引文格式：蓝皓新,徐军. 浙江省县域碳排放时空格局及影响因素研究[J]. 地理空间信息, 2024, 22(10): 5-8. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.10.002

浙江省县域碳排放时空格局及影响因素研究

蓝皓新[1]，徐　军[1*]
（1. 河海大学，江苏 南京 210000）

摘　要：准确估算区域碳排放，分析其时空演变特征，可为区域持续发展和节能减排提供理论参考。基于DMSP/OLS和NPP-VIIRS两类夜间灯光整合的数据集，结合能源消费统计数据，构建浙江省碳排放估算模型，模型拟合优度达到91.5%。利用空间自相关等空间分析方法对2000—2020年浙江省县级碳排放时空特征进行研究，利用地理加权回归模型探究影响因素。结果表明：浙江省县级碳排放量显著增长，高碳排放区域呈扩张趋势，且南北差异明显。80%区县的碳排放量处于中高速增长阶段。浙江省县级碳排放具有空间正相关性和区域聚集特征。浙江省北部高碳区县聚集，南部低碳区县聚集。探究影响碳排放空间分异的4种因素，贡献度依次为：人口＞第二产业占比＞人均可支配收入＞人均生产总值。

关键词：碳排放；夜间灯光数据；低碳发展；空间分析
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）10-0005-04

Research on Spatio-temporal Pattern and Influence Factors of County-level Carbon Emissions in Zhejiang Province

LAN Haoxin[1], XU Jun[1]
(1. Hohai University, Nanjing 210000, China)

Abstract: Accurate estimation of regional carbon emission and analysis of its spatio-temporal evolution characteristics can provide theoretical reference for regional sustainable development and energy conservation and emission reduction. Based on the integration data set of DMSP/OLS and NPP-VIIRS nighttime light, combined with the statistical data of energy consumption, we constructed the carbon emission estimation model of Zhejiang Province. The good fit of model reached 91.5%. Then, we used spatial autocorrelation and other spatial analysis methods to study the spatio-temporal characteristics of county-level carbon emissions in Zhejiang Province from 2000 to 2020, and used the geographical weighted regression model to explore the influence factors. The results show that ①the county-level carbon emissions increase significantly in Zhejiang Province. The regions with high carbon emissions show an expanding trend, and the difference between the north and the south is obvious. The carbon emissions of 80% of the districts and counties are in the stage of medium-high growth. ②The county-level carbon emissions have the characteristics of spatial positive correlation and regional aggregation. In the north of Zhejiang Province, high carbon emission counties are clustered, and in the south, low carbon emission counties are clustered. ③To explore the four factors affecting the spatial differentiation of carbon emissions, the contribution degree is as follows population, proportion of secondary industry, per capita disposable income, per capita GDP.

Key words: carbon emission, nighttime light data, low carbon emission development, spatial analysis

2017年中国的碳排放量占全球27%[1]，作为碳排放大国，中国有必要解决碳排放引发的一系列环境问题[2]。近年来国内有关“碳排放”的研究受限于数据的滞后性，不完整性和不及时性，导致小尺度区域的碳排放研究进展比较困难[3]。因此，使用更为高效的数据源研究区域碳排放，分析其空间规律，提出针对性的减排建议成为研究重点。

面对严峻的碳排放问题，有更多的学者选择使用夜间灯光数据进行碳排放研究[4-8]，较好地解决了研究中统计数据缺失问题[5]。

浙江省是长三角经济圈中的重要省份，各市县经济发展方式，能源结构有所差异。本文借鉴已有的研究成果进行数据整合[9-10]，对区域碳排放进行反演。其结果可作为精准减排政策制定的依据。

1. 研究区概况

1.1 研究区概况

浙江省地处27°02′~31°11′N，118°01′~123°10′E，占地面积约为105 500 km^2，下辖11个地级市，共90个县级行政区（35个县、20个县级市、35个市辖区），

收稿日期：2023-05-11。
第一作者简介：蓝皓新（1999—），硕士，主要从事区域规划，生态遥感工作，E-mail：211301050001@hhu.edu.cn。
通信作者：徐军（1966—）博士，副教授，主要从事海岸带环境演变及海岸带遥感工作，E-mail：navy2690996@163.com。

后文统称为区县。

1.2 数据来源

研究采用整合后的夜间灯光数据和浙江省历年统计数据。能源消耗统计数据和国民经济指标来源于浙江省统计年鉴。夜光遥感数据来源于美国国家海洋与大气管理。DMSP提供了1992—2013年原始数据，VIIRS提供了从2012年至今的原始数据。两类传感器提供的夜间灯光数据被广泛运用在与城市，环境，能源，经济等相关的领域。

2 研究方法

2.1 夜间灯光数据处理

两类夜间灯光数据存在不同传感器和不同年份间差异，VIIRS数据精度优于DMSPS数据，因此对两类数据进行整合。

1）校正DMSP数据的连续性和可比性[10]。相互校正，采用不变区域法解决同一卫星不同年份数据波动问题；年内融合，解决同一年份不同传感器数据差异问题；年际间校正，确保 *DN* 值逐年增加,符合实际能源消耗情况。

2）对2012—2020年的VIIRS栅格数据进行年度合成。进行稳定性校正后存在少量负值和少量极端异常值，设置472.86为像元阈值。对于缺失的像元，将其 *DN* 值设置为0。最后进行年际间校正确保 *DN* 值逐年增加。

3）在spss中建立2012、2013年DMSP-OLS与NPPVIIRS两种数据源的回归关系，选择最优回归方程对2012、2013年NPP-VIIRS数据进行相互校正。再利用所建立的回归方程对2014—2020年VIIRS数据进行校正，设定阈值 h，得到2000—2020年长时间序列的一致的夜间灯光影像集。

2.2 基于能源数据的碳排放统计

根据IPCC提供的能源消耗测算方法[1]，计算浙江省2000—2020年碳排放量。

$$P=\frac{44}{12}\times\sum_{i=1}^{9}K_iE_i \tag{1}$$

式中，P 为不同能源种类；E_i 为能源 i 的消耗量，按标准煤计（万t）；K_i 为能源 i 的碳排放系数（万t碳/万 t 标准煤）。

2.3 碳排放估算模型

提取研究区2000—2020年间的夜光数据 *DN* 总值，根据统计年鉴计算出2000—2020年间研究区能源消费碳排放总量，进行线性回归分析，得到拟合方程。拟合结果在0.01水平上显著相关，拟合优度达到0.915，如式（2）：

$$y=-24\,176.755+0.07x-1.710\times10^{-8}x^2 \tag{2}$$

式中，Y 为CO_2排放量（万t）；x 为灯光数据的 *DN* 总值。

2.4 研究方法

2.4.1 全局空间自相关

采用全局自相关法探究浙江省各区县碳排放的空间聚集情况，指标Moran's I可以表征某县的碳排放与邻县是否具有相关性及其相关程度。Moran's I指数计算方程如式（3）：

$$\text{Moran's I}=\frac{n\sum_{n=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}W_{ij}(x_i-x)(x_j-x)}{(\sum_{n=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}W_{ij})\sum_{n=1}^{n}(x_i-x)^2} \tag{3}$$

2.4.2 局部空间自相关

利用局部空间自相关探究不同区域的空间相关性和异质性。相邻区县间是否存在碳排放的空间聚集，采用LISA图进行直观展示。

$$I_c=\sum\nolimits_j w_{kp}z_kz_p \tag{4}$$

通过局部Moran's I_c指数可将区县划分成4类，包括H-H（高值地区聚集）；L-L（低值地区聚集）；L-H集聚（高值地区包围低值地区）和H-L集聚（低值地区包围高值地区），其余为不显著地区。

2.4.3 增长趋势分析

对浙江省90个区县的碳排放量按照两类方法进行划分。计算2000、2010、2020年3 a的县级碳排放均值，大于等于400 t的为高值型、小于400 t的为低值型。计算2000—2020年县碳排放量增长值的增长速率，大于等于200%为高速增长型、100%~200%为增长型、小于100%为低速增长型。最终将浙江省县级单元划分为6类：高值高速增长、高值增长、高值低速增长、低值高速增长、低值增长和低值低速增长。

2.4.4 地理加权回归模型

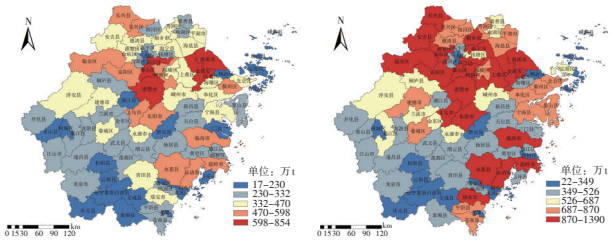
全局模型假定了变量间同质性，忽略了其局部特性。地理加权回归模型作为局部回归模型，可以很好地解释影响因素的空间分异，以及各区域受影响因素的敏感度情况。

3 结果与讨论

3.1 行政区划尺度碳排放演变特征

1）县级尺度碳排放时空演变特征。2000年的高碳区县主要集中在杭州市的萧山区、富阳区、临安区，绍兴市的诸暨市，宁波市的慈溪市、余姚市。低碳区县集中在丽水市的庆元县、景宁自治县、云和

县、松阳县，温州市的文成县、泰顺县。其中萧山区是2000年浙江省生产总值最高的区县，景宁县是生产总值最低的区县。2020年高碳区域扩张趋势更为快速，分别为嘉兴市的桐乡市，杭州市的余杭区，台州市的临海市、温岭市，温州市的永嘉县、乐清市；湖州市的安吉县、长兴县。其中余杭区是2020年浙江省生产总值最高的区县。从2000—2020年，高碳县数量增长了62.5%，浙江省北部地区呈现出稳定的县域高碳态势，如图1。可以发现区县碳排放量与当地经济发展水平存在一定的相关性。



a 2000年县级碳排放图　　b 2020年县级碳排放图

图1　县级碳排放图

审图号：GS(2022)1873

2）县级尺度增长趋势分析。浙江省中部和北部区县碳排放呈现高值增长，且北部增速较快。南部区县碳排放多为低值增长，且增长速度较慢，见表1。非低速增长的区县占浙江省全部区县总数的80%，超过一半，说明浙江省的碳排放形势十分严峻。因此统计不同碳排放增幅的区县，提出针对性的减排建议是有必要的。高值高速增长和高值增长，主要分布在湖州市全域、杭州市东部和中部、嘉兴市全域、绍兴市全域、宁波市北部以及金华市、温州市的部分区域。能源的高速消耗导致温室气体过度的排放会对该区域的环境造成难以修补的影响。因此这些区县应当减少资源的损耗，节能减排，推广低碳生活方式，控制碳排放的总量和增长速度。低值高速增长主要集中在衢州市、舟山市、台州市、温州市。这些区县的耗能产业起步较晚，发展较弱，但增速相对较快。在后续发展中应当考虑优化产业结构，同时提高清洁能源使用率，以此来控制碳排放。高值慢速增长的区县仅为杭州市的淳安县，其碳排放已达到峰值，应当推进当地产业升级转型，避免高碳排放造成的环境持续性恶化。此外，低值慢速增长的区县主要集中在丽水市的大部分区县、衢州市的江山市、金华市的武义县。这些地区建议参照绿色低碳城市的发展理念，合理进行产业布局。

表1　县级尺度碳排放增长趋势表

高值高速增长	高值增长	高值低速增长	低值高速增长	低值增长	低值低速增长
安吉县、苍南县 慈溪市、富阳区 海宁市、嘉善县 柯桥区、南浔区 平湖市、上虞区 桐乡市、温岭市 象山县、秀洲区 义乌市、余杭区 余姚市、长兴县	北仑区、德清县 东阳市、奉化区 海盐县、建德市 乐清市、临安区 临海市、宁海县 平阳县、瑞安市 嵊州市、桐庐县 吴兴区、婺城区 萧山区、鄞州区 永嘉县、永康市 越城区、诸暨市	淳安县	岱山县、定海区 洞头区、金东区 龙港市、浦江县 三门县	常山县、黄岩区 江北区、缙云县 开化县、柯城区 兰溪市、莲都区 临平区、龙游县 路桥区、南湖区 瓯海区、磐安县 普陀区、钱塘区 衢江区、嵊泗县 泰顺县、天台县 文成县、仙居县 新昌县、玉环市 镇海区	滨江区、拱墅区 海曙区、江山市 椒江区、景宁畲族自治县、龙泉市 龙湾区、鹿城区 青田县、庆元县 上城区、松阳县 遂昌县、武义县 西湖区、云和县

3.2　空间相关性分析

3.2.1　全局空间相关性

计算县级尺度碳排放的Global Moran’s I指数。根据相应的Z值和P值检验碳排放空间属性。相关结果见表2。

表2　全局自相关性分析结果

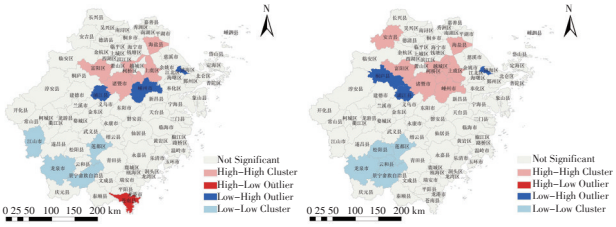
		2000年	2005年	2015年	2020年
县级	Moran’s I	0.051 4	0.178 5	0.181 4	0.190 5
	z	0.866 7	2.633 6	2.668	2.777 7
	p	0.386 1	0.008 4	0.007 6	0.005 5

2000—2020年浙江省县级尺度Moran’s I从0.051 4增长为0.190 5。除2000年外Z值均大于1.96，P值均在5%水平上显著，通过了显著性检验。表明2005—2020年浙江省县级尺度碳排放数据具有显著的空间正相关性。总体来看，浙江省县级尺度碳排放空间上呈现出聚集态势。

3.2.2　局部空间相关性

局部空间相关性结果见图2。以2020年为例，从县级尺度来看，共有17.78%的区县呈现出显著性聚集态势。其中属于HH和LL型区县一共13个，占82.25%。LH和HL区县分别占3个和0个，占显著类型总数的17.75%。正相关性是县级尺度碳排放最显著性空间类型，聚集态势由浙江省北部的高碳聚集区以及南部的低碳聚集区组成。其中HH型主要分布在绍兴市的县级区域，少量集中在湖州市、杭州市、嘉兴市的

区县。LL型集中在丽水市的大部区县。LH型集中在金华市、宁波市的区县，且LH型的区县呈点状分布在HH型区县附近，这表明LH型区县自身碳排放量较低，但距离高碳排放地区较近，受到高碳地区正向溢出效应的影响。区域内没有HL型区县，说明低碳聚集的区县附近，不存在高碳排放的区县，没有发生溢出效应。时间尺度上看，2005年到2020年高碳排放的聚集区域变化较小，依然集中在绍兴市和杭州市，可以确定上述的高碳聚集区县为精准减排区域。低碳排放的聚集区域依旧集中在丽水市。丽水市能源碳排放在浙江省范围内持续处于低位。总体来看浙江省县级尺度碳排放具有空间异质性和局部区域聚集特征。北部区县高碳聚集，南部低碳聚集是浙江省碳排放最明显的空间格局。



a 2005年碳排放局部空间相关性 b 2020年碳排放局部空间相关性

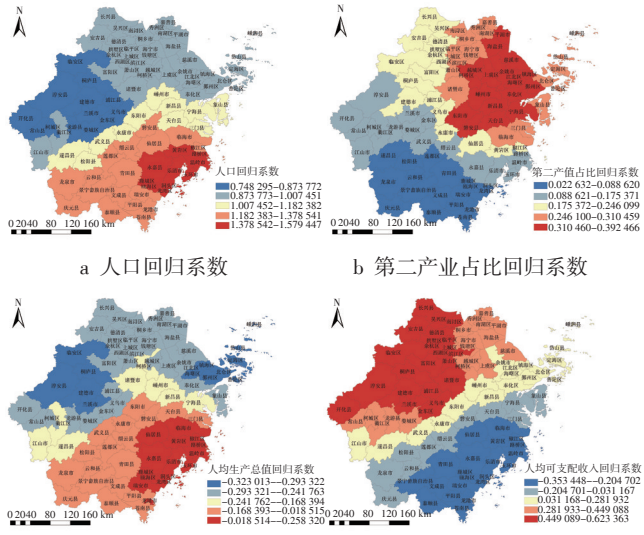
图2　县级碳排放局部空间相关性

审图号：GS(2022)1873

3.3　碳排放影响因素分析

对2020年浙江省90个区县进行地理加权回归分析，得到的结果如图3。①人口回归系数表现为东南区域向西北区域递减的空间格局。受人口因素影响最大的是温州市洞头区。高敏感度区域集中在温州市，台州市，丽水市大部分区县。受人口因素影响最小的是杭州市淳安县。低敏感度区域集中在杭州市，湖州市，嘉兴市的大部分区县。此结果与上文相吻合，淳安县碳排放是高值低速的增长，能源消耗趋于饱和，碳排放增速低较为稳定，受人口因素影响相对较小。②第二产业占比可以显示地区产业结构，其回归系数表现为东北向西南递减。受产业结构影响最大的是绍兴市新昌县。虽然产业结构对碳排放有正向促进作用，但由于浙江省多数城市为现代服务业和综合产业基地，产业结构变化对区域碳排放的影响力有限，其影响因子回归系数普遍较小。③人均生产总值对碳排放也有双向影响，高利润低能耗的可持续经济发展模式会导致人均生产总值对碳排放有负向抑制作用。④人均可支配收入表现为西北向东南递减。这可能与收入方式有关，财产净收入为主导的收入方式对碳排放有抑制作用，生产经营活动为主导的收入方式对碳排放有促进作用。

横向比较4种影响因素对浙江省区县碳排放的贡献度依次为：人口＞第二产业占比＞人均可支配收入＞人均生产总值。



a 人口回归系数　b 第二产业占比回归系数

c 人均生产总值回归系数　d 人均可支配收入回归系数

图3　影响因素回归系数的空间分布

审图号：GS(2022)1873

4　结论与讨论

本文构建了浙江省碳排放拟合模型。分析了县级碳排放空间分布规律，探讨了碳排放空间聚集格局和时空演变特征，利用地理加权回归探究影响因素。主要结论如下：

1）浙江省能源碳排放持续增长。高碳地区集中在北部：杭州市、宁波市、温州市，低碳地区集中在舟山市、衢州市。从2000—2020年，高碳区县数量增长了62.5%。

2）浙江省中部和北部区县碳排放呈现高值增长。南部区县碳排放呈现低值增长。针对不同的碳排放类型，提出了相应的建议：高值增长的区县应当推广低碳生活，控制碳排放增长速度；低值增长的区县应当考虑优化产业结构，提高清洁能源使用率。

3）2005—2020年浙江省的90个区县呈现出显著的空间正相关性。县级尺度相具有显著的空间异质性和区域聚集特征，北部区县高碳聚集显著，南部低碳聚集显著。

4）探究影响碳排放空间分异的4种因素。贡献度依次为：人口＞第二产业占比＞人均可支配收入＞人均生产总值。

参考文献

[1] Hiraishi T, Krug T, Tanabe K, et al. 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands Methodological Guidance on Lands with

（下转第112页）