

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.03.002

塔里木河干流地表水与地下水耦合模拟

薛联青¹,魏卿¹,魏光辉²

(1. 河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098; 2. 新疆塔里木河流域管理局,新疆 库尔勒 841000)

摘要: 基于流域水资源管理需求,揭示塔里木河地表水与地下水转化关系,以更好地发挥区域水资源整体性功能,采用 HSPF-MODFLOW 耦合模型对塔里木河流域进行日径流模拟,并选用纳什系数 E_{ns} 、确定性系数 R^2 、均方根误差 σ 对模拟结果进行率定,以明晰大气降水-地表水-地下水转化规律。结果表明:率定期和验证期地表水模拟纳什系数均大于 0.7,对长期连续径流模拟效果较好;地下水位模拟随补给量变化与实测值基本一致,随着干流下游间歇性输水的延续,下游整体地下水位明显回升,但生态走廊以下河段抬升幅度较小,2004 年下游地下水年平均埋深约 6.21 m,而在规划年预计达到 4.73 m;耦合模型能较为准确地模拟地表径流和地下水动态变化过程,对水资源联合评价与综合管理具有重要意义。

关键词: HSPF-MODFLOW 耦合模型;率定分析;水循环;径流模拟;地表水;地下水;塔里木河;纳什系数

中图分类号: TV121 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2019)03-0195-07

Coupled simulation of surface water and groundwater in the main stream of Tarim River

XUE Lianqing¹, WEI Qing¹, WEI Guanghui²

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Xinjiang Tarim River Basin Management Bureau, Korla 841000, China)

Abstract: Based on the needs of water resources management in the Tarim River Basin, the relationship between surface water and groundwater conversion was revealed to better exert the overall function of regional water resources. Using the HSPF-MODFLOW model, daily runoff process simulation was carried out in the basin, and the Nash coefficient E_{ns} , the deterministic coefficient R^2 and the root mean square error σ were selected to determine the simulation results. Under changing conditions, the atmospheric precipitation-surface water-groundwater conversion law was clarified. The results show that the simulated Nash coefficients of surface water in the calibration period and the verification period were both greater than 0.7, and the simulation results of long-term continuous runoff were good as well. The simulated variation of groundwater level with the recharged quantity was basically consistent with the measured value. With the continuation of intermittent ecological water conveyance downstream of the main stream, the groundwater level in the lower reaches has risen remarkably, but the lower section of the ecological corridor has a small uplift. In 2004, the average groundwater depth of downstream groundwater was about 6.21 m, and it was expected to reach 4.73 m in the planning year. The coupled model can accurately simulate the process of surface runoff and groundwater dynamic change, which is significant for the joint evaluation and comprehensive management of water resources.

Key words: HSPF-MODFLOW coupled model; calibration analysis; water cycle; runoff simulation; surface water; groundwater; Tarim River; Nash coefficients

塔里木河是我国最大的内陆河,战略地位突出,掌握其地表水与地下水交互规律,可提高区域水资源利用效率。陆地蒸散发、河道水流等地表水文过程和地下水运移过程共同构成了流域水文循环系统^[1-2]。卢小

基金项目: 国家自然科学基金(51779074,41371052);水利部公益性行业专项(201501059);国家重点研发计划(2017YFC0404304);江苏省水利科技项目(2017027);江苏省高校优秀中青年骨干教师和校长境外研修项目(苏教师[2015]35号)

作者简介: 薛联青(1973—),女,教授,博士,主要从事环境水文及生态水文研究。E-mail: lqxue@hhu.edu.cn

引用本文: 薛联青,魏卿,魏光辉.塔里木河干流地表水与地下水耦合模拟[J].河海大学学报(自然科学版),2019,47(3):195-201.

XUE Lianqing, WEI Qing, WEI Guanghui. Coupled simulation of surface water and groundwater in the main stream of Tarim River[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(3): 195-201.

慧等^[3]基于 MIKE SHE 模型在流域尺度上分析了降雨入渗补给地下水的滞后效应,指出不同埋深条件下,地下水补给峰值滞后时间存在一定的差异;Hughes 等^[4]采用地表水路径(surface water routing, SWR)代码耦合 MODFLOW 模型,分析地下水流动过程,解释了水面梯度引起地表水流量变化的原因;Heydari 等^[5]采用模拟优化 SO(service-oriented)建模方法和人工神经网络优化地表水和地下水资源配置,并针对用水需求提出目标方案;朱金峰等^[6]利用水资源分析管理工具 WEAP(water evaluation and planning)和 MODFLOW 模型,建立了黑河流域地表水地下水耦合模型,得出人类活动和出山口径流共同影响下游径流过程的结论;张浩佳等^[7]应用 GSFLOW(groundwater and surface-water flow)模型对干旱区地表水地下水进行了耦合模拟。独立型地下水模型将河流简化为一维稳定流,不能真实刻画地下水的水力特征,而基于陆地水文学角度的地表水模型,一般忽略了含水层对地表水的作用^[8-9]。地表水地下水相互转化规律研究较多,但在干旱区的研究较少,因此,有必要在变化环境下确定流域地表水地下水的转化及反馈作用机制,促进流域水资源管理。

本文基于塔里木河干流地表水地下水统一管理需求,采用美国国家环境保护局开发的 HSPF(hydrological simulation program-fortran)模型和 Visual MODFLOW 模型对流域水循环过程进行耦合模拟^[10-12],在日时间尺度模拟流域地表径流,并基于 GIS 平台进行网格空间耦合,利用 2001—2011 年的实测地下水埋深数据进行验证分析,预测未来变化趋势,从机理上研究该流域水循环规律,验证该模型在干旱区的适用性。

1 研究区概况

塔里木河发源于天山山脉,位于东经 73°10′~94°05′、北纬 34°55′~43°08′之间,全长 2 179 km,为“四源一干”格局,总面积 19.8 万 km²,穿过塔克拉玛干沙漠,最后汇集于台特玛湖。流域总人口 902 万,四周环山,属暖温带极端干旱气候,全流域多年平均降水量为 116.8 mm,冬夏昼夜温差大。由于上中游的无序水土开发,致使塔里木河流域生态条件逐渐恶化,严重影响了流域的经济发展。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据资料

研究采用数据包括 30 m×30 m 的 DEM 数据和 LUCC 数据,干流及各支流主要站点的气象资料(中国气象科学数据共享服务网),包括 2001—2011 年的 20 个气象站逐日降雨、蒸发量数据,日平均温度、最高温度及最低温度、平均风速和日照时间等。水文数据采用 2001—2011 年的流域各水文站的逐日实测径流资料,地下水资料为干流区 2004—2017 年地下水埋深数据。

2.2 研究方法

以 HSPF 模型划分子流域,利用 MODFLOW 模型离散有限差分网格,地下水位是两者的动态连接线,在时间尺度上,HSPF 模型为短时段(小时、日),MODFLOW 模型为长时段(多日、月),两者采用滞后演算法逐步耦合。将 HSPF 模型计算的地下水补给量和潜水蒸散量作为 MODFLOW 模型的输入,基于水量平衡逐步汇流演算,把 HSPF 模拟的地下水补给量,利用入渗滞后性逐步补给计算。同时,地下水模拟历次输出的地下水位、基流量等通过叠置单元传递给 HSPF 模型,进而对蒸发、蒸腾等水文过程进行约束检验,反映流域时空特征。

HSPF 模型中地表水下渗量影响土壤水分的增加,计算采用修正 Horton 公式:

f_p(i,t)=f_c(i)+[f_0(i)-f_c(i)]e^{-kT_h(i,t)} \tag{1}

其中 T_h(i,t)=\frac{-\ln[1-\theta_r(i,t)]}{\alpha}

式中:f_p(i,t)——下渗能力;f_c(i)——土壤饱和时的最小下渗率;f_0(i)——初始最大下渗率;i——模拟单元;k——经验系数;T_h(i,t)——等价时间;\theta_r(i,t)——土壤相对湿度;\alpha——经验参数。

地下径流模拟采用圣维南连续方程和达西定律实现,计算公式为

\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial l} = r_g \\ f_g = D \frac{\partial H}{\partial l} = D \left(S_0 + \frac{\partial h}{\partial l} \right) \\ q = p_s f_g h \\ S_b = S_0 + \frac{d_1 - d_2}{\Delta l} \end{cases} \tag{2}

式中: h ——地下水深度; q ——单宽流量; r_g ——垂直净入流量; f_g ——土壤水分通量; H ——地下水水头值; l ——坡面长度; D ——土壤水力传导率; p_s ——土壤孔隙率; S_b ——基岩坡度; S_0 ——地表坡度; d_1 ——基岩水深; d_2 ——地表水深。

2.3 模型率定

在日时间尺度上,地表径流模拟和地下水位模拟效果选用纳什系数 E_{ns} (式(3))和确定性系数 R^2 进行校准和不确定性评价(式(4)), E_{ns} 反映拟合的程度, $E_{ns}>0.60$ 时结果可接受。 R^2 和 E_{ns} 越接近于 1,则率定效果越好。

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n (Q_{oj} - Q_{sj})^2}{\sum_{j=1}^n (Q_{oj} - \bar{Q}_{oj})^2}$$

(3)

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{j=1}^n (Q_{oj} - \bar{Q}_o)(Q_{sj} - \bar{Q}_s)}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (Q_{oj} - \bar{Q}_o)^2} \sqrt{\sum_{j=1}^n (Q_{sj} - \bar{Q}_s)^2}} \right]^2$$

(4)

式中: Q_{oj} ——第 j 时刻流量实测值; Q_{sj} ——第 j 时刻流量模拟值; $\bar{Q}_o$ ——流量实测值的总平均; $\bar{Q}_s$ ——流量模拟值的总平均; n ——时段总数。

地下水埋深率定选用均方根误差 σ ,它反映了测量数据偏离真实值的程度, σ 越小,模拟效果越好,其计算公式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (X_{oj} - X_{sj})^2}{m}}$$

(5)

式中: X_{oj} ——地下水埋深实测值; X_{sj} ——地下水埋深模拟值; m ——模拟总数。

3 流域地表水与地下水耦合模拟

3.1 HSPF 模型的率定及模拟

选取流域 2010 年的土地利用资料(图 1),将其分为 6 种土地利用类型,不同子流域的气象数据按照泰森多边形法分配,利用重分类的土地利用数据,构建 Win HSPF 工程。流域网络拓扑连接采用 D8 算法,利用 DEM 网格,按照最陡方向确定地表汇流方向、生成河道网。根据塔里木河 30 m 的 DEM 分辨率及计算效率,阈值面积设定为 7 500 m²,将大西海子水库作为流域出水口,利用流域自动划分工具,生成了 5 个片区及 39 个子流域,其中红色区域为 36 号子流域,各片区分布如图 2 所示^[13-15]。

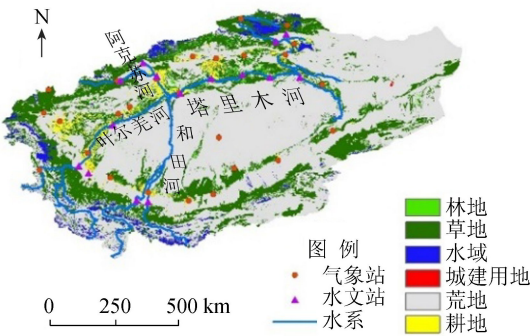


图 1 塔里木河流域 2010 年土地利用

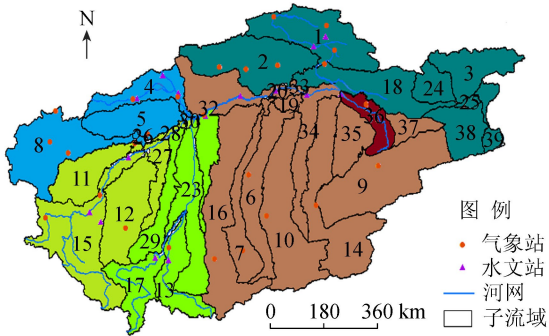


图 2 子流域空间划分

Fig.1 LUCC map of the Tarim River Basin in 2010

Fig.2 Sub-basin space division

选用扰动分析法^[14]进行灵敏度分析,运用 PEST(parameter estimation)进行参数的自动率定,基于 Levenberg-Marquardt 算法,实现目标函数的收敛,结合人工率定,进行模型参数优选,同时参考相关研究资料^[9-15],对 HSPF 模型主要参数进行率定及影响因素分析。通过参数估计和调整,将误差控制在允许的范围。基于水量平衡原理对径流模拟进行校准,改进模拟效果。

采用 Hamon PET 公式,结合气象站与雨量站的分配关系获取研究区的小时蒸发能力。模拟的率定期一般为 3~5 a,本文选取 2004—2007 年为率定期,2008—2011 年为验证期,对各子流域日径流过程模拟分析,根据源流及干流水文站逐日流量资料对模型进行验证,利用 Genscn 工具绘制沙里桂兰克、阿拉尔 2 个站点的率定期及验证期的日径流模拟效果,径流模拟效率及拟合情况如图 3 所示。受人类引水灌溉及渠道渗漏影响,在汛期(7—9 月)河道水量较大,非汛期(4—6 月)受灌溉引水影响径流量较小。模拟期内源流区人工绿洲规模扩大,灌溉引水量增加,进入干流的水量逐渐减少,人为影响强度逐渐增加^[16-17]。

图 4 为沙里桂兰克、阿拉尔站日径流模拟相关分析,可以看出径流模拟率定期的 E_{ns} 分别为 0.73 和 0.74,验证期为 0.75 和 0.76。 E_{ns} 反映计算值的拟合程度,取值介于 0~1 之间,0.9 以上为甲等,0.7~0.9 为乙等,0.5~0.7 为丙等,低于 0.5 时偏差过大,结果不适宜。率定期和验证期的日径流模拟值和实测值拟合较好,年均误差小于实测值的 15%, $R^2>0.70$,且 E_{ns} 为乙等以上。根据计算结果可以看出,HSPF 模型在塔里木河流域的径流模拟效果良好,可较为准确地模拟其水文规律演变趋势。

由图 4 可知,HSPF 模型适应于塔里木河流域的径流变化,率定期和验证期的模拟效果较为满意。分析塔里木河的径流特征,塔里木河干流的阿拉尔站来水主要为三源流组成,并且受到人类引水灌溉及渠道渗漏影响,在汛期(7—9 月)河道水量较大,非汛期(4—6 月)受灌溉引水影响河道径流量较小,其量值基本匹配。少数年份流量峰值偏大,可能与水库调蓄等人类活动有关,总体拟合度较高,可为大尺度流域径流模拟和气候响应研究提供借鉴。

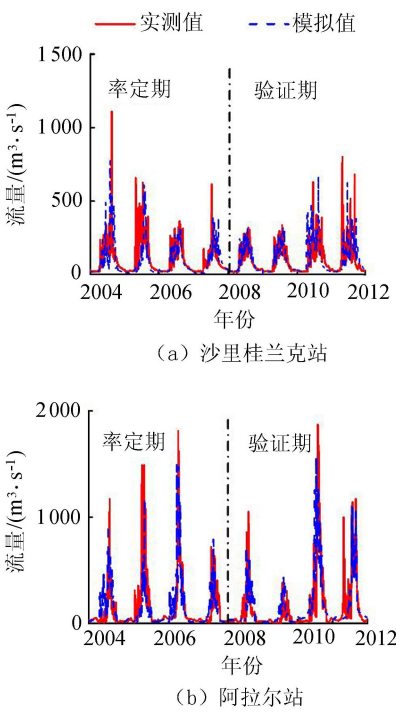


图 3 塔里木河流域日径流模拟对比
Fig.3 Comparison of the daily runoff and the simulated results in Tarim River Basin

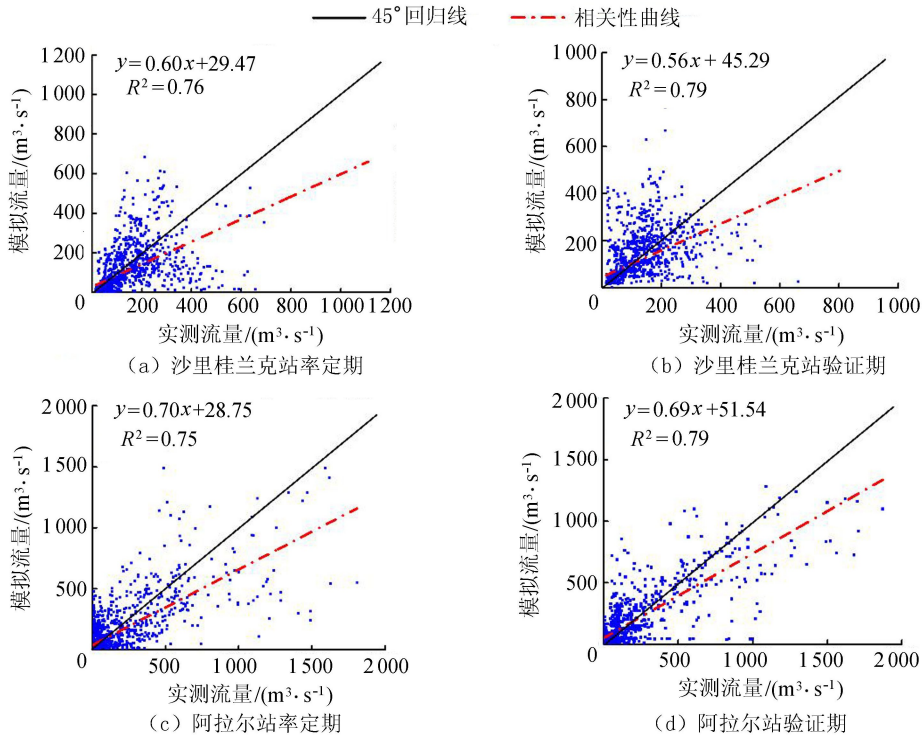


图 4 沙里桂兰克站、阿拉尔站日径流模拟相关分析
Fig.4 Correlation analysis of daily runoff and simulation at each station

3.2 地表水与地下水模型耦合

将 BASINS/HSPF 模型提取的流域边界及子流域作为 MODFLOW 模型计算区域,选取干流平原区,根据

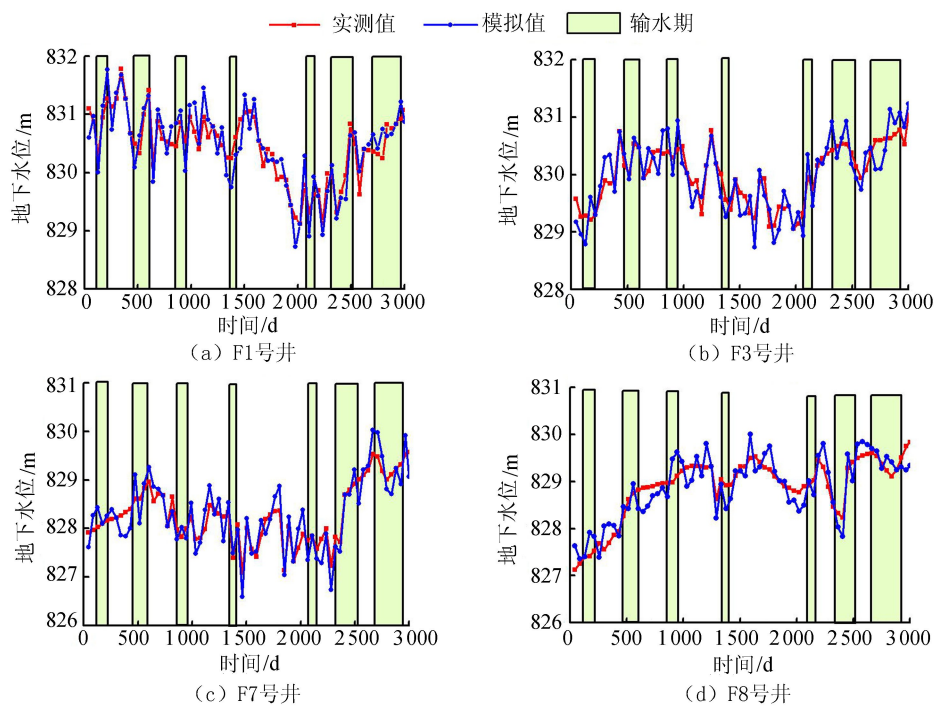


图 6 2004—2011 年各观测井模拟与实测地下水位过程

Fig. 6 Simulated and actual groundwater level of each well logged from 2004 to 2011

根据预测结果,随着 2000 年以来的间歇性输水延续,下游地下水位明显回升。模拟结果显示大西海子水库库区水位较高,两岸的地下水补给库区,地下水埋深离河 1 km 的范围内恢复到 4 m。英苏/老英苏断面地下水位未来年均上升 1.01 m,2004 年下游地下水年平均埋深约 6.21 m,而在规划年预计达到 4.73 m。输水期水位上升明显,随时间延长,水位上升渐趋于稳定。空间上,地下水位表现为以输水河道向两侧逐渐减弱,不同地区的地下水位也存在一定差异。下游上段灌区由于引水灌溉,地下水埋深 1.2 ~ 3.0 m,植被覆盖度较高。但生态走廊以下河段由于河道长期断流和土壤风蚀作用加强,地下水位抬升幅度较小。

4 结 论

- a. 在 BASINS 平台下将塔里木河流域划分为 39 个水文响应单元,对其进行日径流过程模拟,率定期和验证期地表水模拟 E_{ms} 均大于 0.7,属乙等以上,HSPF 模型对该流域地表水径流过程模拟效果较好。
- b. 基于水量平衡原理,建立塔里木河干流地表水地下水耦合模型,将其按照 5 km×5 km 网格离散,共划分为 53 行,135 列,共计 1 587 个活动单元,利用监测资料验证分析,计算的地下水位随补给量变化与实测值基本一致,具有较好的适用性。
- c. 2000 年以来的间歇性输水延续,使得干流下游地下水位明显回升,但生态走廊以下河段地下水位抬升幅度较小。规划年英苏断面地下水埋深预计达到 4.73 m。地下水位沿河道向两侧逐渐减弱,后期需加强生态走廊保护,合理控制上中游的农业规模,增加下游的来水量。
- d. 需根据下游地下水埋深分布、生态输水条件,以水权管理为核心,控制河势变化,充分利用大西海子水库,恢复生态修复区的地下水位,维系流域整体生态平衡。

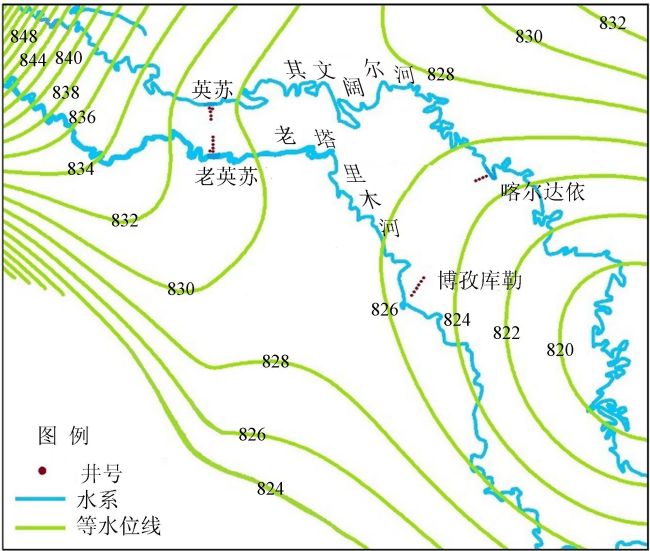


图 7 规划年 36 号子流域地下水等水位线 (单位:m)

Fig. 7 Groundwater level of the 36th subbasin in the planning year (units: m)

参考文献:

- [1] 凌敏华, 陈喜, 程勤波, 等. 地表水与地下水耦合模型研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(4):79-84. (LING Minhua, CHEN Xi, CHENG Qinbo, et al. Research progress on coupling model of surface water and groundwater[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(4): 79-84. (in Chinese))
- [2] 朱金峰, 刘悦忆, 章树安, 等. 地表水与地下水相互作用研究进展[J]. 中国环境科学, 2017, 37(8):3002-3010. (ZHU Jinfeng, LIU Yueyi, ZHANG Shuan, et al. Research progress on the interaction between surface water and groundwater[J]. China Environmental Science, 2017, 37(8): 3002-3010. (in Chinese))
- [3] 卢小慧, 李奇龙. 基于 MIKE SHE 模型的流域地下水水文响应[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(1):11-15. (LU Xiaohui, LI Qilong. Groundwater hydrological response based on MIKE SHE model[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(1): 11-15. (in Chinese))
- [4] HUGHES J D, LANGEVIN C D, WHITE J T. MODFLOW-based coupled surface water routing and groundwater-flow simulation [J]. Ground Water, 2015, 53(3):452-463.
- [5] HEYDARI F, SAGHAFIAN B, DELAVAR M. Coupled quantity-quality simulation-optimization model for conjunctive surface-groundwater use[J]. Water Resources Management, 2016, 30(12):1-17.
- [6] 朱金峰, 王忠静, 郑航, 等. 黑河流域中下游全境地表-地下水耦合模型与应用[J]. 中国环境科学, 2015, 35(9):2820-2826. (ZHU Jinfeng, WANG Zhongjing, ZHENG Hang, et al. Surface-groundwater coupling model and its application in the middle and lower reaches of the Heihe River[J]. China Environmental Science, 2015, 35(9): 2820-2826. (in Chinese))
- [7] 张浩佳, 吴剑锋, 林锦, 等. 基于 GSFLOW 的地下水-地表水耦合模拟与分析[J]. 工程勘察, 2015, 43(5):34-38. (ZHANG Haojia, WU Jianfeng, LIN Jin, et al. Simulation and analysis of groundwater-surface water coupling based on GSFLOW[J]. Engineering Investigation, 2015, 43(5): 34-38. (in Chinese))
- [8] 初京刚, 张弛, 周惠成. SWAT 与 MODFLOW 模型耦合的接口及框架结构研究及应用[J]. 地理科学进展, 2011, 30(3):335-342. (CHU Jinggang, ZHANG Chi, ZHOU Huicheng. Research and application of interface and frame structure of SWAT and MODFLOW model coupling[J]. Process in Geography, 2011, 30(3): 335-342. (in Chinese))
- [9] 杨博, 陈莹, 陈兴伟, 等. 基于 PEST 的 HSPF 模型径流模拟优化[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(2):9-16. (YANG Bo, CHEN Ying, CHEN Xingwei, et al. Runoff simulation optimization of HSPF model based on PEST[J]. China Soil and Water Conservation Science, 2018, 16(2):9-16. (in Chinese))
- [10] BICKNELL B R, IMHOFF J C, KITTLE J L. Hydrological simulation program-FORTRAN (HSPF): user's manual for version 12 [M]. Washington, D. C.: US Environmental Protection Agency, 2001.
- [11] GEURINK J S, ADAMS A, ROSS M A. Water management advantages of comprehensive representation of wetlands in an integrated HSPF-Modflow hydrologic model [M]. Tallahassee:World Environmental and Water Resources Congress, 2007.
- [12] ROSS M, GEURINK J, SAID A, et al. Evapotranspiration conceptualization in the HSPF-MODFLOW integrated models [J]. Jawa Journal of the American Water Resources Association, 2010, 41(5):1013-1025.
- [13] 薛联青, 张卉, 张洛晨, 等. 塔里木灌区引水前后环境流特性变化[J]. 水资源保护, 2017, 33(3):31-37. (XUE Lianqing, ZHANG Hui, ZHANG Luo Chen, et al. Changes in characteristics of environmental flow in Tarim irrigation area before and after water diversion[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(3):31-37. (in Chinese))
- [14] 张丽红. HSPF 模型径流参数优化及不确定性研究[D]. 杭州:浙江大学, 2016.
- [15] 董延军. HSPF 流域模型原理与模拟应用[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2014.
- [16] YANG Fan, XUE Lianqing, WEI Guanghui. Study on the dominant causes of streamflow alteration and effects of the current water diversion in the Tarim River Basin, China[J]. Hydrological Processes, 2018, 32(22): 3391-3401.
- [17] 杨帆, 薛联青, 张洛晨, 等. 塔里木河生态水流形势分析及其适应性利用[J]. 水资源保护, 2018, 34(5):41-49. (YANG Fan, XUE Lianqing, ZHANG Luo Chen, et al. Analysis of ecological water regime in Tarim River and its adaptive utilization [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(5):41-49. (in Chinese))
- [18] 努热曼古丽·图尔荪. 生态输水对塔里木河下游地下水变化及胡杨生长的影响[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2012.
- [19] HIBI Y, TOMIGASHI A, HIROSE M. Evaluation of a numerical simulation model for a system coupling atmospheric gas, surface water and unsaturated or saturated porous medium [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2015, 183:121-134.
- [20] 刘海军. 塔里木河下游输水条件下的地下水位动态变化与模拟[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2010.