

基于文献计量的长江经济带重点湖泊生态环境 研究进展与趋势分析

莫加伟, 陈芳芳, 汤媛媛, 王凯华, 邹蒲, 彭毅, 熊忠华, 张汉峰

(中国地质调查局长沙自然资源综合调查中心, 湖南长沙 410600)

摘要: [目的] 通过文献计量方法识别长江经济带重点湖泊研究热点、发展脉络与前沿趋势, 为后续研究及政策制定提供科学参考。[方法] 基于中国知网(CNKI)和 Web of Science(WOS)核心数据库, 检索 1979 年至今与长江经济带重点湖泊生态环境相关的中英文文献, 最终纳入中文文献 5 081 篇、英文文献 2 243 篇。运用 CiteSpace 6.3.R1 软件进行关键词共现分析、聚类分析、突现词检测和时间线图绘制, 从年度发文量、研究热点与演进趋势等方面开展多维可视化分析。[结果] ①年度发文量可分为 4 个时期: 研究初期(1979—1995 年, 年均发文量 < 50 篇)、缓慢增长期(1996—2003 年)、快速增长期(2004—2015 年)和国际影响力提升期(2016 至今), 其中国家政策与重大环境事件(如太湖蓝藻事件)显著影响研究进程; ②研究热点集中于湖泊富营养化机制与治理、水质与沉积物污染特征及风险评估、气候变化与人类活动对湖泊生态的驱动影响、生态修复与生物多样性保护以及遥感与智能监测技术应用 5 个方面; ③研究前沿从早期的局部污染治理逐步转向多维度、系统性研究, 突出表现为近年来的强突现词如“气候变化”(2022 至今)、“景观格局”(2015 至今)和“ecosystem services”(2019—2021), 表明对社会-生态系统协同性与江湖一体关系的关注持续增强。[结论] 长江经济带湖泊生态环境研究呈现出从问题识别到驱动解析, 再到治理响应的完整研究链条, 已形成较为鲜明的理论与实践体系。未来需进一步加强多尺度耦合机制、湖泊跨区域生态补偿与用途管制协同优化研究, 深化基于自然的解决方案(NbS)在湖泊修复中的应用, 以支撑长江经济带生态保护与高质量发展。

关键词: 长江经济带; 湖泊生态环境; 文献计量分析; 前沿趋势; 生态修复

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)02-0453-12

中图分类号: P942, P963

文献参数: 莫加伟, 陈芳芳, 汤媛媛, 等. 基于文献计量的长江经济带重点湖泊生态环境研究进展与趋势分析[J]. 水土保持通报, 2026, 46(2): 453-464. Mo Jiawei, Chen Fangfang, Tang Yuanyuan, et al. Research progress and trends of ecological environment of key lakes in Yangtze River economic belt based on bibliometric analysis [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(2): 453-464.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.02.004

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.02.004

Research progress and trends of ecological environment of key lakes in Yangtze River economic belt based on bibliometric analysis

Mo Jiawei, Chen Fangfang, Tang Yuanyuan,

Wang Kaihua, Zou Pu, Peng Yi, Xiong Zhonghua, Zhang Hanfeng

(Changsha General Survey of Natural Resources Center, China Geological Survey, Changsha, Hunan 410600, China)

Abstract: [Objective] The research progress on the ecological environment of key lakes in the Yangtze River economic belt was systematically reviewed. Using bibliometric methods, research hotspots, development trajectories, and frontier trends were identified in order to provide scientific references for subsequent research and policymaking. [Methods] Based on the core databases of the China National Knowledge Infrastructure (CNKI) and the Web of Science (WOS), this study retrieved Chinese and English publications related to the ecological environment of key lakes in the Yangtze River economic belt from 1979 to the present. A total of 5 081 Chinese and 2 243 English publications are included. CiteSpace 6.3.R1 software was used to conduct keyword co-occurrence

收稿日期: 2025-09-08

修回日期: 2025-10-29

采用日期: 2025-11-03

资助项目: 自然资源部中国地质调查局项目“东部平原湖区南部湖泊调查”(DD20230501303)

第一作者: 莫加伟(1990—), 男(瑶族), 湖南省长沙市人, 硕士, 工程师, 主要从事自然资源调查监测研究。Email: 244068806@qq.com。

通信作者: 陈芳芳(1992—), 女(汉族), 湖南省长沙市人, 硕士, 工程师, 主要从事资源与环境遥感研究。Email: 949659286@qq.com。

analysis, cluster analysis, burst word detection, and timeline mapping. A multidimensional visualization analysis is carried out, focusing on annual publication volume, research hotspots, and evolutionary trends. [Results] ① The annual publication volume can be divided into four stages: initial (1979—1995, with an average of fewer than 50 publications per year), slow growth (1996—2003), rapid growth (2004—2015), and enhanced international influence (2016 to present). National policies and major environmental events (such as the Taihu Lake cyanobacterial bloom event) have significantly affected the research trajectory. ② Research hotspots focus on five major themes: mechanisms and control of lake eutrophication; characteristics and risk assessment of water and sediment pollution; driving effects of climate change and human activities on lake ecology; ecological restoration and biodiversity conservation; and application of remote sensing and intelligent monitoring technologies. ③ Research frontiers have gradually shifted from early localized pollution control to multidimensional and systematic research. This shift is particularly evident in strong burst words in recent years, including ‘climate change’ (2022 to present), ‘landscape pattern’ (2015 to present), and ‘ecosystem services’ (2019—2021), reflecting a growing focus on the synergy of social-ecological system and the integrated relationship between rivers and lakes. [Conclusion] Research on the ecological environment of lakes in the Yangtze River economic belt has formed a complete research chain, from problem identification to driver analysis, and to governance response, establishing a distinct theoretical and practical framework. Future efforts should focus on further strengthening the research on multi-scale coupling mechanisms, cross-regional ecological compensation, and coordinated optimization of land use control mechanisms for lakes, as well as deepening the application of nature-based solutions (NbS) in lake restoration, so as to support ecological protection and high-quality development of the Yangtze River economic belt.

Keywords: Yangtze River economic belt; lake ecological environment; bibliometric analysis; frontier trends; ecological restoration

长江经济带是中国重要的经济发展区域,包括沪、苏、浙、皖、赣、鄂、湘、渝、川、滇8省2市,土地面积 $2.05 \times 10^6 \text{ km}^2$,其生态环境的可持续性对于区域乃至全国的生态安全和社会经济发展具有深远的意义^[1]。湖泊作为长江经济带生态系统的重要组成部分,不仅在调节气候,维持生物多样性,提供水资源等方面发挥着关键作用,同时也是区域生态健康的重要指示器。长江经济带湖泊一直是国家水环境治理的重点^[2]。随着长江经济带上升为国家战略,国家陆续颁布包括《关于加强长江经济带重要湖泊保护和治理的指导意见》《中华人民共和国长江保护法》在内的多项法律法规,强调鄱阳湖、洞庭湖、太湖、巢湖、洱海、滇池等重要湖泊作为河流生态系统的关键要素在保障长江经济带生态、水资源、防洪等安全和促进流域经济社会发展等方面发挥着不可替代的作用^[3-4]。

长江经济带区域内湖泊主要分布在西南横断山区和东部江淮流域洪泛平原区,并在自然环境和人类活动的影响下,呈现出不同的生态环境演变特征^[5-6]。随着经济的快速发展和人口的不断增长,长江经济带的湖泊生态环境面临着前所未有的挑战^[7-8]。近年来,学术界围绕长江经济带湖泊生态环境问题展开了多维度、多主题的研究探索。在湖泊富营养化机制与治理方面,针对氮磷循环、蓝藻水华

暴发机理及内源污染控制开展研究,并提出以生态修复为核心的系统治理策略^[8-9]。在生态系统服务领域,不仅评估湖泊在水质净化、洪水调蓄、碳汇及生物栖息地等方面的功能,还开展其经济价值评估及空间量化分析^[10-12]。在驱动机制解析方面,研究聚焦于气候变化与人类活动(如水利工程、土地利用变化、工农业污染物排放)对湖泊水文、水质及生态过程的影响。此外,遥感、环境DNA技术、数值模型与大数据分析等新兴技术手段被广泛应用于湖泊生态环境的动态监测与模拟预测,显著提升了研究的精度与时空尺度。尽管已有研究积累了丰富的案例成果,为区域生态保护与修复提供了重要科学依据^[8-12],但目前长江经济带湖泊生态保护修复研究以单一案例研究或定性分析为主,缺少对已有研究成果的定量化和系统性分析,对已有大量文献中的整体研究格局、热点演进路径及知识结构缺乏系统性的定量整合与可视化呈现。

文献计量学作为一种基于数学和统计学方法的跨学科研究工具,能够通过对大量学术文献进行定量分析,揭示某一领域的研究热点、发展脉络、合作网络及前沿趋势^[13]。随着信息技术和数据分析方法的快速发展,文献计量分析已从早期的引文分析、共被引分析,逐步拓展到关键词共现分析、作者合作网络分析、关键词突现图谱构建等多维度应用^[14]。特别

是近年来,随着 CiteSpace, VOSviewer, Bibliometrix 等可视化分析工具的广泛应用,文献计量学在识别学科结构、追踪理论演变、发现新兴主题等方面起到重要作用^[13-14]。在环境科学与生态管理领域,文献计量方法已被广泛应用于流域治理、生态系统服务、气候变化响应等主题的综合评估中。其中 CiteSpace 工具通过关键词共现分析、聚类标签提取和突现词检测等功能,可系统梳理某一领域的研究结构与发展轨迹,尤其适合对长江经济带湖泊生态环境这类复杂、跨学科主题进行宏观趋势与微观内容分析。

本研究以中国知网(CNKI)和 Web of Science (WOS)数据库为基础,利用 CiteSpace 工具对长江经济带重点湖泊生态环境研究相关文献进行可视化分析,系统梳理相关研究的发展态势,并提出长江经济带湖泊生态保护修复相关建议。

1 材料与方法

1.1 数据来源

选用中国知网(CNKI)和 Web of Science 核心合集数据库(WOS)作为数据源,根据《关于加强长江经济带重要湖泊保护和治理的指导意见》《长江经济带-长江流域国土空间规划(2021—2035年)》等文件^[3-4]对于长江经济带重点湖泊的相关表述设置检索关键词,文献检索日期为2025年5月31日。

在 CNKI 数据库中,选取中国期刊全文数据库、中国博士学位论文数据库和中国优秀硕士学位论文全文数据库对长江经济带重点湖泊生态环境领域研究进行检索。在高级检索框中以主题=(“湖泊”)和(“生态”+“环境”)和篇关摘=“鄱阳湖”+“洞庭湖”+“太湖”+“巢湖”+“洱海”+“滇池”+“长江”进行检索,文件检索总数为6 589篇,检索结果最早出现时间为1979年,使用知网文献分类功能并结合人工比对,对1979年至今的文献检索结果进行筛选,去除可能重复的文献及与研究主题不相关文献,最终得到5 081篇中文文献。

在 WOS 数据库中,以 Topic=(“lake”) AND Topic=(“ecosystem” OR “environment”) AND Abstract=(“Poyang Lake” OR “Dongting Lake” OR “Taihu Lake” OR “Chaohu Lake” OR “Erhai Lake” OR “Dianchi Lake” OR “Yangtze River”),检索类型为 article 和 review,文献总数为2 995篇,发表时间最早为1993年,利用 Citespace 数据清洗器结合人工比对,对1993年至今的文献进行去重筛选,获得2 243篇英文文献。

1.2 分析方法

采用 CiteSpace(版本号:6.3.R1)可视化文献计量

软件^[15],对筛选出的“长江经济带重点湖泊生态环境”主题相关的国内外文献进行可视化知识图谱分析。

运用 CiteSpace 分析时,时间精度选择1 a为时间切片;术语来源选择标题(title)、摘要(abstract)、作者关键词(author keywords)以及增补关键词(keywords plus)作为分析单元;节点类型设置选择关键词和被引用文献作为网络节点,分别进行关键词共现、文献共被引分析。为控制网络密度,在保证主要知识结构清晰可见的同时避免网络过于复杂,参考以往研究,选择标准为每个时间切片内出现频次最高约200个节点,中、英文文献分别设置 g -index ($k=5, k=6$)。为保障网络结构的清晰度和主要路径的突出性,选择寻径网络(pathfinder)算法。通过中介中心性指标来识别网络中起关键枢纽作用的研究或关键词。

为确保知识图谱分析结果的精度,通过计算网络的模块值和平均轮廓值来评估图谱的聚类质量。通常认为,模块值(Modularity, Q) > 0.3 意味着网络聚类结构显著;平均轮廓值(weight mean silhouette, S) > 0.5 表明聚类结果合理, $S > 0.7$ 认为聚类可信度高^[13]。本研究中,中文文献图谱 $Q=0.809 1, S=0.943 6$;英文文献 $Q=0.831 0, S=0.949 4$,表明聚类结果具有可信度。在此基础上,选取规模最大、最具代表性的前14个聚类进行分析。利用软件中 Kleinberg 的突现检测算法识别在特定时间段内频次急剧增加的关键词(突现词)及其突现强度,以此精准捕捉研究前沿的演变。本研究中,中、英文文献均检测到25个突现词。

在研究热点与趋势分析中,去除检索中使用的关键词,对研究的热点方向和趋势进行分析。去除检索用词(如“湖泊”“长江”)是文献计量分析中避免统计偏差、凸显实质性研究热点的标准方法,旨在过滤高频但信息冗余的领域标识词,从而提升关键词共现分析结果的科学性、客观性和可比性^[16-17]。在此基础上,纳入作为检索关键词的湖泊名称,对不同湖泊间的研究差异进行补充分析。

2 结果与分析

2.1 国内外发文量年际变化特征

从图1可以看出,CNKI和WOS数据库中关于长江经济带重点湖泊生态环境研究的发文量在不同年份呈现出不同变化趋势。CNKI的发文量从1979年后缓慢增长,2004年后呈现快速上升态势,2011—2013年达到峰值平台期(年发文量251~264篇),2022年达到最高值321篇后略有回落。WOS自1993年出现首篇文献,2000年后开始稳定增长,尤其在2014年后增长明显加速,2016年突破百篇(109

篇),2022—2024年进入爆发式增长阶段。进入21世纪后,2000—2023年,WOS的年均增长率(14.2%)显著高于CNKI(9.8%),表明尽管国内研究起步早、体量大,但近年来该领域的国际化进程显著加快,国际关注度提升。

发文量随时间的推移呈现波动上升态势,但在不同时间段和数据库间存在差异:①研究初期(1979—1995年,年均发文量<50篇),CNKI和WOS的发文量均处于较低水平,相关研究尚处于起步阶段;②缓慢增长期(1996—2003年),这一阶段中国政府对环境保护的重视程度有所提升,1996年国务院召开“太湖流域环保执法检查现场会”,正式启动以太湖为代表的重点湖泊污染治理行动,开始进行大规模湖泊治理;1998年长江流域特大洪水后,流域生态安全、湖泊调蓄功能受到越来越多的关注;2001年,国家环境保护总局印发《三峡库区及其上游水污染防治规划》,大型水利工程的生态影响评估成为研究热点;2002年底国家启动“973计划”项目“湖泊富营养化过程与蓝藻水华暴发机理研究”,从基础科学层面为湖泊研究提供系统性支撑,湖泊生态环境研究进入稳步发展的新阶段^[18-19],CNKI的发文量逐渐增加,但国际影响力仍然有限,WOS的发文量增长不明显;③快速增长长期

(2004—2015年),CNKI的发文量呈现爆发式增长后稍有回落,这可能与国家政策的推动有关,例如《中华人民共和国国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要》和《中华人民共和国国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》中将主要污染物减排作为约束性指标,极大地推动了水环境治理研究;2006年国家科技重大专项“水体污染控制与治理”正式启动,该专项设立大量与湖泊相关的课题,为研究提供持续且庞大的资金与项目支持;2007年太湖蓝藻危机等环境事件的暴发,从实践层面推动了对湖泊富营养化机理与治理技术的研究^[20],加之长江经济带上升为国家战略区域^[1,21],其湖泊生态环境研究得到更多资金和支持。同时WOS的发文量也开始显著增加,表明中国学者的研究成果逐渐受到国际关注;④研究活跃与国际影响力提升期(2016年至今),2016年《长江经济带发展规划纲要》发布后^[22],CNKI发文量再次出现明显增长,体现出国家战略布局对学术研究的强大带动作用。WOS发文量开始快速增长,表明长江经济带湖泊生态环境研究成果逐步获得国际学术界的认可和关注,这可能与中国科研实力的整体增强和近年来中国深度参与全球环境治理(如生物多样性公约COP15等国际议程)密切相关^[23]。

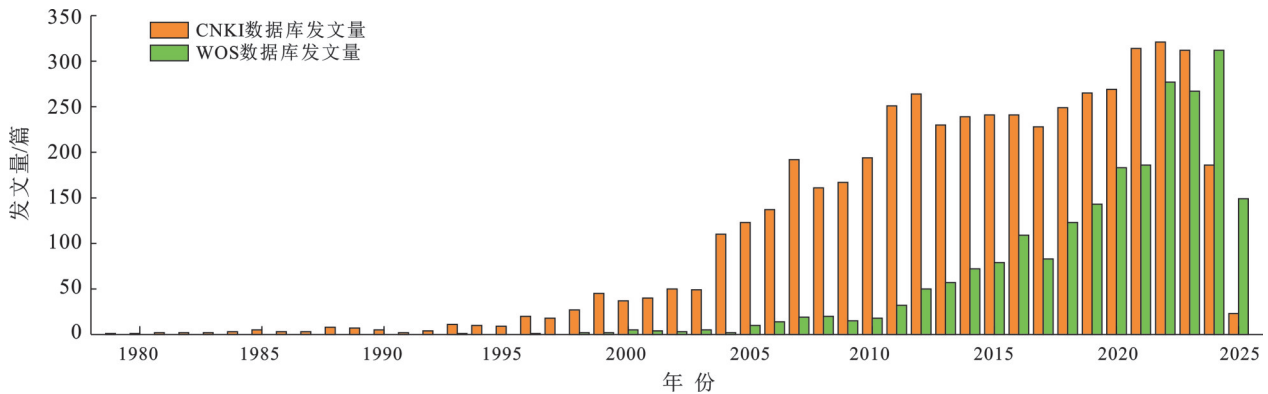


图1 CNKI数据库和WOS数据库发文量年度分布情况(1979—2024)

Fig.1 Annual distribution of publications in CNKI and WOS databases (1979—2024)

2.2 研究热点分析

关键词是文献核心内容的体现,去除检索中使用的关键词(如湖泊、长江等),中英文文献出现频次排名前10的关键词及其占比分别为富营养化(6.96%),沉积物(6.35%),影响因素(3.33%),水质分析(3.30%),蓝藻水华(2.76%),浮游植物(1.90%),重金属(1.83%),群落结构(1.81%),湿地(1.64%),水生植物(1.49%)和 impacts(4.48%), river(3.38%), dynamics(2.78%), land use(2.70%), climate change(2.36%), eutrophication(2.32%), ecosystem services(2.07%), diversity(1.78%),

pollution(1.76%), water quality(1.75%)。关键词频次与中心度有关联但并不一致,无法直接用于判断研究热点,因此通过关键词共现关系分析长江经济带重点湖泊生态环境研究热点。

运用 Citespace 软件对 CNKI 和 WOS 数据库文献关键词进行共线分析。CNKI 数据库文献形成 195 个节点,214 条连接,网络密度为 0.011 3 的关键词共线图;WOS 数据库文献形成 206 个节点、287 条连接、网络密度为 0.013 6 的关键词共线图(图 2)。其中节点表示关键词、连接表示关键词之间的共线关系。去除检索用词后,中心度较高的中

英文关键词分别为富营养化(0.80)、水利工程(0.52)、湖滨带(0.44)、保护对策(0.39)和 dynamics (0.52)、eutrophication (0.29)、nitrogen (0.29)、sediments(0.20)。

深入分析关键词网络图谱,可以识别连接不同知识群、在网络中起枢纽作用的关键概念以及核心研究主题及其内在联系。以 CNKI 网络中的关键节点“太湖”为例,其与“蓝藻水华”“富营养化”“沉积物”“氮磷”等关键词形成紧密的共现簇(图 2a),表明围绕“太湖”的研究已形成一个高度聚焦的主题群,其核心关切点是浅水湖泊的富营养化成因、内源污染(沉积物)作用及蓝藻水华暴发机制。在 CNKI 网络中,“富营养化”拥有最高的中心度(0.80),表明它是连接水质恶化、生态响应、治理技术等子领域的核心;“水利工程”(0.52)和“湖滨带”(0.44)的高中心度

表明人类活动与自然生态系统(湖滨带)的交互影响是该领域的重要研究轴线。在 WOS 网络中,“dynamics”(中心度 0.52)作为枢纽性节点,与“climate change”“hydrological regime”“modeling”等节点紧密相连,研究主题聚焦湖泊生态系统对气候变化与人类活动的动态响应过程及模拟预测。“eutrophication”(中心度 0.29)则与“nitrogen”“phosphorus”“algal bloom”形成强共现簇,构成以营养盐循环驱动藻类水华发生机理为核心的研究主线。其中,“nitrogen”虽与“eutrophication”紧密关联,但其本身也链接“retention”“cycling”等节点,显示出对氮素迁移转化过程的基础性关注。此外,“sediments”(中心度 0.20)共现节点包括“heavy metals”“organic matter”“resuspension”,表明沉积物在污染物、湖泊内源释放等环境风险研究中具有重要意义。

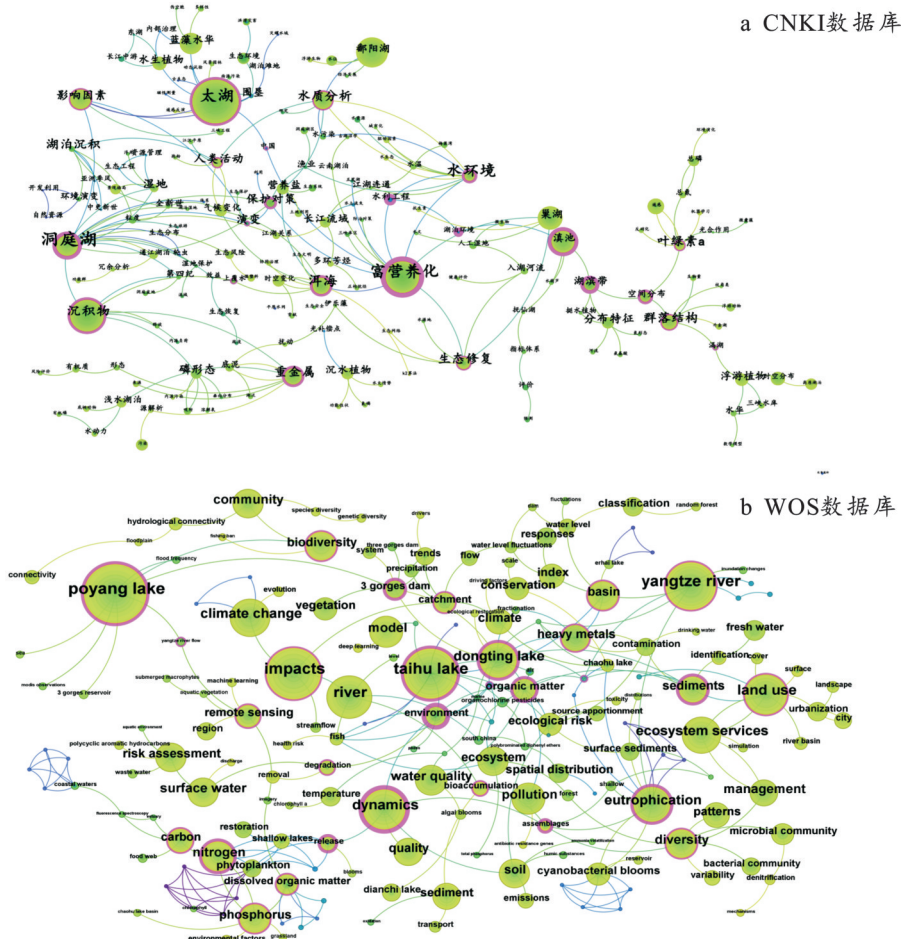


图 2 CNKI数据库(a)和WOS数据库(b)长江经济带重点湖泊生态环境研究关键词网络图谱
Fig.2 Keywords network maps of ecological environment research on key lakes in Yangtze River economic belt from CNKI database (a) and WOS database (b)

对关键词进一步进行聚类分析并形成聚类标签,前 14 项聚类中,CNKI 和 WOS 文献检索用词以外的聚类图谱包括“富营养化”,“沉积物”,“重金属”,“浮游植物”,“磷形态”,“人类活动”,“叶绿素 a”,“湿地”,“生态

环境”,“沉水植物和”,“heavy metals”,“spatial distribution”,“climate change”,“remote sensing”,“wetland vegetation”,“pahs”,“shallow lakes”,“ecosystem services”,“net primary productivity”,“risk assessment”,“prior probability”。综合

分析关键词共线图(图 2)和聚类表(表 1, 表 2), 长江经济带重点湖泊生态环境研究热点可归纳为效应识别、机理分析和决策应用 3 个方面。相关研究聚焦于对湖泊生态环境效应响应(如富营养化、重金属污染)的识别, 进而深入探究其自然与人为驱动机制(如气候变化、土地利用), 最终发展为寻求系统性解决方案与技术支撑(如生态修复、遥感监测), 形成从基础问题识别到治理实践应用的研究逻辑。

表 1 CNKI 文献关键词共线网络聚类结果
Table 1 Keyword co-occurrence network clusters from CNKI database

聚类号	聚类大小	标识词(LSI)
#0	24	洞庭湖, 三峡工程, 太湖, 东洞庭湖, 环境因子
#1	17	太湖, 蓝藻水华, 蓝藻, 水生植物, 洞庭湖
#2	16	富营养化, 巢湖, 生态修复, 鄱阳湖, 巢湖流域
#3	15	沉积物, 洱海, 营养盐, 时空变化, 洱海流域
#4	15	重金属, 浅水湖泊, 污染评价, 底泥, 底泥疏浚
#5	14	鄱阳湖, 水质, 水环境, 水质评价, 水位
#6	14	滇池, 滇池流域, 分布特征, 湖滨带, 水污染治理
#7	13	浮游植物, 群落结构, 浮游动物, 时空分布, 沉积物
#8	12	磷形态, 长江流域, 吸附, 长江, 多环芳烃
#9	12	人类活动, 气候变化, 湖泊沉积, 全新世, 孢粉
#10	10	叶绿素 a, 总磷, 总氮, 遥感, 空间分布
#11	5	湿地, 景观格局, 景观格局指数, 遥感影像, 浮床
#12	5	生态环境, 洪灾, 湖泊滩地, 湖北省, 长江经济带
#13	5	沉水植物, 功能性状, 氮磷, 西洞庭湖, 河蚌

(1) 湖泊生态环境效应的表征与风险评估。主要包括湖泊富营养化研究和水质与沉积物研究。关键词共现网络中, “富营养化”节点拥有极高的中心度(0.80), 聚类#2 富营养化、#8 磷形态和#10 叶绿素 a、#7 pahs 涉及湖泊富营养化研究, 共线标志词包括“蓝藻水华”“总磷”“总氮”等, 表明营养盐过量输入及其引发的藻类水华问题是长江经济带湖泊面临的最核心、最受关注的生态环境效应。已有研究揭示该区域湖泊, 尤其是浅水湖泊如太湖、巢湖等, 富营养化的发生机制与湖泊水动力条件(如风浪扰动导致的沉积物再悬浮)、内源营养盐释放通量以及外源输入负荷等因素密切相关。研究表明, 部分湖泊正处于从中营养化向富营养化转变的关键时期, 水体生态系统的稳定性面临严峻挑战^[8, 24]。“重金属”(#4 重金属、#0 heavy metals)、“沉积物”(#3 沉积物)以及“PAHs”(#7 PAHs)等节点与“污染评价”“生态风险”(ecological risk)、“微塑料”(microplastics)等关键词形成强关网络(表 1, 表 2), 表明研究热点已从常规的富营养化问题扩展到对持久性有毒污染物(PTS)

及新型污染物的生态风险关注。对长江经济带主要湖泊沉积物的系统调查表明, 太湖、滇池等重点湖泊沉积物中镉(Cd)、铅(Pb)、汞(Hg)等重金属的潜在生态风险指数多次被报道处于中、高风险水平^[25]。沉积物作为污染物的“汇”和“源”, 其内源释放行为, 尤其是磷的二次释放, 对上覆水体营养盐浓度的贡献率可达 20%~40%, 是维持湖泊富营养化状态的关键过程^[26]。此外, 随着分析技术的进步, 对湖泊中微塑料、抗生素等新型污染物的赋存特征、迁移转化规律及生态毒理效应的研究正成为新兴热点(聚类中出现相关关键词), 标志着效应识别范围正从传统污染物向复合污染风险拓展^[27]。

(2) 气候变化与人类活动对湖泊生态环境影响的多尺度耦合驱动机制解析。气候驱动方面, 聚类#9 人类活动、#3 climate change 显示出已有研究对气候变化和人类活动的关注, 共线标志词包括“城市化”“土地利用”“温度”“降水”“湖泊沉积”“全新世”“孢粉”“transport”“trend analysis”等。气候变化和人类活动共同影响湖泊的水文过程、水质和生物多样性^[28]。气候变化通过改变降水、温度和极端天气影响长江经济带湖泊生态环境, 其中, 降水变率增加导致湖泊水位波动加剧, 温度升高促进蓝藻水华暴发并延长富营养化持续时间, 冰川退缩和降水格局变化影响上游湖泊的水量平衡^[29]。此外, 气候变暖还改变湖泊热力学结构, 影响水生生物群落。人为驱动方面, 人类活动主要包括水利工程、污染排放和土地利用变化^[30], 其中三峡大坝等水利工程改变下游湖泊的水文连通性^[25, 31], 导致湿地萎缩和生物栖息地退化; 农业面源污染(氮、磷)和城市污水排放加剧湖泊富营养化(如太湖、巢湖)^[32]; 围湖造田、水产养殖等土地利用变化减少湖泊面积, 削弱生态功能; 航运和采砂活动增加沉积物再悬浮, 影响水质。已有研究表明, 驱动因素之间具有复杂的交互影响, 例如气候变暖为蓝藻水华的暴发创造更有利的温度条件, 而人类活动(农业、生活)导致营养盐过剩则为水华暴发提供充足的物质基础, 二者协同作用显著加剧湖泊富营养化的风险与治理难度^[32]。同样, 水利工程引起的水文情势改变, 可能会与气候变化导致的降水格局变化叠加, 共同影响湖泊的自净能力。因此, 揭示不同驱动因子的耦合协同效应是当前研究的前沿与难点。

(3) 生态修复与智能管控的治理策略与技术响应。该方面的相关研究从传统的“末端治理”逐渐扩展到“源头预防—过程调控—智慧管控”的系统性治理范式, 主要包括生态风险评估与生态修复、技术赋能与智能管控研究。生态风险评估与生态修复方

面,聚类#11 湿地, #12 生态环境, #6 wetland vegetation, #9 ecosystem services, #11 risk assessment 显示出对湖泊风险评估与管理与湖泊生态系统修复、生物多样性保护等领域的关注,共线标志词包括“生态修复”“沉水植物”“湿地”“景观格局”“洪灾”“湖泊滩地”“长江经济带”“ecosystem services”“community assembly”“antibiotics”等。生态风险评估主要关注污染物暴露效应及生态系统响应,相关研究构建了多样化的评价指标体系和方法,综合考虑自然因素和人类活动的影响,开发了基于湖泊水文连通性等本底状况的湖泊富营养化关键因子甄别方法和“一湖一策”治理路径^[33]。研究表明,长江中下游湖泊(如洞庭湖、鄱阳湖、太湖)沉积物中重金属和有机污染物存在较高生态风险^[25]。此外,水利工程(如三峡大坝)改变湖泊水文节律,加剧湿地退化风险^[34]。新型污染物(如微塑料、抗生素)的生态风险也受到关注^[27]。在生态修复方面,开展生态系统服务相关研究,提出长江中下游湖泊生态环境调控策略,并构建水文-生态耦合的水文连通性评估工

具^[35-36]。已有生态修复技术主要包括物理修复(如底泥疏浚)、化学钝化(如镧改性膨润土)和生物修复(如人工湿地、水生植被恢复)等,在部分湖泊提升了水质和生物多样性^[37-38]。在技术赋能与智能管控方面,聚类#4 remote sensing 和#10 net primary productivity 显示出对湖泊生态环境监测分析方法研究的关注。近年来,长江流域湖泊生态环境监测技术快速发展,主要方法包括遥感监测、原位传感器网络、生物监测及大数据分析等。多源卫星遥感(如 Landsat, Sentinel-2, MODIS)结合高光谱成像,实现湖泊水质(叶绿素 a、悬浮物、透明度)和富营养化的动态监测^[39]。深度学习算法(如 CNN)提升遥感数据的分类精度^[40]。物联网(IoT)技术推动实时监测,浮标式传感器可采集 pH、溶解氧、氮磷等参数,结合 LoRa/WiFi 传输,构建长江中下游湖泊的立体监测网络。通过环境 DNA(eDNA)宏条形码技术分析浮游生物和底栖生物群落,评估生态健康状态。机器学习(如随机森林、LSTM)用于水质预测,耦合水文模型(SWAT, EFDC)模拟污染物迁移。

表2 WOS文献关键词共线网络聚类结果

Table 2 Keyword co-occurrence network clusters from WOS database

聚类号	聚类大小	标识词(LSI)
#0	22	heavy metals; microplastics; heavy metal; land use; Dongting Lake
#1	21	spatial distribution; Taihu Lake; deep learning; surface sediment; source
#2	17	Poyang Lake; hydrological connectivity; Taihu Lake; three gorges dam; Dongting Lake
#3	17	climate change; transport; trend analysis; runoff; remote sensing
#4	16	remote sensing; submerged aquatic vegetation; aquatic vegetation; dissolved organic matter
#5	15	Yangtze River; Chaohu Lake; eutrophication control; phosphorus buffering capacity; NAPI
#6	13	wetland vegetation; Poyang Lake wetland; random forest; water level; sediment
#7	13	pahs; ammonia volatilization; surface sediments; ecological risk; lake sediments
#8	12	shallow lakes; river-connected lake; microcystins; algae bloom; correlation
#9	11	ecosystem services; bacterial community; microbial community; community assembly; high-throughput sequencing
#10	9	net primary productivity; dissolved organic matter composition; stoichiometry; modis image; excitation-emission matrix fluorescence coupled
#11	8	risk assessment; surface water; antibiotics; passive sampler; distribution pattern
#12	7	Dianchi Lake; water quality; SOM; water quality assessment; WQI
#13	6	shallow lakes; prior probability; NAI; 2-methylisoborneol; ve bayes

在研究区域方面,已有文献对长江中下游的太湖、洞庭湖、鄱阳湖生态环境相关研究较多,而对上游的洱海和下游的巢湖研究相对较少。虽然对于上游滇池的研究相对较少但研究较为集中,以水质分析和水污染治理为主。此外,尽管英文文献中“长江”作为关键词虽然出现较多,但研究多集中在水利工程对局地环境的影响,针对长江经济带湖泊的整体研究相对不足。

2.3 研究前沿与趋势分析

关键词时间线图谱和突现图谱能够反映不同时

间段内的研究热点和趋势变化。时间线图谱中关键词按时间顺序排列,并通过不同颜色和大小节点表示其重要性和研究的集中度(图3)。在时间轴上,中文文献关键词突现主要集中在2000年以后(占总关键词的85%),其中2010年后是高峰期(占75%)。早期热点关键词(如“洞庭湖”“太湖”“富营养化”“沉积物”和“重金属”)在1993—2010年出现频率较高(平均每年2~3个关键词),反映了对湖泊污染和生态问题的初始关注。2000—2010年,关键词以污染类为主(如“重金属”出现频率达0.8次/年);2010年后,热点

转向“鄱阳湖”“滇池”“浮游植物”“磷形态”和“人类活动”,其中“人类活动”的集中度最高,节点大小上升30%。同时,生态修复类关键词(如“湿地”“生态环境”和“沉水植物”)在2015年后突增,平均每年新增1.5个

关键词,表明研究向生态修复和生物多样性保护倾斜。2010年以来,每10个新关键词中有6个涉及生态系统过程或人类影响,表明研究热点逐渐转向内部过程和人类影响。

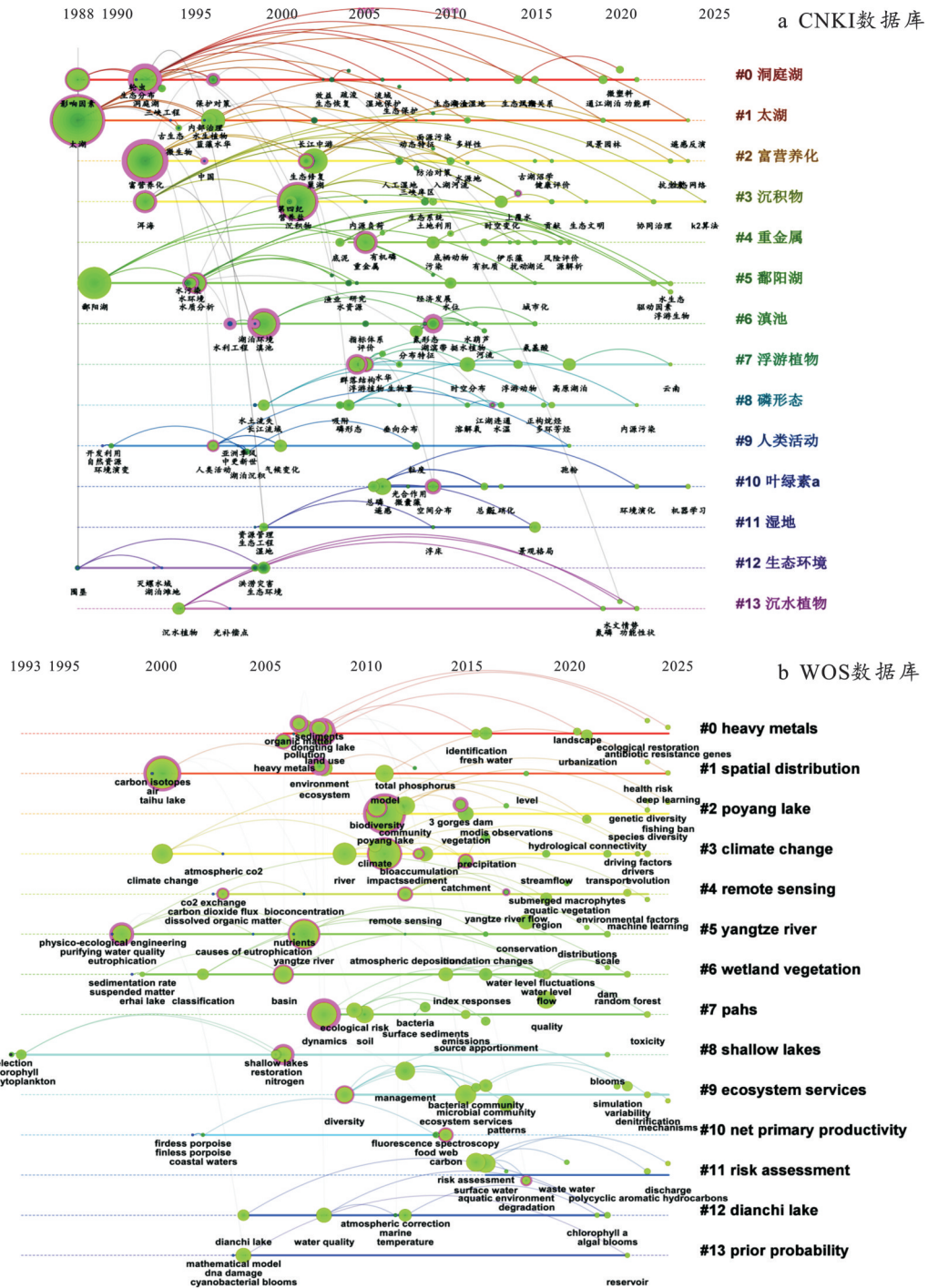


图3 CNKI(a)和WOS数据库(b)长江经济带重点湖泊生态环境研究关键词时间线图谱
Fig.3 Timeline of keywords in research on ecological environment of key lakes in Yangtze River economic belt from CNKI (a) and WOS databases (b)

英文文献关键词突现同样集中在2000年后(占90%),且2010年后更显著(占80%)。早期关键词较少,2000—2010年平均每年1~2个关键词;2010年后,热点如“heavy metals”“spatial distribution”“climate

change”和“remote sensing”集中出现,其中“climate change”节点大小增长40%,表示研究集中度提升。2017年以来,关键词如“wetland vegetation”“ecosystem services”和“net primary productivity”

“climate change”突增,表明国际研究对湖泊生态系统服务(如碳汇功能)和跨学科整合的关注增加。

进一步通过关键词突现图谱分析突现强度较高的关键词的具体研究时段变化,结果(图4)表明,中文文献中突现强度较高的关键词为“保护对策”(1996—2010)、“生态环境”(1999—2009)、“湿地”(1999—2010)等,显示早期研究集中在湖泊保护策略、生态环境和湿地保护等方面,这一时期保护策略的探讨以定性分析为主,主要面向某一特定区域或污染物。随着时间推移,研究热点逐渐转向“时空分布”(2013—2019)、“气候变化”(2022至今)、“景观格局”(2015至今)等,研究内容更加关注湖泊生态系统的空间分布特征以及气候变化对湖泊生态的影响,江湖交互关系的研究也逐渐增加。英文研究中突现强度较高的关键词包括“spatial distribution”(2006—2018)、“Taihu Lake”(2008—2014)、“water quality”(2008—2015)等,反映了国际研究对湖泊空间分布、特定湖泊以及水质问题的关注。近年来,研究热点转向“urbanization”(2021至今)、“ecosystem services”(2019—2021)、“climate change”(2017至今)等,显示出对城市化进程、生态系统服务以及气候变化影响的关注增加。总体上,早期(1993—2010年)研究聚焦污染治理,中文以区域湖泊效应为核心(占关键词70%),英文则侧重空间分布技术;2010年后,中英文热点同步转向生态过程与人类影响,中文“人类活动”“磷形态”节点增长30%,英文“climate change”突现强度提升40%,凸显全球挑战的跨学科整合趋势。近年来中文持续深化江湖交互研究,其中“景观格局”突现时长持续10 a,英文则聚焦城市化与生态系统服务,关键词“ecosystem services”突现强度年增35%。

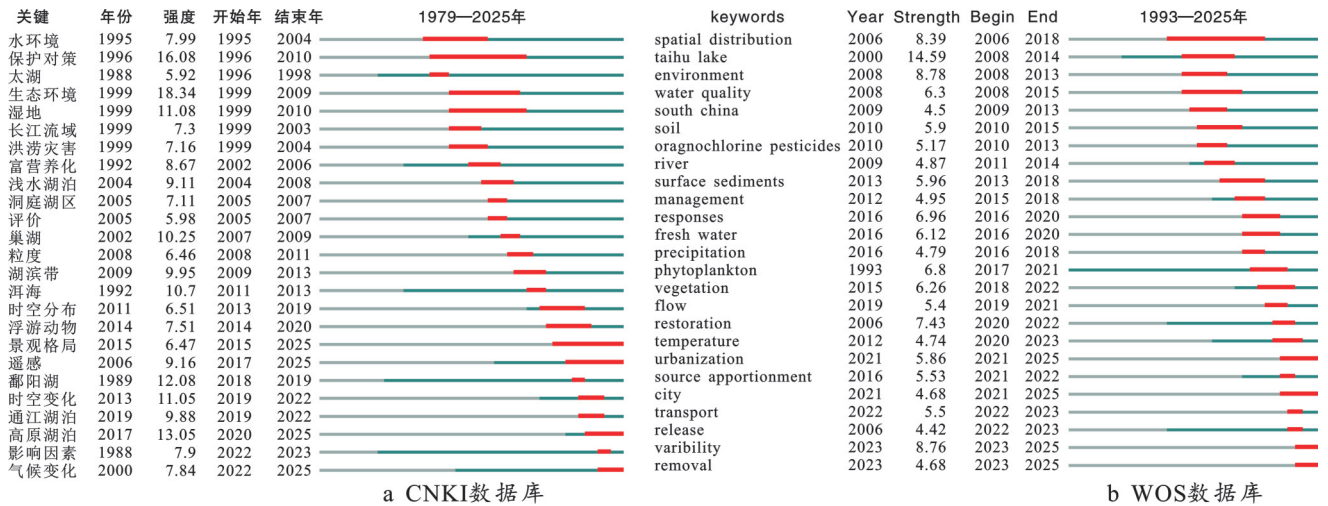


图4 CNKI数据库(a)和WOS数据库(b)长江经济带重点湖泊生态环境研究关键词突现词图谱
 Fig.4 Burst keyword map of research on ecological environment of key lakes in Yangtze River economic belt from CNKI database (a) and WOS database (b)

3 展望

基于上述对长江经济带湖泊生态环境研究热点的文献计量分析,本研究识别出长江经济带湖泊生态保护的热点从早期的保护策略和污染治理^[32],逐渐转向生态修复^[37-38]、生物多样性保护^[3]、生态系统服务功能^[35],以及对全球变化响应的研究^[28-29],显示出研究领域的扩展和深化(图3,图4)。然而,热点中仍存在若干亟待深化与突破的关键科学问题,在多尺度耦合机理、协同效应、新技术和新理念应用方面研究较少。2024年发布的《长江经济带-长江流域国土空间规划(2021—2035年)》通过明确“生态优先,绿色发展”的总体定位,强化湖泊湿地保护与修复目标,划定生态保护红线和管控要求,推动跨区域,多学科

协同研究,促进水环境治理、生物多样性维护和生态功能提升等关键领域的科学探索^[3]。随着气候变化与人类活动对湖泊生态系统影响的不断加强,未来需要加强以下4方面的研究,科学支撑长江经济带湖泊生态系统稳定性维持与可持续性提升。

(1) 探讨长江经济带多尺度河湖生物多样性、生态过程与气候变化、人类活动的关系,深化多过程耦合与跨尺度驱动机制研究。当前研究虽已广泛识别出富营养化、蓝藻水华等热点问题,但对不同驱动因子的交互作用以及“流域-湖体-生物”多尺度间的耦合机理认识不足。相关研究已成为全球湖泊生态学的焦点,尤其是在全球变化背景下评估多重压力因子对淡水生物多样性的协同影响。因此,应强化不同尺度湖泊富营养化、蓝藻水华等问题的驱动机制

研究,结合气候变化模型(如IPCC SSP-RCP),预测极端气候对湖泊水文和生态的影响。

(2) 加强长江经济带湖泊跨区域生态补偿与用途管制协同优化研究,探索基于生态系统的跨区域协同治理路径。尽管生态系统服务已成为研究热点,但如何将其价值评估转化为可操作的跨区域生态补偿机制和空间用途管制策略仍需深入研究。因此,在单一生态学视角的基础上,需将社会-生态系统(SSES)框架纳入分析,探讨治理规则与生态过程的互馈机理。未来应强化湖泊群水文连通性及污染物迁移规律、多污染物协同效应、社会-生态协同发展机制等方面的研究,探讨长江经济带不同湖泊、江湖生态系统服务的空间关联性以及用途管制下如何平衡生态保护与生计替代,研究差异化的跨区域生态补偿机制和用途管制政策路径。

(3) 开展长江经济带重点湖泊生态保护修复新技术研究,推动智慧湖泊与适应性管理技术创新。当前,遥感、eDNA等新技术已广泛应用于生态环境监测,但其在智能预警与适应性管理方面的潜力尚未充分发挥。因此应加强多尺度耦合预测、AI驱动的智能预警模型研究,利用5G、AI和数字孪生技术构建湖泊动态仿真系统,实现污染溯源与精准管控。应用eDNA和遥感技术监测濒危物种,量化湖泊生态服务价值,探索“双碳”目标下的生态管理路径。

(4) 深化国内外先进理念在长江经济带湖泊生态保护修复中的应用路径研究,强化基于自然的解决方案(NbS)本地化应用与效能评估。面对日益复杂的生态环境挑战,NbS因其能够协同提供生态、社会和经济多重效益而成为全球生态治理的核心范式。未来需强化山水林田湖草沙系统治理理念,探索基于自然的解决方案(NbS)在湿地修复、生态缓冲带建设,提升湖泊自净能力等方面的应用,研究适应气候变化的保护修复策略。

在未来研究中,建议加强江湖联动过程的量化模拟,推动跨区域生态补偿机制与生态空间用途管制的协同优化,并深化NbS在湖泊生态修复与可持续管理中的应用,从而为长江经济带生态安全与高质量发展提供更具操作性的科学支撑。

4 结论

长江经济带重点湖泊生态环境研究已从早期的局部污染治理,演进为一个融合自然过程机理解析与人类活动调控的综合性研究领域。其发展脉络不仅受国家政策与环境事件的显著驱动,也体现出研究范式从单一环境问题识别向社会-生态系统复杂性解

析的转变。中英文文献的研究热点各有侧重但又体现出共性的演进趋势,中文研究更关注治理对策与政策实施效果,而英文研究则偏重全球变化下的生态系统服务响应与模拟预测,二者的共同趋势均指向对跨尺度作用机制及系统性治理方案的关注。

参考文献(References)

- [1] 刘毅,周成虎,王传胜,等.长江经济带建设的若干问题与建议[J].地理科学进展,2015,34(11):1345-1355.
Liu Yi, Zhou Chenghu, Wang Chuansheng, et al. Issues and suggestions on the construction of the Yangtze River economic belt [J]. Progress in Geography, 2015, 34 (11):1345-1355.
- [2] 羊向东,董旭辉,陈旭,等.长江经济带湖泊环境演变与保护、治理建议[J].中国科学院院刊,2020,35(8):977-987.
Yang Xiangdong, Dong Xuhui, Chen Xu, et al. Past environmental changes and management suggestions for lakes in the Yangtze River economic belt [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(8):977-987.
- [3] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.关于加强长江经济带重要湖泊保护和治理的指导意见[EB/OL]. (2021-11-24) [2025-05-30]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202111/t20211124_1304885.html.
National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Guiding opinions on strengthening the protection and governance of important lakes in the Yangtze River economic belt [EB/OL]. (2021-11-24) [2025-05-30]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202111/t20211124_1304885.html.
- [4] 自然资源部.长江经济带—长江流域国土空间规划(2021—2035年)[EB/OL]. [2025-05-30]. <https://swj.sh.gov.cn/shshyglswzx-zcfg/20240912/83f2c68d68114835a95e95b73efeb038.html>.
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Yangtze River economic belt: Yangtze River basin national territorial spatial planning (2021—2035) [EB/OL]. [2025-05-30]. <https://swj.sh.gov.cn/shshyglswzx-zcfg/20240912/83f2c68d68114835a95e95b73efeb038.html>.
- [5] Cui Lijuan, Gao Changjun, Zhao Xinsheng, et al. Dynamics of the lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin, China, since late nineteenth century [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185(5):4005-4018.
- [6] 张甘霖,谷孝鸿,赵涛,等.中国湖泊生态环境变化与保护对策[J].中国科学院院刊,2023,38(3):358-364.
Zhang Ganlin, Gu Xiaohong, Zhao Tao, et al. Ecological and environmental changes and protection measures of lakes in China [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(3):358-364.

- [7] 徐力刚, 谢永宏, 王晓龙. 长江中游通江湖泊洪泛湿地生态环境问题与研究展望[J]. 中国科学基金, 2022, 36(3):406-411.
Xu Ligang, Xie Yonghong, Wang Xiaolong. Ecological environment problems and research prospect of flood wetlands of Yangtze River-connected lake in the middle reaches of Yangtze River [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2022, 36(3):406-411.
- [8] 李海生, 杨鹤平, 赵艳民. 聚焦水生态环境突出问题, 持续推进长江生态保护修复[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(2):336-347.
Li Haisheng, Yang Queping, Zhao Yanmin. Focusing on water eco-environment problems and sustainably promoting ecological conservation and restoration of the Yangtze River [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(2):336-347.
- [9] Guan Qi, Feng Lian, Hou Xuejiao, et al. Eutrophication changes in fifty large lakes on the Yangtze plain of China derived from MERIS and OLCI observations [J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 246:111890.
- [10] 高伟, 杜展鹏, 严长安, 等. 污染湖泊生态系统服务净价值评估:以滇池为例[J]. 生态学报, 2019, 39(5):1748-1757.
Gao Wei, Du Zhanpeng, Yan Chang'an, et al. Evaluating net ecosystem services value of a polluted lake: A case study of Lake Dianchi [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(5):1748-1757.
- [11] 秦伯强, 吴海斌. 长江流域湖泊富营养化发展趋势与展望[J]. 人民长江, 2023, 54(10):18-23.
Qin Boqiang, Wu Haibin. Lake eutrophication development trend and perspectives in Changjiang River basin [J]. Yangtze River, 2023, 54(10):18-23.
- [12] 陆杉, 王楠, 郭玥汐. 基于文献计量的湖泊生态系统服务研究热点与趋势分析[J]. 环境科学研究, 2024, 37(6):1253-1266.
Lu Shan, Wang Nan, Guo Yuexi. Analysis of research hotspots and trends in lake ecosystem services based on bibliometrics [J]. Research of Environmental Sciences, 2024, 37(6):1253-1266.
- [13] Chen Chaomei. CiteSpace II: Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature [J]. Journal of the American Society for Information Science and Technology, 2006, 57(3):359-377.
- [14] Small H. Co-citation in the scientific literature: A new measure of the relationship between two documents [J]. Journal of the American Society for Information Science, 1973, 24(4):265-269.
- [15] Chen Chaomei, Song Min. Visualizing a field of research: A methodology of systematic scientometric reviews [J]. PLoS One, 2019, 14(10):e0223994.
- [16] Zupic I, Čater T. Bibliometric methods in management and organization [J]. Organizational Research Methods, 2015, 18(3):429-472.
- [17] Della Corte V, Del Gaudio G, Sepe F, et al. Sustainable tourism in the open innovation realm: A bibliometric analysis [J]. Sustainability, 2019, 11(21):6114.
- [18] Zong Yongqiang, Chen Xiqing. The 1998 flood on the Yangtze, China [J]. Natural Hazards, 2000, 22(2):165-184.
- [19] 卢耀如, 金晓霞. 三峡工程的现实与争议[J]. 中国减灾, 2011(7):32-34.
Lu Yaoru, Jin Xiaoxia. Reality and controversy of the Three Gorges project [J]. Disaster Reduction in China, 2011(7):32-34.
- [20] 孔繁翔, 胡维平, 谷孝鸿, 等. 太湖梅梁湾2007年蓝藻水华形成及取水口污水团成因分析与应急措施建议[J]. 湖泊科学, 2007, 19(4):357-358.
Kong Fanxiang, Hu Weiping, Gu Xiaohong, et al. On the cause of cyanophyta bloom and pollution in water intake area and emergency measures in Meiliang bay, Lake Taihu in 2007 [J]. Journal of Lake Sciences, 2007, 19(4):357-358.
- [21] 虞孝感, 王磊, 杨清可, 等. 长江经济带战略的背景及创新发展的地理学解读[J]. 地理科学进展, 2015, 34(11):1368-1376.
Yu Xiaogan, Wang Lei, Yang Qingke, et al. Background of the Yangtze River economic belt development strategy and geography interpretation of its innovative development [J]. Progress in Geography, 2015, 34(11):1368-1376.
- [22] 国务院. 长江经济带发展规划纲要[EB/OL]. (2016-09-11) [2025-05-30]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/hjyw/201609/t20160912_363929.shtml.
The State Council of the People's Republic of China. Outline of Yangtze River economic belt development plan [EB/OL]. (2016-09-11) [2025-05-30]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/hjyw/201609/t20160912_363929.shtml.
- [23] 郭娅, 薛滨, 吕新华. 基于文献计量的湖泊科学领域国际合作研究[J]. 世界科技研究与发展, 2023, 45(增刊1):60-70.
Guo Ya, Xue Bin, Lü Xinhua. Research on international cooperation in lake science based on bibliometrics [J]. World Sci-Tech R & D, 2023, 45(S1):60-70.
- [24] 邹伟, 朱广伟, 蔡永久, 等. 综合营养状态指数(TLI)在夏季长江中下游湖库评价中的局限及改进意见[J]. 湖泊科学, 2020, 32(1):36-47.
Zou Wei, Zhu Guangwei, Cai Yongjiu, et al. The limitations of comprehensive trophic level index (TLI) in the eutrophication assessment of lakes along the middle and lower reaches of the Yangtze River during summer

- season and recommendation for its improvement [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(1):36-47.
- [25] Zhu Chunyan, Zhang Yuning, van Maren D S, et al. Modulation of sediment load recovery downstream of Three Gorges dam in the Yangtze River [J]. *Anthropocene Coasts*, 2023, 6(1):2.
- [26] Song Xinyu, Xu Lina, Dai Yanhui. Yangtze River: The potential ecological risk of heavy metals in sediment from 1996 to 2012 [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, 61(1):012030.
- [27] Zhang Zeqian, Deng Chenning, Dong Li, et al. Microplastic pollution in the Yangtze River basin: Heterogeneity of abundances and characteristics in different environments [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 287:117580.
- [28] Chen Ting, Zou Lei, Xia Jun, et al. Decomposing the impacts of climate change and human activities on runoff changes in the Yangtze River basin: Insights from regional differences and spatial correlations of multiple factors [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 615:128649.
- [29] 益西卓玛, 高佳佳, 拉巴, 等. 长江源区湖泊-冰川变化特征及其对气候变化的响应[J]. *冰川冻土*, 2024, 46(1):28-39.
Yixizhuoma, Gao Jiajia, Laba, et al. Characteristics of lake-glacier change in source region of the Yangtze River and its response to climate change [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2024, 46(1):28-39.
- [30] Sheng Hui, Darby S E, Zhao Ning, et al. Anthropogenic eutrophication and stratification strength control hypoxia in the Yangtze estuary [J]. *Communications Earth & Environment*, 2024, 5:235.
- [31] 邓金运, 范少英, 庞灿楠, 等. 三峡水库蓄水期长江中游湖泊调蓄能力变化[J]. *长江科学院院报*, 2018, 35(5):147-152.
Deng Jinyun, Fan Shaoying, Pang Cannan, et al. Adjustment of regulation and storage capacity of lakes in the middle Yangtze River basin during impoundment of Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, 35(5):147-152.
- [32] 李静, 闵庆文, 李子君, 等. 太湖流域农业污染压力分析[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(3):348-355.
Li Jing, Min Qingwen, Li Zijun, et al. Agricultural pollution pressure in the Taihu Lake basin [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(3):348-355.
- [33] 生态环境部, 发展改革委, 财政部. 水质较好湖泊生态环境保护总体规划(2013—2020年)[EB/OL]. (2014-09-10) [2025-05-30]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201409/t20140930_289795.
Ministry of Ecology and Environment, National Development and Reform Commission, Ministry of Finance of the People's Republic of China. Overall plan for the protection of the ecological environment of lakes with relatively good water quality (2013—2020) [EB/OL]. (2014-09-10) [2025-05-30]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201409/t20140930_289795.htm
- [34] 汪浩, 王为木, 刘慧, 等. 长江中下游典型浅水湖泊表层水体微塑料时空分布特征: 以湖北保安湖为例[J]. *湖泊科学*, 2024, 36(3):731-740.
Wang Hao, Wang Weimu, Liu Hui, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of microplastics in surface water of typical shallow lake in the middle and lower reaches of Yangtze River: A case study of Lake Baoan, Hubei Province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2024, 36(3):731-740.
- [35] 张平, 朱翔, 贺清云, 等. 长江经济带生态系统服务供需时空分异与平衡格局分析[J]. *生态科学*, 2020, 39(6):155-166.
Zhang Ping, Zhu Xiang, He Qingyun, et al. Analysis on the spatial-temporal differentiation and supply-demand balance pattern of ecosystem services in the Yangtze River economic zone [J]. *Ecological Science*, 2020, 39(6):155-166.
- [36] Luo Qiaoling, Luo Longyan, Zhou Qingfeng, et al. Does China's Yangtze River economic belt policy impact on local ecosystem services? [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 676:231-241.
- [37] 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 Tong, Li Jianqiang, Chen Wenxue, et al. Research progress in theories and approaches for lake ecosystem restoration [J]. *Advances in Water Science*, 2024, 35(6):1005-1020.
- [38] 刘帅, 沈剑, 汪金辉, 等. 镧改性膨润土应用于自然水体的控磷效果及其水生生态影响研究进展[J]. *环境工程*, 2025, 43(2):126-137.
Liu Shuai, Shen Jian, Wang Jinhui, et al. Research on phosphorus control effect of lanthanum-modified bentonite applied to natural water bodies and its aquatic ecological impacts [J]. *Environmental Engineering*, 2025, 43(2):126-137.
- [39] 段洪涛, 张寿选, 张渊智. 太湖蓝藻水华遥感监测方法[J]. *湖泊科学*, 2008, 20(2):145-152.
Duan Hongtao, Zhang Shouxuan, Zhang Yuanzhi. Cyanobacteria bloom monitoring with remote sensing in Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, 20(2):145-152.
- [40] 温泉, 李璐, 熊立, 等. 基于深度学习的遥感图像水体提取综述[J]. *自然资源遥感*, 2024, 36(3):57-71.
Wen Quan, Li Lu, Xiong Li, et al. A review of water body extraction from remote sensing images based on deep learning [J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2024, 36(3):57-71.