

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2025.05.025 CSTR:32310.14.stbcbx.2025.05.025

徐帆, 赵俊三, 林伊琳, 等. 耦合气候与土地利用变化的洱海流域径流预测及影响机制[J]. 水土保持学报, 2025, 39(5): 80-91.

XU Fan, ZHAO Junsan, LIN Yilin, et al. Runoff prediction and influencing mechanisms in erhai lake basin under coupled climate and land use changes[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(5): 80-91.

耦合气候与土地利用变化的洱海流域 径流预测及影响机制

徐帆^{1,2}, 赵俊三^{1,2}, 林伊琳^{1,2}, 陈国平^{1,2}, 李坤^{1,2}

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093; 2. 自然资源智慧治理产学研融合创新基地, 昆明 650093)

摘要: [目的] 探究未来气候和土地利用对湖泊流域径流预测及影响机制研究, 有助于探究流域水文响应规律、优化水资源配置及制定适应性管理策略。[方法] 以洱海流域为研究对象, 结合CMIP6气候数据和土地利用数据, 耦合PLUS模型和SWAT模型, 构建未来气候和土地利用变化情况下洱海流域径流预测分析框架。该框架基于不同共享社会经济路径(SSP1-1.9、SSP2-4.5、SSP5-8.5)3种气候情景和未来土地利用变化的耦合情景对洱海流域径流量进行预测, 并利用最优参数地理探测器揭示影响洱海流域径流的主要驱动因素及其相互作用。[结果] 1) 洱海流域以耕地、林地、草地为长期主导类型。2010—2020年, 城镇化驱动建设用地扩张, 占用耕地与林地; 至2030年, 建设用地预计达18 396 hm², 新增建设用地面积1 427 hm², 主要来自耕地的转化, 反映人口增长与基建需求压力。2) 2030年洱海流域的径流量在3种情景下表现出一定差异。SSP5-8.5情景下的径流量最高, 为19.592 m³/s; SSP1-1.9情景次之, 为18.013 m³/s; SSP2-4.5情景最低, 为17.387 m³/s。尽管在不同排放情景下径流量存在一定变化, 但整体趋势相对稳定。3) 地理探测器结果表明, 风速在多数年份中表现出较强的独立解释能力, 降水与其他因子的组合在各年份中均展现出极为显著的交互解释能力。[结论] 洱海流域2030年的径流量在不同情景下均处于较为稳定的状态, 年平均径流量呈SSP5-8.5>SSP1-1.9>SSP2-4.5的趋势, 2030年3种情景下均为风速对洱海流域径流量的影响最大, 2030年3种情景下均为降水和其他因子结合对径流量的影响优于其他组合。

关键词: CMIP6; PLUS模型; SWAT模型; 地理探测器; 径流量

中图分类号: P467 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2025)05-0080-12

Runoff Prediction and Influencing Mechanisms in Erhai Lake Basin under Coupled Climate and Land Use Changes

XU Fan^{1,2}, ZHAO Junsan^{1,2}, LIN Yilin^{1,2}, CHEN Guoping^{1,2}, LI Kun^{1,2}

(1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2. Natural Resources Intelligent Governance Industry-University-Research Integration Innovation Base, Kunming 650093, China)

Abstract: [Objective] The study aims to explore the impact of future climate and land use changes on runoff prediction and its influencing mechanisms in a lake basin. It helps investigate hydrological response patterns, optimize water resource allocation, and formulate adaptive management strategies. [Methods] Taking the Erhai Lake Basin as the study area, the research integrated CMIP6 climate data and land use data, coupling the PLUS model and SWAT model to construct an analytical framework for runoff prediction under future climate and land use change scenarios. This framework predicted runoff in the Erhai Lake Basin under three climate scenarios based on Shared Socioeconomic Pathways (SSP1-1.9, SSP2-4.5, and SSP5-8.5), combined with future land use change. The geodetector with optimal parameter was used to reveal the main driving factors and their interactions affecting runoff in the basin. [Results] 1) Cultivated land, forest land, and grassland were the dominant land use

收稿日期: 2025-03-21 修回日期: 2025-05-04 录用日期: 2025-05-12 网络首发日期(www.cnki.net): 2025-07-02

资助项目: 国家自然科学基金项目(42301304)

第一作者: 徐帆(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事国土空间规划研究。E-mail: 1794446361@qq.com

通信作者: 林伊琳(1991—), 女, 讲师, 硕士生导师, 主要从事GIS、国土空间规划研究。E-mail: 601960754@qq.com

http://stbcbx.alljournal.com.cn

types in the Erhai Lake Basin over the long term. From 2010 to 2020, urbanization drove the expansion of construction land, taking over cultivated land and forest land. By 2030, construction land was expected to reach 18 396 hm², with an increase of 1 427 hm² mainly converted from cultivated land, reflecting the pressures of population growth and infrastructure demand. 2) The runoff in the Erhai Lake Basin in 2030 showed variations under the three scenarios. The highest runoff was observed under the SSP5-8.5 scenario (19.592 m³/s), followed by the SSP1-1.9 scenario (18.013 m³/s), and the lowest under the SSP2-4.5 scenario (17.387 m³/s). Despite variations under different emission scenarios, the overall trend remained relatively stable. 3) The geodetector results indicated that wind speed exhibited strong independent explanatory power in most years, while the combination of precipitation and other factors showed significant interactive explanatory power. [Conclusion] In 2030, runoff in the Erhai Lake Basin remains relatively stable under all scenarios, with the annual average runoff following the trend of SSP5-8.5>SSP1-1.9>SSP2-4.5. In all three scenarios for 2030, wind speed has the greatest impact on runoff in the Erhai Lake Basin, while the combination of precipitation and other factors has a greater influence on runoff than other combinations.

Keywords: CMIP6; PLUS model; SWAT model; geodetector; runoff

Received: 2025-03-21

Revised: 2025-05-04

Accepted: 2025-05-12

Online(www.cnki.net): 2025-07-02

湖泊流域是重要的地表水资源,在防洪减灾、农业生产、旅游休闲、调节生态系统等方面发挥着非常重要的作用^[1]。在全球气候变化和人类活动加剧的背景下,气候与土地利用方式对湖泊流域水文过程的影响日益显著,已成为湖泊流域水资源管理和生态保护的核心问题。气候变化通过改变降水、气温和蒸发等气象要素,直接影响流域的水量平衡;而土地利用变化则通过改变地表覆盖、土壤性质和径流路径,进一步加剧水文过程的复杂性。湖泊流域作为重要的水资源和生态系统服务提供者,其径流变化不仅关系到区域水资源的可持续利用,还对防洪抗旱、生态保护和经济社会发展具有重要影响。因此,构建科学的径流预测模型,合理预测径流变化趋势,研究气候变化对湖泊流域的影响机制,对制定科学的流域土地利用和水资源配置方案及管理策略具有重要意义。

气候和土地利用变化下湖泊流域径流变化是当下研究的热点。分布式水文模型作为再现流域不同空间尺度水循环内部过程及其相互作用机制的手段,在不同条件影响下的径流模拟及预测方面有着极其重要的应用^[2-3],如 PRMS (precipitation-runoff modeling system)^[4]、VIC(variable infiltration capacity)^[5]、SWAT(soil and water assessment tool)^[6]等。其中,SWAT模型具有操作灵活、输入参数少及不断改进等特点已经在诸多流域内得到广泛应用,并取得满意的结果^[5,7]。RESHMIDEVI等^[8]使用与 ArcGIS 集成的 SWAT 对当时和未来的气候情景进行水文模拟,评估气候变化对印度河流域水平衡的影响,预测

河流流量和地下水补给量的减少及灌溉需求的增加可能加剧该地区的水资源压力;HASAN等^[9]将 SWAT 模型用于开发模拟河流流量,通过模型进行的数值模拟结果表明,气候变化会改变流域的季节性流态,未来的气候变化有可能对水电潜力产生影响;张萧萧等^[10]基于 SWAT 模型对日照沭河流域雨水集蓄潜力展开分析,为研究区域内水资源的高效持续利用提供一系列科学依据;刘飞等^[11]运用 SWAT 模型对珲春河流域地表径流进行简要分析,为洪水灾害研究提供参考数据。

土地利用变化和土地覆被变化是对区域水文循环过程造成短期影响的主要驱动因素^[12]。一方面,土地利用变化通过影响流域的植被覆盖情况,影响流域的降水量、径流量,进而改变产汇流机制和水文过程;另一方面,土地利用变化增加地面不透水面积,影响土壤下渗能力,使地下径流减少。吴森等^[13]基于 ArcGIS 软件分析不同时期的土地利用空间转移规律,并结合 SWAT 模型定量研究潢川流域径流对土地利用变化的响应,结果发现,水田面积增大使水面蒸散发增加,林地面积增多使径流汇集速度降低、蒸发增加,导致研究区年径流量明显减小;马新萍等^[14]探讨汉江上游土地利用与气候变化对径流的影响表明,未来汉江上游流域径流将呈明显上升趋势;张吉洪等^[15]模拟亚热带江河源头区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显示,土地利用对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。

IPCC 发布的最新耦合模型相互比较项目第六阶段(CMIP6)模型耦合共享社会经济路径(SSPs)和代表性集聚路径(RCPs)^[16]为研究人员提供全球气候变化背景下的多种未来发展情景。当前,气候变化正在全国范围内影响流域径流的流动模式^[17-19]。CMIP 作为计划的最新版本,具有更高的分辨率和更完善的数据,并结合未来共享经济路径及辐射强迫,能够预测和评估不同决策对未来气候变化产生的影响^[20]。例如,WANG 等^[21]基于 CMIP6 数据对典型干旱区石羊河流域 2015—2100 年不同情景下降雨与径流的变化进行预测分析显示,各情景下年降雨量均呈增加趋势,在径流方面,SSP1-2.6 情景下呈增加趋势,SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下呈减少趋势;杨晨辉等^[22]聚焦碳达峰碳中和对赣江流域的水文影响显示,“双碳”路径下赣江流域年径流将呈增加趋势。

洱海作为云南第二大淡水湖,属于国家重点保护水域。目前,流域内开发过度导致生态系统遭到破坏,影响径流的自然调节功能,加剧水资源问题。同时,气候变化对洱海流域的降雨量、蒸发量等水文要素产生影响,进而改变区域的水量平衡。因此,本文基于土地利用数据、气候和土壤等多源异构数据,耦合 PLUS-SWAT 模型,预测不同气候情景下洱海流域径流,在此基础上,采用最优参数地理探测器模型定量评价气候对洱海流域影响因素,以期为流域径流可持续发展提供借鉴参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

洱海流域位于云南省大理市(25°25'36"~26°26'52"N,99°49'44"~100°26'56"E),主要是指洱海湖泊水面和其周边所有汇水区域(流入洱海的所有河流、溪流和地下水)的总和及流域周边的土地等,面积 316 616 hm²(图 1)。流域内地势呈南北向分布,地形坡度较陡,垂直高差大,最高海拔为 4 085 m,最低海拔为 1 969 m,高差为 2 116 m。洱海流域属于低纬度高原季风气候,具有大陆性和海洋性等特点。气候温和,年温差较小,日温差较大,光照充足,年平均降水量为 950.44 mm,雨量充沛但分布不均。洱海是云南省第二大高原淡水湖,水面面积约为 25 100 hm²,总容量为 25.3 亿 m³。近年来,土地利用变化和气候变化使得洱海流域的水量平衡发生变化,通过研究洱海流域内的径流量情况,洞察其演化趋势并对未来的径流量情况进行预测,对更好地指导洱海流域内水资源的规划与利用,推动洱海流域生态建设和可持续发展具有重要意义。

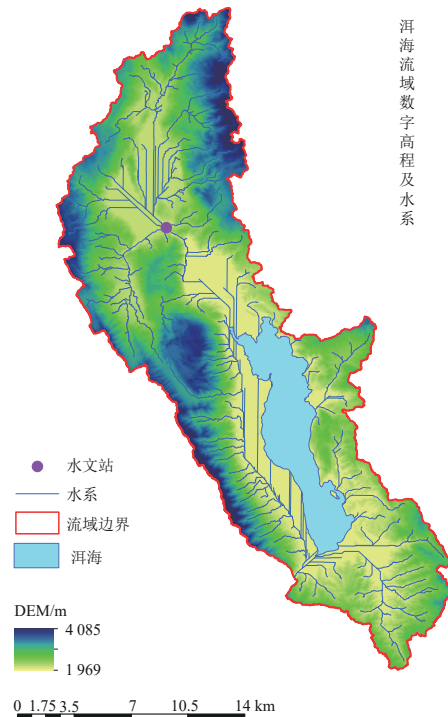


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

1.2 数据来源与预处理

本研究涉及的数据主要包括气象数据、土地利用数据、径流量数据、DEM 数据和土壤数据及社会经济数据,具体数据来源见表 1。所有空间数据均利用 ArcGIS 10.2 软件进行投影变换、裁剪、按掩膜提取、重分类等预处理,土地利用分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 类,所有空间数据采用同一投影坐标系(WGS_1984_World_Mercator),空间分辨率均为 30 m×30 m 的网格单元,气象数据通过覆盖在流域内的观测站点进行收集,并整理成日平均数据,径流数据选取炼城水文站的实测数据,整理成年平均径流量和月平均径流量数据。

2 研究方法

2.1 研究框架

论文总体研究框架见图 2。首先,验证 SWAT 模型的适用性,主要采用 SWAT-CUP 对 SWAT 模型进行率定及验证;然后,选取 8 个评价因子利用 PLUS 模型对 2030 年土地利用进行预测,整理 CMIP6 中 3 种共享社会经济路径(SSP1-1.9、SSP2-4.5、SSP5-8.5)下的气候数据(表 2);其次,根据未来不同情景下的气候数据运用 SWAT 模型进行 2030 年径流量的预测;最后,利用地理探测器对流域径流量的驱动机制进行分析。

表 1 数据来源
Table 1 Data sources

项目	数据名称	数据分辨率	数据来源
土地利用数据	土地利用数据 (2010年、2015年、2020年)	30 m	中国科学院资源环境科学数据中心(www.resdc.cn)
DEM 数据	DEM 数据	30 m	地理空间数据云(www.gscloud.cn)
	Slope 数据	30 m	由 DEM 数据处理而来
土壤数据	土壤数据	1 km	世界土壤数据库 (webarchive.iasa.ac.at)
社会经济数据	路网数据	1 km	OSM(www.openstreetmap.org)
	GDP、POP	1 km	中国科学院资源环境科学数据中心(www.resdc.cn)
	CMIP6 数据		国家地球系统科学数据
气象数据	温度、降水	1 km	资源环境科学数据平台
	2010—2018年气象数据	—	https://cmads.org/
	2019—2020年气象数据	—	https://ccrc.iap.ac.cn/resource
径流量数据	2010—2020年月平均径流量	—	https://cds.climate.copernicus.eu

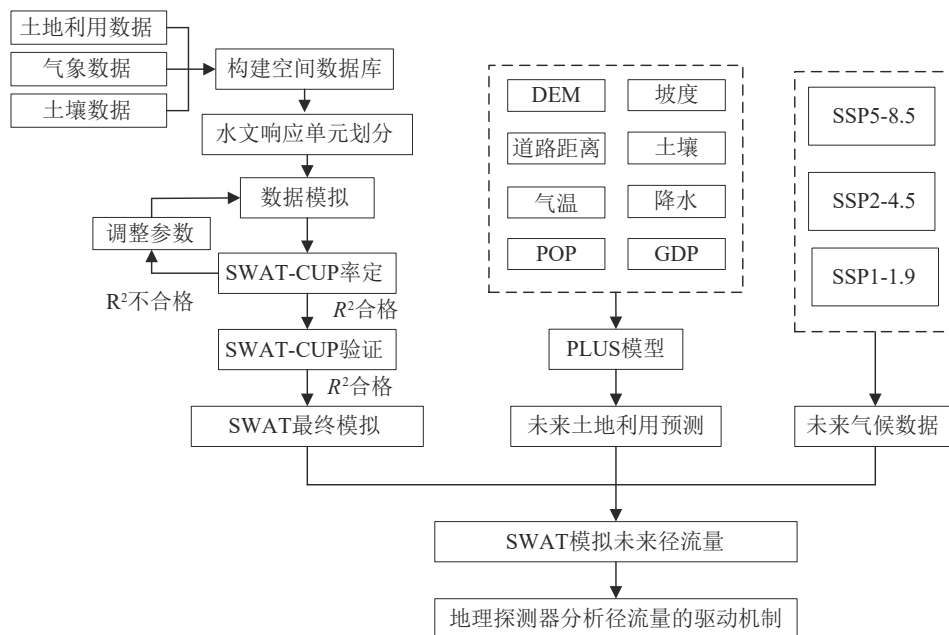


图 2 技术路线

Fig. 2 Technological route

表 2 CMIP6 情景

Table 2 CMIP6 scenarios

情景模式	情景描述
SSP1-1.9	SSP1-1.9 情景代表最乐观的低碳发展路径,主要用于研究未来社会经济发展对气候变化的影响。SSP1 是低脆弱性发展路径,兼顾可持续目标,减少资源消耗与化石能源依赖;RCP1.9 为最严格减排路径,通过大幅削减化石燃料、提升可再生能源比例,将全球温升控制在 1.5 °C 以内。二者共同指向气候危机下的低碳转型核心方案
SSP2-4.5	SSP2-4.5 情景代表一个中等挑战的减缓和适应气候变化的路径。SSP2 代表渐进式发展路径,延续既有发展惯性,未出现重大技术突破或政策转向,维持社会经济增长与历史轨迹的基本同步;RCP4.5 则对应中度减排框架,通过政策调控推动可再生能源部署与碳捕集技术应用,在逐步降低化石能源消费的过程中实现 2 °C 温控目标。这两个情景共同构成气候治理的中等强度解决方案
SSP5-8.5	SSP5-8.5 情景代表一种高温室气体排放的未来发展路径。SSP5 代表延续高碳依赖型发展模式,以经济扩张为核心,依赖化石能源驱动增长,社会资源消耗强度居高不下;RCP8.5 代表假设全球无气候政策约束,化石燃料持续主导能源结构,碳排放持续攀升,导致 2100 年全球温升突破 4 °C。二者共同揭示高排放、高气候风险的不可持续发展困境

2.2 研究方法

2.2.1 CMIP6 未来气候数据 全球气候模式可以较为精确地模拟地面气温、降水、风速等气象要素,是目前用来预测未来气候变化的重要工具之一^[23-24]。本文采用CMIP6(耦合模式比较计划第六阶段)的最新成果,该计划由世界气候研究计划(WCRP)组织开发,已有研究证实其在中国区域具有较好的适用性。基于WorldClim平台,选取BCC-CSM2-MR气候模式下的3种共享社会经济路径(SSPs)情景数据(SSP1-1.9、SSP2-4.5和SSP5-8.5)用于2030年气候预测。为消除模式数据的系统偏差并提高其在洱海流域的适用性,研究采用Delta方法进行空间降尺度处理^[25],其计算公式为:

$$P_f = P_o \times \frac{P_{Gf}}{P_{Go}} \quad (1)$$

$$T_f = T_o + (T_{Gf} - T_{Go}) \quad (2)$$

式中: P_f 、 T_f 为Delta方法重建的未来降水、气温序列,mm; P_{Gf} 、 T_{Gf} 为气候模式预估的未来降水、气温序列,mm; P_{Go} 为历史观测数据多年月平均降水,mm; T_{Go} 为历史观测数据多年月平均气温,°C; P_o 为基准期内观测场的多年平均降水,mm; T_o 为基准期内观测场多年平均气温,°C。

2.2.2 模型的验证和率定 基于SWAT-CUP对径流相关数据进行敏感性分析并对模型参数进行率定和调整,选取2010—2017年的数据作为校准期,而2018—2020年的数据作为验证期,以确保模型在不同时间段的适用性和准确性。通过48个参数(表3为代表性参数)的率定,本研究采用参数自动迭代法。在校准阶段,模型运行1000次,利用自动迭代算法来接近模拟的最佳结果。决定性系数(R^2)和纳什效率系数(NSE)是评估模型性能的2个关键指标。 R^2 衡量的是模型解释变量对因变量变异的解释程度,其值越接近1,表示模型的解释能力越强。纳什效率系数NSE则衡量模型模拟值与实际观测值的接近程度,NSE值越接近1,表示模型的模拟效果越好。在本研究中,当 $R^2 > 0.6$ 且 $NSE > 0.5$ 时,认为模型的模拟效果是可靠的。指标评价计算公式为:

$$R^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})(Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs}) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (3)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (4)$$

式中: $Q_{obs,i}$ 为实测径流量, m^3/s ; $Q_{sim,i}$ 为模拟径流量, m^3/s ; \bar{Q}_{obs} 为实测平均径流量, m^3/s ; $\bar{Q}_{sim,i}$ 为模拟平均径流量, m^3/s 。

2.2.3 PLUS模型 PLUS模型是用于模拟土地利用/土地覆盖变化的元胞自动机(CA)模型,该模型集成土地扩张分析策略(LEAS)和基于多类随机斑块种子的CA模型(CARS),能够在时空动态下模拟土地利用斑块的自动生成。

1)LEAS部分通过提取2期土地利用变化间各类用地扩张的部分,采用随机森林算法逐一对各类土地利用扩张和驱动力的因素进行挖掘,获取各类用地的发生概率及驱动因素对该时段各类用地扩张的贡献。

表3 SWAT-CUP校准参数及阈值

Table 3 SWAT-CUP calibration parameters and thresholds

编号	参数	最小值	最大值
1	CN2.mgt	87	98
2	ALPHA_BF.gw	0.61	0.93
3	ALPHA_BNK.rte	0.24	0.51
4	GW_DELAY.gw	196	315
5	GWQMN.gw	0	3 000
6	SOL_AWC.sol	0.04	0.26
7	SOL_K.sol	-0.27	-0.11
8	ESCO.hru	0.41	0.86
9	GW_REVAP.gw	0.02	0.09
10	RCHRG_DP.gw	0.18	0.57
11	CH_N2.rte	0.23	0.41
12	CH_K2.rte	171	249
13	SURLAG.bsn	17	26
14	CH_N1.sub	1	7
15	CH_K1.sub	148	257

2)CARS模块是基于多类型随机斑块种子的元胞自动机模型,结合随机种子生成和阈值递减机制,在发展概率的约束下,通过自适应系数影响土地利用斑块生成,从而模拟未来土地利用分布情况^[26]。

该模型基于栅格数据,能够深入挖掘土地扩张和地类变化的驱动因素,更好地模拟多地类土地利用的产生和演化^[27-28]。PLUS模型通过用地扩张分析策略(LEAS)提高模拟精度,与其他模型相比,PLUS模型的模拟结果与真实格局最为相似,并获得最高的模拟精度和更相似的景观。

论文选取DEM、坡度、距离、GDP、POP、温度、降水和土壤8个驱动因子加载到PLUS模型对洱海流域2030年土地利用情况进行预测。驱动因子作为PLUS模型的核心输入参数,其科学选取直接影响模拟结果的可靠性。本文在驱动因子遴选过程中,充分考虑洱海流域的“自然限制-人文驱动”耦合机制,结合其高原湖泊生态脆弱性、旅游经济与农业发展的冲突等特征,从自然约束、气候条件及社会经济影响3个维度进行综合考量:自然约束因子中的DEM和坡度及土壤类型决定土地可利用性与农业适宜

性,气候因子中的降水和温度影响植被分布与作物生长,社会经济因子中的GDP和POP反映人类活动强度,驱动建设用地扩张和耕地转化;距离因子则量化区位优势对开发优先级的空间影响。

2.2.4 SWAT模型 SWAT模型是美国农业部农业研究中心研发的分布式水文模型,目的是在具有多种土壤、土地利用和管理条件的复杂流域,预测长期土地管理措施对水、泥沙和农业污染物的影响。SWAT模型在流域水量平衡、长期地表径流及日平均径流模拟等方面得到广泛应用。SWAT模型基于公式(5)对径流成分进行模拟计算:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})_i \quad (5)$$

式中:SW_t为土壤最终含水量,mm;SW₀为土壤前期含水量,mm;R_{day}为第*i*天降水量,mm;Q_{surf}为第*i*天地表径流量,mm;E_a为第*i*天蒸发量,mm;Q_{gw}为第*i*天地下水出流量,mm;W_{seep}为第*i*天存在于土壤剖面底层的渗透量和测流量,mm。

2.2.5 最优参数地理探测器 地理探测器是探测地理要素的分层异质性和揭示其背后驱动力的一组统计学方法,该方法对连续性数据的离散化处理需要人工进行设定,其中存在离散化处理不够准确和人为主观因素的影响^[29]。最优参数地理探测器能够评估所有连续型数据在不同分级方法和不同间断数下的*q*值,从而确定最佳的分级方案。其中,因子探测器主要用来检测某种地理因素是否是形成某一地理特征空间分异的原因,以及其所能解释的力度,*q*值的大小可以代表驱动因子对因变量的解释力,其表达式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (6)$$

式中:*L*为驱动因子*X*的分层;*N_h*和*N*分别为层*h*和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别为层*h*和全区的*Y*值的方差。*q*值为0~1,值越大表明该驱动因子对径流的解释力越强。交互探测器能够计算2个因子叠加后的*q*值,通过与单因子的*q*值相比,可以判断2个因子是否具有交互作用和作用的强弱等。风险探测器主要是揭示不同驱动因子内部分层的差异。生态探测器用于比较驱动因子对因变量*Y*的空间分布的影响是否存在显著差异。

为探明各气候因素对研究区径流量的影响,以研究区2010年、2015年、2020年和2030年不同情景下的径流量为因变量选取5个气候因子,分别为PCP(降水)、RH(相对湿度)、SOR(太阳辐射)、TM(温度)和WD(风速)。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化特征分析

3.1.1 PLUS模型精度验证 通过对2020年国土空间格局的预测与实际数据的对比分析,PLUS模型的预测精度得到充分验证。该模型以2010年的数据为基础,对2020年的土地利用情况进行预测,结果显示Kappa系数高达97.15%,总体准确度达到97.86%,不仅证明PLUS模型在土地利用预测方面的高精确度和可靠性,也为其在土地利用规划和管理中的应用提供强有力的支持。

3.1.2 土地利用变化特征分析 由图3可知,2010—2020年洱海流域的土地利用类型变化显著。耕地、林地和草地作为该流域的主要土地利用类型,其中林地在2010年占比最高,达到33.79%,草地占比27.25%,耕地占比22.83%,水域占比10.2%,而建设用地相对较小,为4.9%。2015年林地和草地的占比略有下降,分别为33.77%和27.07%,而耕地下降至22.54%,水域增加至10.22%,建设用地增加至5.36%。建设用地的需求不断上升,随着经济发展和城镇化加速,基础设施、住宅和工业用地需求上升,导致耕地和林地被占用。2020年林地和草地的占比保持相对稳定,分别为33.77%和27.07%,耕地略有增加至22.55%,水域保持在10.21%,建设用地也保持在5.36%。这一稳定状态与洱海流域的耕地保护、生态保护政策有关,政策的实施有助于维持土地利用的平衡。政府实施严格的耕地保护政策,限制耕地转为建设用地,确保耕地面积稳定。同时洱海流域加强林地和水域保护,限制过度开发,退耕还林还草等措施有助于维持林地和草地的稳定。因此,合理规划土地利用,平衡经济发展与生态保护的关系,对于洱海流域的可持续发展至关重要。根据2030年预测结果显示,洱海流域变化最大的地类是建设用地,其面积从16 969 hm²增加到18 396 hm²。主要来源于耕地的转化,可能与区域经济发展和人口增长对住房和基础设施的需求增加有关。随着建设用地的扩张,可能对原有的林地、草地等自然景观造成挤压,进而影响到洱海流域的生态平衡。

由图4可知,2010—2015年,建设用地主要来源于耕地的转化,与城市周边的建设开发有关。由于部分林地的自然演替或者受到一些人类活动干扰,林地中有一部分被转换为草地和耕地。草地也向其他类型土地转移,比如有部分变成耕地和建设用地,表明这一时期对草地利用的方式有所变化,可能是为满足一些农业生产或建设的需求。水域面积变化相对较小,但也有部分水域周边土地被开发为建设

用地等,对水域生态环境产生一定的影响,如生态系统完整性受到一定程度的破坏。2015—2020年,耕地面积持续向林地和建设用地转移,且相较2010—2015年有所增加。可能反映城市化进程加快,对建设用地的需求增大,同时生态退耕的力度也进一步加大。林地向草地和耕地的转变趋势依然存在,同时林地向建设用地的转换也有所体现。可能是因为一些交通等基础设施建设穿越林地,或者在林地中开发一些生态旅游等项目,使部分林地功能发生改变。草地方面,除继续向耕地和建设用地转移外,其向林地的转换也更加明显,是因为一些草地生态恢复工程的实施,通过植树等方式将部分草地改造为林地。2010—2020年,耕地整体呈减少趋势,向林地、草地和建设用地进行转移,综合反映2010—2020年洱海流域在生态建设和城市扩张等方面的总体情况。林地和草地之间的转换较为复杂,既有林地转

草地,也有草地转林地,总体上这2种土地类型处于一种动态平衡的变化过程中,受到自然因素(如植被演替)和人为因素(如生态工程、放牧等)的综合影响。水域周边土地向建设用地的转移在一定程度上表明洱海周边开发强度在加大,可能对洱海的水环境和生态系统造成压力。2020—2030年,耕地的减少趋势预计继续,更多地向林地和建设用地转移。这表明未来城市化进程仍将持续,同时生态保护政策(如退耕还林还草)也持续推进。林地和草地之间的相互转换也持续存在,预计林地面积有望通过生态恢复等措施保持稳定或增加。草地在生态保护和合理利用之间寻求平衡,部分草地根据规划转变为林地或者用于其他用途。水域周边土地的开发未来应该受到更严格的管控,以保护洱海的生态环境,但建设用地对水域的压力仍然存在,需要通过有效的政策和管理措施来缓解。

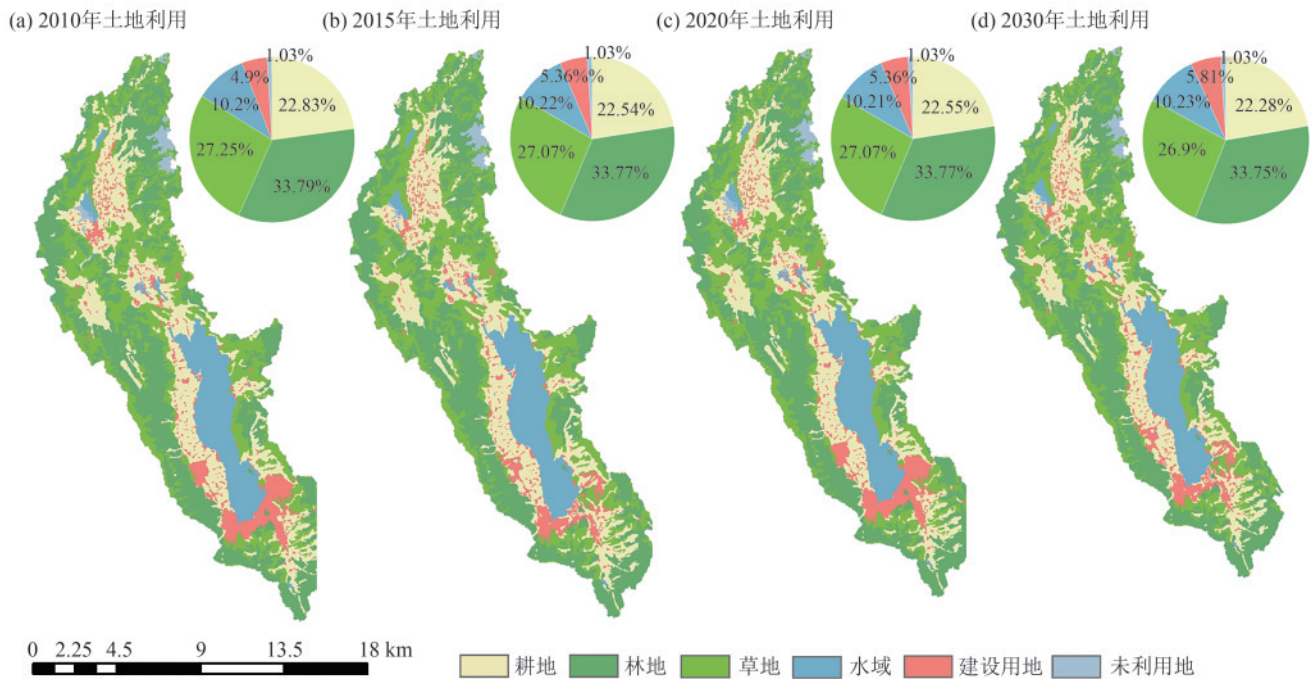


图3 土地利用空间分布

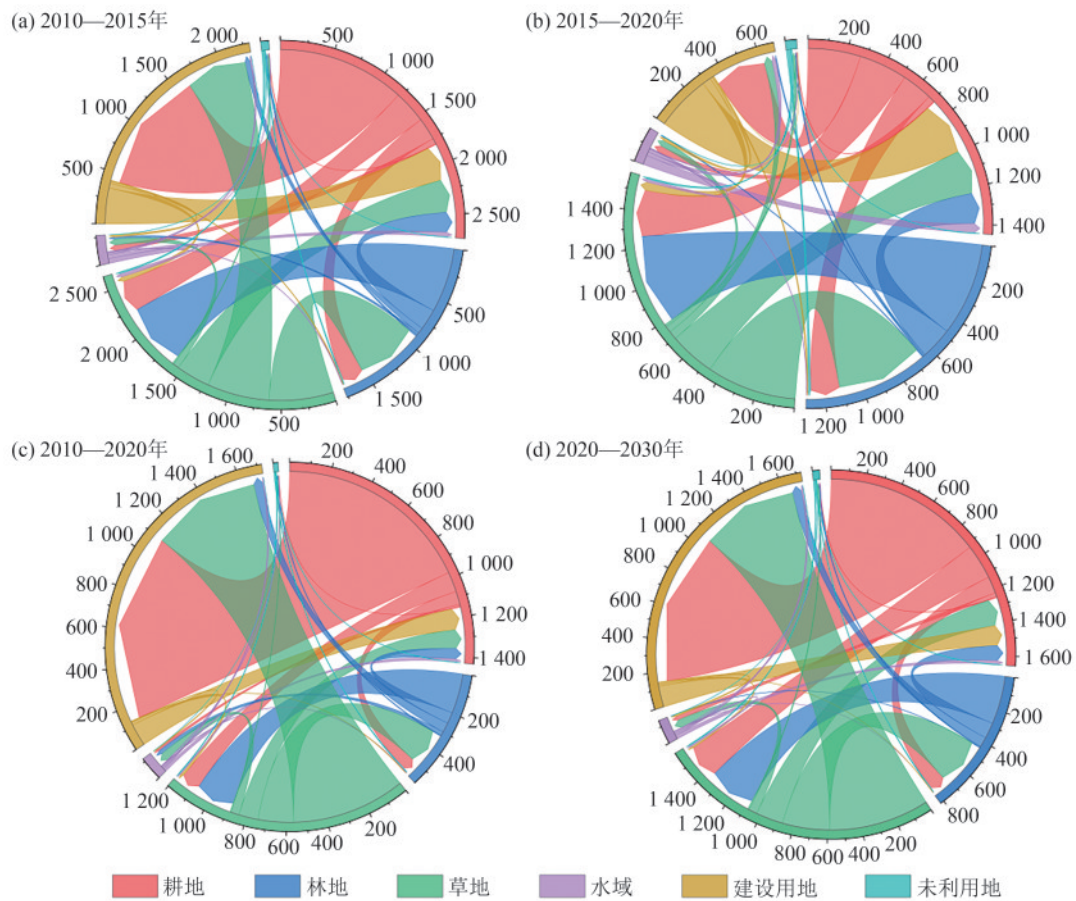
Fig. 3 Spatial distribution of land use

3.2 洱海流域历史径流量分析

由图5a可知,2010—2020年,洱海流域的年平均径流量呈波动变化,没有明显的长期上升或下降趋势,但存在较明显的年际差异。2010—2017年径流量保持相对稳定,2018年出现显著上升,径流量达到 $22.65 \text{ m}^3/\text{s}$,与当年的降雨量增多有直接联系。2019年径流量有所下降,降至 $14.77 \text{ m}^3/\text{s}$,到2020年,洱海流域的径流量呈波动情况,与降水量和气温2个关键因素密切相关。年平均径流量随着降雨量的增加而增加,而随着气温的升高则有所减小。

由图5b可知,2010—2020年,洱海流域的月平均径流量在不同年份之间虽有波动,但整体上并未显示出

明显的上升或下降趋势。图5b清晰地展示了径流量的周期性波动,每年平均出现2个明显的高峰,可能与季节性降水模式有关,如夏季和秋季的雨季,反映流域内水文周期的规律性。每年的高峰流量值存在一定的波动,但整体上保持在 $40\sim 70 \text{ m}^3/\text{s}$ 。表明尽管存在年度差异,但洱海流域的径流量在长期内保持一定的稳定性。图5中每年径流量的最低点通常出现在年初或年末,可能与降水量减少或蒸发量增加有关;每年径流量的最高值均出现在7、8月,可能与7、8月是雨季有关。2016年的高峰值异常高,2011—2015年为连续枯水年^[30],径流量较正常年份减少40%以上,而2016—2018年流域来水属正常年份,径流量较2011—2015年显著增加。



注:图中数据表示土地利用面积, hm²。

图 4 土地利用转移矩阵

Fig. 4 Land use transition matrix

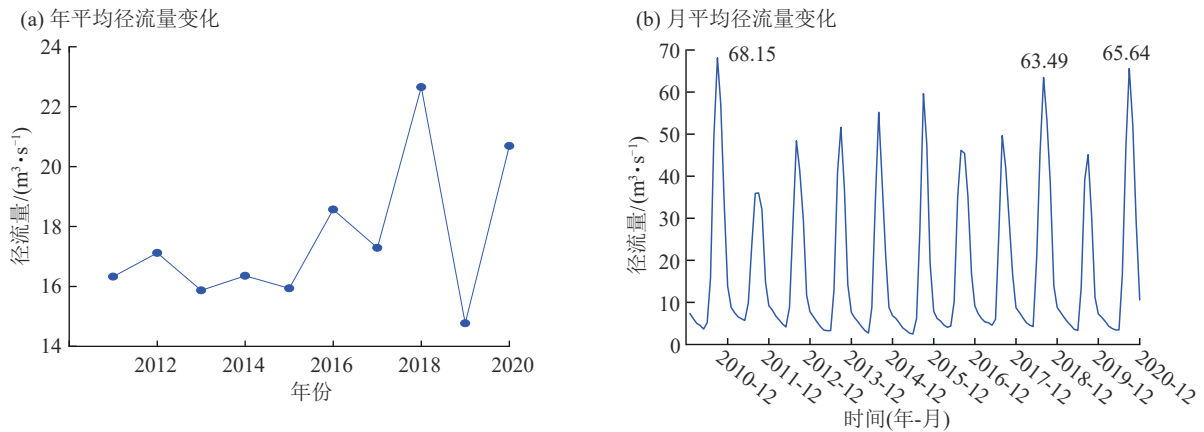


图 5 洱海流域径流量年平均和月平均变化

Fig. 5 Annual and monthly mean runoff changes in Erhai Lake basin

3.3 未来径流量预测

在本研究中,当 $R^2 > 0.6$ 且 $NSE > 0.5$ 时,认为模型的模拟效果是可靠的。通过不断的参数调整和迭代,模型的评价结果表明 SWAT 模型的模拟效果较好(表 4、表 5),为模型在 2030 年的径流模拟提供依据。

从图 6 可以看出,在 SSP1-1.9 情景下,洱海流域 2030 年的径流量为 $18.013 \text{ m}^3/\text{s}$;在 SSP2-4.5 情景下,径流量为 $17.387 \text{ m}^3/\text{s}$;而在 SSP5-8.5 情景下,径

流量最高,为 $19.592 \text{ m}^3/\text{s}$ 。表明在高排放情景(SSP5-8.5)下,由于气候变化的影响,洱海流域的径流量可能有所增加。CMIP6 数据提供未来气候变化的详细预测,对于径流量的预测至关重要。总体来看,洱海流域 2030 年的径流量在不同情景下均处于较为稳定的状态,年平均径流量呈 $\text{SSP5-8.5} > \text{SSP1-1.9} > \text{SSP2-4.5}$ 趋势。SSP5-8.5 情景下,7 月的径流量最低,而 8 月的径流量最高。不同情景在枯水期径

流量差异较小,径流量主要差异表现在汛期。表明尽管在不同情景下径流量存在一定的变化,但整体趋势相对稳定,对于洱海流域的水资源管理和规划具有重要的参考价值。气候变化将引起降雨量、蒸发量等水文要素的变化,进而改变整个区域的水量平衡,引发水资源和营养物负荷在时空上的再分布。

表 4 校准期前后模型评价

Table 4 Model evaluation before and after calibration period

指标	校准前	校准后
R^2	0.44	0.86
NSE	0.20	0.58

表 5 径流校准期和验证期模拟评价指标

Table 5 Runoff simulation evaluation metrics during calibration and validation periods

模拟期	R^2	NSE
校准期(2010—2017年)	0.86	0.58
验证期(2018—2020年)	0.87	0.70

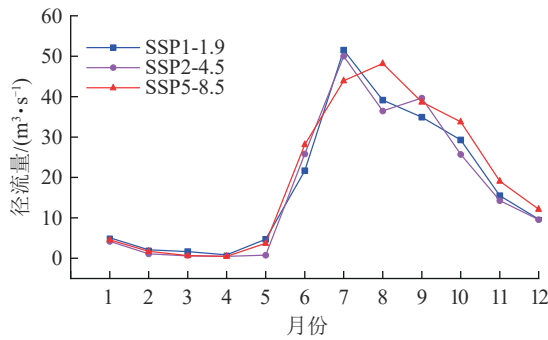


图 6 2030年3种情景下径流量月平均变化

Fig. 6 Monthly average runoff changes under three scenarios in 2030

3.4 洱海流域径流量驱动机制

为探明各类因素对洱海流域径流量的影响,以径流量为因变量,并选取PCP(降水)、RH(相对湿度)、SOR(太阳辐射)、TM(温度)和WD(风速)5个气候因子进行地理探测,单因子地理探测器的结果反映各个单一因素对径流量的独立解释能力(图7)。2010年WD的Q值最高,为0.75,表明在2010年风速对洱海流域径流量的影响最为显著,可能是该年径流量变化的主要驱动因子之一。RH和SOR的Q值也相对较高,分别为0.52和0.47,说明湿度和太阳辐射在一定程度上也对径流量有影响。SOR的Q值最高,为0.58,意味着太阳辐射在2015年对洱海流域径流量的影响最大,可能是径流量变化的关键因素。TM的Q值为0.38,相对也较高,表明温度在该年对径流量有一定影响。PCP的Q值高达0.91,远高于其他因子,说明在2020年降水是影响洱海流域径流量的主导因子,降水的变化对径流量的变化起到决定性的作用。RH的Q值为0.84,也相对较高,表明

湿度与径流量之间存在较强的关联。2030年SSP1-1.9情景、SSP2-4.5情景、SSP5-8.5情景均是WD的Q值最高,风速对洱海流域径流量的影响最大。PCP在SSP1-1.9情景和SSP2-4.5情景下也比较重要,但在SSP5-8.5情景下则SOR较为重要。

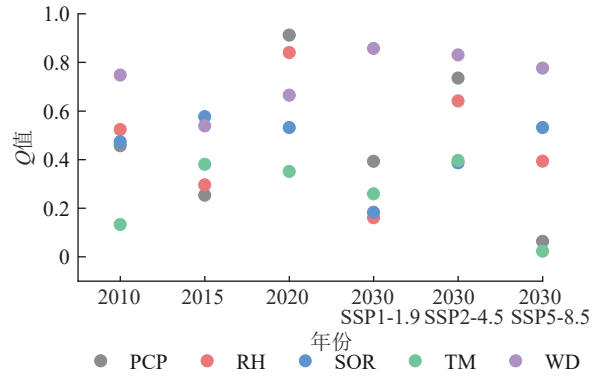


图 7 单因子探测结果

Fig. 7 Single-factor detection results

双因子地理探测器通过计算2个因素组合的Q值,反映不同因素对径流量的交互解释能力(图8)。2010年PCP与SOR交互的Q值为0.96,降水和太阳辐射交互作用对径流影响极强。太阳辐射影响降水形成和蒸发,进而影响径流,二者交互作用显著。WD与SOR交互的Q值为0.96,风速和太阳辐射交互作用对径流影响极强。风速和太阳辐射共同影响蒸发和水体循环,进而影响径流。2015年TM与SOR交互的Q值为0.96,温度和太阳辐射交互作用对径流影响极强。二者对径流影响显著,可能是温度和太阳辐射变化导致蒸发和水体循环变化,影响径流。WD与SOR交互的Q值为0.97,风速和太阳辐射交互作用对径流影响极强,二者对径流影响显著。2020年RH与SOR交互的Q值为0.97,相对湿度和太阳辐射交互作用对径流影响极强,二者对径流影响显著。WD与SOR交互的Q值为0.97,风速和太阳辐射交互作用对径流影响极强,二者对径流影响显著。2030年SSP1-1.9情景下,WD与PCP的交互作用对径流的影响最大(Q值为0.99),表明在未来低排放情景下,风速与降水的协同作用对径流产生显著影响。2030年SSP2-4.5情景下,PCP与SOR的交互作用对径流的影响最大(Q值为0.97),表明在中等排放情景下,降水与太阳辐射的协同作用对径流产生显著影响。2030年SSP5-8.5情景下,WD与PCP的交互作用对径流的影响最大(Q值为0.96),表明在高排放情景下,风速与其他气候因子的协同作用对径流产生显著影响。总体而言,与单因子的解释能力相比,多因子的交互作用表现出显著的非线性增强效应,尤其是双因子交互作用的增强效应更为突出。表明多因子交互作用对径流量具有更强的解释能力,其效果远超单一因素的独立作用。

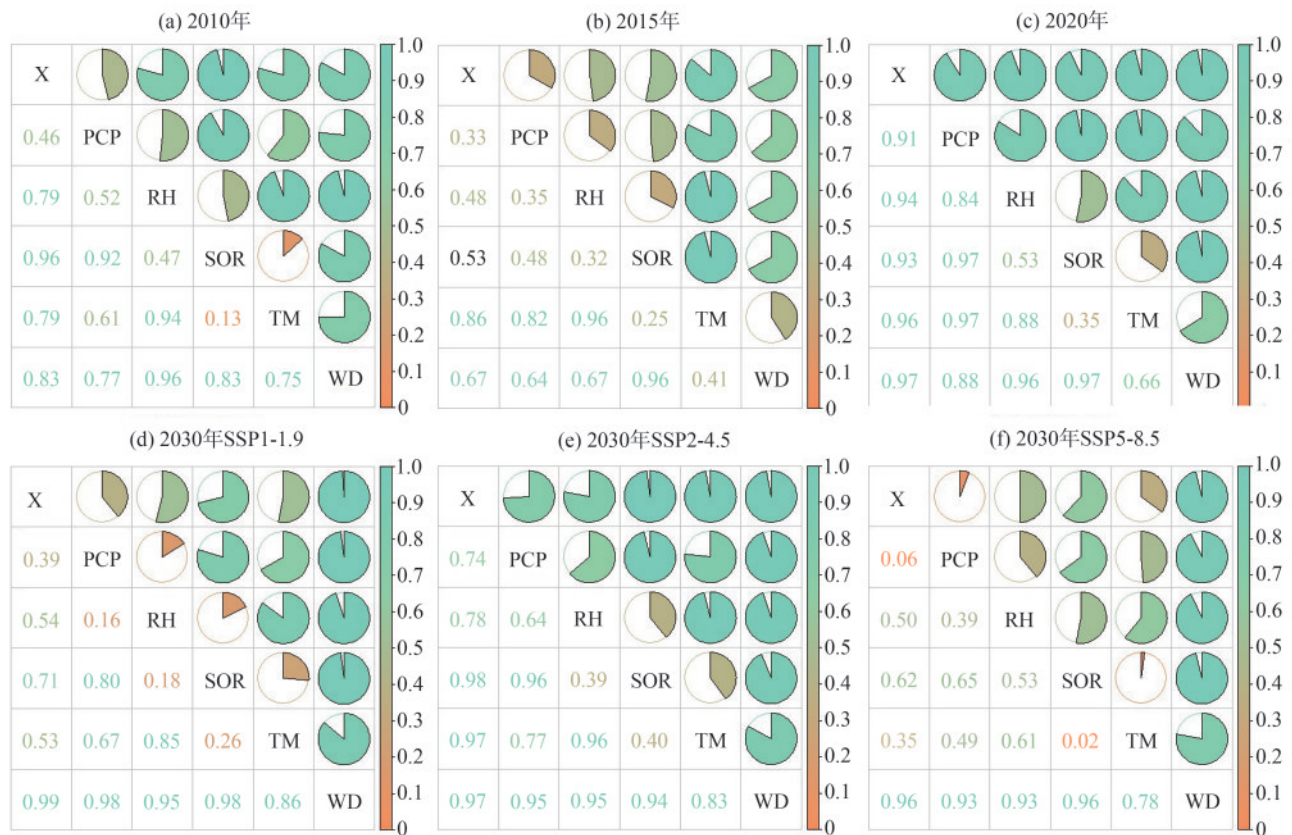


图 8 交互影响因子探测结果
Fig. 8 Interactive effect factor detection results

4 讨论

本研究采用SWAT模型对洱海流域径流量进行模拟预测。虽然模型验证期(2018—2020年)仅包含3 a观测数据,时间跨度相对较短,但由于校准期和验证期均未出现极端水文事件,模型在该流域表现出较好的适用性和可靠性。需要说明的是,验证期长度的确定主要受历史观测数据可获取性的限制。后续研究可考虑通过融合遥感降水产品、再分析数据等多源信息,或采用气候模式生成的合成水文序列开展更长时序的模型补充验证,以进一步提升模型评估的全面性,深化对洱海流域水文过程的认识。

本文对洱海流域径流量的驱动机制进行探测,以径流量为因变量,并选取PCP(降水)、RH(相对湿度)、SOR(太阳辐射)、TM(温度)和WD(风速)5个气候因子进行地理探测,通常情况下都是降水对流域径流量影响最大。进行单因子的探测也进行双因子的交互探测,在单因子的探测情况中,2010年时风速对洱海流域径流量影响显著,是由于洱海“湖陆风”效应显著,强风加速湖面蒸发与坡面径流冲刷,导致当年并不是降水对洱海流域影响最大。2015年太阳辐射对洱海流域径流量影响最大,由于当年太阳辐射强度高于常年平均值,导致地表蒸发量显著增加。洱海湖面及周边农田蒸发加剧,直接减少地表径流储量。双因子探测中,2015年TM-SOR的组

合对径流量的影响最大,温度和太阳辐射叠加,导致土壤水分快速蒸散,减少地下水补给,抑制径流量。2020年RH-SOR的组合方式对径流的影响显著,相对湿度较高的环境下,太阳辐射加热饱和空气引发强对流降水,径流量增强。

本文利用地理探测器着重分析气候因子对洱海流域径流量的时间分异特征及其驱动因素,选取2010年、2015年、2020年、2030年3种不同的情景,以径流量为因变量,并选取PCP(降水)、RH(相对湿度)、SOR(太阳辐射)、TM(温度)和WD(风速)5个气候因子进行地理探测。研究发现,在洱海流域水文过程研究中,气候因子因其显著的月际变化特征(相较于土地利用的年际变化特征)对径流量具有更强的解释力,与以往研究^[31]结果一致,即土地利用的月尺度变化对径流量的影响相对有限,使得气候因子成为洱海流域水文过程的主导驱动要素。后续研究将进一步整合土地利用的年际变化数据,构建“气候-土地利用”耦合模型,以更全面地解析洱海流域水文过程的驱动机制。

本文基于气候和土地利用对洱海流域径流量进行研究,2030年洱海流域的径流量在不同共享社会经济路径(SSP)情景下存在一定差异。其中,SSP5-8.5情景下的径流量最高,为19.592 m³/s;SSP1-1.9情景次之,为18.013 m³/s;SSP2-4.5情景最低,为

17.387 m³/s。尽管不同排放情景下径流量有所变化,但整体趋势保持相对稳定。但是由于研究主要是聚焦于自然发展情景,未充分考虑其他可能的情景因素,因此后续研究可进一步拓展研究视角,将生态保护情景与经济发展情景进行考量,并紧密结合洱海流域的国土空间规划,以更全面、深入地探究洱海流域径流量的变化规律及其影响因素,为洱海流域的水资源管理和生态保护提供更具针对性和科学性的决策依据。

5 结论

1)在 PLUS 模型中,以 2010 年的数据为基础,对 2020 年的土地利用情况进行预测,结果显示 Kappa 系数高达 97.15%,总体准确度达到 97.86%。在 SWAT-CUP 的率定中,当 $R^2 > 0.6$ 且 $NSE > 0.5$ 时,认为模型的模拟效果是可靠的。校准期的 R^2 为 0.86 且 NSE 为 0.58,验证期的 R^2 为 0.87 且 NSE 为 0.7,说明 SWAT 模型用于洱海流域的径流预测是可靠的。

2)洱海流域土地利用类型,耕地、林地和草地一直是洱海流域的主要土地利用类型。2010—2020 年,建设用地因城镇化加速持续扩张,建设用地需求的持续增长是土地利用变化的主要影响因素,导致耕地和林地面积减少。2030 年建设用地面积将增至 18 396 hm²,较 2020 年新增 1 427 hm²,主要源于耕地的转化。这一趋势与城镇化加速、人口增长及基础设施需求密切相关。

3)2011—2017 年,洱海流域的径流量总体保持稳定。2018 年,径流量出现显著上升,达到 22.651 m³/s,主要归因于当年降雨量增加导致相对湿度上升。2019 年径流量下降至 14.768 m³/s,可能与降雨量减少有关。从 2010—2020 年,洱海流域的径流量整体呈波动状态。通过耦合“CMIP6 数据-PLUS 模型-SWAT 模型”对未来径流量的预测显示,2030 年洱海流域的径流量在不同共享社会经济路径(SSP)情景下存在一定差异。其中,SSP5-8.5 情景下的径流量最高,为 19.592 m³/s;SSP1-1.9 情景次之,为 18.013 m³/s;SSP2-4.5 情景最低,为 17.387 m³/s。尽管不同排放情景下径流量有所变化,但整体趋势保持相对稳定。

4)在单因子对径流量的影响分析中,2010 年、2015 年、2020 年影响因素不同,分别为风速、太阳辐射和降水,2030 年 3 种不同情景下均是风速对径流的影响最大。在双因子对径流量的交互影响分析中,2010 年、2015 年和 2020 年均是太阳辐射和其他因子交互影响最大的年份,太阳辐射使得蒸发量上升,导致径流量减少;2030 年 3 种情景下均是降水和其他因子结合对径流量的影响优于其他组合,降水直接影响径流量的生成以及通过相对湿度对径流量产生影响。

参考文献:

- [1] 彭波.我国跨行政区湖泊治理研究[D].武汉:华中科技大学,2014.
PENG B. Study on governance of inter-regional lake in China[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [2] 金鑫,金彦香,杨登兴.SWAT 模型在土地利用/覆被变化剧烈地区的改进与应用[J].地球信息科学学报,2018,20(8):1064-1073.
JIN X, JIN Y X, YANG D X. Improved SWAT and its application to a region with severe land use/land cover changes [J]. Journal of Geo-Information Science, 2018, 20(8):1064-1073.
- [3] SULTANA R, CHOI M. Sensitivity of streamflow response in the snow-dominated sierra Nevada watershed using projected CMIP5 data [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2018, 23(8):e05018015.
- [4] AHMADALIPOUR A, MORADKHANI H, DEMIREL M C. A comparative assessment of projected meteorological and hydrological droughts: Elucidating the role of temperature [J]. Journal of Hydrology, 2017, 553:785-797.
- [5] SRIVASTAVA A, SAHOO B, RAGHUWANSHI N S, et al. Evaluation of variable-infiltration capacity model and MODIS-terra satellite-derived grid-scale evapotranspiration estimates in a river basin with tropical monsoon-type climatology [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2017, 143(8):e04017028.
- [6] RUAN H W, ZOU S B, YANG D W, et al. Runoff simulation by SWAT model using high-resolution gridded precipitation in the upper Heihe River basin, north-eastern Tibetan Plateau [J]. Water, 2017, 9(11):e866.
- [7] 赵芳芳,徐宗学.黄河源区未来气候变化的水文响应[J].资源科学,2009,31(5):722-730.
ZHAO F F, XU Z X. Hydrological response to climate change in headwater catchment of the Yellow River basin [J]. Resources Science, 2009, 31(5):722-730.
- [8] RESHMIDEVI T V, NAGESH KUMAR D, MEHROTRA R, et al. Estimation of the climate change impact on a catchment water balance using an ensemble of GCMs [J]. Journal of Hydrology, 2018, 556:1192-1204.
- [9] HASAN M M, WYSEURE G. Impact of climate change on hydropower generation in Rio Jubones basin, Ecuador [J]. Water Science and Engineering, 2018, 11(2):157-166.
- [10] 张萧萧,高舒,李旺林,等.基于 ArcSWAT 的日照沭河流域雨水集蓄潜力分析[J].中国农村水利水电,2020(12):46-50.
ZHANG X X, GAO S, LI W L, et al. Analysis of rainwater harvesting potential in Rizhao Shuhe basin based on ArcSWAT [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(12):46-50.
- [11] 刘飞,权赫春.基于 SWAT 模型的珙春河流域地表径流分析[J].科学技术创新,2021(36):163-165.
LIU F, QUAN H C. Surface runoff analysis of Hunchun River basin based on SWAT model [J]. Scientific and Technological Innovation, 2021(36):163-165.

- [12] 莫桂燕. 气候与土地利用变化下的龙滩流域径流响应研究[D]. 南宁: 广西大学, 2018.
MO G Y. Runoff response to the climate and land use change in the Longtan basin[D]. Nanning: Guangxi University, 2018.
- [13] 吴森, 石朋, 张行南, 等. 土地利用变化对径流影响的定量研究[J]. 人民黄河, 2018, 40(3): 39-43.
WU M, SHI P, ZHANG X N, et al. Quantitative research of land use change impact on runoff[J]. Yellow River, 2018, 40(3): 39-43.
- [14] 马新萍, 武涛, 余玉洋. 基于SWAT模型的汉江上游流域径流情景预测研究[J]. 国土资源遥感, 2021, 33(1): 174-182.
MA X P, WU T, YU Y Y. A study of runoff scenario prediction in the upper reaches of Hanjiang River based on SWAT model[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2021, 33(1): 174-182.
- [15] 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.
ZHANG J H, YAO Z H, LI J J, 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.
- [16] 姜彤, 吕嫣冉, 黄金龙, 等. CMIP6模式新情景(SSP-RCP)概述及其在淮河流域的应用[J]. 气象科技进展, 2020, 10(5): 102-109.
JIANG T, LÜ Y R, HUANG J L, et al. New scenarios of CMIP6 model (SSP-RCP) and its application in the Huaihe River basin[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2020, 10(5): 102-109.
- [17] 李慧. 气候变化影响下全球河流径流量极值和平均值变化趋势研究[J]. 水利水电快报, 2021, 42(7): e4.
LI H. Globally observed trends in mean and extreme river flow attributed to climate change[J]. Express Water Resources and Hydropower Information, 2021, 42(7): e4.
- [18] BLÖSCHL G, HALL J, VIGLIONE A, et al. Changing climate both increases and decreases European river floods[J]. Nature, 2019, 573(7772): 108-111.
- [19] BLÖSCHL G, HALL J, PARAJKA J, et al. Changing climate shifts timing of European floods[J]. Science, 2017, 357(6351): 588-590.
- [20] CHEN H P, SUN J Q, LIN W Q, et al. Comparison of CMIP6 and CMIP5 models in simulating climate extremes[J]. Science Bulletin, 2020, 65(17): 1415-1418.
- [21] WANG Q Z, SUN Y F, GUAN Q Y, et al. Exploring future trends of precipitation and runoff in arid regions under different scenarios based on a bias-corrected CMIP6 model[J]. Journal of Hydrology, 2024, 630: e130666.
- [22] 杨晨辉, 王艳君, 苏布达, 等. SSP“双碳”路径下赣江流域径流变化趋势[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(2): 177-187.
YANG C H, WANG Y J, SU B D, et al. Runoff variation trend of Ganjiang River basin under SSP "Double Carbon" path[J]. Climate Change Research, 2022, 18(2): 177-187.
- [23] 邹星捷, 朱丽华. BCC-CSM2-MR模式对东亚冬季季风气候特征的模拟评估[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(6): 182-191.
ZOU X J, ZHU L H. Assessment of the climate characteristics of the East Asian winter monsoon by BCC-CSM2-MR model[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2023, 45(6): 182-191.
- [24] 宋志红, 王辉, 景唤, 等. 引江济淮工程水源区和受水区干旱遭遇风险[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(5): 996-1005.
SONG Z H, WANG H, JING H, et al. The risk of concurrent drought between the water source and destination regions of Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 2023, 21(5): 996-1005.
- [25] 杜懿. 基于统计降尺度的东江流域未来气候预估[J]. 人民珠江, 2023, 44(3): 40-50.
DU Y. Climate projection of Dongjiang River basin based on statistical downscaling methods[J]. Pearl River, 2023, 44(3): 40-50.
- [26] 刘俸汝, 赵俊三, 林伊琳, 等. 基于气候和土地利用变化的云南省水源涵养功能时空演变及驱动力分析[J]. 水土保持学报, 2024, 38(5): 212-224.
LIU F R, ZHAO J S, LIN Y L, et al. Temporal and spatial evolution and driving force analysis of water conservation function in Yunnan Province based on climate and land use change[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5): 212-224.
- [27] GAO L N, TAO F, LIU R R, et al. Multi-scenario simulation and ecological risk analysis of land use based on the PLUS model: A case study of Nanjing[J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 85: e104055.
- [28] 林彤, 杨木壮, 吴大放, 等. 基于InVEST-PLUS模型的碳储量空间关联性及其预测: 以广东省为例[J]. 中国环境科学, 2022, 42(10): 4827-4839.
LIN T, YANG M Z, WU D F, et al. Spatial correlation and prediction of land use carbon storage based on the InVEST-PLUS model—a case study in Guangdong Province[J]. China Environmental Science, 2022, 42(10): 4827-4839.
- [29] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
WANG J F, XU C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.
- [30] 李芸, 李宝芬, 张坤, 等. 云南高原湖泊洱海流域年降水量时空分布特征研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2017, 15(3): 234-240.
LI Y, LI B F, ZHANG K, et al. Study on spatiotemporal distribution characteristics of annual precipitation of Erhai basin[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2017, 15(3): 234-240.
- [31] 龙笛, 李雪莹, 吴业楠, 等. 西南河流源区1981—2020年间径流变化的南北差异及气候驱动机制[J]. 科学通报, 2024, 69(25): 3821-3830.
LONG D, LI X Y, WU Y N, et al. Spatial disparity in runoff variability between southwestern China's River basin headwaters during 1981—2020[J]. Chinese Science Bulletin, 2024, 69(25): 3821-3830.