

· 调查与评价 ·

基于用电数据的潍坊市工业污染源冬奥会管控效果评估

李政, 陈建华*, 刘翰青, 高健, 杨艳

(中国环境科学研究院大气环境研究所, 北京 100020)

摘要: 利用潍坊市安装用电监控的工业企业在冬奥会前和会中的生产用电数据及部分企业大气污染物排放在线监测数据, 分析企业生产用电量和排放量的变化特征及潜在的相关性, 评估管控措施落实状况及减排效果。结果表明: 管控期间, 潍坊市工业企业用电量相比管控前平均下降 57.96%; 完全停产类企业用电量下降 75% 以上, 大气污染物 (SO_2 、 NO_x 、烟粉尘) 排放量下降 100%; 限产类企业用电量降幅呈现随管控措施加严而增大的趋势; 延迟复产类企业延迟复产率为 47.83% ~ 96.00%, 用电量下降 50.76%。根据管控期间各行业企业的用电量变化状况, 判定各企业基本落实了减排要求。可见, 企业用电数据在一定情况下, 可以替代或辅助工业企业排放数据, 反映企业管控措施落实状况及减排效果。

关键词: 工业污染源; 用电量数据; 管控效果评估; K-means 聚类算法; 北京冬奥会期间; 潍坊

中图分类号: X820.6 文献标志码: B 文章编号: 1006-2009(2024)01-0037-06

Evaluation of Control Effect of Industrial Pollution Sources in Weifang during the Beijing Winter Olympics Based on Electricity Consumption

LI Zheng, CHEN Jianhua*, LIU Hanqing, GAO Jian, YANG Yan

(Atmospheric Environment Institute, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100020, China)

Abstract: In this study, the change characteristics and potential correlation of electricity consumption and emissions of enterprises were analyzed, and the implementation status of control measures and emission reduction effects were evaluated by using the electricity consumption data of industrial enterprises installing electricity monitoring facilities in Weifang before and during the Beijing Winter Olympics and the online monitoring data of atmospheric pollutant emissions of some enterprises. The results indicated that during the control period, the electricity consumption of industrial enterprises in Weifang decreased by 57.96% on average, compared with that before the control period. The electricity consumption of completely shutdown enterprises decreased by more than 75%, and the emissions of atmospheric pollutants (SO_2 , NO_x , particulate matter) decreased by 100%. The decrease in electricity consumption of limited production enterprises increased with the strengthening of control measures. The delayed resumption rate of enterprises was from 47.83% to 96.00%, and the electricity consumption decreased by 50.76%. Based on the changes in electricity consumption of enterprises in various industries during the control period, it was determined that each enterprise basically met the emission reduction requirements. This indicated that electricity consumption data could replace or assist industrial enterprise emission data under certain circumstances, reflecting the implementation status of control measures and emission reduction effect.

Key words: Industrial pollution sources; Electricity consumption data; Evaluation of control effect; K-means clustering algorithm; The Beijing Winter Olympics period; Weifang

收稿日期: 2022-12-30; 修订日期: 2023-11-17

基金项目: 国家重点研发计划“大气与土壤、地下水综合治理重点专项——2022年度 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 污染系统防控的工程化模式系统与支撑平台建设”基金资助项目(2022YFC3703000)

作者简介: 李政(1996—), 男, 安徽宿州人, 在读研究生, 研究方向为大气科学。

* 通信作者: 陈建华 E-mail: chenjh@craes.org.cn

大气污染问题严重制约了社会经济的发展, 威

胁人民群众的身心健康^[1-2],影响气候及天气的变化^[3-4],如何科学有效地治理空气污染,已成为当今时代关注的焦点^[5-6]。电力能源是工业企业不可或缺的生产要素,企业的用电数据能够从侧面反映企业的生产和污染物排放状况。相关学者利用企业用电数据在“散乱污”与“偷排漏排”企业识别监管^[7]、碳排放分析^[8-9]及大气污染源排放清单精细化动态更新^[10]等方面开展了研究,并取得了良好效果。

2022 年 2 月我国在北京举办第 24 届冬奥会,为保障冬奥会期间北京地区的空气质量,京津及周边部分城市工业企业实施停产限产的减排措施。潍坊市作为此次协同减排的重要城市,评估协同减排措施的实施、落实情况和对该市工业源大气污染物的管控效果具有一定意义。目前,国内外对于减排措施实施效果的主流评估方法有基于监测站点观测数据^[11-12]、卫星遥感反演数据^[13-15]、空气质量模型模拟评估方法^[16-17]和基于在线监测数据的排放量削减评估^[18]等方法,较少有学者利用企业用电数据对重大活动期间的减排措施实施效果评估开展相关研究。马春玲等^[19]采用 LSTM 算法构建短期用电负荷预测模型与用电-环保指数关联映射,预测某化肥企业某时段内 SO₂ 排放量,准确率达 97.67%。企业用电数据变化状况在一定程度上可以反映活动期间企业减排措施实施效果,并且相比于传统评估方法,企业的用电数据覆盖面更广,更能反映总体工业源企业的减排效果。今以冬奥会保障期间潍坊市企业用电数据为基础,结合部分企业在线监测数据,分析讨论实施减排措施后的用电量与排放量变化情况,以此验证大气污染管控措施的减排效果,也为今后政府制定相应的大气污染管控措施提供参考。

1 材料与方 法

1.1 数据来源

研究所使用的企业用电数据来自潍坊市企业排污智能管控系统。对潍坊市 2 000 余家安装了该系统的企业用电量数据进行预处理及筛选,去除空值及异常值,获得其中 1 163 家工业企业在 2022 年北京冬奥会前后(1 月 23 日—2 月 20 日)的小时、日用电量数据。

依据生态环境部《重污染天气重点行业应急减排措施制定技术指南(2020 年修订版)》中工业

企业行业分类标准,上述企业涉及 25 类行业。企业排污在线监测数据来自潍坊市环境监测监控系统,包括 345 家企业烟粉尘、SO₂、NO_x 3 项污染物的小时、日排放数据。

1.2 研究方法

1.2.1 管控阶段划分

根据所处的地理位置进行联防联控区域划分,潍坊市属于一般管控区,管控日期为 1 月 30 日—2 月 20 日。根据冬奥会期间所采取的管控措施差异,将整个管控日期分为 5 个阶段,分别为 1-0 阶段(1 月 30—2 月 2 日和 2 月 5 日—2 月 7 日)、1-1 阶段(2 月 3 日—2 月 4 日)、1-2 阶段(2 月 8 日—2 月 12 日)、2-0 阶段(2 月 13 日—2 月 16 日)、2-1 阶段(2 月 17 日—2 月 20 日)。

1.2.2 行业与管控措施

1-0、2-0 阶段潍坊市工业企业执行一般管控措施;1-1(冬奥会开幕式)、1-2(不利气象条件)和 2-1(冬奥会闭幕式)阶段在一般管控措施基础上,部分排污量较大企业自主采取进一步压减负荷、提高后处理效率(投加脱硫、脱硝剂,提高除尘效率)的协商减排措施。根据各阶段管控措施差异对各行业进行分类,具体见表 1。

1.2.3 数据分析方法

对于表 1 中的不可中断类和停产类行业主要基于时间序列分析冬奥会管控期间不同阶段不同行业的企业用电量变化趋势及差异,并结合部分企业污染物排放在线监测数据,分析企业用电量与污染物排放量的潜在相关性;自主减排类行业在冬奥会期间主要采取春节过后延迟复工复产(2 月 13 日后恢复生产)的减排措施,采用 K-means 聚类算法计算该行业的延迟复产率,辅助环保部门准确了解管控措施响应状况。

K-means 聚类算法是一种无监督聚类算法,具有收敛速度快、对大规模数据集聚类效果好等优点,也是目前机器学习领域应用较普遍的聚类算法。已有研究表明,K-means 聚类算法对企业复工复产状况分类效果明显,准确度高^[20]。现根据冬奥会期间企业用电特征构建企业延迟复工复产分析模型如下。

(1)构建聚类特征。获取企业在正常生产时一周的日用电量,取平均值 e 作为基准,将企业 2 月 7 日—2 月 12 的日用电量记为 $e_i(i=1,2,\dots,6)$,企业延迟复产用电特征 a 构建如下:

表 1 不同阶段不同分类工业行业管控措施

Table 1 Management and control measures for different industries at different stages

行业分类	包含行业类型	管控阶段				
		1-0 阶段	1-1 阶段	1-2 阶段	2-0 阶段	2-1 阶段
不可中断类	钢铁	限产 10% ~ 30%	协商减排	协商减排	限产 10% ~ 30%	协商减排
	焦化	限产 5% ~ 25%	协商减排	协商减排	限产 5% ~ 25%	协商减排
	燃煤发电	自主减排	协商减排	协商减排	自主减排	协商减排
	煤制氮肥	限产 30%	协商减排	协商减排	自主减排	协商减排
停产类	陶瓷、岩矿棉、耐火材料、纤维素醚、人造革合成革、涂料制造、橡胶制品制造、防水建筑卷材、包装印刷、油墨制造	停产	停产	停产	停产/自主减排	停产/自主减排
自主减排类	电炉铸造、水泥制品、人造板制造、再生铜铝铅锌、汽车整车制造、家具制造、工业涂装、工程机械制造、制鞋	自主减排	自主减排	自主减排	自主减排	自主减排

$$a = \min\left(\frac{e - e_i}{e}\right) \quad (1)$$

(2) 根据用电量判断企业运行状态, 分为停产、恢复生产两类, 即 $K=2$ 。计算所有样本与这两个“聚类中心”之间的欧氏距离, 得出聚类结果。

2 结果与讨论

2.1 工业企业用电量总体变化特征

工业用电量的变化能够反映工业源大气污染物的排放状况^[21]。以管控前一周(1月23日—1月29日)企业用电量及大气污染物排放量日均值作为基准, 根据冬奥会协同减排方案要求, 管控期间潍坊市全社会烟粉尘、SO₂ 和 NO_x 排放量须分别削减 20%、26% 和 25% 以上。对企业用电数据进行计算分析, 用电监管企业管控期间用电量平均下降 57.96%, 反映了协同减排措施的管控成效。图 1 为不同管控阶段企业用电量的削减率变化。由图 1 可见, 整体企业用电量在不同管控阶段降幅为 37.17% ~ 72.61%, 春节期间(1-0 及 1-1 阶段),

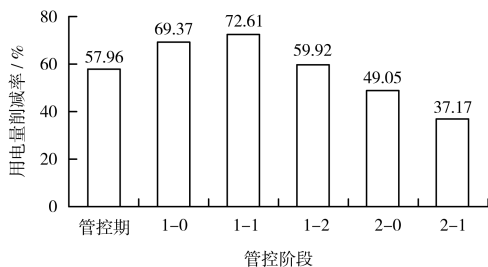


图 1 不同管控阶段企业用电量的削减率变化

Fig. 1 Variations in reduction rate of electricity consumption by enterprises at different control stages

多数企业放假停产, 用电量降幅最高, 而后随着企业陆续复工复产用电量降幅呈现递减的趋势。由表 1 可知, 1-2 阶段为应对不利气象条件, 改善空气质量, 潍坊市重点排污行业企业(钢铁、燃煤发电等)自主采取进一步压减生产负荷、提高后处理效率, 部分行业(工业涂装、水泥制品等)春节假期后延迟复工复产, 管控措施最为严格, 企业用电量达到春节假期结束后的降幅峰值(59.92%)。

2.2 不可中断类行业用电量和污染物排放量变化特征分析

钢铁、焦化、煤制氮肥及燃煤发电等行业由于自身工艺特征、安全生产及民生需求等方面原因, 在管控期间不能完全停产, 只能采取限产的方式减少污染物的排放。以管控前一周(1月23日—1月29日)企业用电量的日均值为基准, 分析不同管控阶段不可中断类行业用电量的削减率变化, 见图 2。整体来看, 管控期间不可中断类行业用电量削减率达 15.20%, 钢铁、焦化、煤制氮肥和燃煤发电行业用电量的削减率分别为 5.05%、3.88%、23.47% 和 27.75%。

在管控的前 3 个阶段(1-0、1-1 和 1-2 阶段), 用电量削减比例呈随管控措施加严而升高的趋势, 在 1-2 阶段用电量降幅最高, 达 22.28%。原因是由于在该阶段潍坊市气象条件不利于污染物扩散, 为改善空气质量, 各行业进一步压减生产负荷, 提高后处理效率, 最大幅度削减工业源污染物排放量, 限产力度最大。在 2-0、2-1 阶段部分企业开始降低限产力度, 通过增加脱硫、脱硝剂投加量, 提高除尘后处理效率的措施来达到减排目

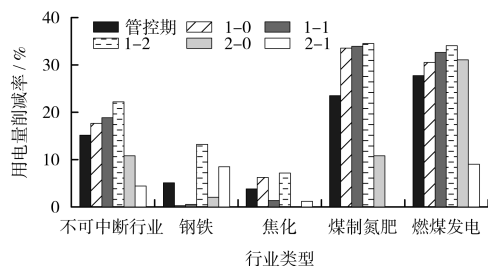


图 2 不同管控阶段不可中断类行业用电量的削减率变化

Fig. 2 Variations in reduction rate of electricity consumption by non interruptible production enterprises at different control stages

标,导致用电量降幅有所降低。

选取钢铁、煤制氮肥、燃煤发电行业分析企业用电量与污染物排放量之间的削减关系。部分行业如焦化行业由于主要能耗工序炼焦车间承担民生供暖任务不可中断,在整个管控期间,用电量下降 $-0.52\% \sim 7.21\%$,基本没有变化,故从企业用电量层面难以反映管控措施落实状况及大气污染物减排量^[22]。

钢铁行业在 1-2 和 2-1 阶段采取协商减排措施,为达到减排效果,主要排污工序烧结机停产,用电量降幅最大。结合污染物排放在线监测数据,以钢铁企业 A 为例,该企业采用典型的长流程钢铁冶炼工艺,核心生产环节包括烧结、高炉和转炉等,年产 320 万 t 钢,排污环节多、排污量大。不同管控阶段钢铁企业用电量和污染物排放量的削减率变化见图 3(a)。由图 3(a)可见,在管控期间,该企业用电量平均下降 4.94%,对应 SO_2 、 NO_x 和烟粉尘排放量分别下降 20.58%、20.48% 和 7.66%。在 1-2 阶段,该企业主要排污工序烧结机采取停产 12 h/d 的管控措施时,用电量、 SO_2 、 NO_x 和烟粉尘排放量降幅最大,分别为 13.25%、38.02%、39.19% 和 18.88%。另外,在管控前期(1-0 阶段),出现烟粉尘排放量不降反增的现象,这是由于该企业主要烟粉尘排放工序高炉承担民生供暖任务,无法采取限产措施,并且管控前期处于春节假期,民生供暖负荷增大,导致烟粉尘排放量在管控前期出现不降反增的现象,且管控期内整体削减率低于 SO_2 、 NO_x 。从各个阶段用电量降幅变化来看,仅在 1-2 和 2-1 阶段,烧结机工序停止运行时,用电量及污染物排放量显著下降,故控制钢铁企业的烧结工序能够有效降低其排污量^[23-24]。

煤制氮肥行业根据减排要求在管控期间采取限产措施,以某企业为例,管控期间其用电量和污染物排放量的削减率变化见图 3(b)。由图 3(b)可见,管控期间,该企业用电量平均下降 23.43%,对应 SO_2 、 NO_x 、烟粉尘排放量平均下降 32.37%、43.69%、7.25%。分阶段来看,其在 1-0 阶段采取限产 30% 的管控措施,用电量下降 33.64%,对应 SO_2 、 NO_x 、烟粉尘排放量下降 42.72%、45.34%、12.37%。1-1 和 1-2 两阶段在 1-0 阶段限产 30% 的基础上提高后处理效率,污染物排放量进一步降低,用电量削减率基本没有变化。在 2-0 和 2-1 阶段,为保障春季农耕化肥用量,煤制氮肥行业解除管控措施,恢复正常生产,用电量恢复至管控前水平。在此期间,企业采取提高排污处理效率的方式,降低大气污染物排放量,排放的 NO_x 质量浓度由管控前的 63.03 mg/m^3 降至 44.03 mg/m^3 ,对应 NO_x 排放量下降 27.42%。

燃煤发电企业是大气环境主要污染物排放源之一,对该排放源的管控减排对于保障冬奥会期间空气质量至关重要^[25]。管控期间,燃煤发电企业主要通过采取压减煤炭使用量、停产部分机组及提高后处理效率等措施减少排污量。以某燃煤发电企业 4 号机组为例,其引风机用电量、 SO_2 、 NO_x 及烟粉尘削减率见图 3(c)。由图 3(c)可见,管控期间,其用电量平均降幅为 40.99%, SO_2 、 NO_x 和烟粉尘排放量下降 50.58%、50.53% 和 43.48%。用电量与排放量之间变化趋势基本一致,随着管控措施的不断加严而降低。潍坊市 2 月 8 日起,气象条件不利于污染物扩散,为避免发生重污染事件,环保部门迅速启动协商减排措施。该企业 4 号机组 2 月 9 日起采取停产措施,从图中可以明显看出在 1-2 和 2-0 阶段,该机组用电量急剧降低,平均降幅达 90% 左右。

为进一步探究钢铁、煤制氮肥及燃煤发电企业用电量与排放量之间的潜在相关性,钢铁、煤制氮肥及燃煤发电企业烟气排放量与用电量的回归分析结果分别见图 4(a)(b)(c)。由图 4 可见,各行业烟气排放量与用电量之间呈显著正相关。其中,钢铁企业在正常生产和限产两种生产工况时的聚类效果明显,拟合曲线 R^2 为 0.781。煤制氮肥企业烟量与用电量呈显著正相关,线性拟合效果良好,拟合曲线 R^2 为 0.923。燃煤发电企业机组烟气排放量与用电量拟合曲线 R^2 为 0.996。从用

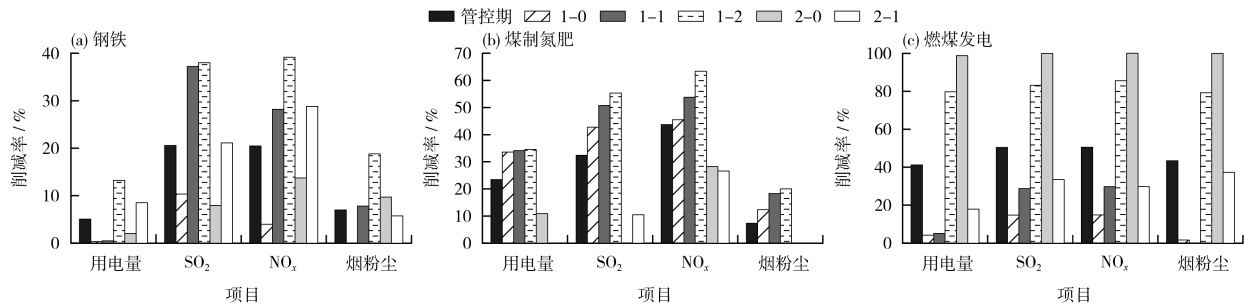


图 3 不同管控阶段各行业用电量和污染物排放量的削减率变化

Fig. 3 Variations in reduction rates of electricity consumption and pollutant emissions in various industries at different control stages

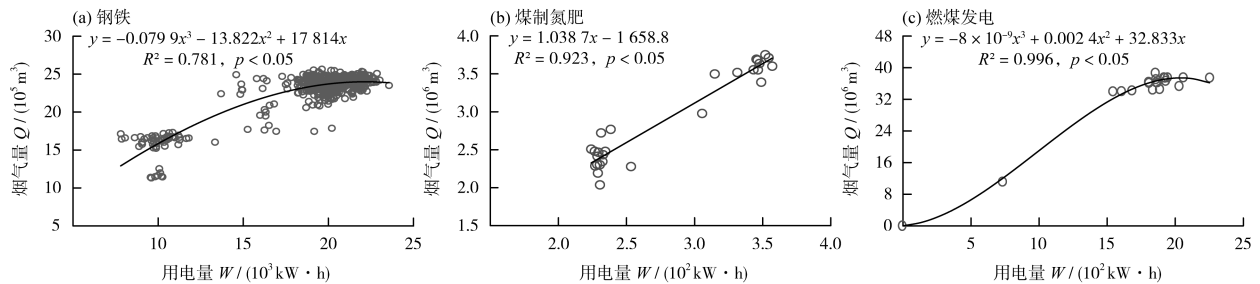


图 4 各行业烟气排放量与用电量的回归分析结果

Fig. 4 Regression analysis results of flue gas emissions and electricity consumption in various industries

电量层面清晰地反映了管控措施的减排效果及污染物排放量的变化趋势。

2.3 停产类行业用电量分析

根据减排方案要求,陶瓷、耐火材料和岩矿棉行业在管控期间采取停产措施。不同管控阶段完全停产类行业用电量的削减率变化见图 5。由图 5 可见,管控期间完全停产类行业用电量平均下降 92.79%~98.81%,可以判定其严格落实了停产措施,大气污染物排放量完全削减。

分阶段停产行业按照减排要求,在 2-0 阶段(2 月 13 日)之前停产,而后采取恢复生产、自主减

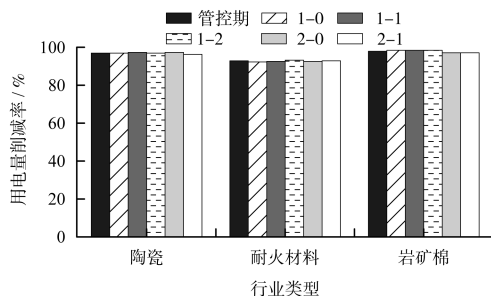


图 5 不同管控阶段完全停产类行业用电量的削减率变化

Fig. 5 Variations in reduction rates of electricity consumption by completely shutdown enterprises at different control stages

排的措施。图 6 为不同管控阶段停产-自主减排类行业用电量的削减率变化。由图 6 可见,停产-自主减排类行业在 2-0 阶段之前,用电量削减率都达到了 80%以上,基本落实了停产措施,而后用电量迅速回升。在 2-1 阶段,涂料制造、人造革合成革等行业用电量相比管控前有所增加,主要是由于该行业部分企业在管控前已停产,在 2-0、2-1 阶段陆续恢复生产,导致用电量相比管控前有所增加。

2.4 自主减排类行业延迟复产情况分析

自主减排类各行业在管控期间根据企业自身状况采取自主减排措施,部分企业承诺春节后延迟复工复产(2 月 13 日开始恢复生产),减少污染物排放量。为了解管控期间各行业的延迟复产状况,基于 K-means 聚类算法,构建企业用电特征 a 进行聚类分析,得到自主减排类行业延迟复产率,见图 7。由图 7 可见,对应 2 月 7 日—2 月 12 日采取延迟复产措施的自主减排类行业整体用电量下降 50.76%。从聚类结果来看,再生铜铝铅锌、汽车整车制造和工程机械制造行业在此期间用电量相比管控前基本没有变化,延迟复产率为 0,没有采取延迟复工复产的措施。采取延迟复工复产措施的

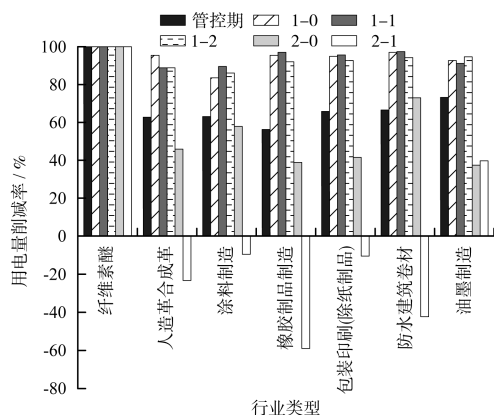


图 6 不同管控阶段停产-自主减排类行业用电量的削减率变化

Fig. 6 Variations in reduction rates of electricity consumption by stop production-independent emission reduction enterprises at different control stages

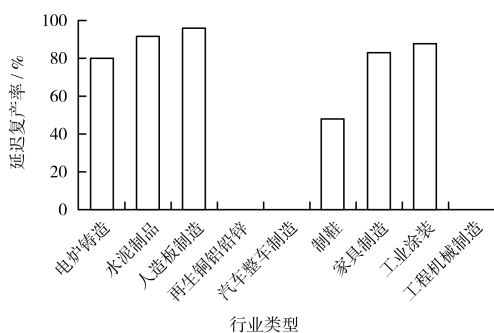


图 7 自主减排类行业延迟复产率

Fig. 7 Delayed resumption rate of independent emission reduction enterprises

电炉铸造、人造板制造、水泥制品等行业延迟复产率达 47.83% ~ 96.00%。上述行业企业大多未安装排污在线监测系统,企业数量多、排污量小、环保水平相对较差、无组织排放问题严重,传统评估方法难以对其减排效果进行量化评估,利用企业用电量数据可以做到对其生产状态精准研判,从用电量层面量化评估管控措施的减排效果。

3 结论

(1) 2022 年 1 月 30 日—2 月 20 日即北京冬奥会空气质量保障期间,工业企业采取停产限产措施,潍坊市 1 163 家用电监控企业用电量相比管控前平均下降 57.96%。冬奥会管控期间,采取停产措施的行业企业用电量下降达 75% 以上,对应污染物(SO₂、NO_x、烟粉尘)排放量完全削减。采取限

产措施的各行业企业用电量降幅与限产力度密切相关,且随管控措施加严而不断增大。

(2) 钢铁、煤制氮肥和燃煤发电等行业各阶段用电量削减趋势与其污染物排放量削减趋势大致相同,烟气排放量与生产用电量呈高度正相关,拟合曲线 R^2 均 > 0.7。

(3) 在自主减排类行业中基于企业用电数据得到,采取了延迟复产措施的各行业延迟复产率为 47.83% ~ 96.00%,用电量平均下降 50.76%。再生铜铝铅锌、汽车整车制造及工程机械制造行业在管控期间用电量基本没有变化,没有采取延迟复工复产的减排措施。

[参考文献]

- [1] India State-Level Disease Burden Initiative Air Pollution Collaborators. The impact of air pollution on deaths, disease burden, and life expectancy across the states of India: The global burden of disease study 2017[J]. *Lancet Planetary Health*, 2019, 3: e26-e39.
- [2] ZHOU M G, WANG H D, ZENG X Y, et al. Mortality, morbidity, and risk factors in China and its provinces, 1990—2017: A systematic analysis for the global burden of disease study 2017[J]. *Lancet*, 2019, 394: 1145-1158.
- [3] HERRERA-ESTRADA J E, DIFFENBAUGH N S, WAGNER F, et al. Response of electricity sector air pollution emissions to drought conditions in the western United States[J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(12): 124032.
- [4] MANISALIDIS I, STAVROPOULOU E, STAVROPOULOS A, et al. Environmental and health impacts of air pollution: A review[J]. *Frontiers in Public Health*, 2020, 8: 00014.
- [5] HADLEY M B, VEDANTHAN R, FUSTER V. Air pollution and cardiovascular disease: A window of opportunity[J]. *Nature Reviews Cardiology*, 2018, 15(4): 193-194.
- [6] ZHENG B, TONG D, LI M, et al. Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18(19): 14095-14111.
- [7] 邓勇, 李宏发, 陈昊晓, 等. 一种基于聚类特征树和离群度量化的散乱污企业研判方法: CN112800148A[P]. 2021-05-14.
- [8] AL-MULALI U, SAB C. Electricity consumption, CO₂ emission, and economic growth in the Middle East[J]. *Energy Sources Part B: Economics Planning and Policy*, 2018, 13(5): 257-263.
- [9] ZHANG P F, CAI W Q, YAO M T, et al. Urban carbon emissions associated with electricity consumption in Beijing and the driving factors[J]. *Applied Energy*, 2020, 275: 115425.
- [10] 胡雪, 王鑫, 刘启贞, 等. 典型大气污染源动态排放清单编制方法及应用研究[J]. *中国环境监测*, 2020, 36(5): 54-62.

(下转第 48 页)