

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2018.04.016

潜流交换温度示踪方法研究进展

任 杰^{1,2}, 程嘉强², 杨 杰^{1,2}, 程 琳^{1,2}

(1. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;
2. 西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 潜流带是河流生态系统中活跃的生态群落交错区, 是地表水和地下水相互作用的重要界面。研究潜流带内存在的潜流交换机制对评估水资源的开发利用以及维持和修复河流生态系统健康有着重要意义。系统介绍了温度示踪方法的一维垂向稳态和瞬态热运移解析模型, 梳理归纳了基于温度示踪的时序数据采集方法、信号分析方法和数值方法的相关研究进展, 最后对比论述了温度示踪方法的优势和存在的主要问题, 同时指出了地下水的多维流动、温度测量的不确定性以及非理想条件对解析模型的影响仍是未来温度示踪方法需要进一步研究的重点。

关键词: 潜流带; 潜流交换; 温度示踪方法; 解析模型

中图分类号: TV13 ; G353.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2018)04-0597-10

河流生态系统是一个动态且高度开放的非平衡非线性复合系统^[1]。潜流带是河流底部及其周边连接地表水体和地下水的饱和沉积物层, 是河流生态系统中活跃且极为重要的群落交错区^[2-3]。过去 20 年的研究指出, 河流地表水体和地下水不是水文系统中相互独立的组分, 而是在潜流带中时刻发生着质量、动量及热量的双向交换作用^[4-6]。这些交换过程不仅对地表水和地下水区域的水文、物理、化学和生物特性产生强烈影响^[7-8], 还与河流生态廊道的物质循环、能量交换、信息流动和物种迁移密切相关^[9-10]。因此, 准确了解潜流交换过程和途径对评估水资源的开发利用以及改善或修复河流生态系统的结构和功能有着重要的意义。

地表水和地下水的相互作用时刻存在着热量的传递, 观测河流潜流带温度场的时空分布特征是定性或定量分析潜流交换速度及过程模式的有效手段^[11-12]。特别是近年来, 自动化温度监测设备的改进、信号分析与处理方法的发展以及计算机数值计算与仿真分析能力的提升为潜流交换温度示踪方法的应用提供了广阔的空间, 使之逐渐成为国内外研究潜流带水分交换问题的重要手段之一^[13-15]。众多国外学者对温度示踪方法的机理、应用和适用性进行了深入研究, 如 Boano 等^[16]从不同空间尺度出发对潜流交换温度示踪机理和方法进行了论述; Caissie 等^[17]利用温度示踪方法对季节性冰盖河流的地下水流速和方向进行了评估和分析; Irvine 等^[18]从温度数据采集、数据分析以及相关计算工具等方面归纳了潜流交换温度示踪方法应用研究的主要进展。但是, 国内关于温度示踪方法在潜流交换研究中的应用相对较少, 且大多集中于利用温度示踪方法对特定区域的水文地质特征进行分析^[19-21], 尚缺乏系统量化的温度示踪研究, 也极少涉及对温度示踪方法适用性的分析。因此, 本文在阐述温度示踪方法一维垂向热运移解析模型的基础上, 对温度数据的采集方法、信号分析方法及数值方法的研究现状进行综述, 并总结和分析目前潜流交换温度示踪研究存在的主要问题。

1 潜流交换温度示踪研究分析方法

1.1 一维垂向稳态热运移解析方法

通过温度示踪方法分析地下水运移的概念由来已久, 早在 20 世纪 60 年代, 有关学者就提出利用地质体

收稿日期: 2018-01-09; 网络出版时间: 2018-07-14

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20180713.1411.030.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51679194); 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地自主研究基金资助项目(2016ZZKT-4)

作者简介: 任杰(1980—), 男, 河南信阳人, 副教授, 主要从事工程渗流分析与控制方法研究。

E-mail: renjie@xaut.edu.cn

的温深剖面估算地下水运动速度的典型曲线法。Bredehoeft 和 Papaopulos^[22] 假设地质体上、下部边界的温度相对稳定并且存在一定温差, 提出了一种基于热传导-对流方程的一维垂向稳态热运移解析模型。早期的学者最初是由该模型通过天然的地温梯度来评估地温异常带的垂向地下水运动, 如 Sorey^[23] 通过监测科罗拉多州和新墨西哥州某处地质体的温度梯度计算了该地地下水向上流动的速率, 并与含水层抽水试验结果进行了对比验证。随后, Lapham^[24] 将该方法应用于河流潜流交换研究中, 通过季节性温度垂直分布曲线计算了河床的地下水排泄速率; Schmidt 等^[25] 在 Bitterfeld-Wolfen 地区的某一长 220 m 的人工河段对 140 个河床垂向剖面的温度进行了监测, 通过一维稳态解析模型计算了潜流交换速度, 并指出潜流交换过程呈现空间非均质特性; 朱静思等^[26] 采用温度示踪方法, 结合曲线拟合对山东省大汶河琵琶山闸下 2 km 处河段的潜流交换空间非均质特性进行了分析。这些研究利用一维垂向稳态热运移解析方法, 大多根据研究区域的温度垂直剖面图及温度场空间分布情况, 或通过温深曲线形态的异常情况来分析地表水与地下水相互作用的动态变化, 确定监测区域的水文地质参数和潜流带水分交换速度和通量。

然而, 在实际环境下, 潜流带的水文地质和温度波动难以同时满足 Bredehoeft 解析模型的全部基本假设, 对于非理想状态, Anibas 等^[27] 研究发现一维垂向稳态热运移解析模型可以便捷快速地评估地表水与地下水交换的空间模式, 但计算精度受地表水温度波动的影响较大; Irvine 等^[28] 通过数值模拟结果表明在上、下边界温度稳定的情况下, 非均匀介质内垂直流动分量与水平流动分量的比值低至 0.1 时, 使用该模型仍可得出可信的计算结果。

1.2 一维垂向瞬态热运移解析方法

针对河流地表水温度在水动力、地形地貌和外部环境等因素的影响下呈现一定的周期性变化规律, 水体温度时序数据大致具有正弦式的变化趋势, 一些学者提出利用潜流带对地表水周期性温度波动的热响应特征来分析潜流交换动态变化过程。假设上边界地表水入渗速度不变, 且温度呈正弦波动特征, 下边界为均质各向同性的半无限空间, 无穷远处为地壳恒温层, Suzuki^[29] 提出利用含水层对地表周期性温度波动的热响应特征来评估稻田土壤水分的垂向入渗速度, 并基于一维瞬态非等温热运移方程推导出一个关于温度、时间、水分垂向入渗速度和入渗深度的代数公式。Stallman^[30] 改进了 Suzuki^[29] 的研究, 通过待定系数法获得了该代数公式的解析解, 结果表明在均质各向同性的多孔介质中, 利用昼夜温度波动产生的时序资料, 可较为容易地检测到 2 cm/d 或更大的渗透率, 而利用年度温度波动产生的时序资料, 则可以检测到 0.1 cm/d 量级的渗透率。

Suzuki^[29] 和 Stallman^[30] 的开创性研究为温度示踪方法在潜流交换领域的后续发展奠定了基础, 随着计算机数据处理性能的提升和温度测量仪器及采集方式的革新, 后来的众多学者根据实际情况对 Stallman 解析方法加以完善和拓展, 使得改进后的方法得以适应更为复杂的边界条件和水文地质环境。Hatch 等^[31] 基于 Goto 等^[32] 的研究成果, 提出了一种利用竖直剖面上任意两个温度测点存在的振幅衰减和相位滞后计算垂向地下水流速的温度时序数据解析模型, 如图 1(a) 所示, A_r 为深部测点温度时序曲线振幅 A_d 与浅部测点温度时序曲线振幅 A_s 的比值, 即 $A_r = A_d / A_s$, $\Delta\varphi$ 为两个测点之间的相位滞后, 即时间滞后量。Keery 等^[33] 对 Stallman 解析方法进行了改进, 通过结合动态谐波回归 (Dynamic Harmonic Regression, DHR) 信号处理技术, 提出了另一种基于时间序列分析的解析模型, 该模型可以利用温度时序观测资料对地表水与地下水垂向交换的时空变化进行定量分析, 但其并未考虑热弥散效应对多孔介质内热量运移的影响。

尽管 Hatch 和 Keery 解析模型可以较为准确地识别和量化地表水与地下水的相互作用, 但振幅比法与相位滞后法在实际应用中却很少可以得到完全一致的计算结果。此外, 由于在具体应用时需要多孔介质相关的热物理参数进行推定, 而热物理参数的计算带有一定的不确定性, 容易对上述解析方法的解算结果产生较大的影响^[34-35]。这些因素均在一定程度上限制了采用该类解析模型对潜流交换动态变化过程及规律的定量描述。

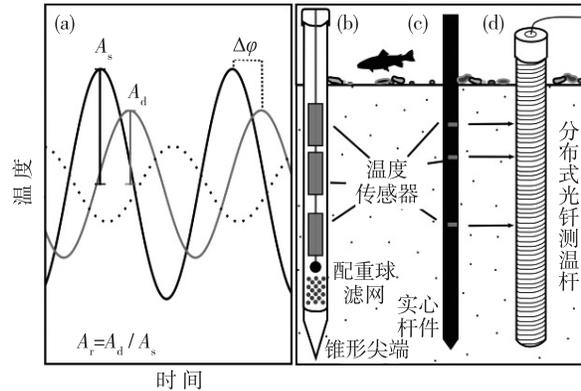


图1 深、浅部测点温度时序曲线及温度观测仪器常用布设方式示意^[18]

Fig. 1 Sketch for the temperature time-series curves of deep and shallow measurement points and the commonly layout approaches of temperature observation instrument^[18]

针对上述问题, Mccallum 等^[36]采用数学方法将 Hatch 振幅比方程与相位滞后方程联立和重新组合推导出振幅-相位组合法, 并认为该方法避开了推求等效热扩散系数过程中的不确定性问题, 且在地表水与地下水垂向交换速率较小的情况下具有较好的适用性; Luce 等^[37]对 Stallman 解析方法的待定系数方案做了进一步的研究, 认为其相应参数可以近似地用两测点温度波动信号的振幅比值和对应测点温度波动信号的相位滞后分别除以两测点间的竖直距离来表示, 但 Luce 解析模型也未考虑热弥散效应的影响。以上研究多是通过周期性时序测温曲线的振幅比和相位滞后来判断垂向地下水流动速度及方向, 研究河床介质的热物理特性, 也有部分研究^[38]将温度数据和水力学数据相结合, 通过数值方法来反演相应的水文地质参数。

更多的研究^[39-40]表明, Hatch 解和 Keery 解的计算结果大致相同, 但由于 Hatch 解考虑了热弥散效应的影响, 理论上 Hatch 解可以获得比 Keery 解更高的精度, 且热弥散度大于 0.1 时, Keery 解的计算精度会随着热弥散系数增大而急剧降低。一般情况下, 基于温度时间序列的振幅比较相位滞后法更不容易发生错误, 且相位滞后法无法辨别潜流交换的方向。在瞬态流条件下, 振幅比法的计算结果精度优于相位滞后法和振幅-相位组合法, 而在稳定流条件下, 或交换速度较低甚至接近于 0 的情况下, 振幅-相位组合法则可以获得最为精确的计算结果。另外, 与振幅比法和相位滞后法相比, 振幅-相位组合法不需要对热物理参数进行预估, 并消除了单独使用振幅比和相位滞后所造成的计算结果不一致的可能性, 在测点间距已知的情况下, 也可以根据温度时间序列估算相关的热传导系数。同时, Mccallum 解可以根据热物理参数时序变化的异常点来剔除温度时间序列中的错误数据, 而 Luce 解则可以在热物理参数已知的情况下反推出沉积物的垂直厚度。这些研究极大地促进了温度示踪方法在潜流带及潜流交换领域的应用, 对定量描述潜流交换的时空分布和非均质特征以及进一步系统地深入地研究地表水和地下水相互作用的动态机理均有着十分重要的意义。

1.3 潜流带温度时序数据采集方法

基于时间序列的温度示踪方法需要对河流潜流带不同深度处的温度波动数据进行采集, 合理的仪器布设方式、布设深度、布设间距以及良好的温度传感器性能有助于提高前述解析方法的解算精度。吴志伟和宋汉周^[41]研究表明影响 Hatch 解析模型计算精度的主要影响因子是两测点的竖向间距。Briggs 等^[42]发现当地表水补给地下水时, 在 0.5 m 以上的深度可以清晰地观测到日周期温度波动特征; 而当地下水补给地表水时, 地下水的向上流动导致温度的日周期波动被限定在 0.2 m 左右的深度。因此, 通常情况下, 地表水与地下水的交换作用越剧烈, 温度传感器布设深度越深, 布设间距也越大; 地表水与地下水的交换作用越微弱, 温度传感器布设越靠近河床表面, 布设间距也越小。表 1 列出了目前几种常用温度传感器的主要性能参数。

表 1 几种常用温度传感器的主要性能参数

Table 1 Main performance parameters of several commonly used temperature sensors

制造商	温度传感器型号	测量分辨率/°C	测量精度/°C	测量范围/°C	数据容量/组	外形尺寸
Vemco	PT100-A	0.01	±0.15	-200~200		
	Minilog-II-T	0.01	±0.1	-30~80	1 000 000	98 mm×23 mm
Thermochron	iButton DS1922L	0.062 5/0.5	±0.5	-40~85	4 096/8 192	17.5 mm×17.5 mm×6 mm
Alpha Mach	IBCod-Z/G	0.125/0.5	±1.0	-5~26/-40~85	2 048	44.4 mm×23.4 mm×12.2 mm
	iBWetland-22L	0.062 5/0.5	±0.5	-40~85	4 096/8 192	27 mm×20 mm×7.5 mm
Onset	HOBO TidbiT-v2	0.02	±0.21	-20~30	42 000	30 mm×41 mm×17 mm
	HOBO TidbiT MX2203	0.01	±0.2~±0.25	-20~50	96 000	44.5 mm×73.2 mm×35.8 mm
	HOBO TidbiT MX2204	0.01	±0.2~±0.25	-20~50	96 000	40.6 mm×69.9 mm×35.1 mm
	HOBO Water Temperature Pro-v2	0.02	±0.21	-40~50	42 000	114 mm×30 mm

对于尺寸较大的温度传感器,如 HOBO Water Temperature Pro-v2、Minilog-II-T 等,较为典型的仪器布设方式是将温度传感器间隔一定距离垂直布置于管径适宜的 PVC 材质的护筒内部,上、下部温度传感器之间使用聚苯乙烯泡沫材料和硅胶密封,以防止护筒内部产生优先流通道,同时在与河床监测位置相对应的护筒管壁上,钻孔以确保水流在护筒与沉积物之间交换通畅,然后利用橡胶锤或铁锤将底部带有可拆卸锥形尖端且管径稍大的钢制管件竖直地打入河床指定深度,再将装配有温度传感器的 PVC 护筒插入钢管中,最后轻轻扭转拔出钢管,使该 PVC 护筒嵌入河床;另一种布设方式是将温度传感器根据所需的测量间距悬挂于导热性能良好的金属或 PVC 材质护筒中,护筒底部开口并设置筛网,护筒内部可充满水使护筒内壁与温度传感器保持良好的热接触,如图 1(b)所示。上述两种布设方法避免了温度传感器与沉积物的直接接触,可以有效减少温度传感器遭受水流和河流漂浮物冲击破坏的可能性,且大尺寸的温度传感器通常也具有更高的测量精度与更大的数据存储容量。然而,由前述可知,当地下水补给地表水时,温度的日波动深度较浅,使大尺寸的温度传感器在应用时受到深、浅部测点间距的限制。此外,由于护筒材质、直径以及壁厚度的影响,造成护筒内部的温度传感器响应滞后于外部沉积层的温度变化,会给相位滞后法的计算结果带来一定的误差^[43]。

对于尺寸较小的温度传感器,如 HOBO TidbiT-v2、IBCod-Z/G、iBWetland-22L 等,常见的布设方式是利用导热性能良好的胶凝材料将温度传感器布置在带有表面凹槽的实心杆件上(如钢棒、塑料棒或木棒等),再利用橡胶锤或预先在河床打孔将其埋设于沉积层中,如图 1(c)所示。此类布设方式使温度传感器与河床沉积物密切接触,也能避免了因护筒而造成的热响应延迟现象,但易于受到高速水流或含砂水流的冲刷破坏,且对于热电偶或热电阻温度传感器,如 TP100-A 等,还涉及传输线路和数据记录仪的布设问题。

对于有防水要求的温度传感器,如 iButton DS1922L 等,最近的一种布设方式^[44]是将其布置在塑料杆件上,同时使用绝缘泡沫隔离以防止传感器之间产生热量传递,最后将其放置于 PVC 护筒中,并采取相应的防水措施密封,利用橡胶锤竖直打入河床。

除上述布设方式外,也有一些学者^[45-47]采用高分辨率的分布式光纤温度传感器(FO-DTS)实现远距离河床断面温度波动信号的连续测量,如图 1(d)所示。虽然该类采集方法在传感器间距的选取上更具灵活性,但布设成本较高也更为复杂,且需要持续的电源供给。

这些仪器布设方式各有优缺点,每种方式的适用性也随着具体的研究内容和实际研究区域内不同的水文特征、地形地貌及地质条件而不尽相同。最优的温度传感器布设方案取决于所使用传感器的类型以及地下水交换速率的方向和大小。一般地,多组传感器垂直布置可以提高数据分析的灵活性,获得地下水流速随深度变化的动态特征,在部分传感器发生故障的情况下,多组传感器布置方式也可以提供足够的备份数据。对于测点间距的选择问题,吴志伟和宋汉周^[39]指出当深、浅部温度测点间隔 1.0 m 时,Hatch 解的振幅比法可以有效评估 $(-1.0 \times 10^{-5} \sim 8.0 \times 10^{-5})$ m/s 的地下水垂向流速,Hatch 解的相位滞后法则能够评估 $(0 \sim 1.6 \times 10^{-4})$ m/s 的地下水垂向流速。而对于监测点的布置位置问题,Roshan 等^[48]认为在尽可能靠近河床表面的位置布

设传感器可以减少前述解析解的误差, 而在河床断面纵向部署多排传感器阵列, 则可以评估地下水水平流动的影响。

1.4 潜流带温度时序信号分析方法

实际的温度时序数据往往是由多个频率的温度信号叠加而成, 并包含各类噪声信号, 因此, 利用温度示踪方法定量分析河床潜流带温度场的时空差异和空间分布, 不可回避的问题是对这些周期性温度时序信号进行过滤和示踪信息提取处理。除了快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)的带通滤波方法和动态谐波回归分析法外, 更为简单的信号处理方法是滑动窗口快速傅里叶变换(Windowed Fourier Transform, WFT), 将温度时域信号转换为温度频域信号, 进一步从符合计算要求的正弦式日周期温度波动信号中提取出振幅和相位数据^[49]。最近, 一些学者^[50]提出利用连续小波变换(Continuous Wavelet Transform, CWT)对温度时间序列信号进行分析和鉴别, 进而从昼夜温差信号中提取谐波信号, 隔离出基本的振幅和相位信息, 但该方法在瞬态水力条件下的可靠性尚待进一步验证。

1.5 基于温度示踪理论的数值方法

近年来, 计算机数值技术的飞速进步为温度示踪方法的深入研究拓宽了更为广阔的发展空间。针对上述一维垂向热运移解析模型的解算, 目前常用的求解软件为 VFLUX^[51] 和 Ex-Stream^[52] 程序, 二者均通过 MATLAB 编程开发, 其中 VFLUX 的最新版本可以利用一维垂向瞬态热运移解析方法对渗流速度进行解算, 而 Ex-Stream 程序则可以实现一维垂向稳态和瞬态热运移解析模型的求解。

与解析方法相比, 数值方法对二维或三维问题更具优势, 将温度时序数据作为限制性因子对热流耦合模型进行约束和校正, 通过正演模拟与实测温度数据进行对比分析, 或通过反演方法研究最优化问题以及求解热扩散系数等一系列水文地质参数, 针对各种复杂温度边界和水文地质条件的数值仿真软件不断涌现, 并得到广泛应用。如 Bastola 和 Peterson^[53] 利用 VS2DH1 模拟了美国伊利诺斯州中部 Little Kickapoo Creek 河段河床复杂的季节性温度波动, 并据此对该段河床温度场的动态变化和空间分布特征进行了分析; Su 等^[54] 通过实例验证对 GA-VS2DHR 软件在侧岸潜流交换参数反演问题上的可靠性进行了评估; Munz 和 Schmidt^[55] 基于 Crank-Nicolson 格式隐式有限差分方法开发出 FLUX-BOT 程序用于求解潜流带中的垂向水分交换问题。此外, 1D TempProV2 程序可以对没有周期性特性的温度时序数据进行数值模拟以评估地表水和地下水的动态交换, 也可以在水头已知的情况下估算出渗透系数^[56]。这些研究工作表明, 数值方法在针对二维和三维问题以及定义复杂温度边界、水文地质条件和材料异质性方面更具灵活性, 提高了人们对热量在潜流带中自然运移过程的认知, 是了解和还原潜流交换真实过程和途径的有效手段之一。然而, 与解析方法类似, 数值方法依赖于理论框架及若干微分方程的基本假设, 如连续介质假设、局部热平衡假设、热弥散系数的经验公式等, 具有一定的局限性, 且数值计算精度还受算法以及计算机计算处理性能影响。

2 比较研究与讨论

2.1 与传统的水力学方法相比

传统的水力学方法通常需要对压力水头和渗透系数进行评估, 而渗透系数除了受沉积物颗粒的形状、大小影响外, 也受由温度变化引起的水体密度和黏滞性变化的影响。另外, 在现场试验中, 一条河流不同位置的渗透系数常常会有几个数量级的差异^[57], 这给渗透系数的准确量化带来了一定的困难, 而热传导系数对潜流带沉积物的结构特征敏感性更低, 河床温度对河流水力条件的变化反应强烈, 且温度示踪方法的测温设备成本较低, 易于布置, 数据收集和处理也较为经济, 便于在野外实现高密度连续监测。对于二者的量化对比研究, 杨国强等^[20] 利用水动力学方法和温度示踪方法计算了内蒙古鄂托克旗境内大克泊湖西侧某处的渗流速度, 计算结果的对比分析表明两种方法的计算结果较为接近, 但水动力学方法由于水面波动等因素的影响, 计算结果具有较强的波动性; 李英玉等^[21] 对浙江省新安江下游某河岸带的水位与温度数据进行监测, 分析指出与水力学方法计算结果相比, Hatch 相位滞后法的计算结果与其较为接近。这些研究说明基于时间

序列的温度示踪方法对评估潜流交换速度具备较高的可信度,可以较为准确地分析和研究潜流交换的动态变化和过程模式。

2.2 与环境示踪剂方法相比

环境示踪剂方法是潜流交换研究领域的一种常用方法,可分为天然示踪剂方法和人工示踪剂方法。该方法大多基于质量平衡理论,通过将人工或天然示踪剂输入上游河流的地表水体,并在下游对示踪剂穿透曲线进行测量和分析,从而进一步结合暂态存储模型来研究示踪剂在潜流带中的迁移和滞留特征以及河流地表水和地下水的交换规律^[58-60]。也有不少学者^[61-62]利用野外现场试验和数值模拟方法对温度示踪方法和环境示踪剂方法在潜流交换研究领域的适用性进行了讨论分析。相比而言,环境示踪剂方法多是对河流潜流交换模式的半定量分析,无法对河流潜流带动态交换过程的时空分布特征进行精准刻画,且环境示踪剂方法的观测与采集设备的成本一般较高,操作也较为复杂,不利于长时间的连续观测。此外,多数环境示踪剂在近地表环境中广泛分布,容易对试验过程和计算结果造成干扰,部分示踪剂还可能对环境造成二次污染。

总体而言,温度示踪方法作为一种新型高效的分析方法,对于研究河流、湖泊、湿地等近地表水体环境的水文地质特征有着重大意义,有助于在更广阔的空间尺度上实现对河床潜流交换过程模式的定量研究,为探究地表水与地下水相互作用的过程模式和时空动态特征提供了一种新的思路。

然而,真实环境下河流地表水与地下水的相互作用十分复杂,潜流交换的高度动态特征与多维多尺度性质使得单一的研究方法不足以完全清楚地涵盖地表水与地下水作用的全部过程和不同的影响因素。通过运用不同方法进行相互印证和比较,有助于定量分析潜流带水文地质特征以及潜流交换的动态过程。如在同等条件下,温度示踪方法与环境示踪剂方法相互配合有助于提高对微孔尺度上多孔介质中的流场和运输机制的理解;而将温度示踪方法和水文学方法相结合,则可以对实际工程的水文地质参数进行分析与反演。Cranswick等^[63]发现河床小尺度非均质性会对热和氡(Radon-222)运移产生不同的影响;Xie和Batlle-Aguilar^[64]通过现场试验及数值模拟指出,与水力学数据相比,单一的温度数据作为限制性因子在约束和校正河流侧向潜流交换模型方面并没有体现出明显的优势,但两种方法组合使用可以显著降低“失水”河流侧向潜流交换的不确定性。

河流潜流交换研究不可避免地要涉及多维交换问题,Lautz^[65]强调使用温度时间序列解析模型的最大误差来源是潜流带地下水非垂向流动;Cuthbert和Mackay^[66]指出虽然地下水非垂向流动并不一定会导致垂向交换速度的错误估算,但不均匀的流场或水动力弥散效应仍会对计算结果产生较大的误差。同时,热物理参数的不确定性和温度监测设备布设及其分辨率所导致的不精确测量也会造成计算结果的较大误差。Shanafield等^[34]研究发现在地下水流速较小或为负值时,热物理参数、传感器误差和传感器间距的不确定性会导致错误的地下水速度;Soto-López等^[67]指出与相位滞后法相比,温度测量分辨率对振幅比法的计算精度影响更大,且对于同一类温度传感器,分辨率是造成计算结果值域范围不一的主要因素,同时,当地下水补给地表水时,热物理参数和温度观测精度的不确定性会给解析模型的计算结果造成较大误差。

此外,温度示踪法的若干解析模型均是基于理想化的基本假设得到的,潜流带多孔介质的非均质性、各向异性、地下水流非稳态流动、局部热平衡以及非正弦温度信号均会对解析模型的计算精度产生影响。Mccallum等^[36]指出水流条件的快速变化会导致错误的计算结果;Roshan等^[68]研究发现在雷诺数较小的情况下忽略局部非热平衡的影响会给地下水流速的计算带来误差;Rau等^[69]研究表明非正弦温度边界会显著影响解析模型的计算结果。虽然这些学者对前述解析模型在某些非理想条件下的应用进行了一些探讨,但仍然需要进一步定量研究非理想条件对潜流交换温度示踪方法的影响。

3 结论与展望

回顾温度示踪方法在地表水与地下水潜流交换领域的研究进展,从定性分析河床特定区域若干温度剖面的潜流交换过程,到定量刻画河床潜流带温度场的时空差异和空间分布,温度示踪方法在潜流交换机理研究

领域取得了长足的进步。

(1) 与其他研究方法相比,温度示踪方法为潜流交换的交换模式和时空动态特征的研究提供了新的思路。潜流带及潜流交换研究涉及多个尺度和多个学科领域,单一的研究方法很难对潜流带内发生的全部物理、化学及生物过程进行准确地刻画与分析。多种研究方法协同运用有助于提高对潜流交换机理的理解。

(2) 温度示踪方法依赖于地表水与地下水之间的温度差异,温度测量方式和观测仪器的不同对潜流交换的计算结果造成的影响也各有差异,目前仍缺乏客观有效的标准对温度测量的不确定性进行量化评估。

(3) 一维垂向热运移方程的稳态和瞬态温度场解析方法均是基于若干个基本假设得到的,而实际的边界条件和水文地质往往难以满足全部的假设条件,使得解析方法在多维流场和非理想条件下的适用性受到限制,尚待进一步全面和深入的研究。

参考文献:

- [1] 董哲仁. 河流生态系统研究的理论框架[J]. 水利学报, 2009, 40(2): 129-137. (DONG Z R. Framework of research on fluvial ecosystem [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(2): 129-137. (in Chinese))
- [2] HOU Z, NELSON W C, STEGEN J C, et al. Geochemical and microbial community attributes in relation to hyporheic zone geological facies [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 1-17.
- [3] 于靖, 张华. 城市小型河流水动力弥散和潜流交换过程[J]. 水科学进展, 2015, 26(5): 714-721. (YU J, ZHANG H. Hydrodynamic dispersion and hyporheic exchange in a small urban stream [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 26(5): 714-721. (in Chinese))
- [4] WONDZELL S M. Groundwater-surface-water interactions: perspectives on the development of the science over the last 20 years [J]. Freshwater Science, 2015, 34(1): 368-376.
- [5] CARDENAS M B. Hyporheic zone hydrologic science: a historical account of its emergence and a prospectus [J]. Water Resources Research, 2015, 51(5): 3601-3616.
- [6] ROBERTSON A L, WOOD P J. Ecology of the hyporheic zone: origins, current knowledge and future directions [J]. Fundamental & Applied Limnology, 2010, 176(4): 279-289.
- [7] BRUNNER P, THERRIEN R, RENARD P, et al. Advances in understanding river-groundwater interactions [J]. Reviews of Geophysics, 2017, 55(3): 818-854.
- [8] WEATHERILL J J, ATASHGAHI S, SCHNEIDEWIND U, et al. Natural attenuation of chlorinated ethenes in hyporheic zones: a review of key biogeochemical processes and in-situ transformation potential [J]. Water Research, 2018, 128(1): 362-382.
- [9] 董哲仁, 孙东亚, 赵进勇, 等. 河流生态系统结构功能整体性概念模型[J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 550-559. (DONG Z R, SUN D Y, ZHAO J Y, et al. Holistic conceptual model for the structure and function of river ecosystems [J]. Advances in Water Science, 2010, 21(4): 550-559. (in Chinese))
- [10] HARVEY J, GOOSEFF M. River corridor science hydrologic exchange and ecological consequences from bedforms to basins [J]. Water Resources Research, 2015, 51(9): 6893-6922.
- [11] ANDERSON M P. Heat as a ground water tracer [J]. Ground Water, 2005, 43(6): 951-968.
- [12] CONSTANTZ J. Heat as a tracer to determine streambed water exchanges [J]. Water Resources Research, 2008, 44: 10.
- [13] 吴志伟, 宋汉周. 地下水温度示踪理论与方法研究进展[J]. 水科学进展, 2011, 22(5): 733-740. (WU Z W, SONG H Z. Temperature as a groundwater tracer: advances in theory and methodology [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(5): 733-740. (in Chinese))
- [14] STONESTROM D A, CONSTANTZ J. Heat as a tool for studying the movement of ground water near streams [R]. Reston: US Geological Survey, 2003.
- [15] RAU G C, ANDERSEN M S, MCCALLUM A M, et al. Heat as a tracer to quantify water flow in near-surface sediments [J]. Earth-Science Reviews, 2014, 129(1): 40-58.
- [16] BOANO F, HARVEY J W, MARION A, et al. Hyporheic flow and transport processes: mechanisms, models, and biogeochemical implications [J]. Reviews of Geophysics, 2014, 52(4): 603-679.
- [17] CAISSIE D, KURYLYK B L, ST-HILAIRE A, et al. Streambed temperature dynamics and corresponding heat fluxes in small

- streams experiencing seasonal ice cover [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 1441-1452.
- [18] IRVINE D J, BRIGGS M A, LAUTZ L K, et al. Using diurnal temperature signals to infer vertical groundwater-surface water exchange [J]. *Ground Water*, 2017, 55(1): 10-26.
- [19] 鲁程鹏, 张颖, 朱静思, 等. 基于热追踪方法的河流横断面潜流交换时空非均质特征研究[J]. *第四纪研究*, 2014, 34(5): 1094-1105. (LU C P, ZHANG Y, ZHU J S, et al. Temporal spatial patterns of hyporheic exchange along a river transect through the heat tracing method [J]. *Quaternary Sciences*, 2014, 34(5): 1094-1105. (in Chinese))
- [20] 杨国强, 苏小四, 王璜, 等. 热量示踪在潜流带水力交换量计算中的应用[J]. *长江科学院院报*, 2014, 31(10): 124-133. (YANG G Q, SU X S, WANG H, et al. Using heat as a tracer to quantify hydrodynamic exchange within hyporheic zone [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2014, 31(10): 124-133. (in Chinese))
- [21] 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 Y Y, ZHAO J, LYU H, 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))
- [22] BREDEHOEFT J D, PAPAOPULOS I S. Rates of vertical groundwater movement estimated from the earth's thermal profile [J]. *Water Resources Research*, 1965, 1(2): 325-328.
- [23] SOREY M L. Measurement of vertical groundwater velocity from temperature profiles in wells [J]. *Water Resources Research*, 1971, 7(7): 963-970.
- [24] LAPHAM W W. Use of temperature profiles beneath streams to determine rates of vertical ground-water flow and vertical hydraulic conductivity [R]. Denver: US Geological Survey, 1989: 1-35.
- [25] SCHMIDT C, BAYER-RAICH M, SCHIRMER M. Characterization of spatial heterogeneity of groundwater-stream water interactions using multiple depth streambed temperature measurements at the reach scale [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2006, 10(4): 849-859.
- [26] 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 J S, SHU L C, LU C P. 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))
- [27] ANIBAS C, FLECKENSTEIN J H, VOLZE N, et al. Transient or steady-state? Using vertical temperature profiles to quantify groundwater-surface water exchange [J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(15): 2165-2177.
- [28] IRVINE D J, CARTWRIGHT I, POST V E A, et al. Uncertainties in vertical groundwater fluxes from 1D steady state heat transport analyses caused by heterogeneity, multi-dimensional flow, and climate change [J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(2): 813-826.
- [29] SUZUKI S. Percolation measurements based on heat flow through soil with special reference to paddy fields [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1960, 65(9): 2883-2885.
- [30] STALLMAN R W. Steady one-dimensional fluid flow in a semi-infinite porous medium with sinusoidal surface temperature [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1965, 70(12): 2821-2827.
- [31] HATCH C E, FISHER A T, REVENAUGH J S, et al. Quantifying surfacewater-groundwater interactions using time series analysis of streambed thermal records: method development [J]. *Water Resources Research*, 2006, 42(10): 2405-2411.
- [32] GOTO S, YAMANO M, KINOSHITA M. Thermal response of sediment with vertical fluid flow to periodic temperature variation at the surface [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2005, 110(B1): 211-226.
- [33] 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]. *Journal of Hydrology*, 2007, 336(1/2): 1-16.
- [34] SHANAFIELD M, HATCH C, POHLL G. Uncertainty in thermal time series analysis estimates of streambed water flux [J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(3): 341-351.
- [35] RAU G C, ANDERSEN M S, ACWORTH R I. Experimental investigation of the thermal dispersivity term and its significance in the heat transport equation for flow in sediments [J]. *Water Resources Research*, 2012, 48: W03511.
- [36] 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]. *Water Resources Research*, 2012, 48(11): 76-78.
- [37] 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]. *Water Resources Research*, 2013, 49(1): 488-506.

- [38] VANDERSTEEN G, SCHNEIDEWIND U, ANIBAS C, et al. Determining groundwater-surface water exchange from temperature-time series: combining a local polynomial method with a maximum likelihood estimator [J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(2): 922-939.
- [39] 吴志伟, 宋汉周. 由温度时序资料反演地下水流速的两种解析解及其比较[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2014, 44(2): 610-618. (WU Z W, SONG H Z. Analysis and contrast of two analytic solutions of inversing groundwater velocity by temperature time-series records [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2014, 44(2): 610-618. (in Chinese))
- [40] IRVINE D J, LAUTZ L K, BRIGGS M A, et al. Experimental evaluation of the applicability of phase, amplitude, and combined methods to determine water flux and thermal diffusivity from temperature time series using VFLUX 2 [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 531: 728-737.
- [41] 吴志伟, 宋汉周. 温度时序资料确定地下水流速解析模型灵敏度分析[J]. *水科学进展*, 2013, 24(6): 877-882. (WU Z W, SONG H Z. Sensitivity analysis of determining seepage velocity using temperature records [J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(6): 877-882. (in Chinese))
- [42] BRIGGS M A, LAUTZ L K, BUCKLEY S F, et al. Practical limitations on the use of diurnal temperature signals to quantify groundwater upwelling [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519(B): 1739-1751.
- [43] CARDENAS M B. Thermal skin effect of pipes in streambeds and its implications on groundwater flux estimation using diurnal temperature signals [J]. *Water Resources Research*, 2010, 12: W03536.
- [44] NARANJO R C, TURCOTTE R. A new temperature profiling probe for investigating groundwater-surface water interaction [J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(9): 7790-7797.
- [45] BRIGGS M A, LAUTZ L K, MCKENZIE J M. A comparison of fibre-optic distributed temperature sensing to traditional methods of evaluating groundwater inflow to streams [J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(9): 1277-1290.
- [46] 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]. *Water Resources Research*, 2016, 52(7): 5178-5194.
- [47] 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]. *Hydrological Processes*, 2017, 31(14): 2648-2661.
- [48] ROSHAN H, RAU G C, ANDERSEN M S, et al. Use of heat as tracer to quantify vertical streambed flow in a two-dimensional flow field [J]. *Water Resources Research*, 2012, 48: 197-205.
- [49] CUTHBERT M O, MACKAY R, DURAND V, et al. Impacts of river bed gas on the hydraulic and thermal dynamics of the hyporheic zone [J]. *Advances in Water Resources*, 2010, 33(11): 1347-1358.
- [50] ONDERKA M, BANZHAF S, SCHEYTT T, et al. Seepage velocities derived from thermal records using wavelet analysis [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 479(5): 64-74.
- [51] 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]. *Journal of Hydrology*, 2012, 420(4): 142-158.
- [52] 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]. *Computers & Geosciences*, 2011, 37(10): 1664-1669.
- [53] BASTOLA H, PETERSON E W. Heat tracing to examine seasonal groundwater flow beneath a low-gradient stream in rural central Illinois, U S A [J]. *Hydrogeology Journal*, 2016, 24(1): 1-14.
- [54] SU X R, SHU L C, CHEN X H, et al. Interpreting the cross-sectional flow field in a river bank based on a genetic-algorithm two-dimensional heat-transport method (GA-VS2DH) [J]. *Hydrogeology Journal*, 2016, 24(8): 2035-2047.
- [55] MUNZ M, SCHMIDT C. Estimation of vertical water fluxes from temperature time series by the inverse numerical computer program FLUX-BOT [J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31(15): 2713-2724.
- [56] KOCH F W, VOYTEK E B, DAY-LEWIS F D, et al. 1-D TempProV2: new features for inferring groundwater/surface-water exchange [J]. *Ground Water*, 2016, 54(3): 434-439.
- [57] CÔTÉ J, FILLION M, KONRAD J M. Estimating hydraulic and thermal conductivities of crushed granite using porosity and equivalent particle size [J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2011, 137(9): 834-842.
- [58] 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 X B, ZHAO J, LI Y Y, et al. Experimental study of bedform-driven hyporheic exchange [J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(6): 835-

841. (in Chinese))
- [59] ZHOU T, ENDRENY T A. Reshaping of the hyporheic zone beneath river restoration structures; flume and hydrodynamic experiments [J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(8): 5009-5020.
- [60] BOURKE S A, COOK P G, SHANAFIELD M, et al. Characterisation of hyporheic exchange in a losing stream using radon-222 [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519(Part A): 94-105.
- [61] ENGELHARDT I, PROMMER H, MOORE C, et al. Suitability of temperature, hydraulic heads, and acesulfame to quantify wastewater-related fluxes in the hyporheic and riparian zone [J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(1): 426-440.
- [62] LAATTOE T, WERNER A D, POST V E A. Spatial periodicity in bed form-scale solute and thermal transport models of the hyporheic zone [J]. *Water Resources Research*, 2015, 50(10): 7886-7899.
- [63] 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(Part B): 1870-1881.
- [64] XIE Y Q, BATLLE-AGUILAR J. Limits of heat as a tracer to quantify transient lateral river-aquifer exchanges [J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(9): 7740-7755.
- [65] LAUTZ L K. Impacts of nonideal field conditions on vertical water velocity estimates from streambed temperature time series [J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(1): 3473-3475.
- [66] CUTHBERT M O, MACKAY R. Impacts of non-uniform flow on estimates of vertical streambed flux [J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(12): 19-28.
- [67] SOTO-LÓPEZ C D, MEIXNER T, FERRÉ T P A. Effects of measurement resolution on the analysis of temperature time series for stream-aquifer flux estimation [J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(12): 12602.
- [68] ROSHAN H, CUTHBERT M O, ANDERSEN M S, et al. Local thermal non-equilibrium in sediments; implications for temperature dynamics and the use of heat as a tracer [J]. *Advances in Water Resources*, 2014, 73(1): 176-184.
- [69] RAU G C, CUTHBERT M O, ANDERSEN M S, et al. Assessing the accuracy of 1-D analytical heat tracing for estimating near-surface sediment thermal diffusivity and water flux under transient conditions [J]. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*, 2015, 120(8): 1551-1573.

Advances in temperature tracer method of hyporheic exchange*

REN Jie^{1,2}, CHENG Jiaqiang², YANG Jie^{1,2}, CHENG Lin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Institute of Water Resources and Hydro-Electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The hyporheic zone, which is an important interface between the surface of the water and groundwater, is an active ecotone in a river ecosystem. The study on hyporheic zones and hyporheic exchange mechanism impose significant effects in assessing the development and utilization of water resources, and in maintaining and restoring the health of a river ecosystem. The present study systematically introduces the analytical model of a one-dimensional vertical steady-state and transient heat transport equation in the temperature tracer method, and combines and summarizes the research progress of temperature time-series data collection methods, signal analysis methods, and numerical methods, based on temperature tracing. Finally, the advantages and main problems of the temperature tracer method were compared and discussed, indicating that the uncertainty in temperature measurements, multi-dimensional groundwater flow, and impact of non-ideal conditions on these analytical models should still be emphasized in future studies on temperature tracer methods.

Key words: hyporheic zone; hyporheic exchange; temperature tracer method; analytical model

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51679194).