

中国能源行业碳排放强度下降过程中的 省际减排成效评价

崔盼盼¹, 赵媛^{1,2,3}, 郝丽莎^{1,3}, 夏四友^{4,5}, 许昕^{1,3}, 唐文敏^{1,3}

(1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023; 2. 南京师范大学金陵女子学院, 南京 210097;
3. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023; 4. 中国科学院地理科学与资源研究所/可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101; 5. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 采用矫正系数衡量各省份的减排有效性, 根据各省份能源行业碳排放强度及产值份额构建自上而下的全国能源行业碳排放强度恒等式, 运用LMDI-I分解方法获取各省份、各省份能源行业碳排放强度及产值份额对全国能源行业碳排放强度下降的贡献率, 并遵循“减排有效性-碳排放强度贡献-省份综合贡献-减排有效性与省份综合贡献关系”的思路对中国能源行业碳排放强度下降过程中各省份的减排成效进行评价。结果显示: ① 中国能源行业碳排放强度呈逐年下降趋势, 2016年能源行业碳排放强度较2005年下降45%。② 超过一半的省份为减排有效区且数量呈增加趋势, 而减排未达标的省份多数为经济欠发达地区, 各省份间的减排路径存在显著差异。③ 多数省份能源行业碳排放强度的贡献率呈上升趋势, 省份差异逐渐缩小。④ 省份减排综合贡献的进位赶超势头强劲, 绝大多数省份对全国能源行业碳排放强度的下降作出了贡献, 且多个省份的综合贡献等级呈正向发展, 东部地区是主要的减排贡献区。⑤ 减排成效良好省份数量最多, 中等区多散布于东部沿海地区及少数内陆地区, 欠佳区在西部地区空间格局保持相对稳定。未来各省份不仅要根据自身的减排成效特征因地制宜的选择低碳发展道路, 还应与全国碳排放强度的下降形成良性互动。

关键词: 能源行业; 碳排放强度; 减排成效; 减排有效性; 省份综合贡献

DOI: 10.11821/dljy020190688

1 引言

在2009年底哥本哈根气候变化大会上, 中国向世界庄重承诺“到2020年中国单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降40%~45%”。该承诺是中国应对气候变化的重大战略, 也是转变经济发展方式、调整经济结构的重大机遇。中国将碳减排目标纳入发展规划与政策制定中, 展现出了推进可持续发展和绿色低碳转型的决心, 但作为世界上最大的发展中国家, 中国正处于城镇化与工业化快速发展的阶段, 面临着能源的刚性需求及相应的温室气体排放空间需求, 因此目前只能进行相对减排, 即在设定碳减排目标时采取了具有“软性”特征的碳排放强度指标, 该指标不仅能衡量碳排放下降潜能也能反映出经济增长的质量, 同时也说明碳减排是与能源消费总量、能源消费结构及经济增长

收稿日期: 2019-08-15; 修订日期: 2019-10-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971248); 国家自然科学基金重点项目(41430635); 国家社会科学基金项目(18BRK031)

作者简介: 崔盼盼(1990-), 女, 河南焦作人, 博士研究生, 研究方向为区域可持续发展研究。

E-mail: cuipan 3353@163.com

通信作者: 赵媛(1963-), 女, 江苏南京人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事能源经济与区域可持续发展研究。E-mail: zhaoyuan@njnu.edu.cn

相关的问题。

在促进全国碳排放强度下降的研究中,一方面注重碳减排责任的区域分摊^[1-5],另一方面关注各省份自身碳排放强度的下降^[6-11],二者均为减排达标提供了有效路径,同时也说明中国近年来在能源碳减排领域做出了有益尝试与不懈努力,但目前已处于2020年碳排放强度目标的后期阶段,如何从省份贡献的角度全面认识及合理评估各省份的减排成效,进而找到合理的减排调整路径,显然成为需要研究的迫切现实问题,即需回答减排期间各省份碳排放强度下降的程度是否达标?各省份对国家碳排放强的降低是否做出贡献?贡献值是多少?在未来碳减排实施过程中各省份该如何调整定位等问题。这些问题的解答不仅有利于从宏观上监测和把握全国碳排放强度目标的实现进度,也为合理调整区域低碳发展路径,进而更好更快地实现2030年碳减排目标提供了基础。

然而,关于碳减排成效的相关研究,目前学者主要集中于对碳减排效果、碳减排效率、碳减排收益、碳减排状态及碳减排政策的分析。从碳减排效果的角度,对碳排放总量^[12-14]、碳排放结构^[15-17]、碳排放增长量^[18,19]等指标进行分析,从而反映碳减排的规模、结构及变化趋势;从碳减排效率的角度,采用单一指标法如碳生产效率^[20-22]、碳指数^[23]及综合指标^[24-27]对碳排放效率进行测算,进而评估碳减排绩效、减排潜力;从碳减排收益的角度,应用专家型的减排成本曲线、模型推导的减排成本曲线和基于生产理论推导出的成本函数、距离函数等对边际减排成本进行衡量,以反映碳减排的经济损失或收益情况^[28,29];从碳减排状态的角度,运用脱钩指数、环境库兹涅茨曲线等分析碳排放对经济发展的依赖程度^[30,31];从碳减排政策的角度,运用CGE、EMRICES等集成评估模型对减排政策变动下的减排成效进行评价^[32,33]。以上研究从不同侧面考评了碳减排成效,有助于引导、控制各减排主体的碳减排行为,也为对接国家、区域等多层面的碳减排考核目标提供了依据,但其均未关注各省份在促进全国碳排放强度下降过程中碳排放强度下降的有效性及各省份综合贡献水平。此外,中国碳排放主要来源于能源行业,且具有数据可获性强的优点,因此在研究中学者多以能源行业碳排放为对象进行分析。

鉴于此,本文选取2005—2016年能源行业的耗能数据,采用矫正系数、LMDI-I数量加法模型分别测度促进全国能源行业碳排放强度下降过程中各省份能源行业碳排放强度下降的有效性、贡献率和省份综合贡献率,其中有效性指某省份能源行业碳排放强度下降幅度是否大于全国能源行业碳排放强度的下降幅度,省份碳排放强度贡献率指某省份能源行业碳排放强度下降对促进全国能源行业碳排放强度下降的贡献率,而省份综合贡献率指在综合考虑省份碳排放强度与其他经济社会因子后省份对促进全国碳排放强度下降的贡献率。并遵循“减排有效性-碳排放强度贡献-省份综合贡献-减排有效性与省份综合贡献关系”的思路对中国能源行业碳排放强度下降过程中各省份的减排成效进行评价,并在减排成效评价的基础上进一步划分减排成效类型及提出相应建议,以期为未来碳减排工作的开展与省份减排政策的制定提供科学支撑。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 研究方法

2.1.1 能源行业碳排放强度测算 参考相关文献^[16,34,35],选取煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气8种化石能源消耗,并基于2006年《IPCC国家温室气体清单编制指南》中提供的缺省值和计算方法^[36]进行碳排放测算。其计算公式具体如下:

$$C_i = \sum_{j=1}^8 E_{ij} \times \beta_j \quad (1)$$

式中： C_i 为*i*省份的CO₂排放量， $i=1, 2, \dots, 30$ ，单位为万tCO₂； E_{ij} 为*i*省份第*j*种能源的消耗量， $j=1, 2, \dots, 8$ ，单位为万t； β_j 为*j*种能源的CO₂排放系数。全国、各省份的能源行业碳排放强度用相应的CO₂总量与GDP的比值表示，单位为tCO₂/万元，其中GDP用地区生产总值指数换算成以2005年为基期的可比价地区生产总值。

2.1.2 减排有效性测度 中国碳减排目标的实现需要各省份的共同努力，但差异化的区域条件、区域发展阶段与水平致使各省份减排潜能存在空间分异。此外，低碳发展作为一个循序渐进的过程，“一刀切”式的要求所有省份达到相同的某一绝对水平会产生资源错配、干预低效等问题，因此应以公平原则为基础强调碳排放水平下降的幅度，从而保证中国区域碳减排政策的有效性。根据此思路，并假设中国能源行业碳排放强度减排目标与2020年中国碳排放强度目标一致，本文通过构建能够衡量省份能源行业碳排放强度下降幅度是否高于全国平均水平的修正系数指标 cc_i 来定量考核与评价各省份能源行业碳排放强度削减的有效性^[37]，计算步骤如下：

$$r = \frac{\Delta IR_t}{IR_0} \quad (2)$$

式中： r 为全国能源行业碳排放强度平均下降率； ΔIR_t 为从基期 $t=0$ 到报告期 t 的全 国能源行业平均碳排放强度变化量； IR_0 为基期 $t=0$ 时的全国能源行业平均碳排放强度。

$$\Delta IR_{it} = r \times I_{i0} \quad (3)$$

式中：假设每个省份与全国有相同的能源行业碳排放强度下降率； ΔIR_{it} 为*i*省份相对于基期 $t=0$ 能源行业碳排放强度的参考下降值； I_{i0} 为基期 $t=0$ 时*i*省份的能源行业碳排放强度。

$$cc_i = \frac{\Delta I_{it}}{\Delta IR_{it}} \quad (4)$$

式中： cc_i 为*i*省份的修正系数； ΔI_{it} 为*i*省份基期 $t=0$ 到报告期 t 的能源行业碳排放强度实际变化量。

当 $cc_i \geq 1$ 时，*i*省份的能源行业碳排放强度下降量高于或等于计算出来的参考下降量 ΔIR_{it} ，即与全国平均水平相比，*i*省份在降低碳排强度方面更有效，实现了省份控排目标，此时*i*省份为减排有效区；当 $0 \leq cc_i < 1$ 时，*i*省份能源行业碳排放强度下降率低于全国平均水平，未能实现省份控排目标，此时*i*省份为减排未达标区；当 $cc_i < 0$ 时，*i*省份能源行业碳排放强度变化与全国变化情况呈现相反方向，此时*i*省份也为减排未达标区，且减排有效性最差。

2.1.3 省份能源行业碳排放强度贡献及综合贡献测度 全国能源行业碳强度的变化不仅取决于各省份能源行业碳排放强度变化，同时还受其经济社会发展状况的综合影响。因此参考相关文献将各省份能源行业碳排放强度与产值份额纳入LMDI-I模型进行两因素分解测算省份各因素对全国能源行业碳排放强度下降的贡献及省份的综合贡献^[38,39]。根据Ang的研究选取分解模型。Ang指出当分解对象具有层级特性时应采用LMDI-I方法中的模型1和模型2^[40]，为了简化模型，选取模型1，即LMDI-I中的数量加法模型（表1）。

2.2 数据来源

本文以中国碳排放强度目标中的基期2005年为起点，以2005—2016年中国30个省份为时空尺度，选取的8种化石能源消耗数据来源于《中国能源统计年鉴》，各省份地区生产总值及地区生产指数数据来源于《中国统计年鉴》。由于西藏自治区、香港特别行政区、澳门特别行政区、台湾省相关数据无法获取，因此不在本文的研究范围内。

表1 中国能源行业碳排放强度的LMDI-I数量加法分解模型

Tab. 1 The decomposition of China's energy industry carbon emission intensity by LMDI-I quantitative addition model

变量名称	公式	解释
恒等式	$CI = \frac{C}{Q} = \sum_{i=1}^{30} \frac{C_i}{Q} = \sum_{i=1}^{30} \frac{C_i}{Q_i} \frac{Q_i}{Q} = \sum_{i=1}^{30} CI_i OS_i$	CI 为中国能源行业碳排放强度； C 为中国能源行业碳排放量； Q 为国内生产总值； Q_i 为 <i>i</i> 省份地区生产总值； CI_i 为 <i>i</i> 省份能源行业碳排放强度； OS_i 为 <i>i</i> 省份产值份额，即 <i>i</i> 省份地区生产总值与国内生产总值的比值
ΔCI	$\Delta CI = CI_t - CI_0 = \sum_{i=1}^{30} \Delta CI_i + \sum_{i=1}^{30} \Delta OS_i$	ΔCI 为 <i>t</i> 年间中国能源行业碳排放强度的变化； CI_t 和 CI_0 分别为中国基期和报告期的能源行业碳排放强度
ΔCI_i	$\Delta CI_i = \bar{W}_i \ln \frac{CI_{it}}{CI_{i0}}$	ΔCI_i 为 <i>i</i> 省份能源行业碳排放强度效应； CI_{it} 、 CI_{i0} 分别为 <i>i</i> 省份报告期和基期的能源行业碳排放强度
ΔOS_i	$\Delta OS_i = \bar{W}_i \ln \frac{OS_{it}}{OS_{i0}}$	ΔOS_i 为 <i>i</i> 省份产值份额效应； OS_{it} 、 OS_{i0} 分别为 <i>i</i> 省份报告期和基期产值份额
\bar{W}_i	$\bar{W}_i = \frac{CI_{it} - CI_{i0}}{\ln(CI_{it}) - \ln(CI_{i0})}$	\bar{W}_i 为 <i>i</i> 省份的权重

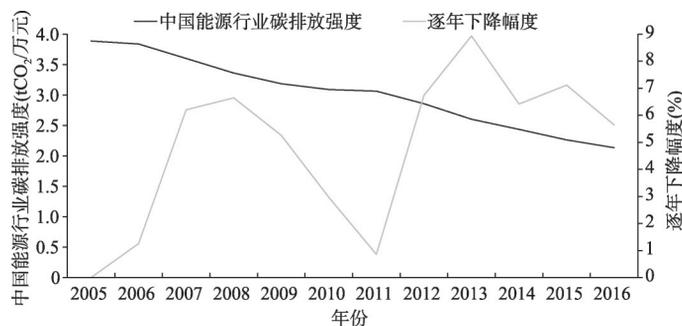


图1 2005—2016年中国能源行业碳排放强度变化

Fig. 1 The evolution of China's energy industry carbon emission intensity from 2005 to 2016

注：由于西藏自治区、香港特别行政区、澳门特别行政区、台湾省相关数据缺失，因此不在本文的研究范围内。

3 结果分析

3.1 中国能源行业碳排放强度时间演变

中国能源行业碳排放强度呈下降趋势，且逐年下降幅度具有波动变化特征（图1）。中国能源行业碳排放强度由2005年的3.88 tCO₂/万元下降到2016年的2.13 tCO₂/万元，根据其走势及逐年下降幅度的变化可划分为三个阶段：2005—2006年处于初步下降阶段，下降绝对量及幅度均较少；2006—2011年呈略微弧线下降趋势，处于数量上稳步下降、幅度上波动变化阶段；2011—2016年基本呈现直线下降趋势，其下降幅度虽呈波浪式变动特征但其水平均较高，处于急剧下降阶段。可见在2009年底碳排放强度目标宣布后中国能源行业碳排放强度呈现短暂缓冲后迅速下降，碳减排目标的提出对全国能源行业碳排放强度的下降具有较大的促进作用，加快了我国能源行业碳排放强度下降的步伐。与2005年中国能源行业碳排放强度相比，2015年中国能源行业碳排放强度下降幅度达到41.81%，在2016年下降幅度达到45.10%，与已有研究结果差距不大^[41]，说明依据本文数据，中国能源行业碳排放强度在2015年初步达到“单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降40%~45%”的水平，在2016年下降幅度超过45%，为实现2030年的碳减排目标打下了坚实基础。

3.2 省份减排有效性评价

为了更好的探究与对比2020年碳排放强度目标提出前后中国各省份减排成效的区域差异与空间分布规律,本文以碳排放强度目标提出的时间为中期,将时间尺度划分为2005—2010年和2010—2016年两个阶段,并根据矫正系数是否大于等于1将各省份划分为减排有效区($cc_i \geq 1$)和减排未达标区($cc_i < 1$)两类。

多数省份能源行业碳排放强度下降幅度较大,减排有效省份数量过半,主要集聚于中国的西南、中部、东北及东部沿海的部分省份,空间范围逐渐扩大,但其减排路径存在差异(表2)。矫正系数大于1的省份数量由16个增加到18个,在空间上连片分布并具有向东部发达地区扩散趋势。两个阶段矫正系数均大于1的省份多分布在资源型地区或重工业地区以及经济实力雄厚的直辖市,包括贵州、云南、四川、甘肃、黑龙江、吉林、湖南、湖北、河南、北京、天津、上海、重庆。其中北京、上海、天津3市的基期能源行业碳排放强度虽低,但两个阶段的矫正系数均大于1,在碳减排方面做出了较大的努力,为低碳发展的典范,这一方面可能与“波特假说”相印证,即正确设计且严格执行的环境规制政策引致的创新抵消了执行环境政策的成本,因此取得了环境质量与生产效率的双赢,另一方面可能是低碳化的产业基础和能源模式为减排任务的完成提供了保障。而甘肃、贵州、云南3省城镇化水平均具有低水平、高速度特征,城镇化进程的加速撬动能源消费规模上升,致使基期能源行业碳排放强度大,下降困难程度较低。吉林、黑龙江两省作为东北地区重要的传统老工业基地,以第二产业为主导的不平衡产业结构特征使能源需求与消耗量旺盛,但其调整回旋余地大,借助东北振兴等优惠政策其产业结构逐步趋于合理,能源行业碳排放强度迅速下降,始终为减排有效区。湖南、湖北、河南位于中部地区,具有毗邻东部沿海地区的地理优势与良好的工业基础,为承接东部发达地区的产业转移与低碳技术的引进蓄积势能,从而弥补“大而不强”的短板,保障了减排有效性的发挥。重庆、四川为重要的清洁能源基地,可梯级开发和永续利用的水电资源丰富,为提高能源结构清洁化程度进而促进能源行业碳排放强度下降提供了清洁的能源基底条件。广东、福建、河北、浙江、安徽的基期碳排放强度低,在后期进入减排有效区行列,说明这5省的碳减排成效逐渐增强;山西、辽宁、江苏3省前期的矫正系数大于1,但在后期退出减排有效区行列,反映出山西和辽宁在较高基期能源行业碳排放强度的基础上其对前沿技术吸收的追赶效应显著,随着各类低成本减排措施潜力的挖掘殆尽,追赶效应逐渐消失,降低碳排放强度的困难程度随之增大,因此两者的下降速度在后期低于全国平均水平,而江苏具有经济发达、能源匮乏^[42]、城镇化水平及质量较高的特征,基期能源行业碳排放强度相对较小,且随着产业结构轻型化特征逐渐凸显,有限的碳排放强度下降空间进一步收窄。

两个阶段均为减排未达标区的省份多数位于经济欠发达地区(表2)。其中江西两个

表2 中国各省份矫正系数

Tab. 2 Provincial correction coefficients in China

年份	[-3.75, 0)	[0, 1)	[1, 1.76]
2005—2010年	新疆、海南	青海、内蒙古、宁夏、陕西、甘肃、四川、重庆、云南、贵州、湖南、湖北、山东、安徽、浙江、福建、江西、广东、广西	北、河南、山西、江苏、黑龙江、吉林、辽宁、上海、北京、天津
2010—2016年	新疆	青海、内蒙古、山西、陕西、宁夏、辽宁、山东、江苏、江西、广西、海南	甘肃、四川、重庆、云南、贵州、湖南、湖北、河南、河北、安徽、浙江、福建、广东、黑龙江、吉林、北京、天津、上海

注:由于西藏自治区、香港特别行政区、澳门特别行政区、台湾省相关数据缺失,因此不在本文的研究范围内。

阶段矫正系数均接近于1, 虽其能源行业碳排放强度下降率与全国平均水平相近, 但依旧低于全国平均水平, 这主要是因为江西矿产资源丰富, 且为长三角洲与珠三角地区产业转移的纵深腹地, 产业发展依托于自身资源优势和沿海地区转移的特征决定了其“高投入, 低产出”的生产体系, 从而制约了低碳经济的发展。广西、山东的基期碳排放强度相对较低, 其下降率始终低于全国平均水平, 处于减排瓶颈期, 需要寻找新的减排措施来进一步降低能源行业碳排放强度。内蒙古、宁夏、青海、陕西具有基期能源行业碳排放强度较高, 阶段矫正系数小的特征, 说明其低碳发展水平极低, 尤其是宁夏, 其两个阶段矫正系数均接近于0, 可见与基期相比其能源行业碳排放强度未发生显著变化; 而新疆和海南的能源行业碳排放强度变化与碳减排目标背道而驰。新疆两个阶段矫正系数均为负值, 分别为-0.45和-0.14, 说明新疆两个阶段的能源行业碳排放强度均发生了显著上升, 偏离了低碳发展的轨道, 但其情况较前期有所好转。这主要是因为新疆具有能源资源禀赋优势^[43], 作为能源综合生产基地其主导产业为具有能源资源优势 and 成本优势的高碳行业, 作为能源接替区和战略能源储备区能源资源及能源资源型产品的区域间调出均会引致其碳排放量的上升^[44]。而海南的矫正系数由负转正, 这可能是因为随着“国家旅游岛建设”上升为国家战略, 以旅游业为龙头的现代服务业的快速成长使低碳发展比较优势显现, 且海南具有丰富的水能、太阳能、潮汐能和风能等较好的先天优势, 低碳技术的进步促使能源结构逐步低碳化, 推进了低碳发展进程。

需要指出的是无论是减排有效区还是减排未达标区, 其均具有进一步减排的潜力。根据本文所涉及的经济-能源-碳排放数据对各省份的结构减排潜力进行分析, 包括产业结构和能源结构两类。具体地, 通过各省份产值份额与能源行业碳排放份额的对比可得出各省份产业结构调整减排潜力, 通过对比各省份能源与碳排放份额差异以及各省份中煤炭占比情况可得出各省份能源结构调整的减排潜力。根据对比分析得知, 河北、山西、内蒙古、吉林、贵州、宁夏、云南、黑龙江具有较大的产业结构和能源结构减排潜力, 未来可从产业结构和能源结构两方面挖掘减排潜力。此外, 辽宁、陕西、甘肃、新疆碳排放份额远高于能源份额, 河南、安徽、重庆、四川、青海、广西煤炭占比较大, 因此这些省份具有较大的能源结构减排潜力, 未来需要加大力度调整、优化能源结构。而其他省份的结构减排潜力相对较小, 未来可从其他方面如技术、政策等方面挖掘其减排潜能。

3.3 省份碳排放强度贡献评价

依据LMDI-I方法测得各省份能源行业碳排放强度的贡献率(图2)。除新疆和海南外, 其余省份能源行业碳排放强度的下降均促进了全国能源行业碳排放强度的下降。其中能源行业碳排放强度贡献率较大的有山西、辽宁、江苏、山东、河北、河南、广东等, 这些地区或是依靠先进的低碳技术、逐步合理的产业结构, 或是拥有较高的基期能源行业碳排放强度, 或是经济发展速度大于能源行业碳排放增速从而拥有较高的能源行业碳排放强度贡献率, 而青海、宁夏、广西、陕西等省份的能源行业碳排放强度贡献率较小, 这些省份虽然基期能源行业碳排放强度较高, 但区域社会经济基础条件薄弱, 低碳创新与研发支撑能力有限, 使其经济发展处于“高碳锁定”模式, 因此能源行业碳排放强度下降不显著、贡献率小。此外海南、新疆与减排有效性的情况一致, 均出现负贡献。

能源行业碳排放强度贡献率普遍上升, 变动速率各异, 但区域差异性逐渐收缩(图2)。河南、四川、广东、安徽等19省份能源行业碳排放强度的贡献率呈上升趋势, 其中增加值最多是福建、陕西、广东, 其贡献率分别增加了1.71%、1.60%、1.58%, 表明这3省具有较强的碳减排改善能力, 在全国处于相对领先地位。福建和广东2省均位于东部

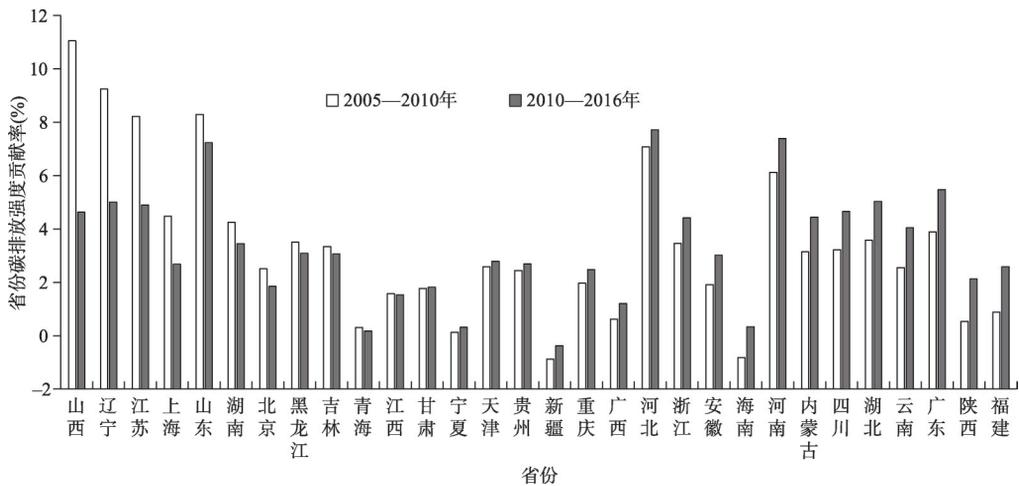


图2 中国各省份能源行业碳排放强度变化促进全国能源行业碳排放强度下降的贡献率

Fig. 2 The contribution rate of provincial energy industry carbon emission intensity change to the decline of the country's energy industry carbon emission intensity in China

注：由于西藏自治区、香港特别行政区、澳门特别行政区、台湾省相关数据缺失，因此不在本文的研究范围内。

沿海发达地区，高效节能技术水平的提高强化了产业结构“退二进三”及高碳行业内部结构调整的力度，能源行业碳排放强度下降显著，而陕西则主要是通过淘汰落后产能和压减过剩产能两方面显著地降低碳排放强度。山西、辽宁、江苏、北京、上海等11省份的贡献率呈现下降趋势，北京、上海虽为经济发达区域，但由于减排效益递减规律的存在，其能源行业碳排放强度下降空间更小，减排难度更大，因此其贡献率逐渐下降。能源行业碳排放强度贡献率最高的省份由山西转为河北，其中山西2005—2010年能源行业碳排放强度下降44.06%，而河北2010—2016年能源行业碳排放强度下降50.57%，反映出随着京津冀区域一体化进程的加快，河北一方面借助京津冀协同力量加深与北京和天津两市碳减排方面的合作，另一方面在北京和天津两市扩散效应的作用下，承接京津转移产业，促使京津科研成果在河北转化，达到用高新技术改造传统产业的目的，助推面向高级化与合理化产业结构的转型与升级。除出现负值的海南和新疆外，能源行业碳排放强度贡献率为正的最大与最小值之间的差距由前阶段的85倍缩小至43倍，说明在碳减排目标的约束下，各省份均积极应对减排压力，区域差异逐渐减小。

3.4 省份综合贡献评价

采用分位数方法将减排目标提出前后两个阶段除负综合贡献率省份外的其余各省份的综合贡献率划分为三级，从低到高依次为低贡献区、中贡献区、高贡献区，并定义贡献率为负的省份为负贡献区（表3）。

除个别省份外，绝大多数省份对全国能源行业碳排放强度的下降均作出了贡献（表3）。2005—2010年贡献率为正的省份数量为27个，其数量在2010—2016年增加到29个，说明绝大多数省份通过经济的综合发展与明确且有针对性的减排手段对促进全国能源行业碳排放强度的下降做出了相应的努力与贡献。但2005—2010年内蒙古、陕西和海南为负贡献区，其中内蒙古和陕西是因为产值份额具有高的负贡献率，从而抵消了能源行业碳排放强度的正向贡献，而海南主要是因为负向的能源行业碳排放强度贡献导致其省份综合贡献率为负，且产值份额起到了一定的同向加剧作用（图2、表3、图3）。2010—2016年的新疆综合贡献率为负，不仅是因为能源行业碳排放强度的负贡献，更主

率,而差的经济发展环境加深了对高碳能源的依赖,从而降低区域减排的综合贡献率。

不同等级综合贡献区均呈现“集聚化”空间分布特征(表3)。两个阶段高值贡献区在空间上均具有“两点一面”的分布结构,2005—2010年的面状高贡献区主要位于东部沿海及周边的华北地区,黑龙江、广东两省分别散落于面状高值贡献区外的北部和南部;与第一阶段相比,2010—2016年高值贡献区空间范围进一步扩大,面状区域在原有基础上向中部延伸,广东和四川分别在其东南、西南方向隆起。总体看来,面状高值区的空间分布格局稳定性相对高。中贡献区先在西南及其周边形成集聚面,其后该面状区逐渐支解,在南部地区呈破碎状弧带分布特征,而新的面状集聚区即内-黑-吉连片分布区横亘于北部延边地区。低水平区在西部地区汇聚为面状区域,但在中部地区由面状集聚转为孤立分布。不同等级省份综合贡献的面状集聚分布特征一方面反映出局部区域经济与社会发展环境、资源禀赋存在相似性,另一方面也反映出减排政策、减排措施等可能存在区域趋同效应。

多个省份减排综合贡献率的等级呈正向发展(等级增加,或保持不变),减排综合贡献进位赶超势头强劲(表3)。除新疆、贵州、甘肃、黑龙江、上海外,其余各省份减排综合贡献水平等级保持不变或有所提高,其中,内蒙古呈现跃等级提高的特征,安徽、福建、四川、重庆4省份产值份额的负向贡献逐步增强,弱化了省份综合贡献,但这些省份依旧呈现综合贡献等级上行趋势,而海南、湖北、内蒙古、陕西4省份的产值份额的负向贡献逐渐减少,抑制作用被削弱,促进了省份综合贡献的等级上升(图3)。值得注意的是海南和陕西虽由负转正,但其综合贡献水平依旧较低。

4 减排有效性与省份综合贡献的关系分析

4.1 减排有效性与省份综合贡献的叠加关系类型分析

为整体把握省份减排成效状况,对省份减排有效性与综合贡献的空间叠加关系与位序关系进行分析。减排成效存在显著的区域差异,总体上呈现“西南-中部-东北组团凸起,西北凹陷”的空间分布格局(表4)。

减排成效良好区数量最多(包括有效-高贡献区和有效-中贡献区)(表4)。两个阶段占比分别为47%和53%,广泛分布于西南、中部和东部地区,特点是不仅完成了自身的减排任务,对全国能源行业碳排放强度的下降也做出了较大贡献。从中可以发现,减排综合贡献可能在一定程度上依赖于减排有效性的发挥,减排成效良好的省份多为经济、技术水平相对落后的地区。技术进步虽对省份依靠增加资源投入扩大经济效益发展

表4 中国各省份减排有效性及省份综合贡献叠加类型

Tab. 4 The superposition types for provincial emission reduction efficiency and comprehensive contribution in China

叠加类型	2005—2010年	2010—2016年
无效-低贡献区	内蒙古、安徽、福建、江西、广西、海南、陕西、青海、宁夏、新疆	江西、广西、海南、陕西、青海、宁夏、新疆
无效-中贡献区	无	内蒙古
无效-高贡献区	河北、浙江、山东、广东	山西、辽宁、江苏、山东
有效-低贡献区	天津、重庆	贵州、甘肃
有效-中贡献区	北京、吉林、湖北、湖南、四川、贵州、云南、甘肃	北京、天津、吉林、黑龙江、上海、安徽、福建、湖南、重庆、云南
有效-高贡献区	山西、辽宁、黑龙江、上海、江苏、河南	河北、浙江、河南、湖北、广东、四川

注:由于西藏自治区、香港特别行政区、澳门特别行政区、台湾省相关数据缺失,因此不在本文的研究范围内。

路径的修正作用有限, 但将提高的经济效益用于改进生产效率的降排措施逐渐被接纳与采用, 因此该类型省份数量最多且呈增加趋势, 同时也说明未来减排应更加关注减排良好区, 减排的投资力度及优惠政策等可以向该类型区倾斜。

减排成效中等区(包括有效-低贡献区和无效-高贡献区)多散布于东部沿海地区及少数内陆地区(表4)。这类省份一方面会利用先进的技术完善生产链条, 在扩大生产规模的同时, 减少能源消耗, 如江苏、浙江、广东等; 另一方面会借助优越的区位条件、优惠的国家政策等优势优化生产结构, 降低经济发展对高碳能源的依赖, 如山东、辽宁、河北等省份。

减排成效欠佳区空间范围逐渐缩小(包括无效-中贡献区和无效-低贡献区), 但其空间格局在西部地区保持稳定(表4)。这些省份多数位于经济欠发达地区, 经济发展层次与质量有待提高, 自身能源行业碳排放强度相对较大但下降速度较慢, 处于经济效益与生态环境效益“双输”的困境。

4.2 减排有效性和省份综合贡献的位序关系分析

为探析省份综合贡献与减排有效性的联系, 分别对二者按从小到大排序后进行位序比较分析(图4)。各省份减排有效性与综合贡献的位序及变化并非完全协同一致。2005—2010年所有省份减排有效性与综合贡献位序均不一致, 14个省份的减排有效性位序优于省份综合贡献位序。这些省份碳排放强度下降值高于全国水平, 超额完成本地区的碳排放强度下降目标, 但由于其较小经济总量或自身较高的碳排放强度使其省份综合贡献的排序低于减排有效性的排序。而其余16省份的减排有效性位序劣于省份综合贡献的位序。其中二者排序相差较大的有山东、河北、广东、浙江等省份, 这些省份的综合贡献排序远高于减排有效性的排序。2010—2016年除新疆外其余各省份的减排有效性与综合贡献的位序存在不一致性, 且与2005—2010年相比变化显著。其中二者位序差距较大有山东、重庆、辽宁、山西、北京、天津等省份, 由省份综合贡献排序高于减排有效性排序转为减排有效性排序高于综合贡献排序的省份有海南、四川、福建、广西, 说明2010—2016年之间这4省份在发展经济的同时, 也强调了生态环境效益的维护; 而内蒙古、陕西由减排有效性排序高于省份综合贡献排序转变为省份综合贡献排序高于减排有效性排序。

省份综合贡献排名靠前的省份其减排有效性的排名往往也靠前, 省份综合贡献排名靠后的省份其减排有效性较差(图4)。如2005—2010年综合贡献排名前15位的省份中有10个省份的减排有效性也位列15名之内, 其中排名一致性较高的有山西、辽宁、江苏、上海等省份, 2010—2016年综合贡献排名前15位的省份中有8个省份的减排有效性也位列15名之内, 排名一致性较高的有山东、河南、浙江、湖北等省份。而两个阶段中省份综合贡献排名位序低于15位的省份中减排有效性位于后15位的省份个数分别为11个和8个。

综上两方面可知, 减排有效性与省份综合贡献水平存在错位现象, 但总体上二者呈正向关系, 省份综合贡献对减排有效性的发挥存在一定的依赖性。

5 结论与讨论

省际层面的碳减排实际上是某种意义上的区域经济格局重构, 因此各省份的碳减排成效得到了学者的广泛关注, 但从减排贡献的角度评价各省份在促进全国能源行业碳排放强度下降过程中的减排成效并未得到充分的认识。因此, 本文遵循“减排有效性-碳排

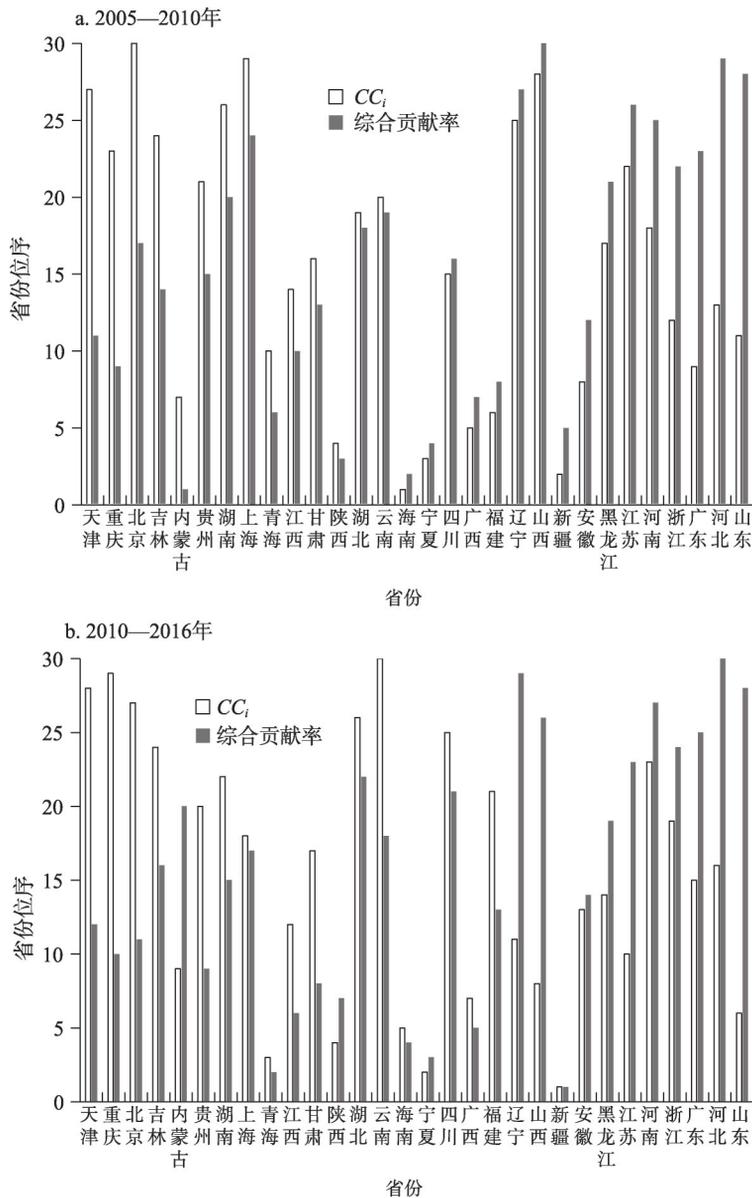


图4 2005—2016年中国各省份综合贡献及减排有效性位序

Fig. 4 The order of provincial comprehensive contribution and emission reduction efficiency in China from 2005 to 2016

注：由于西藏自治区、香港特别行政区、澳门特别行政区、台湾省相关数据缺失，因此不在本文的研究范围内。

放强度贡献-省份综合贡献-减排有效性与省份综合贡献关系”的思路，利用矫正系数与LMDI-I结构分解模型，对中国30省份2005—2016年的减排成效进行评估，主要结论：

(1) 碳排放强度目标的提出有力地促进了全国能源行业碳排放强度下降。中国能源行业碳排放强度呈逐年下降趋势，经历初步下降-数量上稳步下降、幅度上波动变化-急剧下降3个阶段，2009年底碳减排目标提出后中国能源行业碳排放强度呈现短暂缓冲后迅速下降，其下降幅度于2016年超过了45%。

(2) 在全国能源行业碳排放强度下降的过程中多数省份的减排成效良好。超过一半

的省份碳排放强度下降幅度高于全国平均水平, 为减排有效省份; 绝大多数省份的综合贡献水平为正, 且多个省份的综合贡献等级呈正向发展, 进位赶超势头强劲; 减排成效良好区数量最多, 减排成效欠佳区空间范围逐渐缩小。

(3) 省份综合贡献对减排有效性的发挥存在一定的依赖性。影响减排有效性和省份综合贡献的机制同中有异, 因此二者水平存在错位现象, 但总体上具有正向关系。

(4) 不同减排成效类型省份未来减排措施的选择与调整也应因地制宜。其中, 深入剖析减排成效良好区的资源禀赋、经济结构及其发展模式, 有利于总结减排经验, 为挖掘中等区及不佳区的减排潜力提供参考, 因此其在节能减排领域承担更大的责任, 未来不仅要继续加强自身的低碳发展, 也要考虑低碳效益在全国的扩散, 可作为减排的引领者; 而减排成效欠佳区未来在进行基础设施建设、资源开发、特色产业发展时应与低碳经济发展有机衔接, 在接受发达地区产业转移时既要结合自身发展条件与产业基础拟定引资和承接产业的规划, 又要硬化环境约束提高产业的引进要求。减排成效中等区未来的省份减排路径规划需要兼顾减排有效性和综合贡献性, 继续跟进低碳发展步伐、拓宽低碳发展路径, 提高低碳发展水平, 如促进产业结构转型升级, 优化能源使用结构等。

4.2 讨论

虽然, 本研究对中国能源行业碳排放强度下降过程中的省份减排成效做了初步的评估与分析, 可以较好反映省份在促进全国能源行业碳排放强度下降过程中的减排努力与贡献, 但对驱动省份综合贡献的机制考虑不够深入与全面, 还有很大继续提升的空间。未来研究中以下问题仍值得继续讨论: 首先, 本文发现产值份额的扩大会降低省份在促进全国能源行业碳排放强度下降中的贡献, 但未根据产业类型细化不同类型产业产值变动的减排贡献效应, 未来可根据产业划分标准进行分类, 进一步找出部门或行业产值变动的贡献, 一方面为优化产业结构指明方向, 另一方面也为协调省份自身碳排放强度与产值份额的关系、挖掘各省份促进全国能源行业碳排放强度下降的潜力提供参考。其次, 本研究发现不同等级综合贡献区在空间上具有集聚分布特征, 说明在区域协调、产业协调发展的背景下, 区域发展是区域内部资源动员和跨区联系相协同的过程^[45], 区域经济的发展不仅依赖于自身能源的消耗, 也需要多个区域资源消耗的支撑, 因此未来对减排任务及贡献的研究可进一步考虑由区域合作与要素流通而产生的“碳转移”影响。

致谢: 真诚感谢匿名评审专家在论文评审中所付出的时间和精力, 评审专家对本文图表完善、结果分析的补充、结论梳理方面的修改意见, 使本文获益匪浅。

参考文献(References)

- [1] 王勇, 程瑜, 杨光春, 等. 2020年和2030年碳强度目标约束下中国碳排放权的省区分解. 中国环境科学, 2018, 38(8): 3180-3188. [Wang Yong, Cheng Yu, Yang Guangchun, et al. Provincial decomposition of China's carbon emission rights under the constraint of 2020 and 2030 carbon intensity targets. China Environmental Science, 2018, 38(8): 3180-3188.]
- [2] 王文举, 陈真玲. 中国省级区域初始碳配额分配方案研究: 基于责任与目标、公平与效率的视角. 管理世界, 2019, 35(3): 81-98. [Wang Wenju, Chen Zhenling. Research on the allocation scheme of initial carbon quota in provincial regions of China: Based on the perspective of responsibility and goal, fairness and efficiency. Management World, 2019, 35(3): 81-98.]
- [3] Yu S W, Wei Y M, Wang K. Provincial allocation of carbon emission reduction targets in China: An approach based on improved fuzzy cluster and Shapley value decomposition. Energy Policy, 2014, 66: 630-644.
- [4] Zhou P, Wang M. Carbon dioxide emissions allocation: A review. Ecological Economics, 2016, 125: 47-59.
- [5] 钱浩祺, 吴力波, 任飞州. 从“鞭打快牛”到效率驱动: 中国区域间碳排放权分配机制研究. 经济研究, 2019, (3): 86-102. [Qian Haoqi, Wu Libo, Ren Feizhou. From “spurring a willing horse” to efficiency driven: A study of China's regional CO₂ emission permit allocation. Economic Research Journal, 2019, (3): 86-102.]

- [6] 刘贤赵, 高长春, 张勇, 等. 中国省域碳排放强度空间依赖格局及其影响因素的空间异质性研究. 地理科学, 2018, 38(5): 681-690. [Liu Xianzhao, Gao Changchun, Zhang Yong, et al. Spatial dependence pattern of carbon emission intensity in China's provinces and spatial heterogeneity of its influencing factors. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(5): 681-690.]
- [7] 张翠菊, 张宗益. 中国省域碳排放强度的集聚效应和辐射效应研究. 环境科学学报, 2017, 37(3): 1178-1184. [Zhang Cuiju, Zhang Zongyi. Agglomeration effect and radiation effect of provincial carbon emission intensity in China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(3): 1178-1184.]
- [8] Zhao X, Burnett J W, Fletcher J J. Spatial analysis of China province-level CO₂ emission intensity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 33: 1-10.
- [9] Feng D, Yu B L, Hadachin T, et al. Drivers of carbon emission intensity change in China. *Resources, Conservation & Recycling*, 2018, 129: 187-201.
- [10] Junna Y, Bin S, Yu L. Multiplicative structural decomposition and attribution analysis of carbon emission intensity in China, 2002-2012. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 198: 195-207.
- [11] Chen C, Zhao T, Yuan R, et al. A spatial-temporal decomposition analysis of China's carbon intensity from the economic perspective. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 215: 557-569.
- [12] 陈江龙, 李平星, 高金龙. 1990—2014年泛长三角地区能源利用碳排放时空格局及影响因素. 地理科学进展, 2016, 35(12): 1472-1482. [Chen Jianglong, Li Pingxing, Gao Jinlong. Spatiotemporal patterns and influencing factors of carbon emissions in the Pan-Yangtze River Delta region, 1990-2014. *Progress in Geography*, 2016, 35(12): 1472-1482.]
- [13] 高长春, 刘贤赵, 李朝奎, 等. 近20年来中国能源消费碳排放时空格局动态. 地理科学进展, 2016, 35(6): 747-757. [Gao Changchun, Liu Xianzhao, Li Chaokui, et al. Spatiotemporal dynamics of carbon emissions by energy consumption in China from 1995 to 2014. *Progress in Geography*, 2016, 35(6): 747-757.]
- [14] Ye B, Jiang J J, Li C, et al. Quantification and driving force analysis of provincial-level carbon emissions in China. *Applied Energy*, 2017, 198: 223-238.
- [15] 刘晓燕, 孙慧. 资源型产业碳排放驱动因素演化与低碳发展路径选择. 统计与决策, 2019, 35(2): 53-57. [Liu Xiaoyan, Sun Hui. The evolution of carbon emission drivers and the choice of low carbon development path in resource-based industry. *Statistics & Decision*, 2019, 35(2): 53-57.]
- [16] 鲁万波, 仇婷婷, 杜磊. 中国不同经济增长阶段碳排放影响因素研究. 经济研究, 2013, 48(4): 106-118. [Lu Wanbo, Qiu Tingting, Du Lei. A study on influence factors of carbon emissions under different economic growth stages in China. *Economic Research Journal*, 2013, 48(4): 106-118.]
- [17] 赵荣钦, 黄贤金, 钟大洋. 中国不同产业空间的碳排放强度与碳足迹分析. 地理学报, 2010, 65(9): 1048-1057. [Zhao Rongqin, Huang Xianjin, Zhong Taiyang. Research on carbon emission intensity and carbon footprint of different industrial spaces in China. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(9): 1048-1057.]
- [18] 王喜, 张艳, 秦耀辰, 等. 我国碳排放变化影响因素的时空分异与调控. 经济地理, 2016, 36(8): 158-165. [Wang Xi, Zhang Yan, Qin Yaochen, et al. The spatial-temporal differentiation of the influence factors of carbon emissions and the regulation in China. *Economic Geography*, 2016, 36(8): 158-165.]
- [19] 孙艳芝, 沈镭, 钟帅, 等. 中国碳排放变化的驱动力效应分析. 资源科学, 2017, 39(12): 2265-2274. [Sun Yanzhi, Shen Lei, Zhong Shuai, et al. Driving force analysis of carbon emission changes in China. *Resources Science*, 2017, 39(12): 2265-2274.]
- [20] 潘家华, 张丽峰. 我国碳生产率区域差异性研究. 中国工业经济, 2011, (5): 47-57. [Pan Jiahua, Zhang Lifeng. Research on the regional variation of carbon productivity in China. *China Industrial Economics*, 2011, (5): 47-57.]
- [21] 李亚冬, 宋丽颖. 我国碳生产率的收敛机制研究: 理论和实证检验. 科学学与科学技术管理, 2017, 38(3): 117-125. [Li Yadong, Song Liying. Study on the convergence mechanism of carbon productivity in China: Theory and empirical test. *Science of Science and Management of S.&T.*, 2017, 38(3): 117-125.]
- [22] 张成, 蔡万煊, 于同申. 区域经济增长与碳生产率: 基于收敛及脱钩指数的分析. 中国工业经济, 2013, (5): 18-30. [Zhang Cheng, Cai Wanhuan, Yu Tongshen. Regional economic development and carbon productivity: A convergent and decoupling index analysis. *China Industrial Economics*, 2013, (5): 18-30.]
- [23] Mielnik O, Goldemberg J. The Evolution of the "Carbonization Index" in developing countries. *Energy Policy*, 1999, 27(5): 307-308.
- [24] 曹珂, 屈小娥. 中国区域碳排放绩效评估及减碳潜力研究. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(8): 24-32. [Cao Ke, Qu Xiao'e. Research on regional carbon emissions performance evaluation and carbon reduction potential in China. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(8): 24-32.]
- [25] 王群伟, 周德群, 周鹏. 中国全要素二氧化碳碳排放绩效的区域差异: 考虑非期望产出共同前沿函数的研究. 财贸经济, 2010, (9): 112-117. [Wang Qunwei, Zhou Dequn, Zhou Peng. Regional differences in the performance of total factor productivity index of carbon emissions in China--Study of common frontier functions of undesirable outputs. *Finance & Trade Economics*, 2010, (9): 112-117.]

- [26] 华坚, 任俊, 徐敏, 等. 基于三阶段DEA的中国区域二氧化碳排放绩效评价研究. 资源科学, 2013, 35(7): 1447-1454. [Hua Jian, Ren Jun, Xu Min, et al. Evaluation of Chinese regional carbon dioxide emissions performance based on a three-stage DEA model. Resources Science, 2013, 35(7): 1447-1454.]
- [27] 马大来, 陈仲常, 王玲. 中国省际碳排放效率的空间计量. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(1): 67-77. [Ma Dalai, Chen Zhongchang, Wang Ling. Spatial econometrics research on inter-provincial carbon emissions efficiency in China. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(1): 67-77.]
- [28] 陈德湖, 潘英超, 武春友. 中国二氧化碳的边际减排成本与区域差异研究. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(10): 86-93. [Chen Dehu, Pan Yingchao, Wu Chunyou. Marginal abatement costs of CO₂ emission in China and its regional differences. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(10): 86-93.]
- [29] 杨子晖, 陈里璇, 罗彤. 边际减排成本与区域差异性研究. 管理科学学报, 2019, 22(2): 1-21. [Yang Zihui, Chen Lixuan, Luo Tong. Marginal cost of emission reduction and regional differences. Journal of Management Sciences in China, 2019, 22(2): 1-21.]
- [30] 刘博文, 张贤, 杨琳. 基于LMDI的区域产业碳排放脱钩努力研究. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(4): 78-86. [Liu Bowen, Zhang Xian, Yang Lin. Decoupling efforts of regional industrial development on CO₂ emissions in China based on LMDI analysis. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(4): 78-86.]
- [31] Wang W W, Li M, Zhang M. Study on the changes of the decoupling indicator between energy-related CO₂, emission and GDP in China. Energy, 2017, 128: 11-18.
- [32] 邱立新, 徐海涛. 能源经济环境协调发展的最优政策设计: 基于CGE模型的实证研究. 科学与管理, 2018, 38(5): 33-45. [Qiu Lixin, Xu Haitao. Optimal policy design for coordinated development of energy economy and environment based on CGE model. Science and Management, 2018, 38(5): 33-45.]
- [33] 黄蕊, 刘昌新. 中国参与全球气候治理的影响分析. 地理研究, 2017, 36(11): 2213-2224. [Huang Rui, Liu Changxin. Analysis of the impact of China's participation in global climate governance. Geographical Research, 2017, 36(11): 2213-2224.]
- [34] Cheng Y Q, Wang Z Y, Zhang S Z, et al. Spatiotemporal dynamics of carbon intensity from energy consumption in China. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(4): 631-650.
- [35] 关伟, 许淑婷. 中国能源生态效率的空间格局与空间效应. 地理学报, 2015, 70(6): 980-992. [Guan Wei, Xu Shuting. Study of spatial patterns and spatial effects of energy eco-efficiency in China. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(6): 980-992.]
- [36] IPCC/OECD. 2006 IPCC Guidelines for National Green-house Gas Inventories. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_2_Ch2_Stationary_Combustion.pdf, 2019-08-02.
- [37] Diakoulaki D, Mandaraka M. Decomposition analysis for assessing the progress in decoupling industrial growth from CO₂ emissions in the EU manufacturing sector. Energy Economics, 2007, 29(4): 636-664.
- [38] Yi W J, Zou L L, Guo J, et al. How can China reach its CO₂ intensity reduction targets by 2020?. A regional allocation based on equity and development. Energy Policy, 2011, 39(5): 2407-2415.
- [39] 王锋, 冯根福, 吴丽华. 中国经济增长中碳强度下降的省区贡献分解. 经济研究, 2013, (8): 143-155. [Wang Feng, Feng Fugen, Wu Lihua. Regional contribution to the decline of national carbon intensity in China's economic growth. Economic Research Journal, 2013, (8): 143-155.]
- [40] Ang B W. LMDI decomposition approach: A guide for implementation. Energy Policy, 2015, 86: 233-238.
- [41] 杨思涵, 佟孟华, 刘睿婕, 等. 异质性工业企业碳减排状态与路径的比较. 中国环境科学, 2019, 39(6): 2678-2688. [Yang Sihan, Tong Menghua, Liu Ruijie, et al. Comparison on status and paths of carbon emission reduction of industrial enterprises with heterogeneity. China Environmental Science, 2019, 39(6): 2678-2688.]
- [42] 赵媛, 郝丽莎, 杨足膺. 江苏省能源效率空间分异特征与成因分析. 地理学报, 2010, 65(8): 919-928. [Zhao Yuan, Hao Lisha, Yang Zuying. Regional differentiation of energy efficiency and its causes in Jiangsu. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(8): 919-928.]
- [43] 郝丽莎, 赵媛. 中国石油资源利用的区域经济效应差异分析. 自然资源学报, 2016, 31(2): 187-201. [Hao Lisha, Zhao Yuan. Differentiation of regional economic effects of oil resource utilization in China. Journal of Natural Resources, 2016, 31(2): 187-201.]
- [44] 王长建, 张小雷, 张虹鸥, 等. 基于IO-SDA模型的新疆能源消费碳排放影响机理分析. 地理学报, 2016, 71(7): 1105-1118. [Wang Changjian, Zhang Xiaolei, Zhang Hongou, et al. Influencing mechanism of energy-related carbon emissions in Xinjiang based on IO-SDA model. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(7): 1105-1118.]
- [45] 苗长虹, 胡志强, 耿凤娟, 等. 中国资源型城市经济演化特征与影响因素: 路径依赖、脆弱性和路径创造的作用. 地理研究, 2018, 37(7): 1268-1281. [Miao Changhong, Hu Zhiqiang, Geng Fengjuan, et al. Characteristics of economic evolution and the influencing factors of resource-dependent cities in China: The role of path dependence, vulnerability and path creation. Geographical Research, 2018, 37(7): 1268-1281.]

Evaluation on the effectiveness of provincial emission reduction in the process of carbon emission intensity decline in China's energy industry

CUI Panpan¹, ZHAO Yuan^{1,2,3}, HAO Lisha^{1,3}, XIA Siyou^{4,5}, XU Xin^{1,3}, TANG Wenmin^{1,3}

(1. School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. Jinling College, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China; 3. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China; 4. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, The Key Laboratory of Regional Sustainable Development Analysis and Simulation, CAS, Beijing 100101, China; 5. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In this paper, the correction coefficient was applied to measure energy industry efficiency of emission reduction in each province. According to the energy industry carbon emission intensity and output value share of each province, the identity of national carbon emission intensity in China's energy industry was established from top to bottom, and the contribution rate of each province, energy industry carbon emission intensity and output value share in each province to the decline of national carbon emission intensity in energy industry was obtained by using LMDI- I decomposition method. Following the idea of "emission reduction efficiency - carbon emission intensity contribution - comprehensive contribution by province - the relationship between provincial emission reduction efficiency and the comprehensive contribution of province", the emission reduction effectiveness of each province in the process of carbon emission intensity decline in China energy industry was evaluated. The results indicate that (1) the carbon emission intensity in China' energy industry shows a downward trend year by year, and the carbon emission intensity decreased by 45% in 2016 than that in 2005. (2) More than half of the provinces are efficiency areas for emission reduction and the number of provinces is increasing, while most of the provinces that do not meet the emission reduction standards are located in economically underdeveloped areas, and there are significant differences in emission reduction paths between provinces. (3) The contribution rate of energy industry carbon emission intensity in most provinces shows an upward trend, and the regional differences gradually decrease. (4) The competing momentum of comprehensive contribution by province is strong, and most provinces have contributed to the decline of carbon emission intensity in China energy industry, and the eastern region is the main contribution area, where the comprehensive contribution grade of many provinces develops positively. (5) The number of provinces with good emission reduction effectiveness is the largest, the general areas are scattered in the eastern coastal area and a few inland areas, and the spatial pattern of the poor areas remains stable in the western region. In the future, provinces should not only choose the low-carbon development path according to their own emission reduction effectiveness characteristics, but also form a benign interaction with the decline of national carbon emission intensity.

Keywords: energy industry; carbon emission intensity; emission reduction effectiveness; emission reduction efficiency; provincial comprehensive contribution