

土地利用及气候变化下洮儿河流域 水文要素分析和径流预测

马利国, 刘建卫, 逢晓腾, 景海华

(大连理工大学建设工程学院水环境研究所, 大连 116024)

摘要: [目的] 揭示洮儿河流域径流对土地利用及气候变化的响应特征, 并预测流域径流的未来演变规律。[方法] 以洮儿河流域为研究区域, 基于 SWAT 模型, 分别以 CMIP6 气候模式和 PLUS 模型驱动气象及土地利用变化, 预测 2025—2100 年的发展情景, 对流域的径流响应过程进行定量分析。[结果] 1) SWAT 模型在率定期和验证期的 R^2 均 >0.75 , NSE 均 >0.65 ; PLUS 模型总体精度均 >0.85 , Kappa 系数 >0.80 , 2 个模型在该流域的适用性较好。2) 相对于基准期 (1990—2022 年), 洮儿河流域在 3 种未来情景下的降水量均高于历史时期, 表现为 $SSP126 > SSP585 > SSP245$; 在 3 种未来情景下的气温均高于历史时期, 表现为 $SSP585 > SSP245 > SSP126$ 。3) 2025—2100 年, 洮儿河流域内耕地、水域和未利用地面积显著增长, 林地面积缓慢增加, 而草地和建设用地面积持续减少。4) 未来期年平均径流量在 $SSP126$ 情景下将超过基准期水平, 而在 $SSP245$ 和 $SSP585$ 情景下则低于基准期水平, 3 种情景下的多年平均径流量分别为 11.17×10^8 、 9.00×10^8 、 $9.34 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{s}$ 。[结论] 洮儿河流域未来径流量变化呈持续增长的趋势, 在 3 个水平年内的年平均径流量达到最大值时, 应提升防汛意识。研究结果为未来洮儿河流域的合理开发建设提供一定参考依据。

关键词: 径流预测; CMIP6 气候模式; PLUS 土地利用; SWAT 模型

中图分类号: P333.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)02-0390-11

Analysis of Hydrological Elements and Runoff Prediction in Tao'er River Basin under Land Use and Climate Change

MA Ligu, LIU Jianwei, PANG Xiaoteng, JING Haihua

(Institute of Water and Environmental Research, Faculty of Infrastructure Engineering,

Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: [Objective] To reveal the characteristics of the response of runoff to land use and climate change in the Tao'er River basin, and to predict the future evolution of runoff in the basin. [Methods] Taking the Tao'er River basin as the study area, the runoff response process of the watershed was quantitatively analyzed based on the SWAT model with the CMIP6 climate model and PLUS model driving meteorological and land use changes, respectively, to project development scenarios for 2025—2100. [Results] 1) The SWAT model had an $R^2 > 0.75$ and an $NSE > 0.65$ for both the rate period and the validation period. The overall accuracy of the PLUS model was >0.85 , and the Kappa coefficient was >0.80 , and the two models had good applicability in this watershed. 2) Relative to the baseline period (1990—2022), the Tao'er River Basin received higher precipitation under all three future scenarios than during the historical period, as shown by $SSP126 > SSP585 > SSP245$, and higher temperatures under all three future scenarios than during the historical period, as shown by $SSP585 > SSP245 > SSP126$. 3) During the period of 2025—2100, the areas of cropland, watersheds, and unutilized land in the Tao'er River Basin increased significantly, while the area of forested land increased slowly, and the areas of

收稿日期: 2024-09-27

修回日期: 2024-10-16

录用日期: 2024-10-25

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-12-02

资助项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (52309079)

第一作者: 马利国 (1999—), 男, 硕士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: maliguo@mail.dlut.edu.cn

通信作者: 刘建卫 (1978—), 男, 博士, 副教授, 主要从事水文学及水资源、水环境研究。E-mail: jwliu@dlut.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

grasslands and built-up lands continued to decrease. 4) The average annual runoff in the future period would exceed the level of the base period under the SSP126 scenario, while it would be lower than the level of the base period under the SSP245 and SSP585 scenarios, and the average multi-year runoff under the three scenarios would be 11.17×10^8 , 9.00×10^8 and 9.34×10^8 m³/s. [Conclusion] The Tao'er River basin's future runoff change presents the trend of continuous growth, therefore should enhance the flood control consciousness when the annual average runoff reaches the maximum value in three level years, the results can provide certain reference basis for reasonable development and construction of the Tao'er River basin in the future.

Keywords: runoff prediction; CMIP6 climate model; PLUS land use; SWAT modeling

Received: 2024-09-27

Revised: 2024-10-16

Accepted: 2024-10-25

Online(www.cnki.net): 2024-12-02

气候变化日益成为全球环境与社会发展的重要议题,气温上升和降水模式的变化对水文循环产生深远影响^[1]。流域作为水资源的重要集水区域,其水文过程受到降水、蒸发、土壤湿度和土地利用等多种因素的影响,各因素相互作用,决定径流的变化趋势。为更好地管理水资源和维护区域生态系统的健康,深入研究气候与土地利用变化对径流的影响关系,对于有效应对未来的水资源变化具有重要意义。

目前,已有大量研究分析气候和土地利用变化对径流量的复合效应。在气候变化方面,通常采用气候模型(如CMIP6^[2-3])来模拟未来的气温与降水情况。在土地利用变化方面,利用PLUS^[4]、CLUE-S^[5]等模型预测未来土地利用情境,并与SWAT、HEC-HMS等水文模型结合,对径流进行预测。例如,马新萍等^[6]探讨汉江上游土地利用与气候变化对径流的影响;张吉洪等^[7]模拟亚热带江河源头区不同土地利用与气候变化及其组合情景下的径流响应特征;郑培龙等^[8]研究黄土高原渭河流域径流对气候和土地利用变化的响应。然而,针对洮儿河流域气候与土地利用变化共同影响下的综合研究仍显不足。

洮儿河流域受温带大陆性气候影响,年降水量和气温变化明显,水资源丰富且生态环境多样,成为研究气候、土地利用和水文响应的重要区域。然而,目前尚未在该流域开展关于未来气候和土地利用变化如何综合影响径流量的研究^[9]。特别是在面对区域性干旱、洪水等极端天气事件愈发频发的背景下,准确预测该区域的径流量已成为研究的迫切需求。本研究整合CMIP6气候模拟数据和PLUS模型的土地利用预测结果,利用SWAT模型系统量化未来气候与土地利用变化对洮儿河流域径流量的影响。研究旨在探讨二者的复合影响,填补该流域相关研究的空白,促进洮儿河流域在应对气候和土地利用变化带来的挑战时,制定更加科学和有效的水资源管理政策,从而实现区域生态环境的可持续发展。

1 研究区域与数据

1.1 研究区概况

洮儿河流域(45°42'~47°15'N, 120°10'~124°00'E)位于我国北方半干旱地区,属于气候变化敏感区域,面积为3.2万km²。流域内以耕地、草地和林地为主。流域内河流水源春季主要为冰雪融水,夏季主要为降水。

流域内年平均气温5.2℃,多年平均降水量433 mm,降水量年际差异显著。年内降水多集中于6—9月,汛期降水量可占全年降水量的78%,流域内90%以上的大洪水事件均发生在该时段内^[10],流域水系见图1。

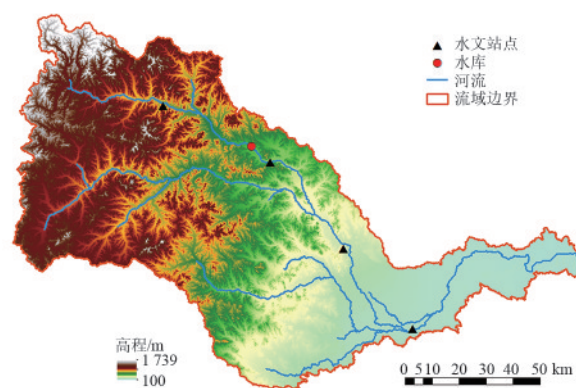


图1 洮儿河流域水系及水文气象站点、水库位置分布

Fig. 1 Distribution of water system, hydrometeorological stations and reservoirs in the Tao'er River basin

1.2 数据来源

本研究所需的资料数据主要包括流域数字高程模型(DEM)数据、水文气象资料、下垫面资料和气候资料。

1) DEM数据:来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>),采用ASTER全球数字高程模型的V3版本,空间分辨率为30 m。

2) 气象数据:来源于中国气象数据网(<https://data.cma.cn/>),采用中国地面气候资料日值数据集,涵盖1951年以来的降水、气温、相对湿度和风速数据。

3) 流量数据(镇西水文站、洮南水文站):实测洪水流量及对应的降水数据来源于松辽委水文局,将数据整理成日尺度和月尺度数据。

4) 土地利用数据:来源于武汉大学 CLCD 数据集^[11],空间分辨率为 30 m,本研究共收集 1985—2020 年土地利用遥感资料,并依据一级土地利用分类标准将数据重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地。

5) CMIP6 全球模式资料:根据模式的齐全性、代表性和常用性,采用来自 17 个不同国家和不同研究机构的 CMIP6 模式(ACCESS-CM2、ACCESS-ESM1-5、BCC-CSM2-MR、CanESM5、CAS-ESM2-0、CESM2-WACCM、CMCC-CM2-SR5、CMCC-ESM2、FGOALS-f3-L、FGOALS-g3、GFDL-ESM4、IPSL-CM6A-LR、KACE-1-0-G、MIROC6、MPI-ESM1-2-HR、MRI-ESM2-0、TaiESM1),多模式适应性评估选用月尺度数据,基准期及未来气候情景数据选用日尺度数据,变量为降水和气温,变量标签统一为 r1ilp1fl^[12-13]。

2 研究方法

2.1 SWAT 水文模型

本研究基于 SWAT 模型进行水文过程模拟,进而量化分析气候及土地利用变化对径流的影响,并预测未来不同气候情景的径流演变趋势。SWAT 模型是由美国农业部农业研究局开发的半分布式水文模型,具有较强的物理机制,可实现长期连续模拟,目前被广泛应用于流域水文模拟、非点源污染控制及流域管理等方面。

利用流域 DEM 数据及河流水系数据建立流域水文模型,以下游月亮泡水库作为流域出口,将流域划分为 27 个子流域^[14-15]和 324 个水文响应单元(HRUs)。针对径流模拟筛选 20 个参数,结合自动率定和手动调整方式率定模型参数,使用 SUFI2 算法对镇西和洮南 2 个水文站 1988—2009 年的月径流观测数据进行率定和验证。

设置 1988—1989 年为预热期,1990—1999 年为率定期,2000—2009 年为验证期。决定系数(R^2)和纳什系数(NSE)作为衡量 SWAT 模型准确性的指标,计算公式为:

$$R^2 = \frac{[\sum_i (Q_{x,i} - \bar{Q}_x)(Q_{y,i} - \bar{Q}_y)]^2}{\sum_i (Q_{x,i} - \bar{Q}_x)^2 \sum_i (Q_{y,i} - \bar{Q}_y)^2} \quad (1)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_i (Q_x - Q_y)^2}{\sum_i (Q_{x,i} - \bar{Q}_x)^2} \quad (2)$$

式中: Q 为流量(m^3); $\bar{Q}$ 为流量平均值(m^3); x 和 y 分

别为实测值和模拟值; i 为第 i 个实测值或模拟值。

通常的值一般认为 $R^2 > 0.60$, $NSE > 0.50$, 则 SWAT 模拟结果满足要求^[16]。设置近期水平年(2025—2035 年)、远景水平年(2036—2050 年)和远景设想水平年(2051—2100 年)3 个水平年模拟洮儿河流域水文气象要素^[17-18]。

2.2 CMIP6 气候模式优选

由于不同的 CMIP6 气候模式模拟结果存在较大的地区差异,为提高气候变化预估精度,针对不同地区气候特点进行模式适应性评估工作十分重要^[19-20]。

本研究利用 1990—2022 年洮南水文站的气象观测数据,识别降水和气温 2 个变量,以月为时间尺度,分析不同气候模式对降水和气温的模拟能力。采用评价指标对历史数据与模拟数据进行相关性分析,表示其相关程度的强弱,以确保模拟数据精准可用。选用均方根误差(RMSE)、平均绝对误差(MAE)、相关系数(R)和偏差(Bias)4 个评价指标^[13],利用等级排序方法对 17 个气候模式进行优选。评价指标的计算公式为

均方根误差(RMSE):

$$RMSE = (x_i - y_i)^2 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (3)$$

平均绝对误差(MAE):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad (4)$$

相关系数(R):

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

偏差(Bias):

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i) \quad (6)$$

式中: x_i 为每个月的观测值; y_i 为每个月各模式的模拟值; n 为月模拟值的个数; $\bar{x}$ 为月观测数据的平均值; $\bar{y}$ 为月模拟数据的平均值。

通过计算评价指标全面评估模式模拟结果的准确性和适应性。根据指标的数值来判断模式的优劣,选择最适合的模式用于气候变化的研究和预测。一般情况下,均方根误差(RMSE)和平均绝对误差(MAE)数值越小,表示模拟值更接近实测值;相关系数(R)接近于 1,表示模拟值与实测值具有高度相关性,而接近于 0 表示相关性较弱;偏差(Bias)接近于 0,表示模拟值与实测值的平均差异较小。综合考虑各评价指标的数值,有时针对具体的研究目的,某些指标可能更为重要,可以对其进行加权综合评估,对各个模式进行排序,确定最符合研究需求的 5 种模式。

2.3 PLUS 模型

本研究采用 PLUS 模型,优势在于对各地类土地利用变化进行深度挖掘,实现更加精准的多地类复杂演变过程模拟。PLUS 模型以马尔可夫链作为基础,集成土地扩张分析策略(LEAS)和多类型随机种子模型(CARS),能够挖掘驱动因子和地类斑块之间的相关性,并模拟未来多种土地利用类型的斑块级变化^[21-22]。

通过考虑相关性、时效性、适应性、政策和经济因素,本研究共选取 11 项数据作为土地利用变化的驱动因子^[23-24](表 1)。以 2010 年和 2020 年 2 期土地利用数据为基础,提取各类土地利用的用地扩张面积,基于随机森林算法进行采样计算,获取各类土地利用的用地发展概率,结合转换成本矩阵和领域权重等机制,预测自然发展情景下 2030—2100 年洮儿河流域土地利用分布图^[25]。

通过 Kappa 系数检验模型精度,可以揭示景观空间信息的变化情况,适用于 2 幅图件的相似性评价,计算公式为:

Kappa = (Po - Pc) / (Pp - Pc) (7)

式中:Po 为模拟正确的栅格占比;Pp 为理想状态下模拟正确比例;Pc 为随机状态下模拟正确比例。

表 1 驱动因子信息

Table 1 Driver information

类型	数据	数据来源
社会经济数据	人口	http://www.resdc.cn
	GDP	
	到一级道路距离	https:// www.webmap.cn/
	到二级道路距离	
	到三级道路距离	
气候与环境数据	到河流距离	https://data.cma.cn/
	气温	
	降水	https://www.gscloud.cn/
	高程	
	坡度	http://www.ncdc.ac.cn/portal/
	土壤类型	

3 结果与分析

3.1 SWAT 模型参数率定及验证

对洮儿河流域镇西水文站和洮南水文站 1988—2009 年的月径流观测数据进行模型率定和验证。运用 SWAT-CUP 软件对其进行参数敏感性分析,选取对模型模拟结果影响较大的参数进行率定,最终选出 20 个参数,并依据其对流域径流敏感性程度大小进行排序。从表 2 可以看出,径流曲线系数、主河道曼宁系数值、河道有效水力传导度、河岸基流因子和基流回归系数敏感性较高。

表 2 洮儿河流域 SWAT 模型参数值

Table2 Parameter values of SWAT model in Tao'er River basin

序号	参数名称	物理意义	参数范围	最优值
1	CN2	径流曲线数	-0.5~0.5	0.278
2	CH_N2	主河道曼宁系数值	-0.01~0.3	0.212
3	CH_K2	河道有效水力传导度	-0.01~500	424.643
4	ALPHA_BNK	河岸基流因子	0~1	0.730
5	ALPHA_BF	基流回归系数	0~1	0.813
6	GWQMN	浅层地下水径流系数	0~5 000	616.304
7	SOL_AWC(1)	第 1 层土壤可利用水量	0~1	0.806
8	SOL_AWC(2)	第 2 层土壤可利用水量	0~1	0.904
9	SOL_K(1)	第 1 层土壤饱和水力传导度	-0.8~0.8	-0.472
10	SOL_K(2)	第 2 层土壤饱和水力传导度	-0.8~0.8	-0.267
11	SOL_BD(1)	土壤体积质量	0.9~2.5	1.581
12	GW_DELAY	地下水延迟时间	0~500	12.028
13	GW_REVAP	浅层地下水再蒸发系数	0.02~0.2	0.161
14	ESCO	土壤蒸发补偿系数	0~1	0.895
15	SMTMP	雪融化基础温度	-20~20	3.916
16	SMFMX	6 月 21 日雪融系数	0~20	13.064
17	SMFMN	12 月 21 日雪融系数	0~20	10.716
18	TIMP	结冰气温滞后系数	0.01~1.0	0.183
19	SFTMP	降雪气温	-20~20	-4.962
20	SURLAG	地表径流滞后系数	0.05~24	15.603

径流过程模拟效果见图 2。率定期的模拟值与实测值吻合程度较好,验证期的模拟值高于实测值,原因是模拟结果忽略察尔森入库的汛期流量,可能是由于上游水库汛期拦蓄洪水行为,而模拟结果仅

体现天然情况下的河道流量,致使模拟值大部分高于实测值。2000—2009 年径流比 1990—1999 年呈明显的降低趋势,主要是由于水利工程的修建在上游拦蓄洪水改变天然径流,使下游存在断流的情况。

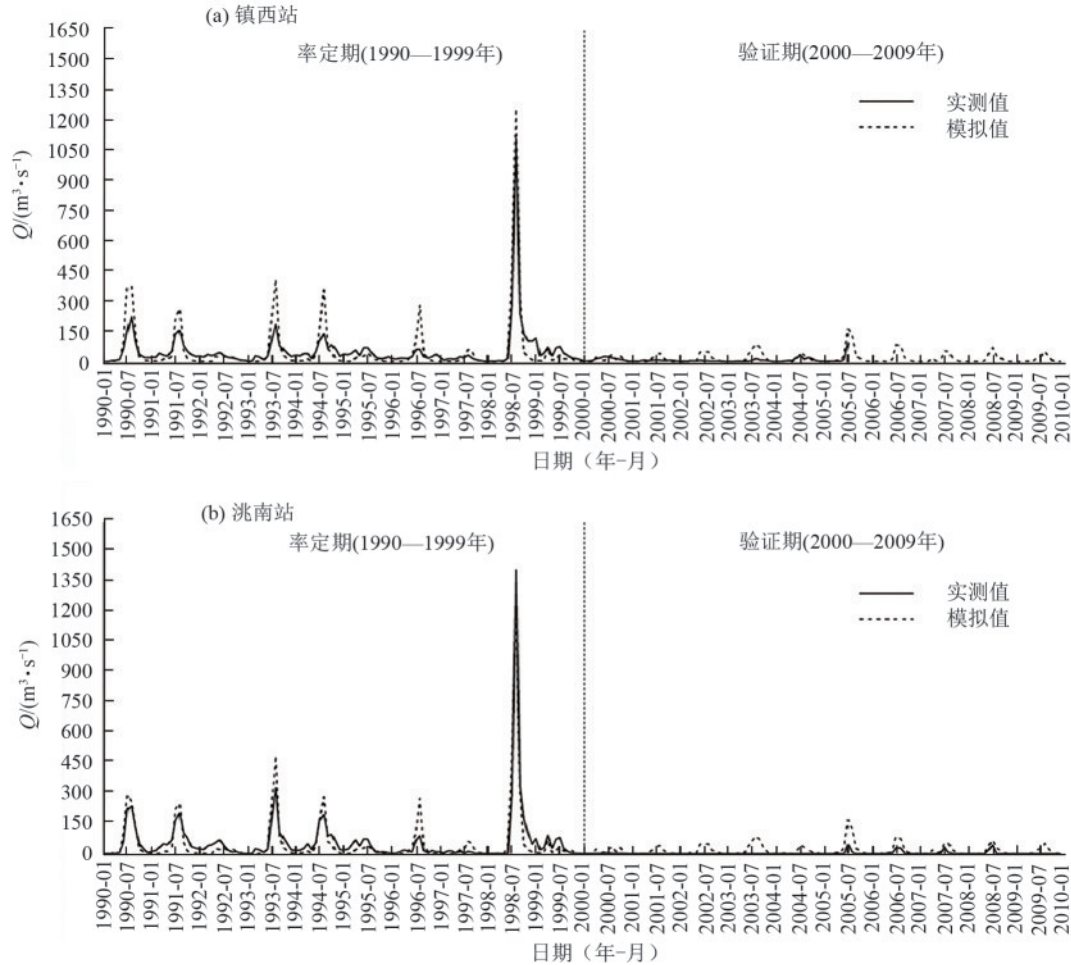


图 2 1990—2009 年镇西站及洮南站月径流实测值与模拟值对比

Fig. 2 Comparison of the measured and simulated values of monthly runoff at Zhenxi Station and Taonan Station from 1990 to 2009
模型率定期和验证期的结果见表 3。率定期和验证期的 R^2 均 >0.75 , NSE 均 >0.65 , 表明 SWAT 模型径流模拟结果较好,适用于洮儿河流域,可用于后续研究。

表 3 1990—2009 年镇西站及洮南站月径流模拟率定与验证结果

时间	镇西水文站				洮南水文站			
	实测值/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	模拟值/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	R^2	NSE	实测值/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	模拟值/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	R^2	NSE
率定期(1990—1999 年)	53.26	53.30	0.88	0.77	59.01	51.85	0.82	0.79
验证期(2000—2009 年)	9.92	15.73	0.81	0.73	7.60	15.68	0.76	0.69

3.2 CMIP6全球气候模式

根据数据的评价指标和数据完整性,经多模式适应性评估确定降水的最优模式为 GFDL-ESM4、CanESM5、CMCC-ESM2、ACCESS-ESM1-5 和 MRI-ESM2-0;气温的最优模式为 ACCESS-ESM1-5、MIROC6、CMCC-ESM2、ACCESS 和 CanESM5。
根据降尺度结果,使用多模式集合平均值法,计算得 2025—2100 年不同排放情景下洮儿河流域年平

均降水量和气温数据(表 4)。将 2025—2100 年作为气候变化预测期,1990—2022 年作为基准期,对降水和温度的演变趋势进行对比分析。

表 4 气候情景特征

Table 4 Characteristics of climate scenarios		
名称	发展特征	排放情景
SSP126	SSP1:可持续发展	RCP2.6
SSP245	SSP2:中度发展	RCP4.5
SSP585	SSP5:基于化石燃料的发展	RCP8.5

洮儿河流域未来期年平均降水量变化结果见表 5。由表 5 可知,与基准期相比,近期水平年流域年平均降水量在 SSP126、SSP245、SSP585 情景下分别增加 13.83%、1.49%、3.53%;远景水平年流域年平均降水量在 3 种情景下分别增加 12.01%、10.11%、15.22%;远景设想水平年流域年平均降水量在 3 种情景下分别增加 21.96%、18.17%、21.02%。

表 5 洮儿河流域未来期年平均降水量变化

Table 5 Changes in the average annual precipitation in the Tao'er River basin in the future							
基准期 (1990—2022 年)	未来情景	近期水平年 (2025—2035 年)		远景水平年 (2036—2050 年)		远景设想水平年 (2051—2100 年)	
实测值/mm		预测值/mm	变化率%	预测值/mm	变化率%	预测值/mm	变化率%
429.66	SSP126	489.07	13.83	481.28	12.01	524.03	21.96
	SSP245	436.06	1.49	473.10	10.11	507.74	18.17
	SSP585	444.83	3.53	495.05	15.22	519.96	21.02
	平均值	456.65	6.28	483.14	12.45	517.24	20.38

洮儿河流域未来期年平均气温变化结果见表 6。由表 6 可知,与基准期相比,近期水平年洮儿河流域年平均气温在 SSP126、SSP245、SSP585 情景下分别增加 1.29、1.51、1.59℃;远景水平年流域年平均气温在 3 种情景下分别增加 2.06、1.94、2.42℃;远景设想水平年流域年平均气温在 3 种情景下分别增加 2.50、3.45、5.56℃。

3.3 土地利用变化

2000—2020 年土地利用桑基图结果见图 3。洮儿河流域耕地、水域和未利用地面积分别增加 998.33、27.93、85.84 km²,林地增加缓慢,草地和建设用地分别减少 1 344.18、66.84 km²。

表 6 洮儿河流域未来期年平均气温变化

Table 6 Changes in annual mean temperature in the Tao'er River basin in the future							
基准期 (1990—2022 年)	未来情景	近期水平年 (2025—2035 年)		远景水平年 (2036—2050 年)		远景设想水平年 (2051—2100 年)	
实测值/℃		预测值/℃	变化率%	预测值/℃	变化率%	预测值/℃	变化率%
5.55	SSP126	6.84	23.22	7.61	37.16	8.05	45.13
	SSP245	7.06	27.25	7.49	34.95	9.00	62.12
	SSP585	7.14	28.65	7.97	43.58	11.11	100.25
	平均值	7.01	26.37	7.69	38.56	9.39	69.17

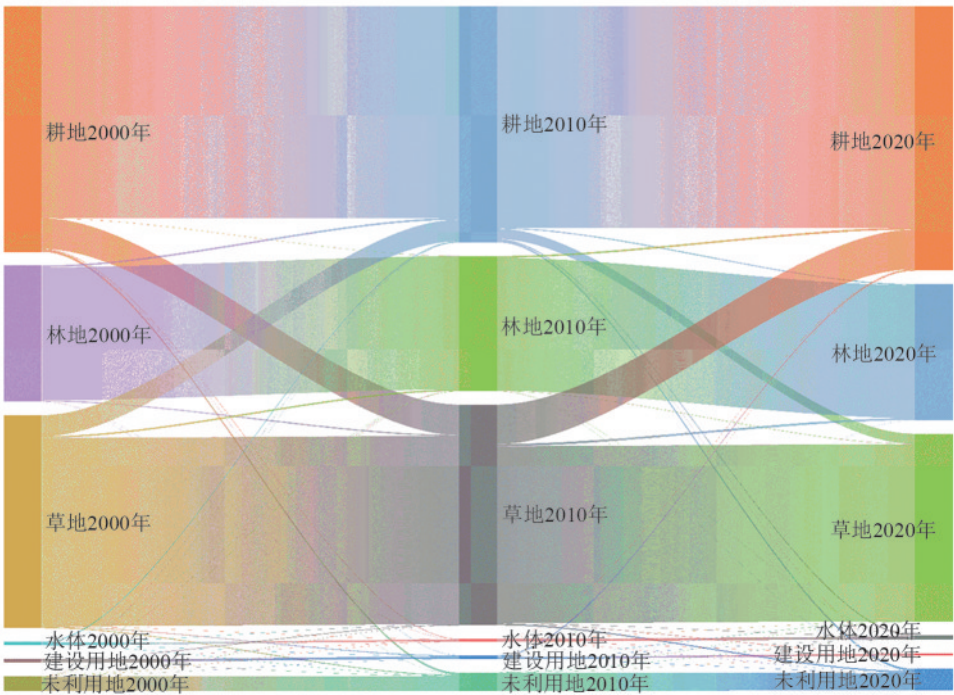


图 3 2000—2020 年土地利用桑基图

Fig. 3 Land use Sankey diagram from 2000 to 2020
<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

分别以 2000 年、2010 年、2020 年实际土地利用状况进行对比,2000 年、2010 年、2020 年预测的土地利用总体精度均>0.85,Kappa 系数>0.80,精度验证结果见表 7,模拟精度极高^[26],表明 PLUS 模型模拟效果较好,可用于洮儿河流域土地利用变化预测。

表 7 土地利用精度验证

Table7 Land use accuracy verification							%
土地利用类型	2000 年		2010 年		2020 年		
	实际占比	预测占比	实际占比	预测占比	实际占比	预测占比	
耕地	39.84	37.20	38.30	38.56	42.87	37.06	
草地	22.09	18.23	21.91	18.50	22.09	21.75	
林地	34.57	36.45	35.82	35.15	30.49	36.73	
水域	0.60	1.61	0.44	1.37	0.68	0.51	
建设用地	0.57	2.24	0.59	2.12	0.37	0.45	
未利用地	2.33	4.27	2.93	4.30	3.51	3.50	
总体精度	0.87		0.92		0.88		
Kappa 系数	0.82		0.89		0.83		

在保持驱动因子和模型参数不变的情况下,利用 PLUS 模型预测 2030—2100 年洮儿河流域土地利用类型,未来土地利用预测见图 4。根据 2000—2020 年的发展趋势,预计洮儿河流域的未来土地利用变化将表现出明显的趋势,主要体现在耕地面积的持续增长及草地和建设用地的逐步减少,此变化与 2000—2020 年的土地利用转型密切相关,反映出政府政策的延续性,

尤其是“耕地红线”政策所带来的耕地保护力度。在 2030—2100 年,预计耕地面积将增加 3 102.29 km²,其中 2 948.29 km²的草地转化成为耕地,草地的贡献面积最大;林地面积将增加 195.67 km²,完全由草地转化而来。草地的持续减少不仅受到农业需求的推动,还与经济向城市集中及基础设施建设的扩展密切相关。

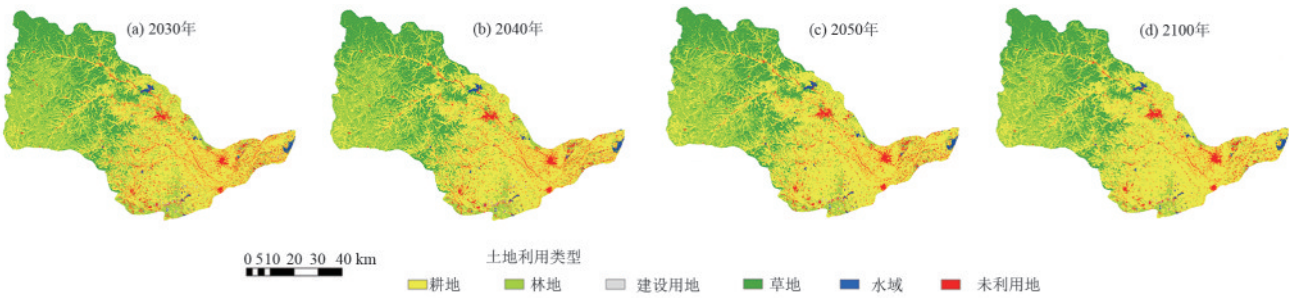


图 4 未来土地利用预测

Fig. 4 Future land-use projections

3.4 径流预测

本研究重点关注洮儿河流域下游的未来径流研究,将预测得到的 2030 年、2050 年和 2100 年的土地利用数据与 CMIP6 气候模式 3 种未来情景数据输入

SWAT 模型中,保持土壤及其他阈值设置不变,模拟近期水平年、远景水平年和远景设想水平年 3 个时间段内流域未来发展情景下径流的年际及年内变化趋势。洮南站未来年平均径流量变化见表 8。

表 8 洮南站未来年平均径流量变化

Table 8 Changes in the average annual runoff of Taonan Station in the future							
基准期 (1990—2022 年)	变化情景	近期水平年 (2025—2035 年)		远景水平年 (2036—2050 年)		远景设想水平年 (2051—2100 年)	
实测值/(10 ⁸ m ³ ·s ⁻¹)		预测值/(10 ⁸ m ³ ·s ⁻¹)	变化率%	预测值/(10 ⁸ m ³ ·s ⁻¹)	变化率%	预测值/(10 ⁸ m ³ ·s ⁻¹)	变化率%
11.30	SSP126	11.10	−1.77	10.10	−10.62	12.30	8.85
	SSP245	7.26	−35.75	9.43	−16.55	10.30	−8.85
	SSP585	7.87	−30.35	10.50	−7.08	9.64	−14.69

由表 8 可知,对于径流量,相较于基准期,2025—2035 年的流域多年平均年径流量在 SSP126、SSP245、SSP585 情景下分别变化 −1.77%、−35.75%、−30.35%;在 2036—2050 年,流域多年平均年径流量在 SSP126、SSP245、SSP585 情景下分别变化 −10.62%、−16.55%、−7.08%;在 2051—2100 年,

变化幅度分别为 8.85%、-8.85%、-14.69%，与洮儿河流域的相关研究^[27]相吻合。

流域年径流量变化见图 5。未来时期的年径流量相较于基准期减少,主要原因是耕地和林地面积的增加对径流产生抑制作用。由于气候变化致使降水量显著增加,提高流域的年径流量,即使耕地和林地的增加对径流有抑制作用,年径流量总体仍呈增加趋势。在 SSP126 情景下,洮儿河流域在 3

个水平年内年平均径流量的最大值分别出现在 2034 年、2040 年、2099 年,其径流量值分别为 16.02×10^8 、 14.34×10^8 、 $21.45 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{s}$;在 SSP245 情景下,其最大值出现在 2034 年、2047 年、2083 年,分别为 15.08×10^8 、 16.83×10^8 、 $18.58 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{s}$;在 SSP585 情景下,其最大值出现在 2025 年、2039 年、2100 年,分别为 10.80×10^8 、 15.43×10^8 、 $17.96 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

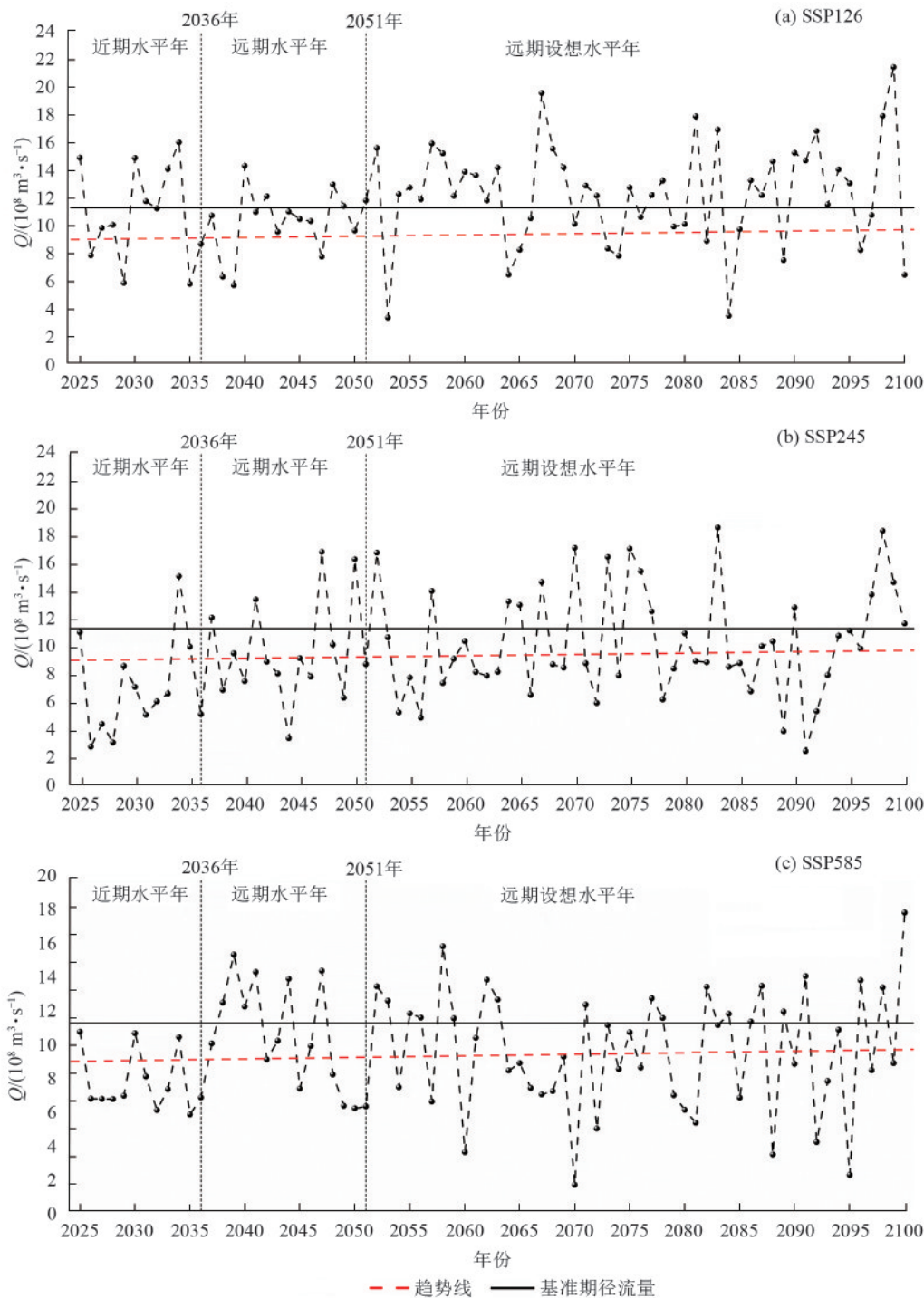


图 5 未来不同情景下洮儿河流域年径流量变化情况

Fig. 5 Changes in annual runoff in the Tao'er River basin under different scenarios in the future
<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

洮儿河流域处于半干旱地区,水资源量相对匮乏,降水时空分布不均,年内降水小于蒸发量。从表9可以看出,在11月至翌年5月,降水不足,难以有效补充径流,出现径流减少的现象;6—10月降水量占全年总量的85%以上,降水补给大于蒸散发损失,径流量整体呈上升趋势。年内径流主要集中在6—10月,最大流量出现在8月,年内变化趋势与历史时期大致相同。

表9 洮儿河流域未来月平均径流量变化

Table 9 Changes in the future monthly average runoff in the Tao'er River basin									10 ⁸ m ³ /s
月份	2025—2035 年			2036—2050 年			2051—2100 年		
	SSP126	SSP245	SSP585	SSP126	SSP245	SSP585	SSP126	SSP245	SSP585
1	0.076	0.052	0.052	0.064	0.059	0.070	0.073	0.061	0.053
2	0.036	0.024	0.024	0.028	0.026	0.031	0.035	0.030	0.030
3	0.023	0.011	0.013	0.014	0.012	0.015	0.016	0.014	0.011
4	0.006	0.003	0.002	0.006	0.005	0.007	0.008	0.007	0.006
5	0.009	0.006	0.004	0.007	0.007	0.018	0.029	0.028	0.022
6	0.229	0.053	0.076	0.150	0.106	0.246	0.465	0.312	0.311
7	1.826	0.752	0.958	1.707	1.484	1.735	2.700	2.114	2.186
8	3.409	2.079	2.518	3.248	2.993	3.303	3.879	3.347	3.181
9	2.807	2.075	2.150	2.673	2.556	2.762	2.957	2.564	2.336
10	1.557	1.196	1.222	1.501	1.447	1.552	1.603	1.348	1.213
11	0.618	0.494	0.434	0.596	0.575	0.595	0.624	0.463	0.393
12	0.155	0.134	0.119	0.149	0.157	0.163	0.168	0.132	0.124

4 讨论

4.1 合理性分析

通过对洮儿河流域径流量的预测研究发现,该流域在未来几十年内年平均径流量呈显著增加趋势,尤其在SSP126和SSP585情景下,2030—2100年的年平均径流量分别达到 11.17×10^8 、 9.34×10^8 m³/s,气温升高及降水量增加可能导致实际蒸发量的变化,影响径流量的增加,与孙嘉琪^[27]、刘启宁^[28]的观点一致,在某些极端气候条件下导致径流量可能减少。

本研究结合CMIP6预测的气候变化数据与PLUS预测的土地利用变化数据,通过SWAT模型模拟径流,增强对洮儿河流域径流变化过程的理解,并为区域水资源管理提供参考。然而,本研究预测情景有限,对特殊极端气候事件^[29]的模拟能力有待提升。研究未深入探讨社会经济因素对土地利用变化的潜在影响,也可能对径流量的预估产生影响。因此,未来的研究应综合考虑特殊极端气候事件和社会经济因素,以更全面地评估气候和土地利用变化对径流量的综合影响。综上所述,本研究为理解洮儿河流域的洪水资源变化提供有力支持,并为相关地方政策的制定提供参考依据,特别是在洪水资源管理和土地利用规划方面。研究结果强调土地利用与气候变化之间的相互作用,提示决策者在制定政策时需综合考虑这些因素。本研究不仅能够激发关于变化环境与洪水资源管理的深入探讨,还在实际应用中产生积极影响,推动可持续发展和资源的

合理利用。通过针对气候和土地利用双重变化的综合性研究,不仅填补该流域现有的研究空缺,还为未来水资源管理挑战提供新领域。

4.2 不确定性分析

鉴于未来气候和土地利用变化所带来的潜在不确定性,研究结果可能存在一定的局限性。因此,为全面评估研究结果的可靠性,对其不确定性进行分析。

在本文模型率定参数的基础上,对比替换中国逐年土地覆盖数据集CLCD^[11]和中国科学院资源环境科学与数据中心CNLUCC数据集,分析SWAT模型模拟精度,结果表明,CNLUCC模拟的径流值始终偏大,这可能是由于CNLUCC数据集统计的耕地面积不足,而中国逐年土地覆盖数据集CLCD的模拟值更接近实际值,在一定程度上反映本文率定参数的合理性,未来应进一步讨论土地利用数据集的不确定性对SWAT模型模拟结果的空间影响。

本研究基于CMIP6气候模式,选取符合中国可持续发展目标SSP126、碳达峰目标SSP245和高碳路径SSP585模拟洮儿河流域2025—2100年可能的气候变化。进一步根据历史实测气象数据(1990—2022年)和CMIP6历史及预测气象数据,分析2025—2100年的年平均降雨量和气温变化趋势(表5、表6)。历史时期和不同气候情景下的降雨均表现出较大的不确定性,历史实测降雨明显低于CMIP6历史降雨数据,整体拟合趋势更接近SSP126,进一步表明未来

洮儿河流域潜在的极端降雨风险可能增加,而历史时期的气温变化趋势更加接近SSP126。

5 结论

1)SWAT模型在洮儿河流域径流模拟方面模拟效果较好,模型结果可用于径流预测。率定期和验证期的 R^2 均 >0.75 ,NSE均 >0.65 ;PLUS模型在该流域土地利用模拟方面具有很好的适应性,总体精度均 >0.85 ,Kappa系数 >0.80 。

2)未来土地利用变化方面,耕地、水域和未利用地面积将持续增长,林地面积缓慢增长,年平均增长速率分别为25.31、5.66、15.93、1.87 km²;而草地和建设用地面积分别以48.19、0.58 km²/a的速率减少。

3)2025—2100年,流域的降水量和气温在3种情景下均高于历史时期,降水量的年平均增长速率为0.76、1.56、1.63 mm,气温的年平均增长速率为0.03、0.04、0.09 °C。

4)洮儿河流域未来时期的年平均径流量低于基线期,2025年后径流量增加,其在3种情景下的年增长速率为0.03、0.05、0.01 m³/s。

参考文献:

- [1] IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability [M]. Cambridge, U K: Cambridge University Press, 2023.
- [2] 王磊,曾思栋,阳林翰,等.基于CMIP6的未来气候变化下汉江流域干旱特征研究[J].水资源保护,2024,40(5):39-45.
WANG Lei, ZENG Sidong, YANG Linhan, et al. CMIP6-based meteorological drought characteristic study under climate change in the Hanjiang River basin [J]. Water Resources Protection, 2024,40(5):39-45.
- [3] 葛路,詹良通,江衍铭.气候变化对元江流域水文过程的影响[J].中国农村水利水电,2022(4):41-49.
GE L, ZHAN L T, JIANG Y M. The impact of climate change on hydrological processes in Yuanjiang River basin [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(4):41-49.
- [4] 胡丰,张艳,郭宇,等.基于PLUS和InVEST模型的渭河流域土地利用与生境质量时空变化及预测[J].干旱区地理,2022,45(4):1125-1136.
HU F, ZHANG Y, GUO Y, et al. Spatial and temporal changes in land use and habitat quality in the Weihe River basin based on the PLUS and InVEST models and predictions [J]. Arid Land Geography, 2022,45(4):1125-1136.
- [5] 董兆蓉.基于CLUE-S模型的岷江上游土地利用空间冲突及预测研究[D].成都:四川师范大学,2022.
DONG Z R. Spatial conflict and prediction of land use in the upper reaches of Minjiang River based on CLUE-S model [D]. Chengdou: Sichuan Normal University, 2022.
- [6] 马新萍,武涛,余玉洋.基于SWAT模型的汉江上游流域径流情景预测研究[J].国土资源遥感,2021,33(1):174-182.
MA X P, WU T, YU Y Y. A study of runoff scenario prediction in the upper reaches of Hanjiang River based on SWAT model [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2021,33(1):174-182.
- [7] 张吉洪,姚正红,李俊杰,等.亚热带江河源头区径流对土地利用及气候变化的响应研究[J].水土保持研究,2024,31(6):55-66.
ZHANG J H, YAO Z H, LI J J, et al. Study on the response of runoff to land use and climate change in subtropical river headwater [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(6):55-66.
- [8] 郑培龙,李云霞,寇馨月,等.黄土高原藉河流域径流对气候和土地利用变化的响应[J].水土保持通报,2016,36(2):250-253.
ZHENG P L, LI Y X, KOU X Y, et al. Effects of climate variation and land use change on runoff in Jiehe watershed of Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016,36(2):250-253.
- [9] LI Y Y, CHANG J X, WANG Y M, et al. Spatiotemporal impacts of climate, land cover change and direct human activities on runoff variations in the Wei River basin, China [J]. Water, 2016,8(6):220.
- [10] 董洋洋.基于供需耦合分析的洮儿河流域水资源利用规划研究[D].辽宁大连:大连理工大学,2020.
DONG Y Y. Study on water resource utilization planning of Tao'er River basin based on the coupling analysis of supply and demand [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2020.
- [11] YANG J, HUANG X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. Earth System Science Data, 2021,13(8):3907-3925.
- [12] 陈泽霞,朱睿,尹振良,等.基于CMIP6多模式的黑河干流山区降水气温变化趋势分析[J].高原气象,2022,41(6):1544-1556.
CHEN Z X, ZHU R, YIN Z L, et al. The trend analysis of future precipitation and temperature in the mountainous regions of Heihe mainstream based on the CMIP6 multi-model [J]. Plateau Meteorology, 2022,41(6):1544-1556.
- [13] 王苗,秦鹏程,余晨旭,等.基于CMIP6多模式集合的华中地区气候变化模拟与预估[J].气象与环境学报,2023,39(6):51-60.
WANG M, QIN P C, SHE C X, et al. Simulation and projection of climate change in Central China based on CMIP6 multi-model ensemble [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2023,39(6):51-60.
- [14] 邱曦,马军霞,左其亭,等.基于区域水平衡理论和SWAT模型的沁河流域水收支平衡演变分析[J].水利

- 水电科技进展, 2024, 44(1): 9-15.
- QIU X, MA J X, ZUO Q T, et al. Evolution analysis of water budget balance in Qinhe River basin based on regional water balance theory and SWAT model [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2024, 44(1): 9-15.
- [15] 寇丽敏. 基于 SWAT 模型的洮儿河流域水资源演变形势分析[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2017.
- KOU L M. The situation analysis of water resources in Tao'er River basin based on SWAT model [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2017.
- [16] JEYRANI F, MORID S, SRINIVASAN R. Assessing basin blue-green available water components under different management and climate scenarios using SWAT [J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 256: e107074.
- [17] TAVOSIM, VAFAKHAH M, MOOSAVI V. Evaluation of SWAT model in runoff simulation using rainfall and temperature derived from satellite images [J]. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 2024: 1-20.
- [18] 贾何佳, 李谢辉, 文军, 等. 黄河源区径流变化模拟及未来趋势预估[J]. *资源科学*, 2022, 44(6): 1292-1304.
- JIA H J, LI X H, WEN J, et al. Runoff change simulation and future trend projection in the source area of the Yellow River [J]. *Resources Science*, 2022, 44(6): 1292-1304.
- [19] ZHAO J Z, HE S P, FAN K, et al. Projecting winter-time newly formed arctic sea ice through weighting CMIP6 model performance and independence [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2024, 41(8): 1465-1482.
- [20] 张文青, 刘浏, 伦玉蕊, 等. 青藏高原未来极端降水时空变化特征及海拔依赖性研究[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(2): 149-158.
- ZHANG W Q, LIU L, LUN Y R, et al. Spatial-temporal variation characteristics of future extreme precipitation and its elevation dependency over the Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(2): 149-158.
- [21] 冯波, 孟宪红, 杨显玉, 等. 第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)中青藏高原气温和降水的适用性评估及极端气候事件变化预估[J]. *高原气象*, 2025, 44(2): 265-278.
- FENG B, MENG X H, YANG X Y, et al. Temperature and precipitation assessment and extreme climate events prediction based on the coupled model intercomparison project phase 6 over the Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Plateau Meteorology*, 2025, 44(2): 265-278.
- [22] 杨智勇, 牛健植, 樊登星, 等. 基于 SWAT 和 PLUS 模型的窟野河流域径流对土地利用变化的响应及预测[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(1): 289-299.
- YANG Z Y, NIU J Z, FAN D X, et al. Response and prediction of runoff to land use change in Kuye River basin based on SWAT and PLUS models [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(1): 289-299.
- [23] 王芳, 陈芝聪, 谢小平. 太湖流域建设用地与耕地景观时空演变及驱动力[J]. *生态学报*, 2018, 38(9): 3300-3310.
- WANG F, CHEN Z C, XIE X P. Analysis of spatial-temporal evolution and it's driving forces of construction land and cultivated landscape in Taihu Lake basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(9): 3300-3310.
- [24] 余文广, 陈芸芝, 唐丽芳, 等. 气候和土地利用变化情景下闽江流域水沙变化模拟[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(2): 216-233.
- YU W G, CHEN Y Z, TANG L F, et al. Simulation of runoff and sediment changes in the Minjiang River basin under climate and land use change scenarios [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(2): 216-233.
- [25] LI S P, CAO Y G, LIU J L, et al. Simulating land use change for sustainable land management in China's coal resource-based cities under different scenarios [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 916: e170126.
- [26] 兰健, 渠立权. 未来 10 年珠江流域土地利用多情景模拟及碳储量评估[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(3): 266-275.
- LAN J, QU L Q. Multi-scenario simulation of land use and carbon storage assessment in the Pearl River basin in the next decade [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(3): 266-275.
- [27] 孙嘉琪. 环境变化情景下洮儿河流域水资源响应及预测[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- SUN J Q. Water resources response and prediction in Tao'er River basin under changing environment [D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [28] 刘启宁. 变化环境下洮儿河流域径流演变规律研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- LIU Q N. Study on the evolution mechanisms of water resources in Tao'er River basin under the changing environment [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [29] 宋轩宇, 许民, 李振中, 等. 叶尔羌流域极端气候变化特征及其对径流的影响研究[J]. *水文*, 2023, 43(2): 52-57.
- SONG X Y, XU M, LI Z Z, et al. Study on variation characteristics of extreme climate and its impacts on runoff in Yarkant basin [J]. *Journal of China Hydrology*, 2023, 43(2): 52-57.