

DOI: 10.3969/j.issn.1674-1951.2020.01.001

基于合肥市 PM_{2.5} 源解析的电能替代效果评估

Assessment of alternative energy based on the source apportionment
of PM_{2.5} in Hefei City

尤佳¹, 王润芳², 马大卫³, 姜少毅², 朱仁斌², 陈剑³, 王克峰¹
YOU Jia¹, WANG Runfang², MA Dawei³, JIANG Shaoyi²,
ZHU Renbin², CHEN Jian³, WANG Kefeng¹

(1. 国网安徽省电力有限公司, 合肥 230022; 2. 中国科学技术大学 极地环境与全球变化安徽省
重点实验室, 合肥 230026; 3. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 合肥 230601)
(1. State Grid Anhui Electric Power Company Limited, Hefei 230022, China; 2. Anhui Province Key Laboratory
of Polar Environment and Global Change, University of Science and Technology of China, Hefei 230026,
China; 3. State Grid Anhui Electric Power Company Limited Research Institute, Hefei 230601, China)

摘要: 对2018年合肥市PM_{2.5}来源进行了解析, 确定了民用散煤对PM_{2.5}质量浓度($\rho_{(PM_{2.5})}$)的贡献系数, 评估了散煤量削减带来的空气质量改善, 为下一步电能替代的开展提供参考。结果表明: 合肥市区PM_{2.5}的主要污染源包括二次污染源以及机动车尾气尘、煤烟尘和地壳尘等一次污染源, 贡献比例分别为37.80%, 33.70%, 19.60%, 8.90%; 2014—2018年累计完成电能替代2802 GW·h, 主要集中在工(农)业生产制造领域; 实施电能替代后, 合肥市 $\rho_{(PM_{2.5})}$ 年均值呈逐年下降趋势, 春季和冬季 $\rho_{(PM_{2.5})}$ 平均值高于夏季和秋季, 夏季 $\rho_{(PM_{2.5})}$ 最低; 2014年和2018年散煤对大气环境中 $\rho_{(PM_{2.5})}$ 的贡献值分别为9.07, 4.33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 下降了4.74 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 电能替代方案是改善合肥市区空气质量的有效途径之一; 机动车尾气尘排在合肥市PM_{2.5}污染治理中应高度重视, 未来应在交通领域大力推行电能替代。

关键词: 电能替代; PM_{2.5}源解析; 大气污染; 散煤; 机动车; 合肥市

中图分类号: X 131.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-1951(2020)01-0001-07

Abstract: Based on the source apportionment of PM_{2.5} in Hefei in 2018, the contribution coefficient of civil bulk coal to $\rho_{(PM_{2.5})}$ was figured out, and the effect of replacing bulk coal on air quality improvement was evaluated, which provided reference for alternative energy study. The results showed that the main sources of PM_{2.5} in Hefei included secondary pollution sources and primary pollution sources such as vehicle emission, soot dust, and crust dust. Their contribution to PM_{2.5} source were 37.80%, 33.70%, 19.60% and 8.90%, respectively. Since 2014 to 2018, 2802 GW·h electricity, mainly in manufacturing of industrial (agricultural) industry, was replaced. After the implementation of alternative energy, the average concentration of PM_{2.5} decreased year by year, and concentrations in spring and winter were higher than those in summer and autumn. The concentration in summer was the lowest. The contribution of bulk coal to the concentration of atmospheric PM_{2.5} in 2014 and 2018 were 9.07 and 4.33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively, which showed a 4.74 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ decrease. The alternative energy is an effective way to improve the air quality of Hefei. Contribution of vehicle emissions to atmospheric PM_{2.5} should be highly valued in pollution control. More efforts should be made to promote alternative energy in transportation sector.

Keywords: alternative energy; source apportionment of PM_{2.5}; air pollution; bulk coal; vehicle; Hefei City

0 引言

大气细颗粒物(PM_{2.5})是主要大气污染物之一,

PM_{2.5}质量浓度($\rho_{(PM_{2.5})}$)增加不仅会降低大气能见度, 影响局地气候^[1-2], 导致灰霾事件频发^[3-4], 还会对人体健康造成危害, 如呼吸系统发病率上升、暴露人群致癌风险增加等^[5-7]。因此, PM_{2.5}已成为公众关注的热点。为了降低空气污染对人体健康和社会经济发展的负面影响, 目前, 学者们对京津冀、长三角和珠三角地区的主要城市开展了PM_{2.5}污染的

收稿日期: 2019-11-04; 修回日期: 2019-12-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41576181); 国家电网有限公司管理咨询项目(81120018002)

来源解析研究^[8-10]。

燃煤作为大气主要污染物来源之一,其对大气环境污染的影响不容忽视,特别是散烧煤,绝大多数没有采取除尘、脱硫、脱硝等环保措施,致使大量大气污染物排放,对空气质量和人体健康的影响尤为严重^[11-14]。电能具有清洁、安全、便捷等优势,实施电能替代对于推动能源消费革命、落实国家能源战略、促进能源清洁化发展意义重大;电力已成为煤炭利用最清洁的行业,电力行业发展是治理灰霾的有效途径^[15-18]。王志轩等^[19]提出利用煤电代替散煤燃烧将是未来治霾的关键,但该观点缺乏理论和足够的键数据支持。

目前,冶金电炉、建材电窑炉、工业电锅炉已成为电能替代的主要技术领域。截至 2018 年年底,全国累计实现替代电量 493.6 TW·h,替代项目超过 20 万个,电力占终端能源消费的比重由 2013 年的 22.60% 提升到 2018 年的 25.50%,电能替代工作总体取得了显著成效^[20]。2018 年安徽省燃煤量为 1.13 亿 t,其中散煤使用量仍然超过 500 万 t,因此,要在散煤利用领域重点推广电能替代。当前,合肥市是华东地区大气污染严重区域之一,能源消费强度大、燃煤量大、散煤燃烧比例较高^[21-22],以煤为主的能源结构还未发生根本性变化,灰霾天气时有发生^[10]。随着电能替代项目的深入推进,其对合肥市大气环境质量改善的贡献到底如何,未来电能替代的重点实施领域是什么,这些问题尚需深入研究。

本文通过综合考量民用散煤占燃煤消费量的比例、散煤 PM_{2.5} 排放强度,计算其污染影响权重,同时分析合肥市 PM_{2.5} 源解析结果和电能替代改造清单数据,确定民用散煤领域电能替代对大气环境中 $\rho_{(\text{PM}_{2.5})}$ 的贡献比例,计算散煤消费量削减带来的空气质量改善,为后续电能替代项目的开展和环保目标约束下重点实施领域的挖掘提供数据参考。

1 研究方法

1.1 样品采集

依据检测方法对样品量的要求,采样在合肥市国网安徽省电力有限公司电力科学研究院楼顶(31°50'9.82"N,117°15'53.83"E)进行,高度约 21 m。采样点位于合肥市中心,人口密集,周围主要是商业活动区、学校和居民住宅,无较大典型排放源影响。2018 年 8—11 月共收集 68 张膜样,每个样品采集时间为 23 h(当日 09:00 至次日 08:00)。规范记录观测采样时的气象条件。采样仪器为青岛众瑞公司研制的环境空气颗粒物综合采样器(ZR-3922),切割粒径为 2.5 μm。根据滤膜特性和采样后化学分

析的需要,该研究选择直径为 90 mm 的石英滤膜。

1.2 样品分析

采用称重法分析颗粒物的质量浓度,所有样品均在恒温恒湿环境(温度 26℃,相对湿度 45%)中干燥 48 h 以上,采用百万分之一天平(Sartorius M2P)获得采样前、后的膜片质量。

取 1/8 膜样放入比色管中,超纯水定容,放入超声波清洗仪中清洗 30 min,用 0.22 μm 混纤-水系过滤头过滤,获得待测样品,用离子色谱仪(dionex-ICS-2100)测量样品中 NO₃⁻, NO₂⁻, SO₄²⁻, Cl⁻, NH₄⁺, K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ 等离子体的质量浓度。取 1/8 膜样放于消解罐中,加入 3:1 的硝酸和盐酸进行微波消解,消解后赶酸定容,用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)分析样品中 Mg, Al, Si, K, Ca, Ti, Be, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb, Mn, V, Fe, Se, As, Mo, U 等 20 多种元素。用多波段碳分析仪(DRIModel2015)测定样品中元素碳(EC)和有机碳(OC)的质量浓度。

1.3 电能替代对 PM_{2.5} 改善的贡献评估方法

通过 PM_{2.5} 源解析结果中散煤占燃煤消费量的比例和散煤 PM_{2.5} 排放强度(约为电力行业的 5 倍),计算其污染影响权重,确定散煤对大气环境中 $\rho_{(\text{PM}_{2.5})}$ 的贡献比例 γ , 计算由于散煤带来的 $\rho_{(\text{PM}_{2.5})}$ 削减量^[23]

$$\rho = \gamma_1 \times \rho_{2017} - \gamma_2 \times \rho_{2018},$$

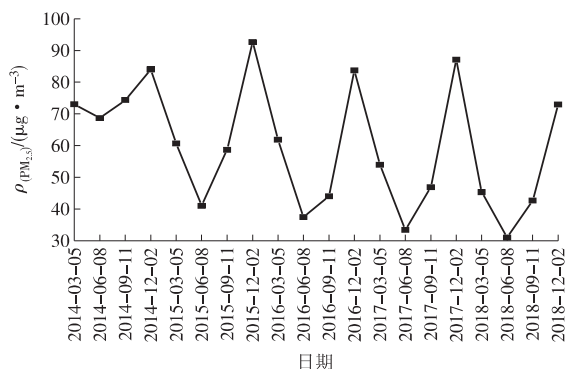
式中: ρ 为散煤消费量减少后的 $\rho_{(\text{PM}_{2.5})}$ 变化量, μg/m³; ρ_i 为大气中的 $\rho_{(\text{PM}_{2.5})}$, μg/m³; γ_i 为民用散煤对大气环境中 $\rho_{(\text{PM}_{2.5})}$ 的贡献比例, %。

2 结果与讨论

2.1 近 5 年实施电能替代后 PM_{2.5} 减排情况分析

根据国家气象科学数据中心监测数据^[24], 2014—2018 年合肥市 $\rho_{(\text{PM}_{2.5})}$ 的季节变化如图 1 所示: 春季和冬季的 $\rho_{(\text{PM}_{2.5})}$ 平均值高于夏季和秋季,其中夏季最低,秋季部分时段受秸秆燃烧的影响, $\rho_{(\text{PM}_{2.5})}$ 有所上升; 冬季 $\rho_{(\text{PM}_{2.5})}$ 最高,可能与集中供暖时燃煤燃油特别是散煤的集中燃烧排放有关^[25-26]。同时, $\rho_{(\text{PM}_{2.5})}$ 季节变化规律还受大气扩散的影响^[27-28]: 冬季盛行的西北风输送来北方的污染物,合肥受副热带高压控制,冷空气下沉,降水较少,导致污染物大量堆积且不易扩散,春、夏季降水量增加会在一定程度上净化空气。

2014—2018 年,合肥市大气中 $\rho_{(\text{PM}_{2.5})}$ 年均值依次为 79.50, 64.67, 56.75, 55.32, 47.96 μg/m³,呈逐年下降的趋势。合肥市春、夏季 $\rho_{(\text{PM}_{2.5})}$ 逐年下降,

图 1 2014—2018 年合肥市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 季节变化特征Fig. 1 Seasonal variation characteristics of $\rho(\text{PM}_{2.5})$

in Hefei from 2014 to 2018

秋、冬季无明显变化,近 5 年 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值为 $60.84 \mu\text{g}/\text{m}^3$,显著低于 2014 年的监测结果 $79.50 \mu\text{g}/\text{m}^3$,但仍超过国家二级标准 $35.00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

2.2 PM_{2.5}主要来源及其占比

综合使用 PM_{2.5}样品分析获得的无机元素、水溶性离子和碳组分数据,同时考虑各数据的不确定度,

采用正交矩阵因子分解法(PMF)模型对合肥市大气中 PM_{2.5}来源进行解析^[10-29]。通过“Robust Q”(Q 为实测和模拟质量浓度拟合系数)观测数据量值,使之不至于偏差过大,同时保证模拟结果与观测结果有较好的相关性。解析结果表明:合肥市大气中 PM_{2.5}主要来源于二次源(二次硫酸盐和二次硝酸盐)、机动车尾气尘、煤烟尘和地壳尘等 4 个因子(如图 2 所示)。PMF 解析结果的 Q 值为 1780,接近理论 Q 值(1810),表明分析结果较理想^[10]。

PM_{2.5}来源解析得到的 4 个因子中^[30-31]:因子 1 的 Al, Ca, Mg, Sb 等组分质量浓度和占比较高,可能为地壳尘;因子 2 中 Ti, Cr, Ni, OC, EC 组分质量浓度和占比较高,可能为煤烟尘;因子 3 的 Pb, Cu, Zn, Mn, OC, EC 质量浓度和占比较高,可能为机动车尾气尘;因子 4 的 NH_4^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} 等组分质量浓度和占比较高,可能为二次硫酸盐和二次硝酸盐,硫元素主要来源于含硫煤的燃烧,表明燃煤排放对大气污染程度增加具有较大的贡献^[32]。

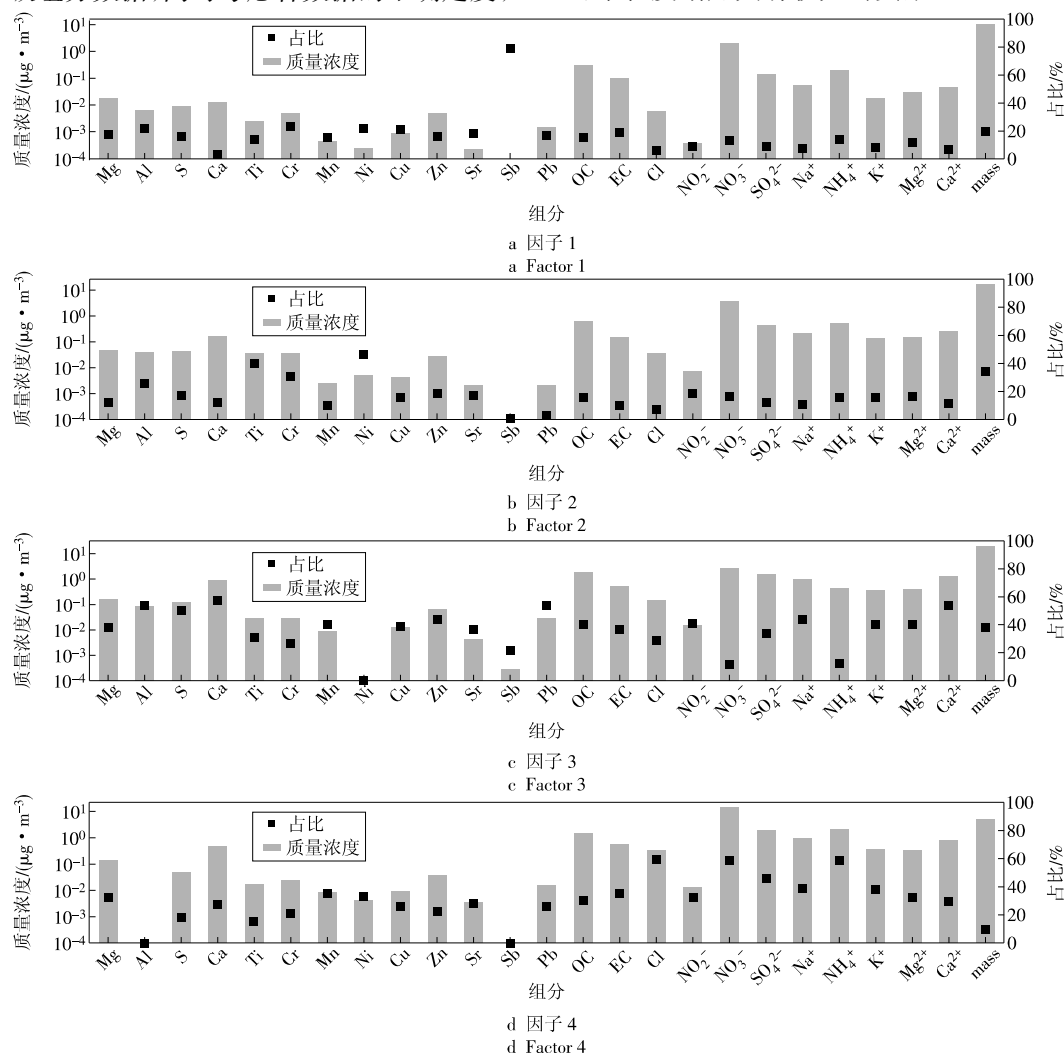


图 2 PMF 方法解析出的源廓线图

Fig. 2 Profile of the source apportionment based on PMF method

2018 年的 PMF 模型解析结果表明(如图 3b 所示):合肥市大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要污染源类包括二次污染源以及机动车尾气尘、煤烟尘和地壳尘等一次污染源,贡献比例分别为 37.80%, 33.70%, 19.60% 和 8.90%。陈刚等^[10]对合肥城区 2014 年 $\text{PM}_{2.5}$ 季节污染特征及来源解析结果显示(如图 3a 所示):二次源、煤烟尘、机动车尾气尘及地壳尘的贡献比例分别为 38.80%, 25.69%, 9.90% 和 21.70%。通过对比可以看出,一次源组成中,机动车尾气尘占比提高了 23.80 个百分点,燃煤和地壳尘占比均下降。由此可见,电能替代实施后燃煤排放的颗粒物质量浓度降低,对空气污染的改善起到了显著的效果,由于机动车的使用增多,其排放已代替燃煤成为主要污染源。近些年,合肥市通过颁布建设系统大气污染防治专项工作方案,强化了各类施工扬尘整治,地壳尘贡献比例有较大幅度降低。

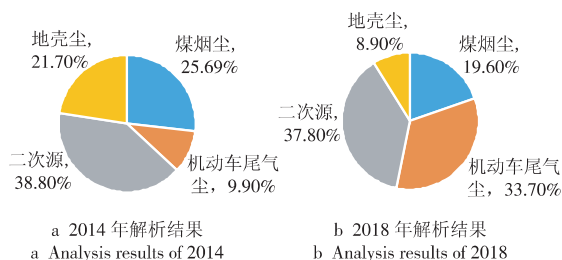


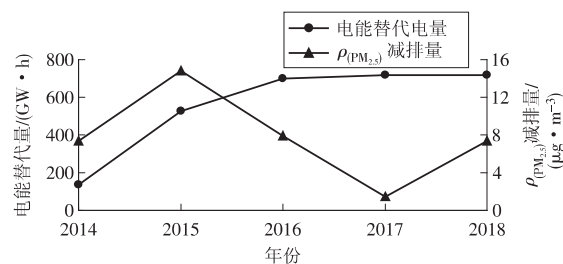
图 3 PMF 模型解析结果

Fig. 3 Analysis results based on PMF method

2.3 电能替代对大气中 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 改善的贡献评估

加强重点区域散烧煤治理,清洁取暖改造,错峰生产和重污染应急等,全面推进“以电代煤”“以电代油”改造工程,提升清洁取暖比例,有助于缓解严峻的环保形势,减轻雾霾污染,建设和谐美丽生态安徽^[33-34]。

从图 4 可以看出,2014—2018 年,合肥市通过大力推广电能替代引起的替代电量累计达到了 2802 $\text{GW} \cdot \text{h}$,且替代电量呈逐年增加趋势。2014, 2015, 2016 年 $\text{PM}_{2.5}$ 减排量与电能替代量成正比, 2017, 2018 年电能替代量均较高,但 $\text{PM}_{2.5}$ 减排量相对较低,其原因是主要污染源燃煤排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 在 2017 年之前大大降低,而其他行业如机动车行业排放量大大增加,消减了燃煤领域电能替代效果。接下来,降低 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 需要从其他污染源着手。由图 5 所示的合肥市电能替代领域分布特征可以看出:电能替代主要集中在工(农)业生产制造领域,其次是交通领域,其他领域相对较少;工农业生产制造领域的电能替代量逐年升高;交通领域 2015, 2016 年电能替代量最高,2017, 2018 年呈减小趋势,主要原因是随着合肥市轨道交通的投运,交通领域电能替代有了一定增加。

图 4 2014—2018 年电能替代量与 $\rho(\text{PM}_{2.5})$

减排量变化特征

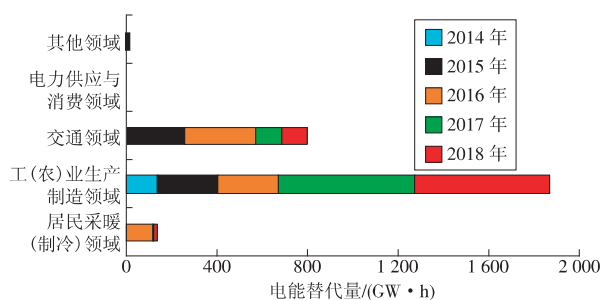
Fig. 4 Relationship between alternative energy and $\rho(\text{PM}_{2.5})$ emission reduction from 2014 to 2018

图 5 2014—2018 年合肥市分领域电能替代量

Fig. 5 Alternative energy distribution in Hefei from 2014 to 2018

根据安徽省散煤综合治理研究报告^[35],散煤占燃煤消费量的比例 2014 年为 13.60%, 2018 年为 10.80%, 散煤的 $\text{PM}_{2.5}$ 排放强度一般为电力行业的 5 倍。根据区域复合影响给出污染影响权重,结合合肥市 $\text{PM}_{2.5}$ 源解析中燃煤对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的贡献比例^[10](2014 年为 25.69%, 2018 年为 19.60%), 得出 2014 年和 2018 年散煤对大气环境中 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的贡献系数 γ 分别为 11.41% 和 9.02%。

由 γ 值计算得出: 2014—2018 年 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化量为 $32.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 其中燃煤贡献的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化量为 $11.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$; 电能替代后, 散煤削减对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的贡献量达到 $4.74 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 占总 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化量的 14.51%, 见表 1。

表 1 电能替代对合肥市大气 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 降低的贡献

Tab. Contribution of alternative energy to the reduction

年份	of $\rho(\text{PM}_{2.5})$ in atmosphere of Hefei $\mu\text{g}/\text{m}^3$		
	年均	燃煤贡献量	散煤贡献量
2014	79.50	20.42	9.07
2018	47.96	9.40	4.33
差值	32.67	11.02	4.74

鉴于电力行业的环境排放影响效率系数较低,一些研究提出了电能替代的思路和方案^[36-38],通过增加电力行业的产能,以电能输送的形式替代污染地区的能源消耗,从而降低面源的排放。选取民用

行业作为电能替代的对象,一方面是因为居民散烧燃煤主要用于生活和取暖,是电能替代最容易实现的理想对象,而 30% 的削减率是实施污染物控制措施时常设定的低限值;另一方面,电能替代本质就是以电能替代煤炭、石油等化石能源的直接消费,利用燃煤电厂高效的烟气治理措施,有效降低污染物的排放^[39-40]。

根据合肥市区 2018 年大气 PM_{2.5}源解析结果,燃煤对大气中 $\rho_{(\text{PM}_{2.5})}$ 的贡献比例为 19.60%,相对于 2014 年的 25.69% 虽有降低,但比例仍相当高。因此,针对合肥市周边散烧燃煤进一步实施电能替代,将对大气环境质量改善具有显著的效果且易于实施。张凯等^[41]对保定市的研究表明,民用燃煤对大气中 $\rho_{(\text{PM}_{2.5})}$ 的贡献比例由 2014 年冬季的 30.90% 分别降至 2017—2018 年冬季的 25.00% 和 2018—2019 年冬季的 22.00%,煤炭消费量占比由 2014 年的 49.00% 降至 2017 年的 38.00%,电力消费量占比由 2014 年的 33.80% 升至 2017 年的 39.50%,保定市空气质量得到了一定改善。因此,电能替代方案是改善合肥市区空气质量的有效途径之一。

机动车尾气尘排放的大气污染物对 $\rho_{(\text{PM}_{2.5})}$ 的贡献不容忽视,在 PM_{2.5}治理中应予以高度重视。近 5

年来,合肥机动车保有量每年保持约 20% 的增长率,合肥市相关部门的统计数据显示,截至 2018 年 5 月,合肥市机动车保有量已达 200.9 万辆,达到全国各大城市中等水平^[42]。根据 2014 年和 2018 年合肥市 PM_{2.5}颗粒物源解析结果,机动车贡献量从 7.87 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 上升到 16.16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,增长为 2.05 倍,同期机动车保有量从 103.0 万辆增长到 209.7 万辆,增长为 2.04 倍(见表 2),2014—2018 年全市交通领域电能替代在全市电能替代中占比一直不高。机动车保有量大增,严重污染城市大气环境,这可能就是 2017,2018 年合肥市在保持年均 720 GW·h 电能替代量下,城市大气 PM_{2.5}减排效果不明显的原因。从杭州市污染排放对 $\rho_{(\text{PM}_{2.5})}$ 的贡献率来看,机动车占 28.00%、工业生产占 22.90%、扬尘占 21.90%、燃煤占 18.40%、其他占 8.80%,机动车列市区源排放榜首^[43]。目前,通过对合肥市进行实际调研、访谈,了解到个别地区在工业生产制造领域已经完成了大部分的电能替代技术,剩余改造潜力较小。国网安徽省电力有限公司将会抓住国家大气污染防治的有利时机,在合肥市交通领域大力推广电能替代新技术,从而达到通过电能替代进一步改善城市大气环境质量的目的。

表 2 合肥市机动车排放对大气 $\rho_{(\text{PM}_{2.5})}$ 的影响

Tab. 2 Effect of vehicle emissions on $\rho_{(\text{PM}_{2.5})}$ in atmosphere of Hefei

年份	年均 $\rho_{(\text{PM}_{2.5})} / (\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	机动车 $\rho_{(\text{PM}_{2.5})}$ 贡献量 $/ (\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	机动车 $\rho_{(\text{PM}_{2.5})}$ 贡献率 $/ \%$	机动车保有量 / 万辆
2014	79.50	7.87	9.90	103.0
2018	47.96	16.16	33.70	209.7

3 结论

(1) 2018 年 PMF 模型解析表明,PM_{2.5}中二次源、机动车尾气尘、煤烟尘及地壳尘的贡献率分别为 37.80%,33.70%,19.60% 和 8.90%。合肥市大气中 PM_{2.5}的主要污染源类包括二次污染源以及煤烟尘、机动车尾气尘和地壳尘等一次污染源。

(2) 合肥市区大气中 $\rho_{(\text{PM}_{2.5})}$ 年均值从 2014 年到 2018 年呈逐年下降的趋势。2014—2018 年 $\rho_{(\text{PM}_{2.5})}$ 平均值(60.84 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 显著低于 2014 年的监测结果(79.50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)。春季和冬季 $\rho_{(\text{PM}_{2.5})}$ 平均值高于夏季和秋季,其中夏季 $\rho_{(\text{PM}_{2.5})}$ 最低。

(3) 合肥市 5 年来完成电能替代 2 802 GW·h,且替代电量呈逐年增加趋势,主要集中在工(农)业生产制造领域,其次是交通领域,其他领域相对较少。

(4) 根据 2014 年和 2018 年合肥市 PM_{2.5}源解析中燃煤的贡献比例,电能替代后散煤削减对 $\rho_{(\text{PM}_{2.5})}$ 的贡献量达 4.74 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,占 $\rho_{(\text{PM}_{2.5})}$ 总削减量的

14.51%,电能替代方案是改善合肥市区空气质量的有效途径。

(5) 机动车尾气尘排放的大气污染物对 $\rho_{(\text{PM}_{2.5})}$ 贡献率从 9.90% 增长到 33.70%,在 PM_{2.5}污染治理中应予以高度重视,应在交通领域大力推行电能替代。

参考文献:

- [1] 毛婉柳,徐建华,卢德彬,等. 2015 年长三角地区城市 PM_{2.5}时空格局及影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(2): 264-272.
- MAO Wanliu, XU Jianhua, LU Debin, et al. An analysis of the spatial-temporal pattern and influencing factors of PM_{2.5} in the Yangtze River Delta in 2015 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(2): 264-272.
- [2] GUO Y M, TONG S L, LI S S, et al. Gaseous air pollution and emergency hospital visits for hypertension in Beijing, China: a time-stratified case-crossover study [J]. Environmental Health, 2010, 9(1): 1-7.

- [3] 朱先磊, 张远航, 曾立民, 等. 北京市大气细颗粒物 $PM_{2.5}$ 的来源研究[J]. 环境科学研究, 2005, 18(5): 1-5.
ZHU Xianlei, ZHANG Yuanhang, ZENG Limin, et al. Source identification of ambient $PM_{2.5}$ in Beijing [J]. Research of Environmental Sciences, 2005, 18(5): 1-5.
- [4] 叶贤满, 徐昶, 洪盛茂, 等. 杭州市大气污染物排放清单及特征[J]. 中国环境监测, 2015, 31(2): 1-5.
YE Xianman, XU Chang, HONG Shengmao, et al. Emission inventory and characteristics of air pollutants in Hangzhou [J]. Environmental Monitoring in China, 2015, 31(2): 1-5.
- [5] HUANG D S, XU J H, ZHANG S Q. Valuing the health risks of particulate air pollution in the Pearl River Delta, China [J]. Environmental Science & Policy, 2012, 15(1): 38-47.
- [6] HALEY V B, TALBOT T O, FELTON H D. Surveillance of the short-term impact of fine particle air pollution on cardiovascular disease hospitalizations in New York State [J]. Environmental Health: A Global Access Science Source, 2009, 8(1): 1-10.
- [7] STIEB D M, YAO J Y, HENDERSON S B, et al. Variability in ambient ozone and fine particle concentrations and population susceptibility among Canadian health regions [J]. Canadian Journal of Public Health, 2019, 110(2): 149-158.
- [8] 王彤, 华阳, 许庆成, 等. 京津冀郊区站点秋冬季大气 $PM_{2.5}$ 来源解析[J]. 环境科学, 2019, 40(3): 1035-1042.
WANG Tong, HUA Yang, XU Qingcheng, et al. Source apportionment of $PM_{2.5}$ in suburban area of Beijing-Tianjin-Hebei region in autumn and winter [J]. Environmental Science, 2019, 40(3): 1035-1042.
- [9] 张永运, 王宏青, 肖浩, 等. 东北亚冬季 $PM_{2.5}$ 水溶性离子空间分布特征及来源[J]. 中国环境科学, 2019, 39(6): 2291-2298.
ZHANG Yongyun, WANG Hongqing, XIAO Hao, et al. Winter spatial distribution and source apportionment of water-soluble ions in $PM_{2.5}$, Northeast Asia [J]. China Environmental Science, 2019, 39(6): 2291-2298.
- [10] 陈刚, 刘佳媛, 皇甫延琦, 等. 合肥城区 PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 季节污染特征及来源解析[J]. 中国环境科学, 2016, 36(7): 1938-1946.
CHEN Gang, LIU Jiayuan, HUANGFU Yanqi, et al. Seasonal variations and source apportionment of ambient PM_{10} and $PM_{2.5}$ at urban area of Hefei, China [J]. China Environmental Science, 2016, 36(7): 1938-1946.
- [11] ZHANG J F, SMITH K R. Household air pollution from coal and biomass fuels in China: Measurements, health impacts, and interventions [J]. Environmental Health Perspectives, 2007, 115(6): 848-855.
- [12] 支国瑞, 杨俊超, 张涛, 等. 我国北方农村生活燃煤情况调查、排放估算及政策启示[J]. 环境科学研究, 2015, 28(8): 1179-1185.
ZHI Guorui, YANG Junchao, ZHANG Tao, et al. Rural household coal use survey, emission estimation and policy implications [J]. Research of Environmental Sciences, 2015, 28(8): 1179-1185.
- [13] 赵文慧, 徐谦, 李令军, 等. 北京平原区城乡结合部燃煤散烧及污染物排放量估算[J]. 环境科学研究, 2015, 28(6): 869-876.
ZHAO Wenhui, XU Qian, LI Lingjun, et al. Estimation of air pollutant emissions from coal burning in the semi-rural areas of Beijing Plain [J]. Research of Environmental Sciences, 2015, 28(6): 869-876.
- [14] 张海霞, 程先富, 陈冉慧. 安徽省 $PM_{2.5}$ 时空分布特征及关键影响因素识别研究[J]. 环境科学学报, 2018, 38(3): 1080-1089.
ZHANG Haixia, CHENG Xianfu, CHEN Ranhui. Analysis on the spatial-temporal distribution characteristics and key influencing factors of $PM_{2.5}$ in Anhui Province [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(3): 1080-1089.
- [15] 赵胤慧. 北京环境减排目标下能源替代分析与优化模型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [16] LIANG X Y, WANG Z H, ZHOU Z J, et al. Up-to-date life cycle assessment and comparison study of clean coal power generation technologies in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 39: 24-31.
- [17] ZHAO Y, WANG S X, NIELSEN C P, et al. Establishment of a database of emission factors for atmospheric pollutants from Chinese coal-fired power plants [J]. Atmospheric Environment, 2010, 44(12): 1515-1523.
- [18] YUE L. Dynamics of clean coal-fired power generation development in China [J]. Energy Policy, 2012, 51: 138-142.
- [19] 王志轩. 煤电是中国治霾关键[J]. 中国电力企业管理, 2014(17): 38-42.
WANG Zhixuan. Coal power is the key to control haze in China [J]. China Power Enterprise Management, 2014(17): 38-42.
- [20] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告 2019 [M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2019.
- [21] 王跃思, 张军科, 王莉莉, 等. 京津冀区域大气霾污染研究意义、现状及展望[J]. 地球科学进展, 2014, 29(3): 388-396.
WANG Yuesi, ZHANG Junke, WANG Lili, et al. Researching significance, status and expectation of haze in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(3): 388-396.
- [22] 闫桢, 陈潇君. 我国“十三五”能源与环境协同发展策略研究[J]. 环境与可持续发展, 2017, 42(2): 31-35.
YAN Zhen, CHEN Xiaojun. Study on synergetic development strategy of energy and environment in the 13th Five-Year-Planning [J]. Environment and Sustainable Development, 2017, 42(2): 31-35.
- [23] 闫桢, 金玲, 陈潇君, 等. 京津冀地区居民采暖“煤改电”的大气污染物减排潜力与健康效益评估[J]. 环境科学研究, 2019, 32(1): 95-103.

- YAN Zhen, JIN Ling, CHEN Xiaojun, et al. Assessment of air pollutants emission reduction potential and health benefits for 'residential heating coal changing to electricity' in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(1): 95–103.
- [24] 国家气象科学数据中心. 中国地面气象逐小时观测资料 [DB/OL]. <https://www.nmic.cn/>.
- [25] 李佳琦, 吴烨, 宋少洁, 等. 北京道路交通环境亚微米颗粒物元素组成特征及来源分析 [J]. *环境科学学报*, 2015, 35(1): 49–55.
- LI Jiaqi, WU Ye, SONG Shaojie, et al. Characteristics and source apportionment of elements in submicron particulate matter near an urban freeway in Beijing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(1): 49–55.
- [26] 陈珂, 窦薇艳, 马伟, 等. 西宁市非采暖季和采暖季PM_{2.5}中14种金属元素特征 [J]. *中国环境监测*, 2018, 34(2): 28–34.
- CHEN Ke, DOU Xiaoyan, MA Wei, et al. A preliminary study on the characteristics of 14 metal elements in PM_{2.5} during non-heating season and heating season of Xining [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2018, 34(2): 28–34.
- [27] 陶俊, 张仁健, 段菁春, 等. 北京城区PM_{2.5}中致癌重金属季节变化特征及其来源分析 [J]. *环境科学*, 2014, 35(2): 411–417.
- TAO Jun, ZHANG Renjian, DUAN Jingchun, et al. Seasonal variation of carcinogenic heavy metals in PM_{2.5} and source analysis in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2014, 35(2): 411–417.
- [28] 刘童, 王晓军, 陈倩, 等. 烟台市环境受体PM_{2.5}四季污染特征与来源解析 [J]. *环境科学*, 40(3): 1082–1090.
- LIU Tong, WANG Xiaojun, CHEN Qian, et al. Pollution characteristics and source apportionment of ambient PM_{2.5} during four seasons in Yantai City [J]. *Environmental Science*, 40(3): 1082–1090.
- [29] LIU G R, PENG X, WANG R K, et al. A new receptor model-incremental lifetime cancer risk method to quantify the carcinogenic risks associated with sources of particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons from Chengdu in China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 283: 462–468.
- [30] HASHEMINASSAB S, DAHER N, SAFFARI A, et al. Spatial and temporal variability of sources of ambient fine particulate matter (PM_{2.5}) in California [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(22): 12085–12097.
- [31] 王苏蓉, 喻义勇, 王勤耕, 等. 基于PMF模式的南京市大气细颗粒物源解析 [J]. *中国环境科学*, 2015, 35(12): 3535–3542.
- WANG Surong, YU Yiyong, WANG Qingeng, et al. Source apportionment of PM_{2.5} in Nanjing by PMF [J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(12): 3535–3542.
- [32] SHEN Z X, CAO J J, ARIMOTO R, et al. Chemical characteristics of fine particles (PM₁) from Xi'an, China [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2010, 44(6): 461–472.
- [33] 安徽省能源局. 关于推进安徽省电能替代的实施意见: 皖发改能源(2017)576号 [Z].
- [34] 安徽省能源局. 关于印发安徽省煤炭消费减量替代工作方案(2018—2020年)的通知: 皖发改环资(2017)87号 [Z].
- [35] 安徽省能源局. 安徽省散煤综合治理研究报告 [R]. 合肥: 安徽省能源局, 2018.
- [36] 尹航. 节能减排环境下电能替代其他能源评价方法研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- [37] 吴玲, 刘秋华, 牛文琪. 商业电锅炉替代传统锅炉的调查分析——基于南京市112家锅炉用户的问卷调查 [J]. *工业技术经济*, 2012, 31(1): 31–36.
- WU Ling, LIU Qihua, NIU Wenqi. Survey analysis on energy substitution of boilers in business——Based on questionnaire survey of 112 boiler users in Nanjing [J]. *Industrial Technology & Economy*, 2012, 31(1): 31–36.
- [38] 钟连红, 刘晓, 李志凯, 等. 北京居民生活用煤大气污染控制思路与对策 [J]. *环境保护*, 2015, 43(3): 77–78.
- ZHONG Lianhong, LIU Xiao, LI Zhikai, et al. The thoughts and control countermeasures of air pollution caused by coal products consuming from Beijing residents [J]. *Environmental Protection*, 2015, 43(3): 77–78.
- [39] 杜晓惠, 徐峻, 刘厚凤, 等. 重污染天气下电力行业排放对京津冀地区PM_{2.5}的贡献 [J]. *环境科学研究*, 2016, 29(4): 475–482.
- DU Xiaohui, XU Jun, LIU Houfeng, et al. Contribution of power plant emissions to PM_{2.5} over Beijing-Tianjin-Hebei area during heavy pollution periods [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(4): 475–482.
- [40] 赵秀勇, 朱法华, 王圣, 等. 江苏省火电超低排放对环境中PM_{2.5}质量浓度影响模拟研究 [J]. *中国电力*, 2019, 52(9): 167–172.
- ZHAO Xiuyong, ZHU Fahua, WANG Sheng, et al. Simulation study of the impacts of ultra-low emission implemented in thermal power plants on PM_{2.5} mass concentration in ambient air of Jiangsu Province [J]. *Electric Power*, 2019, 52(9): 167–172.
- [41] 张凯, 吕文丽, 王婉, 等. 保定市大气污染源与燃煤治理成效 [J]. *环境科学研究*, 2019, 32(10): 1720–1729.
- ZHANG Kai, LYU Wenli, WANG Wan, et al. Sources of air pollution and effects of coal combustion treatment in Baoding City [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(10): 1720–1729.
- [42] 省城机动车保有量超200万辆 [N/OL]. 新安晚报, 2018-07-05(2) [2019-11-01]. http://epaper.ahwang.cn/xawb/20180705/html/page_01.htm.
- [43] 赵佳佳. 杭州市细颗粒物(PM_{2.5})源解析研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2015.

(本文责编: 刘芳)

作者简介:

尤佳(1981—),女,安徽合肥人,高级工程师,工程硕士,从事电力营销工作(E-mail: youj2027@ah.sgcc.com.cn)。