

DOI: 10.20103/j.stxb.202404150833

赵先超, 李艺霖, 欧阳晓. 碳中和导向下湘江流域土地利用空间冲突测度及情景模拟. 生态学报, 2025, 45(23): - .
Zhao X C, Li Y L, Ouyang X. Measurement and multi-scenario simulation of land use spatial conflicts in Xiangjiang River Basin under carbon neutrality. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(23): - .

碳中和导向下湘江流域土地利用空间冲突测度及情景模拟

赵先超¹, 李艺霖^{1,*}, 欧阳晓²

¹ 湖南工业大学城市与环境学院, 株洲 412007

² 湖南财政经济学院工程管理学院, 长沙 410205

摘要:以碳中和目标为导向测度及模拟土地利用空间冲突,有助于构建区域绿色低碳国土空间格局,实现土地资源的可持续利用。以湖南省境内湘江流域为例,基于 1990—2020 年土地利用分类数据,运用景观生态风险评价方法,从土地复杂性、土地脆弱性和土地稳定性三个维度构建土地利用空间冲突测度模型,在网格尺度上分析流域内土地利用空间冲突的时空演变特征。借助新兴的斑块生成土地利用模拟模型(PLUS),并构建碳中和指数,探讨不同情景下 2030 年湘江流域的空间冲突特征及碳中和水平。结果表明:(1)湘江流域土地利用结构变化显著,林地占比最大,建设用地扩张 151.37%。PLUS 模拟结果显示,湘江流域在自然发展情景下建设用地占比增加 0.41%,低碳发展情景下的不同地类的面积变化更加合理。(2)1990—2020 年湘江流域的土地利用空间冲突平均值呈先下降后上升趋势,从 0.56 降至 0.51 后回升到 0.52,整体维持在相对可控等级。(3)2030 年自然发展、耕地优先、生态优先和低碳发展情景的空间冲突平均值分别为 0.506、0.523、0.507 和 0.505,城镇中心区域的冲突情况有所缓解。低碳发展情景的碳中和水平高值区占比 21.56%,仅次于占比最高的生态优先情景(21.65%),该情景能够在兼顾碳平衡的同时最大程度缓解土地利用冲突。研究为湘江流域的可持续协调发展提供重要数据支持,对土地资源高效利用和生态安全具有重要意义。

关键词:土地利用冲突;国土空间优化;碳中和;多情景模拟;PLUS 模型

Measurement and multi-scenario simulation of land use spatial conflicts in Xiangjiang River Basin under carbon neutrality

ZHAO Xianchao¹, LI Yilin^{1,*}, OUYANG Xiao²

¹ College of Urban and Environmental Sciences, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China

² School of Engineering Management, Hunan University of Finance and Economics, Changsha 410205, China

Abstract: The strategic pursuit of global carbon neutrality goals necessitates a profound understanding of land use dynamics and their associated spatial conflicts. The precise measurement and sophisticated simulation of land use spatial conflicts, explicitly guided by the imperative of carbon neutrality, constitute critical methodologies for informing the development of regional territorial spatial patterns that are inherently green and low-carbon. Such approaches are fundamentally vital for advancing the sustainable utilization of land resources and mitigating environmental degradation. This study took the Xiangjiang River Basin in Hunan Province as a case, using land use classification data from 1990 to 2020. It employed a landscape risk assessment method to construct a land use spatial conflict measurement model from three dimensions: land complexity, land vulnerability, and land stability. We analyzed the spatiotemporal evolution characteristics of land use

基金项目:湖南省自然资源科研项目(20230108GH);湖南省社科评审委重大课题(XSP22ZDA008);湖南省教育厅重点项目(22A0419);湖南工业大学研究生科研创新项目(CX2307)

收稿日期:2024-04-15; 网络出版日期:2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liyilin221000@foxmail.com

spatial conflicts within the basin at the grid scale. By utilizing the emerging Patch Generation Land Use Simulation (PLUS) model and constructing a carbon neutrality index, the study explored the characteristics of land use spatial conflicts and carbon neutrality levels in the Xiangjiang River Basin under different scenarios for 2030. The results showed that: (1) The land use structure in the Xiangjiang River Basin underwent significant changes, with forest land accounting for the largest proportion, and built-up land expanding by 151.37%. The PLUS simulation results will show that, under the natural development scenario, the proportion of built-up land in the Xiangjiang River Basin will increase by 0.41%, while the area changes of different land types under the low-carbon development scenario will be more reasonable. (2) The average land use spatial conflict in the Xiangjiang River Basin from 1990 to 2020 showed a declining-then-rising trend, decreasing from 0.56 to 0.51 and then rebounding to 0.52, remaining overall within a relatively controllable level. (3) In 2030, the average spatial conflict values under the scenarios of natural development, farmland priority, ecological priority, and low-carbon development are 0.506, 0.523, 0.507, and 0.505 respectively, with a noticeable alleviation of conflicts in urban center areas. The high-value areas of carbon neutrality under the low-carbon development scenario account for 21.56%, second only to the ecological priority scenario (21.65%), indicating that this scenario can best alleviate land use conflicts while maintaining carbon balance. The findings of this study furnish crucial empirical support essential for fostering sustainable and coordinated development within the Xiangjiang River Basin. Furthermore, the research carries substantial implications for achieving efficient land resource utilization and safeguarding regional ecological security.

Key Words: land use conflicts; territorial spatial optimization; carbon neutralization; multi-scenario simulation; PLUS model

土地利用的多功能性承载着农业生产、城市建设和生态保护等需求^[1]。然而,城镇化和工业化的持续推进、农村地区加速转型以及多重政策执行和适应性不足等问题,使得土地资源承受着前所未有的压力,土地利用空间冲突及生态风险愈发严峻^[2]。生境破碎化加剧削弱景观稳定性,进而导致生态系统碳汇功能衰退和碳排放强度上升,形成“冲突升级-碳失衡-生态退化”的恶性循环,成为掣肘区域可持续发展的核心难题^[3]。为破解这一困局,我国将“双碳”目标纳入生态文明建设顶层设计,并在二十届三中全会中提出要加快经济社会发展全面绿色转型,健全生态环境治理体系,推进生态优先、节约集约、绿色低碳发展。碳中和目标驱动下的土地利用转型必然引发多维度空间博弈,加剧国土空间冲突显性化。因此,科学测度土地利用空间冲突的强度及空间分布,将碳中和目标纳入国土空间规划和治理,探索有效的冲突缓解路径,既是重构人地系统协调关系的重要科学问题,也是高质量发展的必然要求。

20世纪70年代,国际社会开始关注土地利用冲突问题,联合国粮农组织于1976年发布了《土地评价纲要》,提出土地规划应以土地适宜性为导向,并鼓励各国建立本国土地评价体系^[4]。土地利用空间冲突涉及生态、环境及经济等多个领域,当前土地利用空间冲突研究不断深化,已涵盖冲突类型识别^[5]、时空演变^[6]、驱动机制^[7]、冲突协调权衡^[8-9]等多个方面。在方法上既包括参与式调查^[10]、博弈论等定性分析工具,也包括“风险-效应”识别模型^[10]、土地利用适宜性评价^[11]等定量分析方法。基于景观生态风险的空间冲突测度模型因其能综合反映土地系统的复杂性、脆弱性和动态性,成为精细化识别冲突空间格局的重要手段。国内已有研究广泛覆盖不同区域类型,董兆蓉等对西部生态脆弱典型区川西农牧交错带开展“三生”空间冲突研究^[13],邱国强等以城镇化水平快速提高的苏锡常地区为例对土地利用空间冲突进行定量分析^[14],但鲜少有学者对流域的土地利用空间冲突进行研究。近年来,各国研究者们陆续提出新的研究视角,如生态环境^[15]、地理空间^[16]、利益相关者^[17],但现有研究多聚焦于历史时期的冲突识别,缺乏对未来多情景发展的预测,且较少关注土地冲突与碳中和目标的内在联系。

湘江流域是长江中游的重要支流流域,贯穿湖南省多个核心城市,生态资源敏感性高、经济发展活跃度高、国土空间格局失序风险随发展增大。如何精准测度流域内土地利用空间冲突,并通过科学合理的土地利用优化路径,协同推进冲突调控与碳中和目标,成为当前亟需破解的关键问题。基于此,本研究从碳中和视角

出发,提出了“理论建构-机理解析-冲突识别-情景模拟-路径优化”的研究模式,基于空间复杂性、空间脆弱性和空间稳定性以网格尺度构建湘江流域土地利用空间冲突测度模型,通过 PLUS 模型预测多种情景下 2030 年土地利用格局,开展研究区空间冲突演化、消解及碳平衡研究,旨在有效协调生态文明建设与“双碳”目标下经济发展与生态保护之间的关系,为潜在土地利用冲突的识别与预防提供理论和方法支持,为全国山水林田湖草综合治理、区域低碳转型和国土空间优化提供示范与参考。

1 理论框架

土地利用空间冲突是土地资源利用过程中因不同利益主体或目标之间的竞争与矛盾所引发的空间或功能上的不协调现象,是自然环境、社会经济、政策制度等多维因素交互作用的结果^[18]。碳中和与土地利用空间冲突之间的关系本质上是相互制约与反馈的双向机制(图 1)^[19]。

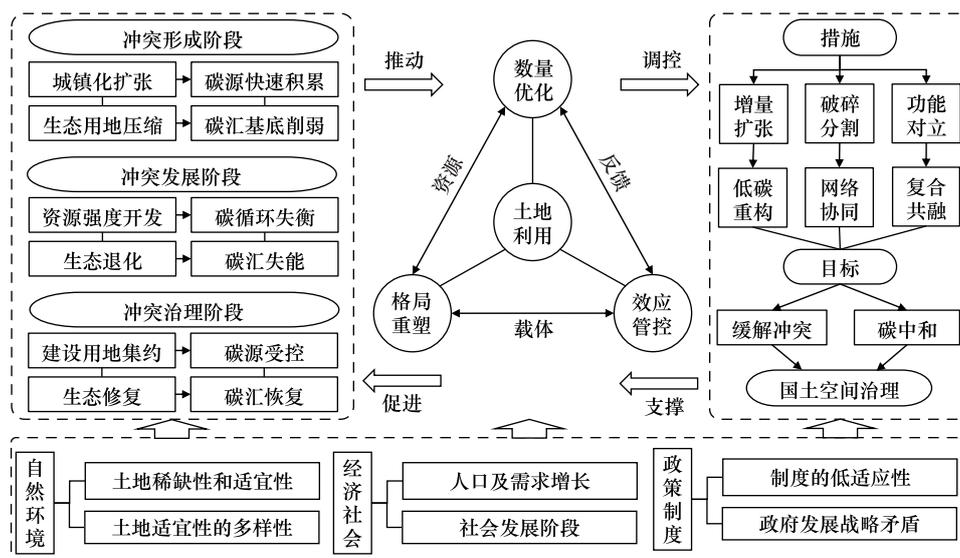


图 1 理论框架示意

Fig.1 Schematic representation of the theoretical framework

在冲突形成阶段,碳中和受制于土地利用的无序扩张。经济增长与城镇化主导了土地开发行为,建设用地不断侵占生态空间,导致土地利用方式单一、结构失衡^[20]。大量森林、湿地、草地等生态用地被转换为建设用地,不仅加剧景观格局的破碎化,而且严重削弱碳汇能力。同时,高排放产业与高强度建设活动推高碳排放总量,使碳中和目标陷入困境。碳中和被动受限于空间冲突的扩张过程,其实现路径尚未被系统纳入土地利用决策中。

在冲突发展阶段,碳中和与空间冲突矛盾交织,双向影响加剧。土地利用冲突逐步显性化,空间挤压、生态退化与功能对立成为突出问题。此时,碳中和目标开始在政策层面得到重视,并开始与土地利用规划相融合。部分生态用地被划为保护区,高排放区域受到限制,形成初步的调控机制。然而,由于土地用途间的竞争加剧,碳中和目标与现实用地需求产生错配^[21],政策落地难、空间管控弱,二者的矛盾性显著增强^[22]。此阶段,碳中和对冲突演化产生初步干预作用,但仍受其制约,一方面,高能耗建设用地的大规模扩展推动碳排放强度陡升;另一方面,生态系统破碎削弱了碳汇系统的自我修复与调节能力,生态韧性下降。

在冲突治理阶段,碳中和引导土地利用转型,同步推动冲突消解。碳中和成为土地利用优化与空间规划的重要目标导向,其作用从被动适应转向主动引领。土地利用政策开始重构空间结构,限制高排放用地、拓展生态空间,推动用地结构向“减排增汇”转型。通过数量结构优化、生态空间连通性提升、多功能用地复合布局等策略,实现碳中和目标与空间冲突治理的协同推进。碳中和在此阶段不再是外部目标,而是转化为内部

驱动力,深度嵌入土地利用决策,成为统筹资源配置、生态安全和发展需求的核心逻辑。

在碳中和导向下,土地利用空间冲突的消解路径主要从三个维度展开。一是从“增量扩张”到“低碳重构”的数量结构优化。通过调整不同土地利用类型的比例关系来减少源头性冲突,压缩高碳排用地的无序扩张,释放更多生态空间,从而增强碳汇能力。二是从“破碎分割”到“网络协同”的格局重塑。通过优化生态用地的布局、提升斑块集中度、构建廊道与缓冲区,将原有破碎化、边缘化、孤岛化的用地格局向“连通-协同-稳定”型转化,削弱冲突演化机制,并提升碳循环系统的完整性与连续性,改善其空间承载环境^[23]。三是从“功能对立”到“复合共融”的多功能管控^[24]。在单一土地单元中实现生态、生产、生活等多重功能的空间整合,如利用生态农业、绿色基础设施等方式打破功能对立,实现空间功能的多重叠加^[25],在提升土地利用效率的同时,为碳中和目标提供更稳定的生态支撑^[26]。

2 研究区概况与方法

2.1 研究区域概况

湘江是中国长江的第二大支流,流经南岭向洞庭湖平原过渡的山脉和盆地,沿途接收各种支流后,在湘阴县入洞庭湖,全长 856km,流域总面积 96253km²。研究区为湖南省湘江全流域,覆盖湖南省长沙、湘潭、株洲、衡阳、郴州、永州、娄底、邵阳、岳阳市等 9 市 70 个县级行政区,地貌以山地、丘陵为主(图 2)。湘江流域是湖南新型工业化、新型城镇化和农业现代化的集中区和先导区,流域产业结构以第二产业和第三产业为主,2020 年流域地区二三产值分别占湖南省总产值的 71.46%和 71.11%,城镇化率达 65.02%。

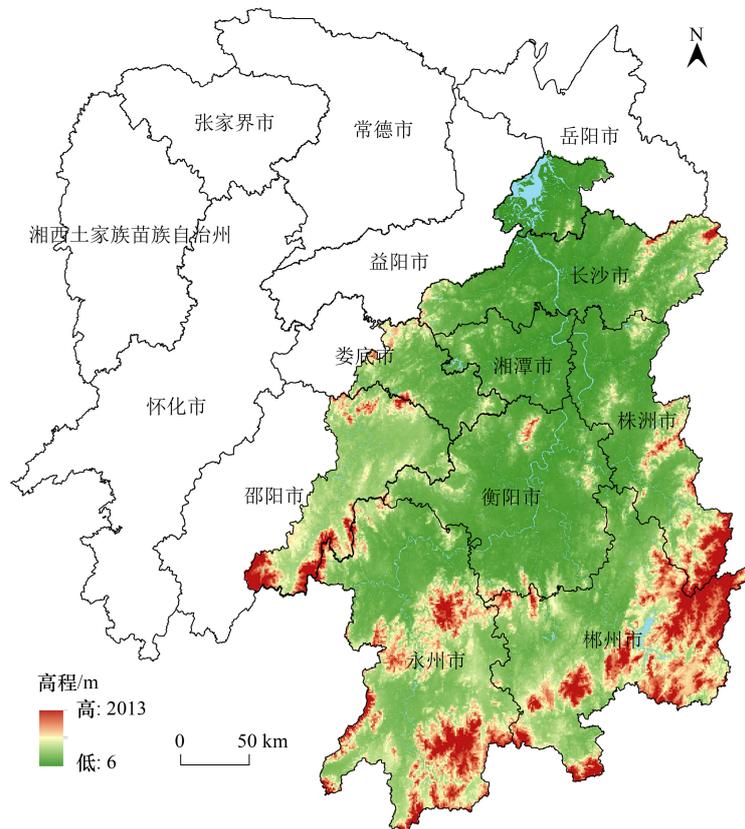


图 2 研究区示意图

Fig.2 Location of the study area

2.2 数据来源

本研究使用的数据主要包括土地利用数据、统计年鉴数据和用于预测土地利用变化的相关栅格数据,均

来自国内外公开数据库(表 1)。1990—2020 年 4 期土地利用数据,空间分辨率为 30m×30m,参考已有分类标准,将其划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 种地类。

表 1 数据来源信息表
Table 1 Data information

数据类型 Data type	数据名称 Data name	数据来源 Data source	
基础数据 Basic data	土地数据	资源环境科学数据平台 (https://www.resdc.cn/)	
	第二、三产业产值	《湖南省统计年鉴》	
	单位 GDP 能耗	《湖南省统计年鉴》	
限制区 Restricted area	自然保护区	ArcGIS Online https://www.ArcGIS Online.cn/	
驱动因子 Driving factor	经济社会条件	资源环境科学数据平台	
	自然环境条件	GDP	
		夜间灯光	https://data.tpdc.ac.cn/
		NDVI	资源环境科学数据平台 (https://www.resdc.cn/)
		年平均降水	
		年平均温度	
		DEM	
	坡度	利用 DEM 数据进行坡度分析得出	
	土壤类型	中国 1:100 万的土壤类型数据库	
	土壤 PH 值		
	土壤有机质		
	交通区位条件	距市区中心距离	Open Street Map (https://www.openstreetmap.org/)
		距县区中心距离	借助 ArcGIS 进行欧氏距离计算得出
		距铁路距离	
		距高速距离	
距主干道距离			
距二级道路距离			
距三级道路距离			
距水域距离	Open Street Map (https://www.openstreetmap.org/)		

2.3 主要研究方法

2.3.1 碳排放测算

研究中耕地的碳排放采用直接碳排放系数法,直接碳排放系数法指通过利用某种土地利用类型的面积与其对应的碳排放系数直接计算该土地利用类型产生的碳排放的方法。结合湘江流域实际情况,参考已有研究成果判定^[27-28],耕地土地碳排放系数取 0.497t/hm²。建设用地的碳排放量测算采用间接碳排放系数法,由于湘江流域部分区县的能源统计数据存在缺失现象,考虑到区域的第二产业值和第三产业值主要来自建设用地,单位 GDP 能耗可以较为准确地反映能源利用情况,因此,参考王桂波等的研究^[29-30],利用二、三产业值与单位 GDP 能耗来间接计算湘江流域建设用地的碳排放量,计算公式如下:

$$E = \text{GDP}_{2,3} \times H \times K \quad (1)$$

式中, E 为建设用地碳排放量; $\text{GDP}_{2,3}$ 为第二、三产业产值; H 为单位 GDP 能耗; K 为折标准煤系数。

2.3.2 InVEST 模型

InVEST 模型使用每种土地利用类型的碳密度和土地利用图来评估每个单元中的碳储量,本文考虑的三个碳库分别为:地上生物碳库,地下生物碳库和土壤有机碳库。计算公式为:

$$C_{\text{tot}} = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} \quad (2)$$

式中, C_{tot} 为总的碳储量; C_{above} 为地上生物碳库碳储量, C_{below} 为地下生物碳库碳储量, C_{soil} 为土壤有机碳库碳储量。以上计算结果最后通过 ArcGIS 赋值到相应土地利用栅格数据上。研究区碳密度数据主要参考糜毅等的研究成果^[31-34]。

2.3.3 碳中和指数

“碳中和”指数(Carbon Neutrality Index, CNI)反映区域碳储量和碳排放的平衡能力的大小,即区域碳吸收

量占全区的比例与该区域碳排放量占全区比例之商,计算公式如下:

$$CNI = \frac{CA_L/CA}{E_L/E} \quad (3)$$

式中, CA_L 、 CA 分别为第 L 个网格和整个湘江流域的碳吸收量, E_L 、 E 分别为第 L 个网格和整个湘江流域的碳排放量。CNI 越高表示碳吸收生态承载系数越高,生态系统固碳能力越强,反之则越低,固碳能力越弱。

2.3.4 空间冲突测度模型

景观生态学理论认为,人类活动引发的土地利用强度差异会通过景观格局演变反馈于生态系统^[35]。当自然因素或人为干预对土地生态系统造成影响时,景观斑块的空间结构随之调整,从而影响土地利用冲突的空间分布特征。生态风险的高低可作为衡量土地利用空间冲突程度的重要指标^[36]。因此,本研究以生态风险水平来表征土地利用冲突的强度^[37],从风险来源、受体及效应三个方面构建土地利用冲突测度模型^[38]。在此基础上,结合土地系统的复杂性、脆弱性及稳定性三大属性,选取空间复杂性指数(CI)、空间脆弱性指数(FI)及空间稳定性指数(SI),衡量区域内空间单元的冲突程度^[39]。该模型已广泛应用于土地利用冲突研究,并获得认可^[38,40]。

为了避免区域空间单元的碎片化,综合考虑研究范围、尺度、空间分辨率、空间斑块状态和数据类型,选择 5km×5km 网格作为评价单元。空间冲突综合指数(SCCI)表达式为:

$$SCCI = CI + FI - SI \quad (4)$$

式中, CI 为空间复杂性指数; FI 为空间脆弱性指数; SI 为空间稳定性指数。

(1) 空间复杂性指数(CI)

土地利用格局在城镇化进程中趋于复杂化,面积加权平均斑块分形维数(AWMPFD)指数在一定程度上反映了自然或人为影响造成的景观格局的复杂性,因此,利用 AWMPFD 指数表征空间复杂性指数(CI),即风险源。CI 值越高,表明斑块的边界越曲折或不规则,受到外界干扰的强度也越大。CI 表示为:

$$CI = AWMPFD = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[\frac{2 \ln(0.25 P_{ij})}{\ln(a_{ij})} \left(\frac{a_{ij}}{A} \right) \right] \quad (5)$$

式中, P_{ij} 为第 i 类用地类型第 j 个斑块的周长; a_{ij} 为第 i 类用地类型第 j 个斑块的面积; A 为空间单元总面积; m 为网格中斑块的总数; n 为土地利用类型的数量。

(2) 空间脆弱性指数(FI)

FI 主要反映景观斑块抵御外部干扰的能力,即风险受体,其数值越低,表明承受外部干扰的能力越强,冲突的强度也就越低。FI 表示为:

$$FI = \sum_{i=1}^n F_i \times \frac{a_i}{A} \quad (6)$$

式中, F_i 为第 i 类景观脆弱性指数; a_i 为第 i 类土地总面积; A 为空间单元总面积; n 为土地利用类型的数量。基于研究区土地利用变化,将未利用地、森林、草地、耕地、水域、建设用地脆弱性指数分别赋值为 1、2、2、3、4、5。

(3) 空间稳定性指数(SI)

景观稳定性表征每一景观的稳定性,体现在人类活动和自然地理过程中景观斑块的演变。常用斑块密度(Patch density, PD)表示区域景观破碎化程度,即风险效应。PD 值越大,反映景观破碎化程度越高,土地稳定性越差,单位面积内的冲突越激烈^[41]。SI 表示为:

$$SI = 1 - PD, PD = \frac{n_i}{A} \quad (7)$$

式中, n_i 为第 i 种土地利用类型的景观斑块数; A 为空间单元总面积。

此外,为了使各项指标能够聚集,采用最大最小标准化方法将 SCCI、CI、FI 和 SI 的计算结果归一化到 0—

1 的范围内。按照等区间划分,将土地利用空间冲突分为稳定可控(0、0.2)、基本可控(0.2、0.4)、相对可控(0.4、0.6)、基本失控(0.6、0.8)、严重失控(0.8、1.0)5 个等级。

2.3.5 Markov-PLUS 模型及多情景设定

PLUS 是基于现有土地利用类型来模拟未来土地利用覆被变化的模型,该模型首先对两个时期的土地利用数据进行叠加,从后期的土地利用数据中提取变化状态的图像元素,表示各土地利用类型的变化面积,然后利用随机森林算法探索各土地利用类型与多种驱动因子之间的关系,得到各土地利用类型的变化规律,即各土地利用类型的发展潜力^[42]。PLUS 模型能够将各种空间因素的影响与地理单元动态结合,以模拟土地利用变化,从而获得高精度、高准确性的土地利用空间分布。利用 2010 年和 2020 年两期土地利用数据对模型精度进行验证,Kappa 系数大于 0.85,具有较高可信度,满足研究需求。

(1) 土地利用变化驱动因子

土地利用变化受经济社会、自然环境、交通区位等方面综合影响,本研究结合湘江流域的基本发展要求,考虑数据的可获取性,最终确定 19 项驱动因子见表 1。

(2) 发展情景设定

结合湘江流域土地利用变化现实情况和国家政策导向,综合区域碳中和目标,对湘江流域 2030 年土地利用变化设定四种情景:自然发展情景、耕地优先情景、生态优先情景和低碳发展情景。在自然发展情景下,延续历史时期理想状态下的土地利用发展趋势,但考虑区域生态文明建设战略和湘江保护相关政策,除建设用地外,其他用地类型间转化不做限制。耕地优先情景下,考虑永久基本农田的保护目标,加强耕地保护力度,耕地向其他用地的转化概率减少 60%;湘江是长江的一级支流、湖南的“母亲河”,位于长江经济带经济发展、生态文明建设的关键部位,因此生态优先情景考虑到《湖南省湘江保护条例》、《湖南省“十四五”生态环境保护规划》等相关政策,提高林地、草地等碳汇地类面积,将水域、生态保护区设置为限制条件,并限制林地、草地等转化为建设用地;低碳发展情景是处于前三种发展情景之间的平衡发展模式,在考虑到耕地保护、生态保护及碳中和目标的同时,不过度发展导致建设用地无序扩张,合理地分配各类用地需求。林地、草地和水域作为碳汇的主要来源得到优先保护,严格控制建设用地扩张侵占生态用地,林地、草地向建设用地转变减少 20%,未利用地向建设用地转变增加 20%,将生态保护区、湘江等开放水域设置为约束条件,限制其向其他地类转变。

3 结果分析

3.1 土地利用时空变化

从图 3 可以看出,1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年湘江流域林地占比最大,空间分布均匀;耕地集中在永州、邵阳、衡阳等地,郴州市桂东县大量耕地在 2000—2010 年间转变为林地,“非粮化”问题严重;水域主要

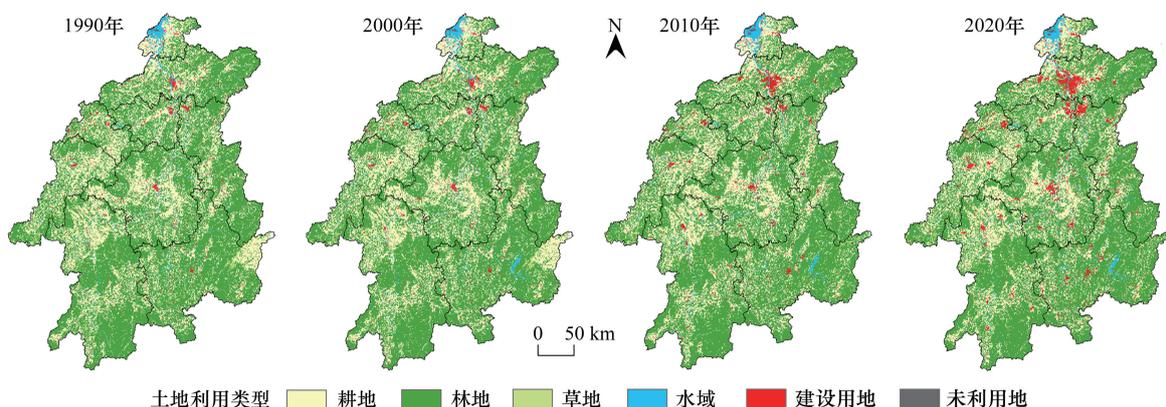


图 3 1990—2020 年土地利用类型分布图

Fig.3 Distribution of land use pattern from 1990 to 2020

分布在岳阳,长沙、湘潭、郴州等也有少量水域;建设用地在流域内各市中心城区聚集度高,呈现多点集聚扩张趋势。为进一步揭示各类土地利用类型的变化特征,研究统计了各地类的比重(表 2),耕地和草地的面积占比持续下降,林地、水域呈先上升再下降趋势,建设用地面积占比持续上升,2010—2020 年间增长比例最高,达 1.05%。

表 2 1990—2020 年土地利用类型占比/%

Table 2 Percentage of land use pattern from 1990 to 2020

年份 Year	耕地 Cropland	林地 Forest	草地 Grassland	水域 Water	建设用地 Built-up land	未利用地 Unused land
1990	32.26	61.49	2.84	1.87	1.46	0.07
2000	32.02	61.39	2.83	2.06	1.62	0.07
2010	30.43	61.99	2.61	2.19	2.67	0.11
2020	29.97	61.59	2.51	2.15	3.67	0.10

3.2 土地利用多情景模拟

基于 PLUS 模型,以 2010—2020 年为基准期,预测 2030 年 4 种发展情景下的土地利用分布,结果见表 3 和图 4。自然发展情景下,耕地、林地、草地和水域面积占比均呈下降趋势,建设用地增长 0.41%,表明在不受政策限制的情况下,建设用地会随人类活动的加剧快速扩张,侵占其他类型用地,对生态和粮食安全造成较大威胁。耕地优先情景下,耕地向其他用地转化受到限制,建设用地扩张得到有效控制,耕地面积大幅增加,林地、草地、水域将分别减少 6786.560km²、304.388km²、318.133km²。生态优先情景下,建设用地减少量最多,达 0.25%,而林地、水域分别增加 287.1619km²、26.6216km²。低碳发展情景下通过科学规划和合理布局,各类用地占比均衡。对比四种情景下土地利用空间分布,耕地优先情景有效控制了耕地缩减,耕地与林地的混杂程度明显降低,但水域受耕地侵占过多。生态优先情景则有效保障了林地、水域等生态用地。低碳发展情景下,除未利用地外其他 5 类用地占比在 4 种情景中均排在第二位,比例较为合理。

表 3 不同情景下 2030 年土地利用类型占比/%

Table 3 Percentage of land use pattern in 2030 under different scenarios

情景 Scenario	耕地 Cropland	林地 Forest	草地 Grassland	水域 Water	建设用地 Built-up land	未利用地 Unused land
自然发展 Natural development	29.96	61.25	2.46	2.15	4.08	0.09
耕地优先 Cropland priority	37.27	54.92	2.21	1.84	3.67	0.09
生态优先 Ecological priority	29.95	61.88	2.49	2.18	3.42	0.09
低碳发展 Low-carbon development	30.00	61.41	2.47	2.15	3.87	0.10

3.3 土地利用空间冲突时空演变特征

利用空间冲突模型对湘江流域空间冲突进行测算(表 4),并采用 ArcGIS10.5 对研究区冲突水平进行可视化。1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年的平均冲突水平分别为 0.56、0.54、0.51 和 0.52,均处于相对可控等级,可控级别空间冲突网格单元数分别占研究区域的 50.26%、55.14%、63.92%和 60.73%(图 5)。1990—2020 年内,基本失控和相对可控等级占比最大,严重失控等级占比最小。稳定可控、基本可控和相对可控等级的占比均呈上升趋势,但 2010 年后,稳定可控和相对可控等级的占比有所下降,分别减少了 13 个和 187 个网格单元。

1990 年基本失控等级网格单元数个数高达 1747 个,占比 40.67%,相对可控等级比例为 29.35%,这一时间点的冲突情况最为严峻,严重失控等级网格单元数占比高达 9.08%。2000 年严重失控等级网格单元数减少 145 个,可控等级的网格单元数增加,特别是相对可控等级网格单元数增加了 125 个,表明湘江流域土地利用冲突情况逐渐好转。2010 年相对可控等级占比最高,增加至 39.15%,严重失控等级网格单元占比为四个

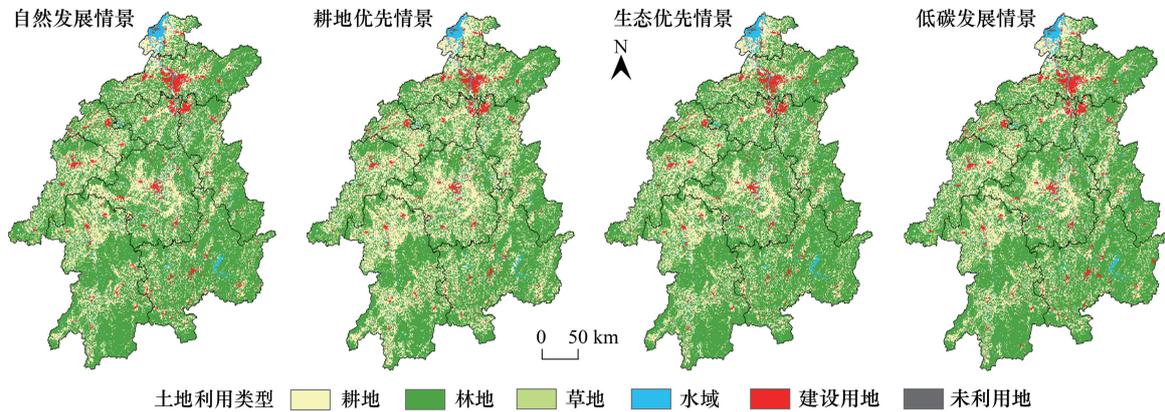


图 4 多情景模拟土地利用类型分布图

Fig.4 Multi-scenario simulation of land use pattern

时间点中最低值。相较于 2010 年,2020 年基本可控等级网格单元数增加 63 个,基本失控等级和严重失控等级占比分别增加 2.12%和 1.07%,表明湘江流域内整体土地利用空间冲突加剧。

表 4 1990—2020 年土地利用冲突指数测度结果/%

Table 4 Results of the land use conflict index measurement from 1990 to 2020

变化程度 Degree of change	阈值区间 Threshold interval	空间单元百分比 Percentage of space units			
		1990 年	2000 年	2010 年	2020 年
稳定可控 Definitely controllable	0—0.2	5.96	6.05	7.24	6.94
基本可控 Basically controllable	0.2—0.4	14.94	16.83	17.53	18.99
相对可控 Relatively controllable	0.4—0.6	29.35	32.26	39.15	34.80
基本失控 Basically uncontrollable	0.6—0.8	40.67	39.15	33.43	35.54
严重失控 Heavily uncontrollable	0.8—1.0	9.08	5.70	2.65	3.72

1990—2020 年湘江流域长沙东部、株洲南部、郴州东南部以及永州南部等区域的空间冲突强度较低,而长株潭都市圈以及娄底、邵阳、衡阳三市中心城区等区域冲突强度较高(图 6),由严重失控等级转为基本失控后强度逐渐上升,可控范围内的空间单元萎缩,失控面积逐渐蔓延,主要原因是近些年在国土空间多规合一融合发展的政策趋势下,城镇中心用地情况愈加复杂,土地资源的竞争关系加剧,导致空间冲突逐渐失控。与之相反,远离中心城区的城镇外围地带带有较多水域和耕地,人为干扰程度相对较小,空间冲突程度较轻,属于可控级别。值得注意的是,1990 年湘江流域空间冲突指数较高的区域集中在行政区边界处或中心城区,而 2020 年空间冲突指数较高区域转移至城镇中心城区,表明区域间合作有所加强。

3.4 土地利用空间冲突多情景模拟

2030 年自然发展、耕地优先、生态优先和低碳发展情景下的平均冲突水平分别为 0.506、0.523、0.507 和 0.505,可控等级网格单元数分别占研究区的 63.52%、60.73%、63.27%和 63.59%(表 5)。相较于 2020 年,自然发展情景下稳定可控等级增加了 3.19%,但严重失控等级增加 1.98%,5 类等级呈现“三升两降”的变化趋势

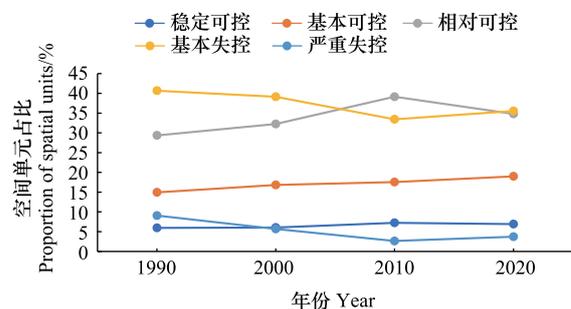


图 5 1990—2020 年土地利用冲突等级占比变化

Fig.5 The changes in the proportion of land use conflict levels from 1990 to 2020

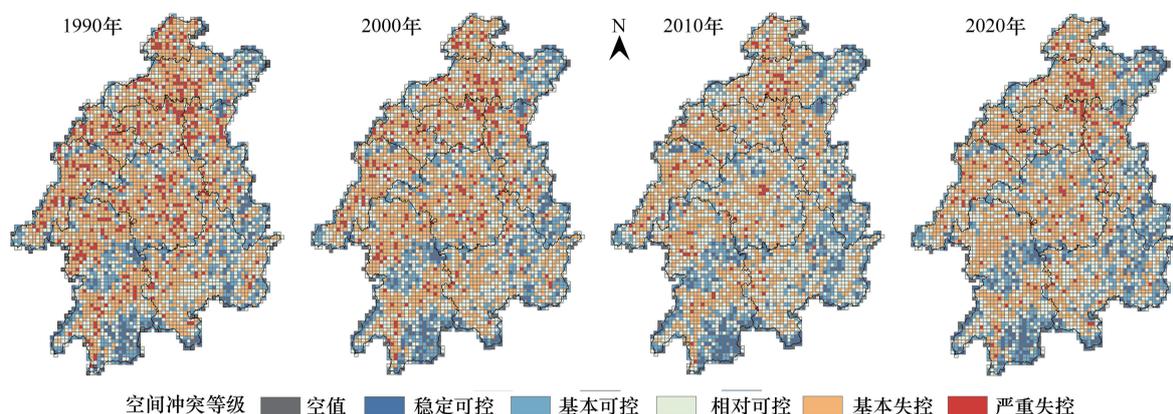


图6 1990—2020年土地利用冲突变化特征

Fig.6 The change characteristics of land use conflict from 1990 to 2020

(图7),与其他三种情景相同。尽管政府在协调土地利用功能方面取得了一定成效,减少了各区县内的冲突等级,但由于区县之间联系不足及政策独立性,行政区交界处的冲突等级有所上升,表明需要加强跨区域协调,促进劳动力、技术等要素的流动。耕地优先情景下,土地利用冲突的变化最为显著,基本失控和严重失控区域广泛分布。此情景以粮食安全为核心,忽视生态文明建设和社会发展,导致基本失控等级占比高达32.96%,严重失控等级占比增至6.31%。生态优先情景下,各冲突级别占比变化幅度微弱。低碳发展情景则通过平衡经济、粮食安全和生态保护,保持了土地利用结构和冲突程度的稳定,成为所有情景中冲突水平最低的情景。

表5 2030年不同情景下土地利用冲突指数测度结果/%

Table 5 Results of the land use conflict index measurement under different scenarios in 2030

变化程度 Degree of change	阈值区间 Threshold interval	空间单元百分比 Percentage of space units			
		自然发展	耕地优先	生态优先	低碳发展
稳定可控 Definitely controllable	0—0.2	10.13	8.64	10.15	10.47
基本可控 Basically controllable	0.2—0.4	17.02	15.69	16.88	16.83
相对可控 Relatively controllable	0.4—0.6	36.38	36.41	36.24	36.29
基本失控 Basically uncontrollable	0.6—0.8	30.77	32.96	30.98	30.70
严重失控 Heavily uncontrollable	0.8—1.0	5.70	6.31	5.75	5.70

2030年不同发展情景下可控等级冲突区集中在南山、阳明山等山区,而失控等级冲突区分布形态从连片转变为分散,主要分布在整个研究区的西部和北部(图8)。与1990—2020年不同,2030年各情景下长株潭都市圈中心的土地利用冲突情况得到较好缓解,且重心偏移至雨湖区和天元区附近。这表明,随着社会发展集中区与土地利用冲突的重叠度下降,地形地貌等自然环境因素的限制使得部分地区的土地利用冲突加剧,无法向周边溢出。

3.5 不同情景下碳中和及空间冲突消解效果评估

计算4种情景下的碳中和指数(图9),并将湘江流域的地理网格分为高值区、中值区和低值区(图10)。碳中和指数的低值区集中在各区县城镇中心及研究区

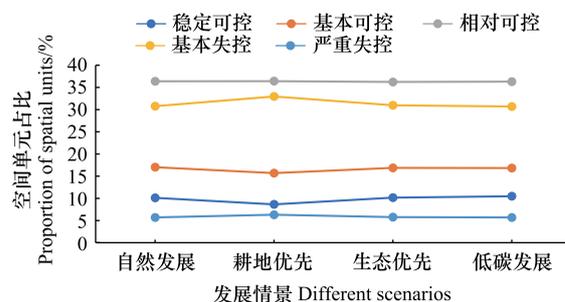


图7 2030年不同情景下的土地利用冲突等级占比变化

Fig.7 The change in the proportion of land use conflict levels under different scenarios in 2030

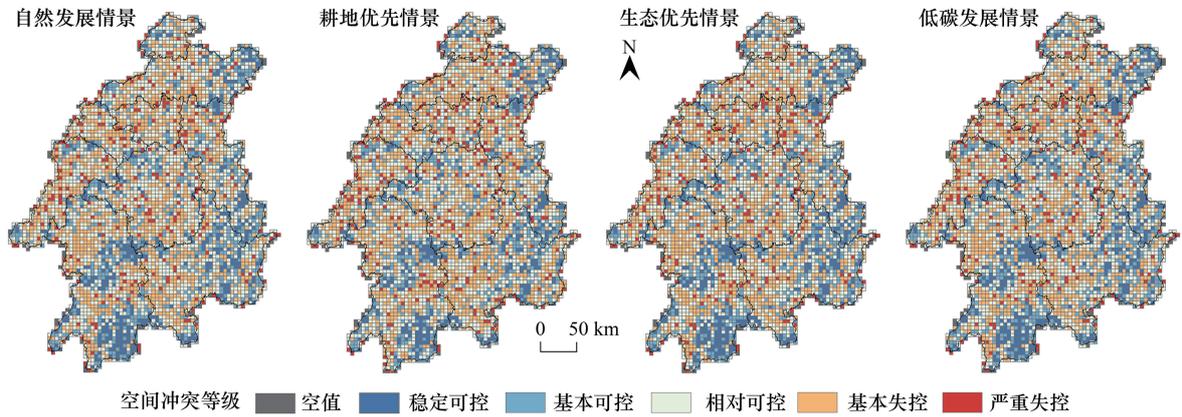


图 8 2030 年不同情景下的土地利用冲突模拟

Fig.8 Simulation of land use conflicts under different scenarios in 2030

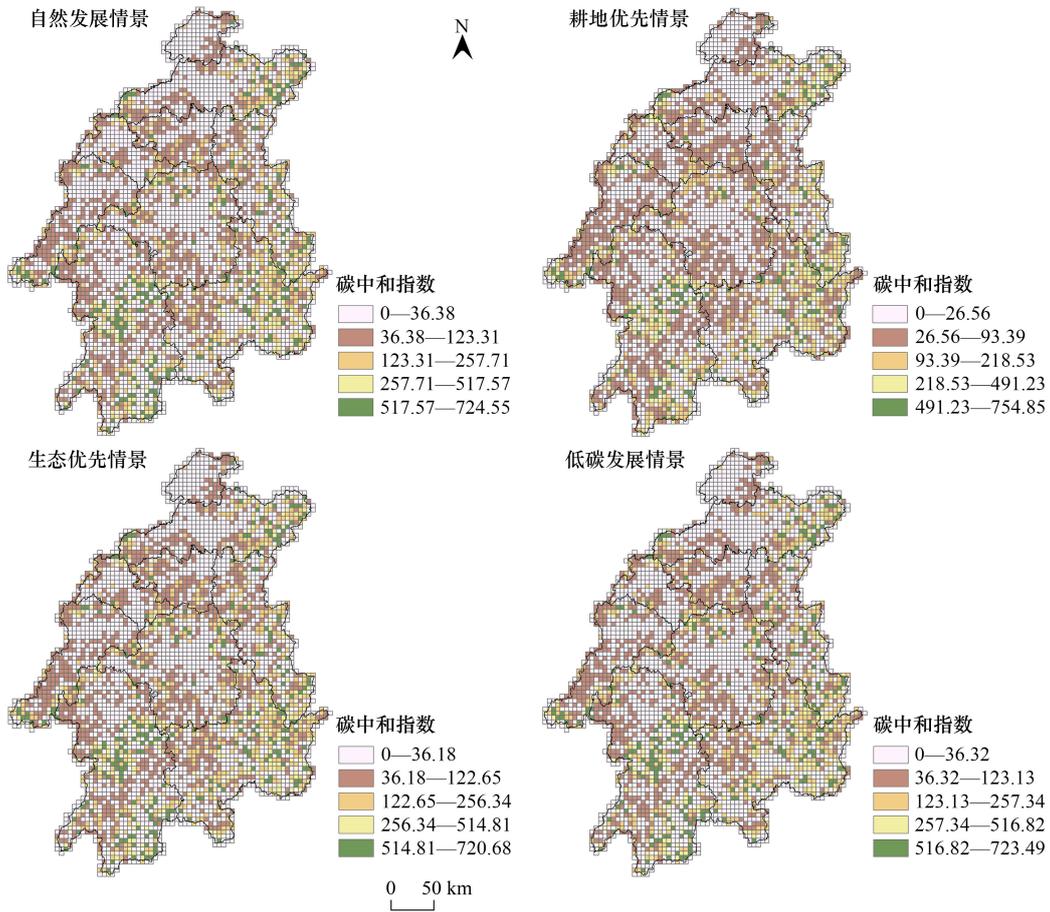


图 9 2030 年不同情景下碳中和指数

Fig.9 Carbon Neutrality Index for different scenarios in 2030

中北部耕地密度较高的区域,高值区域分布较为分散,但浏阳市、双牌县、祁阳市、资兴县等地存在较为明显的集聚区。自然发展、耕地优先、生态优先、低碳发展情景下湘江流域碳中和指数平均值为 103.78、85.84、106.10、105.59。高值区占比最高为生态优先情景,达 21.65%,比占比最低的耕地优先情景高 5.93%,耕地优先情

景的低值区占比最高,达 55.99%,低碳发展情景的低值区占比为 50.68%,高值区占比为 21.56%。

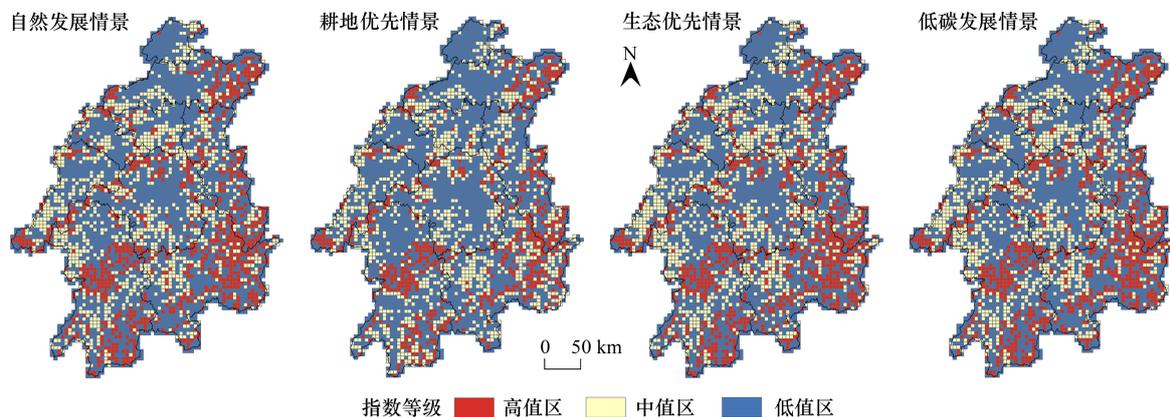


图 10 2030 年不同情景下碳中和指数等级

Fig.10 Ranking of carbon neutral indices under different scenarios in 2030

通过对比 2030 年 4 种情景下的土地利用空间冲突强度与碳中和指数,评估不同情景的土地利用空间冲突和解效果。在自然发展情景下,湘江流域碳排放总量将达到 118206855.70t,碳储量达到 1883208726.00t,土地利用空间冲突失控等级网格单元数较 2020 年减少 2.79%。在耕地优先情景下,湘江流域碳排放量为 118576275.80t,碳储量为 1813252432.00t,土地利用空间冲突失控等级网格单元数为 39.17%。在生态优先情景下,湘江流域碳排放量为 118206209.60t,碳储量为 1893297447.00t,土地利用空间冲突失控等级网格单元数为 36.73%。在低碳发展情景下,湘江流域碳排放量为 118208644.90t,碳储量为 1885988122.00t,相较于自然发展情景,碳排放量增加了 1789.20t,但碳储量增加 2779396.00t,土地利用空间冲突的失控等级网格单元数较 2020 年减少 2.86%,高于其他三种情景。低碳发展情景在实现经济增长的同时,碳中和水平较高且土地利用空间冲突状况向好发展,协调效果优于其他情景。

总体来看,生态优先情景和低碳发展情景下的土地利用策略能够有效缓解湘江流域的空间冲突程度。但生态优先情景可能会对一些传统经济活动或基础建设产生限制,这对经济活动和人口密集的湘江流域而言是不现实的。相比之下,低碳发展情景在兼顾经济发展的同时有效减少碳排放和环境压力,将湘江流域的生态保护与经济发展相结合,提升碳中和能力并改善人居环境,成为未来协调与权衡土地利用冲突的最佳选择。

4 讨论

4.1 土地利用空间冲突识别结果

研究结果显示,湘江流域土地利用空间冲突指数在 2010 至 2020 年间呈现上升趋势,与江西省宜黄县等地的研究结果相似^[43],但资源型城市新泰市冲突强度保持稳定状态,变化幅度仅为 0.0018^[44]。过去 30 年,湘江流域土地利用空间冲突经历了和贵阳市相同的“先降低后增加”的变化过程^[45],而苏锡常地区冲突强度从 0.269 增长至 0.418^[14],胶东半岛三生空间的平均冲突水平也持续上升^[46]。相反,长江三角洲土地利用空间冲突明显缓解,稳定可控网格单元面积占比从 30.23% 增加到 34.50%^[42]。此外,与湘江流域 1990—2020 年以 0.4—0.8 冲突值为主不同,新疆麦盖提县的冲突值在 2009 年集中在 0.0—0.2 区间,但到 2019 年空间冲突强度明显增加,以 0.4—0.6 冲突值为主^[47]。未来可扩展到更广泛的区域进行比较分析,探讨不同地域特征对土地利用冲突的影响。PLUS 模拟结果表明,2030 年自然发展情景下整体土地利用空间冲突有所改善,与重庆市、鄱阳湖区等地相关研究一致^[48—49]。虽然在模拟时参数设置较为客观,但是由于数据的获取与准确性,预测能力受到限制。随着碳中和政策的逐步实施,今后研究可以关注政策执行效果及其对土地利用冲突的长期影响,并结合社会经济动态等多维因素,精准量化不同年份不同情景的用地数量和结构,进一步优化土地利

用冲突调控策略。

4.2 土地利用优化的多重效益

在全球气候变化与可持续发展日益成为各国发展战略核心的背景下,不同的人地关系塑造了差异化的土地利用模式,进而影响生态系统服务、资源配置效率与区域碳平衡等特征,土地利用优化在协调多重发展目标中的重要性日益凸显。本研究提出的框架为其他地区未来的土地利用规划调整,尤其是碳中和目标下的冲突缓解提供了一个有效模型。以碳中和为导向的土地利用低碳转型,既是对传统经济社会发展模式的反思,也为土地资源高效利用与生态环境协同治理指明方向^[50]。已有研究基于土地的数量结构、空间格局以及管控政策等方面开展了多尺度、多过程的土地利用优化研究^[51],本文结果有助于直观地理解土地利用优化在实现湘江流域碳中和目标中的重要作用。

在生态优先情景和低碳发展情景下,优化土地利用对碳中和作出更大贡献,产生了明显的效益。自然环境与人类活动动态互动过程中,土地的多适宜性和稀缺性导致各主体因使用目标不同而产生效益冲突,若规划部门之间缺乏协调,可能导致土地用途在空间和时间上的功能重叠及潜在冲突。通过明确区域的功能定位,实现土地的精细化管理和多功能协调,可在冲突频发区域有效缓解不同功能需求之间的直接冲突,同时提升土地的综合利用效益^[52]。本文发现研究区内长株潭三市中心城区是冲突发生频率最高的区域,但在4种情景下冲突程度均有不同程度缓解,其中生态优先情景和低碳发展情景缓解效果更好。何紫玲等人的研究结果也显示^[53],生态保护发展情景和可持续发展情景下的土地利用冲突有所缓和,且可持续发展情景是模拟的最优情景,重度冲突的占比最小。土地利用优化不仅限于碳减排与缓解冲突,也可带来生态、经济与社会等多维效益。基于生态系统服务供需合理优化调整各类国土空间利用结构,有助于维持煤炭资源型城市生态系统的健康运转^[54];Xu等提出的基于优化模型的不同土地利用策略,旨在实现最大化经济效益与减排目标的有效组合,验证了土地利用与管理策略的有效性和经济效率^[55]。本研究所提出的优化模式为解决区域经济发展与生态安全之间的内在矛盾提供理论参考,也为有效管理土地利用模式、实现碳中和目标提供了科学依据。

5 结论与建议

以湘江流域为研究对象,刻画湘江流域的土地利用冲突格局,模拟预测2030年冲突演化趋势,探讨不同发展情景下空间冲突特征及碳中和程度。主要结论如下:

(1) 1990—2020年湘江流域经历了显著的土地利用变化。变化特征表现为耕地“非粮化”严重,建设用地面积显著增长,特别是在2010—2020年间,增长比例最高。

(2) 土地利用空间冲突经历了由强变弱又增强的演变过程,在整个研究期早期冲突最为严重,政府政策的制定和实施减轻了土地利用冲突的程度。但没有达到土地安全和生态环境保护等方面的平衡,2010—2020年冲突加剧,空间冲突指数较高的区域逐渐从行政区边界处及城镇中心转变为仅城镇中心。

(3) 2030年耕地优先情景下土地利用冲突演化最显著,而生态优先情景下各冲突级别占比变化较小,主要受生态环境保护为主要目标的影响。低碳发展情景合理地分配各类用地需求,林地、草地等碳汇区域得到优先保护,设置生态保护区、进行湘江的水域保护,土地利用结构和冲突程度更加稳定和缓和,整体土地利用冲突水平也相对较低。

(4) 综合2030年四种情景下的碳中和水平及冲突程度,低碳发展情景的协调效果最好。通过优化土地利用结构和促进低碳产业发展,碳排放量虽略增但碳储量大幅增加,同时通过科学规划和生态保护,土地利用空间冲突失控等级网格单元数减少,空间冲突得以缓解,土地利用效率提高。

从现实发展来看,近年来,湘江流域各城市也普遍追求绿色低碳发展,特别是长沙、株洲、湘潭、郴州市作为国家第三批低碳试点城市纷纷开展了减碳降污示范建设,也取得了一定成效,从2023年《国家低碳城市试点工作进展评估报告》来看,株洲、湘潭、郴州市评估结果为优良。因此,提出以下政策建议:第一,实施差异化空间管控,优化国土开发格局。在流域内的长株潭都市圈中心及区县城镇中心推行“紧凑型+生态嵌入”发

展模式,严格划定城镇开发边界,控制建设用地无序扩张,通过立体绿化等措施提升建成区碳汇能力。对城镇边缘区等冲突较低的区域,则需实施弹性管控,鼓励低碳产业集聚,推动土地节约集约利用。在宁乡市等农业生产主导区推广复合型生态农业,减少对土地资源的高强度依赖。第二,强化生态修复,构建碳汇网络。以湘江干流、洞庭湖为核心,实施退耕还湿、植被恢复工程,增强水域、林地的碳储存与生态服务功能。充分发挥长株潭生态绿心在区域生态安全格局的关键作用,推动其与大京山、雪峰山等丘陵山地生态廊道的功能连通,构建结构完整、分布合理的全域碳汇网络。第三,完善跨区域协同治理机制,提升动态监测能力。建立湘江流域“空间冲突—碳排放”一体化动态监测平台,实施跨行政区联合监测、信息互通与数据共享,实现市、县、乡三级联动预警。

参考文献 (References):

- [1] Verburg P H, Van De Steeg J, Veldkamp A, Willemen L. From land cover change to land function dynamics: a major challenge to improve land characterization. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(3): 1327-1335.
- [2] 龙花楼, 屠爽爽. 论乡村重构. *地理学报*, 2017, 72(4): 563-576.
- [3] Li T N, Liu Y B, Ouyang X, Zhou Y J, Bi M, Wei G E. Sustainable development of urban agglomerations around lakes in China: Achieving SDGs by regulating Ecosystem Service Supply and Demand through New-type Urbanization. *Habitat International*, 2024, 153, 103206.
- [4] 成筱溪, 李效顺, 和伟康, 倪衡, 赵子龙. 河南省县域土地利用适宜度空间格局特征及分区调控. *西南大学学报: 自然科学版*, 2022 (11): 153-165.
- [5] Von Der Dunk A, Grêt-Regamey A, Dalang T, Hersperger A M. Defining a typology of peri-urban land-use conflicts - A case study from Switzerland. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 101(2): 149-156.
- [6] Jiang S, Meng J J, Zhu L K. Spatial and temporal analyses of potential land use conflict under the constraints of water resources in the middle reaches of the Heihe River. *Land Use Policy*, 2020, 97: 104773.
- [7] 唐常春, 卢幸芷, 雷钧钧, 孙为民. 大城市边缘区城乡多维空间冲突特征与形成机制——以韶关市转溪村为例. *经济地理*, 2022, 42 (1): 79-89.
- [8] Zhang J, Chen Y, Zhu C M, Huang B B, Gan M Y. Identification of potential land-use conflicts between agricultural and ecological space in an ecologically fragile area of southeastern China. *Land*, 2021, 10(10): 1011.
- [9] 戴智勇, 杨朝现, 信桂新, 魏耀华, 熊想想. 丘陵山区土地利用冲突评价及调控优化. *西南大学学报: 自然科学版*, 2019, 41(11): 82-91.
- [10] 杨永芳, 朱连奇. 土地利用冲突的理论及诊断方法. *资源科学*, 2012, 34(6): 1134-1141.
- [11] 王健, 刘欣雨. 基于“风险—效应”的土地利用空间冲突识别与测度. *农业工程学报*, 2022, 38(12): 291-300.
- [12] 张新鼎, 崔文刚, 韩会庆, 梅艳, 汪田归, 潘杉. 基于“三生”适宜性的典型喀斯特乡村土地利用冲突识别及分析. *水土保持研究*, 2023, 30(4): 412-422.
- [13] 董兆蓉, 苑全治, 王紫晨, 任平. 川西农牧交错带“三生”空间冲突演变特征分析及模拟预测——以阿坝州四县为例. *生态学报*, 2023, 43(15): 6243-6256.
- [14] 邱国强, 牛潜, 吴振华, 郭珊珊, 秦琳, 汪应宏. 苏锡常城市群土地利用冲突空间测度及异质性分析. *水土保持研究*, 2022, 29(4): 400-406+414.
- [15] Wang C, Wang H W, Wu J H, He X, Luo K, Yi S Y. Identifying and warning against spatial conflicts of land use from an ecological environment perspective: A case study of the Ili River Valley, China. *Journal of Environmental Management*, 2024, 351: 119757.
- [16] Zhu C M, Dong B Y, Li S N, Lin Y, Shahtahmassebi A, You S X, Zhang J, Gan M Y, Yang L X, Wang K. Identifying the trade-offs and synergies among land use functions and their influencing factors from a geospatial perspective: A case study in Hangzhou, China. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 314: 128026.
- [17] Liu J, Jin X B, Li H B, Zhang X L, Xu W Y, Fan Y P, Zhou Y K. Spatial-temporal changes and driving factors of the coordinated relationship among multiple land use efficiencies integrating stakeholders' vision in eastern China. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 336: 130406.
- [18] 于伯华, 吕昌河. 土地利用冲突分析: 概念与方法. *地理科学进展*, 2006, 25(3): 106-115.
- [19] Xu Z C. Towards carbon neutrality in China: A systematic identification of China's sustainable land-use pathways across multiple scales. *Sustainable Production and Consumption*, 2024, 44: 167-178.
- [20] Wang K, Li X B, Lyu X, Dang D L, Dou H S, Li M Y, Liu S Y, Cao W Y. Optimizing the land use and land cover pattern to increase its contribution to carbon neutrality. *Remote Sensing*, 2022, 14(19): 4751.
- [21] 邹利林, 刘彦随, 王永生. 中国土地利用冲突研究进展. *地理科学进展*, 2020, 39(2): 298-309.

- [22] 王高远, 陈天. 流域国土空间优化研究进展. 城市规划, 2023, 47(8): 101-113.
- [23] Ding S Y, Liu S M, Chang M X, Lin H W, Lv T Y, Zhang Y J, Zeng C. Spatial optimization of land use pattern toward carbon mitigation targets—A study in Guangzhou. *Land*, 2023, 12(10): 1903.
- [24] Chen N, Xin C L, Zhang B, Xin S J, Tang D B, Chen H X, Ma X S. Contribution of multi-objective land use optimization to carbon neutrality: A case study of Northwest China. *Ecological Indicators*, 2023, 157: 111219.
- [25] Cui J X, Kong X S, Chen J, Sun J W, Zhu Y Y. Spatially explicit evaluation and driving factor identification of land use conflict in Yangtze River economic belt. *Land*, 2021, 10(1): 43.
- [26] 田俊峰, 王彬燕, 王士君. 土地利用冲突研究的逻辑主线与内容框架. 资源科学, 2023, 45(3): 465-479.
- [27] 郭安宁, 牛陆, 刘霏珈, 李玉峰. 黄河流域城市群土地利用的碳排放效应. 经济地理, 2023, 43(9): 172-178+240.
- [28] 阳凯, 王奕文, 黄春华, 王志远, 何曦冉. 洞庭湖区域土地利用变化的碳排放效应研究. 生态科学, 2023, 42(2): 193-201.
- [29] 王桂波, 南灵. 陕西省土地利用碳排放效应时空差异分析. 资源与产业, 2012, 14(1): 124-130.
- [30] 田一豆, 赵先超. 基于 Markov-PLUS 模型的长株潭城市群建设用地扩张模拟及碳排放响应分析. 生态学报, 2024, 44(1): 129-142.
- [31] 糜毅, 李涛, 吴博, 赵燕萍. 基于优化模拟的长株潭 3+5 城市群碳储量时空演变与预测. 环境工程技术学报, 2023, 13(5): 1740-1751.
- [32] 欧阳晓, 王坤, 魏晓. 城乡建设用地关联对生态系统服务的影响——以洞庭湖地区为例. 生态学报, 2022, 42(21): 8713-8722.
- [33] 王宇滨, 曹良中, 王妍, 朱士华, 方霞. 土地利用/土地覆被对江西陆地碳储量的影响. 遥感信息, 2023, 38(4): 96-105.
- [34] 周文强, 韩宇, 王金龙, 杨伶, 阙华斐. 洞庭湖流域碳储量的时空异质性及驱动力分析. 中国环境科学, 2024, 44(4): 1851-1862.
- [35] 谢花林. 基于景观结构和空间统计学的区域生态风险分析. 生态学报, 2008, 28(10): 5020-5026.
- [36] 吕乐婷, 张杰, 孙才志, 王晓蕊, 郑德凤. 基于土地利用变化的细河流域景观生态风险评估. 生态学报, 2018, 38(16): 5952-5960.
- [37] Peterseil J, Wrška T, Plutzer C, Schmitzberger I, Kiss A, Szerencsits E, Reiter K, Schneider W, Suppan F, Beissmann H. Evaluating the ecological sustainability of Austrian agricultural landscapes—the SINUS approach. *Land Use Policy*, 2004, 21(3): 307-320.
- [38] Zuo Q, Zhou Y, Wang L, Li Q, Liu J Y. Impacts of future land use changes on land use conflicts based on multiple scenarios in the central mountain region, China. *Ecological Indicators*, 2022, 137: 108743.
- [39] 陈理庭, 蔡海生. 昌江流域土地利用冲突时空演变及关键影响因素探析. 生态与农村环境学报, 2024, 40(1): 55-67.
- [40] 周德, 徐建春, 王莉. 环杭州湾城市群土地利用的空间冲突与复杂性. 地理研究, 2015, 34(9): 1630-1642.
- [41] 周国华, 彭佳捷. 空间冲突的演变特征及影响效应——以长株潭城市群为例. 地理科学进展, 2012, 31(6): 717-723.
- [42] 张潇, 谷人旭. 土地利用冲突的时空格局刻画与多情景模拟研究——以长江三角洲城市群为例. 地理研究, 2022, 41(5): 1311-1326.
- [43] 向芳芳, 黄丽萍, 陈荣清. 基于综合视角的县域国土空间冲突测度与功能优化——以江西省宜黄县为例. 水土保持通报, 2024, 44(1): 158-171.
- [44] Zheng Y, Cheng L L, Wang Y F. Measuring the spatial conflict of resource-based cities and its coupling coordination relationship with land use. *Land*, 2022, 11(9): 1460.
- [45] 陈大蓉, 周旭, 胡锋, 裴宇, 胡玉雪, 罗为维. 近 30 年贵阳市土地利用冲突时空变化分析. 水土保持研究, 2023, 30(6): 337-344+356.
- [46] 王志炜, 魏宇, 李申, 朱晓伟. 胶东半岛三生空间的时空演变与冲突测度研究. 环境工程技术学报, 2023, 13(1): 386-393.
- [47] 张云霞, 高敏华, 孜比布拉·司马义. 西北干旱区绿洲县域 3 类空间冲突分析与模拟. 水土保持通报, 2021, 41(4): 207-213, 223.
- [48] 王朝阳, 张军以, 李海懿, 苏维词. 重庆市土地利用冲突多尺度时空演化与多情景演化模拟. 生态学报, 2024, 44(3): 1024-1039.
- [49] 王博, 舒晓波, 廖富强, 黎钰, 万智巍. 基于最佳景观尺度的鄱阳湖区土地利用冲突时空演变及多情景模拟. 水土保持研究, 2024, 31(4): 336-347.
- [50] 丁明磊, 杨晓娜, 赵荣钦, 张战平, 肖连刚, 谢志祥. 碳中和目标下的国土空间格局优化: 理论框架与实践策略. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1137-1147.
- [51] 揣小伟. 基于“碳中和”目标的土地利用研究进展与思考. 武汉大学学报(理学版), 2025, 71(1): 1-11.
- [52] 翟端强. 城市群国土空间冲突识别、归因与消解. 城市规划, 2024, 48(4): 71-84.
- [53] 何紫玲, 陈运春, 郭晓飞, 张鋈, 张莹, 黄玉南, 柳兴鹏, 史钰柱, 曾维军. 洱海流域土地利用冲突时空演变及多情景模拟预测. 农业资源与环境学报, 1-20[2025-01-24]. <https://doi.org/10.13254/j.jare.2024.0298>.
- [54] 明莉, 常江, 李成. 煤炭资源型城市生态系统服务供需匹配多情景模拟与空间格局优化. 资源科学, 2024, 46(10): 2078-2091.
- [55] Xu H, Brown D G, Moore M. R, Currie W S. Optimizing spatial land management to balance water quality and economic returns in a Lake Erie watershed. *Ecological Economics*, 2018, 145: 104-114.