

杨静,郭群.省级层面碳排放估算及减排路径方法研究——以宁夏为例[J].中国沙漠,2023,43(5):176-185.

# 省级层面碳排放估算及减排路径方法研究 ——以宁夏为例

杨静<sup>1,2a,3</sup>, 郭群<sup>1,2b,3</sup>

(1.中国科学院地理科学与资源研究所 生态网络观测与模拟重点实验室,北京 100101; 2.中国科学院大学 a.中丹学院, b.资源与环境学院,北京 100049; 3.国家生态科学数据中心,北京 100101)

**摘要:**从省级层面研究碳排放年际变化进而探讨减排路径对制定碳减排措施和实现“双碳”目标具有重要意义。以西北典型干旱省份宁夏为例,综合对数平均迪氏指数分解、相关分析、脱钩分析等方法分析碳排放的多年变化趋势、影响因素及减排路径。结果表明:(1)宁夏年碳排放量、人均碳排放量及单位面积碳排放量均逐年增加,而碳排放强度呈现出先升后降又回升的波动趋势。(2)经济 and 产业结构是年碳排放量增加的主要影响因素,能源结构和能源强度对碳排放增长具有一定的抑制作用。(3)十大高排放行业主要利用热值低且碳排放高的原煤等能源,导致宁夏碳排放和GDP仍未脱钩,但脱钩的行业数量在增加。本研究采用年碳排放量、碳排放强度、人均碳排放量及单位面积碳排放量等多个指标全面服务于碳达峰、产业结构优化、碳公平等目的,依据主要影响因素、细分行业分类及能流分析,从产业结构优化和能源结构调整等角度提供有效的碳减排路径。研究结果将为“双碳”目标下省级层面绿色发展规划措施的制定提供科学支持。

**关键词:**碳排放; 影响因素; 产业分析; 减排路径

**文章编号:** 1000-694X(2023)05-176-10

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2023.00090

**中图分类号:** N8

**文献标志码:** A

## 0 引言

二氧化碳(CO<sub>2</sub>)排放引起的全球气候变化问题已引起各国政府的高度重视。中国明确提出力争在2030年前实现碳达峰,努力争取2060年前实现碳中和,即“双碳”目标<sup>[1]</sup>,不仅体现了中国主动承担应对全球气候变化责任的大国担当,也是加快国内生态文明建设和实现高质量发展的战略抉择。“全球碳计划”数据显示中国2021年化石能源产生的CO<sub>2</sub>排放量约占全球的31%<sup>[2]</sup>,因此中国控制CO<sub>2</sub>排放的任务十分艰巨,准确评估碳排放进而探讨降低碳排放的路径将是未来实现“双碳”目标的工作重点。

要实现“双碳”目标,需要准确评估碳排放并分析其影响因素的方式方法。碳排放的估算方法主要有实测法<sup>[3]</sup>、物料衡算法<sup>[4]</sup>和清单编制法<sup>[5]</sup>等。实测法通过排放源现场实测基础数据计算排放量,该法中间环节少、准确度较高但耗时耗力,更适用于

小区域、有能力获取监测数据的自然排放源<sup>[6]</sup>。物料衡算法是用输入物料中的含碳量减去输出物料中的含碳量后计算CO<sub>2</sub>排放量,优点是系统研究了产生和排放的物质,实施有效性较强,然而由于需要搜集详细的工业生产数据,该方法仅适用于数据基础较好的行业。清单编制法出自联合国气候变化委员会,该方法对温室气体的排放考虑全面,有成熟公式、活动数据和排放因子数据库,为计算碳排放提供了较合理的工具,是大区域碳排放估算有效且便于实施的方法<sup>[7]</sup>。3种方法综合比较来看,实测法和物料衡算法的碳排放数据虽精确度较高,但仅适用于部分区域或部分行业,省级层面实践指导意义较差,本文碳排放的估算选用大区域数据易获取的清单编制法。根据现有的研究成果,碳排放的影响因素有经济发展水平<sup>[8]</sup>、人口因素<sup>[9]</sup>、能源强度<sup>[10]</sup>、能源结构<sup>[11]</sup>和产业结构<sup>[12]</sup>等。王中英

收稿日期:2023-03-21; 改回日期:2023-06-01

资助项目:美丽中国生态文明建设科技工程专项(XDA23060205); 国家自然科学基金项目(3217155,31961143022)

作者简介:杨静(1999—),女,河南南阳人,硕士研究生,主要从事碳减排与可持续发展研究。E-mail: yangjing21@mails.ucas.ac.cn

通信作者:郭群(E-mail: guoq@igsrr.ac.cn)

等<sup>[13]</sup>通过相关性分析发现,中国经济增长与碳排放量存在明显的相关性。彭希哲等<sup>[14]</sup>发现,人口因素如居民消费水平、人口城市化率和人口规模对中国碳排放总量的变化影响明显。赵敏等<sup>[15]</sup>认为能源利用效率的提高和产业结构的调整是上海碳排放强度下降的主要原因。然而,现有碳减排路径方面的研究大部分仅关注宏观层面的经济增长、产业结构等,实践意义有待提高。比如以往产业结构分析只针对第一、二、三产业,而同一产业中的不同行业对碳排放的影响程度以及在经济中的重要性也存在很大差异,因此有必要从细分行业角度对其脱钩情况、能源使用情况以及人口、经济、能源结构、能源强度和产业结构等碳排放影响因素进行具体且全面的分析。

宁夏肩负着黄河流域生态保护和高质量发展的重要任务,在国家绿色发展战略中具有重要地位。然而宁夏产业结构单一、经济增长过分依赖自然资源消耗,是碳排放强度最高的西北省份<sup>[16]</sup>,其高质量发展问题亟待解决。作为典型的西北干旱省份之一,宁夏碳排放的研究结果将对西北干旱区实现双碳目标具有较高的借鉴意义。基于此,本文以宁夏为研究区域,旨在解决以下3个科学问题:①宁夏碳排放多年变化趋势。②人口、经济、能源及产业对宁夏碳排放的影响。③行业和能源流动对宁夏碳排放的影响以及宁夏区域减排路径。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况

宁夏位于中国西北内陆地区,东邻陕西,南连甘肃,西北接内蒙古。总面积6.64万km<sup>2</sup>,地形分为北部引黄灌区、中部干旱带、南部山区三大区域,地势南高北低,呈阶梯状下降。全区属温带大陆性干旱、半干旱气候,是中国西部重要的生态屏障。区内矿产资源富集,能源产业是经济发展的重要支柱,然而其发展除了受到产业结构单一、经济增长过分依赖自然资源产出、矿产资源不可再生性等资源型城市面临的普遍问题制约外,还面临水资源短缺和生态环境脆弱两大痛点。

### 1.2 数据来源

本研究的数据区间是2005—2020年。人口、GDP、三次产业产值、分行业增加值及构成、生产总

值指数(上年为100)、能源消费构成等数据来自历年宁夏统计年鉴。其中,GDP、三次产业增加值均以2005年不变价表示。碳排放量数据来自中国碳核算数据库(CEADs)<sup>[17-20]</sup>,数据库中省级清单数据分别计算了以能源为主的直接排放和与电力相关的间接排放,本研究仅考虑直接排放中与能源相关的部分,通过使用化石燃料活动数据乘以各自的排放系数计算所得。活动数据采用“表观消费”方法重新计算中国的能源消费<sup>[21]</sup>:

$$\text{表观能源消费量} = \text{本地生产量} + \text{进口量} - \text{出口量} \pm \text{库存量} \quad (1)$$

排放系数是通过中国主要煤矿区采集的602个煤样本分析所得,更贴近中国实际煤质情况。

### 1.3 数据处理与分析

#### 1.3.1 碳排放估算

宁夏实际碳排放量根据《IPCC 2006 国家温室气体排放清单指南》<sup>[22]</sup>中的方法测算,即所有人为消耗化石燃料带来的碳排放,计算公式<sup>[19]</sup>如下:

$$CE = \sum_i \sum_j AD_{ij} \times NCV_i \times CC_i \times O_{ij} \quad (2)$$

式中:CE指的是能源相关CO<sub>2</sub>排放量;*i*代表燃料品种;*j*代表行业类别;*AD<sub>ij</sub>*是*j*行业对燃料*i*的消耗量;*NCV<sub>i</sub>*代表单位燃料*i*燃烧产生的净热值;*CC<sub>i</sub>*是燃料*i*产生单位净热值的CO<sub>2</sub>排放量;*O<sub>ij</sub>*指*j*行业内燃料*i*燃烧过程中的氧化率。

#### 1.3.2 碳排放衡量指标

本研究碳排放用以下4个指标衡量:年碳排放量、碳排放强度、人均碳排放量和单位面积碳排放量。年碳排放量代表某评估单位(如国家、省份等)一年内的CO<sub>2</sub>排放总量,是衡量碳排放总体规模和水平的指标,也是评估碳达峰与碳中和的常用指标。碳排放强度常和经济挂钩,代表单位GDP的CO<sub>2</sub>排放量,是衡量经济发展质量水平的重要指标,碳排放强度高表示地区经济发展是以牺牲环境利益实现的,碳排放强度越低则表示低碳经济发展越好。人均碳排放量是消除人口基数影响的年碳排放量,单位面积碳排放量是消除区域面积影响的年碳排放量,二者常用作不同区域之间的横向对比。

#### 1.3.3 年碳排放量影响因素

本研究采用对数平均迪氏指数分解法(LMDI)和相关性分析,从人口、经济、能源及产业结构等方面探究年碳排放量的影响因素(表1)。

表1 年碳排放量影响因素的应用指标及影响过程

Table 1 Application indicators and processes of the factors influencing annual carbon emissions

影响因素	应用指标	影响过程
人口	年末总人口	人类活动(呼吸、出行等)消耗能源产生碳排放
经济	GDP	经济生产活动消耗能源产生碳排放
能源强度	能源消费总量/GDP	高能源强度下碳排放量大于低能源强度
能源结构	煤炭、石油、天然气及清洁能源在能源消费总量中的构成比例	化石能源含碳量的多少影响碳排放量的大小
产业结构	第一、二、三产业产值比例	单位产值能耗量的大小影响一个产业/行业的碳排放量

LMDI加法分解公式<sup>[23]</sup>如下:

$$C = \sum_i P \times \frac{GDP}{P} \times \frac{E}{GDP} \times \frac{E_i}{E} \times \frac{C_i}{E_i} \quad (3)$$

$$\Delta C = C_t - C_{t-1} = \Delta C_P + \Delta C_{GP} + \Delta C_{EI} + \Delta C_S \quad (4)$$

公式(3)中: $C$ 为 $\text{CO}_2$ 排放量; $P$ 表示人口; $GDP$ 表示地区生产总值; $i$ 表示煤炭、石油和天然气3种能源品种; $\frac{E}{GDP}$ 表示单位GDP的能源消费强度; $\frac{E_i}{E}$ 表示能源品种 $i$ 在能源消费结构中的占比; $\frac{C_i}{E_i}$ 表示能源品种 $i$ 的碳排放强度。公式(4)中: $\Delta C$ 代表年碳排放量变化; $C_t$ 和 $C_{t-1}$ 别为第 $t$ 年和第 $t-1$ 年的碳排放量, $\Delta C_P$ 、 $\Delta C_{GP}$ 、 $\Delta C_{EI}$ 、 $\Delta C_S$ 分别对应人口、GDP、能源强度和能源结构效应,若上述变化量为负值,说明抑制了年碳排放量的过快增长,反之则表现为促进作用<sup>[23]</sup>。

### 1.3.4 脱钩分析

2002年经济合作与发展组织(OECD)提出了“脱钩”(Decoupling)概念,用来形容经济增长与资源消耗或环境污染之间的关系,主要是 $\text{CO}_2$ 排放和GDP的关系<sup>[24]</sup>。宁夏年碳排放量与GDP的关系分为绝对脱钩、相对脱钩和负脱钩3类。其中,绝对脱钩表示碳排放随着GDP增长而有所下降,相对脱钩表示碳排放随着GDP的增长而增长但增幅小于GDP增幅,负脱钩表示碳排放随着GDP的增长而增长且增幅大于GDP增幅。计算公式<sup>[23]</sup>如下:

$$D_{C,Y} = \frac{\Delta C'}{\Delta Y'} = \frac{(C_{t+1} - C_t)/C_t}{(Y_{t+1} - Y_t)/Y_t} \quad (5)$$

式中: $D_{C,Y}$ 是年碳排放量与GDP增长的脱钩弹性值,即GDP每变动一个百分点所导致的年碳排放量变化; $\Delta C'$ 和 $\Delta Y'$ 分别为年碳排放量和GDP的变化速率; $C_{t+1}$ 和 $Y_{t+1}$ 分别为 $t+1$ 年的年碳排放量和GDP; $C_t$ 和 $Y_t$ 分别为 $t$ 年的年碳排放量和GDP。当脱钩弹性值小于0为绝对脱钩,脱钩弹性值大于0且小于1为相对脱钩,脱钩弹性值大于1为负脱钩。

### 1.3.5 细分行业分类方法

本研究覆盖国民经济核算47个部门<sup>[25]</sup>中的39种行业。由于数据缺失未考虑的8个行业是:有色金属矿采选业(无增加值数据)、其他矿物采选业(无增加值数据)、木材和竹子的采伐和运输(无增加值数据)、其他制造业(无增加值数据)、开采辅助活动(无碳排放数据)、化学纤维制造业(无碳排放数据)及城市和乡村(无增加值数据)。本研究涉及的39种行业中,碳排放量或碳排放强度较高的十个行业的排放量占宁夏总碳排放的97%(具体数据见表2),说明选择的39种行业至少可以代表宁夏97%的碳排放,8个数据缺失的行业对宁夏碳排放状况的影响不超过3%。由于行业种类较多,为了便于产业结构分析,以2020年的GDP和年碳排放量数据为基础,将39个行业的GDP按照千亿元、百亿元、十亿元及十亿元以下的标准分为超高产值、高产值、中产值及低产值行业,行业碳排放量按照亿t、千万t、百万t及百万t以下的标准分为超高排放、高排放、中排放及低排放行业。

## 2 结果

### 2.1 宁夏碳排放概况

2005—2020年宁夏年碳排放量、人均碳排放量及单位面积碳排放量均呈现出显著的逐年上升趋势( $P < 0.05$ ,图1),而碳排放强度呈现出先升后降又回升的波动趋势。年碳排放量从2005年的51.7 Mt增至2020年的225.9 Mt,同期人均碳排放量从8.7 t增至31.3 t,单位面积碳排放量从 $7.8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增至 $34.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,碳排放强度从2005年的 $8.9 \text{ t} \cdot \text{万元}^{-1}$ 增至2020年的 $10.4 \text{ t} \cdot \text{万元}^{-1}$ 。16年间上升速率存在差异,2005—2011年碳排放量、人均碳排放量及单位面积碳排放量的年均增速分别为18.58%、16.90%和18.58%,2011—2016年无显著增加或降低趋势( $P > 0.05$ ),随后升高趋势



表2 宁夏细分行业碳排放(2020年)及脱钩情况  
Table 2 Carbon emissions (2020) and decoupling by sector in Ningxia

行业分类	行业名称	GDP		碳排放量		碳排放强度	脱钩情况			
		亿元	占比/%	10 <sup>6</sup> t	占比/%	/(t·万元 <sup>-1</sup> )	2010年	2015年	2020年	
超高排放、高产值	电力、热力生产和供应业	265.44	6.70	176.55	78.75	66.51	负脱钩	绝对脱钩	负脱钩	
高排放、中产值	黑色金属冶炼和压延加工业	43.15	1.09	15.96	7.12	36.97	相对脱钩	绝对脱钩	负脱钩	
中排放、中产值	非金属矿物制品业	30.60	0.77	8.39	3.74	27.41	负脱钩	绝对脱钩	绝对脱钩	
	燃气生产和供应业	14.72	0.37	1.69	0.75	11.49	负脱钩	负脱钩	负脱钩	
中排放、高产值	石油加工、炼焦和核燃料加工业	182.33	4.60	8.39	3.74	4.60	负脱钩	负脱钩	负脱钩	
	化学原料和化学制品制造业	214.79	5.42	4.66	2.08	2.17	负脱钩	负脱钩	负脱钩	
	交通运输、仓储和邮政业	181.00	4.57	3.26	1.46	1.80	相对脱钩	绝对脱钩	绝对脱钩	
	煤炭开采和洗选业	206.46	5.21	1.94	0.87	0.94	相对脱钩	相对脱钩	负脱钩	
低排放、超高产值	其他服务业	1545.3	38.98	0.46	0.21	0.03	相对脱钩	绝对脱钩	相对脱钩	
低排放、高产值	建筑业	324.30	8.18	0.71	0.32	0.22	相对脱钩	绝对脱钩	绝对脱钩	
	批发、零售和住宿、餐饮业	243.00	6.13	0.35	0.15	0.14	绝对脱钩	绝对脱钩	绝对脱钩	
	农林牧渔业	356.30	8.99	0.23	0.10	0.06	相对脱钩	绝对脱钩	绝对脱钩	
低排放、中产值	食品制造业	36.89	0.93	0.39	0.18	1.06	绝对脱钩	负脱钩	相对脱钩	
	通用设备制造业	15.47	0.39	0.17	0.08	1.11	绝对脱钩	负脱钩	相对脱钩	
	有色金属冶炼和压延加工业	48.69	1.23	0.16	0.07	0.33	负脱钩	负脱钩	绝对脱钩	
	金属制品业	17.39	0.44	0.02	0.01	0.13	绝对脱钩	绝对脱钩	绝对脱钩	
	农副食品加工业	16.32	0.41	0.02	0.01	0.10	相对脱钩	负脱钩	负脱钩	
	纺织业	30.11	0.76	0.01	0.01	0.04	相对脱钩	负脱钩	绝对脱钩	
	电气机械和器材制造业	63.61	1.60	0.01	0.00	0.01	绝对脱钩	负脱钩	相对脱钩	
	专用设备制造业	12.47	0.31	0.01	0.00	0.04	相对脱钩	绝对脱钩	绝对脱钩	
	运输设备制造业	29.70	0.75	0.00	0.00	0.01	相对脱钩	绝对脱钩	绝对脱钩	
	烟草制品业	16.24	0.41	0.00	0.00	0.01	负脱钩	负脱钩	绝对脱钩	
	医药制造业	10.60	0.27	0.00	0.00	0.01	绝对脱钩	负脱钩	负脱钩	
	低排放、低产值	黑色金属矿采选业	7.87	0.20	0.63	0.28	7.97	—	相对脱钩	绝对脱钩
		非金属矿采选业	1.31	0.03	0.11	0.05	8.08	负脱钩	负脱钩	绝对脱钩
造纸和纸制品业		2.27	0.06	0.05	0.02	2.25	绝对脱钩	负脱钩	绝对脱钩	
酒、饮料和精制茶制造业		9.09	0.23	0.01	0.01	0.13	相对脱钩	负脱钩	负脱钩	
废弃资源综合利用业		5.25	0.13	0.005	0.002	0.09	—	相对脱钩	负脱钩	
印刷和记录媒介复制业		3.59	0.09	0.003	0.001	0.09	相对脱钩	负脱钩	相对脱钩	
仪器仪表制造业		4.30	0.11	0.003	0.001	0.07	相对脱钩	负脱钩	绝对脱钩	
木材加工和木、竹、藤、棕、草制品业		0.91	0.02	0.003	0.001	0.33	绝对脱钩	负脱钩	负脱钩	
水的生产和供应业		6.80	0.17	0.002	0.001	0.03	相对脱钩	负脱钩	绝对脱钩	
纺织服装、服饰业		8.52	0.21	0.001	0.0004	0.01	相对脱钩	负脱钩	相对脱钩	
皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业		1.28	0.03	0.001	0.0003	0.06	负脱钩	绝对脱钩	负脱钩	
橡胶和塑料制品业		6.99	0.18	0.0005	0.0002	0.01	绝对脱钩	绝对脱钩	绝对脱钩	
文教、工美、体育和娱乐用品制造业		0.26	0.01	0.0002	0.0001	0.07	—	相对脱钩	相对脱钩	
家具制造业		0.60	0.02	0	0	0	绝对脱钩	负脱钩	绝对脱钩	
石油和天然气开采业		0.09	0.002	0	0	0	相对脱钩	绝对脱钩	负脱钩	
计算机、通信和其他电子设备制造业		—	—	0.001	0.001	—	—	—	—	

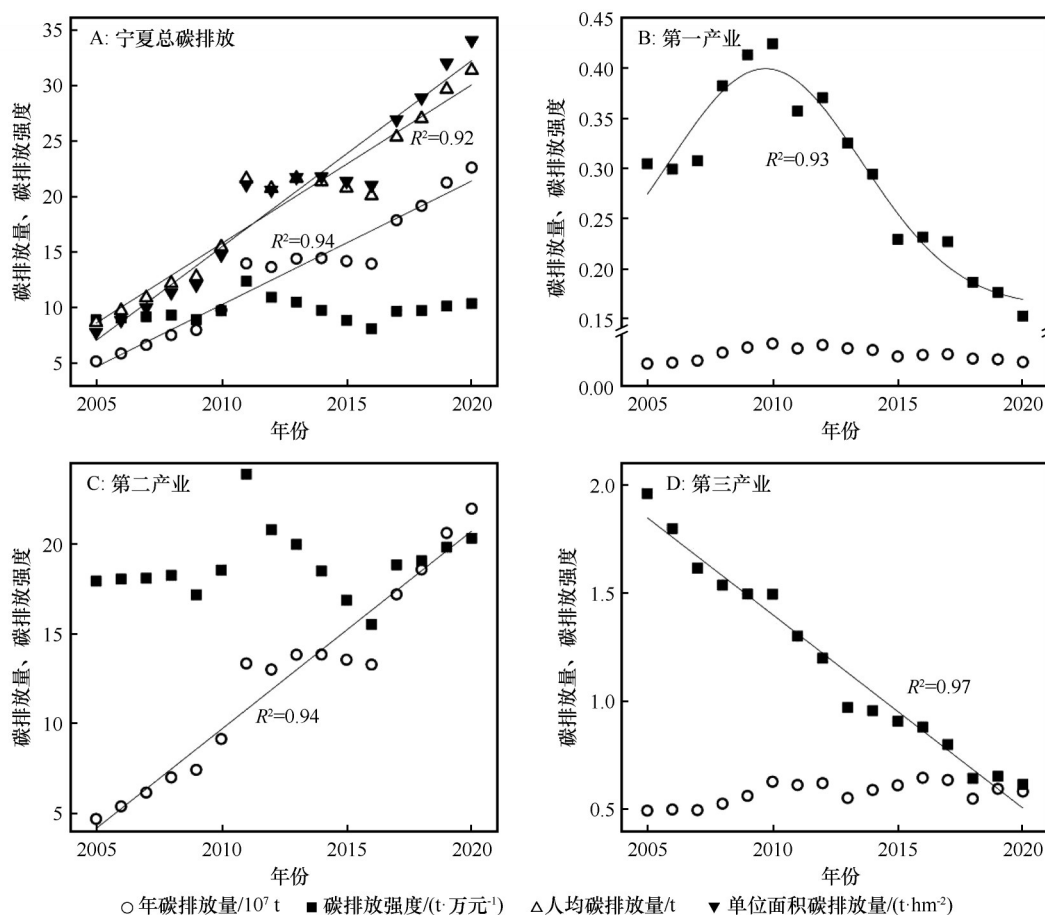


图1 2005—2020年宁夏年碳排放量、碳排放强度、人均碳排放量、单位面积碳排放量变化及分产业碳排放情况

Fig.1 Changes in annual carbon emissions, carbon intensity, carbon emissions per capita, carbon emissions per unit area and carbon emissions by industry in Ningxia from 2005 to 2020

放缓,增速分别为13.13%、12.06%和13.13%。宁夏的碳排放强度在2005—2011年和2016—2020年均均为增长趋势,年均增速分别为6.08%和6.56%,2011—2016年有所下降,年均降低速率为8.04%。

从各个产业的碳排放情况来看,第二产业是宁夏碳排放的主要来源(占比91%~97%),其碳排量远超过第一产业(占比<0.5%)和第三产业(占比2.8%~9.5%)。第一产业的碳排放量和碳排放强度在2010年之前为升高趋势,2010年之后均开始下降。第二产业的碳排放量在2011—2016年保持平稳,随后又继续增长,碳排放强度也在2016年开始出现回升。第三产业的碳排放量在16年间稍有增加,但碳排放强度逐年降低。对比宁夏碳排放总体变化和分产业碳排放变化情况可以看出,宁夏碳排放的年际变化基本由第二产业主导。

## 2.2 宁夏年碳排放量的影响因素分析

2005—2020年宁夏人口和GDP呈显著的逐年

增加趋势( $P<0.05$ ,图2)。从多年能源消费情况可以看出,宁夏能源消费总量逐年增加,其中2011—2016年增长明显放缓。能源结构以煤炭消费为主,其消费量在增加但比例略有降低,清洁能源的消费比例在“十二五”之后有所提高,说明宁夏能源结构正在优化。第二产业对宁夏GDP的贡献占有绝对优势,约占45%~50%,第三产业和第一产业占比较小,但2015年开始宁夏第三产业的比重逐年上升,第一产业和第二产业的比例均有所下降。

宁夏能源结构以原煤为主,一定程度依赖洗煤、焦炭等煤制品以及电力、原油、天然气等能源。宁夏碳排放量或碳排放强度较高的十个行业中,除交通运输、仓储和邮政业外,其余9个行业均来自第二产业。从行业性质来看,宁夏十大高排放行业由5个能源生产业、3个重工业、1个轻工业和1个服务业组成;对能源使用情况的分析发现,宁夏3个主要耗能大户中,电力、热力的生产和供应业(41.7%)基本以原煤为主,石油加工、炼焦和核燃

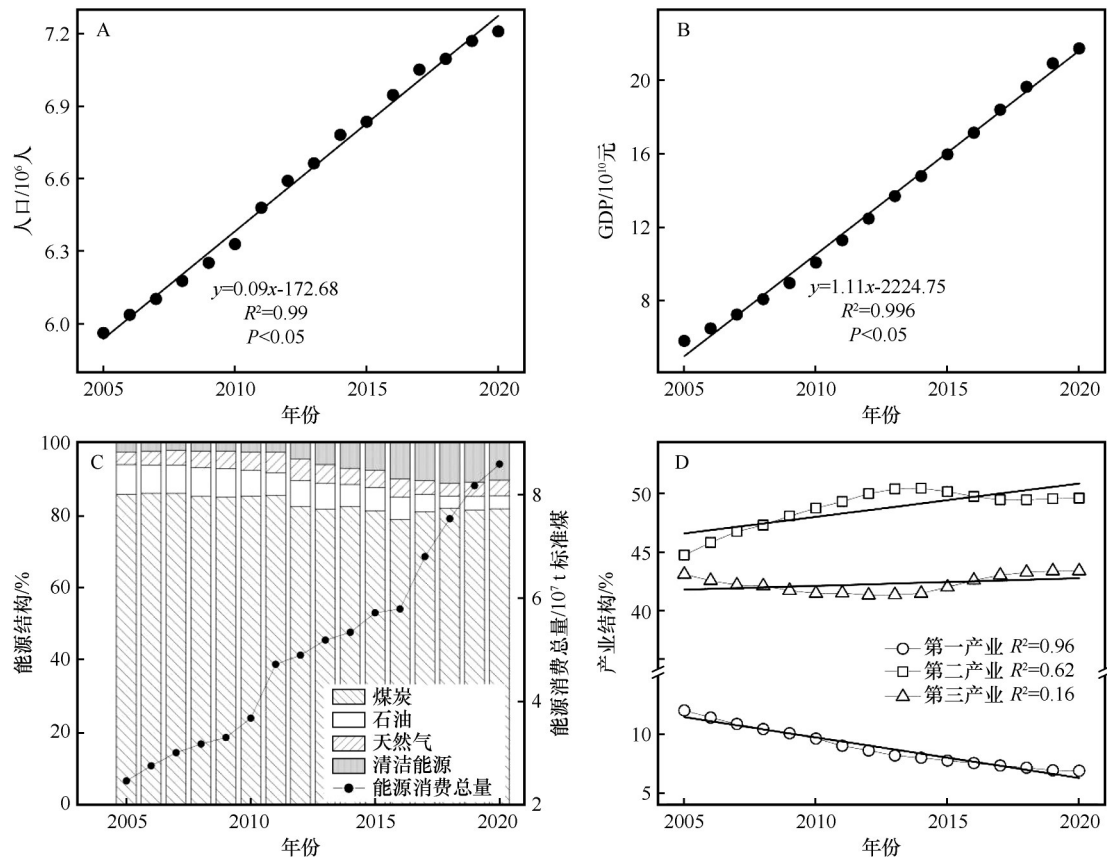


图2 2005—2020年宁夏人口(A)、GDP(B)、能源结构(C)及产业结构(D)

Fig.2 Population, GDP and composition of energy consumption and industrial structure in Ningxia from 2005 to 2020

料加工业(28.3%)以原煤、洗煤和原油3种能源为主,化学原料和化学制品制造业(20.4%)除了原煤一种主要能源外还有多种其他能源的使用(图3),造成宁夏整体能耗构成中原煤占比远远高于其他能源品种,一定程度依赖洗煤、焦炭等煤制品以及电力、原油、天然气等能源。与其他能源相比,原煤、洗煤和焦炭都属于热值低而碳含量高的燃料,而天然气的热值高且碳含量低,是一种相对清洁的化石燃料。

相关性分析结果表明:人口因素与年碳排放量之间无显著相关性( $P>0.05$ ,  $r=0.04$ ,图4),经济因素及产业结构因素与年碳排放量之间均存在显著正相关( $P<0.05$ ,  $r=0.96$ ;  $P<0.05$ ,  $r=0.81$ ),能源强度及能源结构因素与年碳排放量之间存在显著负相关( $P<0.05$ ,  $r=-0.86$ ;  $P<0.05$ ,  $r=-0.98$ )。

LMDI分析表明:人口和经济增长呈现显著的正效应,2005—2019年累计贡献约142.5 Mt CO<sub>2</sub>,能源结构和能源强度整体均为负效应,分别贡献约-9.3 Mt CO<sub>2</sub>和-9.0 Mt CO<sub>2</sub>,其中能源强度效应自2017年开始变为正效应,这可能与能源消费总量大

幅度增加有关。总体来看,经济增长是宁夏碳排放增长的主要驱动力,能源结构清洁化和由此带来的能源强度下降对碳排放增长呈现一定的负效应,抵消了部分由经济发展带来的碳排放增长(图4)。

2.3 宁夏年碳排放量与经济的脱钩分析

从碳排放变化与GDP的脱钩情况来看,2011年之前宁夏碳排放与GDP未脱钩,2011—2016年碳排放与经济增长相对脱钩,2017年至今为负脱钩状态(表2,图5),说明未来几年随着宁夏经济增长仍依赖能源消耗,碳排放量仍会继续增加。

对宁夏所有47种行业中的39种行业的分析发现,宁夏脱钩的行业数量在不断增加。2010、2015、2020年碳排放量与GDP绝对脱钩的行业占比由2010年的26%增加到2020年的46%(还有18%处于相对脱钩),未脱钩的行业主要是电力、热力生产和供应业、黑色金属冶炼和压延加工业等。

根据2020年碳排放量和GDP将39种行业分为以下8种类型:①超高排放高产值行业,即电力、热力生产和供应业,该行业占年排放量的78.75%,是碳排

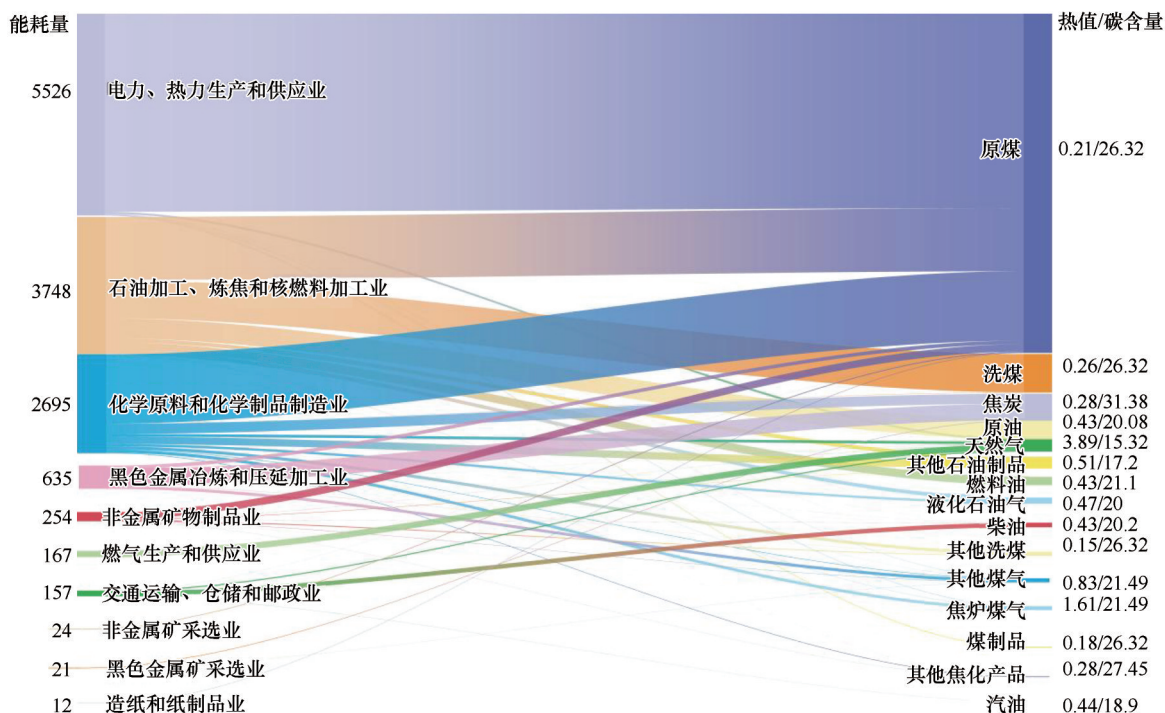


图3 2020年宁夏十大高排放行业能流图(单位:能耗量, $10^4$  tces;热值, $\text{PJ}\cdot 10^{-4}$  tonnes, $10^8$  m<sup>3</sup>;碳含量,tonne C·TJ<sup>-1</sup>)

Fig.3 Energy flow diagram of the top 10 high-emission sectors in Ningxia in 2020 (unit: energy consumption,  $10^4$  tces; calorific value,  $\text{PJ}\cdot 10^{-4}$  tonnes,  $10^8$  m<sup>3</sup>; carbon content, tonne C·TJ<sup>-1</sup>)

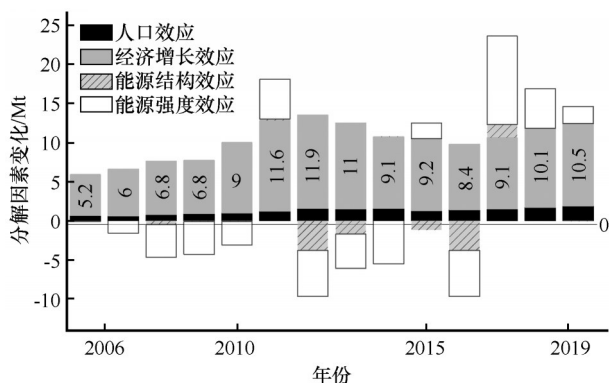


图4 2005—2019年宁夏碳排放年际变化因素分解

Fig.4 Carbon emission factor decomposition in Ningxia from 2005 to 2020

放量和碳排放强度最高的行业。②高排放中产值行业,即黑色金属冶炼和压延加工业,是第二大碳排放行业。③中排放中产值行业,包括非金属矿物制品业、燃气生产和供应业。④中排放高产值行业,包括石油加工、炼焦和核燃料加工业,化学原料和化学制品制造业,交通运输仓储和邮政业,煤炭开采和洗选业。⑤低排放超高产值行业,即其他服务业(包括金融业、房地产业、教育等),GDP约占总产值的39%,而碳排放量仅占0.21%。⑥低排放高产值行业,包括建筑业、批发、零售和住宿、餐饮业和农林牧渔业。

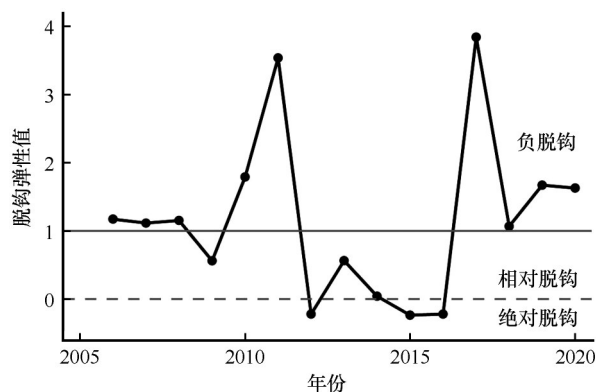


图5 2006—2020年宁夏年碳排放量与GDP增长脱钩情况(虚线:脱钩弹性值=0,实线:脱钩弹性值=1)

Fig.5 Decoupling of annual carbon emissions from economic growth in Ningxia from 2005 to 2020 (Dashed line: decoupling elasticity value=0, solid line: decoupling elasticity value=1)

⑦低排放中产值行业,包括食品制造业、通用设备制造业及有色金属冶炼和压延加工业等11个行业。⑧低排放低产值行业,包括黑色金属矿采选业、非金属矿采选业及造纸和纸制品业等16个行业。

### 3 讨论

本研究的碳排放计算采用了4个指标,可以应



用于排放量的评估、解析与经济的耦联关系以及区域之间横向对比等方面。从碳排放来看,宁夏年碳排放量在西北地区处于中等。2018年内蒙古、新疆、甘肃和青海碳排放量分别为552.6、466.6、198.2、55.0 Mt<sup>[23,26-28]</sup>,同期宁夏约191.6 Mt,但与中部和东部城市相比均偏高,分别比湖北和上海高约36%和90%<sup>[29-30]</sup>。由于宁夏人口稳定增长(图2A)且省域面积保持不变,因此人均碳排放量和单位面积碳排放量的增加均由年碳排放量主导。而宁夏年碳排放量的变动基本由第二产业主导,这是由于宁夏作为资源型省份,除了国务院确定的国家级宁东能源化工基地外,在“十三五”期间建成投产的神华宁煤煤制油等煤化工项目也直接导致全区第二产业碳排放量的迅速升高<sup>[31]</sup>。从碳排放强度来看,由于GDP一直增加(图2B),2005—2011年和2016—2020年碳排放强度的上升是由于年碳排放量的增长率大于GDP增速,即这两个时间段内GDP增长是以牺牲环境利益实现的。2011—2016年碳排放量无显著增加或降低趋势,GDP增加导致了碳排放强度降低,做到了既保持经济增长又维持碳排放不变的状态。

本文用到的2种碳排放影响因素分析方法,结果基本一致,但不同之处在于,LMDI可以展示每一年不同因素对年碳排放量影响的程度,而相关性分析结果是不同影响因素与年碳排放量多年变化之间的整体相关性,2种方法有一定的互补性,同时分析可达到全面理解各因素如何影响年碳排放量的目的。分析发现,经济增长和产业结构是宁夏年碳排放量持续攀升的主要驱动力,而人口因素的促进作用较小,能源结构和能源强度对碳排放增长具有一定的抑制作用。对比之下,相邻省份甘肃的人口数量较大但产业结构中高碳强度行业比重偏低,因此人口规模对甘肃碳排放是增量效应,产业结构对甘肃碳排放是减排效应<sup>[27]</sup>。

脱钩分析表明,年碳排放量与经济增长整体仍处于负脱钩状态,由于2005年以来宁夏经济处于增长状态,经济增长依然是以高强度碳排放为代价,是年碳排放量持续增加的主要驱动力。然而,细分行业分析发现,近年来脱钩的行业数量在不断增加(表2),这说明通过技术改革或者发展新产业可以逐步降低经济增长对能源消耗的依赖。宁夏的十大高排放行业中除交通运输、仓储和邮政业外,其余行业均来自第二产业,其共同特点是行业规模大

且大多属于涉及民生的经济支柱产业,在产生高经济贡献的同时也带来了大量的碳排放,以煤消费为主又是这些行业高碳排放的重要原因,因此这些行业是宁夏着手降低碳排放的重中之重。

虽然宁夏碳排放量在全国范围来看不是最高的,但由于人口数量和省份面积较小,其平均碳排放量已达到较高水平,未来面临着较大的减排压力。为了降低碳排放实现双碳目标,未来宁夏可从以下几个方面寻求发展:首先,继续开展能源结构改革,加快发展水电、核电等新能源,保障清洁电力供应,在电力系统安全稳定运行的前提下,动态协调电力低碳转型发展节奏。其次,加大对超高排放行业和中高排放行业的技术研发投入,提升高碳排放民生支柱行业能源利用效率。电力行业要通过完善能源品种价格的市场化形成机制,优化差别化电价、分时电价、居民阶梯电价政策,交通行业须推广应用低碳运输装备,提高运输组织效率,建设“集约、高效、绿色、智能”的城市货运配送服务体系<sup>[32-33]</sup>。最后,推进产业结构优化,逐步发展壮大低排放超高产值和低排放高产值行业,加快低排放中低产值行业的科技创新、增强产品市场竞争力。地方政府要根据宁夏自身优势和特色建立不同类型的特色产业并出台配套发展政策,加强专业人才的培养,提升人才吸引力和市场竞争力,形成在全国范围内独具特色的地方服务业。

本文虽然对宁夏细分行业的碳排放情况进行全面分析,但未能充分考虑各行业间的相互关联及影响。另外,数据资料的滞后一定程度上影响了计算结果的时效性与可参考性,未来在优化产业结构从而实现深度减碳方面还需开展进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 习近平.继往开来,开启全球应对气候变化新征程:在气候变化峰会上的讲话[N].人民日报,2020-12-13(002).
- [2] Friedlingstein P, O'sullivan M, Jones M W, et al. Global carbon budget 2022 [J]. *Earth System Science Data*, 2022, 14 (11): 4811-4900.
- [3] 李研妮.碳核算的统计范畴、测算方法及指标选择[J].金融纵横,2021,11:29-34.
- [4] 张德英,张丽霞.碳源排碳量估算办法研究进展[J].内蒙古林业科技,2005(1):20-23.
- [5] 刘竹,耿涌,薛冰,等.城市能源消费碳排放核算方法[J].资源科学,2011,33(7):1325-1330.
- [6] 刘明达,蒙古军,刘碧寒.国内外碳排放核算方法研究进展[J].热带地理,2014,34(2):248-258.



- [7] 刘竹, 关大博, 魏伟. 中国二氧化碳排放数据核算[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(7): 878–887.
- [8] Zhang H, Jin G, Zhang Z. Coupling system of carbon emission and social economy: a review [J]. Technological Forecasting and Social Change, 2021, 167: 120730.
- [9] Casey G, Galor O. Population growth and carbon emissions[R]. National Bureau of Economic Research, 2016.
- [10] Danish, Ulucak R, Khan S U D. Relationship between energy intensity and CO<sub>2</sub> emissions: does economic policy matter? [J]. Sustainable Development, 2020, 28(5): 1457–1464.
- [11] Liu J, Bai J, Deng Y, et al. Impact of energy structure on carbon emission and economy of China in the scenario of carbon taxation[J]. Science of the Total Environment, 2021, 762: 143093.
- [12] Cheng Z, Li L, Liu J. Industrial structure, technical progress and carbon intensity in China's provinces [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 2935–2946.
- [13] 王中英, 王礼茂. 中国经济增长对碳排放的影响分析[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(5): 88–91.
- [14] 彭希哲, 朱勤. 我国人口态势与消费模式对碳排放的影响分析[J]. 人口研究, 2010, 34(1): 48–58.
- [15] 赵敏, 张卫国, 俞立中. 上海市能源消费碳排放分析[J]. 环境科学研究, 2009, 22(8): 984–989.
- [16] 韩梦瑶, 刘卫东, 谢瀚甜, 等. 中国省域碳排放的区域差异及脱钩趋势演变[J]. 资源科学, 2021, 43(4): 710–721.
- [17] Guan Y, Shan Y, Huang Q, et al. Assessment to China's Recent Emission Pattern Shifts [J]. Earth's Future, 2021, 9(11): e2021EF002241.
- [18] Shan Y, Guan D, Zheng H, et al. China CO<sub>2</sub> emission accounts 1997–2015 [J]. Scientific Data, 2018, 5(1): 170201.
- [19] Shan Y, Huang Q, Guan D, et al. China CO<sub>2</sub> emission accounts 2016–2017 [J]. Scientific Data, 2020, 7(1): 54.
- [20] Shan Y, Liu J, Liu Z, et al. New provincial CO<sub>2</sub> emission inventories in China based on apparent energy consumption data and updated emission factors [J]. Applied Energy, 2016, 184: 742–750.
- [21] Liu Z, Guan D, Wei W, et al. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China [J]. Nature, 2015, 524(7565): 335–338.
- [22] Eggleston H, Buendia L, Miwa K, et al. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [C]. International Panel on Climate Change, 2006.
- [23] 王敏, 冯相昭, 安祺, 等. 基于脱钩指数和LMDI的青海省绿色低碳发展策略研究[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(5): 598–607.
- [24] Vadén T, Lähde V, Majava A, et al. Decoupling for ecological sustainability: a categorisation and review of research literature [J]. Environmental Science & Policy, 2020, 112: 236–244.
- [25] 国家统计局. 国民经济行业分类: GB/T 4754–2011 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [26] 马越峰, 刘爽. “双碳”背景下内蒙古碳排放情景仿真模拟研究[J]. 河北环境工程学院学报, 2023, 33(1): 1–7.
- [27] 吴茜, 陈强强. 甘肃省行业碳排放影响因素及脱钩努力研究[J]. 干旱区地理, 2023, 46(2): 274–283.
- [28] 马冬芬, 祝学军. 新疆碳排放驱动因素与减排策略分析[J]. 煤炭经济研究, 2022, 42(12): 25–31.
- [29] 秦旭阳, 吴丽丽. 湖北省碳排放现状深度解析及减碳途径研究[J]. 工业安全与环保, 2021, 47(增刊1): 53–57.
- [30] 候勃, 岳文泽, 王腾飞. 中国大都市区碳排放时空异质性探测与影响因素: 以上海市为例[J]. 经济地理, 2020, 40(9): 82–90.
- [31] 水木. 神华宁煤集团煤制油化工智能制造简介[J]. 通用机械, 2018(6): 22–25.
- [32] 舒印彪, 张丽英, 张运洲, 等. 我国电力碳达峰、碳中和路径研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 1–14.
- [33] 李晓易, 谭晓雨, 吴睿, 等. 交通运输领域碳达峰、碳中和路径研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 15–21.

## Study on carbon emission estimation methods and emission reduction pathways at provincial level—Ningxia as an example

Yang Jing<sup>1,2a,3</sup>, Guo Qun<sup>1,2b,3</sup>

(1. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2.a. Sino-Danish College, b. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. National Ecosystem Science Data Center, Beijing 100101, China)

**Abstract:** The interannual variation of carbon emissions and the reduction pathways at the provincial level are important to formulate carbon reduction measures and achieve the "goal of Carbon Peak and Carbon Neutrality (dual carbon goals)". By conducting jointly LMDI, correlation, and decoupling analysis, this study takes Ningxia, a typical arid province in Northwest China, as an example, and analyse the multi-year changes of carbon emissions, the influencing factors and the emission reduction pathways. The results show that (1) the annual carbon emissions and carbon emissions per capita and per unit area of Ningxia are all increasing with year, while the carbon emission intensity shows a fluctuating trend of first rising, then falling and then rising again. (2) GDP and energy intensity are the main influencing factors on the increase in annual carbon emissions, while energy structure and energy intensity have a dampening effect on the growth of carbon emissions. (3) It is found that the ten high-emission industries mainly use energy such as raw coal, which has a low calorific value and high carbon emissions, which has resulted in Ningxia's carbon emissions still not being decoupled from GDP, but the number of decoupled sectors is increasing. This study uses various indicators such as annual carbon emissions, carbon intensity and carbon emissions per capita and per unit area to serve the purposes of carbon peak attainment, industrial structure optimisation and carbon equity. Based on the main influencing factors, industry classification, and energy flow analysis, this study can provide efficient carbon reduction pathways from industrial structure optimisation and energy restructuring. This study will also provide scientific support for green development planning measures at the provincial level under the "dual carbon goals".

**Key words:** carbon emission; influencing factors; industry analysis; emission reduction pathways