

DOI: 10.20103/j.stxb.202211293454

黄汉志, 贾俊松, 张振旭. 江西省县域土地利用变化碳排放时空演变及其影响因素. 生态学报, 2023, 43(20): 8390-8403.

Huang H Z, Jia J S, Zhang Z X. Spatiotemporal pattern evolution and influencing factors of land-use carbon emissions in counties, Jiangxi Province. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(20): 8390-8403.

江西县域土地利用变化碳排放时空演变及其影响因素

黄汉志^{1,2}, 贾俊松^{1,2,*}, 张振旭^{1,2}

1 江西师范大学地理与环境学院, 南昌 330022

2 江西师范大学鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 南昌 330022

摘要:查明县域尺度下土地利用变化碳排放,对于推进县域低碳发展和土地资源的可持续利用与管理具有重要意义。以江西省为例,基于 2000—2020 年江西省土地利用数据、社会经济数据等,利用空间自相关模型和对数平均迪氏指数分解法(LMDI)法,对其县域土地利用碳排放时空演变及影响因素进行分析。结果表明:①2000—2020 年间,区县土地利用碳排放均呈上升趋势,碳排放量增速和平均碳排放强度均有下降,但部分区县碳排放增速在 2015 年后出现提高的变化特征。建设用地是碳排放量增长的首要碳源,林地则具有重要的碳汇作用。②空间上,土地利用变化碳排放呈现出明显的空间差异,表现为北高南低的分布特征和较为稳定的聚类模式,即轻度和重度及以上排放区空间分布上较为集中。经济发达区县成为碳排放量增长“核心”,欠发达区县则是碳排放量增长“外围”,且这种“核心-外围”格局在不断强化。③总体上,抑制碳排放量增长的主要因素为碳排放强度及土地利用效率;驱动因素则有经济发展水平和建设用地规模。但部分区县碳排放强度可能表现为“前期驱动后期抑制”作用,且抑制作用小于驱动作用,故这类区县土地利用碳排放量仍显著增长。因此,江西省各区县应积极调整产业结构和继续降低碳排放强度及通过优化土地资源配置,提高土地利用效率,如用适度集约模式提高建设用地利用效率以免盲目性扩张浪费。另外,欠发达地区和发达地区需加强在资金、技术等领域的交流与合作,不同区县还应因地制宜,各自明确发展目标,走具有各自县域特色的低碳高质量发展道路。

关键词:县域;土地利用碳排放;时空演变特征;影响因素

Spatiotemporal pattern evolution and influencing factors of land-use carbon emissions in counties, Jiangxi Province

HUANG Hanzhi^{1,2}, JIA Junsong^{1,2,*}, ZHANG Zhenxu^{1,2}

1 School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China

2 Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China

Abstract: Identifying carbon emissions from land-use change at the county scale is important for promoting low-carbon development and sustainable use and management of land resources in counties. Thus, here, taking Jiangxi province as an example, we use the spatial autocorrelation model and Logarithmic Mean Divisia Index (LMDI) method to analyze the spatiotemporal pattern evolution and the influencing factors of land-use carbon emissions in the counties, based on land-use data and socio-economic data of Jiangxi Province from 2000—2020. The results show that: (1) the carbon emissions from land use in different districts showed an increasing trend, but the growth rate of carbon emissions and the average carbon emission intensity decreased in 2000—2020. However, some districts showed a change in the growth rate of carbon emissions that increased after 2015. Construction land is the primary source of carbon emission growth, while forest land has an important role as a carbon sink. (2) Spatially, the distribution of carbon emissions from land-use change shows obviously

基金项目:国家自然科学基金项目(72264016);江西省教育厅人文社科基金项目(GL19225);江西省哲学社会科学基金项目(21JL03);江西省教育厅研究生创新基金项目(YC2022-s247)

收稿日期:2022-11-29; **网络出版日期:**2023-08-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jiaaniu@126.com

spatial differences, with a high north to low south distribution and a relatively stable clustering pattern, and the spatial distribution of light and heavy emission areas and above is more concentrated. With economically developed regions and counties being the “core” and undeveloped regions and counties being the “periphery” of carbon emissions growth. And this “core-periphery” pattern is continuously strengthening. (3) In general, the main factors inhibiting the growth of carbon emissions are carbon emission intensity and land-use efficiency; the driving factors are the level of economic development and the scale of construction land. However, the carbon emission intensity of some districts and counties show the effect of “early driving and later suppressing”, and the suppressing effect is smaller than the driving effect, so the carbon emission of land use in these districts and counties is still growing significantly. Therefore, Jiangxi counties should actively adjust their industrial structure and continue to reduce their carbon emissions intensity and improve land use efficiency by optimizing the allocation of land resources. For example, people should use an appropriately intensive model to improve the efficiency of construction land use for avoiding blind expansion and waste. Moreover, the undeveloped and developed regions need to strengthen exchanges and cooperation in the areas of capital and technology. In addition, different regions and counties in Jiangxi province should also take into account their own local conditions, define their own development goals and follow a low-carbon, high-quality development path with their own county characteristics.

Key Words: county; carbon emissions from land-use; spatiotemporal evolution characteristics; influencing factors

2020 年国家主席习近平在联合国大会上提出了我国实现“碳达峰、碳中和”的目标^[1]。为此,土地利用变化引起的碳排放问题也受到越来越多的关注和研究^[2-4],土地利用结构变化已经成为仅次于化石能源燃烧造成大气中碳排放量增加的第二大温室气体排放源。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)指出^[5],1950—1998 年间在全球碳排放中,土地开发利用引起的碳排放约占人为碳排放总量的 1/3^[6]。可见,加强对土地利用碳排放的相关研究对于推动区域碳减排和绿色发展具有重要意义。

当前,国内外学者针对于土地利用碳排放问题开展了广泛而深入的研究。研究内容主要包括:①从微观层面探讨土地利用碳排放机理和模拟预测未来的土地利用碳排放的变化趋势^[7]。研究发现在一定时期内林地转化为农业用地导致的碳排放量约占全球人为碳排放量的 20%,同样湿地转化为其他土地利用类型也会导致大量的碳排放量;②对土地利用碳排放量进行核算与减碳增汇的对策研究^[8-9]。在陆地生态系统中建设用地和耕地是主要碳源,林地和湿地是主要碳汇;③进行土地利用碳收支与经济增长的协同关系研究^[10-11]。研究发现,经济发展水平是区域碳排放量增加的主要驱动因素,但经济发展的同时可通过技术革新等手段提高碳排放的经济效益和土地利用强度的耦合协调度,来实现区域的低碳发展。在研究尺度上,当前国外研究主要集中于从微观层面^[12-14]进行分析,而国内更多集中于国家^[15-16]、省域^[17-18]等空间尺度,也有像王刚^[10]、赵荣钦^[19]等基于县域的研究,但数量相对较少。

综上,目前国内在研究尺度上主要集中于从国家、省域等尺度出发,而基于县域尺度的土地利用碳排放研究较少,这在一定程度上不利于揭示区域内部的异质性特点;其次,在内容上较少关注到相邻区域之间的相互作用,然而揭示区域之间的依赖程度和相互作用,利于实现区域之间的优势互补和协调发展;最后,在地域上当前研究多集中于发达地区,如京津冀^[20]、长三角^[21]等,对于欠发达地区关注较少,如中国中部地区江西省(北纬 24°29′14″至 30°04′41″,东经 113°34′36″至 118°28′58″之间)。但欠发达地区随着城镇化速度的加快土地利用结构变化明显,加强对其相关研究,利于推动该地的土地利用结构优化和绿色发展。

江西地处我国东南部,域内具有丰富的自然资源和多样化的生态系统,地貌类型复杂多样,森林、草地和水域等土地资源丰富^[22]。近年来江西同其他欠发达地区一样经历了较为显著的城乡发展和土地利用变化过程,在经济发展的过程中面临着土地利用方式转变对碳排放影响显著的问题。探讨江西土地利用碳排放时空演变及影响因素不仅利于实现该区域的可持续土地利用与资源管理,还可为其他相似地区的碳减排政策制定提供一定的科学支持。

为此,本文以江西县域为研究对象,基于土地利用、社会经济等数据,从县域视角出发,通过空间自相关模

型、对数平均迪氏指数分解法(LMDI)因素分解等方法,在核算其 2000—2020 年土地利用碳排放量的基础上,揭示县域尺度下土地利用碳排放量在时空格局上的分布格局和演变规律及探究导致碳排放量增减的驱动因素等问题。这不仅利于江西省各县域因地制宜地进行“降碳增汇”,而且对其他欠发达地区制定有关的绿色低碳发展战略具有重要的参考价值。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

(1)夜间灯光数据来源于 Wu 等^[23]公开发表在遥感技术领域著名期刊 *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* (IEEE TGRS) 上的夜间灯光遥感数据集(1992—2021 年)。该数据集通过利用“伪不变像素”法对 Defense Meteorological Satellite Program/Operational Linescan System (DMSP/OLS) 数据进行校准,并在合成年度 Suomi National Polar-Orbiting Partnership/Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (SNPP/VIIRS) 数据之前实现 SNPP/VIIRS 原始月度数据中缺失数据的修复,最终结合校准的 DMSP/OLS 数据(1992—2013 年)和由 SNPP/VIIRS 数据转换的类 DMSP/OLS 数据(2013—2021 年)计算得到改进的类 DMSP/OLS 长时间序列夜间灯光数据。该数据集最大优势在于实现了跨传感器长时间序列中国区夜间灯光数据的校准、合成和改进,数据来源可靠,可用于本文研究。

(2)能源碳排放数据及扩展方法

因中国实行自上而下的能源统计方式,县级尺度下的能源碳排放数据相对缺乏。考虑到夜间灯光与社会经济活动密切相关^[24—25],所以本文县区能源碳排放数据采用 Chen 等^[26]在 *Scientific Data* 上发布的 1997—2017 年中国县域碳排放量数据,该数据是由特定算法统一 DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS 的卫星图像规模反演得到,反演得到的碳排放数据与相关能源核算的碳排放数据拟合 R^2 高达 0.998,拟合效果良好,可用于本文研究。但由于该能源碳排放数据集的年限具有一定的滞后性,考虑到碳排放量与夜间灯光数据具有相关性,故本文在结合 Chen 等人县域能源碳排放数据集的基础上,拟运用能源消费碳排放量与夜间灯光数据进行拟合,获取各县域的能源消费碳排放。具体操作如下:先将县域的能源碳排放数据相加得到各地级市 1997—2017 年的能源碳排放量;再将各地级市的夜间灯光数据与相应年份的能源消耗碳排放量进行拟合,获得各地级市的能源消耗碳排放量的拟合方程;最终基于县域与地级市的夜间灯光数据比重,估算得到 2020 年各县域的能源碳排放。

需要说明的是,考虑到研究数据的精确性,本文在综合各地级市的夜间灯光总亮度值和平均值的基础上选取其中拟合优度最高的方程作为地级市的能源消耗碳排放量拟合方程,如表 1 所示。各地级市能源消耗碳排放量拟合方程 R^2 均在 0.7800 以上,拟合效果良好,可用于开展县域尺度的能源消耗碳排放量的测算。

表 1 各地级市能源消耗碳排放量拟合方程

Table 1 Fitting equations for carbon emissions from energy consumption by prefecture level cities

地级市 Prefecture-level cities	公式 Formula	R^2	地级市 Prefecture-level cities	公式 Formula	R^2
南昌	$y = 0.0638x^{0.9869}$	0.8603	吉安*	$y = -1.2016x^2 + 92.288x - 166.05$	0.9339
赣州*	$y = -1.0644x^2 + 138.36x - 611.62$	0.9648	上饶	$y = 0.0978x^{0.9506}$	0.8530
鹰潭*	$y = -0.4846x^2 + 44.286x - 218.2$	0.8275	抚州*	$y = -4.0426x^2 + 160.27x - 178.44$	0.9468
九江	$y = 0.2947x^{0.8443}$	0.9334	宜春*	$y = -3.1621x^2 + 187.82x - 261.35$	0.8814
萍乡	$y = 0.0786x^{0.9694}$	0.7830	景德镇	$y = 0.0455x^{1.023}$	0.8576
新余*	$y = -6.6451x^3 + 108.08x^2 - 415.13x + 707.4$	0.8742			

y 指各地级市的能源碳排放量, x 指各地级市的夜间灯光总值或平均值,带*的地级市运用的是平均值进行拟合

由于中国县域碳排放数据是以 2010 年国家行政区划为标准,考虑到相关数据的完整性,对研究单元做适

当调整。如对面积较小的市辖区合并处理;另外共青城市在 2011 年设立,数据库中缺乏其能源碳排放数据,予以剔除。最终整理得到 91 个县级研究单元。

(3) 土地利用遥感数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心,土地利用数据的生产制作均以各期的 Landsat TM/ETM 遥感影像为主要数据源,通过人工目视解译生成,空间分辨率为 1 km。通过 ArcGIS 10.2 对遥感影像进行解译处理,重分类为耕地、林地、建设用地、草地、水域和未利用地等六种类型,再进行分区统计得到各区县的土地利用面积数据。

(4) 社会经济数据均来源于相关统计年鉴和各县市统计公报等。为消除通货膨胀等价格波动因素对经济数据的影响,本文对涉及需要用到的国内生产总值(GDP)数据均折算成以 2000 年为基期的不变价。对于个别缺失数据,采用多重插值法进行补齐。

1.2 研究方法

1.2.1 碳核算系数法

土地利用碳排放主要包括两个部分:一是直接的土地利用碳排放即土地利用结构自身变化带来的碳排放量,二是间接的土地利用碳排放即在土地利用活动中产生的人为碳排放^[27]。

因此,研究中土地利用碳排放量的核算公式如下:

$$C = C_n + \sum C_m \quad (1)$$

式中, C 为总碳排放量, C_n 为建设用地碳排放量,因为建设用地承载着人类的生产活动,可用其产生的能源碳排放量间接得到。 C_m 为除建设用地外,其他五种土地利用类型碳排放量。其碳排放量 C_m 可以通过 IPCC 碳核算系数法得到。公式如下:

$$C_m = B_m \times b_m \quad (2)$$

式中, B_m 为相应的地类面积(hm^2), b_m 各地类的碳排放(吸收)系数,根据已有文献成果^[28-32]并结合江西省实际土地利用情况,本文耕地、林地、草地、水域和未利用地碳排放(吸收)系数(t/hm^2)分别取:0.422、-0.644、-0.022、-0.253、-0.005,其中系数为正值代表该地类主要表现为碳源,反之为碳汇。

1.2.2 空间相关性指标(Moran's I 指数)

Moran's I 指数是研究空间相关性问题的常用指标,可用于定量分析空间要素在空间上的集聚或离散程度。相比较其他研究空间相关性的方法,Moran's I 具有可解释性强、空间权重灵活和进行统计显著性检验等优势^[33],在探讨区域空间聚类模式和研究单元之间空间依赖性等方面具有重要作用。Moran's I 指数包括全局 Moran's I 指数和局部 Moran's I 指数。其中全局 Moran's I 指数可描述其土地利用碳排放量在空间上的整体分布状况,其值域为 $[-1, 1]$ 。若指数 >0 ,则表明呈正相关,反之呈负相关。值越趋向 1,表明其空间正相关性越明显,具有相似属性的空间单元集聚作用强,在空间上呈现出高值或低值集聚;值趋向-1,表明其在空间上离散的趋势越明显,也反映出具有相异属性的空间单元的集聚作用越强。等于 0,则表明在空间相关性上表现出不显著,空间单元属性属于随机的分布状态。具体公式如下:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij} (x_i - \bar{x}) (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

式中, I 为全局 Moran's I 指数, n 为县域研究单元数量, x_i 和 x_j 表示空间上相邻的两县域碳排放量, $\bar{x}$ 为各县级单元碳排放量的平均值, ω_{ij} 为相邻县域之间的空间权重矩阵。

为可视化展示局部上存在的集聚和分散现象和空间异质性问题^[34],拟利用 geoda 软件,基于 Queen 标准的一阶空间权重矩阵,用局部 Moran's I 指数反映各县域与其周围其他县域碳排放量在空间上的相互关系,从局部上揭示要素之间的集聚或离散状态。其公式如下:

$$I_i = \frac{n(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n \omega_{ij}(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

式中,根据局部 Moran's I_i 取值情况,可得到高-高聚集型(HH)、低-低聚集型(LL)、高-低聚集型(HL)和低-高聚集型(LH)四种聚类,分别表示研究单元与相邻县区碳排放量之间存在的高值集聚、低值集聚、高值被低值包围和低值被高值包围四种空间关联形式。

1.2.3 LMDI 因素分解法

为分析江西县域土地利用碳排放各影响因素的贡献力,本文引入 LMDI 因素分解法进行探究。该方法相比较其他研究方法,可定量分解出各影响因素对研究对象的贡献量,并且该方法具有技术成熟、形式多样、分解无残差等优势,在能源、土地利用等碳排放领域的影响因素研究中被广泛应用^[35-36]。为此,本文利用 Kaya 碳排放恒等式,建立起江西县域土地利用碳排放 LMDI 分解模型,分解成碳排放强度、经济发展水平、土地利用效率和建设用地规模四项因素的乘积形式。公式如下:

$$C = \frac{C}{GDP} \times \frac{GDP}{P} \times \frac{P}{S} \times S \quad (5)$$

式中, C 为土地利用总碳排放量($\times 10^4$ t), GDP 为地区国内生产总值($\times 10^8$ 元), P 为区域年末总人口总数($\times 10^4$ 人), S 为建设用地面积($\times 10^4$ hm^2)。

对影响因素做如下定义:碳排放强度因素 $e = \frac{C}{GDP}$,即单位经济产出的碳排放量;经济发展水平因素 $h = \frac{GDP}{P}$,即人均国内生产总值;土地利用效率因素 $g = \frac{P}{S}$,即建设用地上的人口密度;建设用地规模因素 $s = S$,即研究区的建设用地面积。因此公式如下表达:

$$C = e \times h \times g \times s \quad (6)$$

最后,采用 LMDI 模型的加和分解方式对公式(6)进行因素分解,结果如下:

$$\Delta C_{tot} = C^t - C^0 = \Delta C_e + \Delta C_h + \Delta C_g + \Delta C_s \quad (7)$$

式中, C^0 、 C^t 为基期、 t 期的土地利用总碳排放量; ΔC_{tot} 为土地利用碳排放的总变化量即综合累积效应; ΔC_e 、 ΔC_h 、 ΔC_g 、 ΔC_s 分别表示为各影响因素从基期到 t 期各驱动因素影响下的分效应,即碳排放强度效应、

经济发展水平效应、土地利用效率效应、建设用地规模效应。各分解因素表达式为: $\Delta C_e = \frac{C^t - C^0}{\ln C^t - \ln C^0} \times \ln \frac{e^t}{e^0}$;

$\Delta C_h = \frac{C^t - C^0}{\ln C^t - \ln C^0} \times \ln \frac{h^t}{h^0}$; $\Delta C_g = \frac{C^t - C^0}{\ln C^t - \ln C^0} \times \ln \frac{g^t}{g^0}$; $\Delta C_s = \frac{C^t - C^0}{\ln C^t - \ln C^0} \times \ln \frac{s^t}{s^0}$ 。并为深入研究各影响

因素效应贡献的大小,分别计算其贡献率,其公式如下: $Q_e = \frac{\Delta C_e}{\Delta C_{tot}}$; $Q_h = \frac{\Delta C_h}{\Delta C_{tot}}$; $Q_g = \frac{\Delta C_g}{\Delta C_{tot}}$; $Q_s = \frac{\Delta C_s}{\Delta C_{tot}}$ 。其中,分别为各分效应在研究期内对县域土地利用碳排放变化的贡献率。

2 结果分析

2.1 时间演变特征分析

通过碳排放核算得到 2000—2020 年间江西县域总体上的土地利用碳排放(吸收)量和平均碳排放强度及年均增长率变化趋势图,如图 1,图 2 所示。

由图分析知,江西土地利用净碳排放量一直处于上升趋势(图 1),从 2000 年的 5561.14×10^4 t 增加到 2020 年的 25294.55×10^4 t,年均增长率为 7.87%。碳汇量总体上变化较小,并呈现下降趋势;而碳源的排放量一直呈现增长的趋势,年均增长率为 7.39%。虽然碳排放量呈现上升趋势,但江西县域平均碳排放强度和年

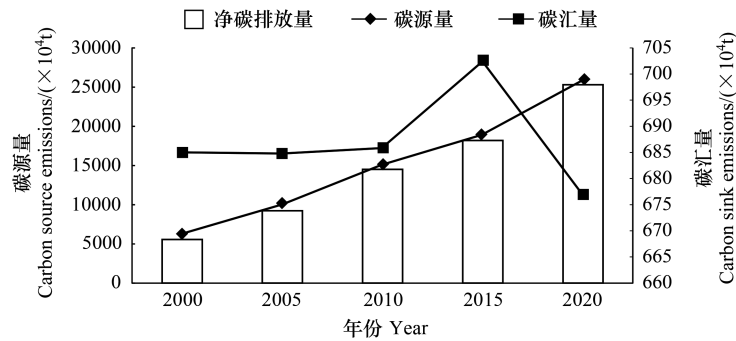


图1 江西县域土地利用碳排放(吸收)量变化

Fig.1 The Changes in carbon emissions (absorption) of land-use in Jiangxi county

均增长率均有明显下降(图2)。其中,平均碳排放强度从2000年的3.12 t/万元下降到2020年的1.71 t/万元,降幅达到45.34%;碳排放的年均增长率虽在2015年后有所回升但降幅仍较大,从2000年10.67%下降到2020年6.81%,降幅达到36.16%。这得益于江西省近年来依靠技术创新,积极推进生态文明建设和产业结构的绿色转型等。

通过核算得到江西省土地利用碳源与碳汇的碳排放(吸收)量,如表2所示(其中正值代表碳排放,负值为碳吸收):

就碳源而言,建设用地是导致江西省碳排放量增加的首要用地类型,年均增长率为7.51%。而耕地的碳源作用有所减弱,从2000年 190.63×10^4 t减少到2020年的 185.48×10^4 t,降幅不大,约为2.7%。从碳汇来看,林地发挥着最主要的碳汇作用,约占碳汇吸收量的97%以上,其次是水域,草地和未利用地的吸收量微乎其微,固碳能力微弱。碳汇的吸收量明显低于碳源的排放量,并且碳源的增速高于碳汇,故在未来一段时间内江西省土地利用碳排放量仍将持续上升,仅靠植树种草等生物固碳措施已难以抵消在建设用地上增长的碳排放量。

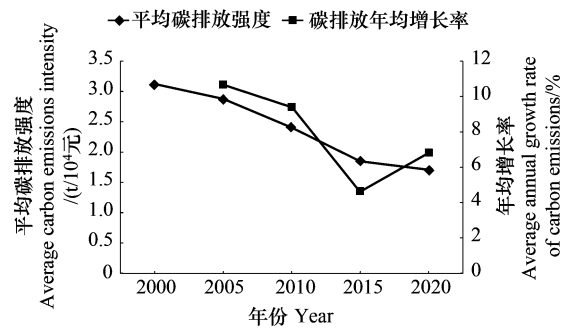


图2 江西县域平均碳排放强度与年均增长率变化

Fig.2 The Changes of the counties average carbon emissions intensity and average annual growth rate of carbon emissions in Jiangxi

表2 2000—2020年江西省土地利用各地类碳源(汇)量/ 10^4 t

Table 2 Amount of carbon source (sink) in land-use in Jiangxi Province from 2000 to 2020

年份 Year	碳源用地 Carbon source land		碳汇用地 Carbon sink land			
	耕地 Arable land	建设用地 Construction land	林地 Forest land	草地 Grass land	水域 Water land	未利用地 Unused land
2000	190.63	6055.27	-665.95	-1.58	-17.19	-0.04
2005	189.95	9726.00	-665.65	-1.55	-17.60	-0.03
2010	189.32	14998.67	-666.65	-1.51	-17.47	-0.03
2015	179.02	18719.20	-683.99	-1.40	-16.87	-0.03
2020	185.48	25785.81	-657.17	-1.57	-17.98	-0.03

随着工业技术的更新和发展,区县的碳排放年均增长率均有所下降,但在2015—2020年间仍有部分区县的年均增长率与前期相比存在升高的特点。为此,本文选取2015—2020年间碳排放年均增长率前20位区县的年均增长速率和碳排放强度来进行分析(图3)。

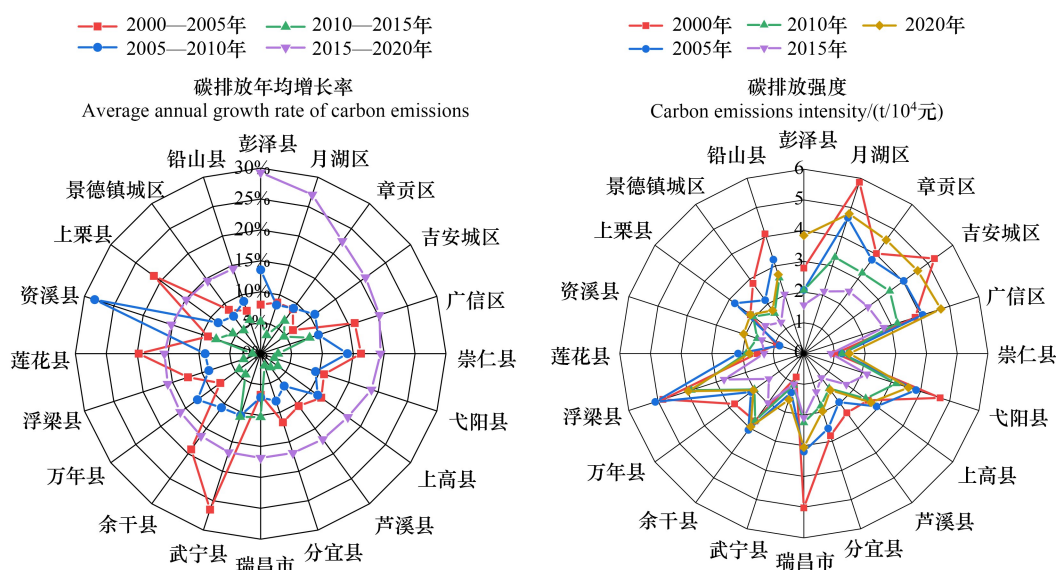


图3 前20位区县2000—2020年土地利用碳排放相关指标

Fig.3 The front 20 districts with Indicators related to land-use carbon emissions from 2000 to 2020

从图3可发现,在2015—2020年土地利用碳排放年均增长率较大的区县其碳排放强度也较高。研究表明,2015—2020年间土地利用碳排放年均增长率呈上升趋势且高于全省同期增长率水平的区县有38个,约占全省区县总数的41.76%。分析可知,这些区县可分为两大类,一为矿产资源丰富,工业基础较为良好的区县,其建设用地上重化工业部门占比较大,如万年县、浮梁县等域内矿产资源丰富,重工业发达,在2015—2020年间其年均增长率均维持在10%以上。经济发展的同时伴随着能源消耗的增加和产业活动的扩大且高耗能高碳排的产业较为密集,导致其碳排放年均增长率和强度在短期内并未出现明显的降低;二为省欠发达地区的区县,这类区县主要分布在省际边界或多山地丘陵地形限制性地区,如资溪县、莲花县等。这类区县初期碳排放量基数小,但随着城镇化水平的提高和能源消耗量的增加,碳排放的年均增长率得到明显提升。如莲花县在2015—2020年间碳排放年均增长率达到了15.59%,为萍乡地区碳排放量增长的重要区县。而这类区县因经济欠发达,在基础设施建设和技术水平方面相对滞后,无法有效地利用现代化的低碳技术和设备等。为此,完善这类区县的基础设施,并依靠技术进步和改善当地能源结构对于实现该地区 and 全省的“降碳增汇”具有重要意义,这与陈群等^[37]研究结果相一致。

2.2 空间演变特征分析

2.2.1 江西省县域土地利用碳排放空间演变

为方便研究,本文将县区的土地利用碳排放量划分为不同等级,分别是:①轻度排放区(年碳排放量规模低于 30×10^4 t);②一般排放区(年碳排放量规模 30×10^4 — 70×10^4 t);③中度排放区(年碳排放量规模 70×10^4 — 150×10^4 t);④重度碳排放区(年碳排放量规模 150×10^4 — 300×10^4 t);⑤极重度碳排放区(年碳排放量规模 300×10^4 t以上)。

基于上述划分标准并结合2000—2020年土地利用碳排放量的空间分布情况(图4)可知,县域尺度下的土地利用碳排放量呈现出明显的空间差异,总体上碳排放量具有北高南低的分布特点和明显的集聚特征,即轻度和重度及以上排放区空间分布上较为集中。

从年度上来看,在2000年全省的土地利用碳排放量普遍低于 70×10^4 t,其中超过 150×10^4 t的重度碳排放区县有8个,极重度碳排放区有2个(南昌城区 483.87×10^4 t、南昌县 343.45×10^4 t)。碳排放量大的区县主要为地级市的市辖区,如新余的渝水区、九江城区等,年碳排放量均超过 150×10^4 t。究其原因,市辖区作为区域的经济增长极,工业化水平高,建设用地上的能源消耗大,导致存在较高的碳排放量规模;相比而言,轻度碳排

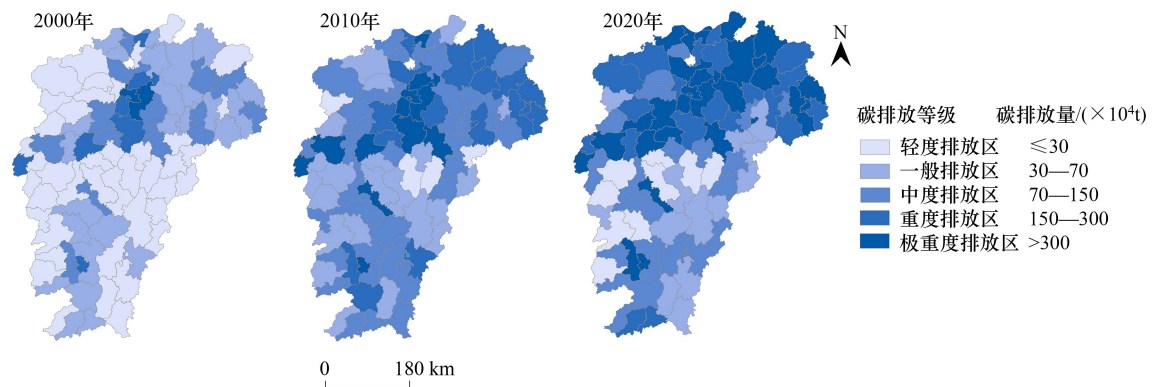


图 4 2000—2020 年县域土地利用碳排放量的时空演变/ 10^4 t

Fig.4 Temporal and spatial evolution of county land-use carbon emissions from 2000 to 2020

放区有 42 个,主要分布于省际边界地带和赣南地区。这些地区碳汇比重大且主导产业多为农业或旅游业,经济增长对耗能大的产业依赖较小。如铜鼓县(3.2×10^4 t)、石城县(10.20×10^4 t)等。但章贡区碳排放量却达到 186.28×10^4 t,成为 2000 年赣南地区唯一的一个重度碳排放区。原因在于章贡区作为赣州市的经济中心,冶金等重化工业部门发达,导致碳排放量较大。

2000—2010 年间,土地利用碳排放量空间格局变化较为明显。中度及以上碳排放区明显增多,由 2000 年的 24 个变化到 2010 年的 65 个,其中变化明显的区域主要集中在赣南地区。结合现状分析可知,赣南地区的区县多为江西贫困县和革命老区,如于都县、兴国县等,享受的国家政策红利较多,进而促进了当地经济的发展和建设用地的扩张,另外赣南地区有色金属资源较为丰富,部分区县将当地的资源优势转为经济优势,也导致其碳排放量的增长明显。如矿产资源丰富的石城县由 2000 年的 10.20×10^4 t 增长到 2010 年的 53.67×10^4 t,年均增长率达到 18.06%。但也有一些区县矿产资源并不丰富,产业结构也较为单一(如以旅游业为主),但后期随着城镇化的发展,碳排放量也有明显增加,如井冈山市、婺源县等。

在 2020 年,大多数区县较 2000 年的碳排放量均有所大幅度增加,如极重度碳排放区由 2000 年的 2 个增加到 27 个,重度排放区由 2000 年的 6 个增加到 20 个,中度排放区由 2000 年的 16 个增加到 22 个;低于 70×10^4 t 以下的一般和轻度排放区分别从 25 个减少到 13 个,42 个减少到仅有 9 个。值得注意的是,部分区县受撤县(县级市)设区等政策影响,城镇建设用地的扩张明显,也导致了土地利用碳排放量增长迅速。如上饶市的广信区(原为上饶县)由 2000 年的 53.96×10^4 t 增长到 2020 年的 679.39×10^4 t,年均增长率达到了 13.50%;南昌市的新建区(原为新建县)由 2000 年的 194.01×10^4 t 增长到 1116.45×10^4 t,年均增长率为 9.14%,日益成为区域碳排放量增长的“核心”。

2.2.2 江西省县域土地利用碳排放空间自相关性分析

通过公式(3)对 2000—2020 年江西省县域土地利用碳排放量进行全局空间自相关性分析,得到研究期内的五期 Moran's I 指数(表 3)。根据表 3 和置信度水平可知,Moran's I 指数在各期均大于 0 和在 1% 的水平上显著。这表明区县的土地利用碳排放量之间具有很强的空间正相关性,具有相似碳排放特征的区县在空间上相互集聚,即高值或低值集聚的县区在空间上相互邻近。而且 Moran's I 指数有所增长,表明其空间正相关性在增强,即高值或低值集聚的空间分布格局有所强化。

表 3 江西县域土地利用碳排放量的全局 Moran's I 指数(2000—2020 年)

Table 3 Global Moran's I index of county land-use carbon emissions in Jiangxi County (2000—2020)

年份 Year	2000	2005	2010	2015	2020
Moran's I	0.2506	0.2504	0.2562	0.2536	0.2510
Z	4.25	4.24	4.30	4.21	4.17
P	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

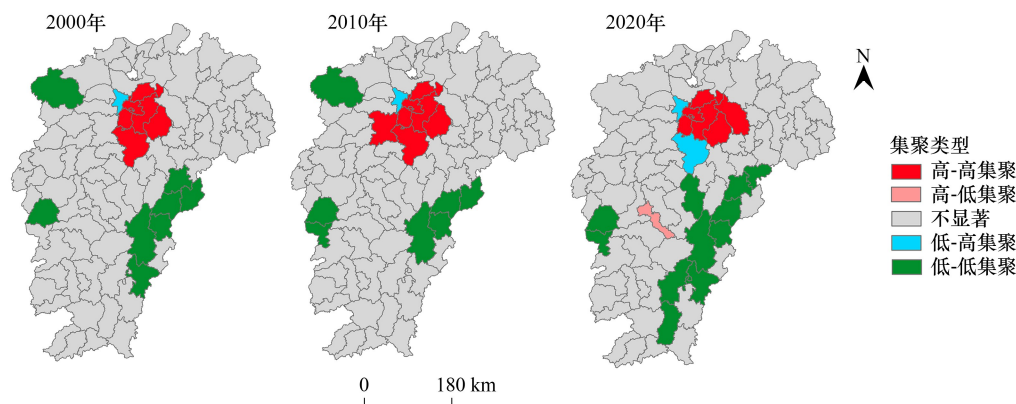


图5 2000—2020年县域土地利用碳排放量局部空间LISA集聚状态图

Fig.5 Local spatial LISA agglomeration state diagram of county land-use carbon emissions from 2000 to 2020
LISA:空间关联的局部指标 Local Indicators of Spatial Association

总体上来看,在局部上县域土地利用碳排放的空间集聚类型以高-高(HH)集聚和低-低(LL)集聚为主要聚类模式,且分布地区较为稳定。经济发达地区日益成为了碳排放量增长的“核心”,欠发达地区则成为了碳排放量增长的“外围”,并且结合表3可知,这种“核心-外围”的分布格局有所强化。

高-高集聚区主要分布在南昌市周围地区,包括南昌县、进贤县等地,具备较强的“高碳空间锁定”效应,成为了碳排放量增长的“核心”。分析可知,南昌市作为江西省的经济中心,人口和产业等高度集聚的同时,向周边区县进行“涓滴”,如输出高耗能产业等,无形之中也增加了周边区县的碳排放量。在2000—2020年间,高-高集聚区数量上大致稳定,但区域变化明显。如其中赣北地区的余干县在2020年变为高-高集聚区,这与近十年来,余干县大力推进“工业强县”战略有密切关联。低-低集聚分布区域也较为稳定,主要布局在江西省经济欠发达地区,如其中的永新县、宁都县等,其境内山地丘陵较多,经济结构以农业为主,生态环境好,植被覆盖率高,故而碳排放量相对较低,成为了碳排放量增长的“外围”。但在数量上低低集聚区有所浮动,原因可能在于区县的城镇化水平提高和产业结构的调整升级。如赣北地区的修水县,20年间建设用地年均增长率为4.65%,建设用地的扩张带动了所承载的人类生产生活能源消耗量的增加,因此导致其由低-低集聚变为了不显著区。再如井冈山市从不显著区变为低-低集聚区,这和井冈山市明确自身发展定位,通过调整产业结构,大力发展红色旅游业有关。

除上述两种主要聚类外,在空间分布中还存在少量的低-高(LH)集聚区,主要与高-高集聚区相邻近,如安义县2020年碳排放强度仅为1.9 t/万元,成为了赣北地区为数不多的排放量较少的区县;此外吉安城区在2020年变为了高-低(HL)集聚区,原因在于吉安城区作为地区的经济中心,经济发展的同时产业和人口等集聚现象明显,导致其地区的能源消耗和碳排放量均高于周边的区县,也成为了地区碳排放量增长的“高地”。

2.3 主要影响因素分析

2.3.1 影响因素总体分析

根据公式计算得到研究单元的土地利用碳排放量因素分解结果。并分别计算整理出碳排放强度效应(ΔC_e)、经济发展水平效应(ΔC_h)、土地利用效率效应(ΔC_g)、建设用地规模效应(ΔC_s)和综合效应,如表4所示。

由表4可知,总体上造成土地利用碳排放量增加的促进因素是经济发展水平和建设用地规模,分别使碳排放量累积增加了 28457.51×10^4 t和 10875.93×10^4 t。此外,起抑制作用的是碳排放强度和土地利用效率,分别使得碳排放量减少了 9224.41×10^4 t和 10375.63×10^4 t。但由于抑制作用小于促进作用,导致在2000—2020年间江西县域土地利用碳排放量仍呈上升趋势,共累积引起碳排放量增加了 19733.40×10^4 t。

表 4 江西县域土地利用碳排放影响因素分解结果/10⁴ t

Table 4 Decomposition results of land-use carbon emissions in Jiangxi County

指标 Items	年份 Year				累积效应 Cumulative effect
	2000—2005	2005—2010	2010—2015	2015—2020	
ΔC_e	-958.36	-2668.43	-4722.79	-874.82	-9224.41
ΔC_h	4226.18	7164.99	7996.16	9070.18	28457.51
ΔC_g	-725.28	182.44	-1697.07	-8135.73	-10375.63
ΔC_s	1127.44	592.22	2117.28	7038.99	10875.93
综合效应 Comprehensive effect	3669.98	5271.22	3693.58	7098.63	19733.40

ΔC_e :碳排放强度效应 Carbon emission intensity effect; ΔC_h :经济发展水平效应 Economic development level effect; ΔC_g :土地利用效率效应 Land use efficiency effect; ΔC_s :建设用地规模效应 Construction land scale effect

2.3.2 影响因素具体分析

为进一步揭示各影响因素对县域土地利用碳排放量影响的特征,根据影响因素分解结果得到江西省县域土地利用碳排放的各影响因素效应变化(图 6)和各效应对土地利用碳排放的累积贡献率(图 7)。

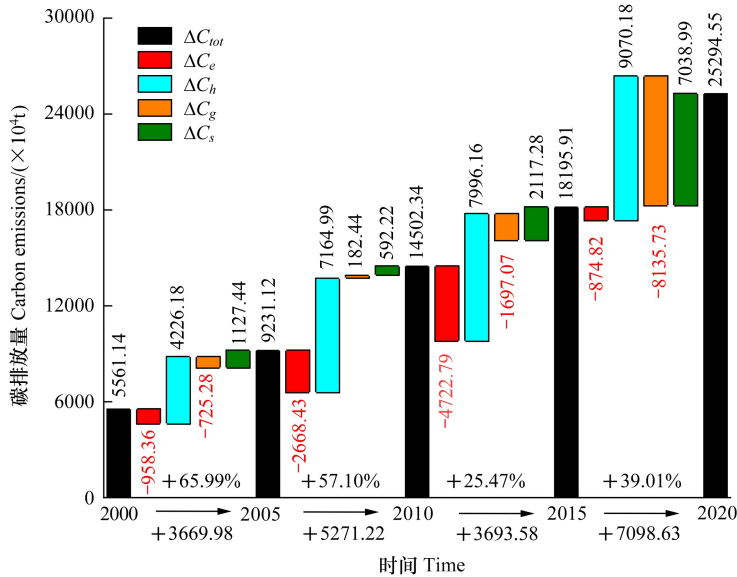


图 6 各影响因素的碳排放效应变化

Fig.6 The Change of carbon emissions effect of various influencing factors

Δ_{tot} :综合累积效应 Comprehensive cumulative effect; ΔC_e :碳排放强度效应 Carbon emission intensity effect; ΔC_h :经济发展水平效应 Economic development level effect; ΔC_g :土地利用效率效应 Land use efficiency effect; ΔC_s :建设用地规模效应 Construction land scale effect

(1) 碳排放强度影响因素

由图 7 可知,碳排放强度是抑制区县土地利用碳排放量过快增长的主要因素,累计贡献率为-46.75%,累积实现碳减排量 9224.41×10⁴ t,占碳减排总量的 47.06%。近年来,江西省大力推进产业结构的转型升级和加强对清洁能源的开发与使用,县域的平均碳排放强度呈显著下降趋势。分析可知,在经济发展的过程中降低碳排放强度,减少单位 GDP 能耗,可有效地抑制碳排放量的过快增长。如江西省重要的有色金属工业基地贵溪市通过调整产业结构和科技创新等措施,减少化石能源消耗量,实现经济发展的同时碳排放强度的降低,研究期内共实现了效应的 480.45×10⁴ t 的碳减排量。研究发现,有部分区县碳排放强度效应在前期表现为促进作用而后期为抑制作用,如袁州区、瑞金市等。这类区县在前期经济发展过程中产业和人口的集聚导致能源消耗的增加,进而提高了区域的碳排放量,而后期通过产业结构的调整升级,经济生产方式由粗放走向了集

约,降低了单位经济产出上的能源消耗量,碳排放强度则变为了抑制因素。

(2) 经济发展水平影响因素

由图可知,经济发展水平因素对区县土地利用碳排放量增加起到较强的正向促进作用,其累计贡献率高达 144.21%,引起的碳排放量占碳排放增长总量的 72.35%。可见经济发展水平的提高会带动区县的土地利用碳排放量的增长。如南昌县该效应累积高达 $1756.05 \times 10^4 \text{ t}$,位居全省区县首位。此外渝水区、九江城区等均由于经济发展促进了碳排放量的大幅增加,经济的高速发展势必会产生较强的“虹吸效应”,即导致周围区县的资源、资金等要素的流入,从而最终增加了生产生活中的能源消耗量,促进了地区碳排放量的增长。

(3) 土地利用效率影响因素

土地利用效率因素也是抑制碳排放量增加的主要因素,但作用强度略高于碳排放强度因素,累积贡献率为 -52.58%。由图 6 可知,土地利用效率因素在 2010 年前,有小幅上升,但总体以负效应为主,并且在后期土地利用效率的抑制作用大于碳排放强度效应。如赣南地区的章贡区在 2000—2005 年间该效应表现为促进因素,表明此时可能存在土地利用效率低下、建设用地未得到高效利用的问题,导致碳排放量增长迅速,但后期土地利用效率效应转化为了抑制因素,2005—2020 年间共实现了 $766.05 \times 10^4 \text{ t}$ 的减排量,类似的还有渝水区、吉安城区等。可见土地利用效率的提高,在减少对土地的无序开发和建设用地低效利用的同时,还可以集约利用土地资源,抑制建设用地上人为碳排放量的过快增长。

(4) 建设用地规模影响因素

建设用地规模因素也是促进区县土地利用碳排放增长的主要因素之一。2000—2020 年间江西省建设用地规模不断扩大,从 $27.78 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 增加到 $53.92 \times 10^4 \text{ hm}^2$,年均增长率达到 3.37%。受建设用地面积扩张的影响,2000—2020 年江西省县域土地利用碳排放量累积增加了 $10875.93 \times 10^4 \text{ t}$,累积贡献率达到 55.11%,引起的碳排放量占增加总量的 27.65%。虽然建设用地规模的作用强度低于经济发展水平,但建设用地规模在后期对促进碳排放量增长的速度要明显高于经济发展水平,建设用地的碳源作用在增强。因为建设用地的扩张会带动其所承载的工业生产活动和居民消费量的增加,进而引起能源消耗量等人为碳排放量的提高。为此,合理控制城区的建设用地面积,提高建设用地利用率,保障一定比例的城市绿地、湿地等碳汇用地,对于缓解建设用地上碳排放量过快增长具有重要意义。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文通过测算江西县域 2000—2020 年的土地利用碳排放量,运用空间自相关、LMDI 模型等技术方法,对其时空演变格局及影响因素进行了研究分析。可得到以下几点结论:

第一,从时序演变特征来看,区县的土地利用净碳排放量仍呈显著上升趋势,从 2000 年的 $5561.14 \times 10^4 \text{ t}$ 增加到 2020 年的 $25294.55 \times 10^4 \text{ t}$,年均增长率为 7.87%。但碳排放增速和平均碳排放强度都有明显下降,降幅分别达到 45.34% 和 36.16%;其中建设用地是导致碳排放量增加的首要排放源且碳源作用在不断增强,而耕地的碳源作用有所减弱;林地为主要碳汇用地,起着重要的固碳作用,草地、水域和未利用地的固碳能力较小,这与杨静媛等研究结论一致^[38]。但由于碳源的排放量明显高于碳汇吸收量,因此在未来一段时间内江西省土地利用碳排放量仍将持续上升。

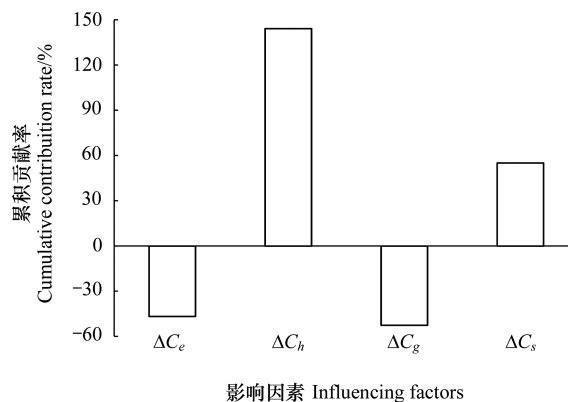


图 7 各效应对土地利用碳排放的累积贡献率

Fig. 7 The cumulative contribution rate of each effect on land-use carbon emissions

第二,部分区县碳排放增速在后期呈现提高的变化特点,这类区县可分为两类,一为矿产资源丰富,建设用地上重化工业部门占比较大的区县,其碳排放量在短期内并未出现明显降低;二为在省际边界或多山地丘陵地形限制性地带的欠发达区县,这类区县初期碳排放基数较小,在城镇化发展的过程中碳排放量随着经济发展和建设用地规模扩大等明显上升。

第三,从空间演变特征来看,土地利用碳排放量在空间上具有北高南低的分布特点和较为稳定的空间聚类模式,主要表现为以高高集聚和低低集聚为主。经济发达的县区日益成为地区碳排放量增长的“核心”,而经济欠发达的地区则成为土地利用碳排放量增长的“外围”。并且由 Moran's I 指数可知,这种“核心-外围”结构的空间分布格局有所强化。

第四,从影响因素上来看,促进江西省县域土地利用碳排放增长的因素主要为经济发展水平和建设用地规模,而抑制碳排放量增长的因素为碳排放强度和土地利用效率。但部分区县碳排放强度可能表现为“前期驱动后期抑制”作用,这与地区的经济生产方式转变、资源利用率提高有关。但由于抑制作用小于促进作用,导致这类县区的土地利用碳排放量仍增长显著。

3.2 讨论

本文的创新性在于从县域的角度出发,研究了欠发达地区江西省的土地利用碳排放时空演变及影响因素等问题。与国家、省域等尺度相比,开展基于县域尺度下的土地利用碳排放研究利于具体分析和评估特定县区的土地利用碳排放情况,揭示其时空变化和影响因素。此外,县域尺度的研究结果更加具体化和局部化,可为决策者提供更具有针对性的决策支持,制定和优化地方政策,指导土地利用规划和管理,实施具体的碳减排措施。此外研究发现,与发达地区相比^[20,39],欠发达地区的土地利用碳排放增速较快,这是因为欠发达地区由于技术水平和经济条件的限制,能源消费结构偏重且传统的化石能源利用效率低下,导致在城镇化的过程中碳排放量增长较快;但欠发达地区的林地等碳汇储量比发达地区丰富,具有较高的碳汇潜力,可通过与发达地区进行低碳交流合作,实现可持续地碳汇管理。

为此,本文提出以下几点建议:第一,各区县在经济发展的同时,应调整产业结构和依靠技术创新,继续降低碳排放强度尤其是高碳排放区的碳排放强度。因高碳排放区的碳排放总量在全省碳排放量中占有绝对比重,实现这类区县的碳减排任务对于实现全省的低碳发展具有重要意义。而这类区县普遍属于矿产资源较为丰富的地区或经济发达地区,针对于这类区县建设用地上的产业结构偏重、化石能源消耗量大等特点,应积极调整产业结构,降低高耗能产业比重;或依靠技术创新,实现经济发展与绿色低碳的良性循环。

第二,提高土地利用效率,优化城市土地资源配。置。如可根据实际情况用适度集约模式提高建设用地利用效率以免盲目性扩张浪费和严格限制建设用地向林地、草地等碳汇用地的过度扩张。从县区实际存在的资源禀赋出发,规划建设一定比例的森林公园等碳汇用地,以提高区域的生态固碳能力。

第三,欠发达地区和发达地区需加强在资金、技术等方面的交流与合作。推动赣北发达的区县如南昌城区等对赣南的欠发达区县在资金和技术、人才等的扶持,开展区域之间横向碳补偿等,以实现不同区域之间的低碳协同和公平发展。

第四,各区县应结合实际情况,明确自身发展目标,走具有特色的低碳高质量发展道路。高碳排放区的区县在社会经济发展水平上领先于欠发达地区,可在全省的节能减排战略中发挥着先导作用,推动产业结构调整升级,降低高耗能产业比重,并依靠技术创新,积极探寻适合于自身特色的发展路径;低碳排放区普遍属于欠发达地区,产业结构以农业为主,在追求经济发展的同时需加强生态保护,不以牺牲生态环境为代价换取经济利益。

不足与展望:首先,国内外学者对于陆地生态系统碳源和碳汇的估算在理论方法上做了大量工作^[40-42],但有关于土地利用碳排放系数和测算方法并不完全与实际区域相吻合,由此测算出来的碳排放量可能存在着一定的误差,但与前人相关研究^[37-38]对比,该文碳核算的结果与相关研究的变化趋势基本一致,研究结果仍具有一定的参考价值。其次,虽然夜间灯光反演的碳排放数据很好地弥补了在县域尺度上碳排放统计数据的

不足,但由于缺乏实际真实的县域能源碳排放数据,故数据的稳定性还值得深入探究。最后,土地利用变化碳排放的研究对空间尺度的选取要求较高,选取的空间尺度越大,区域内部的自然和社会经济条件越复杂,所得到的研究结果可能越失真^[19]。为此,未来可在研究尺度的精细化、研究数据的多源性等方面进行创新和提高,使得研究结果和政策建议更加具有科学性和针对性。

参考文献 (References):

- [1] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话. 人民日报, 2020-09-23(3).
- [2] 曲福田, 卢娜, 冯淑怡. 土地利用变化对碳排放的影响. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(10): 76-83.
- [3] 赖力. 中国土地利用的碳排放效应研究[D]. 南京: 南京大学, 2010.
- [4] Houghton R A. The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850 - 1990. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 1999, 51(2): 298.
- [5] IPCC 第五次阶段性报告. 政府间气候变化专门委员会出版, 2013-2014.
- [6] Goldewijk K K, Ramankutty N. Land cover change over the last three centuries due to human activities: the availability of new global data sets. *GeoJournal*, 2004, 61(4): 335-344.
- [7] Popp A, Krause M, Dietrich J P, Lotze-Campen H, Leimbach M, Beringer T, Bauer N. Additional CO₂ emissions from land use change—forest conservation as a precondition for sustainable production of second generation bioenergy. *Ecological Economics*, 2012, 74: 64-70.
- [8] 方精云, 黄耀, 朱江玲, 孙文娟, 胡会峰. 森林生态系统碳收支及其影响机制. 中国基础科学, 2015, 17(3): 20-25.
- [9] Piao S L, He Y, Wang X H, Chen F H. Estimation of China's terrestrial ecosystem carbon sink: methods, progress and prospects. *Science China Earth Sciences*, 2022, 65(4): 641-651.
- [10] 王刚, 张华兵, 薛菲, 甄艳. 成都市县域土地利用碳收支与经济发展关系研究. 自然资源学报, 2017, 32(7): 1170-1182.
- [11] 李健, 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. 生态经济, 2019, 35(8): 28-34, 66.
- [12] Krause A, Pugh T A M, Bayer A D, Li W, Leung F, Bondeau A, Doelman J C, Humpenöder F, Anthoni P, Bodirsky B L, Ciais P, Müller C, Murray-Tortarolo G, Olin S, Popp A, Sitch S, Stehfest E, Arneth A. Large uncertainty in carbon uptake potential of land-based climate-change mitigation efforts. *Global Change Biology*, 2018, 24(7): 3025-3038.
- [13] Potma Gonçalves D R, Carlos de Moraes Sá J, Mishra U, Ferreira Furlan F J, Ferreira L A, Inagaki T M, Romaniw J, de Oliveira Ferreira A, Briedis C. Soil carbon inventory to quantify the impact of land use change to mitigate greenhouse gas emissions and ecosystem services. *Environmental Pollution*, 2018, 243: 940-952.
- [14] Li W, Ciais P, Peng S S, Yue C, Wang Y L, Thurner M, Saatchi S S, Arneth A, Avitabile V, Carvalhais N, Harper A B, Kato E, Koven C, Liu Y Y, Nabel J E M S, Pan Y D, Pongratz J, Poulter B, Pugh T A M, Santoro M, Sitch S, Stocker B D, Viovy N, Wiltshire A, Yousefpour R, Zaehle S. Land-use and land-cover change carbon emissions between 1901 and 2012 constrained by biomass observations. *Biogeosciences*, 2017, 14(22): 5053-5067.
- [15] 黄贤金, 张秀英, 卢学鹤, 王佩玉, 秦佳遥, 蒋昀辰, 刘泽森, 汪振, 朱阿兴. 面向碳中和的中国低碳国土开发利用. 自然资源学报, 2021, 36(12): 2995-3006.
- [16] 付超, 于贵瑞, 方华军, 王秋凤. 中国区域土地利用/覆被变化对陆地碳收支的影响. 地理科学进展, 2012, 31(1): 88-96.
- [17] 周嘉, 王钰萱, 刘学荣, 时小翠, 蔡春苗. 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. 地理科学, 2019, 39(12): 1955-1961.
- [18] 罗谷松, 李涛. 碳排放影响下的中国省域土地利用效率差异动态变化与影响因素. 生态学报, 2019, 39(13): 4751-4760.
- [19] 赵荣钦, 刘英, 马林, 李宇翔, 侯丽朋, 张战平, 丁明磊. 基于碳收支核算的河南省县域空间横向碳补偿研究. 自然资源学报, 2016, 31(10): 1675-1687.
- [20] 邓祥征, 蒋思坚, 李星, 赵海鹏, 韩曠, 董金玮, 孙志刚, 陈明星. 区域土地利用影响地表 CO₂ 浓度异质性特征的动力学机制. 地理学报, 2022, 77(4): 936-946.
- [21] 李建豹, 黄贤金, 孙树臣, 揣小伟. 长三角地区城市土地与能源消费 CO₂ 排放的时空耦合分析. 地理研究, 2019, 38(9): 2188-2201.
- [22] 吴园玲, 黄灵光, 余裕平, 刘海婷, 张华敏, 徐玉玲. 江西省自然资源领域碳达峰碳中和路径研究. 江西科学, 2022, 40(3): 619-624.
- [23] Wu Y Z, Shi K F, Chen Z Q, Liu S R, Chang Z J. Developing improved time-series DMSP-OLS-like data (1992 - 2019) in China by integrating DMSP-OLS and SNPP-VIIRS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 1-14.

- [24] 莫惠斌, 王少剑. 黄河流域县域碳排放的时空格局演变及空间效应机制. 地理科学, 2021, 41(8): 1324-1335.
- [25] Du X Y, Shen L Y, Wong S W, Meng C H, Yang Z C. Night-time light data based decoupling relationship analysis between economic growth and carbon emission in 289 Chinese cities. Sustainable Cities and Society, 2021, 73: 103119.
- [26] Chen J D, Gao M, Cheng S L, Hou W X, Song M L, Liu X, Liu Y, Shan Y L. County-level CO₂ emissions and sequestration in China during 1997-2017. Scientific Data, 2020, 7: 391.
- [27] 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. 生态学报, 2016, 36(4): 1152-1161.
- [28] 孙赫, 梁红梅, 常学礼, 崔青春, 陶云. 中国土地利用碳排放及其空间关联. 经济地理, 2015, 35(3): 154-162.
- [29] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 陈安平. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算. 中国科学: D 辑: 地球科学, 2007, 37(6): 804-812.
- [30] 孙贤斌. 安徽省会经济圈土地利用变化的碳排放效益. 自然资源学报, 2012, 27(3): 394-401.
- [31] 徐婕, 潘洪义, 黄佩. 基于 LUCC 的四川省主体功能区碳排放与生态补偿研究. 中国生态农业学报: 中英文, 2019, 27(1): 142-152.
- [32] 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. 生态学报, 2021, 41(14): 5814-5824.
- [33] 李子杰, 高沪宁, 丁琪洵, 费坤, 丁世伟, 马友华. 基于 Moran's I 的安徽省太湖县耕地质量时空格局分析. 水土保持通报, 2021, 41(3): 350-356.
- [34] 赵先超, 彭竞霄, 胡艺觉, 张子兮. 基于夜间灯光数据的湖南省县域碳排放时空格局及影响因素研究. 生态科学, 2022, 41(1): 91-99.
- [35] 刘洋. 广东省土地利用碳排放与经济增长关系及其影响因素研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [36] Ma C B, Stern D I. China's changing energy intensity trend: a decomposition analysis. Energy Economics, 2008, 30(3): 1037-1053.
- [37] 陈群. 土地利用变化对江西省碳达峰与碳中和时点的影响研究[D]. 抚州: 东华理工大学, 2022.
- [38] 杨静媛, 张明, 多玲花, 肖圣, 赵昱茜. 江西省土地利用碳排放空间格局及碳平衡分区. 环境科学研究, 2022, 35(10): 2312-2321.
- [39] 梁归, 林跃胜, 方凤满. 环境规制视角下长三角地区碳排放的时空效应. 环境科学研究, 2023, 36(4): 848-856.
- [40] 于贵瑞, 方华军, 伏玉玲, 王秋凤. 区域尺度陆地生态系统碳收支及其循环过程研究进展. 生态学报, 2011, 31(19): 5449-5459.
- [41] 马晓哲, 王铮. 土地利用变化对区域碳源汇的影响研究进展. 生态学报, 2015, 35(17): 5898-5907.
- [42] Liu X C, Wang S A, Zhuang Q L, Jin X X, Bian Z X, Zhou M Y, Meng Z, Han C L, Guo X Y, Jin W J, Zhang Y F. A review on carbon source and sink in arable land ecosystems. Land, 2022, 11(4): 580.