

河岸带潜流层动态过程与生态修复

夏继红^{1,2}, 陈永明³, 王为木¹, 韩玉玲³, 刘海洋¹, 胡玲³

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098;

2. National Center for Computational Hydroscience and Engineering, the University of Mississippi, MS Oxford 38655 USA;

3. 浙江省河道管理总站, 浙江 杭州 310009)

摘要: 河岸带潜流层是河岸带内地表水与地下水相互作用的生态交错带, 在水文地理学、生态学、环境学上含义不尽相同。河岸带潜流层具有复杂的垂向、横向、纵向结构特征, 其边缘效应显著, 表现为泥沙、水流、生物、环境化学因子之间的复杂动态过程, 主要包括水动力动态过程、生态学过程、溶质循环与化学过程等。水动力动态过程是驱动条件, 氧气浓度是生态过程、溶质循环和化学过程的决定性因素。在各动态过程的驱动下, 河岸带潜流层具有调蓄洪水、削减污染、净化缓冲环境和提供适宜栖息地等功能。针对河岸带潜流层功能退化的问题, 需开展健康诊断, 明确致病机理, 实施适宜的生态修复。未来中国在开展河岸带潜流层研究时, 应根据中国河岸带特点, 采用示踪试验、数值模拟等方法, 集成GIS等现代技术手段, 研究多尺度下, 水文条件、地形变化、土壤渗透系数、河岸带建设方式、植被分布等对河岸带潜流层水文、热传导、生化、生态等的影响机制, 准确界定河岸带潜流层区域范围, 制定适宜的生态修复策略。

关键词: 河岸带; 潜流; 潜流生物; 边缘效应; 生态修复

中图分类号: TV122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2013)04-0589-09

“潜流”是指地表水与地下水相互作用形成的水流, 起源于对河床以下生物分布特征的认识, 最早由Orghidan于1959年提出^[1]。近50多年来, 人们主要关注了河床内的潜流交换, 重点研究了河床潜流垂向交换机理、主要功能、溶质循环等。而潜流交换不仅仅会发生于河床以下, 在河岸带和洪泛平原区域也同样会发生潜流交换^[2-3]。由于河岸带系统内地表水与地下水间的交界面-河岸带潜流层位置和结构的特殊性, 它在潜流交换机理、生态学过程、物质运移等方面均与河床潜流层有所不同。它是河岸带复杂边缘效应的重要体现区^[4-5], 对河流和地下水具有重要的保护功能, 尤其是能够有效调蓄洪水、削减污染、保护水土环境^[5-6]。正是由于河岸带潜流层独特的边缘效应和丰富的功能, 它正在成为多个学科研究的热点^[7]。目前对河岸带潜流层的研究主要是在河床潜流层研究过程中将其作为河床区域侧向边界来考虑, 主要研究了河床与河岸的水文连接性, 比较了交换通量、水头等参数随离岸距离与河岸土壤渗透系数的不同而发生的变化^[8-9]。但是专门针对河岸带潜流层的研究却不多见, 对河岸带潜流层结构特征、潜流运动、生物分布、溶质变化、退化机制以及如何进行修复等不太清楚。这在一定程度上影响了河岸带生态修复措施的全面性。本文将借鉴现有有关河床潜流层研究成果, 界定河岸带潜流层的概念, 分析其结构特征和主要动态过程, 探讨生态修复思路 and 措施, 以期能为河岸带潜流层研究和河岸带生态保护提供借鉴。

1 河岸带潜流层结构特征

1.1 潜流概念

“潜流”(Hyporheic)一词起源于希腊语“Hypo-”(“下面”)和“rhe-”(“水流”), 是指地表水与地下

收稿日期: 2012-08-07; 网络出版时间: 2013-04-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/KCMS/detail/32.1309.P.20130410.1725.018.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40871050); 浙江省水利科技重大项目(RA1104)

作者简介: 夏继红(1970-), 男, 江苏如皋人, 副教授, 博士, 主要从事生态河岸带及河流生态修复研究。

E-mail: syjxia@hhu.edu.cn

水相互交换的水流,发生潜流交换的区域称为潜流带^[10-11]。河岸带与潜流带存在一定的交叉区域,这一交叉区称为河岸带潜流层。河岸带潜流层是指河岸带内地表水、地下水相互交换的过渡区域,它是河岸带的下边缘。该边缘区内存在着复杂的地表水、地下水、土壤、生物、溶质之间的相互作用。由于不同学科所关注的重点不同,对河岸带潜流层有不同的理解和观点。从水文地理学上看,河岸带潜流层是指由于地形、土壤、覆盖物等条件变化引起水压力梯度而形成的地表水与地下水的交换区域,该区域内具有独特的水动力学特性。从生态学上看,在特殊水动力条件的驱动下,河岸带潜流层的温度、含氧量和营养条件为生物生存、繁殖、避难提供了良好的栖息条件^[12]。如,鲑鱼选择河岸带潜流层作为其生活、产卵、孵化的场所^[13]。河岸带潜流层内生活着独特的生物物种,既有临时的、也有永久的、还有两栖的^[14]。所以,生态学上的河岸带潜流层是指存在地下水生物与地表水生物相互过渡的生态交错带。从环境化学上看,当潜流交换发生时,河岸带潜流层内温度、氧气、养分、有机质、矿物质等环境指标会发生变化,从而促使生物的吸收或分解以及物质之间的氧化还原反应发生^[15]。所以,环境化学上的河岸带潜流层是指河岸带内存在一定化学梯度的地表水与地下水交换区域。

1.2 结构特征

(1) 垂向结构 河岸带潜流层垂向结构包括浅层潜流层和深层潜流层,如图1所示。浅层和深层潜流

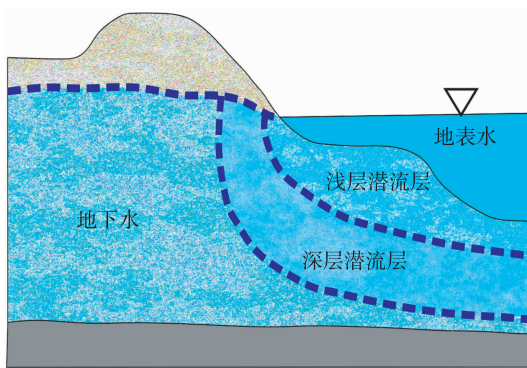


图1 河岸带潜流层垂向结构示意图

Fig. 1 Vertical structure of hyporheic layer

层的界定有3种方法:①水文学方法。潜流层总体区域范围是指地表水含量为10%~98%的区域范围^[16]。因此,可根据潜流层地表水含量的变化来确定浅层和深层。目前还未有明确的划分阈值。②生物学方法。根据含有潜流生物的多少来确定浅层和深层潜流层。92%的无脊椎动物都会出现在浅层潜流层内^[17]。③环境学方法。在水流的相互作用,潜流中溶解氧、有机物浓度、pH值、温度等环境化学指标值存在一定的梯度变化。据此,河岸带潜流层浅层与深层范围也可根据相关环境化学指标值变化来确定,其中温度指标是最常用的^[18],目前还没有具体划定阈值。

(2) 横向、纵向结构 在横断面上,河岸带包括近岸区、浅滩区、岸坡区以及缓冲区4个区域^[5],每个区域位置都可能发生潜流交换。相应地,河岸带潜流层横向结构包括近岸区潜流层、浅滩区潜流层、岸坡区潜流层、缓冲区潜流层4个组成部分,如图2所示,其结构范围可根据潜流侧向流径变化和潜流生物活动空间确定。河岸带潜流层纵向形态与河岸带形态基本保持一致,根据水流进出河岸的区域不同,河岸带潜流层的纵向结构包括出流区和进流区,如图3所示。

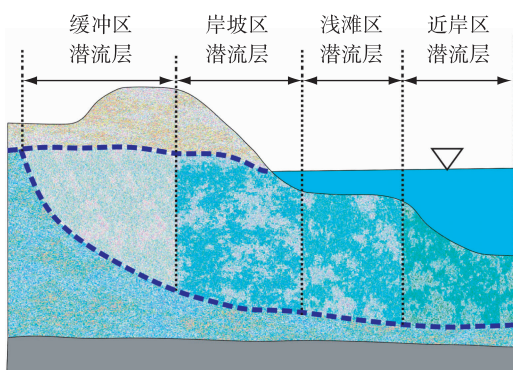


图2 河岸带潜流层横向结构示意图

Fig. 2 Horizontal structure of hyporheic layer

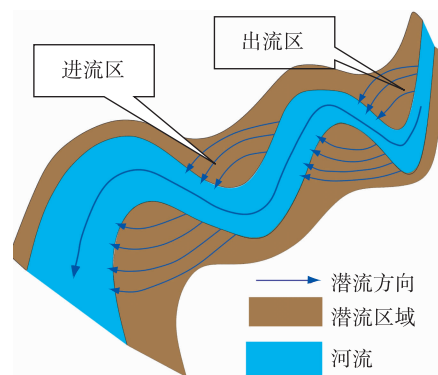


图3 纵向结构及水动力交换过程示意

Fig. 3 Hyporheic exchange in longitudinal direction

2 河岸带潜流层的动态过程

由于河岸带独特的立地条件, 河岸带潜流层内地表水、地下水、土壤、生物、溶质之间存在着复杂的水动力作用、生物作用、物质迁移、化学反应等动态过程, 其中水动力动态过程是其他动态过程的驱动条件。

2.1 水动力动态过程

河岸带潜流层水动力动态过程是指河岸带内地表水-地下水相互作用的动态过程, 其动态过程与河岸带潜流层结构特征密切相关。相应地, 河岸带潜流层水动力动态过程包括纵向动态过程、横向动态过程、垂向动态过程及局部动态过程。① 纵向动态过程。在纵向上, 河岸带总体呈“S”型。当地表水从上游向下游流动时, 凹岸处易出现环流, 凹岸迎水面压力增大, 背水面压力减小, 使部分地表水进入河岸带。流进河岸带的地表水与地下水发生交换, 形成潜流, 潜流在河岸带内向下游运动, 并在下游某一凹岸背水面流出河岸, 进入地表水, 其作用过程如图 3 所示。② 垂向和横向动态过程。在垂向和横向上, 由于河岸边坡地形特征、土壤渗透系数的空间差异性以及水压力的作用, 使地表水会在垂向和横向上进入河岸与地下水发生交换, 形成垂向潜流交换和横向潜流交换, 其作用过程如图 4 所示。③ 局部动态过程。局部地形的变化也会引起浅层潜流交换^[19]。例如, 在河岸局部位置, 由于大型树根、大体积倒伏树干、大块砾石、台阶、河埠头、码头、河岸淘刷、河岸带水生植被丛以及河岸带土壤渗透系数空间差异性等现象的存在, 使河岸带局部区域出现不规则地形, 地表水在该区段内会形成局部环流, 引起水压力梯度, 促使水流流入河岸带, 与地下水交换后流出河岸带, 形成河岸带潜流交换, 如图 5 所示。④ 描述参数。据观测, 近岸区域地下水变化与地表水变化相比, 存在一定的迟滞性, 而且离岸越远, 其迟滞性越弱, 交换量越小, 潜流层深度与交换时间在靠近河岸位置最大^[10]。可见, 交换速率、交换通量、滞留时间、流径(纵向、垂向、横向交换距离)等参数可以有效地定量描述河岸带潜流层水动力动态过程, 这些参数与河岸带的水文条件、地形变化、土壤渗透系数、建筑物、建设方式、植被分布等密切相关, 其影响机制需深入探讨。

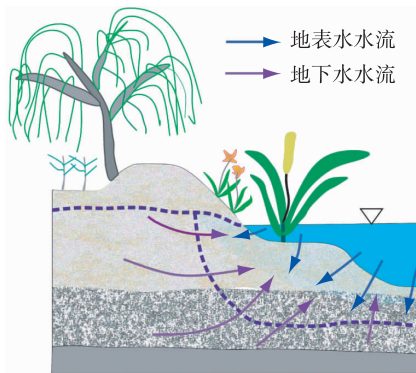


图 4 垂向与横向水动力过程示意

Fig. 4 Hyporheic exchange in vertical and horizontal direction

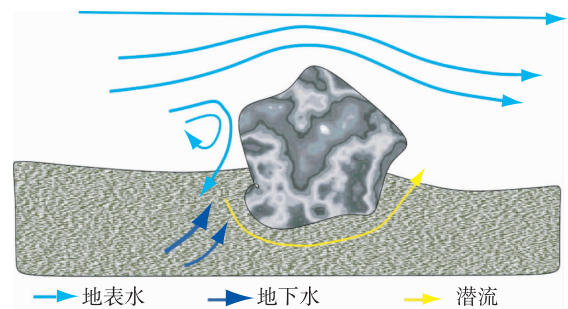


图 5 河岸障碍物位置的潜流交换示意

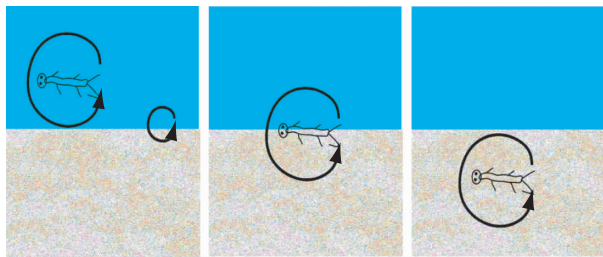
Fig. 5 Hyporheic exchange around lumped obstacle

2.2 生态学过程

河岸带潜流层独特的地理和水动力条件, 为生物生存提供了良好的生存环境, 很多生物选择潜流层作为其避难、栖息和繁殖的场所。它在生物组成、分布、多样性、食物链、新陈代谢等方面与地表水和地下水生态系统有较大差异, 是一个典型的生态交错带^[15]。

(1) 生物类型 该交错带具有较高的生物多样性, 主要生存着微生物、原生生物、无脊椎动物和植被根系。根据生物生长期对地表水的依赖程度, 河岸带潜流层生物也可分为临时性潜流生物、两栖类潜流生物以及永久性潜流生物等类型^[14,20], 如图 6 所示。临时性潜流生物主要是一些蜕变期的昆虫。当蜕变期结束后, 它们会返回地表水。两栖类潜流生物是指既可生活于地表水, 又可生活于地下水的生物。如石蝇类, 它

们能生存于潜流层中一年以上。永久性潜流生物是指整个生命期均生活于潜流层的生物,包括线虫类、蠕虫类、寡毛类、微甲壳类、轮虫类以及其他完全生活于潜流层中的微小底栖类生物^[21]。



(a) 临时性潜流生物 (b) 两栖类潜流生物 (c) 永久性潜流生物

图6 河岸带潜流层生物类型示意

Fig. 6 Types of species in hyporheic layer

减少^[25]。潜流生物的恢复需要一定的时间。Mori等^[26]研究认为无脊椎动物平均密度需要2.5个月左右才能恢复。

(3) 食物链 河岸带潜流层在没有光合作用的条件下,依靠水动力交换过程和植被根系将有机质(颗粒态有机质 POM 和溶解态有机质 DOM)、氧气输运进入潜流层,微生物、原生物、无脊椎动物可直接吸收和分解水体携带的养分和氧气。同时,原生物可以微生物为消费对象,无脊椎动物可以微生物和原生物为消费对象^[15]。这种生物之间的消费关系形成了河岸带潜流层的食物链、食物网。通过食物链和食物网完成物质、能量转化过程^[27]。

(4) 主要影响因素 Siva 和 Williams^[28]研究指出生物的生产率在不同季节差异性较大,春天细菌生产率是夏天的3倍多。总体而言,河岸带潜流层生态过程与水文条件、季节、地形、土壤渗透性、溶解氧浓度、潜在食物源(硝酸盐、溶解碳 DOC、特殊有机质 POM 以及生物膜电子运输系统的活性 ETSA)等密切相关^[12,25],尤其容易受人为干扰的影响。

2.3 溶质循环与化学过程

由于河岸带景观结构和植被分布的异质性,氧气、营养物质、污染物质会随水流、植被根系进入河岸带潜流层,各物质之间以及溶质与水体、土壤和生物之间会发生复杂的循环与化学过程。河岸带潜流层内的主要溶质包括碳、氮、磷。主要生物与化学过程包括稀释、生物根系吸收、微生物吸收、硝化、反硝化、氧化-还原反应等^[29]。溶质随水流进入地下,通过微生物、硝化、反硝化等生化反应,将溶质转化成氧化或还原性物质,进而改变水中溶质的浓度,从而影响地表水和地下水中的化学物质组成和浓度,影响水环境质量。正是由于生物与化学反应,所以河岸带潜流层对碳、氮、磷具有一定的去除率,能够有效净化水质^[30]。河岸带潜流层中的碳主要以溶解态碳 DOC 和有机质(树叶、根系、残枝、碎屑)形式存在,转化过程主要通过生物的吸收完成,并随食物链传递^[31]。本文重点阐述氮和磷的循环和化学过程。

(1) 氮循环和化学过程 氮循环主要通过硝化和反硝化作用实现。其中,反硝化过程是河岸带潜流层发挥去除硝酸盐的主要过程,通过反硝化作用将其转化成 N_2 而释放^[32]。反硝化率与河岸带结构、氧气含量、时间密切相关^[15]。在垂向上,不同深度硝酸盐含量不同,越向下层,潜硝酸盐浓度和反硝化率越低,浅层硝酸盐浓度为深层的10%~60%^[33]。在不同洪水期,洪水淹没后的河岸带潜流层反硝化率有所增加,而且在有植被条件下,潜流层反硝化率也会增加^[34]。滞留时间也是影响反硝化率的重要因子^[35]。Zarnetske等^[32]研究发现 DO 和 DOC 的去除率和硝化反应率在较短的时间内就会达到最大,而反硝化率要在较长的滞留时间内才能达到最大。

(2) 磷循环和化学过程 河岸带潜流层中磷含量较低,主要以溶解态磷和颗粒态磷存在。在水流作用、河岸侵蚀、淤积、氧化还原反应的作用下,当氧气浓度较高时, PO_4^- 被释放,形成溶解性磷进入水体。在氧气浓度较低时,矿物质条件决定着磷的化学过程,沙砾中的铁、铝矿物容易与磷发生反应,厌氧生物将矿

化有机磷转化为可溶性磷,为生物所吸收,从而有效降低磷的浓度^[36]。河岸带潜流层内磷的衰减能力与土壤特征、水动力学特性、植被分布等密切相关,目前对其影响和作用的过程还不完全清楚。

3 河岸带潜流层生态修复

3.1 生态修复目标与步骤

河岸带潜流层的结构特征与动态过程决定了河岸带潜流层具有丰富的保护功能,为生物建立了一个独特的栖息环境,能够有效调蓄洪水、净化水质,特别是能够有效控制面源污染,是河流系统和地下水系统的重要保护屏障和生物迁徙廊道。由于受洪泛平原改造、土地开垦、河岸带开发、大坝建设、渠道化工程、砍伐森林等人类活动,以及洪灾、泥石流等自然灾害的影响,河流、河岸带以及潜流层功能有所减弱^[37]。近20年来,人们正努力改善受损河流系统的生态条件,河岸带作为河流系统的重要组成部分,也一直是河道建设和生态修复的重要内容之一。尽管一些河岸带修复措施具有促进潜流交换的潜在功能,但在建设和修复中往往忽略了潜流层的功效,也未考虑河岸带修复措施对潜流层的影响^[38]。这使得修复措施并未能达到预期效果。因此,为了有效保护地表水系统与地下水系统健康,必须实施河岸带潜流层生态修复,准确界定河岸带潜流层范围,保证河岸带适宜的宽度^[39-40]。河岸带潜流层生态修复是根据潜流层健康状况和潜流作用机理,有效组合河岸带元素,选择适宜的措施,促进潜流交换,充分发挥河岸带潜流层的主要功能,从而有效保护河流系统和地下水系统的动态平衡和健康发展。

河岸带潜流带生态修复根本目标是恢复河岸带潜流层水流运动的连通性和生物生境的连通性,包括纵向连通性、横向连通性、垂向连通性。修复的主要步骤是:首先,认识河岸带潜流层的价值和功能,开展河岸带潜流层健康诊断;其次,掌握主要控制因子和致病机理,制定详细生态修复目标;最后,进行生态修复设计,提出适宜的生态修复措施,并加以实施。

3.2 健康现状诊断

Boulton等^[3]、吴健等^[41]指出潜流层健康评价是河流生态修复的重要工作之一。河岸带潜流层健康诊断是针对河岸带潜流层的特点,综合分析影响其健康状况的内源性因素和外源性因素,通过建立科学的诊断指标体系,应用合适的诊断数学模型,评估潜流层的健康现状,诊断存在的病症,并进一步定量分析引起病症的主要病因。只有在定量掌握和了解了潜流层健康现状和存在问题后,才能有针对性地提出有效的生态修复措施。因此,科学诊断河岸带潜流层健康状况是河岸带潜流层生态修复的基础性工作。

3.3 致病机理分析

河岸带潜流层健康受到众多因素的影响,不同因素其作用对象和影响程度不同,有的改变了水文交换特性,有的直接污染水体环境,有的破坏了生物多样性^[42]。例如,河岸带的弯曲程度、植被分布方式、砾石粒径大小、结构形式、建设材料及建筑物等因子对潜流交换、生物分布、物质运输等影响方式和影响程度差别较大。根据健康诊断确定的主要控制因子,通过野外监测、室内试验和数值模拟,进一步深入探索主要控制因子对垂向、横向和纵向上的潜流流径、交换范围、交换强度、滞留时间、溶质运移、生物多样性等方面的影响,明确主要控制因子的致病机理,从而为实施合理修复措施提供理论依据。

3.4 主要生态修复措施

在健康诊断和致病机理分析的基础上,选择适宜措施,提高地表水-地下水间水力梯度、土壤水力传导性,促进潜流交换,提供养分,改善生物栖息条件。主要措施有地形塑造、自然植被和适宜硬质措施。

(1) 地形塑造措施 通过在河岸带内设置浅滩、原木坎、台阶、河湾等措施,有效塑造河岸带自然弯曲、起伏的地形,使地表水、地下水间形成水力梯度,促进潜流交换的发生。这些措施既可以保证河岸带稳定性,又可以增强河岸带的连通性,拦截枯枝、树叶等有机质,增加碳源和氧化还原反应梯度,充分发挥河岸带潜流层的功能,还可以提高河岸带自然景观价值。在实际应用中,应根据具体位置特点,适当选择,并控制好相关参数,使其最大限度地促进潜流交换的形成。

(2) 自然植被措施 在河岸带水边缘区栽种适宜的植被, 或者铺设安放树干或树根等自然植被措施, 利用根系、秆茎与土壤的相互作用, 使地表与地下保持连通, 保证水流、氧气、溶质和生物迁徙的通畅性, 促进潜流交换的发生。这一措施可以有效提高河岸带稳定性, 为水体形成树荫, 降低水温, 为生物提供生物栖息地, 改善景观效果。在实际应用中, 应考虑当地条件, 选择适宜的植被物种、布置方式、尺寸大小。

(3) 适宜硬质措施 一些容易发生淘刷、崩塌和稳定性较差的河岸段, 保证河岸带稳定性是生态修复的首要要求。因此, 必须采取适宜的硬质化措施, 在保证结构稳定的基础上, 保证潜流交换的通畅。主要措施包括大块砾石、格宾网石笼、生态混凝土、三维植被网、镂空式预制块、生态袋等。这些措施在保证河岸带结构稳定的同时, 还为植被生长提供有利条件, 克服了全坡面封闭式硬质化措施的弊端, 使河岸带地表和地下之间保持了一定的连通性, 有利于促使潜流交换过程的完成, 保证生物活动和物质运移通道的通畅性。

4 结论与讨论

河岸带潜流层是河岸带的下边缘, 是地表水与地下水相互作用的区域, 具有独特的垂向、横向、纵向结构特征, 这一特征决定了河岸带潜流层具有显著的边缘效应, 尤其是潜流交换不仅存在垂向和纵向交换, 还存在较强的横向交换。正是由于横向潜流运动的存在, 部分农业面源污染在水动力作用下进入潜流层, 在物理与生化过程的作用下, 污染物会有一定程度的削减, 从而可有效保护地表水和地下水水环境。可见潜流的水动力学过程是生态过程和化学过程的驱动条件, 其中潜流滞留时间、交换率、交换通量等水文参数对潜流层功能的发挥起着主要控制作用。因此, 在实施河岸带潜流层生态修复前, 须科学诊断其健康现状, 定量掌握各参数的变化和影响机制, 把握主要致病因子, 进而制定适宜措施和修复计划。中国河岸带类型众多, 结构型式多样, 建设方式复杂。因此, 中国在开展河岸带潜流层研究、建设和管理中, 应根据河岸带特点, 注重以下问题探讨。

(1) 由于河岸带的物理结构与河道水流模式之间的相互作用决定了水文滞留时间, 极大地控制着溶质输运和在不同栖息地以及潜流层之间的交换。尽管在一些文献中介绍了河床地形、河道型式、水文迟滞、水质以及河内栖息地之间的联系, 但是河岸带特性、河岸建筑物、建设方式、植被分布等对潜流滞留时间、交换速率、交换通量等水动力参数的影响还需深入探讨。

(2) 河岸带潜流层在生物组成上, 除了存在潜流层动物, 还存在植被的根系, 在独特水动力过程的作用下, 其生态过程、化学过程较为复杂。在参照河床潜流层研究成果的基础上, 深入研究不同尺度下栖息地特点、养分生境、新陈代谢、生物多样性、环境化学指标等的变化规律, 特别需对无脊椎动物群落、有机质处理、养分流动、大型植被的生态系统驱动过程、时空尺度活动范围和相互关系开展研究。由于人为扰动是引起河岸带潜流层功能退化的主要原因, 因此, 深入探讨不同人为扰动对生物、有机质、污染物等动态过程的影响机理, 对河流生态修复具有十分重要的意义。

(3) 河岸带潜流层对维护河流与地下水系统具有重要的功能, 在河岸带管理和建设中, 首先需认识到河岸带潜流层的价值, 其次需结合当地水文、生态、环境和社会经济要求, 明确河岸带潜流层健康的概念和定量衡量标准, 准确界定河岸带潜流层区域范围, 考虑具有自我过滤清洁的措施实施生态修复, 尤其需考虑河岸带潜流层对面源污染的作用机理和有效修复措施。

(4) 河岸带潜流层涉及到多因素、多尺度。在研究、建设和管理中, 可以温度、稳定同位素、氯化物、X射线造影剂、人造甜味剂等作为示踪剂进行野外监测和室内试验, 耦合水动力学、生态学、环境学等数学模型进行数值模拟, 集成数字仿真、GIS、网络等现代技术, 实现对河岸带潜流层多变量、多时空尺度耦合问题的准确分析。

致谢: 衷心感谢美国密西西比大学国家水科学计算与工程中心提供了良好的研究条件和资源, 衷心感谢 Weiming Wu 教授、Mustafa Altinakar 教授、Sam S Y Wang 教授、Zhangping Wei 博士生等给予的帮助。

参考文献:

- [1] MARMONIER P, ARCHAMBAUD G, BELAIDI N, et al. The role of organisms in hyporheic processes: Gaps in current knowledge, needs for future research and applications[J]. *International Journal of Limnology*, 2012, 48(3): 253-266.
- [2] BUTTURINI A, BERNAL S, SABATER S, et al. The influence of riparian-hyporheic zone on the hydrological responses in an intermittent stream[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2002, 6(3): 515-525.
- [3] 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.
- [4] 滕彦国,左锐,王金生,等. 区域地下水演化的地球化学研究进展[J]. *水科学进展*, 2010, 21(1): 127-136. (TENG Yanguo, ZUO Rui, WANG Jinsheng, et al. Progress in geochemistry of regional groundwater evolution[J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(1): 127-136. (in Chinese))
- [5] 夏继红,林俊强,姚莉,等. 河岸带的边缘结构特征及边缘效应[J]. *河海大学学报:自然科学版*, 2010, 38(2): 265-269. (XIA Jihong, LIN Junqiang, YAO Li, et al. Edge structure and edge effect of riparian zones[J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2010, 38(2): 265-269. (in Chinese))
- [6] 钱进,王超,王沛芳,等. 河湖滨岸缓冲带净污机理及适宜宽度研究进展[J]. *水科学进展*, 2009; 20(1): 139-144. (QIAN Jin, WANG Chao, WANG Peifang, et al. Research progresses in purification mechanism and fitting width of riparian buffer strip[J]. *Advances in Water Science*, 2009; 20(1): 139-144. (in Chinese))
- [7] KRAUSE S, HANNAH D M, FLECKENSTEIN J H, et al. Inter-disciplinary perspectives on processes in the hyporheic zone[J]. *Ecohydrology*, 2011, 4(4): 481-499.
- [8] 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.
- [9] GERECHT K E, CARDENAS M B, GUSWA A J, et al. Dynamics of hyporheic flow and heat transport across a bed-to-bank continuum in a large regulated river[J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(3): W03524.
- [10] 滕彦国,左锐,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 functions[J]. *Earth and Environment*, 2007, 35(1): 1-8. (in Chinese))
- [11] 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.
- [12] Dole-Olivier M J. The hyporheic refuge hypothesis reconsidered: A review of hydrological aspects[J]. *Marine and Freshwater Research*, 2011, 62(11): 1281-1302.
- [13] ROBERTSON A L, WOOD P J. Ecology of the hyporheic zone: Origins, current knowledge and future directions[J]. *Fundamental Application Limnology*, 2010, 176(4): 279-289.
- [14] 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): 133-139. (YUAN Xingzhong, LUO Guyuan. A brief review for ecological studies on hyporheic zone of stream ecosystem[J]. *Acta Ecologica SINICA*, 2003, 23(5): 133-139. (in Chinese))
- [15] WILLIAMS D D, FEBRIA C M, WONG J C Y. Ecotonal and other properties of the hyporheic zone[J]. *Fundamental and Applied Limnology*, 2010, 176(4): 349-364.
- [16] 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))
- [17] JAMES P D. The hyporheic zone of Scottish rivers: Its ecology, function and importance[D]. Stirling: University of Stirling, 2011: 9.
- [18] NARANJO R C, NISWONGE R G, STONE M, et al. The use of multiobjective calibration and regional sensitivity analysis in simulating hyporheic exchange[J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(1): W01538.
- [19] STONEDAHL S H, HARVEY J W, WÖRMAN A, et al. A multiscale model for integrating hyporheic exchange from ripples to meanders[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(12): W12539.
- [20] BOULTON A J. Hyporheic rehabilitation in rivers: Restoring vertical connectivity[J]. *Freshwater Biology*, 2007, 52(4):

- 632-650.
- [21] HANCOCK P J, BOULTON A J, HUMPHREYS W F. Aquifers and hyporheic zones: Towards an ecological understanding of groundwater[J]. *Hydrogeology Journal*, 2005, 13(1): 98-111.
- [22] BURIÁNKOVÁ I, BRABLCOVÁ L, MACH V, et al. Methanogens and methanotrophs distribution in the hyporheic sediments of a small lowland stream[J]. *Fundamental and Applied Limnology*, 2012, 181(2): 87-102.
- [23] STANFORD J A, LORANG M S, HAUER F R. The shifting habitat mosaic of river ecosystems[J]. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Limnologie*, 2005, 29(1): 123-136.
- [24] DATRY T. Benthic and hyporheic invertebrate assemblages along a flow intermittence gradient: Effects of duration of dry events [J]. *Freshwater Biology*, 2012, 57(3): 563-574.
- [25] 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.
- [26] MORI N, SIMČIČT, LUKANČIČS, et al. The effect of in-stream gravel extraction in a pre-alpine gravel-bed river on hyporheic invertebrate community[J]. *Hydrobiologia*, 2011, 667(1): 15-30.
- [27] SUDHEEP N M, SRIDHAR K R. Aquatic hyphomycetes in hyporheic freshwater habitats of southwest India[J]. *Limnologia-Ecology and Management of Inland Waters*, 2012, 42(2): 87-94.
- [28] SLIVA L, WILLIAMS D D. Exploration of riffle-scale interactions between abiotic variables and microbial assemblages in the hyporheic zone[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2005, 62(2): 276-290.
- [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]. *Annales de Limnologie-International Journal of Limnology*, 2012, 48(3): 279-287.
- [30] MOLDOVAN O T, LEVEI E, MARIN C, et al. Spatial distribution patterns of the hyporheic invertebrate communities in a polluted river in Romania[J]. *Hydrobiologia*, 2011, 669(1): 63-82.
- [31] GABRIELSEN P J. Hyporheic zone process controls on dissolved organic carbon quality[D]. New Mexico: New Mexico Institute of Mining and Technology, 2012:5.
- [32] 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*, 2011, 116(G1): G01025.
- [33] 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(10): 2021-2033.
- [34] ROLEY S S, TANK J L, WILLIAMS M A. Hydrologic connectivity increases denitrification in the hyporheic zone and restored floodplains of an agricultural stream[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(G3): G00N04.
- [35] MASON S J K, MCGLYNN B L, POOLE G C. Hydrologic response to channel reconfiguration on Silver Bow Creek, Montana[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 438/439: 125-136.
- [36] VERVIER P, BONVALLET-GARAY S, SAUVAGE S, et al. Influence of the hyporheic zone on the phosphorus dynamics of a large gravel-bed river, Garonne River, France[J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(12): 1801-1812.
- [37] HESTER E T, GOOSEFF M N. Moving beyond the banks: Hyporheic restoration is fundamental to restoring ecological services and functions of streams[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(5): 1521-1525.
- [38] WARD A S, GOOSEFF M N, JOHNSON P A. How can subsurface modifications to hydraulic conductivity be designed as stream restoration structures? Analysis of Vaux's conceptual models to enhance hyporheic exchange [J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(8): W08512.
- [39] 单楠, 阮晓红, 冯杰. 水生态屏障适宜宽度界定研究进展[J]. *水科学进展*, 2012, 23(4): 581-589. (SHAN Nan, RUAN Xiaohong, FENG Jie. Research advances in optimized design of water ecological shelter zones width[J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(4): 581-589. (in Chinese))
- [40] HESTER E T, GOOSEFF M N. Hyporheic restoration in streams and rivers [J]. *Geophysical Monograph Series*, 2011, 194: 167-187.
- [41] 吴健, 黄沈发, 唐浩, 等. 河流潜流带的生态系统健康研究进展[J]. *水资源保护*, 2006, 22(5): 5-8. (WU Jian, HUANG Shenfa, TANG Hao, et al. Review of research on ecosystem health in riverine phreatic zones[J]. *Water Resources Protection*, 2006, 22

(5):5-8. (in Chinese))

[42] KASAHARA T, DATRY T, MUTZ M, et al. Treating causes not symptoms: Restoration of surface-groundwater interactions in rivers[J]. *Marine and Freshwater Research*, 2009, 60(9): 976-981.

Dynamic processes and ecological restoration of hyporheic layer in riparian zone*

XIA Jihong^{1,2}, CHEN Yongming³, WANG Weimu¹, HAN Yuling³, LIU Haiyang¹, HU Ling³

(1. *College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China;*

2. *National Center for Computational Hydroscience and Engineering, University of Mississippi, MS Oxford 38655, USA;*

3. *Department of River Management of Zhejiang Province, Hangzhou 310009, China*)

Abstract: Hyporheic layer of riparian zone is an active transition zone and ecotone between river and groundwater in riparian zone, which can be denoted respectively from hydrogeography, ecology and environment. Due to its unique structure properties in vertical, lateral and longitudinal directions, hyporheic layer of riparian zone was characterized to have some edge-effects and dynamic processes, including flow dynamics, ecological and chemical processes, which were driven by interactions among sediments, flow, communities, organic matters, solutes and environmental factors. As the three dynamic processes have affected each other and ecological and chemical processes have depended on flow dynamics driving and oxygen concentration, it has resulted that hyporheic layer in riparian zone could have stored floods and supplied suitable habitats and removed pollution. However, some of these functions were being weakened due to human and natural actions. In order to conserve the ecological balance and keep the sustainable development in riparian zone, it should be necessary to diagnose health status and verify weakening mechanism and practice ecological restoration. In future, according to the complex properties of riparian zones in our countries, it should be very important to investigate the responses of the hydrological, heat transportation, biochemical and ecological mechanisms to variation of hydrology, geomorphology, permeability, vegetation and riparian construction, and quantify the range of hyporheic layer and design the ecological restoration.

Key words: riparian zone; hyporheic; hyporheos; edge effect; ecological restoration

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40871050).