

Dynamic Characteristic of Vertical Hyporheic Flux in Huxian County, the Downstream of Weihe River, China

Congyi Li, Yiran Wen, Jinze Cheng, Huajiang Bo, Rong Liu, Kang Zhang, Aidi Huo*

School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an Shaanxi
Email: *huoaidi@163.com

Received: Jun. 21st, 2017; accepted: Jul. 8th, 2017; published: Jul. 11th, 2017

Abstract

Hyporheic zone is a special hydrogeological body, which has unique hydrodynamic mechanism and ecological function; hyporheic flux, one of the important indexes, can reflect the relationship between surface water and groundwater. The study uses wave amplitude attenuation method to calculate the hyporheic zone vertical hyporheic flux. On the basis of temperature tracing theory and calculation methods, we study the relationship between hydroheic conditions and variation characteristics as well as temporal and spatial distribution characteristics of subsurface flux. We calculated the amount of hydrodynamic exchange in the hyporheic zone of the Huxian County section in Weihe River as a case study. Results show that surface water recharges groundwater mainly in this research area. Mean hyporheic flux changed from 9.7×10^{-7} m/s to 2.9×10^{-6} m/s. As the depth increases, fluctuation range of hyporheic flux became small over the time. The vertical distribution of subsurface flux varies with time and space.

Keywords

Hyporheic Zone, Temperature Tracer, Hyporheic Flux, Huxian County Section of Weihe River

渭河下游户县段垂向潜流通量动态特征研究

李聪怡, 温轶然, 成金泽, 李华江, 刘榕, 张康, 霍艾迪*

长安大学, 环境科学与工程学院, 陕西 西安
Email: *huoaidi@163.com

收稿日期: 2017年6月21日; 录用日期: 2017年7月8日; 发布日期: 2017年7月11日

*通讯作者。

文章引用: 李聪怡, 温轶然, 成金泽, 李华江, 刘榕, 张康, 霍艾迪. 渭河下游户县段垂向潜流通量动态特征研究[J]. 自然科学, 2017, 5(3): 293-301. <https://doi.org/10.12677/ojns.2017.53040>

摘要

河流的潜流带是一个特殊的水文地质体, 有其独特的水动力机制和生态作用。潜流通量是其中一项重要指标, 在一定程度上能够反映地表水和地下水的相互作用关系。本文采用波动振幅衰减法计算潜流通量, 利用温度示踪技术, 重点研究潜流通量动态变化特征及潜流通量在时间空间上的分布特征。以陕西西安户县渭河段为研究区, 进行河床浅层沉积物潜流通量的计算。结果表明: 监测时段内研究区主要为河水补给地下水, 不同深度平均潜流通量变化范围为 $9.7 \times 10^{-7} \sim 2.9 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 。潜流通量随潜流带深度增大, 潜流通量数值随时间波动幅度减小。潜流通量数值垂向分布上随时空变化具有差异性。

关键词

潜流带, 温度示踪, 潜流通量, 渭河户县段

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 研究背景

潜流带是河流河床内水分饱和的沉积物层, 是河流和地下水相互作用的区域, 也是河床中能与河流存在物质和能量交换的区域[1] [2]。前人在潜流带研究方面也有一定进展, 如李佳选等人利用温度梯度法在北洛河进行的水交换研究, 发现同一断面上的 5 个测试点温度分布廓线表现出相同的趋势[3]。研究潜流带的水文特性与气象特性的关系, 可以深入了解气象变化对地表水地下水相互作用的影响。当前, 应国家建设生态城市, 整修河道相关政策, 河道的综合治理相关工程较多。有关潜流通量动态特征研究可预测气候变化情况下潜流带的时空变异[3]。能够为河道综合治理工程提供一定的参考依据, 同时, 为水环境污染的防治奠定基础。

与常规研究潜流带的方法(如同位素示踪[4]、水化学[5] [6]等)相比, 温度示踪法因其独特的优势逐渐被人们广泛应用[7] [8] [9]。如李英玉, 赵坚等人利用温度示踪法探测温度场和流场分布特性[10] [11] [12]。杨国强等人以大克泊湖(西侧)为例进行的潜流带水动力交换量计算研究[13] [14] [15]。但目前的研究大多集中在规模较小、未曾经过治理的原始河流[16] [17] [18]。而规模较大的河流, 水位深、流速快, 仪器安放与数据采集有一定困难, 这方面的研究相对较少。渭河户县段近期要进行全线整治, 大规模修建防护林, 而改造后的河道对潜流带有较大的影响, 迫切需要进行深入研究。

本文旨在通过对渭河陕西户县段横断面的温度监测, 通过温度示踪法来探索潜流通量的动态变化特征[19], 得到温度数据后, 利用 MATLAB 插入 VFLUX 垂直流体热传导求解器求潜流通量。同时, 通过远程气象监测站对气象指标进行检测并进行数据统计分析。结合气象特征和潜流通量变化特征, 分析其时空动态变化特性, 这将从高时空分辨率角度, 提高对潜流交换时空异质性的认识, 揭示气象变化对河流与地下水相互作用的影响。

2. 潜流通量计算的方法

地下水与地表水的运动及相互作用伴随这能量的传递, 热是能量的一种表现方式。因此在多种因素作用下, 地质体温度具有一定的时空差异性, 此差异性表现水的运动。因地下水与地表水对流, 随着对

流深度增加,发生温度波动振幅衰减和相位延迟现象,能够反映地表水与地下水的相互交换,从而为计算潜流带垂向潜流量提供了理论基础。

本研究利用 MATLAB 插入 VFLUX 垂直流体热传导求解器, VFLUX 分布是在 MATLAB 环境下编写 MATLAB 计算语言设计运行的一个工具箱。该程序通过饱和和多孔介质计算一维垂直流(流量),利用热传导方程,它使用温度时间序列数据测量由多个温度传感器在一个垂直的配置文件中,以计算在特定时间深度的潜流量。VFLUX 运行过程中将温度时间序列的第一重采样数据降到一个较低的采样率,以减少与过采样滤波问题该程序将温度传感器所测的原始数据进行处理,然后过滤采用动态谐波回归时间序列(DHR)的工具箱项目,通过它的操作系统(一个典型的昼夜振荡信号)隔离一个基本的温度信号,使杂乱无序的温度序列变为存在周期性变化的谐波回归时间序列,将用于下一步温度传感器使用额振幅以及潜流量的计算中。最后,该程序计算出的温度传感器使用的振幅和相位,以及相应的垂直通量。

利用 VFLUX 在 MATLAB 工作空间中运行的计算语言编写的程序,专门用于处理获取的浅层沉积物温度时序数据。该程序将原始数据进行处理,然后过滤采用动态谐波回归时间序列(DHR)的工具箱项目,通过它的操作系统(一个典型的昼夜振荡信号)隔离一个基本的温度信号。最后,该程序计算出的温度传感器使用的振幅和相位,其过滤的温度信号计算出相应的垂直通量。VFLUX 分布作为一个工具箱,是在 MATLAB 环境下编写 MATLAB 计算语言设计运行的功能。

该程序针对不同深度的温度时序数据进行同步处理、重取样、信息分离及波动振幅、相位提取的基础上,利用 Keery 和 Hatch 提出的一维热运移模型解法进行垂向潜流量计算。其中一维热运移模型是在以下四个假设条件下建立:1) 水流垂向运动;2) 介质和水流的热特征在时空上同时稳定不变;3) 热量在垂直方向上进行传导;4) 水的温度与潜流带沉积物的温度保持相同。针对河道内地下水和地表水以垂向运动为主,对潜流交换中的热量运移采用饱和和多孔介质的一维稳态热量运移控制方程[8]来描述,如式(1):

$$\frac{K_{fs}}{\rho c} \nabla^2 T(z) - \frac{\rho_f c_f}{\rho c} \nabla \cdot (T(z) q_z) = \frac{\partial T(z)}{\partial t} \quad (1)$$

式中: $T(z)$ 为河床内深度 z 处的温度($^{\circ}\text{C}$); t 为时间(s); q_z 为垂向达西流速(m/s); ρc 为固液系统的综合体积热容($\text{J}/\text{m}^3\cdot\text{K}$); $\rho c = n\rho_f c_f + (1-n)\rho_s c_s$, $\rho_f c_f$ 为液体体积热容, $\rho_s c_s$ 为固体体积热容; n 为孔隙度; K_{fs} 为饱和和沉积物导热系数($\text{J}/(\text{s}\cdot\text{m})$)。一般来说,潜流量越大,表明地表水与地下水的连通性越好,该处河床温度越接近地下水温度。潜流量越大,温度相对稳定的位置距河床表面越近,即潜流带深度越小。式(1)揭示了潜流带深度和地下水温度的关系,可用于进行潜流量的数值计算并对潜流带垂向潜流量动态变化特征进行研究,分析地表水与地下水的补给关系,了解水流方向变化。

3. 研究区域和野外试验

3.1. 研究区域

渭河,古称渭水,是黄河的最大支流。发源于甘肃省定西市渭源县鸟鼠山,主要流经今甘肃天水、陕西省关中平原的宝鸡、咸阳、西安、渭南等地,至渭南市潼关县汇入黄河。本次研究区域为陕西西安户县境内渭河流域,观测点的地理位置为 $34^{\circ}13'48''\text{N}$, $180^{\circ}33'25''\text{E}$,海拔 370 米。

渭河流域地形特点为西高东低,自西向东,地势逐渐变缓,河谷变宽,地貌为经黄土沉积和渭河干支流冲积而成的河谷冲积平原区—关中盆地(盆地海拔为 370 米),本研究观测点在渭河下游,植被良好。

3.2. 野外试验

本试验于 2016 年 5 月 1 日到 4 日在研究区选取 1 个垂直于河道的剖面,选取左岸一处为观测点,在

河主干道布设温记录仪。记录仪为直径 2.5 cm 木棍, 由裸露在空气的一个传感器(测量环境温度)和在断面垂直河流方向排列的 1 组温度传感器组成(5 个传感器和一个记录仪, 传感器分别在河床 15、25、50、85、110 cm 以下)。

将温度记录仪用液体蜡密封, 套上真空袋抽成真空防水, 再套入金属保护套, 利用橡胶锤将固定了温度传感器的木棒打入河床并用与水色相近的塑料薄片掩护, 连续记录 2016/5/1-2016/5/4 河床浅层沉积物的温度变化(图 1, 图 2)。

4. 结果与分析

4.1. 气象因素

通过远程气候监测站观测研究区域温度、湿度压强及降雨量等指标, 具体观测值如图 3:

1) 温度指标

如图 3 所示, 观察期内每天温度变化趋势大致相同, 早上 6 时左右温度开始上升, 在下午 2 点左右达到峰值。5 月 2 日当天有降雨, 室外温度明显降低。

2) 湿度指标

如图 4, 湿度在凌晨 0 点到 6 点湿度较高, 观察期内 5 月 2 日因有降雨湿度出现反常。在上午 10 点左右达到峰值。

3) 气压指标

气压变化趋势与湿度变化趋势呈正相关, 但变化幅度小于湿度变化幅度(见图 5)。气压在 5 月 2 日变化幅度大, 下午 3 点开始基本稳定, 一直到 5 月 3 日中午, 随后开始下降。

4.2. 河床温度时空变化特征

图 6 为传感器在原始时间序列下的温度分布图; 图 7 为传感器在过滤时间序列下的温度分布图。

把获取的浅层沉积物温度时序数据用 VFLUX 在 MATLAB 工作空间中运行的计算语言编写的程序进行处理。过滤采用动态谐波回归时间序列(DHR)的工具箱项目, 隔离一个基本的温度信号, 使杂乱无序的温度序列变为存在周期性变化的谐波回归时间序列, 用于下一步温度传感器使用额振幅以及潜流通量的计算中。由图 7 可以得出, 随着深度增加, 温度变化振幅逐渐减小。河床深达到 1.1 m 时变化曲线接近水平。

图 8 显示, 0.25 m 处的温度传感器数值变化比较明显。0.15 m 处振幅缓慢减小。由图 9 可见, 0.5 m 处相位变化大, 0.25 m 相位为负。

4.3. 不同深度的瞬时潜流通量

本次研究过程中使用 Keery 振幅方法求解潜流通量, 计算结果如下:

研究区在监测时间段内, 河床下不同深度平均潜流通量如下: 0.2 m 处为 9.7×10^{-7} m/s, 0.375 m 处为 2.6×10^{-6} m/s, 0.675 m 处为 1.8×10^{-6} m/s, 0.975 m 处为 2.9×10^{-6} m/s, 0.325 m 处为 2.0×10^{-6} m/s, 0.55 m 处为 2.1×10^{-6} m/s, 0.8 m 处为 2.2×10^{-6} m/s。可知, 地表水和地下水的补给关系为地表水补给地下水。

图 10 显示, 0.2 m 处潜流通量在 5 月 1 日 6:00 左右开始增加, 20:00 开始趋于平稳直至 5 月 2 日 12:00, 随后垂向潜流通量持续下降, 并在 5 月 3 日 9:00 左右垂向潜流通量出现负值, 其余均为正值; 0.375 m 处潜流通量在 5 月 1~2 号维持稳定, 5 月 3 日有所增长。0.975 处潜流通量几乎维持不变。随着潜流带深度增加, 其潜流通量随时间的波动振幅减小。垂向潜流通量随时空变化不具规律性。



Figure 1. Recorder device
图 1. 记录仪装置



Figure 2. Recorder installation
图 2. 记录仪安装

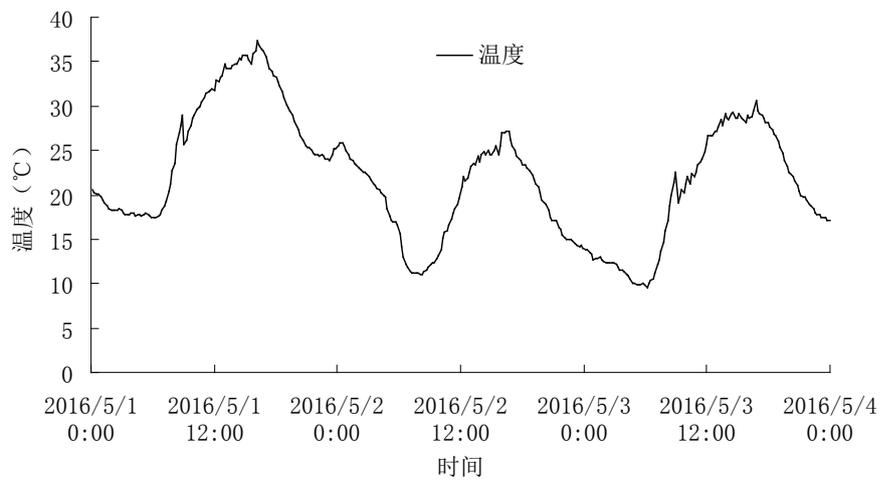


Figure 3. Temperature change chart
图 3. 5月 1~3 日温度变化图

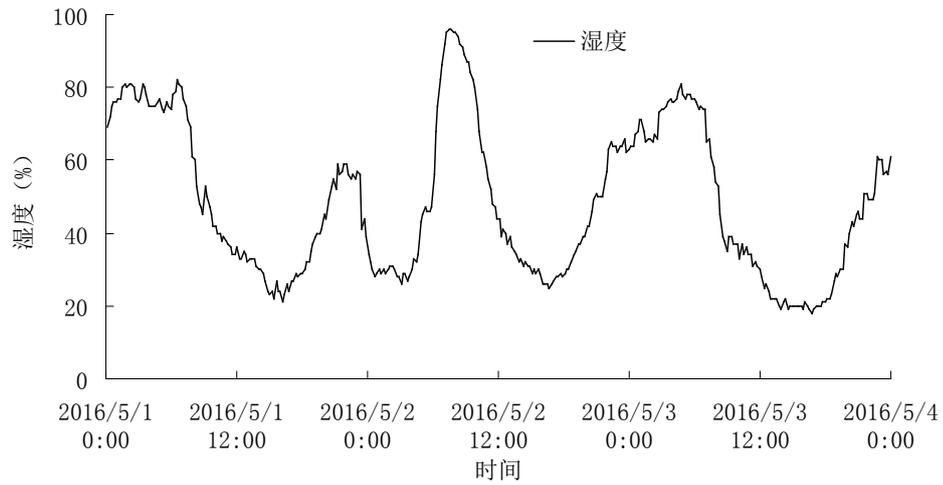


Figure 4. Moisture change chart
图 4. 5月 1~3 日湿度变化图

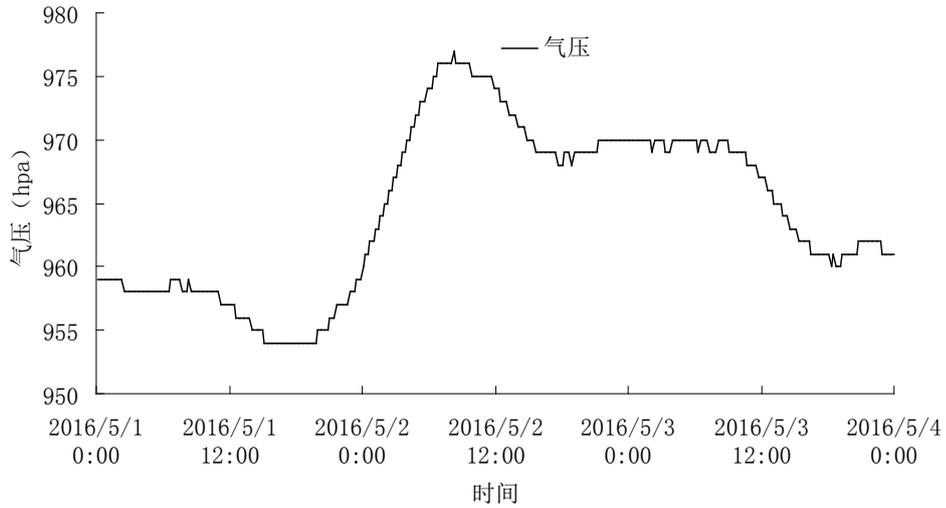


Figure 5. Daily pressure change chart
图 5. 5月 1~3 日气压变化图

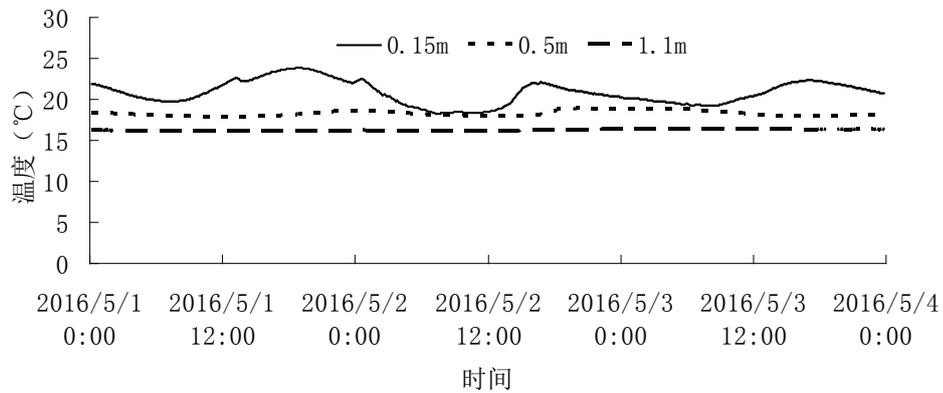


Figure 6. Temperature distribution in the original time series
图 6. 传感器在原始时间序列下的温度分布图

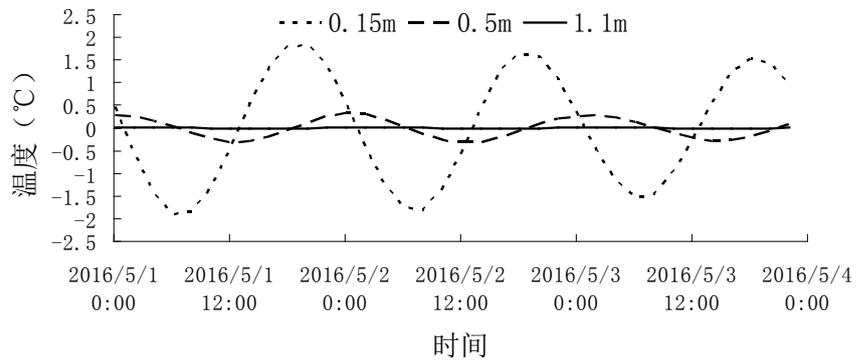


Figure 7. The temperature distribution graph of the sensor under the filter time series
图 7. 传感器在过滤时间序列下的温度分布图

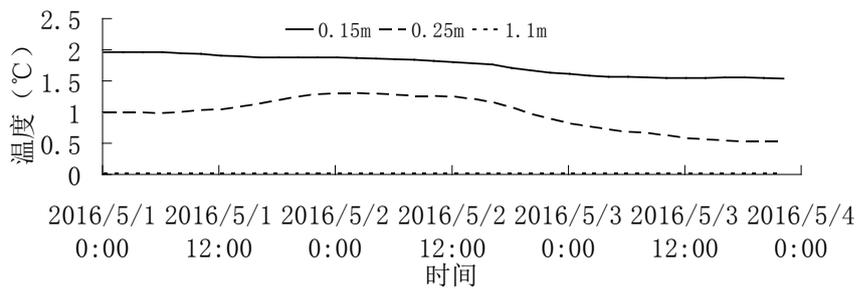


Figure 8. The amplitude distribution graph of the sensor under the filtered time series
图 8. 传感器在过滤时间序列下的振幅分布图

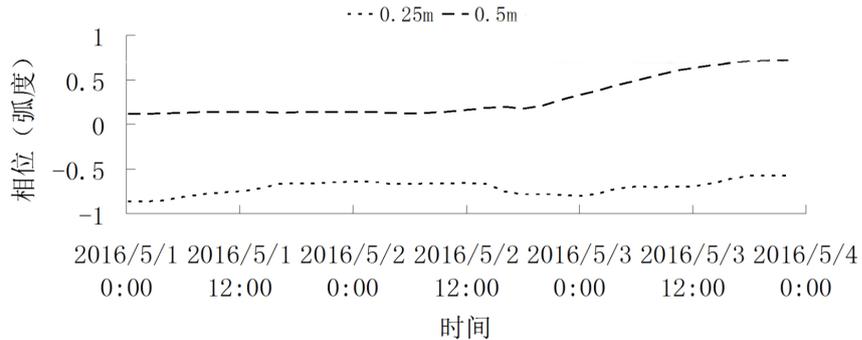


Figure 9. Phase angle distribution graph of the sensor in the filtered time series
图 9. 传感器对在过滤时间序列下的相位角分布图

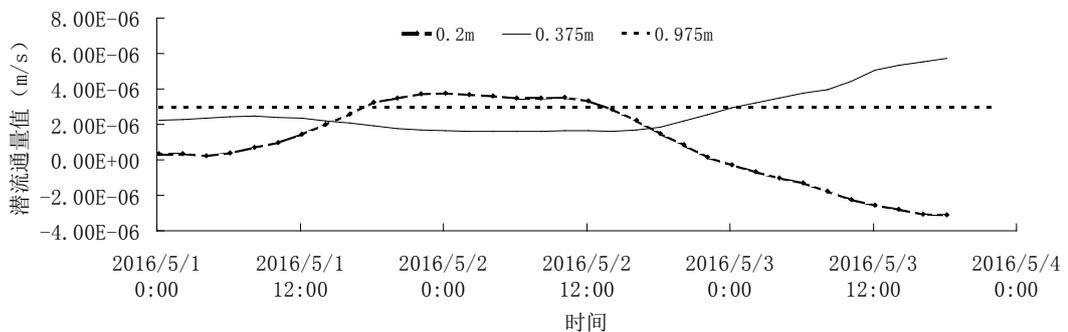


Figure 10. Daily hyporheic flux change chart
图 10. 5 月 1~3 日瞬时潜流量变化图

4.4. 河流地下水补给关系

潜流通量为正值,表示地表水补给地下水;潜流通量为负值,表示地下水补给地表水。由图 10 显示,在 5 月 1 日 0:09:01~5 月 2 日 22:09:01 时间段内潜流带垂向潜流量数值为正值,地表水(河流)补给地下水。在 5 月 3 日 0:09:01~22:09:01 时间段内河床下 0.15 m 与 0.25 m 传感器对的潜流带垂向潜流量数值为负值,其余 6 组传感器对的潜流带垂向潜流量数值为正值,计算得出 0.15~0.25 m 处的平均潜流量为 9.7×10^{-7} m/s,即水流方向向下其补给关系仍为地表水(河流)补给地下水。第一组传感器为负值原因可能是 5 月 2 日上午有降雨,导致地下水位上升,出现局部区域地下水补给地表水。

5. 结论

1) 流通量为正值,表示地表水补给地下水;潜流通量为负值,表示地下水补给地表水。由图 10 显示,在 5 月 1 日 0:09:01~5 月 2 日 22:09:01 时间段内潜流带垂向潜流量数值为正值,地表水(河流)补给地下水。本次研究中温度数据检测的精度为 0.0625°C ,数据采集较精准。

2) 5 月 2 日上午有降雨,而潜流量数据在 5 月 3 日出现负值。可知,降雨对潜流影响有一定延缓作用。

3) 潜流量随潜流带深度增大,潜流量数值随时间波动幅度减小。垂向分布上随时空变化具有差异性。

本研究揭示了潜流带深度和地下水温度的关系,进行了潜流量的计算并对潜流带垂向潜流量动态变化特征进行了分析,分析了地表水与地下水的补给关系。分析水流方向变化能够为河道综合治理工程提供一定的参考依据,同时,为水环境污染的防治奠定基础。

基金项目

长安大学 2017 年大学生创新创业训练计划项目(201710710161)。

致 谢

感谢马瑞同学在原位温度测试方面大力支持,在此表示衷心感谢!

参考文献 (References)

- [1] 杨小全,金光球,李凌,曹淼. 河流潜流带中胶体迁移的研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2011, 30(6): 78-83.
- [2] 冯斯美,宋进喜,来文立,王珍,梁雯. 河流潜流带渗透系数变化研究进展[J]. 南水北调与水利科技, 2013(3): 123-126.
- [3] 李佳选,王元元,宋进喜,张军龙,蒋卫威,杨小刚. 北洛河潜流带水交换研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 310-313.
- [4] 王璜. 鄂尔多斯沙漠高原湖泊潜流带中硫的生物地球化学特征及其分带规律研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [5] Sun, Z., Ma, R., Wang, Y., Ma, T. and Liu, Y. (2016) Using Isotopic, Hydrogeochemical-Tracer and Temperature Data to Characterize Recharge and Flow Paths in a Complex Karst Groundwater Flow System in Northern China. *Hydrogeology Journal*, **24**, 1-20. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1390-2>
- [6] 余倩. 潜流带砷迁移水动力—水化学过程监测与耦合模拟研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 中国地质大学, 2014.
- [7] 张佳. 基于温度示踪的潜流交换动态变化研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2016.
- [8] 朱静思,束龙仓,鲁程鹏. 基于热追踪方法的河道垂向潜流量的非均质性研究[J]. 水利学报, 2013, 44(7): 818-825.
- [9] Briggs, M.A., Lautz, L.K., McKenzie, J.M., Gordon, R.P. and Hare, D.K. (2012) Using High-Resolution Distributed Temperature Sensing to Quantify Spatial and Temporal Variability in Vertical Hyporheic Flux. *Water Resources Re-*

- search*, **48**, 2527. <https://doi.org/10.1029/2011wr011227>
- [10] 杨国强, 苏小四, 王璜, 郭金淼. 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): 124-127.
- [11] Huo, A., Chen, X., Li, H., Hou, M. and Hou, X. (2011) Development and Testing of a Remote Sensing-Based Model for Estimating Groundwater Levels in Aeolian Desert Areas of China. *Canadian Journal of Soil Science*, **91**, 29-37. <https://doi.org/10.4141/cjss10044>
- [12] Huo, A., Li, H., Hou, M. and Qiao, C. (2011) Relations between Surface Evapotranspiration and Water Table: A Case Study Base on Remote Sensing. *African Journal of Agricultural Research*, **6**, 6653-6660.
- [13] 李英玉, 赵坚, 吕辉, 陈斌. 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.
- [14] Huo, A.-D., Li, J.-G., Jiang, G.-Z. and Yang, Y. (2013) Temporal and Spatial Variation of Surface Evapotranspiration Based on Remote Sensing in Golmud Region, China. *Applied Mathematics & Information Sciences*, **7**, 519-524. <https://doi.org/10.12785/amis/072L21>
- [15] Huo, A., Peng, J., Chen, X., Deng, L., Wang, G. and Cheng, Y. (2016) Groundwater Storage and Depletion Trends in the Loess Areas of China. *Environmental Earth Sciences*, **75**, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5951-4>
- [16] 苏小茹, 束龙仓, 鲁程鹏, 等. 基于热追踪方法的垂向潜流量动态特征研究[EB/OL]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201401-1024>, 2014-01-23.
- [17] Huo, A.-D., Dang, J., Song, J.-X., Chen, X.H. and Mao, H.-R. (2016) Simulation Modeling for Water Governance in Basins Based on Surface Water and Groundwater. *Agricultural Water Management*, **174**, 22-29. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.02.027>
- [18] Chen, X.H., Mi, H.C., He, H.M., Liu, R.C., Gao, M., Huo, A.D. and Cheng, D.H. (2014) Hydraulic Conductivity Variation within and between Layers of a High Floodplain Profile. *Journal of Hydrology*, **515**, 147-155. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.052>
- [19] 来文立. 河流潜流带水文联通时空特性研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西北大学, 2013.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ojs@hanspub.org