

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202302005



# 长三角城市群路网密度与碳排放 时空特征及耦合分析

陈燕<sup>1,2</sup>, 周镇宇<sup>1</sup>, 蒋有君<sup>1</sup>, 索心睿<sup>1</sup>, 宋新山<sup>1</sup>, 王宇晖<sup>1</sup>

(1. 东华大学 环境科学与工程学院, 上海 201620;

2. 中国科学院 流域地理学重点实验室, 江苏 南京 210008)

**摘要:** 以长三角为例, 基于碳排放空间化模型, 在格网尺度下量化分析路网密度与城市群碳排放的时空响应特征, 利用耦合协调模型分析区域路网密度与碳排放的耦合协调特征. 结果表明: 在时空特征上, 碳源主要为沿湖沿江的都市功能发达区, 碳汇主要为长江、新安江水域及南部林地区, 整体呈现碳排放逐渐分散化的趋势; 在响应特征上, 单位面积碳排放与路网密度呈明显的正相关, 人均碳排放与路网密度呈倒 U 型曲线关系; 在耦合特征上, 耦合度和耦合协调度均上升, 呈现高值区以各大城市地区为中心向周边扩张的发展态势.

**关键词:** 路网密度; 碳排放; 耦合协调; 长三角

中图分类号: TU 984.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2023)04-0485-10

## Spatial-Temporal Characteristics and Coupling Analysis of Road Network Density and Carbon Emissions in Yangtze River Delta Urban Agglomeration

CHEN Yan<sup>1, 2</sup>, ZHOU Zhenyu<sup>1</sup>, JIANG Youjun<sup>1</sup>,  
SUO Xinrui<sup>1</sup>, SONG Xinshan<sup>1</sup>, WANG Yuhui<sup>1</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. Key Laboratory of Watershed Geography, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** Taking the Yangtze River Delta as an example, the spatial-temporal response features of road network density and carbon emission of urban agglomerations at the grid scale is analysed based on the carbon emission spatialization model, and the coupled coordination characteristics of regional road network density and carbon emissions are analysed using the coupled coordination model. The results show that, in terms of spatial-temporal characteristics, carbon sources are mainly developed urban areas along lakes and rivers, and carbon sinks are mainly the waters of the Yangtze River and Xin'an River as well as southern forest areas. Overall, there is a trend of gradual dispersion of carbon emission. In terms of response characteristics, there is a significant positive correlation between ground average carbon emissions and road network density, and an inverted U-shaped relationship between per capita carbon emissions and road network density. In terms of coupling

收稿日期: 2023-02-15

通信作者: 陈燕(1976-), 女, 副教授, 博士, 主要从事区域生态环境演变、环境遥感与地理信息系统的研究. E-mail: chenyan-hjxy@dhu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41471089); 中国科学院流域地理学重点实验室开放基金资助项目(WSGS2020006); 国家重点研发计划项目(2021YFC3000102)

characteristics, the degrees of coupling and coupling coordination both increase. It shows a development trend of high-value areas expanding to the surrounding areas centered on each major urban area.

**Keywords:** road network density; carbon emission; coupling coordination; Yangtze River Delta

近年来,随着温室气体排放量的增加,全球居民的生活质量和各国的经济发展都受到了严峻挑战.绿色、低碳的发展模式成为国际社会普遍关注的焦点问题.中国城市群区域一体化仍在持续推进,伴随而来的城市化率的提高、工业经济的发展、能源消耗的增加都对城市群碳排放产生了深远影响.

路网是高质量一体化的基础支撑,其与碳排放之间存在复杂的相互关系.一方面,路网会在区域用地布局<sup>[1]</sup>、土地开发利用<sup>[2]</sup>、居民出行方式<sup>[3]</sup>、区域产业结构<sup>[4-5]</sup>等多个方面对碳排放产生间接影响.另一方面,碳排放作为改善区域土地规划、引导居民绿色出行、促进产业结构转型升级的动力和门槛也将促使区域路网格局发生改变.路网密度作为城市交通路网规划的关键指标<sup>[6]</sup>,可以较好地描述道路网络的空间模式及其结构属性<sup>[7]</sup>,直观地反映交通对社会经济要素空间流动及城镇化进程的促进作用<sup>[8]</sup>,较好地解释普遍存在的城市蔓延或城市扩张现象<sup>[1,9]</sup>.在“碳达峰、碳中和”及区域一体化背景下,探究路网密度与城市群碳排放之间的时空响应机制及其耦合关系具有重要意义.

目前,研究主要分为两类.一类研究从城市空间角度出发<sup>[10-11]</sup>,关注路网通过城市空间布局对碳排放产生的影响,如 Chen 等<sup>[12]</sup>研究表明,路网的加强有助于抑制空间功能分工深化导致的单位产值碳排放的增加;Wang 等<sup>[13]</sup>研究表明,更高的路网密度一定程度上可以减少交通拥堵,提高城市交通能源消耗的效率,从而减少碳排放.另一类研究从碳排放的影响因素出发,分析路网与碳排放之间的影响途径,如 Xie 等<sup>[11]</sup>研究表明,路网的人口规模效应有利于减少碳排放,而其经济增长和技术创新效应则增加了碳排放;Xiao 等<sup>[14]</sup>研究表明,旅游流动性和产业集聚是交通基础设施间接影响碳排放的两个重要中介因素.发达的路网可以减少碳排放,但路网与碳排放之间的联系却是非线性和内生的.现有研究尺度多为省、市等行政区划尺度<sup>[11-12]</sup>,对路网与碳排放之间的空间特征描述不足<sup>[15]</sup>,主要集中在单个城市或国家区域<sup>[16-17]</sup>,缺乏在相对精细尺度下,对城市群路网与碳排放之间时空特征及变化机理的深入探讨.本文以长三角为例,在格网尺度下对路网密度与碳排放的时空特征及耦合协调特征进行研究.

# 1 研究区概况与数据来源

## 1.1 研究区概况

长三角包括江苏省的南京市、无锡市、常州市、苏州市、南通市、扬州市、镇江市、盐城市、泰州市 9 市,浙江省的杭州市、宁波市、湖州市、嘉兴市、绍兴市、金华市、舟山市、台州市 8 市,安徽省的合肥市、芜湖市、马鞍山市、铜陵市、安庆市、滁州市、池州市、宣城市 8 市,以及上海市,26 市总面积约 21 万 km<sup>2</sup>.

长三角位于亚热带季风气候区,降水充沛,水系覆盖广,北部以平原地形为主,各类产业发达,南部以山地丘陵为主,自然资源丰富.土地利用类型以耕地、林地为主,水域和建设用地区次之,草地和未利用地较少.

长三角是我国经济最发达的地区之一,路网覆盖广度、扩张速度显著高于国家平均水平.在国家新型城镇化规划(2014—2020 年)对交通运输网络的多个层次要求下,长三角路网密度迅速增加,城乡交通一体化发展迅速,城镇化水平持续提高、发展趋于协调<sup>[18]</sup>,但新型城镇化也将对环境质量和脱碳计划、污染控制及气候行动计划的预期激励措施施加进一步压力<sup>[19]</sup>.

## 1.2 数据来源

以长三角 26 市为研究对象,研究时段为新型城镇化规划期间(2014—2020 年),研究数据均来自于国内外公开数据库.数据来源及说明,如表 1 所示.构建 3 km×3 km 大小的格网作为数据处理和分析的单元,各类数据的处理过程如下:土地利用类型根据国家标准 GB/T 21010—2017《土地利用现状分类》及研究区实际情况,重分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和其他土地,共 6 类.

在综合考虑道路通行量、低级路网的准确性等因素的基础上,提取高速公路、城市主干道、城市次干道的路网数据,通过核密度法计算路网密度,并利用自然断点法将路网密度分为 6 个等级;夜间灯光数据采用中值滤波与低阈值去噪结合的方法进行处理.所有地图数据均通过 ArcGIS 投影为 albert 坐标,

重采样大小为 3 km,并将数据统一提取至格网中.

表 1 数据来源及说明  
Tab.1 Data source and description

数据类型	数据来源	数据精度	数据用途
土地利用数据	武汉大学遥感与信息工程学院的 30 m 土地覆盖数据集 ( <a href="https://zenodo.org/record/5210928#.Y2t2uXZByMp">https://zenodo.org/record/5210928#.Y2t2uXZByMp</a> )	30 m×30 m	直接碳排放计算
路网数据	众源数据集 OpenStreetMap( <a href="https://www.openstreetmap.org/">https://www.openstreetmap.org/</a> )	—	路网密度计算
夜间灯光数据	美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的 重要的卫星系统(NPP VIIRS)卫星数据集的稳定灯光数据 ( <a href="https://eogdata.mines.edu/products/vnl/">https://eogdata.mines.edu/products/vnl/</a> )	500 m×500 m	间接碳排放空间化
人口数据	美国能源部橡树岭国家实验室(ORNL)的 LandScan 数据集 ( <a href="https://landscan.ornl.gov/">https://landscan.ornl.gov/</a> )	1 km×1 km	人均碳排放 强度计算
能源数据	《中国能源统计年鉴》	—	间接碳排放计算

## 2 研究方法

### 2.1 路网密度的计算

路网密度一般采用路网总长除以土地面积的计算方法,但该方法易受分析单元大小、位置和方向等因素影响,出现不同程度的任意性<sup>[20]</sup>.在栅格、格网等小尺度下,核密度(KDE)法能够输出平滑的密度表面,提供更具一致性的分析结果.因此,路网密度采用 KDE 法进行计算.

设  $x_1, x_2, \cdots, x_n$  是从分布密度函数为  $f(x)$  的总体中抽取的独立同分布样本<sup>[21]</sup>,则有

$$f_n(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n k\left(\frac{x-x_i}{h}\right).$$

式中: $k()$ 为核函数; $h$ 为带宽, $h>0$ ; $x-x_i$ 为估计点到样本  $x_i$  处的距离.

在 KDE 法中,带宽  $h$  的大小会影响计算结果, $h$  越大,估计点与周围点的重复面积就越大,空间上点密度的整体变化就越平滑,结构上点密度被掩盖的程度就越高.通过分析比较不同带宽的核密度曲线,将带宽定为 4 km.

### 2.2 碳排放的测算

2.2.1 直接碳排放的计算 直接碳排放的计算公式为

$$E_D = \sum E_{s,i} = \sum s_i \cdot \delta_i.$$

式中: $E_D$  为直接碳排放; $E_{s,i}$  为第  $i$  种土地利用方式产生的碳排放; $s_i$  为第  $i$  种土地利用方式的利用面积; $\delta_i$  为第  $i$  种土地利用方式的碳排放系数.

各种土地覆被的碳排放系数,如表 2 所示.表 2 中: $\delta_a$  为耕地碳排放系数; $\delta_l$  为林地碳排放系数; $\delta_g$  为草地碳排放系数; $\delta_w$  为水域碳排放系数; $\delta_u$  为未利用地碳排放系数.

表 2 各种土地覆被的碳排放系数  
Tab.2 Carbon emission coefficients of each land cover

碳排放系数/ $\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$	参数值	文献来源	取值
$\delta_a$	0.042 2	文献[22]	0.046 0
	0.049 7	文献[23]	
$\delta_l$	−0.581 0	文献[24]	−0.581 0
$\delta_g$	−0.021 0	文献[25]	−0.021 0
$\delta_w$	−0.024 8	文献[26]	−0.025 3
	−0.025 7	文献[27]	
$\delta_u$	−0.000 5	文献[26]	−0.000 5

2.2.2 间接碳排放的测算 间接碳排放的计算公式为

$$E_I = \sum E_i = \sum_{i=1}^n Y_i \cdot \theta_i \cdot f_i.$$

式中: $E_I$  为间接碳排放; $E_i$  为第  $i$  类能源消耗产生的碳排放; $Y_i$  为第  $i$  类能源的消耗量; $\theta_i$  为  $i$  类能源的

折标准煤系数; $f_i$  为第  $i$  类能源消耗碳排放转换系数.

能源消耗数据主要参考《中国能源统计年鉴》,能源折标准煤系数和能源碳排放系数主要参考政府间气候变化专门委员会(IPCC)标准,如表 3 所示.

表 3 能源的折标准煤系数及碳排放系数  
Tab. 3 Conversion standard coal coefficients and carbon emission coefficients of energy

指标	原煤	焦炭	汽油	煤油	柴油	燃料油	液化石油气	天然气	电力
$\theta$	0.714 3	0.971 4	1.471 4	1.471 4	1.457 1	1.428 6	1.714 3	1.214 3	0.404 0
$\delta$	0.755 9	0.855 0	0.553 8	0.571 4	0.592 1	0.618 5	0.504 2	0.448 3	0.793 5

2.3 碳排放空间化模型

鉴于夜间灯光强度与能源消耗碳排放有较好的相关性<sup>[28-29]</sup>,以无截距的线性模型为基础<sup>[30]</sup>,分别计算各省级行政区、各时相的转换系数( $K$ ),结合《中国能源统计年鉴》,计算碳排放,再裁剪得到研究区碳排放数据. $K$  的相关计算公式为

$$\left. \begin{aligned} Y_{n,t} &= K_{n,t} \times \text{SDN}_{n,t}, \\ \text{SDN}_{n,t} &= \sum D_i \times J_i. \end{aligned} \right\}$$

式中: $Y_{n,t}$  为第  $n$  个省级行政区的第  $t$  个时相的能源消耗量; $K_{n,t}$  为第  $n$  个省级行政区的第  $i$  个时相的转换系数; $\text{SDN}_{n,t}$  为第  $n$  个省级行政区的第  $t$  个时相的稳定夜间灯光数据值; $D_i$  为稳定夜间灯光影像第  $i$  个像元值; $J_i$  代表第  $i$  个像元值所对应的个数.

2014 年、2020 年各省级行政区指标,如表 4 所示.

表 4 各省级行政区指标  
Tab. 4 Indicators of each provincial administrative region

指标	浙江		安徽省		江苏省		上海市	
	2014 年	2020 年	2014 年	2020 年	2014 年	2020 年	2014 年	2020 年
SDN	16 644	28 791	7 390	14 053	25 126	38 063	9 989	11 717
Y/万 t	5 013.75	5 111.64	4 743.47	5 190.45	8 546.13	9 297.64	3 432.56	3 096.06
K	0.301 235	0.177 543	0.641 876	0.369 348	0.340 131	0.244 270	0.343 634	0.264 237

2.4 耦合协调模型

耦合协调模型可测度两个或两个以上系统之间相互作用程度,在地学研究中,一般使用表征多系统之间离差公式计算耦合度<sup>[31]</sup>,即

$$C = \left[ \frac{U_1 U_2 U_3 U_4}{\left( \frac{U_1 + U_2 + U_3 + U_4}{4} \right)^4} \right]^{\frac{1}{4}}.$$

式中: $C$  为耦合度; $U_1 \sim U_4$  分别表示耦合分析采用的各指标,由原始数据经极差法标准化得到.

正向指标为

$$x_i' = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}.$$

负向指标为

$$x_i' = \frac{x_{\max} - x_i}{x_{\max} - x_{\min}}.$$

式中: $x_i'$  为各类数据中的  $i$  个  $x_i$  经极差法标准化的数据; $x_{\max}$  为最大数据; $x_{\min}$  为最小数据.  
为更好反映各网格之间的协调发展程度,在耦合度模型的基础上建立耦合协调度模型<sup>[32]</sup>,有

$$C_T = \alpha U_1 + \beta U_2 + \gamma U_3 + \eta U_4, \quad C_x = \sqrt{C C_T}.$$

式中: $C_T$  为协调度; $\alpha, \beta, \gamma, \eta$  分别为各指标对应的各系统权重; $C_x$  为耦合协调度.

选用土地利用强度、路网密度、直接碳排放和间接碳排放为分析指标. 其中,土地利用程度、路网密度为正向指标,直接碳排放和间接碳排放为负向指标. 在 SPSSau 环境下,采用独立性权重确定各时相各成分的系统权重. 各指标权重,如表 5 所示. 表 5 中: $D_{RN}$  为路网密度; $R$  为复相关系数; $1/R$  为复相关系数倒数.

表 5 各指标权重  
Tab. 5 Weights of each index

年份	指标	$R$	$1/R$	权重
2014 年	土地利用程度	0.940	1.064	0.220 5
	$D_{RN}$	0.725	1.380	0.286 0
	$E_1$	0.773	1.293	0.268 1
	$E_D$	0.919	1.088	0.225 4
2020 年	土地利用程度	0.939	1.065	0.232 3
	$D_{RN}$	0.827	1.209	0.263 6
	$E_1$	0.824	1.214	0.264 7
	$E_D$	0.911	1.098	0.239 4

参考文献[33-35],将耦合度和耦合协调度分为 4 个阶段,耦合协调度等级划分,如表 6 所示.

表 6 耦合协调度等级划分  
Tab. 6 Classification of coupling coordination degrees

$C$	协调阶段	$C_x$	协调等级
$0 \leq C < 0.3$	分离阶段	$0 \leq C_x < 0.3$	低度协调
$0.3 \leq C < 0.5$	拮抗阶段	$0.3 \leq C_x < 0.5$	中度协调
$0.5 \leq C < 0.8$	磨合阶段	$0.5 \leq C_x < 0.8$	高度协调
$0.8 \leq C < 1.0$	耦合阶段	$0.8 \leq C_x < 1.0$	极度协调

3 结果分析

3.1 城市群碳排放空间格局

按自然间断点的分类方法,将碳排放由小到大分为 0~5 级,共 6 级.碳排放空间分布,如图 1 所示.由图 1 可知:在时空特征上,碳源主要为沿湖沿江的都市功能发达区,上海市位于长江出海口,苏州市、潮州市背靠太湖、合肥省临近巢湖,常州市处于江湖之间,宁波市、台州市沿海存有港口.碳汇主要为长江、新安江水域及南部林地区,如太湖、巢湖、安庆市西北部的大别山林地、安庆市—杭州市一线以南的大面积林地地区.随着新型城镇化进程的推进,上海市、嘉兴市、宁波市、杭州市等中心城市的城市核心区碳排放明显下降,而盐城市、池州市等次中心城市的乡镇、城镇地区碳排放略有增加.

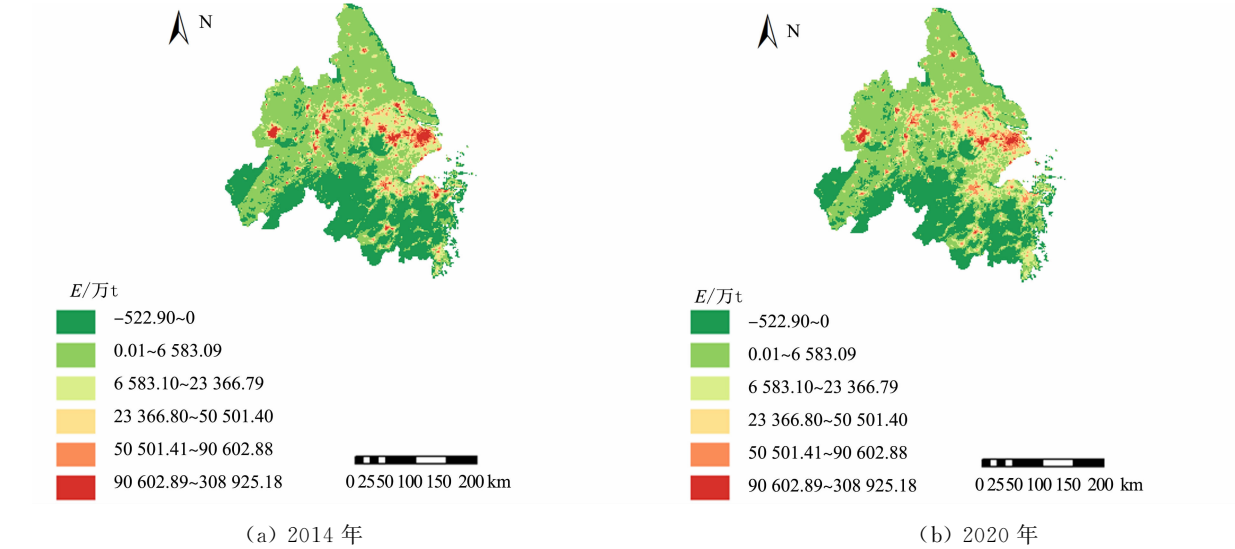


图 1 碳排放空间分布  
Fig. 1 Spatial distribution of carbon emission

6 级碳排放变化情况,如表 7 所示.表 7 中: $E_{a,s}$  为单位面积碳排放; $E$  为总碳排放; $\eta$  为变化率.由表 7 可知:长三角呈现 0,5 级碳排放区域面积减少,排放(吸收)总量降低,而 1~4 级碳排放区域面积增加,排放总量上升的变化特征;在空间上表现为碳源区挤占碳汇区,高值区的碳排放分散到低值区的变

化趋势. 这是各省市环境规制成效显著,城镇化进程稳定推进的综合结果.

表 7 6 级碳排放变化情况

Tab. 7 Change situations of grade 6 carbon emissions

碳排放 级别	网格数			$E_{a,s}/t$			$E/万 t$		
	2014 年	2020 年	$\eta/\%$	2014 年	2020 年	$\eta/\%$	2014 年	2020 年	$\eta/\%$
0 级	8 638	7 705	-10.80	-359.64	-366.91	2.02	-310.66	-282.70	-9.00
1 级	11 189	11 574	3.44	1 054.66	1 153.92	9.41	1 180.06	1 335.55	13.18
2 级	2 629	3 159	20.16	12 096.43	12 562.06	3.85	3 180.15	3 968.35	24.79
3 级	1 110	1 200	8.11	33 544.02	34 966.13	4.24	3 723.39	4 195.94	12.69
4 级	726	838	15.43	67 320.11	68 113.07	1.18	4 887.44	5 707.88	16.79
5 级	451	267	-40.80	126 866.00	116 080.10	-8.50	5 721.65	3 099.34	-45.83

上海市早在 2008 年就开始实施工业节能政策,“十三五”期间确立了工业领域节能“双控”目标,2017 年 5 月扩大了政策扶持范围、提高了补贴标准. 江苏省于 2016 年 1 月实施《循环经济促进条例》,2017 年 5 月发布政策法规推进燃煤电厂的升级改造. 浙江省于 2015 年 9 月提出加强节能标准化工作目标,2016 年 9 月着手推进百万家庭屋顶光伏工程建设. 安徽省编制的《安徽省新型城镇化发展规划(2016—2025 年)》强调绿色发展和生态保护. 在国家新型城镇化规划(2014—2020 年)期间,我国城市规模结构持续改善、城乡居民收入差距持续缩小. 在各省市环境规制和国家新型城镇化规划的推动下,长三角产业聚集的中心城市地区碳排放下降,而多个乡镇地区碳排放增加.

3.2 城市群碳排放效应分析

6 级路网密度区域碳排放特征,如表 8 所示. 表 8 中: $E_{a,p}$  为 人均碳排放; $D_p$  为 人口密度.

表 8 6 级路网密度区域碳排放特征

Tab. 8 Carbon emission characteristics of grade 6 road network density areas

年份	指标	路网密度区域级别					
		1 级	2 级	3 级	4 级	5 级	6 级
2014 年	网格数	15 860	6 492	1 780	402	164	45
	$E_{a,s}/t \cdot km^{-2}$	134.64	971.17	3 661.12	7 532.25	11 126.35	13 674.75
	$D_p/人 \cdot km^{-2}$	259.04	738.98	1 945.94	4 563.42	9 942.84	18 128.18
	$E_{a,p}/t \cdot 人^{-1}$	0.52	1.31	1.88	1.65	1.12	0.75
2020 年	网格数	9 723	9 359	3 598	1 359	548	156
	$E_{a,s}/t \cdot km^{-2}$	42.83	322.14	1 523.44	4 273.46	7 544.97	10 698.96
	$D_p/人 \cdot km^{-2}$	183.68	456.03	1 097.96	2 255.43	4 344.68	11 048.84
	$E_{a,p}/t \cdot 人^{-1}$	0.23	0.71	1.39	1.89	1.74	0.97

由表 8 可知以下 2 点结论.

1) 长三角的碳排放呈现明显的路网密度区域空间分异, $E_{a,s}$  与  $D_{RN}$  呈明显的正相关. 2014 年, $E_{a,s}$  在 1 级路网密度区域仅为  $134.64 t \cdot km^{-2}$ ,而在 6 级路网密度区域则达到  $13 674.75 t \cdot km^{-2}$ ;  $E_{a,p}$  与  $D_{RN}$  呈倒 U 型曲线关系,2014 年,1 级路网密度区域  $E_{a,p}$  为  $0.52 t \cdot 人^{-1}$ ,在 3 级路网密度区域上升至最高点  $1.88 t \cdot 人^{-1}$ ,随后回落至 6 级路网密度区域的  $0.75 t \cdot 人^{-1}$ ;  $D_p$  与  $D_{RN}$  也呈现明显的正相关,  $D_{RN}$  越高,  $D_p$  就越高,呈加速上升趋势,2014 年,1 级路网密度区域人口密度仅为  $259.04 人 \cdot km^{-2}$ ,而 6 级路网密度区域则达到  $18 128.18 人 \cdot km^{-2}$ .

2) 2014 年、2020 年,长三角交通格局显著变化,路网明显密集化,各密度区域面积发生较大变动而影响碳排放和人口密度的空间分异特征. 2020 年相比于 2014 年,各级路网密度区域的  $E_{a,s}$  和  $D_p$  均减少,  $E_{a,s}$  的减少幅度逐级降低,在 68.19%至 21.76%之间;人口密度的减少幅度先增后降,从 1 级路网密度区域的 35.63%上升至 5 级路网密度区域的 56.30%,再下降到 39.05%;  $E_{a,p}$  在 1~3 级路网密度区域减少,在 4~6 级路网密度区域上升.

直接碳排放与间接碳排放变化累加,如图 2 所示. 图 2 中: $sum(\Delta E_D)$  为直接碳排放变化累加值;  $sum(\Delta E_I)$  为间接碳排放变化累加值. 由图 2 可知:间接碳排放下降的拐点出现在  $1.04 km \cdot km^{-2}$  处(前 6.7%),碳排放累计增长 1 302 万 t;直接碳排放下降的拐点出现在  $0.65 km \cdot km^{-2}$  处(前 14.3%),

碳排放增长 9.35 万 t; 在  $2.07\text{ km}\cdot\text{km}^{-2}$  处(前 1.7%)出现平稳点, 下降趋缓.

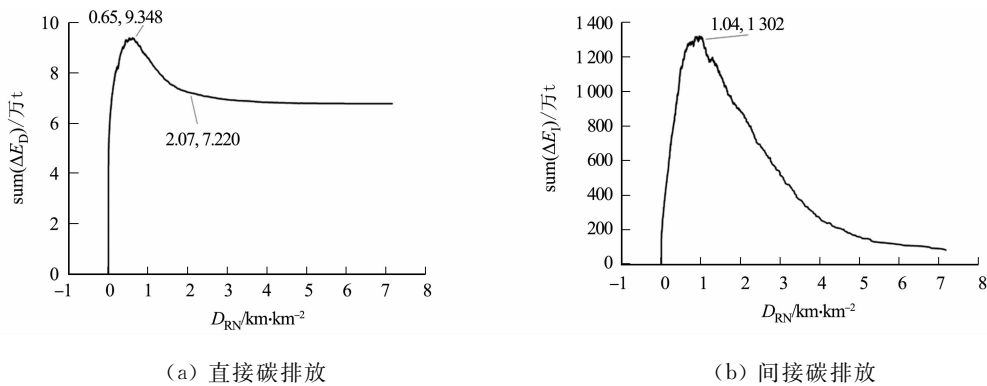


图 2 直接碳排放与间接碳排放变化累加值

Fig. 2 Accumulated values of change in direct and indirect carbon emission

3.3 耦合协调分析

3.3.1 不同耦合度的时空演化 不同耦合度的空间分布, 如图 3 所示.

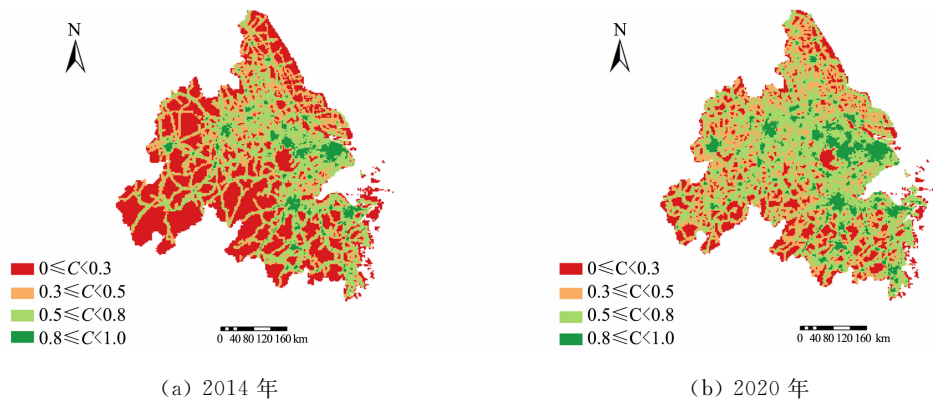


图 3 不同耦合度的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of different coupling degrees

由图 3 可知以下 2 点结论.

1) 在空间维度上, 耦合度高值区主要分布在都市功能发达的地区, 如合肥省的庐阳区、蜀山区, 南京市的鼓楼区、玄武区, 常州市的天宁区、武进区, 无锡市的江阴市、锡山区, 苏州市的姑苏区、吴中区, 上海市的浦东新区、杨浦区, 杭州市的拱墅区、上城区, 宁波市的鄞州区、海曙区, 金华市的义乌县级市, 马鞍山市的雨山区. 耦合度低值区主要分布在太湖、巢湖、高邮湖等湖泊水库地区, 安庆市、池州市、铜陵市、宣城市一带的山地丘陵地区及各种自然保护区及风景区地带, 大致呈现“东高西低”、“中高南北低”的分布特征.

2) 从时间维度上, 耦合度高值区以圈层的形式向外扩散, 影响范围逐渐增大, 呈现耦合度高值区以各大城市地区为中心向周边扩张的发展态势. 2014 年, 处于分离阶段和拮抗阶段的地区较多, 分别占比 42.64%, 24.14%, 处于磨合阶段和耦合阶段的地区相对较少, 比例分别为 28.79%, 4.43%. 自 2010 年长三角区域规划实施以来, 土地的开发利用和交通运输路线的建设势头迅猛, 城市的建设和发展提高了长三角的能源消费, 但更密集的道路网络则一定程度减少了碳排放, 使得长三角整体的耦合水平上升、达到耦合阶段的地区范围扩大. 与 2014 年相比, 2020 年处于分离和拮抗阶段的比例分别为 19.52%, 29.67%, 处于磨合阶段和耦合阶段的比例升高至 41.79%, 9.01%.

自 2010 年长三角区域规划落地以来, 长三角便确立了加快城市同城化效应和一体化进程, 从而带动区域产业的发展和调整的整体方针. 2012 年, 长三角明确推动道路运输一体化发展的政策方向, 2014 年, 提出“形成‘多三角、放射状’大交通联动发展格局”的目标. 长三角道路的发展对耦合度的提升是显著的, 大量分离、拮抗阶段的区域因路网密度的提高而带动了当地产业的发展, 直接、间接碳排放的增加一定程度抑制了耦合程度的提高, 但耦合度整体仍上升. 路网密度的提高也促进了处于磨合、耦合



阶段区域的产业调整,使得区域间接碳排放明显下降,耦合度提高.长三角的耦合系统逐渐向有序、协调的耦合阶段迈进.

3.3.2 耦合协调度的时空演化 不同耦合协调度的空间分布,如图 4 所示.

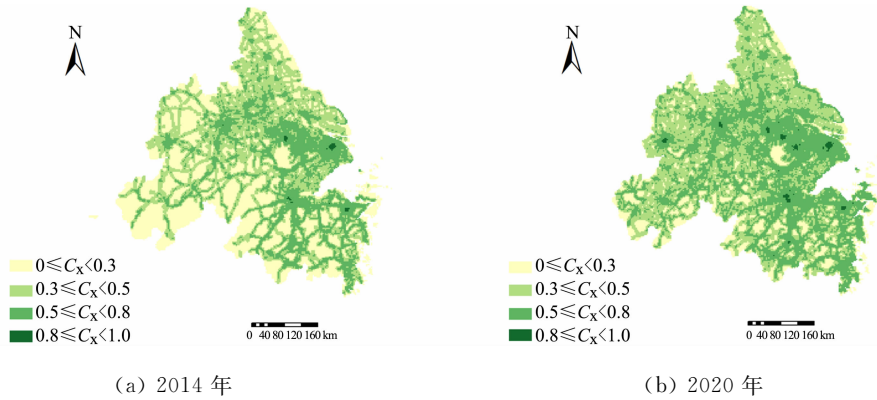


图 4 不同耦合协调度的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of different coupled coordination degrees

由图 4 可知如下 2 点结论.

1) 在空间维度上,耦合协调度高值区主要分布在上海市黄浦区、普陀区、徐汇区、长宁区,无锡市梁溪区,杭州市拱墅区和宁波市海曙区等地,以耦合协调度高值区为中心逐渐向外扩散,呈现“东高西低”、“中高南北低”的分布特征.

2) 在时间维度上,长三角的耦合协调度大幅上升,平均水平从 0.3518 上升至 0.4580,呈现大量低度协调、中度协调区向更高一级转变,而高度协调区转变为极度协调区的比例却较少的特征. 2014 年,长三角大部分地区处于低度、中度协调状态,占比分别为 36.09%,37.96%,处于高度协调状态的地区也有较大的比例 25.74%,但极度协调地区的比例仅有 0.22%. 2020 年,低度协调地区的比例大幅下降,变为 13.26%,而中度、高度协调地区比例较大幅度上升,分别上升为 44.40%和 41.77%,极度协调地区比例小幅上升为 0.58%. 2020 年相比于 2014 年,低度协调区有 49.67%的比例转变为中度协调,中度协调区有 30.73%的比例转变为高度协调,而高度协调区仅有 1.41%转变为极度协调,落差较大.

我国自 2001 年以来陆续开展低碳试点工作,为低碳经济的发展积累经验. 2013 年末,上海市建立碳排放配额管理制度并启动碳排放交易,管理企业碳排放配额的分配、清缴、交易等活动,规范企业碳排放的监测、报告、核查等活动. 2017 年末,全国碳排放交易体系正式启动. 2018 年,全球生态环境遥感监测报告显示我国碳排放增速逐渐降低. 在交通一体化发展的前提和低碳政策、碳排放市场两方面的调控和管理下,长三角地区产业转移升级规模逐渐扩大,产业结构持续优化,大量待发展地区的开发和发展得到转移产业的经济支持,上海市、杭州市等中心城市地区的碳排放则得到一定的缓解,使得长三角逐渐向更加协调的方向发展. 耦合协调度高值区面积较小,仅分布于上海市黄浦区、普陀区、徐汇区、长宁区,无锡市梁溪区,杭州市拱墅区和宁波市海曙区等少数区域,低值区同样为各类碳源地.

4 结论

1) 时空特征上,碳源主要为沿湖沿江地带的都市功能发达区,如上海市、苏州市、合肥市、常州市、宁波市、碳汇主要为长江、新安江水域及南部林地聚集区,如太湖、巢湖、安庆市西北部的大别山林地、安庆市—杭州市一线以南的大面积林地地区. 呈现碳源区挤占碳汇区,碳排放逐渐分散化的趋势.

2) 单位面积碳排放与路网密度呈明显的正相关,人均碳排放与路网密度呈倒 U 型曲线关系. 在时间维度上,间接碳排放下降的拐点出现在  $1.04 \text{ km} \cdot \text{km}^{-2}$  处(前 6.7%),碳排放增长 1302 万 t;直接碳排放下降的拐点出现在  $0.65 \text{ km} \cdot \text{km}^{-2}$  处(前 14.3%),碳排放增长 9.35 万 t.

3) 长三角路网密度与城市群碳排放耦合协调的时空特征差异有统计学意义,耦合度和耦合协调度整体上升,空间上呈现“东高西低”、“中高南北低”的分布特征,时间上呈现高值区以各大城市地区为中心向周边扩张的发展态势. 其中,耦合度高值区主要分布在都市功能发达的合肥市、南京市、常州市、上



海市等地,耦合度低值区主要分布在太湖、巢湖、高邮湖等湖泊水库地区,安庆、池州、铜陵、宣城一带的山地丘陵地区及各种自然保护区及风景区地带。

## 参考文献:

- [1] 冯志新,陈颖彪,千庆兰,等. 东莞市交通路网格局对城市空间扩张影响研究[J]. 地球信息科学学报,2014,16(1): 79-86. DOI:10.3724/SP.J.1047.2014.00079.
- [2] KASRAIAN D, MAAT K, STEAD D, *et al.* Long-term impacts of transport infrastructure networks on land-use change: An international review of empirical studies[J]. *Transport Reviews*, 2016, 36(6): 772-792. DOI:10.1080/01441647.2016.1168887.
- [3] 龙雪琴,关宏志. 基于交通方式出行距离需求的网格状城市道路级配[J]. 北京工业大学学报,2012,38(2):262-268. DOI:10.11936/bjutxb2012020262.
- [4] SONG Malin, WANG Shuhong, FISHER R. Transportation, iceberg costs and the adjustment of industrial structure in China[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2014, 32: 278-286. DOI:10.1016/j.trd.2014.08.005.
- [5] HERRENDORF B, SCHMITZ J, TEIXEIRA A. The role of transportation in US economic development: 1840—1860[J]. *International Economic Review*, 2012, 53(3): 693-716. DOI:10.1111/j.1468-2354.2012.00697.x.
- [6] 蔡军,程茂春,朱峰杰. 路网规划关键指标对开发强度的影响作用分析: 以国内外 24 个 CBD 为例[J]. 城市规划学刊,2017(1):79-88. DOI:10.16361/j.upf.201701010.
- [7] SREELEKHA M G, KRISHNAMURTHY K, ANJANEYULU M V L R. Interaction between road network connectivity and spatial pattern[J]. *Procedia Technology*, 2016, 24: 131-139. DOI:10.1016/j.protcy.2016.05.019.
- [8] ZHANG Xueliang. Has transport infrastructure promoted regional economic growth: With an analysis of the spatial spillover effects of transport infrastructure[J]. *Social Sciences in China*, 2013, 34(2): 24-47. DOI:10.1080/02529203.2013.787222.
- [9] ZENG Chen, ZHAO Zhe, WEN Cheng, *et al.* Effect of complex road networks on intensive land use in China's Beijing—Tianjin—Hebei urban agglomeration[J]. *Land*, 2020, 9(12): 532. DOI:10.3390/land9120532.
- [10] OU Jinpei, LIU Xiaoping, LI Xia, *et al.* Quantifying the relationship between urban forms and carbon emissions using panel data analysis[J]. *Landscape Ecology*, 2013, 28(10): 1889-1907. DOI:10.1007/s10980-013-9943-4.
- [11] XIE Rui, FANG Jiayu, LIU Cenjie. The effects of transportation infrastructure on urban carbon emissions[J]. *Applied Energy*, 2017, 196: 199-207. DOI:10.1016/j.apenergy.2017.01.020.
- [12] CHEN Xu, XU Huilin, ZHANG Liang, *et al.* Spatial functional division, infrastructure and carbon emissions: Evidence from China[J]. *Energy*, 2022, 256: 124551. DOI:10.1016/j.energy.2022.124551.
- [13] WANG Shaojian, LIU Xiaoping, ZHOU Chunshan, *et al.* Examining the impacts of socioeconomic factors, urban form, and transportation networks on CO<sub>2</sub> emissions in China's megacities[J]. *Applied Energy*, 2017, 185: 189-200. DOI:10.1016/j.apenergy.2016.10.052.
- [14] XIAO Fanyu, PANG Zhengqi, YAN Dan, *et al.* How does transportation infrastructure affect urban carbon emissions? An empirical study based on 286 cities in China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(4): 10624-10642. DOI:10.1007/s11356-022-22866-4.
- [15] LIN Boqiang, CHEN Yu. Will land transport infrastructure affect the energy and carbon dioxide emissions performance of China's manufacturing industry? [J]. *Applied Energy*, 2020, 260: 114266. DOI:10.1016/j.apenergy.2019.114266.
- [16] DZATOR M, ACHEAMPONG A O, DZATOR J. Does transport infrastructure development contribute to carbon emissions? Evidence from developing countries[M]//SINGH P, *et al.* *Environmental Sustainability and Economy*. Holland: Elsevier, 2021: 19-33.
- [17] WEI Ting, CHEN Shaoqing. Dynamic energy and carbon footprints of urban transportation infrastructures: Differentiating between existing and newly-built assets[J]. *Applied Energy*, 2020, 277: 115554. DOI:10.1016/j.apenergy.2020.115554.
- [18] 唐健雄,何庆,刘雨婧. 长三角城市群城镇化质量与规模的时空错位及影响因素分析[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2022, 56(4): 703-716. DOI:10.19603/j.cnki.1000-1190.2022.04.020.
- [19] CHESHMEHANGI A. China's New-type urbanisation plan (NUP) and the foreseeing challenges for decarboniza-

tion of cities: A review[J]. Energy Procedia, 2016, 104: 146-152. DOI: 10. 1016/j. egypro. 2016. 12. 026.

[20] BORRUSO G. Network density and the delimitation of urban areas[J]. Transactions in GIS, 2003, 7(2): 177-191. DOI: 10. 1111/1467-9671. 00139.

[21] SHI Xun. Selection of bandwidth type and adjustment side in kernel density estimation over inhomogeneous backgrounds[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(5): 643-660. DOI: 10. 1080/13658810902950625.

[22] 李颖, 黄贤金, 甄峰. 江苏省区域不同土地利用方式的碳排放效应分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(增刊 2): 102-107.

[23] 石洪昕, 穆兴民, 张应龙, 等. 四川省广元市不同土地利用类型的碳排放效应研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(3): 101-106.

[24] 肖红艳, 袁兴中, 李波, 等. 土地利用变化碳排放效应研究: 以重庆市为例[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2012, 29(1): 38-42. DOI: 10. 11721/cqnj20120107.

[25] FANG Jingyun, YANG Yuanhe, MA Wenhong, *et al.* Ecosystem carbon stocks and their changes in China's grasslands[J]. Science China Life Sciences, 2010, 53(7): 757-765. DOI: 10. 1007/s11427-010-4029-x.

[26] 赖力. 中国土地利用的碳排放效应研究[D]. 南京: 南京大学, 2010.

[27] 段晓男, 王效科, 逯非, 等. 中国湿地生态系统固碳现状和潜力[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 463-469. DOI: 10. 3321/j. issn: 1000-0933. 2008. 02. 002.

[28] 李峰, 刘小阳, 刘军, 等. 夜间灯光数据下河北省能源消费量的空间模拟[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2017, 30(1): 92-96. DOI: 10. 3969/j. issn. 1003-0972. 2017. 01. 020.

[29] 吴健生, 牛妍, 彭建, 等. 基于 DMSPs 夜间灯光数据的 1995—2009 年中国地级市能源消费动态[J]. 地理研究, 2014, 33(4): 625-634. DOI: 10. 11821/dlyj201404003.

[30] 顾羊羊, 乔旭宁, 樊良新, 等. 夜间灯光数据的区域能源消费碳排放空间化[J]. 测绘科学, 2017, 42(2): 140-146. DOI: 10. 16251/j. cnki. 1009-2307. 2017. 02. 027.

[31] 丛晓男. 耦合度模型的形式、性质及在地理学中的若干误用[J]. 经济地理, 2019, 39(4): 18-25. DOI: 10. 15957/j. cnki. jjdl. 2019. 04. 003.

[32] 张玉萍, 瓦哈甫, 哈力克, 等. 吐鲁番旅游-经济-生态环境耦合协调发展分析[J]. 人文地理, 2014, 29(4): 140-145.

[33] 田泽, 景晓栋, 肖钦文. 长江经济带碳排放-产业结构-区域创新耦合度及时空演化[J]. 华东经济管理, 2020, 34(2): 10-17. DOI: 10. 19629/j. cnki. 34-1014/f. 190904013.

[34] 赵荣钦, 李志萍, 韩宇平, 等. 区域“水-土-能-碳”耦合作用机制分析[J]. 地理学报, 2016, 71(9): 1613-1628. DOI: 10. 11821/dlxb201609012.

[35] 张旺, 周跃云, 胡光伟. 超大城市“新三化”的时空耦合协调性分析: 以中国十大城市为例[J]. 地理科学, 2013, 33(5): 562-569. DOI: 10. 13249/j. cnki. sgs. 2013. 05. 007.

[36] ZHANG Ning, YU Keren, CHEN Zhongfei. How does urbanization affect carbon dioxide emissions? : Across-country panel data analysis[J]. Energy Policy, 2017, 107: 678-687. DOI: 10. 1016/j. enpol. 2017. 03. 072.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 刘源岗)