

金沙江中上游流域未来径流模拟研究

杜智毅, 倪福全, 邓玉, 周家豪

(四川农业大学 水利水电学院, 四川 雅安 625014)

摘要: 为了探究金沙江中上游流域未来径流变化趋势,为流域防洪规划提供依据,基于 SWAT 水文模型,选用 CMIP5 数据集建立未来时段的全球气候模式,从时间和空间尺度解析研究区 2022—2050 年径流变化趋势。结果表明:流域 2022—2050 年降水量和平均气温均高于基准期,并且呈现上升趋势,其中流域南部降水量增幅较大,流域北部气温增幅较大。在 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 3 种气候情景下,2022—2050 年年径流量均呈现增大趋势,变化率分别为 5.79×10^8 、 5.53×10^8 、 $2.99 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。相较于基准期,未来春季和秋季径流量呈现减少趋势,夏季和冬季径流量呈现增加趋势,冬季径流量增幅达到了 10%。流域产流量呈现从西北到东南依次增加的特点,相较于基准期,流域南部产流量均呈现增加趋势。未来径流量呈现增加趋势,冬季径流量增幅较大,可能会发生冬汛等极端水文事件,流域南部受洪水威胁的可能性进一步增大。

关键词: 未来径流模拟; 产流量空间分布; SWAT 模型; 金沙江中上游流域

中图分类号:TV121; P333

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)02-0071-10

Simulation of future runoff in the middle and upper reaches of Jinsha River Basin

DU Zhiyi, NI Fuquan, DENG Yu, ZHOU Jiahao

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China)

Abstract: The change trend of future runoff in the middle and upper reaches of Jinsha River Basin was investigated to provide some technical support for the planning of flood control in the basin. Based on the SWAT hydrological model, the CMIP5 data set was selected to establish a global climate model for the future period of 2022–2050, and the runoff change trend in the study area was analyzed from the temporal and spatial scales. The results show that the precipitation and temperature in the basin from 2022 to 2050 are both higher than those in the base period, and show an upward trend, with a large increment in rainfall in the south of the basin and a large increment in temperature in the north of the basin. Under the three scenarios of RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5, the runoff from 2022 to 2050 all show an upward trend, and the change rates are 579×10^6 , 553×10^6 and $299 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$, respectively. Compared with the base period, the future spring and autumn runoff show a downward trend, whereas the summer and winter runoff show an upward trend, with the largest increment in winter, reaching 10%. The runoff yield increases sequentially from northwest to southeast; compared with the base period, the runoff yield in the south of the basin presents an increasing trend. The results indicate that the runoff will show an increasing trend in the future, with a greater increment in winter, and extreme hydrological events such as winter floods may occur; in the future, the threat of floods in the southern basin may further aggravate.

Key words: future runoff simulation; spatial distribution of runoff yield; SWAT model; middle and upper reaches of Jinsha River Basin

收稿日期:2022-07-25; 修回日期:2022-11-16

基金项目:四川省教育厅农村水安全工程研究中心项目(035Z2289)

作者简介:杜智毅(1998—),男,四川眉山人,硕士研究生,主要从事农业水土环境研究。

通讯作者:倪福全(1965—),男,四川成都人,博士,教授,硕士生导师,主要从事水安全和农业水土环境研究。

1 研究背景

全球气候变化将改变流域的水文过程,直接或间接地影响流域的产流量和时空分布规律^[1]。随着全球变暖趋势的加剧,20 世纪 50 年代以来,极端水文事件的强度和频率发生了明显变化^[2]。洪水、干旱等极端水文事件往往会造成巨大损失,因此未来径流模拟研究引起了中外学者的高度关注,成为水文与水资源领域的研究焦点^[3-5]。

SWAT(soil and water assessment tool)模型由于其效率高、精度高、模拟周期较长和易于操作,已被广泛应用于不同流域的水资源评价中^[6-9],在研究变化环境下的流域径流过程及响应规律、变化趋势以及归因分析等方面均有很好的应用^[10-13]。Koua 等^[14]使用 SWAT 模型对洛博流域进行了水量分析,发现 SWAT 模型能够很好地适用于径流模拟;贾何佳等^[15]利用 SWAT 模型对黄河源区未来径流进行了模拟;马月^[16]运用 SWAT 模型研究了金沙江流域气候变化对径流的影响;陈华等^[17]对考虑在水库调蓄下的金沙江径流进行了模拟研究。近年来,SWAT 模型在金沙江流域得到了一定应用^[18-19],但仍缺乏对金沙江流域的未来径流变化和未来产流量空间分布的研究。

金沙江地处长江上游,流域水能资源丰富,年径流变化幅度较大,极端水文事件频发。该流域上游通天河段是南水北调西线工程的引水水源地,中游多发区域性暴雨,洪水灾害等极端事件时有发生。曾小凡等^[20]研究发现,从 20 世纪 60 年代以来,金沙江中上游流域平均气温上升显著。第六次联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)报告指出,水安全风险随着全球升温水平的提高而增加,干旱和洪水等极端水文事件发生的概率也会增大^[21]。金沙江中上游流域的气温持续升高可能会导致洪水等极端水文事件的发生频率增加。因此,本文建立金沙江中上游流域 SWAT 模型,结合未来气候模式对金沙江中上游流域未来径流进行模拟研究,评估年尺度和季节尺度下的径流量变化趋势,探讨研究区未来产流量的时空变化特征,以为金沙江中上游流域防洪规划提供科学依据。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

金沙江中上游流域($90^{\circ}34' \sim 100^{\circ}43'E, 23^{\circ}52' \sim$

$35^{\circ}41'N$)跨青海省、四川省、云南省和西藏自治区共 4 个省份(自治区),总面积 $24.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。金沙江全长约 3 496 km,自西北向东南穿过青藏高原、横断山脉、云贵高原、四川盆地西南部,地势上西北高、东南低,地形复杂多变,地貌差异大。其中金沙江在云南省丽江市石鼓镇以上为上游、石鼓镇至四川省攀枝花市雅砻江口为中游。金沙江中上游流域概况见图 1。

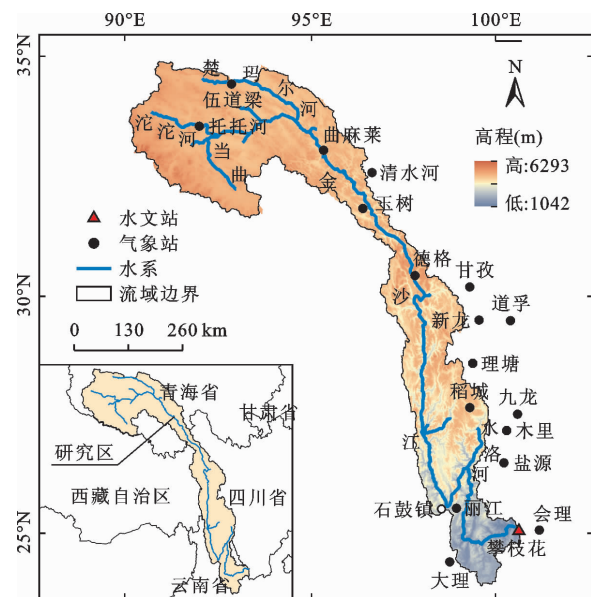


图 1 金沙江中上游流域概况

金沙江全流域多年平均气温为 4.1°C ;降水量时空分布不均,上游和中游的多年平均降水量分别为 346 和 603 mm,降水量年内分布不均匀,6—10 月份的降水量占全年的 80%。金沙江中游水能资源丰富,是整个长江上游水电开发体系中不可或缺的一环^[22]。此外,金沙江中上游流域是重要的旅游区,旅游资源十分丰富,在当地社会经济的发展中占有重要地位。

2.2 数据来源及用途

SWAT 模型数据包括数字高程数据(digital elevation model, DEM)、土地利用数据、土壤数据、气象数据和水文数据等。气象数据为流域 1971—2020 年的日降水量、最高气温、最低气温、湿度、风速和太阳辐射数据;土地利用分为耕地、林地、草地、水域、城镇用地和未利用土地 6 类;土壤数据来源于全球土壤数据库(Harmonized World Soil Database, HWSD),可直接用于 SWAT 模型土壤数据构建^[23];水文数据为 1973—2020 年攀枝花水文站月径流观测数据,构建金沙江中上游流域 SWAT 模型所需数据见表 1。

表 1 SWAT 模型数据一览表

数据名称	数据来源	分辨率及处理方式	数据用途
数字高程数据	地理空间数据云	90 m,裁剪、投影变换	生成流域河网、划分子流域
土地利用数据	地理空间数据云	1 km,ENVI 遥感解译、重分类、投影变换	HRU 划分
土壤类型数据	HWSD 土壤数据库	1 km,裁剪、投影变换	HRU 划分,构建土壤数据库
气象数据	研究区 17 个气象站	日值,建立天气发生器、按一定格式 应用 SWAT Weather 软件处理	构建气象数据库
径流数据	攀枝花水文站	月值	率定及验证

2.3 未来气候模式

未来气候模式已经成为研究未来径流变化的重要工具之一。世界气候研究计划(world climate program,WCRP)组织的 CMIP(coupled model intercomparison project)为国际耦合模式的评估和后续发展提供了重要的平台^[24]。CMIP5 目前有 65 个大气环流模式,被广泛应用于气候变化研究领域^[25-27]。本文选择在中国表现较好的大气环流模式 BCC_CSM1.1 下的 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 共 3 种不同排放情景进行径流模拟研究,其中 RCP8.5 为高排放情景,RCP4.5 为中等稳定化情景,RCP2.6 为低排放情景,即分别代表在 21 世纪末辐射强迫达到 8.5、4.5 和 2.6 W/m²。

2.4 SWAT 水文模型

SWAT 模型是美国农业部(United States Department of Agriculture,USDA)开发的流域尺度的分布式水文物理模型^[28],径流模拟是 SWAT 模型最基本、最重要的功能,运用 SWAT 模型进行径流模拟研究是 SWAT 研究的焦点。

SWAT 模型中有众多参数,本文结合金沙江中上游流域的区域特点选取了 20 个参数对构建好的 SWAT 模型模拟结果进行了校准与验证,并选取决定系数 R^2 、纳什系数 NSE 、误差百分数 $PBIAS$ 、均方根误差与标准误差的比率 PSR 用于评价模型的模拟精度^[29-30]。

决定系数 R^2 表示的是模型模拟值与径流实测值之间的贴合程度, R^2 越接近于 1,说明模拟值与实测值越贴合,模型模拟效果越好; NSE 是指模型模拟值与径流实测值之间偏离程度, NSE 越接近于 1,说明两者偏差越小^[31]; $PBIAS$ 是指模型模拟值与径流实测值之间的变化趋势, $PBIAS < 0$ 说明模型模拟值偏大,反之,模型模拟值偏小^[32]; PSR 是指均方根误差与实测径流值标准差的比值, PSR 绝对值越小,则模型模拟效果越好^[33]。一般情况下,当 $R^2 > 0.7$ 、 $NSE > 0.6$ 时,可认为模拟结果与实测数据拟合情况较好,说明模型可以基本准确地反映该流域

的水文循环过程。

2.5 参数敏感性分析

参数与模型运行的不确定性与模型的运行效率密切相关,但是 SWAT 模型的参数众多,因此需要进行敏感性分析找出敏感性较强的参数,本研究使用 LH-OAT(Latin hypercube and one-factor-at-a-time)算法^[34]对参数进行敏感性分析。LH-OAT 算法结合了 LH 抽样法和 OAT 敏感性分析法,该算法以 LH 抽样思想将整个参数空间进行分层,在各分层中依次进行随机抽样。现将参数空间划分为 n 层,每层包含 m 个参数,即生成了 n 个 LH 抽样参数组。在此基础上根据 OAT 敏感性方法思路,将 n 个抽样参数组中的 1 个参数进行微小调整改变,即改变参数 m ,计算目标函数随每次微小改变的情况。

本文以 p 和 t 检验值参数作为敏感程度的评判标准, p 值越接近于 0 且 t 绝对值越大,则说明参数越敏感^[35]。

3 结果与分析

3.1 SWAT 模型的适用性分析

采用攀枝花水文站月径流观测值对构建的 SWAT 模型进行校准验证,选取 1973—1996 年为模型模拟的率定期,1997—2020 年为模型模拟的验证期,率定期和验证期流量模拟值与观测值对比见图 2,模型率定及验证结果各评价指标值见表 2。

由图 2 和表 2 可见,模型参数经校准和验证后,流域出口攀枝花水文观测站月径流模拟效果较好, R^2 、 NSE 、 $PBIAS$ 和 PSR 指标均符合模型评价标准,表明 SWAT 模型在金沙江中上游流域径流模拟中具有较好的适用性。

表 2 SWAT 模型率定及验证结果各评价指标值

水文站	阶段	年份	R^2	NSE	$PBIAS$	PSR
攀枝花	率定期	1973—1996	0.88	0.88	2.2	0.35
	验证期	1997—2020	0.92	0.92	-0.6	0.29

3.2 参数敏感性分析结果

本文结合金沙江中上游流域的特点,选取 20 个参数对模型进行校准验证,采用 LH - OAT 算法对

所选取的 20 个模型参数进行敏感性分析,20 个参数的名称、定义和敏感性排名以及敏感性分析结果见表 3 及图 3。

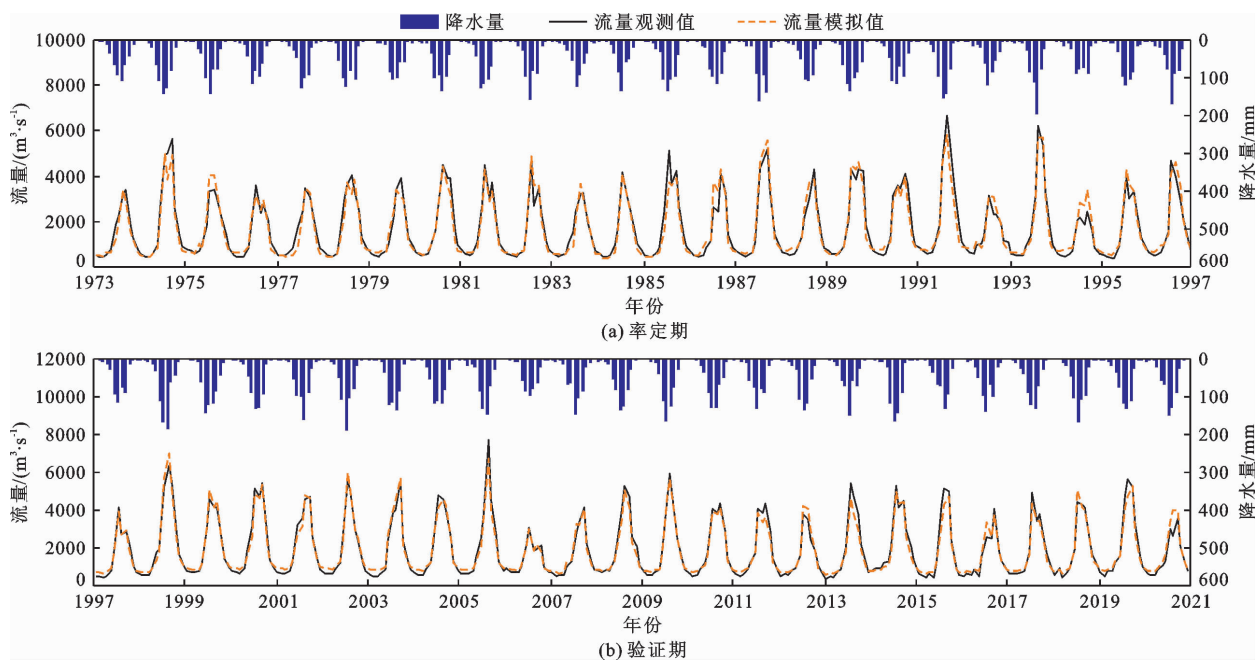


图 2 SWAT 模型率定期和验证期流量模拟值与观测值对比

表 3 SWAT 模型参数敏感性排名

排名	参数名称	参数定义	排名	参数名称	参数定义
1	SFTMP	降雪基准温度	11	EPCO	植物吸收补偿因子
2	SMFMX	降雪最高融化速率	12	SOL_ALB	湿润土壤反照率
3	CANMX	最大冠层截留量	13	ALPHA_BNK	基流储存因子
4	SOL_K	饱和水力传导系数	14	RCHRG_DP	深蓄水层蒸发系数
5	SLSUBBSN	平均坡长	15	GW_DELAY	地下水滞后系数
6	SOL_Z	土层表层至底层深度	16	SMFMN	年中降雪最低速率
7	ESCO	土壤蒸发系数	17	REVAPMN	浅层地下水蒸发系数
8	SMTMP	融雪基准温度	18	HRU_SLP	平均坡度
9	CH_N2	渠道曼宁系数	19	CN2	SCS 径流曲线数
10	SOL_BD	土壤湿容重	20	TLAPS	温度递减率

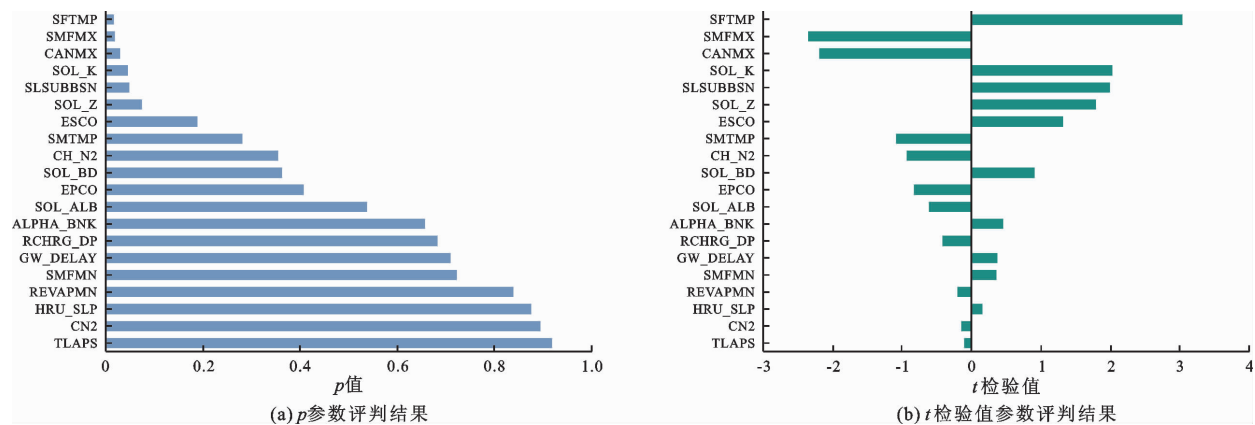


图 3 SWAT 模型参数敏感性分析结果

由表 3 和图 3 可见,对金沙江中上游流域径流模拟结果影响最大的参数是决定降雪基准温度的 SFTMP, SFTMP 越大,代表流域降雪的基准温度越高;其次是代表年中降雪最高融化速率的 SMFMX 和代表流域植被最大冠层截留量的 CANMX。另外,饱和水力传导系数 SOL_K、平均坡长 SLSUBBSN 和土层表层至底层深度 SOL_Z 也均对金沙江中上游流域径流模拟结果较为敏感。

3.3 未来气候变化分析

3.3.1 未来降水情况分析 利用 RCP2.6、

RCP4.5、RCP8.5 数据,将 1973—2020 年作为基准期,分析 2022—2050 年金沙江中上游流域的年降水量变化趋势,结果见图 4。

由图 4 可知,相对于基准期,3 种气候情景下流域年降水量均有增大的趋势,由多年平均降水量对比来看,RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 未来气候情景下降水量较基准期分别增加了 3.10%、6.59% 和 7.38%。在 3 种不同情景下,2022—2050 年年降水量随时间整体均呈现增大的趋势,年变化率分别为 2.09、2.16 和 0.72 mm/a。

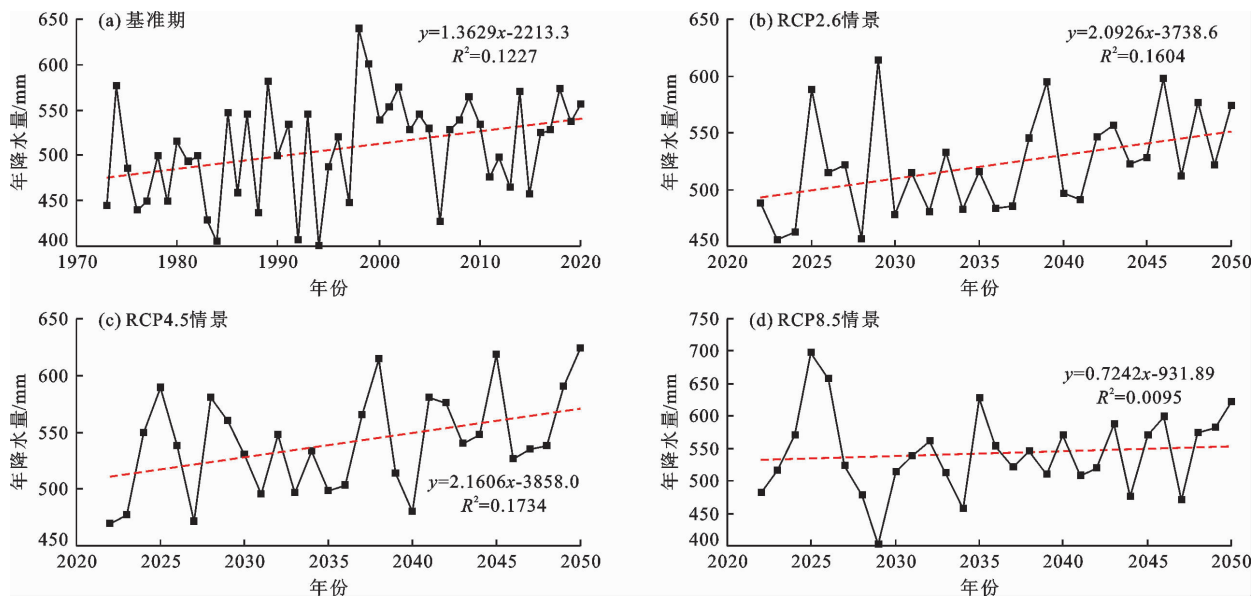


图 4 基准期及不同气候变化情景下 2022—2050 年流域年降水量变化

为了研究空间尺度下的降水变化规律,将金沙江中上游流域划分为 23 个子流域,计算各个子流域的多年平均降水量。图 5 为金沙江中上游流域各个子流域在不同情景下较基准期的降水量变化情况。由图 5 可

以看出,在 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 未来气候情景下,除 15 号子流域外,其他各个子流域的降水量均呈现增加趋势;不同气候情景下的降水量变化量空间分布无显著差异,研究区南部降水量增幅最大。

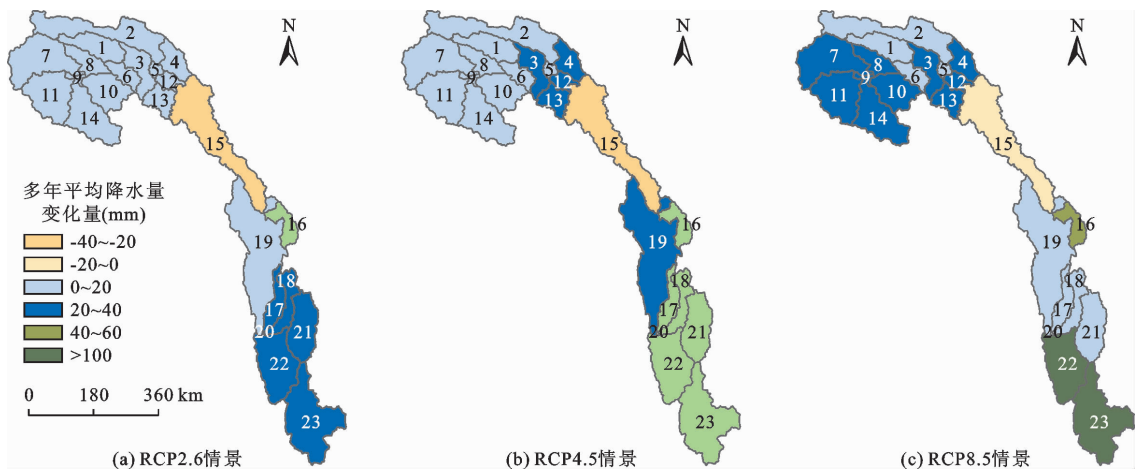


图 5 不同气候变化情景下各个子流域较基准期的降水量变化量

3.3.2 未来气温情况分析 利用未来气候情景数据(RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5),将1973—2020年作为基准期,分析金沙江中上游流域2022—2050年的最高、最低气温变化趋势以及平均气温变化量的空间分布,如图6~8所示。

由图6、7可知,相对于基准期,3种气候情景下流域2022—2050年多年平均最高气温和平均最低气温均有升高的趋势。RCP2.6、RCP4.5和RCP8.5情景下的多年平均最高气温较基准期分别升高0.36、0.77和1.31℃。RCP2.6、RCP4.5和RCP8.5

情景下的多年平均最低气温较基准期分别升高0.50、1.22和1.68℃。2022—2050年3种气候情景下流域各年最高气温和最低气温均呈波动式上升趋势,最高气温变化率分别为0.027、0.317、0.387℃/10a;最低气温变化率分别为0.025、0.253、0.315℃/10a。其中RCP8.5情景下的年最高气温和年最低气温上升率最大,RCP2.6情景下的年最高气温和年最低气温上升率最小。由图8可见,在3种情景下,各子流域多年平均气温几乎均呈现上升趋势,其中研究区北部升温幅度最大。

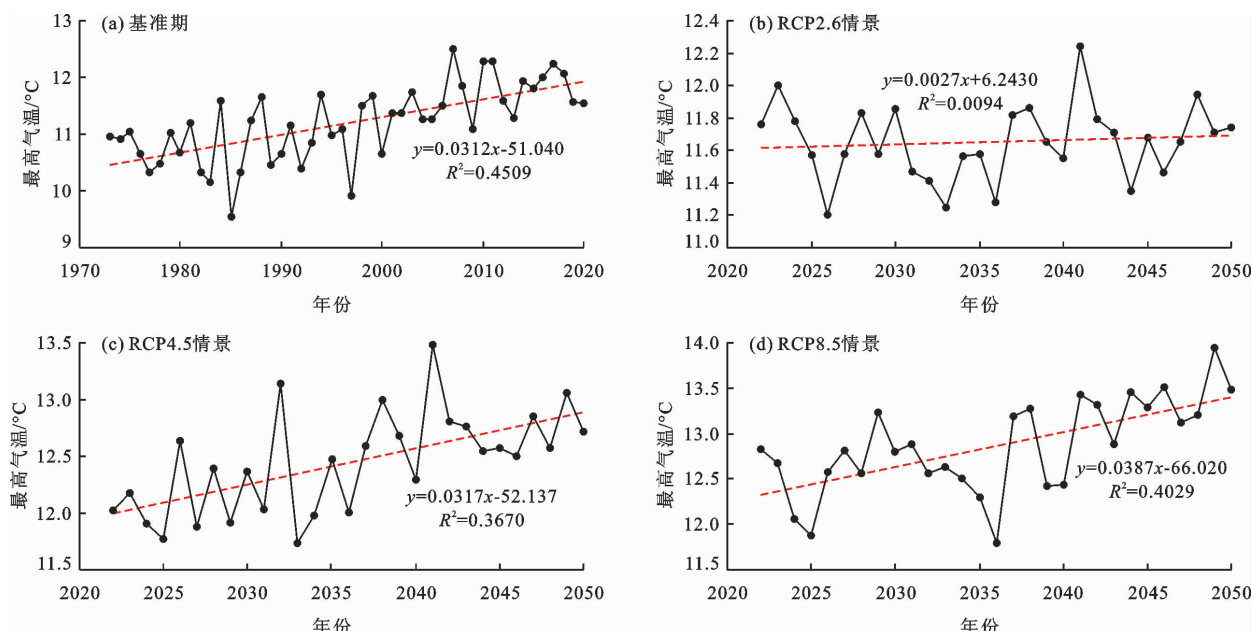


图6 基准期及不同气候情景下流域2022—2050年最高气温变化

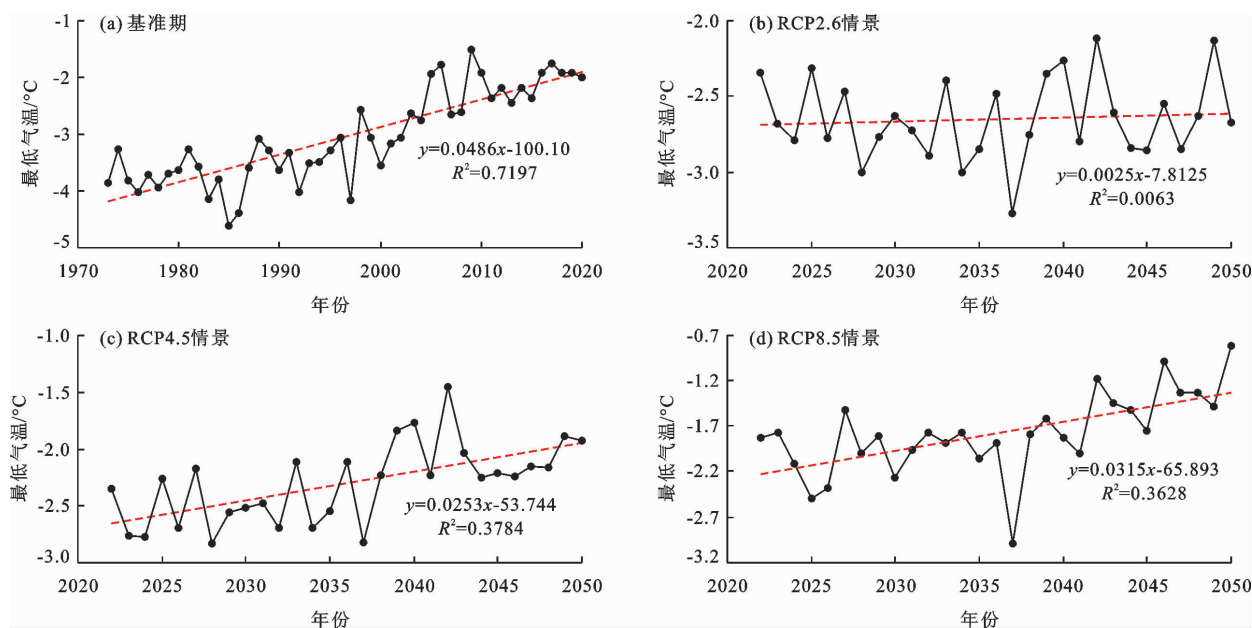


图7 基准期及不同气候情景下流域2022—2050年最低气温变化

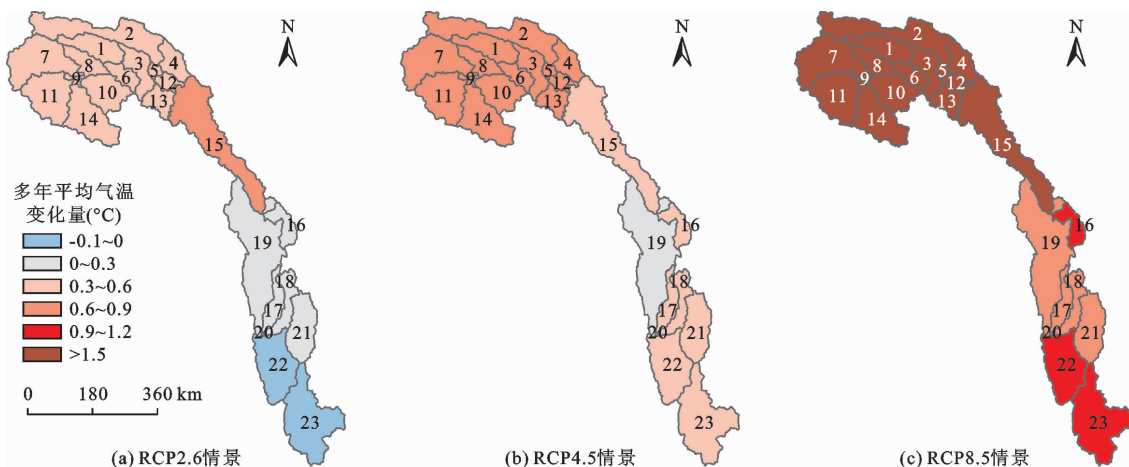


图8 不同气候变化情景下各个子流域较基准期的多年平均气温变化量

结合以上分析,与基准期相比,2022—2050 年金沙江中上游流域降水量和气温均呈现增加和上升趋势。张英娟等^[36]研究发现中国西部地区气温、降水量及湿度均呈现显著的增加趋势,与本文的结果一致。气温的显著上升可能会导致金沙江上游冰川、积雪的加速消融,从而影响金沙江中上游流域的

产流机制。

3.4 未来径流量模拟

利用构建好的 SWAT 模型及全球气候模式数据,对金沙江中上游流域 2022—2050 年年径流量变化趋势进行模拟预测,基准期及不同气候变化情景下流域年径流量变化见图 9。

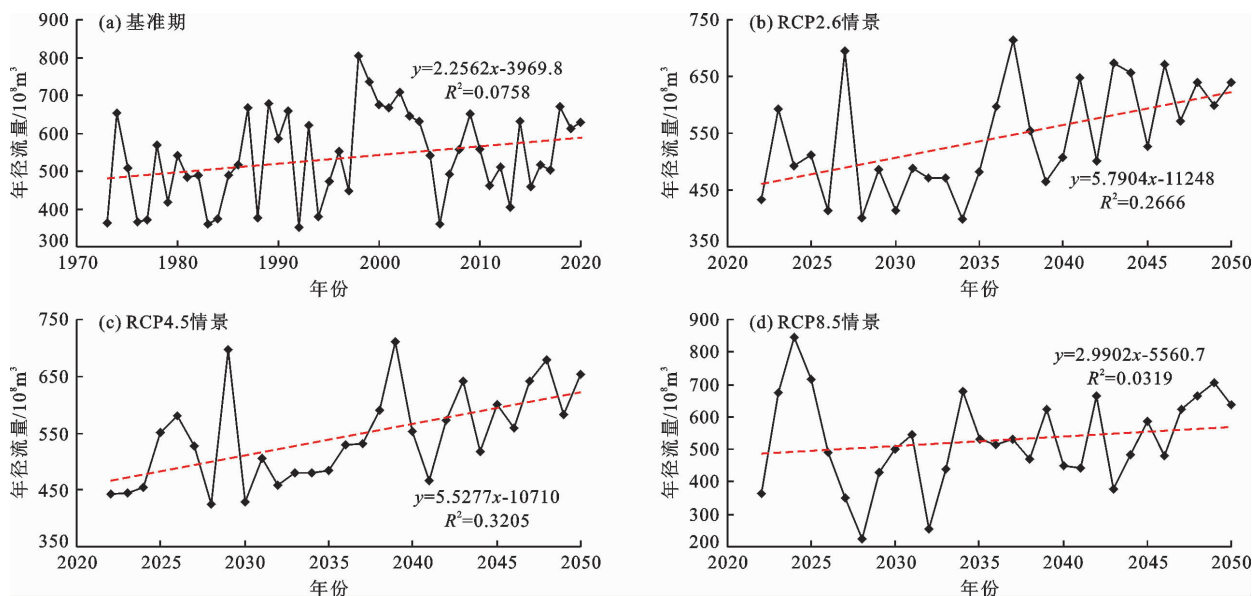


图9 基准期及不同气候变化情景下 2022—2050 年流域年径流量变化

由图 9 可知,3 种情景下,未来多年平均径流量分别为 541.81×10^8 、 544.39×10^8 和 $527.23 \times 10^8 \text{ m}^3$,分别较基准期增加了 10.73×10^8 、 $13.31 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和减少了 $3.85 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。不同气候情景下未来年径流量均呈现增大趋势,RCP2.6 情景下年径流量变化最明显,年径流量增长率为 $5.79 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$;RCP8.5 情景下年径流量增长趋势最小,增长率为 $2.99 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。金沙江中游洪水遭遇明显的年份为 1998 和 1999 年,年径流量均高达 $740 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以

上(异常值),引发了严重的洪涝灾害^[37-38]。RCP8.5 情景下,2024 年年径流量超过 $740 \times 10^8 \text{ m}^3$,2025、2049 年的年径流量接近 $740 \times 10^8 \text{ m}^3$,因此 2024、2025 及 2049 年很可能再次出现大的洪水,引发洪涝灾害;RCP4.5 情景下,2039 年年径流量与 1999 年相近,因此在 RCP4.5 情景下 2039 年流域可能发生类似于 1999 年的洪涝灾害;在 RCP2.6 情景下,只有 2027、2037 年的年径流量比较接近于 $740 \times 10^8 \text{ m}^3$,其他年份均未达到 1999 年的径流量值。尽管

径流模拟预测具有不确定性,但上述分析的异常年份需引起当地水资源管理部门的格外关注。

为进一步分析未来气候情景下金沙江中上游流域径流量的变化情况,在季节尺度上模拟了不同气候情景下年径流量较基准期的变化情况,各季节多年平均径流量变化率见图 10。

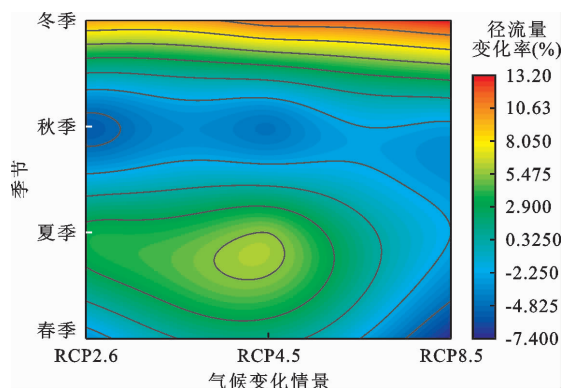


图 10 不同气候变化情景下各季节流域多年平均径流变化率

由图 10 可见,在 3 种不同气候情景下,径流量变化率均呈现出春季降低、夏季上升、秋季降低、冬季上升的趋势。其中,春季、夏季和秋季径流量变化幅度较小,而冬季变化幅度较大,变化率高达 10%。因此,未来水资源管理相关部门需要提前做好防洪排涝准备,以防止冬汛等极端水文事件的发生。

3.5 未来气候情景下产流空间变化特征

金沙江中上游流域南北跨度广,地形地貌差异大,地质条件复杂,流域内气候时空变化差异大,气候类型包括大陆性气候、半干旱气候和亚热带季风性气候,导致金沙江中上游流域产流量呈现显著的空间异质性。在 3 种气候情景下,利用金沙江中上游流域 SWAT 模型模拟结果,计算不同气候情景下各子流域产流情况,可对未来气候情景下流域产流空间异质性进行分析。基准期及不同气候情景下各个子流域多年平均产流量见图 11,各子流域产流量较基准期的变化量见图 12。

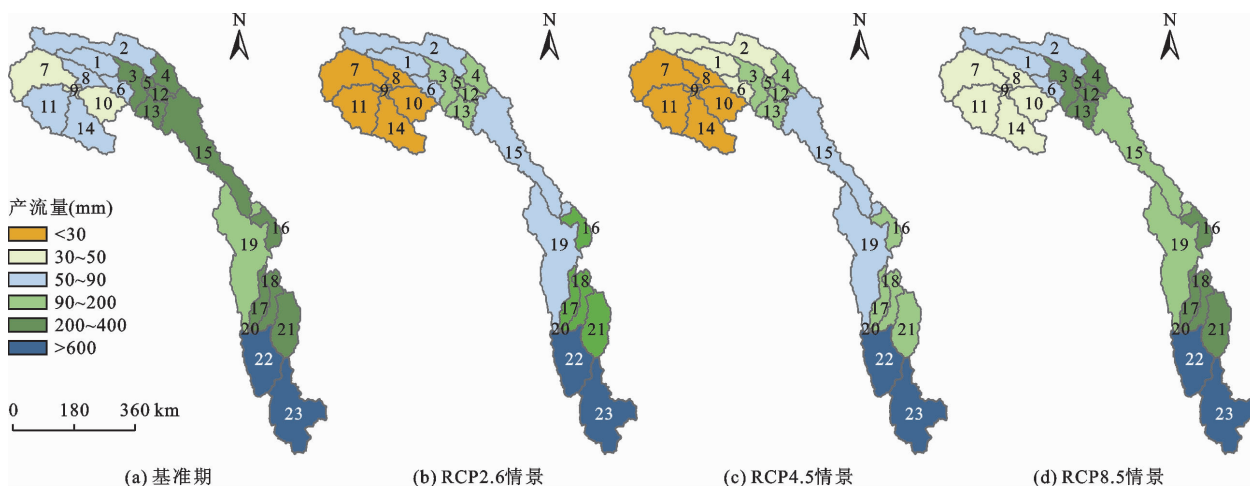


图 11 基准期及不同气候情景下各个子流域多年平均产流量

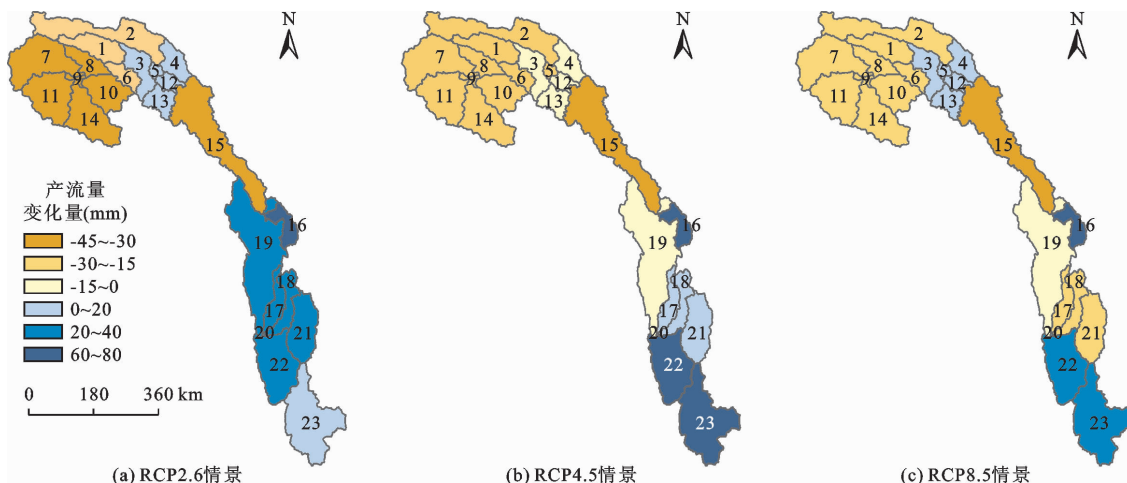


图 12 不同气候变化情景下各个子流域较基准期的产流量变化量

分析图 11、12 可知,流域北部、中部均为低产流区域,不同气候情景下多年平均产流量空间分布与基准期产流量分布具有一定的相似性,即金沙江中上游流域产流量呈现从东南到西北依次增加的特点。RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 3 种情景下金沙江中上游产流量呈现减少趋势的区域面积所占的百分比分别为 49.30%、71.56%、72.56%,即除 RCP2.6 情景外,RCP4.5、RCP8.5 情景下流域内产流量减少的区域均多于产流量增加的区域。不同气候情景下产流量增加的区域不同,RCP2.6 情景下产流量增加区域集中在中部、南部,零星分布在北部;RCP4.5 情景下产流量增加区域集中在南部,零星分布在中部;RCP8.5 情景下产流量增加区域集中分布在南部,零星分布在北部、中部。无论在何种情景下,金沙江中上游流域南部产流量均呈现增大趋势,并且增加幅度较大,表明流域南部未来受洪水威胁的可能性进一步增大。

4 讨论

本研究模拟的金沙江中上游流域未来年降水量、气温和径流量均呈现增大和上升趋势,该结果与关于金沙江流域的已有研究结论一致,表明本研究结论具有一定可靠性。史雯雨等^[39]研究发现,金沙江流域年均气温呈现明显的上升趋势,并且在未来一段时间仍将呈持续上升的趋势;程雪蓉^[40]研究发现,未来时期金沙江流域气温和降水量总体呈现增加趋势;何旭等^[41]开展了金沙江中上游流域所在的长江流域的水文要素变化研究,结果表明金沙江流域的气温、降水量和径流量均呈增大和上升趋势。但也有研究^[42]表明,21 世纪金沙江中上游流域径流量增加,但径流量年内分配呈现丰水更丰,枯水更枯的趋势。径流量预估结果不同,与气候模式的选择、水文模型和研究时段的选取有关。

本文应用 SWAT 模型对未来金沙江中上游流域的径流量变化进行了较全面的模拟,并对未来产流量的时空分布特征进行了预估。但气候变化对径流的影响比较复杂,气候模式的选择、水文模型的选取以及水文模型的参数化等因素均会对结果带来较大的不确定性^[43],并且人类活动对径流变化也有很大的影响。一方面,本研究未考虑水利工程的修建、土地利用的变化等人为因素对径流变化的贡献率;另一方面,本文使用的气候模式单一,未考虑采取多模式集合研究以降低结果的不确定性。后续研究需要叠加考虑人类活动对径流变化的影响以及选取多

个气候模式开展集合预估,深层次地分析流域未来径流变化情况,为金沙江中上游流域防洪规划提供科学依据。

5 结论

(1)本研究建立了金沙江中上游流域 SWAT 模型,并对模型进行了率定与验证,得出率定期 R^2 为 0.88, NSE 为 0.88, $PBIAS$ 为 2.2;验证期 R^2 为 0.92, NSE 为 0.92, $PBIAS$ 为 -0.6,模型模拟效果较好。

(2)随着未来气候的变化,流域未来多年平均降水量和气温均高于基准期,并且呈上升趋势,流域南部降水量增幅较大,北部气温增幅较大。

(3)随着未来气候变化,流域未来径流量呈现增大趋势,并存在较多径流量异常的年份。相较于基准期,未来春季、秋季径流量呈现减少趋势,夏季、冬季径流量呈现增加趋势,冬季径流量变化幅度较大,变化率高达 10%。

(4)随着未来气候变化,流域产流量呈现出从西北到东南递增的特点。不同未来气候情景下流域产流量变化量的空间分布存在差异。流域南部产流量呈现增加趋势,因而受洪水威胁的风险可能进一步增大。

参考文献:

- [1] 张洪刚,杨文发,陈华. 气候变化条件下长江水资源演变趋势与对策[J]. 人民长江,2014,45(7):1-6+38.
- [2] WANG Aihui, FU Jianjian, ZHU Nansen, et al. Changes in daily climate extremes of observed temperature and precipitation in China[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters,2013, 6(5): 312-319.
- [3] 倪宁洪,谢佳鑫,刘小莽,等. 基于径流对气候变化敏感性指标的多源数据质量评估[J]. 地理学报,2022,77(9):2280-2291.
- [4] ZAHABIYOUN B, GOODARZI M R, BAVANI A, et al. Assessment of climate change impact on the Ghareh River basin using SWAT hydrological model[J]. Clean Soil Air Water, 2013, 41(6): 601-609.
- [5] ANAND J, DEVAK M, GOSAIN A K, et al. Spatio-temporal effect of climate and landuse change on water balance of the Ganga River Basin[J]. Journal of Hydro-environment Research, 2021, 36: 50-66.
- [6] 杨昊,倪福全,邓玉,等. 基于 SWAT 模型分析嘉陵江流域蓝、绿水资源量的时空变化特征[J]. 水资源与水工程学报,2022,33(2):18-26.
- [7] 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.

- [8] 谭秀翠, 庄会波, 季 好. 基于 SWAT 模型的沂蒙山水土流失治理区地表水与地下水转化规律研究[J]. 中国农村水利水电, 2021(2): 1-7.
- [9] 张 洋, 邓 玉, 倪福全, 等. 基于 SWAT 模型分析岷沱江流域蓝/绿水资源量的时空变化特征[J]. 中国农业气象, 2020, 41(6): 345-356.
- [10] NESTEROVA N, MAKARIEVA O, POST D A. Parameterizing a hydrological model using a short-term observational dataset to study runoff generation processes and reproduce recent trends in streamflow at a remote mountainous permafrost basin[J]. Hydrological Processes, 2021, 35(7): e14278.
- [11] GBOHOU Y P, PATUREL J-E, FOWE T, et al. Impacts of climate and environmental changes on water resources: a multi-scale study based on Nakanbé nested watersheds in West African Sahel[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2021, 35: 100828.
- [12] CAO Wenzhi, BOWDEN W B, DAVIE T, et al. Modelling impacts of land cover change on critical water resources in the Motueka River Catchment, New Zealand[J]. Water Resources Management, 2009, 23: 137-151.
- [13] 张金萍, 王宇昊. 基于 SWAT 模型和降水随机模拟的径流预测[J]. 中国农村水利水电, 2021(7): 12-18.
- [14] KOUA T J-J, DHANESH Y, JEONG J, et al. Implementation of the semi-distributed SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model capacity in the Lobo Watershed at Nibéhibé (Center-West of Côte D'Ivoire)[J]. Journal of Geoscience and Environment Protection, 2021, 9(8): 21-38.
- [15] 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.
- [16] 马 月. 基于 SWAT 模型的金沙江流域水文过程对气候变化的响应研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- [17] 陈 华, 朱 迪, 陈启会, 等. 考虑水库调蓄的金沙江径流模拟研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2022, 55(1): 13-21.
- [18] 袁树堂, 谢飞帆, 刘新有. SWAT 模型在金沙江上游小流域径流模拟中的应用[J]. 人民长江, 2015, 46(13): 17-20.
- [19] 陈启会, 张 俊, 侯雨坤, 等. 近 60 年气候与土地利用变化对金沙江径流的影响[J]. 人民长江, 2018, 49(23): 47-53.
- [20] 曾小凡, 翟建青, 苏布达, 等. 长江流域年平均气温的时空变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(5): 427-431.
- [21] 刘俊国, 陈 鹤, 田 展. IPCC AR6 报告解读: 气候变化与水资源[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(4): 405-413.
- [22] 孟蓓蓓, 段 钢. 金沙江中上游水电资源开发利益共享机制研究[J]. 人民长江, 2021, 52(7): 221-225.
- [23] 刘 钦, 王雯涛. SWAT 模型土壤物理属性数据库构建方法探究[J]. 水科学与工程学报, 2015(6): 40-42.
- [24] 辛晓歌, 吴统文, 张 洁. BCC 气候系统模式开展的 CMIP5 试验介绍[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(5): 69-73.
- [25] 李斐斐, 刘朝晖. CMIP5 模式对青藏高原中东部夏季降水双极型模拟能力的评估[J]. 海洋气象学报, 2022, 42(2): 22-32.
- [26] YU Xiaoyong, LIU Chengyan, WANG Xiaochun, et al. Evaluation of Arctic Sea ice drift and its relationship with near-surface wind and ocean current in nine CMIP6 models from China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2022, 39: 903-926.
- [27] 刘 锋, 薛联青, 魏光辉. 基于 CMIP5 的塔里木河流域未来降水模拟及响应分析[J]. 水电能源科学, 2022, 40(3): 5-8+148.
- [28] 郭军庭, 张志强, 王盛萍, 等. 应用 SWAT 模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(6): 1559-1567.
- [29] 王 磊, 杜 欢, 谢建治. 基于 SWAT 模型的张家口清水河流域径流模拟[J]. 水生态学杂志, 2020, 41(4): 34-40.
- [30] 白淑英, 王 莉, 史建桥, 等. 基于 SWAT 模型的开都河流域径流模拟[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(9): 79-84.
- [31] ZUO Depeng, XU Zongxue, PENG Dingzhi, et al. Simulating spatiotemporal variability of blue and green water resources availability with uncertainty analysis[J]. Hydrological Processes, 2015, 29(8): 1942-1955.
- [32] GEZA M, MCCRAY J E. Effects of soil data resolution on SWAT model stream flow and water quality predictions [J]. Journal of Environmental Management, 2008, 88(3): 393-406.
- [33] GUPTA H V, SOROOSHIAN S, YAPO P O. Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multilevel expert calibration[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 1999, 4(2): 135-143.
- [34] 刘春烨. 基于 LH-OAT 的马斯京根模型参数全局敏感性分析[J]. 中国农村水利水电, 2017(9): 48-51.
- [35] 武海喆, 刘登峰, 黄 强, 等. 不同潜在蒸发估算方法对黄土高原渭河径流模拟的影响研究[J]. 人民珠江, 2020, 41(10): 36-43+65.
- [36] 张英娟, 董文杰, 俞永强, 等. 中国西部地区未来气候变化趋势预测[J]. 气候与环境研究, 2004(2): 342-349.
- [37] 张新田, 邵 骏, 邴建平, 等. 金沙江干流与雅砻江洪水遭遇规律研究[J]. 水文, 2018, 38(4): 29-34.
- [38] 郑 静, 周鹏飞, 许银山. 金沙江中游与长江中下游洪水遭遇规律分析[J]. 人民长江, 2015, 46(18): 43-47.
- [39] 史雯雨, 杨胜勇, 李增永, 等. 近 57 年金沙江流域气温变化特征及未来趋势预估[J]. 水土保持研究, 2021, 28(1): 211-217.

- 科学出版社,2002.
- [12] 郭彦,侯素珍,夏润亮,等. 1955—2014 年黄河内蒙古河段水沙变化特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2020,31(4):70–77.
- [13] 中华人民共和国水利部. 河湖生态环境需水计算规范 SL/T 712—2021[S]. 北京:中国水利水电出版社,2021.
- [14] 杨志峰,张远. 河道生态环境需水研究方法比较[J]. 水动力学研究与进展(A辑),2003,18(3):294–301.
- [15] 周林飞,赵崧,张玉龙. 基于水文要素变化特征的浑河干流生态需水量计算[J]. 大连理工大学学报,2014,54(2):215–221.
- [16] 中华人民共和国城乡建设环境保护部. 制订地方水污染物排放标准的技术原则与方法 GB/T 3839—1983 [S]. 北京:中国质检出版社,1983.
- [17] 唐斌. 基于河流健康的渭河经济用水与生态用水合理配置研究[D]. 西安:西北大学,2018.
- [18] 于龙娟,夏自强,杜晓舜. 最小生态径流的内涵及计算方法研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2004,32(1):18–22.
- [19] 李小荣. 大通河跨流域引水和梯级水电站建设对径流的影响分析[J]. 地下水,2017,39(4):134–136.
- [20] 姚志春,王得虎,刘佳莉,等. 甘肃省庄浪河流域水资源可持续利用对策研究[J]. 水资源与水工程学报,2010,21(6):109–112.
- [21] 赵晨旭. 黄河上游龙青段水温演变特征及影响因素研究[D]. 西安:西安理工大学,2021.
- [22] 苏贤保,李勋贵,张建香,等. 气候变化和人类活动对黄河上游径流影响的时空差异[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2021,57(3):285–293.
- [23] ZHANG Hongbo, SINGH V P, ZHANG Qiang, et al. Variation in ecological flow regimes and their response to dams in the upper Yellow River Basin[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75: 938.
- [24] 苏贤保,李勋贵,王义鹏,等. 多时间尺度下黄河上游径流复杂度变化特征研究[J]. 水资源与水工程学报, 2021,32(5):1–10.
- [25] 杜丽芳. 祖厉河中下游水沙特征和河道演变分析[D]. 兰州:兰州大学,2020.
- [26] 李雯. 泾河流域气候变化对径流量的影响研究[D]. 西安:长安大学,2008.
- [27] 王学良,李洪源,陈仁升,等. 变化环境下 1956—2020 年黄河兰州站以上干支流径流演变特征及驱动因素研究[J]. 地球科学进展,2022,37(7):726–741.
- [28] 许文龙,赵广举,穆兴民,等. 近 60 年黄河上游干流水沙变化及其关系[J]. 中国水土保持科学,2018,16(6):38–47.
- [29] 冯绍杰,穆兴民,高鹏,等. 泾河水沙变化特征及其影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境,2022,36(10):151–157.
- [30] 刘宇,管子隆,田济扬,等. 近 70 a 泾河流域径流变化及其驱动因素研究[J]. 干旱区地理,2022,45(1):17–26.
- [31] 赵凯云,石长伟,张广林. 泾河入陕主要控制断面生态需水量的分析与确定[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(2):206–208.
- [32] 王一艳,杨涛,王伟,等. 渭河生态基流时空分异特征及保障率分析[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(3):66–75.
- [33] 水利部. 水利部关于做好河湖生态流量确定和保障工作的指导意见[J]. 中国水利,2020(15):1–2.

(上接第 80 页)

- [40] 程雪蓉. 基于 CMIP5 模式预估长江上游流域气温及降水时空特征[J]. 水电能源科学,2019,37(1):13–16.
- [41] 何旭,缪子梅,田佳西,等. 基于 CMIP6 多模式的长江流域气温、降水与径流预估[J/OL]. 南京林业大学学报(自然科学版),2021,(2022-10-26)[2023-02-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1161.S.20221026.1053.006.html>.
- [42] 侯丽娜. 气候变化对金沙江干流径流的影响分析[J]. 中国农村水利水电,2018(6):63–67.
- [43] 王媛,苏布达,王艳君,等. “双碳”情景下抚河流域径流变化特征[J/OL]. 长江科学院院报,2022,(2022-05-05)[2023-02-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.tv.20220429.1146.015.html>.