

河床地形起伏变化对地表水-地下水-湿地水交互过程的影响研究

张丽娟, 吴佩鹏, 张盛艳, 张 阳

Impact of topographic fluctuation of riverbed on surface water-groundwater-wetland water interaction

ZHANG Lijuan, WU Peipeng, ZHANG Shengyan, and ZHANG Yang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202303004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于GSFLOW的镜湖湿地地表水与地下水耦合数值模拟

Numerical simulation of coupling surface water and groundwater based on GSFLOW for the Jinghu Wetland

郜会彩, 肖玉福, 胡云进, 陈柳安, 周如杰 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 182-191

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

黑河流域中游盆地地表水与地下水转化机制研究

Study on the conversion mechanism of surface water and groundwater in the middle reaches of the Heihe River Basin

祁晓凡, 李文鹏, 崔虎群, 康卫东, 刘振英, 邵新民 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 29-43

西北典型内陆流域地下水与湿地生态系统协同演化机制

Co-evolution mechanism of groundwater and wetland ecosystem in a typical inland watershed in northwest China

胡顺, 凌抗, 王俊友, 乔树锋, 葛孟琰, 孙自永, 马瑞 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 22-31

西藏波密冰川覆盖区大型河流与断裂带地下水转化关系

Transformation characteristics of the large-flow river and groundwater in the fault zone in the glacier-covered area of Bomi in Tibet

马剑飞, 李向全, 张春潮, 付昌昌, 白占学, 王振兴 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 23-33

同位素技术解析安阳河与地下水相互作用

Isotope analyses of the interaction between the Anyang River and groundwater

张敏, 平建华, 禹言, 黄先贵, 朱亚强, 程玉刚 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 31-39



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202303004

张丽娟, 吴佩鹏, 张盛艳, 等. 河床地形起伏变化对地表水-地下水-湿地水交互过程的影响研究 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(1): 22-29.

ZHANG Lijuan, WU Peipeng, ZHANG Shengyan, et al. Impact of topographic fluctuation of riverbed on surface water-groundwater-wetland water interaction[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(1): 22-29.

河床地形起伏变化对地表水-地下水-湿地水交互过程的影响研究

张丽娟^{1,3}, 吴佩鹏², 张盛艳^{1,3}, 张 阳^{1,3}

(1. 河南省地质局生态环境地质服务中心, 河南 郑州 450053; 2. 吉林大学新能源与环境学院, 吉林 长春 130021; 3. 河南省矿山环境生态修复工程技术研究中心, 河南 郑州 450053)

摘要: 地表水动力条件变化及河床沉积物岩性空间差异造成河床地形在空间上起伏变化是水沙界面压力空间分布的主要因素, 影响地表水-地下水、地下水-傍河湿地水交互过程。为研究河床地形起伏变化对地表水-地下水-湿地水交互过程的影响机理, 在黄河下游开封柳园口设置研究断面, 统计分析河床地形起伏变化特征数据, 建立半理想化地下水流数值模型, 分析地表水-地下水-湿地水相互作用过程。结果表明: (1) 与平整河床相比, 河流横断面河床地形空间起伏变化可增大地表水-地下水转换量及地下水-湿地水转化量; (2) 河床地形空间起伏变化使河床下伏含水层发育不同级次的地下水流系统, 改变了地下水流路径及其径流时间, 与平整河床地形相比, 河流横断面河床地形起伏变化使得河流下伏含水层地下水流路径复杂化, 近河床界面的浅部含水层不同位置发育有滞留区, 且随着河床地形起伏程度越大, 湿地侧河床下伏含水层及湿地附近含水层地下水年龄增大。研究结果可为黄河下游悬河段地表水-地下水-湿地协同保护提供理论依据。

关键词: 河床地形起伏; 地表水; 地下水; 湿地水; 相互作用

中图分类号: P641.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)01-0022-08

Impact of topographic fluctuation of riverbed on surface water-groundwater-wetland water interaction

ZHANG Lijuan^{1,3}, WU Peipeng², ZHANG Shengyan^{1,3}, ZHANG Yang^{1,3}

(1. Ecological Environment Geo-Service Center of Henan Geological Bureau, Zhengzhou, Henan 450053, China; 2. College of New Energy and Environment, Jilin University, Changchun, Jilin 130021, China; 3. Technology Research Center for Mine Environment Ecological Restoration Engineering of Henan, Zhengzhou, Henan 450053, China)

Abstract: Spatial variation of riverbed topography caused by the difference of dynamic conditions of surface water affects spatial distribution of pressure at water-sediment interface, which has an important influence on the interaction between surface water and groundwater and the interaction between groundwater and wetland water. To reveal the influence mechanism of riverbed undulations on surface water-ground water interaction, This study

收稿日期: 2023-03-02; 修订日期: 2023-05-16

投稿网址: www.swd zgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(42102286); 河南省自然资源厅 2020 年度新立项目(2020-7)

第一作者: 张丽娟(1980—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事生态环境、环境地质等方面的研究。E-mail: 50554420@qq.com

通讯作者: 吴佩鹏(1989—), 男, 博士, 副教授, 主要从事地下水系统理论与调控研究。E-mail: hydrogeowu@jlu.edu.cn

established a groundwater flow numerical simulation model and analyzed the influence mechanism of riverbed topography on surface water-groundwater-wetland interaction process based on the characteristics of riverbed topographic undulations of a profile at Liuyuankou, Kaifeng, the lower reaches of the Yellow River. The results show that: (1) compared with flat riverbed, the variable riverbed topography leads to an increasing exchange fluxes between surface water and between groundwater and wetland water; (2) The spatial fluctuation of riverbed topography forms different levels of groundwater flow systems at the bottom of the riverbed, and changes the groundwater flow path and the travel time. Compared with the flat bed topography, the variation of the topography of river bed complicates the groundwater flow path in the underlying aquifer. Retention areas are developed in different positions in the aquifer near the bed interface. Moreover, the greater topography degree of the river bed, the older the groundwater age in the aquifer beneath the wetland bed and aquifer near the wetland. This study can provide theoretical basis for promoting the coordinated protection of surface water, groundwater and wetland water in the suspended reach of the lower Yellow River.

Keywords: riverbed topography; surface water; groundwater; wetlands water; interaction

滨河湿地生态系统是发育于水陆环境过渡地带的特殊系统, 湿地水量输入输出的动态变化对其发育和演变起着至关重要的作用^[1-2]。受湿地类型、地质条件、气候和水文情势变化等的共同控制, 滨河湿地水体的补给来源及其转化关系极其复杂^[3]。当前, 关于滨河湿地水补给来源及其转化关系的研究多集中于湿地水和地下水的补排关系^[4]、河流和洪泛湿地的相互作用^[5]等方面, 多关注依赖地表水的湿地系统, 较少关注依赖地下水的湿地系统。然而, 地下水是干旱半干旱区湿地系统的主要甚至是唯一补给来源^[6]。同时, 地表水、地下水作为陆地上重要的水资源存在形式, 在不同时空尺度上相互转化, 是不可分割的整体^[7-8]。因此, 从系统角度对地表水-地下水-湿地水交互过程进行研究, 对区域水资源综合管理与湿地生态保护具有重要的理论和实践价值。

自然界中, 不同空间尺度上河床地形起伏变化是水沙界面压力空间分布的主要影响因素, 影响地表水-地下水交互过程^[9-11]。例如, Tonina 等^[12]指出河床地形变化幅度可影响地表水地下水交换特征; 鲁程鹏等^[13]通过数值模拟研究了河床地形影响下的潜流交换过程; Behzadi 等^[14]研究表明, 水沙界面的压力分布主要受河床几何形状的控制。Lee 等^[15]研究表明, 地表水地下水交换通量随河床地形分形维数呈指数增长。分析前人研究表明河床地形变化是地表水地下水交互过程的主要控制因素, 但现有研究多关注河床地形变化特征对河床下伏含水层有限空间内小尺度潜流交换过程的影响, 较少考虑河床地形变化对地表水与区域地下水间的交互过程及其对地下水-傍河湿地水交互过程的影响。

黄河下游柳园口断面附近地下水循环过程大致为黄河水入渗补给地下水, 地下水在河堤外低洼处出露形成湿地^[16], 是较为理想的地表水-地下水-湿地水循环过程研究断面。本文根据实际水文及水文地质条件, 以地下水流系统理论为基础^[17], 以地下水动力场演化过程为工具^[18], 基于柳园口断面黄河地表水-地下水-湿地水循环转化模式及实际河床地形变化特征, 计算典型断面河床起伏变化对地表水-地下水-湿地水相互作用产生的影响并分析其机制, 为促进黄河下游悬河段地表水-地下水-湿地协同保护提供理论依据。

1 研究区概况

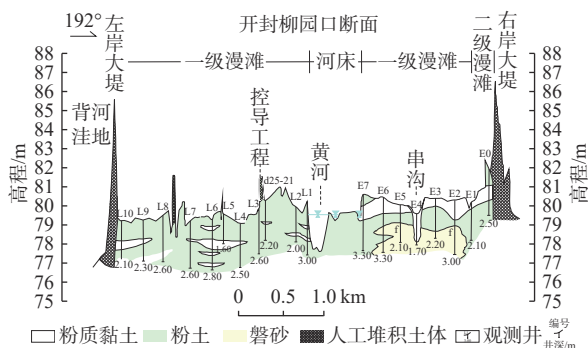
柳园口位于开封市北 10 km 处黄河下游南岸, 属于黄河对地下水的影响范围, 地面高程为 65 ~ 81 m。附近地形开阔, 地势平坦, 黄河河床高出堤外两侧平原 4 ~ 10 m, 地表水-地下水交互强烈, 是典型的地上悬河。柳园口附近, 黄河北岸地下水流向北偏东, 黄河南岸地下水流向南偏东。为尽量减少侧向地下水径流对断面模拟结果的影响, 本文模拟断面垂直于区域浅层地下水水位等值线设计。

柳园口断面南北跨越新乡封丘县和开封市北, 长 10 km, 断面位置见图 1(a)。柳园口断面地表岩性以粉砂、粉土、粉质黏土为主, 地下水类型为松散岩类孔隙水^[19]。潜水含水层由黄河冲积形成, 包括全新统、上更新统、中更新统上段含水砂层。含水层底板埋深一般 60 ~ 120 m, 水文地质剖面见图 1(b)。本文通过野外开展微水试验、竖管试验测定平原区含水层及河床沉积物的水文地质参数, 根据试验结果, 柳园口附近河床沉积物渗透系数为 3.925 ~ 6.425 m/d。平原

区微水试验显示地下水位回落过程渗透系数为 5.8 m/d, 水位上升过程渗透系数为 4.7 m/d。



(a) 研究区位置



(b) 水文地质剖面

图 1 研究区位置及水文地质剖面图

Fig. 1 Location of the study area and the hydrogeological profile

2 地下水流数值模拟

2.1 数学模型

本文采用 Richards 方程进行地下变饱和流的模拟。其中,毛细管压力与饱和度之间的非线性关系以及饱和度与渗透性之间的非线性关系,采用 Van Genuchten 模型进行描述。

2.2 模型概化

本文将模拟断面的潜水含水层概化为均质、各向同性介质。本次模拟选择垂直于区域地下水水位等值线的断面。同时,本文主要关注地表水-地下水-湿地水相互作用关系,地下水流除水平向流动外,还有相当程度的垂向运动,因此,将地下水流概化为水平-垂向二维流进行模拟。模拟过程中,将水沙界面(黄河河床及柳池池底)、模拟区南北侧向边界均设置为

一类边界,模型下边界设置为隔水边界。同时,因模拟区降水量不大,加之模拟区范围较小,所以不考虑降水补给及蒸发排泄。

2.3 网格剖分及模拟时间

采用 Feflow 软件对模拟断面进行三角形网格剖分,并对黄河河道及堤外排泄湿地(柳池)进行局部加密,研究断面共剖分为 16 748 个单元格、8 652 个计算节点,如图 2 所示。其中模型底板高程根据开封附近潜水含水层底板埋深确定,即 140 m。此外,模型模拟时间以相对时间进行设置,即由 0 时刻开始计算,共运行 5 a 时间,直至模型由初始流场运行至稳定状态。

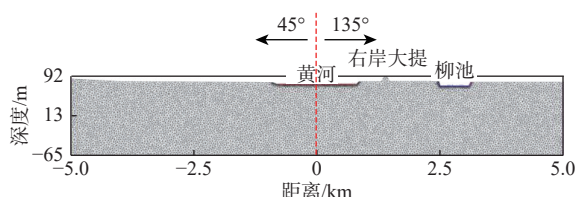


图 2 垂向网格剖分结果

Fig. 2 Mesh in the model

2.4 模拟场景设置及模型参数设置

河床冲淤变化、地层结构等介质条件是影响地表水-地下水-湿地水相互作用的重要因素。本文主要关注河床冲淤变化导致的河床地形起伏对地表水-地下水-湿地水相互作用的影响机理,并据此设置模拟场景,具体见表 1。基于野外竖管试验及微水试验选取模型参数,试验过程可见于文献 [20]。河道下伏含水层渗透系数设置为 5 m/d,给水度为 0.3。需要指出的是,本文研究重点在于识别河床地形起伏对地表水-地下水-湿地水交互的影响,并不着力于实际场地地表水-地下水-湿地水交互过程的反演分析,因此,模型参数选取以实际野外场地测得数据为依据,并未对模型进行校正和验证 [21]。

表 1 模拟场景设置

Table 1 Simulated Scenarios

编号	模拟场景	主要变量	河床起伏
Case 1	对照模型	河床地形	无
Case 2	河床地形起伏	河床地形	有

2.5 河床地形起伏刻画方法

为了研究河床横断面地形起伏变化对地表水-地下水-湿地水量交换的影响,以地下水流数值模型为基础,在河道横断面方向上赋以起伏状河床,并将河床起伏概化为不同形态的三角形沙丘,计算地表水-地下水转化量、地下水-湿地水转化量。Fehlman [22] 测量了

二维三角形沙丘表面的压力分布情况, 表明压力水头沿着沙丘表面在空间上形成一种近似正弦曲线的分布特征(图 3)。Elliott 等^[23-24]用经验公式描述沙丘表面的正弦压力(h)分布:

$$h = h_m \sin(\omega x)$$

式中: h_m ——正弦波动的压力变化的振幅/m。

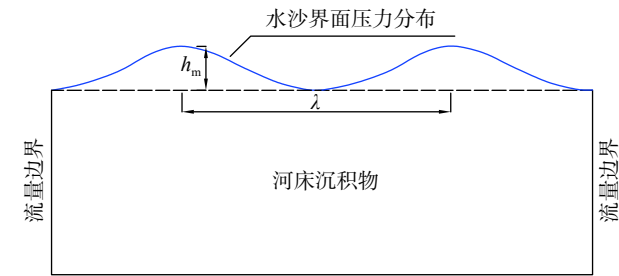


图 3 河床起伏变化条件下水沙界面压力分布示意图
Fig. 3 Pressure distribution along the interface of water and sediment

河床地形在空间上的波动周期(λ):

$$\lambda = 2\pi/\omega$$

式中: ω ——沙丘起伏频率。

h_m 的值可由经验公式得出:

$$h_m = 0.28 \frac{U^2}{2g} \begin{cases} \left(\frac{H/d}{0.34}\right)^{3/8} & H/d \leq 0.34 \\ \left(\frac{H/d}{0.34}\right)^{3/2} & H/d > 0.34 \end{cases}$$

式中: U ——地表水平均流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$);

H/d ——沙丘的波高与平均水深之比;

g ——重力加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)。

本文研究过程中, 地形起伏变化特征设置主要依据野外河床实测数据, 见图 4。经统计分析可知, 该断面地形在空间上的波动周期均值约为 178 m, 地形波动振幅均值约为 3.97 m。

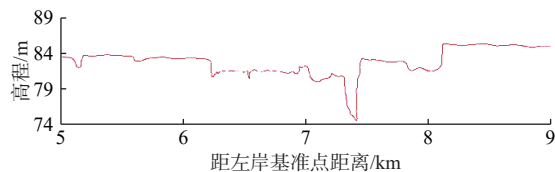


图 4 柳园口断面河床地形
Fig. 4 Riverbed topography in the Liuyuankou profile

3 研究结果

3.1 地表水-地下水-湿地水交换水量

不同类型间水体转化过程研究是准确掌握水体

水量变化及水质演变的重要环节, 对流域水资源保护、水污染防治、水资源合理开发利用具有重要意义。本文通过改变河床地形空间起伏程度和起伏周期, 统计分析不同河床地形起伏变化条件下地表水-地下水-湿地水转化量, 如表 2 所示。与平整河床相比, 横向起伏的河床在一定程度上增大了地表水-地下水的转化量, 但增大程度不明显。同样的, 地形起伏的河床也在一定程度上增大地下水-湿地水的转化量; 此外, 随着地形变化振幅的增大, 即 h_m 由 0.5 m 增大至 1.5 m 的过程中, 地表水-地下水转化量、地下水-湿地水转化量均表现为不显著的先增大后减小趋势; 随着河床地形起伏周期的增大, 即 ω 由 0.05π 增大至 0.10π 时, 地表水-地下水转化量、地下水-湿地水转化量也均表现为不显著的先增大后减小趋势。

表 2 不同河床起伏变化条件下地表水-地下水-湿地水转化水量
Table 2 Exchange flux between surface water-groundwater-wetland in the scenarios with different riverbed topography

模拟场景	h_m/m	ω	地表水-地下水转化量 /($\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)	地下水-湿地水转化量 /($\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)
Case 1	0	0	55.25	25.286
		0.10π	55.35	25.619
	1	0.08π	56.27	26.214
Case 2	1.5	0.05π	55.75	25.308
		0.05π	55.37	25.158
	0.5	0.05π	55.63	25.211

3.2 地下水流路径

地下水流路径是精细分析地表水-地下水-湿地水交互过程的主要工具。本文以 $h_m=1\text{ m}$ 、 $\omega=0.10\pi$ 为例, 分析了河床地形起伏变化条件下, 河流下伏含水层地下水水头空间分布及地下水径流路径特征, 见图 5。河床地形空间起伏条件下, 水沙界面上水头沿程分布随空间变化, 使得河道下伏含水层地下水流场复杂化, 即由河道通过水沙界面的入渗水流并未完全进入

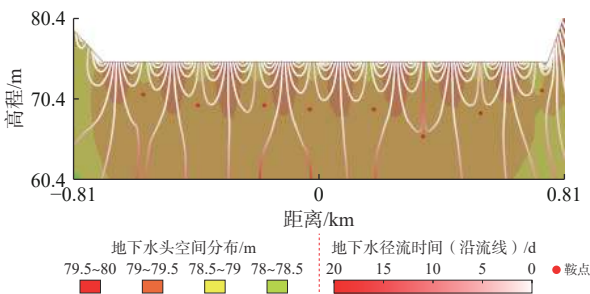


图 5 河床地形起伏变化条件下河床底地下水流线及水头分布特征

Fig. 5 Groundwater flow path and Head Distributions with varied riverbed topography

区域含水层,而是部分进入区域含水层,另一部分水流经含水层渗流后回归至河道。

河床地形空间起伏变化条件下河床下伏地下水系统可划分为不同级次的地下水流系统(图 5),即由河道入渗进入河床下伏含水层而后再回归河道的局部水流系统,以及由河道入渗进入区域含水层的中间水流系统和区域水流系统。不同级次水流系统间存在鞍点,见图 5,即流线同时发生发散和汇聚,且流线可以无限接近但不可能通过鞍点。

河床地形变化可改变水沙界面压力分布,进而改变地下水流路径及相应的径流时间。本文对不同河床地形波动振幅及其在空间上的波动周期条件下地下水流路径进行模拟,结果显示:不同河床地形空间起伏特征条件下的地下水流路径和相应路径上的地下水径流时间明显不同(图 6)。由图 6 可以看出,随着 ω 的减小,即空间上沙丘长度的增大,河道入渗进入含水层的水量增大,由地下水向湿地的排泄水量增大,具体表现为:流向含水层深部和湿地的流线数量增多、密度增大。也就是说,空间上随着河床地形起伏周期的增大,由河流流入含水层而后返回河流的局部水流系统越不发育;同时,河床下伏含水层深部鞍点位置没有明显变化。随着河床地形起伏程度的增大,即 h_m 的增大,河道入渗水进入含水层的水量减小,由地下水向湿地的排泄水量亦增大,具体表现为:流向含水层深部和湿地的流线数量减少、密度减小。也就是说,随着河床地形起伏程度的增大,由河流流入含水层而后返回河流的局部水流系统越发育。同样的,河床地形起伏程度的变化对河床底鞍点的位置影响不明显。

3.3 地下水年龄

地下水年龄是区域地下水可更新能力的主要指标,本文通过改变河床地形波动振幅及其在空间上的波动周期,分别识别了不同空间尺度上地下水年龄的响应过程。图 7 以 $h_m=1.0\text{ m}$ 、 $\omega=0.1\pi$ 为例,给出了河床起伏条件下河床下伏含水层有限空间范围内地下水年龄分布。由图 7 可以看出,河床地形变化可显著改变河床下伏含水层地下水年龄的空间分布特征。该场景下,地下水年龄除随深度增加而增加外,还与河床地形起伏变化条件下水沙界面水头分布类似,地下水年龄在沿河道横断面方向上并非均一值,而是随河床地形起伏变化。将图 7 与图 6 相结合进行分析可以看出,鞍点位置的地下水年龄相对较大,这也印证了鞍点位置地下水流速慢、循环速度慢这一结论。

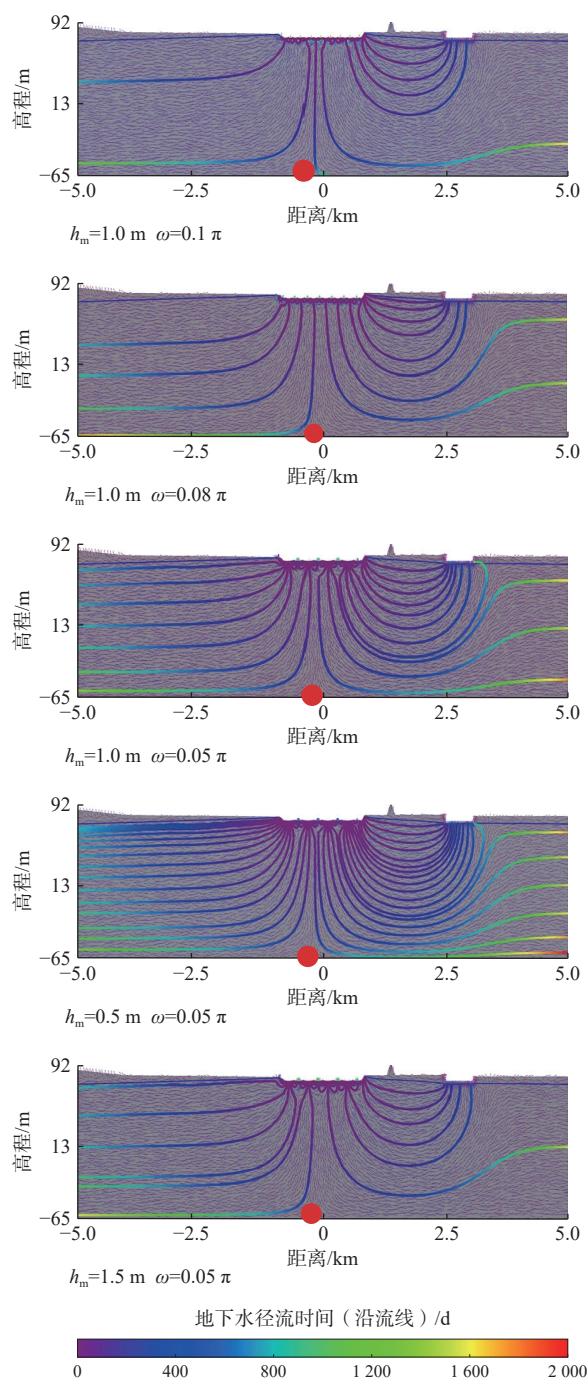


图 6 河床地形起伏变化条件下地下水流路径分布

Fig. 6 Groundwater flow path in the scenarios with different riverbed topography

此外,在河床地形起伏变化条件下,河床底有限空间范围内地下水年龄分布识别的基础上,本文进一步探究了河床地形变化对区域地下水年龄分布的影响,见图 8。图 8 展示了不同河床地形空间起伏特征条件下区域地下水年龄空间分布特征,由图 8 难以清晰对比出河床地形起伏特征对区域地下水年龄空间分布的影响。因此,为了更加清楚地研究河床地形起

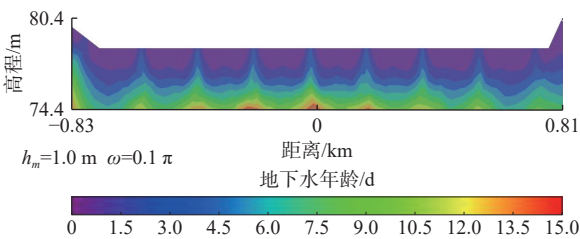


图 7 河床地形起伏变化条件下河床底地下水年龄分布特征

Fig. 7 Groundwater age distribution with the varied riverbed topography

伏变化对地下水年龄的影响, 本文在模拟断面上选取 3 个计算点, 分别为 A(-800 m, 60 m)、B(800 m, 60 m)、C(2 480 m, 71 m), 其中, 点 A 位于河道左岸河床下方, 点 B 位于河床右岸河床下方, 点 C 位于右岸湿地排泄面。对不同河床地形起伏特征条件下的地下水年龄进行统计, 结果见表 3。由表 3 可知, 随着河床起伏程度(即 h_m 越大)的增大, 河床左岸地下水年龄减小, 右岸及湿地排泄点地下水年龄增大; 随着河床起伏周期 ω 的减小, 即空间上沙丘长度的减小, 河床左岸地下水年龄减小, 河床右岸及湿地排泄点地下水年龄增大。

4 讨论

地表水-地下水-湿地水交互过程识别是区域生态环境有效保护与科学治理的重要基础和基本依据, 本文选择黄河下游悬河段典型剖面, 通过野外微水试验、竖管试验测定平原区含水层及河床沉积物的水文地质参数, 以 Richards 方程为基础, 建立半理想化地下水流数值模型, 通过改变河床起伏程度和河床在空间上的起伏周期, 研究黄河下游河床地形起伏变化对不同空间尺度地表水-地下水-湿地水相互作用的影响。

河床地形变化是河流水动力条件变化和河床沉积物岩性差异共同作用的结果。河床地形起伏变化可影响水沙界面压力分布, 改变地表水-地下水在空间上的相互转化通量^[25-26]。例如, Movahedi 等^[27]研究成果表明, 河床地形变化可增大地表水-地下水的转化量(潜流量)。在传统研究的基础上, 本研究将不同空间尺度(潜流交换、地表水-区域地下水)上的地表水-

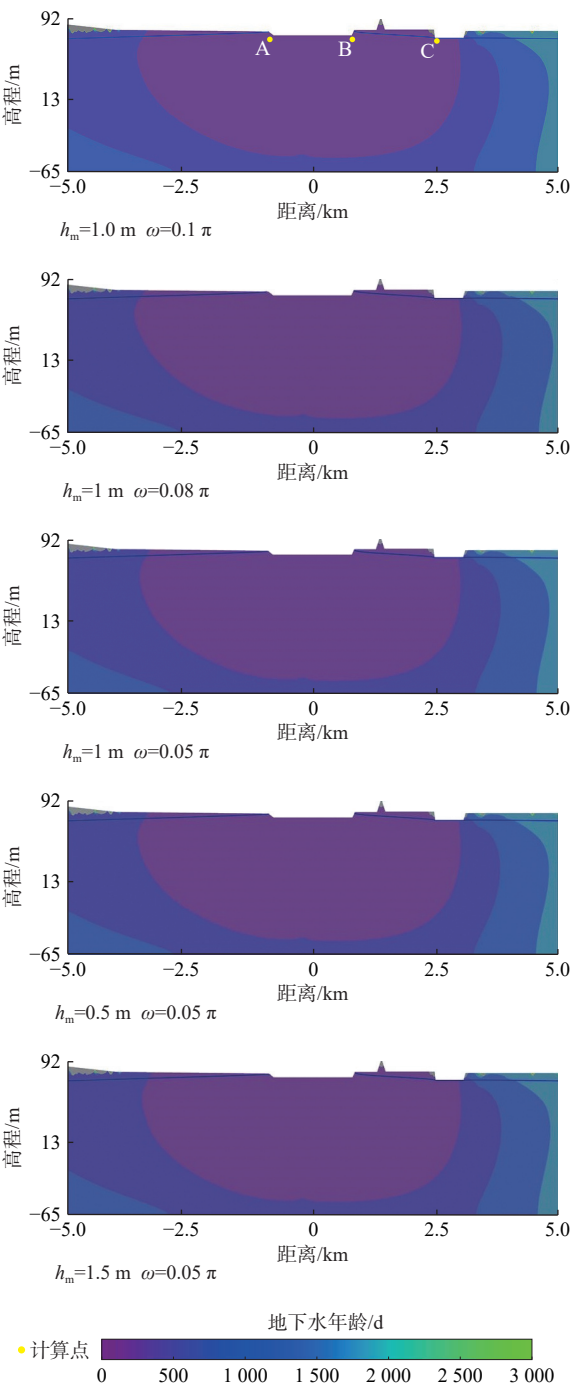


图 8 河床地形起伏条件下地下水年龄分布

Fig. 8 Groundwater age distributions in different scenarios with changed riverbed topography

表 3 不同河床起伏特征条件下含水层不同点位地下水年龄统计

Table 3 Groundwater age at different locations in the aquifer in different scenarios with different riverbed topography									
h_m /m	ω	地下水年龄/d			h_m /m	ω	地下水年龄/d		
		计算点A	计算点B	计算点C			计算点A	计算点B	计算点C
0.5	0.05 π	12.69	15.74	151.48	1.0	0.10 π	11.69	13.55	145.65
1.0	0.05 π	10.27	16.87	149.65	1.0	0.08 π	10.55	15.08	147.40
1.5	0.05 π	8.80	17.13	148.86	1.0	0.05 π	10.27	16.87	149.65

地下水相互作用过程进行耦合模拟,分析河床地形变化对地表水-地下水交换量及其转化路径、地下水年龄的影响。本研究进一步表明,河床地形空间起伏变化不仅控制着地表水-地下水转换量,还是地表水-地下水转化路径及河床下伏含水层地下水年龄空间分布的主要控制因素。此外,河床地形起伏变化不仅控制着小尺度地表水-地下水的交互过程(潜流交换),其对地表水-区域地下水-湿地水交互过程的影响亦不可忽略。因此,在地表水-地下水交互过程研究中,要重点关注河床地形在不同时空尺度上的变化规律。

另外,需要指出的是,本研究旨在通过数值模拟技术,对不同空间尺度的地表水-地下水交互过程进行刻画,分析河床地形对地表水-地下水交互过程的影响机理。自然条件下,由于黄河泥沙含量较大,水动力条件复杂,使得黄河河床冲淤变化频繁,河床地形在不同时空尺度上变化极其复杂。因此,本研究并不试图反演研究场地的地表水地下水相互作用的实际过程,所采用的模型参数也以场地实测水文地质参数为依据进行直接计算,未对其进行校正和验证。在后续工作中,将进一步加强观测,对数值模型和研究结论进行验证,提高研究成果的实际应用价值。

5 结论

(1)与平整河床地形相比,河流横断面河床地形空间起伏变化可增大地表水-地下水转换量及地下水-湿地水转化量。

(2)河床地形起伏变化明显改变了地表水-地下水交互的水流路径及地下水向湿地排泄的水流路径,且使得河道附近地下水流场复杂化,河道附近含水层内发育有不同级次的地下水流系统,河床底不同位置发育有滞留区。

(3)河床地形起伏变化主要影响河床附近区域的地下水年龄空间分布特征,增大了河床湿地两侧及湿地排泄点的地下水年龄,对区域地下水年龄空间分布影响不明显。

参考文献 (References) :

[1] 范伟,章光新,李然然.湿地地表水—地下水交互作用的研究综述[J].地球科学进展,2012,27(4):413-423. [FAN Wei, ZHANG Guangxin, LI Ranran. Review of groundwater-surface water interactions in wetland[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(4): 413-423. (in Chinese with English abstract)]

[2] CHEN Sheming, LIU Futian, ZHANG Zhuo, et al. Changes of groundwater flow field of Luanhe River Delta under the human activities and its impact on the ecological environment in the past 30 years[J]. China Geology, 2021, 4(3): 455-462.

[3] 许秀丽,李云良,高博,等.黄河中游汾河入黄口湿地水源组成与地表地下水转化关系[J].湖泊科学,2022,34(1):247-261. [XU Xiuli, LI Yunliang, GAO Bo, et al. Composition of water sources and transformation relationship between surface water and groundwater in the Fenhe River estuarine wetland of the middle Yellow River[J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(1): 247-261. (in Chinese with English abstract)]

[4] 徐华山,赵同谦,孟红旗,等.滨河湿地地下水水位变化及其与河水响应关系研究[J].环境科学,2011,32(2):362-367. [XU Huashan, ZHAO Tongqian, MENG Hongqi, et al. Relationship between groundwater level in riparian wetlands and water level in the river[J]. Environmental Science, 2011, 32(2): 362-367. (in Chinese with English abstract)]

[5] 李云良,姚静,谭志强,等.洪泛湿地系统地表水与地下水转化研究进展综述[J].水文,2019,39(2):14-21. [LI Yunliang, YAO Jing, TAN Zhiqiang, et al. Advances in surface water-groundwater interactions in floodplain wetlands[J]. Journal of China Hydrology, 2019, 39(2): 14-21. (in Chinese with English abstract)]

[6] CROSBIE R S, MCEWAN K L, JOLLY I D, et al. Salinization risk in semi-arid floodplain wetlands subjected to engineered wetting and drying cycles[J]. Hydrological Processes, 2009, 23(24): 3440-3452.

[7] 曾献奎,卢文喜,王伟卓,等.地下水与地表水耦合模拟模型研究与展望[J].人民黄河,2009,31(11):47-49. [ZENG Xiankui, LU Wenxi, WANG Weizhuo, et al. Research and prospect of coupling simulation model of groundwater and surface water[J]. Yellow River, 2009, 31(11): 47-49. (in Chinese)]

[8] 王国梁,梁修雨.考虑河床渗透性影响的基流退水过程解析模型[J].地质科技通报,2023,42(4):201-209. [WANG Guoliang, LIANG Xiuyu. An analytical model for baseflow recession considering riverbank permeability[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(4): 201-209. (in Chinese with English abstract)]

[9] 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.
- [10] BOUCHEZ C, COOK P G, PARTINGTON D, et al. Comparison of surface water-groundwater exchange fluxes derived from hydraulic and geochemical methods and a regional groundwater model[J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(3): e2020WR029137.
- [11] 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.
- [12] TONINA D, BUFFINGTON J M. Hyporheic exchange in gravel bed rivers with pool-riffle morphology: Laboratory experiments and three-dimensional modeling[J]. *Water Resources Research*, 2007, 43(1): W01421.
- [13] 鲁程鹏, 束龙仓, 陈洵洪. 河床地形影响潜流交换作用的数值分析 [J]. 水科学进展, 2012, 23(6): 789 – 795. [LU Chengpeng, SHU Longcang, CHEN Xunhong. Numerical analysis of the impacts of bedform on hyporheic exchange[J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(6): 789 – 795. (in Chinese with English abstract)]
- [14] BEHZADI F, WALLACE C D, WARD D, et al. Bed form-induced hyporheic exchange and geochemical hotspots[J]. *Advances in Water Resources*, 2021, 156: 104025.
- [15] LEE A, AUBENEAU A F, CARDENAS M B. The sensitivity of hyporheic exchange to fractal properties of riverbeds[J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(5): e2019W – e26560W.
- [16] 王永久, 田海峰, 夏浩铭, 等. 黄河花园口至柳园口段河道变迁遥感监测 [J]. 人民黄河, 2020, 42(增刊 2): 61 – 63. [WANG Yongjiu, TIAN Haifeng, XIA Haoming, et al. Remote sensing monitoring of river course change from Huayuankou to Liuyuankou of the Yellow River[J]. *Yellow River*, 2020, 42(Sup 2): 61 – 63. (in Chinese)]
- [17] 邵敏, 张奇. 分布式水文模型中河流水深及其与地下水相互作用的耦合模拟 [J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(2): 13 – 18. [SHAO Min, ZHANG Qi. Coupled simulation of river water depth and its interactions with groundwater in a spatially distributed hydrological model[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2012, 39(2): 13 – 18. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 姜瑞雪, 韩冬梅, 宋献方, 等. 潮白河再生水补给河道对周边浅层地下水影响的数值模拟研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(6): 43 – 54. [JIANG Ruixue, HAN Dongmei, SONG Xianfang, et al. Numerical modeling of the impacts of reclaimed water recharge to the Chaobai River channel on the ambient shallow groundwater[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(6): 43 – 54. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 河南省地质调查院. 黄河下游河南段悬河稳定性评价报告 [R]. 郑州: 河南省地质调查院, 2003. [Henan academy of geology. Stability evaluation of the suspended river in the lower reaches of the Yellow River[R]. Zhengzhou: 河南省地质调查院, 2003. (in Chinese)]
- [20] 吴佩鹏, 束龙仓, 李福林, 等. 层状非均质性影响下河流对地下水的补给过程研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(3): 44 – 53. [WU Peipeng, SHU Longcang, LI Fulin, et al. Influence of stratified heterogeneity on the recharge from surface water to groundwater[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(3): 44 – 53. (in Chinese with English abstract)]
- [21] ANDERSON M P, WOESSNER W W, HUNT R J. Applied ground water modeling: Simulation of flow and advective transport[C]//Applied Ground Water Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport, 2015.
- [22] M Fehlm H. Resistance Components and Velocity Distributions of Open Channel Flows Over Bedforms[D]. Colorado State University, 1985.
- [23] ELLIOTT A H, BROOKS N H. Transfer of nonsorbing solutes to a streambed with bed forms: laboratory experiments[J]. *Water Resources Research*, 1997, 33(1): 137 – 151.
- [24] ELLIOTT A H, BROOKS N H. Transfer of nonsorbing solutes to a streambed with bed forms: Theory[J]. *Water Resources Research*, 1997, 33(1): 123 – 136.
- [25] KASAHARA T, WONDZELL S. M. Geomorphic controls on hyporheic exchange flow in mountain streams[J]. *Water Resources Research*, 2003, 39
- [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]. *Journal Of Hydrology*, 2019, 574: 75 – 84.
- [27] MOVAHEDI N, DEGHANI A A, SCHMIDT C, et al. Hyporheic exchanges due to channel bed and width undulations[J]. *Advances In Water Resources*, 2021, 149: 103857.