肖明宇,邹长伟,黄 虹,等.工业生物质锅炉烟尘化学组分与棕碳吸光特性 [J]. 中国环境科学, 2025,45(7):3681-3691.
Xiao M Y, Zou C W, Huang H, et al. Case study on chemical composition and optical absorption properties of smoke particles emitted from biomass boilers [J]. China Environmental Science, 2025,45(7):3681-3691.

工业生物质锅炉烟尘化学组分与棕碳吸光特性

肖明宇[1],邹长伟[1],黄 虹[1*],高 燕[1],涂 翔[2],邓 威[2],喻成龙[3] (1.南昌大学资源与环境学院,江西 南昌 330031；2.江西省生态环境科学研究与规划院,江西 南昌 330039；3.江西农业大学国土资源与环境学院,江西 南昌 330045)

摘要：以 6 台工业生物质锅炉为例,采集锅炉烟尘,探讨烟尘中化学组分的分布与棕碳吸光特性.研究发现,工业生物质锅炉烟尘中有机碳(OC)和元素碳(EC)质量占比分别为 1.96%、0.78%,水溶性无机离子质量占比为 46.3%;不同锅炉的烟尘化学组分差异显著,受锅炉燃料、吨位、除尘方式等综合影响;经布袋除尘后 OC/EC 比值(10.8)显著高于旋风除尘(2.27);碳组分以 OC_2、OC_3、OC_4 和 EC_1 为主,Char-EC/Soot-EC 比值变化范围大(0.25~86.0),平均为 18.7;水溶性无机离子组分以 K^+、Cl^-、Na^+、SO_4^{2-}、Ca^{2+}为主(占总水溶性离子的 81.0%~93.6%);WSOC、MSOC 两种棕碳(BrC)的光谱依赖性(AAE)与锅炉燃料、吨位及除尘方式关联不大,质量吸收效率(MAE_{365})与 OC/EC 比值密切相关,工业生物质锅炉烟尘棕碳光吸收能力与燃烧条件相关.工业生物质锅炉烟尘的 MAE_{WSOC} 是生物质炉灶的 4~5 倍,是开放式生物质燃烧的 5~9 倍.研究揭示工业生物质锅炉烟尘中棕碳的吸光特性及其与燃烧条件的关联性.

关键词：生物质锅炉；化学组分；棕碳；吸光特性
中图分类号：X513 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)07-3681-11

Case study on chemical composition and optical absorption properties of smoke particles emitted from biomass boilers. XIAO Ming-yu[1], ZOU Chang-wei[1], HUANG Hong[1*], GAO Yan[1], TU Xiang[2], DENG Wei[2], YU Cheng-long[3] (1.School of Resources & Environment, Nanchang University, Nanchang 330031, China；2.Jiangxi Academy of Ecological Environment Science and Planning, Nanchang 330039, China；3.School of Land Resources and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China). *China Environmental Science*, 2025,45(7)：3681~3691

Abstract：This study investigates the chemical composition and brown carbon (BrC) light-absorption characteristics of smoke particles from six industrial biomass boilers. The mass fractions of organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) in the smoke particles were 1.96% and 0.78%, respectively, while water-soluble inorganic ions accounted for 46.3% of the mass. Significant differences in the chemical composition of smoke particles were observed across different boilers, influenced by factors such as fuel types, boiler loads, and dust removal techniques. Soot-EC from bag-filtered boilers exhibited a higher OC/EC ratio (10.8) compared to cyclone-filtered boilers (2.27). The carbon components were predominantly OC_2, OC_3, OC_4 and EC1, with a highly variable Char-EC/Soot-EC ratio (average: 18.7, range: 0.25~86.0). Water-soluble inorganic ions were primarily K^+, Cl^-, Na^+, SO_4^{2-} and Ca^{2+}, constituting 81.0%~93.6% of the total ions. The spectral properties of BrC, including water-soluble organic carbon (WSOC) and methanol-soluble organic carbon (MSOC), showed limited correlation with boiler fuel, load, or dust removal method. The mass absorption efficiency at 365 nm (MAE_{365}) was closely related to the OC/EC ratio, suggesting a strong link between BrC photo-absorption capacity and combustion conditions. The mass absorption efficiency of WSOC (MAE_{WSOC}) from industrial biomass boiler was 4~5 times higher than that from biomass cookstoves and 5~9 times higher than open biomass combustion emissions, as reported in literature. The study elucidates the light absorption characteristics of brown carbon in smoke particles emitted from industrial biomass boiler and their correlation with combustion conditions.

Key words：biomass boiler；chemical composition；brown carbon；light absorption properties

随着一系列农作物秸秆综合利用政策的推进,生物质露天焚烧或受限或禁止.生物质炉灶主要分布在农村地区,从农村能源使用的多元化趋势来看,薪柴的使用量正在逐渐减少[1].近年来,全国各地秸秆成型燃料生产基地逐步建成,生物质成型燃料产量不断增加[2].生物质属于可再生资源,含硫率低,被认为是比煤更清洁的能源,生物质锅炉在工业领域越来越普遍[3].生物质燃烧源的组成正在发生变化,工业生物质锅炉占工业锅炉的比率快速增加.当前生物质燃烧研究以露天焚烧和民用炉灶为主[4-15],对工业生物质锅炉关注少,仅有叶潇[16]、马彤等[17]

收稿日期：2024-12-06
基金项目：国家自然科学基金资助项目(42265011)
* 责任作者, 教授, honghuang@ncu.edu.cn

分别采用现场采集、下载灰再悬浮两种方式研究生物质锅炉污染物排放特征,而工业生物质锅炉烟尘的吸光特性的研究则更为少见.

碳组分是生物质燃烧排放颗粒的重要组成部分[5,6],对大气辐射平衡有显著影响,主要包括有机碳(OC)、元素碳(EC)[8].OC 是上万种有机物的混合物,棕碳(BrC)是吸光性有机碳的总称,对紫外和近紫外光有较强的吸收[13];EC 不仅对紫外、近紫外有强吸收,对可见光也有较强的吸收,甚至对红外光也有一定的吸收[18].EC 主要来源于含碳物质的不完全燃烧,又分 Char-EC 和 Soot-EC 两部分,燃料燃烧后固态残渣中的 EC 被称为 Char-EC,燃烧后高温气相的挥发物再凝结形成的 EC 被称为 Soot-EC.生物质燃烧排放颗粒物中的水溶性无机离子成分主要有 Na^+、NH_4^+、K^+、Mg^{2+}、Ca^{2+}、Cl^-、NO_2^-、NO_3^-、SO_4^{2-}等[4],影响颗粒物的酸碱性,具有吸湿性,对云凝结核、降水造成影响,对太阳辐射具有散射作用,影响辐射强迫,降低能见度.

本研究选取中国南方地区 6 台工业生物质锅炉为例,以锅炉尾气中的颗粒物为研究对象,探讨工业生物质锅炉烟尘的化学组分与棕碳吸光特性.旨在为构建工业生物质锅炉源成分谱及环境空气中颗粒物来源解析提供数据支撑.

1 实验与方法

1.1 锅炉烟尘样品采集与称重

选取的 6 台工业生物质锅炉涵盖了不同吨位、燃料和除尘技术(如布袋除尘和旋风除尘),在一定程度上反映了工业生物质锅炉实际应用的多样性.按除尘方式分类编号,Bt 指袋式除尘器,Cw 指旋风+水膜除尘器,Cy 指旋风除尘器,被采样锅炉信息见表 1.

表 1 本研究工业生物质锅炉基本信息

Table 1 The Basic information of industrial biomass boilers

参数	锅炉					
	Bt_1	Bt_2	Cw_1	Cw_2	Cy_1	Cy_2
位置	鹰潭	广州	南昌	南昌	鹰潭	南昌
吨位(t/h)	4	4	2	4	4	4
烟温(℃)	102	80	67.5	57	101.3	147
燃料	木质类	生活垃圾中分选出的生物质(树枝、树干、碎木片、木板等)	木屑	木屑	松、杉木+木屑	松、杉木
除尘方式	袋式	袋式	旋风除尘+水膜	旋风除尘+水膜	多管旋风除尘	旋风除尘
采样次数	3	3	3	3	2	2

采样位置位于锅炉烟气处理设备之后、烟囱出口之前的烟囱中部.参考《固定污染源废气 低浓度颗粒物的测定 重量法》(HJ 836-2017)[19]对 Bt_2、Cw_1、Cw_2、Cy_1、Cy_2 锅炉尾气烟尘,使用低浓度烟尘采样器采集于石英滤膜;参考《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法》(GB/T 16157-1996)[20]及其修改单,对锅炉 Bt_1 尾气烟尘使用青岛崂应烟尘采样器采集于石英滤筒.石英滤膜/滤筒经马弗炉 500℃热解 6h 的预处理,衡重 48h 后用十万分之一天平称量空白滤膜/滤筒的重量,采样后的滤筒/滤膜同样衡重 48h 后用天平称重,采样前后质量之差为采集到的烟尘质量.

1.2 锅炉烟尘中化学组分测定

1.2.1 碳组分测定 七波段热光碳分析仪(DRI-2015)IMPROVE-A-TOR 协议测定滤膜上碳组分,$OC=OC_1+OC_2+OC_3+OC_4+OPC$;$EC=EC_1+EC_2+EC_3-OPC$[21].

1.2.2 水溶性无机离子的测定 截取 1/4 采样滤膜/滤筒,剪碎,放入离心管,加 40mL 去离子水,浸没膜片,超声仪(KQ-300DE)超声提取 2h,用固体冰保证低温超声,超声提取液用一次性注射器配 0.22μm 孔径水相过滤头转移至洁净的离心管,-4℃冰箱保存至组分测定.ICS-1100(DionexInc., USA)测定提取液中 Na^+、NH_4^+、K^+、Mg^{2+}、Ca^{2+};ICS-5000+SP(Dionex Inc.,USA)测定提取液中 Cl^-、NO_2^-、NO_3^-、SO_4^{2-}[22].

1.2.3 水溶解有机碳和甲醇溶解有机碳的测定 采用溶剂(纯水、甲醇)提取法,截取 2 张 0.495cm^2 的采样滤膜小圆片分别置于棕色离心管中,分别加入 10mL 去离子水(电阻率为 18.25MW)和 10mL 甲醇(色谱纯),超声仪(KQ-300DE)保证低

温条件下超声提取 1h,避免震动、摇晃.水、甲醇提取液分别用 0.22μm 孔径水相针头式过滤片、0.22μm 孔径 PTEF 针头式过滤片,转移到干净的棕色离心管.取出离心管内经水、甲醇提取后的滤膜小圆片,避免触碰采样面,使用无尘称量纸包裹,经真空冷冻仪(Christ Alpha 1−4LDplus)冷冻干燥,再用碳分析仪测滤膜圆片上剩余的 OC,未经水、甲醇提取的 OC 量减去经水、甲醇提取后剩余的 OC 量,差值法分别计算水溶解有机碳(WSOC)和甲醇溶解有机碳(MSOC)的浓度.

1.3　锅炉烟尘中 WSOC、MSOC 吸光特性检测

1.3.1　棕碳吸光度的测定　水、甲醇提取液用双光束紫外可见分光光度计(TU−1900)测量吸收光谱.吸收光谱扫描间隔为 1nm,扫描范围为 190~900nm,每次测量前进行基线校准和暗电流校准,用纯水、甲醇空白样校零,每测 5 个样重新进行一次基线校准和空白校准.

1.3.2　吸收系数、吸收 Ångström 指数、质量吸收效率的计算　根据朗伯−比尔定律,提取液不同波长的吸光度 A_λ 与吸收系数 $b_{\mathrm{abs},\lambda}$ 之间的关系见式(1).

$$\begin{aligned} A_\lambda &= -\log_{10}\frac{I}{I_0} = l\cdot C\cdot \mathrm{MAE} \\ &= l\cdot\sum_i\left(C_i\cdot \mathrm{MAE}_i\right) = l\cdot b_{\mathrm{abs},\lambda} \end{aligned} \tag{1}$$

式中:I 是透过溶液的光强;I_0 是初始光强;l 是比色皿的光程(0.01m);C 是溶液中吸光发色团的浓度;MAE 是溶液中吸光发色团的质量吸收效率.溶液中发色团对光的吸收等于某个发色团(i)的浓度 C_i 乘以其对应的质量吸收效率 MAE_i,加和再乘以比色皿光程.提取液中棕碳的光吸收系数转换为烟尘中棕碳的吸收系数 $b_{\mathrm{abs},\lambda}$ 的计算见式(2).

$$b_{\mathrm{abs},\lambda} = \frac{\left(A_\lambda - A_{700}\right)\cdot V_1\cdot\times\ln 10}{l\cdot V_\mathrm{a}}\cdot K \tag{2}$$

式中:$b_{\mathrm{abs},\lambda}$ 为烟尘中棕碳(WSOC 或 MSOC)的光吸收系数,Mm^{-1}; A_{700} 为 700nm 波长处提取液的吸光度,该波长处提取液棕碳吸光度接近零; $A_\lambda - A_{700}$ 防止基线偏移干扰;V_1 为提取液体积,mL;ln10 把以 10 为底的对数值转换成以 e 为底的对数值;V_a 是采样滤膜/滤筒的烟气采集体积,m^3;系数 K 把 0.495cm^2 滤膜上的吸光度转换成整张滤膜的吸光度.

本研究对波长 λ_1~$\lambda_2$nm 范围的光吸收系数拟合获得光吸收波长指数(AAE),见式(3).

$$\mathrm{AAE} = -\frac{\ln(b_{\mathrm{abs},\lambda_2}) - \ln(b_{\mathrm{abs},\lambda_1})}{\ln(\lambda_2) - \ln(\lambda_1)} \tag{3}$$

烟尘中棕碳的质量吸收效率(MAE)计算如(4).

$$\mathrm{MAE}_{\mathrm{MSOC\ or\ WSOC},\lambda} = \frac{b_{\mathrm{abs},\lambda}}{[\mathrm{MSOC}]\mathrm{or}[\mathrm{WSOC}]} \tag{4}$$

式中:$\mathrm{MAE}_{\mathrm{MSOC\ or\ WSOC},\lambda}$ 为 MSOC、WSOC 的质量吸收效率,m^2/g; [MSOC]or[WSOC] 为 MSOC 或 WSOC 的质量浓度,$\mu\mathrm{g}/\mathrm{m}^3$.

2　结果与讨论

2.1　工业生物质锅炉烟尘中化学组分的分布特征

由图 1 可知,工业生物质锅炉烟尘中水溶性无机离子、OC 和 EC 分别占颗粒物总质量的 17.70%~70.53%(平均(46.29%±24.29%))、1.23%~3.98%(平均(1.96%±1.07%)) 和 0.11%~1.69%(平 均 (0.78%±0.59%)),占比最高的是水溶性离子,与叶潇研究的生物质锅炉排放 $PM_{2.5}$ 的组分特征结果(水溶性离子占 30%~67%,OC 占 11%~29%;EC 占 0%~12%)相似[16].生物质燃烧过程中不仅直接排放水溶性离子,同时锅炉烟气中汽水含量高,烟气从锅炉燃烧室到烟囱末端的传送过程中,还会有相当数量的二次无机气溶胶颗粒的生成[23].工业生物质锅炉烟尘中碳组分的占比小,原因可能是工业生物质锅炉内燃料与氧气混合较充分,氧燃比较高,OC、EC 的一次产生量不多,同时烟气经过脱硝、高效除尘等装置净化后,含碳颗粒在废气污染控制工艺过程中易被捕集,因此碳组分颗粒在尾气中含量少.不同锅炉烟尘的化学组分占比差异,受锅炉的燃料、吨位及除尘方式等综合影响.

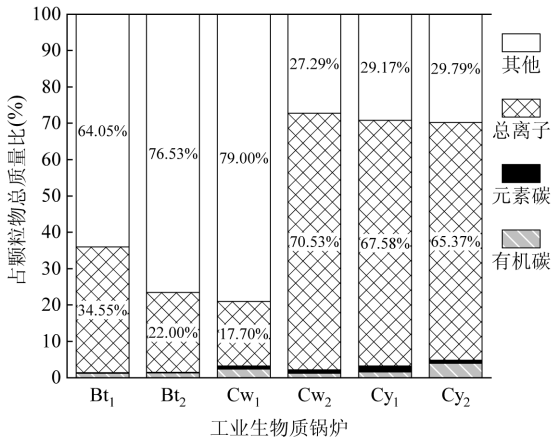


图 1　工业生物质锅炉烟尘中化学组分的占比分布

Fig.1　Distribution of chemical composition in smoke particles from industrial biomass boiler

另外,与生物质露天焚烧和民用炉灶相比,工业生物质锅炉燃烧温度更高,这也是工业生物质锅炉烟尘中碳组分占比低的原因之一,尤其是OC占比相对更低.王玉珏等[24]、Cao 等[8]、Zhang 等[6]分别模拟生物质露天燃烧,发现 OC 和 EC 在颗粒物总质量占比各不相同,OC 占比 31%~61.9%,EC 占比 1%~18.1%.王艳妮等[5]、刘成龙等[11]研究民用生物质炉灶燃烧,OC 占比 42%~58%、6.77%~44.97%,EC 占比 0.39%~0.56%、4.79%~11.42%,Lai 等[4]发现民用炉灶排放 $PM_{2.5}$ 颗粒主要化学组分为碳组分,有机物(OM)占比 76%~90%,EC 占比 5%~6%,无机离子占比小于 2%.通过对比发现,本研究工业生物质锅炉烟尘中 OC、EC 占颗粒物总质量的比例显著低于生物质开放式燃烧.与生物质露天燃烧、民用炉灶燃烧相比,工业锅炉燃烧设备更先进,炉内燃烧更完全[25];当炉膛温度高于 675℃时,飞灰颗粒增加,而有机颗粒持续减少[26].工业锅炉的炉膛温度最高能达到 1000℃左右,生物质在工业锅炉燃烧过程中燃料本身有机质转化为有机挥发分、焦炭和硝酸盐、氯化物、硫酸盐等[27].

赵珂等[28]研究燃煤锅炉排放颗粒物,发现 OC 占颗粒物总质量的 13.10%,EC 占 2.96%,徐健等[29]研究长三角燃煤锅炉排放颗粒物,发现OC占颗粒物总质量的 3.1%~40.7%,EC 占 0.5%~13.5%.与工业燃煤锅炉相比,工业生物质锅炉排放颗粒物中碳组分的占比稍低.

本研究工业生物质锅炉烟尘中水溶性无机离子占颗粒物总质量的 17.70%~70.53%.Cw_1 锅炉(2t/h)烟尘中水溶性无机离子占颗粒物总质量的 17.70%、Cw_2 锅炉(4t/h)烟尘中水溶性无机离子占颗粒物总质量的 70.53%.对比除尘方式、生物质燃料一致的 Cw_1、Cw_2 锅炉,统计显著性检验支持(P<0.05)2 台工业生物质锅炉烟尘中水溶性无机离子含量有显著性差异,锅炉吨位可能是影响工业生物质锅炉烟尘中水溶性无机离子含量的因素之一.工业生物质锅炉烟尘中水溶性无机离子含量差异显著:Bt_1(34.55%)、Bt_2(22.00%)与 Cy_1(67.58%)、Cy_2(65.35%),表明除尘设备的差异(布袋除尘与旋风除尘)也可能会影响工业生物质锅炉烟尘中水溶性无机离子的含量.

2.2 工业生物质锅炉烟尘中碳组分的分布特征

2.2.1 8 个碳组分的分布

如图2所示,本研究工业生物质锅炉烟尘中碳组分 OC_1、OC_2、OC_3、OC_4 和 OPC 占总碳(TC)的质量比依次为 0%~10.9%(平均(3.83%±4.03%))、2.14%~29.96%(平均(14.63%±10.77%))、15.97%~39.21%(平均(28.25%±9.19%))、6.06%~38.01%(平均(22.23%±12.69%))和 0%~10.26%(平均(2.42%±4.20%));EC_1、EC_2、EC_3 占 TC 的质量比依次为 7.89%~51.29%(平均(25.06%±17.16%))、0.6%~7.73%(平均(3.54%±2.53%))、0%~0.15%(平均(0.04%±0.06%)).工业生物质锅炉烟尘中优势碳组分为 OC_2、OC_3、OC_4 和 EC_1、EC_2.王艳妮等[5]研究发现,生物质炉灶排放颗粒物中碳组分主要是 OC_2、OC_3、OC_4 和 EC_1,与本研究工业生物质锅炉特征碳组分一致.

杨艳蓉等[30]研究兰州不同吨位燃煤锅炉排放颗粒物碳组分,发现不同燃煤锅炉排放颗粒物中OC、EC 及其热解成分谱较为相似,其中 EC_1 的含量最高,是最主要的碳质组分,其次为 OC_3.燃煤锅炉排放颗粒物与本研究工业生物质锅炉烟尘中的特征碳组分存在差异.

Chow 等[31]研究发现,植物燃烧排放颗粒物中碳组分以 OC_1、OC_3、EC_1 为主,其中 OC_1 含量最高,与本研究 OC_1 含量低有差异.工业生物质锅炉从燃烧室到排放,烟气有一个传送过程,同时也经过脱硝和除尘装置,与露天燃烧直接排放颗粒物不同,OC_1 在烟气中会很快衰减,并发生二次转化[10].

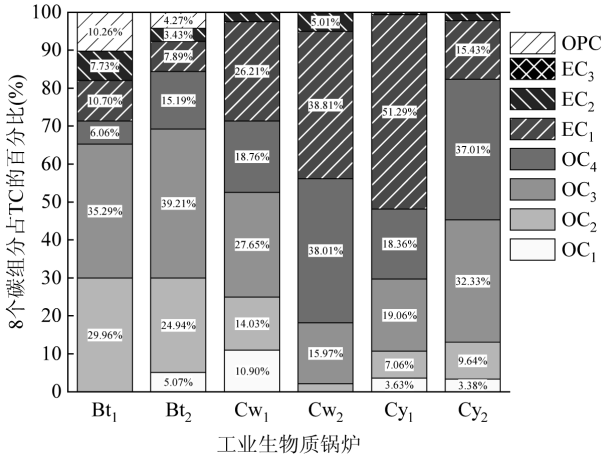


图 2 工业生物质锅炉烟尘中 8 个碳组分占比分布

Fig.2 Distribution of 8 carbon fractions in smoke particles from industrial biomass boiler

本研究 6 台不同工业生物质锅炉烟尘中 8 个碳组分占 TC 比存在明显差异.采用布袋高效除尘的 Bt_1、Bt_2 锅炉,8 个碳组分的分布相似,OC_2、OC_3 占比较高(27.45%、37.25%),两者相加超过 64%;采用旋风除尘的 Cw_1、Cw_2、Cy_1、Cy_2 锅炉,8 个碳组分中以 OC_3、OC_4、EC_1 为优势组分,三者相加超过 72%.马彤等[17]研究南宁市蔗渣经工业生物质锅炉燃烧后产生的下载灰中优势碳组分为 EC_1、OC_1、OC_2 和 OC_3,有差异的优势碳组分是 OC_1.本研究工业生物质锅炉烟尘是末端烟气中的,与马彤等[32]采样方法的不同导致获得的成分谱出现差异.

2.2.2　OC/EC 与 Char−EC/Soot−EC　如图 3 所示,本研究工业生物质锅炉烟尘中 OC/EC 比值为 0.93~12.61,平均(5.47±4.61),Char−EC/Soot−EC 比值为 0.25~86.01,平均(18.74±29.18),其中 Cy_1 锅炉烟尘的 Char−EC/Soot−EC 显著高于其他锅炉,可能与该锅炉燃烧室温度低有关.

有研究[16]发现以成型生物质粉末、颗粒及木材屑为燃料的工业生物质锅炉排放 $PM_{2.5}$ 的组分,OC/EC 比值为 0.86~2.47,以蔗渣生物质燃料为原料的生物质锅炉的下载灰的 OC/EC 比值为(3.8±2.7)[17],与本研究中 Cw_1、Cw_2、Cy_1、Cy_2 锅炉烟尘的 OC/EC 比值(2.27±1.48)相近,但与锅炉 Bt_1、Bt_2 烟尘中 OC/EC 比值(10.79±2.33)差异较大.这可能是除尘方式差异造成的 OC/EC 差异[33].Bt_1、Bt_2 锅炉烟尘浓度较 Cw_1、Cw_2、Cy_1、Cy_2 锅炉烟尘浓度低且 OC/EC 值高,Bt_1、Bt_2 锅炉采用了除尘性能更好的布袋除尘,所以烟尘浓度低,布袋除尘器对细颗粒捕集效率更高[34],与 OC 相比,EC 更集中在<0.49μm 的粒径段[35],所以相比 OC,EC 被去除更多,所以 OC/EC 值高.研究者马彤[17]采集工业生物质锅炉除尘器下载灰,测得布袋除尘器下载灰 OC/EC 值低于旋风除尘器下载灰,本研究中使用布袋除尘器的工业生物质锅炉尾气烟尘的 OC/EC 值高于使用旋风除尘器的锅炉尾气烟尘,两者相互佐证.

有研究以 Char−EC/Soot−EC 判断排放源类型,因其不受 SOA 的影响,被认为是比 OC/EC 更有效的源指标[36].Char−EC 主要来源于生物质和煤炭燃烧,Soot−EC 主要来源于机动车尾气[37].当 Char−EC/Soot−EC<1.0 时,代表移动源强贡献,Char−EC/Soot−EC>3 时指示生物质燃烧和燃煤源贡献[38].本研究中 Char−EC/Soot−EC 比值(18.74±29.18)变化非常大,可能是工业生物质锅炉类型、除尘方式、生物质燃料类型各不相同导致.

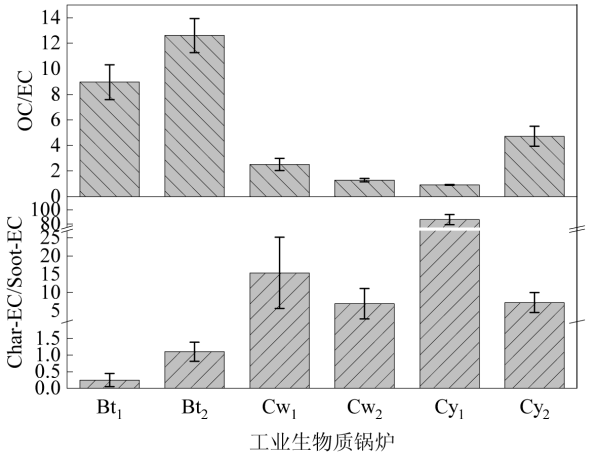


图 3　工业生物质锅炉烟尘中 OC/EC 与 Char−EC/Soot−EC

Fig.3　Ratio of OC/EC and Char−EC/Soot−EC in the smoke particles from industrial biomass boilers

工业生物质锅炉 Cw_1 烟尘的 Char−EC/Soot−EC 高于 Cw_2 锅炉烟尘,Cw_1 锅炉(2t/h)规格低于 Cw_2 锅炉(4t/h),Cw_1 锅炉炉膛燃烧温度低于 Cw_2 锅炉,在高温下生成的碳组分 Soot−EC 含量低于 Cw_2 锅炉.工业生物质锅炉 Cy_1 烟尘的 Char−EC/Soot−EC 很高(86.01±7.26),分析原因是 Cy_1 锅炉烟尘中 EC_1 含量高而 EC_2、EC_3 几乎不排放,原因可能与 Cy_1 锅炉处于低温燃烧状态或采用多管旋风除尘器有关联.

2.2.3　WSOC、MSOC 的分布　生物质燃烧排放颗粒的 OC 中,有相当部分的有机物是水溶性的,能影响大气颗粒物的吸湿性;而且水溶性有机物中含有较多的棕碳,对大气消光的贡献明显.

如图 4,本研究工业生物质锅炉烟尘中 WSOC 占 OC 的比例(WSOC/OC)介于 0.16~0.78 之间,平均(0.52±0.26),是 OC 的重要组成部分,略高于文献报道的生物质开放燃烧排放颗粒物的 WSOC/OC 比值(0.28~0.65,平均 0.46[9];0.37~0.47,平均 0.42[24]),表明生物质燃烧排放颗粒物的消光性具有潜在影响.Lai 等发现传统生物质炉灶排放颗粒物中 WSOC/OC 比值为 0.12[4],Deka 等[7]发现使用未颗粒化生物质的传统南亚生物质炉灶燃烧产生的 WSOC 占 OC 的比例小于 15%,均低于本研究.同为工业锅炉,工业生物质锅炉烟尘的 WSOC/OC(0.52±0.26)高于工业燃煤锅

炉的(平均(0.23±0.12))[30].

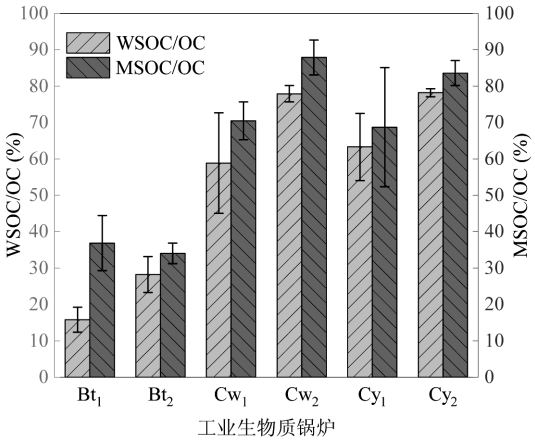


图 4 工业生物质锅炉烟尘中 WSOC、MSOC 占比分布

Fig.4 Ratios of WSOC and MSOC to OC in the smoke particles from industrial biomass boilers

工业生物质锅炉烟尘中 MSOC 占 OC 的比例(MSOC/OC)介于 0.34~0.87 之间,平均(0.62±0.23).在颗粒物样品中,WSOC、MSOC 浓度均呈现相似的变化趋势,这是因为 WSOC 及 MSOC 在来源上具有一定的相似性,但所有样品 MSOC 浓度均高于 WSOC 浓度,这是因为 MSOC 中不仅包括水溶性的有机碳也包括非水溶性的有机碳[12].

对 6 台工业生物质锅炉按除尘方式的不同划分为 3 组(布袋除尘器 Bt_1、Bt_2 锅炉,旋风除尘+水膜 Cw_1、Cw_2 锅炉,旋风除尘器 Cy_1、Cy_2 锅炉),统计显著性检验支持(P<0.05)3 组不同除尘方式的工业生物质锅炉烟尘中 WSOC、MSOC 占比有显著性差异,说明工业生物质锅炉烟尘中 WSOC、MSOC 占比与锅炉除尘方式有关联.

2.3 工业生物质锅炉烟尘中水溶性离子的分布特征

水溶性无机离子是颗粒物中重要的化学组分,决定颗粒物的酸碱性[39],能反映颗粒物的形成机制,并在一定程度上影响颗粒物的表面性质[40].水溶性离子可能会促进气溶胶的吸湿性增长[41],与吸湿性有机物形成云凝结核,直接影响霾的形成[42].

如图 5 所示,本研究工业生物质锅炉烟尘中 9 种水溶性无机离子,按照占比从大到小依次为 K^+、Cl^-、Na^+、SO_4^{2-}、Ca^{2+}、NH_4^+、NO_3^-、NO_2^-和 Mg^{2+},依次占离子总量的(3.35%~64.18%(平均 31.52%±22.27%))、(5.93%~41.59%(平均 20.64%±13.32%))、(3.89%~30.12%(平均 16.23%±7.11%))、(2.12%~30.04%(平均 9.60%±8.98%))、(0.97%~19.40%(平均 8.87%±4.81%))、(0.71%~15.43%(平均 4.73%±4.61%))、(0.23%~8.74%平均(4.20%±3.95%))和(0.42%~11.19%(平均 2.39%±2.76%))、(0.02%~4.38%(平均 1.82%±1.53%)).

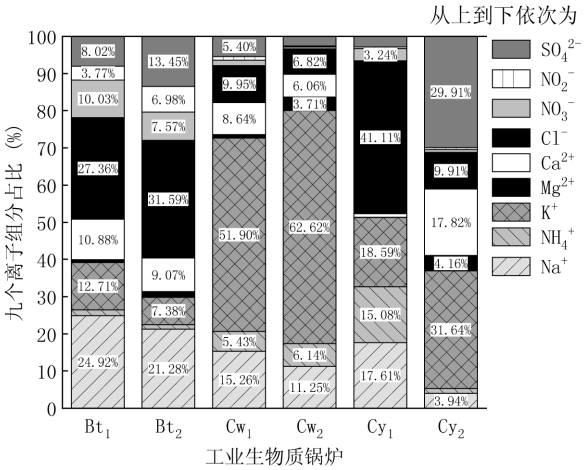


图 5 工业生物质锅炉烟尘中水溶无机离子占离子总量的比

Fig.5 Percentage of water-soluble inorganic ions in total ions of smoke particles from industrial biomass boiler

工业生物质锅炉烟尘中 K^+、Cl^-、Na^+、SO_4^{2-}、Ca^{2+}占水溶性离子的大部分(81.03%~93.55%),与田杰[10]关于生物质开放燃烧的研究类似,而一些关于生物质开放燃烧的研究表明[9,24]排放颗粒物中 Cl^-、K^+是其中浓度最高的组分,其次是 SO_4^{2-}和 NH_4^+,其它组分含量很低或未检出.工业燃煤锅炉中,SO_4^{2-}、Cl^-、Ca^{2+}、Na^+是主要的水溶性离子[30].对比发现工业锅炉烟尘中 Na^+、Ca^{2+}比非工业锅炉的高,可能是受烟气除硫装置使用的脱硫剂的影响;生物质开放燃烧或工业生物质锅炉燃烧,K^+均为所排放颗粒物的示踪成分.

Cw_2 锅炉烟尘中 K^+占离子总量的比例大于 Cw_1 锅炉,原因可能是 Cw_2 锅炉吨位大于 Cw_1 锅炉,炉膛温度更高,导致 K^+的释放增加[43].

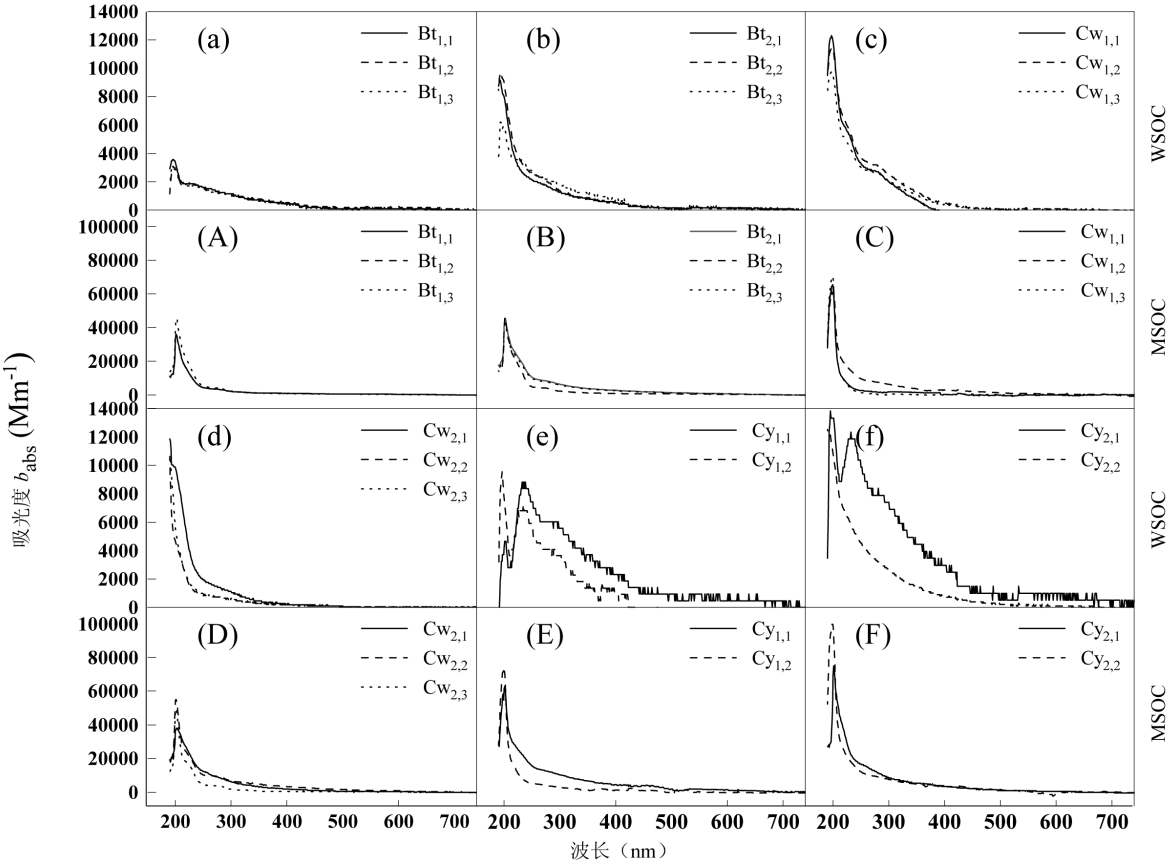
2.4 工业生物质锅炉烟尘中棕碳的吸光特性

如图 6,工业生物质锅炉烟尘中 WSOC 的最大光吸收系数出现在约 197nm 处,平均峰值为 9132Mm^{-1},MSOC 的最大光吸收系数出现在 200nm 左右,平均峰值为 56619Mm^{-1},约为 WSOC 的 6 倍.考虑到最大吸收峰的位置,MSOC 的吸收峰相对于 WSOC 有轻微的“红移”,这可能与溶剂极性的差异

有关.研究发现,通过使用不同极性的甲醇和有机混合溶剂提取棕碳,溶剂极性的差异可以导致芳香族化合物在特定波段的吸收增强[44].另一个原因可能是超纯水和甲醇提取的棕碳成分的类型和含量不同,表明 MSOC 组分中含有一些弱共轭化合物,使得吸收光谱红移[45].

在近紫外波长范围内,光吸收系数的下降趋势比可见光波长更为明显,特别是在 200~250nm 左右.可见光波长下光吸收系数随波长的变化很小,反映了溶解态棕碳在近紫外波长下的强光吸收.

多个锅炉烟尘中棕碳(如 $Bt_{2,3}$ 中 WSOC,$Cw_{1,2}$ 中 WSOC,Cw_2 中 MSOC)吸收锋在250~300nm之间出现一个小吸收峰,这个现象与 Li 等关于中国家用块煤燃烧排放的棕碳气溶胶的吸光特性研究结果一致,且吸收峰所在的波长范围也相同,在 250~ 300nm 之间.Li 等[45]指出小的吸收肩峰可能是 C=C 和 C=O 不饱和键中的π–π*电子跃迁导致,同时也意味着MSOC中可能含有黄腐酸.Domeizel等[46]也指出肩峰代表了芳香族化合物双键吸收的特征.此外这个吸收肩峰还可能和含氮杂环类物质有关,如咪唑,其主要在 280nm 波长处起吸收作用.综上所述,这个肩峰的出现可能跟多种有机物在 250~300nm 处吸光有关.



(图(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f)为WSOC吸收光谱, 图(A)、(B)、(C)、(D)、(E)、(F)为MSOC吸收光谱)

图 6　工业生物质锅炉烟尘中棕碳的吸收光谱

Fig.6　Absorption spectrum of brown carbon in smoke particles from industrial biomass boiler

2.4.1　吸收系数 $b_{abs,365}$　文献中通常将365nm处的光吸收系数 $b_{abs,MSOC,365}$、$b_{abs,WSOC,365}$ 作为 MSOC、WSOC 吸光特性重要表征[47],本研究列出工业生物质锅炉烟尘中棕碳在 365nm 处的光吸收系数,一是为了与文献研究结果进行比较,二是 365nm 波长处吸收系数可以避免硝酸盐等无机组分的干扰[15].

图 7 显示,工业生物质锅炉烟尘的 $b_{abs,WSOC,365}$ 为 327.87~4445.57Mm^{-1}, 平均 (1054.29±1135.47) Mm^{-1},$b_{abs,MSOC,365}$ 为 1048.05~8397.19Mm^{-1}, 平均 (2901.07±1915.88)Mm^{-1}.不同锅炉烟尘的 $b_{abs,365}$ 差异大,受锅炉的燃料、吨位、除尘方式等综合影响.

$b_{abs,MSOC,365}$>$b_{abs,WSOC,365}$ 说明甲醇较水能提取更

多棕碳且提取的棕碳吸光能力更强,这归因于提取的发色团的类型和数量的差异,即更多的发色体(如多环芳烃)在甲醇中提取而不是在水中提取,表明工业生物质锅炉烟尘中存在较多非极性棕碳,水提取可能会低估工业生物质锅炉烟尘中棕碳的光吸收.

图 7 显示 $b_{abs,MSOC,365}/b_{abs,WSOC,365}$ 平均为(3.77±2.64),MSOC/WSOC 平均为(1.40±0.64).锅炉烟尘的 $b_{abs,MSOC,365}/b_{abs,WSOC,365}$ 高于 MSOC/WSOC,表明 MSOC 中的非水溶性成分具有更强的光吸收能力,并主导了棕碳的光吸收.

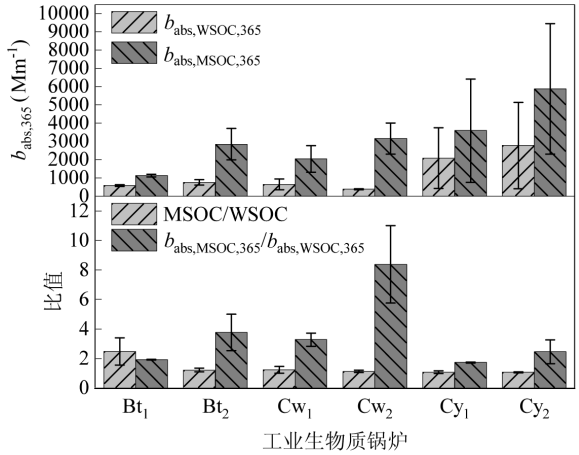


图 7 工业生物质锅炉烟尘中棕碳的 $b_{abs,MSOC,365}$、$b_{abs,WSOC,365}$、$b_{abs,MSOC,365}/b_{abs,WSOC,365}$ 与 MSOC/WSOC

Fig.7 $b_{abs,MSOC,365}$, $b_{abs,WSOC,365}$, ritios of $b_{abs,MSOC,365}/b_{abs,WSOC,365}$ and ritios of MSOC/WSOC for brown carbon in smoke particles from industrial biomass boiler

2.4.2 AAE 指数 WSOC、MSOC 的吸收系数均显示出明显的光谱依赖性,这种光谱依赖性是棕碳的独特特征,通常用参数 AAE 来描述,本研究 AAE 指数在 300~500nm.

如图 8 显示,本研究工业生物质锅炉烟尘的 $AAE_{MSOC,300\sim500}$(2.37~5.04,平均(3.12±0.84))略低于 $AAE_{WSOC,300\sim500}$(3.35~7.72,平均(4.65±1.31)),与其他生物质燃烧排放颗粒物的 AAE 指数相似[12].说明排放源类型相同,棕碳的 AAE 指数差异不大;生物质燃烧排放颗粒物的 AAE 指数值反映棕碳内包含对光有较高吸收能力的有机分子[45].

统计显著性检验支持(P=0.06≥0.05)6 台工业生物质锅炉烟尘中 WSOC、MSOC 的光谱依赖性均没有显著性差异,即工业生物质锅炉烟尘中 WSOC、MSOC 的光谱依赖性与锅炉吨位、燃料及除尘方式关联不大.

2.4.3 质量吸收效率(MAE) 研究表明,MAE_{365} 是描述棕碳中发色团吸光能力的关键参数[45].基于此,本研究使用 MAE_{365} 来表征光吸收能力.

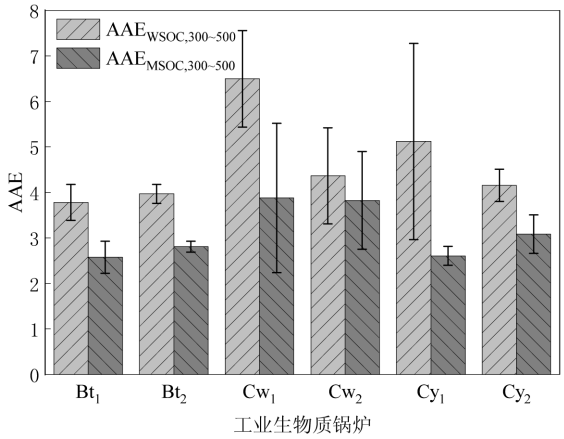


图 8 工业生物质锅炉烟尘中棕碳的 $AAE_{WSOC,300\sim500}$、$AAE_{MSOC,300\sim500}$

Fig.8 $A_{AEWSOC,300\sim500}$, $A_{AEMSOC,300\sim500}$ of brown carbon in smoke particles from industrial biomass boiler

如图 9 显示,本研究工业生物质锅炉烟尘的 MSOC 质量吸收效率 $MAE_{MSOC,365}$(0.34~35.97m^2/g,平均(10.11±12.45m^2/g))高于 $MAE_{WSOC,365}$(0.12~17.06m^2/g,平均(4.82±6.25m^2/g)),约为 1.5~6.0 倍.

Deep 等[13]从美国犹他州的 Fishlake 国家森林收集植被,通过实验室模拟燃烧测得其排放颗粒物的 $MAE_{WSOC,365}$ 为 1.04m^2/g; Wang 等[14]研究农作物秸秆燃烧排放的碳气溶胶的 $MAE_{WSOC,365}$ 为 1m^2/g 左右;Yan 等[15]获得用小麦和稻草在改进的炉灶中燃烧以模拟家用生物燃料的燃烧排放颗粒物的 $MAE_{WSOC,365}$ 为 0.80m^2/g; Zhao 等[12]模拟木材 360℃燃烧、450℃燃烧排放颗粒物的 $MAE_{MSOC,365}$ 分别为(1.73±0.08)和(1.82±0.21)m^2/g,$MAE_{WSOC,365}$ 分别为(0.53±0.04)和(0.56±0.041)m^2/g; Hu 等[48]实测木材炉灶燃烧排放 $PM_{2.5}$ 的 $MAE_{WSOC,365}$ 为(0.89±0.24)m^2/g.工业生物质锅炉烟尘的平均 MAE_{WSOC} 是生物质炉灶的 4~5 倍,约是研究报道的开放式生物质燃烧的 5~9 倍.生物质燃烧排放对气候影响评估模型中,生物质锅炉的棕碳辐射强迫的模拟应专门处理,并与开放式生物质燃烧及生物质炉灶分开.

统计显著性检验发现(P<0.05),本研究 3 组不同

除尘方式的工业生物质锅炉排放棕碳(WSOC、MSOC)的 MAE_{365} 有显著性差异,说明工业生物质锅炉排放棕碳(WSOC、MSOC)的质量吸收效率与锅炉除尘方式有关联.采用袋式除尘的锅炉烟尘的吸收系数 $b_{abs,365}$ 低,但是其质量吸收效率 MAE 高,说明单位质量棕碳的光吸收能力不容忽视.

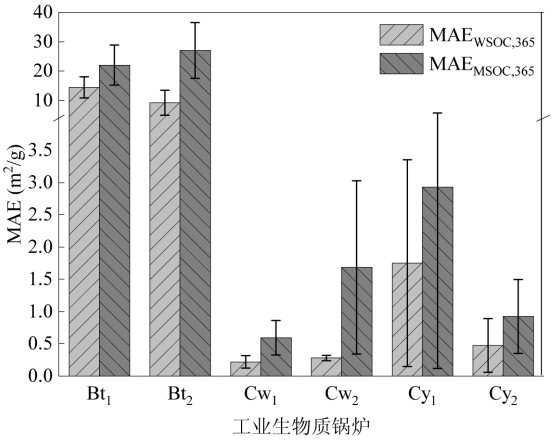


图 9　工业生物质锅炉烟尘中棕碳的质量吸收效率

Fig.9　Mass absorption efficiency of brown carbon in smoke particles from industrial biomass boiler

Bt_1、Bt_2 锅炉烟尘的 $MAE_{WSOC,365}$、$MAE_{MSOC,365}$ 显著高于其他锅炉,可能是由于 Bt_1、Bt_2 锅炉烟尘的 OC/EC 值显著高于其他锅炉.有研究指出 MAE_{BC} 与 OC/EC 呈正相关[18],也有研究称生物质燃烧排放棕碳的 MAC_{365} 与 EC/OC 质量比密切相关[49],与本研究具有相同规律.相关性分析表现 $MAE_{WSOC,365}$ 与 OC/EC 相关系数 R=0.79(P<0.001),$MAE_{MSOC,365}$ 与 OC/EC 的相关系数 R=0.90(P<0.001),OC/EC 一定程度上反应了锅炉的燃烧条件,表明棕碳光吸收能力对燃烧条件的依赖性.

3　结论

3.1　工业生物质锅炉烟尘中 OC、EC 质量占比为(1.96%±1.07%)、(0.78%±0.59%),水溶性无机离子占比为(46.29%±24.29%);与工业燃煤锅炉排放颗粒物的化学组分占比相比,工业生物质锅炉烟尘中碳组分的占比更低;不同锅炉烟尘的组分差异较大,受锅炉的燃料、吨位及除尘方式的综合影响.

3.2　采用布袋除尘的工业生物质锅炉的碳组分与采用旋风除尘的锅炉烟尘存在差异,其 OC/EC 比值(10.79±2.33)高于旋风除尘锅炉的(2.27±1.48); Char-EC/Soot-EC 比值(18.74±29.18)变化范围大,工业生物质锅炉燃烧源贡献指示需特别注意.

3.3　工业生物质锅炉烟尘中含碳组分以 OC_2、OC_3、OC_4 和 EC_1 为主,与生物质炉灶排放颗粒的特征碳组分一致,与生物质露天燃烧、工业燃煤锅炉排放颗粒的特征碳组分存在差异.

3.4　工业生物质锅炉烟尘中水溶性无机离子中 K^+、Cl^-、Na^+、SO_4^{2-}、Ca^{2+} 占水溶性离子的大部分(81.03%~93.55%),反映生物质燃烧 Cl^-、K^+ 特征组分的特征,同时有工业锅炉烟尘 Na^+、Ca^{2+} 占比高的特征.

3.5　工业生物质锅炉烟尘中棕碳(WSOC、MSOC)AAE 指数($AAE_{MSOC,300\sim500}$ 平均(3.12±0.84),$AAE_{WSOC,300\sim500}$ 平均(4.65±1.31)反映生物质燃烧源特征,与锅炉吨位、燃料及除尘方式关联不大,吸收系数 $b_{abs,365}$ 受锅炉吨位、燃料及除尘方式的影响,MAE_{365} 与 OC/EC 质量比密切相关,表明棕碳吸收取决于燃烧条件.

参考文献：

[1] 字琼珍,王昌梅,吴　凯,等.“双碳”目标下中国农村能源发展现状、问题与对策 [J]. 南方能源建设, 2024,11(6):69-78.
Zi Q Z, Wang C M, Wu K, etc Current situation, problems and Countermeasures of China’s rural energy development under the “double carbon” goal [J]. Southern energy construction, 2024,11(6): 69-78.

[2] 杨　波,李胤奇.我国农村能源转型发展的现状、困难及建议 [J]. 农业发展与金融, 2022,(4):37-40.
Yang B, Li Y Q. Current status, difficulties, and suggestions for rural energy transformation and development in China [J]. Agricultural Development and Finance, 2022,(4):37-40.

[3] Huang H, Gao Y, Chen H, et al. Biomass briquette fuel, boiler types and pollutant emissions of industrial biomass boiler: a review [J]. Particuology, 2023,77:79-90.

[4] Lai A, Shan M, Deng M, et al. Differences in chemical composition of $PM_{2.5}$ emissions from traditional versus advanced combustion (semi-gasifier) solid fuel stoves [J]. Chemosphere, 2019,233:852-861.

[5] 王艳妮,杨敬婷,程　燕,等.贵州省户用生物质炉具 $PM_{2.5}$ 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 $PM_{2.5}$ and carbonaceous components from household biomass stoves in guizhou province [J]. China environmental science, 2023,43(5):2138-2151.

[6] Zhang Y, Shao M, Zhang Y, et al. Source profiles of particulate organic matters emitted from cereal straw burnings [J]. Journal of Environmental Sciences, 2007,19(2):167-175.

[7] Deka P, Hoque R R. Chemical characterization of biomass fuel smoke particles of rural kitchens of south Asia [J]. Atmospheric Environment,

2015,108:125−132.

[8] Cao G, Zhang X, Gong S, 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.

[9] 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.

[10] 田 杰.基于实验室模拟我国农作物秸秆与家用煤炭燃烧的 $PM_{2.5}$ 排放特征研究 [D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院地球环境研究所), 2017.
Tian J. Study on $PM_{2.5}$ emission characteristics of crop straw and household coal combustion in China based on laboratory simulation [D]. Shaanxi: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences), 2017.

[11] 刘成龙.典型民用燃烧源排放颗粒物成分谱特征研究 [D]. 北京:华北电力大学(北京), 2021.
Liu C L. Study on the component spectrum characteristics of particulate matter emissions from typical domestic combustion sources [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2021.

[12] Zhao R, Zhang Q, Xu X, et al. Light absorption properties and molecular compositions of water−soluble and methanol−soluble organic carbon emitted from wood pyrolysis and combustion [J]. Science of the Total Environment, 2022,809:151136.

[13] Sengupta D, Samburova V, Bhattarai C, et al. Light absorption by polar and non−polar aerosol compounds from laboratory biomass combustion [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018,18(15): 10849−10867.

[14] Wang Y, Hu M, Xu N, et al. Chemical composition and light absorption of carbonaceous aerosols emitted from crop residue burning: influence of combustion efficiency [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2020,20(22):13721−13734.

[15] Yan C, Zheng M, Sullivan A P, et al. Chemical characteristics and light−absorbing property of water−soluble organic carbon in beijing: biomass burning contributions [J]. Atmospheric Environment, 2015, 121:4−12.

[16] 叶 潇.基于实测的非道路移动源、生物质锅炉污染物排放特征研究 [D]. 广州:华南理工大学, 2019.
Ye X. Study on the emission characteristics of pollutants from non−road mobile sources and biomass boilers based on field measurements [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.

[17] 马 彤,陈家宝,韦进进,等.南宁市生物质锅炉排放的颗粒物中碳组分特征 [J]. 中国环境科学, 2017,37(1):21−26.
Ma T, Chen J B, Wei J J, et al. Characteristics of carbonaceous components in particulate exhausted from biomass boilers in Nanning [J]. China Environmental Science, 2017,37(1):21−26.

[18] Zhang L, Luo Z, Xiong R, et al. Mass absorption efficiency of black carbon from residential solid fuel combustion and its association with carbonaceous fractions [J]. Environmental Science & Technology, 2021,55(15):10662−10671.

[19] HJ 836−2017 生态环境部.固定污染源废气 低浓度颗粒物的测定 重量法: [S].
HJ 836−2017 Ministry of Ecology and Environment Determination of low concentration particulate matter in exhaust gas from fixed pollution sources by gravimetric method: [S].

[20] GB/T 16157—1996 生态环境部.固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法: [S].
GB/T 16157−1996 Ministry of Ecology and Environment Determination of particulate matter and sampling methods for gaseous pollutants in exhaust from fixed sources: [S].

[21] Zou C, Wang J, Gao Y, et al. Distribution characteristics and optical properties of carbonaceous aerosol: brown carbon and black carbon in nanchang, inland china [J]. Atmospheric Pollution Research, 2023, 14(3):101700.

[22] Huang H, Yin X, Tang Y, et al. Seasonal distribution and source apportionment of chemical compositions in $PM_{2.5}$ in nanchang, inland area of east China [J]. Atmosphere, 2023,14(7):1172.

[23] 陈振辉,杨海平,杨 伟,等.生物质燃烧过程中颗粒物的形成机理及排放特性综述 [J]. 生物质化学工程, 2014,48(5):33−38.
Chen Z h, Yang H P, Yang W, et al. Review of the formation mechanism and emission characteristics of particulate matter in biomass combustion [J]. Biomass Chemical Engineering, 2014,48(5): 33−38.

[24] 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. Study on the characteristics and influencing factors of $PM_{2.5}$ emissions from straw combustion [J]. Acta chimica sinica, 2016,74(4):356−362.

[25] 张海瑞.秸秆与皮革污泥混合成型燃料的燃烧特性研究 [D]. 济南:山东大学, 2013.
Zhang H R. Study on the combustion characteristics of briquettes made from straw and leather sludge [D]. Jinan: Shandong University, 2013.

[26] Wiinikka H, Gebart R. Critical parameters for particle emissions in small−scale fixed−bed combustion of wood pellets [J]. Energy & Fuels, 2004,18(4):897−907.

[27] Vassilev S V, Baxter D, Vassileva C G. An overview of the behaviour of biomass during combustion: part I. Phase−mineral transformations of organic and inorganic matter [J]. Fuel, 2013,112:391−449.

[28] 赵 珂.北京某燃煤电厂颗粒物的排放特征与环境影响研究 [D]. 成都:成都理工大学, 2014.
Zhao K. Study on the emission characteristics and environmental impact of particulate matter from a coal−fired power plant in Beijing [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.

[29] 徐 健,黄 成,李 莉,等.长三角地区中小燃煤锅炉 $PM_{2.5}$ 成分谱特征 [J]. 环境科学, 2018,39(4):1493−1501.
Xu J, Huang C, Li L, et al. Chemical composition characteristics of $PM_{2.5}$ emitted by medium and small capacity coal−fired boilers in the Yangtze River delta region [J]. Environmental science, 2018,39(4): 1493−1501.

[30] 杨艳蓉,周雪明,秦娟娟,等.燃煤锅炉颗粒物化学组成排放特征 [J]. 环境科学, 2019,40(9):3908−3915.
Yang Y R, Zhou X M, Qin J J, et al. Emission characteristics of chemical composition of particulate matter from coal−fired boilers [J].

Environmental Science, 2019,40(9):3908−3915.

[31] Chow J C, Watson J G, Kuhns H, et al. Source profiles for industrial, mobile, and area sources in the big bend regional aerosol visibility and observational study [J]. Chemosphere, 2004,54(2):185−208.

[32] 陆　炳,孔少飞,韩　斌,等.燃煤锅炉排放颗粒物成分谱特征研究 [J]. 煤炭学报, 2011,36(11):1928−1933.
Lu B, Kong S F, Han B, et al. Study on the component spectrum characteristics of particulate matter emissions from coal−fired boilers [J]. Journal of China Coal Society, 2011,36(11):1928−1933.

[33] Du X, Wu J, Tian Y, et al. Characteristics of chemical composition and particle size distribution from real coal−fired circulating fluidised bed (CFB) boiler [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2021,21(6): 200539.

[34] 宋凤敏.袋式除尘器和旋风除尘器的性能及其应用的比较 [J]. 环境科学与管理, 2012,37(8):90−92,119.
Song F M. Comparison of performance and application of bag filters and cyclone separators [J]. Environmental Science and Management, 2012,37(8):90−92,119.

[35] 范雪波,刘　卫,王广华,等.杭州市大气颗粒物浓度及组分的粒径分布 [J]. 中国环境科学, 2011,31(1):13−18.
Fan X B, Liu W, Wang G H, et al. Size distributions of concentrations and chemical components in Hangzhou atmospheric particles [J]. China Environmental Science, 2011,31(1):13−18.

[36] Han Y M, Lee S C, Cao J J, et al. Spatial distribution and seasonal variation of char−EC and soot−EC in the atmosphere over china [J]. Atmospheric Environment, 2009,43(38):6066−6073.

[37] Han Y M, Chen L W A, Huang R J, et al. Carbonaceous aerosols in megacity xi'an, china: implications of thermal/optical protocols comparison [J]. Atmospheric Environment, 2016,132:58−68.

[38] Han Y M, Cao J J, Lee S C, et al. Different characteristics of char and soot in the atmosphere and their ratio as an indicator for source identification in xi'an, china [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010,10(2):595−607.

[39] Ye B. Concentration and chemical composition of $PM_{2.5}$ in shanghai for a 1−year period [J]. Atmospheric Environment, 2003,37(4):499−510.

[40] Wang G, Wang H, Yu Y, et al. Chemical characterization of water−soluble components of PM_{10} and $PM_{2.5}$ atmospheric aerosols in five locations of nanjing, china [J]. Atmospheric Environment, 2003, 37(21):2893−2902.

[41] Qiao T. Seasonal variations of water soluble composition (WSOC, hulis and WSIIs) in PM1and its implications on haze pollution in urban shanghai, china [J]. Atmospheric Environment, 2015,123:306−314.

[42] 韩月梅,沈振兴,曹军骥,等.西安市大气颗粒物中水溶性无机离子的季节变化特征 [J]. 环境化学, 2009,28(2):261−266.
Han Y M, Shen Z X, Cao J J, et al. Seasonal variation characteristics of water−soluble inorganic ions in atmospheric particulate matter in Xi'an [J]. Environmental Chemistry, 2009,28(2):261−266.

[43] Venturini E, Vassura I, Agostini F, et al. Effect of fuel quality classes on the emissions of a residential wood pellet stove [J]. Fuel, 2018, 211:269−277.

[44] 赵美玲,黄汝锦,杨　露.甲醇和有机混合溶剂提取棕碳气溶胶光学性质的差异及原因探讨 [J]. 地球环境学报, 2021,12(6):666−676.
Zhao M L, Huang R J, Yang L. Differences and reasons in the optical properties of brown carbon aerosols extracted by methanol and organic mixed solvents [J]. Journal of Earth Environment, 2021,12(6):666−676.

[45] Li M, Fan X, Zhu M, et al. Abundance and light absorption properties of brown carbon emitted from residential coal combustion in China [J]. Environmental Science & Technology, 2019,53(2):595−603.

[46] Domeizel M, Khalil A, Prudent P. UV spectroscopy: a tool for monitoring humification and for proposing an index of the maturity of compost [J]. Bioresource Technology, 2004,94(2):177−184.

[47] Ni H, Huang R J, Pieber S M, et al. Brown carbon in primary and aged coal combustion emission [J]. Environmental Science & Technology, 2021,55(9):5701−5710.

[48] Hu Z, Kang S, Li C, et al. Light absorption of biomass burning and vehicle emission−sourced carbonaceous aerosols of the Tibetan Plateau [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(18):15369−15378.

[49] Xie M, Shen G, Holder A L, et al. Light absorption of organic carbon emitted from burning wood, charcoal, and kerosene in household cookstoves [J]. Environmental Pollution, 2018,240:60−67.

作者简介：肖明宇(2002−),男,江西赣州人,南昌大学硕士研究生,主要研究方向为大气环境.mingyv_xiao@qq.com.