

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.06.017.

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, 73.

Zhang Jihong, Yao Zhenghong, Li Junjie, 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, 73.

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

张吉洪^{1,2}, 姚正红^{1,2}, 李俊杰^{1,4}, 万 炜^{3,4}, 朱锦奇^{3,4}, 郑博福^{1,3,4}

(1.南昌大学 工程建设学院, 南昌 330031;

2.江西省地质局物化探大队, 南昌 330009; 3.南昌大学 资源与环境学院, 南昌 330031;

4.鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室/南昌大学 江西生态文明研究院, 南昌 330031)

摘 要: [目的]厘清不同情景下亚热带江河源头区的径流量变化,为流域水资源的综合管理调控和水资源开发利用提供决策依据,并为亚热带江河源头区生态安全保障提供科学参考。[方法]以赣江主要源头区域的桃江流域为研究区,采用 2000—2019 年的气象及降水数据开展 SWAT 模型的率定与验证,进而模拟了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。[结果]SWAT 模型对于桃江流域具有良好的适用性,模拟径流与实测径流拟合效果良好。建设发展情景下的产流能力最强,生态保护情景下的产流能力最弱。不同季节的产流能力存在明显差异,丰水期各情景产流能力差异较大,而枯水期不同情景地表径流量差异较小。15 种气候变化情景中,流域径流量与降水量呈正相关($p < 0.01$),与温度呈负相关。相较于气温变化,降水量的变化对桃江流域的径流量影响更大,是径流量变化的主要影响因素。 L_1 & C_5 情景(耕地扩张情景,温度不变,降水量增加 20%)下的年均径流量最大,达 $267.15 \text{ m}^3/\text{s}$ 。[结论]土地利用对于径流变化影响相对较弱,气候因素在桃江流域径流变化中起主要作用。

关键词: 亚热带江河源头区; 径流; 土地利用变化; 气候变化; SWAT 模型; 桃江流域

中图分类号: K903; P343

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)06-0055-12

Study on the Response of Runoff to Land Use and Climate Change in Subtropical River Headwater

Zhang Jihong^{1,2}, Yao Zhenghong^{1,2}, Li Junjie^{1,4}, Wan Wei^{3,4}, Zhu Jinqi^{3,4}, Zheng Bofu^{1,3,4}

(1.School of Infrastructure Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2.Geophysical & Geochemical Exploration Brigade of Jiangxi, Nanchang 330009, China; 3.School of Resources & Environment, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 4.Key Laboratory of Poyang Lake Environment and Resources Utilization, Ministry of Education/Jiangxi Institute of Ecological Civilization, Nanchang University, Nanchang, 330031, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to clarify the runoff changes in the subtropical river headwaters under different scenarios, to provide decision-making basis for the comprehensive management and regulation of water resources in the basin and the development and utilization of water resources, and to provide scientific reference for the ecological security guarantee in the subtropical river headwaters. [Methods] Taojiang River Basin, the main source area of the Ganjiang River, was taken as the research area. SWAT model was constructed. The model was calibrated and validated by using meteorological and precipitation data from 2000 to 2019, and then the runoff response characteristics under different land use and climate change and their combination scenarios were simulated. [Results] SWAT model has good

收稿日期: 2023-09-27

修回日期: 2024-01-12

资助项目: 江西省重点研发计划项目(20223BBG74S01; 20223BBG71013); 国家自然科学基金青年科学基金项目(42301091)

第一作者: 张吉洪(1998—), 男, 江西九江人, 硕士研究生, 研究方向为生态水文与水土保持。E-mail: 406000210055@email.ncu.edu.cn

通信作者: 郑博福(1973—), 男, 江西上饶人, 博士, 教授, 主要从事环境规划与管理研究。E-mail: bfzhen@ncu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

applicability to the Taojiang River Basin, and the fitting effect between simulated runoff and measured runoff is good. The runoff capacity under the construction and development scenario is the strongest, and the runoff capacity under the ecological protection scenario is the weakest. There are obvious differences in runoff capacity in different seasons. The runoff capacity of each scenario in the wet season is quite different, while the difference of surface runoff in different scenarios in the dry season is small. In the 15 climate change scenarios, the runoff is positively correlated with precipitation ($p < 0.01$) and negatively correlated with temperature. Compared with the change of temperature, the change of precipitation has a greater impact on the runoff flow in Taojiang River Basin, which is the main influencing factor on runoff change. The average annual runoff under $L_1 \& C_5$ scenario (cultivated land expansion scenario, temperature unchanged, precipitation increased by 20%) is the largest, reaching $267.15 \text{ m}^3/\text{s}$. [Conclusion] In this study, land use has a weak impact on runoff change, and climate factors play a major role in runoff change in Taojiang River Basin.

Keywords: subtropical river headwaters; runoff; land use change; climate change; SWAT model; Taojiang River Basin

径流是水循环及水量平衡的基本环节,也是自然地理环境中最为活跃的因素,还是区域水资源的重要体现。因此,径流量的变化不仅影响着水文过程,同时也会对区域生态格局演变以及社会经济发展等方面产生重要影响^[1]。已有研究表明,气候变化及人类活动两者共同作用的影响是流域内径流变化的主要原因^[2]。此外,也有学者关于气候变化以及人类活动对径流的影响程度开展了相关定量研究,其方法主要包括经验统计法^[3]、弹性系数法^[4]和水文模型法等^[5]。由于经验统计法是基于大量历史实测数据进行分析,因此该方法不适用于缺乏水文资料的地区。弹性系数法则通过改变模型中的单个因子来估算各因子的水文效应,这种方法难以解释水文循环的机理过程^[6]。而水文模型法因其能考虑流域时空异质性,且较为精细地刻画水文循环的机理过程,因而成为目前较为常用的方法。

人类活动对地表径流的影响是一个复杂且多维度的过程。一方面,人口增长带来的用水需求增加,以及修建水利设施等人类活动均会对径流造成不同程度的影响^[7]。另一方面,从宏观视角来看,人类活动通过改变地表覆被情况使土地利用发生相应变化,造成地表下垫面物理性质、局域小气候以及水文通量等有所差异,进而使径流量的时空分布特征发生改变^[8]。此外,人类活动通过改变大气成分、释放人为热等途径对气候产生影响,造成明显的气温升高趋势,使得高温、干旱、洪涝等极端异常气候发生的频率及强度不断增加^[9]。气候变化通过影响降水、蒸散发等过程,进一步造成地表水资源的分布和流域径流发生明显变化。而土地利用变化及气候变化则会影响农业生产、能源消耗等人类活动。因此,复杂变化环境特别是土地利用及气候变化背景下的径流响应特

征,成为当前国内外学者重点关注的科学问题^[10]。

我国降水量整体呈现南方多于北方、山区多于平原区的空间格局。同时,山区也是大多数江河的源头区域^[11]。长期以来,气候变化与人类活动作为最重要的双重驱动因子,不断改变着亚热带江河源头区的生态环境状况,对流域中下游的水生态安全产生影响。因此,厘清不同情景下亚热带江河源头区的径流量变化对于整个流域的水安全具有重要战略意义^[12]。尽管先前的研究者关注到了土地利用以及极端气候对于径流变化的影响,但同时考虑两者交互作用下的研究仍有待深入。

亚热带江河源头区多位于山地,海拔较高,植被生长茂密,人为扰动程度相对较小。降雨季节分布不均匀,径流的形成以坡面漫流以及沟谷细流为主^[13]。桃江流域作为长江一级支流——赣江的重要的源头区之一,区域内水资源充沛,水能蕴藏量高。从植被条件与地形地貌特征来看,该区域以常绿阔叶林以及针叶林为主,山峦与峡谷交纵分布,具有亚热带江河源头区的典型自然地理特征。另一方面,该区域地处南方丘陵山地屏障带,生态敏感性较强,径流量的变化不仅会对桃江流域的水源涵养、土壤保持、生境质量等方面发挥作用,同时也会对下游乃至整个赣江流域的自然环境、社会经济及生态安全产生重要影响。

尽管已有学者开展了关于径流对土地利用或气候变化响应过程的相应研究,但目前多数研究在情景设置方面较为单一,且多是单独对土地利用或气候变化的径流响应进行分析,而对于土地利用和气候变化共同作用下的径流变化研究相对较少。同时,目前对于亚热带江河源头区的研究多集中于水资源量以及水环境质量等方面,而关于土地利用及气候变化对径流的影响研究相对较少。

在气候变化及人类活动强度愈发强烈的大背景下,理清亚热带江河源头区径流对土地利用及气候变化响应特征具有重要意义。因此,本研究以桃江流域为研究区,通过建立适用于桃江流域的 SWAT 模型,并揭示不同气候情景、不同土地利用情景、以及不同气候与土地利用组合情景下的径流量变化特征。研究结果以期为流域尺度径流模拟研究有所裨益,为水资源的综合管理调控和水资源开发利用提供决策依据,并为亚热带江河源头区生态安全保障提供科学参考。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

桃江流域地处江西省赣州市南端(114°12′—115°20′E, 24°30′—25°55′N),是赣江的主要源头区之一,流域面积约 7 684 km²(图 1)。该区域属于亚热带季风气候,年均气温 20 ℃,年均相对湿度 75%,年均蒸发量为 1 300 mm,年均日照时数 1 582~1 928 h。桃江流域年均降水量达 1 600 mm,降水集中在 4—8 月,其中降水峰值多以暴雨形式出现,主要集中在 7—8 月,极易发生洪涝灾害。境内主要的土壤类型为红壤、黄壤和紫色土。土地覆被类型以林地为主,森林覆盖率达 65%。其中,天然植被中常绿阔叶树占主要部分,主要分布在海拔 500~1 000 m;而针阔叶混交林主要分布在海拔 1 000 m 以上。

研究区内的桃江发源于江西省与广东省交界的南岭北麓,干流全长 289 km,属于鄱阳湖流域的赣江水系。桃江自西南向东北流经了赣州市全南县、龙南县、定南县、信丰县和赣县 5 个县域,最后汇入赣江上游的支流——贡江。桃江多年平均径流量为 5.5×10^9 m³,径流量年际及月际变化较大,3—8 月的丰水期径流量占全年径流量的七成左右。

1.2 数据源与数据预处理

(1) 数字高程数据。通过地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)下载 30 m 空间分辨率的 DEM 数据。用于提取研究区海拔、坡长、坡度、坡向等地貌特征参数;另外,通过对 DEM 数据削峰、填挖等处理,实现河网水系提取、流域边界识别、子流域划分等水文分析(图 1)。

(2) 土地利用数据。土地利用类型对流域产流、产沙等水文过程均产生重要影响^[14]。2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年 30 m 空间分辨率的土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)。

(3) 土壤数据。本研究所使用的土壤数据包括土壤类型分布图、土壤类型索引表以及土壤物理参数

数据库三部分。土壤物理参数数据库和土壤数据从国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/>)获得,该数据来源于世界土壤数据库 HWSO(Harmonized World Soil Database),空间分辨率为 1 km×1 km。土壤类型代码属性数据根据《中国土种志》查询获取,包括土壤机械组成、土壤剖面、有机质层厚度和 pH 值等主要指标。将桃江流域土壤类型进行重分类得到相对应的各个类型。土壤的物理属性是流域水文循环的重要参数,能够直接影响 SWAT 模型的径流模拟效果。本研究中所应用到的土壤物理参数详见表 1。

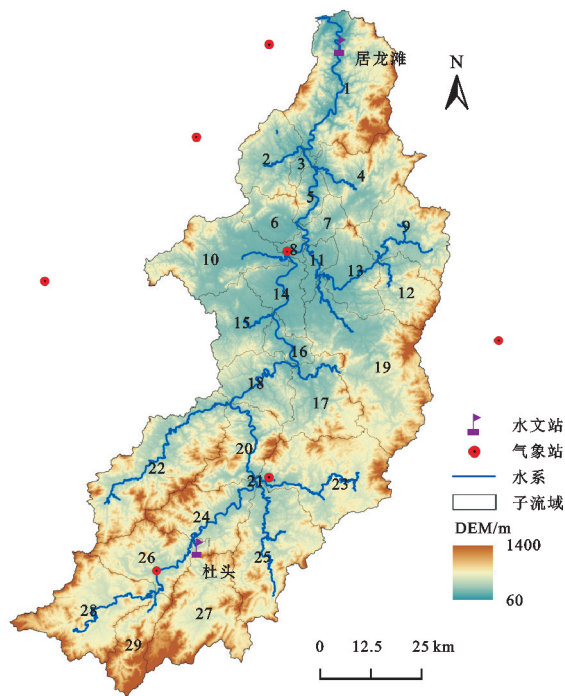


图 1 桃江流域地理概况及子流域划分

Fig. 1 Geographical overview and sub-watershed division of Taojiang basin

(4) 气象及水文数据。2000—2019 年桃江流域及其周边 9 个气象站点的逐日气温、降水、相对湿度和平均风速等气象数据来源于国家科学气象数据中心(<http://data.cma.cn/>)。对于部分缺失的气象数据,本研究采用当日临近站点的数据进行插补。水文数据则采用赣州市水文局提供的居龙滩水文站和杜头水文站日径流量数据,时间跨度是 2000—2019 年(图 1)。

2 研究方法与模型率定

由美国农业部研发的 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)分布式流域水文模型,因其充分利用了遥感与地理信息系统所提供的地表空间数据,可较为精准地刻画水量、泥沙、污染物等要素在不同情景下的流域水文过程。基于 SWAT 模型的相关研究,主要集中在西北干旱区^[15]、华北平原^[16]、黄土高原等^[17]中国北方的水资源敏感区开展了诸多应用。

表 1 土壤属性数据库参数定义及获取方式

Table 1 Soil attribute database parameter definition and obtaining method

| 参数名称 | 参数定义 | 参数获取 |
|---------|------------|--------------|
| SNAM | 土壤类型 | HWSD.mdb 属性表 |
| NLAYERS | 土壤层数 | HWSD.mdb 属性表 |
| SOL_ZMX | 土壤剖面最大根系深度 | HWSD.mdb 属性表 |
| SOL_Z | 各层深度 | HWSD.mdb 属性表 |
| CLAY | 黏土含量 | HWSD.mdb 属性表 |
| SOL_CBN | 有机碳含量 | 有机质含量乘 0.58 |
| SILT | 粉砂含量 | HWSD.mdb 属性表 |
| ROCK | 砾石含量 | HWSD.mdb 属性表 |
| TEXTURE | 土壤层结构 | SPAW 软件计算 |
| SOL_EC | 土壤电导率 | SPAW 软件计算 |
| SOL_CRK | 土壤最大可压缩量 | 0.5 |
| SOL_ALB | 地表反射率 | 模型自带 |
| USLE_K | 土壤侵蚀因子 | 推导公式计算 |
| HYGDRP | 土壤水文学分组 | 推导公式计算 |
| SOL_K | 饱和水力传导系数 | SPAW 软件计算 |
| SOL_BD | 土壤湿密度 | SPAW 软件计算 |
| SOL_AWC | 土壤有效持水量 | SPAW 软件计算 |

2.1 地表径流计算

SWAT 模型可分为 3 个子模块,分别为水文过程模块、土壤侵蚀模块以及污染负荷模块。其中,模型中水文过程模块以水量平衡作为原始驱动力,在模型中的运算过程中,完成对水文陆地内循环的演算。循环过程可分为以下两个阶段:第一是地面汇流演算阶段,包括对每个河道、流域内的污染物、水流等在河道内的流动进行控制等。第二则是河道汇流演算阶段,即对第一阶段预测的水流、污染物质等进行迁移的预测和过程分析。SWAT 模型的水量平衡计算方法如下:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{n=1}^t (R_n - Q_n - E_n - W_n - T_n) \quad (1)$$

式中: SW_t 、 SW_0 、 R_n 、 Q_n 、 E_n 、 W_n 及 T_n 分别为第 n 天的含水量(mm)、土壤初始含水量(d)、总降雨量(mm)、总地表径流量(mm)、蒸发蒸腾量(mm)、土壤剖面下渗量(mm)以及地下水回流量(mm)。

在此基础上,采用 SCS(soil conservation service)曲线法进行地表径流模拟计算^[18]。该方法通常以小流域为研究对象,是一种预测流域水文过程的经验模型,计算式如下:

$$Q = \frac{(R_p - I)^2}{R_p - I + M} \quad (2)$$

$$M = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (3)$$

式中: Q 为地表径流量(mm); R_p 为降雨深度(mm); M 为日最大滞留量(mm); I 为初损值(mm); CN 为

日径流曲线数,无量纲。关于 R_p 、 S 、 I 的参数设置,参考 Boughton^[18] 和刘家福等^[19] 的研究。

2.2 SWAT 模型率定及精度评价

本研究通过 ArcSWAT 平台,使用构建好的索引表,预处理和导入包括土壤类型、土地面积等关键信息,利用 Multiple Slope 法逐步演算,以完成水文响应单元(HRU)分析。参考相关文献并结合实际情况,将流域阈值设定为 18 000 hm²^[20],将桃江流域一共划分为 29 个子流域,714 个 HRU。由于土地利用、土壤和坡度的阈值设置对 HRU 划分结果影响很大,因此参考前人相关成果,本研究将土地利用、土壤和坡度的阈值均设定为 10%^[21]。

2.2.1 敏感性分析 为减小“异参同效”的影响,提高模型效率,本文参考相关文献,选取了 20 个与径流模拟相关的参数,采用 SWAT-CUP(SWAT Calibration and Uncertainty Programs)的 SUFI-2 算法,并根据参数敏感性水平 t 值(t -Stat)和显著性水平 p 值(p -Value)进行检验,最终得到 17 个与径流相关的参数。

2.2.2 参数率定与验证 SWAT 模型中需要设置模型预热期提高模型精确度。本研究将预热期、率定期、验证期分别设定为 2000—2001 年、2002—2010 年、2011—2019 年,时间为月尺度,率定和验证的实测月径流站点为居龙滩站、杜头站。使用 SWAT-CUP 每次 1 000 次进行迭代,共进行 5 次,并取得较优结果,模型参数的最终筛选结果见表 2。

模型在流域的适用性采用决定系数,纳什效率系数以及相对误差来评价。其中,决定系数 R^2 代表水文过程与模拟结果可以被模型结构解释的比例程度, R^2 越大,则说明模拟的结果可信度越高。纳什效率系数 E_{NS} 代表实测数据和模拟数据的方差之比,能更为合理地反映模拟值与观测值之间的吻合程度。 E_{NS} 越大,亦说明模拟的结果可信度越高。PBIAS 则是通过绝对误差(实测数据与模拟数据的差值)和实测数据的比值计算得到。计算式如下:

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2} \quad (4)$$

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{S}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (5)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i) \times 100}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (6)$$

式中: O_i 为模拟值; \bar{O} 为实测值; \bar{S}_i 为多年平均模拟值; \bar{S} 为多年平均实测值; n 为实测数据的个数。相

关 SWAT 分布式水文模型研究认为 $R^2 > 0.7$, $E_{NS} > 0.7$ 表示模型是较适用的^[22]。

SWAT 径流模拟的精度评价表明:居龙滩站率定期、验证期 R^2 分别为 0.80,0.81, E_{NS} 分别为 0.79,0.78;杜头站率定期、验证期 R^2 分别为 0.86,0.81, E_{NS} 分别为 0.85,0.80(图 2)。由此可见,研究区率定期和验证期的月尺度径流模拟值与观测值变化趋势吻合度较高,表明该模型在桃江流域有很好的适用性。

表 2 模型参数敏感性分析及率定结果
Table 2 Sensitivity analysis of model parameters and calibration results

| 参数名称 | 物理意义 | 下限 | 上限 | 最佳值 |
|-----------------|-----------------------------|--------|-------|--------|
| v_ESCO.hru | 土壤蒸发补偿系数 | 0.1 | 0.4 | 0.37 |
| r_SOL_AWC.sol | 土壤有效水含量/mm | -1.0 | 1.0 | 0.55 |
| v_GW_DELAY.gw | 地下水滞后系数 | 0 | 150.0 | 125.00 |
| r_CN2.mgt | SCS 径流曲线系数 | -0.2 | 0.2 | 0.19 |
| v_RCHRG_DP.gw | 深层地下水渗透系数 | -1.0 | 1.0 | 0.64 |
| v_REVAPMN.gw | 潜水极限蒸发深度/mm | 0 | 450.0 | 177.10 |
| v_SURLAG.bsn | 地表径流滞后系数 | 0 | 30.0 | 25.90 |
| v_SMFMN.bsn | 融雪基温/℃ | 0 | 15.0 | 8.42 |
| r_SOL_BD.sol | 土壤湿容重/(g·cm ⁻³) | -0.5 | 2.5 | 0.18 |
| r_EPCO.hru | 植被蒸发补偿系数 | -1.0 | 1.0 | 0.66 |
| r_SOL_K.sol | 土壤饱和和水力传导度 | -1.0 | 1.0 | -0.06 |
| v_CH_K2.rte | 主河道水力传导度 | -100.0 | 100.0 | -88.90 |
| v_ALPHA_BF.gw | 基流消退系数 | 0 | 1.0 | 0.49 |
| v_ALPHA_BNK.rte | 河岸储水回归系数 | 0 | 1.0 | 0.79 |
| r_CANMX.hru | 最大冠层截留量/mm | -10.0 | 10.0 | -7.90 |
| v_CH_N2.rte | 河道曼宁系数 | -1.0 | 1.0 | 0.07 |
| v_GWQMN.gw | 浅层地下水径流系数 | 0 | 2.0 | 0.05 |

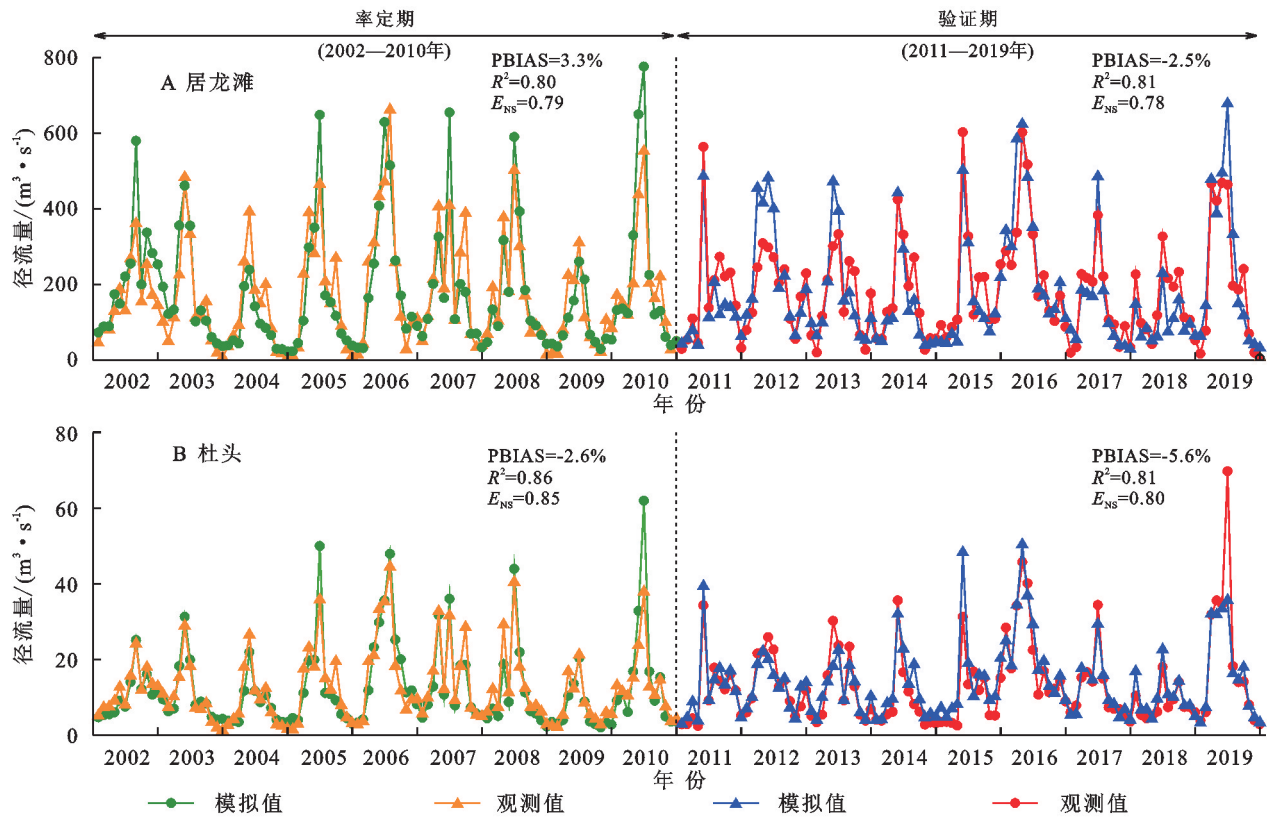


图 2 水文站率定期、验证期月径流量的模拟与验证
Fig. 2 Simulation and verification of monthly runoff at rate and verification periods of hydrographic stations

2.3 基于 CA-Markov 模型的土地利用情景模拟

CA(Cellular Automata)模型主要由空间、元胞、邻域和转化规则 4 个要素组成。时间、空间、状态三者在 CA 模型中全部离散。CA 模型可表达为:

$$C_{t+1} = f(C_t, N) \quad (7)$$

式中: C 为元胞的状态集合; N 为元胞的领域范围; C_t 和 C_{t+1} 分别为 t 和 $(t+1)$ 时的模拟状态; f 为元胞单元间互相影响的状态转移规则函数, 转移规则函数计算式如下:

$$F_{ij} = \frac{k_j}{k} \times A_{ij} \times \frac{k_i + k_j}{k} \quad (8)$$

式中: k 为邻域元胞数; k_i 和 k_j 分别为邻域中 i 级土地利用地质类型转化为 j 级土地利用地质类型的元胞数; A_{ij} 为各状态发生转移的概率矩阵。

Markov 预测是基于无后效性假设条件用于土地利用变化模拟的方法, 其模拟土地利用变化的计算式为:

$$C_{t+1} = A_{ij} \cdot C_t \quad (9)$$

本研究以 IDRISI 中的 CA-Markov 相关模块进行土地利用情景的模拟, 输入数据包括 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年与 2020 年的土地利用数据, 以及坡度、坡向、距乡镇的距离、距水系的距离、距交通网(公路、铁路、高速)的距离等驱动因子数据(图 3), 以综合考虑各因素对桃江流域土地覆盖变化情况的影响。在 IDRISI 软件中的 MCE(多准则评价)模块中, 采用布尔相乘法将各地物类型的约束条件进行合并, 从而获得各地类的适宜性图像, 最后使用 IDRISI 的 Collection Editor 模块, 按照各地物类型的顺序进行排列, 得到桃江流域地物类型适宜性图集。分别选择 2000—2005 年、2010—2015 年土地利用转移矩阵生成概率矩阵, 模拟预测的年限为 2020 年, 设置循环次数为 10, 使用 5×5 滤波器, 从而得到了 2020 年桃江流域土地利用模拟图。将预测的 2020 年土地利用数据与 2020 年真实数据对比, 并利用 Kappa 系数从空间、数量方面对模拟值进行精度检验。计算结果表明, Kappa 系数达 0.88, 可见土地利用模拟误差小, 预测精度高。因此, 基于验证好的 CA-Markov 模型, 可以模拟得到未来 2035 年的土地利用类型图。

2.4 径流对土地利用及气候变化的响应

2.4.1 土地利用变化情景设置 为定量研究桃江流域径流对不同土地利用的响应情况, 本研究在模型模拟精度达标的基础上, 以桃江流域 2020 年实际土地利用作为基准情景 L_0 , 依据《赣州市国土空间总体规划(2021—2035 年)》的国土规划纲要^[23], 建议 15° 以上的坡耕地退耕还林; 25° 以上的山地丘陵区纳入生态红线区。因此, 本研究设置如下 4 种土地利用情景开展分析。

(1) L_1 耕地扩展情景。鉴于桃江流域丘陵广布, 耕地后备资源偏小。对于坡度 $< 15^\circ$ 的林地和草地, 通过模拟转变为耕地。

(2) L_2 建设发展情景。鉴于人地矛盾的愈发突出, 建设用地扩张趋势明显。对于坡度 $< 15^\circ \sim 25^\circ$ 的草地和林地, 通过模拟转变为建设用地。

(3) L_3 生态保护情景。鉴于桃江流域是赣江重要的源头区, 区域内存在大范围的水源地。为践行生态保护战略, 加大自然保护力度, 对于坡度在 $15^\circ \sim 25^\circ$ 的耕地, 通过模拟转变为草地; 而坡度 $\geq 25^\circ$ 的耕地, 通过模拟转变为林地。

(4) L_4 自然发展情景。在模型预测法下, 以 2000—2020 年统计的土地利用数据、不同土地类型转换率为参考, 假定研究区的土地利用类型在将来也按相同概率转换, 并利用 CA-Markov 模型模拟未来 2035 年的土地利用类型图。

2.4.2 气候变化情景设置 研究表明, 气温和降水是区域尺度气候变化的最主要影响因子^[24]。以 IPCC 在第 5 次、第 6 次评估报告为参考, 并结合桃江流域历年的气候数据, 采用假设气候变化法来对该流域的气候进行模拟。此次模拟中, 土地利用数据年份为 2020 年。气温、降水的变化幅度分别设置为 $\pm 2^\circ\text{C}$, $\pm 1^\circ\text{C}$, $\pm 0^\circ\text{C}$ 和 $+20\%$, $+10\%$, $+0\%$ 。表 3 为假设气候变化法下设置的桃江流域气候变化情景, 并在 SWAT 模型中进行 15 次模拟运行。

2.4.3 组合情景下径流模拟 在 SWAT 模型中, 需要设置模型预热期提高模型精确度。本文将预热期、率定期、验证期分别设定为 2000—2001 年、2002—2010 年、2011—2019 年。使用校准完成的 SWAT 模型模拟 2000—2019 年不同土地利用情景(L_1 — L_4)、不同气候变化情景(C_1 — C_{15})以及土地利用变化及气候变化组合($L_n \& C_n$)情景下的径流, 进而探讨径流量对土地利用及气候变化的响应。

3 结果与分析

3.1 流域径流对土地利用变化的响应

3.1.1 多情景下的土地利用变化 基于前文所述方法, 得到 4 种不同发展情景下土地利用类型的空间格局以及面积占比情况, 分别见图 4—5。在耕地扩张情景(L_1)下, 土地利用类型以耕地为主, 耕地规模以建设用地为中心向周围扩张, 占比达到了 55.97%, 主要分布于信丰县, 呈现出北多南少的空间格局, 相较于自然发展情景(L_4), 耕地面积比例增加了 34%。建设发展情景(L_2)下, 土地利用类型以林地和建设用地为主, 其中林地占比 49.61%, 建设用地占比 29.88%, 城区扩张

迅速。与自然发展情景(L₄)相比,建设用地规模增加了 27%,两种地类在流域范围内交错分布。生态保护情景(L₃)与自然发展情景(L₄)下土地利用类型均以林地为主,规模占比分别为 77.25%和 70.88%。

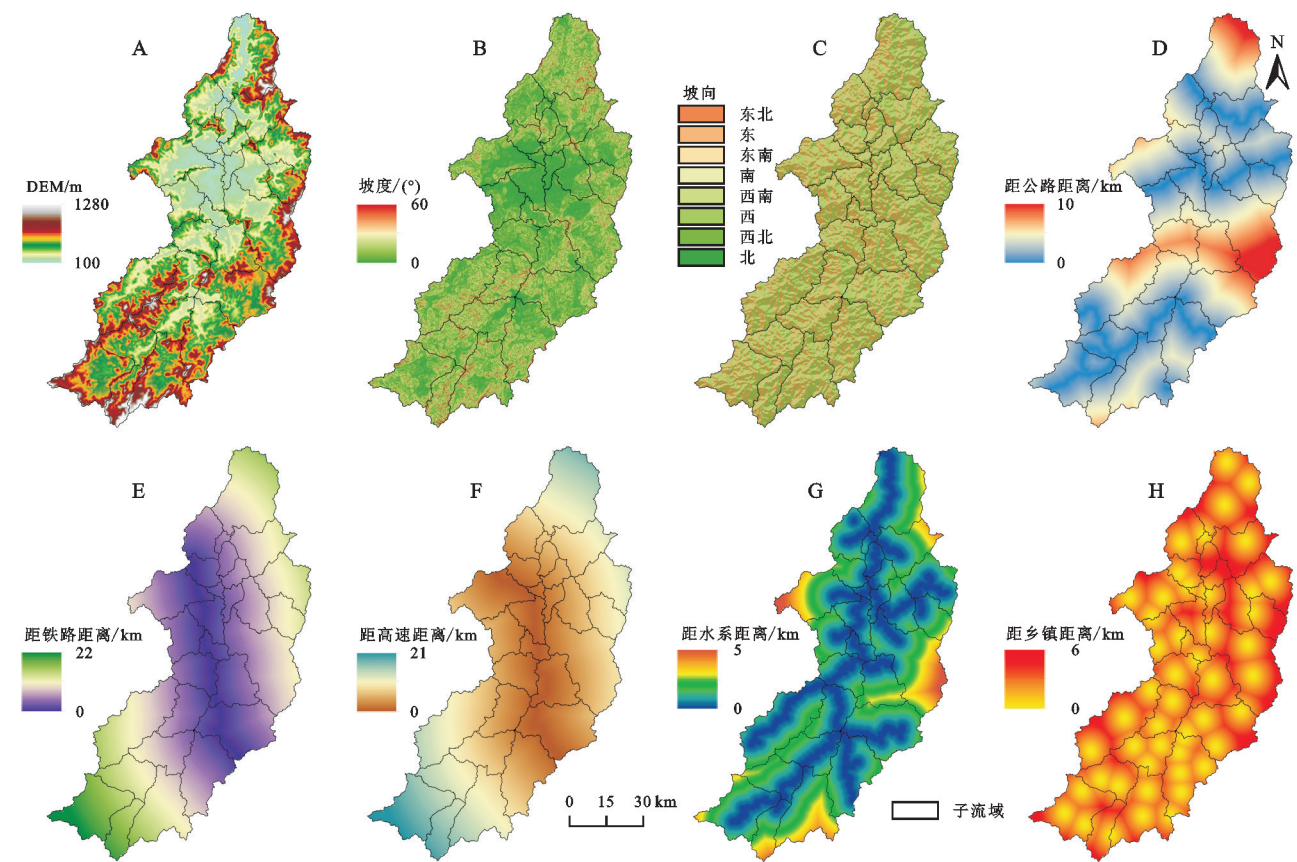


图 3 土地利用变化驱动因子空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of driving factors of land use change

表 3 桃江流域气候变化情景设置

Table 3 Climate change scenario setting in Taojiang basin

| 情景设置 | $P \times (1 - 20\%)$ | $P \times (1 - 10\%)$ | P | $P \times (1 + 10\%)$ | $P \times (1 + 20\%)$ |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------|-----------------------|-----------------------|
| T | C_1 | C_2 | C_3 | C_4 | C_5 |
| $T + 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ | C_6 | C_7 | C_8 | C_9 | C_{10} |
| $T + 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ | C_{11} | C_{12} | C_{13} | C_{14} | C_{15} |

注: P 和 T 分别代表降水量与气温,下表同。

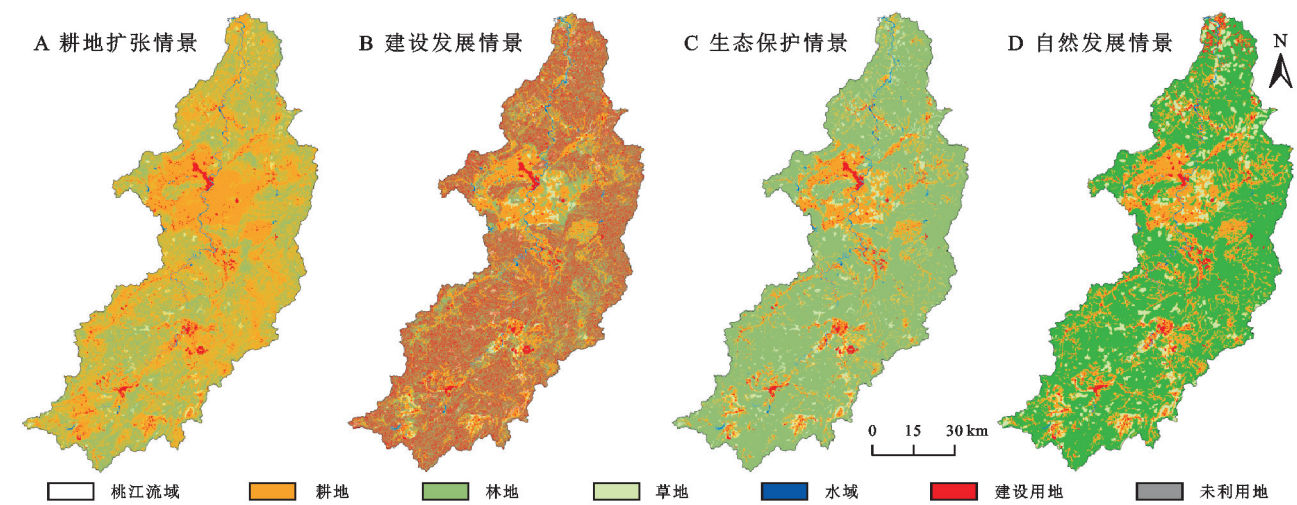


图 4 不同情景下桃江流域土地利用空间格局

Fig. 4 Spatial pattern of land use in Taojiang basin under different scenarios

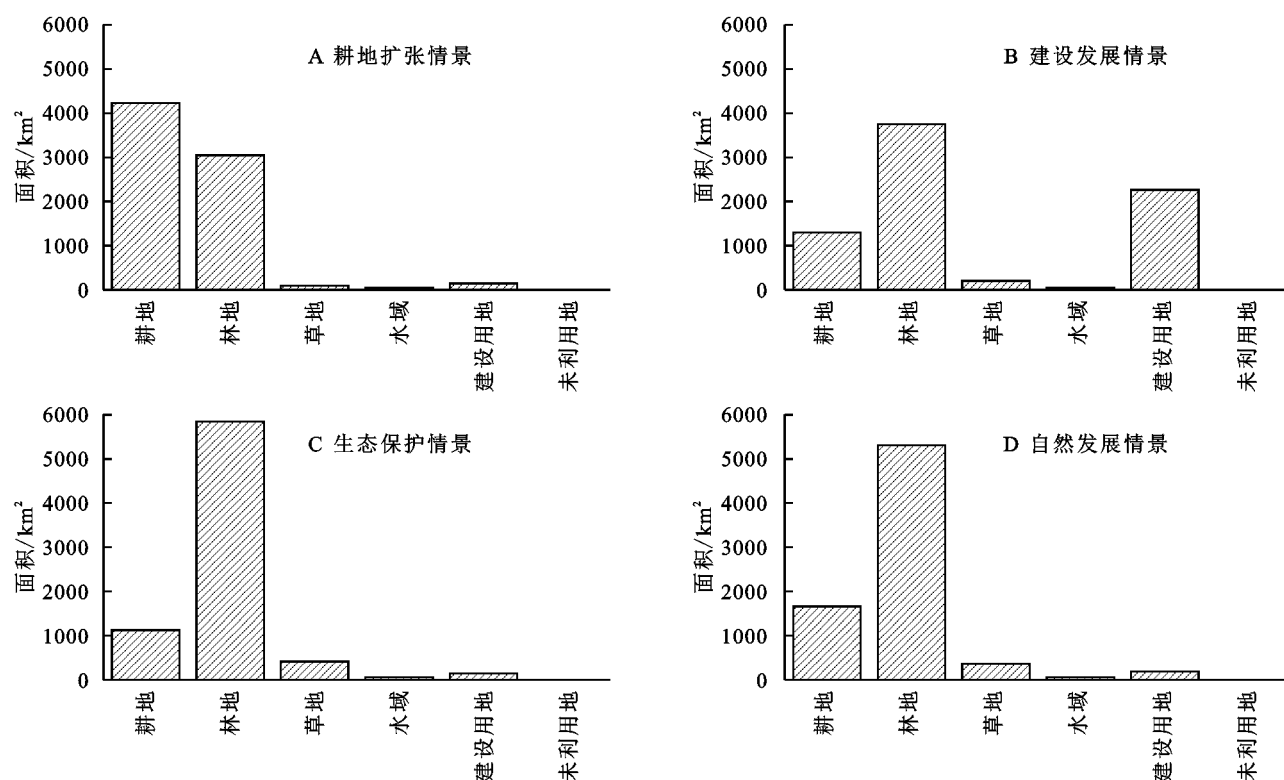


图 5 不同情景下各土地利用类型面积

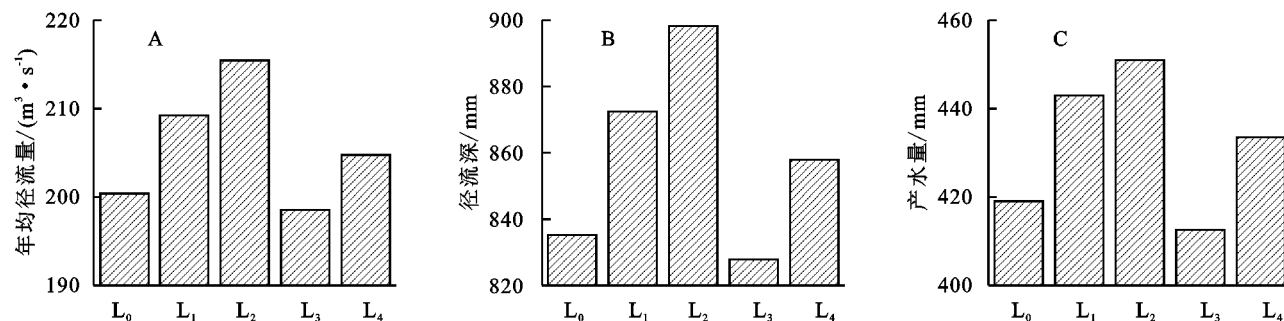
Fig. 5 Area of land use types under different scenarios

3.1.2 径流对不同土地利用情景的响应 在模型模拟精度达标的基础上,对几种不同土地利用情景进行详细的径流模拟,计算出桃江流域不同情境下 2000—2019 年平均径流量、产水量以及径流深(图 6)。

结果表明,4 种情景下的多年平均径流量差异性较为明显。与 2020 年土地利用基准情景(L_0)相比,除生态保护情景(L_3)下的径流量减小外,其余情景下径流量均有不同程度的增加。其中建设发展情景(L_2)下的径流值最大。这可能是由于对于雨水具有截留能力以及具有固土固坡能力的林草地的大面积开发,导致林草地等对地表径流的拦截能力减弱,致使径流量大

幅增加。生态情景(L_3)下的径流量最小,与基准情景(L_0)相比,平均径流量下降了 0.89%。可能是林地规模的增加,对雨水的截留作用增强,从而减少了对土地的侵蚀作用。同时,草地也可起到保持水土、预防泥石流、涵养水源的效果。尤其在雨季,通过林草地对雨水、地表径流的阻挡、截留作用,还可实现区域防洪。

此外,为研究流域水文过程在不同情景以及不同季节下的响应过程,以基准情景(L_0)为参考,对比了 4 种不同情景下流域月均径流量的变化情况,计算 4 种情景(L_1 — L_4)与基准情景(L_0)的月径流量之差,结果如图 7 所示。



注: L_0, L_1, L_2, L_3, L_4 分别代表基准情景、耕地扩张情景、建设发展情景、生态保护情景、自然发展情景。

图 6 不同土地利用情景下的径流响应

Fig. 6 Runoff response under different land use scenarios

总体来看,径流响应情况程度依次为 $L_2 > L_1 > L_4 > L_3$,不同情景下的径流量差值在春夏两季较为明显,峰值集中在 5 月前后,总体呈现出先上升后下

降的变化趋势。原因可能是桃江流域属于亚热带季风气候,春夏两季多雨,4—9 月属于丰水期,径流量较大。具体来看,由于 3 月前后处于植被生长初期,

截流能力较弱,此时径流量大幅增加。而进入 5 月前,植被趋于成熟,生长旺盛,同时在夏季高温作用下,其蒸散发量增大,此时径流量差值开始呈现下降趋势。而从生态保护情景(L_3)来看,进入春季后,植被的生长加快,高温也使得其蒸腾作用增强,而生态保护下的植被基数较大,截流能力远远超过了基准情景(L_0)下的径流量,故使得径流量差值负向增加。这表明,通过退耕还林还草等措施,可有效控制径流量的增加,减少洪涝灾害风险。进入枯水期后(10 月一次年 2 月),土地利用变化对于径流量的影响较小,不同情景下的径流量差值均在基准情景(L_0)径流量上下波动,且无明显差异。值得注意的是,在建设发展情景(L_2)下,10 月份的径流差值在 4 种情景中最小,这可能是由于建设用地的增加,使得地表不透水面积增加,而此时属于枯水期,植被的蒸散发作用减小,降水量减少,导致了径流量的下降。

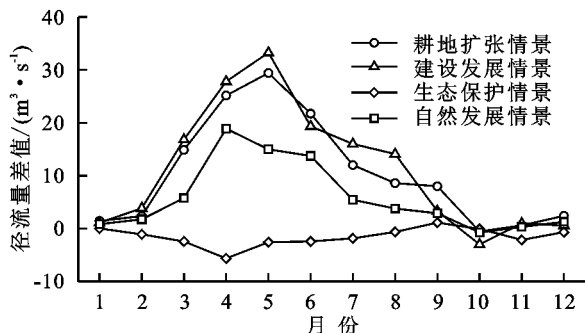


图 7 不同土地利用情景下多年月均径流量变化

Fig. 7 Changes of annual mean monthly runoff under different land use scenarios

3.2 流域径流对气候变化的响应

降水和气温的变化是气候变化的直接体现,降水

是径流的主要来源;温度的变化则会影响植被蒸散发量及降水,从而间接影响径流量的变化。由前文所述的情景设置,将 15 种不同的气候情景(C_1 — C_{15})代入率定后的模型,结果见表 4。其中 C_3 为基准情景, C_1 , C_2 , C_4 和 C_5 为气温不变,降水增加或减少下的情景; C_8 和 C_{13} 则是降水不变,气温变化下的情景;其余情景则是气温与降水均发生变化。

相同温度下,流域年径流量随着降水量的增加而增加,降水量变化与流域年径流量呈正相关关系。具体而言,当流域气温不变时,降雨增加 10%,20%,年均径流量分别增加 15.61%,27.52%,上升趋势明显($p < 0.01$)。而在相同降水量情况下,随着温度的上升,年径流量呈现出下降的趋势。温度变化与年径流量呈负相关关系,但年径流量下降幅度并不大,在流域温度分别升高 1 °C,2 °C,且降水量固定时,年径流量降幅仅为 0.45%,1.06%。可以看出,相较于气温因子,降水对年径流的影响程度更大。究其原因,可能是气温主要通过影响流域内植被的蒸散发量来影响土壤前期的含水量,而降水量直接用于 SCS 曲线中地表径流的计算,由于蒸发量较小,故径流响应不明显。对于不同气温降水组合下的气候情景,年径流量的变化差异较大。各情景中,年径流量增幅最大的为 C_5 (气温不变,降水量增加 20%),流域年径流量增幅为 29.04%。年径流量降幅最大的为 C_{11} (气温上升 2 °C,降水量降低 20%),流域年径流量降幅为 29.04%。总之,在本研究的情景设置下,相较于气温,降水量是桃江流域径流量变化的主要影响因素。

表 4 不同气候情景下的桃江流域径流变化

Table 4 Changes of runoff in Taojiang basin under different climate scenarios

| 情景设置 | $P \times (1-20\%)$ | $P \times (1-10\%)$ | P | $P \times (1+10\%)$ | $P \times (1+20\%)$ |
|--------|---------------------|---------------------|-------|---------------------|---------------------|
| T | -26.13 | -14.57 | 0 | 15.61 | 27.52 |
| T+1 °C | -27.53 | -15.08 | -0.45 | 15.28 | 26.75 |
| T+2 °C | -29.04 | -16.02 | -1.06 | 14.85 | 25.42 |

3.3 流域径流对土地利用及气候变化组合情景的响应

现实情况下,径流量变化的影响因素是复杂多变的。已有研究表明,极端高温以及极端降水天气均会导致极端洪水的产生,尤其在夏季,暴雨天气下的径流量迅速增加,易在短时间内形成洪水,而气候变暖可能使温湿地区一年内的洪峰提前到来^[25]。为了解流域径流在复杂环境下的水文变化情况,提高科学抗旱、抗洪的能力,本研究综合考虑气候情景及土地利用情景,通过不同情景组合的方式,探究流域径流量在复杂环境变化背景下的响应特征。将 C_1 (温度不变,降水量-20%)、 C_5 (温度不变,降水量+20%)以

及 C_{13} (降水量不变,温度+2 °C) 3 种极端气候情景与耕地扩张情景(L_1)、建设发展情景(L_2)进行两两组合,共设置了 6 组极端情景,详见表 5。

将上述 6 种极端情景代入至 SWAT 模型,根据模型模拟结果计算桃江流域年均径流量及年径流深,并比较 6 种极端情景下径流量与初始情景下径流量的变化情况(图 8)。

结果表明:6 种组合情景中, L_1 & C_5 情景下(耕地扩张,降水量增加 20%,温度不变)的年均径流量最大,达 267.15 m³/s,相较于基准情景(L_0)的径流量增加了 25%。这可能是由于耕地面积的扩张,林草地

转为农作物用地,其截流能力不如天然植被;加之降水量的增加使得径流量大幅增加。 L_2 & C_1 情景下(建设用地扩展,降水量减少 20%,温度不变)的年均径流量最小,仅 $161.14 \text{ m}^3/\text{s}$,相较于基准情景(L_0)的径流量降低了 19.6%。原因可能是建设用地的增加提高了地面硬化程度,使地面不透水率增加,影响地下水的补充及自然水循环过程,同时降水量减少导致

径流流量的削减。对比单一情景和组合情景下的流域径流响应情况,发现流域径流的变化量并不是各要素单独作用下径流量变化的简单叠加。在土地利用和气候变化的共同作用下,组合情景下的径流变化趋势同气候情景下的变化趋势相同,说明土地利用对于径流变化的影响相对较弱,气候变化因素是桃江流域径流变化的主要影响因素。

表 5 桃江流域极端情景设置

Table 5 Extreme scenario setting in Taojiang basin

| 组合情景 | C_1 | C_5 | C_{13} |
|-------|----------------|----------------|---------------|
| L_1 | 耕地扩张,且降水-20% | 耕地扩张,且降水+20% | 耕地扩张,且温度+2℃ |
| L_2 | 建设用地扩张,且降水-20% | 建设用地扩张,且降水+20% | 建设用地扩张,且温度+2℃ |

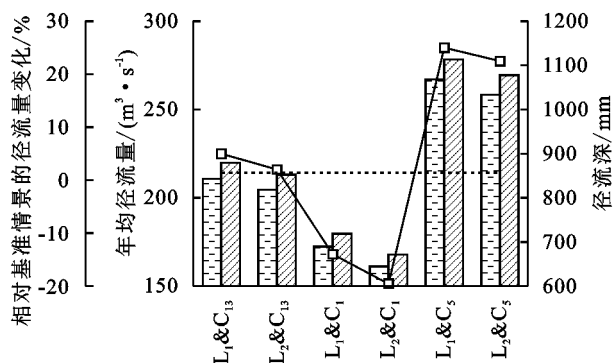


图 8 6 种极端情景下的桃江流域径流响应

Fig. 8 Response of runoff in Taojiang basin under 6 extreme scenarios

4 讨论

4.1 研究的创新性

径流变化对于流域生态环境及水资源都会产生重要影响,江河源头区是流域水资源的重要来源,对中下游地区的水资源供给、水量调节,乃至生态系统维持都起到至关重要的作用。目前对于亚热带江河源头区的研究多集中于水资源量以及水环境质量等方面^[26],对于其土地利用及气候变化对径流的影响研究相对较少。由于亚热带江河源头区主要发源于山地丘陵地区,地势陡峭,地表水在此迅速汇集。因此,在季风气候的作用下,江河源头区一旦形成强降水,则极易引发洪涝灾害,严重威胁中下游水生态安全。本文以典型亚热带江河源头区的桃江流域为例,围绕径流对于土地利用及气候变化的响应情况进行探讨,对于复杂变化环境下的径流响应特征的研究进行了有力补充。研究结果可为水资源的综合管理调控和水资源开发利用提供决策依据,并为亚热带江河源头区生态安全保障提供科学参考。

4.2 研究结果的不确定性

就方法而言,鉴于桃江流域属于小范围研究区,气温和降水是气候变化的主要影响因子。目前关于

气候模拟的方法主要有假设气候变化法、全球气候模式法(Global Climate Models)以及 BCC-CSM 预测法(Beijing Climate Center Climate System Model)等。但后两种方法对于小面积流域的适用性较差,模拟结果的空间分辨率较低。因此本研究采用假设气候变化法,以历年的水文数据资料为参考进行情景设置,这也是小流域气候变化研究中一种主流的方法,能够保障模拟结果更加准确。

其次,本文通过设置不同方向的情景进行模拟研究,较为全面地揭示了各情景下的径流响应特征。然而,在径流响应特征的研究过程中,如果只以单个情景的模拟结果作为依据,可能会得出有失偏颇的结论。一方面,土地利用变化通过改变地表下垫面与局域小气候而对降水过程产生一定的影响。如路中等^[27]研究发现,在一定空间尺度下的土地利用强度与降水之间存在负相关关系,而与温度之间呈现正相关关系。另一方面,温度的升高使得农作物产量降低,对耕地生产力产生负面影响,进而可能会导致农用地用途的变化。而降水量的显著变化也会导致干旱、洪涝等自然灾害的形成,使水质条件变差,滑坡、泥石流等发生频率增加,进而影响土地利用方式^[28]。因此,土地利用变化和气候变化之间可能存在一定的复杂关系。本研究设置了 6 组极端组合情景,揭示了多种复杂情景下的径流变化规律,这在已有研究中少有提及。此外,土地利用与气候共同变化并对流域产生影响,也与现实情况更加契合。

在模型方法方面,本研究还存在一些不足之处,如对于气象数据未进行一致性检验,使得模型率定结果可能存在一定的局限性。但从实际验证结果来看,SWAT 模型对于桃江流域的径流模拟具有较好的适用性($R^2 > 0.80$)。另外,流域径流受诸多因素影响,如地形地貌、土壤类型以及植被特征等,这些因素在模型中可能难以完全考虑,此外,SCS 径流曲线法更适用于蓄满产流区域模拟,而对于低值径流的模拟存

在一定的局限性,可能导致 R^2 对低值径流的评估效果造成一定影响^[29]。而在本研究中,除 R^2 外,PBIAS 与 E_{NS} 与的验证结果均表明 SWAT 模型在桃江流域具有较好的适用性。

4.3 其他因素对流域径流的影响

从宏观层面来看,土地利用及气候变化是影响流域径流的两种最主要驱动因素。而人类活动与气候变化均会通过影响土地利用,从而影响径流。因此在进行水文模型的模拟过程中,本文引入了包括距铁路、公路、高速距离等人为因子及距水系距离等自然因子的影响,可能使模拟结果更接近真实情况。而本研究未涉及到的其他因素,对流域径流响应情况分析的影响相对较小。今后研究可从更长时间序列的实测数据对模型进一步完善,同时引入多种复杂因素对径流过程开展深入分析。

此外,径流的丰枯变化受到降雨的直接影响^[25]。极端气候造成的极端降雨事件增加,降雨历时延长等都会使径流流量发生不同程度的变化。研究表明,在全球气候变暖的背景下,气候系统的不稳定性处于加剧状态,这说明未来极端气候事件出现的频率和强度可能均会表现出明显的增加趋势,其中主要以极端湿润和极端干旱的年份频率增加为主^[30]。主要表现为极端干旱和极端降雨事件交替出现,这将导致径流量的急剧减小或迅速上升。此外,极端降雨还可能导致地区水土流失的情况加剧,地表径流的冲刷带走了大量地表有机质,从而对生态环境造成一定的破坏,甚至可能导致自然灾害的发生。因此,后续研究可进一步分析极端降雨事件对径流的影响。

除极端气候的影响外,径流变化还可能与人类活动及下垫面的物理特性相关。如人工修建的水利设施通过改变水文条件,从而对径流产生较大影响。另一方面,下垫面的物理特性,如土壤类型、植被类型和地表粗糙度等,均会影响径流过程,改变流域的产汇流机制。从本文研究结果来看,林草地对于控制径流的效果最好,原因是其增加了土壤的渗透性并使水流速度减小。此外,下垫面的温度和湿度也会影响蒸发和下渗。在干旱地区,下垫面的蒸发作用增强,对于降水量的变化更为敏感,因此径流量的变化较为明显。而在湿润地区,下垫面下渗作用增强,加之其基流较大,故对径流量影响较小^[25]。

5 结论

(1) SWAT 模型的率定结果表明,模拟径流与实测径流拟合效果良好,桃江流域居龙滩水文站率定期和验证期结果 R^2 和 E_{NS} 分别为 0.80, 0.79, 0.81, 0.78, 杜头水文站率定期和验证期结果 R^2 和 E_{NS} 分别

是 0.86, 0.85, 0.81, 0.80, 模型适用性较好。

(2) 4 种土地利用情景下产流能力为 $L_2 > L_1 > L_4 > L_3$, 林地和草地的增加对于控制径流具有良好效果,耕地及建设用地的扩张会增加径流量,导致水土流失。不同季节下地表水量有所差别,在丰水期,各情景产流能力差异较大,而枯水期不同情景地表径流量差异较小。

(3) 15 种气候变化情景中,流域径流量与降水量呈正相关关系,与温度呈负相关关系。在本研究中,相较于气温变化,降水量的变化对桃江流域的径流量影响更大,是径流量变化的主要影响因素。

(4) L_1 & C_5 情景下(耕地扩张情景,温度不变,降水量增加 20%)的年均径流量最大。流域径流的变化不等于各要素单独作用下径流量变化的简单叠加。土地利用对于径流变化影响较弱,气候因素在桃江流域径流变化中起主要作用。

参考文献 (References):

- [1] Ureta J C, Clay L, Motallebi M, et al. Quantifying the landscape's ecological benefits: An analysis of the effect of land cover change on ecosystem services[J]. Land, 2020, 10(1): 21.
- [2] Ahmadi A, Jalali J, Mohammadpour A. Future runoff assessment under climate change and land-cover alteration scenarios: A case study of the Zayandeh-Roud Dam upstream watershed[J]. Hydrology Research, 2022, 53(11): 1372-1392.
- [3] Wang S J, Yan M, Yan Y X, et al. Contributions of climate change and human activities to the changes in runoff increment in different sections of the Yellow River[J]. Quaternary International, 2012, 282: 66-77.
- [4] 夏露, 马耘秀, 宋孝玉, 等. 黄河中游昕水河流域水沙变化及归因研究[J]. 水土保持学报, 2021, 35(6): 109-115. Xia L, Ma Y X, Song X Y, et al. Study on the variation and attribution of runoff and sediment in Xinshui River watershed of middle Yellow River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(6): 109-115.
- [5] Ahn K H, Merwade V. Quantifying the relative impact of climate and human activities on streamflow[J]. Journal of Hydrology, 2014, 515: 257-266.
- [6] 张艳霞, 于瑞宏, 薛浩, 等. 锡林河流域径流量变化对气候变化与人类活动的响应[J]. 干旱区研究, 2019, 36(1): 67-76. Zhang Y X, Yu R H, Xue H, et al. Response of runoff volume change to climate change and human activities in the Xilin River Basin[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(1): 67-76.
- [7] Su J W, Long A H, Chen F L, et al. Impact of the construction of water conservation projects on runoff from the Weigan River[J]. Water, 2023, 15(13): 2431.
- [8] 邓睿, 张治意, 陈亚. 嘉陵江流域下游地表径流对土地利

- 用变化的响应[J].水土保持研究,2019,26(3):141-147.
- Deng R, Zhang Z Y, Chen Y. Responses of runoff to land use changes in lower Jialing River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(3):141-147.
- [9] 慎璐璐,杨艳芬,吴晶,等.黄河流域极端气候事件时空变化规律[J].水土保持研究,2022,29(2):231-242.
- Shen L L, Yang Y F, Wu J, et al. Spatial and temporal variation characteristics of extreme climate events in the Yellow River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(2):231-242.
- [10] Li Z H, Wang Y M, Zhang H B, et al. Runoff response to changing environment in Loess Plateau, China: Implications of the influence of climate, land use/land cover, and water withdrawal changes[J]. Journal of Hydrology, 2022,613:128458.
- [11] 孔凡斌.江河源头水源涵养生态功能区生态补偿机制研究:以江西东江源区为例[J].经济地理,2010,30(2):299-305.
- Kong F B. Eco-compensation mechanism for ecological function conservation zones in the headwaters: A case study of Dongjiang riverhead region in Jiangxi Province[J]. Economic Geography, 2010,30(2):299-305.
- [12] 邹家祥,翟红娟.三峡工程对水环境与水生态的影响及保护对策[J].水资源保护,2016,32(5):136-140.
- Zou J X, Zhai H J. Impacts of Three Gorges Project on water environment and aquatic ecosystem and protective measures[J]. Water Resources Protection, 2016,32(5):136-140.
- [13] 张奇.湖泊流域水文学研究现状与挑战[J].长江流域资源与环境,2021,30(7):1559-1573.
- Zhang Q. Hydrology of lake catchment: Research status and challenges[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021,30(7):1559-1573.
- [14] 万炜,魏伟,钱大文,等.土地利用/覆被变化的环境效应研究进展[J].福建农林大学学报:自然科学版,2017,46(4):361-372.
- Wan W, Wei W, Qian D W, et al. Progress on the environmental effects of land use and land cover change[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University: Natural Science Edition, 2017, 46(4): 361-372.
- [15] 祖拜代·木依布拉,师庆东,普拉提·莫合塔尔,等.基于 SWAT 模型的乌鲁木齐河上游土地利用和气候变化对径流的影响[J].生态学报,2018,38(14):5149-5157.
- Muyibul · Z, Shi Q D, Muhtar · P, et al. Land use and climate change effects on runoff in the upper Urumqi River watershed: A SWAT model based analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(14):5149-5157.
- [16] 曾思栋,夏军,杜鸿,等.气候变化、土地利用/覆被变化及 CO₂ 浓度升高对滦河流域径流的影响[J].水科学进展,2014,25(1):10-20.
- Zeng S D, Xia J, Du H, et al. Effects of climate change, land use and cover change and CO₂ enrichment on runoff: A case study of the Luanhe River Basin[J]. Advances in Water Science, 2014,25(1):10-20.
- [17] 邓文平,李海光,余新晓,等.黄土高原吕二沟流域土地利用/覆被和气候变化对径流泥沙的影响[J].水土保持研究,2011,18(4):226-231.
- Deng W P, Li H G, Yu X X, et al. Influence of the change of land use/land cover and precipitation variation on runoff and sediment transport in Lüergou river watershed on the Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011,18(4):226-231.
- [18] Boughton W C. A review of the USDA SCS curve number method[J]. Soil Research, 1989,27(3):511.
- [19] 刘家福,蒋卫国,占文凤,等.SCS 模型及其研究进展[J].水土保持研究,2010,17(2):120-124.
- Liu J F, Jiang W G, Zhan W F, et al. Processes of SCS model for hydrological simulation: A review[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(2):120-124.
- [20] 毛安琪.基于 SWAT 模型的土地利用演变对抚河流域非点源污染研究[D].南昌:南昌大学,2020.
- Mao A Q. Research on Non-Point Source Pollution Caused by Land Use Evolution of Fuhe River Basin Based on SWAT Model[D]. Nanchang: Nanchang University, 2020.
- [21] 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.
- Guo J T, Zhang Z Q, Wang S P, et al. Applying SWAT model to explore the impact of changes in land use and climate on the streamflow in a Watershed of Northern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(6):1559-1567.
- [22] 张田田,陈有超,李潜,等.土地利用变化对丹江流域径流和泥沙时空格局的影响[J].长江流域资源与环境,2022,31(8):1797-1811.
- Zhang T T, Chen Y C, Li Q, et al. Effects of land-use change on the spatio-temporal patterns of runoff and sediment in the Danjiang River Basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022,31(8):1797-1811.
- [23] 赣州市人民政府.赣州市国土空间总体规划(2021—2035 年)[R/OL].(2023-02-28)[2023-08-22]. <https://www.ganzhou.gov.cn/gzszf/c100023/202210/395816a5dce5445e907b7c41d2505f01.shtml>.
- Ganzhou City People's Government. Ganzhou City Land Space Overall Planning (2021—2035)[R/OL].(2023-02-28)[2023-08-22]. <https://www.ganzhou.gov.cn/gzszf/c100023/202210/395816a5dce5445e907b7c41d2505f01.shtml>.

- Du G M, Lei G P, Zong X D. Analysis on spatial pattern of gully erosion across typical black hilly region of North-east China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011,18(2):94-97,271.
- [22] 范昊明,王铁良,蔡强国,等.东北黑土漫岗区侵蚀沟发展模式研究[J].水土保持研究,2007,14(6):328-330,334.
- Fan H M, Wang T L, Cai Q G, et al. Gully erosion developing model in the gentle hilly black soil regions in northeast China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007,14(6):328-330,334.
- [23] 张兴义,刘晓冰.东北黑土区沟道侵蚀现状及其防治对策[J].农业工程学报,2021,37(3):320-326.
- Zhang X Y, Liu X B. Current scenario of gully erosion and its control strategy in Mollisols areas of Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021,37(3):320-326.
- [24] 刘卉芳,单志杰,秦伟,等.东北黑土区水土流失治理技术与模式研究评述[J].泥沙研究,2020,45(4):74-80.
- Liu H F, Shan Z J, Qin W, et al. Review on soil and water loss control techniques and models in the Black Soil regions in the Northeast[J]. Journal of Sediment Research, 2020,45(4):74-80.
- [25] 牟廷森,沈海鹏,贺云锋,等.黑土区垄作方式对坡耕地土壤侵蚀的调控效果[J].水土保持通报,2022,42(2):22-30.
- Mou T S, Shen H O, He Y F, et al. Effects of ridge tillage patterns on soil erosion of sloping croplands in black soil region of northeastern China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(2):22-30.
- [26] 李立新,陈英智,董景海.东北低山丘陵区小流域水土流失防治措施的布设及效益评估:以黑龙江省宁安市和盛小流域为例[J].水土保持通报,2016,36(1):253-258.
- Li L X, Chen Y Z, Dong J H. Construction and benefit evaluation of soil erosion control in small watershed in low mountain and hill region of northeast China: A case study in Hesheng small watershed of Ning'an City in Heilongjiang Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016,36(1):253-258.
- [27] 张爱玲,钟云飞,陈祥伟.黑龙江省拜泉县水土保持新进展与效益评价[J].水土保持通报,2018,38(1):276-280,286.
- Zhang A L, Zhong Y F, Chen X W. Recent progress in soil and water conservation and effect assessment in Baiquan County of Heilongjiang Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018,38(1):276-280,286.
- [28] 温磊磊,许海超,秦伟,等.东北黑土区水土保持重点工程措施保存现状及其问题[J].水土保持通报,2023,43(1):417-423.
- Wen L L, Xu H C, Qin W, et al. Preservation status and problems of key soil and water conservation projects in black soil region of Northeast China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(1):417-423.
- [29] Vanmaercke M, Panagos P, Vanwalleghem T, et al. Measuring, modelling and managing gully erosion at large scales: A state of the art [J]. Earth-Science Reviews, 2021,218:103637.

(上接第66页)

- [24] Zheng B F, Wang J, Wu S Y, et al. Spatio-temporal patterns and driving mechanisms of rice biomass during the growth period in China since 2000[J]. Ecological Indicators, 2023,153:110389.
- [25] 高爽,逯超普,汤水荣,等.长江流域径流模拟及其对极端降雨的响应[J].环境科学,2023,44(9):4853-4862.
- Gao S, Ti C P, Tang S R, et al. Runoff simulation and its response to extreme precipitation in the Yangtze River Basin[J]. Environmental Science, 2023,44(9):4853-4862.
- [26] 卞建民,胡昱欣,李育松,等.基于BP神经网络的辽河源头区水质评价研究[J].水土保持研究,2014,21(1):147-151.
- Bian J M, Hu Y X, Li Y S, et al. Water quality assessment in source area of Liao River based on BP neural network[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014,21(1):147-151.
- [27] 路中,雷国平,郭一洋,等.不同空间尺度松嫩平原土地利用强度变化及其对气候因子的影响[J].生态学报,2021,41(5):1894-1906.
- Lu Z, Lei G P, Guo Y Y, et al. Changes of land use intensity in the Songnen Plain of different spatial scales and their effects on climatic factors[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(5):1894-1906.
- [28] 李卓,杨舫.基于SWMM的多情境城市雨洪控制模拟[J].南昌大学学报:工科版,2020,42(2):169-175.
- Li Z, Yang S. Simulation of urban rainwater control in multi-scenario based on SWMM[J]. Journal of Nanchang University: Engineering & Technology, 2020,42(2):169-175.
- [29] Qin G X, Meng Z Y, Fu Y. Drought and water-use efficiency are dominant environmental factors affecting greenness in the Yellow River Basin, China[J]. Science of the Total Environment, 2022,834:155479.
- [30] Piao S L, Yin G D, Tan J G, et al. Detection and attribution of vegetation greening trend in China over the last 30 years[J]. Global Change Biology, 2015,21(4):1601-1609.