

我国西部农村地区固体燃料燃烧污染物排放因子测定及分布特征

杨乐汀^{1,2}, 张宁宁^{1,3*}, 张 勇^{1,2}, 王 怡^{1,2}

1. 中国科学院地球环境研究所 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 中国科学院气溶胶化学与物理重点实验室, 西安 710061

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 中国科学院第四纪科学与全球变化卓越创新中心, 西安 710061

摘 要: 排放因子是估算污染物排放量的重要参数, 为获取可靠的、有区域特征的固体燃料排放因子, 2018 年在我国西部 9 个省/自治区利用稀释采样系统入户收集了 226 个固体燃料燃烧样本, 获得了薪柴、秸秆和煤在不同类型炉具中燃烧排放 CO₂、CO、OC、EC、PM_{2.5} 的排放因子。结果表明: 秸秆类较易燃烧的燃料有较高的 OC、EC、PM_{2.5} 排放因子, 煤有较高的 CO₂、CO 排放因子。炉灶类型对薪柴的 OC、PM_{2.5} 的排放因子影响稍大, 薪柴在炕中燃烧的 OC、PM_{2.5} 排放因子比在砖灶和铁炉高约 2—3.1 倍, 但秸秆在不同炉具中的排放因子差异较小。受不同区域燃料和炉灶类型以及操作习惯差异的共同影响, 排放因子呈现明显的区域性差异, 高 CO₂ 排放因子分布在以煤为主要燃料的区域, 高 OC、EC、PM_{2.5} 排放因子分布在以生物质为主要燃料的区域, 并且 CO、OC 和 PM_{2.5} 排放因子的区域分布呈现一定的相关性。

关键词: 农村地区; 我国西部; 固体燃料; 污染排放; 排放因子

Measurement and distribution characteristics of emission factors of pollutant emission in solid fuel combustion in rural areas of western China

YANG Leting^{1,2}, ZHANG Ningning^{1,3*}, ZHANG Yong^{1,2}, WANG Yi^{1,2}

1. Key Laboratory of Aerosol Chemistry and Physics, State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. CAS Center for Excellence in Quaternary Science and Global Change, Xi'an 710061, China

Abstract: *Background, aim, and scope* Solid fuels such as biomass and bulk coal are the primary energy sources for cooking and heating in rural areas of China. However, low combustion efficiency and the large amounts of pollutants emissions from solid fuels combustion cause a decline in regional air quality and damage to human

收稿日期: 2022-02-08; 录用日期: 2022-06-29; 网络出版: 2022-07-15

Received Date: 2022-02-08; Accepted Date: 2022-06-29; Online first: 2022-07-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41877404); 西部之光“西部青年学者”项目 (XAB2021YN06); 陕西省自然科学基金研究计划 (2020JQ-982)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (41877404); CAS “Light of West China” Program (XAB2021YN06); Natural Science Basic Research Program of Shaanxi (2020JQ-982)

通信作者: 张宁宁, E-mail: zhangnn@ieecas.cn

Corresponding Author: ZHANG Ningning, E-mail: zhangnn@ieecas.cn

引用格式: 杨乐汀, 张宁宁, 张 勇, 等. 2024. 我国西部农村地区固体燃料燃烧污染物排放因子测定及分布特征 [J]. 地球环境学报, 15(1): 154–163.

Citation: Yang L T, Zhang N N, Zhang Y, et al. 2024. Measurement and distribution characteristics of emission factors of pollutant emission in solid fuel combustion in rural areas of western China [J]. *Journal of Earth Environment*, 15(1): 154–163.

health. Regional emission factors are a key factor in evaluating regional pollutant emissions which are important for regional air pollution control. In order to localize the emission factors for western China's rural areas, a portable dilution sampling system was designed and established, and the emission factors of CO₂, CO, OC, EC and PM_{2.5} were calculated after field investigation and sampling. **Materials and methods** A portable dilution sampling system was used to collect the flue gas from solid fuel combustion. The concentrations of CO₂ and CO were measured by in-line instruments. The filter was weighed by a high precision electronic balance, OC and EC were analyzed by a DRI model 2001A OC/EC carbon analyzer, and the emission factors were calculated following carbon balance method. **Results** Because coal has higher carbon content, the emission factors of CO₂ and CO of coal are $(2375.30 \pm 365.28) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $(147.11 \pm 126.92) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively, which are larger than those of firewood and straw. Firewood and straw have higher emission factors of OC, EC and PM_{2.5}, since they burn less efficiently than coal and tend to produce more pollutants. In this study, the values of emission factors in this study are generally higher than the results measured in lab. This could be due to the fact that lab can control the fuel and combustion process more precisely, while uncontrolled combustion releases more pollutants in real life. Additionally, the type of stove has a great influence on emission factors of OC and PM_{2.5} of fuel wood. The emission factors for Kang were found to be about 2—3.1 times higher than those for brick stove and metal stove. Burning coal in metal stoves and firewood in brick stoves can relatively reduce emissions of solid fuel pollutants in rural areas. It is important to note that the emission factors of CO₂, CO, OC, EC and PM_{2.5} present obviously regional difference due to differences of combustion habits in different regions. **Discussion** Analyzing the variations of emission factors of CO₂, CO, OC, EC and PM_{2.5}, it was found that fuel types and stove types have effect on emission factors and combustion habits cause regional distribution of emission factors. Coal has higher CO₂ and CO emission factors due to its high carbon content, while straw and firewood have higher OC, EC and PM_{2.5} emission factors because of their relatively insufficient combustion, which tends to produce more pollutants. The type of stove had a greater impact on the OC and PM_{2.5} emission factors when using firewood, but had a lesser impact on the emission factors when using straw. The values in this study were slightly higher compared to the laboratory results, possibly due to the release of more pollutants from uncontrolled combustion processes in real life situations. Significant geographical differences in emission factors exist due to variations in combustion habits across different regions. The high CO₂ emission factors are distributed in the regions where coal is the main fuel, and the high OC, EC and PM_{2.5} emission factors are distributed in the regions where biomass is the main fuel. **Conclusions** Emission factors are influenced by combustion habits such as the type of fuel and stove. Therefore, localization of emission factors is helpful for obtaining more accurate emission inventories. **Recommendations and perspectives** The findings of this study address the existing gap in regional emission factors, which can significantly reduce the variability of emission results, and provide basic data for assessing pollutant emissions from rural areas in China. Further investigation is necessary to identify specific reasons for differences between field and laboratory measurements, as the complex influences of field measurements can significantly impact emissions.

Key words: rural areas; western China; solid fuels; pollution emission; emission factor

生物质、散煤等固体燃料是我国农村地区烹饪、取暖的主要能源。2016 年我国农村生活用生物质用能约为 1.3 亿 t 标准煤 (廖华, 2019), 我国乡村每年民用煤约为 2 亿 t (徐银鸿等, 2020)。由于民用炉灶燃烧效率低, 且燃烧产生的大量污染物直接排放到大气中, 造成区域空气质量下降, 损害人体健康, 已成为影响区域空气质量和农村居民

身体健康的重要污染源之一 (曹军骥, 2014; 张玥等, 2018)。根据 2018 年中国能源统计年鉴, 我国农村生活能源消费占比西部 (40.18%) 大于中部 (30.45%) 和东部 (29.37%)。且西部冬季寒冷, 有较强的取暖需求, 但经济发展相对落后, 清洁取暖改造工作尚未完全覆盖, 因此西部农村地区固体燃料燃烧污染物的排放贡献较高 (支国瑞等,

2015)。

较为准确地估算区域污染物排放量是进行区域空气污染治理的基础条件。排放量的计算建立在活动数据和排放因子 (emission factors, EFs) 之上, 当活动数据确定时, 排放因子成为表征排放量的重要参数。欧美发达国家对排放源清单开发的研究起步较早, 开展了大量有关污染源的污染物排放测试, 测定了基于现场测试的各类污染源大气污染物排放因子, 建立了系统的排放因子数据库 (Zhang and Morawska, 2002; Cheruiyot et al., 2016; Maffia et al., 2020)。我国此类工作起步较晚, 早期大多采用国外的排放因子数据库, 但国内区域燃料种类不同, 以及燃烧习惯的不同均会导致污染物的排放存在较大差异 (田贺忠等, 2002; 田贺忠等, 2011)。2000 年以来, 我国也逐步开展了一些排放因子测试工作 (王丽涛等, 2005; Huang et al., 2012), 对于固体燃料燃烧污染物排放因子的测试工作, 以实验室模拟燃烧居多, 测定的污染物多限于 2—3 种 (Shen et al., 2011; Chen et al., 2015), 沈国峰 (2012)、Weyant et al. (2019) 也进行了一些现场排放因子测定工作。目前对于较大地域范围, 多种燃料与炉灶结合, 多种污染物排放因子的现场测定工作还较为缺乏。

本研究以我国西部农村地区为研究区域, 设计建立了一套便携式稀释采样系统, 经过实地调查采样, 测定污染物的排放量, 计算得到 CO_2 、 CO 、 OC 、 EC 、 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放因子, 以实现排放因子本地化, 有助于完善现有排放因子库, 对估算大气污染物排放量、制定排放清单和节能减排措施具有重要意义。

1 采样与方法

1.1 采样点选取

2018—2019 年采用分层随机抽样的方式在我国西部 9 个省/自治区 (甘肃、贵州、宁夏、青海、四川、陕西、新疆、云南、西藏) 农村地区进行实地采样 (图 1)。抽样主要根据空间位置从每个城市中随机选择 1—3 个县, 每个县选择 1—2 个村庄和一定数量的家庭, 每个家庭进行 1 次燃烧采样。

1.2 测量系统

使用的装置为自行组装的便携式烟气采样系

统 (图 2)。采样系统主要由四部分组成: 稀释腔、切割头、在线监测装置和采样装置。采样时, 采样探头放置在烟囱出口中心附近 (有烟囱的炉子) 或炉子出烟口 (没有烟囱的炉子), 通过内置泵将烟气吸入管道并进入稀释腔, 通过调节稀释比对烟气进行稀释 (2—10 倍), 稀释后的烟气在流量计的控制下以 $16.7 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度通过 $\text{PM}_{2.5}$ 切割头, $\text{PM}_{2.5}$ 以约 $3.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度收集在三个平行的石英滤膜上 (直径 37 mm), CO 和 CO_2 浓度由在线监测仪器烟气分析仪在线测量 (斯柯森, 广州), 采样系统的可靠性见 Liu et al. (2021) 的研究。



地图矢量文件来源于国家地理信息公共服务平台 (<https://map.tianditu.gov.cn/>), 审图号: GS(2023)336 号。

图 1 研究区域和采样点

Fig. 1 Research area and sampling sites

1.3 样品采集

采集样品时 (图 3), 抽样家庭按照日常操作在炉具中燃烧生物质或煤。炉具和燃料均能代表研究地区的普遍情况, 其中炉具包括炕、砖灶、金属炉 (具有不同的外观和结构); 燃料包括农作物秸秆、薪柴、煤 (具有不同的种类)。总体看, 炕使用最多的燃料为生物质, 砖灶燃烧各种不同的燃料, 金属炉主要燃烧煤。共收集 226 组有效石英滤膜样本, 同时在线测量了 226 个样本的 CO 浓度和 CO_2 浓度。

1.4 实验分析和质量控制

使用精度为 $1 \mu\text{g}$ 的电子天平 (Mettler M3, 瑞

士)对石英滤膜进行称重。采样前先将石英滤膜置于马弗炉中 800℃ 高温煅烧 3 h, 去除空白滤膜本身携带的相关污染物。称重前后, 滤膜均在温度为 21—25℃、相对湿度为 45%—55% 的恒温恒

湿箱中放置 24 h 达到平衡。为保证称量质量, 每个样品至少称量 2 次, 3 个平行滤膜之间 $PM_{2.5}$ 质量浓度的平均相对误差为 15%。计算排放浓度时, 测量并减去滤膜 $PM_{2.5}$ 的背景浓度。

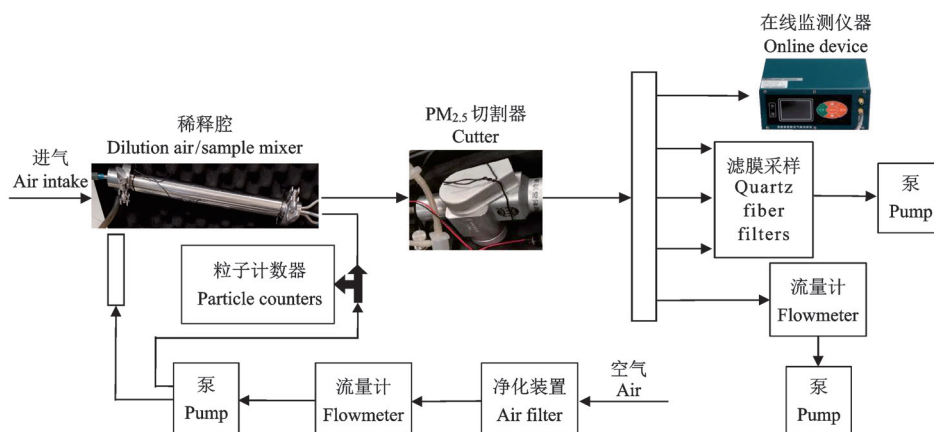


图2 采样装置示意图

Fig. 2 Diagram of sampling system



图3 实地采样

Fig. 3 Sampling tests in this work

应用 IMPROVE_A 协议所规定的热光反射法 (TOR) (Chow, 1995), 采用热-光碳分析仪 (DRI Model 2001, Atmoslytic, 美国) 测试 OC 和 EC, 主要测试原理: 在无氧纯氮的环境下, 分别在 140℃ (对应 OC1)、280℃ (对应 OC2)、480℃ (对应 OC3) 和 580℃ (对应 OC4) 热解有机碳。然后再将样品置于 98% 氮气混合 2% 氧气的环境下, 分别于 580℃ (对应 EC1)、740℃ (对应 EC2) 和 840℃ (对应 EC3) 逐步升温加热释放 EC。热光炉中含碳组分经 MnO_2 催化氧化生成

CO_2 , 再还原为 CH_4 。最后利用火焰离子检测器 (FID) 对其进行定量检测。最终 $OC=OC1+OC2+OC3+OC4+OP$ (裂解碳), $EC=EC1+EC2+EC3+OP$ (田鹏山等, 2016)。仪器在运行前后均使用 CH_4 和 CO_2 标准气体进行校准。每分析 10 个样品至少选取 1 个样品进行复检, 复检样品的 TC 浓度偏差 < 5%, OC 和 EC 的浓度偏差 < 10%。共分析 226 个样品, 其中包含平行样品 27 个, 平行样品的偏差平均值分别为 1.9% (OC) 和 3.2% (EC)。

1.4 计算方法

采用碳平衡法计算排放因子 (Zhang et al., 2000), 计算公式简化为 (沈国锋, 2012):

$$q = (C_{CO} + C_{THC} + C_{PM}) \div C_{CO_2} \quad (1)$$

$$N_{CO_2} = C_{fuel} \times f' \div (1 + q) \quad (2)$$

$$N_X = N_{CO_2} \times M_X \div M_{CO_2} \quad (3)$$

式中: q 为不完全燃烧系数; C_{CO} 、 C_{CO_2} 、 C_{THC} 和 C_{PM} 分别为 CO 、 CO_2 、总碳氢和颗粒物中的 C 质量, 单位为 g; N_{CO_2} 为 CO_2 的排放因子, 单位为 $g \cdot kg^{-1}$; C_{fuel} 为燃料的含碳量, 单位为 $g \cdot kg^{-1}$; f' 为 CO_2 中 C 和 CO_2 的转换因子, 取 3.67; N_X 为污染物 X 的排放因子, 单位为 $g \cdot kg^{-1}$; M_X 和 M_{CO_2} 分别为 X 和 CO_2 的质量浓度, 单位为 $g \cdot L^{-1}$ 。

2 结果与讨论

2.1 不同类型燃料的排放因子的差异

薪柴、秸秆和煤燃烧排放 CO₂、CO、OC、EC、PM_{2.5} 的排放因子见表 1。薪柴和秸秆的 CO₂ 排放因子相似，分别为 (1596.32±109.41) g·kg⁻¹ 和 (1456.61±123.95) g·kg⁻¹，均低于煤的 (2375.30±365.28) g·kg⁻¹。薪柴的 CO 排放因子低于秸秆和煤，为 (96.42±56.23) g·kg⁻¹。三种燃料的 OC、EC 排放因子差异较小，所有燃料的 OC 排放因子都高于 EC，与 Cao et al. (2012) 和 Sun et al. (2018) 的研究一致。秸秆的 PM_{2.5} 排放因子最高，平均值

约为 (11.99±8.17) g·kg⁻¹，薪柴次之，煤最低。表明燃烧速度越快但燃烧不完全的燃料，烟气中 PM_{2.5} 的排放因子越大 (Du et al., 2018)。总体来看，煤有较高的 CO₂ 和 CO 排放因子，这是因为煤的含碳量较高；薪柴和秸秆有更高的 PM_{2.5} 和 EC 排放因子，说明它们不完全燃烧程度高于煤；秸秆的 OC 排放因子较高，与其燃烧温度较低有关，更易形成二次污染 (霍静, 2011)。由于生物质燃料燃烧容易排放更多的颗粒物，建议减少天然生物质燃料的使用量，可使用经过加工处理的生物质燃料制品 (Sun et al., 2019a; Sun et al., 2019b)。

表 1 CO₂、CO、OC、EC、PM_{2.5} 的排放因子
Tab. 1 Emission factors of CO₂, CO, OC, EC and PM_{2.5}

燃料 Fuel	样本数 Sample sizes	CO ₂ /(g·kg ⁻¹)	CO /(g·kg ⁻¹)	OC /(g·kg ⁻¹)	EC /(g·kg ⁻¹)	PM _{2.5} /(g·kg ⁻¹)
薪柴 Wood	163	1596.32±109.41	96.42±56.23	5.23±6.46	1.67±1.17	9.97±11.35
秸秆 Straw	37	1456.61±123.95	131.65±55.47	5.82±4.19	1.53±1.03	11.99±8.17
煤 Coal	26	2375.30±365.28	147.11±126.92	5.02±7.03	1.18±1.33	8.61±12.58

与实验室燃烧模拟结果对比可知 (表 2)：本研究中薪柴的 CO₂、CO、EC、PM_{2.5} 排放因子与沈国锋 (2012)、孔少飞等 (2014) 的结果相似，OC 排放因子高约 1.5 倍；与祝斌等 (2005) 部分样本、孔少飞等 (2014)、田杰 (2016) 的结果相比，秸秆的 PM_{2.5} 排放因子相似，OC、EC 排放因子均偏高，但在沈国锋 (2012) 的结果范围内，可能与秸秆种类和炉具类型不同有关；与沈国锋 (2012)、孔少飞等 (2014) 的结果相比，煤的 CO₂、CO、OC、PM_{2.5} 排放因子相似，EC 排放因子高约 1.3 倍，可能与煤的种类有关。与实验室结果相比，本研究总体数值普遍偏高一些，可能由于实验室能更精准地控制燃料细节和燃烧过程，而实际生活中由于各种因素的限制，不受控的燃烧条件可能比实验室测量释放更多的污染物 (Du et al., 2018)。根据沈国锋 (2012) 的研究，生物质燃料的湿度、密度、元素组成、挥发分性质参数，单个因素与排放因子没有显著关联性；煤炭的挥发性组分和热值等性质对燃烧状况和污染物排放有直接影响，挥发性组分较高的煤炭在燃烧时不易完全燃烧，不完全燃烧产物排放较高。

2.2 炉灶类型对排放因子的影响

现场燃烧取样可以反映燃料炉灶类型和燃烧习惯的不同对排放因子的影响。由图 4 可知：对薪柴来说，在砖灶中燃烧，其 CO₂ 排放因子最大，金属炉次之，炕最小；在炕中燃烧，其 CO、OC、EC、PM_{2.5} 排放因子最大，金属炉次之，砖灶最小；且在三种炉灶中燃烧，其 CO₂、CO、EC 排放因子差异相对较小，但在炕中燃烧，其 OC 和 PM_{2.5} 排放因子比另两种炉灶高约 2—3.1 倍，这与炕中燃烧方式多为焖烧有关。对秸秆来说，在三种炉灶中燃烧，其 CO₂、OC、PM_{2.5} 排放因子差异较小，其中炕和砖灶的数据十分接近；金属炉中的 CO 排放因子分别是炕和砖灶的 1.5 倍和 1.3 倍，EC 排放因子分别是炕和砖灶的 2.1 倍和 1.5 倍。总体来看，炉灶类型对薪柴的 OC 和 PM_{2.5} 排放因子影响较大，对秸秆的排放因子影响较小。

一般而言，燃烧效率越高的炉灶燃料燃烧越完全，产生更少的颗粒物，PM_{2.5} 排放因子越小 (Coffey et al., 2017)，但 Thompson et al. (2019) 的实验显示砖炉燃烧生物质的 PM 排放因子比金属炉燃烧生物质的 PM 排放因子略小。这可能是

由于燃料种类和炉灶种类不同, 导致排放因子的大小规律发生变化。根据图 4e, 金属炉中燃烧薪柴的 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子大于砖灶, 与 Thompson et al. (2019) 的实验结果一致。与秸秆和薪柴相比, 在金属炉中燃烧煤的 CO_2 排放因子较高, CO 、 EC 、 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子较低, 说明煤在铁炉中燃烧更完全, 产生较少的污染。与秸秆相比, 在炕中

燃烧薪柴的 CO_2 排放因子较低, CO 、 OC 、 EC 、 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子较高, 说明燃烧更不完全, 产生更多的污染、更易发生二次污染; 但在砖灶中结果相反, 薪柴燃烧产生的污染物少于秸秆。建议对低性能炉灶进行改造, 提升燃烧效率, 避免在燃烧效率高的炉具中烧生物质燃料, 能减少农村固体燃料污染物的排放 (Sun et al., 2017)。

表 2 文献中 CO_2 、 CO 、 OC 、 EC 、 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放因子
Tab. 2 Emission factors of CO_2 , CO , OC , EC and $\text{PM}_{2.5}$ in previous literature

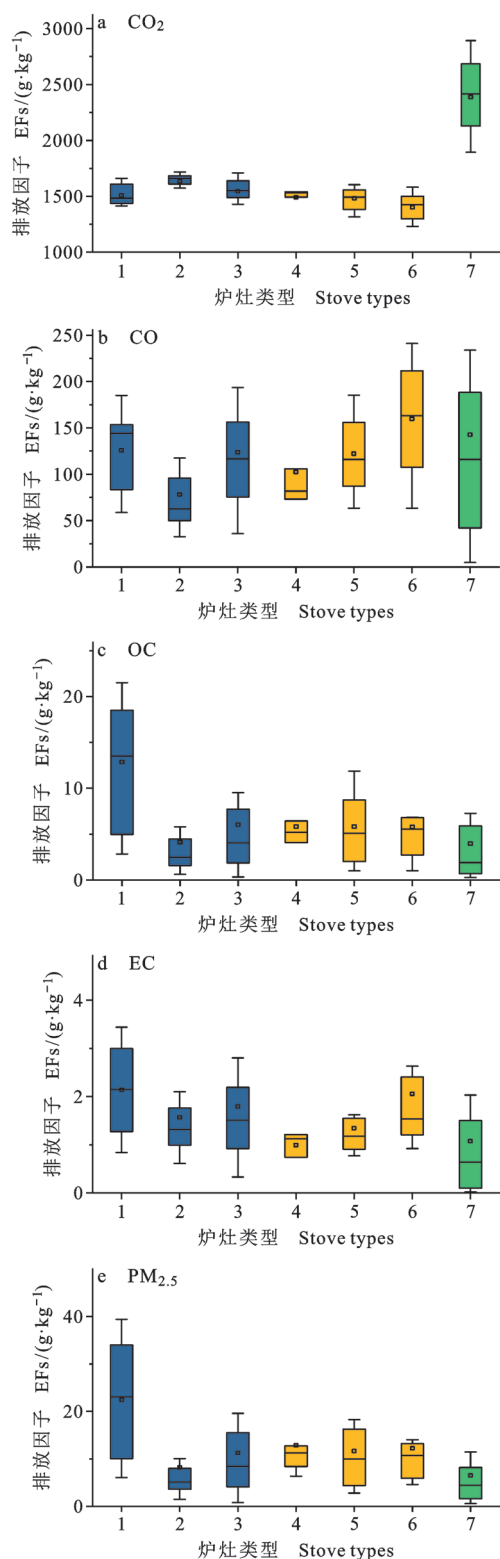
燃料 Fuel	CO_2 /($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	CO /($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	OC /($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	EC /($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$\text{PM}_{2.5}$ /($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	备注 Note	参考文献 References
薪柴 Wood	—	32.75—140.0	0.13—3.81	0.10—2.49	—	实验室模拟室内燃烧 Laboratory measurement	沈国锋, 2012 (Shen G F, 2012)
薪柴 Wood	—	—	3.460 ± 1.199	1.065 ± 0.314	7.539—10.444	实验室模拟室内燃烧 Laboratory measurement	孔少飞等, 2014 (Kong S F et al., 2014)
秸秆 Straw	1140—1520	72.3—215	0.354—2.34	0.493—2.64	—	实验室模拟室内燃烧 Laboratory measurement	沈国锋, 2012 (Shen G F, 2012)
秸秆 Straw	—	—	—	—	7.2—39.0	实验室模拟明燃燃烧 Laboratory measurement	祝斌等, 2005 (Zhu B et al., 2005)
秸秆 Straw	—	—	3.603 ± 0.355	0.098 ± 0.018	7.539—10.444	实验室模拟室内燃烧 Laboratory measurement	孔少飞等, 2014 (Kong S F et al., 2014)
秸秆 Straw	—	—	3.49 ± 1.64	0.31 ± 0.11	8.76 ± 3.47	实验室模拟室内燃烧 Laboratory measurement	田杰, 2016 (Tian J, 2016)
煤 Coal	1810—2290	112—288	0.104—1.00	0.006—0.825	—	实验室模拟室内燃烧 Laboratory measurement	沈国锋, 2012 (Shen G F, 2012)
煤 Coal	—	—	5.286 ± 1.044	0.915 ± 0.267	9.873	实验室模拟室内燃烧 Laboratory measurement	孔少飞等, 2014 (Kong S F et al., 2014)
煤 Coal	—	—	0.51—1.41	0.003—7.528	1.73—20.82	实验室可控式燃烧 Laboratory measurement	程晋俊, 2019 (Cheng J J, 2019)

2.3 排放因子的空间分布

收集到的样本参照祝斌等 (2005) 以及田杰 (2016) 的计算方法, 基于各省/自治区排放因子算术平均得到排放因子空间分布。2018 年我国西部地区主要固体燃料污染物排放因子分布见图 5, 可知 CO_2 、 CO 、 OC 、 EC 、 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子存在明显的地域差异。高 CO_2 排放因子分布在以煤为主要燃料的区域, 如新疆; 高 CO 排放因子分布在以煤和秸秆为主要燃料的区域, 如青海、宁夏; 以薪柴和秸秆为主要燃料的区域, OC 、 EC 、 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子较高, 如云南, 这些规律与前述结论吻合。总体来看, CO 、 OC 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放因子变化较为一致, 高 CO 、 OC 、 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子通常代表不完全燃烧程度较高, 因此这 3 个排放因子

表现出弱的相关性, 云南、青海、甘肃和宁夏均为高因子区域。与 Liu et al. (2021) 结果相比, 高 CO 和高 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子区域为青海、宁夏、甘肃、云南, 基本符合在相对欠发达地区, 生物质燃料丰富且消耗多, 块煤、有烟煤使用的多, 容易产生更多的污染物 (由于西藏地区样本量较少, 仅供参考)。

本研究是按大类划分燃料类型和炉灶类型, 实际上对于同一类型燃料, 细分不同品种, 如水稻秆、玉米秆、小麦的秆排放因子是不同的 (吴剑, 2021), 因此同一炉型同一燃料类型在不同地区排放因子存在差异。今后应对燃料和炉具类型进行细化, 进一步探索同一燃料同一炉型在不同地区排放因子是否存在差异。

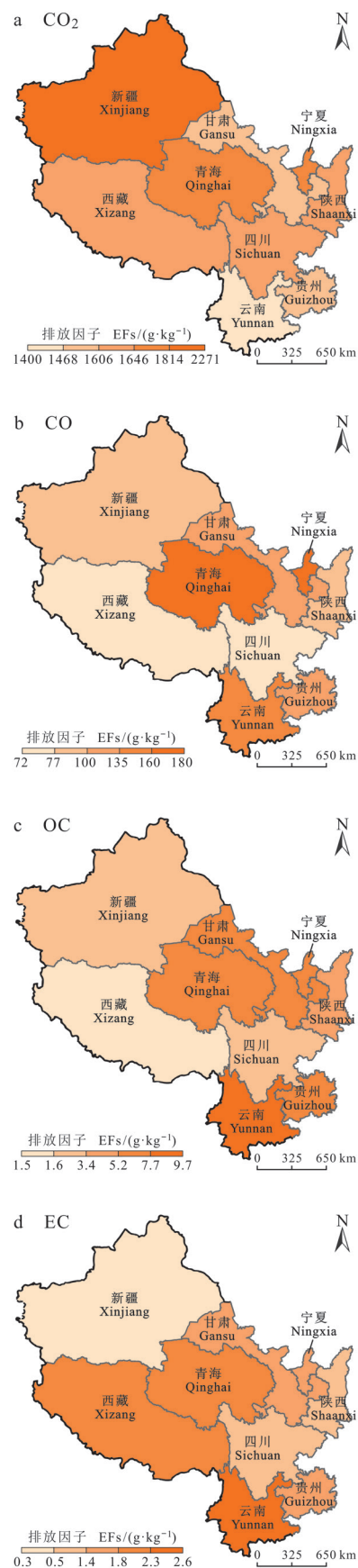


1: 炕-W; 2: 砖灶-W; 3: 铁炉-W; 4: 炕-S; 5: 砖灶-S; 6: 铁炉-S; 7: 铁炉-C。

1: Kang-W; 2: brick-W; 3: metal-W; 4: Kang-S; 5: brick-S; 6: metal-S; 7: metal-C.

图 4 薪柴 (W)、秸秆 (S) 和煤 (C) 在三种炉灶中的排放因子

Fig. 4 Emission factors from various stove-fuel combinations (W for fuel wood, S for straw, C for coal)



(待续 To be continued)

(续图5 Continued Fig. 5)



地图矢量文件来源于国家地理信息公共服务平台 (<https://map.tianditu.gov.cn/>), 审图号: GS(2023)336号。

图5 各排放因子的省域分布
Fig. 5 Provincial distribution of emission factors

3 结论

通过对我国西部地区典型固体燃料燃烧排放烟气进行现场采样, 获得薪柴、秸秆和煤在不同炉灶中燃烧的 CO_2 、 CO 、 OC 、 EC 、 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子。结果如下:

(1) 煤的 CO_2 和 CO 排放因子分别为 $(2375.30 \pm 365.28) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(147.11 \pm 126.92) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均大于薪柴和秸秆, 与煤的含碳量较高有关。秸秆和薪柴有较高的 OC 、 EC 和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子, 与它们燃烧相对不充分, 容易产生更多的污染物有关。与实验室结果相比, 本研究总体数值普遍偏高, 可能由于实验室能更精准地控制燃料和燃烧过程, 而实际生活中不受控的燃烧过程会释放更多的污染物。

(2) 炉灶类型对薪柴的 OC 和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子影响较大, 在炕中燃烧, 其 OC 和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子比砖灶和金属炉高约 2—3.1 倍; 但炉灶类型对秸秆的排放因子影响较小。用铁炉烧煤以及用砖灶烧薪柴, 可减少农村固体燃料燃烧污染物的排放。

(3) 由于不同地区燃烧习惯的差异, CO_2 、 CO 、 OC 、 EC 、 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子存在明显的地域差异。高 CO_2 排放因子分布在以煤为主要燃料的区域, 高 OC 、 EC 、 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子分布在以生物质为主要燃料的区域。

研究结果填补了区域性固体燃料燃烧排放因子

数据库, 可提高排放量估算的准确性, 为评估我国农村地区污染物排放量提供基础数据。由于现场测量复杂的影响因素对排放有较大影响, 应进一步寻找现场和实验室测量之间差异的具体原因。

致谢: 感谢支持本研究及参与现场采样的李伟生、姚懿、李致宇等人。

参考文献

- 曹军骥. 2014. $\text{PM}_{2.5}$ 与环境 [M]. 北京: 科学出版社. [Cao J J. 2014. $\text{PM}_{2.5}$ and the environment in China [M]. Beijing: Science Press.]
- 程晋俊. 2019. 民用燃煤细颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$) 及其化学组分排放特征研究 [D]. 武汉: 江汉大学. [Cheng J J. 2019. Emission characteristics of fine particulate matter ($\text{PM}_{2.5}$) and its chemical components emitted from residential coal combustion [D]. Wuhan: Jiangnan University.]
- 霍静. 2011. 天津市 $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2.5}$ 中有机碳和元素碳的研究 [D]. 天津: 南开大学. [Huo J. 2011. Study on organic carbon and elemental carbon in $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2.5}$ in Tianjin [D]. Tianjin: Nankai University.]
- 孔少飞, 白志鹏, 陆炳. 2014. 民用燃料燃烧排放 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 中碳组分排放因子对比 [J]. 中国环境科学, 34(11): 2749–2756. [Kong S F, Bai Z P, Lu B. 2014. Comparative analysis on emission factors of carbonaceous components in $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} from domestic fuels combustion [J]. China Environmental Science, 34(11): 2749–2756.]
- 廖华. 2019. 中国农村居民生活用能现状、问题与应对 [J]. 北京理工大学学报 (社会科学版), 21(2): 1–5. [Liao H. 2019. Residential energy consumption in rural China: situation, problems and solutions [J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 21(2): 1–5.]
- 沈国锋. 2012. 室内固体燃料燃烧产生的碳颗粒和多环芳烃的排放因子及影响因素 [D]. 北京: 北京大学. [Shen G F. 2012. Emission factors and influencing factors of carbon particles and polycyclic aromatic hydrocarbons produced by indoor solid fuel combustion [D]. Beijing: Peking University.]
- 田鹏山, 曹军骥, 韩永明, 等. 2016. 关中地区冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 中碳气溶胶的污染特征及来源解析 [J]. 环境科学, 37(2): 427–433. [Tian P S, Cao J J, Han Y M, et al. 2016. Pollution characteristics and sources of carbonaceous aerosol in $\text{PM}_{2.5}$ during winter in Guanzhong area [J].

- Environmental Science*, 37(2): 427–433.]
- 田贺忠, 郝吉明, 陆永琪, 等. 2002. 中国生物质燃烧排放 SO_2 、 NO_x 量的估算 [J]. *环境科学学报*, 22(2): 204–208. [Tian H Z, Hao J M, Lu Y Q, et al. 2002. Evaluation of SO_2 and NO_x emissions resulted from biomass fuels utilization in China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 22(2): 204–208.]
- 田贺忠, 赵丹, 王艳. 2011. 中国生物质燃烧大气污染物排放清单 [J]. *环境科学学报*, 31(2): 349–357. [Tian H Z, Zhao D, Wang Y. 2011. Emission inventories of atmospheric pollutants discharged from biomass burning in China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 31(2): 349–357.]
- 田杰. 2016. 基于实验室模拟我国农作物秸秆与家用煤炭燃烧的 $\text{PM}_{2.5}$ 排放特征研究 [D]. 西安: 中国科学院大学 (中国科学院地球环境研究所). [Tian J. 2016. Laboratory study on emission characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ from crop residue burning and residential coal combustion in China [D]. Xi'an: Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences.]
- 王丽涛, 张强, 郝吉明, 等. 2005. 中国大陆 CO 人为源排放清单 [J]. *环境科学学报*, 25(12): 1580–1585. [Wang L T, Zhang Q, Hao J M, et al. 2005. Anthropogenic CO emission inventory of China's mainland [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 25(12): 1580–1585.]
- 吴剑. 2021. 中国生物质燃烧常规污染物和关键组分排放清单构建及应用研究 [D]. 武汉: 中国地质大学. [Wu J. 2021. The establishment and application of emission inventory for routine air pollutants and key species from biomass burning in China [D]. Wuhan: China University of Geosciences.]
- 徐银鸿, 李闯, 张文廷, 等. 2020. 中国北方典型地区农村清洁取暖调研分析及思考 [J]. *农学报*, 10(3): 31–37. [Xu Y H, Li C, Zhang W T, et al. 2020. Current status and implication of clean energy heating: field survey in typical areas of rural northern China [J]. *Journal of Agriculture*, 10(3): 31–37.]
- 张玥, 张宇, 王志成. 2018. 北方地区农村住宅室内空气污染现状分析 [J]. *化学与黏合*, 40(6): 461–463. [Zhang Y, Zhang Y, Wang Z C. 2018. Analysis of indoor air pollution in rural residences in northern China [J]. *Chemistry and Adhesion*, 40(6): 461–463.]
- 支国瑞, 杨俊超, 张涛, 等. 2015. 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*, 28(8): 1179–1185. [Zhi G R, Yang J C, Zhang T, et al. 2015. Rural household coal use survey, emission estimation and policy implications [J]. *Research of Environmental Sciences*, 28(8): 1179–1185.]
- 祝斌, 朱先磊, 张元勋, 等. 2005. 农作物秸秆燃烧 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子的研究 [J]. *环境科学研究*, 18(2): 29–33. [Zhu B, Zhu X L, Zhang Y X, et al. 2005. Emission factor of $\text{PM}_{2.5}$ from crop straw burning [J]. *Research of Environmental Sciences*, 18(2): 29–33.]
- Cao J J, Huang H, Lee S C, et al. 2012. Indoor/outdoor relationships for organic and elemental carbon in $\text{PM}_{2.5}$ at residential homes in Guangzhou, China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 12(5): 902–910.
- Chen Y J, Tian C, Feng Y L, et al. 2015. Measurements of emission factors of $\text{PM}_{2.5}$, OC, EC, and BC for household stoves of coal combustion in China [J]. *Atmospheric Environment*, 109: 190–196.
- Cheruiyot N K, Lee W J, Yan P, et al. 2016. An overview of PCDD/F inventories and emission factors from stationary and mobile sources: what we know and what is missing [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 16(12): 2965–2988.
- Chow J C. 1995. Measurement methods to determine compliance with ambient air quality standards for suspended particles [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association* (1995), 45(5): 320–382.
- Coffey E R, Muvandimwe D, Hagar Y, et al. 2017. New emission factors and efficiencies from in-field measurements of traditional and improved cookstoves and their potential implications [J]. *Environmental Science & Technology*, 51(21): 12508–12517.
- Du W, Zhu X, Chen Y C, et al. 2018. Field-based emission measurements of biomass burning in typical Chinese built-in-place stoves [J]. *Environmental Pollution*, 242(Pt B): 1587–1597.
- Huang X, Li M M, Li J F, et al. 2012. A high-resolution emission inventory of crop burning in fields in China based on MODIS Thermal Anomalies/Fire products [J]. *Atmospheric Environment*, 50: 9–15.
- Liu X L, Shen G F, Chen L G, et al. 2021. Spatially resolved emission factors to reduce uncertainties in air pollutant emission estimates from the residential sector [J]. *Environmental Science & Technology*, 55(8): 4483–4493.

- Maffia J, Dinuccio E, Amon B, et al. 2020. PM emissions from open field crop management: emission factors, assessment methods and mitigation measures— a review [J]. *Atmospheric Environment*, 226: 117381. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2020.117381.
- Shen G F, Wang W, Yang Y F, et al. 2011. Emissions of PAHs from indoor crop residue burning in a typical rural stove: emission factors, size distributions, and gas-particle partitioning [J]. *Environmental Science & Technology*, 45(4): 1206–1212.
- Sun J, Shen Z X, Cao J J, et al. 2017. Particulate matters emitted from maize straw burning for winter heating in rural areas in Guanzhong Plain, China: current emission and future reduction [J]. *Atmospheric Research*, 184: 66–76.
- Sun J, Shen Z X, Zhang Y, et al. 2019a. Characterization of PM_{2.5} source profiles from typical biomass burning of maize straw, wheat straw, wood branch, and their processed products (briquette and charcoal) in China [J]. *Atmospheric Environment*, 205: 36–45.
- Sun J, Shen Z X, Zhang Y, et al. 2019b. Effects of biomass briquetting and carbonization on PM_{2.5} emission from residential burning in Guanzhong Plain, China [J]. *Fuel*, 244: 379–387.
- Sun J Z, Zhi G R, Jin W J, et al. 2018. Emission factors of organic carbon and elemental carbon for residential coal and biomass fuels in China— a new database for 39 fuel-stove combinations [J]. *Atmospheric Environment*, 190: 241–248.
- Thompson R J, Li J H, Weyant C L, et al. 2019. Field emission measurements of solid fuel stoves in Yunnan, China demonstrate dominant causes of uncertainty in household emission inventories [J]. *Environmental Science & Technology*, 53(6): 3323–3330.
- Weyant C L, Chen P F, Vaidya A, et al. 2019. Emission measurements from traditional biomass cookstoves in South Asia and Tibet [J]. *Environmental Science & Technology*, 53(6): 3306–3314.
- Zhang J J, Morawska L. 2002. Combustion sources of particles: 2. Emission factors and measurement methods [J]. *Chemosphere*, 49(9): 1059–1074.
- Zhang J, Smith K R, Ma Y, et al. 2000. Greenhouse gases and other airborne pollutants from household stoves in China: a database for emission factors [J]. *Atmospheric Environment*, 34(26): 4537–4549.