

叶 巡, 程晋俊, 陈 莎, 等. 秸秆燃烧PM<sub>2.5</sub>及其碳组分排放特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(5): 1165-1175.

YE Xun, CHENG Jin-jun, CHEN Sha, et al. Emission characteristics of PM<sub>2.5</sub> and its carbonaceous components emitted from crop straw burning[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(5): 1165-1175.

## 秸秆燃烧PM<sub>2.5</sub>及其碳组分排放特征研究

叶 巡, 程晋俊, 陈 莎, 梁志发, 张 晖, 刘君侠, 刘琼玉\*

(工业烟尘污染控制湖北省重点实验室, 江汉大学, 武汉 430056)

**摘 要:**采用自主设计的民用炉灶燃烧-烟气稀释采样装置, 获得安徽淮南和湖北武汉的小麦、玉米、水稻、花生、大豆5类典型农作物秸秆燃烧排放PM<sub>2.5</sub>及其碳组分的排放因子, 分析了排放因子的差异, 筛选了碳组分的标识组分。结果表明, 秸秆燃烧PM<sub>2.5</sub>的排放因子随秸秆种类和地区的不同而呈现明显差异, 淮南的秸秆燃烧烟气PM<sub>2.5</sub>排放因子在0.56~7.67 g·kg<sup>-1</sup>, 武汉的秸秆燃烧烟气PM<sub>2.5</sub>排放因子在3.53~7.91 g·kg<sup>-1</sup>; 不同种类秸秆烟气PM<sub>2.5</sub>排放因子有明显差异, 花生秸秆燃烧烟气PM<sub>2.5</sub>的排放因子最高(均值5.98 g·kg<sup>-1</sup>), 是大豆秸秆燃烧烟气PM<sub>2.5</sub>排放因子(均值2.04 g·kg<sup>-1</sup>)的2.93倍。秸秆燃烧PM<sub>2.5</sub>的排放因子随秸秆含水率的增加而明显增大。碳组分是5种秸秆燃烧PM<sub>2.5</sub>的主要成分碳, 总碳(TC)占PM<sub>2.5</sub>的36.40%~65.84%, 其中花生秸秆TC排放因子最高(均值2.58 g·kg<sup>-1</sup>), 是小麦秸秆的TC排放因子(均值1.07 g·kg<sup>-1</sup>)的2.41倍; 秸秆燃烧PM<sub>2.5</sub>中的有机碳(OC)浓度远高于元素碳(EC), OC/EC值为2.36~13.73, 表明秸秆燃烧对二次气溶胶的形成具有重要影响。淮南及武汉的秸秆燃烧烟气PM<sub>2.5</sub>中char-EC/soot-EC值为17.20~64.16, char-EC显著高于soot-EC, 可作为判断秸秆燃烧源的一个重要指标。主成分分析结果表明, 秸秆燃烧PM<sub>2.5</sub>中的OC1、OC2和EC1在碳组分中贡献较大, 因此, OC1、OC2和EC1可作为秸秆燃烧PM<sub>2.5</sub>的标识性组分。

**关键词:** 秸秆; 细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>); 碳组分; 排放因子; 标识组分

中图分类号: X513 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2019)05-1165-11 doi:10.11654/jaes.2018-1195

### Emission characteristics of PM<sub>2.5</sub> and its carbonaceous components emitted from crop straw burning

YE Xun, CHENG Jin-jun, CHEN Sha, LIANG Zhi-fa, ZHANG Hui, LIU Jun-xia, LIU Qiong-yu\*

(Hubei Key Laboratory of Industrial Fume and Dust Pollution Control, Jiangnan University, Wuhan 430056, China)

**Abstract:** Five kinds of typical crop straws including wheat, corn, peanut, rice and soybean straws obtained from Huainan, Anhui Province and Wuhan, Hubei Province, were investigated for combustion experiment using self-designed combustion-dilution sampling device. The fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) and carbonaceous components emitted from crop straws combustion were collected and the differences in emission factors of PM<sub>2.5</sub> and the carbonaceous components in the two regions were analyzed, and the indicative components of carbonaceous components were screened. The result showed that emission factors of PM<sub>2.5</sub> from crop straw burning were obviously different for the different crop straw species and regions. The emission factors of PM<sub>2.5</sub> from crop straw burning in Huainan were 0.56~7.67 g·kg<sup>-1</sup>, and that in Wuhan was 3.53~7.91 g·kg<sup>-1</sup>. Moreover, the emission factor of PM<sub>2.5</sub> was also significantly different for the different kinds of crop straws. The emission factor of PM<sub>2.5</sub> of peanut straw reached the maximum value with an average value of 5.98 g·kg<sup>-1</sup> among the five crop straws, which was 2.93 times of that of soybean straw (the average value was 2.04 g·kg<sup>-1</sup>). The emission factor of PM<sub>2.5</sub> increased with increasing the moisture content in straw. Carbonaceous components were the main component of PM<sub>2.5</sub> from crop straw burning, and the percentage of total carbon (TC) in PM<sub>2.5</sub> ranged from 36.40% to 65.84%. Among the five crop straws, peanut straw showed the highest emission factor of

收稿日期: 2018-09-19 录用日期: 2018-11-13

作者简介: 叶 巡(1993—), 男, 湖北武汉人, 硕士研究生, 从事环境化学工程研究。E-mail: asd1145697@163.com

\*通信作者: 刘琼玉 E-mail: qiongyuliu@163.com

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划(培育项目)(91543103); 武汉研究院开放性课题(IWHS2016332)

Project supported: The Major Research Plan of the National Natural Science Foundation of China (Cultivating Project) (91543103); Open Research Project of Wuhan Research Institute (IWHS2016332)

TC in  $PM_{2.5}$  with an average value of  $2.58 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , which was 2.41 times of that of wheat straw with the average value of  $1.07 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ . The percentage of organic carbon (OC) was much higher than that of elemental carbon (EC) in  $PM_{2.5}$ , and the ratios of OC/EC ranged from 2.36 to 13.73, indicating that crop straw burning had an important effect on the formation of secondary aerosols. The ratios of char-EC/soot-EC in  $PM_{2.5}$  from crop straw in Huainan and Wuhan were between 17.20~64.16, and char-EC was significantly higher than soot-EC. So the ratios of char-EC/soot-EC could be used as an important indicator to judge the source of straw combustion. The result of principal component analysis (PCA) showed that OC1, OC2 and EC1 mainly contributed to the carbonaceous component in  $PM_{2.5}$  in Huainan and Wuhan, and therefore OC1, OC2 and EC1 could be used as indicative components of  $PM_{2.5}$  emitted from crop straw burning.

**Keywords:** crop straw; fine particulate matter ( $PM_{2.5}$ ); carbonaceous component; emission factor; indicative component

近年来,灰霾天气频繁出现,对人类身体健康和心理健康造成了极大的威胁<sup>[1-2]</sup>。研究表明, $PM_{2.5}$ 中的碳组分对灰霾的形成有重要影响,碳组分是 $PM_{2.5}$ 的重要组成部分<sup>[3]</sup>,一般包括有机碳(OC)和元素碳(EC),OC和EC联合作用能吸收大量太阳辐射,并改变大气光化学性质,对农业生产、气候变化和人体健康有重要影响<sup>[4-5]</sup>,引起了国内外学者的广泛关注。生物质燃烧向大气中排放大量污染物,是大气 $PM_{2.5}$ 及其碳组分的重要来源之一。国家环保部于2014年在全国直辖市、各省会城市及周边城市开展大规模的源解析工作,从全国主要城市发布的 $PM_{2.5}$ 源解析结果来看,生物质尘源对 $PM_{2.5}$ 的贡献率可达10%~15%<sup>[6-9]</sup>,生物质尘源对 $PM_{2.5}$ 的贡献不可忽略。我国是农业大国,秸秆燃烧比率远高于草原燃烧和森林燃烧,对秸秆燃烧排放特征的掌握是制定控制对策和进行污染治理的重要前提。由于秸秆燃烧排放的 $PM_{2.5}$ 及其碳组分受到秸秆种类、燃料性质、含水率、燃烧条件等因素的影响,研究的结果会产生较大的差异<sup>[10]</sup>。以小麦秸秆为例,中国科学院建立的我国 $PM_{2.5}$ 主要排放源谱数据库中,陕西渭南、咸阳、铜川、河北邢台以及山东济宁的小麦秸秆燃烧排放的OC在 $PM_{2.5}$ 中的所占比例为18.07%~58.70%,差距较为明显<sup>[11]</sup>。因此,为提供更具代表性的基础数据,需要建立本地化、精细化的秸秆燃烧源谱。

湖北省和安徽省是我国粮食大省,湖北每年秸秆产量可达3680万t<sup>[12]</sup>,安徽秸秆年产量更是达到4831万t左右<sup>[13]</sup>。根据环保部的秸秆焚烧报告统计,2017年环保部卫星共报道安徽省秸秆火点76个,淮南市2个,湖北省秸秆火点86个,武汉市7个<sup>[14]</sup>。安徽及湖北的秸秆产量和秸秆火点数目在全国居于前列,开展安徽淮南和湖北武汉两地秸秆燃烧 $PM_{2.5}$ 碳组分排放特征的研究,获得秸秆燃烧 $PM_{2.5}$ 及其碳组分(OC1、OC2、OC3、OC4、EC1、EC2、EC3、OPC、TC、OC、EC等)

的排放因子,分析不同秸秆(小麦、玉米、花生、水稻、大豆)的碳组分排放特征差异,对估算生物质对大气 $PM_{2.5}$ 的贡献以及灰霾的来源解析等问题有重要意义。

## 1 材料与方 法

### 1.1 主要仪器与试剂

恒温恒湿箱(HWS-150,上海精宏实验设备有限公司),破碎机(FW80-1,天津市泰斯特仪器有限公司),中流量智能颗粒物采样器(2030,青岛崂山应用技术研究),颗粒物再悬浮采样装置(自主设计,委托制作),燃烧炉(自行购置,通过《民用柴炉、柴灶热性能测试方法》(NY/T 8—2006)),数显电热鼓风干燥箱(HN101-3A,南通沪南科学仪器有限公司),电子天平(CPA225D,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司),TC分析仪(multi N/C 3100,德国耶拿分析仪器股份有限公司),OC/EC分析仪(DRI2001A,美国沙漠研究所),冰箱(BCD-108CL,中国星星集团有限公司),箱式节能电阻炉(SX2-2.5-10,湖北英山县建力电炉制造有限公司),无水乙醇(分析纯,国药集团)。

### 1.2 秸秆样品的采集与制备

选取淮南及武汉的5种典型生物质秸秆,即小麦秸秆、玉米秸秆、花生秸秆、水稻秸秆和大豆秸秆为研究对象,根据《生物质固体成型燃料样品制备方法》(NY/T 1880—2010)制样,将5种生物质处理成长度小于30 mm的样品平铺在盘子内,厚度不超过样品粒度的3倍,放置在实验室至少24 h,直至接近温度和湿度的平衡。为研究含水率对生物质燃烧烟气 $PM_{2.5}$ 排放特征的影响,将淮南及武汉的大豆秸秆,制备成3个不同含水率的样品。秸秆原样破碎后过200目筛网,装入干净的塑料自封袋待测。

### 1.3 秸秆燃烧烟气 $PM_{2.5}$ 样品的采集

经过走访调查,淮南及武汉农村居民仍然普遍存

在使用炉灶燃烧秸秆的现象。对秸秆燃烧的研究主要可分为实地燃烧和实验室模拟燃烧两种方式,实地燃烧更贴近实际情况,但是燃烧条件不易控制,且烟气容易扩散,较难采集具有代表性的细颗粒物样品。为了更好地控制燃烧条件和采集具有代表性的细颗粒物样品,本研究采用了实验室模拟农村炉灶燃烧-稀释采样的方式进行研究。称取淮南及武汉5种典型生物质秸秆样品及不同含水率大豆秸秆20 g,燃烧-稀释烟气采样装置,装置由燃烧炉、连接管、稀释采样室和PM<sub>2.5</sub>采样器组成,如图1所示。每种生物质、每种含水率的大豆秸秆均平行采样4次,记录相关采样数据。

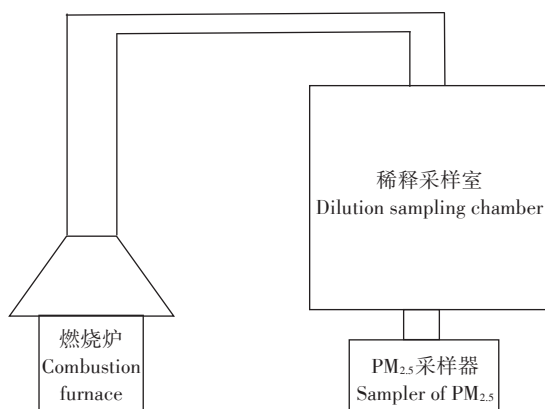


图1 秸秆燃烧烟气PM<sub>2.5</sub>采样装置示意图

Figure 1 The sampling device schematic diagram of PM<sub>2.5</sub> from crop straw burning

#### 1.4 碳组分的分析方法

##### (1) PM<sub>2.5</sub>样品中碳组分的测定

本研究使用美国沙漠研究所研制的DRI-2001A型OC/EC分析仪分析采集烟气PM<sub>2.5</sub>中的碳组分。经过实验室对不同碳组分分析方法的测试后,本研究采用美国环保总署下属的视觉环境保护协作监测网络项目推荐的IMPROVE法的改进方法IMPROVE-A法<sup>[15]</sup>。

##### (2) 秸秆原样总碳的分析方法

利用德国耶拿公司生产的multi N/C总碳分析仪测试秸秆原样中的TC(总碳)含量,燃烧温度900℃。

#### 1.5 PM<sub>2.5</sub>及碳组分排放因子计算

PM<sub>2.5</sub>及碳组分的排放因子计算公式如下:

$$EF_i = \frac{m_i}{M} \times 1000$$

式中:  $EF_i$  为第  $i$  种秸秆燃烧PM<sub>2.5</sub>或者PM<sub>2.5</sub>中某碳组分排放因子,  $g \cdot kg^{-1}$ ;  $m_i$  为第  $i$  种秸秆燃烧采集烟气中

PM<sub>2.5</sub>或PM<sub>2.5</sub>中某碳组分质量,  $g$ ;  $M$  为第  $i$  种秸秆实际燃烧质量,  $g$ 。

#### 1.6 质量控制

本研究所采用的玻璃纤维滤膜采样前置于马弗炉中在500℃的高温条件下烘烤2 h,以除去可能的含碳杂质干扰,置入洁净的自封袋并编号。将自封袋开一道小口放入恒温恒湿箱,在温度为25℃相对湿度为50%的条件下平衡24 h,使用精度为0.01 mg的电子天平称量,平衡后准确称量滤膜质量,将平衡后的滤膜置于PM<sub>2.5</sub>采样器中,采样后再次将装有滤膜的自封袋放置于恒温恒湿箱中平衡24 h,平衡后再次准确称量,两次称量差值即为所采集的PM<sub>2.5</sub>实际质量,同时对采样室内空气做空白采样。OC/EC分析仪的系统空白低于 $0.5 \mu g \cdot cm^{-2}$ ,平行样测试结果的相对标准偏差(RSD)在5%以内。

## 2 结果与讨论

### 2.1 秸秆燃烧烟气PM<sub>2.5</sub>的排放特征

#### 2.1.1 秸秆燃烧烟气PM<sub>2.5</sub>的排放因子

5种代表性秸秆燃烧烟气中PM<sub>2.5</sub>排放因子如图2所示。

由图2可知,淮南的秸秆燃烧烟气PM<sub>2.5</sub>排放因子为 $0.56 \sim 7.67 g \cdot kg^{-1}$ ,武汉的秸秆燃烧烟气PM<sub>2.5</sub>排放因子为 $3.53 \sim 7.91 g \cdot kg^{-1}$ 。不同种类的秸秆燃烧烟气的PM<sub>2.5</sub>排放因子相差较大,淮南的花生秸秆燃烧PM<sub>2.5</sub>排放因子最大,达 $7.67 g \cdot kg^{-1}$ ,大豆秸秆燃烧PM<sub>2.5</sub>排放因子最小,为 $0.56 g \cdot kg^{-1}$ ;武汉的玉米秸秆排放因子最大,为 $7.91 g \cdot kg^{-1}$ ,大豆秸秆燃烧PM<sub>2.5</sub>排放因子最小,为 $3.53 g \cdot kg^{-1}$ 。两地花生秸秆燃烧PM<sub>2.5</sub>排放因子(均值 $5.98 g \cdot kg^{-1}$ )是大豆秸秆PM<sub>2.5</sub>排放因

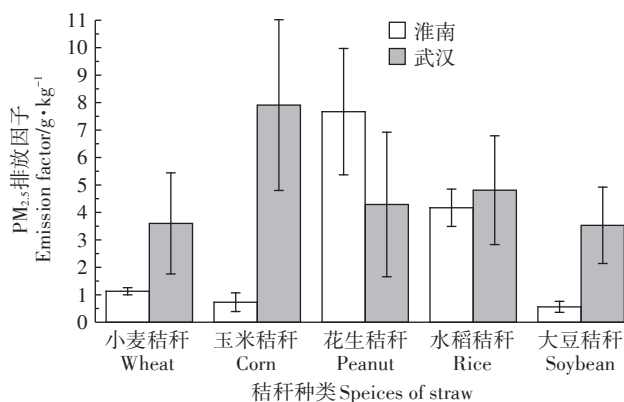


图2 秸秆燃烧烟气PM<sub>2.5</sub>的排放因子

Figure 2 Emission factors of PM<sub>2.5</sub> from crop straw burning

子(均值  $2.04 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )的 2.93 倍。同种生物质燃烧排放因子差异也较为明显,武汉玉米秸秆  $\text{PM}_{2.5}$  排放因子远高于淮南玉米秸秆的  $\text{PM}_{2.5}$  排放因子。

鉴于秸秆燃烧  $\text{PM}_{2.5}$  的排放因子较大,对大气环境污染影响较大,2014 年国家发改委和农业部编制的《秸秆综合利用技术目录》提出了秸秆资源肥料化、燃料化、原料化、饲料化和基料化“五化”利用途径。国家和各地方政府已出台政策严禁秸秆焚烧,但是全国各地仍然观测到很多秸秆焚烧火点,建议各级政府引导农民进行秸秆“五化”规模化利用。

本研究与国内外学者获得的秸秆燃烧  $\text{PM}_{2.5}$  排放因子的比较列于表 1。

由表 1 国内外的研究结果来看,由于秸秆种类、地区和燃烧方式的差异,秸秆燃烧  $\text{PM}_{2.5}$  的排放因子存在一定差异,因此在  $\text{PM}_{2.5}$  源解析中,需要建立本地

化、精细化的源排放清单。

### 2.1.2 含水率对秸秆燃烧烟气 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子的影响

制备了不同含水率大豆秸秆样品,所得的秸秆燃烧烟气  $\text{PM}_{2.5}$  排放因子结果如图 3 所示。

由图 3 可知,含水率对秸秆燃烧  $\text{PM}_{2.5}$  排放因子有显著影响。以淮南和武汉的大豆秸秆的燃烧为例,  $\text{PM}_{2.5}$  排放因子随含水率的增加而增大。含水率为 12.68% 的淮南大豆秸秆  $\text{PM}_{2.5}$  排放因子为  $0.56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 当水分含量增加至 26.63% 时,  $\text{PM}_{2.5}$  排放因子达到  $2.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 增加了 3 倍; 含水率为 36.49% 的武汉大豆秸秆排放因子为  $4.79 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 是含水率为 18.83% 的样品的 1.3 倍。随着含水率的增加,排放的  $\text{PM}_{2.5}$  也随之增大。

相关研究表明,对小麦和玉米秸秆进行控制含水率梯度进行实验,含水率高的样品  $\text{PM}_{2.5}$  排放因子为

表 1 本研究秸秆燃烧烟气  $\text{PM}_{2.5}$  与国内外研究结果的比较

Table 1 Comparison with published emission factors of  $\text{PM}_{2.5}$  from crop straw burning at home and abroad

地区 Region	秸秆种类 Species of straw	排放因子 Emission factor/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	燃烧-采样方式 Combustion-Sampling method	参考文献 Reference
淮南 Huainan	小麦秸秆 Wheat	1.13±0.13	实验室模拟农村炉灶燃烧-稀释采样 Simulative experiment of burning in stove-dilution sampling	本研究 This study
	玉米秸秆 Corn	0.72±0.34		
	花生秸秆 Peanut	7.67±2.30		
	水稻秸秆 Rice	4.81±0.68		
	大豆秸秆 Soybean	0.56±0.20		
武汉 Wuhan	小麦秸秆 Wheat	3.60±1.84		
	玉米秸秆 Corn	7.91±3.11		
	花生秸秆 Peanut	4.29±2.63		
	水稻秸秆 Rice	4.17±1.98		
	大豆秸秆 Soybean	3.53±1.39		
河南邓县 Dengxian	小麦秸秆 Wheat	0.84±0.47	实验室模拟露天燃烧-稀释通道采样 Simulative experiment of burning in field-dilution channel sampling	[16]
河南望都 Wangdu	小麦秸秆 Wheat	0.90±0.55		
河南郑州 Zhengzhou	玉米秸秆 Corn	1.08±0.59		
陕西、安徽、山东、河南、河北 Shaanxi, Anhui, Shandong, Henan and Hebei	小麦秸秆 Wheat	11.4±4.9	实验室燃烧室燃烧-稀释通道采样 Simulative experiment of burning in stove-dilution channel sampling	[17]
	玉米秸秆 Corn	12.0±5.4		
	水稻秸秆 Rice	8.5±6.7		
中国东部、中部和北部 East, north and central section of China	小麦秸秆 Wheat	6.2	实验室燃烧室燃烧-稀释通道采样 Simulative experiment of burning in stove-dilution channel sampling	[18]
	玉米秸秆 Corn	10.5		
	水稻秸秆 Rice	13.1		
重庆 Chongqing	玉米秸秆 Corn	2.45~3.85	现场模拟农村炉灶燃烧-稀释通道采样 Simulative experiment of burning in stove-dilution channel sampling	[19]
	水稻秸秆 Rice	1.66~1.94		
	大豆秸秆 Soybean	3.28±0.87		
河南 Henan	小麦秸秆 Wheat	5.61~8.39		
山东 Shandong	小麦秸秆 Wheat	3.21±0.32		
	玉米秸秆 Corn	4.54±0.97		
印度 India	水稻秸秆 Rice	9.3±4.1	实验室模拟农村炉灶燃烧-稀释通道采样 Simulative experiment of burning in stove-dilution channel sampling	[20]

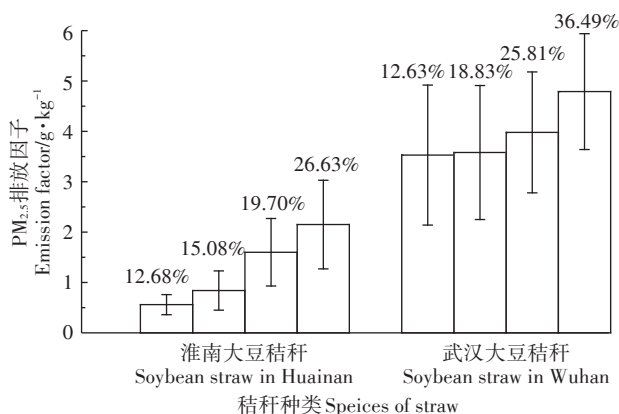


图3 含水率对大豆秸秆燃烧烟气PM<sub>2.5</sub>排放因子的影响

Figure 3 Emission factors of PM<sub>2.5</sub> from soybean straw burning under different straw moisture contents

低含水率样品的2~3倍<sup>[20]</sup>,这是因为随着含水率的增加,生物质需要消耗更多的燃烧热量蒸发水分,从而降低燃烧效率,排放更多的颗粒物。国外学者对蔷薇科淡灰色灌木叶片研究发现,叶片的湿度从5%增加到84%时,PM<sub>2.5</sub>排放因子增加了27倍<sup>[21]</sup>。含水率与秸秆燃烧排放的PM<sub>2.5</sub>成正比关系。

## 2.2 秸秆燃烧烟气PM<sub>2.5</sub>中TC、OC和EC的排放特征

### 2.2.1 生物质原样中TC含量

采用TC分析仪,测得淮南和武汉水稻秸秆、小麦秸秆、玉米秸秆、花生秸秆和大豆秸秆等5种典型生物质原样中TC含量,结果见图4。

由图4可知,淮南水稻秸秆、小麦秸秆、玉米秸秆、花生秸秆和大豆秸秆等5种典型秸秆TC在26.62%~37.71%范围,TC含量大小次序为:小麦秸秆>花生秸秆>大豆秸秆>水稻秸秆>玉米秸秆,其中小麦秸秆TC百分含量最高,达37.71%,玉米秸秆TC百

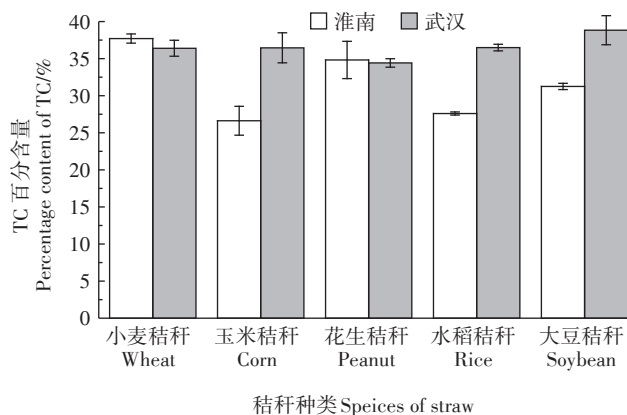


图4 秸秆原样中TC百分含量

Figure 4 Percentage content of TC in crop straw

分含量最低,为26.62%。武汉水稻秸秆、小麦秸秆、玉米秸秆、花生秸秆和大豆秸秆等5种典型秸秆TC含量在34.42%~38.83%范围内,TC含量大小次序为:大豆秸秆>水稻秸秆>玉米秸秆>小麦秸秆>花生秸秆。

淮南和武汉的5种典型秸秆原样TC的含量在26.62%~38.83%之间,TC的含量较高。不同种类的秸秆TC含量有较为明显的差异,大豆秸秆的TC含量明显高于水稻秸秆。不同地区的同类秸秆之间TC的含量也有较明显的差异,武汉玉米秸秆和淮南玉米秸秆的TC百分含量分别为36.46%和26.62%,TC含量之差达到9.84%,武汉水稻秸秆和淮南水稻秸秆的TC百分含量之差也达到8.89%。不同地区的5种典型秸秆之中,花生秸秆的TC含量最接近,仅相差0.40%。

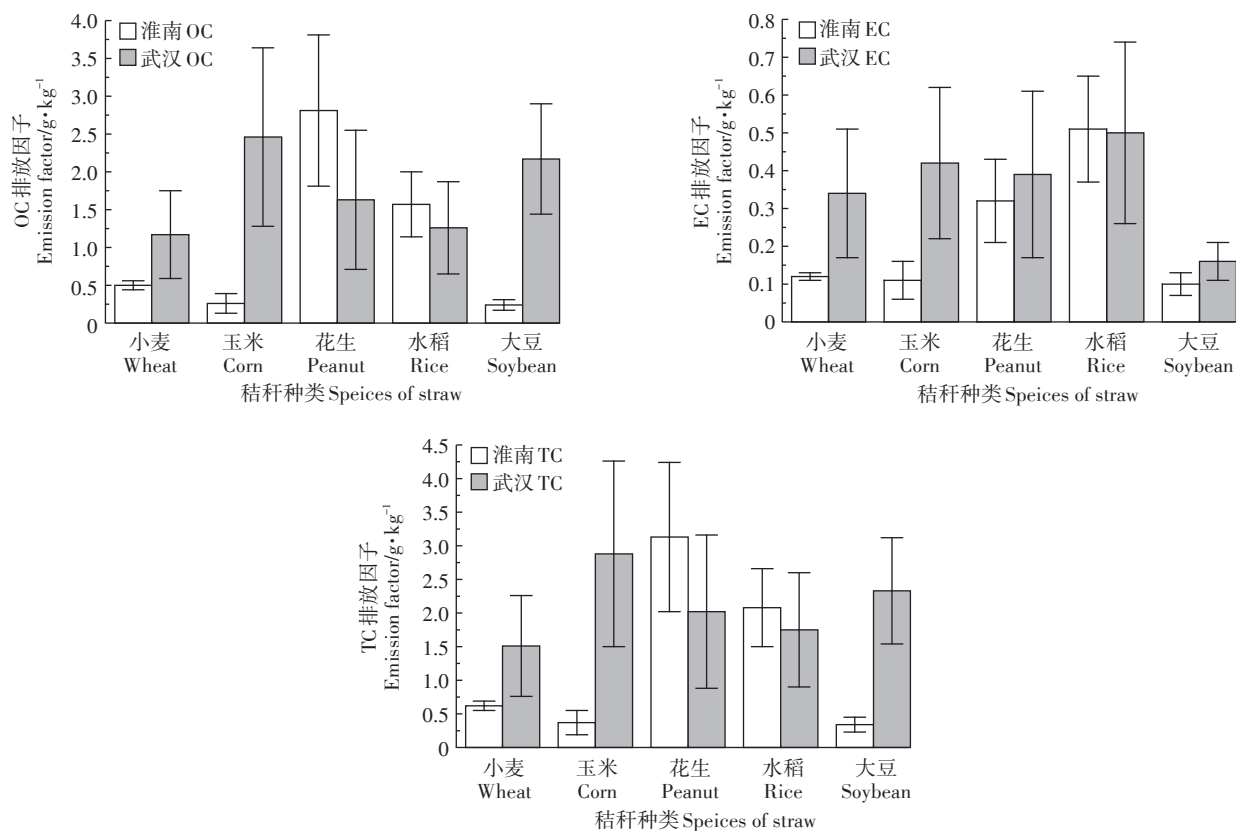
### 2.2.2 秸秆燃烧烟气PM<sub>2.5</sub>中OC、EC和TC排放因子

采用OC/EC分析仪对采集到生物质燃烧烟气PM<sub>2.5</sub>的滤膜进行分析,所得到的OC和EC排放因子及比值如图5、图6和表2所示。

由图5可知,本研究所得到的淮南秸秆OC排放因子为0.20~2.81 g·kg<sup>-1</sup>,EC排放因子为0.12~0.51 g·kg<sup>-1</sup>,武汉秸秆OC排放因子为1.17~2.46 g·kg<sup>-1</sup>,EC排放因子为0.16~0.42 g·kg<sup>-1</sup>。淮南的花生秸秆OC排放因子最大,为2.81 g·kg<sup>-1</sup>,武汉的玉米秸秆OC排放因子最大,为2.46 g·kg<sup>-1</sup>。五种秸秆中花生秸秆的TC排放因子最高(均值2.58 g·kg<sup>-1</sup>),小麦秸秆最低(均值1.07 g·kg<sup>-1</sup>),花生秸秆的TC排放因子是小麦秸秆的2.41倍。由图6及表2可知,淮南的大豆秸秆烟气PM<sub>2.5</sub>中的OC、EC和TC的排放因子与在PM<sub>2.5</sub>中所占比例与含水率均无明显规律。

由表2可知,碳组分是淮南及武汉小麦、玉米、花生、水稻和大豆秸秆燃烧烟气PM<sub>2.5</sub>的主要成分。淮南的5种秸秆燃烧烟气PM<sub>2.5</sub>中TC百分含量分别为54.85%、50.67%、40.87%、43.28%、61.44%,武汉的5种秸秆TC的百分含量分别为42.02%、36.40%、47.04%、42.07%和65.84%。淮南及武汉的5种生物质燃烧烟气PM<sub>2.5</sub>中均以大豆秸秆的TC百分含量最高。这可能是由于大豆秸秆原样的总碳含量较高所导致的。本研究中淮南的秸秆燃烧烟气PM<sub>2.5</sub>中OC的平均百分含量为40.36%,EC为11.88%,武汉的烟气中OC的平均百分含量为42.70%,EC为7.12%,本研究中秸秆燃烧排放烟气PM<sub>2.5</sub>中OC含量远高于EC,表明秸秆燃烧排放了较多的有机碳。

淮南的花生秸秆OC/EC值最高,为8.78,是大豆

图5 秸秆燃烧烟气PM<sub>2.5</sub>中OC、EC和TC排放因子Figure 5 Emission factors of OC, EC and TC in PM<sub>2.5</sub> from crop straw burning表2 秸秆燃烧烟气PM<sub>2.5</sub>中OC、EC和TC百分含量Table 2 The percentage content of OC, EC and TC in PM<sub>2.5</sub> from crop straw burning

地区 Region	秸秆种类 Species of straw	含水率 Straw moisture content/%	OC/%	EC/%	TC/%	OC/EC
淮南 Huainan	小麦秸秆(风干样)	13.01	44.24	10.61	54.85	4.17
	玉米秸秆(风干样)	14.56	36.28	14.39	50.67	2.52
	花生秸秆(风干样)	15.19	36.69	4.18	40.87	8.78
	水稻秸秆(风干样)	11.78	32.59	10.69	43.28	3.05
	大豆秸秆(风干样)	12.68	42.18	17.90	60.07	2.36
	大豆秸秆	15.08	39.95	15.54	55.49	2.57
武汉 Wuhan		19.70	46.46	9.11	55.57	5.10
		26.63	44.53	12.65	57.17	3.52
	小麦秸秆(风干样)	10.53	32.59	9.43	42.02	3.46
	玉米秸秆(风干样)	13.10	31.05	5.35	36.40	5.80
	花生秸秆(风干样)	11.49	37.99	9.05	47.04	4.20
	水稻秸秆(风干样)	10.11	30.15	11.92	42.07	2.53
	大豆秸秆(风干样)	12.63	61.37	4.47	65.84	13.73
	大豆秸秆	18.83	51.55	6.54	58.09	7.89
	25.81	49.48	4.82	54.30	10.27	
	36.49	47.38	5.39	52.77	8.79	

秸秆的OC/EC值的3.7倍。武汉的大豆秸秆OC/EC值最高,为13.73,是OC/EC值最低的水稻秸秆的5.4倍。不同类秸秆的OC/EC值差距较大。两地的同类

秸秆OC/EC值差距也较大,武汉的大豆秸秆OC/EC值是淮南的大豆秸秆OC/EC值的5.8倍。本研究秸秆燃烧排放烟气PM<sub>2.5</sub>中的OC/EC值均高于2,且比值介

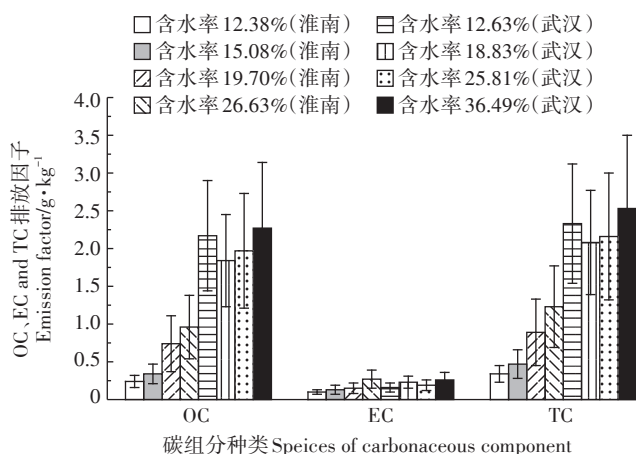


图6 含水率对大豆秸秆燃烧烟气PM<sub>2.5</sub>中OC、EC和TC排放因子的影响

Figure 6 Emission factors of OC, EC and TC in PM<sub>2.5</sub> from soybean straw burning under different straw moisture contents

于2.36~13.73。

有研究<sup>[22]</sup>认为,当OC/EC值超过2时,存在二次污染。Zhang等<sup>[18]</sup>测得的小麦、玉米OC/EC值为5.3、6.3。Li等<sup>[19]</sup>测得重庆水稻、玉米和大豆排放的OC/EC比值在10~12.5、4~4.7和0.95,山东的水稻和玉米秆的比值在11和10左右。鞠国华等<sup>[23]</sup>测得的玉米、小麦等六种农作物秸秆的OC/EC值介于1.49~8.46之间。Chuang等<sup>[24]</sup>在生物质燃烧源附近测得的OC/EC的比值为5.7左右,这些结果与本研究接近。总的来说,秸秆燃烧的OC/EC值普遍超过2,存在二次污染。OC/EC值可用于区分不同的燃烧源<sup>[25]</sup>,Mayol等<sup>[26]</sup>认为当OC/EC值为1时,可认为OC与EC来自化石燃料燃烧。Chen等<sup>[27]</sup>的研究测得煤样的平均OC/EC值为1.28,且烟煤的OC/EC值低于无烟煤。汽油车尾气的OC/EC值在1.47~1.54<sup>[28]</sup>。本研究结果和其他研究结果表明,秸秆燃烧排放烟气OC/EC普遍高于2,对二次气溶胶形成有很大的贡献,对大气环境有潜在危害,本研究的OC/EC值为2.36~13.73,可作为判断秸秆燃烧源的一个初步指标。

### 2.3 秸秆燃烧烟气PM<sub>2.5</sub>中碳组分的排放特征

采用IMPROVE-A法对采集到生物质燃烧烟气PM<sub>2.5</sub>的滤膜进行分析,得到OC1、OC2、OC3、OC4、EC1、EC2、EC3、OPC 8个碳组分,其中OPC是裂解碳,8种碳组分排放因子及百分含量如图7所示。

由图7和图8可知,淮南花生秸秆的OC1和EC1排放因子最高,武汉的玉米秸秆OC1排放因子最高,EC1排放因子仅次于水稻的EC1排放因子且排放因

子接近。淮南的花生秸秆和武汉的玉米秸秆的OC1在OC中所占的比例也是所有秸秆中最高的。淮南和武汉秸秆燃烧烟气PM<sub>2.5</sub>中排放最多的碳组分为OC1。淮南的秸秆燃烧烟气PM<sub>2.5</sub>中的OC1、OC2、OC3、OC4、EC1、EC2、EC3、OPC在总碳中的平均百分含量为26.20%、23.63%、13.67%、3.40%、32.34%、0.58%、0.18%、10.73%,武汉的OC1、OC2、OC3、OC4、EC1、EC2、EC3、OPC在总碳中的平均百分含量为35.23%、26.25%、12.86%、2.32%、22.97%、0.25%、0.13%、8.12%。淮南和武汉的秸秆燃烧烟气PM<sub>2.5</sub>的8种碳组分中,OC1在有机碳中含量最高,EC1在元素碳中含量最高。OC2在部分秸秆中排放因子略高于OC1,且总体上与OC1较为接近,OC1与OC2的含量在OC中明显高于OC3和OC4。

OC1以挥发性有机物为主,OC2和OC3代表低挥发性有机物,OC4可能是高分子量和极性分子量有机化合物的混合物<sup>[29-30]</sup>。EC可分为焦炭(Char-EC)和烟灰(Soot-EC),Char-EC指的是较大的颗粒(一般粒径范围为1~100 μm),主要在燃烧温度相对较低的时候形成,其形态与原始物质形态相似;而Soot-EC主要是在高温下由气相化合物凝结形成,其主要是由10 nm级粒径的粒子聚集形成0.1~1 μm粒径大小的颗粒。Char-EC中芳环含量较低,Soot-EC中含有石墨、刚性和高芳环结构,相比Char-EC较难被氧化<sup>[31]</sup>。Char-EC一般定义为EC1-OPC,Soot-EC为EC2+EC3。本研究中,淮南的秸秆燃烧烟气排放PM<sub>2.5</sub>中的Char-EC/Soot-EC范围为17.20~64.16,武汉的秸秆PM<sub>2.5</sub>中的Char-EC/Soot-EC范围为19.03~60.59,两地的Char-EC/Soot-EC范围较为接近,Char-EC显著高于Soot-EC,可作为判断秸秆燃烧源的一个重要指标。

Char-EC和Soot-EC可以进一步指示碳质气溶胶的来源,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<sup>[32]</sup>。有文献报道,生物质燃烧源的Char-EC/Soot-EC为11.60~31.0和2.5~15.5<sup>[33-34]</sup>。一般认为,当Char-EC/Soot-EC>3时,来源主要是生物质燃烧和煤燃烧,当Char-EC/Soot-EC<1时,来源主要是机动车尾气。本研究的Char-EC/Soot-EC范围为17.20~64.16,与之前的研究者所得结论一致。

### 2.4 秸秆燃烧烟气PM<sub>2.5</sub>中碳组分的相关性研究

为获得碳组分的相关性,探究不同组分之间相互联系情况,运用SPSS19.0软件对秸秆燃烧排放的碳组分进行了皮尔逊相关性分析,结果见表3。

由表3可知,淮南及武汉秸秆燃烧烟气PM<sub>2.5</sub>中

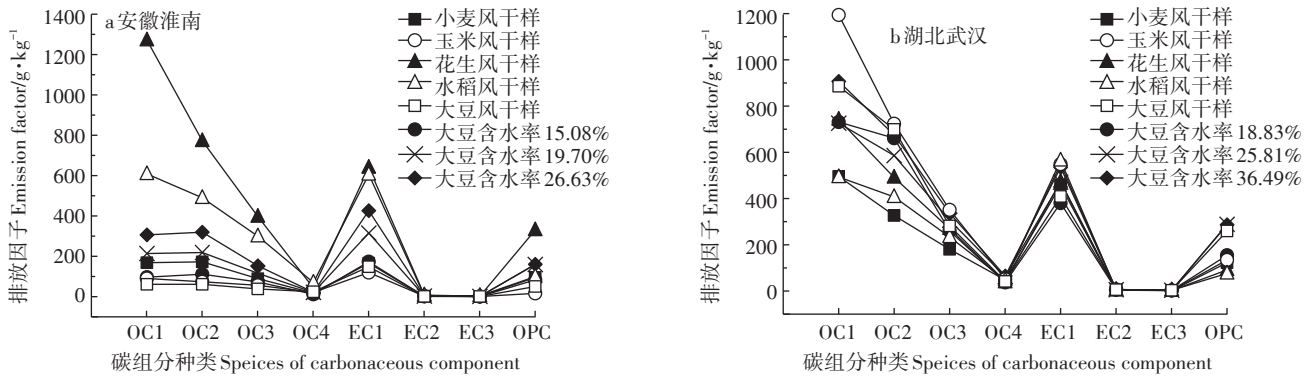
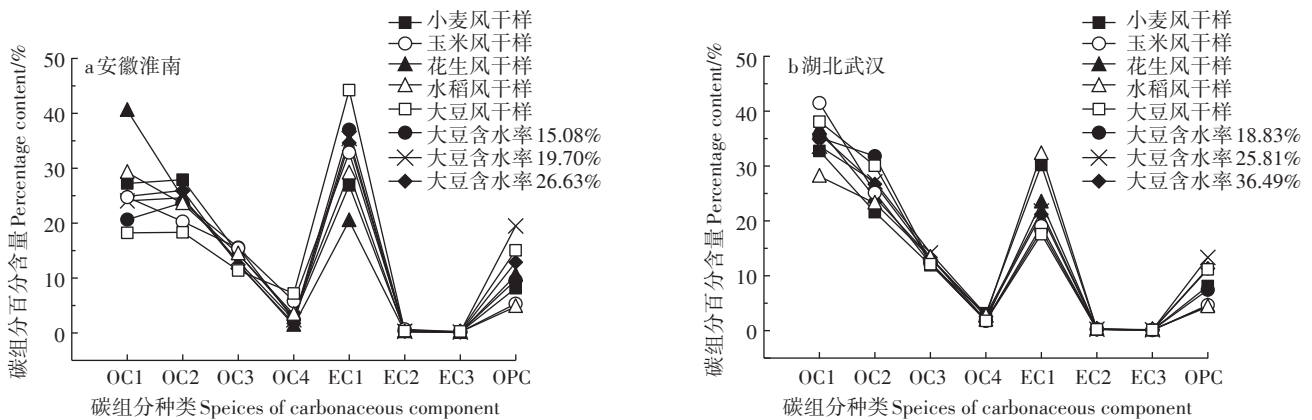
图7 秸秆燃烧烟气PM<sub>2.5</sub>中碳组分的排放因子Figure 7 Emission factors of carbonaceous components in PM<sub>2.5</sub> from crop straw burning图8 秸秆燃烧烟气PM<sub>2.5</sub>中碳组分在总碳中百分含量

Figure 8 Percentage content of carbonaceous components in TC from crop straw burning

TC和OC的相关系数分别为0.967和0.995,表明OC和TC有极强的相关性,淮南的EC和TC相关系数为0.773,有较强相关性,但武汉的EC和TC无明显相关性。淮南及武汉的OC1~OC3和TC以及OC的相关系数都在0.89以上,具有强相关性,武汉的EC2和TC及OC相关性较大,但安徽淮南及湖北武汉的EC1和TC以及OC相关性较大,安徽淮南及湖北武汉的EC1均和EC相关性较强。相关性分析表明秸秆燃烧烟气PM<sub>2.5</sub>中OC和TC的相关性极强,且OC1~OC3和TC均具有强相关性。

### 2.5 秸秆燃烧烟气PM<sub>2.5</sub>中碳组分的标识组分筛选

特征组分也称为标识组分,是指某一源类中对贡献值和偏差影响程度较大的组分,是某源类区别于其他源类的重要标志,碳组分可用于区分不同的PM<sub>2.5</sub>来源。为确定本研究中秸秆燃烧烟气PM<sub>2.5</sub>中的八个碳组分的标识组分,使用SPSS19.0数理统计软件对安徽淮南及湖北武汉的碳组分进行主成分分析,结果如表4所示。

表4中提取出的二个累积方差贡献率最大的公因子,方差累积贡献率为84.59%,超过80%,可以达到较好的效果,且采用正交旋转使得不同组分的载荷差异化便于因子识别,表3中的数值为提取出的公因子与原始变量的相关系数,绝对值越大,说明关系越密切。因子1中OC和EC1以及EC3的相关系数均大于0.9,具有极强的相关性,由于EC3排放因子最少,且在总碳中所占比例很低,因此可以忽略不计,所以因子1中OC和EC1贡献显著,因子2中EC2的相关系数为0.93,其余相关系数都低于0.5,因子2中EC2贡献显著。鉴于因子1解释了70.69%的方差,远高于因子2的13.90%,因此OC和EC1部分是对总碳贡献最大的部分。由于OC中OC1和OC2远高于OC3和OC4,结合标识元素筛选的条件,以贡献值较大和偏差影响程度大的组分作为标识元素,选取OC1、OC2和EC1为秸秆燃烧的标识组分,表明秸秆燃烧对挥发性有机物及半挥发性有机物有较大的贡献。张灿等<sup>[5]</sup>通过MPIN矩阵得到水稻秸秆以及柏树枝中OC1



表3 碳组分相关系数

Table 3 Correlation coefficient of carbonaceous components

地区 Region	碳组分 Carbonaceous component	TC	OC	EC	OC1	OC2	OC3	OC4	EC1	EC2	EC3	OPC
武汉 Wuhan	TC	1										
	OC	0.967**	1									
	EC	-0.174	-0.418	1								
	OC1	0.975**	0.940**	-0.159	1							
	OC2	0.899**	0.955**	-0.488	0.864**	1						
	OC3	0.953**	0.929**	-0.195	0.879**	0.846**	1					
	OC4	0.336	0.349	-0.151	0.206	0.159	0.490	1				
	EC1	0.239	0.039	0.704	0.148	-0.142	0.317	0.536	1			
	EC2	0.950**	0.964**	-0.339	0.919**	0.932**	0.918**	0.353	0.063	1		
	EC3	0.322	0.358	-0.239	0.118	0.381	0.505	0.512	0.316	0.286	1	
	OPC	0.429	0.612	-0.839*	0.338	0.572	0.518	0.617	-0.205	0.522	0.574	1
淮南 Huainan	TC	1										
	OC	0.995**	1									
	EC	0.773*	0.704	1								
	OC1	0.982**	0.994**	0.658	1							
	OC2	0.998**	0.995**	0.754*	0.981**	1						
	OC3	0.995**	0.983**	0.813*	0.968**	0.990**	1					
	OC4	0.725*	0.661	0.931**	0.638	0.692	0.772*	1				
	EC1	0.955**	0.926**	0.893**	0.885**	0.950**	0.962**	0.805**	1			
	EC2	0.273	0.258	0.301	0.198	0.306	0.235	-0.004	0.367	1		
	EC3	0.739*	0.671	0.968**	0.625	0.717*	0.791*	0.957**	0.857**	0.099	1	
	OPC	0.846**	0.884**	0.392	0.871**	0.868**	0.800*	0.280	0.754*	0.359	0.349	1

注:\*\*在0.01水平(双侧)上显著相关。\*在0.05水平(双侧)上显著相关。

Note:\*\* indicate significant correlation at  $P<0.01$  levels(two-tailed test). \* indicate significant correlation at  $P<0.05$  levels(two-tailed test).

表4 主成分分析结果

Table 4 Results of principal component analysis

碳组分 carbonaceous component	因子1 Factor 1	因子2 Factor 2
OC1	0.901	0.224
OC2	0.924	0.258
OC3	0.969	0.184
OC4	0.904	-0.170
EC1	0.901	0.195
EC2	0.028	0.930
EC3	0.895	-0.095
OPC	0.665	0.443

或者OPC为标识性组分。

### 3 结论

(1)安徽淮南和湖北武汉的秸秆燃烧烟气PM<sub>2.5</sub>排放因子分别为0.56~7.67 g·kg<sup>-1</sup>和3.53~7.91 g·kg<sup>-1</sup>。不同种类的秸秆燃烧烟气的PM<sub>2.5</sub>排放因子相差较

大,花生秸秆燃烧烟气PM<sub>2.5</sub>的排放因子最高(均值5.98 g·kg<sup>-1</sup>),是大豆秸秆(均值2.04 g·kg<sup>-1</sup>)的2.93倍。PM<sub>2.5</sub>排放因子与含水率成正比。

(2)碳组分是安徽淮南及湖北武汉小麦、玉米、花生、水稻和大豆秸秆燃烧烟气PM<sub>2.5</sub>的主要成分,PM<sub>2.5</sub>中TC占比为36.40%~65.84%,其中花生秸秆的TC排放因子最高(均值2.58 g·kg<sup>-1</sup>),是小麦秸秆(均值1.07 g·kg<sup>-1</sup>)的2.41倍。5种秸秆燃烧烟气PM<sub>2.5</sub>的OC/EC值均大于2,表明秸秆燃烧对二次气溶胶的形成具有重要影响,建议秸秆以“五化”规模化利用为宜。

(3)安徽淮南和湖北武汉的秸秆燃烧烟气PM<sub>2.5</sub>中Char-EC显著高于Soot-EC,可作为判断秸秆燃烧源的重要指标;主成分分析结果表明,OC1、OC2和EC1可作为安徽淮南和湖北武汉秸秆燃烧烟气的标识组分,表明秸秆燃烧对挥发性有机物及半挥发性有机物有较大的贡献。

## 参考文献:

- [1] Örjan Gustafsson, Kruså M, Zencak Z, et al. Brown clouds over South Asia: Biomass or fossil fuel combustion?[J]. *Science*, 2009, 323(5913): 495-498.
- [2] Cheng Z, Wang S, Fu X, et al. Impact of biomass burning on haze pollution in the Yangtze River Delta, China: A case study in summer 2011 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(9): 4573-4585.
- [3] Zhao P, Fan D, Yang Y, et al. Characteristics of carbonaceous aerosol in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 71(3): 389-398.
- [4] Chow J C, Watson J G, Lowenthal D H, et al. PM<sub>2.5</sub> source profiles for black and organic carbon emission inventories[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(31): 5407-5414.
- [5] 潘月鹏, 贾琳, 田世丽, 等. 大气霾污染对农业生产的可能影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(11): 2279-2280.  
PAN Yue-peng, JIA Lin, TIAN Shi-li, et al. Potential effects of haze pollution on agriculture in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(11): 2279-2280.
- [6] 广州市环保局. 广州市发布2016年度大气细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)来源解析研究成果[EB/OL]. (2017-6-22)[2018-9-16]. [http://www.gdep.gov.cn/news/hbxw/201706/t20170622\\_224905.html](http://www.gdep.gov.cn/news/hbxw/201706/t20170622_224905.html).  
Guangzhou Environmental Protection Bureau. Results of sources apportionment of atmospheric PM<sub>2.5</sub> had announced in Guangzhou in 2016 [EB/OL]. (2017-6-22)[2018-9-16]. [http://www.gdep.gov.cn/news/hbxw/201706/t20170622\\_224905.html](http://www.gdep.gov.cn/news/hbxw/201706/t20170622_224905.html).
- [7] 上海市环保局. 上海公布大气颗粒物源解析结果[EB/OL]. (2015-1-8)[2018-9-16]. <http://www.shanghai.gov.cn/nw2/nw2314/nw2315/nw17239/nw17252/u21aw968232.html>.  
Shanghai Environmental Protection Bureau. Results of sources apportionment of atmospheric particulates had announced in Shanghai[EB/OL]. (2015-1-8)[2018-9-16]. <http://www.shanghai.gov.cn/nw2/nw2314/nw2315/nw17239/nw17252/u21aw968232.html>.
- [8] 济南市环保局. 济南市发布2017年PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>来源解析结果[EB/OL]. (2018-5-18)[2018-9-16]. <http://jnsb.e23.cn/shtml/jinrb/20180518/1730121.shtml>.  
Jinan Environmental Protection Bureau. Results of sources apportionment of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> had announced in Jinan in 2017[EB/OL]. (2018-5-18)[2018-9-16]. <http://jnsb.e23.cn/shtml/jinrb/20180518/1730121.shtml>.
- [9] 武汉市环保局. 武汉雾霾成因报告出炉[EB/OL]. (2016-4-22)[2018-9-16]. [http://www.hubei.gov.cn/gzhd/gzhd/hyggq\\_49009/](http://www.hubei.gov.cn/gzhd/gzhd/hyggq_49009/).  
Wuhan Environmental Protection Bureau. The report of the reasons for the formation of haze in Wuhan had announced[EB/OL]. (2016-4-22)[2018-9-16]. [http://www.hubei.gov.cn/gzhd/gzhd/hyggq\\_49009/](http://www.hubei.gov.cn/gzhd/gzhd/hyggq_49009/).
- [10] 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.
- [11] 中国科学院. 我国PM<sub>2.5</sub>主要排放源数据库[DB/OL]. [2018-9-16]. <http://www.sourceprofile.org.cn/home/biomass/index.html?%E6%BA%90%E6%A0%B7%E5%93%81%E7%BC%96%E5%8F%B7=Biomass-10>.  
Chinese Academy of Sciences. Main emission database of PM<sub>2.5</sub> of China[DB/OL]. [2018-9-16]. <http://www.sourceprofile.org.cn/home/biomass/index.html?%E6%BA%90%E6%A0%B7%E5%93%81%E7%BC%96%E5%8F%B7=Biomass-10>.
- [12] 湖北省人民政府网. 湖北力争2020年秸秆综合利用率超95%[EB/OL]. (2016-06-02)[2018-9-16]. [http://www.hubei.gov.cn/zhuanti/2016zt/yqhz/jjpl/201606/t20160602\\_843006.shtml](http://www.hubei.gov.cn/zhuanti/2016zt/yqhz/jjpl/201606/t20160602_843006.shtml).  
Hubei Provincial People's Government Website. The utilization of straw would exceed 95% in Hubei Province in 2020[EB/OL]. (2016-06-02)[2018-9-16]. [http://www.hubei.gov.cn/zhuanti/2016zt/yqhz/jjpl/201606/t20160602\\_843006.shtml](http://www.hubei.gov.cn/zhuanti/2016zt/yqhz/jjpl/201606/t20160602_843006.shtml).
- [13] 安徽省. 2017年安徽全省农作物秸秆综合利用率87.3%[EB/OL]. (2018-5-15)[2018-9-16]. <http://www.ahwang.cn/zbah/20180515/1769222.shtml>.  
Anhui Website. The utilization of straw reached 87.3% in Anhui Province in 2017[EB/OL]. (2018-5-15)[2018-9-16]. <http://www.ahwang.cn/zbah/20180515/1769222.shtml>.
- [14] 中华人民共和国生态环境部. 秸秆焚烧监测报告[EB/OL]. (2018-01-09)[2018-9-16]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/dqhj/jgjsjcbg/>.  
Ministry of Ecology and Environment of People's Republic of China. Monitoring report of crop straw burning[EB/OL]. (2018-01-09)[2018-9-16]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/dqhj/jgjsjcbg/>.
- [15] 黄睿, 谈静, 刘琼玉. PM<sub>2.5</sub>中有机碳/元素碳测定探讨[J]. *江汉大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(1): 11-17.  
HUANG Rui, TAN Jing, LIU Qiong-yu. Determination of organic and elemental carbon in fine particulate matters (PM<sub>2.5</sub>)[J]. *Journal of Jiangnan University(Natural Science Edition)*, 2016, 44(1): 11-17.
- [16] 王玉珏, 胡敏, 王渝, 等. 秸秆燃烧排放PM<sub>2.5</sub>特征及影响因素研究[J]. *化学学报*, 2016, 74(4): 356-362.  
WANG Yu-jue, HU Min, WANG Yu, et al. Characterization and influence factors of PM<sub>2.5</sub> emitted from crop straw burning[J]. *Acta Chimica Sinica*, 2016, 74(4): 356-362.
- [17] Ni H, Han Y, Cao J, et al. Emission characteristics of carbonaceous particles and trace gases from open burning of crop residues in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 123: 399-406.
- [18] Zhang H, Hu J, Qi Y, et al. Emission characterization, environmental impact, and control measure of PM<sub>2.5</sub>, emitted from agricultural crop residue burning in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 149: 629-635.
- [19] Li X, Wang S, Duan L, et al. Carbonaceous aerosol emissions from household biofuel combustion in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(15): 6076-6081.
- [20] Habib G, Venkataraman C, Bond T C, et al. Chemical, microphysical and optical properties of primary particles from the combustion of biomass fuels[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(23): 8829-8834.
- [21] Chen L W A, Verburg P, Shackelford A, et al. Moisture effects on carbon and nitrogen emission from burning of wildland biomass[J]. *Atmospheric Chemistry & Physics Discussions*, 2010, 10(3): 6617-6625.

- [22] Cao J J, Lee S C, Ho K F, et al. Spatial and seasonal variations of atmospheric organic carbon and elemental carbon in Pearl River Delta Region, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(27): 4447-4456.
- [23] 鞠园华,杨夏捷,靳全锋,等.不同燃烧状态下农作物秸秆PM<sub>2.5</sub>排放因子及主要成分分析[J].环境科学学报,2018,38(1):92-100.  
JU Yuan-hua, YANG Xia-jie, JIN Quan-feng, et al. Emission factor and main components of PM<sub>2.5</sub> emitted from crop straw under different burning status[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(1):92-100.
- [24] Chuang M T, Chou 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 Environment*, 2013, 78(7):72-81.
- [25] Novakov T, Andreae M O, Gabriel R, et al. Origin of carbonaceous aerosols over the tropical Indian Ocean: Biomass burning or fossil fuels?[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(24):4061-4064.
- [26] Mayol-Bracero O L, Gabriel R, Andreae M O, et al. Carbonaceous aerosols over the Indian Ocean during the Indian Ocean Experiment (INDOEX): Chemical characterization, optical properties, and probable sources[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2002, 107(D19):INX2-1-INX2 29-21.
- [27] Chen Y, Tian C, Feng Y, et al. Measurements of emission factors of PM<sub>2.5</sub>, OC, EC, and BC for household stoves of coal combustion in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 109:190-196.
- [28] 黄 成,胡馨遥,鲁 君.轻型汽油车尾气OC和EC排放因子实测研究[J].环境科学,2018,39(7):3110-3117.  
HUANG Cheng, HU Qing-yao, LU Jun. Measurements of OC and EC emission factors for light-duty gasoline vehicles[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(7):3110-3117.
- [29] Grabowsky J, Streibel T, Sklorz M, et al. Hyphenation of a carbon analyzer to photo-ionization mass spectrometry to unravel the organic composition of particulate matter on a molecular level[J]. *Analytical & Bioanalytical Chemistry*, 2011, 401(10):3153-3164.
- [30] Joseph A E, Unnikrishnan S, Kumar R. Chemical characterization and mass closure of fine aerosol for different land use patterns in Mumbai City[J]. *Aerosol & Air Quality Research*, 2012, 12(1):61-72.
- [31] Han Y M, Cao J J, Chow J C, et al. Evaluation of the thermal/optical reflectance method for discrimination between char- and soot-EC[J]. *Chemosphere*, 2007, 69(4):569-574.
- [32] 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.
- [33] Chen L W A, Moosmüller H, Arnott W P, et al. Emissions from laboratory combustion of wildland fuels: Emission factors and source profiles [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(12):4317-4325.
- [34] Tong M A, 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.
- [35] 张 灿,周志恩,翟崇治,等.基于重庆本地碳成分谱的PM<sub>2.5</sub>碳组分来源分析[J].环境科学,2014,35(3):810-819.  
ZHANG Can, ZHOU Zhi-en, ZHAI Chong-zhi, et al. Carbon source apportionment of PM<sub>2.5</sub> in Chongqing based on local carbon profiles[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(3):810-819.