

DOI: 10.20103/j.stxb.202207061924

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.

Tian Y D, Zhao X C. Simulation of construction land expansion and carbon emission response analysis of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration based on Markov-PLUS model. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(1): 129-142.

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

田一豆, 赵先超*

湖南工业大学城市与环境学院, 株洲 412007

摘要:在双碳目标和新型城镇化背景下, 保证经济平稳增长的同时减少碳排放是实现城市高质量发展的重要任务之一, 更是长沙、株洲、湘潭等国家低碳试点城市重点建设目标之一。因此以长株潭城市群中用地变化和碳排放最为剧烈的中心城区作为研究区域, 在现状分析的基础上运用 Markov-PLUS 耦合模型和碳排放响应模型, 模拟了自然状态发展情景、耕地保护发展情景、生态保护发展情景和绿色低碳发展情景下建设用地扩张及碳排放响应情况。结果表明: ①2000—2020 长株潭城市群建设用地面积呈现阶段性的波动增长趋势, 耕地和林地是其主要来源, 扩张强度在 2010—2015 年最大, 主要集中在城市群中心区域; 碳排放量呈现倒“V”型曲线, 可以划分为碳排放量快速上升阶段(2000—2005 年)和碳排放量下降阶段(2005—2020 年), 以 2010 年为节点, 下降幅度先增加后减缓; 二者之间存在较为密切的正相关关系, 整体表现为建设用地面积增加(减少)碳排放随之增加(减少)的较强扩张与较高排放模式。②Markov-PLUS 模拟结果显示, 长株潭城市群建设用地在自然状态发展情景下扩张面积最大(235.9503km²), 在生态保护发展情景下扩张面积最小(200.6354km²); 绿色低碳发展情景下建设用地扩张所占用的生态碳汇面积相对较少(169.78km²), 占未利用地相比其他情景较多(1.20km²), 扩张分布较为合理, 带来的生态环境压力和碳排放压力较小, 既有利于生态环境保护也有利于社会经济发展。③碳排放响应结果显示, 在不同情景下长株潭城市群各区县的碳排放对建设用地扩张均表现出一定的敏感性, 综合建设用地扩张与碳排放响应结果, 绿色低碳发展情景是长株潭城市群未来的较优发展模式。

关键词: Markov-PLUS 模型; 多情景模拟; 建设用地扩张; 碳排放响应; 长株潭城市群

Simulation of construction land expansion and carbon emission response analysis of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration based on Markov-PLUS model

TIAN Yidou, ZHAO Xianchao*

School of Urban and Environment, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China

Abstract: In the context of dual carbon goals and new urbanization, ensuring stable economic growth while reducing carbon emissions is one of the important tasks to achieve high-quality urban development, and it is also one of the key construction goals of national low-carbon pilot cities such as Changsha, Zhuzhou and Xiangtan. Therefore, taking the central urban area with the most drastic land use changes and carbon emissions in the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration as the research area, on the basis of the current situation analysis, the Markov-PLUS coupling model and carbon emission response model are used to simulate the expansion of construction land and carbon emission response under the existing trend

基金项目: 湖南省社科评审委重大项目(XSP22ZDA008); 湖南省自然科学基金(2021JJ50057); 湖南省教育厅重点项目(22A0419); 湖南省自然资源科技计划项目(2023-08)

收稿日期: 2022-07-06; **网络出版日期:** 2023-09-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaoxianchao@hut.edu.cn

development scenario, the development scenario of arable land protection, the green and low-carbon development scenario, and the rational development and construction scenario. The results show that: ① From 2000 to 2020, the construction land area of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration showed a trend of periodical fluctuation growth. Cultivated land and forest land were the main sources, and the expansion intensity was the largest from 2010 to 2015, mainly concentrated in the central area of the urban agglomeration. The carbon emissions showed an inverted "V" shaped curve, which could be divided into two stages: rapid rise of carbon emissions (2000—2005) and decline of carbon emissions (2005—2020). With 2010 as the node, the decline rate first increased and then slowed down. There is a relatively close positive correlation between construction land area expansion and carbon emission, the overall performance is a strong expansion of construction land area increase (decrease) carbon emissions increase (decrease) and higher emission mode. ② The results of Markov-PLUS simulation show that the expansion area of construction land is the largest (235.9503km^2) under the natural development scenario, and the smallest (200.6354km^2) under the ecological protection development scenario. Under the scenario of green and low-carbon development, the ecological carbon sink area occupied by construction land expansion is less than the other scenarios (169.78km^2), accounting for more unused land (1.20km^2) than other scenarios. The distribution of expansion is more reasonable, and the pressure of ecological environment and carbon emission is less, which is conducive to ecological environmental protection and social and economic development. ③ Carbon emission response results displaced that under different scenarios, the carbon emissions of each district and county present certain sensitivity to the expansion of construction land. Integrating construction land expansion and carbon emission response results, the green and low-carbon development scenario is the better development model of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration in the future.

Key Words: Markov-PLUS; multi scenario simulation; expansion of construction land; carbon emission response; Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration

改革开放以来,中国城镇化进程不断推进,但城市扩张所诱发的生态环境问题也引起了社会各界的广泛关注,成为近年来国内外学者研究的热点问题^[1-3]。以经济增长和土地非农化为重要特征的传统城市扩张促使碳排放不断增加^[4],根据 IPCC 研究结果发现,建设用地产生的碳排放量占有土地利用类型产生的碳排放量的 90% 以上。城市群建设用地占比较大,在快速城镇化背景下“摊大饼”和无序蔓延等现象更为显著,更加凸显了区域发展与生态环境保护之间的矛盾^[5]。因此,研究城市群建设用地扩张与碳排放响应关系,最大限度地降低城市群发展过程中对碳循环系统的影响具有重要意义。

国内外学者对建设用地扩张与碳排放问题开展了大量研究。在建设用地扩张模拟方面,采用较多的方法主要有马尔科夫链 (Markov)^[6]、系统动力学 (System dynamics, SD)^[7]、元胞自动机 (CA)^[8-10] (包括 CLUE、SLEUTH、FLUS) 和多智能体模型 (ABM)^[11] 等。研究显示,相比传统的 CA 模型,梁迅等提出的 PLUS 模型可以达到更高的模拟精度和更接近真实景观的格局度量^[12]。PLUS 模型在区域层面的应用较为广泛,如郭蓉等运用 Markov-PLUS 模型对哈长城市群土地利用进行模拟,证明 PLUS 模型可以提高城市群规模下的仿真精度^[13];王佳楠等运用 PLUS 对柴北缘土地利用变化模拟分析,证明 PLUS 比 FLUS 的模拟准确性更高;马瑞等运用 PLUS 模拟干旱区未来土地利用变化^[14]。在土地利用碳排放方面,国外学者的研究角度涵盖微观、中观、宏观多个层面,国内主要集中在微观和中观层面,研究成果主要集中在土地利用碳排放的作用机理^[15-16],碳排放测算^[17-19],碳排放影响因素及效应^[20-23],碳排放时空格局及特征^[24-26] 等方面。在建设用地扩张与碳排放响应关系方面的研究尚不多见,主要研究方向为土地利用变化与碳排放效应,如:吴文佳等运用 ESDA 技术对 2001—2009 年中国土地利用变化的碳排放响应时空格局进行空间自相关分析,在现有、积极、强化积极政策三种情景下预测 2020 年土地利用的碳排放响应^[27];蔡苗苗等利用 VAR 模型和脉冲响应函数分析了上海市建设用地面积与碳排放量之间的动态关系,发现短期碳排放量增加会加速城市建设用地的扩张,长期则会

逐渐制约建设用地扩张^[28];李彦旻等分析了安徽省碳排放时空特点及碳排放效应^[29]。目前学者对城市群尺度建设用地扩张引起的碳排放响应研究较少,在当前碳减排和新型城镇化建设的大背景下,仅探究土地利用变化与碳排放效应不足以作为制定碳减排政策措施的基础。

在快速城镇化过程中,长株潭城市群建设用地规模迅速扩张,碳排放量持续增加,如何准确模拟和识别建设用地扩张及碳排放响应,是区域国土空间高质量发展的关键问题。因此,以长株潭城市群为例,基于 2000—2020 的土地利用数据、能源消耗数据及夜间灯光数据,运用 ArcGIS 统计分析、碳排放系数法、Markov-PLUS 模型等方法,定量分析长株潭城市群 2000—2020 年建设用地扩张及碳排放的时空演变特征,并模拟不同发展情景下 2030 年建设用地扩张情况,探讨不同发展理念下的碳排放响应特征,为长株潭城市群及相关区域制定土地利用规划规划和碳减排政策提供参考,以期促进长株潭城市群区域高质量发展。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

长株潭城市群由长沙、株洲、湘潭三市组成,位于湖南省中东部,长江中游城市群中西部,是长江中游城市群的重要组成部分,是湖南省经济发展的核心增长极。截至 2020 年,建成区面积为 862km²,其中建设用地 781km²,占比达到 90.60%。长株潭城市群主城区是整个城市群中建设用地扩张和碳排放变化最活跃的区域,能够较好地反映土地利用变化对碳排放的影响。因此,本文选取长株潭城市群主城区为研究区,包括长沙、株洲、湘潭三市的市区以及长沙县、浏口区 and 湘潭县,如图 1 所示,研究区行政区划面积为 8629km²,建成区面积为 901.12km²。

1.2 数据来源及处理

研究数据主要包括:(1)土地利用数据,根据 2000—2020 年的 Landsat 遥感影像在 ENVI 软件中解译获得,精度验证达到 93.2%,参照国家土地利用现状分类标准,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。(2)经济发展与能源消耗数

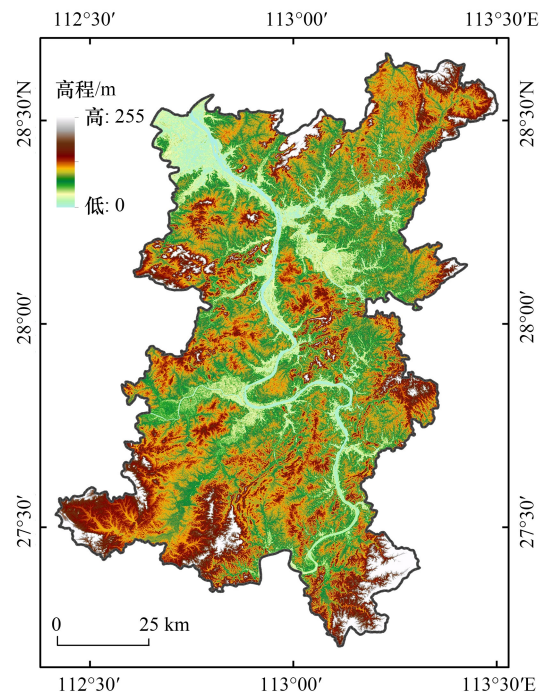


图 1 长株潭城市群区位图

Fig.1 Map of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration

据,包括 2000—2020 年第二、三产业产值和单位 GDP 能耗,数据源自湖南省 2001—2021 年统计年鉴,夜间灯光数据源自中国研究数据服务平台(CNRDS)。(3)土地利用变化驱动因素数据,①自然地理因素数据:高程数据来源于地理空间数据云,坡度数据是利用 ArcGIS 中的坡度模块计算得到,年均降水量和年平均气温来自中国科学院资源环境科学与数据中心,归一化植被指数(NDVI)源自国家科技基础条件平台—国家生态科学数据中心,空间分辨率为 30m;②区位条件因素数据:包括到市区中心距离、到政府机构距离、到各级道路和到河流的距离等,利用 ArcGIS 中的欧式距离模块计算得到;③社会经济因素数据:包括人口密度和 GDP 密度,源自 2001—2021 年长沙、株洲、湘潭 3 市的统计年鉴,综合土地利用数据和夜间灯光数据,转化为空间栅格数据,分辨率为 1km。(4)限制发展区域数据,其中,开放水域空间分布图根据 2000—2020 年土地利用数据和 DEM 数据矢量化得到;农业生产分布图源自湖南省自然资源厅;生态保护分区图源自湖南省生态环境厅;以上数据均转化为属性仅包含 0 和 1 的二值化栅格数据,0 代表限制转化区域,1 代表其他区域;城市发展潜力图是根据百度地图兴趣点分类标准,抓取包括“美食、酒店、购物”等 15 个一级类 POI 数据,运用 ArcGIS 中的核密度分析得到,将其转化为属性包含 0、1、2 栅格图像,0 代表限制开发区,2 代表开发区,1 代表其他区域。

以上土地利用数据、驱动因素数据及限制区域数据均运用 ArcGIS 软件处理成栅格数据,行列数为 3735×5492 ,像元大小为 $30\text{m} \times 30\text{m}$,将使其满足 PLUS 模型的数据格式。

2 研究方法

2.1 土地利用碳排放测算

不同的土地利用类型因其覆被差异表现出不同的碳排放特征,从整体上可以分为直接碳排放和间接碳排放两种。参考相关研究,对耕地、林地、草地、水域和未利用地采用直接碳排放系数法进行测算,建设用地采用间接碳排放系数法。值得注意的是,土地利用碳排放系数可能会随着时间的推移或所承载人类活动的变化而变化,本文主要探讨长株潭城市群建设用地扩张与碳排放的响应程度,碳排放系数的微小变化对研究的影响较小,因此假设碳排放系数在研究年限内保持相对稳定。

(1) 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或碳吸收量的方法,具体参考苏雅丽等研究成果^[30]。结合长株潭城市群实际情况,耕地、林地、草地的碳排放系数参考苏雅丽等研究经验数据,未利用地参考方精云等^[20]的研究,水域参考赖力^[31]的研究。

(2) 间接碳排放系数法

间接碳排放系数法指通过能源消耗数据等其他相关系数间接计算碳排放量的方法。由于长株潭城市群部分区县的能源统计数据存在缺失现象,考虑到城市群的第二产业值和第三产业值主要来自城市群建设用地,单位 GDP 能耗可以较为准确地反映城市群能源利用情况,因此,参考王桂波等(2012)^[32]的研究,利用二、三产业值与单位 GDP 能耗来间接计算长株潭城市群建设用地的碳排放量,计算公式如下:

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

式中, E_b 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。

土地利用净碳排放量计算公式如下:

$$E = E_a + E_b \quad (2)$$

为验证计算所得碳排放数据的准确性,将长株潭城市群各区县的碳排放总量与中国碳核算数据库 (CEAD) 中的县域碳排放数据进行精度验证,县级尺度上得出的均方根误差 RMSE 为 $15.62 \times 10^4 \text{t}$,平均相对误差 MRE 为 6.31%,数据整体的误差在允许范围以内,并且与现有相关研究成果比较结果显示,碳排放总量的变动趋势相同,数据差异较小。总体来看,数据的误差较小,精度可以用于长株潭城市群碳排放情况的分析与模拟预测。

(3) 长株潭城市群 2030 年碳排放预测

2030 年的耕地、林地、草地、水域和未利用地等类型碳排放量主要通过模拟出的未来土地利用类型面积与碳排放系数计算得到,建设用地碳排放计算如下:①运用指数平滑法预测 2030 年各区县二、三产业值;②结合国家层面 2030 年的碳排放强度下降目标以及湖南省对于各地市的碳排放强度下降目标,得到各区县碳排放强度;③二、三产业值和碳排放强度相乘,并结合夜间灯光数据拟合得到长株潭城市群 2030 年建设用地碳排放量(表 1)。

2.2 Markov-PLUS 模型及多情景设定

Markov 模型具有较强的数据预测能力,PLUS 模型是基于土地扩张分析策略 (LEAS) 的规则挖掘框架和多类型随机种子 (CARS) 的 CA 模型,具有空间分布模拟功能,Markov-PLUS 耦合模型兼具数据预测和空间模拟功能,可以获得更高的仿真精度和与现实更相似的景观,对长远期的土地利用变化模拟具有一定的科学性。

2.2.1 驱动因子选取

土地利用变化是多重驱动因子共同作用产生的结果,其中包括自然因素、区位因素、社会经济因素等,因

此从自然、区位和社会三个层面选取了 14 项影响因子,如表 2。自然地理因素对土地利用的方式、强度以及发展方向起着决定性作用,是建设用地扩张的阻力因素,从地形、气候、生态等方面选取高程、坡度、年降水量、年平均气温和归一化植被指数(NDVI)作为表征自然地理因素的驱动因子;区位条件因素对土地利用变化的成本有着重要的影响,是建设用地扩张的引力因素,从各类用地所处区位出发选取到市区中心距离、到政府机构距离、到铁路距离、到高速公路距离、到主干道距离、到普通道路距离(包括一级道路、二级道路、三级道路)和到河流距离作为表征区位条件因素的驱动因子;社会经济因素在很大程度上促进了建设用地的扩张,选取人口密度和 GDP 密度两个城市群社会经济发展水平的主要衡量指标作为表征社会经济因素的驱动因子。

表 1 长株潭城市群 2030 年二三产业值及碳排放预测

Table 1 Secondary and tertiary industry value and carbon emission forecast of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration in 2030

区县 District	第二产业值/($\times 10^9$ 元) Secondary industry value	第三产业值/($\times 10^9$ 元) Tertiary industry value	碳排放强度/($\text{t} \times 10^{-4}$ 元) Carbon intensity	建设用地碳排放/($\times 10^4 \text{t}$) Carbon emissions from construction land
长沙市	芙蓉区	367.53	1693.45	0.33
	开福区	385.12	1063.61	0.32
	天心区	580.12	843.97	0.33
	望城区	858.78	210.10	0.43
	雨花区	1851.04	1094.17	0.28
	岳麓区	1052.07	696.03	0.25
	长沙县	1829.63	505.04	0.34
株洲市	荷塘区	300.59	148.39	0.30
	芦淞区	299.31	357.07	0.30
	渌口区	117.98	65.29	0.30
	石峰区	588.35	91.74	0.30
	天元区	346.86	253.47	0.30
湘潭市	湘潭县	298.27	176.94	0.46
	雨湖区	330.17	433.71	0.46
	岳塘区	778.44	233.29	0.46

表 2 长株潭城市群土地利用变化驱动因子

Table 2 Driving factors of land use change in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration

选取层面 Level	编号 ID	驱动因子 Factors	因子解释 Factor interpretation
自然地理因素 Physical geographical factors	X_1	高程/m	地形高程条件
	X_2	坡度/($^\circ$)	地形坡度条件
	X_3	年均降水量/mm	降水气象条件
	X_4	年平均气温/ $^\circ\text{C}$	气温气候条件
	X_5	归一化植被指数(NDVI)	生态环境条件
区位条件因素 Location condition factors	X_6	到市区中心距离/m	像元几何中心到最近市区中心的欧氏距离
	X_7	到政府机构距离/m	像元几何中心到最近政府机构的欧氏距离
	X_8	到铁路距离/m	像元几何中心到最近铁路的欧氏距离
	X_9	到高速公路距离/m	像元几何中心到最近高速公路的欧氏距离
	X_{10}	到主干道距离/m	像元几何中心到最近主干道的欧氏距离
	X_{11}	到普通道路距离/m	像元几何中心到最近普通道路的欧氏距离
	X_{12}	到河流距离/m	像元几何中心到最近河流的欧氏距离
社会经济因素 Socio-economic factors	X_{13}	人口密度/(人/ km^2)	各像元的常住人口数量
	X_{14}	GDP 密度/(万元/ km^2)	各像元的国内生产总值

2.2.2 限制性区域及不同情景设置

根据不同发展情景的需要,设置开放水域、农业生产分布、生态保护区以及城市发展潜力四个限制性发展区域(图 2)。

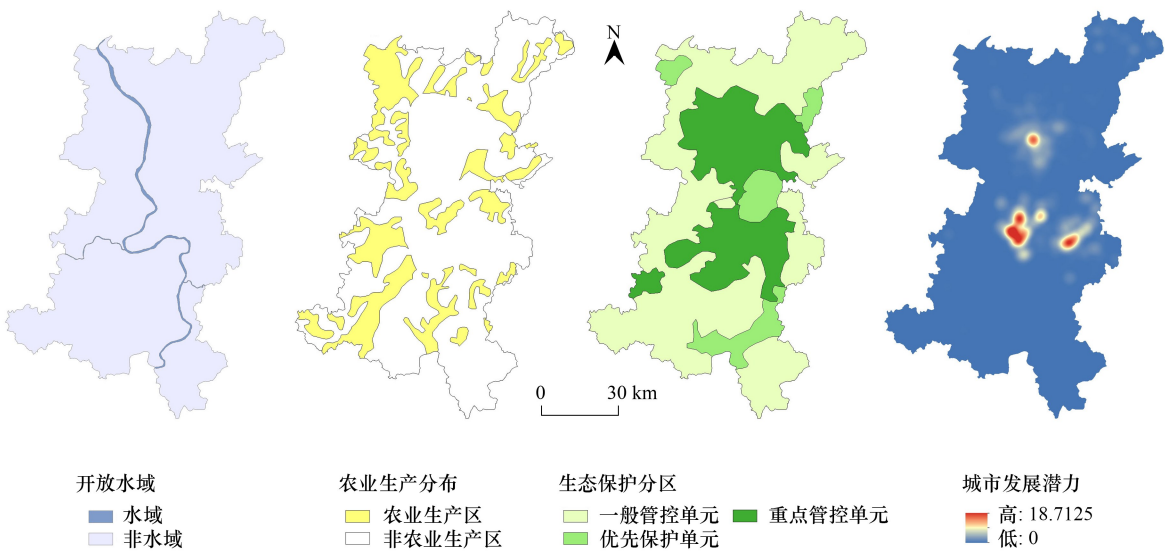


图 2 限制发展区域

Fig.2 Restricted development area

根据长株潭城市群的社会经济特点和发展潜力,结合国家和地方政府制定的耕地保护、生态环境保护相关政策以及湖南省双碳目标,调整模型参数和限制发展区域,制定了自然状态发展情景、耕地保护发展情景、生态保护发展情景以及绿色低碳发展情景,并根据 2015—2020 年的用地扩张概率图集运用 Markov 预测得到 2030 年的用地需求量(表 3)。

表 3 不同情景下长株潭城市群 2030 年各土地利用类型需求像元数目/个

Table 3 Number of pixels required for each land use type of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration in 2030 under different scenarios

发展情景 Development scenarios	耕地 Cultivated land	林地 Woodland	草地 Grassland	水域 Waters	建设用 Construction land	未利用地 Unused land	总计 Total
自然状态发展情景 Natural state development scenarios	3130489	4631774	33655	354371	1408574	4123	9562986
耕地保护发展情景 Cultivated land protection development scenario	3180468	4602771	33495	352261	1389867	4124	9562986
生态保护发展情景 Ecological protection development scenario	3130980	4670308	33745	354387	1369543	4023	9562986
绿色低碳发展情景 Green and low-carbon development scenarios	3130686	4647142	33714	354377	1392970	4097	9562986

①自然状态发展情景

城市群按照自身发展规律,依据历史土地利用变化趋势和社会经济发展趋势自然向外发展,具有历史发展特征,但需考虑国家正在实施的生态文明建设战略和湖南省湘江保护相关政策。因此,将长株潭城市群开放水域分布图作为限制发展区域,除建设用地外,其他用地类型间转化不做限制。

②耕地保护发展情景

在自然状态发展情景的基础上考虑耕地保护政策,加强对耕地保护力度,增加基本农田分布图作为限制发展区域,同时减少耕地向其他用地的转化概率。

③生态保护发展情景

在耕地保护发展情景的基础上考虑生态环境保护政策和长株潭城市群双碳目标,尽量提升林地、草地等碳汇用地面积,保证城市群按时或提前实现碳达峰碳中和。因此将生态保护分区图中的优先保护区和重点保护区作为限制发展区域,并且限制林地、草地等生态植被用地转化为建设用地。

④绿色低碳发展情景

处于前三种发展情景之间的一种平衡发展模式,同时考虑到耕地保护、生态保护、双碳目标以及城市群经济增长,不过度发展导致城市群无序扩张,也不过度保护环境而阻碍城市群的经济增长,合理地分配各类用地需求。在生态保护发展情景的基础上考虑城市群发展潜力,增加城市发展潜力图作为限制发展区域,同时,将林地和草地向建设用地转化的概率降低 20%,未利用地向建设用地转化的概率增加 20%。

2.3 Person 相关性分析

Person 相关性分析的具体计算公式为:

$$R = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

通常情况下,当 R 为负值时,表示两个变量为负相关关系, R 为正值时,两个变量为正相关关系, $R > 0.8$ 为高度相关, $0.5 < R \leq 0.8$ 为中度相关, $0.3 \leq R < 0.5$ 为低度相关, $R < 0.3$ 为不相关。

2.4 碳排放响应模型构建

借鉴弹性系数(Elastic coefficient)来构建长株潭城市群建设用地扩张与碳排放响应模型,对城市群未来不同情景下的碳排放响应程度进行量化分析。计算公式如下:

$$\theta = \frac{\Delta C_{i+n} / C_i}{\Delta S_{i+n} / S_i} \quad (4)$$

式中, θ 表示碳排放响应强度; ΔC_{i+n} 表示研究区第 $i+n$ 年的建设用地碳排放量相比第 i 年的变化量; C_i 为研究区第 i 年的建设用地碳排放量; ΔS_{i+n} 表示第 $i+n$ 年的建设用地面积相比第 i 年的变化量; S_i 为研究区第 i 年的建设用地面积。

3 结果分析

3.1 长株潭城市群建设用地扩张与碳排放时空特征分析

3.1.1 建设用地扩张时空特征

基于长株潭城市群 2000—2020 年的遥感图像,通过 ENVI 与 ArcGIS 软件对土地利用现状进行解译,并运用 ArcGIS 空间分析工具对 2000、2005、2010、2015、2020 五期土地利用数据进行叠加分析,得到 2000—2020 年长株潭土地利用转移空间分布图(图 3),在此基础上构建土地利用转移矩阵来分析长株潭城市群 2000—2020 各时间段土地利用类型间的转化关系及转化特征(图 4)。

从图 3 可以看出,2000—2020 长株潭城市群建设用地面积呈现阶段性的波动增长趋势,耕地和林地是其主要来源,扩张强度在各年份和各地区间差异较大。建设用地面积扩张从高到低依次为 2010—2015 年(372.150km^2)>2015—2020 年(128.486km^2)>2000—2005 年(99.221km^2)>2005—2010 年(61.944km^2)。其中,2000—2015 年,长株潭城市群建设用地扩张强度逐年增强,在 2010—2015 年达到最大,此研究期内,城市群处于快速发展期,这与长株潭“一体化”建设的提出有关,城市群在外商直接投资、出口和消费的带动下经济迅速发展,建设用地快速向外扩张;2015—2020 年扩张强度相比前期有所下降,原因是受到“两型社会”和“新型城镇化”等城市发展战略的影响。从空间分布上看,2005—2010 年,长沙市扩张明显,2010—2020 年株洲和湘潭的发展步伐加快,扩张面积较大的县区集中在长沙市、株洲市和湘潭市的中心区域,这些区域的人口和产业密度较大,建设用地需求较大。通过分析可知,随着社会经济的不断发展,长株潭城市群的建设用地快速扩张,且占用了大量的林地和耕地面积,这种现象在 2010—2015 年最为明显,且主要集中在城市群中心区域。

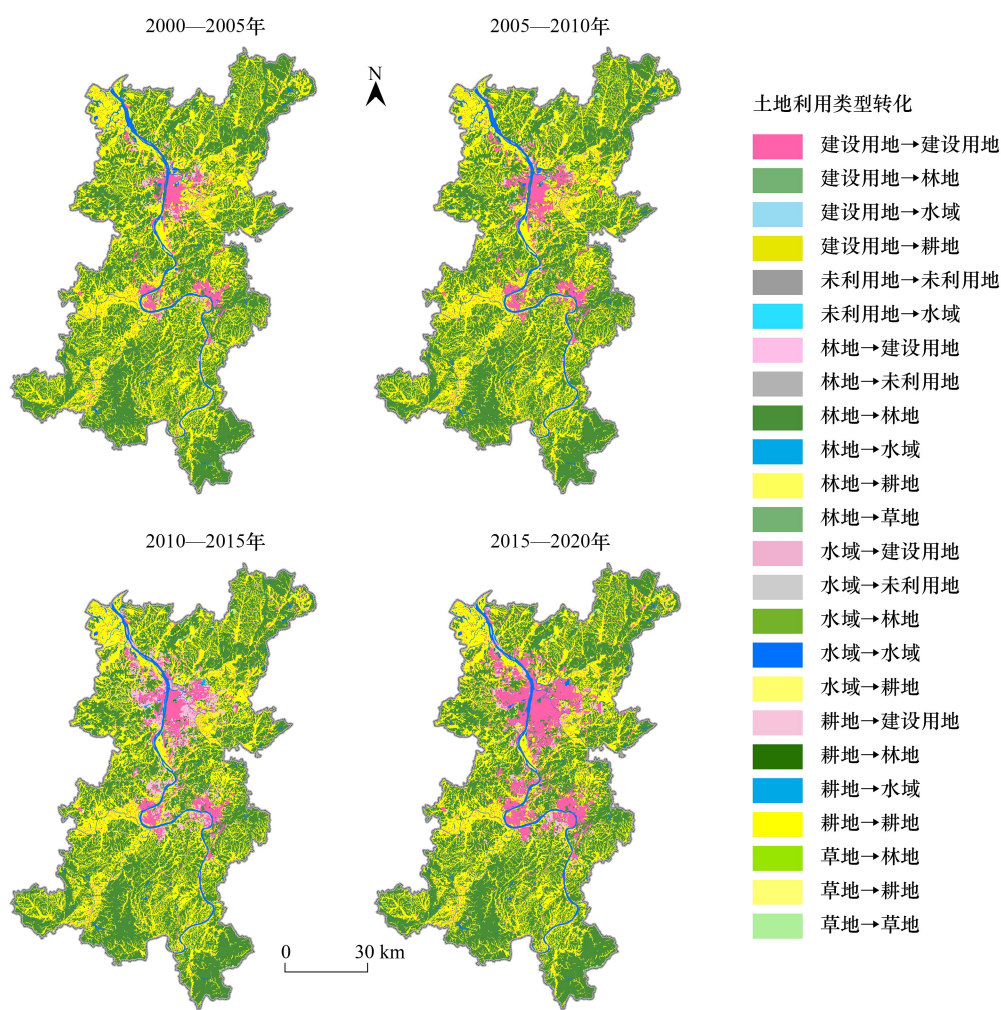


图 3 长株潭城市群 2000—2020 土地利用类型转化图

Fig.3 Transformation of land use types in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration from 2000 to 2020

3.1.2 土地利用碳排放时空特征

从表 4 可以看出 2000—2020 年城市群整体的建设用地碳排放与土地利用碳排放量不断增加,建设用地碳排放量由 1057.92 万 t 上涨到 4125.12 万 t,土地利用净碳排放量由 1041.93 万 t 上涨到 4109.21 万 t,年均增长速度分别为 146.05 万 t/a、146.06 万 t/a;其中,湘潭县、长沙县和浏口区的建设用地碳排放量相比其他区县在五个年份均占较大比例,芙蓉区的土地利用净碳排放量始终保持较高值,说明芙蓉区面临着相对较大的碳减排压力。分时间段来看,长株潭城市群碳排放量的变化呈现倒“V”型曲线,可以分为两个阶段,①2000—2005 年碳排放量快速上升阶段;其中,建设用地碳排放涨幅最大的为雨花区,其次为芙蓉区,分别增加 54.31 万 t 和 34.50 万 t,增量最小的为岳麓区,建设用地碳排放量减少了 28.36 万 t;土地利用净碳排放量涨幅最大的为雨花区,其次为芦淞区,涨幅最小的为浏口区;②2005—2020 年碳排放量下降阶段,下降幅度先增加后减缓;以

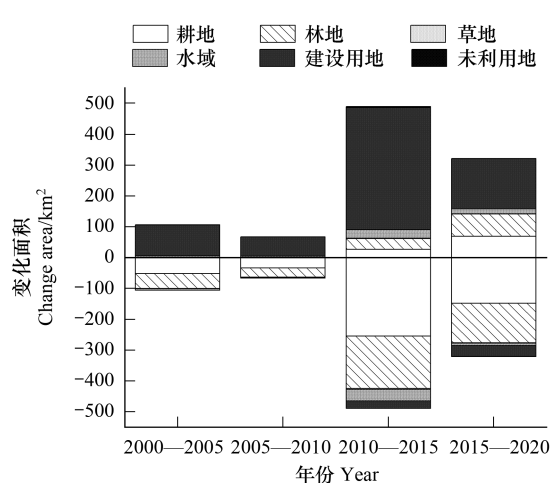


图 4 长株潭城市群各用地类型变化面积

Fig.4 Change area of various land types in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration

2010 年为节点,15 个区县的建设用地碳排放增量开始下降,甚至出现负增长,土地利用净碳排放保持在涨幅为 100%左右的小幅度增加,2010—2015 年下降幅度达到最大,株洲市五个区县的土地利用净碳排放为负增长,长沙市和湘潭市中除芙蓉区、雨湖区和岳塘区外,其余区县的涨幅均在 100%以下,2015—2020 年下降幅度变小,各区县土地利用净碳排放量的变化存在差异,其中湘潭县、雨湖区和岳塘区涨幅由正变负,相对于其他区县碳减排效果更为明显。究其原因,2000—2005 年长株潭城市群处于发展初期,各区县根据自身优势迅速发展,碳排放量逐年增加,2007 年国家提出“两型社会”后,城市群建设用地的减碳工作逐步取得成效,十八大以来开展“生态文明建设”,节碳减排工作持续推进,各区县的碳排放量得到有效控制。

表 4 长株潭城市群建设用地碳排放与土地利用净碳排放/($\times 10^4$ t)

Table 4 Carbon emissions from construction land and net carbon emissions from land use of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration

年份 Year		2000		2005		2010		2015		2020	
行政区 District		建设用地 碳排放	土地利用 净碳排放	建设用地 碳排放	土地利用 净碳排放	建设用地 碳排放	土地利用 净碳排放	建设用地 碳排放	土地利用 净碳排放	建设用地 碳排放	土地利用 净碳排放
长沙市	芙蓉区	134.02	134.07	173.54	173.59	132.61	132.66	401.59	401.61	400.11	400.12
	开福区	119.05	118.12	101.99	101.76	220.97	220.75	263.46	263.25	347.59	347.39
	天心区	97.23	97.27	98.71	98.74	232.55	232.58	255.78	255.76	345.78	345.76
	望城区	58.42	57.83	72.26	71.62	156.33	155.69	244.54	244.01	376.31	375.78
	雨花区	96.41	96.01	150.72	150.39	255.75	255.41	284.25	283.82	593.15	592.71
	岳麓区	114.20	113.03	85.84	84.76	214.19	213.11	239.14	238.08	361.24	360.19
株洲市	长沙县	108.82	106.34	143.32	139.80	400.77	397.25	436.17	432.66	551.10	547.55
	荷塘区	34.13	33.82	49.17	48.87	115.40	115.10	73.58	73.28	66.88	66.58
	芦淞区	47.34	46.61	72.10	71.38	148.78	148.06	112.13	111.43	113.52	112.82
	渌口区	37.85	34.91	32.37	29.43	55.04	52.08	35.49	32.51	35.11	32.13
	石峰区	75.32	74.76	92.56	92.00	218.61	218.05	126.40	126.14	98.60	98.34
	天元区	25.19	24.80	36.79	36.40	123.26	122.88	95.47	95.07	126.99	126.61
湘潭市	湘潭县	60.72	56.04	75.58	70.90	159.36	154.68	235.97	231.27	185.54	180.87
	雨湖区	25.02	24.42	34.20	33.60	59.90	59.31	343.18	342.62	269.84	269.30
	岳塘区	24.20	23.90	35.76	35.47	83.15	82.87	322.22	321.93	253.36	253.07
总计 Total		1057.92	1041.93	1254.91	1238.71	2576.67	2560.49	3469.37	3453.45	4125.12	4109.21

3.1.3 建设用地扩张与碳排放相关性分析

通过分析长株潭城市群各县区 2000—2020 年建设用地面积与碳排放的时空演变特征,发现二者之间表现出一定的相关性,为深入了解相关性的密切程度及数量关系,采用 Person 相关性分析的方法进行定量分析。

结果如表 5 所示,15 个县区的相关性系数均大于 0.9,建设用地面积与碳排放存在高度的正相关性,建设用地面积增加会导致二氧化碳排放量的同步增加。其中开福区、天心区、望城区和岳麓区的相关性系数分别为 0.997、0.998、0.991、0.997,且在 0.01 水平(双侧)上显著性相关,芙蓉区、长沙县、湘潭县、雨湖区和岳塘区相关性系数分别为 0.970、0.974、0.970、0.979 和 0.967,在 0.05 水平(双侧)上显著性相关。

3.2 基于 PLUS 模拟结果的长株潭城市群建设用地扩张及碳排放响应

3.2.1 长株潭城市群建设用地扩张模拟结果分析

在 PLUS 软件中进行模拟精度验证,结果显示 Kappa 系数为 0.92,大于 0.75,总体精度 OA 为 0.95,FOM 指数为 0.072,说明本次模拟结果精度较高,模拟效果较好,与真实土地利用情况差异性较小,结果可信度较高,可以用相关参数模拟长株潭城市群未来土地利用空间分布。

基于 PLUS 模拟结果,得到不同发展情景下长株潭城市群 2030 年土地利用分布局部细节图(图 5),并构建长株潭城市群 2020—2030 年不同发展情景下的非建设用地与建设用地转移矩阵,分析其转化特征。

表 5 长株潭城市群各区县建设用地扩张与碳排放相关系数表

Table 5 Correlation coefficient between expansion of construction land and carbon emission in districts and counties of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration

区县 District	芙蓉区	开福区	天心区	望城区	雨花区	岳麓区	长沙县
person 相关性(R) Person Correlation (R)	0.973 *	0.997 **	0.998 **	0.991 **	0.970 *	0.997 **	0.974 *
显著性(双侧) Significance (bilateral)	0.027	0.003	0.002	0.009	0.030	0.003	0.026
荷塘区	芦淞区	渌口区	石峰区	天元区	湘潭县	雨湖区	岳塘区
0.932	0.921	0.900	0.906	0.906	0.970 *	0.979 *	0.967 *
0.068	0.079	0.100	0.094	0.094	0.030	0.021	0.033

*, ** 分别代表在 0.05 和 0.01 水平(双侧)上显著相关

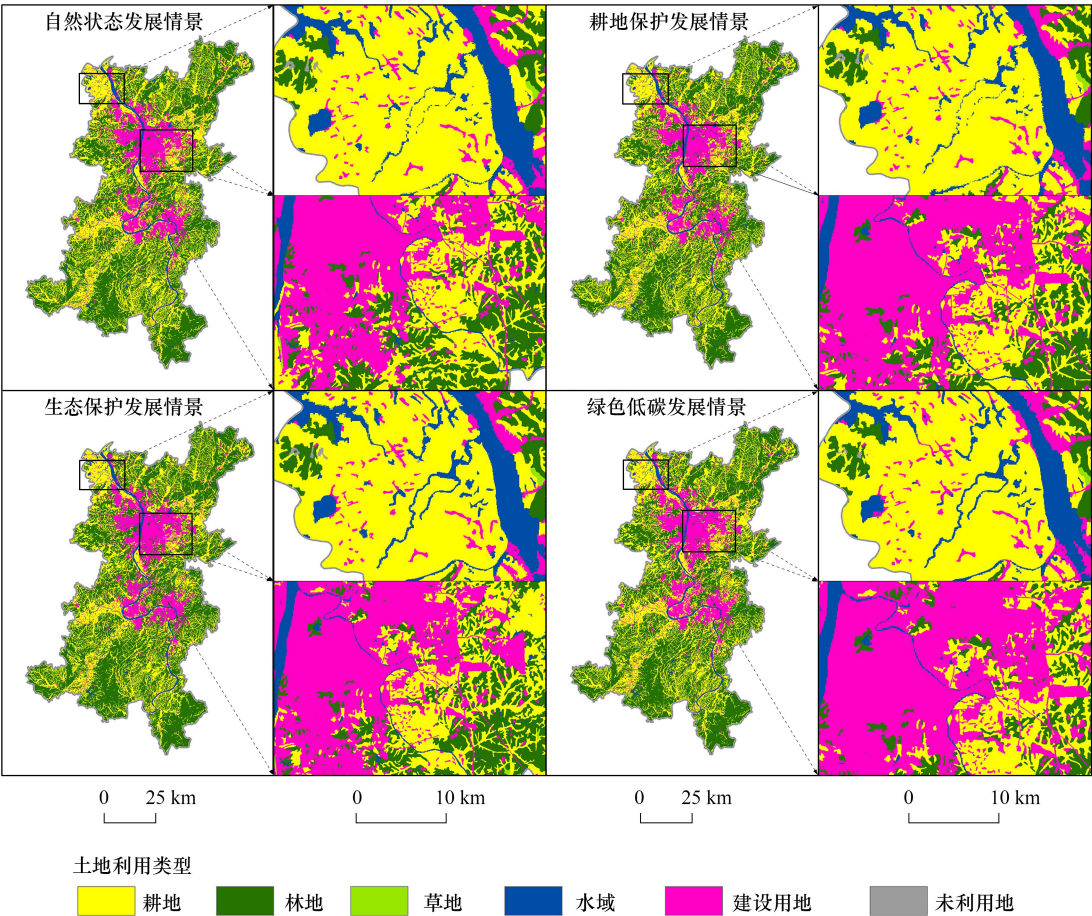


图 5 不同发展情景下长株潭城市群 2030 年土地利用分布局部细节图

Fig.5 Partial details of land use distribution of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration in 2030 under different development scenarios

从长株潭城市群整体来看,不同发展情景下,建设用地扩张面积及其对不同土地利用类型的影响存在差异;建设用地在自然状态发展情景下扩张面积最大,为 235.95km²,在绿色低碳发展情景下扩张面积最小,为 200.64km²,在四种发展情景下,耕地、林地和水域向建设用地转化的面积均较大,草地和未利用地较少,其中耕地在绿色低碳发展情景下的转化面积最大,林地在自然状态发展情景下转化面积最大,水域在合理开发建设情景下转化面积最大。具体来看,在前两种发展情景下,建设用地扩张主要来源为林地,分别占总转化面积

的 70.04%和 60.50%;绿色低碳发展情景下,耕地的转化面积最大,占总转化面积的 43.15%;合理开发建设情景下,建设用地扩张面积为 221.83km²,排在第二位,但相比其他发展情景,占用耕地面积明显减少,为 20.07km²,仅占总扩张面积的 9.05%,占用林地的面积也下降为 149.71km²,占用未利用地的面积增加到 1.20km²,相比前三种发展情景分别提高 0.30%、0.32%、0.35%,说明在合理开发建设情景下,长株潭城市群建设用地面积扩张所占用的生态碳汇用地相对较少,占用未利用地相对较多,扩张分布较为合理。

从长株潭城市群不同的区县来看,长沙县、望城区、湘潭县在四种发展情景下建设用地扩张占用的耕地和林地面积均较大,岳塘区和天元区占用林地的面积较大,说明在未来的发展过程中这几个区县仍会占用大量的生态碳汇用地和粮食生产用地,从而产生较大的碳减排压力和粮食生产压力,生态安全形式较为严峻。另外,在自然状态发展情景下,各区县建设用地面积均有较大幅度的扩张,不利于双碳目标的实现和生态环境保护;在耕地保护情景下,各区县建设用地占用林地面积均最大,对生态碳源用地的影响较大,不利于碳减排工作的推进;生态保护发展情景下占用的耕地面积最大,对基本农田等粮食生产安全用地有较大影响,不利于城市群经济发展;这三种发展情景下长株潭城市群建设用地扩张均会对生态保护和经济发展带来较大的负面影响,在绿色低碳发展情景下,长株潭城市群各区县建设用地扩张的面积适中,对耕地和林地的占用也处于其他三种发展情景之间,该发展情景带来的生态环境压力和碳排放压力相对较小,既有利于生态环境保护也有利于社会经济发展。

3.2.2 不同情景下的建设用地扩张与碳排放响应分析

根据公式 4 计算得到长株潭城市群土地利用与碳排放响应程度(表 6)。结果显示 2020—2030 年长株潭城市群碳排放对建设用地扩张的响应程度较低,四种情景下的碳排放综合响应值均小于 1。可能由两种原因造成,第一种是土地存在低效利用现象,第二种是土地利用和经济发展调整为低排放的利用模式。根据各用地类型的响应程度来看,在不同发展情景下,草地和林地的碳排放响应值均较高,未利用地的响应值均较低,说明草地和林地在各发展情景中都承担着重要的碳汇功能,长株潭城市群建设用地扩张占用林地和草地,会产生较大的碳排放压力;而未利用地的碳汇作用较弱,碳排放响应程度较低,将未利用地作为城市群建设用地扩张方向所带来的碳排放压力较小。综合前文的建设用地扩张模拟结果,前两种发展情景主要是由于占用较多林地、草地等碳汇用地导致土地利用方式较为低效,因而响应值较低,这与生态文明建设理念不符;而后两种发展情景通过综合考虑生态用地保护和城市群经济发展,合理调整土地利用方式,促进城市群土地集约高效利用,有利于我国碳达峰和碳中和目标的实现,长株潭城市群在未来的发展中可以考虑后两种情景的发展模式。

表 6 不同发展情景下长株潭城市群土地利用碳排放响应程度表

Table 6 Response degree of land use carbon emission of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration under different development scenarios

发展情景 Development scenarios	碳排放响应值 Carbon emission response value			
	自然状态发展情景	耕地保护发展情景	生态保护发展情景	绿色低碳发展情景
耕地 Cultivated land	1.91	2.77	1.90	1.91
林地 Woodland	3.75	2.99	5.54	4.31
草地 Grassland	5.78	4.45	6.86	6.47
水域 Waters	1.47	1.62	1.46	1.47
未利用地 Unused land	0.40	0.40	0.37	0.39
综合响应值 Comprehensive response value	0.41	0.44	0.48	0.44

3.2.3 区县尺度下的建设用地扩张与碳排放响应分析

整体上看 2020—2030 年长株潭城市群碳排放对建设用地扩张的响应程度相比于 2000—2020 年有所下降,表明各县区在未来的发展过程中都将表现出低碳发展的特征,15 个区县中仅石峰区出现小幅度的上升,这与石峰区的自然条件密切相关;2000—2020 年各区县的响应值均大于 1,建设用地扩张对碳排放的影响程

度较高,其中荷塘区的碳排放响应值最高(7.33),其次为芦淞区(4.42),高于长株潭城市群的平均水平 1.78,响应值最低的为石峰区 0.26,其次为天元区 0.79;2020—2030 年,除绿色低碳发展情景中的芙蓉区外,15 个区县的碳排放响应值均小于 1,表现出低碳发展的特征。在自然状态发展情景下,荷塘区和芦淞区的响应值分别下降 93.98%、93.38%,碳排放对建设用地扩张的敏感性迅速降低,原因是按照现有发展趋势,未来建设用地扩张限制条件较少,导致摊大饼的无序扩张模式;在耕地保护发展情景下,各区县碳排放响应值对比自然状态发展情景有所增加,这主要是由于对建设用地扩张的条件限制所导致;在生态保护发展情景下,碳排放对建设用地扩张敏感性最高的为芙蓉区(0.71),其次为雨花区(0.64),敏感性最低的为岳塘区(0.38),总体上表现出碳排放对建设用地扩张的低敏感性特征。在绿色低碳发展情景下,除芙蓉区外,其他 14 个区县的碳排放响应值均小于 1,原因是在该情景中同时考虑长株潭城市群经济发展和生态环境保护及双碳目标等需求下,有条件地限制城市群建设用地扩张,降低了其对碳排放的影响。

表 7 长株潭城市群不同发展情景下各区县建设用地扩张碳排放响应值

Table 7 Response values of carbon emissions from expansion of construction land in various districts and counties under different development scenarios of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration

区县 District		2000—2020	2020—2030			
			自然状态 发展情景	耕地保护 发展情景	绿色低碳 发展情景	合理开发 建设情景
长沙市	芙蓉区	3.31	0.64	0.70	0.71	1.95
	开福区	2.12	0.39	0.41	0.50	0.44
	天心区	3.21	0.44	0.47	0.56	0.63
	望城区	1.04	0.34	0.37	0.39	0.33
	雨花区	2.17	0.45	0.49	0.64	0.91
	岳麓区	1.34	0.42	0.45	0.57	0.50
	长沙县	1.49	0.43	0.47	0.41	0.53
株洲市	荷塘区	7.33	0.44	0.47	0.48	0.23
	芦淞区	4.42	0.29	0.30	0.58	0.27
	渌口区	3.64	0.58	0.63	0.57	0.50
	石峰区	0.26	0.34	0.36	0.39	0.38
	天元区	0.79	0.42	0.45	0.48	0.54
湘潭市	湘潭县	3.95	0.48	0.52	0.58	0.48
	雨湖区	1.45	0.35	0.38	0.42	0.35
	岳塘区	2.98	0.38	0.40	0.38	0.21
长株潭城市群 Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration		1.78	0.41	0.44	0.48	0.43

4 结论与讨论

4.1 结论

通过分析 2000—2020 年长株潭主城区 15 个区县的建设用地扩张与碳排放现状,运用 Markov-PLUS 和碳排放响应模型等方法,定量揭示了长株潭城市群 2030 年建设用地扩张及碳排放响应情况,主要结论如下:

①2000—2020 长株潭城市群建设用地面积呈现阶段性的波动增长趋势,耕地和林地是其主要来源,扩张强度在 2010—2015 年最大,主要集中在城市群中心区域。

②2000—2020 年建设用地碳排放与土地利用净碳排放量变化呈现倒“V”型曲线,可以划分为碳排放量快速上升阶段(2000—2005 年)和碳排放量下降阶段(2005—2020 年),以 2010 年为节点,下降幅度先增加后减缓。

③建设用地扩张与碳排放之间存在着较为密切的相关关系,整体表现为建设用地面积增加(减少)碳排放随之增加(减少)的较强扩张与较高排放模式。

④建设用地在自然状态发展情景下扩张面积最大(235.9503km²),在生态保护发展情景下扩张面积最小(200.6354km²);相比其他发展情景,绿色低碳发展情景下建设用地扩张占用的生态碳汇面积较少,占未利用地相对较多,扩张分布较为合理,带来的生态环境压力和碳排放压力较小,既有利于生态环境保护也有利于社会经济发展。

⑤长株潭城市群各区县的碳排放量对建设用地扩张均表现出一定的敏感性,综合考虑建设用地扩张与碳排放响应,绿色低碳发展情景为长株潭城市群未来的较优发展模式。

4.2 讨论

在双碳目标和新型城镇化的背景下,保证经济平稳增长的同时减少碳排放是实现城市高质量发展的重要任务之一。建设用地扩张是城市群发展的重要表现方式之一,碳排放对建设用地扩张的响应程度降低有利于城市群低碳发展。本文研究结果显示城市群的建设用地扩张强度先增强后减弱,这与欧阳晓等^[5]和荔琢等^[33]的研究一致,并在此基础上研究了各区县的扩张情况;长株潭城市群碳排放格局与杨旭等^[34]的研究结果相似,但本文利用二、三产业值与单位 GDP 能耗来间接计算长株潭城市群建设用地的碳排放量,碳排放数值偏小;另外,本文设计四种情景,研究表明通过采取不同的发展理念,2020—2030 长株潭城市群碳排放对建设用地扩张的响应值均有所下降,表现出低碳发展的特征,其中在合理开发建设情景下,较多地利用未利用地进行开发建设,控制建设用地对耕地、林地等生态碳汇用地的侵占,在保证城市群经济发展和生态粮食安全的同时降低了碳排放。因此,长株潭城市群应当在合理划定城市边界的基础上,多利用城市群中的未利用地进行填充式开发,减少对碳汇用地的占用,提高城市群土地利用效率,而非无序地向外扩展^[35]。与现有研究相比,本文从城市群尺度出发,同时考虑经济和生态效益,定量分析长株潭城市群建设用地扩张特征及碳排放量时空演变特征,有助于相关部门清晰客观地掌握研究区碳排放现状,从而更好地权衡城市群经济发展与生态环境承载力,一定程度上为长株潭城市群“自下而上”的国土空间规划及高质量发展提供参考。其次,利用 PLUS 模型模拟不同情景下的建设用地扩张,构建碳排放响应模型探讨不同发展理念下的碳排放响应特征,一定程度上有助于丰富碳排放的研究内容,以及元胞自动机理论在城市扩张方面的研究成果,可为长株潭城市群及相关区域制定国土空间规划等提供参考意见,并为城市群碳减排政策的制定提供方向。最后,由于在指标选取及碳排放核算方面还不够完善,Markov-PLUS 模型的参数设置方面也需进一步提高,因此,未来需不断提升模拟精度,完善指标体系,改进碳排放核算方法,以期进行更加准确的分析研究。

参考文献(References):

- [1] 李强,高楠.城市蔓延的生态环境效应研究——基于 34 个大中城市面板数据的分析.中国人口科学,2016(6): 58-67, 127.
- [2] 赵丹阳,佟连军,仇方道,郭付友.松花江流域城市用地扩张的生态环境效应.地理研究,2017, 36(1): 74-84.
- [3] Deng X Z, Huang J K, Rozelle S, Zhang J P, Li Z H. Impact of urbanization on cultivated land changes in China. Land Use Policy, 2015, 45: 1-7.
- [4] 舒心,夏楚瑜,李艳,童菊儿,史舟.长三角城市群碳排放与城市用地增长及形态的关系.生态学报,2018, 38(17): 6302-6313.
- [5] 欧阳晓,朱翔,贺清云.城市群城市用地扩张时空特征及驱动机制研究——以长株潭城市群为例.长江流域资源与环境,2020, 29(6): 1298-1309.
- [6] 刘甲红,胡潭高,潘骅骏,张登荣,张路,李瑶.基于 Markov-CLUES 耦合模型的杭州湾湿地多情景模拟研究.生态环境学报,2018, 27(7): 1359-1368.
- [7] 熊锦惠,岳文泽,陈阳,廖蓉,方恺.面向 SDGs 的城市扩张多情景模拟——以“一带一路”中亚区为例.自然资源学报,2021, 36(4): 841-853.
- [8] 郭延凤,于秀波,姜鲁光,查良松.基于 CLUE 模型的 2030 年江西省土地利用变化情景分析.地理研究,2012, 31(6): 1016-1028.
- [9] 涂小松,濮励杰,吴骏,朱明.基于 SLEUTH 模型的无锡市区土地利用变化情景模拟.长江流域资源与环境,2008, 17(6): 860-865.
- [10] Liu X P, Liang X, Li X A, Xu X C, Ou J P, Chen Y M, Li S Y, Wang S J, Pei F S. A future land use simulation model (FLUS) for simulating

- multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 168: 94-116.
- [11] 符蓉, 濮励杰, 钱敏, 朱明. 区域土地利用变化情景模拟设计与实证分析——基于多智能体系统(MAS)模型. *资源科学*, 2012, 34(3): 468-474.
- [12] Liang X, Guan Q F, Clarke K C, Liu S S, Wang B Y, Yao Y. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: a case study in Wuhan, China. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021, 85: 101569.
- [13] Guo R, Wu T, Wu X C, Luigi S, Wang Y Q. Simulation of urban land expansion under ecological constraints in harbin-Changchun urban agglomeration, China. *Chinese Geographical Science*, 2022, 32(3): 438-455.
- [14] 王佳楠, 张志. 基于 Markov-PLUS 模型的柴北缘土地利用变化及模拟分析. *西北林学院学报*, 2022, 37(3): 139-148, 179.
- [15] 马瑞, 范燕敏, 武红旗, 朱磊, 马轩, 范昕, 张皓宇. 耦合 GMOP 与 PLUS 模型的干旱区土地利用格局模拟. *农业资源与环境学报*, 2023, 40(1): 143-153.
- [16] 李小康, 王晓鸣, 华虹. 土地利用结构变化对碳排放的影响关系及机理研究. *生态经济*, 2018, 34(1): 14-19.
- [17] 张帆, 徐宁, 吴锋. 共享社会经济路径下中国 2020—2100 年碳排放预测研究. *生态学报*, 2021, 41(24): 9691-9704.
- [18] 王正, 周侃, 樊杰. 西部地区县域碳排放核算及主体功能区解析——以四川省为例. *生态学报*, 2022, 42(21): 8664-8674.
- [19] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 陈安平. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算. *中国科学: D 辑: 地球科学*, 2007, 37(6): 804-812.
- [20] 袁凯华, 甘臣林, 杨慧琳, 刘晔, 陈银蓉, 朱庆莹. 建设用地扩张与碳排放增长的 EKC 验证及特征分解研究——以武汉市为例. *中国土地科学*, 2019, 33(1): 56-64.
- [21] 苏王新, 孙然好. 中国典型城市群城镇化碳排放驱动因子. *生态学报*, 2018, 38(6): 1975-1983.
- [22] 杨皓然, 吴群. 基于系统 GMM 面板模型的土地利用碳排放效应研究——以中国省际面板数据为例. *土壤通报*, 2019, 50(3): 541-549.
- [23] 李健, 毛德华, 蒋子良, 李科. 长株潭城市群土地利用碳排放因素分解及脱钩效应研究. *生态经济*, 2019, 35(8): 28-34, 66.
- [24] 赵先超, 朱翔, 周跃云. 湖南省不同土地利用方式的碳排放效应及时空格局分析. *环境科学学报*, 2013, 33(3): 941-949.
- [25] 牛亚文, 赵先超, 胡艺觉. 基于 NPP-VIIRS 夜间灯光的长株潭地区县域土地利用碳排放空间分异研究. *环境科学学报*, 2021, 41(9): 3847-3856.
- [26] 马远, 刘真真. 黄河流域土地利用碳排放的时空演变及影响因素研究. *生态经济*, 2021, 37(7): 35-43.
- [27] 蒋金亮, 高全洲, 赵淑清. 中国土地利用/覆被变化的碳排放响应及其格局与预测——基于 2001-2009 年 MODIS 数据. 第七届全国地理学研究生学术年会论文摘要集. 开封, 2012: 27-28.
- [28] 蔡苗苗, 吴开亚. 上海市建设用地扩张与土地利用碳排放的关系研究. *资源开发与市场*, 2018, 34(4): 499-505.
- [29] 李彦旻, 沈育生, 王世航. 基于土地利用变化的安徽省陆地碳排放时空特征及效应. *水土保持学报*, 2022, 36(1): 182-188.
- [30] 苏雅丽, 张艳芳. 陕西省土地利用变化的碳排放效益研究. *水土保持学报*, 2011, 25(1): 152-156.
- [31] 赖力. 中国土地利用的碳排放效应研究[D]. 南京: 南京大学, 2010.
- [32] 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.
- [33] 荔琢, 蒋卫国, 王文杰, 雷璇, 邓越. 探索长株潭城市群建设用地的时空变化及重心移动. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(8): 1363-1380.
- [34] 杨旭, 刘贤赵. 长株潭城市群地类转移的碳传导效应与预测. *环境科学*, 2022, 43(12): 5850-5860.
- [35] 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.