

地下水-地表水潜流交换通量监测评估方法与试验

周志伟^{1,2}, 李旭^{1,2*}, 王锴², 戴鑫², 张海涛^{1,2}, 聂世博²,
许光泉^{1,2}, 李兵¹

1. 深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室, 安徽 淮南 232000

2. 安徽理工大学 地球与环境学院, 安徽 淮南 232001

摘要: 定量评估潜流带水流交换通量对区域水循环过程中物质、能量迁移转化和污染物修复治理等具有重要意义。然而, 受河床非均质性及评估计算方法的限制, 传统方法难以实现点尺度原位定量监测。本研究提出一种利用自动渗流仪监测评估地下水-地表水交换通量的方法, 并开展室内和野外验证试验。结果表明: 该方法能精准监测评估地下水补给地表水和地表水补给地下水两种交互模式下的交换通量, 试验相对误差均小于 3%; 仪器插入含水层的深度对通量评估结果影响不显著, 表明仪器稳定性强; 野外试验中仪器能有效捕获地下水排泄过程的地下水微动态, 计算得到交换通量为 0.0648 m/d。本研究为潜流带交换通量评估提供参数与技术支持。

关键词: 潜流带; 地下水-地表水相互作用; 交换通量; 自动渗流仪; 区域水循环

中图分类号: P 641 收稿日期: 2025-12-7

Methods and experiments of groundwater-surface water exchange fluxes monitoring and evaluation in the hyporheic zone

Zhou Zhiwei^{1,2}, Li Xu^{1,2*}, Wang Kai², Dai Xin², Zhang Haitao^{1,2}, Nie Shibo², Xu Guangquan^{1,2}, Li Bing¹

1. State Key Laboratory of Safe Mining of Deep Coal and Environmental Protection, Huainan 232000, China

2. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China

Abstract: Quantitative assessment of water exchange flux in hyporheic zone is of great significance for understanding mass and energy transport and transformation in regional water cycles, as well as for contaminant remediation and management. However, due to factors such as heterogeneous streambed conditions and limitations in assessment methods, traditional approaches have struggled to achieve in situ, point-scale quantitative monitoring of hyporheic exchange fluxes. To address this, this study proposes a method using an automatic seepage meter to monitor and assess groundwater-surface water exchange fluxes, supported by both laboratory and field validation tests. The results demonstrate that: The automatic seepage meter accurately monitors and assesses exchange fluxes

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42102293; 42272281); 深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室开放基金 (2025YB020)

作者简介: 周志伟 (2001-), 男, 博士, 主要从事地下水-地表水相互作用方面的研究. E-mail: zhouzw_2001@163.com, Tel: 15055308708, ORCID: 0009-0000-7917-4780.

***通信作者:** 李旭 (1990-), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 从事地下水渗流与溶质运移数值模拟研究. E-mail: lixu@aust.edu.cn, Tel: 15212678076, ORCID: 0000-0002-7746-8598.

under both groundwater discharge to surface water and surface water recharge to groundwater scenarios, with experimental relative errors below 3%. Variations in the insertion depth of the automatic seepage meter into the aquifer do not significantly affect the flux assessment results, indicating strong instrument stability. Field tests confirmed the device's capability to capture subtle groundwater dynamics during discharge events, quantifying groundwater exfiltration rate at 0.0648 m/d. This research provides parametric and technical support for hyporheic flux assessment.

Keywords: hyporheic zone; groundwater-surface water interaction; exchange fluxes; automatic seepage meter; regional water cycle

引言

潜流带是河岸含水层中连接河流与地下水的混合区域,在流域水文和生物地球化学循环中扮演着重要角色(丁吾举等, 2024; Ma et al., 2024; Wang et al., 2025)。地下水-地表水交互过程促进两者之间的水量和物质交换,控制着潜流带氨氮、溶解氧和有机碳等元素的迁移转化,对地表水体污染物去除有着积极作用,其水文动态对水资源评估、开发和管理具有重要影响(金光球等, 2008; 张佩瑶等, 2024; Fakhari et al., 2025)。因此,定量评估潜流带水流交换通量,对区域水循环过程中的物质迁移、能量转化及水量平衡等方面的研究具有重要科学意义,同时可为水资源优化配置和生态环境保护提供关键数据支撑。

随着对地下水与地表水交互过程研究的深入,水量平衡分析、同位素示踪以及热示踪等多种方法已被广泛应用于获取该过程中的水量交换(Bouchez et al., 2021; 卢小慧等, 2024; 彭书艳等, 2024)。其中,水量平衡分析作为一种直接的方法,通过系统地分析地下水与地表水的源汇关系来估算区域水量交换,但其结果受输入数据精度和边界条件设定的影响较大,存在一定不确定性(金光球等, 2022; Cristian et al., 2024)。此外,氡同位素(^{222}Rn)作为天然的放射性示踪剂,可通过其迁移路径和浓度变化判断补排关系,并基于质量守恒定量计算交换量(Lin et al., 2023; 谌宏伟等, 2024; 钱畅等, 2025)。然而,由于河床地形、沉积物结构及渗透系数等在空间上的显著差异,导致地下水-地表水交换通量在区域内呈现强烈的空间变异性(Tripathi et al., 2021; Li et al., 2023; 李冰洁等, 2025)。尽管传统方法虽然在区域尺度上对交换通量的评估时具有一定适用性,但其空间分辨率通常较低,难以实现高时空分辨率的点尺度原位定量监测(张文兵等, 2022; 彭闯等, 2024; Zhai et al., 2025)。因此,为了揭示交换通量的空间变异机制,有必要发展能够实现点尺度原位监测与定量评估的新技术,从而为研究潜流交换过程的空间变异性提供可靠方法与参数支持。

为此,本研究提出了一种利用自动渗流仪监测评估地下水-地表水交换通量的方法,基于地下水-地表水交互数学模型,结合自动渗流仪获取的水位-时间动态曲线,精准计算潜流带地下水-地表水交换通量。此外,本研究构建了地下水-地表水交互模拟装置,并利用自动渗流仪开展了不同交互模式的室内试验。同时,通过野外试验,利用自动渗流仪监测评估野外溪流的潜流交换通量。研究成果对于水资源可持续利用、生态环境保护具有重要的科学价值和现实意义。

1 地下水-地表水交换通量监测评估方法

1.1 基本原理

为定量评估潜流带水流交换通量,本研究提出了一种利用自动渗流仪监测评估地下水-地表水交换通量的方法。该方法的主要原理是利用自动渗流仪获取地下水-地表水交互过程中的瞬时水位变化,并计算其交换通量。自动渗流仪主要由液位计、数据存储器、阀门以及井管构成(图1)。安装时将液位计置于井管中,并通过线缆连接数据存储器,以实时监测水位数据。在井管侧面安装电磁阀门,通过蓝牙远程控制阀门启闭,使得井管内水位发生变

化。工作时，将自动渗流仪垂直插入含水层中，通过蓝牙远程控制电磁阀门瞬时关闭，阻隔井管内外水力联系，激发井管内水位动态发生变化。通过浮球液位计以及数据存储器监测并记录井管内水位的动态变化过程，以获取瞬时水位变化。利用相应的地下水动力学计算方法从而获取地下水-地表水交换通量，其详细的计算方法见 1.2 节。

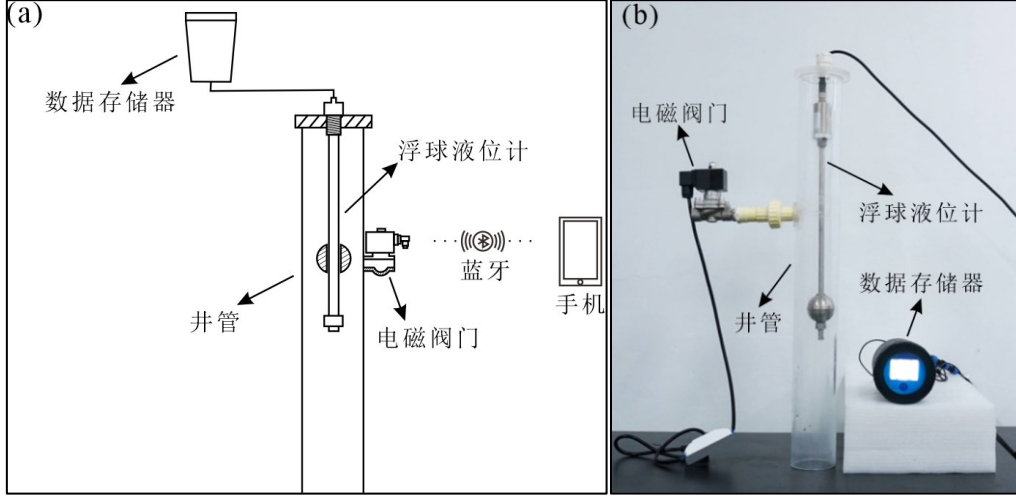


图 1 自动渗流仪：(a) 示意图；(b) 实物图

Fig.1 Automatic seepage meter: (a) schematic diagram; (b) physical diagram

1.2 交换通量计算方法

依据地下水-地表水交互过程中的瞬时水位变化，计算其交换通量的方法，主要基于 Solder 等 (2016) 与 Solomon 等 (2020) 所提出的地下水-地表水交互模型。为了简化数学模型，模型基于如下假设条件：(1) 含水层为均质含水层；(2) 井管外地表水位恒定；(3) 地下水运动符合达西定律。在地下水补给地表水的潜流交互环境下，将自动渗流仪垂直插入含水层中。当阀门开启时，井管内外水位均为 H_s (图 2a)，关闭阀门会局部扰动井管附近的地下水流场 (图 2b)，导致井管内水位上升。根据达西定律，井管内地下水-地表水交互流量 Q 为：

$$Q = -\frac{Ka[h(t) - h_1]}{L} \quad (1)$$

式中， K 为河床渗透系数， mm/s ； a 为井管截面积， mm^2 ； $h(t)$ 为井管内的水位， mm ； h_1 为阀门关闭后井管内稳定水位， mm ； L 为井管深度， mm 。

井管上部地表水中流量可表示为：

$$Q = a \frac{\partial h(t)}{\partial t} \quad (2)$$

联立式 (1-2) 得到：

$$\frac{\partial h(t)}{h(t) - h_1} = -\frac{K \partial t}{L} \quad (3)$$

地下水中流速，即地下水-地表水交互通量 q 为：

$$q = -\frac{K(h_0 - h_1)}{L} \quad (4)$$

$$h_1 = \frac{qL}{K} + h_0 \quad (5)$$

式中， h_0 为初始水位，即井管外地表水位 H_s 。

令 $H=h(t)-h_1$ ，即 $\frac{\partial H}{\partial h(t)}=1$ ，因此， $\partial H=\partial h(t)$ 。 $t=0$ 时， $H_0=h_0-h_1$ 。代入式 (3) 并积分：

$$\int_{H_0}^{H_t} \frac{\partial H}{H} = \int_0^t -\frac{K \partial t}{L} \quad (6)$$

$$\ln H_t - \ln H_0 = -\frac{K}{L}t = \ln \frac{H_t}{H_0} \quad (7)$$

$$\frac{H_t}{H_0} = e^{-\frac{K}{L}t} = \frac{h(t) - h_1}{h_0 - h_1} \quad (8)$$

$$h(t) = (h_0 - h_1)e^{-\frac{K}{L}t} + h_1 \quad (9)$$

将式 (5) 代入式 (9)，得到井管内水位函数：

$$h(t) = \frac{qL}{K} \left(1 - e^{-\frac{K}{L}t} \right) + h_0 \quad (10)$$

将井管内水位函数对时间 t 求导得：

$$\frac{dh}{dt} = qe^{-\frac{K}{L}t} \quad (11)$$

在 $t=0$ 时，即阀门关闭瞬间为：

$$\left. \frac{dh}{dt} \right|_{t=0} = q \quad (12)$$

由此可知，阀门关闭时刻的水位-时间动态曲线斜率即为地下水-地表水的交换通量（图 3）。在地下水补给地表水的情况下，阀门关闭后，井管内外水力联系被切断，地下水通过井管底部进入，使得井管内水位上升。根据达西定律，地下水-地表水交换通量 $q = K*(H_g - H_s)/L$ ，其方向由地下水头 H_g 与地表水头 H_s 之差决定，当 $H_g > H_s$ 时，地下水补给地表水，此时 $q > 0$ ；反之，地表水补给地下水，此时 $q < 0$ 。基于公式 (12)，电磁阀门关闭后，若井管内水位上升，即 $q > 0$ ，地下水补给地表水；若井管内水位下降，即 $q < 0$ ，地表水补给地下水。

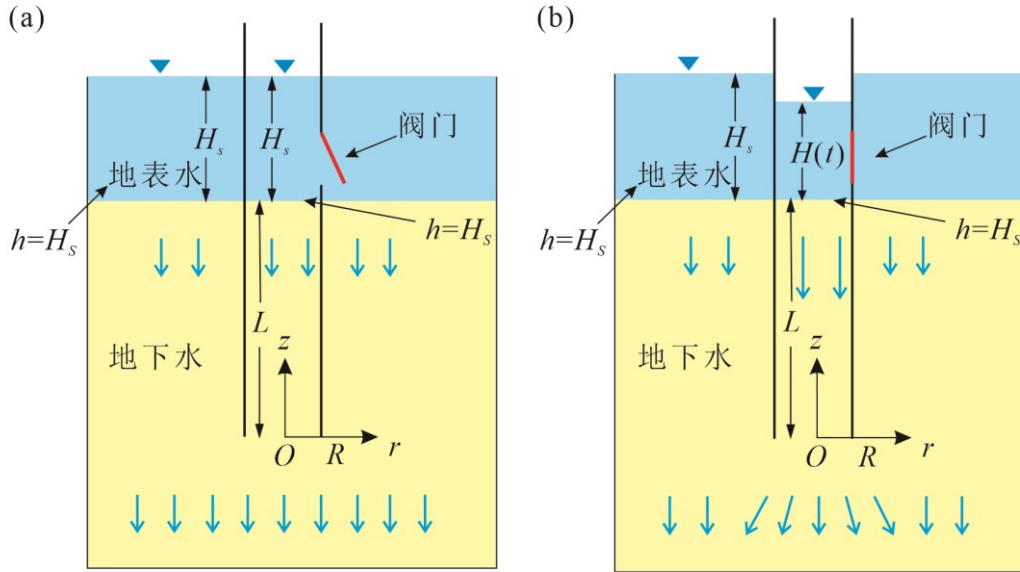


图 2 地下水-地表水交换通量监测评估原理 (修改于 Zlotnik et al., 2023)

Fig.2 The principle of groundwater-surface water exchange fluxes monitoring and evaluation (modified after Zlotnik et al., 2023)

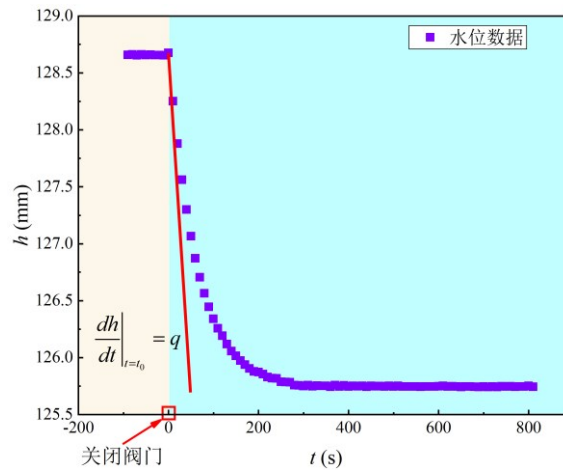


图 3 井管内水位-时间动态曲线

Fig.3 Water level-time dynamic curve in the well

2 室内试验

为验证自动渗流仪监测评估地下水-地表水交换通量的可行性与准确性, 构建了地下水-地表水交互模拟装置, 与自动渗流仪共同组成了地下水-地表水交换通量室内试验装置, 开展了一系列室内试验研究。

2.1 试验材料

1) 试验仪器: 浮球液位计 (监测频率为 10 s/次, 量程为 250 mm, 分辨率为 0.01 mm), 用于高精度水位记录; 电磁阀门 (支持手动与蓝牙远程双模操控), 可实现阀门定时周期循环控制; 数据存储器, 用于水位数据的采集与存储; YZ1515 蠕动泵, 为系统提供稳定可控的水流。

2) 试验介质: 选取具有良好渗透性的石英砂作为试验填充的介质, 通过达西试验计算石英砂的渗透系数为 0.0097 m/s。选取干净的自来水作为试验用水。

2.2 地下水-地表水交换通量试验装置

试验装置包括自动渗流仪和地下水-地表水交互模拟装置。其中，地下水-地表水交互模拟装置包括筒状砂槽（内径为 0.6 m，高为 1.2 m）和蠕动泵，用于模拟地下水与地表水相互作用。筒状砂槽由砂槽和底部供水槽组成，底部配有可拆卸有机玻璃多孔板，将装填介质和底部供水槽分开并保证供水的均匀性。砂槽内填充石英砂，并维持砂槽内水位高于砂层表面，以模拟潜流带环境。蠕动泵水管两端分别连接砂槽上部水体与下部供水槽，通过改变蠕动泵转动方向，实现地表水补给地下水或者地下水补给地表水两种潜流交互模式。将自动渗流仪与地下水-地表水交互模拟装置组合，即可在室内进行地下水-地表水交换通量的监测评估试验（图 4）。

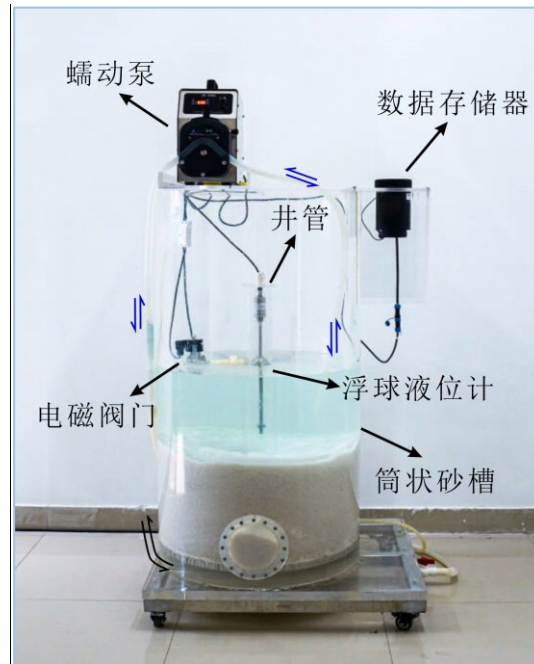


图 4 地下水-地表水交换通量试验装置图

Fig.4 Groundwater-surface water exchange fluxes test device diagram

2.3 试验方案

试验前，在砂槽底部安装滤网防止石英砂进入底部供水槽，然后在筒状砂槽内充填石英砂，模拟潜水含水层系统。介质填充后，注水使含水层达到饱和状态，并使水面高于含水层以形成地下水与地表水。将带有浮球液位计的井管垂直插入砂槽中，并且将蠕动泵的水管两端分别接入砂槽上部水面与下部供水槽中，井管内浮球液位计的测杆前端以及电磁阀门完全浸没于水中。具体试验步骤如下：

1) 水量交换循环阶段。接通电源，与液位计连接的数据存储器开始供电。井管连接的阀门处于打开状态。打开蠕动泵，采取从砂槽上部地表水抽水，下部注水的方式，产生向上的水流，模拟地下水补给地表水。此外，还可以通过改变蠕动泵的转动方向，上注下抽，产生向下的水流，模拟地表水补给地下水。

2) 阀门关闭阶段。待 20-30 min 后试验装置内的水位稳定，远程控制关闭电磁阀门，此时井管内的水位发生变化，通过液位计监测并记录井管内的水位变化。若地表水补给地下水，井管内水位下降；若地下水补给地表水，井管内水位上升。

3) 数据监测分析阶段。连接液位计的数据存储器高频率采集并存储水位数据，数据采集完成后终止试验。将存储器中的数据绘制为水位-时间动态曲线，并根据式（12）计算得出地下水-地表水交换通量。

4) 试验结果验证阶段。为评估自动渗流仪监测所得地下水-地表水交换通量的准确性，

需将自动渗流仪测得的流量与实际流量进行对比验证。由地下水-地表水交换通量 q 与流量 Q 之间关系, 可计算得出砂槽内地下水与地表水交换流量 Q_{obs} :

$$Q_{obs} = qA = q \times \pi R^2 \quad (13)$$

式中: A 为筒状砂槽横截面积, cm^2 ; R 为筒状砂槽半径, cm 。本试验中, 地下水与地表水之间的水量交换仅通过蠕动泵的抽/注实现, 因此蠕动泵的流量即为真实的地下水-地表水交换流量, 可作为参考基准。在蠕动泵运行过程中记录其流量作为实际交换流量 Q_{true} 。

本次试验围绕地下水-地表水相互作用, 进行了以下 3 种条件的室内试验:

1) 在井管位置固定的前提下, 设置蠕动泵循环, 模拟地表水补给地下水, 并将其转速 n 调节至 55 r/min、65 r/min 和 75 r/min, 进行 3 组试验, 即实际流量 Q_{true} 分别为 16.68 ml/s、20.07 ml/s 和 23.16 ml/s。

2) 将井管位置与蠕动泵转速 n 与上述 3 组试验保持一致, 改变蠕动泵循环, 模拟地下水补给地表水, 进行 3 组试验。

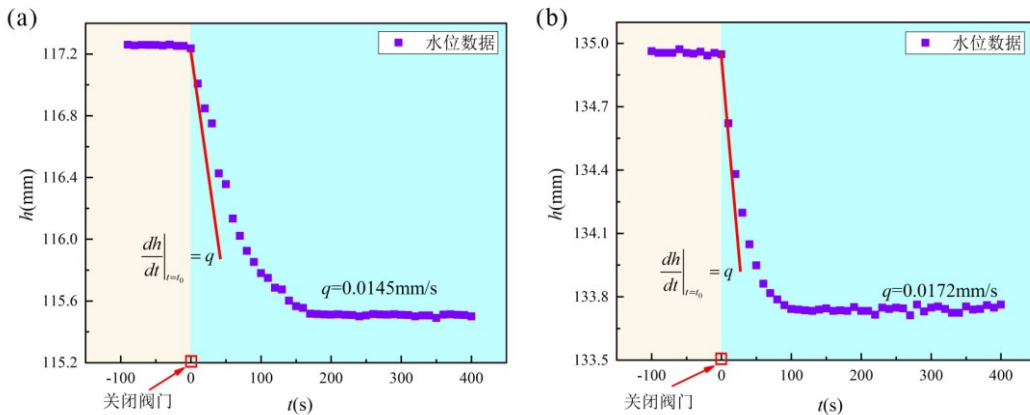
3) 在蠕动泵转速 n 固定的前提下, 设置蠕动泵循环, 模拟地表水补给地下水, 调整井管插入含水层深度 L 分别为 15 cm、20 cm 和 25 cm, 进行 3 组试验。

3 试验结果与讨论

3.1 不同流量下地下水-地表水交换通量分析

为了使用自动渗流仪测量不同流量下的地下水-地表水交换通量, 试验过程中将井管插入深度固定在砂层以下 20 cm。设置蠕动泵抽/注方向, 使其抽取地下水并注入地表水, 在砂槽中实现地表水补给地下水的交互过程。通过调节蠕动泵转速改变抽/注流量, 获取不同流量下的地下水-地表水交换通量, 验证自动渗流仪的准确性。图 5 为蠕动泵转速 n 分别为 55 r/min、65 r/min 和 75 r/min 时自动渗流仪监测的井管内水位-时间动态曲线, 上述转速对应蠕动泵抽/注的实际流量 Q_{true} 分别为 16.68 ml/s、20.07 ml/s 和 23.16 ml/s。

由图 5 可知, 在地表水补给地下水过程中, 关闭阀门后, 井管内水位快速下降, 并在一段时间后趋于稳定。利用式 (12) 可以计算阀门关闭瞬间水位动态曲线的瞬时变化率, 从而得出不同抽注流量对应的地表水补给地下水的通量 q 分别为 0.0145 mm/s、0.0172 mm/s 和 0.0203 mm/s。由式 (13) 可计算得出不同抽注流量对应的地表水补给地下水的流量 Q_{obs} 分别为 16.47 ml/s、19.51 ml/s 和 22.95 ml/s。



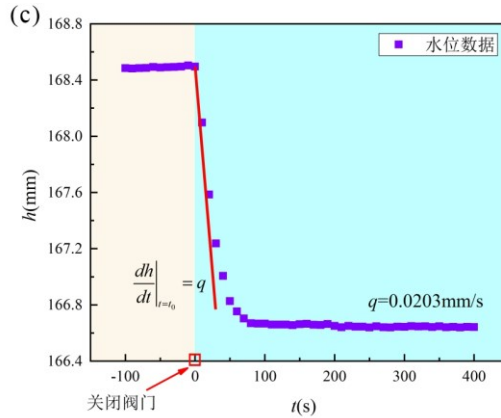


图5 不同流量下井管内水位-时间动态曲线（地表水补给地下水）

Fig.5 The water level-time dynamic curve in the well under different flow rates (Surface water recharges groundwater)

表1为模拟地表水补给地下水时，不同流量下自动渗流仪监测获取的地下水-地表水交换通量与实际流量数据对比结果。对比蠕动泵转速分别为55 r/min、65 r/min和75 r/min时自动渗流仪获取的流量与实际流量，其相对误差均小于3%，结果显示本研究所设计的自动渗流仪具有较高精度，且利用自动渗流仪获取的地下水-地表水交换通量准确性较高。

表1 自动渗流仪流量与实际流量的相对误差分析（地表水补给地下水）

Table.1 Relative error analysis of automatic seepage meter flow and actual flow (Surface water recharges groundwater)

蠕动泵转速 n (r/min)	实际流量 Q_{true} (ml/s)	渗流仪通量 q (mm/s)	渗流仪流量 Q_{obs} (ml/s)	相对误差(%)
55	16.68	0.0145	16.47	1.25
65	20.07	0.0172	19.51	2.79
75	23.16	0.0203	22.95	0.91

3.2 不同交互模式下地下水-地表水交换通量分析

地下水-地表水交互过程在实际场地中较为复杂，主要包括地下水补给地表水和地表水补给地下水两种模式。上节中，已使用自动渗流仪监测评估了地表水补给地下水时的交换通量。为了进一步获取地下水补给地表水条件下的交换通量，通过改变蠕动泵抽/注方向，使其抽取地表水并注入地下水，在砂槽中实现地下水补给地表水的交互过程。试验过程中仍将井管插入深度固定在砂层以下20 cm。通过调节蠕动泵转速改变抽/注流量，获取不同流量下的地下水-地表水交换通量。图6为蠕动泵转速分别为55 r/min、65 r/min和75 r/min时自动渗流仪监测的井管内水位-时间动态曲线，上述转速对应蠕动泵抽/注的实际流量 Q_{true} 分别为16.68 ml/s、20.07 ml/s和23.16 ml/s。

由图6可知，在地下水补给地表水过程中，关闭阀门后，井管内水位快速上升，并在一段时间后趋于稳定。利用式(12)可以计算阀门关闭瞬间水位动态曲线的瞬时变化率，从而得出不同抽注流量对应的地下水补给地表水的通量 q 分别为0.0150 mm/s、0.0173 mm/s和0.0202 mm/s。由式(13)可计算得出不同流量对应的地下水补给地表水的通量 Q_{obs} 分别为16.96 ml/s、19.57 ml/s和22.85 ml/s。

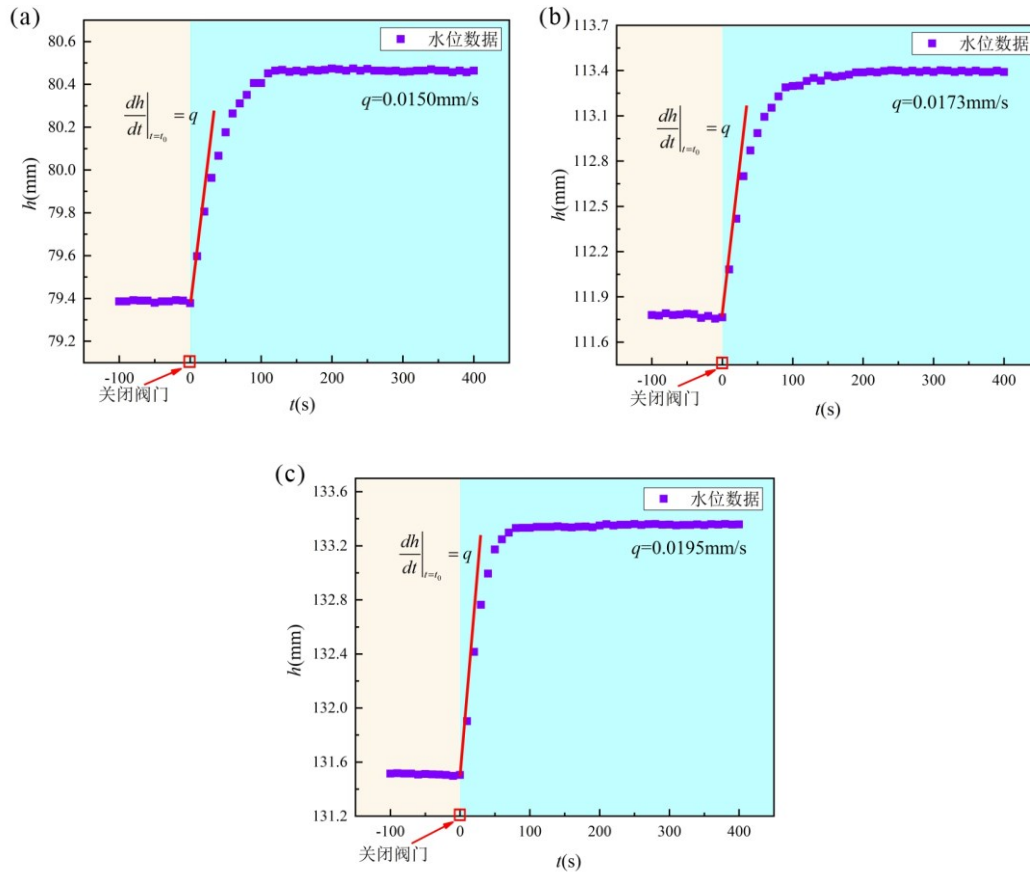


图 6 不同流量下井管内水位-时间动态曲线（地下水补给地表水）

Fig.6 The water level-time dynamic curve in the well under different flow rates (Groundwater recharges surface water)

表 2 为模拟地下水补给地表水时，不同流量下自动渗流仪监测获取的地下水-地表水交换通量与实际流量数据对比结果，其相对误差均小于 2.5%。通过对比不同交互模式下自动渗流仪获取的流量与实际流量，表明在蠕动泵抽/注流量相同时，不同交互模式下的自动渗流仪监测获取的地下水-地表水交换通量差异较小。由此可知，地下水与地表水之间的补排关系对交换通量的获取影响较小，且可根据关闭阀门后水位-时间曲线的变化趋势判断地下水与地表水之间的补排关系。

表 2 自动渗流仪流量与实际流量的相对误差分析（地下水补给地表水）

Table.2 Relative error analysis of automatic seepage meter flow and actual flow (Groundwater recharges surface water)

蠕动泵转速 n (r/min)	实际流量 Q_{true} (ml/s)	渗流仪通量 q (mm/s)	渗流仪流量 Q_{obs} (ml/s)	相对误差(%)
55	16.68	0.0150	16.96	1.68
65	20.07	0.0173	19.57	2.49
75	23.16	0.0202	22.85	1.34

3.3 不同井管深度对交换通量的影响

为了探究使用自动渗流仪时，井管插入深度对其监测获取地下水-地表水交换通量的影响，试验过程中将蠕动泵转速固定为 75 r/min，所对应蠕动泵抽/注的实际流量 Q_{true} 为 23.16 ml/s。设置蠕动泵抽/注方向，使其抽取地下水并注入地表水，在砂槽中实现地表水补给地下水的交互过程。图 7 为井管深度分别为 15 cm、20 cm 和 25 cm 时自动渗流仪监测的井管内

水位-时间动态曲线。利用式 (12) 可以计算阀门关闭瞬间水位动态曲线的瞬时变化率, 从而得出不同井管深度对应的地表水补给地下水的通量 q 分别为 0.0201 mm/s、0.0203 mm/s 和 0.0202 mm/s。由式 (13) 可计算得出不同流量对应的地表水补给地下水的通量 Q_{obs} 分别为 22.78 ml/s、22.95 ml/s 和 22.85 ml/s。

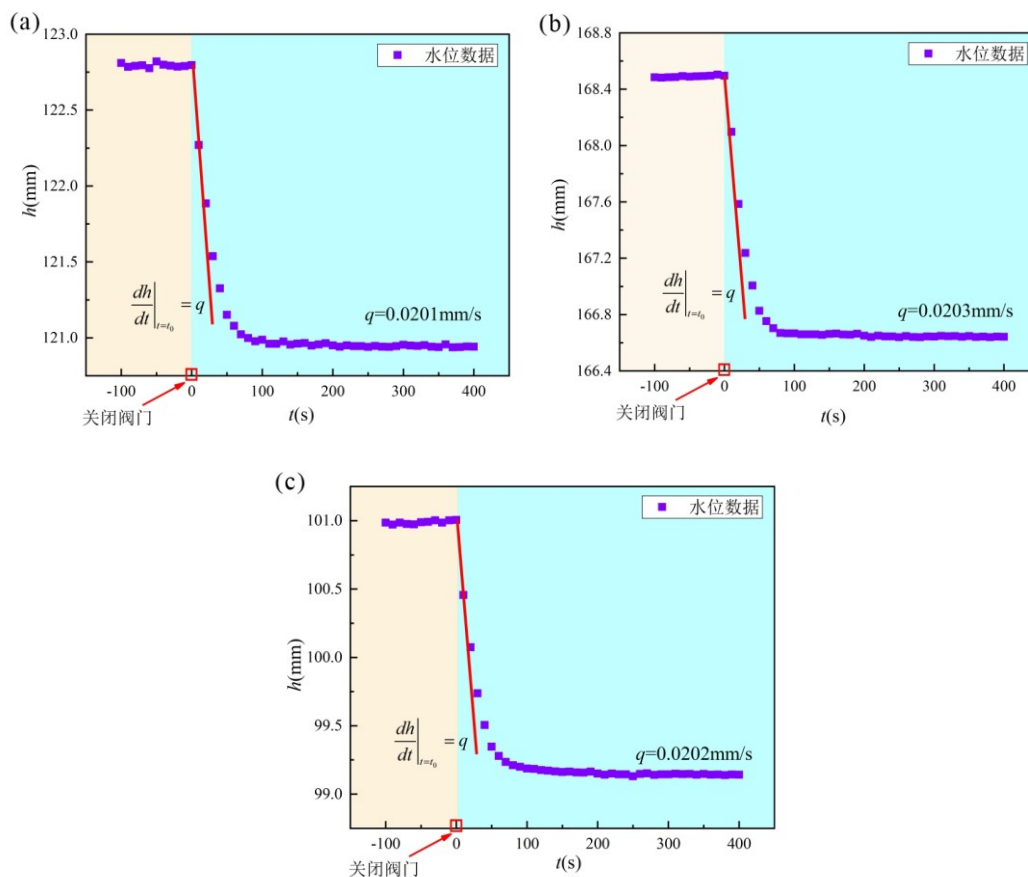


图7 不同深度下井管内水位-时间动态曲线

Fig.7 The water level-time dynamic curve in the well under different depths

在实际中, 井管插入会局部扰动原有的地下水渗流场, 且在井管周围, 水流并非理想的垂向一维流, 而是存在较弱的径向流的三维流。然而, 由式 (12) 可知, 该方法计算的交换通量主要受地下水与地表水之间的水头差控制, 忽视井管附近地下水的径向流动, 因此有必要进一步分析井管插入深度对计算结果的影响。表 3 为模拟地表水补给地下水时, 不同井管深度下自动渗流仪监测获取的地下水-地表水交换通量与实际流量数据对比结果, 其相对误差均小于 2%。通过对比井管插入深度分别为 15 cm、20 cm 和 25 cm 时自动渗流仪获取的流量与实际流量 (图 8), 表明在蠕动泵抽/注流量相同时, 不同井管插入深度对自动渗流仪监测获取的地下水-地表水交换通量影响较小, 说明井管插入深度增大对井管附近的地下水流影响较小, 不会引起误差增大。

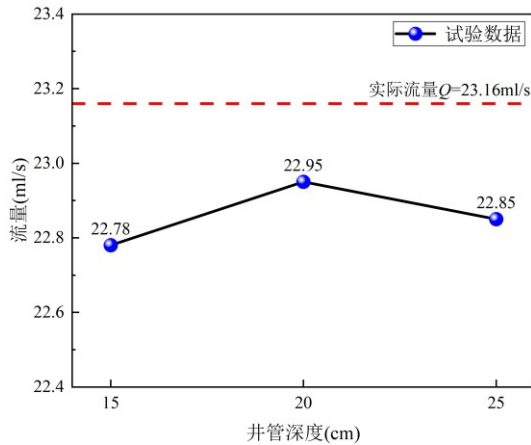


图8 自动渗流仪流量与实际流量对比

Fig.8 Comparison of automatic seepage meter flow and actual flow

表3 不同井管深度下自动渗流仪流量与实际流量的相对误差分析

Table.3 Relative error analysis of automatic seepage meter flow and actual flow under different well embedment depths

井管深度 L (cm)	实际流量 Q_{true} (ml/s)	渗流仪通量 q (mm/s)	渗流仪流量 Q_{obs} (ml/s)	相对误差(%)
15	23.16	0.0201	22.78	1.64
20	23.16	0.0203	22.95	0.91
25	23.16	0.0202	22.85	1.34

通过上述3种条件下多组室内试验,发现对交换通量的监测具有一定误差。经分析,误差可能来源于以下几个方面:首先,井管内水位为毫米级变化,虽采用分辨率为0.01 mm的浮球液位计进行监测,但其固有精度仍会引入测量误差;其次,液位计监测频率为10 s/次,可能导致对阀门关闭瞬间水位变化的捕捉存在细微滞后,进而影响基于水位上升过程计算的交换通量;最后,室内试验在有限尺度砂槽中进行,槽壁可能产生侧向边界效应,对渗流场造成轻微干扰。尽管试验中已将井管置于砂槽中心并保持足够边界距离以减小该效应,但其影响仍无法完全消除。

4 野外试验场地应用

为验证本研究所设计自动渗流仪在野外的适用性,在安徽省淮南市某溪流开展了地下水-地表水交换通量监测试验(图9),旨在验证方法的野外可操作性和结果合理性,而定量精度验证已通过上文室内试验完成。该溪流建有多座小型拦水坝,将河流分为若干区段,相邻区段间存在水位差异,形成上游补给下游的水流系统。其中,上游地表水补给地下水,并通过溪流底部补给下游地表水。监测点处溪流宽度为4 m,水深为40 cm,将自动渗流仪垂直插入距岸边2 m位置处,井管插入深度为10 cm。试验于2025年11月5日约16时开始,连续监测40分钟。前20分钟内,自动渗流仪阀门开启;阀门关闭后,继续监测20分钟。

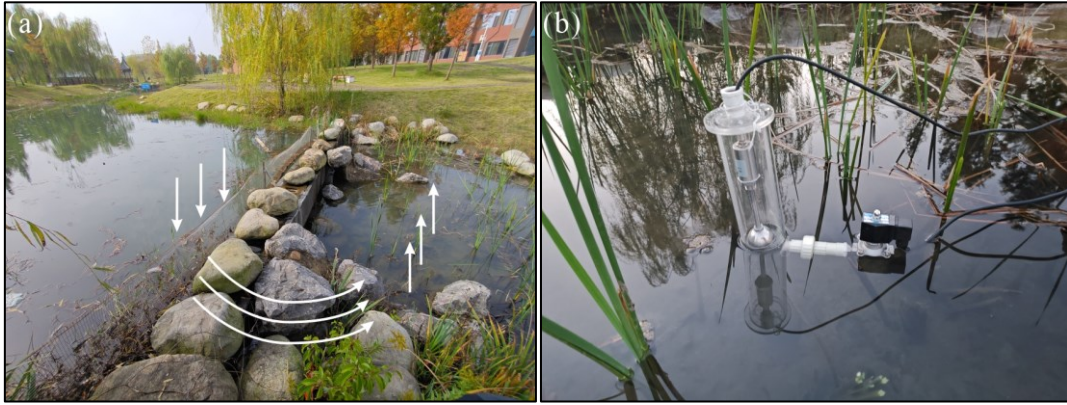


图9 野外试验场地实景

Fig.9 Field test scene

通过分析自动渗流仪监测数据，绘制了阀门关闭前后的水位-时间变化曲线（图10）。由图10可知，由于受外界因素干扰，野外监测获取的水位数据存在一定波动，但其变化趋势与室内试验一致，说明自动渗流仪在野外环境下的监测数据能够有效反映地下水-地表水的交互过程，验证了室内试验结论和仪器设计的有效性。阀门关闭后井管内水位上升，表明此处溪流受地下水补给。结合式（12）计算，得出地下水-地表水交换通量为 0.0648 m/d。Solomon 等（2020）在美国内布拉斯加州沙丘的中罗普河开展的交换通量试验中，得到的平均交互通量为 0.069 m/d，与本次野外试验结果较为接近。此外，监测点位于拦水坝下游侧，监测得到的补给方向与此水文地质判断相符，从场地条件角度进一步支持了结果的合理性。在野外使用自动渗流仪进行地下水-地表水交换通量试验的结果表明，该装置在实际溪流环境中的应用效果符合预期。

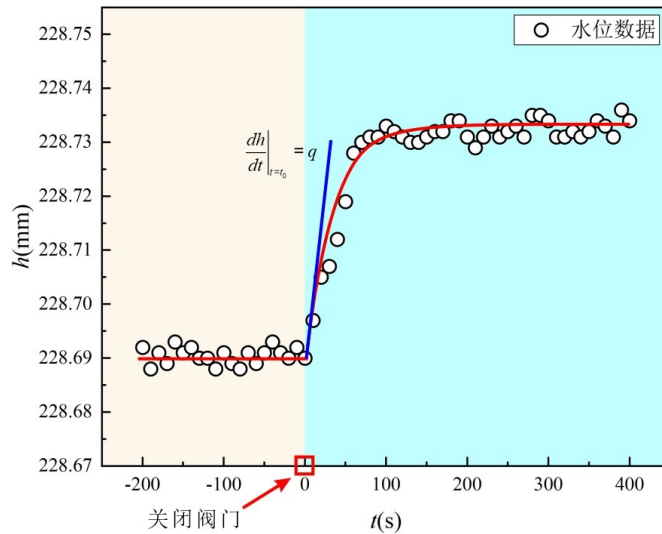


图10 野外监测水位-时间动态曲线

Fig.10 Field monitoring water level-time dynamic curve

此外，在野外复杂环境中，水流扰动、生物活动及温度变化等因素可能对监测数据造成影响。为保障数据质量，在布设自动渗流仪时利用固定支架将仪器主体锚固，以抵御水流冲击。对于可能的生物附着问题，通过在试验前后对传感器进行清洗、维护来降低其影响。综上，尽管存在上述环境挑战，但通过上述针对性措施，可有效保障野外试验数据与结论的可靠性。

5 结论

定量评估潜流带地下水-地表水交换通量,对区域水资源管理与生态环境保护具有重要意义。本研究基于地下水-地表水交换通量的数学模型,提出了一种利用自动渗流仪监测评估地下水-地表水交换通量的方法;同时构建了基于自动渗流仪的地下水-地表水交互模拟装置及通量监测评估试验系统。通过水位-时间动态曲线,计算潜流带中地下水-地表水交换通量,从而实现了在点尺度上的准确监测评估,主要的结论如下:

(1) 根据自动渗流仪监测的井管内水位变化趋势,可有效判别地下水与地表水之间的补排关系。电磁阀关闭后,若水位上升,则表明地下水补给地表水;若水位下降,则表明地表水补给地下水。

(2) 本研究所提出的地下水-地表水交换通量监测评估方法,可以准确获取地下水补给地表水以及地表水补给地下水两种交互模式下的地下水-地表水交换通量,与实际流量对比,其相对误差小于3%。

(3) 当蠕动泵抽/注流量固定时,自动渗流仪井管内地下水位的微动态变化表明,井管插入含水层深度对监测获取地下水-地表水交换通量影响较小。误差分析表明,该自动渗流仪精度高、稳定性强且操作简便。

(4) 野外试验结果表明,溪流下游地表水受地下水补给,监测点地下水-地表水交换通量为0.0648 m/d。总体上,本研究提出的地下水-地表水交换通量监测评估方法能有效监测地下水-地表水交互过程,在实际环境中的应用效果符合预期,在水利工程、生态环境修复与治理等方面具有较好的应用前景。

References

- Bouchez, C., Cook, P. G., Partington, D., et al., 2021. Comparison of Surface Water-Groundwater Exchange Fluxes Derived from Hydraulic and Geochemical Methods and a Regional Groundwater Model. *Water Resources Research*, 57(3): e2020WR029137. <https://doi.org/10.1029/2020WR029137>
- Chen, H. W., Yang, Y., Huang, H., et al., 2024. Interaction Between Surface Water and Groundwater During the Dry Season in Lake Dongting Based on ^{222}Rn Tracing. *Earth Science Frontiers*, 31(2): 423-434 (in Chinese with English abstract).
- Cristian, O. G., Medina, A. S., Luis, V., et al., 2024. Impact of Rainfed Agriculture on Spatio-Temporal Patterns of Water Balance and the Interaction Between Groundwater and Surface Water in Sub-Humid Plains. *Science of the Total Environment*, 912: 169247. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169247>
- Ding, W. J., Lu, F. Y., Zhao, B., et al., 2024. Kinetics of Nitrification and Denitrification in Hyporheic Zone Sediment with Periodical Supply of Nitrogen. *Earth Science*, 49(10): 3712-3722 (in Chinese with English abstract).
- Fakhari, M., Raymond, J., Martel, R., et al., 2025. Complementarity of Multiple In-Situ Techniques for Spatiotemporal Assessment of Groundwater/Surface-Water Exchanges. *Hydrogeology Journal*, 33: 219-235. <https://doi.org/10.1007/s10040-024-02861-4>
- Jin, G. Q., Li, L., 2008. Advancement in the Hyporheic Exchange in Rivers. *Advances in Water Science*, 19(2): 285-293 (in Chinese with English abstract).
- Jin, G. Q., Zhang, Z. T., Yuan, H. Y., et al., 2022. Advances in the Response of Surface-Subsurface Water Exchange to Activities of Typical Aquatic Organisms in the Hyporheic Zone of Rivers. *Advances in Water Science*, 33(5): 835-847 (in Chinese with English abstract).
- Li, B. J., Song, J. X., Zhang, Y. T., et al., 2025. Vertical Variation Characteristics of Heavy Metals in the Hyporheic Zone of the Beiluo River and Response Mechanisms to Hyporheic Exchange. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 45(9): 301-315 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. M., Wen, Z., Schneidewind, U., et al., 2023. Effects of a Large-Scale Dam Structure on Upstream and

- Downstream Lateral Hyporheic Exchange and Residence Time Distributions-The Xinglong Water Conservancy Dam, China. *Journal of Hydrology*, 625(PA): 130073. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130073>
- Lin, Y. Z., Lu, C. P., Wu, C. C., et al., 2023. Hyporheic Exchange and Nitrogen Cycle Processes Under the Dual Effects of Flooding and Heterogeneous Streambed. *Journal of Hydrology*, 626(PA): 130188. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130188>
- Lu, X. H., Wu, C. F., Gong, X. L., 2024. Lack-Groundwater Recharge Fluxes During Dry Season in Plain Lakeland Based on Radon Isotopes. *Journal of Lake Sciences*, 36(3): 939-950 (in Chinese with English abstract).
- Ma, R., Chen, K. W., Andrews, C. B., et al., 2024. Methods for Quantifying Interactions Between Groundwater and Surface Water. *Annual Review of Environment and Resources*, 49(1): 623-653.
- Peng, C., Gan, M. F., Che, J. L., et al., 2024. Study on the Influence of Water Exchange in River Hyporheic Zone on Nitrogen Migration and Transformation Process. *Acta Ecologica Sinica*, 44(23): 10794-10806 (in Chinese with English abstract).
- Peng, S. Y., Lu, Z., WU, T. T., et al., 2024. Research Progress in Integrated Groundwater-Surface Water Models. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 51(6): 60-73 (in Chinese with English abstract).
- Qian, C., Yu, J. Y., Wang, Q. Q., et al., 2025. Application of Radon as a Tracer in Water Science Research. *Chinese Journal of Ecology*, 44(5): 1731-1740 (in Chinese with English abstract).
- Ren, J., Cheng, J. Q., Yang, J., et al., 2018. Advances in Temperature Tracer Method of Hyporheic Exchange. *Advances in Water Science*, 29(4):597-606 (in Chinese with English abstract).
- Solder, J. E., Gilmore, T. E., Genereux, D. P., et al., 2016. A Tube Seepage Meter for In Situ Measurement of Seepage Rate and Groundwater Sampling. *Groundwater*, 2016, 54(4): 588-595. DOI:10.1111/gwat.12388
- Solomon, K. D., Humphrey, E., Gilmore, E. T., et al., 2020. An Automated Seepage Meter for Streams and Lakes. *Water Resources Research*, 56(4): e2019WR026983. <https://doi.org/10.1029/2019WR026983>
- Suárez, F., Sandoval, V., Sarabia, A., et al., 2024. Investigating River-Aquifer Interactions Using Heat as a Tracer in the Silala River Transboundary Basin. *WIREs Water*, 11(1): e1639. <https://doi.org/10.1002/wat2.1639>
- Tripathi, M., Yadav, P. K., Chahar, B. R., et al., 2021. A Review on Groundwater-Surface Water Interaction Highlighting the Significance of Streambed and Aquifer Properties on the Exchanging Flux. *Environmental Earth Sciences*, 80: 604. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09897-9>
- Wang, G. C., Woo, N., Soldatova, E., et al., 2025. The Influence of Groundwater-Surface Water Interactions on the Aquatic Environment and Ecosystems. *Environmental Earth Sciences*, 84: 313. <https://doi.org/10.1007/s12665-025-12324-y>
- Wu, G. D., Zhang, X., Zhu, S. G., et al., 2025. Advances in Response Mechanisms and Identification Methods of Spatiotemporal Variations in Hyporheic Exchange in Rivers. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 42(9):42-50 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, X. C., Chen, K. W., Liang, X. Y., et al., 2025. Assessment of Ensemble Data Assimilation Based Heat Tracer Method for Estimating Surface Water-Groundwater Interaction at Seasonal Timescale Under Complex Field Conditions. *Journal of Hydrology*, 649: 132469. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132469>
- Zhang, P. Y., Wen, Z., Li, Y. M., 2024. Effect of Continuous River Water Level Fluctuations on Nitrate Conversion Efficiency in Hyporheic Zone. *Earth Science*, 49(7): 2637-2649 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W. B., Shen, Z. Z., Chen, G. Y., et al., 2022. Comparison of Analytical Models for Qualifying Hyporheic Exchange Flux Based on Heat Tracer Method. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 42(2): 63-71, 84 (in Chinese with English abstract).
- Zlotnik, V. A., Solomon, D. K., Genereux, D. P., et al., 2023. Theory of an Automatic Seepage Meter and Ramifications For Applications. *Water Resources Research*, 59(10), e2023WR034766. <https://doi.org/10.1029/2023WR034766>

附中文参考文献

- 谌宏伟, 杨瑶, 黄荷, 等, 2024. 基于氦同位素示踪的洞庭湖区枯水期湖水与地下水交互作用研究. 地学前沿, 31(2): 423-434.
- 丁吾举, 陆菲雨, 赵博, 等, 2024. 氮周期供给时潜流带沉积物硝化、反硝化动力学. 地球科学, 49(10): 3712-3722.
- 金光球, 李凌, 2008. 河流中潜流交换研究进展. 水科学进展, 19(2): 285-293.
- 金光球, 张中天, 袁海钰, 等, 2022. 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. 水科学进展, 33(5): 835-847.
- 李冰洁, 宋进喜, 张玉婷, 等, 2025. 北洛河潜流带重金属垂向变化特征及其对潜流交换的响应机制. 环境科学学报, 45(9): 301-315.
- 卢小慧, 吴潮峰, 龚绪龙, 等, 2024. 基于氦同位素的平原湖荡枯水期湖水-地下水补排通量. 湖泊科学, 36(3): 939-950.
- 彭闯, 干牧凡, 车景璐, 等, 2024. 河流潜流带水交换作用对氮迁移转化过程的影响. 生态学报, 44(23): 10794-10806.
- 彭书艳, 陆峥, 吴婷婷, 等, 2024. 地下水-地表水集成模型研究进展. 水文地质工程地质, 51(6): 60-73.
- 钱畅, 余杰予, 汪迁迁, 等, 2025. 氦作为示踪剂在水科学研究中的应用. 生态学杂志, 44(5): 1731-1740.
- 任杰, 程嘉强, 杨杰, 等, 2018. 潜流交换温度示踪方法研究进展. 水科学进展, 29(4): 597-606.
- 吴光东, 张潇, 朱苏葛, 等, 2025. 河流潜流交换时空变化的响应机理及识别方法研究进展. 长江科学院院报, 42(9): 42-50.
- 张佩瑶, 文章, 李一鸣, 2024. 连续河水位波动对河床潜流带硝酸盐转化效率的影响. 地球科学, 49(7): 2637-2649.
- 张文兵, 沈振中, 陈官运, 等, 2022. 基于温度示踪的潜流交换通量解析模型对比. 水利水电科技进展, 42(2): 63-71, 84.