

拦蓄条件下牟汶河-复杂含水层的水量交换关系

张子漾¹, 郑西来^{1,2}, 张 博³

(1. 中国海洋大学环境科学与工程学院; 2. 中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室;
3. 山东科技大学地球科学与工程学院)

摘要:以泰安市旧县地下水水源地为研究区,在水文地质调查、钻探和地表-地下水位长期监测的基础上,建立区域尺度的地下水运动数值模型,定量分析典型水文年牟汶河-复杂含水层水量交换的动态变化关系,将牟汶河从上游至下游划分为 4 个河段,分别计算拦蓄河流不同河段与潜水、承压含水层的水交换量。研究结果表明:河道橡胶坝拦蓄改变了牟汶河-地下水的补给关系,在无橡胶坝条件下,地下水向河段 4 排泄,而建坝后河段 4 补给地下水;不同河段水交换通量的大小存在显著的差异性,在橡胶坝的影响下,河流对地下水的补给通量从小到大的顺序为河段 2、河段 1、河段 4、河段 3;在有橡胶坝条件下,枯、平、丰水年整个河流向潜水含水层的补给量分别增加了 749. 24 万、744. 37 万、773. 10 万 m³,同时向承压含水层的补给量分别增加了 133. 21 万、140. 83 万、164. 74 万 m³,河道拦蓄明显增加了牟汶河对地下水的补给量。

关键词:地表水-地下水;水量交换;复杂含水层;橡胶坝;数值模拟;牟汶河

Water exchange relationship between Mouwen River and complex aquifer under impoundment conditions//Zhang Ziyang¹, Zheng Xilai^{1,2}, Zhang Bo³ (1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China; 2. Ministry of Education Key Laboratory of Marine Environment and Ecology, Ocean University of China; 3. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology)

Abstract: Based on hydrogeological surveys, drilling campaigns, and long-term monitoring of surface and groundwater levels in Jiuxian groundwater source field in Tai'an, a regional-scale numerical groundwater model was established to quantitatively analyze the dynamic variation in water exchange between Mouwen River and the complex aquifer during typical hydrological years. Mouwen River was divided into four reaches from upstream to downstream, and the water exchange volumes between different impounded reaches and the unconfined and confined aquifers were calculated separately. The results show that river impoundment by rubber dams altered the recharge relationship between Mouwen River and groundwater: groundwater discharged into Reach 4 without rubber dams, whereas Reach 4 recharged groundwater after dam construction. Significant differences were observed in the water exchange fluxes of different reaches; under the influence of rubber dams, the order of river recharge fluxes to groundwater from the smallest to the largest was Reach 2, Reach 1, Reach 4, and Reach 3. With rubber dams in place, the annual recharge volumes from the entire river to the unconfined aquifer increased by 7. 4924 million m³, 7. 4437 million m³, and 7. 7310 million m³ during dry, normal, and wet years, respectively, while the annual recharge volumes to the confined aquifer increased by 1. 3321 million m³, 1. 4083 million m³, and 1. 6474 million m³, respectively. River impoundment thus significantly enhanced Mouwen River recharge to groundwater.

Key words: surface water-groundwater; water exchange; complex aquifers; rubber dam; numerical simulation; Mouwen River

地下水与地表水之间的相互作用是水文循环的关键环节^[1-2],对于水资源的可持续管理至关重要^[3-4]。近年来,受地下水过度开采的影响,区域地下水位普遍下降,这一趋势对水资源供需平衡及生态环境造成了严峻挑战^[5]。在此背景下,借助水利

设施强化地表水对地下水的补给,已成为缓解水资源短缺问题的有效手段之一^[6-8]。橡胶坝作为一种灵活拦蓄地表水源的水利工程设施,已得到广泛应用,其对地下水-地表水交互关系的影响也逐渐成为研究的热点^[9-13]。Zhou 等^[14]以河南省南阳市白河

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(42202270)
作者简介:张子漾(2000—),男,硕士研究生,主要从事地下水资源保护研究。E-mail:mooney13@foxmail.com
通信作者:张博(1991—),男,讲师,博士,主要从事地下水污染防治研究。E-mail:zhangbo@sdust.edu.cn

橡胶坝蓄水补源工程为研究对象,建立了傍河区地下水数值模型,以定量分析该工程对地下水补给量的影响,结果表明,橡胶坝的建设显著提升了白河两岸地下水资源量,河道入渗量增加了 715 万~3 400 万 m^3/a ;Paul 等^[15]采用耦合的河流-地下水模型,分析孟加拉国莫汉达河流域拟建橡胶坝后的长期地下水动态变化,结果显示,橡胶坝的修建不仅扩大了地表水灌溉规模,还有效增加了地下水位;李刚等^[16]利用 Modflow 软件构建了吴坦河北外环橡胶坝坝区地下水数值模型,模拟预测了该工程实施后库区对地下水位的影响效应,发现该工程可使地下水补给量增加 141.1 万 m^3 ,预计增幅为 392%;Liu 等^[17]采用数值模拟方法计算了河流对地下水的补给量,并预测了改增建拦河闸坝后连续丰、平、枯水年地下水资源量的变化,发现在现状开采条件下,改增建拦河闸坝后丰、平、枯水年河流对地下水的补给量较之前分别增加了 135%、123%和 100%。然而,现有研究构建的模型多为二维或三维单一潜水含水层模型,难以精准刻画实际场地复杂的水文地质条件,且针对多层含水层与河段间水量交换关系的模拟研究仍较为欠缺^[18-20]。

牟汶河是泰安市内最重要的地表水体之一,厘清牟汶河与含水层之间的水量交换关系,对泰安市地下水资源的保护与可持续利用具有重要意义^[21-23]。因此,本文以旧县水源地 1954—2023 年地下水位、河流水位、降水量、蒸发量及地下水开采量等长期现场监测数据为基础,借助地下水模拟系统 (groundwater modeling system, GMS) 软件构建了泰安市旧县地下水水源地牟汶河-双层含水层相互作用数值模型,定量分析不同水文年 (丰、平、枯) 和不同橡胶坝运行状况下牟汶河-双层含水层水量交换的时空变化特征,揭示橡胶坝运行对潜水含水层和承压含水层补给的时空异质性,以期为区域地下水资源的合理开发与生态环境保护提供科学依据。

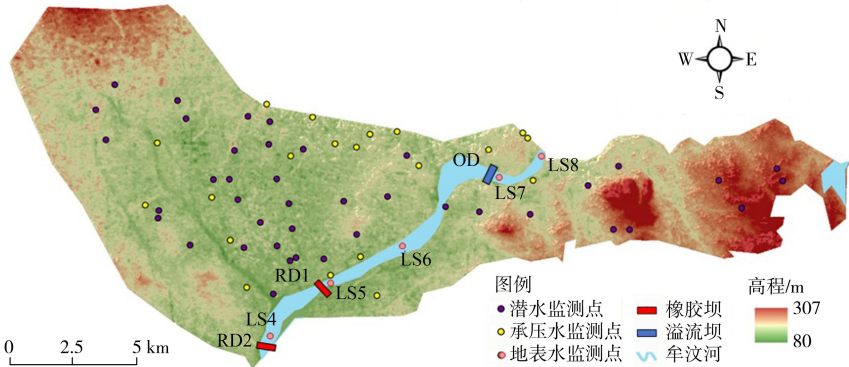


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

1 研究区概况

泰安市旧县地下水源地位于泰莱盆地西部边缘、泰安市区东部 (36° 04' 16" N ~ 36° 12' 10" N, 117° 04' 09" E ~ 117° 26' 45" E), 面积约 220 km^2 , 地势为东部与西北部高、中部低, 见图 1。

研究区属于温带大陆性半湿润季风气候, 具有春季干燥多风、夏季炎热多雨、秋季晴和凉爽、冬季寒冷干燥的气候特征^[24], 多年平均气温为 12.9℃。受大气环流、季风和地形条件的共同影响, 降水时空变化较大, 呈年内分配不均、年际间波动较大及丰枯年份交替出现的特征, 多年平均降水量为 743.69 mm, 多年平均蒸发量为 910.30 mm。

牟汶河总体呈东北—西南走向流经研究区, 河段全长 16.89 km, 为区内最大的地表水体^[25]。牟汶河主要拦河闸坝位置如图 1 所示, 自上游至下游依次为埭阳庄溢流坝 (OD)、颜张村橡胶坝 (RD1) 和泉林村橡胶坝 (RD2), 其结构参数见表 1。

表 1 拦河闸坝结构参数

Table 1 Structural parameters of river-crossing sluice dams

闸坝名称	设计挡水高度/m	正常蓄水位/m	回水长度/m	设计拦蓄水量/万 m^3
埭阳庄溢流坝	2.8	122.8	1 772	57
颜张村橡胶坝	5.5	121.5	6 400	1 820
泉林村橡胶坝	4.5	114.0	8 000	1 460

研究区主要含水岩组为第四系潜水孔隙含水岩组、寒武-奥陶碳酸盐岩类裂隙岩溶含水岩组两类 (图 2)。第四系潜水孔隙含水层由第四系冲积物与洪积物组成, 其中冲积物主要呈条带状分布于旧县至埭阳庄的大汶河现代河床两侧, 上部岩性为浅黄色、褐黄色中粗砂, 下部为粗砂夹卵砾石, 其潜水位埋深为 1.53~4.78 m, 年变化幅度 1~2 m, 单井涌水量 1 000~3 000 m^3/d ; 洪积物则主要分布于山前倾斜平原, 岩性呈上细下粗的特征, 上部为细砂, 中部为粗砂, 下部为砂砾层, 其潜水位埋深 1.21~6.11 m,

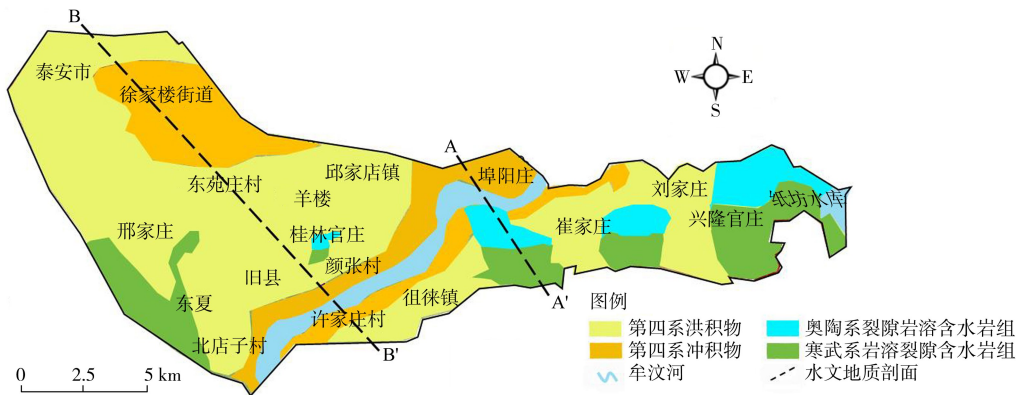


图 2 研究区地表岩性分布

Fig. 2 Surface lithology distribution in study area

年变化幅度 2 ~ 4.8 m, 单井涌水量一般小于 1000 m³/d。第四系潜水孔隙含水层的补给来源以降雨入渗、河道入渗、山区侧向径流及灌溉回归为主, 排泄途径主要为蒸发与人工开采。该含水层地下水径流方向与地形坡向基本一致。

奥陶系裂隙岩溶含水岩组主要为马家沟组灰岩、白云岩、白云质灰岩及三山子组白云岩, 裂隙岩溶发育, 大面积隐伏于第四系松散沉积物之下, 且与第四系潜水孔隙含水层之间存在 0.29 ~ 3.45 m 的弱透水黏土层, 该黏土层构成一个稳定的隔水层, 进而形成研究区的承压含水层, 其主要补给来源为越流补给、河流入渗和侧向径流补给。但在桂林官庄附近及牟汶河以东的部分地区, 基岩地层裸露出地表, 局部形成裂隙岩溶潜水含水层。寒武系岩溶裂隙含水岩组的岩性为炒米店组、张夏组、馒头组碳酸盐岩夹碎屑岩类灰岩、白云岩夹页岩、泥岩, 岩溶裂隙发育

较弱, 主要分布于研究区西南边缘北店子村以西以及兴隆官庄-崔家庄以南部分山区地带, 是该区域的基岩裂隙潜水分布区。基岩裸露区主要接受大气降水补给, 并以河流泄流和人工开采为主要排泄方式。

图 3 为研究区两个典型断面的水文地质剖面, 其中 A—A' 剖面中河流切割深度为 2 ~ 4 m, 仅揭露潜水含水层, 而 B—B' 剖面中河流切割深度为 6 ~ 8 m, 穿透潜水含水层并直接揭露承压含水层顶部。

2 地下水运动数值模型构建

2.1 水文地质概念模型

根据现场水文地质钻探资料, 研究区含水层为双层含水层结构, 上层为潜水含水层, 包括第四系潜水孔隙含水层及裸露出地表的岩溶裂隙含水岩组, 总面积为 220.21 km²; 下层承压含水层隐伏于第四系潜水孔隙含水层以下, 由寒武-奥陶碳酸盐岩类裂

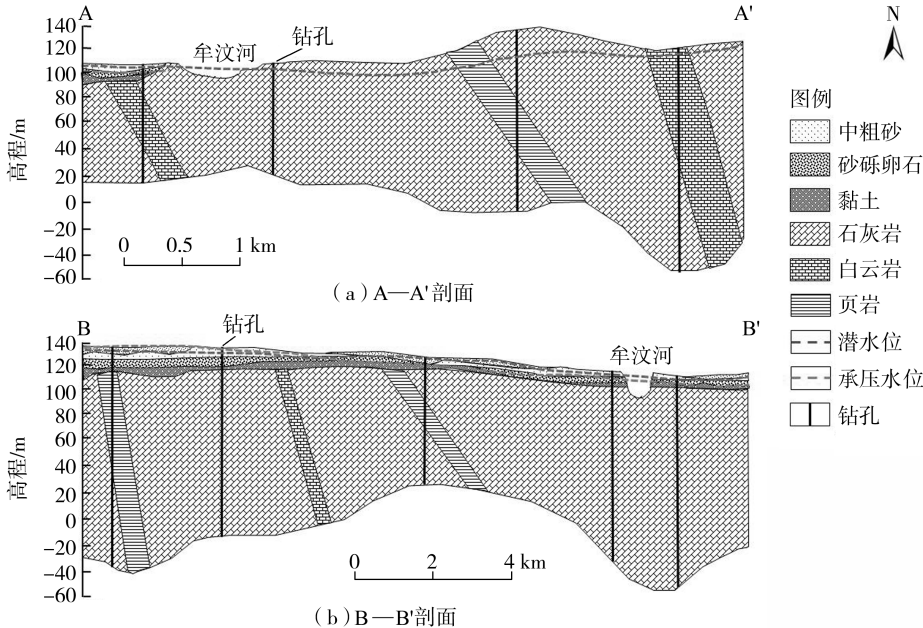


图 3 研究区典型水文地质剖面

Fig. 3 Typical hydrogeological profile of study area

隙岩溶含水岩组构成,面积为 162.59 km²。

研究区东部以纸坊水库为界,因其水位受人工调控保持稳定,故将其设为给定水头边界;西部与南部主要为寒武-奥陶纪灰岩与花岗岩不整合接触带,定义为零通量边界;南部北店子村-许家庄村以南一带为区域地下水排泄区,因长期观测显示该区域水位波动较小(年变幅小于 0.5 m),故作为给定水头边界处理;西北侧边界为泰安断裂,定义为零通量边界;东北侧以寒武-奥陶纪地层与老第三系地层不整合接触带为界,与研究区碳酸盐岩含水系统水力联系较差,也作为零通量边界处理。研究区在垂向上接受大气降雨入渗补给,底部边界概化为不透水边界。利用 Modflow 的 RIV 包将牟汶河嵌入地下水模型中,利用 HFB 软件包将 3 座拦河闸坝的相关参数加入模型中,利用 Budget 包将双层含水层分开分析,定量计算河流各河段与双层含水层之间的交互补给量。

2.2 水文地质参数确定

模型所需水文地质参数均由历史资料及野外试验确定^[26]。在模型识别验证后,参数根据模型的最终调试结果进行调整,验证后的潜水含水层被划分为 15 个区域,而承压含水层为 11 个区域,其余 4 个区域无承压水分布,具体分区情况及识别验证后含水层参数赋值见图 4 与表 2。

2.3 数学模型及离散化

采用标准地下水三维非稳定流方程来计算研究区的地下水流运动:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x M \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y M \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z M \frac{\partial H}{\partial z} \right) + \\ & \varepsilon = S_s \frac{\partial H}{\partial t} \\ & \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x (H - z) \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y (H - z) \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z (H - z) \frac{\partial H}{\partial z} \right) + \rho = S_y \frac{\partial H}{\partial t} \\ & H(x, y, z, t) \big|_{t=0} = H_0(x, y, z) \quad (x, y, z \in \Omega, t \geq 0) \\ & H(x, y, z, t) \big|_{\Gamma_1} = H_1(x, y, z, t) \quad (x, y, z \in \Gamma_1, t \geq 0) \\ & k_n \frac{\partial H}{\partial n_t} \big|_{\Gamma_2} = q(x, y, z, t) \quad (x, y, z \in \Gamma_2, t \geq 0) \end{aligned}$$

式中: k_x 、 k_y 、 k_z 分别为沿 x 、 y 、 z 坐标轴的渗透系数, m/d; H 、 z 、 M 分别为含水层地下水头、潜水含水层底板高和承压含水层厚度, m; H_0 为初始水头, m; H_1 为第一类边界条件已知水头函数, m; S_s 为承压含水层贮水系数; S_y 为潜水含水层给水度; ε 、 ρ 分别为承压含水层和潜水含水层的源汇项, d⁻¹; Γ_1 为研究区第一类边界; Γ_2 为研究区第二类边界,即零通量边界与侧向流量边界; Ω 为研究区; n_t 为边界

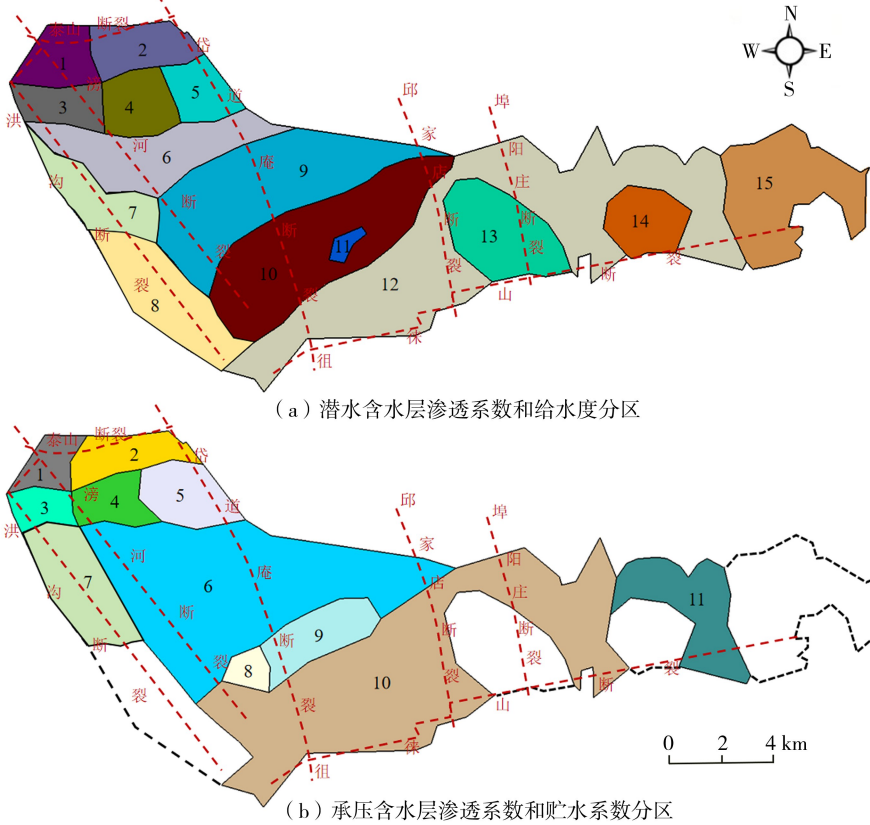


图 4 水文地质参数分区
Fig. 4 Zoning of hydrogeological parameters

表 2 识别验证后含水层参数赋值

Table 2 Assignment of aquifer parameters after identification and verification					
含水层	分区编号	水平渗透系数/(m/d)	垂向渗透系数/(m/d)	给水度	贮水系数
潜水含水层	1	3.00	0.20	0.35	
	2	5.00	0.30	0.35	
	3	0.85	0.05	0.30	
	4	0.75	0.05	0.30	
	5	0.50	0.03	0.25	
	6	3.00	0.20	0.23	
	7	2.80	0.20	0.07	
	8	6.00	0.60	0.05	
	9	3.00	0.30	0.23	
	10	3.00	0.30	0.15	
	11	5.00	0.50	0.04	
	12	4.00	0.40	0.20	
	13	5.00	0.50	0.03	
	14	5.00	0.50	0.03	
	15	6.00	0.60	0.04	
承压含水层	1	4.0	0.40		5×10^{-5}
	2	4.0	0.20		5×10^{-5}
	3	2.0	0.20		6×10^{-4}
	4	2.3	0.23		4×10^{-5}
	5	4.5	0.75		1×10^{-4}
	6	2.8	0.28		3×10^{-5}
	7	2.5	0.25		3×10^{-4}
	8	8.0	1.50		6×10^{-4}
	9	4.5	0.45		3×10^{-4}
	10	5.0	0.50		5×10^{-4}
	11	3.0	0.30		3×10^{-5}

的法线方向; k_n 为边界法线方向的渗透系数,m/d; $q(x,y,z,t)$ 为第二类边界条件已知单位面积流量函数,m/d。

河流与含水层水交换模型采用有限差分法进行求解。求解前,对研究区开展三维有限差分网格剖分。平面上,按每个网格边长 50 m 对研究区进行剖分,垂向上模型分为 2 层,共剖分有效网格数 180 556 个。时间上,模拟时长为 2023 年 10 月 1 日至 2024 年 10 月 1 日,模型分为 12 个应力期,每个应力期表示 1 月的模拟时间,期间迭代 10 个时间步长,共 120 个时间步长。

2.4 模型识别与验证

模型校正采用试错法,通过对渗透系数、入渗补给量的分区及参数值进行适度手动调整,使模型计算水头值与实测水头值相匹配。分别利用潜水含水层和承压含水层水位监测数据进行拟合,拟合结果见图 5。可以看出,模型校正完成之后,得到研究区潜水含水层地下水位模拟值与实测值之间的相关系数为 0.983 6,均方根误差为 1.221 8 m;承压含水层地下水位模拟值与实测值之间的相关系数为 0.951 7,均方根误差为 1.354 9 m,表明模型合理可靠,模拟结果能够反映研究区的实际地下水情况。

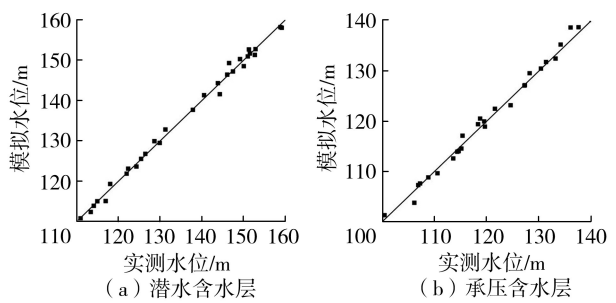


图 5 地下水位拟合结果

Fig.5 Groundwater level fitting results

3 结果与分析

3.1 模拟控制条件设计

根据 1954—2023 年的降水统计资料,分别模拟丰水年(2005 年)、平水年(1967 年)、枯水年(2019 年)降水条件下河流与地下水的转化关系。每种典型水文年内橡胶坝分为无坝和有坝两种状况,其中有坝状况下橡胶坝在汛期塌坝运行,汛期末坝袋充水,非汛期不塌坝拦蓄河水。汛期具体分期为:6 月汛前期,7—8 月汛中期,9 月汛后期。橡胶坝塌坝运行遵循河道安全原则:①塌坝产生的最高水位(橡胶坝上游水位)不超过塌坝安全水位;②塌坝产生的最大泄量不超过河道安全泄量。牟汶河颜张坝与泉林坝的具体运行条件设计见表 3,其中颜张坝非汛期完全立坝时高度为 5.5 m,泉林坝为 4.5 m。

表 3 模拟控制条件设计

Table 3 Simulation control condition design				
控制条件	保证率/%	降水量/mm	橡胶坝汛期高度/m	
			颜张村	泉林村
无坝枯水年	75	535.2	0.0	0.0
无坝平水年	50	670.3	0.0	0.0
无坝丰水年	25	817.7	0.0	0.0
有坝枯水年	75	535.2	5.0、4.5、5.0	3.5、2.5、3.5
有坝平水年	50	670.3	4.5、3.0、4.5	2.5、1.5、2.5
有坝丰水年	25	817.7	3.5、0.5、3.5	1.5、0.5、1.5

3.2 河流与含水层水量交换的时空变化

为更好地分析河流与含水层之间的水量交换关系,以现场水文监测资料及拦河闸坝修建情况为依据^[13],从上游至下游将河流分为 4 个河段,河段 1 为牟汶河上游至埤阳庄溢流坝,河段 2 为埤阳庄溢流坝至 LS6,河段 3 为 LS6 至颜张村橡胶坝,河段 4 为颜张村橡胶坝至下游泉林村橡胶坝。

3.2.1 无橡胶坝与有橡胶坝条件下特征水文年地下水流动场的分布特征

各控制条件在模拟结束时潜水含水层和承压含水层的水位分布如图 6 所示。

从图 6 可以看出,研究区潜水含水层水位在 110~160 m,承压含水层水位在 100~140 m,两层含

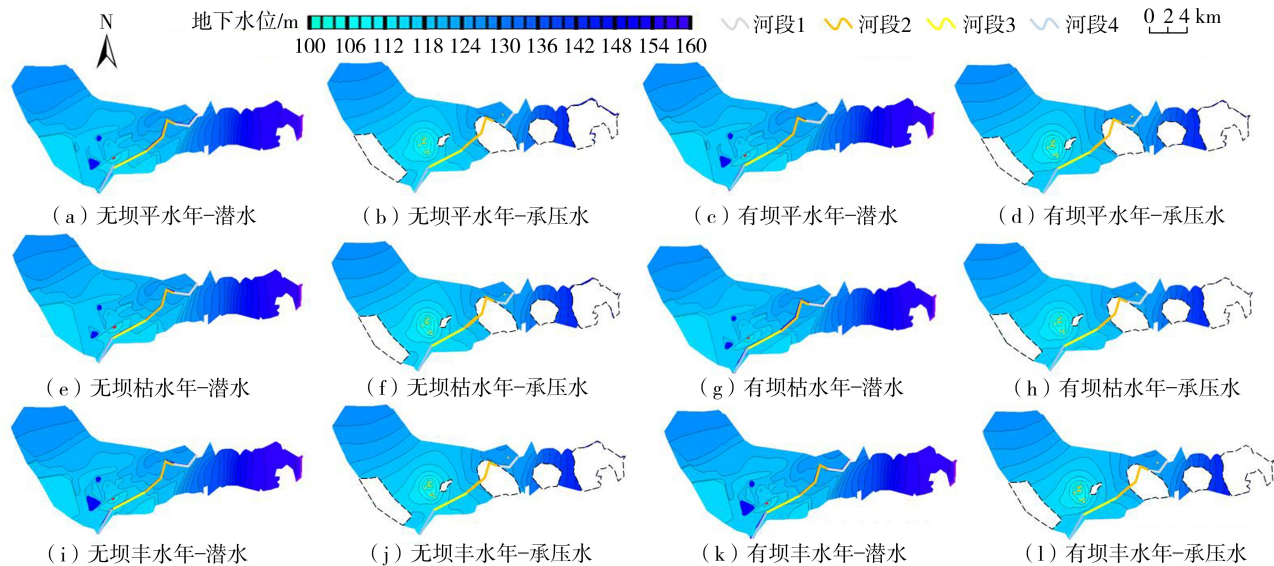


图 6 潜水含水层和承压含水层的地下水位分布

Fig. 6 Groundwater level distribution of phreatic and confined aquifers

水层水位最低点均出现在旧县地下水集中开采区附近,水位最高点均在研究区东部山区地带。牟汶河沿岸 5 km 以内区域的潜水含水层与承压含水层水位变化受橡胶坝运行状态影响较大。橡胶坝的拦蓄运行使得有坝平水年情景牟汶河附近 500 m 处潜水含水层水位较无坝平水年平均抬升 1.0 m,其中河段 3 增幅最大,为 1.50 m,河段 1 增幅最小,为 0.39 m;承压含水层水位平均抬升 0.68 m,其中河段 4 增幅 1.0 m,增幅最大,河段 1 增幅 0.22 m,增幅最小。

枯水年(图 6(e)~(h))与丰水年(图 6(i)~(l))条件下地下水位变化趋势整体相同。降水量的减少使枯水年情景下研究区双层含水层水位整体低于平水年,有坝枯水年情景下牟汶河附近 50 m 潜水含水层水位较无坝枯水年平均抬升 0.97 m,承压含水层水位平均抬升 0.61 m;而无坝平水年情景下牟汶河附近潜水含水层水位较无坝枯水年仅抬升 0.11 m,承压含水层水位平均抬升 0.06 m。丰水年则由于降雨入渗的增加,双层含水层水位对比平水年有所提升,有坝丰水年情景下牟汶河附近潜水含水层水位较无坝丰水年平均抬升 1.22 m,承压含水层水位平均抬升 0.81 m;而无坝丰水年情景下牟汶河附近潜水含水层水位较无坝平水年仅抬升 0.15 m,承压含水层水位抬升 0.08 m。由此可见,研究区降水量对河流附近双层含水层水位的影响小于橡胶坝的影响。

3.2.2 闸坝拦蓄条件下地表水-地下水交换通量的动态变化

牟汶河不同河段与含水层之间的接触长度不同。为比较不同河段的交换流量,对各河段所在区

域的月净水交换流量进行归一化处理,获得各河段的逐月单宽净交换流量(monthly net specific exchange flow, MSE)。6 种条件下不同河段地表水与地下水的 MSE 动态变化曲线见图 7(负值代表地下水补给河流,正值代表河流补给地下水)。可见不同河段与含水层间的 MSE 差异显著,这主要与各河段和周边含水层的水力梯度相关。

由图 7(a)可见,牟汶河各河段与含水层之间的 MSE 都呈现先降低后增加然后再下降的趋势,最小值和最大值分别出现在 1 月和 8 月前后。这是因为在河流补给地下水的河段,汛期 8 月前后河道水位逐渐抬高,河水与地下水之间水力梯度进一步增大,大量河水补给地下水;而 1 月左右河流水位较低,其补给地下水量大幅减少。在地下水向河流排泄的河段,8 月前后河道水位抬升,造成地下水与河水间水力梯度减小,地下水排泄量减少;而 1 月左右河道水位降低,因此地下水与河水间水力梯度增大,地下水排泄量增加。4 个河段中,河段 1 与河段 3 全年内均表现为河流补给地下水,而河段 2 与河段 4 则基本表现为地下水补给河流。分析其原因,河段 1 的下游建有溢流坝,能够控制该河段河流水位始终处于较高的稳定水平,因此在没有橡胶坝的情况下仍能保证河流向地下水稳定补给。河段 3 下游虽然没有溢流坝,但该河段的 MSE 仍然为正,究其原因,河段 3 所在区域为旧县水源地地下水集中开采区,地下水大量集中开采导致该河段形成降落漏斗,地下水位大幅下降,使得河水位高于地下水位。河段 3 的河流补给强度最大, MSE 在 19.64~39.56 m² 之间,河段 1 次之, MSE 值为 11.66~37.34 m²。河段 2、4 的水位整体低于地下水位,河段 4 除在 8 月

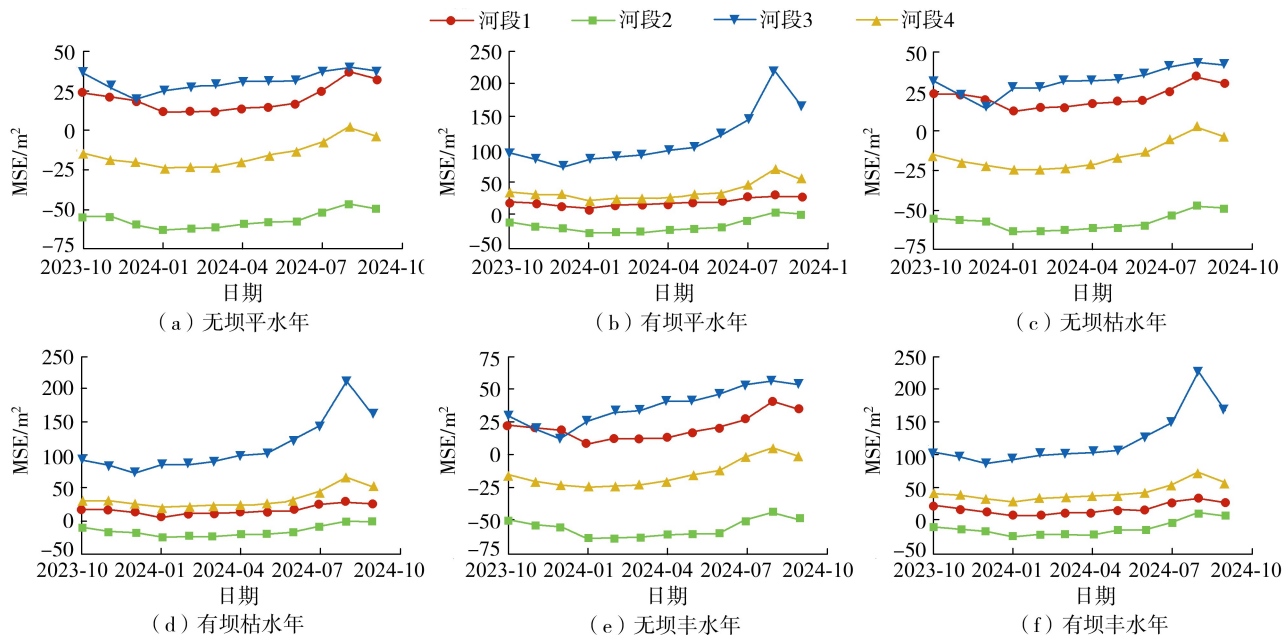


图 7 不同河段地表水-地下水 MSE 动态变化曲线

Fig. 7 Dynamic variation curves of surface water-groundwater MSE in different river sections

MSE 为正外,其余月份均为负值,在无橡胶坝状态下该河段地下水整体表现为向河流排泄;河段 2 则因岩溶塌陷,河水直接与裸露的岩溶潜水含水层交换,岩溶潜水含水层的渗透系数更大,地下水向河流大量排泄,最大 MSE 在 1 月达 -62.44 m^2 。

图 7(c)情景下,各河段与地下水之间的交换关系较无坝平水年无变化,但无坝枯水年各河段 MSE 有所下降,其中河段 3 的降幅最大,MSE 最小值降至 15.02 m^2 ,河段 1 降幅最小。

图 7(e)情景下,无坝丰水年各河段 MSE 较无坝平水年有明显提升,4 个河段 MSE 最大值分别由 37.34 、 -46.40 、 39.56 、 2.29 m^2 提升至 40.64 、 -43.11 、 55.86 、 5.57 m^2 。

在图 7(b)有坝平水年情景下,河段 1 和河段 3 与含水层之间的水量交换关系与无坝平水年情景保持一致,仍为河流向地下水补给;而河段 4 则由无坝平水年时的地下水向河流排泄转变为河流向地下水补给;河段 2 与含水层之间的交换关系虽然没有彻底转变,但由之前的全年地下水补给河流变为 8、9 月河流补给地下水。河段 1 因溢流坝的存在,河流水位稳定,MSE 变化为 4 个河段最小,同时也是 4 个河段中唯一 MSE 较无坝平水年出现下降的河段,从 $11.66\sim 37.34\text{ m}^2$ 下降至 $6.94\sim 28.44\text{ m}^2$ 。究其原因,橡胶坝整体抬升了河流附近含水层的水位,使河段 1 与地下水之间的水力梯度减小。由于 RD1 的拦蓄作用,河段 3 的 MSE 变化幅度最大,由无坝平水年的 $19.64\sim 39.56\text{ m}^2$ 增加到 $73.72\sim 216.77\text{ m}^2$,增幅约 3.91 倍。河段 4 在经过 RD2 的拦蓄作用后,MSE

由仅 8 月为正值变为全年正值,最大值达 68.98 m^2 。河段 2 上没有橡胶坝和溢流坝的直接作用,但下游 RD1 与 RD2 的运行整体抬升了上游河段 2 的水位,地下水向河流方向的排泄量大大减少,MSE 平均提升了 42.48 m^2 。

从图 7(d)可以看出,有坝枯水年时牟汶河各河段与含水层之间的交换关系与有坝平水年基本相同,各河段 MSE 均与平水年同期基本一致。分析其原因,应与河道橡胶坝提升了河道在枯水年的蓄水能力有关。

与有坝平水年相比,图 7(f)有坝丰水年情景下,河段 MSE 均有不同程度的提升,4 个河段 MSE 的最大值分别由 28.44 、 2.71 、 216.77 、 68.98 m^2 提升至 31.42 、 10.53 、 224.63 、 72.42 m^2 。

3.2.3 地表水-地下水之间交换量的识别

河段 1 与河段 2 河流切割深度为 $2\sim 4\text{ m}$,只切割了潜水含水层,故只与潜水含水层直接发生水量交换;而河段 3 与河段 4 河流切割深度达 $6\sim 8\text{ m}$,弱透水层被完全侵蚀,承压含水层顶部直接暴露于河床底部,因此,河流与潜水含水层和承压含水层均发生了直接交换。

无橡胶坝与有橡胶坝条件下河流与不同含水层之间水交换量分布如图 8 所示(正值表示河流补给地下水,负值表示地下水补给河流)。

由图 8(a)可以看出,在无橡胶坝条件下,枯、平、丰水年,河段 1 与潜水含水层的交换量分别为 73.01 万、 75.59 万、 77.93 m^3 ,说明河段 1 的补给量随着降水量的增加而增加;河段 2 与潜水含水层

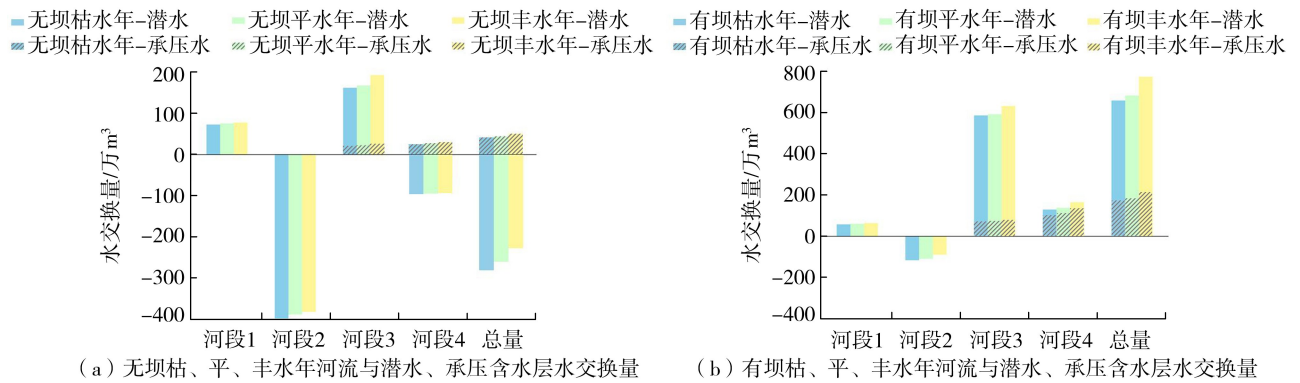


图 8 水交换量分布
Fig. 8 Distribution of water exchange flux

的交换量分别为 -399.52 万、-388.53 万、-382.23 万 m^3 ,说明河段 2 的排泄量随着降水量的增加而减小;河段 3 与潜水含水层的交换量分别为 144.69 万、149.36 万、171.73 万 m^3 ,与承压含水层的交换量分别为 17.64 万、18.44 万、21.49 万 m^3 ,这是由于在无橡胶坝条件下河段 3 的水位始终高于该河段潜水含水层与承压含水层的水位;河段 4 与潜水含水层的交换量分别为 -83.28 万、-82.31 万、-80.77 万 m^3 ,与承压含水层的交换量分别为 21.30 万、22.68 万、24.91 万 m^3 ,这是由于无橡胶坝条件下河段 4 的水位低于潜水含水层水位,而高于承压含水层水位。

从图 8(b)可以看出,在有橡胶坝条件下,枯、平、丰水年,河段 1 与潜水含水层的交换量分别为 58.02 万、60.61 万、64.49 万 m^3 ,说明河段 1 对潜水含水层的补给量随着降水量的增加而增加,较无橡胶坝条件下枯、平、丰水年分别减少了 20.5%、19.8%、17.3%;河段 2 与潜水含水层的交换量分别为 -115.44 万、-108.58 万、-88.90 万 m^3 ,说明河段 2 向潜水含水层的排泄量随着降水量的增加而减小,较无橡胶坝条件下枯、平、丰水年排泄量分别减少 279.95 万、284.08 万、293.33 万 m^3 ;河段 3 与潜水含水层的交换量分别为 513.10 万、517.45 万、551.07 万 m^3 ,较无橡胶坝条件下枯、平、丰水年分别提高了 254.7%、246.5%、220.1%,与承压含水层的交换量分别为 71.26 万、72.88 万、78.72 万 m^3 ,较无橡胶坝条件下枯、平、丰水年向承压含水层的补给量分别提升 303.9%、295.3%、266.3%;河段 4 与潜水含水层的交换量分别为 28.46 万、28.99 万、33.11 万 m^3 ,较无橡胶坝条件下枯、平、丰水年补给量分别增加 111.74 万、112.30 万、113.88 万 m^3 ,与承压含水层的交换量分别为 100.89 万、109.07 万、132.42 万 m^3 ,较无橡胶坝条件下枯、平、丰水年分别增加 379.6%、380.8%、431.5%,这是由于建坝后

该河段水位高于其潜水含水层与承压含水层的水位。

综上所述,在有橡胶坝条件下枯、平、丰水年整个河流向潜水含水层的补给量分别增加了 749.24 万、744.37 万、773.10 万 m^3 ,分别提高了 283%、303%、362%;而整个河流向承压含水层的补给量分别增加了 133.21 万、140.83 万、164.74 万 m^3 ,分别提高了 342%、343%、355%。

4 结 论

a. 河道拦蓄改变了牟汶河-地下水的补给关系。在无橡胶坝和有橡胶坝条件下,河段 1~3 与地下水的补给关系没有发生变化,只是 MSE 大小不同,其中河段 1 和河段 3 是河流补给地下水,而河段 2 始终排泄地下水。不同的是,在无橡胶坝时河段 4 排泄地下水,而建坝后河段 4 补给地下水。

b. 不同河段 MSE 的大小存在显著的差异性。在溢流坝的影响下河段 1 水位稳定,与潜水含水层的 MSE 变化最小;河段 2 存在岩溶塌陷区,岩溶水裸露地表,地下水潜水含水层常年向河流排泄;河段 3 主要位于地下水集中开采漏斗区,河流揭露承压含水层,地下水水力坡度大,对地下水的补给通量最大;河段 4 河流揭露了承压含水层,对地下水的补给通量仅次于河段 3。

c. 河道拦蓄增加了河流对地下水的补给量,减少了地下水的泄流排泄量。在建坝条件下枯、平、丰水年整个河流向潜水含水层的补给量分别增加了 749.24 万、744.37 万、773.10 万 m^3 ,分别提高了 283%、303%、362%;而整个河流向承压含水层的补给量分别增加了 133.21 万、140.83 万、164.74 万 m^3 ,分别提高了 342%、343%、355%。

参考文献:

[1] Li Zihan, Fang Yongjun, Meng Bo, et al. Identification of

- groundwater; surface water interaction using combined hydraulic and hydrogeochemical methods [J]. *Water*, 2024,16(19):2777.
- [2] 王坤,王宗志,白莹,等. 沿海中小河流域地表-地下水水库联合调控洪水资源利用研究: I. 方法与模型[J]. *水资源保护*, 2024, 40(1): 79-85. (Wang Kun, Wang Zongzhi, Bai Ying, et al. Research on the joint regulation of surface and underground reservoirs for flood resource utilization in coastal small and medium-sized river basins: I. Methods and models [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(1): 79-85. (in Chinese))
- [3] Al-Addous M, Bdour M, Alnaief M, et al. Water Resources in Jordan; a review of current challenges and future opportunities [J]. *Water*, 2023, 15(21): w15213729.
- [4] Yu Qian, Zhang Yu, Dong Ting, et al. Effect of surface water-groundwater interaction on arsenic transport in shallow groundwater of Jiangnan Plain [J]. *Earth Science*, 2023, 48(9): 3420-3431.
- [5] 王坤,王宗志,王敏慎,等. 沿海中小河流域地表-地下水水库联合调控洪水资源利用研究: II. 实例应用[J]. *水资源保护*, 2024, 40(2): 55-63. (Wang Kun, Wang Zongzhi, Wang Minshen, et al. Research on the joint regulation of surface and underground reservoirs for flood resource utilization in coastal small and medium-sized river basins: II. Case study [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(2): 55-63. (in Chinese))
- [6] 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.
- [7] Jones E R, Bierkens M F P, Van Vliet M T H. Current and future global water scarcity intensifies when accounting for surface water quality[J]. *Nature Climate Change*, 2024, 14(16): 629-635.
- [8] 王宗志,王宇,王坤,等. 滨海地下水库建设与利用方式对含水层水盐运移规律的影响[J]. *水资源保护*, 2023, 39(4): 69-78. (Wang Zongzhi, Wang Yu, Wang Kun, et al. Impact of coastal underground reservoir construction and utilization modes on water and salt transport patterns in aquifers [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(4): 69-78. (in Chinese))
- [9] Hossain M I, Bari M N, Al-Kafy A, et al. Application of double lifting method for river water irrigation in the water stressed Barind Tract of Northwest Bangladesh [J]. *Groundwater for Sustainable Development*, 2022, 18: 100787.
- [10] Alkhafaji H, Muttashar W R, Al-Mosawi W M. Proposing an inflatable rubber dam on the Tidal Shatt Al-Arab River, Southern Iraq [J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 2023, 32(1): 20220201.
- [11] 张迪,王莹,郑小康,等. 基于拦河闸坝蓄水补给的大沽河流域海水入侵优化防治[J]. *水科学进展*, 2023, 34(6): 971-983. (Zhang Di, Wang Ying, Zheng Xiaokang, et al. Optimized prevention of seawater intrusion in the Dagu River Basin based on water storage and recharge by river dams [J]. *Advances in Water Science*, 2023, 34(6): 971-983. (in Chinese))
- [12] 宫荣,束龙仓,龚建师,等. 新汴河宿州段地下水-地表水交换量计算[J]. *水电能源科学*, 2022, 40(1): 39-42. (Gong Rong, Shu Longcang, Gong Jianshi, et al. Calculation of groundwater-surface water exchange in the Suzhou Section of the Xin Bian River [J]. *Hydropower Energy Science*, 2022, 40(1): 39-42. (in Chinese))
- [13] 陈舟,王锦国,张延杰,等. 水利水电工程地下水环境影响评价关键问题及案例分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(3): 48-55. (Chen Zhou, Wang Jinguo, Zhang Yanjie, et al. Key issues and case studies in groundwater environmental impact assessment of water conservancy and hydropower projects [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2023, 51(3): 48-55. (in Chinese))
- [14] Zhou Qiu, Chen Xi, Ling Minhua, et al. Influence of rubber dam water storage on groundwater recharge and phreatic water evaporation losses[J]. *Hydrology*, 2010, 30(5): 75-79.
- [15] Paul S, Hasan K. The impact of the proposed rubber dam facilitated surface water irrigation on adjacent groundwater at Chapai Nawabganj District, Bangladesh [J]. *Applied Water Science*, 2021, 11(2): 36.
- [16] 李刚,付信伟. 基于数值模型的橡胶坝地下水回补作用研究[J]. *水利技术监督*, 2023(7): 155-159. (Li Gang, Fu Xinwei. Study on the groundwater recharge effect of rubber dams based on numerical models [J]. *Water Conservancy Technical Supervision*, 2023(7): 155-159. (in Chinese))
- [17] Liu Guanqun, Wang Ting, Huang Xiudong, et al. The effect of rubber dams and sluices on the groundwater resources estimation of Dagu River Plain [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2016, 46(12): 87-95.
- [18] 王宗志,王宇,王坤,等. 基于数值模拟的滨海含水层咸淡水运移对地下水库建设与开采的响应规律研究[J]. *水资源保护*, 2022, 39(4): 1-14. (Wang Zongzhi, Wang Yu, Wang Kun, et al. A study on the response pattern of coastal aquifer brackish-freshwater migration to underground reservoir construction and exploitation based on numerical simulation [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 39(4): 1-14. (in Chinese))

Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in Yushenfu Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 383-394. (in Chinese))

[29] 刘海, 宋阳, 李迎春, 等. 长江流域安庆段浅层地下水水化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2024, 45(3): 1525-1538. (Liu Hai, Song Yang, Li Yingchun, et al. Hydrochemical characteristics and control factors of shallow groundwater in Anqing Section of the Yangtze River Basin[J]. Environmental Science, 2024, 45(3): 1525-1538. (in Chinese))

[30] 吴嘉铃, 王莹, 胡倩, 等. 雷州半岛地下水水化学特征及成因分析[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(1): 145-153. (Wu Jialing, Wang Ying, Hu Qian, et al. Hydrochemical characteristics and genetic analysis of groundwater in Leizhou Peninsula[J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29(1): 145-153. (in Chinese))

[31] Xie Zhan, Liu Weiting, Chen Si, et al. Machine learning approaches to identify hydrochemical processes and predict drinking water quality for groundwater environment in a metropolis[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2025, 58: 10227.

[32] Hu Xi, Li Bo, Zhang Beibei, et al. Hydrochemical analysis and quality comprehensive assessment of groundwater in the densely populated coastal industrial city[J]. Journal of Water Process Engineering, 2024, 63: 105440.

[33] 范祖金, 魏兴, 李佳文, 等. 重庆市万州区浅层地下水水化学特征及控制因素[J]. 环境化学, 2023, 42(1): 113-124. (Fan Zujin, Wei Xing, Li Jiawen, et al. Hydrochemical characteristics and possible controls of shallow groundwater in Wanzhou District, Chongqing[J]. Environmental Chemistry, 2023, 42(1): 113-124. (in Chinese))

[34] 杨思敏, 李井峰, 白璐. 神东矿区典型矿井水中氟的分布特征及形成机制[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(6): 246-256. (Yang Simin, Li Jingfeng, Bai Lu. Distribution characteristics and formation mechanism of fluoride in typical mine water in Shendong Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(6): 246-256. (in Chinese))

[35] 郑涛, 秦先燕, 吴剑雄. 店埠河流域地表水-地下水水化学特征及其成因分析[J]. 环境科学, 2024, 45(2): 813-825. (Zheng Tao, Qin Xianyan, Wu Jianxiang. Hydrochemical characteristics and its origin of surface water and groundwater in Dianbu River Basin[J]. Environmental Science, 2024, 45(2): 813-825. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-03-18 编辑: 胡新宇)

(上接第 231 页)

[19] 徐腾, 王以鹏, 叶逾, 等. 地下水超采管控及水量-水位双控体系研究进展[J]. 水资源保护, 2024, 40(4): 27-35. (Xu Teng, Wang Yipeng, Ye Yu, et al. Research progress on groundwater over-exploitation control and dual-control system of water quantity and water level[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(4): 27-35. (in Chinese))

[20] 薛联青, 廖淑敏, 刘远洪, 等. 基于地下水动态模拟的生态输水累积效应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(4): 322-328. (Xue Lianqing, Liao Shumin, Liu Yuanhong, et al. Cumulative ecological effects of water transfer based on groundwater dynamic simulation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(4): 322-328. (in Chinese))

[21] Hu Zhanming, Guo Kaiyuan, Yang Yongjun, et al. Field survey and analysis of water flux and salinity gradients considering the effects of sea ice coverage and rubber dam; a case study of the Liao River Estuary, China[J]. Frontiers in Marine Science, 2023, 10: 1154150.

[22] 魏钢毅, 伊飞, 张卓, 等. 牟汶河流域地表水化学特征及影响因素分析[J]. 山东国土资源, 2024, 40(7): 8-14. (Wei Gangyi, Yi Fei, Zhang Zhuo, et al. Analysis of surface water chemical characteristics and influencing factors in the Mouwen River Basin[J]. Shandong Land and Resources, 2024, 40(7): 8-14. (in Chinese))

[23] 张婧, 马贵宏, 高雅, 等. 华北山前平原典型井灌区地下水水位变化影响因素分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 21-28. (Zhang Jing, Ma Guihong, Gao Ya, et al. Analysis of factors affecting groundwater level changes in a typical well-irrigation area on the North China Plain[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(1): 21-28. (in Chinese))

[24] 李晓波, 李杭, 杨宝萍, 等. 泰安市旧县水源地水化学特征及成因分析[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(6): 2002-2010. (Li Xiaobo, Li Hang, Yang Baoping, et al. Analysis of the hydrochemical characteristics and causes of the Jiuxian water source in Tai'an City[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(6): 2002-2010. (in Chinese))

[25] 刘元晴, 周乐, 吕琳, 等. 牟汶河中上游孔隙水化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2023, 44(3): 1429-1439. (Liu Yuanqing, Zhou Le, Lyu Lin, et al. Pore water chemical characteristics and controlling factors in the middle and upper reaches of the Mouwen River[J]. Environmental Science, 2023, 44(3): 1429-1439. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-02-28 编辑: 胡新宇)