

姜立坤, 李帅冉, 郭彦青, 等. 模型在湖泊咸化研究中的应用: 研究现状与展望[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(1): 160-170. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.012

JIANG Likun, LI Shuiran, GUO Yanqing, et al. Applications of models in lake salinization research: Current status and prospects [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(1): 160-170. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.012

模型在湖泊咸化研究中的应用: 研究现状与展望

姜立坤¹, 李帅冉¹, 郭彦青², 高 娟³, 韩峻丞¹, 薛祥山³, 杨昊天¹,
朱广晟¹, 王 鹏⁴, 豆俊峰¹

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 内蒙古自治区水利科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010051; 3. 中国城市建设研究院有限公司, 北京 100120; 4. 大连工业大学机械工程和自动化学院, 辽宁 大连 116034)

摘要:【目的】湖泊咸化在全球气候变化与人类活动影响下日益严峻, 对生态和水资源造成严重威胁。为了更好地了解模型在湖泊咸化研究领域的研究现状, 总结研究趋势。【方法】本研究运用文献计量工具 VOSviewer, 以 Web of Science 核心合集数据库为数据来源, 对 1900 年至今湖泊咸化与模型研究领域的文献进行计量分析。【结果】结果显示: 文献计量可视化结果呈现明显阶段性变化趋势, 该领域在多个研究方向呈现交叉特点, 总结形成该领域的热点话题, 并根据关键词突变结果解析研究趋势形成展望。结果表明, 该领域发展历经缓慢探索期、平稳发展期和快速增长期, 2009 年后受气候变化研究热潮影响, 发文量快速增长, 未来预计持续上升。研究热点集中于生态系统、环境变化和水模型等领域。关键词分析表明, 研究正朝着综合化方向发展, 多学科知识与方法的整合愈发关键。在未来, 高海拔与干旱地区(如青藏高原和新疆)的湖泊咸化问题将受到更多关注, 遥感、机器学习等新兴技术将广泛应用于湖泊盐度演变分析与水资源管理, 推动该领域研究进一步深入。【结论】全面梳理了该领域在水文学、地质学和生态学的研究现状, 明确了研究热点与趋势, 为湖泊生态保护和水资源可持续利用提供科学依据。

关键词: 湖泊咸化; 文献计量; 模型研究; 气候变化; 研究热点; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.012

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: X524

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)01-0160-11



Applications of models in lake salinization research: Current status and prospects

JIANG Likun¹, LI Shuiran¹, GUO Yanqing², GAO Ran³, HAN Juncheng¹, XUE Xiangshan³,
YANG Haotian¹, ZHU Guangsheng¹, WANG Peng⁴, DOU Junfeng¹

(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Institute of Water Resources Research of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China; 3. China Urban Construction

收稿日期: 2025-02-18; 修回日期: 2025-03-27; 录用日期: 2025-03-28; 网络出版日期: 2025-04-07

基金项目: 内蒙古自治区水利科技项目(NSK202403); 北京师范大学博一学科交叉基金项目(BNUXKJC2425); 国家重点研发计划项目(2019YFC0409201)

作者简介: 姜立坤(1998—), 男, 博士研究生, 主要从事湖泊生态演化研究。E-mail: jianglikun59@163.com

通信作者: 豆俊峰(1975—), 男, 教授, 博士, 主要从事地下水污染修复研究。E-mail: doujif@bnu.edu.cn

郭彦青(1987—), 男, 博士, 主要从事水文及水环境研究。E-mail: guoyanqing563650@163.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Design and Research Institute, Beijing 100120, China; 4. School of Mechanical Engineering and Automation, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, Liaoning, China)

Abstract: [Objective] Lake salinization has become increasingly severe due to global climate change and human activities, posing significant threats to ecosystems and water resources. The aims are to evaluate the current status of model research on lake salinization and summarize research directions. [Methods] Bibliometric tool VOSviewer was employed, with Web of Science Core Collection database serving as the data source, to conduct a quantitative analysis of publications in the field of lake salinization and model research spanning from 1900 to present. [Results] The result showed that the bibliometric visualization exhibited distinct phased changes. The research domain showed interdisciplinary characteristics across multiple directions. Key research hotspots were systematically summarized, and future trends were projected based on keyword burst detection analysis. The results demonstrated that the field went through three developmental phases: a slow exploration phase, a stable development phase, and a rapid growth phase. Since 2009, influenced by heightened interest in climate change research, the volume of publications surged with sustained increases projected for the future. Research hotspots included ecosystem dynamics, environmental variation, and hydrological modeling. Keyword burst analysis highlighted a transition toward integrated research, with interdisciplinary knowledge synthesis and methodological integration becoming increasingly crucial. Future research is anticipated to focus on salinization in high-altitude and arid regions (e. g., Qinghai-Xizang Plateau and Xinjiang). Cutting-edge technologies such as remote sensing and machine learning are expected to be widely applied for salinity dynamics analysis and water resource management, thereby promoting advancements in this field. [Conclusion] Current research status of this field across hydrological, geological, and ecological disciplines is comprehensively reviewed, with research hotspots and emerging trends identified, providing a scientific foundation for ecological conservation and sustainable water resource utilization in lakes.

Keywords: lake salinization; bibliometrics; model research; climate change; research hotspots; influencing factors

0 引言

湖泊作为地球表层系统各圈层相互作用的关键节点, 在区域气候调节、水循环维持以及生态系统与生物多样性平衡中发挥着不可或缺的作用。咸化湖泊不仅蕴含着构造及古气候变化的关键信息, 还是钾、锂、硼等盐类矿产的重要蕴藏地, 并可形成陆相优质烃源岩, 其在页岩油勘探中, 细粒沉积岩更是研究热点^[1]。湖泊咸化由海水盐分衍生、内陆蒸发浓缩、深部热液流体输入等多种机制引发^[2-5], 在全球范围内, 气候变化与人类活动共同加速了这一进程。气候变暖致使降水模式改变、蒸发量增加, 进而导致湖泊水位下降、盐度上升; 农业灌溉、水资源开发利用等人类活动减少了入湖水量, 还可能带入大量盐分; 矿产资源开发、工业污染排放等也加剧了湖泊咸化^[6-7]。当前湖泊咸化问题日益严峻, 深入研究刻不容缓。

近年来, 我国在河湖生态治理和水资源调控方面持续推进系统化与精细化管理, 通过实施河湖长制、河湖生态补水、母亲河复苏行动等举措, 逐步构建了较为完善的湖泊生态修复框架^[8]。在河流断流风险上升、降水空间分布不均等背景下, 对重点河湖实施生态补水与调水调度已成为维持水生态系统健康的重

要措施, 相关实践显示补水可有效改善水动力条件、提升水体交换能力, 并促进水生植被恢复^[9]。随着流域治理进入精细化阶段, 数字孪生流域技术被广泛应用于河湖状态监测与预警, 可将遥感、水文监测、三维地形与自主观测数据进行融合, 在虚拟环境中模拟水量、水质与补水方案的响应过程, 从而提升湖泊治理方案的可靠性与可视化决策水平^[10]。在湖泊生态环境问题方面, 近年来针对富营养化、蓝藻水华、咸化趋势等关键问题开展了大量研究, 通过改进水华预警模型、强化污染减排措施和提升原位修复技术能力, 部分湖泊(如太湖)在氮磷负荷削减和水华处置方面取得了阶段性成效^[11]。

在湖泊咸化研究中, 模型是理解和预测湖泊盐度演变的核心工具。通过模拟水体和盐分动态变化, 整合多种环境因素, 揭示咸化复杂机制。在湖泊盐度管理中模型具有诸多优势, 可实时监测和预警湖泊盐度变化, 为水资源管理和生态保护提供决策支持。1977年, LASHKARI等^[12]率先提出使用盐度与生化需氧量(Biochemical Oxygen Demand, BOD)控制模型, 用于协调美国犹他湖流域城市与农业部门的污染控制活动。SEITZINGER等^[13]开发模型来探究淡水湖泊与海洋沉积物中盐度对可交换铵态氮浓度及底栖氮循环的影响。1991年, BOERS等^[14]在《Water Research》发

表利用矿化模型研究荷兰 Loosdrecht 湖离子浓度对磷释放影响的成果。同年, FRITZ 等^[15]运用基于硅藻的盐度变化重建传递函数, 对美国北达科他州魔鬼湖晚冰期和全新世沉积记录的盐度进行重建, 该模型的实用性得到证实, 引发学界对湖泊研究方法的广泛关注, 这也奠定了该领域未来发展的基础。近年来, 遥感技术、大数据分析和机器学习等新兴技术的发展, 为湖泊盐度模型的研究开拓了新方向。

本综述基于前人研究, 运用文献计量工具 VOSviewer^[16], 以 Web of Science (WOS) 核心合集数据库为数据来源, 对该领域 1900 年至今的相关文献进行计量及可视化分析, 旨在全面把握该领域研究现状, 归纳研究热点, 预测未来发展趋势, 为相关研究提供参考, 为湖泊生态保护和水资源可持续利用提供科学依据。

1 文献计量分析

1.1 文献收集

数据来源是 WOS 核心合集数据库, 引文索引选择 Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED), 高级检索中输入的检索式 $TS = [(Lake\ mineralisation)\ OR\ (Lake\ sali^*)]\ AND\ TS = ((Model)\ OR\ (ecological\ model))$, 时间跨度为 1900 年至今, 文献类型选择论文和综述论文, 文献的语种规定为英语, 经筛选去重后得到 3 124 篇文献。

1.2 发文分析

发文量能够直观反映一个研究领域的热度与活跃度。在 1977—2024 年这 48 年间, 湖泊咸化与模型研究领域共收集到 3 124 篇论文, 其中研究性论文 2 996 篇, 综述性论文 128 篇。这期间, 该领域受关注程度随时间波动, 年度发文量清晰展现了其发展态势。从年度发表量的变化来看, 可分为三个阶段。

如图 1 所示, 第一阶段是 1977—1990 年的缓慢探索期。此阶段年度发表量增长极为缓慢, 年发文量均未超 10 篇, 平均年发文量仅 4.2 篇。第二阶段为 1991—2008 年的平稳发展期。这一时期年平均发文量达到 45.5 篇, 相较于第一阶段有了显著的提升。期间诸多学者取得重要研究成果。第三阶段发展迅猛是该研究领域的快速增长期 (2009—2024 年), 平均年发文量为 140.69 篇, 仅 2023 年就发表 213 篇论文, 彰显出湖泊咸化问题备受国际学者关注。此 16 年间共发表 2 251 篇论文, 而平稳发展阶段 (1991—2008 年) 共发表 819 篇, 缓慢探索阶段 (1977—1990 年) 累计发表量仅 54 篇。随着全球气候问题日益严

峻, 气候变化已成为湖泊咸化的重要驱动因素之一。关于气候变化基于此, 预计未来湖泊咸化及相关生态模型研究的学术文章将持续增长, 深入研究该领域对揭示气候变化与湖泊生态系统响应机制意义重大。

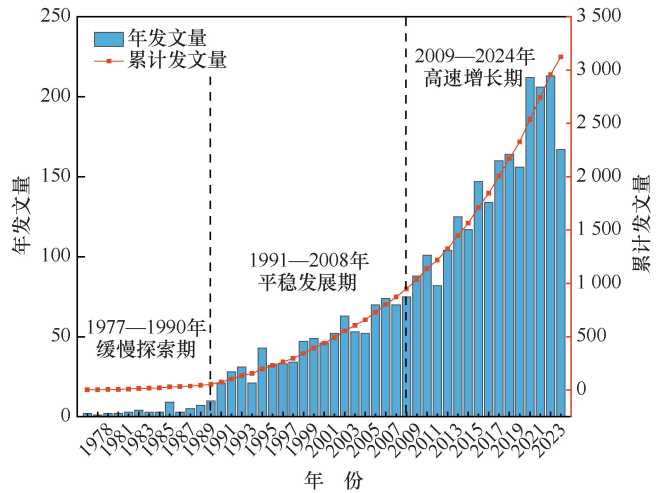


图 1 1977—2024 年湖泊咸化与模型研究发文量

Fig. 1 Volume of publications on lake salinization and model research (1977—2024)

1.3 关键词分析

关键词是论文的关键构成, 既能体现研究领域的核心思想, 也能反映研究热点, 故而关键词分析有助于预测研究前沿的变化。基于 VOSviewer 生成的湖泊咸化与模型研究领域关键词共现网络 (见图 2), 该领域的高频及代表性词汇包括 lake、model、salinity、climate change 等。“salinity”与“lake”关联紧密, 凸显盐度在湖泊研究中的关键地位, 湖泊盐度变化对湖泊生态系统影响显著, 是研究的重要考量因素。借助模型, 可有效模拟湖泊与地下水的交换过程等, 助力深入探究湖泊咸化机制^[17]。此外, 气候与环境因素的变动也直接湖泊演化, 降水和温度变化会直接导致湖泊盐度改变。关键词间的相互连接体现出湖泊咸化与模型研究领域的多学科交叉特性, 预示着未来该领域研究将向综合化方向发展, 通过整合多学科知识与方法来深入探究湖泊咸化的相关问题。

1.4 热点问题浅析

1.4.1 湖泊咸化在古气候与古盐度研究中的重要意义

湖泊作为记录地球环境演变的天然档案库, 其咸化过程在古气候与古盐度研究中占据核心地位。湖泊盐度的动态变化能够灵敏反映区域水文平衡 (如蒸发—降水比) 和气候事件 (如干旱化、季风衰退), 而沉积物中的盐类矿物 (如石膏)、同位素 ($\delta^{18}O$ 、 δD) 及生物标志物 (如介形类壳体) 则为古盐度定量重建

2 研究主题和热点分析

2.1 湖泊咸化在水文学中的研究进展

湖泊咸化作为全球水循环失衡的典型表征, 已成为水文学研究的前沿议题。随着气候变化加剧与人类活动干扰的叠加, 淡水湖泊向咸水湖的转变过程不仅深刻影响着区域水资源安全, 更对流域生态系统的稳定性构成严峻挑战。水文学通过解析地表—地下水文过程、量化盐分输移机制、构建多尺度耦合模型, 系统揭示了湖泊咸化的驱动网络与动态响应规律。

湖泊水流入/流出主要来源于地表水和地下水以及降水蒸发作用, 这些因素导致的水循环失衡是引起湖泊咸化的重要原因。YIHDEGO 等^[36]通过构建 Burrumbeet 湖、Buninjon 湖和 Linlithgow 湖的详细水盐收支来研究玄武岩平原的湖泊水文, 以通过使用气象、水文和相关数据, 确定这三个湖泊中的每一个湖泊控制水收支(溪流、降雨、蒸发和/或地下水流入/流出)的因素。JONES 等^[37]研究肯尼亚马加迪湖地区的咸化演变经历了五个阶段, 通过改进 EUGSTER 的水文模型^[38]进行研究, 认为蒸发浓缩是亚马加迪湖咸化的核心过程, 包括简单的蒸发作用, 还涉及非饱和带中矿物以薄膜或胶结形式析出、风化结壳的再溶解与再沉淀, 从而驱动盐分的循环再生。

在干旱和半干旱地区, 湖泊咸化问题尤为突出。HASSANZADEH 等^[39]为乌尔米亚湖流域开发了一个基于系统动力学方法的模拟模型用于预测湖水水位, 结果表明气候变化和过度使用地表水资源导致的流入变化是造成湖泊水位下降加速咸化的主要因素。为保护脆弱的生态环境, 修复生态失衡问题, 较多地区开展生态补水工程修复退化湖泊。生态补水工程可以有效遏制流域下游荒漠化、生物多样性丧失等一系列生态环境问题。2000 年以来, 为了改善塔里木河下游的生态环境, 当地流域治理利用博斯腾湖的水资源, 在塔里木河下游开展生态输水。补水后, 塔里木河下游地下水埋藏深度显著增加, 沿河植物群落迅速恢复^[40]。然而, 这也导致了下游地区的土壤和水咸化^[41]。众多研究表明大规模的人工干预会导致自然过程发生剧烈变化, 在带来植被覆盖率的增加和水生面积的上升的积极效应外, 也会引起水土咸化、水质不稳定等消极效应^[42-44]。

2.2 湖泊咸化在地质学中的研究进展

国内外研究表明, 构造背景、盆地演化、岩石风化、地下水作用及高蒸发环境等因素是驱动湖泊咸化的重要机制。构造运动决定区域盆地的形成类型和水

文条件。闭合盆地由于四周无出水口, 使得进入湖泊的水分只能通过蒸发或渗漏逐渐损失。对死海、大盐湖等典型咸化湖泊的研究显示, 构造运动引起的盆地低洼、断陷和封闭水系为盐分的累积提供了基本条件^[45-47]。在我国西北地区由于区域构造运动形成的封闭湖盆, 在干旱气候和高蒸发条件下容易发生咸化现象^[48]。

湖泊咸化中的盐分主要来源于周围岩石的风化作用和地下水中的溶解盐。岩石中含有大量的可溶性矿物, 在长期风化作用释放钠、钙、镁、钾等离子随降雨和地下水流入湖泊。研究表明区域岩性及其风化速率直接影响湖泊中盐分的输入量^[49-50]。在我国西北干旱区的风化物质富含可溶盐, 加之局部构造与侵蚀作用, 造成明显的地区性湖泊咸化现象^[51-52]。在干旱或半干旱气候条件下, 湖泊水体的蒸发速率远高于降水及径流补给, 导致湖水中溶解盐分不断浓缩。YAO 等^[53]通过对比蒸发与补给量, 构建了湖泊盐度演化的能量平衡和水文模型, 验证了高蒸发是推动湖泊咸化的关键因素。盛东等^[54]在对西部干旱地区湖泊的水文研究中, 也发现局部蒸发率较高及水量补给不足是导致湖泊盐分逐渐积累、最终发生咸化的重要原因。LIANG 等^[55]利用稳定同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 分析西藏班戈县仁错湖群水体咸化成因, 表明所有湖泊水体均存在显著蒸发效应。

咸化湖盆是重要的地质记录载体, 也是研究气候演化、资源形成和生态环境变化的天然实验室。由于淡水补给不足而蒸发率居高不下, 湖水中溶解的盐分及其他化学元素(如钠、钾、锂等)不断富集, 当溶液达到饱和状态时, 各种盐类矿物便会沉淀出来, 从而为矿床的形成创造有利条件。咸化湖盆中富含有机质的页岩作为常规油气勘探的重要烃源岩, 对油气资源的开发具有重大意义。国内相关研究主要集中在我国西北内陆干旱区, 尤以新疆准噶尔盆地为典型代表^[56-57]。该区域的艾比湖、玛纳斯湖和乌伦古湖因构造运动形成封闭盆地, 水文条件极端、盐分持续累积, 因此成为页岩油烃源岩研究的重要对象。青海柴达木盆地及内蒙古部分咸化湖盆, 也因其独特的沉积环境和高盐背景, 被认为具有较高的页岩油资源潜力, 并正积极开展相关勘探与开采技术研究^[58]。

2.3 湖泊咸化在生态学中的研究进展

湖泊咸化是气候变化与人类活动共同作用下的全球性生态问题。研究表明, 半干旱区湖泊的咸化主要源于气候暖干化与地下水系统的失衡。岱海 1977—2019 年湖面面积萎缩 63.19%, 地下水排泄携带的盐

分占总输入的 89%, 直接加速了湖泊咸化^[59-60]。咸化过程同时会影响烃源岩形成, 这一现象在东西部断陷湖盆中普遍存在^[57]。咸化改变了湖泊的生态稳态, 波斯腾湖的矿化度变化表明, 盐度波动会抑制沉水植被生长, 促使生态系统从“草型清水态”向“藻型浊水态”转变^[61]。国际研究表明, 全球变暖加剧了盐分富集与植被退化, 尤其在浅水湖泊中, 沉水植被 (Submerged Aquatic Vegetation, SAV) 覆盖率近 40 年显著下降, 进一步威胁生物多样性^[62]。

湖泊咸化模型经历从单一因子到多系统耦合的演变。早期研究多采用简单的回归模型或营养物平衡模型, 如基于²²²Rn 质量平衡的地下水排泄量评估模型, 量化了地下水对盐分输入的贡献^[63]。随着技术进步, 模型逐步整合水动力、生态与地球化学过程。咸化湖盆中盐类—有机质沉积模式的建立, 揭示了盐分浓度对有机质保存和油气生成的关键作用^[64-65]。近年来, 复杂综合模型成为主流, 如三维生态—水动力模型被用于模拟盐度梯度对浮游生物群落的影响^[66-67]。此外, 机器学习技术开始应用于咸化预测^[68-69], 如湄公河三角洲研究中通过盐度模型优化水资源管理策略^[70]。国内学者在富营养化模型基础上拓展了咸化模块, 结合 3S 技术实现多尺度动态模拟^[71], 为湖泊修复提供了科学工具。

3 研究不足与展望

3.1 研究不足

当前湖泊咸化及其模型研究在驱动机制解析与综合治理策略方面仍存在亟待突破的瓶颈问题。首先, 生态系统跨尺度响应机制研究存在显著局限。在生态系统跨尺度响应机制层面, 现有模型体系多局限于盐分迁移的物理化学过程模拟, 对生物地球化学循环与生态系统演变的耦合机制揭示不足。盐度梯度变化引起的微生物群落结构重塑、关键物种适应性进化等生物学过程尚未有效整合至模型框架, 制约了生态系统长期演变趋势的预测能力。具体而言, 盐度胁迫对微生物代谢功能的重构效应及其对碳氮循环效率的影响机制尚未明晰, 水生生物生理耐受阈值突破引发的食物网级响应更缺乏定量表征, 导致生态风险预警存在理论缺位。其次, 综合治理技术体系构建面临系统性挑战。在综合治理技术体系构建方面, 现有干预措施普遍存在技术单元孤立化与政策工具碎片化的双重困境。具体表现为: 盐分截留、生态补水等单项技术尚未形成多技术协同的集成方案, 流域尺度的盐分通量调控政策与区域土地利用规划、水资源管理制度间

存在显著的制度性割裂。此外, 盐分资源化技术的成本效益失衡问题严重制约其工程化应用, 环境效益最大化与经济效益可持续性之间的平衡策略亟待创新突破。最后, 社会—生态系统交互作用的研究维度存在显著缺失。湖泊咸化对沿岸社区生计资本的影响路径 (如渔业资源衰减、饮用水安全保障) 及其触发的社会适应机制 (包括灌溉制度革新、人口空间重构) 尚未建立系统的分析框架。尤为突出的是, 人文要素对盐化进程的反馈机制 (涵盖政策执行效能、公众环境认知等社会变量) 仍属科学研究盲区, 多学科交叉的研究范式亟待建立。

3.2 研究展望

关键词突现分析表示了一个研究领域的兴衰, 反映了当前热门的研究趋势。其中关键词出现的越早即为越早被关注到。如图 3 所示, 最早出现且出现时间最长的关键词是 2009 年的“impact”, 表明该领域在高速增长的前期研究可能主要集中在湖泊咸化相关影响的探讨上。2018—2020 年期间, “urmia lake” “late pleistocene” 等关键词出现, 说明特定湖泊 (如乌尔米湖) 和地质时期 (晚更新世) 的湖泊咸化研究在近期受到关注, 这些特定案例对于理解湖泊咸化的长期演变具有重要意义。2019—2024 年期间, “soil salinity” “salinization” “heavy metals” 等关键词出现, 表明湖泊咸化与土壤盐渍化、盐化过程以及重金属污染之间的关系成为近期研究热点。值得注意的是, “machine learning” 一词于 2021 年首次出现在湖泊咸化研究领域, 表明随着技术的不断发展, 机器学习方法开始被应用于湖泊咸化模型研究中, 用于预测、分析和模拟湖泊咸化过程, 为该领域提供了新的研究视角与思路。此外, 基于机器学习的数据处理与模型预测能够有效提升研究效率, 降低研究成本, 推动湖泊咸化研究的进一步发展。JIANG 等^[72]利用机器学习算法重建波斯腾湖过去百年的水位、储水量和盐度变化, 揭示气候与水文变量间的关系, 研究结果促进了对波斯腾湖长期变化特征的科学认识, 并为重建旱地湖泊百年水文和环境轨迹提供技术参考^[68-72]。“Tibetan Plateau” 和 “Xinjiang” 首次出现的时间分别是 2016 年和 2022 年, 说明青藏高原和新疆地区等具有地域特征的湖泊咸化问题逐渐受到了研究者的关注。青藏高原地区和新疆地区拥有众多内陆湖泊, 并且青藏高原也是亚洲众多河流的发源地, 其湖泊生态系统对于区域乃至全球的水资源平衡都有着重要意义。除此之外, 青藏高原和新疆分别是高海拔地区和干旱区的典型代表地区, 湖泊咸化问题逐渐进

入研究者的视野, 这有助于更全面地了解中国乃至亚洲不同地理环境下湖泊咸化的特点和机制, 为湖泊生态保护和在水资源管理提供科学依据。

近几十年来, 湖泊咸化与模型研究领域的发展从初期在做湖泊相关方面的研究结合盐度指标进行模型模拟或者地质相关研究中所提到了盐度指标作为参考等这些边缘化的课题研究, 到该领域发展的中期逐渐关注到咸水湖和盐湖演变的重点问题, 在快速发展期逐渐演化除了多个研究方向, 针对不同水域生态系统和水平衡的研究, 再到近期对特定湖泊、地质时期、土壤盐渍化、重金属污染以及机器学习应用的研究, 同时在地域上也逐渐扩展到特定的重要区域。自1988年首次提出“全球变暖”概念, “全球变暖—气候变化”相关的研究课题被科学界广泛关注, 气候变化同样也被列入了湖泊演化的重要因素之一^[73-74], 特别是盐度方面^[75-78]。人类活动通过多种驱动因素(如农业、资源开采、城市化等)推动了湖泊咸化, 而气候变化又加剧了这一情况^[78]。近年来, 湖泊咸化与气候模型耦合推演湖泊生态变化已逐渐成为研究热点和重要趋势。随着机器学习技术的迅速发展, 这一复杂过程得以显著简化, 同时推演与预测结果的准确性也得到了进一步提升^[72]。随着全球能源需求持续增长及传统油气资源开采难度加大, 页岩油作为非常规油气资源的核心组成部分, 已成为国际能源战略竞争的焦点。近年来, 各国加速推进页岩油勘探与开采技术革新, 尤其针对地质条件复杂的咸化湖盆区域, 通过理论创新与技术突破实现资源高效开发。随着我国在湖泊咸化与模型研究领域的研究逐渐增多, 我国内陆湖咸化的问题越来越被关注^[79-80]。尤其是在青藏高原地区 and 新疆地区分布着大量的咸水湖和盐湖^[81], 探究其变化及影响因素对于研究湖泊咸化及全球湖泊生态具有重要的指导意义。总的来说, 湖泊咸化与模型研究领域的发展趋势随着研究热点不断演变, 依据关键词突现分析结果表明, 该领域早期关注一些基础性和普遍性的主题, 后期逐渐转向特定的环境问题和新兴技术应用。

未来湖泊咸化与模型研究将聚焦多维度交叉与技术创新, 逐步突破现有研究的局限性。在机理层面, 研究重点将从单一水文过程转向多圈层耦合作用, 特别是盐分在气候—水文—生态协同驱动下的跨介质迁移机制。结合同位素示踪与机器学习算法, 可精准解析盐分来源(如地下水渗流、岩石风化或人为排放)及其动态输移路径。模型构建将融合物理机制与数据驱动优势, 通过同化遥感反演盐度数据(如 Sentinel-

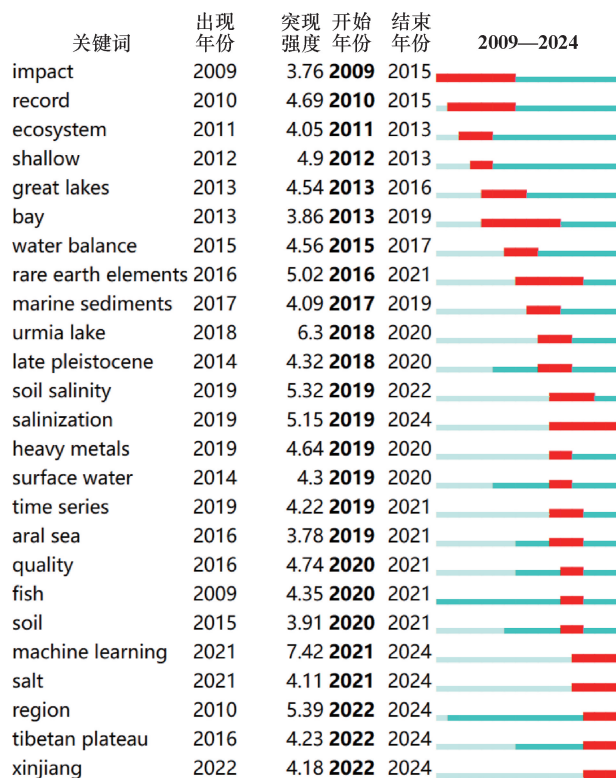


图3 湖泊咸化与模型研究领域关键词突现分析

Fig. 3 Keyword burst detection analysis of lake salinization and model research

3A 高光谱影像)和原位传感器网络, 构建时空分辨率更高的预测系统, 显著提升对极端干旱事件的响应能力。

生态响应研究将深入揭示盐度梯度对生物地球化学循环的重构效应。通过宏基因组技术与生态系统模型结合, 定量表征盐胁迫下微生物群落功能基因表达变化及其对碳氮循环通量的影响阈值。典型案例研究表明, 青藏高原盐湖中嗜盐菌群的代谢适应机制, 可能成为解析高寒湖泊生态韧性的关键。同时, 干旱区封闭湖盆因强烈的人类—自然耦合作用, 将成为检验生态补水工程对盐分再平衡效应的天然实验场。

技术应用层面, 盐湖资源协同开发模式将推动研究范式转型。基于矿物相态演化的成矿预测模型, 可量化锂、钾等战略资源的富集规律, 同时耦合水盐动力学模拟, 评估开采活动对湖盆水化学平衡的扰动边界。柴达木盆地盐湖通过建立“开采—回灌”数值模型, 已实现资源提取与水位稳定的动态调控。此外, 全球湖泊咸化观测网络的构建亟待加强, 需整合GNSS地表形变监测、无人机高光谱扫描与公民科学数据, 形成多尺度动态数据库, 为跨区域治理提供基准框架。通过构建流域尺度的人类活动强度指数揭示社会经济决策对湖泊盐化进程的级联效应。

4 结 论

湖泊咸化研究已形成多学科交叉的立体框架, 揭示了气候变化与人类活动的双重驱动机制。通过文献计量与热点分析发现, 盐分迁移研究正从单一水文过程转向气候—水文—生态多圈层耦合, 同位素示踪与机器学习技术结合显著提升了盐分来源解析精度。

模型技术方面, 物理引导型机器学习与多源数据同化的融合, 增强了盐度时空预测能力, 柴达木盆地“开采—回灌”模型实现了资源开发与水位稳定的动态平衡。生态响应研究证实, 盐度梯度通过重构微生物代谢功能与碳氮循环阈值, 驱动生态系统相变。盐湖资源开发与生态治理的协同策略逐步成熟, 成矿预测模型与修复技术的结合为资源化利用提供新路径。全球湖泊观测网络的构建(整合遥感、无人机与实地监测)量化了人类活动强度对盐化进程的级联效应。

未来需突破生态系统跨尺度响应机制、盐分资源化成本优化及社会—生态耦合模型等瓶颈, 通过多学科协同与国际数据共享, 构建“机理—预警—治理”全链条研究体系, 支撑全球湖泊可持续管理。

参考文献 (References):

- [1] 刘诗局, 高岗, 靳军, 等. 咸化湖相富含层状藻与结构藻烃源岩的成烃特征新探与意义[J]. 地质学报, 2023, 97(3): 879-887.
LIU S J, GAO G, JIN J, et al. Significance of hydrocarbon generation characteristics of source rock samples dominated by telalginate and lamalginate in saline lacustrine sediments[J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(3): 879-887.
- [2] JIANG X Y, LIU C Q, HU Y, et al. Climate-induced salinization may lead to increased lake nitrogen retention[J]. Water Research, 2023, 228: 119354.
- [3] ROCK L A, DUGAN H A. Lakes protect downstream riverine habitats from chloride toxicity[J]. Limnology and Oceanography, 2023, 68(6): 1216-1231.
- [4] BLINN D W, BAILEY P C E. Land-use influence on stream water quality and diatom communities in Victoria, Australia: A response to secondary salinization[J]. Hydrobiologia, 2001, 466(1): 231-244.
- [5] 王宗志, 王宇, 王坤, 等. 滨海地下水库建设与利用方式对含水层水盐运移规律的影响[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 69-78.
WANG Z Z, WANG Y, WANG K, et al. Influences of coastal underground reservoir construction and utilization on saltwater and freshwater transport law in aquifers[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 69-78.
- [6] ZHANG X L, JIAO J J, LI H L, et al. Salinization process in a topographically closed saline lake estimated by radium, barium, and

chloride mass balances [J]. Journal of Hydrology, 2022, 615: 128722.

- [7] FICKER H, LUGER M, PAMMINGER-LAHNSTEINER B, et al. Diluting a salty soup: Impact of long-lasting salt pollution on a deep Alpine lake (Traunsee, Austria) and the downside of recent recovery from salinization[J]. Aquatic Sciences, 2018, 81(1): 7.
- [8] 唱彤, 郦建强, 陈文学, 等. 湖泊生态系统修复理论与技术研究进展[J]. 水科学进展, 2024, 35(6): 1005-1020.
CHANG T, LI J Q, CHEN W X, et al. Research progress in theories and approaches for lake ecosystem restoration[J]. Advances in Water Science, 2024, 35(6): 1005-1020.
- [9] 刘丙香, 王立群, 谭伟, 等. 南水北调东线工程河湖补水水生态效应研究进展[J]. 人民长江, 2023, 54(7): 1-8.
LIU B X, WANG L Q, TAN W, et al. Research progress on aquatic ecological effects of water replenishment for rivers and lakes by the East Route of the South-to-North Water Transfer Project[J]. Yangtze River, 2023, 54(7): 1-8.
- [10] 赵小敏, 孔繁翔, 张超, 等. 数字孪生流域关键技术及其在河湖治理中的应用展望[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(3): 1-15.
ZHAO X M, KONG F X, ZHANG C, et al. Key technologies of digital-twin basins and their application prospects in river-lake governance [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(3): 1-15.
- [11] 张运林, 胡维平, 陈宇炜, 等. 太湖富营养化与蓝藻水华防控研究进展[J]. 湖泊科学, 2023, 35(1): 1-18.
ZHANG Y L, HU W P, CHEN Y W, et al. Progress in the study of eutrophication and cyanobacterial bloom control in Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35(1): 1-18.
- [12] LASHKARI R S, HWANG C L, FAN L T. Regional management of urban and agricultural pollution [J]. Journal (Water Pollution Control Federation), 1977, 49(8): 1877-1888.
- [13] SEITZINGER S P, GARDNER W S, SPRATT A K. The effect of salinity on ammonium sorption in aquatic sediments: Implications for benthic nutrient recycling[J]. Estuaries, 1991, 14(2): 167-174.
- [14] BOERS P, DE BLES F. Ion concentrations in interstitial water as indicators for phosphorus release processes and reactions[J]. Water Research, 1991, 25(5): 591-598.
- [15] FRITZ S C, JUGGINS S, BATTARBEE R W, et al. Reconstruction of past changes in salinity and climate using a diatom-based transfer function[J]. Nature, 1991, 352(6337): 706-708.
- [16] CHEN C M. Searching for intellectual turning points: Progressive knowledge domain visualization [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(suppl_1): 5303-5310.
- [17] 王青, 叶荣辉, 汪玉平, 等. 珠江口盐度预测统计模型[J]. 水资源保护, 2018, 34(6): 82-87.

- WANG Q, YE R H, WANG Y P, et al. Statistical model for salinity prediction in Pearl River Estuary[J]. *Water Resources Protection*, 2018, 34(6): 82-87.
- [18] 刘英, 包安明, 陈曦. 低盐湖泊水体盐度光学遥感反演研究: 以博斯腾湖为例[J]. *遥感学报*, 2014, 18(4): 902-911.
- LIU Y, BAO A M, CHEN X. Measuring salinity of low salinity lake by optical remote sensing: A case study of Bosten Lake[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2014, 18(4): 902-911.
- [19] 毛智慧, 丁放, 袁立来, 等. 基于 Sentinel-2 多光谱遥感的低盐湖泊盐度反演: 以西藏错鄂湖为例[J]. *中国水产科学*, 2022, 29(3): 355-364.
- MAO Z H, DING F, YUAN L L, et al. Salinity inversion of a low salinity lake based on sentinel-2 multispectral remote sensing: A case study of the Co Ngoin Lake in Tibet[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2022, 29(3): 355-364.
- [20] 黄雅丽, 盛晟, 胡朝阳, 等. 感潮河段枯水期盐度模型构建与咸潮上溯影响研究[J]. *水资源保护*, 2025, 41(1): 150-159.
- HUANG Y L, SHENG S, HU Z Y, et al. Construction of salinity model for tidal reaches during dry seasons and study on influence of saltwater intrusion[J]. *Water Resources Protection*, 2025, 41(1): 150-159.
- [21] VYSTAVNA Y, HARJUNG A, MONTEIRO L R, et al. Stable isotopes in global lakes integrate catchment and climatic controls on evaporation[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 7224.
- [22] 郭姝雯, 余芳艳, 王哲, 等. 西藏色林错沉积物介壳同位素重建的 2000 年以来气候变化研究[J]. *第四纪研究*, 2023, 43(1): 83-94.
- GUO S W, YU F Y, WANG Z, et al. The research of climate change of past 2000 years based on isotopes of sediment ostracods shells in serlin co, Tibet[J]. *Quaternary Sciences*, 2023, 43(1): 83-94.
- [23] CURRY B, HENNE P D, MESQUITA-JOANES F, et al. Holocene paleoclimate inferred from salinity histories of adjacent lakes in Southwestern Sicily (Italy)[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 150: 67-83.
- [24] ROHLING E J. Progress in paleosalinity: Overview and presentation of a new approach [J]. *Paleoceanography*, 2007, 22(3): 2007PA001437.
- [25] MARCO-BARBA J, HOLMES J A, MESQUITA-JOANES F, et al. The influence of climate and sea-level change on the Holocene evolution of a Mediterranean coastal lagoon: Evidence from ostracod Palaeoecology and geochemistry[J]. *Geobios*, 2013, 46(5): 409-421.
- [26] GASSE F, BARKER P, GELL P A, et al. Diatom-inferred salinity in Palaeolakes: An indirect tracer of climate change [J]. *Quaternary Science Reviews*, 1997, 16(6): 547-563.
- [27] LI M, LI Z L, DONG S P, et al. Salinity impacts on *n*-alkanes in lake sediments of the Badain Jaran Desert, Northwestern China; Implications for paleoclimate reconstruction [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2024, 656: 112571.
- [28] HAN L, LI Y M, ZOU Y F, et al. Relationship between lake salinity and the climatic gradient in Northeastern China and its implications for studying climate change [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 805: 150403.
- [29] TANG L Y, DUAN X F, KONG F J, et al. Influences of climate change on area variation of Qinghai Lake on Qinghai-Tibetan Plateau since 1980s[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 7331.
- [30] WANG J, DONG J, XU X, et al. Recent global decline in endorheic basin lake areas due to warming climate and human activities[J]. *Nature Geoscience*, 2021, 14(11): 755-761.
- [31] WOOLWAY R I, KRAEMER B M, LENTERS J D, et al. Global lake responses to climate change [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1(8): 388-403.
- [32] WANG W, LEE X H, XIAO W, et al. Global lake evaporation accelerated by changes in surface energy allocation in a warmer climate[J]. *Nature Geoscience*, 2018, 11(6): 410-414.
- [33] SMITH D M, MURPHY J M. An objective ocean temperature and salinity analysis using covariances from a global climate model [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2007, 112(C2): 2005JC003172.
- [34] LIU X M, ZHANG G X, ZHANG J J, et al. Effects of irrigation discharge on salinity of a large freshwater lake: A case study in Chagan Lake, Northeast China[J]. *Water*, 2020, 12(8): 2112.
- [35] ZHAO Z Y, YANG W Y, HUA P, et al. Deicing salt exacerbates freshwater salinization under climate change and human activities[J]. *The Innovation*, 2025, 6(6): 100862.
- [36] YIHDEGO Y, WEBB J. Modelling of seasonal and long-term trends in lake salinity in southwestern Victoria, Australia [J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 112: 149-159.
- [37] JONES B F, EUGSTER H P, RETTIG S L. Hydrochemistry of the lake magadi basin, Kenya [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1977, 41(1): 53-72.
- [38] EUGSTER H P. Chemistry and origin of the brines of Lake Magadi, Kenya [J]. *Mineralogical Society of America Special Papers*, 1970, 3: 213-235.
- [39] HASSANZADEH E, ZARGHAMI M, HASSANZADEH Y. Determining the main factors in declining the urmia lake level by using system dynamics modeling [J]. *Water Resources Management*, 2012, 26(1): 129-145.
- [40] XU H L, YE M, LI J M. The water transfer effects on agricultural development in the lower Tarim River, Xinjiang of China [J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(1): 59-68.
- [41] CHEN Y J, CHEN Y N, LIU J Z, et al. Dynamical variations in groundwater chemistry influenced by intermittent water delivery at the lower reaches of the Tarim River [J]. *Journal of Geographical*

- Sciences, 2005, 15(1): 13-19.
- [42] ZHANG Y, ZHU G F, MA H Y, et al. Effects of ecological water conveyance on the hydrochemistry of a terminal lake in an inland river: A case study of Qingtu lake in the Shiyang River Basin[J]. Water, 2019, 11(8): 1673.
- [43] HU S, MENG K Y, MA R, et al. The potential risk of soil salinization on vegetation restoration by ecological water conveyance project in Qingtu Lake Wetland, Northwestern China[J]. Land Degradation & Development, 2024, 35(4): 1296-1307.
- [44] LIU C, ZHU L P, WANG J B, et al. The decrease of salinity in lakes on the Tibetan Plateau between 2000 and 2019 based on remote sensing model inversions[J]. International Journal of Digital Earth, 2023, 16(1): 2644-2659.
- [45] LONCKE L, GAULLIER V, MASCLE J, et al. The Nile deep-sea fan: An example of interacting sedimentation, salt tectonics, and inherited subsalt paleotopographic features[J]. Marine and Petroleum Geology, 2006, 23(3): 297-315.
- [46] ABU-JABER N S. A new look at the chemical and hydrological evolution of the Dead Sea[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1998, 62(9): 1471-1479.
- [47] FARBER E, VENGOSH A, GAVRIELI I, et al. The origin and mechanisms of salinization of the lower Jordan River[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2004, 68(9): 1989-2006.
- [48] 程强, 陈旭光. 艾比湖湖区新构造运动及其演化特征[J]. 西部探矿工程, 2011, 23(7): 125-128.
CHENG Q, CHEN X G. Neotectonic movements and their evolutionary characteristics in the ebinur lake area[J]. West-China Exploration Engineering, 2011, 23(7): 125-128.
- [49] PACHECO F A L, VAN DER WEIJDEN C H. Modeling rock weathering in small watersheds[J]. Journal of Hydrology, 2014, 513: 13-27.
- [50] SAMANI S, MOGHADDAM A A. Hydrogeochemical characteristics and origin of salinity in Ajabshir aquifer, East Azerbaijan, Iran[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 2015, 48(3/4): 175-189.
- [51] CHEN X, JIANG C L, ZHENG L G, et al. Evaluating the genesis and dominant processes of groundwater salinization by using hydrochemistry and multiple isotopes in a mining city[J]. Environmental Pollution, 2021, 283: 117381.
- [52] 鲁涵, 曾妍妍, 周金龙, 等. 塔里木盆地绿洲带地下水咸化机制[J]. 中国环境科学, 2023, 43(10): 5377-5388.
LU H, ZENG Y Y, ZHOU J L, et al. Mechanism of groundwater salinization in the oasis zone of the Tarim Basin[J]. China Environmental Science, 2023, 43(10): 5377-5388.
- [53] YAO G Q, LI L, CAI M J, et al. Mechanisms of salinization in a middle Eocene lake in the Tanggu area of the Huanghua Depression[J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 86: 155-167.
- [54] 盛东, 李俊峰, 孙飞飞, 等. 干旱区内陆湖泊水盐变化及调控机理[J]. 干旱区研究, 2010, 27(4): 529-535.
SHENG D, LI J F, SUN F F, et al. Study on water-salt change of some inland lakes in arid areas and the control mechanism[J]. Arid Zone Research, 2010, 27(4): 529-535.
- [55] LIANG C, YANG B, CAO Y C, et al. Salinization mechanism of lakes and controls on organic matter enrichment: From present to deep-time records[J]. Earth-Science Reviews, 2024, 251: 104720.
- [56] TAO K Y, CAO J, CHEN X, et al. Deep hydrocarbons in the Northwestern Junggar Basin (NW China): Geochemistry, origin, and implications for the oil vs. gas generation potential of post-mature saline lacustrine source rocks[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 109: 623-640.
- [57] CAO Y, JIN Z J, ZHU R K, et al. Comprehensive evaluation of the organic-rich saline lacustrine shale in the Lucaogou Formation, Jimusar sag, Junggar Basin, NW China[J]. Energy, 2024, 294: 130786.
- [58] GUO P, LIU C Y, GIBERT L, et al. How to find high-quality petroleum source rocks in saline lacustrine basins: A case study from the Cenozoic Qaidam Basin, NW China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 111: 603-623.
- [59] 周云凯, 姜加虎, 黄群, 等. 内蒙古岱海水质咸化过程分析[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(12): 51-55.
ZHOU Y K, JIANG J H, HUANG Q, et al. Analysis on water salinization process of Daihai Lake in Inner Mongolia[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(12): 51-55.
- [60] 马倩, 王冉, 谭荣杰, 等. 近 40a 岱海水域面积与水量变化遥感监测[J]. 人民黄河, 2022, 44(S1): 57-59.
MA Qian, WANG Ran, TAN Rongjie, et al. Remote sensing monitoring of the changes in the water area and water volume of Daihai Lake in the past 40 years[J]. Yellow River, 2022, 44(S1): 57-59.
- [61] 赵景峰, 秦大河, 长岛秀树, 等. 博斯腾湖的咸化机理及湖水矿化度稳定性分析[J]. 水科学进展, 2007, 18(4): 475-482.
ZHAO Jingfeng, QIN Dahe, NAGASHIMA Hideki, et al. Analysis of mechanism of the salinization process and the salinity variation in Bosten Lake[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(4): 475-482.
- [62] LUO J H, DUAN H T, XU Y, et al. Global trends and regime state shifts of lacustrine aquatic vegetation[J]. The Innovation, 2025, 6(3): 100784.
- [63] SCHMIDT A, GIBSON J J, SANTOS I R, et al. The contribution of groundwater discharge to the overall water budget of two typical Boreal lakes in Alberta/Canada estimated from a radon mass balance[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2010, 14(1): 79-89.
- [64] KONG X X, JIANG Z X, ZHENG Y H, et al. Organic geochemical characteristics and organic matter enrichment of mudstones in an

- Eocene saline lake, Qianjiang Depression, Hubei Province, China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 114: 104194.
- [65] KONG X X, JIANG Z X, JU B S. Hydrocarbon accumulation characteristics in the inter-salt shale oil reservoir in the Eocene Qianjiang Depression, Hubei Province, China [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 211: 110117.
- [66] 刘永, 郭怀成, 范英英, 等. 湖泊生态系统动力学模型研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2005, 16(6): 1169-1175.
- LIU Y, GUO H C, FAN Y Y, et al. Research advance on lake ecosystem dynamic models[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(6): 1169-1175.
- [67] SOULIGNAC F, DANIS P A, BOUFFARD D, et al. Using 3D modeling and remote sensing capabilities for a better understanding of spatio-temporal heterogeneities of phytoplankton abundance in large lakes[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2018, 44(4): 756-764.
- [68] XU P J, LIU K, SHI L, et al. Machine learning modeling reveals the spatial variations of lake water salinity on the endorheic Tibetan Plateau[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2024, 56: 102042.
- [69] BEIBEI E, SHUANG Z, DRISCOLL C T, et al. Human and natural impacts on the U. S. freshwater salinization and alkalinization: A machine learning approach [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 889: 164138.
- [70] TRAN D A, TSUJIMURA M, HA N T, et al. Evaluating the predictive power of different machine learning algorithms for groundwater salinity prediction of multi-layer coastal aquifers in the Mekong Delta, Vietnam [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 127: 107790.
- [71] YU D M, WANG Z T, YUE C, et al. Spatial modeling of brine level and salinity in the Qarhan Salt Lake using GIS and automated machine learning algorithms [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2025, 58: 102195.
- [72] JIANG X G, FAN C Y, LIU K, et al. Centenary covariations of water salinity and storage of the largest lake of Northwest China reconstructed by machine learning[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 612: 128095.
- [73] SMOL J P, WOLFE A P, et al. Climate-driven regime shifts in the biological communities of Arctic Lakes [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, 102(12): 4397-4402.
- [74] ZHANG G Q, YAO T D, XIE H J, et al. Response of Tibetan Plateau lakes to climate change: Trends, patterns, and mechanisms [J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 208: 103269.
- [75] ZHAO Y J, WANG R, QIU H S, et al. Ecological response to global changes in Lake Genco, a remote alpine lake on the Southeast Tibetan Plateau, over the past two centuries [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2024, 646: 112238.
- [76] SCHINDLER D W. Lakes as sentinels and integrators for the effects of climate change on watersheds, airsheds, and landscapes [J]. *Limnology and Oceanography*, 2009, 54(6part2): 2349-2358.
- [77] WILLIAMS W D. Environmental threats to salt lakes and the likely status of inland saline ecosystems in 2025 [J]. *Environmental Conservation*, 2002, 29(2): 154-167.
- [78] CUNILLERA-MONTCUSÍ D, BEKLIO ĞLU M, CAÑEDO-ARGÜELLES M, et al. Freshwater salinisation: A research agenda for a saltier world [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2022, 37(5): 440-453.
- [79] JIA J J, SUN K, LÜ S D, et al. Determining whether Qinghai-Tibet Plateau waterbodies have acted like carbon sinks or sources over the past 20 years[J]. *Science Bulletin*, 2022, 67(22): 2345-2357.
- [80] YAN L J, ZHENG M P. Influence of climate change on saline lakes of the Tibet Plateau, 1973—2010[J]. *Geomorphology*, 2015, 246: 68-78.
- [81] 姜加虎, 黄群. 青藏高原湖泊分布特征及与全国湖泊比较 [J]. *水资源保护*, 2004, 20(6): 24-27.
- JIANG J H, HUANG Q. Distribution and variation of lakes in Tibetan Plateau and their comparison with lakes in other part of China [J]. *Water Resources Protection*, 2004, 20(6): 24-27.

(责任编辑 王海锋)