



文章栏目: 大气污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202008245

中图分类号 X511

文献标识码 A

王晨龙, 左朋莱, 张晓曦, 等. 民用型煤燃烧的排放特征及推广型煤的减排效果[J]. 环境工程学报, 2021, 15(10): 3253-3261.

WANG Chenlong, ZUO Penglai, ZHANG Xiaoxi, et al. Study on air pollutant emission characteristics and emission reduction potential of civil square briquette[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(10): 3253-3261.

民用型煤燃烧的排放特征及推广型煤的减排效果

王晨龙¹, 左朋莱¹, 张晓曦¹, 魏志勇¹, 刘洁玉¹, 岳涛¹, 高佳佳¹, 王堃¹, 井鹏^{2,✉}

1. 北京市劳动保护科学研究所, 北京 100054

2. 中国环境保护产业协会, 北京 100037

第一作者: 王晨龙(1988—), 男, 硕士, 助理研究员。研究方向: 大气污染控制。E-mail: wangchenlong@bmiip.com

✉通信作者: 井鹏(1982—), 男, 硕士, 高级工程师。研究方向: 环境技术管理。E-mail: caepijp@163.com

摘要 为探究煤质对型煤燃烧排放特征的影响, 选取了呼和浩特市某城区推广使用的 6 种方型型煤进行了污染物排放水平测试, 并结合煤质数据分析了影响型煤燃烧排放特征的主要因素。结果表明, 挥发分含量是影响型煤燃烧产生的 PM_{2.5} 和 NO_x 排放浓度的主要因素; VOCs 的排放浓度与挥发分和固定碳的总含量相关; 计算得到型煤燃烧后的主要污染物 (CO、SO₂、NO_x、TSP、PM_{2.5}、VOCs) 的排放因子, 分别为 (36.0±17.3)、(1.89±0.47)、(1.18±0.62)、(0.47±0.69)、(0.19±0.15) 和 (0.27±0.18)g·kg⁻¹; 设置排放情景, 计算得到在该区域推广型煤后主要污染物的减排率分别为 61.9%、22.2%、20.6%、89.3%、91.6% 和 89.1%。在推广民用型煤的过程中, 还应加强对煤质的管理, 同时推广型煤的配套炉具, 减少人为操作造成的污染物排放。

关键词 民用型煤; 大气污染物; 排放特征; 环境效益

煤炭是我国最主要的一次能源。2019 年, 全国煤炭消费总量达 2.8×10^9 t(标准煤)^[1], 占世界煤炭消费总量的 51.7%^[2]。自 2017 年以来, 尽管我国生活消费煤炭总量开始下降^[1], 但是北方农村地区家庭的冬季取暖大部分仍以煤炭为主, 对于散煤的依赖较强。由于散煤燃烧采用直燃直排的方式^[3], 排放到大气中污染物的总量不容小觑。《打赢蓝天保卫战三年行动计划》(简称《计划》)指出, 要集中资源推进京津冀及周边地区散煤治理, 对暂不具备清洁能源替代条件的地区, 积极推广洁净煤。各地根据《计划》进行推广实施, 到 2019 年末已取得一定效果。

针对型煤的烟气污染物成分及燃烧特性, 国内学者开展了大量研究。LI 等^[4]对多种民用型煤进行了污染物排放因子的研究, 发现点火、加煤等人为扰动会加剧污染物排放。张熠晨等^[5]通过开展不同燃煤炉具模拟燃烧的大气污染物排放水平监测, 探究了不同炉具对型煤等燃料排放常规气态污染物的影响。基于实测数据, 刘亚男等^[6-7]研究了型煤等不同燃料燃烧后气态污染物、水溶性无机离子、有机碳 (organic carbon, OC)、元素碳 (elemental carbon, EC)、总碳 (total carbon, TC), 以及挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 的排放特征。孙竹如等^[8]应用黑箱原理和物料衡算法对上海市家用炉燃煤的 SO₂ 排放因子进行了计算, 得到其标准排放因子为 11.54 kg·t⁻¹, 小

收稿日期: 2020-08-27; 录用日期: 2021-07-07

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFF0211804, 2017YFC0211406); 北京市科学技术研究院北科萌芽项目 (BGS201911)

于电厂锅炉和工业锅炉的排放因子。张琦等^[9]在更为严格的箱式稀释采样系统中对多种不同民用煤的排放因子进行了实验测试,发现在不同燃烧条件下污染物的排放因子有很大区别,采样和测试方法对结果的影响也较大。

然而,关于煤质特性对大气污染物排放特性影响的深入、系统的研究仍相对较少。此外,上述研究大多在实验室中进行,与实际使用过程中的环境条件差别较大,并且部分实验采用了稀释通道法对污染物进行采样,引风机的使用会改变炉具正常燃烧的状态,取得的数据与实际工况有所差异。针对上述情况,为加强对型煤排放影响因素的识别,本研究选取了6种不同煤质的型煤在专用炉具内燃烧,模拟居民实际使用工况,并周期性监测大气污染物排放情况,系统分析了煤质成分(灰分、挥发分、固定碳)及燃烧状态(点火、稳定、加煤和封火)对污染物排放的影响,并采用情景分析法,核算呼和浩特市某城区推广型煤后主要大气污染物(SO₂、NO_x、CO、TSP、PM_{2.5}、VOCs)的减排潜力,以期为散煤洁净化利用和区域洁净型煤的推广与管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 型煤样品的材质分析

选取呼和浩特市某城区推广使用的方型型煤进行了燃烧排放实验。为得到不同品质型煤的排放特征,根据不同煤粉与复合添加剂的配比,配制了6种型煤,依据《煤的工业分析方法》(GB/T 212-2008)和《煤的发热量测定方法》(GB/T 213-2008),对这6种型煤的煤质进行了工业分析和元素分析(各成分的含量用质量分数表示),结果如表1所示。与《商品煤质量民用型煤》(GB 34170-2017)^[10]对蜂窝煤的标准限值对比,除6号型煤外,其余5种型煤的含硫量和发热量均满足标准要求。

表1 煤质工业分析和元素分析结果
Table 1 Proximate and ultimate analysis of samples

样品编号	工业分析/%				元素分析/%			$Q_{gr,d}$ (MJ·kg ⁻¹)	$Q_{net,ar}$ (MJ·kg ⁻¹)
	M_{ad}	A_d	V_d	FC_{ad}	H_d	N_d	$S_{t,d}$		
1#型煤	4.02	27.6	9.47	60.4	1.43	0.77	0.39	23.57	22.26
2#型煤	5.26	12.1	8.55	75.18	1.08	0.82	0.27	28.88	27.02
3#型煤	5.2	21.07	11.6	63.83	1.27	0.79	0.36	25.1	23.43
4#型煤	5.22	19.22	11.42	65.74	1.27	0.73	0.34	25.83	24.09
5#型煤	5.26	32.88	14.37	49.98	1.34	0.65	0.49	20.39	18.92
6#型煤	5.22	39.44	16.69	41.58	1.77	0.59	0.36	18.14	16.73
标准限值	—	—	—	—	—	—	≤1.00	≥19.00	—

注: M_{ad} 为空气干燥基水分; A_d 为干燥基灰分; V_d 为干燥基挥发分; FC_{ad} 为空气干燥基固定碳; H_d 为氢含量; N_d 为氮含量; $S_{t,d}$ 为含硫量; $Q_{gr,d}$ 为干燥基高位发热量; $Q_{net,ar}$ 为收到基低位发热量。

1.2 样品的采集与污染物分析

采用燃烧方型型煤的专用炉具为实验炉具。炉具型号为NF12-C(FHS-12),热功率为12 kW。炉型剖面见图1。型煤从上部添煤口加入炉膛,空气从炉膛底部的通风口进入,煤块通过送煤手柄横向平推进料,同时将燃尽的煤灰推至燃烧室尽头,通过出灰簸箕倒出。污染物采样点位于烟道上的采样孔位置(见图1)。采样孔距横水管1.5 m。

根据居民使用型煤的周期性特点,将每种型煤的连续采样时长设为8 h,可覆盖居民取暖燃煤的整个燃烧过程,包括点火(启炉)、稳定(通风高功率)、加煤(添煤、卸灰)和封火(闷烧,半通风低功率)4个阶段。

烟气温度、烟气含氧量 ($O_2\%$)、无机气态污染物 (CO 、 SO_2 、 NO_x) 的排放浓度使用德国德图公司 TESTO 350 烟气分析仪进行连续检测, 取 1 min 平均值作为检测结果。由于型煤炉具无主动送风装置, 烟气流速较低 (约为 $0.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), 使用崂应 3072 型智能双路烟气采样器搭配改进的采样装置, 采用恒定流速采样, 将颗粒物 (指标为总悬浮颗粒物, total suspended particulate, TSP) 样品采集到 37 mm 滤膜中带回实验室称重分析。 $PM_{2.5}$ 使用美国 BGI 公司 SCC1.062 Triplex 个体采样旋风分离器进行采样。挥发性有机物 (VOCs) 使用 Tenax GR + Carboxack B 吸附管进行采集, 采样流量为 $20 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 每个样品采集 15 min, 使用美国安捷伦公司 Agilent GC-MS 7890A/5975C 气相色谱-质谱联用仪分析 VOCs 的组分及浓度。

实验共获得 197 组颗粒物浓度数据、3 993 组无机气态污染物浓度数据及 29 组 VOCs 浓度数据。

1.3 排放因子及排放量计算

1.3.1 污染物排放因子

根据烟气排放流量、烟气中污染物的质量浓度以及测试全过程耗煤量, 用每燃烧 1 kg 型煤排放的大气污染物质量表示烟气污染物的排放因子, 见式 (1)。

$$EF_i = \frac{\sum(C_i \times Q_{sn_i} \times t_i)}{A \times 10^3} \quad (1)$$

式中: EF_i 为基于燃料质量的烟气污染物排放因子, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; C_i 为标准状态下烟气污染物的实测质量浓度, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$; Q_{sn_i} 为烟气排放标准状态流量, $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$; t_i 为单一过程持续时间, h; A 为全过程耗煤量, kg; i 为不同的燃烧阶段 (点火、稳定、换煤、封火)。

测试用炉具功率为 12 kW, 测试全过程完全燃烧方型型煤 8 块。型煤规格为 $100 \text{ mm}\times 100 \text{ mm}\times 90 \text{ mm}$, 质量为每块 $0.85\sim 0.90 \text{ kg}$ 。

1.3.2 大气污染物排放量核算

采用排放系数法核算呼和浩特市某城区采暖季民用燃煤的大气污染物排放量, 见式 (2)。

$$E = \sum_i A_m \times EF_i / 1000 \quad (2)$$

式中: E 为排放量, t; A_m 为排放源活动水平, 取当地采暖季燃煤消耗量, t; EF_i 为基于燃煤质量的排放因子, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

2 结果与讨论

2.1 煤质成分对污染物排放的影响

2.1.1 挥发分对颗粒物排放的影响

将 6 种型煤的挥发分含量 (V_d) 与各自在稳定燃烧状态排放的 $PM_{2.5}$ 质量浓度 (标准状态下) 进行 Pearson 相关性分析, 结果见图 2。

经过 SPSS 计算, $PM_{2.5}$ 排放浓度与煤中挥发分含量之间的 Pearson 相关性系数 $r=0.746$, 相伴概率 $P<0.001$, 呈现双侧显著相关, 说明实验中型煤排放的 $PM_{2.5}$ 受挥发分含量的影响较大。挥发分中未完全燃烧的有机物会因温度骤降导致蒸气过饱和, 一部分有机物通过均相成核过程形成颗粒物, 另一部分则通过非均相成核过程凝结在已有颗粒物表面使颗粒物进一步生长, 由此生成大量

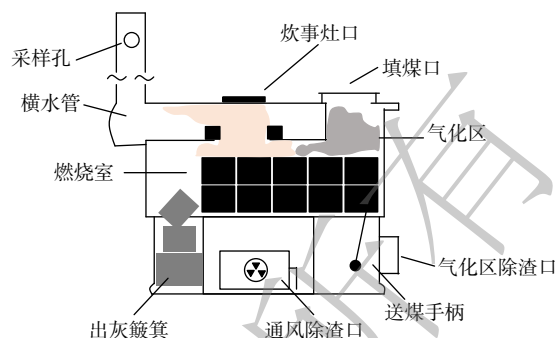


图 1 实验炉具示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental furnace

PM_{2.5}^[11-18]。而型煤的燃烧分为加热干燥析出挥发分、挥发分着火、炭燃烧、燃烬4个阶段。因此, PM_{2.5}受挥发分含量的影响较大的原因可能是由于在点火后的挥发分析出阶段, 大部分有机组分以气态从燃料中挥发出来, 发生了上述反应, 故生成了大量的PM_{2.5}。

2.1.2 氮元素含量和挥发分对NO_x排放的影响

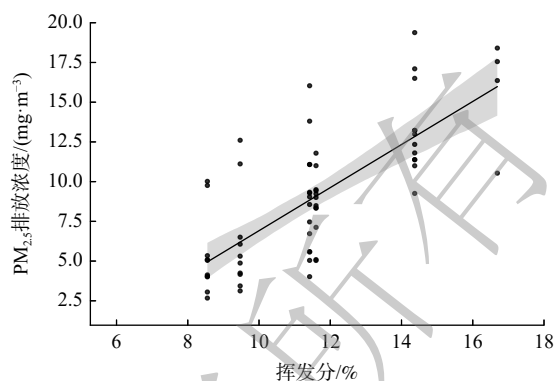
分析了氮元素含量(N_d)与NO_x排放浓度的相关性, Pearson相关系数 $r=-0.334$, 相伴概率 $P=0.052$, 无显著相关性, 说明型煤燃烧后NO_x排放不直接取决于煤质中氮元素的含量。

吴碧君^[19]发现, 型煤燃烧过程中NO_x的生成量与燃烧方式, 特别是燃烧温度和过剩空气系数密切相关。燃料型NO_x的生成机理非常复杂, 其生成和破坏过程与燃料中的氮分受热分解后在挥发分和焦炭中的比例有关, 随温度和氧分等燃烧条件而变。因此, 本研究中将挥发分含量(V_d)与NO_x的排放浓度进行了相关性分析(见图3) Pearson相关系数 $r=0.967$, 相伴概率 $P=0.002$, 结果显著相关。

由图3可知, 随着挥发分含量的增大, NO_x的排放因子逐渐升高。由于制作6组型煤的原煤材料为同一批次, 故挥发分中各组分的占比也基本相同。钟北京等^[20]将影响煤燃烧后NO_x生成的系数定义为 K_{NO} , 即燃料燃烧所需O₂的物质的量(mol)与燃料中碳氢化合物质量(kg)之比($K_{NO} = n_{O_2}/m_{C,H}$), 并且证实了 K_{NO} 的增大会导致NO_x的生成量单调减少。由此可判断, 型煤燃烧过程中NO_x的生成与挥发分中的N元素含量呈线性相关关系, 燃料型NO_x的排放量主要取决于挥发分中N元素的含量。即挥发分中N元素含量越高, 型煤燃烧后NO_x的排放量就越大。这也印证了NO_x的排放因子随挥发分含量增大而升高的现象。

2.1.3 挥发分和固定碳对VOCs排放的影响

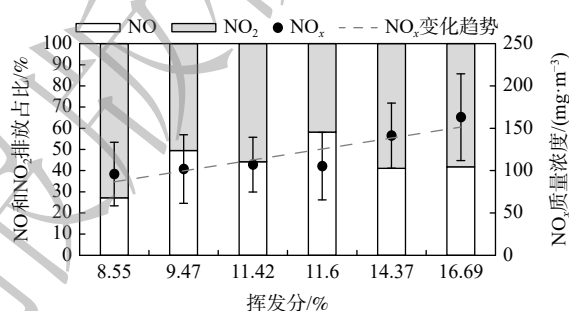
将6种型煤的挥发分含量(V_d)与VOCs的排放因子进行相关性分析, 发现其相关性并不显著, Pearson相关系数 $r=0.64$, 且相伴概率 $P=0.245$, 即VOCs的排放量不只取决于挥发分含量这一因素。然而, 将固定碳(FC_{ad})与挥发分(V_d)进行加和后发现, VOCs的排放与二者加和呈线性相关(见图4), Pearson相关系数 r 为0.94, 相伴概率 $P=0.018$, 在0.05水平上显著相关。分析其原因, 可能是由于固体燃料的炭质燃烧过程中会产生气态有机分子^[21], 故VOCs的排放同时取决于挥发分与固定碳的含量。



注: 污染物数据为标准状况下的测定结果。

图2 煤中挥发分质量分数与PM_{2.5}排放浓度的相关性分析

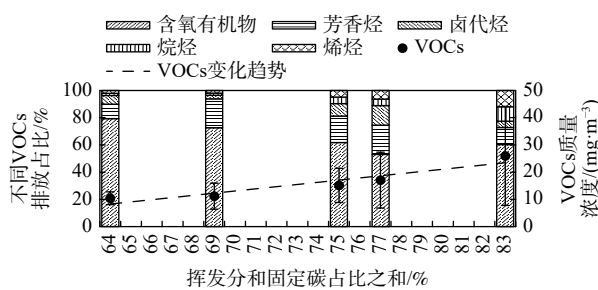
Fig. 2 Relationship between V_d and concentration of PM_{2.5}



注: 污染物数据为标准状况下的测定结果。

图3 挥发分对NO_x质量浓度的影响

Fig. 3 Effect of volatiles on NO_x emission factor



注: 污染物数据为标准状况下的测定结果。

图4 挥发分与固定碳质量分数之和与VOCs质量浓度相关性

Fig. 4 Correlation between the sum of volatile matter and fixed carbon mass fraction and VOCs mass concentration

2.2 燃烧状态对污染物排放的影响

民用炉具的使用，以人工操作为节点，可划分为点火、稳定燃烧、加煤、去灰和封火 5 个阶段。不同阶段对应煤的不同燃烧状态。通过分析不同燃烧状态对污染物排放的影响，得到人工操作对污染物排放的影响。

2.2.1 颗粒物的排放

对于处于不同燃烧状态时烟气中的 TSP 与 $PM_{2.5}$ 的排放浓度进行统计分析，结果见图 5。由图 5 可知，在点火状态下 TSP 的排放浓度最高。这是由于点火过程中炉膛内温度变化较大，加之人为扰动剧烈，使得炉壁等处附着的灰随气流排出。加煤状态次之，但这 2 个状态过程时间较短，对整体燃烧过程排放的影响较小。而 $PM_{2.5}$ 的排放情况与 TSP 有较大差异，这是由于点火前炉膛中是干净空气，并且点火燃烧的温度较低， $PM_{2.5}$ 的成核过程不完善，导致点火状态 $PM_{2.5}$ 生成量较小。加煤过程中，烟气中已有大量 $PM_{2.5}$ ，未完全燃烧的挥发分会携带大量细颗粒物被烟气挟带排出；又由于人为扰动会增大烟气的流速，进而导致加煤过程 $PM_{2.5}$ 排放浓度增高。

2.2.2 气态污染物的排放

将 6 种型煤燃烧产生常规气态污染物 (CO 、 SO_2 、 NO_x) 的排放数据在时间尺度上进行拟合，得出常规气态污染物在型煤燃烧不同阶段 (稳定、加煤、去灰和封火) 的排放浓度分布 (见图 6)。每组实验进行至第 60 min 时，对实验系统进行加煤操作，在第 150 min 时进行加煤及去灰操作。由图中数据可知，排放的 CO 质量浓度在第 150 min 时出现剧烈波动。这是由于去灰的过程在燃烧床侧向引入了二次风，导致右侧新加入的煤块发生部分引燃，短时燃烧不充分，瞬时产生了高浓度 CO 。

排放的 NO_x 质量浓度受添煤等人工干预的影响波动较小；而且在稳定燃烧阶段，随着时间推移，排放的 NO_x 质量浓度呈下降趋势。这是由于燃烧过程中，炉膛内可燃氮在逐渐减少，导致燃料型 NO_x 的生成量也逐渐减小。而在封火后，燃烧状态的改变同样也减少了 NO_x 的产生^[22]。

与 NO_x 情况不同， SO_2 的产生受人工干预的影响较大，而且稳定燃烧阶段排放出的 SO_2 质量浓度最高。这是由于稳定燃烧阶段燃料消耗量最大，再加上高温状态下燃料中的硫更易被氧化，因此导致了该现象的发生。

2.3 排放因子确定

根据现场实测结果和数据统计分析，得到 6 种型煤基于燃料质量的污染物排放因子 (见表 2)。

将 6 组型煤的数据取平均值，与文献中民用型煤的大气污染物排放因子^[5,8-9,23-26]进行对比后 (见

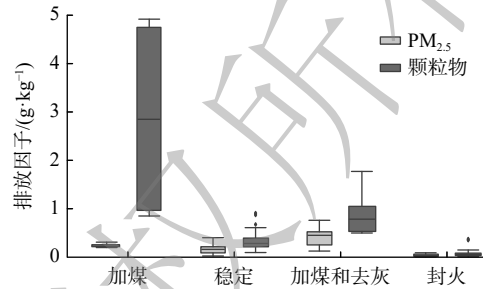
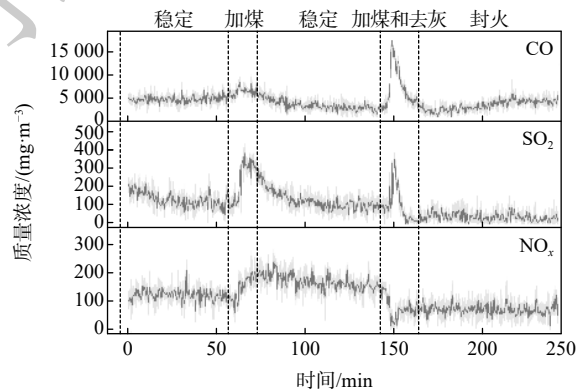


图 5 不同燃烧状态对颗粒物排放因子的影响

Fig. 5 Effects of different combustion states on particulate emission factors



注：污染物数据为标准状况下的测定结果。

图 6 常规气态污染物排放浓度随时间变化情况

Fig. 6 Variation of emission concentration of conventional gaseous pollutants

表 2 基于燃料质量的排放因子

Table 2 Emission factor based on fuel mass

 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

型煤编号	CO	SO ₂	NO _x	TSP	PM _{2.5}	VOCs
1#型煤	42.8±18.2	1.79±0.22	1.03±0.50	0.19±0.08	0.12±0.07	0.18±0.07
2#型煤	34.1±13.5	1.18±0.15	1.06±0.60	0.24±0.09	0.16±0.11	0.42±0.31
3#型煤	38.3±21.0	1.80±0.20	0.99±0.49	0.33±0.13	0.15±0.06	0.25±0.11
4#型煤	35.4±13.8	1.68±0.18	1.25±0.56	0.46±0.19	0.17±0.08	0.29±0.17
5#型煤	27.4±14.1	2.65±0.26	1.24±0.67	0.26±0.08	0.18±0.10	0.18±0.04
6#型煤	35.6±13.6	2.09±0.18	2.15±0.46	0.46±0.24	0.19±0.05	—

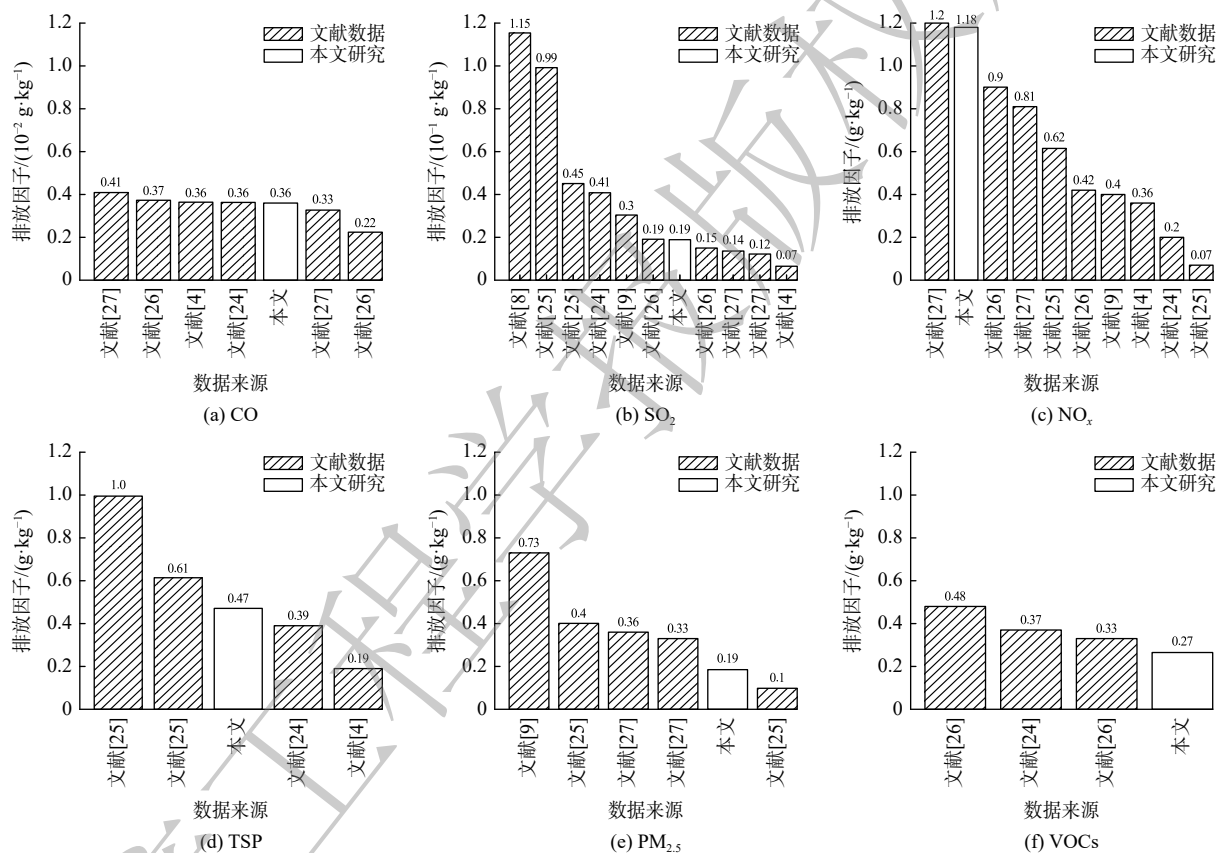


图 7 本研究得到的民用型煤排放因子与文献的对比

Fig. 7 Comparison of emission factors obtained in this study with those in literature

图 7) 发现, 不同研究的结果之间差异性较大。由图 7 可知, CO 排放因子的差异性最小。燃料是否充分燃烧是影响 CO 排放量的主要因素。已有文献在实测过程中使用的炉具均为成品炉具, 由生产厂家调试完善, 即使燃烧方式不同, 也可保证燃料在炉具内尽可能充分燃烧, 故 CO 的排放因子差距不大。在孙竹如等^[8]和 GE 等^[24]的研究中, 使用的燃煤含硫量 (S_{td} , 为质量分数) 分别为 1.31% 和 0.98%, 远高于本研究中使用的燃煤的含硫量。这也是导致其 SO₂ 排放因子较高的主要原因。张道明^[26]采用物料衡算法计算了型煤排放因子, 与本研究使用的方型型煤炉具相同, 同为反烧炉具, 燃烧过程中燃烧充分, 煤中氮元素的转化率高于其在别的炉具中的转化率, 故燃料型 NO_x 的释放量较大, 导致 NO_x 排放因子高于其他研究得出的结果。GE 等^[24]对蜂窝煤和其他型煤的 TSP 排放因子分别进行测算后发现, 由于燃烧过程的差异, 其他型煤的 TSP 排放水平远远高于蜂

窝煤的排放，分别为 0.99 和 0.61 g·kg⁻¹，其中蜂窝煤的排放因子与本研究用到的方型型煤排放因子相近。

2.4 环境效益分析

本研究中假设在推广这种方形型煤之前，呼和浩特市某城区乡村居民在冬季均使用无烟煤取暖。根据呼和浩特市 2018 年统计年鉴^[27]，2017 年实验用煤推广地共有农村户数 20 459 户。通过设置高排放情景 (该地区居民全部采用无烟煤取暖) 和低排放情景 (该地区居民全部采用型煤取暖)，计算了 2 种情景下的主要大气污染物排放量。无烟煤污染物排放因子采用《民用煤大气污染物排放清单编制技术指南》^[28] 中的推荐值，热值和含硫量采用文献 [4] 中基于河北、山西、陕西、辽宁 4 省原煤的数值，分别为 27.73 MJ·kg⁻¹ 和 0.36%。JETTER 等^[29] 研究了 22 种炉具的综合热效率为 53%，而本研究中使用的方形型煤专用炉具的热效率为 83.9%。通过对农户进行 KPT 调查^[27]，得到方形型煤的日消耗量。型煤使用量最大的为烤火炉，其型煤消耗量为每天 (23.4±2.7) kg。假设 2 种情景下采暖热量相同，基于情景分析法得到的采暖季大气污染物减排情况见表 3。由表 3 可知，各污染物均有不同程度的减排，TSP、PM_{2.5} 和 VOCs 的减排量约为 90%。

表 3 不同情景下采暖季大气污染物排放量及减排潜力

Table 3 Total air pollutant discharge in different situation and potential of emission reduction

情景模式	CO	SO ₂	NO _x	TSP	PM _{2.5}	VOCs
散煤排放	5 422 t	140 t	85 t	171 t	109 t	140 t
型煤排放	(2 068±993) t	(108±27) t	(67±35) t	(18±9) t	(9±4) t	(15±10) t
减排率	61.9%	22.2%	20.6%	89.3%	91.6%	89.1%

根据以上分析，型煤的推广可实现以燃煤为取暖燃料地区的各类主要污染物的减排。其中，燃烧产生的 PM_{2.5}、TSP 和 VOCs 较散煤燃烧时的排放量降低较明显，分别为 91.6%、89.3% 和 89.1%，而污染物的排放受煤质成分和操作过程的影响也较大。在煤仍然是该区域主要能源的背景下，还应加强型煤推广过程中煤质的管理，并在保证煤质发热量的前提下尽可能增加固硫剂的添加比例，以减少 SO₂ 的排放。同时，推广与型煤配套、操作简便的炉具，以减少人工加煤和倒灰产生的扰动，从而降低颗粒物等污染物的排放。

3 结论与建议

1) 挥发分含量与排放的 PM_{2.5} 质量浓度的 Pearson 相关性分析表明，挥发分是影响 PM_{2.5} 排放的主要因素；VOCs 的排放总量受挥发分和固定碳含量的共同作用；燃料燃烧越充分，CO 和 VOCs 的排放就越少，但同时排放的 SO₂ 和 NO_x 质量浓度在一定范围内会增大，可通过调节不同比例的固硫剂减少 SO₂ 的排放。

2) 型煤在不同燃烧阶段主要污染物的排放情况为，点火状态时排放的 TSP 和 CO 质量浓度较高，排放的 TSP 浓度达到稳定状态的 20 倍；而排放的 PM_{2.5}、SO₂ 和 NO_x 质量浓度在添煤过程时最高，是稳定过程的 1.5~2 倍；封火阶段，炉膛温度、烟气流速均降低，燃烧状态也较稳定，除 CO 外，其他污染物的排放量均呈下降趋势。

3) 呼和浩特市某城区在推广型煤之后，主要污染物 (CO、SO₂、NO_x、TSP、PM_{2.5}、VOCs) 的减排率分别为 61.9%、22.2%、20.6%、89.3%、91.6% 和 89.1%，减排效果显著。

4) 型煤是减少散煤污染的重要途径。在推广过程中，应加强对煤质的管理，同时推广配套型煤炉具，减少人为操作对污染物排放的影响。

参考文献

- [1] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [2] BP Statistical Review of World Energy. BP statistical review of world energy[R/OL]. [2020-08-01]. 2020: 47. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>.
- [3] 王东升, 白向飞, 刘明锐, 等. 京津冀地区民用洁净煤燃烧及排放特性[J]. 洁净煤技术, 2018, 24(3): 81-84.
- [4] LI C, YE K, MAWUSI S, et al. A 24-h real-time emissions assessment of 41 uncontrolled household raw coal combustion stoves in four provinces of Northern China[J]. *Atmospheric Environment*, 2020, 235: 117588.
- [5] 张熠晨, 薛陈利, 刘杰, 等. 不同居民燃煤炉具大气污染物排放差异性及其减排分析[J]. 环境科学, 2020, 41(10): 4462-4469.
- [6] 刘亚男, 钟连红, 闫静, 等. 民用燃料燃烧碳质组分及VOCs排放特征[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(4): 1412-1418.
- [7] 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.
- [8] 孙竹如, 吴依平. 上海市燃煤二氧化硫排放因子的研究[J]. *上海环境科学*, 1988(12): 15-18.
- [9] 张琦, 李庆, 蒋靖坤, 等. 一套民用固体燃料燃烧大气污染物排放测试系统的搭建和评测[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(9): 3393-3399.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 商品煤质量民用型煤: GB 34170-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [11] 陈振辉, 杨海平, 杨伟, 等. 生物质燃烧过程中颗粒物的形成机理及排放特性综述[J]. *生物质化学工程*, 2014, 48(5): 33-38.
- [12] LIGHTY J A S, VERANTH J M, SAROFIM A F. Combustion aerosols: Factors governing their size and composition and implications to human health[J]. *Journal of the Air & Waste Manage Association*, 2000, 50(9): 1565-1618.
- [13] TORVELA T, TISSARI J, SIPPULA O, et al. Effect of wood combustion conditions on the morphology of freshly emitted fine particles[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 87: 65-76.
- [14] LI Q, JIANG J, WANG S, et al. Impacts of household coal and biomass combustion on indoor and ambient air quality in China: Current status and implication[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 576: 347-361.
- [15] OBAIDULLAH M, BRAM S, VERMA V K, et al. A review on particle emissions from small scale biomass combustion[J]. *International Journal of Renewable Energy Research*, 2012, 2(1): 147-159.
- [16] SIMONEIT B R T, SCHAUER J J, NOLTE C G, et al. Levoglucosan, a tracer for cellulose in biomass burning and atmospheric particles[J]. *Atmospheric Environment*, 1999, 33: 173-182.
- [17] PYYKÖNEN J, MIETTINEN M, SIPPULA O, et al. Nucleation in a perforated tube diluter[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2007, 38: 172-191.
- [18] ZHOU W, JIANG J, DUAN L, et al. Evolution of submicrometer organic aerosols during a complete residential coal combustion process[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50: 7861-7869.
- [19] 吴碧君. 燃烧过程中氮氧化物的生成机理[J]. *电力环境保护*, 2003(4): 9-12.
- [20] 钟北京, 杨静, 傅维标. 煤的挥发分组分对氮氧化物和硫化物排放的影响[J]. *燃烧科学与技术*, 1998(4): 3-5.
- [21] 王东滨, 郝吉明, 蒋靖坤. 民用固体燃料燃烧超细颗粒物排放及其潜在健康影响[J]. *科学通报*, 2019, 64(33): 3429-3440.
- [22] 刘忠攀, 杨晓辉, 王海苗, 等. 新型燃煤炉具燃烧原煤和洁净型煤时NO_x排放量对比研究[J]. *煤炭加工与综合利用*, 2019(6): 99-102.
- [23] 姚渭溪, 沈迪新, 李玉琴, 等. 烟煤作民用燃料可行性的探讨[J]. *环境科学*, 1984, 5(4): 83-87.
- [24] GE S, XU X, CHOW J C, et al. Emissions of air pollutants from household stoves: honeycomb coal versus coal cake[J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(17): 4612-4618.
- [25] 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.
- [26] 张道明. 民用采暖炉具的污染排放测试及减排效果评估[D]. 北京: 北京化工大学, 2019.
- [27] 呼和浩特市统计局. 呼和浩特市经济统计年鉴-2018[EB/OL]. [2020-08-01]. <http://tjj.huhhot.gov.cn/nj/2019nj/gb2.html>.
- [28] 中华人民共和国环境保护部. 民用煤大气污染物排放清单编制技术指南[S/OL]. [2020-08-01]. <http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201610/W020161031388726962758.pdf>.
- [29] JETTER J, ZHAO Y X, SMITH K R, et al. Pollutant emissions and energy efficiency under controlled conditions for household biomass cookstoves and implications for metrics useful in setting international test standards[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(19): 10827-10834.

(责任编辑: 靳炜)

Study on air pollutant emission characteristics and emission reduction potential of civil square briquette

WANG Chenlong¹, ZUO Penglai¹, ZHANG Xiaoxi¹, WEI Zhiyong¹, LIU Jieyu¹, YUE Tao¹, GAO Jiajia¹, WANG Kun¹, JING Peng^{2,*}

1. Beijing Municipal Institute of Labor Protection, Beijing 100054, China

2. China Association of Environmental Protection Industry, Beijing 100037, China

*Corresponding author, E-mail: caepijp@163.com

Abstract To explore the influence of coal quality characteristics on air pollutant discharge of civil square briquette, 6 groups of briquettes were selected, which was widely used in an urban area of Hohhot, Inner Mongolia, to test their air pollutant discharges. The main factors affecting air pollutant discharge is discussed according to coal quality analysis data. Results show that volatile content is the main factor affecting PM_{2.5} and NO_x emission concentration. The total content of volatile matter and fixed carbon is significantly related to the emission concentration of VOCs. The emission factors of major air pollutants (CO, SO₂, NO_x, TSP, PM_{2.5} and VOCs) are (36.0±17.3), (1.89±0.47), (1.18±0.62), (0.47±0.69), (0.19±0.15) and (0.27±0.18) g·kg⁻¹, respectively. Based on an emission scenario, the emission reduction rates of major air pollutants after the promotion of square coal in an urban area of Hohhot are 61.9%, 22.2%, 20.6%, 89.3%, 91.6% and 89.1%, respectively. In the process of promoting briquette, it is necessary to strengthen the management of briquette coal quality and promote supporting briquette stoves to reduce the contribution of human operations to pollutant emissions.

Keywords civil square briquette; air pollutant; emission characteristics; environmental benefits