

环鄱阳湖城市群土地利用碳排放传导效应及预测

胡宜之, 余敦

(江西农业大学 国土资源与环境学院, 南昌 330045)

摘 要: [目的] 量化地类转化视角下土地利用碳传导效应, 预测环鄱阳湖城市群未来土地利用碳排放趋势, 并为区域低碳土地利用管理提供决策依据。[方法] 基于 2000—2020 年环鄱阳湖城市群土地利用碳排放变化结果, 构建碳传导效应测度模型揭示土地利用转移内部碳排放变化情况, 并借助 FLUS-Markov 模型和 GM-Markov 模型对未来土地利用碳排放进行了预测。[结果] 2000—2020 年环鄱阳湖城市群共有 $1.01 \times 10^4 \text{ km}^2$ 土地发生转化, 耕地与林地间的相互转化以及耕地转为建设用地最为活跃。2000—2020 年环鄱阳湖城市群土地利用净碳排放由 $8.79 \times 10^6 \text{ t}$ 增至 $3.63 \times 10^7 \text{ t}$, 碳源/碳汇比值逐年上升, 其中, 建设用地为主要碳源, 林地为主要碳汇。不同时期土地利用碳传导效应均表现为碳排放, 且呈先增后减态势, 研究期间共产生 $4.05 \times 10^7 \text{ t}$ 碳排放, 主要由耕地、林地和水域向建设用地转化引致。2025 年、2030 年、2035 年环鄱阳湖城市群土地利用碳排放预测结果为 $4.13 \times 10^7 \text{ t}$, $4.69 \times 10^7 \text{ t}$ 和 $5.39 \times 10^7 \text{ t}$ 。[结论] 未来环鄱阳湖城市群土地利用碳排放仍会持续增加, 减排重心应集中在减少建设用地碳源和增加林地碳汇两方面。

关键词: 土地利用碳排放; 碳传导效应; FLUS-Markov 模型; GM-Markov 模型; 环鄱阳湖城市群

中图分类号: F301.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)02-0342-12

Transmission Effect and Prediction of Land Use Carbon Emissions in Urban Agglomeration Around Poyang Lake

Hu Yizhi, Yu Dun

(College of Land Resources and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

Abstract: [Objective] The purposes of the study are to quantify the land use carbon conduction effect from the perspective of land type transformation, to predict the future land use carbon emission trend of the urban agglomeration around Poyang Lake, and to provide a decision-making basis for regional low-carbon land use management. [Methods] Based on the results of carbon emissions change of land use in the urban agglomeration around Poyang Lake from 2000 to 2020, a carbon transmission effect measurement model was constructed to reveal the change of internal carbon emissions of land use transfer, and the FLUS-Markov model and GM-Markov model were used to predict the future carbon emissions of land use. [Results] From 2000 to 2020, a total of $1.01 \times 10^4 \text{ km}^2$ land in the urban agglomeration around Poyang Lake was transformed, and the mutual transformation between cultivated land and forestland and the conversion of cultivated land to construction land were the most active. From 2000 to 2020, the net carbon emissions from land use of urban agglomeration around Poyang Lake increased from $8.79 \times 10^6 \text{ t}$ to $3.63 \times 10^7 \text{ t}$, and the carbon source/sink ratio increased year by year. Among them, construction land was the main carbon source and forestland was the main carbon sink. The carbon transmission effect of land use in different periods showed carbon emissions, which increased first and then decreased. A total of $4.05 \times 10^7 \text{ t}$ carbon emission was generated during the

收稿日期: 2023-04-12

修回日期: 2023-04-24

资助项目: 江西省社会科学基金(20GL08); 江西省高校人文社会科学研究项目(GL19128); 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ210453)

第一作者: 胡宜之(1998—), 男, 河南信阳人, 硕士研究生, 研究方向为土地资源管理。E-mail: jxau_hyz9800@163.com

通信作者: 余敦(1975—), 男, 江西安义人, 博士, 教授, 主要从事土地资源管理与利用研究。E-mail: jxauyd@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

study period, which was mainly caused by the transfer of farmland, forestland and water area to construction land. In 2025, 2030 and 2035, the carbon emissions from land use of the urban agglomeration around Poyang Lake will be 4.13×10^7 t, 4.69×10^7 t and 5.39×10^7 t, respectively. [Conclusion] In the future, the carbon emissions from land use in urban agglomeration around Poyang Lake will continue to increase. The focus of emission reduction should be on reducing the carbon sources of construction land and increasing the carbon sinks of forestland.

Keywords: land use carbon emission; carbon conduction effect; FLUS-Markov model; GM-Markov model; urban agglomeration around Poyang Lake

由碳排放增加引起的全球气候变暖被视作 21 世纪人类面临的最严峻的环境挑战之一^[1]。已有研究表明,全球土地利用碳排放约占总碳排放的 1/3,其中建设用地扩张对净碳排放的边际贡献高达 3.99,是仅次于化石能源燃烧的第二大碳排放源^[2]。近 20 年来中国土地利用碳排放增幅约 11.91 Gt,土地利用碳排放呈逐年增长和集聚态势,中国已成为世界上碳排放最大的国家,因此,减碳减排已成为生态文明建设的核心任务^[3]。党的二十大报告也指出,要协同推进降碳、减污、扩绿、增长,推进生态优先、节约集约、绿色低碳发展。而城市群作为推动区域板块之间融合互动发展的着力点,在促进区域低碳化发展过程中发挥关键纽带作用^[4]。因此,针对城市群层面开展土地利用碳排放研究,对制定区域差异化减排政策、促进区域绿色可持续发展具有重要指导意义。

土地利用碳排放已成为社会经济发展的重大约束,逐渐引起学界的高度关注。现有关于土地利用碳排放的研究内容多以碳排放核算为基础,总体上由微观尺度上土壤碳和植被碳测算,过渡至中观尺度上碳排放效应机理探析,进而发展到宏观尺度上减排政策调控,主要集中在时空格局^[5]、影响因素^[6]、脱钩效应^[7]、碳补偿价值^[8]和趋势预测等^[9]方面。就研究主体而言,相关研究已从土地利用延伸至经济发展、生态保护、产业转型以及国土开发等领域,主要表现为探究多种因素主体对土地利用碳排放的影响或二者之间的耦合关系。如 Shen 等^[10]基于 GIS 分析法阐明了土地利用碳排放增长与经济发展的关系;李竹等^[11]运用 Granger 因果检验法揭示了不同省域碳平衡能力与城镇化的互动关系。此外,研究尺度上逐渐多样化,由独立的行政单元拓展至城市群、流域和经济带等发展战略区域,涵盖国家^[12]、省域^[13]、市域^[14]和县域等^[15]尺度。其中,预测作为一种系统仿真模拟的动态过程,已成为研究热点。针对土地利用模拟和碳排放预测的方法包括 FLUS 模型^[16]、Markov 模型^[17]、SD 模型^[18]和 IPAT 模型^[19]等。综上所述,丰硕的成果为开展土地利用碳排放研究奠定了坚实的

理论基础,但仍存在一定的拓展空间:(1) 部分研究在研讨土地利用对碳排放效应作用机理时,多从整体增减角度考虑碳排放的动态变化,对地类转化导致的系统内部碳传导效应研究较为鲜有;(2) 部分研究在预测土地利用碳排放时,多基于数理统计方法进行总量预测,对土地利用格局、能源消费结构等作用影响分析不足,预测结果的可靠性有待提升。

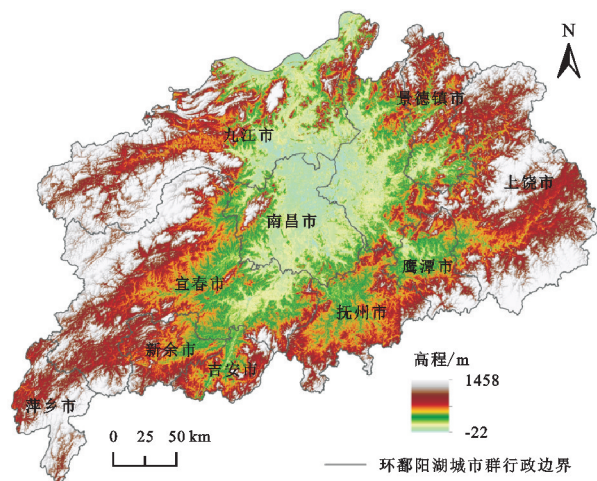
环鄱阳湖城市群作为典型的湖域地区具有完整的土地生态系统和活跃的能源消费机制。随着近年来经济快速发展,建设用地扩张挤占农用地破坏了土地生态系统的功能完整性,能源消费水平持续攀升造成了大量碳排放污染。据统计资料,2000—2020 年建设用地扩张 2 039.4 km²,能源消费增加 6.22×10^7 t,但由此引致的土地利用碳传导效应及变化趋势尚未明晰。基于此,本研究在估算土地利用碳排放变化的基础上,构建碳传导效应测度模型揭示城市群内部地类转化引起的碳传导差异,并采用 FLUS-Markov 模型和 GM-Markov 模型分别对 2025 年(“十四五”规划目标年)、2030 年(碳达峰目标年)和 2035 年(远景目标年)土地利用格局和能源消费结构进行模拟验证,以实现对研究区土地利用碳排放的趋势预测。研究结果可为环鄱阳湖城市群优化土地资源配置、降低土地减排压力提供智力支撑,也可为中国实现碳达峰碳中和目标和绿色低碳高质量发展提供参考借鉴。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

环鄱阳湖城市群位于江西省中北部($26^{\circ}57'—30^{\circ}04'N$, $113^{\circ}34'—118^{\circ}28'E$),地势平缓、水网稠密且多为湖滨平原,林地占比超过 50%,总面积 9.23×10^4 km²,包括南昌市、景德镇市等 10 个地级市(图 1)。2020 年末地区生产总值 19 459.89 亿元,约占全省的 75.74%,人口总数 3 109.97 万人,城镇化率达 61.67%。该区域作为中国重要的生态功能保护区,自然资源丰富,区位优势显著,在长江流域生态安全格局维护和绿色低

碳发展中发挥重要样板作用。随着中部崛起、长江中游城市群等区域发展战略的实施与推进,环鄱阳湖城市群现代化进程也在不断加快,建设用地持续扩张,能源消费强度增大,由此引致的土地利用碳排放日益增长成为区域高质量发展中亟待解决的核心议题。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2020)4619 号的标准地图制作,底图未做修改,下图同。

图 1 环鄱阳湖城市群区位

Fig. 1 Location of urban agglomeration around Poyang Lake

1.2 数据来源

本研究以 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年为时间节点,涉及的基础数据包括土地数据、

地形数据、气象数据、水文数据、交通数据以及统计数据。具体信息见表 1。

2 研究方法

2.1 土地利用碳排放估算

土地利用碳排放估算主要从碳源和碳汇两个方面考虑。基于《土地利用现状分类》(GB/T21010—2017)说明,并结合环鄱阳湖城市群地域特点及发展导向,将研究区土地利用类型重分类为耕地、林地、草地、水域、未利用地和建设用地。林地、草地、水域和未利用地因具有碳吸收功能视为碳汇,而耕地在农业生产活动时表现为碳源,在作物生长期间表现为碳汇,考虑已有研究和研究区实际,耕地利用碳变化主要表现为净碳排放。因此,采用直接系数估算法对上述 5 类土地的碳排放(碳吸收)进行估算,碳排放(碳吸收)系数见表 2,其中正值表示碳排放,负值表示碳吸收(下同)。计算公式如下:

$$E_L = \sum_{m=1}^5 S_m \times \delta_m \quad (1)$$

式中: E_L 为直接土地利用碳排放(10^4 t); m 为地类,包括耕地、林地、草地、水域和未利用地; S_m 为地类 m 的面积(km^2); δ_m 为地类 m 的碳排放(碳吸收)系数 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$]。

表 1 数据类型、预处理及来源

Table 1 Data type, preprocessing and source

数据类型	数据名称	数据预处理	数据来源
土地数据	行政边界	裁剪、拼接	自然资源部标准地图服务网站
	土地覆被变化	重分类为耕地、林地、草地、水域、未利用地和建设用地	中国科学院资源环境科学与数据中心
地形数据	高程	基于栅格处理进行拼接、裁剪等	地理空间数据云
	坡度	基于高程提取	地理空间数据云
气象数据	降水量、气温	重采样为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 分辨率	中国气象科学数据共享服务网
水文数据	距河流距离	基于欧式距离工具生成	国家基础地理信息中心
交通数据	距高速和铁路距离	基于欧式距离工具生成	国家基础地理信息中心
	GDP	基于 Kriging 法插值生成栅格	历年各市统计年鉴
	人口密度	基于 Kriging 法插值生成栅格	历年各市统计年鉴
统计数据	能源消费量	直接使用	历年《江西统计年鉴》
	折标准煤系数	直接使用	《中国能源统计年鉴 2020》
	能源碳排放系数	直接使用	《IPCC2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》

建设用地具有碳排放功能可视为碳源,其承载的碳排放主要来源于各种能源消费,采用 IPCC 核算框架对间接土地利用碳排放进行估算,能源折标准煤系数及碳排放系数见表 3。计算公式如下:

$$E_C = \sum_{j=1}^9 T_j \times \theta_j \quad (2)$$

式中: E_C 为建设用地碳排放(10^4 t); j 为能源种类,包括原煤、洗精煤、其他洗煤、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油和

燃料油; T_j 为能源 j 折算为标准煤后的消耗量(10^4 t); θ_j 为能源 j 的碳排放系数(10^4 t/ 10^4 t 标准煤)。

鉴于区县层面的能源消费数据难以获取,故基于上述方法测算江西省间接土地利用碳排放,同时借鉴王勇等^[25]的研究成果,选取人口、GDP、历史碳排放(公平性原则)、碳排强度(效率性原则)和第三产业比重(可行性原则)等指标构建区域碳排放权分配体系,

将省域碳排放科学合理地分配至环鄱阳湖城市群。

表 2 地类碳排放(碳吸收)系数
Table 2 Carbon emission (Carbon absorption)
coefficient of various land type

类别	土地利用 类型	碳排放 (碳吸收)系数	单位	参考 来源
碳汇	林地	-0.0644	kg/(m ² ·a)	王刚等 ^[20]
	草地	-0.0021	kg/(m ² ·a)	孙赫等 ^[21]
	水域	-0.0253	kg/(m ² ·a)	段晓男等 ^[22]
	未利用地	-0.0005	kg/(m ² ·a)	石洪昕等 ^[23]
碳源	耕地	0.0422	kg/(m ² ·a)	张玥等 ^[24]

2.2 土地利用碳传导效应测度

土地利用碳传导效应是指土地利用过程中由地类面积增减引起的内部碳转移,包括碳转出和碳转入两个过程^[17]。碳传导效应由地类转化前后碳排放(碳吸收)能力的差异以及转化的面积决定。其中,碳排放(碳吸收)能力由对应系数表征,转化面积由土地利用转移矩阵确定。计算公式如下:

$$S_{mn} = \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1N} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{N1} & \cdots & S_{NN} \end{bmatrix} \quad (3)$$

表 3 能源折标准煤系数及碳排放系数

Table 3 Conversion coefficient of energy into standard coal and carbon emission coefficient

能源种类	原煤	洗精煤	其他洗煤	焦炭	原油	汽油	煤油	柴油	燃料油
折标准煤系数	0.7143	0.9001	0.2857	0.9714	1.4286	1.4710	1.4714	1.4571	1.4286
碳排放系数	0.7559	0.7559	0.7559	0.855	0.5857	0.5538	0.5714	0.5921	0.6185

2.3 土地利用碳排放趋势预测

2.3.1 FLUS-Markov 模型 FLUS-Markov 模型是 Liu 等^[26]在 GeoSOS 软件上拓展衍生出的一种土地利用模拟模型,该模型主要通过交互耦合 FLUS 模型处理土地系统空间变化的能力和 Markov 模型预测土地类型数量特征的特点来实现未来土地利用格局模拟。由于土地利用是一种受复合因素驱动的动态变化过程,故参照相关研究,现从自然因素(高程、坡度、降水量和气温)、社会经济因素(GDP 和人口密度)、邻域因素(距高速距离、距铁路距离和距河流距离)方面选取 9 个驱动因子用于构建适宜性图集。模拟过程主要包括适宜性概率估计和元胞自动机空间模拟两部分,相关公式在此不再赘述。

传统土地利用模拟多采用总体精度(overall accuracy,OA)和 Kappa 系数等指标进行精度验证,验证结果具有一定的局限性。本研究在此基础上引入 Pontius 等^[27]提出的 FoM 系数来评估模拟的准确性,FoM 系数在较小范围内越大表明模拟效果越好,该范围可取 0~0.3。计算公式如下:

$$FoM = B / (A + B + C + D) \quad (7)$$

式中: N 为地类数目; S_{mn} 为地类 m 转化至地类 n 的面积。除建设用地以外,地类互相转化引起的碳传导量 E_T 由转化面积与碳排放(碳吸收)能力确定。计算公式如下:

$$E_T = S_{mn} \times (\delta_{m1} - \delta_{m2}) \quad (4)$$

假设环鄱阳湖城市群内部的建设用地在空间上具有同质性,则在时段 T_1-T_2 内,由建设用地转化为其他地类引起的转出碳为 E_O ,由其他地类转化为建设用地引起的转入碳为 E_I 。计算公式如下:

$$E_O = S_{cm} \times (\delta_{T1} - \delta_m) = S_{cm} \times (E_{C1} / S_{C1} - \delta_{m2}) \quad (5)$$

$$E_I = S_{mc} \times (\delta_m - \delta_{T2}) = S_{mc} \times (\delta_{m1} - E_{C2} / S_{C2}) \quad (6)$$

式中: S_{cm} 和 S_{mc} 分别为建设用地与地类 m 互转的面积(km²); S_{C1} 和 S_{C2} 分别为 T_1 和 T_2 时期建设用地的面积(km²); δ_{T1} 和 δ_{T2} 分别为 T_1 和 T_2 时期建设用地单位面积上产生的碳排放[kg/(m²·a)]; δ_m 为其他地类的碳排放系数(δ_{m1})或碳吸收系数(δ_{m2}) [kg/(m²·a)]; E_{C1} 和 E_{C2} 分别为在 T_1 和 T_2 时期建设用地产生的碳排放(10⁴t);。

式中: A 为实际变化而预测不变的误差区域; B 为实际和预测变化一致的正确区域; C 为实际变化与预测变化不一致的误差区域; D 为实际不变而预测变化的误差区域。

2.3.2 GM-Markov 模型 GM-Markov 模型是在 GM(1,1)模型对时间序列进行宏观走势预测的基础上,引入 Markov 链进行相对误差微观修正的改进模型,可用于中长期数据预测^[28]。预测过程如下:

构建原始灰色序列并作一次累加生成新数列,对每个新数列的变量建立白化微分方程以求解发展系数和灰色作用量,最后运用最小二乘估计法及微分方程理论构建 GM(1,1)预测模型,进行累减还原即可得到原始灰色序列的预测值。为了检验模型的可信度,本研究对 GM(1,1)预测结果进行后验差检验和残差检验,若有一项不合格,则需对模型进行改进。精度检验标准见表 4。

若 GM(1,1)模型预测的结果与实际情况存在过大误差,则需要划分状态区间并引入 Markov 链进行误差修正。计算公式如下:

$$\hat{Y}(k) = \frac{\hat{X}_{(t+1)}^{(0)}}{1 \pm 0.5 |e_{1i} + e_{2i}|} \quad (8)$$

式中: $\hat{X}_{(t+1)}^{(0)}$ 为原始灰色序列预测值; e_{1i} 和 e_{2i} 分别为任意状态区间的上下限; $\hat{Y}(k)$ 为误差修正后的预测值。

表 4 模型精度检验等级

Table 4 Model accuracy inspection level

精度级别	指标范围	
	C 值(均方差比值)	p 值(小误差概率)
一级(优秀)	<0.35	>0.95
二级(良好)	<0.50	>0.80
三级(合格)	<0.65	>0.70
四级(不合格)	≥0.65	≤0.70

3 结果与分析

3.1 土地利用碳排放变化分析

借助土地利用转移矩阵得到 2000—2020 年环鄱阳城市群土地利用变化情况(表 5)。从转化方向看,研究期内环鄱阳湖城市群内部地类转化主要为耕地和林地间的相互转化以及耕地转为建设用地,部分水域和耕地也存在互转情况,而草地和未利用地由于面积较小,转化情况并不明显。从转化规模看,研究期内环鄱阳湖城市群共有 $1.01 \times 10^4 \text{ km}^2$ 土地发生转化,其中建设用地利用动态度最高,为 16.83%,其余依次为未利用地、草地、水域、林地,耕地利用动态度则最低,仅为 0.34。可能的原因是近年来在“耕地红线”“藏粮于地”等政策约束下,环鄱阳湖城市群持续推进高标准农田建设,严格管控耕地“非粮化”和“非农化”,积极落实耕地占补平衡,区域耕地保护工作取得积极成效。从转化速度看,研究期内建设用地转出速度为 $19.01 \text{ km}^2/\text{a}$,转入速度为 $426.89 \text{ km}^2/\text{a}$,净转入面积为 $2\ 039.40 \text{ km}^2$,耕地转出速度为 $871.82 \text{ km}^2/\text{a}$,转入速度为 $986.35 \text{ km}^2/\text{a}$,净转入面积为 572.66 km^2 ,而林地作为面积占比最大的地类,转出速度约为转入速度的两倍,净转出面积高达 $2\ 068.13 \text{ km}^2$ 。究其原因,近年来流域经济快速发展促使城市边界持续扩张,部分农用地转化为居住、工业用地等,而湖泊、河流周围的林地因具有良好的水源涵养能力和土壤渗透特性,在国土综合整治与生态修复等调节作用下逐渐转化为耕地和草地,从而保证耕地数量始终维持在动态平衡区间。

基于土地利用转移矩阵和碳排放系数得到 2000—2020 年环鄱阳湖城市群土地利用碳排放变化(图 2)。如图 2 所示,研究期内环鄱阳湖城市群土地利用净碳排放逐年递增,由 $8.79 \times 10^6 \text{ t}$ 增至 $3.63 \times 10^7 \text{ t}$,年均增幅 $1.38 \times 10^6 \text{ t}$ 。其原因可能在于城镇化

和工业化的快速发展刺激更多的生产建设活动,各类土地承载的能源消费产生了大量碳排放。而人口规模膨胀促使就业、居住、休闲等生活需求增加,进而带动二三产业的发展,由此引致的城市建设用地持续扩张也对碳排放增长起到促进作用。此外,碳源的碳排放量总体增加 $2.74 \times 10^7 \text{ t}$,碳汇的碳吸收量则呈现略微减少态势,但由于林地面积始终在减小,建设用地面积持续增加,研究区的碳汇能力始终远低于碳源能力,导致碳源/碳汇比值由 2000 年的 3.56 持续上升至 2020 年的 12.09。值得关注的是,2010 年以后碳源/碳汇比值增长率有所减缓,表明近 10 年来环鄱阳湖城市群在减碳降排上采取了积极举措,但城市群发展仍面临较大减排压力,此发展趋势也与环鄱阳湖生态城市群“生态优先、绿色低碳”的近期规划目标相一致。

就单一地类而言(图 3),建设用地碳排放呈持续增加趋势,由 $1.08 \times 10^7 \text{ t}$ 逐年递增至 $3.82 \times 10^7 \text{ t}$,年均增长率 6.51%,说明城市群进入高质量发展时期后提高了工业生产和能源消费力度,由此产生更多的碳排放。耕地碳排放则在 $1.40 \times 10^6 \text{ t}$ 上下浮动,原因在于尽管研究期间较多耕地转化为其他地类,但在耕地占补平衡和耕地保护红线等政策引导下,转出面积由林地、水域等地类进行补充。在碳汇地类中,面积占比最大的林地年均碳吸收量最高,约为 $3.24 \times 10^6 \text{ t}$,草地和未利用地年碳吸收量呈逐渐降低趋势,主要是因为研究期内草地和未利用地面积在持续减少。而水域主要集中在鄱阳湖国家级自然保护区及周边地区,受到《鄱阳湖生态经济区环境保护条例》等政策规则的约束,研究期间利用动态度较低,但由于地类占比仅为 5.34%,年碳吸收量基本维持在 $1.30 \times 10^5 \text{ t}$ 左右。

3.2 土地利用碳传导效应分析

基于碳传导效应测度模型得出 2000—2020 年环鄱阳湖城市群土地利用碳传导效应变化情况(表 6)。为方便说明碳传导效应情况,分别将 2000—2005 年、2005—2010 年、2010—2015 年、2015—2020 年和 2000—2020 年记作 I 期、II 期、III 期、IV 期和 V 期(下同)。由表 6 可知,各时期由地类转化引致的碳传导效应均表现为碳排放,且呈先增后减态势,即由 I 期($4.90 \times 10^6 \text{ t}$)增长至 III 期($1.30 \times 10^7 \text{ t}$)后降低至 IV 期($1.05 \times 10^7 \text{ t}$),总体增幅 114.21%。从整个研究时段看,2000—2020 年环鄱阳湖城市群土地利用碳传导效应共产生 $4.05 \times 10^7 \text{ t}$ 碳排放,其中建设用地产生 $1.87 \times 10^7 \text{ t}$ 碳排放,耕地产生 $1.41 \times 10^7 \text{ t}$ 碳排放,林地和草地分别产生 $3.23 \times 10^6 \text{ t}$ 和 $3.21 \times 10^6 \text{ t}$ 碳排放,水域和未利用地由于面积不大且利用动态度较低,二者转化引起的碳传导效应分别为 $1.23 \times 10^6 \text{ t}$

和 $4.91 \times 10^4 \text{ t}$ 碳排放。这表明建设用和耕地产生的碳传导效应在土地利用碳排放增长过程中起主导作用,主要是由耕地和林地转为建设用地所致。林地转出面积较大但碳传导效应较低可能是因为该地类本身碳吸收能力较强,未转化的林地产生的碳吸收会中和部分碳排放。

表 5 2000—2020 年环鄱阳湖城市群土地利用变化
Table 5 Land use change of urban agglomeration around Poyang Lake from 2000 to 2020

时期	土地利用类型	转出		转入		未变化 面积/km ²	净转入 面积/km ²	面积 占比/%	k/%
		面积/ km ²	速度/ (km ² · a ⁻¹)	面积/ km ²	速度/ (km ² · a ⁻¹)				
2000—2005	耕地	1627.08	325.42	1471.29	294.26	31626.32	-155.78	36.08	-0.09
	林地	1084.54	216.91	1190.84	238.17	50147.42	106.30	55.59	0.04
	草地	14.28	2.86	20.95	4.19	33.36	6.67	0.05	2.80
	水域	470.22	94.04	210.90	42.18	4710.34	-259.32	5.62	-1.00
	未利用地	9.96	1.99	3.39	0.68	20.41	-6.57	0.03	-4.33
	建设用地	26.57	5.31	335.27	67.05	2397.67	308.70	2.63	2.55
2005—2010	耕地	1943.68	388.74	1927.95	385.59	31153.93	-15.72	35.91	-0.01
	林地	1634.44	326.89	1243.42	248.68	49703.83	-391.01	55.70	-0.15
	草地	25.02	5.00	17.82	3.56	29.28	-7.20	0.06	-2.65
	水域	438.52	87.70	299.98	60.00	4482.73	-138.53	5.34	-0.56
	未利用地	8.79	1.76	10.28	2.06	15.01	1.48	0.03	1.24
	建设用地	41.38	8.28	592.37	118.47	2691.55	550.99	2.97	4.03
2010—2015	耕地	1879.80	375.96	2663.81	532.76	31202.08	784.01	35.89	0.47
	林地	2538.76	507.75	982.64	196.53	48408.50	-1556.13	55.28	-0.61
	草地	25.92	5.18	10.96	2.19	21.17	-14.96	0.05	-6.35
	水域	244.54	48.91	414.13	82.83	4538.17	169.60	5.19	0.71
	未利用地	11.14	2.23	1.52	0.30	14.15	-9.62	0.03	-7.63
	建设用地	50.94	10.19	678.04	135.61	3232.98	627.10	3.56	3.82
2015—2020	耕地	2041.60	408.32	2001.76	400.35	31824.30	-39.84	36.74	-0.02
	林地	1728.97	345.79	1260.97	252.19	47662.17	-467.99	53.59	-0.19
	草地	17.44	3.49	5.69	1.14	14.70	-11.75	0.03	-7.31
	水域	351.65	70.33	321.78	64.36	4600.66	-29.87	5.37	-0.12
	未利用地	7.08	1.42	3.91	0.78	8.56	-3.17	0.02	-4.05
	建设用地	29.26	5.85	581.88	116.38	3881.76	552.62	4.24	2.83
2000—2020	耕地	4359.09	871.82	4931.75	986.35	28894.30	572.66	36.70	0.34
	林地	4599.76	919.95	2290.96	458.19	46632.20	-2068.13	53.08	-0.90
	草地	41.00	8.20	13.76	2.75	6.63	-27.25	0.02	-11.44
	水域	848.76	169.75	590.64	118.13	4331.80	-258.12	5.34	-1.00
	未利用地	23.73	4.75	5.84	1.17	6.63	-17.89	0.01	-11.78
	建设用地	95.06	19.01	2134.46	426.89	2329.18	2039.40	4.84	16.83

注:k表示单一土地利用动态指数,其中正值表示转入,负值表示转出。

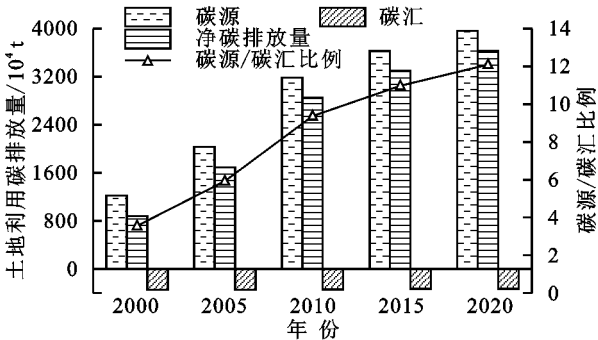


图 2 2000—2020 年环鄱阳湖城市群土地利用碳排放变化
Fig. 2 Change of carbon emissions from land use in urban agglomeration around Poyang Lake from 2000 to 2020

从碳源/汇地向碳汇/源地转化看,主要是耕地、林地和水域向建设用地转化。其中耕地转向建设用地的碳传导量呈逐期递增趋势,I期耕地转出为建设用地的过程中共释放 $1.87 \times 10^6 \text{ t}$ 二氧化碳,II期和III期碳排放逐渐增加至 $4.37 \times 10^6 \text{ t}$ 和 $4.88 \times 10^6 \text{ t}$,而在IV期转出的碳排放则降低至 $4.26 \times 10^6 \text{ t}$ 。虽然碳传导效应趋势上有所减缓,但由耕地转为建设用地的土地利用强度处于较高水平,仍存在一定的减排空间。林地和水域向建设用地转化引起的碳传导量也呈先增后减变化,由I期($2.13 \times 10^5 \text{ t}$ 和 $2.10 \times 10^5 \text{ t}$)增加至III期($7.44 \times 10^5 \text{ t}$ 和 $3.14 \times 10^5 \text{ t}$)后降低至IV期($4.10 \times 10^5 \text{ t}$ 和 $2.73 \times 10^5 \text{ t}$),这可能与近 5 年来环

鄱阳湖城市群严格管控建设用地扩张有关。草地和未利用地由于本身面积较少,同时自身碳汇能力较弱,因此在地类转化的碳传导效应中并未呈现明显变化。此外,受退耕还林政策的影响,各时期耕地和林地

地之间转化引起的碳传导量(碳吸收)基本维持在 $1.60 \times 10^4 \text{ t}$ 以上,尽管林地具有较强的碳汇能力,但其碳吸收速度远不及建设用地的碳排放速度,由此导致环鄱阳湖城市群土地利用碳排放持续增长。

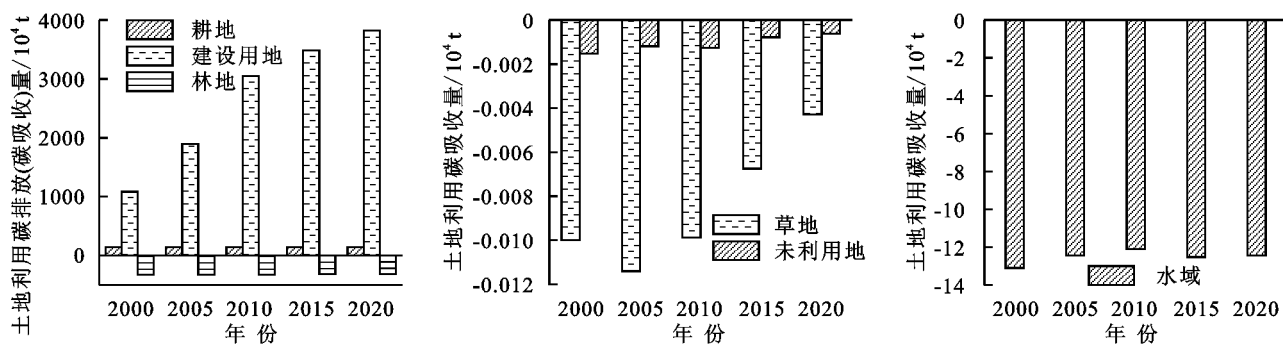


图 3 2000—2020 年环鄱阳湖城市群单一地类碳排放变化

Fig. 3 Change of carbon emissions in a single area of urban agglomeration around Poyang Lake from 2000 to 2020

3.3 土地利用碳排放预测

3.3.1 直接土地利用碳排放预测 直接土地利用碳排放主要受到土地面积变化的影响,在预测碳排放前应先对土地利用面积进行时空模拟。因此,选取高程、坡度等驱动因子在 FLUS-Markov 模型中构建适宜性图集,结合轮盘赌选择的自适应惯性竞争机制在元胞自动机中进行土地利用变化模拟。为确定合适的预测基准年份,现分别用各时期来预测 2010 年、2015 年、2020 年土地利用类型面积,预测结果与精度检验见表 7。

由表 7 可知,采用 FLUS-Markov 模型对环鄱阳湖城市群土地利用变化进行模拟总体精度较高,Kappa 系数均大于 0.81,OA 系数均大于 0.85,FoM 系数均小于 0.3。从预测结果看,采用多年期土地数据对同一目标年的地类面积进行模拟,精度检验结果表明距目标年近的数据更适合作为预测的原始数据,Kappa 系数、OA 系数均有所提升,可降低数据时间滞后性带来的误差。以 2020 年为例,I 期、II 期、III 期预测精度逐渐递增,Kappa 系数依次为 0.864,0.924,0.943,OA 系数依次为 0.896,0.924,0.957,FoM 系数依次为 0.064,0.149,0.215。其中,利用 III 期数据预测 2020 年土地利用变化结果与实际情况见图 4。

由表 7 和图 4 可知,本研究选择 2015 年、2020 年作为预测基准年,以 5 a 期为间隔依次对 2025 年、2030 年和 2035 年环鄱阳湖城市群土地利用变化进行预测(表 8),结果表明除建设用地面积增加以外,其他地类面积均出现小幅度减少。

根据式(1)和式(2)可得环鄱阳湖城市群直接土地利用碳排放预测结果(表 9)。

3.3.2 间接土地利用碳排放预测 间接土地利用碳

排放主要由能源消费量决定,以 2011—2020 年江西省实际能源消费量构建原始序列,分别用 GM(1,1)模型和 GM-Markov 模型对能源消费量进行预测(图 5),结果显示 GM-Markov 模型的拟合效果显著优于 GM(1,1)模型,GM(1,1)模型虽然能够基本反映能源消费量的变化趋势,但对于个别趋势以外的数据并未能准确预测,而 GM-Markov 模型可通过修正误差项有效降低数据波动性的干扰。

进一步对比验证两种模型的预测精度(表 10),可以发现,对于预测相同能源类型而言,GM-Markov 模型的均方差比值都明显高于 GM(1,1)模型,GM-Markov 模型的小概率误差均为 1.000,而 GM(1,1)模型预测汽油消费量的小概率误差则为 0.600,总体精度级别上 GM-Markov 模型除在预测汽油外均为优秀,而 GM(1,1)模型预测汽油时的精度级别则为不合格,表明 GM-Markov 模型在预测能源消费量上具有相对误差小和总体精度高的优点。

采用 GM-Markov 模型对 2025 年、2030 年、2035 年江西省能源消费结构进行预测(表 11),结果显示,原煤、其他洗煤、焦炭和原油消费量呈递增趋势,洗煤、汽油、煤油、柴油和燃料油消费量呈减少趋势,2025 年、2030 年、2035 年江西省能源消费总量依次为 $9.98 \times 10^7 \text{ t}$, $1.11 \times 10^8 \text{ t}$, $1.24 \times 10^8 \text{ t}$ 。

根据公式(2)和表 3 可得出 2025 年、2030 年、2035 年江西省间接土地利用碳排放,同时基于已构建的区域碳排放权分配体系,将省域碳排放科学合理分配至环鄱阳湖城市群(表 12)。结果显示,2025 年、2030 年、2035 年环鄱阳湖城市群土地利用碳排放预计可达到 $4.13 \times 10^7 \text{ t}$, $4.69 \times 10^7 \text{ t}$ 和 $5.39 \times 10^7 \text{ t}$,未来城市群土地利用碳排放仍呈增长态势。

表 6 2000—2020 年环鄱阳湖城市群土地利用碳传导效应

Table 6 Carbon transmission effect of land use in urban agglomeration around Poyang Lake from 2000 to 2020								10 ⁴ t
时期	土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	未利用地	建设用地	转出碳
2000—2005(Ⅰ期)	耕地		1.25	0.00	0.12	0.00	187.25	188.62
	林地	−1.12		0.00	0.00	0.00	21.32	20.20
	草地	0.00	0.00		0.00	0.00	2.86	2.86
	水域	−0.28	0.01	0.00		0.00	20.95	20.67
	未利用地	0.00	0.00	0.00	0.00		0.97	0.98
	建设用地	0.16	0.00	0.00	11.63	0.00		11.79
	转入碳	−1.24	1.26	0.00	11.75	0.00	233.35	
	合计	187.38	21.45	2.86	32.43	0.98	245.14	490.23
2005—2010(Ⅱ期)	耕地		1.30	0.00	0.17	0.00	437.42	438.89
	林地	−1.67		0.00	0.00	0.00	64.35	62.68
	草地	0.00	0.00		0.00	0.00	7.38	7.38
	水域	−0.24	0.01	0.00		0.00	41.27	41.04
	未利用地	0.00	0.00	0.00	0.00		0.98	0.98
	建设用地	0.26	0.00	0.00	28.33	0.00		28.59
	转入碳	−1.65	1.31	0.00	28.50	0.00	551.40	
	合计	437.24	63.99	7.38	69.54	0.98	579.99	1159.12
2010—2015(Ⅲ期)	耕地		1.04	0.00	0.24	0.00	487.68	488.96
	林地	−2.61		0.00	0.00	0.00	74.45	71.84
	草地	0.00	0.00		0.00	0.00	10.18	10.17
	水域	−0.14	0.00	0.00		0.00	31.42	31.28
	未利用地	0.00	0.00	0.00	0.00		2.25	2.25
	建设用地	0.14	0.00	0.00	47.03	0.00		47.17
	转入碳	−2.61	1.05	0.00	47.26	0.00	605.98	
	合计	486.35	72.88	10.18	78.55	2.25	653.14	1303.35
2015—2020(Ⅳ期)	耕地		1.34	0.00	0.19	0.00	426.39	427.93
	林地	−1.79		0.00	0.00	0.00	40.96	39.17
	草地	0.00	0.00		0.00	0.00	3.66	3.66
	水域	−0.21	0.00	0.00		0.00	27.33	27.12
	未利用地	0.00	0.00	0.00	0.00		1.17	1.17
	建设用地	0.22	0.00	0.00	25.79	0.00		26.01
	转入碳	−1.79	1.34	0.00	25.99	0.00	499.51	
	合计	426.14	40.51	3.66	53.10	1.17	525.52	1050.11
2000—2020(Ⅴ期)	耕地		2.40	0.00	0.32	0.00	1403.78	1406.50
	林地	−4.47		0.00	−0.01	0.00	325.03	320.55
	草地	−0.01	0.00		0.00	0.00	8.55	8.55
	水域	−0.48	0.01	0.00		0.00	88.02	87.55
	未利用地	0.00	0.00	0.00	0.00		4.86	4.86
	建设用地	7.18	0.06	0.04	34.96	0.05		42.28
	转入碳	2.22	2.48	0.03	35.27	0.05	1830.24	
	合计	1408.72	323.04	320.59	122.83	4.91	1872.52	4052.61

表 7 环鄱阳湖城市群土地利用类型实际面积与预测面积对比

Table 7 Comparison between actual area and predicted area of land use types in urban agglomeration around Poyang Lake										km ²
年份	时期	耕地	林地	草地	水域	未利用地	建设用地	Kappa 系数	OA 系数	FoM 系数
2010	实际值	33081.9	50947.3	47.1	4782.7	25.3	3283.9			
	Ⅰ期预测值	32938.9	51432.3	42.2	5222.8	19.3	2513.1	0.849	0.908	0.262
2015	实际值	33865.9	49391.1	32.1	4952.3	15.7	3911.0			
	Ⅰ期预测值	32767.5	51519.4	41.6	5223.0	16.5	2601.0	0.832	0.881	0.263
	Ⅱ期预测值	33052.7	50566.6	43.8	4961.3	22.7	3522.7	0.881	0.879	0.251
	实际值	33826.1	48923.2	20.4	4922.4	12.5	4463.6			
2020	Ⅰ期预测值	32589.8	51598.1	41.7	5305.3	14.6	2619.7	0.864	0.896	0.064
	Ⅱ期预测值	32998.5	50197.1	41.6	4961.0	22.6	3948.2	0.924	0.924	0.149
	Ⅲ期预测值	34536.8	47941.8	23.4	5127.8	10.0	4529.3	0.943	0.957	0.215

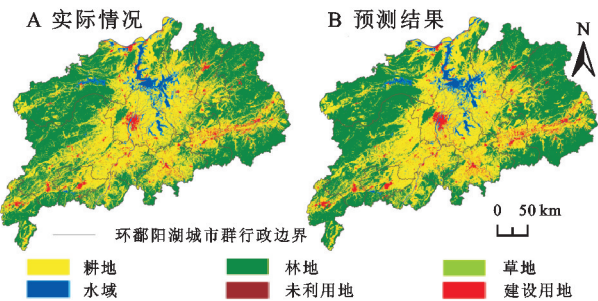


图 4 2020 年环鄱阳湖城市群土地利用变化
实际情况与预测结果

Fig. 4 Actual situation and forecast results of land use change
in urban agglomeration around Poyang Lake in 2020

4 讨论与结论

4.1 讨论

围绕“双碳”战略部署和“十四五”规划目标开展

表 8 2025 年、2030 年、2035 年环鄱阳湖城市群土地利用面积预测结果

Table 8 Prediction results of land use area of urban agglomeration around Poyang Lake in 2025, 2030 and 2035

	km ²					
年份	耕地	林地	草地	水域	未利用地	建设用地
2025	33760.09	48481.26	14.26	4894.51	9.22	5009.75
2030	33682.45	48045.03	11.31	4871.61	7.28	5551.41
2035	33592.93	47620.61	9.76	4852.90	6.16	6086.73

表 9 2025 年、2030 年、2035 年环鄱阳湖城市群直接土地利用碳排放预测结果

Table 9 Prediction results of direct land use carbon emissions (carbon absorption) of urban
agglomeration around Poyang Lake in 2025, 2030 and 2035

	10 ⁴ t					
年份	耕地	林地	草地	水域	未利用地	合计
2025	142.4676	−312.2193	−0.0030	−12.3831	−0.0005	−182.14
2030	142.1399	−309.4100	−0.0024	−12.3252	−0.0004	−179.60
2035	141.7622	−306.6767	−0.0020	−12.2778	−0.0003	−177.20

从土地利用碳排放预测方法看,分别采用 FLUS-Markov 模型和 GM-Markov 模型来预测直接和间接土地利用碳排放能够有效减小“信息孤岛”对预测结果的误差。FLUS-Markov 模型从时空变换角度考虑不同栅格的土地利用类型转化概率,并叠加多重影响因子完成高精度土地利用空间变化的模拟过程,预测精度较高,这一优点已在吴淑芳等^[16]的研究中予以论证。而能源消费数据在时间序列上具有较大波动性,采用传统 GM(1,1)模型易产生灰色偏差,因此引入 Markov 链将模型改进为 GM-Markov 模型。该模型的修正过程主要通过残差与实际值的比值计算相对残差序列,由于相对残差序列具有非平稳随机性,需对其进行状态区间划分,然后基于 Markov 链构建状态转移概率矩阵来确定对象转移状态,以此计算出误差修正后的预测值。值得注意的是,预测结果是基于环鄱阳湖城市群自然发展情景得出,未来城市群可能面临更加多样的发展情景,如生态保护、节能减排、产业转型等,后续研究可继续深入探讨多情

碳减排、碳增汇系列举措对我国实现绿色低碳可持续发展目标具有重要促进意义。土地利用/覆被变化作为引起碳排放的主要动因,在低碳国土空间开发任务中发挥关键作用。已有关于土地利用碳排放的研究多围绕总量展开分析,研究结果存在一定的滞后性,本研究则在此基础上深度剖析地类转化引起的土地内部碳传导效应,揭示了具体地类间由于面积增减导致的碳排放(碳吸收)变化情况,结果表明建设用地和耕地在碳传导过程中起主导作用,未来环鄱阳湖城市群减碳降排的工作应依附这些地类开展。但研究结果仍存在细化空间,各地类的碳排放系数均借鉴已有成果得出,考虑到不同地区海拔高度、土壤属性、季节气候、植被覆盖度等差异因素对碳排放系数的影响,仍需对相关系数的适宜性和精确性进行优化。

景下土地利用碳排放的预测机制。

当前,环鄱阳湖城市群土地利用碳排放仍呈增长趋势,低碳国土空间开发利用面临严峻减排挑战。为此,提出如下对策建议:一是严格管控建设用地扩张,增强耕地林地碳汇能力。加强用地审批力度促进建设用地减量化,同时也可通过提高建筑密度和容积率来提升建设用地利用效率,对于碳汇地类,可改进耕作方式、施肥方案等降低作物生长过程中的碳排放,并通过树种选择、轮伐期确定等措施提高森林碳储量。二是改进技术优化能源结构,创新战略发展清洁能源。环鄱阳湖城市群应逐步整改或淘汰能耗高、污染重、产能低的落后产业,增加资金或政策支持鼓励企业利用地理及技术优势开发新能源,以清洁能源替代化石能源,实现能源消费结构优化升级。三是建立有效的碳补偿机制,科学监督碳源碳汇平衡。建立分区碳排放数据库,综合考量地区碳排放经济贡献能力、生态承载能力等差异,由高碳排区直接向碳汇功能区支付一定的碳补偿资金,助力地区碳源碳汇平

衡。四是探索低碳土地利用模式,统筹提高区域减排潜力。合理评估区域土地利用活动(土地开发、整理与复垦)全周期碳排强度,减少单位土地面积的资源要素投入,推动土地利用方式向低碳集约方向转变。

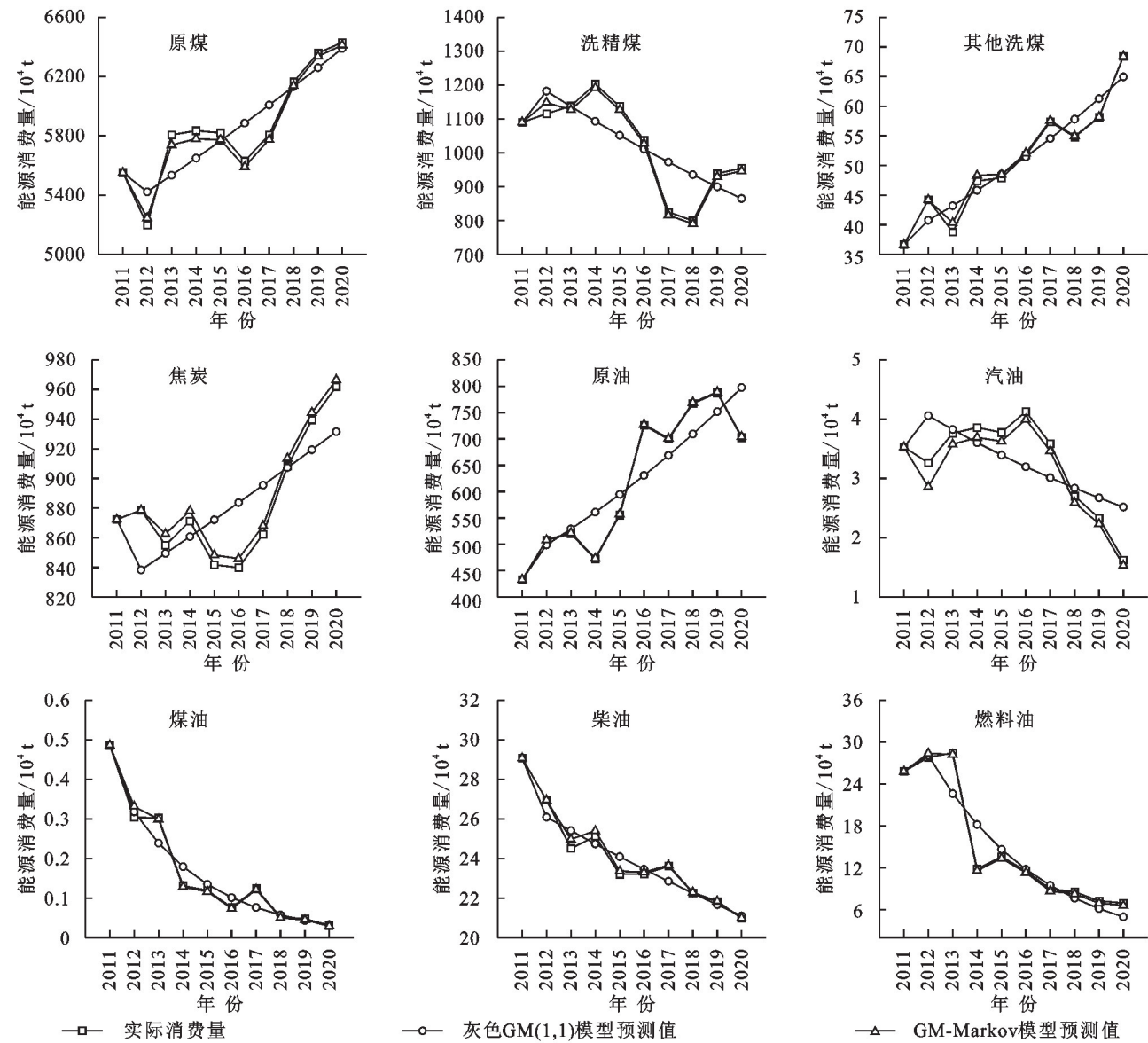


图 5 江西省能源消费结构实际情况与预测结果对比

Fig. 5 Comparison between the actual situation and forecast results of energy consumption structure in Jiangxi Province

表 10 江西省能源消费结构预测精度验证结果
Table 10 Verification results of prediction accuracy of energy consumption structure in Jiangxi Province

能源类型	GM(1,1)模型			GM-Markov 模型		
	C 值	p 值	精度级别	C 值	p 值	精度级别
原煤	0.2219	1.000	优秀	0.1682	1.000	优秀
洗煤	0.4296	1.000	良好	0.1054	1.000	优秀
其他洗煤	0.0886	1.000	优秀	0.0028	1.000	优秀
焦炭	0.4659	1.000	良好	0.0043	1.000	优秀
原油	0.2110	1.000	优秀	0.0001	1.000	优秀
汽油	0.5267	0.600	不合格	0.3699	1.000	良好
煤油	0.0490	1.000	优秀	0.0042	1.000	优秀
柴油	0.0584	1.000	优秀	0.0038	1.000	优秀
燃料油	0.1194	1.000	优秀	0.0009	1.000	优秀

4.2 结 论

- (1) 2000—2020 年环鄱阳湖城市群共有 $1.01 \times 10^4 \text{ km}^2$ 土地进行相互转化,主要表现为耕地与林地间的相互转化以及耕地转为建设用地,其中建设用地利用动态度最高,耕地利用动态度则最低。
- (2) 2000—2020 年环鄱阳湖城市群土地利用净碳排放由 $8.79 \times 10^6 \text{ t}$ 增加至 $3.63 \times 10^7 \text{ t}$,碳源/碳汇比值由 3.56 上升至 12.09。其中,作为主要碳源地的建设用地碳排放由 $1.08 \times 10^7 \text{ t}$ 逐年增至 $3.82 \times 10^7 \text{ t}$,耕地碳排放量稳定在 $1.40 \times 10^6 \text{ t}$ 上下,地类占比最大的林地年均碳吸收量最高,约为 $3.24 \times 10^6 \text{ t}$,草地和未利用地年碳吸收量呈逐渐降低趋势,水域年碳吸收量则基本维持在 $1.30 \times 10^5 \text{ t}$ 左右。

表 11 2025 年、2030 年、2035 年江西省能源消费结构预测结果

Table 11 Forecast results of energy consumption structure of Jiangxi Province in 2025, 2030 and 2035										10 ⁴ t
年份	原煤	洗煤	其他洗煤	焦炭	原油	汽油	煤油	柴油	燃料油	合计
2025	7086.05	718.15	86.91	991.92	1070.85	1.82	0.01	18.47	2.13	9976.31
2030	7847.82	590.77	116.30	1060.59	1435.14	1.35	0.00	16.17	1.18	11069.32
2035	8694.47	485.99	155.62	1133.61	1923.60	1.01	0.00	14.15	1.01	12409.46

表 12 2025 年、2030 年、2035 年环鄱阳湖城市群土地利用碳排放预测结果
Table 12 Prediction results of carbon emissions from land use in urban agglomeration
around Poyang Lake in 2025, 2030 and 2035

年份	耕地	林地	草地	水域	未利用地	建设用地	碳排放量
2025	142.4676	-312.2193	-0.0030	-12.3831	-0.0005	4311.4954	4129.3571
2030	142.1399	-309.4100	-0.0024	-12.3252	-0.0004	4868.7545	4689.1565
2035	141.7622	-306.6767	-0.0020	-12.2778	-0.0003	5565.2963	5388.1016

(3) 2000—2020 年环鄱阳湖城市群土地利用碳传导效应共产生 $4.052\ 16\times 10^7$ t 碳排放,建设用 地和耕地产生的碳传导效应在土地利用碳排放增长过程中起主导作用。不同时期由地类转化引致的碳传导效应均表现为碳排放,且呈现先增后减态势。从碳源/汇地向碳汇/源地转化看,主要是耕地、林地和水域向建设用地转化,耕地转向建设用地的碳传导量呈逐期增加趋势,林地和水域向建设用地转化导致的碳传导量呈先增后减的趋势。

(4) 基于 FLUS-Markov 模型和 GM-Markov 模型预测出 2025 年、2030 年、2035 年环鄱阳湖城市群土地利用碳排放依次为 4.13×10^7 t, 4.69×10^7 t 和 5.39×10^7 t,表明在当前发展条件下,城市群发展将面临更加严峻的减排压力。

参考文献 (References):

[1] 苑韶峰,唐奕钰.低碳视角下长江经济带土地利用碳排放的空间分异[J].经济地理,2019,39(2):190-198.
Yuan S F, Tang Y Y. Spatial differentiation of land use carbon emission in the Yangtze River Economic Belt based on low carbon perspective[J]. Economic Geography, 2019,39(2):190-198.

[2] Wang C, Zhan J Y, Zhang F, et al. Analysis of urban carbon balance based on land use dynamics in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2021,281:125138.

[3] 李缘缘,魏伟,周俊菊,等.中国土地利用碳排放变化及协调分区[J].环境科学,2023,44(3):1267-1276.
Li Y Y, Wei W, Zhou J J, et al. Changes in land use carbon emissions and coordinated zoning in China[J]. Environmental Science, 2023,44(3):1267-1276.

[4] 陈传龙,李泽浩.中国城市群碳转移及责任分担[J].热带地理,2022,42(11):1855-1865.
Chen C L, Li Z H. Carbon transfer and responsibility sharing of Chinese urban agglomerations[J]. Tropical Geography, 2022,42(11):1855-1865.

[5] 张余,姜博,赵映慧,等.东北三省土地利用碳排放时空格局

及影响因素研究[J].地域研究与开发,2022,41(4):150-156.
Zhang Y, Jiang B, Zhao Y H, et al. Temporal and spatial pattern changes and influencing factors of land use carbon emissions in the three provinces of Northeast China[J]. Areal Research and Development, 2022,41(4):150-156.

[6] Yang Y J, Li H Y. Monitoring spatiotemporal characteristics of land-use carbon emissions and their driving mechanisms in the Yellow River Delta: A grid-scale analysis[J]. Environmental Research, 2022,214:114151.

[7] 黄鑫,邢秀为,程文仕.土地利用碳排放与 GDP 含金量的脱钩关系及驱动因素[J].地域研究与开发,2020,39(3):156-161.
Huang X, Xing X W, Cheng W S. Decoupling and driving factors related analysis between the carbon emissions of different land use types and GDP gold content[J]. Areal Research and Development, 2020,39(3):156-161.

[8] 夏四友,杨宇.基于主体功能区的京津冀城市群碳收支时空分异与碳补偿分区[J].地理学报,2022,77(3):679-696.
Xia S Y, Yang Y. Spatio-temporal differentiation of carbon budget and carbon compensation zoning in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration based on the Plan for Major Function-oriented Zones[J]. Acta Geographica Sinica, 2022,77(3):679-696.

[9] 禹康康,王延华,孙恬,等.太湖流域土地利用碳排放变化及其预测[J].土壤,2022,54(2):406-414.
Yu K K, Wang Y H, Sun T, et al. Changes and prediction of carbon emission from different land use types in Taihu Lake basin[J]. Soils, 2022,54(2):406-414.

[10] Shen X Z, Huang L, Zhu J, et al. Relationship between land use carbon emission and economic growth based on GIS[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021,14(6):1-16.

[11] 李竹,王兆峰,吴卫,等.碳中和目标下中国省域碳平衡能力与城镇化的关系[J].自然资源学报,2022,37(12):3136-3152.
Li Z, Wang Z F, Wu W, et al. The relationship between China's provincial carbon balance capacity and urbanization under carbon neutrality target[J]. Journal of Nat-

- ural Resources, 2022,37(12):3136-3152.
- [12] Zhong J L, Qi W, Dong M, et al. Land use carbon emission measurement and risk zoning under the background of the carbon peak: A case study of Shandong Province, China[J]. Sustainability, 2022,14(22):15130.
- [13] 郑永超,文琦.宁夏自治区土地利用变化及碳排放效应[J].水土保持研究,2020,27(1):207-212.
- Zheng Y C, Wen Q. Change of land use and the carbon emission effect of Ningxia Autonomous Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020,27(1):207-212.
- [14] 孙艺璇,程钰,张含朔.城市工业土地集约利用对碳排放效率的影响研究:以中国15个副省级城市为例[J].长江流域资源与环境,2020,29(8):1703-1712.
- Sun Y X, Cheng Y, Zhang H S. Study on the impact of intensive use of urban industrial land on carbon emission efficiency in China's 15 sub-provincial cities[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020,29(8):1703-1712.
- [15] 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 H L, Ma T J, Qian F K, 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.
- [16] 吴淑芳,张彪,石学瑾,等.FLUS-CSLE模型预测黄土高原典型流域不同土地利用变化情景土壤侵蚀[J].农业工程学报,2022,38(24):83-92.
- Wu S F, Zhang B, Shi X J, et al. Prediction of soil erosion under different land uses in the typical watershed of the Loess Plateau based on FLUS-CSLE model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022,38(24):83-92.
- [17] 杨旭,刘贤赵.长株潭城市群地类转移的碳传导效应与预测[J].环境科学,2022,43(12):5850-5860.
- Yang X, Liu X Z. Temporal and spatial differences in carbon conduction and prediction effect of land type transfer in Chang-Zhu-Tan urban agglomeration[J]. Environmental Science, 2022,43(12):5850-5860.
- [18] 韩楠,罗新宇.多情景视角下京津冀碳排放达峰预测与减排潜力[J].自然资源学报,2022,37(5):1277-1288.
- Han N, Luo X Y. Carbon emission peak prediction and reduction potential in Beijing-Tianjin-Hebei region from the perspective of multiple scenarios[J]. Journal of Natural Resources, 2022,37(5):1277-1288.
- [19] 黄贤金,张秀英,卢学鹤,等.面向碳中和的中国低碳国土开发利用[J].自然资源学报,2021,36(12):2995-3006.
- Huang X J, Zhang X Y, Lu X H, et al. Land development and utilization for carbon neutralization[J]. Journal of Natural Resources, 2021,36(12):2995-3006.
- [20] 王刚,张华兵,薛菲,等.成都市县域土地利用碳收支与经济发展关系研究[J].自然资源学报,2017,32(7):1170-1182.
- Wang G, Zhang H B, Xue F, et al. Relations between land use carbon budget and economic development at county level in Chengdu City[J]. Journal of Natural Resources, 2017,32(7):1170-1182.
- [21] 孙赫,梁红梅,常学礼,等.中国土地利用碳排放及其空间关联[J].经济地理,2015,35(3):154-162.
- Sun H, Liang H M, Chang X L, et al. Land use patterns on carbon emission and spatial association in China[J]. Economic Geography, 2015,35(3):154-162.
- [22] 段晓男,王效科,逯非,等.中国湿地生态系统固碳现状和潜力[J].生态学报,2008,28(2):463-469.
- Duan X N, Wang X K, Lu F, et al. Carbon sequestration and its potential by wetland ecosystems in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008,28(2):463-469.
- [23] 石洪听,穆兴民,张应龙,等.四川省广元市不同土地利用类型的碳排放效应研究[J].水土保持通报,2012,32(3):101-106.
- Shi H X, Mu X M, Zhang Y L, et al. Effects of different land use patterns on carbon emission in Guangyuan City of Sichuan Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012,32(3):101-106.
- [24] 张玥,代亚强,陈媛媛,等.土地利用隐性转型与土地利用碳排放空间关联研究[J].中国土地科学,2022,36(6):100-112.
- Zhang Y, Dai Y Q, Chen Y Y, et al. The study on spatial correlation of recessive land use transformation and land use carbon emission[J]. China Land Science, 2022,36(6):100-112.
- [25] 王勇,程瑜,杨光春,等.2020和2030年碳强度目标约束下中国碳排放权的省区分解[J].中国环境科学,2018,38(8):3180-3188.
- Wang Y, Cheng Y, Yang G C, et al. Provincial decomposition of China's carbon emission rights under the constraint of 2020 and 2030 carbon intensity targets[J]. China Environmental Science, 2018,38(8):3180-3188.
- [26] Liu X P, Liang X, Li X, et al. A future land use simulation model(FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects[J]. Landscape and Urban Planning, 2017,168:94-116.
- [27] Pontius R G, Walker R, Yao-Kumah R, et al. Accuracy assessment for a simulation model of Amazonian deforestation[J]. Annals of the Association of American Geographers, 2007,97(4):677-695.
- [28] 王艳,张安录.长江经济带耕地压力时空演变规律与趋势[J].长江流域资源与环境,2022,31(2):461-471.
- Wang Y, Zhang A L. Temporal and spatial evolution and trend of cultivated land pressure in the Yangtze River Economic Belt[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022,31(2):461-471.