

DOI: 10.5846/stxb202112023406

滕菲,王艳军,王孟杰,李少春,林云浩,蔡恒藩.长三角城市群城市空间形态与碳收支时空耦合关系.生态学报,2022,42(23):9636-9650.

Teng F, Wang Y J, Wang M J, Li S C, Lin Y H, Cai H F. Spatiotemporal coupling relationship between urban spatial morphology and carbon budget in Yangtze River Delta urban agglomeration. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23):9636-9650.

长三角城市群城市空间形态与碳收支时空耦合关系

滕 菲^{1,2,3}, 王艳军^{1,2,3,*}, 王孟杰^{1,2,3}, 李少春^{1,2,3}, 林云浩^{1,2,3}, 蔡恒藩^{1,2,3}

1 湖南科技大学测绘遥感信息工程湖南省重点实验室,湘潭 411201

2 湖南科技大学地理空间信息技术国家地方联合工程实验室,湘潭 411201

3 湖南科技大学地球科学与空间信息工程学院,湘潭 411201

摘要:区域碳收支动态监测与评估是推动城市群低碳发展和碳达峰的关键基础问题。设计和分析了长三角城市群区域碳收支与城市空间形态的时空耦合关系。基于 2001、2005 和 2010 年碳排放、净初级生产力、土地利用和土壤等数据构建了长三角城市群区域碳收支的时空分布估算模型,接着利用地理加权回归模型分析了城市空间形态景观格局指数与碳收支的相关性,最后结合地理探测器定量分析了景观格局指数因子对碳收支的影响及其交互作用。研究结果表明:(1)长三角城市群碳收支存在明显的空间异质性,总体呈现南部高,北部次之,东部低的特征;(2)同时,长三角城市群碳收支具有明显时间异质性,2001、2005 和 2010 年呈现减少的趋势,其中 2001—2005 年下降幅度较大;(3)斑块类型面积、城市斑块数量、最大斑块指数、景观形状指数与碳收支具有负相关性;边缘密度、城市建成区斑块密度与碳收支具有显著正相关性;(4)2001 年、2005 年和 2010 年的建成区总面积是碳收支空间异质性的主要驱动因素;斑块类型面积与其他因子的交互作用对碳收支空间异质性影响贡献程度比其他因子间交互作用较强。一定程度揭示了城市空间形态景观格局与碳收支时空分布的相关性,可为碳达峰/碳中和、城市形态优化等提供科学参考。

关键词:碳收支;城市形态;景观格局指数;地理加权回归;地理探测器

Spatiotemporal coupling relationship between urban spatial morphology and carbon budget in Yangtze River Delta urban agglomeration

TENG Fei^{1,2,3}, WANG Yanjun^{1,2,3,*}, WANG Mengjie^{1,2,3}, LI Shaochun^{1,2,3}, LIN Yunhao^{1,2,3}, CAI Hengfan^{1,2,3}

1 Hunan Provincial Key Laboratory of Geo-Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China

2 National-local Joint Engineering Laboratory of Geo-spatial Information Technology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China

3 School of Earth Science and Space Information Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China

Abstract: Dynamic monitoring and evaluation of regional carbon budget is a key and basic problem for promoting the low carbon development and carbon peak in urban agglomeration. It proposed and analyzed the spatiotemporal coupling relationship between regional carbon budget and urban spatial morphology in the Yangtze River Delta urban agglomeration. Firstly, based on the carbon emissions, net primary productivity, land use and soil data in 2001, 2005, and 2010, the spatiotemporal distribution estimation model of carbon budget in the Yangtze River Delta urban agglomeration was constructed. Then, the correlation between landscape pattern indices of urban spatial morphology and carbon budget was analyzed with the geographical weighted regression model. Finally, the influence of landscape pattern index factors on carbon budget and their interaction was quantitatively analyzed by geographical detector. The results show that: (1) the

基金项目:国家自然科学基金项目(41971423);湖南省自然科学基金项目(2020JJ3020);湖南省科技计划项目(2019RS2043,2019GK2132)

收稿日期:2021-12-03; **网络出版日期:**2022-07-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wongyanjun@163.com

carbon budget of Yangtze River Delta urban agglomeration presents obviously spatial heterogeneity, which is higher in the south of the urban agglomeration, followed by the north and lower in the east; (2) The carbon budget of Yangtze River Delta urban agglomeration also presents obviously temporal heterogeneity, showing a decreasing trend from 2001 to 2010 with a large decline from 2001 to 2005; (3) The area of patch type, the number of urban patches, the maximum patch index, and the landscape shape index are negatively correlated with carbon budget while edge density, urban built-up area patch density and carbon budget have significantly positive correlation; (4) The total built-up areas in 2001, 2005 and 2010 are the main driving factors for the spatial heterogeneity of carbon budget; the interaction between patch type area and other factors contributes more to the spatial heterogeneity of carbon budget than others. This paper reveals the correlation between landscape pattern indices of urban spatial morphology and spatiotemporal distribution of carbon budget, which can provide scientific reference for carbon peak/carbon neutralization and urban morphology optimization, etc.

Key Words: carbon budget; urban morphology; landscape pattern index; geographical weighted regression; geographical detector

自 21 世纪以来,全球城市化进程不断加快,大量温室气体不断排放到大气中,全球温室效应加剧,从而导致全球气候变暖,环境问题日益加重。IPCC 第五次评估报告指出,1880—2012 年全球平均气温上升了 0.65—1.06℃,人类活动对全球变暖影响的可能性“极高”(95%以上),其中主要因素是人类排放的温室气体^[1]。国际能源署统计数据表明,至 2018 年中国 CO₂ 排放量达 94.81 亿 t,占全球 CO₂ 排放总量的 28.61%,是世界第一大碳排放国^[2]。因此,减少碳排放强度,增加自然生态系统碳汇,成为保护生态环境、减缓气候变化的重要措施^[3]。碳收支是生态环境效益的重要指标之一,是全球气候变化研究的焦点问题和我国绿色发展战略的重要内容^[4],也关系到我国碳排放放在 2030 年达到峰值和在 2060 年前实现碳中和的实现路径。

在碳收支研究领域,大量关于碳循环、人为碳排放的研究已经展开,为碳收支平衡的定量研究和分析奠定了基础^[5-6]。现今关于碳收支估算模型的构建已有较多的研究成果,罗红等^[7]利用农作物、碳源因子与碳收支的相关性,采用参数估算法、IPCC 清单估算法对农业生产碳收支进行估算;童心华等^[8]采用面向对象分类方法提取研究区涉及碳收支能力的土地利用信息,同时结合碳收支系数确立专题性碳收支能力估算模型;蒋烨林等^[9]利用统计数据分析塔里木盆地碳收支状况,采用景观类型转移矩阵分析和探索景观格局演变对碳收支状况的影响。随着碳收支估算模型的成熟,已有部分研究对碳收支影响机制进行进一步的分析。

在碳收支影响因素或驱动因子研究方面,王刚等^[10]从县域层面研究碳收支空间分布,揭示了碳收支受土地利用强度、经济发展水平的影响。张海凤^[11]等分析了土地利用/覆被类型对陆地生态系统碳收支的影响。孙伟等^[12]从产业结构、土地利用格局、能源消费结构、人口规模方面研究碳收支平衡的空间差异。城市碳排放是影响城市碳收支平衡的关键因素,因此城市碳排放成为当前城市碳收支相关研究的关注重点,有学者从土地利用^[13-14]、能源消耗^[15-16]、交通运输^[17]、工业生产^[18]、居民消费^[19-20]等角度估算碳排放以及评估区域碳排放的差异和影响机制^[21-24]。城市形态反映了城市的交通路网,基础设施,功能区和人口等城市景观的空间组织形式,深刻影响着城市的碳排放和碳收支平衡,近年来,有许多学者从城市形态方面探索研究其与二氧化碳排放的空间关系^[25-32],Zuo^[25]采用了 Pearson 相关分析等方法研究景观格局指数与碳排放的相关性,陈珍启等^[26]利用回归模型分析城市空间格局等城市空间形态要素对城市碳排放的影响机制,Fang^[27]、Ou^[28]和余倩楠等^[29]采用面板数据分析方法量化了城市形态对二氧化碳排放的影响,Wang^[30]以中国 104 个地级市为样本,探讨了城市形态与碳排放之间的关系,Shi^[31]构建了城市空间形态指数与碳排放的关系模型,分析了不同角度的城市形态与碳排放的相关性,Ou^[32]考虑到不同城市发展水平,综合探讨了社会经济因素和城市形态共同影响碳排放的机制,但是城市空间形态与碳收支的时空关系和驱动影响还有待进一步研究。

上述研究多侧重于从城市形态方面定量分析碳排放、利用系数法或土地利用类型吸收碳能力不同来估算碳收支。鉴于此,本文以社会经济高速发展的长三角城市群为研究区域,结合 2001—2010 年间的碳排放数

据、NPP 数据等估算长三角城市群碳收支时空分布特征,探索不同城市形态景观格局和碳收支的时空关联,研究城市景观格局指数对碳收支时空分布的驱动影响及其交互作用关系,为城市形态优化、生态环境保护和低碳绿色城市发展提供基础支撑。

1 研究区域与数据源

1.1 研究区概况

长三角城市群位于中国长江的下游地区(图 1),濒临黄海与东海,范围包括上海市、浙江省、江苏省、安徽省全域,“三省一市”41 个城市,区域总面积 35.8 万 km²。长三角城市群作为我国经济发展最活跃、开放程度最高、创新能力最强的区域之一,以全国 3.74% 的国土面积和 16% 人口,创造了全国超过 1/5 的经济总量,国内生产总值(GDP)约为 23.49%^[33]。然而,随着经济的快速发展,城市化、工业化进程不断推进,使得长三角城市群能源消费迅速增加,导致碳排放量逐年增长,使得碳收支量下降,引发了气候变暖、海平面上升等环境问题,也严重威胁长三角城市群的可持续发展,迫切需要深入探索长三角城市群城市形态格局对碳收支的影响。

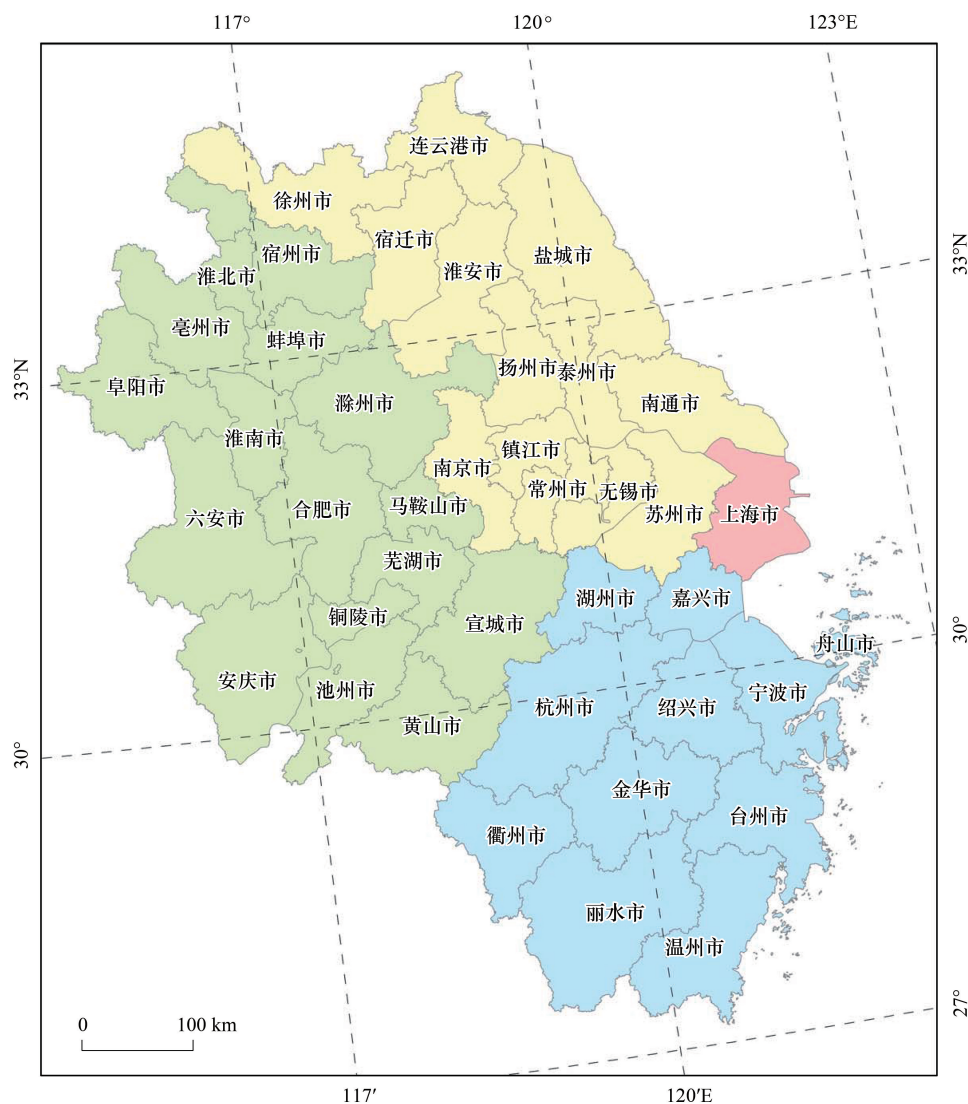


图 1 长三角城市群区域地理位置

Fig.1 Regional geographical location of Yangtze River Delta urban agglomeration

1.2 数据来源

本文实验数据包括 2001、2005、2010 年研究区域同期的碳排放数据、NPP 数据、土地利用数据、气温数据、降水数据和土壤数据。

2001、2005 和 2010 年碳排放数据来自 ODIAC2019 网格化碳排放数据集 (tC/km^2), ODIAC 是一种人为二氧化碳开源数据清单。该数据是基于国家级化石燃料碳排放估计量、全球燃料消耗统计数据、多源夜间灯光数据和 CARMA 发电厂数据库提供的点源位置对人为碳排放进行估算,分辨率为 $1\text{km}\times 1\text{km}$ ^[34];该数据的检验结果表明,ODIAC2019 数据可以有效分配全球、区域、国家和城市规模的二氧化碳排放量。

NPP 数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心,主要基于光能利用率模型 GLO_PEM 计算,该模型通过植被冠层对太阳辐射的有效利用率以精确获取植被生产力,模型估算的精度较高且应用较广泛。同时,该 NPP 数据集的可公开获取年份只到 2010 年,受实验数据年份限制,本文研究选择 2001、2005 和 2010 年的 NPP 数据集进行碳收支分析。

2001、2005 和 2010 年年平均气温、年降水量数据从中国科学院资源环境科学与数据中心获得,年平均气温、年降水量空间插值数据集是基于全国 2400 多个气象站点日观测数据,通过整理、计算和空间插值处理生成。土壤容重数据、 $<2\text{mm}$ 石砾数据来自第二次国家土壤调查获得的表层土壤 (0—20cm) 属性数据集;中国 0—20cm 土壤有机碳含量数据由中国科学院南京土壤研究所提供。

2001、2005 和 2010 年土地利用数据来源于欧航局 (<http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/>)。该数据包括农田、草原、城市建成区、水体共 22 类土地利用类型,本文利用城市建成区土地利用类型提取城市景观格局指数。本文具体研究流程如图 2。

2 研究方法

2.1 碳收支计算

城市碳收支通过相同空间分辨率、相同单位下的碳吸收和碳排放得到^[35],其计算公式为:

$$CB = NEP - CE \quad (1)$$

其中, CB 为碳收支 ($\text{kg C m}^{-2} \text{a}^{-1}$), NEP 为年净生态系统生产力 ($\text{kg C m}^{-2} \text{a}^{-1}$), CE 为年度平均二氧化碳排放量 ($\text{kg C m}^{-2} \text{a}^{-1}$)。

2001、2005 和 2010 年净生态系统生产力 (NEP) 数据由 NPP 数据、气温数据、降水数据、土壤有机碳含量数据和土壤数据计算得到。净生态系统生产力是指净第一生产力中再减去异养呼吸所消耗的光合产物碳通过陆地生态系统循环的部分。净生态系统生产力是植被生态系统碳的净吸收或净储存,可以定量描述植被生态系统碳源/汇的能力。当 $NEP > 0$ 时,表示生态系统发挥碳汇功能,反之则为碳源^[36—37]。净生态系统生产力的表达式为:

$$NEP = NPP - R_h \quad (2)$$

式中, NEP 为年净生态系统生产力 ($\text{kg C m}^{-2} \text{a}^{-1}$), NPP 为年净初级生产力 ($\text{kg C m}^{-2} \text{a}^{-1}$), R_h 为年土壤异养呼

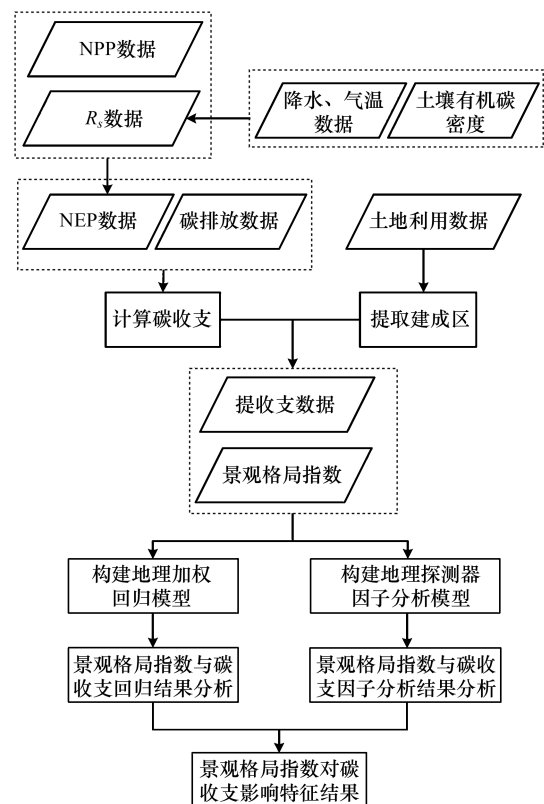


图2 长三角城市群城市空间形态与碳收支耦合时空关系分析流程图

Fig.2 Analysis flow chart of spatial-temporal relationship between urban spatial form and carbon budget coupling in Yangtze River Delta urban agglomeration

NPP: 净初级生产力 Net Primary Productivity; R_h : 土壤呼吸 The soil respiration; NEP: 净生态系统生产力 Net Ecosystem Productivity

吸($\text{kg C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。

张梅等人^[38]收集了中国各地共 113 组 R_s 、 R_h 实测数据,采用多种回归模型对 R_s 和 R_h 间的关系进行推导,确定 R_h 的估算公式为:

$$R_h = 0.6163R_s^{0.7918} \tag{3}$$

式中, R_s 为年土壤呼吸($\text{kg C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。

Chen 等^[39]将全球 147 个地点公布的 657 个年度土壤呼吸记录成表格,采用基于经验的半机械模型,包括气候和土壤性质估算了年土壤呼吸。考虑到 Chen 等^[39]的研究成果在目前土壤呼吸模型研究中采样点较完备,故本文采用其研究结果估算 R_s :

$$R_s = 1.55e^{0.031T} \times \frac{P}{P + 0.68} \times \frac{\text{SOC}}{\text{SOC} + 2.23} \tag{4}$$

式中, T 为年均气温($^{\circ}\text{C}$); P 为年降水量(m); SOC 为 0—20cm 表层土壤有机碳密度(kgC/m^2)。

0—20cm 土壤有机碳密度 SOC(tC/hm^2),计算公式^[39]如下:

$$\text{SOC} = C_c \times \gamma \times H \times (1 - \delta_{2\text{mm}} \div 100) \times 10^{-1} \tag{5}$$

式中, C_c 为 0—20cm 的表层土壤有机碳含量, γ 是容重(g/cm^3), H 为土壤厚度, $\delta_{2\text{mm}}$ 为土壤 <2mm 石砾部分(%)。

2.2 城市形态与景观格局指数选取

景观格局指数是高度浓缩的景观格局信息,是反映景观结构组成、空间配置特征的简单量化指标^[40]。景观形态指数被广泛用于研究城市空间发布模式,分析城市形态特征^[41]。迄今为止,学者们已经使用了大量的景观形态指数来探索城市形态对二氧化碳排放的影响^[42]。本文在参考上述研究的基础上,并顾及到更全面地描述城市空间形态,选取了表 1 中的 6 个景观形态指标来描述城市形态格局,其中①斑块类型面积 CA 即是城市建成区总面积,可以描述城市扩张现象;②城市斑块数量 NP 可以描述城市建成区的分散破碎程度;③最大斑块指数 LPI 即是城市建成区中最大斑块的面积占比,可以描述城市建成区聚集程度,从而分析城市核心动态;④景观形状指数 LSI 可以描述城市建成区内部的不规则程度;⑤边缘密度 ED 即是城市建成区边缘周长与面积之比,可以描述城市的形态复杂程度;⑥城市建成区斑块密度 PD 即是单位面积的斑块数量,描述了城市内部的连通程度。

表 1 景观格局指数及其意义

Table 1 Landscape pattern index and its significance

景观格局指数 Landscape pattern index	缩写 Abbreviation	意义 Meaning
斑块类型面积 Class area	CA	同种类型斑块的总面积
城市斑块数量 Number of patches	NP	描述城市建成区分散破碎程度,斑块数量越多其城市形态分散破碎化程度越高
最大斑块指数 Largest patch index	LPI	描述了斑块的聚集性,反映了城市发展模式是否为单核,反映城市核心的动态
景观形状指数 Landscape shape index	LSI	反映了城市内部不规则程度,值越小,城市越规则;值越高,城市越不规则
边缘密度 Edge density	ED	代表城市用地边缘的蔓延和形状,可以用来描述城市形态的复杂性
城市建成区斑块密度 Patch density	PD	反映了城市内部连通性

2.3 城市形态与碳收支相关性分析

本文从城市层面上选取了 6 个景观格局指数,分析了长三角城市群城市形态与碳收支的相关性。在此基础上,采用地理加权回归分析方法分析城市形态对区域碳收支量的影响。

地理加权回归(Geographical Weighted Regression, GWR)模型在 1996 年提出,其模型基础基于普通线性回归模型,在计算回归参数时同时考虑了空间数据位置信息。GWR 沿用了局部回归的思想,遵循“地理学第一定律”,将数据的地理位置嵌入到回归参数之中,可以实现对参数的局部估计,进而分析城市形态指数对碳收支的影响^[43]。地理加权回归模型公式为:

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i) X_{ik} + \varepsilon_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

式中, Y_i 代表 i 城市碳收支量 ($\text{kg C m}^{-2} \text{a}^{-1}$), $\beta_k(u_i, v_i)$ ($k = 0, 1, \dots, p$) 为空间地理位置函数, (u_i, v_i) 为城市 i 的空间位置, X_{ik} 代表第 k 个城市景观格局指数在城市 i 的值, k 为城市形态指数的个数, ε_i 代表残差。

2.4 城市形态指数对碳收支影响程度分析

本文采用地理探测器模型量化分析 2001 年、2005 年和 2010 年长三角城市群各城市形态指数对碳收支影响程度,同时分析各城市形态指数的交互作用影响,为实现长三角城市群低碳可持续发展提供科学参考。地理探测器是探测空间分异性,以及揭示其背后驱动力的一组统计学方法^[44]。

分异及因子探测:探测 Y 的空间分异性,以及探测某因子 X 多大程度上解释了属性 Y 的空间分异^[44]。用 q 值度量, q 值的取值范围为 $[0, 1]$, q 值越大表示自变量 X 对属性 Y 的解释力越强,反之则越弱。

交互作用探测模型:用于判定不同影响因子对被解释变量空间分异格局影响的独立性,探索关键交互因子并分析其空间叠加交互效应^[45]。

3 结果与分析

3.1 长三角城市群碳收支的时空格局

采用 NPP 数据、碳排放数据,应用公式 1 得到碳收支结果。2001—2010 年,长三角城市群碳收支(图 3)时空分布差异明显,总体呈现南部高,北部次之,东部低的特征,且同一时期不同地区碳收支量差异明显。

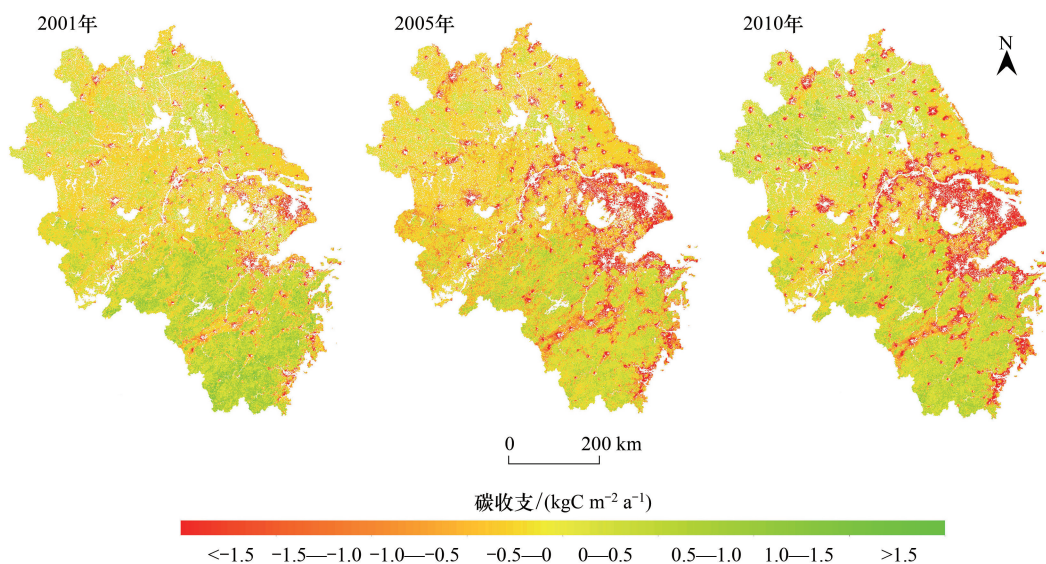


图 3 2001—2010 年长三角城市群碳收支空间分布

Fig.3 Spatial distribution of carbon budget in Yangtze River Delta urban agglomeration from 2001 to 2010

2001 年,碳收支最低的地区在上海市为 $-6426.76 \text{ kg C m}^{-2} \text{a}^{-1}$,嘉兴、南通、扬州次之,说明这些城市碳排放量大于 NEP 值,呈现为碳源;碳收支量最高值的地区在丽水市为 $7296.32 \text{ kg C m}^{-2} \text{a}^{-1}$,黄山、杭州次之,长三角城市群南部地区碳排放量较少,植被绿化较多,呈现为碳汇。

2005 年,碳收支量显著减少,碳排放量呈现迅速上升趋势。上海市碳收支量最低,其周边城市如南通、苏州、无锡、嘉兴碳收支量较 2001 年明显较少,相继出现低值,碳排放量显著增加;碳收支量最高值地区仍为丽水市。南部地区、北部地区碳汇减少,且北部地区有较多地区呈现碳源。

2010 年,长三角城市群碳收支最大值地区是丽水市为 $3607.57 \text{ kg C m}^{-2} \text{a}^{-1}$,平均值为 $-3479.24 \text{ kg C m}^{-2} \text{a}^{-1}$,其中上海市碳收支值最小,苏州、无锡、南通碳收支量显著减少,碳排放量增加,上海及周边地区呈现为碳

源;南部地区碳汇增加,碳收支量也随之增加;北部地区阜阳、亳州等城市碳收支量增加。

3.2 长三角城市群城市形态指数与碳收支的时空关系变化特征

本文选取 6 个景观格局指标作为自变量,碳收支量作为因变量,对各自变量分别进行地理加权回归分析。统计结果见表 2,从 2001 年到 2010 年,中国发展迅速,城市化进程不断推进,城市快速扩张,在此期间,城市形态也变得越来越复杂和多样。平均 *ED* 值增加,平均 *NP* 逐年增加,平均 *LSI* 从 2001 年的 14.095 增加到 2010 年的 22.808,这些结果表明,快速的城市化进程导致城市扩张,城市复杂性、分散破碎程度增加,城市形态更加不规则。2001 年到 2010 年年平均碳收支量减少,但速度减缓。

表 2 2001—2010 年城市形态与碳收支统计

Table 2 Statistics of urban form and carbon balance from 2001 to 2010

年份 Year	统计指标 Statistical indicators	因变量 Dependent variable	自变量 Independent variable					
		碳收支量/ (kg C m ⁻² a ⁻¹)	<i>CA</i>	<i>NP</i>	<i>LPI</i>	<i>LSI</i>	<i>ED</i>	<i>PD</i>
2001	最大值	7296.322	104199.142	583.000	68.486	26.998	0.062	2.798
	最小值	-6426.755	1917.153	44.000	12.257	6.954	0.028	0.560
	平均值	-470.152	14872.900	203.732	34.879	14.095	0.045	1.618
	标准值	2067.860	17025.739	155.047	16.088	5.761	0.009	0.563
2005	最大值	275.911	109250.004	677.000	65.861	29.041	0.062	2.456
	最小值	-15558.590	2792.129	55.000	11.457	8.000	0.029	0.593
	平均值	-3400.085	19710.653	259.244	29.619	17.099	0.046	1.494
	标准值	2864.803	18531.659	175.921	14.387	6.142	0.007	0.418
2010	最大值	3607.572	163975.530	1348.000	71.292	40.895	0.061	2.820
	最小值	-21280.922	5536.047	79.000	9.648	10.784	0.029	0.503
	平均值	-3479.242	34069.345	415.585	26.120	22.808	0.047	1.396
	标准值	4581.130	29099.566	269.954	14.617	7.660	0.007	0.449

地理加权回归模型结果如表 3 所示,GWR 的模型的 *R*² 均大于 0.6,具有较好的拟合精度,模型拟合精度经历了先上升后下降的趋势,模型能较好地评估城市形态指标对碳收支的影响。

表 3 地理加权回归模型整体结果

Table 3 Overall results of geographically weighted regression model

	2001	2005	2010		2001	2005	2010
AICc	-57.068	-62.693	-49.761	调整 Adjust <i>R</i> ²	0.522	0.542	0.623
<i>R</i> ²	0.646	0.909	0.728				

从图 4 可以看出,斑块类型面积(*CA*)指数与长三角城市群碳收支呈负相关,表明城市扩张会减少碳收支量。2001 年斑块类型面积指数回归系数绝对值的高值区(绝对值越大则实际影响越大)集中在长三角城市群西部如六安市、安庆市,绝对值低值地区集中在北部如徐州、宿州、连云港等城市,大部分地区的回归系数介于-0.534—-0.385;到 2005 年,斑块类型面积指数对碳收支的影响程度增加,高值向中部地区倾斜,如无锡、宣城、杭州等城市;2010 年,斑块类型面积指数对碳收支的影响程度在中部、北部地区有所下降,大部分城市的回归系数介于-0.806—-0.534。

从图 5 城市斑块数量(*NP*)指数回归系数空间分布可以看出,长三角城市群碳收支与城市斑块数量呈负相关,表明城市建成区越分散越不利于碳收支增长。2001 年,回归系数绝对值高值区集中在六安、安庆、淮南、丽水和温州,回归系数绝对值低值区出现在中部宣城、湖州等城市和北部徐州、淮北等城市。2005 年,城市斑块数量指数碳收支的影响有所增加,呈现出南通、上海由东向西六安、安庆等地区逐渐降低的空间分布。2010 年,城市斑块数量指数碳收支的影响进一步增加,高值集中在上海及其周边城市,低值集中长三角城市群北部地区。

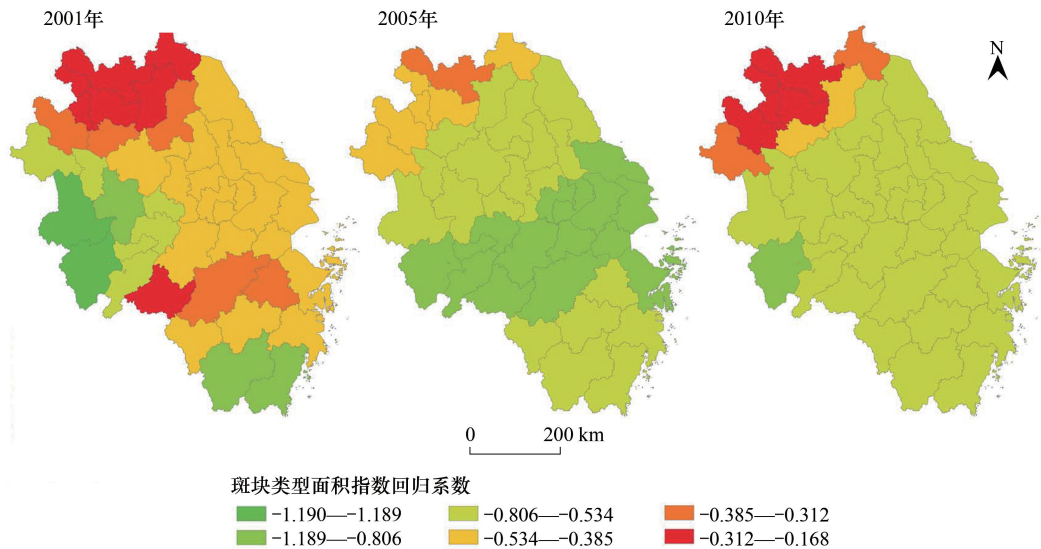


图 4 长三角城市群斑块类型面积 (CA) 指数回归系数的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of regression coefficient of plaque type area (CA) index in Yangtze River Delta urban agglomeration

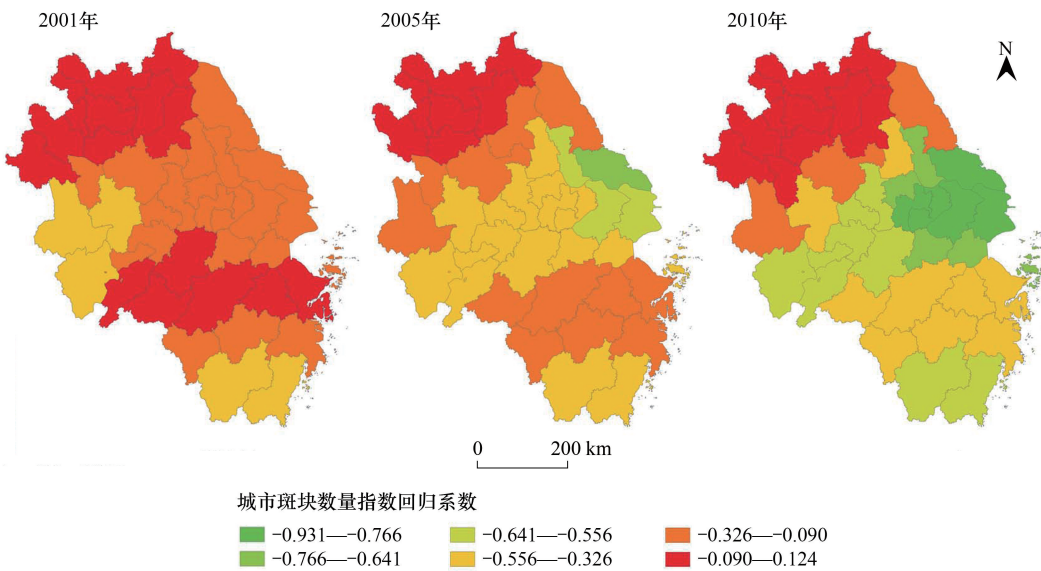


图 5 长三角城市群城市斑块数量 (NP) 指数回归系数的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of regression coefficient of urban patch number (NP) index in Yangtze River Delta urban agglomeration

从图 6 边缘密度 (ED) 指数回归系数的空间分布可以看出,长三角城市群碳收支与边缘密度呈正相关,其回归系数在研究期间逐年上升,说明城市形态越复杂越有利于碳收支的增长,而且对碳收支的影响程度逐年增大。2001 年,边缘密度指数回归系数空间分布总体呈现出从北部到南部逐渐升高的趋势,回归系数高值在东部沿海地区,低值在北部地区。2005 年,边缘密度回归系数呈现出从长三角城市群东部到中部逐渐降低,中部到西部逐渐升高的空间分布。其高值区域仍在上海、南通、宁波地区。2010 年,边缘密度对碳收支的影响程度有所增长,高值在上海市及其周边沿海城市,低值主要分布在长三角城市群中部地区如南京、合肥、马鞍山等城市。

图 7 展示了最大斑块指数 (LPI) 回归系数的空间分布,图中可以看出最大斑块指数与碳收支呈明显的负相关性,表明城市单核发展不利于碳收支增长。2001 年,最大斑块指数对碳收支的影响程度在空间上呈现出

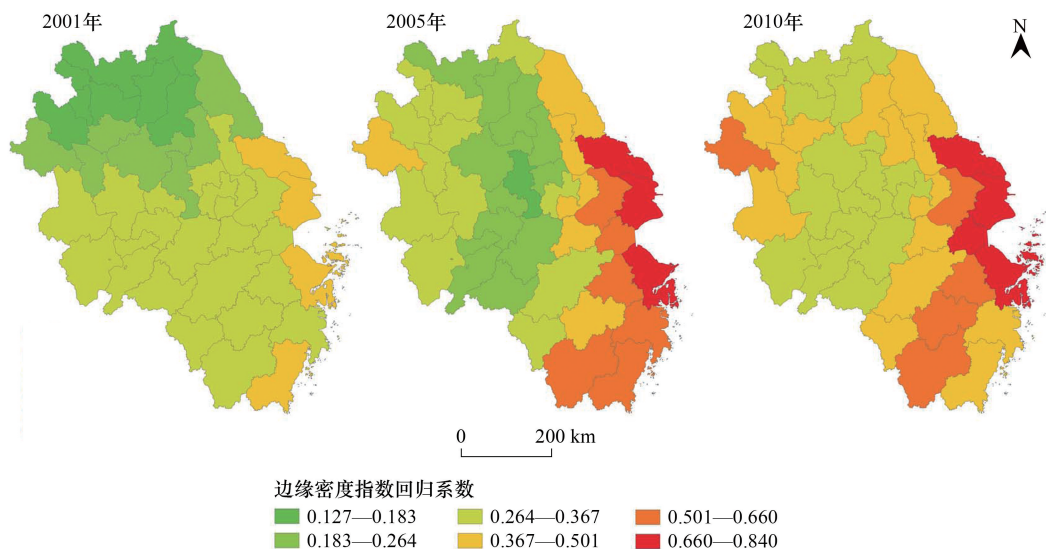


图6 长三角城市群边缘密度(ED)指数回归系数的空间分布

Fig.6 Spatial distribution of regression coefficient of edge density (ED) index in Yangtze River Delta urban agglomeration

以南京、马鞍山、常州、滁州为中心向外逐渐增强的趋势。2005年,回归系数绝对值最高值地区是上海和宁波,回归系数绝对值低值区集中在马鞍山、芜湖等中部城市。2010年,最大斑块指数对碳收支的影响程度出现以南京、马鞍山、芜湖、镇江、宣城为中心向北、向南逐渐增大的趋势。

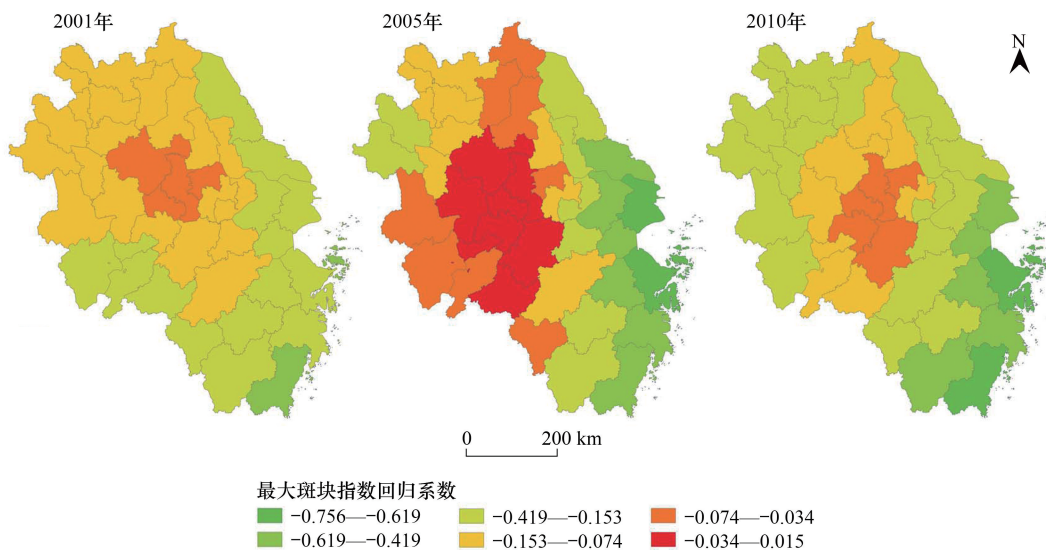


图7 长三角城市群最大斑块指数(LPI)回归系数的空间分布

Fig.7 Spatial distribution of the regression coefficient of the maximum patch index (LPI) of the Yangtze River Delta urban agglomeration

从图8景观形状指数(LSI)回归系数的空间分布图中可以看出,景观形状指数与碳收支呈负相关,表明城市内部越不规则越不利于碳收支的增长。2001年,回归系数绝对值高值区在六安市,绝对值低值区主要聚集在宿迁、蚌埠等长三角城市群北部城市和湖州、嘉兴等地区。2005年,空间分布发生明显差异,回归系数绝对值高值聚集在上海及其周围城市,低值集中在长三角城市群北部地区如淮北、连云港等城市。2010年,景观形状指数对碳收支的影响程度总体扩大,回归系数绝对值高值地区从上海扩散到镇江、湖州等城市。

图9展示了城市建成区斑块密度(PD)回归系数的空间分布,图中可以看出城市建成区斑块密度与碳收

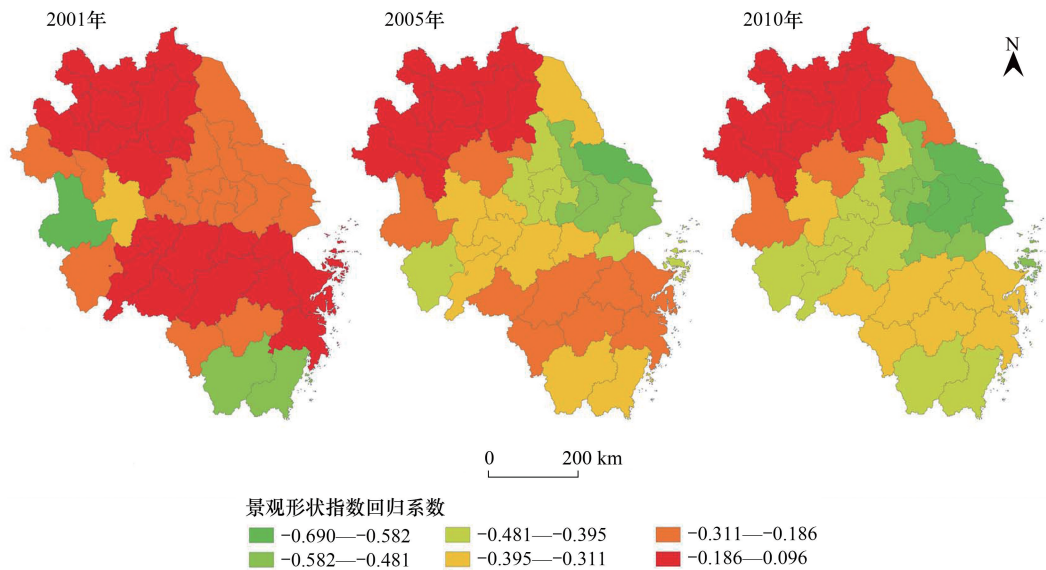


图 8 长三角城市群景观形状指数 (LSI) 回归系数的空间分布

Fig.8 Spatial distribution of landscape shape index (LSI) regression coefficient in Yangtze River Delta urban agglomeration

支呈明显的正相关性,表明城市内部连通性提高对碳收支有促进作用。2001 年,城市建成区斑块密度对碳收支的影响较小。2005 年城市建成区斑块密度对碳收支影响有所增长,回归系数最高值城市为上海市,低值地区有所减少。2010 年,城市建成区斑块密度回归系数高值主要集中在上海等沿海城市,回归系数最低值城市是徐州市。

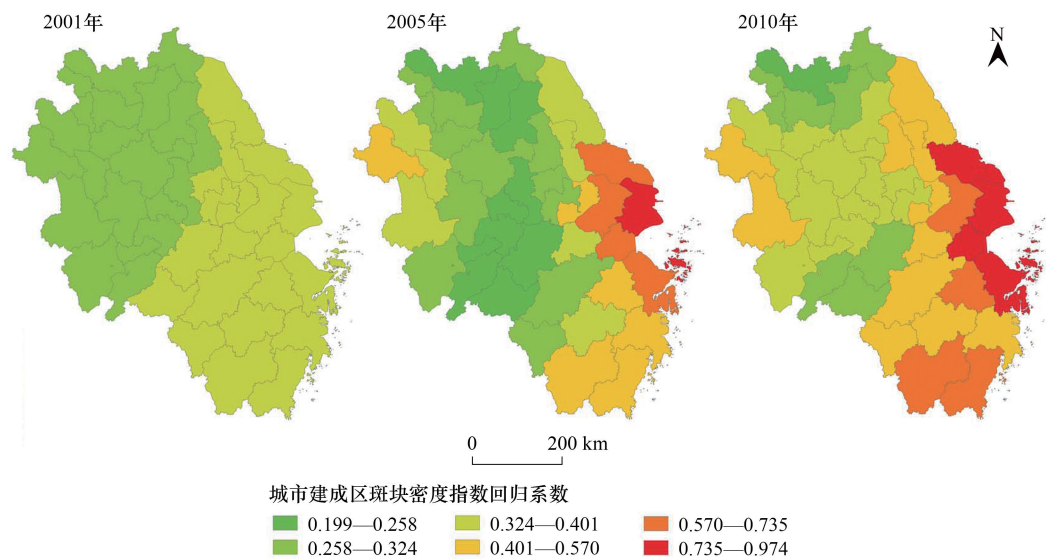


图 9 长三角城市群城市建成区斑块密度 (PD) 指数回归系数的空间分布

Fig.9 Spatial distribution of regression coefficient of patch density (PD) index of urban built-up area in Yangtze River Delta urban agglomeration

3.3 量化各城市形态指数对碳收支的影响及指数交互探测

应用地理探测器,量化分析各城市形态指数对碳收支的影响程度,结果如图 10 所示,各影响因子对应的空间异质性影响程度进行排序为:CA>ED>PD>LPI>NP>LSI。与 2001 年结果所不同的是,2005 年 ED、LPI、

PD 的 *q* 值有所下降,城市建成区斑块密度跃升为第二大影响因子,各指数影响程度排名为:*CA>PD>NP>LSI>ED>LPI*。2010 年,建成区总面积因子对长三角城市群碳收支的驱动作用仍为第一名,各因子的驱动力排序为:*CA>PD>ED>NP>LSI>LPI*。总体看来,建成区面积扩张是碳收支空间异质性的主要驱动因素,城市建成区斑块密度在空间异质性中也起着重要作用,最大斑块指数、景观形状指数在空间异质性中所起的驱动作用相对较小。

运用交互检测器来揭示两个驱动因素之间的交互影响,结果如表 4—6 所示,交互检测结果可以分为两类:增强和非线性(*EN*),增强和双变量(*EB*),所有交互因子对碳收支空间异质性影响程度相对于单个影响因子均有明显增强。对碳收支空间异质性影响程度相对较高的关键交互因子有 *NP∩ED*、*CA∩ED*、*NP∩PD*、*CA∩LPI*、*ED∩LSI*、*LPI∩LSI*,这表明交互作用对空间异质性的影响更大。从表中可以看出,在 2001 年,边缘密度和城市建成区斑块密度的交互影响大于其他因子的交互影响,*q* 值达到最高为 0.866。斑块类型面积因子与其他因子之间的交互影响显著。

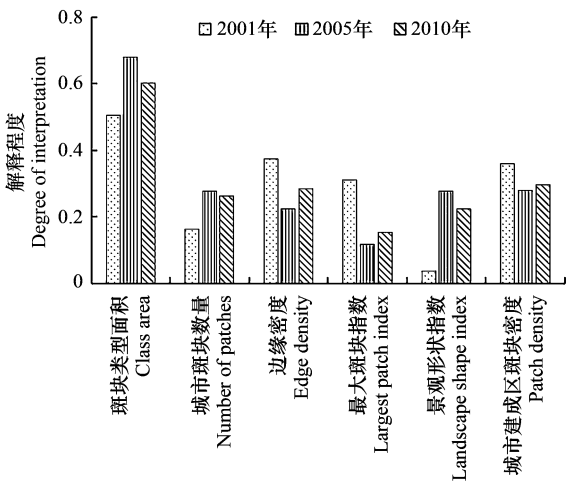


图 10 2001—2010 年景观格局指数对碳收支的影响
Fig.10 Effects of landscape pattern index on carbon budget from 2001 to 2010

表 4 2001 年交互检测结果

Table 4 Interactive testing results for 2001							类型 Types	<i>CA</i>	<i>NP</i>	<i>ED</i>	<i>LPI</i>	<i>LSI</i>	<i>PD</i>
<i>q</i>	<i>CA</i>	<i>NP</i>	<i>ED</i>	<i>LPI</i>	<i>LSI</i>	<i>PD</i>							
<i>CA</i>	0.505						<i>CA</i>						
<i>NP</i>	0.689	0.164					<i>NP</i>	<i>EB</i>					
<i>ED</i>	0.781	0.831	0.373				<i>ED</i>	<i>EB</i>	<i>EN</i>				
<i>LPI</i>	0.851	0.849	0.516	0.312			<i>LPI</i>	<i>EN</i>	<i>EN</i>	<i>EB</i>			
<i>LSI</i>	0.781	0.336	0.782	0.781	0.036		<i>LSI</i>	<i>EN</i>	<i>EN</i>	<i>EN</i>	<i>EN</i>		
<i>PD</i>	0.764	0.866	0.492	0.537	0.789	0.359	<i>PD</i>	<i>EB</i>	<i>EN</i>	<i>EB</i>	<i>EB</i>	<i>EN</i>	

EN:增强和非线性 Enhance and nonlinear;EB:增强和双变量 Enhance and bivariate

表 5 2005 年交互检测结果

Table 5 Interactive testing results for 2005							类型 Types	<i>CA</i>	<i>NP</i>	<i>ED</i>	<i>LPI</i>	<i>LSI</i>	<i>PD</i>
<i>q</i>	<i>CA</i>	<i>NP</i>	<i>ED</i>	<i>LPI</i>	<i>LSI</i>	<i>PD</i>							
<i>CA</i>	0.678						<i>CA</i>						
<i>NP</i>	0.716	0.277					<i>NP</i>	<i>EB</i>					
<i>ED</i>	0.817	0.850	0.224				<i>ED</i>	<i>EB</i>	<i>EN</i>				
<i>LPI</i>	0.764	0.762	0.376	0.116			<i>LPI</i>	<i>EB</i>	<i>EN</i>	<i>EB</i>			
<i>LSI</i>	0.722	0.298	0.850	0.743	0.276		<i>LSI</i>	<i>EB</i>	<i>EB</i>	<i>EN</i>	<i>EN</i>		
<i>PD</i>	0.758	0.780	0.495	0.637	0.759	0.280	<i>PD</i>	<i>EB</i>	<i>EN</i>	<i>EB</i>	<i>EN</i>	<i>EN</i>	

表 6 2010 年交互检测结果

Table 6 Interactive testing results for 2010							类型 Types	<i>CA</i>	<i>NP</i>	<i>ED</i>	<i>LPI</i>	<i>LSI</i>	<i>PD</i>
<i>q</i>	<i>CA</i>	<i>NP</i>	<i>ED</i>	<i>LPI</i>	<i>LSI</i>	<i>PD</i>							
<i>CA</i>	0.601						<i>CA</i>						
<i>NP</i>	0.706	0.262					<i>NP</i>	<i>EB</i>					
<i>ED</i>	0.743	0.831	0.284				<i>ED</i>	<i>EB</i>	<i>EN</i>				
<i>LPI</i>	0.779	0.711	0.514	0.153			<i>LPI</i>	<i>EB</i>	<i>EN</i>	<i>EN</i>			
<i>LSI</i>	0.655	0.364	0.742	0.781	0.223		<i>LSI</i>	<i>EB</i>	<i>EB</i>	<i>EN</i>	<i>EN</i>		
<i>PD</i>	0.768	0.799	0.352	0.550	0.783	0.296	<i>PD</i>	<i>EB</i>	<i>EN</i>	<i>EB</i>	<i>EN</i>	<i>EN</i>	

4 讨论

本文研究评估了城市形态对碳收支的影响,揭示了城市形态与碳收支的时空关系,结果表明碳收支的空间模式与城市形态有较大的相关性。

(1) 城市碳收支与人口、经济等发展水平的适应性

在本研究中,长三角城市群的碳收支时空分布特征与其经济发展、城市化发展相同步。2001—2010 年,长三角城市群经济快速发展,城市化水平不断提高,使得城市人口迅速增长,同时居民消费水平不断提高,导致能源消耗碳排放量不断增长,年平均碳收支量逐年减少。

长三角城市群的碳收支存在明显的时空异质性,总体呈现南部高,北部次之,东部低的特征,且同一时期不同地区碳收支量差异明显,主要是由于各地经济发展水平、人口规模、科技水平和产业结构等因素发展不平衡导致各地碳源/汇出现差异。2001—2010 年,长三角城市群经济高速发展,城市化水平不断提高,从而驱动碳排放量增加,部分地区碳收支量减少,但总体来说长三角生态状况良好。

(2) 城市碳收支的空间形态景观指数响应性

本文选取了 6 个景观格局指数从城市扩展、城市分散性、城市单核化、城市不规则性、城市形状的复杂性和城市连续性来描述城市形态,并分析城市形态对区域碳收支量的影响。

CA 描述城市扩张程度,CA 与碳收支存在显著负相关性,表明城市建成区扩张对碳收支有抑制作用。USAMA、袁凯华等^[46—47]证明城市扩张对碳排放有积极影响,2001—2010 年,长三角城市群进入了快速的城市化阶段,城市产业如工业的快速发展使得城市能源碳排放大幅增加,此外城市扩张使得大量的碳汇用地转变为城市建成区,因此城市扩张导致碳收支量大幅减少,未来控制城市用地扩张应成为低碳城市关注的重点。

NP 描述城市分散性,城市斑块数量越多,城市分散破碎程度越高。城市形态的分散破碎程度越高越不利于碳收支的增长,分散破碎的城市形态增加了城市生产生活成本,产生更多的能源消耗碳排放,如分散破碎的城市形态增加了交通运输相关的能源消耗碳排放,规则紧凑的城市形态提高了出行效率,减少能源消耗碳排放,增加碳收支,促进城市可持续发展。

LPI 描述一个城市区域以单核发展模式为特征的程度,LPI 值越大,内部斑块越聚集,越单核化。LPI 与碳收支存在显著的负相关性,建成区内部聚集程度相对较高的斑块是二氧化碳排放的主要来源,单核城市会增加碳排放,降低碳收支量,这与 Ou^[28]等人的结论相一致,单核模式的城市形态发展会增加碳排放量,因此应该发展多核城市发展模式。

LSI 描述城市不规则性,LSI 与碳收支呈负相关,表明城市越不规则碳收支量越低,规则的城市结构有利于提高土地利用效率和强度,实现城市建成区集约利用,并提高交通可达性,从而减少能源消耗碳排放量,提高碳收支量,促进低碳城市发展。

ED 描述城市形状复杂性,能够衡量城市边界的复杂性程度。ED 对碳收支存在显著正相关,ED 值越高,城市边界越复杂,意味着复杂的城市形态对碳收支有促进作用。由于政府的干预作用,产业集聚现象使企业间良性竞争,利用创新技术降低碳排放强度,能源结构优化能够减少碳排放,如增多低碳能源的使用等。

PD 描述城市连续性,衡量城市形态的连接程度。城市的连通性提高,城市更紧凑,发展更连续,PD 与碳收支呈正相关,城市内部连通性提高对碳收支有促进作用。城市内部连通性有利于公共交通发展,也会提高出行效率,减少交通能源消耗碳排放,此外城市更紧凑连续使得工业产生集群效应,减少运输和存储成本等,使得工业能源碳排放减少,从而增加碳收支量。紧凑和连续的城市区域可以减少二氧化碳排放和实现城市可持续发展。

(3) 城市碳收支的驱动因素的交互影响作用

本文运用地理探测器分析了景观格局指数因子对碳收支的空间异质性影响程度及两个驱动因素之间的交互影响。在研究期间,建成区总面积是碳收支空间异质性的主要驱动因素,城市扩张对碳收支的影响始终

保持较高水平,城市扩张在刺激经济发展的同时,也会减少碳汇用地,还使能源消耗碳排放增加。边缘密度和城市建成区斑块密度影响程度次之。

交互检测结果表明,所有交互因子对碳收支空间异质性影响程度相对于单个影响因子均有明显增强。其中, $NP \cap ED$ 、 $CA \cap LPI$ 、 $LPI \cap LSI$ 交互因子对碳收支空间异质性影响程度较高,2001—2010 年,长三角城市群城市快速发展,城市格局发生变化,城市建成区斑块数量增多,同时斑块形状复杂,使得城市分散性和复杂性增加,能源消耗碳排放增多,因此 NP 和 ED 交互作用对碳收支空间异质性影响程度增加;城市用地扩张使得土地利用类型发生改变,而城市的扩张偏向单核发展模式增加了碳排放量,使碳收支大量减少,因此 CA 和 LPI 交互增强了碳收支影响程度;城市不规则性与单核发展模式交互作用对碳收支影响也处于较高水平,城市同时向着单核和不规则性发展,使得城市增加了生产生活成本,降低了交通可达性,而单中心发展使人口过度聚集,导致能源消耗碳排放增多,碳收支量减少,因此 LPI 和 LSI 交互作用对碳收支的影响程度增强。

本文以长三角城市群 41 个城市为研究对象定量地分析了城市形态与碳收支的关系,但是如何分城市规模和分产业分析城市形态与碳收支的关系还有待进一步研究。处于不同发展阶段城市的城市形态与碳收支的时空关系可能存在较大差异,此外城市形态与不同产业能源碳排放的关系也可能具有差异性,后续研究将对处于不同发展阶段的的城市分别构建城市形态与碳收支的关系模型,同时分产业分析城市形态与能源碳排放的关系。最后,本文使用土地利用数据的城市建成区计算得到景观格局指数,后续研究考虑引入多源数据来反映城市空间形态,以及更新部分数据集以提高研究的时效性。

5 结论

为了应对全球气候变化,制定城市的低碳发展战略,城市形态对碳收支的影响逐渐受到重视,但是系统地量化城市形态对碳收支影响的研究仍较少。因此,本文以长三角城市群为研究区域,利用地理加权回归模型量化了城市形态与碳收支的时空关系,并使用地理探测器分析了碳收支的驱动因素,得到如下结论:(1) 2001、2005 和 2010 年长三角城市群碳收支存在明显时空分布差异,总体呈现南部高,北部次之,东部低的特征;(2) 2001、2005 和 2010 年长三角城市群城市空间形态与碳收支存在显著的时空关系,城市景观格局指数与碳收支的回归系数有着明显时空差异;(3) 建成区面积扩张是碳收支空间异质性的主要驱动因素,交互因子对碳收支影响程度相对于单个影响因子均有明显增强。

上述研究结论可以为探索城市碳收支格局、优化城市形态和实现城市低碳可持续发展提供一定的参考。当前中国正处于快速城市化进程中,在保持经济快速增长的同时,如何维持碳收支平衡仍是一个重大挑战。本文结果表明,优化城市形态能有效减少城市碳排放量,城市在发展过程中应降低建成区的分散破碎程度,提高城市土地利用效率和城市内部连通性、规则性,实现城市多核发展模式,以此提高城市碳收支水平,未来城市规划实践应考虑不同城市形态模式对碳收支的影响。

参考文献 (References):

- [1] 李璐,董捷,徐磊,张俊峰. 功能区土地利用碳收支空间分异及碳补偿分区——以武汉城市圈为例. 自然资源学报, 2019, 34(5): 1003-1015.
- [2] 杜海波,魏伟,张学渊,纪学朋. 黄河流域能源消费碳排放时空格局演变及影响因素——基于 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 夜间灯光数据. 地理研究, 2021, 40(7): 2051-2065.
- [3] 李翠华,蔡榕硕,颜秀花. 2010—2018 年海南东寨港红树林湿地碳收支的变化分析. 海洋通报, 2020, 39(4): 488-497.
- [4] Niu S L, Sherry R A, Zhou X H, Luo Y Q. Ecosystem carbon fluxes in response to warming and clipping in a tallgrass prairie. Ecosystems, 2013, 16(6): 948-961.
- [5] Wu C F, Li G, Yue W Z, Lu R C, Lu Z W, You H Y. Effects of endogenous factors on regional land-use carbon emissions based on the grossman decomposition model: a case study of Zhejiang province, China. Environmental Management, 2015, 55(2): 467-478.
- [6] Zhang T, Zhang Y J, Xu M J, Xi Y, Zhu J T, Zhang X Z, Wang Y F, Li Y N, Shi P L, Yu G R, Sun X M. Ecosystem response more than

- climate variability drives the inter-annual variability of carbon fluxes in three Chinese grasslands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 225: 48-56.
- [7] 罗红, 罗怀良, 李朝艳, 熊静芸. 泸州市农业碳收支时空变化及公平性评价. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(4): 409-418.
- [8] 童新华, 张郭秋晨, 韦燕飞. 区域碳收支能力估算的面向对象遥感分类方法. *地球信息科学学报*, 2016, 18(12): 1675-1683.
- [9] 蒋烨林, 王让会, 彭擎, 李焱, 李成. 干旱区景观格局演变及碳收支状况研究——以塔里木盆地为例. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(7): 875-884.
- [10] 王刚, 张华兵, 薛菲, 甄艳. 成都市县域土地利用碳收支与经济发展关系研究. *自然资源学报*, 2017, 32(7): 1170-1182.
- [11] 张海凤, 崔桂善. 土地利用/覆盖类型的变化对陆地生态系统碳收支的影响. *中国资源综合利用*, 2019, 37(1): 176-179.
- [12] 孙伟, 乌日汗. 长三角核心区碳收支平衡及其空间分异. *地理研究*, 2012, 31(12): 2220-2228.
- [13] 景勇, 左玲丽, 彭文甫. 四川盆地西北部土地利用碳排放时空变化分析: 以绵阳市为例. *环境科学与技术*, 2021, 44(6): 172-185.
- [14] 罗谷松, 李涛. 碳排放影响下的中国省域土地利用效率差异动态变化与影响因素. *生态学报*, 2019, 39(13): 4751-4760.
- [15] 王雅晴, 谭德明, 张佳田, 孟楠, 韩宝龙, 欧阳志云. 我国城市发展与能源碳排放关系的面板数据分析. *生态学报*, 2020, 40(21): 7897-7907.
- [16] 陈江龙, 李平星, 高金龙. 1990—2014 年泛长三角地区能源利用碳排放时空格局及影响因素. *地理科学进展*, 2016, 35(12): 1472-1482.
- [17] 杨文越, 曹小曙. 多尺度交通出行碳排放影响因素研究进展. *地理科学进展*, 2019, 38(11): 1814-1828.
- [18] 王乃举, 黄翔. 兰州市工业能源碳排放强度及效应研究. *环境科学学报*, 2016, 36(6): 2242-2251.
- [19] 彭璐璐, 李楠, 郑智远, 李锋, 王震. 中国居民消费碳排放影响因素的时空异质性. *中国环境科学*, 2021, 41(1): 463-472.
- [20] 周嘉, 时小翠, 赵靖宇, 王钰萱, 孙丽. 中国居民直接生活能源消费碳排放区域差异及影响因素分析. *安全与环境学报*, 2019, 19(3): 954-963.
- [21] 李宇, 王喆, 王菲, 董锁成, 李泽红. 城市碳排放的评估方法——影响要素和过程研究. *自然资源学报*, 2013, 28(9): 1637-1648.
- [22] 金娜, 仇方道, 袁荷. 江苏省碳排放效率时空格局及驱动因素. *地域研究与开发*, 2018, 37(4): 144-149.
- [23] 苏凯, 陈毅辉, 范水生, 张明如. 市域能源碳排放影响因素分析及减碳机制研究——以福建省为例. *中国环境科学*, 2019, 39(2): 859-867.
- [24] 杨青林, 赵荣钦, 丁明磊, 满洲, 王帅, 余娇, 杨文娟. 中国城市碳排放的空间格局及影响机制——基于 285 个地级市截面数据的分析. *资源开发与市场*, 2018, 34(9): 1243-1249.
- [25] Zuo S D, Dai S Q, Ren Y. More fragmented urban form more CO₂ emissions? A comprehensive relationship from the combination analysis across different scales. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 244: 118659.
- [26] 陈珍启, 林雄斌, 李莉, 李贵才. 城市空间形态影响碳排放吗? ——基于全国 110 个地级市数据的分析. *生态经济*, 2016, 32(10): 22-26.
- [27] Fang C L, Wang S J, Li G D. Changing urban forms and carbon dioxide emissions in China: A case study of 30 provincial capital cities. *Applied Energy*, 2015, 158: 519-531.
- [28] Ou J P, Liu X P, Li X, Chen Y M. Quantifying the relationship between urban forms and carbon emissions using panel data analysis. *Landscape Ecology*, 2013, 28(10): 1889-1907.
- [29] 余倩楠, 贾文晓, 潘晨, 朱希扬, 杨芳, 刘敏, 象伟宁. 长三角地区城市形态对区域碳排放影响的时空分异研究. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(11): 44-51.
- [30] Wang M S, Madden M, Liu X J. Exploring the relationship between Urban Forms and CO₂ emissions in 104 Chinese cities. *Journal of Urban Planning and Development*, 2017, 143(4): 04017014.
- [31] Shi K F, Xu T, Li Y Q, Chen Z Q, Gong W K, Yu B L, Yu B L. Effects of urban forms on CO₂ emissions in China from a multi-perspective analysis. *Journal of Environmental Management*, 2020, 262: 110300.
- [32] Ou J P, Liu X P, Wang S J, Xie R, Li X. Investigating the differentiated impacts of socioeconomic factors and urban forms on CO₂ emissions: Empirical evidence from Chinese cities of different developmental levels. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 226: 601-614.
- [33] 梁倩. 长三角一体化发展规划发布渐近. *经济参考报*, 2019-04-22(01).
- [34] Oda T, Maksyutov S. A very high-resolution (1km×1km) global fossil fuel CO₂ emission inventory derived using a point source database and satellite observations of nighttime lights. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(2): 543-556.
- [35] Wen J Q, Chuai X W, Li S C, Song S, Li Y W, Wang M J, Wu S S. Spatial heterogeneity of the carbon emission effect resulting from urban expansion among three coastal agglomerations in China. *Sustainability*, 2019, 11(17): 4590.

- [36] Zhou W, Huang L, Yang H, Ju W M, Yue T X. Interannual variation in grassland net ecosystem productivity and its coupling relation to climatic factors in China. *Environmental Geochemistry and Health*, 2019, 41(3): 1583-1597.
- [37] 戴尔阜, 黄宇, 吴卓, 赵东升. 内蒙古草地生态系统碳源/汇时空格局及其与气候因子的关系. *地理学报*, 2016, 71(1): 21-34.
- [38] 张梅, 黄贤金, 揣小伟, 解宪丽, 朱振宇, 汪煜. 中国净生态系统生产力空间分布及变化趋势研究. *地理与地理信息科学*, 2020, 36(2): 69-74.
- [39] Chen S T, Huang Y, Zou J W, Shi Y S, Lu Y Y, Zhang W, Hu Z H. Interannual variability in soil respiration from terrestrial ecosystems in China and its response to climate change. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(12): 2091-2098.
- [40] 邬建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级(第二版). 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [41] Jia Y Q, Tang L N, Xu M, Yang X Y. Landscape pattern indices for evaluating urban spatial morphology-A case study of Chinese cities. *Ecological Indicators*, 2019, 99: 27-37.
- [42] Wang S J, Liu X P, Zhou C S, Hu J C, Ou J P. Examining the impacts of socioeconomic factors, urban form, and transportation networks on CO₂ emissions in China's megacities. *Applied Energy*, 2017, 185: 189-200.
- [43] 宫文康. 基于夜间灯光数据的中国地级市尺度城市形态与二氧化碳排放关系研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2020.
- [44] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
- [45] 赵领娣, 吴栋. 中国能源供给侧碳排放核算与空间分异格局. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(2): 48-58.
- [46] 袁凯华, 甘臣林, 杨慧琳, 刘晔, 陈银蓉, 朱庆莹. 建设用地扩张与碳排放增长的 EKC 验证及特征分解研究——以武汉市为例. *中国土地科学*, 2019, 33(1): 56-64.
- [47] Al-mulali U, Sab C N B C, Fereidouni H G. Exploring the bidirectional long run relationship between urbanization, energy consumption, and carbon dioxide emission. *Energy*, 2012, 46(1): 156-167.