程继鑫,陈晓红,夏春雷,等.中国人均碳不平等演进趋势及驱动因素研究——基于结构特征、技术进步与效率优化的多维分析 [J]. 中国环境科学, 2026,46(1):450-462.
Cheng J X, Chen X H, Xia C L, et al. The evolution trend and driving factors of per capita carbon inequality in china——a multidimensional analysis based on structural characteristics, technological progress, and efficiency optimization [J]. China Environmental Science, 2026,46(1):450-462.

中国人均碳不平等演进趋势及驱动因素研究

——基于结构特征、技术进步与效率优化的多维分析

程继鑫[1],陈晓红[1,2*],夏春雷[1],刘 堇[3] (1.中南大学商学院,湖南 长沙 410083；2.湘江实验室,湖南 长沙 410205；3.中南大学邓迪国际学院,湖南 长沙 410083)

摘要：通过整合并扩展对数平均迪氏指数与生产分解分析方法构建了一个探究区域碳不平等的综合评估体系,并基于2006~2019年中国273个城市的面板数据,从结构特征、技术变动与效率优化的视角分析了中国人均碳排放不平等程度的动态演化趋势和驱动因素.研究发现:(1)中国人均碳排放存在着明显的不平等特征,碳不平等指数先从2006年的15.18下降至2008年的14.51,后波动上升至2019年的22.59.(2)潜在碳排放强度和区域经济结构的变化是中国整体碳不平等指数上升的主要驱动因素,而区域经济水平的发展、生产技术效率的提升以及城市间生产技术差距的缩小则有效降低了碳不平等水平,但碳减排技术暂未起到缓解人均碳排放不平等的作用.(3)从动态层面看,潜在碳排放强度的波动对碳不平等指数变化的影响最大,生产技术水平的改进和生产效率的提升有效抑制了碳不平等指数的上升,缓解了碳不平等特征.(4)分区域分析发现,南部沿海地区碳不平等水平最高,而西北地区人均碳排放不平等程度最低,各区域的人均碳不平等驱动力因素作用方向与强度存在差异.

关键词：人均碳排放；碳不平等水平；指标分解分析；区域结构特征；技术变化；效率优化
中图分类号：X196 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2026)01-0450-13

The evolution trend and driving factors of per capita carbon inequality in china: A multidimensional analysis based on structural characteristics, technological progress, and efficiency optimization. CHENG Ji-xin[1], CHEN Xiao-hong[1,2*], XIA Chun-lei[1], LIU Jin[3] (1.School of Business, Central South University, Changsha 410083, China；2.Xiangjiang Laboratory, Changsha 410205, China；3.Dundee International Institute of Central South University, Changsha 410083, China). *China Environmental Science*, 2026,46(1)：450~462

Abstract：This study constructs a comprehensive framework for assessing regional carbon inequality by integrating and extending the logarithmic mean Divisia index (LMDI) with production-theoretical decomposition analysis (PDA). Based on panel data from 273 Chinese cities (2006~2019), we examine the dynamic evolution and drivers of per capita carbon emission inequality from structural, technological, and efficiency perspectives. Results indicate significant carbon inequality in China, with the inequality index first decreasing from 15.18 (2006) to 14.51 (2008) before fluctuating upward to 22.59 (2019). Rising potential carbon intensity and shifts in regional economic structure were the main drivers of increased inequality, while regional economic growth, production efficiency improvements, and narrowing inter-city technology gaps helped mitigate it—though carbon reduction technologies showed no significant equalizing effect. Dynamic analysis reveals that potential carbon intensity fluctuations had the strongest impact on inequality changes, while technological progress and efficiency gains effectively curbed its rise. Regionally, the southern coast exhibited the highest carbon inequality, while the northwest had the lowest, with drivers varying in direction and intensity across regions.

Key words：per capita carbon emissions；carbon inequality level；index decomposition analysis；regional structural characteristics；technological changes；efficiency optimization

现代社会对化石燃料的依赖导致温室气体排放激增,全球变暖加剧,引发了一系列环境危机[1].为公平、有效地应对气候变化挑战,中国承诺于2030年前达到碳排放峰值,到2060年前实现碳中和.实现“双碳”目标将推动经济社会发展全面绿色转型,这是一场广泛而深刻的经济社会系统性变革[2].为更

收稿日期：2025-06-25
基金项目：国家自然科学基金卓越研究群体项目(72088101);国家自然科学基金青年项目(72303252);湖南省自然科学基金青年项目(2025JJ60444)
* 责任作者, 院士, c88877803@163.com

有效地落实“双碳”目标,中国各省、市都采取了多项政策措施来实现低碳转型与发展[3].但由于不同地区在发展阶段、资源禀赋、产业结构、人口规模以及技术水平等方面存在较大差异,难以实现减排责任和减排目标的公平分配,加剧了区域间碳排放与经济收益分配的不均衡,造成了在减排过程中的“碳不平等”(指不同地区或个人之间在温室气体排放和承担减排责任上存在的不平等现象)加剧的情况[4-5].碳作为一种复杂的经济要素,几乎存在于所有经济活动之中,具备较强的跨区域流动性[6].如果地区间的减排缺乏整体协同,一些地区的减排有可能演化成为空间上的“碳转移”,而非真正意义上的“减排”,这并不利于总体“双碳”目标的实现[7].在此背景下,“双碳”目标如何更科学地与不同区域的经济发展目标相平衡,确保地区之间的低碳均衡发展,降低区域间的“碳不平等”程度,防止出现严重的地区分化,已然成为落实“双碳”目标过程中不容忽视的关键性问题[8].

碳不平等研究主要关注其对社会经济公平及减排政策效果的深远影响[9],其核心内涵被界定为“减排责任与发展权的动态平衡”[10].在测度方法上,学者普遍采用基尼系数[11-13]、泰尔指数、阿特金森指数[14]等多维指标进行综合评估[15-17],以克服单一指标的局限.在驱动因素分析方面,指数分解分析(IDA)[18]与生产率分解分析(PDA)[19]是两种主流方法,近年来也出现了将两者结合的联合分解框架[20-21],以增强对碳不平等成因的系统解释.

从研究尺度看,现有成果多聚焦于省际层面的碳排放不平等及其驱动机制.相关研究发现,技术差距[22]、潜在能源消费强度、碳排放技术效率及产出技术进步[23-24]是影响碳不平等的重要因素;而在空间格局上,中国碳排放呈现出“东部高、中西部低”的分布特征,与碳汇能力形成反向对应[25].此外,有研究指出碳效率对碳平等具有显著的非对称促进作用[26],凸显了在“双碳”目标下协调效率与平等的重要性.

通过以上文献梳理可以发现,现有研究在碳不平等问题上存在一定空白.首先,在研究视角方面,现有研究主要关注全球层面[12,27-28]或中国省份间的碳不平等[29-31],但较少从城市层面进行探讨,同时忽视了省域内部因产业结构和地域发展差异所带来的不平等特征.其次,在碳不平等的驱动因素方面,现有研究主要围绕技术差距、经济差距、城乡差别、收入不均等因素分析碳不平等现象[13,15,32-35],但视角较为单一,难以全面揭示碳不平等的驱动机制.此外,空间分解模型在分析碳不平等时,大多侧重于碳排放总量[36-37],而对人均碳排放强度不平等的驱动因素探讨较少.尽管已有研究计算了不平等指数,并对其驱动因素进行了初步分析,但在方法上仍存在不足.例如,当前的分解模型普遍未考虑技术差距对碳不平等的影响,计量经济学方法也难以同时从静态和动态角度量化各因素的作用.中国整体层面的碳不平等研究仍较有限,往往仅计算中国碳不平等指数,或聚焦于碳排放强度、经济增长、就业率等经济因素对全球碳不平等的影响[38].针对上述不足,本研究首先基于中国地级市层面数据,构建了一个融合不平等指数(Inequality Index)、LMDI 与 PDA 方法的碳不平等综合评估体系.一方面,将 LMDI 的加法结构优势与 PDA 的生产理论结合,实现结构特征、技术变动及效率优化的多维度驱动解析,在解决跨期数据可比性的基础上,更精准捕捉城市层面碳不平等的演化路径.其次,本文系统评估了 2006~2019 年中国及其主要经济区域人均碳不平等的动态演化趋势,明确了中国各区域低碳发展的差异性特征.并进一步从结构特征、技术变动与效率优化三重视角对碳不平等指数进行分解,进而厘清了影响区域碳不平等程度的主要驱动因素.最后基于相关结果,本文有针对性地提出了缓解碳不平等程度的相关政策建议.

本研究的边际贡献体现在以下三点:第一,基于中国 273 个城市,探究了中国人均碳排放不平等动态演化趋势,弥补了已有研究从省域视角出发进而忽略了省域内部产业结构和地域发展的差异特征,提高了评估精度;第二,从结构特征、技术变动与效率优化三重视角直接量化了各种因素(如经济结构、减排技术、区域发展差距以及资源配置)对区域碳不平等的影响.对碳不平等评估模型进行了更加全面、合理的扩展;第三,依次从国家、区域和省域视角的进行实证分析,全面探究了中国的碳不平等现状与其驱动因素.系统揭示人均碳不平等趋势及其驱动因素在不同地区之间的差异特征.为制定缓解碳不平等程度的政策提供了理论与现实依据.

1 方法

1.1 基于共同前沿的生产技术构建

为了探究不同城市生产效率、碳排放效率及其对应技术的动态变化特征,参考 Yang 等[39]、邵帅等[40]和薛媛等[41]的做法,在此本文引入共同前沿生产技术集.基于实际生产过程,本文选择采用劳动力(l)、资本存量(k)和能源消费总量(e)作为投入要素,GDP(y)作为期望产出,CO_2 排放量(c)作为非期望产出.则广义的生产集可表示为:

$$P=\{(l,k,e)\ \text{can produce}\ (y,c)\} \tag{1}$$

为了进一步得到样本区间内各主体的效率值,本论文首先采用全域 DEA 方法来计算期望产出及非期望产出的距离函数.同时由于不同区域之间存在显著的生产技术异质性,即存在技术差距[44].因此为了有效刻画出不同城市群之间的技术差距,本文在本部分中进一步基于共同前沿分析框架来求解对应的距离函数.期望产出与非期望产出所对应的全域距离函数表示如下:

$$D_y^{G,\text{meta}}(l^t,k^t,e^t,y^t,c^t/\text{CRS})=\inf\left\{\eta:(l^t,k^t,e^t,y^t/\eta,c^t)\in P^{G,\text{meta}}\right\} \tag{2}$$

$$D_c^{G,\text{meta}}(l^t,k^t,e^t,y^t,c^t/\text{CRS})=\sup\left\{\eta:(l^t,k^t,e^t,y^t,c^t/\theta)\in P^{G,\text{meta}}\right\} \tag{3}$$

式中:t 为时间;$D_y^{G,\text{meta}}$ 和 $D_c^{G,\text{meta}}$ 分别代表在共同前沿生产技术集($P^{G,\text{meta}}$)的情况下期望产出与非期望产出所对应的全域距离函数;$P^{G,\text{meta}}=P^{1,\text{meta}}\cup P^{2,\text{meta}}\cup P^{3,\text{meta}},\ldots,P^{T,\text{meta}}$;$T$ 为整个样本周期;CRS 代表规模报酬不变;η和θ分别为所求解的距离函数的最优变量.与此同时,进一步定义:

$$D_y^{t,\text{meta}}(l^t,k^t,e^t,y^t,c^t/\text{CRS})=\inf\left\{\eta:(l^t,k^t,e^t,y^t/\eta,c^t)\in P^{t,\text{meta}}\right\} \tag{4}$$

$$D_c^{t,\text{meta}}(l^t,k^t,e^t,y^t,c^t/\text{CRS})=\sup\left\{\eta:(l^t,k^t,e^t,y^t,c^t/\theta)\in P^{t,\text{meta}}\right\} \tag{5}$$

式中:$D_y^{t,\text{meta}}$ 和 $D_c^{t,\text{meta}}$ 分别代表在共同前沿生产技术集($P^{t,\text{meta}}$)的情况下期望产出与非期望产出所对应的当期距离函数.

$$P^{t,\text{meta}}=P^{t,\text{group1}}\cup P^{t,\text{group2}}\cup P^{t,\text{group3}},\ldots,P^{t,\text{group}N} \tag{6}$$

$$D_y^{t,\text{group}}(l^t,k^t,e^t,y^t,c^t/\text{CRS})=\inf\left\{\eta:(l^t,k^t,e^t,y^t/\eta,c^t)\in P^{t,\text{group}}\right\} \tag{7}$$

$$D_c^{t,\text{group}}(l^t,k^t,e^t,y^t,c^t/\text{CRS})=\sup\left\{\eta:(l^t,k^t,e^t,y^t,c^t/\theta)\in P^{t,\text{group}}\right\} \tag{8}$$

由于共同前沿生产技术集包络所有子生产技术集,因此在时间为 t 时,$P^{t,\text{meta}}$ 可以进一步写为公式(6),其中 N 为子样本集的个数(在本文中子样本集为八大主要经济区).子样本集的距离函数可以进一步写为公式(7)和(8). $D_y^{t,\text{group}}$ 和 $D_c^{t,\text{group}}$ 分别代表在子样本生产技术集($P^{t,\text{group}}$)的情况下期望产出与非期望产出所对应的当期距离函数.

同时,为了厘清各区域的技术及效率因素,参考 Xia 等[43]和 Yu 等[44] 的做法,定义碳排放技术差距(CEG)、CO_2 排放效率(PCE)和碳减排技术水平(CRT)如公式(9)所示.其中,CEG 为不同生产技术集情景下距离函数比值,可表示为区域间 CO_2 排放技术的差距;PCE 是指在碳排放视角下的资源配置能力;而 CRT 则为碳减排技术应用水平.相似地,参考张纳军等[23]的做法,生产技术差距(PTG)、生产效率(PPE)以及生产技术(PT)的定义见公式(10),潜在碳排放强度(PCEI)的定义见公式(11).

$$\text{CEG}=\frac{D_c^{t,\text{meta}}}{D_c^{\text{t,group}}};\ \text{PCE}=D_c^{t,\text{group}};\ \text{CRT}=\frac{D_c^{G,\text{meta}}}{D_c^{t,\text{meta}}} \tag{9}$$

$$\text{PTG}=\frac{D_c^{t,\text{group}}}{D_c^{t,\text{meta}}};\ \text{PPE}=\frac{1}{D_c^{t,\text{group}}};\ \text{PT}=\frac{D_c^{t,\text{meta}}}{D_c^{G,\text{meta}}} \tag{10}$$

$$\text{PCEI}=\frac{C_{ij}^t\big/D_c^{G,\text{meta}}(l^t,k^t,e^t,y^t,c^t)}{Y_{ij}^t\big/D_y^{G,\text{meta}}(l^t,k^t,e^t,y^t,c^t)} \tag{11}$$

式中:C_{ij} 表示省份 i 城市 j 的 CO_2 排放量,Y_{ij} 表示省份 i 城市 j 的生产总值.其中,PTG 为不同生产技术集情景下距离函数比值,可表示为区域间生产技术的差距;PPE 为经济产出视角下资源配置能力;PT 为生产技术水平;PCEI 表示剔除实际技术效率影响后的“基准”碳排放强度,用来刻画生产要素配置效率对碳排放的影响潜力,即假设所有生产单元均达到最优技术效率时的碳排放强度水平.

1.2 驱动因素分解

通过构建链式分解公式,可以分解出影响人均 CO_2 排放的促进和抑制因素[5].为了有效分解各区域人均 CO_2 排放量,进一步从产业结构、技术变动与效率优化的层面获得相应驱动力因素,本节构造一个扩展的 LMDI 分解模型,如公式(12)所示.

在此需要强调的是,与已有文献主要对能源强

度进行分解的做法不同,一方面由于中国城市能源消耗数据缺乏详细的统计.同时为了直接探究生产过程中技术与效率对于区域碳不平等的影响,本文采用 PDA 方法对各地级市碳排放强度进行分解.如公式(13)所示.同时,结合式(12)与(13),可以进一步得到公式(14).

$$\mathrm{PC}_i=\frac{C_i^t}{P_i^t}=\sum_j\frac{C_{ij}^t}{Y_{ij}^t}\times\frac{Y_{ij}^t}{Y_i^t}\times\frac{Y_i^t}{P_i^t}=\sum_j\mathrm{CI}_{ij}\times\mathrm{ES}_{ij}\times\mathrm{ED}_i \quad (12)$$

式中:PC_i 为省份 i 的人均碳排放量,C_i 为省份 i 城市 j 的总碳排放量,P_i 表示省份 i 的总人口,CI_{ij} 为 t 时刻省份 i 城市 j 的碳排放强度,ES_{ij} 表示省份 i 城市 j 的 GDP 占该城市所在省份 GDP 的比重,反映出该省份的经济布局,参考 Wang 等[45]的做法,我们进一步将其定义为区域经济结构因素. ED_i 表示第 i 个省份的人均 GDP,通过这个指标反映出区域的经济发展水平.

$$\begin{aligned}\frac{C_{ij}^t}{Y_{ij}^t}=&\frac{C_{ij}^t\Big/D_c^{G,\mathrm{meta}}(l^t,k^t,e^t,y^t,c^t)}{Y_{ij}^t\Big/D_y^{G,\mathrm{meta}}(l^t,k^t,e^t,y^t,c^t)}\times\\&\frac{D_c^{G,\mathrm{meta}}(l^t,k^t,e^t,y^t,c^t)}{D_c^{t,\mathrm{meta}}(l^t,k^t,e^t,y^t,c^t)}\times\frac{D_c^{t,\mathrm{meta}}(l^t,k^t,e^t,y^t,c^t)}{D_c^{t,\mathrm{group}}(l^t,k^t,e^t,y^t,c^t)}\times\\&D_c^{t,\mathrm{group}}(l^t,k^t,e^t,y^t,c^t)\times\frac{D_y^{t,\mathrm{meta}}(l^t,k^t,e^t,y^t,c^t)}{D_y^{G,\mathrm{meta}}(l^t,k^t,e^t,y^t,c^t)}\times\\&\frac{D_y^{t,\mathrm{group}}(l^t,k^t,e^t,y^t,c^t)}{D_y^{t,\mathrm{meta}}(l^t,k^t,e^t,y^t,c^t)}\times\frac{1}{D_y^{t,\mathrm{group}}(l^t,k^t,e^t,y^t,c^t)}=\\&\mathrm{PCEI}_{ij}\times\mathrm{CRT}_{ij}\times\mathrm{CEG}_{ij}\times\mathrm{PCE}_{ij}\times\mathrm{PT}_{ij}\times\mathrm{PTG}_{ij}\times\\&\mathrm{PPE}_{ij}\end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned}\mathrm{PC}_i=&\sum_j\mathrm{PCEI}_{ij}\times\mathrm{CRT}_{ij}\times\mathrm{CEG}_{ij}\times\mathrm{PCE}_{ij}\times\\&\mathrm{PT}_{ij}\times\mathrm{PTG}_{ij}\times\mathrm{PPE}_{ij}\times\mathrm{ES}_{ij}\times\mathrm{ED}_i\end{aligned} \quad (14)$$

目前,各省份人均 CO_2 排放量可进一步从结构特征、技术进步与效率优化三个视角划分为 9 个因素.具体如图 1 所示:

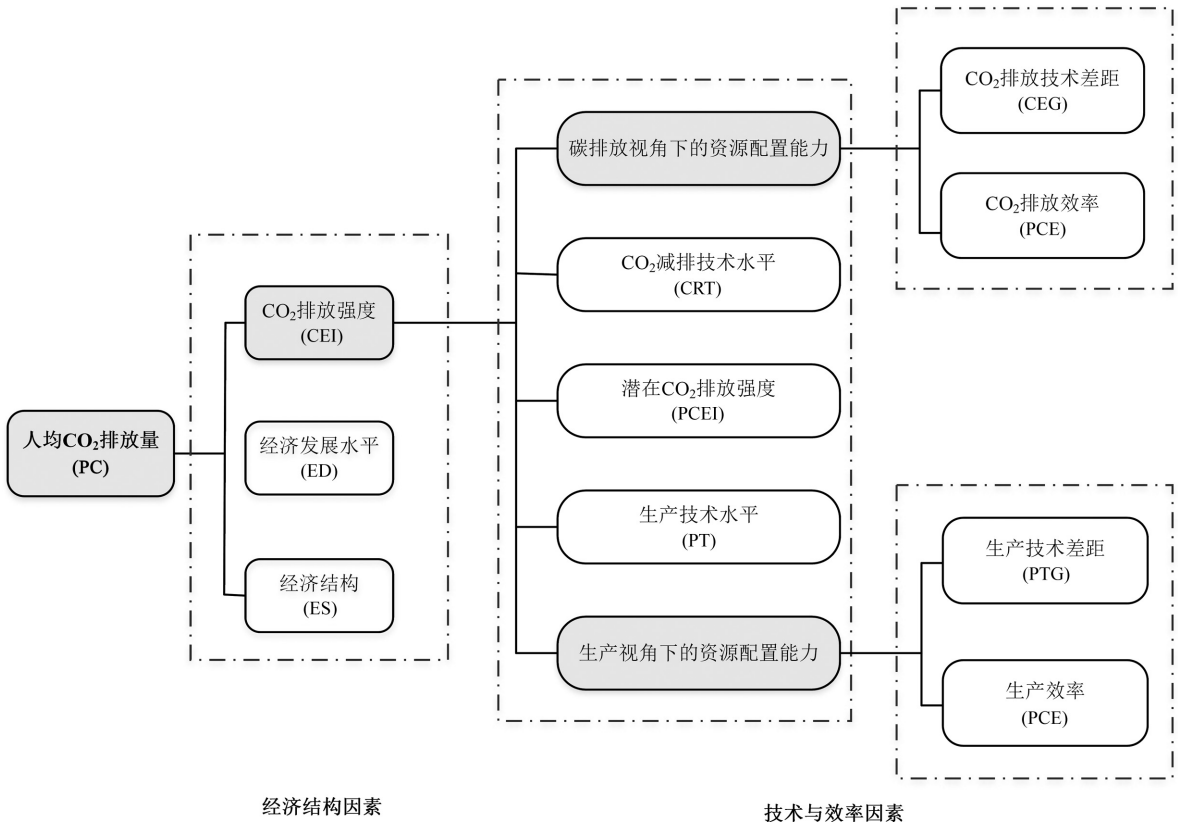


图 1　分解框架与驱动因素含义

Fig.1　Break down the framework and the implications of the driver

1.3　碳不平等指数与驱动因素

本文以人均碳排放量为基础进一步构建碳不平等评估体系.通过加权汇总各子区域与基准值之间的差距来衡量全样本层面的碳不平等程度,其公式具体如下所示:

$$I_{\mathrm{PC}}^t=\sum_i\Phi_i^t\left(\left|\mathrm{PC}_i^t-\mathrm{PC}_\mu^t\right|\right) \quad (15)$$

式中:I_{PC} 为碳不平等指数,表示中国人均碳不平等程

度;PC_i表示t时刻第i个省份的人均CO_2排放量;PC_μ表示t时刻各省份人均CO_2排放量的均值;Φ_i为权重,用t时刻第i个省份占中国GDP的比重表示.以上公式表明当I_{PC}的值越大时,表明各区域间的碳不平等程度越高,反之则碳不平等程度就越低.

为了得到影响区域碳不平等的驱动力因素,将(14)与(15)相结合,得到公式(16),基于LMDI方法,各驱动因素可以通过公式(17)计算,得到静态条件下中国人均碳不平等指数以及驱动力因素,表示为公式(18).

$$\Delta PC = PC_i - PC_\mu = \Delta PCEI + \Delta CRT + \Delta CEG + \Delta PCE + \Delta PT + \Delta PTG + \Delta PPE + \Delta ES + \Delta ED \tag{16}$$

$$\begin{cases} \Delta X_{i\mu} = \sum_j L\left(PC_{ij}^t, PC_\mu^t\right) \ln\left(\dfrac{X_{ij}^t}{X_\mu^t}\right) \\ X = PCEI, CRT, CEG, PCE, PT, PTG, PPE, ES, ED \\ \text{if } a \neq b, L(a,b) = \dfrac{a-b}{\ln a - \ln b}; a = b, L(a,b) = a \text{ or } b \end{cases} \tag{17}$$

$$I_{PC}^t = \sum_i \Phi_i \left(\left|PC_i^t - PC_\mu^t\right|\right) = I_{PCEI}^t + I_{CRT}^t + I_{CEG}^t + I_{PCE}^t + I_{PT}^t + I_{PTG}^t + I_{PPE}^t + I_{ES}^t + I_{ED}^t \tag{18}$$

式中:I_{ES}与I_{ED}为产业结构因素;I_{CRT}、I_{CEG}、I_{PT}、I_{PTG}为技术因素;I_{PCEI}、I_{PCE}、I_{PPE}为效率因素(即资源配置能力),如果I大于0,表明该因素加剧了中国的人均碳不平等特征,反之亦然.此外,为了揭示碳不平等的动态演化,进一步构造动态分解方程,见公式(19).

$$I_{PC}^t - I_{PC}^0 = (PC_i^t - PC_\mu^t) - (PC_i^0 - PC_\mu^0) = \Delta I_{PCEI} + \Delta I_{CRT} + \Delta I_{CEG} + \Delta I_{PCE} + \Delta I_{PT} + \Delta I_{PTG} + \Delta I_{PPE} + \Delta I_{ES} + \Delta I_{ED} \tag{19}$$

1.4 数据描述与处理

本研究所使用的数据涵盖了2006~2019年间中国30个省份中的273个地级市,样本期选择主要基于数据可得性(CEADs数据库更新至2019年)和典型性(覆盖工业化后期阶段), 2020年后数据因疫情扰动暂未纳入.为了进一步在分析中反映中国区域发展的差异特征并考虑技术异质性,根据中国实际发展情况及区域协调发展的相关政策文件[46],对样本城市进行划分,具体划分结果如表1所示.本文涉及变量包含地级市的劳动力人数、能源消费量、资本存量、CO_2排放量以及GDP,以及省份的GDP与常住人口.其中参考Yang等[47]和Cheng等[48]的做法,劳动力人数为城市的雇员数量.省、市两级GDP进一步用居民消费价格指数折算为2003年不变价格.基于城市年度固定资产投资数据,以2003年为基年,采用永续盘存法估算城市资本存量[48].省份人口数均为区域内年度常住人口数.而对于能源投入,考虑到数据可获得性并且确保统计范围的一致性,本文选取省际能源消耗总量(将多种能源转化为标准煤)为能源投入基础数据,并以城市全社会用电量占所属省份的比重折算为城市能源投入数据.以上相关数据来源于中国城市统计年鉴及中国统计年鉴.而城市CO_2排放数据来源于中国碳核算数据库(CEADs)[49-50].具体变量统计信息如表2所示:

表1 中国八大经济区域划分

Table 1 Table of china's eight major economic regions

序号	区域	省份
1	北部沿海地区	北京、河北、山东、天津
2	东部沿海地区	江苏、上海、浙江
3	南部沿海地区	福建、广东、海南
4	东北地区	黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古
5	西北地区	甘肃、宁夏、青海、新疆
6	西南地区	广西、贵州、四川、云南、重庆
7	黄河中游地区	河南、山西、陕西
8	长江中游地区	安徽、湖北、江西、湖南

表2 变量统计信息

Table 2 Variable statistics

变量	单位	样本数	最小值	最大值	均值	标准差
城市CO_2排放量	10^5t	3822	15.19	2801.33	300.87	313.39
城市GDP	10^9元	3822	2.98	2483.37	150.25	207.67
城市劳动力人数	10^4人	3822	7.491	1729.08	107.55	147.03
城市资本存量	10^9元	3822	19.94	7704.97	530.19	667.18
城市能源消耗量	10^5t	3822	3.32	140.97	530.19	165.56
省份人口	10^4人	420	548	12489	4505.16	2736.48
省份GDP	10^9元	420	49.76	7296.57	1400.04	1275.212

2 结果与讨论

2.1 中国国家层面碳不平等演化趋势

为了初步探究中国人均碳不平等的趋势,首先从全样本视角出发,计算了2006~2019年间中国273个城市的人均碳排放量及其统计量,结果如图2(包含人均碳排放量的均值、方差量以及核密度分布信

息)所示.其次,为了进一步分析中国整体碳不平等演化趋势,根据公式(1)~(14),进一步计算出了 2006~2019 年间的中国碳不平等指数,结果见图 3 和表 3 所示.

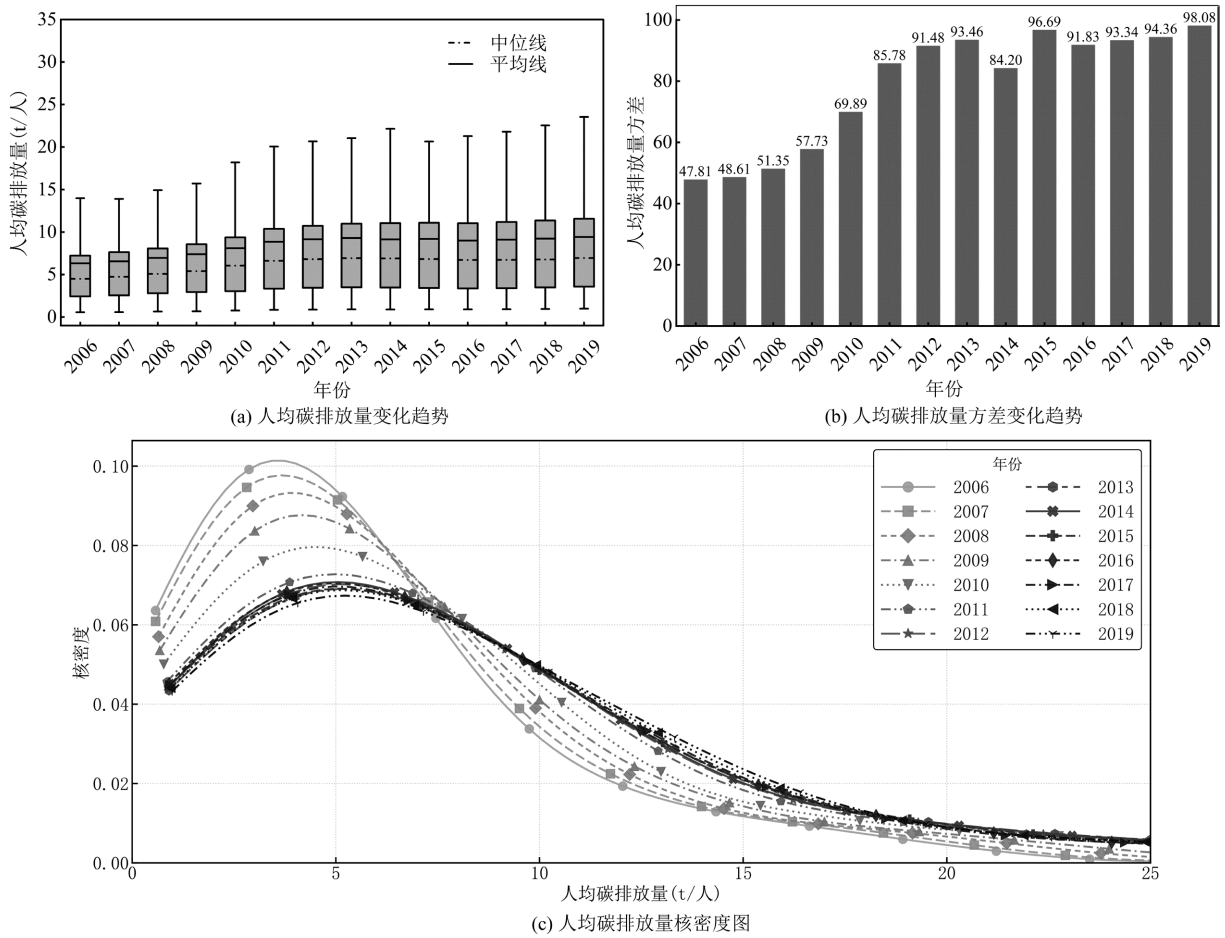


图 2　中国城市人均碳排放变动趋势

Fig.2　Trends in per capita carbon emissions in Chinese cities

如图 2(a)所示,可以发现箱型图的平均值与中位数均经历了一段时间的上升后趋于平稳,这表明中国城市的人均碳排放量自 2006~2013 年一直呈现出明显的上升趋势,2013~2019 年则处在一个较为稳定的水平.此外,在研究时期内箱型图的下界也就是城市层面最低的人均碳排放量一直维持在小于 1t 的区间里,而最高的人均碳排放量则是一直处在波动上升的过程中.与此同时,为进一步分析中国城市人均碳排放量的差异,观察数据的波动情况,计算中国 273 个地级市的人均碳排放量的方差,如图 2(b)所示.可以直观地看到除了 2014 年和 2016 年出现过两次下降之外,其余年份里中国人均碳排放量方差持续增长,表明中国城市之间人均碳排放量的差异在不断增大.以上结果初步表明中国人均碳不平等特征在不断加剧.图 2(c)展示了 2006~2019 年中国城市人均碳排放量的核密度分布.从图中可以看出,核密度曲线的形态由“高瘦”逐渐转变为“矮胖”,表明在此期间人均碳排放量的分布呈现明显的分散化趋势.具体而言,早期大部分城市的人均碳排放量集中在 4t 左右,而后期则逐渐扩散至 0~15t 的广泛区间.这一变化直观反映了中国城市间人均碳排放量差距的显著扩大,表明碳不平等程度进一步加剧.因此,缓解碳不平等现象已成为当前中国亟需解决的重要问题.

基于对人均碳排放量的初步探讨,本文进一步分析了中国整体碳不平等指数的变化情况. 根据表 3 与图 3 可以看出,中国的碳不平等水平总体呈现出先下降再上升最后波动上升的趋势,碳不平等指数从 2006 年的 15.18 上升到 2019 年的 22.59.整个中国碳不平等指数的变化呈现出 4 个阶段,从

2006~2008 年碳不平等指数呈现出明显的下降趋势,从 2006 年的 15.18 下降到了 2008 年的 14.51,而后从 2008 年开始迎来了一轮连续的上涨,一直持续到 2012 年,不平等指数达到了 19.96,在之后的年份中,碳不平等指数的波动上升经历了两次拐点,分别是在 2013 年和 2016 年,均是在经历一轮持续上升后突然下降,而后继续上升,这两轮持续上升分别是从 2013 年的 19.38 上升到 2015 年的 22.49 以及从 2016 年的 20.56 上升到 2019 年的 22.59.分析结果表明中国碳不平等指数虽然偶有下降,但总体依然呈现出上升趋势.

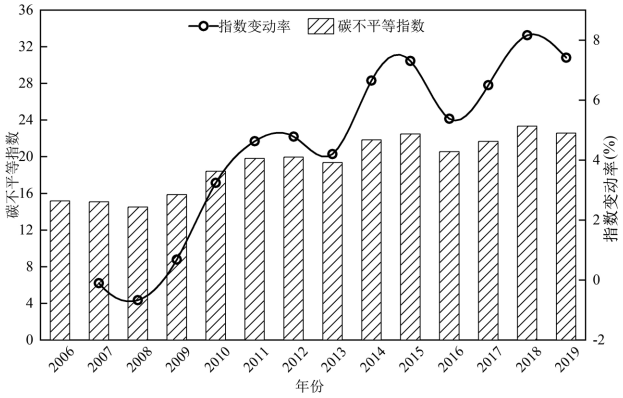


图 3 中国碳不平等指数及变化趋势

Fig.3 China's carbon inequality index and its changing trend

表 3 中国碳不平等指数静态分解结果

Table 3 Static decomposition results of China's carbon inequality index

年份	碳不平等指数	潜在碳排放强度	碳减排技术水平	碳排放技术差距	碳排放效率	生产技术	生产技术差距	生产效率	经济结构	经济发展水平
2006	15.1785	13.6861	0.0214	−0.6322	−0.1310	0.6702	−0.6328	−0.1246	2.9289	−0.6075
2007	15.0740	13.7081	0.0369	−0.6437	−0.1265	0.5726	−0.5829	−0.1229	3.0520	−0.8196
2008	14.5082	13.3483	0.0970	−0.5368	−0.1025	0.3611	−0.4982	−0.1706	2.8942	−0.8843
2009	15.8636	14.5966	0.0385	−0.5412	0.0230	0.2807	−0.5776	−0.1322	3.0045	−0.8288
2010	18.4227	17.0325	0.1307	−0.3839	−0.1231	0.1464	−0.5906	−0.1906	3.4001	−0.9988
2011	19.8122	17.9105	0.1061	0.0651	−0.5127	0.1320	−0.3035	−0.4370	4.1254	−1.2740
2012	19.9644	18.0369	0.1067	−0.0405	−0.4004	0.1032	−0.2982	−0.4712	4.1848	−1.2568
2013	19.3769	17.4537	0.1887	−0.1947	0.1907	−0.0707	−0.5243	−0.2047	3.5496	−1.0113
2014	21.8335	19.4360	0.0965	0.0606	0.0516	−0.0727	−0.5960	−0.2654	4.0731	−0.9502
2015	22.4881	19.4886	0.0767	0.1419	0.3828	−0.0609	−0.5487	−0.2419	4.1160	−0.8665
2016	20.5554	17.9957	0.1340	0.1095	0.1748	−0.0022	−0.5179	−0.2776	3.8121	−0.8729
2017	21.6798	18.7193	0.0770	0.3553	0.2349	−0.0231	−0.4923	−0.2345	3.7608	−0.7176
2018	23.3455	20.2289	0.0602	0.3724	0.1678	−0.0034	−0.5456	−0.1956	3.9948	−0.7340
2019	22.5922	19.4326	0.1011	0.3186	0.4179	0.0276	−0.5379	−0.1015	3.7676	−0.8337

从指数的变动率来看,2006~2019 年间,中国碳不平等指数的变化率呈现明显的波动特征.其中,2009~2010 年以及 2013~2014 年,变化率分别达到 16.12%和 12.67%,表明碳不平等程度在此期间显著加剧.尽管 2015~2016 年变化率下降至−8.60%,碳不平等程度有所缓解,但 2016~2018 年变化率再度转为正值,碳不平等程度重新扩大.总体来看,碳不平等指数的变化率在多个阶段呈现快速上升与短期下降交替的特征,反映了中国碳不平等问题的动态性和复杂性

2.2 碳不平等指数驱动因素

根据公式(15)~(17), 衡量中国碳不平等程度的指数分解为 9 个驱动因素.图 4 展示了研究时期内中国历年碳不平等指数中各个驱动因素的占比,各驱动因素占比的详细数值见表 3.其次,根据公式(18),从动态层面上计算出各个驱动因素随时间的变化情况,从而深入探究各因素对碳不平等指数的影响.图 5 展示了各个驱动因素对相邻年份之间碳不平等指数变动的影响程度.详细的动态分解结果见表 4.

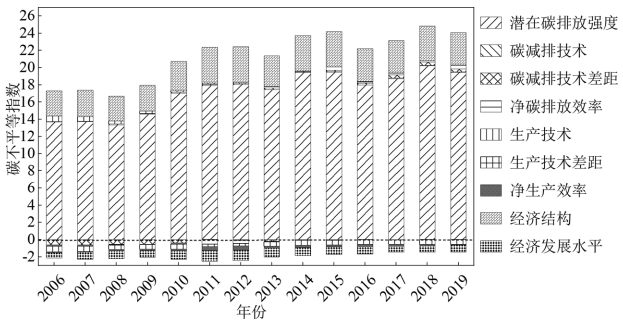


图 4 中国碳不平等指数驱动因素占比

Fig.4 Proportion of drivers of China's carbon inequality index

从图 4 可以看出,潜在碳排放强度是中国碳不

平等最重要的驱动因素,该驱动因素在 2018 年达到了最高的 20.23,在研究时期内潜在碳排放强度在中国碳不平等指数的占比均超过 85%,极大地拉大了中国的碳不平等程度.结合表 4 的详细分解结果,区域经济结构的变化会正向增加碳不平等指数,该因素对碳不平等指数的贡献集中在 3~4 之间,有极少数年份会跳出这个区间,但大部分年份集中在 4 左右,由于各个地级市占省份的 GDP 的比重存在较大差异,使得不同地级市之间的碳排放水平存在差异,增大了中国碳不平等程度,而经济发展水平的提升可以减小碳不平等指数,但减小的水平有限,绝大部分年份减小的量小于 1,分解结果显示 2011 年中国经济发展水平的提升有效地缓解了碳不平等特征,贡献份额达到了 1.27,经济发展水平越高往往意味着更高的人均 GDP,有能力负担更昂贵的低碳技术和能源替代品,有助于减小中国碳不平等的水平.其次,分解结果显示 CO_2 减排技术没有起到缓解中国碳不平等特征的作用.CO_2 排放技术差距和 CO_2 排放效率在 2013 年以前对中国碳不平等程度存在抑制作用,在 2013 年以后起开始加剧中国碳不平等水平,这表明中国 CO_2 排放技术与排放效率在 2013 年之前差距并不大,在 2013 年之后,这种差距开始增大,这可能是由于碳排放技术的进步与应用,排放效率在区域之间存在不平等,由于 CO_2 减排技术通常需要高度先进的技术和设备,实施成本较高.导致在经济相对落后的地区往往难以承担这些成本,无法采用和应用这些技术.相比之下,经济相对发达的地区或高收入家庭更有能力采用和应用这些技术,从而导致碳减排水平的不平等分布,增大中国碳不平等的水平.生产技术在 2012 年以前加剧了中国碳不平等的程度,2012 年之后开始减小碳不平等的程度,生产技术差距和生产效率两个驱动因素均起到了缩小中国碳不平等程度的作用,并且生产技术差距的缩小降低碳不平等指数的程度要大于生产效率的提高,降低幅度几乎是后者的两倍,对生产效率来说,高效的生产技术通常能够更有效地利用资源,减少能源和原材料的消耗.同时还能减少生产过程中的废物和排放物,降低碳排放.

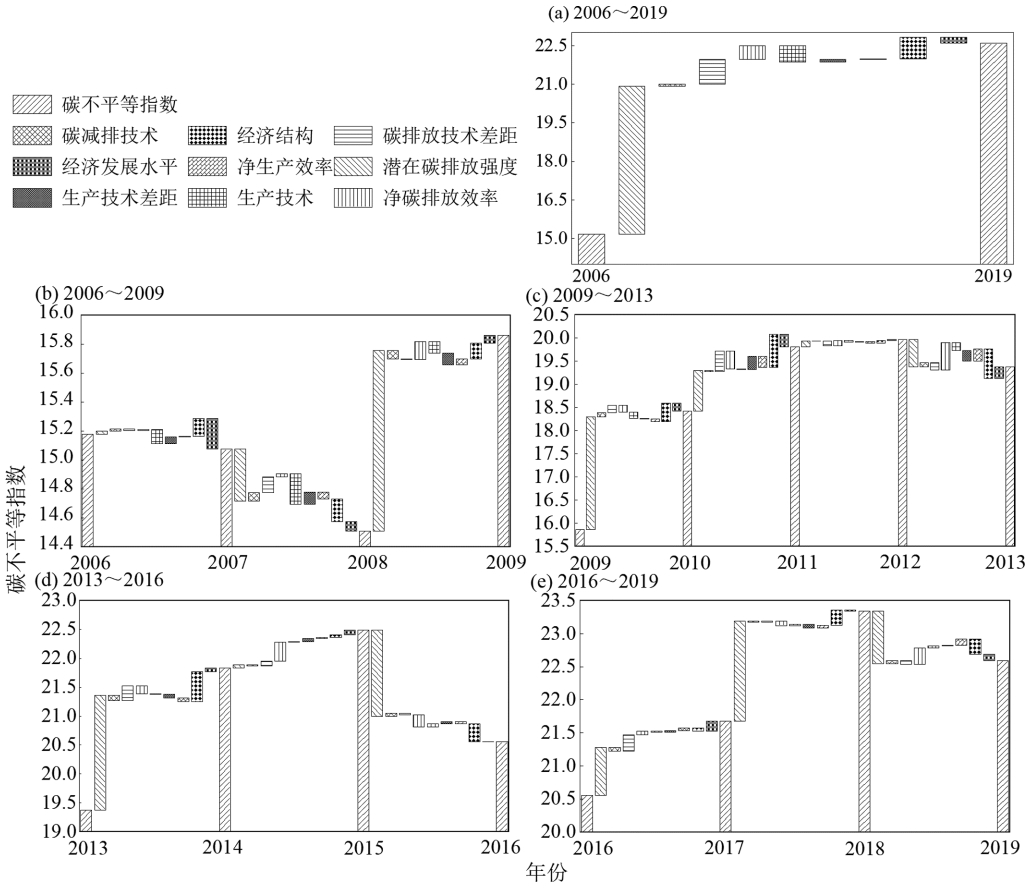


图 5　中国碳不平等指数驱动因素累计变动

Fig.5　Cumulative changes in the drivers of China's carbon inequality index

由图 5 可以发现,无论是从 2006~2019 的整体时间跨度上看,还是在相邻年份之间,潜在碳排放强度对每一年的碳不平等指数变化有着最大的影响,绝大部分时候会对碳不平等指数起正向促进作用,这种促进作用在 2009~2010 里达到了最大值为 2.44,但在 2007~2008、2012~2013、2015~2016 和 2018~2019 四年间潜在碳排放强度减小了中国碳不平等指数,减小程度最大的一年是 2015~2016,达到了 1.49.经济结构的变化在大部分时候会增大中国碳不平等指数,而经济发展水平的发展则明显的减小了各年的碳不平等指数,表明经济发展水平的提高有助于减小中国碳不平等程度,此外,生产技术的改进会减小碳不平等指数,但减小的幅度并不大,最多为 0.28.

表 4 中国碳不平等指数动态分解结果

Table 4 Dynamic decomposition results of China's carbon inequality index

年份	Δ碳不平等指数	Δ潜在碳排放强度	Δ碳减排技术水平	Δ碳排放技术差距	Δ碳排放效率	Δ生产技术水平	Δ生产技术差距	Δ生产效率	Δ经济结构	Δ经济发展水平
2006~2007	−0.1045	0.0220	0.0155	−0.0115	0.0045	−0.0977	0.0500	0.0017	0.1231	−0.2121
2006~2008	−0.6703	−0.3378	0.0756	0.0954	0.0285	−0.3091	0.1347	−0.0459	−0.0348	−0.2768
2006~2009	0.6851	0.9105	0.0171	0.0910	0.1541	−0.3895	0.0552	−0.0075	0.0756	−0.2213
2006~2010	3.2442	3.3464	0.1092	0.2483	0.0080	−0.5238	0.0423	−0.0659	0.4711	−0.3913
2006~2011	4.6337	4.2244	0.0847	0.6973	−0.3817	−0.5382	0.3294	−0.3123	1.1965	−0.6664
2006~2012	4.7859	4.3508	0.0853	0.5917	−0.2694	−0.5670	0.3346	−0.3466	1.2558	−0.6493
2006~2013	4.1985	3.7676	0.1673	0.4375	0.3217	−0.7409	0.1085	−0.0801	0.6206	−0.4038
2006~2014	6.6550	5.7499	0.0751	0.6928	0.1827	−0.7430	0.0369	−0.1408	1.1442	−0.3427
2006~2015	7.3096	5.8025	0.0553	0.7740	0.5139	−0.7311	0.0842	−0.1173	1.1871	−0.2590
2006~2016	5.3769	4.3095	0.1126	0.7417	0.3058	−0.6724	0.1149	−0.1530	0.8831	−0.2654
2006~2017	6.5013	5.0332	0.0556	0.9874	0.3659	−0.6933	0.1406	−0.1099	0.8319	−0.1101
2006~2018	8.1670	6.5428	0.0388	1.0046	0.2988	−0.6736	0.0873	−0.0710	1.0658	−0.1265
2006~2019	7.4137	5.7465	0.0797	0.9507	0.5489	−0.6426	0.0949	0.0231	0.8386	−0.2262

2.3 中国八大经济区域碳不平等变动情况及其驱动因素

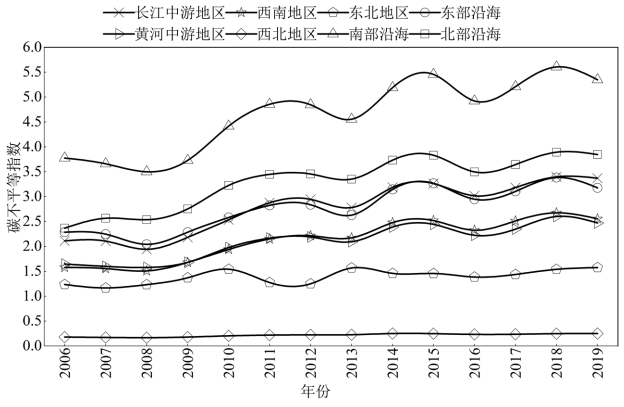


图 6 中国八大区域碳不平等指数变化趋势

Fig.6 Trends in carbon inequality indices in eight major regions in China

由图 6,八大区域的碳不平等指数均呈现出波动上升的趋势,南部沿海地区的碳不平等程度最高,碳不平等指数从 3.78 上升到了 5.35,而西北地区的人均碳排放程度最低,2006 年时仅有 0.18,尽管在研究时期内有所上升,但到 2019 年时也仅有 0.25.北部沿海地区的碳不平等指数从 2006 年的 2.37 上升到了 2019 年的 3.85,是仅次于南部沿海地区的第二大碳不平等区域,之后是东部沿海地区和长江中游地区,这两个区域的碳不平等程度较为接近,均在研究时间段内有小幅的上升,黄河中游地区和西南地区两个区域的碳不平等程度也相当接近,但碳不平等指数比前两个区域更低,东北地区是中国人均碳不平等程度第二小的区域,仅次于西北地区.

本研究不仅测算了各个区域的碳不平等指数,还分析了九大驱动因素对各区域碳不平等指数的影响,区域碳不平等指数驱动因素静态占比结果如图 7 所示.对于碳不平等程度比较高的南部沿海地区和北部沿海地区来说,潜在的碳排放强度与区域经济结构是导致区域碳不平等最重要的两个因素,位于这两个区域的省市如北京市、广东省、山东省等,其经济生产总值在中国名列前茅,但区域内部不同省份之间、省份内部的不同城市之间存在着发展的不平衡,经济发达的区域通常具有更多的工业化和生产活动,这些活

动往往会产生大量的碳排放.这两个经济水平高的区域碳不平等指数较高说明在这两个区域内部的地级市之间存在着发展上的不平衡,经济发展水平存在着较大的差距.此外,北部沿海地区比南部沿海地区的碳不平等程度更低,从驱动因素分解结果来看,北部沿海地区的CO_2减排技术在2008年以后就开始减小区域内部的碳不平等程度,而南部沿海地区的CO_2减排技术则是在2012年以后拉大区域内部的碳不平等程度,这可能是北部沿海地区内部将CO_2减排技术做了很好的普及,使得区域内部的碳排放技术差距减小,减小了城市之间的碳不平等,而南部沿海地区的 CO_2减排技术应用水平在不同地级市之间存在差距,促使该区域的碳不平等水平高于北部沿海地区.东部沿海地区与长江中游地区两个区域有着相似的碳不平等指数,观察这两大区域的驱动因素静态占比发现,东部沿海地区的潜在碳排放强度值要明显大于长江中游地区,经济发展水平这一驱动因素减小了东部沿海地区碳不平等程度,但加剧长江中游地区的碳不平等程度.黄河中游地区的CO_2减排技术因素显著缓解了区域的碳不平等程度,近年来中国政府一直在推动区域间的协调发展政府实施了一系列政策和措施,如推动清洁能源发展、鼓励绿色产业发展、实施区域协调发展战略等,有助于推广碳减排技术,减少该区域的碳排放.

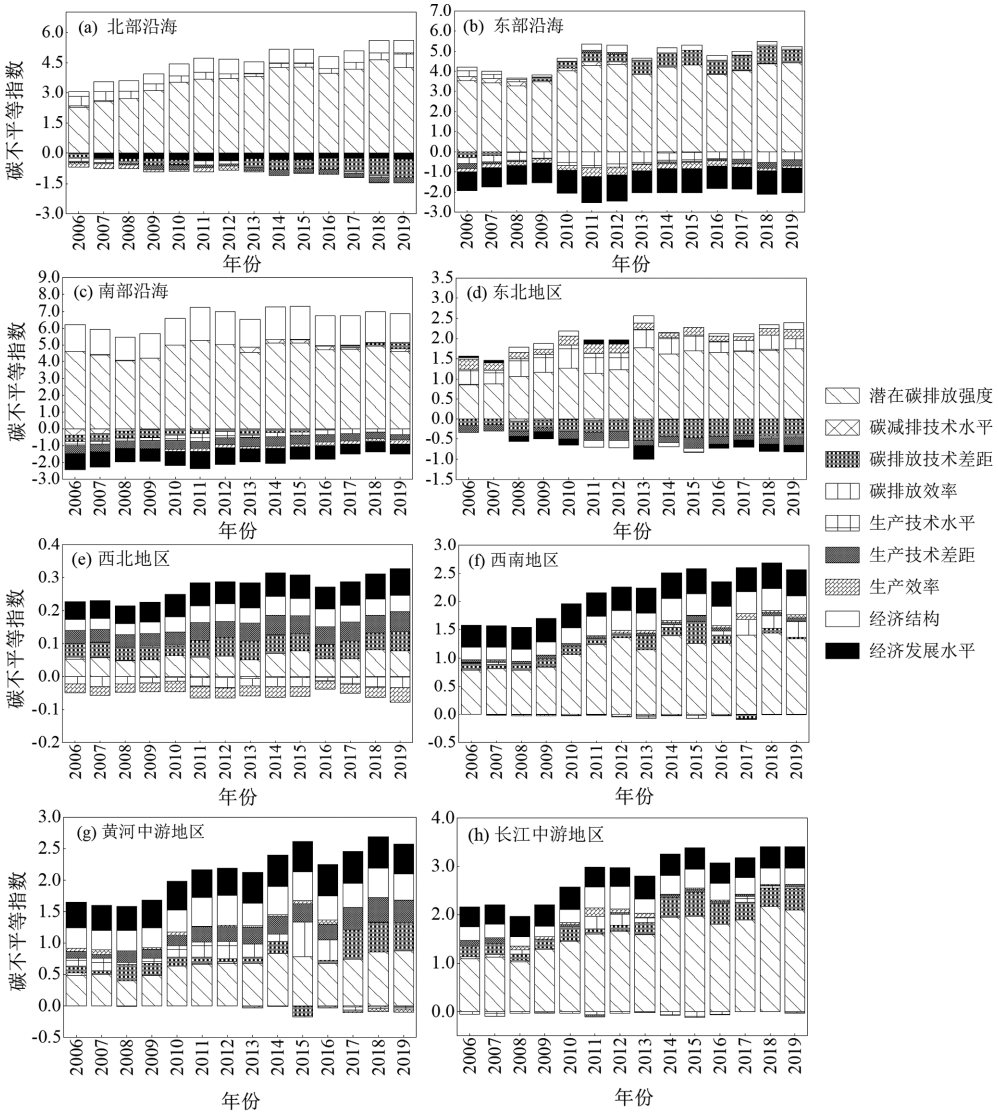


图 7　中国八大区域碳不平等指数驱动因素占比

Fig.7　Proportion of drivers of carbon inequality index in China's eight major regions

西北地区是中国碳不平等指数最低的区域,碳排放效率和生产效率的提高显著的降低了该区域

的碳不平等指数,使得西北地区的人均碳排放量保持在稳定的水平上,此外,西北地区的 CO_2 减排技术也缓解了该区域的碳不平等特征,但缓解的程度并不大.西北地区拥有丰富的可再生能源资源,如太阳能和风能等.这使得西北地区更容易实现清洁能源的开发和利用,减少对高碳能源的依赖,并且该区域地理广阔,大部分地区属于高原和沙漠地区.这些地理条件限制了人口密度和工业发展,经济结构相对简单,主要以农牧业和资源开采为主.这些行业相对于重工业和重化工业来说,碳排放相对较低,这使得西北地区的碳不平等指数保持在极低的水平.但需要注意的是经济水平的发展正在加剧西北地区的碳不平等程度,随着西北地区城市化进程的推进,人均碳排放不平等特征存在加剧的风险.东北地区的碳不平等指数仅高于西北地区,为中国第二低,根据指数分解结果来看CO_2减排技术和生产技术差距的缩小助力缓解了东北地区的碳不平等程度,而 CO_2 排放效率与生产技术水平两个因素加剧了碳不平等程度.东北地区曾是中国的传统重工业基地,但随着经济发展和环境意识的提升,该地区已经开始进行经济结构转型.政府推动了一系列政策和措施,鼓励发展清洁能源、节能环保产业和现代服务业.这些转型举措有助于减少碳排放.

3 结论

3.1 中国人均碳排放不平等特征显著且呈上升趋势,研究发现,中国人均碳排放存在明显的不平等特征,碳不平等指数从 2006 年的 15.18 波动上升至 2019 年的 22.59.尽管在 2006 年至 2008 年间有所下降,但整体呈现上升趋势,表明中国城市间的人均碳排放差距在不断扩大.

3.2 从静态层面看,潜在碳排放强度和区域经济结构的变化是导致中国整体碳不平等指数上升的主要驱动因素.具体而言,潜在碳排放强度对碳不平等的贡献最大,历年占比均超过 85%.区域经济结构的不平衡也加剧了碳不平等.而区域经济水平的发展、生产技术效率的提升以及城市间生产技术差距的缩小则有效降低了碳不平等水平.然而,CO_2 减排技术并未起到缓解碳不平等的作用,反而在 2013 年后加剧了不平等.

3.3 从动态层面看,潜在碳排放强度的波动对碳不平等指数变化的影响最大,尤其是在 2009~2010 年间,其对碳不平等的推动作用达到峰值.生产技术水平的改进和生产效率的提升有效抑制了碳不平等指数的上升,缓解了碳不平等特征.

3.4 中国八大主要经济区的碳不平等水平在样本区间呈现出异质性特征,南部沿海地区的碳不平等程度最高,指数从 2006 年的 3.78 上升至 2019 年的 5.35,北部沿海地区次之,东部沿海地区和长江中游地区的碳不平等程度较为接近,黄河中游地区和西南地区的碳不平等程度较低.碳不平等指数最低的区域是西北地区.同时,各主要经济区的不平等驱动力因素作用方向与作用强度也存在差异,但各区域内部生产技术水平的改进均显著缓解了各区域的碳不平等水平.

4 建议

4.1 建立差异化区域调控机制,针对研究揭示的南部沿海地区人均碳不平等程度最高、西北地区最低的显著区域差异,建议实施"分区施策"的精准调控.对高碳不平等区域(如南部沿海、东部沿海区域)实行碳排放配额紧缩政策,将人均碳排放基尼系数纳入地方政府考核指标;对低碳不平等区域(如西北、西南区域)实施预防性调控,在承接产业转移时设置碳不平等红线.同时建立跨区域碳补偿基金,按照各区域碳不平等指数变化率进行动态调节.

4.2 建议构建低碳技术协同创新与转移体系,研究发现减排技术的应用在某些情况下反而加剧了碳不平等,这提示我们需要建立更加有效的技术转移机制.重点支持适配性强的能效提升技术在欠发达地区的推广应用,完善技术转移的激励机制.可以考虑设立中央财政专项转移支付资金,对向中西部地区转移适用低碳技术的企业给予政策支持,确保先进低碳技术的扩散不会扩大区域人均碳排放差距.

4.3 着力推动要素市场建设.基于潜在碳排放强度对人均碳不平等指数的高贡献度这一重要发现,要缓解区域人均碳不平等,必须从要素市场改革这一根本入手.一方面需要推进要素市场一体化,进一步推动要素自由流动;另一方面需要针对不同地区的发展阶段,设计差异化的要素配置优化策略.特别是对欠发达地区,应着力提升其资本积累水平和人力资本质量,为其创造更多要素替代的可能性空间.

4.4　建议健全人均碳不平等治理的长效机制.这包括将人均碳不平等指标纳入国家生态环境监测体系,建立完善的统计核算和报告制度;加强法治保障,推动将人均碳平等原则纳入相关法律法规;建立政府、企业、公众共同参与的多元共治机制,完善信息公开制度,保障公众知情权和监督权.

参考文献：

[1] 周曙东,雷会妨,葛继红,等.“双碳”背景下中国能源结构转型的碳减排潜力及宏观经济影响 [J]. 中国人口·资源与环境, 2024,34(12):55-63.
Zhou S D, Lei H F, Ge J H, et al. Carbon emission reduction potential and macroeconomic impact of China's energy structure transition under the "dual carbon" goals [J]. China Population, Resources and Environment, 2024,34(12):55-63.

[2] 张沈习,王丹阳,程浩忠,等.“双碳”目标下低碳综合能源系统规划关键技术及挑战 [J]. 电力系统自动化, 2022,46(8):189-207.
Zhang S X, Wang D Y, Cheng H Z, et al. Key technologies and challenges of low-carbon integrated energy system planning under "dual carbon" goals [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022,46(8):189-207.

[3] 林伯强.碳中和进程中的中国经济高质量增长 [J]. 经济研究, 2022,57(1):56-71.
Lin B Q. High-quality economic growth of china in the carbon neutrality process [J]. Economic Research Journal, 2022,57(1):56-71.

[4] 王　迪,聂　锐,王胜洲.中国二氧化碳排放区域不平等的测度与分解——基于人际公平的视角 [J]. 科学学研究, 2012,30(11):1662-1670,1661.
Wang D, Nie R, Wang S Z. Measurement and decomposition of regional inequality of CO_2 emissions in China: A perspective of interpersonal equity [J]. Studies in Science of Science, 2012,30(11):1662-1670,1661.

[5] 陈　瑶,许　敏.碳排放视角下我国城市群环境公平状况及关键要素分析——以长三角城市群为例 [J]. 学习与探索, 2023,(4):119-127.
Chen Y, Xu M. Environmental equity and key factors analysis of urban agglomerations in china from carbon emission perspective: a case study of yangtze river delta urban agglomeration [J]. Study & Exploration, 2023,(4):119-127.

[6] 张卓群,张　涛,冯冬发.中国碳排放强度的区域差异、动态演进及收敛性研究 [J]. 数量经济技术经济研究, 2022,39(4):67-87.
Zhang Z Q, Zhang T, Feng D F. Regional differences, dynamic evolution and convergence of carbon emission intensity in china [J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2022,39(4):67-87.

[7] 李祎雯,班晴晴,张　兵.长江经济带省际贸易碳不平等:要素禀赋结构驱动的视角 [J]. 江海学刊, 2024,(1):100-106,255.
Li Y W, Ban Q Q, Zhang B. Carbon inequality in interprovincial trade of yangtze river economic belt: a factor endowment structure-driven perspective [J]. Jianghai Academic Journal, 2024,(1):100-106,255.

[8] 薄　凡,庄贵阳.“低碳+”战略引领新时代绿色转型发展的方向和路径 [J]. 企业经济, 2018,(1):19-23.
Bo F, Zhuang G Y. "Low carbon plus" strategy leads the direction and path of green transformation development in the new era [J]. Enterprise Economy, 2018,(1):19-23.

[9] Liu J Y, Feng C. Marginal abatement costs of carbon dioxide emissions and its influencing factors: A global perspective [J]. Journal of Cleaner Production, 2018,170:1433-1450.

[10] Tian Y, Pang J. Promoting the achievement of carbon neutrality targets: systematic review of research dimensions and measure methods on carbon equity in china [J]. Environmental Science & Technology, 2024,58(23):9912-9924.

[11] 何　淼,张　阳,栾韶涵,等.基于 LMDI-Tapio-GA-BP 的中国城乡居民消费碳排放分析 [J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2024,56(6):1-16.
He M, Zhang Y, Luan S H, et al. Analysis of carbon emissions from urban and rural residential consumption in china based on lmdi-tapio-ga-bp [J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2024,56(6):1-16.

[12] 刘　波.国际碳平等的内涵、测度和事实——基于 1850~2022 年数据的历史分析 [J]. 消费经济, 2024,40(6):25-36.
Liu B. Connotation, measurement and facts of international carbon equity: a historical analysis based on data from 1850 to 2022 [J]. Consumer Economics, 2024,40(6):25-36.

[13] 马晓微,陈丹妮,兰静可,等.收入差距与居民消费碳排放关系 [J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2019,21(6):1-9.
Ma X W, Chen D N, Lan J K, et al. Relationship between income gap and household carbon emissions [J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2019,21(6):1-9.

[14] Hedenus F, Azar C. Estimates of trends in global income and resource inequalities [J]. Ecological Economics, 2005,55(3):351-364.

[15] 钱　宇,浦正宁.数字技术创新能否缩小市域内碳不平等？[J]. 中国人口·资源与环境, 2024,34(12):64-74.
Qian Y, Pu Z N. Can digital technology innovation narrow intra-city carbon inequality? [J]. China Population, Resources and Environment, 2024,34(12):64-74.

[16] 万伦来,孙　博,任雪萍.中国省际碳排放公平性的测度与分解 [J]. 经济学动态, 2014,(12):53-60.
Wan L L, Sun B, Ren X P. Measurement and decomposition of interprovincial carbon emission equity in china [J]. Economic Perspectives, 2014,(12):53-60.

[17] 王　青,傅莉媛,孙海添.中国工业生产能源消费碳排放的区域差异、动态演进与影响因素 [J]. 资源科学, 2023,45(6):1239-1254.
Wang Q, Fu L Y, Sun H T. Regional differences, dynamic evolution and influencing factors of carbon emissions from industrial energy consumption in China [J]. Resources Science, 2023,45(6):1239-1254.

[18] 刘元欣,贺　铄,江雅婧,等.中国四大城市群碳排放驱动因素时空分解研究 [J]. 气候变化研究进展, 2024,20(2):231-241.
Liu Y X, He S, Jiang Y J, et al. Spatiotemporal decomposition of driving factors of carbon emissions in China's four major urban agglomerations [J]. Climate Change Research, 2024,20(2):231-241.

[19] 李江龙,孙士强,林伯强.工业化进程与碳排放变迁:国际经验及对实现“双碳”目标的启示 [J]. 中国经济学, 2024,(3):39-80,323-326.
Li J L, Sun S Q, Lin B Q. Industrialization process and carbon emission transition: International experience and implications for achieving "dual carbon" goals [J]. China Economic Quarterly, 2024,(3):39-80,323-326.

[20] 安庆贤,邹雨晴,熊贝贝.基于 PDA-IDA 分解法的碳强度影响因素研究 [J]. 运筹与管理, 2023,32(4):140-146.
An Q X, Zou Y Q, Xiong B B. Research on influencing factors of carbon intensity based on PDA-IDA decomposition method [J]. Operations Research and Management Science, 2023,32(4):140-146.

[21] Lin B, Zhu J, Determinants of renewable energy technological innovation in China under CO_2 emissions constraint [J]. Journal of Environmental Management, 2019,247:662-671.

[22] Zha D, Yang G, Wang Q, Investigating the driving factors of regional CO_2 emissions in China using the IDA-PDA-MMI method [J]. Energy Economics, 2019,84:104521.

[23] 张纳军,程郁泰,肖红叶.我国碳排放因素时变分解分析——基于生产理论分解分析模型的研究 [J]. 江西财经大学学报, 2018,(3):23-30.
Zhang N J, Cheng Y T, Xiao H Y. Time-varying decomposition analysis of carbon emission factors in China: A study based on production-theoretical decomposition analysis model [J]. Journal of Jiangxi University of Finance and Economics, 2018,(3):23-30.

[24] 王　佳,杨　俊.中国地区碳排放强度差异成因研究——基于 Shapley 值分解方法 [J]. 资源科学, 2014,36(3):557-566.

Wang J, Yang J. Research on the causes of regional carbon emission intensity differences in china—based on the shapley value decomposition method [J]. Resources Science, 2014,36(3):557-566.

[25] 郭文强,史瑞雪,雷 明,等.中国省际碳排放空间关联网络结构特征及碳平衡分区 [J]. 生态学报, 2024,44(18):8003-8020.
Guo W Q, Shi R X, Lei M, et al. Structural characteristics of interprovincial carbon emission spatial correlation network and carbon balance zoning in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(18):8003-8020.

[26] Tian Y, Pang J. Revealing the coupling coordination mechanisms between carbon efficiency and carbon equity: the evidence in china's interprovincial trade [J]. Environmental Science & Technology, 2025, 59(27):13705-13718.

[27] 杨春蕾,佟继英.工业智能化与全球碳减排 [J]. 经济经纬, 2024, 41(1):110-119.
Yang C L, Tong J Y. Industrial intelligence and global carbon emission reduction [J]. Economic Survey, 2024,41(1):110-119.

[28] 马 艳,李 真.国际贸易中的"碳"不平等交换理论与实证分析 [J]. 学术月刊, 2010,42(7):69-73,77.
Ma Y, Li Z. Theoretical and empirical analysis of "carbon" unequal exchange in international trade [J]. Academic Monthly, 2010,42(7): 69-73,77.

[29] 滕王滕菲,冯套柱,郭道燕.西北地区碳排放的驱动因素与脱钩效应研究 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2023,59(2):260-268.
Teng W T F, Feng T Z, Guo D Y. Driving factors and decoupling effects of carbon emissions in Northwest China [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2023,59(2):260-268.

[30] 任洪杰,李辉尚,冯祎宇.基于时空视角的广东省农业碳排放动态演化特征及发展趋势研究 [J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(8):1287-1300.
Ren H J, Li H S, Feng Y Y. Dynamic evolution characteristics and development trends of agricultural carbon emissions in Guangdong Province from spatiotemporal perspective [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023,31(8):1287-1300.

[31] 赵鹏程,丁晓欣,王 群.建筑业碳排放测算及影响因素研究——以东北三省为例 [J]. 吉林建筑大学学报, 2023,40(4):58-64.
Zhao P C, Ding X X, Wang Q. Measurement and influencing factors of carbon emissions in construction industry: A case study of three northeastern provinces [J]. Journal of Jilin Jianzhu University, 2023, 40(4):58-64.

[32] 束克东,李 影.基于城镇化视角的收入不平等对CO_2排放的影响研究 [J]. 经济经纬, 2020,37(1):25-31.
Shu K D, Li Y. Impact of income inequality on CO_2 emissions from urbanization perspective [J]. Economic Survey, 2020,37(1):25-31.

[33] 杨艳芳,郑海霞.基于公平性原则的区域碳排放空间分配研究综述 [J]. 资源开发与市场, 2016,32(7):802-807.
Yang Y F, Zheng H X. Review on spatial allocation of regional carbon emissions based on equity principle [J]. Resource Development & Market, 2016,32(7):802-807.

[34] 欧阳强,廖盛华,李祝平,等.收入不平等、经济增长与碳排放关系的非线性 [J]. 系统工程, 2016,34(5):90-96.
Ouyang Q, Liao S H, Li Z P, et al. Nonlinear relationship among income inequality, economic growth and carbon emissions [J]. Systems Engineering, 2016,34(5):90-96.

[35] 孙 巍,夏海利.收入分布、环境政策与清洁技术转型 [J]. 数量经济技术经济研究, 2023,40(10):115-136.
Sun W, Xia H L. Income distribution, environmental policy and clean technology transition [J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2023,40(10):115-136.

[36] 陈 伟,洪静兰,李照令,等.2011~2020 年中国大豆生产碳排放效率时空演变及影响因素 [J]. 中国人口·资源与环境, 2024,34(2):70-80.
Chen W, Hong J L, Li Z L, et al. Spatiotemporal evolution and influencing factors of carbon emission efficiency in soybean production in China from 2011 to 2020 [J]. China Population, Resources and Environment, 2024,34(2):70-80.

[37] Wu D, Yuan L, Li R, et al. Decomposing inequality in research funding by university-institute sub-group: A three-stage nested Theil index [J]. Journal of Informetrics, 2018,12(4):1312-1326.

[38] Bolea L, Duarte R, Sánchez-Chóliz J. Exploring carbon emissions and international inequality in a globalized world: A multiregional- multisectoral perspective [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020,152.

[39] Yang J, Cheng J X, Huang S J. CO_2 emissions performance and reduction potential in China's manufacturing industry: A multi-hierarchy meta-frontier approach [J]. Journal of Cleaner Production, 2020,255:120226.

[40] 邵 帅,范美婷,杨莉莉.经济结构调整、绿色技术进步与中国低碳转型发展——基于总体技术前沿和空间溢出效应视角的经验考察 [J]. 管理世界, 2022,38(2):46-69,4-10.
Shao S, Fan M T, Yang L L. Economic restructuring, green technological progress, and China's low-carbon transition development: An empirical investigation based on the perspectives of overall technological frontier and spatial spillover effects [J]. Management World, 2022,38(2):46-69,4-10.

[41] 薛 媛,李春华,李静雯,等.中国农业碳排放时空特征及驱动因素分析 [J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024,32(11):1805-1817.
Xue Y, Li C H, Li J W, et al. Spatiotemporal characteristics and driving factors of agricultural carbon emissions in China [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024,32(11):1805-1817.

[42] 李振冉,宋 妍,岳 倩,等.基于 SFA-CKC 模型评估中国碳排放效率 [J]. 中国人口·资源与环境, 2023,33(4):46-55.
Li Z R, Song Y, Yue Q, et al. Evaluation of China's carbon emission efficiency based on SFA-CKC model [J]. China Population, Resources and Environment, 2023,33(4):46-55.

[43] Xia Y S, Sun L X, Feng C. What causes spatial inequalities of low-carbon development in China's transport sector? A newly proposed meta-frontier DEA-based decomposition approach [J]. Socio-Economic Planning Sciences, 2022,80:101151.

[44] Yu J Q, Zhou K L, Yang S L. Regional heterogeneity of China's energy efficiency in "new normal": A meta-frontier Super-SBM analysis [J]. Energy Policy, 2019,134(Nov.):110941.1-110941.13.

[45] Wang M, Feng C. Towards a decoupling between economic expansion and carbon dioxide emissions in resources sector: A case study of China's 29non-ferrous metal industries [J]. Resources Policy, 2021,74.

[46] 高 赢.中国八大综合经济区绿色发展绩效及其影响因素研究 [J]. 数量经济技术经济研究, 2019,36(9):3-23.
Gao Y. Research on green development performance and its influencing factors in China's eight comprehensive economic zones [J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2019,36(9):3-23.

[47] Yang J, Hao Y, Feng C. A race between economic growth and carbon emissions: What play important roles towards global low-carbon development? [J]. Energy Economics, 2021,100:105327.

[48] Cheng J X, Xu L, Wang H X, et al. How does the marginal abatement cost of CO_2 emissions evolve in Chinese cities? An analysis fromthe perspective of urban agglomerations [J]. Sustainable Production and Consumption, 2022,32:147-159.

[49] Shan Y L, Guan Y R, Hang Y, et al. City-level emission peak and drivers in China [J]. Science Bulletin, 2022,67(18):1910-1920.

[50] Shan Y L, Guan D B, Hubacek K, et al. City-level climate change mitigation in China [J]. Science Advances, 2018,4(6):eaaq0390.

作者简介： 程继鑫(1992-),男,云南昆明人,讲师,博士,主要研究方向为资源环境经济、区域低碳转型与均衡发展.发表论文 10 余篇.chengjixin127@126.com.