

“双碳”目标下长江经济带城市碳足迹压力非均衡性研究¹

康宽 陈景帅 郭沛*

(中国农业大学经济管理学院, 北京 100083)

【摘要】：长江经济带肩负率先实现“双碳”目标的重大使命，亟待准确把握长江经济带城市减排增汇压力现状及其非均衡性。在计算 2000 ~ 2019 年中国 336 个地级及以上城市碳排放和碳汇数据的基础上，构建城市碳足迹压力指数，在全国视野下识别长江经济带城市减排增汇压力，并分别采用 Dagum 基尼系数、核密度估计和局部莫兰指数考察其区域差异、分布动态和空间集聚特征，从多个维度探究其非均衡性。研究发现：(1) 长江经济带城市碳足迹压力低于长江经济带以外区域及全国平均水平。上中下游差异明显，呈梯度递增空间格局。(2) 从区域差异来看，总体差异水平较大，呈扩大趋势。差异分解表明，区域间净差异是总体差异的主要来源，且主要表现为上下游之间的差异。(3) 从分布动态来看，绝对差异水平较大，同时存在明显的多极分化特征。(4) 从空间集聚来看，同时存在 4 种空间集聚类型。上游和下游以低低集聚为主，中游以高高集聚为主。

【关键词】：长江经济带；碳排放；碳汇；非均衡性

【中图分类号】：F062 **【文献标识码】**：A **【文章编号】**：1004- 8227(2023)03- 0537- 11

【DOI】：10.11870/cjlyzyyhj20230309

作为应对气候变化的积极倡导者和坚定践行者，中国向国际社会承诺，二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和。这一宏伟目标已经被纳入生态文明建设总体布局，列为“十四五”和 2035 远景时期经济社会发展的主要目标之一。相较于其它区域，长江经济带具备经济、区位和生态优势，肩负着率先实现“双碳”目标的重大使命，在中国“双碳”目标实施路径中发挥着独特作用。从经济优势来看，长江经济带以长江黄金水道为依托，内含长江三角洲城市群、长江中游城市群和成渝城市群，是中国经济发展最活跃的区域之一，2019 年长江经济带人口和地区生产总值分别达到全国的 43.04% 和 46.41%，在国家现代化建设大局中具有举足轻重的战略地位。从区位优势来看，长江经济带横跨中国东中西三大板块，是我国纵深最长、覆盖面最广的经济带，上中下游互动合作、协同发展能够对全国区域协同发展起到先行和示范作用，在区域发展总体格局中具有重要战略地位^[1]。从生态优势来看，长江经济带上游是长江流域乃至全国的重要生态屏障^[2]，将长江经济带打造为生态文明建设先行示范带是长江经济带发展的重要战略定位。在此背景下，本文从“碳源”和“碳汇”两方面着手，计算 2000 ~ 2019 年中国 336 个地级及以上城市的碳排放和碳汇数据，构建城市碳足迹压力指数，在全国视野下考察长江经济带城市减排增汇压力在全国的相对位置，同时从区域差异、分布动态和空间集聚多个维度识别长江经济带城市碳足迹压力的非均衡性。

纵观已有研究，有关中国“双碳”目标测算及特征分析的文献较为丰富，有助于加深了解中国碳达峰、碳中和进程，同时

¹ **【收稿日期】**：2022- 04- 21；**【修回日期】**：2022- 08- 11

【基金项目】：国家社会科学基金项目(19BJY111)

【作者简介】：康宽(1994 ~)，男，博士研究生，主要研究方向为低碳经济。E-mail: kangkuan2017@163

【* 通讯作者 E-mail】：guopei@cau

对于开展本文研究起到有益的指导和借鉴,但其仍存在如下有待拓展之处:一是从研究对象来看,实现“双碳”目标应从“碳源”和“碳汇”两方面着手^[3]。但已有文献多侧重碳排放,对碳汇的关注明显不足,且仅有的关于碳汇的文献也多局限于单一植被类型的碳汇,对整体陆地绿色植被碳汇的测算更是匮乏。如 Zhang 等^[4]、张逸如等^[5]基于森林清查数据测算中国森林碳汇;尚杰和杨滨键^[6]基于农作物产量测算山东省的种植业碳汇^①。二是从研究方法来看,已有文献对于非均衡性的研究多关注其单一维度,鲜有文献以区域差异、分布动态和空间集聚相结合的视角开展考察。如 Chen 等^[7,8]、Zhang 等^[9]分别采用基尼系数和泰尔指数考察碳排放的区域差异特征;李建豹等^[10]采用标准差和变异系数考察长三角地区碳排放效率的绝对差异和相对差异特征;Liu 等^[11]采用探索性空间数据分析方法考察中国城市碳排放的空间集聚特征。

相较于已有文献,本文可能的创新在于:一方面,本文在计算城市碳排放和碳汇数据的基础上构建城市碳足迹压力指数,将关于“双碳”目标的已有研究从碳排放视角拓展至“双碳”视角,更加科学地评估“双碳”目标进程。另一方面,本文采用 Dagum 基尼系数、核密度估计和局域莫兰指数,从区域差异、分布动态和空间集聚多重视角尽可能全面地考察长江经济带城市碳足迹压力的非均衡性,有助于制定差异化、针对性的城市净零碳方案。

1 指标测算、研究方法与数据来源

1.1 指标测算

为准确识别长江经济带城市碳足迹压力在全国的相对位置,将长江经济带城市置于全国视野下考察,研究样本涉及全国 336 个地级及以上城市。本文在计算城市碳排放和碳汇数据的基础上构建城市碳足迹压力指数,以此识别城市减排增汇压力。

1.1.1 碳排放

已有文献对于中国碳排放的测算主要基于能源消费数据,较多关注省级行政区,而囿于省级以下行政区能源消费数据的获取难度,对城市碳排放的研究明显不足,且仅有的研究依然存在空间维度和时间维度的局限。邓荣荣和张翱翔^[12]采用夜间灯光数据反向推演中国城市碳排放数据,缓解了上述研究的时空局限,但仅以夜间灯光数据作为测算的依据,难以确保数据的精确性。Oda 等^[13]基于 CDIAC(Carbon Dioxide Information Analysis Center)提供的化石燃料排放数据,同时利用夜间灯光数据和发电站的排放强度、地理位置等信息对化石燃料排放数据进行时空分解,以此获取空间分辨率为 1km×1km 的全球碳排放栅格数据(ODIAC, Open-source Data Inventory for Anthropogenic CO₂),该数据现已更新至 2019 年,相较于其它数据源,进一步提升了碳排放数据的时效性、客观性和精确性。鉴于此,本文基于 2020 年中国行政区划矢量数据,采用 ArcGIS10.7 对 ODIAC 全球碳排放栅格数据进行掩膜提取以及分区统计,获取 2000~2019 年中国 336 个地级及以上城市(不包括三沙市)的碳排放数据。

1.1.2 碳汇

参照 Chen 等^[7]对中国县级陆地绿色植被碳汇的测试方法,本文利用美国国家航空航天局(NASA, National Aeronautics and Space Administration)发布的净初级生产力栅格数据 MOD17A3 以及 Yang 和 Xin^[14]提供的中国土地利用类型栅格数据 CLCD,计算陆地绿色植被碳汇总量。首先采用 HEGTool 对 MOD17A3 进行波段提取、图像拼接,然后采用 ArcGIS10.7 对 MOD17A3 和 CLCD 进行坐标转换、掩膜提取、分区统计,计算各城市每年不同土地利用类型(林地、草地、农地)的净初级生产力,最后参照 Chen 等^[7]提供的转换因子,将净初级生产力数据折算为碳汇量,至此获取 2000~2019 年中国 336 个地级及以上城市的陆地绿色植被碳汇总量,作为碳汇的衡量指标。

1.1.3 碳足迹压力

减排增汇是如期实现“双碳”目标的必然要求。参照 Chen 等^[15]对国家层面碳足迹压力的测算方法,本文基于中国城市碳排放和碳汇数据,构建城市碳足迹压力指数,以期真实反映观测期内各城市落实“双碳”目标的压力水平,测算公式如下:

$$cfp_{it} = ce_{it} / cs_{it} \quad (1)$$

式中： ce_{it} 和 cs_{it} 分别表示城市 i 在 t 年的碳排放和碳汇； cfp_{it} 表示城市 i 在 t 年的碳足迹压力，与城市减排增汇的压力成正比。

1.2 研究方法

1.2.1 Dagum 基尼系数

本文采用 Dagum 基尼系数测算长江经济带城市碳足迹压力的总体差异，并基于上中下游的区域划分方式测算区域内差异、区域间净差异和超变密度(后两者合称为区域间差异)，分解差异来源。

$$G = \left(\sum_{j=1}^k \sum_{h=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_h} |cfp_{ji} - cfp_{hr}| \right) / 2n^2\mu \quad (2)$$

式(2)为总体基尼系数的计算公式。分子部分为 n^2 对城市碳足迹压力差值的绝对值总和，其中 n 为城市总数； k 为区域个数； n_j (n_h) 为第 j (h) 个区域包含的城市个数； cfp_{ji} (cfp_{hr}) 为第 j (h) 个区域中第 i (r) 个城市的碳足迹压力； μ 为所有城市碳足迹压力的均值。

$$G = G_w + G_{gb} = G_w + (G_{nb} + G_t) \quad (3)$$

式(3)为总体差异的分解公式， G_w 为区域内差异对总体差异的贡献， G_{gb} 为区域间差异对总体差异的贡献，其又可以进一步分解为区域间净差异和超变密度对总体差异的贡献，即 G_{nb} 和 G_t 。限于篇幅，区域内差异、区域间净差异、超变密度及三者贡献的计算公式见 Dagum^[16]。

1.2.2 核密度估计

核密度估计采用离散采样点进行表面内插，使用连续平滑的密度曲线代替直方图刻画随机变量的分布位置、形态、延展性等特征，是非参数估计方法的一种，对模型的依赖性较低，具有较强的稳健性，被广泛用于变量的空间非均衡分析^[17]。核函数包括线性核函数、多项式核函数和高斯核函数等，本文选用较为常用的高斯核函数。核密度的计算公式如下：

$$f(x) = (1/nh) \sum_{i=1}^n K[(cfp_i - \mu)/h] \quad (4)$$

$$K(x) = (1/\sqrt{2\pi}) \exp(-x^2/2) \quad (5)$$

式(4)、(5)为核密度函数计算公式， $cfpi$ 表示城市 i 的碳足迹压力； $f(x)$ 表示核密度； n 表示城市个数； μ 表示城市碳足迹压力的均值； h 表示带宽； $K(x)$ 表示高斯核函数。

1.2.3 局域莫兰指数

局域莫兰指数用以探究以单个空间单元为中心的空间自相关情况，即空间集聚特征。

$$I_i = [(cfp_i - \mu) / s^2] \sum_{j=1}^n w_{ij} (cfp_j - \mu) \quad (6)$$

式(6)为局域莫兰指数的计算公式。 w_{ij} 为空间权重矩阵 W 的元素，表示城市 i 与 j 之间的空间权重，本文选择城市间距离的倒数进行衡量； μ 表示城市碳足迹压力的均值； s^2 为城市碳足迹压力的方差。根据局域莫兰指数的计算结果，可以识别高高、高低、低高和低低 4 种空间集聚类型。

1.3 数据来源

在“双碳”目标引发中国经济社会重大变革的当下，本文在计算城市碳排放和碳汇的基础上，测算 2000~2019 年中国 336 个地级及以上城市的碳足迹压力指数，从全国视野下识别长江经济带城市碳足迹压力在全国的相对位置。城市碳排放的原始数据来自全球环境研究中心(Center for Global Environmental Research, CGER)发布的 ODIAC 栅格数据。城市碳汇的原始数据来自 NASA 发布的净初级生产力遥感产品 MOD17A3 以及 Yang 等^[14]提供的中国土地利用类型栅格数据 CLCD。

表 1 原始数据说明

原始数据	空间分辨率	时间分辨率	空间跨度	时间跨度	数据来源
ODIAC	1 km	1year	全球	2000~2019	CGER
MOD17A3	500 m	1year	全球	2000 至今	NASA
CLCD	30 m	1year	中国	1990~2019	Yang 等 ^[14]

注：ODIAC 的数据连接为 https://db.cger.nies.go.jp/dataset/ODIAC/DL_odiac2020b.html；MOD17A3 的数据连接为 <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/products/MOD17A3HGF>；CLCD 的数据连接为 <https://zenodo.org/record/4417810#.Ys4-4TdBw7e>。

2 结果与分析

2.1 长江经济带城市碳足迹压力测算结果与分析

2000~2019 年长江经济带城市碳足迹压力测算结果见表 2。从平均水平来看，长江经济带城市碳足迹压力均值为 1.348，减排增汇压力低于长江经济带以外区域及全国平均水平。但长江经济带内部不同区域存在明显差异，其中上游和中游城市碳足迹压力均值分别为 0.265 和 0.527，低于长江经济带整体；下游城市碳足迹压力均值为 3.350，高于长江经济带整体。依据城市碳足迹压力平均水平由高至低进行排序，下游>长江经济带以外区域>全国>长江经济带整体>中游>上游。从长江经济带内部来看，城

市碳足迹压力平均水平由上游至下游表现为“梯度递增”分布格局。

表 2 2000~2019 年长江经济带城市碳足迹压力测算结果

年	长江经济带	长江经济带			全国	其它
		上游	中游	下游		
2000	0.494	0.124	0.244	1.149	0.761	0.921
2001	0.497	0.130	0.246	1.150	0.772	0.936
2002	0.593	0.138	0.270	1.413	0.836	0.982
2003	0.737	0.164	0.329	1.773	0.956	1.087
2004	0.824	0.179	0.360	1.995	1.073	1.222
2005	1.009	0.209	0.421	2.470	1.314	1.497
2006	1.110	0.247	0.455	2.708	1.449	1.653
2007	1.111	0.236	0.453	2.724	1.503	1.739
2008	1.272	0.261	0.525	3.123	1.579	1.763
2009	1.349	0.272	0.551	3.322	1.729	1.957
2010	1.587	0.321	0.607	3.947	1.897	2.082
2011	1.755	0.352	0.641	4.395	2.082	2.279
2012	1.773	0.347	0.670	4.430	2.085	2.272
2013	1.871	0.345	0.676	4.729	2.196	2.391
2014	1.750	0.333	0.668	4.378	2.158	2.402
2015	1.771	0.317	0.648	4.479	2.118	2.326
2016	1.849	0.327	0.678	4.679	2.114	2.273
2017	1.863	0.326	0.665	4.737	2.160	2.338
2018	1.821	0.340	0.691	4.567	2.117	2.294
2019	1.922	0.330	0.742	4.840	2.257	2.459
平均	1.348	0.265	0.527	3.350	1.658	1.844

从演变态势来看,观测期内年均增长率7.7%,高于长江经济带以外区域及全国平均水平。由此可见,虽然观测期内长江经济带城市碳足迹压力在全国处于低位,但需要警惕减排增汇压力的快速加剧。在长江经济带内部不同区域,上游和中游城市碳足迹压力年均增长率分别为5.6%和6.2%,均低于长江经济带整体;下游城市碳足迹压力年均增长率为8.2%,高于长江经济带整体。依据城市碳足迹压力年均增长率由高至低进行排序,下游>长江经济带整体>中游>全国>上游>长江经济带以外区域。从长江经济带内部来看,城市碳足迹压力年均增长率由上游至下游同样表现为“梯度递增”分布格局,与碳足迹压力平均水平的分布格局相一致,碳足迹压力水平较高区域的保持较高增速,同时碳足迹压力水平较低区域保持较低增速,可以初步判定长江经济带城市碳足迹压力区域差异呈扩大趋势。

为直观展示观测期内长江经济带城市碳足迹压力的时空分布特征,本文基于全国336个地级及以上城市碳足迹压力数据,采用4分位数划分为不同区间,低水平区间为0~0.181、中低水平区间为0.181~0.552、中高水平区间为0.552~1.647、高水平区间为1.647~39.076,并采用ArcGIS10.7绘制典型年份分布地图(图1)。从长江经济带整体来看,碳足迹压力处于低、中低、中高和高水平的平均城市数量占比^②依次递减,分别为32.4%、29.2%、20.3%和18.1%,但城市碳足迹压力逐年上升趋势明显,不断从较低层级向较高级别转移。低水平城市数量下降趋势明显,由2000年的62个缩减为2019年的31个,下降了1/2;中高水平和高水平城市数量上升趋势明显,分别上升了52.6%和200.0%;中低水平城市数量有所增加,但变化不明显。

分区域来看,上游城市碳足迹压力主要表现为低水平和中低水平,平均城市数量占比分别为56.2%和31.5%,中高水平和高水平平均城市数量占比较少,分别为11.1%和1.3%。上游城市所属省份为云南省、四川省、贵州省和重庆市,位于中国西南地区,生态系统受人为干扰相对较少,植被覆盖度较高,具有优越的水源涵养、水土保持和防风固沙能力,为维持中国自然资源生态系统的稳定及其服务功能发挥重要作用^[18],同时为“双碳”目标如期实现提供坚实的生态基础。以2019年为例,上游城市碳排放总量和碳汇总量分别为730.152和3266.172 Mt,碳汇水平远高于碳排放水平,决定城市减排增汇压力在长江经济带和全国城市中处于低位。上游城市碳足迹压力属于中高水平和高水平的城市集中于成渝城市群,是长江经济带上游和西南地区的重要经济增长极,其中成都市碳足迹压力属于高水平,是该区域唯一属于高水平的城市。

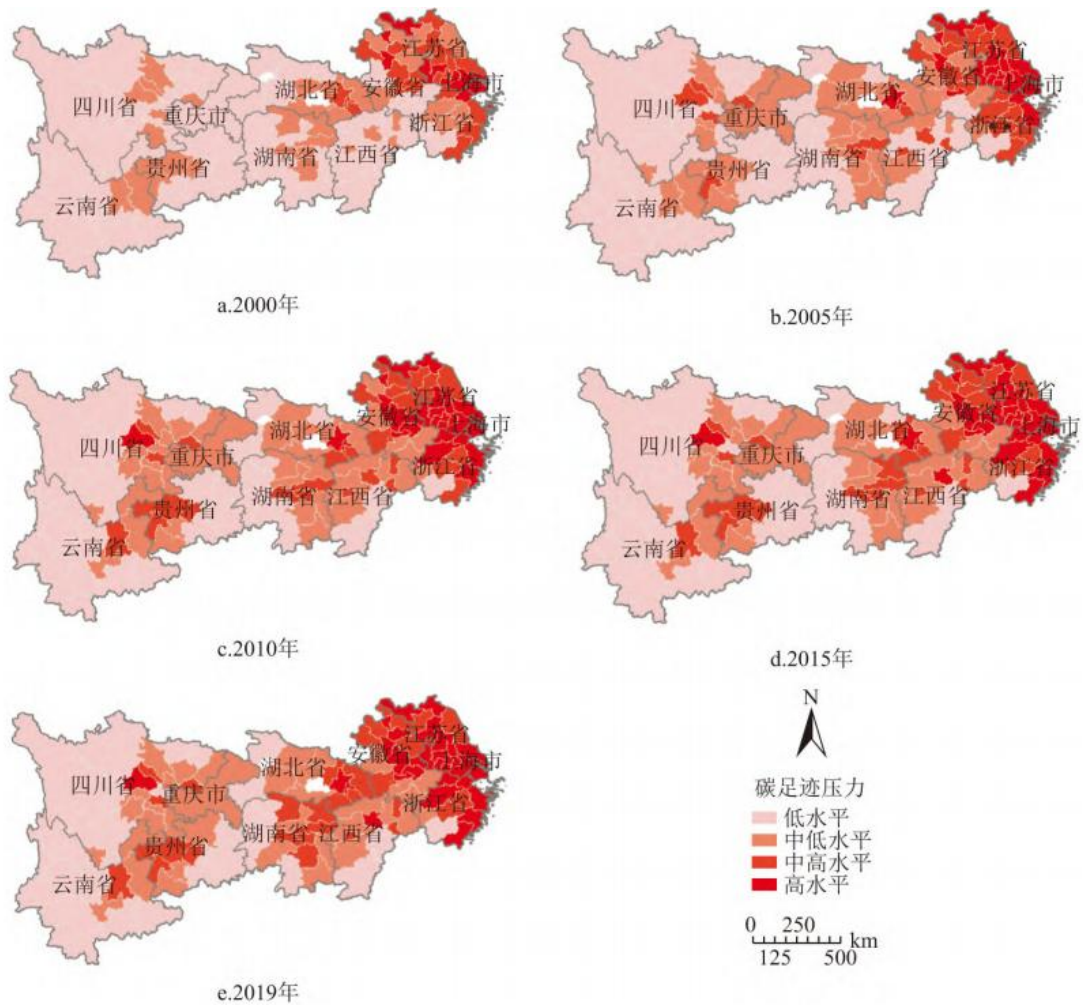


图 1 典型年份长江经济带城市碳足迹压力分布

Fig. 1 Distribution of city carbon footprint pressure in Yangtze River Economic Belt: typical years

中游城市碳足迹压力主要表现为低水平和中低水平，平均城市数量占比分别为 31.6%和 41.6%，以中低水平为主，且中高水平和高水平的平均城市数量占比均高于上游城市，分别为 21.6%和 5.3%。从碳排放总量和碳汇总量来看，2019 年中游城市碳排放总量为 546.918 Mt，碳汇总量为 1 297.88 Mt，二者均低于上游城市，但后者的差异更大，导致中游城市减排增汇压力高于上游城市。碳足迹压力属于高水平的城市包括武汉市和南昌市，均为省会城市，且前者为新一线城市，是中游区域经济和人口集聚中心。碳足迹压力属于中高水平的城市主要集中于武汉市周边，表明武汉市负向辐射作用明显。

下游城市碳足迹压力主要表现为中高水平和高水平，平均城市数量占比分别为 29.8%和 49.3%，以高水平为主，低水平和中低水平的平均城市数量占比较低，分别为 5.9%和 15.1%。下游城市碳足迹压力属于高水平和中高水平的城市主要集中在长江三角洲城市群，包括一线城市上海市，新一线城市南京市、苏州市、杭州市和宁波市，是长江经济带乃至全国的重要经济增长极之一，以 2019 年为例，下游城市地区生产总值占长江经济带整体的 52.8%。从碳排放总量和碳汇总量来看，2019 年下游城市碳排放总量为 2 001.726 Mt，碳汇总量为 695.341 Mt，碳排放水平远高于碳汇水平，决定城市减排增汇压力在长江经济带和全国城市中处于高位。

2.2 长江经济带城市碳足迹压力的区域差异特征

2000~2019年长江经济带城市碳足迹压力的Dagum基尼系数测算及其分解结果见表3。从总体差异来看,长江经济带城市碳足迹压力的总体差异水平较大,观测期内基尼系数均值为0.722,且扩大趋势明显,基尼系数由2000年的0.666上升至2019年的0.740,上升了11.1%。

从区域内差异来看,依据观测期内不同区域城市碳足迹压力的基尼系数均值由高至低进行排序,下游>上游>中游;上游城市碳足迹压力的基尼系数呈下降趋势,下降了2.6%;中游和下游城市碳足迹压力的基尼系数呈上升趋势,分别上升了7.5%和19.2%。下游城市碳足迹压力的差异水平和上升趋势均明显高于上游和中游城市,这与下游城市的城市规模结构更加均衡有关。相较于上游和中游城市,下游城市中二线及以上城市数量占比更高,达36.6%,而上游和中游城市中该比例仅为8.5%和7.9%,其构成主体为三线及以下城市,城市间碳足迹压力更为接近。不同规模城市的碳足迹压力差异明显,其中一线城市与五线城市的差距更是达到数十倍,不难发现,下游城市的碳足迹压力水平包括其分布曲线的两端,区域内碳足迹压力的差异水平较高。

表3 2000~2019年长江经济带城市碳足迹压力的Dagum基尼系数测算及其分解结果

年	总体差异	区域内差异			区域间差异			贡献率(%)		
		上游	中游	下游	上中	上下	中下	Gw	Gnb	Gt
2000	0.666	0.548	0.505	0.499	0.569	0.820	0.710	24.743	68.971	6.287
2001	0.666	0.555	0.511	0.504	0.571	0.815	0.711	25.037	68.095	6.868
2002	0.694	0.544	0.522	0.549	0.572	0.837	0.738	25.626	68.520	5.855
2003	0.700	0.544	0.523	0.554	0.575	0.844	0.744	25.607	68.882	5.512
2004	0.713	0.546	0.526	0.583	0.579	0.851	0.755	26.170	68.242	5.587
2005	0.716	0.543	0.525	0.574	0.578	0.857	0.762	25.754	69.182	5.064
2006	0.717	0.560	0.532	0.582	0.578	0.850	0.767	26.111	68.189	5.700
2007	0.722	0.554	0.529	0.587	0.579	0.856	0.769	26.104	68.527	5.370
2008	0.725	0.553	0.533	0.592	0.586	0.860	0.768	26.181	68.606	5.213
2009	0.724	0.549	0.532	0.588	0.584	0.862	0.770	26.020	68.938	5.042

2010	0.732	0.548	0.546	0.595	0.583	0.864	0.784	26.091	68.837	5.072
2011	0.735	0.551	0.539	0.594	0.577	0.866	0.792	25.957	69.142	4.901
2012	0.734	0.540	0.542	0.594	0.580	0.868	0.787	25.946	69.235	4.818
2013	0.741	0.549	0.547	0.594	0.588	0.876	0.796	25.784	69.717	4.499
2014	0.738	0.541	0.546	0.603	0.587	0.872	0.788	26.138	69.080	4.782
2015	0.744	0.540	0.550	0.600	0.590	0.879	0.796	25.882	69.730	4.389
2016	0.743	0.540	0.549	0.598	0.592	0.880	0.795	25.799	69.913	4.288
2017	0.746	0.540	0.548	0.599	0.589	0.882	0.800	25.769	70.040	4.191
2018	0.739	0.539	0.549	0.600	0.589	0.874	0.789	26.016	69.334	4.650
2019	0.740	0.534	0.543	0.595	0.597	0.882	0.786	25.744	70.023	4.233
平均	0.722	0.546	0.535	0.579	0.582	0.860	0.770	25.824	69.060	5.116

从区域间差异来看，观测期内不同区域城市碳足迹压力之间的基尼系数均值由高至低进行排序，上游一下游>中游一下游>上游一中游，且区域间差异均呈上升态势，上游一中游、上游一下游、中游一下游的基尼系数分别上升了4.9%、7.6%和10.7%。这一结果符合常规认知，即碳足迹压力较高的下游城市与碳足迹压力较低的上游城市存在较大差异，同时在上游城市碳足迹压力保持相对较低增速、下游城市碳足迹压力保持相对较高增速的情况下，上游一下游差异仍将保持高位。

从基尼系数的分解结果来看，区域间净差异是总体差异的主要来源，观测期内平均贡献率为69.1%，其次为区域内差异和超变密度，平均贡献率分别为25.8%和5.1%，且区域间净差异贡献率呈明显上升趋势，超变密度贡献率呈明显下降趋势，区域内差异贡献率在波动中有所上升，但变化趋势不明显。区域间差异由区域间净差异和超变密度组成，其中区域间净差异表示区域间的均值差异，而超变密度表示区域间差异与均值差异具有不同的方向，即均值较高的区域中的低值城市与均值较低的区域中的高值城市之间存在差异，可以在一定程度上反映区域内部的极化现象。

2.3 长江经济带城市碳足迹压力的分布动态特征

不同于Dagum基尼系数聚焦于相对差异，核密度估计可以通过分布曲线的延展性刻画绝对差异，使本文得以在相对和绝对

的双重视角下，更为全面地考察长江经济带城市碳足迹压力的差异现状。此外，分布曲线的主峰形态和波峰数量分别代表了碳足迹压力的收敛和极化特征，能够从多个维度较为完整地展示长江经济带城市碳足迹压力的分布特征。本文采用 Matlab R2021a 绘制 2000~2019 年长江经济带城市碳足迹压力的三维核密度估计曲面图，能够直观展示观测期内长江经济带城市碳足迹压力的分布特征及其动态演变。

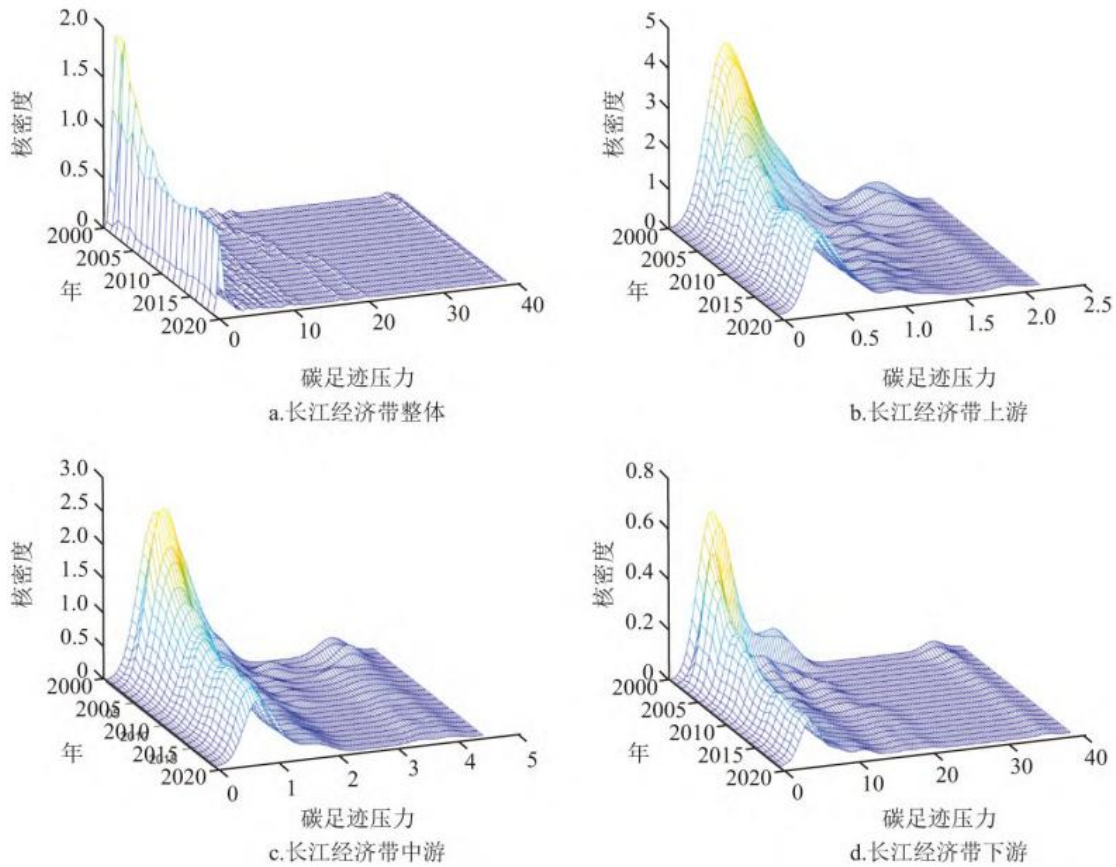


图 2 2000~2019 年长江经济带城市碳足迹压力的三维核密度估计曲面图

Fig. 2 Three-dimensional kernel density estimation surface plot of city carbon footprint pressure in Yangtze River Economic Belt; 2000~2019

(1) 主峰形态。

从长江经济带整体来看，观测期内主峰高度明显下降，表明聚集在主峰下的城市数量下降，长江经济带城市碳足迹压力离散程度增加。可能的原因在于，观测期内不同城市的碳足迹压力增速存在差异，导致部分增速较大的城市逐渐脱离主峰区域。分区域来看，上游、中游和下游城市分布曲线的主峰形态基本一致，主峰高度明显下降，各区域城市碳足迹压力离散程度增加。

(2) 延展性。

从长江经济带整体来看，观测期内分布曲线存在明显的右拖尾现象，表明长江经济带部分城市的碳足迹压力远高于平均水平，存在较高的绝对差异。这与长江经济带城市碳足迹压力的“梯度递增”分布格局相一致，以长江三角洲城市群为代表的下游城市，其减排增汇压力远高于上游和中游城市，导致其在分布曲线的位置远远脱离均值区域。分区域来看，上游、中游和下游城市分布曲线均存在明显的右拖尾现象，其中下游城市分布曲线的右拖尾现象更为突出，绝对差异水平在长江经济带位居第

一。

(3) 波峰数量。

从长江经济带整体来看，观测期内分布曲线存在多峰现象，表明长江经济带城市碳足迹压力呈现多级分化特征，即根据碳足迹压力分布的聚合特征将城市划分为不同子群，子群内部碳足迹压力水平接近，同时子群之间碳足迹压力水平存在差异。此外，部分波峰位置右移趋势明显，表明部分子群碳足迹压力水平不断提高。分区域来看，上游、中游和下游城市分布曲线均存在明显的多峰现象，各区域城市碳足迹压力均呈现多级分化特征。

2.4 长江经济带城市碳足迹压力的空间集聚特征

典型年份长江经济带城市碳足迹压力的空间集聚分布地图见图 3。从长江经济带整体来看，观测期内长江经济带城市碳足迹压力同时具有高高、高低、低高和低低 4 种空间集聚类型，平均城市数量占比^⑧分别为 13.3%、0.8%、5.1%和 34.8%，以高高和低低为主，即碳足迹压力较高(低)的城市，其周边城市的碳足迹压力同样较高(低)，且空间集聚类型的时空分布基本保持稳定。

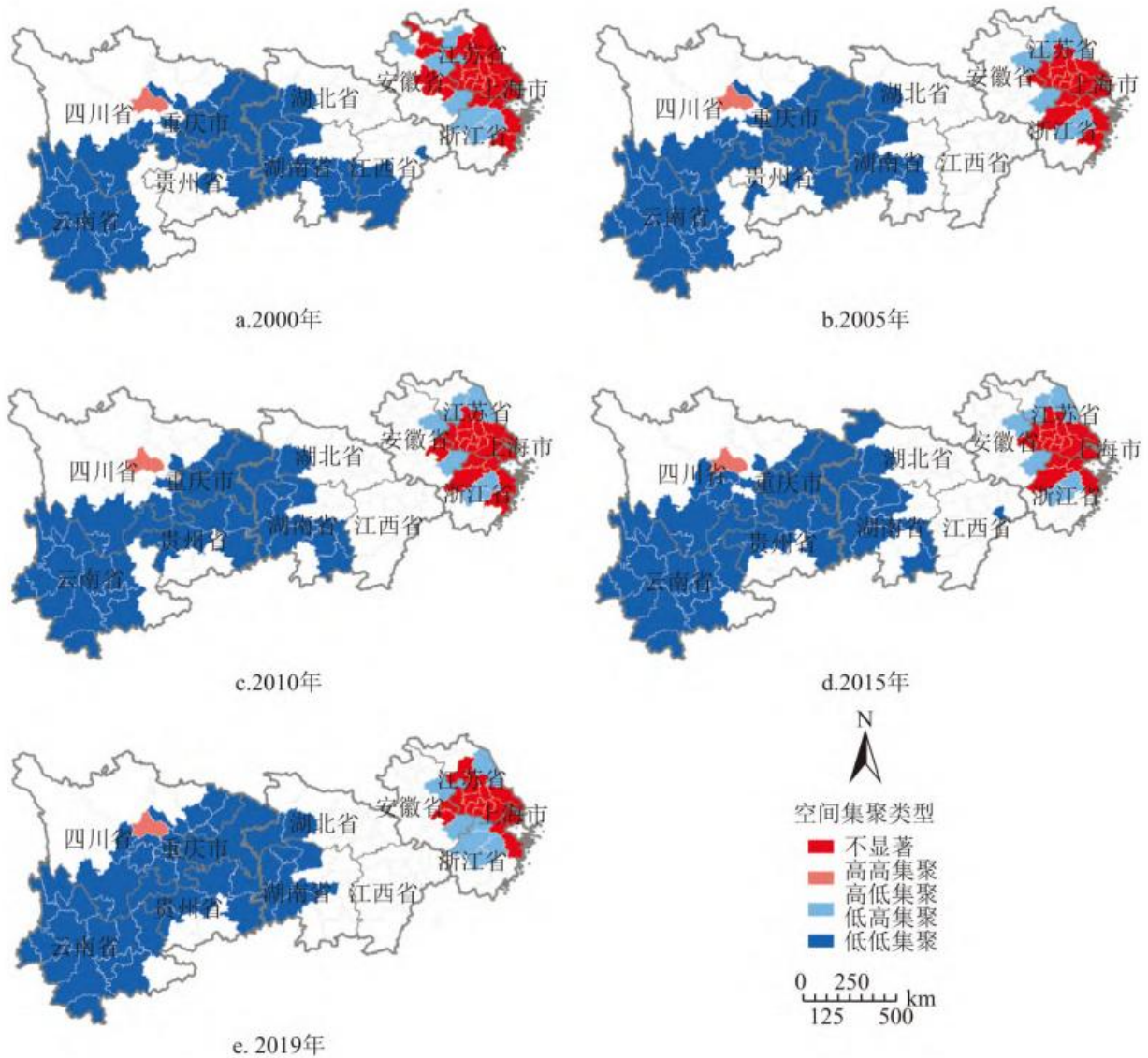


图 3 典型年份长江经济带城市碳足迹压力的空间集聚分布

Fig. 3 Spatial clustering distribution of city carbon footprint pressure in Yangtze River Economic Belt; typical year

分区域来看，上游城市碳足迹压力具有高低和低低 2 种空间集聚类型，平均城市数量占比分别为 2.2%和 67.2%，以低低集聚类型为主。根据 2.1 的分析，上游城市碳足迹压力主要位于低水平和中低水平区间，较低的碳排放水平和优越的生态本底使上游城市面临较低的减排增汇压力。观测期内上游城市中仅有成都市表现为高低集聚，对周边城市的碳足迹压力具有负向辐射作用。成都市与重庆市是上游城市中仅有的 2 个新一线城市，虽然成都市的碳排放水平低于重庆市，但后者在碳汇水平上具备更大优势，2019 年重庆市碳汇 208.569 Mt，在上游城市中位居第一，导致其减排增汇压力远低于成都市。此外，重庆市是上游城市中唯一的碳排放权交易试点城市，自 2014 年正式启动碳排放权交易试点以来，用市场化手段推动工业企业节能减排，能源消费结构不断优化，煤炭消费量由 2015 年的 1 165.180 万 t 减少至 2019 年的 182.800 万 t，天然气消费量则从 2015 年的 146.880 亿 m³ 增加至 2019 年的 189.400 亿 m³，碳达峰进程不断推进。

中游城市碳足迹压力仅表现为低低集聚，平均城市数量占比为 32.1%，且主要分布在与上游区域接壤或距离较近的城市。相

较于上游城市，中游城市碳足迹压力水平虽然有所提升，但仍与上游城市碳足迹压力水平十分接近。在长江经济带城市碳足迹压力的“梯度递增”分布格局下，上游—中游梯度明显远低于中游—下游梯度，说明长江经济带城市碳足迹压力分布具有明显“右拖尾”特点。在“双碳”政策背景下，低低集聚类型城市在减排增汇中具有明显的区域协同优势，可以在更大程度上发挥城市间正向辐射影响。但不容忽视的是，当前阶段，低低集聚类型城市形成的主导因素仍基于西南地区的生态资源优势，在该部分城市多为二线及以下城市的情况下，仍处于城市化和工业化进程的中后期，可以预计在未来很长一段时期仍将保持高速的碳排放增长。因此，应在积极保护和修复生态资源、巩固生态资源优势的同时，积极布局碳排放总量和强度“双控”，优化能源消费结构，降低经济发展和碳达峰的冲突。

下游城市碳足迹压力具有高高和低高 2 种空间集聚类型，平均城市数量占比分别为 41.0%和 15.6%，以高高集聚类型为主，已经形成以上海市、南京市、苏州市、常州市、合肥市、杭州市等大型城市为核心的高碳足迹压力集聚区域。不难发现，高高集聚和低高集聚类型城市主要集中在长江三角洲城市群，这些城市已经基本完成城市化和工业化进程，是长江经济带的重要发展引擎，碳排放水平居于全国前列。长江三角洲城市群包括多个低碳城市试点，具有经济基础、技术能力以及节能减排需求，可以率先实现碳达峰和碳中和，能够对长江经济带内部乃至全国起到示范带动作用。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文在计算 2000~2019 年中国 336 个地级及以上城市碳排放和碳汇数据的基础上，构建城市碳足迹压力指数，识别城市减排增汇压力，在全国视野下考察长江经济带城市碳足迹压力的发展水平。在此基础上，采用 Dagum 基尼系数、核密度估计和局域莫兰指数考察长江经济带城市碳足迹压力的区域差异、分布动态和空间集聚特征。主要研究结论如下：

(1) 长江经济带城市碳足迹压力保持增长趋势，区域内部上中下游呈梯度递增空间格局。在全国视野下进行考察，观测期内长江经济带城市碳足迹压力始终低于长江经济带以外区域以及全国平均水平，但年均增速高于长江经济带以外区域以及全国平均水平。

(2) 从区域差异来看，长江经济带城市碳足迹压力的总体差异水平较大，且保持扩大趋势。从差异来源来看，区域间净差异是总体差异的主要来源，其次为区域内差异和超变密度。

(3) 从分布动态来看，长江经济带城市碳足迹压力的离散程度呈扩大趋势，绝对差异水平较大，且存在明显的多极分化特征。上中下游城市碳足迹压力的分布动态特征与长江经济带整体基本一致。

(4) 长江经济带城市碳足迹压力具有高高、高低、低高和低低 4 种空间集聚类型，以高高和低低集聚为主。上游城市碳足迹压力具有高低和低低 2 种空间集聚类型，以低低集聚为主；中游城市碳足迹压力仅表现为低低集聚，且主要分布在与上游城市接壤或距离较近的城市；下游城市碳足迹压力具有高高和低高 2 种空间集聚类型，以高高集聚为主。

3.2 讨论

虽然长江经济带城市碳足迹压力低于长江经济带以外区域及全国平均水平，但其年均增速处于高位，减排增汇压力不容忽视，且其时空格局具有明显非均衡性，本文建议从如下几点进行优化：

(1) 结合长江经济带城市碳足迹压力非均衡现状，制定符合城市自身特点的差异化净零碳路径，梯次有序推进“双碳”目标实现。下游城市在工业化和城镇化进程中处于前列，碳足迹压力主要来自碳排放，应积极落实碳排放总量和强度“双控”，鼓励该类城市率先实现碳达峰。上游城市以及与上游城市接壤或临近的部分中游城市，拥有丰富的可再生能源，通过积极布局水能、

风能、太阳能,优化能源消费结构,同样可以率先实现碳达峰,同时该类城市生态系统的碳汇能力强大,应巩固提升生态碳汇能力,增强全局意识,为长江经济带整体实现碳中和贡献力量。中游城市的经济和生态基础并不具备优势,在推进工业化和城镇化和进程中,应加强绿色低碳意识,提前布局碳排放总量和强度“双控”,提高经济发展的前瞻性。

(2)加强顶层设计,打破“属地化”治理模式,构建和完善长江经济带减排增汇协作机制。下游城市碳足迹压力已经形成以大型城市为核心的高碳足迹压力集聚区域,城市间碳足迹压力存在相互加强或负向辐射风险,减排增汇协作机制亟待构建和完善。建议借鉴大气污染区域联防联控的成功实践经验,成立长江经济带减排增汇协作小组,统筹减排增汇方案,优化经济带内工业布局和能源消费结构,将减排增汇方案落实到城市,并进一步分解到责任单位和企业,并完善考核制度,公开发布考核结果。

囿于中国省级以下行政区能源消费数据的获取难度,本文采用的城市碳排放原始数据为 CGER 发布的 ODIAC 栅格数据。相较于其它数据源,ODIAC 同时综合了 CDIAC 化石燃料排放数据、夜间灯光、发电站排放强度和地理位置等多维度信息,提高了数据可信度。但值得说明的是,ODIAC 属于推演数据,与真实碳排放水平仍存在一定偏离。今后的研究可以创新数据获取方式和来源,进一步增强数据可信度。

参考文献

[1] 董会忠,韩沅刚.长江经济带城市群环境规制效率时空演变及影响因素[J].长江流域资源与环境,2021,30(9):2049-2060. DONG H Z, HAN Y G. Spatial-temporal evolution and influencing factors of environmental regulation efficiency of urban agglomerations in the Yangtze River economic belt[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(9):2049-2060.

[2] 黄成,吴传清.长江经济带工业绿色转型与生态文明建设的协同效应研究[J].长江流域资源与环境,2021,30(6):1287-1297. HUANG C, WU C Q. Research on the synergetic effect of industrial green transformation and ecological civilization construction in the Yangtze River economic belt[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(6):1287-1297.

[3] 杜之利,苏彤,葛佳敏,等.碳中和背景下的森林碳汇及其空间溢出效应[J].经济研究,2021,56(12):187-202. DU Z L, SU T, GE J M, et al. Towards the carbon neutrality: The role of carbon sink and its spatial spillover effects[J]. Economic Research Journal, 2021, 56(12):187-202.

[4] ZHANG C, JU W, CHEN J M, et al. China's forest biomass carbon sink based on seven inventories from 1973 to 2008[J]. Climatic Change, 2013, 118(3):933-948.

[5] 张逸如,刘晓彤,高文强,等.天然林保护工程区近20年森林植被碳储量动态及碳汇(源)特征[J].生态学报,2021,41(13):5093-5105. ZHANG Y R, LIU X T, GAO W Q, et al. Dynamic changes of forest vegetation carbon storage and the characteristics of carbon sink (source) in the Natural Forest Protection Project region for the past 20 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(13):5093-5105.

[6] 尚杰,杨滨键.种植业碳源、碳汇测算与净碳汇影响因素动态分析:山东例证[J].改革,2019(6):123-134. SHANG J, YANG B J. Estimation of carbon source and carbon sequestration in planting industry and dynamic analysis of influencing factors of net carbon sequestration: A case study of Shandong Province[J]. Reform, 2019(6):123-134.

-
- [7] CHEN J,GAO M,CHENG S,et al.County-level CO₂ emissions and sequestration in China during 1997-2017[J]. Scientific Data, 2020, 7:391.
- [8] CHEN J,CHENG S,SONG M,et al. Interregional differences of coal carbon dioxide emissions in China[J]. Energy Policy, 2016, 96:1-13.
- [9] ZHANG Y,YU Z,ZHANG J. Research on carbon emission differences decomposition and spatial heterogeneity pattern of China ' s eight economic regions[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2022, 29(20):29976-29992.
- [10] 李建豹, 黄贤金, 揣小伟, 等. 长三角地区碳排放效率时空特征及影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(7):1486-1496. LI J B, HUANG X J, CHUAI X W, et al. Spatio-temporal characteristics and influencing factors of carbon emissions efficiency in the Yangtze River Delta region[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(7):1486-1496.
- [11] LIU K, NI Z, REN M, et al. Spatial differences and influential factors of urban carbon emissions in China under the target of carbon neutrality[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(11):6427.
- [12] 邓荣荣, 张翱翔. 中国城市数字金融发展对碳排放绩效的影响及机理[J]. 资源科学, 2021, 43(11):2316-2330. DENG R R, ZHANG A X. The impact of urban digital finance development on carbon emission performance in China and mechanism[J]. Resources Science, 2021, 43(11):2316-2330.
- [13] ODA T, MAKSYUTOV S, ANDRES R J. The Open-source Data Inventory for Anthropogenic Carbon dioxide (CO₂), version 2016 (ODIAC2016): A global, monthly fossil-fuel CO₂ gridded emission data product for tracer transport simulations and surface flux inversions[J]. Earth System Science Data, 2018, 10(1):87-107.
- [14] YANG J, HUANG X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8):3907-3925.
- [15] CHEN J, FAN W, LI D, et al. Driving factors of global carbon footprint pressure: Based on vegetation carbon sequestration[J]. Applied Energy, 2020, 267:114914.
- [16] DAGUM C. A new approach to the decomposition of the Gini income inequality ratio[J]. Empirical Economics, 1997, 22(4):515-531.
- [17] 张文彬, 王赟. 可行能力视角下中国福利水平区域差异、动态演进与结构分解[J]. 数量经济技术经济研究, 2021, 38(12):45-66. ZHANG W B, WANG Y. Regional differences, dynamic evolution and structural decomposition of China' s welfare from the perspective of feasible capability[J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2021, 38(12):45-66.
- [18] 吴英迪, 蒙吉军. 中国自然资源生态服务重要性评价与空间格局分析[J]. 自然资源学报, 2022, 37(1):17-33. WU Y D, MENG J J. Quantifying the spatial pattern for the importance of natural resource ecosystem services in

注释

①以低水平的平均城市数量占比为例, 2000、2005、2010、2015、2019年处于低水平的城市数量分别为62、44、33、34、31, 平均城市数量为40.8, 城市总数为126, 因此平均城市数量占比为 $40.8/126=32.4\%$ 。由于数值保留采取四舍五入, 因此各水平的平均城市数量占比加总可能存在不等于1的情况。

②值得说明的是, Chen等[7]基于MODIS遥感数据对中国县级陆地绿色植被碳汇进行测算, 为本文测算中国地级及以上城市陆地绿色植被碳汇提供了方法参照, 但其时间跨度为2000~2017年, 需要拓展研究的时间尺度, 且并未覆盖中国全部区县, 难以逆向加总获取地级行政区的碳汇数据, 需要拓展研究的空间尺度。

③以高高集聚的平均城市数量占比为例, 2000、2005、2010、2015、2019年表现为高高集聚的城市数量分别为21、16、17、15、15, 平均城市数量为16.8, 城市总数为126, 因此平均城市数量占比为 $16.8/126=13.3\%$ 。此外, 由于数值保留采取四舍五入, 因此各种集聚类型(包括不存在显著集聚类型的城市)的平均城市数量占比加总可能存在不等于1的情况。