

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2021042202

韩新宇, 李帅, 史建武, 等. 民用固体燃料燃烧排放对家庭环境空气颗粒物影响及暴露风险[J]. 环境化学, 2022, 41(8): 2596-2605.

HAN Xinyu, LI Shuai, SHI Jianwu, et al. Impact of household environmental particulate matter and its exposure risks from the combustion of residential solid fuels[J]. Environmental Chemistry, 2022, 41 (8): 2596-2605.

## 民用固体燃料燃烧排放对家庭环境空气颗粒物 影响及暴露风险\*

韩新宇<sup>1</sup> 李帅<sup>1</sup> 史建武<sup>2\*\*</sup> 宁平<sup>2</sup> 郭晋源<sup>1</sup> 夏英杰<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学建筑工程学院, 昆明, 650500; 2. 昆明理工大学环境科学与工程学院, 昆明, 650500)

**摘要** 民用固体燃料燃烧时会排放大量的颗粒物 (particulate matter, PM), 不仅会导致严重的家庭环境空气颗粒物污染, 还会带来较大的人群健康风险, 因此受到了研究者的广泛关注. 然而, 民用固体燃料燃烧排放对家庭环境空气的影响研究还相对较少, 尤其是家庭环境空气中颗粒物来源及人体暴露风险研究方面. 本文综述了民用固体燃料燃烧中 PM 的形成机理, 分析了民用燃料和炉灶类型对家庭环境空气颗粒物的影响, 归纳了民用固体燃料燃烧排放的家庭环境空气颗粒物暴露风险研究, 最后探讨了民用固体燃料燃烧排放控制研究的不足之处.

**关键词** 民用固体燃料, 家庭环境空气, 颗粒物, 暴露风险, 排放控制.

## Impact of household environmental particulate matter and its exposure risks from the combustion of residential solid fuels

HAN Xinyu<sup>1</sup> LI Shuai<sup>1</sup> SHI Jianwu<sup>2\*\*</sup> NING Ping<sup>2</sup> GUO Jinyuan<sup>1</sup> XIA Yingjie<sup>1</sup>

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming, 650500, China;

2. Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, 650500, China)

**Abstract** Large amounts of particulate matter (PM) are emitted from the combustion of residential solid fuels. It will not only cause serious pollution of household environment particles, but also bring greater health risks to the population, which has attracted extensive attentions of researchers. However, there are few studies about the impact of the household environment emission from the combustion of residential solid fuels, especially the researches on sources of particulate matter and human exposure risks in household environment. This review summarized the formation mechanism of particulate matter from the combustion of residential solid fuels, analyzed the impact of residential fuels and stove type on household environmental particulate matter, and generalized the exposure risks of household environmental particulate matter emitted from the combustion of residential solid fuels. Finally, the deficiencies of the researches on emission control of residential solid fuels combustion are discussed.

**Keywords** residential solid fuel, household environment, particulate matter, exposure risks, emissions control.

2021年4月22日收稿(Received: April 22, 2021).

\* 国家自然科学基金(21966016)和国家重点研发计划(2019YFC0214405)资助.

**Supported by** the National Natural Science Foundation of China (21966016) and the National Key Research and Development Plan (2019YFC0214405).

\*\* 通信联系人 **Corresponding author**, Tel: 15912128009, E-mail: shijianwu2000@sina.com

全球有近 30 亿人仍然依靠传统的固体燃料烹饪和取暖, 而且大多数集中在发展中国家, 特别是收入相对较低的农村地区<sup>[1]</sup>. 民用固体燃料的低效燃烧会产生大量的空气污染物, 如 CO、颗粒物 (particulate matter, PM)、多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 等, 不仅会严重影响家庭环境, 也会对室外环境造成污染<sup>[2-3]</sup>. 但在许多空气污染研究中, 相对于工厂和车辆排放等有代表性的人为污染源, 民用固体燃料燃烧排放的家庭环境空气颗粒物污染常常被忽视<sup>[4]</sup>. 固体燃料燃烧造成的家庭空气污染 (household air pollution, HAP) 是导致发展中国家重大疾病风险因素之一<sup>[5]</sup>. 据估计, 由固体燃料燃烧引起的家庭空气污染每年造成 280 万人死亡<sup>[6]</sup>. 20 世纪 80 年代以来, 中国城镇化的快速发展导致民用固体燃料使用比例下降, 但 2012 年中国家庭使用固体燃料烹饪和取暖的比例仍分别为 43% 和 30%<sup>[7]</sup>. 尽管人们普遍认为, 固体燃料燃烧造成的家庭空气污染主要影响发展中国家, 但美国人口普查局调查的数据显示, 美国有 650 万人主要以木材或煤炭取暖<sup>[8]</sup>. 由于民用固体燃料的广泛使用在很大程度上加剧了 HAP.

近年来, 民用固体燃料燃烧排放 PM 的相关研究逐渐受到关注, 以对人体危害较大的细颗粒物 (PM<sub>2.5</sub>) 研究为主. 许多流行病学研究已经证实, 持续暴露于高浓度的细颗粒物中, 与各种呼吸系统和心血管疾病的人类健康风险密切相关<sup>[9-11]</sup>. 然而, 目前对民用固体燃料燃烧排放的家庭环境空气颗粒物、暴露风险和排放控制研究等方面, 还存在许多不足之处. 本文针对民用固体燃料燃烧中家庭环境空气颗粒物排放相关研究进行整理. 综述了民用固体燃料燃烧中 PM 的形成机理; 分析了民用燃料和炉灶类型对家庭环境空气颗粒物的影响; 归纳了民用固体燃料燃烧排放的家庭环境空气颗粒物的暴露风险研究; 讨论了目前家庭环境空气颗粒物的排放控制领域存在的不足之处.

## 1 民用固体燃料燃烧中 PM 的形成机理 (The formation mechanism of PM emission from the combustion of residential solid fuels)

在实际生活中, 家用炉灶的炉膛体积小, 燃烧速度和所需的氧气量都会受到限制, 导致燃料不完全燃烧. 民用固体燃料不完全燃烧现象是 PM 形成的典型特征. 民用固体燃料燃烧过程中产生的 PM 是碳烟颗粒和飞灰颗粒. 不同类型颗粒的生成方式和演变转化过程各有不同. 接下来分别综述了民用固体燃料燃烧过程中两种不同类型 PM 的形成机理.

### 1.1 碳烟颗粒物

碳烟颗粒物是由非晶质碳及有机物组成的混合物, 在富燃料区域的火焰内部经历复杂的反应机制形成<sup>[12]</sup>. 碳烟颗粒的形成受燃料的性质和条件等因素影响, 通常在家用炉灶中, 由于燃料燃烧不完全导致其容易产生<sup>[13]</sup>. 碳烟颗粒是民用固体燃料燃烧过程中颗粒物的主要组成部分<sup>[14]</sup>. 据研究发现, 在燃烧初期, 由于温度较低导致燃料不完全燃烧, 碳氢化合物从燃料中析出并分解成更小的分子碎片, 这些分子碎片与周围环境的气体反应生成多环芳烃<sup>[15]</sup>. 多环芳烃分子再经过化学反应、聚团等作用, 最终形成碳烟颗粒<sup>[16]</sup>. 已成形的碳烟颗粒物会经历表面增大、凝结、氧化和碰并等过程, 进而形成粒径更大的 PM<sup>[17]</sup>.

### 1.2 飞灰颗粒物

在民用固体燃料燃烧过程中主要生成的飞灰颗粒物是亚微米颗粒, 由无机矿物的气化-凝结过程形成<sup>[18]</sup>. 在高温环境下, 燃料中的无机组分会发生气化和氧化反应<sup>[19]</sup>. 当环境温度降低无机组分蒸气过饱和, 会通过均相成核形成颗粒. 随后, 颗粒通过相互碰并和异相凝结, 形成各微粒的混合物<sup>[20]</sup>. Xiao 等<sup>[21]</sup>研究证明了气化-凝结是亚微米颗粒重要的形成机理, 很好地解释了高挥发性 Na 和 K 在亚微米灰上的富集.

综上所述, 由于家庭炉灶热效率低导致的固体燃料不完全燃烧是 PM 形成的主要原因. 在燃烧过程中产生的 PM 会直接排放到家庭环境中, 给家庭成员带来严重的健康危害. 因此, 想要进一步研究民用固体燃料燃烧排放 PM 的影响及暴露风险, 理解燃料燃烧过程中 PM 的形成机理是关键点.

## 2 家庭环境空气颗粒物来源 (Sources of household environmental particulate matter)

家庭环境空气颗粒物有两种不同的来源: 一种是由自然环境或人类活动产生的 PM, 通过门窗等

围护结构进入到家庭环境;另一种是家庭人员活动(如吸烟、取暖、烹饪、地板颗粒再悬浮等)产生的PM。其中取暖、烹饪是家庭环境空气颗粒物最主要的发生源<sup>[22]</sup>。经研究发现,民用固体燃料燃烧排放的PM,可随燃料和炉灶类型的变化而变化<sup>[23-24]</sup>。因此,了解燃料和炉灶类型对家庭环境空气颗粒物的影响,为民用固体燃料燃烧中PM排放、暴露风险及控制研究提供新思路。

### 2.1 不同燃料对家庭环境空气颗粒物的影响

煤和生物质(木柴或农作物秸秆)是民用固体燃料中最为常用的燃料。Jin等<sup>[25]</sup>对中国4个省份(甘肃、贵州、内蒙古和陕西)使用固体燃料的家庭进行了调查研究,发现主要用于烹饪的燃料是煤和生物质。固体燃料的高效率燃烧通常受许多因素的影响,如燃料水分、氧气供应和燃烧温度等<sup>[26-27]</sup>。高水分的燃料在燃烧过程中需要耗费额外的能量来蒸发自身的水分,若燃烧温度较低会影响燃料的燃烧效率,造成PM高排放。家庭炉灶的炉膛体积小,低水分燃料在炉膛中可能燃烧过快,氧气供应不足也会导致燃料的不完全燃烧<sup>[28]</sup>。

目前在家庭环境空气颗粒物研究领域,针对不同类型燃料的研究主要是基于实验室燃烧测试平台。这种燃烧测试能够有效的反映固体燃料燃烧过程中PM理化特征的实际情况。Shen等<sup>[29]</sup>调查了17种木柴和1种竹子的燃料特性,包括密度、水分、元素含量等,分析了燃料的挥发物、固定碳、灰分含量以及高热值。发现灌木燃烧中PM的排放因子(emission factors, EFs)高于林木燃烧中PM的EFs。Liu等<sup>[30]</sup>测量了17种煤样品PM<sub>2.5</sub>中元素的浓度,发现所有煤样的铅排放量都很高。这与Zhu<sup>[31]</sup>和Wu<sup>[32]</sup>研究得出的结果一致,燃煤家庭中的铅浓度高于燃烧生物质的家庭。而在最近的流行病学研究中发现<sup>[33]</sup>,肺泡中沉积的绝大多数目标PAHs与亚微米颗粒有关。图1统计了不同研究中煤和生物质燃烧排放的PM中PAHs和碳质组分(OC,EC)的质量中值粒径(mass median diameter, MMD)<sup>[34-45]</sup>。MMD常用来进行粒径分布的分析,是指PM中小于某一空气动力学直径的各种粒度颗粒的总质量占全部PM质量50%的粒径。从图1中可以看出PAHs和碳质组分(OC,EC)主要富集在亚微米颗粒上。但目前民用固体燃料燃烧排放超细颗粒物的相关研究数量较少,尤其是超细颗粒物的形成、排放和潜在暴露风险等方面还需进一步开展研究。

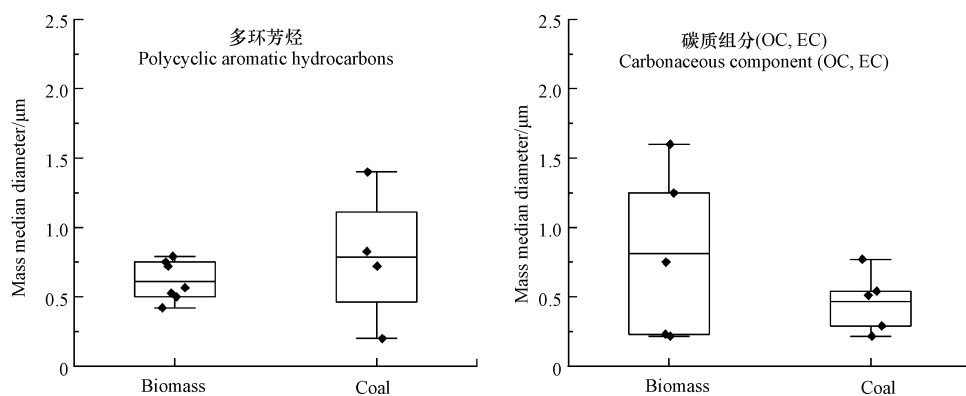


图1 煤和生物质燃烧排放的PM中PAHs和碳质组分(OC,EC)的质量中值粒径(MMD)统计图<sup>[34-45]</sup>

Fig.1 Mass median diameter (MMD) statistics of PAHs and carbonaceous components(OC,EC) in particulate emissions from coal and biomass combustion<sup>[34-45]</sup>

### 2.2 不同炉灶对家庭环境空气颗粒物的影响

不同地区气候条件和生活习惯的差异,产生出不同类型的炉灶。Jin等<sup>[25]</sup>指出中国地区用于烹饪和取暖的家用炉灶,在不同的地区有明显差异,如贵州大多数家用炉灶是带有烟囱的铸铁炉;陕西有使用地炉的情况;甘肃使用火盆或窑洞是普遍现象;内蒙古主要以炕为主。

每种炉灶燃烧效率不同,导致其燃烧时排放的PM浓度水平存在较大差异。Wang等<sup>[23]</sup>指出在使用无烟炉灶的家庭中PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>浓度水平显著升高。Xiao等<sup>[46]</sup>发现无烟炉灶排放的PM<sub>2.5</sub>浓度是带烟囱炉灶的6倍。Muralidharan等<sup>[47]</sup>筛选出印度家庭常用的6种炉灶,以木柴为固定燃料做PM<sub>2.5</sub>燃烧排放实验,发现带有强制通风装置的炉灶排放PM<sub>2.5</sub>的浓度水平远低于自然通风炉和传统

炉灶排放的  $PM_{2.5}$  浓度, 但强制通风炉  $PM_{2.5}$  排放浓度仍高于世界卫生组织 (World Health Organization, WHO) 规定的  $PM_{2.5}$  浓度. Jetter 等<sup>[48]</sup> 对美国地区常用的 22 种炉灶进行了  $PM_{2.5}$  排放测试研究, 也发现带有强制通风装置的炉灶排放  $PM_{2.5}$  的浓度显著降低. 但 Just 等<sup>[49]</sup> 在研究中指出, 使用燃烧效率更高的改进型炉灶与传统石火堆相比, 虽然  $PM_{2.5}$  浓度水平能够显著降低, 但从粒径分布上看, 超细颗粒物的排放浓度所占比例显著增加.

综上所述, 不同的燃料和炉灶类型对家庭环境空气颗粒物的影响有明显差异. 实验室燃烧测试平台的研究成果有助于更好的理解固体燃料燃烧过程中 PM 的形成和排放特征, 也为家庭环境空气颗粒物暴露风险研究奠定了基础.

### 3 家庭环境空气颗粒物环境和个人暴露风险研究 (Research on the environmental and personal exposure risks of household environmental particulate matter)

暴露风险研究能深入了解实际的民用燃烧活动对家庭空气质量的影响, 以及真实的家庭环境空气颗粒物暴露情况. 目前对民用固体燃料燃烧形成的家庭环境空气颗粒物暴露风险研究主要分为两种: 一种是环境暴露风险研究, 通过固定采样器测量家庭环境空气颗粒物浓度, 根据测量区域 PM 浓度和在不同环境中停留的时间来估计个人日常平均暴露量; 另一种是个人暴露风险研究, 主要使用便携式采样器测量个人日常吸入 PM 暴露量, 并根据人类活动模式和采样器监测值结果, 来表示日常人体暴露水平.

#### 3.1 家庭环境空气颗粒物环境暴露风险研究

家庭环境空气颗粒物环境暴露风险研究的目的是探究不同民用燃烧活动中家庭人群的暴露情况, 为民用固体燃料燃烧中 PM 造成的健康风险研究提供数据支撑. 目前采用固定式采样器对民用固体燃料燃烧造成的家庭环境空气颗粒物质量浓度的暴露风险研究较多, 主要研究活动分布在发展中国家. 表 1 列举了世界范围内采用固定式采样器对民用固体燃料燃烧排放 PM 的暴露风险研究. 从表 1 中观察到, 在使用燃料时排放的 PM 浓度远高于 WHO 现行准则建议<sup>[50]</sup>. 采用固定式采样器测量的 PM 浓度水平, 表示的是在家庭环境中固定点位的 PM 浓度, 由于区域浓度的时间变化 (如烹饪期间的峰值浓度) 和不同区域的环境因素等影响, 导致在估算人体暴露量时, 存在较大偏差和不确定性. 因此, 这种方法并不能准确的评估人体日常吸入暴露量.

表 1 在民用固体燃料燃烧暴露风险研究中采用固定式采样器测量的 PM 环境暴露值

Table 1 The PM environmental exposure value measured by a fixed sampler in the exposure risks study of residential solid fuel combustion

地点 Location	采样仪器 Sampling instrument	燃料类型 Fuel type	炉灶类型 Stove type	监测点 Monitoring location	PM(环境浓度) PM (Environmental concentration)		发表年份 Year of publication	参考文献 References
					浓度/ $(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$ Concentration	粒径 Particle size		
中国江苏	Minivol-Air Metrics	水稻杆	带烟囱炉灶	室内	114.3	$PM_{2.5}$	2009年	[51]
		木柴			87.5			
中国西藏	Model 8520 DustTrak aerosol monitor	牛粪	带烟囱炉灶	室内	191	$PM_{2.5}$	2015年	[46]
			无烟囱炉灶		1243			
希腊	Derenda LVS3.1/PMS3.1-15	木柴	壁炉	室内	62	$PM_{10}$	2015年	[52]
					29	$PM_{2.5}$		
印度	Minivol-Air Metrics	混合固体燃料	传统炉灶	室内	990.4±282.6	$PM_{2.5}$	2017年	[53]
西班牙	PMS Model PCASP-X	木柴	壁炉	室内	58.3	$PM_{10}$	2018年	[54]
中国云南	Minivol-TAS	煤炭	传统炉灶	室内	139.3	$PM_{2.5}$	2019年	[55]
葡萄牙	DustTrak DRX 8533	木柴	壁炉	室内	319±173	$PM_{10}$	2020年	[56]
			柴火炉		78.5±24			

### 3.2 家庭环境空气颗粒物个人吸入暴露风险研究

个人便携式采样器对个人日常暴露量进行测量的研究逐渐受到关注,此方法能更准确地对个人吸入暴露进行评估. Huang 等<sup>[57]</sup> 研究指出,虽然估算的环境平均暴露量与直接测量的吸入暴露水平呈正相关,但估算的值比实际低 30% 左右. Du 等<sup>[58]</sup> 也有相似的发现. 因此,个人便携式采样器是进行个人吸入暴露风险研究较好地选择. 表 2 中列举了使用个人便携式采样器测量个人吸入暴露量的研究. 采用此方法的研究活动,在中国分布较多,主要在华北和东北(河北、山西和内蒙古)和西南(云南、四川和贵州)等地区. 国外相关研究较少,大多都集中在经济欠发达的发展中国家.

近年来,民用固体燃料燃烧对特殊人群(如妇女和儿童)的暴露风险研究是热点问题. Baumgartner 等<sup>[59]</sup> 使用个人便携式采样器对中国云南妇女进行了个人日常暴露风险研究,发现在冬季女性 PM<sub>2.5</sub> 个人暴露量为 117  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . Weinstein 等<sup>[60]</sup> 进行了同样的研究,女性 48 h 的 PM<sub>2.5</sub> 个人暴露量为 105.7  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . Dionisio 等<sup>[61]</sup> 对冈比亚儿童接触生物质燃料燃烧中 PM 进行了暴露风险研究,结果发现儿童接触木柴和木炭两种燃料排放的 PM<sub>2.5</sub> 浓度分别为 114  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和 85  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,都远高于 WHO 建议的安全限值. 从上述研究中可看出,使用个人便携式采样器能够准确的测量目标人群的 PM 暴露情况,是目前暴露风险研究中主流的测量手段.

表 2 在民用固体燃料燃烧暴露风险研究中采用个人便携采样器测量的 PM 个人暴露值

Table 2 The PM personal exposure value measured by personal portable sampler in the exposure risks study of civil solid fuel combustion

地点 Location	采样仪器 Sampling instrument	燃料类型 Fuel type	炉灶类型 Stove type	监测点 Monitoring location	PM(个人暴露) PM (Personal exposure)		发表年份 Year of publication	参考文献 References
					浓度/ $(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$ Concentration	粒径 Particle size		
冈比亚	PM <sub>2.5</sub> Monitor	木柴	传统炉灶	室内	144	PM <sub>2.5</sub>	2012年	[61]
		木炭			85			
中国四川	Personal Exposure Monitors (PEMs)	木柴	陶瓷砖烟囱炉灶	室内	61	PM <sub>2.5</sub>	2014年	[62]
秘鲁	PDR-1000 (Thermo Fisher Scientific)	木柴	传统炉灶	室内	316	PM <sub>10</sub>	2014年	[63]
					245	PM <sub>2.5</sub>		
中国内蒙古	Personal Exposure Monitors (PEMs)	作物残留物	炕	室内	249	PM <sub>2.5</sub>	2016年	[64]
中国四川	Personal Exposure Monitors (PEMs)	木柴	砖砌烟囱炉灶	室内	83.9	PM <sub>2.5</sub>	2016年	[64]
危地马拉	UCB-PATS (Berkeley Air)	木柴	带烟囱炉灶	室内	105.7	PM <sub>2.5</sub>	2017年	[60]
中国陕西	Personal Exposure Monitors (PEMs)	蜂窝煤	炕	室内	263.4±105.8	PM <sub>2.5</sub>	2018年	[65]
中国四川	Personal Exposure Monitors (PEMs)	木柴	传统炉灶	室内	202±99.1	PM <sub>2.5</sub>	2019年	[66]
中国云南	Shinyei-PPD42NS	煤炭	传统炉灶	室内	26.26	PM <sub>2.5</sub>	2020年	[67]
中国陕西	Personal Exposure Monitors (PEMs)	煤炭和木柴	新型炉灶	室内	205.5	PM <sub>2.5</sub>	2020年	[68]
			传统炉灶		336.5			

图 2 统计了采用个人便携式采样器对不同粒径 PM(PM<sub>0.25</sub>、PM<sub>1</sub>、PM<sub>2.5</sub> 和 TSP) 的个人吸入暴露风险研究<sup>[57-58,69-71]</sup>. 发现 TSP 中 PM<sub>2.5</sub> 的平均质量浓度在 70% 左右, PM<sub>1</sub> 占 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的 80%. 表明在使用民用固体燃料时, PM 排放呈现出以细颗粒物为主的趋势, 虽然针对民用固体燃料燃烧排放细颗粒及超细颗粒的暴露风险研究越来越多, 但目前仍然处于探索阶段.

综上所述, 开展家庭环境空气颗粒物暴露风险研究, 不仅可以了解当地燃料和炉灶的使用情况, 而且可以掌握家庭环境空气颗粒物的暴露水平, 对保护家庭人群健康具有重要意义, 也能为家庭环境空气颗粒物排放控制提供科学依据.

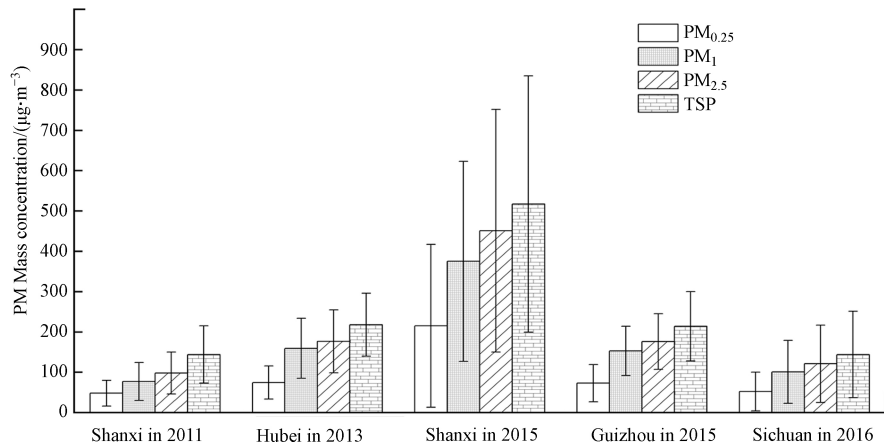


图2 民用固体燃料燃烧排放的不同粒径PM( $PM_{0.25}$ 、 $PM_1$ 、 $PM_{2.5}$ 和TSP)的个人吸入暴露量<sup>[57-58,69-71]</sup>

Fig.2 Personal inhalation exposure of different particle diameter PM ( $PM_{0.25}$ ,  $PM_1$ ,  $PM_{2.5}$  and TSP) emitted from combustion of residential solid fuels<sup>[57-58,69-71]</sup>

#### 4 家庭环境空气颗粒物的排放控制影响研究 (Research on the emission control impact of household environmental particulate matter)

家庭环境空气颗粒物的排放控制研究主要从两个角度展开: 一是通过考虑房屋布局和通风的影响, 快速降低家庭环境空气颗粒物浓度; 二是针对家庭环境空气颗粒物的排放源头, 对其进行减排措施. 两种类型的研究都结合了家庭生活的实际情况, 能有效的缓解家庭环境空气颗粒物暴露水平, 为民用固体燃料燃烧中PM排放的管理与控制提供了依据.

##### 4.1 房屋布局和通风对家庭环境空气颗粒物的影响

当室内有明显污染源时, 通风是快速降低污染物浓度的重要途径. 王军亮等<sup>[72]</sup>对北京办公建筑室内外PM质量浓度分布特征进行研究, 提出当室内有明显污染排放源时, 有效通风对于降低室内PM浓度具有重要意义. 在使用民用固体燃料的家庭中, 通过开窗自然通风的方式改善家庭空气质量是常用的手段. 目前, 针对自然通风和燃料污染排放的相关研究却少有报道. Arif等<sup>[73]</sup>研究了印度农村家庭房间通风情况与固体燃料燃烧 $PM_{2.5}$ 排放之间的关系, 发现使用高污染燃料时, 通风房间 $PM_{2.5}$ 浓度显著下降; 当使用清洁燃料时, 两个房间 $PM_{2.5}$ 浓度没有明显变化. Hu等<sup>[74]</sup>在中国农村对房间通风情况研究时, 发现气流会受到房间内楼梯间的影响, 有无楼梯间的空气污染物测量值有明显差异, 该研究还表明窗户数量是影响 $PM_{2.5}$ 个人暴露的重要因素.

炉灶位置也是造成家庭环境空气颗粒物高污染的重要影响因素<sup>[25,74]</sup>. 图3列举了针对厨房和生活区进行的 $PM_{2.5}$ 暴露风险研究<sup>[9,57,69,75-77]</sup>.

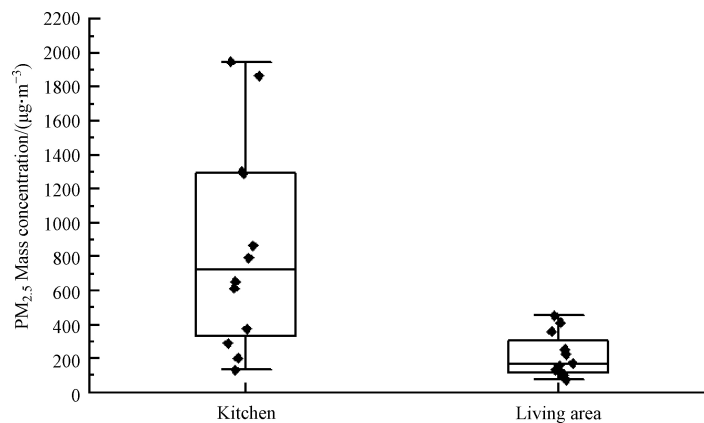


图3 民用固体燃料燃烧排放的 $PM_{2.5}$ 在厨房和生活区的质量浓度对比图<sup>[9,57,69,75-77]</sup>

Fig.3 Comparison chart of the mass concentration of  $PM_{2.5}$  emitted from the combustion of residential solid fuels in the kitchen and living area<sup>[9,57,69,75-77]</sup>

可以观察到,通风条件较差时,厨房  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度可达到  $1947.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  远高于生活区  $\text{PM}_{2.5}$  浓度水平.但这些研究都是在房间有明确分区的情况下进行. Jin 等<sup>[25]</sup> 在研究中已经注意到厨房和客厅共同使用的情况,在贵州省农村大约 72% 的家庭通常在客厅烹饪,在内蒙古还有起居和烹饪都在一个房间的现象.因此,在暴露风险研究中,应充分考虑当地房屋实际的使用功能和通风条件影响.

#### 4.2 清洁型燃料和改进型炉灶对家庭环境空气颗粒物的影响

高效率燃烧炉灶和清洁型燃料(如天然气、沼气和液化石油气等),是目前公认的民用燃料燃烧  $\text{PM}_{2.5}$  减排最有效的方法<sup>[78-80]</sup>. Huang 等<sup>[57]</sup> 研究发现,使用固体燃料比使用天然气等清洁型燃料的家庭 PM 每日暴露量高出约 30%—40%. Li 等<sup>[79]</sup> 也在其研究中指出,使用较“清洁”的半焦煤比烟煤排放的  $\text{PM}_{2.5}$  和黑炭分别降低了 93% 和 98%;该研究还提出了一种改变燃烧方式的新型气化炉灶,发现随着燃料燃烧效率的提高,  $\text{PM}_{2.5}$  中含碳量显著降低,说明改进炉灶燃烧方式可有效减排  $\text{PM}_{2.5}$ . 然而, Just 等<sup>[49]</sup> 发现在使用燃烧效率更高的改进型炉灶时,虽然  $\text{PM}_{2.5}$  的质量浓度明显降低,但从 PM 数浓度粒径分布上看,超细颗粒物的数浓度所占比例显著增加.因此,  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度的减排方法是否适用于超细颗粒物数浓度的减排仍不明确<sup>[81]</sup>.

房屋布局和通风是居民减少家庭环境空气颗粒物暴露的常用手段,而目前使用清洁型燃料和改进型炉灶是  $\text{PM}_{2.5}$  减排最有效的方法.针对超细颗粒物的排放控制尚未受到足够重视.因此,未来民用燃料燃烧 PM 减排工作的重点,应主要集中在超细颗粒物的减排效应以及气流分布对家庭环境空气颗粒物的影响研究.

## 5 结论与展望 (Conclusion and prospects)

近年来,民用固体燃料燃烧造成的家庭环境空气颗粒物污染问题已成为全球关注的焦点.民用固体燃料燃烧排放对家庭环境空气颗粒物的形成机理、来源、暴露风险及控制等方面已取得了一定成果.由于经济欠发达地区使用民用固体燃料的情况较为普遍,家庭环境空气颗粒物的日平均浓度长期高于 WHO 的标准限值.因此,家庭环境空气颗粒物的相关研究在这些地区至关重要.但目前民用固体燃料燃烧中 PM 暴露风险和控制研究存在不足,亟需开展进一步研究:

(1) 现阶段民用固体燃料燃烧对家庭环境空气颗粒物的影响,主要集中于  $\text{PM}_{2.5}$  的研究.实际上,燃料燃烧排放的 PAHs 和碳质组分 (OC、EC) 更容易富集在亚微米颗粒上,对人类健康构成重大风险.但相关研究还较少,尤其是超细颗粒物的排放、暴露风险和排放控制等方面.

(2) 目前在民用固体燃料燃烧的暴露风险研究中,主要是基于过滤采样器的重量测试研究,无法准确的测量出在使用燃料时 PM 浓度排放的峰值时段和分布情况.因此,采用高时间分辨率、高粒径分辨率的实时采样器对 PM 暴露风险和排放控制研究具有重要意义.

(3) 民用固体燃料燃烧中  $\text{PM}_{2.5}$  的减排方法得到普遍认可.但目前民用固体燃料燃烧中 PM 与房间气流分布的相关研究较少,大多数研究是在实验室进行或通过计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 数值模拟得到结果,在暴露风险研究中还存在着许多难点.

### 参考文献 (References)

- [1] BONJOUR S, ADAIR-ROHANI H, WOLF J, et al. Solid fuel use for household cooking: Country and regional estimates for 1980-2010 [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2013, 121(7): 784-790.
- [2] CLARK M L, PEEL J L, BALAKRISHNAN K, et al. Health and household air pollution from solid fuel use: The need for improved exposure assessment [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2013, 121(10): 1120-1128.
- [3] CHAFE Z A, BRAUER M, KLIMONT Z, et al. Household cooking with solid fuels contributes to ambient  $\text{PM}_{2.5}$  air pollution and the burden of disease [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2014, 122(12): 1314-1320.
- [4] LIU J, MAUZERALL D L, CHEN Q, et al. Air pollutant emissions from Chinese households: A major and underappreciated ambient pollution source [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113(28): 7756-7761.
- [5] World Bank. The cost of air pollution: Strengthening the economic case for action[EB/OL]. [2020-12-23]. Washington, World Bank Group, 2016. <http://documents.worldbank.org/curated/en/781521473177013155/The-cost-of-airpollution-strengthening-the-economic-case-for-action>.
- [6] COHEN A J, BRAUER M, BURNETT R, et al. Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air

- pollution: An analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015 [J]. *The Lancet*, 2017, 389(10082): 1907-1918.
- [ 7 ] 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 (CEERHAPS) [J]. *Applied Energy*, 2014, 136: 692-703.
- [ 8 ] ROGALSKY D K, MENDOLA P, METTS T A, et al. Estimating the number of low-income Americans exposed to household air pollution from burning solid fuels [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2014, 122(8): 806-810.
- [ 9 ] SMITH K R, BRUCE N, BALAKRISHNAN K, et al. Millions dead: How do we know and what does it mean? Methods used in the comparative risk assessment of household air pollution [J]. *Annual Review of Public Health*, 2014, 35: 185-206.
- [ 10 ] APTE J S, MARSHALL J D, COHEN A J, et al. Addressing global mortality from ambient PM<sub>2.5</sub> [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(13): 8057-8066.
- [ 11 ] MADANIYAZI L, NAGASHIMA T, GUO Y M, et al. Projecting fine particulate matter-related mortality in East China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(18): 11141-11150.
- [ 12 ] 田红, 廖正祝. 生物质碳烟颗粒物生成机理研究进展 [J]. *洁净煤技术*, 2017, 23(3): 7-15.
- TIAN H, LIAO Z Z. Progress on the formation mechanism of biomass soot particles [J]. *Clean Coal Technology*, 2017, 23(3): 7-15 (in Chinese).
- [ 13 ] JOKINIEMI J K, LIND T, HOKKINEN J, et al. Modelling and experimental results on aerosol formation, deposition and emissions in fluidized bed combustion of biomass [J]. *Aerosols from biomass combustion*, 2001, 28: 31-40.
- [ 14 ] OBAIDULLAH M, BRAM S, RUYCK J D. An overview of PM formation mechanisms from residential biomass combustion and instruments using in PM measurements [J]. *International Journal of Energy and Environment*, 2018, 12: 41-50.
- [ 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 ] SIPPULA O, HOKKINEN J, PUUSTINEN H, et al. Particle emissions from small wood-fired district heating units [J]. *Energy & Fuels*, 2009, 23(6): 2974-2982.
- [ 17 ] STANMORE B R, BRILHAC J F, GILOT P. The oxidation of soot: A review of experiments, mechanisms and models [J]. *Carbon*, 2001, 39(15): 2247-2268.
- [ 18 ] 于敦喜, 徐明厚, 易帆, 等. 燃煤过程中颗粒物的形成机理研究进展 [J]. *煤炭转化*, 2004, 27(4): 7-12.
- YU D X, XU M H, YI F, et al. A review on particle formation mechanisms during coal combustion [J]. *Coal Conversion*, 2004, 27(4): 7-12 (in Chinese).
- [ 19 ] HELBLE J J, SAROFIM A F. Factors determining the primary particle size of flame-generated inorganic aerosols [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1989, 128(2): 348-362.
- [ 20 ] GAO Q, LI S Q, YANG M M, et al. Measurement and numerical simulation of ultrafine particle size distribution in the early stage of high-sodium lignite combustion [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 36(2): 2083-2090.
- [ 21 ] XIAO Z H, SHANG T K, ZHUO J K, et al. Study on the mechanisms of ultrafine particle formation during high-sodium coal combustion in a flat-flame burner [J]. *Fuel*, 2016, 181: 1257-1264.
- [ 22 ] LONG C M, SUH H H, KOUTRAKIS P. Characterization of indoor particle sources using continuous mass and size monitors [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2000, 50(7): 1236-1250.
- [ 23 ] WANG S X, WEI W, LI D, et al. Air pollutants in rural homes in Guizhou, China - Concentrations, speciation, and size distribution [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(36): 4575-4581.
- [ 24 ] WU F Y, LIU X P, WANG W, et al. Characterization of particulate-bound PAHs in rural households using different types of domestic energy in Henan Province, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 536: 840-846.
- [ 25 ] JIN Y L, MA X, CHEN X N, et al. Exposure to indoor air pollution from household energy use in rural China: The interactions of technology, behavior, and knowledge in health risk management [J]. *Social Science & Medicine*, 2006, 62(12): 3161-3176.
- [ 26 ] DHAMMAPALA R, CLAIBORN C, CORKILL J, et al. Particulate emissions from wheat and Kentucky bluegrass stubble burning in eastern Washington and northern Idaho [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(6): 1007-1015.
- [ 27 ] MCMEEKING G R, KREIDENWEIS S M, BAKER S, et al. Emissions of trace gases and aerosols during the open combustion of biomass in the laboratory [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(D19): D19210.
- [ 28 ] SIMONEIT B R T. Biomass burning—a review of organic tracers for smoke from incomplete combustion [J]. *Applied Geochemistry*, 2002, 17(3): 129-162.
- [ 29 ] SHEN G F, WEI S Y, WEI W, et al. Emission factors, size distributions, and emission inventories of carbonaceous particulate matter from residential wood combustion in rural China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(7): 4207-4214.
- [ 30 ] LUI K H, CHAN C S, TIAN L W, et al. Elements in fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) from indoor air during household stoves coal combustion at Xuanwei, China [J]. *Aerosol Science and Engineering*, 2017, 1(1): 41-50.
- [ 31 ] ZHU C S, CAO J J, SHEN Z X, et al. Indoor and outdoor chemical components of PM<sub>2.5</sub> in the rural areas of Northwestern China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2012, 12(6): 1157-1165.
- [ 32 ] WU F Y, WANG W, MAN Y B, et al. Levels of PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> and associated metal(loid)s in rural households of Henan Province, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 512/513: 194-200.
- [ 33 ] LI T X, CAO S Z, FAN D L, et al. Household concentrations and personal exposure of PM<sub>2.5</sub> among urban residents using different cooking fuels [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 548/549: 6-12.
- [ 34 ] SHEN G F, WEI S Y, ZHANG Y Y, et al. Emission and size distribution of particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons from



- residential wood combustion in rural China [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2013, 55: 141-147.
- [35] HATA M, CHOMANEE J, THONGYEN T, et al. Characteristics of nanoparticles emitted from burning of biomass fuels [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, 26(9): 1913-1920.
- [36] SONG W H, CAO F, LIN Y C, et al. Extremely high abundance of polycyclic aromatic hydrocarbons in aerosols from a typical coal-combustion rural site in China: Size distribution, source identification and cancer risk assessment [J]. *Atmospheric Research*, 2021, 248: 105192.
- [37] VENKATARAMAN C, NEGI G, BRATA SARDAR S, et al. Size distributions of polycyclic aromatic hydrocarbons in aerosol emissions from biofuel combustion [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2002, 33(3): 503-518.
- [38] ZHANG J D, LIU W J, XU Y S, et al. Distribution characteristics of and personal exposure with polycyclic aromatic hydrocarbons and particulate matter in indoor and outdoor air of rural households in Northern China [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 255: 113176.
- [39] SHEN G F, WANG W, YANG Y F, et al. Emission factors and particulate matter size distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons from residential coal combustions in rural Northern China [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(39): 5237-5243.
- [40] 陈颖军. 家用蜂窝煤燃烧烟气中碳颗粒物和三环芳烃的排放特征[D]. 广州: 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所), 2004.
- CHEN Y J. Emission characteristics of carbonaceous particulate and polycyclic aromatic hydrocarbons from residential honeycomb-coal-briquette combustion[D]. Guangzhou: University of Chinese Academy of Sciences(Guangzhou Institute of Geochemistry), 2004(in Chinese).
- [41] 杨国威, 孔少飞, 郑淑睿, 等. 民用燃煤排放分级颗粒物中碳组分排放因子 [J]. *环境科学*, 2018, 39(8): 3524-3534.
- YANG G W, KONG S F, ZHENG S R, et al. Size-resolved emission factors of carbonaceous particles from domestic coal combustion in China [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(8): 3524-3534 (in Chinese).
- [42] 符海欢, 田娜, 商惠斌, 等. 模拟不同排放源排放颗粒及多环芳烃的粒径分布研究 [J]. *环境科学*, 2014, 35(1): 46-52.
- FU H H, TIAN N, SHANG H B, et al. Size distribution of particle and polycyclic aromatic hydrocarbons in particle emissions from simulated emission sources [J]. *Environmental Science*, 2014, 35(1): 46-52 (in Chinese).
- [43] 沈潇雨, 郭照冰, 姜文娟, 等. 生物质室内燃烧产物的碳质特征及EC同位素组成 [J]. *中国环境科学*, 2017, 37(10): 3669-3674.
- SHEN X Y, GUO Z B, JIANG W J, et al. Carbon characteristics and elemental carbon isotopic compositions in biomass indoor combustion products [J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(10): 3669-3674 (in Chinese).
- [44] 沈国锋. 室内固体燃料燃烧产生的碳颗粒物和三环芳烃的排放因子及影响因素[D]. 北京: 北京大学, 2012.
- SHEN G F. Emission factors of carbonaceous particulate matter and polycyclic aromatic hydrocarbons from residential solid fuel combustions[D]. Beijing: Peking University, 2012(in Chinese).
- [45] 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.
- LIU Y N, ZHONG L H, YAN J, et al. Carbon compositions and VOCs emission characteristics of civil combustion fuels [J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(4): 1412-1418 (in Chinese).
- [46] XIAO Q Y, SAIKAWA E, YOKELSON R J, et al. Indoor air pollution from burning yak dung as a household fuel in Tibet [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 102: 406-412.
- [47] MURALIDHARAN V, SUSSAN T E, LIMAYE S, et al. Field testing of alternative cookstove performance in a rural setting of western India [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, 12(2): 1773-1787.
- [48] 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.
- [49] JUST B, ROGAK S, KANDLIKAR M. Characterization of ultrafine particulate matter from traditional and improved biomass cookstoves [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(7): 3506-3512.
- [50] WHO. Exposure to air pollution: a major public health concern[EB/OL]. [2020-12-8]. Public health and environment, 2010: 1-6. [https://www.who.int/ipcs/features/air\\_pollution.pdf](https://www.who.int/ipcs/features/air_pollution.pdf)
- [51] 顾庆平, 高翔, 陈洋, 等. 江苏农村地区室内PM<sub>2.5</sub>浓度特征分析 [J]. *复旦学报(自然科学版)*, 2009, 48(5): 593-597.
- GU Q P, GAO X, CHEN Y, et al. The mass concentration characters of indoor PM<sub>2.5</sub> in rural areas in Jiangsu Province [J]. *Journal of Fudan University (Natural Science)*, 2009, 48(5): 593-597 (in Chinese).
- [52] SARAGA D E, MAKROGKIKI A, KARAVOLTSOS S, et al. A pilot investigation of PM indoor/outdoor mass concentration and chemical analysis during a period of extensive fireplace use in Athens [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2015, 15(7): 2485-2495.
- [53] MATAWLE J L, PERVEZ S, SHRIVASTAVA A, et al. PM<sub>2.5</sub> pollution from household solid fuel burning practices in central India: 1. Impact on indoor air quality and associated health risks [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2017, 39(5): 1045-1058.
- [54] CASTRO A, CALVO A I, BLANCO-ALEGRE C, et al. Impact of the wood combustion in an open fireplace on the air quality of a living room: Estimation of the respirable fraction [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 628/629: 169-176.
- [55] 吴凡, 邵龙义, 鲁静, 等. 宣城市冬季室内PM<sub>2.5</sub>中水溶性无机离子污染特征 [J]. *环境工程技术学报*, 2019, 9(5): 538-543.
- WU F, SHAO L Y, LU J, et al. Characteristics of the water-soluble inorganic ions of indoor PM<sub>2.5</sub> in Xuanwei City in winter [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, 9(5): 538-543 (in Chinese).
- [56] VICENTE E D, VICENTE A M, EVTUYUGINA M, et al. Impact of wood combustion on indoor air quality [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 705: 135769.

- [57] HUANG Y, DU W, CHEN Y C, et al. Household air pollution and personal inhalation exposure to particles (TSP/PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>1.0</sub>/PM<sub>0.25</sub>) in rural Shanxi, North China [J]. *Environmental Pollution*, 2017, 231: 635-643.
- [58] DU W, SHEN G F, CHEN Y C, et al. Wintertime pollution level, size distribution and personal daily exposure to particulate matters in the northern and southern rural Chinese homes and variation in different household fuels [J]. *Environmental Pollution*, 2017, 231: 497-508.
- [59] BAUMGARTNER J, SCHAUER J J, EZZATI M, et al. Patterns and predictors of personal exposure to indoor air pollution from biomass combustion among women and children in rural China [J]. *Indoor Air*, 2011, 21(6): 479-488.
- [60] WEINSTEIN J R, ASTERIA-PENALOZA R, DIAZ-ARTIGA A, et al. Exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons and volatile organic compounds among recently pregnant rural Guatemalan women cooking and heating with solid fuels [J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2017, 220(4): 726-735.
- [61] DIONISIO K L, HOWIE S R C, DOMINICI F, et al. Household concentrations and exposure of children to particulate matter from biomass fuels in the Gambia [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(6): 3519-3527.
- [62] SHAN M, YANG X D, EZZATI M, et al. A feasibility study of the association of exposure to biomass smoke with vascular function, inflammation, and cellular aging [J]. *Environmental Research*, 2014, 135: 165-172.
- [63] POLLARD S L, WILLIAMS D L, BREYSSE P N, et al. A cross-sectional study of determinants of indoor environmental exposures in households with and without chronic exposure to biomass fuel smoke [J]. *Environmental Health*, 2014, 13(1): 21.
- [64] SECREST M H, SCHAUER J J, CARTER E M, et al. The oxidative potential of PM<sub>2.5</sub> exposures from indoor and outdoor sources in rural China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 571: 1477-1489.
- [65] XU H M, LI Y Q, GUINOT B, et al. Personal exposure of PM<sub>2.5</sub> emitted from solid fuels combustion for household heating and cooking in rural Guanzhong Plain, northwestern China [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 185: 196-206.
- [66] LAI A M, CARTER E, SHAN M, et al. Chemical composition and source apportionment of ambient, household, and personal exposures to PM<sub>2.5</sub> in communities using biomass stoves in rural China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 646: 309-319.
- [67] WU J, XIAO X, LI Y, et al. Personal exposure to fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) of pregnant women during three trimesters in rural Yunnan of China [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 256: 113055.
- [68] 贺开来, 李娅琦, 徐红梅, 等. 家用燃料燃烧排放PM<sub>2.5</sub>的特征及其对肺功能的影响: 以陕西蓝田县为例 [J]. *环境化学*, 2020, 39(2): 552-565.
- HE K L, LI Y Q, XU H M, et al. Characteristics of PM<sub>2.5</sub> emitted from domestic fuel combustion and its effect on lung function: A case study in Lantian County, Shaanxi, China [J]. *Environmental Chemistry*, 2020, 39(2): 552-565 (in Chinese).
- [69] ZHONG J J, DING J N, SU Y H, et al. Carbonaceous particulate matter air pollution and human exposure from indoor biomass burning practices [J]. *Environmental Engineering Science*, 2012, 29(11): 1038-1045.
- [70] LIU W J, SHEN G F, CHEN Y C, et al. Air pollution and inhalation exposure to particulate matter of different sizes in rural households using improved stoves in central China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, 63: 87-95.
- [71] HUANG Y, WANG J Z, FU N, et al. Inhalation exposure to size-segregated fine particles and particulate PAHs for the population burning biomass fuels in the Eastern Tibetan Plateau area [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 211: 111959.
- [72] 王军亮, 王清勤, 范东叶, 等. 北京地区办公建筑室内颗粒物质量浓度分布特征 [J]. *暖通空调*, 2017, 47(5): 113-118.
- WANG J L, WANG Q Q, FAN D Y, et al. Particle mass concentration distribution characteristics in an office building of Beijing [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2017, 47(5): 113-118 (in Chinese).
- [73] ARIF M, PARVEEN S. Carcinogenic effects of indoor black carbon and particulate matters (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>) in rural households of India [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(2): 2082-2096.
- [74] HU W, DOWNWARD G S, REISS B, et al. Personal and indoor PM<sub>2.5</sub> exposure from burning solid fuels in vented and unvented stoves in a rural region of China with a high incidence of lung cancer [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(15): 8456-8464.
- [75] GAO X, YU Q, GU Q, et al. Indoor air pollution from solid biomass fuels combustion in rural agricultural area of Tibet, China [J]. *Indoor Air*, 2009, 19(3): 198-205.
- [76] SIDHU M K, RAVINDRA K, MOR S, et al. Household air pollution from various types of rural kitchens and its exposure assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 586: 419-429.
- [77] SHARMA D, JAIN S. Impact of intervention of biomass cookstove technologies and kitchen characteristics on indoor air quality and human exposure in rural settings of India [J]. *Environment International*, 2019, 123: 240-255.
- [78] RAPP V H, CAUBEL J J, WILSON D L, et al. Reducing ultrafine particle emissions using air injection in wood-burning cookstoves [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(15): 8368-8374.
- [79] LI Q, JIANG J K, QI J, et al. Improving the energy efficiency of stoves to reduce pollutant emissions from household solid fuel combustion in China [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2016, 3(10): 369-374.
- [80] DU W, SHEN G F, CHEN Y C, et al. Comparison of air pollutant emissions and household air quality in rural homes using improved wood and coal stoves [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 166: 215-223.
- [81] 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.
- WANG D B, HAO J M, JIANG J K. Ultrafine particle emission and its potential health risk from residential solid fuel combustion [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(33): 3429-3440 (in Chinese).