DOI: 10.5846/stxb202207212098

郑丽,金鑫,金彦香,傅笛,翟婧雅.高寒内陆河流域植被覆盖增加对地下水补给的影响.生态学报,2023,43(1):140-152. Zheng L, Jin X, Jin Y X, Fu D, Zhai J Y.Impacts of the increasing vegetation coverage on groundwater recharge in an alpine and arid endorheic river watershed.Acta Ecologica Sinica,2023,43(1):140-152.

高寒内陆河流域植被覆盖增加对地下水补给的影响

郑 丽^{1,2},金 鑫^{1,2,3,*},金彦香^{1,2,3},傅 笛^{1,2},翟婧雅^{1,2}

1青海师范大学地理科学学院,西宁 810016

2 青海省自然地理与环境过程重点实验室,西宁 810016

3 高原科学与可持续发展研究院,西宁 810016

摘要:地下水是干旱区内陆河流域的主要基础性资源,对流域生态安全、可持续发展等具有重要意义。干旱/半干旱区的地下水补给比湿润地区更易受到地表覆盖条件的影响。为揭示干旱区内陆河流域植被覆盖增加对地下水补给的影响,以巴音河中下游为例,针对土壤和水评价工具(SWAT)模型未有效考虑降水、地形等因素对植被覆盖影响的缺陷,改进 SWAT 模型,采用全球地表卫星叶面积指数(GLASS LAI)数据代替其 LAI 计算模块,再结合 SWAT 土地利用更新模块,准确刻画区域植被覆盖变化。将改进后的 SWAT 模型与模块化有限拆分地下水流耦合(MODFLOW)模型耦合,准确模拟并分析植被覆盖增加对流域地下水补给的影响。结果表明:基于植被动态变化的土壤和水评价工具与模块化有限拆分地下水流耦合模型(DVSWAT-MODFLOW) 模型的月蒸散发及月地下水位模拟效果较好;巴音河中下游 2019 年林地及草地面积以及 LAI 较 2001 年明显增加;2019 年植被覆盖情况对应的年际及月际尺度地下水补给量较 2001 年分别减少了 6.1—26.52 mm 以及 0—15.03 mm;植被覆盖增加对年际尺度地下水补给量的影响强弱在一定程度上取决于年降水量,对月际尺度地下水补给量影响较强的月份集中于植物生长旺盛且降水较多时期。

关键词:SWAT; MODFLOW; LAI; 模型改进; 地下水补给量

Impacts of the increasing vegetation coverage on groundwater recharge in an alpine and arid endorheic river watershed

ZHENG Li^{1,2}, JIN Xin^{1,2,3,*}, JIN Yanxiang^{1,2,3}, FU Di^{1,2}, ZHAI Jingya^{1,2}

1 School of the Geographical Science, Qinghai Normal University, Xining 810016, China

2 Key Laboratory of Physical Geography and Environmental Processes, Xining 810016, China

3 Academy of Plateau Science and Sustainability, Xining 810016, China

Abstract: The groundwater is one of the most important basic resources in arid land. The groundwater recharge is easier to be affected by vegetation coverage in the arid and semi-arid areas than the wet areas. Bayin River Basin, a typical alpine and arid endorheic river watershed is located in the northeast of the Qaidam Basin. In the past 20 years, because of the warmer and more humid climate and human activities, the vegetation coverage condition of the watershed was becoming better. Calculation of the groundwater recharge in endorheic watershed is difficult. Soil and Water Assessment Tool (SWAT) is one of the most important tools that can simulate the watershed hydrological processes and its impact factors. However, it has considerable limitations in vegetation coverage and groundwater processes simulation. For the vegetation coverage simulation (leaf area index, LAI), it neglects the precipitation and terrain, which is important in arid land; For the groundwater simulation, it only is based on a simple linear mathematical formula without consideration of the physical processes. To better reveal the impacts of the vegetation coverage increasing on groundwater recharge in arid inland river,

收稿日期:2022-07-21; 采用日期:2022-10-24

基金项目:国家自然科学基金项目(42161020);青海省科技厅应用基础研究项目(2021-ZJ-705)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: jinx13@ lzu.edu.cn

this research modified the SWAT model by replacing the LAI module with Global Land Surface Satellite (GLASS) based on LAI. The land use/cover change of the Middle and Lower Reaches of the Bayin River was further considered to better simulate the vegetation dynamics. After that, the modified SWAT model (named Dynamic Vegetation SWAT, DVSWAT) was coupled with the MODFLOW (MODular finite difference groundwater FLOW model), a professional groundwater processes simulation model. The latest GLEAM (Global Land Evaporation Amsterdam Model) v3 based on monthly evapotranspiration data and the observed groundwater level data were used to calibrate the DVSWAT-MODFLOW. We further used the variable-controlling approach to analyze the impacts of the vegetation coverage increasing on groundwater recharge based on the simulation results of the calibrated DVSWAT-MODFLOW. The results showed that the performance of the DVSWAT-MODFLOW in modelling the monthly evapotranspiration was good, with the R² value of over 0.83, NSE value of over 0.68, and PBIAS value within -22%-22% for each subbasin. The performance of the DVSWAT-MODFLOW in modelling the monthly groundwater level was good as well, with the R^2 value of over 0.95 and absolute bias of below 1 m for each groundwater level observation well. The area of the forest land and grassland in the study area increased 5.41 times and 98.96%, respectively, in 2019 compared to 2001. In addition, the annually average LAI of the study in 2019 increased 28.83% than 2001. The yearly and monthly groundwater recharge reduced about 6.1-26.52 mm and 0-15.03 mm, respectively, under the impacts of the increased vegetation coverage. The influence of the increasing vegetation coverage on the annual groundwater recharge depends on the annual precipitation to a certain extent. The months with strong influence on the monthly groundwater recharge are concentrated in the period of vigorous plant growth and more precipitation.

Key Words: Soil and water assessment tools; Modular finite difference groundwater flow model; LAI; hydrological model modifying; groundwater recharge

地下水在干旱区内陆河流域水循环中占有主导地位,是自然系统中最重要的基础性资源之一^[1-3]。植被 是土壤和大气间水量交换的关键驱动因素,其通过降雨截留和消耗土壤水分等方式间接影响地下水的补给, 在地下水循环中具有重要作用^[4-5]。相关研究表明,在冰岛,当草地及荒地被人工林代替后,植被覆盖增加, 区域地下水补给量降低了 10%^[6]。在荷兰,当农田被林地代替后区域地下水补给量减少约 485 mm/a^[7]。 澳大利亚昆士兰州东南部部分流域的稀疏草地被稀疏林地替代后,地下水补给量将减少 25%;当稀疏草地被 茂密林地替代后,地下水补给量将减少 48%^[8]。我国黄土高原泾河流域的研究表明,平均森林覆盖率每增加 10%,将导致流域年地下水补给量低 11.1 mm^[9]。这些区域尺度的研究已经证实,植被覆盖增加对地下水补 给的影响非常显著。

一般来说,干旱/半干旱区的地下水补给比湿润地区更容易受到地表覆盖条件的影响^[10-11]。由于降水少 且季节性强、补给量通常很小等原因,干旱/半干旱区地下水补给量的估算具有挑战性,一般的土壤水资源平 衡法^[3]、水文资料分析法^[8]等难以适用。目前,水文模型因其可对自然界中复杂水循环过程近似描述和再 现,可作为区域植被变化之水文效应研究的有效手段^[12-14]。如SWAT(Soil and Water Assessment Tools)模型, 在我国干旱/半干旱区内陆河流域的水循环及其影响因素研究中具有广泛应用^[15-17]。区域植被覆盖的增加 或减少可能由人类活动导致的土地利用类型变化引起,也可能因气候变化导致的植被生长状态改变等因素引 起。SWAT 模型中的土地利用更新模块可在一定程度上表达土地利用类型变化情况^[10],但其缺乏对于其它 因素导致的植被覆盖度时空变异性的有效考虑:在 SWAT 模型中,叶面积指数(LAI)作为表征地表植被生长 状况、植被覆盖度等的重要指标,是连接植被与水循环的重要桥梁^[18]。但是,SWAT 仅基于温度计算 LAI,忽 略了降水、地形等因素。这在湿润的热带、亚热带地区水文过程模拟中被更多被关注^[19]。但在降水时空异质 性强、地形复杂的干旱区内陆河流域,这一问题被忽视。

基于卫星遥感的长时间序列 LAI 数据产品因能较好展示 LAI 的空间异质性、季节性变化等,在评估区域 植被生长状况、植被覆盖条件等方面具有重要应用。如,中分辨率成像光谱仪叶面积指数 MODIS(MODerateresolution Imaging Spectroradiometer) LAI^[20]、全球地表卫星叶面积指数 GLASS (Global Land Surface Satellite) LAI^[21]、全球长时间序列叶面积指数 GLOBMAP (Long-term Global Mapping) LAI^[22]等。这些产品在不同区域 的时空精度具有差异,且部分产品在中国西北部分区域存在空值区^[21-23]。相对来说,GLASS LAI 产品在中国 范围内具有相对较高的准确性^[21,23],并且具有较好的时空连续性和完整性^[21]。基于该数据集进行区域生态 -水文过程模拟更为可靠。

SWAT 模型仅采用简单的线性方程来表达地下径流变化与潜水面埋深变化速率之间的关系,无法真实表达流域地下水过程^[24]。利用成熟的地下水模型 MODFLOW 取代 SWAT 模型的地下水模块,二者通过同参变量的传输和反馈进行耦合,既发挥 SWAT 模型在作物生长、地表水模拟中的优势,又结合了 MODFLOW 对于地下水模拟的长处。土壤和水评价工具与模块化有限拆分地下水流耦合模型(SWAT-MODFLOW)耦合模型已在美国科罗拉多州南普拉特河流域^[25]、非洲林波波河流域^[26]、巴音河流域^[10,27]的地下水-地表水转换关系、地下水补给、地下水位预测等方面得到了应用且效果优于原始 SWAT 模型。

巴音河位于柴达木盆地东北缘,是盆地第四大内陆河。近年来,在人工植被恢复以及气候暖湿化背景下, 巴音河流域植被覆盖条件明显变好^[10]。本文为探究干旱区内陆河流域植被覆盖变化对地下水补给的影响, 以巴音河中下游为例,改进 SWAT 模型,采用 GLASS LAI 数据代替其 LAI 计算模块,再结合流域土地利用/覆 被类型变化,准确刻画区域植被覆盖度变化。将改进后的 SWAT 模型与 MODFLOW 模型耦合。在准确模拟 植被覆盖变化下流域地下水循环过程的基础上,基于控制变量法分析巴音河中下游地区植被覆盖变化对地下 水补给的影响。本研究可为干旱区内陆河流域生态环境保护与可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

巴音河位于青海省德令哈市,是柴达木盆地东北部最大的内陆河,也是德令哈市境内最大的河流。该河 流中下游段为德令哈市区北部黑石山水库以下到可鲁克湖、尕海湖入湖口以上的流域^[27],该流域中游段由北 向南穿过德令哈市市区,下游段由东向经郭里木、戈壁乡最终汇入克鲁克湖-托索湖湖区(图1)。巴音河出山 后河水大量下渗,河道径流量较少,部分河段河水全部潜入地下。气候寒冷、干旱,水资源短缺,日照时间长, 属于高原荒漠半荒漠气候,主要的土地覆盖类型为荒漠和草地^[28]。



图 1 研究区概况图 Fig.1 The study area

1.2 GLASS LAI 数据集

本文采用时空分辨率为 8 d/250 m 的最新 GLASS LAI v5 数据,时间跨度为 2001—2019 年。该数据集由 北京师范大学全球变化处理与分析中心(http://www.glass.umd.edu/Download.html)发布。该数据集采用了加 权线性组合的方式,首先将 MODIS LAI 和基于生物地球物理参数的叶面积指数(CYCLOPES LAI) 融合,产生 二者的融合 LAI^[20],再与经过预处理的中分辨率成像光谱仪/高级甚高分辨率辐射计(MODIS/AVHRR) 地 表反射率数据,建立广义回归神经网络训练样本,训练出地表反射率与 LAI 值的关系模型,最后将 MODIS/ AVHRR 地表反射率数据作为关系模型输入数据,得到全球长时间序列的 GLASS LAI 产品^[29]。使用该数据 之前进行了特异值去除并将有效值归为 0—10。

1.3 土地利用/覆被数据的获取

本研究基于携带专题制图仪的美国陆地卫星系列第五颗卫生 Landsat5 TM、携带陆地成像仪的美国陆地 卫星计划第8颗卫星 Landsat8 OLI、全球环境与安全监测计划的第二颗卫星(Sentinel-2A)影像数据获取巴音 河中下游 2001—2019 年土地利用/覆被数据。首先在研究区针对耕地、林地、草地、水体、城镇用地、裸地六种 地类开展野外调查。利用 Landsat5 TM(2011 年 11 月之前)、Landsat8 OLI(2013 年 4 月之后)、以及 Sentinel-2A(2015 年 8 月之后)影像数据,创建归一化植被指数(NDVI)、增强型植被指数(EVI)和归一化水体指数 (NDWI)时间序列数据集,结合野外调查结果,实现各地类光谱特征、植被指数特征、时空变化特征等特征提 取,进而利用随机森林算法对研究区五种地类进行分类。运用混淆矩阵对获得的土地利用/覆被数据进行精 度评价,其总体精度达到 94%,kappa 系数为 0.96。图 2 显示了本研究获取的 2001 年及 2019 年研究区土地利 用/覆被数据。





Fig.2 Land use/ land cover maps of the Middle and Lower Reaches of the Bayin River in year 2001 and 2019

1.4 SWAT 模型改进

本研究利用 GLASS LAI 代替原始 SWAT 模型基于理想叶面积发育模型计算的 LAI。过程如下:将基于 GLASS 数据集的 250 m 分辨率、8 d LAI 数据集,映射至 SWAT 模型每个基本计算单元(HRU) 上。由于 LAI 数据集与 HRU 的空间尺度不同,首先对二者进行空间叠加。叠加完成后,对于 1 个 HRU 包含多个网格的情况, 对所有网格的 LAI 值进行平均后,赋予相应的 HRU。由于 SWAT 模型模拟水文过程的时间步长为 1 d,故在 LAI 数据集与动态 HRU 完成对应后,对每个 HRU 上的 8 d LAI 数据进行插值,使其时间分辨率变为 1 d,从而实 现 GLASS LAI 与 SWAT 模型的耦合(如图 3)。生物量及流域产流、产沙等后续过程均基于改进后的作物生长模 块计算。由于改进后的 SWAT 模型更能有效刻画区域植被动态变化,故本研究将其命名为 DVSWAT。



图 3 GLASS LAI 与 SWAT -MODFLOW 模型的耦合 Fig.3 Coupling of the GLASS LAI and SWAT -MODFLOW

HRU:水文响应单元 Hydrologic response unit;GALSS:全球地表卫星 Global land surface satellite;LAI:叶面积指数 Leaf area index;SWAT:土壤 和水评价工具 Soil and water assessment tools;MODFLOW:模块化有限差分地下水流耦合模型 Modular finite difference groundwater flow model

1.5 DVSWAT - MODFLOW 模型及构建

通过 GIS 平台建立 SWAT 模型的基本计算单元与 MODFLOW 模型的基本计算单元之间的映射关系,然 后将每个 HRUs 分配到 MODFLOW 模型的相应网格单元上,将 DVSWAT 模型计算出的地下水补给量、蒸发量 等数值用来作为地下水模拟的边界条^[27]。同时,利用映射关系把 MODFLOW 模型所计算出的地下水排泄量 添加到 DVSWAT 模型的相应地表水计算单元中,以此来实现 DVSWAT 模型与 MODFLOW 模型之间的耦合 (图 3)^[30]。其中,由 DVSWAT 模型负责计算降水对地下水的直接补给以及灌溉对地下水的补给。由 DVSWAT 模型负责计算河水水位并结合 MODFLOW 模型的河流子模块计算河水渗漏对地下水的补给。

本文选取了德令哈站的逐日降水、温度、相对湿度、风速及太阳辐射数据作为 DVSWAT 模型输入数据,结合 30 m 分辨率的 DEM 数据(http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/)、全国 1:400 万土壤类型数据、2001、2010、2015、2019 年土地利用类型数据以及 2001—2019 年逐日 GLASS LAI 数据建立 DVSWAT 模型。土壤属性数据查阅 自《青海土壤》^[31]及《德令哈市志》^[32]。

采用研究区钻孔数据、地下水位观测数据、河网数据、数字高程模型(DEM)数据等建立 MODFLOW 模型, 建模方法主要参考已有研究^[27,33]。以巴音河中下游流域边界以及浅层含水层底板作为隔水边界,流域入口 及出口作为定水头边界,河网作为河流边界。将研究区概化为 250 m×250 m 的规则网格,全区共 251 行、272 列。本研究根据需要仅模拟浅层含水层地下水循环过程,且将浅层含水层概化为单层非均质各向同性,将地 下水运动概化为二维非稳定流^[27,33]。其中,给水度、渗透系数、河流渗透系数等参数主要参考已有研究^[33], 再结合研究区地下水位观测数据进行微调。 采用了基于遥感的全球陆地蒸散发阿姆斯特丹模型 GLEAMv3(最新)蒸散发数据(https://www.gleam. eu/)、地下水位观测数据对 DVSWAT-MODFLOW 模型进行校准。其中,GLEAM 数据集空间分辨率为 0.25°, 时间分辨率为 1 天。该数据集在中国区域内精度较高^[34],被广泛应用于水文模型校准及验证^[35-36],具有较 高可靠性。此外,利用决定系数(*R*²)、纳什系数(NSE)、误差百分数(PBIAS)、绝对误差(AE)评价模型的适 用性^[10,37]。

2 结果与讨论

2.1 巴音河中下游土地覆被类型变化

基于 2001 年和 2019 年土地利用/覆被数据(图 2)提取了研究区土地利用转移矩阵(表 1)。从 2001 年至 2019 年,土地覆被类型发生了明显变化。其中,草地、建设用地、林地和水体面积增加,2019 年建设用地、林地和水体面积约是 2001 年的 5.41 倍、2 倍和 2.35 倍,草地面积增加了 98.96%;裸地和耕地面积减少,分别减 少了 30.75%和 52.88%。本研究主要关注植被覆盖增加对流域地下水补给的影响。故将 2001 及 2019 年土地利用/覆被数据进行空间叠加,提取研究区植被恢复斑块,结果如图 4 所示。其中,草地恢复主要在流域北部 及东南部山区,林地恢复主要在流域中部农业区。

Table 1 Land use transfer matrix from year 2001 to 2019							
2001年	2019 年						
	草地	建设用地	耕地	林地	裸地	水体	总计
草地 Grassland	143.75	2.57	23.22	4.48	480.47	3.15	657.65
建设用地 Builtland	22.07	6.82	21.76	1.31	57.48	0.62	110.06
耕地 Farmland	2.12	1.65	42.49	0.80	6.60	0.04	53.72
林地 Forest land	5.67	1.00	9.17	1.39	22.02	0.09	39.33
裸地 Barren land	156.22	4.59	16.16	1.64	754.97	1.13	934.70
水体 Water	5.73	0.55	1.19	0.22	15.29	2.60	25.59
总计 Total	335.57	17.17	114.00	9.83	1336.83	7.64	1821.04





图 4 研究区植被恢复情况 Fig.4 Revegetation of the study area

2.2 巴音河中下游植被覆盖度时空变化

图 5显示了基于 GLASS LAI 数据集的 2001 年及 2019 年研究区 7 月平均 LAI 空间分布情况。从空间上

看,研究区北部高海拔山区、中部农业灌区、中南部地下水位高值区植被覆盖状况相对较好,这些区域 2019 年7月植被覆盖度明显高于 2001 年同期。2001 年研究区 7月(植物生长旺季)平均 LAI 值为 4.37,2019 年 7月 平均 LAI 值为 5.63,比 2001 年增加了 28.83%。这与巴音河流域人工植被恢复及气候暖湿化有关^[27,33]。





Fig.5 Distribution of the annual average LAI in the Middle and Lower Reaches of the Bayin River in year 2001 and 2019





NSE:纳什系数 Nash-Sutcliffe efficiency; PBIAS;误差百分数 Percent bias; R²: 拟合优度 Absolute error; ET: 蒸散发 Evapotranspiration

2.3 DVSWAT-MODFLOW 蒸散发模拟效果评价

巴音河流至中下游后大量渗漏,补给地下水。故河道径流量较小且无观测数据。基于河道径流数据的传 统参数校准方法难以适用。本研究基于 GLEAM v3 蒸散发数据集校准 DVSWAT-MODFLOW 模型蒸散发相关 参数。GLEAM v3 蒸散发数据集在资料缺乏区水文模型校准中具有重要应用^[33]。图 6 显示了 DVSWAT-MODFLOW 模型的月蒸散发模拟效果。各子流域 *R*²值在 0.83 以上,NSE 值在 0.68 以上,PBIAS 绝对值在 22%以内。可见模型对于月蒸散发的模拟效果较好^[38]。图 6 亦显示了 DVSWAT-MODFLOW 模型模拟的各子 流域多年平均蒸散发分布情况。流域下游子流域地下水位较高,年蒸散发量相对较大,超过 200 mm。个别子 流域年蒸发量超过 300 mm,这是相应子流域仅包含耕地且被大水漫灌所致。

2.4 DVSWAT-MODFLOW 地下水位模拟效果评价

图 7 显示了 DVSWAT-MODFLOW 模型月地下水位模拟效果。20 个地下水位观测井的空间分布较为均匀 (图 1)。流域南部观测井较为密集,月地下水位模拟效果相对优于其它区域,*R*²达到 0.95 以上,绝对误差 (AE)小于 0.35 m。1 号及 17 号观测井处绝对误差较大,接近 1 m。总体上来说,各观测井月地下水位模拟效



http://www.ecologica.cn

43 卷





Fig.7 The simulated and observed groundwater level in the Middle and Lower Reaches of the Bayin River

1—10 号观测井观测数据涵盖 2019 年各月;11 号观测井观测数据涵盖 2009—2011 年各月;12—14 号观测井观测数据涵盖 2013—2015 年各月;15 号观测井观测数据涵盖 2004—2005 年各月;16—20 号观测井观测数据涵盖 2001—2014 年各月

果较好。

2.5 植被覆盖增加对地下水补给的影响

图 8 显示了研究区不同地表植被覆盖类型对应的年平均地下水补给量。为剔除气象因素、坡度、土壤类 型等对地下水补给的影响,本研究对具有相同气象条件、土壤类型及坡度的 HRUs 所对应的土地覆被类型进 行了统计。在年平均降水量为 244.23 mm 的情况下,耕地对应的年平均蒸散发量、地下水补给量最大,分别为 393.12 mm 及 373.46 mm 这主要是由大水漫灌所致。裸地对应的年平均蒸发量为 178.14 mm,年平均地下水 补给量为 55.68 mm。林地对应的年平均蒸发量为 193.04 mm,年平均地下水补给量为 39.53 mm。草地对应的 年平均蒸发量为 179.79 mm,年平均地下水补给量为 50.14 mm。可见研究区地下水补给量耕地>裸地>草地 >林地。表明巴音河中下游耕地、裸地的大量减少和草 地的大面积增加使地下水补给量降低。

为探究巴音河中下游植被覆盖度增加对地下水补 给量的影响,本研究选取年平均 LAI 增加较明显的 26 号子流域为典型区(图 9),将 2001 年 LAI 与 2019 年 LAI 分别输入 DVSWAT-MODFLOW 模型。结果表明, 2001 年该典型区平均 LAI 在 0—0.48 之间,在年平均降 水量为 244.23 mm 的情况下,对应的年平均蒸散发量为 195.53 mm,对应的年平均地下水补给量为 38.14 mm。 2019 年该典型区平均 LAI 在 0—0.79 之间,在年平均降





水量为 244.23 mm 的情况下,对应的年平均蒸散发量为 208.10 mm,对应的年平均地下水补给量为26.92 mm (图 9)。可见植被覆盖度增加使蒸散发量增加,地下水补给量减少。



图 9 不同植被覆盖度对应的地下水补给量



为在全流域尺度综合探究植被覆盖增加对流域地下水补给的影响,首先基于研究区 2001 年对应的土地 利用/覆被数据以及 LAI 数据建立 DVSWAT-MODFLOW1。在保证它地表特征参数及气象数据等输入参数不 变的前提下,基于图 4 所显示的植被恢复斑块建立研究区草地、林地面积增加(其它土地利用类型不变)后的 土地利用/覆被数据。再结合 2019 年 LAI 数据建立 DVSWAT-MODFLOW2。图 10 显示了 DVSWAT-MODFLOW1 及 DVSWAT-MODFLOW2 模拟的年际尺度河水渗漏补给地下水量。表明植被覆盖增加将使 2001—2019 年河水渗漏补给量减少。减少量最小值为 2 mm,出现在 2006 年,对应的年降水量亦最小,为 143 mm。最大减少值为 10.34 mm,出现在 2019 年,对应的年降水量为 256.5 mm。图 10 显示了模型模拟的地下 水其它补给量(包括降水直接补给、灌溉直接补给等),可见植被覆盖增加后,地下水其它补给量减少 4.1— 16.18 mm。最小减少量出现在 2006 年。最大减少量出现在 2002 年,对应的年降水量为 302 mm。可见年降 水量可在一定程度上决定植被覆盖增加对地下水补给量的影响强弱。在月际尺度上,植被覆盖增加将使河水 渗漏补给量减少 0—7.18 mm(图 11)。减少量为 0 的月份一般处于较为寒冷、干旱的植物休眠期或河流枯水 期。河水渗漏补给最大减少量出现在 2012 年 7 月,对应的月降水量为 109 mm。此外,植被覆盖增加将使地 下水其它补给量减少 0—7.85 mm(图 11)。减少量为 0 的月份同样处于较为寒冷、干旱的植物休眠期或其它 降水较少时期。最大减少量出现在 2016 年 8 月,对应的月降水量为 113 mm。植被覆盖增加对地下水补给量 的影响较强的月份集中于植物生长旺盛且降水较多时期。综合来看,2019 年植被覆盖情况对应的年际及月









3 结论

(1) DVSWAT-MODFLOW 模型的月蒸散发模拟效果较好,各子流域 R²值在 0.83 以上,NSE 值在 0.68 以上,PBIAS 绝对值在 22%以内。月地下水位模拟效果亦较好,各观测井 R²值在 0.92 以上,绝对误差在 0.28—0.97 m 之间。

(2)2019年巴音河中下游林地及草地面积较 2001年增加明显,分别增加了 5.41 倍及 98.96%。耕地 及裸地面积减少明显。此外,2019年植物生长旺季平均 LAI 值为 5.63,比 2001年增加了 28.83%。

(3)年际尺度上,巴音河中下游植被覆盖增加导致河水渗漏补给地下水量减少2—10.34 mm,导致地下水 其它补给量减少4.1—16.18 mm。植被覆盖增加对年际尺度地下水补给量的影响强弱在一定程度上取决于年 降水量。

(4)月际尺度上,巴音河中下游植被覆盖增加导致河水渗漏补给地下水量减少0—7.18 mm,地下水其它 补给量减少0—7.85 mm。植被覆盖增加对月际尺度地下水补给量影响较强的月份集中于植物生长旺盛且降 水较多时期。

参考文献(References):

- [1] 程国栋,肖洪浪,傅伯杰,肖笃宁,郑春苗,康绍忠,延晓冬,王毅,安黎哲,李秀彬,陈宜瑜,冷疏影,王彦辉,杨大文,李小雁,张甘霖,郑元润,柳钦火,邹松兵.黑河流域生态--水文过程集成研究进展.地球科学进展,2014,29(4):431-437.
- [2] Fan Y, Li H, Miguez-Macho G. Global patterns of groundwater table depth. Science, 2013, 339(6122): 940-943.
- [3] de Vries J J, Simmers I. Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. Hydrogeology Journal, 2002, 10(1): 5-17.
- [4] Qiu J. China faces up to groundwater crisis. Nature, 2010, 466(7304): 308.
- [5] Bekele E B, Salama R B, Commander D P. Impact of change in vegetation cover on groundwater recharge to a phreatic aquifer in Western Australia: assessment of several recharge estimation techniques. Australian Journal of Earth Sciences, 2006, 53(6): 905-917.
- [6] Allen A, Chapman D. Impacts of afforestation on groundwater resources and quality. Hydrogeology Journal, 2001, 9(4): 390-400.
- [7] van der Salm C, Denier van der Gon H, Wieggers R, Bleeker A, van den Toorn A. The effect of afforestation on water recharge and nitrogen leaching in The Netherlands. Forest Ecology and Management, 2006, 221(1/2/3): 170-182.
- [8] Fan J L, Oestergaard K T, Guyot A, Lockington D A. Estimating groundwater recharge and evapotranspiration from water table fluctuations under three vegetation covers in a coastal sandy aquifer of subtropical Australia. Journal of Hydrology, 2014, 519: 1120-1129.
- [9] 张淑兰,于澎涛,张海军,王彦辉,贺亮亮,李振华. 泾河流域上游土石山区和黄土区森林覆盖率变化的水文影响模拟. 生态学报, 2015, 35(4): 1068-1078.
- [10] Jin X, Jin Y X, Mao X F, Zhai J Y, Fu D. Modelling the impact of vegetation change on hydrological processes in bayin river basin, northwest China. Water, 2021, 13(19): 2787.
- [11] Jin X, Jin Y X, Yuan D H, Mao X F. Effects of land-use data resolution on hydrologic modelling, a case study in the upper reach of the Heihe River, Northwest China. Ecological Modelling, 2019, 404: 61-68.
- [12] 徐宗学, 程磊. 分布式水文模型研究与应用进展. 水利学报, 2010, 41(9): 1009-1017.
- [13] Han Z Y, Long D, Huang Q, Li X D, Zhao F Y, Wang J H. Improving Reservoir outflow estimation for ungauged basins using satellite observations and a hydrological model. Water Resources Research, 2020, 56(9).
- [14] Sorribas M V, Paiva R C D, Fleischmann A S, Collischonn W. Hydrological tracking model for Amazon surface waters. Water Resources Research, 2020, 56(9).
- [15] Luo Y, Arnold J, Allen P, Chen X. Baseflow simulation using SWAT model in an inland river basin in Tianshan Mountains, Northwest China. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16(4): 1259-1267.
- [16] 宋增芳,曾建军,金彦兆,胡想全,孙栋元,卢书超,张云亮.基于 SWAT 模型和 SUFI-2 算法的石羊河流域月径流分布式模拟.水土保持 通报,2016,36(5):172-177.
- [17] Jin X, Jin Y X, Mao X F. Ecological risk assessment of cities on the Tibetan Plateau based on land use/land cover changes-Case study of Delingha City. Ecological Indicators, 2019, 101: 185-191.
- [18] Zhang H, Wang B, Liu D L, Zhang M X, Leslie L M, Yu Q. Using an improved SWAT model to simulate hydrological responses to land use change: a case study of a catchment in tropical Australia. Journal of Hydrology, 2020, 585: 124822.

- [19] Jin X, Jin Y X, Fu D, Mao X F. Modifying the SWAT model to simulate eco-hydrological processes in an arid grassland dominated watershed. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 939321.
- [20] Fang H L, Zhang Y H, Wei S S, Li W J, Ye Y C, Sun T, Liu W W. Validation of global moderate resolution leaf area index (LAI) products over croplands in northeastern China. Remote Sensing of Environment, 2019, 233: 111377.
- [21] Xu B D, Li J, Park T, Liu Q H, Zeng Y L, Yin G F, Zhao J, Fan W L, Yang L, Knyazikhin Y, Myneni R B. An integrated method for validating long-term leaf area index products using global networks of site-based measurements. Remote Sensing of Environment, 2018, 209: 134-151.
- [22] Xie X Y, Li A N, Jin H A, Tan J B, Wang C B, Lei G B, Zhang Z J, Bian J H, Nan X. Assessment of five satellite-derived LAI datasets for GPP estimations through ecosystem models. Science of the Total Environment, 2019, 690: 1120-1130.
- [23] Xiao Z Q, Liang S L, Jiang B. Evaluation of four long time-series global leaf area index products. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 246: 218-230.
- [24] Jin X, He C S, Zhang L H, Zhang B Q. A modified groundwater module in SWAT for improved streamflow simulation in a large, arid endorheic river watershed in northwest China. Chinese Geographical Science, 2018, 28(1): 47-60.
- [25] Aliyari F, Bailey R T, Tasdighi A, Dozier A, Arabi M, Zeiler K. Coupled SWAT-MODFLOW model for large-scale mixed agro-urban river basins. Environmental Modelling & Software, 2019, 115: 200-210.
- [26] Mosase E, Ahiablame L, Park S, Bailey R. Modelling potential groundwater recharge in the Limpopo River Basin with SWAT-MODFLOW. Groundwater for Sustainable Development, 2019, 9: 100260.
- [27] 傅笛,金鑫,金彦香,翟婧雅.巴音河中下游农业灌溉对地下水补给量与排泄量的影响.水电能源科学,2021,39(10):63-67.
- [28] 武慧敏, 吕爱锋, 张文翔. 巴音河流域水文干旱对气象干旱的响应. 南水北调与水利科技:中英文, 2022, 20(3): 459-467.
- [29] 杨勇帅,李爱农,靳华安,尹高飞,赵伟,雷光斌,边金虎.中国西南山区 GEOV1、GLASS 和 MODIS LAI 产品的对比分析. 遥感技术与应用, 2016, 31(3): 438-450.
- [30] 张洪波, 支童, 卫星辰, 党池恒, 夏岩, 高文冰. 基于 SWAT-MODFLOW 的黄河中游区径流过程模拟及对黄土高原变绿的响应. 华北水利 水电大学学报:自然科学版, 2020, 41(6): 1-10.
- [31] 青海省农业资源区划办公室.青海土壤.北京:中国农业出版社, 1997: 35-36.
- [32] 德令哈市地方志编纂委员会. 德令哈市志. 北京: 方志出版社, 2004: 1-5.
- [33] Jin X, Jin Y X, Zhai J Y, Fu D, Mao X F. Identification and prediction of crop waterlogging risk areas under the impact of climate change. Water, 2022, 14(12): 1956.
- [34] 杨秀芹, 王国杰, 潘欣, 张余庆. 基于 GLEAM 遥感模型的中国 1980—2011 年地表蒸散发时空变化. 农业工程学报, 2015, 31(21): 132-141.
- [35] Wang D Y, Wang D G, Mo C X. The use of remote sensing-based ET estimates to improve global hydrological simulations in the community land model version 5.0. Remote Sensing, 2021, 13(21): 4460.
- [36] Jepsen S M, Harmon T C, Guan B. Analyzing the suitability of remotely sensed ET for calibrating a watershed model of a Mediterranean montane forest. Remote Sensing, 2021, 13(7): 1258.
- [37] Arnold J G, Moriasi D N, Gassman P W, Abbaspour K C, White M J, Srinivasan R, Santhi C, Harmel R D, van Griensven A, Liew M W V, Kannan N, Jha M K. SWAT: model use, calibration, and validation. Transactions of the ASABE, 2012, 55(4): 1491-1508.
- [38] Moriasi D N, Arnold J G, Liew M W V, Bingner R L, Harmel R D, Veith T L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3): 885-900.