

# 洞庭湖生态经济区县域土地利用碳排放及 碳平衡分区特征

何震宇, 帅红

(湖南师范大学地理科学学院, 长沙 410081)

**摘要:** 洞庭湖生态经济区作为重要的生态保护和经济发展区域,对于长江经济带的可持续发展具有关键作用。基于土地利用和能源消耗数据,测算2005—2020年经济区内县域土地利用碳收支量,基于碳平衡分析评价体系,将经济区各县划分为4类碳平衡功能区。结果表明,洞庭湖生态经济区土地利用碳排放量呈显著增长趋势,经济区土地利用碳排放量呈现东高西低的分布特征,碳吸收量呈现西高东低的分布特征,其分布格局与土地利用水平和能源消费结构密切相关。

**关键词:** 土地利用; 碳核算; 碳平衡; 洞庭湖生态经济区

**中图分类号:** X321; F301.24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)01-0213-08

全球变暖是人类目前共同面临的最大挑战之一,据联合国政府间气候变化专门委员会第四次评估报告指出,未来100年全球地表温度将升高1.6~6.4℃<sup>[1]</sup>。人类社会经济活动产生的温室气体与全球变暖密切相关。中国作为世界第一大碳排放国<sup>[2]</sup>,受到国际高度关注,面临着巨大的碳减排压力。土地利用是人类活动对地表自然环境的重要干预方式之一。土地利用类型变化导致的碳排放和吸收过程是地球系统碳平衡的重要组成部分,对全球气候变化和生态环境保护具有重要影响。因此推动土地利用碳排放及碳平衡分区的深入研究,尤其是县域尺度下的差异化研究,对于推动生态文明建设、实现碳中和目标具有重要的理论和实践意义。

近年来在碳排放相关领域,国内外学者开展了大量不同范式的研究,研究内容集中在从不同的地理视角和空间尺度建立区域碳预算核算体系,进而分析碳排放的空间格局和影响要素、空间相关性和碳源(汇)的时空变化。在研究成果的实际应用方面,许多学者围绕碳循环<sup>[3]</sup>、碳足迹<sup>[4-5]</sup>、碳平衡<sup>[6]</sup>和碳补偿进行研究。碳平衡区划的研究多集中在国家、省际、市域尺度,县域尺度的研究相对较少<sup>[7-11]</sup>。此外,在碳平衡区划的研究领域中,常见的做法是

基于碳预算核算体系,利用净初级生产力变化<sup>[12]</sup>、净碳排放量<sup>[13]</sup>等指标来衡量区域碳平衡,较少进一步考虑碳排放的经济贡献和碳汇的生态作用。尽管这些方法为碳平衡的评估提供了基础,但它们往往未能涵盖评价体系的全部维度。相较之下,一种更为全面的碳平衡区划方案能够整合土地利用碳预算中的自然、资源和经济等多方面属性,从而更准确地描绘出县域单元的碳排放与吸收的全貌。这种区划方法不仅为区域碳平衡提供了深入的洞察,而且能够针对具体情况制定出更为精确和细致的低碳发展策略,确保这些策略在实施过程中既具有针对性也富有成效。

随着经济的快速发展和城市化进程的加速推进,洞庭湖生态经济区的土地利用结构发生了显著变化,亟待解决经济区内经济发展与生态保护间的矛盾问题,因此通过土地利用变化视角研究碳排放效应,探索碳平衡区划的优化策略,对于科学制定碳减排政策具有重要意义。在全球变暖这一全球性挑战的背景下,深化对土地利用碳排放及其碳平衡分区的研究显得尤为关键。通过深入探究土地利用变化对碳循环的具体影响,能够更加精准地制定出有效的生态环境保护政策和碳减排策略,对于达成碳中和的目标至关重要。因此,加强相关研究,

**收稿日期:** 2024-08-07

**作者简介:** 何震宇(1999—),男,江西鹰潭人,硕士研究生,研究方向为土地利用碳排放与区域发展;通信作者帅红(1975—),女,湖南益阳人,博士,教授,研究方向为生态环境规划、区域生态安全与可持续发展。

推动土地利用碳排放及碳平衡分区的理论和实践创新,是当前亟须解决的重要课题之一。

## 1 研究区概况

洞庭湖生态经济区位于中国长江中游,介于北纬 27°98′~30°23′N,东经 110°20′~114°14′E,地形以冲积平原和丘陵为主,整体地势四周高中间低,气候为典型亚热带季风气候,区内水系主要由洞庭湖和资、湘、沅、澧 4 条入湖河流组成,年平均降水量 1 200~1 450 mm,年平均气温 16.5~17.0℃,是长江中游最脆弱的生态敏感区域,同时该区域碳储量较为丰富,是重要的生态碳汇区。经济区地跨湖南、湖北两省,处于长株潭城市群、武汉城市圈腹地,包含湖南省常德市、益阳市、岳阳市、长沙市望城区以及湖北省荆州市,共 33 个县(市、区),总面积达 6.05 万 km<sup>2</sup>。

## 2 数据来源及研究方法

### 2.1 数据来源

研究中所使用主要数据包括:①2005—2020 年 4 期土地利用数据(30 m×30 m 分辨率)来源于中国科学院资源环境科学与数据中心;②夜间灯光数据来自 *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 期刊上公开发表的长时间序列(1992—2022 年)夜间灯光数据集<sup>[14]</sup>;③地级市能源消费碳排放量以及各县市区社会经济数据主要来源于《中国县域统计年鉴》、各省级统计年鉴与市级统计年鉴;④行政边界矢量数据来源于自然资源部全国地理信息资源目录服务系统。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 土地利用碳排放量估算模型

土地利用碳排放可分为直接碳排放和间接碳排放,直接碳排放是由土地利用类型变化产生的碳排放,而间接碳排放主要是由人类在不同土地利用类型进行活动所产生的碳排放<sup>[15]</sup>。土地利用类型包括耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地,其中由于耕地中的农作物吸收的 CO<sub>2</sub> 在短期内又会释放到空气中<sup>[16]</sup>,因此将耕地仅视作碳源。

由耕地、林地、草地、水域、未利用地所产生的碳排放(吸收),使用碳排放系数法进行估算,计算公式为

$$E = \sum e_i = \sum S_i \delta_i \quad (1)$$

式中: $E$  为上述 5 类土地利用类型碳排放总量; $e_i$  为某类土地利用类型的碳排放量; $S_i$  为某类土地利用类型的总面积; $\delta_i$  为某类土地利用类型的碳排放系

数,根据已有研究成果<sup>[9,17-22]</sup>并结合实际情况,耕地、林地、草地、水域、未利用地的碳排放(吸收)系数分别取 0.422、-0.644、-0.020、-0.023、-0.005 t/hm<sup>2</sup>,其中系数为正值表示为碳源,反之为碳汇。

对于建设用地产生的碳排放量,通过能源消费的标准煤当量间接计算(标准煤消费量来自各地级市统计年鉴)。由于县域尺度下的能源消费统计数据较为缺乏,又因夜间灯光数据与碳排放量具有相关性<sup>[23]</sup>,所以对各地级市的夜间灯光数据平均亮度值(DN)与能源消费碳排放量进行拟合,得到各地级市能源消费碳排放量拟合方程(表 1),可见拟合方程的  $R^2$  均大于 0.850 0,拟合效果良好,所以可用各县市区夜间灯光数据总亮度值(TDN)占地级市总亮度值(TDN)的比重来估算县域能源消费碳排放量,得到建设用地碳排放量。

表 1 各地级市能源消费碳排放量拟合方程

| 地级市 | 拟合方程  | $R^2$   |
|-----|---|---------|
| 长沙  | $y = -0.4937x^3 + 11.168x^2 - 91.568x + 783.98$ | 0.850 2 |
| 荆州  | $y = 70.226x + 245.78$                          | 0.917 1 |
| 岳阳  | $y = 7559.5x^3 - 92870x^2 + 379432x - 514646$   | 0.936 9 |
| 常德  | $y = -129.71x^3 + 1170.4x^2 - 3349.8x + 3437.2$ | 0.922 9 |
| 益阳  | $y = -83.161x^3 + 445.34x^2 - 744.09x + 730.8$  | 0.885 1 |

注: $y$  为各地级市的能源消费碳排放量; $x$  为各地级市的夜间灯光平均值。

#### 2.2.2 空间相关性分析

空间自相关分析可用于分析相邻区域之间研究对象的关联度,并定量分析和评价各个空间要素的集聚或离散特征,揭示研究区域内各空间单元土地利用碳排放量的空间分异规律<sup>[24-25]</sup>。

#### 2.2.3 碳排放经济贡献系数

碳排放经济贡献系数(economic contribution coefficient, ECC)能够从经济角度衡量区域内碳排放量的差异性,是反映碳生产力的重要指标之一<sup>[26-27]</sup>,计算公式为

$$ECC = \frac{G_i/G}{C_i/C} \quad (2)$$

式中, $G_i$  和  $G$  分别为第  $i$  县和洞庭湖生态经济区的 GDP, $C_i$  和  $C$  分别为第  $i$  县和经济区的土地利用碳排放量。当  $ECC > 1$  时说明该县具有较高的碳生产率 and 能源利用效率,反之说明该县碳生产率和能源利用效率较低。

#### 2.2.4 碳排放生态承载系数

碳生态承载系数(ecological support coeffi-

cient, ESC)能够从生态学角度衡量生态承载力的公平性,进一步反映县域的碳汇能力,计算公式为

$$ESC = \frac{CS_i/CS}{C_i/C} \quad (3)$$

式中:CS<sub>i</sub>和CS分别为第*i*县和经济区的碳吸收量。当ESC > 1说明该县具有较强的碳汇能力,反之说明该县碳汇能力较弱。

### 3 结果分析

#### 3.1 土地利用碳排放时序演变特征

通过上述核算方法,得到洞庭湖生态经济区2005—2020年的总体土地利用碳排放(吸收)量,如图1所示。经济区总体碳汇量变化幅度不大,从144.91×10<sup>4</sup> t降至143.83×10<sup>4</sup> t,呈现缓慢下降趋势。而经济区总体净碳排放量一直呈上升趋势,从2005年的1 641.74×10<sup>4</sup> t增加到2020年的2 416.58×10<sup>4</sup> t,年均增长率为3.94%。其中,在2005—2010年增长速度最快,增长率为34.23%。造成这一现象的主要原因是洞庭湖流域在此期间城镇化水平大幅提高,工业化进程不断推进,同时湖区的大规模围垦导致土地利用结构发生变化,湿地生态系统碳储量减少。但是2010年后的经济区净碳排放量增长明显放缓。主要原因是自2012年以来,洞庭湖湿地保护上升为国家级战略,湿地开发受到限制<sup>[29]</sup>。

从各类型土地利用类型对碳排放(吸收)量的影响上分析(表2、表3),建设用地碳排放量的增加对总碳排放量的影响最大,由2005年的1 672.51×10<sup>4</sup> t增加到2020年的2 449.09×10<sup>4</sup> t,涨幅为46.43%,与此相反,耕地产生的碳排放量则呈现出轻微的下降趋势,由114.16×10<sup>4</sup> t降低到111.32×10<sup>4</sup> t,降幅为2.55%。这一下降趋势可能和洞庭湖生态经济区采取了一系列的农业绿色发展政策有关,如退耕还湿、精准施肥、水肥一体化等措施,降低

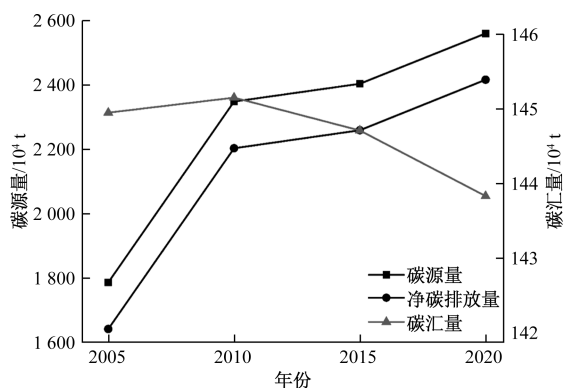


图1 2005—2020年洞庭湖生态经济区碳源(汇)量变化

表2 2005—2020年部分年份洞庭湖生态经济区土地利用面积

| 年份   | 面积/10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup> |        |      |       |       |       |
|------|------------------------------------|--------|------|-------|-------|-------|
|      | 耕地                                 | 林地     | 草地   | 水域    | 建设用地  | 未利用地  |
| 2005 | 270.53                             | 221.97 | 8.99 | 76.97 | 17.24 | 8.44  |
| 2010 | 264.59                             | 222.26 | 8.46 | 77.38 | 20.08 | 11.36 |
| 2015 | 263.03                             | 221.58 | 8.42 | 77.36 | 22.39 | 11.35 |
| 2020 | 263.80                             | 220.30 | 8.41 | 75.28 | 25.16 | 11.13 |

表3 2005—2020年部分年份洞庭湖生态经济区土地利用碳排放量

| 年份   | 碳排放量/10 <sup>4</sup> t |         |       |       |          |       |
|------|------------------------|---------|-------|-------|----------|-------|
|      | 耕地                     | 林地      | 草地    | 水域    | 建设用地     | 未利用地  |
| 2005 | 114.16                 | -142.95 | -0.18 | -1.77 | 1 672.51 | -0.04 |
| 2010 | 111.66                 | -143.14 | -0.17 | -1.78 | 2 237.26 | -0.06 |
| 2015 | 111.00                 | -142.70 | -0.17 | -1.78 | 2 293.18 | -0.06 |
| 2020 | 111.32                 | -141.87 | -0.17 | -1.73 | 2 449.09 | -0.06 |

了农业生产过程中的化肥使用量和农田碳排放量。就碳汇而言,作为主要碳汇用地的林地发挥了最主要的碳汇作用,占2020年总碳汇量的98.64%,尽管林地碳汇量在过去15年存在波动,但整体呈现出逐渐降低的趋势。这一变化主要受到了林地面积持续减少的影响,随着城市化和工业化的不断推进,土地利用方式发生了变化,林地面积不断受到压缩。此外,草地、水域、未利用地的碳汇量减少幅度非常小,可能是气候变化影响了湿地和水域生态系统的面积变化,导致其碳储存能力受损,从而微弱减少了碳的固定和储存,同时这3类用地的碳汇量占比很低,难以平衡碳源用地产生的碳排放量。因此,这也说明了在生态经济区的碳平衡管理中,需要更加注重对碳源用地的管理和控制,以保障整体碳平衡的稳定性和可持续性。

#### 3.2 土地利用碳排放空间关联特征

##### 3.2.1 土地利用净碳排放量空间分布特征

为了方便研究,将各县(市、区)的土地利用净碳排放量划分为5个等级(图2),分别是:①微度排放区(≤20×10<sup>4</sup> t);②轻度排放区(20×10<sup>4</sup>~50×10<sup>4</sup> t);③中度排放区(50×10<sup>4</sup>~150×10<sup>4</sup> t);④重度排放区(150×10<sup>4</sup>~200×10<sup>4</sup> t);⑤极重度排放区(≥200×10<sup>4</sup> t)。

在县域尺度下,土地利用净碳排放量呈现出明显的空间分异性,整体上表现为东高西低的分布特征,并形成了以岳阳楼区为中心的“中心-外围”结构。原因在于岳阳楼区作为岳阳市的核心区域和地区增长极,其城市化水平相对领先于周围县区,因此其碳排放水平较高。同时,由于空间溢出效应的存在,岳阳楼区的高排放量也影响了周围县区的

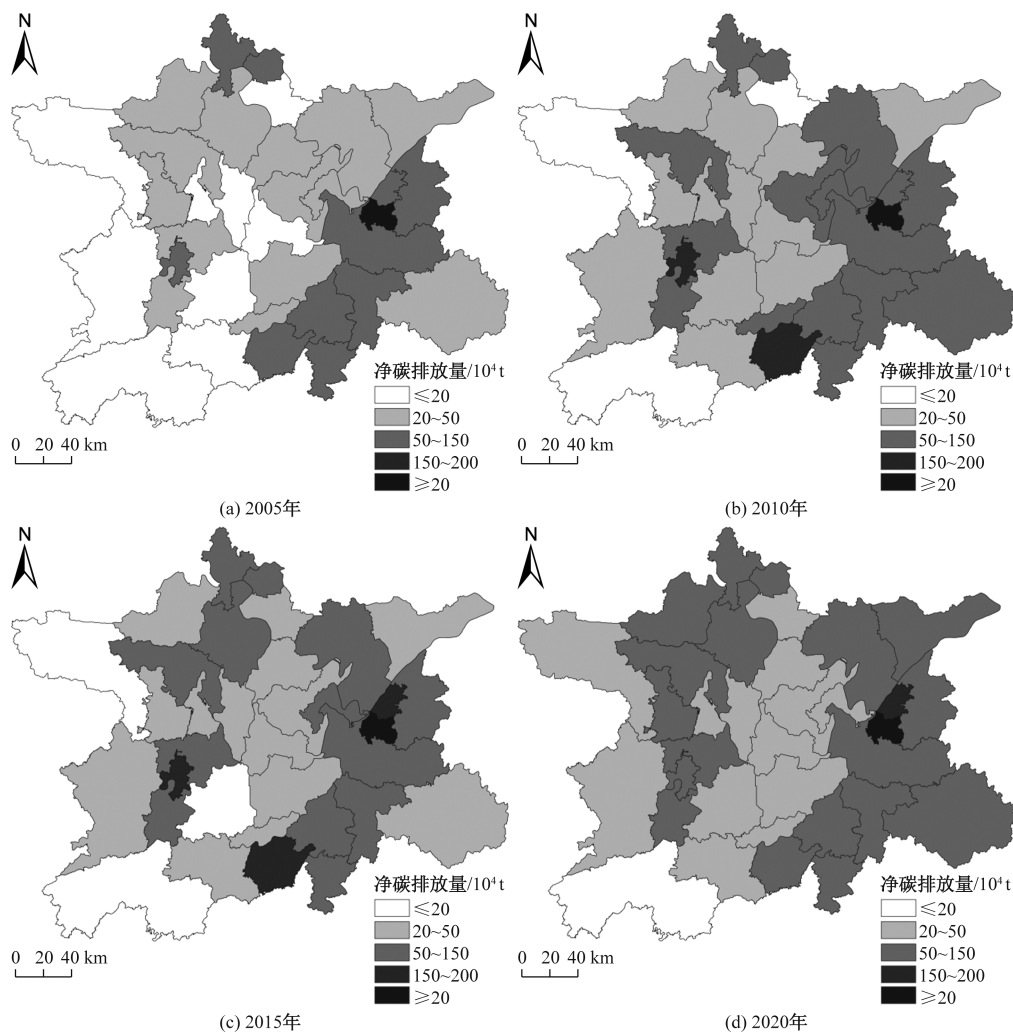


图 2 2005—2020 年部分年份洞庭湖生态经济区土地利用净碳排放量空间分布

土地利用净碳排放量,使得“中心-外围”结构更加稳定。

从年度变化上看,研究期内除安化县外,其他县区的净碳排放量都呈现持续波动增长的趋势,而安化县始终保持为微度排放区,且 2005 年安化县净碳排放量为  $-14.71 \times 10^4$  t。原因在于安化县的经济以农业(茶产业)为主导,且林地占比较大,依托其丰富的生态资源,实现了碳平衡或微度碳排放的状态。具体来看,2005 年各县域的土地利用净碳排放量均普遍低于  $150 \times 10^4$  t,微度排放区和轻度排放区共有 22 个县,主要分布在经济区的中部和西部,这些地区碳汇比重大且经济发展水平较低。而随着经济的发展,从 2005—2020 年,土地利用净碳排放量的空间分布特征发生了显著变化,中度排放区明显增多,从 2005 年的 10 个增长到 2020 年的 17 个。其中,常德市地区的县域净碳排放量增长最为明显,原因在于常德市拥有丰富的矿产资源,矿

产资源开采力度的加大导致了碳排放量的显著增加。

值得注意的是,武陵区、云溪区、赫山区等市辖主城区在 2015 年转变为重度排放区,尽管武陵区 and 赫山区在 2020 年回落至中度排放等级,但仍需注意控制土地利用结构,保留碳汇用地。另外,有部分区县受撤县设区或区划调整等政策影响,城镇建设用地扩张需求增加,也导致碳排放量有所上涨,如云溪区 2015 年调整乡镇区划后,土地利用净碳排放量由 2010 年的  $89.94 \times 10^4$  t 上升至 2020 年的  $151.33 \times 10^4$  t,年均增长率为 6.82%,转变为重度排放区。

### 3.2.2 空间自相关分析

根据洞庭湖生态经济区县域尺度下的土地利用净碳排放量全局自相关计算结果(表 4)可以发现,2015 年的 Z 得分与 P 值未通过显著性水平检验,说明 2015 年的土地利用碳排放未表现出明显的

表 4 2005—2020 年部分年份洞庭湖生态经济区土地利用净碳排放量全局空间自相关结果

| 年份   | Moran's I | Z       | P         |
|------|-----------|---------|-----------|
| 2005 | 0.296 0   | 3.122 5 | 0.001 793 |
| 2010 | 0.191 8   | 2.029 9 | 0.042 366 |
| 2015 | 0.096 3   | 1.247 2 | 0.212 323 |
| 2020 | 0.253 8   | 2.726 3 | 0.006 403 |

空间相关性。而其余年份的 Moran's I 值均大于 0,且通过了 95% 的显著性水平检验,表明土地利用净碳排放量呈现显著的空间正相关性,但聚集程度不高。

### 3.3 碳平衡分区及优化思路

对区域碳收支进行核算后可得,洞庭湖生态经济区县域碳排放经济贡献系数(ECC)呈现下降趋势,2005 年 ECC 大于 1 的县区有 22 个,而 2020 年降低到 17 个,表明区域内碳排放生产力降低,需要调整产业结构、推动节能减排技术,提升碳排放的经济效益。ECC 空间分布特征为西高东低,ECC 小于 1 的县区集中在经济区东部和南部的经济发达区域,如云溪区、赫山区、岳阳县等,这些县区的经济贡献率小于碳排放贡献率,偏重于重工业或资源型产业,单位产值所需的能源和资源消耗较多,同时碳汇用地不足,从而导致 ECC 较低。

洞庭湖生态经济区县域碳排放生态承载系数(ESC)总体水平保持稳定,至 2020 年,ESC 大于 1 的县区有 11 个,与 2005 年的 12 个相比仅减少 1 个。其中,津市市的 ESC 由 2005 年的 1.17 降低至 2020 年的 0.66。ESC 空间分布特征为东西高,中间低。ESC 大于 1 的县区集中在植被覆盖占比大的区域,如石门县、安化县、桃源县等县的 ESC 均大于 5,表明这些县区具有较强的碳汇作用,对碳收支平衡有积极作用。另外,汨罗市的 ESC 由 2005 年的 0.48 上升到 2020 年的 0.69,有效推动了碳排放的消纳。

洞庭湖生态经济区土地利用碳收支情况表现出明显的空间差异,区域经济增长程度和生态承载能力也存在差异,导致该区域存在一定程度的经济生态失衡。因此,在碳平衡区划中要充分考虑土地利用碳预算的差异及其所反映的属性特征,因地制宜地利用区域特征,实现生态保护与经济协调。

基于经济区各县域单元碳排放(吸收)量、空间自相关分析结果、碳生态承载系数、碳积极贡献系数以及实际发展情况,同时结合前人研究结果<sup>[30-32]</sup>,将 33 个县(市、区)划分为碳汇功能区、低碳

经济区、碳强度控制区和高碳优化区(图 3),进而提出未来各区域的优化发展方向,从而充分发挥其经济发展、农业生产和生态保护的最大潜力。具体划分结果如下。

(1)碳汇功能区。ESC 大于 1,ECC 大于 1,且净碳排放量小于等于  $50 \times 10^4$  t(微度、轻度排放)的区域,主要分布在经济区西部,这些县的基础设施相对落后,人类活动对生态系统的影响较小。碳汇功能区对其他地区的碳溢出产生了吸收效应,有利于降低经济区的总体碳排放。在未来的发展过程中,应重视保护森林和草地的范围,增强生态用地的碳吸收能力,并促进低碳产业发展,通过限制和调节人类的生产活动,实现人与自然的和谐,避免过度开发带来的生态恶化等问题。另外,尽管安化县在 2005—2015 年 ECC 小于 1,但该县碳汇量始终保持经济区的首位,因此在研究期间将安化县划分为碳汇功能区。安化县作为雪峰山生物多样性保护、保水涵养和水土保持生态功能区的重要组成部分,具有得天独厚的自然禀赋和绿色发展基础。同时作为国家重点生态功能区和茶旅文康融合发展区,未来应依托当地丰富的资源,建设茶旅文康融合发展为主导的绿色产业体系。

(2)低碳保持区。ESC 大于 1,ESC 大于 1,碳补偿率小于 1 的区域,该区域主要分布在经济区的北部,整体上来看,低碳保持区的数量有所增长。这些地区具备良好的自然条件,拥有充足的绿色发展基础,并且与区内其他县域的联系紧密。经济贡献率与生态承载力相对平衡,未来应在保持碳平衡水平的基础上,推动产业结构向新能源、高新技术等低碳方向转型。其次,应加强农业基础设施建设,提高农业生产水平,并打造区域特色农产品,如松滋蜜柚、石首鱼肚等农副产品。同时,加强森林资源保护和水土保持,积极发展低碳旅游,利用生态优势促进经济发展。例如,临湘市生态文化和旅游资源丰富,具有长江与黄盖湖生态资源优势 and 3 市交汇地的区位优势,未来应以旅游产业带动特色农业,将绿色生态与乡村旅游相结合,最终通过优良的生态环境实现低碳绿色发展。

(3)碳强度控制区。ESC 小于 1,ECC 大于 1,碳补偿率小于 1 的区域,主要分布在经济区的中部区域,如洪湖市、公安县始终保持此类别。该类型区域拥有较好的经济发展基础,能源企业集中,工业能源碳排放量较大,但碳汇资源匮乏,区域生态系统碳吸收能力相对较弱。在未来的发展过程中,

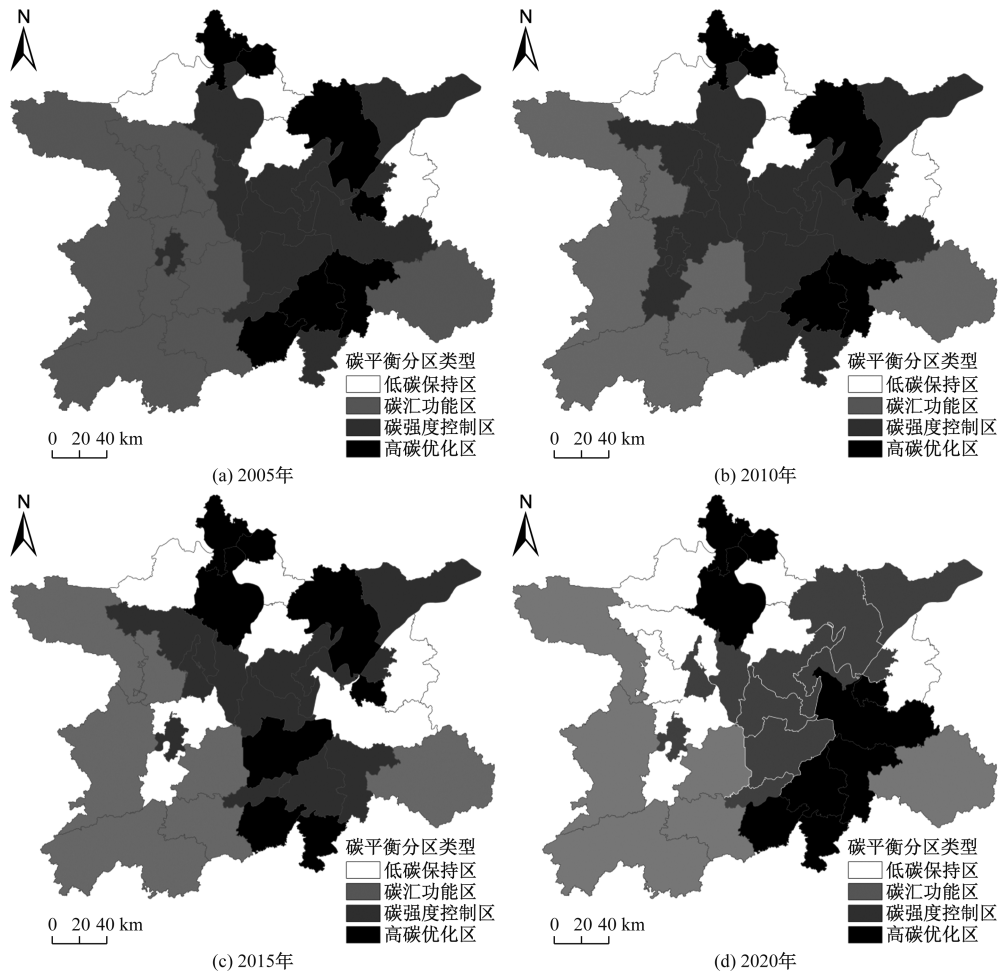


图 3 2005—2020 年部分年份洞庭湖生态经济区碳平衡分区划分

需要加强土地利用的综合管理,控制开发强度,并引导农产品的深加工,提高农作物的单位生产能力和工业附加值。同时,未来的发展应以绿色生产和环境保护为导向,控制高排放产业的增长速度,调整能源消费结构,实现能源消费效率的提高和功能集约化生产,以期实现产业结构的优化升级和区域内碳排放的协同减少。例如,洪湖市拥有丰富的油气资源,具备发展绿色低碳能源产业的内在优势,未来应以产业转型绿色发展为导向,推进工业节能减排,积极引进新能源企业,为制造业发展注入“绿色动能”,实现能源绿色发展。

(4)高碳优化区。ESC 小于 1,ECC 小于 1,碳补偿率小于 1 的区域,主要分布在地级市的主要城区,且数量有所增加,如 2020 年荆州区、岳阳楼区、赫山区、望城区都被划分为该类型。这类区域经济发展较快,人口密集,工业化和城市化程度高,导致碳排放总量高,区域土地碳足迹大。当地碳汇资源远远不能抵消碳排放,造成严重的生态赤字。在未来的发展过程中,要控制城市化扩张进程,注重城

市绿化,加强生态环境综合治理。充分利用该地区在区域经济中的主导地位,利用自身的辐射能力,对高碳产业进行转移和分工,带动周边地区的产业发展,同时提高其对碳排放的经济贡献。最后,加大科研投入,实施环保低碳技术,有效保护碳汇资源,包括有效保护林地、草原等碳汇资源。此外,应加强城市绿地建设,减少区域净碳排放,与碳汇功能区形成碳补偿机制,缓解区域内碳源压力。

#### 4 结论

通过分析 2005—2020 年洞庭湖生态经济区 33 个县域土地利用碳收支量,得到土地利用净碳排放量时空分布并分析其空间相关性。结合经济结构和生态结构两个方面建立碳平衡分区,提出区域差异化发展战略。主要结论如下。

(1)2005—2020 年,洞庭湖生态经济区土地利用碳排放呈现增长趋势,净碳排放量从  $1\ 641.74 \times 10^4$  t 上升到  $2\ 416.58 \times 10^4$  t,其中建设用地碳排放占比最高。土地利用碳汇量变化幅度不大,仅从

144.91×10<sup>4</sup> t 降至 143.83×10<sup>4</sup> t,其中林地碳汇占比始终居于首位。然而,经济区碳排放总量始终高于碳汇总量,净碳排放量增长较快,洞庭湖生态经济区处于碳赤字状态,存在严重的碳失衡。

(2)洞庭湖生态经济区土地利用碳收支表现出明显的空间分异,碳排放的空间分布呈现出东高西低的分布特征,并形成了以岳阳楼区及其周边地区为中心的“中心-外围”结构。该区域人口密集,建设用地面积较大,碳排放能力较强。总体而言,经济区内各县域的净碳排放量呈现增长趋势,高值集聚区位于东部,低值集聚区位于西北部。

(3)根据土地利用碳收支核算结果,结合区域净碳排放量、碳经济贡献系数和碳生态承载系数等指标,建立了洞庭湖生态经济区土地利用碳平衡分区体系,将区内各县(市、区)划分为碳汇功能区、低碳保持区、碳强度控制区和高碳优化区,并针对各类分区的特点,提出碳排放优化方案。在当前形势下,生态经济区应合理配置土地资源,加强林地保护,提升区域碳汇能力,同时采取节能减排措施,调整产业结构,逐步接近低碳可持续发展的战略目标。

基于 2005—2020 年洞庭湖生态经济区各县域的社会经济和土地利用数据,分析了经济区碳收支的时空特征,并划分了碳平衡分区,但仍存在一些不足。由于目前碳排放核算的标准尚未完全统一,在其他研究的基础上对部分碳排放系数进行了调整,并在间接计算建设用地碳排放量过程中,利用夜间灯光数据 DN 值。然而,由于不同区域地表植被覆盖率不同、各县域统计口径的差异以及拟合方法的缺陷,碳排放核算模型存在一定的误差,在后续的研究中需进一步完善碳排放量核算模型。

### 参考文献

- [1] MANNING M R, 戴晓苏. IPCC 第四次评估报告中对不确定性的处理方法[J]. 气候变化研究进展, 2006(5): 233-237.
- [2] 王睿, 张赫, 强文丽, 等. 基于城镇化的中国县级城市碳排放空间分布特征及影响因素[J]. 地理科学进展, 2021, 40(12): 1999-2010.
- [3] ZHAO R, HUANG X, PENG B. Research on carbon cycle and carbon balance of Nanjing urban system[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67: 758-770.
- [4] 陈义忠, 乔友凤, 卢宏伟, 等. 长江中游城市群水-碳-生态足迹变化特征及其平衡性分析[J]. 生态学报, 2022, 42(4): 1368-1380.
- [5] 刘康, 张寒, 王玲. 黄土高原作物种植碳足迹时空演化驱动因素及趋势预测[J/OL]. 环境科学, 1-17[2024-07-07]. <https://doi.org/10.13227/j.hjkk.202405096>.
- [6] 徐影, 郭楠, 茹凯丽, 等. 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.
- [7] 吴立军, 田启波. 碳中和目标下中国地区碳生态安全与生态补偿研究[J]. 地理研究, 2022, 41(1): 149-166.
- [8] 吉雪强, 刘慧敏, 张跃松. 中国省际土地利用碳排放空间关联网络结构演化及驱动因素[J]. 经济地理, 2023, 43(2): 190-200.
- [9] 赖力. 中国土地利用的碳排放效应研究[D]. 南京: 南京大学, 2010.
- [10] 韩梦瑶, 刘卫东, 谢漪甜, 等. 中国省域碳排放的区域差异及脱钩趋势演变[J]. 资源科学, 2021, 43(4): 710-721.
- [11] 张余, 姜博, 赵映慧, 等. 东北地区城市土地利用碳排放效应研究[J]. 环境科学与技术, 2022, 45(7): 209-217.
- [12] 郝旭光, 宋梅. 基于碳平衡的黄河流域市域横向碳补偿研究[J]. 生态经济, 2024, 40(4): 165-174.
- [13] 朱智沼, 桂梦婷, 李红艳. “双碳”目标下江苏省碳平衡潜力预测研究[J]. 资源与产业, 2023, 25(1): 1-13.
- [14] WU Y, SHI K, CHEN Z, et al. Developing improved time-series DMSP-OLS-Like data (1992-2013; 2019) in China by integrating DMSP-OLS and SNPP-VIIRS[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 1-14.
- [15] 韩骥, 周翔, 象伟宁. 土地利用碳排放效应及其低碳管理研究进展[J]. 生态学报, 2016, 36(4): 1152-1161.
- [16] LIPING G, ERDA L. Carbon sink in cropland soils and the emission of greenhouse gases from paddy soils: a review of work in China[J]. Chemosphere - Global Change Science, 2001, 3(4): 413-418.
- [17] TSURUTA A M. Estimate of CH<sub>4</sub> Emissions from year-round flooded rice fields during rice growing season in China[J]. Pedosphere, 2005(1): 66-71.
- [18] 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(6): 804-812.
- [19] 苏雅丽, 张艳芳. 陕西省土地利用变化的碳排放效益研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(1): 152-156.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 阳凯, 王奕文, 黄春华, 等. 洞庭湖区域土地利用变化的碳排放效应研究[J]. 生态科学, 2023, 42(2): 193-201.
- [23] 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.

- [24] 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.
- [25] ZHANG J, LI S, LIN N, et al. Spatial identification and trade-off analysis of land use functions improve spatial zoning management in rapid urbanized areas, China [J]. Land Use Policy, 2022, 116: 106058.
- [26] 赵荣钦, 张帅, 黄贤金, 等. 中原经济区县域碳收支空间分异及碳平衡分区[J]. 地理学报, 2014, 69(10): 1425-1437.
- [27] ZHANG J, LI S, LIN N, et al. Spatial identification and trade-off analysis of land use functions improve spatial zoning management in rapid urbanized areas, China [J]. Land Use Policy, 2022, 116: 106058.
- [28] 李璐, 夏秋月, 董捷, 等. 武汉城市圈县域空间横向碳生态补偿研究: 基于土地利用碳收支差异[J]. 生态学报, 2023, 43(7): 2627-2639.
- [29] 张英豪, 王殿常, 吴兴华, 等. 近百余年(1900—2020年)洞庭湖湿地演化驱动因素分析[J]. 湖泊科学, 2023, 35(5): 1786-1795.
- [30] 王丽蓉, 石培基, 尹君锋, 等. 碳中和视角下甘肃省县域碳收支时空分异与国土空间分区优化[J]. 环境科学, 2024, 45(7): 4101-4111.
- [31] 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.
- [32] 李卓娜, 杨洋, 朱晓东. 基于土地利用变化的江苏省碳排放时空差异与碳平衡分区[J]. 环境保护科学, 2024, 50(1): 120-132.

## Characteristics of Land Use Carbon Emissions and Carbon Balance Zoning in the Dongting Lake Ecological Economic Zone

HE Zhenyu, SHUAI Hong

(College of Geographical Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

**Abstract:** As an important area of ecological protection and economic development, Dongting Lake Ecological Economic Zone plays a key role in the sustainable development of the Yangtze River Economic Belt. Based on the data of land use and energy consumption, the carbon income and expenditure of county land use in the economic zone from 2005 to 2020 were calculated. Based on the carbon balance analysis and evaluation system, the counties in the economic zone were divided into four types of carbon balance functional zones. The results show that the carbon emission of land use in Dongting Lake Ecological Economic Zone showed a significant growth trend. The carbon emission of land use in the economic zone shows the distribution characteristics of high in the east and low in the west, and the carbon absorption is high in the west and low in the east. Its distribution pattern is closely related to the land use level and energy consumption structure.

**Keywords:** land use; carbon accounting; carbon balance; Dongting Lake Ecological Economic Zone