

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2022.01.002

基于土地利用变化的岳阳市碳排放时空格局研究

赵先超¹, 牛亚文¹, 肖杰², 张子兮¹

(1. 湖南工业大学 城市与环境学院, 湖南 株洲 412007; 2. 湖南省农林工业勘察设计研究总院, 湖南 长沙 410007)

摘要: 研究市域土地利用碳排放时空格局, 对于指导区域实现碳中和目标具有重要的意义。因此, 基于岳阳市 2013—2019 年的土地利用数据和能源消耗数据, 结合重心转移模型、ArcGIS 空间分析等方法, 对岳阳市的土地利用碳排放时空格局特征进行了分析。研究表明: 岳阳市的土地利用类型以林地和耕地为主, 建设用地面积呈现出增加的变化趋势, 土地利用的净碳排放量由 2013 年至 2019 年增加了 4.05%, 其中建设用地的碳排放是岳阳市最主要的碳源, 林地对碳汇的贡献量最大, 同时总土地利用碳排放强度呈现出先减少后增加的变化趋势; 岳阳市土地利用类型转移呈现出一转多的特征, 土地利用碳排放总量和碳排放强度重心均集中在岳阳县, 整体上均向东南方向转移, 转移距离分别为 2.96 km 和 16.15 km; 2013—2019 年岳阳市主要的土地利用变化引起的碳效应表现为碳排放增量高于碳吸收增量 5 168 294.63 t, 且建设用地侵占耕地、林地是碳排放总量大量增加的主要原因, 此外林地带来的生态效益较为显著, 在平衡碳循环中发挥着重要作用。

关键词: 土地利用; 碳排放; 时空格局; 岳阳市; 重心转移模型; ArcGIS 空间分析

中图分类号: X321

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2022)01-0010-10

引文格式: 赵先超, 牛亚文, 肖杰, 等. 基于土地利用变化的岳阳市碳排放时空格局研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2022, 36(1): 10-19.

Spatial and Temporal Pattern of Carbon Emissions in Yueyang City Based on Land Use Change

ZHAO Xianchao¹, NIU Yawen¹, XIAO Jie², ZHANG Zixi¹

(1. College of Urban and Environment Sciences, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. Hunan Prospecting Designing and Research Institute for Agriculture Forestry and Industry, Changsha 410007, China)

Abstract: The spatial and temporal pattern of carbon emissions from urban land use is essential for the realization of the regional carbon neutrality. Therefore, based on the land use data and energy consumption data of Yueyang city from 2013 to 2019, an analysis has been made of the spatio-temporal pattern characteristics of carbon emissions from land use by using the gravity center transfer model, with ArcGIS spatial analysis combined together. The results show that the land use in Yueyang city is mainly characterized with woodland and cultivated land, with the construction land area in increase; net carbon emissions from land use has increased by 4.05% from 2013 to 2019, among which

收稿日期: 2021-07-16

基金项目: 湖南省社科成果评审委重大课题基金资助项目 (XSP22ZDA008); 湖南省哲学社会科学基金资助项目 (20JD026); 湖南省研究生科研创新基金资助项目 (CX20211080); 湖南省大学生创新创业训练计划基金资助项目 (S202011535032)

作者简介: 赵先超 (1983-), 男, 山东郓城人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要研究方向为城乡发展与区域规划,

E-mail: zhaoxianchao@hut.edu.cn

通信作者: 肖杰 (1982-), 男, 湖南湘潭人, 湖南省农林工业勘察设计研究总院高级工程师, 主要研究方向为景观规划,

生态建设与工程, E-mail: 8733591@qq.com

the carbon emissions from construction land were the most important carbon source in Yueyang city, while the forest land contributes the most to carbon sink. Meanwhile, the total carbon emission intensity of land use shows a trend of an initial decreasing and a subsequent increasing feature. The land use types in Yueyang City is characterized with a single-to-multiple transfer feature. The total carbon emission and carbon emission intensity of land use are concentrated in Yueyang County, which are transferred to the southeast as a whole, with transfer distances of 2.96 km and 16.15 km respectively; the carbon effect brought about by the main land use change in Yueyang City from 2013 to 2019 is that the carbon emission increment is higher than the carbon absorption increment of 5 168 294.63 tons, with the occupation of cultivated land and forest land by construction land being the main reason for the significant increase of total carbon emission. In addition, forest land brings significant ecological benefits, thus playing an important role in keeping the carbon cycle in good balance.

Keywords: land use; carbon emissions; spatio-temporal pattern; Yueyang city; the gravity center transfer model; ArcGIS spatial analysis

1 研究背景

碳排放是使得全球气候变暖的一个重要因素, 如何有效减少碳排放, 发展绿色低碳经济, 已经成为世界各国亟待解决的问题之一。作为低碳发展的关键时期, 我国政府主动承担应对气候变化的国际责任, 在2020年9月22日的第七十五届联合国大会上提出, 中国将提高国家自主贡献力度, 采取更加有力的政策和措施, 二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值, 努力争取2060年前实现碳中和。土地作为人类活动的场所, 承载着各种社会经济活动, 已有研究表明, 土地利用变化带来的碳排放量仅次于化石燃料的燃烧产生的碳排放量。因此, 分析市域土地利用的碳排放时空格局特征, 对指导区域实现碳中和目标, 促进绿色低碳发展具有重要意义。

目前, 国内外学者已围绕土地利用变化引起的碳排放开展了广泛的研究, 并取得了丰富的成果, 主要表现在以下几个方面:

1) 在不同尺度下测算不同土地利用类型的碳排放, 并分析其时空格局特征。如周嘉等^[1]分析了中国省域土地利用碳排放的时空特征, 以推动中国低碳经济发展; 马远等^[2]对2000—2017年黄河流域各省份的土地利用碳排放时空格局特征进行了探讨, 结果表明, 该地域净碳排放总量在不断增加, 但增长速度呈下降的变化趋势; 文枫等^[3]探讨了重庆市不同土地利用方式碳排放时空差异及其变化特征, 以推进区域绿色低碳发展; 袁霄等^[4]从县域尺度出发, 分析了重庆市县域土地利用碳排放的时空演变特征, 为区域经济低碳发展提供参考。

2) 土地利用转换视角下的碳排放分析。张旺等^[5]

基于北京市土地利用转换矩阵, 计算出因土地利用转换导致的碳排放效应变化; 李鹏等^[6]经计算得出, 鹤壁市近30 a来土地利用转换引起的碳排放增量高于碳吸收增量, 土地利用格局变化会直接影响区域碳循环过程; 秦岩等^[7]通过ArcGIS叠加分析, 得到了2000—2018年长江三角洲中心区土地利用碳排放强度的转移情况, 发现土地利用对碳排放变化具有明显的影响。

3) 探索土地利用变化的碳排放影响因素。此类文献主要运用时空地理加权回归分析、地理探测器、LMDI (logarithmic mean divisia index) 模型、STIRPAT (stochastic impacts by regression on population, affluence, and technology) 模型等进行分析, 以深入了解土地利用碳排放的影响因素^[2, 8-11]。

4) 土地利用碳排放的动态模拟预测。已有研究主要采用灰色理论模型、系统动力学等方法, 模拟出不同情景下区域内未来几年的碳排放情况, 并提出低碳土地利用结构的优化方案^[12-15]。

岳阳市作为中部区域性中心城市, 近年来随着城镇化的快速发展, 其土地利用发生了一定程度的变化, 由此引起的碳排放量也迅速增加。基于此, 本研究试图根据岳阳市2013—2019年的土地利用数据和能源消耗数据, 探讨其土地利用碳排放时空变化特征, 旨在为岳阳市土地资源持续利用以及实现区域碳中和目标、推动绿色低碳发展提供一定的参考。

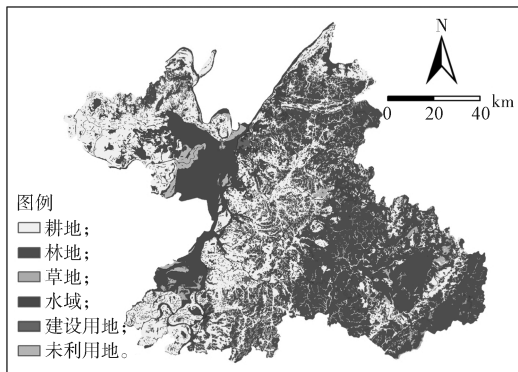
2 研究区域与研究方法

2.1 研究区域概况与数据来源

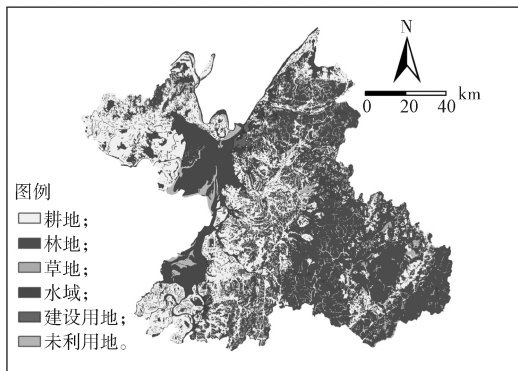
岳阳市位于湖南省东北部长江南岸, 地处北纬

28°25'33"~29°51'00", 东经 112°18'31"~114°09'06", 处于武汉城市圈和长株潭城市群的节点, 长三角和珠三角向内陆辐射、长江经济带和京广铁路经济带的黄金十字架上。

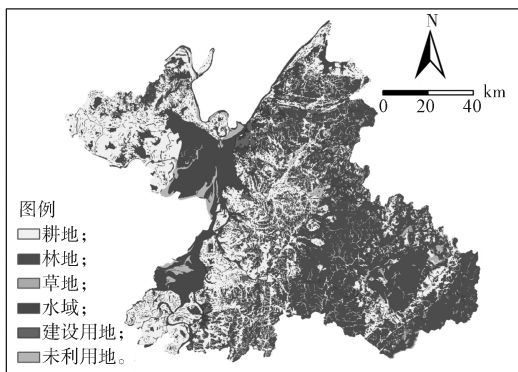
本研究所用主要数据包括: 1) 土地利用原始数据, 来源于中国地理空间数据云, 为确保土地利用分类的准确性, 本文选取云量小于 10% 的影像数据, 空间分辨率为 30 m, 运用 ENVI 软件进行校正、影像融合、镶嵌与裁剪等处理, 并运用监督分类将土地利用类型分为 6 类, 分类结果精度均通过检验, 最终得到 4 个年份的土地利用现状图(如图 1 所示); 2) 岳阳市行政区划界线, 来源于 2019 年全国基础地理信息数据库。3) 能源数据, 主要来源于《湖南省统计年鉴(2014—2020 年)》。



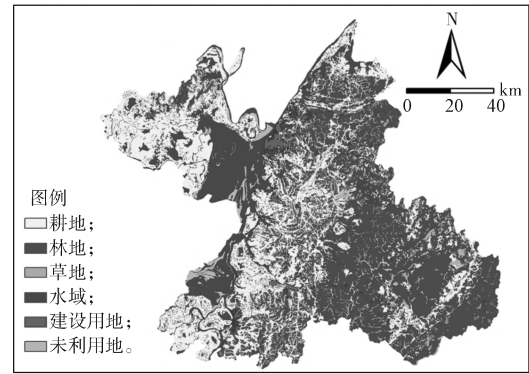
a) 2013 年



b) 2015 年



c) 2017 年



d) 2019 年

图 1 2013—2019 年岳阳市土地利用现状图

Fig. 1 Current situation of land use in Yueyang city from 2013 to 2019



2.2 研究方法

2.2.1 土地利用碳排放量估算方法

土地利用碳排放量估算方法分为直接碳排放量估算方法和间接碳排放量估算方法。前者为非建设用地的碳排放量估算; 后者为建设用地的碳排放量估算。其中, 非建设用地的碳排放量估算借鉴文献 [16] 的研究成果, 其计算公式如下:

$$E = \sum A_i = \sum S_i \times T_i \quad (1)$$

式中: E 为非建设用地碳排放量, t ;

A_i 为第 i 种土地利用类型碳排放量, t ;

S_i 为第 i 种土地利用类型面积, hm^2 ;

T_i 为第 i 种土地利用类型碳排放系数。

在现有研究 [17-20] 的基础上, 结合岳阳市的实际情况, 最终确定耕地碳排放系数取 $0.497 0 t/hm^2$, 林地碳排放系数取 $-0.644 0 t/hm^2$, 草地碳排放系数取 $-0.023 0 t/hm^2$, 水域碳排放系数取 $-0.020 5 t/hm^2$, 未利用地碳排放系数取 $-0.005 0 t/hm^2$ 。

建设用地的碳排放是运用能源消耗碳排放间接替代, 采用《国家温室气体排放清单指南》中提供的能源消耗碳排放进行计算, 具体的计算公式以及不同能源的折标准煤系数、碳排放系数等参考王雅晴等的研究成果 [21]。

2.2.2 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵, 可反映区域研究期初、研究期末各土地利用类型间的转化规模与转移方向, 其数学形式如下 [22]:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: S_{ij} 为第 i 种土地利用类型转化为第 j 种土地利用类型的面积, hm^2 ;

n 为土地利用类型的数量。

2.2.3 重心转移模型

重心转移模型是根据人口分布重心的原理构建的, 是区域发展过程中各要素空间变化的重要分析工具, 它可以直观地揭示不同时期某一要素在空间演变过程中的转移方向及转移距离等^[23], 其计算公式为

$$X_t = \frac{\sum C_i \times x_i}{\sum C_i}, Y_t = \frac{\sum C_i \times y_i}{\sum C_i} \quad (3)$$

式中: X_t 和 Y_t 分别为第 t 年研究对象的重心经、纬度坐标;

C_i 为 t 年第 i 类土地利用类型的研究对象值;

x_i 和 y_i 分别为区域内第 i 类土地利用类型的几何重心经、纬度坐标。

重心转移距离测度的计算公式如下:

$$D = H \times \sqrt{(X_m - X_n)^2 + (Y_m - Y_n)^2} \quad (4)$$

式中: D 为研究对象在不同年份间重心移动距离, km ;

H 为常数, 是把地理坐标单位 (1°) 转化为平面距离 (km) 的系数, 取值 111.111;

(X_m, Y_m) 、 (X_n, Y_n) 分别为第 m 年和第 n 年研究对象的重心地理坐标。

2.2.4 碳效应估算方法

碳效应估算方法主要用于计算 2013—2019 年岳阳市土地利用的碳效应变化值^[6]。值得说明的是, 该变化值仅代表转换型的土地利用变化引起的碳效应变化^[24], 其计算公式如下:

$$C = \sum S_{ij} \times T_{ij} \quad (5)$$

式中: C 为土地利用变化的总碳效应, t ;

T_{ij} 为第 i 种土地类型向第 j 种土地类型转移时碳效应系数的变化值。

将建设用地的碳排放量除以岳阳市建设用地面积, 即可以得到 2019 年建设用地碳效应系数, 为

266.56 t/hm^2 。

3 土地利用碳排放时空变化分析

3.1 时间变化分析

3.1.1 土地利用变化分析

图 2 所示为 2013—2019 年岳阳市土地利用面积统计图。

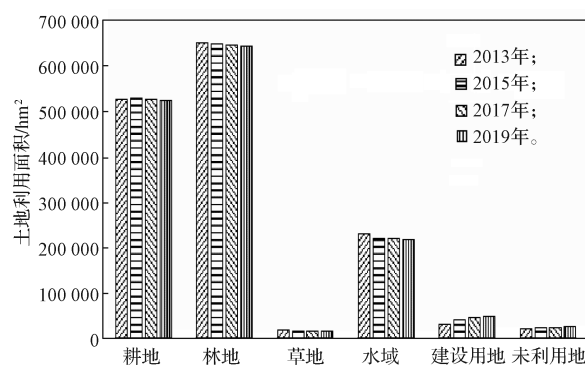


图 2 2013—2019 年岳阳市土地利用面积统计图

Fig. 2 Statistical map of Yueyang city's land use area from 2013 to 2019

由图 2 可以看出, 岳阳市的林地面积最大, 耕地面积次之, 这两者为岳阳市的主要土地利用类型; 再次为水域面积; 建设用地面积、草地面积和未利用地面积相对较小。总体来看, 2013—2019 年的岳阳市土地利用变化幅度较小。其中, 耕地面积由 2013 年的 528 158.16 hm^2 减少为 2019 年的 525 270.42 hm^2 , 约减少了 0.55%; 林地面积和水域面积都呈现出逐渐减少的变化趋势; 而草地面积在波动中呈现出递减的变化趋势, 最终减少为 2019 年的 17 399.34 hm^2 ; 建设用地面积呈现出逐渐增长的态势, 由 2013 年的 31 758.66 hm^2 增加为 2019 年的 49 086.45 hm^2 , 约增加了 54.56%; 未利用地面积在波动中呈现出递增的变化趋势。

为了能更加直观地展现研究区内土地利用的变化情况, 对岳阳市土地面积变化与利用动态进行了计算, 所得结果见表 1。

表 1 2013—2019 年岳阳市土地利用面积变化与动态度

Table 1 Changes and dynamic features of land use area in Yueyang city from 2013 to 2019

土地利用类型	2013—2015		2015—2017		2017—2019		2013—2019	
	面积变化/ hm^2	土地利用动态度/ %	面积变化/ hm^2	土地利用动态度/ %	面积变化/ hm^2	土地利用动态度/ %	面积变化/ hm^2	土地利用动态度/ %
耕地	1 129.68	0.11	-3 554.46	-0.34	-462.96	-0.04	-2 887.74	-0.09
林地	-3 301.20	-0.25	-3 010.86	-0.23	-789.30	-0.06	-7 101.36	-0.18
草地	-2 950.38	-7.23	-123.48	-0.35	59.58	0.17	-3 014.28	-2.46
水域	-7 942.95	-1.73	-1 526.13	-0.34	-1 634.49	-0.37	-11 103.57	-0.80
建设用地	9 189.18	14.47	6 019.92	7.35	2 118.69	2.26	17 327.79	9.09
未利用地	3 996.18	9.22	-64.80	-0.13	2 700.45	5.27	6 631.83	5.10

由表1可以得知,总体来看,2013—2019年岳阳市建设用地的土地利用动态度最大,为9.09%,其次为未利用地,为5.10%,耕地、林地和水域次之,草地的动态度最小。其中,2013—2015年、2015—2017年、2017—2019年林地和水域的土地利用动态度均为负值,而建设用地均为正值,且在2013—2015年最大,高达14.47%,这表明在研究期间岳阳市建设用地的扩张主要以牺牲部分林地、水域为代价;耕地的动态度呈现出先减少后增加的波动态势;草地的动态度在波动中呈递增态势,在2017—2019年达峰值,高达0.17%;未利用地的动态度呈现出先减少后增加的变化趋势,在2015—2017年为负值,值为-0.13%。

为进一步探讨岳阳市在研究时期的土地利用程度,计算出2013年、2015年、2017年、2019年的岳阳市土地利用程度的综合指数,得出其值分别为282.35, 283.16, 283.66, 283.57,可知其为在波动中呈增加的变化趋势。由此可见,岳阳市土地利用程度总体偏高,土地利用的深度在研究期间提高,这与岳阳市建设用地在研究期间大幅度增加有着一定的联系。

3.1.2 土地利用碳排放分析

基于岳阳市的土地利用程度和能源消耗数据,对各年份6类土地利用类型的碳排放进行估算,得到岳阳市2013—2019年的土地利用碳排放量,结果如表2所示。

表2 2013—2019年岳阳市土地利用碳排放

Table 2 Land use carbon emission of Yueyang city from 2013 to 2019 10^4 t

碳排放量	2013	2015	2017	2019
耕地	26.249	26.306	26.129	26.106
建设用地	1 258.431	1 235.485	1 154.311	1 308.460
碳排放总量	1 284.680	1 261.790	1 180.440	1 334.566
林地	41.996	41.784	41.590	41.539
草地	0.047	0.040	0.040	0.040
水域	0.471	0.455	0.452	0.449
未利用地	0.011	0.013	0.013	0.014
碳吸收总量	42.526	42.292	42.095	42.042
净碳排放量	1 242.155	1 219.498	1 138.345	1 292.524

如表2所示,总体来看,2013—2019年,岳阳市土地利用净碳排放量在波动中整体呈现出上升的变化趋势,具体数据由2013年的 $1 242.155 \times 10^4$ t增加为2019年的 $1 292.524 \times 10^4$ t,增加幅度约为4.05%,2017年的土地利用净碳排放量最低,低至 $1 138.345 \times 10^4$ t,这与2016年岳阳市政府深入实施碳减排相关政策密切相关。

在碳源方面,总碳源量在研究期间呈现出先减少

后增加的变化趋势,2013—2019年约增加了3.88%。其中,耕地碳排放量在波动中整体呈递减趋势,减少量为 0.143×10^4 t;建设用地的碳排放量与总碳源量和净碳排放量的波动趋势一致,由2013年的 $1 258.431 \times 10^4$ t最终增加为 $1 308.460 \times 10^4$ t,增幅为3.98%。由此可见,建设用地的碳排放是岳阳市最主要的碳源,因此有效控制建设用地的扩张是推进岳阳市实现碳中和目标的重要任务之一。

在碳汇方面,总碳汇量在研究期间呈现出逐渐递减的态势,2013—2019年约减少了1.14%。其中,林地碳吸收占总碳汇的98.75%~98.80%,对碳汇的贡献量最大,这与岳阳市林地面积最大有关;其次为水域,草地、未利用地的碳排放量相对较小,且其在研究期间整体较为稳定,变化幅度不大。由此可以看出,在碳中和的目标约束下,可通过优化调整土地利用结构,适当地进行退耕还林,以增加碳汇能力较大的土地利用类型面积,从而降低净碳排放量。

3.1.3 土地利用碳排放强度分析

土地利用碳排放强度(单位面积碳排放)可以更好地揭示各土地利用类型与碳排放量之间的关系,参考秦岩等^[7]的研究成果,计算得出2013—2019年岳阳市的土地利用碳排放强度。总体来看,2013—2019年,岳阳市总土地利用碳排放强度呈现出先减少后增加的变化趋势,由2013年的 8.37 t/hm²最终增加为2019年的 8.71 t/hm²,增幅为4.06%。为更加直观地展示研究期间土地利用碳排放强度的演变特征,将计算得到的各土地利用类型的碳排放强度进行统计,所得结果如图3所示。

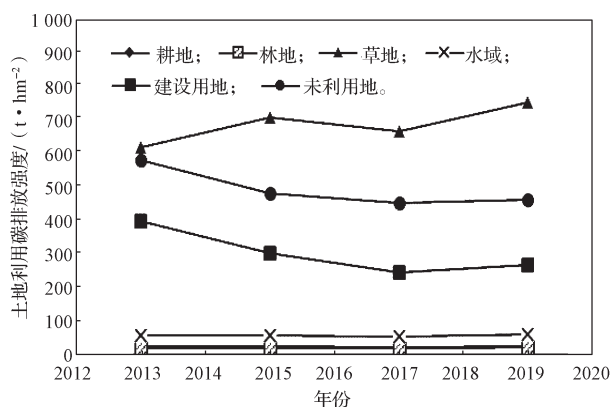


图3 2013—2019年岳阳市土地利用碳排放强度变化曲线

Fig. 3 Land use carbon emission intensity in Yueyang city from 2013 to 2019

由图3可以得知,4个年份的土地利用碳排放强度最高范围均集中在草地和未利用地上,2013年和2019年的土地利用碳排放强度的最高范围分别为

573.31~608.49 t/hm² 和 456.75~742.86 t/hm², 土地利用碳排放强度明显增加。从土地利用结构来看, 草地最高, 由2013年的608.49 t/hm²增加至2019年的742.86 t/hm², 增幅约为22.08%; 其次为未利用地, 在波动中呈现出递减的变化趋势, 在2017年达最低值, 为242.37 t/hm²; 建设用地次之, 其碳排放强度在研究期间约减少了32.68%。

3.2 空间变化分析

3.2.1 土地利用空间转移分析

借助 ArcGIS10.5 软件中空间叠加工具及数据透视表, 得到了岳阳市土地利用变化结果, 由于篇幅所限, 仅列出 2013—2019 年岳阳市土地利用转移空间格局 (见图 4) 和土地利用转移矩阵 (见表 3)。由图 4 可以发现, 岳阳市的 6 类土地利用类型转移呈现出一转多的特征。

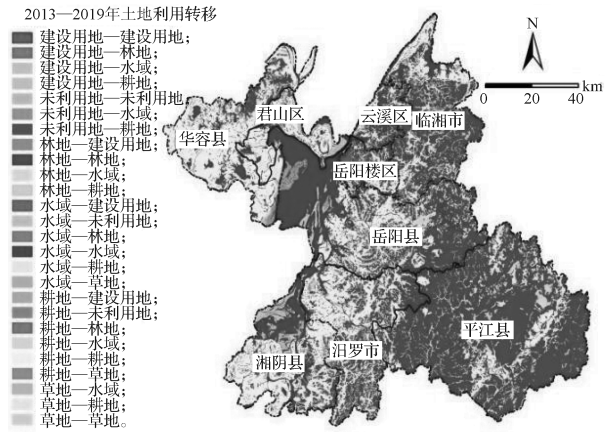


图 4 2013—2019 年岳阳市土地利用转移空间格局

Fig. 4 Spatial pattern of land use transfer in Yueyang city from 2013 to 2019



表 3 2013—2019 年岳阳市土地利用转移矩阵
Table 3 Land use transfer matrix of Yueyang city from 2013 to 2019

土地利用类型	2013 年						转入合计
	草地	耕地	建设用地	林地	水域	未利用地	
2019 年							
草地	15 385.68	356.85	90.18	1 365.57	152.37	40.77	2 005.74
耕地	242.55	490 454.28	2 366.37	14 189.40	17 437.05	531.09	34 766.46
建设用地	128.61	11 056.86	28 128.69	8 323.47	1 435.05	11.43	20 955.42
林地	744.03	15 859.98	715.23	625 909.23	1 716.48	2.52	19 038.24
水域	3 834.81	9 272.70	430.92	1 879.47	191 961.81	11 357.82	26 775.72
未利用地	51.12	1 093.50	24.75	241.20	17 157.15	9 721.08	18 567.72
转出合计	5 001.12	37 639.89	3 627.45	25 999.11	37 898.10	11 943.63	-

分析表 3 中的数据可以得知:

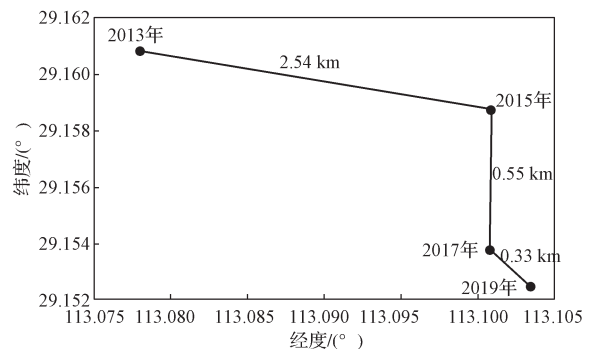
1) 在转出面积中, 2013—2019 年, 岳阳市水域的转出面积最多, 高达 37 898.10 hm², 其中 46.01% 的转出水域面积转化为耕地面积, 45.27% 的转化为未利用地面积; 在空间上, 水域向耕地转化的区域主要分布在君山区南部, 向未利用地转化的区域基本上在湘阴县北部和岳阳县西部。其次为耕地, 其转出面积为 37 639.89 hm², 其中约 42.14% 的转出面积转化为林地面积, 29.38% 转化为建设用地面积, 24.64% 转化为水域面积, 在空间上转换区域较为分散; 林地的转出面积次之, 为 25 999.11 hm², 主要转化为耕地面积和建设用地面积, 转化比例分别为 54.58% 和 32.01%; 随后为未利用地的转出面积, 有 95.10% 的转化为水域面积; 草地和建设用地的转出面积较小, 分别为 5 001.12 hm² 和 3 627.45 hm², 其中有 76.68% 的草地转化为水域, 65.24% 的转化为耕地。

2) 在转入面积中, 2013—2019 年, 岳阳市耕地的转入面积最大, 为 34 766.46 hm²; 其次为水域; 建设用地的转入面积紧随其后, 为 20 955.42 hm², 其中 52.76% 来自耕地, 39.72% 来自林地, 在空间上

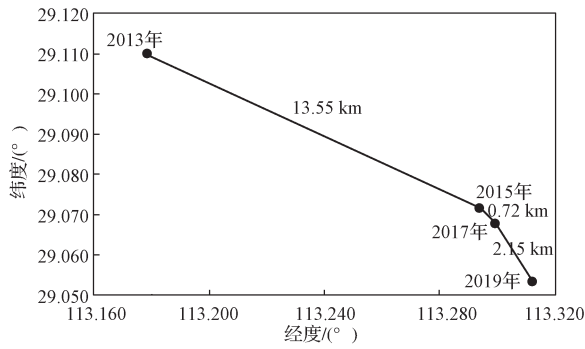
主要集中在城市周围区域。研究表明, 随着城镇化的快速发展, 岳阳市主要通过占用耕地和林地进行经济建设, 这将面临越来越大的碳减排压力。

3.2.2 土地利用碳排放重心转移分析

基于 4 个年份的土地利用数据, 运用 ArcGIS10.5 软件确定各土地利用类型的几何重心坐标, 依据重心公式分别计算出 2013—2019 年的土地利用碳排放总量和土地利用碳排放强度的重心坐标, 运用式 (4) 计算得到土地利用碳排放总量和碳排放强度重心转移距离, 所得结果如图 5 所示。



a) 土地利用碳排放总量重心转移



b) 土地利用碳排放强度重心转移
 图5 土地利用碳排放总量和碳排放强度的重心转移距离

Fig. 5 Total land use carbon emission and gravity center transfer distance of carbon emission intensity

借助 ArcGIS10.5 软件输出 2013—2019 年岳阳市土地利用碳排放总量和碳排放强度的重心转移空间格局图, 如图 6 所示。

观察图 5 和图 6 可以发现, 总体来看, 2013—2019 年岳阳市土地利用碳排放总量和碳排放强度的重心, 均集中在岳阳县。研究期间, 岳阳市土地利用碳排放总量重心整体向东南方向移动了 2.96 km, 重心转移速率约为 0.49 km/a; 土地利用碳排放强度重心同样整体向东南方向移动, 转移距离较大, 为 16.15 km, 重心转移速率约为 2.69 km/a, 具体的转

移特征描述如下:

1) 土地利用碳排放总量的重心转移特征。统计年间, 2013—2015 年, 岳阳市土地利用碳排放总量重心经向移动了 0.023°, 纬向移动了 0.002°, 整体向东偏南方向移动了 2.54 km, 重心转移距离最大, 该时期是土地利用碳排放总量重心转移最快的时期, 重心转移速率为 1.27 km/a; 2015—2017 年, 岳阳市土地利用碳排放总量重心向南偏西方向转移了 0.55 km, 重心转移速率约为 0.28 km/a; 2017—2019 年, 岳阳市土地利用碳排放总量重心经向转移了 0.003°, 纬向转移了 0.001°, 转移方向为东南方向, 重心转移速率为 0.16 km/a。

2) 土地利用碳排放强度的重心转移特征。各研究时期, 岳阳市土地利用碳排放强度的重心转移方向均为东南方向, 重心转移距离和转移速率有较大差异。其中, 2013—2015 年, 土地利用碳排放强度重心的转移距离最大, 为 13.55 km, 该时期重心转移速率也最大, 约为 6.77 km/a; 2015—2017 年, 岳阳市土地利用碳排放强度的重心转移距离和转移速率均最小, 分别为 0.72 km 和 0.36 km/a, 经向转移了 0.005°, 纬向转移了 0.004°; 2017—2019 年, 岳阳市土地利用碳排放重心经向转移了 0.013°, 纬向转移了 0.014°, 转移至岳阳县中南部, 重心转移速率为 1.08 km/a。

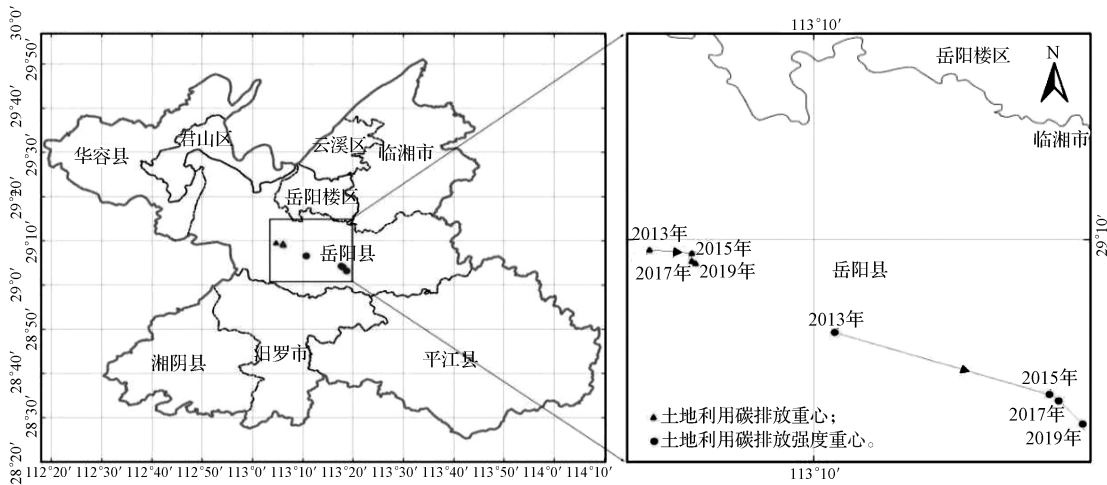


图6 土地利用碳排放总量和碳排放强度的重心转移空间格局

Fig. 6 Spatial pattern of gravity shift of total carbon emission and carbon emission intensity of land use

3.2.3 土地利用变化的碳效应分析

土地利用变化的碳效应是指各种土地利用行为对区域碳循环的影响。本文运用式 (5), 结合不同土地利用类型的碳效应系数, 估算出 2013—2019 年岳阳市 8 种主要土地利用类型转移引起的区域碳效应, 所得结果见表 4。

分析表 4 中的数据可以得知, 2013—2019 年, 岳阳市的土地利用变化引起的碳效应表现为碳排放总量的增量高于碳吸收总量的增量 5 168 294.63 t。其中, 生态系统的正向演变 (退耕还林、耕地转化为水域、未利用地转化为水域) 以及水域转化为未利用地所引起的碳吸收总量增量为 22 804.97 t; 生态

系统的逆向演变(林地转化为耕地、建设用地, 水域转化为耕地)所引起的碳排放增量约为碳吸收增量的227倍。具体分析可以得知, 6 a间, 由于岳阳市城市化的快速发展, 致使其建设用地侵占耕地和林地而引起的碳排放增量较大, 分别为2 941 821.34 t和2 224 064.48 t, 两者之和约占统计年间总碳排放增

量的99.95%, 由此可见, 建设用地侵占耕地、林地是碳排放总量大量增加的主要原因; 此外, 耕地转化为林地所引起的碳吸收增量最大, 高达18 096.24 t, 约占总碳吸收增量的79.35%, 可见林地作为岳阳市碳汇能力最大的土地利用类型, 具有较为显著的生态效益。

表4 主要土地利用类型转移引起的区域碳效应
Table 4 Regional carbon effects caused by land use transfer

土地利用转移类型	变化面积 /hm ²	碳汇系数变化值 / (t·hm ⁻²)	碳汇量变化 /t	碳源系数变化值 / (t·hm ⁻²)	碳源量变化 /t	总碳效应 /t
耕地→建设用地	11 056.86	-	-	266.06	2 941 821.34	2 941 821.34
耕地→林地	15 859.98	-1.14	-18 096.24	-	-	-18 096.24
耕地→水域	9 272.70	-0.52	-4 798.62	-	-	-4 798.62
林地→耕地	14 189.40	-	-	1.14	16 190.11	16 190.11
林地→建设用地	8 323.47	-	-	267.20	2 224 064.48	2 224 064.48
水域→耕地	17 437.05	-	-	0.52	9 023.67	9 023.67
水域→未利用地	17 157.15	0.02	265.94	-	-	265.94
未利用地→水域	11 357.82	-0.02	-176.05	-	-	-176.05
合计	104 654.43	-	-22 804.97	-	5 191 099.60	5 168 294.63

注: “-”表示未考虑。

根据以上分析, 面向碳中和目标, 岳阳市在未来的发展进程中, 应严格控制建设用地规模, 可通过占用碳汇能力较小的土地利用类型进行开发建设, 比如未利用地、草地; 此外, 可积极实施退耕还林政策, 以提高森林覆盖率, 进而提升区域固碳能力。需要注意的是, 在进行土地利用结构调整时, 必须平衡好城市建设、生态保护和耕地保护之间的关系, 使岳阳市能够低碳、可持续发展。

4 结论与讨论

本文基于2013—2019年岳阳市土地利用数据和能源统计数据, 探讨了土地利用变化下岳阳市碳排放时空格局。结果表明: 岳阳市的土地利用类型主要为林地和耕地, 研究发现岳阳市仍然面临着巨大的碳减排压力。通过分析得出, 2013—2019年岳阳市土地利用净碳排在波动中整体呈现出上升的变化趋势, 建设用地的碳排放是岳阳市最主要的碳源, 林地对碳汇的贡献量最大, 在平衡碳循环中发挥着重要作用。此外, 岳阳市总土地利用碳排放强度呈现出先减少后增加的变化趋势, 增幅约为4.06%。由于人类活动加剧, 研究期间岳阳市土地利用碳排放总量和碳排放强度的重心均整体向东南方向移动, 均集中在岳阳县内。研究发现, 岳阳市主要的生态系统逆向演变所引起的碳排放增量约为碳吸收增量的227倍, 建设用地侵占耕地、林地是碳排放大量增加的主要原因。因此, 在碳中和目标约束下, 有效控制建设用地规模是

推进岳阳市实现碳中和目标的重要任务之一; 同时, 土地利用变化对碳排放总量具有显著作用, 可通过优化调整土地利用结构, 适当地增加碳汇能力较大的土地利用类型面积, 可积极实施退耕还林、森林质量精准提升、建设用地增绿补绿等政策, 以提高岳阳市的森林覆盖率和森林质量, 进而提升区域固碳能力, 从而实现碳平衡。

需要注意的是, 国内外学术界对土地利用的碳排放系数还尚未统一, 且不同区域土地利用变化对生态系统的影响存在一定的差异, 本文估算的结果可能存在一定误差, 故符合岳阳市实际情况的碳排放系数有待进一步研究。但是与其他相关研究相比, 本文的土地利用碳排放计算结果与相关研究的变化趋势基本一致, 研究结果仍然具有一定的参考价值。此外, 本文仅分析了面向碳中和目标的市域土地利用变化的碳排放时空格局特征, 而对动态变化下土地利用碳排放的影响因素缺乏深入挖掘, 同时, 面对当前碳达峰、碳中和的目标要求, 岳阳市未来的土地利用碳排放预测模拟尤为重要, 后续将基于相关模型进一步开展研究。

参考文献:

- [1] 周嘉, 王钰萱, 刘学荣, 等. 基于土地利用变化的中国省域碳排放时空差异及碳补偿研究[J]. 地理科学, 2019, 39(12): 1955-1961.
ZHOU Jia, WANG Yuxuan, LIU Xuerong, et al.

- Spatial Temporal Differences of Carbon Emissions and Carbon Compensation in China Based on Land Use Change[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(12): 1955-1961.
- [2] 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[J]. *生态经济*, 2021, 37(7): 35-43.
MA Yuan, LIU Zhenzhen. Study on the Spatial-Temporal Evolution and Influencing Factors of Land Use Carbon Emissions in the Yellow River Basin[J]. *Ecological Economy*, 2021, 37(7): 35-43.
- [3] 文 枫, 鲁春阳. 重庆市土地利用碳排放效应时空格局分异[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(4): 257-262, 268.
WEN Feng, LU Chunyang. Effects of Land Use on Carbon Emission and Their Spatiotemporal Difference in Chongqing[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(4): 257-262, 268.
- [4] 袁 霄, 倪九派, 谢德体. 重庆市县域空间土地利用碳排放的时空格局分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2021, 29(1): 25-38.
YUAN Xiao, NI Jiupai, XIE Deti. Spatial-Temporal Pattern Analysis of Land Use-Related Carbon Emissions in Chongqing Based on County Space[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2021, 29(1): 25-38.
- [5] 张 旺, 申玉铭. 北京市土地利用结构转换的碳排放效应分析[J]. *技术经济与管理研究*, 2014(9): 110-114.
ZHANG Wang, SHEN Yuming. Analyze on the Carbon Emission Effects Based on the Transition Matrix of Land Use Structure in Beijing[J]. *Technoeconomics and Management Research*, 2014(9): 110-114.
- [6] 李 鹏, 李静婷, 梁亚红, 等. 近 30 年鹤壁市土地利用/覆被变化及碳效应分析[J]. *生态经济*, 2019, 35(7): 121-128.
LI Peng, LI Jingting, LIANG Yahong, et al. Analysis of Land Use/Cover Change and Carbon Effect in Hebi in Recent 30 Years[J]. *Ecological Economy*, 2019, 35(7): 121-128.
- [7] 秦 岩, 於 冉, 於忠祥, 等. 2000—2018 年长三角中心区土地利用碳排放强度的时空特征[J]. *河南农业大学学报*, 2021, 55(1): 132-140.
QIN Yan, YU Ran, YU Zhongxiang, et al. Spatial and Temporal Characteristics of Land Use Carbon Emission Intensity in the Central Area of Yangtze River Delta from 2000 to 2018[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2021, 55(1): 132-140.
- [8] SINGH M K, ASTLEY H, SMITH P, et al. Soil CO₂-C Flux and Carbon Storage in the Dry Tropics: Impact of Land-Use Change Involving Bioenergy Crop Plantation[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2015, 83: 123-130.
- [9] 赵先超, 宋丽美, 谭书佳. 基于 LMDI 模型的湖南省农业碳排放影响因素研究[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(1): 177-183.
ZHAO Xianchao, SONG Limei, TAN Shujia. Research on Influential Factors of Agricultural Carbon Emission in Hunan Province Based on LMDI Model[J]. *Environmental Science and Technology*, 2018, 41(1): 177-183.
- [10] 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[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(9): 3847-3856.
NIU Yawen, ZHAO Xianchao, HU Yijue. Spatial Variation of Carbon Emissions from County Land Use in Chang-Zhu-Tan Area Based on NPP-VIIRS Night Light[J]. *ActaScientiae Circumstantiae*, 2021, 41(9): 3847-3856.
- [11] 赵荣钦, 陈志刚, 黄贤金, 等. 南京大学土地利用碳排放研究进展[J]. *地理科学*, 2012, 32(12): 1473-1480.
ZHAO Rongqin, CHEN Zhigang, HUANG Xianjin, et al. Research Progresses of Land Use Carbon Emission in Nanjing University[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(12): 1473-1480.
- [12] 曲鲁平, 翟腾腾, 张全景. 基于灰色理论模型的山东省土地利用碳排放研究[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2019, 50(2): 290-296.
QU Luping, ZHAI Tengting, ZHANG Quanjing. Study on Carbon Emission from Land Use in Shandong Province Based on Grey Theory Model[J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2019, 50(2): 290-296.
- [13] 陈紫君, 赵先超, 倪筱珈. 基于 SD 法的湖南省土地利用碳排放情景方案设定与仿真模拟[J]. *湖南工业大学学报*, 2019, 33(6): 67-74.
CHEN Zijun, ZHAO Xianchao, NI Xiaojia. Scenario Setting and Simulation of Land-Use Carbon Emissions in Hunan Province Based on System Dynamics[J]. *Journal of Hunan University of Technology*, 2019, 33(6): 67-74.
- [14] CUI X Z, LI S Y, GAO F. Examining Spatial Carbon Metabolism: Features, Future Simulation, and Land-Based Mitigation[J]. *Ecological Modelling*, 2020, 438: 109325.
- [15] 杨皓然, 吴 群. 不同政策方案下的南京市土地利用碳排放动态模拟[J]. *地域研究与开发*, 2021, 40(3): 121-126.
YANG Haoran, WU Qun. Dynamic Simulation of Carbon Emissions from Land Use in Nanjing City Under Different Policy Scenarios[J]. *Areal Research and Development*, 2021, 40(3): 121-126.

- [16] 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[J]. 环境科学学报, 2013, 33(3): 941-949.
ZHAO Xianchao, ZHU Xiang, ZHOU Yueyun. Effects of Land Uses on Carbon Emissions and Their Spatial-Temporal Patterns in Hunan Province[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(3): 941-949.
- [17] 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 He, LIANG Hongmei, CHANG Xueli, et al. Land Use Patterns on Carbon Emission and Spatial Association in China[J]. Economic Geography, 2015, 35(3): 154-162.
- [18] 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 Shaofeng, TANG Yiyu. 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.
- [19] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981—2000年中国陆地植被碳汇的估算[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2007, 37(6): 804-812.
FANG Jingyun, GUO Zhaodi, PIAO Shilong, et al. Estimation of Terrestrial Vegetation Carbon Sink in China from 1981 to 2000[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2007, 37(6): 804-812.
- [20] 石洪昕, 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 Hongxin, MU Xingmin, ZHANG Yinglong, 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.
- [21] 王雅晴, 谭德明, 张佳田, 等. 我国城市发展与能源碳排放关系的面板数据分析[J]. 生态学报, 2020, 40(21): 7897-7907.
WANG Yaqing, TAN Deming, ZHANG Jiatian, et al. The Impact of Urbanization on Carbon Emissions: Analysis of Panel Data from 158 Cities in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(21): 7897-7907.
- [22] 王宁, 杨光, 韩雪莹, 等. 内蒙古1990—2018年土地利用变化及生态系统服务价值[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 244-250.
WANG Ning, YANG Guang, HAN Xueying, et al. Land Use Change and Ecosystem Service Value in Inner Mongolia from 1990 to 2018[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(5): 244-250.
- [23] 赵珍珍, 冯建迪. 1980—2016年科尔沁沙地土地利用重心的时空迁移特征[J]. 水土保持通报, 2019, 39(4): 256-260, 299, 2.
ZHAO Zhenzhen, FENG Jiandi. Spatial-Temporal Evolution Features of Land Use Gravity Center in Horqin Sandy Land During 1980—2016[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(4): 256-260, 299, 2.
- [24] 赖力. 中国土地利用的碳排放效应研究[D]. 南京: 南京大学, 2010.
LAI Li. Carbon Emission Effect of Land Use in China[D]. Nanjing: Nanjing University, 2010.

(责任编辑: 廖友媛)