DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.02.034

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 Wenguang, CHEN Yunzhi, TANG Lifang, 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.

气候和土地利用变化情景下闽江流域水沙变化模拟

余文广1,3,陈芸芝1,3,唐丽芳2,汪小钦1,3

(1.福州大学数字中国研究院(福建),福州 350108;2.福建省水土保持实验站,福州 350001; 3.福州大学空间数据挖掘和信息共享教育部重点实验室,福州 350108)

摘 要:[目的]模拟未来土地利用和气候影响下的流域水沙变化有利于制定适合的流域管理计划。[方法]基于土地利用和气象数据,结合 CMIP6 气候模式数据、PLUS 模型和 SWAT 模型,定量模拟 2030 年土地利用及不同气候情景下径流和泥沙的时空变化。[结果](1)SWAT 模型在闽江流域月尺度模拟精度较好,其中径流模拟的 R²范围为 0.80~0.95,NSE 范围为 0.75~0.91;泥沙模拟的 R²范围为 0.75~0.98,NSE 范围为 0.64~0.94。(2)利用 2020 年土地利用数据对 PLUS 模型进行精度评估的 Kappa 系数为0.77,模拟 2030 年闽江流域建设用地和耕地将分别增加 325.64,1 157.51 km²。(3)SSP2-4.5 和SSP5-8.5 情景下,2025—2035 年平均降水量分别增加 0.15%和 2.18%,年平均气温分别增加 0.23,0.62 ℃。(4)低碳情景和高碳情景下,仅土地利用变化导致年平均径流量相较于基准期分别增加 0.08%和 0.07%,年平均输沙量分别增加 0.24%和减少 0.05%;仅气候变化导致年平均径流量相较基准期分别减少 4.76%和 4.11%,年平均输沙量分别增加 18.12%和 0.13%;土地利用和气候综合影响导致年平均径流量相较于基准期分别减少 4.57%和 3.93%,年平均输沙量分别增加 18.28%和 0.33%。(5)未来气候和土地利用综合变化情景下,地表径流和产沙量较高且增幅较大的区域集中在以南平邵武市为中心的流域西北部和以三明将乐县为中心的流域西南部。[结论] 研究结果为未来闽江流域的合理开发建设提供一定参考依据。

关键词: 闽江流域; 气候情景; 土地利用变化; 径流; 输沙量; 模拟

中图分类号:P339 文献标识码:A 文章编号:1009-2242-(2024)02-0216-18

Simulation of Runoff and Sediment Changes in the Minjiang River Basin Under Climate and Land Use Change Scenarios

YU Wenguang^{1,3}, CHEN Yunzhi^{1,3}, TANG Lifang², WANG Xiaoqin^{1,3}

(1. The Academy of Digital China (Fujian), Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

- 2. Fujian Soil and Water Conservation Experimental Station, Fuzhou 350001, China;
- 3. Key Laboratory of Spatial Data Mining & Information Sharing, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: [Objective] Simulating the change of runoff and sediment changes in the watershed under the influence of land use and climate in the future is conducive to making suitable management plans. [Methods] Based on land use and meteorological data, combined with CMIP6 climate model data, PLUS model and SWAT model, the temporal and spatial changes of land use and runoff and sediment under different climate scenarios in 2030 were quantitatively simulated. [Results] (1) The SWAT model exhibited good accuracy in monthly scale in simulation of Minjiang River Basin, in which the R^2 and NSE (Nash—Sutcliffe Efficiency) ranged from 0.80 to 0.95 and 0.75 to 0.91, respectively. The R^2 and NSE ranged from 0.75 to 0.98 and 0.64 to 0.94 respectively. (2) Using the land use data of 2020 to evaluate the accuracy of the PLUS model, the Kappa coefficient was 0.77, and the simulated construction land and cultivated land in the Minjiang River Basin in 2030 would increase by 325.64 km² and 1 157.51 km², respectively. (3) Under the SSP2—4.5 and SSP5—8.5

收稿日期:2023-09-28 **修回日期:**2023-10-25 **录用日期:**2023-11-27 **网络首发日期(www.cnki.net):**2024-03-07

资助项目:中国科学院战略性先导科技专项子课题(XDA23100503);福建省水利科技项目(MSK202210,MSK202214);福建省水土保持实验 站委托技术服务项目(SBSYZ332618363422021038)

第一作者:余文广(1998—),男,硕士研究生,主要从事地理过程建模与分析研究。E-mail: 3203399472@qq.com

通信作者:陈芸芝(1982—),女,博士,副研究员,主要从事资源与生态环境监测研究。E-mail: chenyunzhi@fzu.edu.cn

scenarios, the average precipitation in 2025—2035 would increase by 0.15% and 2.18%, and the average annual temperature would increase by 0.23 and 0.62 °C, respectively. (4) In the low carbon and high carbon scenarios, only land use change led to an increase of 0.08% and 0.07% in annual mean runoff, and an increase of 0.24% and decreased of 0.05% in annual mean sediment transport, respectively, compared with the baseline period. Compared with the baseline period, the mean annual runoff decreased by 4.76% and 4.11%, and the mean annual sediment transport increased by 18.12% and 0.13%, respectively. The combined effects of land use and climate resulted in a decrease of 4.57% and 3.93% in annual average runoff and an increase of 18.28% and 0.33% in annual average sediment transport compared with the base period, respectively. (5) Under the scenario of future climate and land use comprehensive change, the areas with higher and larger increase in surface runoff and sediment yield were concentrated in the northwestern of the basin centered on Shaowu City in Nanping and the southwest of the basin centered on Jiangle County in Sanming. [Conclusion] These research results provide some reference for the reasonable development and construction of Minjiang River basin in the future.

Keywords: Minjiang River Basin; climate scenario; land use change; runoff; sediment transport; simulation

Received; 2023-09-28 **Revised**; 2023-10-25 **Accepted**; 2023-11-27 **Online**(www.cnki.net); 2024-03-07

气候变化的不确定性和频繁的人类活动对流域可持续发展提出新的挑战。一方面过度的人类活动可能破坏流域的生态平衡,导致土壤侵蚀,水量减少,干旱和洪涝等灾害频发;另一方面,气候变暖可能带来流域气温升高,降雨模式改变,进而影响农业发展,水资源平衡。评估未来气候和土地利用变化对于流域可持续发展具有重要意义。

如何量化土地利用和气候变化对于流域径流和 泥沙变化的影响是流域水资源管理的研究热点之一, 目前根据评估手段的不同,主要可以分为数理统计方 法[1]和水文模型方法[2]。许多学者采用 SWAT 模 型[3-4]和 InVEST 模型[5-6]来评估不同土地利用情景 和气候变化对流域径流时空格局变化的影响,结果表 明,气候是影响流域产水的主要原因。一些学者[7-8] 利用长时间序列水文观测数据进行径流变化归因分 析,定量分析人类活动和气候变化的贡献程度。此 外,量化单一气候变量、土地利用类型、地形因子和景 观格局等对流域径流和泥沙的影响也是主要的研究 工作之一,例如,李朝月等[9]通过 SWAT 模型和 Fragstats4.2 软件分析地形因子,降雨和景观因子对 流域产沙的影响,结果表明,地形和景观因子是主要 影响流域侵蚀产沙的因素。也有学者通过土地利用 预测模型来评估未来可能的发展情形对流域水资源 的影响,例如,Negar等[10]利用 CA-Markov 模型和 SWAT模型评估未来气候变化下的流域水资源平衡 关系发现,流域产沙量受土地利用变化的影响大于气 候影响;汤佳等[11]利用 FLUS 模型模拟未来不同土 地利用情景下汨罗江流域径流时空变化,结果表明, 限制情景能够更好地减少流域径流量。通过获取全 球气候模式提供的气温和降雨数据是目前评估未来气候变化下水文响应的主要方法,例如,王媛等[12]评估 CMIP6 不同气候情景下抚河流域年均和逐月径流变化趋势;王辉源等[13]采用 NEX-GDDP-CMIP6高分辨率气候数据中径流模拟效果最佳的气候模式评估未来 2030—2050 年灞河流域的水源涵养功能。这些研究都表明 SWAT 模型是衡量气候变化和土地利用变化对水资源平衡影响的有效工具之一。

闽江流域是福建省重要的水资源供应地之一,保护闽江流域的水质和水量对维持当地人民的生活和经济发展至关重要。此前已有学者采用水文模型[14]和数理模型[15]评估历史时期闽江流域径流变化。HAROON等[16-17]评估历史土地利用变化和气候对闽江流域的水文变量的影响,此外还探究2062—2095年气候变化下,闽江流域水平衡组分变化。但目前对于中远期气候情景和土地利用变化综合影响下的闽江流域径流和泥沙时空格局分析不足。本文利用CMIP6气候数据,结合SWAT模型和PLUS模型,模拟未来不同气候情景和土地利用变化下的闽江流域径流和泥沙变化情况,对于辅助闽江流域水资源管理和生态保护等相关政策制定提供参考依据。

1 研究区概况、数据与方法

1.1 研究区概况

闽江流域发源于闽赣、闽浙交界的杉岭、武夷山、仙霞岭等山脉,流域面积约为60000km²(图1)。闽江流域中上游主要有建溪,富屯溪、沙溪三大支流,沿途接纳尤梅溪、大樟溪等支流,汇入闽江。闽江流域属于亚热带海洋季风气候,干湿季节明显,受地形和气候的影响,流域内降水空间分布不均匀,呈现西北多、

东南少的趋势。闽江流域坡度范围在 $0\sim68^\circ$,依据《水利水电工程水土保持技术规范》标准 $[^{18]}$,进一步将坡度细分为 $0\sim5^\circ$, $5^\circ\sim8^\circ$, $8^\circ\sim15^\circ$, $15^\circ\sim25^\circ$, $25^\circ\sim35^\circ$ 和 $>35^\circ$ 共6个级别。2020年闽江流域耕地面积占流域总面积的9.50%,各坡度下的耕地面积占比依次为62.12%,15.57%,17.26%,4.58%,0.43%和0.04%。

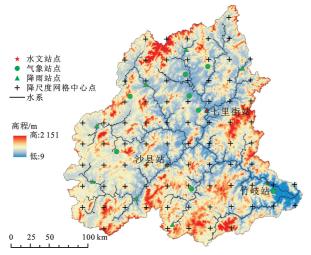


图 1 闽江流域范围、气象和水文站点位置

Fig. 1 Location of the Minjiang river basin, its meteorological and hydrological stations

1.2 研究区数据

研究区 SWAT 建模数据包括数字高程数据、土地利用数据、土壤类型数据、气候数据、水文数据等,各数

据获取途径见表 1。

其中数字高程数据采用美国地质调查局提供的SRTM 1 Arc—Second Global(30 m)。土地利用类型数据来源于武汉大学提供的2010年和2020年2期CLCD数据^[19];土壤类型数据来源于世界土壤数据库(HWSD, Harmonized World Soil Database);气候数据是中国气象数据网提供的2017—2020福州、邵武、建阳、武夷山等8个站点的逐日风速、太阳辐射和相对湿度数据;降雨数据是福建省水文水资源勘测局提供的2017—2020年宁化、大田、松溪、武夷山等10个雨量站点的逐日降水数据;水文数据是福建省水文水资源勘测局提供的2018—2020年七里街、竹岐和沙县水文站逐日径流量和输沙量数据;路网、居民点、国民生产总值和夜间灯光等数据用于后续PLUS模型土地利用预测。

选用 4 个在中国区域模拟效果较好^[20]的 CMIP6 气候模式,数据来源于网址(https://cds.climate.copernicus.eu/)。各气候模式信息见表 2。包括历史(1850—2014年)以及未来(2015—2100年)2 种共享经济路径(SSP2—4.5,SSP5—8.5)模拟下提供的逐日最高、最低气温和降雨量,其中 SSP2—4.5 代表 1 种中等气候变化和低碳排放的未来发展情景,SSP5—8.5 对应于 1 种传统化石能源排放的高辐射强迫路径。

表 1 数据源

Table 1 Data source

	Table 1	Data source
数据	分辨率	数据来源
数字高程模型	30 m	地理空间数据云平台(https://earthexplorer.usgs.gov/)
1. 16.41 111	20	武汉大学遥感与信息工程学院公开数据集(https://doi.org/10.
土地利用	30 m	5281/zenodo.4417810)
1 读 不 四	1 000	黑河 数 据 中 心 (http://westdc. westgis. ac. cn/data/611f7d50 —
土壤类型	1 000 m	b419-4d14-b4dd-4a944b141175)
最高/最低温度、太阳辐射、风速、	逐日数据(2017—2020)	山园 <u>与鱼科</u> 类新提升宣服友网
相对湿度	逐口致据(2017─2020)	中国气象科学数据共享服务网
降雨量	逐日数据(2017—2020)	福建省水文水资源勘测局
实测径流量和输沙量	逐日数据(2018—2020)	福建省水文水资源勘测局
路网数据	2020年公路、铁路和水域	OSM 开放数据集(https://www.openstreetmap.org/)
居民点	2018 年矢量	北京大学地理数据平台(http://geodata.pku.edu.cn)
日日上文艺体	1 000	全国 GDP 公开数据集(https://github.com/thestarlab/ChinaG-
国民生产总值	1 000 m	DP)
夜间灯光指数	1 000 m	DMSP—OLS 数据集(https://doi.org/10.7910/DVN/GIYGJU)
3. h /*	20	全球 地 表 水 逐 月 数 据 集 (https://global — surface — water.
永久水体	30 m	appspot.com/)

1.3 研究方法

1.3.1 全球气候模式数据的降尺度方法 全球气候模式通常空间分辨率较低,直接用于中小区域尺度的气候变化分析存在一定误差^[21]。本文采用国家气候信息中心提供的 1961—2014 年 CN05.1 逐日栅格降水和气温数

据(0.25°×0.25°)作为观测数据^[22],对原始气候模式统一插值到与观测数据分辨率相同的格网上,然后通过统计降尺度方法中的 Delta 方法^[23]对插值后气候模式中逐格点的降水和气温数据进行修正,最后通过最近邻法提取对应站点位置的格网值用于未来气候模拟。

表 2 不同 CMIP6 气候模式

Table 2 Different CMIP6 climate models

模式名称	研究机构	原始分辨率	降尺度后分辨率
$\overline{BCC-CSM2-MR}$	中国	$1.125^{\circ} \times 1.125^{\circ}$	0.25°×0.25°
EC-Earth3-Veg	欧盟	$0.7^{\circ} \times 0.7^{\circ}$	$0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$
MRI-ESM2-0	日本	$1.4^{\circ} \times 1.4^{\circ}$	$0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$
NorESM2-MM	挪威	$0.94^{\circ} \times 1.25^{\circ}$	$0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$

本文以 1961—1999 年作为不同气候模式偏差订正的率定期,2000—2014 年作为不同气候模式订正效果的验证期,降尺度后各模式模拟月降雨量(图 2a) 与实测值之间的 Nash — Suttcliffe 效率系数 (NSE)变化范围为 0.81~0.93,确定系数(R^2)范围为 0.83~0.93,模式平均下的月降雨量模拟结果与实测值之间的 NSE 为 0.91, R^2 为 0.92; 由于 BCC —

CSM2-MR 未提供历史气温数据,仅对其余 3 种气候模式进行气温降尺度偏差校正处理,从图 2b 和图 2c 可以看出,降尺度后各模式可以很好地模拟逐月最高和最低气温的变化,月平均最高气温和最低气温的模拟与实测之间的 NSE 均为 0.99, R² 均为 0.99。根据降尺度结果,最终使用模式平均值来反映未来不同情景下的气候变化。

1.3.2 PLUS 模型 PLUS 模型 (Patch—generating Land Use Simulation Model)是由中国地质大学 HP-SCIL 实验室开发的一款土地利用变化模拟模型^[24]。PLUS 模型是在 FLUS 模型基础上改进的模型,能够更好地挖掘驱动因子和地类斑块之间的相关性并用于模拟未来多类土地利用类型的斑块级变化。

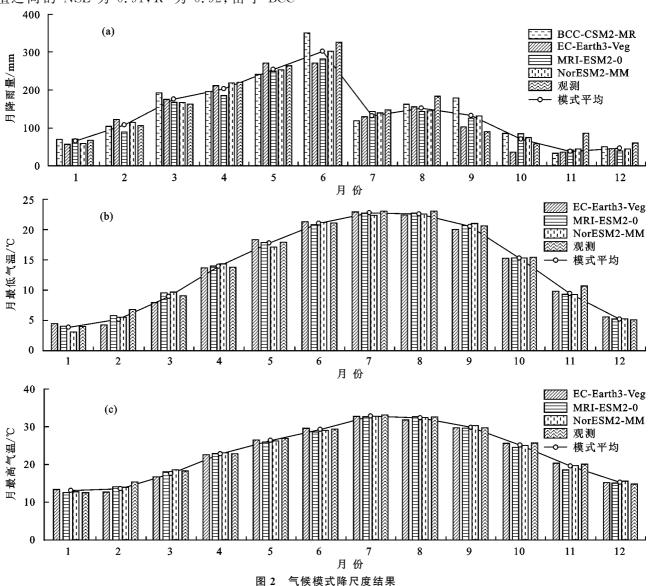


Fig. 2 Climate models downscaled results

基于 2010 年和 2020 年土地利用数据,预测自然 发展情景下 2030 年闽江流域土地利用分布图。选择 地形、坡度、坡向、土壤类型、国内生产总值、到公路、 铁路、水域和村镇欧式距离,以及夜间灯光指数共 10 个驱动因子^[25]制作土地利用类型适宜性图集,同时通过 GEE 提取 2020 年像元值保持在 7 个月及以上的水体作为永久水体限制因子。

领域权重因子和土地利用转移成本矩阵是

PLUS模型控制模拟精度的主要参数。其中领域权重因子是表征不同地类扩张能力的无量纲因子,范围为 0~1,值越接近 1 表示扩张能力越强,本文使用各土地利用类型总面积变化量的无量纲值^[26]作为领域权重因子的初始参数,根据模拟结果对参数进行调整,最终设置耕地 0.8,林地 0.2,草地 0.5,水体 0.4,未利用地 0.2 和建设用地 1.0。转移成本矩阵中 0 表示不允许转换,1 表示允许转换,结合研究区现状,各地类转移关系见表 3。最终将得到的 2020 年预测值与真实值进行精度验证,得到 Kappa 系数为 0.77,总体精度为 0.95,FOM 值为 0.16。有研究^[27]表明,当 Kappa 系数大于 0.75 表示模拟精度较高,因此可以认为 PLUS 模型模拟效果较好,可用于闽江流域 2030 年土地利用模拟。

表 3 土地利用转移成本矩阵

Table 3 Land use transition cost matrix

土地利用类型	耕地	林地	草地	水体	未利用地	建设用地
耕地	1	1	1	1	1	1
林地	1	1	1	1	1	1
草地	1	1	1	1	1	1
水体	1	1	1	1	1	1
未利用地	1	0	1	1	1	1
建设用地	1	1	0	1	0	1

1.3.3 SWAT 模型 产流模拟: SWAT 模型基于水 文循环原理,通常采用 SCS 径流曲线法和土壤湿度 来模拟陆面产流过程。陆面产流公式为:

$$SW_{t} = SW_{o} + \sum_{i=1}^{t} \begin{pmatrix} R_{i} - Q_{\text{surf}i} - \text{EVA}_{i} \\ -w_{i} - Q_{\text{gwi}} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: SW_i 为最终土壤含水量(mm); SW_o 为第 i 天初始土壤含水量(mm); R_i 为第 i 天的累积降雨(mm); Q_{surf_i} 为第 i 天的地表径流(mm); EVA_i 为第 i 天的蒸发量(mm); w_i 为第 i 天土壤入渗量(mm); Q_{gwi} 为第 i 天的地下水含量(mm)。

产沙模拟:SWAT模型使用 EPIC(erosion productivity Impact calculator)模块,将泥沙产量表示成与土地利用类型、土壤侵蚀性和降雨强度相关的MUSLE 方程 (modified universal soil loss equation)。具体公式为:

$$sed = 11.8 \cdot (Q_{\text{surf}} \cdot q_{\text{peak}} \cdot \text{area}_{\text{hru}})^{0.56} \cdot K \cdot C \cdot P \cdot LS \cdot \text{CFRG}$$
 (2)

式中: sed 为某一天中的泥沙产出量(t); Q_{suf} 为陆面径流量(mm); q_{peak} 为峰值径流比; $area_{hru}$ 为 HRU 面积(km^2); K、C、P、LS 分别为 USLE 方程中的土壤侵蚀因子、植被覆盖和管理因子、水土保持措施因子和地形因子; CFRG 为调整系数。此外模型还考虑了河道输沙的沉积和输移过程,通过调整河道相关系数来估计河道输沙量的转移沉积过程。

SWAT模型构建细节参考王钰双等[14]在闽江流域的相关研究,共划分157个子流域。本文针对径流和泥沙模拟各筛选了16个参数^[17,28],使用SWAT-CUP软件初期进行100次率定,根据SUFI-2算法对参数重要性进行排序,参数重要性分析结果见表4和表5。率定顺序遵循"先径流,后泥沙"的原则。

表 4 径流相关参数敏感度排序

Table 4 Sensitivity ranking of runoff-related parameters

参数	排序	参数名称	参数定义	范围	率定值
	1	V_ALPHA_BF	基流消退系数	0 ~ 1.00	0.67
	2	R_CN2	SCS 径流曲线数	$-0.25 \sim 0.25$	0.08
	3	R_HRU_SLP	平均坡度	$-0.25 \sim 0.25$	0.22
	4	V_CH_K2	主河道有效导水率	$-0.01 \sim 500$	327.50
	5	R_SOL_AWC	土壤有效含水量	$-0.25 \sim 0.25$	-0.09
	6	V_ESCO	土壤蒸发补偿系数	$0 \sim 1.00$	0.84
公达和 胆》。	7	V GW REVAP	地下水蒸散发系数	0.02 ~0.20	林地:0.08 草地:0.04
径流和泥沙	,	V_OW_KEVIII	地工小杰取及小奴	0.02 0.20	耕地:0.15
相关参数	8	V_GW_DELAY	地下水延迟系数	$0 \sim 500$	37.50
	9	R_{GWQMN}	浅层地下水基流阈值	$-0.25 \sim 0.25$	-0.15
	10	R_SLSUBBSN	平均坡长	$-0.25 \sim 0.25$	0.02
	11	V_{EPCO}	植被吸水补偿系数	$0 \sim 1.00$	0.05
	12	V_CH_N2	主河道曼宁系数	$-0.01 \sim 0.30$	0.12
	13	R_CANMX	最大冠层存储量	$-0.25 \sim 0.25$	-0.17
	14	V_REVAPMN	浅层地下水再蒸发	$0 \sim 500$	397.50
	15	R_SOL_K	土壤饱和水力传导系数	$-0.25 \sim 0.25$	-0.24
	16	R_SURLAG	地表径流延迟系数	$-0.25 \sim 0.25$	0.05
		R_代表新参数=原参	多数 * (1+率定值), V_代表	· 新参数=率定值	

表 5	泥沙相天 奓数

Table 5	Sencitivity	ranking (of sediment-	- related	narameters
Table 3	Sensitivity	Tallking (or seamnem	rerateu	parameters

参数	排序	参数名称	参数定义	范围	率定值	
	1	V_USLE_C	土地覆盖管理因子	0.001 ~ 0.5	林地:0.04 草地:0.07 耕地:0.10	
	2	V_ADJ_PKR	支流河道泥沙输移峰值 速率调整因子	$0.5 \sim 2.0$	0.78	
	3	R_CN2	SCS 径流曲线数	$-0.25 \sim 0.25$	-0.22	
	4	RUSLE_K	土壤侵蚀性因子	$-0.25 \sim 0.25$	-0.12	
	5	VCH_K2	主河道有效导水率	$-0.01 \sim 500$	0.08	
	6	$R_{-}SOL_{BD}$	土壤湿容重(g/m³)	$-0.25 \sim 0.25$	0.14	
泥沙相关	7	RUSLE_P	水土保持措施因子	$-0.25 \sim 0.25$	-0.09	
参数	8	VCH_COV1	河道可蚀性因子	$-0.05 \sim 0.60$	0.11	
<i>≫</i>	9	$V_{-}ALPHA_BF$	基流系数	$0 \sim 1.00$	0.79	
	10	$V_{-}SPEXP$	泥沙输移指数参数	$1 \sim 1.50$	1.43	
	11	VSPCON	泥沙输移线性参数	$0.0001 \sim 0.01$	0.007	
	12	VCH_N2	主河道曼宁系数	$-0.01 \sim 0.30$	0.25	
	13	VCH_ERODMO	季节性河道侵蚀因子	$0 \sim 1.00$	0.19	
	14	V_{LAT_SED}	地下水泥沙含量	$0 \sim 5000$	1 154.36	
	15	$V_{-}CH_{-}COV2$	河道植被覆盖系数	$-0.001 \sim 1.00$	0.08	
	16	VPRF_BSN	主河道泥沙输移峰值速 率调整因子	$0 \sim 2.00$	1.08	
		R 代表新参数=原参	参数 * (1+ 率定值), V 代表	新参数=率定值		

设置 2017 年 1-12 月为模型预热期,2018 年 1 月到 2019 年 6 月为模型率定期,2019 年 7 月到 2020 年 12 月为模型验证期,对七里街,竹岐和沙县 3 个水 文站分别进行日尺度和月尺度的径流和泥沙模拟。 结果表明,3个站点的日和月尺度径流模拟效果较 好,其中月尺度模拟效果最佳(图 3),而在泥沙模拟 方面,2个站点逐日模拟效果不佳,但月尺度输沙量 模拟中七里街站和竹岐站表现较好(图 4),整体模拟 结果符合" $R^2 > 0.6$, NSE> 0.5"的精度要求^[29]。在 泥沙率定中涉及部分径流参数,试验结果表明,这些 参数有助于泥沙率定,因此在后续参数设置中优先以 泥沙参数率定结果为主,进一步验证统一参数后的径 流模拟效果。3个站点径流模拟精度变化不大:七里 街站率定和验证期的 R²分别为 0.95 和 0.91, NSE 分别 为 0.75 和 0.90; 竹岐站率定和验证期的 R^2 分别为 0.95和 0.92, NSE 分别为 0.76 和 0.91; 沙县站率定和验证 期的 R^2 分别为 0.94 和0.80, NSE 分别为 0.75 和 0.79。 由于本文缺少水库运行具体信息,故未在模型中添加 水库相关参数,有研究[16]表明,SWAT 模型中水库运 行在一定程度上影响径流和泥沙的率定效果,这可能 是导致沙县站泥沙模拟效果不佳的主要原因。

1.3.4 情景设置 本文重点在于探究不同气候情景对流域水资源带来的相对变化,同时也为了避免历史实测气候直接与未来气候比较之间可能存在的系统误差,分别设置 2018—2020 年 SSP2-4.5 气候与 2020 年

土地利用数据为基准期 S1,2018-2020 年 SSP5-8.5 气候与 2020 年土地利用数据为基准期 S2。

本文采用技术路线见图 5。首先通过降尺度方法和 PLUS 模型预测得到未来气候情景和土地利用变化,然后设置不同变化情景,最后输入到率定好的 SWAT 模型中模拟水沙变化。为定量分析闽江流域水沙变化对不同气候和土地利用变化的响应,共设置 6 种变化情景(表 6)。通过对比 S3 和 S1,S4 和 S2 得到仅土地利用变化情景对年平均径流量和输沙量的影响;通过对比 S5 和 S1,S6 和 S2 得到仅气候变化情景对年平均径流量和输沙量的影响;通过对比 S7 和 S1,S8 和 S2 得到气候和土地利用综合变化对年平均径流量和输沙量的影响。

2 结果与分析

2.1 未来气候模拟与分析

利用降尺度后的 4 个 GCM 模式(简称 BCC 模式、EC 模式、MRI 模式和 Nor 模式),其中 BCC 模型未进行气温校正。以 2025—2035 年未来气象数据为例,对比历史时期(2018—2020 年)不同气候情景下的年平均降雨量和气温数据(表 7)表明,不同气候模式模拟的气温存在一定的差异,但平均来看流域未来年平均气温呈现上升趋势。从年平均气温变化来看,在 SSP2—4.5 情景下,3 种模式年平均气温依次增加 0.01,0.56,0.12 \mathbb{C} ;在 SSP5—8.5 情景下,3 种模式年

2035 年 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 多年平均气温分别为19.21,19.56 $^{\circ}$ 。就不同排放情景来看,在 SSP5-8.5情景下未来气温增加幅度更为明显,与陈笑晨等[30] 在福建省的研究结论一致。从年累积降水变化来看,在 SSP2-4.5 情景下,4 种模式年降雨依次变化 3.77%,-0.63%,-3.14%和 0.62%;在 SSP5-8.5情景下,4 种模式降水量依次变化 10.31%,-5.28%,4.43%和-0.73%。未来 2025—2035 年 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 多年平均降水量分别为1 694.13,1 723.19 mm,根据唐振飞等[31]的相关研究,未来闽江流域极端降水进一步增加。

2.2 闽江流域土地利用变化及未来预测

2.2.1 闽江流域土地利用现状变化 根据土地利用

转移矩阵(表 8)所示,相较于 2010 年,2020 年各土地利用面积增加比例从大到小依次为建设用地、耕地、未利用地、草地、林地和水体,其中建设用地占总用地面积比例从 1.03%提高到 1.50%,其他地类转入建设用地面积来源从大到小依次为林地、耕地、水体、草地和未利用地。除耕地和建设用地面积有所增加外,林地占总用地比例下降最为明显,从 90.87%下降到88.16%,林地转出地类大部分为耕地和建设用地。从土地利用空间分布(图 6a,图 6b)来看,耕地变化主要集中对山脚平原地区的林地侵蚀,空间上呈现零散分布;建设用地扩展主要集中在城市发展过程中侵占郊区耕地和林地,空间分布主要集中在现有城区周边。

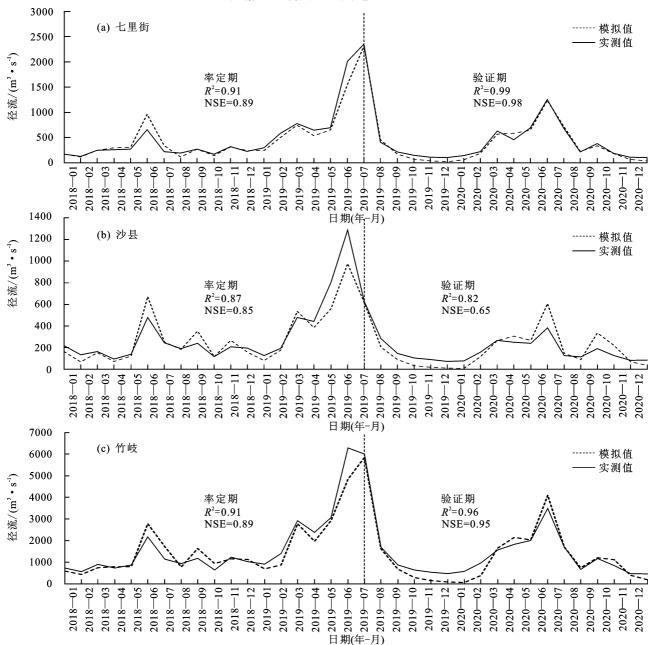


图 3 月径流率定结果

Fig. 3 Montly runoff calibration results http://stbcxb.alljournal.com.cn

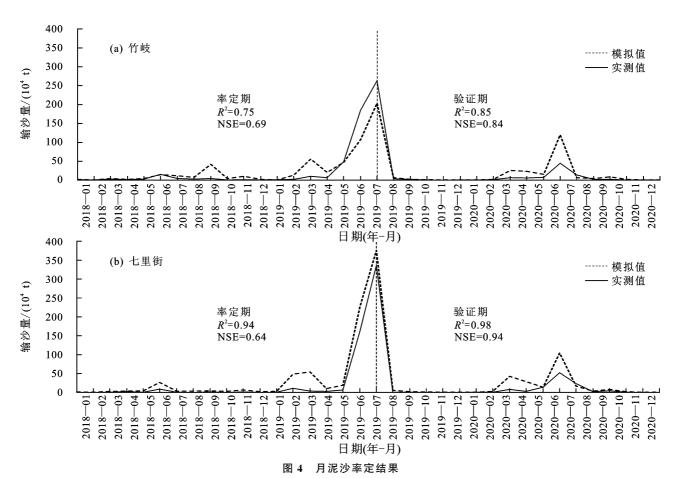


Fig. 4 Monthly sediment calibration results

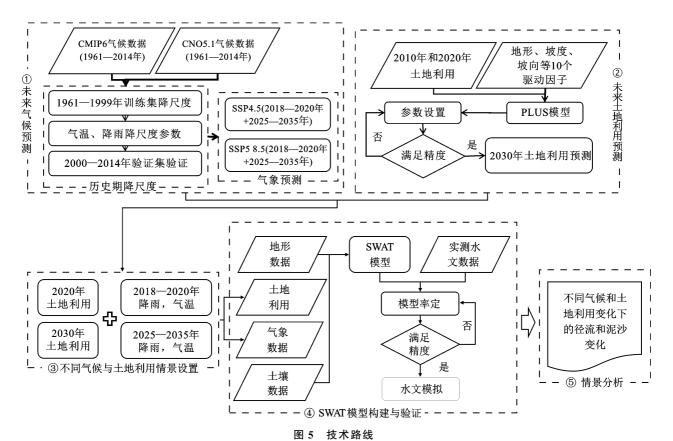


Fig. 5 Framework of the methodology http://stbcxb.alljournal.com.cn

表 6 不同情景设置

Table 6 Different scenario settings

气候模式	情景设置	基准期	LULC 变化	气候变化	气候和 LULC 综合变化
	情景	S1	S3	S5	S7
SSP2-4.5	气候时期	2018—2020	2018—2020	2025—2035	2025—2035
	LULC 时期	2020	2030	2020	2030
	情景	S2	S4	S6	S8
SSP5-8.5	气候时期	2018-2020	2018-2020	2025—2035	2025—2035
	LULC 时期	2020	2030	2020	2030

表 7 未来不同气候情景下的年平均降雨和气温变化

Table 7 Annual average rainfall and temperature changes under different climate scenarios for the future

未来		历史年平均值	BCC-CS	M2-MR	EC-Eart	h3 — Veg	MRI-E	SM2-0	NorESM	12 – MM	模式	平均
情景	项目	(2018—2020)	(2025 -	-2035)	(2025-	-2035)	(2025-	-2035)	(2025-	-2035)	(2025—	-2035)
旧尽		(2010—2020)	年平均值	变化量	年平均值	变化量	年平均值	变化量	年平均值	变化量	年平均值	变化量
	累积降水/	1 691.52	1 755.23	63.71	1 680.86	-10.66	1 638.44	-53.08	1 702.00	10.48	1 694.13	2.61
SSP2	mm	1 001.02	1 .00.20	00.11	1 000.00	10.00	1 000.11	00.00	1 .02.00	10.10	1 001.10	2.01
-4.5	平均气温/ ℃	18.98	*	*	18.99	0.01	19.54	0.56	19.10	0.12	19.21	0.23
SSP5	累积降水/	1 686.40	1 860.28	173.88	1 597.34	-89.06	1 761.05	74.65	1 674.09	-12.31	1 723.19	36.79
-8.5	平均气温/℃	18.94	*	×	19.46	0.52	19.89	0.95	19.33	0.39	19.56	0.62

注:*表示数据缺失。

表 8 2010-2020 年闽江流域土地利用转移矩阵

Table 8 Land use transition matrix for the Minjiang river basin from 2010 to 2020

项目	土地利用类型 -		2020 年各土地利用类型面积/km²									
沙 白	工地利用天空	草地	耕地	建设用地	林地	水体	未利用地	总计	转出量			
	草地	5.34	6.27	5.15	1.51	0.95	0.17	19.39	14.05			
	耕地	3.74	3 859.37	185.95	233.56	13.02	0.15	4 295.79	436.42			
0010 5 5 1 116	建设用地	0	0.46	601.10	0	7.05	0	608.61	7.51			
2010 年各土地	林地	3.22	1 758.23	82.82	51 989.13	1.22	0.02	53 834.64	1 845.51			
利用类型	水体	0.04	20.70	8.48	0.41	448.83	0.08	478.54	29.71			
面积/km²	未利用地	0.01	1.36	0.48	0	0.59	0.48	2.92	2.44			
	总计	12.35	5 646.39	883.98	52 224.61	471.66	0.90	EO 220 20				
	转人量	7.01	1 787.02	282.88	235.48	22.83	0.42	59 239.89				

2.2.2 闽江流域未来土地利用预测 保持驱动因子和模型参数不变,利用 Markov Chain 预测未来 2030 年闽江流域各地类总像元值,确定各地类像元值模拟上限。在保持历史 10 年的发展趋势下,2030 年闽江流域林地总面积占比将继续下降,耕地和建设用地面积保持上升,其中建设用地面积占比从 2020 年的1.50%(883.99 km²)提高到 2.00%(1 209.64 km²),耕地面积占比从 9.50%(5 646.40 km²)提高到11.40%(6 803.91 km²)。

从空间分布来看(图 6b、图 6d),建设用地主要沿着现有建设用地斑块侵占四周的耕地和林地,其中福州市主城区和三明市主城区建设面积扩张最为明显,这是由于地势平坦且靠近河流水系,导致建设用地斑块分配概率整体偏高。耕地保持零散扩张的趋势,整体分布与 2020 年类似,且大多通过侵占林地来扩张

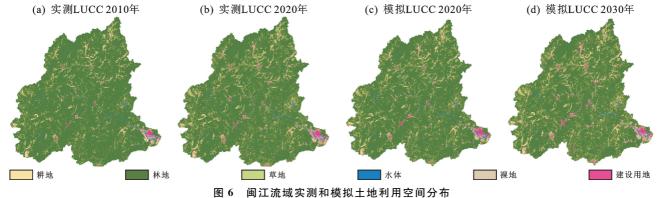
耕地面积。

2.3 气候及土地利用变化情景下的水沙响应分析

2.3.1 不同情景下径流和泥沙时间格局变化分析 从径流量和输沙量的年际变化(表 9)来看,在SSP2—4.5 情景下,相较于基准期 S1,土地利用变化情景 S3 年平均径流量增加 0.07 亿 m^3 (0.08%),年平均输沙量增加 0.2 万 t (0.24%);气候变化情景 S5 年平均径流量减少 3.77 亿 m^3 (4.76%),年输沙量增加14.98万 t (18.12%);土地利用和气候综合变化情景 S7 年平均径流量减少 3.62 亿 m^3 (4.57%),年输沙量增加15.11万 t (18.28%);在 SSP5—8.5 情景下,相较于基准期 S2,土地利用变化情景 S4 年均径流量增加 0.06 亿 m^3 (0.07%),年输沙量减少 0.05 万 t (0.04%);气候变化情景 S6 年平均径流量减少 3.30 亿 m^3 (4.11%),年输沙量增加 0.15 万 t (0.13%);土地利用

和气候综合变化情景 S8 年平均径流量减少 3.15 亿 m³(3.93%),年输沙量增加 0.37 万 t(0.33%)。未来不同气候情景下,尽管年平均降雨量有所上升,但年平均径流量均有一定程度减少,这主要是由于未来平

均温度升高导致流域蒸发量上升,从而在一定程度上减少地表径流。仅土地利用变化对流域年平均径流量和输沙量的改变有限,这是由于未来预测中土地利用变化面积不大且空间差异不显著所导致。



Observed and simulated spatial distribution of land use in the Minjiang river basin 表 9 不同气候情景和土地利用变化下年平均径流量和泥沙量变化

Table 9 Changes in annual mean runoff and sediment load under different climate scenarios and land use changes

	基准期(2018—2020)		仅 LUI	LC 变化	仅气值	媃变化	气候和 LULC 均变化	
水文要素			(2018—2020)		(2025-	-2035)	(2025—2035)	
	S1(低碳情景)	S2(高碳情景)	S3(低碳情景)	S4(高碳情景)	S5(低碳情景)	S6(高碳情景)	S7(低碳情景)	S8(高碳情景)
年平均降雨量/mm	1 676.68	1 673.96	1 676.65	1 673.94	1 680.59	1 708.58	1 680.57	1 708.55
年平均流量/(m³ · s ⁻¹)	251.06	254.19	251.29	254.39	239.13	243.76	239.58	244.23
年平均径流量/108 m3	79.23	80.22	79.30	80.28	75.46	76.92	75.61	77.07
年平均泥沙量/10 ⁴ t	82.63	111.82	82.83	111.77	97.61	111.97	97.74	112.19
年平均蒸发量/mm	654.91	662.52	654.25	661.93	680.63	684.65	679.93	683.92

注:各水文要素均为所有子流域算术平均值。

2.3.2 不同情景下径流和泥沙空间格局变化分析 统计各子流域年平均地表径流,其中图 7 为不同情景 下的地表径流相对基准期变化,图 8 为基准期以及气 候和土地利用均变化下的地表径流模拟值。

土地利用变化情景下,SSP2-4.5 低碳模式 S3 和 SSP5-8.5 高碳模式 S4 情景基本一致,大部分子流域 (图 7a 和图 7b)地表径流增加在 0~10%,其中径流增幅较显著的 110,123 和 139 号子流域(24%,12%和45%),统计其地类变化(图 9),各子流域中建设用地均呈现出较明显的扩展趋势,而在以建设用地为主的 123号子流域位于福州市晋安区,其地表径流最高,表明建设用地扩展是导致地表径流增加的主要原因。因土地利用导致地表径流增加的大面积区域,集中在 95,110,128,137,154 和 155 号子流域,其中 110 号子流域位于三明市三元区,本文预测未来三明市建设用地可能进一步扩大,这与王军等[25]的研究结论一致。

气候变化情景下,SSP2-4.5 低碳模式 S5 中(图 7c),接近 1/2 的子流域地表径流增加,SSP5-8.5 高碳模式 S6 中(图 7d),小部分子流域地表径流增加。不同气候情景下,地表径流变化差异较大,但整体上看,径流增加的区域集中在流域西北部,这也表明未来降雨更多集中在这一区域。其中地表径流较大的子流域13,26,29 和 30 号子流域位于南平市光泽县和邵武市,

该流域也是历次极端降雨事件中报道洪涝灾害较多的 区域,主要原因在于该地区降雨量及坡降比大,且流域 内存在河道交汇口,在强降雨下易导致山洪汇集。

土地利用和气候均变化情景下,SSP2-4.5 低碳 模式 S7 中(图 7e),大部分的子流域地表径流增加, 气候和土地利用变化的叠加影响导致流域西南部地 表径流显著增加,SSP5-8.5 高碳模式 S8中(图 7f), 接近 1/2 的子流域地表径流增加,径流增幅大部分在 30%以下,径流增幅较大的区域集中在流域西北部。 整体而言,气候和土地利用共同变化下的地表径流变 化与气候变化情景大体一致。结合地表径流分布图 8c 和图 8d 来看,地表径流显著增加的区域除集中在 流域西北部,在流域西南部也有体现,例如,以50, 60,79 和 108 为代表的子流域位于三明市建宁县、明 溪县和清流县,以上区域位于三明市的中高度生态敏 感区[32],地类以林地和耕地分布为主,过度的城镇化 开发容易导致生态环境恶化。因此,建议在以建设用 地和耕地扩张为主的发展情景下,为避免极端气候带 来的洪涝灾害,快速城市化地区发展需要做好生态保 护措施;耕林结合地区发展不能盲目追求经济效益, 需要因地制宜选择合适的种植模式;林地为主的地区 发展需要合理管控建设用地和耕地面积,查处违规侵 占林地行为。

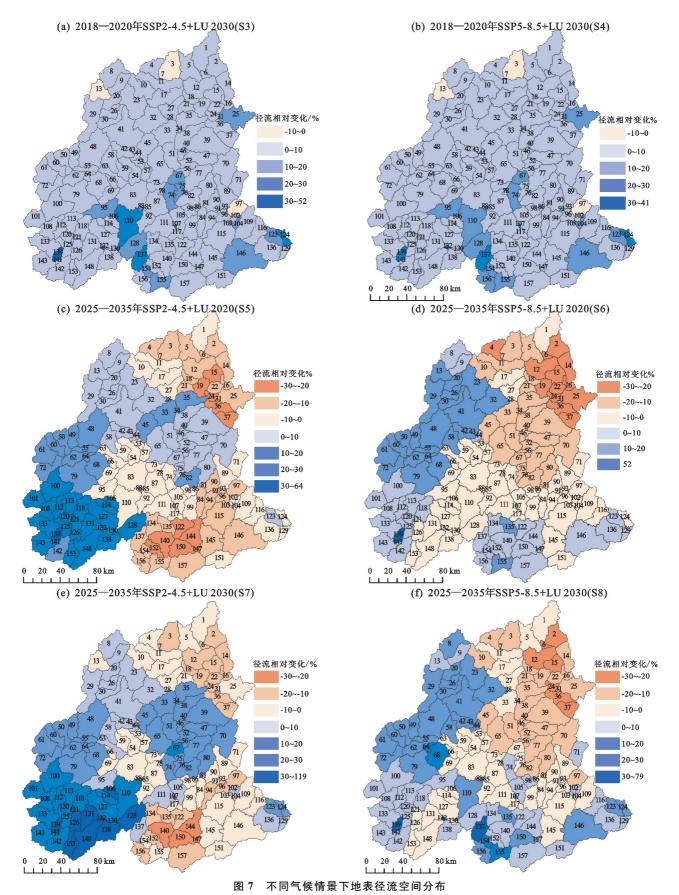


Fig. 7 Spatial distribution of surface runoff under different climate scenarios

统计各子流域年均产沙量,其中图 10 为不同情景下的产沙量相对基准期的变化,图 11 为基准期及

气候和土地利用均变化的产沙量模拟值。

土地利用变化情景下, SSP2-4.5 低碳模式 S3

中(图 10a),大部分子流域产沙量变化几乎为 0,产沙量增幅变化最大的子流域分别是 13,25 和 95 号子流域(3%,3%,4%),统计地类变化结果见图 12。在地

类变化幅度相近的情况下,产沙量增加最大的 95 号子流域中耕地增幅最为显著(19%),耕地面积增加是导致流域产沙增加的主要原因。

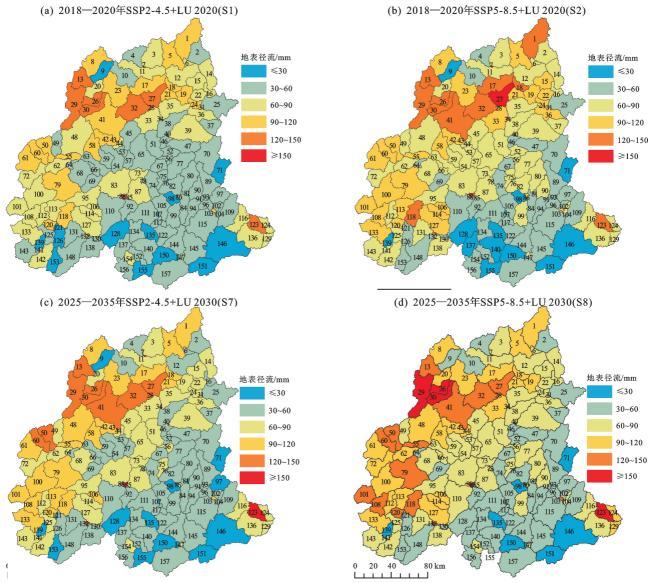
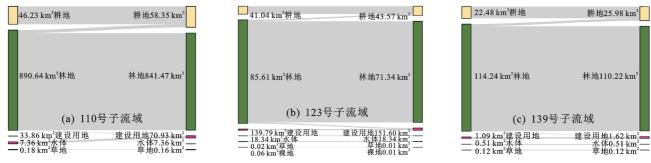


图 8 不同气候及土地利用变化下的地表径流空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of surface runoff under different climate scenarios and land use changes



注: 左列为 2020 年土地利用, 右列为 2030 年土地利用。

图 9 地表径流变化较大的子流域土地利用转移

Fig. 9 Land use changes in sub-basins with significant variations in surface runoff

SSP5-8.5 高碳模式 S4(图 10b),地表产沙量变化空间趋势与 S3 模式基本一致。仅土地利用变化导

致的产沙量变化在空间上的差异并不明显,主要原因在于建设用地和耕地增加面积不显著和分散式布局。

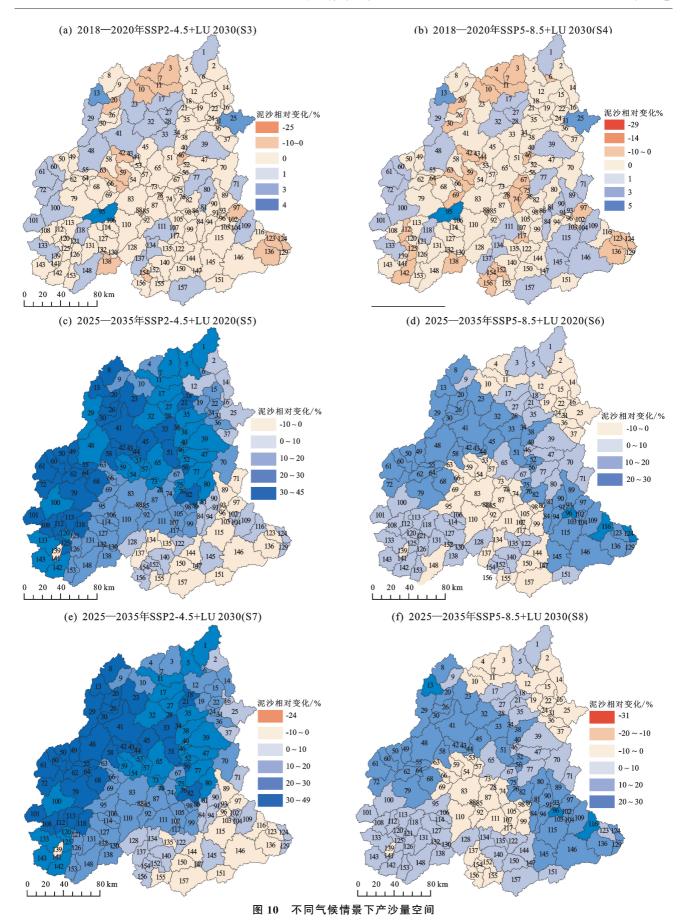


Fig. 10 Spatial distribution of sediment yield under different climate scenarios

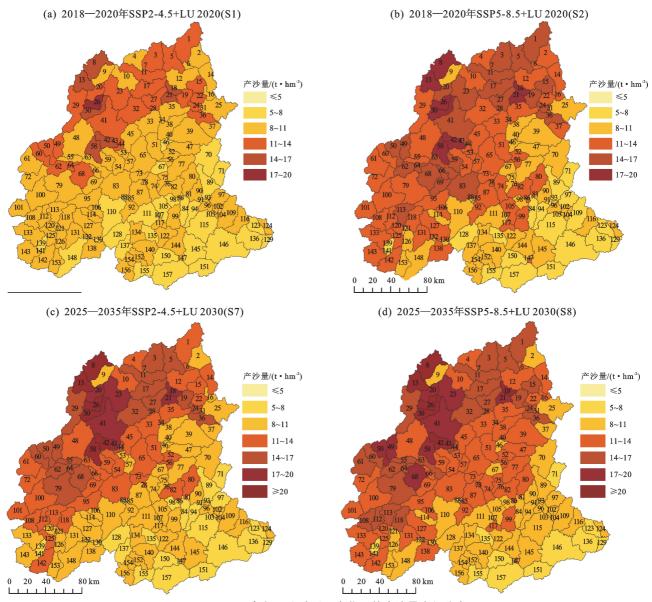
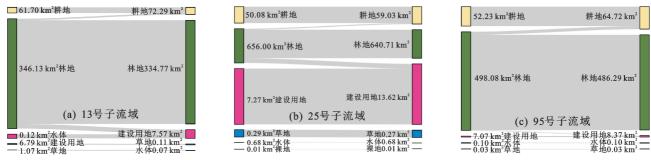


图 11 不同气候及土地利用变化下的产沙量空间分布

Fig. 11 Spatial distribution of sediment yield under different climate scenarios and land use changes



注:左列为 2020 年土地利用,右列为 2030 年土地利用。

图 12 地表产沙量变化较大的子流域土地利用转移

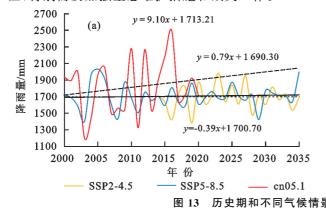
Fig. 12 Land use transition in sub-basins with significant changes in surface sediment yield

气候变化情景下,SSP2-4.5 低碳模式 S5 中(图 10c),绝大部分子流域的产沙量增加,30 个产沙量增加幅度在 30%以上的子流域集中在流域西北部。SSP5-8.5 高碳模式 S6 中(图 10d),大部分子流域的产沙量增加,其中 96,116 和 124 号子流域产沙量增

加幅度较大(22%,23%和20%)。不同气候情景下大部分产沙量增加的区域同时也是地表径流增加的区域,相较于低碳情景,高碳情景下产沙量整体变化幅度更小,这也与SSP5-8.5 未来气候情景 S6 中(图7d)径流变化幅度更小的趋势一致。

土地利用和气候均变化情景下,SSP2-4.5 低碳模式 S7 中(图 10e),大部分子流域产沙量增加,34 个子流域产沙量增加幅度在 30%以上,SSP5-8.5 高碳模式 S8 中(图 10f),大部分子流域产沙量增幅在 0~20%,而 13,96 和 116 号子流域产沙量增幅较大(23%,22%和 22%)。从产沙量空间分布来看,基准期(图 11a 和图 11b)中产沙量较大的区域集中在流域中上游,SSP2-4.5 情景下(图 11c)产沙量增加的区域集中在流域西北部,而 SSP5-8.5 情景下(图 11d)产沙量变化差异相对较小,2 种气候情景下,8,13,26,30,42 和 58 号子流域是产沙量较大的区域,分别对应流域中的南平光泽县、南平邵武市和三明将乐县,降雨集中且耕地面积占比较大共同导致这些区域产沙量较高。整体而言,流域内大部分区域产沙量较低,范围在 5~17 t/hm²。

综上所述,在土地利用变化情景下,闽江流域内的地表径流变化幅度高于产沙量,在气候变化情景下,地表径流和产沙量增幅较高的区域集中在流域西北部,而在土地利用和气候的双重影响下,流域西南部也出现了显著的地表径流和产沙量增加。未来流域内的开发建设应重点关注2个区域:一个是以南平市邵武市为中心的流域西北部;另一个是以三明市将乐县为中心的流域西南部的山地丘陵区。在这些地区,特别需要加强生态维护措施和减灾工作。



3 不确定性分析

GlobalLand30产品^[33]也是常用的土地利用数据集之一,后续进一步讨论不同土地利用数据源对SWAT模型模拟的年平均地表径流量和产沙量的影响。在本文 2.3.3 节率定参数的基础上,对比替换为2020年 GlobalLand30产品后 SWAT模型模拟精度,结果表明,月径流模拟精度几乎没有变化,而月输沙量模拟精度有所下降,这可能是由于 GlobalLand30统计的耕地面积更多,但整体精度依旧满足模拟要求,这也在一定程度上反映本文率定参数的合理性,未来应进一步讨论不同土地利用数据源对 SWAT模型模拟结果的空间影响。

本文基于 CMIP6 气候模式,选取符合中国碳达峰目标^[34]的 SSP2-4.5 和高碳路径 SSP5-8.5 模拟未来闽江流域 2025—2035 年可能的气候变化。进一步根据 CN05.1 提供的历史实测气象数据(2000—2020 年)和 CMIP6 历史及预测气象数据,分析 2000—2035 年的年平均降雨量和气温变化趋势(图 13)。历史期和不同气候情景下的降雨均表现出较大的不确定性,历史时期降雨的变化趋势显著高于 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5,整体拟合趋势更接近 SSP5-8.5,这也进一步表明未来闽江流域潜在的极端降雨风险可能增加,而历史期的气温变化趋势更加接近 SSP2-4.5。

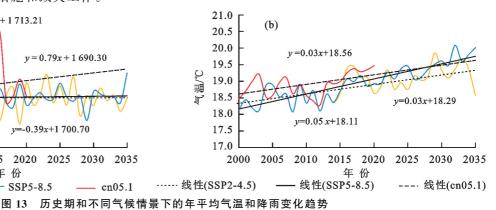


Fig. 13 Trends in annual average temperature and precipitation changes during the historical period and different climate scenarios

为进一步量化降雨气温组合对径流和泥沙的影响,以 2018—2020 年历史实测气候为基准,分别设置降雨变化—5%,—3%和+3%,+5%,气温变化—3,—1 $^{\circ}$ 0和+1,+3 $^{\circ}$ 0,共计 24 组气候组合。由图 14 可知,单一降雨量的增加和减少直接影响径流量的增加和减少,而温度的升降导致地表蒸散发量增加或者减少,从而影响径流量的减少和增加。在降雨气温组合中, $\Delta P = +3\%$, $\Delta T = +3\%$ 0 和 $\Delta P = -3\%$ 1,在 $\Delta P = -3\%$ 1,在 $\Delta P = -3\%$ 2,不是有效变,表明温度升高或降低 3 $^{\circ}$ 0,可以在一定程度上抵消降水量增加

或降低 3%带来的径流变化。输沙量的变化与径流的变化之间呈现高度线性相关($R^2=0.87$),单一降雨或者气温变化中,输沙量变化规律与径流变化一致,其中温度下降 3 ° 导致泥沙量增加幅度最大(37%)。在降雨气温组合中,降雨量变化 3%,温度增减 1 ° C时,输沙量增减均由降雨量增减主导,而温度大幅度增减 3 ° C时,输沙量增减主要由降雨量增减主导;降雨量变化 5%,输沙量增减主要由降雨量增减主导,及P=-5%, $\Delta T=-3$ ° C是唯一由于降温导致输沙量增加的组合,这也表明温度是影响输沙量的另一个重要因素。

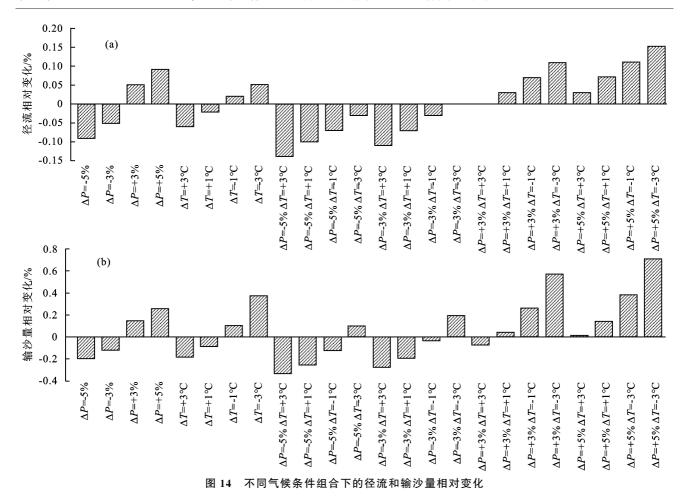


Fig. 14 Relative changes in runoff and sediment transport under different climate condition combinations

4 讨论

现有研究中,大部分学者在使用 SWAT 模型评 估未来气候影响时[12-13] 采用的历史水文数据多为 5 年以上的长时序数据,本文由于实测数据的限制,采 用3年的径流和泥沙数据作为模型率定和基准期数 据。同时为了避免未来气候模式和现状气候之间可 能存在的系统偏差,统一采用降尺度后的气候模式数 据作为历史和未来的数据。本文得出的结论表明: SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下,未来降雨和气温均 呈现不同程度的增加,这也符合现有研究的观 点[26-27,35];气候变化是导致径流和泥沙量变化的主要 原因,而 SSP2-4.5 情景可能比 SSP5-8.5 情景带来 更多的土壤侵蚀,导致输沙量增加,这与前人[17]在闽 江流域的研究相吻合,一种解释是 SSP5-8.5 情景 下,降雨量增加的同时,更大的升温幅度带来更多的 蒸发量,从而减少地表径流,间接导致输沙量的下降, 而 SSP2-4.5 情景下,冬季雨水的增加使得低温下没 有植被覆盖而裸露的土壤更容易遭受降雨侵蚀。

本文模拟闽江流域径流和泥沙对未来气候和土地利用变化的时空响应,在仅土地利用变化情景下,通过与基准期对比找到地表径流和产沙量增加较高的子流域,分析其土地利用变化,结果表明,建设用地

和耕地的增加是分别导致地表径流和产沙量增加的主要原因,这与 ZHANG 等[36]的研究结论一致。在综合考虑气候和土地利用变化的情景下,通过与基准期对比识别出各子流域地表径流和产沙量在空间上的变化差异,应重点关注在基准期已经具有较高地表径流和产沙量的区域,而在未来情景下可能面临进一步显著增加的潜在风险区域,对于这些潜在风险区域,提出相应的防治建议。然而不同气候情景和土地利用变化下的流域水文响应是一个复杂的过程,人类目前无法干预全球气候模式演变,但人类活动导致的地表覆盖和土地利用变化是影响流域水资源平衡的重要环节,因此在今后的研究中,可以在验证土地利用数据集精度的基础上,探究极端气候灾害下采取不同水土保持措施的最优土地利用策略。

5 结论

(1)采用先径流后泥沙的率定方式,对参数进行率定和统一,结果表明,闽江流域七里街、竹岐和沙县3个站点径流模拟 R^2 范围为 $0.80\sim0.95$, NSE 范围为 $0.75\sim0.91$;七里街和竹岐 2 个站点泥沙模拟 R^2 范围为 $0.75\sim0.98$, NSE 范围为 $0.64\sim0.94$ 。经参数率定的 SWAT 模型在闽江流域月尺度模拟的径流和泥沙效果较好。

- (2)利用 2020 年土地利用对 PLUS 模型进行验证,结果表明,预测值与实测值之间的 Kappa 系数为 0.77, PLUS 模型在闽江流域的土地利用模拟具有较好的适应性。基于该模型预测 2030 年闽江流域土地利用,其中建设用地和耕地面积将分别增加 325.64, 1 157.51 km²,但土地利用类型空间分布差异不显著。
- (4)在 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下,仅土地利用变化导致年平均径流量分别增加 0.08%和 0.07%,年平均泥沙量分别增加 0.24%,减少 0.04%;仅气候变化情景下,年平均径流量分别减少 4.76%和 4.11%,年平均泥沙量分别增加 18.12%和 0.13%;土地利用和气候均变化情景下,年平均径流量分别减少 4.57%和 3.93%,年平均泥沙量分别增加 18.28%和 0.33%。
- (5)综合考虑气候和土地利用的影响,未来流域 地表径流和产沙量的增长主要集中在以南平邵武市 为中心的流域西北部和以三明市将乐县为中心的流 域西南部,且增长幅度较大。

参考文献:

- [1] 徐宗学,姜瑶.变化环境下的径流演变与影响研究:回顾与展望[J].水利水运工程学报,2022(1):9-18.
 - XU Z X, JIANG Y. Studies on runoff evolution mechanism under changing environment: A state-of-the-art review[J]. Hydro-Science and Engineering, 2022(1):9-18.
- [2] 程思,于兴修,李振炜,等.流域输沙量变化归因分析方法综述[J].地理科学进展,2021,40(12):2140-2152. CHENG S, YU X X, LI Z W, et al. Review on the methods to separate the impacts of climate and human activities on sediment discharge[J]. Progress in Geography,2021,40(12):2140-2152.
- [3] AHMED N, WANG G X, BOOIJ M J, et al. Separation of the impact of landuse/landcover change and climate change on runoff in the upstream area of the Yangtze River, China [J]. Water Resources Management, 2022, 36(1):181-201.
- [4] SADEGHI S, SAGHAFIAN B, NAJARCHI M. Assessment of impacts of change in land use and climatic variables on runoff in Tajan River Basin[J]. Water Supply, 2020, 20(7):2779-2793.
- [5] 岁姚炳,牛存稳,贾仰文,等.黄河水源涵养区近 60 a 降水、气温和径流演变及其对水源涵养的影响[J].山地学报,2023,41(1):41-55.
 SUI Y B, NIU C W, JIA Y W, et al. Precipitation, temperature and runoff for the recent 60 years in the

Yellow River water conservation area of China and their

influence on water conservation[J]. Mountain Research,

- 2023,41(1):41-55.
- [6] 窦攀烽,左舒翟,任引,等.气候和土地利用/覆被变化对 宁波地区生态系统产水服务的影响[J].环境科学学报, 2019,39(7):2398-2409.
 - DOU P F, ZUO S Z, REN Y, et al. The impacts of climate and land use/land cover changes on water yield service in Ningbo region[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(7): 2398-2409.
- [7] 薛帆,张晓萍,张橹,等.基于 Budyko 假设和分形理论的 水沙变化归因识别:以北洛河流域为例[J].地理学报, 2022,77(1):79-92.
 - XUE F, ZHANG X P, ZHANG L, et al. Attribution recognition of streamflow and sediment changes based on the Budyko hypothesis and fractal theory: A case study in the Beiluo River Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(1):79-92.
- [8] 徐宗学,班春广,张瑞.雅鲁藏布江流域径流演变规律与 归因分析[J].水科学进展,2022,33(4):519-530. XU Z X, BAN C G, ZHANG R. Evolution laws and attribution analysis in the Yarlung Zangbo River Basin[J]. Advances in Water Science,2022,33(4):519-530.
- [9] 李朝月,方海燕.基于 SWAT 模型的寿昌江流域产沙模 拟及影响因素分析[J].水土保持学报,2019,33(6):127-135,142.
 - LICY, FANG HY. Simulation of sediment yield and analysis of influencing factors in the Shouchang River Basin based on SWAT model[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(6):127-135, 142.
- [10] TAYEBZADEH M N, ABBASPOUR K C, MALEK-MOHAMMADI B, et al. Spatiotemporal modelling of water balance components in response to climate and landuse changes in a heterogeneous mountainous catchment[J]. Water Resources Management, 2021, 35 (3): 793-810.
- [11] 汤佳,胡希军,韦宝婧,等.基于 FLUS 模型的流域土地 利用变化预测及水文响应评估[J].长江科学院院报, 2022,39(4):63-69.
 - TANG J, HU X J, WEI B J, et al. Land use change prediction and hydrological response assessment of watershed based on FLUS model[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(4):63-69.
- [12] 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].长江科学院院报,2023,40(2):44-51. WANG Y, SU B D, WANG Y J, et al. Streamflow change in Fuhe River Basin under China's dual-carbon scenario[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(2):44-51.
- [13] 王辉源,宋进喜,吴琼.未来气候及土地利用变化对水源 涵养量的影响[J].水土保持学报,2023,37(5):226-234. WANG H Y, SONG J X, WU Q. Influence of future climate and land use changes on water conservation[J].

- Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5): 226-234.
- [14] 王钰双,陈芸芝,卢文芳,等.闽江流域不同土地利用情景下的径流响应研究[J].水土保持学报,2020,34(6): 30-36.
 - WANG Y S, CHEN Y Z, LU W F, et al. The hydrological response to different land use scenarios in the Minjiang River Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(6); 30-36.
- [15] 王立辉,钟吴林,余志明,等.1950—2019 年闽江下游径 流量变化特征分析[J].福州大学学报(自然科学版), 2022,50(5):681-686.
 - WANG L H, ZHONG H L, YU Z M, et al. Analysis of the runoff variation characteristics in the downstream of Minjiang River from 1950 to 2019 [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2022, 50 (5):681-686.
- [16] RASHID H, YANG K J, ZENG A C, et al. The influence of landcover and climate change on the hydrology of the Minjiang River watershed [J]. Water, 2021, 13 (24):e3554.
- [17] RASHID H, YANG K J, ZENG A C, et al. Predicting the hydrological impacts of future climate change in a humid-subtropical watershed [J]. Atmosphere, 2021, 13 (1):e12.
- [18] 中华人民共和国水利部.水利水电工程水土保持技术规范:SL 575—2012 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2012.
 - The People's Republic of China, Ministry of Water Resources. Technical specification for soil and water conversion in water resources and hydropower engineering: SL 575—2012 [M]. Beijing: China Water and Power Press, 2012.
- [19] 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.
- [20] ZHU H H, JIANG Z H, LI L. Projection of climate extremes in China, an incremental exercise from CMIP5 to CMIP6[J]. Science Bulletin, 2021, 66(24): 2528-2537.
- [21] 雷华锦,马佳培,李弘毅,等.基于分位数映射法的黑河上游气候模式降水误差订正[J].高原气象,2020,39(2): 266-279.
 - LEI H J, MA J P, LI H Y, et al. Bias correction of climate model precipitation in the upper Heihe River basin based on quantile mapping method[J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(2); 266-279.
- [22] 吴佳,高学杰.一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比[J]. 地球物理学报,2013,56(4):1102-1111.

- WU J, GAO X J. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56 (4): 1102-1111.
- [23] 赵芳芳,徐宗学.统计降尺度方法和 Delta 方法建立黄河 源区气候情景的比较分析[J].气象学报,2007,65(4): 653-662.
 - ZHAO F F, XU Z X. Comparative analysis on downscaled climate scenarios for headwater catchment of Yellow River using sds and Delta methods[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2007,65(4):653-662.
- [24] LIANG X, GUAN Q F, CLARKE K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China[J].Computers, Environment and Urban Systems, 2021, 85:e101569.
- [25] 王军,严有龙,王金满,等.闽江流域生境质量时空演变特征与预测研究[J].生态学报,2021,41(14):5837-5848.
 - WANG J, YAN Y L, WANG J M, et al. Temporal-spatial variation characteristics and prediction of habitat quality in Min River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(14):5837-5848.
- [26] 王保盛,廖江福,祝薇,等.基于历史情景的 FLUS 模型 邻域权重设置:以闽三角城市群 2030 年土地利用模拟 为例[J].生态学报,2019,39(12):4284-4298.

 WANG B S, LIAO J F, ZHU W, et al. The weight of neighborhood setting of the FLUS model based on a historical scenario: A case study of land use simulation of urban agglomeration of the Golden Triangle of Southern Fujian in 2030[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(12): 4284-4298.
- [27] 周锐,苏海龙,王新军,等.CLUE-S模型对村镇土地利用 变化的模拟与精度评价[J].长江流域资源与环境,2012,21(2):174-180.
 - ZHOU R, SU H L, WANG X J, et al. Simulation and accuracy assessment of village land use change based on CLUE-S model[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(2):174-180.
- [28] 张灵.桑干河上游流域径流泥沙对气候要素与土地利用变化的响应研究[D].北京:中国地质大学(北京),2017. ZHANG L. Response of runoff and sediment to climate and land use changes in the upper Sanggan River Basin [D].Beijing;China University of Geosciences(Beijing),2017.
- [29] ARNOLD J G, MORIASI D N, GASSMAN P W, et al. SWAT: Model use, calibration, and validation[J]. Transactions of the ASABE, 2012, 55(4):1491-1508.

(下转第 245 页)

- [49] 元晓春,林惠瑛,曾泉鑫,等.武夷山不同海拔梯度黄山松土壤有机氮解聚酶活性及其影响因素[J].生态学报,2022,42(4):1560-1570.
 - YUAN X C, LIN H Y, ZENG Q X, et al. Soil organic nitrogen depolymerase activities and its influencing factors of *Pinus taiwanensis* at different altitude gradients in Wuyi Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(4):1560-1570.
- [50] 王竹,刘扬,王芳,等.黑河上游不同植被类型土壤细菌群落多样性、功能及季节动态[J].环境科学,2023,44 (11):6339-6353.
 - WANG Z, LIU Y, WANG F, et al. Effects of vegetation types and seasonal dynamics on the diversity and function of soil bacterial communities in the upper

(上接第84页)

- [27] 万志纲,丁文广,蒲晓婷,等.祁连山国家公园产水量时空变化及驱动因素分析[].水土保持学报,2023,37 (6):161-169.
 - WAN Z G, DING W G, PU X T, et al. Analysis of the spatio-temporal variation and driving factors of water yield in Qilian Mountain National Park[J], Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(6):161-169.
- [28] 张云昌.三峡水库蓄水 20 年回顾与展望[J].中国水利, 2023(19):5-9.
 - ZHANG Y C. Twenty years of reservoir impoundment in the Three Gorges: A retrospective and outlook[J].

(上接第 233 页)

- [30] 陈笑晨,唐振飞,陈锡宽,等.基于 CMIP6 的福建省极端 气温预估[J].干旱气象,2022,40(3),415-423. CHEN X C, TANG Z F, CHEN X K, et al. Projection of extreme temperature in Fujian based on CMIP6
 - of extreme temperature in Fujian based on CMIP6 output[J]. Journal of Arid Meteorology, 2022, 40(3): 415-423.
- [31] 唐振飞,杨婷,陈笑晨,等.SSPs 情景下福建省未来极端降水的模拟与预估[J].气象与环境学报,2023,39(1):26-36.
 - TANG Z F, YANG T, CHEN X C, et al. Simulation and prediction of future extreme precipitation in Fujian Province under SSPs scenarios[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2023, 39(1); 26-36.
- [32] 杨舒婷.三明市土地利用生态敏感性评价研究[D].福州:福建农林大学,2021.
 - YANG S T. Research on land use ecological sensitivity assessment in Sanming city[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2021.

- reaches of the Heihe River[J]. Environmental Science, 2023,44(11):6339-6353.
- [51] 高海宁,李彩霞,孙小妹,等.祁连山北麓不同海拔土壤化学计量特征[J].中国沙漠,2021,41(1):219-227. GAO H N, LI C X, SUN X M, et al. Stoichiometry characteristics of soil at different altitudes in the Qilian Mountains[J].Journal of Desert Research,2021,41(1):219-227.
- [52] 李聪,吕晶花,陆梅,等.文山自然保护区典型植被土壤碳氮储量变化特征[J].生态学杂志,2021,40(11):3531-3542. LIC, LYUJH, LUM, et al. Variation of soil carbon and nitrogen storage under typical vegetations in Wenshan Nature Reserve [J]. Chinese Journal of Ecology,2021,40(11):3531-3542.
 - China Water Resources, 2023(19):5-9.
- [29] 黄意武,江优优,王广锋.新时代弘扬三峡移民精神的价值意蕴和实践路径[J].重庆社会科学,2021(9);81-90. HAUNG Y W, JIANG Y Y, WANG G F. The rich meaning and practical path of carrying forward the spirit of the Three Gorges migrants in the new era[J]. Chongqing Social Sciences,2021(9);81-90.
- [30] 喻永红.退耕还林可持续性研究:以重庆万州为例[D]. 杭州:浙江大学,2014.
 YU Y H. Research on the viability of the Frain for Green Project: A case study of Wanzhou District in Chongqing[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2014.
- [33] CHEN J, CAO X, PENG S, et al. Analysis and applications of GlobeLand30: A review[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2017, 6(8): e230.
- [34] 杨晨辉,王艳君,苏布达,等.SSP"双碳"路径下赣江流域径流变化趋势[J].气候变化研究进展,2022,18(2): 177-187.
 - YANG C H, WANG Y J, SU B D, et al. Runoff variation trend of Ganjiang River Basin under SSP "Double Carbon" path [J]. Climate Change Research, 2022, 18 (2):177-187.
- [35] YOU Q L, CAI Z Y, WU F Y, et al. Temperature dataset of CMIP6 models over China: Evaluation, trend and uncertainty [J]. Climate Dynamics, 2021, 57 (1):17-35.
- [36] ZHANG L M, MENG X Y, WANG H, et al. Simulated runoff and sediment yield responses to land-use change using the SWAT model in Northeast China [J]. Water, 2019,11(5):e915.