

京津冀与关中地区“以电代煤”大气环境与碳减排效益评估

吴华成^{1*}, 周卫青¹, 李朋¹, 张子健², 汪美顺³, 周子龙¹

(1. 国网冀北电力有限公司电力科学研究院(华北电力科学研究院有限责任公司), 北京市 西城区 100045;
2. 国网冀北电力有限公司, 北京市 西城区 100054; 3. 国家电网有限公司, 北京市 西城区 100031)

Atmospheric Environment and Carbon Emission Reduction Benefit Evaluation of “Coal-to-Electricity” Project in Beijing-Tianjin-Hebei and Guanzhong Region

WU Huacheng^{1*}, ZHOU Weiqing¹, LI Peng¹, ZHANG Zijian², WANG Meishun³, ZHOU Zilong¹

(1. Jibei Electric Power Research Institute, State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., North China Electric Power Research Institute Company Limited, Xicheng District, Beijing 100045, China;
2. State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Xicheng District, Beijing 100054, China;
3. State Grid Corporation of China, Xicheng District, Beijing 100031, China)

Abstract: This paper studies the impact of the implementation of the “coal-to-electricity” in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) and Guanzhong regions on the improvement of regional atmospheric environmental quality and the benefits of carbon emission reduction. The results show that as of 2018, the “coal-to-electricity” in the BTH region has replaced 2.584 million bulk coal users, which can replace 7 066 000 tons of bulk coal each year; Guanzhong region replaces 657 600 bulk coal users, which can reduce 693 900 tons of bulk coal each year. Based on the WRF-Chem (weather research and forecasting (WRF) model coupled with chemistry) model, it is calculated that “coal-to-electricity” will reduce the monthly average concentration of PM_{2.5} in BTH region by 3~26 μg/m³, which has a decrease of 2%~35%; the mass concentration of PM_{2.5} in the Guanzhong region in winter will decrease 8.70 μg/m³, the reduction ratio is 6.8%. Benefiting from the “coal-to-electricity” project, the BTH area will reduce CO₂ emissions by 16.887 7 million tons per year, and the Guanzhong area will reduce 1.658 4 million tons per year. With the increase in the proportion of low-carbon energy and the continuous advancement of electric heating technology, the benefits of “coal-to-electricity” for carbon emission reduction will continue to be reflected.

Keywords: coal-to-electricity; Beijing-Tianjin-Hebei region; Guanzhong region; atmospheric environment; carbon emission reduction

摘要: 研究了京津冀与关中地区“以电代煤”(简称“煤改电”)实施后,对区域大气环境质量改善的影响以及碳减排效益。结果表明:截至2018年,京津冀地区“煤改电”共替代散煤用户258.4万户,每年可替代散煤706.6万t;关中地区“煤改电”替代散煤用户65.76万户,每年可减少散煤69.39万t。基于WRF-Chem (weather research and forecasting (WRF) model coupled with chemistry)模式,计算得到“煤改电”将使京津冀地区PM_{2.5}月平均浓度下降3~26 μg/m³,下降比例为2%~35%;关中地区冬季PM_{2.5}质量浓度下降8.70 μg/m³,降低比例为6.8%。受益于“煤改电”工程,京津冀地区每年可减少CO₂排放1 688.77万t,关中地区每年可减少CO₂排放165.84万t。随着低碳能源占比的提高,以及电采暖技术的不断进步,“煤改电”对碳减排的效益将不断体现。

关键词: 以电代煤; 京津冀; 关中; 大气环境; 碳减排

0 引言

近年来,北方地区采暖季“雾霾围城”将散煤推向了环境治理的风口^[1]。相关研究表明,散煤燃烧特别是农村地区散煤取暖是中国北方地区冬季雾霾天气频发的重要原因之一^[2]。以北京地区为例,2014年采暖季民用燃煤的SO₂、NO_x、PM₁₀、PM_{2.5}日排放强度

基金项目: 国家电网有限公司科技项目“京津冀等典型地区‘以电代煤’大气环境改善效益研究”(52010118000C)。

Science and Technology Foundation of SGCC “Research on the Atmospheric Environment Improvement of ‘Coal-to-Electricity’ in Beijing-Tianjin-Hebei and Other Typical Areas”(52010118000C).

分别约为电力行业的7倍、1.2倍、8倍和5倍^[3]。近些年,农村散煤治理一直是中国北方地区大气污染防治的重点工作之一。

2013年9月国务院出台《大气污染防治行动计划》,提出了以北京市及其周边传输通道地区为重点,加快推进散煤替代,开启了散煤治理的步伐,散煤治理也为《大气污染防治行动计划》目标的实现做出了突出贡献,据中国工程院对《大气污染防治行动计划》的终期评估,仅2016—2017年两年间的散煤治理就对京津冀地区2017年的PM_{2.5}年均浓度下降贡献了21%^[4]。2018年国家四部委联合发布的《关于扩大中央财政支持北方地区冬季清洁取暖城市试点的通知》明确指出,清洁取暖试点城市申报范围扩展至京津冀及周边地区大气污染防治传输通道“2+26”城市、张家口市和汾渭平原城市,3年示范期结束后试点城市城区清洁取暖率要达到100%。

近年来许多学者通过空气质量模型模拟了民用散煤对区域空气质量的影响。张众志等^[5-6]通过WRF-CMAQ (weather research and forecasting-the community multiscale air quality) 模型模拟了民用散煤对京津冀地区2015年冬季PM_{2.5}污染的贡献,其结果显示在重污染时期,民用散煤燃烧对京津冀区域PM_{2.5}月均浓度的贡献为30%~57%。李霞等^[7-8]基于WRF-Chem (weather research and forecasting (WRF) model coupled with chemistry) 模式计算京津冀地区2014年冬季大气重污染期间家用燃煤排放对空气质量的影响,以及关中地区大气重污染期间PM_{2.5}污染过程及污染源相关贡献,其计算结果表明,京津冀地区家用燃煤排放对当地PM_{2.5}质量浓度贡献为23.1%,居民源是秋冬季关中地区主要污染源。尽管民用散煤对区域大气环境影响的研究较多,但“以电代煤”对区域大气改善的影响却鲜有报道。闫祯等^[9]采用贡献系数的方法估算了京津冀地区“煤改电”大气污染物减排潜力,在替代户数为202万户与315万户的假设情景下,京津冀地区PM_{2.5}年均浓度下降值分别为3.6 μg/m³与4.3 μg/m³。张翔等^[10]通过能源-环境-经济可持续综合评价模型 (integrated model of energy, environment and economy for sustainable development, IMED) 计算得到,通过实施“煤改电”,2020年京津冀区域PM_{2.5}年均浓度可下降6~15 μg/m³。然而,结合“以电代煤”的实施情况,计算实施区域内“以电代煤”替代大气污染物的排放清单,以及基于空气质量模式,综合考虑气象、地理等因素,对“以电代煤”实施后区域大气质量环境的

改善进行定量评价,还有待进一步研究。

国家电网有限公司积极落实国家北方地区冬季清洁取暖规划,大力推进“以电代煤”工程(以下简称“煤改电”),助力打赢“蓝天保卫战”。在“碳达峰、碳中和”的背景下,“煤改电”工程在促进能源供给侧清洁化低碳化、能源消费侧高效化减量化电气化方面也发挥了重要作用。京津冀与关中地区都是大气污染防治攻坚战的重要战场,也是国网公司“煤改电”工程的重点实施区域。本文将研究京津冀与关中地区“煤改电”实施后对区域大气环境改善以及碳排放的定量影响。

1 京津冀与关中地区“煤改电”实施情况

1.1 京津冀地区

京津冀各地区“煤改电”实施情况差异较大。北京地区自2003年开始实施“煤改电”,截至2018年底,北京地区“煤改电”用户约128万户^[11]。天津地区首批“煤改电”试点开始于2015年^[12],截至2018年底,“煤改电”工程用户约71.9万户^[13]。河北省2015年在石家庄与保定地区开始“煤改电”试点,截至2018年底,国网河北省电力公司与国网冀北电力有限公司共完成“煤改电”约58.5万户^[14],整个京津冀地区“煤改电”工程共替代用户约258.4万户。京津冀与关中地区“煤改电”实施情况见表1。

表1 截至2018年京津冀与关中地区“煤改电”实施情况
Table 1 Implementation of “coal-to-electricity” policy in Beijing-Tianjin-Hebei region and Guanzhong region till 2018

地区	省份/城市	“煤改电”替代用户数量/万户
京津冀	北京	128
	天津	71.9
	河北	58.5
	总计	258.4
关中	西安	47.69
	咸阳	7.44
	其他地区	10.63
	总计	65.76

1.2 关中地区

关中地区包括西安市、咸阳市、宝鸡市、渭南市、铜川市、韩城市与杨凌示范区、西咸新区,是汾渭平原的重要组成部分。根据国网陕西省电力公司相

关数据,截至2018年底,整个关中地区“煤改电”替代总户数为65.76万户,与京津冀地区相比规模明显偏小,关中地区“煤改电”户数介于河北省与天津市之间。主要集中在西安地区,共有47.69万户,占关中地区“煤改电”总量的72.52%;其次为咸阳和渭南,其替代户数分别为7.44万户和3.34万户;关中其他地区“煤改电”实施程度不高,均在3万户以下。

2 京津冀与关中地区“煤改电”替代散煤排放清单

2.1 排放清单计算方法

京津冀与关中地区“煤改电”实施后,替代了散煤的使用,相应减少了散煤产生的大气污染物。“煤改电”替代散煤排放清单中各类大气污染物排放量根据式(1)进行计算^[15]。

$$E = A \cdot M \cdot [C \cdot K_i + (1 - C) \cdot K_j] / 1000 \quad (1)$$

式中: E 为某污染物的排放量, t/a ; A 为地区散煤替代户数; M 为户均燃煤量, t/a ; C 为地区原煤使用比例, %; K_i 和 K_j 分别为原煤与型煤的污染物排放因子^[15], kg/t 。

京津冀与关中地区户均燃煤量通过公开文献报道获取,原煤使用比例通过现场调研获得^[15]。大气污染物排放因子引用文献数据^[16]与《民用煤大气污染物排放清单编制技术指南》^[17]中的相关数据。

2.2 京津冀地区“煤改电”替代散煤排放清单

京津冀与关中地区“煤改电”替代散煤产生大气污染物排放清单见表2。截至2018年,京津冀地区“煤改电”完成后,每年可替代散煤706.6万t,可减少TSP (total suspended particulate, 总悬浮颗粒物)、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、BC (black carbon)、OC (elemental carbon)、CO、 NO_x 、 SO_2 和VOCs (volatile organic compounds)的排放量如表2所示,CO由于排放因子高^[18],减排量最大。北京市由于“煤改电”实施力度最大,每年可减少散煤燃烧438.16万t,超过了天津市和河北省总和,以 $PM_{2.5}$ 、 SO_2 和 NO_x 为例,可分别减少排放1.29万t、1.01万t和0.39万t。天津市2018年“煤改电”完成后,每年可减少散煤161.22万t,分别减少 $PM_{2.5}$ 、 SO_2 和 NO_x 排放0.84万t、0.64万t和0.21万t。河北省“煤改电”实施规模低于北京市与天津市,每年替代散煤约107.22万t,分别减少 $PM_{2.5}$ 、 SO_2 和 NO_x 排放0.68万t、0.52万t和0.17万t。从表2可以看出,燃煤量与污染物排放量之间并没有呈现简单的线性关系,这是由于式(1)中,各地区原煤与型煤比例不同,且两种煤的排放因子存在一定差异。例如,北京地区型煤使用率为100%,天津地区约为59.8%;型煤与原煤 $PM_{2.5}$ 的排放因子分别为2.95 kg/t 与8.58 kg/t 。由此可以计算出,北京“以电代煤”替代燃煤量约为天津的2.72倍,而替代 $PM_{2.5}$ 排放量只有天津的1.53倍。

表2 京津冀与关中地区“煤改电”替代散煤排放清单

Table 2 Emission inventory of atmospheric pollutants from the residential coal replaced by “coal-to-electricity” policy in Beijing-Tianjin-Hebei region and Guanzhong region

地区	省份/城市	燃煤量/万t	污染物排放量/万t								
			TSP	PM_{10}	$PM_{2.5}$	BC	OC	CO	NO_x	SO_2	VOCs
京津冀	北京	438.16	2.62	1.84	1.29	0.15	1.09	49.30	0.39	1.01	0.46
	天津	161.22	1.47	1.03	0.84	0.21	0.52	21.56	0.21	0.64	0.41
	河北	107.22	1.14	0.80	0.68	0.19	0.38	15.44	0.17	0.52	0.35
	合计	706.60	5.24	3.67	2.81	0.56	1.99	86.30	0.76	2.17	1.23
关中	西安	50.34	0.60	0.42	0.36	0.11	0.19	7.65	0.09	0.27	0.19
	咸阳	6.57	0.08	0.05	0.05	0.01	0.02	0.99	0.01	0.04	0.02
	其他	12.48	0.13	0.09	0.08	0.02	0.04	1.77	0.02	0.06	0.04
	合计	69.39	0.80	0.56	0.48	0.15	0.26	10.40	0.12	0.37	0.26

2.3 关中地区“煤改电”替代散煤排放清单

与京津冀地区相比,由于关中地区“煤改电”实施规模较小,每年可减少散煤使用69.39万t,替代散

煤排放清单如表2所示。关中地区“煤改电”户数高于河北省,但替代燃煤量却明显小于河北省,其原因在于受气温与生活习惯影响,京津冀地区户均年燃煤量高于关中地区。西安市“煤改电”实施后,每年可

减少燃煤50.34万t, 减少PM_{2.5}、SO₂与NO_x排放分别约0.36万t、0.27万t与0.09万t。

根据国家电网有限公司相关报道^[19], 截至2020年, 国网公司完成北方地区“煤改电”清洁取暖改造1063万户, 可减少散烧煤2055万t。本研究中京津冀与关中地区截至2018年“煤改电”约324.16万户, 共替代散煤约776万t, 低于报道中的数据。这一方面是因为报道中的数据涵盖的地理范围为整个北方地区; 另一方面, 由于2020年是“打赢蓝天保卫战三年行动计划”收官之年, 国网公司加快推进了“煤改电”相关工作, 因此“煤改电”用户大大增加。此外, 报道中户均燃煤用量为1.93 t/a, 本研究中京津冀与关中地区该量约为2.39 t/a, 略高于报道中的数据, 其可能原因在于, 本研究中北京与天津地区替代户数占比较高, 而这两个地区户均燃煤量相对较大^[15]。

3 “煤改电”对京津冀与关中地区大气污染物浓度影响

3.1 WRF-Chem空气质量模式

WRF-Chem模式是基于一种气象过程和化学过程同时发生相互耦合的全新的大气化学模式理念设计而成, 被广泛应用于大气环境质量模拟^[20-23]。本研究基

于WRF-Chem模式模拟了京津冀与关中地区在“煤改电”之后, 对区域大气污染物PM_{2.5}浓度的影响, 采用的基础排放清单为清华大学主持研发的华北区域0.1°×0.1°格点化清单。将“煤改电”排放清单经过时间分配、空间差值与排放高度垂直分布处理后, 输入WRF-Chem模式计算得到对应情景下不同大气污染物的浓度。在之前的研究工作中, WRF-Chem模式展示了其模拟值与观测值之间良好的相关性^[24-25]。“煤改电”工程对区域大气污染物浓度的定量影响通过式(2)进行计算。

$$\Delta m = \frac{\Delta C}{C_{\text{base}}} = \frac{C_{\text{base}} - C'}{C_{\text{base}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: Δm 为污染物浓度变化百分比; ΔC 为污染物浓度变化量; C_{base} 为基础情景即“煤改电”实施前情景下的大气污染物浓度; C' 为“煤改电”实施后大气污染物浓度。

3.2 “煤改电”对京津冀地区大气污染物排放的影响

在京津冀地区供暖季, PM_{2.5}为首要大气污染物, 图1展示了通过WRF-Chem模式模拟计算得到京津冀地区在“煤改电”实施后, 2018至2019年供暖季地面PM_{2.5}浓度变化以及变化比例。由图1可知, 就月平均

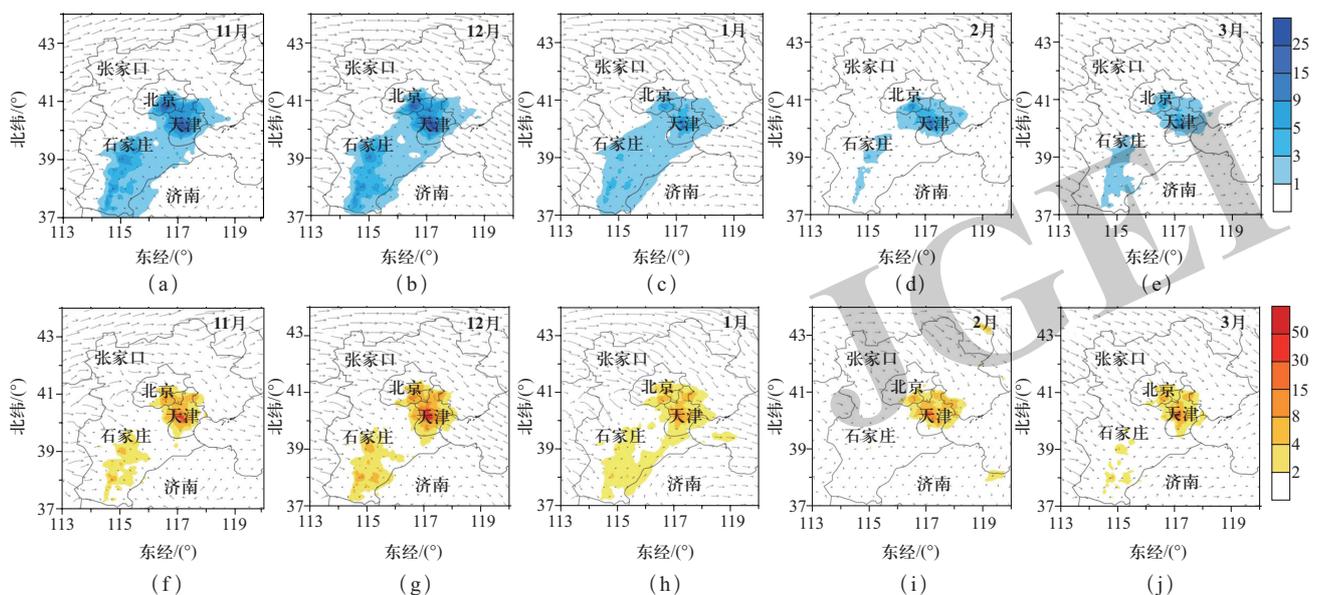


图1 2018年11月至2019年3月京津冀及周边地区“以电代煤”措施实施后对地面PM_{2.5}浓度的影响:

(a-e) 月平均浓度变化量 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$); (f-j) 月平均浓度变化比例 (%)

Fig. 1 The impact of the implementation of the “coal-to-electricity” PM_{2.5} concentration from November 2018 to March 2019:

(a-e) monthly average concentration change ($\mu\text{g}/\text{m}^3$); (f-j) monthly average concentration change ratio (%)

浓度变化量空间分布来看,月均浓度变化较大的区域集中在北京城区、天津和河北南部部分地区,这些地区与“煤改电”措施实施后地面污染物排放量变化较大的区域吻合,表明就月平均状况而言,该项措施的实施对当地大气污染物浓度的改善最显著;从月均浓度变化的程度来看,上述地区在措施实施后PM_{2.5}月平均浓度下降3~26 μg/m³,变化量占比在2%~35%之间;采暖季逐月对比显示,2018年12月浓度变化最为显著,这与该月气温较低,燃烧散煤取暖相关。月均浓度的这种变化特点,一方面与民用散煤燃烧的时间分布特点相关,12月与1月都是民用散煤燃用量较大的月份^[15];另一方面,也与气象条件密切相关,如气温、扩散条件以及周边污染物的传输等,导致PM_{2.5}浓度的下降会呈现一定的时间和空间分布。闫祯等^[9]与张翔等^[10]分别计算得到“煤改电”使京津冀地区PM_{2.5}年均浓度下降3.6~4.3 μg/m³和6~15 μg/m³;Li等^[26]研究表明,2013年京津冀地区民用源对年均PM_{2.5}浓度的贡献为30%,到冬季增加至48%,按此估算,“煤改电”可使京津冀年均和冬季PM_{2.5}浓度分别下降6.88 μg/m³和24 μg/m³。本研究的计算结果与张翔等^[10]的结果比较接近。

3.3 “煤改电”对关中地区的影响

采用WRF-Chem模式模拟计算了2019年1月“煤改电”实施后对关中地区大气环境质量的影响。

关中地区实施“煤改电”后,有效降低冬季PM_{2.5}、NO₂、SO₂、CO的平均质量浓度分别为8.70 μg/m³、1.29 μg/m³、0.57 μg/m³、0.14 mg/m³,降低比例分别为6.8%、2.1%、3.3%、8.8%。造成O₃质量浓度上升0.17 μg/m³,上升比例为0.6%。主要原因是O₃为二次反应生成,其在大气环境中的反应属于非线性过程,当单一减少或增加其前体物(VOCs或氮氧化物)排放量时,并不能保证O₃浓度的降低,可能减弱夜间氮氧化物的滴定作用。

关中地区“煤改电”措施对西安、咸阳、渭南、铜川和宝鸡五市带来的环境改善效益见图2和图3。“煤改电”措施实施后,除了会引起O₃浓度的波动外,可以有效降低冬季大气污染物PM_{2.5}、NO₂、SO₂和CO的浓度,尤其是冬季PM_{2.5}的质量浓度,对5个地市PM_{2.5}质量浓度影响顺序为:咸阳(10.96 μg/m³)>西安(9.62 μg/m³)>渭南(9.57 μg/m³)>宝鸡(7.15 μg/m³)>铜川(5.70 μg/m³),从下降比例来看,咸阳(7.1%)>渭南(7.0%)>西安(6.9%)>宝鸡(6.4%)>铜川(5.8%)。

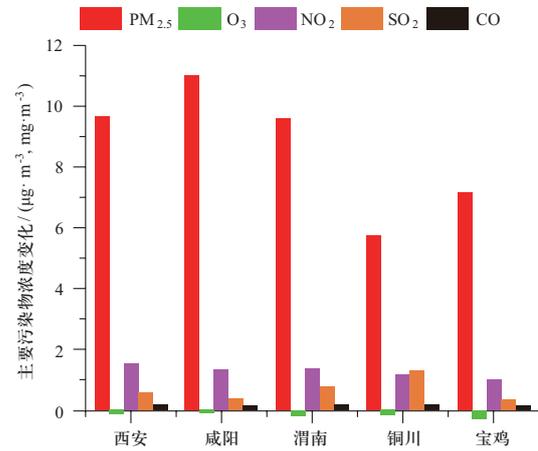


图2 关中五市“煤改电”措施环境效益改善情况 (PM_{2.5}、O₃、NO₂和SO₂质量浓度单位为μg/m³, CO质量浓度单位为mg/m³)
Fig. 2 Environmental benefits of the “coal-to-electricity” measures in five cities of Guanzhong areas (concentration unit of PM_{2.5}, O₃, NO₂, and SO₂ is μg/m³, that of CO₂ is mg/m³)

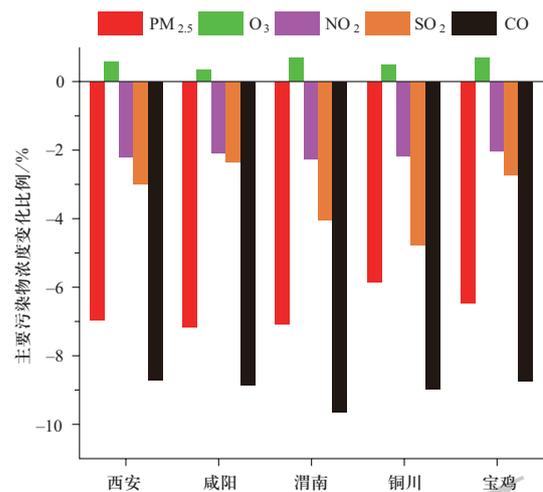


图3 “煤改电”降低关中五市主要污染物浓度比例

Fig. 3 Concentration reduction ratio of major air pollution in five cities of Guanzhong area by the “coal-to-electricity” measures

4 “煤改电”对京津冀与关中地区碳排放的影响

京津冀与关中地区“煤改电”替代散煤的碳排放量通过式(3)进行计算。

$$E_{e-coal} = M_{e-coal} \cdot e_{coal} \quad (3)$$

式中: E_{e-coal} 为“煤改电”替代散煤的碳排放量, 万t/a; M_{e-coal} 为“煤改电”之后每年替代散煤量, 万t/a; e_{coal} 为原煤的CO₂排放因子, 引用文献中的参考值^[27], 取值2.39。计算得到京津冀与关中地区“煤改电”实施后对区域CO₂的减排量汇总如表3所示。

表3 京津冀与关中地区“煤改电”CO₂减排量
Table 3 CO₂ emission reduction from “coal-to-electricity” in Beijing-Tianjin-Hebei and Guanzhong area

地区	省份/城市	CO ₂ 减排量/万t
京津冀	北京	1 047.20
	天津	385.32
	河北	256.26
	合计	1 688.77
关中	西安	120.31
	咸阳	15.70
	其他	29.83
	合计	165.84

值得注意的是, 本研究计算“煤改电”对区域CO₂减排的影响, 只考虑了减少散煤导致CO₂排放的降低, 并未考虑电采暖导致用电量升高而带来碳排放增加的问题^[27], 因此其计算值可以被认为是“煤改电”工程的CO₂减排空间。受目前电源结构中火电比例仍较高, 以及电采暖相关设备电热转换效率有待提高等因素的影响, “煤改电”工程对CO₂减排的作用还未充分发挥。要充分发挥“煤改电”工程的碳减排作用, 一方面需要改变现有电源结构, 降低火电比例, 大力增加风能、太阳能、核能与水能等低碳能源占比; 另一方面, 在用户侧需要改进“电-热”转换技术、材料与设备, 例如分布式光伏蓄热技术, 高效电制热材料, 与电网耦合交互的电采暖设备等。随着国家“碳达峰、碳中和”目标的深入推进, 以及电采暖相关材料、设备与技术路线的不断改进创新, 在未来以新能源为主体的低碳能源结构下, “煤改电”工程对区域CO₂减排的作用将越来越明显。

5 结论

1) 截至2018年, 京津冀地区完成“煤改电”替代散煤用户共258.4万户, 其中北京市最多, 占比约为49.5%。关中地区共完成“煤改电”替代散煤用户共65.76万户, 其中西安市为47.69万户, 占比约72.52%。

2) 经过计算得到, 京津冀地区“煤改电”之后, 每年可替代散煤706.6万t, 可减少PM_{2.5}排放约2.81万t、SO₂排放约2.17万t、NO_x排放约0.76万t。关中地区“煤改电”实施后每年可减少散煤69.39万t, 可减少PM_{2.5}排放约0.48万t、SO₂排放约0.37万t、NO_x排放约0.12万t。

3) 基于WRF-Chem空气质量模式模拟了“煤改电”实施后对区域大气环境的定量影响。在京津冀地区, PM_{2.5}月均浓度变化较大的区域集中在北京城区、天津和石家庄地区, 与这些地区“煤改电”实施程度较大相关, 其PM_{2.5}月平均浓度下降3~26 μg/m³, 变化量占比在2%~35%之间; 采暖期逐月对比显示, 2018年12月浓度变化最为显著。

4) 关中地区实施“煤改电”措施后, 有效降低冬季PM_{2.5}质量浓度8.70 μg/m³, 降低比例为6.8%; 在关中五市中, PM_{2.5}浓度影响最大的是咸阳市, 其降低值与比例分别为10.96 μg/m³与7.1%。

5) 截至2018年“煤改电”实施后, 京津冀地区每年可减少散煤燃烧产生CO₂ 1 688.77万t, 关中地区每年可减少散煤燃烧产生CO₂ 165.84万t。

6) 在现有能源结构下, “煤改电”工程的碳减排效益还未充分发挥, 随着“碳达峰、碳中和”目标下低碳能源占比越来越高, 以及电采暖相关核心材料、设备与技术路线的不断进步, “煤改电”工程将在碳减排领域发挥重要作用。

参考文献

- [1] 中国煤控研究项目散煤治理课题组. 中国散煤综合治理调研报告2018 [R/OL]. (2018-08-31)[2021-06-03]. <http://coalcap.nrdc.cn/datum/info?id=79&type=22018-08-31/>.
- [2] 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(in Chinese).
- [3] 潘涛, 薛亦峰, 钟连红, 等. 民用燃煤大气污染物排放清单的建立方法及应用[J]. 环境保护, 2016, 44(6): 20-24.
PAN Tao, XUE Yifeng, ZHONG Lianhong, et al. The methodology for air pollutants emission inventory from residential coal combustion and its application[J]. Environmental Protection, 2016, 44(6): 20-24(in Chinese).
- [4] 卢亚灵, 周思, 王建童, 等. 北方试点地区农村散煤治理的政策回顾与展望[J]. 环境与可持续发展, 2020, 45(3): 37-42.
LU Yaling, ZHOU Si, WANG Jiantong, et al. Review and prospect of rural bulk coal management policy in pilot cities of the North China[J]. Environment and Sustainable Development, 2020, 45(3): 37-42(in Chinese).
- [5] ZHANG Z Z, WANG W X, CHENG M M, et al. The contribution of residential coal combustion to PM_{2.5} pollution over China's Beijing-Tianjin-Hebei region in winter[J]. Atmospheric Environment, 2017, 159: 147-161.
- [6] 张众志. 京津冀民用散煤燃烧对该地区冬季PM_{2.5}污染贡献

- 模拟研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
- [7] LI X, WU J R, ELSER M, et al. Contributions of residential coal combustion to the air quality in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH), China: a case study[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18(14): 10675-10691.
- [8] 李霞. 模拟研究京津冀和关中地区大气重污染期间各污染源排放对空气质量的贡献[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院地球环境研究所), 2018.
- [9] 闫祯, 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(in Chinese).
- [10] 张翔, 戴瀚程, 靳雅娜, 等. 京津冀居民生活用煤“煤改电”政策的健康与经济效益评估[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(2): 367-376.
ZHANG Xiang, DAI Hancheng, JIN Yana, et al. Evaluation of health and economic benefits from “coal to electricity” policy in the residential sector in the jing-Jin-ji region[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2019, 55(2): 367-376(in Chinese).
- [11] 北京市发展和改革委员会. 北京市“煤改电”用户达到128万户 [EB/OL].(2018-12-14)[2021-06-03]. http://fgw.beijing.gov.cn/gzdt/fgzs/gzdt/202004/20200417_1814458.htm.
- [12] 国网天津市电力公司. 中国电力报《为了天更蓝环境更美》[EB/OL].(2015-12-29)[2021-06-03]. http://www.tj.sgcc.com.cn/html/main/col37/2015-12/29/20151229103408823202890_1.html.
- [13] 天津市人民政府. 关于印发天津市居民冬季取暖工作方案的通知 [EB/OL].(2017-11-21)[2021-06-03].http://www.tj.gov.cn/zw/gk/szfgb/qk/2017/23_3399/202005/20200520_2476433.html.
- [14] 河北省发展和改革委员会. 对政协河北省第十二届委员会第二次会议第605号提案的答复[EB/OL]. (2019-04-19)[2021-06-03]. <http://hbdc.hebei.gov.cn/web/web/xxgkzhzwjytdf/4028818b6a540d2b016a5895c5e7389f.htm>.
- [15] 李朋, 吴华成, 周卫青, 等. 京津冀“以电代煤”替代大气污染物排放清单[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(4): 1489-1497.
LI Peng, WU Huacheng, ZHOU Weiqing, et al. Emission inventory of atmospheric pollutants replaced by “coal-to-electricity” policy in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(4): 1489-1497(in Chinese).
- [16] CHENG M M, ZHI G R, TANG W, et al. Air pollutant emission from the underestimated households’ coal consumption source in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 580: 641-650.
- [17] 中华人民共和国生态环境部. 关于发布《民用煤燃烧污染综合治理技术指南(试行)》与《民用煤大气污染物排放清单编制技术指南(试行)》的公告[EB/OL]. (2016-10-26)[2021-06-03]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201610/t20161031_366528.htm/.
- [18] 刘亚男, 钟连红, 韩力慧, 等. 民用燃料烟气中气态污染物及水溶性无机离子的排放[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(8): 3225-3232.
LIU Yanan, ZHONG Lianhong, HAN Lihui, et al. Emission of gaseous pollutants and water-soluble inorganic ions from civil fuel flue gas[J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(8): 3225-3232(in Chinese).
- [19] 国务院国有资产监督管理委员会. 国家电网公司全面完成今年“煤改电”配套电网建设 [EB/OL].(2020-11-13)[2021-06-03].<http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c15944124/content.html>.
- [20] WEN W, MA X, GUO C W, et al. Source apportionment of black carbon and the feedback effect on the meteorological factors in Beijing, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(33): 41764-41775.
- [21] 周卫青, 吴华成, 李睿, 等. “大气污染防治行动计划”特高压工程大气环境效益评估[J]. *全球能源互联网*, 2018, 1(增刊1): 283-289.
ZHOU Weiqing, WU Huacheng, LI Rui, et al. Environment benefit evaluation on UHV transmission in China’s air pollution prevention and control action plan[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2018, 1(S1): 283-289(in Chinese).
- [22] 陈厚合, 茅文玲, 张儒峰, 等. 基于碳排放流理论的电力系统源-荷协调低碳优化调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(10): 1-11.
CHEN Houhe, MAO Wenling, ZHANG Rufeng, et al. Low-carbon optimal scheduling of a power system source-load considering coordination based on carbon emission flow theory[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(10): 1-11.
- [23] WEI W, LI Y, REN Y T, et al. Sensitivity of summer ozone to precursor emission change over Beijing during 2010-2015: a WRF-Chem modeling study[J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 218: 116984.
- [24] WEN W, MA X, GUO C W, et al. Source apportionment of black carbon and the feedback effect on the meteorological factors in Beijing, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(33): 41764-41775.
- [25] WEN W, MA X, GUO C W, et al. The aerosol-radiation interaction effects of different particulate matter components during heavy pollution periods in China[J]. *Atmosphere*, 2020, 11(3): 254.
- [26] LI X, ZHANG Q, ZHANG Y, et al. Source contributions of urban PM_{2.5} in the Beijing-Tianjin-Hebei region: changes between 2006 and 2013 and relative impacts of emissions and meteorology[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 123: 229-239.
- [27] WANG J X, ZHONG H W, YANG Z F, et al. Exploring the trade-offs between electric heating policy and carbon mitigation in China[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 6054.

收稿日期: 2021-06-28; 修回日期: 2021-08-30。



吴华成

作者简介:

吴华成(1972), 高级工程师, 研究方向为电网环保, 大气环境影响评价, 火电厂环保设施与工艺。通信作者, E-mail: whc@vip.sina.com。

周卫青(1981), 男, 高级工程师, 研究方向为电网环保与环境影响评价, E-mail: zhouweiqing1113@yeat.net。

(责任编辑 张宇)