

张乐开, 左其亭, 钟涛, 等. 基于 SWAT 的沁河流域水源涵养能力分析 & 预测[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(5): 862-872. ZHANG L K, ZUO Q T, ZHONG T, et al. Analysis and prediction of water conservation capacity in Qinhe River basin based on SWAT[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(5): 862-872. (in Chinese)

# 基于 SWAT 的沁河流域水源涵养能力分析 & 预测

张乐开<sup>1</sup>, 左其亭<sup>1,2,3</sup>, 钟涛<sup>1</sup>, 张羽<sup>1</sup>, 吴青松<sup>1</sup>

(1. 郑州大学水利与交通学院, 郑州 450001; 2. 河南省水循环模拟与水环境保护国际联合实验室, 郑州 450001;  
3. 郑州大学黄河生态保护与区域协调发展研究院, 郑州 450001)

**摘要:** 水源涵养能力是生态系统服务功能的重要体现, 为探究变化环境下的流域水源涵养状况, 支撑流域生态保护和经济发展, 构建沁河流域 SWAT(soil and water assessment tool)模型, 基于元胞自动机马尔科夫(cellular automata-Markov, CA-Markov)模型预测未来 2030 年土地利用状况, 结合第六次国际耦合模式比较计划(coupled model intercomparison project phase 6, CMIP6)气象数据, 模拟流域未来降水、蒸发和径流, 依据水量平衡原理, 分析历史和未来年份流域水源涵养能力的时空变化特征。时间维度上: 2010—2016 年沁河流域水源涵养能力呈波动上升趋势, 多年平均水源涵养量为 49 mm, 多年平均水源涵养率为 8%; 2024—2030 年水源涵养能力呈波动下降趋势, 多年平均水源涵养量为 51 mm, 多年平均水源涵养率为 10%。空间维度上: 2010、2015 和 2025 年流域水源涵养能力呈现从上游到下游递增的趋势, 2030 年则呈现从上游到下游递减的趋势。整体来看, 流域多年平均水源涵养量不足 100 mm, 且各年份均有子流域的水源涵养量出现负值, 流域水源涵养能力较差。研究结果可为流域水资源管理、协同保护和发展以及改善人水关系提供科学参考和数据支撑。

**关键词:** 水源涵养量; SWAT 模型; CA-Markov 模型; 水源涵养率; 沁河流域

**中图分类号:** TV213.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0084

水资源作为一种战略性的经济资源和自然资源, 对维持生态环境健康和保障经济社会发展具有不可替代的作用<sup>[1]</sup>。人类对水资源不合理的开发利用和全球极端气候事件的频发导致大量河流年内水量分布不均, 甚至出现断流现象<sup>[2]</sup>。水资源短缺、水环境污染和水生态恶化等问题日益严峻, 流域内的生态系统受到破坏, 流域生态系统服务功能降低。水源涵养作为生态系统水量调节服务功能之一<sup>[3]</sup>, 具有供给水源、调节径流、净化水质、拦蓄降水以及调蓄洪水等重要服务功能<sup>[4-6]</sup>。水源涵养能力是水源涵养功能大小的重要体现, 是评估生态系统服务功能的重要指标之一, 通常计算水源涵养量以表现水源涵养能力的大小<sup>[2,7-8]</sup>。

目前, 确定水源涵养量的方法主要有野外试验测定法和模型模拟法<sup>[9]</sup>。野外试验测定法受试验场地的局限性较大<sup>[10]</sup>, 且试验一般以点尺度进行, 难以得出流域内水源涵养量的空间分布。模型模拟法

通常采用水文模型, 该方法可以较为精确、合理地对水源涵养量进行计算。计算水源涵养量最为广泛的水文模型包括 InVEST(integrated valuation of ecosystem services and trade-offs)、SWAT(soil and water assessment tool)模型等。其中, InVEST 模型基于水循环原理, 认为降水量扣除实际蒸散发量即为产水量, 再根据地形指数、土壤特性和流速系数计算得出水源涵养量<sup>[11]</sup>。贾雨凡等<sup>[7]</sup>采用 InVEST 模型中的产水模块, 并结合流速系数、土壤饱和导水率等, 计算了伊洛河流域的水源涵养量。Su 等<sup>[12]</sup>基于 InVEST 模型, 研究了变化环境下黄土高原 1975—2008 年的水源涵养量。然而, 基于 InVEST 模型对流域水源涵养量进行计算, 较难反映流域内各子流域水源涵养量的空间差异, 而 SWAT 模型可以基于 DEM 数据, 对流域水系进行划分, 并根据各子流域的输出结果求得各子流域的水源涵养量, 能够较好地反映流域内水源涵养量的空间特征。相关研究<sup>[13-14]</sup>

收稿日期: 2023-06-06 修回日期: 2023-09-15 网络出版时间: 2023-09-27

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20230926.0907.006>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3200201); 国家自然科学基金项目(52279027)

作者简介: 张乐开(1999—), 男, 河南新乡人, 主要从事水文学及水资源研究。Email: [zhanglekai202204@163.com](mailto:zhanglekai202204@163.com)

通信作者: 左其亭(1967—), 男, 河南固始人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事水文学及水资源研究。Email: [zuoqt@zzu.edu.cn](mailto:zuoqt@zzu.edu.cn)

表明, SWAT 模型在对水源涵养量的计算方面具有严格的水文机制和很好的可靠性, 且比 InVEST 模型的计算精度更高。刘景红等<sup>[15]</sup> 基于 SWAT 模型, 并根据水量平衡公式和影子工程法分别计算了浑河上游流域 2000—2019 年的水源涵养量和水源涵养服务价值。Wu 等<sup>[16]</sup> 借助 SWAT 模型对黑河流域 2010—2020 年的水源涵养功能进行估算, 并基于经验正交函数分析了黑河流域水源涵养功能的时空格局演变。然而, 现有大多数研究<sup>[17-18]</sup> 仅针对历史年份的水源涵养能力进行评估计算, 考虑未来气候变化和土地利用变化 (land use/land cover change, LUCC) 情况下的流域水源涵养能力的预测研究较少。此外, 子流域尺度的水源涵养能力评估不仅可以更好地反映其空间差异性, 而且能够验证流域整体尺度下的水源涵养能力结果, 有必要开展多尺度的研究分析。

《中华人民共和国黄河保护法》指出, 要加大对黄河干流和支流源头、水源涵养区的保护力度。沁河流域内矿产资源丰富、高耗水行业集中, 径流年内年际变化不均衡, 夏丰冬枯, 易发生旱涝灾害, 是贯彻黄河保护治理的典型流域。综上, 选取沁河流域为研究实例, 基于 SWAT 模型将流域划分为若干个子流域, 结合未来气候变化模式和模拟预测的土地利用数据, 多尺度揭示变化环境下沁河流域水源涵养能力的时空演变特征, 以期为流域水资源管理、水生态保护以及改善人水关系提供科学参考。

## 1 沁河流域概况与数据来源

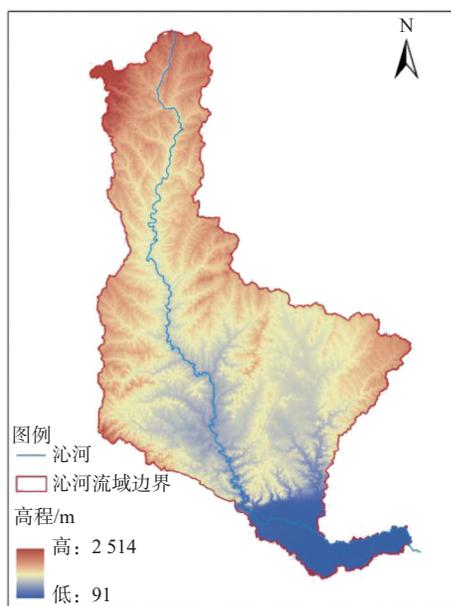
### 1.1 流域概况

沁河属黄河一级支流, 是黄河在山西境内的第二大支流, 发源于山西省沁源县西北太岳山东麓的二郎神沟, 地处 34°54' N~36°57' N、111°58' E~113°29' E(图 1), 经山西、河南两省于武陟县方陵村汇入黄河。沁河长 485 km, 流域面积 13 535 km<sup>2</sup>, 其中, 山西境内流域面积为 12 256 km<sup>2</sup>, 河南境内流域面积为 1 279 km<sup>2</sup><sup>[19]</sup>。沁河是沿线地区的重要生产生活用水水源和生态系统的重要组成部分, 但近年来流域内土地利用变化显著, 水源涵养功能年际年内变化特征逐渐复杂。

### 1.2 数据来源与处理

SWAT 模型构建所需数据包括数字高程 (digital elevation model, DEM)、土地利用、土壤、气象以及水文数据, 详见表 1。其中, DEM 数据采用地理空间数据云提供的 90 m 分辨率栅格数据; 土地利用数

据源于中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学与数据中心提供的 1 km 分辨率栅格数据, 根据研究区土地利用及分布特征, 将其重分类为耕地、林地、草地、水域、城乡居民用地和未利用地 6 种土地利用类型; 土壤栅格与属性数据源于世界土壤数据库 (harmonized world soil database, HWSO), 其分辨率为 1 km; 气象数据采用 CMADS (中国大气同化驱动数据集), 包括最高/最低气温、风速、相对湿度、降水量和日照辐射数据, 共 32 个气象格点; 水文数据来源于水利部黄河水利委员会官网, 为 2008—2016 年沁河流域 3 个水文站月平均流量实测数据; CMIP6 数据采用国内相关研究常用的 BCC-CSM2-MR 气候模式<sup>[20-21]</sup>, 考虑沁河流域未来社会发展模式, 选取中等社会经济发展路径与中等辐射强迫的组合情景 (SSP2-4.5)<sup>[22]</sup>, 并将数据降尺度为 0.5°×0.5°分辨率, 对未来气象数据进行处理。



注: 该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的标准地图 (审图号为 GS(2020)4619), 底图无修改。

图 1 沁河流域概况

Fig. 1 Overview map of Qinhe River basin

## 2 研究方法

根据表 1 中的数据构建沁河流域 SWAT 模型, 在率定和验证的基础上, 结合 SWAT 模型的输出结果和水源涵养量的计算公式, 分析流域 2010—2016 年水源涵养量的变化趋势。本文变化环境是指未来气候变化和土地利用变化对水文要素的影响。为预测未来沁河流域水源涵养能力的变化特征, 根据 CMIP6 数据中 BCC-CSM2-MR 气候模式的 SSP2-4.5 情景气象数据和预测的 2030 年流域土地利用数

据,将二者输入到率定好的 SWAT 模型并运行, 结 析其时空特征, 见图 2。  
合模型的输出结果计算未来流域水源涵养量并分

表 1 SWAT 模型基本数据类型描述及来源

Tab. 1 Description and source of basic data types of SWAT model

数据名称	数据描述	数据来源
DEM数据	90 m分辨率	<a href="http://www.gscloud.cn/">http://www.gscloud.cn/</a>
土地利用数据	1 km分辨率	<a href="http://www.resdc.cn/">http://www.resdc.cn/</a>
土壤数据	1 km分辨率	<a href="http://www.fao.org/">http://www.fao.org/</a>
气象数据	最高/最低气温、风速、相对湿度、日降水量、日照辐射	<a href="http://www.cmads.org/">http://www.cmads.org/</a>
水文数据	2008—2016年沁河流域水文站月平均流量实测数据	<a href="http://www.yrcc.gov.cn/">http://www.yrcc.gov.cn/</a>
CMIP6数据	2022—2030年	<a href="http://esgf-node.llnl.gov/search/CMIP6/">http://esgf-node.llnl.gov/search/CMIP6/</a>

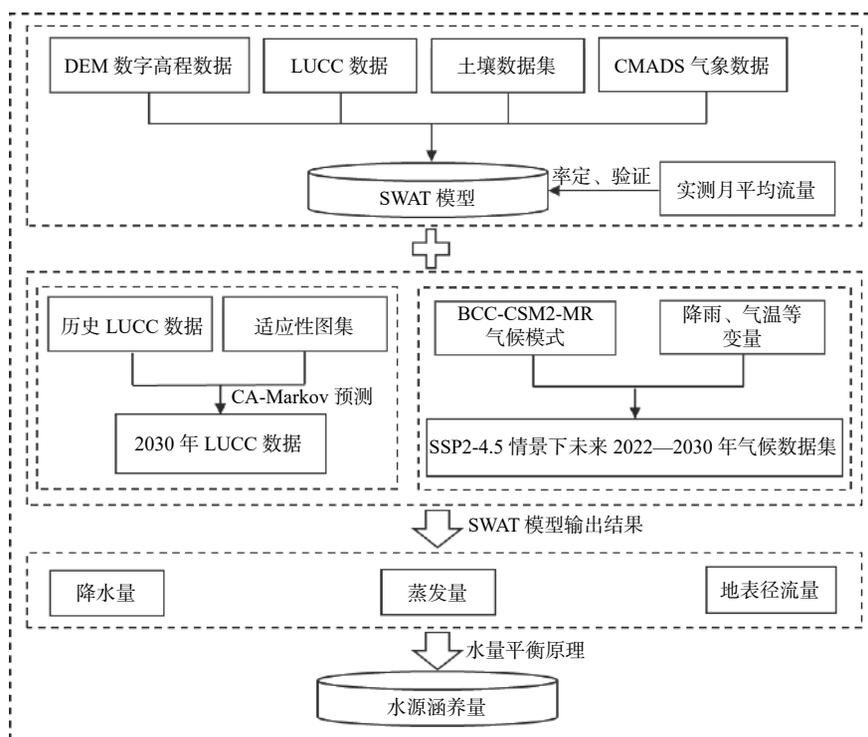


图 2 研究框架

Fig. 2 Research framework

### 2.1 沁河流域 SWAT 模型

SWAT 模型是美国农业部(USDA)农业研究中心于 1994 年研发的一种分布式水文模型, 目前已被广泛应用于研究变化环境对流域水文要素的影响。本文的沁河流域 SWAT 模型在 ArcGIS 10.4 软件中进行构建, 主要步骤如下: 导入流域 DEM 数据, 在提取河网的基础上将流域划分为若干个子流域; 依次导入处理后的土地利用与土壤数据, 将坡度划分为 0~<5°、≥5°~<25°、≥25°三部分; 设置土地利用阈值为 5%, 土壤阈值为 10%, 坡度阈值为 10%, 划分流域水文响应单元; 导入 CMADS 气象数据库, 在进行模拟时设置预热期为 2 年。

采用 SWAT-CUP 软件中的 SUFI-2 算法对构建

的模型进行率定与验证, 评估模型模拟结果。设置 2008—2009 年为模型预热期; 2010—2014 年为模型率定期; 2015—2016 年为模型验证期。采用决定系数( $R^2$ )和纳什效率系数( $E_{NS}$ )评估模型的精确度。其中:  $R^2$  为模拟月平均流量与实测月平均流量的变化趋势, 取值区间为 [0, 1], 其值越接近于 1, 表明模拟值越接近实测值;  $E_{NS}$  为模拟月平均流量与实测月平均流量的偏离程度, 取值区间为  $[-\infty, 1]$ 。

$R^2$  的计算公式为

$$R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - Q_{o,avg})(Q_{p,i} - Q_{p,avg}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - Q_{o,avg})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{p,i} - Q_{p,avg})^2} \quad (1)$$

$E_{NS}$  的计算公式为

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - Q_{p,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - Q_{o,avg})^2} \quad (2)$$

式中:  $Q_{o,i}$  为实测流量;  $Q_{p,i}$  为模拟流量;  $Q_{o,avg}$  为实测流量的平均值;  $Q_{p,avg}$  为模拟流量的平均值。相关研究<sup>[23-24]</sup>表明: 当  $R^2 > 0.50$  时模拟结果基本合格; 当  $R^2 > 0.70$  时模拟结果较为准确; 当  $R^2 = 1$  时则模拟结果与实测结果完全吻合; 当  $E_{NS} \leq 0.50$  时模拟结果不合格; 当  $0.50 < E_{NS} \leq 0.65$  时模拟结果基本合格; 当  $0.65 < E_{NS} \leq 0.75$  时模拟结果较好; 当  $0.75 < E_{NS} \leq 1.00$  时模拟结果为优秀。

## 2.2 CA-Markov 模型

CA-Markov 模型是集合了元胞自动机 (cellular automata) 与马尔科夫 (Markov) 的耦合预测模型<sup>[25]</sup>。将重分类的 2000 年、2010 年和 2020 年的土地利用数据导入 IDRISI 软件, 借助软件中的 Markov 功能模块计算 2000—2010 年土地利用转移概率矩阵。在正常发展情况下, 水域不会转变为其他土地利用类型, 因此提取出水域类型的土地利用数据, 将其设置为土地利用变化的限制性因素, 将高程、坡度、铁路和道路距离设置为土地利用变化的影响性因素, 并采用主观赋值法和层次分析法确定各个影响因子的权重大小, 利用多目标评价模块生成每种土地利用类型的适应性图集。然后在 CA-Markov 功能模块导入 2010 年实际土地利用数据、2000—2010 年土地利用转移矩阵和适应性图集, 即可预测出 2020 年土地利用数据。采用 Kappa 系数<sup>[26]</sup>对预测得到的 2020 年土地利用数据和实际 2020 年土地利用数据进行一致性检验, Kappa 系数表达式为

$$K = \frac{P_0 - P_e}{1 - P_e} \quad (3)$$

式中:  $K$  为 Kappa 系数;  $P_0$  和  $P_e$  分别表示模型的总体模拟精度和理论模拟精度。  $0 < K \leq 0.2$ , 表明模拟效果极低;  $0.2 < K \leq 0.4$ , 表明模拟效果一般;  $0.4 < K \leq 0.6$ , 表明模拟效果为中等精度;  $0.6 < K \leq 0.8$ , 表明模拟精度较高; 在  $0.8 < K \leq 1.0$ , 则表明模拟精度极高<sup>[27]</sup>。

重复上述方法, 首先根据 2010 年和 2020 年实际土地利用数据, 在 Markov 功能模块计算 2010—2020 年土地利用转移概率矩阵, 然后在 CA-Markov 功能模块中导入 2020 年实际土地利用数据、2010—2020 年土地利用转移概率矩阵和适应性图集, 预测得到 2030 年土地利用数据。

## 2.3 水源涵养量概念及计算方法

水源涵养量作为评估流域水源涵养能力的重要指标, 是指在特定的时空范围内生态系统所储存的水量, 其实质是一定时空范围生态系统对降水的存储能力<sup>[2]</sup>。从水量平衡原理的角度出发, 水源涵养量的值即为降水量与蒸散发量、其他消耗的差值<sup>[28]</sup>。对于具备水源涵养能力的流域或区域, 水源涵养量的概念则是在一定时间段内收入的水量与支出的水量的差值<sup>[29-31]</sup>。目前计算水源涵养量的方法较多, 代表性的方法有水量平衡法、土壤蓄水能力法、林冠截留量法和年径流法等<sup>[6]</sup>。其中, 水量平衡法将流域的降水量扣除蒸散发量和其他消耗的水量后, 即为流域的水源涵养量。该方法将流域内的生态系统视为一个“黑箱”模型, 模型输入的水量与输出的水量之差即为水源涵养量<sup>[32]</sup>, 适用于所有尺度下的水源涵养量计算<sup>[33]</sup>, 故选取水量平衡法。

根据水量平衡原理, 降水落至每个子流域内, 一部分水量通过蒸散发的方式被扣除, 另一部分的水量通过地表径流的方式汇入河道内, 剩余的水量即为流域内的水源涵养量<sup>[34]</sup>。结合上述思路和 SWAT 模型输出要素, 得出基于水量平衡的水源涵养量计算公式为

$$W_i = P_i - E_i - Q_i \quad (4)$$

式中:  $W_i$  为第  $i$  个子流域的水源涵养量, mm;  $P_i$  为第  $i$  个子流域的降水量, mm;  $E_i$  为第  $i$  个子流域的实际蒸散发量, mm;  $Q_i$  为第  $i$  个子流域的地表径流量, mm。

## 2.4 水源涵养率计算方法

降水量是影响水源涵养量最主要的因素<sup>[35]</sup>, 通过计算水源涵养率这一指标, 进一步表征流域对降水的拦截和储存能力, 以反映流域拦蓄降水和供给水源的能力。水源涵养率是指流域在一定时空范围内其水源涵养量与降水量的比值, 具体公式<sup>[36]</sup>为

$$\alpha_i = \frac{W_i}{P_i} \times 100\% \quad (5)$$

式中:  $\alpha_i$  为第  $i$  个子流域的水源涵养率, %。

## 3 结果分析

### 3.1 参数率定和验证

选取 13 个参数, 在 SWAT-CUP 软件中对模型输出结果进行率定和验证, 并对 13 个参数进行敏感性分析, 结果见表 2。较为敏感的参数有土壤湿密

度、土层有效持水量、地下水再蒸发系数、土壤饱和和传导系数和河道曼宁系数,表明地表水和地下水对流域水文要素变化的影响较大。根据流域内孔家坡、润城和五龙口 3 个水文站的 2008—2016 年

实测月平均流量数据,对构建好的 SWAT 模型进行率定和验证,结果见图 3。在率定和验证期内,3 个水文站的  $R^2$  和  $E_{NS}$  均满足要求,说明模型模拟结果与沁河流域的水文特征相符。

表 2 参数敏感性排序与最优取值  
Tab. 2 Sensitivity ranking and optimal values of parameters

敏感性排序	参数名称	参数含义	初始取值区间	最优取值
1	SOL_BD	土壤湿密度	-0.5~0.5	0.07
2	SOL_AWC	土层有效持水量	-0.5~0.5	0.23
3	GW_REVAP	地下水再蒸发系数	0.02~0.20	0.04
4	SOL_K	土壤饱和和传导系数	-0.8~0.8	-0.52
5	CH_N2	河道曼宁系数	-0.01~0.3	0.27
6	SFTMP	融雪温度	-20~20	8.91
7	SOL_ALB	土壤反照率	-0.5~0.5	-0.10
8	GW_DELAY	地下水滞后系数	0~500	26.77
9	GWQMN	浅层地下水蒸发系数	0~5 000	3 675
10	CN2	潮湿条件下SCS径流曲线系数	-0.5~0.5	0.27
11	CH_K2	河流有效水力传导率	-0.01~500	258
12	ESCO	土壤蒸发补偿因子	0~1	0.02
13	ALPHA_BF	基流系数	0~1	0.93

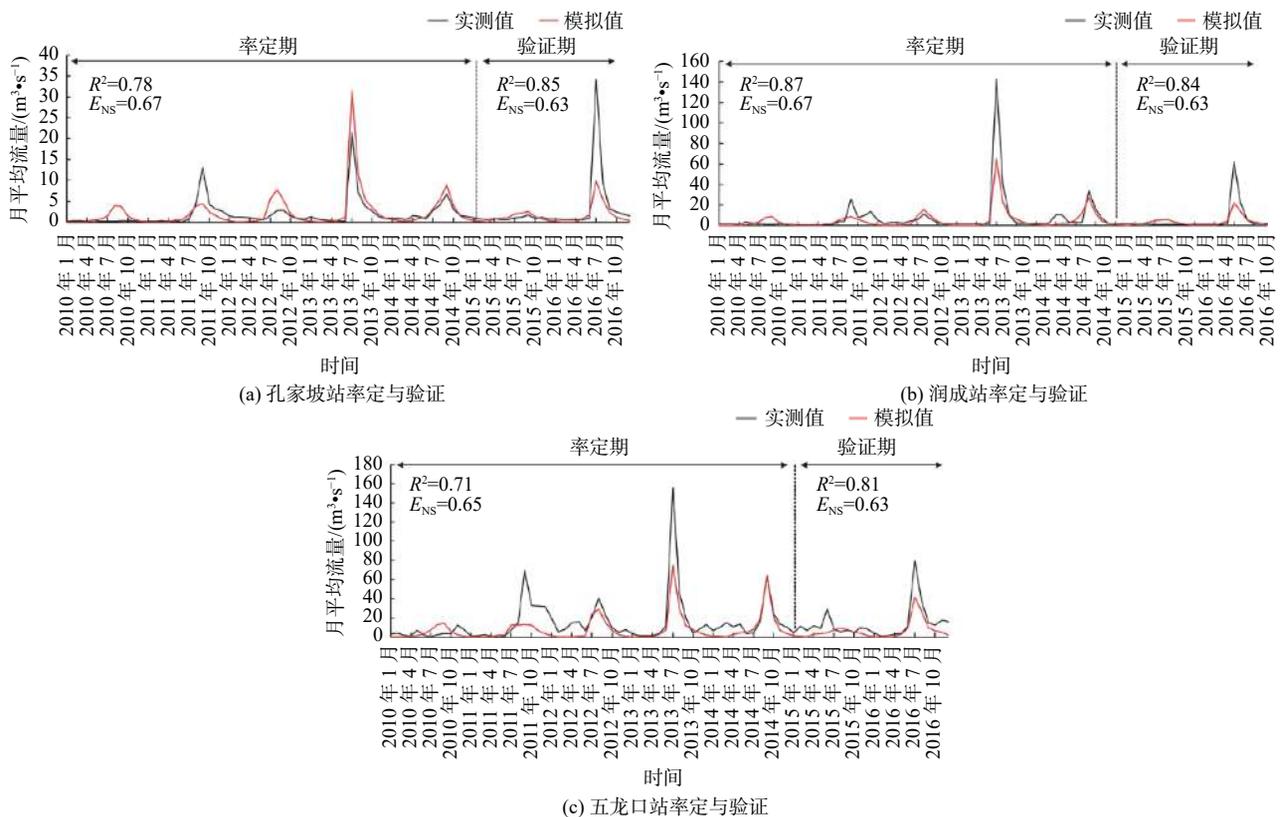


图 3 模型率定与验证结果分析

Fig. 3 Model calibration and verification results analysis

### 3.2 土地利用变化预测及分析

用CA-Markov模型预测2030年沁河流域土地利用数据。采用Kappa系数对实际与预测的2020年土地利用数据进行检验,其检验结果为 $K=0.82$ ,表明预测结果较准确,与2020年实际土地利用数据有较好的一致性,能够适用于2030年土地利用数据的预测。研究期内沁河流域各类土地利用面积的变化状况见表3。由表3可知,在2010年历史情景和2030年未来情景下林地所占土地利用类型面积

最高,所占比例均达到了40%以上。除未利用地(占比为0.01%~0.02%)外,水域所占土地利用类型面积最低,所占比例均小于1%。2010—2030年城乡居民用地面积增加最大,增加值为452 km<sup>2</sup>,这与近年来沁河流域经济快速发展、城镇化比例逐渐升高密切相关;林地面积减少最大,减少值为381 km<sup>2</sup>;耕地和草地面积也有较大幅度的变化,其中耕地面积减少了264 km<sup>2</sup>,草地面积增加了156 km<sup>2</sup>;水域面积并未发生明显变化,仅增加35 km<sup>2</sup>。

表3 不同时期沁河流域各土地利用类型面积及占比

Tab. 3 Area and proportion of different land use types in different periods in Qinhe River basin

土地利用类型	2010年(历史情景)		2020年(实测)		2020年(预测)		2030年(未来情景)	
	面积/km <sup>2</sup>	比例/%						
耕地	5 176	38.24	4 862	35.92	4 354	32.17	4 912	36.29
林地	6 031	44.56	6 070	44.85	5 473	40.44	5 650	41.74
草地	1 824	13.48	1 770	13.08	2 464	18.21	1 980	14.63
水域	71	0.53	86	0.64	162	1.20	106	0.78
城乡居民用地	432	3.19	744	5.49	1 073	7.93	884	6.53
未利用地	1	0.01	3	0.02	8	0.06	3	0.02

### 3.3 水源涵养能力计算结果及分析

#### 3.3.1 水源涵养量时空变化分析

将2008—2016年的CMADS气象数据输入率定调参后的SWAT模型,模拟出沁河流域2010—2016年水文要素变化特征,并基于SWAT模型的水源涵养量和水源涵养率计算结果,定量分析2010—2016年沁河流域水源涵养功能的变化。流域降水量、蒸发量、水源涵养量和水源涵养率的变化趋势见图4。流域内多年平均水源涵养量为49 mm,研究期内水源涵养量的年际变化趋势随降水量保持一致,说明降水量是影响水源涵养量的主要因素,这与曹叶琳

等<sup>[37]</sup>对陕西省生态系统水源涵养量的分析结果一致。降水量和水源涵养量最大的年份出现在2014年,最小的年份出现在2012年;蒸发量变化幅度不大,蒸发量最大的年份出现在2016年,最小的年份出现在2013年。整体上,2010—2016年流域内水源涵养量呈现波动上升趋势,其中,2012年和2015年的水源涵养量最小,为负值,结合许拯民等<sup>[38]</sup>对沁河流域1995—2015年标准化降水蒸发指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)的分析,2012年和2015年的SPEI较其他年份小,气象干旱程度较大,导致2012年和2015年的水源涵养量为负值。

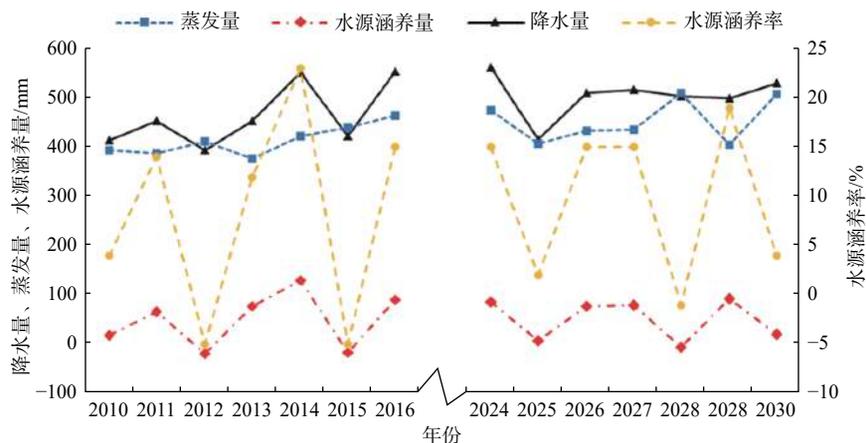


图4 沁河流域2010—2016年、2024—2030年降水量、蒸发量、水源涵养量及水源涵养率时间变化特征

Fig. 4 Temporal changes of precipitation, evaporation, water conservation and water conservation rate in the Qinhe River basin from 2010 to 2016 and from 2024 to 2030

将 CMIP6 气象数据和预测的 2030 年土地利用数据输入率定好的 SWAT 模型中,模拟 2024—2030 年沁河流域水文气象要素。未来流域降水量、蒸发量、水源涵养量和水源涵养率的变化趋势见图 4。其中未来流域多年平均水源涵养量约 51 mm,且在 2024—2030 年呈波动下降的趋势。水源涵养量最大的年份出现在 2024 年,最小的年份出现在 2028 年。

结合流域水文气象要素模拟结果和公式(4)计算各子流域 2010 年、2015 年、2025 年和 2030 年水源涵养量,结果见图 5。2010 年、2015 年和 2025 年流域水源涵养量的空间分布特征类似,水源涵养量均呈现从上游到下游递增、自西向东递减的趋势。2010 年流域的平均水源涵养量为 18 mm,且在该年内大部分子流域的水源涵养量均大于 0; 2015 年流域的平均水源涵养量最小为-16 mm,且多数子流域

的水源涵养量均为负值,这与 2015 年的 SPEI 较小、气象干旱程度较大有关;未来 2025 年流域的平均水源涵养量为 8 mm,流域上游各子流域的水源涵养量大多均为负值,其中 16 号子流域的水源涵养量最大为 56 mm,3 号子流域的水源涵养量最小为-80 mm。未来 2030 年流域的平均水源涵养量为 21 mm,需要指出,2030 年各子流域水源涵养量的空间分布特征与其他年份存在差异,整体上流域内水源涵养量呈从上游到下游递减的趋势。其中 4 号子流域的水源涵养量最大为 115 mm,下游 27 号子流域的水源涵养量最小为-43 mm,且下游多处子流域的水源涵养量均为负值,结合 2030 年土地利用预测结果分析可知,未来沁河流域城乡居民用地面积大幅度增加,流域内部分区域的不透水面积增加剧烈,更加难以积蓄降水,很大程度上导致了多处子流域的水源涵养量为负值。

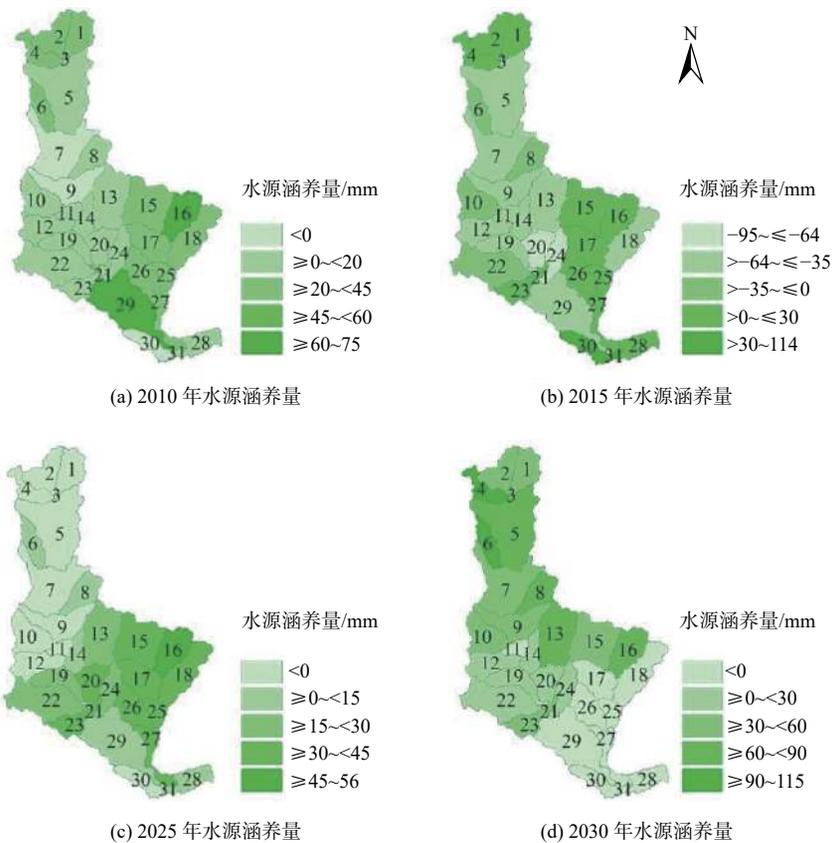


图 5 沁河流域 2010 年、2015 年、2025 年和 2030 年水源涵养量空间变化特征

Fig. 5 Spatial variation characteristics of water conservation in the Qinhe River basin in 2010, 2015, 2025 and 2030

### 3.3.2 水源涵养率时空变化分析

根据 3.3.1 节水源涵养量的计算结果,结合公式(5),对沁河流域水源涵养率的时空变化进行分析,结果见图 4。在时间维度上,现状年流域水源涵养率和水源涵养量的变化趋势一致,均呈波动上升的

趋势。沁河流域多年平均水源涵养率为 8%,水源涵养率最高年份出现在 2014 年为 23%,最低年份出现在 2012 年和 2015 年,水源涵养率均为-5%;未来沁河流域多年平均水源涵养率为 10%,水源涵养率最高年份出现在 2029 年为 19%,最低年份出现在

2028年为-1%。水源涵养率在空间维度上的结果见图6。2010年、2015年、2025年和2030年流域的水源涵养率分别为4%、-5%、2%和4%,且2015年大多数子流域的水源涵养率均为负值,降水几乎都以蒸散发或地表径流的方式被扣除。由图5和

图6可知,在空间维度上,流域各年份的水源涵养率和水源涵养量的变化特征也存在较好的一致性。综上所述,受气候与土地利用变化的影响,沁河流域水源涵养量与水源涵养率处于低值,流域涵养水源的能力较差。

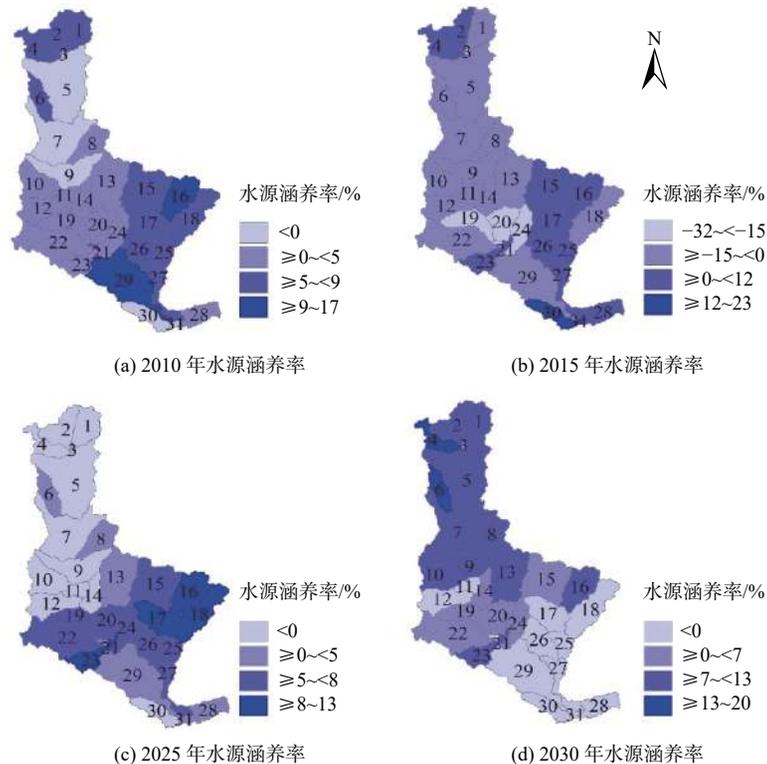


图6 沁河流域2010年、2015年、2025年和2030年水源涵养率空间变化特征

Fig. 6 Spatial variation characteristics of water conservation rate in the Qinhe River basin in 2010, 2015, 2025 and 2030

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

通过计算水源涵养量和水源涵养率两个指标量化了沁河流域水源涵养能力,根据计算结果,现状年流域多年平均水源涵养量为49 mm,多年平均水源涵养率为8%,水源涵养能力较低,这与张昌顺等<sup>[4]</sup>对中国山西及河南两省涉及沁河流域水源涵养功能的分析结果类似,且很好地验证了全国大尺度下水源涵养能力的研究结果。此外,多处子流域水源涵养量为负值,这与刘景红等<sup>[15]</sup>对浑河流域水源涵养量空间分布特征的分析结果相似。后续面向黄河流域生态保护与高质量发展这一国家重大战略,应统筹流域生态保护和经济社会发展,在不影响流域经济社会发展水平的前提下,加大对森林草地的封育保护力度,提升各子流域森林草地的覆盖面积,增强流域生态系统涵养水源的能力和稳定性。

由于气候条件、土地利用和经济社会是一个复

杂的巨系统,引起土地利用和气候变化的因素有很多。一方面,沁河流域下游地区受人类活动影响程度较大,经济增长和城镇化进程较快,其土地利用变化受人类活动和自然条件的双重影响,而本研究在预测2030年土地利用数据时初步考虑了高程、坡度和道路距离3个影响性因素,未综合考虑经济社会、人口变化等其他人文因素的影响,在一定程度上影响了2030年土地利用数据预测的准确性;另一方面,未来气候模式和情景众多,本文为综合考虑我国“双碳”目标和沁河流域碳排放强度较高的实际情况,使用了BCC-CSM2-MR气候模式的SSP2-4.5情景数据,对未来水源涵养能力的预测存在一定的局限性。水源涵养能力受气候变化及人类活动的影响复杂,后续研究应关注综合人类活动影响的土地利用预测、多气候模式集成等方面,进一步揭示相关因素对水源涵养能力变化的驱动机制。

### 4.2 结论

通过构建沁河流域SWAT模型,结合CMIP6

气象数据集和 CA-Markov 模型预测的未来土地利用数据, 计算了历史和未来年份沁河流域的水源涵养量和水源涵养率, 分析了水源涵养能力的时空演变特征, 得出主要结论如下:

SWAT 模型适用于对沁河流域水文变化特征的模拟, 率定期和验证期内 3 个水文站的实测月平均流量与 SWAT 模型模拟的月平均流量较为契合, 决定系数  $R^2$  和纳什效率系数  $E_{NS}$  均满足要求, 模拟精度较高。

现状年沁河流域多年平均水源涵养量为 49 mm, 多年平均水源涵养率为 8%。在时间上, 2010—2016 年流域水源涵养量及水源涵养率呈波动上升的趋势, 2024—2030 年流域水源涵养量及水源涵养率呈波动下降趋势; 在空间上, 2010 年、2015 年、2025 年沁河流域水源涵养量呈从上游到下游递增的趋势, 2030 年则呈从上游到下游递减的趋势; 流域水源涵养率和水源涵养量的空间分布特征存在较好的一致性。

流域水源涵养量与降水的时空变化趋势一致, 受气候与土地利用变化影响, 在各年份内均有子流域的水源涵养量和水源涵养率出现负值, 说明沁河流域水源涵养能力较低。

#### 参考文献:

- [1] 左其亭, 吴青松, 金君良, 等. 区域水平衡基本原理及理论体系[J]. *水科学进展*, 2022, 33(2): 165-173. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2022.02.001.
- [2] 左其亭, 王娇阳, 杨峰, 等. 水源涵养相关概念辨析及水源涵养能力计算方法[J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42(2): 13-19. DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2022.02.003.
- [3] 吕一河, 胡健, 孙飞翔, 等. 水源涵养与水文调节: 和而不同的陆地生态系统水文服务[J]. *生态学报*, 2015, 35(15): 5191-5196. DOI: 10.5846/stxb201404140717.
- [4] 张昌顺, 范娜, 刘春兰, 等. 1990—2018年中国生态系统水源涵养功能时空格局与演变研究[J/OL]. *生态学报*, 2023(13): 1-10 [2023-05-17]. DOI: 10.5846/stxb202107191937.
- [5] ZHANG B, LI W H, XIE G D, et al. Water conservation of forest ecosystem in Beijing and its value[J]. *Ecological economics*, 2010, 69(7): 1416-1426. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2008.09.004.
- [6] 王云飞, 叶爱中, 乔飞, 等. 水源涵养内涵及估算方法综述[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(6): 1041-1071. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0109.
- [7] 贾雨凡, 王国庆. 基于InVEST模型的伊洛河流域水源涵养能力评估[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(3): 101-108. DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2023.03.014.
- [8] 刘树锋, 陈记臣, 关帅, 等. 基于InVEST模型的杨溪河流域土地利用变化对水源涵养功能的影响[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(12): 4746-4751. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2022.12.009.
- [9] 马文静, 王晓燕, 耿润哲. 我国森林生态系统水量调节研究综述[J]. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(2): 87-92. DOI: 10.19789/j.1004-9398.2016.02.017.
- [10] 王尧, 徐佩, 傅斌, 等. 森林生态系统水源涵养功能评估模型研究进展[J]. *生态经济*, 2018, 34(2): 158-164, 169.
- [11] 包玉斌, 李婷, 柳辉, 等. 基于InVEST模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化[J]. *地理研究*, 2016, 35(4): 664-676. DOI: 10.11821/dlyj201604006.
- [12] SU C H, FU B J. Evolution of ecosystem services in the Chinese Loess Plateau under climatic and land use changes[J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 101: 119-128. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2012.12.014.
- [13] CONG W C, SUN X Y, GUO H W, et al. Comparison of the SWAT and InVEST models to determine hydrological ecosystem service spatial patterns, priorities and trade-offs in a complex basin[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 112: 106089. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106089.
- [14] LÜKE A, HACK J. Comparing the applicability of commonly used hydrological ecosystem services models for integrated decision-support[J]. *Sustainability*, 2018, 10(2): 346. DOI: 10.3390/su10020346.
- [15] 刘景红, 郑晓, 樊俊美, 等. 基于SWAT模型的浑河中游水源涵养服务价值评估[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(11): 3905-3912. DOI: 10.13287/j.1001-9332.202111.007.
- [16] WU Q, SONG J X, SUN H T, et al. Spatiotemporal variations of water conservation function based on EOF analysis at multi time scales under different ecosystems of Heihe River basin[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 325: 116532. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116532.
- [17] 乔飞, 富国, 徐香勤, 等. 三江源区水源涵养功能评估[J]. *环境科学研究*, 2018, 31(6): 1010-1018. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2018.03.45.
- [18] 林峰, 陈兴伟, 姚文艺, 等. 基于SWAT模型的森林分布不连续流域水源涵养量多时间尺度分析[J]. *地理学报*, 2020, 75(5): 1065-1078. DOI: 10.11821/dlxb202005013.
- [19] 纪义虎, 左其亭, 马军霞. 基于Tapio和LMDI模型的

- 沁河流域水资源利用与碳排放关系脱钩分析[J/OL]. 水资源保护: 1-14[2023-05-22].
- [20] 辛晓歌, 吴统文, 张洁, 等. BCC模式及其开展的CMIP6试验介绍[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(5): 533-539. DOI: 10.12006/j.issn.1673-1719.2019.039.
- [21] 杨肖丽, 马慧君, 吴凡, 等. 基于CMIP6的全球及干旱带干旱时空演变[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 40-49. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2023.02.006.
- [22] 向竣文, 张利平, 邓瑶, 等. 基于CMIP6的中国主要地区极端气温/降水模拟能力评估及未来情景预估[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(1): 46-57, 81. DOI: 10.14188/j.1671-8844.2021-01-007.
- [23] VAN LIEW M W, GARBRECHT J. Hydrologic simulation of the little Washita River experimental watershed using SWAT[J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 2003, 39(2): 413-426. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2003.tb04395.x.
- [24] 李帅, 魏虹, 刘媛, 等. 气候与土地利用变化下宁夏清水河流域径流模拟[J]. 生态学报, 2017, 37(4): 1252-1260. DOI: 10.5846/stxb201606291299.
- [25] 刘小妮, 鞠琴, 鞠晓晗, 等. 基于CA-Markov模型的渭河中下游干流土地利用变化模拟及预测[J]. 节水灌溉, 2022(11): 1-8. DOI: 10.12396/jsgg.2022098.
- [26] 张学儒, 周杰, 李梦梅. 基于土地利用格局重建的区域生境质量时空变化分析[J]. 地理学报, 2020, 75(1): 160-178. DOI: 10.11821/dlxb202001012.
- [27] 刘强, 杨众养, 陈毅青, 等. 基于CA-Markov多情景模拟的海南岛土地利用变化及其生态环境效应[J]. 生态环境学报, 2021, 30(7): 1522-1531. DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2021.07.021.
- [28] 肖寒, 欧阳志云, 赵景柱, 等. 森林生态系统服务功能及其生态经济价值评估初探: 以海南岛尖峰岭热带森林为例[J]. 应用生态学报, 2000(4): 481-484. DOI: 10.13287/j.1001-9332.2000.0119.
- [29] BAI Y, OCHUODHO T O, YANG J. Impact of land use and climate change on water-related ecosystem services in Kentucky, USA[J]. Ecological Indicators, 2019, 102: 51-64. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.01.079.
- [30] 曾莉, 李晶, 李婷, 等. 基于贝叶斯网络的水源涵养服务空间格局优化[J]. 地理学报, 2018, 73(9): 1809-1822. DOI: 10.11821/dlxb201809015.
- [31] XU W, XIAO Y, ZHANG J, et al. Strengthening protected areas for biodiversity and ecosystem services in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2017, 114(7): 1601-1606. DOI: 10.1073/pnas.1620503114.
- [32] 王晓学, 沈会涛, 李叙勇, 等. 森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法[J]. 生态学报, 2013, 33(4): 1019-1030. DOI: 10.5846/stxb201206130852.
- [33] 周佳雯, 高吉喜, 高志球, 等. 森林生态系统水源涵养服务功能解析[J]. 生态学报, 2018, 38(5): 1679-1686. DOI: 10.5846/stxb201701180159.
- [34] 杨勇. 植被分布与景观格局对东江流域水源涵养功能影响研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2022. DOI: 10.27212/d.cnki.glnsu.2022.000436.
- [35] 龚诗涵, 肖洋, 郑华, 等. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2017, 37(7): 2455-2462. DOI: 10.5846/stxb201512012406.
- [36] 蒋桂芹, 毕黎明, 贺逸清. 若尔盖湿地水源涵养时空变化及影响因素[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(29): 12688-12694. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2021.29.044.
- [37] 曹叶琳, 宋进喜, 李明月, 等. 陕西省生态系统水源涵养功能评估分析[J]. 水土保持学报, 2020, 34(4): 217-223. DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2020.04.032.
- [38] 许拯民, 林睿, 左向菊, 等. 基于SWAT模型的沁河流域短中长期综合干旱指数构建及适用性分析[J]. 中国农村水利水电, 2022(6): 76-83, 89.

## Analysis and prediction of water conservation capacity in Qinhe River basin based on SWAT

ZHANG Lekai<sup>1</sup>, ZUO Qiting<sup>1,2,3</sup>, ZHONG Tao<sup>1</sup>, ZHANG Yu<sup>1</sup>, WU Qingsong<sup>1</sup>

( 1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan International Joint Laboratory of Water Cycle Simulation and Environmental Protection, Zhengzhou 450001, China; 3. Yellow River Institute for Ecological Protection & Regional Coordinated Development, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China )

**Abstract:** In the context of global climate change, excessive deforestation, urban construction and irrational use of water resources have been carried out by human beings for a long time, and the phenomena of water resource shortage, water environment pollution, water ecology deterioration and river closure have become increasingly prominent. The original ecosystems in many river basins were destroyed and the ecosystem service functions were reduced. Water conservation capacity has important service functions such as regulating runoff, purifying water quality, and regulating and storing flood water. As a first-level tributary of the Yellow River, the Qinhe River is an

important part of the ecosystem along the river. However, due to the influence of climate change and human activities in recent years, the land use change of the Qinhe River basin is significant, and the inter-annual variation characteristics of water conservation function are gradually complicated. Therefore, exploring the water conservation capacity of Qinhe River basin in the changing environment can provide scientific reference value for ecological protection and high-quality development strategy of the Yellow River basin.

SWAT model was constructed, and the land use data set of the Qinhe River basin in 2030 was predicted based on the CA-Markov model to analyze and predict the temporal and spatial changes of water conservation capacity in the Qinhe River basin. Combined with CMIP6 meteorological data, the hydrological factors of the river basin simulated by the SWAT model were obtained according to the principle of water balance. The temporal and spatial changes in water conservation in the past and future years were calculated. In addition, by calculating the ratio of water conservation and precipitation, the index of water conservation rate was introduced to further quantify the water conservation capacity of the basin for storing precipitation and supplying water.

The results show that the average annual water conservation is 49 mm and the average annual water conservation rate is 8% in the Qinhe River basin. From 2010 to 2016, water conservation showed a trend of fluctuation and increase, and the water conservation is consistent with the inter-annual variation trend of precipitation. The spatial distribution characteristics of water conservation and water conservation rate in 2010, 2015, and 2025 are similar, showing a trend of increasing from upstream to downstream and decreasing from west to east. However, the spatial distribution characteristics of water conservation and water conservation rate in 2030 are different from other years, and the overall trend is decreasing from the upstream to the downstream, and the water conservation and water conservation rate are negative in the downstream multi-section basins.

The analysis showed that the spatial distribution of water conservation rate and water conservation in the basin has a good consistency, and there are negative values in the sub-basins, indicating that the water conservation capacity of the basin is low, the ecological environment is damaged to a high degree, and the ecological water consumption in the river is insufficient, which is in line with the actual situation that the relevant river reaches were cut off.

**Key words:** water conservation; SWAT model; CA-Markov model; water conservation rate; Qinhe River basin