

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.01.001

潜流带水流特性及氮素运移转化研究进展

李 勇^{1,2}, 张维维², 袁佳慧², 黄漫丽², 朱 亮^{1,2}, 倪利晓^{1,2}, 吴云海^{1,2}

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要:为进一步探明潜流带表层沉积物对地表水体的“源汇”关系及季节性转化规律,综合阐述了当前国内外在河道和湖泊潜流带方面的研究进展,包括不同区域潜流带内水流形态及其对氮素运移转化的影响机制、潜流带内部环境变化梯度和温度分布季节性变化对潜流带好氧-厌氧区分布范围及氮素硝化反硝化过程的影响、潜流带中氮素与地表水体的交换特征及季节变化规律,并结合当前的研究动态提出了潜流带水流特性及氮素运移转化研究中存在的问题并对研究进行展望。

关键词:潜流带;水流特性;表层沉积物;氮素运移转化;内部环境梯度;“源汇”关系;交换通量;综述
中图分类号:X52 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2016)01-0001-07

Research advances in flow patterns and nitrogen transformation in hyporheic zones

LI Yong^{1,2}, ZHANG Weiwei², YUAN Jiahui², HUANG Manli², ZHU Liang^{1,2}, NI Lixiao^{1,2}, WU Yunhai^{1,2}

(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes,

Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To better illuminate the relationship of surface sediment in hyporheic zones as a source or sink for surface water and its seasonal conversion rule, this review focuses on research advances in hyporheic zones of rivers and lakes in China and other countries. The main aspects of the review include the water regimes of hyporheic zones and their influence on the transport and transformation of nitrogen, the influence of interior environmental gradients and seasonal variation of the temperature distribution in hyporheic zones on the distributions of aerobic and anaerobic zones and the processes of nitrification and denitrification, and the exchange characteristics and seasonal variation patterns of nitrogen in hyporheic zones with surface water. Some research prospects are proposed based on present research trends and deficiencies in hyporheic zones.

Key words: hyporheic zone; flow pattern; surface sediment; nitrogen transformation; interior environmental gradient; source-sink relationship; exchange flux; review

潜流带(hyporheic zone),作为地表水和地下水动态交互混合的重要过渡区域,其物理特性及生物地球化学环境共同承载着水流、物质和能量交换的变化过程。自 Clements^[1]于1905年提出潜流带的概念后,国际上涌现了大量关于潜流带的研究成果(特别是20世纪末期以来)。随后 Triska 等^[2]通过设定地下水和河水的混合比例对潜流带的定义进行了量化(即地表水含量大于10%但小于98%为相互作用的潜流带),逐渐演变为地表水-地下水动态变化的交错混合区域,并在不同学科赋予了不同的涵义^[3]。潜流带是河流/湖泊等地表水体和地下水连续统的重要组成部分,其伸展面积往往是地表水体的数倍甚至数百倍;它有效链接着陆地、地表水体和地下水体的水流、物质和能量的传递,其自然形成的物理化学和微生物梯度是各种生物

收稿日期:2015-06-18

基金项目:国家自然科学基金(51579074,51079048);“十二五”国家科技支撑计划(2015BAB07B02);江苏省水利科技项目(2013071);江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)。

作者简介:李勇(1974—),男,江西萍乡人,副教授,博士,主要从事水体和土壤溶质运移研究。E-mail:liyonghh@163.com

地球化学过程变化的重要驱动^[3-4]。袁兴中等^[3]从潜流带的概念、结构和功能出发,阐明溪流潜流带在地表水-地下水之间的重要联系,并揭示潜流带的生态学意义。夏继红等^[5]综合阐述了河道潜流带的水动力、溶解氧浓度及溶质循环等动态过程,并提出河岸带整治及生态修复的适宜策略。当前越来越多的研究兴趣集中于潜流带与地表水体的水流和污染物质交换,其中潜流带内复杂多变的水流被认为是地表水和地下水之间物质和能量交换的关键载体^[6-8]。

1 潜流带水流形态

潜流带水流形态复杂,受地表水和地下水水位差及潜流带自身特征的影响,主要分为垂直流(upwelling flow 和 downwelling flow)和水平流(parafluvial flow 和 floodplain flow),在垂直流和水平流之间亦存在相对静止的静滞流。由于河床局部地形地貌的变化,且受到河道底部流速的影响,在潜流带中的水平流沿深度方向的流速呈递减分布^[9-10]。Ward 等^[11]对山区性河道潜流带水流路径和驻留时间进行研究,发现潜流带中水流运动具有明显的时空分布差异性,其水流运动虽以对流占主导,但易受到扩散作用和可动水体与不可动水体之间交换等因素的综合影响。林俊强等^[12]通过模拟试验研究了河岸弯曲形态引起的侧向潜流交换,发现侧向潜流交换存在对流、扩散和微循环3种形式,河道弯曲程度及其水动力条件是影响潜流交换特征的重要因素。

湖泊潜流带与河道潜流带存在较大差异。大多数湖泊都处于流域的低洼地,周边地下水容易通过湖岸或湖底潜流带进入湖泊水体^[13]。同时,湖泊水体流动性相对较差,底部流速接近于零,其潜流带中水流以垂直流或倾斜流为主^[14],这主要依赖于潜流带上下边界的压力差和能量差进行缓速传递,底栖动物及风生流的扰动也引起潜流带局部水流的运动^[15-16]。由于湖泊水位和地下水水位的季节性变化并不完全同步,导致潜流带上下压力差的季节性变化,同样造成潜流带内水流流向和流速随之变化。以太湖为例,在枯水期初期周边地下水主要沿近岸区排泄至太湖水体^[13,17],在枯水期后期则局部地区出现湖泊水流补给地下水现象;在丰水期由于太湖水位上涨但维持一定的水位,而地下水位则随着降水补给逐渐上升,特别是作物生长期大量灌溉水下渗,抬升了湖泊周边地下水位,加大了潜流带中水流的流速,改变了局部潜流带的流向。同时,湖泊潜流带中水流流速和流向随着距离岸线的距离增大而发生变化^[13,17],形成了潜流带中水流形态的空间差异性^[18]。Cranswick 等^[18]发现在离岸较近区域潜流带中存在上行流,而在离岸较远区域存在下行流,由此造成不同区域潜流带中水流驻留时间的分布差异。潜流带中营养物质的转换与驻留时间(水流路径长短)等密切相关^[18-19],主要取决于潜流带的水力梯度和渗透性能,驻留时间变化范围甚至达到几个数量级^[20]。驻留时间严重影响着氮素等营养物质在潜流带中的硝化反硝化反应过程^[21]。另据资料^[22]显示,太湖湖底86%以黄泥层覆盖,其渗透性明显较低,而岸边带则存在渗透性较大的冲积层,也造就了其潜流带水流特性的空间分布差异性。潜流带的渗透性能(路径、时间)是影响营养物质运移转化的重要因素^[23]。

2 潜流带水流形态及内部环境对氮素运移转化的影响

2.1 水流形态的影响

潜流带水流形态对营养物质产生、分布和传输以及生物分布发挥了重要影响,也是相连的地表水体中生物地球化学循环的重要驱动因素^[24-25]。潜流带靠近地表水体部分的水流形态和生物地球化学环境变化剧烈,且随着深度发生变化^[26]。地表水刚刚渗入潜流带后其生物活性被认为是最大的,随着深度增加,溶质的反应速率呈指数形式递减^[27]。潜流带中的下行流(downwelling flow)是携带富氧地表水体及其污染物质进入潜流带和地下水的重要机制^[14,28],为潜流带中的微生物提供了丰富的溶解氧和有机质^[29]。潜流带上行流(upwelling flow)则将含有低氧还原性物质的地下水和孔隙水重新释放进入地表水体^[10,30-31],给地表水体中微生物补充了营养盐(如 NO_3^-),但溶解氧含量低。潜流带水流交换控制了地表水与地下水的混合比例和在潜流带中的可反应时间长短,进而影响潜流带中有氧和厌氧环境及温度的分布^[30-32]。

Storey 等^[33]通过对安大略南部 Speed 河流的研究,分析了氮的迁移转化随河流深度以及在上行流和下行流区域的变化,结果表明,在电子供体相对于电子受体较为丰富的地区,还原成氨作用可能比硝化作用更加强烈;而在含有较多硝态氮以及较少溶解氧的下行流区域,厌氧过程反硝化作用更易发生。Holmes 等^[34]研究了在潜流带下行流中氮的转化规律,如果河流中的硝态氮和有机质能够为反硝化作用提供基质,则在下行流中以反硝化作用为主,而上行流中以硝化作用为主。Gómez-Alday 等^[35]对西班牙中部的一个咸水湖泊-地

下水系统进行研究,发现不同区域潜流带发生的上行流和下行流明显影响硝态氮反硝化发生的途径,同时不同深度的有机碳含量制约着反硝化过程。Stelzer 等^[36]对 70 cm 深度范围内的潜流带进行研究,发现较深层的地下水含溶解氧较高(质量浓度达 6.9 mg/L),但在上行流过程中由于有机碳丰富,溶解氧浓度下降明显(质量浓度仅为 0.8 mg/L),硝态氮浓度也明显降低,表明上行流中发生了明显的反硝化作用。由此可见,潜流带中水流形态对其内部环境梯度,特别是溶解氧的垂向分布具有重要影响,进而影响氮素的运移转化过程。

2.2 内部环境对氮素运移转化的影响

潜流带作为地表水体与地下水交换的核心纽带区域,其内部环境梯度对营养物质运移转化产生了综合影响。Storey 等^[33]、Mermillod-Blondin 等^[37]通过室内模拟试验和野外调查,研究了潜流带的生物地球化学过程,证明潜流带浅层的微生物承担了大部分的氧气消耗,硝化作用主要产生在潜流带浅层,反硝化作用随深度增加而增强。Zhang 等^[38]对我国洱海沉积物进行研究,发现厌氧状态($\rho(\text{DO}) < 1 \text{ mg/L}$)和 $\text{pH} = 6$ 时,氨氮容易释放进入地表水体;而好氧状态($\rho(\text{DO}) < 8 \sim 10 \text{ mg/L}$)和 $\text{pH} = 10$ 时,硝态氮容易从沉积物释放到地表水体。在淡水生态系统沉积物厌氧环境中,硝态氮往往充当有机碳氧化的终极电子受体,大部分硝态氮以 N_2 而非 N_2O (仅少量且不稳定)的形式去除,同化作用仅占少部分^[25]。Duff 等^[39]研究了溶解氧浓度对氮转化的重要影响,明确了潜流带的氮循环主要是基于生物作用的氧化还原过程。Hou 等^[40]对柱状潜流带进行研究,发现不同深度的硝态氮转化速率与其中有机质、铁和硫含量具有明显的相关性。基于水流形态、溶质反应和能量之间的相互作用,越来越多的研究趋向于耦合研究潜流带中水、热、氮、铁、硫和砷等的生物地球化学循环过程^[41-44]。

潜流带中生物活性还受到周边温度的强烈影响,温度分布的变化对氮素的硝化反硝化速率产生重要影响。Holmroos 等^[45]在浅水富营养化 Kirkkojärvi 湖泊(芬兰)底泥悬浮试验中发现夏季高温时表层沉积物反硝化脱氮明显增强,甚至改变了湖泊水体中 $\text{TN}:\text{TP}$ 的关系。Zhang 等^[46]对我国洱海研究显示,夏季高温对潜流带表层酶活性影响较大,酶活性随深度增加而降低,进而影响潜流带中氮素的硝化反硝化和有机质的腐解和再矿化作用。Burke 等^[47]对德国 Wannsee 湖岸坡渗滤系统进行原状柱试验研究时发现,当温度为 6.5°C 时,沿着渗流路径溶解氧质量浓度急剧下降(从 11.6 mg/L 降到 1.9 mg/L), NO_3^- 的质量浓度也有所降低(从 7.8 mg/L 降到 5.5 mg/L);当温度为 19.7°C 时,潜流带上层 6 cm 内溶解氧质量浓度从 8.0 mg/L 急剧下降到 1.5 mg/L , NO_3^- 的质量浓度则略有上升(可能是矿化作用导致),随着深度增大,溶解氧浓度消耗殆尽;低氧区一直延伸至 24 cm 深度,其中 Mn^{2+} 的质量浓度上升较大,而 NO_3^- 的质量浓度维持稳定在 3.0 mg/L 左右;同时发现,在低温状况下,DOC 的消耗量明显比高温下更大;所有污染物质在土柱顶端部分的消耗明显高于底部,在底部的污染物质衰减非常缓慢或者保持稳定。陈佳等^[48]对渭河陕西段潜流带进行研究,发现沉积物中 TP、TN 在夏季的平均含量明显高于冬季(接近 3 倍),沉积物、间隙水和河水 TP、TN 含量之间存在“源汇”的关系及间隙水 TP、TN 具有向河水释放的趋势。

3 潜流带表层沉积物“源汇”关系及其转换原理

3.1 表层沉积物“源汇”关系

潜流带中水流形态主导了河湖水体表层沉积物的“源汇”角色和交换通量。相对于地表水体来说,潜流带中上行流发生的区域(或点位)表现为“源”,下行流发生的区域则表现为“汇”,这两者在界面的物质能量传递主要依赖于对流传输;而在静滞流占主导的区域,界面的物质能量交换主要取决于物质浓度和能量的梯度并依赖于扩散作用进行,其“源汇”特征并不明显。这些水流特征交替出现,具有明显的时空分布特征,水流方向的变化则相应转换了其相对于地表水体的“源汇”关系^[29, 44]。有研究^[29]显示,潜流带上行流携带的营养物质促进了其表层底栖藻类生物团的形成,并为大型水生植物提供营养。高增文等^[49]通过无风和有风条件下 2 组沉积物盐分释放试验,研究海湾水库砂质沉积物-水界面扩散边界层的形成情况,结果表明:在稳定风场条件下,沉积物-水界面处存在厚度约 3.5 cm 的扩散边界层;有风条件下的界面盐分交换通量略大于无风时的通量;分子扩散是边界层内盐分运移的主要机制,扩散边界层对沉积物盐分释放具有阻滞作用,并且边界层越厚,阻滞效应越显著;由于扩散边界层的存在,限制了水动力对沉积物与上覆水之间物质交换的增强作用。

湖泊、河流等水体沉积物中营养物质含量随季节变化,也随沉积物深度发生变化^[48, 50]。不同地区湖泊甚至是同一湖泊的不同区域,表层沉积物特性不同,无机氮中有的以铵态氮为主、有的则以硝态氮为主,同时

这种主导性及氮素含量随着季节发生变化^[51-52]。主要原因大多解释为河湖水体中的污染物质浓度变化导致了沉积物表层相应污染物含量的变化,这在很多情况下确实存在较好的相关性。当湖泊周边地下水位高于湖泊水位时,地下水携硝态氮等营养物质沿潜流带渗入(上行流)湖泊水体,表现为“源”,其渗透流速随着离岸距离的增加而呈指数型递减,逐渐过渡到静滞流;而当地下水位低于湖泊水位时,湖泊水携氧等渗入(下行流)到浅层地下水,其渗透流量也随离岸距离增加而递减,并逐渐过渡到静滞流^[13,53]。同时潜流带中这些水流形态还受地表水和地下水位波动(如丰、枯水期过渡阶段)的影响,随着季节发生局部切换。而水流形态的变换将对潜流带中驻留时间、好氧-厌氧区和元素的重新分布和运移转化产生重要影响^[44]。Keery等^[54]认为潜流带的水动力交互关系及潜流带内部环境的变化能更好地阐释表层沉积物中污染物是“源”或“汇”及其时空变异性。

3.2 表层沉积物“源汇”转换原理

目前,对于潜流带表层沉积物的“源汇”关系解释的原理主要分为扩散原理、扰动释放原理和“草”“藻”型湖泊原理。扩散原理主要是因为表层沉积物与上覆水体中物质含量梯度引起的跨界面物质迁移,是一个缓慢的过程;扰动释放原理则认为地表水体的流速、流向发生剧烈变化时(如风生流、船舶行驶等)扰动了表层(或更深层)沉积物内的污染物质,使其向上覆水体迁移,这种释放是局部的和暂时的;“草”“藻”型湖泊原理则认为大型水生植物抑制了表层沉积物中污染物的释放,而藻型湖泊则有利于污染物的释放。

然而有的情况下却不能解释即使在同一河段上或同一湖泊内,有的监测点位的沉积物表现为“源”,而有的却表现为“汇”,甚至“源汇”关系也发生季节性转换^[7, 50, 55]。这些氮、磷营养元素的变化特征并不能仅以地表水体的水质变化来加以解释^[44, 50]。太湖表层沉积物的研究也显示,受死亡残体沉降和分解影响明显的“草”“藻”型湖区,氮的年释放通量较大;太湖表层沉积物对于太湖水体来说“源汇”关系分布差异性较大且发生季节性转换^[55-56],大部分表层沉积物在一年中至少经过了一次的“源”—“汇”转换过程^[55]。另外有研究^[57]显示,水生植物生长的区域更有利于反硝化作用进行,比对照区(无水生植物区域)高出30%左右(主要是根系区作用),因此即使该区域潜流带中氮素是“源”,也很可能由于水生植物的存在使得局部水体中硝态氮浓度显著偏低。

沉积物中营养元素对于地表水体来说是“源”还是“汇”无法用以上3种原理完全加以解释。Zarnetske等^[44]研究发现,潜流带中硝态氮对于地表水体来说是“源”还是“汇”取决于其在潜流带中的对流扩散过程和驻留时间长短以及溶解氧分布。这些现象表明,以潜流带作为整体来进行研究并揭示其水流形态变化及其引起的污染物质释放规律显得越来越重要^[8]。

4 存在问题及发展动态分析

地表水与地下水之间潜流带中的水流形态和氮素运移转化研究一直是国际上研究的热点问题^[25]。目前国内外对河道潜流带的研究颇多,而对相对静止的水体——湖泊的潜流带研究则相对偏少。我国也在逐步加强对潜流带的相关研究,但同样主要侧重于研究河道潜流带的水流和溶质运移转化^[5, 12, 15, 48, 58]。我国在湖泊沉积物的研究方面则侧重于其表层与上覆水体之间的动态交换,而以潜流带作为整体研究对象的相对偏少。然而相对于河道来讲,湖泊水体流动相对缓慢,其潜流带由数年或数十年沉降物堆积而成,分层特征明显,腐殖质含量较高,各种生物地球化学元素丰富,对水流形态和氮素的运移转化会产生有别于河道潜流带的作用和影响。掌握潜流带内水流形态是揭示其内部环境变化及氮素运移转化的关键和首要步骤,结合水流形态及其转换规律是阐释湖泊表层沉积物作为“源”或“汇”的重要理论和机制。

由于潜流带受到众多因素的综合影响,目前国内外都趋于采用数值模型的模拟结果阐释其中发生的水流运动和生物地球化学过程的机理机制^[44, 59]。数值模拟的方法是现场监测和室内试验的重要补充和综合,有利于进一步掌握潜流带中水流形态的驱动因素及对氮素运移转化的影响。Marzadri等^[10]采用数值模型模拟了河道潜流带垂向二维的水流形态和溶质运移过程,进一步揭示了微地貌(局部上凸和下凹)潜流带与地表水和地下水的交换细节和驱动因素,弥补了现场监测资料无法解释的过程。鲁程鹏等^[58]采用MODFLOW模型模拟研究了河床地形对潜流带水流形态的影响,所得结果表明河床地形起伏是引起潜流带渗透系数非均质现象的重要原因之一。

5 研究展望

基于潜流带在地表水和地下水动态交互中的枢纽作用,潜流带复杂的水流形态、内部环境梯度及其对溶质运移转化的影响,从地表水和地下水交互变化引起的潜流带内水流形态转变及其季节性变化可更科学地阐释不同河流、湖泊甚至是同一水体不同区域的潜流带中氮素等营养物质与地表水体的交换特征,从而更科学地界定其“源汇”关系和阐释其时空变化差异性。

笔者认为需进一步加强研究的内容主要包括以下4个方面:(a)将潜流带作为整体研究对象,进行潜流带内部环境变量垂向分布的基础研究;(b)针对不同季节(热传递效应下)地表水体不同点位潜流带内水流形态及其对氮素硝化反硝化的影响机制进行研究;(c)揭示地表水-地下水交互作用对潜流带氮素与地表水体交换通量分布规律并总结季节转换特征;(d)测算大型地表水体潜流带反硝化作用释放进入地表水体的气态氮通量,进一步掌握潜流带在氮素循环中发挥的衔接枢纽作用。这些研究将有利于阐释地表水体不同区域潜流带表层沉积物“源汇”关系及其季节性转换规律,为大型水生植物种植区的选择提供理论参考,亦为我国河湖水体的综合治理提供科学依据。

参考文献:

- [1] CLEMENTS F E. Research methods in Ecology[M]. Lincoln, NB: University of Nebraska Publishing Company, 1905: 334.
- [2] TRISKA F J, KENNEDY V C, AVANZINO R J. Retention and transport of nutrients in a third order stream in northwestern California: hyporheic processes[J]. Ecology, 1989, 70: 1894-1905.
- [3] 袁兴中,罗固源. 溪流生态系统潜流带生态学研究概述[J]. 生态学报, 2003, 23(5): 956-964. (YUAN Xingzhong, LUO Guyuan. A brief review for ecological studies on hyporheic zone of stream ecosystem[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(5): 956-964. (in Chinese))
- [4] 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.
- [5] 夏继红,陈永明,王为木,等. 河岸带潜流层动态过程与生态修复[J]. 水科学进展, 2013, 24(4): 589-597. (XIA Jihong, CHEN Yongming, WANG Weimu, et al. Dynamic processes and ecological restoration of hyporheic layer in riparian zone[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(4): 589-597. (in Chinese))
- [6] 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.
- [7] XIE Xianjun, JOHNSON T M, WANG Yanxin, et al. Pathways of arsenic from sediments to groundwater in the hyporheic zone: evidence from an iron isotope study[J]. Journal of Hydrology, 2014, 511: 509-517.
- [8] SIERGIEIEV D, WIDERLUND A, INGRI J, et al. Flow regulation effects on the hydrogeochemistry of the hyporheic zone in boreal rivers[J]. Science of The Total Environment, 2014, 499: 424-436.
- [9] KIM H, LEE K, LEE J. Numerical verification of hyporheic zone depth estimation using streambed temperature[J]. Journal of Hydrology, 2014, 511: 861-869.
- [10] MARZADRI A, TONINA D, MCKEAN J A, et al. Multi-scale streambed topographic and discharge effects on hyporheic exchange at the stream network scale in confined streams[J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 1997-2011.
- [11] WARD A S, GOOSEFF M N, FITZGERALD M, et al. Spatially distributed characterization of hyporheic solute transport during baseflow recession in a headwater mountain stream using electrical geophysical imaging[J]. Journal of Hydrology, 2014, 517: 362-377.
- [12] 林俊强,严忠民,夏继红. 弯曲河岸侧向潜流交换试验[J]. 水科学进展, 2013, 24(1): 119-125. (LIN Junqiang, YAN Zhongmin, XIA Jihong. Laboratory experiments on lateral hyporheic exchange in riverbanks with curved bank morphology[J]. Advances In Water Science, 2013, 24(1): 119-125. (in Chinese))
- [13] LI Yong, WANG Chao. Theoretical estimation of groundwater discharge and associated nutrient loading to a lake with gentle slope bottom[J]. Journal of Hydrodynamics; Ser. B, 2007, 19(1): 30-35.
- [14] TONINA D, BUFFINGTON J M. Hyporheic exchange in mountain rivers I: mechanics and environmental effects[J]. Geography Compass, 2009, 3(3): 1063-1086.
- [15] 宋进喜,任朝亮,李梦洁,等. 河流潜流带颤蚓生物扰动对沉积物渗透性的影响研究[J]. 环境科学学报, 2014, 34(8): 2062-2069. (SONG Jinxi, REN Chaoliang, LI Mengjie, et al. Effects of Tubificid bioturbations on vertical hydraulic conductivity

- of the hyporheic streambed sediments[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(8): 2062-2069. (in Chinese))
- [16] ZHANG Lei, SHEN Qiushi, HU Haiyan, et al. Impacts of corbicula fluminea on oxygen uptake and nutrient fluxes across the sediment-water interface[J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 2011, 220(1/2/3/4): 399-411.
- [17] LI Yong, WANG Chao, YANG Linzhang, et al. Influence of seepage face obliquity on discharge of groundwater and its pollutant into lake from a typical unconfined aquifer[J]. *Journal of Hydrodynamics(Ser B)*, 2007, 19(6): 756-761.
- [18] CRANSWICK R H, COOK P G, LAMONTAGNE S. Hyporheic zone exchange fluxes and residence times inferred from riverbed temperature and radon data[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 1870-1881.
- [19] BRIGGS M A, LAUTZ L K, HARE D K. Residence time control on hot moments of net nitrate production and uptake in the hyporheic zone[J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28: 3741-3751.
- [20] GARTNER J D, RENSHAW C E, DADE W B, et al. Time and depth scales of fine sediment delivery into gravel stream beds: constraints from fallout radionuclides on fine sediment residence time and delivery[J]. *Geomorphology*, 2012, 151/152: 39-49.
- [21] CLARET C, BOULTON A J. Integrating hydraulic conductivity with biogeochemical gradients and microbial activity along river-groundwater exchange zones in a subtropical stream[J]. *Hydrogeology Journal*, 2009, 17(1): 151-160.
- [22] 黄漪平.太湖水环境及其污染控制[M].北京:中国科学出版社,2001.
- [23] CHEN Xunhong, MI Haicun, HE Hongman, et al. Hydraulic conductivity variation within and between layers of a high floodplain profile[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 515: 147-155.
- [24] BOURKE S A, COOK P G, SHANAFIELD M, et al. Characterisation of hyporheic exchange in a losing stream using radon-222[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 94-105.
- [25] BURGIN A J, HAMILTON S K. Have we overemphasized the role of denitrification in aquatic ecosystems? a review of nitrate removal pathways[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2007, 5(2): 89-96.
- [26] HEBERER T, MASSMANN G, FANCK B, et al. Behaviour and redox sensitivity of antimicrobial residues during bank filtration[J]. *Chemosphere*, 2008, 73(4): 451-460.
- [27] STUYFZAND P J. Hydrogeochemical processes during riverbank filtration and artificial recharge of polluted surface waters: zonation, identification, and quantification[M]. Netherlands:Springer, 2011:97-128.
- [28] TONINA D, BUFFINGTON J M. Hyporheic exchange in gravel bed rivers with pool-riffle morphology: laboratory experiments and three-dimensional modeling[J]. *Water Resources Research*, 2007, 43(1): 1-16.
- [29] BOULTON A J, DATRY T, KASAHARA T, et al. Ecology and management of the hyporheic zone: stream-groundwater interactions of running waters and their floodplains[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2010, 29(1): 26-40.
- [30] MARZADRI A, TONINA D, BELLIN A. Quantifying the importance of daily stream water temperature fluctuations on the hyporheic thermal regime: Implication for dissolved oxygen dynamics[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 507: 241-248.
- [31] 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(4): 4036-4048.
- [32] STONEDAHL S H, HARVEY J W, PACKMAN A I. Interactions between hyporheic flow produced by stream meanders, bars, and dunes[J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(9): 25-36.
- [33] STOREY R G, WILLIAMS D D, FULTHORPE R R. Nitrogen processing in the hyporheic zone of a pastoral stream[J]. *Biogeochemistry*, 2004, 69(3): 285-313.
- [34] HOLMES R M, JONES J B, FISHER S G, et al. Denitrification in a nitrogen limited stream ecosystem[J]. *Biogeochemistry*, 1996, 33: 125-146.
- [35] GÓMEZ-ALDAY J J, CARREY R, VALIENTE N, et al. Denitrification in a hypersaline lake-aquifer system (Pétrola Basin, Central Spain): the role of recent organic matter and Cretaceous organic rich sediments[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 497-498: 594-606.
- [36] STELZER R S, BARTSCH L A, RICHARDSON W B, et al. The dark side of the hyporheic zone: depth profiles of nitrogen and its processing in stream sediments[J]. *Freshwater Biology*, 2011, 56: 2021-2033.
- [37] MERMILOD-BLONDIN F, MAUCLAIRE L, MONTUELLE B. Use of slow filtration columns to assess oxygen respiration, consumption of dissolved organic carbon, nitrogen transformations, and microbial parameters in hyporheic sediments[J]. *Water Research*, 2005, 39(9): 1687-1698.
- [38] ZHANG Li, WANG Shengrui, WU Zhihao. Coupling effect of pH and dissolved oxygen in water column on nitrogen release at water-sediment interface of Erhai Lake, China[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2014, 149: 178-186.
- [39] DUFF J H, TRISKA F J. Denitrifications in sediments from the hyporheic zone adjacent to a small forested stream[J]. *Canadian*

- Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2011, 47(6): 1140-1147.
- [40] HOU Lijun, LIU Min, CARINI S A, et al. Transformation and fate of nitrate near the sediment-water interface of Copano Bay [J]. Continental Shelf Research, 2012, 35: 86-94.
- [41] XIE Xianjun, WANG Yanxin, LI Junxia, et al. Effect of irrigation on $\text{Fe(III)}-\text{SO}_4^{2-}$ redox cycling and arsenic mobilization in shallow groundwater from the Datong basin, China: evidence from hydrochemical monitoring and modeling [J]. Journal of Hydrology, 2015, 523: 128-138.
- [42] 余倩. 潜流带砷迁移水动力-水化学过程监测与耦合模拟研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2014.
- [43] WANG Yanxin, XIE Xianjun, JOHNSON T M, et al. Coupled iron, sulfur and carbon isotope evidences for arsenic enrichment in groundwater [J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 414-422.
- [44] ZARNETSKY 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): 1-15.
- [45] HOLMROOS H, HIETANEN S, NIEMISTO J, et al. Sediment resuspension and denitrification affect the nitrogen to phosphorus ratio of shallow lake waters [J]. Fundam Appl Limnol, 2012, 180(3): 193-205.
- [46] ZHANG Li, WANG Shengrui, IMAI A. Spatial and temporal variations in sediment enzyme activities and their relationship with the trophic status of Erhai Lake [J]. Ecological Engineering, 2015, 75: 365-369.
- [47] BURKE V, GRESKOWIAK J, ASMUS T, et al. Temperature dependent redox zonation and attenuation of wastewater-derived organic micropollutants in the hyporheic zone [J]. Science of the Total Environment, 2014, 482/483: 53-61.
- [48] 陈佳, 宋进喜, 杨小刚, 等. 渭河陕西段潜流带污染特征及其对河水的影响 [J]. 干旱区研究, 2015, 32(1): 140-148. (CHEN Jia, SONG Jinxi, YANG Xiaogang, et al. Water pollution in underflow Zone along the Shaanxi section of the Weihe River [J]. Arid Zone Research, 2015, 32(1): 140-148. (in Chinese))
- [49] 高增文, 郑西来, 赵全升. 扩散边界层对沉积物盐分释放的阻滞影响 [J]. 水科学进展, 2010, 21(2): 255-260. (GAO Zengwen, ZHENG Xilai, ZHAO Quansheng. Diffusive boundary layer and its resistance on salt release from deposited sediments in a polder reservoir [J]. Advances In Water Science, 2010, 21(2): 255-260. (in Chinese))
- [50] 金相灿, 姜霞, 徐玉慧, 等. 太湖东北部沉积物可溶性氮、磷的季节性变化 [J]. 中国环境科学, 2006, 26(4): 409-413. (JIN Xiangcan, JIANG Xia, XU Yuhui, et al. Seasonal changes in Taihu sediments in northeast part of soluble nitrogen, phosphorus [J]. China Environmental Science, 2006, 26(4): 409-413. (in Chinese))
- [51] 刘清学. 我国不同分区湖泊表层沉积物中氮形态及 DOM 光谱特性研究 [D]. 青岛: 青岛科技大学, 2011.
- [52] ZHANG Lu, ZHU Guangwei, LUO Liangcong, et al. Wind-wave affected phosphate loading variations and their relationship to redox condition in Lake Taihu [J]. Science in China (Series D), 2006, 49(1): 154-161.
- [53] LI Yong, ŠIMŮNEK J, ZHANG Zhentin, et al. Water flow and nitrate transport through a lakeshore with different revetment materials [J]. Journal of Hydrology, 2015, 520: 123-133.
- [54] KEERY J, BINLEY A, CROOK N, et al. Temporal and spatial variability of groundwater-surface water fluxes: development and application of an analytical method using temperature time series [J]. Journal of Hydrology, 2007, 336(1/2): 1-16.
- [55] 范成新, 张路, 包先明, 等. 太湖沉积物-水界面生源要素迁移机制及量化: 2. 磷释放的热力学机制及源-汇转换 [J]. 湖泊科学, 2006, 18(3): 207-217. (FAN Chengxin, ZHANG Lu, BAO Xianming, et al. Migration mechanism of biogenic elements and their quantification on the sediment-water interface of Lake Taihu: II. chemical thermodynamic mechanism of phosphorus release and its source-sink transition [J]. Lakes Science, 2006, 18(3): 207-217. (in Chinese))
- [56] 范成新, 张路, 秦伯强, 等. 太湖沉积物-水界面生源要素迁移机制及量化: 1. 铵态氮释放速率的空间差异及源-汇通量 [J]. 湖泊科学, 2004, 16(1): 10-20. (FAN Chengxin, ZHANG Lu, QIN Boqiang, et al. Migration mechanism of biogenic elements and their quantification on the sediment-water interface of lake Taihu: I. spatial variation of the ammonium release rates and its source and sink fluxes [J]. Lakes Science, 2004, 16(1): 10-20. (in Chinese))
- [57] NIZZOLI D, WELSH D T, LONGHI D, et al. Influence of Potamogeton pectinatus and microphytobenthos on benthic metabolism, nutrient fluxes and denitrification in a freshwater littoral sediment in an agricultural landscape: N assimilation versus N removal [J]. Hydrobiologia, 2014, 737: 183-200.
- [58] 鲁程鹏, 束龙仓, 陈洵洪. 河床地形影响潜流交换作用的数值分析 [J]. 水科学进展, 2012, 23(6): 789-795. (LU Chengpeng, SHU Longcang, CHEN Xunhong. Numerical analysis of the impacts of bedform on hyporheic exchange [J]. Advances in Water Science, 2012, 23(6): 789-795. (in Chinese))
- [59] EVRARD V, GLUD R N, COOK P L M. The kinetics of denitrification in permeable sediments [J]. Biogeochemistry, 2013, 113: 563-572.