

基于实测的北方地区不同清洁取暖方式 环境效益对比研究*

周卫青¹ 吴华成¹ 李朋¹ 张子健² 汪美顺³ 康玺¹

(1.国网冀北电力有限公司电力科学研究院,北京 100045;2.国网冀北电力有限公司,北京 100054;
3.国家电网有限公司,北京 100031)

摘要 通过实验和测试,对比研究了散煤传统炉具以及型煤环保炉具的大气污染物排放因子;以散煤传统炉具为基准,对比研究了型煤环保炉具、天然气壁挂炉、蓄热式电取暖、空气源热泵4种清洁取暖方式的大气污染物减排效果,探讨了北方地区冬季清洁取暖技术路线选择原则。结果表明:4种清洁取暖方式都有显著的PM_{2.5}减排效果,环境效益从大到小依次为空气源热泵、蓄热式电取暖、天然气壁挂炉、型煤环保炉具,PM_{2.5}削减率分别为99.9%、99.8%、98.4%、95.4%。各地政府在选择清洁取暖技术路线时,应在体现减排效果的基础上,综合考虑当地的大气环境状况、财政状况、居民收入水平等因素,在保障居民取暖的同时,取得环境效益的最大化。

关键词 散煤 型煤 排放因子 清洁取暖 环境效益

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2021.04.003

Comparative study on environmental benefits of different clean heating modes in Northern China based on testing ZHOU Weiqing¹, WU Huacheng¹, LI Peng¹, ZHANG Zijian², WANG Meishun³, KANG Xi¹. (1. State Grid Jibei Electric Power Research Institute, Beijing 100045; 2. State Grid Jibei Electric Power Company Limited, Beijing 100054; 3. State Grid Corporation of China, Beijing 100031)

Abstract: Through experiments and tests, the atmospheric pollutant emission factors of raw coal-traditional stove and briquette coal-environmentally-friendly stove were compared and studied. Based on raw coal-traditional stove, a comparative study of the atmospheric pollutant emission reduction effects of four clean heating modes including briquette coal-environmentally-friendly stove, natural gas wall-hung boilers, regenerative electric heating and air-source heat pump were investigated; the selection principle of clean heating technology routes in Northern China was discussed. The results showed that the four clean heating modes had significant PM_{2.5} emission reduction effects, and the environmental benefit in descending order was air-source heat pump, regenerative electric heating, natural gas wall-hung boilers, briquette coal-environmentally-friendly stove, and PM_{2.5} reduction rates were 99.9%, 99.8%, 98.4%, and 95.4%, respectively. When local governments chose clean heating technology routes, they should take into account the local atmospheric environmental conditions, financial conditions, and residents' income levels on the basis of the emission reduction effects to ensure the heating effect and maximize the environmental benefits.

Keywords: raw coal; briquette coal; emission factor; clean heating; environmental benefit

近年来,我国大气污染治理工作取得了显著成效,以2017年为例,京津冀及周边地区70个城市PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂和NO₂的年均质量浓度分别为55、102、28、39 μg/m³,与2013年相比分别下降了37.2%、25.0%、51.1%和4.0%,重污染天数也明显减少,区域空气质量整体呈改善趋势^[1]。但是,京津冀及周边地区目前仍然是我国大气污染最重的区域^[2],尤其是秋冬季,均有重污染天气出现,其中燃煤仍然是主要原因之一^[3]。自2014年以来,煤电行业已逐步实施超低排放改造,排放的大气污染物得

到高效控制,排放量进一步降低^[4],电煤消耗已非大气污染的关键因素,农村散烧煤大气污染物排放问题显得更加突出^[5],推进北方地区清洁取暖已成为近年来大气污染防治的主要措施之一,国家发展改革委等十部委联合印发了《北方地区冬季清洁取暖规划(2017—2021年)》等相关文件,地方政府逐步大力推进“煤改电”“煤改气”等工作,但由于该规划本身以指导性为主,在落实过程中部分地方政府不能科学有效地实施,清洁取暖效果欠佳,甚至造成资源浪费和影响居民正常取暖^[6]。国内外现有的民用

第一作者:周卫青,男,1981年生,硕士,高级工程师,研究方向为火电行业污染物控制、电网环保及环境影响评价。

* 国家电网有限公司科技项目(No.52010115002P);国网冀北电力有限公司科技项目(No.52018K18001D)。

煤取暖相关研究主要集中在燃煤燃烧大气污染物排放特征方面,因此,本研究以实测为基础,分析研究了型煤环保炉具、天然气壁挂炉、蓄热式电取暖和空气源热泵4种清洁取暖方式相较于散煤传统炉具的大气污染物减排效果,研究结果对各地根据实际情况制定合理的“宜电则电、宜气则气、宜煤则煤”清洁取暖措施,实现环境、经济效益的最大化,具有重要参考意义。

1 实验及计算方法

1.1 燃烧实验及大气污染物排放因子测试

1.1.1 测试平台

燃烧实验及监测平台按照《民用煤大气污染物排放清单编制技术指南(试行)》附录B要求设计,管道按照《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法》(GB/T 16157—1996)要求设计,实验装置见图1。

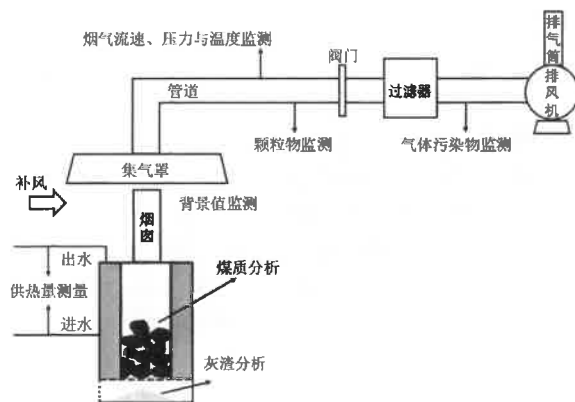


图1 实验装置

Fig.1 Experimental device

燃烧实验过程中总悬浮颗粒物(TSP)、PM_{2.5}排放分别按照GB/T 16157—1996和《固定污染源排放烟气中PM₁₀/PM_{2.5}质量浓度的测定 低浓度下利用撞击器进行测量》(ISO 23210—2009)的要求采样、称重,气态污染物排放按《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)要求进行连续在线监测。

1.1.2 燃料和炉具

本次实验所用散煤和型煤为北方地区居民家中实际冬季取暖用煤,煤样的灰分、挥发分、全硫、发热量等指标测定结果见表1。选用的传统炉具、环保炉具均为市场常见品牌。

1.1.3 实验方法

使用选定的实验煤样和炉具开展燃烧实验及大气污染物的监测、分析,实验主要过程如下:

(1) 实验前准备。完成大气污染物在线监测仪器标定、采样膜称重、燃烧实验平台测试等工作。

(2) 点火。在实验炉中依次加入一定量的实验煤样,用丙烷引燃。

(3) 燃烧过程与北方地区居民冬季取暖一致,每日包括加煤、旺火、封火3个阶段,燃烧实验持续48 h,之后让火自然熄灭。

(4) 开启烟气在线监测仪器,在整个燃烧过程中,对排放的SO₂、NO_x、CO等气态污染物进行连续监测。

(5) 在加煤、旺火、封火等不同阶段,采集TSP、PM_{2.5}样品,记录采样时间和采样状态,待后续称重分析。

(6) 使用精度为0.01 kg的电子秤对添加的实验煤样称重并记录。

(7) 实验过程同时监测稀释空气的环境背景浓度值。

1.1.4 排放因子计算

对采集的样品称重后,由式(1)计算TSP、PM_{2.5}的排放因子。

$$E_{PM_i} = \frac{\Delta m_i \times Q \times t}{V \times M \times 10^{-3}} \quad (1)$$

式中: E_{PM_i} 为颗粒物*i*的排放因子,kg/t; Δm_i 为滤筒或采样膜收集的颗粒物质量,g; Q 为实验过程烟气流量,m³/h; t 为实验时间,h; V 为采集颗粒物过程中的采气量,L; M 为实验燃煤量,kg。

SO₂、NO_x、CO排放浓度使用在线监测仪器监测,对3个燃烧阶段分别监测、计算,具体见式(2):

表1 实验炉具及煤样煤质

Table 1 Experimental stove and coal quality

炉型	煤样	来源	煤质			
			灰分 (质量分数)/%	挥发分 (质量分数)/%	全硫 (质量分数)/%	低位发热量 (MJ·kg ⁻¹)
传统炉具	散煤 1	唐山	4.32	30.83	0.21	30.79
	散煤 2	张家口	3.38	28.71	0.25	29.95
环保炉具	型煤 1	天津	25.89	11.34	0.31	24.41
	型煤 2	北京	21.02	8.89	0.28	24.99

$$E_p = \frac{\sum Q_j \times t_j \times c_{pj}}{M \times 10^3} \quad (2)$$

式中: E_p 为气态污染物 p 的排放因子, kg/t ; Q_j 为 j 燃烧阶段(加煤、旺火、封火)的烟气流量, m^3/h ; t_j 为 j 燃烧阶段的时间, h ; c_{pj} 为 j 燃烧阶段气态污染物 p 的质量浓度, mg/m^3 。

1.2 清洁取暖方式大气污染物削减计算

选取北京地区某典型取暖用户, 分别计算散煤传统炉具、型煤环保炉具、天然气壁挂炉、蓄热式电取暖、空气源热泵 5 种取暖方式 1 个取暖季的煤、气、电消耗量, 以及相应的大气污染物排放量、清洁取暖方式大气污染物削减率。该用户取暖面积为 100 m^2 , 1 个取暖季取暖时间为 120 d , 平均取暖热负荷为 $43 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 取暖热量为 $4.458 \times 10^4 \text{ MJ}^{[7]}$ 。

1.2.1 煤、气、电消耗量

煤、气、电的消耗量使用等热值法计算, 具体公式见式(3)至式(7)。

$$B_t = D/(\eta_1 \times Q_{1\text{ar}, \text{net}} \times 1000) \quad (3)$$

$$B_b = D/(\eta_1 \times Q_{2\text{ar}, \text{net}} \times 1000) \quad (4)$$

$$B_g = D/(\eta_2 \times Q_{3\text{ar}, \text{net}}) \quad (5)$$

$$B_{\text{el}} = D/(\eta_3 \times K) \quad (6)$$

$$B_{\text{e2}} = D/(\eta_4 \times K) \quad (7)$$

式中: B_t 、 B_b 分别为散煤、型煤的消耗量, t ; B_g 为天然气消耗量, m^3 ; D 为 1 个取暖季的取暖热量, MJ ; η_1 、 η_2 、 η_3 、 η_4 分别为传统炉具和环保炉具、天然气壁挂炉、蓄热式电取暖、空气源热泵的热效率, 相应的值分别为 $0.4^{[8]}$ 、 $0.85^{[9]}$ 、 $0.85^{[10]}$ 、 $3^{[11]}$; $Q_{1\text{ar}, \text{net}}$ 、 $Q_{2\text{ar}, \text{net}}$ 分别为散煤、型煤的低位发热量, MJ/kg , 取本次实验煤样测试结果; $Q_{3\text{ar}, \text{net}}$ 为天然气的低位发热量, MJ/m^3 , 取值为 $38.1 \text{ MJ}/\text{m}^3^{[12]}$; B_{el} 、 B_{e2} 分别为蓄热式电取暖、空气源热泵取暖电消耗量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; K 为热电转换系数, $\text{MJ}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, 取值为 $3.6 \text{ MJ}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

1.2.2 大气污染物排放量

大气污染物排放量使用排放因子法(散煤、型煤、天然气)或排放绩效法(电)计算, 散煤传统炉具、

型煤环保炉具大气污染物排放因子采用本次实验数据, 天然气壁挂炉 TSP、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_x 、CO 的排放因子分别取 0.3 、 0.3 、 0.63 、 1.84 、 $0.006 \text{ g}/\text{m}^3^{[13-14]}$, 蓄热式电取暖和空气源热泵 TSP、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_x 、CO 排放绩效分别取 6.5 、 3.38 、 40 、 100 、 $660 \text{ mg}/(\text{kW} \cdot \text{h})^{[15-16]}$ 。

1.2.3 大气污染物削减率

以散煤传统炉具大气污染物排放量为基准, 计算其余 4 种清洁取暖方式的大气污染物削减率。

2 结果与讨论

2.1 大气污染物排放因子

散煤传统炉具、型煤环保炉具大气污染物排放因子实验结果见表 2。散煤传统炉具的 TSP、 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子分别为 7.77 、 6.91 kg/t , 型煤环保炉具的 TSP、 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子分别为 0.38 、 0.26 kg/t , 后者是前者的 5% 左右。部分学者使用类似测试平台, 得到散煤传统炉具的 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子为 $3.58 \sim 11 \text{ kg/t}^{[17-20]}$, 本次实验结果大致属于该范围的中值; 李庆等^[21]通过实验得出散煤环保炉具的 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子为 0.6 kg/t 左右, 无烟煤环保炉具的 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子为 $(0.16 \pm 0.10) \text{ kg/t}$, 是散煤传统炉具的 98% 左右, 相同燃烧条件下, TSP、 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放因子与燃煤的挥发分呈正相关关系^[22], 型煤挥发分介于散煤和无烟煤之间, 本实验测得的排放因子也在上述两者区间内。由此可见, 本次实验得到型煤环保炉具的颗粒物排放因子和减排效果与相关研究结果一致。型煤的挥发分低, TSP、 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放因子小; 环保炉具采用反式燃烧方式, 可以延长烟气在炉膛中的停留时间, 使挥发分充分燃烧, 有效降低 $\text{PM}_{2.5}$ 排放强度^[23], 型煤环保炉具取暖具有显著的 TSP、 $\text{PM}_{2.5}$ 减排效果。

散煤传统炉具的 SO_2 、 NO_x 、CO 排放因子分别为 1.19 、 1.37 、 78.35 kg/t , 型煤环保炉具的 SO_2 、 NO_x 、CO 排放因子分别为 1.10 、 0.76 、 116.85 kg/t , 气态污染物排放因子因燃煤品质、燃烧方式的不同

表 2 大气污染物排放因子
Table 2 Results of atmospheric pollutant emission factors

炉具	项目	TSP	$\text{PM}_{2.5}$	SO_2	NO_x	CO
传统炉具	散煤 1	8.03	7.59	1.92	1.20	77.48
	散煤 2	7.51	6.22	0.45	1.54	79.22
	平均	7.77	6.91	1.19	1.37	78.35
环保炉具	型煤 1	0.46	0.34	0.96	1.05	102.46
	型煤 2	0.30	0.17	1.24	0.46	131.24
	平均	0.38	0.26	1.10	0.76	116.85

变化较大,SO₂排放因子与燃煤的硫分及硫存在的形态、燃烧温度等相关,NO_x排放因子主要与燃烧温度或炉膛温度、燃烧方式等相关,CO排放因子与燃烧方式、燃烧效率相关^[24]。从本次测试结果来看,传统炉具的NO_x、SO₂排放因子相对更大,环保炉具燃烧效率比传统炉具低,CO的排放因子更大。

2.2 不同清洁取暖方式环境效益分析

2.2.1 不同清洁取暖方式环境效益

散煤传统炉具、型煤环保炉具、天然气壁挂炉、蓄热式电取暖和空气源热泵取暖所消耗的物料量分别为散煤 3.7 t、型煤 4.5 t、天然气 1 376.6 m³、电 14 568.6 kW·h、电 4 127.8 kW·h,1 个取暖季大气污染物的排放量见表 3,4 种清洁取暖方式的大气污染物削减率见表 4。

由表 4 可知,4 种清洁取暖方式都能够大幅降低 TSP、PM_{2.5}的排放量,空气源热泵减排效果最好,削减率为 99.9%,型煤环保炉具效果相对较差,但削减率也在 90% 以上;电取暖方式 TSP、PM_{2.5}、SO₂、NO_x等大气污染物的减排效果最显著,主要原因为燃煤机组通过超低排放或近零排放改造,大气污染物排放浓度已达燃气机组排放要求,空气源热泵由于热转换效率高,取暖耗电量少,减排效果最明显;天然气壁挂炉燃烧最充分,CO 减排效果最明显,削减率接近 100%,天然气硫含量低,SO₂减排效

果也很明显,削减率在 80% 以上,但 NO_x的减排效果不明显;型煤环保炉具仅对 TSP、PM_{2.5}有明显减排效果,NO_x减排效果不明显,SO₂排放量小幅增加,主要由于京津冀地区对民用散煤、型煤硫分都按照小于 0.40% 的标准控制,两种燃煤硫分相差较小,型煤的低位发热量较低,取暖煤耗量大,相对于传统炉具,环保炉具总体燃烧效率低,CO 排放量增加近 1 倍。综上所述,4 种清洁取暖方式环境效益从大到小依次为空气源热泵、蓄热式电取暖、天然气壁挂炉、型煤环保炉具。

2.2.2 清洁取暖方式技术路线选择

在考察环保效益的同时,对比了 4 种清洁取暖方式的投资及运行费用、取暖主观感受等,综合环境效益,探讨不同区域清洁取暖方式的选择原则。部分研究^[25-27]对比研究了几种清洁取暖方式的初期投资及运行费用,得出型煤环保炉具取暖的改造和运行费用最低,因此从经济性角度更具推广性,空气源热泵相比蓄热式电取暖,PM_{2.5}削减率相差约 0.1 百分点,但初期投资多 3 倍左右,如以区县为单位考虑,投资额度巨大,需要地方有足够的财政支撑;谢伦裕等^[28]通过 4 000 多户清洁取暖用户的入户调查,获知了居民取暖的主观感受,发现电取暖的安全性、卫生程度、方便性等方面有一定优势,型煤环保炉具取暖效果、可靠性最好。具体情况见表 5。

表 3 不同取暖方式大气污染物排放量

Table 3 Atmospheric pollutant emissions of different heating modes g

取暖方式	TSP	PM _{2.5}	SO ₂	NO _x	CO
散煤传统炉具	28 749	25 567	4 403	5 069	289 895
型煤环保炉具	1 710	1 170	4 950	3 420	525 825
天然气壁挂炉	413	413	867	2 533	8
蓄热式电取暖	95	49	583	1 457	9 615
空气源热泵	27	14	165	413	2 724

表 4 清洁取暖方式大气污染物削减率

Table 4 Atmospheric pollutant emission reduction rates of different clean heating modes %

取暖方式	TSP	PM _{2.5}	SO ₂	NO _x	CO
型煤环保炉具	94.1	95.4	-12.4	32.5	-81.4
天然气壁挂炉	98.6	98.4	80.3	50.0	>99.9
蓄热式电取暖	99.7	99.8	86.8	71.3	96.7
空气源热泵	99.9	99.9	96.2	91.9	99.1

表 5 减排效果、费用及主观感受情况对比¹⁾

Table 5 Comparison of emission reduction effect, cost and subjective feeling

取暖方式	PM _{2.5} 削减率/%	费用		取暖效果	安全性	卫生程度	可靠性	方便性
		初期投资/元	运行/(元·a ⁻¹)					
型煤环保炉具	95.4	3 500	2 800	I	III	III	I	III
天然气壁挂炉	98.4	15 368	3 512	II	II	II	III	II
蓄热式电取暖	99.8	8 200	3 141	IV	I	I	II	I
空气源热泵	99.9	30 390	2 600	III	I	I	II	I

注:1) I、II、III、IV 依次表示主观感受的优劣次序, I 为主观感受最优;取暖运行费用均为财政补贴后的费用。

大气环境状况、财政状况、居民收入水平、居民意愿、能源禀赋等都是清洁取暖方式选择的影响因素。各地方在选择清洁取暖方式时,应在重点考虑环境效益的基础上,综合考虑以上因素,切实做到“宜电则电、宜气则气、宜煤则煤”,如在人均收入高、居民有更高生活品质意愿的区域优先实施“煤改电”,在收入尚不高的农村区域优先使用型煤环保炉具,在具备“煤改电”“煤改气”条件的区域充分考虑初期投资和气、电的可靠性因素选择技术路线,在保障居民取暖的同时,取得环境效益的最大化。

3 结论

(1) 散煤传统炉具的 TSP、PM_{2.5} 排放因子分别为 7.77、6.91 kg/t,型煤环保炉具的 TSP、PM_{2.5} 排放因子分别为 0.38、0.26 kg/t,后者是前者的 5% 左右。散煤传统炉具的 SO₂、NO_x、CO 排放因子分别为 1.19、1.37、78.35 kg/t,型煤环保炉具的 SO₂、NO_x、CO 排放因子分别为 1.10、0.76、116.85 kg/t;冬季采用型煤环保炉具取暖,有显著的 TSP、PM_{2.5} 减排效果。

(2) 4 种清洁取暖方式的环境效益从大到小依次为空气源热泵、蓄热式电取暖、天然气壁挂炉、型煤环保炉具;空气源热泵对 TSP、PM_{2.5}、SO₂、NO_x 等大气污染物的减排效果最好;天然气壁挂炉对 CO 的减排效果最好;型煤环保炉具仅对 TSP、PM_{2.5} 有明显的减排效果,SO₂、CO 的排放量将会增大。

(3) 各地政府选择冬季清洁取暖技术路线时,需在考虑环境效益的基础上,结合当地的大气环境状况、财政状况、居民收入水平、居民意愿、能源禀赋等因素进行综合考虑,切实做到“宜电则电、宜气则气、宜煤则煤”,在保障居民取暖的同时,取得环境效益的最大化。

参考文献:

- [1] 京津冀及周边地区大气污染防治协作小组办公室.不信蓝天唤不回——京津冀及周边地区 2017 年大气污染防治攻坚战成效及经验[J].前线,2018(6):76-78.
- [2] 柴发合,邹天森,许耀中.深入推进能源结构优化 助力大气污染防治攻坚[J].国家电网,2018(11):28-31.
- [3] 胡京南,柴发合,段晋春,等.京津冀及周边地区秋冬季 PM_{2.5} 爆发式增长成因与应急管控对策[J].环境科学研究,2019,32(10):1704-1712.
- [4] 王树民,宋畅,陈寅彪,等.燃煤电厂大气污染物“近零排放”技术研究及工程应用[J].环境科学研究,2015,28(4):487-494.
- [5] 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.

- [6] 温吴文.我国北方地区民用清洁煤取暖情况调研与分析[J].中国能源,2019,41(12):12-16,27.
- [7] 徐钢,王春兰,许诚,等.京津冀地区散烧煤与电采暖大气污染物排放评估[J].环境科学研究,2016,29(12):1735-1742.
- [8] 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.
- [9] DONG K F, LI Z, WANG L. Discussion of the heating mode between the wall mounted electric heat storage box and the wall mounted gas boiler[J]. Heating & Refrigeration, 2014(7):64-66.
- [10] 李腾,张九根,毛韵嘉.蓄能供热采暖技术在建筑采暖中的应用与研究[J].电气应用,2015,35(2):87-89.
- [11] 孙赋敏,刘学来,李永安.山东地区农村清洁取暖方案环境效益分析[J].洁净与空调技术,2019,12(4):34-37.
- [12] 国家统计局能源统计司.中国能源统计年鉴 2016[M].北京:中国统计出版社,2016.
- [13] 第一次全国污染源普查资料编纂委员会.污染源普查产排污系数手册(下)[M].北京:中国环境科学出版社,2011.
- [14] 王丽涛,张强,郝吉明,等.中国大陆 CO 人为源排放清单[J].环境科学学报,2005,25(12):1580-1585.
- [15] 沈海萍,刘寒梅,范海燕,等.基于总量控制的火电行业主要污染物排放绩效标准研究[J].能源工程,2018(6):44-50.
- [16] 赵磊,周洪光.超低排放燃煤火电机组湿式电除尘器细颗粒物脱除分析[J].中国电机工程学报,2016,36(2):468-473,604.
- [17] LI Q, LI X H, JIANG J K, et al. Semi-coke briquettes: towards reducing emissions of primary PM_{2.5}, particulate carbon, and carbon monoxide from household coal combustion in China [J]. Scientific Reports, 2016, 6:19306.
- [18] CHEN Y J, TIAN C G, FENG Y L, et al. Measurements of emission factors of PM_{2.5}, OC, EC, and BC for household stoves of coal combustion in China[J]. Atmospheric Environment, 2015, 109:190-196.
- [19] TIAN J, NI H Y, HAN Y M, et al. Primary PM_{2.5} and trace gas emissions from residential coal combustion: assessing semi-coke briquette for emission reduction in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China[J]. Atmospheric Environment, 2018, 191:378-386.
- [20] LI Q, QI J, JIANG J K, et al. Significant reduction in air pollutant emissions from household cooking stoves by replacing raw solid fuels with their carbonized products[J]. Science of the Total Environment, 2019, 650:653-660.
- [21] 李庆,段雷,蒋靖坤,等.我国民用燃煤一次颗粒物的减排潜力研究[J].中国电机工程学报,2016,36(16):4408-4414.
- [22] 刘源,张元勋,魏永杰,等.民用燃煤含碳颗粒物的排放因子测量[J].环境科学学报,2007,27(9):1409-1416.
- [23] 梁斌,宋华,白浩隆,等.民用散煤污染治理(I)不同炉燃烧特性的对比试验研究[J].洁净煤技术,2017,23(4):89-94.
- [24] 梁云平,张大伟,林安国,等.北京市民用燃煤烟气中气态污染物排放特征[J].环境科学,2017,38(5):1775-1782.
- [25] 罗宏,张保留,王健,等.京津冀及周边地区清洁取暖补贴政策现状、问题与对策[J].中国环境管理,2020,12(2):34-41.
- [26] 程翔.北方供暖地区不同采暖方式发展现状及经济性分析[J].中国集体经济,2019(24):14-17.
- [27] 中国能源研究会.京津冀农村清洁用能方案分析[J].农电管理,2020(5):8-11.
- [28] 谢伦裕,常亦欣,蓝艳.北京清洁取暖政策实施效果及成本收益量化分析[J].中国环境管理,2019,11(3):87-93.

编辑:胡翠娟 (收稿日期:2020-08-10)