引文格式：孙桂候,徐军,张静雯,等. 利用多源数据分析江苏省碳源/汇时空格局[J]. 地理空间信息, 2024, 22(9): 7-12. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.09.002

利用多源数据分析江苏省碳源/汇时空格局

孙桂候[1]，徐　军[1*]，张静雯[1]，黄加美[1]，杨星童[1]，王嘉伟[1]
（1. 河海大学 水文水资源学院，江苏 南京 210024）

摘　要：准确估算碳源/汇格局对实现“双碳”目标具有重要意义。以江苏省为例，基于类NPP-VIIRS夜光数据和WorldPop人口数据，结合中国城市碳排放清单构建能源碳排放估算模型，R^2高于0.9；利用MOD17A3年均植被净初级生产力、气温和降水数据估算江苏省陆地生态系统碳汇；利用空间自相关分析探究碳源/汇的时空格局。结果表明，2001—2020年江苏省能源碳排放持续增加，但增速有所下降，陆地生态系统碳汇呈缓慢波动增长趋势；同期陆地生态系统碳汇在能源碳排放的占比由17%降至7%，均表现为碳源。在空间上，能源碳排放高值区位于苏南、徐州，且呈显著空间正相关，高高聚集位于苏州—无锡—常州东南部，低低聚集位于淮安—连云港南部—盐城北部—扬州北部；陆地生态系统碳汇整体表现为东高西低、北高南低。

关键词：碳排放；夜间灯光影像；陆地生态系统碳汇；时空变化；江苏省
中图分类号：P237　　文献标志码：B　　文章编号：1672-4623（2024）09-0007-06

Spatio-temporal Pattern Analysis of Carbon Sources and Sinks in Jiangsu Province Using Multi-source Data

SUN Guihou[1], XU Jun[1], ZHANG Jingwen[1], HUANG Jiamei[1], YANG Xingtong[1], WANG Jiawei[1]
(1. Collage of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: Accurately estimating the pattern of carbon sources and sinks is of great significance for achieving the goals of “Carbon Peak and Carbon Neutrality”. Taking Jiangsu Province for example, the Emission Inventories for 290 Chinese Cities as a reference, we constructed an energy carbon emission estimation model based on NPP-VIIRS-like nighttime light data and WorldPop population data, and achieved an R^2 value higher than 0.9. Then, we used MOD17A3 average vegetation net primary productivity and temperature and precipitation data to estimate terrestrial carbon sinks in Jiangsu Province. Finally, we used the spatial autocorrelation analysis to investigate the spatio-temporal pattern of carbon sources and sinks. The results show that from 2001 to 2020, the energy carbon emissions in Jiangsu Province continued to increase, but the growth rate decreased. Meanwhile, the terrestrial carbon sinks show a slow fluctuating growth trend, but the growth rate is lower than that of carbon emissions. From 2001 to 2020, all cities in Jiangsu Province acted as carbon sources, and the proportion of Jiangsu’s terrestrial carbon sinks to energy carbon emissions decreased from 17% to 7% and tended to stabilize. Spatially, energy carbon emissions are higher in southern Jiangsu and Xuzhou, and show a significant positive spatial correlation. The high aggregations of emissions are observed in the southeastern part of Suzhou-Wuxi-Changzhou, while the low aggregations are observed in Huai’an-the southern part of Lianyungang-the northern parts of Yancheng and Yangzhou. The terrestrial carbon sinks show an overall pattern of higher in the east and lower in the west, as well as higher in the north and lower in the south.

Key words: carbon emission, nighttime light, terrestrial ecosystem carbon sink, spatio-temporal change, Jiangsu Province

2021年全球与能源相关的CO_2排放量达到363亿t，其中中国CO_2排放量超过119亿t，占全球总量的33%[1]。面对巨大的气候环境压力和减排压力，中国向世界做出了力争于2030年前碳排放达峰，2060年前实现碳中和的承诺[2]。“双碳”目标的实现需要统筹减少碳排放和增加碳汇两个方面。近10年来众多学者利用夜间灯光数据实现了不同尺度的碳排放估算，如郝瑞军[2]、苏泳娴[3]等实现了中国市级尺度的碳排放估算；吕倩[4]等构建了黄河流域多尺度碳排放估算模型；赵乘锐[5]等研究了哈长城市群的碳排放时空分布规律；郭忻怡[6]等构建了江苏省1 km×1 km的碳排放空间格网。从增汇角度来看，2012—2021年全球陆地生态系统碳汇占碳排放总量的29%[7]，有效缓解了气候变暖[8]。过去的20年里中国学者通过多种方法得出中国陆地生态系统是一个重要碳汇，但中国陆地碳汇抵消同期化石燃料燃烧碳排放比例在不断下降[8]。在

收稿日期：2023-05-19。
第一作者简介：孙桂候（2002—），本科，主要研究方向为遥感智能解译、时空数据挖掘，E-mail：sungh@hhu.edu.cn。
通信作者：徐军（1966—），博士，副教授，主要研究方向为海岸带环境演变及海岸带遥感，E-mail：navy2690996@163.com。

生态系统碳循环研究中，净生态系统生产力（NEP）是反映植被生态系统碳平衡状态的重要参数，可直接作为评估生态系统固碳功能的指标[9]，正值表现为碳汇，负值表现为碳源[10]。目前，NEP已被广泛应用于我国干旱区[11]、省域[12]、流域[13]等碳汇的估算。

江苏省是我国沿海发达省份，碳排放量位居全国前列，是“双碳”目标的重点实践区域，因此研究江苏省碳源/汇时空格局演变对其他经济发达地区的减排政策制定具有借鉴意义。目前学者主要针对江苏省碳排放[6]或生态系统碳汇[14]进行研究，但并未综合二者进行分析。因此，本文利用2001—2020年全球年度类NPP-VIIRS夜光数据和WorldPop人口数据估算江苏省能源碳排放量，利用MOD17A3年均植被净初级生产力（NPP）和气温、降水估算江苏省陆地生态系统碳汇，并综合分析了江苏省碳源/汇的空间自相关性和时空格局演变。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

江苏省（116°18′~121°57′E、30°45′~35°20′N）位于我国东部沿海地区，长江、淮河下游；地形以平原为主，整体地势南北高中间低、并自西向东倾斜[15]；属温带向亚热带过渡性气候，冬温夏热，四季分明，年均气温为14~15℃，年均降水量为800~1 100 mm[14]。江苏省经济发展迅速，工业化和城市化水平较高，碳排放总量长期位居全国前列，面临巨大的减排压力[16]；下辖13个地级行政区，根据地理位置可划分为苏南、苏中和苏北（图1），不同区域的经济和生态情况存在较大差异。

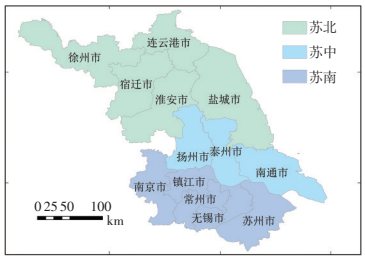


图1 研究区分区划分

审图号：GS(2019)1822

1.2 数据来源

本文采用全球年度类NPP-VIIRS夜间灯光数据（来源于国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据中心，http://www.geodata.cn）[17]以及WorldPop世界人口密度影像（来源于佛罗里达大学地理系和新型病原研究所，https://hub.worldpop.org/）估算能源碳排放量。其中，WorldPop数据集已被证明适用于中高人口密度区域的精细化研究[18]，类NPP-VIIRS夜间灯光数据集也具有较好的精度和适用性，城市尺度拟合R^2达到0.95[17]。参考能源碳排放量源自中国碳核算数据库的《1997—2019年290个中国城市碳排放清单》（https://www.ceads.net/），包含17种化石燃料的能源相关碳排放以及水泥生产过程的相关碳排放[19]。年均NPP来源于美国国家航空航天局发布的EOS/MODIS全球NPP数据（MOD17A3，http://www.ntsg.umt.edu/）[20]。月均气温和降水量来源于历年《江苏统计年鉴》，用于估算土壤微生物呼吸碳排放。

2 研究方法

2.1 城市分组

由于江苏省各市的人口数量、经济情况不同，碳排放差异较大，本文采用参考碳排放数据、夜光数据和人口数据对江苏省13个城市进行二次分析与分组，分别计算各市每年的人均碳排放和单位夜光值碳排放。其计算公式为：

$$C_{\mathrm{POP}i}=\frac{\mathrm{CO}_{2i}}{\mathrm{POP}_i} \tag{1}$$

$$C_{\mathrm{DN}i}=\frac{\mathrm{CO}_{2i}}{\mathrm{Light}_i} \tag{2}$$

式中，CO_{2i}为i市参考能源碳排放；POP_i为i市总人口；Light_i为i市夜光值。

根据人均碳排放量和单位夜光值碳排放量将13个市分为3组，分组情况见表1。

表1 城市分组

类型	含义	城市
高—中	高单位夜光值碳排放，中等人均碳排放	徐州
中—高	中等单位夜光值碳排放，高人均碳排放	南京、无锡、苏州、常州、镇江
中—低	中等单位夜光值碳排放，低人均碳排放	南通、淮安、泰州、扬州、宿迁

2.2 能源消费碳排放模拟

本文分别对3组城市进行不含常数的线性回归分析，结果显示当夜光值和人口数量作为自变量时，方差膨胀因子（VIF）均小于10，多重共线性弱，回归模型较稳健。参考能源碳排放与夜光数据和人口数据具有良好的线性相关关系，调整R^2均大于0.9，且均在0.001水平下显著，模型预测精度较高。碳排放回归方程参数见表2。

因此可估算江苏省各市的能源消费碳排放量，计算公式为：

$$CO_{2_Emissions} = a \times Light + b \times POP \quad (3)$$

式中，Light为地区夜光DN值；POP为WorldPop地区人口总数；a、b分别为各自变量的回归参数。

表2　碳排放回归方程参数

类型	Light	POP	调整 R^2	p	VIF
高—中	0.107 1	2.200 1	0.973	< 0.001	3.777
中—高	0.031 1	6.380 6	0.948	< 0.001	5.550
中—低	0.027 2	1.958 9	0.971	< 0.001	3.376

2.3　陆地生态系统碳汇估算

由NEP的计算公式可知，区域上的碳平衡就是区域陆地NPP与土壤微生物呼吸（R_H）之间的动态关系[21]。本文采用裴志永[21]等建立的经验方程计算R_H，该方程已被成功应用于我国多地[11-13]。

$$NEP = NPP - R_H \quad (4)$$

$$R_H = 0.22\left(e^{0.091\,3T} + \ln(0.314\,5R + 1)\right) \times 30 \times 46.5\% \quad (5)$$

式中，T为气温；R为降水量。

计算得到2001—2020年江苏省各市年均NEP，单位为gC/m^2，为便于与碳排放量进行对照分析，本文将NEP进一步转换为陆地生态系统碳汇的年度累积量，单位为万t，计算公式为：

$$CO_{2_Sink} = \frac{NEP \times Area}{10^{10}} \times \frac{44}{12} \quad (6)$$

式中，CO_{2_Sink}为陆地生态系统碳汇；Area为城市面积；$\frac{44}{12}$为CO_2转换系数。

2.4　空间自相关分析

本文采用Moran's I和LISA研究江苏省各市县碳排放的空间聚集特征。Moran's I可统计整个区域的空间自相关性，计算公式为[2,22]：

$$\text{Moran's I} = \frac{n\sum_{n=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{W}_{ij}(x_i - x)(x_j - x)}{\left(\sum_{n=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{W}_{ij}\right)\sum_{n=1}^{n}(x_i - x)^2} \quad (7)$$

式中，x_i、x_j分别为空间单元i和j的属性值；n为空间单元数量；$\boldsymbol{W}_{ij}$为空间权重矩阵。Moran's I越接近1，说明空间分布越聚集，相关性越明显，为空间正相关；越接近−1，说明空间分布越离散，相关性越明显，为空间负相关。

LISA可统计区域内各空间面对象与其周围空间面对象的空间自相关性，计算公式为[2]：

$$I_i = \frac{y_i - \bar{y}}{S^2}\sum_{j=i}^{n}\boldsymbol{w}_{ij}(y_j - \bar{y}) \quad (8)$$

式中，n为面对象数量；y_i、y_j分别对应面对象i和j的属性值；$\boldsymbol{w}_{ij}$为面对象i和j的空间权重矩阵（空间邻近度量）；S^2为y_i的离散方差。

3　研究结果与分析

3.1　碳排放时空演变特征分析

本文估算得到2001—2020年江苏省以及各市县的能源碳排放量，并对不同尺度下能源碳排放量的时空格局演变特征进行分析。

1）省级尺度。由表3可知，随着江苏省能源消费结构和产业结构的优化，2001—2020年江苏省碳排放总量不断增长，但增长速率明显下降，碳排放强度也由3.49 t/万元降至1.06 t/万元。

表3　2001—2020年江苏省能源碳排放数据

指标	2001年	2005年	2010年	2015年	2020年
碳排放量/亿t	3.28	4.76	6.51	9.12	11.07
碳排放量增速/%	–	9.72	6.48	6.98	3.95
碳排放强度/(t/万元)	3.49	2.61	1.56	1.27	1.06

2）市级尺度。由图2可知，2001—2013年能源碳排放增速较快的城市为苏北的徐州以及苏南的苏州、无锡和常州，除徐州外的苏北城市增速均低于全省均值；而2013—2020年除盐城、宿迁、淮安、徐州4个苏北城市碳排放增速有所提高外，其余城市的碳排放增速均有所下降，其中苏州、无锡、常州的增速大幅减缓，位居全省末位，产业转型升级成效明显。

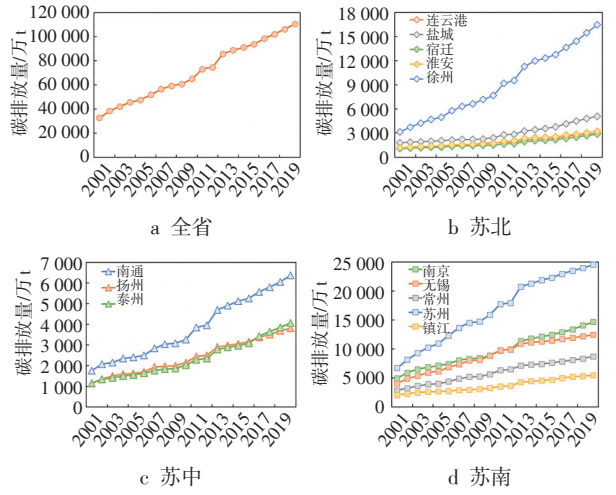


图2　2001—2020年江苏省以及各市能源碳排放量变化曲线

将江苏省各市能源碳排放量划分为4个等级：低碳排放区（0~0.4亿t）、较低碳排放区（0.4~0.6亿t）、较高碳排放区（0.6~0.8亿t）和高碳排放区（>0.8亿t）。由图3可知，江苏省碳排放量南北差异较大，高碳排放区和较高碳排放区主要集中在苏南地区，低碳和较低碳排放区主要分布在苏中和苏北地区。2001—2010年

苏北的徐州由低碳排放区转变为较高碳排放区，苏北其余城市和苏中3市保持低碳排放，而苏南的南京、无锡和苏州均转变为高碳排放区。2010—2020年苏北的徐州排放量进一步增长为高碳排放区，盐城则转变为较高碳排放区，苏北其余城市无明显变化；苏中的泰州由低碳排放区转变为较低碳排放区，南通由低碳排放区转变为较高碳排放区；除镇江外，苏南的其余城市均转变为高碳排放区。

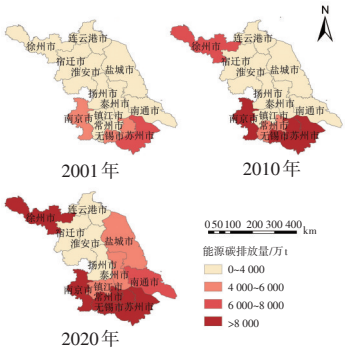


图3 2001—2020年江苏省能源碳排放空间分布

审图号：GS(2019)1822

3）县级尺度。由图4可知，2020年江苏省高碳排放区县（>800万t）主要分布在南京、苏州、常州、无锡，其中南京和常州仅江宁区和武进区为高碳排放区，且均为经济开发区，工业聚集、能源消耗量较大；无锡的高碳排放区县分布在南部的宜兴市和北部的江阴市，中心市区碳排放较低，这与无锡工业企业向外迁移有关；苏州除虎丘区、太仓市、相城区外均为高碳排放区县。总体而言，各区县在其所在城市定位的基础上，存在一定程度的内部差异。

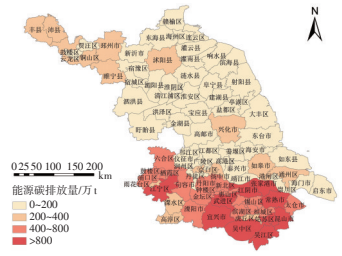


图4 2020年江苏省县域能源碳排放空间分布

审图号：GS(2019)1822

3.2 碳排放空间聚集特征

计算2001年、2005年、2010年、2015年、2020年江苏省市级和县级的Moran's I指数发现（表4），江苏省市县尺度的Moran's I均大于0，表明江苏省市县尺度的碳排放具有较显著的空间正相关性，即存在高值聚集或低值聚集现象。其中，碳排放在县级尺度通过1%显著性水平检验，且Moran's I在2001—2015年呈上升趋势，2015—2020年略有下降，但仍为高值，即近20年江苏省县级尺度碳排放在空间上高度聚集，高碳排放县相邻近，低碳排放县相邻近。

表4 2020年江苏省市县级Moran's I指数

范围	指标	2001年	2005年	2010年	2015年	2020年
市级	Moran's I	0.252	0.239	0.259	0.217	0.217
	Z	1.858	1.821	1.962	1.710	1.710
	p	0.063	0.069	0.050	0.087	0.087
县级	Moran's I	0.474	0.513	0.554	0.554	0.626
	Z	5.437	5.875	6.323	6.323	7.107
	p	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

利用LISA指数对江苏省能源碳排放进行局部变异性分析发现（图5），碳排放聚集情况和社会经济发展水平紧密相关，碳排放的高—高聚集区主要分布于经济高度发达的苏州—无锡—常州东南部，低—低聚集区则主要分布于经济相对滞后的淮安—连云港南部—盐城北部—扬州北部。由于部分城市的中心市区以高新产业或商业金融服务为主，碳排放水平略低于周边区县，出现低—高聚集的情况，如南京的鼓楼区、徐州的鼓楼区和贾汪区以及苏州的虎丘区（高新区）。

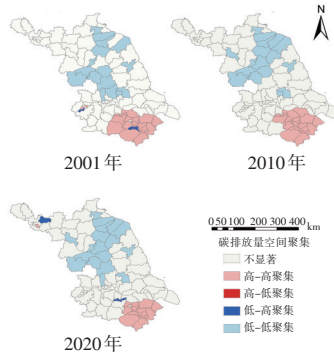


图5 2001—2020年江苏省能源碳排放集聚分布

审图号：GS(2019)1822

近20年来，碳排放的高—高聚集区略有收缩，如常州的武进区、钟楼区、天宁区以及无锡的宜兴市和江阴市高值聚集逐渐不显著；而碳排放的低—低聚集区逐步向西扩张，盐城的响水县、阜宁县以及淮安的淮安区转变为低—低聚集，碳排放的显著低值区域逐渐连结成片。江苏省南北部碳排放差距不断加大，显著高值区域越来越集聚于发达的苏州、无锡地区，而显著低值区域则逐步向淮安、连云港、盐城和扬州扩张，主要原因是苏州、无锡与淮安的经济体量差距在增大。

3.3 陆地生态系统碳汇时空演变特征分析

由图6可知，2001—2020年江苏省陆地生态系统碳汇波动增长，2005年陆地碳汇最低，为4 952万t，2014年达到峰值，为8 965万t；2001—2005年苏南的苏州、无锡、常州、南京、镇江陆地生态系统碳汇大

幅下降，而苏北的连云港、盐城、宿迁、淮安、徐州则小幅上涨，苏中各市无明显变化。2006—2014年江苏省各市陆地生态系统碳汇呈上升趋势，其中苏南5市的增速位居全省前列；2015—2016年江苏省全省的陆地碳汇均大幅下降；2017—2020年逐步回升，其中城市化水平较高的苏南各市、苏中的南通以及苏北的徐州增速较快。

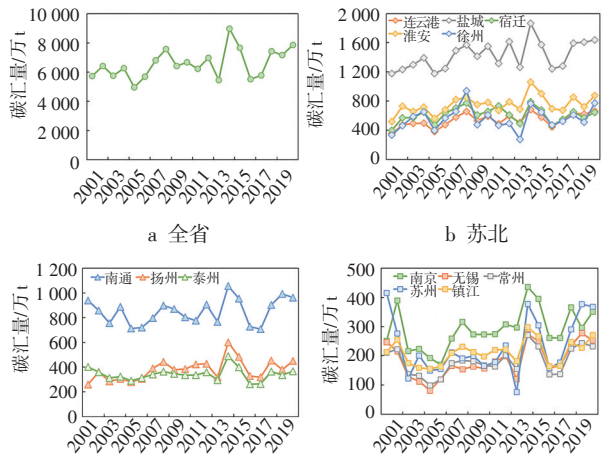


图6　2001—2020年江苏省以及各市陆地碳汇变化曲线

在空间上，江苏省陆地生态系统碳汇总体表现为东高西低、北高南低（图7）；苏北各市陆地碳汇普遍高于苏中和苏南，苏中则高于苏南。东部沿海城市盐城和南通由于气候条件好、雨量充足、植被覆盖率高，陆地生态系统固碳能力较强。其中，盐城近20年的陆地碳汇始终保持900万t以上，位居全省第一。陆地碳汇较低的城市主要集中在城市化水平较高的苏南地区，其中常州、无锡和镇江始终在300万t以下。

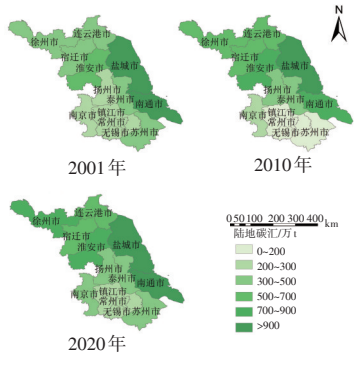


图7　2001—2020年江苏省陆地碳汇空间分布

审图号：GS(2019)1822

3.4　碳源/汇时空格局分析

由表5可知，2001—2020年江苏省同期陆地生态系统碳汇在能源碳排放的占比整体呈下降趋势，虽然陆地生态系统碳汇能抵消部分同期碳排放，但抵消比例已由17%降至7%，并逐渐趋于平稳。由表6可知，苏州、无锡、南京和常州近20年累计陆地生态系统碳汇在能源碳排放的占比较低，不到5%；而盐城、淮安、宿迁则可达到30%以上，其中盐城抵消了其48.3%的能源碳排放量，是江苏省最大的陆地碳汇贡献地区。

表5　2001—2020年江苏省陆地碳汇占同期能源碳排放的比例

年份	陆地碳汇/亿t	能源碳排放/亿t	同期陆地碳汇占比/%
2001	0.573	3.281	17.463
2005	0.495	4.755	10.414
2010	0.668	6.509	10.267
2015	0.767	9.122	8.404
2020	0.786	11.073	7.095

表6　近20年江苏省各市累计陆地碳汇占能源碳排放的比例

城市	累计陆地碳汇/亿t	累计能源碳排放/亿t	累计陆地碳汇占比/%
盐城	2.86	5.91	48.35
淮安	1.5	4.04	37.24
宿迁	1.22	3.51	34.87
连云港	1.08	3.83	28.25
南通	1.7	7.71	22.06
扬州	0.76	4.84	15.65
泰州	0.69	4.75	14.46
徐州	1.13	18.16	6.2
镇江	0.42	7.3	5.8
常州	0.36	11.82	3.07
南京	0.58	19.49	2.98
无锡	0.37	17.81	2.06
苏州	0.46	33.36	1.39

综合能源碳排放和陆地生态系统碳汇发现，2001—2020年江苏省各市均表现为碳源（图8），即能源碳排放大于陆地碳汇。将江苏省各市划分为低碳源（<0.2亿t）、中碳源（0.2~0.5亿t）、高碳源（0.5~1亿t），超高碳源（>1亿t）4个等级，2001—2010年除徐州外，苏中和苏北各市均表现为低碳源；2010—2020年各市逐步迈入中、高碳源，仅宿迁市始终保持低碳源；截至2020年，江苏省超高碳源城市包括徐州、南京、苏州和无锡。

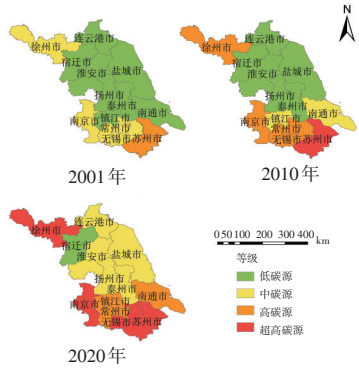


图8　2001—2020年江苏省碳源/汇空间分布

审图号：GS(2019)1822

4 结 语

1）2001—2020年江苏省碳排放总量不断增长，但随着产业结构优化，增长速率明显下降，由9.72%降至3.95%。碳排放总量在空间上存在较大差异，苏南的碳排放水平最高，其中苏州、南京、无锡、徐州和常州于2020年达到了高碳排放水平（>0.8亿t）。

2）江苏省碳排放在市县尺度上呈现较显著的空间正相关，存在高值聚集或低值聚集现象。其中，高—高聚集区主要分布于苏州—无锡—常州东南部，低—低聚集区则主要分布于淮安—连云港南部—盐城北部—扬州北部。近20年来，高—高聚集区范围逐步缩小，低—低聚集区逐步扩张，并连结成片。

3）近20年江苏省陆地生态系统碳汇整体呈波动上升趋势，于2014年达到峰值（8 965万t）。在空间分布上总体表现为东高西低、北高南低，其中盐城和南通等东部沿海城市，由于较好的气候环境，陆地生态系统固碳能力位于全省前列。

4）2001—2020年江苏省各市均为碳源，全省同期陆地碳汇占能源碳排放的比例由17%降至7%。盐城、淮安和宿迁为主要陆地碳汇贡献城市，累计抵消碳排放比例达25%以上。

随着经济发展和城市化的推进，2001—2020年江苏省能源碳排放量逐年增长；但随着“双碳”政策的提出以及“两山”理论的实践，江苏省的发展质量不断提高，能源碳排放增长速率明显下降，陆地生态系统碳汇则有缓慢增加的趋势。研究结果对于深入了解江苏碳源/汇格局具有重要意义。

参考文献

[1] 国际能源署: 2021年全球二氧化碳排放反弹至历史最高水平[J]. 节能与环保,2022(3):8

[2] 郝瑞军,魏伟,刘春芳,等. 中国能源消费碳排放的空间化与时空动态[J]. 环境科学,2022,43(11):5 305-5 314

[3] 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):1 513-1 526

[4] 吕倩,刘海滨. 基于夜间灯光数据的黄河流域能源消费碳排放时空演变多尺度分析[J]. 经济地理,2020,40(12):12-21

[5] 赵乘锐,李鑫,张鹏,等. 基于夜间灯光数据整合的县级尺度碳排放时空格局演变研究:以哈长城市群为例[J]. 大众标准化,2022(12):82-86

[6] 郭忻怡,闫庆武,谭晓悦,等. 基于DMSP/OLS与NDVI的江苏省碳排放空间分布模拟[J]. 世界地理研究,2016,25(4):102-110

[7] Friedlingstein P, O’Sullivan M, Jones M W, et al. Global Carbon Budget 2022[J]. Earth System Science Data, 2022, 14(11):4 811-4 900

[8] 朴世龙,何悦,王旭辉,等. 中国陆地生态系统碳汇估算:方法、进展、展望[J]. 中国科学:地球科学,2022,52(6):1 010-1 020

[9] 曹云,孙应龙,姜月清,等. 黄河流域净生态系统生产力的时空分异特征及其驱动因子分析[J]. 生态环境学报,2022,31(11):2 101-2 110

[10] 李洁,张远东,顾峰雪,等. 中国东北地区近50年净生态系统生产力的时空动态[J]. 生态学报,2014,34(6):1 490-1 502

[11] 潘竟虎,文岩. 中国西北干旱区植被碳汇估算及其时空格局[J]. 生态学报,2015,35(23):7 718-7 728

[12] 石志华. 基于CASA与GSMSR模型的陕西省植被碳汇时空模拟及影响因素研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2015

[13] 贠银娟,赵军. 基于MODIS-NDVI数据的植被碳汇空间格局研究:以石羊河流域为例[J]. 山地学报,2018,36(4):644-653

[14] 王琳,景元书,李琨. 江苏省植被NPP时空特征及气候因素的影响[J]. 生态环境学报,2010,19(11):2 529-2 533

[15] 曹磊. 江苏省植被NDVI动态变化及其与气候因子的关系[D]. 南京:南京农业大学,2014

[16] 刘奕宏,张震,陈虹玮,等. 江苏省未来植被变化对“碳达峰、碳中和”的影响评价[J]. 气象与减灾研究,2022,45(1):46-52

[17] Chen Z, Yu B, Yang C, et al. An Extended Time Series (2000-2018) of Global NPP-VIIRS-like Nighttime Light Data from a Cross-sensor Calibration[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(3):889-906

[18] 林丹淳,谭敏,刘凯,等. 代表性人口空间分布数据集的精度评价:以2010年广东省为例[J]. 热带地理,2020,40(2):346-356

[19] Shan Y, Guan Y, Hang Y, et al. City-level Emission Peak and Drivers in China[J]. Science Bulletin, 2022, 67(18):1 910-1 920

[20] 李登科,王钊. 基于MOD17A3的中国陆地植被NPP变化特征分析[J]. 生态环境学报,2018,27(3):397-405

[21] 裴志永,周才平,欧阳华,等. 青藏高原高寒草原区域碳估测[J]. 地理研究,2010,29(1):102-110

[22] 杨占东,王力斌. 基于GIS城镇扩展的空间格局分析[J]. 地理空间信息,2011,9(3):12-14