

# 侧向潜流交换水动力过程及生态环境效应

朱新丽<sup>1</sup>, 金光球<sup>1</sup>, 姜启豪<sup>1</sup>, 魏杰<sup>1</sup>, 李凌<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏南京 210098;

2. National Center for Groundwater Research and Training School of Civil Engineering, University of Queensland, St. Lucia QLD 4072, Australia)

**摘要:** 鉴于侧岸潜流带中发生着强烈的生物地球化学作用, 其独特而复杂的水动力特性对水生生态系统及生态环境有重要作用。通过分析总结前人对侧岸潜流带所做的研究, 阐明了侧岸不同方向上潜流交换过程及其产生机制, 分析了影响侧向潜流交换过程的主要因素(包括地形条件、沉积层特性、水文地质条件、河道工程、河岸植被条件), 阐述了侧向潜流交换过程对溶质、颗粒和生态环境的影响。最后对侧向潜流交换今后的研究提出了一些建议。

**关键词:** 侧岸潜流带; 潜流交换; 水动力过程; 生态环境效应

**中图分类号:** TV138      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1006-7647(2017)03-0015-07

**Processes of lateral hyporheic exchange and its eco-environment effects//ZHU Xinli<sup>1</sup>, JIN Guangqiu<sup>1</sup>, JIANG Qihao<sup>1</sup>, WEI Jie<sup>1</sup>, LI Ling<sup>1,2</sup> (College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. National Center for Groundwater Research and Training School of Civil Engineering, University of Queensland, St. Lucia, QLD 4072, Australia)**

**Abstract:** Due to the occurrence of strong biogeochemical processes in the lateral hyporheic zone (LHZ), its unique and complex hydrodynamic characteristics play an important role in aquatic ecosystem and ecological environment. Through analysis and summarization of previous studies on the LHZ, the process and mechanism of hyporheic exchange in different directions are clarified, and the main factors (including topographic conditions, characteristics of sedimentary layers, hydrogeological conditions, river engineering, and riparian vegetation conditions) that affect the lateral hyporheic exchange are analyzed in detail. Furthermore, the effects of lateral hyporheic exchange on solutes, grains, and ecological environments are discussed. Finally, some suggestions on this subject are given for future study.

**Key words:** lateral hyporheic zone; hyporheic exchange; hydrodynamic process; eco-environment effects

河岸带作为水生生境与陆生生境的过渡区域, 具有独特的植被、地质、地形地貌和水文特性, 并受地表水和地下水水位变化的影响<sup>[1]</sup>。河岸带的各种特性, 影响着河岸带下边缘侧岸潜流带的独特性、复杂性、边缘性、动态性以及水动力过程。潜流带对水生生态系统以及水陆交错带生态系统的结构和功能具有重要作用<sup>[2]</sup>, 它与河道共同具有一定的生物、化学、物理特征<sup>[3]</sup>, 其内发生的物理、化学、生物作用过程影响着侧岸潜流带中水体的运动、溶质和颗粒的迁移、生物活动过程以及植物的生长, 能保护地表和地下水径流、生物多样性以及全球气候和自然环境<sup>[4]</sup>, 并具备有效调蓄洪水、削减污染、净化环境、保护植被和提供适宜栖息地<sup>[5]</sup>等功能。侧岸潜流带作为潜流带一部分, 主要依靠渗透性、生物多样

性、水动力交错带的连接性等对地表水生态系统产生影响<sup>[6]</sup>, 同时一定宽度的侧岸潜流带还可通过渗透、过滤、滞留、沉积等物理、化学和生物过程, 使进入地表和地下水的污染物毒性减弱, 即可有效去除农业点源和非点源污染物, 同时也改善了侧岸的生态系统环境, 为水陆生物提供了适宜的栖息场所<sup>[7-8]</sup>。本文通过对侧向潜流交换相关文献的总结和分析, 对侧岸潜流带区域进行界定, 分析其水动力过程和影响侧岸潜流带潜流交换的因素以及侧向潜流交换对生态环境的效应。

## 1 侧岸潜流带区域

潜流带普遍被定义为河床中浅层地下水与河水存在能量循环与物质交换的交错区域, 实际上河岸

基金项目: 国家自然科学基金(51239003, 51109059); 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2012CB417000)

作者简介: 朱新丽(1989—), 女, 硕士, 主要从事水生态环境研究。E-mail: zhuxl890@126.com

通信作者: 金光球(1979—), 男, 教授, 博士, 主要从事水生态环境研究。E-mail: jingq@hhu.edu.cn

带内地下水水位和河流水位是相互影响的<sup>[9]</sup>,因此,潜流交换不仅发生在河床也可发生在河岸。侧岸潜流带应指河床与河道两侧一定区域内河水与河岸地下水相互作用的混合区域,该区域存在于河岸带的下边缘且靠近河水(图1)。无论是河床潜流带还是侧岸潜流带都是生物多样性研究的热点区域。

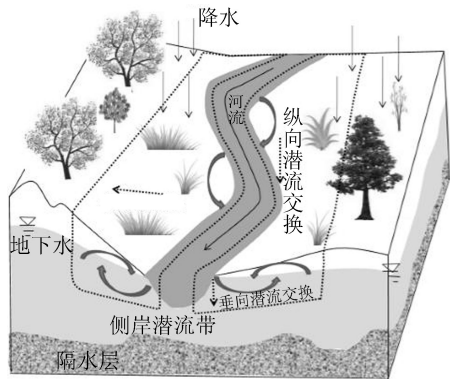


图1 侧岸潜流带示意图

侧岸潜流带区域在空间上分为横向、垂向和纵向结构:横向上侧岸潜流带由河流河床两侧水分饱和和沉积物层延伸至河岸带植被缓冲区甚至更远,这与潜流交换强度及其影响因素有关;垂向上由河道坡底向下延伸至隔水层,包括浅层地下水与河水相互作用的浅层潜流带和深层地下水与河水相混合的深层潜流带;纵向结构指上游河水侧向进入河岸与河岸地下水相混合,并在下游使地下水由河岸流向河流的纵向区域。

## 2 侧岸潜流带水动力过程

潜流带内发生的水动力过程对水体的运动、物质运移以及生物活动都有着重要作用,并与地表水水量、物质、能量等输运和交换紧密相关。

### 2.1 横向和垂向潜流交换水动力过程

在单一横向结构上,由于河流与河岸交界面具有强烈的水文连通性,河水水位的变化往往会影响地下水的泄流方式<sup>[10]</sup>。河水水位上涨时,河水通过侧向交换补给河岸地下水,并保持一个短暂的补水期,河水水位下降时河岸地下水又会补给河流,这种连通性最早是通过地形作用,驱动地下水的流动而形成的,并在湖泊和河流的侧岸出流这一现象中得到验证<sup>[11-12]</sup>。对于湿地生态系统,由于垂向沉积层渗透率小使得沼泽地基层进一步堆积,此时主要由湿地周围侧向地下水补给地表水<sup>[13]</sup>。沉积物如果分布在两侧具有水位差的河流之间,沉积物中埋藏有自由水面的浅层地下水,这种地表水与地下水在发生横向侧岸潜流交换的同时,往往伴随着垂向侧岸潜流交换。另一方面,由于山区地下水位一般较高,

在与邻近河流发生侧岸潜流交换时,在重力驱动作用下垂向潜流交换占主要部分<sup>[14]</sup>。

### 2.2 纵向潜流交换水动力过程

在纵向结构上,由于河岸地形边界的不规则性,水流经过时会产生水力高压区与低压区,河流地表水通过河岸表面的水力高压区进入地下,并通过一定距离的浅层沉积区与地下水进行掺混与交换,再从水力低压区返回地表与河流水相汇<sup>[15]</sup>。天然河道大多呈蜿蜒型,在弯曲河道中随着河道弯曲度的增大,河道两侧的水力梯度也会随之发生变化,最终通过河流与侧岸的潜流交换量呈线性或非线性增加<sup>[16]</sup>。弯曲河道不规则形态使河岸表面产生局部压力梯度,诱导河岸地下水与河水沿河道水流方向发生纵向潜流交换。边滩水头梯度的改变,驱使河水在上游由凹岸流入河岸并与地下水混合,随后通过下游面渗出。地下水与地表水沿弯曲河道的侧向潜流交换在自然界中是非常常见的,交换路径以及滞留时间都与河道弯曲度有紧密的联系<sup>[17]</sup>。

## 3 侧向潜流交换研究进展

潜流带最早由 Orghidan 提出,早期对潜流带的研究主要是针对河床潜流带。而侧向潜流交换研究发展较慢,且主要通过野外实验和数值模拟进行。20世纪90年代, Brunke 等<sup>[18]</sup>在研究河水与地下水交换对生态系统的重要性时提出了侧岸潜流带的概念。Ward 等<sup>[19]</sup>于1988年概述了地表水和河岸带地下水各系统特性以及其连通性对多细胞动物新陈代谢和栖息地的影响。Brugger 等<sup>[20]</sup>通过对澳大利亚恩斯河河道与河岸泄流量、有机物含量等进行取样测量,研究季节性水文条件下,由于河流向河岸地下水补给和物质输运,对河岸地下水有机物、细菌新陈代谢以及河岸地下水水质产生的重要影响。Storey 等<sup>[21]</sup>采用 MODFLOW 区域预算功能对安大略湖南部波状地形河床河流垂向、纵向和侧向潜流交换通量进行计算,并结合粒子追踪功能确定河水垂向和侧向进入潜流区的范围以及潜流交换时间。Butturini 等<sup>[22]</sup>开发了一种新的混合模型,模拟西班牙地中海区域两条受污染河流在暴雨作用下,河流与集水区交界面(河岸带沉积层)内反应性污染物如何通过侧向潜流交换释放到河流中。对于侧向潜流带的研究,Chou 等<sup>[23]</sup>做了一个J形圆柱体,用来研究侧向地下水进入河流的物理过程和特性。Osenbrück 等<sup>[24]</sup>进一步对内卡河支流与泛洪区含水层潜流交换过程与微生物群落及生物化学反应的关系进行研究,关注了侧向潜流交换通量分布和污染物滞留时间关系,还根据电导率随时间的变化,确定

潜流交换路径。

国内对于侧岸潜流交换的研究起步较晚,2003年袁兴中等<sup>[25]</sup>才定义了溪流潜流带,并指出它不仅占据河床沉积层,在空间结构上还包括河岸带与地下水之间的潜流交换区。2010年高敏等<sup>[26]</sup>通过建立垂直潜流人工湿地模型,研究化学需氧量和游离态氨氮浓度随时间和含水层深度的变化,研究发现物质浓度的波动与潜流区植物光合作用及泌氧规律有直接关系,靠近含水层表层植物泌氧活跃,微生物(硝化菌)聚集,主要发生硝化作用,有利于 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 的去除。河岸侧向潜流交换及其物质输运主要受压力梯度驱使。林俊强等<sup>[27]</sup>为了研究弯曲河道河岸边界的压强分布,在室内制作不同形态的正弦形河道,研究河道在不同地形条件和水流条件下河岸边界的压强分布。周鹏鹏等<sup>[28]</sup>用SEAWAT模型模拟潮汐作用下,东海岛非承压含水层地下水水动力过程,SEAWAT模型结合MODFLOW-2000地下水模块和MT3DMS物质传输模块,形成了一个可模拟三维变密度流地下水和物质输运的单程序模型。朱蓓等<sup>[29]</sup>将新安大坝下游某一河段作为试验基地,实时监测河道与河岸水位及温度分布,利用Bussinesq方程结合流量微分方程计算侧向潜流交换流量,分析表明离河道越远,侧向潜流区水位波动消减越快。

## 4 水动力过程影响因素

### 4.1 地形条件

自然状态下,地形蜿蜒曲折、跌宕起伏,而正是因为地形的不规则才为河流侧向潜流交换创造了条件。地下水进出潜流区主要是与河流交换产生的,而这个过程是由地形产生的上覆水压力水头和河床沉积层渗透性引起,地形变化产生的对流传输作用,很大程度上改变了潜流区化学、物理、生物梯度,并最终影响水生生态系统的结构功能<sup>[30]</sup>。冲积河道发生的河床演变通过对河床下游地形产生影响,进而影响河岸沉积层内沉积物浓度,Cardenas<sup>[31]</sup>运用二维数值模拟预测了不同弯曲条件下,侧岸潜流交换的区域、交换量以及物质通过潜流区的滞留时间,得出弯曲度越大越容易诱导潜流交换发生的结论。

### 4.2 沉积层特性

河岸沉积层空间异质性导致垂向渗透率不同,影响侧岸潜流交换的时间和交换区域的大小以及潜流流速等指标<sup>[32]</sup>。Sawyer等<sup>[33]</sup>对非均质沉积层和等效均质沉积层分别进行数值模拟分析,经过对比分析得到渗透系数的变化引起污染物滞留时间分布跨越几个数量级。Rassam等<sup>[34]</sup>通过现场监测,分析澳大利亚昆士兰的魔瑞顿海湾低渗透率沉积层主

流与支流侧岸潜流交换水动力特性,发现支流集水区受水文影响较大,主河道常年有水与泛洪区的侧向潜流交换受渗透率影响较大,在低渗透率作用下进入主河道侧岸的水流在碳富集区域形成一个浅层高水位区,使潜流带内饱和度增加,溶氧量减少。细颗粒沉积层主要源于流域尺度地质作用,并决定了潜流带多数物理和化学过程,这种模式下形成的紊流容易产生盲区,这种特性是因沉积层空间异质性而产生,其能够实现小区域内潜流区生物过程与化学过程共同作用,并促进小区域内生态过程的多样性<sup>[35]</sup>。

### 4.3 水文地质条件

河流与侧岸交界面存在着明显的水文关系,这种水文关系由于降水、气候等影响地下水与地表水水位差,同时不同区域河流生成系统也会影响潜流交换水动力过程。

气候的变化导致降雨、径流、蒸发等水文条件也发生着季节性变化,并伴随着洪水期和干早期交替出现。Burt等<sup>[36]</sup>和Krause等<sup>[37]</sup>分别对欧洲NICOLAS和德国东北部HAVEL河流与邻近泛洪区域在不同季节下发生的潜流交换进行数据分析和数值模拟分析,了解到冬季地下水位高致使高水头梯度的产生,这对侧岸地下水流具有重要作用,夏季如果没有持续来自河流的水体补给,侧岸潜流带地下水水位将下降。Stewart等<sup>[38]</sup>通过模拟英国的Severn河在洪水期和干旱环境下与周围泛洪区的泄流随时间的变化关系,得出洪水期河水补给地下水,干早期地下水补给地表水的结论。Kiel等<sup>[39]</sup>研究发现,在侧向潜流交换过程中,源头位置河水滞留时间不超过1h,而在大尺度的河道中滞留时间却能达到1个月。van Meerveld等<sup>[40]</sup>为研究山区河流与地下水间的侧向连通性以及水流方向,对邻近美国亚特兰大位于佐治亚州帕诺拉山的一集水区域进行现场监测和分析,得到一般情况下只有暴雨时期山区地下水与河流侧向连通,但除了山腰处地下水水位上升慢并且流速小外,山顶和山脚区域地下水在暴雨初期和后期低水位条件下沿基岩流向河岸,在暴雨中期的高水位条件下山顶和山脚区域地下水整体下泄,因此地下水和地表水系统的时空变化过程受区域地质和水文条件共同作用。

### 4.4 河道工程

人类出于社会和经济目的对侧岸潜流带的干扰和影响越来越严重,因而直接或间接影响侧岸潜流交换功能。大坝、水库等水利枢纽的建立改变了侧向潜流交换的连通性,或阻碍或促进了侧岸潜流带地下水与地表水的交换。Paillex等<sup>[41]</sup>对法国罗纳河18个泛洪平原河道重建前后大型无脊椎动物群

落多样性和侧向连通性进行了评估,发现在河道重建后侧向连通性增大,生物群落多样性随之增多。自然状态下地表水与地下水水位均发生季节性变化,由于安大略湖南部河道砾石坝的重建,形成的砾石沙波改变了大坝周围的水力梯度,增加了交换量和潜流区内水体的滞留时间,以此加强了侧岸与河道的关系,扩建后的砾石坝还改变了河流生物地球化学过程<sup>[42]</sup>。美国科罗拉多河上的 Longhorn 大坝水力发电产生的水体波动振幅达到 2.5 m,并引起下游 15 km 处水位产生振幅为 1 m 的周期性波动,研究人员对该处河岸渗透系数以及地下水高程、水温、污染物浓度进行监测,发现 Longhorn 大坝的建设基本上改变了河岸带含水层及其潜流带水文、温度和地球化学动力过程<sup>[43]</sup>。

#### 4.5 河岸植被条件

河岸植被缓冲带作为侧岸潜流带的横向区域,其对于水陆生态系统之间的物质流、能量流、生物流和信息流发挥着重要的廊道、过滤和屏障作用,并能够有效地吸收移除地表径流以及工农业污染渗入地下水和河流水的氮磷有机物,截留过滤颗粒状吸附性污染物<sup>[44]</sup>。侧岸潜流带缓冲区的植被对于河流微气候以及水温的调节也有一定的影响,在夏季可以阻挡太阳光的照射以降低水温,在冬季吸收反向辐射提高水温以保持溪流常年较稳定的水流条件。缓冲区的乔木植物根系对于河岸的稳定也有一定的帮助,当根系深入潜流区会产生水体绕流从而减小水流速度,草本植物在洪水季节能够发挥其防洪和防侵蚀作用来保证地下水缓慢地进入河流以保持河流流量的相对稳定,同时也可通过增大地表粗糙度来增强地表径流的渗透能力,减小径流流速<sup>[45]</sup>。

### 5 生态环境效应

#### 5.1 对溶质的影响

每年河流对于全球陆生有机物碳的运输、转化、储存量接近陆生生态系统有机碳产量的 1/4,全球反硝化作用的 65% 发生在水中沉积层<sup>[46]</sup>。在侧岸潜流带中反硝化作用产生的氮气经沉积层迁移出河流,河流在层流、紊流、波浪或潮汐作用下将氮气释放到空气中,以减少地下水中碳氮有机物的富集。周艳雨等<sup>[47]</sup>在研究水平潜流人工湿地脱氮去磷机理过程中,不仅分析了潜流区水质、含水层基质等对脱氮去磷机理的影响,同时还分析了水力停留时间对氮磷去除的影响,认为水力停留时间越长,氮磷的去除率越高。Welch 等<sup>[48]</sup>通过二维数值模拟研究潜流区污染物传输速率以及滞留时间,得到潜流交换量和水体在河流和潜流带的运动范围,认为河流与

地下水的水文连通性为营养物质的迁移提供了条件。Bernal 等<sup>[49]</sup>在对西班牙蒙特塞尼自然公园 Font del Regàs 流域进行现场采样和实验分析,发现河岸带区域物质循环能够强烈影响河流营养物浓度。

#### 5.2 对颗粒的影响

胶体在农业区分布广泛,不仅可以自然分解产生有害物质还可促进河流与地下水中反应性污染物的传输,经过地表径流进入水生生态系统中会严重威胁河流以及地下水水质。在地下水与地表水系统中,实际上部分吸附性污染物的运移是与胶体相耦合的,Ren 等<sup>[50]</sup>通过水槽试验研究了地表水与地下水耦合作用下赤铁矿与吸附性污染物锌、铜和磷酸盐的交换,发现吸附性污染物与氧化铁(胶体)间的相互作用能够改变胶体的移动,扰乱细颗粒水动力过程并影响污染物的运移过程。胶体不仅可以携带污染物在河流潜流带中迁移,也可阻塞河床孔隙从而阻碍潜流交换,河床介质以及河床上覆水流速对胶体在潜流带中的迁移也有重要作用<sup>[51]</sup>。侧岸潜流带植被缓冲带能够有效减少地表径流携带的胶体物质,河流中溶解有机物以及胶体颗粒的运输可通过侧岸潜流交换的对流、扩散和微循环 3 种方式大幅度提高运输效率,促进侧岸潜流带内微生物、无脊椎动物等的新陈代谢,也可降低泛洪区有机物和颗粒带来的污染。

#### 5.3 对生态的影响

从生态学的观点看,侧岸缓冲带的植被能够缓冲水文和生物地球化学作用下侧向地下水的通量,并能控制地表水水质的短期变化<sup>[52]</sup>。河流侧岸区域高度的时空不均匀性对富集且多样的生物区具有重要的支撑作用,通过评估发现欧洲和南美洲 90% 的泛洪区与河流侧向连通性已经改变,这种连续的改变对于生物区以及生态系统都造成了一定程度的有害影响<sup>[26]</sup>。Besacier 等<sup>[53]</sup>对法国罗纳河 4 个泛洪平原河道进行取样分析,了解到主河道与泛洪区内地表水、沉积层和生物区间交换的侧向连通性,对于维持由激流到缓流条件下生物栖息地多样性以及生态环境过程都有重要作用。河流的泄流决定了潜流区内化学过程、潜在食物源、生物膜活性以及微型甲壳动物群落的分布。Nataša 等<sup>[54]</sup>分析了斯洛文尼亚萨瓦河区域浅层潜流带与深层潜流带内水动力过程对小型甲壳动物结构和功能的影响,由于浅层潜流带能够很好地与地表水接触,但潜流交换滞留时间短,使潜流区生物膜活性、微生物新陈代谢速度降低,而深层潜流带中的生物膜活性随交换路径增加而增强。河岸带地下水的波动控制了土壤的氧化还原条件<sup>[55]</sup>,进而影响土壤中营养物质的循环过

程、潜流交换的强度和营养物质的迁移距离。植被群落的动态演替不仅与河岸带水文条件有关,同时与潜流区营养物质以及含氧量和耐水性等因素有关,这就导致了植被群落空间的层状分布,同时间接影响河岸带区域野生生物分布。

## 6 研究展望

侧岸潜流带生态学的研究近些年才被人们重视,但侧岸潜流交换作用机理以及对生态环境的影响效应需要进一步的研究。

a. 当前对侧向潜流交换机理的研究比较缺乏,且主要集中在一维和二维小尺度。今后应研究三维空间下大尺度侧向潜流交换水动力过程,以及物质运输(惰性污染物、反应性污染物)和能量循环过程。

b. 目前使用传统现场监测技术对纵向潜流交换机理的研究比较多,而对于横向以及垂向的研究不足,而且传统现场监测技术所受制约因素多。在今后的研究中可将传统现场监测技术与现代集成数字仿真技术、3S 技术以及数值模拟耦合方式相结合,研究多时空尺度下侧岸地表水与地下水交换区水动力过程及生物化学过程(包括横向、垂向和纵向结构)。

c. 地表水与地下水很难达到全耦合模拟的状态,因此,目前对地表水与地下水的模拟都是处于单独模拟或者半耦合模拟(河道水流变化产生的压强作为模拟地下水的边界条件,或者将河流在河水与地下水交界面产生的通量作为计算地下水模型的边界条件等)。今后对侧岸潜流带的模拟研究应主要考虑如何有效地将地表水与地下水做全耦合处理,以便能更全面地了解潜流区内的水动力过程和物质运输过程,界定侧向潜流交换的范围。

d. 侧岸潜流带易受到外界因素影响,然而各因素共同作用对侧岸潜流带水动力过程的影响更为复杂且研究还不够深入,如潜流区内溶质和细颗粒等会随着潜流交换和滞留作用堵塞多孔介质,改变潜流交换路径,今后可加强这方面的研究。

e. 侧向潜流交换处于复杂而又独特的河岸带内,其交换机理更为复杂。今后不仅要深入研究侧向潜流交换和潜流区物质循环对于河岸带动植物群落结构、栖息地、生物膜结构、微生物活动等的影响;还要了解河岸带内植被结构以及无脊椎动物、微生物新陈代谢等对于潜流交换的水动力过程、不同营养物质反应性/吸附性迁移扩散以及时空分布和潜流区生物化学过程的影响。

## 参考文献:

[ 1 ] 郭怀成,黄凯,刘永,等. 河岸带生态系统管理研究概念

框架及其关键问题[J]. 地理研究,2007,26(4): 789-801. (GUO Huaicheng, HUANG Kai, LIU Yong, et al. A conceptual framework of riparian ecosystem management and its key problems[J]. Geographical Research,2007,26(4):789-801. (in Chinese)).

[ 2 ] 滕彦国,佐锐,王金生. 地表水-地下水的交错带及其生态功能[J]. 地球与环境,2007,35(1): 1-8. (TENG Yanguo, ZUO Rui, WANG Jinsheng. Hyporheic zone of Groundwater and surface water and its ecological function [J]. Earth and Environment, 2007, 35(1): 1-8. (in Chinese))

[ 3 ] 金光球,李凌. 河流中潜流交换研究进展[J]. 水科学进展,2008,19(2): 285-293. (JIN Guangqiu, LI Ling. Advancement in the hyporheic exchange in rivers [J]. Advances in Water Science, 2008, 19(2): 285-293. (in Chinese))

[ 4 ] GARRASTAZÙ M C, MENDONÇA S D, HOROKOSKI T T, et al. Carbon sequestration and riparian zones: assessing the impacts of changing regulatory practices in Southern Brazil [J]. Land Use Policy, 2015, 42: 329-339.

[ 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): 1-10. (XIA Jihong, CHEN Yongming, WANG Weimu, et al. Dynamic processes and ecological restoration of hyporheic layer in riparian zone [J]. Advance in Water Science, 2013, 24(4): 1-10. (in Chinese))

[ 6 ] 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.

[ 7 ] 张建新. 河岸带功能及其管理[J]. 水土保持学报, 2001, 15(6): 143-151. (ZHANG Jianchun. Riparian functions and its management [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(6): 143-151. (in Chinese))

[ 8 ] 韩路,王海珍,于军. 河岸带生态学研究进展与展望[J]. 生态环境学报,2013,22(5): 879-885. (HAN Lu, WANG Haizhen, YU Jun. Research progress and prospects on riparian zone ecology [J]. Ecology and Environment Sciences, 2013, 22(5): 879-885. (in Chinese))

[ 9 ] BANZHAF S, KREIN A, SCHEYTT T. Investigative approaches to determine exchange processes in the hyporheic zone of a low permeability riverbank [J]. Hydrogeology Journal, 2011, 19(3): 591-601.

[ 10 ] CURRY R A, GEHRELS J, DAVID L G, et al. Effects of river flow fluctuations on groundwater discharge through brook trout, salvelinus fontinalis, spawning and incubation habitats [J]. Hydrobiologia, 1994, 277: 121-134.

[ 11 ] SINGH S K. Aquifer response to sinusoidal or arbitrary stage of semipervious stream [J]. Journal of Hydraulic

- Engineering, 2004, 130(11):1108-1118.
- [12] CARDENAS M B. Potential contribution of topography-driven regional groundwater flow to fractal stream chemistry: residence time distribution analysis of Tóth flow [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(5): L05403.
- [13] FERLATTE M, QUILLET A, LAROCQUE M, et al. Aquifer-peatland connectivity in southern Quebec (Canada) [J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29(11): 2600-2612.
- [14] WONDZELL S M, SWANSON F J. Seasonal and storm dynamics of the hyporheic zone of a 4th-order mountain stream: hydrologic processes [J]. *Journal of The North American Benthological Society*, 1996, 15(1): 3-19.
- [15] 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): 118-124. (LIN Junqiang, YAN Zhongmin, XIA Jihong. Laboratory experiments on lateral hyporheic exchange in riverbanks with curved bank morphology [J]. *Advance in Water Science*, 2013, 24(1): 118-124. (in Chinese))
- [16] CARDENAS M B. A model for lateral hyporheic flow based on valley slope and channel sinuosity [J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(1): 206-216.
- [17] CARDENAS M B. The effect of river bend morphology on flow and timescales of surface water-groundwater exchange across pointbars [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 362: 134-141.
- [18] BRUNKE M, GONSER T. The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater [J]. *Freshwater Biology*, 1997, 37: 1-33.
- [19] WARD J V, BRETSCHKO G, BRUNKE M, et al. The boundaries of river systems: the metazoan perspective [J]. *Freshwater Biology*, 1988, 40(3): 531-569.
- [20] BRUGGER A, REITNER B, KOLAR I, et al. Seasonal and spatil distribution of dissolved and particulate organic carbon and bacteria in the bank of an impounding reservoir on the Enns River, Austria [J]. *Freshwater Biology*, 2001, 46: 997-1016.
- [21] STOREY R G, HOWARD K W F, WILLIAMS D D. Factors controlling riffle-scale hyporheic exchange flows and their seasonal changes in a gaining stream: a three-dimensional groundwater flow model [J]. *Water Resources Research*, 2003, 39(2): 180-189.
- [22] BUTTURINI A, BERNAL S, FRANCESC S. Modeling storm events to investigate the influence of the stream-catchment interface zone on stream biogeochemistry [J]. *Water Resources Research*, 2005, 41(8): 2643-2647.
- [23] CHOU P Y, WYSEURE G. Hydrodynamic dispersion characteristics of lateral inflow into a river tested by a laboratory model [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, 13: 217-228.
- [24] OSENBRÜCK K, WÖHLING T, LEMKE D, et al. Assessing hyporheic exchange and associated travel times by hydraulic, chemical, and isotopic monitoring at the Steinlach Test Site, Germany [J]. *Environ Earth Sci*, 2013, 69(2): 359-372.
- [25] 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 gyporheic zone of stream ecology [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 956-964. (in Chinese))
- [26] 高敏, 朱伟, 董婵, 等. 垂直流人工湿地中污染物昼夜及沿程变化规律 [J]. *水资源保护*, 2010, 26(2): 49-52. (GAO Min, ZHU Wei, DONG Chan, et al. Diurnal and spatial variations of pollutants in vertical flow constructed wetland [J]. *Water Resources Protection*, 2010, 26(2): 49-52. (in Chinese))
- [27] 林俊强, 严忠民, 夏继红. 微弯河岸沿线扰动压强分布特性试验 [J]. *水科学进展*, 2013, 24(6): 855-860. (LIN Junqiang, YAN Zhongmin, XIA Jihong. Laboratory experiments on pressure distribution along sinuous riverbanks [J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(6): 855-860. (in Chinese))
- [28] ZHOU Pengpeng, LI Guomin, LU Yaodong, et al. Numerical modeling of the effects of beach slope on water-table fluctuation in the unconfined aquifer of Donghai Island, China [J]. *Hydrogeology Journal*, 2014, 22(2): 383-396.
- [29] 朱蓓, 赵坚, 陈孝兵, 等. 水库运行对下游和岸潜流带水位-温度影响研究 [J]. *水利学报*, 2015, 46(11): 1337-1343. (ZHU Bei, ZHAO Jian, CHEN Xiaobing, et al. Impact of reservoir operation on the water stage and temperature in the downstream riparian hyporheic zone [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(11): 1337-1343. (in Chinese))
- [30] ARNTZEN E V, GEIST D R, DRESEL P E. Effects of fluctuating river flow on groundwater/surface water mixing in the hyporheic zone of a regulated, large cobble bed river [J]. *River Research and Applications*, 2006, 22(8): 937-946.
- [31] CARDENAS M B. Stream-aquifer interactions and hyporheic exchange in gaining and losing sinuous streams [J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(6): 267-272.
- [32] 夏继红, 林俊强, 陈永明, 等. 国外河流潜流层研究的发展过程及研究方法 [J]. *水利水电科技进展*, 2013, 33(4): 73-77. (XIA Jihong, LIN Junqiang, CHENG Yongming, et al. Advancing processes and methods of abroad research on hyporheic zone [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2013, 33(4): 73-77. (in Chinese))
- [33] SAWYER A H, CARDENAS M B. Hyporheic flow and residence time distributions in heterogeneous cross-bedded

- sediment[J]. *Water Resources Research*, 2009, 45 (8), 2263-2289.
- [34] RASSAM D W, FELLOWS C S, HAYR R D, et al. The hydrology of riparian buffer zones: two case studies in an ephemeral and a perennial stream [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 325: 308-324.
- [35] ANDREW J B, STUART F, PIERRE M, et al. The functional significance of the hyporheic zone in streams and rivers [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1998, 29(29): 59-81.
- [36] BURT T B, PINAY G, MATHESON F E, et al. Water table fluctuations in the riparian zone: comparative results from a pan-European experiment [J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 265: 129-148.
- [37] KRAUSE S, BRONSTERT A, ZEHE E. Groundwater-surface water interactions in a north German lowland floodplain: implications for the river discharge dynamics and riparian water balance [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 347: 404-417.
- [38] STEWART M D, BATES P D, ANDERSON M G, et al. Modelling floods in hydrologically complex lowland river reaches [J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 223: 85-106.
- [39] KIEL B A, CARDENAS M B. Lateral hyporheic exchange throughout the Mississippi River network [J]. *Nature Geoscience*, 2014, 7(6): 413-417.
- [40] van MEERVELD H J, SEIBERT J, PETERS N E. Hillslope-riparian-stream connectivity and flow directions at the Panola Mountain Research Watershed [J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29 (16): 3556-3574.
- [41] PAILLEX A, CASTELLA E, PSEZ E, et al. Testing predictions of changes in alien and native macroinvertebrate communities and their interaction after the restoration of a large river floodplain (French Rhône) [J]. *Freshwater Biology*, 2015, 60(6): 1162-1175.
- [42] KASAHARA T, HILL A R. Instream restoration: its effects on lateral stream-subsurface water exchange in urban and agricultural streams in southern Ontario [J]. *River Research and Applications*, 2007, 23(8): 801-814.
- [43] SAWYER A H, CARDENAS M B, BOMAR A, et al. Impact of dam operations on hyporheic exchange in the riparian zone of a regulated river [J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(15): 2129-2137.
- [44] 饶良懿, 崔建国. 河岸植被缓冲带生态水文功能与进展 [J]. *中国水土保持科学*, 2008, 6(4): 121-128. (RAO Liangyi, CUI Jianguo. Research advances on the eco-hydrological functions of riparian buffer [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(4): 121-128. (in Chinese))
- [45] 曾立雄, 黄志霖, 肖文发, 等. 河岸植被缓冲带的功能及其设计与管理 [J]. *林业科学*, 2010, 46(2): 128-138. (ZENG Lixiong, HUANG Zhilin, XIAO Wenfa, et al. Function, design and management of riparian vegetation buffer strips [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, 46(2): 128-138. (in Chinese))
- [46] SAWYER A H. Enhanced removal of groundwater-borne nitrate in heterogeneous aquatic sediments [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(2): 403-410.
- [47] 周艳丽, 余宗莲, 孙文杰. 水平潜流人工湿地脱氮除磷研究进展 [J]. *水资源保护*, 2011, 27(2): 42-48. (ZHOU Yanli, SHE Zonglian, SUN Wenjie. Progress of research on removal of nitrogen and phosphorus in horizontal subsurface flow constructed wetlands [J]. *Water Resources Protection*, 2011, 27(2): 42-48. (in Chinese))
- [48] WELCH C, HARRINGTON G A, LEBLANC M, et al. Relative rates of solute and pressure propagation into heterogeneous alluvial aquifers following river flow events [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 511: 891-903.
- [49] BERNAL S, LUPON A, RIBOT M, et al. Riparian and in-stream controls on nutrient concentrations and fluxes in a headwater forested stream [J]. *Biogeosciences*, 2015, 12(6): 1941-1954.
- [50] REN Jianhong, PACKMAN A I. Coupled stream-subsurface exchange of colloidal hematite and dissolved zinc, copper, and phosphate [J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, 39(17): 6387-6394.
- [51] 杨小全, 金光球, 李凌, 等. 河流潜流带中胶体迁移的研究进展 [J]. *水利水电科技进展*, 2010, 30(6): 78-83. (YANG Xiaoquan, JIN Guangqiu, LI Ling, et al. Advances in researches on colloid transport in hyporheic zone [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2010, 30(6): 78-83. (in Chinese))
- [52] GRABS T, BISHOP K, LAUDON H, et al. Riparian zone hydrology and soil water total organic carbon (TOC): implications for spatial variability and upscaling of lateral riparian TOC exports [J]. *Biogeosciences*, 2012, 9(10): 3901-3916.
- [53] BESACIER M A L, PAILLEX A, CASTELLA E. Short-term impacts of lateral hydrological connectivity restoration on aquatic macroinvertebrates [J]. *River Research and Applications*, 2014, 30(5): 557-570.
- [54] NATAŠA M, TATJANA S, UROŠ Ž, et al. The role of river flow dynamics and food availability in structuring hyporheic microcrustacean assemblages: a reach scale study [J]. *Fundamental and Applied Limnology*, 2012, 180(4): 335-349.
- [55] 郭二辉, 孙然好, 陈利顶. 河岸带植被缓冲带主要生态服务功能研究的现状与展望 [J]. *生态学杂志*, 2011, 30(8): 1830-1837. (GUO Erhui, SUN Ranhao, CHEN Liding. Main ecological service functions in riparian vegetation buffer zone: research progress and prospects [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(8): 1830-1837. (in Chinese))

(收稿日期: 2016-01-19 编辑: 骆超)