

成渝双城经济圈土地利用碳排放 空间格局及碳平衡分区

邓元杰^{1,2}, 陈航¹, 海宜峰¹, 周佳妮¹, 吉则丁的^{1,2}, 罗洎^{1,2}, 李兰³

(1.四川轻化工大学 经济学院, 四川 自贡 643000;

2.四川轻化工大学 经济学院 农业经济研究中心, 四川 自贡 643000; 3.宜宾市农业科学院, 四川 宜宾 644000)

摘要: [目的] 在“双碳”目标下, 研究土地利用对碳排放、碳吸收以及碳平衡的影响, 为国土空间规划提供依据。[方法] 以成渝经济圈作为研究区, 基于土地利用和社会经济数据, 并采用系数法测算研究区2000—2022年的碳收支量并探讨其时空格局差异, 通过经济贡献率和生态承载系数从多角度对处理后的结果进行碳平衡分区, 并提出具有针对性的策略。[结果] ①碳排放量总体上呈现上升趋势, 耕地和建设用地区是最主要的碳源, 在空间上主要分布在研究区域的成都平原地区以及重庆市区。②碳吸收总量呈现上升趋势, 碳汇的主要来源为林地, 在空间上主要分布在研究区域周边的山区。③净碳排放总量增幅达273%。实现碳平衡县域由23个减少至10个。④基于碳平衡分析, 根据净碳排放量、经济贡献率等指标, 将优质农产品产区等区域划分为低碳发展区, 人稠地窄的核心发达区域划分为碳强度控制区, 传统工业区域划分为高碳优化区, 将生态屏障区划分为碳汇功能区。[结论] 成渝经济圈碳排放时空差异具有相应规律性, 碳吸收空间较稳定, 可以根据国土分区优化方案对土地资源利用结构进一步进行更精细化调整, 推动经济圈低碳发展和可持续发展。

关键词: 土地利用; 碳排放; 碳平衡; 国土空间优化; 成渝双城经济圈

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)05-0337-10

中图分类号: X321, F301.24

文献参数: 邓元杰, 陈航, 海宜峰, 等. 成渝双城经济圈土地利用碳排放空间格局及碳平衡分区[J]. 水土保持通报, 2024, 44(5): 337-346. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.05.036; Deng Yuanjie, Chen Hang, Hai Yifeng, et al. Spatial patterns of carbon emission from land use and carbon balance partitioning in Chengdu-Chongqing economic zone [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(5): 337-346.

Spatial Patterns of Carbon Emission from Land Use and Carbon Balance Partitioning in Chengdu-Chongqing Economic Zone

Deng Yuanjie^{1,2}, Chen Hang¹, Hai Yifeng¹, Zhou Jiani¹, Jize Dingdi^{1,2}, Luo Ji^{1,2}, Li Lan³

(1.College of Economics, Sichuan University of Science and

Engineering, Zigong, Sichuan 643000, China; 2.Agricultural Economy

Research Center, College of Economics, Sichuan University of Science and Engineering,

Zigong, Sichuan 643000, China; 3.Yibin Academy of Agricultural Sciences, Yibin, Sichuan 644000, China)

Abstract: [Objective] Under the “double carbon” goal, the impact of land use on carbon emission, absorption, and balance was examined to provide a basis for national spatial planning. [Methods] The Chengdu-Chongqing economic zone was taken as the study area, based on land use and socio-economic data, and the coefficient method was adopted to measure the carbon balance of the study area from years 2000 to 2022. The study then explored the differences in the spatial and temporal patterns of the area and conducted carbon balance zoning of the processed results from multiple perspectives using the economic contribution rate and ecological carrying capacity coefficient. Lastly, a targeted strategy was proposed. [Results]

收稿日期: 2024-01-15

修回日期: 2024-06-21

资助项目: 长江上游航运物流协同创新中心项目“宜宾市减污降碳协同效应的时空演变及影响机制研究”(XTCX2023A01); 成渝地区双城经济圈川南发展研究院资助(CYQCNY20234); 四川省农村社区治理研究中心资助项目(SQZL2023C03); 四川省大学生创新训练计划项目(S202410622069)

第一作者: 邓元杰(1992—), 男(汉族), 四川省内江市人, 博士, 讲师, 主要从事资源经济与环境管理方面的研究。Email: ecodyj@suse.edu.cn.

通信作者: 吉则丁的(1992—), 男(彝族), 四川省马边彝族自治县人, 硕士, 助教, 主要从事资源经济与环境管理方面的研究。Email: jizedingdi@suse.edu.cn.

① Carbon emissions generally showed an upward trend, and cropland and construction land were the most important sources of carbon. These land types were spatially distributed mainly in the Chengdu Plain and Chongqing metropolitan areas of the study area. ② The total amount of carbon sequestration showed an upward trend, and the main source of carbon sinks was forest land, which was spatially distributed mainly in the mountainous areas around the study area. ③ Total net carbon emissions increased by 273%. The number of counties achieving carbon balance reduced from 23 to 10. ④ Based on carbon balance analysis, indicators of net carbon emissions, and economic contribution rate, among others, high-quality agricultural production areas were classified as low-carbon development zones, densely populated and narrowly developed core areas as carbon-intensity control zones, traditional industrial areas as high-carbon optimization zones, and ecological barrier zones as carbon sink functional zones. [Conclusion] The spatial and temporal differences in carbon emissions in the Chendu-Chongqing economic zone had corresponding regularities, and the carbon absorption space were more stable. Therefore, to promote the low-carbon and sustainable development of the economic zone, the land resource utilization structure can be further adjusted in a more refined way according to the land zoning optimization plan.

Keywords: land use; carbon emissions; carbon balance; national spatial optimization; Chengdu-Chongqing economic zone

因人类活动而排放的 CO₂ 等温室气体是导致全球气候变暖的主要原因之一,严重危害了全球生态平衡和稳定^[1]。基于此,各国签署了《巴黎协定》,提出了“将全球气温升幅限制在比工业化前水平高 2 °C 以内,并寻求进一步限制在 1.5 °C 以内的措施”的目标^[2]。中国作为《巴黎协定》的缔约国,为实现此目标,习近平总书记在 2020 年 9 月的第七十五届联合国大会上,向世界作出了实现“双碳”目标的中国承诺。为此,学者们就如何实现“双碳”目标进行了大量的探索。研究^[3]表明,人类在对土地利用类型进行改变时所排放的温室气体是导致全球气候变暖的重要原因;此外,部分研究^[4]也表明,人类活动主导的土地利用类型的变化所增添的林地与草地等利用类型也能够使得碳吸收量增加,净碳排放量减少。因此,探究土地利用类型变化与碳收支之间的相关关系,能够为“双碳”目标的实现提供理论依据。

如今,越来越多的学者将目光聚焦在土地利用变化对碳排放与碳吸收的影响研究上,研究类型主要分为 3 类。第 1 类学者从各地土地利用类型变化出发,利用探索性空间分析法(ESDA)及标准差椭圆等方法探究该地碳收支的时空分异情况^[5-6]。第 2 类学者则在对碳收支时空分异研究的基础之上,利用地理加权回归、地理探测器及 LMDI 等分析方法进一步探讨了其背后的影响因素^[7-8]。第 3 类学者则更进一步,运用未来土地利用(FLUS)与生态系统服务和权衡的综合评估(InVEST)以及灰色预测等模型,对未来的土地利用碳排放情况进行预测^[9-10]。以上研究在土地利用碳收支层面取得了一定的成果,为固碳减排提供了一定的思路。然而,目前鲜有研究进一步将

研究结果落实到国土空间规划管控之上。

2021 年《成渝地区双城经济圈建设规划纲要》明确了成渝双城经济圈中国经济增长第四极的战略地位。成渝双城经济圈的发展和建设必然会导致土地利用类型发生变化,造成温室气体排放,进而为成渝地区减排固碳带来一定的压力。由此可见,对成渝地区土地利用碳排放进行研究并在此基础上提出国土空间优化方案有重大意义。当前,虽然有少数学者^[11-12]已就成渝经济圈的土地利用碳排放时空格局演变或模拟预测等方面进行了研究,但缺乏基于土地利用碳排放研究结果,并提出切实可行的碳平衡分区方案。因此,本文将基于成渝地区双城经济圈 142 个县域单元土地利用数据,利用土地碳排放系数测算成渝地区碳收支数据并探究碳排放空间格局,并进一步对碳排放经济贡献率及碳吸收生态承载系数进行测算,最后并提出碳平衡分区以及国土分区优化方案,进一步为成渝地区减排固碳,实现高质量发展提供一定的建议与政策参考,以达到推动成渝经济圈高质量发展、低碳绿色可持续发展的目的,也为全国早日实现“双碳”目标提供科学依据及理论支撑。

1 研究区概况

成渝地区双城经济圈总面积 1.93×10^5 km², 研究区介于 101.56°E 至 108.8°E, 27.39°N 至 31.4°N 之间,地处四川盆地,东邻湘鄂、西通青藏、南连云贵、北接陕甘,是西部唯一具备突破省级行政区界限、在更大范围内促进资源合理配置的地区^[13]。成渝地区境内地形复杂多样主要由平原、盆地、山地构成,海拔在

76~5 726 m 之间。气候以亚热带季风气候为主,年平均气温 16~18 ℃,年平均降水量 900~1 200 mm,动植物种类繁多,生态禀赋优良^[14]。截至 2022 年地区生产总值达 7.758 万亿元,占全国比重的 6.4%,占西部地区比重的 30.2%,是中国西部经济发展程度最高的地区,成为了继京津冀、珠三角、粤港澳大湾区后的中国经济增长第四极^[15]。本文基于《成渝地区双城经济圈建设规划纲要》选取了 142 个区(县)作为研究区域,主要包括重庆市的中心城区及万州、涪陵等 27 个区(县)以及开州、云阳的部分地区,四川省的成都、自贡、泸州等 15 个市,基于本文使用的土地利用数据,2022 年成渝经济圈各类土地利用面积比例分别是耕地 59.59%,林地 35.80%,草地 0.35%,水体 1.27%,建设用地 2.98%,未利用地 0.01%。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

土地利用数据来源于武汉大学黄昕团队制作的 CLCD (China land cover datasat, CLCD) 数据集 (<https://zenodo.org/records/8176941>)。该数据集基于 Landsat 数据提取的 1980—2022 年的数据其空间分辨率为 30 m×30 m,准确率达 79.31%^[16]。利用 ArcGIS 10.7 软件对数据进行裁剪、重分类和重采样后得到研究区 2000, 2005, 2010, 2015 和 2022 年的土地利用数据,包括耕地、林地、草地、水体、建设用地和未利用地 6 种地类,本文所有数据经投影变换全部转换为 WGS_1 984_UTM_Zone_48 N,分辨率统一为 100 m×100 m。

基础地理信息包括成渝双城经济圈边界数据、成渝双城经济圈所涉及行政边界数据。其中成渝双城经济圈边界数据是基于《成渝地区双城经济圈建设规划纲要》中公布的边界范围,运用 ArcGIS10.7 软件自绘所得 (<https://www.resdc.cn>),成渝双城经济圈涉及行政边界数据来源于全国地理信息资源目录服务系统的 1:100 万全国基础地理信息数据库 (<http://www.webmap.cn>)。

社会经济数据来自《四川省统计年鉴 (http://tjj.sc.gov.cn/scstjj/c105_855/nj.shtml)》和《重庆市统计年鉴 (https://tjj.cq.gov.cn/zwgk_233/tjnj/)》中 2000—2022 年中涉及到本文研究区内的各县市地区生产总值,其中由于《2023 四川省统计年鉴》未公布,暂以《2022 四川省统计年鉴》替代。

2.2 研究方法

2.2.1 土地碳排放测算 参考以往碳排放相关研究^[17-21],并结合成渝地区实际情况,将耕地和建设用

地确定为碳源,碳排放系数见表 1,碳排放量测算具体表达式如下^[17]:

$$C_e = \sum e_i = \sum s_i \cdot \partial_i \quad (1)$$

式中: C_e 为碳收支量; e_i 为第 i 种地类的碳排放量; ∂_i 为第 i 种地类的面积; s_i 为第 i 种地类的碳排放系数。值得注意的是,本文所选择的耕地碳源系数为扣除了耕地碳汇系数的净碳排放系数,因此本文仅将耕地作为碳源^[17-21]。

表 1 不同土地利用类型碳排放系数

Table 1 Carbon emission factors for different land use types

土地类型	碳排放系数/ (t·hm ⁻²)	数据来源
耕地	0.459 6	吴蒙等 ^[18] ,张杰等 ^[19] ,彭文甫等 ^[21]
建设用地	49.1	自然资源部公布的西南地区系数值 ^[22]

2.2.2 土地碳吸收测算 参考以往碳吸收相关研究^[17-21,23-26]并结合川渝地区土地利用实际状况,将林地、草地、水体、未利用地确定为碳汇,它们碳吸收系数系数见表 2,碳吸收测算具体表达式为^[17]:

$$C_e = \sum e_i = \sum s_i \cdot \partial_i \quad (2)$$

式中: C_e 为碳收支量; e_i 为第 i 种地类的碳排放量; ∂_i 为第 i 种地类的面积; s_i 为第 i 种地类的碳吸收系数。

表 2 不同土地利用类型碳吸收系数

Table 2 Carbon sequestration coefficients for different land use types

土地类型	碳吸收系数/ (t·hm ⁻²)	数据来源
林地	-0.612 5	吴蒙等 ^[18] ,张杰等 ^[19] ,彭文甫等 ^[21]
草地	-0.021	易丹等 ^[23] ,方精云等 ^[24] ,Yu 等 ^[25]
水体	-0.024 8	吴蒙等 ^[18] ,Rong 等 ^[20] ,易丹等 ^[23]
未利用地	-0.000 5	吴蒙等 ^[18] ,郑永超等 ^[26]

2.2.3 土地利用类型净碳排放测算 计算碳排放与碳吸收的差量,进而得到净碳排放量,具体公式如下^[27]:

$$E_e = (E_{\text{cons}} + E_{\text{crop}}) - \sum E_i \quad (3)$$

式中: E_e 为净碳排放量; E_{cons} 为建设用地碳排放量; E_{crop} 为耕地碳排放量; E_i 为林地、草地、水体及未利用地的碳吸收量, $E_e = 0$ 为碳平衡状态。

2.2.4 碳排放经济贡献率 碳排放经济贡献率就是反映了此地的碳排放量对此地经济效益的影响,表达式如下^[28]:

$$\text{ECC} = \frac{G_n/G}{E_n/E} \quad (4)$$

式中: G_n, G 分别为第 n 个区县及成渝地区的 GDP; E_n, E 分别为第 n 个区县和成渝地区的碳排放量; $ECC > 1$ 表示碳排放经济贡献率较高,对经济效益的贡献率较大; $0 < ECC < 1$ 表示碳排放经济贡献率较低,对经济效益的贡献率较小。

2.2.5 碳吸收生态承载系数 碳吸收生态承载系数表现了此地的固碳能力大小,具体表达式如下^[29]:

$$ESC = \frac{CA_n / CA}{E_n / E} \quad (5)$$

式中: CA_n, CA 分别为第 n 个区县和成渝地区的碳吸收量; E_n, E 分别为第 n 个区县和成渝地区的碳排放量; $ESC > 1$ 表示碳吸收生态承载系数较高,生态系统固碳能力强; $0 < ESC < 1$ 表示碳吸收生态承载系数较低,生态系统固碳能力较弱。

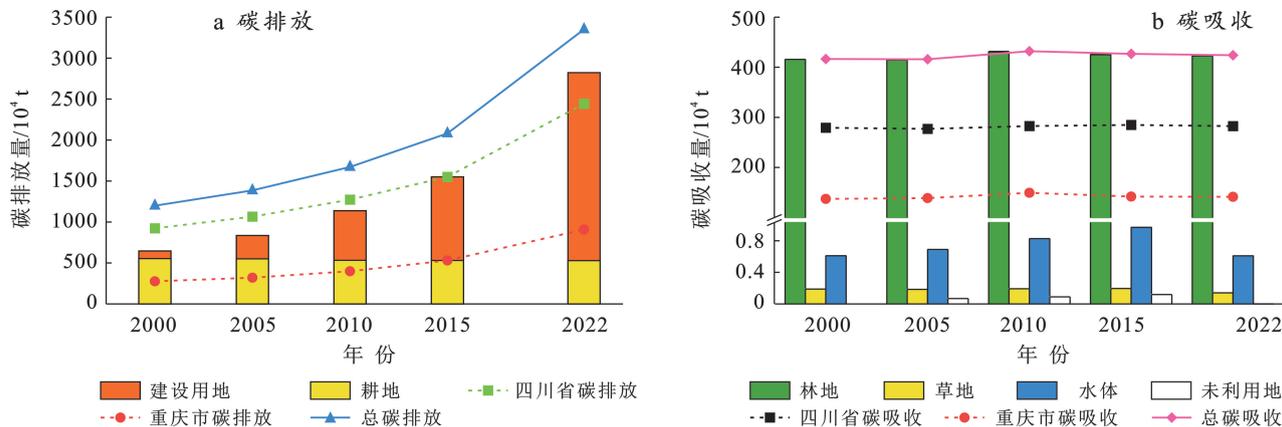


图 1 2000—2022 年成渝经济圈碳收支时间变化

Fig.1 Time variation of carbon balance in Chendu-Chongqing economic zone during 2000—2022

3.1.2 土地利用碳收支空间格局特征 成渝经济圈各区县碳排放整体表现为“中间高,四周低”的分布特征(图 2),前期的较高碳排区主要集中于成渝西北部,最低碳排区域分布于成渝地区的周边,后期最高碳排区域集中在成都市和重庆市,最高碳排的区域向成渝东南部扩散,具有一个较明显的扩散趋势,呈现一个“对角”的分布状况,最低碳排集中在西南部。整体而言,最高碳排区域由成都市和重庆市中心向外扩散,最低碳排区域在周边,其数量逐渐减少。碳吸收量最高的区域主要集中在盆周山地区;碳吸收量最低的区域则主要分布在经济发达的城市,如成都市、重庆市等。碳汇区域分布随时间变化大致相似(图 2),有少许区县从最低碳吸收向较低碳吸收,受土地利用性质和经济发展状况等因素的影响,这种变化不断发生。研究期内,最高碳吸收区域数量从 12

3 结果与分析

3.1 土地利用碳收支时空格局演变分析

3.1.1 土地利用碳收支时间变化特征 从 2000—2022 年,成渝经济圈碳排放量是斜率增大的上升趋势(图 1),碳排放量由 1.20×10^7 t 增长至 3.4×10^7 t,增幅为 179%。2000 年建设用地的碳排放占总排放量的 54%,2022 年增至 72.8%,整体碳排放量总值增幅较大,可能的原因在于建设用地的大幅扩张承载了工业化及城镇化的快速发展,由此产生了巨大的能源消耗^[11-12]。碳吸收量呈现较为一个平缓的增长态势,2000 年经济圈碳吸收量 4.17×10^6 t,2022 年碳吸收量达到了 4.24×10^6 t。林地碳吸收占比稳定在总碳吸收的 99%以上,但近年来其吸收比例逐年下降,水体的碳吸收量逐年增加,草地和未利用地则基本维持稳定。

个增加至 13 个,碳汇向良好的趋势发展。

3.2 土地利用净碳排放量变化分析

3.2.1 土地利用净碳排放时间变化分析 根据成渝经济圈的碳排放和碳吸收差值计算得出成渝经济圈净碳排放量,2022 年的净碳排放总量达到了 2.93×10^7 t,较 2000 年的 7.83×10^6 t 增加了 2.14×10^7 t,增幅 273%,而从实际土地利用中得出 2022 年耕地占比相比 2000 年减少了 2.8%,而建设用地增加了 2.3%,可以看出快速发展的工业和城镇化的建设可能会导致净碳排放大量增加。如图 3 所示,在 2015—2022 年这个时间段,两地区连线的斜率迅速增大,变化率从 0.2~0.4 增加至 0.7 以上,该现象表明净碳排放量均处于快速增长,并且随着工业的兴盛和建设用地的扩展,碳排放量逐步增加,碳吸收量平缓上升,也就导致净碳排放量呈现迅速增长的趋势。

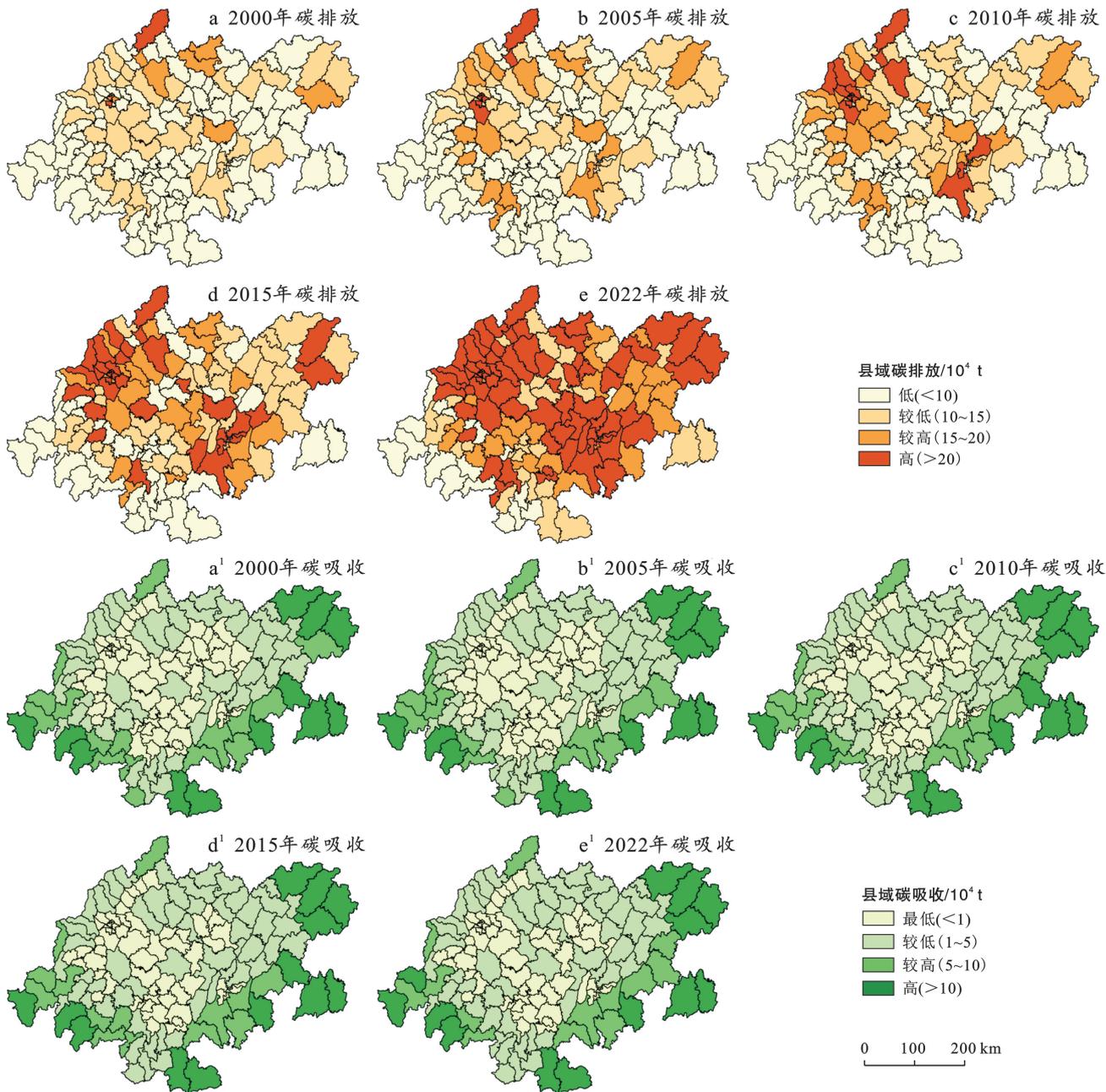


图 2 2000—2022 年成渝经济圈碳收支空间变化

Fig.2 Spatial variation of carbon balance in Chendu-Chongqing economic zone during 2000—2022

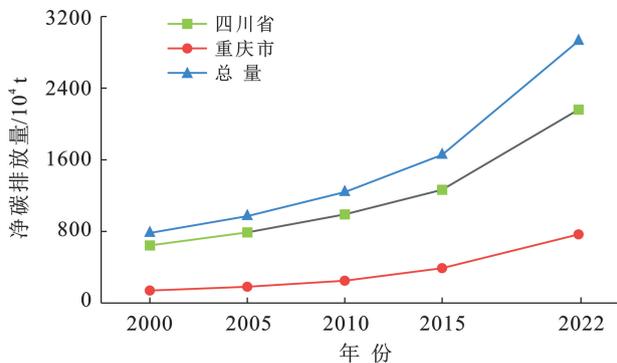


图 3 2000—2022 年成渝经济圈净碳排放量

Fig.3 Net Carbon Emissions in Chendu-Chongqing economic zone during 2000—2022

3.2.2 碳平衡空间格局分析 图 4 为实现碳平衡地区的区位图。研究期内,实现碳平衡的地区主要位于成渝经济圈的四大生态屏障,包括岷山—邛崃山—凉山生态屏障的区县,以及大娄山生态屏障,还包括武陵山生态屏障,以及位于米仓山—大巴山生态屏障。该类地区多以盆周山为主,且受人类活动影响小,植被覆盖率高,原生环境保存良好,林地占土地利用类型的比重极高,大量的林地能够通过光合作用起到良好的固碳作用,有效实现碳平衡。由图 4 可知,前期与后期达到碳平衡的区县数量不同,这样的现象根本表现在:建设用地和耕地的比例增加,林地、草地比例减少。此类现象反映了地区经济发展将无法避免地

侵占生态用地造成生态环境破坏,可见实现碳平衡与经济水平、生态用地面积有较为密切的关系^[28]。如何寻找到经济发展与生态保护的平衡点,“既要绿水青山,又要金山银山”是当下成渝双城经济圈发展中亟待解决的一大问题。

3.3 国土空间优化

根据此前所计算出的净碳排放的数据并综合碳排放经济贡献率和碳吸收生态承载系数,基于上述所示并结合相关文献^[28-30]将成渝经济圈划分为4个碳平衡分区(表5)。

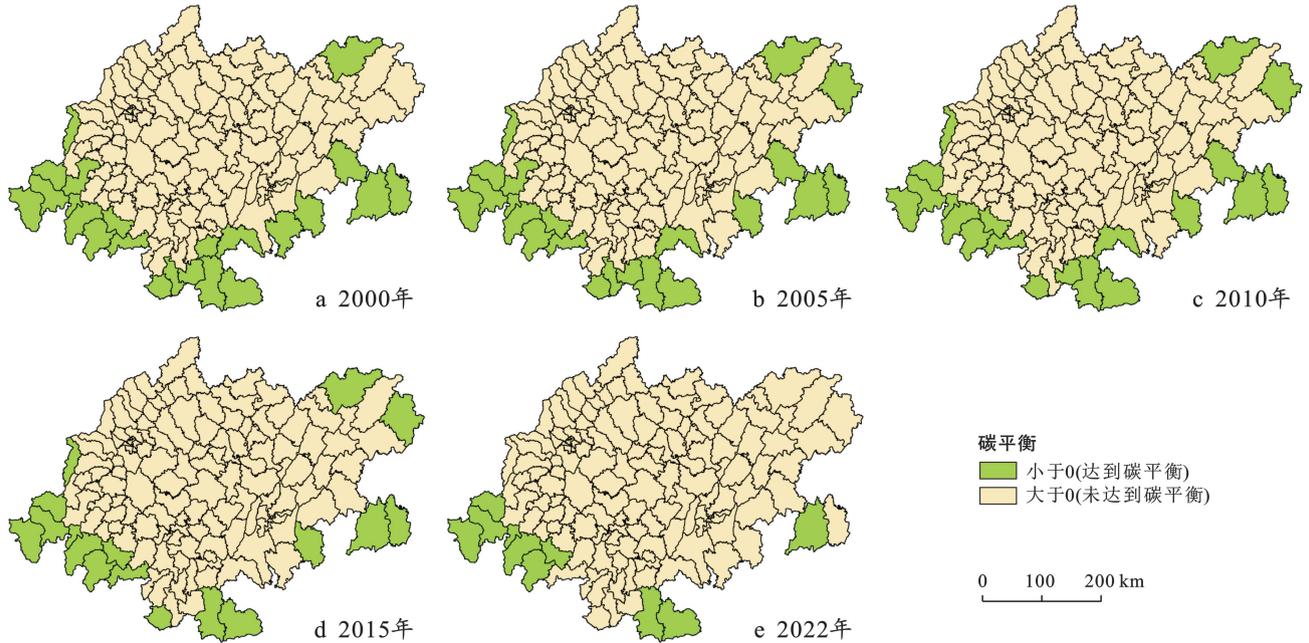


图4 2000—2022年成渝经济圈碳平衡区域

Fig.4 Carbon balance area of Chendu-Chongqing economic zone during 2000—2022

表5 成渝经济圈碳平衡分区特征

Table 5 Characteristics of carbon balance zones in Chendu-Chongqing economic zone

划分区域	划分依据	划分特征
低碳发展区	$ECC > 1, ESC > 1$	碳排放经济贡献率和生态承载系数均较高总体上碳吸收量大于碳排放量具有良好的绿色发展基础
碳强度控制区	$ECC > 1, ESC < 1$	碳排放经济贡献率较高单位生态承载水平较低整体碳排放量大于碳吸收量
碳汇功能区	$ECC < 1, ESC > 1$	固碳能力强碳汇资源丰富碳排放经济效率低下单位GDP碳排放大
高碳优化区	$ECC < 1, ESC < 1$	碳排放总量在100 t以上碳排放经济效率与生态承载水平均较低

对于成渝经济圈主体功能区规划,本文按开发内容划分为优化开发区、重点开发区、农产品主产区和重点生态功能区,并且与成渝经济圈的碳平衡分区相结合,重构为5个国土分区(图5)。

(1) 低碳发展—农产品主产区。低碳发展—农产品主产区主要分布于四川盆地的各个地方,主要包括阆中市、梓潼县、蓬溪县、犍为县、蓬安县等区县,这些区域分布于四川盆地粮油主产区的盆中浅丘粮油主产区以及盆中深丘粮油主产区,该区域包含的各区县都拥有着优质农产品基地,并具备良好的农业生产条件。除此之外,四川盆地仍然有许多的传统工业聚集,如:德阳市是我国最大的重型机械制造企业 and

大技术装备国产化基地,而中江县又属于低碳发展—农产品主产区。为保护该地区农业发展生态,应该积极提倡各个工业场所培育发展新能源,推进太阳能、风能等清洁能源的开发和利用。同时还应该通过促进产业结构调整与转型升级来促进低碳发展。从低碳农业方面来说:要依托各地区具有地区特色的农业产业,类似于渠县黄花、宜宾早茶等重点发展优质农产品,提供良好的农产品生产条件,以农产品为主及低碳工业为辅推动当地经济发展,并佐以休闲农业和观光农业。

这类地区需加强建设优良农产品主产区,要推动高标准农田建设,重点改善农业生产设施条件,加强

永久基本农田保护,减少对优质耕地资源的过度占用,持续实施退耕还林政策。同时,应妥善处理土地

闲置等问题,挖掘建设用地的潜力,确保城市化进程所需用地,提高土地利用效率。

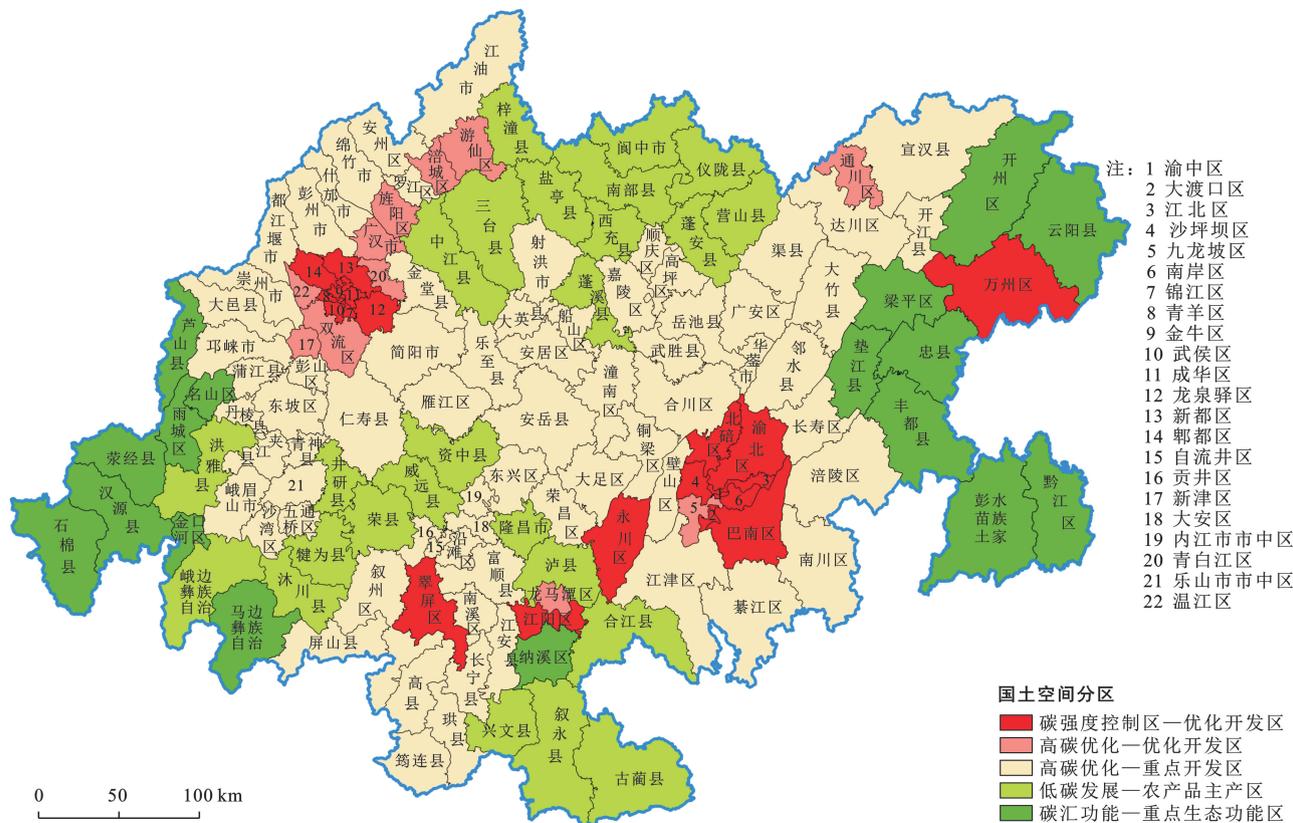


图 5 主体功能区划下成渝经济圈碳平衡分区

Fig.5 Carbon balance zoning of Chengde-Chongqing economic zone under main function zoning

(2) 碳强度控制—优化开发区。该类型主要包括各市的主城区和成都市以及重庆市的大部分开发区,主要包括渝中区、锦江区、北碚区、青羊区等各市的主城区,其均位于成渝经济圈的核心区域,此类型总体呈现区域面积小但是常住人口较多的现状。经济发展增速较快,碳排放经济贡献率相对较高,但是资源环境承载能力弱,区域生态系统固碳能力不足,碳吸收生态承载系数都几乎小于 0.01,个别区县接近 1。

主要经济中心,需构建更多生态、绿色、低碳的现代化产业。

这类地区需转变经济增长模式,减少过度占用可耕作土地、减弱消耗资源、严管污染排放,而是以提高质量和效益为首要目标,继续成为省区经济社会发展的龙头和参与经济全球化的主体区域。具体来说,成都市和重庆市主城区需要实行更严格的碳排放标准和产业准入环境指标,控制产业碳排放总量,建立更加清洁低碳、安全高效的能源体系,推动产业向高端、高效、高附加值转变,提升碳排放经济贡献能力。同时,要严格保护生态环境和禁止开发的区域,加强城市森林、公园绿地和城市湿地建设,提升城市碳吸收能力。综上所述,成都市和重庆市作为成渝经济圈的

(3) 高碳优化—重点开发区。此类型包括乐山市市中区、都江堰市、大安区、什邡市等位于成渝发展主轴上的大部分地区,此类地区基本上属于传统工业区域,经济发展比较好,在其中,城镇化的面积和工业开发程度都较高,碳排放经济贡献率在 0.6 上下浮动,碳吸收生态承载系数较低,但是相比较碳强度控制区略高,也意味着资源环境承载压力较大^[27]。这类地区是传统工业聚集区,需要及时改变经济发展模式,减少高能耗、高污染、高排放企业,推动传统工业技术升级,调整能源消费结构,完善基础设施和投资环境,促进产业集群化发展,壮大经济规模,加速工业化和城镇化进程。同时,应承接优化开发区域和产业转移,引导人口转移,加强工业和城市污染治理,解决建设用地碳排放问题,加大生态环境保护力度,拓展绿色生态空间。

(4) 高碳优化—优化开发区。高碳优化—优化开发区包括大渡口区、双流区、新都区、青白江区等位于成德绵眉雅乐城市发展带的县域地区,基本位于各

市主城区,经济发展比较好(GDP占比为11%),与高碳优化—重点开发区基本持平,该类地区的碳排放量都比较高,碳排放经济贡献较低,资源环境压力大,碳吸收生态承载系数较低。这类地区碳排放较高,需要加大产业结构调整力度,让原来的“粗重”的产业特征“轻质化”。需要培育更多新材料、软件、信息服务技术企业,建立高新技术产业化基地,发挥该类型的作用。工业领域主要通过优化生产工艺实现节能减排。

(5) 碳汇功能—重点生态功能区。碳汇功能—重点生态功能区主要承担着防风固沙、调节气候、涵养水源等一系列绿色能源的责任。此类型包括马边彝族自治县、芦山县、雅安市名山区、汉源县等位于岷山—邛崃山—凉山生态屏障、大娄山生态屏障与武陵山生态屏障的区县,这一类地区主要分布在盆周山,绝大多数区域都被植被占据,林地占比极高,虽然此类面积占成渝经济圈的比重很大,但是经济发展速度相对较缓慢,可供开发程度较低。由于自然生态条件较好,碳汇资源丰富,所以生态服务和资源环境承载能力较强(碳吸收生态承载系数几乎都在10以上),区域生态系统固碳能力优越,是成渝经济圈的重要生态屏障^[14]。

这类地区自然生态条件优越,碳汇资源丰富,生态系统固碳能力出色,是成渝经济圈的重要生态屏障。这些区域的发展要重点关注生态保护,包括加强自然保护区、风景名胜区和国家重点生态功能区的管理,以增强生态服务功能,构建国家生态安全屏障。同时,应积极保护天然林地,控制人类经济活动对生态环境的不良影响,实现区域经济和环境保护的共同发展。

4 结论与讨论

4.1 结论

(1) 研究期内,碳排放量由 1.20×10^7 t 增长至 3.40×10^7 t,碳排放总量呈现递增趋势;成渝双城经济圈总碳吸收量呈现平缓增长的态势,从 4.17×10^6 t 增加至 4.24×10^6 t。

(2) 碳排放整体表现为“中间高,四周低”的分布特征,成都市和重庆市碳源能力较强;碳吸收高的区县包围碳吸收低的区县,层次分明。

(3) 实现碳平衡的地区均是成渝经济圈周边地区,地广人稀,植被覆盖度高,实现碳平衡与经济水平、生态用地面积有较为密切的关系;需要周边降低碳排放量和提升碳吸收量来更快实现碳平衡。

(4) 基于碳平衡分析,根据净碳排放量、经济贡献率等指标,将成渝经济圈重构为5个分区,分别命

名为低碳发展—农产品主产区、碳强度控制—优化开发区、高碳优化—重点开发区、高碳优化—优化开发区、碳汇功能—重点生态功能区。基于各分区优劣势,提出具有差异化的国土空间发展策略与管控建议。

4.2 讨论

(1) 在土地利用碳排放上,建设用地为最主要的碳源,其较高的碳排放系数意味着其面积增加将导致更多的碳排放,随着成渝经济圈未来社会经济的快速发展,建设用地将进一步呈扩张趋势^[11],今后需合理控制建设用地扩张强度,提升建设用地利用效率,协调建设用地和碳汇用地的空间布局,有效控制碳排放强度。林地、草地等碳汇用地的增加有助于增加碳吸收,吸收部分碳排放量。成渝双城经济圈作为长江上游重要生态屏障的核心区域,未来应在落实生态环境保护政策的同时,持续开展山水林田湖草、天然林保护、退耕还林等生态保护修复工程,以巩固和提升区域生态系统碳汇能力。

(2) 在制定碳平衡分区上,考虑到各地区碳收支情况不同,因此在制定碳平衡分区方案时需结合研究区社会经济发展的实际情况。本文聚焦于成渝地区,在其碳平衡分区划定上与其他研究结果相比具有一定差异,如杜海波等^[31]在制定长三角地区的碳平衡分区时,考虑到研究区作为经济高度发达的区域,其人为活动更为积极,能源消耗更多,因此提出的国土优化方案聚焦于限制城市扩张,控制人口密度,优化城市空间结构等措施上。而成渝经济圈人口密度相对较低,现代工业进程相对落后,并拥有大量生态保护区,因此其减碳减排压力相对较小,国土空间优化方案应聚焦在产业转型和生态保护等措施上。

(3) 本文还存在以下两点不足:①本文受限于数据来源及空间演算能力,仅从县域尺度对成渝经济圈碳排放进行研究,未对该研究区进行更低尺度、更多维度、更全面的研究,未来需要对加强对成渝经济圈更细致的研究,以拓展本文未涉及的层面,来达到更全面的研究。②本文的碳排放/碳吸收系数均是参考以往研究所得到的,不同地区上取得的系数均有差异,选择的系数也仅是涵盖成渝经济圈范围的地区,没有与成渝经济圈最符合、最贴切的碳排放/碳吸收系数,所以未来需要考虑成渝经济圈实际碳排放监测数据为支撑进行测算,以提高研究结果的准确性。

参考文献 (References)

- [1] Huang Hanzhi, Jia Junsong, Chen Dilan, et al. Evolution of spatial network structure for land-use carbon emissions and carbon balance zoning in Jiangxi Province:

- A social network analysis perspective [J]. *Ecological Indicators*, 2024,158:111508.
- [2] Zhang Da, Huang Xiaodan, Zhong Junting, et al. A representative CO₂ emissions pathway for China toward carbon neutrality under the Paris Agreement's 2 °C target [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2023,14(6):941-951.
- [3] Barati A, Zhooldideh M, Azadi H, et al. Interactions of land-use cover and climate change at global level: How to mitigate the environmental risks and warming effects [J]. *Ecological Indicators*, 2023,146:109829.
- [4] 曹炜.“双碳”目标下的流域生态环境保护规划:理念更新与措施调适[J].*中国人口·资源与环境*,2022,32(12):31-40.
- Cao Wei. Watershed ecological and environmental protection planning under the 'dual carbon' goals: Concept renewal and measure adjustment [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2022,32(12):31-40.
- [5] 赵佳文,晁云舒,肖兰,等.海岛碳排放核算与时空特征:以东山岛为例[J].*生态学报*,2024,44(6):2216-2227.
- Zhao Jiawen, Chao Yunshu, Xiao Lan, et al. Calculation of carbon emission and its spatio-temporal characteristics in Dongshan Island, Fujian Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024,44(6):2216-2227.
- [6] 詹绍奇,张旭阳,陈孝杨,等.2000—2020年淮南矿区土地利用变化对碳源/碳汇时空格局的影响[J].*水土保持通报*,2023,43(3):310-319.
- Zhan Shaoqi, Zhang Xuyang, Chen Xiaoyang, et al. Effects of landuse change on spatial and temporal patterns of carbon sources/sinks in Huainan mining area from 2000 to 2020 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023,43(3):310-319.
- [7] 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.
- [8] He Jie, Yang Jun. Spatial-temporal characteristics and influencing factors of land-use carbon emissions: An empirical analysis based on the GTWR model [J]. *Land*, 2023,12(8):1506.
- [9] 杨蕴琦,郝晋珉,张金懿,等.曲周县土地利用碳排放测算及情景预测研究[J].*中国农业大学学报*,2024,29(2):160-175.
- Yang Yunqi, Hao Jinmin, Zhang Jinyi, et al. Carbon emission measurement and prediction of land use in Quzhou County based on carbon neutrality target [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024,29(2):160-175.
- [10] Li Yingxue, Liu Zhaoshun, Li Shujie, et al. Multi-scenario simulation analysis of land use and carbon storage changes in Changchun City based on FLUS and InVEST model [J]. *Land*, 2022,11(5):647.
- [11] 李语诗,夏志业,张蕾.基于SSPs多情景目标的2030年成渝经济圈土地利用碳排放预测及其空间优化[J].*生态环境学报*,2023,32(3):535-544.
- Li Yushi, Xia Zhiye, Zhang Lei. Carbon emission prediction and spatial optimization of land use in Chengdu-Chongqing economic circle in 2030 based on SSPs multi-scenarios [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2023,32(3):535-544.
- [12] 韦彦汀,李思佳,张华.成渝城市群碳排放时空特征及其影响因素[J].*中国环境科学*,2022,42(10):4807-4816.
- Wei Yanting, Li Sijia, Zhang Hua. Temporal-spatial evolution of carbon emission and driving factors in the Chengdu-Chongqing urban agglomeration [J]. *China Environmental Science*, 2022,42(10):4807-4816.
- [13] 黄庆华,向静,潘婷.成渝地区双城经济圈产业融合发展:水平测度、时空分布及动力机制[J].*重庆大学学报(社会科学版)*,2023,29(6):17-35.
- Huang Qinghua, Xiang Jing, Pan Ting. Industrial convergence and development of Chengdu-Chongqing Double-city Economic Circle: Level measurement, spatiotemporal distribution and dynamic mechanism [J]. *Journal of Chongqing University (Social Science Edition)*, 2023,29(6):17-35.
- [14] Zhang Yan, Zhang Luoqi, Wang Junyi, et al. Quantitative analysis of NDVI driving factors based on the geographical detector model in the Chengdu-Chongqing Region, China [J]. *Ecological Indicators*, 2023,155:110978.
- [15] 曾华九.铸牢中华民族共同体意识实践路径探赜:以双城经济圈为中心考察[J].*湖北经济学院学报(人文社会科学版)*,2023,20(8):29-32.
- Zeng Huajiu. Exploring the Practical Path of Forging the community consciousness of the chinese nation-investigating with the twin cities economic circle as the center [J]. *Journal of Hubei University of Economics (Humanities and Social Sciences)*, 2023,20(8):29-32.
- [16] Yang Jie, Huang Xin. 30 m annual land cover and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. *Earth System Science Data Discussions*, 2021,2021:1-29.
- [17] 陈靖松,张建军,李金龙,等.京津冀地区碳排放时空格局变化及其驱动因子[J].*生态学报*,2024,44(6):2270-2283.
- Chen Jingsong, Zhang Jianjun, Li Jinlong, et al. Spatio-temporal pattern of carbon emissions and its driving

- factors in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(6):2270-2283.
- [18] 吴蒙,王琳琳,程进.长三角城市群国土空间碳汇冲突测度及空间格局特征分析[J].*资源科学*,2022,44(10):2048-2059.
- Wu Meng, Wang Linlin, Cheng Jin. Territorial carbon sink conflict measurement and its spatial pattern in the Yangtze River delta urban agglomeration [J]. *Resources Science*, 2022, 44(10):2048-2059.
- [19] 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.
- Zhang Jie, Chen Hai, Liu Di, et al. The spatial and temporal variation and influencing factors of land use carbon emissions at county scale [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2022, 52(1):21-31.
- [20] Rong Tianqi, Zhang Pengyan, Zhu Huiru, et al. Spatial correlation evolution and prediction scenario of land use carbon emissions in China [J]. *Ecological Informatics*, 2022, 71:101802.
- [21] 彭文甫,周介铭,徐新良,等.基于土地利用变化的四川省碳排放与碳足迹效应及时空格局[J].*生态学报*, 2016, 36(22):7244-7259.
- Peng Wenfu, Zhou Jieming, Xu Xinliang, et al. Effect of land use changes on the temporal and spatial patterns of carbon emissions and carbon footprints in the Sichuan Province of Western China, from 1990 to 2010 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(22):7244-7259.
- [22] 中国国土资源报.低碳排放:土地利用调控新课题[EB/OL].(2023-12-16)[2024-01-14].https://www.mnr.gov.cn/dt/ywbb/201810/t20181030_2249226.html.
- The Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Low Carbon Emissions: A New Topic of Land Use Regulation [EB/OL]. (2009-12-25) [2021-06-17]. https://www.mnr.gov.cn/dt/ywbb/201810/t20181030_2249226.html.
- [23] 易丹,欧名豪,郭杰,等.土地利用碳排放及低碳优化研究进展与趋势展望[J].*资源科学*,2022,44(8):1545-1559.
- Yi Dan, Ou Minghao, Guo Jie, et al. Progress and prospect of research on land use carbon emissions and low-carbon optimization [J]. *Resources Science*, 2022, 44(8):1545-1559.
- [24] 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 carbon sinks of terrestrial vegetation in China from 1981 to 2000 [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2007, 37(6):804-812.
- [25] Yu Ziqi, Chen Longqian, Tong Haixia, et al. Spatial correlations of land-use carbon emissions in the Yangtze River delta region: A perspective from social network analysis [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 142:109147.
- [26] 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 Yongchao, Wen Qi. 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.
- [27] 王争光.京津冀地区土地利用碳中和及国土空间优化研究[D].河北石家庄:河北地质大学,2022.
- [28] 杨静媛,张明,多玲花,等.江西省土地利用碳排放空间格局及碳平衡分区[J].*环境科学研究*,2022,35(10):2312-2321.
- Yang Jingyuan, Zhang Ming, Duo Linghua, et al. Spatial pattern of land use carbon emissions and carbon balance zoning in Jiangxi Province [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(10):2312-2321.
- [29] 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 Siyou, Yang Yu. 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.
- [30] 李建豹,陈红梅,张彩莉,等.长三角地区碳源碳汇时空演化特征及碳平衡分区[J].*环境科学*,2024,45(7):4090-4100.
- Li Jianbao, Chen Hongmei, Zhang Caili, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of carbon sources and carbon sinks and carbon balance zoning in the Yangtze River delta region [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(7):4090-4100.
- [31] 杜海波,杨山,李振亚,等.碳中和目标下长三角碳源/汇时空特征及其影响因素[J/OL].*环境科学*,1-13[2024-08-26].<https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202312107>.
- Du Haibo, Yang Shan, Li Zhenya. Spatio-temporal characteristics and influencing factors of carbon sources/sinks in the Yangtze River Delta under carbon neutrality target [J/OL]. [2024-08-26] *Environmental Science*, 1-13. <https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202312107>.