

湖南省国土空间碳排放分区特征与优化策略

周宸帆¹, 谢水波^{2*}

¹南华大学松霖建筑与设计艺术学院, 湖南 衡阳

²南华大学土木工程学院, 湖南 衡阳

收稿日期: 2023年2月27日; 录用日期: 2023年4月12日; 发布日期: 2023年4月20日

摘要

研究区域国土空间碳排放分区, 可为“双碳”目标背景下区域低碳转型和高质量发展提供参考依据。文章以湖南省14个地市为研究单元, 基于2020年土地利用数据、能源以及经济数据, 采用IPCC清单法估算各地市的土地利用碳排放与碳吸收, 结合碳排放的经济贡献与碳吸收生态承载能力, 将湖南省划分为低碳发展区、碳强度控制区、碳汇功能区和高碳优化区, 分析了碳排放空间特征与国土空间分区特征。研究结果表明, 2020年湖南省碳排放总量为4790.97万吨, 其中能源碳排放占比最高, 碳排放与碳吸收整体上呈现出相反的空间分布特征; 碳排放经济贡献系数与湖南省空间发展格局不协调, 需发挥城市群带动作用, 促进区域低碳发展; 湘潭市、岳阳市、益阳市、娄底市属于高碳优化区, 需重点强化这些城市的减排责任, 加快调整能源消费结构。

关键词

湖南省, 土地利用碳排放, 国土空间, 碳中和

Characteristics and Optimization Strategies of Carbon Emission Zoning in the Territorial Space of Hunan Province

Chenfan Zhou¹, Shuibo Xie^{2*}

¹Solux College of Architecture and Design, University of South China, Hengyang Hunan

²School of Civil Engineering, University of South China, Hengyang Hunan

Received: Feb. 27th, 2023; accepted: Apr. 12th, 2023; published: Apr. 20th, 2023

*通讯作者。

Abstract

The study of regional spatial carbon emission zoning can provide a reference for regional low-carbon transformation and high-quality development under the background of the “two-carbon” target. The study in 14 cities in Hunan Province as the research unit, based on the 2020 land use data, energy and economic data, using the IPCC listing method to estimate each city’s land use carbon emissions and carbon absorption, combined with the economic contribution of carbon emissions and the ecological carrying capacity of carbon absorption, is divided into low carbon development area, carbon intensity control area, carbon sink function and high carbon optimization area, analyzes the carbon emissions space characteristics and national spatial zoning characteristics. The research results show that the total carbon emission in Hunan Province in 2020 is 47,909,700 tons, of which the carbon emission and carbon absorption show the highest opposite spatial distribution characteristics; the economic contribution coefficient of carbon emission is not coordinated with the spatial development pattern of Hunan Province, so the leading role of urban agglomeration is played to promote regional low-carbon development; Xiangtan, Yueyang, Yiyang and Loudi are high-carbon optimization areas, which is necessary to strengthen the emission reduction responsibility of these cities and accelerate the adjustment of energy consumption structure.

Keywords

Hunan Province, Carbon Emission from Land Use, Territorial Space, Carbon Neutral

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

人类活动引起的气候变化已经成为全球性问题[1], 除化石燃料燃烧所释放的二氧化碳以外, 土地利用与土地覆被变化导致碳排放量占人类活动总排放量的 1/3 [2]。2020 年 9 月, 中国首次提出力争于 2030 年前达到碳排放峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和的目标与承诺[3]。明确构建绿色低碳循环发展经济体系、提升能源利用效率、提高非化石能源消费比重、降低二氧化碳排放水平、提升生态系统碳汇能力等五方面主要目标[4]。湖南省人民政府出台《湖南省碳达峰实施方案》确保 2030 年前如期实现碳达峰目标。深入研究湖南省碳排放的空间分布, 有助于推动城市的低碳转型, 优化国土空间布局。

在土地利用碳排放研究方面, 国外主要集中于生命周期视角下的碳足迹、碳循环以及经济增长、消费与碳排放驱动机制和仿真模拟[5]。国内则较多侧重于土地利用碳排放的空间分异[6]、影响因素分析[7]、不同土地利用方式的碳排放效应分析[8]、土地利用碳排放的变化与预测等[9]。在国土空间分区方面, 目前学者多从“三生”空间的空间功能特征构建国土空间分区指标体系[10]、基于“双评价”对国土空间地域功能优化分区[11]、生态安全格局[12]、生态修复[13]、用途管制[14]等角度进行研究。然而, 现有的研究较少将二者结合起来, 根据土地利用碳排放对国土空间进行分区。本文以湖南省为例, 在核算湖南省不同土地利用方式产生的碳排与碳汇的基础上, 通过计算碳排放经济贡献系数和碳汇生态承载系数, 对湖南省国土空间进行了碳排放分区, 探讨国土空间的碳排放特征与优化策略, 对湖南省绿色低碳转型和国土空间优化具有一定的现实意义。

2. 数据来源与研究方法

2.1. 研究区域概况

湖南省位于云贵高原及南岭山脉与江汉平原之间的过渡地带, 罗霄和南岭山脉在东南方向上呈不对称的马蹄形, 并向东北方向伸展。地处东部、中西部过渡带、长江和沿海开放经济带的交界处, 国土面积达 21.18 万平方公里, 下辖 13 个地级市及 1 个湘西土家族苗族自治州。到 2020 年, 全市常住人口 6644.48 万, 城市化率 58.76%, GDP4.18 万亿元, 在全国排名第九。

2.2. 数据来源

主要涉及的研究数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心, 包括土地利用数据(空间分辨率为 30 m 的解译数据), 以及湖南省行政边界。通过 ArcGIS 软件的重分类工具, 将湖南省的土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地及未利用地 6 类, 并将其与全省 13 个地市和 1 个州的行政区边界进行融合分析, 提取各地市数据, 见图 1。碳排放量测算数据主要来源于《湖南省统计年鉴》《湖南能源统计年鉴》《中国能源统计年鉴》以及各市统计年鉴等。

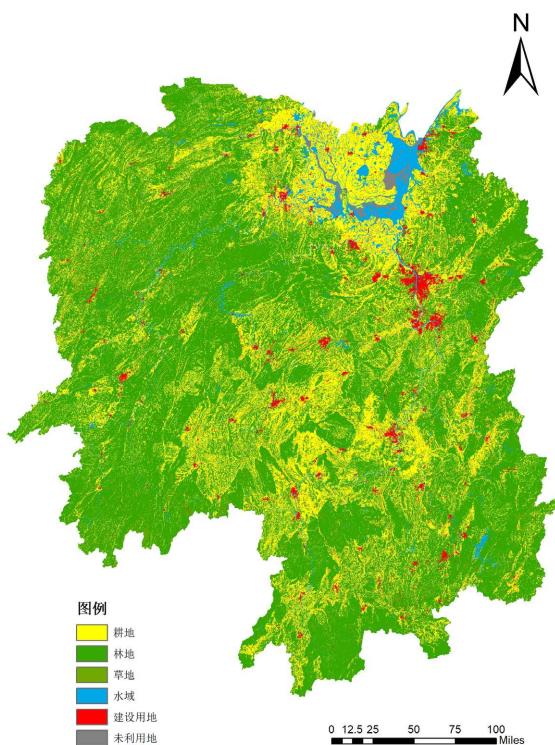


Figure 1. Land use status of Hunan Province in 2020

图 1. 2020 湖南省土地利用现状

2.3. 研究方法

2.3.1. 土地利用碳排放量测算

土地兼具碳排放和碳吸收两种功能[15]。土地利用碳排放测算方法包括直接测算和间接测算法。直接碳排放主要指不同土地利用类型引起的碳排放, 是基于 IPCC 清单的直接估算法[16], 通过碳排放和碳吸收系数来计算土地利用碳排放量, 适用于非建设用地的碳排放计算。

1) 直接测算法测算的包括耕地、林地、草地、水域、未利用地等类型所导致的碳排放量, 计算公式如下:

$$E_{direct} = \sum A_i = \sum S_i \times C_i \quad (1)$$

式中, E_{direct} 为直接碳排放量, t; A_i 为第 i 种用地类型的碳排放量或碳吸收量, t; S_i 为第 i 种用地类型的面积, hm^2 ; C_i 为第 i 种用地类型的碳排放系数, t/hm^2 ; 耕地、林地、草地、水域、未利用地的碳排放系数分别为 0.497、-0.644、-0.02、-0.023、-0.005 [17]。

2) 间接测算法测算的是建设用地中由于人类活动消耗能源所产生的碳排放量。建设用地的碳排放量主要依据研究区内所消耗的各类能源量和相应碳排放系数间接估算[18]。因此, 研究将化石能源消耗碳排放量和人口呼吸碳排放量之和作为建设用地碳排放量, 选取原煤、焦炭、原油等 9 种能源的消费量计算 [19], 计算公式如下:

$$E_{indirect} = E_{fue} + E_{peo} \quad (2)$$

$$E_{fue} = \sum E_i \times V_i \times X_i \quad (3)$$

$$E_{peo} = P \times R \times D \quad (4)$$

式中, $E_{indirect}$ 为间接碳排放量, t; E_{fue} 为各种能源消耗产生的碳排放量, t; E_{peo} 为人口呼吸碳排放量, t; E_i 表示原煤、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气和电力的能源消费量, t; V_i 表示各能源对应的标准煤折算系数; X_i 表示各能源对应的碳排放系数。 P 为每人每天的 CO_2 排放量, t, 按每人每天排出 0.9 kg CO_2 进行计算[20]; R 为地区常住人口数量, 人; D 为天数, 天; 其中, 各种能源的碳排放系数与折算标准煤系数来源于《中国能源统计年鉴》与《IPCC 国家温室气体排放清单指南》, 并参考相关文献整理所得[21], 见表 1。

Table 1. Carbon emission coefficient and conversion standard coal coefficient of various energies

表 1. 各类能源的碳排放系数与折算标准煤系数

能源类型	原煤	焦炭	原油	汽油	煤油	柴油	燃料油	天然气	电力
碳排放系数 (kg/kgce)	0.7559	0.855	0.5857	0.5538	0.5714	0.5921	0.6185	0.4483	0.7476
折算标准煤系数 (kg/kgce)	0.7143	0.9714	1.4286	1.4714	1.4714	1.4571	1.4286	1.2143	0.1229

2.3.2. 碳排放经济贡献系数

碳排放的经济贡献系数(ECC)能够衡量一个国家或地区对碳排放的控制程度和经济贡献度, 可用于判断其减排降碳是否达标的标准之一[17]。计算公式如下:

$$ECC = \frac{G_L/G}{E_L/E} \quad (5)$$

式中, G_L 、 G 分别表示第 L 个地市和湖南省的地区生产总值; E_L 、 E 分别表示第 L 个地市和湖南省的碳排放总量。若 $ECC > 1$, 则表示该区域碳排放的经济贡献程度较高, 相反则表示贡献度较低。

2.3.3. 碳吸收生态承载系数

碳吸收生态承载系数(ESC)可以反映区域碳吸收能力和土地固碳能力的强弱, 是评价生态环境健康与否的重要指标[22]。计算公式如下:

$$ESC = \frac{GC_L/GC}{E_L/E} \quad (6)$$

式中, GC_L 、 GC 分别表示第 L 个地市和湖南省的碳吸收总量; E_L 、 E 分别表示第 L 个地市和湖南省的碳排放总量。若 $ESC > 1$, 则表示该区域碳吸收生态承载系数较高, 碳吸收能力较强, 相反则表示碳吸收能力较差。

3. 结果分析

3.1. 湖南省土地利用碳排放空间格局特征

3.1.1. 土地利用碳排放总体特征

湖南省的碳排放空间格局整体上呈现出由东部向西部减少的特征, 见图 2。2020 年, 湖南省碳排放总量为 4790.97 万吨, 94.1% 来源于人类活动的能源消耗。其中, 长株潭城市群的碳排放占比为 20.35%, 岳阳市的碳排放量最高, 为 1239.69 万吨, 其次为娄底市和湘潭市, 分别为 541.56 万吨、823.46 万吨。西部的张家界市、怀化市、湘西州的碳排放总量最小, 分别为 23.90 万吨、81.11 万吨、36.37 万吨。湖南省各地市单位 GDP 碳排放强度较高区域主要是岳阳市、娄底市和湘潭市, 单位 GDP 碳排放强度较低的区域主要是长沙市、湘西州、张家界市、怀化市和永州市, 说明这些区域单位经济产量所产生的碳排放较少, 地市经济的生态效率较高。

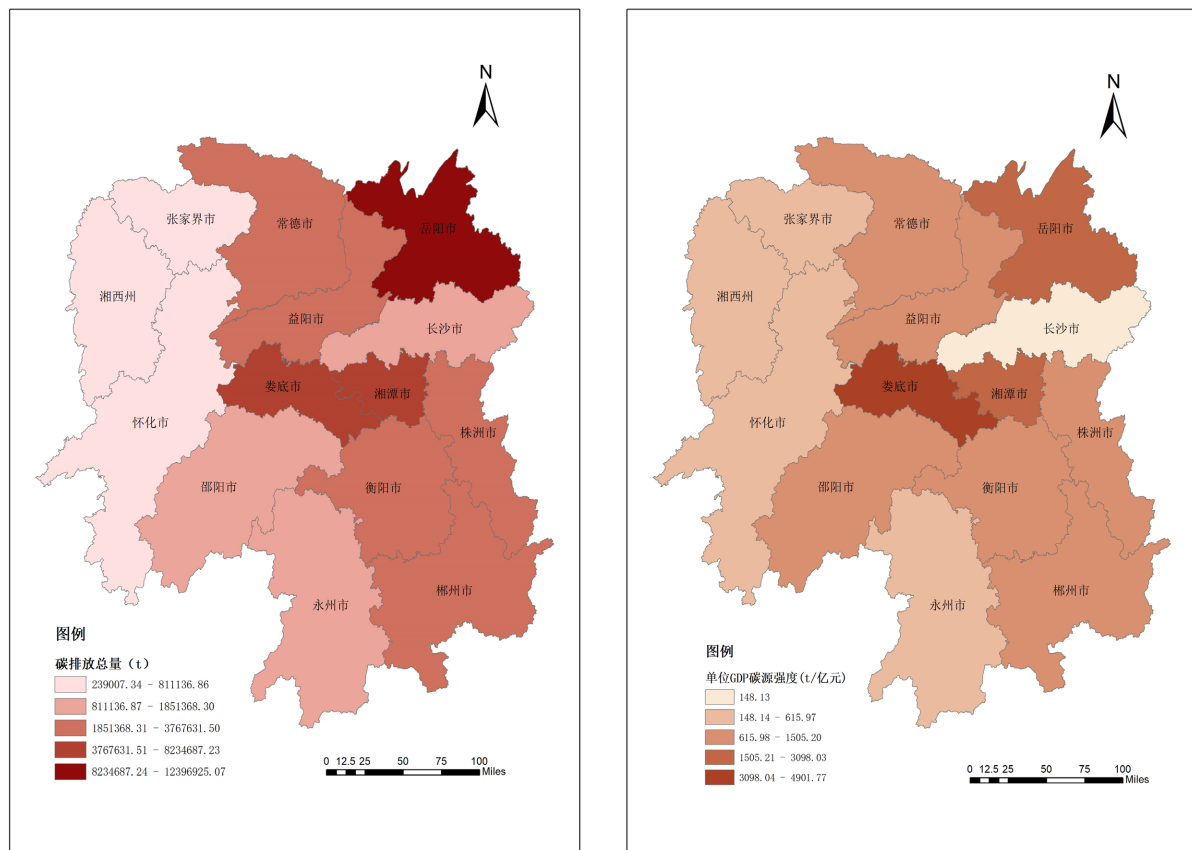


Figure 2. Spatial distribution of carbon emission (left) and carbon emission intensity per unit of GDP (right) in cities of Hunan Province

图 2. 湖南省地市碳排放(左)与单位 GDP 碳排放强度(右)的空间分布

3.1.2. 土地利用碳吸收总体特征

湖南省中部与南部有雪峰山脉、衡山和南岭, 自然资源丰富, 碳吸收总量整体上呈西部高东部低的分布特征, 见图 3。2020 年, 湖南省的碳吸收总量为 851.75 万吨, 碳吸收量最高的土地利用类型是林地, 占 99.63%。其中, 怀化市的碳汇总量最高, 为 136.43 万吨, 其次是永州市和郴州市, 分别为 93.03 万吨、90.83 万吨。而碳吸收总量最小的湘潭市、娄底市和张家界市, 分别为 18.19 万吨、30.86 万吨、39.92 万吨, 长株潭城市群的碳吸收占比为 13.24%。通过测算单位面积的碳吸收强度消除用地面积对碳汇总量产生的绝对影响, 结果表明, 岳阳市、常德市、益阳市的单位土地面积吸收二氧化碳的能力最弱, 说明这些区域的单位土地面积对生态的贡献率较低。

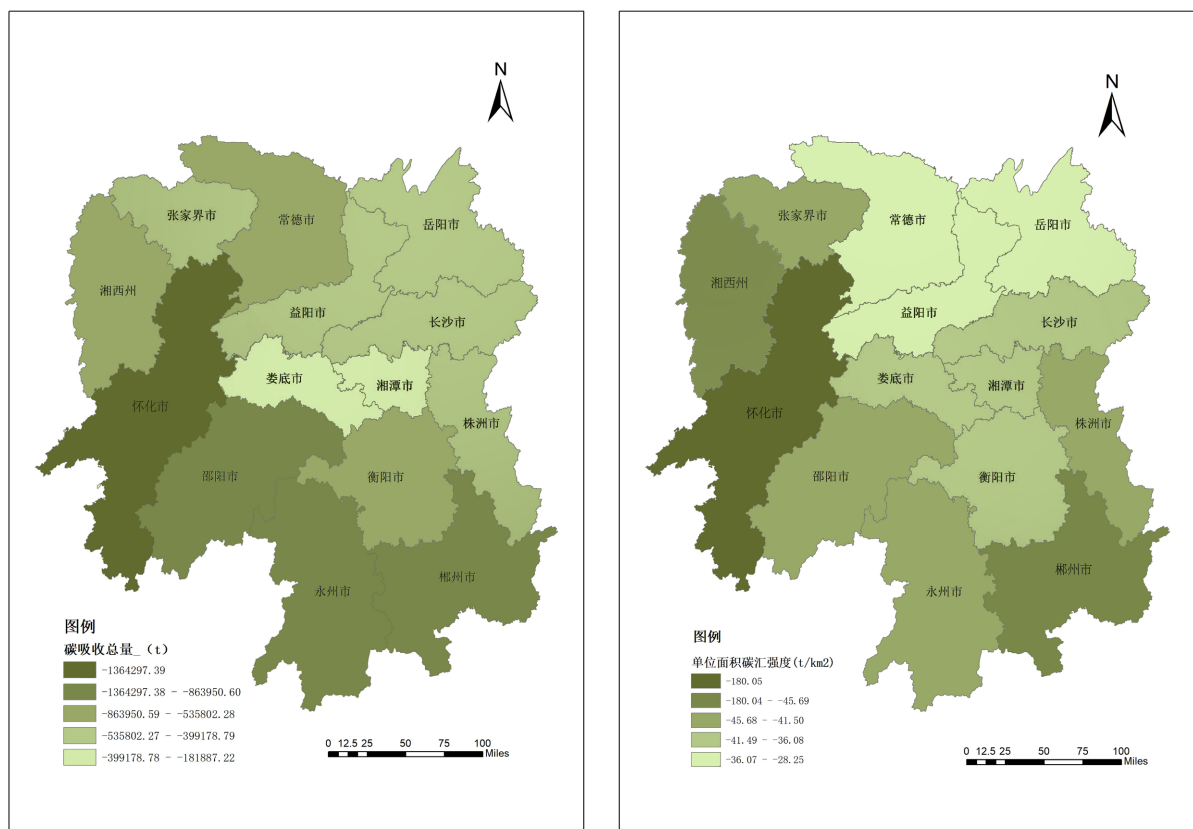


Figure 3. Spatial distribution of carbon absorption (left) and carbon absorption intensity (right) in cities of Hunan Province
图 3. 湖南省地市碳吸收(左)与单位面积碳吸收强度(右)的空间分布

3.1.3. 碳排放经济贡献系数与碳吸收生态承载系数

湖南省碳排放经济贡献系数的空间分布总体上呈现“一核三翼”的特征, 见图 4。主要表现为以长沙市为主导驱动引领, 其碳排放经济贡献系数为 7.66, 说明长沙市在湖南省碳排放的经济贡献率最高; 而“三翼”主要指位于西部的张家界市(2.64)、怀化市(2.34)、湘西州(2.26)。此外, 碳排放经济贡献系数大于 1 的城市还有永州市(1.84)、株洲市(1.39)、邵阳市(1.38)、衡阳市(1.25)以及常德市(1.22)。碳排放经济贡献系数最低的区域是益阳市(0.83)、郴州市(0.75)、湘潭市(0.49)、岳阳市(0.37)、娄底市(0.23), 这些城市的单位碳排放产生的经济效益不高。

湖南省碳吸收生态承载系数的空间分布呈现西高东低、中间最低的特征, 见图 4。具体表现为湘西州的碳吸收生态承载系数最高为 10.93, 其次是怀化市(9.46)和张家界市(9.39), 表明湘西州、怀化市以及

张家界市对湖南省的碳排放的吸收具有积极的贡献作用。此外, 碳吸收生态承载系数大于 1 的城市还有永州市(4.03)、邵阳市(2.62)、长沙市(1.44)、郴州市(1.36)、株洲市(1.08)。碳吸收生态承载系数最低的区域是衡阳市(0.98)、益阳市(0.89)、常德市(0.86)娄底市(0.21)、湘潭市(0.19)、岳阳市(0.19), 这些区域的碳吸收强度较低, 生态承载能力较差。

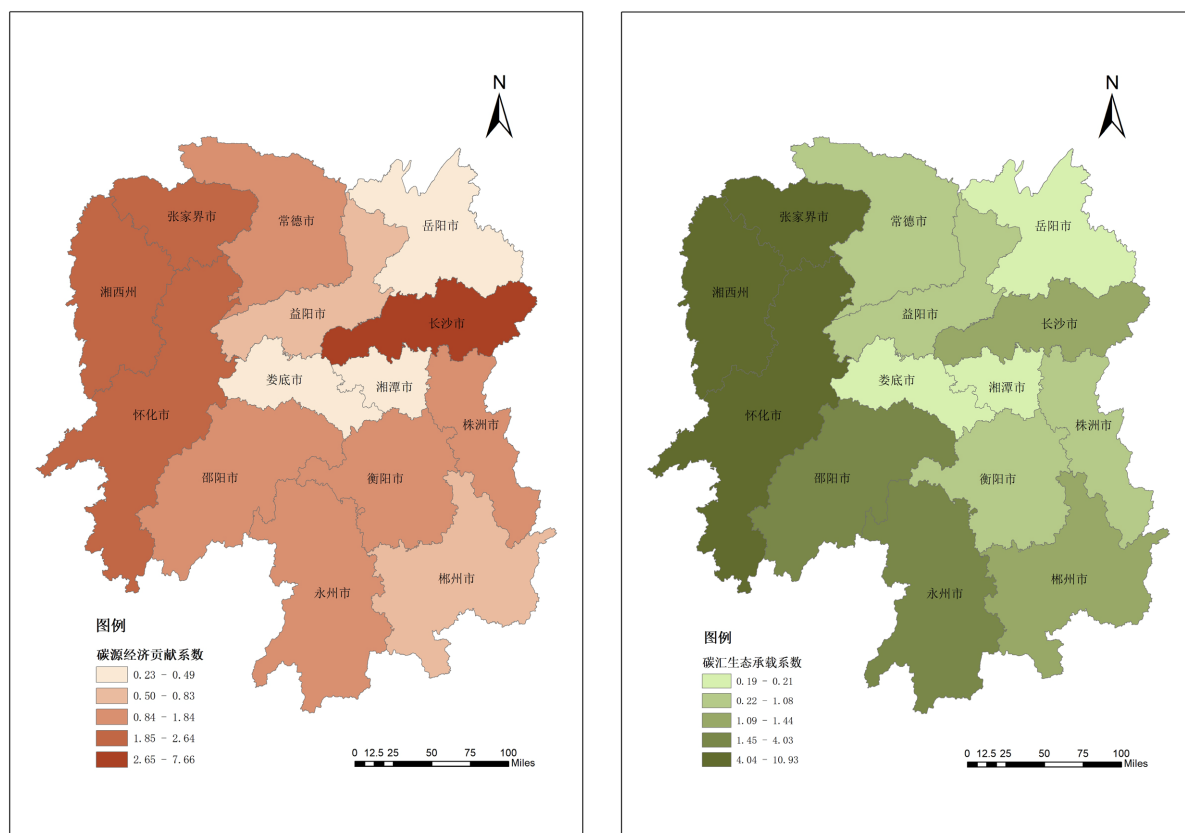


Figure 4. Spatial distribution of carbon emission economic contribution coefficient and carbon absorption ecological carrying coefficient in Hunan Province

图 4. 湖南省碳排放经济贡献系数与碳吸收生态承载系数空间分布图

3.2. 湖南省国土空间碳排放分区特征

根据碳排放经济贡献系数和碳吸收生态承载系数与 1 的关系, 结合湖南省行政区划将湖南省分为低碳发展区、碳强度控制区、碳汇功能区以及高碳优化区, 见图 5 与表 2。每个分区的碳排放特征如下:

1) 低碳发展区: 碳排放经济贡献率(ECC) > 1 且碳吸收生态承载系数(ESC) > 1 的区域, 主要包括长沙市、株洲市、邵阳市、张家界市、永州市、怀化市、湘西州, 这些区域的碳排放经济效益高, 生态循环较为系统完善。其中, 长沙市的 ECC 最高(7.66), 湘西州的 ESC 最高(10.93), 见表 3。长沙市作为湖南省的工业中心, 碳排放较高, 碳排放对经济效益贡献度居湖南省首位, 相对而言, 碳汇能力有待提升。张家界市、怀化市、湘西州拥有丰富的自然资源和文化旅游资源, 碳排放量较少, 碳吸收能力较强, 存在碳排放经济贡献度与碳吸收生态承载度不均衡的问题。

2) 碳强度控制区: 是碳排放经济贡献率(ECC) > 1、碳吸收生态承载系数(ESC) < 1 的区域, 包括常德市、衡阳市。这些区域的人口众多, 发展速度较快, 工业能源碳排放量较大, 碳排放经济贡献效益尚可, 但是生态环境有待改善。

3) 碳汇功能区: 是碳排放经济贡献率(ECC) < 1、碳吸收生态承载系数(ESC) > 1 的区域, 即郴州市。郴州市是湖南省绿色高优农产品主产区, 林地占比高, 碳汇能力较强, 但碳排放经济效益明显较低。

4) 高碳优化区: 是碳排放经济贡献率(ECC) < 1、碳吸收生态承载系数(ESC) < 1 的区域, 包括湘潭市、岳阳市、益阳市、娄底市。这些区域的碳排放对经济效益的贡献度较低, 仅占全省的 9.6%, 同时固碳能力较差。在“3 + 5”环长株潭城市群中, 岳阳市、娄底市、益阳市的碳排放经济贡献度仅占全省的 5.80%, 湘潭市和娄底市的碳排放较高, 占全省的 43.06%, 与长沙市、株洲市存在一定差距, 存在碳排放经济贡献与空间发展格局不协调、与湖南省低碳发展方向不匹配等问题的区域, 是湖南省低碳转型需要重点关注的区域。

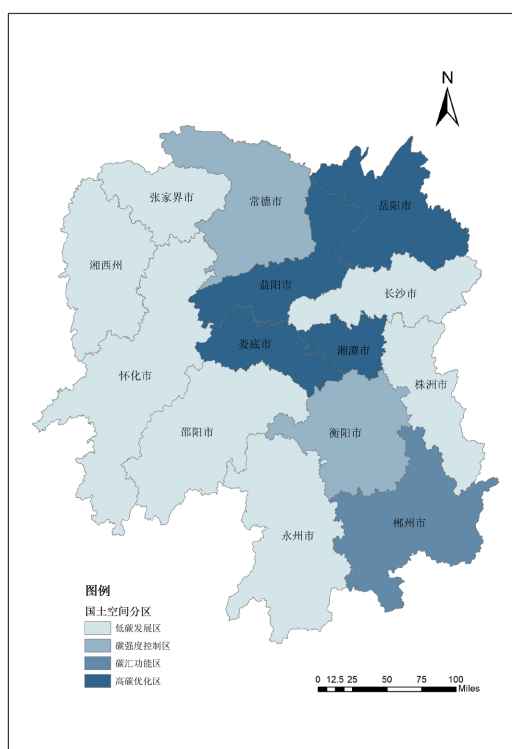


Figure 5. Territorial space zoning in Hunan Province

图 5. 湖南省国土空间分区

Table 2. Zoning characteristics of carbon emission in territorial space

表 2. 国土空间碳排放分区特征

分区名称	划分标准	分区特征	典型城市
低碳发展区	ECC > 1 ESC > 1	碳排放经济效益较高, 具有较好的生态系统	长沙市, 株洲市, 邵阳市, 张家界市, 永州市, 怀化市, 湘西州
碳强度控制区	ECC > 1 ESC < 1	碳排放量较大, 碳吸收能力不足	常德市, 衡阳市
碳汇功能区	ECC < 1 ESC > 1	碳汇能力较强, 但碳排放经济效益明显较低	郴州市
高碳优化区	ECC < 1 ESC < 1	碳排放很高, 且碳吸收能力较弱	湘潭市, 岳阳市, 益阳市, 娄底市

注: ECC: 碳排放经济贡献率; ESC: 碳吸收生态承载系数。

Table 3. Accounting results of carbon emission and carbon absorption in each city of Hunan Province**表 3.** 湖南省各地市碳排放与碳吸收核算结果

地市行政名称	碳排放总量 (吨)	碳吸收总量 (吨)	净碳排放量 (吨)	单位 GDP 碳排放强度 (吨/亿元)	单位面积 碳吸收强度 (吨/公顷)	碳排放经济 贡献系数	碳吸收生态 承载系数
长沙市	1798691.81	-459072.80	1339619.01	148.13	-38.85	7.66	1.44
株洲市	2536168.66	-486624.60	2049544.06	816.59	-43.27	1.39	1.08
湘潭市	5415655.22	-181887.22	5233767.99	2311.27	-36.34	0.49	0.19
衡阳市	3177546.87	-551860.40	2625686.47	905.67	-36.08	1.25	0.98
邵阳市	1851368.30	-863950.60	987417.71	822.53	-41.50	1.38	2.62
岳阳市	12396925.07	-419700.84	11977224.22	3098.03	-28.25	0.37	0.19
常德市	3485610.90	-535802.28	2949808.62	929.71	-29.48	1.22	0.86
张家界市	239007.34	-399178.79	-160171.44	429.34	-41.86	2.64	9.39
益阳市	2533294.81	-400991.21	2132303.59	1366.78	-32.54	0.83	0.89
郴州市	3767631.50	-908305.14	2859326.36	1505.20	-46.97	0.75	1.36
永州市	1298287.49	-930339.73	367947.76	615.97	-41.79	1.84	4.03
怀化市	811136.86	-1364297.39	-553160.54	485.17	-180.05	2.34	9.46
娄底市	8234687.23	-308623.12	7926064.11	4901.77	-38.06	0.23	0.21
湘西州	363736.46	-706902.36	-343165.89	501.63	-45.69	2.26	10.93

4. 结论与建议

4.1. 结论

基于 2020 年土地利用数据、能源以及经济数据, 通过 IPCC 清单法估算湖南省 14 个地市的土地利用碳排放与碳吸收量, 发现湖南省的碳排放呈现出由东部向西部减少的空间特征, 岳阳市的碳排放量最高, 其次为娄底市和湘潭市。碳吸收呈现出由东向西逐渐增加的空间特征, 怀化市的碳吸收量最高, 其次是永州市和郴州市。结合碳排放经济贡献系数(ECC)与碳吸收生态承载系数(ESC)将湖南省划分为低碳发展区($ECC > 1, ESC > 1$), 包括长沙市、株洲市、邵阳市、张家界市、永州市、怀化市、湘西州; 碳强度控制区($ECC > 1, ESC < 1$), 包括常德市、衡阳市; 碳汇功能区($ECC > 1, ESC < 1$), 包括郴州市; 高碳优化区($ECC < 1, ESC < 1$), 包括湘潭市、岳阳市、益阳市、娄底市。通过分析土地利用碳排放特征和国土空间分区特征, 发现湖南省存在碳排放经济贡献度与碳吸收生态承载度不均衡、碳排放经济贡献与空间发展格局不协调、高碳优化区与整体低碳发展方向不匹配等问题, 为促进湖南省国土空间低碳发展提出优化建议。

4.2. 建议

4.2.1. 结合分区特征, 优化空间碳排放格局

低碳发展区包括长沙市、株洲市、邵阳市, 推动能源向绿色、低碳的转变的同时, 要维持经济的正

常发展, 并加速发展洁净能源。在此基础上, 重视生态保护和绿色发展, 实现碳排放和碳吸收的均衡配置。张家界市、永州市、怀化市、湘西州要坚持对自然资源和文化旅游资源的保护, 确保土地碳汇功能, 加快发展旅游经济, 提升碳排放的经济效益。碳强度控制区包括常德市和衡阳市, 要从优化经济结构、加大污染治理等方面, 有效地促进资源的利用和减少二氧化碳的排放。在规划和发展中, 要注重对碳的吸收和生态环境的保护, 坚持可持续发展的方针, 实现资源的可持续利用。碳汇控制区主要为郴州市, 郴州市被称为“林中之城”, 林业起到了重要的碳汇作用, 但是能源碳排放的经济效益不高, 需要提高重点行业能源利用效率, 打造低碳经济发展产业链, 促进绿色经济循环发展。高碳优化区, 包括湘潭市、岳阳市、益阳市、娄底市, 需重点强调这些区域的减排责任, 加快能源消费结构调整, 形成低碳循环发展模式。

4.2.2. 依托空间发展格局, 联动区域低碳发展

贯彻落实湖南省空间发展战略, 结合以长株潭现代都市圈为核心, “3+5”环长株潭城市群联动发展, 构建“一圈一群三轴多点”的湖南省城镇空间发展格局, 制定与之相协调的降碳增汇方案, 充分发挥长株潭现代都市圈对全省发展的带动作用, 积极推进株洲市和湘潭市的碳中和工作。严格控制碳排放量, 优化调整煤炭消费结构, 大力发展可再生能源。在确保能源安全的基础上, 科学合理地控制煤炭消费总量, 促进风电和光伏发电规模化发展, 加大减污降碳协同治理力度。促进工业领域、城乡建设、交通运输等方面低碳转型, “3+5”环长株潭城市群联动发展, 在湖南省实现“双碳”目标中发挥带头作用。

4.2.3. 结合分区管理, 强化重点区域碳减排责任

高碳优化区是湖南省推进低碳发展、实现低碳目标需要攻坚克难的区域。包括湘潭市、岳阳市、益阳市、娄底市。这些城市的碳排放经济效益不足, 且固碳能力不高。尤其以湘潭市和娄底市的碳排放较高。要坚持生态优先、绿色发展的原则, 优先处理建设用地的碳排放, 鼓励 TOD 模式的城市规划开发, 完善建筑节能、减碳、绿色、改造等标准体系。加强对高能耗、高污染、高碳排放企业的限制, 大力发展清洁能源, 调整能源消费结构, 提高能源利用效率, 形成低碳循环发展模式。提高生态保护力度, 强化生态环境管理系统, 加强全民低碳宣传教育, 促使绿色生产生活方式成为公众的自觉选择。引导企业履行社会责任, 促进各领域绿色科技创新和资源循环利用。

参考文献

- [1] 黄晶, 彭雪婷, 孙新章, 樊俊. 可持续革命——塑造人类文明发展新范式[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(1): 1-6.
- [2] 杨绪红, 金晓斌, 项晓敏, 等. 近 300 年中国耕地开垦导致的碳排放估算[J]. 中国科学(地球科学), 2019, 49(3): 554-568.
- [3] 胡鞍钢. 中国实现 2030 年前碳达峰目标及主要途径[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(3): 1-15.
- [4] 张友国. 中国降碳政策体系的转型升级[J]. 天津社会科学, 2022, 3(3): 90-99.
- [5] Beerling, D.J., Kantzas, E.P., Lomas, M.R., et al. (2020) Potential for Large-Scale CO₂ Removal via Enhanced Rock Weathering with Croplands. *Nature*, **583**, 242-248. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2448-9>
- [6] 张杰, 陈海, 刘迪, 等. 基于县域尺度土地利用碳排放的时空分异及影响因素研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2022, 52(1): 21-31.
- [7] 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.
- [8] 魏媛, 吴长勇. 喀斯特贫困山区土地利用碳排放效应及风险研究——以贵州省为例[J]. 生态经济, 2018, 34(3): 31-36.
- [9] 魏媛, 简小玉. 基于碳达峰碳中和的贵州省土地利用碳排放演变及预测研究[J]. 生态经济, 2022, 38(4): 108-114.

- [10] 李志英, 李媛媛, 汪琳, 裴玉力. 云南省国土空间“三生”功能特征及分区优化研究[J]. 生态经济, 2021, 37(6): 94-101.
- [11] 魏旭红, 开欣, 王颖, 郁海文. 基于“双评价”的市县国土空间“三区三线”技术方法探讨[J]. 城市规划, 2019, 43(7): 10-20.
- [12] 倪庆琳, 侯湖平, 丁忠义, 等. 基于生态安全格局识别的国土空间生态修复分区——以徐州市贾汪区为例[J]. 自然资源学报, 2020, 35(1): 204-216.
- [13] 张箫, 牟雪洁, 王夏晖, 等. 国土空间生态修复分区研究——以海南岛为例[J]. 生态经济, 2021, 37(2): 183-189.
- [14] 戚冬瑾, 周剑云, 李贤, 陈浩. 国土空间详细规划分区用途管制研究[J]. 城市规划, 2022, 46(7): 87-95.
- [15] 李玉玲, 李世平, 祁静静. 陕西省土地利用碳排放影响因素及脱钩效应分析[J]. 水土保持研究, 2018, 25(1): 382-390.
- [16] Yang, X., Ma, C.B. and Zhang, A.L. (2016) Decomposition of Net CO₂ Emission in the Wuhan Metropolitan Area of Central China. *Sustainability*, 8, Article 784. <https://doi.org/10.3390/su8080784>
- [17] 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.
- [18] 李鹏, 李静婷, 梁亚红, 廖易. 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.
- [19] 刘学荣, 杨琳, 王颖, 等. 基于土地利用变化的东北地区碳排放效应研究[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2): 107-114.
- [20] 魏燕茹, 陈松林. 福建省土地利用碳排放空间关联性与碳平衡分区[J]. 生态学报, 2021, 41(14): 5814-5824.
- [21] 李键, 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[J]. 生态经济, 2019, 35(8): 28-34+66.
- [22] 徐影, 郭楠, 茹凯丽, 范胜龙. 碳中和视角下福建省国土空间分区特征与优化策略[J]. 应用生态学报, 2022, 33(2): 500-508.