

DOI: 10.5846/stxb202108082170

张珂莉, 何理, 卢宏伟. 中国区域间贸易碳转移特征及其对碳中和的影响. 生态学报, 2023, 43(9): 3407-3416.

Zhang K L, He L, Lu H W. Carbon transfer characteristics and its effect on carbon neutrality of China's inter-regional trade. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(9): 3407-3416.

中国区域间贸易碳转移特征及其对碳中和的影响

张珂莉¹, 何理^{1,2,*}, 卢宏伟³

¹ 华北电力大学水利与水电工程学院, 北京 102206

² 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072

³ 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101

摘要: 优化贸易模式对实现“碳达峰, 碳中和”这一中长期计划至关重要。基于多区域投入产出模型和碳生态承载力模型, 分析了我国 2017 年 30 个省份 (本研究不含中国港澳台和西藏的统计数据) 碳足迹和碳生态承载力剩余量的空间分布特征。研究表明: (1) 经济或人口总量较大的省份 (如广东、江苏、河南等) 碳足迹较大, 而万元 GDP 碳足迹较大的省份主要分布在西部和东北地区, 虚拟碳主要是向经济发达的省份转移。(2) 总体上, 中国的区域间贸易不具备碳中和特征, 但就地区而言, 区域间贸易使得山西、内蒙古、辽宁、宁夏、新疆地区碳足迹有所降低, 但碳中和程度较低 (<20%); 就行业而言, 建筑业贸易的碳中和特征最为明显, 特别是在东北三省。(3) 经济富裕的几个省份碳减排压力较大, 如: 北京、天津等地的碳生态承载力出现赤字, 而黑龙江、河南、吉林、山东碳生态承载力剩余量超过 10×10^8 t, 碳减排压力较小。未来在制定相关政策时, 应综合考虑省际间碳的转移特征, 合理分配碳排放定额, 以保障碳排放权交易市场的顺利运行。

关键词: 碳足迹; 碳中和; 多区域投入产出模型; 碳生态承载力

Carbon transfer characteristics and its effect on carbon neutrality of China's inter-regional trade

ZHANG Keli¹, HE Li^{1,2,*}, LU Hongwei³

¹ School of Water Conservancy and Hydropower Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China

² State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China

³ Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Human activities lead to global climate change, such as the greenhouse effect, heat island effect, global warming, glacier melting, sea-level rise, and so on. Among them, the global warming caused by the increase of greenhouse gas emissions has a great impact on human production and life. To control greenhouse gas emissions, many countries are exploring various ways to reduce carbon emissions, and hope to achieve the goal of “carbon neutrality” in the planned time. China is also one of them, our country has formulated a medium-and long-term plan to achieve carbon neutrality and is exploring ways to achieve this goal, such as adjusting the industrial and energy consumption structure, and changing the way of production and life. With the development of China's economy, regional trade interactions are frequent, and reducing carbon emissions through optimizing trade patterns should not be ignored. However, such studies are relatively few at present, and the carbon-neutral characteristics of trade in each province are not clear yet. This paper, based on the multi-regional input-output model, carbon-neutral model, and carbon ecological footprint model, analyzed the spatial distribution

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFC0507801)

收稿日期: 2021-08-08; 采用日期: 2022-05-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: helix111@tju.edu.cn

of carbon footprint, carbon transfer characteristics, and carbon ecological carrying capacity surplus of 30 Chinese provinces in 2017. Our results show that (1) provinces with larger populations or richer economies have larger carbon footprints, such as Guangdong, Jiangsu, and Henan, while in the provinces of western and northeastern China, the carbon footprints of 10000 yuan GDP are relatively larger. Virtual carbon is mainly transferred to economically affluent provinces. (2) For different provinces and sectors, the carbon-neutral characteristics of trade vary considerably. For the provinces, the trade reduced the carbon footprint in Shanxi, Inner Mongolia, Liaoning, Ningxia, and Xingjiang, but the degree of carbon neutrality is relatively low ($< 20\%$). As far as the sectors are concerned, the carbon-neutral feature of the construction sector is the most obvious, especially in the northeastern. (3) There are significant differences in the surplus of carbon ecological carrying capacity among provinces. Specifically, the regions with larger carbon ecological carrying capacity surplus are mainly distributed in the agricultural developed provinces, such as Heilongjiang, Henan, Jilin, Shandong, and so on ($> 10 \times 10^8$ t), while Beijing, Tianjin, Shanghai, Zhejiang, Fujian, and Guangdong are in deficit. In the future, when formulating relevant policies, we should comprehensively consider the characteristics of inter-provincial carbon transfer, reasonably allocate carbon emission quota, and ensure the smooth operation of the carbon emission trading market.

Key Words: carbon footprint; carbon neutrality; MRIO model; carbon ecological carrying capacity

应对人类活动造成的全球气候变暖,控制全球温室气体排放,是世界各国的共同目标^[1-2]。国际上,为了应对温室气体排放,如何界定碳减排责任成为各国关注的重点。目前,“谁生产谁负责”为主要的界定方式,但这种方法忽略了贸易的影响,以进口商品为主的国家,减轻了碳排放的责任^[3]。在国家内部同样存在类似的问题,20 世纪 80 年代以来,中国省际间贸易互动不断加强,地区城镇化和工业化进程不断推进,导致社会对能源的需求量持续增加^[4]。相关研究表明,化石燃料燃烧和工业化进程的推进是导致温室气体排放量增加的主要因素,约占总排放的 78%^[5]。中国作为碳排放大国,在应对全球气候变化过程中,积极探索节能减排的方法和途径,其中,碳排放权交易是我国控制能源消费总量的重要措施^[6]。为了保障地区碳交易市场的正常运行,2011 年,发改委决定在北京市、天津市、上海市、重庆市、湖北省、广东省及深圳市开展碳排放权交易试点,并确定了地区温室气体排放控制目标,合理分配各省的碳排放额度^[7]。在制定不同地区碳排放分配方案时,除要考虑各省的经济发展状况的差异外,不可忽略的是贸易使得碳在省际间的流动对各省碳排放的影响。

碳中和(Carbon Neutrality),即碳的净零排放。实现碳中和是一些国家碳排放管制的最高目标^[8]。我国也将碳中和提上日程,2020 年习近平总书记在联合国大会上提出中国将在 2030 年前实现“碳达峰”,2060 年前实现“碳中和”的总体目标^[9]。碳中和的提出,使得大量研究人员积极探索具有碳中和的行业^[10-12],研究实现碳中和的途径^[13-15]。相关研究表明,推广使用清洁能源^[13],在节能的同时提高能源的利用效率^[16],加强森林和碳汇建设,植树造林^[17],购买碳信用额度等方式抵消碳排放被视为有效途径^[18-19]。但是在贸易全球化的今天,贸易对地区的碳排放影响巨大,商品中蕴含的碳也会随着贸易在区域间流动,有必要探究贸易碳减排的途径。

目前碳足迹(Carbon Footprint)计算的方法主要有四种,分别为:生命周期评估法(LCA)^[20-21]、IPCC 碳排放法^[22-23]、投入产出法(IO)^[24-25]、Kaya 碳排放恒等式法^[26-27],其中生命周期法和投入产出法最为常用。生命周期法计算结果更精确详细,因此也被成为从“摇篮”到“坟墓”的方法^[28]。由于生命周期法的这一特点,很难用此方法测算全行业的碳足迹,相关研究人员一般从地区、行业的角度测算碳足迹,利用这种方法缪小红等^[20]分析了农产品供应链的碳足迹;肖雅心等^[29]发现北京市住宅建筑生命周期碳足迹随时间推移呈现降低趋势;王上等^[30]研究表明,改善华北平原的种植结构,可以实现增收的同时,还可以降低农业生产系统碳排放。而环境扩展的投入产出模型是一种可以反映区域间资源流动的自上而下的方法,利用这种方法杨传明等^[24]分析了中国产业部门之间的全碳足迹关联关系;谭飞燕等^[6]分析了京津冀地区碳足迹,并分配了各地区

的碳排放责任。王菲等^[31]研究了东北三省通过优化水和能源耦合关系实现碳中和的途径;虽然目前碳足迹的研究较多,但是很少有研究分析区域间贸易的碳中和的特征,如何通过贸易达到碳减排的目的。

针对目前存在的问题,假设区域间“无贸易”,在保持地区现有经济发展水平不变的前提下,核算了各省份“无贸易”时的碳足迹,并分析了贸易是否会降低地区碳足迹,即贸易是否具有碳中和的特征,找出了具有碳中和特征的主要行业。另外,类比之前的研究^[10],提出了贸易碳中和度的概念,以量化不同地区和行业的贸易碳减排程度。此外,本文还扩展了多区域投入产出模型,将该模型与碳生态足迹模型结合,能更精确的分析地区碳生态赤字情况,为各地区生态环境的可持续发展提供依据。

1 数据和方法

1.1 数据来源

鉴于 2017 年区域间投入产出表是目前最新的数据,本文以 CEADS 数据库 (<https://www.ceads.net.cn/>) 发布的 2017 年 30 个省份(不含中国港澳台和西藏的统计数据)42 个部门的多区域投入产出表^[32]为基础研究中国区域间贸易的特征。另外,中国 30 个省份不同部门 CO₂ 排放数据也是从 CEADS 数据库获得的。为了便于展示研究结果,将 42 个部门划分成 8 个主要部门,分别为:农业、采矿业、轻工业、重工业、水燃气电的生产和供应业、建筑、运输业、其他服务业。中国 30 个省份 2017 年的 GDP 数据来自国家统计局 (<http://www.stats.gov.cn/>);林地和主要农作物产量数据来自 EPS 数据平台;草地面积数据来自《2018 年中国统计年鉴》。

1.2 研究方法

1.2.1 多区域投入产出模型

非竞争型多区域产出模型根据生产平衡可以将 R 省份 i 部门的总产出 x_i^R 表示为:

$$x_i^R = \sum_{S=1}^{30} \sum_{j=1}^8 a_{ij}^{RS} x_j^S + \sum_{S=1}^{30} f_i^{RS} + e_i^R \quad (1)$$

式中, a_{ij}^{RS} 为直接消耗系数,表示 S 地区 j 部门单位产出需要 R 区域 i 部门的投入量; f_i^{RS} 代表 S 地区的最终需求中 R 省份 i 部门的投入量; e_i^R 代表 R 省份 i 部门的出口量。

直接消耗系数 a_{ij}^{RS} 计算公式为:

$$a_{ij}^{RS} = \frac{x_{ij}^{RS}}{x_j^S} \quad (2)$$

式中, x_j^S 为 S 区域 j 部门的总产出。

根据公式(1)和公式(2)可以将公式(1)改写成矩阵的形式:

$$X^R = A^{RS} X^R + F^{RS} + E^R \quad (3)$$

将公式(3)变形得:

$$X^R = (I - A^{RS})^{-1} (F^{RS} + E^R) = L(F^{RS} + E^R) \quad (4)$$

式中, I 和 A^{RS} 分别为单位矩阵和直接消耗系数矩阵; X^R 和 E^R 均为 8×1 的列向量; $L = (I - A^{RS})^{-1}$ 为 Leontief 逆矩阵。

直接碳排放系数 P 为单位产值 CO₂ 排放量,其中的元素 p_i^R 可以用公式(5)表示:

$$p_i^R = \frac{Pf_i^R}{X_i^R} \quad (5)$$

式中, Pf_i^R 表示 R 地区 i 部门 CO₂ 排放量, X_i^R 表示 R 地区 i 部门的总产出。

碳足迹 E_c 为一个地区消费过程中排放的 CO₂ 总量,计算公式为:

$$E_c = P \times (I - A)^{-1} \times F^{RS} \quad (6)$$

式中, F^{RS} 为地区最终消耗矩阵。

1.2.2 碳中和模型

贸易避免的碳排放量为“无贸易”假设下各地区碳足迹与贸易状态下各地区消耗的碳足迹之间的差值,其计算公式可以表示为:

$$EA = E_w - E_c \quad (7)$$

式中, EA 为各地区贸易碳减排量, E_w 为各省份“无贸易”时碳足迹,其计算方法为本省份不同行业的完全碳排放系数与最终消耗量(本地区生产和外部流入量)的乘积。

类比 Wu 等^[10]研究中定义的可再生能源的碳中和程度的概念,定义了贸易碳中和度,即贸易碳减排量和无贸易时碳排放量的比值,公式可以表示为:

$$CN = \frac{E_w - E_c}{E_w} = 1 - \frac{E_c}{E_w} \quad (8)$$

式中, CN 表示贸易碳中和度,贸易碳足迹越大,碳中和度越小。

1.2.3 碳吸收计算模型

(1) 林地、草地。森林和草地碳吸收量 CS 可以用以下公式计算:

$$CS = S_m \times \alpha_m + S_n \times \alpha_n \quad (9)$$

式中, S_m 、 S_n 为不同类型土地的面积, α_m 、 α_n 表示不同类型土地的碳吸收系数。

(2) 耕地。耕地的碳吸收量 CI_{crop} 可以按照公式(10)计算:

$$CI_{\text{crop}} = \sum_i CI_{\text{crop}-i} = \sum_i C_{\text{crop}-i} \times (1 - P_{\text{water}-i}) \times \frac{Y_{\text{ceo}-i}}{H_{\text{crop}-i}} \quad (10)$$

式中, $\sum_i CI_{\text{crop}-i}$ 表示第 i 种农作物 CO_2 的吸收量,本文主要考虑了水稻、小麦、玉米、谷子、高粱、大豆、薯类、油料作物、麻类作物、糖类作物、烟叶 11 种农作物。 $C_{\text{crop}-i}$ 表示第 i 种作物的碳吸收率, $P_{\text{water}-i}$ 为第 i 种作物的含水率, $Y_{\text{ceo}-i}$ 表示第 i 种作物的产量, $H_{\text{crop}-i}$ 为第 i 种作物的经济系数,以上参数采用李克让^[33]、方精云^[34]、朱向梅^[35]等的研究成果。

(3) 碳的生态承载力模型

$$\text{CEC} = (CS + CI_{\text{crop}}) \times \left(\frac{P_f}{\text{NEP}_f} + \frac{P_g}{\text{NEP}_g} + \frac{P_p}{\text{NEP}_p} \right) \quad (11)$$

$$\text{CED} = C - \text{CEC} \quad (12)$$

式中, CEC 和 CED 分别表示碳生态承载力和碳生态赤字。 P_f 、 P_g 、 P_p 分别表示森林、草地和耕地的碳吸收比例, NEP_f 、 NEP_g 、 NEP_p 分别为全球森林、草地和耕地的固碳能力,根据谢鸿宇等^[36]、朱向梅等^[35]的研究成果,森林、草地和耕地的固碳能力分别取 3.8096 t/hm^2 、 0.9482 t/hm^2 和 0.1532 t/hm^2 。

2 结果分析

2.1 中国各省碳足迹和虚拟碳的流动格局分析

总体上,碳足迹呈现“东多西少”的特征,而万元 GDP 碳足迹却呈现“西多东少,北多南少”的特点(图 1)。经济的发展促进了产业的优化,技术的进步,能源利用效率的提高,因此经济富裕的省份虽然能源消耗量大,但是利用效率较高。具体而言,人口或经济总量较大的省份碳足迹较大,其中,山东省的碳足迹最大($5.57 \times 10^8 \text{ t}$),占全国碳足迹总量的 7.14%,海南的碳足迹最小,仅有山东碳足迹的 7.00%。在这 30 个省份中,碳足迹大于 $4 \times 10^8 \text{ t}$ 的省份还包括河南、广东、江苏、河北和浙江,仅这六个省份的碳足迹就占全国总量的 38.84%,其中,广东、江苏和浙江碳足迹较大,主要是由于这些省份较大的经济总量,山东、河南和河北主要由于较大的人口数量。西部的几个省份(青海、宁夏、甘肃、新疆等)虽然碳足迹较小,但万元 GDP 碳足迹较大,这些省份需要提高能源利用效率。

虚拟碳呈现“从北向南”的流动趋势,其中西北地区净碳输出量最大($3.71 \times 10^8 \text{ t}$),且输出范围广,主要流

向中部、东部沿海和西南地区(图2)。相关研究表明,经济的发展是资源流动的一个重要因素^[37]。沿海地区经济较为发达,每年流入了大量的虚拟资源,缓解了经济发展和能源短缺的矛盾。经济较为发达的东部沿海和京津地区主要通过贸易缓解地区资源短缺,每年大量的碳流入这些地区,净输入的虚拟碳分别为 1.45×10^8 t 和 1.28×10^8 t,减轻了当地环境压力。

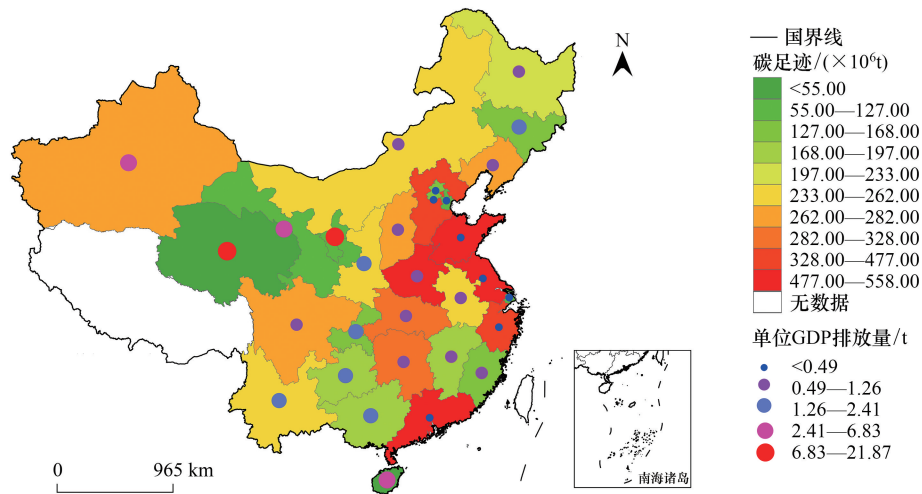


图1 各省份碳足迹(底图)及万元 GDP 碳足迹(圆)

Fig.1 Carbon footprint (bottom map) and carbon footprint of ten thousand yuan GDP (circle) in each province

本研究不含中国港澳台和西藏的统计数据



图2 各区域碳的转移特征

Fig.2 Carbon transfer characteristics of each region

在大部分省份中,重工业和水燃气电的生产和供应业的碳足迹占比较大,农业碳足迹占比相对较小(图3)。通过对比生产碳足迹和消耗碳足迹,可以把30个省份分为三类。第一类,生产碳足迹与消耗碳足迹均较大的地区,如:山东、江苏、河北,三个省份碳足迹均在 5×10^8 t 以上,且这些省份重工业和水燃气电的生产供应业占比也在80%以上;第二类,生产碳足迹远大于消耗碳足迹的地区,如:内蒙古的消耗碳足迹仅为 2.54×10^8 t,生产碳足迹却高达 5.43×10^8 t,是消耗碳足迹的2.14倍,这些地区每年承担了大量的碳排放压力;第三类,生产碳足迹远远小于消耗碳足迹的地区,如:广东和浙江两个省份的生产碳足迹分别为 3.30×10^8 t 和

2.54×10⁸ t,仅占消耗碳足迹的 61%,这也表明这两个省份通过贸易避免了大量碳排放压力。

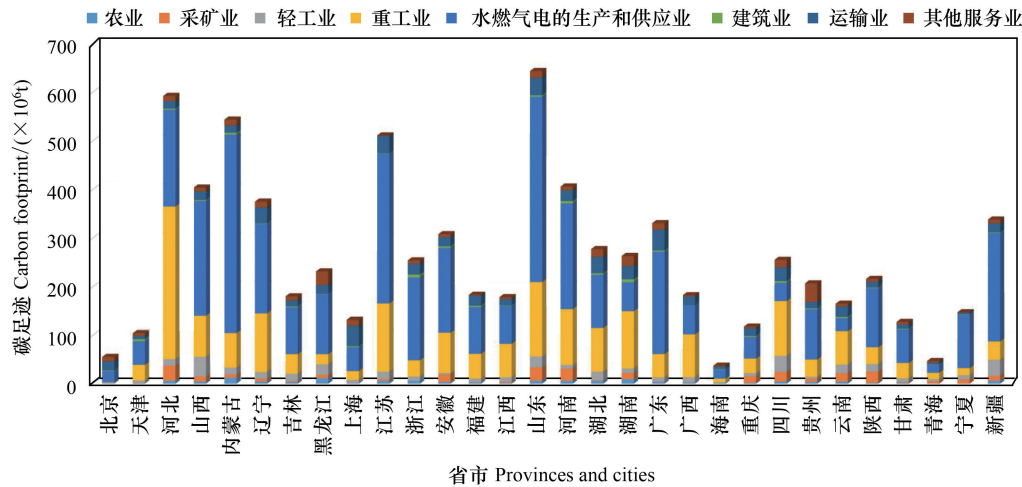


图 3 中国 30 个省市生产碳足迹的行业构成

Fig.3 The produce carbon footprint industry composition of 30 provinces and cities in China

2.2 各地区贸易的碳中和特性

基于碳中和模型,本文核算了 30 个省份贸易导致的地区碳足迹减少量(图 4)。分析发现,在“无贸易”假设下全国总碳足迹仅为 57.04×10⁸ t,与贸易碳足迹 78.05×10⁸ t 相比,贸易使得中国碳足迹增加了 21.03×10⁸ t,因此,总体上中国的区域间贸易不具备碳中和特征。就地区而言,研究发现贸易使得山西、内蒙古、辽宁、宁夏、新疆地区碳足迹有所降低,其中新疆碳足迹减少量最大,减少了 38.97×10⁶ t,但这几个省份碳中和的特征均不明显,碳中和度均小于 20%(表 1)。相反,河南、广东、浙江、江苏、北京等省份的碳足迹显著增加,其中广东增加量最大(2.76×10⁸ t),此外,在全国 30 个省份中,北京的碳中和度最低(−535.35%)。虽然经济发达的地区单位 GDP 耗能较低,但是由于地区能源存储量较少,经济快速发展需要大量的能源支持,因此,不得不通过商品贸易从其他地区引进虚拟能源,来缓解经济发展和能源短缺之间的矛盾。但是大量高碳排放地区商品的引入,导致地区的贸易碳中和度较低。

表 1 各省市贸易的碳中和度

Table 1 The degree of trade Carbon neutrality in each province and city

省市 Provinces and cities	碳中和度/% The degree of Carbon neutrality	省市 Provinces and cities	碳中和度/% The degree of Carbon neutrality	省市 Provinces and cities	碳中和度/% The degree of Carbon neutrality	省市 Provinces and cities	碳中和度/% The degree of Carbon neutrality
北京	−535.35	上海	−105.35	湖北	−23.45	云南	−17.68
天津	−83.85	江苏	−61.60	湖南	−45.05	陕西	−90.28
河北	−20.45	浙江	−123.56	广东	−105.07	甘肃	−6.52
山西	10.89	安徽	−35.99	广西	−25.37	青海	−15.50
内蒙古	10.41	福建	−24.39	海南	−28.84	宁夏	18.24
辽宁	4.40	江西	−80.44	重庆	−181.30	新疆	12.52
吉林	−58.18	山东	−17.44	四川	−30.50		
黑龙江	−32.50	河南	−81.51	贵州	−16.70		

碳中和度越大,地区碳中和的特征越明显

为了进一步研究 8 个部门的碳中和特征,我们分析了贸易导致的每个部门碳足迹的变化率(图 5)。分析发现建筑业的碳中和特性最为明显,近 50%的省份建筑业碳足迹都有所降低,其中辽宁省的建筑业碳足迹变化率达到了 74.69%。重工业和其他服务业具有碳中和特征的省份主要集中在西部,如:青海、宁夏、新疆、云

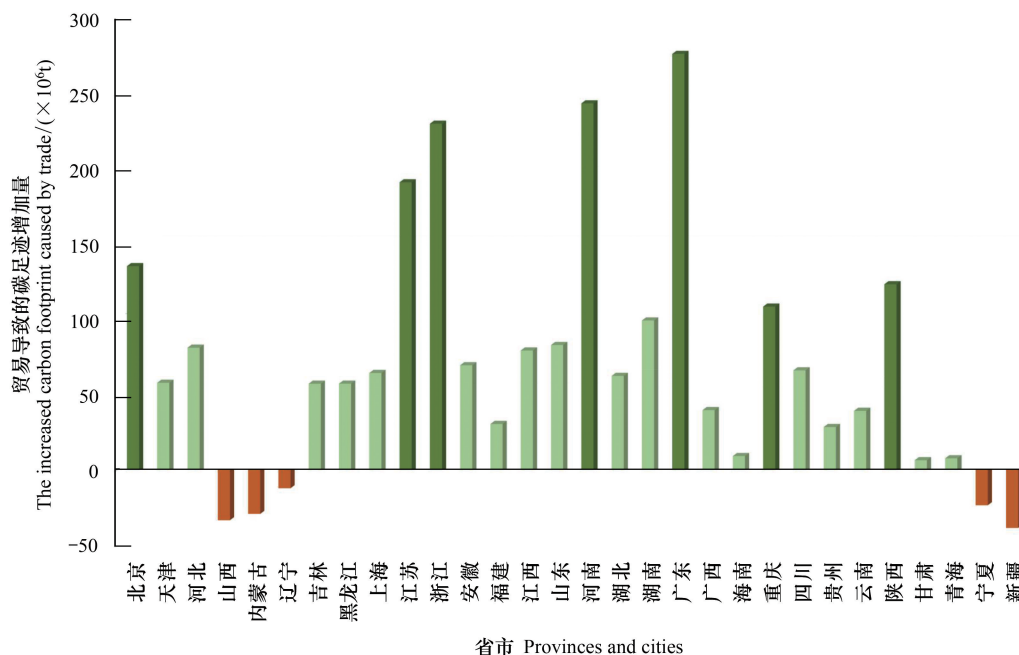


图4 贸易导致的各省碳足迹增加量

Fig.4 The increased Carbon footprint caused by trade

南,这些地区重工业和服务业发展水平相对较低,万元 GDP 碳足迹远远高于其他省份,因此,这些地区可以通过产品贸易大大降低该地区碳的排放量。农产品贸易降低了北京、天津、山西、辽宁、上海、湖北的碳足迹,其中北京和天津变化最明显。采矿业和水燃气电的生产和供应业的碳中和特征不明显,除采矿业在上海和云南,水燃气电的生产和供应业的碳足迹在辽宁和青海有所降低外,在其他地区碳足迹均有不同程度的增加。交通运输业具有碳中和特征的地区主要集中在西北的几个省份:青海、宁夏、新疆,而轻工业具有碳中和特征的区域分布较为分散(北京、山西、云南、青海、新疆),在这几个省份中,除北京和山西的降低率为 30.62% 和 24.41% 以上外,云南、青海和新疆的变化率均小于 20%。

2.3 地区碳生态承载力分析

图 6 显示了 2017 年中国 30 个省份碳生态承载力剩余量。从图 6 可以看出,除青海外,出现碳生态承载力赤字现象的地区均为经济发展水平较高的省份(北京、天津、上海、浙江、福建、广东),其中浙江碳生态赤字最为严重,差值高达 2.43×10^8 t。这些地区工业化和城镇化水平相对较高,相应的耕地、草地和林地面积占比相对较少,因此,地区吸收 CO_2 的能力有限,碳生态承载力出现赤字现象,环境压力较大。而青海虽然草原面积较大,但是耕地面积相对较少,生态环境较为脆弱,碳吸收能力相对较弱,导致出现碳生态赤字现象。黑龙江、河南、吉林、山东碳排放量较高,但是作为中国的农业大省,耕地面积远超过其他省份,碳生态承载力剩余量相对充足,环境压力相对较小。海南、宁夏的人口、工农业生产和生活碳排放量相对较小,但是由于宁夏生态环境不利于植被生长,地区固碳能力较差,近而导致宁夏的生态承载力濒临赤字的危险。而海南不论是林地和草地面积还是农作物固碳能力,都远小于其他地区,总的碳生态承载力仅有 0.52×10^8 t,2017 年碳排放量达到 0.39×10^8 t,即将达到碳排放上限,环境保护的任务十分艰巨。

3 结论与建议

3.1 结论

本文基于多区域投入产出模型分析了中国 2017 年 30 个省的碳足迹空间分布和转移特征。并通过“无贸易”假设分析了各省、各行业的贸易碳中和特征,另根据各省林地、草地面积、农作物产量核算了地区碳生态

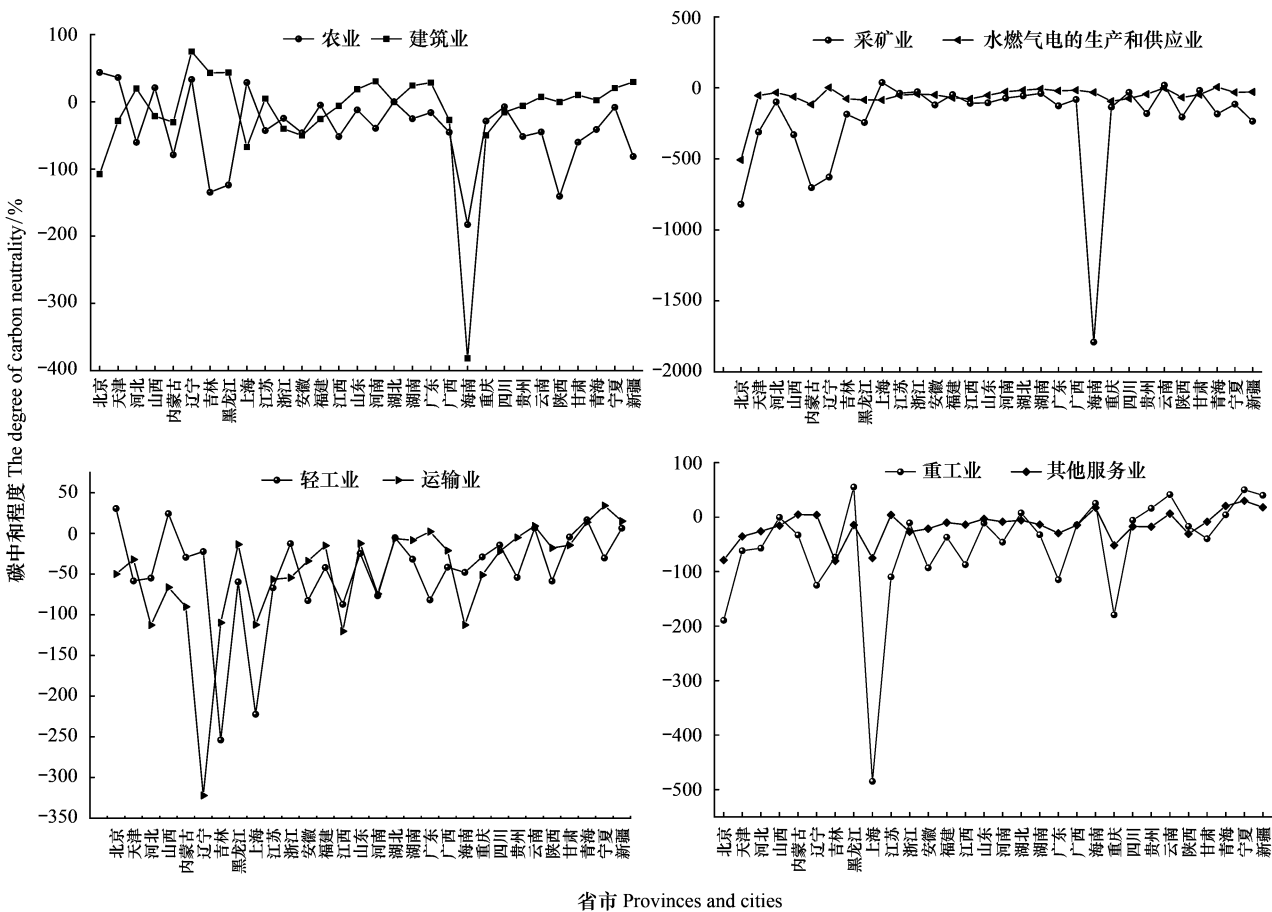


图5 各行业的贸易碳中和度
Fig.5 The degree of trade carbon neutrality in each sector

承载力剩余量,得出以下三个主要结论:

(1) 中国高碳排放区域和万元 GDP 碳足迹较大的省份空间分布存在较大差异。高碳排放区主要集中在经济或人口总量较大的地区,但是万元 GDP 碳足迹较大的地区却集中在生态环境较为脆弱,经济发展水平较低的西部和东北地区。贸易促使碳从能源的丰富的省份向经济发达能源短缺的省份转移,其中,重工业和水电气热的生产和供应业占比较大。

(2) 总体上,中国的区域间贸易不具备碳中和的特征,但部分省份和行业碳中和特征明显。就地区而言,商品贸易在山西、内蒙古、辽宁、宁夏、新疆具有碳中和特征,但是碳中和度较低,均小于 20%。而在其他地区贸易使得碳足迹有不同程度的增加,尤其是北京和广东,碳中和度分别低至-535.35%和-105.07%。就行业而言,建筑业的贸易碳中和特性最为明显,尤其是在东北三省,剩余的几个行业碳中和特征均不明显。

(3) 经济发展水平较高的几个省份碳生态压力较大。具体地,由于黑龙江、河南、吉林、山东几个省份的耕地面积较大,碳生态承载力剩余量相对充足($>10 \times 10^8$ t),环境压力较小。北京、天津、上海、浙江、福建、广东的碳生态承载力出现赤字现象,碳生态可持续能力较弱,减排的任务十分艰巨。

3.2 建议

(1) 万元 GDP 碳足迹较大的地区(新疆、青海、宁夏、甘肃等)首要任务是逐步优化或者淘汰高碳排放产业,朝着绿色低碳产业转型。每年大量碳足迹输入的地区,除考虑自身减排外,还需考虑输入来源,积极引导本地企业与低碳排放省份相互协作,减少本地此类商品的生产。此外,各省政府还需引导企业和个人向绿色生产和低碳生活转变,如:制定合理的碳排放定额,对于超出部分实施阶梯碳价收费制度,也可对企业和个人

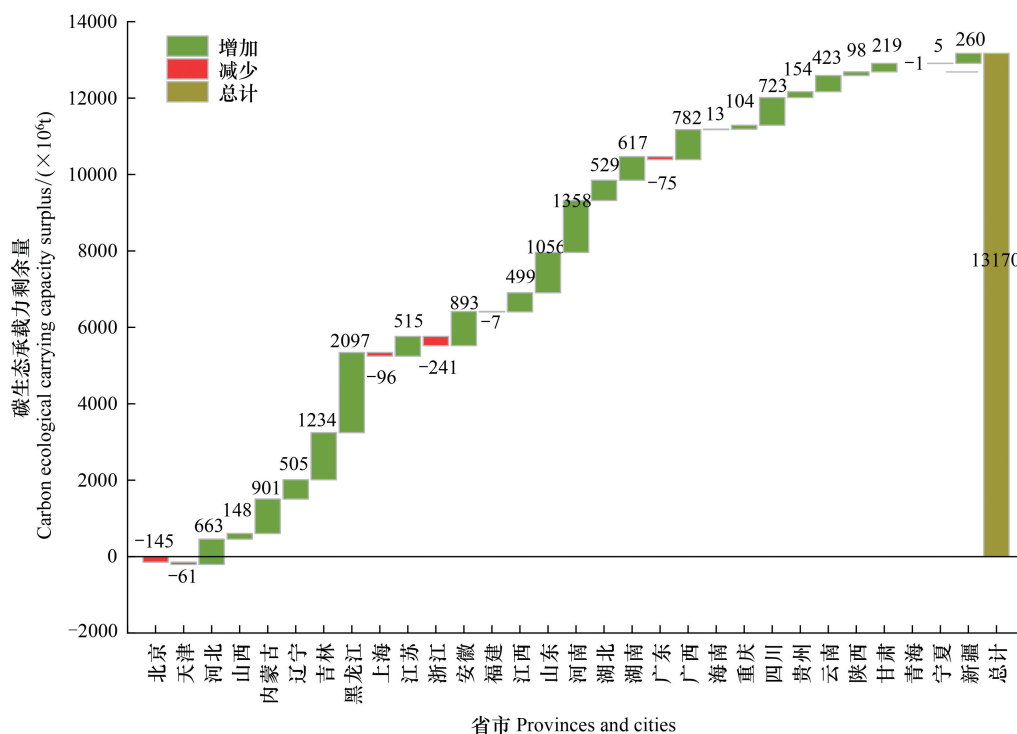


图6 碳生态承载力剩余量

Fig.6 Carbon ecological carrying capacity surplus

建立碳信用账户,将碳信用高低作为评判市场和社会竞争力的一项指标,充分调动企业和大众参与实现“碳中和”目标的积极性。

(2) 不同省份和行业的碳中和特征差异较大,因此,各省份应充分了解地区特点,发展特色产业,考虑产品的外观设计、生产过程、使用等各个环节的能源利用效率,使得本地区商品更低碳环保,更有市场竞争力,倒逼其他省份发展绿色产业,进而实现“美丽中国”的美好愿景。另外,由于目前不同地区间行业交流不充分,许多高新技术大范围推广受阻,建议政府为各行业提供全国性的经验交流渠道,分享国内外高新技术及获得途径,对积极引进高新技术的地区和企业实施补贴,让所有地区能够用得起。

(3) 碳生态承载力出现赤字的地区主要是经济较为发达的几个省份,这些地区应合理处理经济发展和碳排放之间的矛盾,重新拟定草地、林地、耕地面积红线,在发展经济的同时,保障地区碳汇能力。另外,在全国范围内还应提供一个开放的平台,整合各地区所有产业逐月的碳排放强度数据,便于区域间商品贸易时选择和参考,以优化贸易模式。

参考文献 (References):

- [1] 林春逸, 文昕. 全球气候治理的发展伦理: 理论阐释与实践策略. 云南师范大学学报: 哲学社会科学版, 2021, 53(4): 123-130.
- [2] 薄燕. 全球气候治理机制适用“共区原则”方式的变化. 复旦国际关系评论, 2021(02): 88-114.
- [3] 庞军, 高笑默, 石媛昌, 孙文龙. 基于 MRIO 模型的中国省级区域碳足迹及碳转移研究. 环境科学学报, 2017, 37(5): 2012-2020.
- [4] 王少剑, 黄永源. 中国城市碳排放强度的空间溢出效应及驱动因素. 地理学报, 2019, 74(6): 1131-1148.
- [5] Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt K, Tignor M, Miller H. Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. United Kingdom: Cambridge University Press, 2007.
- [6] 谭飞燕, 张力, 李孟刚. 基于 MRIO 模型的京津冀贸易隐含碳排放核算. 统计与决策, 2018, 34(24): 30-34.
- [7] 杜灵. 我国碳排放权交易试点经验及工作启示. 再生资源与循环经济, 2019, 12(10): 20-24.

- [8] 曹淑艳, 霍婷婷, 王璐, 陈前, 刘思池, 麻丽萍, 高威, 张瑞星. 农村家庭能源消费碳中和能力评价. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(S3): 301-303.
- [9] 刘志海. 平板玻璃行业如何从低碳走向碳中和. 玻璃, 2021, 48(3): 1-5.
- [10] Wu X D, Li C H, Shao L, Meng J, Zhang L X, Chen G Q. Is solar power renewable and carbon-neutral; evidence from a pilot solar tower plant in China under a systems view. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 138: 110655.
- [11] 李克宽. 在碳达峰碳中和背景下加气混凝土行业将大有作为. 企业家日报, 2021-05-06(003).
- [12] 常毓文, 冯乃超. “双碳”目标下油气行业发展对策. 新疆石油地质, 2022, 43(02): 235-240.
- [13] 谢立勇, 杨育蓉, 赵洪亮, 郭李萍, 靳泽群, 杨扬, 何雨桐. “双碳”战略背景下农业与农村减排技术路径分析. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(04): 527-534.
- [14] Schreyer F, Luderer G, Rodrigues R, Pietzcker R C, Baumstark L, Sugiyama M, Brecha R J, Ueckerdt F. Common but differentiated leadership: strategies and challenges for carbon neutrality by 2050 across industrialized economies. Environmental Research Letters, 2020, 15(11): 114016.
- [15] 刘长松. 碳中和的科学内涵、建设路径与政策措施. 阅江学刊, 2021, 13(2): 48-60, 121.
- [16] 雷超, 李韬. 碳中和背景下氢能利用关键技术及发展现状. 发电技术, 2021, 42(2): 207-217.
- [17] 谭继伟, 王创业, 宋欣慰. 基于碳汇理念的防护林体系建设研究. 防护林科技, 2018(7): 71-72.
- [18] Ahmadi L, Kannangara M, Bensebaa F. Cost-effectiveness of small scale biomass supply chain and bioenergy production systems in carbon credit markets: a life cycle perspective. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2020, 37: 100627.
- [19] Izhar T N T, Xuan L P. The estimation of greenhouse gas emission in leachate treatment plant and its carbon credit revenue. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 646(1): 012067.
- [20] 缪小红, 周新年, 倪川, 连捷. 基于生命周期法的生鲜农产品供应链碳足迹分析. 兰州文理学院学报: 自然科学版, 2021, 35(1): 24-29.
- [21] 林剑艺, 孟凡鑫, 崔胜辉, 于洋, 赵胜男. 城市能源利用碳足迹分析——以厦门市为例. 生态学报, 2012, 32(12): 3782-3794.
- [22] 闫丰, 王洋, 杜哲, 陈影, 陈亚恒. 基于 IPCC 排放因子法估算碳足迹的京津冀生态补偿量化. 农业工程学报, 2018, 34(4): 15-20.
- [23] 郑德凤, 刘晓星, 王燕燕, 吕乐婷. 中国省际碳足迹广度、深度评价及时空格局. 生态学报, 2020, 40(2): 447-458.
- [24] 杨传明, 周霞. 中国产业全碳足迹网络结构——基于投入产出与社会网络分析. 科技管理研究, 2019, 39(13): 259-265.
- [25] 张向阳, 张玉梅, 冯晓龙, 樊胜根, 陈志钢. 中国农业食物系统能源碳排放趋势分析. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(04): 535-542.
- [26] 张巍. 基于 Kaya 恒等式的西安市碳足迹影响因素分析. 环境科学导刊, 2020, 39(6): 40-45.
- [27] 邓宣凯. 武汉市土地利用碳排放的影响因素研究——基于扩展的 Kaya 等式和 LMDI 分解方法. 农业与技术, 2021, 41(20): 104-109.
- [28] 梁田. 基于生命周期评价的典型钢铁企业环境影响评估及绿色发展研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
- [29] 肖雅心, 杨建新. 北京市住宅建筑生命周期碳足迹. 生态学报, 2016, 36(18): 5949-5955.
- [30] 王上, 李康利, 聂江文, 杨亚东, 臧华栋, 曾昭海. 华北平原春绿豆-夏玉米种植模式经济效益和碳足迹评价. 中国生态农业学报: 中英文, 2020, 28(6): 910-919.
- [31] 王菲, 曹永强, 范帅邦. “双碳”目标下东北三省水-能源纽带关系及网络特征分析. 生态学报, 2022, 42(14): 10.5846/stxb202109222653.
- [32] Zheng H R, Zhang Z K, Wei W D, Song M L, Dietzenbacher E, Wang X Y, Meng J, Shan Y L, Ou J M, Guan D B. Regional determinants of China's consumption-based emissions in the economic transition. Environmental Research Letters, 2020, 15(7): 074001.
- [33] 李克让. 土地利用变化和温室气体净排放与陆地生态系统碳循环. 北京: 气象出版社, 2002.
- [34] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 陈安平. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算. 中国科学: D 辑: 地球科学, 2007, 37(6): 804-812.
- [35] 朱向梅, 王子莎. 黄河流域碳水足迹评价及时空格局研究. 环境科学与技术, 2020, 43(10): 200-211.
- [36] 谢鸿宇, 陈贤生, 林凯荣, 胡安焱. 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.
- [37] Xiong Y L, Tian X, Liu S W, Tang Z P. New patterns in China's water footprint: analysis of spatial and structural transitions from a regional perspective. Journal of Cleaner Production, 2020, 245: 118942.