基于夜间灯光数据的湖南省湘江流域能源消费碳排放时空演变分析

刘 晓[1]，朱 润[2]，邓吉祥[3]

（1. 湖南省社会科学院（湖南省人民政府发展研究中心）区域经济与绿色发展研究所，长沙 410003；
2. 东华理工大学土木与建筑工程学院，南昌 330013；3. 长沙学院经济与管理学院，长沙 410022）

摘要： 基于时间序列和空间统计方法，采用NPP/VIIRS（美国国家极轨业务环境卫星系统/可见光红外成像辐射仪）夜间灯光数据，对湖南省湘江流域8个城市2012—2022年能源消费碳排放的时空演变进行深入分析，揭示该区域能源消费碳排放的动态变化及其空间分布特征。研究结果表明：湘江流域的能源消费碳排放量整体上虽有波动，但呈缓慢上升趋势，其中湘江流域能源碳排放总量在2020年显著下降，但2022年迅速回升；湘江流域共有22个区县的SLOPE（CO_2倾向值）计算值小于0，碳排放量随时间减少效应不显著，共38个区县属于较慢增长型，6个区县属于中速增长型，2个区县属于较快增长型，3个区县属于迅猛增长型，能源碳排放量在空间呈“核心-边缘”结构。研究结论可为湘江流域能源消费碳排放的时空演变提供科学依据，也可为制定针对性的减排政策提供参考。

关键词： 城市能源碳排放；夜光遥感；NPP/VIIRS（美国国家极轨业务环境卫星系统/可见光红外成像辐射仪）；时空特征分析；湘江流域

中图分类号： X196 **文献标志码：** A **文章编号：** 1671－1807(2026)03－0214－09

人类在工业化和城镇化的加速进程中排放了大量的温室气体，是导致全球气候变暖和极端天气事件频发的重要原因。中国是世界能源消费第一大国[1]和负责任的大国，高度重视气候变化问题并将应对气候变化摆在国家治理的突出位置。“双碳”目标提出后，党中央、国务院关于“双碳”进行了重大决策部署，相关主题也成为热门研究领域。

近年来，为推动落实“双碳”目标，厘清碳排放的时空分布特征及其驱动机制，学者们开展了广泛研究。遥感技术因其能将夜间灯光数据与社会经济活动关联，在能源消费与碳排放的空间估算和动态分析中应用较广。与传统统计方法相比，夜间灯光遥感数据具有覆盖范围广、时间序列连续、空间分辨率较高等优势，能为区域尺度碳排放的时空格局研究提供了新的视角和方法支撑[2]。Elvidge等[3]利用DMSP/OLS（Defense Meteorological Satellite Program/Operational Linescan System）夜间灯光数据进行了国家尺度上的能源消费估算，为后续研究奠定了基础。Zhang等[4]进一步构建了基于夜间灯光数据的碳排放估算模型，并验证了其在中国省域能源碳排放研究中的适用性。随着遥感数据精度的提升与建模方法的发展，学者们逐步将机器学习、多源遥感融合等新技术引入碳排放估算中。Shi等[5]提出一种结合多源遥感数据与随机森林算法的碳排放估算模型，显著提高了估算精度与空间分辨率。赵金彩等[6]基于长时序夜间灯光和LandScan人口数据对城市蔓延程度进行测度，并检验了黄河流域城市蔓延对碳排放的影响及空间效应。邓因等[7]基于DMSP/OLS与NPP/VIIRS夜间灯光数据融合技术，系统揭示了城市建设用地利用效率与碳排放的时空耦合机制。王子尧等[8]通过耦合多目标规划（multiple objective programming，MOP）与斑块生成土地利用模拟模型（patch-generating land use simulation model，PLUS），对不同情景下北京市2030年土地利用与生态系统服务价值进行了模拟评估，将传统的多情景土地利用模拟研究进行了延伸与扩展。在区域尺度上，湘江流域作为湖南省经济社会发展的核心区域，其能源消费与

收稿日期： 2025-06-30

基金项目： 湖南省自然科学基金（2022JJ40231）

作者简介： 刘晓（1984—），女，湖南宁乡人，博士，副研究员，研究方向为城市发展；朱润（2002—），女，湖南邵阳人，硕士研究生，研究方向为隧道及地下工程；邓吉祥（1984—），男，湖南岳阳人，博士，讲师，研究方向为区域发展。

碳排放的时空演变研究具有重要意义。黄建中[9]较早分析了森林碳汇市场形成的关键要素,提出了湘江流域试点森林碳汇市场的基本构想,但总体来看,相关研究成果还较少,与湘江流域作为长江经济带与湖南省生态安全格局的核心区,在区域绿色低碳转型和"双碳"目标实现进程中居于重要战略地位不符,难以支撑将长江经济带打造成中国生态文明先行示范带重要战略支点的重任[10]。基于此,现以湖南省湘江流域为例,采用 NPP(national polar-orbiting partnership)/VIIRS(visible infrared imaging radiometer suite)夜间灯光数据[11]与湖南省能源消费碳排放数据构建城市能源消费碳排放估算模型,模拟湖南省湘江流域 8 个城市的能源消费碳排放量,并深入分析该流域碳排放演变的时空演变特征,为湘江流域低碳政策制定及"双碳"目标实现提供路径参考。

1　研究区域与数据来源

1.1　研究区域概况

湘江是长江的一级支流,流域各城市经济发展迅速,能源消费不断增长,是长江经济带经济发展、生态文明建设的重要部分。研究区域为湖南省湘江流域(图 1),包括长沙、株洲、湘潭、岳阳、郴州、娄底、永州、衡阳 8 个地级市,该区域聚集了全省 70% 的企业,贡献了全省 80% 的生产总值,是湖南省内经济最繁荣、人口最密集、经济规模最大、城市化水平最高的地区。流域内部共有 30 个国家级和省级的工业园区与经济开发区,是全省产业园区最为集中的经济核心区域,在推动湖南省的经济发展中仍然发挥着不可或缺的支撑作用[12]。

1.2　数据来源及处理

1.2.1　数据来源

使用的数据主要包括能源消费统计数据和夜间灯光数据。其中,2012—2022 年湖南省主要能源消费统计数据来源于《中国能源统计年鉴》中的《湖南省能源平衡表(实物量)》。夜间灯光原始数据选取 2012—2022 年 NPP_VIIRS 夜间灯光数据进行处理(数据来源于 VIIRS Nighttime Light)。

1.2.2　夜间灯光数据处理

2012 年,美国国家极轨业务环境卫星系统 NPP 搭载的可见光红外成像辐射仪 VIIRS 提供了新一代夜间灯光遥感数据[13]。这一数据相较于先前的 DMSP/OLS 数据,在空间分辨率、时间分辨率以及辐射分辨率等多个关键指标上均有显著进步,进一步扩展了夜间灯光遥感的研究方向和应用领域[14],但由于该数据并未消除极光、火灾等因素的影响,存在负值和极个别异常值和突变值,需要校正[15]。对此,在对灯光数据完成重采样等预处理后,采用阈值法对 NPP 夜间灯光数据的背景噪声进行处理。该方法能准确反映城市化空间过程,是研究城市地面重建过程的经典方法[16],其基本原理是:以像元灰度(DN)值代表灯光强度,则灰度值越大表示城镇建成区的可能性越大,碳排放水平越高,据此,借助像元 DN 值的统计数据可确定研究区各发展等级的最佳阈值,完成建成区对象识别,得到无噪声的 2012—2022 年 NPP/VIIRS 夜间灯光数据,重采样分辨率为 1 km。由于灯光数据与 GDP 存在强相关关系,中国改革开放以来 GDP 不断在增加,因此每一年的 NPP/VIIRS 夜间灯光数据 DN 值理论上来说应相较于前一年原有水平有所增加,而官网上可供下载的已经过处理的年度数据只有 2015 年、2016 年。为得到 2012—2022 年连续夜间灯光数据集,利用 2015 年已校正的年度夜间灯光数据,对合成的 2014 年年度数据和 2016 年年度数据进行连续

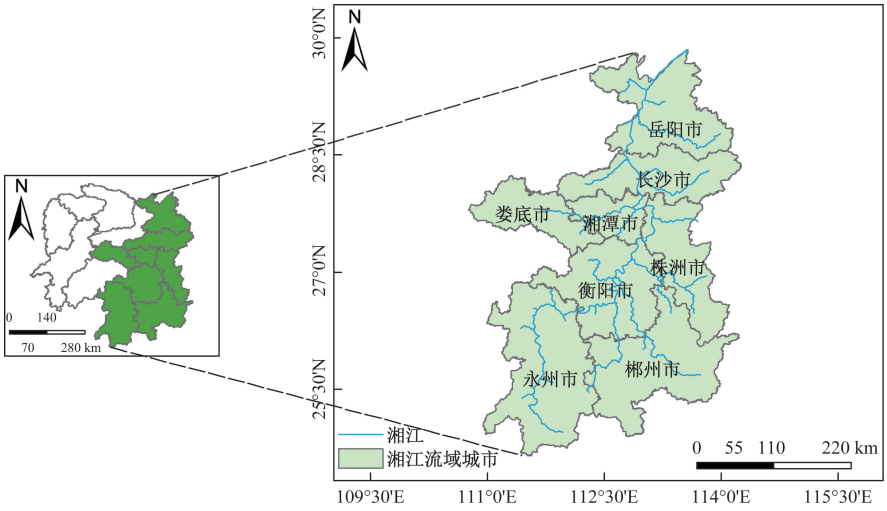


图 1　研究区域

性校正，得到 2016 年的数据之后，用校正好的当年数据去校正下一年数据，以此类推。2015 年以前年份的校正公式为

$$DN_n=\begin{cases}DN_n, & DN_{n-1}>DN_n\\ DN_{n-1}, & 其他\end{cases} \tag{1}$$

2015 年以后的校正公式为

$$DN_n=\begin{cases}DN_n, & DN_n>DN_{n-1}\\ DN_{n-1}, & 其他\end{cases} \tag{2}$$

式中：DN_{n-1} 为第 $n-1$ 年影像 DN 值；DN_n 为第 n 年影像 DN 值。

2　估算模型

2.1　能源消费碳排放量的核算

综合比较现有的几种能源消费碳排放核算方法，对联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change，IPCC）碳排放因子法、物料平衡法和实测法的优缺点进行分析，发现排放因子法适用于大尺度范围且计算较准确，因此，本文选择排放因子法测算湖南省能源消费碳排放量，其中湖南省能源平衡表采用国家统计局能源统计司发布的 2013—2023 年《中国能源统计年鉴》中的数据，碳排放系数采用《中国能源统计年鉴 2018》公布的标准煤折算系数和碳排放系数（表 1）。碳排放量计算公式为

$$C=\frac{44}{12}\sum_{i=1}^{j}E_i\sigma_i\rho_i \tag{3}$$

式中：C 为某地区的碳排放量；j 为选取能源种类数；E_i 为第 i 种能源消费总量；σ_i 为第 i 种能源折标准煤参考系数；ρ_i 为第 i 种能源的碳排放系数；44/12 为从碳质量转换为 CO_2 质量的系数。

碳排放计算选取煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、液化石油气、天然气、电力共 10 种能源，其能源消费总量来源于《中国能源统计年鉴》中各省份能源平衡表（实物量）[17]，能源的折标准煤系数和碳排放系数见表 1[18]。

湖南省能源消费碳排放量见表 2。2012—2019 年湖南省能源消费碳排放量整体大致呈波动上升趋势，2017 年湖南省的能源消费碳排放量最高，2020—2022 年相较前几年碳排放量较低，但也呈上升趋势。

2.2　基于夜间灯光数据湘江流域能源碳排放模型的选取

夜光数据中的几个关键指标中，灯光总强度（I）、归一化值（N）、平均灯光强度（A）均与能源碳排放量之间存在一定的相关性[19]。其中，灯光总强度代表某一区域内所有 DN 值的总和；归一化值则

表 1　各化石能源标准煤折算系数和碳排放系数[18]

能源种类	折标准煤折算系数/（千克标准煤·kg^{-1}）	碳排放系数/（千克碳·标准煤$^{-1}$）	能源种类	折标准煤折算系数/（千克标准煤·kg^{-1}）	碳排放系数/（千克碳·标准煤$^{-1}$）
原煤	0.714 3	0.755 9	柴油	1.457 1	0.592 1
焦炭	0.971 4	0.855 0	燃料油	1.428 6	0.618 5
原油	1.428 6	0.585 7	液化石油气	1.619 8	0.504 2
汽油	1.471 4	0.553 8	天然气	1.330 0	0.448 3
煤油	1.457 1	0.571 4	电力	0.345 0	0.272 0

注：电力换算系数单位为千克标准煤/（kW·h）。

表 2　基于碳排放因子法 2012—2022 年湖南省能源消费碳排放量

年份	能源碳排放量/万 t	年份	能源碳排放量/万 t	年份	能源碳排放量/万 t
2012	22 886.94	2016	25 943.44	2020	23 448.46
2013	20 931.96	2017	27 514.10	2021	26 314.65
2014	21 727.20	2018	24 893.51	2022	26 689.15
2015	23 832.11	2019	25 369.13	—	—

通过将区域内每个像元的 DN 值与区域内最大的像元 DN 值进行比值运算，并将这些比值相加汇总；而平均灯光强度采用区域内所有 DN 值总和与该区域面积的比重计算。相关研究表明，3 个指标均存在显著的相关关系[20]，其中灯光总强度相关系数最高。因此，本文以灯光总强度作为拟合对象，构建湖南省能源碳排放量估算模型。

$$I=\sum_{0}^{n}DN_i \tag{4}$$

$$N=\sum_{0}^{n}\frac{DN_i}{DN_{max}} \tag{5}$$

$$A=\frac{\sum_{0}^{n}DN_i}{s} \tag{6}$$

式中：DN_i 为 i 区域内的像元值；n 为区域内像元的数量；DN_{max} 为 i 区域内最大的像元值；s 为 i 区域的总面积。

选取线性模型、对数模型、二次多项式模型、三次多项式模型、S 模型 5 个相关关系模型对湖南省灯光总强度与测算的能源消费碳排放量进行拟合，比较不同模型的拟合优度，得到最佳拟合模型。2020—2022 年的能源消费碳排放量情况较特殊，在进行长时间拟合分析时将这两年与 2012—2019 年分开讨论，以确保估算模型的科学性和准确性。

分析模型结果见表 3，三次模型拟合度的表现最好，为 0.819，据此选取三次模型作为碳排放估算模型，公式为

表 3　2012—2019 年一元回归分析模型结果

拟合方式	R^2	显著性
线性	0.552	0.035
对数	0.629	0.019
二次	0.773	0.025
三次	0.819	0.058
S模型	0.663	0.013

$$C_i = aX_i^3 + bX_i^2 + cX_i + d \tag{7}$$

式中:C_i 为第 i 年的能源消费碳排放量;X_i 为第 i 年夜间灯光数据 DN 值;a、b、c、d 为参数。

2.3　基于夜间灯光数据湘江流域能源碳排放模型精度检验

为评价模型的模拟效果,将模型相关参数与其他学者的类似课题进行比较,以此评估和检验模型的准确性和适用性。张慧琳[19]以不同省份建立拟合模型,其中湖南省的 R^2 为0.725 9,拟合均值为 0.71;周月凌[21]以中部地区省级碳排放建立模型,其中湖南省 R^2 为 0.936 5,各省份 R^2 均值为 0.952 4。以湖南省的能源消费碳排放与夜间灯光数据分两个时间段建立模型,2012—2019 年的 R^2 为 0.811 0,2020—2022 年的由于数据周期仅为 3 年,拟合异质性没有充分体现,R^2 接近 1,2012—2019 年的模型拟合系数介于前两者之间,2020—2022 年的模型拟合系数高于前两者(图 2)。在评估碳排放的模拟值与计算值之间的误差时,张慧琳[19]的研究中,相对误差的最大值为 33.23%,而最小值为 1.3%。周月凌[21]的研究中,相对误差的最大值为 31.79%,最小值为 0.462%。

比较湖南省能源消费碳排放的模拟值与计算值,其相对误差的最大值为 5.54%,最小值为−5.48%,这一误差范围相较于前两者的误差范围更窄,准确性更高。由此表明,模型在整体上表现较好,可用于城市、区县能源碳排放的估算以及后续湘江流域能源消费碳排放的时空分析。

2.4　能源消费碳排放时间趋势研究方法

SLOPE(slope of linear regression)趋势分析法是一种通过对随时间变化的变量进行线性回归分析,并预测其变化趋势的方法。采用一元线性回归的相关系数表示时间尺度的变化趋势,对 2012—2021 年湘江流域区县尺度的能源消费碳排放量的变化斜率[22]进行计算,由此进一步研究湘江流域各区县能源消费碳排放 10 年的变化情况,公式为

$$\mathrm{SLOPE} = \frac{n\sum_{i=1}^{n} x_i c_i - \sum_{i=1}^{n} x_i \sum_{i=1}^{n} c_i}{n\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right)^2} \tag{8}$$

式中:SLOPE 为 CO_2 倾向值;n 为总年份数,即 2012—2022 年;x_i 为第 i 年;c_i 为第 i 年某区域排放的能源消费碳排放量。当 SLOPE 小于 0,表示碳排放量随时间减少,为不显著;当 SLOPE 大于 0,表示碳排放随时间增加,根据李海萍等[23]提出的分级标准,将能源消费碳排放量排放总量增长趋势划分为缓慢增长型、较慢增长型、中速增长型、较快增长型、迅猛增长型 5 种类型,见表 4[24]。

3　湘江流域能源碳排放时空演变分析

3.1　湘江流域能源消费碳排放时空分布

湘江流域整体及各市能源碳排放量如图 4 所示。湘江流域的能源消费碳排放量整体呈波动式上升趋势。2012—2014 年湘江流域能源消费碳排放总量缓慢下降,2014—2018 年呈上升趋势但增速缓慢,湘江流域在经济发展快速的同时也做到了节能减排,2019 年能源消费碳排放量相比 2018 年略有降低,2020 年湘江流域能源消费碳排放量大幅下降,达到 10 年内最低值,2021 年以来能源消费碳排放量逐渐回升。

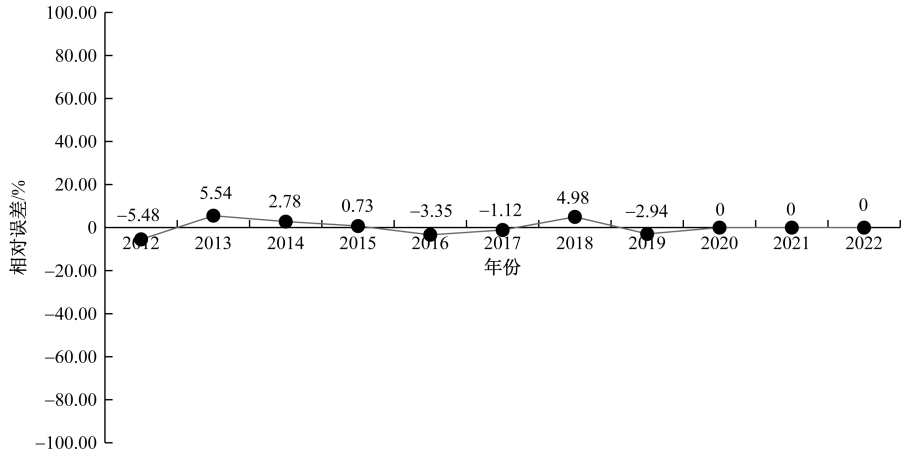


图 2　湖南省能源消费碳排放量模拟值与计算值的相对误差

表 4　SLOPE 等级划分标准[24]

增长类型	缓慢增长型	较慢增长型	中速增长型	较快增长型	迅猛增长型
SLOPE	$<x-0.5s$	$x-0.5s\sim x+0.5s$	$x+0.5s\sim x+1.5s$	$x+1.5s\sim x+2.5s$	$>x+2.5s$

注：x 为某地区 SLOPE 的平均值；s 为标准差。

2013 年，湘江保护与治理成为湖南省委“一号重点工程”，连续实施 3 个“三年行动计划”，累计关停涉及重污染的企业 292 家，先后出台《湖南省湘江保护条例》《湖南省湘江流域生态补偿暂行办法》等政策法规。一系列的措施取得了较好的成效，政府对工厂的监管力度加强，一定程度上控制了湘江流域能源消费碳排放的增长，能源消费碳排放量在 2012—2018 年呈现先下降后缓慢上升趋势。2020 年湘江流域能源消费碳排放量大幅下降。2021 年以后湘江流域的能源消费碳排放量开始回升。

在对湘江流域能源碳排放总体变化情况的研究基础上，对城市尺度能源消费碳排放量做进一步的研究。如图 4 所示，2012—2022 年，湘江流域能源消费碳排放量各市占比虽然有波动，但整体变动不大。长沙是湖南省省会城市，其能源消费碳排放稳居湘江流域首位，且接近整个湘江流域的 1/2；娄底市在湘江流域能源消费碳排放占比最低；长沙、株洲、湘潭和郴州 10 年间占比有所降低；岳阳和娄底的占比比较稳定；衡阳、永州的碳排放在 10 年内所占比例稳定增加。

由于 2020—2022 年湘江流域能源消费碳排放量表现较为特殊，分别对 2012—2019 年以及 2020—2022 年这两个时间段的能源碳排放变化量以及变化率进行讨论（图 5）。2012—2019 年除岳阳、永州、娄底及衡阳碳排放增长外，湘江流域其余

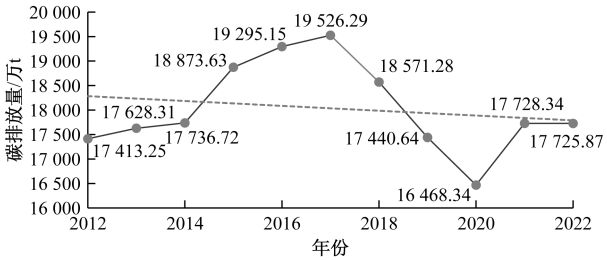
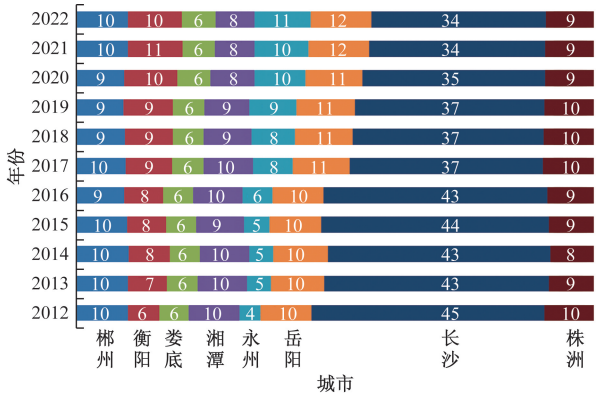
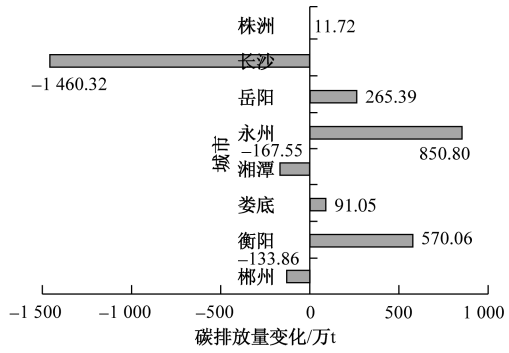


图 3　2012—2022 年湘江流域及各市能源消费碳排放总量

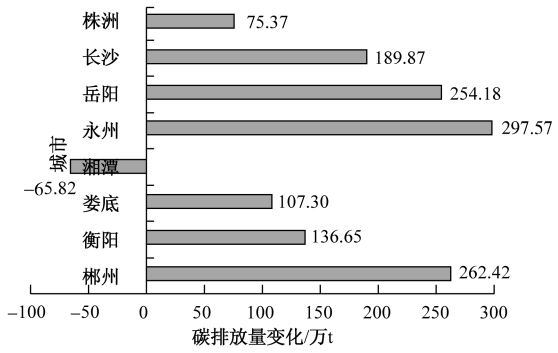


单位：%

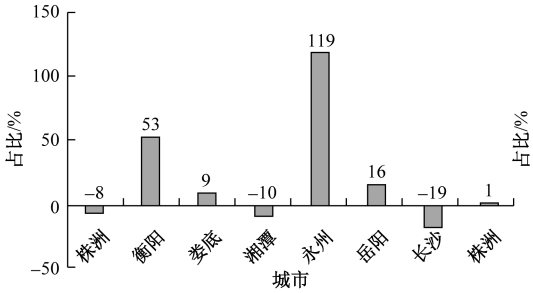
图 4　2012—2022 年湘江流域各市能源碳排放占比情况



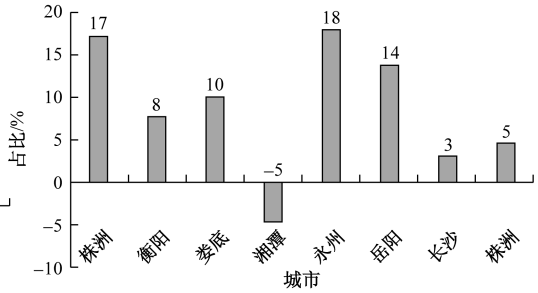
(a) 2012—2019年能源消费碳排放量变化



(b) 2020—2022年能源消费碳排放量变化



(c) 2012—2019年能源消费碳排放占比变化



(d) 2020—2022年能源消费碳排放占比变化

图 5　湘江流域各市能源碳排放占比及变化情况

城市均有所减少。其中永州增长量最大,从 2012 年的 716.07 万 t 增长至 2019 年的 1 566.88 万 t;衡阳次之,从 2012 年的 1 076.98 万 t 增长至 2019 年的 1 647.03 万 t。2020—2022 年,湘江流域除湘潭市外各市能源消费碳排放量均有所回升,其中永州增长量最大、增长率最高,从 2020 年的 1 634.97 万 t 增长到 2022 年的 1 932.54 万 t;郴州次之,由 2020 年的 1 509.27 万 t 增长到 2022 年的 1 771.68 万 t。

空间上,湘江流域能源碳排放量呈现总体上升,且呈"核心-边缘"结构(图 6)。碳排放量较高的区县大多集中分布在湖南省的省会城市长沙市以及长沙市的周边城市,永州市和郴州市部分区县的碳排放增长明显。进一步分析可知,这种集聚和中心递减规律与区域的经济发展水平、产业结构等均有紧密联系。长沙作为省会,集中了众多的工业企业和人口,经济活动频繁,其能源消费量较大,在传统化石能源为主导的能源结构影响下,碳排放量必然为全省最高。周边城市受长沙的辐射带动,产业协作紧密,能源消耗也相对较高。而永州市和郴州市部分区县由于距离经济中心较远,尽管承接了部分产业转移,但受能源结构不优、排放效率不高等影响,产业的发展滞后于能源排放,碳排放增长明显。将代表经济总体水平的经济总量、代表工业发展水平的规模工业水平,以及代表人口能源消费的城镇人口数量的指标综合考虑,可以较好解释能源碳排放量的空间一致性关系。以 2022 年为例,长沙、株洲、湘潭 3 市的 GDP 分别为 13 966.11 亿元、3 616.81 亿元和 2 697.54 亿元,其对应的规模以上

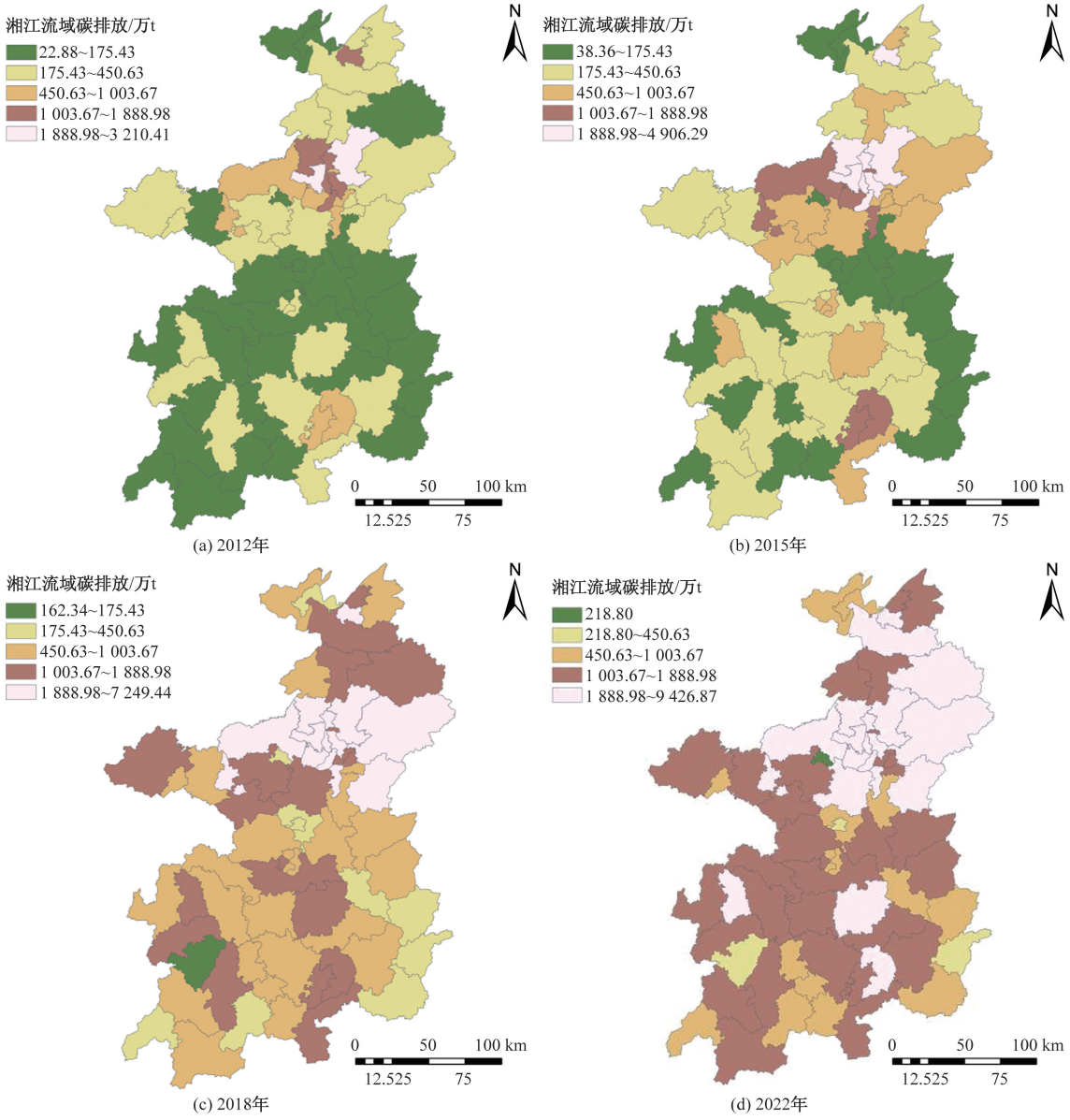


图 6　部分年份湘江流域能源消费碳排放估算量

工业企业综合能源消费量分别为437.47万t、376.01万t和911.58万t，对应常住城镇人口分别为1 042.06万人、387.11万人和270.27万人，3市对应了湘江流域能源碳排放量的高值区域，而永州市远离经济中心，2022年GDP仅为长沙的17.2%，其对应的规模以上工业企业综合能源消费量和常住城镇人口均较中心地区低，分别为183.42万t和514.37万人，在空间上表现为能源碳排放量的低值区域。

3.2　湘江流域能源消费碳排放时间趋势

基于SLOPE趋势分析法，计算湘江流域各区县2012—2022年SLOPE值，进一步探究湘江流域区县尺度能源碳排放的增长情况。按照分级标准(表5)对计算结果进行分级，可将能源消费碳排放量分为5类，分别为缓慢增长型、较慢增长型、中速增长型、较快增长型、迅猛增长型。由表5可知，2012—2022年，湘江流域有22个区县的SLOPE计算值小于0，属于不显著型；共38个区县的SLOPE计算值在0～11.75区间内，属于较慢增长型；6个区县的SLOPE计算值在11.75～32.62区间内，属于中速增长型；2个区县SLOPE计算值在32.62～53.49区间内，属于较快增长型；3个区县SLOPE计算值大于53.49，属于迅猛增长型。

空间上，较快增长型和迅猛增长型的3个地区浏阳市、长沙县和望城区，SLOPE值分别为35.65、44.82和87.34，均分布于长沙市。湘江流域有52.1%的区县属于较慢增长型，为2012—2022年湘江流域能源消费碳排放量的最主要增长类型，其次是缓慢增长型，占湘江流域的33.8%。2012—2022年，湘江流域8成以上的区县能源消费碳排放增长速度缓慢甚至呈降低趋势，如增长类型为不显著型的区县中芙蓉区、岳麓区、开福区、岳阳楼区、岳塘区，增长类型为较慢增长型的荷塘区、华容县、衡东县、衡南县、衡山县、衡阳县、耒阳市等，经济体量相对较大，恢复相对困难，导致能源消费碳排放量相比2012年有所下降或增长速度缓慢。

表5　2012—2021年湘江流域县级尺度能源消费碳排放增长类型

增长类型	区县	合计
缓慢增长型	安仁县、桂东县、嘉禾县、临武县、汝城县、永兴县、衡山县、南岳区、石鼓区、雁峰区、珠晖区、冷水江市、韶山市、江永县、蓝山县、双牌县、新田县、华容县、君山区、芦淞区、渌口区、炎陵县	22
较慢增长型	北湖区、桂阳县、苏仙区、宜章县、资兴市、常宁市、衡东县、衡南县、衡阳县、耒阳市、祁东县、蒸湘区、涟源市、娄星区、双峰县、新化县、湘潭县、湘乡市、道县、东安县、江华瑶族自治县、冷水滩区、零陵区、宁远县、祁阳市、临湘市、汨罗市、平江县、湘阴县、岳阳县、云溪区、芙蓉区、天心区、茶陵县、荷塘区、醴陵市、石峰区、攸县	38
中速增长型	雨湖区、岳塘区、岳阳楼区、开福区、雨花区、天元区	6
较快增长型	浏阳市、宁乡市	2
迅猛增长型	望城区、岳麓区、长沙县	3

基于不同增长类型、资源禀赋及区域经济社会状况，进一步针对性提出减排策略。缓慢增长型县域以山地丘陵地形为主，森林资源丰富、林业和农业产业较为发达，部分地区矿业资源较为丰富。该类地区针对性的减排策略应集中于生态固碳，如在林地依托“湘林碳票”机制扩大碳汇开发，探索“生态补偿+碳交易模式”，推动碳减排，在农地推广农业生物质能利用，加强碳汇功能保护，提升系统碳汇能力。较慢增长型县域多具有丰富的矿产资源，地形地貌、水资源和森林植被较为丰富，中业以有色金属、新材料、循环经济为主，特色农业和旅游业较为发达。该类地区针对性的减排策略应聚焦于能源结构优化，推动清洁能源替代与能效提升，如针对桂阳、永兴等矿产资源富集区，推进矿山开采与冶炼环节的电气化改造，减少化石能源依赖，针对资兴、临武等水能资源区，扩大水电、风电、生物质能等可再生能源装机规模，同时针对有色金属和新材料产业等，推进循环经济与绿色制造。中速增长型县域多为城市建成区，产业多元且经济活跃，工业基础较为雄厚，但面临的环境压力与生态挑战也较大，主要的减排策略应为进一步优化能源结构，如推广循环经济与资源再生，进一步推动产业升级、发展数字经济等精准减碳。较快增长型县域均为全国百强县，属于工业主导型经济，浏阳市的减排策略需推动花炮产业“短流程冶炼”技术升级，减少重熔环节能耗，宁乡市则需深化先进储能材料产业链绿色制造。迅猛增长型均位于长株潭都市圈核心区，交通网络密集，是长沙主城区产业转移、生态保护、科创研发的重要载体，需从能效提升、产业绿色转型、交通与城市管理减排等多维度推进减排。

4　结论与讨论

利用NPP-VIIRS夜间灯光影像数据，有效估算了湘江流域地级市以及县级尺度的能源消费碳排放量。结果表明，夜光数据的灯光总强度与城市能源碳排放量之间存在线性关系且三次模型拟合

度最高,达到了0.819。结果表明,2012—2022年湘江流域的能源消费碳排放量在2020年出现明显的下降,但在2021年迅速回升到接近前8年的平均水平,整体上呈波动上升趋势。SLOPE趋势分析法结果表明,2012—2022年,湘江流域共有22个区县的SLOPE计算值小于0,属于能源碳排放缓慢增长型;共38个区县属于较慢增长型;6个区县的属于中速增长型;2个区县属于较快增长型;3个区县属于迅猛增长型。针对不同类型的排放类型,从能效提升、产业转型等角度提出了相关对策建议。

作为长江经济带的重要战略支点,湘江流域在统筹经济增长与低碳转型方面具有典型示范意义。本文系统揭示了2012—2022年流域碳排放的时空分异特征,但受限于地市尺度能源平衡表数据的可获得性,研究在空间关联效应解析、产业转移碳泄漏测算等方面仍存在深化空间,后续研究可结合夜间灯光遥感、企业级用电大数据等多源信息,构建碳排放空间化模型,重点揭示该流域协同发展背景下的碳转移机理与生态补偿机制,并进一步完善流域尺度的碳排放核算方法体系,为差异化制定“碳预算-碳交易”政策工具包提供科学支撑,助推湘江流域形成“产业低碳化-空间集约化-能源清洁化”的绿色发展新范式,为中国内陆流域生态文明建设提供可复制的解决方案。

参考文献

[1] 刘华军,石印,郭立祥,等. 新时代的中国能源革命:历程、成就与展望[J]. 管理世界,2022,38(7):6-24.

[2] 刘贤赵,杨旭. 夜间灯光数据估算中国省域碳排放与国际碳数据库分配的碳排放比较[J]. 遥感技术与应用,2022,37(2):319-332.

[3] ELVIDGE C,BAUGH K,DIETZ J,et al. Radiance calibration of DMSP-OLS low-light imaging data of human settlements[J]. Remote Sensing of Environment,1999,68:77-88.

[4] ZHANG Z,FU S,LI J,et al. Spatiotemporal analysis and prediction of carbon emissions from energy consumption in China through nighttime light remote sensing[J]. Remote Sensing,2024,16(1):103390.

[5] SHI K,CHEN Y,YU B,et al. Modeling spatiotemporal CO_2(carbon dioxide) emission dynamics in China from DMSP-OLS nighttime stable light data using panel data analysis[J]. Applied Energy,2016,168:523-533.

[6] 赵金彩,张暕,李琬,等. 黄河流域城市蔓延对碳排放的影响:基于夜间灯光数据的实证研究[J]. 地理科学进展,2025,44(8):1596-1616.

[7] 邓因,王永超,杨可芯. 基于夜间灯光数据的碳排放与土地利用效率时空相关性演进研究[J]. 环境保护科学,2025,51(5):1-15.

[8] 王子尧,孟露,李倞,等. 低碳发展背景下北京市土地利用与生态系统服务多情景模拟研究[J]. 生态学报,2023,43(9):3571-3581.

[9] 黄建中. 关于在湘江流域试点森林碳汇市场的构想[J]. 江苏农业科学,2011(1):507-509.

[10] 吴传清,黄磊. 长江经济带绿色发展的难点与推进路径研究[J]. 南开学报(哲学社会科学版),2017(3):50-61.

[11] ZHAO N Z,ERIC S,NATHAN C. Nighttime-lights-derived fossil fuel carbon dioxide emission maps and their limitations[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing,2015,81:935-943.

[12] 于婧萱. 湘江流域土地利用变化及土壤侵蚀风险评估[D]. 长沙:中南林业科技大学,2023.

[13] 续宇彤,刘昭华. 夜间灯光支持下江西省典型城市发展动态监测[J]. 北京测绘,2021,35(9):1177-1182.

[14] 余柏蒗,王丛笑,宫文康,等. 夜间灯光遥感与城市问题研究:数据、方法、应用和展望[J]. 遥感学报,2021,25(1):342-364.

[15] 钟亮,刘小生,杨鹏. SNPP-VIIRS夜间灯光影像去噪方法研究[J]. 测绘通报,2019(3):21-26.

[16] 何春阳,史培军,李景刚,等. 基于DMSP/OLS夜间灯光数据和统计数据的中国大陆20世纪90年代城市化空间过程重建研究[J]. 科学通报,2006(7):856-861.

[17] 刘佳骏,李雪慧,史丹. 中国碳排放重心转移与驱动因素分析[J]. 财贸经济,2013(12):112-123.

[18] 赵明轩,吕连宏,张保留,等. 中国能源消费、经济增长与碳排放之间的动态关系[J]. 环境科学研究,2021,34(6):1509-1522.

[19] 张慧琳. 基于DMSP/OLS夜间灯光数据的中国能源消费碳排放时空变化特征及驱动力研究[D]. 兰州:兰州大学,2019.

[20] 肖亚来. 夜光遥感技术支持下湖南省城市能源消费碳排放研究[D]. 南昌:江西理工大学,2021.

[21] 周月凌. 基于NPP-VIIRS数据的中部地区碳排放时空演变及其影响因素分析[D]. 合肥:安徽建筑大学,2023.

[22] DOLL C H,MULLER J P,ELVIDGE C D. Night-time imagery as a tool for global mapping of socioeconomic parameters and greenhouse gas emissions[J]. Ambio A Journal of the Human Environment,2000,29(3):157-162.

[23] 李海萍,龙宓,李光一. 基于DMSP/OLS数据的区域碳排放时空动态研究[J]. 中国环境科学,2018,38(7):2777-2784.

[24] 苏泳娴,陈修治,叶玉瑶,等. 基于夜间灯光数据的中国能源消费碳排放特征及机理[J]. 地理学报,2013,68(11):1513-1526.

Spatiotemporal Evolution Analysis of Energy Consumption Carbon Emissions in Xiangjiang River Basin, Hunan Province Based on Nighttime Light Data

LIU Xiao[1], ZHU Run[2], DENG Jixiang[3]

(1. Institute of Regional Economy and Green Development, Hunan Academy of Social Sciences (Hunan Provincial People's Government Development Research Center), Changsha 410003, China; 2. School of Civil and Architectural Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 3. School of Economics and Management, Changsha University, Changsha 410022, China)

Abstract: Based on time series and spatial statistical methods, and using NPP /VIIRS(National Polar-Orbiting Partnership/visible infrared imaging radiometer suite) night light data, an in-depth analysis was conducted on the spatio-temporal evolution of energy consumption carbon emissions in eight cities in the Xiangjiang River Basin of Hunan Province from 2012 to 2021, revealing the dynamic changes and spatial distribution characteristics of energy consumption carbon emissions in this region. The research results show that although the carbon emissions from energy consumption in the Xiangjiang River Basin have fluctuated overall, they have shown a slow upward trend. Among them, the total carbon emissions from energy in the Xiangjiang River Basin decreased significantly in 2020, but rebounded rapidly in 2022. In the Xiangjiang River Basin, the calculated SLOPE values of 22 districts and counties are less than 0, and the reduction effect of carbon emissions over time is not significant. A total of 38 districts and counties belong to the relatively slow growth type. Six districts and counties belong to the medium-speed growth type. Two districts and counties belong to the relatively rapid growth type. Three districts and counties are of the rapid growth type. The carbon emissions from energy sources exhibit a "core-periphery" structure in space. The research conclusion can provide a scientific basis for the spatio-temporal evolution of carbon emissions from energy consumption in the Xiangjiang River Basin, and also can offer an important reference for formulating targeted emission reduction policies.

Keywords: urban energy carbon emissions; luminous remote sensing; NPP/VIIRS(National Polar-Orbiting Partnership/visible infrared imaging radiometer suite); spatio-temporal feature analysis; Xiangjiang River Basin