

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2022.06.015

基于连通性恢复的潜流带生态修复研究进展

王龙飞^{1,2}, 王子怡^{1,2}, 李 轶^{1,2}

(1. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098; 2. 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)

摘要: 潜流带是流域生态修复的关键区域之一, 潜流带修复的根本目标是恢复水系间的能量流通、物质传递和信息流动, 即恢复潜流带的连通性。对于潜流带连通性恢复而言, 应统筹考虑水文连通性、生态连通性和功能连通性等多层次的内容。潜流带生态修复相关研究主要基于流体动力学、地质学和生态学等基础理论, 剖析潜流驱动的生物地球化学耦合机制, 研发可促进潜流交换和恢复生物多样性的生态修复技术, 实现潜流带水文条件的改善与生物物种的恢复, 进而达到潜流带生态系统结构和功能综合性修复的目的。本文从潜流带水文连通性、生态连通性和功能连通性等多层次出发, 从潜流带流体动力学性能、介质性能、生物群落组成、食物网结构及环境生态功能等方面, 综述基于生态修复目标的潜流带连通性恢复理论与技术进展, 以实现潜流带生态系统整体稳定性的提升。在未来潜流带生态修复理论与应用研究中, 需发挥多学科交叉的优势, 耦合多组学方法对潜流带生态过程进行微观探索, 系统探究时间和空间尺度上潜流带生态修复过程的演替规律, 进一步构建多因素作用下的潜流带生态修复框架体系。

关键词: 潜流带; 水文连通性; 生态连通性; 功能连通性; 生态修复

中图分类号: P59; P343 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2022)06-1009-12

“潜流”(Hyporheic)一词取自希腊语“Hypo-”(“下面”)和“rhe-”(“水流”), 最早由罗马尼亚动物学家 Orghidan 于 1955 年提出, 他将潜流带定义为发生潜流交换的地表水和地下水的“中间层”区域。美国学者 White^[1]将潜流带的范围定义为地表水和河道之下可渗透的沉积缓冲带、侧向的河岸带和地下水之间的中心位置。中国学者袁兴中等^[2]认为潜流带是河流/湖泊等地表水体和地下水连接的重要组成部分, 该区域有效连通着陆地、地表水体和地下水体的水流、物质和能量的传递。自潜流带概念提出以来, 国内外学者围绕潜流带水文和生态过程开展了长期的研究工作, 研究普遍指出, 为实现潜流带生态修复, 首先需要从水文角度描绘潜流的流动路径。Vaux^[3]在 1968 年建立了基于物理过程的潜流模型; Elliott 等^[4]于 1997 年开始将野外试验和室内数据模拟相结合, 以探究潜流过程与潜流带介质的相互作用。在潜流过程数值模拟研究的基础上, 学者们进一步探讨了潜流交换过程的环境意义和生态功能^[5], 研究认为水文过程和潜流生物活性是决定潜流带生态功能的关键因子^[6]。潜流带具有较长的溶质滞留时间、多样的微生物代谢途径和较强的化学反应速率, 能显著改变地下水与地表水中各类溶质的赋存特性, 对氮、磷等营养盐和痕量污染物质具有优异的自然衰减效应^[7]。

水资源高度开发和城市化进程加剧在一定程度上破坏了河岸、漫滩和湖滨带等生境之间的连接^[8], 使潜流带连通性发生退化, 流域生态功能逐步下降^[9]。中国对流域生态系统保护与治理工作始于 21 世纪初, 2004 年 8 月水利部颁布了《关于水生生态系统保护与修复的若干意见》, 提出了流域水生生态系统保护与修复的要求。自此, 国内研究人员围绕河流地貌特征改善与修复、水文条件改善、水生生境和水生态改善与修复等方向开展了大量基础理论与实践研究, 形成了《河湖水生生态系统保护与修复工程技术导则: SL/T 800—2020》等

收稿日期: 2022-04-14; 网络出版日期: 2022-09-29

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20220928.1328.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52170159); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(B210202054)

作者简介: 王龙飞(1988—), 男, 安徽安庆人, 副教授, 博士, 主要从事水污染控制和水生态修复方面的研究。

E-mail: lfwang@hhu.edu.cn

通信作者: 李轶, E-mail: envly@hhu.edu.cn

行业标准^[10]。流域生态修复要素众多、目标复杂,如何确定生态修复的重点区域和任务是研究关注的重点。作为生物过滤带的重要组成部分,潜流带是流域复杂边缘效应的重要体现区,在改善区域连通性、提升水环境质量和维持流域生态系统稳定中发挥着重要作用^[11]。

潜流带生态功能的恢复是提升流域生态系统稳定性的重要任务之一。国内外学者已经从水环境、水文、水生态等角度解析了潜流带动态连通机理,并提出了潜流带生态修复的技术方案与措施。通常潜流带连通性包含3个层次的概念,具体而言水文连通性是潜流带连通性的基础框架,生态连通性是潜流带连通性的承载形式,功能连通性是潜流带连通性的表现形式。本文将从潜流带水文连通性、生态连通性和功能连通性角度出发,系统性地总结国内外相关领域最新研究动态,展望基于连通性恢复的潜流带生态修复理论与技术进展。

1 潜流带生态修复的内涵

流域生态修复是依据水文学、生态工程学等原理和技术,对受损的流域生态系统和结构进行修复与重构,恢复流域原有的功能价值,使其达到稳定、健康的状态^[12]。中国流域生态修复理论研究与工程实践主要经历了4个阶段:学习国外经验的探索阶段(1998—2001年)、实施实例建设的萌芽阶段(2002—2006年)、全面推进流域生态修复的发展阶段(2007—2015年)以及规范完善阶段(2016年至今)^[10]。尽管中国流域生态修复理论与技术研究已取得了长足进展,但相关工程措施和修复工作中往往忽略了潜流带的功能及作用,也尚未关注已开展的生态修复技术对潜流带功能的影响机制,这些不足将可能影响研究者对流域生态修复效果的全面认知^[13]。因此,在水利高质量发展和河湖生态环境全面复苏的背景下,为有效开展流域治理和保护流域生态功能等工作,应深入开展对潜流带的研究,以期科学制定潜流带区域的生态修复策略提供理论依据。

流域连通性的恢复是维系流域生态功能的重要环节^[14],潜流带在物理结构、化学物质分布和生物群落组成等方面均具有显著的时空变化特征,是流域连通性的重要体现。在长期的研究过程中,学者们强调了连通性在流域生态修复中的重要意义。董哲仁等^[15]提出水系之间的能量流通、物质流动和信息流动要依靠水系的连通性;夏继红等^[16]指出水系连通性程度决定着区域的水文循环和生态循环,潜流带生态修复的根本目标是恢复潜流带水动力、生态、物质迁移转化等动态过程的连通性^[17],从而改善流域生态系统的结构与功能。潜流带连通性恢复应从水文过程、化学过程和生物过程等多角度统筹考虑。水文过程承载着物质流、能量流、信息流和物种流的传递,其连通性是生态连通性恢复的重要驱动力;生态连通性决定物种构建和演替过程,进而影响代谢功能的多样性;功能连通性是水文连通性及生态连通性畅通程度的具体表现。潜流带生态修复的重点是潜流带连通性的恢复,需要统筹考虑水文连通关系和生态连通程度,进而根据不同区域的生物地球化学过程和生态演替过程选择适宜的修复措施^[17],逐步使退化的潜流带生态系统恢复到一定的功能水平。

近年来学者们已围绕潜流带生态修复方向进行了系列基础性研究。图1展示了潜流带区域的三维模型结构^[18]。图2描述了潜流驱动的水文学、生物学、生物地球化学耦合的概念模型^[19],该模型强调潜流带在溶质运输及底栖生物群落构建等过程中起到关键作用。Peralta-Maraver等^[20]从水文学和群落生态学角度探讨了潜流带中营养元素和污染物迁移转化的过程,强调了采用整体的、跨学科的方法对于潜流带研究的重要性。大多有关潜流带生态修复的研究工作重点关注潜流带在营养元素循环、重金属固定和有机污染物场地修复等方面的作用,近年来 Schaper 等^[21]、Posselt 等^[22]开始关注抗生素、内分泌干扰物和活性药物等痕量污染物在潜流带中的去除机制,并探索全球气候变化加剧和极端气候条件增多背景下潜流带功能对潜流带生态修复的影响。

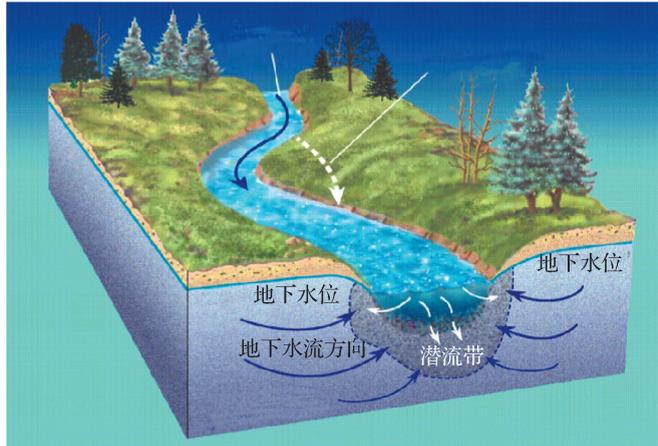
图1 潜流带三维模型结构示意图^[18]

Fig.1 Schematic diagram of hyporheic zone

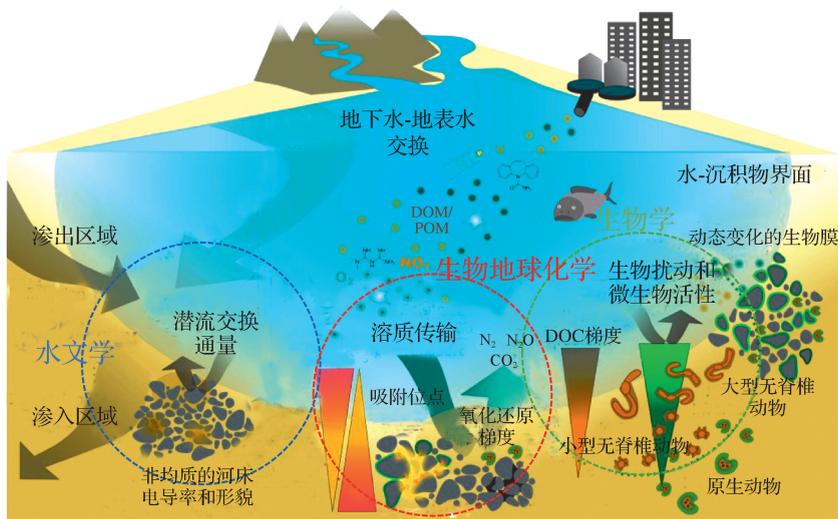
图2 潜流驱动的水文学-生物地球化学-生物学耦合过程概念模型^[19]

Fig.2 Conceptual model of the major hyporheic zone drivers and processes

2 潜流带水文连通性恢复

Hynes^[23]于1975年提出了“潜流水文连接性”的概念, Pringle^[24]在2003年定义了“水文连通性”。结合二者定义, 潜流水文连通性是指潜流带在水文过程的调节下与河流、峡谷、地下水等相连的通畅性程度, 主导着潜流带中物质、能量和生物运移过程的连通^[23-24]。潜流带介质内部的水动力是控制潜流带水文连通性的主要变量, 内容包括水文通量和停留时间等流体动力及潜流带介质特性, 因此可以从流体动力性能恢复和潜流带介质性能恢复角度实现潜流带连通性的恢复。

2.1 通过流体动力性能恢复潜流带连通性

湖泊和水库的潜流带与河流潜流带在流体动力性能方面存在较大差异。由于湖泊和水库水体流动性相对较差, 底部流速接近于零^[25], 其潜流带中以垂直流或倾斜流为主。而河流中潜流交换流分布并不均匀, 上

升流和下降流区交替出现,在时间和空间尺度呈现出一定的斑块性分布特征^[26],导致地表水和地下水之间的流动遵循着复杂的动态流体动力学。潜流量、水力停留时间、流速和流体压力等水文要素都是影响潜流流体动力性能的重要因素。

由水头压力和水力传导率控制的潜流交换通量的方向和大小决定了潜流路径及溶质的运输速率,因此恢复潜流带连通性的前提是潜流交换的量化及对交换机理的探索。为探究潜流交换机理,研究者通常在野外监测和室内试验的基础上,进一步运用数值模拟技术进行研究和分析^[8]。量化潜流交换的主要方法有渗流仪测量法、测压管测量结合达西定律法、示踪剂注射试验法、温度示踪法、环境示踪法以及质量平衡法等^[8],其中温度示踪法因其低污染、易测量、受干扰小等特点受到重视^[27]。水力停留时间、流速和流体压力等也是影响潜流带流体动力学的重要因素。水力停留时间会影响水力梯度和渗透速度,进而控制溶质在潜流带内的输移过程^[28]。Peter等^[29]在暴雨期间监测了工程潜流带中有机污染物的浓度,发现较长的潜流水力停留时间明显增强了污染物衰减速率。河流流速会因潜流交换界面的压力变化而发生变化,水流流速的增加可以促进潜流交换^[30],也会促进潜流带内溶质的迁移运输过程^[31]。Grant等^[32]在*Science*上发文证实湍流影响下的潜流交换会增强边界层的物质输送能力,与湍流相关的流体压力变化也是发生潜流交换的重要因素^[33]。综上所述,可通过调节潜流量、水力停留时间、流速和流体压力等关键水文要素促进潜流交换,实现潜流带水文连通性的恢复。

2.2 通过潜流带介质性能恢复潜流带连通性

由于湖泊和水库流动性较弱,该区域潜流带沉积物常被视为是外源污染的“汇”和上覆水体污染的“源”^[25],因而湖库生态修复的重点任务是对污染的湖库潜流带沉积物进行修复。对于河流潜流带而言,地下水和地表水经过潜流带介质进行混合交换。由于潜流带介质具有复杂的孔隙结构以及分布不均匀的渗透性能^[34],因此可以通过调控介质特性实现河流潜流带水文连通性的恢复。

为研究较小尺度范围内的潜流交换过程,首先需要对潜流带介质颗粒赋存形态进行深入解析。介质特性主要包括介质形态(粒径大小、孔隙度等)和介质迁移速率等^[35]。泥沙渗透性和孔隙度的改变会影响潜流带水力传导率和空间异质性,进而影响潜流交换过程^[36]。潜流带中细粒介质会降低表层渗透性,引起堵塞并破坏潜流路径的连通性和营养元素的循环,进而引起生物活性及群落丰度的下降^[35,37]。在充分解析潜流带介质特性的基础上,研究者常采用数值模拟的方法模拟预测潜流交换过程,识别影响潜流交换过程和提升潜流带连通性的关键物理结构单元,进而通过改善潜流带介质的物理结构实现连通性的恢复。为全面评估流域范围内的潜流交换过程,则需要统筹考虑地貌特征等因素对潜流交换过程的影响^[35]。研究普遍认为河床地形是流域范围内潜流交换过程的主要控制因素。Gomez-Velez等^[38]发现河床形态会促进潜流带的垂向交换,河道弯曲程度则会影响潜流带的横向交换。虽然对河道的弯曲程度进行规划和调整可以改变潜流生物群落特征,增强其除氮能力^[39],但Kiel等^[40]则认为垂向潜流交换更能有效地促进潜流带营养元素循环,因而改造河床形态比增加河道曲度对恢复潜流带水文连通性的效果更好。

3 潜流带生态连通性恢复

Merriam^[41]在1984年提出了生态连通度的概念;May^[42]在2006年将生态连通性定义为物质、信息与能量在各组成部分之间流动和扩散的通畅性程度。潜流带生态连通性既表示潜流生物群落在分布上具有一定的连通度,也要求潜流带生态系统生物学过程具有足够的连通性^[43],因此可以从生物群落组成及其食物网结构方面开展潜流带生态连通性的恢复。

3.1 通过生物群落恢复潜流带连通性

潜流带多孔介质空间结构为潜流生物提供了多样的栖息地,使潜流带成为生物多样性的热点区域。按照生物在生命期内对潜流的依赖程度可将潜流生物分为两栖类潜流生物、临时性潜流生物和永久性潜流生物

3类^[44]。两栖类潜流生物指既可生活在地表水中,又可生活在地下水中的生物;临时性潜流生物主要包括利用潜流带作为避难所来躲避外界扰动的生物以及因生活习性进行迁移的生物,如蜉蝣、鲑鱼等;永久性潜流生物包括由真菌、细菌和古菌组成的生物膜、单细胞真核生物和无脊椎动物^[2]。潜流带中的生物膜是酶活性的关键部位,显著影响着潜流带内溶质运移、生态系统呼吸和初级生产等过程^[45]。

生态群落的组成和多样性是由区域扩散动力学、局部环境和生物相互作用共同决定的。水文连通性和生物连通性之间存在着相互适应和相互调节的耦合关系^[13]。一方面水文连通性是生态连通性的驱动条件和内在动力^[16],另一方面生物变化又会反作用于潜流带介质的孔隙度、有机质含量等理化性质。例如,潜流带生物膜会适应并进化以不断响应河床环境的物理和化学结构变化,同时会通过改变水动力性能改变潜流微环境^[46]。潜流带中大型无脊椎动物、小型动物和原生生物的生命活动(钻行、捕食、筑巢、排泄和躲避危险)会增加潜流路径的距离和复杂度,增大生物膜表面和细菌密度,增强潜流带介质的渗透性、呼吸能力和细菌活动^[47-49]。除动物群落以外,研究发现底栖植被群落特征会影响潜流带的流体动力学性能、潜流带介质性质及物质的输送过程^[50],因此植物修复也是常见的潜流带生态恢复手段^[51-52]。随着多组学技术的发展,已有研究利用多组学方法探究了潜流生物的种类、功能及代谢途径^[49],这些研究将潜流带生物群落关键功能和特征与水文参数有机耦合,探寻潜流带生物多样性及其在生物地球化学循环中的作用,对精确指导潜流带连通性的恢复和流域生态修复设计具有重要意义。

3.2 通过食物网结构恢复潜流带连通性

潜流带生物群落在营养级联过程中起着重要作用^[9]。潜流生物之间的捕食关系形成了潜流带生态系统内独特的食物链和食物网结构,其相互作用关系可能会改变潜流带的理化性质,进而影响潜流交换过程^[46],因此恢复食物网结构也是恢复潜流带生态连通性的重要途径。潜流带食物网结构有别于地表水生态系统的食物网结构,地表水生态系统主要由初级生产力维持植食者的取食^[45]。相比而言,潜流带内透光较差,氧化还原梯度显著且生物多样性更加丰富,形成了以地表水运输进入潜流带的有机质为主要营养来源的食物网结构^[53]。水动力交换和植被根系作用等过程会将有机质和氧气运输进入潜流带中,微生物、原生生物和部分无脊椎生物可直接吸收和分解水体携带的养分和氧气。同时,原生生物以微生物为消费对象,无脊椎动物以微生物和原生动物为消费对象,进而形成了潜流带生态系统的食物链和食物网^[53]。

潜流带生物代谢标度系数可反映潜流带代谢能力和系统生物反应器能力^[54],代谢标度系数(潜流生物身体大小与丰度关系的斜率和截距)常被用作比较和预测潜流带内物质分解速率的综合指数,进而推断潜流带食物网结构的变化情况及原因^[55]。潜流带食物网的结构不仅会受到物理和化学环境的影响,还受到本身自上而下的生物群落控制作用的影响^[56]。Gerke等^[57]利用鲤形鱼类自上而下地控制食物网来缓解河流的富营养化效应,该种群的引入显著增加了潜流带中氧气的供应和潜流通量交换,改善了由于浮游生物过度生长导致的潜流带生物堵塞和缺氧的情况。

4 潜流带功能连通性恢复

潜流带本身具有阻滞污染物和保护生物多样性等丰富的生态功能,然而无论从恢复时间还是从恢复程度上来讲,潜流带通过自身净化进行生态修复的能力是有限的,通常需要依靠工程技术手段,恢复潜流带的水文连通性和生态连通性,进而推动其完成自身系统性的功能连通性修复,最终实现流域生态功能的整体提升。

4.1 潜流带的环境生态功能

(1) 潜流带是具有强大自净能力的“生物反应器”。潜流带内的污染物在氧化还原、吸附与解吸、沉淀与溶解等一系列物理化学过程作用下进行迁移转化^[11]。同时,由于潜流带内介质颗粒的高表面积和生活在潜流带中的高活性生物群落^[54],潜流带被认为是具有天然自净能力的“生物反应器”^[17]。潜流带自净能力较

高的原因主要有如下几点：① 潜流带生物膜中的原核生物具有较强的酶解能力，且具有丰富多样的代谢途径，可实现对多种营养盐的转化和各类污染物的分解代谢^[58]；② 介质内的潜流交换使分解者能充分地进行生化反应；③ 原生生物和无脊椎动物的生命活动(如生物扰动、钻行、捕食和筑巢等)会增强潜流带介质渗透性；④ 生物膜上原生动物的捕食活动会促进潜流交换，增加生物膜的表面积，进一步增强细菌的活性。

(2) 潜流带是重要的生物栖息地和避难所。潜流带是横跨地表-地下水和水生-陆地栖息地的多维过渡带^[19]，为多种生物提供了适宜的生境条件。潜流交换也是底栖介质中鱼类卵和胚胎存活的关键决定因素^[34]，比如鲑鱼会将卵埋在沙砾河床的潜流带中数月。Williams 等^[59]提出了潜流带避难所假说，当流域表面的条件不适宜生存时，大型无脊椎动物等水生生物会向更深的介质中迁移。水生和陆生条件之间的动态交替(如干早期)会导致水生和陆生大型无脊椎动物在潜流生境中的迁移^[60]，足类和片脚类动物会被线虫、环节动物和节肢动物(如蚂蚁)取代，使整个流域生态系统的营养循环过程发生显著变化。

(3) 潜流带是营养元素循环的热点区域。地下水与地表水的相互作用会显著影响进入潜流带介质内的氧化还原物质通量，进而强烈影响营养元素的生物地球化学循环过程^[61]。潜流的水位波动会促进氧化还原过程，刺激异养细菌呼吸，加强碳氮循环^[62-63]。潜流带中的碳组分主要以溶解态碳和有机残骸(树叶、残枝、碎屑等)等形式存在。木质素类物质常通过外源输入过程进入潜流带，强化微生物矿化溶解态碳的能力，进而促进木质素类物质的消耗和氨基糖类物质的累积^[51]。在潜流路径上也存在显著硝酸盐迁移转化现象，浅层潜流带中微生物同化作用和自养反硝化作用是硝酸盐浓度降低的主要机制，而随着深度增加和厌氧区域的形成，异养反硝化作用开始占主导^[61]。潜流带也是硝态氮和溶解性有机氮的“汇”，硝酸盐可能被固定或反硝化，而溶解性有机氮可能被矿化成氨氮，因而潜流带向河流输出的氮以氨氮为主^[63]。

4.2 潜流带生态修复技术进展

近年来，研究者们研发了多种潜流带生态修复技术，以实现潜流生态近自然状态的修复目标。学者们主要在水文学、生态学的研究基础上综合探究潜流带生态修复机制，因此潜流带生态修复技术大多基于水文学和生态学原理，通过潜流带水文连通性和生态连通性的恢复，实现潜流带的功能修复和生态系统整体稳定性提升。

基于水文连通性理论基础的潜流带生态修复技术可分为 2 类。第一类技术以流体动力学理论为基础研发相关生态修复技术，例如，在湖库修复工程中通过曝气等手段将底部和近表层水体进行垂向交换，通过循环水流来混合上、下水层，同时增加下层水体氧浓度，抑制底泥中污染物的释放^[26]。此外可以在河流修复工程中安装水池、台阶和弯道等结构单元以促进地貌稳定，或通过创造斜坡或回水改变潜流关键水文要素，在地表水和地下水之间建立水力梯度以促进潜流交换^[52]。第二类技术主要通过改良潜流带介质结构(如粒径和材质等)实现连通性的恢复，或是通过引入适合河床发育的物质^[49]等手段促进渗透性地下河床形态的发展，从而促进垂直潜流交换。

基于生态连通性理论基础的生态修复技术亦可分为 2 类。第一类技术是基于植物群落的潜流带生态恢复技术^[22]，植物群落优势种的合理搭配可以起到吸收过滤污染物、提供碳源及固定水土等作用；第二类是基于食物网理论的修复技术，主要通过引入特定物种改良潜流带中的食物网结构，从而促进物质循环和能量流动，达到生态修复的目的。在太湖冲山湖滨带生态修复工程中，研究者将成片芦苇荡和挺水、浮水、沉水等植物群落有机组合进行浅水区生态修复，通过合理放养和捕捞水生动物等手段，有效恢复了原生态水生动物群落及食物网结构，并实现了深水区的生态修复^[64]。

工程潜流带是指通过改变河道或地下结构形态而诱导潜流交换的人工过渡区^[65]。工程潜流带技术由于成本较低、修复效果较好^[65]，在潜流带水质改善和生态恢复等方面受到重点关注。工程潜流带技术的主要目标是通过构建潜流带生态系统所需的地貌结构功能，改变河床地形、局部水流流态以及含沙量在空间上的分布^[66]，进而增强潜流交换、控制潜流带生物地球化学过程的类型和速率，实现水文连通性和生态连通性的恢复。《河道建设规范：DB33/T 614—2016》等规范中规定了系列流域生态修复建设中适用的新技术、新

工艺和新材料。不同工程结构特征会导致潜流呈现不同的湍流运动状态,形成不同的压力梯度,进而影响局部区域的水体交换特征^[66]。Mutz等^[67]在水槽模拟试验中发现放置木材会使流动阻力增加,也会促进垂向潜流交换并增加潜流交换的深度;Zhou等^[68]和Dudunake等^[69]研究表明卵石结构也会增加垂向潜流交换,但会降低潜流交换的深度,也会引起局部和河段尺度上潜流停留时间和下降流通量的增加。研究表明卵石结构的变化对潜流产生影响的主要原因是河床形态的变化^[69]。表1总结了近5a来利用不同结构单元工程潜流带进行生态修复的研究进展。

表1 工程潜流带结构单元的研究总结

Table 1 Summary of feature modification studies in engineered hyporheic zones

文献	构建的结构	区域	研究内容	研究方法
文献[70]	最佳尺寸的结构单元	溪流	潜流交换的促进和溶质的去除	示踪剂、现场数据和建模
文献[71]	水槽床身形态特征	水槽	潜流交换流和细菌多样性对微量污染物降解的影响	盐示踪剂和取样
文献[29]	直接构建工程潜流带	野外	对雨水有机污染物的去除	示踪剂和现场取样
文献[72]	水槽床身形态特征	水槽	生物膜生长和床层相互作用对潜流交换的影响	示踪剂和取样
文献[73]	水槽床身形态特征	水槽	细菌多样性和潜流带介质形态对潜流交换的影响	盐示踪剂、水动力模型

5 结论与展望

基于连通性恢复的潜流带修复是流域生态修复的重要组成部分,需要通过多层次的连通性恢复措施来提升流域潜流带生态功能。基于连通性恢复的潜流带生态修复的基础研究和应用研究目前已取得了一定的成果,但仍有较大的发展空间。为了在科学研究和实际应用上更好地指导潜流带连通性生态修复工程的实施,未来的研究应在以下方面进行探索:

(1) 推进多学科交叉融合助力潜流带生态修复基础研究。潜流带生态修复涉及到多学科的理论框架和知识体系,包括生态学、水力学、地貌学、地质学和环境工程学等,从单一学科角度研究往往无法准确刻画潜流带生态过程的全貌,但目前对潜流带生态过程的研究大多缺乏足够的交叉融合。因此,未来的研究需要结合多学科的研究优势,从多角度评估流域潜流带的生态过程和存在问题,进一步结合其在水文连通性、生态连通性或功能连通性角度的问题开展针对性的生态修复。

(2) 耦合多组学方法对潜流带生态过程进行微观探索。限制潜流带生态修复理论发展的重要因素之一是缺乏对潜流生物、尤其是对原生生物和生物膜生态过程的准确认知。随着测序技术的飞速发展,组学技术(包括基因组学、转录组学、蛋白质组学和代谢组学等)已成为揭示潜流带生物群落“隐藏的多样性”的一种极具前景的方法。未来研究可充分发挥多组学研究手段的优势,辅以飞行时间质谱(MALDI-TOF)等新型质谱技术,深入解析潜流带生物地球化学过程和作用机制,为潜流带生态修复技术的研究与应用提供理论依据。

(3) 系统探究时间和空间尺度上潜流带生态修复过程的演替规律。研究指出影响潜流交换的驱动因素众多,但这些因素在时间和空间尺度上如何影响潜流交换仍存在不确定性。此外,潜流生物会受到地表水、地下水水文过程作用频率、持续时间和作用程度的强烈影响,但昼夜节律、季节更替和气候变化等对潜流带生态过程的影响机制也尚未得到充分解析。未来研究需全面描述地表水-地下水界面上物理过程、化学过程和生物过程的时空变异性,以提升人们对潜流带生态系统服务功能的认知。

(4) 构建多因素作用下的潜流带生态修复框架。潜流带生态修复涉及内容多,影响因素复杂,流体动力学、潜流带介质特性、生物群落等因素相互关联、相互作用,针对特定修复目标采取相应技术对潜流带进行

修复时,可能也会对其他过程产生影响,但现阶段研究对这些内容的关注较少。未来研究需科学量化修复技术对潜流带不同功能的影响,例如,在应用河岸种植技术进行潜流带生态修复过程中,应考虑植物类碳源含量和形态特征对污染物衰减和潜流带生态过程的影响,以进一步构建多因素作用下潜流生态修复框架体系。

参考文献:

- [1] WHITE D S. Perspectives on defining and delineating hyporheic zones[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1993, 12(1): 61-69.
- [2] 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 X Z, LUO G Y. A brief review for ecological studies on hyporheic zone of stream ecosystem[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 956-964. (in Chinese))
- [3] VAUX W G. Intra-gravel flow and interchange of water in a streambed[J]. *Fishery Bulletin*, 1968, 66(3): 479-489.
- [4] ELLIOTT A, BROOKS N. Transfer of nonsorbing solutes to a streambed with bed forms: laboratory experiments[J]. *Water Resources Research*, 1997, 33: 137-151.
- [5] BRUNKE M, GONSER T. The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater[J]. *Freshwater Biology*, 1997, 37: 1-33.
- [6] BOULTON A J, FINDLAY S, MAMONIER P, et al. The functional significance of the hyporheic zone in streams and rivers[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1998, 29: 59-81.
- [7] 杜尧, 马腾, 邓娅敏, 等. 潜流带水文-生物地球化学: 原理、方法及其生态意义[J]. *地球科学*, 2017, 42(5): 661-673. (DU Y, MA T, DENG Y M, et al. Hydro-biogeochemistry of hyporheic zone: principles, methods and ecological significance[J]. *Earth Science*, 2017, 42(5): 661-673. (in Chinese))
- [8] 唐家璇, 曾庆慧, 胡鹏, 等. 近 60 年长江流域河流纵向连通性演变特征[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(1): 40-53. (TANG J X, ZENG Q H, HU P, et al. Evolution characteristics of river longitudinal connectivity within Yangtze River basin in the past 60 years[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2022, 20(1): 40-53. (in Chinese))
- [9] HANCOCK P J. Human impacts on the stream-groundwater exchange zone[J]. *Environmental Management*, 2002, 29(6): 763-781.
- [10] 林跃朝, 朱晨东. 我国河流生态治理历程[J]. *中国防汛抗旱*, 2020, 30(11): 73-76. (LIN Y C, ZHU C D. The journey of river ecological management in China[J]. *China Flood & Drought Management*, 2020, 30(11): 73-76. (in Chinese))
- [11] 苏小四, 师亚坤, 董维红, 等. 潜流带生物地球化学特征研究进展[J]. *地球科学与环境学报*, 2019, 41(3): 337-351. (SU X S, SHI Y K, DONG W H, et al. Review on biogeochemical characteristics of hyporheic zone[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2019, 41(3): 337-351. (in Chinese))
- [12] 雷国龙, 季建国, 邸琰茗. 城市河流生态修复技术研究[J]. *水资源开发与管理*, 2022, 8(1): 27-33, 39. (LEI G L, JI J G, DI Y M. Study on urban river ecological restoration technology[J]. *Water Resources Development and Management*, 2022, 8(1): 27-33, 39. (in Chinese))
- [13] 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 J H, CHEN Y M, WANG W M, 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))
- [14] STAMMEL B, FISCHER P, GELHAUS M, et al. Restoration of ecosystem functions and efficiency control: case study of the Danube floodplain between Neuburg and Ingolstadt (Bavaria/Germany) [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(16): 1-14.
- [15] 董哲仁, 王宏涛, 赵进勇, 等. 恢复河湖水系连通性生态调查与规划方法[J]. *水利水电技术*, 2013, 44(11): 8-13, 19. (DONG Z R, WANG H T, ZHAO J Y, et al. Eco-survey and planning method for rehabilitation of connectivity of river-lake water system[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2013, 44(11): 8-13, 19. (in Chinese))

- [16] 夏继红, 陈永明, 周子晔, 等. 河流水系连通性机制及计算方法综述[J]. 水科学进展, 2017, 28(5): 780-787. (XIA J H, CHEN Y M, ZHOU Z Y, et al. Review of mechanism and quantifying methods of river system connectivity[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(5): 780-787. (in Chinese))
- [17] 夏继红, 林俊强, 姚莉, 等. 河岸带的边缘结构特征与边缘效应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(2): 215-219. (XIA J H, LIN J Q, YAO L, et al. Edge structure and edge effect of riparian zones[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2010, 38(2): 215-219. (in Chinese))
- [18] ALLEY W M, HEALY R W, LABAUGH J W, et al. Hydrology-flow and storage in groundwater systems[J]. Science, 2002, 296(5575): 1985-1990.
- [19] LEWANDOWSKI J, ARNON S, BANKS E, et al. Is the hyporheic zone relevant beyond the scientific community[J]. Water, 2019, 11(11): 2230.
- [20] PERALTA-MARAVER I, REISS J, ROBERTSON A L. Interplay of hydrology, community ecology and pollutant attenuation in the hyporheic zone[J]. Science of the Total Environment, 2018, 610/611: 267-275.
- [21] SCHAPER J L, POSSELT M, BOUCHEZ C, et al. Fate of trace organic compounds in the hyporheic zone: influence of retardation, the benthic biolayer, and organic carbon[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(8): 4224-4234.
- [22] POSSELT M, MECHELKE J, RUTERE C, et al. Bacterial diversity controls transformation of wastewater-derived organic contaminants in river-simulating flumes[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(9): 5467-5479.
- [23] HYNES H B N. Groundwater and stream ecology[J]. Hydrobiologia, 1983, 100(1): 93-99.
- [24] PRINGLE C M. What is hydrologic connectivity and why is it ecologically important[J]. Hydrological Processes, 2003, 17(13): 2685-2689.
- [25] 李勇, 张维维, 袁佳慧, 等. 潜流带水流特性及氮素运移转化研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(1): 1-7. (LI Y, ZHANG W W, YUAN J H, et al. Research advances in flow patterns and nitrogen transformation in hyporheic zones[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44(1): 1-7. (in Chinese))
- [26] 任杰, 王帆, 王大博, 等. 潜流交换模型试验与影响因素研究进展[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(5): 28-40. (REN J, WANG F, WANG D B, et al. Review of research on model experiment and influencing factors of hyporheic exchange[J]. Journal of Natural Disasters, 2021, 30(5): 28-40. (in Chinese))
- [27] 任杰, 程嘉强, 杨杰, 等. 潜流交换温度示踪方法研究进展[J]. 水科学进展, 2018, 29(4): 597-606. (REN J, CHENG J Q, YANG J, et al. Advances in temperature tracer method of hyporheic exchange[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(4): 597-606. (in Chinese))
- [28] 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.
- [29] PETER K T, HERZOG S, TIAN Z Y, et al. Evaluating emerging organic contaminant removal in an engineered hyporheic zone using high resolution mass spectrometry[J]. Water Research, 2019, 150: 140-152.
- [30] FRASER B G, WILLIAMS D D. Seasonal boundary dynamics of a groundwater/surface-water ecotone[J]. Ecology, 1998, 79(6): 2019-2031.
- [31] MERILL L, TONJES D J. A review of the hyporheic zone, stream restoration, and means to enhance denitrification[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2014, 44(21): 2337-2379.
- [32] GRANT S B, AZIZIAN M, COOK P, et al. Factoring stream turbulence into global assessments of nitrogen pollution[J]. Science, 2018, 359(6381): 1266-1269.
- [33] PACKMAN A I, SALEHIN M, ZARAMELLA M. Hyporheic exchange with gravel beds: basic hydrodynamic interactions and bedform-induced advective flows[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 130(7): 647-656.
- [34] FISCHER H, KLOEP F, WILZCEK S, et al. A river's liver-microbial processes within the hyporheic zone of a large lowland river[J]. Biogeochemistry, 2005, 76(2): 349-371.
- [35] WARD A S, PAACKMAN A I. Advancing our predictive understanding of river corridor exchange[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews-Water, 2019. 6(1): e1327.

- [36] REHG K J, PACKMAN A I, REN J H. Effects of suspended sediment characteristics and bed sediment transport on streambed clogging[J]. *Hydrological Processes*, 2005, 19(2): 413-427.
- [37] LAUTERS F, LAVANDIER P, LIM P, et al. Influence of hydropeaking on invertebrates and their relationship with fish feeding habits in a Pyrenean River[J]. *Regulated Rivers Research & Management*, 1996, 12(6): 563-573.
- [38] GOMEZ-VELEZ J D, HARVEY J W, CARDENAS M B, et al. Denitrification in the Mississippi River network controlled by flow through river bedforms[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(12): 941-945.
- [39] 李轶, 雷梦婷, 杨楠, 等. 河流微生物生态学的研究进展[J]. *水资源保护*, 2022, 38(1): 190-197. (LI Y, LEI M T, YANG N, et al. Research and prospect on river microbial ecology[J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(1): 190-197. (in Chinese))
- [40] KIEL B A, BAYANI CARDENAS M. Lateral hyporheic exchange throughout the Mississippi River network[J]. *Nature Geoscience*, 2014, 7(6): 413-417.
- [41] MERRIAM G. Connectivity: a fundamental ecological characteristic of landscapes[C]//BRANDT S, AGGER P. *Proceedings of the 1st International Seminar on Methodology in Landscape Ecological Research and Planning*. Roskilde: Roskilde University, 1984.
- [42] MAY R. "Connectivity" in urban rivers: conflict and convergence between ecology and design[J]. *Technology in Society*, 2006, 28(4): 477-488.
- [43] 董哲仁, 孙东亚, 彭静. 河流生态修复理论技术及其应用[J]. *水利水电技术*, 2009, 40(1): 4-9, 28. (DONG Z R, SUN D Y, PENG J. Theories and practices of river eco-restoration[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2009, 40(1): 4-9, 28. (in Chinese))
- [44] BOULTON A J. Hyporheic rehabilitation in rivers: restoring vertical connectivity[J]. *Freshwater Biology*, 2007, 52: 632-650.
- [45] BATTIN T J, BESEMER K, BENGTSSON M M, et al. The ecology and biogeochemistry of stream biofilms[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2016, 14(4): 251-263.
- [46] 金光球, 张中天, 袁海钰, 等. 河流潜流带地表-地下水过程对典型水生生物活动的响应研究进展[J]. *水科学进展*, 2022, 33(5): 835-847. (JIN G Q, ZHANG Z T, YUAN H Y, et al. Advances in the response of surface-subsurface water exchange to activities of typical aquatic organisms in the hyporheic zone of rivers[J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(5): 835-847. (in Chinese))
- [47] PERNECKER B, MAUCHART P, CSABAI Z. What to do if streams go dry? Behaviour of balkan goldenring (*Cordulegaster heros*, Odonata) larvae in a simulated drought experiment in SW Hungary[J]. *Ecological Entomology*, 2020, 45(6): 1457-1465.
- [48] CARIOU M, FRANCOIS C M, VOISIN J, et al. Effects of bioturbation by tubificid worms on biogeochemical processes, bacterial community structure and diversity in heterotrophic wetland sediments [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 795: 148842.
- [49] GRAHAM E B, CRUMP A R, KENNEDY D W, et al. Multi 'omics comparison reveals metabolome biochemistry, not microbiome composition or gene expression, corresponds to elevated biogeochemical function in the hyporheic zone[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 642: 742-753.
- [50] YUAN Y, CHEN X B, CARFENAS M B, et al. Hyporheic exchange driven by submerged rigid vegetation: a modeling study [J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(6): e2019WR026675.
- [51] STEGEN J C, FREDRICKSON J K, WILKINS M J, et al. Groundwater-surface water mixing shifts ecological assembly processes and stimulates organic carbon turnover[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 11237.
- [52] 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.
- [53] FERIS K P, RAMSEY P W, FRAZAR C, et al. Structure and seasonal dynamics of hyporheic zone microbial communities in free-stone rivers of the Western United States[J]. *Microbial Ecology*, 2003, 46(2): 200-215.
- [54] PERALTA-MARAVER I, STUBBINGTON R, ARNON S, et al. The riverine bioreactor: an integrative perspective on biological decomposition of organic matter across riverine habitats[J]. *The Science of the Total Environment*, 2021, 772: 145494.

- [55] PERKINS D M, DURANCE I, EDWARDS F K, et al. Bending the rules: exploitation of allochthonous resources by a top-predator modifies size-abundance scaling in stream food webs[J]. *Ecology Letters*, 2018, 21(12): 1771-1780.
- [56] LIN X J, MCKINLEY J, RESCH C T, et al. Spatial and temporal dynamics of the microbial community in the Hanford unconfined aquifer[J]. *The ISME Journal*, 2012, 6(9): 1665-1676.
- [57] GERKE M, HÜBNER D, SCHNEIDER J, et al. Can top-down effects of cypriniform fish be used to mitigate eutrophication effects in medium-sized European rivers? [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 755: 142547.
- [58] KOLVENBACH B A, HELBLING D E, KOHLER H P E, et al. Emerging chemicals and the evolution of biodegradation capacities and pathways in bacteria[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2014, 27: 8-14.
- [59] WILLIAMS D, HYNES H. The occurrence of benthos deep in the substratum of a stream[J]. *Freshwater Biology*, 1974, 4: 233-256.
- [60] ROBERTSON A, WOOD P. Ecology of the hyporheic zone: origins, current knowledge and future directions[J]. *Fundamental and Applied Limnology*, 2010, 176: 279-289.
- [61] HINKLE S R, DUFF J H, TRISKA F J, et al. Linking hyporheic flow and nitrogen cycling near the Willamette River: a large river in Oregon, USA[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 244(3/4): 157-180.
- [62] STEGEN J C, JOHNSON T, FREDRICKSON J K, et al. Influences of organic carbon speciation on hyporheic corridor biogeochemistry and microbial ecology[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 585.
- [63] KO J, LEE J, KANG H. Effects of micro-topography on N₂O emission from sediments in temperate streams[J]. *Ecological Engineering*, 2020, 155: 105906.
- [64] 李婧慧, 沈振华, 吴荣华, 等. 太湖冲山湖滨带生态修复工程对富营养化水体的作用[J]. *淮海工学院学报(自然科学版)*, 2018, 27(2): 86-92. (LI J H, SHEN Z H, WU R H, et al. Effects of ecological remediation project in the lakeside zone of Chongshan, Taihu Lake on eutrophic water environment[J]. *Journal of Huaihai Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 27(2): 86-92. (in Chinese))
- [65] TEWARI A, SINGH P K, GAUR S. Engineered hyporheic zones: design and applications in stream health restoration-a review [J]. *Water Supply*, 2022, 22(2): 2179-2193.
- [66] 刘信鑫. 河道内工程结构对潜流带水体交换的影响[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2021. (LIU J X. Effect of in-stream structures on hyporheic exchange[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2021. (in Chinese))
- [67] MUTZ M, KALBUS E, MEINECKE S. Effect of instream wood on vertical water flux in low-energy sand bed flume experiments [J]. *Water Resources Research*, 2007, 43(10): 5676.
- [68] ZHOU T, ENDRENY T. Reshaping of the hyporheic zone beneath river restoration structures: flume and hydrodynamic experiments[J]. *Water Resources Research*, 2013, 49: 5009-5020.
- [69] DUDUNAKE T, TONINA D, REEDER W J, et al. Local and reach-scale hyporheic flow response from boulder-induced geomorphic changes[J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(10): e2020WR027719.
- [70] HERZOG S P, HIGGINS C P, SINGHA K, et al. Performance of engineered streambeds for inducing hyporheic transient storage and attenuation of resazurin[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(18): 10627-10636.
- [71] JAEGER A, COLL C, POSSELT M, et al. Using recirculating flumes and a response surface model to investigate the role of hyporheic exchange and bacterial diversity on micropollutant half-lives[J]. *Environmental Science Processes & Impacts*, 2019, 21(12): 2093-2108.
- [72] COOK S, PRICE O, KING A, et al. Bedform characteristics and biofilm community development interact to modify hyporheic exchange[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 749: 141397.
- [73] BETTERLE A, JAEGER A, POSSELT M, et al. Hyporheic exchange in recirculating flumes under heterogeneous bacterial and morphological conditions[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 80(6): 1-18.

Ecological restoration of hyporheic zone based on connectivity restoration: a review*

WANG Longfei^{1,2}, WANG Ziyi^{1,2}, LI Yi^{1,2}

(1. *College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: The hyporheic zone (HZ) serves as one of the key areas for watershed ecological restoration. HZ restoration is intended to ensure the flow of energy, material and information between adjacent water systems. The restoration of HZ connectivity depends on hydrological, ecological, and functional connectivity. Studies related to ecological restoration of HZ are mainly based on hydrodynamic, geological and ecological theories. Most of the studies analyze the biogeochemical coupling mechanism driven by HZ. They report ecological restoration technologies that promote HZ exchange and restore biodiversity. The improvement of hydrologic conditions and the recovery of biological species in the HZ are additional goals for the comprehensive restoration of the HZ ecosystem structure and function. Based on the perspective of hydrological, ecological and functional connectivity, this study reviews the theoretical and technological progress in the hydrodynamic features, media properties, biome composition, food web structure and ecological function during the restoration of HZ connectivity. A multi-disciplinary approach is needed to expand the theory and practice of research methods and scales. Multi-omics approaches are suggested for the exploration of ecological processes on a microscale. The mechanism of restoration needs to be elucidated on both temporal and spatial scales. Finally, a framework for ecological restoration of the HZ under various scenarios should be constructed.

Key words: hyporheic zone; hydrological connectivity; ecological connectivity; functional connectivity; ecological restoration

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52170159) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (No. B210202054).