

流域尺度氮滞留研究现状、趋势及展望

王喜华¹, 贾顺卿¹, 胥毅军², 刘泽军¹, 毛博洋¹, 吕沁雅¹, 季许鸣¹, 罗成明¹,
戴妍¹, 荣延鑫¹

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092;

2. 路易斯安那州立大学农业中心可再生自然资源学院, 路易斯安那州 巴吞鲁日 70803)

摘要: 系统梳理了流域尺度氮滞留的内在机制与储库动态, 综述了其时空分布特征、关键影响因素以及数值模型的研究与应用现状。研究发现, 当前在多介质界面耦合机制认知、遗留氮滞后效应量化及跨尺度模型不确定性等方面存在瓶颈, 导致管理政策与水质响应存在时空错配。未来研究需深化地表水-沉积物-地下水连续体耦合机制, 推动人工智能与机理模型的深度融合, 并创新基于自然解决方案的适应性管理范式。

关键词: 氮滞留; 流域尺度; 地表水-沉积物-地下水; 氮循环; 基于自然解决方案

中图分类号: X52

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2025)06-0001-11

Current status, trends, and prospects in watershed-scale nitrogen retention research//WANG Xihua¹, JIA Shunqing¹, XU Yijun², LIU Zejun¹, MAO Boyang¹, LYU Qinya¹, JI Xuming¹, LUO Chengming¹, DAI Yan¹, RONG Yanxin¹ (1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Renewable Natural Resources, Louisiana State University Agricultural Center, Baton Rouge 70803, USA)

Abstract: The study systematically reviews the intrinsic mechanisms and reservoir dynamics of watershed-scale nitrogen retention, summarizing its spatiotemporal distribution characteristics, key influencing factors, as well as the current research and application status of numerical models. Research has found that there are bottlenecks in understanding the coupling mechanism of multimedia interfaces, quantifying the lag effect of nitrogen retention, and uncertainty in cross scale models, leading to spatial and temporal mismatches between management policies and water quality responses. Future research needs to deepen the understanding of the surface water-sediment-groundwater continuum coupling mechanism, promote the deep integration of artificial intelligence and mechanistic models, and innovate adaptive management paradigms based on nature-based solutions.

Key words: nitrogen retention; watershed-scale; surface water-sediment-groundwater; nitrogen cycle; nature-based solution

氮滞留是指在流域水文循环过程中, 氮元素(如硝态氮、铵态氮等)通过物理吸附、生物吸收、化学沉淀、反硝化作用等过程, 在土壤、地下水、河流、湿地、水库等介质中被暂时或长期截留, 从而减少其向下游或水体输出的现象。这一过程是流域氮生物地球化学循环的关键环节, 直接影响水体富营养化、生态系统健康及全球氮素平衡。研究流域尺度上的地表水体(河流、湖泊、水库、湿地等)、土壤孔隙水、地下水等的氮滞留机制对精准评估流域氮素输移路径、优化污染控制策略具有重要意义。一方面, 潜流带作为氮素迁移的缓冲区, 其滞留能力可显著降低河流氮输出通量^[1-2], 但其时空异质性易导致氮污染

的滞后效应^[3]; 另一方面, 气候变化和人类活动进一步改变了潜流带水文条件, 使得氮滞留过程与水质响应的非线性关系愈发复杂^[4]。因此, 揭示流域尺度氮滞留的驱动机制与调控路径对实现流域尺度水质目标管理和生态系统服务功能提升具有重要科学价值与实践意义^[5]。

本文拟综述流域尺度氮滞留的研究进展, 揭示多介质界面氮循环的时空异质性与驱动机制。通过阐明氮滞留的分布特征与关键过程, 总结数值模拟方法的创新突破, 探讨流域管理策略的协同效应与实施瓶颈, 厘清流域氮滞留的动态及其对全球变化的响应, 以期氮滞留的研究与流域氮污染精准治

基金项目: 上海市自然科学基金项目(24ZR1470500)

作者简介: 王喜华(1984—), 男, 研究员, 博士, 主要从事碳氮磷迁移转化溯源研究。E-mail: 21531@tongji.edu.cn

理提供理论支撑。

1 流域氮滞留机制与氮滞留库动态变化

1.1 流域氮滞留机制

对于一个给定的流域,通过陆水连续体在景观单元内部和不同景观单元之间运输、转移、储存和移除的营养量取决于营养投入产出平衡,并受到一系列水文和生物地球化学过程的调节。因此,各种景观单元中氮滞留库的建立主要源于水力滞留效应、生物地球化学滞留效应以及人为营养输入滞留效应(图1),图中 $N_{\text{滞留}}$ 、 $N_{\text{输入}}$ 、 $N_{\text{输出}}$ 分别为景观单元氮的滞留量、输入量和输出量。

1.1.1 水力滞留效应

氮素从源头(人类聚居区)通过不同景观单元(沟渠、排水渠、湿地、河岸带等)向受纳水体(湖泊、水库、河流等)的输送主要由地表水和地下水的途径主导(图1)。不同景观单元中的养分循环还受到景观区块中水力停留时间的影响,水力滞留效应可被视为养分沿水文路径从源头输送到受纳水体所需的时间。

流域中营养物质的滞留能力因传输路径与水文-生物地球化学条件的差异呈现显著空间异质性。河道系统(溪流、沟渠、河流)作为快速传输通道,其水力特性决定了营养物质的动态响应。点源污染与地表径流输入的氮、磷可通过水流分离与减缓实现局部沉积,尤其在弯曲河段、植被覆盖区或低流量条件下,物理沉降与生物吸收效率显著提升^[6]。然而,此类滞留具有可逆性,径流增大会重新激活表层沉积

物,导致短暂停留的营养物再悬浮并向下迁移^[7-8]。相比之下,洪泛平原与河岸带通过洪水漫溢捕获泥沙-营养物复合体,可将滞留周期延长至数年或数十年^[9-10],形成“快进慢出”的空间分异格局^[11-13]。

静水水域(湿地、湖泊、水库)通过降低水流速度和增强界面作用,成为流域营养物质积累的关键节点^[14-16]。其中,湿地依赖植被碎屑与细颗粒物沉积实现高效固持,其沉积速率显著高于浅水湖泊^[17-18];水库、湖泊等深层水体则通过稳定的层流条件促进颗粒物沉降,形成深层沉积库,氮素释放需依赖剧烈扰动或长期扩散过程^[19]。此类水域的滞留效率受水文连通性调控,季节性水位波动或人为调度可改变沉积-再悬浮平衡,导致营养物输出模式复杂化^[20]。陆地-水生交界面的地形梯度进一步强化了滞留的空间分异。从高地向低地过渡过程中,地表径流携带的颗粒态营养物随坡度降低逐渐沉积,容易在地形突变区(山脚、汇流区等)形成沉积带^[10]。暴雨或融雪驱动的间歇性径流促使营养物经历输移-滞留-再输移的循环过程,延长其流域尺度流动时间。这种机制导致低地土壤与沉积物中营养物净积累增加,但也加剧了外部负荷削减后的内源释放风险^[21]。

地下水流系统主导硝酸盐等溶解态营养物的长周期滞留。浅层地下水的流动时间可达数月数十年^[22],其动力学受吸附-解吸平衡与非饱和带厚度控制^[23]。流域尺度上,地下水过境时间分布呈幂指特征,表现为长尾效应,即少量溶质以极慢速率迁移,形成百年尺度

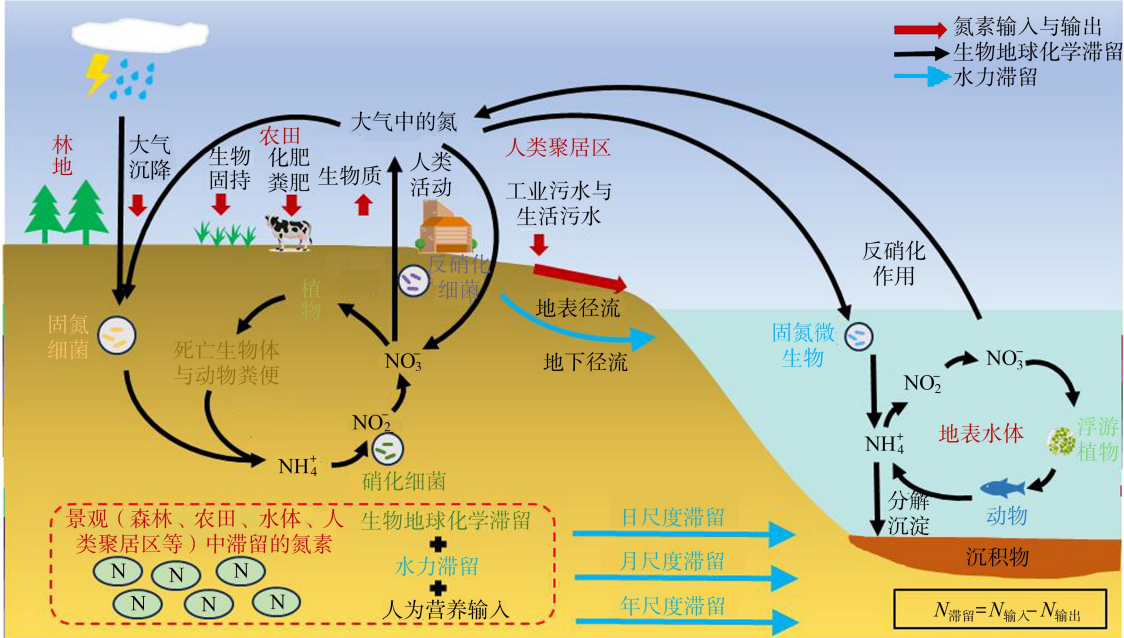


图1 氮滞留示意图

Fig.1 Schematic diagram of nitrogen retention

的化学记忆^[24]。这一特性意味着即使外源输入终止,地下水系统仍可能持续释放历史累积的氮素,构成水质改善的主要滞后因子^[25]。

1.1.2 生物地球化学转化滞留效应

营养物质在土壤/沉积物-水-生物群系统中的形态转化与迁移构成了复杂的生物地球化学循环网络(图1)。这一过程通过气体挥发、植物吸收、水文输出等途径控制营养物质的生态去留,其滞留效应表现为营养物质在完全脱离特定景观前经历的滞留周期。不同介质中氮的生物地球化学停留时间存在显著差异,表层土壤中可交换态氮的生物地球化学停留时间跨度为10~70 a,而水生沉积物的滞留周期可达10~100 a^[9]。

陆地生态系统中,氮循环由微生物介导的多重转化过程驱动。有机质分解和氨化作用通过微生物降解动植物残体释放铵离子(NH_4^+),其速率受温度、水分及碳氮比调控^[26-27]。硝化作用在有氧条件下由氨氧化细菌(AOB)和亚硝酸盐氧化菌(NO_B)协同完成,将 NH_4^+ 依次转化为 NO_2^- 和 NO_3^- ^[28-29]。反硝化作用则在厌氧环境下通过反硝化细菌将 NO_3^- 还原为 N_2O 或 N_2 气体,实现氮素脱除^[30]。土壤中有有机氮的微生物固定与矿化形成动态平衡,但耕作扰动会破坏团聚体结构,加速有机质氧化与矿化速率^[31]。耕地系统中,长期施肥导致氮素在土壤剖面积累,其滞留周期受作物类型与管理措施调控。多年生植物根系分泌物促进微生物活性,增强氮矿化速率。湿地与河岸带通过水力滞缓和植物吸收实现高效截留;湖泊、水库沉积物中有有机氮的埋藏速率受初级生产力与氧化还原条件控制,其周转周期通常超过10 a^[32]。

营养物质在各景观单元内的再循环显著延长停留时间。例如,湿地中凋落物分解释放的氮经矿化后被植物再吸收,形成植物-微生物-土壤的闭路循环,其周转周期因植被类型差异可达数月至数年^[33]。农田中未被作物利用的氮通过渗漏进入地下水,其返排过程常滞后施肥周期数十年^[34]。这种时间滞后效应成为流域氮减排效益评估的关键挑战。

1.1.3 人为营养输入滞留效应

全球人口增长与城市化进程加速驱动下,人类活动显著改变了地球氮循环格局^[35]。农业生产中过量化肥施用与化石能源消耗导致活性氮输入量激增,而多数地区氮素利用效率不足^[36],这种供需失衡引发多重生态环境风险。有研究表明,化肥施用与化石能源消耗构成人为活性氮的主要供给途径,其环境归趋呈现差异化分布^[37]。土壤与河流系统

的反硝化贡献率分别为35%~44%和11%~20%^[38];约25%的活性氮通过河口输出进入海洋^[39],剩余10%~20%则以有机质形式蓄积于景观单元^[33]。全球流域氮质量平衡模型的长期观测显示,1940—2008年陆地生态系统的年均氮滞留量达50 kg/hm²^[31],这种累积效应在高强度农业流域尤为显著。研究还揭示,高度管理的流域中的氮饱和度随过量输入而显著升高^[40-41],因此许多学者^[31,42-43]通过氮平衡研究证实陆地生态系统中存在大规模且持续的氮储量积累现象。

1.2 流域氮滞留库的动态变化

水力、生物地球化学和人为因素对整个流域景观中的氮滞留库的建立产生了关键作用。在陆生-水生连续统一体的不同地貌中,水力和生物地球化学作用的停留时间各不相同,进而形成了不同的氮滞留时空模式^[6,10]。滞留氮热点总是出现在地下水更新时间较长的大流域和氮的生物地球化学循环时间较长的地区^[43]。一般而言,整个流域景观中的农田土壤、沉积物和包气带地下水是流域氮滞留库积累的重点区域^[44-45]。

1.2.1 农田土壤氮滞留动态

农田土壤作为流域人为养分输入的重要区域,通过长期化肥与有机肥施用形成了显著的养分残留效应^[46-47]。全球尺度研究表明,肥料氮、磷当季利用率分别低于50%和20%^[36],这种低效利用导致农业生态系统持续累积过量养分。近半个世纪观测数据显示,农田表层土壤全氮和有机质含量显著上升^[31,48],同位素追踪试验进一步证实约40%~60%的施用氮通过微生物固持转化为土壤有机氮库^[35]。

1.2.2 沉积物氮滞留动态

河道系统(沟渠、溪流)与静水水域(湿地、湖泊)通过多级生物地球化学过程(如反硝化作用、生物固持)产生显著的氮滞留效应。在河道系统中,净氮滞留主要依赖有机氮沉积、物理吸附及河床沉积物的生物地球化学固持。农业区侵蚀颗粒携带的营养物是河道沉积物氮积累的核心来源,而居民区排水则以污水溶解态氮及不透水面侵蚀颗粒贡献为主^[49-50]。有研究表明,浅层水流环境中底栖界面光照增强与生物膜附着可显著提高氮滞留效率^[51-52]。湖泊湿地因水力停留时间延长使其沉积物氮累积效率较河道系统更高^[53],其核心机制包括颗粒有机氮沉积、植物根系对溶解氮的吸收^[54]以及微生物介导的硝化-反硝化链式反应。湿地系统的氮滞留效率受多重因子耦合控制,较低的水力负荷与较长的停留时间使颗粒态氮更易沉降,同时促进生物地球化学过程对溶解态氮的吸附或转化^[55]。湿地季节性

水位波动通过增强有机质分解,促使铵态氮向硝态氮转化并迁移至厌氧层,从而促进反硝化作用。对于湿地或河岸地带,由于自然和人工调节导致水位下降,有机物分解增强,会增加无机氮(NH_4^+ 、 NO_3^-)含量,其中部分向下移动到厌氧层,从而通过反硝化作用去除氮。根据降水量(尤其是暴雨)和水流情况,沉积物中的残留营养物质会随水流从湿地或河岸地带迁移,成为下游氮滞留的重要来源。

1.2.3 包气带地下水氮滞留动态

溶解氮(硝酸盐等)因其高溶解性、强迁移性和长滞留期,在包气带地下水中易形成由土壤残留氮衍生的氮滞留库,此类氮库广泛分布于人类聚居区。地下水系统中遗留氮的衰减主要通过反硝化作用与地表水迁移实现。反硝化需要缺氧环境及电子供体(有机碳、硫化物等)协同作用,但在氧化还原过渡带常受碳源或低氧条件限制^[56]。浅层富氧地下水虽含溶解有机碳,但氧气抑制反硝化活性^[57];当水流经河岸缓冲区时,有机碳富集与低氧环境可激活脱氮过程^[58],局部流动系统中浅层隔水层促使地下水接触富含电子供体的河岸沉积物,从而增强反硝化效率^[59]。地下水流速与路径深刻影响氮输出动态。长滞留时间促进微生物介导的矿化-硝化链式反应,使氮以硝酸盐形式持续释放^[60]。地下水滞留时间可达数月至数十年,甚至在某些区域达到百年尺度,尤其在低渗透性含水层中,氮素迁移速率极慢,形成长期的“化学记忆”。暴雨引发的水位波动可扰动沉积物-水界面,导致吸附态氮解吸并随径流迁移,成为下游水域的重要污染源^[61]。该过程揭示了地下水氮循环的时间滞后性与空间连续性特征,

为流域尺度氮污染治理提供了理论依据。

2 流域尺度氮滞留研究方法进展

定量了解流域尺度上的遗留养分动态对于制定有效的养分管理措施至关重要。由于存在巨大的时空异质性,直接监测工作几乎不可能做到。数值模型是量化接纳水体的流域养分输入量以及预测气候和土地利用变化影响的重要工具^[62],现有的数值模型主要包括经验模型和机理模型,常见的氮滞留数值模型见表 1^[63-75]。

2.1 经验模型

经验模型通过建立氮滞留与环境变量之间的经验关系研究区域尺度氮循环。刘敏等^[63]以石头口门水库汇水流域为例,建立了流域 ReNuMa 污染负荷模型,开展了分期、分区、分源的总氮输出特征分析。陈瑜等^[64]基于 SPARROW 模型,通过空间回归分析揭示了污染源输入与河道传输效率的关系,在中国新安江流域进行应用,该模型量化了坡度、降雨等因素对农业源、生活源氮入河比例的影响,并优化了子流域减排优先区的识别。Robertson 等^[65]使用 SPARROW 模型分析了美国中西部地区流域的氮、磷和悬浮沉积物负荷,提供了流域尺度的氮输送和滞留估计。GWLF 模型则因参数需求低、计算高效,在中小型流域的氮磷负荷估算中表现突出,李泽利等^[76]在于桥水库入库河流的研究利用该模型校准水文参数后,成功解析了引滦调水工程对氮磷输入的贡献占比。王心亮^[66]使用 GlobalNEWS 模型评估了人类活动对长江流域总氮输出的空间异质性影响,结合土地利用和气候数据预测了滞留效应主导的氮输

表 1 常见的氮滞留数值模型

Table 1 Common numerical models of nitrogen retention

模型分类	模型名称	模拟空间尺度	时间步长	模型描述	文献
经验模型	ReNuMa	区域	月	用于区域尺度的营养物管理,评估不同管理措施对氮负荷的影响,支持农业管理决策	[63]
	SPARROW	中、大流域	年	基于统计回归,结合地理空间数据,估算氮、磷等营养物质的来源、输送和滞留,广泛应用于各大流域	[64-65]
	GlobalNEWS	全球	年	估算全球尺度的氮输出,考虑不同土地利用和氮源的影响,支持全球营养物管理政策制定	[66]
机理模型	INCA	中等流域	日	过程驱动模型,模拟土壤-植物系统和河流系统中的氮循环,适用于评估土地利用变化和气候变化对氮动态的影响	[67]
	ANSWERS	小流域	小时	用于模拟非点源污染对流域氮负荷的影响,评估土地利用变化的影响,支持农业管理	[68]
	HSPF	小、中等流域	小时~日	模拟流域的水文过程和水质变化,评估氮的输送和滞留,支持非点源污染管理	[69]
	MONERIS	区域	年	模拟欧洲流域的营养物排放,评估不同氮源对河流系统的影响,支持流域管理	[70-71]
	IMAGE-GNM	全球	年	全球分布式模型,模拟氮和磷在地表水中的输送和滞留,支持全球营养物管理政策制定	[72]
	SWAT	小、大流域	日	综合水文和农业管理模型,模拟土壤水分、作物生长和营养物质输送,广泛用于农业流域氮动态模拟	[73]
	ELEMent-N	小、中等流域	年	模拟土壤有机氮的积累与矿化过程,以及氮在地下水中的迁移和滞留,评估历史氮输入对当前水质的影响	[74-75]

移路径。Billen 等^[58]结合了随机森林模型和滞后效应的新型河流水质模型框架,用于模拟和预测流域出口的季节性氮素浓度。目前流行的流域模型一般都缺乏明确的机制来描述遗留养分动态和输送滞后^[77]。GlobalNEWS、GWLF、PolFlow 和 SPARROW 等模型通常假定每年或多年的营养物循环处于稳定状态,在确定用于考虑模型中营养源输入的多年期的适当长度以满足稳态假设方面仍然存在重大挑战^[78]。

2.2 机理模型

机理模型通过物理-化学-生物过程的耦合解析氮滞留的时空异质性。Wade 等^[67]开发了 INCA 模型的新版本,模拟了英国流域的氮循环过程,包括植物/土壤系统和河流系统中的氮动态。ANSWERS-2000 模型可在农业流域中模拟氮磷流失路径,通过栅格化划分研究区,预测不同土地利用下氮素的分离、运输与淋溶过程^[68]。樊荣^[69]用 HSPF 模型模拟总氮入海通量,量化城镇污水、农业面源等污染源的贡献,并提出了减排策略。De Lima Barros 等^[70]使用 Moneris 模型量化了流域点源和扩散源的营养物排放。Tzoraki 等^[71]使用改进的 Moneris 模型计算了间歇性河流的养分变化。Lee 等^[79]利用 LM3-TAN 模型探讨了萨斯奎汉纳流域气候变化和极端事件增加对溶解态氮负荷的影响,结果表明该流域经历了 1~3 a 的干旱后,由于整个干旱过程中积累的氮素冲刷和微生物过程的改变,超过溶解态氮负荷阈值的可能性增加了 40%~65%。

由于对营养流失的停留时间和生物地球化学机制的定量了解有限,很多流域机理模型并没有很好地解决滞留效应问题。Beusen 等^[72]耦合了 IMAGE 与 GNM 模型用于大型流域氮滞留的研究。SWAT 模型广泛应用于农业流域的氮动态模拟,评估不同农业管理措施对氮负荷的影响。Ilampooranan 等^[73]对 SWAT 模型进行了改进,考虑了土壤和地下水库中遗留养分积累产生的时间滞后,使用 SWAT-LAG 模型探究了南福克爱荷华河流域的氮滞留时间。特别地,针对地下水氮滞留的长期效应及其与地表水响应的耦合机制, Van Meter 等^[74]开发了模块化的 ELEMeNT 模型框架,该模型将土壤有机氮降解方程与三维地下水流模型(MODFLOW)及粒子示踪模型(MODPATH)相结合,旨在量化流域尺度土壤和地下水中的遗留氮,并模拟其沿地下路径的传输和滞留。ELEMeNT 模型的显著优势在于其能够重建历史硝酸盐负荷量,从而揭示长达数十年甚至上百年的氮素滞后效应。例如,该模型成功应用于美国密西西比河流域和萨斯奎汉纳河流域,量化了过去农

业活动导致的氮素累积如何持续影响当前河流的硝酸盐浓度,其模拟结果清晰地展示了大型农业流域的氮素滞后时间尺度可达数十年^[74-75]。

经验模型数据需求低、计算高效,主要通过统计回归建立氮滞留与环境因子间的宏观经验关系,适用于中~大尺度流域的宏观评估和政策制定,但缺乏对内在机制的深入描述,可解释性较弱。机理模型基于物理、化学、生物过程的详细刻画,能深入解析氮循环机制,提供更高的时空分辨率,适用小~中等流域的精细化模拟和未来情景预测,但数据需求大、参数化复杂且计算成本高。近年来兴起的数据驱动模型通过机器学习算法从海量数据中学习复杂非线性关系,无需明确的物理过程机制,在预测精度上表现出色,尤其适用于数据充足、需要高精度预测的场景。然而,其黑箱特性限制了对氮循环机制的深入理解和管理决策的可解释性,且对高质量、长时间序列数据依赖性强。在实际应用中,选择何种类型的模型应综合考虑研究目的、可获取数据、所需精度和解释性需求。例如在农业旱半干旱区或寒区高山区,由于水文过程的复杂性和数据获取的难度,数据驱动模型可能需要结合物理约束才能更好地应用,而机理模型则能在数据支持下提供更深入的机制理解。

3 管理策略与挑战

3.1 源头-过程协同控制

源头削减基于多目标分区,采用差异化策略降低氮输入负荷。例如,高氮区推广农牧一体化模式,通过粪肥资源化利用减少化肥依赖;高盈余区实施精准施肥管理,结合遥感监测优化作物生长季的氮肥施用时间和用量。针对农业密集区(如松花江流域),建议减少秋前氮输入并增加植被覆盖以降低春季径流冲刷风险。生态工程技术通过过程阻断方式延缓氮迁移。平原河网地区可构建梯级生态沟渠,利用挺水植物(如芦苇)和沉水塘吸附截留颗粒态氮;在河流交汇区或湖库缓冲带,设计滞洪区与湿地系统提高生物固持与反硝化效率^[80]。以太湖流域为例,近年来通过实施环湖湿地修复工程,构建多级人工湿地系统,显著降低了湖泊富营养化风险。在美国 Chesapeake Bay 流域,通过恢复河岸缓冲带和潮汐湿地,结合农业最佳管理实践,实现了入湾氮负荷的显著削减,虽然面临滞后效应的挑战,但长期综合治理的成本效益已初步显现^[81]。此外,城市排水口需加强污水处理厂脱氮工艺升级,并配套雨水

收集管网以减少暴雨期氮负荷冲击。

3.2 适应性管理框架

3.2.1 基于水力响应时间的最佳管理实践滞后效应评估

最佳管理实践的效果受流域水力响应时间制约。例如,松花江流域研究表明,遗留氮导致水质改善存在 2~5 a 滞后窗口期^[82]。改进的 SWAT 模型可通过模拟地表径流、壤中流及地下水中的氮氮迁移路径^[80],量化不同情景下最佳管理实践(如化肥减施、植被缓冲带)对氮负荷的削减贡献率。结合机器学习(如随机森林算法)分析多年观测数据,可识别关键驱动因子(如降雨强度、土壤渗透速率),优化最佳管理实践的空间优先级排序。

3.2.2 多圈层监测网络

构建涵盖大气、土壤、水体、人类活动的全链条监测体系,支撑氮循环动态解析。如雅鲁藏布江流域的多圈层水文监测网,集成降水、冻土、土壤湿度及河道氮浓度数据,揭示冰川融水与农业活动对氮输移的耦合影响^[83]。此外,遥感技术可用于区域尺度反硝化速率反演,而高频自动监测站则能捕捉暴雨事件下的氮脉冲响应。这些数据驱动的监测手段为模型校准与政策调整提供实时反馈。

3.3 局限与挑战

3.3.1 跨尺度模型耦合的不确定性

流域尺度氮滞留研究的复杂性必然导致需要整合不同空间和时间尺度的信息,使得跨尺度模型耦合成为必然趋势,但也引入了显著的不确定性^[84]。首先,过程表示的尺度差异是核心挑战。微观尺度的生物地球化学过程(如微生物反硝化速率、吸附-解吸动力学)在流域宏观模型中往往需要进行概化或参数化,这可能导致关键机制的丢失或不准确的表示。其次,数据和参数的尺度不匹配加剧了不确定性。不同尺度的观测数据往往具有不同的分辨率、覆盖范围和采样频率。将点尺度(如原位传感器数据、实验室分析)或小流域尺度(如径流小区数据)的参数直接应用于大尺度流域模型时,由于空间异质性和非线性效应的存在,可能导致参数失真和模型预测偏差。此外,模型参数的校准和验证在跨尺度情景下变得更为复杂,不同尺度上的最优参数集可能存在显著差异。模型结构的简化与假定也带来不确定性。为了平衡计算效率和复杂性,流域模型通常会对真实系统的复杂性进行简化。例如,许多水文模型未能充分耦合地表水与地下水的动态交换过程,尤其是在潜流带、河岸带等关键区域,这会低估这些区域对氮滞留的贡献及其潜在的滞后效应。当进行模型耦合时,不同模型的固有假设和数

值方法差异可能导致接口处的系统性误差累积。

3.3.2 政策实施与水质响应的时空错配

管理措施的水质改善存在显著延迟效应。研究发现,松花江流域河流溶解性无机氮浓度对人为氮输入(氮营养指数)的响应存在长期滞后效应,可达数十年,其中春季滞后效应最强(平均 23 a),主要受地膜覆盖和土壤有机质积累的协同作用^[81]。政策工具的设计需应对此类时空错配。例如美国切萨皮克湾的氮信用交易体系因成本转嫁导致小型农户参与度下降 37%^[79]。

4 未来研究方向

4.1 多界面耦合机制:地表水-沉积物-地下水连续体氮通量定量

现有研究已初步揭示了地表水、沉积物和地下水各自的氮滞留机制,但缺乏对三者之间动态耦合、协同作用的系统性认识。未来需突破传统单界面研究范式,构建地表水-沉积物-地下水连续体动态模型,实现跨介质氮通量的高精度量化^[85-87]。

a. 深化潜流带与河岸带机制研究。运用先进的原位监测技术(如高分辨率传感器、纤维光学分布式温度传感系统)和同位素示踪技术(如 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 双同位素),精细刻画潜流带和河岸带的水文连通性、氧化还原条件和微生物群落结构在时空上的高度变异性,量化其对氮转化(反硝化、厌氧氨氧化)和滞留的贡献。特别要关注极端水文事件(如暴雨、干旱)如何改变这些关键区域的氮循环动力学,并驱动沉积物中滞留氮的再释放。

b. 探索土壤-包气带-地下水耦合机制。加强对包气带中氮素垂直迁移路径、速率及其与土壤有机质、含水层渗透性等水文地质条件之间相互作用的研究。结合地球物理探测技术,更准确地识别地下水流路径和滞留区,并通过长期观测数据和模型模拟,量化历史氮输入在地下水系统中形成的“遗留氮库”及其向地表水体的持续释放通量,这对于理解水质改善的长期滞后效应至关重要。针对地下水氮遗留效应,亟须开发多介质耦合的长期动态监测系统,结合水文地质特征(如渗透系数、含水层厚度)建立氮滞留时间尺度图谱,并进一步利用如 ELEMeNT 模型等进行定量模拟,以更精确地评估历史氮输入对当前水质的长期贡献。

c. 发展多介质界面模型耦合框架。构建无缝连接地表水、沉积物和地下水模型的耦合框架,实现氮素在不同介质间传输、转化和滞留过程的连续模拟。例如,结合水动力模型、生物地球化学模型和溶质运移模型,量化氮素在河流、湖泊、湿地和地下水

体之间的动态交换与转化效率,从而更全面地评估流域氮滞留能力。

4.2 新兴技术应用:人工智能驱动的高分辨率氮循环模拟

当前流域氮滞留模型面临机理描述不足与数据驱动模型黑箱效应的挑战。未来研究应着力发展机理与数据驱动深度融合的新一代智能化模型,以提升模拟精度、增强可解释性和扩展适用范围^[88]。

a. 构建物理信息神经网络等混合模型,将氮循环的基本物理、化学和生物定律作为约束条件嵌入到深度学习模型中,使模型在保持强大预测能力的同时,具备更强的物理可解释性和泛化能力。

b. 强化模型对滞后效应的刻画,针对地下水和土壤遗留氮的长期滞后效应,需要开发专门的时间滞后模型(如 ELEMNT、SWAT-LAG 的改进版),并通过长时间序列数据进行校准和验证,精确量化不同地质条件和土地利用情景下的滞后时间及其对当前水质的影响。

c. 融合多源异构数据,充分利用遥感大数据、原位传感器网络、基因组学数据、社会经济数据等多源异构信息,通过先进的数据同化和融合技术,为智能化模型提供丰富而精准的输入。例如,结合遥感反演的植被指数、土壤湿度等信息,与高频水质监测数据耦合,提升氮素流失预测的实时性和准确性。

4.3 管理范式创新:基于自然解决方案的适应性调控

流域氮滞留研究的最终目标是支撑水环境的可持续管理。未来研究应将科学发现转化为更具操作性、成本效益和适应性的管理策略,重点推动基于自然解决方案的流域治理模式^[81,89]。

a. 优化自然解决方案的配置与评估。深入研究梯级生态沟渠、滞洪区湿地、河岸缓冲带等基于自然解决方案措施在不同水文地质条件和土地利用背景下的最佳配置模式和脱氮效率。不仅要量化其氮滞留潜力,更要从生态系统服务功能、成本效益和长期维护角度进行综合评估,为区域尺度推广提供实证依据。例如,可借鉴太湖流域环湖湿地修复、切萨皮克湾流域河岸带恢复等成功案例,分析其工程参数、投资效益与长期生态效应。

b. 构建考虑滞后效应的政策工具。鉴于氮滞留的长期滞后效应,传统的短期政策可能难以取得预期效果。未来需要设计和实施能够跨越长期时间尺度的政策工具,例如基于长期效益的生态补偿机制、灵活的氮信用交易体系以及鼓励长期投入的农业管理补贴。通过建立健全的监测-评估-反馈机制,实现政策的动态调整和适应性管理。

c. 发展多目标协同的决策支持系统。整合氮循环模拟、生态系统服务评估、经济效益分析和政策工具评估等模块,开发集成的决策支持系统。该类系统应能够可视化不同管理情景下的氮滞留效果、水质改善潜力、生态效益增益和经济社会成本,为流域管理者提供量化、直观的决策依据,从而实现水质改善、生态系统健康和经济社会发展之间的多目标协同。

5 结 语

本文系统综述了流域尺度氮滞留的研究进展,揭示了多介质界面氮循环的时空异质性与驱动机制。通过阐明氮滞留的分布特征与关键过程,总结了数值模拟方法的创新突破,并探讨了流域管理策略的协同效应与实施瓶颈。当前研究在潜流带动态机制解析、氮滞留量化及跨时空尺度模型耦合方面仍存在显著挑战:水力-生物地球化学耦合模型对界面异质性的表征不足;地下水氮污染的滞后效应与地表水响应机制尚未明晰;长期监测数据匮乏与政策工具时效性错位制约了管理效能。未来研究需重点关注以下方向:深化地表水-沉积物-地下水连续体耦合机制研究,融合同位素示踪与高分辨率传感网络,构建多过程协同的跨尺度动态模型;推动人工智能与机理模型的深度融合,发展物理约束的深度学习框架,提升氮循环模拟的精度与可解释性;创新协同治理范式,设计兼顾生态补偿与水文滞后效应的动态管理工具,建立基于自然解决方案的适应性调控体系。通过多学科交叉创新与多尺度数据同化,有望突破氮滞留的时空复杂性瓶颈,为实现流域水安全、生态健康的协同提供科学支撑。

参考文献:

[1] 李恒鹏,陈伟民,杨桂山,等. 基于湖库水质目标的流域氮、磷减排与分区管理:以天目湖沙河水库为例[J]. 湖泊科学, 2013, 25 (6): 785-798. (LI Hengpeng, CHEN Weimin, YANG Guishan, et al. Reduction of nitrogen and phosphorus emission and zoning management targeting at water quality of lake or reservoir systems: a case study of Shahe Reservoir within Tianmuhu Reservoir area [J]. Journal of Lake Sciences, 2013, 25 (6): 785-798. (in Chinese))

[2] 李如忠,何瑞亮,刘超,等. 水库泄洪闸下溪流深潭氮磷营养盐滞留特征及动力学模拟[J]. 环境科学学报, 2021, 41 (11): 4606-4614. (LI Ruzhong, HE Ruiliang, LIU Chao, et al. Retention characteristics and kinetics simulation of nitrogen and phosphorus in a stream pool under the sluice gate of a small reservoir [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41 (11): 4606-4614. (in Chinese))

- [3] 胡敏鹏. 流域非点源氮污染的滞后效应定量研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [4] 刘梅冰, 陈兴伟, 陈莹. 山美水库流域氮素流失的时间过程及影响因素[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13 (4): 659-663. (LIU Meibing, CHEN Xingwei, CHEN Ying. Temporal characteristics and impact factors of nitrogen loss in Shanmei Reservoir watershed[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(4) : 659-663. (in Chinese))
- [5] 卢诚, 李国光, 齐作达, 等. SPARROW 模型的传输过程研究: 以新安江流域总氮为例[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28 (1): 7-13. (LU Cheng, LI Guoguang, QI Zuoda, et al. Research on the transport processes of SPARROW model: a case study for total nitrogen in Xin' anjiang River Basin[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28 (1): 7-13. (in Chinese))
- [6] CHEN Dingjiang, HU Minping, GUO Yi, et al. Reconstructing historical changes in phosphorus inputs to rivers from point and nonpoint sources in a rapidly developing watershed in eastern China, 1980-2010[J]. Science of the Total Environment, 2015, 533: 196-204.
- [7] COLLINS A L, WALLING D E. Fine-grained bed sediment storage within the main channel systems of the Frome and Piddle catchments, Dorset, UK [J]. Hydrological Processes, 2007, 21(11): 1448-1459.
- [8] JARVIE H P, SHARPLEY A N, SCOTT J T, et al. Within-river phosphorus retention: accounting for a missing piece in the watershed phosphorus puzzle[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(24): 13284-13292.
- [9] HAMILTON S K. Biogeochemical time lags may delay responses of streams to ecological restoration [J]. Freshwater Biology, 2012, 57(Sup1): 43-57.
- [10] SHARPLEY A, JARVIE H P, BUDA A, et al. Phosphorus legacy: overcoming the effects of past management practices to mitigate future water quality impairment[J]. Journal of Environmental Quality, 2013, 42 (5): 1308-1326.
- [11] 陆帅帅, 周念清, 蔡奕, 等. 洞庭湖湿地潜流带地下水中氮磷迁移转化过程及驱动机制分析[J]. 水资源保护, 2024, 40(5): 122-130. (LU Shuaishuai, ZHOU Nianqing, CAI Yi, et al. Analysis of nitrogen and phosphorus migration and transformation and driving mechanism in hyporheic zone groundwater of Dongting Lake wetland[J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (5): 122-130. (in Chinese))
- [12] 王辉, 马巍, 杨智, 等. 基于数字滤波和 LOADEST 模型的思茅河基流氮磷输出通量估算[J]. 水资源保护, 2023, 39 (6): 186-194. (WANG Hui, MA Wei, YANG Zhi, et al. Estimation of base flow nitrogen and phosphorus output flux in the Simao River based on digital filtering and LOADEST model[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 186-194. (in Chinese))
- [13] 杨雨潇, 李家科. 基于 HYPE 模型的汉江安康断面以上流域非点源污染模拟[J]. 水资源保护, 2024, 40 (3): 140-148. (YANG Yuxiao, LI Jiake. Simulation of non-point source pollution in watershed above Ankang Section of the Han River based on HYPE model[J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (3): 140-148. (in Chinese))
- [14] 胡诗瑶, 王沛芳, 胡斌, 等. 农田退水中氮磷与吡虫啉的光催化水循环协同净化试验研究[J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2024, 52 (2): 35-42. (HU Shiyao, WANG Peifang, HU Bin, et al. Experimental study on photocatalytic water-circulating synergistic purification of nitrogen, phosphorus and imidacloprid in receding water of farmland[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(2): 35-42. (in Chinese))
- [15] 张婷, 高雅, 李建柱, 等. 流域非点源氮磷污染负荷分布模拟[J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2021, 49 (1): 42-49. (ZHANG Ting, GAO Ya, LI Jianzhu, et al. Distribution simulation of non-point source nitrogen and phosphorus pollution load in watershed [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49 (1): 42-49. (in Chinese))
- [16] 李勇, 张维维, 袁佳慧, 等. 潜流带水流特性及氮素运移转化研究进展[J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2016, 44 (1): 1-7. (LI Yong, ZHANG Weiwei, YUAN Jiahui, et al. Research advances in flow patterns and nitrogen transformation in hyporheic zones[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44 (1): 1-7. (in Chinese))
- [17] FISHER J, ACREMAN M C. Wetland nutrient removal: a review of the evidence[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2004, 8(4): 673-685.
- [18] HEFTING M M, CLEMENT J C, BIENKOWSKI P, et al. The role of vegetation and litter in the nitrogen dynamics of riparian buffer zones in Europe [J]. Ecological Engineering, 2005, 24(5): 465-482.
- [19] BLOESCH J. Mechanisms, measurement and importance of sediment resuspension in lakes[J]. Marine and Freshwater Research, 1995, 46(1): 295-304.
- [20] OWENS P N, WALLING D E, CARTON J, et al. Downstream changes in the transport and storage of sediment-associated contaminants (P, Cr and PCBs) in agricultural and industrialized drainage basins[J]. Science of the Total Environment, 2001, 266(1/2/3): 177-186.
- [21] TRIMBLE L A, FEHR W R. Genetic improvement of seedling emergence of low-phytate soybean lines[J]. Crop Science, 2010, 50(1): 67-72.
- [22] TESORIERO A J, DUFF J H, SAAD D A, et al. Vulnerability of streams to legacy nitrate sources[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(8): 3623-3629.

- [23] MEALS D W, DRESSING S A, DAVENPORT T E. Lag time in water quality response to best management practices: a review [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(1): 85-96.
- [24] GODSEY S E, AAS W, CLAIR T A, et al. Generality of fractal $1/f$ scaling in catchment tracer time series, and its implications for catchment travel time distributions [J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24(12): 1660-1671.
- [25] CARDENAS M B, JIANG Xiaowei. Groundwater flow, transport, and residence times through topography-driven basins with exponentially decreasing permeability and porosity [J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(11): W11538.
- [26] SCHIMMEL J P, BENNETT J. Nitrogen mineralization: challenges of a changing paradigm [J]. *Ecology*, 2004, 85(3): 591-602.
- [27] MÖBIUS J. Isotope fractionation during nitrogen remineralization (ammonification): implications for nitrogen isotope biogeochemistry [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, 105: 422-432.
- [28] DI H J, CAMERON K C, SHEN J P, et al. Nitrification driven by bacteria and not archaea in nitrogen-rich grassland soils [J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(9): 621-624.
- [29] YAN Enrong, WANG Xihua, GUO Ming, et al. Temporal patterns of net soil N mineralization and nitrification through secondary succession in the subtropical forests of eastern China [J]. *Plant and Soil*, 2009, 320(1/2): 181-194.
- [30] SEITZINGER S, HARRISON J A, BÖHLKE J K, et al. Denitrification across landscapes and waterscapes: a synthesis [J]. *Ecological Applications*, 2006, 16(6): 2064-2090.
- [31] VAN METER K J, BASU N B, VEENSTRA J J, et al. The nitrogen legacy: emerging evidence of nitrogen accumulation in anthropogenic landscapes [J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(3): 035014.
- [32] JONES D L, HEALEY J R, WILLETT V B, et al. Dissolved organic nitrogen uptake by plants-an important N uptake pathway? [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(3): 413-423.
- [33] SØNDERGAARD M, EPPESEN E, LAURIDSEN T L, et al. Lake restoration: successes, failures and long-term effects [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2007, 44(6): 1095-1105.
- [34] SEBILO M, MAYER B, NICOLARDOT B, et al. Long-term fate of nitrate fertilizer in agricultural soils [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(45): 18185-18189.
- [35] FOWLER D, COYLE M, SKIBA U, et al. The global nitrogen cycle in the twenty-first century [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2013, 368(1621): 20130165.
- [36] BOUWMAN L, GOLDEWIJK K K, VAN DER HOEK K W, et al. Exploring global changes in nitrogen and phosphorus cycles in agriculture induced by livestock production over the 1900-2050 period [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(52): 20882-20887.
- [37] GOYETTE J O, BENNETT E M, HOWARTH R W, et al. Changes in anthropogenic nitrogen and phosphorus inputs to the St. Lawrence sub-basin over 110 years and impacts on riverine export [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2016, 30(7): 1000-1014.
- [38] GROFFMAN P M. Terrestrial denitrification: challenges and opportunities [J]. *Ecological Processes*, 2012, 1(1): 11.
- [39] HOWARTH R, SWANEY D, BILLEN G, et al. Nitrogen fluxes from the landscape are controlled by net anthropogenic nitrogen inputs and by climate [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2012, 10(1): 37-43.
- [40] GRIZZETTI B, BOURAOUI F, ALOE A. Changes of nitrogen and phosphorus loads to European seas [J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(2): 769-782.
- [41] SWANEY D P, HONG B, TI Chaopu, et al. Net anthropogenic nitrogen inputs to watersheds and riverine N export to coastal waters: a brief overview [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2012, 4(2): 203-211.
- [42] CHEN Dingjiang, HU Minpeng, DAHLGREN R. A dynamic watershed model for determining the effects of transient storage on nitrogen export to rivers [J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(10): 7714-7730.
- [43] Worrall F, Howden N J K, Burt T P. Evidence for nitrogen accumulation: the total nitrogen budget of the terrestrial biosphere of a lowland agricultural catchment [J]. *Biogeochemistry*, 2015, 123(3): 411-428.
- [44] 王锦国, 刘子辉, 李伟健. 污水灌溉区土壤非饱和带氮分布特征 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(5): 377-383. (WANG Jinguo, LIU Zihui, LI Weijian. Distribution characteristics of nitrogen in the unsaturated soil of sewage irrigation area [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2018, 46(5): 377-383. (in Chinese))
- [45] 张毅敏, 桂浩翔, 陈婷, 等. 浦阳江中下游氮分布特征及来源解析 [J]. *水资源保护*, 2024, 40(6): 206-214. (ZHANG Yimin, GUI Haoxiang, CHEN Ting, et al. Distribution patterns and source analysis of nitrogen in middle and lower reaches of the Puyang River [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(6): 206-214. (in Chinese))
- [46] 余晓萍, 郝玉洁, 郑西来, 等. 填海条件下地下水氮素污染的动力学特征 [J]. *水资源保护*, 2024, 40(6): 224-232. (YU Xiaoping, HAO Yujie, ZHENG Xilai, et al.

- Dynamic characteristics of nitrogen contamination in groundwater under land reclamation[J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(6): 224-232. (in Chinese))
- [47] 邱英英,郑西来,刘乐成,等. 干湿交替频率影响下非饱和和带有机氮转化的生物学机制[J]. *水资源保护*, 2024, 40(6): 242-250. (QIU Yingying, ZHENG Xilai, LIU Lecheng, et al. Biological mechanism of dry-wet alternation frequency affecting organic nitrogen transformation in vadose zone [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(6): 242-250. (in Chinese))
- [48] YAN Li, ZHANG Jinjing, ZHANG Zhidan, et al. Effect of different fertilization managements on nitrate accumulation in a mollisol of Northeast China [J]. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 2016, 3(1): 16.
- [49] WITHERS P J A, JARVIE H P, HODGKINSON R A, et al. Characterization of phosphorus sources in rural watersheds[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2009, 38(5): 1998-2011.
- [50] NEAL C, JARVIE H P, WILLIAMS R, et al. Declines in phosphorus concentration in the upper River Thames (UK): links to sewage effluent cleanup and extended end-member mixing analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(6): 1315-1330.
- [51] SCHADE J D, MACNEILL K, THOMAS S A, et al. The stoichiometry of nitrogen and phosphorus spiralling in heterotrophic and autotrophic streams [J]. *Freshwater Biology*, 2011, 56(3): 424-436.
- [52] DRAKE W M, SCOTT J T, EVANS-WHITE M, et al. The effect of periphyton stoichiometry and light on biological phosphorus immobilization and release in streams [J]. *Limnology*, 2012, 13(1): 97-106.
- [53] WANG Cong, WANG Xihua, XU Y J, et al. Nitrogen and phosphorus evolution process and driving mechanisms of three major freshwater lakes with different river-lake connectivity (DRLC) in the lower reaches of the Yangtze River, the largest river in Asia [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2025, 486: 144471.
- [54] GÄLMAN V, RYDBERG J, DE-LUNA S S, et al. Carbon and nitrogen loss rates during aging of lake sediment: changes over 27 years studied in varved lake sediment [J]. *Limnology and Oceanography*, 2008, 53(3): 1076-1082.
- [55] GROH T A, GENTRY L E, DAVID M B. Nitrogen removal and greenhouse gas emissions from constructed wetlands receiving tile drainage water [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2015, 44(3): 1001-1010.
- [56] ZHOU Junyu, GU Baojing, SCHLESINGER W, et al. Significant accumulation of nitrate in Chinese semi-humid croplands [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 25088.
- [57] SANFORD W E, POPE J P. Quantifying groundwater's role in delaying improvements to Chesapeake bay water quality [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(23): 13330-13338.
- [58] BILLEN G, GARNIER J, LASSALETTA L. The nitrogen cascade from agricultural soils to the sea: modelling nitrogen transfers at regional watershed and global scales [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2013, 368(1621): 20130123.
- [59] TESORIERO A J, LIEBSCHER H, COX S E. Mechanism and rate of denitrification in an agricultural watershed: electron and mass balance along groundwater flow paths [J]. *Water Resources Research*, 2000, 36(6): 1545-1559.
- [60] DAUGHNEY C J, MORGENSTERN U, VAN DER RAAIJ R, et al. Discriminant analysis for estimation of groundwater age from hydrochemistry and well construction: application to New Zealand aquifers [J]. *Hydrogeology Journal*, 2010, 18(2): 417-428.
- [61] PABICH W J, VALIELA I, HEMOND H F. Relationship between DOC concentration and vadose zone thickness and depth below water table in groundwater of Cape Cod, USA [J]. *Biogeochemistry*, 2001, 55(3): 247-268.
- [62] WANG Xihua, JI Xuming, XU Y J, et al. Multi-machine learning methods to predict spatial variation characteristics of total nitrogen at watershed scale: evidences from the largest watershed (Yangtze River Watershed), Asian [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 949: 175144.
- [63] 刘敏,谢阳村,王东,等. 基于 ReNuMa 模型的长春石头口门水库流域非点源污染负荷模拟[J]. *水资源与水工程学报*, 2012, 23(6): 70-72. (LIU Min, XIE Yangcun, WANG Dong, et al. Simulation of non-point source pollution in the watershed of Shitoukoumen Reservoir based on ReNuMa model [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2012, 23(6): 70-72. (in Chinese))
- [64] 陈瑜,刘光逊,赵越,等. 仿真流域的总氮模拟: SPARROW 模型应用方法研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2012, 23(4): 98-101. (Chen Yu, Liu Guangyue, Zhao Yue, et al. Research on the transport processes of SPARROW model: a case study for total nitrogen in Xin'anjiang River Basin [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2012, 23(4): 98-101. (in Chinese))
- [65] ROBERTSON D M, SAAD D A. Spatially referenced models of streamflow and nitrogen, phosphorus, and suspended-sediment loads in streams of the midwestern United States [R]. Reston: U. S. Geological Survey, 2019.
- [66] 王心亮. 考虑滞留效应的长江流域总氮输出 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2024.
- [67] WADE A J, DURAND P, BEAUJOUAN V, et al. A nitrogen model for European catchments: INCA, new model structure and equations [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2002, 6(3): 559-582.
- [68] 潘沛,刘凌,梁威. 非点源污染模型 ANSWERS-2000 的

- 水文子模型研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(1): 103-106. (PAN Pei, LIU Lin, LIANG Wei. Usage study of non-point source pollution model ANSWERS-2000's hydrology sub-model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(1): 103-106. (in Chinese))
- [69] 樊荣. 基于 HSPF 模型甬江入海总氮排放控制路径研究[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2022.
- [70] DE LIMA BARROS A M, DO CARMO SOBRAL M, GUNKEL G. Modelling of point and diffuse pollution; application of the Moneris model in the Ipojuca River Basin, Pernambuco State, Brazil [J]. Water Science & Technology, 2013, 68(2): 357-365.
- [71] TZORAKI O, COOPER D, DÖRFLINGER G, et al. A new MONERIS in-stream retention module to account nutrient budget of a temporary river in Cyprus [J]. Water Resources Management, 2014, 28(10): 2917-2935.
- [72] 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.
- [73] ILAMPOORANAN I, VAN METER K J, BASU N B. A race against time: modeling time lags in watershed response[J]. Water Resources Research, 2019, 55(5): 3941-3959.
- [74] VAN METER K J, BASU N B, VAN CAPPELLEN P. Two centuries of nitrogen dynamics; legacy sources and sinks in the Mississippi and Susquehanna River Basins[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2017, 31(1): 2-23.
- [75] DESSIRIER B, BLICHER-MATHIESEN G, ANDERSEN H E, et al. A century of nitrogen dynamics in agricultural watersheds of Denmark [J]. Environmental Research Letters, 2023, 18(10): 104018.
- [76] 李泽利, 张庆强, 高锴, 等. 基于 GWLF 模型的于桥水库入库河流水文模拟及氮磷负荷估算[J]. 中国环境监测, 2021, 37(6): 127-135. (Li Zeli, ZHANG Qingqiang, GAO Kai, et al. Hydrological simulation and nitrogen and phosphorus load estimation of inflow rivers to Yuqiao reservoir based on GWLF model [J]. Environmental Monitoring in China, 2021, 37(6): 127-135. (in Chinese))
- [77] KLEINMAN P J A, SHARPLEY A N, WITHERS P J A, et al. Implementing agricultural phosphorus science and management to combat eutrophication[J]. AMBIO, 2015, 44(2): 297-310.
- [78] CHEN Dingjiang, HUANG Hong, HU Minpeng, et al. Influence of lag effect, soil release, and climate change on watershed anthropogenic nitrogen inputs and riverine export dynamics [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(10): 5683-5690.
- [79] LEE M, MALYSHEV S, SHEVLIKOVA E, et al. Capturing interactions between nitrogen and hydrological cycles under historical climate and land use: susquehanna watershed analysis with the GFDL land model LM3-TAN [J]. Biogeosciences, 2014, 11(20): 5809-5826.
- [80] FENG Sijie, WANG Mengru, HEAL M R, et al. The impact of emissions controls on atmospheric nitrogen inputs to Chinese river basins highlights the urgency of ammonia abatement [J]. Science Advances, 2024, 10(37): eadp2558.
- [81] CHANG S Y, ZHANG Q, BYRNES D K, et al. Chesapeake legacies: the importance of legacy nitrogen to improving Chesapeake Bay water quality [J]. Environmental Research Letters, 2021, 16(8): 085002.
- [82] GAO Yedong, TIAN Yu, ZHAN Wei, et al. Characterizing legacy nitrogen-induced time lags in riverine nitrogen reduction for the Songhuajiang River Basin: source analysis, spatio-seasonal patterns, and impacts on future water quality improvement [J]. Water Research, 2023, 242: 120292.
- [83] WANG Lei, CUO Lan, LUO Dongliang, et al. Observing multisphere hydrological changes in the largest river basin of the Tibetan Plateau [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2022, 103(6): E1595-E1620.
- [84] HARVEY J, GOOSEFF M. River corridor science: hydrologic exchange and ecological consequences from bedforms to basins[J]. Water Resources Research, 2015, 51(9): 6893-6922.
- [85] WANG Siru, WANG Ai, YANG Dawen, et al. Understanding the spatiotemporal variability in nonpoint source nutrient loads and its effect on water quality in the upper Xin'an River Basin, Eastern China [J]. Journal of Hydrology, 2023, 621: 129582.
- [86] WANG Xihua, XU Y J, LIU Zejun, et al. Spatiotemporal changes of nitrate retention at the interface between surface water and groundwater: insight from watershed scale in an elevated nitrate region [J]. Hydrological Processes, 2023, 37(3): e14856.
- [87] WANG Xihua, JIA Shunqing, XU Y J, et al. Dual stable isotopes to rethink the watershed-scale spatiotemporal interaction between surface water and groundwater [J]. Journal of Environmental Management, 2024, 351: 119728.
- [88] YAN Xing, XIA Yongqiu, ZHAO Xu, et al. Coupling nitrogen removal and watershed management to improve global lake water quality [J]. Nature Communications, 2025, 16(1): 2182.
- [89] SU Rui, ZHAO Dayong, ZHANG Xiaomin, et al. Dissimilatory nitrate reduction pathways drive high nitrous oxide emissions and nitrogen retention under the flash drought in the largest freshwater lake in China [J]. Water Research, 2025, 274: 123075.

(收稿日期: 2025-05-12 编辑: 王芳)