

湖泊氮沉积研究热点与发展趋势

吴 净¹, 郭佳怡¹, 张明礼^{1,2,3}, 王延华^{1,2,3}

(1. 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210023)

(2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 江苏 南京 210023)

(3. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210023)

[摘要] 为剖析 2000—2022 年国内外湖泊氮沉积研究的发展历程、热点与趋势, 利用文献计量学软件 CiteSpace, 主要从合作网络、文献被引和关键词三个方面, 对 Web of Science (WOS) 和中国知网 (CNKI) 数据库中的相关文献进行了可视化计量分析。研究结果显示: (1) 23 年来, 湖泊氮沉积领域研究成果高度集中于中国和美国; (2) 领域内的研究热点依次为富营养化、流域视角下的氮形态及其转化、湖泊综合环境效应; (3) 未来研究需重点关注气候变化与人类活动双重作用下流域氮的动态变化及其驱动因素, 以及湖泊氮素数据库的完善和复合污染评价。

[关键词] 湖泊, 氮沉积, 热点, CiteSpace, 可视化图谱

[中图分类号] X524; G353.1 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2025)01-0018-10

Research Hotspot and Development Trend of Lake Nitrogen Deposition

Wu Jing¹, Guo Jiayi¹, Zhang Mingli^{1,2,3}, Wang Yanhua^{1,2,3}

(1. School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China)

(3. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment of Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: To analyze the research development stage, hotspots, and future trend of lake nitrogen deposition worldwide from 2000 to 2022, the bibliometrics software CiteSpace was applied to visualize the related literatures in the Web of Science (WOS) and China National Knowledge Infrastructure (CNKI), focusing on collaborative networks, literature citations, and keywords. Results show that: (1) In the past 23 years, the research achievements in lake nitrogen deposition have been concentrated in China and America. (2) The hotspots include eutrophication, nitrogen morphology and its transformation from watershed perspective, and lake comprehensive environmental effects in turn. (3) Future research needs to focus on the dynamic change of nitrogen and its driving factors in watersheds under the dual effects of climate change and human activities, as well as the improvement of lake nitrogen databases and the assessment of compound pollution.

Key words: lake, nitrogen deposition, hotspot, CiteSpace, visual mapping

湖泊作为流域物质的汇, 其沉积物是记录人类活动和自然环境变化的重要载体, 在流域生态环境的演变研究中起关键作用^[1]。氮是湖泊生态系统中的重要元素, 可通过颗粒物的沉降和输运蓄积于湖泊沉积物中, 并在一定条件下从沉积物再释放到上覆水中, 参与新一轮的生物地球化学循环^[2-5]。随着人类活动干扰程度的不断加深, 湖泊氮素过量引发的水环境问题日益严重, 引起了学者的广泛关注^[6-8]。由于湖泊氮沉积的研究不断增加, 使用传统的计量方法已无法全面预测该领域的未来发展趋势, 因此运用高效的计量方法厘清湖泊氮沉积的研究热点、阐明该领域的发展趋势和方向就十分必要。

文献计量学是一门应用统计学计量方法分析文献的结构、特征和规律的交叉学科^[9-10]。科学知识图

收稿日期: 2023-11-26.

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFC3201500).

通讯作者: 王延华, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 流域生态环境演变. E-mail: wangyanhua@njnu.edu.cn

谱是目前被广泛使用的可视化分析方法,绘制工具包括 CiteSpace、VOSviewer、UCINET 等。其中,CiteSpace 软件能够实现作者、机构、国家和关键词的共现分析,引文、作者和期刊的共被引分析,文献耦合分析以及突现词或突现文献探测,更适用于多元、分时、动态的复杂网络分析^[11-13]。本研究以 Web of Science (WOS) 及中国知网 (CNKI) 数据库的文献资料为数据源,选择 CiteSpace 软件作为文献计量分析工具,并从发文量、发文国家、关键词、载文期刊及文献被引频次等方面,分析国内外湖泊氮沉积的相关研究,旨在从文献数量与期刊分布、国际交流合作、研究主题与演变等角度阐述湖泊氮沉积的研究进展与发展态势。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

基于 WOS 核心合集和 CNKI 数据库,本研究分别以“湖泊”和“氮”和“沉积物”、“lake”AND“nitrogen”AND“sediment”为中英文主题词进行高级检索,每条检索记录包括文章标题、作者、出版年份、关键词等信息,检索了 2000—2022 年湖泊氮沉积领域热点变化及发展。所使用的数据集由 648 条 CNKI 数据和 4 625 条 WOS 数据组成。

1.2 研究方法

本研究使用 CiteSpace 6.1.R6 进行文献可视化分析,同时结合统计软件 Excel 2016 和绘图软件 Origin 2021 对文献数量、高频关键词等进行统计分析。在可视化分析过程中,令时间阈值为 2000—2022 年,切片长度为 1 年;将 g 指数^[14]作为选择标准进行节点筛选,通过设置 k 值调节文献数量, k 值越大,选取的文献越多,本研究令 $k=20$,使图谱中出现的节点尽可能完整和全面,并通过对数似然率聚类分析得出结果。

2 结果分析

2.1 发文量年际变化与载文期刊分布

发文量及其变化趋势反映了研究领域的受关注程度。2000—2022 年,WOS 发文量整体呈增长的趋势,2022 年发文量是 2000 年的 6.43 倍(图 1),说明该领域研究热度进入快速发展阶段并保持着较高的研究热度。

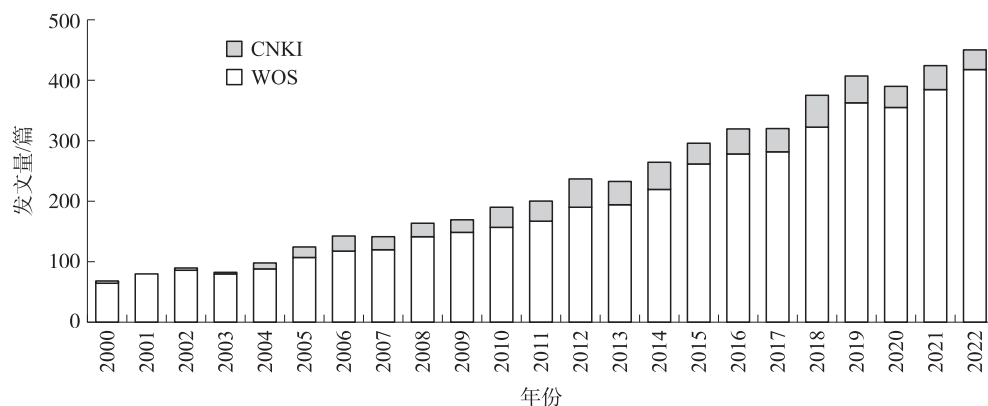


图 1 2000—2022 年 WOS 和 CNKI 发文量变化

Fig. 1 Changes in publication number in WOS and CNKI from 2000 to 2022

研究成果对应的载文期刊数量和分布情况一定程度上反映了该领域的理论研究价值,为该领域的研究明晰方向。统计发现,该领域 WOS 来源的文献共发表在 679 种期刊上,其中发文量最多的期刊是 *Science of the Total Environment* (258 篇),其次是 *Journal of Paleolimnology* (165 篇) 和 *Hydrobiologia* (160 篇)。篇均被引频次较高的期刊为 *Environmental Science and Technology* (83 次)、*Limnology and Oceanography* (51 次)、*Freshwater Biology* (42 次) 和 *Water Research* (40 次)。见表 1。

湖泊氮沉积研究涉及学科较多,随着研究的不断推进,学科交叉的程度日益加深。环境科学、地球科学、海洋与淡水生物学、水资源学、湖沼学、生态学是该研究领域的重要学科,学科相应文献数量与总文献数量的比值均超过 10%。其中,环境科学学科的文献在所有样本文献中占比超过 50%,且在发文量前 20 的期刊中占比达 75%。

表 1 发量前 20 的期刊

Table 1 Top 20 journals in terms of publication number

期刊名称	发量	总被引频次	篇均被引频次	h-index
<i>Science of the Total Environment</i>	258	7 300	28	205
<i>Journal of Paleolimnology</i>	165	4 526	27	76
<i>Hydrobiologia</i>	160	4 227	26	125
<i>Environmental Science and Pollution Research</i>	155	2 090	13	82
<i>Water</i>	109	874	8	33
<i>Limnology and Oceanography</i>	93	4 761	51	179
<i>Water Research</i>	85	3 432	40	263
<i>Ecological Engineering</i>	84	2 331	28	109
<i>Freshwater Biology</i>	82	3 413	42	139
<i>Environmental Pollution</i>	82	2 665	33	194
<i>Journal of Great Lakes Research</i>	75	2 003	27	68
<i>Chemosphere</i>	58	1 771	31	212
<i>Environmental Earth Sciences</i>	57	781	14	98
<i>Biogeochemistry</i>	55	1 827	33	130
<i>Environmental Monitoring and Assessment</i>	54	832	15	91
<i>Lake and Reservoir Management</i>	53	868	16	34
<i>Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology</i>	50	1 238	25	134
<i>Water Air and Soil Pollution</i>	47	867	18	100
<i>Fresenius Environmental Bulletin</i>	46	105	2	35
<i>Environmental Science and Technology</i>	45	3 721	83	345

2.2 国家合作网络分析

国家合作网络表现了国家间的发文合作关系. 根据 WOS 核心合集数据,利用 CiteSpace 进行国家合作网络分析,发现共有 114 个国家取得湖泊氮沉积的相关成果. 在国家合作网络中,美国和中国居于重要位置. 从文献被引用的角度看,领域文献被引用次数最多的国家是中国,达 1 758 次;其次是美国和加拿大,总被引次数分别为 1 144 次和 409 次;其后 6 个国家的文献被引次数相差不大,差值均在 200 以内. 从中心性分析,中心性是表征该网络中节点重要性的重要指标,中心性值 ≥ 0.1 的节点被视为关键性的节点,这些节点通常被视为导致研究领域发生变化的重要因素^[15]. 统计发现,美国在国家合作网络中的中心性最高,中心性为 0.46,法国、中国、德国、日本、英国 5 个国家的中心性均大于 0.1(表 2),说明这些国家在湖泊氮沉积研究中发挥着极为重要的作用.

表 2 高中心性和高被引国家

Table 2 Countries in high centrality and countries in high frequency of citations

序号	国家	中心性	国家	被引次数
1	美国	0.46	中国	1 758
2	法国	0.20	美国	1 144
3	中国	0.17	加拿大	409
4	德国	0.15	德国	254
5	日本	0.14	英国	212
6	英国	0.11	澳大利亚	193
7	加拿大	0.09	日本	172
8	挪威	0.09	瑞典	135
9	荷兰	0.09	法国	127
10	瑞士	0.09	丹麦	122

分析文献突现性较高的国家发现,芬兰和瑞典表现出了较强的突现性,突现强度分别为 10.69 和 10.38(表 3),二者的文献发布量突现年份分别是 2002 年和 2001 年,即从该年份开始该国的发量突然显著增加. 由图 2 可知,美国、日本、瑞典等国家研究起步较早,且部分文献是这一领域研究的关键点和转折点,立陶宛相关研究的起步晚了近十年.

Table 3 Burst strength of nitrogen deposition research publications across countries

Fig. 2 Burst appearing time of nitrogen deposition research publications across countries

分析关键词出现的频次和年份有助于进一步阐述该领域内各发展阶段的研究热点及趋势,对 CNKI

Fig. 3 Keyword clustering results in CNKI

相较于 CNKI 的数据, WOS 的文献数量更大, 分析结果更加符合领域内研究现状. 基于 WOS 的关键词共现结果, 对其进一步进行聚类分析, 得到湖泊氮沉积领域学者关注的 9 个重点方向(图 4), 聚类标签由小到大依次是 #1 organic matter(有机质)、#2 phosphorus(磷)、#3 climate change(气候变化)、#4 microbial community(微生物群落)、#5 water quality(水质)、#6 heavy metals(重金属)、#7 denitrification(反硝化)、#8 freshwater lake(淡水湖)、#9 phosphorus fractions(磷组分), 聚类标签前的数字越小, 聚类中包含的关键词越多. 分析发现, 2000 年 nitrogen(氮)、carbon isotope(碳同位素)、eutrophication(富营养化)等多个关键词较为集中地首次出现, 且相关研究成果较为丰富. 周子珂等^[16]利用碳同位素结合 ^{210}Pb 定年技术, 揭示了滇池流域双龙水库的有机质来源并重建了该区域的湖泊沉积环境; 周健等^[17]基于 1 151 个湖泊, 探究了湖泊形态与人类活动强度对湖泊富营养化的影响, 发现浅水湖泊更易富营养化. 近年出现的关键词, 如 carbon burial(碳埋藏)、denitrification rate(反硝化速率)、microbial community(微生物群落)等, 在湖泊氮沉积领域内也具有一定的研究潜力.

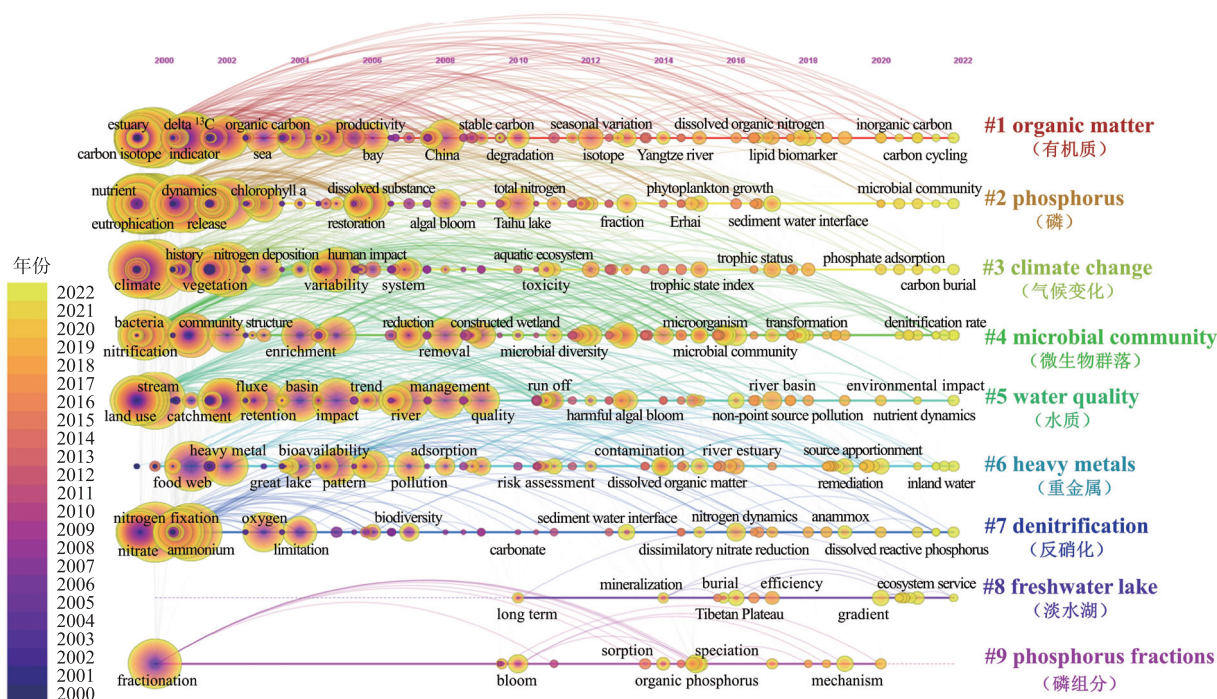


图4 WOS 关键词聚类结果

Fig. 4 Keyword clustering results in WOS

由 CNKI 关键词聚类结果可得到 8 个聚类,分别是#1 有机质、#2 氮磷、#3 氮形态、#4 同位素、#5 富营养化、#6 反硝化、#7 沉积物、#8 迁移转化,其中“沉积物”“太湖”“富营养化”节点外有明显的紫色圆圈,表明该节点的关键词具有较高的中心性,在聚类分析网络中具有很好的连接能力,且关键词所属聚类在湖泊氮沉积领域中具有重要作用. 相较于 WOS 的关键词聚类结果,CNKI 的关键词聚类标签与之具有良好的-致性,但 CNKI 关键词聚类结果中的线条数量较少,且排列较为稀疏,说明在相同时间节点内 CNKI 上研究成果相对较少,各关键词之间的联系较弱.

统计关键词共现结果发现(表4),除用于检索的关键词(nitrogen、sediment、lake)之外,出现频次较高的关键词是 phosphorus(727)、organic matter(502)、water(500)、eutrophication(436)等,这表明相关研究成果主要围绕湖泊富营养化、有机质等。分析发现在关键词共现网络中,出现频次高的关键词对应的中心性不一定高。一般认为,中心性大于0.1的关键词较为重要,但由表4数据可知,所有关键词的中心性均小于0.1。按中心性由大到小的顺序排列,中心性最高的关键词是 nitrate(硝酸盐)、assemblage(群落),其中心性均为0.07,其次是 climate change(气候变化)、nitrification(硝化作用)、estuary(河口)、catchment(流域)等关键词,说明在湖泊氮沉积领域现有研究中群落和流域沉积记录受到较多关注, nitrate(硝酸盐)和 assemblage(群落)最大程度地连接了不同关键词之间的研究,是关键词共现网络中的重要节点。

表 4 高频次和高中心性关键词
Table 4 Keywords in high frequency and keywords in high centrality

序号	关键词	频次	关键词	中心性
1	nitrogen(氮)	1 245	nitrate(硝酸盐)	0.07
2	sediment(沉积)	1 068	assemblage(群落)	0.07
3	lake(湖泊)	733	climate change(气候变化)	0.06
4	phosphorus(磷)	727	nitrification(硝化作用)	0.06
5	organic matter(有机质)	502	marine sediment(海洋沉积)	0.06
6	water(水)	500	estuary(河口)	0.06
7	eutrophication(富营养化)	436	catchment(流域)	0.06
8	fresh water(淡水)	417	shallow lake(浅水湖泊)	0.05
9	carbon(碳)	404	nutrient(营养物质)	0.05
10	water quality(水质)	404	community(群落)	0.05
11	phytoplankton(浮游植物)	323	heavy metal(重金属)	0.05
12	dynamics(动态)	320	ecosystem(生态系统)	0.05
13	lake sediment(湖泊沉积)	312	marine(海洋)	0.05
14	denitrification(反硝化作用)	280	ammonium(铵盐)	0.05
15	climate change(气候变化)	278	fresh water(淡水)	0.04
16	shallow lake(浅水湖泊)	272	dynamics(动态)	0.04
17	river(河流)	248	lake sediment(湖泊沉积)	0.04
18	diversity(多样性)	237	diversity(多样性)	0.04
19	stable isotope(稳定同位素)	229	release(释放)	0.04
20	release(释放)	222	eutrophic lake(富营养化湖泊)	0.04

2.4 突现词可视化分析

基于 CiteSpace 关键词共现结果对其进行突现词追踪,以获取在短期内突现强度变化的关键词,突现强度越大,相应的关键词在该时段内影响越大,从而分析该领域内相关研究更深层次的发展变化,表 5 和表 6 分别为 CNKI 和 WOS 文献数据生成的突现关键词,并按照突现开始年份依次排列. γ 值用于调整出现的突现词个数, γ 值降低可得到足够量的突现词,本研究令 $\gamma=0.4$,使获得的突现词兼顾数量和完整性.

表 5 CNKI 突现关键词
Table 5 Keywords with the strongest bursts in CNKI

关键词	年份	突现强度	开始年份	结束年份	2000—2022 年
东湖	2004	2.66	2004	2008	
氮形态	2006	2.63	2009	2014	
有机碳	2003	3.06	2010	2012	
洱海	2000	3.84	2011	2013	
南四湖	2009	2.57	2012	2013	
滇池	2005	3.4	2015	2017	
空间分布	2007	2.5	2015	2017	
鄱阳湖	2015	2.33	2015	2018	
间隙水	2000	3.45	2016	2018	
污染评价	2017	6.28	2017	2022	
氮磷	2005	2.31	2018	2019	
沉水植物	2007	2.25	2018	2019	
重金属	2004	2.33	2019	2022	
气候变化	2019	2.32	2019	2022	

注:红色条带表示突现持续时间段,深蓝色条带表示关键词自出现后非突现的时间段,浅蓝色条带表示关键词未出现时间段.

由表 5 可知,CNKI 突现性最强的关键词是“污染评价”(6.28),其次是“洱海”(3.84)和“间隙水”(3.45). 其中“污染评价”自 2017 年在该领域首次出现后,近年被持续重点关注,说明其在湖泊氮沉积领域今后的发展中具有重要地位. 关键词突现持续的时间为 2~6 年,持续时间最长的是“氮形态”和“污染评价”,突现时间分别为 2009—2014 年和 2017—2022 年,说明“氮形态”和“污染评价”在湖泊氮沉积领域的关注度较高. 同时发现,洱海、南四湖、东湖、滇池等流域湖泊的研究成果较为集中和丰富.

表 6 WOS 突现关键词
Table 6 Keywords with the strongest bursts in WOS

关键词	年份	突现强度	开始年份	结束年份	2000—2022 年
phytoplankton(浮游植物)	2000	13.39	2001	2006	
ratio(比例)	2001	10.36	2001	2014	
exchange(交换)	2002	11.11	2002	2013	
aquatic macrophyte(大型水生植物)	2002	9.57	2002	2010	
stable isotope(稳定同位素)	2000	10.65	2004	2013	
food web(食物网)	2001	10.09	2004	2012	
runoff(径流)	2011	7.31	2011	2015	
China(中国)	2008	10.62	2016	2018	
river basin(河流流域)	2017	10.07	2017	2020	
dissolved organic matter(溶解性有机质)	2014	8.77	2017	2020	
microbial community(微生物群落)	2016	13.43	2018	2022	
bacterial community(细菌群落)	2013	11.70	2019	2022	
bloom(水华)	2010	8.34	2019	2022	
Taihu(太湖)	2006	10.85	2020	2022	
cyanobacterial bloom(蓝藻水华)	2006	8.96	2020	2022	

注:红色条带表示突现持续时间段,深蓝色条带表示关键词自出现后非突现的时间段,浅蓝色条带表示关键词未出现时间段。

在 WOS 突现关键词(表 6)中,突现强度较大的关键词为 microbial community(微生物群落)、phytoplankton(浮游植物)、bacterial community(细菌群落)、Taihu(太湖)、stable isotope(稳定同位素)等,突现强度均大于 10. 按照突现时间,研究大致可分为 3 个阶段:(1)2000—2008 年,突现词为 phytoplankton(浮游植物)、ratio(比例)、exchange(交换)、aquatic macrophyte(大型水生植物)、stable isotope(稳定同位素)、food web(食物网)等关键词,这些突现词持续时间为 6~14 年;(2)2011—2017 年,突现词为 runoff(径流)、China(中国)、river basin(河流流域)、dissolved organic matter(溶解性有机质)等关键词,该阶段突现持续时间最长仅为 5 年,说明该领域这个阶段的发展非常迅速,流域环境的变化受到学者广泛关注;(3)2018—2022 年,突现词为 microbial community(微生物群落)、bacterial community(细菌群落)、bloom(水华)、Taihu(太湖)、cyanobacterial bloom(蓝藻水华)等关键词,突现持续至今并可能持续突现,说明在未来一段时间内微生物群落、蓝藻水华可能是湖泊氮沉积领域的研究焦点。

3 结论与展望

3.1 2000—2022 年国内外湖泊氮沉积领域的研究热点

研究热点按照突现时间顺序可分为以下 3 个阶段:

(1)2000—2008 年,领域内研究大多围绕富营养化这一主题,CNKI 数据库显示的研究重点主要是湖泊富营养化的发生机制和控制途径. 随着湖泊所在流域及其周边地区的人口增长和经济快速发展,工农业废水排放和化肥、农药的不合理使用导致的入湖污染物显著增加是湖泊富营养化的主要原因^[18-20]. 而营养物质富集会 导致浮游植物大量繁殖,影响其他水生生物生存,从而改变湖泊生态系统的群落结构,并通过影响食物网及其能量流动降低生态系统的稳定性和削弱其服务功能^[21-23]. 为了缓解这一现状,吴雅丽等以富营养化为主题在太湖、滇池等重点流域湖泊展开一系列研究工作^[24-27]. 除了关注湖泊富营养化的特征、驱动因素、影响以及湖泊富营养化的预防和恢复机制^[28],Beaty 等还将湖泊富营养化与初级生产者的群落变化联系起来^[29-30],加深了对富营养化湖内过程和外源输入的理解.

(2)2009—2017 年,从流域氮循环角度探讨氮的形态与转化成为研究热点. 流域的生物地球化学循环由内部因素和外部因素共同驱动,其中外部驱动因素的研究主要围绕河流湖库的水文特征、大气沉降等对流域氮素收支的影响^[31-33],内部驱动因素的研究重点则是微生物作用下的氮循环过程^[34-35]. 研究发现,流域氮素来源复杂多样,加之非点源污染管理不足等问题,氮素来源的准确追踪和定量识别存在挑战,稳定同位素技术应运而生,并被广泛应用于解决流域湖泊氮素源解析问题^[36-39]. 同时学者也在湖泊氮库方面开展了大量研究,为完善全球湖泊氮库提供了基础数据. 据估算,2000—2010 年全球内陆湖泊沉积物中氮储量为 $(9.6\pm1.1)\text{ Tg N y}^{-1}$ ^[40],1900—2014 年滇池的总氮储量约为 9.21 万 t^[41],王艳平等测算出巢湖总

氮储量约为 15.8 万 t^[42]。另有研究根据湖泊沉积物对水体氮的吸附解吸作用,揭示了湖泊沉积物总氮储量与湖水氮形态之间的关系。据统计,白洋淀表层沉积物总氮储量约为 15.9 万 t^[43],沉积物-水界面的氮释放速率均值达 $106.37 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ^[44],沉积物氮释放过程主要受游离态和可交换态氮含量的影响,尤其受游离态和可交换态氮的控制,且沉积物氮总量越大,可矿化无机氮越大^[45-46]。

(3)2018—2022 年,气候变化与人类活动双重作用下的湖泊综合环境效应受到重点关注。学者们将高原淡水湖、平原淡水湖等类型湖泊作为研究对象,基于湖泊氮素分布特征定量评估流域湖泊污染风险^[47-50],同时综合研究湖泊不同类群(微生物、水生高等植物等)与流域湖泊生态的相互作用,探究流域湖泊地球化学循环对环境因子和非环境因子的动态响应^[51-52]。研究表明微生物在湖泊氮循环中具有重要作用,学者通过设计室内培养实验,测定湖泊沉积物的反硝化速率,探讨湖泊脱氮机制与微生物群落之间的相互作用^[53-55],为流域氮素水平保持长期稳定状态提供新思路。

3.2 湖泊氮沉积领域的未来发展趋势

学者对湖泊氮素迁移过程和氮形态转化已有大量研究,未来研究仍需重点关注流域环境的动态变化及其驱动因素,将表征气候变化的降水量、气温等指标与表征人类活动的土地利用类型变化、人口增长等指标结合,量化气候变化背景下的城市化、农业生产等人类活动对流域氮循环的影响。研究应灵活运用地理信息系统、遥感等技术,借助其在实时监测和数据库构建中的优势,为湖泊氮沉积领域相关研究提供高精度、高质量的影像数据。

与此同时,该领域仍需重视并开展湖泊氮库相关的研究工作,为构建不同时空条件下的湖泊氮素数据库提供坚实的数据支撑,以合理预测湖泊未来的氮沉积状况。鉴于国内部分湖泊缺乏长期观测记录,可通过湖泊沉积记录与湖泊生态模型相结合的方式弥补,为解析气候变化与人类活动双重作用下的湖泊氮循环和生态演化机制,提供一个新的研究思路。除湖泊氮库外,复合污染影响下的湖泊环境演变和生态效应也值得关注,未来需要综合研究氮与碳、磷等元素共同作用下的环境效应,综合评价氮污染与有机污染、重金属污染共同作用下的污染风险,为流域管理措施的优化提供科学依据。

[参考文献]

- [1] SINGH M, SINHA R. Evaluating dynamic hydrological connectivity of a floodplain wetland in North Bihar, India using geostatistical methods[J]. *Science of the total environment*, 2019, 651: 2473-2488.
- [2] WU W T, WANG J J, WANG H, et al. Trends in nutrients in the Changjiang River[J]. *Science of the total environment*, 2023, 872: 162268.
- [3] HECKY R E, KILHAM P. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: a review of recent evidence on the effects of enrichment[J]. *Limnology and oceanography*, 1988, 33(4): 796-822.
- [4] VOROBYEVA T Y, CHUPAKOVA A A, CHUPAKOV A V, et al. Distribution of dissolved nitrogen compounds in the water column of a meromictic subarctic lake[J]. *Nitrogen*, 2021, 2(4): 428-443.
- [5] HO J C, MICHALAK A M, PAHLEVAN N. Widespread global increase in intense lake phytoplankton blooms since the 1980s[J]. *Nature*, 2019, 574: 667-670.
- [6] 秦伯强. 浅水湖泊湖沼学与太湖富营养化控制研究[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(5): 1229-1243.
- [7] BASU N B, VAN METER K J, BYRNES D K, et al. Managing nitrogen legacies to accelerate water quality improvement[J]. *Nature geoscience*, 2022, 15: 97-105.
- [8] 周滨, 邢美楠, 刘丹, 等. 浅析我国内陆淡水湖库富营养化及防控措施[J]. *资源节约与环保*, 2019(12): 110-111.
- [9] CHEN C M, DUBIN R, KIM M C. Emerging trends and new developments in regenerative medicine: a scientometric update (2000-2014)[J]. *Expert opinion on biological therapy*, 2014, 14(9): 1295-1317.
- [10] HICKS D, WOUTRES P, WALTMAN L, et al. Bibliometrics: the Leiden Manifesto for research metrics[J]. *Nature*, 2015, 520: 429-431.
- [11] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. *科学学研究*, 2015, 33(2): 242-253.
- [12] 胡泽文, 孙建军, 武夷山. 国内知识图谱应用研究综述[J]. *图书情报工作*, 2013, 57(3): 131-137.
- [13] 侯剑华, 胡志刚. CiteSpace 软件应用研究的回顾与展望[J]. *现代情报*, 2013, 33(4): 99-103.
- [14] WOEGINGER G J. An axiomatic analysis of Egghe's g-index[J]. *Journal of informetrics*, 2008, 2(4): 364-368.

- [15] 盛云梦,刘倩. 基于 CiteSpace 的国际人工智能研究热点与趋势分析[J]. 软件工程,2022,25(11):35-38.
- [16] ZHOU Z K,WANG Y P,YANG H,et al. Sedimentary record of nutrients and sources of organic matter in the Shuanglong reservoir,Dianchi watershed,China[J]. Environmental science and pollution research,2021,28(14):17763-17774.
- [17] ZHOU J,LEAVITT P R,ZHANG Y B,et al. Anthropogenic eutrophication of shallow lakes;is it occasional? [J]. Water research,2022,221:118728.
- [18] HOBBIE S E,FINLAY J C,JANKE B D,et al. Contrasting nitrogen and phosphorus budgets in urban watersheds and implications for managing urban water pollution[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences,2017,114(16):4177-4182.
- [19] SCHINDLER D W,CARPENTER S R,CHAPRA S C,et al. Reducing phosphorus to curb lake eutrophication is a success[J]. Environmental science and technology,2016,50(17):8923-8929.
- [20] RÄIKE A,PIETILÄINEN O P,REKOLAINEN S,et al. Trends of phosphorus,nitrogen and chlorophyll a concentrations in Finnish rivers and lakes in 1975—2000[J]. Science of the total environment,2003,310:47-59.
- [21] SEEHAUSEN O,VAN ALPHEN J J M,WITTE F. Cichlid fish diversity threatened by eutrophication that curbs sexual selection[J]. Science,1997,277(5333):1808-1811.
- [22] ÖSTMAN Ö,EKLÖF J,ERIKSSON B K,et al. Top-down control as important as nutrient enrichment for eutrophication effects in North Atlantic coastal ecosystems[J]. Journal of applied ecology,2016,53(4):1138-1147.
- [23] POIKANE S,RITTERBUSCH D,ARGILLIER C,et al. Response of fish communities to multiple pressures:development of a total anthropogenic pressure intensity index[J]. Science of the total environment,2017,586:502-511.
- [24] 吴雅丽,许海,杨桂军,等. 太湖水体氮素污染状况研究进展[J]. 湖泊科学,2014,26(1):19-28.
- [25] 倪兆奎,王圣瑞,金相灿,等. 云贵高原典型湖泊富营养化演变过程及特征研究[J]. 环境科学学报,2011,31(12):2681-2689.
- [26] 华映肖,潘继征,杜劲松,等. 富营养化高原浅水湖泊持续多年生态修复工程效果分析:以滇池大泊口为例[J]. 湖泊科学,2023,35(5):1549-1561.
- [27] 郑丙辉,曹晶,王坤,等. 水质较好湖泊环境保护的理论基础及中国实践[J]. 湖泊科学,2022,34(3):699-710.
- [28] AYELE H S,ATLABACHEW M. Review of characterization,factors,impacts,and solutions of lake eutrophication;lesson for Lake Tana,Ethiopia[J]. Environmental science and pollution research,2021,28(12):14233-14252.
- [29] BEATY M H,PARKER B C. Response of phytoplankton primary productivity to nutrient enrichment at Mountain Lake, Virginia[J]. Journal of freshwater ecology,1996,11(4):421-431.
- [30] EARLEY S M,WATERS M N,THIEME D,et al. Linking biogeochemical processes and historic primary producer communities in a SE USA sinkhole lake from the mid-Holocene to present[J]. Journal of paleolimnology,2017,57(4):295-306.
- [31] YOSHIKAWA N,SHIOZAWA S. Nitrogen budget and gaseous nitrogen loss in a tropical agricultural watershed [J]. Biogeochemistry,2008,87(1):1-15.
- [32] YAN X Y,CAI Z C,YANG R,et al. Nitrogen budget and riverine nitrogen output in a rice paddy dominated agricultural watershed in eastern China[J]. Biogeochemistry,2011,106(3):489-501.
- [33] EIMERS M C,PATERSON M J,WATMOUGH S A,et al. Phosphorus and nitrogen deposition within a large transboundary watershed:implications for nutrient stoichiometry and lake vs watershed budgets[J]. Journal of great lakes research,2023,49(1):44-52.
- [34] 侯杰. 湖泊中微生物驱动的氮循环机理及其与富营养化的关系研究[D]. 北京:中国科学院大学,2013.
- [35] 孙小溪,蒋宏忱. 湖泊微生物反硝化过程及速率研究进展[J]. 微生物学报,2020,60(6):1162-1176.
- [36] GUO J X,ZUO P,YANG L,et al. Quantitative identification of non-point sources of nitrate in urban channels based on dense in-situ samplings and nitrate isotope composition[J]. Chemosphere,2021,263:128219.
- [37] KOHL D H,SHEARER G B,COMMONER B. Fertilizer nitrogen:contribution to nitrate in surface water in a corn belt watershed[J]. Science,1971,174(4016):1331-1335.
- [38] 张鑫,张妍,毕直磊,等. 中国地表水硝酸盐分布及其来源分析[J]. 环境科学,2020,41(4):1594-1606.
- [39] 王希欢. 乌梁素海流域氮污染来源的时空特征解析研究[D]. 北京:中国环境科学研究院,2021.
- [40] WANG M,HOULTON B Z,WANG S,et al. Human-caused increases in reactive nitrogen burial in sediment of global lakes[J]. The innovation,2021,2(4):100158.
- [41] 吴亚林,李帅东,江俊武,等. 百年来滇池沉积物中不同形态氮分布及埋藏特征[J]. 环境科学,2017,38(2):517-526.
- [42] 王艳平,徐伟伟,韩超,等. 巢湖沉积物氮磷分布及污染评价[J]. 环境科学,2021,42(2):699-711.

- [43] 尹德超,王雨山,祁晓凡,等. 白洋淀表层沉积物氮磷分布、储量及污染评价[J]. 地质通报,2023,42(11):1983-1992.
- [44] 杜奕衡,刘成,陈开宁,等. 白洋淀沉积物氮磷赋存特征及其内源负荷[J]. 湖泊科学,2018,30(6):1537-1551.
- [45] 王雯雯,王书航,姜霞,等. 蠡湖沉积物不同形态氮赋存特征及其释放潜力[J]. 中国环境科学,2017,37(1):292-301.
- [46] 赵丽,王书航,姜霞,等. 蠡湖表层沉积物氮矿化过程及其赋存形态变化[J]. 环境科学,2016,37(12):4626-4632.
- [47] WANG W W,JIANG X,ZHENG B H,et al. Composition,mineralization potential and release risk of nitrogen in the sediments of Keluke Lake,a Tibetan Plateau freshwater lake in China[J]. Royal society open science,2018,5(9):180612.
- [48] PAN X,LIN L,HUANG Z,et al. Distribution characteristics and pollution risk evaluation of the nitrogen and phosphorus species in the sediments of Lake Erhai,Southwest China[J]. Environmental science and pollution research,2019,26(22):22295-22304.
- [49] 刘丽娜,马春子,张靖天,等. 东北典型湖泊沉积物氮磷和重金属分布特征及其污染评价研究[J]. 农业环境科学学报,2018,37(3):520-529.
- [50] 王书锦,刘云根,张超,等. 洱海流域入湖河口湿地沉积物氮、磷、有机质分布及污染风险评价[J]. 湖泊科学,2017,29(1):69-77.
- [51] MOSER K A,BARON J S,BRAHNEY J,et al. Mountain lakes:eyes on global environmental change[J]. Global and planetary change,2019,178:77-95.
- [52] SHI K,ZHANG Y L,ZHANG Y B,et al. Phenology of phytoplankton blooms in a trophic lake observed from long-term MODIS data[J]. Environmental science and technology,2019,53(5):2324-2331.
- [53] LI Y Y,LIU L,WANG H J. Mixotrophic denitrification for enhancing nitrogen removal of municipal tailwater:contribution of heterotrophic/sulfur autotrophic denitrification and bacterial community [J]. Science of the total environment, 2022, 814:151940.
- [54] ZHU L,SHI W,VAN DAM B,et al. Algal accumulation decreases sediment nitrogen removal by uncoupling nitrification denitrification in shallow eutrophic lakes[J]. Environmental science and technology,2020,54(10):6194-6201.
- [55] ZHANG H H,NIU L M,MA B,et al. Novel insights into aerobic denitrifying bacterial communities augmented denitrification capacity and mechanisms in lake waters[J]. Science of the total environment,2023,864:161011.

[责任编辑:丁 蓉]