

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.05.004

# 变化环境下韩江生态流量演变特征分析

李泽君<sup>1,2,3</sup>, 黄本胜<sup>1,3</sup>, 邱 静<sup>1,3</sup>, 蔡宴朋<sup>2</sup>, 杨志峰<sup>2</sup>, 陈思淳<sup>1,3</sup>

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510610; 2. 广东工业大学环境生态工程研究院, 广东 广州 510006;  
3. 河口水利技术国家联合工程实验室, 广东 广州 510610)

**摘要:**选取位于粤东、闽西南地区的韩江流域为研究对象, 基于 CA-Markov 模型对 2050 年流域土地利用空间格局进行预测, 构建 SWAT 分布式水文模型, 以未来土地利用情景和气候变化情景为变量进行水文模拟, 分析不同情景下韩江生态流量的时空演变特征。结果表明, 未来城镇化扩张将使梅江支流中上游成为韩江流域内生态流量对土地利用变化最为敏感的区域; 土地利用和气候变化将导致韩江流域枯水期流量整体减小, 枯水期流量对环境变化更加敏感; 韩江流域生态流量变化特征将呈现从西南到东北由升到降的趋势, 梅江支流中上游地区的生态流量将得到改善; 梅江和汀江两大支流上游区域生态流量对气候变化更为敏感; 韩江流域径流总量下降, 但丰枯流量分化加剧, 长期来看枯季生态流量保障风险可能进一步增大。

**关键词:** 气候变化; 土地利用变化; 生态流量; 时空变化; SWAT 模型; 韩江流域

**中图分类号:** TV213.4; P339 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2021)05-0022-08

**Analysis on evolution characteristics of ecological flow of Hanjiang River under changing environment** // LI Zejun<sup>1,2,3</sup>, HUANG Bensheng<sup>1,3</sup>, QIU Jing<sup>1,3</sup>, CAI Yanpeng<sup>2</sup>, YANG Zhifeng<sup>1,3</sup>, CHEN Sichun<sup>1</sup> (1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510610, China; 2. Institute of Environmental & Ecological Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 3. State and Local Joint Engineering Laboratory of Estuarine Hydraulic Technology, Guangzhou 510610, China)

**Abstract:** Taking the Hanjiang River basin located in eastern Guangdong and southwest Fujian as the research object, the spatial pattern of land use in the basin in 2050 was predicted based on CA-Markov model. The SWAT distributed hydrological model was constructed, and the hydrological simulation was carried out with the future land use scenario and climate change scenario as variables to analyze the temporal and spatial evolution characteristics of ecological flow of Hanjiang River under different scenarios. The results show that the future urbanization expansion will make the middle and upper reaches of the Meijiang River become the most sensitive area of ecological flow to land use change in the Hanjiang River Basin. Land use and climate change will lead to the overall decrease of flow in dry season of the Hanjiang River Basin, and the flow in dry season is more sensitive to environmental change. The change characteristics of ecological flow in the Hanjiang River Basin will show a downward trend from southwest to northeast, and the ecological flow in the middle and upper reaches of Meijiang River will be improved. The regional ecological flow in the upper reaches of Meijiang River and Tingjiang River is more sensitive to climate change. The total runoff of the Hanjiang River Basin decreases, but the differentiation of flow in dry season and wet season intensifies. In the long run, the risk of ecological flow guarantee in dry season may further increase.

**Key words:** climate change; land use change; ecological flow; spatial-temporal variation; SWAT model; Hanjiang River Basin

社会经济的快速发展使得人类社会对水资源的开发利用和干预逐步增强。水库、梯级电站等水利工程的修建, 破坏了河流的天然连通性, 加之社会用水对径流的挤占, 引发河流水文情势的改变, 甚至导

致河流生态系统结构改变和功能的退化<sup>[1]</sup>。河流生态环境恶化引起社会对生态流量的关注, 联合国在 2015 年通过的《2030 年可持续发展议程》中, 将实施生态流量作为实现可持续发展目标的重要措施

基金项目: 广东省水利科技创新项目(2017-13); 广东省科技计划项目(2020B1212030005)

作者简介: 李泽君(1991—), 男, 博士, 主要从事水文模拟与水库调度研究。E-mail: lizejun09@163.com

之一<sup>[2]</sup>。河流生态流量是指能够维持河流生态系统健康,满足人类生存发展所需要的流量<sup>[3]</sup>,其中维持河流基本形态和基本生态功能所需的流量称为生态基流<sup>[4-5]</sup>。

关于生态流量的研究最早开始于20世纪40年代,经过不断探索与实践,生态流量的评价指标体系和评价方法得到了不断发展,河流生态流量保障已逐渐成为水资源调度与管理的重要内容之一<sup>[6-8]</sup>。如,Richter等<sup>[9]</sup>提出变异范围法(range of variability approach, RVA)确定河流生态流量管理目标,用于指导河流天然情势的恢复与保障工作,其中变化范围法中包含了不同时间尺度下流量的量级、历时、出现时间、频率、变幅等多个统计指标。考虑到水文非一致性因素对生态流量目标确定的影响,王强等<sup>[10]</sup>采用水文时间序列变异检验方法分析了江西潦河径流的变异性,通过构建水文模型对变异后时段内的径流进行还原,确定了天然状态下河道生态流量目标。Torabi等<sup>[11]</sup>基于流量的量级、历时和年内变幅等特征值,提出了一个可适用于变化环境(包括大坝修建、气候变化、土地利用变化等)河流水文情势影响的综合指标。卢有麟等<sup>[12]</sup>采用Tennant法计算出宜昌站逐月生态流量目标,以发电量最大和生态缺水最小为目标建立了三峡梯级电站多目标生态优化调度模型,对三峡梯级枢纽多目标生态优化调度进行了研究。

在全球气候变化和人类活动强度不断增强的背景下,河流生态流量所受影响日益显著,开展变化环境下河道生态流量的影响评估和适应性管理研究,成为保护河流生态系统的新需求。如,Thompson等<sup>[13]</sup>通过在湄公河构建MIKE SHE模型,基于RVA评估气候变化情景下河道生态流量变化的不确定性,研究结果表明河道内枯水流量在气候变化影响下不确定性更大。Laizé等<sup>[14]</sup>综合考虑了不同气候变化情景和社会经济用水情景下欧洲河流生态流量的变化,结果指出变化环境下欧洲约2/3的河流将面临中等或高度变化的风险。陈晓宏等<sup>[15]</sup>将生态流量破坏率纳入水库调度优化目标,通过模拟未来气候情景下澜沧江流域径流过程,对气候变化影响下梯级电站发电和生态效益间的冲突变化情况进行了分析。整体而言,目前针对变化环境下河道生态流量影响评估的研究仍相对较少,且较多侧重于考虑气候变化条件下的模拟分析。随着社会经济的进一步发展,土地利用率的逐步提高(如城镇化提高),土地利用和气候条件变化的综合影响将为生态流量变化带来更多不确定性。

韩江作为粤东、闽西南地区重要河流,是流域内

各地区的主要供水水源,新建的外调水工程(如韩江榕江练江水系连通工程)也将使韩江成为流域外其他区域的重要水源。另一方面,韩江流域水库丰枯调蓄能力相对较弱,流域多年平均径流量153亿 $m^3$ ,而流域内4座大型水库总兴利库容约13亿 $m^3$ 。资源与工程方面的综合因素导致了韩江流域枯水期长期面临较为严重的河道内外用水矛盾<sup>[16]</sup>。本文以韩江流域为研究区,构建分布式水文模型,开展土地利用变化模拟,并结合多气候模式输出的全球气候变化数据,开展韩江流域水文模拟,选取生态流量相关指标值,探究气候条件和土地利用变化综合影响下河道生态流量的时空演变特征,以为未来流域水资源规划管理和生态环境的修复提供参考。

## 1 研究区概况与资料来源

韩江流域面积30 112  $km^2$ ,其中59.4%在广东省境内,40.1%在福建省境内,其余位于江西省境内(图1)。流域多年平均降水量在1 600 mm左右,汛期降水量占全年降水量的80%。降水年内丰枯不均导致韩江流域汛枯季径流量差异明显,汛期平均径流量达枯季的2.7倍。韩江流域多年平均水资源总量为153.5亿 $m^3$ ,流域总人口为1 072.3万人,现状用水量为46.9亿 $m^3$ 。目前流域内已建4座大型水库中,位于汀江支流的棉花滩水库兴利库容占比达到了84%,其余3座(益塘水库、合水水库和长潭水库)位于梅江支流,总兴利库容仅约2亿 $m^3$ 。此外,韩江流域也是诸多水生生物的繁衍栖息地,其中

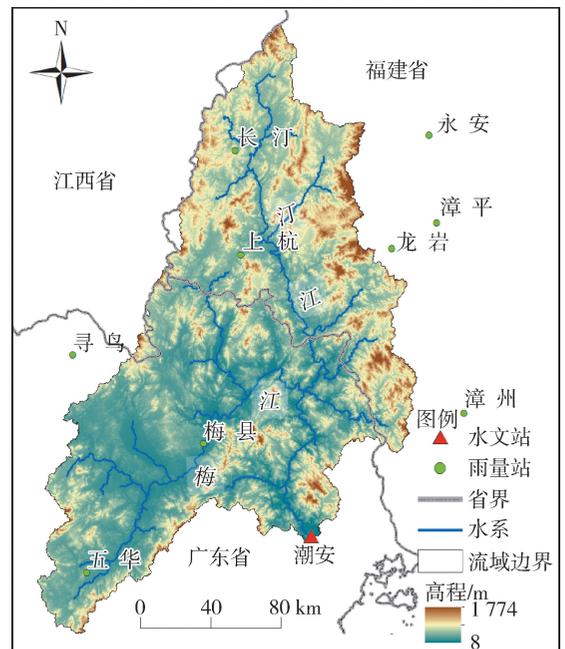


图1 韩江流域概况

Fig. 1 Profile of Hanjiang River Basin

分布有国家 I 级重点保护物种鼋和国家 II 级重点保护物种花鳗鲡,但是从区系角度来看该流域水生生物种大多属于单种属和寡种属,一旦受到破坏和人为干扰,这些物种极容易消失。

本研究资料包括潮安水文站 1979—2005 年逐日径流序列,五华、梅县、上杭、长汀、龙岩等共 16 个气象站点的 1979—2005 年逐日降水、气温、风速、辐射、相对湿度序列,1995 年、2010 年和 2015 年土地利用/覆被数据(分辨率 1 km),1:100 万全球土壤数据库(HWSD)土壤类型数据,SRTM 90 m 数字高程模型(DEM)数据。

未来气候情景来源于 IPCC 第五次评估报告(IPCC AR5)发布的 23 个气候模式资料,选取 RCP 4.5 和 RCP 8.5 两种情景代表浓度路径(representative concentration pathways, RCP),以 23 个模式的集合平均降水和气温作为未来气候条件。

## 2 研究方法

### 2.1 SWAT 分布式水文模型

SWAT(soil and water assessment tool)模型是由美国农业部研制开发的分布式流域水文模型,可用于模拟流域内水流、泥沙、营养物等在日尺度上的输移与转化过程<sup>[17]</sup>。SWAT 模型基于地形将流域首先划分为多个子流域,然后根据土地利用/覆被类型、土壤类型、地形等因素将子流域进一步划分为水文响应单元(hydrologic response units, HRU)。SWAT 模型在 HRU 尺度上进行水量平衡计算,HRU 相互独立,不发生水分交换。HRU 上形成的地表、地下径流汇入子流域出口,然后经河道汇流演算至流域出口。

采用 SWAT-CUP<sup>[18]</sup> 程序内嵌的 SUFI-2 算法对 SWAT 模型参数进行率定。SUFI-2 算法可以同时参数优化和不确定性分析,能够在不同空间尺度(HRU、子流域和流域尺度)上对 SWAT 模型进行快速调参。SWAT 模型以 1979—1995 年为率定期(其中 1979 年为预热期),1996—2005 年为验证期。采用 Nash-Sutcliffe 效率系数  $N_{SE}$ 、径流总量相对误差  $R_E$  和确定性系数  $R^2$  对模型率定和验证结果进行评价。结果表明,率定期和验证期日尺度  $N_{SE}$  均高于 0.7,月尺度  $N_{SE}$  均高于 0.8;  $R_E$  率定期为 -7.53%,验证期为 10.7%;率定期和验证期  $R^2$  日尺度均高于 0.7,月尺度均高于 0.8。整体而言,SWAT 模型在韩江流域模拟精度较好。

### 2.2 CA-Markov 模型

元胞自动机(cellular automata, CA)是一种非线性动力学系统,CA 模型将时间、空间、状态离散,根据局部的、相同的相互作用规则进行更新,具有强大

的空间运算能力。Markov 过程是指具有“无后效性”特征的随机过程。CA-Markov 模型发挥了 CA 模型模拟复杂系统空间变化的能力和 Markov 模型长期预测的优势<sup>[19]</sup>,其基本原理是以基准期的土地利用为初始状态,以土地利用转移矩阵和适宜性图集为依据,对土地利用空间分布进行迭代模拟。土地利用模拟结果的验证通常采用 Kappa 空间相关统计系数,当该系数大于或等于 0.75 时,说明两幅图一致性较高。

通过 ArcGIS 对韩江流域土地利用类型进行重分类,得到以林地、草地、水体、城镇和农田 5 种土地利用类型为主的 1995 年、2010 年和 2015 年土地利用数据。基于 1995 年和 2010 年土地利用数据,以年为时间步长,采用 IDRISI 软件提取土地利用转移概率矩阵,作为每次迭代元胞转换数量的决策依据。然后以 1995 年土地利用数据为初始状态,采用 CA-Markov 模型进行逐年迭代模拟,得到 2015 年模拟土地利用数据,进行精度评价。在以 1995 年和 2010 年生成的土地利用转移矩阵基础上,将 2015 年土地利用数据作为初始状态,基于 CA-Markov 模型对韩江流域 2050 年土地利用空间分布格局进行模拟,得到未来情景年土地利用数据。

### 2.3 Delta 方法

采用 Delta 方法实现未来气候情景下降水和气温序列的生成。Delta 方法的基本原理是将 GCM 所模拟某一气候要素在未来和现状情景下的相对改变,叠加到该气候要素基准期实际观测序列上,从而得到该气候要素未来情景下的数据序列<sup>[20]</sup>。进行 Delta 方法计算时,首先确定格网内 GCM 未来时期与基准时期气候要素月均值的比率(降水)或差值(气温),然后对基准期实测气象资料进行缩放(降水)或加减(气温),从而得到未来格网内的气候要素值。以 1979—2005 年为历史基准时期,2040—2060 年为未来气候变化时期。

### 2.4 生态流量评价指标

从量级和变异性两个方面选取生态流量相关指标,包括 3 个量级指标(90% 经验频率流量值  $Q_{90}$ 、最枯连续 7 日平均流量  $Q_{min7}$ 、流量均值  $\bar{Q}$ )和 1 个变异性指标(5% 经验频率流量值  $Q_{50}$  与  $Q_{90}$  之间的差值  $Q_{var}$ )。此外,采用破坏率和最大破坏深度评价生态基流满足程度。根据现有成果得到潮安断面生态基流为  $128 \text{ m}^3/\text{s}$ 。生态基流的破坏率和最大破坏深度计算公式为

$$D_R = (1 - N_S/N_T) \times 100\% \quad (1)$$

$$D_M = \max(1 - Q_i/Q_m) \times 100\% \quad (2)$$

式中: $D_R$ 为生态基流破坏率,%; $D_M$ 为生态基流最大

破坏深度, %;  $N_s$  为断面流量达到生态基流的时段数;  $N_T$  为总时段数;  $Q_t$  为  $t$  时刻断面流量,  $m^3/s$ ;  $Q_m$  为断面生态基流值,  $m^3/s$ 。

### 3 结果与分析

#### 3.1 土地利用变化模拟

图2为韩江流域2015年实测、模拟土地利用与2050年模拟土地利用情况。由图2可见,2015年模拟土地利用空间布局整体与实际情况比较接近,土

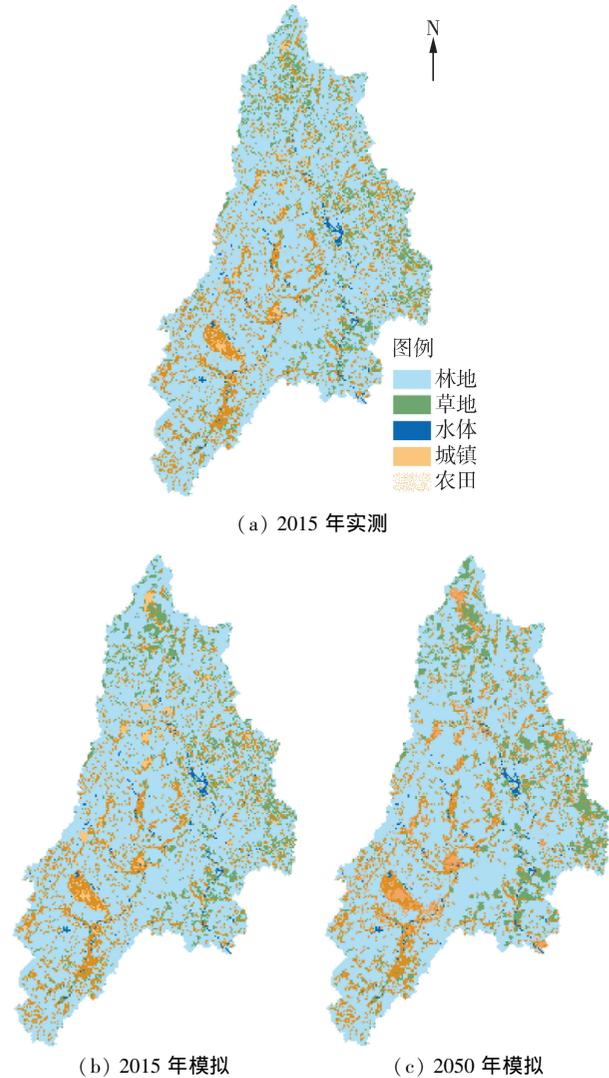


图2 韩江流域2015年实测、模拟土地利用与2050年模拟土地利用情况

Fig.2 Measured and simulated land use in Hanjiang River Basin in 2015 and simulated land use in 2050

地利用情景 Kappa 系数为 0.986, 说明土地利用模拟结果具有较高的可信度。2050 年土地利用模拟结果表明, 未来韩江流域内城镇用地和草地面积将继续扩大, 分别由 2% 和 8% 扩大至 4% 和 9%, 而林地和农田面积将进一步减小, 分别由 74% 和 15% 减小至 71% 和 14%。其中, 城镇用地扩张较为明显, 由当前的 691  $km^2$  扩大至 1 207  $km^2$ , 2050 年约占韩江流域总面积的 4%。城镇用地扩张最为显著的区域位于梅江中上游区域, 该区域为五华县、兴宁市、梅州市区所在地, 人口规模约 300 万人, 约占潮安断面以上韩江流域总人口的 40%。

#### 3.2 不同情景下潮安断面生态流量的演变

不同情景下潮安断面流量特征值变化情况见表1, 其中 LU2050 代表 2050 年土地利用情景, RCP4.5 + LU2050 和 RCP85 + LU2050 分别代表 2050 年土地利用条件下的 RCP 4.5 和 RCP 8.5 情景。由表1可见, 土地利用变化将导致潮安断面  $Q_{90}$  和  $Q_{min7}$  分别降低 1.8% 和 0.6%, 而  $\bar{Q}$  和  $Q_{var}$  分别增大 0.6% 和 0.4%, 可见土地利用变化会引起韩江枯水流量下降, 但整体影响程度较小。在 RCP 4.5 和 RCP 8.5 情景下, 潮安断面  $\bar{Q}$  分别降低 2.3% 和 5.2%, 而  $Q_{90}$  分别降低 7.5% 和 11.9%,  $Q_{min7}$  增大 1.3% 和 0.7%,  $Q_{var}$  减小 3.9% 和 6.3%, 表明气候变化将导致韩江流域平均流量和枯水期流量整体减少, 枯水期流量的变异性降低。两种气候情景相比, RCP 8.5 情景下韩江径流量整体更加偏枯。未来情景下, 气候变化对韩江流域径流产生的影响整体高于土地利用变化, 导致二者综合影响下的潮安断面流量变化特征整体上呈现与气候变化下相似。

图3为不同情景下潮安断面流量对数经验频率曲线与以及其中经验频率大于或等于 50% 对应流量的相对变化情况。可以看出, 土地利用和气候变化对  $Q_{50} \sim Q_{90}$  (平水至枯水) 区间的流量影响在特征上基本一致, 流量变幅大体上呈现由  $Q_{50} \sim Q_{90}$  逐渐减小的趋势, 流量相对变化值在  $Q_{50} \sim Q_{75}$  (平偏枯) 区间较为平稳, 而在  $Q_{75} \sim Q_{90}$  (枯水) 区间则随着流量值的减小而增大; 对于流量值低于  $Q_{95}$  的特枯流量, 相对变化值虽然存在一定波动, 但仍低于平偏枯流量。可见枯水期流量对变化环境相对更加敏感。

表1 不同情景下潮安断面流量特征值变化情况

Table 1 Variation of flow characteristic value of Chao'an section under different scenarios

特征值	现状值/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	不同情景下的变化率/%				
		LU2050	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5 + LU2050	RCP85 + LU2050
$Q_{90}$	225.2	-1.8	-7.5	-11.9	-8.4	-12.5
$Q_{min7}$	49	-0.6	1.3	0.7	2.1	1.4
$\bar{Q}$	852	0.6	-2.3	-5.2	-1.5	-4.4
$Q_{var}$	414	0.4	-3.9	-6.3	-3.2	-5.4

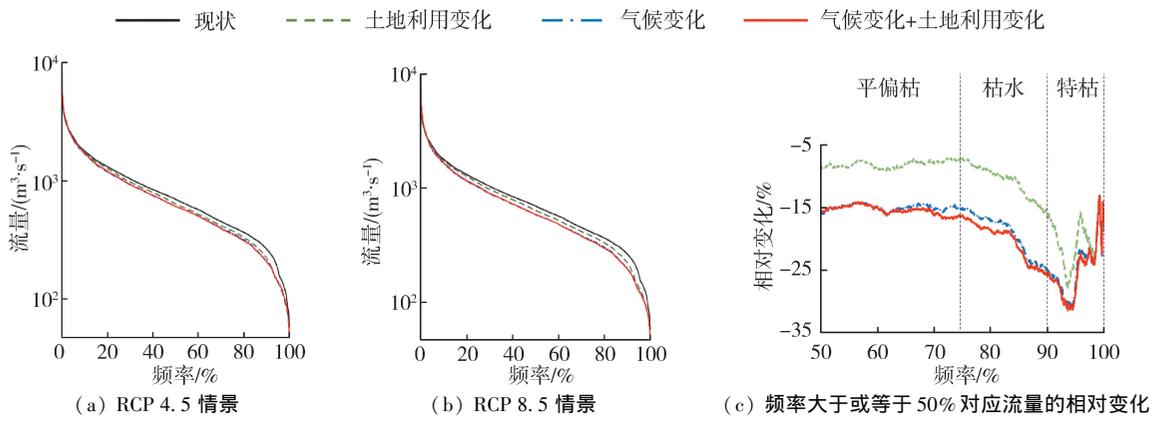


图3 不同情景下潮安断面流量对数经验频率曲线与流量相对变化情况

Fig. 3 Logarithmic empirical frequency curve and relative change of discharge at Chao'an section under different scenarios

图4为不同情景下潮安断面逐月流量变化情况。可以看出,在2050年土地利用情景下,韩江流域2—9月平均流量均有所增大,而在枯水期的10月至次年1月,韩江流域平均流量有所降低。土地利用变化对潮安断面逐月流量的影响整体低于 $\pm 2\%$ 。相较于土地利用变化,气候变化对潮安断面逐月流量的影响更加显著,整体变幅在 $-33\% \sim 21\%$ 之间。其中6—10月流量显著增加,而1—4月、11—12月流量显著减少。相较于RCP 4.5情景(图4(a)),RCP 8.5情景(图4(b))下潮安断面汛

期逐月流量增幅普遍偏低,而枯水期流量减幅整体偏大。气候变化影响下,潮安断面2—4月平均流量下降幅度超过15%,最大可达32.3%。土地利用和气候变化综合影响下,潮安断面汛期逐月流量增幅进一步扩大,而枯水期流量减幅低于气候变化单因素造成的影响。

表2为不同情景下潮安断面最枯年生态基流破坏情况。由表2可以看出,土地利用变化对潮安断面生态基流的 $D_R$ 和 $D_M$ 影响较小。RCP 4.5和RCP 8.5情景下,潮安断面生态基流的 $D_R$ 分别下降了6.4%、6.1%,而 $D_M$ 分别上升了11.6%、13.1%。土地利用和气候变化综合影响下,潮安断面生态基流破坏情况出现了分化:在土地利用变化与RCP 4.5情景下,潮安断面生态基流破坏情况有所改善;而在土地利用变化与RCP 8.5情景下,潮安断面生态基流破坏情况加剧。

表2 潮安断面最枯年生态基流破坏情况

Table 2 Destruction of ecological base flow in the driest year of Chao'an section

不同情景	$D_R/\%$	$D_M/\%$
现状	18.1	42.8
LU2050	0.1	0.2
RCP4.5	-6.4	11.6
RCP8.5	-6.1	13.1
RCP4.5 + LU2050	-2.3	-2.3
RCP8.5 + LU2050	1.2	2.1

### 3.3 不同情景下生态流量的空间演变特征

为分析不同情景下韩江流域生态流量的空间响应特征,利用SWAT模型计算各子流域生态流量指标相对变化幅度,结果见图5~8。由图5~8可见,在土地利用变化影响下,梅江中游区域 $\bar{Q}$ 变化最为显著,最大增幅达3.3%,而 $Q_{90}$ 和 $Q_{min7}$ 最大降幅达7.0%, $Q_{var}$ 最大降幅达4.0%。流域内其他区域生态流量指标受土地利用变化影响较小。可见,城镇

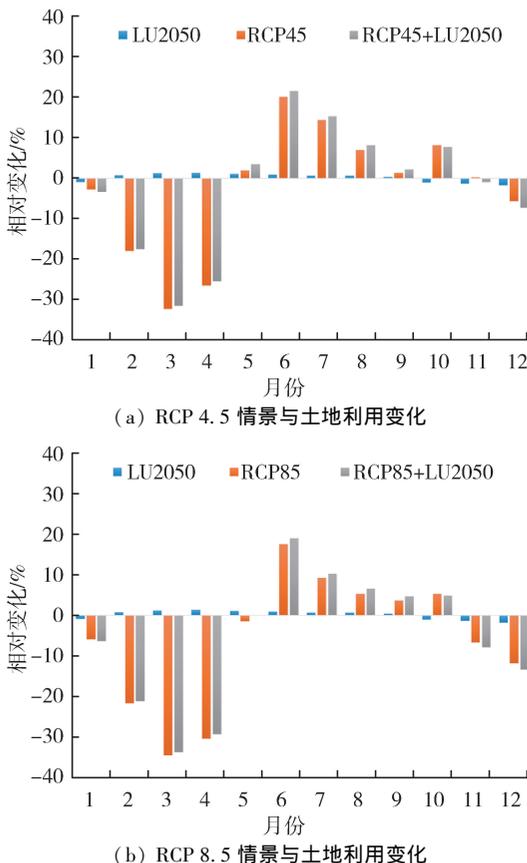


图4 不同情景下潮安断面月径流量变化情况

Fig. 4 Monthly runoff variation of Chao'an section under different scenarios

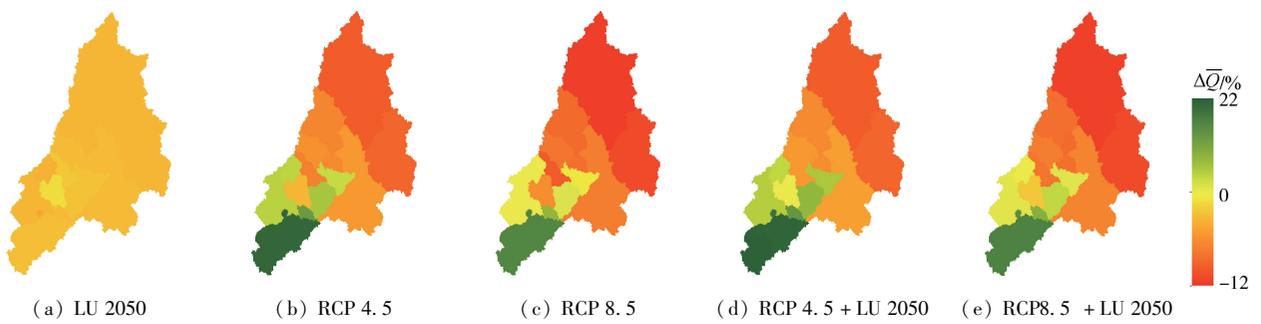


图 5 不同情景下各子流域  $\bar{Q}$  相对变化情况

Fig. 5 Relative changes of  $\bar{Q}$  in sub basins under different scenarios

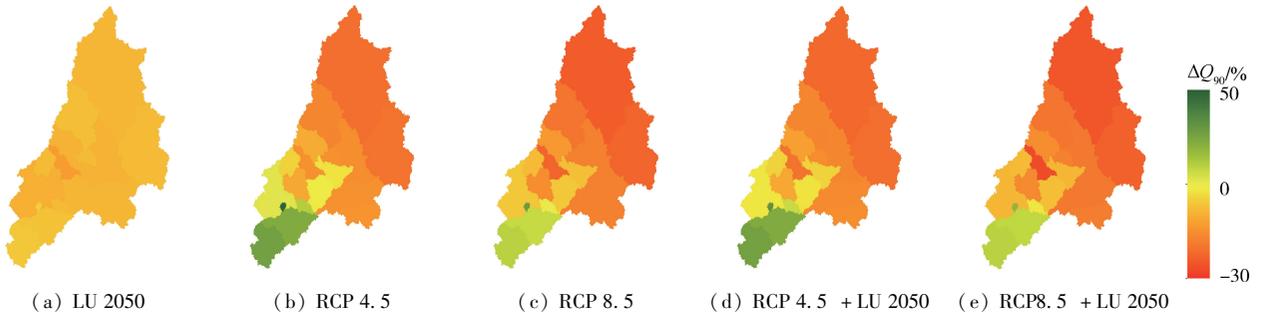


图 6 不同情景下各子流域  $Q_{90}$  相对变化情况

Fig. 6 Relative changes of  $Q_{90}$  in sub basins under different scenarios

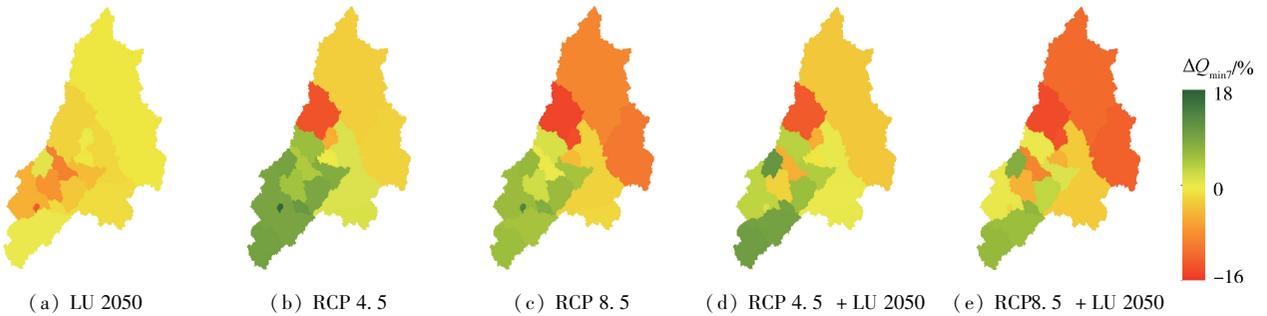


图 7 不同情景下各子流域  $Q_{\min 7}$  相对变化情况

Fig. 7 Relative changes of  $Q_{\min 7}$  in sub basins under different scenarios

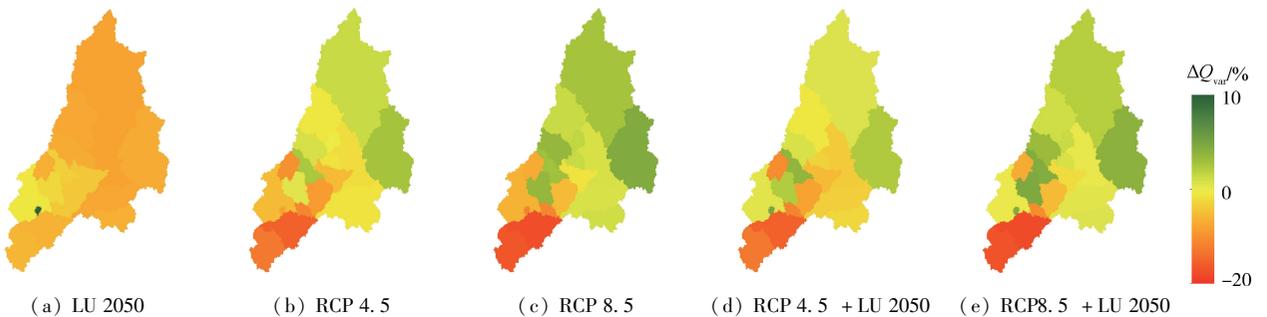


图 8 不同情景下各子流域  $Q_{\text{var}}$  相对变化情况

Fig. 8 Relative changes of  $Q_{\text{var}}$  in sub basins under different scenarios

化扩张使得梅江中上游成为韩江流域内生态流量对土地利用变化最为敏感的区域。由图 5~8 可见, 气候变化影响下, 韩江流域  $\bar{Q}$ 、 $Q_{90}$ 、 $Q_{\min 7}$  和  $Q_{\text{var}}$  在空间上呈现相似的变化特征, 具体表现为: 各生态流量指标值从西南方位的梅江上游到东北方位的汀江上游

呈现由升到降的趋势; 梅江上游和汀江上游区域各生态流量指标值相对变幅均高于其他区域。可见, 气候变化将改善梅江中上游地区的生态流量; 韩江两大支流上游区域生态流量对气候变化更为敏感。由于气候变化对韩江各区域生态流量的影响高于土

地利用变化,因而二者综合影响下,韩江生态流量呈现与气候变化影响下相似的特征。

### 3.4 讨论

由表 1 和图 3 可以发现,土地利用和气候变化虽然会导致潮安断面中低值流量减小,但是对于高值区流量则存在不同影响特征。表 3 统计了不同情景下流量高值区域 10% 经验频率流量值  $Q_{10}$  和最大连续 7 d 平均流量  $Q_{max7}$  的变化情况,可以看出土地利用和气候变化情景下,  $Q_{10}$  略有下降,  $Q_{max7}$  增幅超

表 3 不同情景下流量高值区域  $Q_{10}$  和  $Q_{max7}$  变化情况

Table 3 Changes of  $Q_{10}$  and  $Q_{max7}$  in high flow areas under different scenarios

特征值	现状值/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	不同情景下的变化率/%				
		LU2050	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5 + LU2050	RCP8.5 + LU2050
$Q_{10}$	1720	0.013	-0.016	-0.044	-0.002	-0.025
$Q_{max7}$	7350	0.035	0.228	0.241	0.272	0.287

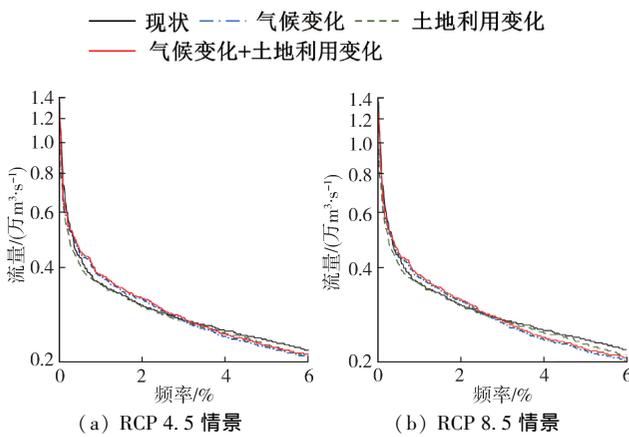


图 9 变化环境下潮安断面高值流量对数经验频率曲线

Fig. 9 Logarithmic empirical frequency curve of high value discharge in Chao'an section under changing environment

综上,未来不同情景下韩江流域径流总量减少,枯水流量下降,平水至枯水区间流量变异性减小。汛期将面临更加极端的洪水事件,来水不确定性增大,考虑到韩江流域内水库工程蓄水能力较弱,将导致汛期弃水增加,长期来看径流总量的减少和弃水的增加有可能导致流域内水库汛期蓄水量减少,从而在枯水期面临更加严峻的供水和生态补水压力,枯季生态流量保障风险进一步增大。

由于土地利用/覆被类型影响着产汇流和蒸散发等水文过程,因此流域内土地利用的空间分布也会对生态流量过程产生影响。探究土地利用变化对生态流量的影响可以指导流域土地规划管理,具有一定的现实意义。开展土地利用变化影响评估涉及多维度的对比分析,如同一种土地利用类型在流域空间上的分布位置和面积比例,以及不同土地利用类型的组合效果。本文所采用的土地利用变化情景仅基于 CA-Markov 模型的模拟预测,但关于土地利用/覆被类型对生态流量的影响

过 20%,  $Q_{max7}$  的变化幅度均高于  $Q_{10}$ , 可见,相较于  $Q_{10}$ ,  $Q_{max7}$  代表了更加极端的洪水流量过程。通过对图 3 中经验频率小于等于 6% 的部分放大(图 9)可以发现,由情景变化所引起的潮安断面流量变化发生分化的临界点约在 3% 经验频率位置,对应流量值约为  $2800 m^3/s$ 。结合图 3 相关结果,当流量经验频率大于等于 3% 时,土地利用和气候变化将导致流量减少;而当流量经验频率小于 3% 时,土地利用和气候变化将导致流量增大。

仍值得进一步分析。

## 4 结论

a. 未来韩江流域城镇用地面积将进一步扩大,城镇用地扩张最为明显的区域分布在梅江中上游,而城镇化的快速扩张导致梅江中上游生态流量的变幅高于流域内其他区域。

b. 土地利用和气候变化影响下,潮安断面枯水期流量将进一步减少,且在平偏枯流量区间枯水流量对土地利用和气候变化更加敏感。相较于 RCP 4.5 情景,RCP8.5 情景下韩江生态流量减少幅度更大,但整体高于土地利用变化带来的影响。

c. 从空间变化趋势上来讲,土地利用和气候变化影响下,韩江流域生态流量呈现从西南到东北由升到降的特征,梅江中上游地区的枯水期生态流量将有所增大,该区域河道内外竞争性用水将得到缓解;梅江和汀江两大支流上游区域生态流量对环境变化更为敏感。

d. 整体而言,土地利用和气候变化将导致未来韩江流域径流总量下降,但丰枯流量将进一步分化,极端洪水和干旱事件有所增加,长期来看径流总量的减少和水库弃水的增加有可能导致枯季生态流量保障风险进一步增大。

### 参考文献:

[1] 王浩,王建华,胡鹏. 水资源保护的新内涵:“量-质-域-流-生”协同保护和修复[J]. 水资源保护,2021,37(2): 1-9. (WANG Hao, WANG Jianhua, HU Peng. New connotation of water resources protection: “quantity-quality-domain-connectivity-biology” coordinated protection and restoration[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 1-9. (in Chinese))

- [ 2 ] BHADURI A, BOGARDI J, SIDDIQI A, et al. Achieving sustainable development goals from a water perspective [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2016, 4(21) :64.
- [ 3 ] POFF N, MATTHEWS J H. Environmental flows in the Anthropocene: past progress and future prospects [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5: 667-675.
- [ 4 ] 徐宗学, 武玮, 于松延. 生态基流研究: 进展与挑战 [J]. *水力发电学报*, 2016, 35(4) :1-11. (XU Zongxue, WU Wei, YU Songyan. Ecological baseflow: progress and challenge [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2016, 35(4) :1-11. (in Chinese))
- [ 5 ] 陈昂, 隋欣, 廖文根, 等. 我国河流生态基流理论研究回顾 [J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2016, 14(6) : 401-411. (CHEN Ang, SUI Xin, LIAO Wengen, et al. Review study on instream ecological base flow in China [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2016, 14(6) : 401-411. (in Chinese))
- [ 6 ] 金纯, 姜翠玲, 吴为. 基于水力水文学法的大渡河上游生态流量确定 [J]. *水利水电科技进展*, 2021, 41(2) :8-14. (JIN Chun, JIANG Cuiling, WU Wei. Determination of ecological flow in upstream of Daduhe River based on hydraulic and hydrological methods [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2021, 41(2) :8-14. (in Chinese))
- [ 7 ] 华祖林, 董越洋, 褚克坚. 高度人工化城市河流生态水位和生态流量计算方法 [J]. *水资源保护*, 2021, 37(1) :140-144. (HUA Zulin, DONG Yueyang, CHU Kejian. Calculation method of ecological water level and discharge in highly artificial urban river [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(1) :140-144. (in Chinese))
- [ 8 ] 李扬, 孙翀, 刘涵希. 福建省域河流生态流量监管与控制目标核定 [J]. *水资源保护*, 2020, 36(2) :92-96. (LI Yang, SUN Chong, LIU Hanxi. Supervision of river ecological flow and verification of control objectives in Fujian Province [J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(2) :92-96. (in Chinese))
- [ 9 ] RICHTER B D, BAUMGARTNER J V, BRAUN D P, et al. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network [J]. *Regulated Rivers: Research & Management*, 1998, 14(4) :329-40.
- [ 10 ] 王强, 夏瑞, 邹磊, 等. 水文变异条件下潦河生态流量计算研究 [J]. *环境科学研究*, 2020, 34(3) :1-14. (WANG Qiang, XIA Rui, ZOU Lei, et al. Calculation of ecological flow in liaohe river under the hydrological alteration conditions [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 34(3) :1-14. (in Chinese))
- [ 11 ] TORABI H A, MARTTILA H, KLØVE B. Development of a new index to assess river regime impacts after dam construction [J]. *Global and Planetary Change*, 2014, 122: 186-196.
- [ 12 ] 卢有麟, 周建中, 王浩, 等. 三峡梯级枢纽多目标生态优化调度模型及其求解方法 [J]. *水科学进展*, 2011, 22(6) : 780-788. (LU Youlin, ZHOU Jianzhong, WANG Hao, et al. Multi-objective optimization model for ecological operation in Three Gorges cascade hydropower stations and its algorithms [J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(6) :780-788. (in Chinese))
- [ 13 ] THOMPSON J R, LAIZÉ C L R, GREEN A J, et al. Climate change uncertainty in environmental flows for the Mekong River [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2014, 59(3/4) :935-954.
- [ 14 ] LAIZÉ C L R, ACREMAN M C, SCHNEIDER C, et al. Projected flow alteration and ecological risk for pan-european rivers [J]. *River Research and Applications*, 2014, 30(3) :299-314.
- [ 15 ] 陈晓宏, 钟睿达. 气候变化对澜沧江下游梯级电站发电及生态调度的影响 [J]. *水科学进展*, 2020, 31(5) :754-764. (CHEN Xiaohong, ZHONG Ruida. Hydropower generation and ecological operation under climate change: a case study of the downstream cascade of Lancang River hydropower plants [J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(5) :754-764. (in Chinese))
- [ 16 ] 郑宇, 程香菊, 王兆礼, 等. 韩江流域面源污染及与景观格局的关系 [J]. *水资源保护*, 2019, 35(5) :78-85. (ZHENG Yu, CHENG Xiangju, WANG Zhaoli, et al. Non-point source pollution in Hanjiang River Basin and its relation with landscape pattern [J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35(5) :78-85. (in Chinese))
- [ 17 ] ARNOLD J G, SRINIVASAN R, MUTTIAH R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment part 1: model development [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34(1) :73-89.
- [ 18 ] ABBASPOUR K C, YANG J, MAXIMOV I, et al. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 333(2) :413-30.
- [ 19 ] 杨国清, 刘耀林, 吴志峰. 基于 CA-Markov 模型的土地利用格局变化研究 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2007(5) :414-418. (YANG Guoqing, LIU Yaolin, WU Zhifeng. Analysis and simulation of land-use temporal and spatial pattern based on ca-markov model [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007(5) :414-418. (in Chinese))
- [ 20 ] 赵芳芳, 徐宗学. 统计降尺度方法和 Delta 方法建立黄河河源区气候情景的比较分析 [J]. *气象学报*, 2007(4) :653-662. (ZHAO Fangfang, XU Zongxue. Comparative analysis on downscaled climate scenarios for headwater catchment of yellow river using sds and delta methods [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2007(4) :653-662. (in Chinese))

(收稿日期:2020-11-19 编辑:王 芳)