

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.05.033

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 Fengru, ZHAO Junsan, LIN Yilin, 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.

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

刘俸汝^{1,2,3}, 赵俊三^{1,2,3}, 林伊琳^{1,2,3}, 陈国平^{1,2,3}, 张龙江^{1,2,3}, 彭苏芬^{1,2,3}

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093; 2. 智慧矿山地理空间信息集成创新重点实验室, 昆明 650093; 3. 云南省高校自然资源空间信息集成与应用科技创新团队, 昆明 650211)

摘要: [目的] 探讨水源涵养功能是应对未来气候变化的重要途径, 现有研究主要侧重于历史和现状的水源涵养功能评估, 缺乏对未来水源涵养功能的认识, 限制了对区域可持续发展和动态管理的指导价值。[方法] 以云南省为例, 结合系统动力学模型、斑块级土地利用变化模拟模型(PLUS 模型)和 InVEST 模型, 构建了未来气候和土地利用变化影响下水源涵养评价框架。该框架可在未来气候变化和不同经济发展的背景下预测土地利用变化和评估水源涵养。基于 3 种共享社会经济路径和典型浓度路径(SSP1-1.9、SSP2-4.5、SSP5-8.5)的耦合情景对云南省水源涵养进行评价, 并利用最优参数地理探测器识别云南省水源涵养时空变化的主要驱动因子。[结果] (1) 2000—2030 年, 耕地、未利用地面积整体减少, 水域和建设用地面积逐渐增加, 林地和草地呈波浪线变化; 不同情景的土地利用变化趋势大致相同, 表现为草地 > 建设用地 > 耕地 > 未利用地 > 水域 > 林地。(2) 2000—2020 年水源涵养量总体上呈现逐渐减少趋势, 减少 $2.27 \times 10^9 \text{ m}^3$; 受不同气候和土地利用模式的影响, 不同情景下的水源涵养量有所差异, 其中 SSP2-4.5 情景下的水源涵养量最高, 为 $9.338 \times 10^9 \text{ m}^3$; 空间上呈“西南高东北低”的分布格局。(3) 地理探测结果表明, 年平均降水量、土壤类型、DEM 是影响水源涵养时空分布差异的主要驱动因素, 且降水量与其他因素交互显著增强。[结论] 研究根据云南省水源涵养时空分异提出不同建议, 为云南省生态系统服务研究和可持续发展路线规划提供科学参考。

关键词: CMIP6; SD-PLUS 模型; InVEST 模型; 地理探测器; 水源涵养

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242-(2024)05-0212-13

Temporal and Spatial Evolution and Driving Force Analysis of Water Conservation Function in Yunnan Province Based on Climate and Land Use Change

LIU Fengru^{1,2,3}, ZHAO Junsan^{1,2,3}, LIN Yilin^{1,2,3}, CHEN Guoping^{1,2,3},

ZHANG Longjiang^{1,2,3}, PENG Sufen^{1,2,3}

(1. College of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology,

Kunming 650093, China; 2. Key Laboratory of Smart Mine Geospatial Information Integration

Innovation, Kunming 650093, China; 3. Science and Technology Innovation Team of Spatial Information

Integration and Application of Natural Resources in Universities of Yunnan Province, Kunming 650211, China)

Abstract: [Objective] Exploring the water-holding function is an important way to cope with future climate change. Existing research mainly focuses on the assessment of historical and current water-holding function, and lacks the understanding of the future water-holding function, which limits the value of guiding the sustainable development and dynamic management of the region. [Methods] Taking Yunnan Province as an example, this paper combined the system dynamics model, patch-level land use change simulation model (PLUS model), and InVEST model to build a water conservation evaluation framework under the impact of

收稿日期: 2024-06-03 修回日期: 2024-06-23 录用日期: 2024-07-13 网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-09-18

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42301304)

第一作者: 刘俸汝 (1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事生态系统服务与土地利用、国土空间规划研究。E-mail: 2418895138@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://stbxb.alljournal.com.cn

future climate and land use change. The framework can predict land use change and assess water conservation in the context of future climate change and different economic developments. Water conservation in Yunnan Province was evaluated based on the coupling scenarios of three shared socioeconomic paths and typical concentration paths (SSP1-1.9, SSP2-4.5, SSP5-8.5). The main driving factors of temporal and spatial changes in water conservation in Yunnan Province were identified by using the optimal parameter geodetector. [Results] (1) From 2000 to 2030, the total area of cultivated land and unused land decreased, the area of water area and construction land increased gradually, and the forest land and grassland changed in a wavy line; The trend of land use change in different scenarios is roughly the same, namely: grassland > construction land > cultivated land > unused land > water area > forest land. (2) From 2000 to 2020, water conservation showed a gradually decreasing trend, decreasing by $2.27 \times 10^9 \text{ m}^3$; Under the influence of different climate and land use models, the water conservation under different scenarios is different, and the water conservation under the SSP2-4.5 scenario is the highest, which is $9.338 \times 10^9 \text{ m}^3$. The spatial distribution pattern is "high in the southwest and low in the northeast". (3) The results of geographical detection show that the average annual precipitation, soil type, and DEM are the main driving factors affecting the spatiotemporal distribution difference of water conservation, and the interaction between precipitation and other factors is significantly enhanced. [Conclusion] According to the temporal and spatial differences in water conservation in Yunnan Province, different suggestions were put forward in this study to provide scientific reference for ecosystem service research and sustainable development route planning in Yunnan Province.

Keywords: CMIP6; SD-PLUS model; InVEST model; geographic detector with optimal parameters; water conservation

Received: 2024-06-03

Revised: 2024-06-23

Accepted: 2024-07-13

Online(www.cnki.net): 2024-09-18

生态系统服务是人类从生态系统中获取的所有利益,也是自然系统与社会系统之间的纽带和桥梁^[1],生态系统服务对于地球生命支持系统的运转不可或缺^[2],直接或间接影响着人类的生存和发展。水源涵养功能是重要的生态系统服务功能,作为重要的调节服务,为人类赖以生存的水资源可持续利用提供保障。在全球变暖背景下,世界水循环速度加快,区域水资源涵养能力下降,对区域可持续发展产生较大影响^[3],使得水源涵养功能的研究逐渐成为生态系统服务与资源环境等领域的热点问题。

近年来,国内外学者对水源涵养功能进行大量的研究。在研究方法上,针对水源涵养量的估算方法不尽相同,例如,综合蓄水法、多因子分析、水量平衡法等方法体系^[4-8]。随着计算机技术的发展,对水源涵养的研究进入模型综合评估阶段,主要有SCS模型^[9]、TVDI模型^[10]、Terrain Lab模型^[11]、SWAT模型^[12]和InVEST模型^[13]等,目前计算水源涵养应用最多的是InVEST模型。张成虎等^[14]、苑跃等^[15]分别对流域的水源涵养进行评估和影响因素分析;吕乐婷等^[16]、王治等^[17]分别基于历史土地利用栅格数据研究水源涵养功能时空演变;龚诗涵等^[18]、李怡颖

等^[19]、刘树锋等^[20]分别从不同空间尺度上分析水源涵养功能,为生态系统服务和生态可持续发展提供研究价值和理论依据。综上所述,当前的研究热衷于对平原、干旱区或特定水域等进行水源涵养分析,对高原山区的研究较少。而大多数研究集中于评估历史气候变化或土地利用变化对水源涵养功能的影响,关于耦合未来气候变化和经济发展影响下的土地利用变化对水源涵养功能时空分布格局的研究有限。

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)^[21],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。越来越多的学者开始基于SSP-RCP数据对未来发展情景展开模拟研究。例如,范泽孟^[22]、SUN等^[23]分别基于不同情景SSP-RCP气候数据展开分析。但未来模式的发展充满不确定性和复杂性。因此,本文结合研究区未来发展规划,选用3个SSP-RCP情景(SSP1-1.9、SSP2-4.5、SSP5-8.5),分别从可持续发展路径、中间路径和以化石燃料为主路径3种发展路径进行综合分析,为研究区水源涵养功能的未来发展和生态保护提供新的见解。

针对土地利用多情景模拟已开展诸多研究,其主

要分为数量优化模拟和空间格局分布模拟。常用的面积需求设计方法有 SD、线性规划、Markov 等模型^[24-25],其中,SD 模型从系统论的角度构建土地利用变化驱动因素的信息反馈机制,对土地利用系统内复杂的非线性关系进行模拟^[26]。在空间格局分布模拟中,PLUS 模型相比 CA、CLUE-S、FLUS 等模型^[27]能够有效识别 LUCC 变化过程中的驱动因素,也可以同时对多个土地利用斑块进行动态模拟。该模型保留自适应惯性竞争和轮盘赌竞争机制的优势,利用随机森林(RF)算法准确地模拟土地利用空间分布的变化,从而确定每种土地利用类型的影响因素^[28]。随着人类活动对土地利用的影响,使得土地利用格局变化逐渐复杂和多样化,关于土地利用数量和空间的耦合模拟模型逐渐成为土地利用格局优化的研究热点^[29]。为了更好探究土地利用变化机制,提高模拟精度,本研究耦合 SD-PLUS 模型为未来土地利用时空分布格局研究提供保障。

云南省是中国西南和东南亚国家生态环境安全和区域可持续发展的重要生态屏障。但面临着水资源时空分布不均、水土流失严重、水资源与经济发展要素极不匹配等严重问题,这些问题受经济发展和气候变化影响较大,对该区域的可持续发展构成重大威胁。因此,在未来的发展过程中,探索气候变化和人类活动对水资源环境的影响有重要意义。本文基于 CMIP6 数据,耦合 SD-PLUS-InVEST 定量分析水源涵养功能的时空分布特征,结合最优参数地理探测器探究水源涵养功能时空变化的影响因素,为云南省生态安全保护、提高水源涵养服务功能及合理配置水资源提供一定参考依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

云南省(21°08'—29°15'N,97°31'—106°11'E)位于中

国西南山地高原地区,全省地势西北高、东南低,自北向南呈阶梯状逐级下降。该地区气候属于亚热带高原季风型,由于海拔高低悬殊和地形起伏等条件,形成多种多样的植被和土壤类型,为生物多样性资源和生态系统服务功能提供基础。全省水资源较为丰富,境内径流面积在 100 km² 以上的河流有1 002条,分属金沙江、南盘江、元江、澜沧江、怒江和伊洛瓦底江 6 大水系,但由于地理环境的复杂性,水资源时空分布不均匀,差异明显,存在空间异质性(图 1)。

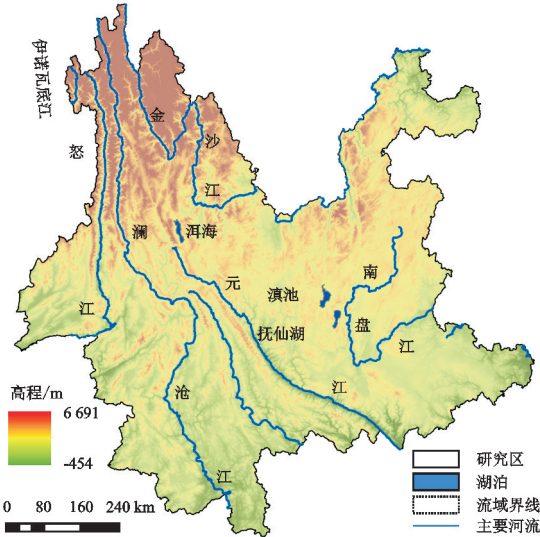


图 1 研究区地形地貌

Fig. 1 Topography of the study area

1.2 数据来源与预处理

本文研究数据主要包括自然地理数据、社会经济数据和气候数据(表 1),根据研究需要,将土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 类。通过重采样,所有数据都转换为 300 m×300 m 的统一分辨率,坐标系重投影为 WGS1984_UTM_ZONE_48N,栅格范围保持一致。

表 1 数据来源
Table 1 Data sources

数据名称	数据描述	分辨率	数据来源
土地利用数据	土地利用数据	30 m	中国科学院资源环境科学数据中心(www.resdc.cn)
气象数据	气温、降水、潜在蒸散量	1 km	
社会经济数据	GDP、POP	—	《云南省统计年鉴》
	路网数据	—	OSM(www. openstreetmap.org)
	坡度、坡向	—	由 DEM 处理得到
地理数据	河流数据	—	OSM(www. openstreetmap.org)
	DEM	30 m	地理空间数据云(www.gscloud.cn)
土壤数据	—	1 km	世界土壤数据库(webarchive.iiasa.ac.at)
SSP-RCP 数据集	2030 年 GDP、POP	1 km	共享社会经济路径(SSPs)人口和经济格点化数据集 ^[30]
	2030 年气温、降水、潜在蒸散量	1 km	国家地球系统科学数据共享服务平台(geodata.cn)

2 研究方法

2.1 研究框架及未来情景情景设计

本文以云南省为例,首先,根据3种不同情景的未来气候和经济数据,利用SD模型预测未来土地利用数量需求;其次,根据SD模型计算的未来土地利用数量数据,结合PLUS模型对未来土地利用空间分布进行模拟,得到不同情景下的土地利用空间分布

数据;然后,利用InVEST模型,对历史和未来情景的水源涵养功能进行定量评估;最后,对研究区水源涵养功能进行空间相关性分析,并利用最优参数地理探测器对水源涵养功能时空分布的影响因子进行探究(图2)。本研究选取3种共享社会经济路径和典型浓度路径(SSP1-1.9、SSP2-4.5、SSP5-8.5)的CMIP6耦合情景(表2)。

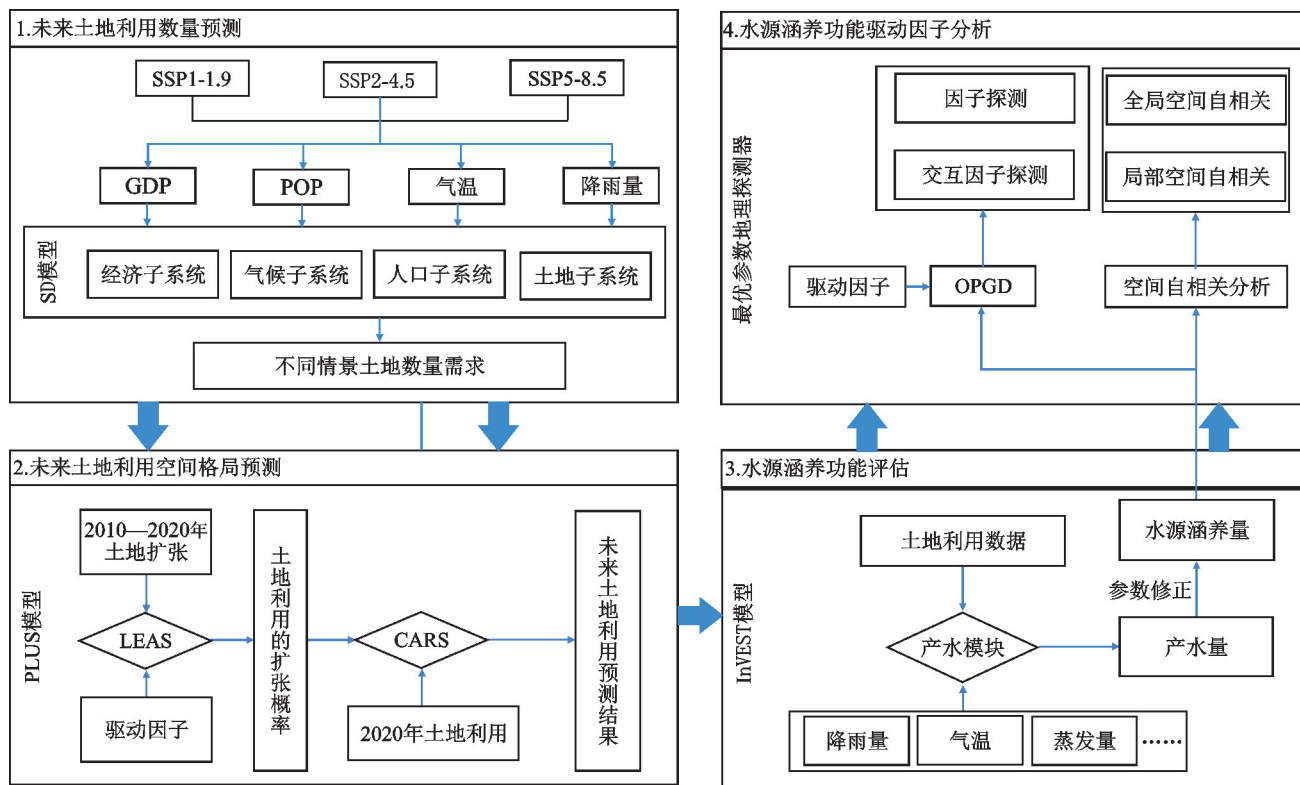


图2 技术路线

Fig. 2 Technical route

表2 基于CMIP6情景设计

Table 2 CMIP6 scenario-based design

情景模式	情景描述
SSP1-1.9	该情景是低社会脆弱性和低辐射强迫水平相结合。SSP1代表低社会脆弱性,考虑可持续发展目标,同时降低对资源强度和化石能源依赖度;RCP1.9是目前最低的辐射排放情景,化石燃料比重大幅降低,生物质能、风能光能等可再生能源占比大幅上升
SSP2-4.5	该情景是中等社会脆弱性和中等辐射强迫水平的结合。SSP2是一条社会经济和技术等趋势不会明显偏离历史模式的道路,其发展趋势大体上遵循其历史发展模式;RCP4.5是一种政府干预下的气候情景,可再生资源和碳捕捉系统的使用以及化石燃料使用率的不断减少
SSP5-8.5	该情景是高社会脆弱性和高强迫水平相结合。SSP5情景下以减缓挑战为主,强调传统的以经济发展为导向的方式,通过追求自身利益解决社会和经济问题;RCP8.5则是无气候变化等相关政策干预下的情景,是温室气体排放和浓度不断加剧的快速发展模式

2.2 基于SD模型的数量结构模拟

土地利用需求与区域社会经济建设密切相关,区域社会经济发展主要受人口、GDP、市场和技术进步、各级政策等人为因素的驱动^[31]。SD模型用于分析土地利用和社会经济发展之间的复杂联系,从系统视角优化土地利用数量结构,动态模拟区域土地利用变

化,设计出合理的土地利用方案。

本研究使用的SD模型主要由经济子系统、人口子系统、气候子系统和土地利用子系统组成。经济子系统:经济的快速发展,促进农、林、牧、渔和房地产建设等产业投资,从而影响耕地、林地、草地、水域和建设用地的变化;人口子系统:人口的增加引起建设用

行修正得到水源涵养量,计算公式为:

$$\text{Rentention}_{xj} = \min(1, \frac{249}{\text{Vel}_{xj}}) \times \min(1, \frac{\text{Ksat}_x}{300}) \times \min(1, \frac{0.9 \times \text{TI}_x}{3}) \times Y_{xj} \quad (5)$$

$$\text{TI}_x = \lg(\frac{\text{drainagearea}}{\text{Soildepth}_x \times \text{Slope}_x}) \quad (6)$$

式中:Rentention_{xj}为j类土地类型栅格单元x的水源涵养量(mm);Vel_{xj}为j类土地类型栅格单元x的流速系数;Ksat_x为栅格单元x的土壤饱和导水率(mm/d);TI_x为栅格单元x的地形指数;drainagearea为集水区栅格数量;Soildepth_x为栅格单元x的土壤深度(mm);Slope_x为栅格单元x的百分比坡度。

2.5 空间自相关

全局 Moran's I 进行全局自相关度量和检验,变化范围为[-1,1]。局部空间自相关用于识别局部区域存在的空间关联性和空间异质性,进一步显示具体的空间聚类特征。计算公式为:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{xj} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij}} \quad (7)$$

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x}) \sum_{j=1}^n \omega_{xj} (x_i - \bar{x})}{S^2} \quad (8)$$

式中:n为格网单元总数;x_i、x_j为格网单元i、j的测度值;(x_i-x)、(x_j-x)为第i、j个格网单元上测度值与平均值的偏差;ω_{xj}为标准化的空间权重矩阵;S²为方差。

2.6 最优参数地理探测器

地理探测器是用于探索空间分异性并揭示其背后驱动力的一组统计学方法。但是该方法对连续性数据的离散化处理需要人工进行设定,其中存在离散不够准确及人为主观因素的影响^[34]。最优参数地理探测器(optimal parameters-based geographical detector)可以计算所有连续型数据不同分级方式下及不同间断数下的q值,从而选择最优的分级方式。其中因子探测器用于分析单个因子对变量的驱动作用。而交互作用探测器主要用于分析不同驱动因子之间的交互作用。计算公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (9)$$

式中:h=1……L为变量Y或因子X的分层,即分类或分区;N_h和N分别为层h和全区的单元数;σ_h²和σ²分别为层h和全区Y值的方差;q为因子解释力,q的值域为[0,1],值越大说明该因子的作用越大。

为探明各类因素对研究区水源涵养空间分异的影响,以研究区2020年和2030年不同情景下的水源涵养量为因变量,选9个影响因子。分别为气候因子:年蒸散量(X4)、年平均气温(X5)、年平均降水量(X6);地理因子:土地利用类型(X1)、高程(X7)、坡度(X8)和土壤类型(X9);社会经济因子:GDP(X2)和POP(X3)。

3 结果与分析

3.1 土地利用时空演变

3.1.1 精度检验 为验证模型的仿真效果,本文对2020年SD模型模拟的各种土地利用类型和实际土地利用类型数据进行对比(表3)。结果表明,除未利用地用来限制土地总数量外,其余土地利用数据精度均<5%,满足真实土地利用系统的结构与作用机制。在空间上,利用PLUS模型模拟2020年的土地利用空间分布情况,与2020年土地利用真实数据进行对比,其中Kappa系数为0.88,总体精度为0.93,结果表明精度符合模拟要求。因此,通过耦合SD-PLUS模型,能够很好地从数量和空间上模拟未来土地利用情景。

3.1.2 土地利用时空变化 研究区2000—2030年,耕地、草地和未利用地面积整体呈减少趋势,水域、林地和建设用地面积逐渐增加,表明随着社会经济水平的不断提高,城市化进程正在扩大。由图4可知,历史土地利用与未来情景土地利用空间分布整体相似,研究区的土地利用类型以林地为主,面积占比超总面积的50%,以片状分布在各个区域;耕地主要分布在珠江流域西北部及西南部、金沙江流域东北部和澜沧江流域西部一带;草地集中分布在金沙江流域西北部及东南部、珠江流域南部等地;建设用地主要分布在昆明市及其周边城市;水域主要以湖泊形式分布在滇中和滇西北一带;未利用地主要分布在滇西北高原地带。

表 3 SD 模型精度检验
Table 3 SD model accuracy test

土地利用类型	模拟数据/ hm ²	真实数据/ hm ²	精度/%	总体 精度/%
耕地	6 710 640	6 770 736	-0.89	93.00
林地	22 047 100	22 042 791	0.02	
草地	8 661 610	8 615 421	0.54	
水域	372 580	380 061	-1.97	
建设用地	481 293	476 379	1.03	
未利用地	168 157	155 970	7.81	

不同情景土地利用(图5)表明,3个未来情景中,草地、建设用地、水域均呈增长趋势,耕地、林地、未利用地呈减少趋势。但不同情景的土地利用变化情

况各不相同,具体表现为:(1)SSP1-1.9 情景下,草地面积的增加主要来源于未利用地,建设用地的增加主要来源于耕地,水域的增加主要来源于草地和林地。(2)与 SSP1-1.9 情景相比,SSP2-4.5 情景下,草地面积变化较小,而水域、建设用地有所增加;草地主要由未利用地转移而来,建设用地主要来源于耕地和草地,水域则主要由林地转移而来。(3)SSP5-8.5 情景下,草地的增加主要来源于耕地和未利用地,建设用地的增加主要来源于草地和耕地,水域的增加主要来源于林地。不同情景下的城市扩张均呈相似的空间趋势,主要围绕现有的建成区持续扩张,扩张区域大多集中在经济较发达的滇中城市群,如昆明、曲靖和玉溪等城市。

3.2 水源涵养时空变化分析

研究区的水源涵养量是通过产水量进行参数修正得到,2000—2030 年产水量呈波浪线变化,水源涵养量的变化亦如此。由于未来 3 种情景的环境保护力度和社会发展强度不同,使得水源涵养分布存在差异。从图 6 可以看出,水源涵养高值(>1 000)区域主要集中在怒江流域、澜沧江和元江下游流域,得益

于林地和草原覆盖度高和人类活动程度低;水源涵养低值(<500)区域主要分布在金沙江流域及元江下游流域,这与滇中地区人口密集、建设用地不断扩张有关,导致该区域水源涵养功能一直处于较低水平;中值区域主要以元江和澜沧江中间区域为主。

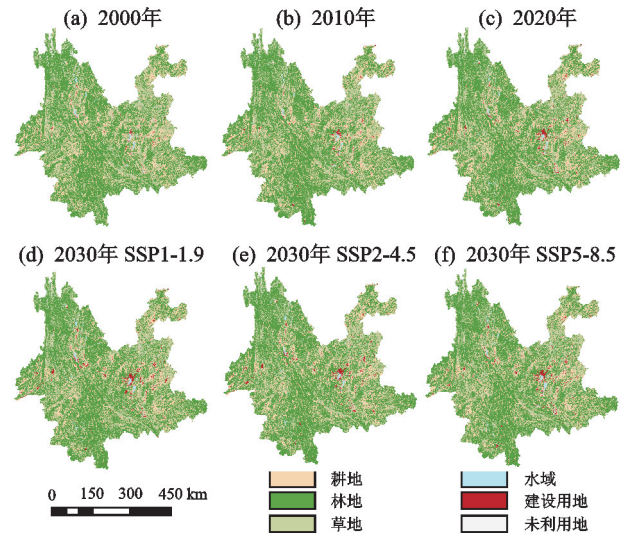
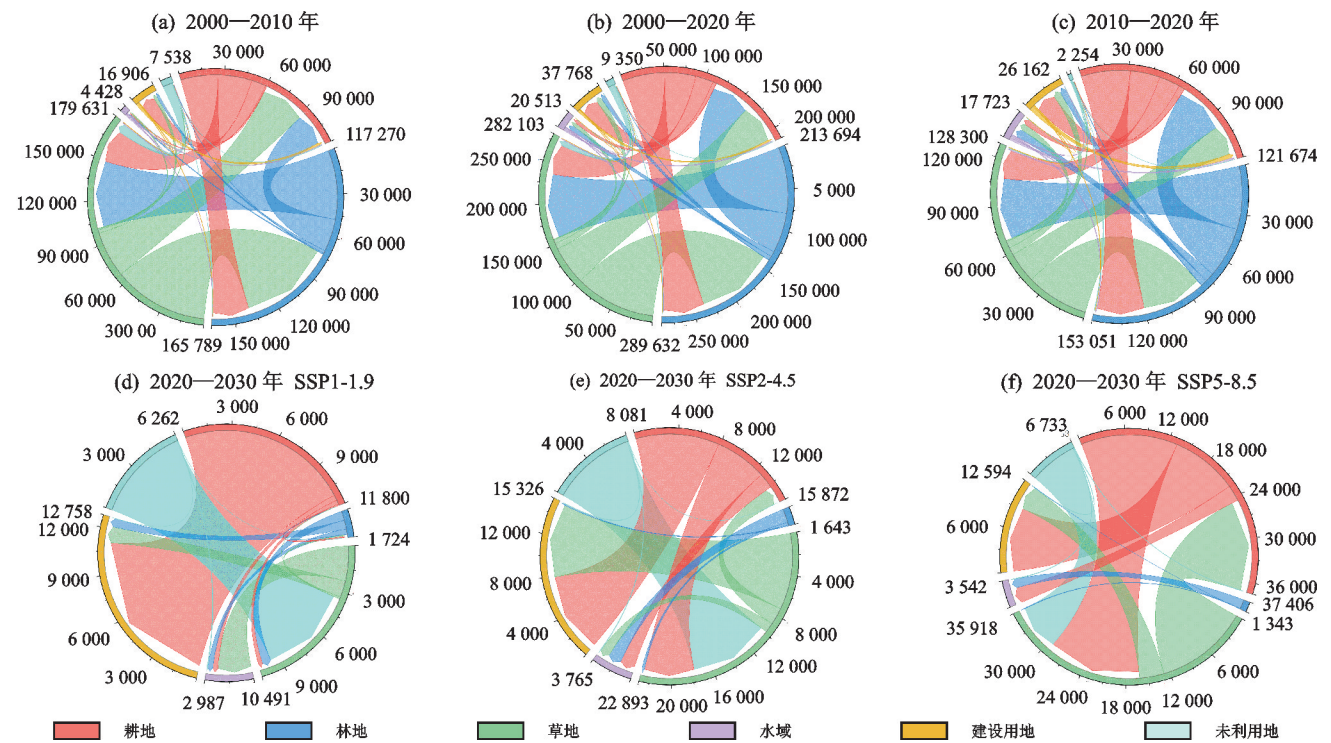


图 4 2000—2030 年云南省土地利用空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of land use in Yunnan Province from 2000 to 2030



注:图中数据表示土地利用面积(hm²)。

图 5 2000—2030 年云南省土地利用转移矩阵

Fig. 5 Land use transfer matrix for Yunnan Province from 2000 to 2030

2000—2020 年研究区水源涵养总量分别为 1.007×10^{10} , 8.036×10^9 , 7.802×10^9 m³,总体上呈减少趋势(表 4)。对不同地类的水源涵养量分析可知,林地、草地、耕地的水源涵养量高于建设用地、未利用地和水域,除建

设用地的水源涵养量在增加外,其他地类的水源涵养量均在降低。相比于 2020 年水源涵养量,2030 年不同情景的水源涵养量变化有所差异,情景 SSP1-1.9 的水源涵养量呈现减少趋势,而情景 SSP2-4.5 和情景 SSP5-8.5 的

水源涵养量则有所增加。具体表现为:(1)SSP1-1.9 情景下,水源涵养量减少 $6.77\times 10^8\text{ m}^3$,主要由于林地、草地、水域和未利用地的水源涵养量的降低,而耕地和未利用地存在少量增加。(2)SSP2-4.5 情景下,水源涵养总量增加 $1.54\times 10^9\text{ m}^3$,除未利用地的水源涵养量减少外,其他地类的水源涵养量均有增加。相比于其他 2 个情景,SSP2-4.5 情景的水源涵养量最多。(3)SSP5-8.5 情景下,水源涵养量增加 $1.39\times 10^9\text{ m}^3$,该情景下,所有地类的水源涵养量均有所增加。其中,耕地增加最明显,增加 $4.20\times 10^8\text{ m}^3$,其次是草地,增加 $3.86\times 10^8\text{ m}^3$ 。SSP5-8.5 情景下,云南省中部城市群的水源涵养明显高于 SSP1-1.9 情景和 SSP2-4.5 情景,但西部和南部的水源涵养低于 SSP2-4.5 情景,与 SSP1-1.9 情景分布相似,主要原因是在该情景下,经济与科技的高速发展,对生态问题有一定的改善,水源涵养整体提升,但该情景的碳排放浓度最高,影响气温和降水,森林的蒸发量最大,降低西南部的水源涵养。

3.3 水源涵养空间异质性和驱动因素分析

3.3.1 水源涵养量空间相关性 研究区 2000 年、2010 年、2020 年的水源涵养量的 Moran's *I* 值分别为 0.862,0.843,0.861;2030 年 SSP1-1.9、SSP2-4.5、SSP5-8.5 3 个未来情景的水源涵养量的 Moran's *I* 值分别为 0.848,0.973,0.777,*p* 值均 ≤ 0.001 ,表明研究区水源涵养量分布具有显著的空间正相关性和空间聚集效应(表 5),水源涵养量的高值趋于累积,低值趋于邻近,具有区域分布的特点。

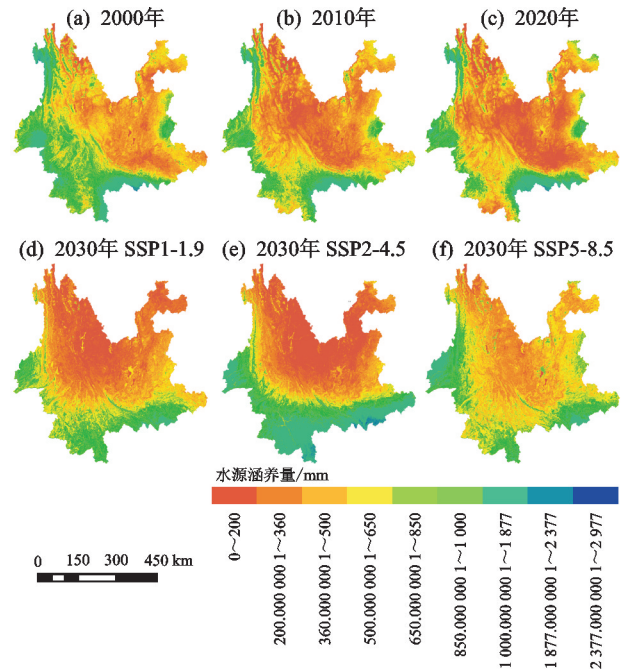


图 6 2000—2030 年云南省水源涵养量空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of water conservation in Yunnan Province from 2000 to 2030

表 4 2000—2030 年云南省不同土地利用类型的水源涵养量

Table 4 Water source capacity of different land use types in Yunnan Province from 2000 to 2030 10^9 m^3

土地利用类型	2000 年	2010 年	2020 年	2030 年		
				SSP1-1.9	SSP2-4.5	SSP5-8.5
耕地	1.896	1.548	1.461	1.475	1.801	1.881
林地	5.495	4.361	4.224	3.694	5.207	4.758
草地	2.517	1.976	1.924	1.761	2.103	2.310
水域	0.009	0.005	0.007	0.005	0.026	0.011
建设用地	0.061	0.080	0.119	0.162	0.176	0.199
未利用地	0.094	0.066	0.067	0.029	0.025	0.034
合计	10.072	8.036	7.802	7.126	9.338	9.193

利用 LESA 图研究水源涵养量空间单元属性的局域聚类特征,将空间聚类分为 4 种类型:高一高聚类,网格及其相邻网格的水源涵养量高;高一低聚类,网格内的水源涵养量高,但周围网格的水源涵养量低;低—高聚类,网格中的水源涵养量低,但周围的邻居网格高;低—低聚类,网格和周围的邻居网格的水源涵养量低。从图 7 可以看出,未来 3 种情景的高—高聚集类型特征各不相同,SSP1-1.9 情景的高—高聚集的面积占 26.83%,主要分布在伊洛瓦底江流域南部、澜沧江流域西南部及红河流域南部;SSP2-4.5 情景的高—高聚集的面积占 27.88%,分布在伊洛瓦底江流域南部、澜沧江流域西南部及红河流域南部、东南部 and 珠江流域东部,在该情景下气候条件适宜,高一高聚集区明显增加,而中部城市群的人口急剧增长和经济水平不断提高,对建设用地的需求不断增加,使得该区域的气候条件相比于其于地区更加严峻,导致该区域水源涵养功能受到严重破坏,低—低聚集区不断扩张;SSP5-8.5 情景的高—高聚集的面积占 19.19%,主要分布在伊洛瓦底江流域南部、澜沧江流域西部及少部分红河流域南部和东南部,该情景是碳排放最高的路径,使得生态系统遭到破坏,对气温和降水造成一定的影响,与前 2 种情景相比该情景的水源涵养量分布不均匀,高一高聚集也比较分散。进一步分析发现,高一高聚集区在研究区的西部和南部,地形起伏较大,为水蒸气的上升提供条件,使得降水增多水源涵养功能高,SSP1-1.9 和 SSP2-4.5 的高—高聚集区明显高于 SSP5-8.5,主要是由于 SSP5-8.5 情景下,人类主要以经济发展为主、导致工业化和城市化高于其余 2 个情景,因此高一高聚集区域呈扩散的趋势;而低—低聚集面积占比均高于高一高聚集,主要分布滇中区域和北部高原地区,因为在城市发展迅速和人口聚集的地区,土地利用类型转换速度快,使得水源涵养功能低。

3.3.2 水源涵养量影响因素分析 根据最优参数地理探测器结果表明,气候因子、地理因子和社会经济因子在不同程度上反映研究区水源涵养量空间分异的驱动力。基于因子探测器结果,由图 8 可知,各因子对水源涵养量的解释力从大到小依次为气候因子>地理因子>社会经济因子。年平均降水量的解释力均>70%,是研究区水源涵养空间分异最主要的驱动因素,其次是土壤类型、高程和年平均气温,解释力均>20%,是水源涵养空间分异重要的驱动因素,而其余因子解释力均<10%,对水源涵养空间分异的贡献度较小。

表 5 2000—2030 年云南省水源涵养量的 Moran's I 值
Table 5 Moran's I values of water conservation in Yunnan Province from 2000 to 2030

指数	2000 年	2010 年	2020 年	2030 年		
				SSP1-1.9	SSP2-4.5	SSP5-8.5
Moran's I 指数	0.862	0.843	0.861	0.848	0.973	0.777
p	0	0	0	0	0	0

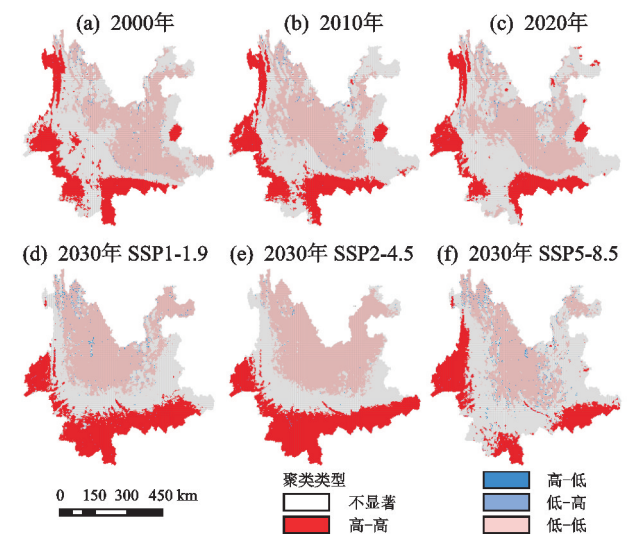


图 7 水源涵养量空间异质性分析

Fig. 7 Analysis of spatial heterogeneity in water yield

交互影响因子探测器结果图 9 表明,各驱动因子间交互结果对水源涵养空间分异的影响均呈增强作用。年平均降水量与土地利用类型交互作用均>0.85,其交互作用解释力最高。其次是降水量与土壤类型、降水量与 POP,解释力分别为 0.76 和 0.74,可能是土壤类型对水分的吸收和蒸发及人口聚集程度对水源涵养空间分异具有一定的影响程度。降水量与其他因子的交互作用解释力远高于其他因子之间的交互作用,表明降水量不仅直接影响水源涵养空间分异,同时也增强其他因子对水源涵养空间分异的影响。总之,与单因子解释力相比,多因子交互作用均显示为非线性增强和双因子增强,说明多因子交互作用对水源涵养量的空间分布高于单因子,双因子交互作用增强。

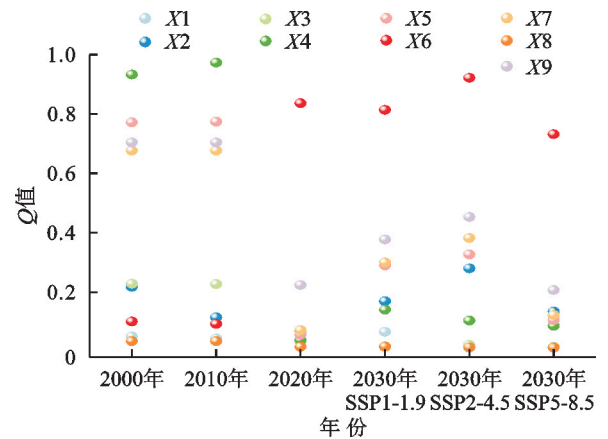


图 8 单因子探测结果(Q)

Fig. 8 Results of single-factor detection (Q)

4 讨论

4.1 气候与土地利用变化对水源涵养的影响

气候变化是当前人类发展面临的严峻挑战,气候变化不仅直接影响区域水源涵养,同时也影响土地利用的变化,从而间接影响区域水源涵养。而土地利用变化造成植被破坏、土壤侵蚀、水质恶化等一系列生态问题,对水源涵养的影响过程也极其复杂^[35]。在云南省西部和南部,土壤类型丰富,林地面积广,耕地与建设用地少,使得水分易渗透,又因该区域山脉高差大,易汇聚成溪,受气温影响较大,雨水充足,使得水资源充沛,因此该区域的水源涵养功能明显优于其余区域。而中部和东部地区由于人口密度大,建成区大,耕地比例高,对生态系统服务构成重大威胁,使得该区域的水源涵养功能低。说明不同区域的气候环境、地理因子、经济发展对水源涵养变化具有一定的影响,与地理探测器研究结果一致,即区域水源涵养的变化是多种因素共同作用的结果。在气候和土地利用变化的双重影响下,不同的驱动因子对水源涵养的空间分布格局产生不同的影响,降水量、土壤类型、DEM 是影响水源涵养时空分布差异的主要驱动因素,其中,降水量是影响研究区水源涵养变化的最主要驱动因子,且降水量与土地利用类型作用交互影响最大。所以在生态风险调控和生态环境保护过程中,应考虑不同驱动因素的特点,采取多样化的调控策略。

2000—2020 年,云南省城市化进程的加快使得人口数量增多,滇中城市群逐渐向外扩张,为弥补农田的大量减少,加大对森林的砍伐和开垦,使得东北部的水源涵养持续减少,并且不断向南扩张。而经济、气候等因子对水源涵养的影响较大,因此未来不同情景的水源涵养功能有所差异。SSP1V1.9 情景注重经济生态可持续发展,整体趋向于平缓发展,对水资源变化的影响程度较小,降水量和温度是 3 种情景中最小的,得到该情景下的水源涵养量最小。SSP2-4.5 情景沿历史基

准发展的同时,注重生态环境和生物多样性的保护,该情景下人口增长最为明显,导致云南省中部地区的居民用地和耕地的迅速扩张,加剧水资源的大量需求,而土地利用类型的快速转换,导致区域水土流失更加严重。加之该情景下气候条件适宜,整体上的水源涵养得到提升,说明生态保护政策取得一定的成效。SSP5-8.5 情景下经济的高速发展对生态环境的破坏强度较大,特别是南部森林的破坏加剧,导致该

区域储水能力降低,水源涵养功能局部下降。而在该情景下人口的增长得到一定的控制,中部城市群的快速城镇化情况得到缓解,使得区域生态环境有所恢复,因此中部城市群的水源涵养功能得到改善。水源涵养呈“西南高东北低”的空间分布格局,并且低值区逐渐向高值区蔓延,曲靖东北部水源涵养减少最明显。因此,在未来的发展中,应注重生态保护与经济发展的协调,优化流域的土地利用结构。

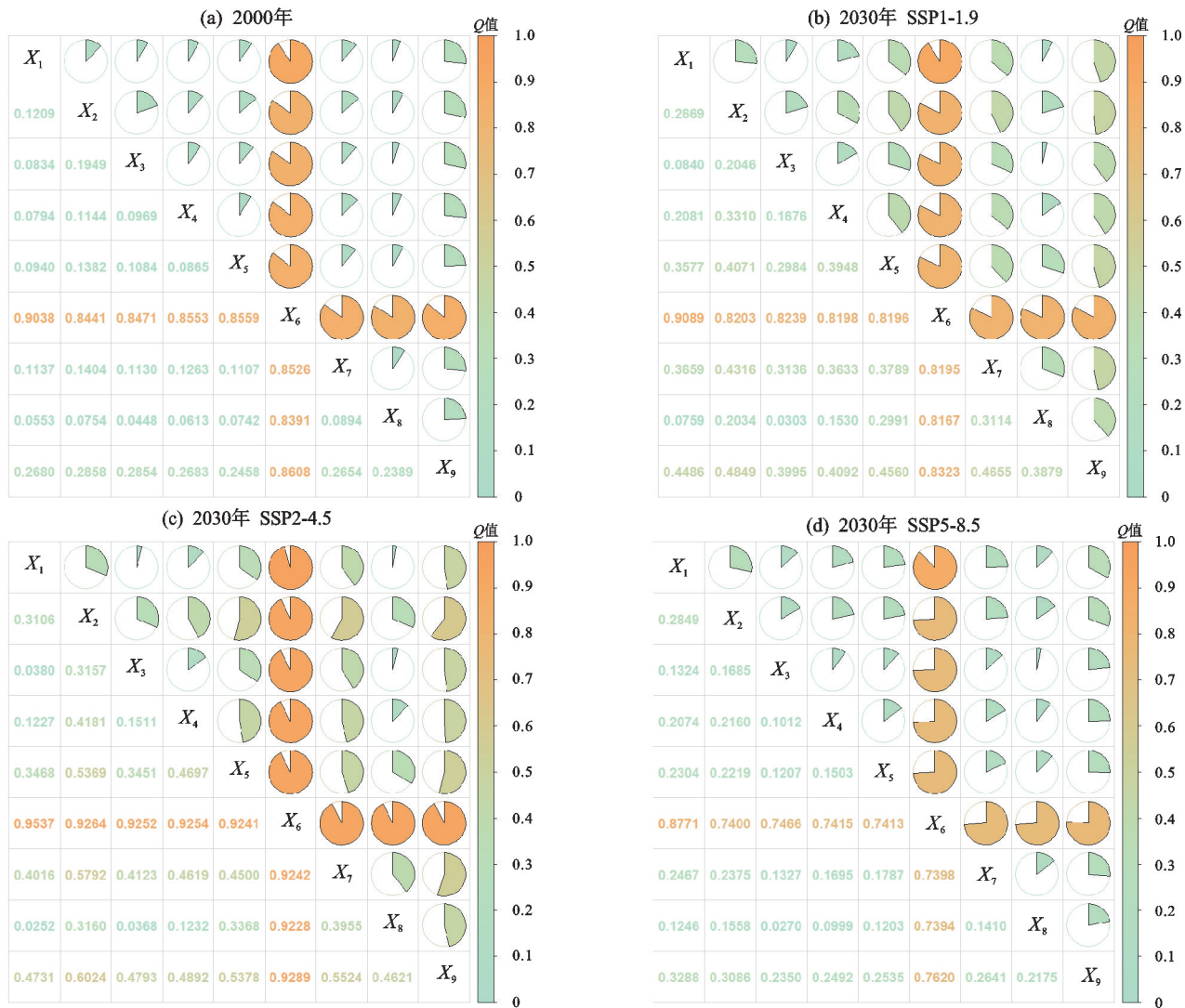


图9 交互影响因子探测结果(Q)

Fig. 9 Interaction impact factor detection results (Q)

4.2 建议措施

城市的发展避免不了建设用地的扩张,考虑到未来云南省城市化进程的发展趋势,应建立自然保护区或限制开发区,保护自然地表不被任意开采,保护重点生态系统。为提高生态安全,对中部城市群如昆明市、云溪市等城市严格遏制与管控耕地“非农化”“非粮化”,严格贯彻落实退耕还林还草政策以维持水源涵养服务功能的稳定。在水源涵养功能明显减弱的区域,如宣威市及其周边乡镇要加大水资源保护措施,加强水利工程建设,发展科学的灌溉体系,提高应

对气候和土地利用变化的能力。澜沧江流域下游和红河流域南部产水量多的地方会增加暴雨和洪水灾害的风险,应实施一定的保护措施,如景洪市、勐腊县应加强防洪和减灾工程建设。对滇西北地区如香格里拉市、德钦县等水源涵养始终保持在低值区域,应实施最严格的森林保护政策,避免建设用地的侵占,以提高生态系统服务功能。

4.3 试验局限性

本文结合 CMIP6 数据,耦合 SD-PLUS 模型分析研究区 2000 年、2010 年、2020 年历史土地利用变

化和未来情景 SSP1-1.9、SSP2-4.5、SSP5-8.5 土地利用变化,通过 InVEST 模型和最优参数地理探测器分析云南省历史和未来情景的水源涵养量时空分布特征及其影响因子。在数据和方法相对于之前对水源涵养量的研究有一定进步,但仍存在一些不足。SD 方法虽然可以将政策规划和研究区实际情况融入到未来的土地利用模拟中,但是对土地利用变化过程中存在的自然地理条件无法进行约束。InVEST 模型产水模块是基于水量平衡原理计算的,但该模型中使用的参数如蒸散系数和流速系数均参考已有文献的经验数据,而且也忽略地下水的影响,在一定程度上影响精度。因此,在未来的研究中,应多与本地区的数据特征结合分析,并加强实地数据监测,更加综合地对水源涵养功能进行评价,提高精度的准确性。

5 结 论

(1)云南省土地利用类型,林地面积最多,超过总面积的 50%,其次是草地和耕地。2000—2020 年土地利用类型变化最明显的是建设用地,增长 272 754 hm^2 ,主要来源于耕地,其次是草地和林地,未来 3 种情景的土地利用变化虽有不同,但变化程度均一致,表现为草地>建设用地>耕地>未利用地>水域>林地。在空间分布上,3 种未来情景与历史土地利用数据分布具有相似性,林地呈片状分布在各个区域,耕地和草地主要分布在滇西和滇东,建设用地以滇东为主,水域和未利用地则分别在滇中和滇西北。

(2)2000—2020 年水源涵养量总体上呈现逐渐减少趋势,总体减少 $2.27 \times 10^9 \text{ m}^3$;2030 年不同情景的水源涵养量相比于 2020 年水源涵养量,情景 SSP1-1.9 的水源涵养量呈减少趋势,而情景 SSP2-4.5 和情景 SSP5-8.5 的水源涵养量则有所增加,水源涵养总量为 $\text{SSP2-4.5} > \text{SSP5-8.5} > \text{SSP1-1.9}$ 。在空间分布上,空间聚类特征结果表明,研究区水源涵养量分布以高一高聚集、低—低聚集分布为主,而且未来不同情景水源涵养分布情况与历史水源涵养分布情况相似,总体呈“西南高东北低”的分布格局。

(3)由地理探测器结果发现,年平均降水量的 q 值均 >0.7 ,是影响水源涵养量空间分异性的最主要因素。因子交互结果显示,年平均降水量与土地利用类型交互作用 q 值均 >0.85 ,与其他因子交互作用呈非线性增强和交互增强的趋势,表明研究区水源涵养量变化是多个因子共同作用的结果,但气候因子的作用更强。

参考文献:

- [1] COSTANZA R, DE GROOT R, BRAAT L, et al. Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? [J]. *Ecosystem Services*, 2017, 28: 1-16.
- [2] COSTANZA R, D'ARCE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Ecological Economics*, 1998, 25(1): 3-15.
- [3] 兰翔宇,叶冲冲,王毅,等.1995—2014 年青藏高原水源涵养功能时空演变特征及其驱动力分析[J]. *草地学报*, 2021, 29(S1): 80-92.
- [4] LAN X Y, YE C C, WANG Y, et al. Spatiotemporal variation characteristics and its driving forces of water conservation function on the Tibetan Plateau from 1995 to 2014[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(S1): 80-92.
- [5] 李佳,邵全琴,刘纪远.基于综合蓄水能力法的森林水源涵养功能估算:以江西兴国县为例[J]. *西北林学院学报*, 2012, 27(4): 83-87.
- [6] LI J, SHAO Q Q, LIU J Y. Forest conservation estimation based on the integrated storage capacity method: A case study of Xingguo County in Jiangxi [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2012, 27(4): 83-87.
- [7] CHEN H, CHEN K, YANG M H. A new hysteresis model of the water retention curve based on pore expansion and contraction[J]. *Computers and Geotechnics*, 2020, 121: e103482.
- [8] 王升堂,孙贤斌,夏韦,等.生态系统水源涵养功能的重要性评价:以皖西大别山森林为例[J]. *资源开发与市场*, 2019, 35(10): 1252-1257.
- [9] WANG S T, SUN X B, XIA W, et al. Evaluating on significance function of water conservation in forest ecosystem: Taking Dabieshan Mountain in western Anhui Province as an example[J]. *Resource Development and Market*, 2019, 35(10): 1252-1257.
- [10] FU C, LIU Y Z, LI F, et al. Response of hydrological ecosystem services to land-use change and risk assessment in Jiangxi Province, China[J]. *Heliyon*, 2024, 10(3): e24911.
- [11] ZHAO L L, SHEN Y J, LIU M Z, et al. The impacts of land use changes on water yield and water conservation services in Zhangjiakou, Beijing's upstream watershed, China[J]. *Sustainability*, 2023, 15(14): e11077.
- [12] 崔景轩,李秀芬,郑海峰,等.典型气候条件下东北地区生态系统水源涵养功能特征[J]. *生态学报*, 2019, 39(9): 3026-3038.
- [13] CUI J X, LI X F, ZHENG H F, et al. Spatial analysis of water conservation function in Northeast China under different climatic conditions [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(9): 3026-3038.
- [14] 陈书林.基于 TVDI 模型的森林生态系统水源涵养服务功能研究[J]. *生态经济*, 2016, 32(12): 182-186.
- [15] CHEN S L. Estimating forest ecosystem service function of water conservation based on TVDI[J]. *Ecologi-*

- cal Economy, 2016, 32(12):182-186.
- [11] 陈佩佩, 张利华, 崔越, 等. 基于 BEPS-Terrainlab V_{2.0} 模型的鄂西湄河流域 NPP 模拟及环境响应分析[J]. 自然资源遥感, 2023, 35(4):273-281.
- CHEN P P, ZHANG L H, CUI Y, et al. Net primary productivity simulation and environmental response analysis of the Jianghe River Basin in western Hubei Province based on the BEPS-TerrainLabV_{2.0} model[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(4):273-281.
- [12] WANG Z Y, CAO J S. Spatial-temporal pattern study on water conservation function using the SWAT model[J]. Water Supply, 2021, 21(7):3629-3642.
- [13] 包玉斌, 李婷, 柳辉, 等. 基于 InVEST 模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化[J]. 地理研究, 2016, 35(4):664-676.
- BAO Y B, LI T, LIU H, et al. Spatial and temporal changes of water conservation of Loess Plateau in northern Shaanxi Province by InVEST model[J]. Geographical Research, 2016, 35(4):664-676.
- [14] 张成虎, 刘菊, 胡宝清, 等. 广西西江流域水源涵养服务空间格局及其影响因素[J]. 浙江农林大学学报, 2022, 39(5):1104-1113.
- ZHANG C H, LIU J, HU B Q, et al. Spatial pattern and its influencing factors of water conservation services in Xijiang River Basin, Guangxi[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2022, 39(5):1104-1113.
- [15] 苑跃, 张亮, 崔林林. 若尔盖高原生态系统水源涵养功能时空变化特征[J]. 生态学杂志, 2020, 39(8):2713-2723.
- YUAN Y, ZHANG L, CUI L L. Spatiotemporal variations of water conservation capacity in Ruorgai Plateau[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(8):2713-2723.
- [16] 吕乐婷, 任甜甜, 孙才志, 等. 1980—2016 年三江源国家公园水源供给及水源涵养功能时空变化研究[J]. 生态学报, 2020, 40(3):993-1003.
- LÜ L T, REN T T, SUN C Z, et al. Spatial and temporal changes of water supply and water conservation function in Sanjiangyuan National Park from 1980 to 2016[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(3):993-1003.
- [17] 王冶, 薛忠财, 王瑞丰, 等. 1990—2017 年承德市水源涵养功能时空变化格局与影响因素研究[J]. 生态与环境学报, 2022, 38(9):1138-1146.
- WANG Y, XUE Z C, WANG R F, et al. Spatial and temporal patterns of water retention and its influencing factors in Chengde city from 1990 to 2017[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(9):1138-1146.
- [18] 龚诗涵, 肖洋, 郑华, 等. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2017, 37(7):2455-2462.
- GONG S H, XIAO Y, ZHENG H, et al. Spatial patterns of ecosystem water conservation in China and its impact factors analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(7):2455-2462.
- [19] 李怡颖, 范继辉, 廖莹. 基于 InVEST 模型的张家口市水源涵养功能时空差异分析[J]. 草业科学, 2020, 37(7):1313-1324.
- LI Y Y, FAN J H, LIAO Y. Analysis of spatial and temporal differences in water conservation function in Zhangjiakou based on the InVEST model[J]. Pratacultural Science, 2020, 37(7):1313-1324.
- [20] 刘树锋, 陈记臣, 关帅, 等. 基于 InVEST 模型的未来土地利用变化对水源涵养功能的影响: 以杨溪河流域为例[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(15):67-70.
- LIU S F, CHEN J C, GUAN S, et al. Effect of future land use change on water conservation function based on InVEST model: Taking Yangxi River Basin as an example[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2020, 48(15):67-70.
- [21] 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.
- [22] 范泽孟. 基于 SSP-RCP 不同情景的京津冀地区土地覆被变化模拟[J]. 地理学报, 2022, 77(1):228-244.
- FAN Z M. Simulation of land cover change in Beijing-Tianjin-Hebei Region under different SSP-RCP scenarios[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(1):228-244.
- [23] SUN L, YU H J, SUN M X, et al. Coupled impacts of climate and land use changes on regional ecosystem services[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 326:e116753.
- [24] 胡焯婷, 李天宏. 基于 SD-CA 模型的快速城市化地区土地利用空间格局变化预测[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2022, 58(2):372-382.
- HU Y T, LI T H. Forecasting spatial pattern of land use change in rapidly urbanized regions based on SD-CA model[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2022, 58(2):372-382.
- [25] 张晓荣, 李爱农, 南希, 等. 基于 FLUS 模型和 SD 模型耦合的中巴经济走廊土地利用变化多情景模拟[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(12):2393-2409.
- ZHANG X R, LI A N, NAN X, et al. Multi-scenario simulation of land use change along China-Pakistan economic corridor through coupling FLUS model with SD model[J]. Journal of Geo-Information Science, 2020, 22(12):2393-2409.
- [26] 顾茉莉, 叶长盛, 李鑫, 等. 基于 SD 模型的江西省土地利用变化情景模拟[J]. 地理与地理信息科学, 2022, 38

- (4):95-103.
- GU M L, YE C S, LI X, et al. Scenario simulation of land use change in Jiangxi Province based on SD model [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2022, 38 (4):95-103.
- [27] 林伊琳,赵俊三,陈国平,等.基于 MCR-FLUS-Markov 模型的区域国土空间格局优化[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(4):159-170.
- LIN Y L, ZHAO J S, CHEN G P, et al. Optimization of regional territory space pattern based on MCR-FLUS-Markov model[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52 (4): 159-170.
- [28] LI Y M, YANG X, WU B W, et al. Spatio-temporal evolution and prediction of carbon storage in Kunming based on PLUS and InVEST models[J]. *PeerJ*, 2023, 11:e15285.
- [29] CAMACHO OLMEDO M T, PONTIUS R G, PAEGELOW M, et al. Comparison of simulation models in terms of quantity and allocation of land change[J]. *Environmental Modelling and Software*, 2015, 69:214-221.
- [30] 姜彤,苏布达,王艳君,等.共享社会经济路径(SSPs)人口和经济格点化数据集[J]. *气候变化研究进展*, 2022, 18(3):381-383.
- JIANG T, SU B D, WANG Y J, et al. Gridded datasets for population and economy under Shared Socioeconomic Pathways for 2020—2100[J]. *Climate Change Research*, 2022, 18(3):381-383.
- [31] LUO G P, YIN C Y, CHEN X, et al. Combining system dynamic model and CLUE-S model to improve land use scenario analyses at regional scale: A case study of Sangong watershed in Xinjiang, China[J]. *Ecological Complexity*, 2010, 7(2):198-207.
- [32] 云南省水利厅.云南省水资源公报(2010 年)[EB/OL]. [2015-01-24] (2024-05-25). <https://www.docin.com/p-1038083962.html>.
Yunnan Provincial Water Resources Department. Yunnan Provincial water resources bulletin (2010) [EB/OL]. [2015-01-24] (2024-05-25). <https://www.docin.com/p-1038083962.html>.
- [33] 云南省水利厅.云南省水资源公报(2020 年)[EB/OL]. [2021-11-19] (2024-05-25). <http://wcb.yn.gov.cn/html/shuiziyuangongbao/?time=2020>.
Yunnan Provincial Water Resources Department. Yunnan Provincial water resources bulletin (2020) [EB/OL]. [2021-11-19] (2024-05-25). <http://wcb.yn.gov.cn/html/shuiziyuangongbao/?time=2020>.
- [34] 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.
- [35] 乔亚军,张慧,韩晓盈,等.基于地理空间角度的黑龙江省水源涵养功能变化的驱动因素分析[J]. *生态学报*, 2023, 43(7):2711-2721.
QIAO Y J, ZHANG H, HAN X Y, et al. Exploring drivers of water conservation function variation in Heilongjiang Province from a geospatial perspective[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(7):2711-2721.
- (上接第 211 页)
- [32] 樊杰,钟林生,黄宝荣,等.地球第三极国家公园群的地域功能与可行性[J]. *科学通报*, 2019, 64(27):2938-2948.
FAN J, ZHONG L S, HUANG B R, et al. Territorial function and feasibility of the Earth's Third Pole national park cluster[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(27):2938-2948.
- [33] 于海彬,张懿锂,刘林山,等.青藏高原特有种子植物区系特征及多样性分布格局[J]. *生物多样性*, 2018, 26 (2):130-137.
YU H B, ZHANG Y L, LIU L S, et al. Floristic characteristics and diversity patterns of seed plants endemic to the Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Biodiversity Science*, 2018, 26(2):130-137.
- [34] 胡西武,贾天朝.基于生态敏感性与景观连通性的三江源国家公园生态安全格局构建与优化[J]. *长江流域资源与环境*, 2023, 32(8):1724-1735.
HU X W, JIA T C. Construction and optimization of ecological security pattern in Three-River-Source National Park based on ecological sensitivity and landscape connectivity[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, 32(08):1724-1735.
- [35] 高雅丽.报告显示人类活动对青藏高原环境影响有限[N]. *中国科学报*, 2023-06-02(1).
GAO Y L. Report shows that human activities have limited impact on the environment of the Qinghai-Tibet Plateau[N]. *Chinese Journal of Science*, 2023-06-02(1).