

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.06.014.

余扬波, 唐国平, 牛香豫, 等. 土地利用和气候变化对流溪河水库流域径流的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 32-39, 48.

Yu Yangbo, Tang Guoping, Niu Xiangyu, et al. Effect of Land Use and Climate Change on Runoff in Liuxi River Reservoir Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 32-39, 48.

# 土地利用和气候变化对流溪河水库流域径流的影响

余扬波, 唐国平, 牛香豫, 黎毅

(中山大学 地理科学与规划学院, 广州 510275)

**摘要:** [目的]探究径流对土地利用与土地覆被变化(LUCC)和气候变化的响应,为华南地区流溪河水库流域未来水资源的合理利用开发及社会经济可持续发展提供依据。[方法]通过构建分布式生态水文模型 CHES 和设置情景模式,定量分析了土地利用和气候变化对径流的影响,同时结合 CA-Markov 模型,对流域未来径流变化进行了预测。[结果]CHES 模型在流溪河水库流域径流模拟中有很好的适用性,率定期的纳什系数(NS)为 0.82,  $R^2$  为 0.91,验证期的 NS 为 0.74,  $R^2$  为 0.86;土地利用变化方面,耕地转化为林地或草地会导致年均径流量减少,林地或草地转化为耕地会导致年均径流量的增大,耕地、林地、草地对径流形成的贡献能力为耕地>草地>林地;气候变化方面,年均径流量与降水量成正比,与温度成反比;2000—2020 年,流域年均径流量逐渐增大,气候变化促进了径流的形成,土地利用变化抑制了径流的形成,且气候变化的影响占主要地位;未来预估情景下,2030 年、2050 年流域内建筑用地面积会增大,林地、草地面积会减小,耕地、水体面积变化不大,且在 2040—2050 年,流域年均径流量呈现增大趋势。[结论]土地利用和气候变化分别抑制和促进了流溪河水库流域径流的产生,且气候变化的影响较大,未来流域年均径流量呈现增大趋势,应加强对洪涝灾害的预警。

**关键词:** 土地利用变化; 气候变化; 径流模拟; 流溪河水库流域; CHES 模型

中图分类号: P333.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)06-0032-08

## Effect of Land Use and Climate Change on Runoff in Liuxi River Reservoir Basin

Yu Yangbo, Tang Guoping, Niu Xiangyu, Li Yi

(School of Geography and Planning, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** [Objective] The objective of this study is to explore the response of runoff to land use and land cover change (LUCC) as well as climate change, provide a basis for the rational utilization and development of water resources and the sustainable development of social economy in Liuxi River Reservoir Basin. [Methods] We analyzed the impacts of land use and climate change under several scenarios on river runoff in the Liuxi River Reservoir Basin using a distributed eco-hydrologic CHES model. Meanwhile, we used the CA-Markov model to predict the future changes of land use change on river runoff. [Results] The CHES model had a good performance in simulating river runoff in the Liuxi River Reservoir Basin. The calibration and validation results showed that NS was 0.82 and 0.74, and  $R^2$  was 0.91 and 0.86, respectively. Under the land use change scenarios, the conversion of farmland into forest or grassland would reduce runoff, and the conversion of forest or grassland into farmland would lead to the increase of runoff. The descending order of contribution to runoff was farmland, grassland, and forest. Under the climate change scenarios, changes in runoff were proportional to precipitation and inversely proportional to temperature. From 2000 to 2020, the basin runoff increased gradually. Climate change promoted the generation of runoff during this time, while

收稿日期: 2022-10-14

修回日期: 2022-11-08

资助项目: 国家自然科学基金“华南湿热区河流源区土-气界面和水-气界面碳通量动态及联系机理”(41031472)

第一作者: 余扬波(1999—),男,江西赣州人,硕士研究生,研究方向为流域水循环与水环境研究。E-mail: yuyb5@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 唐国平(1969—),男,湖南张家界人,博士,教授,主要从事流域水循环与水环境研究。E-mail: tanggp3@mail.sysu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonice.org>

land use change inhibited it, and the impact of climate change was greater. Under the future land use change scenarios, the area of building land in the basin will increase in 2030 and 2050, while the area of forest and grassland will decrease, and the area of farmland and water will change little. Moreover, the runoff of the basin will increase in the period from 2040 to 2050. [Conclusion] Land use and climate change have respectively suppressed and promoted the generation of runoff in the Liuxi River Reservoir Basin, and the impact of climate change is greater. In the future, the runoff in this basin will show an increasing trend, and early warning of flood disasters should be strengthened.

**Keywords:** land use change; climate change; runoff simulation; Liuxi River Reservoir Basin; CHES model

土地利用与土地覆被变化(LUCC)以及气候变化是影响水资源变化的两大主要因素<sup>[1]</sup>。土地利用变化通过改变下垫面条件,如截留量、下渗率、土壤含水量、蒸散发量等,来影响产汇流机制,改变流域的水资源状况<sup>[2]</sup>。气候变化会影响流域的降水模式,进而流域径流的形成,反映在年径流量、径流系数、洪峰径流量上的改变<sup>[3]</sup>。径流量的变化会引发洪涝灾害或缺水问题,对区域的水资源开发利用和社会经济发展造成显著影响。因此,土地利用和气候变化对径流的影响成为了当前水文学的热点问题。

模型模拟是分析流域径流对土地利用和气候变化响应的主要方法,其中分布式水文模型得到了广泛应用。例如,窦小东等<sup>[4]</sup>利用 SWAT 模型研究了澜沧江流域土地利用和气候变化对径流的影响,并对流域未来径流变化进行了预估。林娴等<sup>[5]</sup>采用 HIMS 模型,定量分析了武江流域气候变化与人类活动对流域年最大日流量和径流变化的贡献率及影响。然而,在评估未来径流变化方面,大多数研究都是基于历史观测的土地利用数据,仅考虑了气候变化对径流的影响,忽视了未来土地利用变化对径流的影响。此外,相关研究多集中在我国中部地区<sup>[6-8]</sup>、西北地区<sup>[9-10]</sup>、西南地区<sup>[4]</sup>,而对于华南地区尤其是小流域的关注较少。杨宏伟<sup>[11]</sup>、袁宇志<sup>[12]</sup>、黄锋华<sup>[13]</sup>等分别对华南地区东江流域、流溪河流域、北江流域径流对土地利用和气候变化的响应进行了定量分析,但均未在未来径流预测方面展开相关研究。

流溪河水库流域位于广州市从化区东北部,是广州市的重要水源地,流域径流量关乎整个广州市的用水安全<sup>[14]</sup>。流域内多山地丘陵,地形地貌情况复杂,极端降水易引起山洪的发生。近年来流域内暴雨频繁,洪水多发,这对当地的生态系统及人们用水安全造成了严重的影响。为此,本文基于 CHES 模型,结合历史土地利用数据和气象数据,通过设置不同情景,分析土地利用和气候变化对流域径流的影响,并利用 CA-Markov 模型预测未来土地利用变化的情景,再结合未来气候预估数据对流域未来径流变化进

行模拟预测。研究结果可为流溪河水库流域未来水资源的合理利用和社会经济的可持续发展提供依据。

## 1 研究区域与数据

### 1.1 研究区概况

流溪河水库流域( $113^{\circ}44'—144^{\circ}04'E$ ,  $23^{\circ}40'—23^{\circ}60'N$ )位于广东省广州市从化区东北部,流域面积约为  $539\text{ km}^2$ ,海拔为  $170\sim 1\,139\text{ m}$ 。气候类型属南亚热带湿润季风气候,年平均气温约为  $20.3^{\circ}\text{C}$ (图 1)。流溪河发源于广州市从化区吕田镇桂峰山,流经从化区、花都区、白云区,最终在南岗口与白泥河汇入珠江西航道<sup>[14]</sup>。气候上,流域空气湿度大,雨水资源充足,但降雨量在不同年份、不同月份差异较大,4—9 月为雨季,年平均降水量为  $1\,770\text{ mm}$ ,年平均蒸发量为  $1\,100\text{ mm}$ 。土壤以沙壤土为主,其次是壤土,粉砂壤土最少<sup>[15]</sup>。

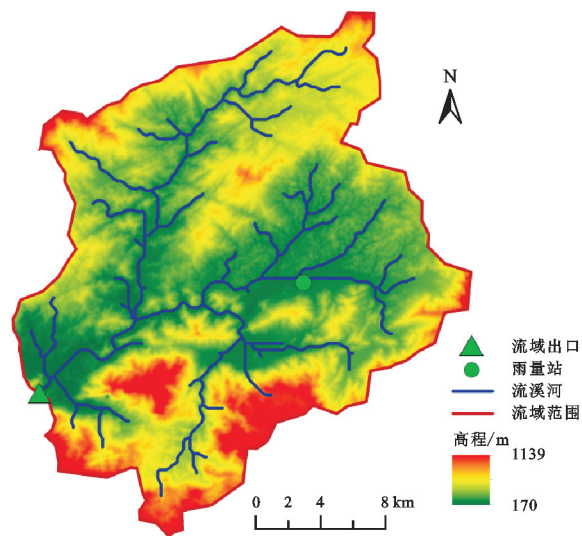


图 1 流溪河水库流域示意图

Fig. 1 Map of Liuxi River Reservoir Basin

### 1.2 基础数据

本文所使用的数据包括栅格数据和气象数据。其中数字高程模型数据采用 SRTM(<http://srtm.csi.cgiar.org/>)提供的数据,分辨率为  $90\text{ m}$ 。河网数据基于 ArcGIS 中的水文模块获得。土壤数据采用世界土壤数据库(HWSD)数据,分辨率为  $1\text{ km}$ ,并结合流域土壤的性质

以及研究需要,将研究区内的土壤分为壤土、沙壤土和粉砂壤土。土地覆被类型数据来自于国家基础地理信息中心全球地表覆盖数据产品服务网站(<http://www.globallandcover.org/>),年份为 2000 年、2010 年、2020 年,分辨率为 30 m。根据土地覆被类型及研究区的实际情况,将流域内的土地覆被类型划分为 5 类:耕地、林地、草地、水体和建筑用地。

逐日最高气温、最低气温、平均气温数据取自距离研究流域最近且气候、土壤、植被等条件与研究区相似的新丰站(114°8'E, 24°N)。日尺度降雨数据取自流域内的流溪河水库站和吕田站。以上气象数据均由国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn>)提供。径流数据通过《广东省水文年鉴》中流溪河水库逐日出库流量、逐日水位表以及逐日入库流量数据推导而来<sup>[16]</sup>。二氧化碳年平均值数据来自 NOAA/美国海洋及大气管理局(<https://www.noaa.gov/>)。

## 2 研究方法

### 2.1 CHES 模型

本文选取分布式耦合生态水文模型 CHES (coupled hydrology and ecology simulation System) 来量化土地利用和气候变化对径流的影响。CHES 是一个基于过程的物理模型,旨在模拟植被生长并量化流域尺度陆地生态系统中的碳、水和养分动态<sup>[17-19]</sup>。CHES 模型能够动态地模拟植被生长,植物拦截降水和水在土壤—植被—大气连续流动情况<sup>[17]</sup>。因此,它能够量化气候变化和相关的植被动态对水量平衡的调节,方程式如下:

$$P = SF + AET + \Delta S + \Delta CanS + \Delta GW \quad (1)$$

$$AET = T_r + E_s + E_{cn} \quad (2)$$

式中:  $P$  为降水;  $SF$  为径流;  $AET$  为实际蒸散发量;  $\Delta S$  为土壤含水量的变化;  $\Delta CanS$  为冠层存储降水的变化;  $\Delta GW$  为地下水含量的变化;  $T_r$  为植物散发量;  $E_s$  是为土壤蒸发量;  $E_{cn}$  为林冠截留的蒸发量。

本文选取流溪河水库流域 1976—1988 年的数据对模型进行率定和验证,其中前 5 a 为植被累计循环期,使植被生长在这 5 a 中达到平衡状态。1981—1984 年为率定期,1985—1988 年为验证期。模型可信度的评估主要采用决定系数  $R^2$  和纳什效率系数  $NS$ <sup>[20-21]</sup>。

纳什效率系数 (Nash-sutcliffe efficiency coefficient,  $NS$ ),能够反映水文模型的模拟结果与实际观测值之间的拟合程度,常用来评价水文模型模拟结果的优良。其计算公式如下:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{O,i} - Q_{m,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{O,i} - \bar{Q}_O)^2} \quad (3)$$

式中:  $Q_O$  为实测值;  $Q_m$  为模拟值;  $\bar{Q}_O$  为实测平均值。  $NS$  越接近 1,说明模型模拟值与实际观测值越接近,模型就拥有越高的可信度。  $NS$  大于 0.6 则表明模型有较好的模拟效果。决定系数  $R^2$  计算公式如下:

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{O,i} - \bar{Q}_O)(Q_{m,i} - \bar{Q}_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{O,i} - \bar{Q}_O)^2 \sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2}} \right]^2 \quad (4)$$

式中:  $Q_O$  为实测值;  $\bar{Q}_O$  为实测平均值;  $Q_m$  为模拟值;  $\bar{Q}_m$  为模拟平均值。  $R^2$  越接近 1,说明模拟值和实测值越吻合。  $R^2$  大于 0.7 说明模拟的结果较为准确。

### 2.2 CA—Markov 模型

CA-Markov 模型结合了 CA 模型和 Markov 模型的优势,填补了 Markov 模型对空间属性不敏感的特点<sup>[22]</sup>,具有模拟多类别土地利用变化的能力<sup>[23]</sup>,在模拟土地利用变化领域得到了广泛的使用<sup>[24-25]</sup>。

本文利用 IDRISI 17.0 软件中的 CA-Markov 模型对流溪河水库流域未来的土地利用格局进行模拟。首先,将 2000 年土地利用数据和 2010 年土地利用数据导入 IDRISI 17.0 软件,使用 Markov 模块获得转移概率矩阵和转移面积矩阵。然后通过导入高程、坡度等栅格文件对不同的土地类型添加约束条件,得到适宜性图集。最终,使用 CA-Markov 模块生成 2020 年土地利用模拟数据。使用 ArcGIS 中的相交功能,比较 2020 年土地利用的模拟数据和实测数据,并通过计算 Kappa 系数来验证模型的适用性。Kappa 系数能够评估图像的模拟数据与实际数据之间的拟合程度,常用于土地利用变化模拟精度检验<sup>[6]</sup>。其计算公式如下:

$$Kappa = \frac{P_0 - P_c}{1 - P_c} \quad (5)$$

式中:  $P_0$  为总体模拟精度;  $P_c$  为理论模拟精度; 1 代表理想状况下模拟的栅格比例。初步模拟结果显示, Kappa 数为 0.71,模拟精度较高 (0.60~0.80),表明 CA-Markov 模型模拟的未来的土地利用格局具有适用性<sup>[26]</sup>。

### 2.3 情景设置

2.3.1 土地利用变化情景 为了确定不同土地利用类型对径流的影响程度,本文设置以下 4 种极端土地利用类型情景。情景 1:采用 2020 年土地利用数据和 2010—2020 年的气象数据,作为基准情景;情景 2:采用 2010—2020 年的气象数据,并将流域内的林地、草地转化为耕地;情景 3:采用 2010—2020 年的气象数据,并将耕地转化为林地;情景 4:采用 2010—2020 年的气象数据,并将耕地转化为草地。



2.3.2 气候变化情景 以情景 1 为基础,通过改变气温和降水量来构建气候变化情景。情景 5:其他条件不变,气温升高 2℃;情景 6:其他条件不变,气温降低 2℃;情景 7:其他条件不变,降水量增加 10%;情景 8:其他条件不变,降水量减少 10%。

2.3.3 综合情景 设置 4 种情景,分析土地利用和气候变化对流溪河水库流域径流的综合影响。情景 9:采用 2000 年土地利用数据和 1990—2000 年的气象数据,作为此部分的背景情景;情景 10:采用 2000 年土地利用数据和 2010—2020 年的气象数据驱动模型,分析气候变化对径流的影响;情景 11:采用 2020 年土地利用数据和 1990—2000 年的气象数据驱动模型,分析土地利用变化对径流的影响;再通过与情景 1 进行比较,分析土地利用和气候变化对径流的综合影响。

2.3.4 未来径流变化预估情景 为了预测未来土地利用变化情况,以 2020 年流溪河水库流域土地利用数据为基础,采用 CA-Markov 模型模拟得到 2030 年和 2050 年流域土地利用的预测数据,以此设置未来土地利用变化情景。情景 12:在其他条件不变的情况下,将情景 1 中的土地利用数据替换为 2030 年土地利用预测数据;情景 13:在其他条件不变的情况下,将情景 1 中的土地利用数据替换为 2050 年土地利用预测数据。

预估未来气候变化有两种常见的方法,IPCC 法<sup>[4,6,21]</sup>和趋势变化法<sup>[9,27]</sup>。由于 IPCC 法预测的结果存在不确定性以及受分辨率的限制<sup>[9]</sup>,本文采用基于历史变化趋势设置未来气候情景的方法。有研究表明,未来华南地区的极端降水事件将持续增多,降

水强度变化倾向率为 0.34 mm/(d·10 a)<sup>[28]</sup>;气温也呈上升趋势,平均增速达到 0.2℃/10 a<sup>[29]</sup>。本文以 2010—2020 年气象数据为基础,将降水日(日降水量≥1 mm)的降水量增大 1.02 mm,将气温升高 0.6℃,得到 2040—2050 年气象预测数据(表 1),再设置未来气候变化情景。情景 14:在其他条件不变的情况下,将情景 1 中的气象数据替换为 2040—2050 年气象预测数据。

最后,对 2040—2050 年径流进行预估。情景 15:采用 2050 年土地利用预测数据和 2040—2050 年气象预测数据驱动模型。

表 1 2040—2050 年气象预测数据

Table 1 Meteorological forecast data from 2040 to 2050			
时间段	降水强度/ (mm·d <sup>-1</sup> )	年均 降水量/mm	平均 气温/℃
2010—2020 年	15.29	2465.92	20.58
2040—2050 年	16.31	2630.43	21.18

3 结果与分析

3.1 参数率定与验证结果

率定结果显示,对流溪河水库流域径流形成最敏感的参数依次为渗透系数垂直递减率、土壤表层孔隙率、地下水补给率、渗透系数、孔径指数,这表明流域径流的形成对地表水和地下水的交换、土壤的渗透能力较为敏感。模拟结果如图 2—3 所示。径流的模拟值总体上略大于实测值,率定期的 NS 为 0.82, R<sup>2</sup> 为 0.91,验证期的 NS 为 0.74, R<sup>2</sup> 为 0.86。模拟径流除部分峰值略低于实测径流值外,大部分径流量都能与实测值匹配,表明模型模拟的精度高,在流溪河水库流域有着良好的适用性。

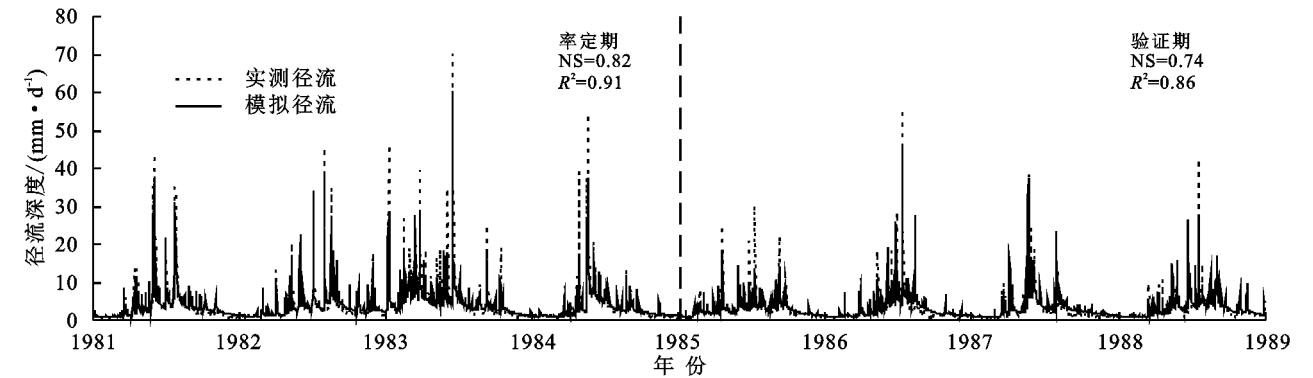


图 2 流溪河水库流域率定期和验证期径流模拟结果

Fig. 2 Runoff simulation results of Liuxi River Reservoir Basin in regular and verification periods

3.2 情景模拟分析

3.2.1 土地利用变化情景分析 由表 2 可知,以情景 1 为基准期,对比情景 2 可知,将流域内的林地和草地全部转化为耕地后,年均径流量增大了 2.36 m<sup>3</sup>/s;对比情

景 3 和情景 4 可知,将流域内的耕地分别转化为林地和草地后,年均径流量分别减少了 0.19,0.1 m<sup>3</sup>/s。结果表明,耕地面积的增大有利于径流的形成,而林地和草地面积的增大会使得径流量减少。通过对比情景 3 和情

景 4 可知,将耕地转化为林地后径流量为 18.23 m<sup>3</sup>/s,将耕地转化为草地后径流量为 18.32 m<sup>3</sup>/s,林地对径流形

成的贡献度小于草地。因此,耕地、林地、草地对径流形成的贡献率为耕地>草地>林地。

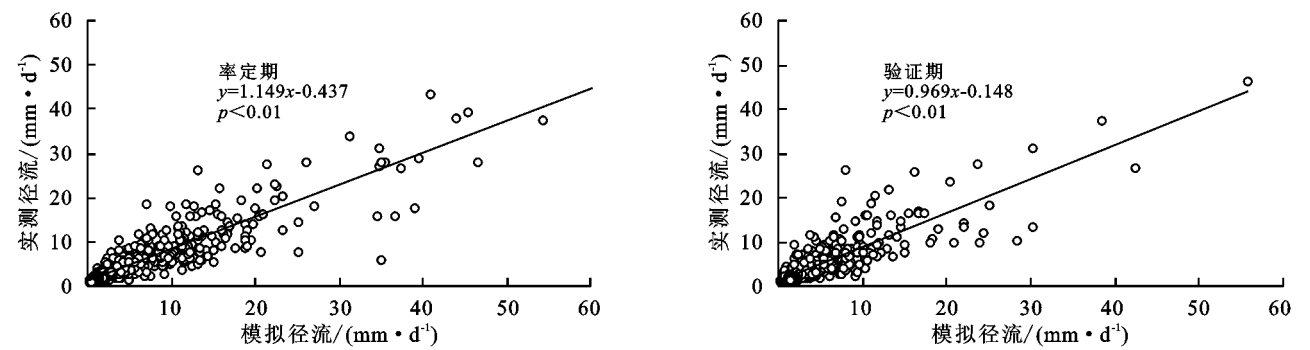


图 3 流溪水库流域率定期和验证期径流模拟散点图

Fig. 3 Scatter diagram of runoff simulation in regular and verification periods of Liuxi River Reservoir Basin

表 2 土地利用变化情景年均径流量

Table 2 Annual average runoff under land use change scenarios			
情景	年均径流量/ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	径流变化量/ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	径流 变化率/%
1	18.42		
2	20.78	2.36	12.83
3	18.23	-0.19	-1.02
4	18.32	-0.1	-0.54

3.2.2 气候变化情景分析 从表 3 可以看出,保持其他条件不变,温度升高或降低 2℃,所对应的径流量变化分别是一 0.21,0.22 m<sup>3</sup>/s,径流变化率分别是一 1.13%,1.19%,表明年均径流量和温度之间存在着反比关系。保持其他条件不变,降水量增加或减少 10%,所对应的径流量变化分别是 2.5,-2.52 m<sup>3</sup>/s,径流变化率分别是 13.59%,-13.67%,表明年均径流量和降水量的变化是正相关的。

表 3 气候变化情景年均径流量

Table 3 Annual average runoff under climate change scenarios			
情景	年均径流量/ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	径流变化量/ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	径流 变化率/%
1	18.42		
5	18.21	-0.21	-1.13
6	18.64	0.22	1.19
7	20.93	2.50	13.59
8	15.9	-2.52	-13.67

3.2.3 综合情景分析 模拟结果见表 4,4 种情景的年均径流量分别为 17.74,18.63,17.55,18.42 m<sup>3</sup>/s。通过对比情景 11 和情景 12 可知,在只改变气候数据的情况下,年均径流量增大了 0.89 m<sup>3</sup>/s;对比情景 11 和情景 13 可知,在只改变土地利用数据的情况下,年均径流量减少了 0.19 m<sup>3</sup>/s;再通过对比情景 11 和情景 1 可知,径流的变化量为 0.68 m<sup>3</sup>/s,这是由气候变化和土地利用变化共同影响所致,气候变化对径流形成的贡献为 0.89 m<sup>3</sup>/s,土地利用变化对径

流形成的贡献为一 0.19 m<sup>3</sup>/s。结果表明,2000—2020 年,流域年均径流量逐渐增大,气候变化促进了径流的形成,土地利用变化抑制了径流的形成,且气候变化的影响大于土地利用变化。

表 4 综合情景年均径流量

Table 4 Annual average runoff under comprehensive scenarios			
情景	年均径流量/ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	径流变化量/ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	径流 变化率/%
9	17.74		
10	18.63	0.89	5.01
11	17.55	-0.19	-1.08
1	18.42	0.68	3.84

3.2.4 未来径流变化预估情景 图 4 展示了 CA-Markov 模型生成的 2030 年和 2050 年土地利用情景。通过观察各地类的变化可以看出,2030 年和 2050 年的建筑用地面积相较于 2020 年有所增多,其他地类并未发生明显的变化。表 5 列出了详细的土地利用类型面积比例。2000—2050 年,变化最大的地类是建筑用地,增大了 3.15%;林地和草地面积比例分别减少了 2.82%,0.89%;耕地和水体则没有太大的变化。模拟结果显示(表 6),两个未来土地利用变化情景的年均径流量相较于 2020 年分别增加了 0.62,1.08 m<sup>3</sup>/s;未来气候变化情景的年均径流量为 20.05 m<sup>3</sup>/s,相较于 2020 年增多了 1.63 m<sup>3</sup>/s。表明未来土地利用和气候的变化对径流的形成有促进作用,且气候变化的贡献大于土地利用变化。2040—2050 年的年均径流量为 21.2 m<sup>3</sup>/s,与情景 1 相比,径流变化量为 2.78 m<sup>3</sup>/s,径流变化率为 15.07%,表明未来流域径流变化趋势为增加趋势。

4 讨论

本文通过设置 3 个极端土地利用变化情景,定量分析了土地利用变化对径流的影响。结果表明,耕地、林

地、草地对径流形成的贡献率大小为耕地>草地>林地,该结论与许多学者所得结论相似<sup>[8, 21]</sup>。耕地面积增大对径流形成有促进作用,其原因体现在以下几点:首先,耕作会降低土壤的降水入渗率。有研究表明<sup>[30]</sup>,耕作会破坏土壤的结构,表层土壤容易发生结皮,土壤入渗速率变慢,径流量增大。还有学者研究发现<sup>[31]</sup>,由于耕地植被覆盖较低,在降雨过程中易发生泥浆的飞溅而导致土壤孔隙堵塞,使得水分下渗减弱。而随着植被覆

盖度的增大,土壤的孔隙结构便能得到改善,土壤的入渗能力也随之增大,并且植被覆盖度的增大能有效减少土壤水分的蒸发量<sup>[32]</sup>,因此林地有着更好的保水能力。另一方面,相较于耕地和草地,林地有着更大的冠层面积和更多的地表覆盖物,冠层和枯枝落叶层都能对降水进行截留。除此之外,发达的根系可以使林地土壤更加疏松,增大土壤孔隙度,还可以吸持水源,减少径流的产出。因此,林地的产流能力要弱于耕地和草地。

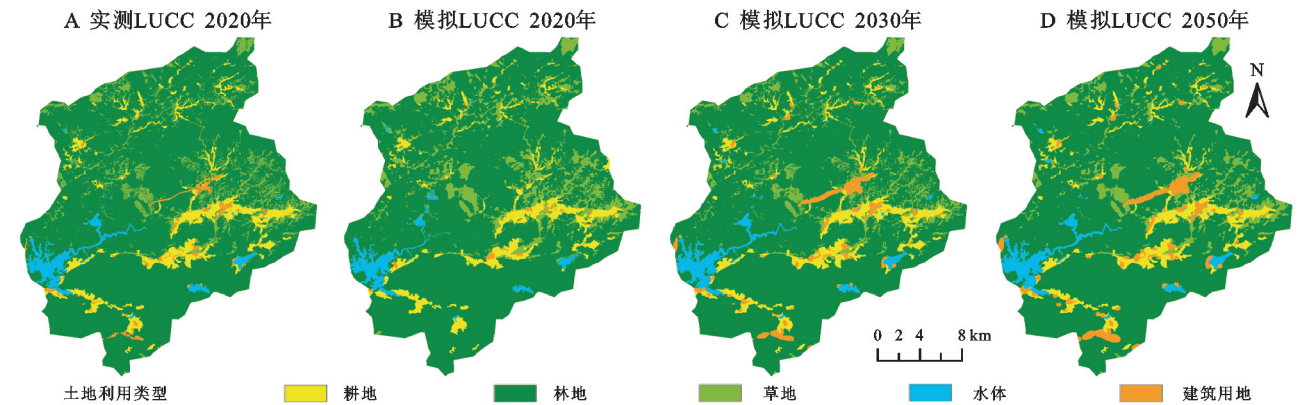


图 4 流溪河水库流域实测和模拟土地利用数据

Fig. 4 Measured and simulated land use data of Liuxi River Reservoir Basin

表 5 2000—2050 年土地利用类型面积比例

Table 5 Land use type area ratio from 2000 to 2050

土地利用 类型	土地利用类型面积比例 %			
	2000 年	2020 年	2030 年	2050 年
耕地	6.11	6.44	6.40	6.35
林地	80.89	80.27	78.83	78.07
草地	9.73	9.07	9.03	8.84
水体	2.97	2.86	3.18	3.29
建筑用地	0.30	1.37	2.57	3.45

表 6 未来径流变化预估情景年均径流量

Table 6 Estimated annual runoff under future scenarios

情景	年均径流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	径流变化量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	径流 变化率/%
12	19.04	0.62	3.37
13	19.51	1.08	5.88
14	20.05	1.63	8.83
15	21.20	2.78	15.07

气候变化是流域水文过程主要的影响因素之一,其影响主要体现在气温和降水的变化上<sup>[4]</sup>。本文通过设置 4 个气候变化情景,定量分析气温和降水变化对流溪河水库流域径流的影响。结果显示,年均径流量与降水量成正比,与温度成反比。气温影响着流域的蒸散发,气温升高会导致蒸散发量的增多,故径流量减少。相比于气温变化的间接影响,降水量对径流产生的影响则更为直接。一部分降水会直接汇入河流,另一部分降水降落至地表,通过下渗补充地下水,再通过地下水补给河流,两者都会使得径流量增大,

因此,降水量变化对径流量的影响更为显著。

为了能更好地了解流溪河水库流域未来土地利用格局变化以及对径流的影响,本文通过 CA-Markov 模型模拟了 2030 年、2050 年土地利用情景。模拟结果显示,2030 年和 2050 年的建筑用地面积呈增大趋势,而林地和草地面积在不断减少,且年均径流量在不断增大,这与许多学者的模拟结果相似<sup>[6]</sup>。除了林地、草地减少对径流的影响之外,建筑用地的增多同样会加快径流的形成。建筑用地的增大意味着不透水层的面积增大,降水无法下渗至地下,增大径流量的同时也缩短了汇流的时间。截至 2020 年底,吕田镇人口约为 3.24 万人,相比于 2010 年底的 2.18 万人增长了 1.06 万人,建筑用地不断增大仍是未来的趋势。作为流溪河流域的上游区域,在扩大建筑用地的同时,应当适当实施退耕还林、还草,降低下游地区遭遇洪水的风险。

为了对流域未来径流变化进行预测,本文用 2050 年土地利用预测数据和 2040—2050 年气候预测数据驱动模型,模拟表明未来年均径流量将会持续增多,这与流域历史径流量变化趋势一致。同时,模拟结果也与未来我国西南地区<sup>[4]</sup>、中部地区<sup>[6]</sup>、北方地区<sup>[10]</sup>的径流量变化趋势相似,呈增加趋势。这表明流溪河水库在未来有更多的水资源可以得到利用,维持为广州地区供水、灌溉、发电等功能。同时,未来降水强度和径流量的增大也意味着流域会面临更大的洪水风险。为了减少洪涝灾害的发生,应当加强对



降水的预报,发挥水库调度防洪的功能,合理地开发和管理河川径流。

此外,本文在使用 CA-Markov 模型进行预测时,Kappa 系数并未达到最优的标准,原因可能在于对建筑用地的模拟方面。CA-Markov 模型是基于城市化区域均匀增长的假设进行预测的,它无法识别新的发展方向<sup>[23]</sup>,而流域内许多建筑用地建于 2010—2020 年,因此通过 2000—2010 年土地利用数据预测 2020 年情景具有挑战性。在将来的研究中需要结合城市未来发展规划来开展更准确的模拟工作。此外,在分析单个气候变量对径流的影响和预估未来气象条件时,本文只考虑了降水和气温两个变量,没有考虑温室气体浓度变化对径流造成的影响。因此,在未来的研究中还需要考虑温室气体等因素。

## 5 结论

(1) CHES 模型在流溪河水库流域径流模拟中有很好的适用性,率定期 NS 为 0.82,  $R^2$  为 0.91,验证期 NS 为 0.74,  $R^2$  为 0.86。

(2) 土地利用变化方面,耕地转化为林地或草地会导致年均径流量减少,林地或草地转化为耕地会导致年均径流量增大,耕地、林地、草地对径流形成的贡献能力为耕地>草地>林地;气候变化方面,年均径流量与降水量成正比,与温度成反比。

(3) 2000—2020 年,流域年均径流量逐渐增大,气候变化促进了径流的形成,土地利用变化抑制了径流的形成,且气候变化的影响占主要地位。

(4) 预估结果显示,2030 年、2050 年流域内建筑用地面积会增大,林地、草地面积会减小,耕地、水体面积变化不大;2040—2050 年,流域年均径流量呈现增大趋势,与 2000—2020 年径流变化趋势相同。

### 参考文献:

- [1] Pan Z, Liu P, Gao S, et al. Improving hydrological projection performance under contrasting climatic conditions using spatial coherence through a hierarchical Bayesian regression framework [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019, 23(8): 3405-3421.
- [2] 史晓亮,李颖,严登华,等.流域土地利用/覆被变化对水文过程的影响研究进展[J].*水土保持研究*, 2013, 20(4): 301-308.  
Shi X L, Li Y, Yan D H, et al. Advances in the impacts of watershed land use/cover change on hydrological processes[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(4): 301-308.
- [3] 张士锋,华东,孟秀敬,等.三江源气候变化及其对径流的驱动分析[J].*地理学报*, 2011, 66(1): 13-24.
- Zhang S F, Hua D, Meng X J, et al. Climate change and its driving effect on the runoff in the "Three-River Headwaters" region [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(1): 13-24.
- [4] 窦小东,黄玮,易琦,等. LUCC 及气候变化对澜沧江流域径流的影响[J].*生态学报*, 2019, 39(13): 4687-4696.  
Dou X D, Huang W, Yi Q, et al. Impacts of LUCC and climate change on runoff in Lancang River Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(13): 4687-4696.
- [5] 林娟,陈晓宏,何艳虎,等.气候变化和人类活动对武江流域年径流及最大日流量影响的定量分析[J].*自然资源学报*, 2018, 33(5): 828-839.  
Lin X, Chen X H, He Y H, et al. Quantitative analysis of the impacts of climate change and human activities on annual and maximum daily runoff in the Wujiang River Basin [J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(5): 828-839.
- [6] 田晶,郭生练,刘德地,等.气候与土地利用变化对汉江流域径流的影响[J].*地理学报*, 2020, 75(11): 2307-2318.  
Tian J, Guo S L, Liu D D, et al. Impacts of climate and land use/cover changes on runoff in the Hanjiang River Basin [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(11): 2307-2318.
- [7] 王一然,丁文峰,张冠华.基于 SWAT 模型的丹江流域土地利用变化对径流影响研究[J].*水土保持研究*, 2022, 29(4): 62-67, 74.  
Wang Y R, Ding W F, Zhang G H. Study on the impact of land use change on Danjiang watershed based on SWAT model [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(4): 62-67, 74.
- [8] 罗巧,王克林,王勤学.基于 SWAT 模型的湘江流域土地利用变化情景的径流模拟研究[J].*中国生态农业学报*, 2011, 19(6): 1431-1436.  
Luo Q, Wang K L, Wang Q X. Using SWAT to simulate runoff under different land use scenarios in Xiangjiang River Basin [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(6): 1431-1436.
- [9] 李帅,魏虹,刘媛,等.气候与土地利用变化下宁夏清水河流域径流模拟[J].*生态学报*, 2017, 37(4): 1252-1260.  
Li S, Wei H, Liu Y, et al. Runoff prediction for Ningxia Qingshui River Basin under scenarios of climate and land use changes [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(4): 1252-1260.
- [10] 韩冬冬,朱仲元,宋小园,等.土地覆被和气候变化对锡林河流域径流量的影响[J].*水土保持研究*, 2019, 26(2): 153-160.  
Han D D, Zhu Z Y, Song X Y, et al. Effects of land cover and climate change on runoff in Xilinhe River Basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(2): 153-160.

- [11] 杨宏伟,许崇育.东江流域典型子流域土地利用/覆被变化对地表径流影响[J].湖泊科学,2011,23(6):991-996.  
Yang H W, Xu C Y. Effect of LUCC on runoff of three representative watersheds in Dongjiang River Basin[J]. Journal of Lake Sciences, 2011,23(6):991-996.
- [12] 袁宇志,张正栋,蒙金华.基于 SWAT 模型的流溪河流域土地利用与气候变化对径流的影响[J].应用生态学报,2015,26(4):989-998.  
Yuan Y Z, Zhang Z D, Meng J H. Impact of changes in land use and climate on the runoff in Liuxihe Watershed based on SWAT model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015,26(4):989-998.
- [13] 黄锋华,黄本胜,邱静,等.气候变化对北江流域径流影响的模拟研究[J].水利水电技术,2018,49(1):23-28.  
Huang F H, Huang B S, Qiu J, et al. Simulative study on impact of climate change on runoff within Beijiang River Basin [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018,49(1):23-28.
- [14] 牛香豫,唐国平,顾慧,等.流溪河水库流域碳氮营养盐浓度的时空变化特征及其影响因素[J].水土保持学报,2022,36(2):352-360.  
Niu X Y, Tang G P, Gu H, et al. Spatial-temporal variation of carbon and nutrients concentrations and its influencing factors in Liuxi River Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(2):352-360.
- [15] 顾慧,唐国平,江涛.模型驱动数据空间分辨率对模拟生态水文过程的影响[J].地理研究,2020,39(6):1255-1268.  
Gu H, Tang G P, Jiang T. Effects of spatial resolution of model-driving data on simulating land-surface eco-hydrological processes [J]. Geographical Research, 2020,39(6):1255-1268.
- [16] 窦乙峰.流溪河水库流域土地利用和气候变化对径流的影响[D].广州:中山大学,2018.  
Dou Y F. The Impacts of Land Use Change and Climate Variability on Runoff in the Liuxihe Reservoir [D]. Guangzhou: Sun Yat-Sen University, 2018.
- [17] Tang G, Carroll R W H, Lutz A, et al. Regulation of precipitation-associated vegetation dynamics on catchment water balance in a semiarid and arid mountainous watershed: Regulation of vegetation dynamics on catchment water balance[J]. Ecohydrology, 2016,9(7):1248-1262.
- [18] Tang G, Hwang T, Pradhanang S M. Does consideration of water routing affect simulated water and carbon dynamics in terrestrial ecosystems[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014,18(4):1423-1437.
- [19] Tang G, Li S, Yang M, et al. Streamflow response to snow regime shift associated with climate variability in four mountain watersheds in the US Great Basin[J]. Journal of Hydrology, 2019,573:255-266.
- [20] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles [J]. Journal of Hydrology, 1970,10(3):282-290.
- [21] 王磊,刘亭亭,谢建治.基于 SWAT 模型的张家口清水河流域土地利用情景变化对径流影响研究[J].水土保持研究,2019,26(4):245-251.  
Wang L, Liu T T, Xie J Z. Study on the effect of different land use scenarios on runoff in Qinghsuihe Basin of Zhangjiakou based on SWAT model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(4):245-251.
- [22] Agarwal C, Green G M, Grove J M, et al. A review and assessment of land-use change models: Dynamics of space, time, and human choice [R]. Newtown Square, Pa, USA: Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station, 2002.
- [23] Memarian H, Kumar Balasundram S, Bin Talib J, et al. Validation of CA-Markov for simulation of land use and cover change in the Langat basin, Malaysia [J]. Journal of Geographic Information System, 2012,4(6):542-554.
- [24] Araya Y H, Cabral P. Analysis and modeling of urban land cover change in Setúbal and Sesimbra, Portugal [J]. Remote Sensing, 2010,2(6):1549-1563.
- [25] Samat N. Integrating GIS and CA-MARKOV model in evaluating urban spatial growth[J]. Malaysian Journal of Environmental Management, 2009,10(1):83-99.
- [26] 张学儒,周杰,李梦梅.基于土地利用格局重建的区域生境质量时空变化分析[J].地理学报,2020,75(1):160-178.  
Zhang X R, Zhou J, Li M M, et al. Analysis on spatial and temporal changes of regional habitat quality based on the spatial pattern reconstruction of land use[J]. Acta Geographica Sinica, 2020,75(1):160-178.
- [27] 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.
- [28] 戴声佩,罗红霞,李茂芬,等.1959—2016 年华南地区极端降水事件变化特征[J].中国农业资源与区划,2022,43(3):128-142.  
Dai S P, Luo H X, Li M F, et al. Extreme precipitation events variations in southern China from 1959 to 2016 [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2022,43(3):128-142.



- 锐减归因分析[J].地理学报,2019,74(9):1745-1757.
- Gao H D, Liu H, Jia L L, et al. Attribution analysis of precipitous decrease of sediment loads in the Hekou-Longmen section of Yellow River since 2000[J]. Acta Geographica Sinica, 2019,74(9):1745-1757.
- [18] 刘晓燕,杨胜天,李晓宇,等.黄河主要来沙区林草植被变化及对产流产沙的影响机制[J].中国科学:技术科学,2015,45(10):1052-1059.
- Liu X Y, Yang S T, Li X Y, et al. The current vegetation restoration effect and its influence mechanism on the sediment and runoff yield in severe erosion area of Yellow River Basin[J]. Science China: Technological Sciences,2015,45(10):1052-1059.
- [19] 王小燕,杨勤科.中尺度流域土地利用变化对土壤侵蚀的影响:以孤山川流域为例[J].水土保持通报,2016,36(2):1-7,349.
- Wang X Y, Yang Q K. Effects of land use on soil erosion in Mesoscale Watershed: A case study at Gushanchuan Watershed[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2016,36(2):1-7,349.
- [20] 冉大川,齐斌,肖培青,等.佳芦河流域特大暴雨洪水对下垫面治理的响应[J].水土保持研究,2015,22(6):7-13.
- Ran D C, Qi B, Xiao P Q, et al. Response of extraordinary rainstorm and flood to the harnessing for underlying surface in Jialu River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015,22(6):7-13.

(上接第31页)

- [22] Xin Z, Yu X, Li Q, et al. Spatiotemporal variation in rainfall erosivity on the Chinese Loess Plateau during the period 1956—2008 [J]. Regional Environmental Change, 2011,11(1):149-159.
- [23] 章文波,谢云,刘宝元.中国降雨侵蚀力空间变化特征[J].山地学报,2003,21(1):33-40.
- Zhang W B, Xie Y, Liu B Y. Spatial distribution of rainfall erosivity in China [J]. Journal of Mountain Research, 2003,21(1):33-40.
- [24] Guo B, Luo W, Han B, et al. Multiple spatial-temporal scale change patterns of rainfall erosivity in China over past 58 years based on gravity centre model [J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2019,10(1):2200-2219.
- [25] 韩建,占车生,王飞宇,等.太行山区降水空间扩展方法与垂直地带性分析[J].山地学报,2017,35(6):761-768.
- Han J, Zhan C S, Wang F Y, et al. Comparison of the methods of precipitation spatial expansion and analysis of vertical zonality in the Taihang Mountains [J]. Journal of Mountain Research, 2017,35(6):761-768.
- [26] 夏正兵.黄河流域极端气候下降雨侵蚀力时空特征研究[J].水电能源科学,2021,39(7):16-19.
- Xia Z B. Study on temporal and spatial characteristics of rainfall erosion under extreme climate in the Yellow River Basin[J]. Water Resources and Power, 2021,39(7):16-19.

(上接第39页)

- [29] 张学珍,郑景云,郝志新.中国主要经济区的近期气候变化特征评估[J].地理科学进展,2020,39(10):1609-1618.
- Zhang X Z, Zheng J Y, Hao Z X. Climate change assessments for the main economic zones of China during recent decades[J]. Progress in Geography, 2020,39(10):1609-1618.
- [30] 杨永辉,赵世伟,雷廷武,等.耕作对土壤入渗性能的影响[J].生态学报,2006,26(5):1624-1630.
- Yang Y H, Zhao S W, Lei T W, et al. Tillage on soil infiltration under simulated rainfall conditions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006(5):1624-1630.
- [31] 殷建华.南方红壤丘陵区不同植被类型土壤不同土层水分对降水的响应[J].东北林业大学学报,2017,45(11):72-77.
- Yin J H. Response of soil moisture to rainfall in *Pinus massoniana* stands and *Paspalum notatum* grassland in hilly red soil region of southern China[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2017,45(11):72-77.
- [32] Wang Y, Xie Z, Malhi S S, et al. Effects of rainfall harvesting and mulching technologies on water use efficiency and crop yield in the semi-arid Loess Plateau, China[J]. Agricultural Water Management, 2009,96(3):374-382.