

杨晶, 张家旋, 金鑫, 等. 跨学科视角下的流域磷源示踪技术: 原理、实践与挑战[J]. 环境科学与技术, 2024, 47(3): 111–118. Yang Jing, Zhang Jiaxuan, Jin Xin, et al. Phosphorus source tracing techniques from an interdisciplinary perspective: principle, practice and challenge[J]. Environmental Science & Technology, 2024, 47(3): 111–118.

跨学科视角下的流域磷源示踪技术: 原理、实践与挑战

杨晶^{1,2,4}, 张家旋², 金鑫^{2,3*}, 路恒通²,
王浩², 吴青璇², 李思敏^{1,2,3*}

(1. 河北工程大学水利水电学院, 河北 邯郸 056038;

2. 河北工程大学能源与环境工程学院, 河北 邯郸 056038;

3. 河北工程大学, 河北省水污染控制与水生态修复技术创新中心, 河北 邯郸 056038;

4. 河北工程大学, 河北省智慧水利重点实验室, 河北 邯郸 056038)

摘要: 文章详细介绍了流域磷源示踪技术的种类和原理, 包括化学特征示踪法、同位素示踪法、微生物指纹法和模型模拟法, 并讨论了各方法的优势、局限性以及面临的挑战。尽管这些技术在理解磷循环的复杂性和动态特性方面各有优势, 但其有效应用受限于技术方法的局限性、数据解释框架的多样性和比较难度、操作的高度复杂性以及对先进技术的依赖。该文强调了跨学科协作在推动技术创新、数据处理集成和成本效益平衡方面的重要性。通过结合化学、生物学、环境科学等学科的方法和理念, 可以为磷源示踪技术的优化提供新视角, 助力未来的研究和实践应用。

关键词: 流域; 磷源示踪; 磷酸盐氧同位素; 微生物指纹; 模型

中图分类号: X52 **文献标志码:** A **doi:** 10.19672/j.cnki.1003-6504.2462.23.338 **文章编号:** 1003-6504(2024)03-0111-08

Phosphorus Source Tracing Techniques from an Interdisciplinary Perspective : Principle, Practice and Challenge

YANG Jing^{1,2,4}, ZHANG Jiaxuan², JIN Xin^{2,3*}, LU Hengtong²,
WANG Hao², WU Qingxuan², LI Simin^{1,2,3*}

(1. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2. School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

3. Hebei Technology Innovation Center for Water Pollution Control and Water Ecological Remediation,
Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

4. Hebei Key Lab of Intelligent Water Conservancy, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: This article overviews the detailed exposition of the types and principles of watershed phosphorus source tracing techniques involving chemical characteristic tracing, isotopic tracing, microbial fingerprinting and modeling simulation, discussing their advantage and limitation, and the challenges facing these techniques. Although these techniques each have their merits in elucidating the complexity and dynamic nature of phosphorus cycling, their effective application is constrained by limitations in terms of technical approaches, the difficulties in diversity and comparability of the data interpretation framework and the high complexity of operations, and the reliance on advanced technologies. In addition, this article emphasizes the importance of interdisciplinary collaboration in driving technological innovation, data processing integration, and cost-effectiveness balance. Summarily, by using amalgamating approaches and concepts from chemistry, biology and environmental science, it is possible in new perspectives to optimize the phosphorus source tracing techniques, strengthening the research and practical applications in the future.

Key words: watershed; phosphorus source tracing; phosphate oxygen isotopes; microbial fingerprinting; modeling

随着人口增长、工业化进程加速和农业活动增多,流域的磷污染问题日益严重,从而威胁水生态系统健康和人类生活质量。过量的磷是导致河流富营养化的关键因素,而准确示踪流域磷的来源是控制水体富营养化的前置逻辑。流域磷源示踪技术作为支撑水体富营养化控制的关键,近年来在水环境治理和水资源管理领域中得到广泛关注。该技术主要用于确定和量化流域中各种磷的来源和贡献,以有效指导磷源的高效削减,为水体富营养化的防治提供科学依据^[1]。

流域磷源示踪技术的研究历程,虽然可以追溯到20世纪,但真正取得重要突破的是近20年来的研究工作。最初,这一领域的研究主要集中在基础的化学分析,例如通过测定水体中磷的浓度和形态来评估磷污染的程度^[2]。进入21世纪,随着跨学科研究方法的兴起,流域磷源示踪技术发生了显著变革。一方面,生物地球化学和生态学的理论开始被广泛应用于理解磷在生态系统中的作用,特别是如何通过微生物活动和生物地球化学循环影响磷的迁移特征^[3]。另一方面,先进的分析技术如稳定同位素分析、高通量测序和地理信息系统(GIS)的引入,为磷源示踪提供了更高的精确度和空间分辨率^[4-6]。这些技术的应用使得研究者能够在分子水平上追踪磷的来源和命运,以及在更大尺度上理解其在流域内的分布和迁移模式。此外,随着全球气候变化和人类活动影响的日益加剧,磷源示踪技术在理解全球变化背景下的流域生态过程中扮演着越来越重要的角色。研究者开始将气候变化、土地利用变化以及社会经济因素纳入考量,以评估它们对流域磷循环的潜在影响^[7]。流域磷源示踪技术的发展不仅是一种技术进步,更是一个跨学科融合和协作的结果,这种融合为水环境保护和可持续管理提供了更全面和深入的理解。

本文从跨学科视角出发,深入探讨流域磷源示踪技术的原理、实践及其面临的挑战,旨在为理解流域磷源示踪技术提供一个更加全面的视角,为相关领域的研究者、决策者和从业者提供更有价值的洞见。

1 磷源示踪技术种类与原理

流域磷源示踪技术的跨学科特性显著地体现在其主要方法上,包括化学特征示踪法、同位素示踪法、微生物指纹法及模型模拟法。化学特征示踪法通过深入解析磷化学指纹,结合化学和环境科学的原理,精准定位流域中的磷源^[8]。同位素示踪法则利用放射性与稳定同位素的特异性,结合核物理和地球化学的方法,追溯磷在环境中的迁移和循环过程^[9]。微生物指纹法通过分析微生物多样性,结合生物学和微生物

生态学的知识,揭示磷对生态系统的生物响应^[10]。而模型模拟法则综合应用水文学、化学、地理信息科学以及计算建模技术,通过时空数据的分析,实现对流域磷循环的系统模拟和预测^[11]。这些方法在示踪流域磷源及解析流域磷循环机制方面相互补充,为流域磷管理提供多维度的科学依据(图1)。

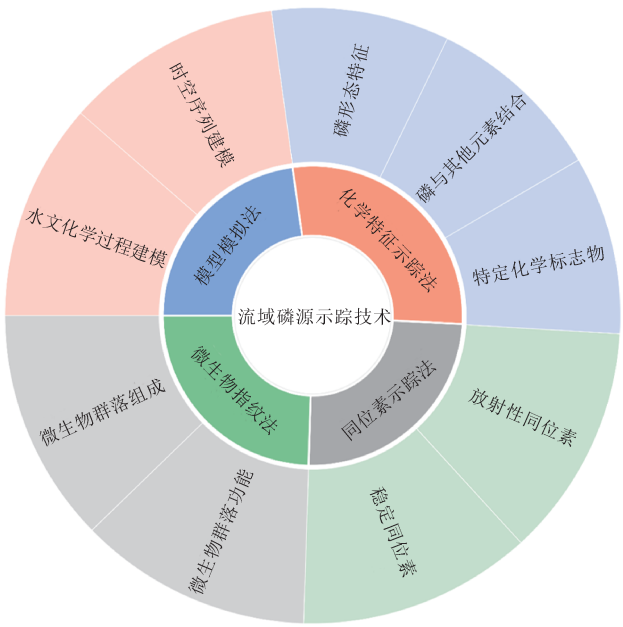


图1 流域磷源示踪技术种类与原理
Fig.1 Types and principles of watershed phosphorus source tracing technologies

1.1 化学特征示踪法

化学特征示踪法在流域磷源示踪中依赖于对磷化学指纹的解析,通过磷的形态分布、磷与其他元素的结合状态以及特定化学标志物的检测,以实现对流域磷来源的精确刻画。磷形态分析着重于磷在环境介质中的存在状态^[12],这一分析层面的核心在于不同形态的磷具有不同的生态功能与迁移特性,从而为磷源示踪提供指示^[13]。磷与其他元素的结合状态分析通常依赖于识别和量化磷在自然水体或沉积物中与特定元素(如铁、铝、钙)的结合形式^[14]。这些信息反映了磷在不同环境条件下的迁移和循环过程,以及磷如何在生物地球化学循环中与其他元素相互作用。此外,由于各种人为活动或自然过程产生的磷具有独特的化学组成,这些独特的成分或其比例可以作为“指纹”来追溯磷的来源。

1.2 同位素示踪法

同位素示踪法主要分为稳定同位素示踪法和放射性同位素示踪法。稳定同位素示踪法在磷源追踪中主要利用磷酸盐中氧稳定同位素比例(¹⁸O/¹⁶O)来识别磷的来源。不同磷源基质磷酸盐氧同位素($\delta^{18}\text{O}_p$)比值在统计学上的差异以及流域水体中的 $\delta^{18}\text{O}_p$ 没有实现分馏平衡是利用该方法识别流域磷源的基础。

通过样品的 $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ 比值分析与模型解译,可以有效识别磷的来源,为流域磷循环的精准定量与环境影响评估提供科学依据。放射性同位素示踪法通过利用磷独有的放射性衰变信号追踪和定量磷在环境中的运移路径和速率。在实际应用中,通过向研究系统中引入放射性标记的磷酸盐并测量样品中的放射性水平,可以揭示磷在流域中的来源和分布模式^[15]。

1.3 微生物指纹法

微生物指纹法利用微生物群落在不同环境条件下的特异性和选择性,通过定量和定性的分析,以鉴别和区分磷源。在农田、污水排放、工业过程等磷输入的环境中,微生物群落受到磷浓度、形态和生物可利用性的影响,能够形成独特的结构和功能特征^[16]。运用高通量测序技术可以对微生物群落的基因组成进行深入解析,进而生成代表性的微生物群落指纹^[17]。将这些数据与不同已知磷源环境中的微生物群落数据库进行匹配与对比分析,可对磷的来源进行精确追踪^[18]。此外,通过综合考虑微生物的功能性基因,可以进一步增强对磷源追踪的解释力度。微生物指纹法的优势在于它能够在微观层面提供磷源示踪的直接证据,相较于化学方法能提供更加具体的生物学线索。

1.4 模型模拟法

流域磷源示踪中应用的模型模拟法是基于复杂水文-化学过程的数学描述。此方法结合地理信息系

统(GIS)来处理地形、土地覆盖、土壤类型等空间数据,并利用气象、流量、磷浓度等时间序列数据,以模拟磷在流域中的运移和转化^[19]。该方法通过对磷生物地球化学循环中关键环节的参数化,并结合灵敏度分析和不确定性评估,实现对流域磷源及磷迁移转化过程的识别^[20]。相较于其他技术,模型模拟法在流域磷源识别领域的优势体现在其综合分析和长期预测能力,尤其在复杂地形和变化水文条件下,能通过模型设定揭示磷的输移和转化过程。劣势则在于高度依赖准确的参数输入和长期观测数据,模型构建和校准繁琐,且不可避免的不确定性可能影响结果的精确性。

2 流域磷源示踪技术应用实践

2.1 化学特征示踪法

化学特征示踪法是流域磷源识别的关键工具,利用高级统计手段,研究者们可以精确地识别流域尺度上磷的分布与迁移。结合主成分分析和空间分析方法的研究策略,显著提高磷源识别的准确性和应用范围,使得磷形态分布的空间异质性及其环境影响因素得以更加全面的揭示。此外,近年来遥感技术和GIS的广泛应用提供了高空间分辨率和时间尺度的数据,对于制定有效的流域磷管理策略、深入理解磷的环境行为以及支持水环境保护决策,起到了至关重要的作用(表1)。

表1 化学特征示踪法识别流域磷源				
Table 1 Identification of watershed phosphorus sources using chemical characteristic tracing method				
技术方法	应用实例	计算方法	示踪结果	参考文献
特定化学标志物	美国 Table Rock Lake 流域磷源追踪	相关性分析、回归分析	溴化物离子可作为独特指标示踪流域磷源	[21]
	爱尔兰 Blackwater River 流域磷源识别	时间序列分析、多元回归分析	点源污染贡献率 7%~27%,主要来自化粪池	[22]
	意大利 Lambro 流域磷源分析	比例分析、时间趋势分析	沉积物中 86% 磷以无机形态为主	[23]
	巴西 Arvorezinha 流域沉积物磷源分析	判别函数分析、Solver 混合模型分析数据	农田对沉积物磷贡献为 56%±19%	[24]
磷的形态分布	丹麦 Gelbæk 流域磷源量化	统计计算	河岸和河床侵蚀是颗粒态磷主要来源,占比 93%	[25]
	新西兰山地牧场流域磷源量化	多重回归分析	表面径流贡献 85% 以上颗粒态磷	[26]
	重庆小南海沉积物磷形态分布	相关性分析、空间分布特征计算	沉积物磷以 IP 为主,而 IP 以 Ca-P 为主	[27]
	中国呼伦湖流域中颗粒态磷溯源	Kruskal-Wallis H 检验筛、多元判别分析	颗粒态磷主要源于退化草地,占 34.1%~100.0%	[28]
	中国南四湖流域面源污染磷源解析	主成分分析法	面源污染磷主要来自农田,贡献率为 50.2%	[29]
磷与其他元素结合	英国 Hampshire Avon 流域磷源分析	判别函数分析	河岸对颗粒态磷贡献为 40%	[30]

2.2 同位素示踪法

同位素示踪法在流域磷源识别中发挥着关键作用,稳定同位素在判别不同磷形态的生物可利用性方面,为磷的生态影响评估和流域管理提供了强有力的科学依据,而且通过与氮、氢、碳等多元

素同位素相结合,显著提高了追踪磷源的精度,深化了对磷循环的认识。放射性同位素技术在分析流域沉积物中磷的来源和动态,尤其是在关联沉积物的代谢速率与颗粒磷之间的相互作用方面表现出色(表2)。

表 2 同位素示踪法识别流域磷源
Table 2 Identification of watershed phosphorus sources using isotopic tracing method

技术方法	应用实例	计算方法	示踪结果	参考文献
稳定同位素	瑞典东南流域不同磷源贡献分析	端元模型、贝叶斯混合模型	点源污染贡献率 13.2‰~15.8‰, 主要来自化粪池	[31]
	中国东南太湖不同磷源区分	比例分析	沉积物中铝结合磷库占比 18.9‰~23.5‰、铁结合磷库占比 16.79‰~19.86‰	[32]
	中国石九湖流域沉积物磷源追踪	Mantel 测试分析	农业面源流域磷主要来源	[33]
	中国巢湖流域沉积物磷源识别	皮尔逊系数分析	农业肥料和生活污水贡献率为 9.6‰~18.2‰	[34]
	美国马里兰州东溪磷库分布及来源追踪	贝叶斯模型, 马尔可夫链蒙特卡罗算法分析	海湾水对所有站点的贡献比 80%~97%	[35]
	特拉华州 Love Creek 流域磷源追踪	定量对比和平衡计算	水面胶体占总磷源 30.8%~77.7%	[36]
	中国沱江流域磷源识别	贝叶斯 SIAR 模型	工业废水和生活污水贡献占比 36.8%, 农业污水占 29.0%	[37]
	中国绵远河流域磷源识别	定量对比和平衡计算	上游磷源主要为工业废水, 下游主要为生活污水	[38]
放射性同位素	美国 Pheasant Branch 流域磷源识别	线性模型计算来源贡献百分比	地表土壤是流域沉积物中磷主要来源	[39]
	丹麦 Gelbæk 流域磷源识别	混合模型分析不同来源的 PP 比例	河岸和河床侵蚀是 PP 主要来源	[25]
	美国 Pleasant Valley 流域磷“遗留效应”	多元混合模型确定来源贡献	沉积物中磷含量范围在 703~963 mg/kg	[40]
	美国 Mendota 流域磷源运输动态分析	线性方程组和粒径校正	颗粒态磷占总磷运输量的 33%~46%	[41]

2.3 微生物指纹法

微生物指纹法在流域磷源识别技术中的应用表明,该方法通过微生物群落结构分析,有效超越了传统化学分析的局限,为水域富营养化研究提供了一种创新性技术。此方法基于微生物生态学与生物地球化学原理,特别强调了磷酸盐溶解细菌(PSB)在磷循环中的关键作用,揭示了微生物群落

在水体磷循环中的重要生态功能和机制。通过分析微生物群落指纹与磷循环的关联,该技术不仅深化了对水体中磷生物地球化学行为的理解,而且增强了对微生物在磷循环中作用的认识。微生物指纹法还在磷源及其生物可利用性的揭示上发挥作用,增强了对水体生态系统中磷相关生态过程复杂性的理解(表 3)。

表 3 微生物指纹法识别流域磷源
Table 3 Identification of watershed phosphorus sources using microbial fingerprinting method

应用实例	计算方法	源标志物	示踪结果	参考文献
黄河流域磷酸盐溶解菌和硫酸盐还原菌在沉积物中磷循环的作用	相关性分析、聚类分析	磷酸盐溶解菌和硫酸盐还原菌	磷酸盐溶解菌和硫酸盐还原菌对沉积物中总磷贡献率为 56%±19%、46%±16% 和 48%±16%	[42]
多伦多安大略湖微生物标记流域磷源	方差分析、Spearman 等级相关分析	<i>E. coli</i> 和人类/海鸥粪便微生物标记	Sunnyside 排放口 TP 浓度与微生物标记的相关系数为 0.66 ($P<0.001$)	[43]
美国不同河流微生物群落与磷梯度的耦合性	PROTEST 相关性统计、冗余分析	细菌和古菌群落的 16S rRNA 基因测序和 PFMs	25 条河流中磷水平与微生物群落结构相关性的 R^2 值超过 0.75	[44]
太湖流域中沉积物磷的来源分析	SourceTracker 分析	磷相关细菌群落 SourceTracker 指纹	沉积物磷源河流是 LX 河(40%~55%)、WJ 河(21%~43%)和 DHD 河(1%~54%)	[45]
微生物群落指纹法识别东洞庭湖磷源和传输路径	SourceTracker 分析、Spearman 秩相关分析	沉积物中的微生物群落指纹	颗粒磷与悬沙吸附微生物呈线性关系 ($R^2=0.906$)	[46]
微生物群落结构变化对滇池磷迁移影响	时间序列分析、统计分析	沉积物和水体中微生物群落结构	滇池中蓝藻水华期间沉积物磷释放量增加 70.2%	[47]
中国不同湖泊分析微生物群落与磷循环的关系	方差分析、主坐标分析	溶磷细菌群落	不同湖泊中溶磷细菌对沉积物总磷的贡献率平均为 15~20 $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$	[48]
中国洞庭湖利用微生物群落指纹法识别磷源	SourceTracker 分析、网络分析	沉积物磷相关细菌群落的 SourceTracker 指纹	洞庭湖中沉积物磷的主要来源为 SZ 河(24.2%)、LS 河(20.6%)和 YJ 河(17.4%)	[49]
中国长江三峡水库溶磷细菌与磷动态关系	线性回归分析、皮尔逊相关系数分析	无机磷溶解菌和有机磷矿化菌	长江三峡水库中 EPC 值高达 0.052 $mg \cdot L^{-1}$, 表明沉积物可能成为磷的释放源	[50]

2.4 模型模拟法

模型模拟法,如 SWAT、SPARROW 和 INCA-P 等,综合考虑了水文、地形、土地利用和气候等多个因素,有效地模拟了磷在流域中的运输、转化和积累。它们不仅能揭示磷在不同流域中的时空分布

特征,还能识别出农业活动、城市排放和自然地质过程对磷负荷的具体贡献。此外,这些模型在评估不同治理措施对磷循环的潜在影响方面显示出独特的优势,为制定有效的污染控制策略提供了科学依据(表 4)。

表4 模型模拟法识别流域磷源				
Table 4 Identification of watershed phosphorus sources using modeling simulation method				
应用实例	应用模型	元变量	示踪结果	参考文献
追踪中国太湖饮用水取水口磷源	三维水动力和水质模型	饮用水取水口总磷含量	沉积物内源负荷贡献占比47.1%和30.4%	[51]
评估美国密西西比河水体磷源和传输	SPARROW模型	监测站的数据	农业源占比77%,城市源占14%	[52]
量化中国太湖流域磷源	SPARROW模型	水文站点的日流量、TP浓度	下游面源污染贡献占比61%	[53]
评估中国永江流域磷源和保留动态	SWAT模型	观测流量、TP浓度、气象数据	面源污染占比43.1%	[54]
追踪美国密西西比河磷源及运输路径	SPARROW模型	平均流量、年度总磷输入量	面源污染占比56.0%	[55]
识别英国 Hampshire Avon 流域中沉积物和磷的关键源区	PSYCHIC模型	无机和有机肥料中的磷输入	点源污染占比80%以上	[56]
评估美国加州流域内磷源及传输途径	SPARROW模型	监测站平均日流量、TP	研究区域点源污染占比占25%	[57]
定量分析和预测美国东南流域磷循环	SPARROW模型	监测点的长期平均年磷负荷	水体磷源主要来自母质岩石和农业用地占比53%,点源污染占比18%	[58]
识别中国鲢鱼山水库流域磷源和变化	SWAT模型	水文站径流和污染物监测数据	面源污染主要来自畜禽养殖,占比75%	[59]
识别中国河套灌区流域磷源	SWAT模型	水文、水质及污染源数据	面源污染主要来自生活污水,占比44.51%	[60]
识别中国海河流域面源污染关键源区	SWAT模型、AnnAGNPS模型	气象数据、农区数据	关键源区主要分布在流域中部和南部	[61]

3 流域磷源示踪技术面临的挑战与限制

3.1 技术方法的局限性

流域磷源示踪技术的进展凸显了跨学科研究的局限性,同时也促进了对于跨学科融合与创新的深刻思考。化学特征示踪法虽然有效揭示磷循环,但其受采样和分析精度的限制凸显了环境化学与分析技术之间互动的必要性。同位素示踪法结合生物地球化学与核物理学,其操作的高成本和复杂性反映了技术创新与成本效益间的权衡。微生物指纹法在探索微生物群落结构、功能以及与环境相互作用机制方面发挥了关键作用,但也凸显了现有研究在技术和理论层面的不足。模型模拟法作为系统科学和计算科学的交汇点,强调了数据科学在模型构建和参数设定中的关键作用,同时突出了科学模型验证和优化的必要性。这些技术的局限性实际上激发了跨学科整合的挑战,强调了不同学科间协作的重要性。因此,流域磷源示踪技术的未来发展依赖于环境科学、化学、生物地球化学等学科的知识共享和技术融合,通过跨学科合作增强磷源示踪技术的应用性。

3.2 数据解释框架的多样性和比较困难

在流域磷源示踪技术研究中,不同方法间的数据解释的多样性以及比较分析的复杂性,共同构成了一个显著的挑战。这种挑战根源于依赖不同数据类型和分析方法的示踪技术,导致对流域中磷循环方面的解释难以有效比较。例如,化学特征示踪法重点分析流域磷的分布模式和环境相关性,而同位素示踪法则聚焦于磷元素的来源及环境迁移路径^[62]。这些方法

的差异不仅提供了多角度的磷源识别视角,也带来了综合的数据解读的挑战,特别是在寻求不同方法数据间统一的比较和解释框架时。因此,流域磷源示踪技术的发展迫切需要制定一个跨学科整合的标准化比较分析框架或解释方法,以促进对流域磷循环的深入理解,为磷源识别和管理提供科学依据。这不仅是技术上的挑战,更是环境科学、化学、生物地球化学、数据科学等学科知识和技术融合的体现。

3.3 操作复杂性和高级技术依赖

流域磷源示踪技术的进展面临着操作复杂性和对高端技术的依赖这一主要挑战。有效应用这些技术通常需要精细的实验技巧、先进的仪器设施和复杂的数据处理能力。特别是磷酸盐氧同位素技术在不同环境基质中面临稳定性挑战^[63],微生物指纹法要求深入的生物分子分析和复杂的统计处理,而如SWAT或SPARROW等模型模拟法则依赖于大量环境数据和高级计算技术^[64]。这些技术的高级性不仅提高了研究成本,还限制了它们在有限资源环境中的普及。因此,在确保研究精确性和可靠性的基础上,简化操作流程和降低技术门槛成为关键,这需要环境科学、分析化学、生物学、计算科学等学科的知识和技术整合,以创新简化方法提高技术的操作性和普及性,从而在更广泛的应用领域中发挥重要价值。

4 结语

本文以跨学科的视角深入探讨流域磷源示踪技术的种类、原理与应用进展,明确了化学特征示踪法、同位素示踪法、微生物指纹法以及模型模拟法在流域

磷源示踪中的关键应用和互补特点。尽管这些技术在理解磷循环的复杂性和动态特性方面具有各自的优势,但它们的有效应用受限于技术方法的局限性、数据解释框架的多样性和比较困难、操作的高度复杂性以及对先进技术的依赖。未来研究的重点应放在跨学科协作、技术方法的创新优化、数据处理的高效集成以及成本效益的平衡上,以增强示踪技术的准确性和适用性。本文凸显了流域磷源示踪技术在水环境保护中的关键地位,为该领域的未来研究方向和实践应用提供了深刻的见解和建议。

[参考文献]

- [1] Ulén B, Bechmann M, Fölster J, et al. Agriculture as a phosphorus source for eutrophication in the north-west European countries, Norway, Sweden, United Kingdom and Ireland: a review[J]. *Soil Use and Management*, 2007,23(S1): 5–15.
- [2] 朱广伟,秦伯强,高光,等. 长江中下游浅水湖泊沉积物中磷的形态及其与水相磷的关系[J]. *环境科学学报*, 2004,24(3):381–388.
Zhu Guangwei, Qin Boqiang, Gao Guang, et al. Fractionation of phosphorus in sediments and its relation with soluble phosphorus contents in shallow lakes located in the middle and lower reaches of Changjiang River, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004,24(3):381–388.
- [3] 钱燕,陈正军,吴定心,等. 微生物活动对富营养化湖泊底泥磷释放的影响[J]. *环境科学与技术*, 2016,39(4):35–40.
Qian Yan, Chen Zhengjun, Wu Dingxin, et al. Effects of microorganisms on phosphorus release from sediment of eutrophic lake[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016,39(4):35–40.
- [4] 马彦涛,薛金凤,梁涛,等. 基于 GIS 的溶解态氮磷负荷模型研究[J]. *环境科学*, 2006,27(9):1765–1769.
Ma Yantao, Xue Jinfeng, Liang Tao, et al. Research on dissolved nitrogen and phosphorus loading model based on GIS [J]. *Environmental Science*, 2006,27(9):1765–1769.
- [5] 艾铄,张丽杰,肖芃颖,等. 高通量测序技术在环境微生物领域的应用与进展[J]. *重庆理工大学学报:自然科学*, 2018, 32(9):111–121.
Ai Shuo, Zhang Lijie, Xiao Pengying, et al. Application and progress of high-throughput sequencing technology in the field of environmental microorganisms[J]. *Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science*, 2018, 32(9):111–121.
- [6] 高月香,张哲,张毅敏,等. 稳定同位素技术在水生态系统中的研究与应用[C]//2020 中国环境科学学会科学技术年会论文集(第二卷), 南京, 2020:965–971.
- [7] Li M H, Hu J L, Lin X G. Profiles and interrelationships of functional soil microbiomes involved in phosphorus cycling in diversified agricultural land-use systems[J]. *Food and Energy Security*, 2021,10(4):e315.
- [8] Heathwaite L, Sharpley A, Gburek W. A conceptual approach for integrating phosphorus and nitrogen management at watershed scales[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000,29(1):158–166.
- [9] Lin X J, Zhang C, Miao Y. Research Progress on the Application of Phosphate Oxygen Isotope in Environmental Science—Tracing Sources and Reaction Mechanisms Identification[C]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021,772(1):012091.
- [10] Stout L M, Joshi S R, Kana T M, et al. Microbial activities and phosphorus cycling: an application of oxygen isotope ratios in phosphate[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014,138:101–116.
- [11] Ouyang W, Gao X, Wei P, et al. A review of diffuse pollution modeling and associated implications for watershed management in China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017,17(6):1527–1536.
- [12] Marip J B, Yuan X Y, Zhu H, et al. Spatial distribution and environmental significance of phosphorus fractions in river sediments and its influencing factor from Hongze and Tiaoxi watersheds, eastern China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020,17(16):5787.
- [13] Li H, Cai Y Y, Song C L, et al. Comparison of phosphorus migration and transformation characteristics in sediments of lakes within the Yangtze River Basin and reservoirs on the Wujiang River[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2024,24(2):991–1001.
- [14] Guo Z W, Wen Z, Bu X C, et al. A sand tank experimental study of distribution, migration and transformation mechanism of iron and phosphorus species under redox fluctuation in a simulated riparian zone[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 625:130032.
- [15] Jaisi D P, Blake R E. Advances in Using Oxygen Isotope Ratios of Phosphate to Understand Phosphorus Cycling in the Environment[M]//Advances in Agronomy. Amsterdam: Elsevier, 2014:1–53.
- [16] Zhu J S, Qin H L, Sun Q Y, et al. Microbial diversity and influencing factors in a small watershed in winter[J]. *Environmental Sciences*, 2020,41(11):5016–5026.
- [17] Wani G A, Khan M A, Dar M A, et al. Next generation high throughput sequencing to assess microbial communities: an application based on water quality[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2021, 106(5): 727–733.
- [18] Flood M T, Hernandez-Suarez J S, Nejadhashemi A P, et al. Connecting microbial, nutrient, physiochemical, and land use variables for the evaluation of water quality within mixed use watersheds[J]. *Water Research*, 2022,219:118526.

- [19] Wang Z Z, Zhang T Q, Tan C S, et al. Modeling of phosphorus loss from field to watershed: a review[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2020,49(5):1203–1224.
- [20] Beusen A H W, Van Beek L P H, Bouwman A F, et al. Coupling global models for hydrology and nutrient loading to simulate nitrogen and phosphorus retention in surface water—description of IMAGE–GNM and analysis of performance[J]. *Geoscientific Model Development*, 2015, 8(12): 4045–4067.
- [21] Yuan Z W, Ramaswami B, Casaletto D, et al. Evaluation of chemical indicators for tracking and apportionment of phosphorus sources to Table Rock Lake in Southwest Missouri, USA[J]. *Water Research*, 2007,41(7):1525–1533.
- [22] Arnscheidt J, Jordan P, Li S, et al. Defining the sources of low-flow phosphorus transfers in complex catchments[J]. *Science of the Total Environment*, 2007,382(1):1–13.
- [23] Copetti D, Tartari G, Valsecchi L, et al. Phosphorus content in a deep river sediment core as a tracer of long-term (1962–2011) anthropogenic impacts: a lesson from the Milan metropolitan area[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 646:37–48.
- [24] Tiecher T, Ramon R, Laceby J P, et al. Potential of phosphorus fractions to trace sediment sources in a rural catchment of Southern Brazil: comparison with the conventional approach based on elemental geochemistry[J]. *Geoderma*, 2019,337:1067–1076.
- [25] Kronvang B, Grant R, Laubel A L. Sediment and phosphorus export from a lowland catchment: quantification of sources[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1997,99(1):465–476.
- [26] Cooke J G. Sources and sinks of nutrients in a New Zealand hill pasture catchment II. Phosphorus[J]. *Hydrological Processes*, 1988,2(2):123–133.
- [27] 杨巧,伍诗宇,何立平,等. 重庆小南海表层沉积物磷形态分布特征及影响因素[J]. *环境污染与防治*, 2023,45(10): 1402–1408.
- Yang Qiao, Wu Shiyu, He Liping, et al. Distribution characteristics and the associating influencing factors of phosphorus species in surface sediments of Xiaonanhai Lake, Chongqing[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2023,45 (10):1402–1408.
- [28] 芦晓峰,郭轶男,王国曦,等. 呼伦湖流域磷形态分布及颗粒态磷的溯源[J]. *中国环境科学*, 2023,43(9):4810–4818.
- Lu Xiaofeng, Guo Yinan, Wang Guoxi, et al. Distribution characteristics of various forms of phosphorus and the traceability of phosphorus in particulate form in Hulun Lake Basin[J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(9): 4810–4818.
- [29] 刘静,路凤,杨延钊,等. 南四湖流域种植业面源污染氮磷源解析研究[J]. *环境科学*, 2012,33(9):3070–3075.
- Liu Jing, Lu Feng, Yang Yanzhao, et al. Source apportionment of nitrogen and phosphorus from cropping non-point source pollution in Nansi Lake Basin[J]. *Environmental Science*, 2012,33(9):3070–3075.
- [30] Walling D E, Collins A L, Stroud R W. Tracing suspended sediment and particulate phosphorus sources in catchments[J]. *Journal of Hydrology*, 2008,350(3/4):274–289.
- [31] Tonderski K, Andersson L, Lindström G, et al. Assessing the use of $\delta^{18}\text{O}$ in phosphate as a tracer for catchment phosphorus sources[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 607/608:1–10.
- [32] Yuan H Z, Li Q, Kukkadapu R K, et al. Identifying sources and cycling of phosphorus in the sediment of a shallow freshwater lake in China using phosphate oxygen isotopes[J]. *Science of the Total Environment*, 2019,676:823–833.
- [33] Yuan H Z, Wang H X, Cai Y W, et al. Iron bound phosphorus predominates the contribution of phosphorus to lake system from terrigenous source: the evidence from the small watershed scale[J]. *Water Research*, 2023,245:120661.
- [34] Wang J, Huang T, Wu Q Q, et al. Sources and cycling of phosphorus in the sediment of rivers along an eutrophic lake in China indicated by phosphate oxygen isotopes[J]. *ACS Earth and Space Chemistry*, 2021,5(1):88–94.
- [35] Mingus K A, Liang X M, Massoudieh A, et al. Stable isotopes and Bayesian modeling methods of tracking sources and differentiating bioavailable and recalcitrant phosphorus pools in suspended particulate matter[J]. *Environmental Science and Technology*, 2019,53(1):69–76.
- [36] Li Q, Yuan H Z, Li H, et al. Tracing the sources of phosphorus along the salinity gradient in a coastal estuary using multi-isotope proxies[J]. *Science of the Total Environment*, 2021,792:148353.
- [37] Liu D D, Li X Y, Zhang Y, et al. Using a multi-isotope approach and isotope mixing models to trace and quantify phosphorus sources in the Tuojiang River, southwest China[J]. *Environmental Science and Technology*, 2023, 57(19): 7328–7335.
- [38] 钟颖. 绵远河水体富营养化成因与磷来源识别[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.
- Zhong Ying. The Cause of Eutrophication and Phosphorus Source in Mianyuan River[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.
- [39] Huisman N L H, Karthikeyan K G, Lamba J, et al. Quantification of seasonal sediment and phosphorus transport dynamics in an agricultural watershed using radiometric fingerprinting techniques[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, 13(10):1724–1734.
- [40] Lamba J, Karthikeyan K G, Thompson A M. Using radiometric fingerprinting and phosphorus to elucidate sediment transport dynamics in an agricultural watershed[J]. *Hydro-*

- logical Processes, 2015,29(12):2681–2693.
- [41] Huisman N L H, Karthikeyan K G. Using radiometric tools to track sediment and phosphorus movement in an agricultural watershed[J]. Journal of Hydrology, 2012,450/451:219–229.
- [42] Yang X H, Zhang R X, Wang J F, et al. Fluxes and mechanisms of phosphorus release from sediments in seasonal hypoxic reservoirs: a simulation-based experimental study[J]. Journal of Soils and Sediments, 2021,21(10):3246–3258.
- [43] Staley Z R, He D D, Shum P, et al. Foreshore beach sand as a reservoir and source of total phosphorus in Lake Ontario [J]. Aquatic Ecosystem Health & Management, 2018,21(3): 268–275.
- [44] LeBrun E S, King R S, Back J A, et al. Microbial community structure and function decoupling across a phosphorus gradient in streams[J]. Microbial Ecology, 2018, 75(1): 64–73.
- [45] Sun C Y, Xiong W, Zhang W L, et al. New insights into identifying sediment phosphorus sources in river-lake coupled system: a framework for optimizing microbial community fingerprints[J]. Environmental Research, 2022, 209: 112854.
- [46] Zhang W L, Gu J F, Li Y, et al. New insights into sediment transport in interconnected river-lake systems through tracing microorganisms[J]. Environmental Science and Technology, 2019,53(8):4099–4108.
- [47] Cao X, Wang Y Q, He J, et al. Phosphorus mobility among sediments, water and cyanobacteria enhanced by cyanobacteria blooms in eutrophic Lake Dianchi[J]. Environmental Pollution, 2016,219:580–587.
- [48] Li H, Song C L, Yang L, et al. Phosphorus supply pathways and mechanisms in shallow lakes with different regime[J]. Water Research, 2021,193:116886.
- [49] Gu J F, Zhang W L, Li Y, et al. Source identification of phosphorus in the river-lake interconnected system using microbial community fingerprints[J]. Environmental Research, 2020,186:109498.
- [50] Liu Y Q, Cao X Y, Li H, et al. Distribution of phosphorus-solubilizing bacteria in relation to fractionation and sorption behaviors of phosphorus in sediment of the Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2017,24(21):17679–17687.
- [51] Qian R, Wang X S, Gao J F, et al. A modelling framework to track phosphorus sources of the drinking water intakes in a large eutrophic lake[J]. Journal of Hydrology, 2022, 607: 127564.
- [52] Alexander R B, Smith R A, Schwarz G E. Estimates of diffuse phosphorus sources in surface waters of the United States using a spatially referenced watershed model[J]. Water Science and Technology, 2004,49(3):1–10.
- [53] Zhang W S, Pueppke S G, Li H P, et al. Modeling phosphorus sources and transport in a headwater catchment with rapid agricultural expansion[J]. Environmental Pollution, 2019, 255(Pt 2):113273.
- [54] Cheng J R, Gong Y M, Zhu D Z, et al. Modeling the sources and retention of phosphorus nutrient in a coastal river system in China using SWAT[J]. Journal of Environmental Management, 2021,278(Pt 2):111556.
- [55] Robertson D M, Saad D A. Nitrogen and phosphorus sources and delivery from the mississippi/atchafalaya river basin: an update using 2012 SPARROW models[J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 2021,57 (3):406–429.
- [56] Davison P S, Withers P J A, Lord E I, et al. PSYCHIC—A process-based model of phosphorus and sediment mobilisation and delivery within agricultural catchments. Part 1: model description and parameterisation[J]. Journal of Hydrology, 2008,350(3/4):290–302.
- [57] Domagalski J, Saleh D. Sources and transport of phosphorus to rivers in California and adjacent states, U. S., as determined by SPARROW modeling[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2015,51(6):1463–1486.
- [58] García A M, Hoos A B, Terziotti S. A regional modeling framework of phosphorus sources and transport in streams of the southeastern United States[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2011,47(5):991–1010.
- [59] 史冲,王浩宇,王慧亮,等. 基于SWAT的鲇鱼山水库流域氮磷面源污染时空变化研究[J]. 华北水利水电大学学报:自然科学版, 2023,44(2):39–48.
- [60] 易绍荣,冯雪娇,王宗伟,等. 基于SWAT的河套灌区氮磷面源污染时空变化研究[J]. 农业环境科学学报, 2023(11):2550–2559.
- Yi Shaorong, Feng Xuejiao, Wang Zongwei, et al. Study on the temporal and spatial variation of nitrogen and phosphorus non-point source pollution in the Hetao Irrigation District based on SWAT[J]. Journal of Agro-environment Science, 2023(11):2550–2559.
- [61] 张巧玲,胡海棠,王道芸,等. 海河流域农田氮磷面源污染的空间分布特征及关键源区识别[J]. 灌溉排水学报, 2021,40 (4):97–106.
- [62] Walling D E. Tracing suspended sediment sources in catchments and river systems[J]. Science of the Total Environment, 2005,344(1/2/3):159–184.
- [63] 杨晶,杜成瑜,金鑫,等. 沉积物磷酸盐氧同位素技术研究进展与发展前景[J]. 环境科学与技术, 2022,45(10):189–196.
- [64] Shan X Y, Zhu Z Q, Ma J Y, et al. Modeling nutrient flows from land to rivers and seas: a review and synthesis[J]. Marine Environmental Research, 2023,186:105928.