

生物质混燃在农村能源供应中应用分析

周宇光^{1,2} 赵楠^{1,2} 李博文^{1,2} 巴哈尔古力·托哈尼亚孜^{1,2} 陈德颖^{1,2} 董仁杰^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学农业部可再生能源清洁化利用技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 通过对比生物质、燃煤及两者 1:1 的混合燃料在燃煤炉具中采暖及炊事两种工况下的能量效率、排放特征及经济性能,具体量化生物质混燃的技术优势,为清洁低廉的生物质能在农村地区的推广提供理论依据。结果显示,在燃煤炉具中混合燃料燃烧时的能源效率明显高于生物质燃料,且其采暖工况效率高于炊事工况效率近 20%。相比于燃煤,混燃时主要气态污染物 SO₂、NO、NO₂ 综合减排效果良好,PM_{2.5} 排放量远低于国标限值(100 mg/MJ)。其主要有机污染排放 PAHs 也能得到有效控制,尤其是高环 PAHs 在采暖和炊事工况下的减排率可分别达到 34% 和 87%。而相比于生物质,混燃时 CO 排放较少,在采暖工况下减排率为 46%,炊事工况则为 61%。此外由于人为操作较少,采暖工况下的污染排放量较为稳定。混合燃料价格较低,单位能量价格为 0.039 元/MJ,而单位质量价格仅为燃煤的 1/2,燃烧器可使用低成本燃煤炉具,避免使用价格昂贵的生物质专用炉具,可确保低收入家庭居民日常用能支出维持在经济承受能力范围之内。

关键词: 生物质混燃; 农业废弃物; 农村能源; 细颗粒物; 多环芳烃; 经济性

中图分类号: S216.2; X712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)S0-0407-06

Application of Biomass Co-combustion in Rural Daily Energy Supply

ZHOU Yuguang^{1,2} ZHAO Nan^{1,2} LI Bowen^{1,2} BAHARGUL Tohniyaz^{1,2} CHEN Deying^{1,2} DONG Renjie^{1,2}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Clean Production and Utilization of Renewable Energy, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: China has abundant biomass equal to over four million tons of standard coal, which can directly substitute coal in residential energy system. The focus was to quantify performances of household biomass co-combustion by comparing energy efficiency, emission characteristics and economic value of biomass, coal and co-fuel in a typical coal-burning stove under space-heating and cooking phase to promote clean and cheap biomass energy in rural areas. The results indicated that energy efficiency of co-fuel was much higher than that of biomass in coal-fire stove with a value of 68.10% in heating phase and 54.50% in cooking phase. The gaseous pollutant of SO₂, NO and NO₂ emitted from co-combustion were reduced significantly compared with coal burning, and PM_{2.5} was decreased to a low concentration which was much lower than the limiting value (100 mg/MJ) of Chinese standard. The emission reduction of SO₂, NO, NO₂ and PM_{2.5} was 22%, 67%, 88% and 18%, respectively, in heating phase, while the reduction emission was 11%, 64%, 63% and 33%, respectively, in cooking phase. The organic emissions of US-EPA priority PAHs with high carcinogenicity were also controlled well and the emission reduction of high-ring PAHs could reach 34% and 87% in heating and cooking phases. Compared with biomass in coal-fire stove, the emission of CO from co-fuel combustion was low with the reduction of 46% in heating phase and 61% in cooking phase. Moreover, the emission levels under heating phase were more stable than cooking phase due to relatively less artificial operations. The co-fuel was cheap, whose price on a unit energy basis was 0.039 yuan/MJ and the price on a unit mass basis was only half of coal. The burner of co-fuel was popular coal-burning stove, avoiding purchasing expensive biomass stove and ensuring the expenditure for daily energy uses within the economic bearing capacity of low-income families.

Key words: biomass co-combustion; agricultural waste; rural energy; great particulate matter; polycyclic aromatic hydrocarbons; economic performance

收稿日期: 2018-07-10 修回日期: 2018-08-20

基金项目: 农业行业标准项目(181721301092371112)

作者简介: 周宇光(1983—),男,副教授,博士生导师,主要从事生物质燃烧及减排、生物质工程装备研究,E-mail: zhouyg@cau.edu.cn

通信作者: 董仁杰(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事农业废弃物资源化利用、生物质工程技术研究,E-mail: rjdong@cau.edu.cn

0 引言

我国煤炭年均消费量约 30 亿 t,其中有超过 2 亿 t 用于满足农村用能需求^[1-3]。散煤在农村能源结构中居主导地位,是日常炊事及冬季采暖的主要能源来源^[4]。燃煤主要在户用炉具中进行燃烧释能,而在我国近 6 000 万的户用炉具中仅有 23% 是清洁炉具,传统炉具效率低、排放高、燃料燃烧不充分,极易造成煤炭资源的浪费^[5]。此外,农村地区民用燃煤多为低品质散煤,其低效高排的燃烧造成每年近 350 万人死于室内空气污染,严重威胁居民健康^[6-8]。研究表明,每年有 21.4% 的 PM_{2.5} 排放和 63% 的多环芳烃(PAHs)排放来自于户用燃烧源^[9]。因此有必要寻找廉价、清洁的可再生能源,逐步替代散煤。

生物质能以其户用供能布局灵活、适应性强等特点,成为一种合适的替代能源。由国家发展和改革委员会等单位联合发布的《北方地区冬季清洁取暖规划(2017—2021 年)》明确提出,在农村地区大力推进生物质成型燃料替代散烧煤。我国农作物秸秆年产量约 9 亿 t,薪柴年产量约为 2 亿 t,折合成标准煤为 2~4 亿 t^[10]。生物质经加工后可得到致密的成型燃料,易于点火,NO_x 及 SO₂ 排放量仅为燃煤的 1/5 和 1/10^[11-14]。但同时存在热值较低、燃烧过快、需频繁加料、专用炉具价格昂贵等问题。生物质与

煤在燃煤炉具中混合燃烧,不仅能延长燃烧时间、提高能源效率,更能降低经济成本、减少硫排放,可作为居民用能选择的新思路^[15]。

本文采用炉具燃烧-排放采样-污染测定的实验方法,对生物质、燃煤及其两者的混合燃料进行燃烧-排放测试,对 3 类燃料的能源效率、主要污染物排放特征进行对比,此外考虑燃料、炉具成本及政策补贴等经济因素,对生物质、燃煤及混合燃料的经济性进行比较,充分分析生物质混燃在农村能源供应中推广的可行性。

1 材料与方法

1.1 燃料与炉具

选取神木散煤(陕西神木能源发展有限公司)与秸秆-花生壳成型燃料(胜庄生物质颗粒有限公司)作为本次研究所用燃料,混燃所需燃料为两者的 1:1(质量比)混合燃料。燃料的热值(GB/T 21923—2008)、工业(GB/T 28731—2012)与元素分析(GB/T 28734—2012)在华北电力大学测定^[16-18],结果如表 1 所示。研究所使用的炉具为炊事采暖型燃煤炉具(鸿庆能源设备有限公司),该炉具燃烧方式为直燃式,额定供热量为 12.3 kW,主体由燃烧室、料斗、进料口、风门、烟囱、水箱等构成,如图 1 所示。

表 1 固体燃料工业及元素分析

Tab.1 Proximate and ultimate analyses of solid fuels

燃料	热值/(MJ·kg ⁻¹)		工业分析(质量分数,湿基)/%				元素分析(质量分数,干基)/%				
	高位热值	低位热值	灰分	挥发分	固定碳	水分	C	H	O	N	S
煤	28.20	26.95	5.67	30.20	59.19	4.94	67.96	4.57	20.49	0.94	0.37
生物质	17.65	16.29	3.02	72.86	19.35	4.77	46.35	5.84	44.25	0.45	0.09
混合燃料	22.93	21.62	4.35	51.53	39.25	4.85	57.16	5.21	32.37	0.70	0.23



图 1 炊事-采暖型燃煤炉具

Fig.1 Coal-burning commercial stove for cooking and heating

1.2 燃烧-排放实验

本研究所涉及的燃料能量效率、燃烧排放等参数量化实验在中国农业大学农业部可再生能源清洁化利用技术重点实验室内测定,测试系统如图 2 所示。燃烧过程中的燃料消耗量由电子台秤实时测量并记录。热交换器由锅及水循环系统组成,确保锅内水温低于水蒸发温度,以避免随水蒸气散失而造成的能量损失。测试序列参考现有炉具测试方法^[19-20],并作部分优化,如:冷启动(点火)—45 min 高功率采暖—45 min 高功率炊事。燃烧过程中,燃料通过进料口批次添加,保证燃烧正常进行。在炊事阶段相应增加人为操作频率(加料、清灰、移动锅具等)以模拟实际炊事过程。

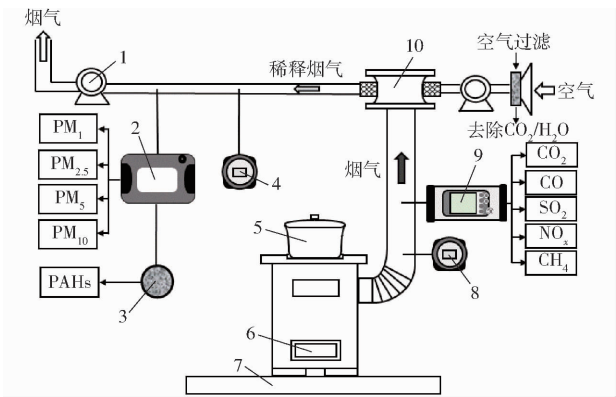


图2 炉具性能在线监测系统

Fig.2 Stove performance testing system

1. 风机 2. 颗粒物检测仪 3. 石英纤维采样膜 4. CO₂ 传感器
5. 热交换器 6. 风门 7. 电子台秤 8. 气体流量计 9. 多气体
分析仪 10. 稀释器

稀释系统由转速恒定的风机鼓入环境空气，经两级过滤器去除 CO₂ 和 H₂O 后作为稀释气体用以冷却稀释烟气。烟气中主要气体污染物，包括一氧化碳（CO）、二氧化硫（SO₂）、一氧化氮（NO）、二氧化氮（NO₂），由 MGA5/Vario Plus 型多气体分析仪（德国 MRU 公司）测定。细颗粒物（PM_{2.5}）由 DRX8533 型颗粒物监测仪（美国 TSI 公司）测定，有机污染物多环芳烃（PAHs）经石英纤维采样膜采集后，采用 GC-MS-7890A/5975C 型气相色谱-质谱仪定性及定量分析（美国 Agilent Technologies 公司）^[21]。稀释前后 CO₂ 浓度比值作为稀释比代入排放计算。气体及水流速度由流量计监测记录，室内、水及烟气温度由温度传感器实时测定。

1.3 计算

本次研究中，能量效率与排放参数的测定主要分为采暖和炊事两个工况，每组实验重复至少 3 次，以生物质燃料在专用炉具的燃烧效率与排放数据作为对照，计算公式为^[22]

表2 采暖、炊事两种工况下 3 种燃料的能量效率及气态污染物排放水平

Tab.2 Energy efficiency and gaseous pollutants emission level of coal, biomass and co-fuel under heating and cooking phases

燃料	工况	能量效率/%	CO 排放量/ (g·MJ ⁻¹)	SO ₂ 排放量/ (mg·MJ ⁻¹)	NO 排放量/ (g·MJ ⁻¹)	NO ₂ 排放量/ (g·MJ ⁻¹)
煤	采暖	89.75 ± 3.18	3.35 ± 0.35	1.10 ± 0.20	0.52 ± 0.04	0.82 ± 0.03
	炊事	83.95 ± 1.06	5.08 ± 0.17	1.77 ± 0.09	0.69 ± 0.12	0.97 ± 0.06
生物质(燃煤炉具)	采暖	59.65 ± 4.45	12.62 ± 1.24	0.22 ± 0.03	0.06 ± 0.01	0.03 ± 0.01
	炊事	38.00 ± 6.65	18.99 ± 6.51	0.30 ± 0.06	0.13 ± 0.02	0.15 ± 0.07
混后燃料	采暖	68.10 ± 7.78	6.76 ± 0.22	0.86 ± 0.02	0.17 ± 0.06	0.10 ± 0.03
	炊事	54.50 ± 3.11	7.39 ± 0.19	1.58 ± 0.39	0.25 ± 0.03	0.36 ± 0.03
生物质(专用炉具)	采暖	92.11 ± 1.34	3.04 ± 0.30	0.06 ± 0.01	0.04 ± 0.01	0.01 ± 0.01
	炊事	87.50 ± 3.12	4.11 ± 0.40	0.10 ± 0.01	0.07 ± 0.01	0.01 ± 0.01

$$P_1 = \frac{V_r \rho_a C_a (T_2 - T_1)}{M_f H_f - M_c H_c - M_a H_a} \times 100\%$$
 (1)

$$P_2 = \frac{C_w (M_w + t Q_w \rho_w) (T_4 - T_3)}{M_f H_f - M_c H_c - M_a H_a} \times 100\%$$
 (2)

$$E_1 = \frac{D Q_g t (E - E_0)}{V_r \rho_a C_a (T_2 - T_1)} \times 10^6$$
 (3)

$$E_2 = \frac{D Q_g t (E - E_0)}{C_w (M_w + t Q_w \rho_w) (T_4 - T_3)} \times 10^6$$
 (4)

式中 P₁、P₂——采暖、炊事工况下燃料燃烧的能量效率，%

E₁、E₂——采暖、炊事工况下的排放浓度，mg/MJ

E——仪器测的污染物排放质量浓度，mg/m³

E₀——污染物背景质量浓度，mg/m³

V_r——室内采暖体积，m³

ρ_a、ρ_w——空气、水密度，kg/m³

C_a、C_w——空气、水比热容，J/(kg·K)

T₁、T₂、T₃、T₄——室内初始、室内最终、水初始、水最终温度，℃

M_f、M_c、M_a、M_w——燃料、焦炭、灰、锅中水的质量，kg

H_f、H_c、H_a——燃料、焦炭、灰的热值，MJ/kg

D——稀释比

Q_w、Q_g——水、烟气流速，m³/min

t——燃烧时间，min

2 结果与分析

2.1 能量效率

分别采用空气加热及烧水实验模拟日常采暖及炊事过程，获取两种主要农村用能工况下的固体燃料能量效率，结果如表 2 所示。受燃料与炉具的匹配性限制，生物质燃料在燃煤炉具中燃烧时能量效率较低，仅有 30% ~ 60%（而在专用炉具中可达近

90%) ,远低于燃煤。而当生物质与煤在燃煤炉具中混合燃烧时,其能源效率有显著提高,在采暖工况可达到 68. 10% ,在炊事工况可达到 54. 50% ,相比生物质燃料可提高 50% ~ 70% ,高于 GB/T 35564—2017 中所规定的 40% 的优秀炉具热效率^[23]。由于在炊事过程中有着相对频繁的人为操作,会直接扰乱燃烧室中气流场,改变燃烧过程中空燃比,造成燃烧不稳定、效率低等现象^[24]。因此 3 种固体燃料在采暖工况下的能量效率都明显优于炊事工况,其中混燃时采暖效率比炊事效率高近 20% 。

2.2 气态污染

对本文所涉及的 3 种固体燃料燃烧排放的主要气态污染物进行测定,结果如表 2 所示。在采暖及炊事两种工况下,生物质燃料相对于燃煤具有良好的硫化物及氮氧化物减排性能,其单位有效能量下的 SO₂、NO 及 NO₂排放量远低于燃煤。这是由于生物质燃料中 S 和 N 元素较少,分别为 0. 09% 和 0. 45% (表 1),仅为煤的 24% 和 48%^[25]。然而由于生物质燃料在燃煤炉具中燃烧效率较低,燃料中 C 元素无法得到充分燃烧,导致其 CO 排放较高,约为燃煤的 3. 7 倍。而考虑到生物质专用炉具普及程度较低,单纯生物质燃料在燃煤炉具中的燃烧并不利于大气污染物的全方位控制。生物质与煤的混合燃烧,可在降低 SO₂、NO 及 NO₂排放的同时,控制 CO 排放,使其低于国标所规定的 CO 排放量限值 (8 g/MJ),是一种合适的清洁用能方式^[23]。相较于煤,混燃时 SO₂、NO、NO₂在采暖阶段的减排率分别为 22%、67%、88%,而在炊事阶段分别为 11%、64%、63%。相较于生物质,混燃时 CO 在采暖阶段的减排率为 46%,而在炊事阶段则为 61%。此外,人为操作频繁是造成炊事工况下气态污染物排放量较高的主要原因。

2.3 PM_{2.5}排放

对生物质、煤及混合燃料在点火、采暖、炊事燃烧全过程的 PM_{2.5}排放特征进行实时测定,结果如图 3 所示。点火及炊事工况 PM_{2.5}排放波动较大、排放量较高,而采暖工况排放相对稳定且排放量显著降低。SO₂与 NO_x是 PM_{2.5}的主要组成成分,相较于燃煤,生物质燃料 S、N 元素含量低,SO₂、NO 及 NO₂排放低,尽管对 PM_{2.5}仍有贡献,但远低于煤(生物质专用炉具在采暖和炊事工况下的 PM_{2.5}平均排放量仅为 2. 86 mg/MJ 和 3. 15 mg/MJ)。而生物质及煤混合燃料的 PM 排放量在采暖及炊事都明显低于燃煤,减排率分别达 18% 和 33% ,是一种控制 PM_{2.5}排放的有效方法。工况下混燃时 PM_{2.5}在某些时间段的排放并不稳定,排放量有较高的峰值,这可能是由

混合时生物质燃料与煤粒径有所不同引起的燃料燃烧局部供氧不均匀所造成的,可以通过粒径控制、均匀混合来避免。

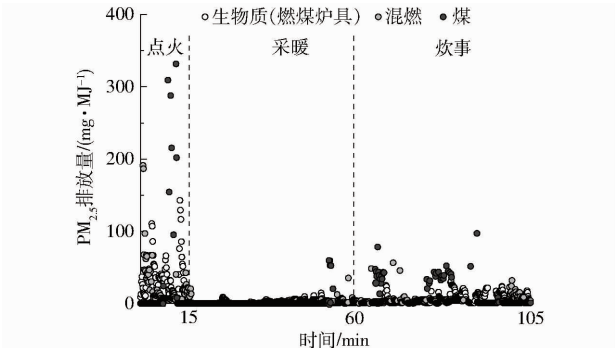


图 3 生物质、煤及混合燃料 PM_{2.5}实时排放特征

Fig. 3 Real-time PM_{2.5} emissions of biomass, coal and co-fuel

2.4 PAHs 排放

美国环保署(EPA)报告优先控制的 16 种多环芳烃(PAHs)在采暖及炊事工况下的排放特征如图 4、5 所示。生物质燃料挥发分较高,主要排放为低环 PAHs (2、3 环),相对分子质量小,多以气态存在,危害较小,其在燃煤及专用炉具下燃烧的 PAHs 排放量均明显小于燃煤^[9]。而高环 PAHs (3 环以上)受重力作用沉降于颗粒物中,易通过呼吸道进入人体,危害更大,多存于燃煤烟气中^[26]。如图 4、5 所示,生物质混燃可降低 PAHs 排放浓度,相比燃煤,其采暖和炊事工况下的 PAHs 减排率分别达 52% 和 77% ,尤其是高环 PAHs 排放可以得到有效控制,减排率分别达 34% 和 87%。此外,采暖工况下燃料由于能量效率高、燃烧充分,PAHs 排放低,且多为低环 PAHs,而炊事工况燃烧效率较低、燃烧不稳定,导致 PAHs 排放量较高,主要以高环排放为主。

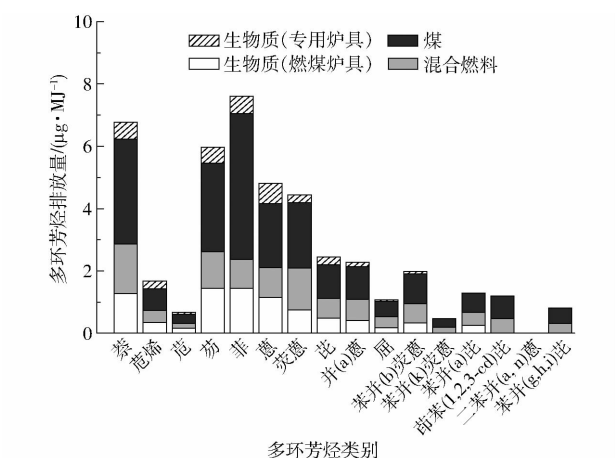


图 4 采暖工况下生物质、煤及混合燃料的 16 种典型多环芳烃排放特征

Fig. 4 Sixteen typical PAHs emissions of biomass, coal and co-fuel under heating phase

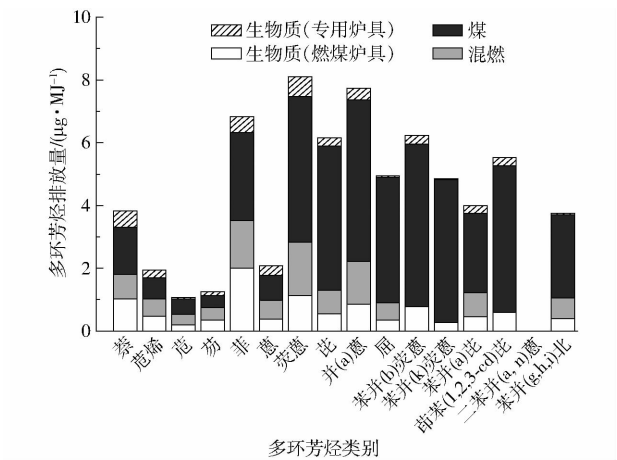


图5 炊事工况下生物质、煤及混合燃料的16种典型多环芳烃排放特征

Fig.5 Sixteen typical PAHs emissions of biomass, coal and co-fuel under cooking phase

2.5 经济性分析

以京津冀地区主要散煤、生物质燃料、炉具市场价格及相关能源补贴政策为研究对象,对3种燃料的经济适用性进行分析,结果如表3所示。生物质燃料由于氯和钾含量较高,燃烧时易结渣、结焦,在传统燃煤炉具中不仅无法实现自动燃烧,更无法实现高效低排的目的^[27]。而生物质专用炉具市场价格较高,尽管国家及地方政府对其购置有一定的财政补贴,但单台价格仍高于燃煤炉具。尽管生物质燃料本身价格低廉(单位质量价格仅为燃煤的1/2),由于设备初始投入等原因,却未能在农村等低收入地区大规模推广。因此,生物质混合燃烧使用燃煤炉具作为燃烧器,不仅能降低炉具购置费用,更能有效控制燃料成本(单位能量价格与生物质相近),符合大部分农村家庭的能源消费需求。

表3 生物质、煤及混合燃料主要经济性分析

Tab.3 Economic performance analysis of biomass, coal and co-fuel

种类	炉具成本/(元·台 ⁻¹)	燃料成本/(元·t ⁻¹)	燃料成本/(元·MJ ⁻¹)	政策补贴
煤	800(普通)/1 500(清洁)	1 100	0.040	无
生物质	2500	650	0.038	每台炉具补贴购置价格的30%,最高不超过400元
混合燃料	800(普通)/1 500(清洁)	875	0.039	无

3 结论

- (1) 混合燃料能源效率较生物质燃料可提高50%~70%,高于国标中所规定的优秀炉具热效率。
- (2) 采暖阶段,SO₂、NO、NO₂、PM_{2.5}、PAHs相比可燃煤的减排率达22%、67%、88%、18%、

- 52%;而在炊事阶段,减排率分别为11%、64%、63%、33%、77%;此外相较于生物质,混燃时CO在采暖阶段的减排率为46%,而在炊事阶段则为61%。
- (3) 混合燃料单位能量价格为0.039元/MJ,单位质量价格仅为燃煤的1/2,炉具使用成本较低。

参 考 文 献

1 ZHOU Y G, ZHANG Z X, ZHANG Y X, et al. A comprehensive review on densified solid biofuel industry in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 54:1412–1428.

2 ZHANG X, KROONENBERG S B, DE BOER C M. Dating of coal fires in Xinjiang, northwest China[J]. Terra Nova, 2004, 16: 68–74.

3 DUAN X L, JIANG Y, WANG B B, et al. Household fuel use for cooking and heating in China: results from the first Chinese Environmental Exposure-Related Human Activity Patterns Survey[J]. Applied Energy, 2014, 136: 692–703.

4 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 Science, 2015, 28(8): 1179–1185. (in Chinese)

5 中国农村能源行业协会节能炉具专业委员会. 中国采暖炉具行业发展报告 [M]. 北京: 中国农村能源行业协会, 2017.

6 ZHANG Z X, SUN Z F, ZHANG Y H, et al. Effects of biomass pellet composition on the thermal and emissions performances of a TLUD cooking stove[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2017, 10(4): 189–197.

7 ZHANG Z Z, WANG W X, CHENG M M, et al. The contribution of residential coal combustion to PM2.5 pollution over China's Beijing–Tianjin–Hebei region in winter[J]. Atmospheric Environment, 2017, 159: 147–161.

8 MESTI H E, AUNAN K, SEIP H M. Health benefits from reducing indoor air pollution from household solid fuel use in China—Three abatement scenarios[J]. Environment International, 2007, 33(6): 831–840.

9 SHEN G F, CHEN Y C, XUE C Y, et al. Pollutant emissions from improved coal- and wood-fuelled cookstoves in rural households [J]. Environmental Science Technology, 2015, 49(11): 6590–6598.

- 10 王金武,唐汉,王金峰. 东北地区作物秸秆资源综合利用现状与发展分析[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 1–21. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170501&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.001.
WANG Jinwu, TANG Han, WANG Jinfeng. Comprehensive utilization status and development analysis of crop straw resource in Northeast China[J/OL]. Transactions of The Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 1–21. (in Chinese)
- 11 HU J J, LEI T Z, WANG Z W, et al. Economic, environmental and social assessment of briquette fuel from agricultural residues in China—a study on flat die briquetting using corn stalk[J]. Energy, 2014, 64(1): 557–566.
- 12 ZHAO B T, SU Y X, LIU D Y, et al. SO_2/NO_x emissions and ash formation from algae biomass combustion: process characteristics and mechanisms[J]. Energy, 2016, 113: 821–830.
- 13 SANCHEZ A M, SALVADOR P, CAMACHO R F, et al. Characterization of biomass burning from olive grove areas: a major source of organic aerosol in PM_{10} of Southwest Europe[J]. Atmospheric Research, 2018, 199: 1–13.
- 14 姚宗路,吴同杰,赵立欣,等. 生物质成型燃料燃烧挥发性有机物排放特性试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 235–240. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151031&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.031.
YAO Zonglu, WU Tongjie, ZHAO Lixin, et al. Emission characteristic of VOCs from biomass molding fuel combustion[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 235–240. (in Chinese)
- 15 肖波. 生物质热化学转化技术[M]. 北京:冶金工业出版社, 2016: 1–298.
- 16 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 固体生物质燃料检验通则: GB/T 21923—2008[S]. 北京:中国标准出版社, 2008.
- 17 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 固体生物质燃料工业分析方法: GB/T 28731—2012 [S]. 北京:中国标准出版社, 2012.
- 18 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 固体生物质燃料中碳氢测定方: GB/T 29734—2012 [S]. 北京:中国标准出版社, 2012.
- 19 中华人民共和国农业部. 户用生物质炊事炉具性能试验方法: NY/T 2370—2013[S]. 北京:中国农业出版社, 2013.
- 20 姚宗路,吴同杰,赵立欣,等. 生物质固定燃烧源烟气稀释采样装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 174–178. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160325&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.025.
YAO Zonglu, WU Tongjie, ZHAO Lixin, et al. Design and experiment of flue gas dilution sampler for biomass fixed combustion source[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 174–178. (in Chinese)
- 21 中华人民共和国环境保护部. 环境空气和废气 气相和颗粒物中多环芳烃的测定 气相色谱-质谱法: HJ 646—2013[S]. 北京:中国环境出版社, 2013.
- 22 张翼翔. 民用炉具性能在线测试方法构建及应用研究[D]. 北京:中国农业大学, 2018.
ZHANG Yixiang. Study on real-time testing protocol for performance evaluation of solid fuel cooking/space-heating stoves and its application[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- 23 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 生物质清洁炊事炉具: GB/T 35564—2017[S]. 北京:中国标准出版社, 2017.
- 24 ZHANG Y X, ZHANG Z X, ZHOU Y G, et al. The influences of various testing conditions on the evaluation of household biomass pellet fuel combustion[J]. Energies, 2018, 11(5): 1131.
- 25 姚宗路,赵立欣,RONNBACK M,等. 生物质颗粒燃料特性及其对燃烧的影响分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 97–102.
YAO Zonglu, ZHAO Lixin, RONNBACK M, et al. Comparison on characterization effect of biomass pellet fuels on combustion behavior[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 97–102. (in Chinese)
- 26 LI C L, FU J M, SHEN G Y, et al. Vertical distribution of PAHs in the indoor and outdoor $\text{PM}_{2.5}$ in Guangzhou, China[J]. Building and Environment, 2005, 40(3): 329–341.
- 27 陈冠益,马文超,颜蓓蓓,等. 煤炭、生物质废物资源综合利用技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2015.