

北部湾滨海地区土地覆被信息提取及时空演变驱动机制

——以广西壮族自治区钦州市为例

廖超明¹, 李宥儒¹, 徐彬彬², 秦元丽³,
曾顺琪⁴, 云子恒¹, 顾观海⁵, 韦媛媛¹, 石春柔¹

(1. 南宁师范大学 自然资源与测绘学院, 广西南宁 530001; 2. 广西交通

职业技术学院, 广西南宁 530022; 3. 广西林业科学研究院, 广西南宁 530002;

4. 广西遥感空间信息科技有限公司, 广西南宁 530023; 5. 广西大学 公共管理学院, 广西南宁 530004)

摘要: [目的] 开展北部湾滨海地区覆被信息提取及时空演变驱动机制研究, 为该地区经济发展和资源可持续利用提供科学支持。[方法] 面向北部湾滨海地区, 以广西壮族自治区钦州市为例, 基于谷歌地球引擎平台(GEE), 在随机森林模型中融合光谱特征、纹理特征、指数特征以及地形特征, 完成 2012—2022 年土地利用/覆被变化(LUCC)数据集制作和格局演变分析, 引入最优参数地理探测器探讨驱动机制。[结果] ①经参数优化的随机森林模型可实现覆被信息有效提取, 各期 LUCC 产品总体精度均在 0.88~0.92, kappa 系数介于 0.86~0.90, 结合 4 km×4 km 解译图斑与 Google Earth 同期同位高分辨率影像进行目视对比, 表明解译结果与地物的实际布局具有较好一致性。②2012—2022 年钦州市林地面积增加 91.93 km², 耕地面积减少 284.73 km², 建设用地面积增加 180.05 km², 综合土地利用动态度呈上升趋势。③研究期内, 经济动力(国内生产总值, GDP)和地形特征(高程、坡度)是研究区土地利用演变的主要影响因素。[结论] 2012—2022 年钦州市在发展经济的同时也在环境保护领域积极作为, 未来应充分利用“平陆运河”建设带来的机遇和挑战, 科学规划土地资源, 推动生态文明建设和经济建设平衡发展。

关键词: 谷歌地球引擎(GEE); 土地利用/覆被变化(LUCC); 时空格局演变; 驱动机制

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2025)03-0143-12

中图分类号: P237

文献参数: 廖超明, 李宥儒, 徐彬彬, 等. 北部湾滨海地区土地覆被信息提取及时空演变驱动机制[J]. 水土保持通报, 2025, 45(3): 143-154. Liao Chaoming, Li Youru, Xu Binbin, et al. Land cover information extraction and driving mechanism of spatiotemporal evolution in Beibu Gulf coastal area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(3): 143-154. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.03.031; CSTR: 32312.14.stbctb. 2025.03.031.

Land cover information extraction and driving mechanism of spatiotemporal evolution in Beibu Gulf coastal area

—Taking Qinzhou City of Guangxi Zhuang Autonomous Region as an example

Liao Chaoming¹, Li Youru¹, Xu Binbin², Qin Yuanli³,

Zeng Shunqi⁴, Yun Ziheng¹, Gu Guanhai⁵, Wei Yuanyuan¹, Shi Chunrou¹

(1. School of Natural Resources and Surveying and Mapping, Nanning Normal University, Nanning, Guangxi 530001,

China; 2. Guangxi Transport Vocational And Technical College, Nanning, Guangxi 530022, China; 3. Guangxi Forestry

Research Institute, Nanning, Guangxi 530002, China; 4. Guangxi Remote Sensing Spatial Information Technology Co., Ltd.,

Nanning, Guangxi 530023, China; 5. School of Public Administration, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)

收稿日期: 2024-12-06

修回日期: 2025-02-19

采用日期: 2025-02-20

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于卫星对地观测技术的广西‘山’字型构造时空演变特征研究”(42164001); 广西重点研发计划“广西自然资源卫星遥感智能监测关键技术与应用示范”(桂科 AB22080080); 广西重点研发计划“国土空间规划实景三维智能可视化分析平台研发与应用”(桂科 AB23026015)

第一作者: 廖超明(1975—), 男(汉族), 广西壮族自治区平南县人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事 3S 技术在土地资源管理应用方面的研究。Email: liaochaoming@nnu.edu.cn.

通信作者: 徐彬彬(1982—), 女(汉族), 山东省昌邑市人, 硕士, 副教授, 主要从事数字化工程管理方面的研究。Email: 8034998@qq.com.

Abstract: [Objective] Research on land cover information extraction and the driving mechanisms of spatiotemporal evolution in the coastal area of the Beibu Gulf was conducted to provide scientific support for regional economic development and sustainable resource utilization. [Methods] Focusing on the coastal area of the Beibu Gulf and taking Qinzhou City, Guangxi Zhuang Autonomous Region, as a case study, the Google Earth Engine (GEE) platform was utilized for imagery. The random forest model was employed by integrating spectral, texture, index, and topographic features to produce land use and land cover change (LUCC) datasets and analyze pattern evolution from 2012 to 2022. The optimal parameter geographic detector was introduced to explore the driving mechanisms. [Results] ① The parameter-optimized random forest model was demonstrated to facilitate effective extraction of cover information, with an overall accuracy of LUCC products in each period ranging from 0.88 to 0.92 and kappa coefficients ranging from 0.86 to 0.90. The integration of multiple 4 km × 4 km interpreted patches with a visual comparison of concurrent high-resolution imagery from Google Earth substantiated a high degree of consistency between the interpretation outcomes and the actual configuration of the landforms. The actual layout demonstrated a strong degree of consistency. ② From 2012 to 2022, the forest land area of Qinzhou City increased by 91.93 km², the cultivated land area decreased by 284.73 km², and the construction land area increased by 180.05 km². The comprehensive land use dynamics exhibited an upward trend. ③ During the study period, economic dynamics (GDP) and topographic features (elevation, slope) were identified as the primary influencing factors of land use evolution in the study area. [Conclusion] From 2012 to 2022, Qinzhou City actively pursued environmental protection while developing its economy. In the future, the city should fully utilize the opportunities and challenges brought by the construction of the Pinglu Canal, scientifically plan land resources, and promote a balanced development of ecological civilization construction and economic growth.

Keywords: Google Earth Engine (GEE); land use/cover change (LUCC); spatiotemporal pattern evolution; driving mechanism

土地利用/覆被变化(LUCC)是人与自然相互作用的直接结果,反映人类赖以生存的地球环境与人类生产发展之间相互作用的基本过程。开展LUCC研究是为了进一步理性化利用土地资源,有效预测特定土地利用行为对社会发展、经济进步和自然生态的影响;寻求最优土地利用模式,实现人与自然和谐共生^[1]。中国改革开放政策实施40 a来,滨海地区产生了显著的土地利用/覆被变化,如何高效、准确提取LUCC信息具有技术挑战^[2]。“遥感(remote sensing)+算法”模式通过整合多源数据,可提高滨海地带LUCC信息提取的效率;支持向量机SVM、分类回归树CART以及随机森林RF等机器学习算法被广泛应用^[3-5]。然而,传统遥感信息提取技术因其操作的复杂性与高成本缺陷而面临被替代风险,以GEE平台为代表的新遥感数据处理平台应运而生。GEE集成海量的大范围、长时序遥感数据资源^[6],具备优异云端计算能力,极大程度满足高效、连续、多尺度等遥感数据处理需求,为研究地球科学相关问题提供有效便捷方式^[7-8]。当前,中国30 m年度土地覆盖数据集(CLCD)^[9]、全球首套1985—2022年30 m分辨率土地覆被时序动态遥感产品等^[10]均基于GEE平台开发。在植被资源及生物多样性保护方面,利用GEE高性能计算能力,粤港澳大湾区近30 a的红树

林动态变化监测得以实现^[11]。在自然灾害防控与监测方面,借助Landsat, Sentinel遥感数据,结合夜间灯光等数据,也可实现对洪涝灾害的动态评估^[12]。就生态文明建设而言,短期人工林种植对环境保护及经济发展具有重要影响,人类利用遥感技术能有效提取人工林的时空分布信息,由此探究其演化规律,为林业资源管理及森林碳循环研究提供有力支持^[13]。

目前,已有学者采用遥感与算法结合模式对滨海地区开展监测研究^[14],但针对北部湾滨海地带的研究成果尚较少。钦州市地处华南、西南、东盟经济圈三圈结合部,是广西北部湾经济区海陆交通枢纽。“平陆运河”作为新时代水运工程建设标杆,自北向南贯穿整个钦州市。运河的建设可带动沿线地区经济发展,同时也给地方资源配置和生态环境带来不小压力,作为运河承建主阵地,钦州市的土地利用现状直接影响运河建设顺利进行。通过探讨土地利用时空演变规律及驱动机制,促进资源合理配置,可为运河前期建设、后期安全运营等提供科学依据,也为地方政府加强生态文明建设提供决策参考。有利于推动区域经济协调发展,实现经济效益、社会效益和生态效益的有机统一。因此,本研究面向北部湾,研究区涵盖钦州市全域,基于GEE平台,在随机森林分类模型中融合光谱特征、纹理特征、指数特征、地形

特征,有效提取研究区LUCC信息,结合转移矩阵、土地利用动态度和植被覆盖度等开展土地利用演变特征分析,并引入最优参数地理探测器实现驱动机制探讨,对研究区国土空间规划合理布局,深化打造西部海路新通道具有理论和现实意义。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

钦州市位于东经 $107^{\circ}27'$ — $09^{\circ}56'$,北纬 $20^{\circ}53'$ — $22^{\circ}42'$,总面积 $10\ 897\text{ km}^2$,是广西北部湾经济区的海路交通枢纽,同时也是西南地区进入东盟国家最便捷的出海通道。钦州市作为中国东盟贸易区前沿城市,该市在海上丝绸之路和“一带一路”南向通道中扮演重要角色,人类社会经济活动频繁,普遍存在土地利用/覆被变化^[15]。随着“平陆运河”开工建设,该区域土地利用空间格局变化尤为显著。

1.2 数据来源

本文使用的卫星遥感数据来源于GEE平台提供的Landsat地表反射率SR(surface reflectance)数据集。其中,2012年的影像来自Landsat 7增强型专题绘图仪ETM+(enhanced thematic mapper plus),2017和2022年的影像来自Landsat 8陆地成像仪OLI(operational land imager)。此外,本文使用的30 m分辨率DEM数据来自GEE平台中的USGS/SRTMGL1_003合集,NPP数据来源于MOD17A3 HGF v061数据集;FVC数据基于GEE平台计算获取;社会经济统计数据来源于《广西统计年鉴》《广西建设年鉴》《中国城市统计年鉴》及各地区统计公报;GDP数据和夜间灯光数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(www.resdc.cn),年均温度和年均降水量数据来自国家气象数据中心(<http://data.cma.cn>),并统一处理为 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 的栅格数据。

2 研究方法

2.1 研究路线

针对滨海区域地貌破碎特征,为提高覆被信息提取效率和分类精度,经多重精度检核,制作LUCC数据集,开展时空格局演变分析及驱动机制探讨。具体研究路线包括:①遥感影像获取及预处理。利用GEE平台JavaScript API接口,调用ee.imageCollection函数获取Landsat遥感数据,调用filterData,filterBound函数对遥感数据进行时间过滤、空间过滤;利用ee.Filter.lt完成影像云量小于3%的自定义筛选,依靠“QA_PIXEL”波段对已筛选影像完成去云处理,调用ee.reducer.median函数计算各

个像素位置反射率中值,实现影像中值合成。②遥感信息提取及精度评价。以Google Earth pro提供的高分辨率遥感影像为底图,以“离散且均匀”为原则,每期平均采集各地类样本共计836个。经优化处理,将样本导入GEE进行随机划分,其中70%作为训练数据,30%作为验证数据。针对耕地、林地、水域、建设用地、裸地的地物识别需求,本文添加“EVI, NDVI, NDBI, NDWI, LSWI, BSI”等遥感特征指数用以辅助分类^[16]。利用ee.Image函数及.clip命令获取研究区DEM,借助ee.Algorithms.Terrain函数计算高程(elevation)、坡度(slope)、坡向(aspect)、山体阴影(hillshade)等地形特征数据并加入分类过程。为验证土地覆被信息提取精度和可靠性,本文利用总体精度、kappa系数、生产精度(PA)、用户精度(UA)进行解译精度评价。随机选取若干 $4\text{ km}\times 4\text{ km}$ 网格大小的解译图斑与Google Earth同期同位高分辨率影像进行地物核查(准确性评价),进一步检验分类结果与实际覆被的一致性。③土地时空格局演变及驱动机制研究。基于已完成覆被信息提取的3期土地利用数据,制作3阶段土地利用转移矩阵。结合各期转移矩阵、植被覆盖度和土地利用动态度,分析土地利用格局演变特征,引入最优参数地理探测器完成单因子探测和交互探测,实现土地利用变化驱动机制探讨。

2.2 构建多维分类特征集

为优化分类模型,本研究借助JavaScript API构建4种分类特征变量(表1)并添加至随机森林分类器。

2.3 随机森林算法

随机森林(random forest, RF)是由Breiman^[17]于2001年提出的一个基于决策树的有效分类方法,运用集成学习的思想将多个决策树整合到一个整体中,实质上是一种基于机器学习的集成学习算法,其计算表达式为:

$$H(x) = C_j \arg \max \sum_{i=1}^T h_i(x) \quad (1)$$

式中: $H(x)$ 表示随机森林组合模型; T 表示基于决策树的数目; h_i 表示第 i 个决策树; C_j 表示类别 j 标记。本文在随机森林模型中添加光谱特征、纹理特征、指数特征和地形特征,实现土地覆被信息提取。

2.4 土地利用动态度

土地利用动态度可直观地体现出不同地类的变化速度与幅度,区域差异、选取时间的跨度都影响其值的变化^[18]。因此,本文借助土地利用动态度来分析钦州市在不同阶段的地类变化差异。单一土地利用动态度可反映该地类在限定时间内的变化速度,

计算公式为:

$$K = \frac{s_{t_2} - s_{t_1}}{s_{t_1}} \times \frac{1}{t_2 - t_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中: K 表示 t_1-t_2 时段内某地类动态度; S_{t_1}, S_{t_2} 分别为该时段内某地类面积。

表 1 特征变量合集

Table 1 set of characteristic variables

特征类型	特征变量	注释
光谱特征	Blue, Green, Red, NIR, SWIR1, SWIR2, QA_PIXEL, BRIGHTNESS	在 GEE 中依托 image.select() 函数基于 Landsat 数据提取、添加
纹理特征	角二矩阵(ASM)、对比度(Contrast)、熵(Entropy)、反差分矩阵(IDM)、相关性(Correlation)、方差(Variance)、差异性(Dissimilarity)	在 GEE 中通过 image.glmTexture() 函数提取及添加
指数特征	归一化植被指数(NDVI)	$\frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}$
	增强植被指数(EVI)	$2.5 \times \frac{(NIR - Red)}{(NIR + 6 \times Red - 7.5 \times Blue + 1)}$
	归一化建筑指数(NDBI)	$\frac{(SWIR - NIR)}{(SWIR + NIR)}$
	归一化水体指数(NDWI)	$\frac{(Green - NIR)}{(Green + NIR)}$
	土壤水分指数(LSWI)	$\frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)}$
	裸土指数 BSI	$\frac{(SWIR - Green)}{(SWIR + Green)}$
地形特征	高程(elevation)、坡度(slope)、坡向(aspect)、山体阴影(hillshade)	在 GEE 中借助 ee.Algorithms.Terrain() 函数基于 DEM 数据提取

综合土地利用动态度可表示总体土地变化趋势,计算公式为:

$$S = \left[\frac{\sum_{j=1}^n \Delta S_{ij}}{2 \sum_{i=1}^m S_i} \right] \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (3)$$

式中: S 为某时段该研究区的土地利用综合动态度; S_i 为研究初期第 i 类土地面积; ΔS_{ij} 为 i 地类转化为 j 地类的面积; T 为研究时长。

2.5 像元二分模型

利用基于 EVI 的像元二分模型进行研究区植被覆盖度估算,计算公式为:

$$FVC = \frac{EVI - EVI_{soil}}{EVI_{veg} - EVI_{soil}} \quad (4)$$

式中: FVC 代表植被覆盖度; EVI_{veg} 为纯植被像元的增强型植被指数; EVI_{soil} 对应纯裸土像元的增强型植被指数。根据西南地区特点^[19],提取 EVI 的累计频率低于 0.5% 的值被认定为 EVI_{soil} , 高于 99.5% 的值则作为 EVI_{veg} 。借鉴前人^[20]的研究成果,将 FVC 划分为 5 个等级:低覆盖度(0~0.30]、中低覆盖度(0.30~0.45]、中覆盖度(0.45~0.60]、中高覆盖度(0.60~0.75]和高覆盖度(0.75~1.00]。

2.6 地理探测器

地理探测器是由王劲峰等^[21]提出的一种探测地理空间分层异质性及其背后驱动力的统计学方法,模型由因子探测、交互作用探测、风险区探测和生态探测四大模块构成,本文主要应用因子探测、交互作用探测两大板块,用以研究影响钦州市土地利用变化的主要因素,借助 R 语言 GD 包筛选出地理探测最优参数。

(1) 因子探测。用于探测某地理因素 y 的空间分异性和某因子 x 是否形成空间分异解释能力,用 q 值表示,范围属 $[0, 1]$,数值越大,解释力越强,其表达式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (5)$$

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

式中: $h=1, \dots, L$ 为因变量 y 或因因子 x 的分层(类、区); N_h, N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2, σ^2 分别为层 h 和全区的 y 值方差。SSW, SST 分别为层内方差之和、全区总方差。

(2) 交互作用探测。评估因子 x_1 和 x_2 共同作用时对因变量 y 解释力的影响强弱及是否相互独立。

3 结果与分析

3.1 土地覆被信息提取精度分析

3.1.1 精度指标分析 根据自定义筛选的训练样本、人工标注的样本类别属性,基于随机森林模型分类处理后分别制作钦州市2012,2017和2022年土地利用分类数据集,借助混淆矩阵计算总体精度、kappa系数、用户精度及生产精度(图1)。解译得到的3期LUCC成果总体精度分别为0.88,0.90和0.92,均大于0.85,平均值为0.9; kappa系数分别为0.86,0.88和0.90,平均值为0.88,与总体精度相仿,均大于0.85。总体精度、kappa系数均呈现逐期上升趋势。这一方面与Landsat影像质量、样本整体质量的逐期提高有关,另一方面表明随机森林模型的优化效果良好,分类结果在整体上具有较高准确性。具体而言,2012—2022年,耕地信息提取的PA, UA精度分别为0.93,0.91,0.96和0.84,0.87,0.85,均维持在0.90上下浮动,林地PA, UA精度分别为0.82,0.93,0.95和0.95,0.92,0.97,平均值分别为0.9,0.94。与耕地、林地相仿,水域和建设用地的PA, UA精度波动平缓。

其中,水域信息提取精度最高,PA, UA值分别为0.90,0.93,0.94和0.94,0.93,0.96,平均值分别为0.92,0.94,整体保持在0.93左右。建设用地的PA, UA精度分别是0.84,0.81,0.86和0.87,0.83,0.89;在数值层面上,其精度均于2017年出现轻微波动,但依旧保持良好水平,这应与该时期建设用地样本采集质量的波动相关。与前4类用地相比,裸地信息提取精度略低,其PA, UA值分别为0.70,0.82,0.75和0.73,0.71,0.87,平均值分别为0.76,0.77。

借助2012,2017和2022年3期Google Earth高分辨率影像,结合混淆矩阵分析,在城市扩张中普遍存在建设用地“批而未建,建而未全”现象。该部分因人类经济活动形成的裸地在随机森林分类模型中与建设用地判别易发生混淆,但在归一化建筑指数(NDBI)及裸土指数(BSI)的修正下,分类器可有效识别两类地物的光谱特征差异,保证信息提取精度整体可靠,分类结果与实际情况基本一致(图2)。解译结果表明,该数据集精度整体较优,精度指标变化平缓,不同期的覆被类型提取精度存在细分差异。

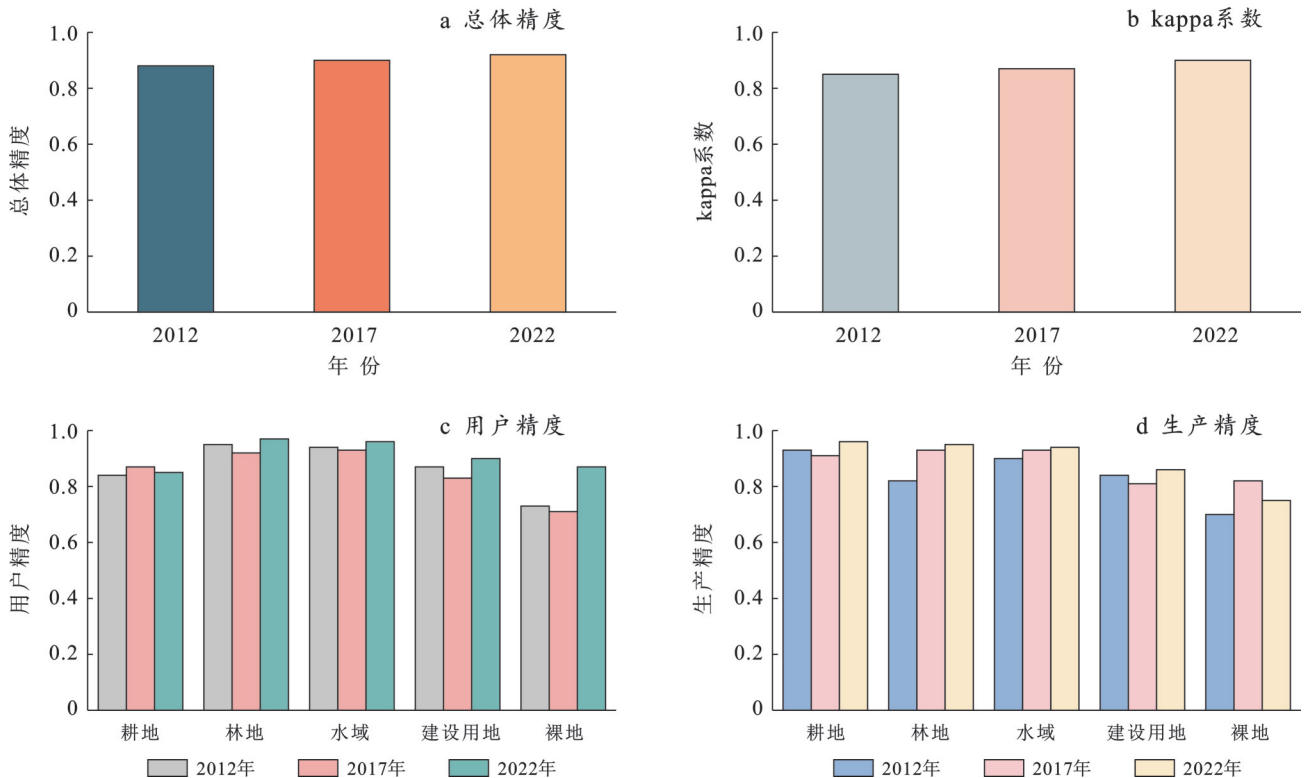


图1 研究区各期OA, kappa, UA, PA提取结果

Fig.1 OA, kappa, UA and PA extraction results of each period

3.1.2 准确性评价 随机抽取若干4 km×4 km网格大小的解译图斑,与Google Earth提供的同期、同方位高分辨率影像进行目视比对(图2)。总体上看,钦

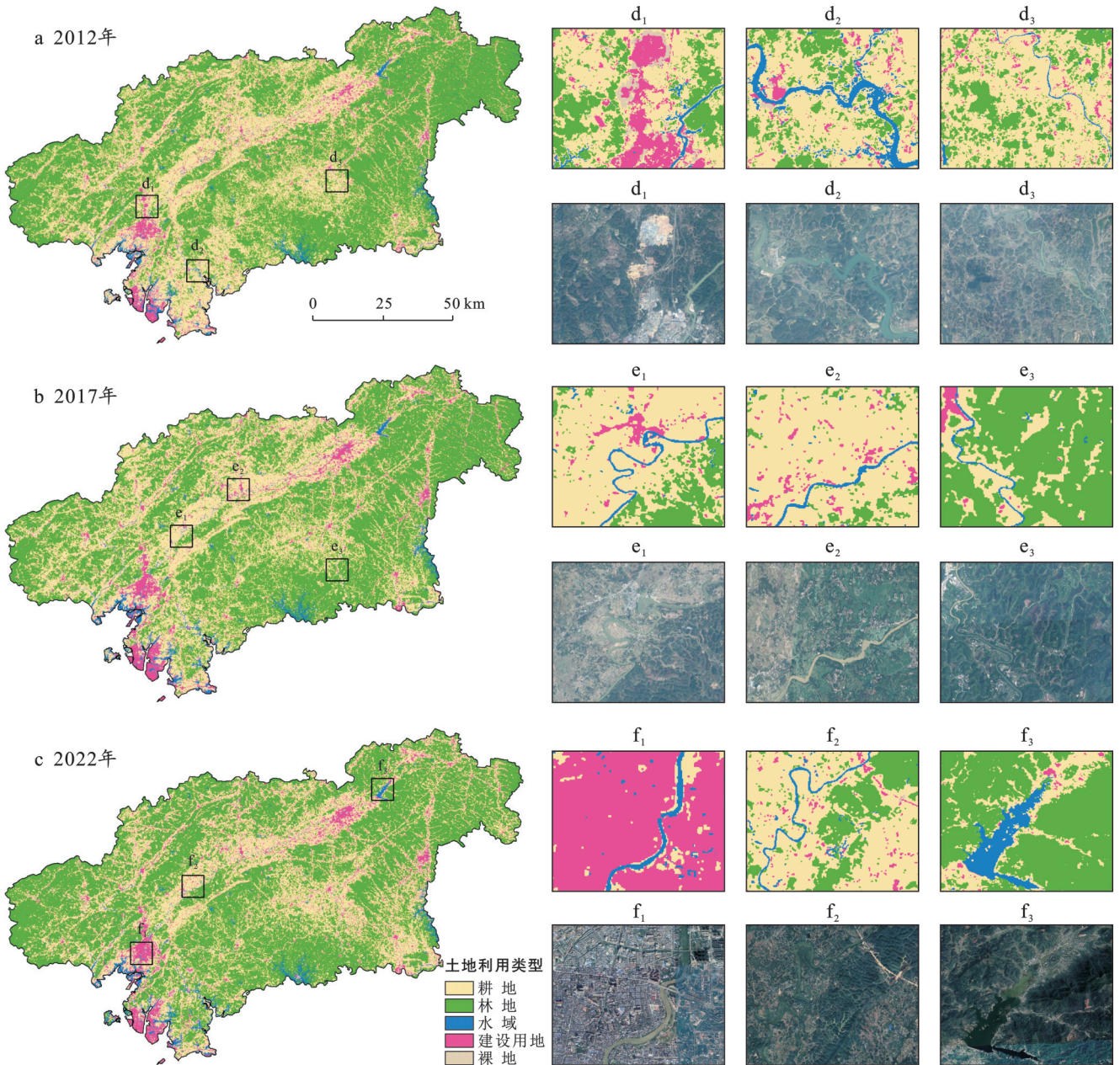
州市水体呈线状规则分布,从光谱数值层面来看,水体光谱特征与其他地类差异显著,加之归一化水体指数(NDWI)、地形指数等对分类模型进一步优化,

故此,河流提取轮廓清晰,与实际位置吻合度较高。

钦州地区素有“依山伴水、依水伴田”的自然特征,耕地、林地交错分布。两类地物于光谱上存在一定“同物异谱”或“异物同谱”现象,若仅使用光谱特征、遥感指数特征很难进行有效区分。本研究通过添加地形特征,使随机森林模型在分类过程中兼顾地势对耕地、林地的分布影响;如耕地通常分布在地势平坦的山间河谷小平原地带,林地大多位于地势稍有起伏的山地丘陵之中。纹理特征可提供有关土

地表面的细节信息,耕地相较于林地通常具备更为规则和重复的纹理,可进一步增强两类地物的可区分性。

如图 2 所示,林地、耕地的解译总体界线分明,与实际“条带状+斑块状”的分布特征相符;建设用地及裸地整体分布吻合度良好。可见,本次试验提取的土地覆被信息与实际地物分布具有较好一致性,所产出的 LUCC 数据集可为后续时空演变及驱动力研究提供准确的数据支撑。



注:样方网格中上排为解译图斑,下排为 Google Earth 同期影像。

图 2 钦州市 2012—2022 年各时期土地利用/覆被空间格局

Fig.2 Spatial pattern of land use and land cover in Qinzhou City during 2012—2022

3.2 土地利用演变分析

3.2.1 土地利用现状分析 2012—2022 年钦州市各

土地利用类型整体布局相对稳定,主要用地类型保持以林地、耕地为主,两者纵横交错(图 2)。

2012年钦州市林地主要分布于西北、东南、东北等山地、丘陵地带,总体分布形态以“条带状、斑块状”并存,林地资源丰富,生态服务价值潜力较高。耕地主要分布于东南部、中部等丘陵、沿河两侧地带,整体以“线状+面状”分布,沿河分布趋势显著。钦州市河流较多,主要平行分布于西部、中部及东部地区,自北向南流注钦州湾。从耕地、林地、水域3类用地角度分析,总体呈现“依山伴水,依水伴田”格局,“以水滋田,以田养水”,使得该地区具备良好的生产功能,成为构建“粮食安全”发展格局的重要组成部分。建设用地主要分布于东部、北部、西南部等地区,整体沿河两岸布局,呈现“大集聚、小分散”特点。直至2022年,钦州市林地总体面积增加91.93 km²,较2012年东北部森林密度略微下降,西部、中部、南部林地面积逐步提升,整体保持“条带状、斑块状”并存状态。耕地面积减少284.73 km²,主要集中于中部、东南部区域,但总体沿河两侧分布的形态保持稳定。水域面积整体平衡,增加63.81 km²,保持线状分布。

建设用地面积增加180.05 km²,整体沿城镇四周扩张,符合城镇发展的客观规律,总体保持“大集聚,小分散”的格局。10 a间,钦州市经济发展及社会活动热度较高,“平陆运河”开工建设、龙门大桥落地、华谊钦州化工新材料一体化基地投产等重大工程建设对土地资源有用地需求,裸地面积减少51.06 km²,与建设用地增长相辅相成。

由图3可知,钦州市的植被覆盖度情况良好,各年份均以“中高级、高级”为主,空间上呈现“四周高,中间低”的分布特征,生态环境较好。其中,“中高级、高级”植被覆盖主要分布于东北、东南部以及西部等山地、丘陵地区。“低级、中低级”植被覆盖主要分布在中部、南部等人类活动的城镇区域,呈现“条带状”形态。

整体来看,钦州市西北、东南部等主要分布林地、耕地,2012—2022年该区域植被覆盖度有所提升,与此处林地面积增加相应。同样,中部地区的植被覆盖度也逐步提高。

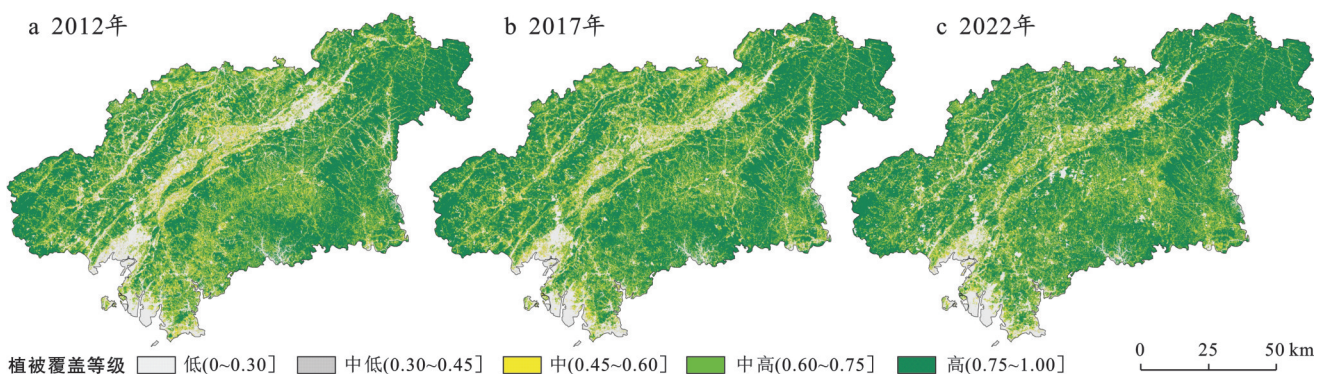


图3 钦州市2012—2022年植被覆盖分布

Fig.3 Distribution of vegetation cover in Qinzhou City during 2012—2022

3.2.2 土地利用变化分析 基于2012—2022年钦州市土地利用数据,绘制LUCC空间转移轨迹(图4),根据公式(2)–(3)计算出钦州市各时期单一地类土地动态度和综合地类土地动态度(图5)。2012—2022年各地类单一土地利用动态度差异显著,除建设用地始终为正值以外,其他4种用地类型因不确定因素干扰而整体呈现不同程度的增减变化。①2012—2017年,钦州市尚处于城市经济发展起步阶段,综合土地利用动态度为0.62%。其中,裸地动态度最大(−3.71%),被陆续开发利用以满足城市扩张的资源需求。建设用地增长(动态度为2.21%)与裸地减少以及耕地的被侵占相辅相成,符合城市扩张发展规律。在自然资源部着力推行“城乡建设用地增减挂钩”的政策背景下,钦州市城市扩张所带来的强烈用地需求,林地、裸地向耕地发生转换,林地动态度为

负值(−0.78%),其余耕地(0.92%)、水域(0.66%)动态度均为正值,5类用地互竞形成“三增两减”的时空演变特征。②2017—2022年,世纪工程“平陆运河”落地广西、着力打造西南陆海新通道、推动广西经济向海图强,钦州市崛起迅猛,土地综合动态度达到0.71%,同比增长了15%。结合Google Earth高分辨率影像分析,该时期钦州市积极响应政策号召,社会经济活动频繁度较高,基建工程项目积极推进,建设用地增速较快,同时出现较多“批而未建,建而未全”的露天施工用地。例如,因“平陆运河”建设需求,马道、企石、青年枢纽一期工程于2022年累计土石方开挖约 $1.78 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。该时期裸露地表增多,裸地动态度由上期的−3.71%转为1.24%,建设用地动态度由前期的2.21%上升至3.29%。在经济推动城市扩张、“退耕还林”政策驱动地区生态建设的双重影

响下,耕地主要向建设用地和林地转换,面积逐减,动态度为-2.18%,林地面积渐长,动态度为1.82%。

与2012—2017年相仿,5类用地互竞形成“三增两减”的时空演变特征。

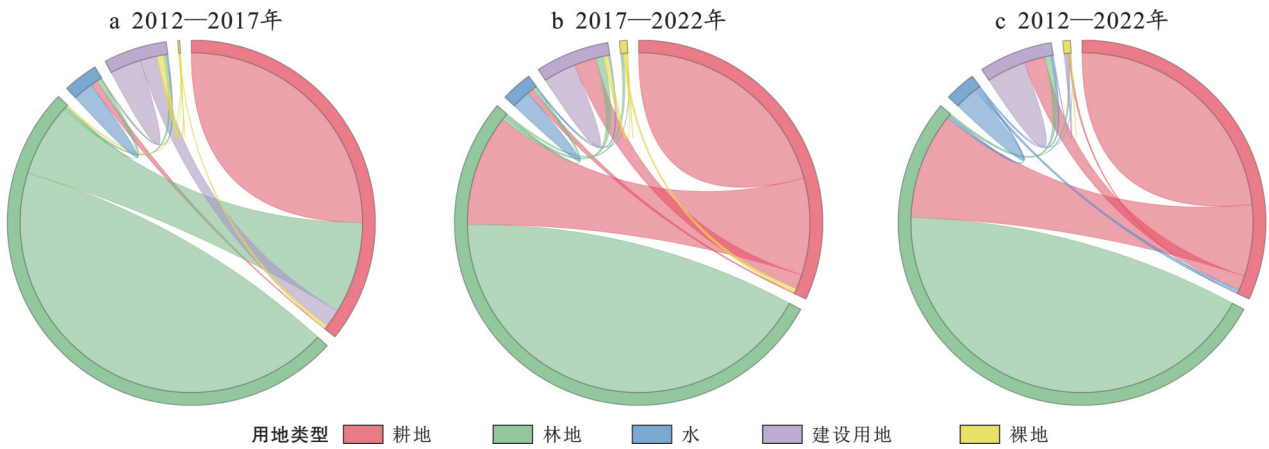


图4 钦州市各时期用地类型空间转移轨迹

Fig.4 Spatial transfer trajectory of land use types during each period in Qinzhou City

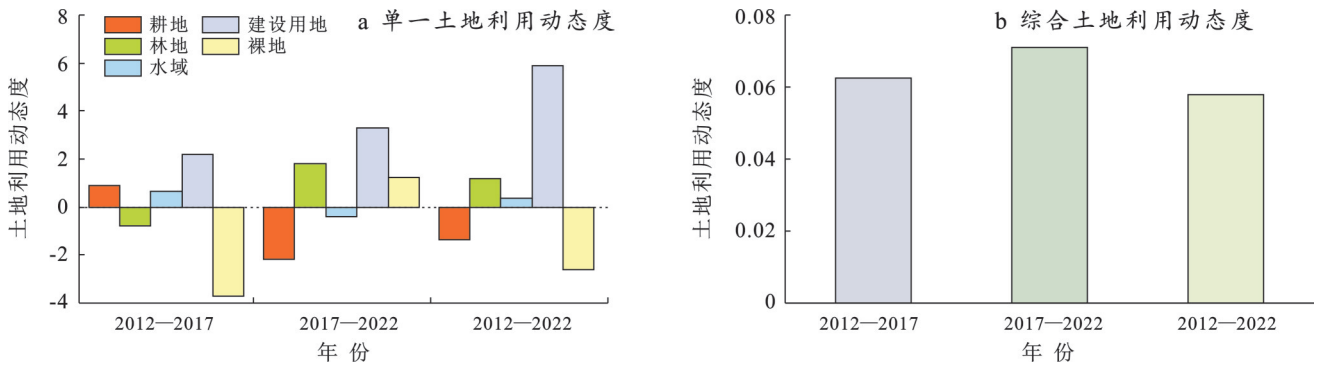


图5 钦州市各时期土地利用动态度

Fig.5 Land-use dynamics of each period in Qinzhou City

从《广西统计年鉴》《中国城市统计年鉴》及各地区统计公报等数据分析可知,钦州市10 a间常住人口由313.33万人增长至331.81万人,人口增长给社会带来充足劳动力,地区就业规模扩大,企业单位个数也由原先251个提高至436个,地区生产总值从691.32亿元上升至1 917.00亿元。社会经济高速运转,综合土地动态度达0.58%。10 a间,城市化步伐加快使钦州市经济发展的用地需求持续提升,耕地、裸地主要向建设用地及林地转换,总面积呈减少趋势,单一动态度为负值,林地、建设用地和水域面积呈上升趋势,动态度为正值,整体互竞保持“三增两减”的时空演变特征。

3.3 驱动机制分析

3.3.1 影响机制指标体系构建 土地利用时空格局演变是自然地理区位条件与社会经济政策双重作用的结果。钦州市是北部湾地区核心出海通道,是广西地区发展沿海经济的重要海滨城市,借鉴现有研究^[22-26],综合考虑滨海地带这一特殊区位条件所带来的地理因素、社会经济要素、人文元素等地域分异特

征,从自然承载、经济动力和社会发展等3个维度构建滨海地区土地利用时空演变的影响因素指标体系(表2)。

3.3.2 单因子探测 9个驱动因子都通过了多重共线性检验,采用最优参数地理探测器实现因子探测。结合图6,从时间维度而言,2012—2017年GDP对土地利用变化的驱动解释力最为显著,达到0.70,表明经济活动是这一时期土地利用变化的核心驱动因素。

高程(0.65)和坡度(0.63)的较高解释力体现出地形特征在土地利用演变中的重要作用。与此同时,夜间灯光(0.53)作为经济活动的间接指标,也体现出较强驱动能力。降水(0.48)和NPP(0.34)等自然因素对土地利用存在一定影响,人口密度(0.32)和路网密度(0.32)的解释力相对较低,表明社会发展水平和基础设施建设在这一阶段对土地利用变化的影响相对较小。2017—2022年,GDP(0.68)、高程(0.64)和坡度(0.58)继续主导土地利用演变,经济活动和地形条件的影响力持续发挥作用。夜间灯光(0.51)和降

水(0.44)的解释力略微下降,路网密度(0.44)和NPP(0.41)的驱动作用有所增强。表明随着基础设施的逐步完善,交通网络建设和自然生产力对土地利用变化的影响逐渐显现。长期数据(2012—2022年)显示,GDP(0.65)、高程(0.67)和坡度(0.63)保持主导驱动地位,突显了经济发展和地形条件对钦州市土

地利用变化的持久影响。夜间灯光(0.59)和路网密度(0.46)的解释力有所提高,表明随着时间推移,经济活动和基础设施建设的重要性日益增加。NPP(0.42)和降水(0.46)的解释力保持平稳,反映自然环境因素对地区土地利用变化的长期、持续影响不可忽视。

表2 滨海地区土地利用时空演变影响因素的指标体系

Table 2 Indicator system for influencing factors of spatio-temporal evolution of land use in coastal areas

维度	指标	注释
经济动力	X_1 国内生产总值/(万元·km ⁻²)	GDP表征地区生产活动的最终成果
	X_2 夜间灯光/Lx	记录城市或地区夜间灯光数量、亮度及分布
社会发展	X_3 路网密度/(km·km ⁻²)	某一范围内的道路总长度与单位面积之比
	X_4 人口密度/(万人·km ⁻²)	某一地区范围内的人口疏密程度,即人口数量/区域面积
自然承载	X_5 植被净初级生产力/(g·m ⁻² ·a ⁻¹)	NPP衡量特定地区碳源、碳汇的重要指标
	X_6 降水/mm	衡量滨海地区气候特征
	X_7 温度/°C	衡量滨海地区气温特性
	X_8 高程/m	评价滨海地区地形特征
	X_9 坡度/(°)	评价滨海地区地形起伏程度

从自然环境影响机制角度考虑,高程和坡度在各个时段的解释力均较高,反映出地形对土地利用的适宜性和限制性具有关键影响,降水和温度等气候因素虽然在单个时段内的解释力相对较弱,但存在长期影响力。钦州市的降水和温度变化影响到植

被生长和农业生产,从而间接影响土地利用模式。NPP作为衡量植被生产力的重要指标,其解释力在0.34~0.42;这些自然环境因素的变动与土地利用之间的相互作用强调了钦州市在制定土地管理政策时需要综合考虑环境保护和气候适应性。

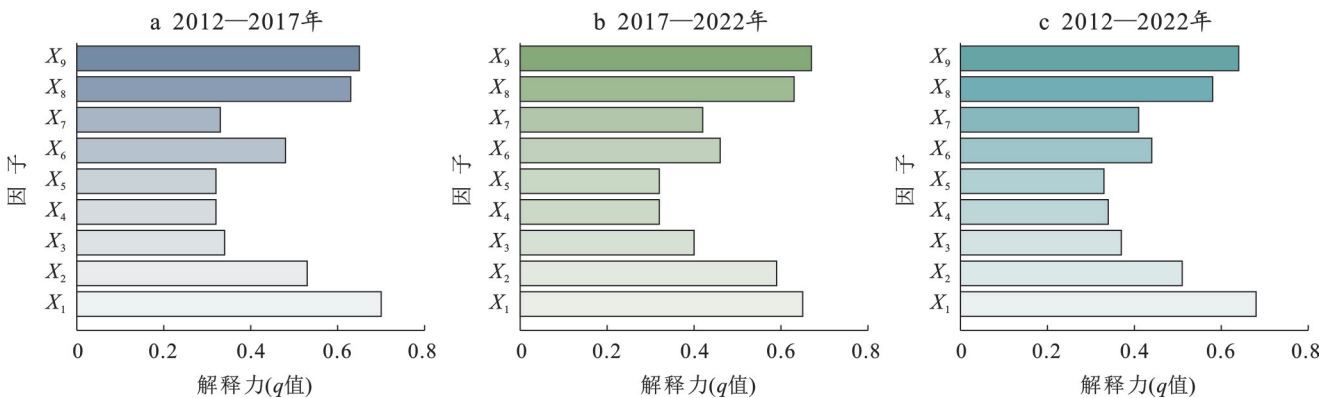


图6 土地利用变化单因子探测结果

Fig.6 Results of single-factor detection of land-use change

3.3.3 交互探测 通过评估GDP、夜间灯光、路网密度、人口密度、NPP、降水、温度、高程、坡度9个指标交互作用,探究其对土地利用演变的驱动效应(图7)。①从经济动力角度考虑,在所有时段中GDP(X_1)和夜间灯光(X_2)都表现出显著的解释力和交互作用。从全时段(2012—2022年)而言, X_1 和 X_2 的交互解释力为0.84,大于其单因子探测强度,表明该指标组合对土地利用演变具有双因子增强作用,由此反映经济增长与城市化进程紧密联系。②从地形及

自然条件考虑,高程(X_8)和坡度(X_9)的交互作用在各个时段均表现出较高的解释力。2012—2017年,2017—2022年和2012—2022年 X_8 和 X_9 的交互解释力分别为0.75,0.71和0.74,地形条件在土地利用变化中发挥着双因子增强作用。钦州市地处亚热带季风气候区,地形多样,山地、丘陵广布,陡峭的坡度限制了农业和建筑活动,而平坦的地形则更适宜开展城市建设和工业园区建设等经济活动。③从气候及生态条件角度分析,NPP(X_5)与其他因素如GDP

(X_1)、降水(X_6)的交互作用在不同时间段具有不同程度的双因子增强效应。2012—2017年,2017—2022年和2012—2022年NPP与GDP的交互解释力分别为0.77,0.73和0.71,与降水的交互解释力分别是0.56,0.56和0.50,体现生态建设与经济发展存在相互影响。农业生产、生态服务的实现离不开土地的支撑,

并影响土地利用模式。④从基础设施建设角度研究,2012—2022年,路网密度(X_3)在后期时段的解释力有所增强,其3个研究时段与GDP的交互解释力分别为0.74,0.75和0.77,均呈现双因子增强作用。随着经济发展,基础设施建设在促进土地利用集约化和效率化方面具有推动作用。

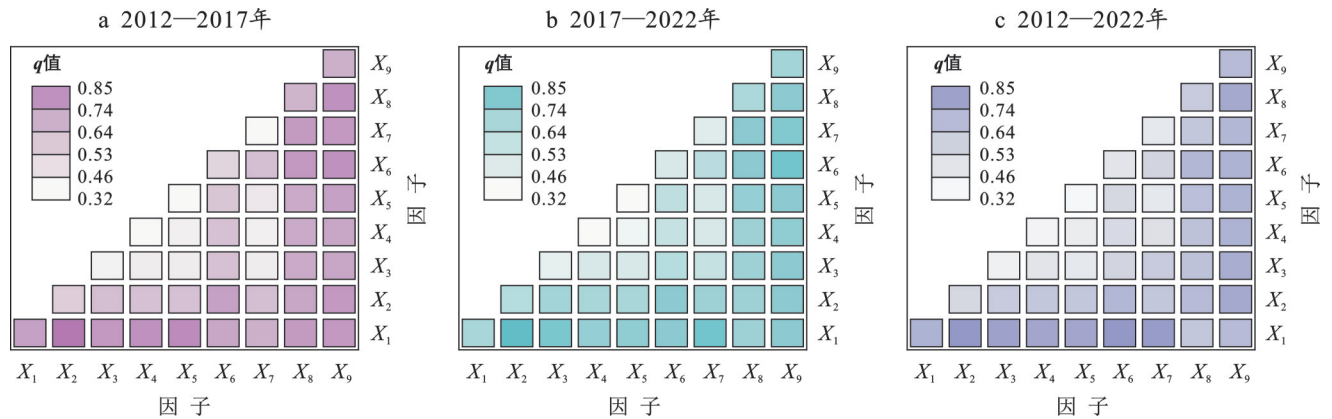


图7 土地利用变化驱动因子交互探测结果

Fig.7 Interaction detection results of land use change driving factors

4 讨论与结论

4.1 讨论

(1) 土地覆被信息提取的高效与局限。GEE平台以“代码+算法”模式为遥感技术赋能,可实现“遥感作业一站式”服务。因此,本研究借助GEE平台,采用融合光谱特征、纹理特征、指数特征和地形特征的随机森林算法进行LUCC产品开发,平均OA精度为0.90,kappa系数为0.88,模型分类性能良好。结合Google Earth提供的同期、同方位高分辨率影像实现整体准确性检核,发现解译结果与地物实际分布呈现较好一致性。另外,中值合成法在提高影像质量的同时,可能会导致少量地物拟合或失真,在此基础上如何进一步提高解译精度是今后的研究内容。

(2) 演变与驱动机制。从试验结果来看,钦州市的耕地主要分布于中部等山间河谷地带,整体呈现“面状+线状”特征。10 a间,在经济发展(GDP)与地形要素(高程和坡度)的叠加影响下,促使耕地主要向建设用地和林地发生转变,面积减少284.73 km²。林地呈现“条带状+斑块状”特征,主要分布于研究区西北、东南、东北部等山地丘陵地区,研究期内林地面积增加91.93 km²,植被覆盖度也随之提高,体现了钦州市在生态环境保护和推动林业发展方面积极作为,与近年来政府大力推行绿化造林、退耕还林等生态修复工程密不可分。与之相仿,建设用地主要集中分布于城镇区域,其面积在研究期内持续增长,

整体以城区为中心向四周扩散,呈现“大集聚、小分散”格局。建设用地的增长与经济发展密不可分,GDP作为经济发展的核心指标,在各个时段的解释力均为最高。10 a以来,钦州市综合土地利用动态度从0.62%提升至0.71%,同比增长约15%,经济快速增长,城市化进程加快,工业和商业用地需求增加,建设用地面积增加也为大势所趋。从遥感影像和解译结果来看,随着“平陆运河”动工、带动沿线经济发展的同时,该地区也产生了一批施工导致的裸露地表,因此,“低级、中低级”植被覆盖在此处零星分布。总体来看,钦州市全域植被覆盖良好,生态美丽,整体呈现“依山伴水,依水伴田”的景观格局,是北部湾滨海地区的一道靓丽风景线。作为平陆运河的主要承建城市,其未来的发展必将与运河建设与运营相互促进、相辅相成,在打造西南陆海新通道的同时推动广西经济向海图强,实现高质量发展。此外,本文在研究驱动机制时受限于数据的可获取性,评价指标不够全面,如何更系统地完善指标体系、深化驱动机制研究是今后的研究内容之一。

(3) 政策建议。①针对钦州市林地面积增长、植被覆盖度良好的现状,建议政府继续保持植树造林和生态修复力度,推动钦州市生态文明建设取得优良成效,特别是在平陆运河沿线区域,通过科学规划,将运河建设与生态绿化相结合,打造绿色生态走廊。同时应加强对现有林地的保护和管理,防止非法占用和破坏,确保林地的生态功能得到充分发

挥。②针对建设用地增加的趋势,建议政府加强土地利用规划和监管,确保建设用地合理布局 and 高效利用。特别是在平陆运河建设过程中,应科学规划利用运河两岸的土地,减少项目施工对耕地或林地的占用,避免无序开发和资源浪费。③鼓励和支持绿色、低碳、循环经济发展,推动产业结构优化升级,提高土地利用的经济效益和社会效益。

4.2 结论

(1) 试验产出的3期两阶段LUCC数字产品总体精度均在0.88~0.92, kappa系数介于0.86~0.90, 各地类生产精度及用户精度于0.87上下浮动。经Google Earth同期同位高分辨率影像目视比对检核,证明模型分类结果与实际地物呈现较好一致性。

(2) 2012—2022年,钦州市林地面积从6 405.25 km²增加至6 497.18 km²;耕地面积从4 177.01 km²减少至3 892.28 km²;建设用地面积从613.81 km²提升至793.86 km²,其单一土地利用动态逐期为正;水体面积整体变化平稳,增加63.81 km²;裸地面积总体减少51.06 km²。研究期内钦州市综合土地利用动态逐期提升,社会经济活动持续保持热度。

(3) 钦州市土地利用变化主要由经济动力(GDP)和地形特征(高程和坡度)驱动,两者对土地利用变化有双因子增强作用。路网密度、降水、NPP对土地利用的影响逐渐增强;NPP、降水与GDP的交互效应在不同阶段呈现不同程度的双因子增强作用。

参考文献(References)

- [1] 后立胜,蔡运龙.土地利用/覆被变化研究的实质分析与进展评述[J].地理科学进展,2004,23(6):96-104.
Hou Lisheng, Cai Yunlong. An essential analysis and review on land use/cover change research [J]. Progress in Geography, 2004, 23(6): 96-104.
- [2] 李清泉,卢艺,胡水波,等.海岸带地理环境遥感监测综述[J].遥感学报,2016,20(5):1216-1229.
Li Qingquan, Lu Yi, Hu Shuibao, et al. Review of remotely sensed geo-environmental monitoring of coastal zones [J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(5): 1216-1229.
- [3] 崔宾阁,吴景,李心慧,等.结合深度学习和植被指数的滨海湿地高分二号遥感影像信息提取[J].遥感学报,2023,27(6):1376-1386.
Cui Bingge, Wu Jing, Li Xinhui, et al. Combination of deep learning and vegetation index for coastal wetland mapping using GF-2 remote sensing images [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2023, 27(6): 1376-1386.
- [4] 张悦琦,任鸿瑞.融合特征优选与随机森林算法的GF-6影像东北一季稻遥感提取[J].遥感学报,2023,27(9):2153-2164.
Zhang Yueqi, Ren Hongrui. Remote sensing extraction of paddy rice in NorthEast China from GF-6 images by combining feature optimization and random forest [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2023, 27(9): 2153-2164.
- [5] 王李娟,孔钰如,杨小冬,等.基于特征优选随机森林算法的农耕地土地利用分类[J].农业工程学报,2020,36(4):244-250.
Wang Lijuan, Kong Yuru, Yang Xiaodong, et al. Classification of land use in farming areas based on feature optimization random forest algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(4): 244-250.
- [6] 王小娜,田金炎,李小娟,等.Google Earth Engine云平台对遥感发展的改变[J].遥感学报,2022,26(2):299-309.
Wang Xiaona, Tian Jinyan, Li Xiaojuan, et al. Benefits of Google Earth Engine in remote sensing [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, 26(2): 299-309.
- [7] 闵钰魁,柯樱海,韩月,等.融合Sentinel-2和GF-1时序影像的入侵植物互花米草清除动态监测[J].遥感学报,2023,27(6):1467-1479.
Min Yukui, Ke Yinghai, Han Yue, et al. Dynamic monitoring of invasive *Spartina alterniflora* clearance via fusion of Sentinel-2 and GF-1 time series images [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2023, 27(6): 1467-1479.
- [8] 程丽娜,钟才荣,李晓燕,等.Sentinel-2密集时间序列数据和Google Earth Engine的潮间带湿地快速自动分类[J].遥感学报,2022,26(2):348-357.
Cheng Lina, Zhong Cairong, Li Xiaoyan, et al. Rapid and automatic classification of intertidal wetlands based on intensive time series Sentinel-2 images and Google Earth Engine [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, 26(2): 348-357.
- [9] 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.
- [10] Zhang Xiao, Zhao Tingting, Xu Hong, et al. GLC_FCS 30D: The first global 30 m land-cover dynamics monitoring product with a fine classification system for the period from 1985 to 2022 generated using dense-time-series landsat imagery and the continuous change-detection method [J]. Earth System Science Data, 2024, 16(3): 1353-1381.
- [11] 郑慧玲,郑辉峰.基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测[J].环境科学,2024,45(4):2321-2331.
Zheng Huiling, Zheng Huifeng. Assessment and prediction of carbon storage based on land use/land cover dynamics in the Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area [J]. Environmental Science, 2024, 45(4):

- 2321-2331.
- [12] 刘小燕,崔耀平,史志方,等. GEE平台下多源遥感影像对洪灾的监测[J]. 遥感学报, 2023, 27(9): 2179-2190.
Liu Xiaoyan, Cui Yaoping, Shi Zhifang, et al. Monitoring of floods using multi-source remote sensing images on the GEE platform [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2023, 27(9): 2179-2190.
- [13] 段文胜,陈元鹏,王力,等. 广西壮族自治区短轮伐期人工林时空分布信息提取[J]. 遥感学报, 2023, 27(11): 2617-2627.
Duan Wensheng, Chen Yuanpeng, Wang Li, et al. Information extraction of temporal and spatial distribution of short-rotation plantations in Guangxi Zhuang Autonomous Region [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2023, 27(11): 2617-2627.
- [14] 梁锦涛,陈超,孙伟伟,等. 长时序 Landsat 和 GEE 云平台的杭州湾土地利用/覆被变化时空格局演变[J]. 遥感学报, 2023, 27(6): 1480-1495.
Liang Jintao, Chen Chao, Sun Weiwei, et al. Spatio-temporal land use/cover change dynamics in Hangzhou Bay, China, using long-term Landsat time series and GEE platform [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2023, 27(6): 1480-1495.
- [15] 秦贤宏,陈雯,段学军,等. 复杂地貌区域生态敏感区综合评价与保护对策: 以广西钦州市为例[J]. 自然资源学报, 2013, 28(4): 608-617.
Qin Xianhong, Chen Wen, Duan Xuejun, et al. Ecosystem sensitivity assessing and protecting policy in the complex geomorphic region: A case study of Qinzhou City in Guangxi [J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(4): 608-617.
- [16] 廖超明,云子恒,罗恒,等. 基于特征优选的喀斯特地区覆被信息提取及精度分析[J]. 测绘通报, 2024(2): 45-50.
Liao Chaoming, Yun Ziheng, Luo Heng, et al. Cover information extraction and precision analysis in karst area based on feature optimization [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2024(2): 45-50.
- [17] 冯文卿,睦海刚,涂继辉,等. 高分辨率遥感影像的随机森林变化检测方法[J]. 测绘学报, 2017, 46(11): 1880-1890.
Feng Wenqing, Sui Haigang, Tu Jihui, et al. Change detection method for high resolution remote sensing images using random forest [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(11): 1880-1890.
- [18] Qiu Haihong, Hu Baoqing, Zhang Ze. Impacts of land use change on ecosystem service value based on SDGs report: Taking Guangxi as an example [J]. Ecological Indicators, 2021, 133: 108366.
- [19] 李美丽,尹礼昌,张园,等. 基于 MODIS-EVI 的西南地区植被覆盖时空变化及驱动因素研究[J]. 生态学报, 2021, 41(3): 1138-1147.
Li Meili, Yin Lichang, Zhang Yuan, et al. Spatio-temporal dynamics of fractional vegetation coverage based on MODIS-EVI and its driving factors in southwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(3): 1138-1147.
- [20] Liu Yu, Huang Tingting, Qiu Zhiyuan, et al. Effects of precipitation changes on fractional vegetation cover in the Jinghe River basin from 1998 to 2019 [J]. Ecological Informatics, 2024, 80: 102505.
- [21] 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 Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.
- [22] 李文秀,燕振刚. 基于地理探测器的甘肃农牧交错带土地利用时空演化及其驱动机制[J]. 干旱区研究, 2024, 41(4): 590-602.
Li Wenxiu, Yan Zhengang. Analysis of spatiotemporal evolution of land use and its driving mechanism in the agro-pastoral ecotone of Gansu Province using Geodetector [J]. Arid Zone Research, 2024, 41(4): 590-602.
- [23] 陈雪玲,孙梅玲,吕一河,等. 青藏东缘若尔盖高原土地利用时空变化特征及其驱动因素分析[J]. 生态与环境学报, 2023, 39(3): 306-315.
Chen Xueling, Sun Meiling, Lü Yihe, et al. Spatial-temporal variability characteristics and its driving factors of land use in zoige plateau on the eastern edge of Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2023, 39(3): 306-315.
- [24] 徐国良,卢凌莹,杨璨,等. 基于多时相 Sentinel-1A 的丘陵山区耕地非粮化特征识别及驱动机制[J]. 农业工程学报, 2023, 39(22): 236-245.
Xu Guoliang, Lu Lingying, Yang Can, et al. Identification and driving mechanisms of non-grain cultivated land in hilly and mountainous areas based on multi-temporal Sentinel-1A images [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(22): 236-245.
- [25] 岳胜如,王伦澈,曹茜,等. 塔里木河流域植被动态及潜在因素驱动机制[J]. 地球科学, 2024, 49(9): 3399-3410.
Yue Shengru, Wang Lunche, Cao Qian, et al. Vegetation dynamics and potential factors driving mechanisms in the Tarim River Basin [J]. Earth Science, 2024, 49(9): 3399-3410.
- [26] 梁鑫源,李阳兵. 三峡库区规模农地时空变化特征及其驱动机制[J]. 地理学报, 2018, 73(9): 1630-1646.
Liang Xinyuan, Li Yangbing. Spatio-temporal features of scaling farmland and its corresponding driving mechanism in Three Gorges reservoir area [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(9): 1630-1646.