

非稳态潜流交换过程研究进展

吴成城, 张小琴, 鲁程鹏, 束龙仓, 刘 波

Research progress of the unsteady hyporheic flow exchange process

WU Chengcheng, ZHANG Xiaoqin, LU Chengpeng, SHU Longcang, and LIU Bo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202108011>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

白洋淀湖岸带地表水与地下水垂向交换研究

A study of vertical exchange between surface water and groundwater around the banks of Baiyangdian Lake

李刚, 马佰衡, 周仰效, 赵凯, 尤冰, 李木子, 董会军, 李海涛 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 48-54

一种可增加海岛地下淡水资源储量的方法研究

A method for improving the fresh groundwater storage of oceanic islands

马婧, 鲁春辉, 吴吉春, 罗剑 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 1-7

深圳“12.20”渣土场远程流化滑坡动力过程分析

Dynamics process simulation of long run-out catastrophic landfill flowslide on December 20 th, 2015 in Shenzhen, China

高杨, 卫童瑶, 李滨, 贺凯, 刘铮, 王学良 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 129-129

层状非均质结构包气带入渗过程单相流与两相流数值模拟对比研究

A comparative numerical simulation study of single-phase flow and water-gas two-phase flow infiltration process in the vadose zone with the layered heterogeneous structure

高靖勋, 冯洪川, 祝晓彬, 吴吉春, 吴剑锋, 卫云波, 王水 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 24-32

高放废物深地质处置地下水数值模拟方法研究进展

Advances in groundwater numerical simulation in deep geological disposal of high-level radioactive waste

李露露, 周志超, 邵景力, 崔亚莉, 赵敬波 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 13-23

非饱和花岗岩残积土水-气两相驱替过程数值模拟

Numerical simulation of water-gas two-phase displacement process in unsaturated granite residual soil

蔡沛辰, 阙云, 李显 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 54-63



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202108011

吴成城, 张小琴, 鲁程鹏, 等. 非稳态潜流交换过程研究进展 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 157-165.

WU Chengcheng, ZHANG Xiaoqin, LU Chengpeng, *et al.* Research progress of the unsteady hyporheic flow exchange process[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 157-165.

非稳态潜流交换过程研究进展

吴成城, 张小琴, 鲁程鹏, 束龙仓, 刘 波
(河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 潜流交换研究涉及地表水-地下水系统交互作用的物理机制、影响因素和生化作用等方面, 是近年来水文学、生态学、环境学等学科的研究热点。潜流交换过程包含水流运动、溶质运移以及能量传输过程。以稳态流动条件作为控制因素的潜流交换研究成果已经不能满足相关学科发展的要求。因此, 近年来非稳态潜流交换过程的研究及其成果渐受关注。当前相关研究多以物理模型试验为主(如室内水槽试验、示踪试验), 辅以数值模拟或遥感技术进行验证, 进而总结非稳态潜流交换过程水动力交换和能量交换过程规律。未来研究应在多时空尺度, 集合多种高精度监测手段, 研究潜流交换中的影响因素(如河流水位波动), 开发更精确的地表水-地下水耦合模型, 系统认识非稳态潜流交换过程。有关非稳态潜流交换的研究结论将有效指导水资源保护与生态环境修复和综合治理。

关键词: 非稳态过程; 潜流交换; 水动力交换; 能量交换; 数值模拟

中图分类号: P641.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)05-0157-09

Research progress of the unsteady hyporheic flow exchange process

WU Chengcheng, ZHANG Xiaoqin, LU Chengpeng, SHU Longcang, LIU Bo
(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: The study of hyporheic exchange involves the physical mechanism, influencing factors and biochemical effects on the interaction of a surface water-groundwater system, which is a hot research topic in recent years in the disciplines of hydrology, ecology and environmental science. The process of hyporheic exchange includes water movement, solute transport and energy transfer process. The research of hyporheic exchange under the steady-state flow conditions as the controlling factor can no longer meet the requirements of the development of related disciplines. Therefore, the research on the unsteady hyporheic exchange processes and its results have attracted attention in recent years. The current research is mostly based on physical model tests (e. g., indoor flume tests, tracer tests), supplemented by numerical simulations or remote sensing techniques for validation, and then summarizes the laws of hydrodynamic and energy exchange processes during the unsteady hyporheic exchange. Future research will integrate multiple high-precision monitoring tools at multiple spatial and temporal scales to study the influencing factors in hyporheic exchange (e. g., river level fluctuations), develop more accurate coupled surface water-groundwater models, and systematically understand the unsteady hyporheic exchange processes.

收稿日期: 2021-08-14; 修订日期: 2021-09-17

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41971027)

第一作者: 吴成城(1997-), 男, 博士研究生, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: 220401010005@hhu.edu.cn

通讯作者: 鲁程鹏(1984-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: luchengpeng@hhu.edu.cn

The findings of the unsteady hyporheic exchange will effectively guide water resources protection and ecological restoration and comprehensive management.

Keywords: unsteady process; hyporheic exchange; hydrodynamic exchange; energy exchange; numerical simulations

潜流带是指河流河床内以及河岸带内饱和沉积层,地表水与地下水双向迁移和充分混合的区域^[1],是水系统进行碳循环、能量循环、营养循环的重要场所,为水生生物提供了生活、繁殖的区域。它增强了河流水文和温度的空间异质性,有利于生物化学的物质交换,同时通过生物作用、水流混合削减污染,具有环境缓冲的作用^[2]。

目前有关地表水和地下水的相互作用在国内外受到广泛关注^[3-4],已有许多学者针对潜流带潜流交换过程的研究进行了十分详细的总结。近年来,非稳态潜流交换研究正在逐渐受到国内外学者的关注,有关非稳态潜流交换过程的研究成果大量涌现,但大多数学者只是针对个别研究方向进行细化,尚缺乏系统的研究分析。

在对潜流交换过程进行试验模拟的时候,通常采用稳定的水流流动条件,这忽略了沉积物—地表水界面的压力随时间变化的特性,然而,自然系统中的水流流态很少是稳定的。此外,将介质视为均质已经不能合理地解释自然界中许多复杂的潜流交换现象^[5]。与稳态流动条件相比,非稳态潜流交换通过频繁地改变河流或含水层的水流状态,导致潜流带中的热力学和生物地球化学过程亦随水流发生变化。短时间尺度和局部空间范围发生的物理化学作用过程对流域尺度潜流交换过程的总体累积效应贡献也是极其重要的。如果将这些因素过度简化,则会在一定程度上影响对潜流交换过程的认识。

近年来有关地表水-地下水系统交互作用的研究成果较多,但对非稳态潜流交换的物理机制、影响因素及研究方法等方面缺少系统的梳理。本文首先分析了稳态及非稳态潜流交换的主要影响因素及其影响机制;针对潜流交换常用的研究方法,指出其原理及适用范围;提出非稳态潜流交换的发展趋势,揭示其对于水资源管理和河流生态保护的重要意义。

1 潜流交换过程的影响因素

潜流带中动量和溶质的转移过程可以发生在一个几秒内形成的毫米级涡旋中,也可以发生在形成时间长达数年的千米级曲流河道流动路径中,潜流交换

广泛发生且具有不同的时空尺度。现有研究表明,能够影响潜流交换的因素很多^[6-7],根据其是否随时间发生变化,可分为稳态要素和非稳态要素。其中随着时间变化不会发生自身特性变化的要素,如河道几何形态、沉积物非均质性等,即为稳态要素,现阶段有关稳态要素的潜流交换研究已较为成熟。反之,如地表水水动力条件、生物作用等随时间变化而变化的要素,即为非稳态条件,这也是当前阶段学者关注并快速发展的研究方向。

值得注意的是,稳态要素与非稳态要素是就影响因素本身特性而言,两者并不是独立存在,如河道几何形态与地表水水动力条件,两者存在互为影响的关系,需要根据研究对象确定主导要素,然后重点对其进行研究。

1.1 河道几何形态

河床的几何形态特征属于典型稳态要素,对潜流交换的影响主要体现在 2 个方面:不平整的床面结构和河道曲度变化。这是影响地表水与地下水之间进行交互作用的重要驱动因子。河道几何形态驱动的潜流交换,本质上是多尺度的,从单个颗粒到河床和坝体,河道在各个尺度上都呈现出不同的几何形态。受沉积物粒径分布及区域地形等特征的影响,局部水头梯度会出现交错压力分布,驱使水流完成潜流交换过程。自然河流中,河道会形成天然的不平整河床以及曲度较大的河道走向,有利于冲积层的侧向堆积,会在一定程度上干扰河道中的水流运动,导致地表水-沉积物界面不同方向存在不相等水力梯度,形成以对流、平流为主要方式的局部水流运动。水流从高水力梯度区流入潜流带,再从潜流带流出到低水力梯度区,完成潜流交换的过程。

目前国内外学者主要采用化学试剂示踪法以及热量示踪法为主要研究手段,探究不同河道几何形态对潜流交换过程产生的影响。陈孝兵等^[8]为揭示河床形态特征引起的潜流交换规律,通过 NaCl 示踪试验对比分析了 4 种河床地形驱动下的潜流交换过程;Phillips 等^[9]分析了细颗粒在泥沙形态动力学背景下的迁移过程,总结出了细颗粒溶质运动过程受河床形态的影响规律。以河流曲度、河床微地形特征等几何

形态为研究对象,对潜流交换生物地球化学过程及能量传输过程的研究已较为成熟。

1.2 沉积物非均质性

沉积物非均质性是潜流带和潜流交换的基本属性,随机性和结构性是沉积物非均质性最为显著的2种特性^[2],其自身特性不随着时间变化而改变,属于稳态要素。潜流带中沉积物的非均质性是渗透系数存在空间变化的表现,直接影响沉积物中的孔隙大小及孔隙的连通性,会导致潜流带中孔隙水停留时间、氧化还原条件和营养盐浓度等的不同。渗透系数的空间分布会影响含水层中溶质的迁移转化,渗透系数的时间变化也会影响地表水-地下水系统的水量、物质、能量交换的时间差异。不同河床环境下的泥沙运移过程和水流特性是渗透系数发生瞬变的重要驱动因素。河流向地下水系统中的补给量和地下水系统向河流的排泄量与沉积物渗透系数的大小及变化情况息息相关,因此沉积物非均质性是控制潜流带的生物地球化学通量变化的关键因素,对潜流交换过程的研究具有重要意义。

通过改变沉积物的种类、含量及分布能够对沉积物非均质性特征进行不同程度的刻画,这也是研究沉积物非均质性对潜流交换影响的主要出发点。Marttila等^[10]在12个室外半天然河槽中加入不同砂量以改变河床底部沉积物的渗透系数,随之进行了一系列示踪试验,探究了流动条件和加砂量对砾石层潜流交换的贡献;Mathers等^[11]通过沉积柱内的试验,探究了新增细颗粒沉积物对潜流带中生物垂直分布的影响。目前室内试验及数值模拟技术是探究沉积物非均质性对潜流交换过程影响的主要手段,但天然河道沉积物非均质性对潜流交换过程产生的影响还缺乏有效的原位监测手段,这一研究方向有待学者继续深入。

1.3 河道中水工建筑物的修建

河道中的水工建筑物如堰、拦河坝等,通过阻碍水流和耗散能量来控制 and 改变水流条件。水工建筑物的修建对潜流交换既有积极的影响,也有消极的影响。这些建筑物可以影响河流水位,并能影响河岸漫滩含水层中的地下水流动^[12]。水工建筑物的运行可以调节河流水位,流量的短期高频变化也会导致河流水位的快速变化,从而在垂向、横向和纵向3个维度上影响河流廊道,并随着所处河道位置的变化而产生广泛影响。

在水工建筑物的上游,建筑物使河流保持在水位,水流速度相对较小,可以看作稳态要素。较高的

河道水位会导致相邻含水层地下水水位升高,地下水流动模式变得更加复杂。可以明显地观测到河流水位的上涨以及河流流速的降低,使得细泥沙颗粒会沉积到河床底部,降低河床底部沉积物的渗透系数,减小潜流交换的强度。

在水工建筑物的下游,当泄水建筑物开始运行时,水流流速变大,此时水工建筑物的存在就属于非稳态要素。由于高流速水流具有更强的冲刷作用,粗颗粒沉积物中的泥沙含量会相对自然河道减少,意味着河床沉积物的渗透性变化会影响下游的潜流交换通量,水流紊动强度更大,对潜流交换过程呈积极的促进作用。

水工建筑物的修建在一定程度上通过降低潜流交换强度、地表水与河漫滩之间的水文连通性,减弱了暴雨驱动和季节性水循环对河流廊道的水文影响^[13]。由于水工建筑物的结构各不相同,在不同的流量条件下,这些结构产生的作用也不尽相同,因此,要量化水工建筑物结构对潜流交换过程的影响,需要对上下游的流量变化情况进行更严格的监测分析,才能得出更加精确的结论。

1.4 地表水水动力条件

大量的试验和研究成果表明^[14-15],地表水水动力条件对潜流带的水量交换、热量传输的影响差异非常显著。地表水水动力条件根据地表水流速相对大小可分为静水条件与动水条件。静水条件是指湖泊、水库上游潜流带等地表水流速较低的情况,随时间变化的程度较小,在大多数研究中被视为稳态要素。在这种条件下,潜流带周围的水流流速较小,潜流带多为淤积的细沙、黏土等物质,进行的潜流交换主要取决于地表水水位与地下水水位的高差变化情况以及沉积物的渗透系数。河流水位的变化会引起河岸蓄水效应,在高水位期间,水暂时储存在河岸带中,然后在河流水位降低时释放回河流,随着河水渗入河岸带,河水中的物质成分被输送到河岸含水层,在其中发生物质的交换和相互作用后又返回河流中。

动水条件是指河道、大坝泄洪口下游等地表水流速较高的情况,通常会产生变化剧烈的下游水流,水流随时间变化而产生复杂的变化,属于典型的非稳态要素。这种高度动态的地下水流加强了河流和含水层之间的潜流交换,水深的变化会同时改变河流的水位和潜流带的分布范围,从而驱动水力梯度的时间变化,促进地表水与地下水的相互作用,为生物地球化学反应创造条件。Zhu等^[16]利用二维水流溶质运移耦

合模型,系统地研究了洪水波驱动下的氮元素循环过程及其时空分布; Ferencz 等^[17]利用在 COMSOL 实现的二维变饱和地下水流有限元模型,对泄洪条件下大坝周围及下游 100 km 范围内的潜流交换进行了分析。

1.5 生物作用

大多数关于潜流交换的研究都集中在水流扰动形成的河床结构上,并与潜流带中的生态过程隔离开。然而,生活在河床底部沉积物周围的生物也会改变河床的地形结构,并对潜流交换产生影响^[18]。潜流带动物种群通常随深度而变化,生物移动、定居、收集食物、寻找庇护所的过程都能引起非稳态潜流交换过程的变化,这些要素随着时间的变化对地表水-地下水系统产生不同的影响,属于非稳态要素。潜流带是河流生态系统的重要组成部分,潜流带周围的微生物活动也会对潜流交换的过程产生影响。携带着各种化学元素、营养物质及污染物的地表水进入潜流带后,会产生一系列的生物地球化学反应,随后又从潜流带中排出到地表水系统中。地表水系统中的微生物会受潜流带中排泄物质的影响,能够吸收其中的营养物质以供自身生长,微生物繁殖所形成的菌落以及其他的物质,混合在沉积物界面以及沉积物之中,造成沉积物的孔隙度下降,降低潜流带的渗透系数,影响潜流交换过程,这个过程可称为生物堵塞。

生物作用影响非稳态潜流交换的另一重要途径是生物扰动作用。生物扰动是指潜流带中生活生长的微生物由于自身觅食、繁殖、迁移等生命需求,对潜流带中沉积物的颗粒进行扰动、扩散、最后沉积再分布的过程^[19]。生物扰动有助于维持潜流带的结构和垂直水力梯度。生物的主动或者被动活动过程会导致河床沉积物形成压力差,在压力差的作用下,水流会进入河床沉积物孔隙中,影响其中的生物代谢。这一过程影响了沉积物中孔隙的重分布以及沉积物的物理化学特性,从而对非稳态潜流交换过程产生相当程度的影响。

2 潜流交换过程的研究方法

水量交换是潜流带物质交换、能量传输的基本载体,影响着热量交换、物质溶解等物理化学过程在内的瞬态过程,对潜流带水量交换的监测是研究地下水-地表水相互作用过程的重要基础^[20]。本文主要对潜流交换研究中涉及到的水量监测方法进行总结。国内外许多学者针对潜流带潜流交换的研究采用了许多

不同的研究方法,如现场监测、数值模拟和室内试验等都是研究潜流交换过程的有效手段,这些常用方法对稳态潜流交换过程的研究起到了重要作用。但对于非稳态潜流交换过程的研究需要在这些常用方法的基础上进一步改进,得到精度更高、成本更低、更易于操作的研究方法。

2.1 室内水槽试验

由于河床形态的复杂性和多样性,采用室内水槽试验探究潜流交换的物理机制是一种有效的研究手段。通过改变试验水槽的水流流量、流速等水力参数,选择砂石、砾石以及黏土等物质作为材料构造河床底部沉积物,可以模拟河床结构、河流几何特征、水动力条件等对潜流交换的影响,进行量化研究。室内水槽试验易于操作,且试验效果十分直观,可以节约大量试验时间与成本,不仅可以方便稳态潜流交换过程研究,而且在非稳态潜流交换过程研究中也具有巨大的优势,如探究非稳定水流、生物扰动作用等非稳态影响因素对潜流交换过程产生的影响,由于这种方法的可视化程度高且操作难度低,已成为目前非稳态潜流交换过程的主要研究方法之一。

2.2 渗流仪直接监测法

河床中的生物地球化学梯度很陡,并且可以在短距离内发生明显变化,这使得精准描述潜流带中生物地球化学过程具有挑战性,是非稳态潜流交换过程研究的一大难点。渗透仪测量方法是直接量化地表水与地下水之间交互作用中最为常见的一种方法,该装置最早是在 1944 年由 Israelson 等^[21]设计出来的,并用于灌溉过程中漏水量的计算。Lee^[22]在此基础上做了改进,设计出了袋式渗流仪,当地下水流向地表水时,单位时间内进入收集袋的流体体积即为交换量;当地表水流向地下水时,收集袋内预先充入一定体积的水,单位时间内收集袋中流体体积的减少量即为交换量^[23],这种渗透仪制作简单,操作简便,在河水和湖水都得到了较好的应用。除此之外,由于渗流仪直接监测法的即时性,可以实时监测到如非稳定水流条件下潜流交换过程的变化,直接测量出溪流或河流中的水沙界面上水和溶质的交换量,为野外天然河道的非稳态潜流交换过程的研究提供了有效的手段,结合不同试验条件及需求,许多学者根据实际情况也对渗透仪做了不同的改进。

2.3 示踪试验法

溶质试验和输运模型,通常被称为示踪试验,为潜流交换通量估算提供了一种基于水力学方法的替

代方法,用于了解不同水流过程的相对重要性,特别是那些影响水、溶质和营养物质在水流中移动的过程,可以为地下水排放量的量化提供依据,其规模和精度是其他方法不可能达到的。示踪试验法的原理是:通过选择一定的化学物质或观测指标,对潜流带中的水流交换速率、生物地球化学反应、热量传输特征等进行追踪监测,从而了解潜流带中的交互过程,在研究潜流交互作用过程中的水流特征时,是一种特别有用的方法。示踪试验刚引入潜流交换研究时,主要用于反演稳态条件下的潜流交换通量,随着对非稳态潜流交换现象的重视,相应的示踪结果求解方法也发展出一些可以识别非稳态潜流交换的方法。温度示踪法、同位素示踪法、荧光染料示踪法都是示踪法的直接应用,主要应用在水文地质条件较复杂、数据难以直接观测的地区,如喀斯特水文地质区。

2.4 数值模拟

潜流交换过程的研究中,现场监测和室内试验存在较为耗费试验时间和人力的缺陷,因此具有经济性且准确度高的数值模拟技术被广泛应用于潜流带的生物地球化学研究。主要包括有限差分法、有限元法、边界元法、积分有限差分法。基于有限元与有限差分的数值模拟方法是目前潜流交换模拟方面采用的主要研究手段。随着计算机技术的不断发展,各种地下水数值模拟软件不断出现,从最开始被广泛应用的 MODFLOW、PEST、MT3DMS 等到现在的可视化软件如 GMS、Visual MODFLOW、FEFLOW 等,再到在复杂边界条件下更高模拟精度的多物理场模拟软件(如 COMSOL),都是模拟地表水-地下水相互作用常用的数值模型。

由于不同科研课题的研究需求重点不同,根据地表水-地下水模型耦合方式的不同,也可分为半耦合型与全耦合型。半耦合型模型的特征是使用地下水数值模型取代了分布式水文模型的地下水传输模块,借助公共参量的传输和反馈进行耦合,例如 GSFLOW 是将降雨-径流模拟系统 PRMS 与 MODFLOW 进行耦合,除此之外还有 SWATMOD、CATHY 等半耦合型数值模型;全耦合型模型是以瞬态微分方程描述各种水流运动,应用数值分析建立相邻网格之间的时空关系,常见的全耦合地表水-地下水数值模型包括 ParFlow、MIKE-SHE、THIHMS 等^[24]。

除了被国内外大量学者广泛使用的数值模型外,还有许多不为人熟知但依然功能强大的开源地下水-地表水模拟软件,如 IWFIM(Integrated Water Flow Model)

就是一个用于流域内的水资源管理和规划的开源数值模型,用于计算地下水流、土壤表面水分流动、地表水和地下水、溪流和地表之间的流量交换;以及 WRF-Hydro 模型耦合框架,可以将大气和陆地水文的多尺度过程模型连接起来,从而实现对地下水-地表水过程的高精度模拟。

但目前的数值模拟技术依然有一些缺陷,远没有将地表水和地下水相互作用的全部复杂性结合起来,如在模拟地表水和地下水相互作用的数值模型中,各种空间尺度的模型都会对河床进行高度简化,通常被模拟为静态、均质的实体。将非稳态因素如非稳定水流、动态河床形状等对潜流交换过程的影响加入到数值模型的开发中,是未来的研究方向。当前主流数值模拟通常为分段线性关系模型。然而,当一定范围内的地表水和地下水交互作用时,会产生由水文和地质因素共同驱动的非线性交互作用,具体表现尚不清楚;当在河床或含水层沉积物中发生水文交换过程时,地表水和地下水会与层状的非均质沉积物产生相互作用,这个过程可能会产生阈值效应,但还未明确。因此,需要更精确、细致的地表水-地下水系统数值模型进行探究,需要开发能够将水文动力学和生物地球化学过程联系起来的模型。

2.5 遥感技术

河流水深、地形的精确测量对于模拟各种潜流交换过程非常重要,有助于建立精确的数字高程模型,并且测量结果也可以与数值模拟的结果进行对比验证。一些新型的遥感技术,例如遥感摄影测量技术、热红外遥感技术等,通常不用将实验仪器布置在地表水体内部,也可以获取到地表水体的信息、定位地表水和地下水发生交互作用的位置。无人机和传感器技术的发展使遥感方法更具成本效益,具有更高的空间分辨率,同时即使在难以进入的地点也能实现高频率采集。可以将高度动态变化的非稳态潜流交换过程转化为更详细的数据记录,为研究提供更加有力和可靠的依据。

但遥感技术只能在较显著的潜流交换通量变化过程中进行研究,通常捕捉不到强度较小的通量变化过程,因此可以考虑将遥感技术与现场监测进行有机结合,以提高潜流交换过程研究的精度。

3 非稳态潜流交换

3.1 河流及潜流带水流运动

鉴于河谷地貌的多样性,潜流交换过程会对河段

水文条件的变化进行系统地响应,在河流水流流态变化和地下水水位波动的共同作用下,通过改变水头分布控制潜流交换过程。研究不同河床结构下潜流交换的物理机制及作用,对河流的综合治理和生态恢复都具有重要的意义,可以帮助管理者更深层次地了解潜流带生态系统中的各项功能以及作用范围,从而更好地制定水资源管理方案。如探究海狸坝的形成对河岸潜流带重金属污染缓冲功能、生物地球化学过程的影响^[25]; Welsh 等^[26]探讨了天然河道修复工程中,河道结构重建以及安装垂直叶片结构对河岸潜流带的影响;姬雨雨等^[15]以澜沧江漫湾水库库区洲滩为研究对象,依据水库运行导致的水位波动特征,探究了水库运行对漫湾库区洲滩水热交换影响。

3.2 河流及潜流带溶质运移

潜流带周围的水动力条件是影响潜流交换过程的重要因素,控制着河道中的物质运输和化学转化过程。由于它直接控制河水的停留时间,导致了物质运输和转化过程之间存在着广泛的相互作用。针对由水动力条件驱动的潜流交换研究,有助于更好地对山区河流、水电站下游以及短期水文事件引起的大流量、高流速的水流特征进行了解,从而对潜流带的水量交换过程有更清晰的认识。Hester 等^[27]利用 MODFLOW 和 SEAM3D 构建了含地表水硝酸盐和地下水溶解有机碳的河床沙丘模型,模拟了其中发生的反硝化过程,分析得出了地表水位波动对河床沙丘潜流带反硝化作用的影响;Zheng 等^[28]利用一组单波的多物理数值模型进行了试验分析,量化了流动河床形态中的潜流带氮循环。

3.3 河流及潜流带生态系统维系与演化

河流系统中潜流带沉积物常受到各种生物、化学物质的污染,受自然过程和人为活动影响显著。研究不同河床结构下潜流带生物地球化学作用,可以为水污染恢复、水质管理问题提供具有很高参考价值的信息,为维护河流生态健康提供一定的理论依据。Yu 等^[29]研究了茅洲河流域潜流带重金属的流域尺度分布,为流域内沉积物污染的治理和修复提供了重要指导方向;Mugnai 等^[30]在巴西大西洋森林的一条溪流中,采集了其潜流带中的动物样品,对其中的摇蚊群落及其垂直分布进行了研究。

3.4 河流及潜流带能量传输

地表水与地下水相互作用时总是伴随着热量传输,地下水运动可以引起地质体热状态的显著变化,温度与潜流带生物地球化学过程、潜流带水生生物的

生存是密切相关的。因此,观察潜流带的热量变化时空特征是定性或定量分析潜流交换过程的有效手段^[31]。与水文测量方法相比,利用热作为示踪剂的主要优点在于,河床热性质对于沉积物结果具有独立性。温度作为能量状态的反映,可以反映水力交换的时空变化,并提供一种易于测量和无污染的自然追踪方法^[32-34]。郭伟强等^[35]采用基于一维热扩散对流方程的温度梯度法,探究了漓河冬季潜流带水交换过程对沉积物间隙水水质的影响;Ren 等^[36]建立了一个基于 COMSOL 的水动力-温度耦合模型,采用实时温度和水力梯度数据,对河岸潜流带的潜流交换进行了量化。

4 发展趋势

虽然已有大量学者对潜流交换过程进行了研究,但对非稳态潜流交换过程的认识还有待进一步深化,以提高对潜流交换过程和潜流带功能的认识,最终采取有效的管理措施,恢复生态系统功能,目前该研究领域发展趋势有以下几个方面:

(1) 将研究扩展到更长时间尺度

前人研究都在短时间尺度上进行,通常在不超过约2年的时间内对潜流带的变化情况进行评估,并且没有充分描述季节性过程的变化,由于地下水对水生态系统的影响可能在不同季节和年份之间有显著差异,如果研究不能充分解释这种时间差异性,可能会出现不一致的结果。因此,需要进行更长期和更深入的调查研究,明确地下水排泄和下游生态系统之间的相互影响,这将有助于更好地了解非稳态潜流交换过程的生物地球化学效应。

(2) 将研究对象扩展到更大空间尺度

许多潜流交换过程研究都是在河段尺度上进行的,研究空间尺度较小,但这些研究的成本却较高,无法在整个河流流域进行重复。现有研究集中在某一独立的河流中,但不同级别河网中非稳态潜流交换过程的时空差异性尚不清楚,所以如何采用更有效、经济的研究方法应用于更大空间尺度的非稳态潜流交换过程研究,是未来重要的研究方向。

(3) 在研究中加入以往被过度简化的影响因素

大多数研究由于简化了河流水位的动态波动过程,对河流潜流带中的热传输和生物地球化学过程采用简单概化的方式,仅调查了动态河流水位波动对潜流带温度和生物地球化学的短时间尺度影响,但要了解动态流量变化对潜流带热运移过程和生物地球化学过程的长期影响,还需要对这一区域内的水文、热

传输和生物地球化学过程进行更广泛的观测和模拟研究。

(4)开发更精确的地表水-地下水耦合模型

从理论角度出发,数值模拟技术被越来越多地应用在不同空间尺度下非稳态潜流交换过程研究当中,以阐明非稳态潜流交换过程,把从探索性建模获得的模拟结果作为基础,开发出能够将水动力学和生物地球化学过程联系起来的精确概念模型,是目前非稳态潜流交换过程研究的重要方向。

5 结论

(1)对潜流带水量交换的监测是研究地下水-地表水相互作用过程的重要基础,常用方法在稳态潜流交换过程中已起到了重要的作用,在非稳态潜流交换研究中,还需要在常用方法的基础上进一步改进,得到精度更高、成本更低、更易于操作的研究方法。

(2)目前大量学者针对非稳态潜流交换过程进行了研究,以期通过研究不同河床结构下潜流带的物理机制、不同河床结构下潜流带生物地球化学作用、潜流带热量变化时空特征等方向,对不同时空尺度、不同地质结构的潜流带进行研究,从不同学科角度出发,进行分析和总结规律,对当前的水资源保护、生态环境的修复和治理起到重要的指导作用。

(3)非稳态潜流交换过程的研究涉及到多要素、多尺度、多学科的大量信息,仅依靠现有的技术、软件、模型尚有局限性,应在现有的现场监测、数值模拟、室内试验的基础上,结合新方法、新技术,开发切合实际应用的集成模拟软件,更直观、有效地为研究者提供信息,指导水资源利用及保护。现有研究已经确定了非稳态潜流交换的多尺度运动过程,但主要集中在河岸潜流带内的单一潜流交换过程上,研究的时空尺度及地形复杂度还不够,有的信息还无法充分综合起来。从水文、地形、地质和生态过程多角度评估跨区域的非稳态潜流交换,加强不同尺度的时空变异性研究,发展多尺度河床形态精确有效的测量方法,以及与热追踪等新技术手段的充分结合,是未来重要的研究方向。

参考文献 (References) :

- [1] 李英玉,赵坚,吕辉,等.河岸带潜流层温度示踪流速计算方法[J].水科学进展,2016,27(3):423-429.
[LI Yingyu, ZHAO Jian, LYU Hui, et al. Investigation on temperature tracer method calculated flow rate of

hyporheic layer in riparian zone[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(3): 423-429. (in Chinese with English abstract)]

- [2] 吴光东,张潇,鲁程鹏.河流潜流带和潜流交换时空变异特征研究综述[J].人民长江,2019,50(10):100-107. [WU Guangdong, ZHANG Xiao, LU Chengpeng. Spatial-temporal variability in hyporheic zone and hyporheic exchange[J]. Yangtze River, 2019, 50(10): 100-107. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 束龙仓,宫荣,栾佳文,等.地下水与地表水水量交换识别及交换量计算——以新汴河宿州段为例[J].水科学进展,2022,33(1):57-67. [SHU Longcang, GONG Rong, LUAN Jiawen, et al. A integrated method to quantify flow exchanges between surface water and groundwater: Take Suzhou section of the Xinbian River as an example[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(1): 57-67. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 李刚,马佰衡,周仰效,等.白洋淀湖岸带地表水与地下水垂向交换研究[J].水文地质工程地质,2021,48(4):48-54. [LI Gang, MA Baiheng, ZHOU Yangxiao, et al. A study of vertical exchange between surface water and groundwater around the banks of Baiyangdian Lake[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(4): 48-54. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 庄玮,鲁程鹏,朱宣毓,等.黏土透镜体影响潜流交换的试验研究[J].长江科学院院报,2019,36(8):49-54. [ZHUANG Wei, LU Chengpeng, ZHU Xuanyu, et al. Hyporheic exchange under the influence of clay lens[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(8): 49-54. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 吕辉,赵坚,陈孝兵,等.洪水过程对垂向潜流交换作用的影响[J].水电能源科学,2015,33(3):14-18. [LV Hui, ZHAO Jian, CHEN Xiaobing, et al. The impact of flood process on vertical aquifer exchange[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(3): 14-18. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 赵彪,任杰,欧玉鹏.三角形河床形态对潜流交换作用的影响[J].水电能源科学,2019,37(7):26-29. [ZHAO Biao, REN Jie, OU Yupeng. Impact of triangular riverbed on morphologies on hyporheic exchange[J]. Water Resources and Power, 2019, 37(7): 26-29. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 陈孝兵,赵坚,李英玉,等.床面形态驱动下潜流交换试验[J].水科学进展,2014,25(6):835-841. [CHEN

- Xiaobing, ZHAO Jian, LI Yingyu, et al. Experimental study of bedform-driven hyporheic exchange[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(6): 835 – 841. (in Chinese with English abstract)]
- [9] PHILLIPS C B, DALLMANN J D, JEROLMACK D J, et al. Fine-particle deposition, retention, and resuspension within a sand-bedded stream are determined by streambed morphodynamics[J]. *Water Resources Research*, 2019, 55(12): 10303 – 10318.
- [10] MARTTILA H, TAMMELA S, MUSTONEN K R, et al. Contribution of flow conditions and sand addition on hyporheic zone exchange in gravel beds[J]. *Hydrology Research*, 2019, 50(3): 878 – 885.
- [11] MATHERS K L, HILL M J, WOOD C D, et al. The role of fine sediment characteristics and body size on the vertical movement of a freshwater amphipod[J]. *Freshwater Biology*, 2019, 64(1): 152 – 163.
- [12] MAGLIOZZI C, GRABOWSKI R C, PACKMAN A I, et al. Toward a conceptual framework of hyporheic exchange across spatial scales[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018, 22(12): 6163 – 6185.
- [13] SHI W, CHEN Q, ZHANG J, et al. Spatial patterns of diffusive methane emissions across sediment deposited riparian zones in hydropower reservoirs[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2021, 126(3): e2020JG005945.
- [14] 于丹青, 陈求稳, 马宏海, 等. 漫湾水库运行下库内洲滩潜流带夏季热传输特征 [J]. *水利学报*, 2019, 50(4): 497 – 505. [YU Danqing, CHEN Qiuwen, MA Honghai, et al. Study on heat transfer across island riparian zone under Manwan reservoir operations in summer[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(4): 497 – 505. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 姬雨雨, 陈求稳, 施文卿, 等. 水库运行对漫湾库区洲滩水热交换影响 [J]. *水科学进展*, 2018, 29(1): 73 – 79. [JI Yuyu, CHEN Qiuwen, SHI Wenqing, et al. Influence of reservoir operation on water and heat exchange in the Manwan's Island[J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29(1): 73 – 79. (in Chinese with English abstract)]
- [16] ZHU H Y, LIU D S, SHI W Q, et al. Nitrogen cycles within the stream-to-riparian continuum under flood waves[J]. *Episodes Journal of International Geoscience*, 2019, 42(4): 333 – 341.
- [17] FERENCZ S B, CARDENAS M B, NEILSON B T. Analysis of the effects of dam release properties and ambient groundwater flow on surface water-groundwater exchange over a 100-km-long reach[J]. *Water Resources Research*, 2019, 55(11): 8526 – 8546.
- [18] HAN X, FANG H W, JOHNSON M F, et al. The impact of biological bedforms on near-bed and subsurface flow: a laboratory-evaluated numerical study of flow in the vicinity of pits and mounds[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2019, 124(7): 1939 – 1957.
- [19] 程丹东, 王元元, 宋进喜, 等. 不同底栖生物扰动对沉积物渗透性的影响 [J]. *水土保持通报*, 2015, 35(5): 77 – 81. [CHENG Dandong, WANG Yuanyuan, SONG Jinxi, et al. Influences of bioturbations on vertical hydraulic conductivity diversity of sediments[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(5): 77 – 81. (in Chinese with English abstract)]
- [20] ZHANG J L, SONG J X, LONG Y Q, et al. Quantifying the spatial variations of hyporheic water exchange at catchment scale using the thermal method: a case study in the Weihe River, China[J]. *Advances in Meteorology*, 2017: 1 – 8.
- [21] ISRAELSON O W, REEVE R C. Canal lining experiments in the delta area, Utah[J]. *Utah Agricultural Experimental Station*, 1944, 313: 15 – 35.
- [22] LEE D R. A device for measuring seepage flux in lakes and estuaries1[J]. *Limnology and Oceanography*, 1977, 22(1): 140 – 147.
- [23] 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 Yao, MA Teng, DENG Yamin, et al. Hydro-biogeochemistry of hyporheic zone: Principles, methods and ecological significance[J]. *Earth Science*, 2017, 42(5): 661 – 673. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 王蕊, 王中根, 夏军. 地表水和地下水耦合模型研究进展 [J]. *地理科学进展*, 2008, 27(4): 37 – 41. [WANG Rui, WANG Zhonggen, XIA Jun. Advances in the integrated surface water and groundwater model[J]. *Progress in Geography*, 2008, 27(4): 37 – 41. (in Chinese with English abstract)]
- [25] BRIGGS M A, WANG C, DAY-LEWIS F D, et al. Return flows from beaver ponds enhance floodplain-to-river metals exchange in alluvial mountain catchments[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 685: 357 – 369.
- [26] WELSH M K, VIDON P G, MCMILLAN S K. Stream and floodplain restoration impacts riparian zone hydrology of agricultural streams[J]. *Environmental Monitoring and*

- Assessment, 2020, 192(2): 85.
- [27] HESTER E T, EASTES L A, WIDDOWSON M A. Effect of surface water stage fluctuation on mixing-dependent hyporheic denitrification in riverbed dunes[J]. *Water Resources Research*, 2019, 55(6): 4668 – 4687.
- [28] ZHENG L Z, CARDENAS M B, WANG L C, et al. Ripple effects: Bed form morphodynamics cascading into hyporheic zone biogeochemistry[J]. *Water Resources Research*, 2019, 55(8): 7320 – 7342.
- [29] YU K, DUAN Y, LIAO P, et al. Watershed-scale distributions of heavy metals in the hyporheic zones of a heavily polluted Maozhou River watershed, Southern China[J]. *Chemosphere*, 2020, 239: 124773.
- [30] MUGNAI R, SERPA-FILHO A, NESSIMIAN J L, et al. Morphological traits and vertical distribution of hyporheic chironomid larvae in Atlantic Forest streams[J]. *Tropical Zoology*, 2019, 32(3): 119 – 134.
- [31] 朱静思, 束龙仓, 鲁程鹏. 基于热追踪方法的河道垂向潜流通量的非均质性研究[J]. *水利学报*, 2013, 44(7): 818 – 825. [ZHU Jingsi, SHU Longcang, LU Chengpeng. Study on the heterogeneity of vertical hyporheic flux using a heat tracing method[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(7): 818 – 825. (in Chinese with English abstract)]
- [32] REN J, CHENG J Q, YANG J, et al. A review on using heat as a tool for studying groundwater – surface water interactions[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(22): 1 – 13.
- [33] YEMELI E J, TEMGOUA E, KENGNI L, et al. Hydrogeochemistry of groundwater and surface water in Dschang town (West Cameroon): Alkali and alkaline-earth elements ascertain lithological and anthropogenic constraints[J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 2021, 9(3): 212 – 224.
- [34] ZHOU N Q, LI T S, ZHAO S, et al. Characteristics of the main inorganic nitrogen accumulation in surface water and groundwater of wetland succession zones[J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 2019, 7(2): 173 – 181.
- [35] 郭伟强, 宋进喜, 刘琪, 等. 漓河冬季潜流带水交换对沉积物间隙水水质的影响[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(5): 1957 – 1967. [GUO Weiqiang, SONG Jinxi, LIU Qi, et al. Influence of hyporheic water exchange on quality of sediment pore water for the Juehe River in winter[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(5): 1957 – 1967. (in Chinese with English abstract)]
- [36] REN J, ZHANG W B, YANG J, et al. Using water temperature series and hydraulic heads to quantify hyporheic exchange in the riparian zone[J]. *Hydrogeology Journal*, 2019, 27(4): 1419 – 1437.

编辑: 张若琳