

DOI: 10.20103/j.stxb.202404090763

陈先鹏, 余福强, 方恺, 何思昆. 碳中和目标背景下中国省域能源碳排放公平性多维评价. 生态学报, 2024, 44(23): 10688-10698.

Chen X P, Yu F Q, Fang K, He S K. The multi-dimensional assessment of China's provincial energy-related carbon emission equity under the goal of carbon neutrality. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(23): 10688-10698.

碳中和目标背景下中国省域能源碳排放公平性多维评价

陈先鹏¹, 余福强¹, 方 恺^{2,3}, 何思昆^{4,*}

1 浙大城市学院法学院, 杭州 310015

2 浙江大学公共管理学院, 杭州 310058

3 浙江大学民生保障与公共治理研究中心, 杭州 310058

4 南京审计大学公共管理学院, 南京 211815

摘要:在碳中和目标背景下,厘清省域能源碳排放公平性状况,对于增强省域碳减排增汇的协同性而言具有重要的参考价值。对区域碳排放公平性内涵进行了拓展,从生态空间占用、经济产出、人口规模三个方面构建评价指标,揭示了中国省域能源碳排放公平性时空变化特征,并基于耦合协调度模型分析了能源碳排放公平性的内在耦合协调关系。结果表明:(1)中国省域能源碳排放压力程度呈东高西低的空间格局,且随时间呈递增态势,超过 2/3 省份增速随时间有所放缓。(2)能源碳排放公平性在生态、经济和社会等维度之间存在权衡关系,而在经济和社会维度之间存在协同关系,其中,能源碳排放生态承载贡献呈由西向东递减态势,能源碳排放经济贡献和人口支撑贡献均呈由南向北递减态势,且省际格局均保持相对稳定。(3)能源碳排放公平性在生态、经济、社会等系统之间的耦合协调程度主要表现为失调状态,失调省份主要位于东部和中部地区,而协调省份协调程度较低,主要位于西部和西南部地区,且能源碳排放公平性耦合协调度随时间整体呈降低态势。中国能源碳排放放在生态承载、生产效率、人口支撑等领域均具有潜在的省际协作空间,应基于此分区分类施策以实现优势互补,进而增强碳减排增汇的协同性。

关键词:碳排放公平性;能源碳足迹;碳承载力;耦合协调度;净初级生产力

The multi-dimensional assessment of China's provincial energy-related carbon emission equity under the goal of carbon neutrality

CHEN Xianpeng¹, YU Fuqiang¹, FANG Kai^{2,3}, HE Sikun^{4,*}

1 School of Law, Hangzhou City University, Hangzhou 310015, China

2 School of Public Affairs, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

3 Center of Social Welfare and Governance, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

4 School of Public Administration, Nanjing Audit University, Nanjing 211815, China

Abstract: In the context of carbon neutrality goal, clarifying the equity of provincial energy-related carbon emissions has important reference value for enhancing the synergy of provincial carbon reduction and sink enhancement. This paper expanded the connotation of regional carbon emission equity, constructed evaluation indicators from three aspects including ecological space occupation, economic output and population size, revealed the spatio-temporal changes in energy-related

基金项目:国家社科基金重大项目(22&ZD108);国家自然科学基金项目(72074193);浙江省重点研发计划项目(2022C03154);杭州市哲学社会科学规划“优秀青年人才”专项(2023QNRC17)

收稿日期:2024-04-09; **网络出版日期:**2024-08-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ma2204131@stu.nau.edu.cn

#限于数据的可获取性,本研究尚未含中国港澳台和西藏自治区统计数据。

carbon emission equity in Chinese provinces, and analyzed the inherent coupling coordination relationship of energy-related carbon emission equity based on the coupling coordination degree model. The results showed that: (1) The pressure level of energy-related carbon emissions in Chinese provinces showed a spatial pattern of high in the east and low in the west, and showed an increasing trend over time while the growth rate of more than 2/3 provinces slowed down over time. (2) There was a trade-off relationship between the ecological, economic, and social dimensions of energy-related carbon emission equity, while there was a synergistic relationship between the economic and social dimensions. Among them, the ecological carrying contribution of energy-related carbon emissions decreased from west to east, while both the economic contribution and the population support contribution of energy-related carbon emissions decreased from south to north, and the inter-provincial pattern remained relatively stable. (3) The coupling coordination degree of energy-related carbon emission equity among ecological, economic and social systems was mainly in an uncoordinated state. The uncoordinated provinces were mainly located in the eastern and central regions, while the coordination degree of the coordinated provinces was relatively low, mainly in the western and southwestern regions. Moreover, the overall coupling coordination degree of energy-related carbon emission equity showed a decreasing trend over time. China's energy-related carbon emissions have potential for inter-provincial cooperation in areas such as ecological carrying capacity, production efficiency and population support. Policies should be implemented based on the zoning and classification in accordance with these characteristics to achieve complementary advantages and enhance the synergy of carbon reduction and sink enhancement.

Key Words: carbon emission equity; energy-related carbon footprint; carbon carrying capacity; coupling coordination degree; net primary productivity

中国在第七十五届联合国大会一般性辩论上作出了“中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,二氧化碳排放力争 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和”的庄严承诺。二十大报告强调,积极稳妥推进碳达峰碳中和,完善能源消耗总量和强度调控,重点控制化石能源消费,逐步转向碳排放总量和强度“双控”制度。由此可见,要实现碳达峰碳中和目标,应立足我国能源禀赋和消费现状,坚持先立后破。我国的能源消费仍以化石能源消费为主,因此科学评估我国区域能源碳排放公平性状况,对于在碳中和目标背景下增强碳减排增汇的协同性而言具有重要的参考价值^[1]。

碳排放公平性是可持续发展领域的重要议题之一。对于碳排放公平性的内涵,学术界形成了不同的认识。从发展权角度而言,有学者认为人类个体应享有平等的碳排放权;从历史责任角度而言,也有学者认为历史碳排放量越高的主体减排责任越大;从支付能力角度而言,还有学者认为经济实力越强的主体碳减排责任越大^[2]。在评估方法方面,基尼系数法是碳排放公平性量化分析的常用方法之一^[3]。邱俊永等基于基尼系数对 G20 国家历史累计碳排放量相较于人口、国土面积、生物生产性土地面积、化石能源探储量等指标的公平性进行了测度^[4]。王慧慧等基于基尼系数对全球主要国家历史累计碳排放量相较于人口、GDP 的代际和代内的公平性进行了分析^[5]。然而,基尼系数主要用于表征整体的公平性程度,对于组成单元间的相对公平性阐释相对受限。为此,卢俊宇等构建生态承载系数、经济贡献系数以表征区域间碳生态容量贡献、碳排放经济贡献的相对公平性,据此探究了中国省域能源碳排放公平性^[6]。刘志华等基于生态承载系数测度了中国省域碳排放公平性^[7]。

碳排放核算是碳排放公平性评估的基础工作。其中,碳足迹是表征人类活动所引起碳排放压力的科学概念^[8]。纵观已有研究,碳足迹研究在核算方法等方面已积累了丰富的成果^[9-11],且涵盖国家^[12]、区域^[13]、产业^[14]、家庭^[15]、产品^[16]等各级尺度。在区域能源碳足迹量化研究方面,卢俊宇等^[17]和郑德凤等^[18]结合排放系数法和净生态系统生产力(NEP)对中国省域能源碳足迹时空格局进行了分析。庞军等基于多区域投入产出模型测算了中国省域碳足迹及省际间的碳转移状况^[19]。潘竞虎等通过夜间灯光数据反演能源消费碳排放量,为能源碳足迹测算提供了新的思路^[20]。方恺等基于全球净初级生产力(NPP)提出了将能源消费量直接

转化为碳足迹的能源碳足迹当量法,据此将各类能源利用与各类生态空间占用相对应^[21]。为体现能源碳排放对生态空间占用的异质性特征,本文将沿用该方法对区域能源碳足迹进行核算。

碳排放公平性内涵界定参考维度的选取至关重要。已有研究对于区域间碳排放相对公平性参考指标的选取主要集中在生态和经济维度,且鲜有研究探讨碳排放公平性在不同维度之间的耦合协调关系。为此,本文将从生态、经济、社会等维度对区域碳排放公平性内涵进行拓展,据此揭示中国省域能源碳排放公平性时空变化特征,并探讨碳排放公平性的内在耦合协调关系,以期为增强省域碳减排增汇的协同性提供科学参考。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 能源碳足迹核算

为追踪能源消耗所排放 CO₂对生态系统造成的影响,本文的能源碳足迹指的是陆地生态系统吸收由化石燃料燃烧所产生 CO₂所需占用的生物生产性土地面积。采用能源碳足迹当量法来计算能源碳足迹,即在全面厘清能源碳排放主要来源的基础上,将碳排放源活动水平与对应的能源碳足迹当量相乘,据此得到能源碳足迹,计算公式如下:

$$CF = \sum AD_i \times EEFE_i \quad (1)$$

式中,CF 为能源碳足迹总量,单位为 hm²;AD_i为第 i 种能源活动水平,单位为 t(或 m³、kW·h);EEFE_i为第 i 种能源的碳足迹当量,单位为 hm²/t(或 hm²/m³、hm² kW⁻¹ h⁻¹)。

其中,能源碳足迹当量是由化石能源的燃烧热值系数与碳排放系数直接决定的,并通过全球 NPP 将其表示为吸收单位能源释放的 CO₂所需占用的生物生产性土地面积,计算公式如下:

$$EEFE_i = \frac{CVF_i \times CEF_i}{NPP_{glo}} \quad (2)$$

式中,CVF_i为第 i 种化石能源的燃烧热值系数,单位为 TJ/t(或 TJ/m³)。CEF_i为第 i 种化石能源的碳排放系数,单位为 t C/TJ;NPP_{glo}为全球净初级生产力,单位为 t C/hm²。

1.2 能源碳承载力核算

陆地生态系统是自然界碳循环的关键组成部分。净初级生产力(NPP)用于表征单位面积地表植被在单位时间内通过光合作用将大气中的碳转化为有机物并扣除自氧呼吸部分所剩余的干物质量^[21]。已有研究多基于净生态系统生产力(NEP)来计算碳承载力,且主要考虑林地和草地等地类,在一定程度上忽略了其他生物生产性土地的碳吸收功能。比较而言,各地类的 NPP 数据较容易获取^[22-23],从而能将更多地类纳入考虑范畴。本文将基于林地、草地、耕地、建设用地、低生产力地、湿地、水域等多地类的 NPP 来计算区域碳承载力,计算公式如下:

$$CC = \sum \frac{S_i \times NPP_i}{NPP_{glo}} \times (1 - \mu) \quad (3)$$

式中,CC 为区域碳承载力,单位为 hm²;S_i为第 i 种地类的面积,单位为 hm²;NPP_i为第 i 种地类的净初级生产力,单位为 t C/hm²;μ 为生态储备系数,表征预留给生态系统的一部分容量占比,以用于维护生态系统的自我修复和适应能力,以及为人类提供自然资源和生态服务^[24]。参考已有文献^[25-26],在确保研究区域生态系统的完整性和稳定性基础上,预留 30%的生物生产性土地作为生态保留地,即 μ 的取值为 30%。为了便于计算,仅考虑了陆地生态系统的碳汇能力。

1.3 能源碳排放收支核算

能源碳排放收支通过比较能源碳足迹与碳承载力的相对大小来测度,计算公式如下:

$$CS = \frac{CF}{CC} \quad (4)$$

式中,CF、CC、CS 分别为区域能源碳足迹、碳承载力、碳排放收支指数。其中,当 CS<1 时,表示该地区能源消

费碳排放负荷未超过陆地生态系统的碳承载力,为收支盈余状态;当 $CS > 1$ 时,表示该地区能源消费碳排放负荷超过了陆地生态系统的碳承载力,为收支赤字状态。

1.4 能源碳排放公平性评价方法

对卢俊宇等构建的区域碳排放公平性评价模型予以拓展,即从碳排放与生态空间占用、碳排放与经济产出、碳排放与人口规模三个方面来阐释区域碳排放公平性的内涵,并通过生态承载系数、经济产出系数、人口规模系数等指标加以表征^[6]。生态承载系数(ESC_i)用于表征区域陆地生态系统碳承载能力贡献的公平性,计算公式如下:

$$ESC_i = \frac{CC_i}{CC} / \frac{CF_i}{CF} \quad (5)$$

式中, CC 、 CC_i 分别为全国和区域能源碳承载力, CF 、 CF_i 分别为全国和区域能源碳足迹。当 $ESC_i > 1$ 时,表示该区域的能源碳承载力贡献率大于能源碳足迹贡献率,对其他区域的碳承载有贡献;当 $ESC_i < 1$ 时,表示该区域的能源碳承载力贡献率小于能源碳足迹贡献率,对其他区域的碳承载形成压力。

经济贡献系数(ECC_i)用于表征区域能源碳排放对应经济产出贡献的公平性,计算公式如下:

$$ECC_i = \frac{EO_i}{EO} / \frac{CF_i}{CF} \quad (6)$$

式中, EO 、 EO_i 分别为全国和区域的 GDP。当 $ECC_i > 1$ 时,表示该区域的经济产出贡献率大于能源碳足迹贡献率,对其他区域的碳经济产出有贡献;当 $ECC_i < 1$ 时,表示该区域的经济产出贡献率小于能源碳足迹贡献率,对其他区域的碳经济产出形成压力。

人口规模系数(PSC_i)用于表征区域能源碳排放对应人口规模贡献的公平性,计算公式如下:

$$PSC_i = \frac{PS_i}{PS} / \frac{CF_i}{CF} \quad (7)$$

式中, PS 、 PS_i 分别为全国和区域的人口规模。当 $PSC_i > 1$ 时,表示该区域的人口规模贡献率大于能源碳足迹贡献率,对其他区域的碳支撑人口有贡献;当 $PSC_i < 1$ 时,表示该区域的人口规模贡献率小于能源碳足迹贡献率,对其他区域的碳支撑人口形成压力。

1.5 能源碳排放公平性耦合协调分析

基于耦合协调度模型分析区域能源碳排放公平性在生态、社会、经济等系统之间的协调作用程度^[27],计算公式如下:

$$C = \frac{3\sqrt[3]{U \times V \times W}}{U + V + W} \quad (8)$$

$$T = \alpha \times U + \beta \times V + \gamma \times W \quad (9)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (10)$$

式中, C 为区域能源碳排放公平性在生态、社会、经济等系统之间的耦合度,取值范围为 $[0, 1]$,且数值越大,耦合度越高; U 、 V 、 W 分别为生态承载系数、经济贡献系数、人口规模系数经最大值法标准化后的值; T 为区域能源碳排放公平性综合评价指数; α 、 β 、 γ 分别为区域能源碳排放公平性在生态、社会、经济等维度的重要性程度,且 $\alpha + \beta + \gamma = 1$,本文取 $\alpha = \beta = \gamma = \frac{1}{3}$; D 为区域能源碳排放公平性在生态、社会、经济等系统之间的耦合协调度,取值范围为 $[0, 1]$,且数值越大,耦合协调度越高。参考熊曦等^[28]研究,将耦合协调度等级划分为十类,具体见表 1。

1.6 数据来源

研究所涉及的数据主要包括社会经济数据、能源消费数据、能源燃烧热值系数和碳排放系数、土地利用数据、NPP 数据等。其中,人口、GDP 数据来源于国家统计局官网;能源消费数据来源于《中国能源统计年鉴》;

燃烧热值系数来源于《公共机构能源资源消费统计调查制度》《中国能源统计年鉴》,碳排放系数来源于《2006年 IPCC 国家温室气体清单指南》《省级温室气体清单编制指南》;土地利用数据来源于国土调查成果共享应用服务平台;NPP 数据来源于方恺等^[21],其中林地、草地、耕地、建设用地、低生产力地、湿地、水域和全球 NPP 值分别为 6.750、5.576、3.971、0.999、1.168、12.070、5.057、1.863,单位为 t C/hm²。

表 1 耦合协调类型

Table 1 Coupling coordination types			
耦合协调度 Coupling coordination degree	耦合协调类型 Coupling coordination type	耦合协调度 Coupling coordination degree	耦合协调类型 Coupling coordination type
$0 \leq D \leq 0.1$	极度失调	$0.5 < D \leq 0.6$	勉强协调
$0.1 < D \leq 0.2$	严重失调	$0.6 < D \leq 0.7$	初级协调
$0.2 < D \leq 0.3$	中度失调	$0.7 < D \leq 0.8$	中级协调
$0.3 < D \leq 0.4$	轻度失调	$0.8 < D \leq 0.9$	良好协调
$0.4 < D \leq 0.5$	濒临失调	$0.9 < D \leq 1$	优质协调

D:耦合协调度 Coupling coordination degree

2 结果与分析

2.1 能源碳足迹时空格局

中国省域能源碳足迹时空格局如图 1 所示。大体而言,省域能源碳足迹呈东高西低的空间格局。其中,能源碳足迹高值区主要集中在东部沿海地区,包括山东、河北、江苏、广东等省份;低值区主要集中在中西部地区,包括有海南、青海、重庆、甘肃等省份。至 2020 年,河北能源碳足迹高达 1.77×10^8 hm²,为省域最高;海南能源碳足迹为 6.07×10^6 hm²,为省域最低;相较而言,省域能源碳足迹最高值约为最低值的 29 倍,两者差距较大。省域能源碳足迹随时间呈递增态势。从 2010 年至 2020 年,中国能源碳足迹增加了 5.48×10^8 hm²,其中,

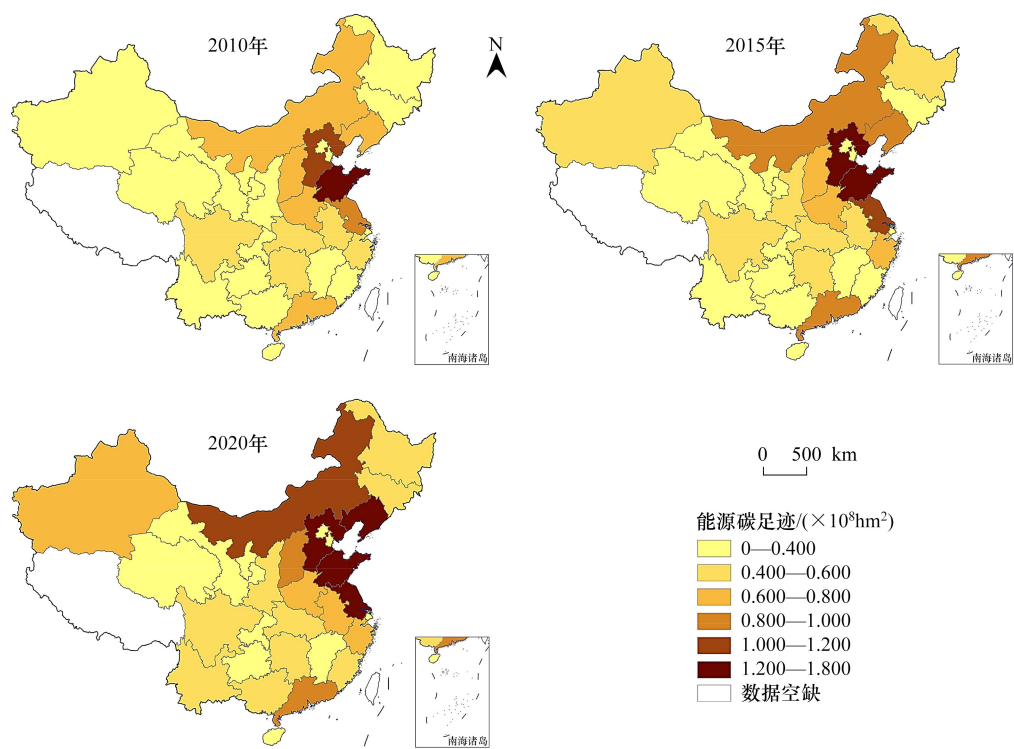


图 1 中国省域能源碳足迹时空格局

Fig.1 The spatio-temporal patterns of China's provincial energy-related carbon footprint

有 6 个省份碳足迹增长贡献率超过 5%,由高至低依次为辽宁、河北、内蒙古、新疆、江苏、山东,其贡献率分别为 15.70%、12.98%、8.88%、8.69%、6.85%、5.46%,合计达 58.56%。大体而言,有超过 2/3 省份碳足迹增速有所放缓,其中新疆、海南、青海等省份的放缓幅度较大。

2.2 能源碳承载力时空格局

中国省域能源碳承载力时空格局如图 2 所示。大体而言,省域能源碳承载力呈西高东低的空间格局,且保持相对稳定。至 2020 年,内蒙古碳承载力为 $2.17 \times 10^8 \text{ hm}^2$,为省域最高;碳承载力排名前五的省(市、区)由高至低依次为内蒙古、新疆、青海、黑龙江、四川;上海碳承载力为 $1.29 \times 10^6 \text{ hm}^2$,为省域最低。值得注意的是,宁夏碳承载力为 $9.10 \times 10^6 \text{ hm}^2$,显著低于周边地区。

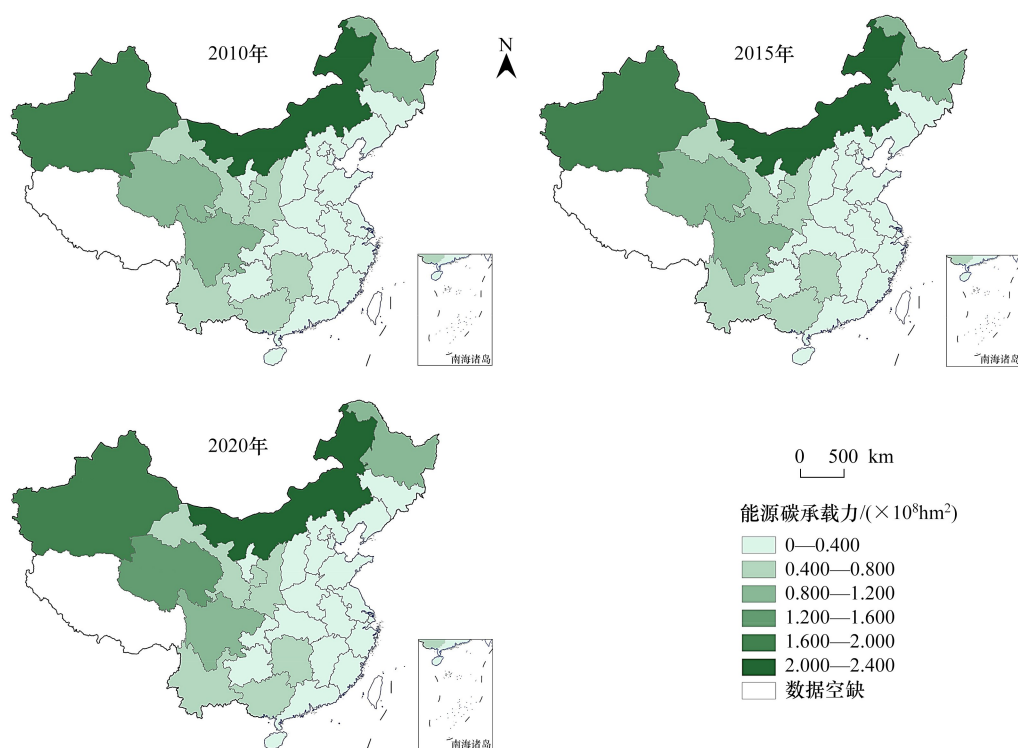


图 2 中国省域能源碳承载力时空格局

Fig.2 The spatio-temporal patterns of China's provincial energy-related carbon carrying capacity

2.3 能源碳排放收支时空格局

在碳中和背景下,合理界定省域能源碳排放责任,并结合本地碳汇能力厘定碳排放收支状况,显得尤为重要。中国省域能源碳排放收支时空格局如图 3 所示。大体而言,省域能源碳排放收支指数呈东高西低的空间格局。至 2020 年,有超过 2/3 的省份能源碳排放为赤字状态,其中上海、天津、江苏的碳排放收支指数排名前三,分别为 23.65、18.29、8.32。此外,宁夏由于其碳承载力远低于周边地区,其收支指数高达 3.53,赤字程度显著高于周边地区。省域能源碳排放收支指数呈递增态势,但其增速有所放缓。大体而言,有超过 2/3 省份碳排放压力程度呈减缓态势。

2.4 能源碳排放公平性时空格局

从生态维度而言,省域能源碳排放对生态空间占用的公平性如图 4 所示。大体而言,省域生态承载系数呈西高东低的空间格局,且保持相对稳定。具体来讲,西部和东北地区具有较高的碳承载能力,其中,青海对其他地区能源碳排放的生态承载贡献遥遥领先,新疆、黑龙江、甘肃、内蒙古、云南、四川等省份对其他地区也有重要贡献。这主要由于这些地区具有较优的生态资源禀赋。而中东部地区的能源碳排放存在不公平现象,

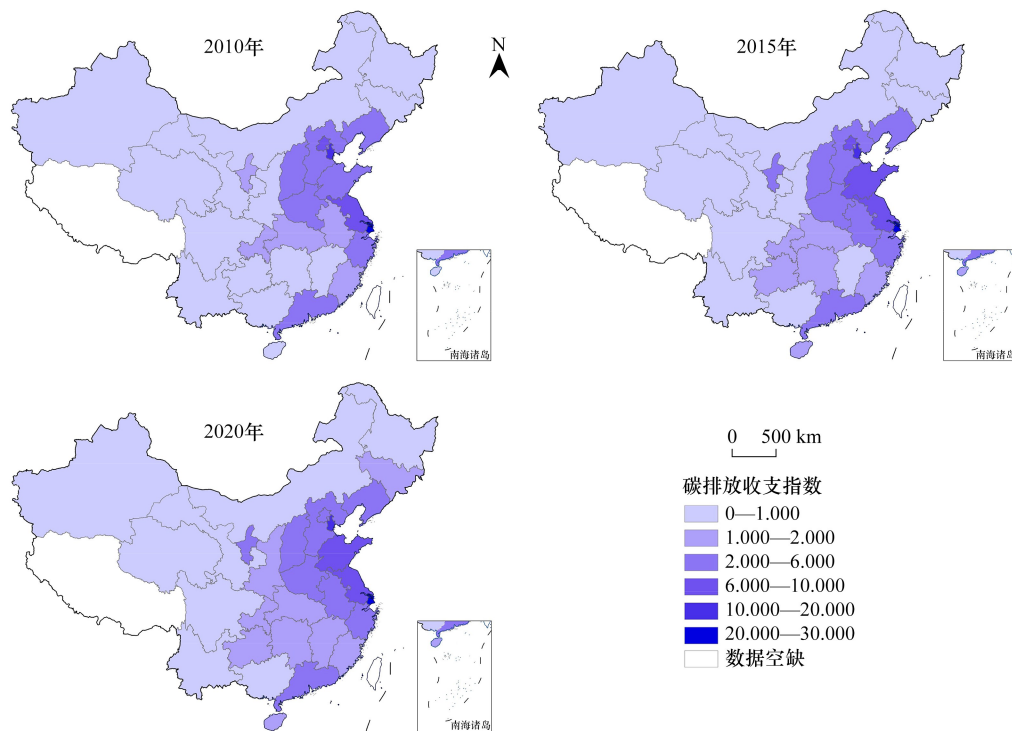


图3 中国省域能源碳排放收支时空格局

Fig.3 The spatio-temporal patterns of provincial energy-related carbon emission budget in China

其中,至2020年,上海、天津等的生态承载系数均小于0.1,江苏、山东、河北、北京、宁夏、浙江、山西、河南、广东、安徽等均小于0.5,福建、湖北、重庆等均小于1。这主要由于这些地区具有较大的经济活动规模。

从经济维度而言,省域能源碳排放经济贡献公平性如图5所示。大体而言,省域经济贡献系数呈南高北低的空间格局,且保持相对稳定。具体来讲,南方大多数省份具有较高的能源碳排放效率,其中,上海、广东、重庆、浙江、福建、海南、四川、湖南等省份对其他地区的能源碳排放具有重要的经济贡献。这主要由于这些地区具有较高的能源碳排放效率。而北方的能源碳排放存在不公平现象,只有北京表现为高效率。至2020年,宁夏、内蒙古、辽宁、新疆、山西、河北等的经济贡献系数均小于0.5,吉林、甘肃、黑龙江、青海、天津、山东等均小于1。这说明这些地区在实现低碳转型发展的进程中,应通过调整产业结构等途径提高经济发展质量。

从社会维度而言,省域能源碳排放的人口规模公平性如图6所示。省域人口规模系数呈南高北低的空间格局,且保持相对稳定。南方大多数省份具有较低的人均能源碳排放量,其中,海南、四川、重庆、湖南、河南、广东、广西、云南等省份对其他地区的人均能源碳排放具有重要贡献。这主要由于这些地区具有较高的人口集聚度。而北方的能源碳排放存在不公平现象,只有北京人均能源碳排放较低。至2020年,内蒙古、宁夏、辽宁、新疆等的人口规模系数均小于0.5,山西、河北、天津、吉林、青海、山东、黑龙江等均小于1。这说明这些地区的生产、生活和生态空间须进一步优化,以提高对于人口的吸引力度。

2.5 能源碳排放公平性耦合协调度时空格局

由图7可知,中国大多数省份能源碳排放公平性在生态、社会、经济等系统之间的耦合协调程度表现为失调状态,小部分省份为协调状态。其中,中度和轻度失调省份主要位于华北和东部地区,濒临失调省份主要位于东南部和中部地区,勉强协调和初级协调省份主要位于西部和西南部地区。随时间推移,省域能源碳排放公平性耦合协调度整体呈降低态势,即失调省份在增多,协调省份在减少。其中,新疆经历了“勉强协调-濒临失调-轻度失调”的转变,中度失调省份由2个增至5个。

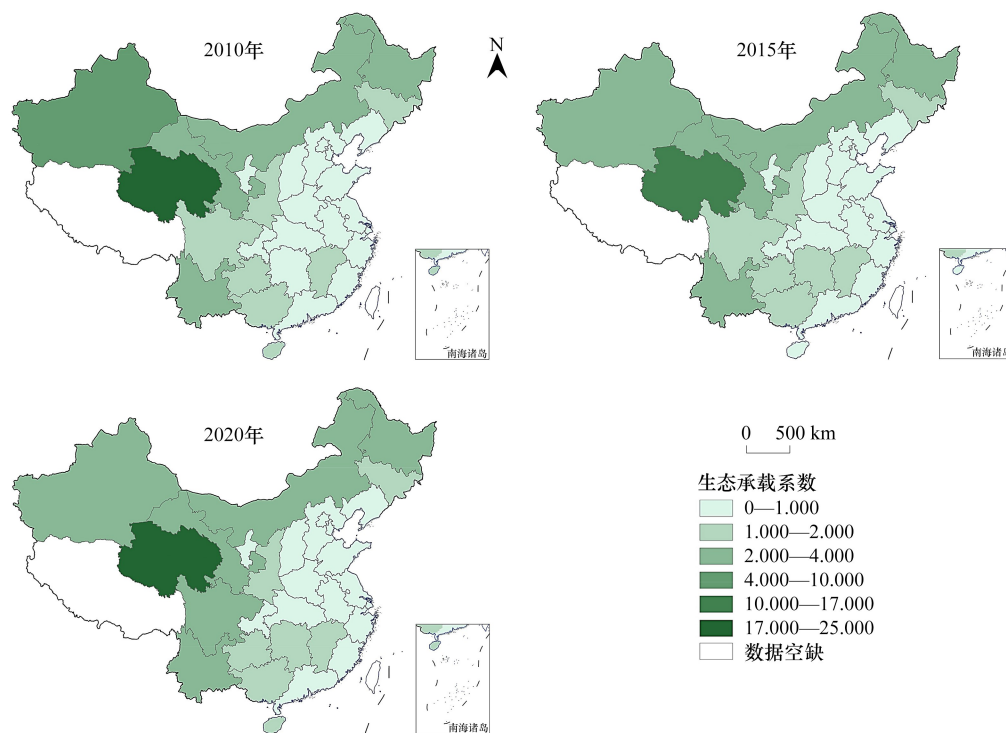


图 4 中国省域能源碳排放生态承载系数时空格局

Fig.4 The spatio-temporal patterns of provincial ecological carrying coefficient of energy-related carbon emissions in China

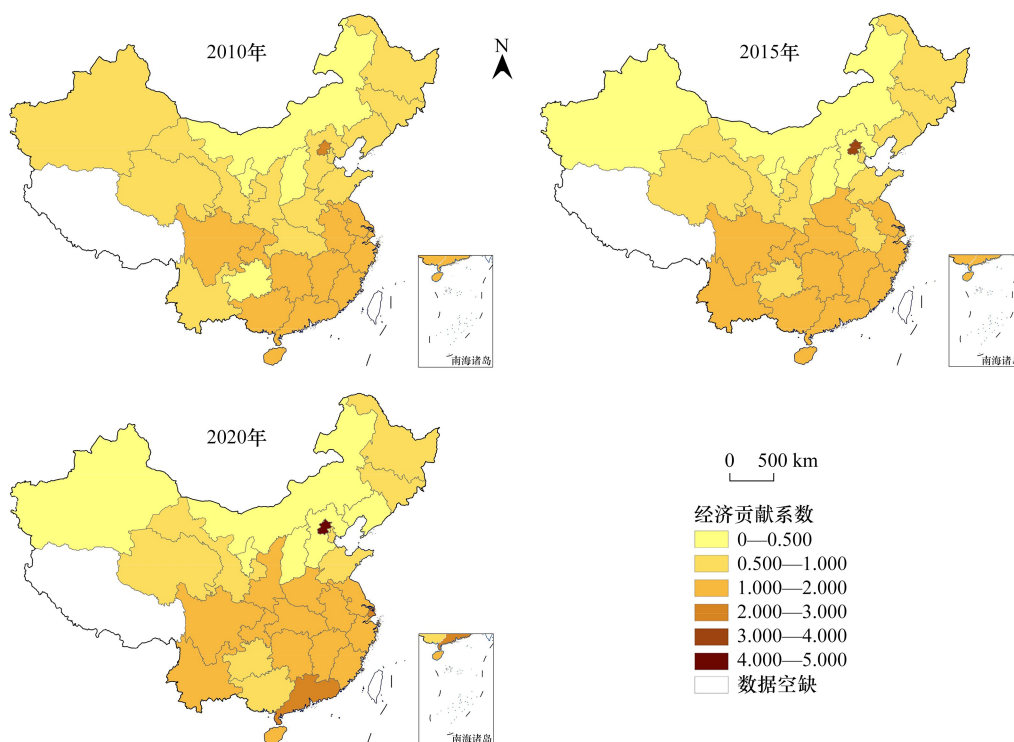


图 5 中国省域能源碳排放经济贡献系数时空格局

Fig.5 The spatio-temporal patterns of provincial economic contribution coefficient of energy-related carbon emissions in China

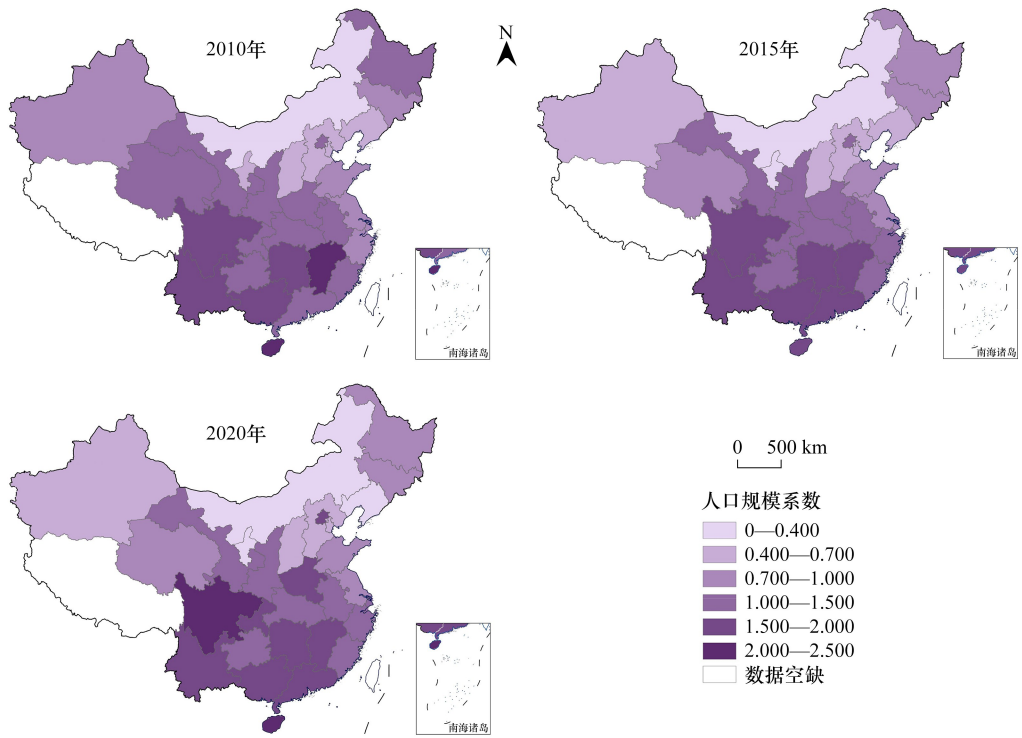


图 6 中国省域能源碳排放人口规模系数时空格局

Fig.6 The spatio-temporal patterns of provincial population size coefficient of energy-related carbon emissions in China

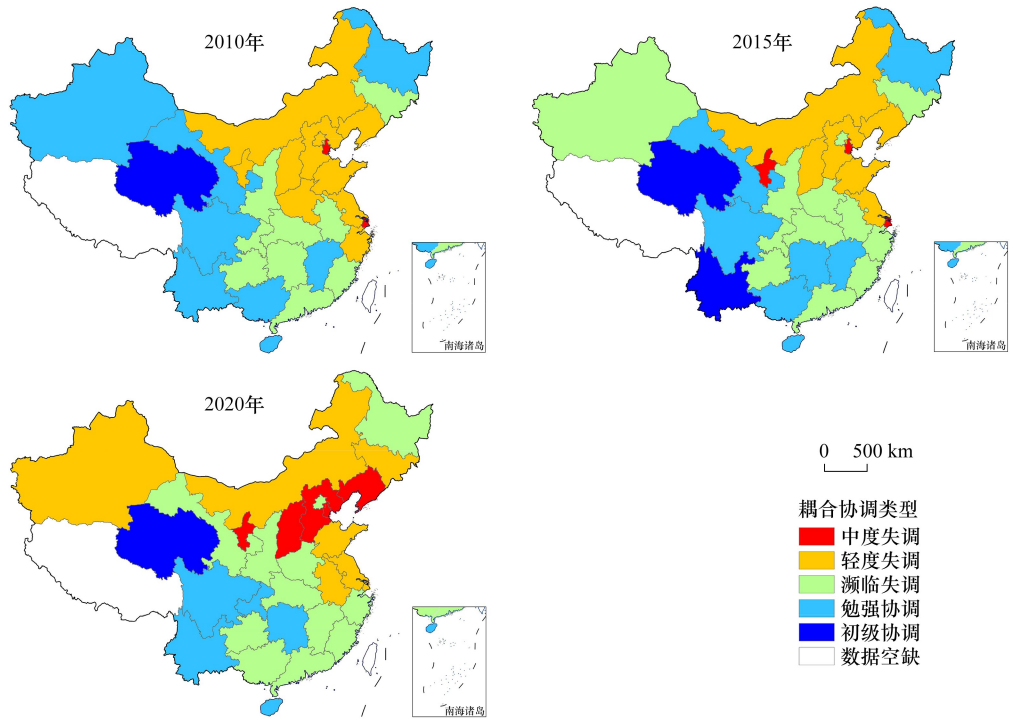


图 7 中国省域能源碳排放公平性耦合协调度时空格局

Fig.7 The spatio-temporal patterns of coupling coordination degree of provincial energy-related carbon emission equity in China

3 结论与建议

(1) 中国省域能源碳排放压力程度整体呈现东高西低的空间格局,且随时间呈递增态势,超过 2/3 省份增速随时间呈减缓态势。至 2020 年,超过 2/3 省份能源碳排放为赤字状态。其中,东部沿海省份能源碳排放赤字程度较高。

(2) 中国省域能源碳排放公平性在生态、经济和社会等维度之间存在权衡关系,而在经济和社会维度之间存在协同关系。其中,受生态禀赋和经济活动影响,省域能源碳排放生态承载贡献呈由西向东递减态势;受能源碳排放效率影响,省域能源碳排放经济贡献呈由南向北递减态势,南方相较于北方具有技术、管理等优势;受人口规模和经济活动影响,省域能源碳排放人口支撑贡献呈由南向北递减态势,南方人均能源碳排放量相对较低,相较于北方具有人口集聚优势。省域能源碳排放公平性在生态、经济、社会维度的空间格局均保持相对稳定。

(3) 中国省域能源碳排放公平性在生态、经济、社会等系统之间的耦合协调程度主要表现为失调状态,小部分省份为协调状态且协调程度较低。失调省份主要位于东部和中部地区,协调省份主要位于西部和西南部地区。省域能源碳排放公平性耦合协调度随时间整体呈降低态势。

在碳中和目标背景下,由于生态资源禀赋、经济发展阶段、人口集聚程度等因素的差异,中国省域能源碳排放放在生态承载、生产效率、人口支撑等领域均存在潜在的协作空间。应统筹好减排和增汇,既立足本地区实际,又将地区间能源碳排放各维度公平性纳入考虑范畴,通过分区分类施策以实现优势互补,增强碳减排增汇的协同性。同时,以增强区域能源碳排放公平性的内在耦合协调关系为导向,构建碳减排增汇的区域协调合作机制。其中,东部地区应采取严格的生态保护措施以提升碳汇能力,并对西部地区给予一定生态补偿;西部地区应立足生态优势,承接好东部地区转移的产业,基于地理条件大力发展清洁能源,并基于中国核证自愿减排量(CCER)项目等机制对碳汇资源予以优化配置;北方地区应借鉴南方地区的先进技术和管理经验,提高能源利用清洁化水平,通过协调生产、生活、生态空间等举措以加大对人口的吸引力度;南方地区要优化产业结构,进一步提高能源碳排放效率,并对北方地区给予一定技术支持。

本文在核算省域能源碳足迹过程中,未考虑由贸易引起的隐含碳足迹,对碳排放责任界定的合理性产生一定影响。今后,可基于多区域投入产出模型来厘清碳排放责任^[29]。本研究的能源碳承载力核算存在一定的不确定性,未来应综合不同核算方法,以增强结果的可靠性^[30]。

参考文献(References):

- [1] 王奕淇,黄涵祝.中国碳排放脱钩效应、时空特征与驱动因素.生态学报,2024,44(6):2228-2243.
- [2] 方恺,李帅,叶瑞克,张琦峰,龙吟.全球气候治理新进展——区域碳排放权分配研究综述.生态学报,2020,40(1):10-23.
- [3] 陆森菁,陈红敏.碳排放不公平性研究综述.资源科学,2013,35(8):1617-1624.
- [4] 邱俊永,钟定胜,俞俏翠,郭家祯,益心虹.基于基尼系数法的全球CO₂排放公平性分析.中国软科学,2011(4):14-21.
- [5] 王慧慧,刘恒辰,何霄嘉,曾维华.基于历史累计碳排放视角的碳排放公平性研究.中国人口·资源与环境,2016,26(5):22-25.
- [6] 卢俊宇,黄贤金,戴靓,陈志刚,李月.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.
- [7] 刘志华,徐军委.“双碳”目标下中国省域碳排放公平性及其影响因素.地理科学,2023,43(1):92-100.
- [8] 耿涌,董会娟,郝凤明,刘竹.应对气候变化的碳足迹研究综述.中国人口·资源与环境,2010,20(10):6-12.
- [9] 方恺,董德明,沈万斌.能源足迹改进方法及其在区域能源利用效益分析评价中的应用.地理科学,2010,30(5):686-692.
- [10] 邓宣凯,刘艳芳,李纪伟.区域能源碳足迹计算模型比较研究——以湖北省为例.生态环境学报,2012,21(9):1533-1538.
- [11] Mancini M S, Galli A, Niccolucci V, Lin D, Bastianoni S, Wackernagel M, Marchettini N. Ecological footprint: Refining the carbon footprint calculation. Ecological Indicators, 2016, 61: 390-403.
- [12] Hertwich E G, Peters G P. Carbon footprint of nations: A global, trade-linked analysis. Environmental Science & Technology, 2009, 43(16): 6414-6420.
- [13] 赵荣钦,黄贤金.基于能源消费的江苏省土地利用碳排放与碳足迹.地理研究,2010,29(9):1639-1649.

- [14] 杨传明. 新旧常态中国产业全碳足迹复杂网络比较. 自然资源学报, 2020, 35(2): 313-328.
- [15] Druckman A, Jackson T. The carbon footprint of UK households 1990-2004: A socio-economically disaggregated, quasi-multi-regional input-output model. *Ecological Economics*, 2009, 68(7): 2066-2077.
- [16] 郝淑丽. 产品碳足迹评价方法及在服装产品的应用. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(S1): 31-33.
- [17] 卢俊宇, 黄贤金, 陈逸, 肖潇. 基于能源消费的中国省级区域碳足迹时空演变分析. 地理研究, 2013, 32(2): 326-336.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 潘竟虎, 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.
- [21] 方恺, 董德明, 林卓, 沈万斌. 基于全球净初级生产力的能源足迹计算方法. 生态学报, 2012, 32(9): 2900-2909.
- [22] 吴立军, 田启波. 碳中和目标下中国地区碳生态安全与生态补偿研究. 地理研究, 2022, 41(1): 149-166.
- [23] 奥勇, 张梦娜, 赵永华, 王晓峰, 白召弟, 蒋嶺峰. 基于生态足迹-净初级生产力的珠三角城市群经济与生态的关系. 应用生态学报, 2022, 33(7): 2001-2008.
- [24] 赵东升, 张雪梅, 邓思琪, 于贵瑞. 区域资源环境承载力的评价理论及方法讨论. 应用生态学报, 2022, 33(3): 591-602.
- [25] 刘坤, 张慧, 孔令辉, 乔亚军, 胡梦甜. 陆地生态系统碳汇评估方法研究进展. 生态学报, 2023, 43(10): 4294-4307.
- [26] 杨元合, 石岳, 孙文娟, 常锦峰, 朱剑霄, 陈蕾伊, 王欣, 郭焱培, 张宏图, 于凌飞, 赵淑清, 徐亢, 朱江玲, 沈海花, 王媛媛, 彭云峰, 赵霞, 王襄平, 胡会峰, 陈世革, 黄玫, 温学发, 王少鹏, 朱彪, 牛书丽, 唐志尧, 刘玲莉, 方精云. 中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献. 中国科学: 生命科学, 2022, 52(4): 534-574.
- [27] 刘晓曼, 吕娜, 侯鹏, 黄艳, 高吉喜, 袁静芳. 生态文明建设与社会经济发展耦合协调关系的定量测度——以浙江省安吉县为例. 生态学报, 2023, 43(21): 8973-8984.
- [28] 熊曦, 肖俊. 武陵山片区城镇化与生态环境耦合协调度时空分异——以六个中心城市为例. 生态学报, 2021, 41(15): 5973-5987.
- [29] 林泽坤, 孟凡鑫, 王东方, 孙宇彤, 胡元超, 刘耕源. “一带一路”倡议下区域碳不平等量化及政策启示. 北京师范大学学报(自然科学版), 2023, 59(1): 56-63.
- [30] 朴世龙, 何悦, 王旭辉, 陈发虎. 中国陆地生态系统碳汇估算: 方法、进展、展望. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(6): 1010-1020.