

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.01.026

杜梦晴, 杨欣. 碳中和背景下统筹土地利用碳收支的广东省横向碳补偿[J]. 水土保持学报, 2024, 38(1): 197-206, 219.

DU Mengqing, YANG Xin. Horizontal carbon compensation in Guangdong province based on coordinating land use carbon budget under the background of carbon neutrality[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1): 197-206, 219.

碳中和背景下统筹土地利用碳收支的广东省横向碳补偿

杜梦晴, 杨欣

(华中农业大学公共管理学院, 武汉 430070)

摘要: [目的] 碳补偿机制是实现双碳目标和社会环境公平的重要途径。[方法] 在测算 2010—2020 年碳收支基础上, 建立碳补偿模型核算碳补偿空间转移额度。[结果] (1) 研究期间全省碳排放总量年平均递增率为 2.51%, 除佛山、东莞、清远外其余城市的碳排放均不同程度增加, 空间上呈现以广州为中心的“核心—外围”的格局。广东省 2010—2020 年碳吸收总量呈现缓慢下降趋势, 空间格局趋于稳定, 总体呈现北高南低的特点。(2) 研究期间碳补偿支付区范围变大, 面积占比由 55.22% 扩大至 60.49%, 支付区主要分布净碳排放较多的惠州及净碳排放少但碳排放效率低的云浮、阳江等, 受偿区主要分为 2 类, 一类是净碳排放量少的河源、汕尾等地; 另一类是碳排放多但碳排放效率高的深圳、广州、东莞等。(3) 惠州需支付碳补偿额度居于首位, 深圳获得碳补偿额度最多, 各市跨区域碳补偿额度占区域 GDP 的比例在 0.017%~0.095% 波动, 跨区域碳补偿具有可操作性。[结论] 为实现广东省区域间的低碳协同发展, 未来应建立以政府为主导的区域横向碳补偿制度, 并实施以低碳为导向的差异化低碳优化策略, 这对区域协调和低碳发展具有重要的现实意义。

关键词: 土地利用; 碳收支; 碳补偿; 额度核算; 广东省

中图分类号: X196

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)01-0197-10

Horizontal Carbon Compensation in Guangdong Province Based on Coordinating Land Use Carbon Budget Under the Background of Carbon Neutrality

DU Mengqing, YANG Xin

(College of Public Administration, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: [Objective] The carbon compensation mechanism is an important way to promote the achievement of carbon peaking and carbon neutrality goals and social environment equity. [Methods] This study established the carbon compensation model to calculate the amount of spatial transfer carbon compensation based on the calculation of the carbon budget from 2010 to 2020. [Results] (1) During the study period, the average annual incremental rate of total carbon emissions was 2.51%, with the remaining cities except Foshan, Dongguan and Qingyuan increasing to varying degrees, presenting a spatial pattern of “core-periphery” centered around Guangzhou. From 2010 to 2020, the total carbon absorption showed a slow downward trend, and the spatial pattern tended to be stable with a general characteristic of high in the northern and low in the southern. (2) The carbon compensation payment area became larger during the study period, the proportion of area increased from 55.22% to 60.49%. The payment regions were mainly distributed in Huizhou, which had higher net carbon emissions, and Yunfu and Yangjiang, which had lower net carbon emissions but lower carbon emission efficiency. The compensated areas were mainly divided into two types, one type exhibited low net carbon emissions, e.g., Heyuan and Shanwei, and the other type was

收稿日期: 2023-08-05

修回日期: 2023-09-26

录用日期: 2023-10-10

网络首发日期 (www.cnki.net): 2023-12-14

资助项目: 国家自然科学基金项目(71704061); 教育部人文社科基金规划项目(21YJA790072); 武汉市曙光计划项目(2023020201020349); 中央高校基本科研业务费专项(2662023YJ001, 2662023PY015)

第一作者: 杜梦晴(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事土地利用与生态环境研究。E-mail: dmq@webmail.hzau.edu.cn

通信作者: 杨欣(1988—), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土地资源经济与管理研究。E-mail: yangxin@mail.hzau.edu.cn

of high carbon emissions but high carbon emission efficiency, such as Shenzhen, Guangzhou and Dongguan. (3) Huizhou ranked the first of the compensation amounts to be paid, while Shenzhen received the largest amount of carbon compensation. The proportion of cross regional carbon compensation amounts to the regional GDP of each city varied from 0.017% to 0.095%, indicating that cross regional carbon compensation was feasible. [Conclusion] In order to achieve the low-carbon collaborative development of Guangdong province, it is needed to establish carbon compensation system guided by the government in the future and implement the low-carbon-oriented regional differentiation low-carbon optimization strategy. The above has important practical significance for regional coordination and low-carbon development.

Keywords: land use; carbon budget; carbon compensation; quota accounting; Guangdong Province

Received: 2023-08-05

Revised: 2023-09-26

Accepted: 2023-10-10

Online(www.cnki.net): 2023-12-14

二氧化碳等温室气体排放引起的全球气候变化不仅对人类生存和发展带来严峻挑战,也成为国际谈判的重要议题^[1]。碳减排活动的开展不仅是实现自身高质量发展的重要手段,也是积极应对全球气候变化治理的现实要求^[2]。继《联合国气候变化框架公约》对世界各国提出了碳减排的具体量化目标后,中国政府明确提出到 2030 年“碳达峰”和 2060 年“碳中和”的目标。土地作为能源消耗、产业结构调整和经济发展模式升级的重要载体,土地利用活动的变化影响区域碳收支水平并通过碳排放的跨区流动而产生外部性^[3-5],直接关系到区域“双碳”目标的实现。而碳补偿因可以实现高碳排放区域和碳汇功能区间转移支付,被视为助力碳中和目标达成的有效手段^[6-7]。因此,从土地利用碳收支出发,在秉持共同但有区别的责任原则上,开展跨区域碳补偿不仅可以从土地利用领域助推区域公平协调发展和“双碳”目标的达成,还能提升我国在应对气候变化领域的国际话语权 and 为国家应对气候变化外交谈判提供政策支持。

国内外基于土地利用碳收支和碳补偿展开了大量的研究。在土地利用碳收支测算方面,研究对象主要包括建设用地上经济活动的碳源排放及自然生态系统的碳汇吸收 2 个方面,碳汇吸收量估算方法主要采用“自上而下”的大气反演模型^[8]或“自下而上”的地面调查和清查、生态系统过程模型、统计模型、清单法^[9],经济活动引起的碳排放量估算多基于 IPCC 温室气体清单方法和相关碳排放系数方法^[3]。研究尺度多围绕国家^[10]、区域^[11]和县域^[12]层面,研究领域主要集中在土地利用碳排放的时空特征及影响因素^[13]、土地利用对碳排放的作用机制^[14]、土地利用碳排放效应^[15-16]等。在碳补偿内涵界定方面,学者们总结了碳补偿内涵特征、碳补偿模式和碳补偿制度的基本框架,构建“碳源—碳汇”的平衡账户和“国家碳补偿制度”^[17-19]。在碳补偿额度测算方面,研究主要在省域^[20]、县域^[12]、流域^[21]尺度上,选择农地^[18]、森

林^[22]、旅游地^[23]等作为研究对象,从补偿意愿^[24]、碳汇价值^[25]、碳平衡^[4,12]等视角来测度碳补偿额度。

综上所述,已有文献围绕区域碳收支和碳补偿展开了丰富的研究,但是在 3 个方面还存在不足:(1)区域碳排放测算主要考虑能源消耗或者土地利用,较少把人类呼吸、畜牧业、固废等纳入考虑,且关于碳收支测算的研究则多局限在土地利用视角,综合性略微欠缺。(2)碳补偿研究主要从支付意愿、碳汇价值或者碳平衡的视角展开,忽略了不同区域经济发展水平和人口差异情况,没有贯彻各地承担“共同但有区别的责任”这一理念,加剧了各地碳汇责任承担的不公平性。(3)已有的跨区域碳补偿研究多是集中在一个时间截面上,较少从时间序列的角度测算我国已经迈入高质量发展阶段的跨区域碳补偿价值。基于此,本文以广东省作为研究区域,在对区域综合碳收支进行测算和时空格局分析的基础上,将碳排放效率和人均 GDP 纳入到传统的跨区域碳补偿价值框架,在划分碳补偿分区的基础上,计算出统筹土地利用碳收支的广东省 21 市 2010—2020 年的跨区域碳补偿价值,以期广东省各城市“双碳目标”达成和低碳绿色发展提供基础性的政策建议。

1 研究区域

广东省(109°45′—117°20′E, 20°09′—25°31′N)位于中国大陆最南部,下辖 21 个地级市,分为珠三角、粤东、粤西和粤北 4 个区域(图 1)。自改革开放以来,广东省经济增速持续位于各省及自治区第 1 位,2020 年全省生产总值为 11.08×10^{12} 元,居国内各省份首位,但区域各城市经济发展分化严重,城市间贫富差距悬殊,广州和深圳处于绝对领跑地位,佛山和东莞依托广深,两市 GDP 均属于万亿级别,其余城市经济总量相对较小。2020 年广东省土地面积约 1.80×10^7 hm^2 ,其中耕地、建设用地、林地的占比分别为 23.82%, 7.53%, 60.10%, 2010—2020 年土地利用变化剧烈,具体表现

为耕地减少及建设用地扩张。与此同时,广东省的能源消耗量和碳排放量持续增长,2020 年能源消费总量为 3.45×10^8 t 标准煤,占全国能源消费总量的 6.93%。截至 2020 年末,广东省常住人口约 1.27×10^8 人,即 2020 年广东省以全国 1.86% 的土地面积和 8.81% 的人口数量条件,在消耗了 6.93% 的能源的基础下,创造了全国 10.90% 的经济总量。但是,作为我国社会主义市场经济的桥头堡和改革开放的先行试验区,广东省内存在严重的发展不均衡不充分问题。近年来,广东省积极响应国家经济转型发展战略以实现持续推进经济社会向高质量绿色低碳循环发展,在这一背景下,探求碳排放与土地利用变化及经济增长之间的关系,对于制订科学合理的碳排放方案意义重大。

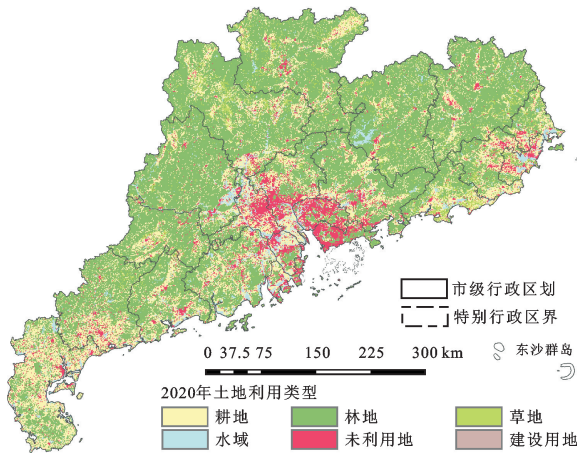


图 1 研究区概况

Fig. 1 Map of the study area

2 研究方法

2.1 土地利用碳收支测算方法

2.1.1 碳排放量核算办法 通过整合 IPCC 温室气体清单方法^[26]和国内相关文献^[21,26]构建碳排放核算体系。利用排放因子法对区域碳排放进行核算。主要包括能源消耗、农业生产活动、人类呼吸、畜牧业、固体废弃物和废水等的碳排放量。

(1) 能源碳排放测算:

$$E_{\text{energy}} = Q_{\text{energy}} \times \sigma \quad (1)$$

式中: E_{energy} 为某区域能源消耗所产生的 CO_2 排放量(t); Q_{energy} 为某区域能源的消耗量(t 标准煤); σ 为单位能源消耗量的 CO_2 排放系数,在李璐等^[3]的研究基础上取值 1.870 t C/t 。

(2) 呼吸作用碳排放测算:

$$E_{\text{hum}} = \text{Num}_{\text{people}} \times 0.079 \quad (2)$$

式中: E_{hum} 为某区域人呼吸所产生的碳排放量(t); $\text{Num}_{\text{people}}$ 为某区域人的数量。

(3) 农业生产活动碳排放测算:

$$E_{\text{mach}} = S_{\text{mach}} \times P + P_{\text{mach}} \times Q \quad (3)$$

$$E_{\text{irri}} = S_{\text{irri}} \times R \quad (4)$$

$$E_{\text{fetr}} = G_{\text{fetr}} \times A \quad (5)$$

$$E_{\text{animal}} = \sum_{i=1}^n \text{Num}_{\text{animal}-i} \times (C1_{\text{animal}-i} + C2_{\text{animal}-i}) \quad (6)$$

式中: E_{mach} 、 E_{irri} 、 E_{fetr} 分别为农机、灌溉和化肥的碳排放(kg); S_{mach} 为农作物种植面积(hm^2); P_{mach} 为农业机械总动力(kW); S_{irri} 为灌溉面积(hm^2); G_{fetr} 为化肥使用量(Mg); P 、 Q 、 R 、 A 为碳排放系数,参照已有学者^[12,21]的研究,分别取 16.47 kg C/hm^2 、 0.18 kg C/kW 、 266.48 kg C/hm^2 、 857.54 kg C/Mg 。 $E_{\text{animal}-i}$ 为动物的碳排放总量; $\text{Num}_{\text{animal}-i}$ 为第 i 种动物的数量; $C1_{\text{animal}-i}$ 为第 i 种动物肠道发酵的甲烷排放系数 [$\text{kg}/(\text{头} \cdot \text{a})$]; $C2_{\text{animal}-i}$ 为第 i 种动物粪便的甲烷排放系数 [$\text{kg}/(\text{头} \cdot \text{a})$]。

(4) 固废、废水碳排放测算:

$$E_{\text{waste-burn}} = Q_{\text{waste-burn}} \times C_{\text{waste}} \times P_{\text{waste}} \times EF_{\text{waste}} \quad (7)$$

$$E_{\text{waste-fill}} = Q_{\text{waste-fill}} \times 0.167 \times (1 - 71.5\%) \quad (8)$$

式中: $E_{\text{waste-burn}}$ 为垃圾焚烧产生的碳排放(t); $E_{\text{waste-fill}}$ 为垃圾填埋产生的碳排放(t); $Q_{\text{waste-burn}}$ 为垃圾焚烧量(t); C_{waste} 为废弃物的碳含量比例(%); P_{waste} 为废弃物中的矿物碳比例(%); EF_{waste} 为废弃物焚烧炉的完全燃烧效率,参照孔凡斌等^[21]的研究,分别取 40%、40%、95%; $Q_{\text{waste-fill}}$ 为垃圾填埋量(t)。

$$E_{\text{liv-water}} = \text{Num}_{\text{people}} \times 60 \times 0.5 \times 0.6 \times 0.8 \times 365 \quad (9)$$

$$E_{\text{ind-water}} = Q_{\text{ind-water}} \times 4.1 \times 0.25 \quad (10)$$

式中: $E_{\text{liv-water}}$ 为生活废水中甲烷的年排放量(kg); $\text{Num}_{\text{people}}$ 为人口(人); $E_{\text{ind-water}}$ 为工业废水中的甲烷排放量(kg); $Q_{\text{ind-water}}$ 为废水量(m^3)。

2.1.2 碳吸收量核算办法 碳汇吸收值的估算使用各类用地面积与各自碳排放系数的乘积^[3]。碳汇地类主要包括耕地、林地、草地、水域及未利用地。其测算公式为:

$$I = \sum_{i=1}^5 A_i \times \alpha_i \quad (11)$$

式中: I 为耕地、林地、草地、水域及未利用地等 5 种用地类型的碳吸收总量(t),通过阅读相关文献及结合区域实际情况,碳排放系数分别取值为 -0.130 ^[27], -0.613 ^[28], -0.022 , -0.298 , $-0.005 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ^[3]; A_i 为各类用地面积(hm^2); α_i 为各类用地碳排放系数。

2.2 碳补偿分区方法

本文以修正后碳收支量作为碳补偿分区的依据,若

修正的碳补偿基准值 >0 ,则为支付区,反之为受偿区。

2.2.1 碳补偿基准值的确定方法

$$L_i = E_{ci} - S_{ci} \quad (12)$$

式中: L_i 为*i*城市的净碳排放量(t); E_{ci} 为*i*城市的碳排放量(t); S_{ci} 为*i*城市碳吸收量(t);若 $L_i > 0$,说明该城市应该支付一定的碳补偿资金,若 $L_i < 0$,则说明该城市可以得到一定的碳补偿资金。

2.2.2 碳补偿基准值修正 根据初步计算结果,公式(12)的方法过于简单,在实际应用中会导致计算结果的偏差:首先,基准值的确定只考虑到净碳排放量,忽略了碳排放强度与碳排放效率之间存在的区域性差别,会导致城市间碳补偿价值核算的不公平性;其次,广东省各城市的净碳排放量数值较大,导致所有城市支付大量的碳补偿资金,造成与实际不符的现象。因此,为避免以上误差,本研究借鉴赵荣钦等^[12]的研究,对碳收支的基准值 L_i 进行修正,见公式(13)~公式(15)。

(1)基于碳排放效率区域差异的碳补偿标准确定

由于各城市间的碳排放强度具有明显的时间及空间差异,为了反映不同城市之间碳排放的经济效率区别,基于2015年和2020年2个年份间不同城市的碳排放强度与广东省碳排放强度进行比对,对 E_{ci} 进行一定的修正,得出公式:

$$E_{ci}^1 = E_{ci} \times (G_{t1-i}/G_{t2-i} - G_{T1-i}/G_{T2} + 1) \times G_{t1-i}/G_T \quad (13)$$

式中: E_{ci}^1 为经过修正后的*i*城市碳排放量(t); G_{t1-i} 和 G_{t2-i} 为2020年和2015年广东省*i*市碳排放强度(t/10⁴元); G_{T1} 和 G_{T2} 为2020年和2015年广东省碳排放强度(t/10⁴元); G_T 为2020年广东省各市平均碳排放强度(t/10⁴元)。

通过修正后,部分具有较大碳排放强度的城市的碳排放总量增大;反之碳排放总量减小。

(2)基于净碳排放量数据失真的碳补偿标准确定

为处理绝大多数城市因为净碳排放量多而造成碳补偿基准值失真的结果,研究纳入基于经济贡献系数的碳排放阈值(P_i)。核算公式为:

$$P_i = ECC \times D = \frac{G_i}{G} / \frac{C_i}{C} \times D \quad (14)$$

式中: P_i 为*i*城市碳排放阈值(t);ECC为碳排放的经济贡献系数,主要用来反映地区的碳生产能力,当 $ECC > 1$ 时,说明该市经济贡献率相对较大,生产效率偏高,反之则较低; D 为广东省各个城市的碳排放平均值(t); G_i 、 G 为*i*城市的GDP和广东省的GDP(10⁴元); C_i 、 C 为*i*城市的碳排放量和广东省的总碳排放量(t)。

通过修正后的碳补偿基准值 L_i^1 的计算公式为:

$$L_i^1 = E_{ci}^1 - S_{ci} - P_i \quad (15)$$

式中: L_i^1 为*i*城市经过修正所得到的碳补偿基准值(t)。经过修正后的 L_i^1 更接近于研究区域实际情况。

2.3.3 碳补偿空间转移额度测算方法 基于修正后的碳补偿基准值的碳补偿价值计算公式为:

$$M_i = |L_i^1| \times \partial \times \gamma = |E_{ci}^1 - S_{ci} - P_i| \times \partial \times \gamma \quad (16)$$

式中: M_i 为*i*城市应当得到(或支付)的碳补偿资金(10⁴元/年); ∂ 为单位碳价格(10⁴元/10⁴t); γ 为碳补偿系数。

$$\partial = (P_{\max} + P_{\min})/2 \times G_{p1}/G_{p2} \quad (17)$$

式中: $P_{\max}$ 、 $P_{\min}$ 分别为目前国内碳汇价格的最大值和最小值^[20]; G_{p1} 为广东省2020年人均GDP(10⁴元/人); G_{p2} 为全国2020年人均GDP(10⁴元/人),经核算本文单位碳价格为105.784 7(10⁴元/10⁴t)。

γ 用改进后的Peal生长曲线模型^[29](“S”形生长曲线)表示,公式为:

$$\gamma_i = A_i / (1 + a e^{-bt}) \quad (18)$$

式中: γ_i 为*i*城市的碳补偿系数; A_i 为*i*城市的碳补偿能力,具体表现为*i*城市的GDP与广东省GDP的比值; a 与 b 作为常数取值为1; t 为广东省恩格尔系数。

2.3 数据来源

本研究土地利用数据来源为Globeland30(<http://www.globallandcover.com/>),空间分辨率为30 m,时间节点为2010年、2015年、2020年3期,覆被类型经重分类后得到耕地、林地、草地、建设用地、水域、未利用地6类,并利用ArcGIS10.7软件统计各市各地类面积;社会经济统计数据主要包括能源消费量、常住人口数量、农业生产情况(农业机械总动力、化肥使用量、有效灌溉面积等)、畜牧业产量、固废及废水排放量,均从《广东省统计年鉴2011—2021》^[30]中获得。

3 结果与分析

3.1 广东省碳收支时空格局演变分析

3.1.1 广东省2010—2020年碳排放总量时空特征分析 根据公式(1)~公式(10)和能源消费量、人口数量等数据,计算得到2010—2020年广东省21市的碳排放总量,具体结果见图2。

研究期间广东省碳排放总量呈现出明显的增长趋势,从2010年的64 327.63×10⁴t增长到2020年的80 430.61×10⁴t,平均每年增加2.51%,其中能耗所造成的碳排放占比最大,平均每年约占总碳排放量的75.42%,且整体呈现波动上升趋势,从75.44%上升到75.52%。具体来看,汕尾市、河源市的碳排放量排在末位,出现了量级上的变化,但碳排放均在

1 450×10⁴t 以下。广州市、深圳市及惠州市碳排放量较多且逐渐增多,增长速度较快,出现量级增长,其中广州市碳排放量最多,由 2010 年的 9 824.00×10⁴t 增长至 2020 年的 12 639.43×10⁴t,而惠州市增长速度最快,2020 年比 2010 年上升 3 313.28×10⁴t,增长近 2 倍,广州市碳排放量与增长速度小于深圳,2020 年比 2000 年上升 702.95×10⁴t。此外,佛山市、东莞市和清远市的碳排放有所减少,其中东莞市减少最多,由 6 068.88×10⁴t 减少至 3 530.43×10⁴t,下降幅度较大。

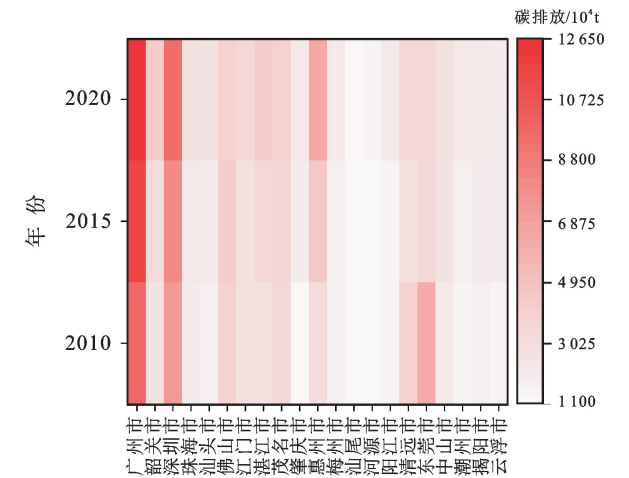


图 2 2010—2020 年广东省碳排放量

Fig. 2 Carbon emissions in Guangdong Province from 2010 to 2020

广东省碳排放量的空间分布见图 3,碳排放的空间格局呈现“核心—外围”的特征,与区域 GDP 空间分布相似。碳排放空间集聚明显,碳排放高值区域主要分布在珠三角地区,自改革开放以来,珠三角作为制造业和出口行业的重点地区,打造了众多的产业集群,人口密集,能源广泛应用于工业、交通等领域,碳排放增长明显,其中广州、深圳市的碳排放量位于首位,2 个市的碳排放量占整个省的 27.57%,作为广东省经济发展的重点区域,广州市和深圳市 2020 年分别实现地区生产总值 2.77×10¹²,2.50×10¹² 元,是广东省内 2 个 GDP 总量超过两万亿的城市。经济的快速发展带来了建设用地的扩张、建设用地承载的人类活动密集及工业生产的增加,深圳市和广州市的能源消耗量占整省份的 32.70%,加上生态用地面积较小,因此这些区域碳排放量一直居高不下且增速快。相反,粤西及粤北山区属于碳排放量及增量相对较少的区域,主要是因为区域经济发展相对落后,建设用地面积小、森林资源丰富且生态环境较好。可以看出,广东省作为典型的外向型经济区域,内部城市发展水平存在较大差距,城市人口、经济及能源结构的差异使得不同城市碳排放存在较大差异。

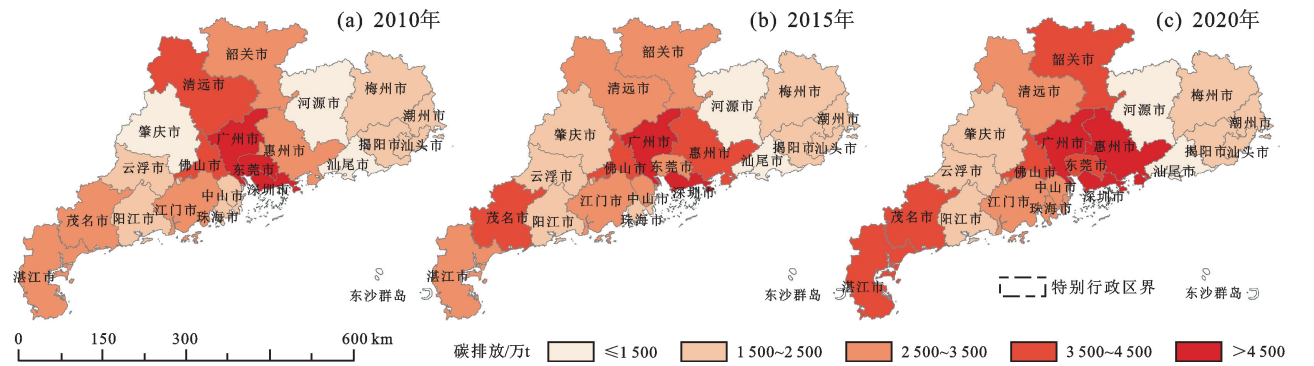


图 3 广东省碳排放空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of carbon emissions in Guangdong Province

3.1.2 广东省 2010—2020 年碳吸收总量时空特征分析 根据公式(11)和土地利用数据,计算得到 2010—2020 年广东省 21 市的碳吸收总量,具体结果见图 4。2010—2020 年广东省碳吸收量总体不断减少,从 2010 年的 741.89×10⁴t 减少到 2020 年的 732.21×10⁴t。具体而言,韶关市、清远市、河源市、梅州市、肇庆市的碳吸收量较多,深圳市、珠海市、汕头市、东莞市及中山市的碳吸收量处于末位,均少于 5.50×10⁴t。研究期间河源市、梅州市减少最多,分别减少 1.32×10⁴,1.24×10⁴t,而湛江市和潮州市的碳吸收量分别增加 0.07×10⁴,0.09×10⁴t,各城市的碳吸收总量未出现量级上的变化,变化速度较慢。

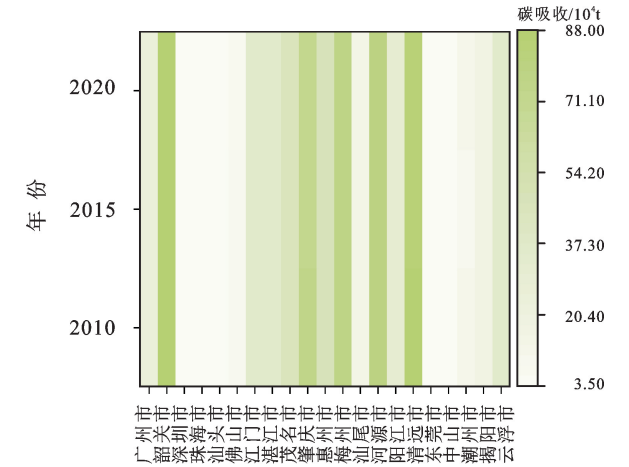


图 4 2010—2020 年广东省碳吸收量

Fig. 4 Carbon absorption in Guangdong Province from 2010 to 2020

广东省的碳吸收空间分布见图 5。广东省碳吸收总量整体呈现“北高南低”的空间分布特点,与区域生态用地空间分布基本一致。其中韶关、清远市属于高值区域,河源、梅州和肇庆属于中高值区域,5 个城市的碳吸收量占整个区域的 54.70%,究其原因,作为区域重点生态功能区,在这 5 个城市中林地、草地土地利用面积所占比例大,分别占全省的 57.46%,55.95%,区域生态环境较好,生态系统固碳能力强,

因此碳吸收总量高。

相反,广州、深圳、珠海等碳吸收量较少,这些城市普遍位于珠三角地区,经济相对发达,但城市面积整体较小,自然环境受人类干预大,导致林地、草地等碳汇地类总面积小,碳吸收能力弱。这在一定程度上说明碳吸收量与生态用地面积存在一定的正相关关系,保护和增加生态用地面积有利于增加碳吸收量,从而促进碳中和目标的实现。

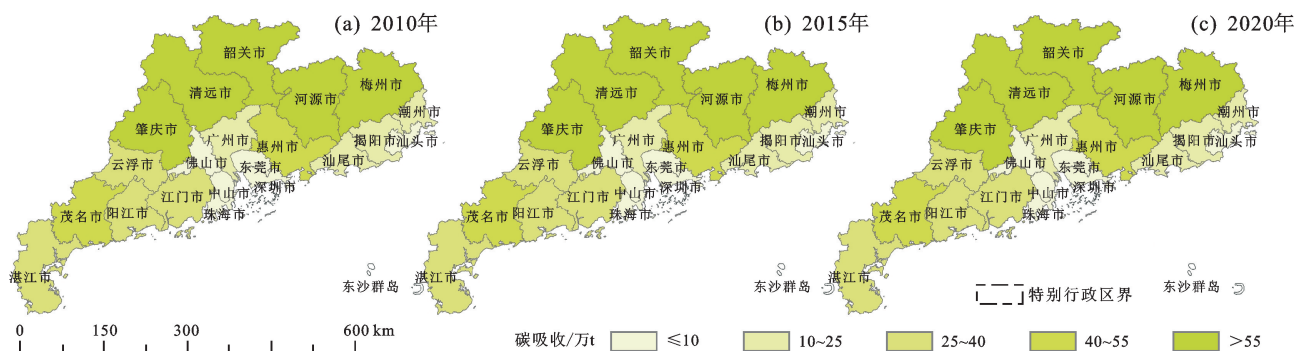


图 5 广东省碳吸收空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of carbon absorption in Guangdong Province

3.2 广东省 2010—2020 年碳补偿分区特征分析

3.2.1 广东省 2010—2020 年净碳排放量时空特征分析 基于公式(12)和前文计算的碳排放和碳吸收量,得到广东省各市的净碳排放量,并绘制出各市净碳排放量的空间分布(图 6)。

2010—2020 年广东省土地利用净碳排放量呈现增长趋势,从 2010 年 $63\,585.74 \times 10^4$ t 增长到 2020

年的 $79\,698.40 \times 10^4$ t,增长 $16\,112.66 \times 10^4$ t,增幅达 25.34%,且各城市的净碳排放量均为正值。各市的净碳排放量均呈现不同程度的增加,其中惠州市增长幅度最大,增长近 2 倍,究其原因,快速的工业化、城市化使得建设用地面积的增加,林地、草地等生态用地减少,在建设用地利用过程中能源消耗的增加且碳吸收量减少,最终导致净碳排放量的快速增加。

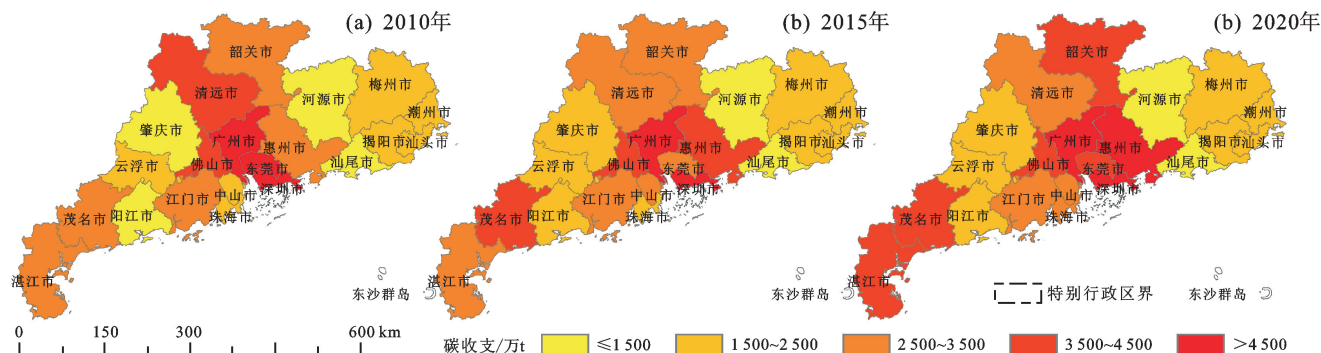


图 6 广东省碳收支空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of carbon budget in Guangdong Province

从广东省净碳排放量的空间分布(图 6)来看,净碳排放量与碳排放的空间分布具有高度一致性,净碳排放高值区分布在经济发展水平高的广州市和深圳市,2 个城市人口密度大,产业结构以二、三产业为主,建设用地面积及其碳排放量大,林地面积小,2 个城市的林地面积仅占全省林地面积的 3.54%,碳汇能力弱,较高的碳排放量加上较低的碳吸收量导致区域净碳排放量高。中高值区的还有惠州、东莞市,以上 4 个城市的净碳排放量占整个省的 40.66%。韶关、清远市虽然碳吸收量高,但碳排放量也高,导致净碳

排放量处于中值区域。河源、汕尾、云浮市由于碳排放量少且碳吸收量较高属于低值区域,这 3 个城市的 GDP 处于全省末位,加上区域内绝大部分为山地丘陵,水资源丰富,区域内限制工业发展,林地、草地面积较大市,云浮市虽林地草地面积较少但因属于山区城市,四面环山,开发难度大,因此 3 个城市的净碳排放量少。

3.2.2 修正广东省碳补偿分区及演变特征分析 前文研究发现,广东省各城市的碳排放总量显著高于碳吸收量,仅以净碳排放量为基准进行碳补偿分区,则各

城市都应划为支付区,不符合实际且会造成区域发展不公平,也进一步印证了进行碳补偿基准值修正的必要性,以此更好地实现区域间公平与可持续发展。因

此本文根据公式(13)~公式(15)及净碳排放量数据,计算得到 2010—2020 年广东省 21 市的修正后的碳补偿基准值,在此基础上绘制广东省碳补偿分区(图 7)。

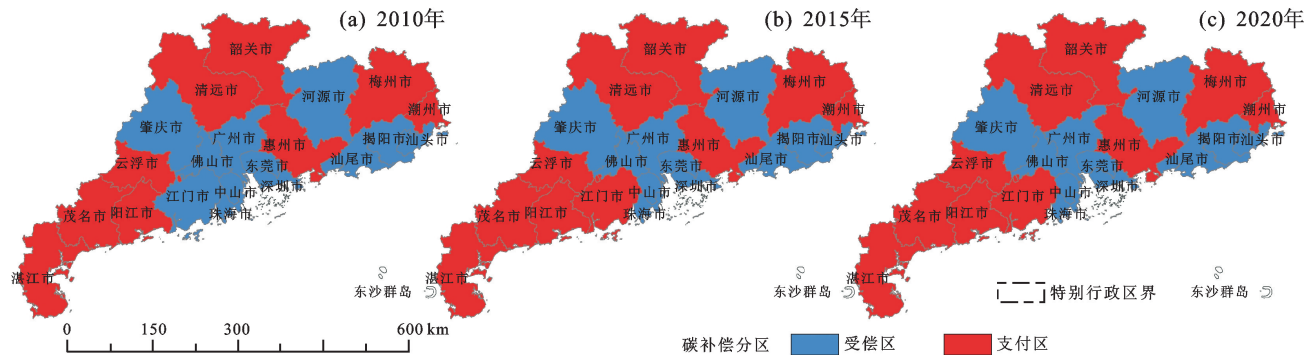


图 7 广东省土地利用碳补偿基准值分区

Fig. 7 Spatial distribution of land use carbon compensation reference value in Guangdong Province

根据修正后的广东省各地级市碳补偿基准值,初步将广东省各市域分为受偿区及支付区,其中韶关、湛江、肇庆、惠州、梅州、阳江、清远、潮州、云浮市在研究期间均需支付一定的碳补偿金额,广州、深圳、珠海、汕头、佛山、茂名、汕尾、河源、东莞、中山、揭阳市均应获得补偿,其他城市部分年份获得,部分年份支付。研究期间,江门市由受偿区变为支付区,支付区范围变大,面积占比由 55.22%扩大至 60.49%,作为广东省珠江三角洲的外围城市,在区位及政策优势下,借助区域较高的资源承载能力和发展潜力,区域经济实现了高质量发展、产业转型升级,碳排放量增多,在碳吸收量减少的前提下,出现了碳需求大于碳供给的状态。具体来看,支付区的主要分布在碳排放效率低的惠州、云浮、阳江市等城市,其中惠州市主要是因为经济发展水平较高、生态用地资源有限,碳排放量较高、碳吸收能力弱,而云浮、阳江市虽都碳排放量较低,但区域未承担较大的经济发展压力和碳排放压力,因此需要支付一定的补偿金额;相反广州、深

圳、东莞、珠海等城市因碳排放效率高、碳排放阈值较大,而获得碳补偿资金。此外,河源、汕头、汕尾市等因净碳排放量少而获得补偿,综上可以将受偿区分为 2 类:一类是净碳排放量少;另一类是净碳排放量较多但碳排放效率高、碳排放阈值大的区域,这些区域虽然碳排放总量相对较高,但综合考虑其经济发展方式、产业结构和发展空间来看,都具有较高的碳排放经济效率,并承担了较大的碳排放增长压力,因此应获得较大的二氧化碳排放空间,广东、深圳等城市的经济发展模式值得各市参考借鉴。此外,同作为广东省国土空间规划中重要的“两级”的汕头市和湛江市,在发挥区域资源优势,加快基础设施建设时,湛江市应向汕头市学习其经济发展模式,在促进经济发展的同时促进资源可持续利用,提升碳排放效率。

3.3 广东省碳补偿空间转移额度测算

根据公式(16)~公式(18)及净碳排放量、区域 GDP 数据,计算得到 2010—2020 年广东省 21 市的碳补偿价值,并绘制出各市碳补偿价值的空间分布(图 8)。

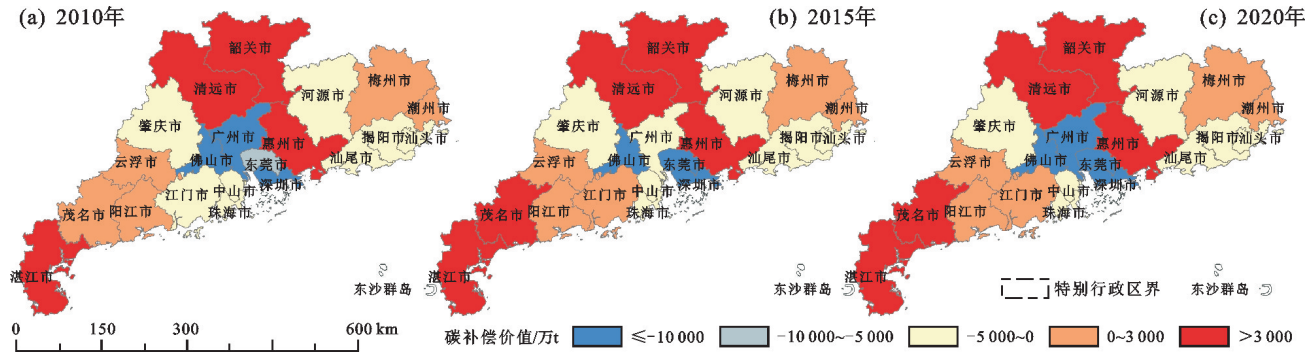


图 8 广东省市域碳补偿价值空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of carbon compensation value in Guangdong Province

本研究发现,支付碳补偿资金最多的是惠州市,其次是韶关市,研究期间需要支付的碳补偿额度均值分别为 $12\,115.42 \times 10^4$, $7\,667.69 \times 10^4$ 元,除清远市

外其他支付区的支付金额逐渐增大,其中惠州市、韶关市支付额度增加量排在首位,年均增长率分别为 22.01%, 4.14%。由此可见,惠州市和韶关市的碳排

放强度较高,且均存在碳排放量较高,碳排放量增速与 GDP 增速不匹配的现象。受偿区中,受偿额度最高的前 2 位分别为深圳和佛山市,可获得的补偿额度均值分别为 $64\ 980.30 \times 10^4$, $34\ 716.00 \times 10^4$ 元。由此可见,深圳和佛山市的碳排放效率较高,在优化开发区规划中实现了碳排放优化工作。深圳、东莞、佛山、珠海、河源、汕尾、揭阳市的受偿额度在研究期间不同程度增加,其中东莞和深圳市受偿额度增加量最多,年平均增长率分别为 33.72%, 8.50%, 可见东莞左邻佛山市右邻深圳市,充分发挥了区位优势,实现了碳减排及经济转型升级。而广州、汕头、肇庆、中山市的受偿额度均减少,变化幅度较大的是肇庆市和中山市,这在一定程度上说明,这 4 个城市的碳排放优化工作仍存在较大的进步空间。从 2010—2020 年广东省市域碳补偿价值的空间分布(图 8)来看,广东省碳补偿价值具有较大的空间差异,总体呈现交叉集聚分布的空间格局。位于广东省中部的惠州、韶关等城市需要支付的碳补偿资金较高,这与区域内净碳排放量大、碳补偿效率低有着直接的关系。相对而言,广东省的河源、汕尾、云浮市等生态优良区及山区由于碳汇功能较强,而获得碳补偿资金,此外深圳、佛山、广州等城市尽管碳汇用地面积较小,净碳排放量相对较高但其经济贡献系数位于区域榜首,经过修正后该城市允许排碳量阈值变大,远大于其净碳排放量,因此其能获的碳补偿资金位居前列。此外,各市跨区域碳补偿额度占到各自 GDP 的比例约为 0.017%~0.095%,均在政府财政收入能力之内,证实了跨区域碳补偿具有现实性和可操作性。综上,从理论角度出发,单就净碳排放量与碳补偿价值关系而言,城市的净碳排放量越多,支付的碳补偿资金会越多,但在考虑到碳排放效率时,会产生部分城市因碳排放效率高从而抵消其净碳排放量较高的负面影响而获得碳补偿资金。因此,从区域经济发展、碳排放效率、碳补偿价值来看,区域之间要实现低碳协调发展,应不断缩小区域之间的经济隔阂,经济发展迅速的城市如深圳、东莞、广州等要积极带动周边城市,实现技术共享,并基于碳补偿从低碳层面推动区域低碳协调发展。

4 讨论

碳补偿作为可以缓解经济发展与环境保护之间矛盾、促进区域低碳、协调发展的经济激励制度,是当前低碳绿色发展背景下生态补偿的研究热点领域。本文创新性地将土地利用碳收支纳入到传统的跨区域碳补偿研究中,测算了广东省 21 市的碳补偿标准。在碳补偿政策干预下,可以有效地控制生态用地向建设用地的转移,且基于土地利用碳收支确定碳受偿和

支付对象,较为全面地考虑了不同地区的资源禀赋能力及变化,使得碳补偿政策更具有实际意义。此外,本研究综合考虑到区域的资源禀赋和经济条件等存在较大的差异,纳入碳排放效率对碳排放量进行修正,用相对的尺度衡量区域的碳补偿基准,比起传统的基于净碳排放确定补偿额度,该模型更具有可比性、公平性及可行性。从研究结果来看,广东省各市土地利用碳收支具有明显的空间差异,研究显示的广东省各市土地利用碳收支量变化趋势与大多相关研究^[31-32]结论较为一致。此外,广东省碳补偿支付区不仅包括经济发展较快、人口及产业集聚的地区,还包括了未承担较大经济发展压力和碳排放压力的地区,而受偿区也不仅是包含碳汇用地丰富的地区,还囊括了具有较高碳排放效率、并承担了较大碳排放增长压力的城市。因此从各城市的发展现状来看,本文的跨区域碳补偿方案的制定一方面可以促进碳减排、保护碳汇资源、提高碳排放效率,还有利于促进广东省整体经济发展的均衡性和生态资源的公平利用,对于我国非均衡发展模式的碳中和目标实现也有较强的参考意义。

但本文在 3 方面有待改进:(1)本研究碳排放系数的确定未考虑到城市内部植被类型、能源消费结构等多因素的差异性,后续应基于区域“差别化”发展模式优化各系数的适宜性。(2)本文尽管考虑到区域碳排放强度及效率的影响,但在针对广东省的研究中碳补偿经济系数权重相对过高,会出现将单位 GDP 碳排放低的经济发达区域归于碳受偿区的现象,在未来研究中应核算广东省碳补偿分区的相对值,针对广东省实际情况改进碳补偿的价值标准。(3)本研究仅对广东省区域内部碳补偿进行研究,鉴于广东省作为对外经济交流活跃区,未来应进一步研究跨省域的碳补偿机制。

基于以上分析,本研究提出 2 点建议:(1)以政府为主导建立市域间的跨区域碳补偿制度。广东省政府应结合省内各城市的具体情况,建立合适的碳补偿机制。可以采取直接的经济补偿形式,以不同城市的碳收支情况作为核算依据,由碳排放强度高的城市(如惠州等城市)向碳排放强度低、经济相对落后的城市(河源、清远等)支付适宜的碳补偿资金,以提高区域对生态环境保护的积极性,有助于实现城市之间公平发展;还可以采取间接的技术支持形式,由深圳、东莞、广州等经济技术发达、碳排放效率高的城市向韶关、清远等技术相对欠发达城市提供技术支持,协助其提高当地有关技术(如减少工厂碳排放净值、发展畜牧业产生废料的多元利用等),帮助区域实现节能减排的目标,减少碳排放;此外,也可以通过建立区域间的碳排放交易制度,如河源、汕尾市等碳排放少的

区域可以将区域碳排放配额出售给碳排放空间需求高的区域如惠州、广州市等。(2)以低碳为导向实施差异化的低碳优化策略。根据本文的碳补偿分区结果,对于韶关、清远市等经济发展一般、碳排放量较多,但森林资源较为丰富的支付区,在今后发展中应以保护和修复生态环境,提供生态产品为首要任务,在严格控制开发强度的同时可以利用当地资源禀赋优势发展低碳生态旅游等特色产业,将资源优势科学转变为经济优势,加快传统高污染产业的转型升级,在促进经济发展的同时实现资源环境可持续利用;对于惠州等经济比较发达、碳排放较高、GDP增速与碳排放增速不匹配的支付区,未来应发挥区位优势,在不断补漏的同时积极吸取其他区域,如深圳的先进发展经验,提升区域综合实力;对于广州、深圳、珠海市等发展水平较高、碳排放较高、但区域内的碳排放量并未超过区域承受范围的受偿区,未来应进一步推进产业结构低碳转型、优化生态系统格局,在兼顾经济发展的同时不断降低区域碳排放量,且积极发挥区域的联动作用,积极推广区域低碳经济发展模式,实现技术共享,注重城市间的协调发展;对于河源、汕尾、云浮、阳江市等经济发展缓慢、碳排放较少,担任农产品主产区的受偿区,在以后的发展中切实保护耕地,优化开发方式,改善农业生产条件,提高农产品单位面积产量,并科学利用区域自然资源优势发展低碳农业,不断提升区域经济发展质量。

5 结论

(1)广东省土地利用碳收支区域差异显著,呈现“核心—外围”的空间分布格局。广东省各城市的土地利用碳排放远高于碳吸收,具有较大碳减排压力。因此,区域间应协作减排,推进区域经济建设与环境保护协调发展目标的实现。

(2)由于区域经济发展水平、资源禀赋等差异,广东省的碳补偿分区差异显著,分为10个碳补偿支付区和11个受偿区。支付区主要是净碳排放多的惠州、韶关及净碳排放量少但碳排放效率低的云浮、阳江等城市。受偿区则主要分为2类:一类是净碳排放量少的河源、汕尾等城市;另一类是净碳排放量较多但碳排放效率高的广州、深圳等城市,并针对不同类型的支付和受偿区提出差异化的低碳发展对策建议。

(3)基于土地利用碳收支构建跨区域碳补偿机制,可以更全面综合地考虑各区域碳源和碳汇禀赋情况,在促进经济建设发展的同时兼顾资源环境的可持续利用,实现区域内部低碳协同发展。

参考文献:

- [1] 禹久泓,武传浩.环境规制、碳减排如何助推经济高质量发展:基于中国省域面板的空间计量分析[J].生态经济,2022,38(7):48-55.
- YU J H, WU C H. How can environmental regulation and carbon emission reduction promote high-quality economic development: Based on the spatial measurement analysis of China's provincial panel[J]. Ecological Economy, 2022, 38(7): 48-55.
- [2] 魏媛,简小玉.基于碳达峰碳中和的贵州省土地利用碳排放演变及预测研究[J].生态经济,2022,38(4):108-114.
- WEI Y, JIAN X Y. Research evolution of carbon emissions from land use in Guizhou Province based on carbon peak and carbon neutrality and the according predictions[J]. Ecological Economy, 2022, 38(4): 108-114.
- [3] 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[J].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[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(5): 1003-1015.
- [4] ZHAO Y B, WANG S J. The relationship between urbanization, economic growth and energy consumption in China: An econometric perspective analysis[J]. Sustainability, 2015, 7(5): 5609-5627.
- [5] 王政强,覃盟琳,唐世斌,等.北部湾城市群土地利用碳收支时空分异及碳补偿分区[J].水土保持通报,2022,42(5):348-359.
- WANG Z Q, QIN M L, TANG S B, et al. Spatio-temporal variation of land use carbon budget and carbon compensation zoning in beibu gulf urban agglomeration area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 348-359.
- [6] 夏四友,杨宇.基于主体功能区的京津冀城市群碳收支时空分异与碳补偿分区[J].地理学报,2022,77(3):679-696.
- XIA S Y, YANG Y. Spatio-temporal differentiation of carbon budget and carbon compensation zoning in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration based on the Plan for Major Function-oriented Zones[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(3): 679-696.
- [7] WANG W X, WANG W J, XIE P C, et al. Spatial and temporal disparities of carbon emissions and interregional carbon compensation in major function-oriented zones: A case study of Guangdong Province[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 245: e118873.
- [8] WHITE E D, RIGBY M, LUNT M F, et al. Quantifying the UK's carbon dioxide flux: An atmospheric inverse modelling approach using a regional measurement network[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19(7): 4345-4365.
- [9] PIAO S L, HE Y, WANG X H, et al. Estimation of China's terrestrial ecosystem carbon sink: Methods,

- progress and prospects [J]. *Science China Earth Sciences*, 2022, 65(4): 641-651.
- [10] 孙赫, 梁红梅, 常学礼, 等. 中国土地利用碳排放及其空间关联[J]. *经济地理*, 2015, 35(3): 154-162.
SUN H, LIANG H M, CHANG X L, et al. Land use patterns on carbon emission and spatial association in China[J]. *Economic Geography*, 2015, 35(3): 154-162.
- [11] 武娜, 沈镭, 钟帅, 等. 晋陕蒙地区经济增长与碳排放时空耦合关系[J]. *经济地理*, 2019, 39(9): 17-23.
WU N, SHEN L, ZHONG S, et al. Spatio-temporal coupling relationship between economic growth and carbon emission in Shanxi-Shaanxi-Inner Mongolia[J]. *Economic Geography*, 2019, 39(9): 17-23.
- [12] 赵荣钦, 刘英, 马林, 等. 基于碳收支核算的河南省县域空间横向碳补偿研究[J]. *自然资源学报*, 2016, 31(10): 1675-1687.
ZHAO R Q, LIU Y, MA L, et al. County-level carbon compensation of Henan Province based on carbon budget estimation[J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(10): 1675-1687.
- [13] HUANG H Q, ZHOU J. Study on the spatial and temporal differentiation pattern of carbon emission and carbon compensation in China's provincial areas[J]. *Sustainability*, 2022, 14(13): e7627.
- [14] 张苗, 吴萌. 土地利用对碳排放影响的作用机制和传导路径分析: 基于结构方程模型的实证检验[J]. *中国土地科学*, 2022, 36(3): 96-103.
ZHANG M, WU M. Analysis on the mechanism and transmission path of the impact of land use on carbon emissions: Empirical test based on structural equation model[J]. *China Land Science*, 2022, 36(3): 96-103.
- [15] HUTYRA L R, YOON B, HEPINSTALL-CYMERMAN J, et al. Carbon consequences of land cover change and expansion of urban lands: A case study in the Seattle metropolitan region [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 103(1): 83-93.
- [16] 张玥, 代亚强, 陈媛媛, 等. 土地利用隐性转型与土地利用碳排放空间关联研究[J]. *中国土地科学*, 2022, 36(6): 100-112.
ZHANG Y, DAI Y Q, CHEN Y Y, et al. The study on spatial correlation of recessive land use transformation and land use carbon emission[J]. *China Land Science*, 2022, 36(6): 100-112.
- [17] 中国环境文化促进会. 首部《中国碳平衡交易框架研究》报告在京发 [EB/OL]. [2008-11-06]. http://www.zhb.gov.cn/zhxx/hjyw/200811/t20081106_130915.htm.
China Environmental Culture Promotion Association. The first report of "Research on China carbon balance trading framework" issued in Beijing [EB/OL]. [2008-11-06]. http://www.zhb.gov.cn/zhxx/hjyw/200811/t20081106_130915.htm.
- [18] 伍国勇, 刘金丹, 杨丽莎. 中国农业碳排放强度动态演进及碳补偿潜力[J]. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(10): 69-78.
WU G Y, LIU J D, YANG L S. Dynamic evolution of China's agricultural carbon emission intensity and carbon offset potential [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2021, 31(10): 69-78.
- [19] 南锡康, 靳利飞. 市域工业企业碳补偿额度核算: 以武汉市为例[J]. *生态经济*, 2022, 38(8): 20-23.
NAN X K, JIN L F. Calculation of carbon compensation amount of municipal industrial enterprises: Taking Wuhan as an example [J]. *Ecological Economy*, 2022, 38(8): 20-23.
- [20] 周嘉, 王钰莹, 刘学荣, 等. 基于土地利用变化的中国省域碳排放时空差异及碳补偿研究[J]. *地理科学*, 2019, 39(12): 1955-1961.
ZHOU J, WANG Y X, LIU X R, et al. Spatial temporal differences of carbon emissions and carbon compensation in China based on land use change [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(12): 1955-1961.
- [21] 孔凡斌, 曹露丹, 徐彩瑶. 县域碳收支核算与碳综合补偿类型分区: 以钱塘江流域为例[J]. *经济地理*, 2023, 43(3): 150-161.
KONG F B, CAO L D, XU C Y. Measurement of carbon budget and type partition of carbon comprehensive compensation in the Qiantang River Basin [J]. *Economic Geography*, 2023, 43(3): 150-161.
- [22] BARUA S K, LINTUNEN J, UUSIVUORI J, et al. On the economics of tropical deforestation: Carbon credit markets and national policies [J]. *Forest Policy and Economics*, 2014, 47: 36-45.
- [23] 王立国, 丁晨希, 彭剑峰, 等. 森林公园旅游经营者碳补偿意愿的影响因素比较 [J]. *经济地理*, 2020, 40(5): 230-238.
WANG L G, DING C X, PENG J F, et al. Comparison of factors affecting tourism operators' carbon offset willingness of forest parks [J]. *Economic Geography*, 2020, 40(5): 230-238.
- [24] 康宝怡, 朱明芳. 生态旅游视域下旅游者碳补偿支付意愿影响因素研究: 以中国大熊猫国家公园为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(7): 16-22.
KANG B Y, ZHU M F. Tourists' willingness to pay for carbon offsets in view of ecotourism: Case study of China Giant Panda National Park [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(7): 16-22.

(下转第 219 页)

- 2002,6(2):129-135.
- [30] 吕铭志,盛连喜,张立.中国典型湿地生态系统碳汇功能比较[J].湿地科学,2013,11(1):114-120.
LÜ M Z, SHENG L X, ZHANG L. A review on carbon fluxes for typical wetlands in different climates of China[J].Wetland Science,2013,11(1):114-120.
- [31] ZHANG Y B, DUAN B L, LI C Y, et al. Links between plant diversity, carbon stocks and environmental factors along a successional gradient in a subalpine coniferous forest in Southwest China[J].Forest Ecology and Management,2011,262(3):361-369.
- [32] 薛晶月,王丽华,谢雨,等.西南地区草地群落灌木植物盖度对生态系统碳库的影响[J].植物生态学报,2019,43(4):365-373.
XUE J Y, WANG L H, XIE Y, et al. Effect of shrub coverage on grassland ecosystem carbon pool in southwestern China[J].Journal of Plant Ecology,2019,43(4):365-373.
- [33] 姜广争.岷江上游干旱河谷区不同土地利用方式土壤有机碳差异性特征研究[D].成都:四川农业大学,2012.
JIANG G Z. Study on differences characteristic of soil organic carbon of different land-use type in dry valley of the upper reaches of Minjiang River[D].Chengdu: Sichuan Agricultural University,2012.
- [34] YANG Y Y, FANG J Y, MA W H, et al. Soil carbon stock and its changes in northern China's grasslands from 1980s to 2000s[J].Global Change Biology,2010,16(11):3036-3047.
- [35] 高俊琴,雷光春,李丽,等.若尔盖高原 3 种湿地土壤有机碳分布特征[J].湿地科学,2010,8(4):327-330.
GAO J G, LEI G C, LI L, et al. The distribution characteristics of soil organic carbon in three kinds of wetland soils in Zoigé Plateau[J].Wetland Science,2010,8(4):327-330.
- [36] 刘晓娟,黎夏,梁迅,等.基于 FLUS-InVEST 模型的中国未来土地利用变化及其对碳储量影响的模拟[J].热带地理,2019,39(3):397-409.
LIU X J, LI X, LIANG X, et al. Simulating the change of terrestrial carbon storage in China based on the FLUS-InVEST model[J].Tropical Geography,2019,39(3):397-409.
- [37] SANG L L, ZHANG C, YANG J Y, et al. Simulation of land use spatial pattern of towns and villages based on CA-Markov model[J].Mathematical and Computer Modelling,2011,54(3/4):938-943.
- (上接第 206 页)
- [25] 王正淑,王继军,刘佳.基于碳汇的县南沟流域退耕林地补偿标准研究[J].自然资源学报,2016,31(5):779-788.
WANG Z S, WANG J J, LIU J. Study on the compensation standard of returning farmland to forest in Xiannangou watershed from the perspective of carbon sink[J].Journal of Natural Resources,2016,31(5):779-788.
- [26] 李璐,夏秋月,董捷,等.武汉城市圈县域空间横向碳生态补偿研究:基于土地利用碳收支差异[J].生态学报,2023,43(7):2627-2639.
LI L, XIA Q Y, DONG J, et al. County-level carbon ecological compensation of Wuhan Urban Agglomeration under carbon neutrality target: Based on the difference in land use carbon budget[J].Acta Ecologica Sinica,2023,43(7):2627-2639.
- [27] 张梅,赖力,黄贤金,等.中国区域土地利用类型转变的碳排放强度研究[J].资源科学,2013,35(4):792-799.
ZHANG M, LAI L, HUANG X J, et al. The carbon emission intensity of land use conversion in different regions of China[J].Resources Science,2013,35(4):792-799.
- [28] 周萍,陈松林,李晶,等.福建省土地利用变化碳排放时空差异与碳补偿[J].水土保持通报,2022,42(3):356-365,372.
ZHOU P, CHEN S L, LI J, et al. Temporal and spatial differences in carbon emissions and carbon neutrality caused by land use changes in Fujian Province[J].Bulletin of Soil and Water Conservation,2022,42(3):356-365,372.
- [29] 李金昌.生态价值论[M].重庆:重庆大学出版社,1999.
LI J C. Discussion on ecological value[M].Chongqing: Chongqing University Press,1999.
- [30] 广东省统计局.广东统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2011—2021.
Guangdong Provincial Bureau of Statistics. Guangdong statistical yearbook[M].Beijing: China Statistical Publishing House,2011—2021.
- [31] 杨国清,朱文锐,文雅,等.20 年来广东省土地利用碳排放强度与效率空间分异研究[J].生态环境学报,2019,28(2):332-340.
YANG G Q, ZHU W R, WEN Y, et al. Spatial differentiation in the intensity and efficiency of carbon emission from land use in Guangdong Province in past two decades[J].Ecology and Environmental Sciences,2019,28(2):332-340.
- [32] 任峰,龙定洪.广东省碳排放量测算、影响因素分析及预测模型选择[J].生态经济,2022,38(5):21-27,32.
REN F, LONG D H. Measurement of carbon emissions, analysis of influencing factors and selection of forecasting models in Guangdong Province[J].Ecological Economy,2022,38(5):21-27,32.