J. Lake Sci.(湖泊科学), 2026, 38(1):000-000
DOI 10.18307/2026.0155
©2026 by Journal of Lake Sciences

岷沱江流域蓝绿水对气候和土地利用变化的响应*

王宇轩[1]，倪福全[1**]，邓 玉[1]，任化准[2]，吴明炎[1]，江 楠[1]，朱萌宇[1]，岳紫莹[1]，文玮[1]

（1：四川农业大学水利水电学院，雅安 625014）

（2：长江水利委员会河湖保护与建设运行安全中心，武汉 430010）

摘 要：为揭示岷沱江蓝绿水对气候和土地利用变化两类驱动因子的敏感性差异，提出管控与适应性措施，定量评估蓝绿水资源的时空演变及其对气候与土地利用变化的响应。基于 SWAT（Soil and Water Assessment Tool, SWAT）和 FLUS 模型（Future Land-Use Simulation, FLUS），结合 CMIP6（Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6）气候数据，分析 1981-2021 年岷沱江流域蓝绿水时空演变，并预测至 2100 年动态变化。研究表明：①1981—2021 年，岷沱江流域以蓝水为主，约占水资源总量的 63.2%，气候变化是蓝绿水变化的核心驱动因素，气候变化对蓝绿水变化的贡献率分别为 79.12%和 63.18%；②1990—2020 年，农业用地与草地分别减少 4.0%和 2.1%，城镇用地扩张了 138%，显著减少农业用地与草地的面积，加剧水资源空间失衡。预估未来 2040 年城镇用地再扩张 135%，将进一步压缩草地与农业用地空间，城镇用地扩张区域集中在流域东部成都平原，加剧人口密集区的水资源短缺风险；③在未来情景下，流域降水量将上升 1.43-1.80 mm/a，气温升高 0.025-0.042℃/a，绿水量将显著增加 0.35-1.02 mm/a，而蓝水量在 2050 年前下降后转为波动增长。在 4 种共享社会经济路径（Shared Socioeconomic Pathways，SSPs）下，以传统化石燃料为主的路径（SSP5-8.5）蓝绿水变化最为显著，控制城镇扩张并优先实施可持续发展路径（SSP1-2.6）可有效缓解水资源压力；④空间分布上，未来蓝水集中于流域西南部，绿水高值区向东南部转移，东部的成都平原因人口密集且受高温影响，面临水资源短缺与极端灾害风险倍增。研究结果为岷沱江流域制定适应性水资源管理策略和应对气候变化提供了科学依据。

关键词：土地利用；气候变化；蓝绿水；SWAT 模型；岷沱江流域

Response of Blue and Green Water in the Minjiang-Tuojiang River Basin to Climate and Land Use Changes

Wang Yuxuan[1], Ni Fuquan[1]*, Deng Yu[1],Ren Huazhun[2],Wu Mingyan[1], Jiang Nan[1], Zhu Mengyu[1], Yue Ziying[1], Wen Wei[1]

(1: College of Water Resources and Hydropower, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, P. R. China)

(2: Bureau of River and Lakes Protection Conservation , Operation and Safety,Changjiang Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources, Wuhan 430010,P.R.China)

Abstract: The present study has sought to quantify the spatiotemporal dynamics of blue and green water resources in the Minjiang-Tuojiang River Basin. In addition, the study has sought to disentangle the differential sensitivities of these water resources to climate and land-use changes. The study has thereby proposed context-specific management strategies and adaptive pathways for sustainable water governance. The utilization of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model and the Future Land-Use Simulation (FLUS) model, in conjunction with climate projections derived from the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6), was employed for the analysis of historical changes (1981–2021) and the projection of future dynamics of blue and green water up to the year 2100. The following key findings were identified: (1) From 1981 to 2021, the Min-Tuo River Basin was dominated by blue water, accounting for 63.2% of the total water resources. Climate change was identified as the primary driving factor for variations in blue and green water, with contribution rates of 79.12% and 63.29%, respectively. (2) Between 1990 and 2020, there was a decrease in cultivated land and grassland of 4.0% and 2.1%, respectively, while urban land expanded by 138%. This has resulted in a significant reduction in agricultural and grassland areas and has exacerbated spatial imbalances in water resources. Projections indicate that by 2040, urban land is expected to further expand by 135%, further compressing the spatial extent of grassland and cultivated land. The expansion will be centered in the Chengdu Plain, located in the eastern part of the basin, thereby exacerbating water scarcity

*2025-02-27 收稿；2025-04-29 收修改稿
四川省教育厅“农村水安全”工程研究中心项目（035Z2289）资助
**通信作者：E-mail：nfq1965@163.com

risks in densely populated areas. (3) Future climate trends indicate a precipitation increase of 1.43-1.80 mm/a and a temperature rise of 0.025-0.042℃/a. Green water will increase significantly by 0.35-1.02 mm/a, while blue water will decrease until 2050 before rebounding. In the context of the four Shared Socioeconomic Pathways (SSPs), the fossil fuel-dominated pathway (SSP5-8.5) demonstrates the most significant alterations in blue and green water. Conversely, the strategies of curbing urban expansion and prioritizing sustainable development (SSP1-2.6) have the potential to effectively alleviate water resource pressures. (4) The concentration of blue water is observed in the southwestern basin, while the shift of green water hotspots towards the southeast is evident. The Chengdu Plain is susceptible to water scarcity and extreme events, a phenomenon attributable to population density and elevated temperatures. This study provides a scientific basis for adaptive water management strategies in the Minjiang-Tuojiang River Basin in the context of climate and land-use pressures.

Keywords: Land use; climate change; blue and green water; SWAT model; Min-Tuo River Basin

全球气候持续变暖与土地利用变化正深刻改变水循环格局，极端干旱与洪涝灾害频发已成为威胁人类社会可持续发展的重要挑战[1]。作为支撑全球数十亿人口生计的核心资源，水资源的空间分布不均与供需矛盾在气候变化背景下进一步加剧[2-4]。作为水资源重要组成部分的蓝水是指地表与地下径流的液态水，是人类社会经济用水的主要来源[5]；绿水指来自降雨的蒸发蒸腾（Evapotranspiration，ET）和未饱和土壤层中的水分，不直接参与地表径流或地下水流动，对调节生态与降水功能与农业生产具有关键作用[6,7]。

降水短缺导致气象干旱，会加剧流域内蓝绿水波动，进一步带来水文干旱，而社会经济干旱通常滞后于水文干旱一段时间，导致人类在生产生活、生态等方面遭受严重缺水问题[8]。因此，研究蓝绿水对气候和土地利用变化的响应是非常必要的。Ma 等[9]评估黄河流域下游地区六种作物的蓝绿水足迹稀缺性指数，并预测 2030 年的时空分布格局；Chang 等[10]探讨湘江流域气候变化对蓝绿水资源时空分布的影响，并提出了相应的管理对策；康文东等[11]定量分析多种变化情景下蓝绿水对乌江流域气候和土地利用变化的响应，并预估未来蓝绿水的时空变化；Tan 等[12]量化气候和土地利用变化对珠江流域蓝绿水的影响权重，发现气候变化贡献率超过八成；杨肖丽等[13]利用 FLUS 模型模拟未来岷沱江流域土地利用变化；Jiang 等[14]基于 CMIP6 数据的降水与温度趋势分析岷沱江流域未来径流变化；张洋[15]研究发现历史时期岷沱江流域蓝绿水变化受气候与土地利用双重驱动。岷沱江流域作为成渝经济圈的水资源命脉，水资源安全直接关系到区域经济发展与生态平衡。随着城镇化进程加速和极端灾害事件增多，亟需开展岷沱江流域蓝绿水多模型耦合研究，揭示其在气候变化与人类活动共同作用下的演变规律，为优化水资源配置、应对复合型灾害风险提供科学依据。

为优化环成都经济区水资源管理和应对未来气候变化挑战，本研究构建多模型耦合框架，整合 SWAT 水文模型、CMIP6 多模式气候数据与 FLUS 未来土地利用模型，定量评估蓝绿水时空演变规律及其对气候与土地利用变化的响应机制[16,17]。研究重点包括：量化 1981-2021 年历史时期蓝绿水动态特征，揭示蓝绿水与气象因子和土地利用类型的关联性；基于 CMIP6 气候数据和 FLUS 土地利用数据，预测在不同 SSPs 社会经济路径下，2015-2100 年蓝绿水变化趋势，并评估不同情景下的风险空间分布；提出适应气候与土地变化的协同管理策略，为流域水资源可持续利用提供科学依据。研究成果不仅为岷沱江流域制定适应性水资源管理策略与灾害防控提供理论支撑[18]，而且通过优化蓝绿水协同配置，增强生态系统碳汇稳定性，结合低碳路径的多目标规划，为区域实现 “双碳”目标提供科学路径[19,20]。研究蓝绿水对气候和土地利用变化的响应机制，并预估未来水资源变化趋势，对于制定精准科学的水资源管理策略具有重要意义。

1 研究区概况

研究区位于 99°~106°E、28°~34°N，主要包括岷江、沱江、青衣江和大渡河 4 个子流域。岷沱江流域地处亚热带季风气候区，整体气候温暖湿润。流域西部为海拔 4000m 以上的邛崃山脉，东部为岷江、沱江及其支流冲积而形成的成都平原。成都平原是该区域重要的工农业生产基地和人口聚居区，地势总体由北向南递减。研究区面积约为 $15.7\times10^4 km^2$，年均水资源总量 $1050\times10^8 m^3$，流域人口约 5125.4 万人，岷沱江流域地表水环境质量良好[21, 22]。岷沱江流域地势、行政区域划分、气象站点等分布情况见图 1。

2 数据处理与方法

2.1 模型与数据

2.1.1 SWAT 模型

采用 SWAT 定量评估岷沱江流域蓝绿水资源的时空演变及其对气候与土地利用变化的响应。SWAT 模型基于物理机制模拟流域内的水文循环、污染物迁移及土地利用管理措施的影响，适用于大尺度流域的水质、水量和泥沙的评估与模拟。构建 SWAT 模型需整合多源数据，包括下垫面数据（Underlying surface data）、气象数据（Weather data）、径流数据（Runoff data）和气候变化数据（Climate change data）4 大类，见表 1。

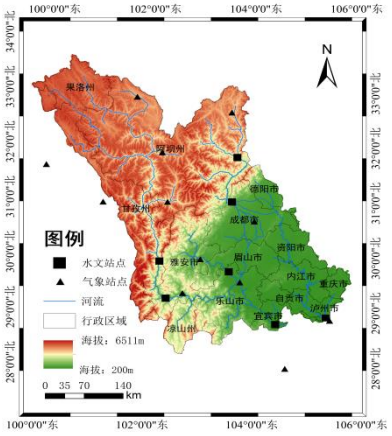


图 1　岷沱江流域及水文、气象站点概况

Fig.1 Overview of the Minjiang-Tuojiang River Basin, hydrological and meteorological stations

表 1　SWAT 模型数据

Tab.1 Data for the SWAT model

数据种类	数据名称	数据详情	数据来源
下垫面数据	数字高程模型数据（Digital Elevation Models，DEM）	2020 年，30 m 分辨率	CGIAR-CSI SRTM 数据库
	土壤数据（Soil data）	1:100 万，1 km 分辨率	黑河数据中心
	土地利用类型（Land Use data）	1990、2000、2010、2015、2020 年 5 期，30 m 分辨率	黑河数据中心
气象数据	降水、气温、太阳辐射、相对湿度和风速数据	1979—2021 年逐日气象数据	国家气象科学数据中心
流数据	实测月径流数据	1982—2021 逐月径流数据	中华人民共和国水文年鉴
气候变化数据	CMIP6 数据	1978-2100 年历史和预估逐日降水和气温数据	CMIP6 全球气候模式

2.1.2　CMIP6 模式与路径

不同气候模式对岷沱江流域的模拟能力存在显著差异。筛选出历史时期的气温和降水模拟值与观测数据偏差较小、数据完整、情景覆盖全面以及时空相关性较强的模式，再选择分辨率较高的 7 个全球气候模式(Global Climate Models，GCMs）（表 2）作为岷沱江流域未来气象数据，并采用 Delta 方法[23]进行偏差订正以达到精度要求。为减少单一模式间不确定性和有效降低系统误差，采用多模式集合平均(Multi-Model Ensemble Mean, MME)的方法进行模拟，MME 模拟性能通常优于大多数单一模式的模拟性能[24-26]。气候变化趋势也受到社会经济发展程度的影响，4 种不同的共享社会经济路径见表 3[27]。

表 2　CMIP6 模式相关信息

Tab. 2 Information related to the CMIP 6 models

编号	模式名称（缩写）	国家	空间分辨率
1	ACCESS-ESM1-5（ACC）	Australia	1.2°× 1.8°
2	BCC-CSM2-MR（BCC）	China	2.8°× 2.8°
3	CanESM5（CAN）	Canadian	2.8°× 2.8°
4	CMCC-ESM2（CMCC）	Italy	3.2°× 1.6°
5	IPSL-CM6A-LR（IPSL）	France	1.3°× 2.5°
6	MRI-ESM2-0（MRI）	Japan	1.1°× 1.1°
7	MIROC6（MIR）	Japan	1.4°× 1.4°

表 3　共享社会经济路径简介

Tab.3 Overview of SSPs

编号	路径名称	共享社会经济路径	典型浓度路径（W/m² ）
1	SSP 1-2.6	低强迫，可持续发展路径	2.6
2	SSP 2-4.5	中低强迫，中间路径	4.5
3	SSP 3-7.0	中高等强迫，区域竞争路径	7.0
4	SSP 5-8.5	高强迫，传统化石燃料为主路径	8.5

2.1.3　FLUS 模型与驱动数据

土地利用类型的变化受自然条件和人类活动的影响[27]。采用 FLUS 模型预估岷沱江流域 2040 年的土地利用变化。FLUS 模型是一种基于元胞自动机（Cellular Automata, CA）和人工神经网络（Artificial Neural Network, ANN）的混合模型，通过耦合自然与社会经济驱动因子模拟多情景下的土地利用动态变化，其核心优势在于能够处理非线性关系和高维数据，并引入自适应惯性权重机制以提高模拟精度。数据包括降水、气温、DEM、水域、GDP、人口密度以及道路等（表 4）。

表 4 FLUS 模型驱动数据

Tab.4　Data driven by the FLUS model

驱动因子类型	数据说明	数据来源
自然因子	坡向、坡度	ArcGIS 计算
	DEM、降水、气温、水域、植被类型、净初级生产力、归一化植被指数	中国科学院资源科学数据中心 (https://www.resdc.cn/Default.aspx)
人类活动	GDP、人口密度、公路	OpenStreetMap (https://download.geofabrik.de/)

2.2 研究方法

2.2.1　SWAT 模型的率定与验证

SWAT 模型模拟大流域不同的水文物理化学过程，由结果文件可以计算出蓝绿水资源量[29]。SWAT 模型基于 DEM 与河网将岷沱江流域划分为 89 个子流域，再依据相同的土壤和土地利用类型细分为 1929 个水文影响单元（Hydrologic Response Units，HRUs）。为验证模型拟合度，采用 SWAT-CUP 的 SUFI-2 算法进行 2000 次率定，迭代 6 轮，采用决定系数（Coefficient of determination，R^2）、纳什系数（Nash-Sutcliffe Coefficient, NSE）和百分比偏差（PBIAS）3 个指标来评估[30]。

2.2.2　蓝绿水量化

蓝水资源由地表产水量和地下水组成[31]。绿水资源由实际蒸散发和土壤水含量组成[32]。计算公式如下：

$$BW = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left[WYLD + \left(GW_RCHG - GW_Q\right)\right] \times S_i}{\sum_{i=1}^{n} S_i} \tag{1}$$

$$GW = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(ET + SW\right) \times S_i}{\sum_{i=1}^{n} S_i} \tag{2}$$

式中，*BW* 是单位面积蓝水资源（mm），*WYLD* 是地表产水量（mm），*GW_RCHG* 是地下含水层补给量（mm），*GW_Q* 汇入河流与地下水量差值（mm），*GW* 是单位面积绿水资源（mm），ET 是实际蒸散发（mm），*SW* 是土壤水含量（mm），*i* 是第 *i* 个 HRU，S_i 是不同土地利用在 HRU 中的面积（km^2）。

2.2.3　相关性分析

采用皮尔逊相关系数（Pearson correlation coefficient，ρ）评估蓝绿水与气象要素的相关性[33]，计算公式为：

$$\rho=\frac{\sum XY-\frac{\sum X\sum Y}{N}}{\sqrt{\left(X^2-\frac{\left(\sum X\right)^2}{N}\right)\left(\sum Y^2-\frac{\left(\sum Y\right)^2}{N}\right)}} \tag{3}$$

式中，ρ 为相关系数；X、Y 为衡量相关性的水文气象要素变量；N 为 X、Y 所包含的变量个数。

2.2.4 贡献率分析

为探究气候与土地利用变化对蓝绿水变化的贡献率，选取 1990 年和 2020 年 2 期土地利用数据以及 1981-2000 年和 2001-2021 年 2 期气象数据组合成 S1~S4 共 4 个情景，见表 5。

表 5 情景设置

Tab.5 Scenarios setup framework

情景	土地利用类型年份	气象数据年份	情景内涵
S1	1990	1981—2000	初始情景（1990 年土地利用与 1981-2000 年气象数据）
S2	1990	2001—2021	初始情景的基础上仅受气候变化影响的情景
S3	2020	1981—2000	初始情景的基础上仅受土地利用变化影响的情景
S4	2020	2001—2021	初始情景的基础上同时受气候和土地利用变化影响的情景

量化岷沱江流域气候、土地利用和其他因素变化对蓝绿水的贡献率，计算公式分别为：

$$\varphi_C=\left|\frac{W_{S2}-W_{S1}}{W_{S4}-W_{S1}}\right|\times100\% \tag{4}$$

$$\varphi_L=\left|\frac{W_{S3}-W_{S1}}{W_{S4}-W_{S1}}\right|\times100\% \tag{5}$$

$$\varphi_O=100\%-\varphi_C-\varphi_L \tag{6}$$

式中，φ_C、φ_L 和φ_O 分别表示气候、土地利用和其他因素（如植被覆盖与生态系统变化、水资源开发利用措施、土壤特性与过程、社会经济与政策因素等）变化对蓝绿水资源变化量的贡献率（%）；W_{S1}~ W_{S4} 为对应情景下的蓝绿水资源量（m^3）。

3 模型评价与分析

3.1SWAT 模型评价

选用岷沱江流域 7 个水文监测站点的月径流数据进行率定和验证，所有站点验证期和率定期结果均满足 $R^2>0.6$，NSE>0.5，|PBIAS|<25%，模型率定和验证结果理想（表 6）。7 个水文监测站中，高场站和泸州站作为研究区的 2 个出口水文站，高场站的月径流模拟值与实测值差异较小（图 2（a））。选取全流域遥感观测数据作为实际蒸散发，对比模拟蒸散发值，模拟结果与真实值拟合效果较理想（图 2（b）），且参数满足模型模拟适用性标准。证实 SWAT 模型在岷沱江流域气候与土地利用变化拟合度高[34]。

表 6 模型率定和验证结果

Tab.6 Model calibration and validation results

水文站点	率定				验证			
	时期	R^2	NSE	PBIAS（%）	时期	R^2	NSE	PBIAS（%）
沙坝	1982-1984	0.9	0.82	-23.9	1985-1987	0.85	0.72	-20.3
夹江	1982-1997	0.8	0.72	21	1998-2013	0.77	0.66	24.7
泸定	1996-2007	0.82	0.77	-18.8	2008-2019	0.71	0.71	0.9
石棉	1983-1985	0.87	0.77	20.4	1986-1987	0.86	0.8	18.4
泸州	2011-2012	0.78	0.77	-0.9	2013-2014	0.7	0.65	10.9
高场	1982-2001	0.8	0.77	3.8	2002-2021	0.69	0.57	-21.6
紫坪铺	2004-2011	0.71	0.65	-4.9	2012-2019	0.79	0.65	-10.2

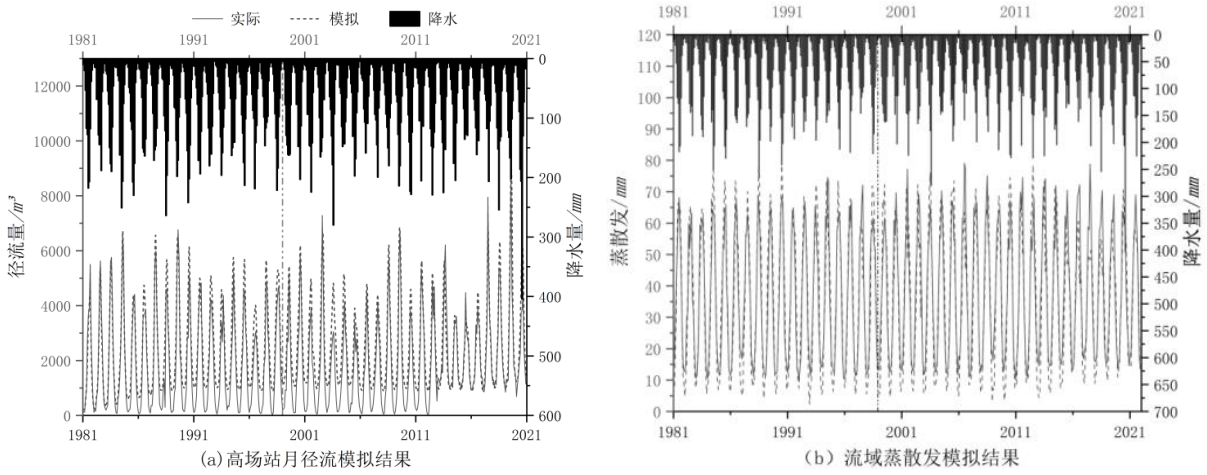


图 2　月径流（a）与蒸散发（b）模拟结果

Fig.2 Simulation results of monthly runoff (a) and evapotranspiration (b)

3.2 岷沱江流域蓝绿水时空分布

由图 3（a）可知，1981—2021 年岷沱江流域多年平均降水量约为 891mm，最大降水量出现在 2019 年为 1215mm，最小降水量出现在 2015 年为 719mm，蓝水量和绿水量年均值分别为 571 mm 与 333 mm，岷沱江水资源以蓝水为主，约占水资源总量的 63.2%。降水量、绿水量和年均气温分别以 0.04mm/a、1.36mm/a 和 0.0017℃/a 缓慢增加，蓝水变化呈现-1.57mm/a 趋势波动下降。

图 3（b）揭示了 1981—2021 年岷沱江流域降水量、蓝水、绿水和气温的月变化特征，流域水资源集中在 5-9 月，5-9 月降水量、蓝水量和绿水量分别占全年水资源总量的 78.8%、70.5%和 64.4%，其中夏季产生全年 55.2%的降水量，49.4%的蓝水量，41.6%的绿水量。

图 4 揭示了岷沱江流域降水量、蓝绿水资源、年均气温、最高气温和最低气温的空间分布特征。由图 4 可见，岷沱江流域绿水量、年均气温、最高气温、最低气温在从上游到下游呈上升趋势，东南部高于西北部；西南部降水量在 1300-1450mm 之间，降水量与蓝水量呈现岷沱江流域西南部高于东北部。

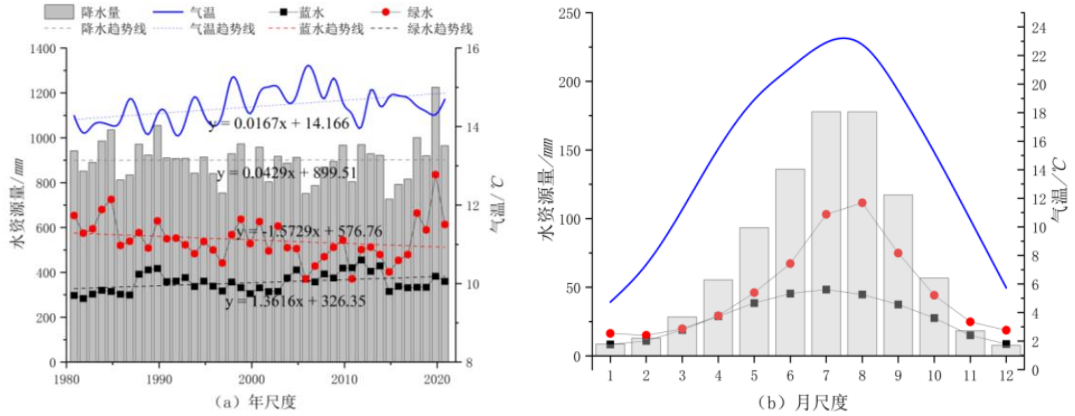


图 3　1981-2021 年气温、降水量、蓝水和绿水年际变化（a）与月变化（b）

Fig.3 Annual(a) and monthly(b) variations in temperature, precipitation, blue and green water from 1981 to 2021

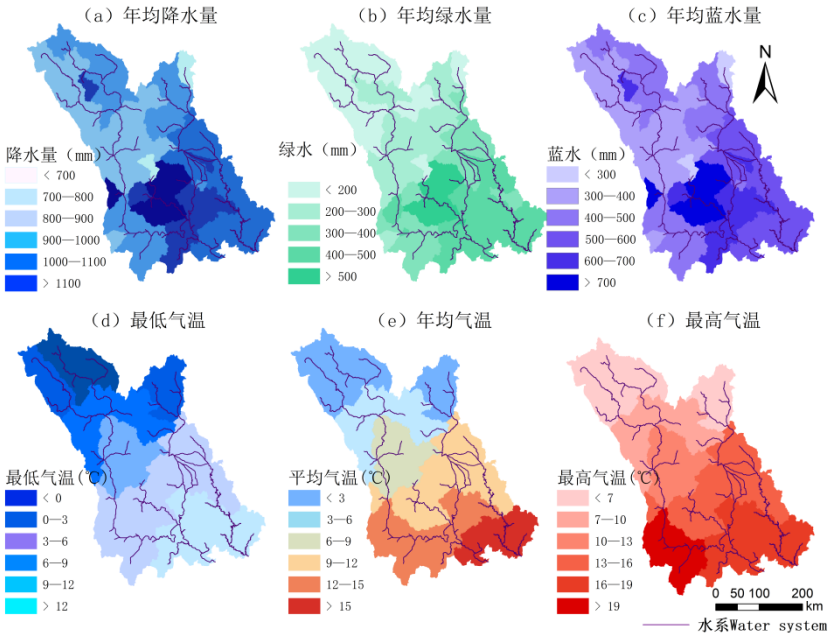


图 4 1981—2021 年年均蓝绿水与气象因子空间分布特征

Fig.4 Spatial distribution characteristics of annual average blue and green water and climate factors from 1981 to 2021

3.3 1990—2020 年土地利用变化分析

采用 1990 年、2000 年、2010 年、2020 年 4 期土地利用数据（图 5（a））。土地利用类型分六类：农业用地（Agricultural Land，AL）、林地（Forest Land,FL）、草地（Grass Land，GL）、水域（Water Body，WB）、城镇用地（Urban Land，UL）和未利用土地（Unused Land，UNL）（图 5（b））。1990—2020 年，岷沱江全流域约 4.1%的土地利用类型发生变化，农业用地与草地规模在 30 年间逐步缩减 4.0%和 2.1%。城镇用地在 1990 年基础上面积扩张了 138%，占所有扩张用地的 75.3%，城镇用地扩张主要发生在岷沱江流域东部，主要表现为农业用地和林地转为城镇用地。因为岷沱江流域东部成都平原区分布大量的城市和人口，经济的高速发展等原因促使城镇用地面积得到扩张。

3.4 蓝绿水对气象因子和土地利用变化的响应

如图 6 相关性热力图所示，蓝水量与降水量、径流和地下水变化呈正相关，结果满足流域内实际产流汇流来源大气降水。绿水流与最高气温、平均气温、最低气温呈强正相关，年际和年内间变化的绿水量与绿水流呈现强正相关，但与绿水储呈现的相关性较弱。流域内温度升高，会加大蒸散发，进一步影响绿水流，从而增加绿水总量。

3.5 气候和土地利用变化对蓝绿水变化的贡献率

1981-2021 年不同情景下气候、土地利用和其他因素变化对蓝绿水变化的相对贡献率见表 7。气候变化对蓝水和绿水变化的贡献率分别为 79.12%和 63.18%，土地利用变化对蓝绿水变化的贡献率分别为 14.12%和 32.96%，气候变化对蓝水和绿水变化贡献率均超过 60%，气候变化对岷沱江流域蓝水变化起主导作用。

表 7　不同情景下的蓝绿水量及各影响因子的相对贡献率

Tab.7 Relative contribution rates of blue and green water quantities and respective influencing factors under different scenarios

类型	不同情景下水量/（mm • a^{-1}）				相对贡献率/%		
	S1	S2	S3	S4	气候变化	土地利用变化	其他因素
蓝水	543.74	580.23	550.25	589.86	79.12	14.12	6.76
绿水	323.40	340.74	332.43	350.80	63.18	32.96	3.86

3.6 未来气候和未来土地利用预估拟合度评价

3.6.1　CMIP6 气候模式拟合度评价

为降低 CMIP6 数据偏差，选用 Delta 方法进行降尺度和偏差修正[23]。选择 CMIP6 数据完整、拟合度高、精度高的 7 种全球气候模式[35]和多模式集合平均模式模拟岷沱江流域降水和平均气温，得出拟合程度泰勒统计图（图 7）。MIROC6 在模拟降水方面更为突出，ACCESS-ESM1-5 模拟平均气温表现最好。而多模式集合平均模式（MME）在综合模拟降水量和平均气温整体效果上优于 7 种单一模型，故本研究区选择 MME 作为对岷沱江流域的气象数据驱动已构建好的 SWAT 模型[36]。

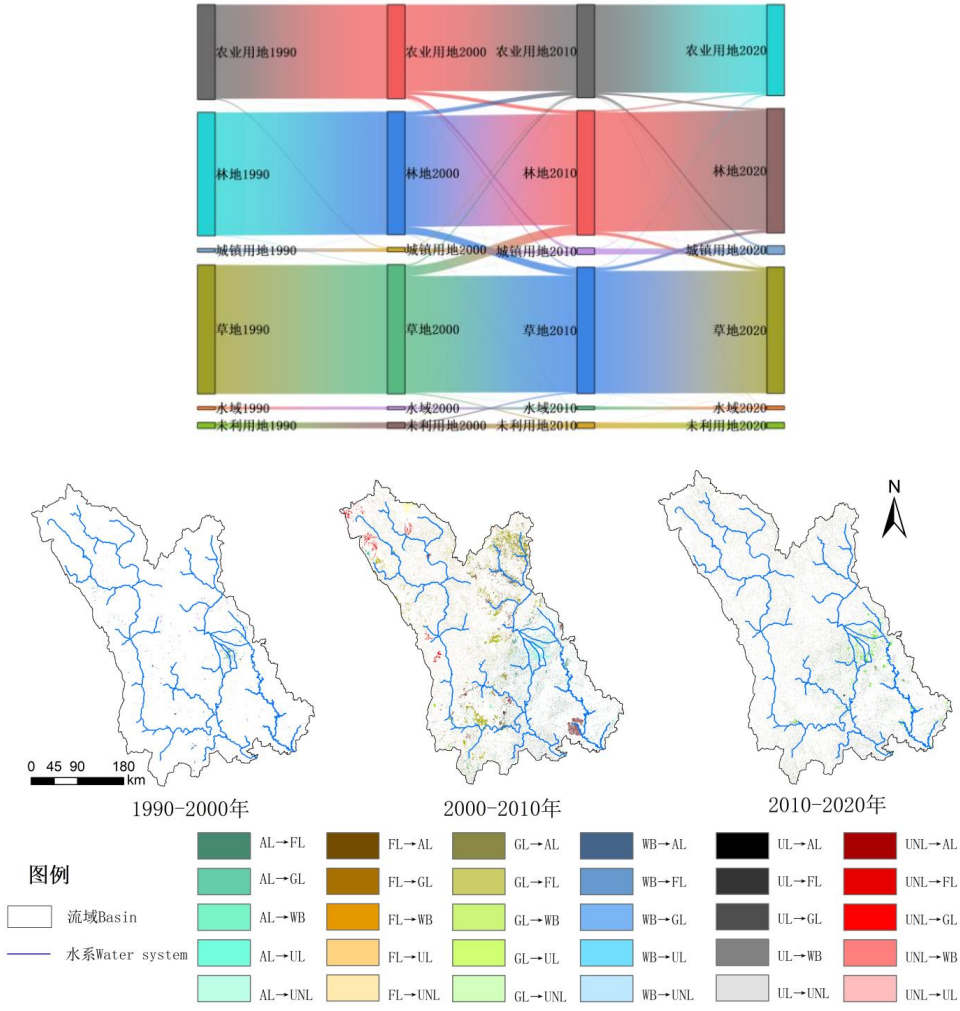


图 5　1990—2020 年土地利用随时间（a）和空间的变化（b）

Fig.5 Temporal (a) and spatial (b) changes of land use from 1990 to 2020

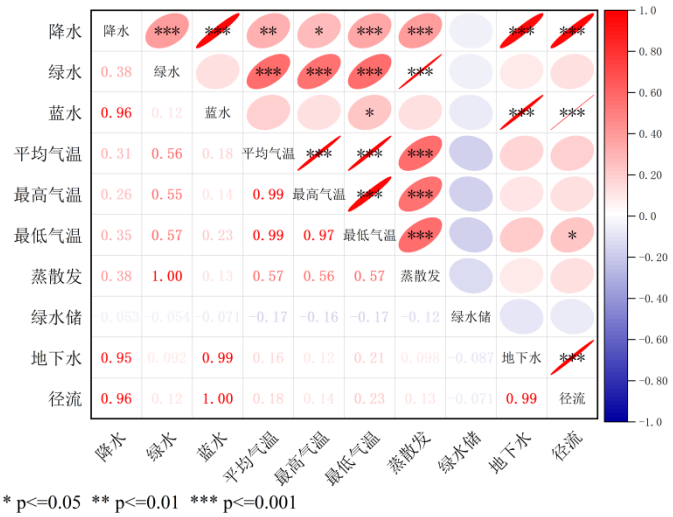


图 6 蓝绿水与气象因子相关性热力图

Fig. 6 Correlation heatmap of blue and green water and meteorological factors

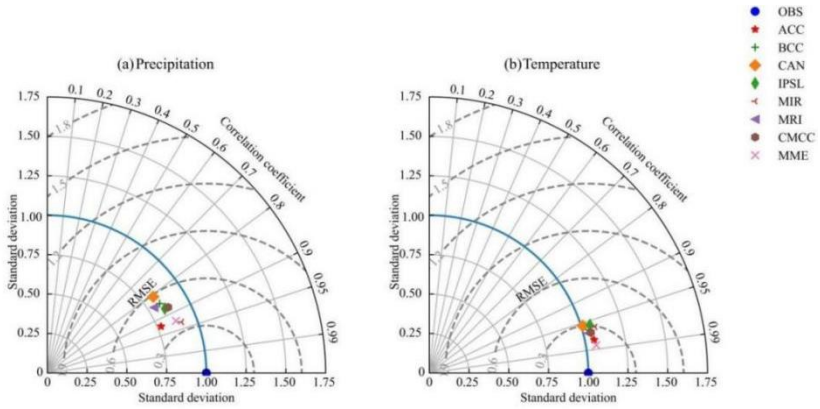


图 7 CMIP6 多模式降水与气温模拟性能评估

Fig. 7 Assessment of precipitation and temperature simulation performance of CMIP6 multi-models

3.6.2 未来土地利用预估拟合度评价

以岷沱江流域 2000 年土地利用为基准，添加自然生态和社会经济等为相关驱动因子，利用 FLUS 模型预估岷沱江流域 2020 年土地利用。当 Kappa 系数大于 0.75 时，表示模拟精度较高，岷沱江流域 2020 年土地利用模拟结果与实测值的 Kappa 系数达到 0.914，故 FLUS 模型在岷沱江流域具有较好的适用性。如图 8 所示，以 2000 和 2020 年两期土地利用进一步模拟得到预估的 2040 年的土地利用。

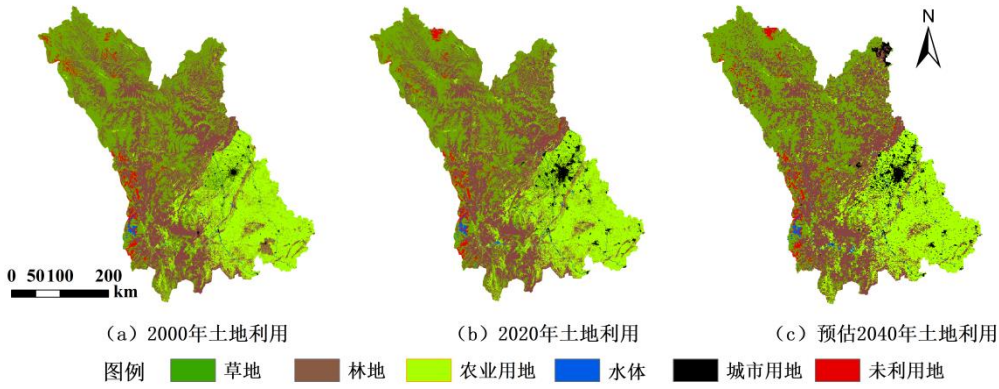


图 8 2000–2040 年土地利用时空演变

Fig.8 Spatiotemporal evolution of land use from 2000 to 2040

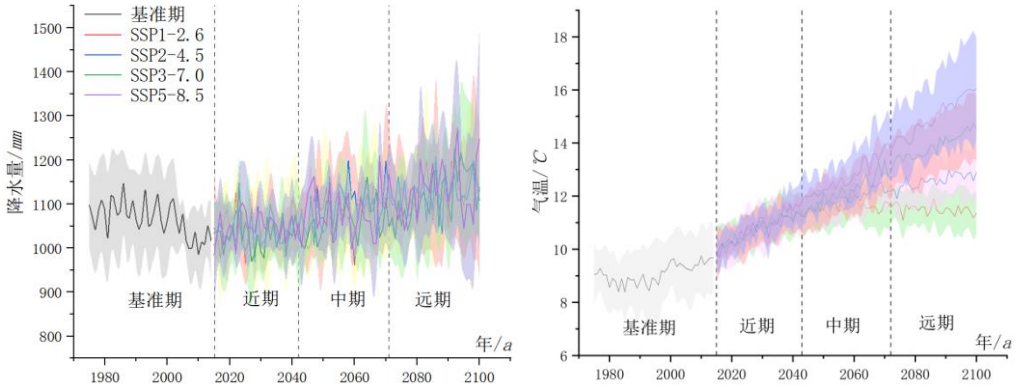
2020 年与预估的 2040 年土地利用相比，城镇用地面积继续扩张 135%，在各类型土地利用类型中增加幅度最大，其次为水体和林地面积分别增加了 29.2%和 1.2%。预估岷沱江流域 2040 年草地减少 4.7%，而未利用地和农业用地面积分别减少了 4.4%和 2.1%。岷沱江流域东部成都平原区的城镇用地面积扩张最为显著，东部地区农业用地受政策保护促使减少速度放缓。

3.7 预估未来岷沱江流域蓝绿水时空分布

3.7.1 未来情景下岷沱江流域蓝绿水时间变化

将 1979-1980 年划分为预热期、1981-2014 年为基准期、 2015－2042 年为近期、2043－2071 年为中期、2072－2100 年为远期。以 FLUS 模型预估的 2040 年土地利用数据和 CMIP6 的 MME 模式的气象数据驱动 SWAT 模型，得到 2015—2100 年岷沱江流域降水量（图 9（a））、气温（图 9（b））和蓝绿水资源量。由图 9（a）可见，在四种 SSPs 下，岷沱江流域降水量呈现上升趋势且波动偏差振幅加剧。其中 SSP5-8.5 降雨量增加最多且偏差振幅最大，SSP1-2.6 降水量增加最少且偏差振幅最小；预估到 2100 年 SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 平均降水量年均增加为 1.43mm/a、1.45mm/a、1.65mm/a 和 1.80mm/a。

由图 9（b）可见，预估岷沱江流域所有 SSPs 下 2015—2100 年平均气温均比基准期高出 2.25—3.7℃，SSP1-2.6 年平均气温增长最小，到 2050 年趋于稳定在 11.3℃附近；SSP5-8.5 到本世纪末期，相比于历史期升高温度达 6.7℃，年均气温达到 16.0℃，预估到 2100 年 SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 平均气温增加为 0.025℃/a、0.031℃/a、0.037℃/a 和 0.042℃/a。



（a）2015—2100 年年降水量　　（b）2015—2100 年年平均气温

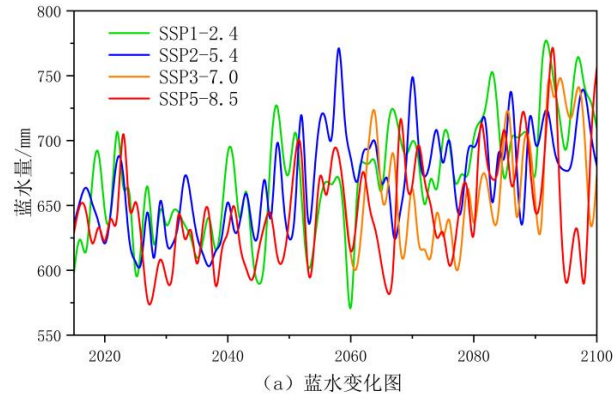
图 9　不同路径下 2015–2100 年降水量与气温趋势分析（阴影区域表示标准差范围）

Fig.9　Trends analysis of precipitation and temperature from 2015 to 2100 under different pathways (the shaded area represents the standard deviation range)

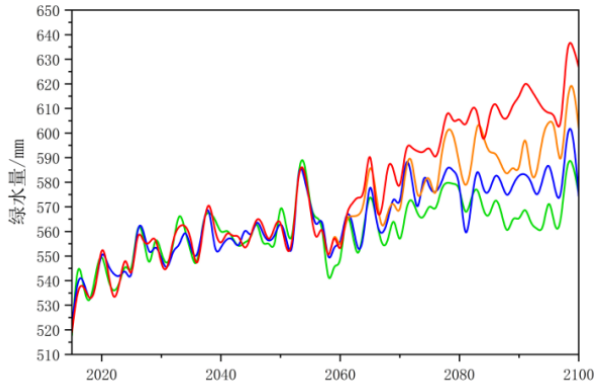
研究区年尺度下蓝水变化量、绿水变化量分别见图 10（a）与图 10（b）。蓝水量在 2025-2050 年 SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 平均减少 1.48mm/a、1.72mm/a、2.42mm/a 和 2.44mm/a，蓝水从本世纪中叶开始由下降趋势转为上升趋势。绿水量增长趋势显著，其中 SSP5-8.5 保持领先趋势明显。所有 SSPs 在前期和中期的上涨趋势相似，到 2070 年前后开始分化，SSP5-8.5 上涨最为显著超过 620mm，SSP1-2.6 绿水上涨至 571mm 趋于稳定。计算 2015-2100 年 SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 平均绿水量上升 0.35mm/a、0.53mm/a、0.74mm/a 和 1.02mm/a。

3.7.2 未来情景下岷沱江流域蓝绿水空间分布

岷沱江流域未来情景不同路径下的蓝绿水空间分布见图 11。各路径下蓝绿水的空间分布整体上与历史时期基本保持一致，岷沱江流域水资源分布仍存在显著差别，西南部蓝水分布多，东南部绿水分布高于其他地区。绿水在各个子流域都呈现从上游到下游逐渐增加的趋势，是由于下游纬度低气温高，导致蒸散发加快。流域东部成都平原区，分布大量的农业用地与城镇用地，导致蓝水资源消耗量大，蓝水资源相对匮乏。同时人类活动影响土地利用，下垫面植被绿化程度会影响流域生态水文，使得岷沱江流域绿水存在较大差异[37]。



（a）蓝水变化图



（b）绿水变化图

图 10　2015–2100 年多情景蓝绿水动态预测

Fig.10　Dynamic pathways of blue and green water from 2015 to 2100 under multiple scenarios

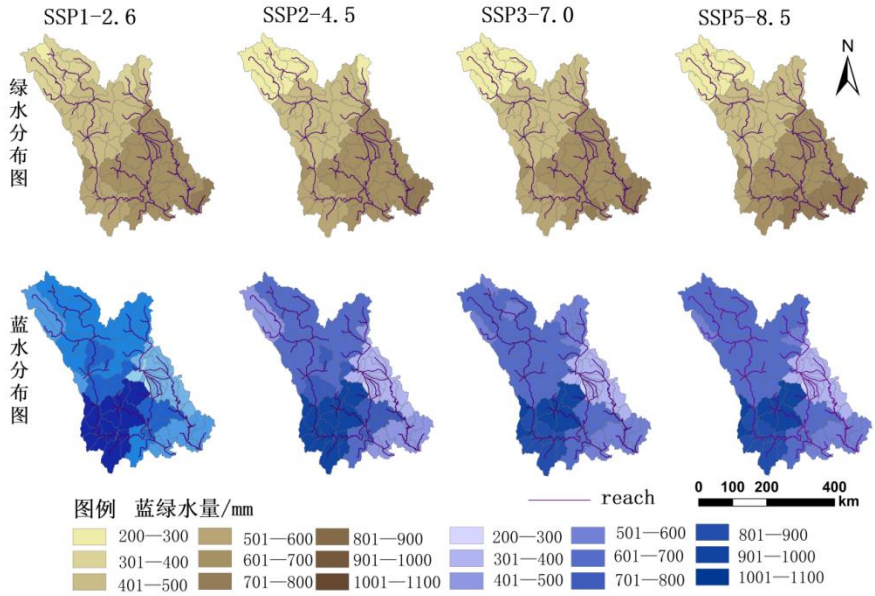


图 11　4 种 SSP 路径下蓝绿水空间分布

Fig. 11 Spatial distribution of blue and green water under four scenarios of SSPs

4 讨论

4.1 蓝绿水对历史时期气候和土地利用变化的响应

1981-2021 年间，气候变化对蓝水和绿水变化的贡献率分别达 79.12%和 63.18%，是驱动水资源时空分异的核心因素。岷沱江流域水资源以蓝水为主，约占水资源总量的 63.2%，而蓝水主要源自降水，蓝水变化与降水变化趋势保持高度相关。蓝绿水呈现显著的季节性与空间异质性，岷沱江流域夏季集中全年 55.2%

的降水量、49.4%的蓝水量和 41.6%的绿水量，夏季降水集中，气温大幅升高，蒸散发速率加快，蓝绿水资源于 7-8 月达到峰值。由于岷沱江流域南部纬度低且气温高受季风气候影响大，所以南部蓝绿水资源丰沛。岷沱江流域西南部位于四川盆地与青藏高原过渡地带，易形成地形雨，使得流域西南部降水量和蓝水量高于东北部[38]。空间上岷沱江流域呈现西南部蓝水资源充沛，东南部绿水资源丰富的特点。

1990-2020 年间，岷沱江流域 4.1%土地利用类型发生变化，农业用地和草地减少 4%和 2.1%，蓄水调水能力较弱的城镇面积扩大 138%，重构了流域下垫面性质。农业用地转为城镇用地主要发生在流域东部成都平原区，城镇用地的扩张直接降低了地表渗透率，增加了生产生活用水，加剧了流域蓝绿水时空演变。

4.2 未来情景下蓝绿水对气候和土地利用变化的响应

本研究揭示了未来岷沱江流域蓝绿水资源分布不均的现象将继续加剧。与基准期相比，流域中部所有 4 个 SSPs 下的绿水均显著增加，降水量增加且波动加剧，年均气温上升 0.025-0.041℃/a，蓝水资源在 2025-2050 年呈现下降趋势，2050 年后由下降趋势变为增加趋势。预估 2040 年岷沱江流域，草地减少 4.7%、城镇用地扩张 135%，东部成都平原扩张最为显著，由于东部农业用地受政策保护促使农业用地下降速度放缓。

不同 SSP 路径通过气候和土地利用协同作用塑造蓝绿水格局。在 SSP1-2.6 绿色环保可持续发展路径下，气候变化较为温和，相较于基准期气温上升 1.32℃，年均气温趋近于 11.3℃；植被水分利用效率与蒸散发增量达到平衡，绿水量年均增长 0.31mm/a，增加率低于其他模式 0.6-2.4%；降水量整体呈现增加趋势；本世纪中叶开始蓝水量实现由下降转为增涨趋势，能够有效缓解蓝水资源不足。在 SSP5-8.5 高排放情景下，蓝水量以年均 2.44mm/a 下降，岷沱江流域年均气温升高至 16.02℃，高温加速土壤水分蒸发，绿水量以年均 1.02mm/a 增长，而夏季降水减少会导致频繁发生极端的干旱事件[39]。

4.3 政策启示与适应性管理

岷沱江流域作为长江上游关键子流域，其蓝绿水演变规律与管理策略对整个长江经济带水资源安全具有重要意义[40]。与长江流域典型支流（如嘉陵江、乌江、长江源等）的研究对比发现[41-44]，岷沱江流域在气候和土地利用变化响应方面既存在共性特征，也展现出显著的时空异质性。

岷沱江流域的水资源管理需结合不同社会经济路径下的气候变化特征和不同水资源空间分布特征，采取差异化措施以应对未来挑战。相比 SSP5-8.5 高碳排放路径，SSP1-2.6 低强迫可持续发展路径下气温与绿水资源增幅最小，降水波动最低，蓝水量于 2050 年后转为稳定增长，可持续发展路径是缓解水资源危机的最优选择。同时，流域东部的成都平原是人口与经济核心区，水资源短缺问题尤为突出。实施跨流域调水工程（如引大济岷工程），将西南部丰沛的蓝水资源调配至需求迫切的平原地带，可显著提升供水韧性，并结合海绵城市建设，增强城市对雨水的蓄滞能力，缓解极端降水与干旱的双重压力。西南山区作为流域主要水源涵养区，需重点防范降水集中引发的极端灾害。

4.4 不确定性和局限性分析

虽聚焦于气候和土地利用变化的驱动机制的研究，但流域内高强度的地下水开采和农业灌溉、工业用水和城乡生活供水取水行为，对水循环的直接干预作用可能未被充分揭示。

模型预估的数据来源于多个渠道，其质量和分辨率对研究结果有直接影响。研究使用的不同 SSPs 路径和情景是基于一系列假设，但缺乏对于未来社会经济发展、技术进步和政策变化等的考虑[45]。使用自然发展的 2040 年土地利用数据作为未来的土地利用数据，岷沱江流域内部存在显著的地理和气候差异，这些差异可能导无法完全捕捉到这些局部差异。

5 结　论

基于 SWAT 模型，探究了岷沱江流域历史时期蓝绿水资源对气候与土地利用变化的响应，并结合 CMIP6 模式 MME 气象数据以及 FLUS 模型预测的未来土地利用数据，预估未来岷沱江流域至 2100 年蓝绿水资源的时空分布特征。主要研究结论如下：

1）1981—2021 年，气候变化主导蓝绿水变化，气候变化对蓝水和绿水变化的贡献率分别为 79.12%和 63.18%，远超土地利用变化的影响。岷沱江流域降水量、绿水量和年均气温均呈现增加趋势，蓝水呈现下

降趋势。岷沱江流域以蓝水为主，约占水资源总量的 63.2%。夏季产生流域全年 55.2%的降水量，49.4%的蓝水量，41.6%的绿水量。

2）1990—2020 年，农业用地与草地分别减少 4.0%和 2.1%，城镇用地扩张了 138%，占所有扩张用地的 75.3%，农业用地与草地面积显著减少，加剧了水资源空间失衡。预估未来 2040 年草地、未利用地和农业用地面积分别减少 4.7%、4.4%和 2.1%，城镇用地预计再扩张 135%，城镇用地扩张主要发生在岷沱江流域东部成都平原，将进一步压缩草地与农业用地空间，加剧成都平原等人口密集区的水资源短缺风险。

3）采用 CMIP6 多模式集合平均（MME）数据预估至 2100 年，气候变化呈现降水增加，气温升高的趋势，未来降水年均增加 1.43-1.80 mm/a，气温上升 0.025-0.042℃/a。蓝绿水动态分异显著，蓝水量在 2025-2050 年呈下降趋势，2050 年后转为波动增长，绿水量则保持年均 0.35-1.02 mm/a 增幅。SSP1-2.6 情景下，绿水量与气温增幅最小，蓝水量与降水波动最低，可持续发展路径通过控制城镇无序扩张、平衡生态与农业用水，是缓解水资源危机的最优选择。

4）未来岷沱江流域空间异质性凸显，蓝水集中于西南山地且降水量高于 1300mm，绿水高值区东移至东南部且年均气温高于 12.5℃。成都平原作为人口与经济核心区，蓝水稀缺，叠加高温热浪频发，需通过跨流域调水、海绵城市建设及农业节水技术提升供水韧性。同时，西南山区需加强山洪预警与生态修复，以应对降水集中期的极端灾害。

6 参考文献

[1] Liang MC, Qin YY, Fan X *et al.* Interpretation and Countermeasures of the Main Conclusions of the IPCC Sixth Assessment Report Working Group III. *J Environmental Protection*, 2022, 50(13):72-76.DOI:10.14026/j.cnki.0253-9705.2022.13.017.[梁媚聪, 秦圆圆, 樊星等. IPCC 第六次评估报告第三工作组报告主要结论解读及对策建议. 环境保护, 2022, 50(13): 72-76.]

[2] Shi CF, Yu Y, Wu FP *et al*. Virtual Water Flow and Water Resource Shortage Risk Transfer in the Yellow River Basin from the Perspective of Near-Far Coupling. *Journal of Natural Resources*, 2024, 39(01): 228-244.[石常峰, 俞越, 吴凤平等. 近远程耦合视角下黄河流域产业虚拟水流动与水资源短缺风险传递.自然资源学报, 2024, 39(01): 228-244.]

[3] Editorial Department. China's Population Status and Trends. *Chief Financial Officer of China*, 2021, (05): 22-25.[本刊编辑部. 中国的人口现状和走势. 中国总会计师, 2021, (05): 22-25.]

[4] Zhang Q, Yao YB, Li YH *et al*. Causes and Changes of Drought in China: *Research Progress and Prospects*. *Journal of Meteorological Research*, 2020, 34(3): 460-481.DOI:10.1007/s13351-020-9829-8.

[5] FALKENMARK M, ROCKSTRöM J. Building Water Resilience in the Face of Global Change: From a Blue-Only to a Green-Blue Water Approach to Land-Water Management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2010, 136(6): 606-610.DOI:10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000118.

[6] LIANG J, LIU Q, ZHANG H *et al*. Interactive effects of climate variability and human activities on blue and green water scarcity in rapidly developing watershed. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 265: 12.DOI:10.1016/j.jclepro.2020.121834.

[7] Fan W, Yang XL, Cui ZY *et al*. The impact of human activities on blue-green water resources and quantification of water resource scarcity in the Yangtze River Basin. *Science of the Total Environment*, 2024, 617: 128983. DOI:10.1016/J.SCITOTENV.2023.168550.

[8] Hu CH, Zhao LX, Wang YX *et al.* Analysis of the Correlation Between Meteorological, Agricultural, and Hydrological Droughts. *J Meteorology and Environmental Sciences*, 2016, 39(04): 1-6. DOI:10.16765/j.cnki.1673-7148.2016.04.001.[胡彩虹, 赵留香, 王艺璇等. 气象、农业和水文干旱之间关联性分析. 气象与环境科学, 2016, 39(04): 1-6.]

[9] Ma XL, Liu CM, Niu Y *et al.* Spatio-temporal pattern and prediction of agricultural blue and green water footprint scarcity index in the lower reaches of the Yellow River Basin. *Journal of Cleaner Production*, 2024,437:140691. DOI:10.1016/J.JCLEPRO.2024.140691.

[10] Feng C, Yang L, Han LF. Impacts of Climate Change on Blue and Green Water Resources in the Xiangjiang River Basin of the Yangtze River,China. *Frontiers in Earth Science*,2021,9: 677191.DOI:10.3389/FEART.2021.677191.

[11]康文东. 气候和土地利用变化对乌江流域蓝绿水的影响研究 [学位论文].雅安：四川农业大学, 2024.

[12] Tan XJ, Liu BJ, Tan XZ. Projected climate change impacts on the availability of blue and green water in a watershed of intensive

human water usage. *Journal of Hydrology:Regional Studies*,2024,53:101827.DOI:10.1016/J.EJRH.2024.101827.

[13] Yang XL, Li WT, Ren LL *et al.* Simulation of the response of blue and green water to land use change in the Weihe River Basin. *J Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(11): 268-276. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2021.11.030. [杨肖丽，李文婷，任立良，等. 渭河流域蓝绿水对土地利用变化的响应模拟. 农业工程学报，2021，37(11)：268-276.]

[14] Jiang N, Ni FQ, Deng Y *et al.* The impact of future climate and land use changes on runoff in the Min-Tuo River Basin. *Journal of Water and Climate Change*,2024,15 (11): 5518–5539.DOI:10.2166/wcc.2024.384.

[15] 张洋. 变化环境下岷沱江流域蓝绿水研究 [学位论文].雅安：四川农业大学, 2020.

[16] Wang XX, Song XH, Hui KR. Urban Expansion Simulation Study Based on FLUS-UGB Model. *J Surveying and Spatial Geographic Information*, 2024, 47(06): 86-89+94.[王训霞, 宋小虎, 惠珂然. 基于 FLUS-UGB 模型的城镇扩展模拟研究. 测绘与空间地理信息, 2024, 47(06): 86-89+94.]

[17] Liu JP, Wang JX, Zhang F *et al*. Comparative Study on Land Use Change Simulation Models Based on CA Principle. *J Journal of Jilin Normal University (Natural Science Edition)*, 2024, 45(02): 116-122.DOI:10.16862/j.cnki.issn1674-3873.2024.02.017.[刘吉平, 王健翔, 张凤等. 基于 CA 原理的土地利用变化模拟模型对比研究. 吉林师范大学学报(自然科学版), 2024, 45(02): 116-122.]

[18] C. D J M, J. T A, J. P A *et al*. Widespread shift from ecosystem energy to water limitation with climate change . *Nature Climate Change*, 2022, 12(7): 677-684.

[19] Yang DL, Hu Y, She J *et al.*. Study on the Ecological Footprint and Sustainability of Water Resources in the Min and Tuojiang River Basins. *J People's Yangtze River*, 2023, 54(10): 67-75.DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2023.10.010. [杨丹荔, 胡艳, 佘佳等. 岷沱江流域水资源生态足迹与可持续性研究. 人民长江, 2023, 54(10): 67-75.]DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2023.10.010.

[20] Hu AG. Main Approaches to Achieving China's Carbon Peak Target by 2030. *Journal of Beijing University of Technology (Social Science Edition)*, 2021, 21(03): 1-15.[胡鞍钢. 中国实现 2030 年前碳达峰目标及主要途径. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(03): 1-15.]

[21] 胡贺, 翟世明, 秦汉, 等. 2015～2020 年岷、沱江流域成都段水环境质量评价及变化趋势分析. 四川环境, 2022, 41(06): 163-171.

[22] Xu J, Wang YG, Chen Y *et al*. Spatiotemporal Variation Characteristics of Surface Water Environmental Quality in the Upper Reaches of the Tuojiang River in the Yangtze River Basin. *Earth Science*, 2020, 45(06): 1937-1947.[许静, 王永桂, 陈岩等. 长江上游沱江流域地表水环境质量时空变化特征. 地球科学, 2020, 45(06): 1937-1947.]

[23] CHEN CZ, GAN R, FENG DM *et al.* Quantifying the contribution of SWAT modeling and CMIP6 inputting to streamflow prediction uncertainty under climate change. *Journal of Cleaner Production,* 2022, 364: 12.DOI:10.1016/j.jclepro.2022.132675.

[24] 杨小玲. CMIP6 优选模式集合对中国温度和降水的模拟评估与预估[学位论文]. 南京:南京信息工程大学, 2022.]

[25]赖雨曈. CMIP6 全球气候模式对中国地区干旱模拟能力评估与未来预估[学位论文].北京：中国气象科学研究院, 2023.]

[26] Li BX, Jiang C, Sun JX. Comprehensive Evaluation of Carbon Use Efficiency Simulation Capability of CMIP6 Models in Southwestern China. *J Chinese Journal of Plant Ecology*, 2023, 47(09): 1211-1224.[李伯新, 姜超, 孙建新. CMIP6 模式对中国西南部地区植被碳利用率模拟能力综合评估. 植物生态学报, 2023, 47(09): 1211-1224.]

[27] GIDDEN M J, RIAHI K, SMITH S J *et al*. Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: a dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century. *Geoscientific Model Development*, 2019, 12(4): 1443-1475.DOI:10.5194/gmd-12-1443-2019.

[28] Ren YM, Liu XP, Xu XC *et al*. Multi-Scenario Land Use Change Simulation in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and Its Impact on Ecosystem Services Based on the FLUS-InVEST Model. *J Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(11): 4473-4487.[任胤铭, 刘小平, 许晓聪等. 基于 FLUS-InVEST 模型的京津冀多情景土地利用变化模拟及其对生态系统服务功能的影响. 生态学报, 2023, 43(11): 4473-4487.]

[29] ESSEL-YORKE K A, ANIM M, NYARKO B K. Sedimentation assessment using hydrological simulation and bathymetry survey: The case of river Amissa drainage basin, Ghana. *Heliyon*, 2023, 9(3): 13.DOI:10.1016/j.heliyon.2023.e14343.

[30] DEY A, REMESAN R. Multimodel quantification of green and blue water components and its error propagations through parameter transferability approach across input choices. *Journal of Hydrology*, 2022, 607.DOI:10.1016/j.jhydrol.2022.127579.

[31] JEYRANI F, MORID S, SRINIVASAN R. Assessing basin blue-green available water components under different management and climate scenarios using SWAT. *Agricultural Water Management*, 2021, 256.DOI:10.1016/j.agwat.2021.107074.

[32] Xie PX, Zhou L, YANG X *et al.* Spatial-temporal variations in blue and green water resources, water footprints and water scarcities in a large river basin: A case for the Yellow River basin. *Journal of Hydrology*, 2020, 590.DOI:10.1016/j.jhydrol.2020.125222.

[33] Xu H, Deng Y. Dependent Evidence Combination Based on Shearman Coefficient and Pearson Coefficient. *Ieee Access*, 2018, 6: 11634-11640.DOI:10.1109/access.2017.2783320.

[34] Li JH, Liu SJ, Wang ZJ. Multi-Scenario Simulation of Land Use and Ecosystem Service Spatiotemporal Changes in the Yunnan-Guizhou Plateau Based on the FLUS and InVEST Models. *J Soil and Water Conservation Research*, 2024, 31(03): 287-298.DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.03.004. [李井浩, 柳书俊, 王志杰. 基于 FLUS 和 InVEST 模型的云贵高原土地利用与生态系统服务时空变化多情景模拟研究. 水土保持研究, 2024, 31(03): 287-298.]

[35] Jin CX, Jiang C, Zhang XY. Simulation and Prediction of Temperature in Southwestern China by CMIP6 Models. *J Chinese Agricultural Meteorology*, 2022, 43(08): 597-611.[晋程绣, 姜超, 张曦月. CMIP6 模式对中国西南地区气温的模拟与预估. 中国农业气象, 2022, 43(08): 597-611.]

[36] Wang LB, Lin QG, Song SK *et al.* Future Heat Wave Trends in China Based on Multi-Model Ensembles. *J Climate and Environmental Research,* 2022, 27(01): 183-196.[王磊斌, 林齐根, 宋世凯等. 基于多模式集合的中国未来热浪趋势研究. 气候与环境研究, 2022, 27(01): 183-196.]

[37] Lan X, Xie Y, Liu Z *et al*. Vegetation greening accelerated hydrological drought in two-thirds of river basins over China. *Journal of Hydrology*, 2024, 637.DOI:10.1016/j.jhydrol.2024.131436.

[38] Dong X, Ni X. Spatial and Temporal Variation Characteristics of Extreme Precipitation at Different Altitudes in Southwest China. *J Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2022, 44(09): 110-121.DOI:10.13718/j.cnki.xdzk.2022.09.012.[董欣, 倪相. 西南地区不同海拔极端降水时空变化特征. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(09): 110-121.]

[39] Zhang Y, Deng Y, Ni FQ *et al*. Analysis of Spatial and Temporal Variation Characteristics of Blue/Green Water Resources in the Min and Tuojiang River Basins Based on the SWAT Model . *J Chinese Agricultural Meteorology,* 2020, 41(06): 345-356.[张洋, 邓玉, 倪福全等. 基于 SWAT 模型分析岷沱江流域蓝/绿水资源量的时空变化特征. 中国农业气象, 2020, 41(06): 345-356.]

[40] Jiang N, Ni FQ, Deng Y *et al*. Runoff Prediction in the Min and Tuojiang River Basins Based on CMIP6. *Journal of Water Ecology*, 2024: 1-13. [江楠, 倪福全, 邓玉等. 基于 CMIP6 的岷沱江流域径流预估. 水生态学杂志, 2024: 1-13.]DOI:10.15928/j.1674-3075.202309220262.

[41] Wu MY, Ni FQ, Deng Y *et al.* Examining future spatiotemporal changes in blue and green water using an nhanced SWAT model: A Jialing River basin case study. *Ecological Indicators*, 2025,170: 112941.DOI:10.1016/J.ECOLIND.2024.112941.

[42] Kang WD, Ni FQ, Deng Y *et al*. Drought impacts on blue and green water: A spatial and temporal analysis. *Ecological Indicators*, 2024, 158:111319.DOI:10.1016/J.ECOLIND.2023.111319.

[43] Ren HZ , Wu GD, Shu LC *et al*. Hydrological Modeling to Unravel the Spatiotemporal Heterogeneity and Attribution of Baseflow in the Yangtze River Source Area, China. *Water*, 2024, 16(20): 2892.DOI:10.3390/W16202892.

[44] Ren HZ , Shu LC, Wu GD *et al*. Evaluation of spatiotemporal variation and driving forces of baseflow coupled with CMIP6 and LUCC in the source region of the Yangtze River, *Journal of Water and Climate Change*,2025,16(3):1098–1118..DOI:10.2166/wcc.2025.690.

[45] Kang WD, Ni FQ, Deng Y *et al*. Response of blue and green water to climate and land use changes: A study in the Wujiang River Basin, China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(19):131-140. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.202304138. [康文东，倪福全，邓玉，等. 乌江流域蓝绿水对气候和土地利用变化的响应. 农业工程学报，2023，39(19)：131-140.]