基于夜间灯光数据的苏南小城镇碳排放时空演变及低碳优化策略研究*

Spatio-temporal Evolution of Carbon Emissions and Low-Carbon Optimization Strategies of Small Towns in Southern Jiangsu Based on Nighttime Light Data

黄 静 徐 曜 喻冰洁 盛 杰 Huang Jing, Xu Yao, Yu Bingjie, Sheng Jie

摘 要 随着全球气候变化问题日益严峻，减少碳排放成为首要任务。小城镇作为人类生活、工作、休憩的空间载体，也是碳排放的主要载体，但目前对于精细化的乡镇甚至栅格尺度的研究尚未充分展开。以苏南地区151个小城镇为研究对象，整合CEADs数据库与VIIRS夜间灯光数据构建2012—2021年碳排放栅格数据集，运用空间自相关分析等方法，系统揭示了碳排放的时空演变特征，并提出分类优化策略。结果表明：(1) 碳排放总量呈阶段性增长，空间分布呈现“南高北低、东高西低”格局，高值区向经济活跃带扩张；(2) 碳排放存在显著空间集聚性，H—H型热点区集中于沿太湖经济带，L—L型冷点区向西部收缩；(3) 针对4类小城镇（协调、绿色、重点、创新区），提出差异化优化路径。为精细化尺度碳排放治理提供了创新方法论，对长江三角洲城镇群实现“双碳”目标具有实践指导意义。

Abstract With the increasingly serious problem of global climate change, reducing carbon emissions has become a top priority. Small towns are also the major carriers of carbon emissions as the spatial carriers of human life, work, and rest, but research on refined townships or even raster scales has not yet been thoroughly carried out. The study takes 151 small towns in Southern Jiangsu as the research object, integrates the CEADs database and VIIRS nighttime light data to construct a carbon emission raster dataset from 2012 to 2021, and applies spatial autocorrelation analysis methods to systematically reveal the spatiotemporal evolution characteristics of carbon emissions, and proposes classification optimization strategies. The results show that: (1) the total amount of carbon emissions shows phased growth, and the spatial distribution shows a pattern of “high in the south and low in the north, high in the east and low in the west,” with the high-value area expanding to the economically active zone; (2) the global Moran’s I index indicates that there is significant spatial agglomeration of carbon emissions, with H-H hotspots concentrated along the Taihu Lake Economic Zone and L-L coldspots contracting to the west; (3) differentiated optimization paths are proposed for the four types of small towns (coordinated/green/focused/innovation zones). This study provides methodological innovations for managing carbon emissions on a refined scale, which is of practical guidance for realizing the “dual-carbon” goal in the urban agglomeration of the Yangtze River Delta.

关 键 词 苏南地区；小城镇；碳排放；时空演变

Key words Southern Jiangsu; small towns; carbon emission; spatiotemporal evolution

文章编号 1673-8985（2026）04-0114-09 中图分类号 TU984 文献标志码 A DOI 10.11982/j.supr.20260416

作者简介

黄 静
马鞍山跃马交通投资有限公司
助理工程师

徐 曜（通信作者）
西南交通大学建筑学院
博士研究生，xuyao@my.swjtu.edu.cn

喻冰洁
西南交通大学建筑学院 助理研究员

盛 杰
西南交通大学建筑学院 博士研究生

0 引言

以全球变暖为主要特征的气候变化问题已成为21世纪人类社会共同面临的重大挑战[1]，减少碳排放的研究也备受关注[2-4]。作为全球最大碳排放国，中国承担着重要责任。为此，中国

*基金项目：国家自然科学基金联合重点项目“交通综合体与城市关联效应及效能优化方法研究”（编号U20A200033）；国家自然科学基金面上项目“轨道枢纽（群）韧性多尺度评估机制与提升方法研究”（编号52472331）；国家自然科学基金面上项目“都市快轨站城协同机理及站区规划研究”（编号52278081）资助。

《上海城市规划》https://www.shplanning.com.cn/. All rights reserved.

提出了2030年实现碳达峰、2060年实现碳中和的目标[5]，积极推动低碳经济的发展，特别是在城市和城镇的绿色生态建设方面，力求实现可持续发展。随着城镇化进程的加速，小城镇在经济社会发展中扮演着重要角色。据统计，全球80%的碳排放量来自小城镇建设用地[6]，在中国，小城镇建设用地上的能源消费碳排放约占总量的73%[7]。

小城镇作为城镇化的重要组成部分，其绿色低碳发展问题尤为突出。特别是在中国经济最发达区域之一的苏南地区，传统高能耗、高排放的产业结构以及快速的城镇化进程带来了日益严峻的碳排放压力[8]。如何在确保经济持续增长的同时有效减少碳排放，已经成为苏南小城镇发展的关键议题。

碳排放核算方法是低碳发展研究中的关键工具。常用的核算方法包括IPCC排放因子法、质量平衡法、实测法和夜间灯光反演法。IPCC排放因子法通过估算能源消耗量与排放因子的乘积计算碳排放，广泛应用于各类区域的核算[9]。质量平衡法依据物料投入与产出关系估算碳排放，适用于特定产业[10-11]。实测法通过现场监测精确估算碳排放，适合小范围应用[12]。夜间灯光反演法结合遥感数据分析灯光强度与碳排放的关系，提供高空间精度的估算结果[13]，通过分析夜间卫星图像中灯光强度（即遥感影像中的光辐射值）与地面碳排放之间的关联，借助统计学方法建立回归模型，进而估算各区域的碳排放量。此方法能够有效捕捉小尺度区域的碳排放特征，尤其适用于难以进行实地测量或缺乏详细能源数据的区域。与传统的碳排放核算方法相比，夜间灯光反演法具有较高的空间分辨率和覆盖范围，能够为碳排放的时空演变分析提供更为精准的空间数据支持。这些方法为碳排放监测与管理提供了多维度的数据支持。此外，碳排放的时空演变分析通过研究碳排放的时间变化与空间分布特征[14-15]，揭示其变化规律，有助于制定科学的减排政策。时空演变分析常结合空间自相关分析[16]和地理加权回归（GWR）模型[17]等方法，能够深入理解不同地区碳排放的集聚效应和差异性[18]，有效识别碳排放高值区和低值区，为低碳发展提供依据。

尽管学者们运用多种方法研究了碳排放的时空演变特征，但大多数研究主要涉及国家[19-20]、省域[21-22]、城市[23]和县域[24]等层面，对于更加精细化的乡镇甚至栅格尺度的研究较少。然而多尺度、综合性碳排放时空演变特征的研究对于我国目前的减排原则和精准化减排政策的落实具有重要意义。因此，本文以苏南地区小城镇为研究对象，基于县域碳排放数据与夜间灯光数据，科学定量地分析苏南地区小城镇碳排放总量和碳排放强度的时空演变特征，提出针对性的低碳优化策略。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区域概况

苏南，即指江苏南部，是中国东南沿海地区长江三角洲的核心地带。东邻上海，西接安徽，南连浙江，北靠长江和苏中、苏北地区，且临东海；拥有辽阔的太湖平原，水系繁复，长江自西向东穿流而过。为保持研究范围的完整性与区域的代表性，并反映苏南不同类型小城镇的碳排放差异，本文研究范围为苏南地区内所有的小城镇（见图1），覆盖南京、镇江、苏州、无锡和常州五市的全部镇域单元，具体包括南京市六合区、溧水区和高淳区，镇江市丹阳市、句容市、扬中市、丹徒区、京口区，苏州市常熟市、昆山市、太仓市、吴江区、吴中区、相城区、张家港市、虎丘区，无锡市滨湖区、惠山区、江阴市、锡山区和宜兴市，常州市金坛区、溧阳市、天宁区、武进区、新北区和钟楼区。经统计，共计27个市/区，151个小城镇。

1.2 数据来源与处理

本文整合碳排放、夜间遥感、统计年鉴及空间边界等多源数据，构建了苏南地区151个小城镇2012—2021年的碳排放数据库。碳排放基准数据来源于CEADs数据库，后期通过VIIRS夜间灯光数据反演延展，空间与属性数据结合ArcGIS平台进行处理，为时空演变分析提供基础支撑（见表1）。

1.3 研究方法

1.3.1 碳排放核算模型与夜间灯光数据反演模型构建

为获取2018—2021年苏南小城镇的碳排放数据，本文基于2012—2017年县域统计碳排放量与NPP/VIIRS夜间灯光数据的年均*DN*值，构建了不含截距的线性回归模型：



图1 研究范围图
Fig.1 Study area map
资料来源：笔者自绘，底图审图号GS(2019)1673，底图边界未作修改。

表1 数据来源与处理方式
Tab.1 Data sources and processing methods

数据类型	数据来源与说明	时间范围	空间分辨率/单位	处理方式
碳排放数据	中国碳核算数据库（CEADs）	2012—2017年	县域（行政单元）	用于建立基准碳排数据；2018—2021年基于模型估算
夜间灯光数据	NPP/VIIRS（NGDC）	2012—2021年	500 m × 500 m	下载年度合成产品，投影转换与去噪处理
社会经济数据	《中国县域统计年鉴（乡镇卷）》《江苏统计年鉴》及各地市统计公报	2012—2021年	镇级（151个小城镇）	整理人口、GDP、面积等指标
地理空间数据	全国地理信息资源目录系统 & 江苏地理信息公共平台	2021年	1:100万（县域）+自绘乡镇边界	空间叠加与镇域边界校准

资料来源：笔者自制。

《上海城市规划》https://www.shplanning.com.cn/. All rights reserved.

$$E_{ij} = K \times DN_{ij} \quad (1)$$

式中：E_{ij}表示第i年j市/区的碳排放量；DN_{ij}表示第i年j市/区的夜间灯光总值；K表示模拟系数。模型建立后，利用DN值反演2018—2021年各县碳排放量，实现时间序列的延续。为提升反演模型的精度，进一步引入调整系数K_{ij}对初步反演结果进行校正，其计算公式如下：

$$K_{ij} = \frac{C_a}{C_b} \quad (2)$$

$$C_{a'} = C_{b'} \times \overline{K} \quad (3)$$

式中：C表示二氧化碳CO_2，C_a和C_b分别为统计碳排放值与初步反演值，$\overline{K}$为历年调整系数的平均值。经验证，修正后的模型拟合优度R^2=0.9927，说明其具备良好的拟合能力与推广性。

1.3.2 GIS空间分析方法

为了弥补碳排放清单数据的不完整性及精细尺度下能源消费数据的缺失，国内外学者不断探索更精确且具有空间特性的碳排放估算方法。夜间灯光遥感数据（如DMSP/OLS和NPP/VIIRS）因其获取便捷、监测范围广、可捕捉微弱光源等优势，为碳排放估算提供了新的视角，并已广泛应用于经济增长、能源消费、城镇化和人口密度等研究。

本文基于国家地球物理数据中心开放平台获取的2012—2021年NPP/VIIRS夜间灯光数据，通过中值滤波和低阈值去噪处理后，利用县域行政边界进行掩膜提取得到苏南地区县域夜间灯光数据集，并通过分区统计后得到各县域单元夜间灯光数据DN总值。由表2可见，苏南地区27个市/区夜间灯光总值逐年递增，DN总值由2012年的504 176增长到2021年的719 919。

将2012—2017年苏南地区27个市/区的碳排放总量与夜间灯光总DN值进行对比，发现两者年变化趋势高度相似，并呈现出一定的演变规律。基于此，采用历年夜间灯光总DN值统计数据与县域碳排放量的统计数据进行拟合分析，并构建回归模型。结果表明，夜间灯光数据总DN值与碳排放量具有较好的拟合关系，其中，线性回归模型的拟合效果最好。因此，本文采取不含截距的线性回归模型。

本文建立历年夜间灯光DN值与碳排放量之间的回归模型（线性函数模型、对数模型、二次函数模型、三次函数模型、幂函数模型）。如图2所示，线性回归模型R^2的值为0.9236，拟合优度最高（R^2的值越接近1，说明拟合程度越好；反之，R^2的值越小，说明拟合程度越差），表明夜间灯光DN值与碳排放量相关度较高，构建的模型是可靠有效的，使用夜间灯光数据来模拟碳排放具有较高的可行性。

1.3.3 空间自相关分析方法

为识别苏南小城镇碳排放的空间聚集特征，本文采用全局与局部空间自相关方法。

（1）全局空间自相关分析

通过Moran's I指数衡量碳排放变量在研究区域内的总体空间自相关性，计算公式如下：

$$I = \frac{n}{W} \times \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} w_{ij}(x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

表2 2012—2021年苏南县域夜间灯光DN总值统计

Tab.2 Statistics on the total *DN* value of nighttime lights in Southern Jiangsu counties from 2012 to 2021

市/区	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年
高淳区	2 510	2 621	2 594	2 523	2 704	3 999	4 304	4 769	5 724	6 838
溧水区	3 965	4 626	5 337	5 193	5 519	7 392	8 023	9 054	12 297	14 319
六合区	15 730	19 531	18 100	17 476	18 057	19 866	19 968	20 211	24 010	25 050
丹徒区	6 742	7 186	7 275	6 781	7 033	8 567	8 246	8 522	9 223	8 962
丹阳市	12 190	14 121	13 191	13 768	15 017	16 861	17 186	17 591	18 386	19 458
京口区	13 325	15 367	14 648	14 745	16 322	18 488	18 591	18 773	17 947	17 423
句容市	5 765	6 885	6 867	7 201	7 622	10 345	11 044	12 143	13 653	14 563
扬中市	2 514	2 804	3 451	3 566	3 254	6 131	6 463	6 996	6 228	6 347
常熟市	35 096	39 606	38 120	38 290	38 391	39 585	40 136	41 284	43 183	46 715
虎丘区	18 813	21 445	20 828	21 199	22 112	23 987	24 423	25 059	24 791	25 425
昆山市	45 406	51 996	50 054	56 075	54 911	60 128	60 315	60 551	61 953	64 144
太仓市	24 112	26 656	26 924	28 246	27 529	29 980	30 283	30 787	32 599	33 132
吴江区	34 995	36 790	35 071	34 176	34 836	39 821	40 269	40 917	41 363	44 308
吴中区	59 697	66 689	65 343	69 146	72 244	79 252	79 803	80 555	82 540	83 779
相城区	18 613	20 365	20 056	21 518	24 155	27 965	28 224	28 685	30 429	31 769
张家港市	28 409	30 319	30 319	30 984	29 763	32 304	32 856	33 809	35 139	38 437
滨湖区	16 625	17 516	16 040	14 635	15 690	17 272	17 487	17 902	18 809	18 542
惠山区	12 989	13 520	12 728	12 307	13 672	15 627	15 938	16 450	16 934	17 738
江阴市	32 120	33 907	32 048	31 977	32 899	35 321	35 855	36 789	36 922	38 655
锡山区	15 657	17 390	15 803	15 205	15 701	16 789	16 891	17 054	17 382	18 480
宜兴市	18 071	20 896	20 630	20 394	20 695	23 934	24 833	25 950	27 832	29 799
金坛区	5 587	5 968	6 137	7 238	9 946	11 841	12 297	12 971	14 680	17 784
溧阳市	6 843	7 905	7 134	7 132	7 393	9 865	10 799	11 934	12 918	14 699
天宁区	8 215	8 825	8 191	7 961	8 897	9 239	9 360	9 582	9 687	10 446
武进区	34 581	32 872	28 420	26 908	28 455	29 995	30 748	31 902	34 729	36 871
新北区	18 300	20 605	18 958	18 907	19 953	20 661	21 281	22 102	22 158	26 564
钟楼区	7 306	8 012	7 486	6 955	7 515	8 003	8 219	8 635	8 581	9 673
合计	504 176	554 422	531 755	540 506	560 285	623 217	633 842	650 978	680 096	719 919

资料来源：笔者自制。

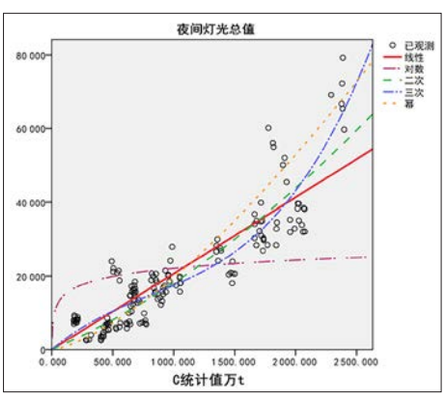


图2 碳排放与夜间灯光数据拟合分析

Fig.2 Fitting analysis of carbon emissions and nighttime light data

资料来源：笔者自绘。

《上海城市规划》 https://www.shplanning.com.cn/. All rights reserved.

式中：n是样本数量，$\bar{x}$是样本均值，x_i和x_j分别是第i和第j个样本点的观测值，w_{ij}是样本点i和j之间的空间权重，W是所有空间权重的总和。显著性检验通过Z（Z-score）值和P值（显著性水平），空间自相关具有统计意义。

（2）局部空间自相关分析

进一步采用LISA方法（公式中简称L）识别高值聚集（H—H）、低值聚集（L—L）等局部空间模式，其计算公式如下：

$$L_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{S^2} \sum_{j=1}^{n} w_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (5)$$

式中：S^2为样本方差，其他变量含义同上。

1.3.4 时空演变特征分析

在低碳发展研究中，碳排放总量和碳排放强度是两个关键的分析维度，从不同角度揭示区域碳排放的特征和效率。碳排放总量是衡量一个区域或单位碳排放水平的直接指标，能够反映该区域对全球气候变化的贡献及其减排任务的紧迫性。因此，碳排放总量分析对于选择哪些区域需要优先减排、设定减排目标和制定宏观减排政策具有重要意义。

然而，仅依赖碳排放总量的分析并不能充分评估经济与碳排放之间的关系。为了揭示不同地区的生产效率差异，本文采纳了碳排放强度作为评估苏南小城镇之间差异性的指标。碳排放强度反映了单位GDP产生的碳排放量，碳排放强度的高低直接影响经济活动对环境的压力。

碳排放强度反映了某一地区在单位国内生产总值（GDP）产生过程中所排放的碳量。其计算公式为：

$$\text{碳排放强度} = \frac{\text{碳排放量}}{\text{GDP}} \quad (6)$$

因此，从碳排放总量与碳排放强度两个维度进行分析，能够从宏观层面和微观层面全面反映区域的碳排放水平及其经济效率，有助于制定更加精准的低碳发展策略，为后续的低碳小城镇分类提供理论基础和数据支持。本文通过结合碳排放总量与碳排放强度两个指标，依据“双高—双低”经济—环境协调评估思路，划分苏南小城镇类型，为后续的空间优化和低碳政策提出针对性的建议。

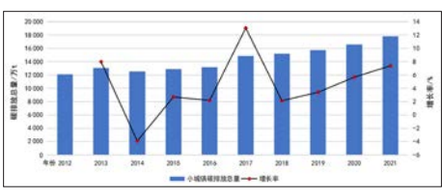


图3 2012—2021年苏南小城镇碳排放总量

Fig.3 Total carbon emissions of small towns in Southern Jiangsu, 2012-2021

资料来源：笔者自绘。

2 苏南小城镇碳排放时空演变特征分析

2.1 小城镇碳排放总量时空演变特征分析

2.1.1 时间序列分析

根据栅格统计提取到2012—2021年苏南151个小城镇的碳排放总量数据（见图3），整体呈现“上升—下降—平稳上升”的趋势。碳排放总量由1.2亿t增长至1.78亿t，年均增长率5.3%。2014年为最低点，增长率为-3.9%；2017年达到增长高峰，增幅为13.0%。2017年后，增长率明显趋缓，反映出党的十九大以后绿色低碳政策与资源环境约束产生的影响。

2.1.2 空间分布特征

将2012—2021年间苏南小城镇的年碳排放量划分为5个不同等级（见图4）。第Ⅰ等级为0—50万t，第Ⅱ等级为51万—100万t，第Ⅲ等级为101万—200万t，第Ⅳ等级为201万—300万t，第Ⅴ等级即高值区，为大于301万t的小城镇。2012年，碳排放高值区集中于昆山市、武进区、张家港市等沿太湖及临沪发达区域；2021年高值区域进一步扩展至宜兴、吴中、常熟等地。Ⅴ级小城镇从3个增至7个，说明高碳排放集聚区逐步扩大，总体呈“南高北低、东高西低”的空间格局。

2.1.3 空间集聚特征分析

（1）全局空间自相关分析

为探讨苏南小城镇碳排放的空间集聚

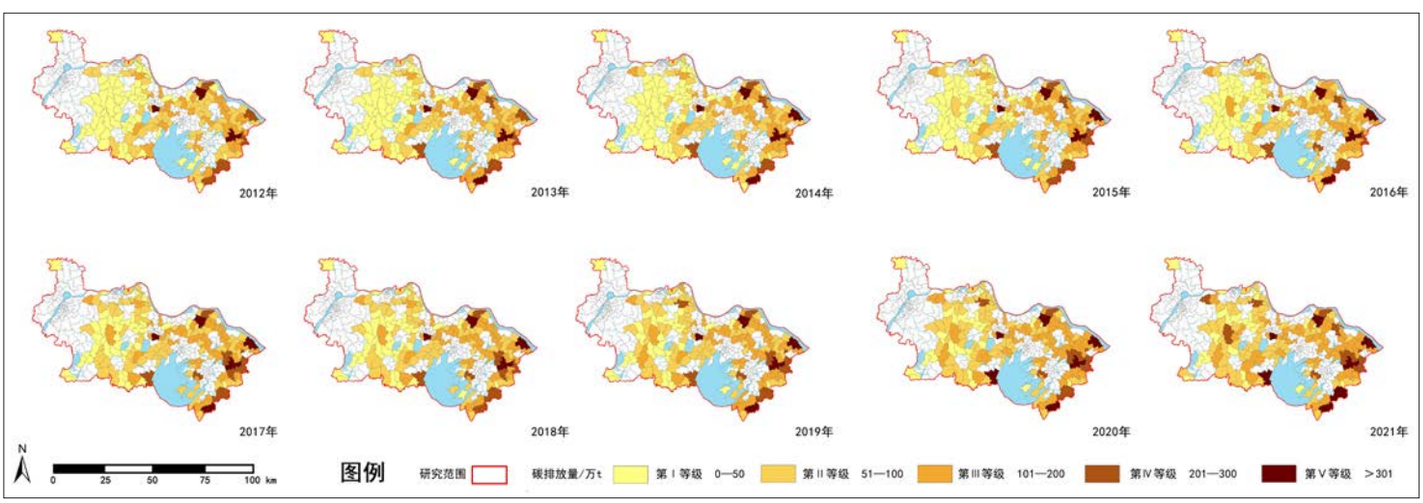


图4 2012—2021年苏南小城镇碳排放量空间分布图

Fig.4 Spatial distribution of carbon emissions in small towns of Southern Jiangsu, 2012-2021

资料来源：笔者自绘。

《上海城市规划》https://www.shplanning.com.cn/. All rights reserved.

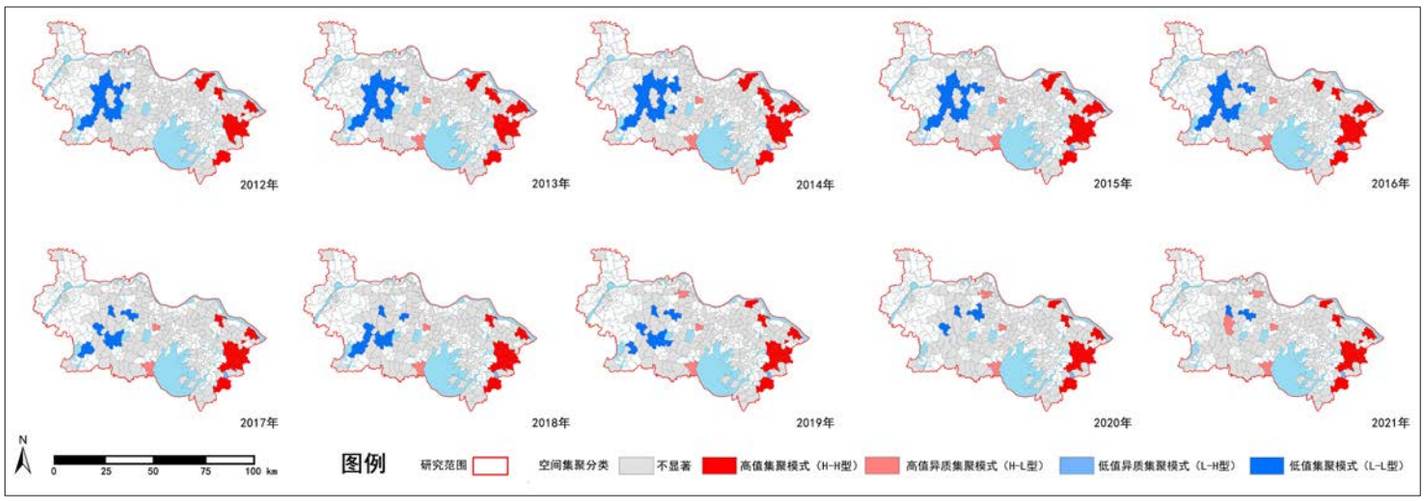


图5　2012—2021年苏南小城镇碳排放量LISA集聚图
Fig.5　LISA aggregation map of carbon emissions in small towns of Southern Jiangsu, 2012-2021

资料来源：笔者自绘。

表3　2012年与2021年苏南小城镇碳排放量LISA集聚转移表
Tab.3　LISA agglomeration and displacement matrix for carbon emissions in small towns of Southern Jiangsu in 2012 and 2021

类型	2012年	2021年
H—H型	黎里镇、周市镇、花桥镇、陆家镇、玉山镇、张浦镇、巴城镇、城厢镇、浮桥镇、杨舍镇、锦丰镇、海虞镇	黎里镇、甪直镇、周市镇、花桥镇、陆家镇、玉山镇、张浦镇、巴城镇、城厢镇、浮桥镇、锦丰镇、海虞镇
H—L型	—	丹北镇、丁蜀镇、薛埠镇、湖塘镇
L—H型	—	周庄镇
L—L型	白马镇、和凤镇、晶桥镇、宝堰镇、珥陵镇、茅山镇、白兔镇、后白镇、天王镇、直溪镇、朱林镇、指前镇、竹箦镇、别桥镇	宝堰镇、珥陵镇、导墅镇

资料来源：笔者自制。

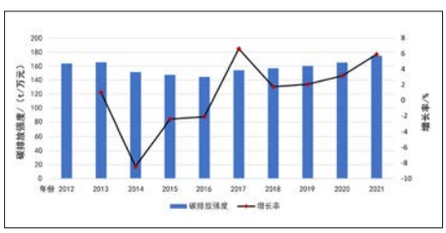


图6　2012—2021年苏南小城镇碳排放强度
Fig.6　Carbon emission intensity of small towns in Southern Jiangsu, 2012-2021

资料来源：笔者自绘。

特征，运用Geoda软件计算碳排放的全局Moran's I指数。Moran's I指数的数值范围从0.249到0.339，且所有年份的指数均大于0，表明碳排放在空间上具有显著的正相关性，存在显著的空间集聚效应。通过1%的显著性检验，表明该空间集聚性保持稳定。Moran's I指数逐年波动，但整体呈现下降趋势，说明苏南小城镇的碳排放在早期几年呈现较强的空间集聚特征，而随着时间的推移，区域间碳排放的差异逐渐增大，空间分布趋于更加分散。

（2）局部空间自相关性分析

依据局部LISA集聚图进行空间自相关分析（见图5，表3）。根据各个区域与其邻近区域的空间关联性，将每个区域单元细分为以下4类：①高值集聚模式（H—H型），指的是某一地区及其相邻地区的碳排放量均处于较高水平，且两者之间存在正相关关系；②高值异质集聚模式（H—L型），表示某一地区的碳排放量高，但其周边相邻地区的碳排放量却相对较低，呈现出中心高四周低的负相关特征；③低值异质集聚模式（L—H型），即某一地区的碳排放量低，而其邻近地区的碳排放量却高，表现为中心低四周高的负相关关系；④低值集聚模式（L—L型），意味着某一地区与其相邻地区的碳排放量都较低，并且两者之间存在正相关关系。H—H型小城镇主要集中在昆山、太仓、张家港等地，数量基本稳定；L—L型逐步减少，集聚分布于金坛、丹阳、句容等经济欠发达区域，反映出碳排放的“高集聚”格局在东南部逐渐强化。

2.2　小城镇碳排放强度特征分析

2.2.1　时间序列特征

碳排放强度（见图6）从2012年的164 t/万元上升至2021年的175 t/万元，整体变动幅度较小，年均增长率仅0.8%，显示出苏南地区单位碳排放控制较为有效。

2.2.2　空间分布特征

采用自然断点分级法，将2012—2021年苏南小城镇碳排放强度分为5个等级，第Ⅰ等级为0—1.0 t/万元，第Ⅱ等级为1.0—1.5 t/万元，第Ⅲ等级为1.6—2.0 t/万元，第Ⅳ等级为2.1—3.5 t/万元，第Ⅴ等级为大于3.6 t/万元。2012—2021年小城镇碳排放强度大多集中于Ⅰ—Ⅱ级区间，表明苏南小城镇整体碳效率较高。但高值区域数量有波动，Ⅴ级小城镇从10个降至7个，集中于宝华、茅山、大新等区域，体现出个别区域产业结构偏重、高耗能问题（见图7）。

2.2.3　空间集聚特征分析

（1）全局空间自相关分析

根据全局Moran's I指数的分析结果，

《上海城市规划》https://www.shplanning.com.cn/. All rights reserved.

2012—2021年间，碳排放强度在空间上表现出显著的正相关性，说明具有较强的空间集聚效应。Moran's I指数从2012年的0.43逐年下降至2021年的0.22，显示出碳排放强度的空间集聚程度逐步减弱。这表明，碳排放强度在早期较为集中，而到2021年，碳排放强度的空间分布趋于均衡。

（2）局部空间自相关分析

根据各个区域与其邻近区域的空间关联性，同样将每个区域单元细分为H—H型、H—L型、L—H型、L—L型4类。LISA图与聚集转移表（见图8，表4）显示，2012年以H—H型为主导，2021年转变为以L—L型为主导，说明高碳强度区域在减少，低碳强度区域增加，碳效率优化明显。

3 苏南小城镇碳排放优化策略研究

3.1 苏南小城镇低碳发展类型划分

基于碳排放总量和碳排放强度对苏南

表4 2012年与2021年苏南小城镇碳排放强度LISA集聚转移表

Tab.4 LISA agglomeration and dispersion matrix for carbon emission intensity in small towns of Southern Jiangsu in 2012 and 2021

类型	2012年	2021年
H-H型	世业镇、宝华镇、下蜀镇、汴墅关镇、望亭镇、光福镇、通安镇	世业镇、高桥镇、宝华镇、下蜀镇、边城镇
H-L型	—	大新镇
L-H型	竹镇镇	竹镇镇
L-L型	和凤镇、晶桥镇	徐霞客镇、月城镇、青阳镇、祝塘镇、郑陆镇、礼嘉镇、洛阳镇

资料来源：笔者自制。

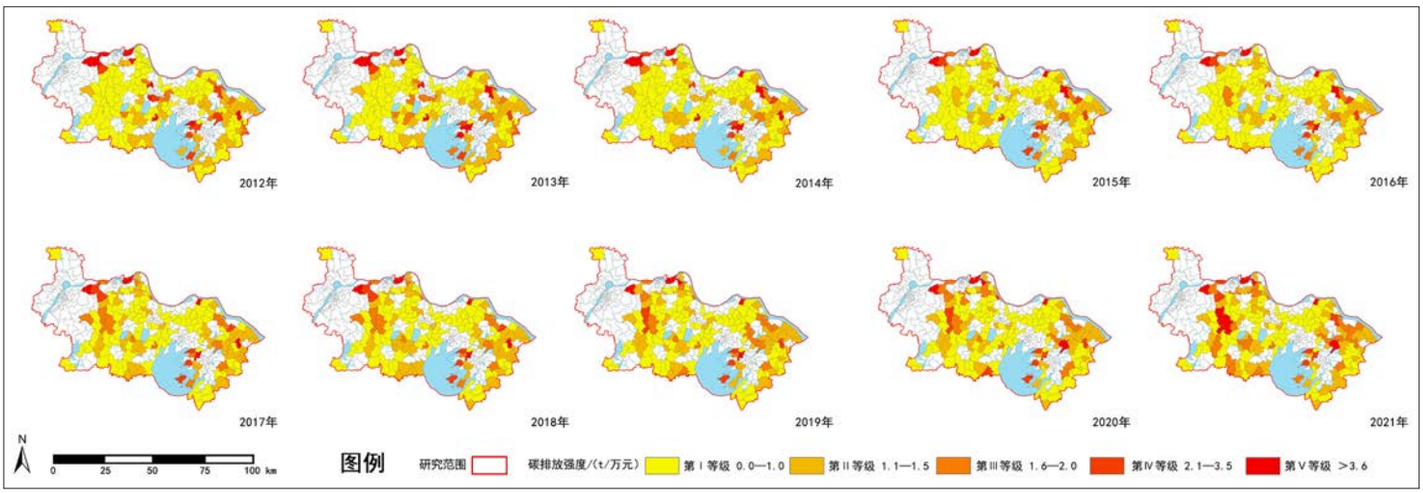


图7 2012—2021年苏南小城镇碳排放强度空间分布图

Fig.7 Spatial distribution of carbon emission intensity in small towns of Southern Jiangsu, 2012-2021

资料来源：笔者自绘。

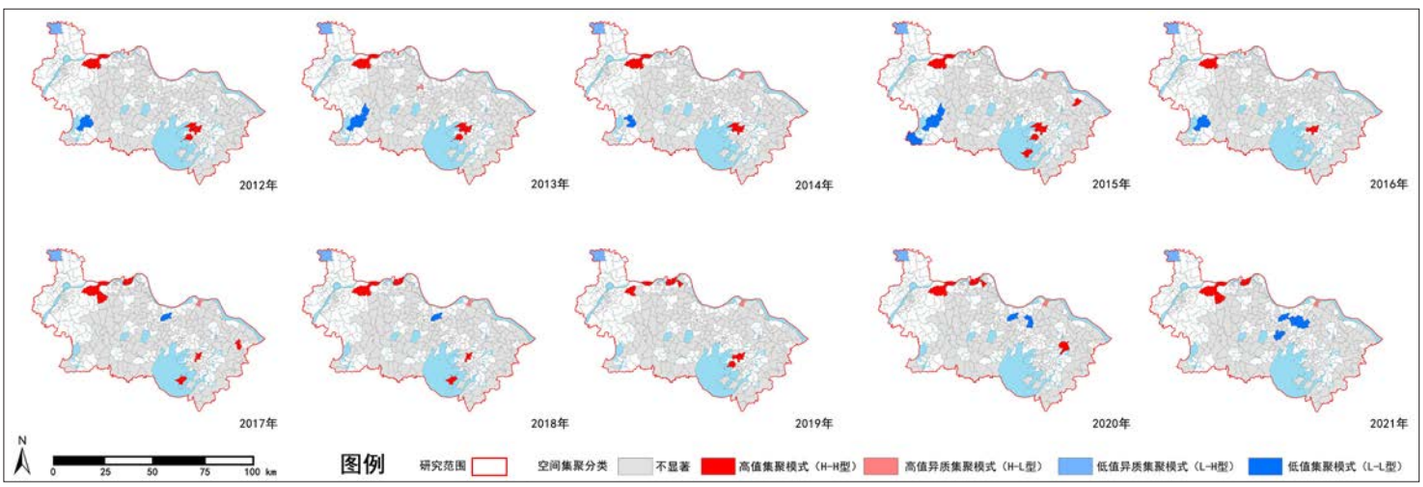


图8 2012—2021年苏南小城镇碳排放强度LISA集聚图

Fig.8 LISA aggregation map of carbon emission intensity in small towns of Southern Jiangsu, 2012-2021

资料来源：笔者自绘。

《上海城市规划》https://www.shplanning.com.cn/. All rights reserved.

小城镇进行低碳发展类型的划分（见表5）。通过时间序列分析，揭示不同小城镇碳排放水平的变化规律；同时，通过空间分布特征分析和空间聚集特征分析，探索碳排放的地理分布情况及区域聚集效应。

空间聚集特征分析表明，碳排放的分布具有显著的空间自相关性，即高碳排放区域往往在地理上形成聚集效应，受区域经济、产业结构、能源消费模式等多重因素的影响。基于上述分析结果，并参考《“十四五”工业绿色发展规划》中的“双高—双低”经济—环境协调评估思路，提出4类低碳发展类型，基于碳排放总量、碳排放强度和社会经济发展水平（以人均GDP表示，G），结合全样本的平均碳排放量（$\bar{E}$）和平均人均GDP（$\bar{G}$）作为定量阈值，确保分类的科学性与可比性，具体分类结果如图9所示。

（1）协调发展区

协调发展区共计82个小城镇，是苏南地区最广泛的类型。此类小城镇碳排放量低于区域平均值，经济发展水平较低，受人口规模与工业结构的影响显著，主要集中于南京、镇江、常州等地。其发展特征体现为：依赖传统产业与农业，人口较少，环保政策实施有限。未来需从产业结构优化、循环经济发展、低碳生活倡导等方向发力，实现经济发展与碳排放同步协调。

（2）绿色发展区

绿色发展区共有18个小城镇，其碳排放量低于区域平均值，但经济发展水平较高，主要分布于无锡和常州。其产业结构以服务业与高新技术产业为主，人口密度适中，生态环境优越。发展策略应聚焦绿色经济建设、生态资源保护与生态旅游培育，以实现经济增长与环境保护协同发展。

（3）重点治理区

重点治理区共13个小城镇，其碳排放高于区域平均值，而经济水平偏低，主要集中于苏州常熟市一带，面临“高排放、低效益”的双重挑战。其主要特征为：重工业主导，能源结构传统，污染问题严重。需加强产业治理，腾退高碳企业，推动绿色转型。

（4）创新示范区

创新示范区共有38个小城镇，其碳排放高于区域平均值，经济发展水平较高，主要集中于苏州、无锡。以高新技术、智能制造、人工智能等产业为主，人口密度大，能源需求高。未来需以技术创新为导向，加强低碳技术应用与能源结构优化，构建可复制的低碳发展路径。

3.2 苏南区域总体空间格局低碳优化策略

基于上述分析，苏南小城镇碳排放呈现“南高北低、东高西低”的空间分布特征，碳排放高值区沿着太湖—临沪经济带扩张，而西部的冷点区域则显著收缩。为推动苏南地区的低碳转型，本文提出基于空间分析的低碳优化策略，构建了“两核、三轴、四片区”的总体空间格局，旨在通过空间结构的调整推动低碳发展（见图10）。“两核”指昆山市和张家港市，作为苏南地区低碳发展的核心地带，在技术创新、产业升级、绿色环保等方面具有较强的示范作用，应发挥其优势，推动苏南地区其他小城镇实现绿色发展和产业升级。“三轴”则是连接多个区域的协调发展轴、绿色发展轴和创新发展轴。协调发展轴将聚焦交通枢纽和物流基地建设，增强区域内城市间的联系，促进资源要素的流动；绿色发展轴着重建设生态景观带与绿色产业园区，加强自然资源的保护和合理利用；创新发展轴则集中在科技园区与创新孵化基地，推动低碳技术的研发和产业的绿色升级。“四片区”即协调发展区、绿色发展区、重点治理区和创新示范区。

3.2.1 优化城镇空间结构，构建低碳国土空间格局

在空间分布分析中，碳排放的高值区域主要集中在东部，尤其是苏州、无锡等城市，而西部则相对较低。针对这一现状，优化城镇空间结构成为关键任务。建议通过推进城镇一体化协调发展，推动区域内各小城镇之间的资源共享与联动。首先，利用昆山和张家港作为低碳发展的“两核”，引领周边城镇向低碳化转型。同时，建立紧凑型的城镇空间结构，减少无序扩张对生态环境的压力。通过优化交通网络与基础设施，推动公共交通系统的发展，减少碳排放。在边缘地带，尤其是西部低碳区，应注重蓝绿开敞空间的建设，以通过将农业与生态

表5 苏南低碳小城镇划分标准
Tab.5 Classification criteria for low-carbon small towns in Southern Jiangsu

类型	碳排放水平（E）	社会经济发展水平（G）	政策含义
协调发展区	$E<\bar{E}$	$G<\bar{G}$	碳排放与经济均处于较低水平，具备低碳提升潜力
绿色发展区	$E<\bar{E}$	$G\geq\bar{G}$	经济发展较高但碳排放较低，可作为绿色发展典型
重点治理区	$E\geq\bar{E}$	$G<\bar{G}$	经济相对滞后但碳排放较高，应作为减排重点区域
创新示范区	$E\geq\bar{E}$	$G\geq\bar{G}$	经济与碳排放均高，需通过技术创新实现脱钩

资料来源：笔者自制。

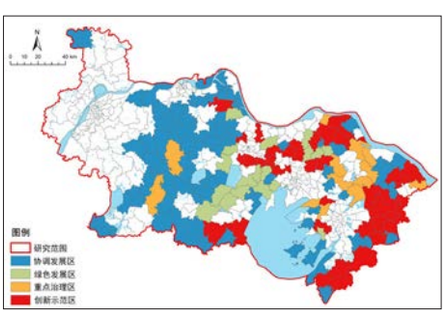


图9 苏南小城镇低碳发展类型分布图
Fig.9 Distribution map of low-carbon development types in small towns of Southern Jiangsu
资料来源：笔者自绘。

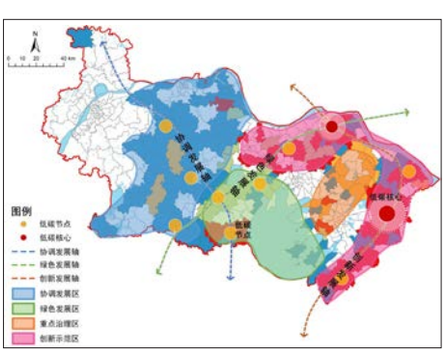


图10 苏南区域总体空间格局图
Fig.10 Overall spatial pattern of Southern Jiangsu
资料来源：笔者自绘。

《上海城市规划》https://www.shplanning.com.cn/. All rights reserved.

保护相结合的方式提升碳汇功能。

3.2.2 促进产业转型升级，打造低碳产业发展格局

苏南地区的高碳排放主要来源于传统制造业，尤其是位于高值碳排放区域的重工业和高能耗产业。因此，产业转型升级是推动低碳发展的关键，推动传统产业的绿色转型，加快新兴低碳产业的培育和发展，成为苏南地区低碳优化的核心任务。首先，要加快传统产业的绿色转型，鼓励现有制造业企业采用绿色生产工艺和清洁能源技术。通过提供政策支持、税收优惠和资金补贴等手段，激励企业进行设备改造和技术升级，推动低碳生产过程的全面实施。其次，建设低碳产业集聚区和示范园区，将低碳技术和绿色产业集聚在特定区域内，形成产业集群效应。建设新能源、智能制造、生物医药等新兴低碳产业园区，吸引相关企业入驻，推动区域产业结构的绿色升级。

3.2.3 建立碳账户管理体系，合理制定碳减排配额

由于苏南地区小城镇碳排放量的分布存在较大差异，为了有效控制碳排放并实现区域低碳目标，建立碳账户管理体系，制定差异化的碳减排配额至关重要。首先，建立碳账户管理体系，针对各小城镇的碳排放情况，逐一设立碳账户，并进行统一的碳排放核算。通过设立碳排放监控平台，实现各小城镇碳排放的实时监控和数据公开。其次，制定差异化的碳减排配额，针对不同小城镇的碳排放强度和经济发展水平，制定合理的碳减排目标和配额分配。

3.3 苏南小城镇分区低碳优化策略

在总体优化策略的基础上，针对不同发展类型的小城镇制定差异化路径，推进“因地制宜、分类施策、分区治理”的碳减排实践。

（1）协调发展区：发展低碳循环经济，倡导低碳生活方式

协调发展区主要分布在南京、镇江等地，小城镇普遍经济水平较低，碳排放总量和强度也处于较低水平，这些地区往往处于冷点集聚区，说明其低碳发展潜力较大。针对这一特征，应推动传统产业的优化升级，避免在低碳基础较好的前提下出现“高耗能、低效率”的情况。同时，应注重居民生活方式的绿色转型，鼓励低碳出行、绿色消费和可再生能源使用，从而实现经济与生态双重效益。

（2）绿色发展区：营造蓝绿开敞空间，改善城镇生态环境绿色发展区主要分布在无锡、常州部分小城镇，经济发展水平较高，而碳排放总量低于平均水平，在碳排放强度上具有明显优势，产业结构以高新技术和服务业为主。应进一步巩固其低碳发展优势，推动形成绿色发展的示范效应。可加强蓝绿开敞空间建设，完善生态廊道与湿地保护体系，提升碳汇功能，改善生态环境（见图11）。

（3）重点治理区：腾退高碳低效产业，培育低碳产业集群

重点治理区集中在常熟、张家港等地，其碳排放总量显著高于区域平均水平，人均GDP却偏低，这些区域往往与高碳产业集聚区重叠，产业结构中仍以钢铁、化工、纺织等高能耗制造业为主。应实施严格的减排政策，优先开展高碳产业的腾退与转型，逐步降低高污染企业的比重。同时，应建立更严格的碳排放标准和监管机制，逐步实现从高碳产业主导向低碳产业集群转型（见图12）。

（4）创新示范区：引导低碳技术创新，提高能源利用效率

创新示范区主要分布在苏州、无锡等地的核心制造业与科技创新区，这些小城镇经济水平与碳排放总量均处于高位，表现为热点区域与高值带的叠加区。尽管碳排放压力较大，但具备强大的科技研发能力和政策资源支持，因此具备率先探索绿色转型的条件。应鼓励该类区域建设低碳技术研发和实验平台，推动新能源利用、智能电网、绿色建筑和智能制造等领域的创新应用。

4 结论

本文基于苏南地区151个小城镇的碳排放数据，结合夜间灯光数据与GIS空间建模技术，揭示了苏南小城镇碳排放的时空演变特征，并提出了相应的低碳优化路径。

（1）苏南小城镇碳排放总量呈现出阶段性增长的趋势，年均增长率为5.3%，且碳排放的空间分布呈现“南高北低、东高西低”的格局。高值区逐渐向经济活跃带扩展，体现了经济发展对碳排放的直接影响。

（2）苏南小城镇碳排放呈现出显著的空间集聚效应。热点区主要集中在沿太湖经济带，冷点区则向西部收缩。局部空间自相关分析显示，碳排放高值区（H—H型）在东南部呈现稳定趋势，而低值区（L—L型）则向西部扩展。

（3）苏南小城镇可分为协调发展区、绿色发展区、重点治理区和创新示范区4类。针对不同类型的小城镇，提出了相应的低碳优化策略，包括产业结构调整、绿色经济建设、生态

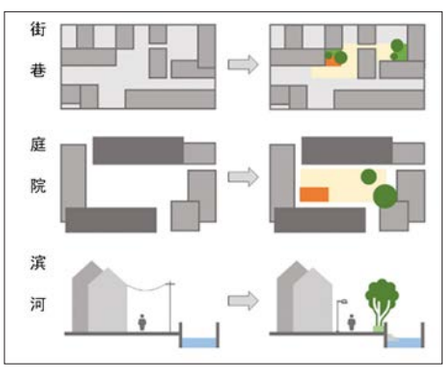


图11 小城镇生态环境改善示意图
Fig.11 Schematic diagram of ecological environment improvement in small towns
资料来源：笔者自绘。

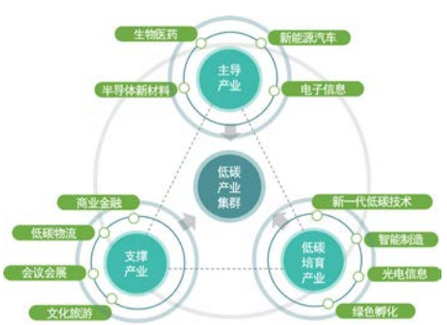


图12 小城镇低碳产业集群
Fig.12 Low-carbon industrial clusters in small towns
资料来源：笔者自绘。

《上海城市规划》https://www.shplanning.com.cn/. All rights reserved.

环境保护和技术创新等措施。

（4）针对苏南地区的整体空间格局，建议优化城镇空间结构，构建低碳国土空间；推动产业转型升级，发展低碳产业集群；同时建立碳账户管理体系，制定合理的碳减排配额和实施碳交易等措施，实现区域协同的低碳发展。

参考文献 References

[1] Mi Z, Zheng J, Meng J, et al. Carbon emissions of cities from a consumption-based perspective[J]. Applied Energy, 2019, 235: 509-518.

[2] Bryan B A, Gao L, Ye Y, et al. China's response to a national land-system sustainability emergency[J]. Nature, 2018, 559: 193-204.

[3] Houghton R A. How well do we know the flux of CO_2 from land use change?[J]. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 2010, 62: 337-351.

[4] Jin G, Guo B, Deng X. Is there a decoupling relationship between CO_2 emission reduction and poverty alleviation in China?[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2020, 151: 119856.

[5] 国务院. 中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[R]. 2021.
State Council. Opinions of the CPC Central Committee and the State Council on comprehensively implementing the new development concept and doing a good job in carbon peaking and carbon neutrality work[R]. 2021.

[6] Goodall C. How to live a low-carbon life: the individual's guide to stopping climate change[Z]. 2007.

[7] Liu C, Wu G, Wang J, et al. China's carbon emissions from urban and rural households during 1992-2007[J]. Journal of Cleaner Production, 2011, 19: 1754-1762.

[8] 李建豹，揣小伟，周艳. 江苏省县域碳排放时空演化及影响因素分析[J]. 生态经济，2023，39（7）：36-44.
Li Jianbao, Chuai Xiaowei, Zhou Yan. Spatiotemporal evolution and influencing factors of county-level carbon emissions in Jiangsu Province[J]. Ecological Economy, 2023, 39(7): 36-44.

[9] 刘明达，蒙吉军，刘碧寒. 国内外碳排放核算方法研究进展[J]. 热带地理，2014，34（2）：248-258.
Liu Mingda, Meng Jijun, Liu Bihan. Research progress on carbon emission accounting methods at home and abroad[J]. Tropical Geography, 2014, 34(2): 248-258.

[10] 张德英，张丽霞. 碳源排碳量估算办法研究进展[J]. 内蒙古林业科技，2005（1）：20-23.
Zhang Deying, Zhang Lixia. Research progress on estimation methods for carbon emissions from carbon sources[J]. Inner Mongolia Forestry Science and Technology, 2005(1): 20-23.

[11] 吉红洁，袁进，郭亚兵，等. 关于焦化行业CO_2排放核算方法的探讨[J]. 中国环境管理，2015，7（1）：63-67.
Ji Hongjie, Yuan Jin, Guo Yabing, et al. Discussion on CO_2 emission accounting methods in the coking industry[J]. China Environmental Management, 2015, 7(1): 63-67.

[12] 王雪娜，顾凯平. 中国碳源排碳量估算办法研究现状[J]. 环境科学与管理，2006（4）：78-80.
Wang Xuena, Gu Kaiping. Research status of estimation methods for carbon emissions from carbon sources in China[J]. Environmental Science and Management, 2006(4): 78-80.

[13] 陈晋，卓莉，史培军，等. 基于DMSP/OLS数据的中国城市化过程研究——反映区域城市化水平的灯光指数的构建[J]. 遥感学报，2003（3）：168-175.
Chen Jin, Zhuo Li, Shi Peijun, et al. Urbanization process in China based on DMSP/OLS data—construction of a light index reflecting regional urbanization level[J]. Journal of Remote Sensing, 2003(3): 168-175.

[14] 徐英启，程钰，王晶晶，等. 中国低碳试点城市碳排放效率时空演变与影响因素[J]. 自然资源学报，2022，37（5）：1261-1276.
Xu Yingqi, Cheng Yu, Wang Jingjing, et al. Spatiotemporal evolution and influencing factors of carbon emission efficiency in China's low-carbon pilot cities[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(5): 1261-1276.

[15] 韦彦汀，李思佳，张华. 成渝城市群碳排放时空特征及其影响因素[J]. 中国环境科学，2022，42（10）：4807-4816.
Wei Yanting, Li Sijia, Zhang Hua. Spatiotemporal characteristics and influencing factors of carbon emissions in the Chengdu-Chongqing urban agglomeration[J]. China Environmental Science, 2022, 42(10): 4807-4816.

[16] 张赫，黄雅哲，王睿，等. 中国县域碳排放脱钩关系及其时空特征演变[J]. 资源科学，2022，44（4）：744-755.
Zhang He, Huang Yazhe, Wang Rui, et al. Decoupling relationship and spatiotemporal evolution of county-level carbon emissions in China[J]. Resources Science, 2022, 44(4): 744-755.

[17] 黄汉志，贾俊松，张振旭. 江西县域土地利用变化碳排放时空演变及影响因素[J]. 生态学报，2023（20）：1-14.
Huang Hanzhi, Jia Junsong, Zhang Zhenxu. Spatiotemporal evolution and influencing factors of carbon emissions from land use change in Jiangxi County areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023(20): 1-14.

[18] Zhou C, Pii S W. Examining the determinants and the spatial nexus of city-level CO_2 emissions in China: a dynamic spatial panel analysis of China's cities[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 171: 917-926.

[19] 王霞，张丽君，秦耀辰，等. 中国高碳制造业碳排放时空演变及其驱动因素[J]. 资源科学，2020，42（2）：323-333.
Wang Xia, Zhang Lijun, Qin Yaochen, et al. Spatiotemporal evolution and driving factors of carbon emissions in China's high-carbon manufacturing industries[J]. Resources Science, 2020, 42(2): 323-333.

[20] 李玲玲，韩瑞玲，张晓燕. 中国航空碳排放及其效率时空演化特征分析[J]. 生态学报，2022，42（10）：3919-3932.
Li Lingling, Han Ruiling, Zhang Xiaoyan. Analysis of the spatiotemporal evolution characteristics of China's aviation carbon emissions and efficiency[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(10): 3919-3932.

[21] 刘玉珂，金声甜. 中部六省能源消费碳排放时空演变特征及影响因素[J]. 经济地理，2019，39（1）：182-191.
Liu Yuke, Jin Shengtian. Spatiotemporal evolution characteristics and influencing factors of energy consumption carbon emissions in six central provinces[J]. Economic Geography, 2019, 39(1): 182-191.

[22] 程钰，张悦，王晶晶. 中国省域碳排放绩效时空演变与技术创新驱动研究[J]. 地理科学，2023，43（2）：313-323.
Cheng Yu, Zhang Yue, Wang Jingjing. Spatiotemporal evolution and technological innovation drivers of provincial carbon emission performance in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2023, 43(2): 313-323.

[23] 陈林，罗怀良，李政，等. 宜宾市近15年农业碳排放时空格局及其驱动力分析[J]. 西南农业学报，2019，32（6）：1426-1434.
Chen Lin, Luo Huailiang, Li Zheng, et al. Spatiotemporal pattern and driving forces of agricultural carbon emissions in Yibin City over the past 15 years[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019, 32(6): 1426-1434.

[24] 王海飞. 基于SSBM-ESDA模型的安徽省县域农业效率时空演变[J]. 经济地理，2020，40（4）：1-15.
Wang Haifei. Spatiotemporal evolution of county-level agricultural efficiency in Anhui Province based on the SSBM-ESDA model[J]. Economic Geography, 2020, 40(4): 1-15.

《上海城市规划》https://www.shplanning.com.cn/. All rights reserved.