



榆林市工业二氧化碳与大气污染物排放控制 协同效应研究

石涵笑^{1,2}, 韦安磊^{1,2}, 朱娅绮^{1,2}, 徐晓珍^{1,2}, 胡浩^{1,2}, 马俊杰^{1,2}

(1. 西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127; 2. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 陕西 西安 710127)

摘要 在“双碳”背景下,了解工业二氧化碳与大气污染物排放之间的协同效应对于实现减污降碳具有重要意义。该研究以榆林市 2015—2021 年二氧化碳与大气污染物排放量为例。首先,利用灰色相关分析对榆林市工业碳排放影响因素的相关度进行计算。其次,对 Kaya 恒等式和 LMDI 模型进行拓展,分析影响二氧化碳及主要大气污染物排放的驱动效应。最后,对榆林市重点行业火力发电行业和镁冶炼行业进行协同性分析并对榆林市减污降碳提出建议。结果表明,协同减排效应是驱动大气污染物排放减少的第一大驱动效应。二氧化碳的排放与氮氧化物的排放相关性最强,且 LMDI 模型分析表明氮氧化物与二氧化碳协同减排具有显著的协同效应。研究结果可为榆林市减污降碳协同增效以及高质量发展提供科学依据,为政府在制定一系列更为有效且切实可行的环境保护政策提供理论基础。

关键词 减污降碳;灰色相关分析;对数平均权重迪氏指数法;碳排放;协同发展

中图分类号: X32 **DOI**: 10.16152/j.cnki.xdxbzr.2024-03-008

Study on the synergistic effect of industrial carbon dioxide and atmospheric pollutant emission control in Yulin City

SHI Hanxiao^{1,2}, WEI Anlei^{1,2}, ZHU Yaqi^{1,2}, XU Xiaozhen^{1,2},
HU Hao^{1,2}, MA Junjie^{1,2}

(1. College of Urban and Environment, Northwest University, Xi'an 710127, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127, China)

Abstract Under the background of "double carbon" policy, it is of great significance to understand the synergistic effect of industrial carbon dioxide and air pollutant emission to realize pollution reduction and carbon reduction. This study takes the carbon dioxide and air pollutant emissions in Yulin City from 2015 to 2021 as an example. Firstly, the correlation degree of the influencing factors of industrial carbon emissions in Yulin City is calculated by using gray correlation analysis. Secondly, the Kaya constant equation and LMDI model are expanded to analyze the driving effects affecting carbon dioxide and major air pollutant emissions. Finally, a synergistic analysis of the thermal power generation industry and the magnesium smelting industry, which are the key industries in Yulin City, was conducted, and recommendations were made for the reduction of pollu-

收稿日期: 2023-11-08

基金项目: 国家自然科学基金(51208424); 陕西省环境介质痕量污染物监测预警重点实验室开放基金(SHJKFJJ202307)。

第一作者: 石涵笑, 女, 从事环境系统分析研究, shihanxiao@stumail.nwu.edu.cn。

通信作者: 韦安磊, 男, 博士, 副教授, 从事可持续水处理技术、水环境修复技术、环境大数据分析研究, alwei@nwu.edu.cn。

tion and carbon emissions. The results show that the synergistic emission reduction effect is the first major driving effect driving the reduction of air pollutant emissions. Carbon dioxide emissions have the strongest correlation with nitrogen oxide emissions, and the LMDI model analysis shows that nitrogen oxide and carbon dioxide have significant synergistic effect. The results of this study can provide a scientific basis for the synergistic effect and high-quality prevention of pollution and carbon reduction in Yulin City and provide theoretical support for the government to formulate more practical and feasible strategies for pollution and carbon reduction.

Keywords pollution and carbon reduction; gray correlation analysis; LMDI; carbon emissions; synergistic development

2020年9月22日,中国政府在第七十五届联合国大会上宣布:“中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”^[1]。实施“双碳”战略是我国实现高质量发展的内在要求,也是推进人类命运共同体的重要抓手。榆林市是以煤炭开采和煤基产业为代表的资源型城市,是四大国家级能源化工基地之一。榆林市以煤炭开采、油气开发、煤炭等为主导工业,这些工业均是能源密集型、碳排放较高的工业^[2]。习近平总书记在榆林考察时强调,榆林是国家重要能源基地,对国民经济和社会的发展具有举足轻重的作用。

榆林地区万元国内生产总值能耗和污染物排放系数高于全省平均水平,目前的产业结构对于区域空气质量持续改善和碳减排均造成较大压力,如何协同推进减污降碳成为亟待解决的问题。要坚持落实新发展理念,以“降碳”为抓手,引导经济和社会全面绿色转型,培育绿色发展新动能,坚持生态优先、绿色发展的方向,通过布局优化、结构调整和效能提高,使生态环境保护的引导、优化和倒逼效应得到最大程度发挥,加快我国应对气候变化的能力明显提高,逐步实现二氧化碳达峰,推动经济和社会发展的全面绿色转型^[3]。

近年来,已有学者对重点碳排放和大气污染物排放间的协同作用展开了研究。针对大气污染排放影响因素的研究方法包括灰色关联分析法^[4]、主成分分析法^[5]、相关性分析法^[6]和时空地理加权回归法^[7]。Ren等^[8]着眼于研究长江流域等典型地区的尺度。此外,还有一些研究聚焦于省级尺度,例如北京市、重庆市、上海市、河南省和黑龙江省^[9-13]。只有了解到碳排放的影响因子种类及在空间上的分布情况才能更有针对性的设计减污降碳方案,这对于促进我国产业的低碳转

型与绿色发展^[14-15],促进节能减排^[16-18],实现碳达峰和大气质量达标等方面都具有十分重要的意义。

对数平均权重迪氏指数法(logarithmic mean weight division index method, LMDI)作为主要的因式分解方法用于分析碳排放的各种影响因素,其特点在于其分解过程不会产生新的残差以及加法分解与乘法分解之间可以相互转换,因此大多数研究选择采用该方法来分析碳排放的各种影响因素。苏佳等^[19]利用LMDI对西北地区重点城市工业大气污染的时空演化特征和主要影响因素进行研究,发现工业污染排放主要受技术改善和产业结构效应带来的抑制作用以及经济发展效应带来的促进作用所影响。杨婧雯等^[20]运用Kaya恒等式和LMDI模型,研究云南省大气二氧化碳及其主要污染物排放的驱动作用,发现了协同减排是影响其减排的主导因素。李薇等^[21]利用LMDI模型构建了碳排放的指标体系,对甘肃省5个典型生态区域近10年的种植业生产碳排放量进行了估算,结果显示经济因素对碳排放的影响最为显著。Liu等^[22]利用LMDI研究了我国4个代表城市各驱动因素对碳排放的贡献。王长建^[23]基于扩展的Kaya恒等式,对1952—2010年间新疆一次能源消耗的主要影响因素进行分析,得出经济效应和人口效应是最主要的影响因素。邓宣凯^[24]扩展Kaya恒等式及采用LMDI方法对武汉市2009—2019年土地利用碳排放变化进行了因素分解,得出用地效率和土地碳排放强度是碳排放增长的抑制因素。

推动协同减污降碳是实现我国“碳达峰碳中和”的重要举措^[25]。然而,目前对于榆林市重点产业领域的协同减污降碳相关研究仍相对不足。为更好地了解榆林市减污降碳的现状和重点产业的发展情况,本研究首先利用灰色关联分析探究榆林市碳排放及大气污染物排放的关联度;其次,

运用 Kaya 恒等式和拓展的 LMDI 分解研究二氧化碳及其主要大气污染物排放的驱动效应;最后,对重点行业进行协同性分析,并提出榆林市减污降碳的建议。研究成果将为榆林市减污降碳、生态工程合理布局以及制定更具可操作性的减排措施提供理论基础和决策支持。

1 研究材料与方法

1.1 研究区域与数据

榆林市全市辖设榆阳区、横山区、神木市、

府谷县、靖边县、定边县、绥德县、米脂县、佳县、吴堡县、子洲县和清涧县共计 12 个县市区、155 个乡镇、29 个街道办事处和 2 967 个行政村^[26]。工业大气污染物排放和社会经济数据主要基于 2015—2021 年《中国环境统计年鉴》和 2015—2021 年《榆林市统计年鉴》。2021 年,榆林市规上重点排污企业共计 504 家,主要集中分布神木市、府谷县、榆阳区,在其他各区县的分布则较为分散(如图 1 所示)。

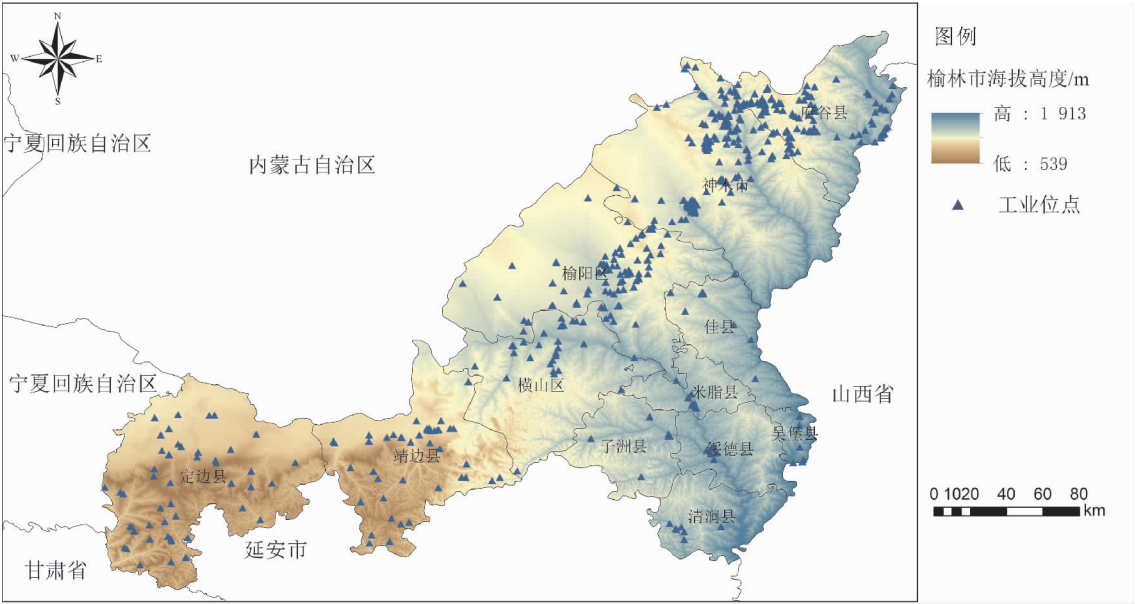


图 1 2021 年榆林市工业企业分布位点图

Fig. 1 Distribution of industrial enterprises in Yulin City in 2022

1.2 灰色关联度

邓聚龙提出的灰色关联度分析方法是通过对相关数据进行几何相似度分析,两者越是相似,灰色关联度就越大^[27]。参考序列 X 包括各种影响目标序列的因素为二氧化硫排放量(X_1)、氮氧化物排放量(X_2)、颗粒物排放量(X_3)、工业生产总产值(X_4)、能源消费量(X_5)以及原煤产量(X_6),目标序列 Y 为二氧化碳排放量。

由于各影响因素的量纲不同,需对原始数据进行归一化处理。通过绝对差值计算关联系数,计算各影响因素的加权关联度。具体计算公式为

$$X'_{ij} = \frac{(X_i - X_j)}{S_j} \tag{1}$$

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{(\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max})}{(\Delta_i(k) + \rho \Delta_{\max})} \tag{2}$$

式中: X'_{ij} 为数据标准化结果; X_i 为数据原始值; X_j

为同一影响因素的平均值; S_j 为同一影响因素的标准差; $\Delta_i(k)$ 为参考序列与目标序列在 k 点的绝对差值; $\Delta_{\min}$ 和 $\Delta_{\max}$ 为目标序列在个时刻绝对差值的最小值和最大值; ρ 为分辨系数; $\rho = 0.5$, r_i 为关联度。

1.3 Kaya 恒等式

Kaya 恒等式由日本学者 Yoichi Kaya 提出^[28],是当前分析和理解全球碳排放以及其驱动因素的关键方法。该方法主要考虑了碳排放强度、能源强度、经济效益和人口因素对碳排放的影响,但在工业活动造成的碳排放占主导的情况下,可以只考虑碳排放强度、能源强度和经济效应,计算公式为

$$C = \frac{C}{E} \times \frac{E}{P} \times P = I_c \times I_e \times I_p \tag{3}$$

式中: C 表示二氧化碳排放量; E 表示能源消费总

量; P 表示国内生产总值; I_C 表示单位能源消耗排放的二氧化碳量; I_E 表示单位 GDP(国内生产总值)消耗的能源用量; I_P 表示经济效应。

Kaya 恒等式可用于研究大气污染物排放的影响因素,如经济增长、能源消耗和人口变化等影响因素^[29]。基于此,本研究通过对 Kaya 恒等式进行了拓展和分解,去除了人口因素带来的不确定性,更准确地评估不同变量对污染物排放的实际影响。同时,通过大气污染物与二氧化碳排放量的比例关系来表征二者的协同效应^[30]。计算公式如下

$$S = \frac{C}{E} \times \frac{E}{P} \times P \times \frac{S}{C} = I_C \times I_E \times I_P \times S_1 \quad (4)$$

$$N = \frac{C}{E} \times \frac{E}{P} \times P \times \frac{N}{C} = I_C \times I_E \times I_P \times S_2 \quad (5)$$

$$P = \frac{C}{E} \times \frac{E}{P} \times P \times \frac{P}{C} = I_C \times I_E \times I_P \times S_3 \quad (6)$$

式中: S 表示二氧化硫排放量; N 表示氮氧化物排放量; P 表示颗粒物排放量; S_1 表示单位二氧化碳引起的二氧化硫变化; S_2 表示单位二氧化碳引起的氮氧化物变化; S_3 表示单位二氧化碳引起的颗粒物变化。

1.4 LMDI 分解

目前指数分解方法作为定量分解指标变化的方法,其中 LMDI 因为分解后没有无法解释的残差,使用加法分解的转换表达式相对简单^[31-33],具体拓展公式为

$$\Delta C = C(t) - C(0) = C_e + E_e + G_e \quad (7)$$

$$G_e = \sum \frac{C(t) - C(0)}{\ln C(t) - \ln C(0)} \ln \frac{I_{C(t)}}{I_{C(0)}} \quad (8)$$

$$E_e = \sum \frac{C(t) - C(0)}{\ln C(t) - \ln C(0)} \ln \frac{I_{E(t)}}{I_{E(0)}} \quad (9)$$

$$G_e = \sum \frac{C(t) - C(0)}{\ln C(t) - \ln C(0)} \ln \frac{I_{P(t)}}{I_{P(0)}} \quad (10)$$

$$\Delta S = S(t) - S(0) = C_e + E_e + G_e + S_s \quad (11)$$

$$S_s = \sum \frac{S(t) - S(0)}{\ln S(t) - \ln S(0)} \ln \frac{S_1(t)}{S_1(0)} \quad (12)$$

$$\Delta N = N(t) - N(0) = C_e + E_e + G_e + S_N \quad (13)$$

$$S_N = \sum \frac{N(t) - N(0)}{\ln N(t) - \ln N(0)} \ln \frac{S_2(t)}{S_2(0)} \quad (14)$$

$$\Delta P = P(t) - P(0) = C_e + E_e + G_e + S_p \quad (15)$$

$$S_p = \sum \frac{P(t) - P(0)}{\ln P(t) - \ln P(0)} \ln \frac{S_3(t)}{S_3(0)} \quad (16)$$

式中: $C(t) - C(0)$ 表示从 0 年至 t 年二氧化碳排放总量的变化值;其他大气污染物同理; G_e 表示经济效应; C_e 表示排放强度效应; E_e 表示能源强度效应。对拓展后的 Kaya 恒等式添加了主要大气污染物与二氧化碳协同效应影响, S_s 表示二氧化碳与二氧化硫协同效应; S_N 表示二氧化碳与氮氧化物协同效应; S_p 表示二氧化碳与颗粒物协同效应。

2 榆林市二氧化碳和主要大气污染物排放协同分析

2.1 二氧化碳排放影响因素灰色关联度分析

根据 2015—2021 年榆林市工业二氧化碳及大气污染物排放量以及碳排放强度数据绘制图 2。由图可知,2015—2021 年榆林市工业的二氧化碳碳排放量呈逐年上升的趋势,其中 2021 年增长幅度最大,比 2020 年增长了 48.7%。碳排放强度总体呈下降趋势,2015—2021 年碳排放强度有小幅增长。由于榆林市能源结构没发生变化,能源活动排放主要包括化石燃料燃烧排放及化石燃料作为非能源利用排放,且榆林市主要为高能耗和高污染工业行业。大气污染物的排放量总体呈波动下降趋势,2018—2020 年氮氧化物与颗粒物的排放有小幅度的增长,与碳排放强度趋势相同,二氧化硫排放一直呈下降趋势。这主要是因为榆林市在过去几年内实施了针对大气污染物的有效管控措施,工业重点行业实现了大气污染物超净排放。

分析二氧化碳排放与大气污染物排放的协同性,有助于更好地理解二者之间的关系,并找到降低它们对环境的有效途径。为了判断二氧化碳与污染物排放之间是否具有协同性,通过灰色相关对榆林市的二氧化碳排放量和污染物排放量之间的相关系数进行分析。将榆林市 2015—2021 年的二氧化碳排放量作为参考序列,分别以二氧化硫排放总量、氮氧化物排放总量、颗粒物排放量、工业生产总产值、能源消费总量及原煤产量为比较序列,计算得到的灰色关联度详见表 1。

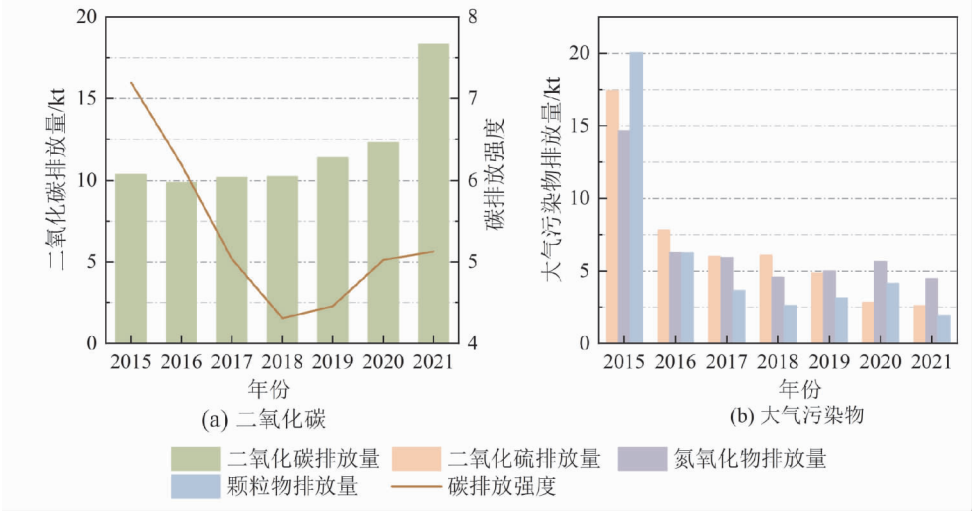


图 2 2015—2021 年榆林市二氧化碳及大气污染物排放量

Fig. 2 CO₂ and air pollutant emissions in Yulin City from 2015 to 2021

表 1 二氧化碳排放量与各分解因素关联度

Tab. 1 Correlation between CO₂ emissions and various decomposition factors

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
关联度	0.677 0	0.821 0	0.633 0	0.605 6	0.781 1	0.731 2

氮氧化物排放的相关系数为 0.821 0,表明 2015—2021 年表明氮氧化物排放的变化对二氧化碳排放的影响最为显著;其次,能源消费总量的相关系数为 0.781 1,说明能源消费对二氧化碳排放也有较强的驱动。其余影响因素的关联度依次是原煤产量、二氧化硫排放量、颗粒物排放量和工业总产值,各个因素之间的关联度都大于 0.6,显示出了相对显著的相关性,因此可以使用因式分析和协同减排研究这些因素之间的相互关系。

2.2 榆林市二氧化碳和主要大气污染物协同减排效应分析

利用拓展的 Kaya 恒等式和 LMDI 分解对 2015—2021 年二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物及颗粒物的排放情况进行分解计算,得到榆林市二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物及颗粒物排放影响因素贡献率情况(如图 3 所示)。

总体而言,二氧化碳的总效应呈总体上升趋势。2015—2016 年,2016—2017 年与 2017—2018 年的经济效应贡献率在这几年为负值,呈现反向驱动;自 2018 年以后,二氧化碳的经济效应贡献率为正值,对二氧化碳的排放呈正向驱动〔见图 3 (a)〕。其中 2020—2021 年的贡献率为 159.7%,排放效应主要呈正向驱动,但 2018—2019 年及 2019—2020 年排放效应的贡献率为负值,呈反向驱动。能源强度效应主要呈现负向驱动,以 2021

年为例,负向贡献率为 62.1%。协同效应和能源强度排放效应对于二氧化硫、氮氧化物及颗粒物的排放总效应减少呈正向驱动。以 2021 年为例,对于二氧化硫减排的贡献率分别为 129.8%与 18.5%〔见图 3 (b)〕;对于氮氧化物减排的贡献率分别为 147.9%与 29.7%〔见图 3 (c)〕;对于颗粒物减排的贡献率分别为 124.1%与 15.0%〔见图 3 (d)〕。

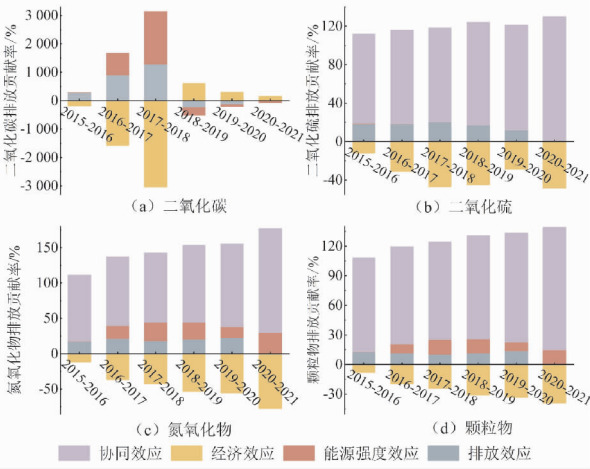


图 3 榆林市二氧化碳及大气污染物排放驱动贡献率

Fig. 3 Contributions of factors influencing CO₂ and air pollutant emissions for Yulin city

2015—2021 年驱动大气污染物排放减少的第一大驱动效应是协同减排效应。根据 2015—

2016 年二氧化碳及主要大气污染物排放减少量计算得每单位二氧化碳减排量能带来 8.85 单位二氧化硫的减排,每单位二氧化碳减排量能带来 7.74 单位氮氧化物的减排,每单位二氧化碳减排量能带来 12.97 单位颗粒物的减排。经济效应对二氧化碳的排放起正向驱动,但对于大气污染物的排放减少均呈反向驱动。

大气污染物中氮氧化物与二氧化碳协同减排的效果较为明显,这可能与榆林市的产业结构有关。根据 2021 年榆林市工业大气污染物排放数据来看,氮氧化物排放最多的行业及依次为火力发电与镁冶炼行业,且火力发电行业是榆林市的支柱产业(见图 4)。因此,选择火力发电行业与镁冶炼行业作为榆林市重点行业二氧化碳与大气污染物排放协同性的研究对象。

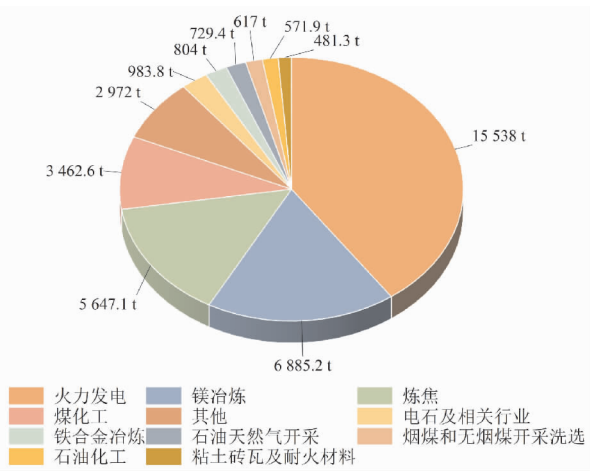


图 4 2021 年榆林市工业各行业氮氧化物排放量情况
Fig.4 Nitrogen oxides emissions from industries in Yulin City in 2021

3 榆林市重点行业二氧化碳与大气污染物排放协同分析

对 2021 年榆林市火力发电行业与镁冶炼行业各企业的二氧化硫、氮氧化物、颗粒物的排放量与二氧化碳的排放量进行归一化处理,分析排放协同性。

3.1 火力发电行业二氧化碳与大气污染物排放协同分析

根据火力发电行业的二氧化碳及大气污染物排放量绘制图 5。火力行业所产生的二氧化碳排放与大气污染物呈现正相关关系,特别是氮氧化

物与二氧化碳排放量之间的相关性最高。这表明加快淘汰火力发电行业的落后煤电产能,对于该行业内氮氧化物和二氧化碳的协同减排效果将产生显著影响。

榆林市目前 600 MW 及以上机组发电量占比为 54.7%,碳排放占比为 44.2%;供电煤耗在 300 gce/kWh 以下的机组只有 1 000 MW 和部分 600 MW 的超超临界机组。在脱硫措施的改造上,主要通过增加多层吸收塔、喷淋塔和托盘,增加浆液循环量及扩大喷淋面积等方法;在超低排放改造后,二氧化硫的排放量减少了 58.06%,减排效果显著,故榆林市火电行业的碳排放量与二氧化硫排放量相关性较强[见图 5(a)]。

从目前榆林市火力发电装机规模来看,300 MW 的机组发电量占比为 17.0%,碳排放占比为 14.9%。300 MW 以下机组装机容量达 565 万千瓦时,占比为 22.9%,其中燃兰炭尾气机组均属于 100 MW 以下机组,300 MW 以下机组发电量占比为 28.0%,碳排放占比为 41.0%,即装机容量越小的机组,每生产一度电排放的二氧化碳越多。部分 600 MW 的机组和 300 MW 的机组均为亚临界机组,这些效率低、煤耗高、性能差的亚临界机组锅炉可产生较高的氮氧化物排放量。对于火力发电行业,近年来榆林市对火电厂进行了超低排放改造。在氮氧化物排放控制方面,一般都设有低氮燃烧控制装置,烟气脱硝装置在逐步推广应用。尽管改造后火电企业的氮氧化物减排效果显著,但总排放量依然很大,导致二氧化碳排放与氮氧化物排放呈现出很强的相关性[见图 5(b)]。

近年来,榆林市绝大多数燃煤电厂进行了超低排放改造。在除尘措施改造上,主要为增加现有静电除尘中的电场数量、采用高效/超净滤袋,在湿法、半干法脱硫的同时增加除尘一体化设备等,使颗粒物排放量减少了 44%,减排效果显著,因此榆林市火电行业的二氧化碳排放量与颗粒物排放量相关性较强[见图 5(c)]。

3.2 镁冶炼行业二氧化碳与大气污染物排放协同分析

根据镁冶炼行业的二氧化碳及大气污染物排放量绘制图 6。镁冶炼行业所产生的二氧化碳排放与大气污染物排放之间存在正相关关系,尤其是氮氧化物与二氧化碳排放之间的相关性最高。

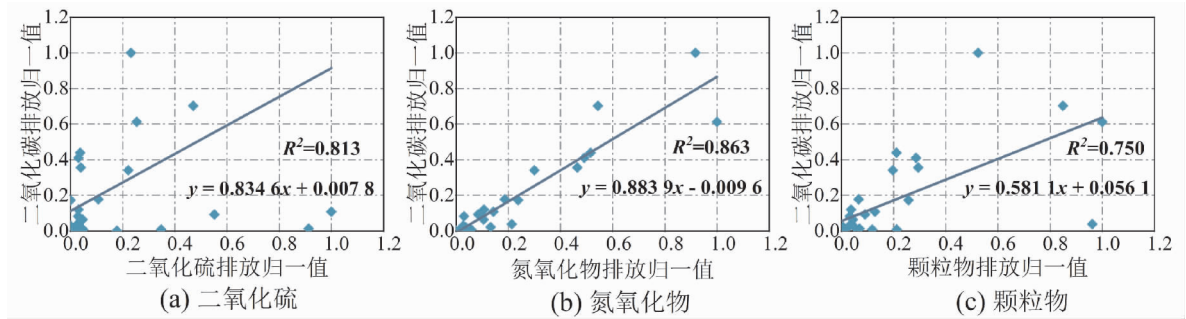


图5 榆林市火力发电行业二氧化碳与大气污染物排放量的相关性

Fig. 5 Correlation between CO₂ emissions and air pollutant emissions from the thermal power generation industry in Yulin City

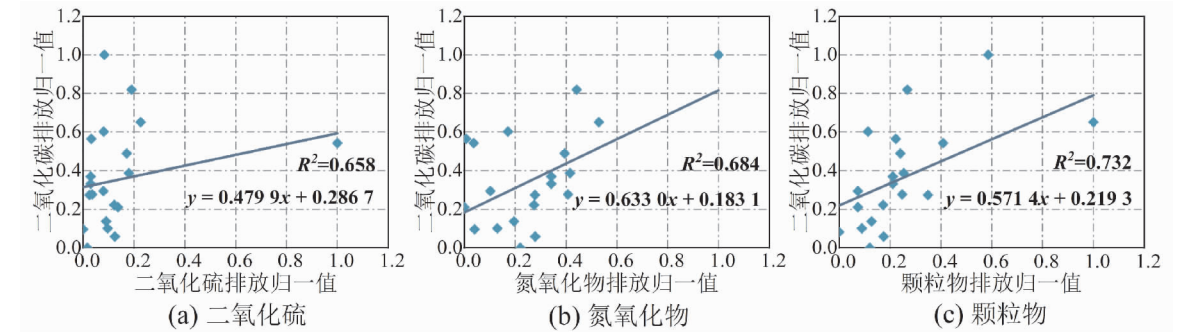


图6 榆林市镁冶炼行业二氧化碳与大气污染物排放量的相关性

Fig. 6 Correlation between CO₂ emissions and air pollutant emissions in the magnesium smelting industry in Yulin City

榆林市镁冶炼行业是全国乃至全球最大原镁生产基地,原镁产量约占全国的 60%、全球的 50%。榆林镁产业的发展与兰炭产业有机结合,充分利用煤干馏过程中产生的荒煤气^[34],以实现能耗降低、成本节约和资源循环利用的目标。目前,金属镁产业链以“兰炭-铁合金-金属镁”“兰炭-金属镁”“焦炭-金属镁”为主。

榆林市镁冶炼行业主要采用皮江法炼镁工艺,包括白云石煅烧、配料压球、真空热还原和精炼与浇铸 4 个工段。在白云石煅烧阶段,荒煤气燃烧、白云石分解会产生二氧化碳,同时荒煤气中残留的二氧化硫也会随之排放。在粗镁精炼阶段,为了防止镁的氧化燃烧,一般通过在液态镁表面撒硫磺粉产生的还原性来阻止镁的氧化燃烧,从而导致间歇的二氧化硫排放。与此同时,粗镁精炼通常以电加热提供热源,这也伴随着二次能源消耗导致的二氧化碳排放。从上述分析可知,在皮江法炼镁工艺过程中,二氧化硫排放与二氧化碳排放相关性较强〔见图 6(a)〕。对于镁冶炼行业,在还原阶段特别是还原罐加热过程,在高温下空气中的氮气和氧气会发生反应生成氮

氧化物。目前,榆林市多采用卧式还原罐和燃烧加热,能耗高,还原阶段其能耗占总能耗的 65% 以上。此阶段消耗的能源多、废气产排量多,导致碳排放与氮氧化物排放呈现出较强的相关性〔见图 6(b)〕。在镁冶炼过程中,颗粒物排放是一个比较普遍的问题。在金属镁冶炼的炉料处理过程中,可能会产生粉尘和细颗粒物的排放。此外,金属镁冶炼过程中将炉料进行装料会产生一定数量的粉尘和细颗粒物的排放。另外还需要使用电炉进行加热反应,这个过程中也会产生大量的粉尘和细颗粒物的排放。因此,镁冶炼行业的二氧化碳排放和颗粒物排放具有较强的相关性〔见图 6(c)〕。

4 行业优化建议

传统电石行业采用电热法进行工业生产,但其能耗高、污染严重、投入大、产出低的特点导致经济效益和环境效益均不佳。《榆林市化工产业“十四五”发展规划》提出到 2025 年电石领域能效优于标杆水平的产能比例达到 30%,并淘汰

落后产能,实现绿色低碳发展。榆林市现有的电石企业规模极不平衡,技术和能耗水平较为落后,产业集约化水平较低。因此,绿色低碳形势驱动下的产业结构优化升级成为电石领域当下发展的必然趋势,也是未来解决榆林市电石行业发展和减污降碳目标协同性问题的关键。实现降碳目标首先应从行业规模方面着手。建议有序淘汰煤电落后产能,其中纯燃煤电厂中300 MW以下机组多为企业自备电厂,应严格落实在国家政策允许的领域以外禁止新(扩)建燃煤自备电厂的要求。同时,需要加快现役机组的节能升级和灵活性改造,适度控制火力发电的增长,积极推进供热改造,争取到2030年,控制火电供电煤耗达到272 gce/kWh的标准。《榆林市可再生能源发展十四五规划》所提出272 gce/kWh的标准煤气混烧机组和兰炭尾气机组的煤耗水平均较高,分别为470 gce/kWh和513 gce/kWh。根据《2030年前碳达峰行动方案》要求,到2030年燃煤及气固混烧机组全部达到GB 21258—2017规定的先进值,兰炭尾气机组达到目前榆林市的最优值(393.3 gce/kWh)。另外,榆林市需要加快推动可再生能源开发,力争到2025年可再生能源装机量达到3.7 GW。

榆林市的镁冶炼行业突出特点是通过与当地兰炭产业有机结合,以降低能耗、节约成本和强化资源利用为目标。在此背景下,对于不符合产业政策、规划环评、产能和能耗置换以及区域削减等要求的项目要坚决停批和停建。镁冶炼行业的工艺技术装备和产品能耗必须达到国内先进水平。为加快淘汰落后产能,产能小于20 kt/a的金属镁企业将进行自愿淘汰、整合重组、升级改造。到2025年,应全面淘汰落后产能,新上项目的能耗必须达到先进值,并且产能需大于或等于50 kt/a。为此,应实施镁冶炼技术行业的竖式还原炉、白云石煅烧双膛竖窑等技术和装备改造。到2025年,竖罐产能比例和白云石煅烧双膛竖窑的使用率均将超过50%。同时,提升有色金属生产过程中余热回收和原料中其他有价值碱金属回收的水平,以推动单位产品能耗的持续下降。最后,应构建完整的“原料购进-原镁冶炼-合金铸造加工-回收再生”的产业链以延伸产业链条。通过上述措施,可以帮助榆林市金属镁行业尽快实现减污降碳、绿色发展的目标。

5 结语

2015—2021年榆林市工业的二氧化碳碳排放量呈逐年上升的趋势,其中2021年增长幅度最大,比2020年增长了48.7%。大气污染物的排放量总体呈波动下降趋势,2020年氮氧化物与颗粒物的排放有小幅度的增长,二氧化硫一直呈下降趋势。根据对榆林市碳排放和大气污染物排放进行相关性分析发现,氮氧化物排放与二氧化碳排放关联度最高,且与二氧化碳协同减排的效果较为明显。

基于Kaya恒等式,将榆林市工业碳排放变动的的作用分解为经济效应、能源强度效应和排放效应,大气污染物排放变动作用分解为经济效应、能源强度效应和排放效应及协同作用。利用拓展的LMDI模型分析了榆林市的二氧化碳和主要大气污染物的协同减排效应。从整体来看,协同效应对于减排均起到了正向驱动的作用。以2021年为例,协同效应对二氧化硫、氮氧化物和颗粒物的减排贡献率分别为129.8%、147.9%和124.1%。2015年至2021年间,协同减排效应成为驱动氮氧化物排放减少的主要因素之一。

根据2021年榆林市工业大气污染物排放数据,氮氧化物排放最多的行业为火力发电行业与镁冶炼行业,因此选择作为榆林市重点行业碳排放和大气污染物排放协同性的研究对象。火力发电行业氮氧化物与二氧化碳排放的协同性最强,其次为二氧化硫与颗粒物。镁冶炼行业的氮氧化物与二氧化碳排放协同性最强,其次是颗粒物与二氧化硫。针对这两个行业的减污降碳潜力,建议从淘汰落后产能入手,进行升级改造,同时可发展绿色可再生能源,从而全面提升生态环境保护工作水平,推动榆林市经济社会高质量发展。

参考文献

[1] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[N]. 人民日报. 2020-09-23(03).

[2] 榆林市经济社会总体规划(2016—2030年)[EB/OL]. (2016-03-25)[2023-10-19]. <https://gsc.yl.gov.cn/gwhj/3391>.

[3] 榆林市“十四五”生态环境保护规划[EB/OL]. (2021-09-18)[2023-10-19]. https://www.shaanxi.gov.cn/zfxxgk/zcwjk/szf_14998/qtwj/202208/t20220808_2235760.html.

- [4] 王乐, 田东方. 基于灰色关联分析法的宜昌市空气质量影响因素分析[J]. 能源环境保护, 2019, 33(5): 60-64.
WANG L, TIAN D F. Analysis of factors affecting air quality in Yichang city based on grey correlation analysis[J]. Energy Environmental Protection, 2019, 33(5): 60-64.
- [5] 卜兴兵, 方自力, 俸强, 等. 基于主成分分析的空气质量综合评价研究: 以四川省 21 个城市为例[J]. 四川环境, 2023, 42(3): 51-56.
BU X B, FANG Z L, FENG Q, et al. Comprehensive evaluation of air quality based on principal component analysis: Take 21 cities in Sichuan Province as an example[J]. Sichuan Environment, 2023, 42(3): 51-56.
- [6] 王暖霞, 尹素真, 李超. 济南市 2015—2021 年 PM_{2.5}、O₃ 和 NO₂ 污染变化特征及相关性分析[J]. 环境保护, 2023, 41(7): 122-126.
WANG N X, YIN S Z, LI C. Pollution change characteristics and correlation analysis of PM_{2.5}, O₃, and NO₂ in Jinan City from 2015 to 2021[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2023, 41(7): 122-126.
- [7] 马伟波, 赵立君, 王楠, 等. 长三角城市群减污降碳驱动因素研究[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(10): 1273-1281.
MAN W B, ZHAO L J, WANG N, et al. Study on driving factors of pollution and carbon reduction in the Yangtze River delta urban agglomerations[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(10): 1273-1281.
- [8] REN F R, TIAN Z, PAN J J, et al. Cross-regional comparative study on energy efficiency evaluation in the Yangtze River Basin of China[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2020, 27(27): 34037-34051.
- [9] 谢元博, 李巍. 基于能源消费情景模拟的北京市主要大气污染物和温室气体协同减排研究[J]. 环境科学, 2013, 34(5): 2057-2064.
XIE Y B, LI W. Synergistic emission reduction of chief air pollutants and greenhouse gases based on scenario simulations of energy consumptions in Beijing[J]. Environmental Science, 2013, 34(5): 2057-2064.
- [10] 王敏, 冯相昭, 杜晓林, 等. 工业部门污染物治理协同控制温室气体效应评价: 基于重庆市的实证分析[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(3): 296-304.
WANG M, FENG X Z, DU X L, et al. Evaluation of co-controlling GHGs from pollutant reduction facilities in the industrial sectors, empirical analysis based on data in Chongqing city[J]. Climate Change Research, 2021, 17(3): 296-304.
- [11] 阿迪拉·阿力木江, 蒋平, 董虹佳, 等. 推广新能源汽车碳减排和大气污染控制的协同效益研究: 以上海市为例[J]. 环境科学学报, 2020, 40(5): 1873-1883.
ALIMUJIANG A, JIANG P, DONG H J, et al. Synergy and co-benefits of reducing CO₂ and air pollutant emissions by promoting new energy vehicles: A case of Shanghai[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(5): 1873-1883.
- [12] 张朝龙, 杨丽亚, 董欣宜, 等. 合成氨行业 CO₂ 与大气污染物排放清单及减污降碳潜力研究: 以河南省为例[J]. 环境科学研究, 2023, 36(11): 2126-2137.
ZHANG C L, YANG L Y, DONG X Y, et al. Research on CO₂ and air pollutant emission inventory and potential for pollution reduction and carbon reduction in synthetic ammonia industry: Taking Henan Province as an example[J]. Research of Environmental Sciences, 2023, 36(11): 2126-2137.
- [13] 钱凤魁, 王祥国, 顾汉龙, 等. 东北三省农业碳排放时空分异特征及其关键驱动因素[J]. 中国生态农业学报, 2024, 32(1): 30-40.
QIAN F K, WANG X G, GU H L, et al. Spatial-temporal differentiation characteristics and key driving factors of agricultural carbon emissions in the three north-eastern provinces of China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(1): 30-40.
- [14] FANG G C, TIAN L X, FU M, et al. The effect of energy construction adjustment on the dynamical evolution of energy-saving and emission-reduction system in China[J]. Applied Energy, 2017, 196: 180-189.
- [15] JIANG T Y, HUANG S J, YANG J. Structural carbon emissions from industry and energy systems in China: An input-output analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 240: 118116.
- [16] YU Y, JIN Z X, LI J Z, et al. Low-carbon development path research on China's power industry based on synergistic emission reduction between CO₂ and air pollutants[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 275: 123097.
- [17] WEI X Y, TONG Q, MAGILL I, et al. Evaluation of potential co-benefits of air pollution control and climate mitigation policies for China's electricity sector[J]. Energy Economics, 2020, 92: 104917.

- [18] JIANG P, KHISHGEE S, ALIMUJIANG A, et al. Cost-effective approaches for reducing carbon and air pollution emissions in the power industry in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 264: 110452.
- [19] 苏佳, 韩倩, 张新生. 西北地区重点城市工业大气污染排放时空演化格局及影响因素研究[J]. *环境科学研究*, 2023, 36(12): 2322-2330.
- SU J, HAN Q, ZHANG X S. Research on the spatio-temporal evolution pattern and influencing factors of industrial air pollution emissions in key cities in Northwest China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2023, 36(12): 2322-2330.
- [20] 杨婧雯, 陈远翔, 何燕. 云南省二氧化碳与大气污染物控制协同效应分析[J]. *环境科学导刊*, 2023, 42(5): 11-16, 20.
- YANG J W, CHEN Y X, HE Y. Analysis of synergistic effect of carbon dioxide and air pollutant control in Yunnan Province[J]. *Environmental Science Survey Agency*, 2023, 42(5): 11-16, 20.
- [21] 李薇, 蒙平珠, 李彩弟, 等. 基于 LMDI 模型的甘肃省种植业生产碳排放影响因素分析及减排途径[J]. *作物杂志*, 2023(5): 264-271.
- LI W, MENG P Z, LI C D, et al. Analysis of influencing factors of carbon emissions from planting production based on LMDI model and approaches of carbon mitigation in Gansu Province[J]. *Crops*, 2023(5): 264-271.
- [22] LIU Y, JIANG Y, LIU H, et al. Driving factors of carbon emissions in China's municipalities: ALMDI approach[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29: 21789-21802.
- [23] 王长建, 汪菲, 张虹鸥. 新疆能源消费碳排放过程及其影响因素: 基于扩展的 Kaya 恒等式[J]. *生态学报*, 2016, 36(8): 2152-2163.
- WANG C J, WANG F, ZHANG H O. The process of energy-related carbon emissions and influencing mechanism research in Xinjiang[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(8): 2151-2163.
- [24] 邓宣凯. 武汉市土地利用碳排放的影响因素研究: 基于扩展的 Kaya 等式和 LMDI 分解方法[J]. *农业与技术*, 2021, 41(20): 104-109.
- DENG X K. Study on the influencing factors of land use carbon emission in Wuhan City: based on extended Kaya equation and LMDI decomposition methods[J]. *Agriculture and Technology*, 2021, 41(20): 104-109.
- [25] 姜欢欢, 李媛媛, 李丽平, 等. 国际典型城市减污降碳协同增效的做法及对我国的建议[J]. *环境与可持续发展*, 2022, 47(4): 66-70.
- JIANG H H, LI Y Y, LI L P, et al. Practices in typical international cities and suggestions for China on synergizing the reduction of pollution and carbon emissions[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2022, 47(4): 66-70.
- [26] 榆林市统计局. 榆林统计年鉴 2022[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023: 9-207.
- [27] 邓聚龙. 社会经济灰色系统的理论与方法[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002: 47-60.
- [28] KAYA Y. Impact of carbon dioxide emission on GNP growth: Interpretation of proposed scenarios[R]. *Response Strategies Working Group, IPCC*, 1989: 76-77.
- [29] DONG F, DAI Y J, ZHANG S N, et al. Can a carbon emission trading scheme generate the Porter effect? Evidence from pilot areas in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 653: 565-577.
- [30] 李云燕, 赵晗. 北京市碳达峰碳中和路径和大气污染物协同减排研究[C]//中国环境科学学会 2021 年科学技术年会论文集(一). 天津: 中国环境科学学会, 2021: 41-50.
- [31] 赵奥, 武春友. 中国 CO₂ 排放量变化的影响因素分解研究: 基于改进的 Kaya 等式与 LMDI 分解法[J]. *软科学*, 2010, 24(12): 55-59.
- ZHAO A, WU C Y. Analysis of decomposition of influencing factors of variation in CO₂ emission of China: Based on improved Kaya identity and LMDI Method[J]. *Soft Science*, 2010, 24(12): 55-59.
- [32] ANG B W. The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide[J]. *Energy Policy*, 2005, 33(7): 867-871.
- [33] ANG B W. LMDI decomposition approach: A guide for implementation[J]. *Energy Policy*, 2015, 86: 233-238.
- [34] 孟宇, 魏伟, 胡超. 榆林市金属镁产业现状分析及发展建议[J]. *有色金属加工*, 2021, 50(2): 14-16, 70.
- MEN Y, WEI W, HU C. Analysis on Current Situation and Development Suggestion of Magnesium Industry in Yulin[J]. *Nonferrous Metals Processing*, 2021, 50(2): 14-16, 70.

(编辑 邵煜)