

黎霞, 兰小机. 环鄱阳湖城市群土地利用碳排放轨迹分析与多情景预测[J]. 环境科学与技术, 2024, 47(11): 11-21. Li Xia, Lan Xiaoji. Trajectory analysis and multi-scenario prediction of carbon emission from land-use of urban agglomeration around Poyang Lake[J]. Environmental Science & Technology, 2024, 47(11): 11-21.

环鄱阳湖城市群土地利用碳排放轨迹分析与多情景预测

黎霞, 兰小机*

(江西理工大学土木与测绘工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要: 城市群在中国经济发展和社会治理中发挥着引领作用, 研究城市群土地利用碳排放有助于区域协调减排。该文以土地利用和能源统计数据为基础, 采用碳排放系数法测算 2000–2020 年环鄱阳湖城市群土地利用碳排放量, 运用标准差椭圆进一步探究土地利用碳排放的迁移轨迹, 最后采用 Markov-PLUS 模型和灰色 BP 神经网络对 2030 年土地利用碳排放进行多情景预测。结果表明: (1) 2000–2020 年, 耕地是城市群快速扩张的重要来源, 土地利用碳排放呈上升趋势, 年均增加 188.01 万 t, 建设用地和林地分别为碳源和碳汇的主要贡献者。(2) 碳排放重心整体上呈现由西南迁移发展为向东北迁移的趋势, 分别累计迁移 37.39 km 和 38.50 km。(3) 预测结果表明, 2030 年环鄱阳湖城市群在耕地保护情景下碳排放量最高, 为 5 882.63 万 t; 其次是自然发展和生态优先情景, 分别为 5 876.48 万 t, 5 866.94 万 t。该文的研究结果可实现环鄱阳湖城市群增汇减源, 为城市可持续发展提供参考依据。

关键词: 土地利用碳排放; 标准差椭圆; Markov-PLUS 模型; 灰色 BP 神经网络

中图分类号: X321 **文献标志码:** A **doi:** 10.19672/j.cnki.1003-6504.1039.24.338 **文章编号:** 1003-6504(2024)11-0011-11

Trajectory Analysis and Multi-scenario Prediction of Carbon Emission from Land-use of Urban Agglomeration Around Poyang Lake

LI Xia, LAN Xiaoji*

(School of Civil and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: Urban agglomerations play a leading role in China's economic development and social governance, and the study of carbon emissions from land-use in urban agglomerations is helpful to the regional coordinate emission reduction. In this study, the carbon emission coefficient method to measure the land-use carbon emissions of the urban agglomeration around Poyang Lake during 2000–2020 was adopted, the standard deviation ellipse was used to further explore the migration trajectory of the land use carbon emissions, and finally the Markov-PLUS model and the gray BP neural network were applied to the multi-scenario prediction of the land-use carbon emissions in 2030. The finding of the study indicated that during the years 2000–2020, the farmland was an important source of rapid expansion of urban agglomerations, land-use carbon emissions showing an upward trend with an average annual increase of 1.880 million tons, while the construction land and forest land were the main contributors of carbon sources and sinks, respectively. As a whole, main part of the carbon emission tended to the change from southwest-ward migration to northeast-ward migration, with a cumulative migrated distance of 37.39 km and 38.50 km, respectively; and the prediction results showed that the urban agglomeration around Poyang Lake will have the highest carbon emission (58.826 3 million tons) in the scenario of adequate farmland protection in 2030, followed by the natural development and ecological priority scenarios, with respective 58.764 8 million tons, 58 669 4 million tons. The results drawn from this study could provide the reference basis for the urban agglomeration around Poyang Lake to increase carbon sinks, and to reduce carbon sources, thus realizing the sustainable development of the city.

Key words: carbon emissions from land-use; standard deviation ellipse; Markov-PLUS model; grey BP neural network

工业革命以来, 人类活动对土地利用的显著改变导致了生态系统碳循环和能量流动的剧变, 并已成为

全球气候变化的主要原因^[1]。其中由土地利用变化直接导致的碳排放占全球总碳排放量的 1/3^[2]。中国作

《环境科学与技术》编辑部: (网址) <http://fjks.chinajournal.net.cn> (电话) 027-87643502 (电子信箱) hjkxyjs@vip.126.com

收稿日期: 2024-06-29; 修回 2024-08-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41561085)

作者简介: 黎霞(2000-), 女, 硕士, 主要研究方向为土地利用与碳排放, (电子信箱) 1937838498@qq.com; *通讯作者, 教授, (电子信箱) Landcom8835@163.com。

为世界上最大的碳排放国^[9],为减少全球碳排放提出双碳目标,将减缓气候变化和可持续发展作为其国家规划的重中之重。因此,为应对气候变化和实现可持续发展,研究土地利用变化下的区域碳排放具有重要的现实意义。

目前关于土地利用变化和碳排放的研究主要集中在土地利用碳排放的时空格局上^[4-7],如张娜等^[8]依据土地利用碳排放估算方法,对2010-2020年长江经济带三大城市群的土地利用碳排放进行了科学测算与空间收敛性分析。随着研究的深入,学者们开始广泛讨论土地利用碳排放的驱动因素,各种计量经济学方法(如分解法^[9]、Laspeyres分解法^[10]和LMDI模型^[11-13])被用来探索影响碳排放的因素,如Wu等^[14]使用改进的Kaya恒等式分析了影响中国碳排放的因素,揭示了城市化率、能源碳排放系数和能源强度的增加导致的碳排放增加的现象。此外,对于土地利用碳排放的预测主要基于对土地利用类型变化的预测,常用的土地利用变化预测模型有Markov模型、CA模型^[15]、CLUE-S模型^[16]、FLUS模型^[17]和PLUS模型^[18,19]等。陈理庭等^[20]基于Markov-FLUS耦合模型,模拟预测了2035年饶河流域的土地利用情况,以此优化不同发展目标下的土地空间配置。综上所述,学者们从不同的角度,运用不同的方法对土地利用碳排放进行了丰富的研究,但仍存在一定的拓展空间:(1)中国许多典型和快速发展的城市群的碳排放得到了学者们的广泛研究,但对环鄱阳湖等新兴和发展中城市群碳排放的研究相对缺乏。(2)许多研究多基于单一数理统计方法或土地预测模型对碳排放进行预测,对土地利用模式和能源消费结构的综合影响分析不足。

环鄱阳湖城市群作为我国新兴和发展中的城市群之一,是长江经济带绿色可持续发展的示范区,通过深入研究其土地利用变化与碳排放的关系,有望为中国低碳土地利用和发展低碳经济提供科学依据。因此,本文以双碳目标为背景,在分析2000-2020年环鄱阳湖城市群土地利用变化的基础上,构建土地利用碳排放核算清单,利用标准差椭圆分析探究环鄱阳湖城市群土地利用碳排放时空迁移轨迹,然后结合土地利用现状和发展规划,使用Markov-PLUS模型和灰色BP神经网络对2030年不同情景下的土地利用碳排放进行模拟预测。本文的研究结果不仅有助于实现区域碳减排目标,同时为城市群高质量发展提供了科学依据。

1 研究区与数据

1.1 研究区概述

环鄱阳湖城市群位于江西省的中北部,北临长

江,拥有庐山和鄱阳湖等得天独厚的天然优势,地貌主要为山地和丘陵,区域森林资源丰富,以常绿阔叶林为主,属于亚热带季风气候。该城市群包括南昌、九江、景德镇等10个地级市(由于能源统计数据限制,本研究中的抚州市和吉安市为全部行政辖区),总面积为 $12.75 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图1)。截至2020年底,累计人口达到8 140.73万,地区生产总值为22 046.29亿元,占全省生产总值的85.81%。随着环鄱阳湖城市群城市化进程的不断加快,建设用地持续扩张,由此导致的土地利用碳排放日益增长成为城市群可持续发展中的巨大挑战。

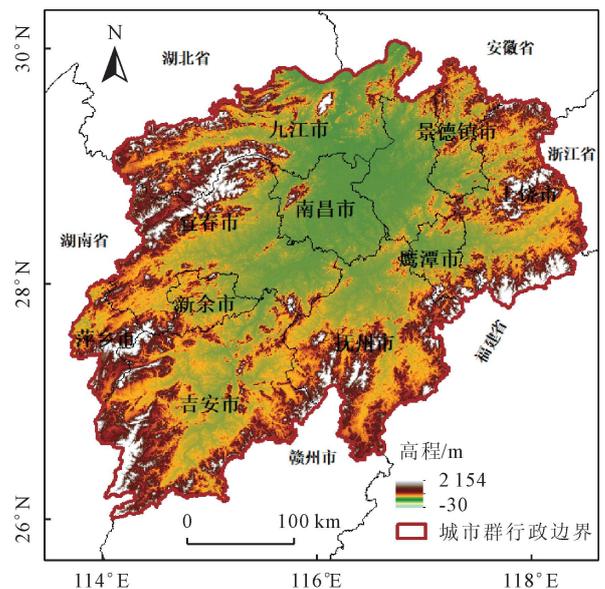


图1 研究区示意图

Fig.1 Schematic map of the study area

1.2 数据来源与处理

本文的数据可分为碳排放核算数据、驱动因素数据和限制转换区域数据,具体如表1所示。根据《土地利用现状分类》(GB/T 21010-2017)和研究区的具体情况,将土地利用数据重新分为耕地、林地、草地、水体、建设用地和未利用土地。坡度由高程数据计算得到。使用欧式距离计算到政府驻地、各级道路和水体的距离。

2 研究方法

2.1 土地利用碳排放核算

本文对土地利用碳排放的核算从碳源碳汇的角度出发,林地、草地、水体、未利用地具有显著的碳吸收能力,被视为碳汇,而耕地、建设用地具有碳排放能力,被视为碳源。使用直接碳排放系数法对耕地、林地、草地、水体和未利用地的碳排放进行核算,计算公式如下:

$$C_A = \sum A_i a_i \quad (1)$$

式中, C_A 代表土地利用的直接碳排放量, t ; A 代表

表 1 数据信息
Table 1 Data information

类别	数据	数据来源	空间分辨率/m	时间分辨率	
碳排放核算数据	土地利用	中国科学院环境科学与数据中心	30	2000-2020年,5 a	
	能源消耗	江西统计年鉴	-	2000-2023年,1 a	
驱动因素数据	NDVI	NASA 地球数据搜索平台	1 000	2020 年	
	土壤类型	科学与数据中心	1 000	-	
	高程	地理空间数据云	90	-	
	坡度				
	年平均降水	国家青藏高原科学数据中心	1 000	2020 年	
	年平均气温				
	限制转换区域数据	人口	worldpop 官网	1 000	2020 年
		GDP	国家地球系统科学数据中心	1 000	2020 年
		到政府驻地的距离	全国地理信息资源国家服务系统	1 000	2020 年
		到一级道路的距离			
到二级道路的距离					
到三级道路的距离					
到水体的距离					
自然保护区	中国国家标本资源平台	1 000	2020 年		

每种土地类型的面积, hm^2 ; a 代表每种土地类型的碳排放系数, t/hm^2 。考虑研究区的地域特点并参考胡宜之等针对环鄱阳湖城市群、黄汉志等针对江西省的碳排放研究^[21, 22], 取上述研究的碳排放系数均值作为本文的碳排放系数。因此, 本文耕地、林地、草地、水体和未利用地的碳排放系数分别为 0.422、-0.644、-0.022、-0.253 和 -0.005 t/hm^2 。

由于建设用地利用方式复杂多样, 其碳排放的核算通常采用 IPCC 碳排放系数法, 间接基于生产生活中使用的化石燃料消耗量及其碳排放系数, 计算公式如下:

$$C_B = \sum B_i \times \theta_i \times \phi_i \quad (2)$$

式中, C_B 代表土地利用的间接碳排放量, t ; B 代表能源的消耗量, t ; θ 表示能源的折标准煤系数, tce/t ; ϕ 表示能源的碳排放系数, t/tce 。根据《江西统计年鉴》中记录的城市各种能源类型的消耗量, 本文选取研究区内的 9 种主要能源, 如表 2 所示。其中, 折标准煤系数来源于《中国能源统计年鉴》, 能源碳排放系数来源于《IPCC 国家温室气体清单指南》。

表 2 能源折标准煤系数及碳排放系数

Table 2 Energy conversion factors for standard coal and carbon emission factors

能源种类	折标准煤系数/($tce \cdot t^{-1}$)	碳排放系数/($t \cdot tce^{-1}$)
原煤	0.714 3	0.755 9
洗精煤	0.9	0.755 9
其他洗煤	0.285 7	0.755 9
焦炭	0.971 4	0.855 0
原油	1.428 6	0.585 7
汽油	1.471 4	0.553 8
煤油	1.471 4	0.571 4
柴油	1.457 1	0.592 1
燃料油	1.428 6	0.618 5

2.2 标准差椭圆

标准差椭圆是一种有效的空间分析方法, 可以从多个维度准确揭示地理要素的空间分布特征和动态趋势, 广泛应用于社会、经济等领域。本研究采用该方法来分析土地利用碳排放的时空迁移轨迹, 计算公式^[23]如下:

$$\bar{X}_w = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \quad \bar{Y}_w = \frac{\sum_{i=1}^n w_i y_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (3)$$

$$\theta = \arctan \left[\frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) + \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n y_i^2 \right)^2 + 4 \left(\sum_{i=1}^n x_i y_i \right)^2}}{2 \sum_{i=1}^n x_i y_i} \right] \quad (4)$$

$$\delta_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i \cos \theta - y_i \sin \theta)^2 / n}, \quad \delta_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i \sin \theta + y_i \cos \theta)^2 / n} \quad (5)$$

式中, (x_i, y_i) 为研究对象的空间位置, (\bar{X}_w, \bar{Y}_w) 为加权平均中心, w_i 为权重, θ 为椭圆方位角, (x_i, y_i) 为研究对象距平均中心的坐标偏差, δ_x 和 δ_y 为 x 轴和 y 轴标准差。

2.3 Markov-PLUS 模型

Markov 模型具有较强的数据预测能力, PLUS 模型能够全面捕捉各种驱动因素对土地利用变化动态

的影响。Markov-PLUS 耦合模型兼具数据预测和空间模拟能力,可以获得更高的仿真精度,对长远期的土地利用变化模拟具有一定的科学性。

2.3.1 PLUS 模型

PLUS 模型由土地扩张分析策略(LEAS)与聚类自主随机种子(CARS)框架相结合。LEAS 使用随机森林算法挖掘每种土地利用类型扩张与各种驱动因素的关系,最终捕捉它们的发展概率以及所有驱动因素对其扩张的贡献程度。CARS 结合多类型随机种子和阈值降低机制,动态呈现土地利用变化过程。其中邻域权重参数代表着不同土地类型的转化难度,本文根据相关研究,将邻域权重值设置在[0,1]范围内^[24],计算公式如下:

$$X_i = \frac{\Delta TA_i - \Delta TA_{\min}}{\Delta TA_{\max} - \Delta TA_{\min}} \quad (6)$$

式中, X_i 为地类*i*的邻域权重参数, ΔTA_i 为研究时段内该地类的变化面积, ΔTA_{\max} 、 ΔTA_{\min} 分别为研究时段内的最大、最小变化面积。

2.3.2 多情景及限制区设置

基于环鄱阳湖城市群的发展趋势和相关政策,通过土地利用数量和土地利用空间转移的约束,模拟预测自然发展、耕地保护和生态优先情景下的土地利用模式。在土地利用数量约束方面,使用 Markov 模型预测 2030 年的各土地利用类型数量。在土地利用空间转移限制方面,设置转换成本矩阵和限制转换区,如表 3 和图 2 所示。

表 3 不同情景下的转换成本矩阵
Table 3 Conversion cost matrix for different scenarios

	自然发展情景						耕地保护情景						生态优先情景					
	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f
a	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
b	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0
c	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0
d	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0
e	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
f	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

注:a~f 分别表示耕地、林地、草地、水体、建设用地和未利用地;其中 1 表示地类可以转换,0 表示地类不能转换。

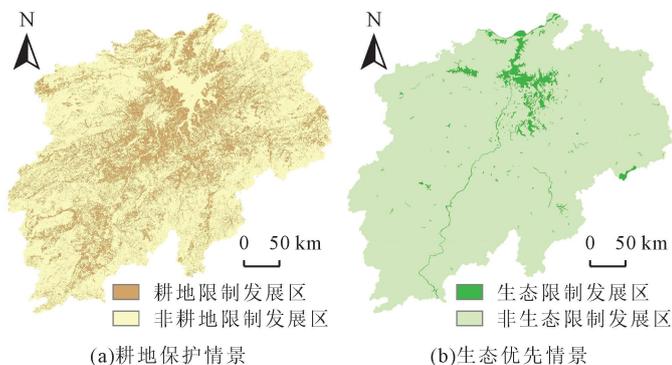


图 2 限制转换区域
Fig.2 Restricted conversion area

(1)自然发展情景:该情景保持现有的土地利用结构变化模式,并保持转移概率不变。

(2)耕地保护情景:该情景以自然发展情景为基础,根据 2024 年中央一号文件精神 and 《全国国土规划纲要》(2016-2030),严格落实耕地保护制度,健全耕地数量、质量、生态“三位一体”保护制度体系,落实新一轮国土空间规划明确的耕地和永久基本农田保护任务,促进土地集约利用。为此,本文参考前人的研究,通过修正 2000-2020 年马尔可夫转移概率矩阵,将耕地转为草地、林地、水体和建设用地的概率降低 30%,未利用地转为耕地的概率增加 30%。研究期内五期均为耕地的部分作为长期稳定耕地。同时参

考《农用地定级规程》取坡度小于 6° 的耕地作为优质耕地,将稳定耕地和优质耕地合并作为耕地限制发展区,如图 2(a)所示。

(3)生态优先情景:该情景考虑环鄱阳湖城市群成为绿色生态走廊战略枢纽,对关键生态区域实施严格的保护措施,遏制碳储存退化,增加林地和草地面积,并限制建筑用地的快速扩张。参照《环鄱阳湖生态城市群规划》(2015-2030),将草地、林地和水体向其他用地类型转移的概率降低 30%,其他用地类型向草地、林地和水体转移的概率增加 20%。同时,为贯彻落实《生态保护补偿条例》中以国家公园为主体的自然保护地体系生态保护补偿机制,将研究区内自然保护区和水体合并作为生态限制发展区,如图 2(b)所示。

2.4 灰色 BP 神经网络

灰色系统理论可对不完备信息系统进行描述、预测、决策和控制,经常作为时间序列预测模型用于经济学、生物科学、医疗保健等领域。该模型建模时所需数据较少,所以它对非线性数据的处理能力较弱。BP 神经网络可以逼近更多的非线性函数,但需要大量的数据,用少量的数据来预测未来的情况是困难的。BP 算法将学习过程分为正向传播和反向传播。

正向传播中各层的顺序为输入、隐藏和输出,通过从预测的样本输出中减去网络输出来计算误差,如果误差没有达到设定的阈值,则使用BP逐层返回到原始路径,并改变每个神经元之间的权重,在连续循环的过程中,直到误差达到预设阈值停止。由于碳排放受非线性函数特征的因素影响,因此本研究选择较少的能源碳排放数据,利用灰色BP神经网络来预测环鄱阳湖城市群的未来间接碳排放。

3 结果与分析

3.1 土地利用动态变化与碳排放轨迹分析

3.1.1 土地利用动态变化

环鄱阳湖城市群2000–2020年土地利用变化如图3,林地和耕地的面积占比始终在50%和30%左右。在所有的土地利用类型中,建设用地的扩张最为显著,面积增加了2 245.90 km²,反映了城市群在过去20年经历了快速城市化。此外,水体面积扩大了350.44 km²,表明对水体采取了强有力的保护措施。相反,耕地、林地、草地和未利用地面积都有一定量的减少。其中,2010–2020年所有土地利用类型的变化比2000–2010年的变化更显著。

从土地利用转移角度看,2000–2020年,耕地是环鄱阳湖城市群建设用地快速扩张的重要来源,其中1 514.47 km²从耕地转换出来。最大面积转换发生在耕地和林地之间,超过1 500 km²。耕地对流出转移的贡献率最高,为40.18%。建设用地对流入转移的贡献

率最高,为28.62%。

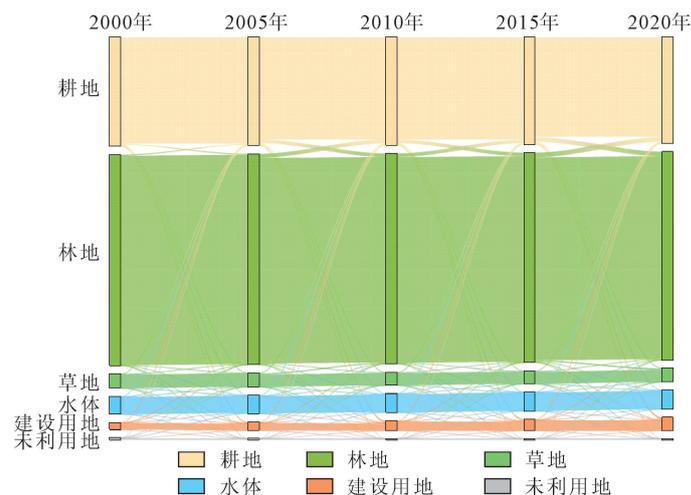


图3 2000-2020年土地利用转移桑基图

Fig.3 Sankey map of land-use transfers, 2000-2020

3.1.2 土地利用碳排放迁移轨迹特征

根据土地利用数据和能源消耗数据,计算各土地类型的碳排放情况,如表4所示。土地利用碳排放作为一个整体呈现出持续增长的趋势,从2000年的1 238.53万t增加到2020年的4 998.77万t。从碳源来看,建设用地是碳源的主要贡献者,由占研究区总碳源的90.63%上升至97.13%。这种转变主要源于2000–2020年耕地面积减少和建设用地面积扩大,导致建设用地碳排放增加。碳汇对区域碳吸收量的贡献显著,在整个研究期间内波动相对较小。碳汇的主要来源为林地,占研究区总碳汇的96%以上,其次是水体、草地和未利用地,它们合起来仅占总量的4%。

表4 2000–2020年环鄱阳湖城市群土地利用碳排放

Table 4 Carbon emissions from land use in the urban agglomeration around Poyang Lake from 2000 to 2020

($\times 10^4$ t)

年份	耕地	林地	草地	水体	建设用地	未利用地	碳源	碳汇	碳排放量
2000年	162.39	-477.97	-1.11	-16.26	1 571.53	-0.05	1 733.92	-495.39	1 238.53
2005年	161.04	-478.09	-1.08	-16.78	2 867.06	-0.03	3 028.10	-495.98	2 532.12
2010年	160.49	-477.19	-1.02	-17.03	4 328.28	-0.03	4 488.77	-495.27	3 993.50
2015年	159.24	-475.85	-1.01	-17.06	4 946.19	-0.03	5 105.44	-493.96	4 611.48
2020年	157.70	-472.27	-1.06	-17.15	5 331.57	-0.03	5 489.28	-490.50	4 998.77

为方便探讨研究区内各城市碳排放的空间格局,本文将土地利用碳排放量划分为5个等级,即低碳排放区(碳排放量 ≤ 100 万t)、较低碳排放区(100万t<碳排放量 ≤ 200 万t)、中碳排放区(200万t<碳排放量 ≤ 400 万t)、较高碳排放区(400<碳排放量 ≤ 800 万t)、高碳排放区(碳排放量 > 800 万t),可视化结果如图4所示。土地利用碳排放量整体表现为“西北部高,东南部低”的分布特征,具有明显的地域集聚发展趋势。2000–2020年土地利用碳排放格局变化显著,较高碳排放区和高碳排放区呈现出由原来的零散分布逐渐过渡为大面积成片式集聚分布态势。九江作为高碳排放区的典

型城市,在2020年达到研究区内碳排放量的最大值,为1 459.84万t。然而抚州在2020年碳排放量仅为21.74万t。因此,应该在积极发展经济的同时注重生态发展,促进地区碳排放平衡。同时,不同地区的碳排放差异也可作为资源分配和政策制定提供有益的指导。

为进一步揭示环鄱阳湖城市群土地利用碳排放重心的迁移轨迹特征,利用标准差椭圆得到2000–2020年的碳排放重心及标准差椭圆,如表5和图5所示。从重心分布来看,2000–2020年环鄱阳湖城市群碳排放重心分布在该区域的几何中心(115°49′34″E, 28°14′48″N)西北方向。这主要是因为西北地区以重

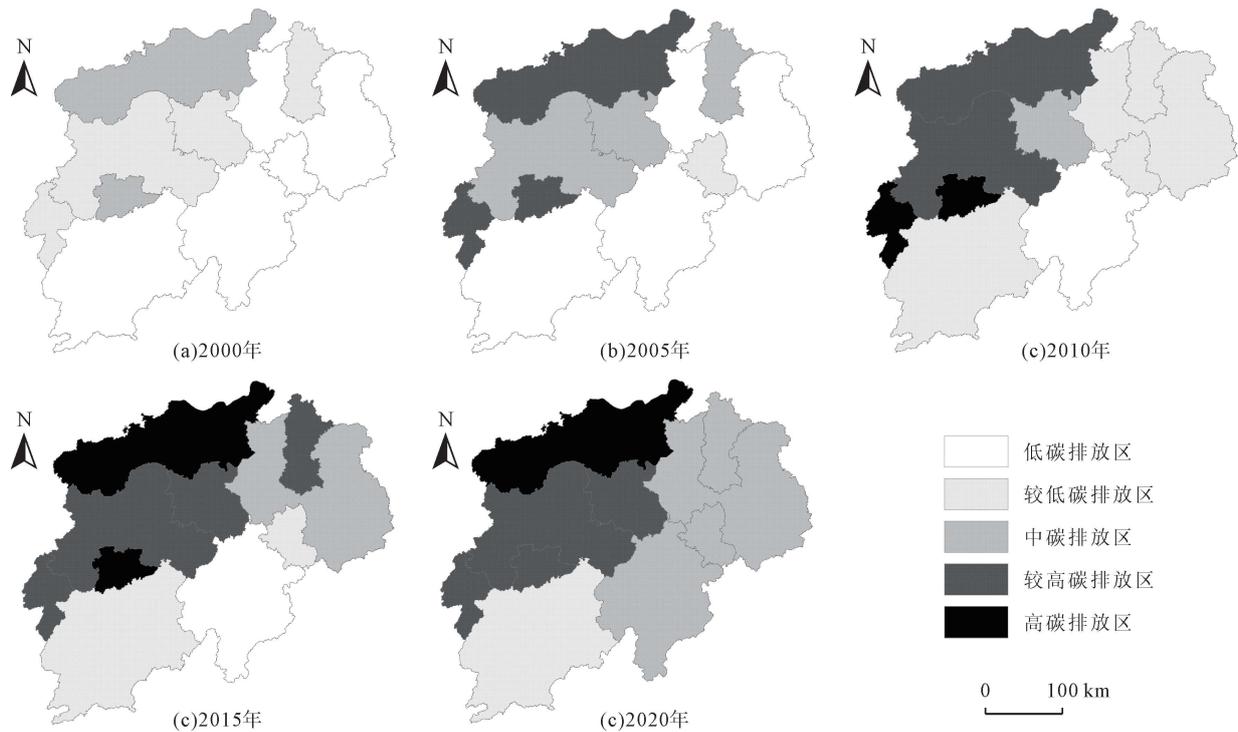


图4 2000-2020年土地利用碳排放等级时空演变特征
Fig.4 Spatiotemporal evolution characteristics of land use carbon emission levels from 2000 to 2020

表5 碳排放标准差椭圆参数

Table 5 Carbon emission standard deviation ellipse parameters

年份	重心迁移				标准差椭圆		
	经度(E)	纬度(N)	距离/km	方向	短轴/km	长轴/km	方位角/°
2000年	115°30'47"	28°29'43"	-	-	74.56	159.99	58.75
2005年	115°27'18"	28°26'12"	9.17	西南	72.58	165.26	56.11
2010年	115°14'35"	28°17'48"	28.22	西南	70.87	166.64	55.69
2015年	115°22'05"	28°24'18"	18.38	东北	74.86	171.56	57.45
2020年	115°29'53"	28°31'52"	20.12	东北	90.35	153.20	54.56

工业为主,能源消耗产生大量的碳排放,使整体碳排放分布中心向西北方向倾斜。从重心移动轨迹来看,碳排放重心总体上呈现由向西南迁移发展为向东北迁移的趋势。重心在2000-2010年向西南累积移动37.39 km,而2010年开始往东北方向移动,2010-2020年重心移动平均速度为3.85 km/a,表明东北部调整区域发展战略对碳排放标准差椭圆和重心分布有一定的影响。

从长半轴来看,长半轴从159.99 km增长到171.56 km后缩减到2020年的153.20 km,表明碳排放在东北-西南方向上先发散后集聚。这是因为2000年初,九江、新余和萍乡作为传统的工业城市,吸引大量的重工业企业集聚,使得碳排放呈现发散的趋势。2010年后由于工业城市进行产业结构、能源结构调整以及技术升级,碳排放发散速度减缓,加上景德镇、上饶地区经济发展迅猛,碳排放量增速较快,最终形成向心集聚。从短轴方向上看,短轴在2000-2010年呈缩短趋势,主要是因为经济发展是碳排放增长的主导

因素之一,南昌市为城市群核心城市,经济发展较好,而周边城市经济基础薄弱,使得碳排放呈向心集聚。2010-2020年,周边城市发展速度加快,社会消费增长带动能源需求扩大,城市能源碳排放量增加,使得碳排放呈发散趋势,短轴随之扩张。

3.2 环鄱阳湖城市群土地利用碳排放预测

3.2.1 多情景土地利用预测

土地利用的变化受到自然和社会因素的影响,本文选择13个驱动因素,利用PLUS模型的LEAS来确定每个因素对土地利用变化的贡献,见图6。在6种地类中,高程对草地、水体和未利用地的扩张影响最大,分别为0.196、0.218和0.384。NDVI对林地和建设用地的扩张贡献最大,分别为0.139和0.191,这表明自然因素对土地利用扩张有重大影响。就社会因素而言,到政府驻地的距离、到一级道路的距离和到二级道路的距离对建设用地扩张影响最大,分别为0.095、0.085和0.078。人口对未利用地的影响最大,为0.116;GDP对草地影响最大,为0.079。

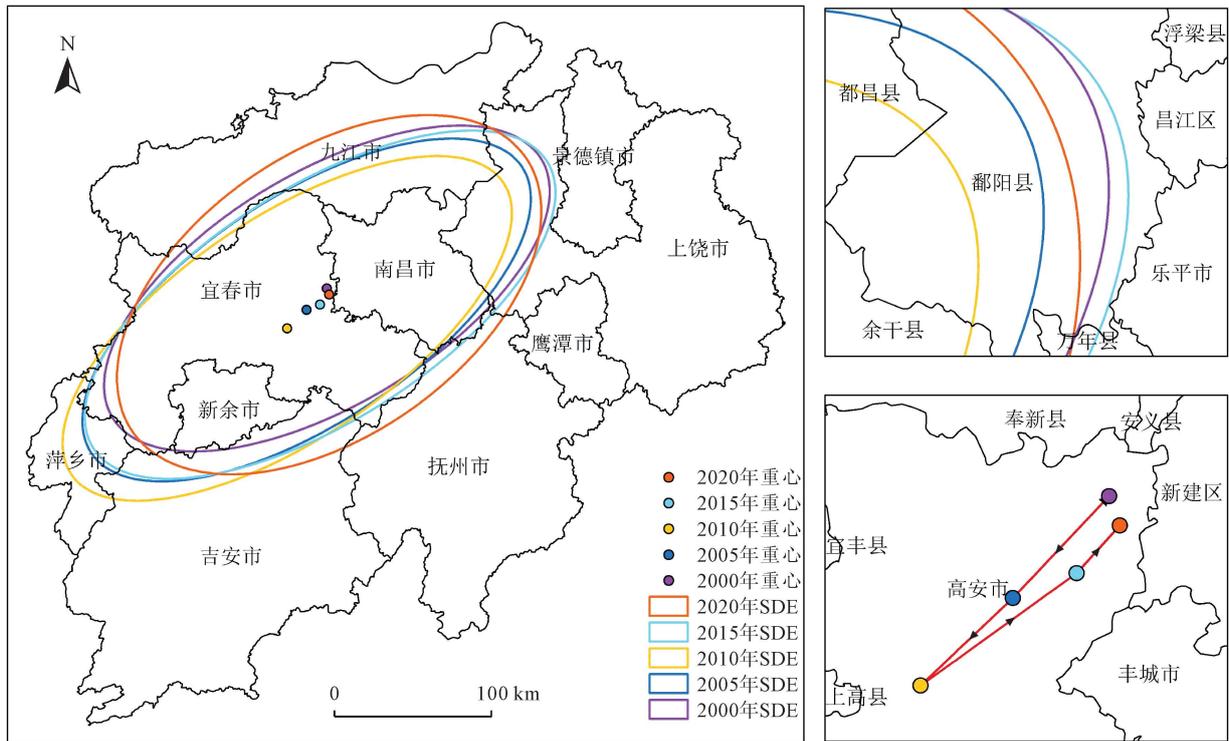


图5 碳排放标准差椭圆及重心迁移轨迹
Fig.5 Carbon emission standard deviation ellipse and center of gravity migration trajectory

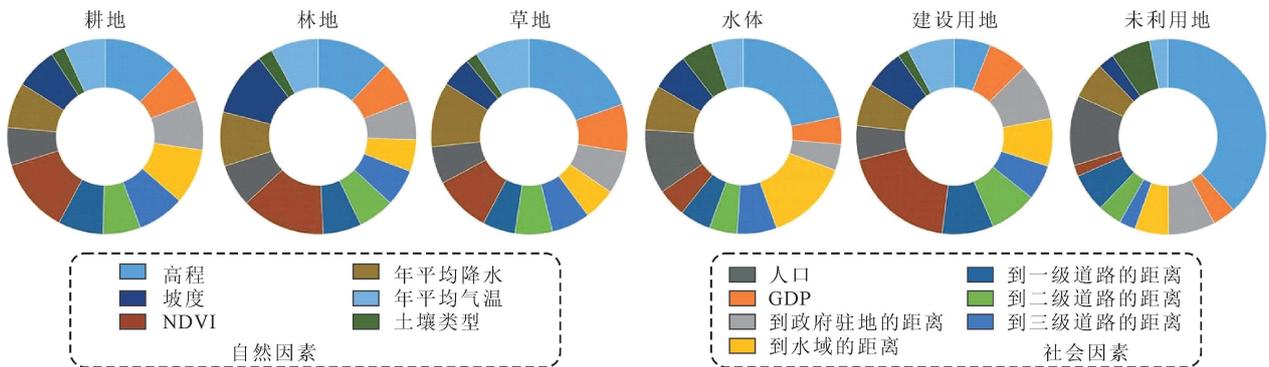


图6 驱动因素贡献分布
Fig.6 Distribution of driver contributions

基于Markov-PLUS模型,以环鄱阳湖城市群2010年的土地利用为起始层,对2020年的土地利用情况进行了模拟,并将模拟结果与2020年真实的土地利用情况进行了比较,采用Kappa和FOM系数用于评估预测结果。在验证结果中,Kappa系数为0.89,总体准确率为94%,FOM系数为0.077,表明PLUS模型生成的结果有较高的置信度,可以用来预测未来的土地利用类型。如图7和表6所示,2030年自然发展、耕地保护和生态优先情景的土地利用模式和面积变化由PLUS模型的CARS得到。自然发展情景下,2030年耕地、林地和未利用地的面积将持续下降,而草地和水体面积将扩大,建设用地面积将迅速增加。建设用地将主要从城市地区向周边延伸,集中在城市群的北部。与2020年相比,耕地保护情景下耕地面积将增加228.36 km²,生态优先情景下林地、草地和水体面积将分别增

加140.77、251.56、153.64 km²。此外,在这3种情景下,草地面积均将扩大,而未利用地面积将略有减少。

3.2.2 间接碳排放预测

基于研究区内各个城市能源类型的碳排放量,利用灰色预测模型对2000-2030年能源碳排放数据进行了模拟预测,随后利用BP神经网络模型反复模拟原始数据的发展趋势,通过多周期实验获得灰色BP神经网络模拟的2000-2030年环鄱阳湖城市群的间接碳排放数据。预测数据与原始数据之间的总体线性回归相关系数R的均值为0.979,表明该模型满足精度要求,预测数据相对可靠,结果如表7所示。

3.2.3 多情景模拟下土地利用碳排放预测

基于土地利用的模拟预测结果和碳排放核算方法,得到多情景模拟预测下2030年环鄱阳湖城市群土地利用碳排放的结果,见表8和表9。由于建设用地

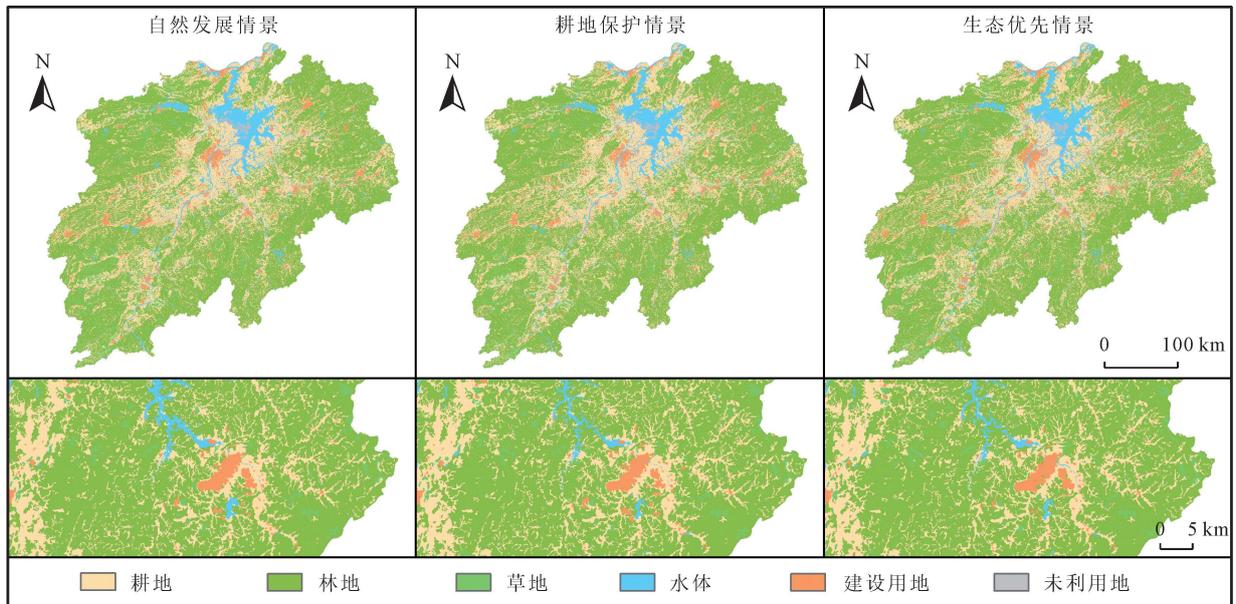


图7 不同发展情景下环鄱阳湖城市群2030年土地利用分布局部细节图

Fig.7 Local details of land use distribution in 2030 in the city cluster around Poyang Lake under different development scenarios

表6 2030年环鄱阳湖城市群多情景模拟下的土地利用量预测

Table 6 Projected land use volume under multi-scenario simulation of urban agglomeration around Poyang Lake in 2030

(km²)

时间	情景	耕地	林地	草地	水体	建设用地	未利用地
2020年	-	37 370.47	73 334.34	4 822.26	6 777.15	4 698.92	538.16
2030年	自然发展	36 826.89	72 591.41	4 998.48	6 822.57	5 777.11	524.84
	耕地保护	37 598.83	72 164.50	4 967.99	6 769.67	5 516.99	523.31
	生态优先	35 983.08	73 475.11	5 073.82	6 930.79	5 568.62	509.87

表7 2000-2030年间接碳排放量关键节点模拟预测结果

Table 7 Results of simulation projections of indirect carbon emissions at key nodes during 2000-2030

(×10⁶ t)

地区	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年	2025年	2030年
南昌	1.79	3.18	3.90	3.97	4.25	4.77	5.34
景德镇	1.47	2.25	2.17	5.00	3.87	4.10	4.11
萍乡	1.90	4.42	8.18	6.65	4.89	4.53	4.53
九江	4.31	6.10	7.98	10.47	15.07	17.83	18.12
新余	2.57	4.60	8.19	8.15	7.72	7.93	6.57
鹰潭	0.91	1.27	1.11	1.98	2.27	2.30	2.29
吉安	0.31	1.34	2.46	2.38	2.68	2.88	2.89
宜春	1.90	4.24	6.56	7.63	6.85	6.79	6.80
抚州	0.17	0.26	0.23	0.27	2.79	3.31	3.32
上饶	0.39	1.00	2.51	2.95	2.93	3.06	3.07

表8 2030年环鄱阳湖城市群不同土地利用类型碳排放的多情景预测

Table 8 Multi-scenario projections of carbon emissions from different land use types in the urban agglomeration around Poyang Lake in 2030 (×10⁶ t)

时间	情景	耕地	林地	草地	水体	建设用地	未利用地	碳排放量
2020年	-	157.70	-472.27	-1.06	-17.15	5 331.57	-0.03	4 998.77
2030年	自然发展	155.41	-467.49	-1.10	-17.26	6 206.95	-0.03	5 876.48
	耕地保护	158.67	-464.74	-1.09	-17.13	6 206.95	-0.03	5 882.63
	生态优先	151.85	-473.18	-1.12	-17.53	6 206.95	-0.03	5 866.94

是碳排放主要的来源,并且不同情景中建设用地碳排放量相同,导致不同情景下土地利用碳排放量差异不大。总体而言,在耕地保护情景下,环鄱阳湖城市群的碳排放量最高,为5 882.63万t。其中自然发展情景下,土地利用碳排放量较2020年增加17.56%。结合各土地利用类型的数量可以看出,在耕地保护情景

下,耕地面积的大幅增加占据了生态用地,其中林地、水体的面积大幅度减少,耕地碳排放在此情景下达到最高,为158.67万t,因此土地利用碳排放量略高。在生态保护情景下,由于严格控制生态用地转换为其他类型用地,生态用地面积增加,此情景下碳汇最高为491.86万t。

表 9 2030 年鄱阳湖城市群不同城市土地利用碳排放的多情景预测

Table 9 Multi-scenario projection of carbon emissions from land use in different cities of Poyang Lake City Cluster in 2030

($\times 10^6$ t)

地区	2030 年自然发展			2030 年耕地保护			2030 年生态优先		
	碳源	碳汇	碳排放量	碳源	碳汇	碳排放量	碳源	碳汇	碳排放量
南昌	549.47	-10.03	539.44	549.76	-10.01	539.74	548.93	-10.44	538.48
景德镇	416.58	-22.91	393.67	416.73	-22.70	394.03	416.46	-23.19	393.28
萍乡	456.80	-16.66	440.14	456.95	-16.47	440.48	456.74	-16.96	439.78
九江	1 833.51	-68.45	1 765.05	1 834.00	-68.40	1 765.60	1 832.98	-69.34	1 763.65
新余	661.94	-10.40	651.54	662.05	-10.30	651.75	661.82	-10.59	651.23
鹰潭	234.23	-12.96	221.27	234.33	-12.85	221.47	234.08	-13.18	220.90
吉安	316.37	-101.76	214.61	316.79	-101.68	215.11	315.50	-103.91	211.59
宜春	706.27	-69.73	636.54	706.82	-69.07	637.75	705.75	-70.32	635.42
抚州	352.47	-82.18	270.29	353.06	-81.46	271.60	352.34	-82.58	269.76
上饶	332.21	-90.79	241.42	332.65	-90.04	242.61	331.72	-91.36	240.37

从城市角度来看,在自然发展、耕地保护和生态优先的情景中,九江均为碳源最高的地区。鹰潭在生态优先情景下碳源最低,为 234.08 万 t。吉安在 3 个情景下一直都是碳汇最高的城市,其碳汇分别为 101.76 万 t、101.68 万 t、103.91 万 t。南昌在耕地保护情景下碳汇最低,为 10.01 万 t。通过对比 2020 年环鄱阳湖城市群的碳排放结果,可以发现九江和新余一直是碳排放比例最高的 2 个城市。宜春的碳排放量也在逐步增加,将成为继九江和新余之后碳排放量最高的城市。这 3 个城市将是“源头减排”的重点地区。九江、新余和宜春的林地最容易受到不同规划方法的影响,导致碳汇发生相当大的变化,表明这 3 个城市的林地需要保护,应尽可能避免将其转换为其他土地利用类型。

建设用地的碳排放是碳源的主要组成部分,能源消耗的变化在一定程度上决定碳排放的大小。因此,如何在未来规划中控制建设用地能源的消耗量,对于双碳目标的实现尤为重要。同时,碳源的数量远远高于碳汇的数量,一方面表明碳源对碳排放的影响远远大于碳汇,“减少源”比“增加汇”能更快地减少碳排放;另一方面表明环鄱阳湖城市群目前的情况与实现碳中和的目标仍有很大差距,有效增加碳汇的数量是可持续发展在达到碳峰值后实现碳中和的更重要的手段。

4 讨论

在快速城市化、人口增长和自然环境变化的背景下,环鄱阳湖城市群 2000—2020 年经历了大规模的城市扩张,土地利用模式的变化导致区域碳排放呈上升趋势。学者们^[25]一致认为,近年来建设用地的快速扩张以及耕地、林地的大规模转化极大地促进了碳排放的增加和温室效应。保护生态用地和适当控制建设用地的扩张已成为实现双碳目标的必要途径。其中,九江、新余和萍乡作为传统的工业城市,对区域碳排

放量贡献显著,然而维持这种状况不符合该地区碳中和的目标。因此,这些城市的工业和能源结构必须改变,除了提高化石能源开发的效率,还可以开发太阳能、热能和风能资源,通过逐步从传统的不可再生能源发展转向可再生能源发展,以实现区域碳减排目标。

与传统的土地利用研究相比,本文从多情景的角度分析不同土地利用模式的碳排放,为未来的土地利用发展提供方向。在土地利用碳排放情景模拟中,比较自然发展、耕地保护和生态优先情景之间的土地利用模式差异,生态保护情景下的土地利用碳排放最少,主要是该情景下的生态用地面积较大。耕地保护情景下土地利用碳排放最多,是因为本研究将耕地视为碳源,限制其向外转移后,对生态用地面积产生了负面影响,导致土地利用碳排放持续增加。同时研究表明建设用地对碳排放有显著影响,因此在增加碳汇的同时,还需要保证建设用地上能源消耗不会大幅增加,一些学者通过土地利用模拟得出了类似的结论^[26]。从方法论的角度来看,PLUS 模型作为一种相对较新的土地利用模拟预测模型,已经得到了许多学者的认可。本研究使用灰色 BP 神经网络预测能源,弥补了使用单一模型预测造成的误差,结合土地利用模拟预测技术,可以在更好地预测研究区未来的碳排放。

本研究中用于模拟预测土地利用的驱动因素仅包括社会经济和自然因素,但政策调整对土地利用也有影响。由于政策因素难以获得,本研究没有考虑这一驱动因素。同时本文多情景预测结合了国家空间规划提取限制转换区域,结果表明土地利用规划会影响碳排放。

5 结论

本研究基于标准差椭圆分析、Markov-PLUS 模型和灰色 BP 神经网络,分析了 2000—2020 年环鄱阳

湖城市群土地利用碳排放的变化和迁移轨迹,并对2030年土地利用碳排放进行多情景预测。

(1)2000–2020年,耕地、林地、草地和未利用地面积呈减少的趋势,其中耕地是建设用地快速扩张的重要来源。土地利用碳排放从1 238.53万t增加到4 998.77万t,建设用地和林地分别为碳源和碳汇的主要贡献者。

(2)碳排放重心分布在以重工业发展为主的城市群西北部,建设用地能源结构的改变会导致重心迁移,迁移方向由西南变为东北,2000–2010年和2010–2020年分别累计迁移37.39 km和38.50 km。

(3)Markov–PLUS模型和灰色BP神经网络对环鄱阳湖城市群土地利用碳排放有良好的模拟预测效果。多情景预测结果表明,九江、新余和宜春是未来碳源削减的重点城市,限制建设用地扩张、调整能源结构和保护林地是实现双碳目标的最佳和最快途径。

[参考文献]

- [1] 陈嘉诚,罗志军,罗媛. 基于低碳导向的南昌市土地利用模拟与优化调控研究[J]. 水土保持通报, 2023,43(5):365–373.
Chen Jiacheng, Luo Zhijun, Luo Yuan. Research on land use simulation and optimization regulation in Nanchang City based on low-carbon orientation[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(5):365–373.
- [2] Houghton R A. The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850–1990[J]. Tellus B, 1999,51(2):298–313.
- [3] Ye B, Jiang J J, Li C S, et al. Quantification and driving force analysis of provincial-level carbon emissions in China [J]. Applied Energy, 2017,198:223–238.
- [4] 陈怡,凌莉,古圳威,等. 陕西省碳排放时空格局演变及其影响因素[J]. 中国环境科学, 2024,44(4):1826–1839.
Chen Yi, Ling Li, Gu Zhenwei, et al. Spatial-temporal pattern evolution of carbon emissions in Shaanxi Province and its influencing factors[J]. China Environmental Science, 2024,44(4):1826–1839.
- [5] Carpio A, Ponce-Lopez R, Lozano-García D F. Urban form, land use, and cover change and their impact on carbon emissions in the Monterrey Metropolitan area, Mexico[J]. Urban Climate, 2021,39:100947.
- [6] Hong C P, Zhao H Y, Qin Y, et al. Land-use emissions embodied in international trade[J]. Science, 2022, 376(6593): 597–603.
- [7] 韩方红,高凡,何兵,等. 1990–2020年阿克苏河流域土地利用碳排放时空轨迹与影响因素[J]. 环境科学, 2024,45(6): 3297–3307.
Han Fanghong, Gao Fan, He Bing, et al. Exploring the spatial and temporal trajectories of land use carbon emissions and influencing factors in the Aksu River Basin from 1990 to 2020[J]. Environmental Science, 2024,45(6):3297–3307.
- [8] 张娜,孙芳城,胡钰苓,等. 长江经济带三大城市群土地利用碳排放的区域差异及空间收敛性[J]. 环境科学, 2024,45(8):4656–4669.
Zhang Na, Sun Fangcheng, Hu Yuling, et al. Regional difference and spatial convergence of land use carbon emissions in three urban agglomerations of Yangtze River Economic Belt[J]. Environmental Science, 2024,45(8):4656–4669.
- [9] Kuang B, Lu X H, Zhou M, et al. Provincial cultivated land use efficiency in China: empirical analysis based on the SBM-DEA model with carbon emissions considered[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2020, 151: 119874.
- [10] Sun W, He Y J, Chang H. Regional characteristics of CO₂ emissions from China's power generation: affinity propagation and refined laspeyres decomposition[J]. International Journal of Global Warming, 2017,11(1):38.
- [11] Liu C X, Xu R, Xu K J, et al. Carbon emission effects of land use in chaobai river region of Beijing–Tianjin–Hebei, China[J]. Land, 2023,12(6):1168.
- [12] Román R, Cansino J M, Rodas J A. Analysis of the main drivers of CO₂ emissions changes in Colombia (1990–2012) and its political implications[J]. Renewable Energy, 2018, 116:402–411.
- [13] Meng Q X, Zheng Y N, Liu Q, et al. Analysis of spatiotemporal variation and influencing factors of land-use carbon emissions in nine provinces of the Yellow River Basin based on the LMDI model[J]. Land, 2023,12(2):437.
- [14] Wu Y Z, Shen J H, Zhang X L, et al. The impact of urbanization on carbon emissions in developing countries: a Chinese study based on the U–Kaya method[J]. Journal of Cleaner Production, 2016,135:589–603.
- [15] 王柯文,秦见,马海涛. 基于CA–Markov模型的重庆西部新城城市扩张时空演化模拟与生态响应[J]. 中国科学院大学学报, 2023,40(4):496–505.
Wang Kewen, Qin Jian, Ma Haitao. Spatio-temporal evolution simulation and ecological response of new city expansion in western Chongqing based on CA–Markov model[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2023,40(4):496–505.
- [16] 顾汉龙,马天骏,钱凤魁,等. 基于CLUE–S模型县域土地利用情景模拟与碳排放效应分析[J]. 农业工程学报, 2022,38(9):288–296.
Gu Hanlong, Ma Tianjun, Qian Fengkui, et al. County land use scenario simulation and carbon emission effect analysis using CLUE–S model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022,38(9):288–296.
- [17] Li L, Huang X J, Yang H. Optimizing land use patterns to

- improve the contribution of land use planning to carbon neutrality target[J]. *Land Use Policy*, 2023,135:106959.
- [18] Liang X, Guan Q F, 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.
- [19] 孙方虎,方凤满,洪炜林,等. 基于 PLUS 和 InVEST 模型的安徽省碳储量演化分析与预测[J]. *水土保持学报*, 2023,37(1):151-158.
- Sun Fanghu, Fang Fengman, Hong Weilin, et al. Evolution analysis and prediction of carbon storage in Anhui Province based on PLUS and InVEST model[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023,37(1):151-158.
- [20] 陈理庭,蔡海生,张婷,等. 基于 Markov-FLUS 模型的饶河流域土地利用多情景模拟分析[J]. *生态学报*, 2022,42(10):3947-3958.
- Chen Liting, Cai Haisheng, Zhang Ting, et al. Multi-scenario simulation analysis of land use in Raohe River Basin based on Markov-FLUS model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(10):3947-3958.
- [21] 胡宜之,余敦. 环鄱阳湖城市群土地利用碳排放传导效应及预测[J]. *水土保持研究*, 2024,31(2):342-353.
- Hu Yizhi, Yu Dun. Transmission effect and prediction of land use carbon emissions in urban agglomeration around Poyang Lake[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024,31(2):342-353.
- [22] 黄汉志,贾俊松,张振旭. 江西县域土地利用变化碳排放时空演变及其影响因素[J]. *生态学报*, 2023,43(20):8390-8403.
- Huang Hanzhi, Jia Junsong, Zhang Zhenxu. Spatiotemporal pattern evolution and influencing factors of land-use carbon emissions in counties, Jiangxi Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023,43(20):8390-8403.
- [23] Wu J S, Jia P, Feng T, et al. Uncovering the spatiotemporal impacts of built environment on traffic carbon emissions using multi-source big data[J]. *Land Use Policy*, 2023, 129: 106621.
- [24] 牛统莉,熊立华,陈杰,等. 基于 PLUS 模型的长江流域土地利用变化模拟与多情景预测[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2024,57(02):129-141, 151.
- Niu Tongli, Xiong Lihua, Chen Jie, et al. Land use simulation and multi-scenario prediction of the Yangtze River Basin based on PLUS model[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2024, 57(02): 129-141, 151.
- [25] 廖祥,杨鑫,牛振生. 成渝城市群陆地碳排放时空变化及效应研究[J]. *环境科学与技术*, 2023,46(1):211-225.
- Liao Xiang, Yang Xin, Niu Zhensheng. Spatio-temporal changes and effects on terrestrial carbon emission in Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023,46(1):211-225.
- [26] Liu X P, Wang S J, Wu P J, et al. Impacts of urban expansion on terrestrial carbon storage in China[J]. *Environmental Science and Technology*, 2019,53(12):6834-6844.