

层状非均质性影响下河流对地下水的补给过程研究

吴佩鹏, 束龙仓, 李福林, 陈华伟

Influence of stratified heterogeneity on the recharge from surface water to groundwater

WU Peipeng, SHU Longcang, LI Fulin, and CHEN Huawei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202208065>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

Numerical modeling of the impacts of reclaimed water recharge to the Chaobai River channel on the ambient shallow groundwater

姜瑞雪, 韩冬梅, 宋献方, 李炳华 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 43-54

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

邵会彩, 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

基于相关指标的裂隙岩体渗透系数估算模型研究

A model for estimating hydraulic conductivity of fractured rock mass based on correlation indexes

王玮, 钱家忠, 马雷, 王德健, 马海春, 赵卫东 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 82-89

一种可增加海岛地下淡水资源储量的方法研究

A method for improving the fresh groundwater storage of oceanic islands

马婧, 鲁春辉, 吴吉春, 罗剑 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 1-7

层状非均质结构包气带入渗过程单相流与两相流数值模拟对比研究

A comparative numerical simulation study of single-phase flow and water-gas two-phase flow infiltration process in the vadose zone with the layered heterogeneous structure

高靖勋, 冯洪川, 祝晓彬, 吴吉春, 吴剑锋, 卫云波, 王水 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 24-32

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



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202208065

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.

层状非均质性影响下河流对地下水的补给过程研究

吴佩鹏^{1,2}, 束龙仓³, 李福林⁴, 陈华伟⁴

(1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 吉林大学新能源与环境学院, 吉林 长春 130061; 3. 河海大学水文水资源学院,
江苏 南京 210098; 4. 山东省水利科学研究院, 山东 济南 250013)

摘要: 河流对地下水的补给过程研究是科学认识水循环规律及地下水资源可持续管理的基础。河床沉积层与其下伏潜水含水层岩性差异是河流下伏含水层的主要结构特征, 也是控制河流对地下水补给过程的主要因素。为揭示含水介质分层结构特征影响下河流对地下水的补给过程, 基于黄河干流河南段野外试验结果, 建立了地表水地下水相互作用概念模型, 并以地下水流路径为对象, 精细刻画了地表水地下水的相互作用过程。结果表明: (1) 河流对地下水的补给量主要受河床沉积层渗透性影响, 河床沉积层厚度变化对河流向地下水的补给量影响不大。即: 河床低渗透性沉积物的存在是河流向地下水补给量降低的主要原因, 当河床沉积层与其下伏含水层厚度比(H_s/H)由 0 增大为 0.125 时, 河流向地下水补给量的减小幅度达 72%。(2) 与均质条件相比, 河床沉积层渗透性及其厚度变化均明显改变了河水向地下水补给的水流路径及径流时间。随着河床沉积物与下伏含水层渗透系数比 K_s/K_l 的增大, 河水向地下水补给的水流路径穿透深度增大, 径流时间延长。(3) 河流对地下水的补给量及地下水径流时间对低渗透性河床沉积层渗透系数的敏感性随渗透系数的减小而增大, 同时, 地下水径流时间对低渗透性河床沉积层的厚度变化较为敏感, 且随着厚度的增大, 敏感性增强。研究成果可为地下水资源管理及可持续开发提供参考依据。

关键词: 河床沉积物; 层状非均质; 地表水地下水交互; 渗透系数; 数值模拟

中图分类号: P641.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)03-0044-10

Influence of stratified heterogeneity on the recharge from surface water to groundwater

WU Peipeng^{1,2}, SHU Longcang³, LI Fulin⁴, CHEN Huawei⁴

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. College of New Energy and Environment, Jilin University, Changchun, Jilin 130061, China; 3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 4. Water Resources Research Institute of Shandong Province, Jinan, Shandong 250013, China)

Abstract: Knowledge of the recharge from surface water to groundwater is the basement of the scientific understanding of water cycle and the sustainable management of groundwater resources. Meanwhile, the layered

收稿日期: 2022-08-15; 修订日期: 2022-10-18

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: “一带一路”水与可持续发展科技基金项目(2020nkms05); 国家自然科学基金项目(42102286); 国家重点研发计划项目(2021YFC3200504)

第一作者: 吴佩鹏(1989-), 男, 博士, 讲师, 主要从事地下水系统理论研究。E-mail: hydrogeowu@jlu.edu.cn

通讯作者: 束龙仓(1964-), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事地下水资源评价与管理研究。E-mail: lcshu@hhu.edu.cn

heterogeneity is the main structural feature of riverbed sediments (i.e., the lithologic difference between riverbed sediments and the underlying aquifer) and the main factor that controlling the recharge from surface water to groundwater. To reveal the influence mechanism of layered structure of pore media on the recharge from surface water to groundwater, a conceptual model of surface water and groundwater interaction is established based on the field test results of Henan reaches of the Yellow River, and the process of the recharge from surface water to groundwater interaction is described using flow path as the object. The results show that the exchange flux of surface water and groundwater is mainly affected by hydraulic conductivity of riverbed sediments, and the change of the thickness of riverbed sediments has little effect on the exchange flux between surface water and groundwater. That is, the increase of the ratio of the thickness of the sediments to that of the underlying aquifer (H_s/H) from 0 to 0.125 leads to the interaction flux decreased by 72%, indicating that the existence of the low permeability layer is the main reason that decreases the interaction flux between surface water and groundwater. The change of the permeability and the thickness of riverbed sediments has obviously changed the flow path from surface water to groundwater and the travel time. Specifically, the increase in K_U/K_L leads to a larger penetration depth of groundwater flow and larger travel times. The sensitivity of exchange flux between surface water and groundwater and groundwater travel time to the hydraulic conductivity of riverbed sediments increases with the decreasing hydraulic conductivity. At the same time, the groundwater travel time is more sensitive to the change of the thickness of the low permeability riverbed sediments, and the sensitivity increases with the increasing thickness. The research results can provide reference for groundwater resource management and sustainable development.

Keywords: riverbed sediment; stratified heterogeneity; surface water-groundwater interaction; hydraulic conductivity; numerical modeling

地表水与地下水相互作用过程是水循环的重要环节, 准确掌握其在不同影响因素下的转化过程及转化机制是水资源可持续开发利用的基础, 也是区域供水安全的重要保障^[1]。由于地质构造与地层结构^[2]、气候变化^[3]、水文过程^[4]、人类活动^[5]等诸多因素的影响, 地表水与地下水转化关系在时间和空间上具有显著的变异性 and 隐蔽性, 因此, 准确刻画其相互作用过程及机理是水文地质学领域的一大挑战^[6]。

长期以来, 国内外学者采用水力学法^[7]、温度示踪法^[8]、同位素及水化学示踪法^[9-10]、数值模拟^[11]等方法对地表水与地下水转化过程的时空变化规律进行了较为系统和深入的研究。鲁程鹏等^[12]基于热追踪方法对河流横断面潜流交换的时空非均质特征进行了研究。文广超等^[13]基于水化学和稳定同位素定量评价了巴音河流域地表水与地下水转化关系。从研究尺度来看, 目前关于地表水地下水相互作用过程的研究主要集中在 2 个方向, 即: 较小时空尺度上的潜流交换^[14]研究和较大时空尺度上的地表水和区域地下水间的相互作用^[15]研究。如, Huang 等^[16]基于物理模型试验和相应尺度的数值模型, 从相对较小的尺度识别了沙坝对潜流交换的影响机理。束龙仓等^[17]以

三江平原为研究区, 结合长时间序列的地表水位及地下水水位动态过程, 对地表水与地下水水量交换的时空变化规律进行了分析。从研究对象看, 前人研究主要集中在地表水地下水的水量交换^[15]和水化学成分^[18]的转化研究。李刚等^[19]利用水位、水温监测数据, 采用温度示踪法, 开展了白洋淀湖岸带区域地表水与地下水垂向交换量研究。Jasechko 等^[20]基于美国大陆 420 万眼地下水监测井的水位数据及 58 万个河段的河流水位数据, 定性分析了美国大陆地表水地下水水量交互情况。雷米等^[21]基于实际采样数据, 采用模型分析方法研究了新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系。由此可见, 当前关于地表水地下水相互作用过程的已有研究较少以地下水流路径为对象, 从地下水流系统理论角度对该过程进行精细刻画。而地下水流系统理论是水文地质学研究的重要方法, 为研究地下水循环转化过程提供了方法论上的新启示^[22]。

此外, 河床沉积物是河流与其临近含水层之间发生水量、能量、物质交换的主要介质通道。自然条件下, 从长时间尺度看, 河流水动力条件的变化使得河床沉积物介质特征与其下伏含水层存在差异, 由此造

成的含水介质分层结构特征^[23]是影响地表水与地下水相互作用过程的主要因素^[24],可显著影响地下水流路径及地下水径流时间^[25]。当前,受限干实际场地的观测成本及条件,关于河床沉积物对地表水地下水相互作用过程的研究多局限于某一具体渗透系数场及有限的试验情景^[26],缺乏规律性认识。因此,本文以黄河干流河南段野外试验结果为基础,通过数值模拟方法,精细刻画河床下伏含水介质层状非均质性对地表水地下水补给量、地下水流路径、地下水径流时间等地下水流运动特征,并研究其影响规律。

1 野外试验

本研究的野外试验位于黄河下游干流河南段,共选取3个断面(图1),沿黄河干流自上至下分别为:桃花峪断面、花园口断面、开封柳园口断面。此外,还在洛阳G207桥附近进行了地表水地下水补排关系调研。野外试验的主要任务为:分析地表水与地下水的补排关系;开展野外河床沉积物现场竖管试验,确定

主要水文地质参数。

1.1 试验区概况

如图1所示,黄河河南段地处中国中东部,西连陕西,东接山东,北接山西,南入河南,呈现承东启西,连贯南北之势;东西横跨三门峡、洛阳、郑州、开封、济源、焦作、新乡、濮阳8个地市。

根据已有的专门水文地质勘探^[27]结果,黄河河南段水砂界面以下地层为粉土、粉质土等构成的细颗粒多孔介质,和中细砂、中粗砂为主的粗颗粒相沉积物。区内主要含水层组为第四系松散岩类孔隙介质,该层组由黄河冲积形成,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,开封北最深可达140 m。由于黄河的高泥沙量特征,该区内黄河干流在人工大堤的约束下形成了世界上著名的“地上悬河”。河床一般高出堤外平原3~5 m,最高达10 m之多,成为南北平原的地下水分水岭。河床砂层与岸边潜水含水层相连,水力联系密切,黄河水源不断补给两岸地下水。

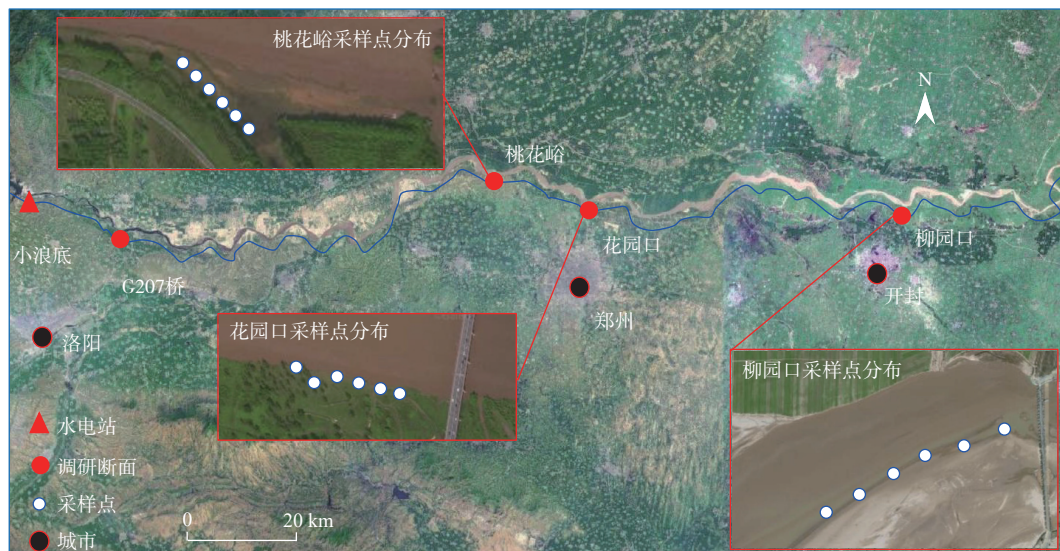


图1 试验断面位置图

Fig. 1 Location of the test sections

1.2 竖管试验

竖管试验(图2)是目前国内外测定河床沉积物渗透系数的较为有代表性的方法^[28]。试验过程中,将不同管径(本次野外试验选用的管材直径为15 cm)的PVC管垂直打入河床沉积物,在管内加入适量水,记录不同时刻管内水位,计算该点的渗透系数值:

$$K_v = \frac{L_v}{t_2 - t_1} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (1)$$

式中: K_v ——测点垂向渗透系数/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$);

L_v ——PVC管内河床沉积物长度/m;

h_1 、 h_2 —— t_1 、 t_2 时刻PVC管内水位/m。

本次野外试验,分别在桃花峪断面、花园口断面、柳园口断面进行了现场竖管试验,每个断面选择6个点位,每个点位读取5个水头值。不同断面不同点位的渗透系数计算结果见表1。由表1可知,即便是同一试验断面,基于竖管试验的不同测点间渗透系数也

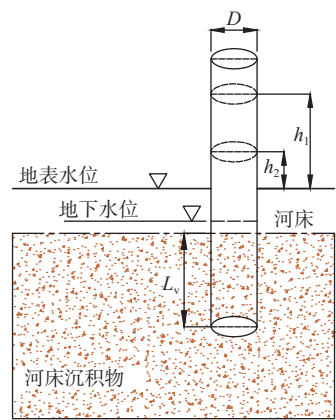


图 2 竖管试验原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the standpipe test

表现出较强的变异性。由于竖管试验过程中, PVC 管打入沉积物的深度大约在 20 cm 左右, 因此, 不同测点间渗透系数变异性主要是由河流水动力条件变化引起的河床沉积物粒径变化造成^[24]。

2 数值模拟

2.1 概念模型

本研究采用数值模拟方法对河道横断面的地表水对地下水的补给过程进行模拟分析。为了避免侧向与垂向水流共同作用而使问题复杂化, 本研究不考虑河道两岸地下水水位差异引起的水平向地下水流对研究结果的影响, 而根据对称原理, 选择河道横断

表 1 不同试验断面不同点位渗透系数竖管试验结果

Table 1 Standpipe test results of hydraulic conductivity at different points in different test sections						/ (m·d ⁻¹)
断面	测点编号1	测点编号2	测点编号3	测点编号4	测点编号5	测点编号6
桃花峪	4.500	2.800	3.400	0.014	6.000	2.400
	4.800	2.700	3.800	0.010	5.800	2.100
	4.000	1.800	3.000	0.012	4.900	2.500
	3.400	2.000	4.000	0.009	6.400	1.800
平均值	4.175	2.325	3.550	0.011	5.775	2.200
花园口	2.400	1.780	2.530	2.180	1.720	0.240
	2.140	1.690	2.320	2.980	0.980	0.190
	1.980	2.010	2.510	2.570	1.540	0.540
	2.070	1.750	1.890	1.690	1.210	0.810
平均值	2.148	1.808	2.313	2.355	1.363	0.445
柳园口	1.570	0.021	0.140	0.001	1.210	0.850
	1.280	0.009	0.009	0.001	1.080	0.940
	1.370	0.021	0.014	0.005	0.970	0.090
	2.150	0.050	0.021	0.008	0.520	0.120
平均值	1.593	0.025	0.046	0.004	0.945	0.500

面河流中泓线右侧一定河宽范围(图 3 中 ABCD 围合范围)进行模拟, 具体模拟范围见图 3, 其物理尺寸为 50 m×80 m (宽×深)。具体模拟过程中, 将水砂界面(模拟范围的上边界 AD)和河岸侧垂向边界 CD 均设置为定水头边界, 河流中泓线侧垂向边界 AB 和下边界 BC 均设置为隔水边界。其中, 河岸侧垂向边界 CD 为沿深度方向上水头线性变化的定水头边界, 边界水头沿深度方向的变化率(0.005)参照竖管试验结果(PVC 管内水位稳定时, 管内外水头差与管内介质长度的比值)确定。此外, 根据区内地层结构, 本研究将水砂界面以下含水层概化为层状非均质各向同性介质, 其中上层介质渗透性低于下层。模型中不涉及动态变化的边界条件, 因此采用稳定流模拟。在确定概念模型、模型尺寸及边界条件的基础上, 本研究采用 FEFLOW 程序求解地下水数值模型。需要指出

的是, 本文研究重点在于河床沉积物渗透性变化及沉积物厚度对地表水地下水交互的影响机制, 并不着力于实际场地地表水地下水交互过程的反演分析, 因此, 模型参数选取以实际野外试验结果为依据, 并未对模型进行校正和验证^[29]。

2.2 模拟场景

本研究旨在通过数值模拟技术, 以地下水流路径为对象, 精细刻画含水介质层状非均质条件下的地表水对地下水的补给过程。由于黄河泥沙含量较大, 且水动力条件复杂, 使得黄河河床冲淤变化频繁, 进而造成河床沉积物渗透系数在时间和空间上均存在较大变异性, 亦会造成河床沉积物厚度的变化。因此, 本研究共设置 2 种场景进行模拟, 分别研究: ① 河床沉积物渗透系数变化条件下, 地表水对地下水补给过程的响应。此时, 根据表 1 野外竖管试验结果, 河床

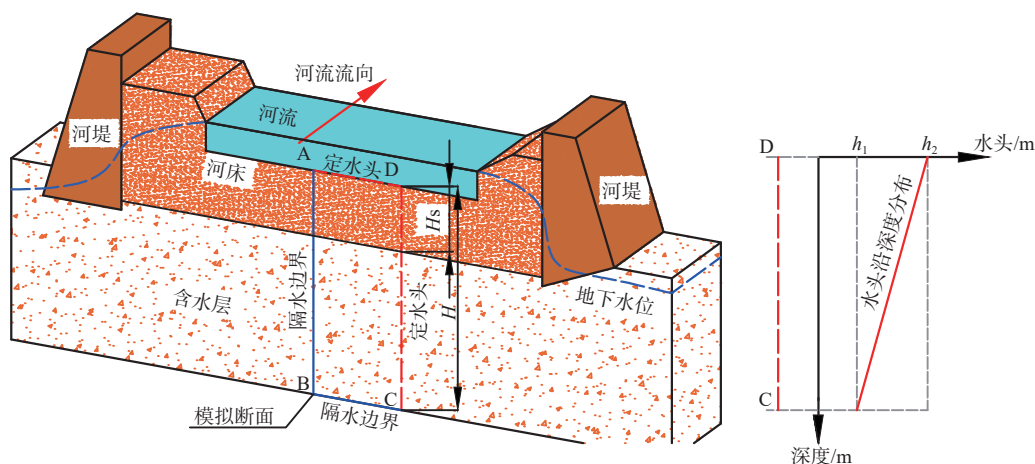


图3 黄河下游地表水地下水相互作用数值模拟的概念模型

Fig. 3 Conceptual model for numerical simulation of surface water-groundwater interaction in the lower Yellow River

沉积物渗透系数(K_U)变化范围为 $0.01 \sim 2.50$ m/d, 其下伏含水层渗透系数(K_L)设置为 5 m/d 恒定不变。②河床沉积物渗透系数不变, 河道冲淤变化造成河床沉积物厚度(H_s)变化条件下, 地表水对地下水补给过程的响应。此时, 河床沉积物渗透系数设置为 0.50 m/d 恒定不变, 其厚度变化范围为 $10 \sim 30$ m。

3 结果与分析

3.1 地表水地下水交换量

图4(a)给出了不同河床沉积物与其下伏含水层渗透系数比(K_U/K_L)条件下地表水与地下水的交换量(本研究中为地表水向地下水的补给量)。由图4(a)可以看出随着河床沉积物渗透系数的减小, 即 K_U/K_L 的减小, 地表水向地下水的补给量减小, 且地表水向地下水的补给量随 K_U/K_L 的变化过程可用幂函数拟合。

图4(b)给出了不同河床沉积物厚度与其下伏含水层厚度比(H_s/H)条件下地表水对地下水的补给量。表明随着 H_s/H 的增大, 地表水向地下水的补给量先急剧减小后趋于平稳。例如, 当河床沉积物厚度由 0 m 变化为 10 m, 即河床沉积物与下伏含水层厚度比由 0 变化为 0.125 时, 地表水向地下水的补给量由 93.90×10^3 m³/d 减小为 25.98×10^3 m³/d, 减小幅度达到 72% 。地表水向地下水的补给量随 H_s/H 的变化过程可用对数函数拟合。由此可见, 低渗透性的河床沉积物对地表水地下水交换的抑制作用即便在该低渗透性介质层厚度较薄时亦十分明显, 且随着 H_s/H 的进一步增大, 其对地表水地下水交换量的影响程度不再显著。

3.2 地表水地下水转化路径及径流时间

图5和图6分别给出了河床沉积物渗透系数及其厚度变化条件下, 不同示踪点地表水向地下水的补给

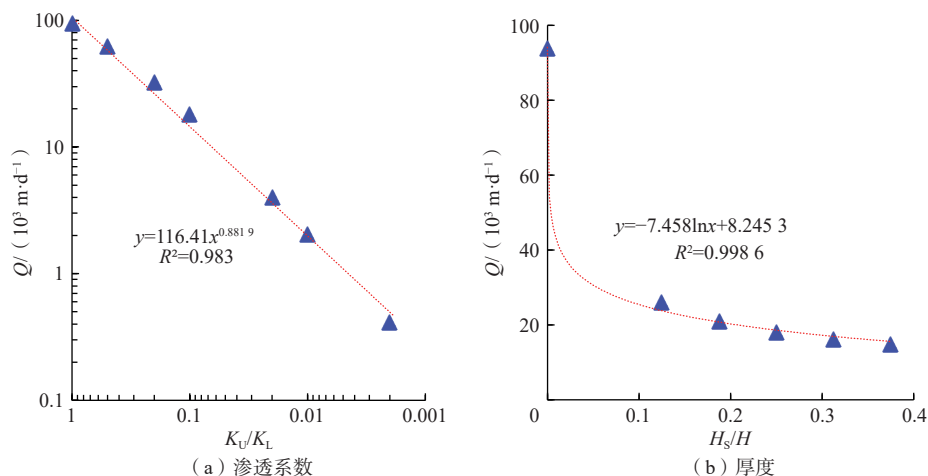


图4 河床沉积物的渗透系数、厚度变化条件下地表水地下水转化量变化规律

Fig. 4 Effect of the variation of the hydraulic conductivity of riverbed sediments and the variation of the thickness of riverbed sediments on the flux exchange between surface water and groundwater.

路径及相应径流时间。均质条件下(图 5a), 即河床沉积物渗透性与其下伏含水层渗透性相同时, 地表水向地下水补给的水流路径表现为先以垂向流向河床下伏含水层深部流动, 后转为近水平向流向右侧边界排泄。当河床沉积物渗透性降低时, 由地表水补给的水流在穿透河床沉积物后, 逐渐向河流中泓线聚集, 且其向右侧边界排泄的位置逐渐向含水层深部移动, 该现象在 K_U/K_L 等于 0.002 时最为明显, 见图 5(d)。同时, 河床沉积物渗透系数的减小延长了地表水补给地下水的水流路径。此外, 随着 K_U/K_L 的减小, 由不同示踪点示踪的地下水径流时间明显增大。图 5 还显示

了地下水流路径在穿透渗透性不同的河床沉积物和下伏含水层界面时发生弯折, 且两者渗透系数比 (K_U/K_L) 越小, 弯折现象越明显, 与前人研究一致^[24]。随着河床沉积物厚度的增加, 由地表水向地下水补给的水流路径逐渐向含水层深部聚集, 且其相应的径流时间也明显增加, 见图 6。

为了进一步分析汗水介质层状非均质性对地下水径流时间的影响规律, 对不同场景示踪点 1 和示踪点 4 示踪的径流路径相对应的地下水径流时间进行统计分析, 具体结果见图 7。随着河床沉积物渗透性的降低, 即 K_U/K_L 的减小, 由示踪点 1 和示踪点 4 示踪

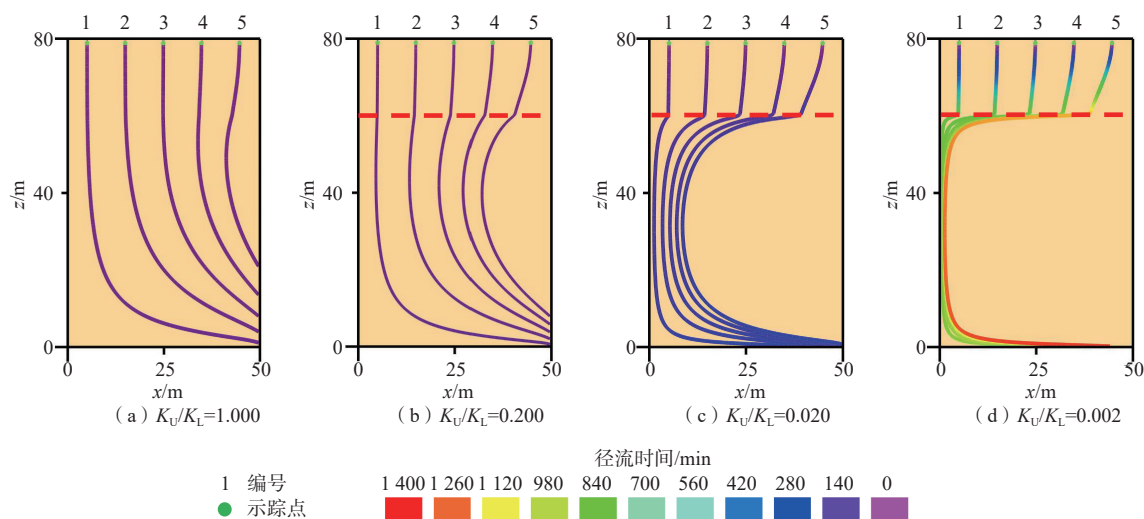


图 5 河床沉积物渗透系数变化条件下地表水地下水转化路径及相应径流时间

Fig. 5 Flow paths from surface water to groundwater and the corresponding travel times under the changing hydraulic conductivity of riverbed sediments

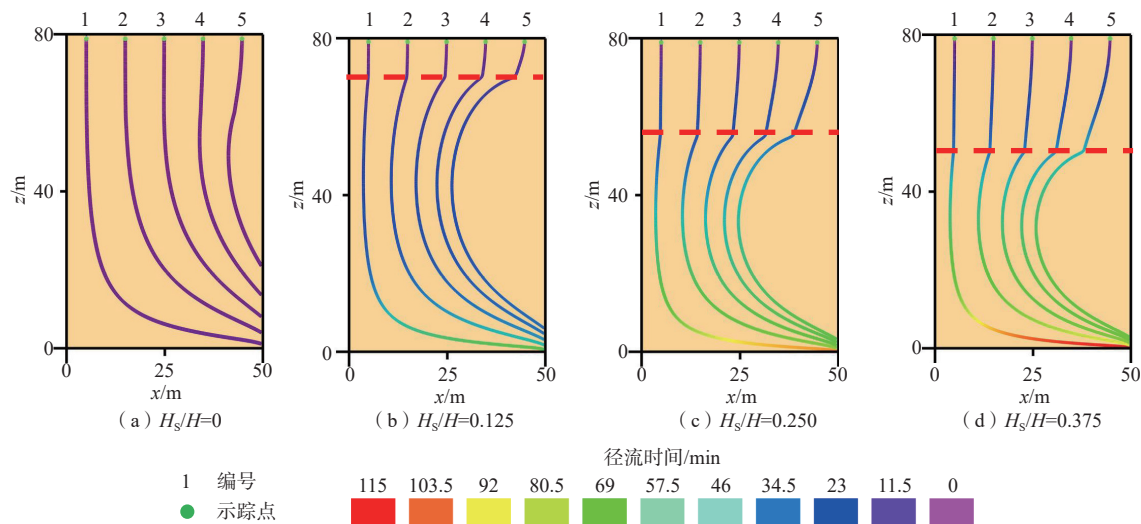


图 6 河床沉积物厚度变化条件下地表水地下水转化路径及径流时间

Fig. 6 Flow paths from surface water to groundwater and the corresponding travel times under the condition of changing sediment thickness

的地下水径流时间均呈现先缓慢增大,后急剧增大的规律,该过程可用幂函数拟合。这说明当河床沉积物和其下伏含水层渗透性(即 K_U 、 K_L)相差不大的情况下,其变化对地下水径流时间影响不明显。随着低渗

透性河床沉积物厚度的增大,由示踪点1和示踪点4示踪的地下水径流时间几乎呈线性增大的趋势。该研究进一步凸显了在研究地下水径流时间时,考虑低渗透性河床沉积物厚度的重要性。

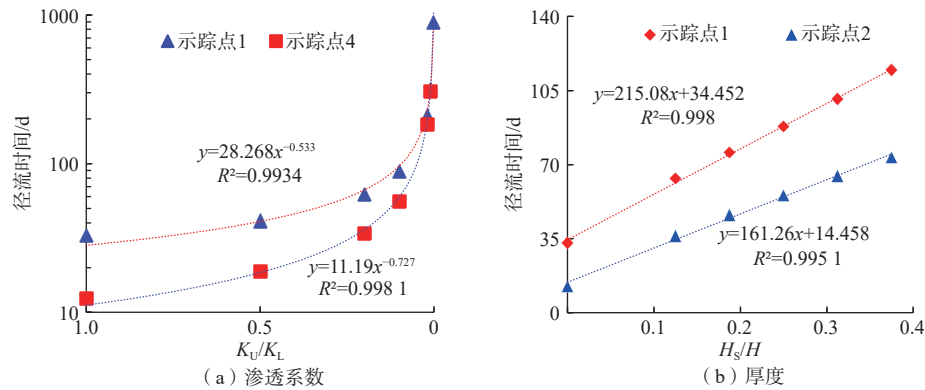


图7 河床沉积物的渗透系数、厚度变化条件下地表水地下水转化的径流时间变化规律

Fig. 7 Effect of the variation of hydraulic conductivity of riverbed sediments, and the variation of sediment thickness on the travel times of groundwater recharged by surface water

3.3 敏感性分析

敏感性分析可以衡量一种因子的变化对另一种因子的影响程度。为了进一步分析河床沉积物渗透系数及其厚度变化对地表水补给地下水过程的影响

程度,图8和图9分别给出了地表水向地下水的补给量和地下水径流时间对河床沉积物渗透系数及其厚度变化的敏感性结果。

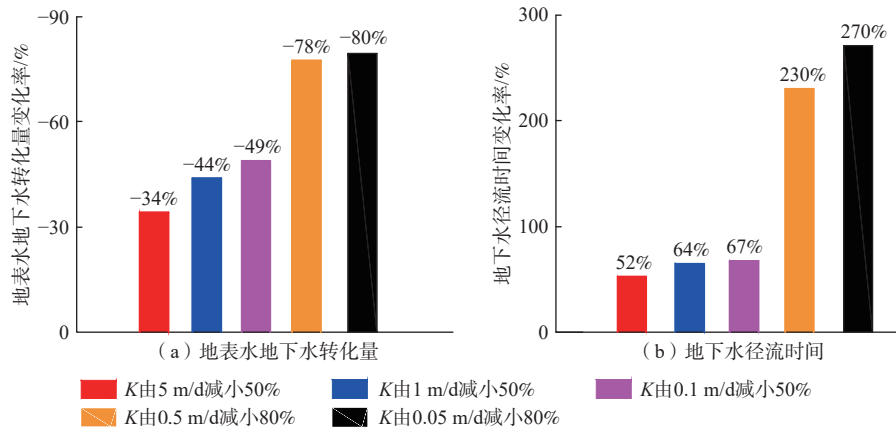


图8 地表水地下水转化量及地下水径流时间对河床沉积物渗透系数变化的敏感性

Fig. 8 Sensitivity of exchange flux between surface water and groundwater and groundwater travel times to the change of riverbed hydraulic conductivities

与前述研究结果一致,由图8可知,地表水向地下水的补给量及地下水径流时间对河床沉积物渗透系数的敏感性随渗透系数的减小而增大。例如,当河床沉积物渗透系数由5 m/d减小50%至2.5 m/d时,地表水向地下水的补给量减小34%,地下水径流时间增加52%;而当河床沉积物渗透系数由0.1 m/d减小50%

至0.05 m/d时,地表水向地下水的补给量减小了49%,地下水径流时间增大了67%;相似地,当河床沉积物渗透系数由0.5 m/d减小80%至0.1 m/d时,地表水向地下水补给量的减小幅度和地下水径流时间的增加幅度分别达到78%和230%,而当河床沉积物渗透系数由0.05 m/d减小80%至0.01 m/d时,地表水向地下

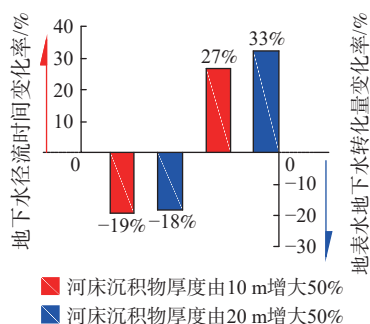


图9 地表水地下水转化量及地下水径流时间对河床沉积物厚度变化的敏感性

Fig. 9 Sensitivity of exchange flux between surface water and groundwater and groundwater travel times to the change of thickness of riverbed sediments

水补给量的减小幅度和地下水径流时间的增加量分别为 80% 和 270%。

由图 9 可知,与地表水向地下水的补给量相比,地下水径流时间对河床沉积物厚度的变化较为敏感,例如,当河床沉积物厚度由 10 m 增大 50% 至 15 m 时,地表水向的地下水补给量和地下水径流时间的变化率分别为 19% 和 27%。研究表明,地下水径流时间对河床沉积物厚度变化的敏感性随河床沉积物厚度的增加而增大。当河床沉积物厚度分别由 10, 20 m 增大 50% 至 15, 30 m 时,地下水径流时间的增加率分别为 27% 和 33%。地表水向地下水的补给量对河床沉积物厚度变化的敏感性随河床沉积物厚度的变化差异不明显。当河床沉积物厚度分别由 10, 20 m 增大 50% 至 15, 30 m 时,地表水向地下水补给量的减小率分别为 19% 和 18%。

4 讨论

河流下伏含水介质的非均质性是造成地表水地下水相互作用复杂性的主要因素之一。由于河流水动力条件变化及河床地层介质条件的差异,河床沉积物渗透性在时间和空间上均表现出显著的变异性^[30]。研究表明,低渗透性河床沉积物的存在对地表水地下水交换量影响较大,即便该低渗透性介质层层厚较薄,其对地表水地下水交换量的影响仍然较为显著,但其厚度变化对地表水地下水交换量的影响不明显。河床沉积物中的低渗透性介质层对地表水地下水相互作用具有控制作用。类似地,童坤等^[31]关于雨洪水回灌过程中的堵塞研究表明,砂柱表层的淤堵是降低回灌水入渗量的主要原因。Wang 等^[32]采用砂槽试验法发现含水层中的低渗透性介质可极大地减小

地下水补给量。因此,在地表水地下水交换量研究过程中,要重点关注河床沉积物渗透系数的时空变化规律。

地表水地下水交换量、地表水地下水相互作用的水流路径及相应路径的径流时间识别是地下水科学管理与保护、地下水监测与风险分析的重要基础,地下水的水文地球化学特征与地下水流路径和地球化学条件密切相关^[22]。地下水流路径的改变意味着地下水化学特征变化的潜在可能性,同时,地下水流路径演化研究对地下水污染物运移路径识别有重要意义。河床沉积物厚度的增大及其渗透系数的减小使得地表水向地下水排泄的径流路径向含水层深部移动,其潜在意义包括但不限于在评价突发性地表水污染对地下水的影响时,应重点关注深层地下水(此处深层地下水并非指承压水,而指含水层相对深度)的水质变化。此外,地下水径流时间对地下水可更新能力方面也具有较强的指示作用。

5 结论

(1)河床低渗透性沉积物的存在可减小地表水对地下水的补给量,即便该低渗透性沉积层层厚较小,其对地表水向地下水补给量的影响仍然较为显著,但低渗透性河床沉积物厚度变化地表水向地下水补给量的影响不明显。

(2)地表水对地下水补给量及相应水流径流时间对河床沉积物渗透系数的敏感性均随渗透系数的减小而增大。

(3)地表水对地下水的补给量随河床沉积物与其下伏含水层渗透系数的比值呈幂函数变化。

(4)与地表水向地下水的补给量相比,地下水径流时间对低渗透性河床沉积物的厚度变化较为敏感,且沉积物厚度越大,敏感性越强。

参考文献 (References) :

- [1] 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.
- [2] 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.

- [3] SAHA G C, LI Jianbing, THRING R W, et al. Temporal dynamics of groundwater-surface water interaction under the effects of climate change: A case study in the Kiskatinaw River Watershed, Canada[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 551: 440 – 452.
- [4] SEDGHI M M, ZHAN Hongbin. Groundwater dynamics due to general stream fluctuations in an unconfined single or dual-porosity aquifer subjected to general areal recharge[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 574: 436 – 449.
- [5] FERENCZ S B, CARDENAS M B, NEILSON B T. Analysis of the effects of dam release properties and ambient groundwater flow on surface water-groundwater exchange over a 100-km-long reach[J]. *Water Resources Research*, 2019, 55(11): 8526 – 8546.
- [6] 廖福, 罗新, 谢月清, 等. 氡(^{222}Rn)地下水-地表水相互作用中的应用研究进展[J]. 地学前缘(中国地质大学(北京); 北京大学), 2022, 29(3): 76 – 87. [LIAO Fu, LUO Xin, XIE Yueqing, et al. Advances in ^{222}Rn application in the study of groundwater-surface water interactions[J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(3): 76 – 87. (in Chinese with English abstract)]
- [7] LAMONTAGNE S, TAYLOR A, COOK P, et al. Field assessment of surface water-groundwater connectivity in a semi-arid river basin (Murray-Darling, Australia)[J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28(4): 1561 – 1572.
- [8] CONSTANTZ J. Heat as a tracer to determine streambed water exchanges[J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(4): W00D10.
- [9] RAUTIO A, KORKKA N K. Chemical and isotopic tracers indicating groundwater/surface-water interaction within a boreal lake catchment in Finland[J]. *Hydrogeology Journal*, 2015, 23(4): 687 – 705.
- [10] 杨艳林, 靖晶, 赵永波, 等. 基于氢氧稳定同位素的武汉北部新城地表水-地下水转换关系研究[J]. 中国地质, 2022, 49(3): 706 – 715. [YANG Yanlin, JING Jing, ZHAO Yongbo, et al. Conversion relationship between surface water and groundwater based on stable isotopes of D and ^{18}O of new town in the northern Wuhan, Hubei[J]. *Geology in China*, 2022, 49(3): 706 – 715. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 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)]
- [12] 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 Chengpeng, ZHANG Ying, ZHU Jingsi, et al. Temporal spatial patterns of hyporheic exchange along a river transect of dawen river through the heat tracing method[J]. *Quaternary Sciences*, 2014, 34(5): 1094 – 1105. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 文广超, 王文科, 段磊, 等. 基于水化学和稳定同位素定量评价巴音河流域地表水与地下水转化关系[J]. 干旱区地理, 2018, 41(4): 734 – 743. [WEN Guangchao, WANG Wenke, DUAN Lei, et al. Quantitatively evaluating exchanging relationship between river water and groundwater in Bayin River Basin of northwest China using hydrochemistry and stable isotope[J]. *Arid Land Geography*, 2018, 41(4): 734 – 743. (in Chinese with English abstract)]
- [14] CARDENAS M B. Surface water-groundwater interface geomorphology leads to scaling of residence times[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(8): 307 – 315.
- [15] 束龙仓, 宫荣, 栾佳文, 等. 地下水与地表水水量交换识别及交换量计算——以新汴河宿州段为例[J]. 水科学进展, 2022, 33(1): 57 – 67. [SHU Longcang, GONG Rong, LUAN Jiawen, et al. A integrated method to quantify flow exchanges between surface water and groundwater: Take Suzhou section of the Xinbian River as an example[J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(1): 57 – 67. (in Chinese with English abstract)]
- [16] HUANG Peng, CHUI T F M. Hyporheic exchange in a straight stream with alternate bars[J]. *Water Resources Research*, 2022, 58(10): e2022WR032221.
- [17] 束龙仓, 殷晓然, 袁亚杰, 等. 三江平原典型区河水与地下水水量交换的时空变化规律分析[J]. 水利学报, 2021, 52(10): 1151 – 1162. [SHU Longcang, YIN Xiaoran, YUAN Yajie, et al. Temporal and spatial variation of water quantity exchange between surface water and groundwater in typical district of Sanjiang Plain[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(10): 1151 – 1162. (in Chinese with English abstract)]
- [18] DRUMMOND J D, AQUINO T, DAVIES C R J, et al. Modeling contaminant microbes in rivers during both baseflow and stormflow[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(8): e2021GL096514.
- [19] 李刚, 马佰衡, 周仰效, 等. 白洋淀湖岸带地表水与地下水垂向交换研究[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(4):

- 48 – 54. [LI Gang, MA Baiheng, ZHOU Yangxiao, et al. A study of vertical exchange between surface water and groundwater around the banks of Baiyangdian Lake[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(4): 48 – 54. (in Chinese with English abstract)]
- [20] JASECHKO S, SEYBOLD H, PERRONE D, et al. Widespread potential loss of streamflow into underlying aquifers across the USA[J]. *Nature*, 2021, 591(7850): 391 – 395.
- [21] 雷米, 周金龙, 张杰, 等. 新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系[J]. *环境科学*, 2022, 43(4): 1873 – 1884. [LEI Mi, ZHOU Jinlong, ZHANG Jie, et al. Hydrochemical characteristics and transformation relationship of surface water and groundwater in the plain area of Bortala River Basin, Xinjiang[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(4): 1873 – 1884. (in Chinese with English abstract)]
- [22] TÓTH J. Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations[J]. *Hydrogeology Journal*, 1999, 7(1): 1 – 14.
- [23] JIANG Qihao, JIN Guangqiu, TANG Hongwu, et al. Density-dependent solute transport in a layered hyporheic zone[J]. *Advances in Water Resources*, 2020, 142: 103645.
- [24] 吴佩鹏, 束龙仓, 鲁程鹏, 等. 三峡水库蓄水前后下游河床沉积物渗透系数的变化分析[J]. *水文地质工程地质*, 2014, 41(6): 98 – 102. [WU Peipeng, SHU Longcang, LU Chengpeng, et al. An analysis of the changes in the riverbed sediment hydraulic conductivity in the downstream channel before and after the Three Gorges Reservoir impoundment[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2014, 41(6): 98 – 102. (in Chinese with English abstract)]
- [25] WU Peipeng, SHU Longcang, COMTE J C, et al. The effect of typical geological heterogeneities on the performance of managed aquifer recharge: physical experiments and numerical simulations[J]. *Hydrogeology Journal*, 2021, 29(6): 2107 – 2125.
- [26] 陈孝兵, 郑春阳, 袁越. 河床沉积物非均质性影响下的潜流交换数值模拟[J]. *水科学进展*, 2019, 30(2): 220 – 229. [CHEN Xiaobing, ZHENG Chunyang, YUAN Yue. Modeling the impacts of streambed sediment heterogeneity on hyporheic exchange[J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(2): 220 – 229. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 赵云章, 邵景力, 闫振鹏, 等. 黄河下游影响带地下水资源评价及可持续开发利用[M]. 北京: 中国大地出版社, 2002. [ZHAO Yunzhang, SHAO Jingli, YAN Zhenpeng, et al. Evaluation and sustainable exploitation of groundwater resources in the influenced zone of the lower Yellow River[M]. Beijing: China Land Press, 2002. (in Chinese)]
- [28] 束龙仓. 美国内布拉斯加州普拉特河河床沉积物渗透系数的现场测定[J]. *水科学进展*, 2002, 13(5): 629 – 633. [SHU Longcang. Measurement in situ of streambed hydraulic conductivities in the Platte River, Nebraska[J]. *Advances in Water Science*, 2002, 13(5): 629 – 633. (in Chinese with English abstract)]
- [29] ANDERSON M P, WOESSNER W W, HUNT R J. Applied groundwater modeling: Simulation of flow and advective transport[M]. 2nd ed. London: Academic Press, 2015.
- [30] WU Guangdong, SHU Longcang, LU Chengpeng, et al. Variations of streambed vertical hydraulic conductivity before and after a flood season[J]. *Hydrogeology Journal*, 2015, 23(7): 1603 – 1615.
- [31] 童坤, 束龙仓, 黄修东, 等. 雨洪水回灌过程中堵塞滤层特征试验[J]. *水利水电科技进展*, 2011, 31(4): 52 – 55. [TONG Kun, SHU Longcang, HUANG Xiudong, et al. Characteristics of mechanical clogging in rain-flood infiltration system[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2011, 31(4): 52 – 55. (in Chinese with English abstract)]
- [32] WANG Wenke, LI Juntao, FENG Xizhou, et al. Evolution of stream-aquifer hydrologic connectedness during pumping experiment[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 402(3/4): 401 – 414.

编辑: 张若琳