ecosystem engineering and global changes are increasingly enhancing China's terrestrial carbon sinks[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2025, 223: 108514.
- [55] LUO Y, YANG D, O'CONNOR P, *et al.* Dynamic characteristics and synergistic effects of ecosystem services under climate change scenarios on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 2540.
- [56] WEN W, DENG Z, MA X, *et al.* Analysis of the synergistic benefits of typical technologies for pollution reduction and carbon reduction in the iron and steel industry in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 12413.
- [57] WANG L, XUE W, SI J, *et al.* Synergizing pollution control and carbon reduction in China's Yellow River Basin: Exploring the roles of policy, technology, and structural transformation[J]. Land Use Policy, 2025, 157: 107669.
- [58] 陈敏鹏, 文皓薇. 全球多边环境治理中“共同但有区别责任”原则的演变逻辑及趋势——以《联合国气候变化框架公约》和《生物多样性公约》为例. 生态学报, 2025, 45(16): 8253-8265. [CHEN Min-peng, WEN Hao-wei. Evolution and trends “Common but Differentiated Responsibilities” in global multilateral environmental governance: case studies of the United Nations Framework Convention on Climate Change and Convention on Biological Diversity. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(16): 8253-8265.]
- [59] ZHENG Y, CAO W, ZHAO H, *et al.* Identifying Key Sources for Air Pollution and CO₂ Emission Co-control in China[J]. Environmental Science & Technology, 2024, 58(35): 15381-15394.
- [60] QIN Y, ZHOU M, HAO Y, *et al.* Amplified positive effects on air quality, health, and renewable energy under China's carbon neutral target[J]. Nature Geoscience, 2024, 17(5): 411-418.
- [61] HUANG L, WOOLWAY R I, TIMMERMAN A, *et al.* Emergence of lake conditions that exceed natural temperature variability[J]. Nature Geoscience, 2024, 17(8): 763-769.
- [62] ABDELHADY H U, FUJISAKI-MANOME A, CANNON D, *et al.* Climate change-induced amplification of

- extreme temperatures in large lakes[J]. *Communications Earth & Environment*, 2025, 6(1): 375.
- [63] WANG H, LIU T, XU H, *et al.* Synergy of carbon-pollution-ecology—The future of synergetic reduction of pollution and carbon emissions[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2025, 114: 107931.
- [64] ZHANG Y, ZHU J, HU W, *et al.* Restoring Shallow Lakes by Constructing Pollution Absorption Zone: Practices and Insights[J]. *Environmental Science & Technology*, 2025, 59(51): 27777-27785.
- [65] MA Y, WANG J, HUO S, *et al.* Explainable machine learning reveals climate warming increases risk of algal blooms in lakes and reservoirs[J]. *Water Research*, 2025, 287(Part B): 10.
- [66] JANSEN J, SIMPSON G L, WEYHENMEYER G A, *et al.* Climate-driven deoxygenation of northern lakes[J]. *Nature Climate Change*, 2024, 14(8): 832-838.
- [67] JANE S F, HEILPERN S A, BRENNAN J T, *et al.* Climate-driven deoxygenation of lakes alters the nutrient-toxin profile of a food fish[J]. *Environmental Science & Technology*, 2025, 59(19): 9486-9496.
- [68] ZHAO X, ZHANG Y, TANG H, *et al.* Water quality improvements and ecological inertia: A basin-wide assessment of ecosystem recovery in the Yangtze River system (2005–2022)[J]. *Ecological Indicators*, 2025, 176: 113700.
- [69] LUO J, DUAN H, XU Y, *et al.* Global trends and regime state shifts of lacustrine aquatic vegetation[J]. *The Innovation*, 2025, 6(3).

作者简介: 洪蕾(1988-), 女, 江苏盐城人, 助理研究员, 博士. 主要从事气候变化、减污降碳协同增效, 湖泊碳循环等方面研究工作。Email:honglei@nies.org