

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.01.024

河流潜流带氮素迁移转化数值模拟研究进展

蔡奕^{1,2}, 邢婧文¹, 阮西科¹, 周念清¹, 黄若尧¹, 乙东泽¹

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要:系统归纳了描述潜流带氮素迁移转化行为的水动力、溶质运移、微生物生长数学模型及其耦合关系,分析了耦合模型的主要参数及其影响因素,探讨了试验数据获取、过程耦合关系建立、模型参数识别对数值模拟不确定性的影响。针对现有研究的不足,提出了未来应加强潜流带原生环境监测、热传输过程与其他过程耦合、多维度多过程耦合模型优化计算等方面的研究。

关键词:潜流带;氮素;迁移转化;多过程耦合;数值模拟

中图分类号:P641.2;X143 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)01-0181-09

Advances in the numerical simulation of the migration and transformation of nitrogen in hyporheic zones of rivers
//CAI Yi^{1,2}, XING Jingwen¹, RUAN Xike¹, ZHOU Nianqing¹, HUANG Ruoyao¹, YI Dongze¹ (1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Yangtze River Water Environment, Ministry of Education, Shanghai 200092, China)

Abstract: This paper systematically summarizes the mathematical models of hydrodynamics, solute transport and microbial growth processes, which describe nitrogen transport and transformation behavior in the hyporheic zone, as well as the coupling relationships of these models. The main parameters and influencing factors of the coupled models are analyzed. The influence of experimental data acquisition, process coupling relationship establishment and model parameter identification on the uncertainty of numerical simulation is discussed. In view of the shortcomings of the existing research, it is proposed that more research should be devoted to the original environment monitoring of the hyporheic zone, the coupling of heat transfer process with other processes and the optimization calculation of the multi-dimensional multi-process coupled model in the future.

Key words: hyporheic zone; nitrogen; migration and transformation; multi-process coupling; numerical simulation

随着工农生产的快速发展,大量含氮生活污水、工业废水以及农业面源污染等通过多种途径进入河流,破坏了原有的营养盐平衡,导致水质下降,从而威胁河流生态系统健康;而且河流中超负荷承载的氮素会随水流向下游输移,进入河口后会诱发近海水体富营养化,严重时会导致大量鱼类和贝类等生物的死亡^[1-2]。如何有效降低或去除河流中超标的氮素以恢复生态平衡,已成为当前水环境保护亟须解决的问题^[3]。

河流潜流带(以下简称“潜流带”)是河床以下并延伸至两侧岸滩区的水分饱和和沉积物含水层,地表水和地下水在此混合发生转化,其内部环境条件复杂多变^[4]。潜流带中水体交换引发了碳、氮、磷、

氧等物质交换和能量传递,即潜流交换,为潜流带生物群落提供了适宜生存的条件。潜流带生物地球化学反应强烈,对调节河流的生态具有重要作用^[5]。潜流带沉积物中碳源物质、氧化还原环境、生物群落等因素对氮素赋存形态和循环模式产生重要影响^[6]。因此,要解决河流中氮素污染问题,必须对潜流带氮素迁移转化机理和运移规律进行深入研究。

研究潜流带中氮素迁移转化机理和规律的方法主要有现场监测、室内试验和数值模拟等方法^[7-9]。相比于现场监测和室内试验,数值模拟不受点位布设和尺寸效应的影响,可定量描述氮素在潜流带地下水中迁移转化的连续行为,还可对其进行反演和预测,因而得到广泛应用。由于潜流带氮素迁移转

基金项目:国家自然科学基金(42077176);上海市自然科学基金(20ZR1459700)

作者简介:蔡奕(1979—),女,副教授,博士,主要从事潜流交换过程及其驱动机制研究。E-mail: caiyi@tongji.edu.cn

通信作者:周念清(1964—),男,教授,博士,主要从事地下水数值模拟及水环境等研究。E-mail: nq.zhou@tongji.edu.cn

化过程复杂,影响因素多,精准量化存在一定的困难^[10-11]。本文系统总结了潜流带氮素迁移转化模拟的研究现状与存在的不足,并提出今后的发展方向,可为河流污染防治和水资源保护提供参考。

1 潜流带氮素迁移转化模拟常用数学模型

1.1 潜流带水力模型

氮素在潜流带地下水中的迁移转化行为十分复杂,涉及水文过程和生物地球化学过程,其数值模拟需构建耦合模型,目前主要考虑水力、溶质运移及微生物生长等过程的耦合^[12-13]。潜流带渗流过程决定了氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、硝氮($\text{NO}_3\text{-N}$)、溶解氧(DO)及溶解性有机碳(DOC)等溶质在沉积物中运移速度和滞留时间,进而影响氮素生物化学反应进程。因此,水力模型是潜流带地下水中氮素迁移转化模拟的基础。潜流带水力交换通常发生在河床和近岸区,但潜流带水力模拟目前主要集中在河床潜流带,通常先利用 Navier-Stokes 方程计算河水-沉积物界面上的压力,再基于渗流连续性方程来计算渗流场^[14-15]。与饱和区的河床不同,河岸潜流带处于变饱和区。因此,需要选用 Richards 方程描述岸滩潜流运动^[16]。此外,河流的弯曲也会引发侧向的水力交换,这使得岸滩的潜流运动更加复杂^[17]。尽管现有的水力模型能反映局部潜流特征,但对于河段尺度的三维潜流带渗流场的量化仍存在挑战^[18]。

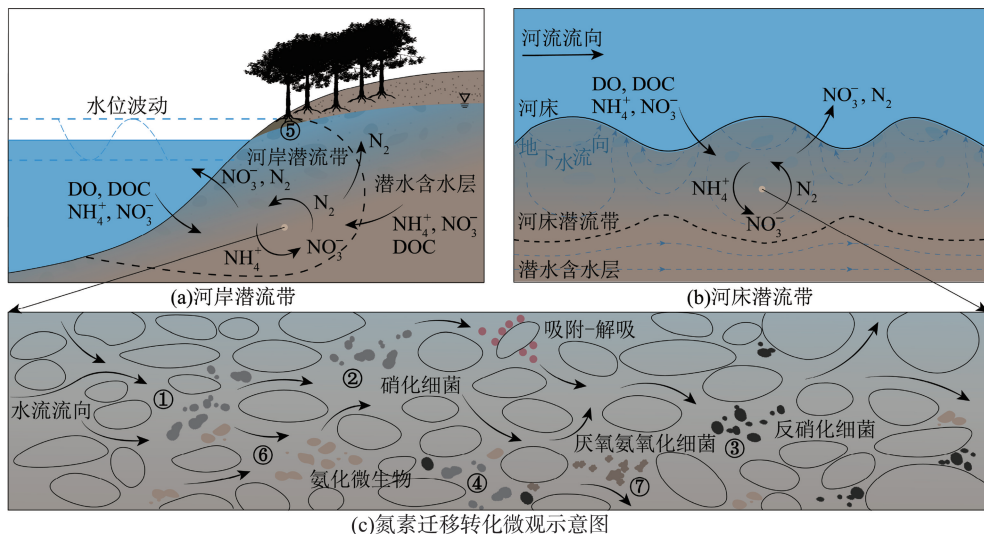
1.2 潜流带溶质运移模型

潜流带溶质运移模拟常用对流-弥散模型。该模型基于连续性方程和质量守恒定律建立,包含对流、弥散及其他源(汇)项,通过水流速度与水力方程耦合求解^[19]。常见的源(汇)项有吸附、解吸

等物理作用项及自然降解、微生物催化等生物地球化学反应项^[20-21]。

目前,潜流带氮素转化模拟主要考虑有氧呼吸、微生物同化、硝化及反硝化等作用,反应底物主要包括 DO、铵根(NH_4^+)、硝酸根(NO_3^-)、DOC 等^[22-23]。模拟研究中常采用 Monod 方程描述主要反应底物的生化反应速率,即对流-弥散模型中的生物地球化学反应项^[24]。反应速率主要涉及有氧呼吸和硝化作用中 DO 的消耗速率、硝化作用和同化作用中 NH_4^+ 的消耗速率、硝化作用中 NO_3^- 的生成速率和反硝化作用中 NO_3^- 的消耗速率、土壤颗粒有机碳(POC)转化中 DOC 的生成速率及有氧呼吸、同化作用、反硝化作用中 DOC 的消耗速率等^[25-27]。方程中涉及的参数包括主要反应底物的最大生化反应速率和半饱和常数、有氧呼吸的需氧分配系数、自养/异养细菌细胞合成所需氨氮的分配系数、反硝化作用的抑制常数、POC 的一级动力学传质系数、沉积物分布系数等^[28]。

潜流带沉积物中富含黏土矿物,黏土颗粒表面通常带有负电荷, NH_4^+ 易被吸附在其表面,因而活性减弱。然而,目前的潜流带氮素运移模型多未考虑氨氮的吸附-解吸过程。潜流带的微生物群落具有多样性,包括硝化细菌(如亚硝化单胞菌)、反硝化细菌(如反硝化杆菌、斯氏杆菌)、厌氧氨氧化细菌、促进氨化作用的细菌(如假单胞菌、芽孢杆菌、梭菌)、真菌(如毛霉菌、根霉菌)及放线菌等。通过这些细菌的催化作用,河床和河岸潜流带地下水中氮素发生价态和相态的转变(图 1)。而在现有的模型中,一些重要的氮素转化过程(如厌氧氨氧化作用)并未涉及。此外,对流-弥散模型未考虑沉



①有氧呼吸;②硝化作用;③反硝化作用;④微生物同化作用;⑤植物同化作用;⑥氨化作用;⑦厌氧氨氧化作用

图 1 潜流带中氮素循环示意图

Fig. 1 Schematic diagram of nitrogen cycle in hyporheic zone

积物孔隙连通性的强弱差异,故难以有效模拟生化环境的局部异常区。针对生化环境复杂的区域,可考虑引入流固两相模型作为潜流带地下水中氮素运移模型^[29-30]。

1.3 潜流带微生物生长模型

Hampton 等^[31-32]研究表明,好氧菌、硝化菌、反硝化菌等微生物的生长与死亡会影响潜流带中氮素迁移转化。潜流带中微生物生长是一个自限性的过程:随着微生物量(生物膜)的增长,沉积物孔隙空间逐渐被填充,生物堵塞导致底物扩散通量和沉积物渗透系数降低,使得物质和能量供给下降,造成微生物的死亡,而随着生物堵塞程度的降低,营养物质得以补充,微生物又开始新一轮的生长繁殖^[33-34]。Ping 等^[35-37]建立了微生物生物量与沉积物孔隙度(或渗透系数)之间的定量关系,涉及微生物生长速率、死亡速率、细胞密度、初始孔隙度等参数。将计算获得的微生物量及孔隙度(或渗透系数)代入溶质运移模型和水动力模型,可实现潜流带渗流场、化学场和生物场的信息互馈。

2 耦合模型主要参数及其影响因素

2.1 水动力参数

渗透系数和水动力弥散系数是反映氮素在地下水中对流和弥散运动的重要参数。渗透系数的大小主要受沉积物组成、沉积条件及饱和度等因素的影响。潜流带沉积物是在流水中以机械方式沉积的碎屑物,通常具有沉积韵律性和流水成因的沉积构造特征,分选性较好,成层性较清晰,非均质性特征显著。潜流带既是河水和地下水的交换区,又是大多数无脊椎动物和微生物的生境,所以潜流带沉积物孔隙结构会因水流冲淤、生物行为、颗粒物质溶解与沉淀等作用影响而呈现动态变化^[38-39]。此外,河岸潜流带是变饱和区,渗透系数与饱和度和含水量之间存在一定的关系。潜流带的非均质性和动态性导致了沉积物渗透系数的时空差异性,其差异可达到几个数量级^[40-41]。由于潜流带水-土-生物环境复杂且多变,渗透系数变化随机性大,目前难以建立定量关系准确表征渗透系数的空间分布特征和动态变化特征。因此,用于模拟计算的渗透系数主要是通过室内试验、野外现场测定或经验估算确定的。作为水文地质的重要参数,渗透系数的取值会直接关系到渗流速度的计算并影响氮素迁移转化模拟结果^[42]。可见,渗透系数的准确测定是潜流带氮素迁移转化模拟的重要基础。

水动力弥散系数包括机械弥散系数和分子扩散系数,通常采用室内或现场的弥散试验确定。Godoy

等^[43]研究表明,室内试验存在尺寸效应,其测定值往往比野外测量值小,两者之间可能有数量级上的差异。大量的研究成果显示影响水动力弥散系数的因素有很多,如孔隙水流速、介质粒径大小、溶质性质、温度、迁移距离等。在低流速条件下,分子扩散作用不可忽略,水动力弥散系数与流速之间并非正比关系^[44]。孔隙介质粒径的增大会导致水动力弥散系数的增大^[45]。饱和土的水动力弥散系数与孔隙水流速存在显著的相关性,非饱和土的水动力弥散系数与含水量有关且与浓度无关,无论是饱和土还是非饱和土,吸附性溶质的水动力弥散系数通常要大于非吸附性溶质^[46]。此外,温度的升高和迁移距离的增大也会导致水动力弥散系数的增大^[47]。受河水、地下水和大气温度差异的影响,潜流带的温度场时刻处于变化状态。可见,潜流带的非均质性和动态性会导致水动力弥散系数的时空差异性。在已有的相关数值模拟研究中,水动力弥散系数通常采用定值,其时空和溶质差异性并没有得到很好的体现,这在一定程度上也影响了氮素迁移转化模拟的精度。

2.2 氨氮吸附-解吸行为参数

相比于 NO_3^- , NH_4^+ 易吸附于沉积物土颗粒表面,其迁移范围也随之受到限制。国内外学者已针对氨氮吸附-解吸行为参数开展了大量研究,主要通过动力学试验和热力学试验确定氨氮吸附-解吸速率常数和吸附平衡常数。潘俊等^[48-49]研究表明,氨氮的吸附-解吸动力学行为比较符合 Lagergren 准二级动力学方程,其热力学行为比较符合 Freundlich 等温吸附方程。此外,氨氮的吸附-解吸行为通常受温度、pH 值、盐度及沉积物类型等因素的影响。张大勇等^[50]研究表明,环境温度升高不利于土颗粒对氨氮的吸附。pH 值降低会抑制 NH_4^+ 的水解,从而增加液相中的氨氮浓度,并导致氨氮吸附量的增加;沉积物颗粒粒径越小,氨氮的吸附量越大^[51]。当盐度超过 0.5% 时,氨氮的吸附量趋于稳定,且变化小,高盐度环境会抑制沉积物颗粒对氮素的吸附作用^[52]。由于河水和地下水在温度和成分组成上存在差异,所以潜流带在发生水量交换的同时,其温度、pH 值及盐度也在发生变化,这会导致氨氮的吸附-解吸行为参数也会随之改变。此外,河流中的氨氮含量通常要高于地下水中的含量,潜流带地下水中的氨氮主要来源于河水,所以不考虑氨氮的吸附-解吸作用及其相关参数的动态变化难以准确模拟潜流带的氨氮时空分布,这必然会对氮素生化反应模拟造成一定的影响。

2.3 氮素生物地球化学反应参数

潜流带氮素转化所涉及的生化反应参数较多,包括反应物的最大生化反应速率、半饱和常数、在不同反应中的分配系数、反应的抑制常数、POC 的传质系数、沉积物分布系数等。在已有的模拟研究中, DO 、 NH_4^+ 、 NO_3^- 的最大生化反应速率的取值范围分别为 $0.1 \sim 10.0 \text{ h}^{-1}$ 、 $0.36 \sim 4.2 \text{ h}^{-1}$ 和 $0.26 \sim 10 \text{ h}^{-1}$, DO 、 NH_4^+ 、 NO_3^- 、DOC 的半饱和常数取值范围分别为 $0.2 \sim 5.8 \text{ mg/L}$ 、 $0.1 \sim 1.1 \text{ mg/L}$ 、 $0.21 \sim 3.1 \text{ mg/L}$ 和 $1.0 \sim 10 \text{ mg/L}$, 有氧呼吸的需氧分配系数和自养/异养细菌细胞合成所需氮氮分配系数的取值分别为 0.64 和 0.40, 反硝化反应的抑制常数取值范围为 $0.2 \sim 1.0 \text{ mg/L}$, POC 的一级动力学传质系数取值范围为 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$, 沉积物分布系数的取值范围为 $5 \sim 100 \text{ L/kg}$ ^[28]。然而,实际上很多研究中所涉及的区域在沉积物类型、环境条件及微生物特征等方面存在差异,利用其他地区的参数并不能很好反映本地的氮素循环过程,需要对本地参数进行深入研究。

潜流带中氮素生物地球化学作用受多环境因子控制,包括氧化还原电位、pH 值、温度、浓度梯度、水流条件、微生物群落等^[53]。Pescimoro 等^[54-56]研究表明,DO 和 DOC 是潜流带氮素生化反应类型和进程的重要控制因素。在沉积物环境下,反硝化细菌酶在 $25 \sim 35^\circ\text{C}$ 范围内活性高,反硝化反应速率快,氮素去除效率高^[57]。当氧化还原电位范围处于 $100 \sim 350 \text{ mV}$ 时,反硝化速率随着氧化还原电位增大而减小^[58]。异养反硝化菌适宜的 pH 值为 $5.5 \sim 8.0$,此时的反硝化速率相对较高,pH 值小于 5.0 的酸性环境会抑制反硝化作用^[59]。以硝化作用为主的生化反应会随着 DO 的消耗而转变为以反硝化作用为主,常通过建立 DO 消耗与河水滞留时间之间的函数关系实现对这两类反应的动态识别^[60-61]。可见,与水动力参数和吸附-解吸参数相似,潜流带氮素生化反应参数并非为常数,而是会随着渗流运动和环境变化而发生改变。不过,在目前的模拟研究中并未考虑生化反应参数与环境因子和水流条件之间的关系。

3 数值模拟的不确定性问题

因受观测数据和控制方程的限制,潜流带氮素迁移转化模拟结果往往与真实值存在一定的偏差。建模时应充分考虑信息数据、数学模型及模型参数对模拟结果的影响,以降低过程模拟的不确定性。

3.1 数据信息获取

潜流带是地表以下的黑暗生境,其渗流场、化学

场、氧化还原环境、生物菌类活性等信息获取很容易受人为干扰而失真,所以潜流带原生环境信息的准确获取是高精度数值模拟的前提。目前,针对潜流带的研究主要借助于观测井,通过在观测井中放置水位、温度、电导率、pH 值、氧化还原电位等传感器或采集水、土样进行分析,以获取数值模拟所需数据^[62-63]。然而,潜流带孔隙水水质、细菌分布特征等相关数据会随采样方式或条件的不同而发生变化。例如,观测井与大气连通会影响水中 DO 含量,可能会导致原先的还原环境转变为氧化环境,使得氮素存在形态发生改变;氧气、光照、温度等采样条件控制不当会造成沉积物土样中微生物生物量测定失真;采集频率低可能会导致多场信息变化幅度难以捕捉。因此,需要结合高分辨率高灵敏度的原位传感监测、非扰动测试及情景模拟试验等技术获取原生环境信息数据,这对氮素迁移转化模拟研究具有重要意义。

3.2 耦合模型构建

潜流带氮素迁移转化行为十分复杂,是渗流场、温度场、化学场、生物场等多场相互作用的结果,故其数值模拟的关键在于描述多场时空演变过程及其相互之间的耦合联动关系。目前的数值模拟主要关注水动力、溶质运移、微生物生长等过程的耦合计算,其中溶质运移计算通常考虑对流项、弥散项、反应项。由于土颗粒对氮氮具有一定的吸附作用,氮氮运移模型应增加吸附项,否则获得的氮氮时空分布规律与真实情况不符。朱静思等^[64-65]研究表明,温度变化会影响氮素的水动力弥散系数、吸附速率和平衡常数及微生物催化反应速率等,进而控制氮素的循环过程。潜流带温度场常伴随着水量交换发生显著的动态变化^[66-67],但在现有的耦合模型中却极少考虑温度的时空演变。为了对潜流带氮素迁移转化有更全面的认识,有必要建立模型参数与温度、pH 值等环境因子之间的定量关系,通过水动力、热传导、溶质运移及微生物生长模型的耦合计算,实现多过程之间的动态联动,如图 2 所示。此外,目前大多数的耦合模型采用一、二维数学模型^[68-69],然而,潜流带具有复杂的三维空间非均质各向异性结构,采用三维模型更符合潜流带氮素迁移转化过程的定量化表达。

3.3 模型参数识别

潜流带氮素迁移转化过程耦合模型结构复杂,涉及参数多,如渗透系数、水动力弥散系数、反应物最大生化反应速率等,其中一些参数在维度、位置或时间上有差异,参数不确定问题是客观存在的。基于经验估算或观测数据优化所获取的参数通常不能

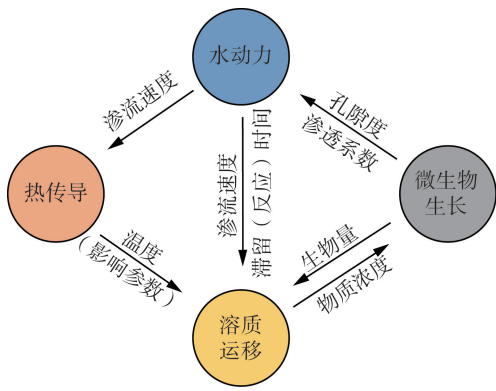


图2 潜流带氮素迁移转化模型中不同过程耦合示意图
Fig.2 Schematic diagram of coupling different processes involved in the model of nitrogen migration and transformation in hyporheic zones of rivers

保证模型在各种可能情景下的模拟精度。而且,因不同算法在参数收敛轨迹上存在差异,优化结果往往也不尽相同,甚至无法判断其是否达到全局最优^[70]。鉴于优化方法在复杂模型的参数识别上有一定的局限性,参数敏感性研究越来越受到关注。目前,潜流带氮素迁移转化模型的参数敏感性研究主要采用基于“最佳”估计值的扰动分析方法,其研究表明敏感参数主要为渗透系数、水动力弥散系数、最大生化反应速率及半饱和常数等^[71-73]。此外,多参数识别通常要比单参数要复杂得多,这是因为复杂模型结构中不同参数之间可能会存在某种相关性,单独考虑各参数的“最佳”估计值未必达到最优的模型效率^[74]。可见,潜流带氮素迁移转化模型的参数识别需要考虑参数时空分布的复杂性、灵敏度及各参数之间的相关性,而且合理的算法应充分体现参数不确定性而不是参数最优化。然而,这些参数识别中所要关注的问题现有研究成果还较少,还有待进一步研究。

4 结论与展望

潜流带氮素迁移转化行为是水动力、热量传输、溶质运移及微生物活动等多过程互馈的结果,其中水动力过程是基础。氮素的转化涉及的反应物包括 NH_4^+ 、 NO_3^- 、DO、DOC等,且不同物质的迁移和反应行为均受水流条件、沉积物特征及环境因素的影响。因此,潜流带氮素迁移转化模拟研究需构建多过程耦合多组分协同的动力学模型。国内外已通过水动力模型、溶质运移模型及微生物生长模型的耦合模拟了潜流带氮素迁移转化过程,研究了水文条件、沉积物渗透性及微生物生长对潜流带氮源(或氮汇)的贡献,也取得了很多有价值的成果。然而,潜流带的氮循环过程复杂,影响因素多,故模型数据的准确

获取、氮素迁移转化行为与温度、pH值、氧化还原电位等环境因素关系的正确量化及耦合模型的优化计算对于模拟的精度和效率而言显得尤为重要,而这些在现有的数值模拟研究中极少涉及,因此今后需加强以下几个方向的研究:

a. 研发适用于潜流带原生环境的实时监测技术。尽管目前水位和温度传感器可实现野外实时监测,但大部分水质数据仍靠采样获取,水质数据质量会受到采样环境、采样频率、保存条件等因素影响。为了尽量减少人为干扰造成的数据破坏,应研发高分辨率高灵敏度的孔隙水水质参数(如DO、 NH_4^+ 、 NO_3^- 、DOC、pH值、氧化还原电位)传感器,满足野外长期在线监测要求,从而实现潜流带渗流场、温度场及化学场的同步监测。

b. 深入研究潜流带氮素迁移转化中多过程间的耦合联动关系。通过试验研究探讨潜流带渗流场、温度场、化学场、生物场的时空演变规律,厘清潜流带水动力、热传导、溶质迁移及微生物活动等多过程间的耦合联动关系,建立主要模型参数与温度、pH值等环境因子间的定量关系,在此基础上对现有耦合模型进一步完善,如耦合热传导过程,考虑氨氮吸附-解吸行为和其他氮素生化反应等。

c. 开展多维度多过程耦合模型优化计算研究。深入研究潜流带氮素迁移转化模型参数的复杂性、敏感性及相关性,提出基于不确定性分析的参数识别算法。分析不同过程的持续时间和涉及范围,合理设置各过程的时间步长和计算网格,以实现多过程间的同步与异步模拟。此外,三维的多过程耦合会消耗大量计算资源,需加强模拟软件的开发与集成,优化空间网格,强化并行计算,节省运行时间,以提升模拟精度和效率。

参考文献:

- [1] 钱睿智,陈静,王永东. 基于氮同位素的通扬运河污染负荷解析[J]. 水资源保护, 2021, 37(4): 121-126. (QIAN Ruizhi, CHEN Jing, WANG Yongdong. Analysis of pollution load of Tongyang Canal based on nitrogen isotope [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(4): 121-126. (in Chinese))
- [2] 李蓓,李勇涛,蔡梅. 基于数据挖掘的太湖蓝藻生长水环境关键因子研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 506-513. (LI Bei, LI Yongtao, CAI Mei, et al. Research on key factors of water environment for cyanobacteria growth in Taihu Lake based on data mining [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(6): 506-513. (in Chinese))
- [3] 朱喜,李贵宝,王圣瑞. 太湖蓝藻暴发的治理[J]. 水资

- 源保护, 2020, 36 (6): 106-111. (ZHU Xi, LI Guibao, WANG Shengrui. Treatment of blue algae outbreak in Taihu Lake [J]. Water Resources Protection, 2020, 36 (6): 106-111. (in Chinese))
- [4] 蔡奕, 石涛, 姚俊兰, 等. 河道潜流交换水动力过程现场监测研究进展[J]. 水科学进展, 2021, 32(4): 638-648. (CAI Yi, SHI Tao, YAO Junlan, et al. Advance in field monitoring research of hydrodynamic process of hyporheic exchange in rivers[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(4): 638-648. (in Chinese))
- [5] WARD A S. The evolution and state of interdisciplinary hyporheic research [J]. WIREs Water, 2016, 3 (1): 83-103.
- [6] 王佳琪, 马瑞, 孙自永. 地表水与地下水相互作用带中氮素污染物的反应迁移机理及模型研究进展[J]. 地质科技情报, 2019, 38(4): 270-280. (WANG Jiaqi, MA Rui, SUN Ziyong. Reactive transport and model of nitrogen pollutants in the surface water-ground water interaction zones; a review [J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(4): 270-280. (in Chinese))
- [7] CAI Yi, XING Jingwen, HUANG Ruoyao, et al. Occurrence characteristics of inorganic nitrogen in groundwater in silty-clay riparian hyporheic zones under tidal action: a case study of the Jingzi River in Shanghai, China [J]. Applied Sciences, 2022, 12(15): 7704.
- [8] 齐冉, 张灵, 杨帆, 等. 水力停留时间对潜流湿地净化效果影响及脱氮途径解析[J]. 环境科学, 2021, 42(9): 4296-4303. (QI Ran, ZHANG Ling, YANG Fan, et al. Effect of hydraulic residence time on removal efficiency of pollutants in subsurface flow constructed wetlands and analysis of denitrification mechanism [J]. Environmental Science, 2021, 42(9): 4296-4303. (in Chinese))
- [9] LIU Suning, CHUI T F M. Optimal in-stream structure design through considering nitrogen removal in hyporheic zone [J]. Water, 2020, 12(5): 1399.
- [10] SHUAI Pin, CARDENAS M B, KNAPPETT P S K, et al. Denitrification in the banks of fluctuating rivers: the effects of river stage amplitude, sediment hydraulic conductivity and dispersivity, and ambient groundwater flow [J]. Water Resources Research, 2017, 53(9): 7951-7967.
- [11] BARDINI L, BOANO F, CARDENAS M B, et al. Nutrient cycling in bedform induced hyporheic zones [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2012, 84: 47-61.
- [12] COOK P L M, WENZHÖFER F, RYSGAARD S, et al. Quantification of denitrification in permeable sediments: insights from a two-dimensional simulation analysis and experimental data [J]. Limnology and Oceanography: Methods, 2006, 4(9): 294-307.
- [13] SHARMA L, GRESKOWIAK J, RAY C, et al. Elucidating temperature effects on seasonal variations of biogeochemical turnover rates during riverbank filtration [J]. Journal of Hydrology, 2012, 428-429: 104-115.
- [14] HESTER E T, YOUNG K I, WIDDOWSON M A. Mixing of surface and groundwater induced by riverbed dunes: implications for hyporheic zone definitions and pollutant reactions [J]. Water Resources Research, 2013, 49(9): 5221-5237.
- [15] ZHENG Lizhi, CARDENAS M B, WANG Lichun, et al. Ripple effects: bed form morphodynamics cascading into hyporheic zone biogeochemistry [J]. Water Resources Research, 2019, 55(8): 7320-7342.
- [16] GU Chuanhui, ANDERSON W, MAGGI F. Riparian biogeochemical hot moments induced by stream fluctuations [J]. Water Resources Research, 2012, 48(9): W09546.
- [17] 夏继红, 窦传彬, 蔡旺炜, 等. 河岸带蜿蜒性与植被密度对潜流驻留时间的复合效应 [J]. 水科学进展, 2020, 31(3): 433-440. (XIA Jihong, DOU Chuanbin, CAI Wangwei, et al. Compounding effect of meandering degree and vegetation density on hyporheic residence time in riparian zone [J]. Advances in Water Science, 2020, 31(3): 433-440. (in Chinese))
- [18] BOANO F, CAMPOREALE C, REVELLI R, et al. Sinuosity-driven hyporheic exchange in meandering rivers [J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(18): L18406.
- [19] KIM J S, KANG P K. Anomalous transport through free-flow-porous media interface: pore-scale simulation and predictive modeling [J]. Advances in Water Resources, 2020, 135: 103467.
- [20] 赵丽, 付坤, 甄晓歌, 等. 深层地下水中硝酸盐迁移转化的实验模拟研究 [J]. 环境科学与技术, 2018, 41(2): 57-62. (ZHAO Li, FU Kun, ZHEN Xiaoge, et al. Experimental simulation of transportation and transformation law of nitrate in the deep groundwater [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41(2): 57-62. (in Chinese))
- [21] GOOTMAN K S, GONZÁLEZ-PINZÓN R, KNAPP J L A, et al. Spatiotemporal variability in transport and reactive processes across a first- to fifth-order fluvial network [J]. Water Resources Research, 2020, 56(5): e2019WR026303.
- [22] 蒋然, 李召旭. 典型河口区硝态氮短程还原成铵的活性氮累积途径研究进展 [J]. 水资源保护, 2014, 30(4): 10-13. (JIANG Ran, LI Zhaoxu. Active nitrogen accumulation mechanism in typical estuarine regions based on dissimilatory nitrate reduction to ammonium [J]. Water Resources Protection, 2014, 30(4): 10-13. (in Chinese))
- [23] NEWCOMER M E, HUBBARD S S, FLECKENSTEIN J H, et al. Influence of hydrological perturbations and

- riverbed sediment characteristics on hyporheic zone respiration of CO_2 and N_2 [J]. *Journal of Geophysical Research:Biogeosciences*,2018,123(3):902-922.
- [24] THULLNER M. Comparison of bioclogging effects in saturated porous media within one- and two-dimensional flow systems [J]. *Ecological Engineering*,2010,36(2):176-196.
- [25] PEYRARD D, DELMOTTE S, SAUVAGE S, et al. Longitudinal transformation of nitrogen and carbon in the hyporheic zone of an N-rich stream;a combined modelling and field study[J]. *Physics and Chemistry of the Earth: Parts A/B/C*,2011,36(12):599-611.
- [26] ZARNETSKE J P, HAGGERTY R, WONDZELL S M, et al. Labile dissolved organic carbon supply limits hyporheic denitrification [J]. *Journal of Geophysical Research:Biogeosciences*,2011,116(G4):G04036.
- [27] GU Chuanhui, HORNBERGER G M, MILLS A L, et al. Nitrate reduction in streambed sediments: effects of flow and biogeochemical kinetics [J]. *Water Resources Research*,2007,43(12):W12413.
- [28] ZARNETSKE J P, HAGGERTY R, WONDZELL S M, et al. Coupled transport and reaction kinetics control the nitrate source-sink function of hyporheic zones[J]. *Water Resources Research*,2012,48(11):W11508.
- [29] NAVEL S, SAUVAGE S, DELMOTTE S, et al. A modelling approach to quantify the influence of fine sediment deposition on biogeochemical processes occurring in the hyporheic zone [J]. *Annalesde Limnologie-International Journal of Limnology*, 2012, 48 (3): 279-287.
- [30] MERMILLOD-BLONDIN F, GAUDET J P, GERINO M, et al. Relative influence of bioturbation and predation on organic matter processing in river sediments:a microcosm experiment [J]. *Freshwater Biology*, 2004, 49 (7): 895-912.
- [31] HAMPTON T B, ZARNETSKE J P, BRIGGS M A, et al. Residence time controls on the fate of nitrogen in flow-through lakebed sediments [J]. *Journal of Geophysical Research:Biogeosciences*,2019,124(3):689-707.
- [32] 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.
- [33] 杨靖,叶淑君,吴吉春. 生物膜对饱和多孔介质渗透性影响的实验和模型研究[J]. *环境科学*,2011,32(5):1364-1371. (YANG Jing, YE Shujun, WU Jichun. Study on the influence of bioclogging on permeability of saturated porous media by experiments and models [J]. *Environmental Science*, 2011, 32 (5): 1364-1371. (in Chinese))
- [34] AUBENEAU A F, HANRAHAN B, BOLSTER D, et al. Biofilm growth in gravel bed streams controls solute residence time distributions [J]. *Journal of Geophysical Research:Biogeosciences*,2016,121(7):1840-1850.
- [35] PING Xue, JIN Menggui, XIAN Yang. Effect of bioclogging on the nitrate source and sink function of a hyporheic zone [J]. *Journal of Hydrology*,2020,590:125425.
- [36] THULLNER M, SCHROTH M H, ZEYER J, et al. Modeling of a microbial growth experiment with bioclogging in a two-dimensional saturated porous media flow field[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*,2004,70(1/2):37-62.
- [37] XIAN Yang, JIN Menggui, ZHAN Hongbin, et al. Reactive transport of nutrients and bioclogging during dynamic disconnection process of stream and groundwater [J]. *Water Resources Research*,2019,55(5):3882-3903.
- [38] 吴光东,张潇,鲁程鹏. 河流潜流带和潜流交换时空变异特征研究综述[J]. *人民长江*,2019,50(10):100-107. (WU Guangdong, ZHANG Xiao, LU Chengpeng. Spatial-temporal variability in hyporheic zone and hyporheic exchange [J]. *Yangtze River*,2019,50(10):100-107. (in Chinese))
- [39] 李勇,汪莹莹,徐纯,等. 潜流带胶体特征及对生源要素迁移的影响机制[J]. *河海大学学报(自然科学版)*,2019,47(4):296-303. (LI Yong, WANG Yingying, XU Chun, et al. Colloid characteristic in hyporheic zone and its influencing mechanism on facilitated-transport of biogenic elements [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2019, 47 (4): 296-303. (in Chinese)).
- [40] GENEREUX D P, LEAHY S, MITASOVA H, et al. Spatial and temporal variability of streambed hydraulic conductivity in West Bear Creek, North Carolina, USA [J]. *Journal of Hydrology*,2008,358(3/4):332-353.
- [41] SHAMSUDDIN M K N, SULAIMAN W N A, RAMLI M F, et al. Vertical hydraulic conductivity of riverbank and hyporheic zone sediment at Muda River riverbank filtration site, Malaysia [J]. *Applied Water Science*,2019,9:8.
- [42] WALLACE C D, SAWYER A H, SOLTANIAN M R, et al. Nitrate removal within heterogeneous riparian aquifers under tidal influence [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020,47(10):e2019GL085699.
- [43] GODOY V A, ZUQUETTE L V, GÓMEZ-HERNÁNDEZ J J. Scale effect on hydraulic conductivity and solute transport; small and large-scale laboratory experiments and field experiments [J]. *Engineering Geology*, 2018, 243: 196-205.
- [44] 苑绍东,张文杰,袁姗姗. 溶质迁移的弥散度取值试验研究[J]. *岩土力学*,2020,41(增刊2):1-6. (YUAN Shaodong, ZHANG Wenjie, YUAN Shanshan. Dispersion

- values in solute migration tests [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41 (Sup2) :1-6. (in Chinese))
- [45] KLOTZ D,SEILER K P, MOSER H, et al. Dispersivity and velocity relationship from laboratory and field experiments [J]. *Journal of Hydrology*, 1980, 45(3/4) :169-184.
- [46] 张富仓,康绍忠,潘英华. 饱和-非饱和土壤中吸附性溶质水动力弥散实验研究[J]. *水利学报*, 2002, 33(3) : 84-90. (ZHANG Fucang, KANG Shaozhong, PAN Yinghua. Experimental study on hydrodynamic dispersion of adsorption solute in saturated-unsaturated soil [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, 33(3) :84-90. (in Chinese))
- [47] 刘军,赵新生,封丽华,等. 不同温度污染源对水动力弥散影响试验研究[J]. *西部探矿工程*, 2016, 28(9) :111-114. (LIU Jun, ZHAO Xinsheng, FENG Lihua, et al. Experimental study on the influence of pollution sources with different temperature on hydrodynamic dispersion [J]. *West-China Exploration Engineering*, 2016, 28(9) : 111-114. (in Chinese))
- [48] 潘俊,杨乐,方永荟. 人工湖水入渗过程中氨氮的吸附-解吸特征实验[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2020, 36(6) : 1146-1152. (PAN Jun, YANG Le, FANG Yonghui. The characteristic experiment of ammonia nitrogen adsorption and desorption during the infiltration process of artificial lake[J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2020, 36(6) :1146-1152. (in Chinese))
- [49] 胡洁蕴,李淑芹,宋歌,等. 北京市北运河沉积物对氮、磷的吸附/解吸动力学特征[J]. *湖泊科学*, 2018, 30(3) :650-659. (HU Jieyun, LI Shuqin, SONG Ge, et al. Adsorption/desorption dynamic characteristic of sediments on nitrogen and phosphorus in the north Grand Canal of Beijing[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(3) :650-659. (in Chinese))
- [50] 张大勇,鲍新华,杜尚海,等. 氨氮在含水层介质中的吸附影响因素分析[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(13) : 175-179. (ZHANG Dayong, BAO Xinhua, DU Shanghai, et al. Analysis of factors affecting of ammonia adsorption in aquifer media[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(13) :175-179. (in Chinese))
- [51] 孙大志,李绪谦,潘晓峰. 氨氮在土壤中的吸附/解吸动力学行为的研究[J]. *环境科学与技术*, 2007, 30(8) : 16-18. (SUN Dazhi, LI Xuqian, PAN Xiaofeng. Ammonia absorption/desorption behavior in soil [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 30(8) : 16-18. (in Chinese))
- [52] 胡智骏,孙红文,谭媛. 湖泊沉积物对 N 和 P 的吸附特性及影响因素研究[J]. *农业环境科学学报*, 2004, 23(6) :1212-1216. (HU Zhitao, SUN Hongwen, TAN Yuan. Adsorptive characteristic of nutrient elements and influential factors in Taihu Lake sediments[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(6) :1212-1216. (in Chinese))
- [53] SHAN Jun, YANG Pinpin, SHANG Xiaoxia, et al. Anaerobic ammonium oxidation and denitrification in a paddy soil as affected by temperature, pH, organic carbon, and substrates[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2018, 54(3) :341-348.
- [54] PESCI MORO E, BOANO F, SAWYER A H, et al. Modeling influence of sediment heterogeneity on nutrient cycling in streambeds [J]. *Water Resources Research*, 2019, 55(5) :4082-4095.
- [55] BARNES R T, SAWYER A H, TIGHT D M, et al. Hydrogeologic controls of surface water-groundwater nitrogen dynamics within a tidal freshwater zone [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2019, 124(11) :3343-3355.
- [56] 李勇,单雅洁,李娜,等. 太湖潜流带有机质含量对硝酸盐还原途径的影响[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(1) :44-51. (LI Yong, SHAN Yajie, LI Na, et al. Effects of organic matter content on nitrate reduction pathway in the hyporheic zone of Lake Taihu [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2022, 50(1) :44-51. (in Chinese))
- [57] HERRMAN K S, BOUCHARD V, MOORE R H. Factors affecting denitrification in agricultural headwater streams in Northeast Ohio, USA [J]. *Hydrobiologia*, 2008, 598(1) :305-314.
- [58] 周念清,李章平,李丹,等. 西洞庭湖湿地 Eh 与 pH 空间变异特征及影响因子分析[J]. *地球科学与环境学报*, 2016, 38(1) : 126-133. (ZHOU Nianqing, LI Zhangping, LI Dan, et al. Spatial variability characteristics of Eh and pH in West Dongting Lake wetland and analysis of their impact factors [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2016, 38(1) :126-133. (in Chinese))
- [59] 周念清,赵姗,沈新平. 天然湿地演替带氮循环研究进展[J]. *科学通报*, 2014, 59(18) : 1688-1699. (ZHOU Nianqing, ZHAO Shan, SHEN Xinping. Nitrogen cycle in the hyporheic zone of natural wetlands [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(18) : 1688-1699. (in Chinese))
- [60] ZARNETSKE J P, HAGGERTY R, WONDZELL S M, et al. Dynamics of nitrate production and removal as a function of residence time in the hyporheic zone [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2011, 116(G1) :G01025.
- [61] LIU Suning, CHUI T F M. Numerical modelling to evaluate the nitrogen removal rate in hyporheic zone and its implications for stream management [J]. *Hydrological Processes*, 2019, 33(24) :3084-3097.
- [62] LU Chengpeng, JI Keyan, ZHANG Yong, et al. Event-driven hyporheic exchange during single and seasonal

- rainfall in a gaining stream [J]. *Water Resources Management*, 2020, 34(15):4617-4631.
- [63] LIANG Dong, SONG Jinxi, XIA Jun, et al. Effects of heavy metals and hyporheic exchange on microbial community structure and functions in hyporheic zone [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 303:114201.
- [64] 朱静思, 束龙仓, 鲁程鹏. 基于热追踪方法的河道垂向潜流通量的非均质性研究 [J]. *水利学报*, 2013, 44(7): 818-825. (ZHU Jingsi, SHU Longcang, LU Chengpeng. Study on the heterogeneity of vertical hyporheic flux using a heat tracing method [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(7): 818-825. (in Chinese))
- [65] ZHENG Lizhi, CARDENAS M B, WANG Lichun. Temperature effects on nitrogen cycling and nitrate removal-production efficiency in bed form-induced hyporheic zones [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, 121(4):1086-1103.
- [66] LIU Dongsheng, ZHAO Jian, CHEN Xiaobing, et al. Dynamic processes of hyporheic exchange and temperature distribution in the riparian zone in response to dam-induced water fluctuations [J]. *Geosciences Journal*, 2018, 22(3):465-475.
- [67] 姬雨雨, 施文卿, 陈求稳, 等. 库区洲滩潜流带温度示踪流速计算方法 [J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(3):159-163. (JI Yuyu, SHI Wenqing, CHEN Qiuwen, et al. Calculation method of temperature tracing velocity in the hyporheic zone of the reservoir continent beach [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, 29(3):159-163. (in Chinese))
- [68] WALLACE C D, SAWYER A H, BARNES R T, et al. A model analysis of the tidal engine that drives nitrogen cycling in coastal riparian aquifers [J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(4):e2019WR025662.
- [69] DWIVEDI D, STEEFEL C I, ARORA B, et al. Geochemical exports to river from the intramander hyporheic zone under transient hydrologic conditions: East River Mountainous Watershed, Colorado [J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(10):8456-8477.
- [70] 刘毅, 陈吉宁, 杜鹏飞. 环境模型参数识别与不确定性分析 [J]. *环境科学*, 2002, 23(6):6-10. (LIU Yi, CHEN Jining, DU Pengfei. Parameters identification and uncertainty analysis for environmental model [J]. *Environmental Science*, 2002, 23(6):6-10. (in Chinese))
- [71] 陈孝兵, 郑春阳, 袁越. 河床沉积物非均质性影响下的潜流交换数值模拟 [J]. *水科学进展*, 2019, 30(2):220-229. (CHEN Xiaobing, ZHENG Chunyang, YUAN Yue. Modeling the impacts of streambed sediment heterogeneity on hyporheic exchange [J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(2):220-229. (in Chinese))
- [72] MENDOZA-LERA C, DATRY T. Relating hydraulic conductivity and hyporheic zone biogeochemical processing to conserve and restore river ecosystem services [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 579:1815-1821.
- [73] LIU Yajing, LIU Yong, LUO Qiankun, et al. Experimental and numerical study of bimolecular reactive transport in a single rough-wall fracture [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 594:125944.
- [74] WU Qiaofeng, LIU Shuguang, CAI Yi, et al. Improvement of hydrological model calibration by selecting multiple parameter ranges [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(1):393-407.

(收稿日期:2022-01-25 编辑:熊水斌)

(上接第 180 页)

- [17] 张万顺, 李琳, 彭虹, 等. 面向水环境改善的城市河网动态水环境容量 [J]. *水资源保护*, 2022, 38(1):167-175. (ZHANG Wanshun, LI Lin, PENG Hong, et al. Dynamic water environment capacity of urban river network for water environment improvement [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(1):167-175. (in Chinese))
- [18] 门宝辉, 牛晓赞, 刘灿均, 等. 滦河承德段水环境容量计算及初始分配 [J]. *水资源保护*, 2022, 38(2):168-175. (MEN Baohui, NIU Xiaoyun, LIU Canjun, et al. Calculation and initial allocation of water environmental capacity in Chengde section of Luanhe River [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(2):168-175. (in Chinese))
- [19] 陈丽娜, 韩龙喜, 谈俊益, 等. 基于多断面水质达标的河网区点面源污染负荷优化分配模型 [J]. *水资源保护*, 2021, 37(6):128-134. (CHEN Li'na, HAN Longxi, TAN Junyi, et al. Optimal allocation model of point and non-point pollution loads in river network based on water quality standard of multiple control sections [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(6):128-134. (in Chinese))
- [20] 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))

(投稿日期:2021-11-08 编辑:施业)