

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20230198

热示踪在潜流带中的研究进展

许倍源¹, 武丽文², 张明珠³, 俞 烜⁴

1. 中山大学 土木工程学院, 广东 珠海 519082;
2. 西交利物浦大学 健康与环境科学系, 江苏 苏州 215123;
3. 广州市水务科学研究院有限公司, 广东 广州 510220;
4. 中国科学院南京土壤研究所 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 江苏 南京 210008)

摘要:潜流带是地表水—地下水生态系统中的重要部分,它对供水滞洪、水污染控制、河流生态保护均具有巨大作用。在潜流带的研究中,热示踪技术可以很好地应用于渗流速度、有效热扩散系数等参数估计,揭示潜流带中的物质与能量交换的过程。热示踪有着装置布置简单、环境效益友好、时间跨度优越等优点。传热机制作为热示踪基础理论中的重要部分,在以往国内的研究中缺乏深入的阐述。本文以传热机制为切入点,介绍不同河道中热传递方式的差异,简述传热方程及历来研究中解析解、数值解发展,最后探讨该技术面临的挑战及未来可能的发展方向。

关键词:潜流带;热示踪;传热机制;传热方程

中图分类号:P33;P641;G353.11

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2024)02-0019-07

0 引言

潜流带指位于地表水和地下水之间发生着物质和能量交换的水分饱和沉积物层^[1],也被称为地表水—地下水的交互作用带、交错带。潜流带的厚度取决于很多因素,如渗流速度、沉积物性质、地下水埋深等。通常情况下,潜流带范围始于地表,止于地表下方数米至数十米,其准确的范围需要通过监测及数据分析得到。潜流带中的水交换方式根据位置的不同可分为侧向交换^[2]与垂向交换^[3](图1)。

潜流带的孔隙率等性质对地下水的质量和储量的动态变化起着控制作用,影响着地下供水的可用性^[4]。此外,潜流带调节着污染物的过滤和生态物质的运输^[5],被称为河流的“肝脏”^[6]。鉴于潜流带重要的环境意义,潜流带已成为研究热点,而研究的关键在于量化潜流带中水的交换频率和交换模式^[7]。

量化潜流带水交换的方式众多,如渗流计^[8]、压力

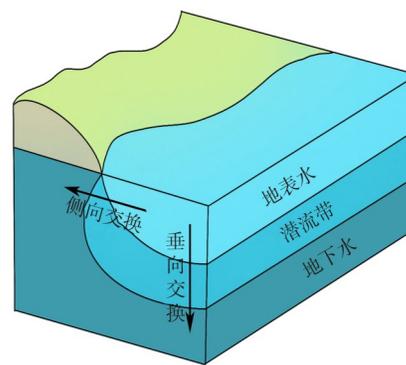


图1 潜流带示意图

Fig.1 Diagram of hyporheic zone

计^[9]和化学示踪剂^[10]等。热示踪因具有环保性、易获性、高灵敏性等优势受到学者们的青睐;其原理是通过追踪温度在水中的变化来获取渗流方向、速度等信息。相较于传统的使用水传导系数计算渗流,热传导系数可大幅减少水传导系数波动带来的不确定性。通常情况下,水传导系数在潜流带中的变化会超过两个

收稿日期:2023-06-07

网络首发日期:2023-11-28

网络首发地址:https://kns.cnki.net/kcms2/detail/11.1814.P.20231127.1121.001.html

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3001000)

作者简介:许倍源(1999—),男,广东湛江人,硕士研究生,主要研究方向为地下水数值模拟。E-mail:xuby36@mail2.sysu.edu.cn

通信作者:俞烜(1985—),男,陕西汉阴人,博士,副研究员,主要研究方向为地下水数值模拟。E-mail:yuxuan@issas.ac.cn

及以上数量级,但热传导系数的变化范围最大相差两个数量级,因此使用热示踪得到的结果更为准确^[11]。随着技术的发展,热示踪方法不仅能应用于潜流带渗流研究,还能反演温度变化规律揭示潜流带热性质,如有效热扩散系数。在以往研究中,学者们对热示踪的模型差异^[12]、测量技术^[13]以及研究进展^[14]均有较好的总结,但传热机制作为热示踪的基础理论,尚无深入阐述。

为更好地介绍热示踪,本文基于潜流带,从热示踪的基础理论“传热机制”出发,介绍不同类型的传热机制,说明不同河道中热的传递方式,概述传热机制之下产生的传热方程及其解析解、数值解,最后探讨目前研究当中普遍存在的难点,提出未来可能的发展方向。

1 热示踪的基础理论与理论应用

本章以热示踪的基础理论——传热机制为起点,根据热传递的特征介绍传热机制的分类,并阐述各类河道中传热方式的差异。随后,概述热示踪的理论应用,对热示踪的传热方程进行分析,说明传热方程中所反映的传热机制,总结传热方程解析解与数值解的发展(图2)。

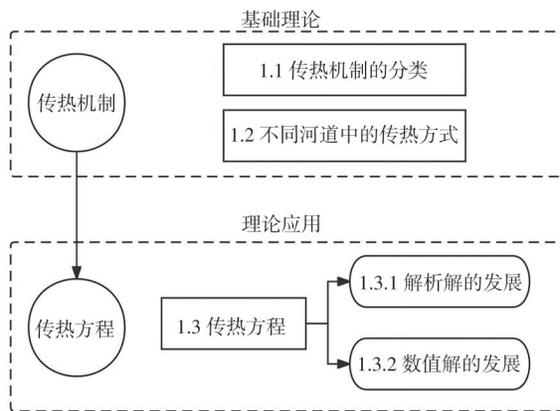


图2 章节导读图

Fig.2 Diagram of chapter introduction

1.1 传热机制的分类

在经典的传热学当中,热的传递分为热对流、热传导和热辐射三种基本形式,在潜流带中主要有四种的传热机制,分别是热辐射、热对流、热传导、热弥散(图3)。

热辐射(heat radiation)是河道中的水或者潜流带中的水分接收了太阳的辐射而产生的传热,其向潜流带提供了大部分的热源,起着供给的作用。在性质上,热辐射的传播是双向,净辐射量决定着热辐射对潜流

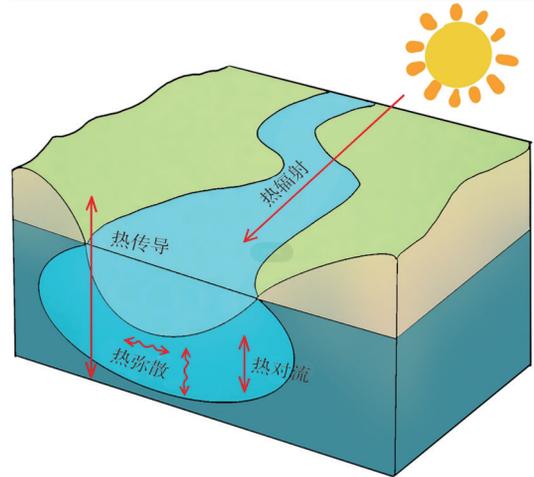


图3 河道中的传热机制

Fig.3 Heat transfer mechanisms in the river

带的传热量^[15]。在实际中,影响热辐射的因素繁多,热辐射进程难以探明,多数时刻将其视为状态量,不细究其变化的过程,因此在过去的研究中,热辐射基本不作为潜流带传热机制中的研究重点。

热对流(heat convection)与热平流(heat advection)是两个争议较多的概念,因此需要注意热平流、热对流两个概念所表述的含义。目前,不同的著作对于二者的定义有所不同,如Constantz^[16]认为热对流是潜流带沉积物上方发生的水体热传递,热会通过对流的形式从河流的上游向下游传递,而热平流是水流经沉积物时发生的热传递。Boano^[17]则提倡使用平流来描述水携带物质运输的过程,而热对流表示由平流所产生的热传递,即平流作用产生了热对流。因流体传热本身的定义为热通过流体的运动传输热量,故本文沿用Boano的定义,用热对流一词来描述流体在潜流带沉积物中的热传递。热对流根据发生的条件可分为强制对流和自由对流,前者受外部驱动力影响,大小与水力梯度密切相关;后者由于自身密度差异引发,密度的差异多源于温度的差异^[17]。

热传导(heat conductivity)由温度梯度驱动,是潜流带中普遍的传热机制,也是传热方程中不可或缺的一部分。热传导与热扩散(heat diffusion)都用于描述因温度不均匀而发生的热传递,但热传导侧重于描述物体之间由高温一方转至低温一方的转移过程,而热扩散则侧重于描述物体内部温度趋于均匀的变化过程。二者在传热方程中刻画的都是热趋于平衡的演变,因此,在个别研究中会选择用热扩散这一术语来代替热传导。热传导与热对流的相对重要性常用佩克莱数(Peclet number)来衡量^[18]。佩克莱数会因简化条件

的不同而存在不同的变体,但其主要思想是在规定的渗流速度及渗流长度之下,比较热传导与热对流的作用大小,有研究认为二者之间存在一定的竞争关系^[19]。

热弥散(heat dispersion)伴随着热对流发生^[20],热弥散率(heat dispersivity)是决定热弥散程度的重要参数,Keery^[21]定量地分析了不同的热弥散率以及不同的渗流速度下热弥散作用表现,结果表明,热弥散在渗流速度较大时较为明显。在渗流速度较小时,热弥散常忽略不计。

以上四种传热方式中,热传导及热对流常作为潜流带中主要的传热机制,但在不同河道中,热传递的方式或作用的区域会有差异。

1.2 不同河道中传热方式

河道中热的传递会因河道的水力条件或沉积物性质而不同,在使用热示踪量化潜流带水交换之前,需要对所研究的河道形成初步认识,了解河道中传热机制的作用方式。河道中的传热主要受三方面影响:(1)地表水和地下水的温差;(2)地表水与地下水的运动;(3)潜流带中沉积物的物理性质^[16]。基于以上前两者,Stonestrom^[22]认为研究潜流带中水的传热可以建立在四种理想化的河道之上,分别为:补给型、排放型、干涸型以及短暂流型。后Constantz^[16]用地表水—地下水联系断开型河道代替干涸型的河道进行研究。

在联系断开型河道中,低渗透层中会形成一个水分饱和带^[23](图4(c)),该区域中存在地表水的向下排放,但由于低渗透沉积物的阻挡,地表水与地下水难以建立联系。此外,在短暂型河道(图4(d))水分缺失的时候,地下水水分的蒸发也会使得热传递出现^[24],但其不属于典型的传热方式,本文不展开讨论。在补给型(图4(a))和排放型(图4(b))的河道当中,热传导与热对流一般是占主导地位的两种传热机制,但以往的

大多数研究都忽略了潜流带沉积物性质的影响,如在细颗粒沉积物组成的潜流带中,沉积物堆积较密实,流体难以移动,热对流不易发生,故热传导占主导地位^[25]。因此在研究不同类型的河道时,除关注河道中的地表水与地下水的温差、运动之外,还应考虑潜流带中的沉积物特性、河床的形态等因素^[26]。

四种河道的地表水温度变化、地表水水流变化、热传递方式及潜流带温度变化特征的具体描述如表1所示。

1.3 传热方程

传热总控制方程如下所示:

$$\frac{\kappa_e}{\rho c} \nabla^2 T - \frac{\rho_w c_w}{\rho c} \nabla \cdot (Tq) = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

其中:

$$\frac{\kappa_e}{\rho c} = \frac{k}{\rho c} + \alpha q \quad (2)$$

上述传热方程被称为微分热传输方程(differential heat transport equation, HTE)或微分传导—平流—弥散微分方程(differential equation for conduction-advection-dispersion, CAD)。方程(1)左侧第一项表示热传导和热弥散,具体组成见方程(2);方程(1)左侧第二项表示热对流。式中: T 表示温度, t 表示时间; ρ 、 c 表示固体的密度、比热容; ρ_w 、 c_w 表示液体的密度、比热容。方程(2)用于描述固液沉积物的热特性,式中: k_e 表示固液沉积物的导热系数, k_e 比 ρc 表示“有效导热系数”或“有效热扩散系数”, k 表示固体沉积物的导热系数, α 表示热弥散系数, q 表示渗流速度。

在传热方程的解法中,解析解和数值解都扮演着重要角色。解析解常用于一维的瞬态或者稳态问题,其通过数学推导得到精确结果,揭示了热在传递中的规律。使用解析解可在短时间内确定潜流带中温度的分布情况以及渗流速度的变化,但需要假设的前提较

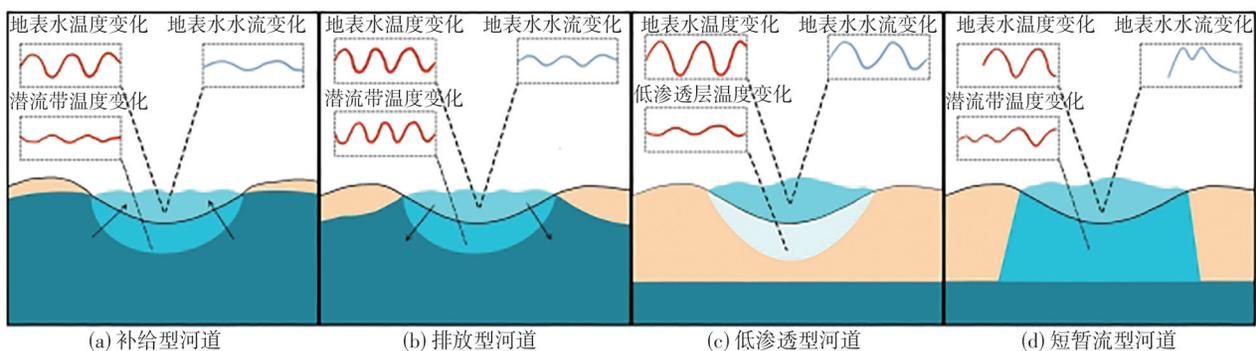


图4 不同类型河道中温度、水流变化
Fig.4 Temperature and flow changes in different types of rivers

表1 不同类型河道温度、水流变化

Table1 Changes in temperature and water flow in different types of rivers

河道类型	地表水水流及地表水温度变化特征	热传递方式及潜流带温度变化特征
补给型	地表水会受地下水补给;地表水温度变化主要受气温及地下水影响。	水力梯度向上使得地下水向地表水补给,潜流带整体温度受地下水温度影响较大。由于地下水位置较深,接收热辐射较小,温度变化较小。潜流带深层受地下水热传导、热对流影响较大,温度变化不明显;浅层受热辐射、地表水热传导影响较大,温度变化较明显。
排放型	地表水向地下水排放;地表水温度变化主要受气温影响。	水力梯度向下使得地表水向地下水排放,潜流带温度变化主要受地表水热传导及热对流影响。
低渗透型	地表水与地下水之间难以建立直接的联系;地表水温度变化主要受气温影响。	不存在严格意义上的潜流带,但低渗透层中会形成水分饱和带,该区域中温度受地表水的热传导及热对流影响。低渗透层的范围和温度变化会受地表水下渗量及速率的影响。
短暂型	地表长期无水,在暴雨等情景下会产生汇流并向地下水排放;地表水温度出现剧变。	潜流带温度出现剧变。地表水向地下水排放,传热机制以热传导及热对流为主,该情况下渗流速度较快,可能存在热弥散。

多,如:热与渗流在传输的过程中需保持均匀、线性,其中均匀指液体与固体的密度、比热容性质不会随着时间或空间的变化而变化;而线性指温度与渗流速度随深度线性变化。数值解可更贴近于现实条件解决问题,然而使用数值解时需搭建相应的模型,为模型输入边界条件及初始条件,工作量较大,获取结果的速度较慢。前期的研究当中,解析解受到普遍的关注,随着计算机的发展,数值解得到了广泛应用和进一步发展。解析解与数值解之间没有绝对的优劣之分,二者相互补充,共同推动着传热方程研究和实际应用。

1.3.1 传热方程解析解的发展

截至目前,传热方程解析解的发展已有60余年的历史,1960年,Suzuki^[27]在稻田上展开实验,使用温度差异构建了垂直方向上的微分传热方程,并在假设“上边界温度正弦振荡”的条件下给出了瞬态解析解。1965年,Stallman^[28]对Suzuki解法进行了精确化的处理,渗流速度估算精度最高可达3 mm/day。2006年,Hatch^[29]将温度的差异重新定义为温度传感器之间的振幅差以及相位差,因温度传感器的位置信息需求由绝对距离变为相对距离,在冲刷频繁导致地形发生变化的地带,该方法具有明显的优势。2007年,Keery^[21]在Hatch方法的基础上引入动态谐波回归信号处理技术分离振幅以及相位,选择忽略热弥散的作用,在英国什罗普郡的燕鸥河展开研究并与渗流计实测值进行比较,发现结果大体一致。2012年,McCallum^[30]组合振幅差以及相位差为整体估算渗流速度,此外,该方法实现了有效热扩散系数的估算,并于澳大利亚墨累达令盆地某一处流域进行验证。2013年,Luce^[31]采用单位长度的振幅、相位衰减率代替振幅差、相位差,构建了新的解析解,该解法更适用于低渗流速度情况。

2015年,Vandersteen^[32]结合局部多项式信号处理技术与最大似然参数估算法,测算了比利时一处河流的渗流速度,将结果与数值模型STRIVE以及Keery解析解的结果进行比较,表明新方法的可行性,并实现了结果不确定性的估算。

直至现在,传热方程瞬态解析解仍在不断完善当中^[33],上述的部分瞬态解析解已经被编写成软件,如VFLUX^[34]、Ex-Stream^[35]。目前瞬态解析解已被广泛应用:2016年,李英玉^[36]使用Hatch解与Keery解计算了浙江省新安江某一河岸的潜流季节变化,发现二者在渗流峰值处相差较大。在2019年,李云良^[37]使用Keery解研究鄱阳湖泛洪区湖水与地下水位的变化关系,并与达西定律的计算结果进行比较,发现二者较为吻合。

除瞬态解析解外,稳态解析解同样是学者们研究的焦点,因在稳态的条件下温度与深度的关系可直接用曲线描述,所以稳态解析解也被称为类型曲线法。1965年,Bredehoeft和Papaopulos^[38]在假设上边界温度为恒定的条件下提出了传热方程的稳态解析解。1971年,Sorey^[39]使用现场勘察数据说明了稳态解析解的不适用情景,包括温度的空间分布有差异、渗流非稳态以及渗流速度过小三种情况。1993年,Taniguchi^[40]开发了适合浅层区域的稳态解析解。1996年,Lu和Ge^[41]通过推导说明了在应用稳态解析解时,水平方向的热以及渗流在传递速度较低的情况下可以忽略。2017年,Irvine^[42]说明了稳态解析解在较大幅度的温度变化下不适用。

相较于瞬态解析解,稳态解析解的优势在于预先建立的类型曲线可以极大地节省计算时间,为渗流速度等参数的初步评估提供参考,但稳态解析解

的假设条件较为苛刻,在复杂的环境中使用会产生偏差。在应用方面:2013年,朱静思^[43]使用稳态解析解对山东省大汶河内三个不同的剖面进行了潜流通量的分析,证实了稳态解析解在非均质潜流带中的可用性。

以上瞬态及稳态解析解均基于一维垂向流动的条件展开,然而对于复杂的实际情况,一维解析解的合理性值得考究。目前不少学者对一维方程的适用性提出质疑,如:2010年,Lautz^[44]认为非垂直的流动会对一维垂向解析解的计算结果造成较大的误差;2013年,Cuthbert^[45]指出流场中的渗流及温度的不均匀性会影响计算结果;2016年,Reeves^[46]使用COMSOL生成的数据测算 Keery 解,发现大量水平渗流会导致垂直渗流速度估算发生偏差。对此,三维解法在处理上述问题时具有显著优势,当前可供使用的三维解析解较少,三维问题常用数值方法求解。

1.3.2 传热方程数值解的发展

相较于解析解,数值解能更全面地考虑多种影响因素和复杂边界条件。1989年,Lapham^[47]使用有限差分法求解了一维问题,并通过温度包络图直观地展示了地水表以下温度信息。此外,还存在众多数值模型,如HST3D、SUTRA和VS2DH等,如表2所示。

2 研究难点与未来发展方向

热示踪经过不断的优化,已经成为一门较为成熟技术。但应用于复杂的现实环境中,仍存在诸多待解决的难点。下文总结目前研究所面临的一些困境,并基于此提出未来发展的可能方向。

2.1 研究难点

(1)传热机制的细化。在实际应用当中,由于不同传热机制之间的分界并不明显,因此很多研究中会忽略传热机制的阐述,且存在着概念混用的现象。在不同渗流速度、不同深度中,主导的传热机制可能是不同的,如:热传导可能在潜流带的上层起主要作用,而热对流在潜流带的下层起主要作用^[57]。

(2)潜流带的形态与性质。地表水水流长期地冲刷、涌动会使得潜流带具有复杂的形态。同时,潜流带的性质也可能随着时间发生变化,如孔隙度、渗透率等^[58]。这些变化可能会影响热示踪在潜流带当中的应用。

(3)非理想条件。在低振幅、窄相位等的非理想温度条件下,温度的变化不足以产生明显的信号,热示踪技术的使用会受到限制^[59]。此外,在非稳态流、非均匀流等情况下,得到的结果可能会产生偏差甚至完全偏离^[60]。

(4)异质介质。在复杂的潜流带环境中,受地质构造影响,异质介质的情况普遍存在。然而,大多数传热方程的解法均基于均质介质假设进行开发,不同的介质当中热的性质有所不同,在异质条件下使用传统的解法可能存在误差^[61]。

2.2 未来发展方向

(1)构建潜流带学科。基于研究难点(1)和(2),创建潜流带学科能更好地统一其中的学术用语,避免出现概念不清的现象;另外潜流带与地表水、地下水是密切相关的,构建一个完整的地表水—潜流带—地下水系统纳入潜流带学科当中,充分考虑地表水及地下水水流对潜流带的影响,能更好地揭示潜流带中水、热的运动规律。

表2 热示踪数值模型介绍
Table2 Introduction to heat tracer numerical model

模型名称	模型描述	缺点	可视化界面	在潜流带中的应用
HST3D ^[48]	开源;有限差分法;适合变密度,饱和介质;最高三维	网格边界必须坐标轴平行且只能指定一个边界条件;模拟区域需设为矩形平行六面体;不支持Z轴倾斜	FLOWHEAT、HST3D GUI-PIE	—
SUTRA ^[49]	开源;有限元及有限差分法;适合变密度,饱和或非饱和介质;最高三维	边界条件应用于模型的节点而非网格边界;质量与能量变化只能线性增加;热在模型中均匀且各向同性	SutraGUI	Briggs ^[50]
VS2DH ^[51]	开源;有限差分法;适合恒定密度,变饱和介质;最高二维	模型只考虑热对流与热弥散,且只能模拟二维;在1DTempPro中只能模拟一维;目前VS2DH 3.0考虑了热传导且能模拟三维情况,但缺少应用	VS2DI、VS2DRTI、1DTempPro、1DTempPro V2	陈建琪 ^[52] 、Anibas ^[53]
TOUGH2 ^[54]	开源;有限差分法;适合变密度,非饱和介质;最高三维	—	IGMESH、iMatTOUGH	Lancaster ^[55]
FEFLOW	商用;有限元法;适合变密度,饱和、非饱和或变饱和介质;最高三维	源/汇输入复杂	自带	Ren ^[56]

(2)传热方程解法的改进。基于研究难点(3)和(4),需要不断改进解析解以突破复杂条件的限制,进一步提高解析解的适用性;另外数值解可在模型设定及算法上进行优化,根据实际情况减少非必要输入条件,改进网格的构建,节省运算时间。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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(5):5-8,27.
- [3] 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/OL].水科学进展,2013,24(4):589-597.
- [4] EDWARDS RICHARD T. The hyporheic zone[J]. River ecology and management: Lessons from the Pacific coastal ecoregion, 1998: 399-429.
- [5] PACKMAN A I, SALEHIN M, ZARAMELLA M. Hyporheic Exchange with Gravel Beds: Basic Hydrodynamic Interactions and Bedform-Induced Advective Flows[J/OL]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 130(7): 647-656.
- [6] FISCHER H, KLOEP F, WILZCEK S, et al. A River's Liver - Microbial Processes within the Hyporheic Zone of a Large Lowland River [J/OL]. Biogeochemistry, 2005, 76(2): 349-371.
- [7] ENGELHARDT I, PIEPENBRINK M, TRAUTH N, et al. Comparison of tracer methods to quantify hydrodynamic exchange within the hyporheic zone[J/OL]. Journal of Hydrology, 2011, 400(1): 255-266.
- [8] ROSENBERRY D O. A seepage meter designed for use in flowing water[J/OL]. Journal of Hydrology, 2008, 359(1): 118-130.
- [9] LAUTZ L K, SIEGEL D I. Modeling surface and ground water mixing in the hyporheic zone using MODFLOW and MT3D[J/OL]. Advances in Water Resources, 2006, 29(11): 1618-1633.
- [10] WARD A S, GOOSEFF M N, SINGHA K. Characterizing hyporheic transport processes — Interpretation of electrical geophysical data in coupled stream-hyporheic zone systems during solute tracer studies [J/OL]. Advances in Water Resources, 2010, 33(11): 1320-1330.
- [11] LAUTZ L K, KRANES N T, SIEGEL D I. Heat tracing of heterogeneous hyporheic exchange adjacent to in-stream geomorphic features [J/OL]. Hydrological Processes, 2010, 24(21): 3074-3086.
- [12] 张文兵,沈振中,陈官运,等.基于温度示踪的潜流交换通量解析模型对比[J].水利水电科技进展,2022,42(2):63-71,84.
- [13] 刘传琨,胡玥,刘杰,等.基于温度信息的地表-地下水交互机制研究进展[J/OL].水文地质工程地质,2014,41(5):5-10,18.
- [14] 任杰,程嘉强,杨杰,等.潜流交换温度示踪方法研究进展[J/OL].水科学进展,2018,29(4):597-606.
- [15] HANNAH D M, MALCOLM I A, BRADLEY C. Seasonal hyporheic temperature dynamics over riffle bedforms [J/OL]. Hydrological Processes, 2009, 23(15): 2178-2194.
- [16] CONSTANTZ J. Heat as a tracer to determine streambed water exchanges [J/OL]. Water Resources Research, 2008, 44(4).
- [17] BOANO F, HARVEY J W, MARION A, et al. Hyporheic flow and transport processes: Mechanisms, models, and biogeochemical implications [J/OL]. Reviews of Geophysics, 2014, 52(4): 603-679.
- [18] GOTO S, YAMANO M, KINOSHITA M. Thermal response of sediment with vertical fluid flow to periodic temperature variation at the surface [J/OL]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2005, 110(B1).
- [19] BONS P D, VAN MILLIGEN B P, BLUM P. A general unified expression for solute and heat dispersion in homogeneous porous media [J/OL]. Water Resources Research, 2013, 49(10): 6166-6178.
- [20] RAU G C, ANDERSEN M S, MCCALLUM A M, et al. Heat as a tracer to quantify water flow in near-surface sediments [J/OL]. Earth-Science Reviews, 2014, 129: 40-58.
- [21] KEERY J, BINLEY A, CROOK N, et al. Temporal and spatial variability of groundwater - surface water fluxes: Development and application of an analytical method using temperature time series [J/OL]. Journal of Hydrology, 2007, 336(1): 1-16.
- [22] DAVID A. STONESTROM, JIM CONSTANTZ. Heat as a tool for studying the movement of ground water near streams [R]. 2003.
- [23] QUICHIMBO E A, SINGER M B, CUTHBERT M O. Characterising groundwater-surface water interactions in idealised ephemeral stream systems [J/OL]. Hydrological Processes, 2020, 34(18): 3792-3806.
- [24] SCANLON B R, MILLY P C D. Water and heat fluxes in desert soils: 2. Numerical simulations [J/OL]. Water Resources Research, 1994, 30(3): 721-733.
- [25] SCOTCH C G, MURGULET D, CONSTANTZ J. Time-series temperature analyses indicate conduction and diffusion are dominant heat-transfer processes in fine sediment, low-flow streams [J/OL]. Science of The Total Environment, 2021, 768: 144367.
- [26] CHENG D, SONG J, WANG W, et al. Influences of riverbed morphology on patterns and magnitudes of hyporheic water exchange within a natural river confluence [J/OL]. Journal of Hydrology, 2019, 574: 75-84.
- [27] SUZUKI S. Percolation measurements based on heat flow through soil with special reference to paddy fields [J/OL]. Journal of Geophysical Research (1896-1977), 1960, 65(9): 2883-2885.
- [28] STALLMAN R W. Steady one-dimensional fluid flow in a semi-infinite porous medium with sinusoidal surface temperature [J/OL]. Journal of Geophysical Research (1896-1977), 1965, 70(12): 2821-2827.
- [29] HATCH C E, FISHER A T, REVENAUGH J S, et al. Quantifying surface water - groundwater interactions using time series analysis of streambed thermal records: Method development [J/OL]. Water Resources Research, 2006, 42(10).
- [30] MCCALLUM A M, ANDERSEN M S, RAU G C, et al. A 1-D analytical method for estimating surface water-groundwater interactions and effective thermal diffusivity using temperature time series [J/OL]. Water Resources Research, 2012, 48(11).
- [31] LUCE C H, TONINA D, GARIGLIO F, et al. Solutions for the diurnally forced advection-diffusion equation to estimate bulk fluid velocity and diffusivity in streambeds from temperature time series [J/OL]. Water Resources Research, 2013, 49(1): 488-506.
- [32] VANDERSTEEN G, SCHNEIDEWIND U, ANIBAS C, et al. Determining groundwater-surface water exchange from temperature-time se-

- ries: Combining a local polynomial method with a maximum likelihood estimator[J/OL]. *Water Resources Research*, 2015, 51(2): 922–939.
- [33] MCALLEY W A, DAY–LEWIS F D, REY D, et al. Application of Recursive Estimation to Heat Tracing for Groundwater/Surface–Water Exchange [J/OL]. *Water Resources Research*, 2022, 58(6): e2021WR030443.
- [34] GORDON R P, LAUTZ L K, BRIGGS M A, et al. Automated calculation of vertical pore–water flux from field temperature time series using the VFLUX method and computer program[J/OL]. *Journal of Hydrology*, 2012, 420–421: 142–158.
- [35] SWANSON T E, CARDENAS M B. Ex–Stream: A MATLAB program for calculating fluid flux through sediment – water interfaces based on steady and transient temperature profiles[J/OL]. *Computers & Geosciences*, 2011, 37(10): 1664–1669.
- [36] 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/OL]. *水科学进展*, 2016, 27(3): 423–429.
- [37] 李云良, 姚静, 谭志强, 等. 鄱阳湖洪泛区碟形湖域与地下水转化关系分析[J/OL]. *水文*, 2019, 39(5): 1–7.
- [38] BREDEHOEFT J D, PAPAOPULOS I S. Rates of vertical groundwater movement estimated from the Earth’s thermal profile[J/OL]. *Water Resources Research*, 1965, 1(2): 325–328.
- [39] SOREY M L. Measurement of Vertical Groundwater Velocity from Temperature Profiles in Wells [J/OL]. *Water Resources Research*, 1971, 7(4): 963–970.
- [40] TANIGUCHI M. Evaluation of vertical groundwater fluxes and thermal properties of aquifers based on transient temperature–depth profiles[J/OL]. *Water Resources Research*, 1993, 29(7): 2021–2026.
- [41] LU N, GE S. Effect of Horizontal Heat and Fluid Flow on the Vertical Temperature Distribution in a Semiconfining Layer[J/OL]. *Water Resources Research*, 1996, 32(5): 1449–1453.
- [42] IRVINE D J, KURYLYK B L, CARTWRIGHT I, et al. Groundwater flow estimation using temperature–depth profiles in a complex environment and a changing climate[J/OL]. *Science of The Total Environment*, 2017, 574: 272–281.
- [43] 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/OL]. *水利学报*, 2013, 44(7): 818–825.
- [44] LAUTZ L K. Impacts of nonideal field conditions on vertical water velocity estimates from streambed temperature time series[J/OL]. *Water Resources Research*, 2010, 46(1).
- [45] CUTHBERT M O, MACKAY R. Impacts of nonuniform flow on estimates of vertical streambed flux[J/OL]. *Water Resources Research*, 2013, 49(1): 19–28.
- [46] REEVES J, HATCH C E. Impacts of three–dimensional nonuniform flow on quantification of groundwater–surface water interactions using heat as a tracer[J/OL]. *Water Resources Research*, 2016, 52(9): 6851–6866.
- [47] LAPHAM W W. Use of temperature profiles beneath streams to determine rates of vertical ground–water flow and vertical hydraulic conductivity: 2337 [R/OL]. (1989) [2023–11–15]. <https://pubs.usgs.gov/publication/wsp2337>
- [48] KIPP K L. HST3D: A Computer Code for Simulation of Heat and Solute Transport in Three–dimensional Ground–water Flow Systems[M]. U.S. Geological Survey, 1987.
- [49] VOSS C I. A finite–element simulation model for saturated–unsaturated, fluid–density–dependent ground–water flow with energy transport or chemically–reactive single–species solute transport [R/OL]. (1984) [2023–11–15]. <https://pubs.usgs.gov/publication/wri844369>
- [50] BRIGGS M A, BUCKLEY S F, BAGTZOGLU A C, et al. Actively heated high–resolution fiber–optic–distributed temperature sensing to quantify streambed flow dynamics in zones of strong groundwater upwelling[J/OL]. *Water Resources Research*, 2016, 52(7): 5179–5194.
- [51] HEALY R W, RONAN A D. Documentation of computer program VS2Dh for simulation of energy transport in variably saturated porous media: Modification of the US Geological Survey’s computer program VS2DT: 96–4230 [R/OL]. (1996) [2023–11–15]. <https://pubs.usgs.gov/wri/1996/4230/report.pdf>
- [52] 陈建琪, 任杰, 倪枫, 等. 基于 1DtempPro 和 VFLUX 的河床潜流交换通量化研究[J]. *水电能源科学*, 2021, 39(9): 37–40.
- [53] ANIBAS C, FLECKENSTEIN J H, VOLZE N, et al. Transient or steady–state? Using vertical temperature profiles to quantify groundwater–surface water exchange[J/OL]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(15): 2165–2177.
- [54] PRUESS K. TOUGH2: A general–purpose numerical simulator for multiphase fluid and heat flow: LBL–29400, 5212064 [R/OL]. (1991) [2023–11–15]. <http://www.osti.gov/servlets/purl/5212064–3iINC8/>.
- [55] LANCASTER S, HAGGERTY R. Investigation of the Temperature Impact of Hyporheic Flow: Using Groundwater and Heat Flow Modeling and GIS Analyses to Evaluate Temperature Mitigation Strategies on the Willamette River, Oregon Final Report [R]. Oregon State University, Corvallis, Oregon, 2005.
- [56] REN J, HU H, LU X, et al. Water and heat exchange responses to flooding and local storm events in the hyporheic zone driven by a meandering bend [J/OL]. *Science of The Total Environment*, 2023, 883: 163732.
- [57] GOTO S, YAMANO M, KINOSHITA M. Thermal response of sediment with vertical fluid flow to periodic temperature variation at the surface[J/OL]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2005, 110(B1).
- [58] CHENG D, SONG J, WANG W, et al. Influences of riverbed morphology on patterns and magnitudes of hyporheic water exchange within a natural river confluence[J/OL]. *Journal of Hydrology*, 2019, 574: 75–84.
- [59] DEWEESE T, TONINA D, LUCE C. Monitoring Streambed Scour/Deposition Under Nonideal Temperature Signal and Flood Conditions [J/OL]. *Water Resources Research*, 2017, 53(12): 10257–10273.
- [60] CHANG C M, YEH H D. Uncertainty in applying the temperature time–series method to the field under heterogeneous flow conditions [J/OL]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 902–908.
- [61] KURYLYK B L, IRVINE D J, CAREY S K, et al. Heat as a groundwater tracer in shallow and deep heterogeneous media: Analytical solution, spreadsheet tool, and field applications[J/OL]. *Hydrological Processes*, 2017, 31(14): 2648–2661.