

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220768

# 干旱区内陆河流域植被恢复对水文过程的影响

翟婧雅<sup>a,b</sup>, 金鑫<sup>a,b,c</sup>, 金彦香<sup>a,b,c</sup>, 傅笛<sup>a,b</sup>

(青海师范大学 a. 地理科学学院; b. 青海省自然地理与环境过程重点实验室;  
c. 高原科学与可持续发展研究院, 青海 西宁 810016)

**摘要:**为更好地理解植被恢复对水文过程的影响,以地表水—地下水交互频繁且植被恢复明显的柴达木盆地东北部巴音河流域中下游为例,将 SWAT-MODFLOW 模型与动态 HRU 相结合,开发了 LU-SWAT-MODFLOW 模型,克服了原始 HRU 在植被动态变化模拟中的缺陷,准确模拟了地表覆被变化及地表水—地下水交互过程。结果表明,LU-SWAT-MODFLOW 模型模拟的 LAI、ET、地下水位效果较好;研究区植被恢复后,不同子流域月蒸散发增加了 0~1.5 mm,年蒸散发增加了 0~6 mm;地下水补给量平均每月增加约 1.27 mm,平均每年增加 14.02 mm;研究区地表水—地下水转换关系及水量在植被恢复类型为低覆盖度草地和裸地向林地转化的区域有较明显变化。

**关键词:** 植被恢复; LAI; ET; 地下水

**中图分类号:** [TV11]; P343.9

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)05-0026-04

## 1 概况

巴音河流域地处青藏高原柴达木盆地东北边缘,是柴达木盆地第四大河流。该流域属于高原荒漠半荒漠干旱性气候,风大沙多、干旱少雨、土地贫瘠,是我国生态环境最为严酷和脆弱的地区之一。巴音河出山后流入口及工农业生产集中的中下游地区,该区域地表水—地下水转换频繁。近 20 年来,随着“退耕还林”等一系列生态恢复措施的实施,巴音河流域植被恢复明显。但由于气候干旱、水资源时空分布不均匀,灌溉是该区域人工恢复植被的水量保证。在此背景下,干旱区恢复植被的需水量、耗水特征等问题备受关注<sup>[1]</sup>。干旱区植被恢复的可持续性需更好地理解植被恢复及相应灌溉措施对水文过程的影响。在水文过程复杂区域,多模型耦合更能有效刻画水循环,如将地表水和地下水作为一个整体系统进行模拟的 SWAT-MODFLOW 耦合模型更能反映区域水循环特点<sup>[2]</sup>。SWAT-MODFLOW 模型的最小计算单元 HRUs 为虚拟单元,且各 HRU 自身为集总式单元,同一 HRU 上的地表特征相同,这使得

SWAT 模型不能有效体现同一 HRU 上的土地覆被向不同类型转变及同一 HRU 上土地覆被部分变化等情景。克服静态 HRU 的缺点就成为模拟地表覆被变化对水文过程影响的关键。为此,本文以地表水—地下水交互频繁且植被恢复明显的巴音河流域中下游为例,将 SWAT-MODFLOW 模型与能够反映流域真实土地覆被变化的动态 HRUs 相结合,模拟了植被恢复背景下流域水循环过程,研究结果可为干旱区植被恢复的可持续性、水资源合理配置等提供支撑。

## 2 研究方法

### 2.1 基于动态 HRUs 的 SWAT-MODFLOW 耦合模型

参照 BAILEY R T 等<sup>[2]</sup>的研究成果,将原始 SWAT 模型的基本计算单元 HRU 改进为动态 HRU。

基于动态 HRUs 的 SWAT-MODFLOW 耦合模型运算流程见图 1。由于基于 HRUs 的 SWAT-MODFLOW 耦合模型能够反映土地利用/覆被的动态变化,将其命名为 LU-SWAT-

**收稿日期:** 2022-04-17, **修回日期:** 2022-08-09

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(42161020); 青海省科技厅自然科学基金项目(2021-ZJ-705)

**作者简介:** 翟婧雅(1997-),女,硕士研究生,研究方向为水文过程模拟,E-mail: jingyasea@163.com

**通讯作者:** 金鑫(1970-),女,博士、教授、博导,研究方向为生态水文,E-mail: jinx13@lzu.edu.cn

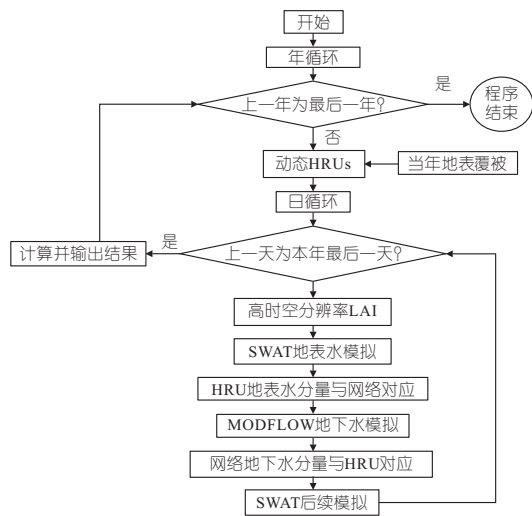


图 1 基于动态 HRUs 的 SWAT-MODFLOW 耦合模型运算流程图

Fig. 1 The calculation flow chart of the SWAT-MODFLOW with dynamic HRUs

MODFLOW。

## 2.2 模型建立

建立 SWAT 模型所需的气象数据为德令哈气象站逐日降水、温度、相对湿度、风速及太阳辐射数据。所需农、林、草灌溉数据来自德令哈市水务局(表 1)。所需 DEM 数据为 30 m 分辨率 SRTM 数据(<http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>)。土壤数据(图 2(a))裁剪自全国 1:100 万土壤类型图。图 2(b)显示了子流域划分结果。

表 1 研究区灌溉水量

Tab. 1 The irrigation water of the stu

灌溉类型	年灌溉水量 /( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ )	灌溉 次数/次	灌溉周 期/月
农业灌溉	5 800	6	3~10
林地灌溉	5 400	6	4~11
草地灌溉	3 600	5	4~11

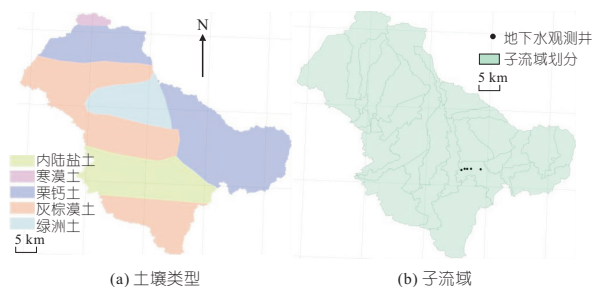


图 2 SWAT 模型输入数据

Fig. 2 Inputs data of the SWAT model

模拟时段内(2000~2018 年)的土地利用类型数据为基于 Landsat 30 m 遥感影像,其分类精度在 90% 以上。图 3 为 2000~2018 年研究区植被覆盖情况。由于 SWAT 模型自带的土地利用/植被数据库中并无枸杞相关参数,本文研究将 SWAT 相关数据库中灌木的相关参数定义为枸

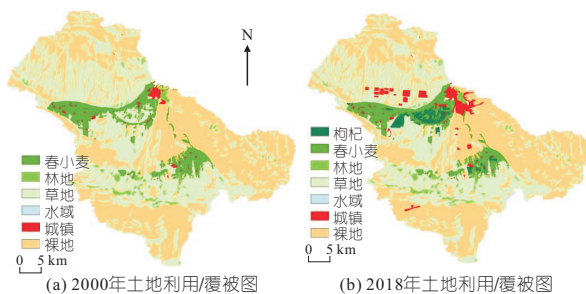


图 3 研究区植被覆盖情况

Fig. 3 The land use/cover map of the study area

杞的默认参数,利用 LAI、ET 等数据对相关参数进行校准<sup>[3]</sup>,基于 SWAT 模型的作物生长模块模拟其生长过程。其他土地利用/覆被类型的相关参数采用模型自带数据库中的默认值或经校准得到。

对于 MODFLOW 模型,将 SWAT 模型划分的流域边界作为其隔水边界,将流域西部及东部出口作为定流量边界。将 SWAT 模型提取的河网作为 MODFLOW 的河流边界。将 steady-state 状态下模拟的水头作为模拟非稳定流的初始水头。此外,将研究区浅层含水层概化为非均质各向异性,将地下水运动概化为二维非稳定流。

## 2.3 模型校准资料及方法

将 2000~2001 年设置为模型预热期,2002~2018 年为模型率定期。采用 TPDC(<http://data.tpdc.ac.cn/>)提供的 2002~2018 年 30 m×30 m 分辨率逐月 LAI 数据集在 HRUs 尺度上校准 SWAT 模型中的植被生长参数。采用 TPDC 提供的  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  分辨率地表蒸散发数据集在子流域尺度对 LU-SWAT-MODFLOW 模型模拟的实际蒸散发进行校准。采用流域内逐月观测的地下水位数据对 MODFLOW 模型相关参数进行率定,地下水位观测井的位置见图 2(b)。文献[4]调整 SWAT 模型 ET 相关参数。选取纳什系数( $E_{NSE}$ )、误差百分数( $e_{PBias}$ )、均方根误差与决定系数( $R^2$ )评价 LU-SWAT-MODFLOW 模型的 ET 模拟效果。选取决定系数( $R^2$ )及绝对误差评价 LU-SWAT-MODFLOW 模型的地下水位模拟效果<sup>[2]</sup>。

## 3 结果及讨论

### 3.1 研究区植被恢复情况

表 2 为研究区 2002~2018 年主要的植被恢复情况。由表 2 可知,主要的植被恢复类型为低覆盖度草地、耕地和裸地转化为林地,转化面积分别为 2 877、518、321  $\text{hm}^2$ 。相应地,各植被恢复地块的灌溉水量也有较大变化。此外,耕地向林

地的转化主要发生在流域东南部的杂海灌区,低覆盖度草地和裸地向林地的转化主要发生在流域西北部的德令哈灌区。SWAT 模型的人工灌溉模块,通过灌溉效率系数、地表径流率等定义进入土壤剖面的水量,能够真实模拟土壤水剖面的漫灌方式<sup>[3]</sup>。

表 2 研究区主要植被恢复情况

Tab.2 The main vegetation restoration of the study area

主要植被恢复类型	恢复面积 /hm <sup>2</sup>	灌溉水量变化 /[m <sup>3</sup> ·(hm <sup>2</sup> ·a) <sup>-1</sup> ]
低覆盖度草地→林地	2 877	0→5 400
耕地→林地	518	5 800→5 400
裸地→林地	321	0→5 400

### 3.2 LU-SWAT-MODFLOW 模型适用性评价

#### 3.2.1 LAI 模拟效果

图 4 为 LU-SWAT-MODFLOW 模型模拟的 2002~2018 年多年 7 月(植物生长旺季)平均 LAI 与遥感反演的多年 7 月平均 LAI 的对比情况。由图 4 可知,LU-SWAT-MODFLOW 模型基于理想叶面积估算模型,在 HRU 上计算 LAI。各个 HRU 作为同质单元,基于其计算的 LAI 与遥感反演的基于网格的 LAI 空间尺度不一致,但二者的空间分布仍有较好的一致性。

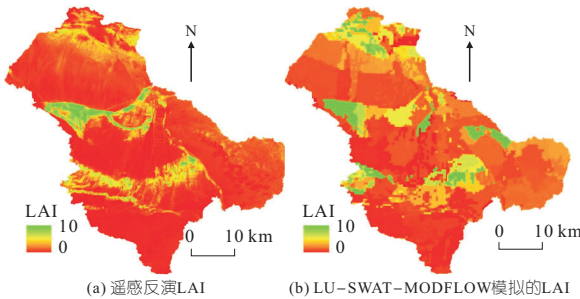


图 4 遥感反演 LAI 及 LU-SWAT-MODFLOW 模型模拟 LAI

Fig. 4 The remotely sensed and simulated LAI

#### 3.2.2 ET 模拟效果

图 5 为 LU-SWAT-MODFLOW 模型校准后模拟的 ET 与遥感反演 ET 的对比情况。由图 5 可知,遥感反演的多年平均 ET 显示出东北部山区高而西南部平原底的空间分布特点,而 LU-SWAT-MODFLOW 模型模拟的 ET 并未显

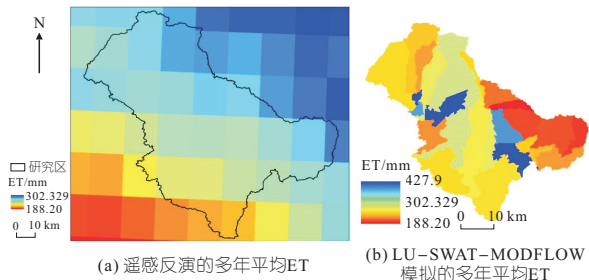


图 5 LU-SWAT-MODFLOW 模型 ET 模拟结果

Fig. 5 The simulated ET

示出该特征。这可能是由于采用的基于遥感的实测 ET 数据在计算过程中并未考虑农、林、草灌溉<sup>[5]</sup>。而 LU-SWAT-MODFLOW 模型较好考虑了植被恢复及相应灌溉措施。经计算,LU-SWAT-MODFLOW 模型模拟的各子流域月平均 ET,其  $N_{NSE} > 0.72$ 、 $e_{PBIAS}$  在  $-20\% \sim 20\%$  之间,  $R^2 > 0.75$ 。

#### 3.2.3 地下水位模拟效果对比

研究区地下水位资料有限,观测井 1 仅有 2009~2011 年观测数据,观测井 2~4 仅有 2013~2015 年观测数据,观测井 5 仅有 2014~2015 年观测数据。基于有限观测数据,图 6 为 LU-SWAT-MODFLOW 月地下水位模拟效果。由图 6 可知,模型能较好地刻画研究区地下水位变化, $R^2$  均在 0.95 以上,经计算,绝对误差均在 0.5 m 以内。

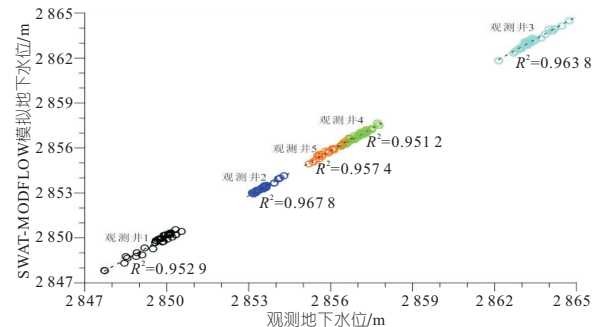


图 6 LU-SWAT-MODFLOW 月地下水位模拟结果

Fig. 6 The monthly groundwater level simulated by the LU-SWAT-MODFLOW

### 3.3 植被恢复对水文过程的影响

#### 3.3.1 蒸散发量

为准确分析植被恢复对水文过程的影响,在 LU-SWAT-MODFLOW 模型中设定 2 个情景:①研究区未进行植被恢复,其他类土地利用/覆被按实际情况变化;②研究区按实际情况进行植被恢复,其他类土地利用/覆被按实际情况变化。图 7 为植被恢复对流域 ET 的影响情况。由图 7 可知,植被恢复及相应灌溉措施并未改变流域上逐月 ET 的变化趋势,多数月份蒸发量较无植被恢复情景高 0~1.5 mm。在年际尺度上,植被恢复及相应灌溉措施亦未改变 ET 的变化趋势,自 2004 年以后,蒸发量明显高于无植被恢复情景。4、12、13、14、26、33 号子流域上的 ET 值大于 10 mm,即在那些子流域上 ET 增大最为明显。研究时段内与研究区土地利用/覆被类型图综合比较后发现这些子流域植被恢复相对明显。

#### 3.3.2 地下水补给量

图 8 为植被恢复对流域地下水补给量的影响

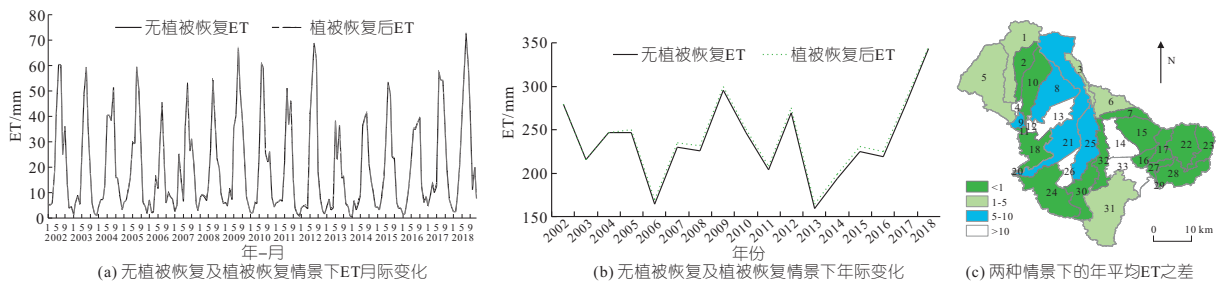


图 7 植被恢复对流域 ET 的影响情况

Fig. 7 The impacts of the vegetation restoration on ET

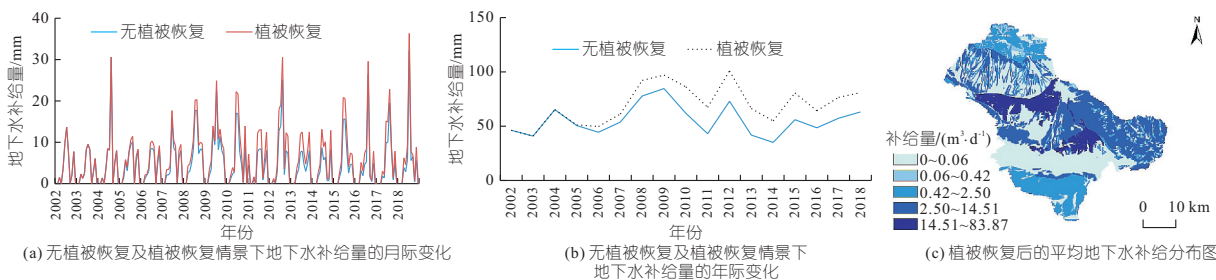


图 8 植被恢复对流域地下水补给量的影响情况

Fig. 8 The impacts of the vegetation restoration on groundwater recharge

情况。由图 8 可知,植被恢复后,地下水补给量平均每月增加约 1.27 mm,平均每年增加 14.02 mm。树冠截留和根系吸水将导致土壤水分、地表径流和林地地下水补给减少<sup>[6]</sup>。然而,在巴音河中下游,虽然有相当一部分低覆盖草地、农田和裸地被改为林地,但植被恢复后的地下水补给量明显高于无植被恢复时的地下水补给量。可见农业灌区及被灌溉的植被恢复区地下水补给量最高(>14.51 m<sup>3</sup>/d)。

### 3.3.3 地表水—地下水交换量

研究区地表水—地下水转换频繁,在研究区水文过程中占主导。为探究植被恢复对其影响,将植被恢复和未恢复两个情景下的多年日平均地表水—地下水转换水量相减,得到图 9。由图 9 可知,河段Ⅲ处于研究区上游,地表水大量补给地

下水。河段Ⅱ处于下游,该河段地下水大量补给地表水。河道Ⅰ既有地表水对地下水的补给,亦有地下水对地表水的补给,该河段处于德令哈灌区内,受农业灌溉、林草灌溉影响较大,地表水—地下水转换关系相对复杂。河段Ⅰ所在的区域亦是研究区主要的植被恢复区。河段Ⅰ处有 6 个网格的地表水—地下水转换关系发生了改变。这与该区域植被恢复后,相应地块的灌溉水量发生变化有关。

尕海灌区与德令哈灌区均进行了植被恢复,但德令哈灌区地表水—地下水转换关系及水量受植被恢复的影响更大,而尕海灌区几乎不受影响。这与植被恢复类型及相应灌溉水量差异有关。

## 4 结论

a. LU-SWAT-MODFLOW 模型模拟的 LAI、ET、地下水水位效果较好。

b. 研究区植被恢复后,不同子流域流域月蒸散发增加了 0~1.5 mm,年蒸散发增加了 0~6 mm;地下水补给量平均每月增加约 1.27 mm,平均每年增加 14.02 mm。

c. 研究区地表水—地下水转换关系及水量在植被恢复类型为低覆盖度草地和裸地向林地转化的区域有较明显变化。

### 参考文献:

[1] 张宝庆,邵蕊,赵西宁,等.大规模植被恢复对黄土高原生态水文过程的影响[J].应用基础与工程科学学报,2020,28(3):594-606.

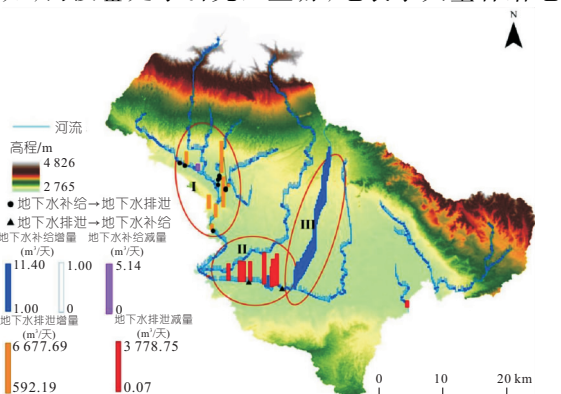


图 9 LU-SWAT-MODFLOW 模拟的多年日平均地表水—地下水交换量

Fig. 9 The LU-SWAT-MODFLOW simulated surface water-groundwater exchange

开启度的减压阀,建立了减压阀优化布置模型并采用遗传算求解模型。

b. 算例验证结果表明,本文模型及方法可行、有效,且优化效果显著。

参考文献:

[1] 张鹏飞,何芳,麦伟成,等. 水务企业编制 DMA 规划工作的实践与探讨[J]. 给水排水, 2014, 40(1): 156-160.

[2] GULLOTTA AURORA, BUTLER DAVID, CAMPISANO ALBERTO, et al. Optimal location of valves to improve equity in intermittent water distribution systems[J]. Journal of water resources planning and management, 2021, 147 ( 5 ): 04021016.

[3] SANTONASTASO G F, DI NARDO A, CREACO E. Dual topology for partitioning of water distribution networks considering actual valve locations[J]. Urban water journal, 2019, 16(7): 469-479.

[4] ARAUJO L S, RAMOS H, COELHO S T. Pressure control for leakage minimisation in water distribution systems management[J]. Water resources management, 2006, 20(1): 133-149.

[5] 唐鹏翔,许仕荣,盛烜. 基于粒子群算法的阀门协同泵站控制供水管网压力[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2020, 43(3): 70-75.

[6] 俞焱曦. 基于泵阀联合调度的供水管网漏损控制及能耗优化[D]. 杭州:浙江大学.

[7] 赫彦文,刘紫阳,李建义,等. 基于遗传算法的测试用例自动生成方法综述[J]. 廊坊师范学院学报(自然科学版), 2020, 20(4): 16-20.

### Research on Optimizing Position of Pressure Relief Valve in Water Supply Network Based on Intelligent Optimization Algorithm

WANG Xing, ZHONG Yu-fei, LV Mou

(School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266400, China)

**Abstract:** To address the problem of excess pressure in the water supply network system, this paper proposed to add pressure reducing valves with certain opening in the system. With the objective of minimizing the square sum of the difference between the operating water pressure at each node and the minimum service head at the node, the pressure reduction valve optimized pressure leakage control model was constructed by combining the hydraulic balance constraint of the pipe network and the node pressure constraint. The model was solved by using genetic algorithm. Taking the main water supply network of southeast coastal towns as an example, the results show that the proposed model and method are effective and feasible, and it has better optimal effectiveness.

**Key words:** pipe network system; overpressure; compression release valve; multi-objective; genetic algorithm

\*\*\*\*\*  
(上接第 29 页)

[2] 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.

[3] 傅笛,金鑫,金彦香,等. 巴音河中下游农业灌溉对地下水补给量与排泄量的影响[J]. 水电能源科学, 2021, 39(10): 63-67.

[4] WHITE K, CHAUBEY I. Sensitivity analysis, calibration, and validations for a multisite and multivariable SWAT model[J]. JAWRA journal of the American water resources association, 2010, 41 ( 5 ):

1077-1089.

[5] MA N, SZILAGYI J, ZHANG Y, et al. Complementary-relationship-based modeling of terrestrial evapotranspiration across China during 1982 - 2012: Validations and spatiotemporal analyses[J]. Journal of geophysical research atmospheres, 2019, 124(8): 4326-4351.

[6] QUBAJA R, AMER M, TATARINOV F, et al. Partitioning evapotranspiration and its long-term evolution in a dry pine forest using measurement-based estimates of soil evaporation[J]. Agricultural and forest meteorology. 2019, 281: 107831.

### The Impacts of Vegetation Restoration on the Hydrological Processes in Arid Inland River Basin

ZHAI Jing-ya<sup>a,b</sup>, JIN Xin<sup>a,b,c</sup>, JIN Yan-xiang<sup>a,b,c</sup>, FU Di<sup>a,b</sup>

(a. School of the Geographical Science; b. Key Laboratory of Physical Geography and Environmental Processes; c. Academy of Plateau Science and Sustainability, Qinghai Normal University, Xining 810016, China)

**Abstract:** In order to better understand the impact of vegetation restoration on hydrological processes, the SWAT-MODFLOW model and dynamic HRU was coupled, and LU-SWAT-MODFLOW model was developed to accurately simulate the dynamic change of vegetation and groundwater in the lower reaches of the Bayin River Basin. The results revealed that the LAI, ET and groundwater level simulated by LU-SWAT-MODFLOW model are better; After vegetation restoration in the study area, the monthly evapotranspiration of different sub-basins increased by 0-1.5 mm, and the annual evapotranspiration increased by 0-6 mm; The average monthly groundwater recharge increased about 1.27 mm, and the average annual groundwater recharge increased 14.02 mm. The exchange of the surface water and groundwater in the study area have obvious changes in the areas where the vegetation restoration type is low-coverage grassland and bare land converted to forestland.

**Key words:** vegetation restoration; LAI; ET; groundwater