

王艳妮,杨敬婷,程 燕,等.贵州省户用生物质炉具 $\text{PM}_{2.5}$ 和碳质组分排放因子 [J]. 中国环境科学, 2023,43(5):2138-2151

Wang Y N, Yang J T, Cheng Y, et al. Emission factors of $\text{PM}_{2.5}$ and carbonaceous aerosols from household biomass stoves in Guizhou Province [J]. China Environmental Science, 2023,43(5):2138-2151

贵州省户用生物质炉具 $\text{PM}_{2.5}$ 和碳质组分排放因子

王艳妮^{1,2},杨敬婷²,程 燕¹,陆 标³,顾兆林^{1*} (1.西安交通大学人居环境与建筑工程学院,陕西 西安 710054; 2.贵州省环境科学研究设计院,贵州 贵阳 550081; 3.贵州大学资源与环境工程学院,贵州 贵阳 550025)

摘要: 为实现贵州省户用生物质炉具细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)和碳质组分排放因子本地化,利用自主搭建和改造的烟气污染物稀释采样测试系统,对 8 种农村常见生物质燃料开展户用生物质炉具排放污染物的采集和分析.考虑生物质燃料类型、炉具类型和燃料预处理方式,共设置了 48 种模拟情景实验,通过稀释倍数法采样计算烟气中 $\text{PM}_{2.5}$ 和碳质组分排放因子.结果表明:贵州省户用生物质炉具燃烧薪柴和秸秆 $\text{PM}_{2.5}$ 、元素碳(EC)和有机碳(OC)排放因子的均值范围分别为 2.63~69.93、0.24~5.87 和 1.54~19.44g/kg;EC 和 OC 是 $\text{PM}_{2.5}$ 中主要组成成分,不同生物质燃料 OC/EC 值有一定差异;生物质燃烧主要释放 OC2~OC4 及 EC1,尤其是较高的 OC3 或 EC1 质量分数是贵州省本地燃料的主要特征之一.

关键词: 生物质燃料; 户用生物质炉具; 细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$); 元素碳; 有机碳; 排放因子

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2023)05-2138-14

Emission factors of $\text{PM}_{2.5}$ and carbonaceous aerosols from household biomass stoves in Guizhou Province. WANG Yan-ni^{1,2}, YANG Jing-ting², CHENG Yan¹, LU Biao³, GU Zhao-lin^{1*} (1.School of Human Settlement and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China; 2.Guizhou Institute of Environmental Sciences Research and Design, Guiyang 550081, China; 3.College of Resources and Environment Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China). *China Environmental Science*, 2023,43(5): 2138~2151

Abstract: A modified dilution sampling system for the emission pollutants from household biomass stoves was developed to test eight common rural biomass fuels and thus to realize the localization of the emission factors (EFs) of fine particulate matter ($\text{PM}_{2.5}$) and carbonaceous aerosols. Considering the different types of biomass fuel, stove, and fuel pretreatment method, a total of 48 simulated scenario experiments were set up to quantify the $\text{PM}_{2.5}$ in the flue gas and carbonaceous component emission factors. The results show that the average provincial EFs of $\text{PM}_{2.5}$, element carbon (EC) and organic carbon (OC) for firewood and all biomass straw ranged from 2.63~69.93, 0.24~5.87 and 1.54~19.44g/kg, respectively. EC and OC were the major components of $\text{PM}_{2.5}$ and their ratio slightly varied with biomass fuels. OC2, OC3, OC4 and EC1 were the main components released from residential biomass combustion, especially a higher mass fraction of OC3 or EC1 was one of major characteristics of residential biomass combustion in Guizhou Province.

Key words: biomass fuel; household biomass stoves; fine particulate matter; elemental carbon; organic carbon; emission factor

户用生物质炉具的燃烧效率低,燃料消耗量大,排放大量一次颗粒物及不完全燃烧污染物,是不可忽视的大气污染、危害人体健康的源头^[1].含碳颗粒物中的碳组分按其性质可通常分为元素碳(EC 或 BC)和有机碳(OC)^[2],不同领域的研究往往将 EC 与 BC 通用,采用热学和热光学仪器分析得到的为 EC,采用光学仪器测量的为 BC^[3],是短期气候污染物(SLCP)的首要物质,OC 中具有吸光性的部分影响大气光化学反应以及臭氧的产生.污染物生成模拟和排放研究是识别污染来源的初始环节,也是制订污染控制策略的根本依据,近些年针对中国地区的生物质燃烧排放清单研究表明^[4-8],户用生物质炉具排

放 $\text{PM}_{2.5}$ 、EC 和 OC 最高占生物质燃烧源总排放量的 70.00%左右,也有针对城市的研究,如西宁市^[9]生物质燃烧源中户用生物质炉具排放 $\text{PM}_{2.5}$ 、BC 和 OC 分别占 32.30%、31.62%和 30.95%,南京市^[10]分别占 57.95%、66.67%和 60.23%.

在排放清单建立过程中,活动水平数据和排放因子是影响其可靠性的主要因素.根据国内外学者的研究结果可知^[2,11-27],户用生物质炉具大气污染物

收稿日期: 2022-10-17

基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目(黔科中引地[2022]4056);贵州省基础研究计划项目(黔科合基础-ZK[2022]一般 239);国家自然科学基金资助项目(41967031)

* 责任作者, 教授, guzhaolin@mail.xjtu.edu.cn

排放因子具有明显的地域特征,由于采用的研究方法不尽相同,导致排放因子范围较大,薪柴排放的 PM_{2.5}、BC 和 OC 相差最高可达 79.35 倍,水稻秸秆最高达 87.90 倍,玉米秸秆最高达 425.65 倍,大豆秸秆最高达 115.25 倍等.贵州省是喀斯特地貌典型发育的山区省份,经济相对落后,环境空气质量总体优良,2021 年全省 9 个中心城市 AQI 优良天数平均比例为 98.40%,88 个县(市、区、特区)AQI 优良天数比例平均为 98.60%^[28],巩固提升环境空气质量的关键在于大气污染防治精细化管理,准确掌握污染源排放情况,迫切 need 加强相关的测试研究,提高排放因子的可靠性.在户用生物质炉具排放因子测试方面,大多采用实验室模拟方法^[11,13-22],燃烧装置与真实炉具燃烧排放有一定差异.

本研究利用自行设计、自主搭建和改造的烟气污染物稀释采样测试系统,在农村住户厨房模拟户用生物质排放,考虑燃烧过程中不同生物质燃料、不同炉具和不同燃料预处理方式对污染物排放的影响,对 PM_{2.5} 及其碳质组分(EC 和 OC)的排放因子进行实测,实现贵州省户用生物质炉具 PM_{2.5} 和碳质组分排放因子本地化,为编制排放清单提供精确可靠的数据.

1 材料与方法

1.1 生物质燃料的选择

表 1 生物质燃料含水率(%)
Table 1 Moisture content of biomass fuel (%)

生物质燃料名称	烘干	风干	未处理
薪柴	2.47	11.02	11.18
水稻秸秆	3.84	8.82	9.48
玉米秸秆	3.65	9.13	9.87
辣椒秸秆	1.67	8.73	10.58
大豆秸秆	1.67	9.97	11.30
小麦秸秆	5.62	8.23	9.33
油菜秸秆	4.26	10.22	11.27
高粱秸秆	2.61	—	—

注:“—”表示没有相关数据.

本次测试所用生物质燃料选取贵州省农村普遍存在的薪柴和 7 种秸秆,秸秆分别为水稻、玉米、辣椒、大豆、小麦、油菜和高粱秸秆,自然晾晒,生物质燃料采集自贵阳国家农业气象试验站和贵阳市修文县农田间.取实验所用适量生物质燃料预处

理并进行含水率分析,预处理分为烘干、风干和未处理共 3 种方式,将生物质燃料剪短至 10~15cm 长度,未进一步处理的燃料为未处理样品,置于实验室风干 24h 以上直至与环境温度、湿度相平衡的燃料为风干样品,经烘箱 65℃烘烤 4h 的燃料为烘干样品.表 1 为本研究选取的生物质燃料在不同预处理方式下的含水率分析结果.

1.2 户用生物质炉具的选择

将贵州省农村家庭常见的户用生物质炉具分为先进和传统两类,选取从市场购买的柴火炉代表先进炉具,炉体全身不锈钢材质,炉膛内径 39cm、深 15cm,不锈钢排烟管内径 10cm、高 200cm,根据实验操作需求,对炉具进行改造,在排烟管高 110cm 处设 8cm×8cm 的采样孔,并在炉栅上加装铁质滤网;选取贵阳市南明区永乐乡住户的土灶代表传统炉具,炉膛内径 46cm、深 38cm,不锈钢排烟管内径 12cm、高 210cm,对炉具进行同样的改造,其中采样孔尺寸为 10cm×10cm.

1.3 烟气污染物稀释采样测试系统

图 1 为户用生物质炉具烟气污染物稀释采样测试系统,主要由户用生物质炉具和 ZDA-PDSI-02P 型稀释通道采样器组成,其原理见相关专利^[29-32],根据实验需求对本研究组现有测试系统进行改造,在一级稀释旁路的流量计进气前加装过滤器,在烟尘采样枪中段靠后位置处的两个采样孔分别连接自动烟气分析传感器和分体耐高温防堵型风速(风量)变送器.实验过程中生物质燃料样品经过户用生物质炉具燃烧释放出烟气,经由烟尘采样枪、一级稀释箱、二级稀释箱、稀释停留仓和四通道采样箱,即通过等速采样装置,将原烟气采入一级稀释仓与一级洁净空气以一定的比例混合,多余的烟气经旁路排出;一级稀释后的烟气与二级洁净空气在二级稀释仓内以一定比例混合;利用空气动力学原理混合均匀,二级稀释后的烟气进入停留仓,模拟污染源的高温排放物到大气环境中的冷却、自然扩散、凝结、成核等过程;最后通过流量平衡控制系统,停留仓的烟气进入 A、B、C、D 通道,经过 PM_{2.5} 切割器、47mm 石英滤膜,完成对颗粒物的均匀采样.自动烟气分析传感器可对经过烟尘采样枪的烟气中 O₂、CO、CO₂ 和烟气温度进行连续实时采样及监测,风速(风量)变送器可对烟气流速进行连续实时记录.

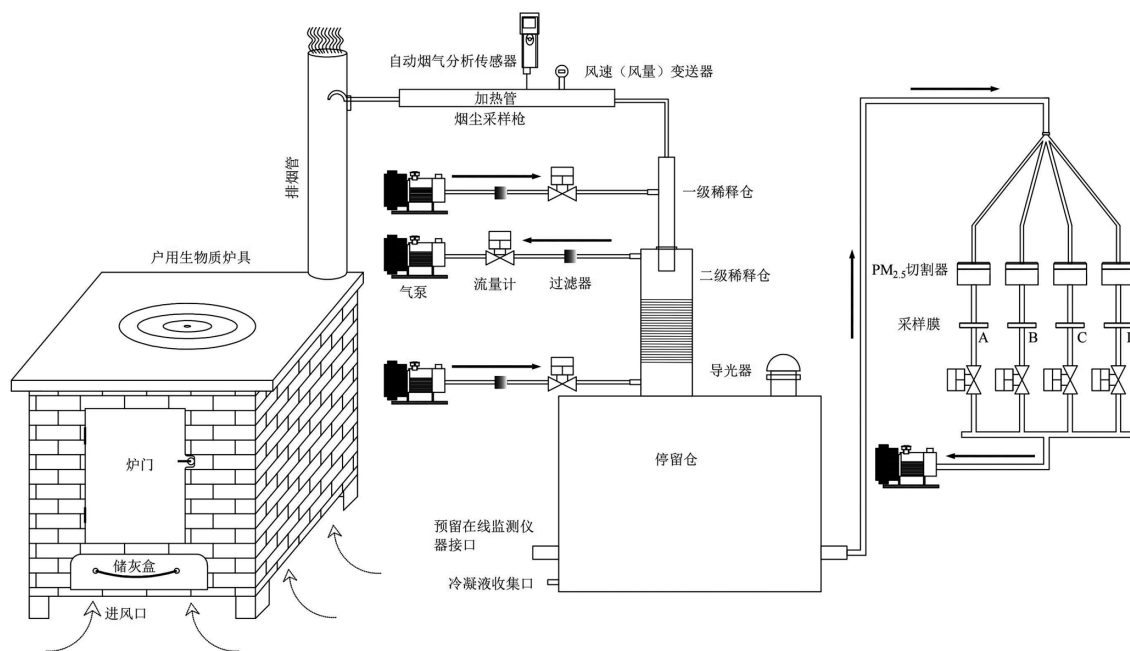


图1 生物质燃料炉燃烧排放污染物稀释采样分析系统示意

Fig.1 Diagram of dilution sampling system for the emission pollutants from household biomass stoves

1.4 模拟情景的设置

根据贵州省9个州市(贵阳市、安顺市、黔东南苗族侗族自治州、黔南布依族苗族自治州、铜仁市、黔西南布依族苗族自治州、毕节市、六盘水市和遵义市)以2019年为基准年的统计年鉴^[33-42],获取各农作物产量,进而计算出生物质理论产生量并从大到小排序,结合贵州省农村家庭使用生物质燃料习惯和燃料是否具有易燃、耐烧等特点,选取薪柴、水稻、玉米、辣椒、大豆、小麦、油菜和高粱秸秆来研究不同生物质燃料的大气污染物排放因子;为探究不同炉具对排放因子的影响,选取先进和传统炉具进行实验研究;我国幅员辽阔,区域空气相对湿度差异大^[43-45],生物质燃料在自然环境下的含水率差异大,为向不同湿度地区提供参考数据,设计不同干燥程度的燃料预处理,实现含水率分级分段以研究对排放因子的影响。综上,本研究设置8种燃料类型、2种炉具类型和3种预处理方式的不同组合方式,即48种情景模拟方案。为保证实验数据的准确性,每种模拟情景有3组以上(包含3组)平行实验,每组平行实验有A、B、C、D共4个通道,共计576个有效采样膜样品。

1.5 采样测试过程和分析方法

1.5.1 采样测试过程 采样时间为2021年8月,采样前打开气泵,调节质量流量计对流量进行控制。采

样过程一次性将0.1kg预处理后的生物质燃料样品经进料口放入预热后的炉膛内,引燃生物质燃料样品的同时开始记录实验数据,关上炉门。烟气在气泵作用下进入采样测试系统,自动烟气分析传感器读取 O_2 、 CO 、 CO_2 和烟气温度数据,分体耐高温防堵型风速(风量)变送器读取烟气流速数据,燃烧结束自动烟气分析传感器和风速(风量)变送器数据稳定后,结束对样品的采集。

1.5.2 分析方法 石英滤膜实验前在马弗炉中经过 $500^\circ C$ 、4h的高温烧灼,除去含碳化合物,冷却后放入 $20^\circ C$ 、50%相对湿度的恒温恒湿箱中进行24h平衡,然后置于洁净实验室中平衡1h,使用精度为 $10^{-6}g$ 的METTLER TOLEDO XPR2微量天平称重后,储存于膜盒中待用;采样后滤膜在相同的条件下平衡并称重,两次膜质量差值为膜上颗粒物质量。在燃烧过程中, O_2 、 CO 、 CO_2 、烟气温度以及烟气流速数据直接自动保存。在燃烧结束后,对底灰样品进行收集,带回实验室称重;采样膜被放入干净的膜盒中,并用盒盖密封,在膜盒外用铝箔进行包裹,然后将其立即放入 $-18^\circ C$ 的冰箱中冷冻保存,防止样品损失。

EC和OC分析采用DRI Model 2015热光碳分析仪,切取直径为3.9cm的小块滤膜进行测量,检出限为 $(0.04 \pm 0.01) \mu g C / cm^2$ 。根据美国IMPROVE_A协议的升温程序,无氧环境加热时,各个温度梯段对应

的碳为:OC1、OC2、OC3、OC4;有氧环境加热时,各个温度梯段对应的碳为:EC1、EC2、EC3;其中,EC1 中包含了裂解碳(OC_{Pyro}).由于 OC_{Pyro} 会引起七波段激光的光强变化,将反射光强回到初始光强的时刻定义为 EC 的起始点,需从 EC1 中分离出 OC_{Pyro}.因此,当一个样品测试完毕,有机碳和元素碳的 8 个组分(OC1、OC2、OC3、OC4、EC1、EC2、EC3、OC_{Pyro})同时给出,总有机碳 TOC=OC1+OC2+OC3+OC4+OC_{Pyro},总元素碳 TEC=EC1+EC2+EC3-OC_{Pyro}.

1.6 计算方法

1.6.1 实际稀释倍数 采样时稀释倍数预设置为 40,而实际稀释倍数会有差别,是两级稀释后的重要指标,由一级稀释倍数和二级稀释倍数共同作用形成.计算公式如下:

$$e_1 = (f_1 + f_0) / f_0 \quad (1)$$

$$e_2 = (f_A + f_B + f_C + f_D) / (f_A + f_B + f_C + f_D - f_2) \quad (2)$$

$$e = e_1 \times e_2 \quad (3)$$

式中: f_A 、 f_B 、 f_C 、 f_D 为 A、B、C、D 通道流量,L/min; f_0 为烟尘采样枪采集的烟气流,L/min; f_1 为一级稀释的洁净空气进气量,L/min; f_2 为二级稀释的洁净空气进气量,L/min; e_1 为一级稀释倍数; e_2 为二级稀释倍数; e 为实际稀释倍数.

1.6.2 排放因子 根据实际稀释倍数计算稀释前后的污染物浓度和质量,进而计算出单位质量生物质燃料 PM_{2.5}、EC 和 OC 排放因子,计算公式如下:

$$EF_{ijk} = \left[e_k \times \left(m_{ijk} / q_j \right) \times Q_k \right] / (1000 M_k) \quad (4)$$

式中:EF 为污染物排放因子,g/kg; i 为各大气污染物; j 为 A、B、C、D 通道; k 为生物质燃料类型; m 为稀释后的污染物质量,mg; q 为稀释后的通道总流量,m³; Q 为烟气总排放量,m³; M 为生物质燃料总质量,kg.

1.6.3 修正燃烧效率 修正燃烧效率(MCE)是划分不同燃烧状态的重要指标^[46].由自动烟气分析传感器实时记录的 O₂、CO、CO₂ 和烟气温度数据,系统分析整个燃烧过程的实时燃烧状态.MCE 值可以由 CO 浓度和 CO₂ 浓度计算得出,公式如下:

$$MCE = \Delta C_{CO_2} / (\Delta C_{CO_2} + \Delta C_{CO}) \quad (5)$$

式中: ΔC_{CO_2} 为去除背景值后 CO₂ 浓度,mg/m³; ΔC_{CO} 为去除背景值后 CO 浓度,mg/m³.

2 结果与讨论

2.1 不同模拟情景下 PM_{2.5}、EC 和 OC 排放因子

采用稀释倍数法计算,实际稀释倍数的范围为 27~50 倍,得到不同模拟情景下户用生物质炉具 PM_{2.5}、EC 和 OC 排放因子见图 2.

燃烧效率、含水率、燃烧装置和生物质种类等是影响排放因子的主要因素^[11,47-48].图 2 可见,生物质燃料种类不同,其化学组成不同,在同一模拟情景下燃烧热解过程中生成的污染物质量存在显著差异,情景模拟结果具体为:①在模拟情景(柴火炉和烘干燃料)时,PM_{2.5} 排放因子辣椒秸秆最大((12.08±2.43)g/kg),EC 排放因子薪柴最大((2.99±0.89)g/kg),OC 排放因子小麦秸秆最大((3.73±1.32)g/kg).②模拟情景(柴火炉和风干燃料)时,PM_{2.5} 排放因子辣椒秸秆最大((14.55±3.31)g/kg),EC 排放因子薪柴最大((2.97±1.48)g/kg),OC 排放因子油菜秸秆最大((4.47±1.21)g/kg).③模拟情景(柴火炉和未处理燃料)时,PM_{2.5} 排放因子辣椒秸秆最大,为(11.45±3.38)g/kg,依次是油菜秸秆、大豆秸秆、小麦秸秆、玉米秸秆和薪柴,水稻秸秆最小,为(4.64±2.33)g/kg; EC 排放因子薪柴最大,为(2.67±0.60)g/kg,依次是大豆、小麦、玉米、油菜和辣椒秸秆,水稻秸秆最小,为 0.39±0.14g/kg; OC 排放因子小麦秸秆最大,为(3.73±1.15)g/kg,依次是辣椒秸秆、大豆秸秆、油菜秸秆、玉米秸秆、薪柴,水稻秸秆最小,为(1.97±0.93)g/kg.④模拟情景(土灶和烘干燃料)时,PM_{2.5} 排放因子小麦秸秆最大((69.93±22.11)g/kg),EC 排放因子薪柴最大((5.87±1.55)g/kg),OC 排放因子水稻秸秆最大((13.06±6.95)g/kg).⑤模拟情景(土灶和风干燃料)时,PM_{2.5} 排放因子小麦秸秆最大((55.32±14.32)g/kg),EC 排放因子薪柴最大((4.29±1.40)g/kg),OC 排放因子辣椒秸秆最大((14.48±3.83)g/kg).⑥模拟情景(土灶和未处理燃料)时,PM_{2.5} 排放因子小麦秸秆最大,为(48.04±21.29)g/kg,依次是辣椒、水稻、油菜、大豆和玉米秸秆,薪柴最小,为(9.58±1.34)g/kg; EC 排放因子薪柴最大,为(3.75±0.85)g/kg,依次是玉米、大豆、油菜、辣椒和小麦秸秆,水稻秸秆最小,为(0.87±0.14)g/kg; OC 排放因子辣椒秸秆最大,为(19.44±10.02)g/kg,依次是水稻秸秆、大豆秸秆、玉米秸秆、油菜秸秆、薪柴,小麦秸秆最小,为(5.32±2.20)g/kg.

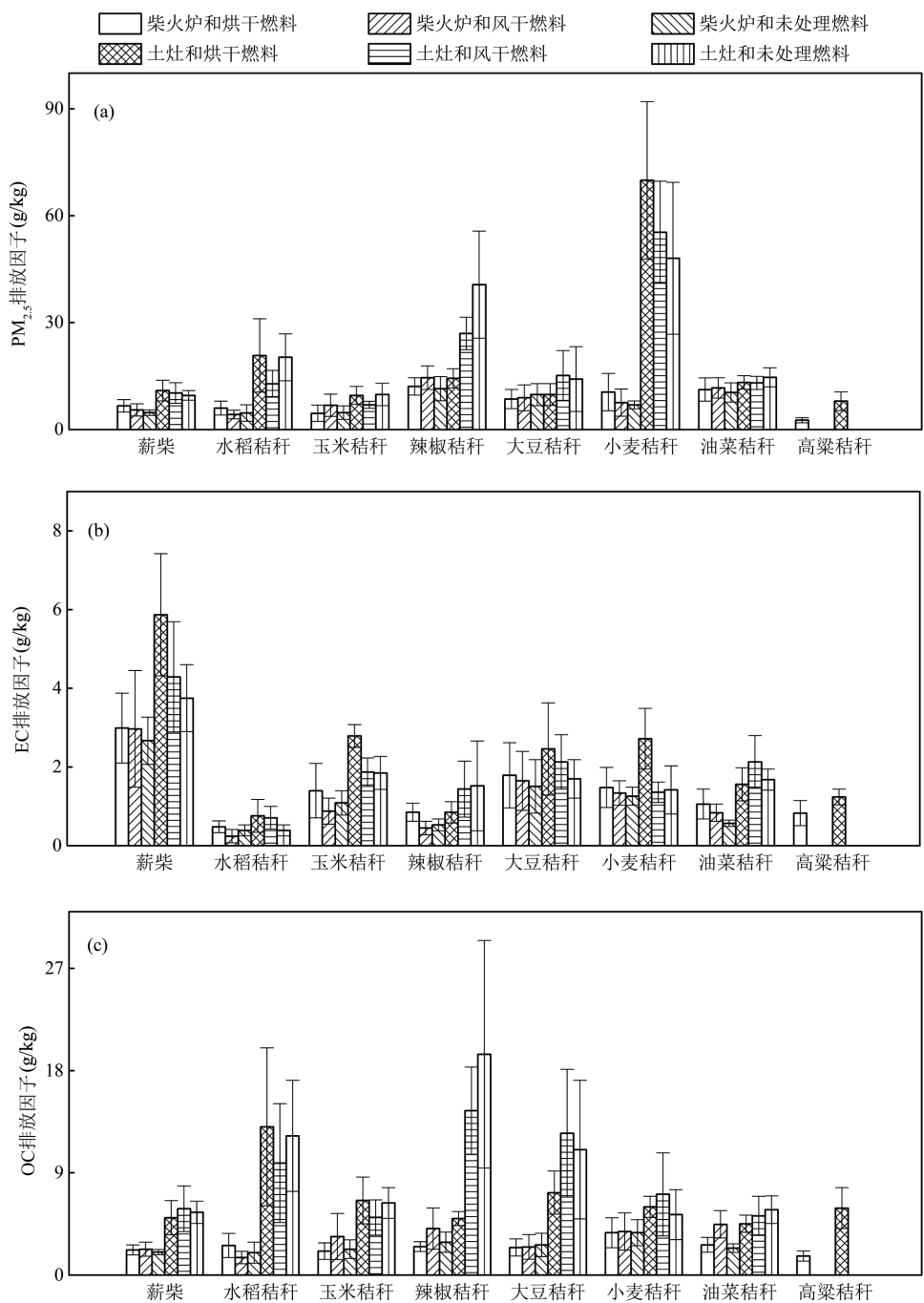


图2 不同户用生物质炉具和燃料预处理方式下的生物质燃料大气污染物排放因子
Fig.2 Emission factors of air pollutants of different biomass under different household stoves and fuel pre-treatments

通过测量薪柴和7种秸秆全燃烧过程的CO和CO₂平均浓度值计算得出MCE平均值(图3),不同模拟情景下薪柴和大部分秸秆的MCE值均大于0.9,可视为明火燃烧支配,通过观察燃烧底灰形貌发现,燃烧较为充分;其他秸秆的MCE值为0.79~0.89之间,可视为焖烧支配,燃烧结束后秸秆仍有少部分残留,燃烧不充分.采用实时CO和CO₂值计算

得到每分钟MCE值(图3),可以看出燃烧过程中明燃与阴燃会交替出现,总体上燃烧中段MCE值较大,在点燃初和燃烧结束时MCE值较小,有的小于0.9,同时观察到燃烧时有火星但无火焰,这与Hays等^[47]研究中对阴燃的定义一致.阴燃、明燃是描述燃烧的两种极端状态,对这两种状态的定义没有统一的标准^[49-50].

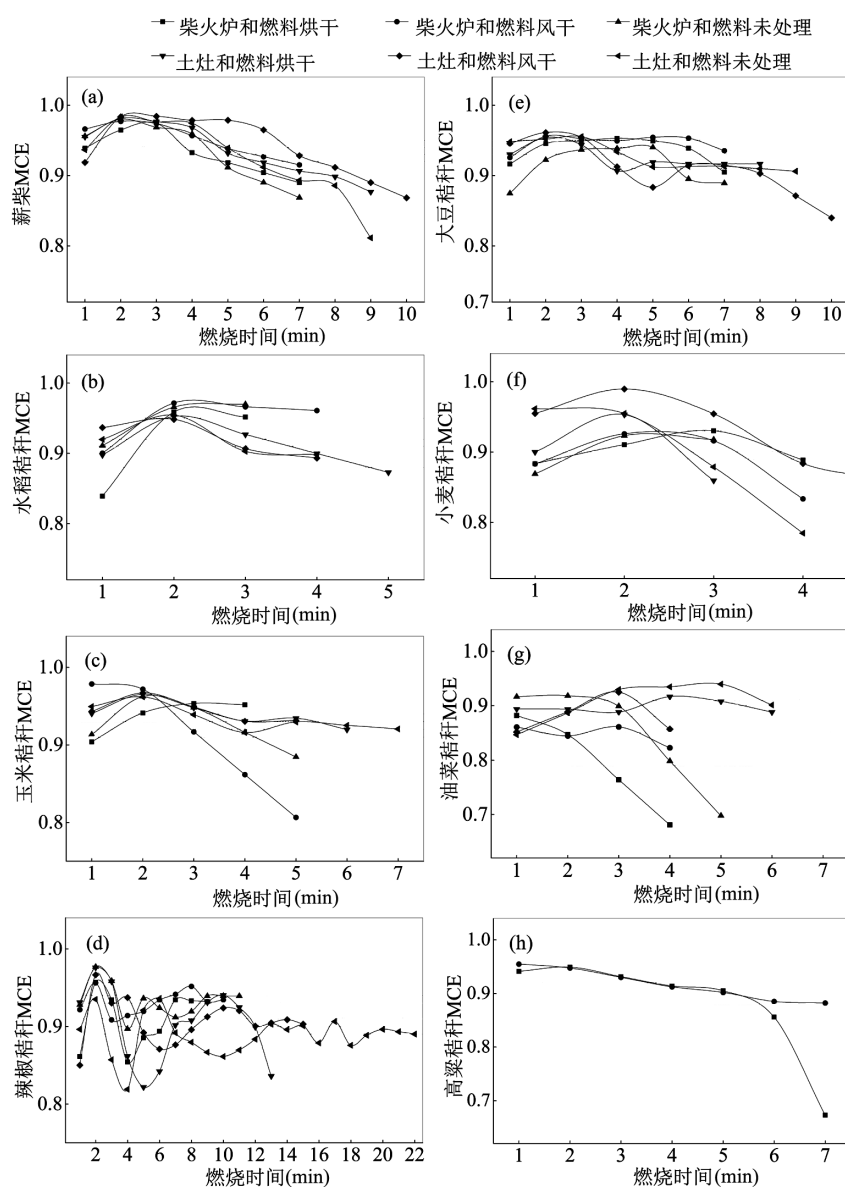


图3 不同户用生物质炉具和燃料预处理方式下的生物质燃料 MCE 值

Fig.3 Variations of MCEs of different biomass under different household stoves and fuel pre-treatments

采用先进和传统炉具时 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子的均值范围分别是 2.63~14.55, 6.95~69.93 g/kg, EC 排放因子分别是 0.24~2.99, 0.71~5.87 g/kg, OC 排放因子分别是 1.54~4.47, 4.52~19.44 g/kg. 可以看出传统炉具污染物排放因子总体大于先进炉具, 可能是土灶炉膛和送风口的结构原因, 使得供氧不足、燃烧不充分导致污染物排放因子较高. Alves 等^[51]发现, 在葡萄牙同种木柴在传统炉灶中燃烧的颗粒物排放因子是在环保型炉具中排放因子的 9.00 倍. 建议加强农村生活使用生物质燃料的引导管理, 在有条件的地区积极推进清洁炉具, 降低土灶排放污染物对环境的

影响.

选择烘干、风干和未处理方式预处理燃料时 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子的均值范围分别是 2.63~69.93, 4.23~55.32, 4.34~48.04 g/kg, EC 排放因子分别是 0.48~5.87, 0.24~4.29, 0.39~3.75 g/kg, OC 排放因子分别是 1.67~13.06, 1.54~14.48, 1.97~19.44 g/kg. 对于不同含水率的辣椒和大豆秸秆, 可以看出随着秸秆含水率升高, 辣椒秸秆 EC 和 OC 排放因子升高, 大豆秸秆 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子升高, 未处理秸秆排放因子最高是烘干预处理的 2.99 倍. 含水率与其他生物质燃料污染物排放因子的关系尚不明显, 可能与本研究

设置的含水率梯度较小有一定关系,尤其未处理燃料和风干燃料的含水率比较接近.其他研究也有类似的结果,如 Fine 等^[12]研究壁炉中燃烧过程,未观察到细颗粒物排放与燃料含水率之间的关系;王艳等^[52]、Hayashi 等^[53]和 Roden 等^[54]均认为含水率梯度与 EC 排放因子的关系尚不明显;黄柯等^[50]研究发现阴燃条件下不同含水率树木树枝燃烧排放的

OC、EC 没有明显区别;韦思业等^[55]发现含水率对 PM、EC 和 OC 的排放因子并无显著影响.获得这些结果的原因可能与各种影响因素之间复杂的相互作用有关,在其他影响因素占主导地位时,含水率的作用在某种程度上被掩盖了,这样的复杂性还体现在相似条件下重复燃烧实验中测得的排放因子也有较大波动.

表 2 本研究户用生物质炉具排放因子和其他文献的比较
Table 2 Comparison of emission factors from household biomass stoves with other literature

生物质 燃料	排放因子(g/kg)			EC/PM _{2.5}	OC/PM _{2.5}	OC/EC	文献	备注
	PM _{2.5}	EC	OC					
薪 柴	4.75±0.77	2.67±0.60	2.02±0.23	0.56	0.42	0.76	本研究	先进炉具,未处理燃料
	9.58±1.34	3.75±0.85	5.53±0.98	0.39	0.58	1.47	本研究	传统炉具,未处理燃料
	—	1.1±0.63	0.57±0.16	—	—	0.54	[57]	先进炉具,未处理燃料
	2.17	0.36(BC)	1.74	0.17(BC/PM _{2.5})	0.80	4.83(OC/BC)	[58]	先进炉灶
	3.24	0.53(BC)	2.59	0.16(BC/PM _{2.5})	0.80	4.89(OC/BC)	[58]	传统炉灶
	7.93	1.07	3.46	0.13	0.44	3.25	[2]	家庭炉灶
	2.58±2.15(PM)	0.29±0.31	0.98±1.24	0.11(EC/PM)	0.38(OC/PM)	3.38	[12]	模拟厨房
	4.36	1.50	1.29	0.34	0.30	0.90	[15]	实验室模拟
	—	0.48	5.81	—	—	12.10	[18]	实验室模拟,松木
	PM _{2.1}	8.08	73.00	—	—	9.03	[19]	实验室模拟,梧桐
	7.20	0.36±0.22	2.82±1.77	0.05	0.39	7.83	[23]	柴火炉,橡木(含水率 15.20%)
	8.50±1.60	1.50±0.30	4.00±0.90	0.18	0.47	2.67	[24]	传统洪都拉斯炉灶
水稻秸秆	3.40	2.15(BC)	0.92	0.63(BC/PM _{2.5})	0.27	0.43(OC/BC)	[26-27]	改进炉,重庆燃料
	4.64±2.33	0.39±0.14	1.97±0.93	0.08	0.42	5.02	本研究	先进炉具,未处理燃料
	20.29±6.58	0.87±0.14	12.26±4.89	0.04	0.60	14.15	本研究	传统炉具,未处理燃料
	—	0.48±0.40	6.80±5.40	—	—	14.20	[57]	先进炉具,未处理燃料
	4.29	1.24(BC)	2.45	0.29(BC/PM _{2.5})	0.57	1.98(OC/BC)	[58]	先进炉灶
	6.40	1.85(BC)	3.65	0.29(BC/PM _{2.5})	0.57	1.97(OC/BC)	[58]	传统炉灶
	4.51	1.04	1.55	0.23	0.34	1.49	[13]	实验室模拟,明燃
	6.95±1.75	—	—	—	—	—	[14]	实验室模拟
	9.14±0.23	0.91±0.28	3.35±0.57	0.10	0.37	3.70	[15]	实验室模拟
	5.37±1.90	—	—	—	—	—	[16]	实验室模拟
	8.70±1.10	—	—	—	—	—	[11]	实验室模拟,明火
	7.22	0.24	4.05	0.03	0.56	16.80	[17]	实验室模拟,明火
玉米秸秆	PM _{2.1}	8.79	23.61	—	—	2.69	[19]	实验室模拟
	4.81±0.68	0.51	1.57	0.11	0.33	3.05	[20]	实验室模拟,武汉燃料
	6.28±1.59(PM)	0.49±0.21	2.01±0.67	0.08(EC/PM)	0.32(OC/PM)	4.10	[21]	实验室模拟
	13.10	1.38	7.68	0.11	0.59	5.57	[22]	实验室模拟
	8.44±0.84(PM)	0.99±0.49	1.82±0.36	0.12(EC/PM)	0.22(OC/PM)	1.84	[25]	土灶,明燃
	1.80	0.10(BC)	1.07	0.06(BC/PM _{2.5})	0.59	10.7(OC/BC)	[26-27]	改进炉,重庆燃料
	4.75±1.92	1.09±0.31	2.28±0.82	0.23	0.48	2.08	本研究	先进炉具,未处理燃料
	9.84±3.14	1.85±0.42	6.35±1.35	0.19	0.65	3.43	本研究	传统炉具,未处理燃料
	—	0.68±0.29	3.40±2.70	—	—	5.10	[57]	先进炉具,未处理燃料
	4.60	0.62(BC)	2.63	0.13(BC/PM _{2.5})	0.57	4.24(OC/BC)	[58]	先进炉灶
	6.87	0.92(BC)	3.92	0.13(BC/PM _{2.5})	0.57	4.26(OC/BC)	[58]	传统炉灶
	11.01	2.11	3.68	0.19	0.33	1.74	[13]	实验室模拟,明燃
玉米秸秆	7.37	0.10	3.60	0.01	0.49	36.82	[2]	家庭炉灶
	8.40±1.19	—	—	—	—	—	[14]	实验室模拟
	14.33±5.26	—	—	—	—	—	[16]	实验室模拟
	15.10±8.60	—	—	—	—	—	[11]	实验室模拟,明火
	6.00	0.14	2.28	0.02	0.38	15.9	[17]	实验室模拟,明火

续表 2

生物质 燃料	排放因子(g/kg)			EC/PM _{2.5}	OC/PM _{2.5}	OC/EC	文献	备注
	PM _{2.5}	EC	OC					
玉米秸秆	—	1.12	31.47	—	—	28.10	[18]	实验室模拟
	PM _{2.1}	31.04	110.67	—	—	3.57	[19]	实验室模拟
	0.72±0.34	0.10	0.26	0.14	0.36	2.52	[20]	实验室模拟,武汉燃料
	5.31±1.79(PM)	0.95±1.08	2.25±0.74	0.18(EC/PM)	0.42(OC/PM)	2.37	[21]	实验室模拟
	10.50	0.94	5.93	0.09	0.56	6.30	[22]	实验室模拟
	8.52±0.36(PM)	1.76±0.08	1.91±0.50	0.21(EC/PM)	0.22(OC/PM)	1.09	[25]	土灶,明燃
辣椒秸秆	3.15	0.45(BC)	2.03	0.14(BC/PM _{2.5})	0.64	4.51(OC/BC)	[26-27]	改进炉,重庆燃料
	11.45±3.38	0.53±0.15	2.89±0.89	0.05	0.25	5.45	本研究	先进炉具,未处理燃料
	40.63±15.00	1.52±1.14	19.44±10.02	0.04	0.48	12.78	本研究	传统炉具,未处理燃料
大豆秸秆	—	1.80±0.77	5.10±3.00	—	—	2.80	[57]	先进炉具,未处理燃料
	9.82±3.10	1.51±0.68	2.66±1.03	0.15	0.27	1.77	本研究	先进炉具,未处理燃料
	14.16±9.10	1.70±0.49	11.05±6.11	0.12	0.78	6.48	本研究	传统炉具,未处理燃料
	—	0.17±0.21	2.00±2.40	—	—	11.7	[57]	先进炉具,未处理燃料
	5.55	0.74	1.77	0.13	0.32	2.40	[13]	实验室模拟,明燃
	10.15±3.31	—	—	—	—	—	[14]	实验室模拟
	7.71±0.91	1.35±0.06	2.12±1.04	1.18	0.27	1.60	[15]	实验室模拟
	—	1.66	27.66	—	—	16.66	[18]	实验室模拟
	0.56±0.20	0.10	0.24	0.18	0.42	2.36	[20]	实验室模拟,武汉燃料
	6.88±1.78(PM)	1.66±0.29	1.09±0.29	0.24(EC/PM)	0.16(OC/PM)	0.66	[25]	土灶,明燃
小麦秸秆	3.28±0.87	0.94±0.04(BC)	0.89±0.15	0.30(BC/PM _{2.5})	0.28	0.95(OC/BC)	[26-27]	改进炉,重庆燃料
	6.93±1.10	1.26±0.23	3.73±1.15	0.18	0.54	2.97	本研究	先进炉具,未处理燃料
	48.04±21.29	1.42±0.61	5.32±2.20	0.03	0.11	3.75	本研究	传统炉具,未处理燃料
	5.52	0.74(BC)	3.15	0.13(BC/PM _{2.5})	0.57	4.26(OC/BC)	[58]	先进炉灶
	8.24	1.10(BC)	4.70	0.13(BC/PM _{2.5})	0.57	4.27(OC/BC)	[58]	传统炉灶
	11.78	1.45	3.73	0.12	0.32	2.57	[13]	实验室模拟,明燃
	7.26±0.79	—	—	—	—	—	[14]	实验室模拟
	8.07±1.57	—	—	—	—	—	[16]	实验室模拟
	31.20±8.60	—	—	—	—	—	[11]	实验室模拟,明火
	7.74	0.13	3.17	0.02	0.41	24.40	[17]	实验室模拟,明火
	1.13±0.13	0.12	0.50	0.44	0.11	4.17	[20]	实验室模拟,武汉燃料
	8.75±4.18(PM)	0.42±0.23	3.46±2.05	0.05(EC/PM)	0.40(OC/PM)	8.24	[21]	实验室模拟
	6.20	0.55	2.93	0.09	0.47	5.33	[22]	实验室模拟
	15.7±4.7(PM)	3.23±0.24	2.99±0.24	0.21(EC/PM)	0.19(OC/PM)	0.93	[25]	土灶,明燃
油菜秸秆	7.00	0.36(BC)	2.39	0.05(BC/PM _{2.5})	0.34	6.64(OC/BC)	[26-27]	改进炉,河南燃料
	10.42±2.68	0.57±0.08	2.37±0.38	0.06	0.23	4.13	本研究	先进炉具,未处理燃料
	14.65±2.67	1.68±0.27	5.76±1.21	0.11	0.39	3.43	本研究	传统炉具,未处理燃料
	8.56	1.14(BC)	4.88	0.13(BC/PM _{2.5})	0.57	4.28(OC/BC)	[58]	先进炉灶
	12.77	1.70(BC)	7.29	0.13(BC/PM _{2.5})	0.57	4.29(OC/BC)	[58]	传统炉灶
	5.72	0.92	2.45	0.16	0.43	2.66	[13]	实验室模拟,明燃
	4.41±2.19	—	—	—	—	—	[14]	实验室模拟
	12.77±3.42	1.80±0.71	1.63±0.72	0.14	0.13	0.90	[15]	实验室模拟
高粱秸秆	14.2±1.7(PM)	2.15±0.25	1.58±0.25	0.15(EC/PM)	0.11(OC/PM)	0.73	[25]	土灶,明燃
	2.63±0.72	0.83±0.32	1.67±0.45	0.32	0.63	2.01	本研究	先进炉具,未处理燃料
	7.96±2.61	1.24±0.20	5.89±1.80	0.16	0.74	4.75	本研究	传统炉具,未处理燃料
	4.76	0.64(BC)	2.71	0.13(BC/PM _{2.5})	0.57	4.23(OC/BC)	[58]	先进炉灶
	7.10	0.95(BC)	4.05	0.13(BC/PM _{2.5})	0.57	4.26(OC/BC)	[58]	传统炉灶
	6.73	0.68(BC)	3.64	0.10(BC/PM _{2.5})	0.54	5.35(OC/BC)	[26-27]	改进炉,河南燃料

注:“—”表示没有相关数据。

本研究中所测得未预处理薪柴和 7 种秸秆户用生物质炉具 PM_{2.5}、EC 和 OC 排放因子与其他文献的对比(表 2),可以看出即使同一类型的生物质燃料,不同研究得到的排放因子仍存在较大的变化范围,可能与四方面因素有关:一是实验室模拟和现场测试的方法不同,其他研究大多在实验室内利用燃烧装置对

生物质燃料进行模拟燃烧,燃烧装置环境相对封闭,而本研究完全模拟厨房环境进行现场测试,结果易受外界条件影响;二是不同产地生物质燃料的元素构成存在一定差异,以及不同区域燃料含水率也有差异;三是其他燃烧装置可能体积偏小或偏大,影响整体燃烧效率,以及实际燃烧过程中明火与阴燃在不同燃烧

阶段可能交替出现,从而导致污染物排放出现差别^[56];四是不同的分析测试方法也会影响最终的结果.本文与研究组前期的薪柴和水稻、玉米、辣椒、大豆秸秆的EC和OC排放因子测量结果^[57]在一定范围内波动,主要是因为本研究通过对实验的改进,包括提高流速测量精度、实时监控MCE、改变投料方式和燃料量以及细分模拟情景,使得排放因子数据更为细化和精准,同时前期研究结果也为本研究提供数据基础.无论是国内外研究结果,还是本研究结果,排放因子的测定都会因燃烧情景不同而产生一定差异,但整体上本研究的结果与其他研究具有一定可比性.建议在进行生物质燃烧污染物排放量估算时,排放因子优先选择本地实测数据,其次为当地生物质模拟燃烧实验

数据,再次为其他文献数据.

2.2 $\text{PM}_{2.5}$ 、EC、OC 排放因子的比值

户用生物质炉具 $\text{PM}_{2.5}$ 、EC、OC 排放因子比值见图 4. EC 和 OC 是颗粒物的重要组成成分,本研究中 EC 和 OC 分别占 $\text{PM}_{2.5}$ 全部质量的 0.02~0.56 和 0.09~0.82,不同生物质燃料、不同炉具、不同预处理方式下 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量和 $\text{PM}_{2.5}$ 中 EC、OC 的比例不同,其中薪柴(柴火炉和未处理燃料)EC/ $\text{PM}_{2.5}$ 值最大,小麦秸秆(土灶和风干燃料)EC/ $\text{PM}_{2.5}$ 值最小;大豆秸秆(土灶和风干燃料)OC/ $\text{PM}_{2.5}$ 值最大,小麦秸秆(土灶和烘干燃料)OC/ $\text{PM}_{2.5}$ 值最小.从源排放碳气溶胶控制的角度来看,对于薪柴需优先控制 EC 的排放,对于秸秆也需重点控制 OC 的排放.

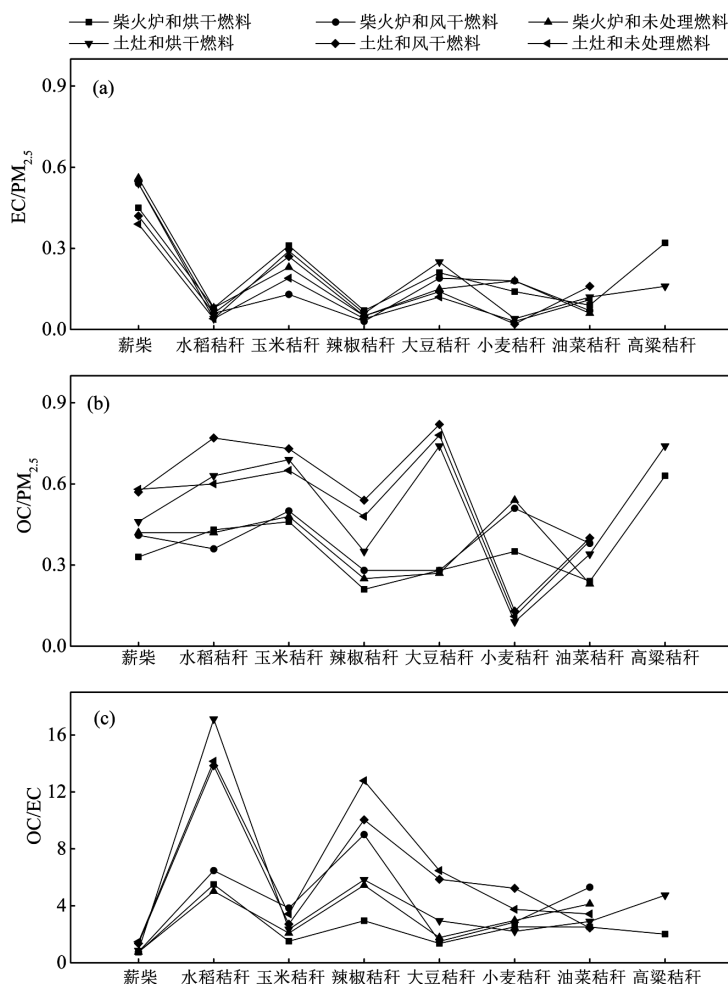


图 4 不同户用生物质炉具和燃料预处理方式下的 EC/ $\text{PM}_{2.5}$ 、OC/ $\text{PM}_{2.5}$ 和 OC/EC 比值

Fig.4 Ratios of EC/ $\text{PM}_{2.5}$, OC/ $\text{PM}_{2.5}$ and OC/EC of different biomass under different household stoves and fuel pre-treatments

由于某一类燃烧源内在的化学组成恒定,可以期望在相同或类似的燃烧条件下所排放的颗粒物中 OC/EC 具有恒定比值^[3],通常用 OC/EC 比值来考

察气溶胶污染物来源^[59],OC/EC 也可作为区分不同燃料类型的依据^[60-61].但是对于生物质燃烧源示踪,由于各种因素影响,OC/EC 变化较大,需进行综合分

析^[52].本研究户用生物质炉具排放 $\text{PM}_{2.5}$ 中 OC/EC 值在 0.74~17.11 之间,不同生物质燃料在多模拟情景下均呈现出一定差异,如薪柴 0.74~1.47,水稻秸秆 5.02~17.11,玉米秸秆 1.51~3.84,辣椒秸秆 2.95~12.78,大豆秸秆 1.36~6.48,小麦秸秆 2.21~5.23,油菜秸秆 2.45~5.30,高粱秸秆 2.01~4.75.研究结果与化石燃料(煤、石油、天然气)^[62]燃烧排放颗粒物中 OC/EC(一般低于 0.4)有着明显差异,但是认为不同排放源的

OC/EC 比值变化非常大,以此判断二次气溶胶可能过于简单^[63].除水稻秸秆,含水率较高的未处理燃料和风干燃料排放 $\text{PM}_{2.5}$ 中 OC/EC 是含水率较低的烘干燃料的 1.36~2.12 倍左右.造成这些情况发生可能是由于随着湿度升高,需要更多的热量使生物质燃料样品中水分挥发,导致燃烧温度降低,不完全燃烧使产生 CO_2 减少,OC 排放增多^[52].

2.3 8 种碳组分的质量分数

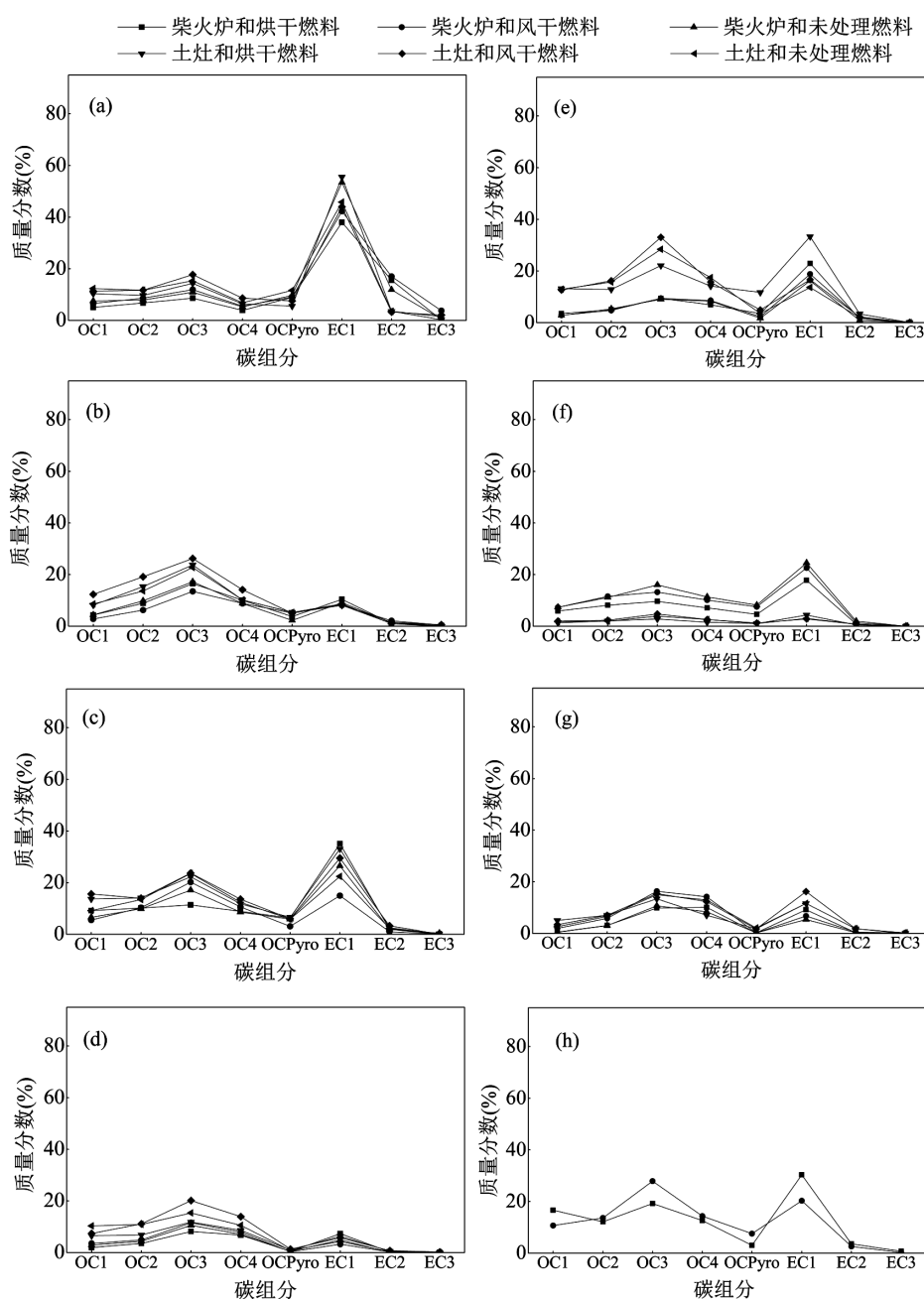


图5 不同户用生物质炉具和燃料预处理方式下 $\text{PM}_{2.5}$ 排放的 8 种碳组分的质量分数

Fig.5 Mass fractions of carbonaceous aerosols in $\text{PM}_{2.5}$ emissions of different biomass under different house hold stoves and fuel pre-treatments

(a)薪柴;(b)水稻秸秆;(c)玉米秸秆;(d)辣椒秸秆;(e)大豆秸秆;(f)小麦秸秆;(g)油菜秸秆;(h)高粱秸秆

根据不同的温度范围将碳定义为 8 个组分,即 OC1~OC4、OC_{Pyro}、EC1~EC3,对于这些组分的质量分数的讨论有利于气溶胶颗粒物的来源解释^[64]. 户用生物质炉具燃烧薪柴和 7 种秸秆排放 PM_{2.5} 中 OC、EC 各组分的质量分数见图 5,可以看出 OC 各组分的质量分数呈现出 OC3 最大的普遍规律,这与 Chuang 等^[65]的研究结果一致.具体排序为薪柴 OC3>OC_{Pyro}>OC2>OC1>OC4,水稻、玉米和小麦秸秆 OC3>OC2>OC4>OC1>OC_{Pyro},辣椒、大豆和油菜秸秆 OC3>OC4>OC2>OC1>OC_{Pyro},高粱秸秆 OC3>OC1>OC4>OC2>OC_{Pyro}.EC 各组分则呈现出一致规律,即 EC1~OC_{Pyro}>EC2>EC3.生物质燃烧主要释放 OC2~OC4 及 EC1,其中水稻、辣椒和油菜秸秆的 OC3 质量分数最高(达 18.84%),薪柴、玉米、大豆、小麦和高粱秸秆的 EC1 质量分数最高(达 39.66%),是贵州省生物质燃料的主要特征之一.这区别于前人对其他燃烧来源的研究结果^[66],如燃煤排放碳组分主要为 OC2~OC4 及 OC_{Pyro}、汽油车排放大量的 OC3 和 OC4、柴油车则有较高的 EC1 质量分数.

3 结论

3.1 贵州省户用生物质炉具燃烧薪柴和水稻、玉米、辣椒、大豆、小麦、油菜、高粱等 7 种秸秆 PM_{2.5} 排放因子的均值范围分别是 4.75~10.93,4.23~20.79,4.57~9.84,11.45~40.63,8.56~15.18,6.93~69.93,10.42~14.65 和 2.63~7.96g/kg,EC 排放因子分别是 2.67~5.87,0.24~0.87,0.88~2.79,0.45~1.52,1.51~2.46,1.26~2.72,0.57~2.13 和 0.83~1.24g/kg,OC 排放因子分别是 2.02~5.84,1.54~13.06,2.11~6.57,2.50~19.44,2.43~12.49,3.73~7.11,2.37~5.76 和 1.67~5.89g/kg.建议在计算污染物排放量时优先选择区域本地实测排放因子.

3.3 生物质燃料种类不同,在同一模拟情景下产生的大气污染物排放因子存在显著差异;传统炉具污染物排放因子总体大于先进炉具,建议加强农村生活使用生物质燃料的引导管理,在有条件的地区积极推进清洁炉具,降低土灶排放污染物对环境的影响;大部分生物质燃料的含水率与污染物排放因子的关系不明显.

3.4 EC 和 OC 是 PM_{2.5} 中主要组成成分,生物质燃烧排放 EC/PM_{2.5} 值和 OC/PM_{2.5} 值分别为 0.02~0.56

和 0.09~0.82,从源排放碳气溶胶控制的角度来看,对于薪柴需优先控制 EC 的排放,对于秸秆也需重点控制 OC 的排放.生物质燃烧排放 PM_{2.5} 中 OC/EC 值为 0.74~17.11,与化石燃料有明显差异,但作为判断二次气溶胶等还需综合考虑.

3.5 户用生物质炉具燃烧薪柴和 7 种秸秆排放 PM_{2.5} 中 OC 各组分的质量分数 OC3 最大,EC 各组分则呈现出 EC1~OC_{Pyro}>EC2>EC3 的规律.生物质燃烧主要释放 OC2~OC4 及 EC1,尤其是较高的 OC3 或 EC1 质量分数是贵州省本地燃料的主要特征之一.

参考文献:

- [1] Shen G F, Ru M Y, Du W, et al. Impacts of air pollutants from rural Chinese households under the rapid residential energy transition [J]. *Nature Communications*, 2019,10(1):3405–3412.
- [2] 孔少飞,白志鹏,陆 炳.民用燃料燃烧排放 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中碳组分排放因子对比 [J]. *中国环境科学*, 2014,11(11):2749–2749.
Kong S F, Bai Z P, Lu B. Comparative analysis on emission factors of carbonaceous components in PM_{2.5} and PM₁₀ from domestic fuels combustion [J]. *China Environmental Science*, 2014,11(11):2749–2749.
- [3] 贺克斌,杨复沫,段凤魁,等.大气颗粒物与区域复合污染 [M]. 北京:科学出版社,2011.
He K B, Yang F M, Duan F K, et al. Combined pollution of atmospheric particulate matter and regional pollution [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [4] 田贺忠,赵 丹,王 艳.中国生物质燃烧大气污染物排放清单 [J]. *环境科学学报*, 2011,31(2):349–357.
Tian H Z, Zhao D, Wang Y. Emission inventories of atmospheric pollutants discharged from biomass burning in China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011,31(2):349–357.
- [5] 陆 炳,孔少飞,韩 斌,等.2007 年中国大陆地区生物质燃烧排放污染物清单 [J]. *中国环境科学*, 2011,31(2):186–194.
Lu B, Kong S F, Han B, et al. Inventory of atmospheric pollutants discharged from biomass burning in China continent in 2007 [J]. *China Environmental Science*, 2011,31(2):186–194.
- [6] 曹国良,张小曳,王 丹,等.中国大陆生物质燃烧排放的污染物清单 [J]. *中国环境科学*, 2005,25(4):389–393.
Cao G L, Zhang X Y, Wang D, et al. Inventory of atmospheric pollutants discharged from biomass burning in China continent [J]. *China Environmental Science*, 2005,25(4):389–393.
- [7] Zhang X H, Lu Y, Wang Q G, et al. A high-resolution inventory of air pollutant emissions from crop residue burning in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2019,213(15):207–214.
- [8] 张晓荟.中国秸秆焚烧大气污染物高分辨率排放特征研究 [D]. 南京:南京大学,2019.
Zhang X H. High-resolution characteristics of air pollutant emissions from crop residue burning in China [D]. Nanjing: Nanjing University,

- 2019.
- [9] 高玉宗,姬亚芹,林 孜,等.西宁市生物质燃烧源大气污染物排放清单 [J]. 环境科学, 2021,42(12):5585-5593.
- Gao Y Z, Ji Y Q, Lin Z, et al. Pollutant emission inventory of biomass combustion sources in Xining City [J]. Environmental Science, 2021,42(12):5585-5593.
- [10] 刘春蕾,杨 峰.南京市生物质燃烧源大气污染物排放清单及其特征 [J]. 安徽农学通报, 2017,23(16):95-97.
- Liu C L, Yang F. Emission inventories of atmospheric pollutants discharged from biomass burning in Nanjing City [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2017,23(16):95-97.
- [11] 祝 斌,朱先磊,张元勋,等.农作物秸秆燃烧 PM_{2.5} 排放因子的研究 [J]. 环境科学研究, 2005,18(2):29-33.
- Zhu B, Zhu X L, Zhang Y X, et al. Emission factor of PM_{2.5} from crop straw burning [J]. Research of Environmental Sciences, 2005,18(2): 29-33.
- [12] Fine P M, Cass G R, Simoneit B R. Chemical characterization of fine particle emissions from fireplace combustion of woods grown in the Northeastern United States [J]. Environmental Science & Technology, 2001,35(13):2665-2675.
- [13] 鞠园华,杨夏捷,靳全锋,等.不同燃烧状态下农作物秸秆 PM_{2.5} 排放因子及主要成分分析 [J]. 环境科学学报, 2018,38(1):92-100.
- Ju Y H, Yang X J, Jin Q F, et al. Emission factor and main components of PM_{2.5} emitted from crop straw under different burning status [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018,38(1):92-100.
- [14] 杨夏捷,马远帆,鞠园华,等.华南农产品主产区 2005~2014 年秸秆露天燃烧污染物排放估算及时空分布 [J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(2):358-368.
- Yang X J, Ma Y F, Ju Y H, et al. Temporal and spatial distribution of air pollutants emitted from field burning of straw crops in Southern China during 2005~2014 [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018,37(2):358-368.
- [15] 唐喜斌,黄 成,楼晟荣,等.长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究 [J]. 环境科学, 2014,35(5):1623-1632.
- Tang X B, Huang C, Lou S R, et al. Emission factor and PM chemical composition study of biomass burning in the Yangtze River Delta Region [J]. Environmental Science, 2014,35(5):1623-1632.
- [16] 黄 帅,黄欣怡,吴水平,等.不同生物质燃烧排放多环芳烃及糖醇类化合物的模拟研究 [J]. 环境科学, 2015,36(10):3573-3581.
- Huang S, Huang X Y, Wu S P, et al. Simulation study of the emission of polycyclic aromatic hydrocarbon and sugar alcohols from biomass burning [J]. Environmental Science, 2015,36(10):3573-3581.
- [17] 朱 恒,戴璐泓,魏 雅,等.生物质燃烧排放 PM_{2.5} 中无机离子及有机组分的分布特征 [J]. 环境科学学报, 2017,37(12):4483-4491.
- Zhu H, Dai L H, Wei Y, et al. Characteristics of inorganic ions and organic components in PM_{2.5} from biomass burning [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017,37(12):4483-4491.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 叶 巡.典型生物质燃烧源 PM_{2.5} 及其化学组分排放特征研究 [D]. 武汉:江汉大学, 2019.
- Ye X. Emission characteristics of PM_{2.5} and its chemical components emitted from typical biomass burning [D]. Wuhan: Jiangnan University, 2019.
- [21] Cao G L, Zhang X Y, Gong S L, et al. Investigation on emission factors of particulate matter and gaseous pollutants from crop residue burning [J]. Journal of Environmental Sciences, 2008,20(1):50-55.
- [22] Zhang H F, Hu J, Qi Y X, et al. Emission characterization, environmental impact, and control measure of PM_{2.5} emitted from agricultural crop residue burning in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2017,149:629-635.
- [23] McDonald J D, Zielinska B, Fujita E M, et al. Fine particle and gaseous emission rates from residential wood combustion [J]. Environmental Science & Technology, 2000,34(11):2080-2091.
- [24] Christoph A R, Tami C B, Stuart C, et al. Emission factors and real-time optical properties of particles emitted from traditional wood burning cookstoves [J]. Environmental science & technology, 2006, 40(21):6750-6757.
- [25] Shen G F, Yang Y Y, Wang W, et al. Emission factors of particulate matter and elemental carbon for crop residues and coals burned in typical household stoves in China [J]. Environmental Science & Technology, 2010,44(18):7157-7162.
- [26] Li X H, Wang S X, Duan L, et al. Carbonaceous aerosol emissions from household biofuel combustion in China [J]. Environmental Science & Technology, 2009,43(15):6076-6081.
- [27] Li X H, Duan L, Wang S X, et al. Emission characteristics of particulate matter from rural household biofuel combustion in China [J]. Energy Fuels, 2007,21(2),doi:10.1021/ef060150g.
- [28] 贵州省生态环境厅.2021 贵州省生态环境状况公报 [EB/OL]. https://sthj.guizhou.gov.cn/hjsj/hjzlsjzx_5802731/hjzkgb_5802732/2020/t20220602_74586137.html, 2022-06-02.
- Department of Ecological and Environment of Guizhou Province. Report on the State of Guizhou Environment [EB/OL]. https://sthj.guizhou.gov.cn/hjsj/hjzlsjzx_5802731/hjzkgb_5802732/202206/t20220602_74586137.html, 2022-06-02.
- [29] 王艳妮.一种农村家用炉灶排放大气污染物采样和监测系统 [P]. 中国专利: ZL202023085035.X, 2021-09-21.
- Wang Y N. A sampling and monitoring system for air pollutants discharged from rural household stoves [P]. Chinese Patent: ZL202023085035.X, 2021-09-21.
- [30] 王艳妮.一种燃烧炉:中国, ZL202023086559.0 [P]. 2021-08-31.
- Wang Y N. A kind of combustion stove: China, ZL202023086559.0 [P]. 2021-08-31.
- [31] 王艳妮.一种适用于大气污染物浓度监测的稀释装置:中国, ZL202023085098.5 [P]. 2021-08-27.
- Wang Y N. A dilution device for monitoring the concentration of air pollutants: China, ZL202023085098.5 [P]. 2021-08-27.
- [32] 张晓博,周 胜,宋 伟,等.一种大气颗粒物稀释通道采样器:中国,

- CN206725278U [P]. 2017-12-08.
- Zhang X B, Zhou S, Song W, et al. An atmospheric particulate matter dilution channel sampler: China, CN206725278U [P]. 2017-12-08.
- [33] 贵阳市统计局,国家统计局贵阳调查队.贵阳统计年鉴 2020 [M]. 北京:中国统计出版社, 2020.
- Guiyang Bureau of Statistics, NBS Survey Office in Guiyang. Guiyang statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.
- [34] 六盘水市统计局.六盘水 2020 年统计年鉴 [EB/OL]. http://tjj.gzlps.gov.cn/bmxxgk/zfxgk/fdzdgknr/zdly/tjnj_5712553/202106/t20210615_68512543.html, 2021-06-15.
- Liupanshui Bureau of Statistics. Liupanshui statistical yearbook 2020 [EB/OL]. http://tjj.gzlps.gov.cn/bmxxgk/zfxgk/fdzdgknr/zdly/tjnj_5712553/202106/t20210615_68512543.html, 2021-06-15.
- [35] 遵义市统计局.2020 年遵义统计年鉴 [EB/OL]. http://www.zunyi.gov.cn/sjfb/tjxx/tjnj_5860125/202011/t20201106_68833238.html, 2020-11-06.
- Zunyi Bureau of Statistics. Zunyi statistical yearbook 2020 [EB/OL]. http://www.zunyi.gov.cn/sjfb/tjxx/tjnj_5860125/202011/t20201106_68833238.html, 2020-11-06.
- [36] 安顺市统计局.2020 年安顺统计年鉴 [EB/OL]. http://www.anshun.gov.cn/zfsj/tjnj/202112/t20211207_71948788.html, 2021-12-07.
- Anshun Bureau of Statistics. Anshun statistical yearbook 2020 [EB/OL]. http://www.anshun.gov.cn/zfsj/tjnj/202112/t20211207_71948788.html, 2021-12-07.
- [37] 毕节市统计局,国家统计局毕节调查队.毕节统计年鉴 2020 [M]. 北京:中国统计出版社, 2020.
- Bijie Bureau of Statistics, NBS Survey Office in Bijie. Bijie statistical yearbook 2020 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.
- [38] 铜仁市统计局.2020 年铜仁统计年鉴 [EB/OL]. http://www.trsgov.cn/zfsj/tjnj/202106/t20210602_68376344.html, 2021-06-02.
- Tongren Bureau of Statistics. Tongren statistical yearbook 2020 [EB/OL]. http://www.trsgov.cn/zfsj/tjnj/202106/t20210602_68376344.html, 2021-06-02.
- [39] 黔西南布依族苗族自治州统计局. 2019 年黔西南布依族苗族自治州统计年鉴 [EB/OL]. http://www.qxn.gov.cn/zwgk/zfjg/zfjg_5135341/bmxxgkml_5135344/tjgb_5135353/202108/t20210825_69768473.html, 2021-08-25.
- Qianxinan Buyi and Miao Autonomous Prefectural Bureau of Statistics. Qianxinan Buyi and Miao Autonomous Prefecture statistical yearbook 2019 [EB/OL]. http://www.qxn.gov.cn/zwgk/zfjg/zfjg_5135341/bmxxgkml_5135344/tjgb_5135353/202108/t20210825_69768473.htm, 2021-08-25.
- [40] 黔东南苗族侗族自治州统计局. 2019 年黔东南苗族侗族自治州统计年鉴 [EB/OL]. http://tjj.qdn.gov.cn/tjsj/sjcx_57102/qdntjnj/202203/t20220316_73006053.html, 2022-03-16.
- Qiandongnan Miao and Dong Autonomous Prefectural Bureau of Statistics. Qiandongnan Miao and Dong Autonomous Prefecture statistical yearbook 2019 [EB/OL]. http://tjj.qdn.gov.cn/tjsj/sjcx_57102/qdntjnj/202203/t20220316_73006053.html, 2022-03-16.
- [41] 黔南布依族苗族自治州统计局.黔东南布依族苗族自治州统计年鉴 2020 [M]. 北京:中国统计出版社, 2020.
- Qiannan Buyi and Miao Autonomous Prefectural Bureau of Statistics. Qiannan Buyi and Miao Autonomous Prefecture statistical yearbook 2020 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.
- [42] 贵州省统计局,国家统计局贵州调查总队.贵州统计年鉴 2020 [M]. 北京:中国统计出版社, 2020.
- Guizhou Province Bureau of Statistics, NBS Survey Office in Guizhou. Guizhou statistical yearbook 2020 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.
- [43] 国家统计局.中华人民共和国统计年鉴 2021 [EB/OL]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2021/indexch.htm>, 2021-09-16.
- National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook 2021 [EB/OL]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2021/indexch.htm>, 2021-09-16.
- [44] 国家统计局.中华人民共和国统计年鉴 2020 [EB/OL]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2020/indexch.htm>, 2020-11-04.
- National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook 2020 [EB/OL]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2020/indexch.htm>, 2020-11-04.
- [45] 国家统计局.中华人民共和国统计年鉴 2019 [EB/OL]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2019/indexch.htm>, 2019-07-30.
- National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook 2019 [EB/OL]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2019/indexch.htm>, 2019-07-30.
- [46] Reid J. S., Koppmann R., Eck T. F., et al. A review of biomass burning emissions part II: intensive physical properties of biomass burning particles [J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2005,5(3):799-825.
- [47] Hays M D, Fine P M., Geron C D, et al. Open burning of agricultural biomass: physical and chemical properties of particle-phase emissions [J]. Atmospheric Environment, 2005,39(36):6747-6764.
- [48] Zhang Y S, Min S, Yun L, et al. Emission inventory of carbonaceous pollutants from biomass burning in the Pearl River Delta Region, China [J]. Atmospheric Environment, 2013,76(5):189-199.
- [49] 洪蕾,刘刚,杨孟,等.稻草烟尘中有机碳/元素碳及水溶性离子的组成 [J]. 环境科学, 2015,36(1):25-33.
- Hong L, Liu G, Yang M, et al. Composition of organic carbon/elemental carbon and water-soluble ions in rice straw burning [J]. Environmental Science, 2015,36(1):25-33.
- [50] 黄柯,刘刚,周丽敏,等.森林生物质燃烧烟尘中的有机碳和元素碳 [J]. 环境科学, 2015,36(6):1998-2004.
- Huang K, Liu G, Zhou L M, et al. Organic carbon and elemental carbon in forest biomass burning smoke [J]. Environmental Science, 2015,36(6):1998-2004.
- [51] Alves C, Gonçalves C, Fernandes A P, et al. Fireplace and woodstove fine particle emissions from combustion of western Mediterranean wood types [J]. Atmospheric Research, 2011,101(3):692-700.
- [52] 王艳,郝伟伟,程轲,等.秸秆露天焚烧典型大气污染物排放因子 [J]. 中国环境科学, 2018,38(6):2055-2061.
- Wang Y, Hao W W, Cheng K, et al. Emission factors of typical air pollutants from open burning of crop straws [J]. China Environmental Science, 2018,38(6):2055-2061.
- [53] Hayashi K, Ono K, Kajiura M, et al. Trace gas and particle emissions from open burning of three cereal crop residues: Increase in residue

- moistness enhances emissions of carbon monoxide, methane, and particulate organic carbon [J]. *Atmospheric Environment*, 2014,95(1): 36-44.
- [54] Roden C A, Bond T C, Conway S, et al. Emission factors and real-time optical properties of particles emitted from traditional wood burning cookstoves [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(21):6750-6757.
- [55] 韦思业, 苏玉红, 沈国锋, 等. 农村室内薪柴燃烧的颗粒物和炭黑排放因子 [J]. *生态毒理学报*, 2013,8(1):29-36.
- Wei S Y, Su Y H, Sheng G F, et al. Emission factors of particulate matter and elemental carbon from rural residential wood combustion [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2013,8(1):29-36.
- [56] 王玉珏, 胡敏, 王渝, 等. 秸秆燃烧排放 PM_{2.5} 特征及影响因素研究 [J]. *化学学报*, 2016,74(4):356-362.
- Wang Y J, Hu M, Wang Y, et al. Characterization and influence factor of PM_{2.5} emitted from crop straw burning [J]. *Acta Chimica Sinica*, 2016,74(4):356-362.
- [57] Wang Y N, Cheng Y, Gu Z L, et al. Emission Factors and Inventories of Carbonaceous Aerosols from Residential Biomass Burning in Guizhou Province [J]. *Atmosphere*, 2022,13,doi:10.3390/atmos13101595.
- [58] 贺克斌. 城市大气污染源排放清单编制技术手册 [EB/OL]. <https://max.book118.com/html/2018/1116/8107025055001133.shtm>, 2018-11-16.
- He K B. Technical manual for preparation of urban air pollutant emission inventory [EB/OL]. <https://max.book118.com/html/2018/1116/8107025055001133.shtm>, 2018-11-16.
- [59] Mo D, Zhuang G S, Li X X, et al. The characteristics of carbonaceous species and their sources in PM_{2.5} in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2004,38(21):3443-3452.
- [60] Wang Z Z, Bi X H, Sheng G Y, et al. Characterization of organic compounds and molecular tracers from biomass burning smoke in South China I: Broad-leaf trees and shrubs [J]. *Atmospheric Environment*, 2009,43(19):3096-3102.
- [61] Zhang Y Y, Obrist D, Zielinska B, et al. Particulate emissions from different types of biomass burning [J]. *Atmospheric Environment*, 2013,72(2):27-35.
- [62] Wang B, Lee S C, Ho K F. Chemical composition of fine particles from incense burning in a large environmental chamber [J]. *Atmospheric Environment*, 2006,40(40):7858-7868.
- [63] 陈颖军. 家用蜂窝煤燃烧烟气中碳颗粒和多环芳烃的排放特征 [D]. 广州: 中国科学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: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2004.
- [64] Zhu C S, Chen C C, Cao J J, et al. Characterization of carbon fractions for atmospheric fine particles and nanoparticles in a highway tunnel [J]. *Atmospheric Environment*, 2010,44(23):2668-2673.
- [65] Chuang M T, Chou C C K, Sopajaree K, et al. Characterization of aerosol chemical properties from near-source biomass burning in the northern Indochina during 7-SEAS/Dongsha experiment [J]. *Atmospheric Environmental*, 2013,78:72-81.
- [66] Li X X, Shen Z X, Cao J J, et al. Distribution of carbonaceous aerosol during Spring 2005 over the Horqin Sandland in northeastern China [J]. *China Particuology*, 2006,4(6):316-322.

作者简介: 王艳妮(1982-), 女, 陕西吴堡人, 高级工程师, 硕士, 主要从事大气污染源排放清单及数值模拟研究. 发表论文 10 余篇. 215521519@qq.com.