

市域国土空间碳排放测算及低碳化发展效率差异

张振龙, 侯琰珍, 孙鸿鹄

(苏州科技大学建筑与城市规划学院, 苏州 215011)

摘要: 国土空间低碳化发展为实现“双碳”战略目标提供基础。市域空间是国土空间规划兼具目标传导与战略落实双重属性的关键地域单元, 揭示市域国土空间碳排放特征及其低碳化发展效率的空间差异对于塑造绿色低碳的国土空间格局具有重要意义。研究探索国土空间碳排放测算方法, 从经济、社会、生态三个维度分析市域国土空间低碳化发展效率的空间差异特征, 进一步提出面向空间治理的优化策略, 并以苏州市为例进行了实证分析。结果表明: (1) 构建的市域国土空间碳排放测算方法及低碳化发展模型能够有效测度市域碳排放特征及其低碳化发展效率空间差异。 (2) 苏州市2020年碳排放总量为2.38亿t, 碳排放量高值地块集中分布在各类工业集聚区内, 低值地块分散分布在乡镇地带以及各类碳汇主体地区。国土空间低碳化发展效率在不同尺度上均有明显差异, 区县尺度主要表现出地域差异, 乡镇尺度具有城乡差异。同时, 经济社会发展水平相对较高的地区, 其经济、社会低碳化发展效率也较高, 但生态低碳化发展效率往往较低。 (3) 根据区县、乡镇不同空间类型, 促进经济社会的绿色发展转型, 发挥国土空间规划减排固碳的作用, 构建复合协调、低碳可持续的国土空间格局。

关键词: 国土空间; 碳排放; 低碳发展; 空间差异; 苏州市

国土空间承载了各类自然资源等碳汇实体以及相关社会经济活动的碳源, 国土空间规划因此成为统筹碳源、碳汇、减碳治理的系统性政策工具之一^[1]。2021年9月, 国家在《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》中提出“构建有利于碳达峰、碳中和的国土空间开发保护新格局”。市域作为上下衔接和实施传导的国土空间关键地域单元, 覆盖了中心城区和乡镇范围的碳排活动, 研究其范围的碳排放对于满足不同规划主体诉求及低碳治理策略落实, 支撑不同层级国土空间规划中低碳发展策略的纵向衔接和横向协调至关重要。在落实生态文明建设和“双碳”战略的背景下, 如何将绿色低碳发展理念融入国土空间规划体系, 优化调整国土空间布局, 对于促进“双碳”目标的实现具有重要意义。2021年12月中央经济工作会议进一步提出“实现碳达峰碳中和是推动高质量发展的内在要求”, 而不是一刀切的运动式减碳, 需要对其驱动力有系统性认识。因此, “双碳”战略需要对碳排放整体水平进行准确测度, 分析其空间分布特征, 需要对经济、社会、生态等系统要素的低碳发展水平进行科学评估, 把握不同国土空间单元低碳化发展效率的差异特征, 因地制宜地提出多维度、系统性、差别化的低碳

收稿日期: 2022-08-08; 修订日期: 2023-03-30

基金项目: 江苏高校优势学科(城乡规划学)建设工程项目; 国家一流专业(城乡规划)建设项目; 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX22_1547)

作者简介: 张振龙(1980-), 男, 河北平山人, 博士, 副教授, 研究方向为国土空间规划、城乡规划技术与方法。

E-mail: zhenlongzhang@163.com

发展策略,有利于塑造低碳可持续的国土空间格局。

目前,围绕碳排放测算的研究主要依据单个行业部门的统计数据测算碳排放量,或以《IPCC温室气体排放指南》为基础,从生产端活动部门构建城市碳排放清单,提供了具有可比性的城市碳排放测算方法^[2],基于土地利用类型及能源消耗测算碳排放的方法兼具数量统计的同时^[3],实现了碳排放规模的空间化表达,但忽略了碳排活动强度的空间差异性,对于减碳规划政策在空间的落实指导不足^[4]。同时,通过构建“土地利用—碳排放”的关联框架也将碳排放与空间载体要素相联系,为国土空间碳排放的测算提供了理论基础^[5]。在载体要素的基础上,基于地理空间数据数量统计特征进行碳排放分配,模拟碳排放的空间分布^[6],为低碳规划治理策略提供了空间现状支撑,但分配主体的同质化导致空间分配存在较大误差,需要进一步提升测算精度。在碳排放测算的基础上,部分学者进一步研究了国土空间低碳化发展效率,包括经济、社会、生态各维度下低碳化发展效率的测度方法^[7]及空间差异^[8]分析。如基于地区经济发展、能源消耗及碳排放水平,采用数据包络分析方法测度其低碳经济发展效率^[9];采用泰尔指数测度碳排放福利绩效反映地域单元碳排放在社会效益层面的区域差异,分析其社会低碳化发展水平的差异特征^[10];运用碳足迹、碳赤字衡量生态环境对生产排放的吸收程度,表征生态碳汇效率的空间差异^[11],为单一维度下的低碳化发展效率评价提供了较为丰富的思路和方法,但关于低碳化发展效率综合评价的研究不足。总之,囿于数据精度及方法限制,已有研究针对国土空间碳排放的测算方法尚未统一,测算结果一般较难落到地块尺度上,且缺乏多维复合视角下国土空间低碳化发展效率差异的研究,难以满足地方国土空间规划对绿色低碳发展精细化治理的支撑。

考虑到“双碳”战略与国土空间高质量开发与保护的全向融合,以及面向基层国土空间治理对战略的落实,本文构建市域国土空间碳排放测算方法,基于多源数据测算市域内不同空间单元的碳排放量;进一步以“经济—社会—生态”复合视角构建国土空间低碳化发展效率的测度方法,从区县、乡镇两个行政治理尺度分析市域范围内国土空间单元低碳化发展效率的空间差异特征。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

苏州市位于江苏省南部,西抱太湖,北依长江,是国家历史文化名城,长三角重要的中心城市之一。苏州市下辖6个市辖区、代管4个县级市,总面积8657.32 km²。作为中国经济转型发展的领先区,截至2020年,苏州城镇化率已达到81.72%,GDP达到20170.45亿元,工业产值亦长期排名全国前列。2012年,苏州成为国家第二批低碳试点城市,倡导节能循环低碳理念,推动空间格局绿色化变革,并致力于在2025年提前实现“碳达峰”。而苏州作为工业大市,面临人口持续流入、能源消耗递增、土地矛盾冲突等多方面问题,对其构建高效低碳、协调可持续的国土空间提出更高的要求。

1.2 数据来源

本文数据包括统计数据和空间数据(表1)。统计数据包括能源、工业、交通、农业、人口、经济,源于城市及各区县2020年的统计年鉴。空间数据包括土地利用数据、POI数据、家庭户数和道路数据。土地利用数据源于高分二号遥感卫星图像,参照《第三次全国国土调查技术规程》进行土地利用分类。

表1 研究数据来源

Table 1 Description of research data sources

数据类型	具体数据	数据内容	数据来源
统计数据	能源数据	工业企业分行业能源消费量、城市居民日常生活能源消费量	《苏州统计年鉴（2021年）》
	工业数据	水泥、玻璃、合成氨等主要工业产品产量	《张家港统计年鉴（2021年）》
	交通数据	公路、铁路、水运的客货运周转量、城市公共交通的年行驶里程	《昆山统计年鉴（2021年）》 《太仓统计年鉴（2021年）》 《吴江年鉴（2021年）》
	农业数据	农用机械量、农药量、化肥量、动物存栏量、农作物产量等	《2020年苏州市交通发展年度报告》、苏州市第七次人口普查
	人口数据	常住人口数量	
	经济数据	GDP数据，部分缺失数据结合《苏州市第四次全国经济普查》相关数据进行数据插补	
空间数据	土地利用数据	根据高分二号遥感卫星图像解译，遥感图像空间分辨率1 m，获取时间2018年5月。参照《第三次全国国土调查技术规程》进行分类，整体分类精度高于85%	中国资源卫星应用中心
	POI数据	2020年苏州市域POI数据，根据研究需要进行分类筛选与归并，并进行数据清洗、坐标转换	高德API
	家庭户数数据	具有经纬度的小区户数数据	安居客
	道路数据	高速路、国道、省道、县道、乡道等城市分等级道路	Open Street Map

1.3 研究思路

以构建高效绿色的国土空间格局和引导城市低碳减排发展为目标，基于国土空间类型、衔接IPCC碳排放测算清单进行市域国土空间碳排放测算，并基于多源地理空间数据将碳排放结果落实到地块尺度，厘清市域范围内碳排放的数量规模及空间格局，以保障国土空间治理对碳排放的有效性与科学性。为明晰国土空间单元的低碳化发展水平与生态碳汇能力的差异程度，进一步衡量不同空间单元在经济—社会—生态复合系统下低碳化发展效率，并制定差异化的低碳空间发展策略，以期塑造复合协调、绿色低碳发展国土空间格局，促进生态文明建设下国土空间的高质量发展，积极助力实现“双碳”目标（图1）。

1.4 研究方法

本文主要通过建立“国土空间—碳排放”对应关系，测算国土空间碳排放，基于多源大数据实现市域国土空间碳排放在地块空间的表达，并通过分区统计获得乡镇、区县单元的碳排放总量。以此为基础构建国土空间低碳化发展效率测度方法，分析不同空间单元低碳化发展的空间差异特征。在结果分析中，采用自然断点分级法将空间碳排放及低碳化效率水平结果由高到底划分为五个等级，突出空间单元内部相似性与外部差异性。

1.4.1 市域国土空间碳排放测算方法

国土空间碳排放测算主要有两种方法，一种是自下而上方法，根据每一地块实际消耗能源计算的碳排放；另一种是自上而下方法，根据统计数据或者夜间灯光等数据计算各个部门碳排放后，通过空间化方法分配到每一个空间单元上^[12]。一般来说，前者更为准确，但是所有地块的能源消耗数据难以获取，一般用来测度微观尺度或一个部门的用地碳排放；后者由于数据容易获取，使用更加普遍，但是空间化的方法差异性较大，而大数据和空间模型能提高空间分配的精度^[13]。本文采用自上而下和自下而上相结合的测算方法，进一步从建立“国土空间—碳排放”的对应关系、构建碳排放测算体系深入分析，并在保证数据可得性、权威性的同时提高空间化结果的准确性。

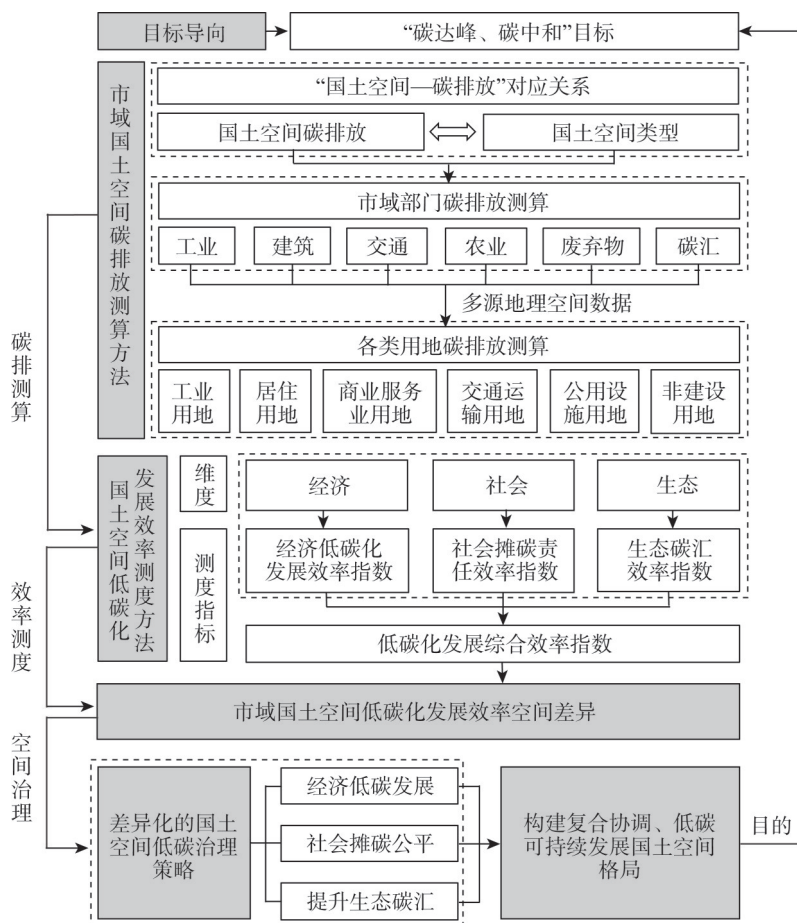


图1 研究思路框架图

Fig. 1 Research framework

(1) 建立“国土空间—碳排放”对应关系

为城市碳排放清单与国土空间规划相互衔接，并反映社会经济活动的影响，本文选取国土空间要素载体，从消费端角度重新归纳《IPCC温室气体排放指南》中的碳排放部门^[14]，划分为工业、建筑、交通、农业、废弃物处理、碳汇六个部门，基于终端消费活动产生碳排放的空间场所，建立市域“国土空间—碳排放”的对应关系（图2）。

(2) 构建碳排放测算体系

本文碳排放测算方法主要借鉴《IPCC国家温室气体清单指南》及《省级温室气体清单编制指南》，基于终端碳排放活动水平及活动系数从工业 C_E 、建筑 C_B 、交通 C_T 、农业 C_F 、废弃物处理 C_W 、碳汇 C_A 六个部门测算市域碳排放总量 C 。测算的温室气体主要包含 CO_2 、 CH_4 、 N_2O ，最终按照IPCC中的GWP数据转化为 CO_2 当量值。

$$C = C_E + C_B + C_T + C_F + C_W + C_A \quad (1)$$

工业部门碳排放主要源自工业化石能源燃烧和工业生产过程中材料的化学或物理转化释放的碳排放。工业能源碳排放主要按照工业行业年消耗燃烧的能源种类及数量测算，由于工业生产过程中工艺的复杂性导致相关系数难以获取，根据水泥、钢铁、玻

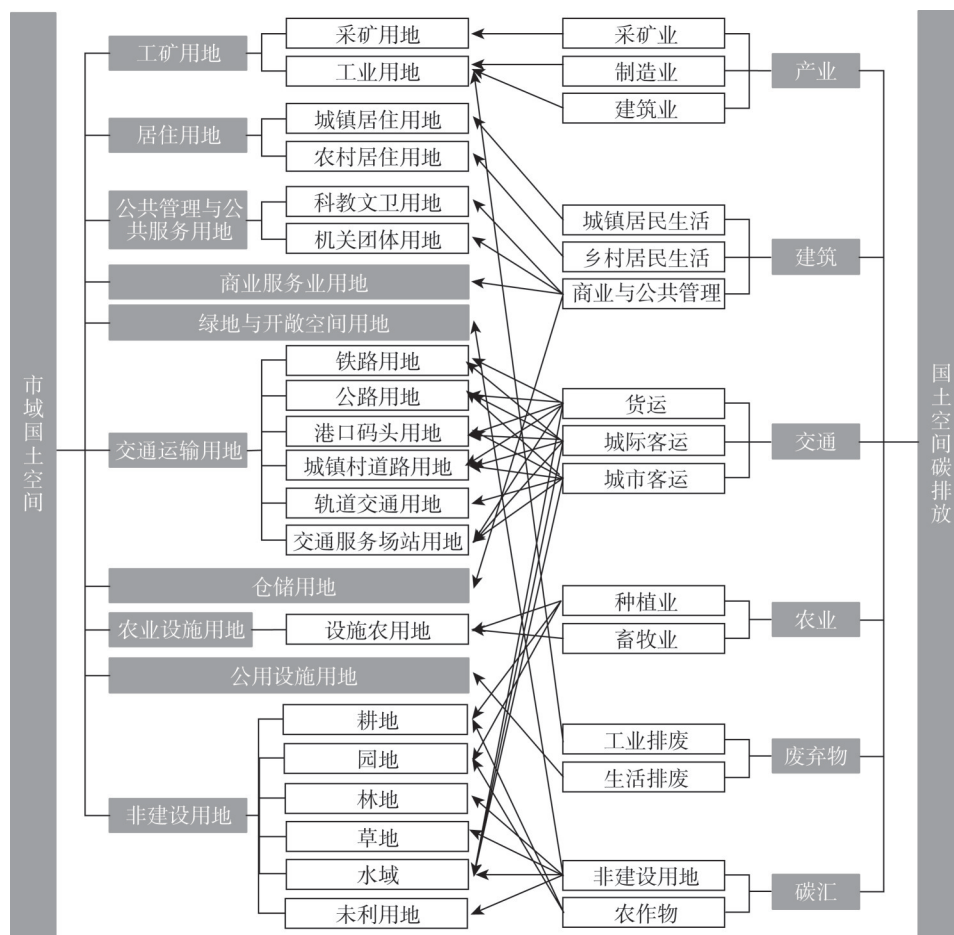


图2 “国土空间—碳排放”对应关系

Fig. 2 "Territorial space-carbon emissions" corresponding relationship

璃、合成氨的产品产量推算其碳排放量。

$$C_E = \sum_{m,n} Ef_{m,n} \times Cf_{m,n} + \sum_k Ep_k \times Cp_k \quad (2)$$

式中： C_E 为工业部门碳排放量（万 t）； m 为工业行业类型； n 为行业内能源消耗类型； $Ef_{m,n}$ 为 m 行业的 n 种能源消耗量（t）； $Cf_{m,n}$ 为 m 行业的 n 种能源碳排放系数，根据能源燃烧的低位发热量、单位热值含碳量、氧化率计算^[15]； Ep_k 为工业产品类型； Cp_k 为生产单位重量工业产品碳排放系数^[16]。

建筑部门碳排放主要考虑居住建筑及商业公共建筑运行期间消耗天然气、液化石油气、电力能源产生的碳排放量。

$$C_B = Eg_{ng} \times Cg_{ng} + Eg_{lpg} \times Cg_{lpg} + (Ee_{ep-h} + Ee_{ep-b}) \times Ce_{ep} \quad (3)$$

式中： C_B 为建筑部门碳排放总量（万 t）； Eg_{ng} 、 Eg_{lpg} 、 Ee_{ep-h} 、 Ee_{ep-b} 分别为天然气、液化石油气、居民建筑、商业建筑的电力消耗量（万 kW·h）； Cg_{ng} 、 Cg_{lpg} 、 Ce_{ep} 为对应的碳排放系数^[17]。

交通部门的碳排放测算根据市域内交通运输结构进行测算,包含货运、城际客运、城市客运。货运及城际客运的碳排放量依据运输方式的年周转量计算。城市客运的碳排放量则根据人群日常出行使用的交通工具构建测算体系。

$$C_T = C_{ft} + C_{ipt} + C_{upt} = \sum_f T_{ft} \times C_{ft} + \sum_p T_{pt} \times C_{pt} + \sum_t T_{td} \times C_{td} \quad (4)$$

式中: C_T 为交通部门碳排放总量 (万 t), C_{ft} 、 C_{ipt} 、 C_{upt} 为货运、城际客运、城市客运的碳排放量 (万 t); f 为铁路、公路、水路运输; T_{ft} 、 T_{pt} 为货运及城际客运各交通方式的周转量; C_{ft} 、 C_{pt} 为各交通方式单位周转量的碳排放系数^[18,19]; t 为公交车、出租车、轨道交通等交通工具类型; T_{td} 为各交通工具的年行驶里程 (万 km); C_{td} 为其百公里碳排放系数^[20,21]。

农业部门碳排放来源于种植业中农地耕作、农用物资使用。同时,畜牧业中动物肠道发酵、粪便管理产生的碳排放也不容忽视。

$$C_F = C_{cf} + C_{sf} \quad (5)$$

式中: C_F 为农业部门碳排放总量 (万 t); C_{cf} 为种植业碳排放量 (万 t), 根据耕地面积及其单位面积碳排放量计算农地耕作时产生的碳排放量^[22,23], 农用物资使用碳排放量则根据物资年消耗量及其碳排放系数测算^[24]; C_{sf} 为畜牧业碳排放量 (万 t), 基于各种动物年存栏量及其对应活动的碳排放系数进行碳排放测算^[15]。

废水、固体废弃物处理过程产生的 CO_2 、 CH_4 也是市域碳排放的重要来源。废水碳排放量包含工业废水和生活废水中甲烷排放, 固体废弃物包含生活废弃物和工业废弃物, 其中生活废弃物处理碳排放源于垃圾焚烧、填埋处理, 而工业废弃物的综合处置利用率达到 95%, 因此不纳入碳排放测算范围。

$$C_W = C_{hw} + C_{sw} \quad (6)$$

式中: C_W 为废弃物处理的碳排放总量 (万 t); C_{hw} 为废水处理碳排放量 (万 t), 工业废水的甲烷排放根据 COD 排放量及其单位 CH_4 生产能力计算^[15], 因缺少生活污水的有机物含量的统计数据, 本文以人口数及人均有机物含量进行甲烷排放量的推算^[25]; C_{sw} 为生活废弃物处理碳排放量 (万 t), 生活废弃物的碳排放根据市域垃圾焚烧、填埋处理的比例, 结合相应参数进行测算^[15]。

林地、草地、水域等非建设用地及农作物是市域的碳汇主体。因相关植被调查数据难以获取, 本文以单位面积的碳吸收量测算林地、草地^[26]、水域^[27]、未利用地^[4]的碳汇量。

$$C_A = C_l + C_{ic} = \sum_j A_j \times Cl_j + \sum_x ca_x \times Y_x \times (1 - wc_x) / HI_x \quad (7)$$

式中: C_A 为市域碳汇总量 (万 t); C_l 为非建设用地的碳吸收量 (万 t); C_{ic} 为农作物的碳吸收量 (万 t); j 为各类非建设用地; A_j 为各用地面积 (hm^2); Cl_j 为对应用地的碳排放系数; x 为各农作物类型; ca_x 、 Y_x 、 wc_x 、 HI_x 分别为各种农作物的碳吸收率、经济产量、含水量、经济系数^[28]。

(3) 碳排放空间化方法

为反映人和地要素活动产生碳排放的差异, 突出市域碳排放规模结构, 依据不同用

地人类活动特征，针对各碳排部门选取合适的空间分配指标，利用多源大数据，设计不同的碳排放空间化方法，分配获得市域国土空间碳排放总量与各个地块碳排放量（表2）。

1.4.2 国土空间低碳化发展效率测度方法

低碳化发展效率是表示国土空间单元绿色低碳发展水平高低的指标^[31]。为探索空间单元在地域范围内“双碳”战略实施的有效性，统筹社会经济发展与生态保护的协调关系，从经济、社会、生态复合维度构建国土空间低碳化发展效率测度方法。既定的空间单元创造经济价值的同时会产生一定的碳排放，而实现高收益、低消耗的低碳经济是低碳发展的主要方向；同时，资源消耗的有限性赋予人群不同的碳排权益及减碳责任，而营造公平与绿色的社会发展环境对于塑造低碳化发展格局具有重要作用；另外，高强度的经济活动产生的碳排放对资源环境带来的负外部性导致自然生态的碳汇效率与碳排放水平难以匹配，对生态平衡产生影响^[32]。基于以上分析，本文构建经济低碳化发展效率指数（Economic low-carbon development efficiency index, ELDEI）、社会摊碳责任效率指数（Social share-carbon responsibility efficiency index, SSREI）、生态碳汇效率指数（Ecological carbon-sink efficiency index, ECEI），通过空间单元自身低碳化发展水平与区域整体发展水平对比的方法测度低碳化发展效率。具体计算公式如下：

（1）经济低碳化发展效率指数

在低碳经济发展方面，提升能源效率是现阶段保持经济增长的同时实现碳减排目标的主要途径^[33]。GDP是衡量地区经济状况的核心指标，碳排放规模则反映了能源消费特征，以空间单元在市域范围的GDP比率与碳排放比率的比值，衡量其产生一定碳排放量的同时创造的经济效益，表现空间单元经济发展的低碳效率程度^[34]。

表2 基于多源数据的国土空间碳排放分配方法

Table 2 Territorial spatial carbon emission allocation method based on multi-source data

碳排放		国土空间类型	分配指标	分配方法
工业	采矿业	采矿用地	行业POI数据	统计对应地块内包含各类行业POI的数量比例，通过各类工业产品产量修正能源消耗量，按照最终参数分配碳排放量，最后累加综合 ^[29]
	工业生产制造	工业用地	产品产量数据	
	供应业	公用设施用地		
建筑	居民生活	城镇居住用地农村宅基地	户数	依据地块户数比例分配碳排放量 ^[13]
	商业服务与公共管理	商业服务业用地公共管理与公共服务用地	商业服务设施POI 公共管理设施POI	统计对应地块内包含各类设施POI的数量比例，按照比例分配碳排放量，最后累加综合 ^[13]
交通	货运 城际客运 城市客运	交通运输用地	城市道路数据交通设施POI数据	根据运输长度比例，分配铁路、水路以及轨道交通用地碳排放量；运用标准道路长度法，通过设施POI密度修正交通活动强度，按照最终参数分配碳排放量 ^[30]
农业	种植业	耕地、园地	土地利用面积	根据地块面积比例分配碳排放量 ^[29]
	畜牧业	设施农用地		
废弃物	工业排废	工业用地	土地利用面积	根据地块面积比例分配碳排放量
	生活排废	公用设施用地		
碳汇	非建设用地	林地、草地、水域、未利用地	土地利用面积	根据地块面积直接测算碳排放量
	农作物	耕地、园地		

$$ELDEI = \frac{G_i}{G} \bigg/ \frac{C_i}{C} \quad (8)$$

式中： G_i 、 G 分别为各空间单元、市域范围的地区生产总值（万元）； C_i 、 C 分别为各空间单元、市域碳排放总量（万 t）。

$ELDEI$ 值越大，空间单元的经济低碳化发展水平越高。当 $ELDEI > 1$ ，则表明某一空间单元的碳排放水平低于经济产出水平，因而其经济低碳化发展水平较高；当 $ELDEI < 1$ ，则表明某一空间单元的碳排放水平高于经济产出水平，因而其经济低碳化发展水平较低。

（2）社会摊碳责任效率指数

考虑人群平等的碳排放权力和应承担的减碳责任^[35]，基于碳减排责任公平分摊原则，将人均碳排放量和地均碳排放量纳入摊碳责任效率指数计算中，测度某一空间单元人均碳资源消耗及碳排放密度在全域范围的相对水平，反映该单元享有的碳排放权力及其分摊的碳减排责任，以保证空间单元资源合理分配下的社会低碳化发展。

$$SSREI = \frac{1}{0.7 \times \frac{\bar{Y}_{pi}}{\bar{Y}_p} + 0.3 \times \frac{\bar{Y}_{si}}{\bar{Y}_s}} \quad (9)$$

式中： \bar{Y}_{pi} 、 \bar{Y}_p 分别为各空间单元、市域人均碳排放量（t/人）； \bar{Y}_{si} 、 \bar{Y}_s 为各空间单元、市域地均碳排放量（万 t/hm²）。其中，根据文献确定人均碳排放量和地均碳排放量权重为 0.7 和 0.3^[35]，主要考虑人群的碳消费及责任分摊。

$SSREI$ 值越大，空间单元的社会低碳化发展水平越高。当 $SSREI > 1$ 时，则表明某一空间单元人均碳资源消耗及碳排放密度占比低于全域平均水平，其分摊的碳减排责任较小，拥有的碳排放额度及预算空间处于优势发展地位。当 $SSREI < 1$ 时，则表明某一空间单元人均碳资源消耗及碳排放密度占比高于全域平均水平，其分摊的碳减排责任较大，应分配更少的碳排放额度及预算发展空间。

（3）生态碳汇效率指数

生态环境的碳吸收是自然界的生物系统对于碳排放的协调平衡，以空间单元内碳汇率与碳排率的比值，衡量地域范围内排放一定比例的碳所对应比例的碳吸收，反映空间单元的生态碳汇水平。

$$ECEI = \frac{C_{Ai}}{C_A} \bigg/ \frac{C_i}{C} \quad (10)$$

式中： C_{Ai} 、 C_A 分别为各空间单元、市域范围的年碳汇量（万 t）； C_i 、 C 分别为各空间单元、市域范围的年碳排放量（万 t）。

$ECEI$ 值越大，空间单元对于碳排放的生态消纳能力越强，生态碳汇水平越高。当 $ECEI > 1$ ，则表明某一空间单元的碳吸收比例大于碳排放比例，说明其对碳排放的生态消纳能力较强，生态碳汇水平较高；反之，若 $ECEI < 1$ ，则表明某一空间单元的碳汇比例小于碳排放比例，说明其碳排放的生态消纳能力较弱，生态碳汇水平较低。

（4）低碳化发展综合效率指数

为揭示全域空间单元在经济、社会、生态方面低碳化发展综合水平特征，构建综合效率指数，计算公式如下：

$$Y_{CAI} = \alpha_{ELDEI} Y_{ELDEI} + \alpha_{SSREI} Y_{SSREI} + \alpha_{ECEI} Y_{ECEI}$$

(11)

式中： Y_{CAI} 为空间单元低碳化发展综合效率指数值； α_{ELDEI} 、 α_{SSREI} 、 α_{ECEI} 为各指数的权重； Y_{ELDEI} 、 Y_{SSREI} 、 Y_{ECEI} 为各指数值。通过专家打分并参考相关文献最终设定经济低碳化发展效率指数、社会摊碳责任效率指数、生态碳汇效率指数的权重分别为0.4、0.4、0.2^[36]，综合效率指数越高说明该空间单元经济低碳化发展水平和生态碳汇水平较高，且承担较低的社会摊碳责任，整体呈现绿色向好的发展状态，在市域范围内低碳化发展水平较高。

2 结果分析

2.1 苏州市国土空间碳排放特征

根据测算，苏州市2020年二氧化碳排放总量约为2.38亿t（表3）。其中，工业部门的碳排放量最高，为1.93亿t，占比为81.32%，其碳排放活动由工业用地和公用设施用地所承载，碳排放量分别为12431.46万t和6905.31万t，分别占比52.29%和30.25%，说明传统能源在能源结构中仍占据主要部分，体现了工业高能耗、高碳排的生产模式。其次是居民生活的能耗碳排放量达到0.29亿t，包括城镇居住用地、农村宅基地、商业服务业用地及公共管理与公共服务用地，其碳排放量分别为767.06万t、537.13万t、1030.09万t与548.48万t，共占比12.12%，电力使用是碳排放主要来源。交通出行带来的碳排放量为0.14亿t，占比为5.98%。苏州碳汇资源较少，碳汇量约0.025亿t，占比为1.06%，碳汇主体主要包含非建设用地及经济作物。

通过多源地理空间数据分配获得市域地块尺度碳排放量（图3a），整体介于36.05万~256.94万t，地块高值主要分布在长江沿线，特别是张家港市的产业用地；较高值在高值周围分布，中值区包含工业、商业服务业等用地，主要在主城区分散分布，较低值区

表3 市域国土空间碳排放量
Table 3 Carbon emissions in the city level territorial space

部门	国土空间类型	CO ₂ 排放量/万 t	部门排放总量/万 t	比例/%
工业	工业用地	12430.46	19334.77	81.32
	公用设施用地	6905.31		
建筑	城镇居住用地	767.06	2882.76	12.21
	农村宅基地	537.13		
	商业服务业用地	1030.09		
	公共管理与公共服务用地	548.48		
交通	交通运输用地	1421.44	1421.44	5.98
农业	耕地、园地	94.68	100.70	0.42
	设施农用地	6.02		
废弃物	工业用地	1.02	288.30	1.21
	公用设施用地	287.28		
碳汇	耕地、园地	71.96	-251.86	-1.06
	林地、草地、水域	179.9		
合计		23776.11	23776.11	100.00

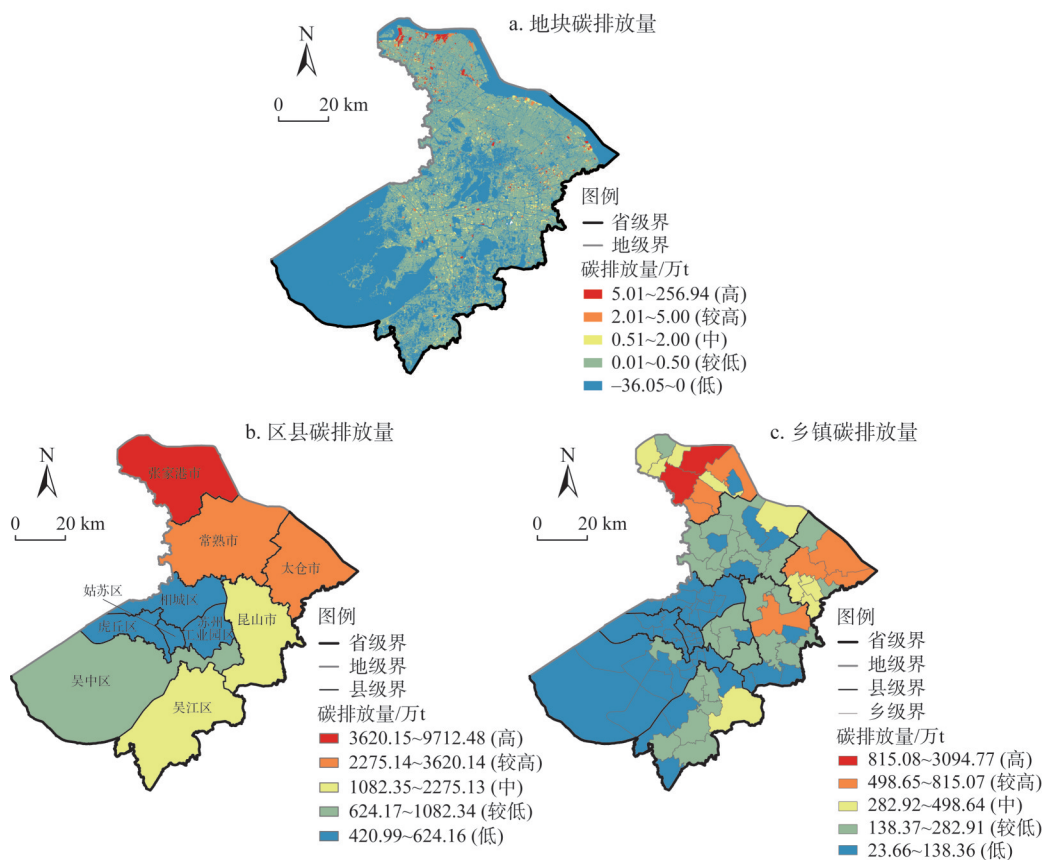


图3 苏州市国土空间碳排放特征

Fig. 3 Characteristics of territorial spatial carbon emissions in Suzhou

在市域内连片分布, 低值区主要为大型水体或林地、园地等碳汇主体。以区县、乡镇尺度统计各行政单元的碳排放量 (图3b、图3c)。区县尺度下整体碳排放量介于414.57万~9712.55万t, 平均值为2377.61万t。空间上形成“一带两心”的分布特征, 在市区主城区形成低值核心。其中, 姑苏区碳排放量最低; 4个县级市和吴江区形成自南向北递增的中高值带半包围在低值区外, 并在张家港形成高值核心。乡镇街道尺度下空间单元的碳排放量介于23.66万~3094.77万t, 低、较低值区占比80.41%, 中值区占比10.31%, 较高、高值区占比9.28%, 具有极值差异特征。空间上表现出“一主两次”的结构。以张家港市城区街道为高值核心, 在太仓和昆山市的产业集聚镇形成南北两个次核心, 中值区开放式衔接在高值区外围。较低值区在县级市和吴江区乡镇、苏州工业园区街道片区集聚; 低值区在主城区街道广泛连片分布, 并延伸到大型水体毗邻的乡镇。

2.2 苏州市国土空间低碳化发展效率空间差异

2.2.1 经济低碳化发展效率空间差异

通过经济低碳化发展效率指数衡量市域区县及乡镇单元的经济低碳发展水平 (图4), 具体分析如下: (1) 区县单元整体经济低碳化发展效率指数值介于0.33~5.81间, $EL-DEI > 1$ 的区县数量共7个, 占比70%。整体具有“两核两片”的空间结构, 在苏州市区

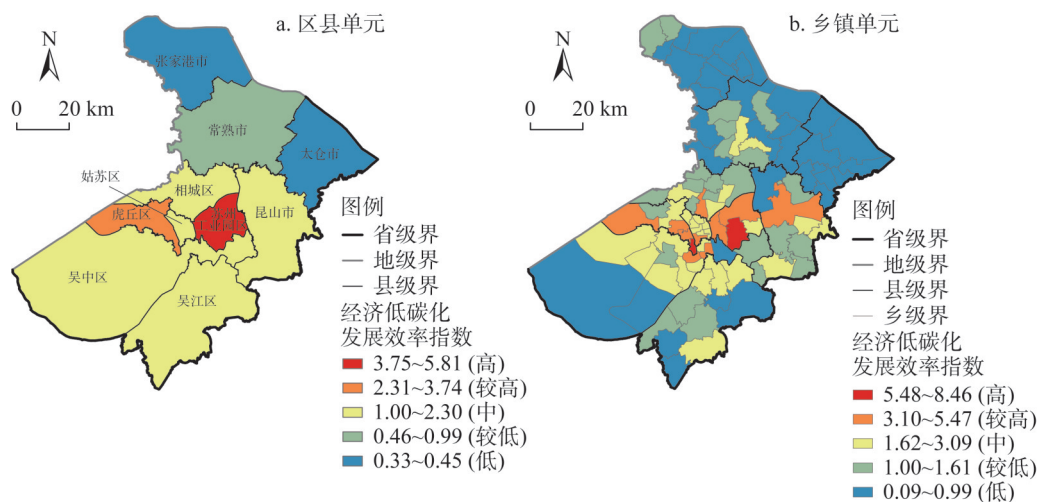


图4 区县、乡镇尺度国土空间经济低碳化发展效率指数

Fig. 4 Economic low-carbon development efficiency index for territorial space at the county and township scales

及昆山市形成中高值片区,以苏州工业园区和虎丘区为两个高值核心,说明其生产模式较为高效,经济低碳化发展水平较高。 $ELDEI < 1$ 的空间单元主要是北部的张家港市、太仓市及常熟市,组合形成低值片区。(2) 乡镇单元整体经济低碳化发展效率指数值介于0.09~8.46之间, $ELDEI > 1$ 的乡镇数量占比67%。空间上整体呈现“双核集聚,边缘包围”的分布特征,以虎丘区横塘和苏州工业园区斜塘街道为高值双核心,较高、中值区开放性围绕在高值区外围,形成中心集聚态势。较低值区在市区边缘乡镇组团分布,并扩展至常熟市城区街道、昆山市远郊乡镇。 $ELDEI < 1$ 的乡镇单元在市域北部连片分布,在市域南部水网密集区分散,总体呈现出向市区包围的态势。(3) 究其原因,区县产业功能定位的不同,带来各区县经济低碳化发展水平差异。边缘乡镇相对低级的产业结构及传统能源结构依赖,导致其经济低碳化发展效率相对劣势。

2.2.2 社会摊碳责任效率空间差异

通过社会摊碳责任效率指数衡量国土空间碳资源消耗及其分摊的碳减排责任,反映空间单元社会低碳化发展的相对水平(图5),具体分析结果如下:(1) 以区县为单元统计整体社会摊碳责任效率指数值介于0.28~2.92之间, $SSREI > 1$ 的区县单元共8个,占比80%。空间上整体表现出“辐射降低”的分布特征,以虎丘区和吴中区为高值核心,向外辐射降低,在张家港市和太仓市形成两个低值点,其碳排放空间相对占用较多,分摊较大的碳减排责任。(2) 乡镇尺度的社会摊碳责任效率指数值介于0.12~6.94之间, $SSREI > 1$ 的乡镇单元占比73.2%。空间分布上呈现“一主多次,低值成片”的格局,即以太湖附近街道为主核心,较高值开放式环绕在市区主城区外围,形成多个次核心;中值区与次核衔接,由在市区主城街道向四周扩展延伸至昆山主城区和太湖附近街道,并在常熟主城区街道分散。较低值区在市区中心街道、边缘乡镇及常熟乡镇单元形成多个组团。 $SSREI < 1$ 的乡镇单元主要成片分布在太仓及张家港市区范围。(3) 较高的人均碳资源消耗及碳排放密度产生过高的碳份额,分摊较多的碳减排责任;部分乡镇的生产、生活活动相对的碳排成本、碳排需求较高,因而乡镇地区的碳排权益往往受到限制,同时

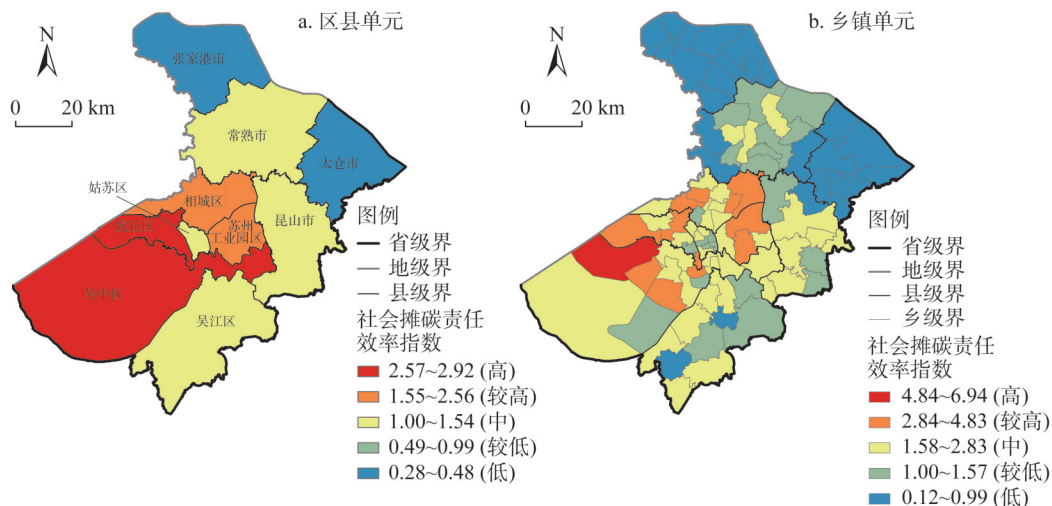


图5 区县、乡镇尺度国土空间社会摊碳责任效率指数

Fig. 5 Social share-carbon responsibility efficiency index in territorial space at the county and township scales

也需承担更多的碳减排责任。

2.2.3 生态碳汇效率空间差异

通过生态碳汇效率指数衡量市域空间单元的生态碳汇水平（图6），具体分析结果如下：（1）区县尺度下整体生态碳汇效率指数值介于0.27~5.28间， $ECEI > 1$ 的区县单元共6个，占比60%。整体呈现出“一带三心”的空间特征，以市区边缘区县和昆山、常熟市共同形成中高值环形带，其生态碳汇能力处于较强水平；同时，对由姑苏区和苏州工业园区形成的低值组团核心成包围的态势；另外在张家港、太仓市形成北部、东部两个低值核心，其生态消纳与碳排放不相适应，表现出低效的生态碳汇水平。（2）乡镇单元的生态碳汇效率指数值介于0.09~45.47之间，数值差异反映出空间单元生态碳汇能力水平的不均衡性。空间上具有“一核多点，环城铺展”的分布特征。生态碳汇效率指数较高

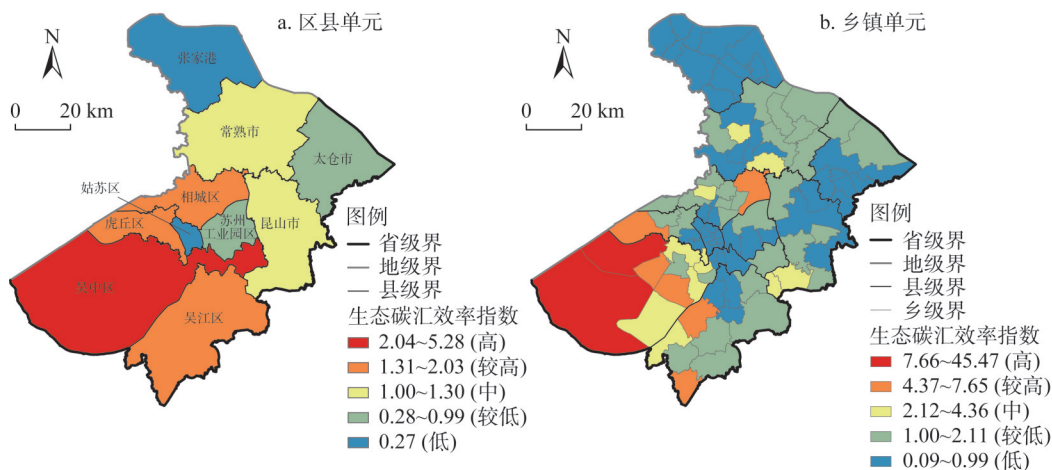


图6 区县、乡镇尺度国土空间生态碳汇效率指数

Fig. 6 Ecological carbon-sink efficiency index for territorial space at the county and township scales

的乡镇街道在大型水体附近集聚，并在太湖形成高值片区，中值区成点式分散在市域内。较低值区围绕在各市主城区外，主要由长江与阳澄湖连线乡镇延伸衔接成北部片区，在市域南部水网乡镇形成南部片区。 $ECEI < 1$ 的空间单元在中心城区街道及邻近乡镇铺展成片。(3) 自然生态本底作为碳汇主体，为空间生态碳汇能力提供了基础，但缺乏生态网络完整性塑造导致空间生态碳汇水平差异明显；同时，城区的连片蔓延对生态空间造成了挤压，影响了碳排放与碳吸收的协调性。

2.2.4 低碳化发展综合效率空间差异

通过低碳化发展综合效率指数体现空间单元在市域内相对的低碳化综合发展水平(图7)，具体分析结果如下：(1) 区县单元的低碳化发展综合效率指数值介于0~0.76之间。空间上呈现“一核两片”的片区集聚特征，主要分为中高值和低值片区。其中，市区和昆山市形成中高值片区，并在虎丘区、苏州工业园区、吴中区形成高值核心，说明其经济低碳化发展和生态碳汇水平较高，碳减排责任较小；中值区主要有姑苏区、吴江区和昆山市，需进一步提高低碳化程度。低值区则主要分布在市域北部，以张家港市综合效率指数最低，其发展对碳资源的依赖较高，低碳化综合发展水平较低。(2) 乡镇单元的整体综合效率指数值介于0.01~0.72之间，整体低碳化发展综合效率指数差异较大。空间分布上呈现“多中心”的结构特征，高值单元主要在太湖附近及市区主要街道形成主核心，较高值分布在高值核心外围，向东延伸至昆山市核心街道形成东西向轴线；中值区成楔状分布在较高值中间，并在常熟城区街道集聚；较低值区主要在吴江区水网密集的乡镇及常熟乡镇组团分布。低值区在张家港市和太仓市范围内片区集聚。(3) 区县层面的碳源碳汇空间连片组合且比例适宜，并基于一定碳资源创造了较高的社会经济价值，拥有良好的低碳化发展条件；部分乡镇单元空间类型较为单一，缺少融合连片布局，碳源碳汇未能较好的协调，且经济产出依赖于高碳消耗，是区域整体低碳化发展的主要矛盾点。

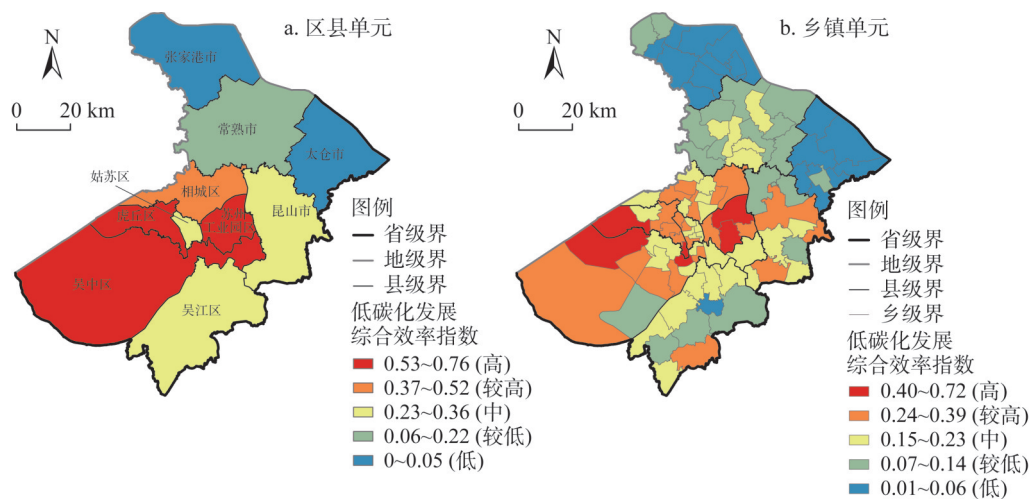


图7 区县、乡镇尺度国土空间低碳化发展综合效率指数

Fig. 7 Low-carbon development comprehensive efficiency index for territorial space at the county and township scales

3 结论与讨论

3.1 结论

本文构建了市域国土空间碳排放测算方法,测算了苏州市国土空间碳排放水平,运用低碳化发展效率模型进一步分析了国土空间在经济、社会、生态维度下低碳化发展效率的空间差异,主要结论如下。

(1) 通过建立“国土空间—碳排放”对应关系,测算国土空间碳排放,基于高精度、细粒度的地理空间大数据实现市域国土空间碳排放空间化,并测度了区县、乡镇不同空间尺度的碳排放水平。秉承生态文明建设可持续发展观,构建低碳化发展效率测度方法衡量国土空间经济低碳化发展效率、社会摊碳责任效率、生态碳汇效率的空间差异,以衡量行政单元在“双碳”战略中的实施地位。为构建低碳可持续发展国土空间格局,助力“双碳”目标实现提供一定启示。

(2) 苏州市域国土空间碳排放总量为2.38亿t。其中,工业碳排放占比81.32%,反映了对于传统能源的使用依赖性较高,对应于工业用地的碳排放量最高。生态资源对碳排放的消纳作用较微弱。区县单元的碳排放总量差值较大,呈现“一带两心”的空间结构,以张家港碳排放量最高。乡镇尺度下空间单元的碳排放具有一定的城乡差异,空间分布上呈现“一主两次,低值连片”的格局特征,市区中心街道及毗邻水体的乡镇碳排放量较低,主要是乡镇的产业类型及人口活动强度不同,带来碳资源的消耗差异。

(3) 苏州市国土空间低碳化发展综合效率指数数值差异较大,在区县尺度上具有较显著地域差异,呈现“一核两片”的空间集聚特征;在乡镇尺度上呈现出“多中心”的结构特征,具有较明显的城乡分异特征。其中,经济低碳化发展效率、社会摊碳责任效率指数在空间分布上具有一定的空间重合性,均在中心城区高值集聚,且相较于经济低碳化发展效率,社会摊碳责任效率高值分布的范围更加延展,主要反映了国土空间单元经济、社会低碳化发展水平的城乡差距;生态碳汇效率指数的空间分布与城市的自然生态格局息息相关,高值单元在大型水体处集聚,具有成片集聚分异的特征,主要反映了国土空间生态碳汇能力的空间尺度差异。

3.2 讨论

为实现“双碳”目标,将绿色低碳理念融入国土空间治理。(1) 在减排控碳方面,增强地类碳排管控,严控高碳工业用地供给及产能效率,保障清洁能源供给项目用地分配,提高低碳排、高碳汇地类比例。统筹市域碳资源分配,优化空间功能布局,加快各县级单元绿色交通及市政设施建设,推动清洁能源在地化生产使用。(2) 在提升经济低碳化发展效率方面,注重不同空间单元之间的协同创新发展,带动地方产业升级,并增强传统产业集镇的经济效率。推动城区街道商业服务型经济提升,重视生态资源丰富地区的旅游生态型经济发展,构建绿色循环经济发展体系。(3) 以碳排空间管控,提升社会摊碳责任效率为目标塑造复合集约的建设空间,着眼于老城区的有机更新、低碳空间挖掘;推动县级市产城融合,打造复合集约的空间格局。此外,引导城区过饱和人口、生产生活资源的外向疏解,加速远郊乡镇的就地城镇化,促进日常生活便利化,农业生产低碳绿色化,降低碳资源消耗。(4) 为提高生态碳汇效率,基于地域的自然本底特色

构建生态安全格局,贯彻落实生态修复,基于公园城市理念保障城区生态品质,加强农田林网建设提高乡镇生态消纳能力。最后,注意碳汇、碳源融合比例及组合方式,统筹协调分配市域碳资源,提升全域各单元的互通联系,促进碳排放份额横向疏解,保证低碳化发展综合水平稳步提升,构建公平和谐、协调共进国土空间格局。

目前,国土空间碳排放测算体系尚未完全统一,也没有绝对准确的碳排放统计值。本文测算的苏州市域2020年碳排放结果为2.378亿t,而中国碳核算数据库(CEADs)公布的苏州市2019年碳排放总量为2.312亿t,但该数据库2020年的碳排放数据暂未发布,研究测算值与CEADs 2019年数据相比略有增长,符合实际情况。另外,本文将基于国土空间统计的区县碳排放总量与基于统计数据的碳排放总量相比对,具有较小误差。因此,本文的碳排放测算方法具有较强的科学性和可靠性。经济社会发展水平相对较高的地区,其经济、社会低碳化发展效率也较高,但其生态碳汇能力往往较低,说明国土空间低碳化发展效率的差异特征遵循地域社会经济发展的特征规律,且社会经济的快速发展往往会牺牲生态环境效益,反映出国土空间低碳化发展的不均衡性。

碳排放具有流动扩散、累积变化的特征,基于时空演变视角下的国土空间低碳化发展效率分析还有待进一步研究。此外,国土空间规划视角下的碳排放治理需依据国土空间低碳发展水平的差异特征,从微观的尺度完善细化城市碳排放治理手段,注重基层空间精细化治理与跨区域的整体协同,构建低碳绿色国土空间格局,助力“双碳”目标的实现。

参考文献(References):

- [1] 熊健,卢柯,姜紫莹,等.“碳达峰、碳中和”目标下国土空间规划编制研究与思考.城市规划学刊,2021,(4): 74-80. [XIONG J, LU K, JIANG Z Y, et al. Study and thoughts on territorial spatial planning under the goal of "carbon emissions peak and carbon neutrality". Urban Planning Forum, 2021, (4): 74-80.]
- [2] 王海鲲,张荣荣,毕军.中国城市碳排放核算研究:以无锡市为例.中国环境科学,2011,31(6): 1029-1038. [WANG H K, ZHANG Y Y, BI J. Carbon accounting for Chinese cities: A case of Wuxi city. China Environmental Science, 2011, 31 (6): 1029-1038.]
- [3] 顾朝林.城市碳排放清单及其规划应用研究.南方建筑,2013,(4): 4-12. [GU C L. Research on urban carbon emissions inventory and its application in planning. South Architecture, 2013, (4): 4-12.]
- [4] 石洪听,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.水土保持通报,2012,32(3): 101-106. [SHI H X, MU X M, ZHANG Y L, et al. Effects of different land use pattern on carbon emission in Guangyuan city of Sichuan province. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(3): 101-106.]
- [5] 姜洋,何永,毛其智,等.基于空间规划视角的城市温室气体清单研究.城市规划,2013,37(4): 50-56, 67. [JIANG Y, HE Y, MAO Q Z, et al. City-level greenhouse gas emission inventory from a spatial planning perspective. City Planning Review, 2013, 37(4): 50-56, 67.]
- [6] LONG Z, ZHANG Z L, LIANG S, et al. Spatially explicit carbon emissions at the county scale. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 73: 105706, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105706>.
- [7] 曾紫琪,王芳,冯艳芬,等.碳中和视角下广东省城市低碳发展效率空间分异及其驱动机制.广州大学学报:自然科学版,2022,21(3): 74-80, 88. [ZENG Z Q, WANG F, FENG Y F, et al. Spatial variation in urban low-carbon development efficiency and its driving mechanism in Guangdong from a carbon neutral harmonized perspective. Journal of Guangzhou University: Natural Science Edition, 2022, 21(3): 74-80, 88.]
- [8] 窦睿音,焦贝贝,张文洁,等.西部资源型城市绿色发展效率时空分异与驱动力.自然资源学报,2023,38(1): 238-254. [DOU R Y, JIAO B B, ZHANG W J, et al. Research on spatiotemporal heterogeneity and driving forces of green de-

- velopment efficiency in resource-based cities of Western China. *Journal of Natural Resources*, 2023, 38(1): 238-254.]
- [9] 杨颖. 四川省低碳经济发展效率评价. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(6): 52-56. [YANG Y. Research on evaluation of Sichuan low-carbon economy efficiency. *China Population, Resources and Environment*, 2012, 22(6): 52-56.]
- [10] 胡剑波, 高鹏, 左鹏飞. 中国碳排放福利绩效区域差异及其贡献度研究. *经济问题*, 2018, (11): 54-60. [HU J B, GAO P, ZUO P F. Study on the regional differences and contribution rate of China's carbon emissions welfare performance. *On Economic Problems*, 2018, (11): 54-60.]
- [11] 潘竞虎, 张永年. 中国能源碳足迹时空格局演化及脱钩效应. *地理学报*, 2021, 76(1): 206-222. [PAN J H, ZHANG Y N. Spatiotemporal patterns of energy carbon footprint and decoupling effect in China. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(1): 206-222.]
- [12] CAI M, SHI Y, REN C, et al. The need for urban form data in spatial modeling of urban carbon emissions in China: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 319: 128792, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128792>.
- [13] ZHENG Y Q, DU S H, ZHANG X Y, et al. Estimating carbon emissions in urban functional zones using multi-source data: A case study in Beijing. *Building and Environment*, 2022, 212: 108804, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108804>.
- [14] 郑德高, 吴浩, 林辰辉, 等. 基于碳核算的城市减碳单元构建与规划技术集成研究. *城市规划学刊*, 2021, (4): 43-50. [ZHENG D G, WU H, LIN C H, et al. The formulation of urban carbon reduction unit and integrated planning methodology based on carbon accounting. *Urban Planning Forum*, 2021, (4): 43-50.]
- [15] 国家发展和改革委员会应对气候变化司. 省级温室气体清单编制指南(试行). 北京, 2010. [Department of Climate Change, National Development and Reform Commission. Guidelines for the provincial greenhouse gas inventories (for trial implementation). Beijing, 2010.]
- [16] 杨欣, 蔡银莺, 张安录. 武汉城市圈碳排放的时空格局及影响因素分解研究: 基于2001—2009年市级面板数据的实证. *长江流域资源与环境*, 2013, 22(11): 1389-1396. [YANG X, CAI Y Y, ZHANG A L. Spatial-temporal characteristics and affecting factors decomposition of carbon emission in Wuhan urban circle from 2001 to 2009. *Resources and Environment of the Yangtze River Basin*, 2013, 22(11): 1389-1396.]
- [17] 屈金凤, 楚春礼, 鞠美庭, 等. 居民生活能源消费碳排放驱动因素分解: 以天津市为例. *生态经济*, 2017, 33(4): 38-42. [QU J F, CHU C L, JU M T, et al. Factor decomposition of carbon emissions from household energy consumption: A case study of Tianjin. *Ecological Economy*, 2017, 33(4): 38-42.]
- [18] 孟凡强. 铁路实现绿色发展的路径探讨. *铁路节能环保与安全卫生*, 2019, 9(5): 14-17. [MENG F Q. Discussion on the path of realizing green development of railway. *Railway Energy Saving & Environmental Protection & Occupational Safety and Health*, 2019, 9(5): 14-17.]
- [19] 魏艳旭, 孙根年, 马丽君, 等. 中国旅游交通碳排放及地区差异的初步估算. *陕西师范大学学报: 自然科学版*, 2012, 40(2): 76-84. [WEI Y X, SUN G N, MA L J, et al. Estimating the carbon emissions and regional differences of tourism transport in China. *Journal of Shaanxi Normal University: Natural Science Edition*, 2012, 40(2): 76-84.]
- [20] XIA C Y, XIANG M T, FANG K, et al. Spatial-temporal distribution of carbon emissions by daily travel and its response to urban form: A case study of Hangzhou, China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 257: 120797, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120797>.
- [21] 赵敏, 张卫国, 俞立中. 上海市居民出行方式与城市交通CO₂排放及减排对策. *环境科学研究*, 2009, 22(6): 747-752. [ZHAO M, ZHANG W G, YU L Z. Resident travel modes and CO₂ emissions by traffic in Shanghai city. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(6): 747-752.]
- [22] WEST T O, MARLAND G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2002, 91(1-3): 217-232.
- [23] 杜金霜, 付晶莹, 郝蒙蒙. 基于生态网络效用的昭通市“三生空间”碳代谢分析. *自然资源学报*, 2021, 36(5): 1208-1223. [DU J S, FU J Y, HAO M M. Analyzing the carbon metabolism of "Production-Living-Ecological" space based on ecological network utility in Zhaotong. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(5): 1208-1223.]
- [24] 邱子健, 靳红梅, 高南, 等. 江苏省农业碳排放时序特征与趋势预测. *农业环境科学学报*, 2022, 41(3): 658-669. [QIU

- Z J, JIN H M, GAO N, et al. Temporal characteristics and trend prediction of agricultural carbon emission in Jiangsu province, China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(3): 658-669.]
- [25] 赵荣钦, 黄贤金, 彭补拙. 南京城市系统碳循环与碳平衡分析. *地理学报*, 2012, 67(6): 758-770. [ZHAO R Q, HUANG X J, PENG B Z. Research on carbon cycle and carbon balance of Nanjing urban system. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(6): 758-770.]
- [26] 谢鸿宇, 陈贤生, 林凯荣, 等. 基于碳循环的化石能源及电力生态足迹. *生态学报*, 2008, 28(4): 1729-1735. [XIE H Y, CHEN X S, LIN K R, et al. The ecological footprint analysis of fossil energy and electricity. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(4): 1729-1735.]
- [27] 段晓男, 王效科, 逮非, 等. 中国湿地生态系统固碳现状和潜力. *生态学报*, 2008, 28(2): 463-469. [DUAN X N, WANG X K, LU F, et al. Carbon sequestration and its potential by wetland ecosystems in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 463-469.]
- [28] 韩召迎, 孟亚利, 徐娇, 等. 区域农田生态系统碳足迹时空差异分析: 以江苏省为案例. *农业环境科学学报*, 2012, 31(5): 1034-1041. [HAN Z Y, MENG Y L, XU J, et al. Temporal and spatial difference in carbon footprint of regional farmland ecosystem: Taking Jiangsu province as a case. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(5): 1034-1041.]
- [29] CHUAI X W, FENG J X. High resolution carbon emissions simulation and spatial heterogeneity analysis based on big data in Nanjing city, China. *Science of the Total Environment*, 2019, 686: 828-837, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.138>.
- [30] 王堃, 高佳佳, 田贺忠, 等. 基于POI兴趣点的排放清单空间分配方法. *中国环境科学*, 2017, 37(6): 2377-2382. [WANG K, GAO J J, TIAN H Z, et al. An emission inventory spatial allocation method based on POI data. *China Environmental Science*, 2017, 37(6): 2377-2382.]
- [31] 秦炳涛, 柳佳男. 长三角绿色发展效率时空演变及空间溢出分析: 基于Super-SBM模型和Tobit回归. *生态经济*, 2022, 38(11): 64-71. [QIN B T, LIU J N. Analysis on spatial and temporal evolution and spatial spillover of green development efficiency in the Yangtze river delta: Based on Super-SBM model and Tobit regression. *Ecological Economy*, 2022, 38(11): 64-71.]
- [32] 李璐, 董捷, 徐磊, 等. 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. [LI L, DONG J, XU L, et al. Spatial variation of land use carbon budget and carbon compensation zoning in functional areas: A case study of Wuhan Urban Agglomeration. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(5): 1003-1015.]
- [33] 林伯强, 孙传旺. 如何在保障中国经济增长前提下完成碳减排目标. *中国社会科学*, 2011, (1): 64-76, 221. [LIN B Q, SUN C W. How can China achieve its carbon emission reduction target while sustaining economic growth. *Social Sciences in China*, 2011, (1): 64-76, 221.]
- [34] 卢俊宇, 黄贤金, 戴靓, 等. 基于时空尺度的中国省级区域能源消费碳排放公平性分析. *自然资源学报*, 2012, 27(12): 2006-2017. [LU J Y, HUANG X J, DAI L, et al. Spatio-temporal scale analysis on the equality of energy consumption carbon emission distribution in China. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(12): 2006-2017.]
- [35] 王秋贤, 高志强, 宁吉才. 基于公平的中国省域碳排放差异模型构建探讨: 以中国2010年碳排放为例. *资源科学*, 2014, 36(5): 998-1004. [WANG Q X, GAO Z Q, NING J C. Model building discussions on the provincial differences of carbon emissions in China based on fairness for 2010. *Resources Science*, 2014, 36(5): 998-1004.]
- [36] 董捷, 魏旭华, 陈恩. 土地利用碳排放地域差异下减排责任分摊研究: 以武汉城市圈为例. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(4): 872-882. [DONG J, WEI X H, CHEN E. Research on the liability sharing of carbon emission reduction under the regional difference of land use carbon emission: A case study in Wuhan Urban Agglomeration. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(4): 872-882.]

Calculation of carbon emissions and the difference of low-carbon development efficiency on city territorial space

ZHANG Zhen-long, HOU Yan-zhen, SUN Hong-hu

(School of Architecture and Urban Planning, Suzhou University of Science and Technology,
Suzhou 215011, Jiangsu, China)

Abstract: Low-carbon development of territorial space provides the basis for realizing the strategic goal of the carbon peak and the carbon neutrality. The city region is a key regional unit with dual attributes of target transmission and strategy implementation in territorial space. It is of great significance to promote the realization of the "dual carbon" goal and to reveal the level of carbon emissions and spatial difference of low-carbon development efficiency of territorial spatial in cities for shaping the low-carbon sustainable territorial spatial pattern. This study explored the methodological system for measuring carbon emissions in territorial space, analyzed the characteristics of spatial differences in the efficiency of low-carbon development in city territorial space from economic, social and ecological dimensions based on the measurement results, further proposed a spatial governance-oriented optimization strategy, and finally conducted an empirical analysis using Suzhou city as an example. The results showed that: (1) The built carbon emission measurement method and low-carbonization development model of city territorial space can effectively measure the carbon emission characteristics of Suzhou city and its spatial differences in low-carbonization development efficiency. (2) The total carbon emissions in Suzhou in 2020 were 238 million tons, and the high-value parcels of carbon emissions were concentrated in various industrial agglomerations, while the low-value parcels were dispersedly distributed in the rural areas and the main areas of various carbon sinks. The development efficiency of territorial spatial low-carbonization varied significantly at different scales, mainly reflecting regional differences at the county and district scales and urban-rural differences at the township scale. Meanwhile, regions with relatively high levels of economic and social development had higher economic and social low-carbonization development efficiency, but ecological low-carbonization development efficiency was often lower. (3) According to the different spatial types of districts and townships, this paper promotes the transformation of green development of economy and society, bringing into play the role of territorial spatial planning in emission reduction and carbon sequestration, and building a composite and coordinated, low-carbon and sustainable territorial spatial pattern.

Keywords: territorial space; carbon emissions; low-carbon development; spatial differences; Suzhou