

地表水置换地下水对宋古超采区地下水位影响的数值模拟研究

牛奇, 任春平*, 吴建华, 高红卫
(太原理工大学 水利科学与工程学院, 太原 030024)

摘要: 【目的】探究东山供水工程实施后, 地表水置换地下水对介休市宋古超采区地下水位的影响。【方法】采用 SWAT-MODFLOW 建立宋古超采区地表水文过程和地下水动力过程耦合模型, 对东山供水不同保证率下的压采方案进行地下水位模拟预测。【结果】压采措施实施后, 宋古超采区地下水位回升明显, 地下水整体由采补平衡转变为正均衡; 在最小供水保证率下, 研究区地下水位也有明显回升, 地下水超采中心地下水位回升速率约为 0.73 m/a, 地下水超采中心由宋古逐渐向介休城区移动; 对于地下水位 < 670、680、690 m 地下水超采面积, 90% 供水保证率下的地下水位回升面积变化率分别是 50% 供水保证率下地下水位回升的 1.78 倍、1.8 倍、2 倍。【结论】地表水置换地下水对于宋古超采区地下水位回升效果显著, 在水资源丰富的情况下, 地表水置换地下水可以适当促进地下水恢复。

关键词: 宋古; 地表水置换地下水; 供水保证率; SWAT-MODFLOW; 东山供水

中图分类号: P641.8

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023199

OSID: 

牛奇, 任春平, 吴建华, 等. 地表水置换地下水对宋古超采区地下水位影响的数值模拟研究[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(1): 97-103, 112.

NIU Qi, REN Chunping, WU Jianhua, et al. Numerical simulation research on the impact of surface water replacement on groundwater level in the overexploited area of Songgu[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(1): 97-103, 112.

0 引言

【研究意义】山西省部分地区地下水超采严重, 区域地下水位下降, 岩溶泉水流量锐减甚至断流, 并且对地下水生态环境的保护措施还不完善。分布于城关、宋古、西靳屯、三佳一带的松散层孔隙水, 是介休市主要富水区, 是城市生活及工业农业的主要供水水源地; 长期以来, 该区由于工业农业生产集中, 高强度开采地下水, 导致地下水位连年持续大幅度下降, 地下水超采面积不断扩大。东山供水工程是山西省一项跨流域引调水工程, 该工程跨越山西省海河流域南运河水系的清漳河、浊漳河及黄河流域汾河水系的昌源河、惠济河、龙凤河等河流, 是一项覆盖面广, 跨越水系众多的大型供水工程, 也是“十二五”期间省重点建设互联互通大水网建设工程之一。因此, 构建合理的模型, 分析东山供水工程实施后宋古超采区地下水位变化, 对于介休市水资源配置和管理具有重要意义。

【研究进展】地下水超采严重、地下水污染加剧是我国地下水资源面临的 2 个问题。为了能准确对地下水进行预测和模拟, 众多学者将各种新技术和新学科应用于地下水的动态模拟和预测, 推进了地下水动态预测模型的研究。目前, 根据研究途径, 可以将地下水动态预测模型分为水均衡法、确定性模型和随机性模型; 确定性模型主要包括解析法^[1]、数值法^[2]以及物理模拟法; 随机性模型主要包括时间序列分析模型^[3-4]、回归模型^[5]、神经网络模型^[6-7]、灰色(GM)模型^[8]等。MODFLOW 模型是三维有限差分地下水模型, 该模型结合达西定律, 在 1984 年由美国地质调查局(USGS)研发而成^[9], 是目前应用较为广泛的数值模型。地下水限采、压采对缓解地下水长期超采的局面以及恢复地下水生态功能具有重要的意义。Chen 等^[10]分析了采用 Visual Modflow 模拟张掖 2009—2018 年各农业情景下的含水层变化, 结果显示, 张掖绿洲最有前途的水资源管理可能是将灌溉定额降低到目前水平的 80%。张雪靓等^[11]针对河北省太行山前平原构建了 SWAT 模型, 分析了春浇一水限灌模式对浅层地下水采补平衡的影响, 结果显示在研究区内 70% 的区域可以实施该方案, 并且实施该方案后, 地下水位平均下降速度将减缓至 0.34 m/a 以内; 帅官印等^[12]通过 GMS 软件以河北省石家庄平原区为研究

收稿日期: 2023-05-06 修回日期: 2023-09-14

基金项目: 山西省自然科学基金(202103021224116); 山西省回国留学人员科研资助项目(2023-67); 山西省水资源管理项目(RH2000003882)

作者简介: 牛奇(1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事地下水生态修复方面研究。E-mail: 673413423@qq.com

通信作者: 任春平(1978-), 副教授, 博士, 主要从事地下水生态修复及水力学及河流动力学方面研究。E-mail: chunpingren@163.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

对象,分析了农业限水灌溉对地下水恢复的影响,结果显示,实施限水灌溉措施后,浅层地下水平均水位恢复率提高了 2 倍;刘若愚等^[13]使用 Visual Modflow 研究了压采作用下的地下水水源置换效应,结果显示,压采比例为 30% 时,地下水水位下降速率减缓至 0.57~0.86 m/a。Li 等^[14]通过 SWAP-WOFOST 模型,优化了 14 个冬小麦减产阈值约束的蒸发蒸腾量最小化灌溉方案,结果表明,采用减产阈值为 60% 的优化灌溉方案,可以实现深层地下水开采量减少 $6.05 \times 10^8 \text{ m}^3$,但冬小麦产量减少约 50% 的目标。

介休市内有多处灌区,灌区灌溉主要利用地下水,导致地下水超采严重,使得地下水生态环境严重破坏,宋古地下水超采区地下水位处于下降趋势,超采区生态修复迫在眉睫。引入外调水源,进而关井压采是行之有效的措施之一。【切入点】地表水置换地下水对介休市宋古超采区地下水位影响尚不清晰。【拟解决的关键问题】为此,针对山西省晋中市介休市宋古地下水超采区域,以地下水埋深较大的超采区为界,构建 SWAT-MODFLOW 耦合模型;根据东山供水工程规划供水量,考虑了 9 种不同供水保证率的压采方案,并使用耦合模型对方案进行数值模拟,为介休市宋古地下水超采区实现水资源合理配置提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

介休市宋古地下水超采区 (111°50′—112°01′E, 37°00′—37°06′N) 位于汾河东岸,研究区总面积为 104.63 km²。介休市属于温带大陆性气候,特点是四季分明,冬季风大雪少、寒冷干燥、持续时间长;夏季天气炎热、湿润多雨;春季干燥多风;秋季凉爽。该区多年平均气温 10.6 °C,极端最高气温 38.6 °C,极端最低气温 -24.5 °C。研究区多年平均降水量为 550 mm,年内降水量分配不均,主要集中在 6—9 月;多年平均蒸发量为 1 776.9 mm。地表水系属于汾河流域,流经的主要河流包括汾河、龙凤河以及侯堡河。

研究区内地貌单元主要包括冲击平原、山前倾斜平原以及龙凤河洪积扇平原,地面高程 729.3~815.5 m。其中山前倾斜平原孔隙地下水特征为:含水层分布不均匀,富水性差异大,洪积扇轴部及中上部,含水层颗粒粗,透水性好、富水性强,扇间地带则富水性较差。冲击平原松散层孔隙地下水特征为:以刘家寨为界分东西 2 部分,东部无很好含水层,仅含零星薄层粉、细砂,为弱富水性;西部受龙凤河影响,分布有古洪积扇,含水层为砂及砂砾层,富水性好。研究区内浅层含水层主要为第四系全新统砂砾石含水层,岩性为亚砂土夹薄层粉砂或亚砂土、亚砂土夹砂砾石,

地下水埋深为 0~20 m,深层含水层为第四系下更新统砂砾石含水层,岩性主要为亚粘土、砂砾石胶结淤泥质杂色粘土,地下水埋深为 40~150 m,微承压水,见图 1。

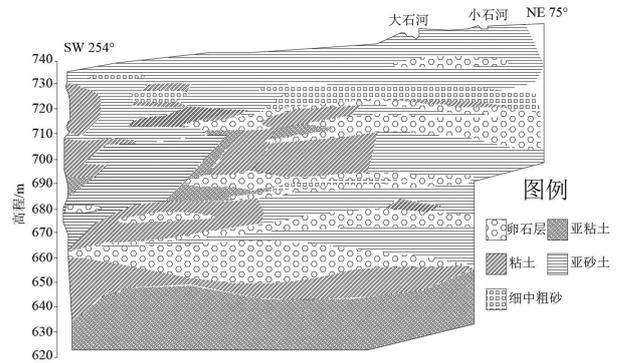
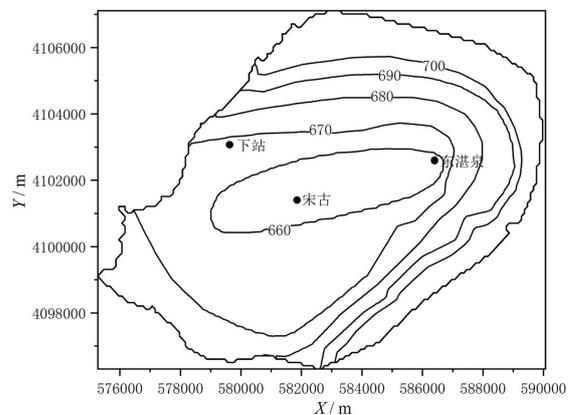


图 1 研究区地质剖面

Fig.1 Geological profile of the study area

1.2 水资源开发利用现状

由晋中市 2013—2017 年水资源公报可知,介休市大部分地区地下水埋深超过 30 m,并且宋古地下水超采中心地下水埋深达到 90 m,2017 年宋古地下水超采区地下水位等值线见图 2,图 2 中 X、Y 表示在 WGS1984 UTM 49N 投影坐标系下研究区地理位置。地下水补给主要为侧向补给和降水入渗补给,排泄项以人工开采为主。地下水位变化主要特征为:开采季节,地下水位下降,非开采季节,地下水位上升,最高水位一般出现在 3 月份,最低水位一般出现在 7—8 月。截至 2017 年,介休市宋古地下水超采区内共有取水井 320 眼,其中农业灌溉井 218 眼,工业供水井 55 眼,农村生活供水 41 眼,城镇生活供水 6 眼。2017 年地下水总开采量为 1 312 万 m³,其中农业灌溉用水量为 663 万 m³,工业用水量 284 万 m³,城镇生活用水量为 250 万 m³,农村生活用水量为 115 万 m³^[15]。



注 X、Y 表示在 WGS1984 UTM 49N 投影坐标系下研究区的地理位置

图 2 介休市 2017 年宋古地下水超采区地下水位等值线图

Fig.2 Contour map of water level in Songgu funnel area of Jiexiu city in 2017

1.3 计算方法

采用地下水位回升变化率来表示各压采方案下地下水的恢复情况，以 670 m 等水位线为例进行说明：

$$ROA_{670} = \frac{A_{b670} - A_{y670}}{A_{b670}}, \quad (1)$$

式中： ROA_{670} 表示低于或等于等水位线 670 m 地下水位回升面积变化率； A_{b670} 和 A_{y670} 分别表示基准方案和压采方案下 <670 m 等水位线的地下水面积。

2 SWAT-MODFLOW 耦合模型构建

2.1 耦合模型简介

SWAT-MODFLOW 耦合模型耦合了美国农业部农业研究局开发的半分布式水文模型 SWAT 和美国地质调查局开发的 MODFLOW 模型；它不仅可以通过分析由灌溉、施肥、耕作等措施引起的水资源利用方式和农业生产的改变，而且可以分析复杂含水层的地下水动态变化。

1) SWAT 模型的土壤水量平衡方程为：

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - Q_{seep} - Q_{gw}), \quad (2)$$

式中： SW_t 为计算期末土壤含水量 (mm)； t 为时间 (d)； SW_0 为计算期初土壤最初含水量 (mm)； R_{day} 为降水量 (mm)； Q_{surf} 为第 i 天地表径流量 (mm)； E_a 为第 i 天蒸发量 (mm)； Q_{seep} 为第 i 天通过土壤剖面到达包气带的水量 (mm)； Q_{gw} 为第 i 天的回归流量 (mm)。

2) MODFLOW 的基本控制方程为：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}, \quad (3)$$

式中： K_{xx} 、 K_{yy} 、 K_{zz} 为沿 x 、 y 、 z 坐标轴的渗透系数 (m/d)； h 为水头 (m)； W 为地下水源和汇 (m/d)：包括降水入渗补给量、灌溉回归水量、潜水蒸发量、机井开采量、含水层与河流交换水量、潜水与承压水交换水量，在非平衡状态下通过介质、各向同性土壤介质单位体积流量； S_s 为多孔介质的比贮水系数； t 为时间 (d)。

在 SWAT-MODFLOW 水文模型中，其水循环过程见图 3，本研究中 SWAT 模型主要计算地表产汇流过程，MODFLOW 模型通过 GMS 软件中的 MODFLOW 模块进行构建，主要模拟机井开采，地表水补给地下水、河流补给地下水过程，由于本研究中地下水埋深较大，因此不考虑地表水蒸发和地下水补给河流 2 个水文过程。

2.2 耦合模型构建与率定

耦合模型的构建主要包括 SWAT 模型、MODFLOW 模型以及耦合模型 SWATMOD，其中

SWAT 模型采用 SWAT2012 版本进行建模；MODFLOW 使用 GMS10.6 进行建模，MODFLOW 版本采用 MODFLOW-NWT；耦合模型采用 QGIS3.10 平台的 QSWATMOD2 插件进行构建。

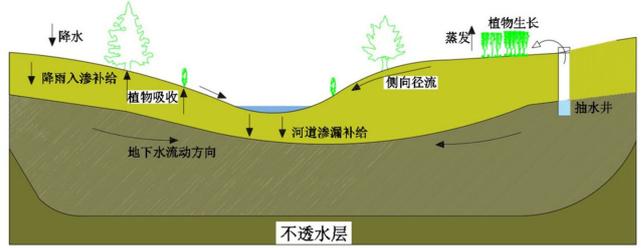


图 3 SWAT-MODFLOW 模拟的河流-含水层系统截面图

Fig.3 Section of river-aquifer system simulated by SWAT-MODFLOW

根据研究区实际水文地质条件和研究需要，将含水层概化为非均质各向同性的二维非稳定流潜水含水层，主要含水层为奥陶系碳酸盐岩溶水层与第四系砂砾石孔隙水层，在垂向上不存在连续的粘土层，具有统一的地下水位，将模型概化为 1 层，将研究区域离散为 100 m×100 m 正方形网格，共划分 109 行、149 列、1 层。该模型东部山前侧向补给按定水头边界处理，西部按隔水边界处理，系统的顶部主要接受大气降水补给，且由于地下水埋深较大，忽略潜水蒸发影响；系统的底部为隔水边界，垂向排泄主要为机井抽水。采用 2013 年 1 月—2017 年 12 月水文数据对模型进行率定和验证。

选用线性回归系数 R^2 和 Nash-Sutcliffe 效率系数 (NSE) 评价模型的模拟效果，率定和验证结果见图 4，其中率定期 R^2 为 0.88, NSE 为 0.84; 验证期 R^2 为 0.78, NSE 为 0.81。 NSE 、 R^2 均 > 0.5，因此，认为该模型可以比较精确的反应研究区的地表月径流过程。

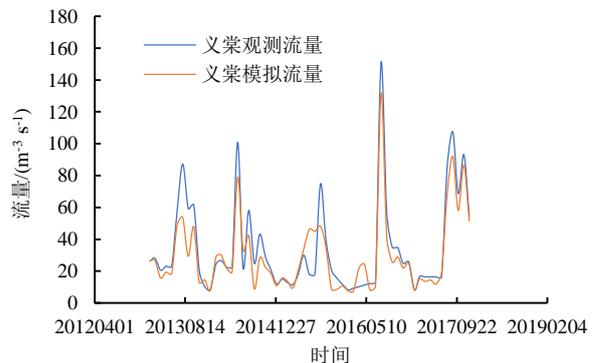


图 4 义棠水文站实测流量与模拟流量对比

Fig.4 Comparison of measured flow and simulated flow at Yitang hydrological station

图 5 为下站和宋古观测孔地下水实测结果和模拟结果。宋古观测井率定期 NSE 、 R^2 分别为 0.69、0.62，验证期 NSE 、 R^2 分别为 0.89、0.71；下站观测井率定期 NSE 、 R^2 分别为 0.65、0.6，验证期 NSE 、

R^2 分别为 0.68、0.61。2 个观测井的相关系数 R^2 、 NSE 均 >0.5 ，表明该模型的地下水位模拟结果与实测结果吻合较好，模型所选取的参数和水文地质条件概化较为准确，可以较为精确的反应研究区的实际情况。

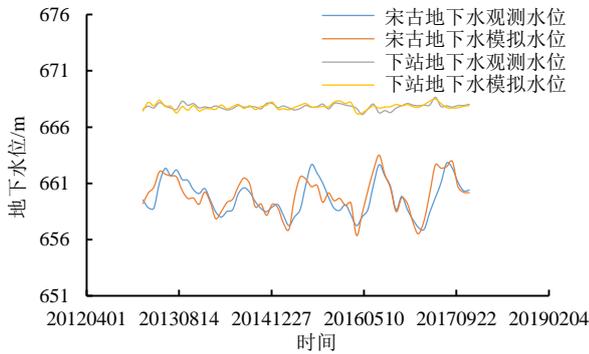


图 5 宋古和下站地下水观测水位和地下水模拟水位

Fig.5 Measured and simulated results of groundwater level in Xiashan and Songgu

3 压采方案的设计研究

东山供水的目的主要为通过关井及压采方式替换地下水源，同时保证介休市的经济发展和农村、城镇居民生活用水需求。根据《介休县域供水规划设计

报告》可知，本文所选研究区内东山供水工程供水量为 1 291 万 m^3/a ，东山供水支管分布见图 6，其中城关-宋古工商业发展园区规划供水量为 700 万 m^3/a ，义安-三佳循环经济园区规划供水量为 591 万 m^3/a ，供水工程水量用于置换地下水开采量。以此为前提，具体压采方案可以做如下设置：以 2017 年地下水开采量为基准，以东山供水保证率为变量，分析 2 个受水区在供水保证率为 50%、75%、90% 的情况下研究区地下水位变化情况，压采方案设计见表 1。

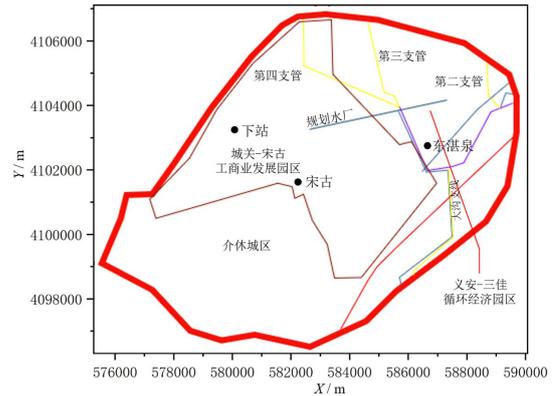


图 6 东山供水支管分布

Fig.6 Distribution of Dongshan water supply branch pipe

表 1 压采方案

Tab.1 Pressure mining scheme

方案	城关-宋古工商业经济发展园区			义安-三佳煤化循环经济园区			介休城区
	供水保证率	置换水量/ $10^4 m^3$	地下水开采量/ $10^4 m^3$	供水保证率	置换水量/ $10^4 m^3$	地下水开采量/ $10^4 m^3$	地下水开采量/ $10^4 m^3$
基准方案	—	—	791	—	—	662	210
方案一	50%	350	441	50%	295.5	366.5	210
方案二	50%	350	441	75%	443.25	218.75	210
方案三	50%	350	441	90%	531.9	130.1	210
方案四	75%	525	266	50%	292.5	366.5	210
方案五	75%	525	266	75%	443.25	218.75	210
方案六	75%	525	266	90%	531.9	130.1	210
方案七	90%	630	161	50%	295.5	366.5	210
方案八	90%	630	161	75%	443.25	218.75	210
方案九	90%	630	161	90%	531.9	130.1	210

注 “—” 表示在基准方案下，研究区内无供水，即地表水置换地下水量为 0，地下水开采量与 2017 年开采量相同。

3.1 不同压采方案地下水位变化过程数值模拟

为分析各压采方案下地下水的恢复情况，使用已经构建好的数值模拟，对基准方案以及 9 种压采方案进行数值模拟，降水数据采用的是 MIP5 气候模拟降水数据中的 HadGEM2-ES 模式^[16]，以下为基准方案和方案九的模拟结果，由于篇幅所限，且 9 种压采方案均为对抽水井进行压采，等水位线形状大致相同，因此，本论文只分析基准方案和方案九压采方案的模拟结果。

3.1.1 基准方案地下水位变化过程模拟结果

利用已构建的耦合模型进行模拟，以 2017 年地下水开采量为基准，保持 2017 年开采量，对 2030 年的地下水位变化进行模拟预测，此时城关-宋古工商业经济发展园区地下水开采量为 791 万 m^3 ，义安-三

佳煤化循环经济园区地下水开采量为 662 万 m^3 ，介休城区地下水开采量为 210 万 m^3 。

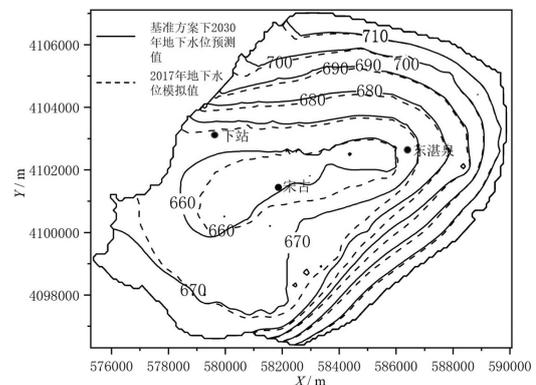


图 7 基准方案下 2030 年地下水位预测值与 2017 年地下水位模拟值

Fig.7 Forecasting groundwater level in 2030 under benchmark scenario and simulated water level in 2017

图 7 为基准方案模拟下得到的 2030 年地下水流场分布。由图 7 可知，地下水位 < 660 m 的地下水超采面积从 2017 年末的 10.82 km² 减小到 2030 年末的 10.77 km²，地下水位 < 670 m 的地下水超采面积从 2017 年初的 42.02 km² 减小到 2030 年末的 39.45 km²，地下水位 < 680 m 的地下水超采面积从 2017 年末的

60.71 km² 减小到 2030 年末的 60.33 km²，平均年变幅较小。2018—2030 年研究区基本处于采补平衡状态。图 8 为基准方案下宋古和下站观测站 2018—2030 年日地下水位模拟值。由图 8 可知，2018—2030 年，宋古观测站观测地下水位基本在 659.2 上下；下站观测井地下水位下降 3.71 m，平均每年下降 0.285 m。

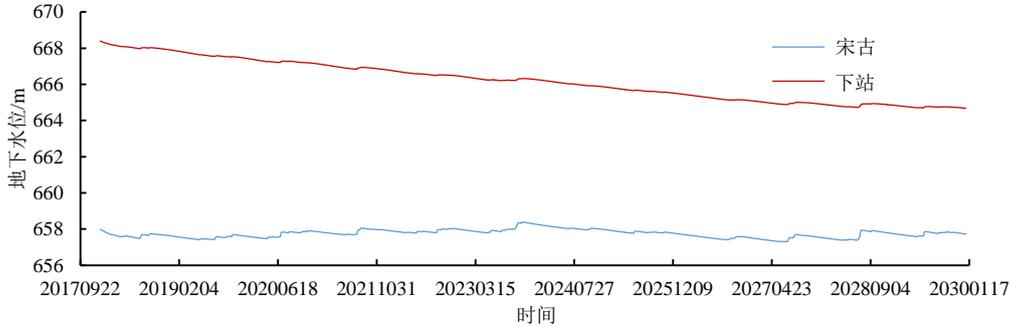


图 8 基准方案下宋古和下站 2018—2030 年地下水位

Fig.8 Groundwater level at Songgu and Xiashan from 2018 to 2030 under the benchmark scenario

3.1.2 方案九压采方案下地下水位变化过程模拟

方案九中宋古-城区工商业发展园区和义安-三佳循环经济园区的供水保证率均为 90%，供水量分别为 630 万 m³ 和 531.9 万 m³，即地表水置换地下水量为 630 万 m³ 和 531.9 万 m³，地下水开采量分别为 161 万 m³ 和 130.1 万 m³，介休城区地下水开采量为 210 万 m³。

水超采中心水位由 660 m 逐渐上升至 670 m。

图 9 为方案九压采方案下 2030 年地下水流场分布。由图 9 可知，与基准方案相比，地下水位 < 660 m 的地下水超采面积，已基本消失；地下水位 < 670 m 的地下水超采面积从 27.92 km² 减小到 16.03 km²，减小 73.6%，平均每年减小 5.7%；地下水位 < 680 m 的地下水超采面积从 60.33 km² 减小到 42.07 km²，减小 49.4%，平均每年减小 3.8%；地下水位 < 690 m 的地下水超采面积从 71.45 km² 减小到 56.47 km²，减小 39.1%，平均每年减小 3%。另外，对比基准方案与各压采方案 2030 年地下水位可知，地下水超采中心发生了偏移，整体趋势由宋古向介休城区发展，并且地下

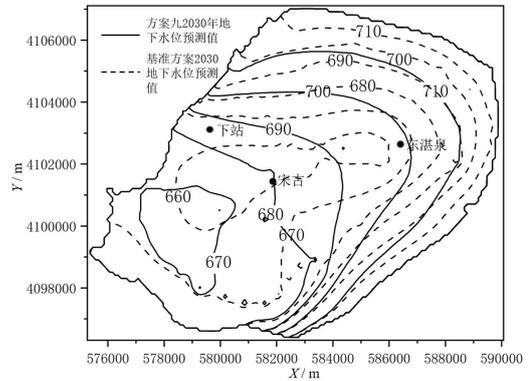


图 9 方案九与基准方案 2030 年地下水位预测值

Fig.9 Forecasting groundwater level in 2030 under the scheme 9 and the benchmark scenario

图 10 为宋古和下站观测井方案九与基准方案下 2018—2030 年地下水位模拟值。由图 10 可知，在方案九压采方案下，宋古观测站水位上升 16.96 m，平均每年上升 1.30 m；下站观测站水位上升 17.21 m，平均每年上升 1.32 m。

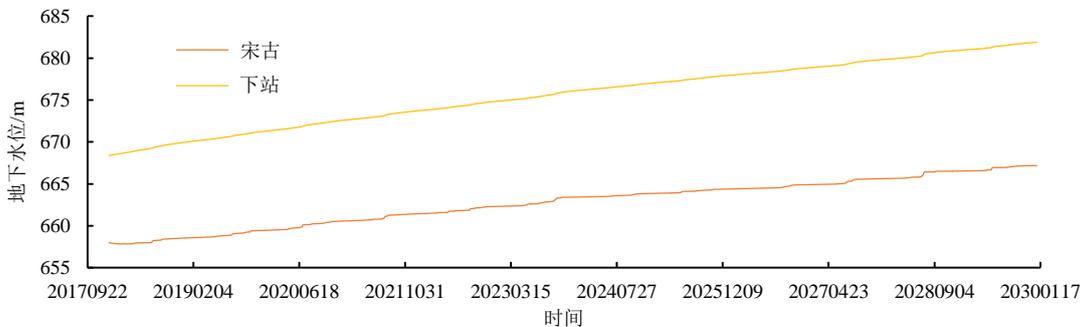


图 10 宋古和下站方案九压采条件下 2030 年地下水位预测值

Fig.10 Forecasting groundwater level at Songgu and Xiashan in 2030 under the pressure mining scheme 9

3.2 不同压采方案对地下水位变化的影响分析

由表 2 可知，方案一中地下水位 < 670 m 的地下水超采面积从 27.92 km² 减小到 16.3 km²，地下水位

年平均回升面积变化率为 3.2%；方案九中地下水位 < 670 m 的地下水超采面积从 27.92 km² 减小到 7.37 km²，地下水位年平均回升面积变化率为 5.7%；从地

下水位 < 670 m 的地下水超采面积来看, 方案九情景下地下水水位回升面积变化率是方案一的 1.78 倍。方案一中地下水水位 < 680 m 的地下水超采面积从 60.33 km² 减小到 44.25 km², 地下水水位年平均回升面积变化率为 2.1%; 方案九中地下水水位 < 680 m 的地下水超采面积从 60.33 km² 减小到 30.5 km², 地下水水位年平均回升面积变化率为 3.8%; 从地下水水位 < 680 m 的地下水超采面积来看, 方案九情景下地下水水位回升面积变化率是方案一的 1.8 倍。方案一中地下水水位 < 690 m 的地下水超采面积从 71.45 km² 减小到 57.42 km², 地下水水位年平均回升面积变化率为 1.5%; 方案九中地下水水位 < 690 m 的地下水超采面积从 71.45 km² 减小到 43.5 km², 地下水水位年平均回升面积变化率为 3%; 从地下水水位 < 690 m 的地下水超采面积来看, 方案九情景下地下水水位回升面积变化率是方案一的 2 倍。表 3 为宋古和下站不同压采方案下 2018—2030 年地下水水位平均变幅。由表 3 可知, 与基准方案相比, 宋古观

表 3 宋古和下站不同压采方案下 2018—2030 年地下水水位平均变幅

Tab.3 Average fluctuation of groundwater level in Songgu and Xiazhan under different pressure mining scheme

观测站点	from 2018—2030									m/a
	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五	方案六	方案七	方案八	方案九	
宋古	0.73	0.75	0.76	1.07	1.09	1.10	1.27	1.29	1.30	1.30
下站	0.75	0.76	0.78	1.09	1.11	1.12	1.30	1.31	1.32	1.32

4 讨论

引入外调水源置换地下水可以有效地缓解地下水超采的局面。区域地下水位是评价地下水回升效果的重要指标, 因此选取合适的模型是很有必要的。MODFLOW 模型对于地表水文过程一般采取概化的方式进行处理, 与 MODFLOW 模型相比, SWAT-MODFLOW 耦合模型中的 SWAT 模块可以相对准确的模拟研究区的地表水文过程。并且在地表水资源相对匮乏的地区, 如果可以将地表水文过程使用合理的方法进行处理, 那么得出的结果更可以反映研究区的实际情况, 使模拟结果更加精确。张琳琳等^[17]、Wei 等^[18]研究表明, SWAT-MODFLOW 耦合模型在地下水模拟和预测方面是基本可行的。介休市宋古地下水超采区, 因为其特殊的地质构造, 地下水接受侧向补给能力较弱, 主要依靠地表水以及大气降水进行补给。前人^[19]主要是以水资源优化配置的基础理论为指导, 构建水资源优化配置体系来分析供、用水关系, 从而建立符合介休市的优化配置方案, 这种方式有助于了解供、用水关系, 但无法较为准确地给出地下水的恢复情况。

本文利用 SWAT-MODFLOW 耦合模型研究了地表水置换地下水对介休市宋古地下水超采区的影响, 使用 2013—2017 年的实测水文数据对模型进行了验

证, 模型表现良好。模型模拟结果主要以研究区地下水水位等值线图 and 观测井水位变化历程 2 种形式输出。另外, 本文设计的压采方案主要依据是《介休县域供水规划设计报告》, 供水保证率设计时考虑的主要因素是在未来运行中, 由于气象、水库蓄水量等因素引起的供水量不稳定。当供水系统水量充分时, 即供水保证率可以达到 90% 时, 地下水水位回升效果最好, 宋古和下站观测孔年平均地下水水位上升速率分别为 1.30 m/a 和 1.32 m/a。

表 2 不同压采方案下 2030 年地下水水位回升面积变化率

Tab.2 The area change rate of groundwater level recovery in

2030 under different scenarios

方案	地下水水位 < 670 m		地下水水位 < 680 m		地下水水位 < 690 m	
	面积/ km ²	ROA ₆₇₀	面积/ km ²	ROA ₆₈₀	面积/ km ²	ROA ₆₉₀
基准方案	27.92	*	60.33	*	71.45	*
方案一	16.3	3.2%	44.25	2.1%	57.42	1.5%
方案二	16.03	3.3%	42.07	2.3%	56.47	1.6%
方案三	15.92	3.3%	41.55	2.4%	51.56	2.1%
方案四	12.79	4.2%	37.73	2.9%	54.78	1.8%
方案五	12.7	4.2%	37.26	2.9%	53.66	1.9%
方案六	10.1	4.9%	33.52	3.4%	48.74	2.4%
方案七	7.71	5.6%	30.98	3.7%	46.69	2.7%
方案八	7.44	5.6%	30.68	3.8%	44.41	2.9%
方案九	7.37	5.7%	30.5	3.8%	43.50	3.0%

注 *表示在基准方案下, 研究区无供水, 即地表水置换地下水量为 0, 不考虑地下水恢复情况。

证, 模型表现良好。模型模拟结果主要以研究区地下水水位等值线图 and 观测井水位变化历程 2 种形式输出。另外, 本文设计的压采方案主要依据是《介休县域供水规划设计报告》, 供水保证率设计时考虑的主要因素是在未来运行中, 由于气象、水库蓄水量等因素引起的供水量不稳定。当供水系统水量充分时, 即供水保证率可以达到 90% 时, 地下水水位回升效果最好, 宋古和下站观测孔年平均地下水水位上升速率分别为 1.30 m/a 和 1.32 m/a。

综上所述, 引入外调水源置换地下水, 可以缓解地下水开采压力, 有利于地下水的恢复, 同时, 由于未来供水量的不确定性, 可以根据未来工程运行的具体情况及时调整区域的压采量, 可以最大限度地降低地下水水位下降速度, 减轻地下水资源压力。另外, 在模型构建时, 如果可以收集到更加具体的地下水开采数据和地表水文过程的精确数据, 那么模型所模拟的结果也会更加准确, 同时, 本文在构建地下水模型时, 根据收集到的钻孔数据对地下水分层进行了概化处理, 这在一定程度上会存在局限性, 后续如果收集到更多的钻孔数据, 可以对其进行更为精确的处理。但总体而言, 本研究为深入探讨东山供水工程实施后对宋古超采区地下水水位变化的影响提供了一定的技术支持。

5 结 论

1) SWAT-MODFLOW 耦合模型率定期和验证期 NES 、 R^2 均 >0.5 , 且地下水位拟合效果较好, 模型表现良好, 满足模拟要求。

2) 当压采措施实施后, 最小供水保证率 50% 下, 研究区地下水位也有明显回升, 地下水超采中心由宋古逐渐向介休城区移动, 地下水超采中心地下水位回升速率为 0.73 m/a ; 对于地下水位 <670 、 680 、 690 m 地下水超采面积, 90% 供水保证率下的地下水位回升面积变化率分别是 50% 供水保证率下的 1.78 倍、1.8 倍、2 倍。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 楚敬龙. 解析法在山区地下水环境影响评价中的应用[J]. 有色金属(矿山部分), 2011, 63(5): 71-74.
CHU Jinglong. Application of analytical method in groundwater environmental impact assessment in mountain areas[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2011, 63(5): 71-74.
- [2] 梅杰, 刘国东, 夏成城, 等. 数值法与解析法在地下水环境影响评价中的应用研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(8): 107-112.
MEI Jie, LIU Guodong, XIA Chengcheng, et al. Application of numerical method and analytical method in groundwater environmental impact assessment[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(8): 107-112.
- [3] 杨忠平, 卢文喜, 李平. 时间序列模型在吉林西部地下水动态变化预测中的应用[J]. 水利学报, 2005, 36(12): 1475-1479.
YANG Zhongping, LU Wenxi, LI Ping. Application of time-series model to predict groundwater regime[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(12): 1475-1479.
- [4] 谭娇, 丁建丽, 陈文倩, 等. 基于多变量时间序列模型的地下水埋深预测: 以渭库绿洲为例[J]. 节水灌溉, 2017(9): 55-59, 64.
TAN Jiao, DING Jianli, CHEN Wenqian, et al. Groundwater depth prediction based on multivariate time series model: A case study on Weigan and kuqa rivers delta oasis[J]. Water Saving Irrigation, 2017(9): 55-59, 64.
- [5] 潘宗源, 吴远斌, 贾龙, 等. 湖南宁乡大成桥岩溶地下水对暴雨响应特征及多元回归预测模型[J]. 中国岩溶, 2020, 39(2): 232-242.
PAN Zongyuan, WU Yuanbin, JIA Long, et al. Response characteristics of karst groundwater to rainstorm and the multiple regression prediction model in Dachengqiao, Ningxiang County, Hunan Province[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(2): 232-242.
- [6] 陈笑, 王发信, 戚王月, 等. 基于遗传算法的 BP 神经网络模型在地下水埋深预测中的应用: 以蒙城县为例[J]. 水利水电技术, 2018, 49(4): 1-7.
CHEN Xiao, WANG Faxin, QI Wangyue, et al. Application of genetic algorithm-based BP neural network model to prediction of groundwater buried depth: A case study of Mengcheng County[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(4): 1-7.
- [7] 闫佰忠, 孙剑, 王昕洲, 等. 基于多变量 LSTM 神经网络的地下水水位预测[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(1): 208-216.
YAN Baizhong, SUN Jian, WANG Xinzhou, et al. Multivariable LSTM neural network model for groundwater levels prediction[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(1): 208-216.
- [8] 谷苏单. 灰色预测模型 GM(1, N) 在邯郸市成安县地下水矿化度预测中的应用[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2018.
GU Sudan. Application of grey prediction model GM(1,N) in groundwater mineralization of Cheng'an County in Handan City[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2018.
- [9] BEVEN Keith. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model[J]. Techniques of Water-Resources Investigations, 1986, 88(3/4): 387-389.
- [10] CHEN S L, YANG W, HUO Z L, et al. Groundwater simulation for efficient water resources management in Zhangye Oasis, Northwest China[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(8): 647.
- [11] 张雪靓, 丁蓓蓓. 冬小麦“春浇一水”限水灌溉模式对浅层地下水采补平衡的影响: 以河北省太行山山前平原为例[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(9): 1-10.
ZHANG Xueliang, DING Beibei. The effects of limiting irrigation frequency of winter wheat to one time on shallow groundwater balance and wheat yield: A simulation study on a piedmont plain of Taihang Mountain in Hebei Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(9): 1-10.
- [12] 帅官印, 张先, 邵景力, 等. 农业限水灌溉对地下水恢复的影响研究: 以河北省石家庄平原区为例[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(8): 54-62.
SHUAI Guanyin, ZHANG Xian, SHAO Jingli, et al. Groundwater recovery after restricting groundwater extraction for irrigation: Taking Shijiazhuang plain in Hebei Province as an example[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(8): 54-62.
- [13] 刘若愚, 康博. 压采作用下宿州市地下水源置换效应模拟研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2022, 45(7): 939-945.
LIU Ruoyu, KANG Bo. Simulation of groundwater replacement effect in Suzhou city under compressive exploitation[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2022, 45(7): 939-945.
- [14] LI P, REN L. Evaluating the effects of limited irrigation on crop water productivity and reducing deep groundwater exploitation in the North China Plain using an agro-hydrological model: II. Scenario simulation and analysis[J]. Journal of Hydrology, 2019, 574: 715-732.
- [15] 翟小艳. 介休市城镇饮用水水源安全评价及建设研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2020.
ZHAI Xiaoyan. Study on the safety evaluation and construction of urban drinking water sources in Jiexiu city[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2020.
- [16] 高峰, 蔡万园, 张玉虎, 等. 5 种 CMIP5 模拟降水数据在中国的适用性评估[J]. 水土保持研究, 2017, 24(6): 122-130, 138, 397.
GAO Feng, CAI Wanyuan, ZHANG Yuhu, et al. Evaluation on the applicability of 5 kinds of CMIP5 simulated precipitation data in China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(6): 122-130, 138, 397.
- [17] 张琳琳, 崔亚莉, 梁桂星, 等. SWAT-MODFLOW 耦合模型在地下水量均衡分析中的应用[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(6): 176-183.
ZHANG Linlin, CUI Yali, LIANG Guixing, et al. Application of SWAT-MODFLOW coupling model in ground-water balance analysis[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(6): 176-183.
- [18] WEI L, SEONGGYU P, RYAN T B, et al. Quantifying the streamflow response to groundwater abstractions for irrigation or drinking water at catchment scale using SWAT and SWAT-MODFLOW[J]. Environmental Sciences Europe, 2020, 32(113): 1-25.
- [19] 黄小丹. 介休市水资源优化配置研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2008.
HUANG Xiaodan. Study on optimal allocation of water resources in Jiexiu City[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008.

(下转第 112 页)

Analysis of spatial-temporal changes and driving factors of net primary productivity of vegetation in the Manasi River basin

ZHAO Liman¹, WANG Xuemei^{1,2*}

(1. College of Geographic Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China;

2. Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone, Urumqi 830054, China)

Abstract: **【Objective】** To investigate the spatial and temporal variation patterns of net primary productivity (*NPP*) of vegetation and its influencing factors in the Manas River Basin, Xinjiang. **【Method】** Based on MODIS remote sensing data as well as topography, meteorological factors and human activity data, the spatial and temporal change characteristics of *NPP* in the Manas River Basin and its driving factors from 2001 to 2021 were analyzed by using slope trend analysis, correlation analysis and geoprobe. **【Result】** From 2001 to 2021, the multi-year average *NPP* in the Manas River Basin was 125.63 g C/(m²·a), with a minimum of 98.80 g C/(m²·a) in 2008 and a maximum of 163.98 g C/(m²·a) in 2016, and the *NPP* generally showed an inter-annual increasing trend. The spatial distribution pattern of *NPP* in the Manas River Basin was characterized by low in the Northern and Southern regions and high in the central region, with nearly 63.84% of the regions showing an increasing trend in *NPP*, of which 26.98% of the regions showed a significant increase in *NPP* ($P < 0.05$); and 19.31% of the regions showed a significant decrease in *NPP* ($P < 0.05$). The *NPP* showed an increasing trend with the increase of elevation and slope, with the highest values occurring in the low mountain forest and grassland areas of the Manas River basin; *NPP* was positively correlated with air temperature and precipitation. The degree of influence of each factor on *NPP* in descending order was elevation > land use > precipitation > slope > GDP > temperature > population density > nighttime light, among which the interaction between elevation and land use had the greatest influence on *NPP*. **【Conclusion】** The *NPP* in Manas River Basin has obvious spatial and temporal differentiation characteristics, and elevation, land use and precipitation have important effects on the spatial and temporal distribution pattern of *NPP*.

Key words: net primary productivity of vegetation; spatial-temporal variation; driving factors; geographic detector; Manasi River Basin

责任编辑: 韩洋

(上接第 103 页)

Numerical simulation research on the impact of surface water replacement on groundwater level in the overexploited area of Songgu

NIU Qi, REN Chunping*, WU Jianhua, GAO Hongwei

(College of Water Resource Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: **【Objective】** Explore the impact of surface water replacement on groundwater level in the Songgu overexploited area of Jiexiu city after the implementation of the Dongshan water supply project. **【Method】** Using the SWAT-MODFLOW coupling model, the surface hydrological processes and groundwater dynamics in the Songgu overexploited area were established, and groundwater level simulation predictions were made for different guaranteed rates of the Dongshan water supply project's pressure mining plan. **【Result】** After implementing the pressure mining measures, the groundwater level in the Songgu overexploited area rebounded significantly and the overall underground water balance shifted from negative to positive equilibrium. Under the minimum water supply guarantee rate, the groundwater level in the study area also showed a significant rebound, with a groundwater level rebound rate of about 0.73 m/a at the center of the funnel, which gradually moved from Songgu to Jiexiu urban area. The area of groundwater level recovery under 90% water supply guarantee rate for groundwater level below 670, 680, and 690 m increased by 1.78 times, 1.8 times, and 2 times, respectively, compared to that under 50% water supply guarantee rate. **【Conclusion】** The replacement of surface water with groundwater has a significant effect on the rebound of groundwater level in the Songgu overexploited area. In situations where water resources are abundant, surface water replacement can appropriately promote groundwater recovery.

Key words: Songgu; surface water replaces groundwater; water supply guarantee rate; SWAT-MODFLOW; Dongshan water supply

责任编辑: 白芳芳