

西部陆海新通道地区土地利用空间 异质性及多情景模拟

谢雅庆^{1,2,3}, 韦燕飞^{1,2,3}, 赖双双^{1,2,3}, 吴广^{1,2,3}, 覃文韬^{1,2,3}, 周雨婷^{1,2,3}

(1. 南宁师范大学自然资源与测绘学院, 广西南宁 530100; 2. “卫星+”空间 AI 自然资源智能治理广西高校工程研究中心, 广西南宁 530100; 3. 广西农用地智慧监测及治理工程研究中心, 广西南宁 530100)

摘要: [目的] 揭示西部陆海新通道地区土地利用空间异质性规律, 模拟不同政策导向下未来土地利用格局, 为协调区域生态保护与经济发展、优化国土空间布局提供科学依据。 [方法] 计算 2002—2022 年土地利用程度指数, 运用空间自相关、最优参数地理探测器(OPGD)和时空地理加权回归(GTWR)模型分析空间异质性及驱动因素, 并采用 PLUS 模型模拟自然发展、耕地保护、经济发展与可持续发展 4 种情景下 2032 年的土地利用格局。 [结果] ① 2002—2022 年, 区域土地利用程度总体稳定, 处于中等水平, 较弱等级土地占比增幅最大, 空间上呈现“核心扩张, 生态约束, 轴线集聚”特征。 ② 土地利用程度变化存在显著空间正相关, 高-高集聚区由单核核心向多核联动扩散, 低-低集聚区持续锁定在生态敏感区; 驱动因素表现出显著的空间异质性, 高速公路密度呈正向效应, 坡度、年平均降水量、城镇居民可支配收入呈负向效应, 年平均气温、人口密度、铁路密度、公路货运量兼具正、负效应。 ③ 多情景模拟结果表明, 可持续发展情景较优, 建设用地增长放缓至 48.35%, 林地面积增长 2.64%, 耕地降幅减缓至 6.37%。 [结论] 西部陆海新通道地区土地利用变化是自然本底约束与战略开发需求空间博弈的结果, 未来需构建“轴带串联, 多核联动”开发模式, 实施“生态优先”国土空间管控, 强化通道—腹地协同, 以实现从“通道流量”向“可持续发展增量”的转化。

关键词: 土地利用程度; 空间异质性; PLUS 模型; 多情景模拟; 西部陆海新通道

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2025)05-0230-15

中图分类号: F301.24, TU982

文献参数: 谢雅庆, 韦燕飞, 赖双双, 等. 西部陆海新通道地区土地利用空间异质性及多情景模拟[J]. 水土保持通报, 2025, 45(5): 230-244. Xie Yaqing, Wei Yanfei, Lai Shuangshuang, et al. Spatial heterogeneity and multi-scenario simulation of land use in New International Land-Sea Trade Corridor region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(5): 230-244. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.05.021; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.05.021.

Spatial heterogeneity and multi-scenario simulation of land use in New International Land-Sea Trade Corridor region

Xie Yaqing^{1,2,3}, Wei Yanfei^{1,2,3}, Lai Shuangshuang^{1,2,3}, Wu Guang^{1,2,3}, Qin Wentao^{1,2,3}, Zhou Yuting^{1,2,3}

(1. School of Natural Resources and Surveying, Nanning Normal University, Nanning,

Guangxi 530100, China; 2. University Engineering Research Center of “Satellite+” Space AI

Intelligent Governance of Natural Resources, Guangxi, Nanning, Guangxi 530100, China; 3. Guangxi Engineering

Research Center for Smart Monitoring and Governance of Agricultural Land, Nanning, Guangxi 530100, China)

Abstract: [Objective] The spatial heterogeneity patterns of land use in the New International Land-Sea Trade Corridor region were revealed, and the future land use patterns under different policy orientations were simulated, in order to provide a scientific basis for coordinating regional ecological conservation with economic development and optimizing the territorial spatial layout. [Methods] Land use intensity indices were calculated from 2002 to 2022. Spatial autocorrelation analysis, the optimal parameters-based geographical detector, and the geographically

收稿日期: 2025-04-25

修回日期: 2025-06-15

采用日期: 2025-06-17

资助项目: 广西重点研发计划项目“‘天-空-地’一体化的耕地“非粮化”高精度智慧监测识别关键技术研发及示范应用”(桂科 AB25069412); 广西重点研发计划项目(桂科 AB25069153); 广西哲学社会科学年度课题(24GLC002)

第一作者: 谢雅庆(2000—), 女(壮族), 广西壮族自治区横州市人, 硕士研究生, 研究方向为国土空间规划与整治。Email: 2293326140@qq.com。

通信作者: 韦燕飞(1978—), 女(壮族), 广西壮族自治区百色市人, 博士, 教授, 主要从事土地利用优化配置研究。Email: 65358105@qq.com。

and temporally weighted regression model were employed to analyze spatial heterogeneity and its driving factors. Subsequently, the patch-generating land use simulation model was used to simulate land use patterns for 2032 under natural development, cropland protection, economic development, and sustainable development scenarios. [Results] ① From 2002 to 2022, the overall degree of regional land use remained stable at a medium level, with the proportion of relatively weak grade land increasing the most. Spatially, it presented the characteristics of ‘core expansion, ecological constraints, and axial agglomeration.’ ② Changes in land use intensity showed a significant positive spatial autocorrelation. High-high agglomeration areas expanded from single-core to multi-core linkages, whereas low-low agglomeration areas remained locked in ecologically sensitive zones. Driving factors demonstrated significant spatial heterogeneity: expressway density had a positive effect; slope, mean annual precipitation, and urban disposable income exerted negative effects; and mean annual temperature, population density, railway density, and road freight volume exhibited both of positive and negative effects. ③ Multi-scenario simulations showed that the Sustainable Development scenario yielded optimal outcomes: the increase in construction land slowed to 48.35%, forest area grew by 2.64%, and decline in cropland area moderated to 6.37%. [Conclusion] Land use changes in the New International Land-Sea Trade Corridor region result from the spatial interplay between natural constraints and strategic development imperatives. Future strategies should establish an ‘axial linkage and multi-core synergy’ development model, implement ‘eco-priority’ spatial governance, and strengthen corridor-hinterland coordination to transition from pursuing ‘corridor throughput’ to achieving ‘sustainable development gains.’

Keywords: degree of land use change; spatial heterogeneity; PLUS model; multi-scenario simulation; the New International Land-Sea Trade Corridor region

西部陆海新通道作为国家“十四五”规划,推进“一带一路”倡议的核心战略走廊,横跨川渝黔桂等省(市),形成“东、中、西三线并进”的陆海联运网络^[1-2]。中国共产党第二十次全国代表大会报告强调需“加快西部陆海新通道的建设”,在此背景下,西部陆海新通道东线衔接长江经济带、中线串联西南腹地、西线缩短出海里程560 km,货物通达全球120个国家/地区的490个港口,成为连接西南内陆与东盟国家的关键枢纽。2023年沿线省份平台企业运营的铁海联运班列、跨境公路班车(重庆、四川)、国际铁路联运班列(重庆、广西、四川)运输集装箱共计61.52万标箱,同比增长7%,货值643.26亿元,同比增长16%^[3]。然而,该区域地理环境复杂且生态脆弱,地形地貌以四川盆地、云贵高原及广西丘陵盆地为主体,其中云贵高原和广西地区广泛发育喀斯特地貌,土壤退化风险显著,若存在不合理的土地利用会直接威胁珠江、长江流域生态安全。伴随着新型城镇化与通道建设的快速、持续推进,土地利用的结构性冲突也存在潜在威胁。例如枢纽城市建设用地激增,交通节点开发会扰动生态敏感区,减少优质耕地等^[4]。加快形成“陆海内外联动,东西双向互济”的对外开放新格局要求该区域优化国土空间布局,促进区域经济协同发展。因此,未来需以土地利用强度阈值管控为核心将“通道流量”转化为“可持续发展增量”。

土地利用/覆被变化研究是地理学与资源科学领域的重要议题,旨在揭示人类活动与自然环境相互作用的空间格局与驱动机制^[5]。目前国内外的研究内容多聚焦于土地利用变化的空间格局^[6]、类型转换^[7]、演化机制及其驱动因子^[8-9]、土地利用变化动态模拟^[10]。土地利用程度作为区域土地资源开发规模与深度的关键指标,反映了土地自然属性和人类活动对土地利用的综合影响^[11],探究其空间异质性有利于土地资源的可持续利用。现有研究侧重于基于遥感技术的土地利用程度变化监测^[12]、土地利用程度变化的驱动因素研究^[13-14]。土地利用变化模拟预测可为土地规划方面提供参考,多使用CA-Markov^[15]、CLUE-S^[16]、FLUS^[17]、PLUS等^[18]模型进行研究。相比之下,PLUS模型具有较强的空间解释能力,其引入灵活的机制,能够更好地处理多类土地利用斑块的变化,同时深入剖析驱动土地利用变化的内在因素,从而在斑块尺度上实现了高精度的动态模拟。例如,基于PLUS模型的不同情景的土地利用空间分布及其差异^[19]、碳储量时空变化及预测^[20]、生态系统服务价值多情景评估等^[21-22]。这些研究不仅验证了PLUS模型在土地利用模拟中的优越性,也为区域土地资源的优化配置和可持续发展提供了科学依据。在此背景下,科学解析土地利用程度及其空间异质性、精准预测未来情景格局,对协调区域生态保护与经济发展,保障国土空间可持续利用具有

迫切意义。基于此,本文以2002—2022年西部陆海新通道地区土地利用数据为基础,计算土地利用程度指数衡量区域发展,结合空间自相关、最优参数地理探测器和时空地理加权回归模型进行空间异质性分析,并基于PLUS模型模拟自然发展、耕地保护、经济发展与可持续发展4种情景下的2032年土地利用格局,旨在为西部陆海新通道沿线生态安全屏障构建、国土空间集约高效利用及多目标协同治理提供科学依据,助力区域高质量发展目标的实现。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

研究范围依据2019年国家发展改革委印发的《西部陆海新通道总体规划》^[1],选取东、中、西三条铁路主通道沿线28个城市作为研究对象。研究区位于中国西南部,地理坐标为东经102°54′—112°04′,北纬20°54′—34°19′,区域总面积约535 171.90 km²。该区域地处青藏高原东缘,位于我国地势第一、二阶梯过渡地带,整体地势自西北向东南倾斜,海拔介于-25~5 228 m,最低处位于研究区南部沿海地区。

研究区按核心地理单元可划分为3大部分:川渝所在的四川盆地、黔滇所在的云贵高原以及桂中桂南的丘陵盆地区。区域内喀斯特地貌广泛发育,以贵州省全境、广西壮族自治区中北部为典型区域。气候类型以亚热带季风气候为主导,高原区域则呈现山地气候特征,复杂的地形格局与气候条件共同塑造了多样化的生态系统,森林和耕地资源十分丰富。2022年,西部陆海新通道地区所有28个地市的地区生产总值(GDP)总和为10.28万亿元,其中第二产业和第三产业总值占分别GDP约40.8%和53.5%,表明新通道通过完善铁路、港口和物流网络等建设促进了经济集聚与效率提升、产业结构优化。

1.2 数据来源与处理

本文所使用数据具体信息见表1。面板数据来自各省市2002—2022年《统计年鉴》及各地级市(州)国民经济和社会发展统计公报,缺失值采用等距插补法进行补全。栅格数据下载后按研究区裁剪成相同范围,并统一重采样为100 m分辨率;利用ArcGIS 10.6软件的欧氏距离工具,计算矢量数据的欧氏距离。

表1 数据类型与数据来源
Table 1 Data types and sources

数据类型	指标类型			时间范围	数据来源
	指标类型	指标名称	分辨率		
栅格数据	土地利用数据	CLCD数据集	30 m	2002, 2012, 2022	武汉大学遥感团队 ^[23]
		DEM	30 m	2020	
	自然本底	坡度	30 m	2020	地理空间数据云
		坡向	30 m	2020	
		土壤类型	1 km	2020	
		气温	1 km	2020	国家青藏高原科学数据中心
		降水	1 km	2020	
		社会经济	人口密度	100 m	
		GDP	1 km	2020	
	基础设施	道路、铁路、水系、县政府	矢量数据	2020	全国地理信息资源目录服务系统
面板数据	自然本底、社会经济、新通道建设			2002, 2012, 2022	统计年鉴、统计公报

2 研究方法

2.1 土地利用程度指数

土地利用程度指数能够反映人类活动对土地利用变化的影响程度。借鉴前人方法^[24],将土地利用程度分为4级:未利用地赋值1,林地、草地及水域赋值2,耕地赋值3,建设用地赋值4。计算公式为:

$$LA = 100 \times \left(\sum_{i=1}^n A_i \cdot C_i \right) \quad (1)$$

式中:LA表示区域土地利用程度指数,指数值越高,

代表该区域的土地利用程度越显著; A_i 表示第*i*种土地利用类型的赋值; C_i 为研究区第*i*级土地利用程度分级类型与区域总面积的比值。结合自然断点分级法与西部陆海新通道地区实际情况,将土地利用程度指数划分为弱、较弱、中等、较强和强5级土地利用程度等级(表2)。

2.2 空间异质性分析

2.2.1 空间自相关分析

全域Moran's *I*指数能有效揭示研究区域内土地利用程度变化的空间依赖程度,从而判断土地利用

程度变化是否呈现空间聚类现象;局域 Moran's I 指数可以进一步展现在空间上具体的聚集或分散位置和范围^[25],计算公式为:

$$I_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (X_i - x)(X_j - x)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \sum_{i=1}^n (X_i - x)^2} \quad (2)$$

$$I_2 = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^n W_{ij} (X_i - x)(X_j - x)}{\sum_{i=1}^n (X_i - x)} \quad (3)$$

式中: W_{ij} 为区域 i 与 j 的空间权重矩阵; X_i 为第 i 个位置的土地利用程度变化值; X_j 为第 j 个位置的土地利用程度变化值; n 为样本数量; x 表示所有样本的平均变化水平,用于衡量整体土地利用程度的变化趋势。

表 2 土地利用程度分级

Table 2 Classification of land use intensity levels

土地利用程度等级	弱	较弱	中等	较强	强
土地利用程度指数	≤ 215.00	210.01~235.00	235.01~255.00	255.01~280.00	≥ 280.01

2.2.2 最优参数地理探测器

最优参数地理探测器(optimal parameters-based geographical detector, OPGD)通过多种统计方式来实现连续变量的离散化方式寻优,以获得最佳 q 值^[26]。本文选取其中的因子探测板块探测自变量 X 对 Y (土地利用程度)的空间分异的解释程度,计算公式为:

$$q = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (4)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, \quad SST = N \sigma^2$$

式中: q 值度量影响因子对 Y 的解释力,值域为 $[0, 1]$, q 值越大表示各影响因子的解释力越强; $h=1, 2 \dots$; L 为 Y 或者 X 的分层; N_h , N 分别为层 h 和研究区的单元数; σ_h^2, σ^2 分别为层 h 和研究区 Y 值的方差; SSW , SST 分别为层内方差之和与全区总方差。

2.2.3 时空地理加权回归

时空地理加权回归(geographically and temporally weighted regression, GTWR)模型是一种高级空间统计分析方法,结合了时间和空间两个维度,该模型在传统地理加权回归(GWR)的基础上发展而来,通过动态调整权重函数,反映不同时空点数据的变化,能够更精确地捕捉数据中的时空异质性,提供更为准确的回归结果^[27],计算公式为:

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i, t_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i, t_i) \cdot X_{ik} + \epsilon_i \quad (5)$$

式中: Y_i 为第 i 个观测点的因变量值; $\beta_0(u_i, v_i, t_i)$ 为第 i 个点的截距项,是地理坐标 (u_i, v_i, t_i) 和时间 t_i 的函数; $\beta_k(u_i, v_i, t_i)$ 为第 i 个观测点对于第 k 个解释变量的回归系数; X_{ik} 为第 i 个观测点的第 k 个解释变量值; ϵ_i 为第 i 个观测点的随机误差项; P 是解释变量的个数。

2.3 PLUS 模型

PLUS 模型是基于栅格数据的在斑块尺度下土地利用变化模拟的元胞自动机模型,主要包括两个方面:①LEAS 模块,其通过随机森林算法获取各类用地的发展概率以及各个驱动因子贡献度^[28];②CARS 模块,设置各地类用地数量需求、邻域权重(表 3)和转换规则矩阵^[29](表 4),结合 LEAS 模块得到的各地类发展概率模拟土地斑块的生成。

本文根据研究区土地利用的实际情况,结合《西部陆海新通道总体规划》的发展要求以及相关文献参数设置,设定 4 种发展情景,通过差异化调整各地类间的转移概率实现:①自然发展情景延续 2012—2022 年土地利用变化趋势,采用 Markov 链预测 2032 年各地类需求(表 3),作为基准情景。②耕地保护情景严格落实耕地保护政策,控制耕地向建设用地的转移概率减少 70%、向草地和水域的转移概率减少 40%,并提高未利用地向耕地的转移概率 50%。③经济发展情景优先保障建设用地供给,降低建设用地转出概率 40%,同时分别提高耕地、林地、草地、水域、未利用地转向建设用地的概率为 40%,10%,20%,10%,50%。④可持续发展情景平衡生态保护和经济发展,严格限制生态用地(林地、草地、水域)及耕地向建设用地转移的概率分别降低 30%,20%,20%,40%;允许适度生态修复与土地整治,建设用地转换为草地的概率提高 10%,水域转换为耕地的概率提高 30%,未利用地转换为建设用地的概率提高 40%。

3 结果与分析

3.1 土地利用程度时空演变分析

2002—2022 年,西部陆海新通道的土地利用程度等级结构发生明显变化。其中,弱等级土地面积

持续低位,构成稳定的冷点区域;至2012—2022年,其范围向遂宁市、铜仁市、来宾市延伸,生态保护政策进一步抑制开发强度。高-低异常区和低-高异常区零星分布于各城市周边,反映局部高强度开发与城市周边低强度区域的空间异质性。不显著区域范围在来宾市、贵港市等有所缩减,表明土地利用变化的空间关联性逐步增强。

3.2.2 影响因素指标构建体系及选取

根据前文的分析结果,西部陆海新通道地区土地利用程度变化具有显著的空间相关性,因此,基于2002,2012和2022年西部陆海新通道地区28个市域单元面板数据,运用OPGD和GTWR模型展开分析。参考相关研究经验和《交通强国建设评价指标体系》^[30],从自然本底、社会经济、新通道建设3个方面选取22个具有代表性的指标构建指标体系。基于R语言“GD”包,将自变量离散类别设置为4~10,运行OPGD模型,因子探测结果详见表6。首先剔除不显著($\text{sig} > 0.05$)的影响因素($X_7, X_9, X_{11}, X_{12}, X_{16}, X_{17}, X_{18}, X_{19}$),再选取平均 q 值 > 0.4 的影响因素,利用

SPSS软件进行多重共线性检验,剔除方差膨胀因子(VIF) > 10 的影响因素。最终分别从自然、社会经济、新通道建设三方面选取8个指标分析其对土地利用程度的空间异质性,按平均 q 值由大到小排序为: $X_6 > X_{14} > X_2 > X_4 > X_5 > X_{15} > X_{13} > X_{20}$ 。

表5 西部陆海新通道地区2002—2022年土地利用程度等级面积及其比例

Table 5 Area and proportions of land use intensity levels in New International Land-Sea Trade Corridor region from 2002 to 2022

土地利用程度等级	2002年		2012年		2022年	
	面积/ km ²	比例/ %	面积/ km ²	比例/ %	面积/ km ²	比例/ %
弱	224 300	31.08	216 100	29.94	205 100	28.42
较弱	175 900	24.37	183 300	25.40	211 100	29.25
中等	134 100	18.58	132 700	18.39	129 800	17.99
较强	90 000	12.47	93 700	12.98	86 800	12.03
强	97 400	13.50	95 900	13.29	88 900	12.32
土地利用程度指数	237.225 9		237.826 7		237.347 8	

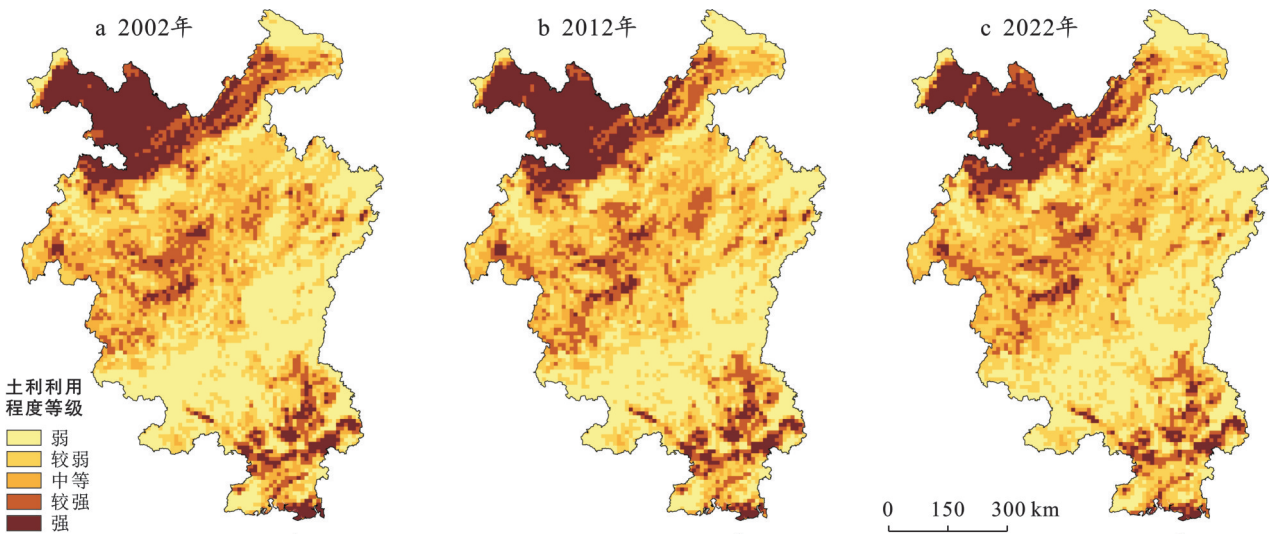


图1 西部陆海新通道地区2002—2022年土地利用程度等级分布

Fig.1 Distribution of land use intensity levels in New International Land-Sea Trade Corridor region from 2002 to 2022

3.2.3 影响因素的空间异质性分析

为了比较模型估计结果的优劣,将所筛选的因子分别导入OLS, GWR, GTWR3种模型进行计算, R^2 的结果分别为0.955 441, 0.963 537, 0.964 066。从拟合优度看,GTWR模型效果较好,因此选用GTWR模型对土地利用程度分年份计算回归系数。

自然本底方面驱动因素回归系数可视化如图3所示。坡度对西部陆海新通道地区土地利用程度的影响表现以负向效应为主,负向效应高值区主要分布在研究区的北部和南部,北部成渝城市群的系数

绝对值普遍增加,但南部北部湾沿海城市的系数绝对值显著下降,云贵高原城市的系数绝对值居高不下,土地利用长期低效。

年平均气温表现为“高海拔促进,低海拔抑制”的垂直分异与“西正东负”的东西梯度差异,在西部川滇黔地区以正向效应为主;在东部湘桂沿海地区以负向效应为主,高温与城市化、生态脆弱性叠加,制约土地利用强度。年平均降水量整体以负向效应为主,负效应高值区为云贵高原和北部湾沿海城市,低值区为四川盆地核心城市。

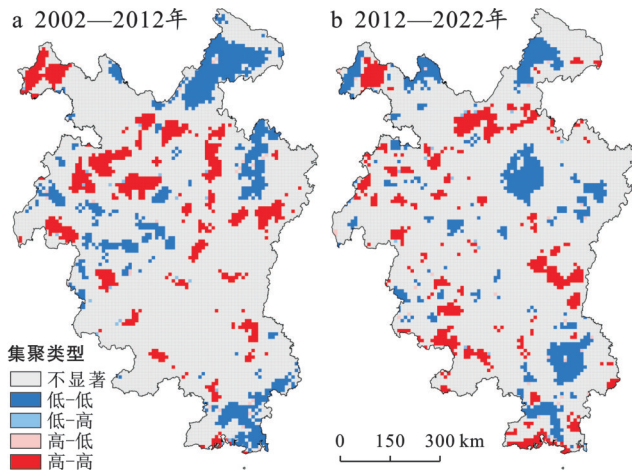


图2 西部陆海新通道地区 2002—2012 年和 2012—2022 年土地利用程度变化空间关联程度分析 (LISA)

Fig.2 Local indicators of spatial association (LISA) analysis of land use intensity changes in New International Land-Sea Trade Corridor region 2002—2012 and 2012—2022

社会经济方面驱动因素回归系数可视化如图 4 所示。人口密度对西部陆海新通道地区土地利用程度的影响表现“山地促进,沿海抑制,平原分化”的空间异质性,正向效应主导区位于云贵高原与湘黔交界带,表现为“需求驱动开发”;负向效应主导区位于北部湾沿海与四川盆地核心城市,表现为“约束强化集约”。

西部陆海新通道地区城镇居民可支配收入在整个研究期内的回归系数普遍为负值。这表明城镇居民收入的提高整体上对土地利用扩张起到抑制作用,这种负向效应的空间强度呈现由东南向西北方向递增的梯度特征,高收入地区的土地资源稀缺性与政策管控强度是核心驱动因素,高负向效应核心区为北部湾沿海与广西内陆城市,中等负向效应区为云贵高原与湘西山区,低负向效应区为四川盆地与边缘城市。

表 6 西部陆海新通道地区土地利用程度影响因素指标体系

Table 6 Indicator system of factors influencing land use intensity in New International Land-Sea Trade Corridor region

类别	一级指标	二级指标	缩写	释义	q 均值	VIF 值
自然本底	地形地貌	海拔/m	X_1	地形的高低差异	0.758 2	13.707
		坡度/(°)	X_2	地表斜坡的倾斜程度	0.795 1	5.771
		地形起伏度	X_3	地形的复杂性和破碎度	0.627 7	14.343
	气候条件	年平均气温/°C	X_4	区域热量条件	0.673 7	6.586
		年平均降水量/mm	X_5	区域水分条件	0.655 0	4.267
社会经济	人口聚集	人口密度/(人·km ⁻²)	X_6	区域人口集聚和分布状况	0.914 6	5.794
		城镇化率/%	X_7	地区人口向城镇集中的过程和程度	0.494 9	
	生产结构	地区生产总值/亿元	X_8	地区经济规模与增长水平	0.580 3	48.112
		第一产业总值/亿元	X_9	基础农业生产能力和粮食安全保障水平	0.414 2	
		第二产业总值/亿元	X_{10}	地区工业化程度和技术实力	0.429 8	45.57
	人民生活	第三产业总值/亿元	X_{11}	体现经济结构高级化水平	0.316 5	
		财政支出/亿元	X_{12}	政府资源配置方向和政策重点	0.475 2	
新通道建设	建设密度	城镇居民可支配收入/元	X_{13}	城镇居民实际生活水平和消费能力	0.499 7	3.653
		高速公路密度/(km·km ⁻²)	X_{14}	高速公路网的覆盖与通达水平	0.796 5	4.163
		铁路密度/(km·km ⁻²)	X_{15}	铁路网的覆盖与通达水平	0.590 3	2.205
		交通网络/(km·万人)	X_{16}	居民对交通基础设施的拥有和利用水平	0.265 1	
		人均道路面积/(m ² ·人)	X_{17}	居民享有道路设施与公共空间水平	0.342 9	
	建设规模	公路客运量/万人	X_{18}	公路运输对居民服务水平	0.381 2	
		铁路客运量/万人	X_{19}	铁路运输对居民服务水平	0.403 4	
		公路货运量/10 ⁴ t	X_{20}	公路运输对货物的运输情况	0.454 8	2.092
		铁路货运量/10 ⁴ t	X_{21}	铁路运输对货物的运输情况	0.391 5	
		建成区规模/km ²	X_{22}	城市建设情况基础设施水平	0.480 5	16.973

注:VIF 为方差膨胀因子。

新通道建设方面驱动因素回归系数可视化如图 5 所示。由图 5 可以看出,高速公路密度对土地利用程度的正向效应呈现“南高北低,核心—边缘”梯度格局,作为西部陆海新通道的陆海联动枢纽,广西内陆与湘西走廊构成高值核心区,高速公路网络(如柳南高速、泉南高速)直接串联港口与产业园区,推动物流用地、临港工业区沿交通干线蔓延;低值区则分

布于研究区北部,云贵高原喀斯特地貌限制路网渗透,叠加生态政策压缩开发空间,四川盆地早期路网饱和与产业升级滞后,削弱新建高速的边际效益。铁路密度呈现“西正东负”的空间分异,正向效应集中分布于云贵高原铁路枢纽城市,符合陆海新通道战略优先提升内陆铁路枢纽功能的政策导向,负向效应则主导北部湾港口群及湘桂喀斯特山区。公路

货运量正向效应集中于资源型内陆城市,如矿产城市百色、黔西南州等依赖公路重载运输;北部湾港口

和核心都市因多式联运竞争或用地饱和以负向效应为主导。

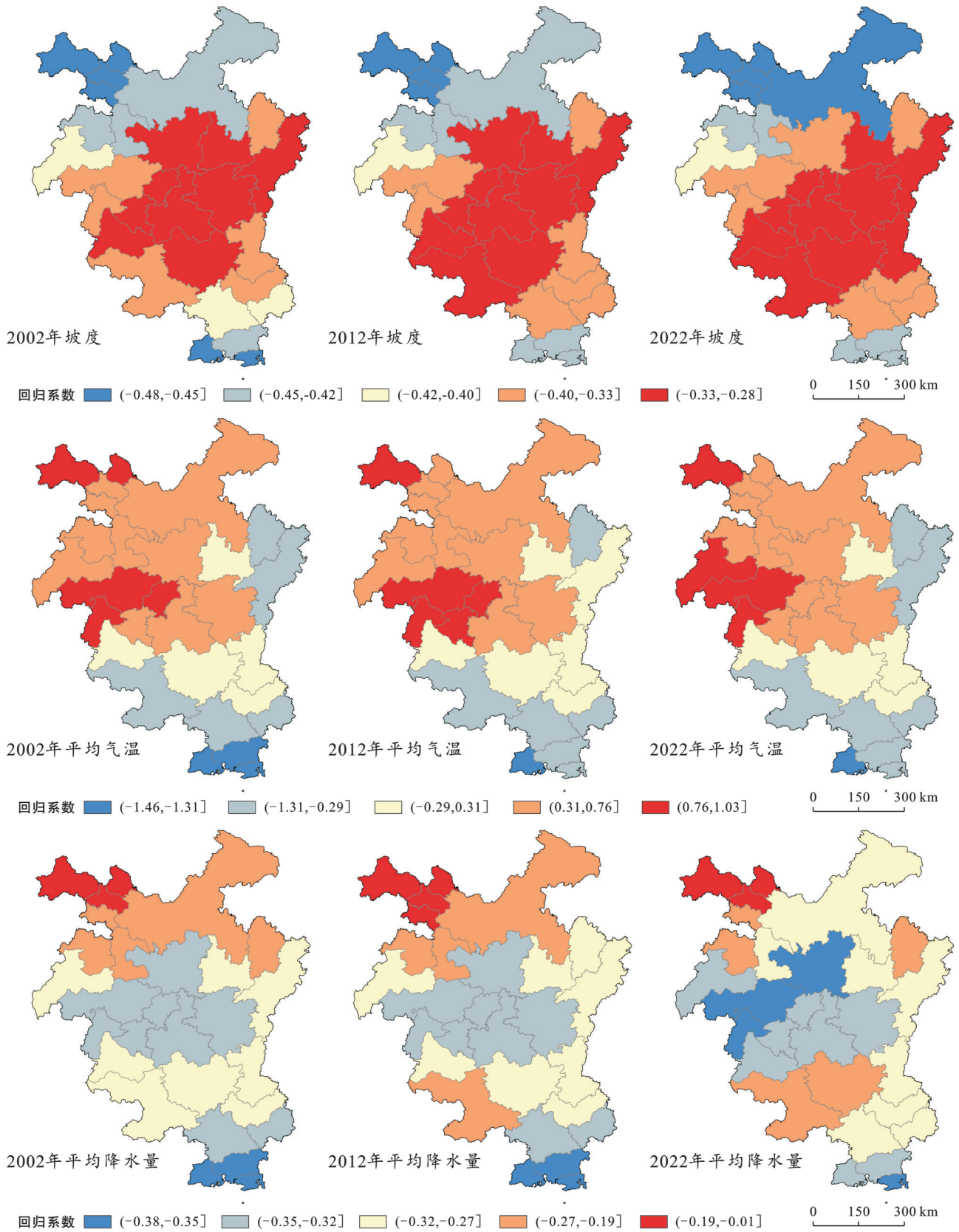


图3 西部陆海新通道地区2002—2012年自然本底因素GTWR模型回归系数空间异质性
Fig.3 Spatial heterogeneity of GTWR model regression coefficients for natural background factors in New International Land-Sea Trade Corridor region from 2002 to 2012

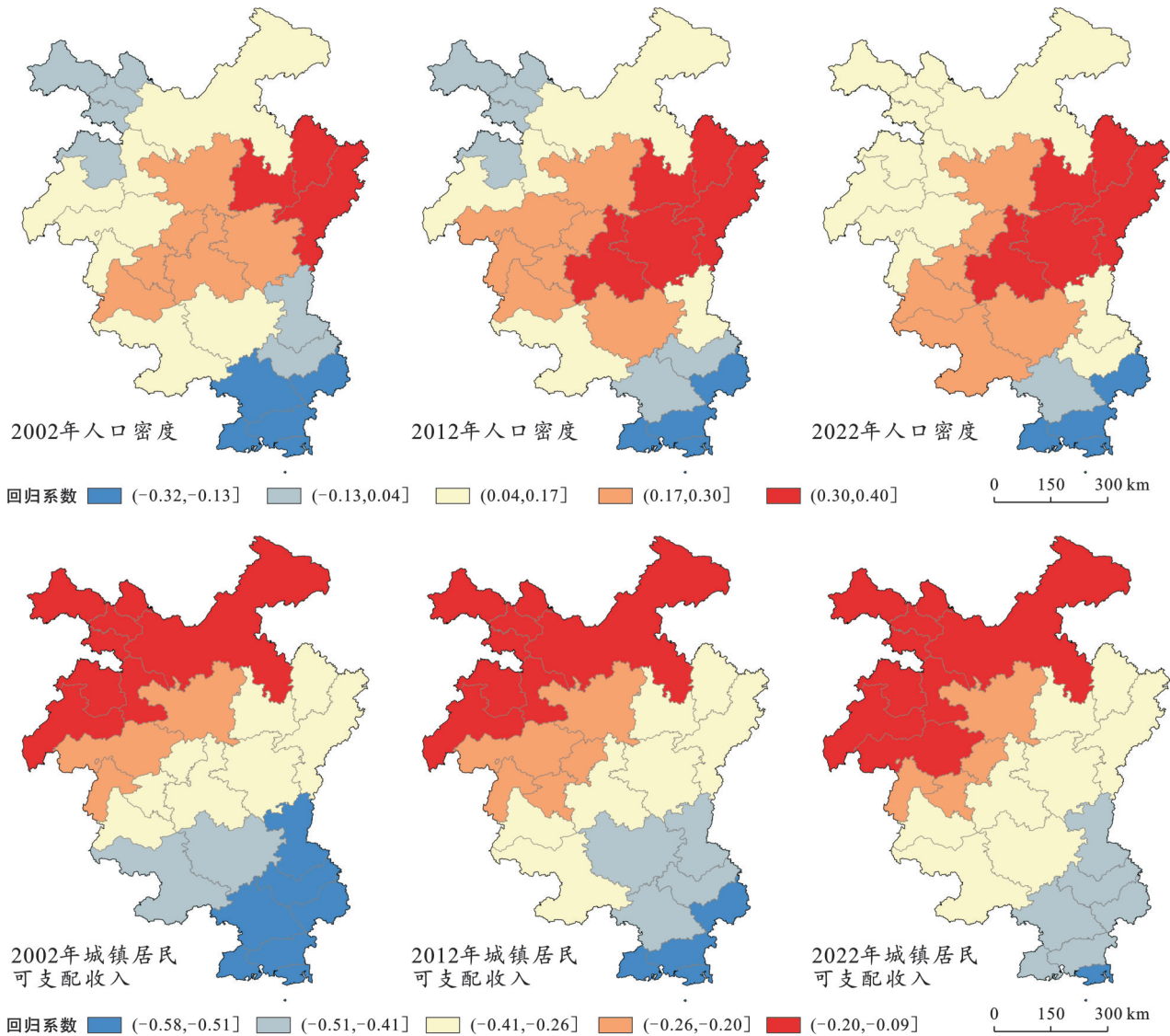


图4 西部陆海新通道地区2002—2012年社会经济因素GTWR模型回归系数空间异质性

Fig.4 Spatial heterogeneity of GTWR model regression coefficients for socioeconomic factors in New International Land-Sea Trade Corridor region from 2002 to 2012

3.3 土地利用多情景模拟预测结果

3.3.1 驱动因子贡献度

利用PLUS模型的LEAS板块对西部陆海新通道地区15个驱动因子进行土地扩张策略分析。图6为15个驱动因子对不同土地利用类型变化的贡献度。耕地和林地的驱动因子贡献度较为相似,主要与人口密度、GDP值、气温、到一级道路的距离等因子相关,其中人口密度和GDP的贡献率较高。草地的主要相关因子为降水、高程、气温、到水域的距离、到一级道路的距离和坡度,其中降水和高程的贡献率最高。水域的主要相关因子为高程、气温、降水,高程的贡献率尤为突出,达到0.34。高程、人口密度、坡度对建设用地的贡献度较大。人口密度、气温、高程对未利用地的影响较大,人口密度的贡献率最为显著,达到0.40。

3.3.2 PLUS精度验证

基于2012—2022年土地利用数据,对2022年土地利用进行空间模拟,对比真实的2022年土地利用数据进行精度验证。采用kappa系数与FOM系数进行精度评价,模拟结果显示(图7),总体分类精度为89.5%,kappa系数为0.785,FOM系数为0.044。kappa系数超过0.7的阈值,表明模拟结果与真实土地利用格局具有较高一致性^[31];FOM系数处于常规经验区间^[32];综合总体精度与kappa系数的量化结果,可判定本次模拟具有较高的可信度,可以用于预测西部陆海新通道地区2032年的土地利用多情景模拟。

3.3.3 不同情景下的土地利用变化

基于2022年土地利用数据,采用PLUS模型预测4种发展情景下2032年土地利用分布,结果由图8可知,各类土地利用面积变化特征详见表7。

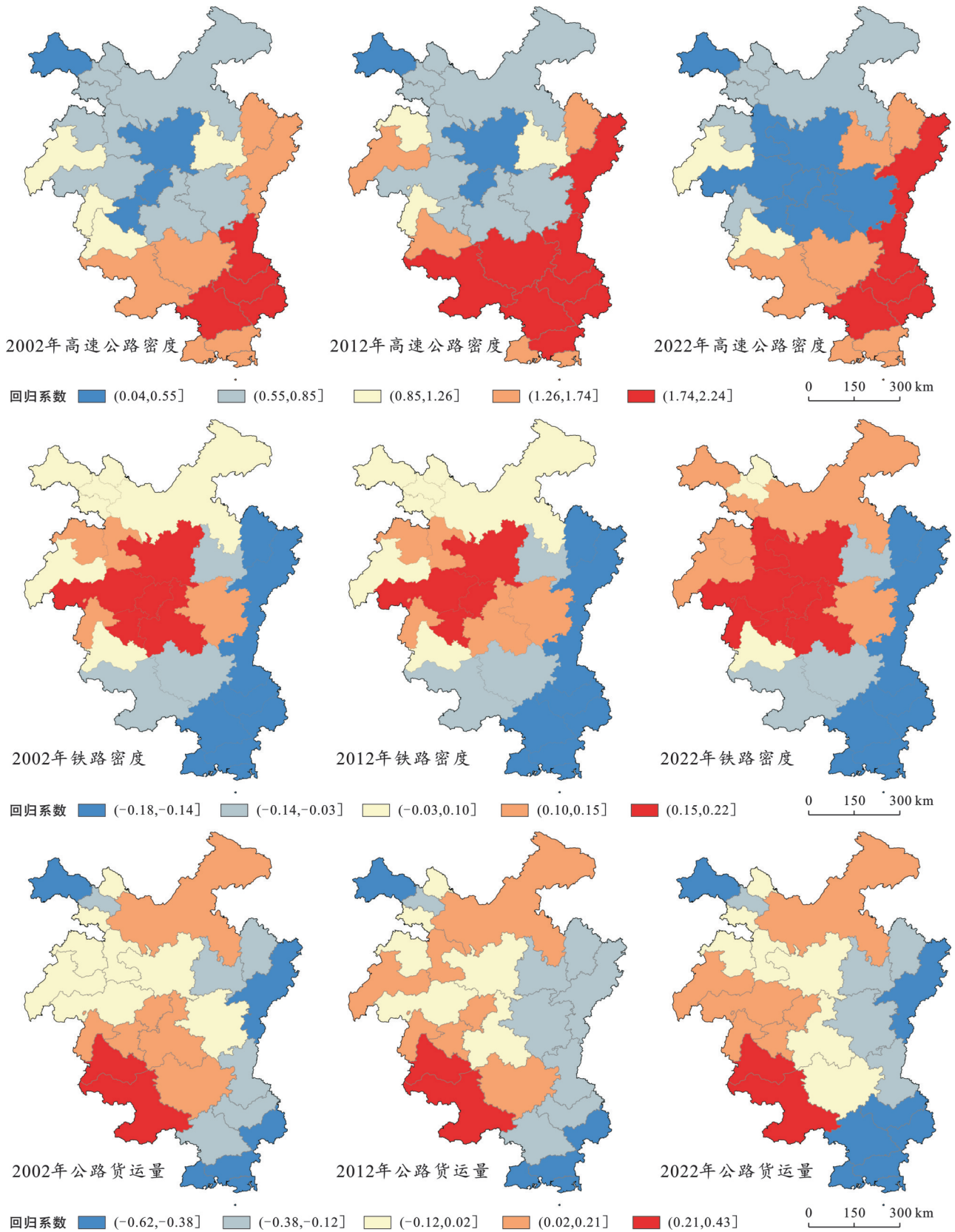


图5 西部陆海新通道地区2002—2012年新通道建设因素GTWR模型回归系数空间异质性
 Fig.5 Spatial heterogeneity of GTWR model regression coefficients for new corridor development factors in New International Land-Sea Trade Corridor region from 2002 to 2012

(1) 在自然发展情景下,土地利用变化延续了2022年的趋势,建设用地扩张显著,面积从2022年的

8 023.31 km²增加至10 160.83 km²,增幅达26.64%。这种扩张主要来源于对耕地和草地的侵占,其中耕地

面积从183 212.57 km²减少至176 378.45 km²,降幅为3.73%;草地面积从3 596.8 km²减少至3 275.06 km²,降幅为8.95%。水域和未利用地面积变化较小,分别减少3.98和7.87 km²。自然发展情景下,城镇化进程对耕地的侵占效应显著,生态用地(草地、水域)的减少可能对区域生态系统服务功能产生负面影响。

(2) 耕地保护情景通过政策干预,限制了耕地的转出,耕地面积从2022年的183 212.57 km²增加至199 876.52 km²,增幅为9.10%。然而,这种保护政策以牺牲其他生态用地为代价,草地面积从3 596.8 km²大幅减少至2 340.92 km²,降幅达34.92%;水域面积从4 383.44 km²减少至3 811.42 km²,降幅为13.05%。建设用地面积也有所增加,从8 023.31 km²增至8 429.87 km²,增幅为5.07%。未利用地面积减少了67.81%。耕地保护情景虽有效保障了粮食安全,但

草地和水域的大幅减少可能导致生态屏障功能弱化,需进一步优化政策设计以平衡耕地保护与生态用地保护的关系。

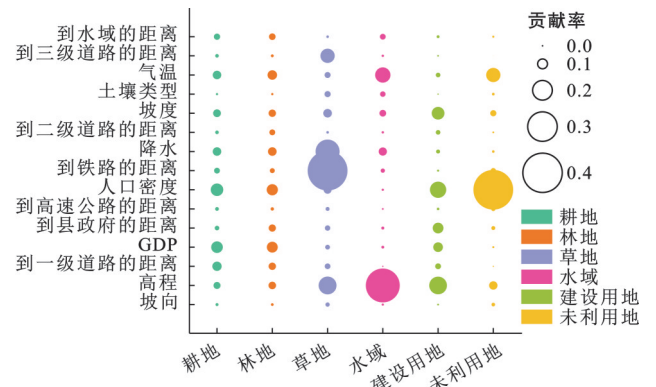


图6 研究区土地利用变化驱动因子贡献度气泡图
Fig.6 Bubble chart of driving factor contributions of land use change in study area

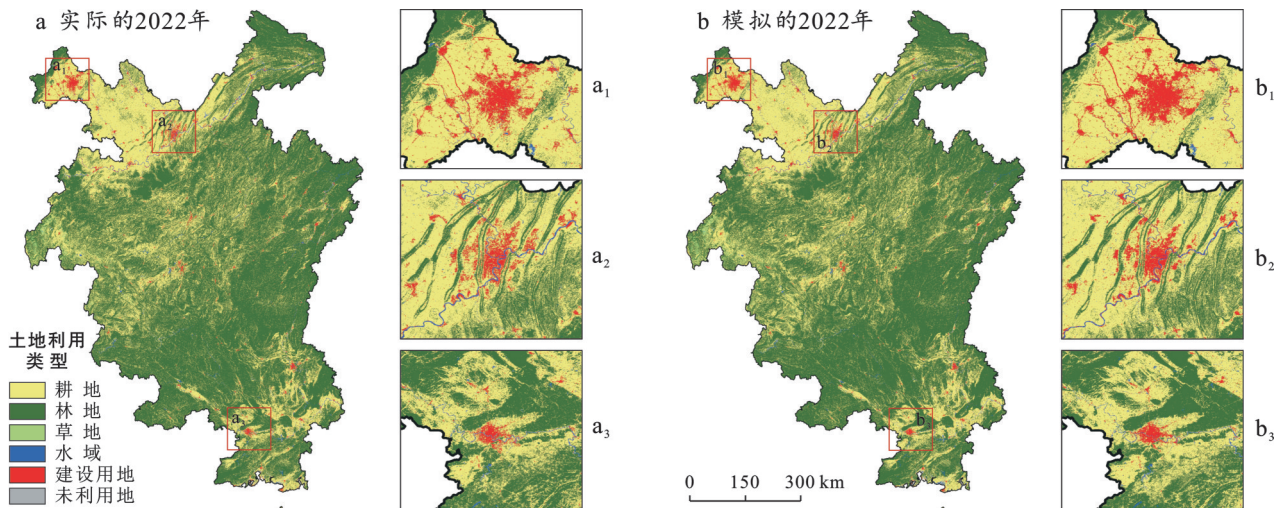


图7 西部陆海新通道地区2022年土地利用实际与模拟结果对比

Fig.7 Comparison of actual and simulated land use in New International Land-Sea Trade Corridor region in 2022

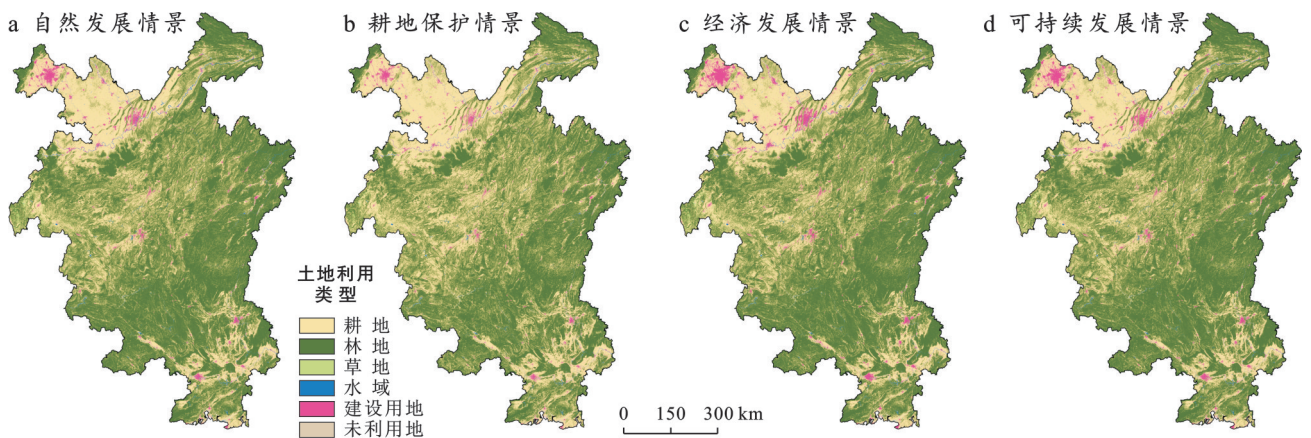


图8 西部陆海新通道地区2032年4种不同情景土地利用分布预测

Fig.8 Predicted land use distribution under four scenarios in New International Land-Sea Trade Corridor region in 2032

(3) 经济发展情景下,建设用地扩张最为剧烈,面积从2022年的8 023.31 km²大幅增加至13 923.98 km²,增幅达73.54%。这种扩张主要来源于对耕地和林

地的侵占,其中耕地面积从183 212.57 km²减少至169 854.98 km²,下降幅度为7.29%;林地面积从335 266.04 km²减少至320 033.14 km²,降幅为

4.54%。草地、水域和未利用地面积也分别减少了16.39%,12.12%和80.45%。经济发展情景下,建设用地的快速扩张显著加剧了生态用地的破碎化,尤其是林地和草地的减少可能对区域碳储量和生物多样性产生负面影响。

(4)可持续发展情景通过平衡生态保护与经济发展,建设用地的扩张得到一定控制,面积从2022年的8 023.31 km²增加至11 902.55 km²,增幅为48.35%。耕地面积从183 212.57 km²减少至171 539.26 km²,降

幅为6.37%,较经济发展情景有所缓和。林地面积从335 266.04 km²增加至344 122.27 km²,增幅为2.64%,表明该情景下林地保护政策效果显著。草地面积从3 596.8 km²减少至3 157.84 km²,降幅为12.20%,较其他情景更为缓和。水域面积减少了13.96%,未利用地面积减少了77.86%。可持续发展情景在保障经济发展的同时,有效减缓了生态用地的流失,尤其是林地的增加有助于提升区域碳储量,体现了生态优先政策的有效性。

表7 西部陆海新通道地区2002年与2032年不同情景下土地利用类型面积对比
Table7 Comparison of land use area under different scenarios in New International Land-Sea Trade Corridor region in 2002 and 2032

土地利用类型	2022年		自然发展情景		耕地保护情景		经济发展情景		可持续发展情景	
	面积/km ²	面积/km ²	变化率/%	面积/km ²	变化率/%	面积/km ²	变化率/%	面积/km ²	变化率/%	
耕地	183 212.57	176 378.45	-3.73	199 876.52	9.10	169 854.98	-7.29	171 539.26	-6.37	
林地	335 266.04	340 296.23	1.50	320 033.14	-4.54	343 855.19	2.56	344 122.27	2.64	
草地	3 596.80	3 275.06	-8.95	2 340.92	-34.92	3 007.17	-16.39	3 157.84	-12.20	
水域	4 383.44	4 379.46	-0.09	3 811.42	-13.05	3 852.36	-12.12	3 771.39	-13.96	
建设用地	8 023.31	10 160.83	26.64	8 429.87	5.07	13 923.98	73.54	11 902.55	48.35	
未利用地	14.32	6.45	-54.96	4.61	-67.81	2.80	-80.45	3.17	-77.86	

4 讨论

本文针对西部陆海新通道这一国家战略走廊的“生态-经济矛盾”核心科学问题,通过空间异质性解析与多情景模拟,揭示了土地利用变化的内在机制,其本质是地理环境约束与战略开发需求的空间博弈。本文通过三重结构性论证回应此问题:一是矛盾表征量化,土地利用程度指数证实“核心聚集、轴线扩散”模式,较弱等级土地比例增长29.25%(表5),反映城镇化与生态保护的拉锯,城市新区扩张以低强度开发置换未利用地,而生态敏感区强等级土地收缩,印证“开发压力向边缘转移”的风险。二是驱动机制分析,OPGD模型识别关键驱动因子(如人口密度 $q=0.9146$),GTWR模型解析其空间分异规律(如高速公路密度正效应沿交通干线辐射)。三是政策干预验证,可持续发展情景的“相对优化性”是对核心问题的响应,证明生态优先政策可部分缓解矛盾,但也存在单目标管控的局限性。

基于本文对西部陆海新通道地区土地利用时空演变及多情景模拟的分析结果,在未来的通道建设中需构建“轴带串联,多核联动”的空间开发模式,以交通干线(如铁路/高速公路)为骨架,在钦州港、重庆科学城等枢纽节点集约布局产业用地,并同时培育次级增长区以缓解核心区生态压力。建立“生态优先”的国土空间管控机制,例如将云贵高原喀斯特地貌区(坡度 $>25^\circ$ 区域)纳入禁止建设区,严格限制

生态用地转出,并在昭通、毕节等冷点区实施退耕还林与石漠化治理;创新陆海统筹生态补偿,推动北部湾港口收益反哺云贵高原生态修复,保障跨境流域生态安全。推行差异化土地利用调控政策,在四川盆地严格守护优质耕地并推行数字化监管,云贵高原原则推进坡耕地提质改造与布局优化;抑制建设用地无序扩张,通过北部湾港口群发展高端临港产业、核心城市工业用地“零增地技改”提升用地效率。强化通道-腹地协同能力,补齐云贵铁路货运短板,共建防城港-柳州-贵阳“公铁海”智能物流走廊以减少公路生态压力,设立阈值参考、碳储量等生态指标联合监测,最终推动陆海新通道从“流量增值”向“可持续发展增量”转化。

本文虽揭示了西部陆海新通道地区土地利用程度空间异质性并预测2032年不同情境下的土地利用格局,但仍存在一定局限性,未来需通过方法优化与内容拓展深化研究:①数据方面,采用武汉大学团队发布的CLCD 30 m土地利用数据集,该数据集总体分类精度达80%^[30],但由于研究年份相距较久远,图像识别在地形破碎区域可能把耕地与灌木草地混淆;社会经济数据(如GDP)的1 km空间分辨率可能弱化局部驱动机制的解析。未来可新增中国-东盟进出口额等跨境指标强化口岸城市用地模拟的政策适配性,融合更高精度的夜间灯光数据或POI数据提升驱动因子的空间表征能力。②现有驱动因子体系(自然本底、社会经济、通道建设)对西南喀斯特地域

特性的表征不足,缺乏石漠化敏感性指数、碳酸盐岩出露面积比等生态约束指标,未来需耦合地质、石漠化监测等数据,更多关注战略驱动效应和生态安全底线,构建“自然-经济-制度”全要素驱动的土地系统解析框架,通过方法论融合(GTWR驱动PLUS)、数据增强(动态-跨境指标)、因子重构(交互项与复合指标)三重路径,为陆海新通道“生态-经济”协调治理提供新范式。

5 结论

(1) 2002—2022年土地利用程度总体处于中等水平,较弱等级土地比例增长显著,其他等级土地比例均小幅下降;从空间变化上看,交通枢纽及沿海港口土地利用强度沿主干线集聚,核心城市群周边较弱等级土地向城市新区开发方向扩张。

(2) 土地利用程度变化高-高集聚区从单极化核心向多核联动演变,体现陆海新通道“轴带串联”开发逻辑;“低-低”冷点区持续锁定地形破碎带与生态敏感区,反映通道建设受自然本底影响。土地利用程度影响因素的空间异质性显著,高速公路密度的影响为正向效应,坡度、年平均降水量、城镇居民可支配收入的影响为负向效应,年平均气温、人口密度、铁路密度、铁路货运量则正负向效应兼具。

(3) 基于PLUS模型模拟西部陆海新通道地区2032年4种发展情景下的土地利用变化,kappa系数为0.785,总体精度达89.5%,自然发展情景下建设用地面积增长,耕地和草地面积减少。耕地保护情景通过政策干预使耕地面积增加,但导致草地和水域面积减少。经济发展情景下建设用地扩张高达73.54%,耕地和林地分别减少。相比之下,可持续发展情景通过平衡政策使建设用地增幅降低,林地面积增长,耕地降幅减缓。研究证明,政策导向显著影响土地利用格局,需通过差异化调控机制协调耕地保护、生态安全与城镇化需求,以实现区域可持续发展。

参考文献(References)

- [1] 国家发展和改革委员会.关于印发《西部陆海新通道总体规划》的通知[EB/OL](2019-08-02)[2025-04-15].https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/201908/t20190815_962187.html. National Development and Reform Commission. Notice on Issuing the “Master Plan for the New International Land-Sea Trade Corridor” [EB/OL] (2019-08-02) [2025-04-15]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/201908/t20190815_962187.html.
- [2] 国家发展和改革委员会.关于印发《“十四五”推进西部陆海新通道高质量建设实施方案》的通知[EB/OL](2021-08-24)[2025-04-15].https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202108/t20210824_1295048.html. National Development and Reform Commission. Notice on Issuing the “Implementation Plan for Promoting High-Quality Development of the New International Land-Sea Trade Corridor during the 14th Five-Year Plan Period (2021—2025)” [EB/OL] (2021-08-24) [2025-04-15]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202108/t20210824_1295048.html.
- [3] 姜峰,张云河,宋豪新,等.跨越山海展新途[N].人民日报,2024-03-26(7).
Jiang Feng, Zhang Yunhe, Song Haoxin, et al. New paths forged across mountains and seas [N]. People's Daily, 2024-03-26(7).
- [4] 陈丽婷.西部陆海新通道地区土地利用变化对生态网络稳定性的影响[D].广西 南宁:南宁师范大学,2024.
Chen Liting. Influence of land use change on the stability of ecological network in the new land-sea passage area of western China [D]. Nanning, Guangxi: Nanning Normal University, 2024.
- [5] 刘彦随,陈百明.中国可持续发展问题与土地利用/覆被变化研究[J].地理研究,2002,21(3):324-330.
Liu Yansui, Chen Baiming. The study framework of land use/cover change based on sustainable development in China [J]. Geographical Research, 2002, 21 (3) : 324-330.
- [6] Etefa G, Frankl A, Lanckriet S, et al. Changes in land use/cover mapped over 80 years in the highlands of northern Ethiopia [J]. Journal of Geographical Sciences, 2018,28(10):1538-1563.
- [7] 李洪庆,宋红艳,程飞飞.沿海城市土地利用冲突解析与评价研究:以江苏省盐城市为例[J].水土保持通报,2024,44(6):318-327.
Li Hongqing, Song Hongyan, Cheng Feifei. Analysis and evaluation on land use conflicts in coastal cities: A case study of Yancheng City, Jiangsu Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(6) : 318-327.
- [8] 徐梦菲,孙一帆,汪霞.郑洛沿黄地区土地利用格局时空演变及驱动机制研究[J].人民黄河,2024,46(11):106-113.
Xu Mengfei, Sun Yifan, Wang Xia. Spatial-temporal evolution and driving mechanisms of land use pattern along the Yellow River in Zhengzhou and Luoyang Cities [J]. Yellow River, 2024,46(11):106-113.
- [9] Xu Wenjin, Song Jinxi, Long Yongqing, et al. Analysis and simulation of the driving mechanism and ecological effects of land cover change in the Weihe River basin, China [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 344:118320.
- [10] Shao Jing'an, Dang Yongfeng, Wang Wei, et al. Simu-

- lation of future land-use scenarios in the Three Gorges reservoir region under the effects of multiple factors [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(12): 1907-1932.
- [11] 张颖,赵宇鸾.黔桂岩溶山区土地利用程度演变的空间分异特征[J].*水土保持研究*,2018,25(1):287-297.
Zhang Ying, Zhao Yuluan. Spatial difference of land use degree evolution in Guizhou-Guangxi karst mountainous areas [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(1): 287-297.
- [12] 梁明,聂拼,陆胤昊,等.淮南市土地利用程度变化过程的时空演化特征[J].*农业工程学报*,2019,35(22): 99-106.
Liang Ming, Nie Pin, Lu Yin hao, et al. Spatiotemporal evolution characteristics of land use intensity change process of Huainan [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(22): 99-106.
- [13] 李广英,李红颖,王凌青,等.青海省土地利用变化及其社会经济驱动因素分析[J].*草业科学*,2022,39(12): 2604-2616.
Li Guangying, Li Hongying, Wang Lingqing, et al. Analysis of land use change and its socio-economic driving factors in Qinghai Province [J]. *Pratacultural Science*, 2022, 39(12): 2604-2616.
- [14] 段红腾,吴发启,杨一凡,等.近10年巴音河流域土地利用变化及驱动力分析[J].*水土保持研究*,2020,27(2):172-177.
Duan Hongteng, Wu Faqi, Yang Yifan, et al. Land use change and driving force analysis of Bayin River basin in the past 10 years [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(2): 172-177.
- [15] Virtriana R, Sumarto I, Deliar A, et al. Model of land cover change prediction in West Java using cellular automata-Markov chain (CA-MC) [C] // National Physics Conference 2014 (Perfik 2014), Kuala Lumpur, Malaysia. AIP Publishing LLC, 2015.
- [16] 牟燕,冯飞.基于土地利用的北京市多情景模拟下生态服务价值影响评估[J].*北京林业大学学报*,2023,45(5):14-24.
Mou Yan, Feng Fei. Impact assessment of ecological service value under multi scenario simulation in Beijing based on land use [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2023, 45(5): 14-24.
- [17] 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[J].*农业工程学报*,2023,39(19): 131-140.
Kang Wendong, Ni Fuquan, Deng Yu, et al. Response of blue and green water to climate and land use changes: A study in the Wujiang River basin, China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineer-*
- ing, 2023, 39(19): 131-140.
- [18] 裴宇洁.耦合多目标优化模型与PLUS模型的京津冀城市群土地利用结构与空间优化研究[D].北京:北京建筑大学,2024.
Pei Yujie. Research on land use structure and space optimization by coupling multi-objective optimization and PLUS models in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2024.
- [19] 杨子韬,田莉.基于PLUS模拟未来土地利用变化的可持续发展评估:以江西省为例[J].*地理科学*,2024,44(10):1826-1836.
Yang Zitao, Tian Li. Sustainability assessment based on PLUS simulation of future land use change: A case study of Jiangxi Province [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2024, 44(10): 1826-1836.
- [20] 李大强,张飞云,李倩,等.基于PLUS-InVEST模型的博斯腾湖流域碳储量时空演变及预测[J].*农业资源与环境学报*,2025,42(5):1267-1276.
Li Daqiang, Zhang Feiyun, Li Qian, et al. Spatial and temporal evolution and prediction of carbon stock in Bosten Lake basin based on PLUS-InVEST model [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2025, 42(5): 1267-1276.
- [21] 姚侠妹,盛雨恬,祁慧敏,等.模拟多情景下淮河生态经济带土地利用变化及生态系统服务价值的空间响应[J].*水土保持研究*,2025,32(3):300-311.
Yao Xiamei, Sheng Yutian, Qi Huimin, et al. Simulating land use changes and spatial response of ecosystem service value in the Huaihe River eco-economic belt under multiple scenarios [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(3): 300-311.
- [22] 耿健茜,李玲,郭珊珊,等.基于PLUS模型的河南省资源型城市生态系统服务价值时空演变及多情景预测[J/OL]. [2025-08-26]. *环境科学*, <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202411170>.
Geng Jianxi, Li Ling, Guo Shanshan, et al. Spatio-temporal evolution and multi-scenario prediction of ecosystem service value of resource-based cities in Henan Province based on PLUS model [J/OL]. [2025-08-26] *Environmental Science*, <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202411170>.
- [23] Yang Jie, Huang Xin. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [24] 郭健斌,张英,张志伟,等.西藏林芝市土地利用程度变化及其空间异质性分析[J].*云南农业大学学报(自然科学)*,2023,38(3):511-519.
Guo Jianbin, Zhang Ying, Zhang Zhiwei, et al. Study of land use intensity change and its spatial heterogeneity

- of Nyingchi City in Tibet [J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2023, 38(3): 511-519.
- [25] Getis A, Ord J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics [J]. Geographical Analysis, 1992, 24(3):189-206.
- [26] 李晓健, 马林兵. 基于参数最优地理探测器的粤东北耕地非农化特征与影响因素研究 [J]. 水土保持通报, 2024, 44(5):100-112.
Li Xiaojian, Ma Linbing. Characteristics and influencing factors of farmland conversion to non-agricultural uses in northeast Guangdong Province based on optimal parameter geographic detector [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(5):100-112.
- [27] 丁一萌, 韩玲, 黄馨. 陕西省县域碳盈亏驱动因素及时空异质性 [J]. 环境科学, 2025, 46(3):1502-1516.
Ding Yimeng, Han Ling, Huang Xin. Temporal and spatial heterogeneity and its influencing factors of carbon surplus and deficit at county-level areas in Shaanxi Province [J]. Environmental Science, 2025, 46(3):1502-1516.
- [28] Liang Xun, Guan Qingfeng, Clarke K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2021, 85:101569.
- [29] 王博. 基于 PLUS 模型的鄱阳湖区土地利用冲突时空演变及多情景模拟 [D]. 江西 南昌: 江西师范大学, 2023.
Wang Bo. Spatio-temporal evolution and multi-scenario simulation of land use conflict in Poyang Lake area based on PLUS model [D]. Nanchang, Jiangxi: Jiangxi Normal University, 2023.
- [30] 交通运输部. 交通强国建设评价指标体系 [J]. 中国水运, 2022(7):12-15.
Ministry of Transport. Evaluation index system for the construction of a powerful transportation country [J]. China Water Transport, 2022(7):12-15.
- [31] Congalton R G, Mead R A. A quantitative method to test for consistency and correctness in photointerpretation [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1983, 49(1):69-74.
- [32] Pontius R G, Boersma W, Castella J C, et al. Comparing the input, output, and validation maps for several models of land change [J]. The Annals of Regional Science, 2008, 42(1):11-37.

(上接第 71 页)

- [28] 郭月峰, 祁伟, 姚云峰, 等. 内蒙古砒砂岩区沙棘细根生长特征对平茬的响应 [J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(12):155-162.
Guo Yuefeng, Qi Wei, Yao Yunfeng, et al. Response of the root characteristics of *Hippophae rhamnoides* to stumping in sandstone area of Inner Mongolia [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2020, 22(12):155-162.
- [29] Bengough A G, Croser C, Pritchard J. A biophysical analysis of root growth under mechanical stress [M] // Plant Roots-From Cells to Systems. Dordrecht: Springer Netherlands, 1997:107-116.
- [30] 郭维俊, 黄高宝, 王芬娥, 等. 土壤-植物根系复合体本构关系的理论研究 [J]. 中国农业大学学报, 2006, 11(2):35-38.
Guo Weijun, Huang Gaobao, Wang Fene, et al. Study on constitutive relation of soil-root composite [J]. Journal of China Agricultural University, 2006, 11(2):35-38.

(上接第 102 页)

- [31] 和丽萍, 李贵祥, 孟广涛, 等. 高黎贡山不同森林类型土壤肥力状况研究 [J]. 水土保持研究, 2015, 22(6): 116-121.
He Liping, Li Guixiang, Meng Guangtao, et al. Study on soil fertility of different forest types in Gaoligong Mountains [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(6):116-121.
- [32] 宋贤冲, 项东云, 郭丽梅, 等. 猫儿山森林土壤养分的空间变化特征 [J]. 森林与环境学报, 2016, 36(3): 349-354.
Song Xianchong, Xiang Dongyun, Guo Limei, et al. Spatial variation pattern of soil nutrients in forests of Maoer Mountain [J]. Journal of Forest and Environment, 2016, 36(3):349-354.
- [33] 殷红慧, 许龙, 冯坤, 等. 文山植烟土壤有机质和氮含量的研究 [J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2015, 30(6):902-908.
Yin Honghui, Xu Long, Feng Kun, et al. Study on content of organic matter and nitrogen in Wenshan tobacco growing soils [J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2015, 30(6):902-908.
- [34] 陈钦程, 徐福利, 王渭玲, 等. 秦岭北麓不同林龄华北落叶松土壤速效钾变化规律 [J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5):1243-1249.
Chen Qincheng, Xu Fuli, Wang Weiling, et al. Seasonal dynamics of available K in soil for different ages of *Larix principis-rupprechtii* in the northern foot of the Qinling [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(5):1243-1249.