



· 碳捕集、利用与封存 ·

中国碳排放不平等的时空格局演变研究

杨苗苗¹, 梁小英², 马羽赫²

(1. 宁夏大学 地理科学与规划学院, 宁夏 银川 750021; 2. 西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127)

摘要 探究空间格网尺度下中国碳排放不平等的时空演变特征,是制定更具有针对性和精细化的减少碳不平等政策的有效途径。鉴于此,采用分配模型、窗口分析等方法,在碳排放和人类福祉空间化的基础上,探讨了中国碳不平等空间分布及其演化特征,提出可能实现减少碳不平等的政策建议。结果表明:2000—2020年全国的碳排放和人类福祉整体呈上升趋势,但碳排放增速有所下降,人类福祉增速保持平稳;碳排放较密集的区域呈现出连片扩张分布趋势,省会城市和大都市群的碳排放远高于小城市和农村地区;人类福祉高值区不断向四周扩张,在人口密集区高值分布更集中;碳基尼系数的高值呈现增长态势,高值区域主要分布在东北地区、中部地区和西南地区的部分省份;碳排放和人类福祉分布不均导致区域内碳不平等不断恶化,碳排放高值区与人类福祉收益高值区不匹配使得全国整体的碳不平等加剧。研究成果可为探索碳不平等空间分布提供新的思路,也为气候政策的制定提供依据。

关键词 碳排放;人类福祉;碳基尼系数;时空演化

中图分类号:K90 **DOI:**10.16152/j.cnki.xdxbzr.2025-05-008

The evolution of the spatial and temporal patterns of carbon emission inequality in China

YANG Miaomiao¹, LIANG Xiaoying², MA Yuhe²

(1. School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract The purpose of this study is to explore the spatial and temporal evolution characteristics of carbon emission inequality in China at the spatial grid scale, providing effective pathways for formulating more targeted and refined policies to reduce carbon inequality. Based on the spatial allocation of carbon emissions and human well-being using a distribution model and window analysis, the spatio-temporal evolution characteristics of carbon inequality were analyzed, and potential policy recommendations for reducing carbon inequality were proposed. The results indicate that from 2000 to 2020, the national carbon emissions and human well-being both showed an overall upward trend. However, while the growth rate of carbon emissions declined, the growth rate of human well-being remained stable. Carbon emissions exhibited a clustered and spatially expanding distribution pattern, with provincial capitals and metropolitan areas demonstrating significantly higher e-

收稿日期:2025-04-27

基金项目:国家自然科学基金(42171256)

第一作者:杨苗苗,女,讲师,从事碳排放、碳不平等和人类福祉等方面的研究,mmyang@stumail.nwu.edu.cn。

通信作者:梁小英,女,教授,博士生导师,从事生态系统服务和碳排放等方面的研究,liangxy@nwu.edu.cn。

mission levels compared to small cities and rural regions. Similarly, high-value zones of human well-being showed continuous outward expansion, with particularly concentrated distributions in densely populated areas. The carbon Gini coefficient exhibited an increasing trend, with high-value regions predominantly concentrated in Northeast China, as well as some provinces within Central and Southwest China. The uneven distribution of carbon emissions and human well-being has led to worsening regional carbon inequality. Furthermore, the spatial mismatch between high-carbon emission zones and high human well-being benefit areas has exacerbated nationwide carbon inequality. The research findings provide new insights for exploring the spatial distribution of carbon inequality and also serve as a basis for the formulation of climate policies.

Keywords carbon emissions; human well-being; carbon Gini coefficient; spatio-temporal evolution

改革开放以来,中国经济持续快速增长,快速的工业化进程增加了对能源和矿产资源的巨大需求^[1-3],中国的碳排放急剧增加^[4]。根据国际能源署(IEA)的数据,中国在 2007 年超过美国成为世界上最大的碳排放国^[2,5-7]。由于资源禀赋、经济发展水平和阶段、能源效率、产业结构和环境压力的差异,不同地区的经济增长和能源需求之间的差距不断扩大^[8],中国不同地区的碳排放也存在显著差异^[4,9-11],导致碳不平等问题突出。因此,在“双碳”目标和中国各地区发展不平衡的背景下,研究碳排放不平等的空间分布格局和时空演化特征,对宏观掌握中国碳不平等演变趋势和实现区域减排目标至关重要。

近年来,学者们借助研究收入不平等的测度方法,来衡量碳排放不平等的程度,常用的方法有阿特金森指数、基尼系数和泰尔指数等^[12-15]。然而,现有的碳不平等研究多集中在不同经济体、不同国家或不同区域层面,研究少有涉及网格尺度的碳不平等分析;且现有研究多关注碳排放和经济收益层面的不平等,缺少基于多维人类福祉视角的碳不平等空间化制图,在一定程度上阻碍了碳不平等时空演化研究。

受限于市级或县级尺度数据的可获取性及统计口径不一致,导致在更小尺度下研究基于人类福祉的碳不平等时空演变特征更具挑战性,也直接影响精准碳排放政策和人类可持续发展政策的制定和落实。随着遥感技术的快速发展,全球遥感影像数据因其客观性强、可获取性高、处理流程标准化等优势被广泛应用到碳排放和人类福祉等指标的空间可视化^[16-17],其中 DMSP/OLS 夜间灯光数据和人口密度数据已成为该领域的核心数据源,为碳不平等的空间化提供了重要参考。

目前,已有相关研究基于夜间灯光数据和碳排放统计数据构建碳排放估算模型对不同地区碳

排放进行空间化^[18-19]。为了提高绘制碳排放空间分布图的精度,Guo 等^[20]结合夜间灯光数据和归一化植被指数(NDVI)提出了一种改进的碳排放指数用于绘制中国多尺度碳排放空间分布图。对于人类福祉的空间化,相关研究将夜间灯光数据纳入人类发展指数(human development index, HDI),构建新的 HDI 指标,并基于人口比例实现新构建的 HDI 指标的空间化^[21-22];也有研究通过人口加权对 HDI 进行缩放,产生不同年度 HDI 网格化数据集并对其进行时空演化分析^[23]。然而,在以往的碳排放和人类福祉空间化过程中,大多数研究都忽略了居住在没有夜间灯光检测地区的大量人口的重要排放源以及福祉分布,这可能会导致碳排放和人类福祉空间化的不确定性增加^[24]。因此,学者们提出了一种基于夜间灯光与人口数据相结合的碳排放和人类福祉分配模型^[25]。如 Liu 等^[24]和 Ghosh 等^[26]根据夜间灯光来估计照明区域的碳排放量,根据人口数量来估计没有夜间灯光地区的碳排放量,从而获得更为精细的区域碳排放空间分布图。Wang 和 Sun^[27]利用夜间灯光数据和人口密度数据在未照明的单元格中填充人口数,在无人口的区域中填充夜间灯光值,从而更好地代表不同福祉指标的空间分解。

基于此,本研究以中国 30 个省份为研究区(不含西藏、香港、澳门、台湾),在构建 2000—2020 年中国省域人类福祉的基础上,基于分配模型对碳排放和人类福祉进行空间化,并采用窗口分析法对基于福祉公平的碳基尼系数进行量化和空间化,并对其空间演化特征及原因进行分析。研究结果对掌握中国碳不平等空间动态演变趋势和制定有区域针对性和差异性的碳减排政策具有重要意义。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

2000、2010 和 2020 年的碳排放数据来源于中国碳核算数据库 (CEADs) (<https://www.ceads.net.cn/>),每个省份的碳排放数据包含 45 个行业部门,参考 Yang 等^[28-29]的研究将其合并为 9 个部门进行分析。中国省域各福祉指标数据主要源于《中国统计年鉴》(<https://data.cnki.net/yearBook>)。夜间灯光数据源于 Wu 等^[30]通过 Harvard Dataverse 平台发布的改进的类 DMSP-OLS 数据 (<https://dataverse.harvard.edu/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.7910/DVN/GIYGJU>),分辨率为 1 km。人口数据源于全球人口数据库 LandScan (<https://landscan.ornl.gov/>),分辨率为 1 km。

1.2 人类福祉指数构建

资本是决定福祉水平的重要因素,基于资本框架测度福祉是可持续发展导向下多维福祉研究的重要趋势^[31]。基于此,本研究基于资本框架构建包括人力资本、社会资本、经济资本和自然资本等 4 个维度的福祉指数。①人力资本是指个人拥有的能够创造个人、社会和经济福祉的知识、技能、能力、素质等,是人类福祉系统的重要组成部分;②经济资本是指与金钱、货币相关的概念,旨在能够反映一个地区的经济发展运行状况;③社会资本旨在反映一个地区社会发展状况,包括公共服务、公共设施水平等方面;④自然资本旨在能够反映一个地区自然生态环境的好坏^[31-32]。参考翟晨阳^[31]、Yang 等^[28-29]的研究,综合考虑各个福祉资本的内涵特征、指标的代表性、省域数据的可获取性以及数据来源的可靠性,选择 16 个代表性指标来表征 4 个资本维度(见表 1),并采用熵权法确定指标权重。

表 1 中国省域人类福祉指标
Tab. 1 Provincial human well-being indicators in China

资本类型	指标	指标说明	指标属性	权重
人力资本	年末总人口	反映劳动力水平	正向指标	0.054
	65 岁及以上人口比例	反映社会老龄化程度	逆向指标	0.024
	普通高中师生比	反映教育投入结构、教育质量水平	正向指标	0.037
	卫生机构技术人员数	反映医疗卫生水平	正向指标	0.058
经济资本	人均 GDP	反映人均经济水平	正向指标	0.070
	农村居民人均可支配收入	反映农村居民的经济资本	正向指标	0.099
	城镇居民人均可支配收入	反映城镇居民的经济资本	正向指标	0.099
	人均社会消费品零售总额	反映经济的景气程度	正向指标	0.095
社会资本	第三产业比重	反映服务业的发展水平	正向指标	0.035
	互联网接入用户数	反映人际互动的潜在能力	正向指标	0.143
	年末供水综合生产能力	反映社会综合生产能力	正向指标	0.071
	公共交通-运营线路网长度	反映交通便利程度	正向指标	0.123
自然资本	废水排放总量	反映水污染的状况	逆向指标	0.006
	森林覆盖率	反映森林资源状况	正向指标	0.046
	人均公园绿地面积	反映人均自然资本受益状况	正向指标	0.022
	工业 SO ₂ 排放量	反映空气质量状况	逆向指标	0.017

1.3 碳排放及人类福祉空间化

夜间灯光卫星图像可以用于解释碳排放和人类福祉的空间分布^[21, 27, 33],本研究采用基于夜间

灯光和人口密度的分配模型^[26-27, 34],将碳排放和人类福祉分配到空间上。模型构建过程如下。

1) 提取行政单元亮区和暗区的人口数量。

利用夜间灯光图像分别创建亮区和暗区的掩模,结合人口数据(LandScan)分别提取行政单元*i*亮区的人口总和(SP_{L_i})和暗区的人口总和(SP_{D_i})。

2) 计算行政单元亮区 L_i 和暗区 D_i 的碳排放及人类福祉总量。假设行政单元 i 亮区的人均碳排放量为 x_i , 人均福祉为 y_i ; 暗区的人均碳排放量为 $x_i/2$, 人均福祉为 $y_i/2$, 计算该行政单元亮区和暗区的碳排放总量及人类福祉总量

$$\begin{aligned} CO_{2L_i} &= SP_{L_i} \cdot x_i \\ HWB_{L_i} &= SP_{L_i} \cdot y_i \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} CO_{2D_i} &= SP_{D_i} \cdot (x_i/2) \\ HWB_{D_i} &= SP_{D_i} \cdot (y_i/2) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: CO_{2L_i} 为亮区 L_i 的碳排放总量; CO_{2D_i} 为暗区 D_i 的碳排放总量; HWB_{L_i} 为亮区 L_i 的人类福祉总量; HWB_{D_i} 为暗区 D_i 的人类福祉总量。

3) 确定行政单元亮区和暗区的碳排放网格和人类福祉网格。将亮区每个网格的夜间灯光值乘以每单位灯光值的碳排放量或人类福祉量, 得到行政单元 i 亮区的碳排放网格或人类福祉网格

$$\begin{aligned} CO_{2Lg_i} &= L_{Lg_i} \cdot (CO_{2L_i}/SL_{L_i}) \\ HWB_{Lg_i} &= L_{Lg_i} \cdot (HWB_{L_i}/SL_{L_i}) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: CO_{2Lg_i} 为亮区每个网格 Lg_i 的碳排放; HWB_{Lg_i} 为亮区每个网络 Lg_i 的人类福祉; SL_{L_i} 为亮区的夜间灯光值之和; L_{Lg_i} 为亮区每个网格 Lg_i 的夜间灯光值。

相反, 将暗区每个网格的人口数乘以每单位人口的碳排放量或人类福祉量, 得到行政单元 i 暗区的碳排放网格或人类福祉量网格

$$\begin{aligned} CO_{2Dg_i} &= P_{Dg_i} \cdot (CO_{2D_i}/SP_{D_i}) \\ HWB_{Dg_i} &= P_{Dg_i} \cdot (HWB_{D_i}/SP_{D_i}) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: CO_{2Dg_i} 为暗区每个网格 Dg_i 的碳排放; HWB_{Dg_i} 为暗区每个网格 Dg_i 的人类福祉; CO_{2D_i} 为暗区碳排放总量; HWB_{D_i} 为暗区人类福祉总量; SP_{D_i} 为暗区的人口总数; P_{Dg_i} 为暗区每个网格 Dg_i 的人口数。

4) 估算全国碳排放和人类福祉网格。将对应行政单元亮区和暗区的碳排放以及人类福祉网格相加, 得到全国碳排放和人类福祉网格

$$\begin{aligned} CO_2 &= \sum_{i=1}^N (CO_{2Lg_i} + CO_{2Dg_i}) \\ HWB &= \sum_{i=1}^N (HWB_{Lg_i} + HWB_{Dg_i}) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: CO_2 为全国碳排放总量网格; HWB 为全国人类福祉总量网格; N 是行政单元总数。

1.4 碳基尼系数的计算及空间化

基尼系数最初用于表示人口中财富分配的不公平, 现在被广泛用于衡量环境或资源消耗不平等^[35]。本研究结合人类福祉来构建衡量中国碳排放-人类福祉的不均衡。参考 Zhang 等^[36]的研究, 将碳排放量代替收入、人类福祉代替人口, 计算基于福祉的碳基尼系数。碳基尼系数可以衡量碳排放-人类福祉分布的不平等, 碳基尼系数越高, 分布越不平等。计算公式如下

$$G = 1 - \sum_{i=1}^n (x_{i+1} - x_i)(y_{i+1} + y_i) \quad (6)$$

式中: G 表示碳基尼系数, 其范围在 0 到 1 之间, 0 表示完全平等, 1 表示完全不平等; x_i 表示 i 省人类福祉的累计比例; y_i 表示 i 省碳排放的累计比例。

为在全国范围内对碳不平等进行精细量化, 本研究通过计算 10 km 网格碳基尼系数表征碳不平等的空间化。在研究期内, 结合前文得到的 1 km 分辨率的碳排放和人类福祉栅格数据, 采用静态窗口法计算每 10 km 窗口的碳基尼系数, 从而得到 2000 年、2010 年和 2020 年基于福祉的碳排放不平等的 10 km 分辨率全国地图。

2 结果与分析

2.1 全国碳排放的时空演化趋势

基于中国碳核算数据库 (CEADs) 各省及各行业的碳排放统计数据, 得到 2000—2020 年全国碳排放量及其变化。如表 2 所示, 2000—2020 年全国的碳排放整体呈上升趋势, 2000、2010 和 2020 年全国总碳排放量分别为 3 052.31 Mt、8 366.84 Mt 和 10 966.96 Mt, 但碳排放增速呈下降趋势, 2000—2010 年碳排放总量增长了约 174%, 年均增速为 10.6%。2010—2020 年碳排放总量增长了约 31.1%, 年均增速为 2.7%。这是由于 2000—2010 年间, 中国以经济增长为首要目标, 经济持续高速增长导致能源需求大幅增加, 这一时期中国的工业化和城市化进程加快, 能源消费结构以煤炭为主, 高能耗和高排放行业迅速扩张, 使得碳排放快速增长。2010—2020 年, 中国在发展过程中逐步从“高增长、高排放”向“高质量、低碳化”转型。随着中国对气候变化问题的重视, 中国在“十二五”和“十三五”规划期间实施了一系列节能减排的政策和法规, 积极落实国家气候变化战略, 通过发展清洁能源、节能减

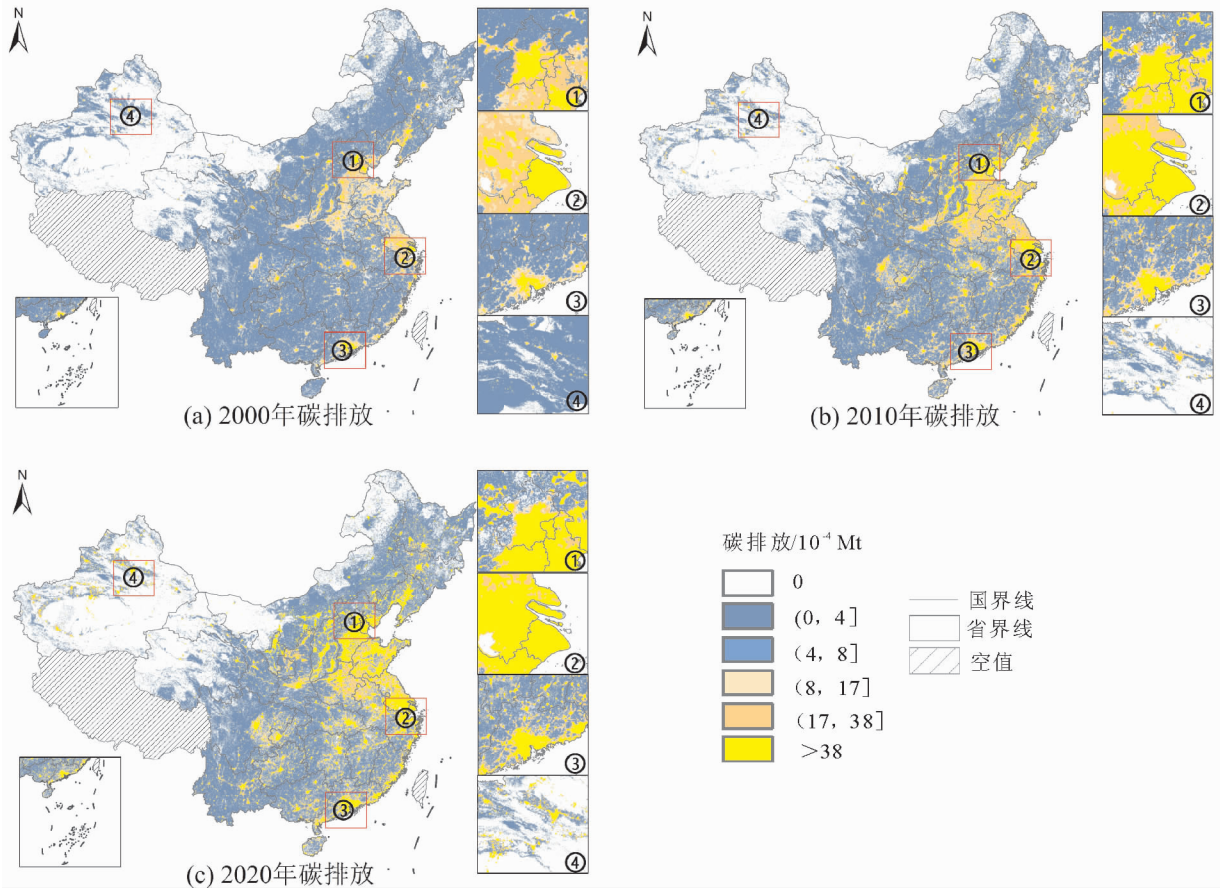
排、提高能源利用效率、推动产业绿色低碳转型、使得碳排放增长明显放缓。
建立碳排放权交易机制等方式,积极降低碳排放,

表2 2000—2020 年全国碳排放总量及其变化
Tab.2 National total carbon emissions and the changes from 2000 to 2020

年份	碳排放总量/Mt	年份区间	碳排放增长量/%	碳排放年均增速/%
2000	3 052.31	2000—2010	174.0	10.6
2010	8 366.84			
2020	10 966.96	2010—2020	31.1	2.7

为明晰碳排放的空间分布特征,本文基于夜间灯光和人口密度将各省的碳排放分配到空间单元上。如图1所示,从全国碳排放的空间分布情况可看出,2000年全国整体的碳排放处于相对较低的水平,且在空间上呈放射状分布,从城市中心向外扩散。2010年全国整体的碳排放有所上升,高碳排放区域进一步扩张。2020年各地碳排放的高值进一步增长,省会城市的碳排放向外扩散也较为明显,碳排放较密集的区域呈现出连片扩

张分布趋势。2000—2020年碳排放较高的区域在京津地区、北方地区的河北和山东、中部的河南、以及沿海地区的江苏、浙江和广东等地呈连片分布状态,在东北地区的辽宁和黑龙江,以及西北地区的新疆和甘肃等地区,碳排放高值零星分布。整体来看,研究期间各地的碳排放呈增长态势,省会城市和大都市群的碳排放远高于小城市和农村地区。



图中典型放大区域分别为:①京津地区;②东部沿海;③南部沿海;④西北地区。
注:基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2020)4619 号标准地图制作,底图边界无修改。

图1 2000—2020 年碳排放空间分布图
Fig.1 Spatial distribution of carbon emissions from 2000 to 2020

中国的碳排放主要来源于水电燃气、重制造业和能源工业部门,其次是交通、其他服务业和农业,而轻制造业、建筑业和其他制造业产生的碳排放相对较少。如图 2 所示,2000 年水电燃气、重制造业和能源工业产生的碳排放高达 1 418.13 Mt,796.53 Mt 和 217.53 Mt。2010 年每个部门的碳排放均有所增加,水电燃气、重制造业和能源工业产生的碳排放已达 4 180.39 Mt,2 186.97 Mt 和 585.5 Mt。2020 年水电燃气和重

制造业产生的碳排放依然最多,达到了 5 772.36 Mt 和 3 072.95 Mt。而交通业产生的碳排放已超过能源工业达到了 558.24 Mt,能源工业略低,为 486.75 Mt。水电燃气部门的碳排放主要分布在山东、江苏、内蒙古和广东等地,重制造业部门的碳排放主要分布在河北、山东、辽宁和江苏等地,而能源工业的碳排放则主要分布在河南、山东、山西和河北等地。

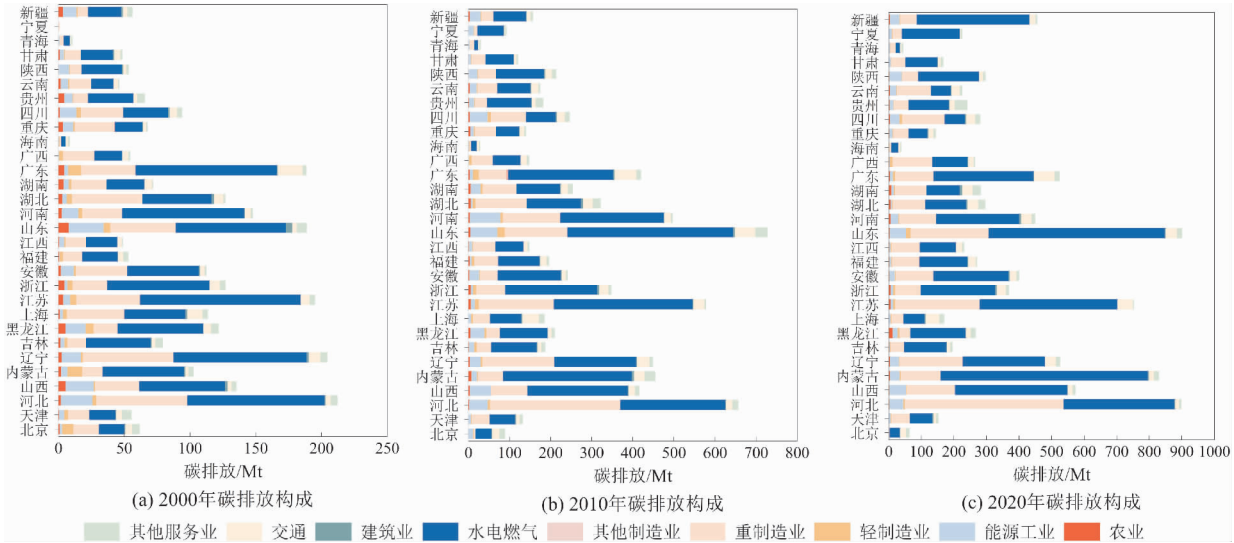


图 2 2000—2020 年各省碳排放的行业构成
Fig. 2 Industrial composition of carbon emissions by province from 2000 to 2020

2.2 全国人类福祉的时空演化趋势

基于构建的资本框架指标体系对人类福祉进行评估,得到 2000—2020 年全国人类福祉及其变化。如表 3 所示,2000—2020 年全国的人类福祉整体呈上升趋势,2000、2010 和 2020 年全国总人类福祉量分别为 4.01、6.8 和 12.69,人类福祉增速较为平稳。2000—2010 年人类福祉总量增长了约 67.8%,年均增速为 5.3%,2010—2020 年人类福祉总量增长了约 86.7%,年均增速为 6.4%。这是由于在研究期间中国 GDP 快速增长,人民收

入水平稳步提高,使得经济持续增长。与此同时,中国政府大力投资基础设施建设,社会保障体系进一步完善;教育领域的投入不断增加,提高了整体的教育水平,人口素质得到提高。在生态环保方面,推动清洁能源发展并注重生态保护,人民生活质量进一步提高,因此人类福祉出现平稳增长的态势。在“十三五”规划期间,除了经济结构的优化升级和高质量发展,中国政府同时也强调应实现社会各方面的均衡发展,这也有助于实现人类福祉的稳定增长。

表 3 2000—2020 年全国人类福祉总量及其变化

Tab. 3 National total human well-being and its changes from 2000 to 2020

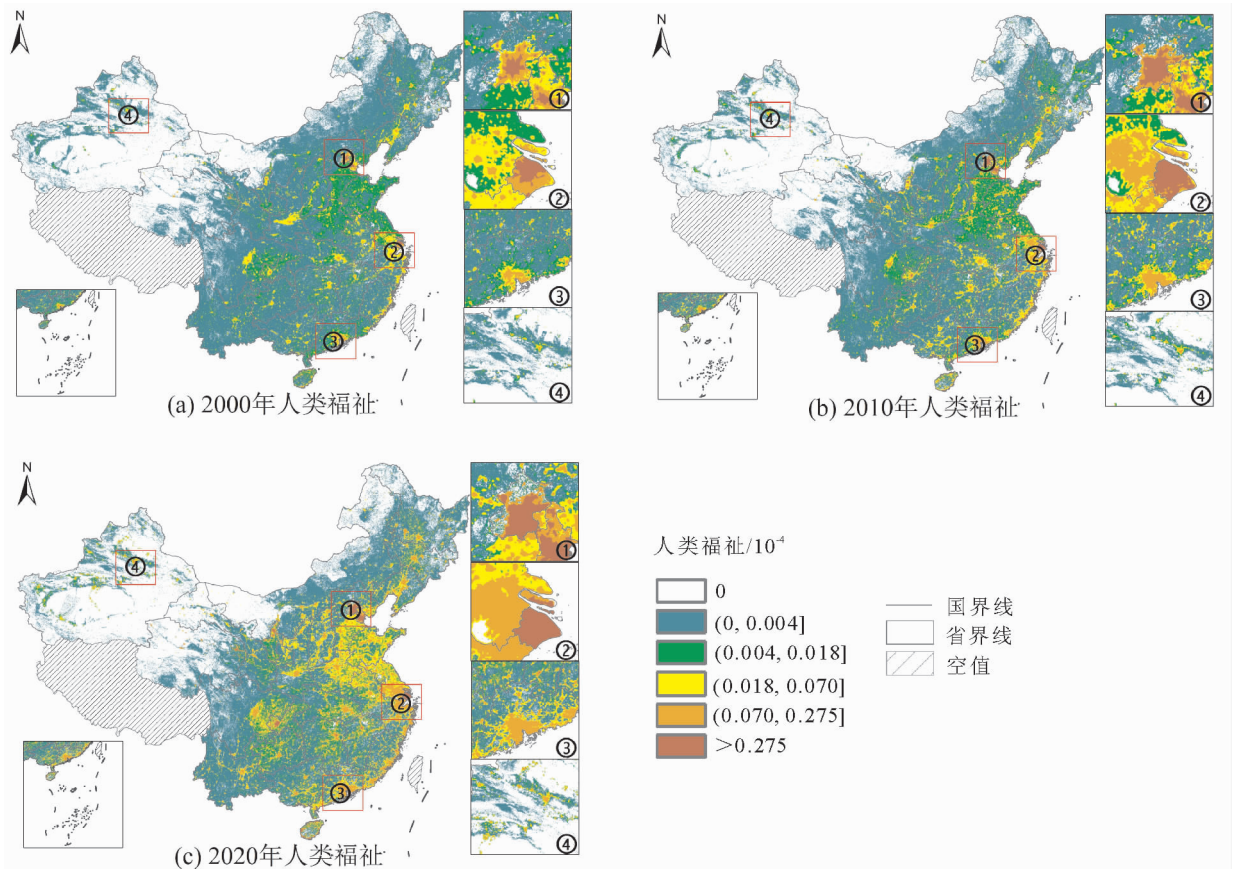
年份	人类福祉总量	年份区间	人类福祉增长量/%	人类福祉年均增速/%
2000	4.01	2000—2010	67.8	5.3
2010	6.80			
2020	12.69	2010—2020	86.7	6.4

如图 3 所示,从全国人类福祉空间化结果可看出,2000 年全国人类福祉水平相对较低,高值主要分布在京津地区、上海和广东等地。2010 年

各地的人类福祉水平有所上升,高值区也进一步向四周扩张,尤其在发展较好的城市及其周边地区,发展较落后的农村地区人类福祉水平较低。

2020 年各地的人类福祉进一步增长,高值区主要在沿海地区的广东、浙江、上海和山东、中部的河南和安徽,以及京津地区的部分区域呈片状分布,在东北的吉林和黑龙江、西南地区的重庆、四川和

各个省会城市呈点状零星分布。整体来看,在研究期间各地的人类福祉呈增长态势,人口越密集的地区,人类福祉的高值区也越集中。



图中典型放大区域分别为:①京津地区;②东部沿海;③南部沿海;④西北地区
注:基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2020)4619 号标准地图制作,底图边界无修改。

图3 2000—2020 年人类福祉空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution of human well-being from 2000 to 2020

从资本视角构建的中国各省人类福祉主要由人力资本、经济资本、社会资本和自然资本构成。如图4所示,2000年的人类福祉构成中,人力资本(1.63)得分最高,其次是自然资本(1.14),社会资本(0.86)和经济资本(0.42)得分较低。2010年各资本均有增加,其中经济资本(2.0)增长最快,已超过人力资本(1.75),其次是社会资本(1.65)和自然资本(1.39)。2020年各资本进一步增加,经济资本(5.06)和社会资本(3.69)增长最快,其次是人类资本(2.12)和自然资本(1.81)。从各个资本的分布来看,人力资本主要分布在山东、广东和河南等地,经济资本主要分布在上海、北京和天津等地,社会资本主要分布在广东、江苏和浙江等地,自然资本则主要分布在福建、江西和海南等地。

2.3 全国碳不平等的时空演化趋势

在对碳排放和人类福祉空间化的基础上,得到基于人类福祉的碳基尼系数分布图(见图5)。如图所示,2000—2020年碳基尼系数的高值呈现增长态势,区域内部碳不平等情况进一步加剧,但研究期间碳基尼系数的高值分布地区较为相似。碳基尼系数高值区域主要分布在东北的黑龙江、吉林和辽宁,中部的湖北、湖南和江西,西南地区的贵州、广西和云南等地,这些地区高值连片分布。上述结果表明,这些地区内部发展差距较大,碳排放高值区和低值区差异显著,使得整个地区内部碳排放分布不均。同时,这些碳排放高值区域,尽管消耗大量的能源并产生了大量的碳排放,但人类福祉的提升却相对有限,在面临环境污染的同时,经济发展、收入水平、社会基础设施建设

从累积人类福祉和碳排放量变化的基尼系数可以清楚地看到碳不平等的加剧(见图 6)。2000 年全国碳基尼系数为 0.28,省份间碳不平等现象明显。例如,2000 年人类福祉占总人类福祉 21.6% 的河南、山东、江苏、辽宁、山西和河北,其碳排放的碳排放占总排放量的 37.8%,而宁夏、海南、青海、福建、江西、北京和云南获取了 20% 的人类福祉,却仅承担了 8.3% 的碳排放。2010 年全国碳基尼系数有所增长,为 0.31。海南、青海、北京、天津和上海获取了 17.9% 的人类福祉,但仅承担了 5.9% 的碳排放。河北、内蒙古、山西、山东和辽宁获取了 16.5% 的人类福祉,但承担了 34.1% 的碳排放。2020 年碳基尼系数进一步增长至 0.33,北京、海南、青海、上海和重庆获取了 16.2% 的人类福祉,仅承担了 4.5% 的碳排放。

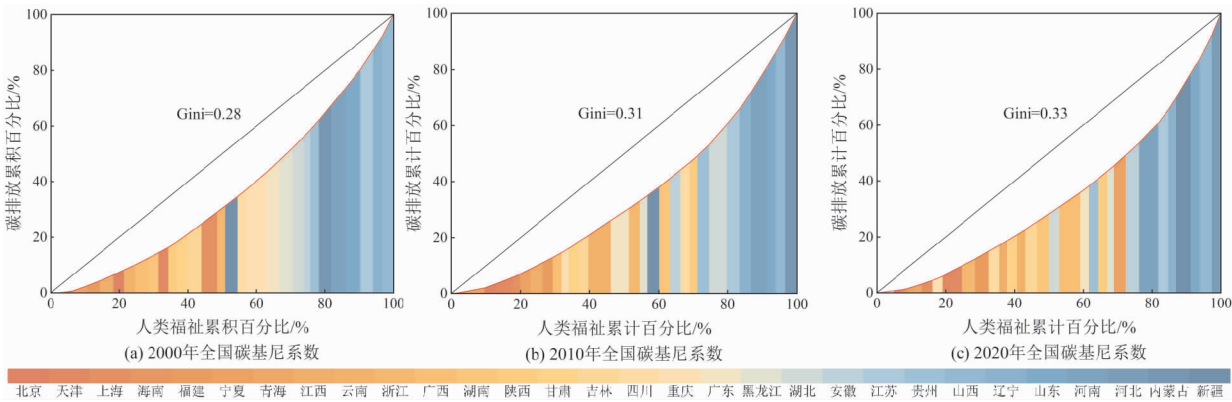


图 6 2000—2020 年全国碳基尼系数

Fig. 6 National carbon Gini coefficient from 2000 to 2020

3 讨论

在研究中发现 2000—2020 年中国整体的碳基尼系数及其高值分布均有所增加,说明中国的碳不平等在持续恶化。原因是在栅格尺度上,区域内部的碳排放和人类福祉分布不均导致区域内碳不平等程度较高,这与区域内部产业布局、产业规模、人口分布和自然地理状况等密切相关。而在全中国范围内,碳基尼系数也在不断增加,这主要是由于不同省份承担的碳排放不同,碳排放高值区与人类福祉收益高值区不匹配所导致的。这主要取决于不同省份之间在资源禀赋、经济发展和产业结构等方面的差异性。

为了降低碳不平等,在区域内部需要对不同社区、企业、产业等进行全面的碳排放调研,建立详细的碳排放清单并制定有针对性的碳减排措

放。辽宁、新疆、山东、山西、河北和内蒙古获取了 15.1% 的人类福祉,却承担了 34.3% 的碳排放。

整体来看,中国与人类福祉相关的碳不平等在过去二十年中都在恶化。如图 6 所示,全国基尼系数呈现明显的增加趋势,即各省区表现出聚集性,橙色部分聚集在横轴的起点,蓝色部分聚集在横轴的终点。这是由于橙色部分的省份,如北京、上海、天津和海南等地,由于大力发展高新技术产业、高耗能产业较少使得碳排放较少,但获取的人类福祉占比较高。而蓝色部分的省份,如新疆、内蒙古、河北和河南等地,由于重工业集中、依赖能源密集型产业,导致碳排放较多,但获取的人类福祉占比较低。这使得这些地区在承担碳排放和获取人类福祉收益方面处于劣势地位,碳不平等现象也有所加剧。

施。引导区域内产业向低碳、高效方向发展,加强区域内企业间的产业链合作,实现资源的循环利用和能源的梯级利用。同时,通过促进经济均衡发展(如鼓励小微企业发展和促进经济活力均衡发展)、提升公共服务均等化(如合理分配教育资源和缩小教育差距)、完善基础设施建设(如建设便捷的公共交通系统和促进城乡交通一体化)等措施,从而有效提高区域内居民生活质量,实现人类福祉的均衡分布,进而减少区域内部的碳不平等。在全国层面,碳排放较高的省份,如内蒙古、河北和河南等,需要减少对资源产量的依赖,加快发展清洁生产结构、降低碳排放强度并提高能源效率进而降低本地区的碳排放,在发展经济的同时创造更多人类福祉及增加人类福祉收益。通过加强森林资源的保护、鼓励植树造林、建立生态产业链和绿色供应链从而保护自然资本;通过发展高科技产业和服务业等增加经济和社会资本;通

过加大人才优惠政策、加快建设人才发展高地、大力招引培育人才从而留住人力资本。对于碳排放较低的发达省份,如北京、上海和天津等地,应该加强对公众、企业和地方政府的碳减排意识教育和宣传,促使更多人参与到低碳发展的过程中。同时,应该发挥技术优势,通过跨区域合作与碳排放高值区共享清洁技术、资源和经验,实现碳减排的协同效应,从而减少省份间的碳不平等^[28-29]。

本研究的不足主要在于,由于不同地区生活在未照明区域人口的人均碳排放量和人类福祉不同,因此黑暗区域的人均碳排放量和人均福祉实际上是变量。正如 Ghosh 等^[26]的描述,由于缺乏更好的定量数据,0.5 因子被用作该模型中非照明区域的碳排放量和人类福祉量的占位符。在未来的研究中,如果有区分城市和农村的人类福祉指标数据的支持,将致力于解决这种不确定性,并绘制出基于不同参数且区分城市与农村的中国碳排放及人类福祉图,进而得到更为精细的碳基尼系数空间分布图。此外,由于目前缺少全国连续多年的更高分辨率(如 100 m)的夜间灯光和人口栅格数据,也缺少与 9 个碳排放部门相匹配的全国行业分布图,无法对每个部门的碳排放进行精确匹配。因此,暂未将碳排放的空间化细分到每个部门,最终碳基尼系数空间分布图分辨率也相对较低,但其空间分布规律较为明显,为掌握碳基尼系数的空间分布特征提供了重要依据。

4 结论

本文基于资本框架构建了中国各省人类福祉,并利用分配模型对各省人类福祉和碳排放进行空间化,在此基础上基于窗口分析实现全国碳不平等的空间化,进一步探讨了全国碳不平等的时空演化特征,并提出政策建议。主要结论如下。

1) 2000—2020 年全国的碳排放整体呈上升趋势,但碳排放增速呈下降趋势。碳排放高值不断向外扩散,碳排放较密集的区域连片分布。全国碳排放主要来源于水电燃气、重制造业和能源工业部门,这些部门的碳排放则主要分布在山东、河北、江苏和内蒙古等地。

2) 2000—2020 年全国的人类福祉整体呈上升趋势,人类福祉增速较为平稳。人类福祉高值区主要分布在人口密集地区,并逐渐向发展较好的城市及其周边扩张。研究期间,各资本水平不

断提升,其中经济资本和社会资本增长最快,其主要分布在上海、北京、广东和江苏等地。

3) 2000—2020 年碳基尼系数的高值呈现增长态势,区域内部碳不平等情况进一步加剧。碳基尼系数高值区域主要分布在东北地区、中部地区和西南地区地区的部分省份,而沿海地区的碳基尼系数相对较低。碳不平等的恶化主要是由于碳排放和人类福祉分布不均,且高值区不匹配所致。

参考文献

- [1] DU J, ZHANG X D, HUANG T, et al. Trade-driven black carbon climate forcing and environmental equality under China's west-east energy transmission [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 313: 127896.
- [2] LIU X J, JIN X B, LUO X L, et al. Multi-scale variations and impact factors of carbon emission intensity in China [J]. Science of the Total Environment, 2023, 857: 159403.
- [3] SHAN Y L, HUANG Q, GUAN D B, et al. China CO₂ emission accounts 2016—2017 [J]. Scientific Data, 2020, 7: 54.
- [4] LI S Y, YAO L L, ZHANG Y C, et al. China's provincial carbon emission driving factors analysis and scenario forecasting [J]. Environmental and Sustainability Indicators, 2024, 22: 100390.
- [5] IEA. CO₂ emissions from fuel combustion highlights [R]. Paris: International Energy Agency, 2012.
- [6] IEA. CO₂ emissions from fuel combustion highlights [R]. Paris: International Energy Agency, 2009.
- [7] JIANG Y K, CAI W J, WAN L Y, et al. An index decomposition analysis of China's interregional embodied carbon flows [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 88: 289-296.
- [8] XIE Z H. China's historical evolution of environmental protection along with the forty years' reform and opening-up [J]. Environmental Science and Ecotechnology, 2020, 1: 100001.
- [9] HAN X, GAO X C, AHMAD F, et al. Carbon compensation and carbon neutrality: Regional variations based on net carbon transfer of trade in China [J]. Geoscience Frontiers, 2024, 15(4): 101809.
- [10] TAN X C, CAI X L, CHENG Y L, et al. How to control China's total amount of carbon emissions? An analysis of provincial allowance demands [J]. Energy, 2024, 303: 131865.
- [11] 刘红光, 范晓梅. 中国区域间隐含碳排放转移 [J].

- 生态学报, 2014, 34(11): 3016-3024.
- LIU H G, FANG X M. CO₂ emissions transfer embedded in inter-regional trade in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(11): 3016-3024.
- [12] 王佳. 中国地区碳不平等:测度及影响因素[D]. 重庆:重庆大学, 2012.
- [13] PADILLA E, SERRANO A. Inequality in CO₂ emissions across countries and its relationship with income inequality: A distributive approach [J]. *Energy Policy*, 2006, 34(14): 1762-1772.
- [14] HAN M Y, LAO J M, YAO Q H, et al. Carbon inequality and economic development across the Belt and Road regions [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 262: 110250.
- [15] ZHANG S, KHARRAZI A, YU Y D, et al. What causes spatial carbon inequality? Evidence from China's Yangtze River economic Belt [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 121: 107129.
- [16] ELVIDGE C D, BAUGH K E, ANDERSON S J, et al. The Night Light Development Index (NLDI): A spatially explicit measure of human development from satellite data [J]. *Social Geography*, 2012, 7(1): 23-35.
- [17] ZHAO M, CHENG W M, ZHOU C H, et al. GDP spatialization and economic differences in South China based on NPP-VIIRS nighttime light imagery [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(7): 673.
- [18] 吕倩, 刘海滨. 京津冀县域尺度碳排放时空演变特征:基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据 [J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2019, 21(6): 41-50.
- LYU Q, LIU H B. Spatio-temporal evolution characteristics of county scale carbon emissions in Beijing-Tianjin-Hebei region: A study based on DMSP/OLS nighttime light data [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology (social sciences edition)*, 2019, 21(6): 41-50.
- [19] 潘竞虎, 张永年. 中国能源碳足迹时空格局演化及脱钩效应 [J]. 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 [J]. *Acta geographica sinica*, 2021, 76(1): 206-222.
- [20] GUO W, LI Y X, LI P X, et al. Using a combination of nighttime light and MODIS data to estimate spatio-temporal patterns of CO₂ emissions at multiple scales [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 848: 157630.
- [21] LIANG H W, LI N, HAN J, et al. Investigating the temporal and spatial dynamics of human development index: A comparative study on countries and regions in the eastern hemisphere from the perspective of evolution [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(12): 2415.
- [22] 李娜. “一带一路”沿线国家人类可持续发展水平时空演变特征研究 [D]. 南京:南京信息工程大学, 2022.
- [23] KUMMU M, TAKA M, GUILLAUME J H A. Gridded global datasets for Gross Domestic Product and Human Development Index over 1990—2015 [J]. *Scientific Data*, 2018, 5: 180004.
- [24] LIU X P, OU J P, WANG S J, et al. Estimating spatiotemporal variations of city-level energy-related CO₂ emissions: An improved disaggregating model based on vegetation adjusted nighttime light data [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 177: 101-114.
- [25] EBERENZ S, STOCKER D, RÖÖSLI T, et al. Asset exposure data for global physical risk assessment [J]. *Earth System Science Data*, 2020, 12(2): 817-833.
- [26] GHOSH T, ELVIDGE C D, SUTTON P C, et al. Creating a global grid of distributed fossil fuel CO₂ emissions from nighttime satellite imagery [J]. *Energies*, 2010, 3(12): 1895-1913.
- [27] WANG T T, SUN F B. Global gridded GDP data set consistent with the shared socioeconomic pathways [J]. *Scientific Data*, 2022, 9: 221.
- [28] YANG M M, LIANG X Y, CHEN H, et al. Analysis of the evolution and drivers of carbon inequality based on a human well-being equity perspective [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 448: 141706.
- [29] YANG M M, LIANG X Y, MA Y H, et al. Exploring the carbon inequality embodied in China's interregional trade based on a human well-being equity perspective [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 420: 138367.
- [30] WU Y Z, SHI K F, CHEN Z Q, et al. Developing improved time-series DMSP-OLS-like data (1992—2019) in China by integrating DMSP-OLS and SNPP-VIIRS [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 1-14.
- [31] 翟晨阳. 基于资本视角的鄱阳湖区居民福祉综合测评、空间特征分析与情景模拟 [D]. 南昌:南昌大学, 2018.
- [32] 廖纯韬. 环鄱阳湖区居民福祉测评及其影响因素研究 [D]. 南昌:南昌大学, 2016.
- [33] WEI W, ZHANG X Y, CAO X Y, et al. Spatiotemporal dynamics of energy-related CO₂ emissions in China based on nighttime imagery and land use data [J].

Ecological Indicators, 2021, 131: 108132.

[34] OU J P, LIU X P, LI X, et al. Evaluation of NPP-VIIRS nighttime light data for mapping global fossil fuel combustion CO₂ emissions: A comparison with DMSP-OLS nighttime light data [J]. PLoS One, 2015, 10 (9): e0138310.

[35] 王菲菲. 中国省际贸易隐含碳转移及碳补偿研究 [D]. 北京:中国环境科学研究院, 2024.

[36] ZHANG H Y, ZHANG W, LU Y L, et al. Worsening carbon inequality embodied in trade within China [J]. Environmental Science&Technology, 2023, 57 (2): 863-873.

(编 辑 邵 煜)