

山谷型小流域地表水与地下水时空交互模拟研究

杨 蕴, 郭 勇, 王发飞, 宋 健, 吴剑锋

Integrated model for estimation of the interaction between surface water and groundwater based on in valley watershed

YANG Yun, GUO Yong, WANG Fafei, SONG Jian, and WU Jianfeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202312042>

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

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

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

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

基于地表水循环遥感观测的黑河流域水平衡分析

Water balance analysis based on remote sensing observation of surface water cycle in the Heihe River watershed

闫柏琨, 李文鹏, 甘甫平, 郑跃军, 祁晓凡, 白娟, 郭艺, 吴艳红, 王龙凤, 马燕妮 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 44-56

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

基于GSFLOW的青土湖生态输水量-湖水面积关系研究

A study of the relationship between ecological water conveyance and water surface area of the Qingtu Lake based on GSFLOW

郭云彤, 周妍, 崔亚莉, 邵景力 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 32-41



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: [10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202312042](https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202312042)

杨蕴, 郭勇, 王发飞, 等. 山谷型小流域地表水与地下水时空交互模拟研究 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(1): 32-41.
YANG Yun, GUO Yong, WANG Fafei, et al. Integrated model for estimation of the interaction between surface water and groundwater based on in valley watershed[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(1): 32-41.

山谷型小流域地表水与地下水时空交互模拟研究

杨 蕴¹, 郭 勇¹, 王发飞¹, 宋 健², 吴剑锋²

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100;

2. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210093)

摘要: 以往地表水-地下水交互过程研究集中于平原河网地区, 而水动力交互作用强烈的山谷型流域研究甚少。选取句容北山水库流域为研究区, 聚焦山谷型流域地表产汇流与浅层地下水渗流交互过程, 基于 SWAT-MODFLOW 构建了地表水-地下水耦合模型评价流域水量交互过程及时空变化规律。结果表明: 流域范围内地下水与地表水的交互存在一定的时空差异性; 2016—2019 年期间整体呈现地下水补给地表水, 但在丰水期局部时段, 地表水补给地下水; 研究区西北部、东北部山区以及南部北山水库周边地区表现为地下水补给地表水; 耦合模型可较好地刻画研究区地表水与地下水的交互流量, 流域地下水对河道净补给量的贡献率为 8.72%, 其中地下水补给量在空间分布上西部支流和中部支流区域分别占 28.8%、79.8%, 东部支流地表水补给地下水, 地下水的补给率逆差为 8.6%。研究成果可为流域水资源联合调度和开发利用提供技术支撑。

关键词: 山谷型流域; 地表水-地下水; SWAT-MODFLOW 模型; 耦合模型; 水量交互

中图分类号: P641.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)01-0032-10

Integrated model for estimation of the interaction between surface water and groundwater based on in valley watershed

YANG Yun¹, GUO Yong¹, WANG Fafei¹, SONG Jian², WU Jianfeng²

(1. School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China;

2. School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

Abstract: Previous studies on surface water-groundwater (SW-GW) interactions have primarily focused on plain river networks, with limited understanding on hydrodynamic interactions in valley-type watersheds. This study focuses on the Beishan Reservoir Basin (BRB) in Jurong, specifically investigating surface runoff and shallow groundwater interactions in a valley-type watershed Jurong. A coupled SWAT-MODFLOW model was developed to evaluate the spatiotemporal variations in SW-GW interaction processes. The results show that the interaction between SW-GW varies both temporally and spatially. Temporally, the groundwater discharged into the surface water during 2016–2019, while the surface water replenished the groundwater during certain periods of wet season. Spatially, the mountainous areas in the northwest and northeast of the study area and the surrounding areas of BRB in the south of the study area are characterized by groundwater discharge into surface water. The coupling model effectively describes the surface water-groundwater (SW-GW) interaction, with groundwater contributing

收稿日期: 2023-12-09; 修订日期: 2024-02-19

投稿网址: www.swd zgcdz.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3702202); 国家自然科学基金-核技术创新联合基金项目(U2167212)

第一作者: 杨蕴(1985—), 男, 博士, 教授, 主要从事地下水数值模拟及优化管理研究。E-mail: yy_hhu@hhu.edu.cn

8.72% to the net replenishment of rivers in the basin. The western tributaries and central tributaries of the basin receive 28.8% and 79.8% groundwater recharge in the whole basin, respectively. The eastern tributaries with negative groundwater recharge rate of 8.6% exhibit surface water discharge into groundwater. This study provides a technical support for joint scheduling and development and utilization of watershed water resources.

Keywords: valley watershed; surface water-groundwater; SWAT-MODFLOW model; coupling model; water exchange

北山水库是句容市饮用水一级保护区,水库水量的多少、水质的好坏直接影响居民健康、粮食安全及当地的经济的发展。由于农业生产以及居民生活用水,区内水资源需求压力较大,加之2017年以来降水量持续减少,水库蓄水位从2017年初的52.47 m下降至2020年48.04 m,水资源量十分紧张^[1]。因此该地区地表-地下水水量交互研究对日后区内地表水-地下水资源联合调度方案的形成具有指导意义^[2]。

北山水库流域是典型的山谷型小流域,形成了相对独立的水文单元或水文地质单元,流域地表水及地下水流至谷口向外排泄^[3];研究区浅层含水层以砂土、粉砂土和粉黏土为主,局部有砂砾石层,基岩出露区以强风化带为主,渗透性较强;研究区地形坡度较大,丰水期区内坡面流量大,地表径流量大,水力梯度同步增大,导致地表水和地下水交互作用强烈^[4-5]。在山谷型流域进行地表水-地下水水量交互研究可以为开展地表水-地下水科学可持续的联合调度和利用提供技术支持,对地表水和地下水资源利用与生态环境保护具有重要的理论和实际意义。地表水与地下水水量交互是开展流域尺度地表水-地下水交互研究的基础,可以为类似山谷型小流域水文模拟提供参考^[6-7]。

地表水-地下水耦合模拟是流域尺度地表水地下水水量交互研究的主流方法^[8]。数值模型能模拟分布式地表水、地下水流及二者的交互过程,对此国内外学者进行了大量的地表水-地下水耦合模拟研究。Markstrom等^[9]采用GSFLOW模型对陆地主要水循环过程进行模拟。Camporese等^[10]将CATHY模型与径流路径分选、条件边界相耦合,结合多源数据同化技术,成功模拟了不同尺度流域的水文过程。崔素芳^[11]以人类活动为切入点开展地表水-地下水耦合模拟,研究大沽河流域水资源时空变化规律。余钟波等^[12]构建了新安江地表-地下双人工调蓄分布式水文模型,双调蓄模型能准确模拟控制区域地表和地下径流人工调蓄过程。以往地表水-地下水交互过程研究的区域

多为平原河网地区,地表水、地下水交互作用强烈的山谷型小流域研究甚少^[13-14]。SWAT-MODFLOW地表水-地下水耦合模型,可模拟复杂地形条件下的产汇流过程,同时可实现与三维地下水流模型的耦合,本文基于SWAT-MODFLOW模型构建句容北山水库小流域地表水-地下水耦合模型,研究流域地表水和地下水的水量交互及时空分布规律^[15-17],可以为区域地表水-地下水联合调度提供理论和技术支撑。

1 北山水库流域概况

研究区位于句容市饮用水水源一级保护区北山水库及周边区域,面积70 km²,地形以低山丘陵为主,地势较高,切割较深,为宁镇山脉的一部分。山系走向北东或近东西,高程多在200~400 m之间,区域地形高差近350 m。由中国大气同化数据集(China meteorological assimilation driving datasets, CMADS)和中国气象数据网提供的南京站和北山水库站气象资料可知,其逐日气象资料序列为2016—2020年,年均降水量为1 018.6 mm,1991年年降水量最大为1 914.4 mm,1978年最小为568.4 mm,年际最大差幅1 346.0 mm。

研究区属秦淮河水系,水系主要为沿山谷分布的水沟和小河流,宽度一般0.5~3.0 m,局部宽阔处可达6~8 m。区内地形东、西、北三面高,南面低,大小水系汇往北山水库,为小型汇水盆地。北山水库是句容市内水域面积最大的水库,水域面积3.32 km²,平均年径流量为2 535×10⁴ m³。水库主要功能是防洪、灌溉和城市供水,水库正常蓄水位53.0 m,汛限制水位52.0 m,50 a一遇设计水位为54.4 m。北山水库为江苏省重点中型水库,现为句容市区水源地,是水源地二级保护区。图1(a)为研究区地理位置及河流水系分布图。

研究区施工了14个水文地质和地下水水位监测孔,与地表水交互作用强烈的地下水为松散岩类孔隙水和局部强风化基岩裂隙水,主要赋存于岗地、山前波状平原、冲沟边坡及小河流两侧的第四系残积坡积

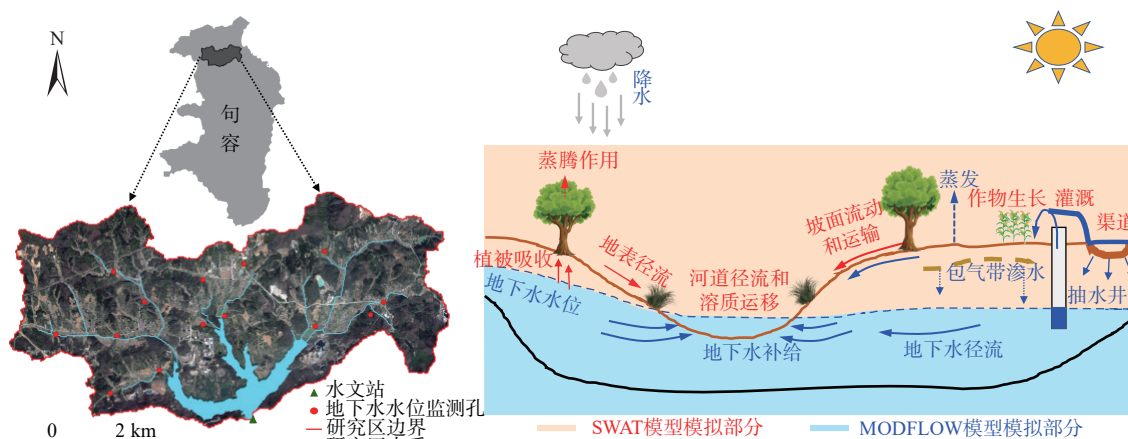


图 1 研究区水系分布和地表水-地下水循环概念图

Fig. 1 The river system and the concept map of surface water-groundwater cycle in the study area

层和上更新统下蜀组及全新统冲积洪积层。潜水含水层主要接受大气降水补给,其次为山区基岩地下水侧渗补给和汛期河道侧向补给;排泄方式以向河沟渗流及浅井开采为主,部分消耗于蒸发。

2 流域地表水-地下水耦合模型

2.1 基于 SWAT-MODFLOW 的地表水-地下水耦合模拟方法

SWAT-MODFLOW 为半分布式耦合模型,可模拟地表水、地下水及其耦合的水动力过程,其中地表水文过程由 SWAT 模型进行模拟,主要包括地表产汇流、土壤水分计算等,地下水流由 MODFLOW 模型进

行模拟,包括地下水补给、井渠、蒸发、河流等主要的地下水源汇项水量计算。耦合模型的水循环计算过程如图 1(b)所示,其中红色部分代表 SWAT 模型计算过程,蓝色部分代表 MODFLOW 模型计算过程。耦合交互过程由 SWAT 模型基于空间数据和属性数据计算出地下水补给速率、地表径流量和渗漏补给量,将渗漏补给量传递到 MODFLOW 的 RCH 包中作为地下水模型的边界条件,再由 MODFLOW 中的 River 包计算得到地下水水位及地表水-地下水的相互交换量传递回 SWAT 子流域通道中,从而更新 SWAT 模型输入条件,计算地表渗漏补给量,如此迭代计算。SWAT-MODFLOW 模型链接示意图如图 2^[18-21]所示。

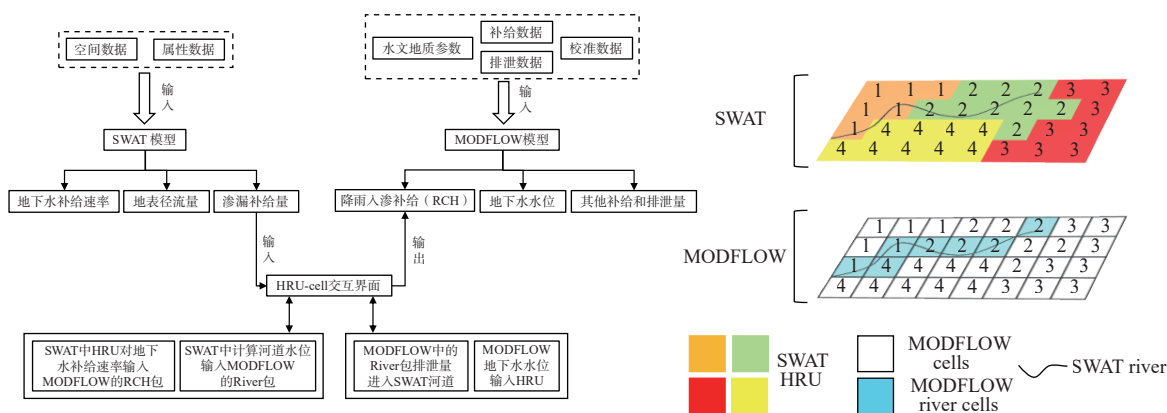


图 2 SWAT-MODFLOW 模型耦合示意图

Fig. 2 Schematic diagram of SWAT-MODFLOW model coupling

耦合的关键在于 SWAT 模型与 MODFLOW 模型数据的传递。数据传递通过 SWAT 模型划分的水文相应单元(HRUs)与 MODFLOW 剖分的单元(Cells)之间的映射实现。SWAT 模型划分的 HRUs 单元并没有

空间位置信息,需先将 HRUs 继续拆分为具有空间信息的 DHRUs,然后匹配 DHRUs 与 MODFLOW 单元,进行数据传输以实现模型耦合^[22-24]。图 2(b)所示为 SWAT 与 MODFLOW 的 HRU-cell 的耦合示意图。

2.2 北山水库流域 SWAT-MODFLOW 模型

2.2.1 SWAT-MODFLOW 模型构建

(1)SWAT 模型基础数据库和模型构建

SWAT 模型需要对不同空间数据和属性数据进行

叠加。其中,空间数据包括高程、土地利用类型、土壤类型等(图 3),属性数据主要包括土壤理化属性、作物生长、农业管理、水文气象数据等。

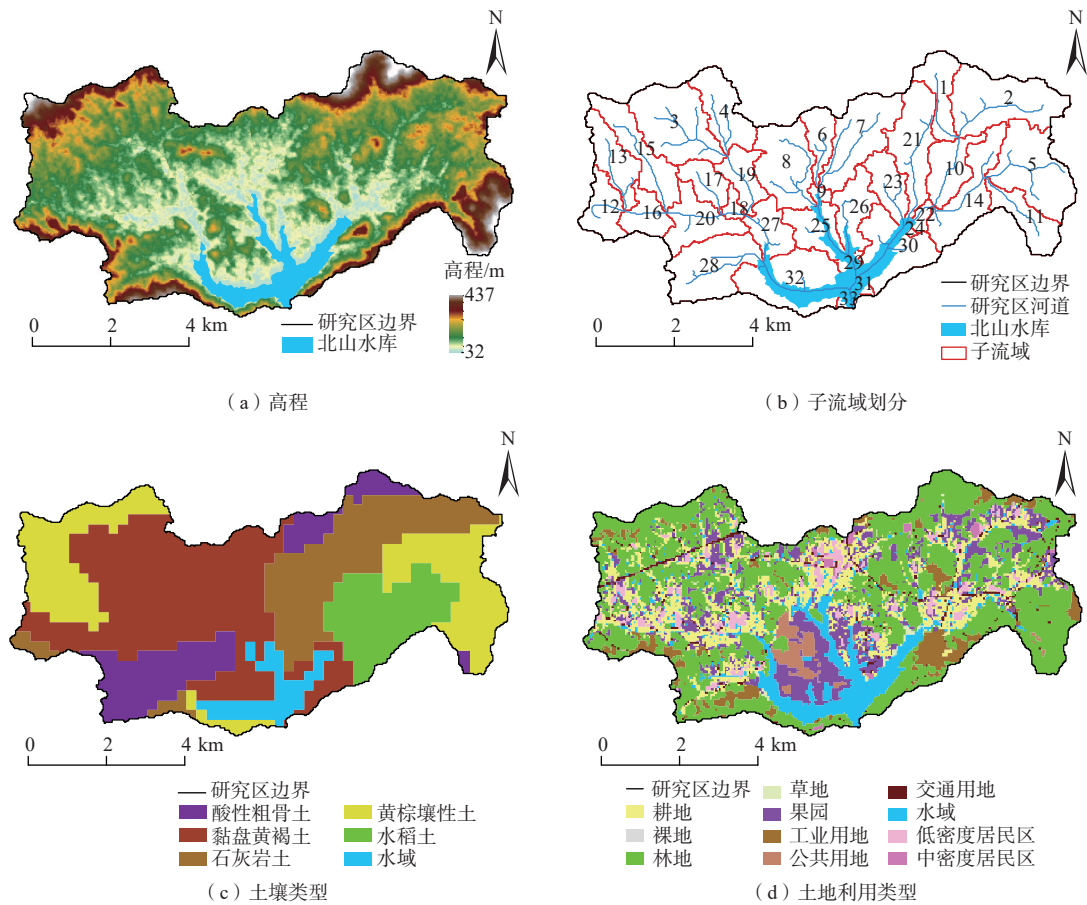


图 3 SWAT 模型数据栅格图

Fig.3 Raster graph of SWAT model data

①高程

采用 NASADEM(NASA digital elevation model)提供的 30 m×30 m 的 DEM 数字高程数据^[25]。

②土地利用类型

句容市自然资源局提供的 1 : 5 000 土地利用类型数据,根据 SWAT 土地利用数据库,划分 11 种土地利用类型,分别为耕地、果园、林地、干草、交通用地、水域、公共用地、裸地、中低密度居民区、低密度居民区、工业用地。

③土壤类型

利用 SPAW 软件的 SWC 模块计算相关土壤数据库参数表,并对研究区土壤数据进行重分类和属性赋值。

④子流域划分

通过设置河网阈值为 100 ha,将北山水库流域共

划分 33 个子流域(图 3b),结合子流域中土地利用、土壤分布和坡度等将流域划分了 2 030 个 HRUs。

(2)MODFLOW 模型构建

研究区概化为上部潜水含水层和下部基岩弱透水系,潜水含水层由松散岩类孔隙水和局部出露强风化基岩裂隙水构成,可等效为孔隙介质,下伏基岩层由花岗岩、砂岩等致密岩层构成,构造不发育,透水性弱,底部概化为隔水边界。模型未考虑深部基岩裂隙水,潜水含水层地下水分水岭与地表分水岭范围可视为一致,采用侧向地形分水岭作为模型边界,处理为零通量边界。模型内部沟渠和河流与地下水发生水量交换,概化为河流边界。结合含水层岩相和抽水试验和渗水试验数据,对研究区进行水文地质参数划分,渗透系数数值分区见图 4。

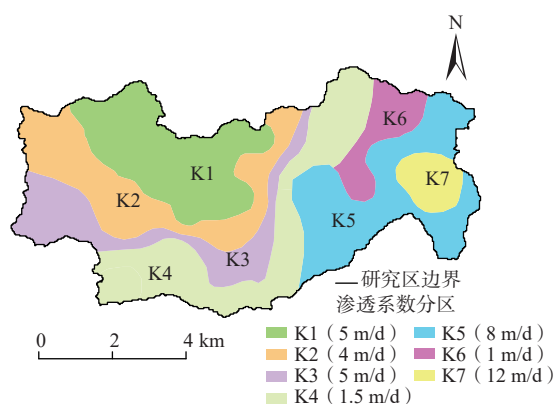


图 4 北山水库流域边界及渗透系数分区划分

Fig. 4 Boundary condition division and permeability coefficient division of Beishan reservoir watershed

2.2.2 SWAT-MODFLOW 模型校准

耦合模型将 2016 年设置为预热期, 2017—2019 年设为率定期, 2020 年为验证期。选取率定参数见表 1, 选取决定系数 (R^2)、纳什效率系数 (NSE)、百分比偏差 ($PBIAS$)^[26] 作为率定指标。 R^2 反映模拟值与实测值的契合程度, 其值越接近 1, 模拟契合程度越高; NSE 反映模型模拟值与实测值的拟合程度, 当趋近于 1 时, 拟合程度最佳。 $PBIAS$ 反映模拟结果的整体趋势大于或小于实测结果, 0 为最佳, 正值表示模拟值偏低, 负值表示模拟值偏高。其计算公式分别为:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})^2} \quad (1)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (2)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})}{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}} \quad (3)$$

式中: $Q_{obs,i}$ 、 $Q_{sim,i}$ ——径流量的实测值和模拟值;
 \bar{Q}_{obs} 、 \bar{Q}_{sim} ——径流量的实测值和模拟值的平均值;
 n ——观测值的时间长度。

耦合模型拟合期与验证期地表径流校准结果见表 2。由此可知, 拟合期的 $R^2=0.98$ 、 $NSE=0.89$ 、 $PBIAS=0.79$, 验证期的 $R^2=0.99$ 、 $NSE=0.90$ 、 $PBIAS=0.77$, 各时期模拟评价指标均符合拟合要求, 表明模型可以较好

表 1 耦合模型选取参数

Table 1 Selection parameters of coupling model

参数	来源	结果
SCS 径流曲线系数	SWAT	0.16
基流分割系数	SWAT	0.55
地下水延迟系数	SWAT	126.83
分区 1 地下水渗透系数/($m \cdot d^{-1}$)	MODFLOW	5.00
分区 2 地下水渗透系数/($m \cdot d^{-1}$)	MODFLOW	4.00
分区 3 地下水渗透系数/($m \cdot d^{-1}$)	MODFLOW	5.00
分区 4 地下水渗透系数/($m \cdot d^{-1}$)	MODFLOW	1.50
分区 5 地下水渗透系数/($m \cdot d^{-1}$)	MODFLOW	8.00
分区 6 地下水渗透系数/($m \cdot d^{-1}$)	MODFLOW	1.00
分区 7 地下水渗透系数/($m \cdot d^{-1}$)	MODFLOW	12.00

反映北山水库流域径流量的变化规律。图 5(a) 显示地表径流量模拟值与实测值吻合较好, 能够反映月平均径流量的变化趋势, 其径流峰值能与降水相对应。

表 2 耦合模型率定期与验证期地表径流校准结果

Table 2 Coupling model verifies the calibration results of periodic and periodic surface runoff

校正参数	率定期(2017年1月15日— 2019年12月15日)			验证期(2020年1月15日— 9月15日)		
	R^2	NSE	$PBIAS$	R^2	NSE	$PBIAS$
拟合值	0.98	0.89	0.79	0.99	0.90	0.77

地下水水位模拟采用 2019 年 4 月研究区内 14 个钻孔实测地下水水位进行拟合, 水文站点和地下水水位观测孔分布见图 1(a), 具体拟合结果见图 5(b)。耦合模型地下水水位拟合决定系数为 0.99, 纳什效率系数为 0.95、百分比偏差为 0.52, 结合研究区实际情况, 认为地下水模拟部分达到了要求的精度。

地表水和地下水动力过程是相互耦合的, 地表径流量和地下水水位模拟值与观测值相比出现同步偏低的现象, 可能原因是模型降水入渗输入值偏低, 源汇数据的不确定性导致模拟结果存在一定规律性的偏差。总体上, 通过模型校正, 模型计算值和实测值的拟合度达到了精度要求, 基于该模型可开展流域地表水和地下水的水量交互及时空规律研究。

3 模拟结果分析

3.1 流域地表水-地下水交互的时空变化

模型假设地表水与地下水补排路径相连接, 未考虑非饱和入渗过程。由模拟结果可知, 地表径流和地下水水流场受流域地形控制, 沿着东部、中部和西部支流最终汇入北山水库。从总量均衡角度北山水库流域呈现地下水补给地表水的规律, 但存在一定的时间空间差异性。

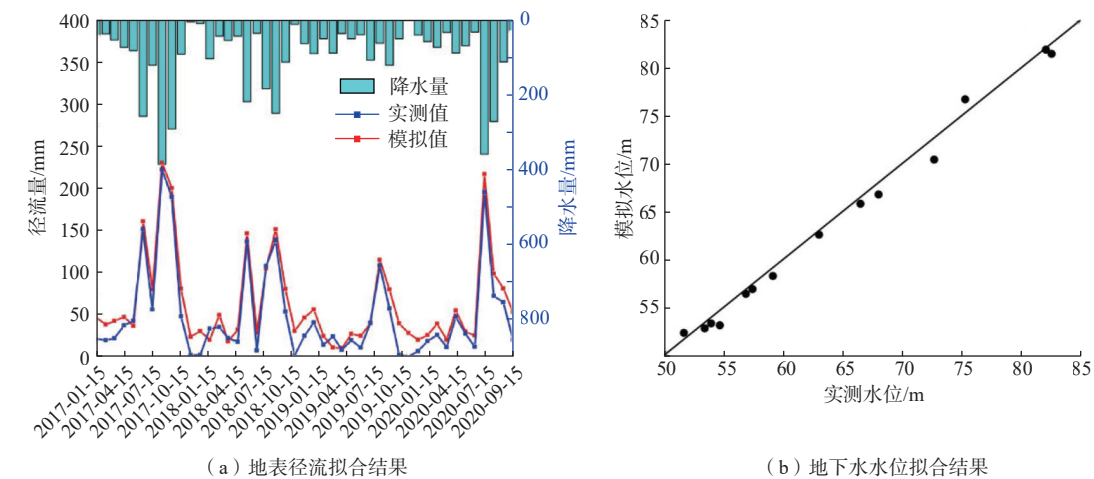


图 5 耦合模型地表径流量和地下水水位拟合结果

Fig. 5 Surface runoff and groundwater level in the coupling model

(1)地表水-地下水交互量时间变化

从时间上看,结合 2016—2019 年逐月降水量与地下水对地表水净补给流量关系(图 6)和地表水-地下水年际交互流量(负值为地下水补给地表水;正值为地表水补给地下水)(表 3),可见地下水对地表水的净补给量与研究区降水量呈正相关关系,2016—2019 年降水量

从 1 808.7 mm 降至 743.00 mm,净补给量由-97.02 mm 逐年递减至-77.45 mm。基于研究区各子流域地表水-地下水交互关系(图 7),2016—2019 年北山水库流域整体上呈现出地下水补给地表水的规律,细分为丰水期(夏季)主要表现为地表水补给地下水,其余时期主要表现为地下水补给地表水。

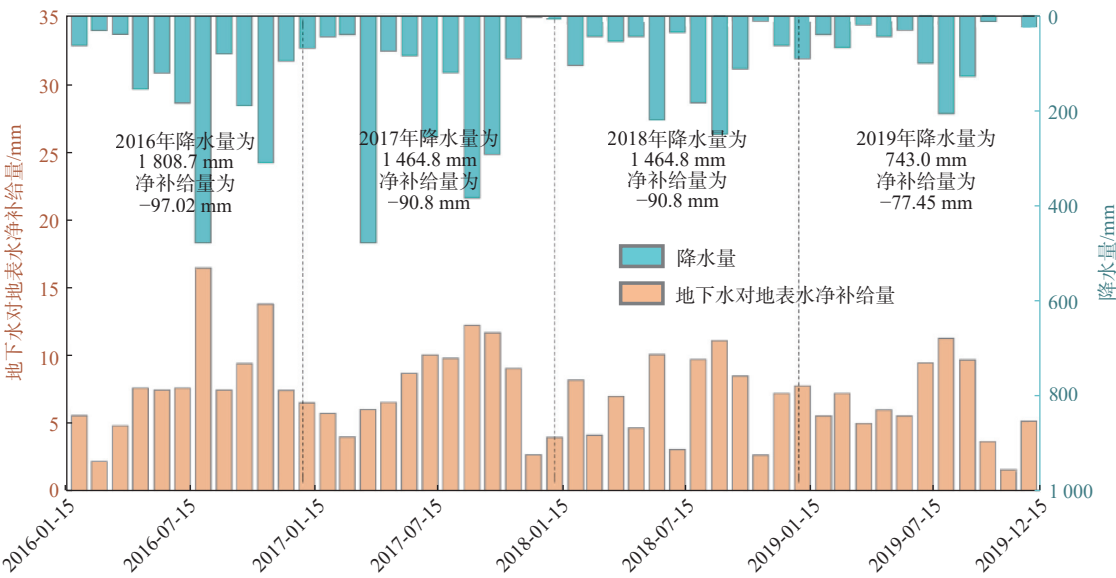


图 6 2016—2019 年逐月降水量与地下水对地表水净补给量关系

Fig. 6 Monthly rainfall and net recharge to surface water by groundwater from 2016 to 2019

由地表水-地下水交互补给面积(表 3)可知,整体上地下水补给地表水区域大于地表水补给地下水区域的面积,随着年际降水量的降低,2016 年至 2019 年地下水补给地表水区域的面积在逐年递减从 34.33 km² 减少到 32.72 km²,且地表水对地下水补给速率逐年降低,由 2016 年的 0.28~7.22 m³/d 降至 2019 年的 0.10~

1.76 m³/d。

(2)地表水-地下水交互量空间变化

空间上,研究区西北部、东北部山区以及南部北山水库附近地区主要表现为地下水补给地表水,其余地区主要表现为地表水补给地下水(图 7)。由表 4 可知,研究区地下水补给地表水区域的高程远大于地表

表 3 地表水-地下水年际补给量

Table 3 Interannual recharge relationship between surface and groundwater

年份	降水量/mm	地下水向地表水 补给量/mm	地表水向地下水 补给量/mm	地下水向地表水 净补给量/mm	地下水补给地表 水面积/km ²	地表水补给地下 水面积/km ²
2016	1 807.70	-194.17	97.15	-97.02	34.33	21.00
2017	1 464.80	-157.34	66.54	-90.80	33.06	22.27
2018	1 226.90	-148.97	64.32	-84.65	31.84	23.49
2019	743.00	-136.90	59.45	-77.45	31.66	23.67
年均	1 310.60	-161.65	71.87	-87.48	32.72	22.61

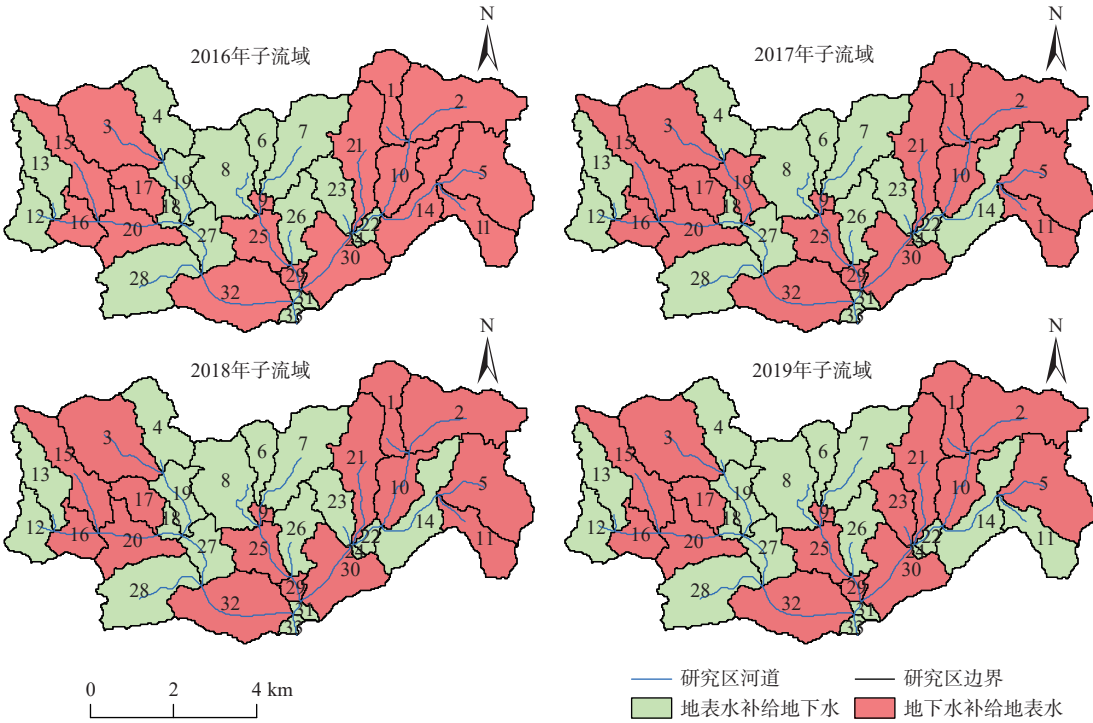


图 7 研究区各子流域地表水-地下水补给关系

Fig. 7 Relationship between surface and groundwater recharge in each sub-basin of the study area

水补给地下水区域的高程,由于西部、东部山区地形坡度较大,地表水与地下水之间水力梯度大,是山谷型流域地表水与地下水交互作用强烈的原因。

表 4 研究区地表水-地下水补给地形高程

Table 4 Topographic elevation of surface-groundwater recharge in the study area

年份	地下水补给 地表水最小 高程/m	地下水补给 地表水最大 高程/m	地表水补给 地下水最小 高程/m	地表水补给 地下水最大 高程/m
2016	48.41	225.88	47.50	171.31
2017	48.35	222.12	47.45	175.31
2018	48.63	227.63	47.35	172.88
2019	47.44	214.25	48.47	185.47
年均	48.21	222.47	47.69	176.24

北山水库流域共分为东、中、西 3 条主要支流,表 5 为 3 条支流 2016—2019 年地表水-地下水交互流量,西部支流、东部支流整体表现为地下水补给地表

水,平均净补给量为 3 039.53 mm 和 8 431.65 m,分别占区域地下水对地表水补给总量的 28.8% 和 79.8%,中部支流地表水补给地下水,年均净补给量为 910.11 m,地下水的补给率逆差为 8.6%。

表 5 各支流地表水-地下水年际交换量

Table 5 Annual surface-groundwater exchange capacity of tributaries

年份	西部支流/mm	中部支流/mm	东部支流/mm	合计/mm
2016	-1 411.03	1 085.58	-3 586.80	-3 912.25
2017	-3 937.60	672.16	-10 498.98	-13 764.40
2018	-3 586.05	901.70	-10 144.49	-12 828.80
2019	-3 223.45	981.01	-9 496.33	-11 738.80
年均	-3 039.53	910.11	-8 431.65	-10 561.10

3.2 北山流域水量均衡分析

北山水库流域模拟期月均水均衡量见图 8, 年际水均衡量见表 6。其中地表水资源量(W_{ATER})均衡项包

括地表径流量(S_{URQ})、河流侧向补给量(L_{ATQ})、地下水对地表水补给量(G_{WQ})、地表水对地下水补给量(S_{WGW})、地下水资源量(G_{WSTOR})均衡项包括地下水补给量(R_{ECH})、地表水向地下水补给量(S_{WGW})、地下水向地表水补给量(G_{WQ})、含水层渗漏量(G_{WLE}),均衡公式为:

$$W_{ATER} = S_{URQ} + L_{ATQ} + G_{WQ} - S_{WGW} \tag{4}$$
$$G_{WSTOR} = R_{ECH} + S_{WGW} + S_{WGW} - G_{WQ} - G_{WLE} \tag{5}$$

2016 年 1 月—2020 年 9 月年均降水量为 1 243.48 mm,

年均地表径流量为 653.22 mm,地下水向地表水的年均补给量为 148.84 mm,地表水向地下水的年均补给量为 67.37 mm,年均地下水储量为 13 764.05 mm,年均地表水资源量为 474.10 mm,年均河流侧向补给量为 78.89 mm。地表水的主要补给来源为降水产流和地下水补给;地下水的主要补给来源为降水入渗补给,主要排泄方式是向地表水排泄。地下水对地表水的净补给量占到了河道总水量的近 10%,是十分重要的组成部分(表 6)。

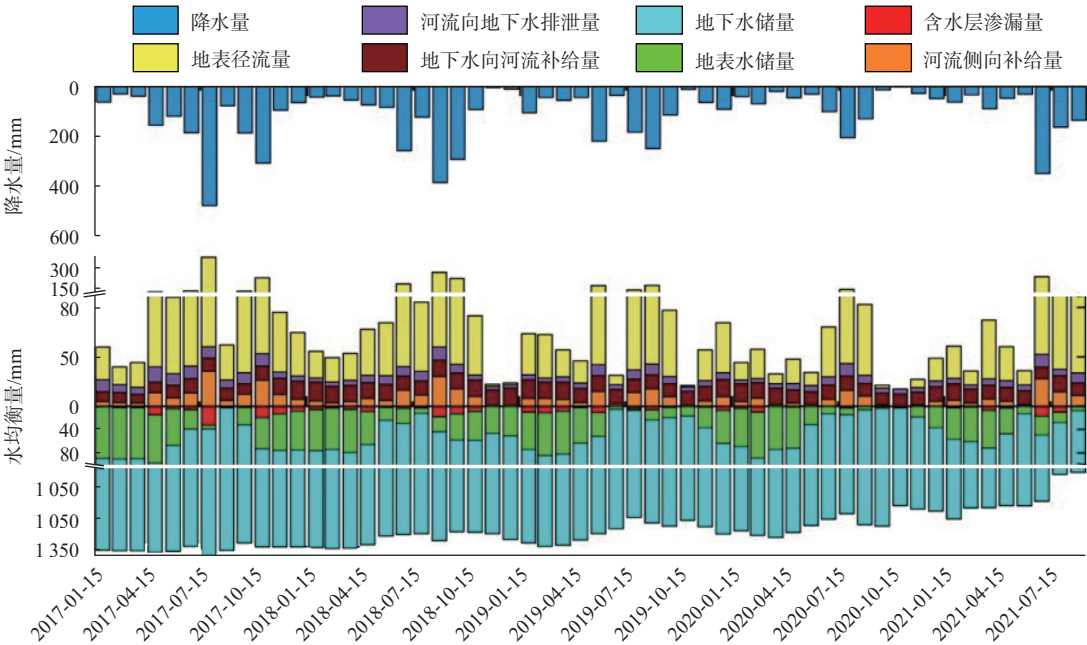


图 8 模拟期月均水均衡量

Fig. 8 Monthly average water balance in the simulation period

表 6 模拟期年际水均衡量

Table 6 Inter-annual average water balance in the simulation period

年份	降水量 /mm	地表径 流量/mm	地下水向地表水 补给量/mm	地表水向地下水 补给量/mm	地下水储量 /mm	地表水储量 /mm	河流侧向 补给量/mm	含水层 渗漏量/mm
2016	1 807.7	1 047.97	194.17	97.15	13 304.95	655.76	116.39	113.87
2017	1 464.8	813.2	157.34	66.54	14 220.41	539.44	90.45	78.97
2018	1 226.9	619.62	148.97	64.32	14 758.89	459.66	80.23	70.34
2019	743.00	309.13	136.90	59.45	15 078.01	408.13	48.75	24.92
2020	975.00	476.18	97.62	49.41	11 457.97	307.52	63.62	47.01
年均	1 243.48	653.22	147.00	67.37	13 764.05	474.10	78.89	67.02

4 结论与展望

(1)从总量均衡角度北山水库流域呈现出地下水补给地表水的规律,但存在时空差异性。

(2)2016—2020 年北山水库流域地下水对地表水的净补给量与研究区降水量呈正相关关系,随着年际降水量的减少,地下水补给地表水区域的补给面积、

补给速率地下水向地表水的净补给量逐年减少逐年降低。

(3)流域地下水对河道净补给量的贡献率为 8.72%,研究区西北部、东北部山区以及南部北山水库附近地区主要表现为地下水补给地表水,其余地区主要表现为地表水补给地下水。

由于流域地表水径流量和地下水水位监测资料

相对有限, SWAT-MODFLOW 耦合模型考虑了地表水和地下水水动力交互的物理机制, 能够刻画山谷型小流域地表水与地下水时空交互过程和流量。然而耦合模型未考虑包气带非饱和入渗补给过程, 后续研究将尝试 SWAT 和 MODFLOW-SURFACT 耦合, 实现流域地表水-土壤水-地下水动力过程的耦合模拟。

参考文献 (References) :

- [1] 周铮, 吴剑锋, 杨蕴, 等. 基于 SWAT 模型的北山水库流域地表径流模拟 [J]. 南水北调与水利科技, 2020, 18(1): 66 – 73. [ZHOU Zheng, WU Jianfeng, YANG Yun, et al. Surface runoff simulation based on SWAT model in Beishan Reservoir watershed[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(1): 66 – 73. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 李文鹏. 对地表水资源与地下水资源重复量的认识与水资源开发利用理念探讨 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(1): 1 – 2. [LI Wenpeng. Understanding of the duplication of surface water resources and groundwater resources and discussion on the concept of water resources development and utilization[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(1): 1 – 2. (in Chinese)]
- [3] 梅其岳, 吴世明. 山谷型填埋及堆体边坡稳定分析 [J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 375 – 378. [MEI Qiyue, WU Shiming. Valley landfill and stability analysis of pile slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(3): 375 – 378. (in Chinese)]
- [4] GILLI E, MANGAN C, MUDRY J. Hydrogeology - objectives, methods, applications[M]. Enfield: Science Publishers, 2012.
- [5] NONNER J C. Introduction to hydrogeology[M]. Leiden: Taylor & Francis, 2002.
- [6] 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. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 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.
- [8] 孔俊, 宋志尧, 赵红军. 基于扩展型浅水方程的地表水与地下水整体数值模型 [J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2010, 25(4): 460 – 468. [KONG Jun, SONG Zhiyao, ZHAO Hongjun. Integrated surface and subsurface flow model based on extended shallow water equations[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2010, 25(4): 460 – 468. (in Chinese with English abstract)]
- [9] MARKSTROM S L, NISWONGER R G, REGAN R S, et al. GSFLOW-coupled ground-water and surface-water flow model based on the integration of the precipitation-runoff modeling system (PRMS) and the modular ground-water flow model (MODFLOW-2005) [J]. US Geological Survey Techniques and Methods, 2008, 6: 240.
- [10] CAMPORESE M, PANICONI C, PUTTI M, et al. Surface-subsurface flow modeling with path-based runoff routing, boundary condition-based coupling, and assimilation of multisource observation data[J]. Water Resources Research, 2010, 46(2): e2008wr007536.
- [11] 崔素芳. 变化环境下大沽河流域地表水—地下水联合模拟与预测 [D]. 济南: 山东师范大学, 2015. [CUI Sufang. Joint simulation and prediction of surface water and groundwater in Dagu River basin under changing environment[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 余钟波, 李敏娟, 刘芸辰, 等. 基于氡同位素的河水与地下水水力交换研究 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 8 – 13. [YU Zhongbo, LI Minjuan, LIU Yunchen, et al. Study on hydraulic exchange of river water and groundwater based on radon isotope[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(1): 8 – 13. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 祁晓凡, 李文鹏, 崔虎群, 等. 黑河流域中游盆地地表水与地下水转化机制研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(3): 29 – 43. [QI Xiaofan, LI Wenpeng, CUI Huqun, et al. Study on the conversion mechanism of surface water and groundwater in the middle reaches of the Heihe River Basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(3): 29 – 43. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 张多纯, 张幼宽. GSFLOW 在沙颍河流域地表水与地下水联合模拟的应用 [J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(2): 1 – 9. [ZHANG Duochun, ZHANG Youkuan. Application of GSFLOW to a coupled surface water and groundwater model for Shaying River Basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(2): 1 – 9. (in Chinese with English abstract)]

- [15] 刘文冲,赵良杰,崔亚莉,等.基于 SWAT-MODFLOW 地表-地下水耦合模型的结构与应用研究[J].[中国岩溶](#), 2023, 42(6): 1131 – 1139. [LIU Wenchong, ZHAO Liangjie, CUI Yali, et al. Structure and application of SWAT-MODFLOW coupling model for surface-groundwater[J]. [Carsologica Sinica](#), 2023, 42(6): 1131 – 1139. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 郑丽,金鑫,金彦香,等.高寒内陆河流域植被覆盖增加对地下水补给的影响[J].[生态学报](#), 2023, 43(1): 140 – 152. [ZHENG Li, JIN Xin, JIN Yanxiang, et al. Impacts of the increasing vegetation coverage on groundwater recharge in an alpine and arid endorheic river watershed[J]. [Acta Ecologica Sinica](#), 2023, 43(1): 140 – 152. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 傅笛,金鑫,金彦香,等.基于 SWAT-MODFLOW 耦合模型的巴音河中游泽令沟盆地地表水-地下水转换关系研究[J].[地理科学](#), 2022, 42(6): 1124 – 1132. [FU Di, JIN Xin, JIN Yanxiang, et al. Modelling of the surface-ground water exchange yield in zelinggou basin, middle reaches of the bayin river based on SWAT-MODFLOW coupled model[J]. [Scientia Geographica Sinica](#), 2022, 42(6): 1124 – 1132. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 李永坤,薛联青,邸苏闯,等.基于 Infoworks ICM 模型的典型海绵措施径流减控效果评估[J].[河海大学学报\(自然科学版\)](#), 2020, 48(5): 398 – 405. [LI Yongkun, XUE Lianqing, DI Suchuang, et al. Evaluation of runoff reduction effect of typical sponge measures based on Infoworks ICM model[J]. [Journal of Hohai University \(Natural Sciences\)](#), 2020, 48(5): 398 – 405. (in Chinese with English abstract)]
- [19] BAILEY R T, WIBLE T C, ARABI M, et al. Assessing regional-scale spatio-temporal patterns of groundwater-surface water interactions using a coupled SWAT-MODFLOW model[J]. [Hydrological Processes](#), 2016, 30(23): 4420 – 4433.
- [20] GASSMAN P W, SADEGHI A M, SRINIVASAN R. Applications of the SWAT model special section: Overview and insights[J]. [Journal of Environmental Quality](#), 2014, 43(1): 1 – 8.
- [21] GASSMAN P W, REYES M R, GREEN C H, et al. The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions[J]. [Transactions of the ASABE](#), 2007, 50(4): 1211 – 1250.
- [22] 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 groundwater balance analysis[J]. [South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology](#), 2020, 18(6): 176 – 183. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 刘路广,崔远来.灌区地表水—地下水耦合模型的构建[J].[水利学报](#), 2012, 43(7): 826 – 833. [LIU Luguang, CUI Yuanlai. Construction of integrated surface water and groundwater model for irrigation area[J]. [Journal of Hydraulic Engineering](#), 2012, 43(7): 826 – 833. (in Chinese with English abstract)]
- [24] WEI X L, BAILEY R T, RECORDS R M, et al. Comprehensive simulation of nitrate transport in coupled surface-subsurface hydrologic systems using the linked SWAT-MODFLOW-RT3D model[J]. [Environmental Modelling & Software](#), 2019, 122: 104242.
- [25] 郜会彩,肖玉福,胡云进,等.基于 GSFLOW 的镜湖湿地地表水与地下水耦合数值模拟[J].[水文地质工程地质](#), 2022, 49(3): 182 – 191. [GAO Huicai, XIAO Yufu, HU Yunjin, et al. Numerical simulation of coupling surface water and groundwater based on GSFLOW for the Jinghu Wetland[J]. [Hydrogeology & Engineering Geology](#), 2022, 49(3): 182 – 191. (in Chinese with English abstract)]
- [26] GOWDA P H, MULLA D J, DESMOND E D, et al. ADAPT: Model use, calibration, and validation[J]. [Transactions of the ASABE](#), 2012, 55(4): 1345 – 1352.

编辑:张若琳