

王真真, 谭吉华, 毕新慧, 等. 秸秆燃烧产生颗粒物化学组分及排放特征[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(11): 150-155. Wang Zhenzhen, Tan Jihua, Bi Xinhui, et al. Emission characteristics and chemical species from agricultural straw burning smoke[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(11): 150-155.

秸秆燃烧产生颗粒物化学组分及排放特征

王真真^{1,2}, 谭吉华¹, 毕新慧³, 段菁春⁴, 盛国英³, 傅家谟³

(1.中国科学院大学资源环境学院, 北京 100049; 2.长沙环境保护职业技术学院环境工程系, 湖南 长沙 410004;
3.中国科学院地球化学研究所, 广东 广州 510640; 4.中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要: 收集玉米、水稻和小麦秸秆模拟露天燃烧排放的颗粒物, 分析样品中碳质组分、水溶性离子(共 9 种)和无机元素(共 17 种), 研究其排放因子及特征比值。结果表明, 秸秆燃烧 OC 的排放因子远高于 EC, 二者范围分别为 169~1 707 和 91~300 mg/kg。总水溶性离子排放因子范围为 162~840 mg/kg。K⁺、Na⁺、NH₄⁺ 和 Cl⁻ 是水溶性离子的主要组分, 占水溶性离子总排放因子的 80%~92%。K、Ca、P 和 Mg 4 种生长元素排放因子之和占秸秆燃烧排放颗粒物中无机元素的 98%~99%。Zn、Pb、Cu 为秸秆燃烧排放颗粒物中排放因子较高的重金属元素, 这些重金属对人体健康的影响不可忽视。此外, 研究发现 OC/EC 可以用来区分秸秆燃烧与香烟燃烧、重型柴油车和草类燃烧源, K⁺/OC 可以用来区分秸秆燃烧与居民燃木取暖, K/Ca 可以用来区分秸秆燃烧与交通污染源。

关键词: 秸秆燃烧; 颗粒物; 化学组分; 排放特征

中图分类号: X503.231 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1003-6504.2016.11.028 文章编号: 1003-6504(2016)11-0150-06

Emission Characteristics and Chemical Species from Agricultural Straw Burning Smoke

WANG Zhenzhen^{1,2}, TAN Jihua¹, BI Xinhui³, DUAN Jingchun⁴,
SHENG Guoying³, FU Jiamou³

(1.College of Resource and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
2.Department of Engineering, Changsha Environmental Protection College, Changsha 410004, China; 3.Guangzhou
Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 4.Chinese Research Academy
of Environmental Science, Beijing 100012, China)

Abstract: Fresh smokes from the burning of three straws (corn, rice and wheat) were collected from laboratory simulation of open burning. Carbonaceous species, water soluble species and 17 elements were analyzed. The emission factors of OC were higher than EC from three straw burning smoke, which ranged from 169~1 707 mg/kg, while EC ranged from 91~300 mg/kg. Total emission factors of water-soluble species ranged from 162~840 mg/kg. The emission factors of K⁺, Na⁺, NH₄⁺ and Cl⁻ were the main components in water-soluble species from straw burning smoke. The sum contribution of these four components to total ions ranged from 80%~92%. The ratio of essential elements for plant growth (K, Ca, P and Mg) to the total concentrations of element ranged from 98%~99%. Zn, Pb and Cu were relatively higher in straw burning smoke emissions, the impacts of these heavy metals on human health and environment was critical for their high toxicity. The ratio of OC/EC could distinguish straw burning from cigarette burning, oil burning from heavy duty diesel vehicle and grass burning. The K⁺/OC could distinguish straw burning from wood combustion and the ratio of K/Ca was useful to identify straw burning from traffic emission.

Key words: straw burning; particulate matter; chemical species; emission characteristics

生物质燃烧是大气污染物的重要来源, 它排放的大量污染物与空气质量、能见度、温室效应和辐射强

迫等环境问题密切相关^[1-4]。全球农作物燃烧排放占生物质燃烧 20%左右^[5], 是生物质燃烧重要排放形式。

《环境科学与技术》编辑部 (网址)http://fjks.chinajournal.net.cn (电话)027-87643502 (电子信箱)hjkxyjs@vip.126.com

收稿日期 2016-01-05, 修回 2016-02-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41475116) 大气复合污染来源与控制重点实验室开放基金项目(SCAPC201401)

作者简介: 王真真(1979-), 女, 讲师, 博士, 主要从事大气环境科学及生物质燃烧源解析研究 (电子信箱)oceanshell@163.com。

秸秆燃烧颗粒物由碳质组分、水溶性离子及无机元素等组成。国内外对于秸秆燃烧化学组分排放特征进行了相关研究。Sahai 等^[6]分析了印度小麦燃烧 OC、EC 等排放因子。Hays 等^[7]计算了小麦和水稻露天燃烧 OC、EC 和水溶性离子排放因子。Viana 等^[8]对比了西班牙东部城市群附近农村水稻燃烧与非燃烧期 PM₁₀ 的化学组成。Cheng 等^[9]研究了水稻燃烧后台北市大气颗粒物化学组分的粒径分布。王丹等^[10]分析了秸秆燃烧水溶性组分的排放因子。Zhang 等^[11]得到了稻草燃烧 PM_{2.5} 中 OC、EC 等排放因子。张鹤丰^[12]测定了水稻、玉米和小麦燃烧 PM_{2.5} 及多环芳烃的排放特征。唐喜斌等^[13]利用燃烧源排放测试系统对小麦等秸秆燃烧排放的气态及 PM_{2.5} 颗粒物进行了排放特征的研究。这些研究对于了解生物质燃烧对环境和气候变化的影响提供了重要基础数据,但还缺少更全面化学组成的排放因子及源解析特征研究。

本研究以国内分布最广的玉米、水稻和小麦秸秆为研究对象,模拟燃烧并采集颗粒物样品,对颗粒态化学组分进行分析,得到燃烧排放碳质组分、水溶性离子、植物营养元素(K、Ca、P 和 Mg 等)、重金属(Cu、Zn 和 Pb 等)的排放因子,并寻找识别秸秆燃烧的推断参数。

1 样品采集与分析

1.1 样品采集

玉米和水稻采集自华南植物园,小麦采集自平顶山。燃烧前干燥 14 d 以上。参考 Simoneit 等^[14]模拟生物质露天燃烧采样方法进行燃烧及样品采集。

实验室约 12 m²,有 2 个窗户,其中 1 个装有通风扇。采样仪器放置于生物质侧上方,水平距离约 0.5 m。为保证烟气尽可能采集到滤膜中,预试验确定采样时间:先强制通风然后密闭实验室采集空白样品后,将秸秆(约 50 g)置钢盆中引燃,采集燃烧样品,采集完毕更换滤膜,采集燃烧后实验室中颗粒物。对比燃烧前后颗粒物浓度,得出最佳采样时间为 2 h。

秸秆燃烧样品采集方法见文献^[15]:每燃烧 1 种秸秆,实验室均打开通风并放置 1~2 d 再重新使用。每种秸秆燃烧采集 1 个样品。仪器为天虹大流量采样器,流速为 1.05 m³/min。采样前石英滤膜置于马弗炉中 450 °C 焙烧 4 h,采样前后恒温恒湿箱(温度 25 °C、相对湿度 50%)中平衡 24 h。

1.2 样品分析

1.2.1 OC、EC 分析

碳质组分采用 Sunset 碳分析仪,采用热光透射法,详细方法见文献^[16]。先运行清炉程序,然后测定

OC/EC 空白值,之后开始样品分析。OC 和 EC 最低检出限分别为 0.82 和 0.19 μg/cm²。

1.2.2 水溶性离子分析

取一定样品置于烧杯,加入 10 mL 超纯水(Milli-Q),然后低温超声 15 min,过滤转移至离心管。重复操作 3 次,合并抽提液,定容至 50 mL。分析仪器采用瑞士万通 761 Compact IC 仪器,分析条件见文献^[16]。

1.2.3 无机元素分析

取一定样品放入 Teflon 器皿,加入 3 mL 经过纯化的硝酸和 0.5 mL 双氧水,浸没样品,在 100 °C 条件下消解 14 d,每 24 h 超声 1 次。当颗粒物完全消解后转移至离心管,然后定容到 8 mL(此时硝酸浓度降至约 2%(体积比))。稀释溶液离心 20 min,取上层 3 mL 样品转移入新的离心管,加入 Rh 作为内标,使用 ICP/MS (PE Flan 6000)进行定量分析。

1.3 质量保证和质量控制

所有操作都经过严格的质量控制。试剂空白、实验室空白和回收率都符合质量控制和质量保证的要求。分析试剂为色谱纯,所用试验器材均用超纯水清洗干净并烘干。

2 结果与讨论

2.1 OC 和 EC 的排放特征

2.1.1 OC 和 EC 的排放因子

玉米、水稻和小麦秸秆燃烧排放颗粒物中检测出的 OC、EC 排放因子及与其他文献研究结果对比如表 1 所示。从表 1 可以看出不同秸秆燃烧的 OC、EC 排放因子范围变化非常大。OC 排放因子的范围为 169~1 707 mg/kg,水稻燃烧排放 OC 最多,EC 排放因子的范围为 91~300 mg/kg,玉米燃烧排放 EC 最多。虽然本研究采集的为 TSP 样品,其他研究采集为 PM₁₀ 或 PM_{2.5} 样品,但研究表明燃烧源排放颗粒物的化学组分主要分布在细颗粒物当中^[17],因此也可以在一定程度上进行对比。本研究水稻产生的 OC 排放因子远低于 Hays 等^[7]的研究结果,但高于 Zhang 等^[11,13]的研究结果,小麦产生的 OC 排放因子与 Sahai 等^[6]的研究结果比较接近,远低于唐喜斌等^[7,13]的研究结果。从 EC 来看,玉米和水稻秸秆燃烧排放的 EC 排放因子要稍高于其他研究结果,而小麦燃烧排放的 EC 排放因子要稍低于 Sahai 等^[6,13]的研究结果,而远低于 Hays 等^[7]的研究结果。

2.1.2 OC/EC 排放特征

OC/EC(排放因子比,下同)经常用于源示踪,认为不同排放源的 OC/EC 有所差异^[18]。表 2 给出了不同来源 OC/EC 的比值。从表 2 中可以看出,本研究中玉米

表 1 秸秆燃烧烟气中 EC/OC 排放因子

Table 1 Emission factors of EC and OC from crop straws burning (mg/kg)

秸秆类型	排放因子		OC/EC	数据来源
	OC	EC		
玉米 1	466	300	1.6	本研究
水稻 1	1 707	231	7.4	本研究
水稻 2	8 940±420	170±40		文献[7]
水稻 3	750±180	110±30	6.8	文献[13]
稻草 3	546±60	71±29		文献[11]
小麦 1	169	91	1.9	本研究
小麦 2	290±120	160±70		文献[6]
小麦 3	1 230±30	520±00		文献[7]
小麦 4	970±130	120±20	8.1	文献[13]

和小麦秸秆燃烧的 OC/EC 比值较为接近,但低于水

稻秸秆燃烧的 OC/EC 比值;小麦秸秆燃烧的 OC/EC 比值(1.9)低于唐喜斌等^[13]的研究(8.1),而水稻秸秆燃烧的 OC/EC 比值(7.4)则稍高于其研究(6.8)。与其他类型的生物质燃烧源相比,农作物秸秆燃烧源的 OC/EC 比值范围(1.6~8.1)低于森林燃烧^[20](14.51)、落叶树燃烧^[21](9~43)及草类燃烧^[22](19~44),可以将此比值用于这几类生物质燃烧源的区分。与生物质之外的燃烧源相比,农作物秸秆燃烧源的 OC/EC 比值范围(1.6~8.1)高于重型柴油车^[21](0.8),低于地面扬尘^[19](13.1)、家庭天然气^[20](12.7)及香烟^[20](121.4),OC/EC 比值差异明显,可以用于不同燃烧源的相互区分。

表 2 不同污染源 OC/EC 范围

Table 2 The ratios of OC/EC in different emission sources

不同大气污染源	OC/EC	数据来源	不同大气污染源	OC/EC	数据来源
阔叶树燃烧	3.2~18.7	文献[19]	家庭天然气	12.7	文献[20]
灌木燃烧	7.3~10.5	文献[19]	香烟	121.4	文献[20]
地面扬尘	13.1	文献[18]	落叶树燃烧	9~43	文献[21]
居民木材燃烧	4.15	文献[20]	针叶树燃烧	3~78	文献[21]
森林燃烧	14.51	文献[20]	草类燃烧	19~44	文献[22]
轻型汽油车	2.2	文献[21]	小麦、水稻秸秆露天燃烧	6.82~8.08	文献[13]
重型柴油车	0.8	文献[21]	农作物秸秆燃烧	1.6~7.4	本研究
水稻秸秆炉灶燃烧	3.68	文献[13]			

2.2 水溶性离子的排放特征

2.2.1 水溶性离子的排放因子

农作物秸秆燃烧颗粒物中水溶性离子排放因子见表 3,王丹等^[10]对不同秸秆也进行了燃烧试验,并测定了燃烧烟气的水溶性离子排放因子,其结果(平均值)列入表 3,以便与本研究进行对比。

表 3 农作物秸秆燃烧烟气 TSP 中水溶性离子的排放因子

Table 3 Emission factors of water soluble ions from crop straws burning (mg/kg)

水溶性离子	秸秆类型					
	玉米 1	玉米 2	水稻 1	水稻 2	小麦 1	小麦 2
K ⁺	91	187	95	538	47	764
Na ⁺	1.9	88	231	65	28	130
NH ₄ ⁺	39	1	152	1	25	16
Cl ⁻	59	375	190	68	49	939
NO ₂ ⁻	0.98	5	4.7	3	0.75	11
NO ₃ ⁻	3.5	19	62	29	7.3	
SO ₄ ²⁻	12	129	101	161	2.4	187
F ⁻	1.3	3	4.5	1	2	3
HCOO ⁻	0.37				0.36	
数据来源	本研究	文献[10]	本研究	文献[10]	本研究	文献[10]

相同条件下,不同秸秆燃烧的水溶性离子排放因子与排放特征差异明显,水稻燃烧水溶性离子较其他 2 种秸秆高(见表 3)。K⁺、Na⁺和 Cl⁻分别是玉米、水稻和小麦秸秆燃烧排放最高的水溶性离子,排放因子分别为 91、231 和 49 mg/kg。K⁺认为是生物质燃烧的示踪

元素^[23],Cl 是植物生长发育所必需的重要微量元素^[24];Na 和 Cl 为农盐成分,主要累积在稻株的根茎^[25]。这 3 种水溶性离子是由于植物本身含有的元素特征排放,可以用来区分秸秆燃烧与其他排放源。

与王丹等^[10]的结果对比发现,本研究中秸秆燃烧水溶性离子排放因子较小,只有少数离子的排放因子高。秸秆燃烧过程包括焰燃和闷烧,空气供给条件不同燃烧方式会有所偏重。本研究模拟秸秆的露天燃烧过程,空气供给量相对其将秸秆作为燃料使用排气筒充足,部分碳质组分直接燃烧生成 CO₂ 排放,颗粒物质量浓度相应小于排气筒采集的颗粒物浓度,因此产生的水溶性离子也会相对低于后者;另外,不同地点的秸秆,其采集地对农作物的施肥方式和数量(如钾肥等)也会影响秸秆中离子的富集程度,相应造成结果的偏差。

2.2.2 水溶性离子的排放特征

不同秸秆燃烧颗粒态水溶性离子的分布见图 1~3。从图中可以看出,K⁺、Na⁺、NH₄⁺和 Cl⁻排放因子之和在 3 种秸秆燃烧颗粒物的比例为 80%~92%,是水溶性离子的主要组成。K⁺(11%~44%)和 Na⁺(0.91%~27%)在不同秸秆燃烧颗粒态样品中的分布波动较大,NH₄⁺和 Cl⁻在 3 种秸秆燃烧颗粒态中的分布比较稳定,所占比例分别为 16%~19%和 22%~30%。

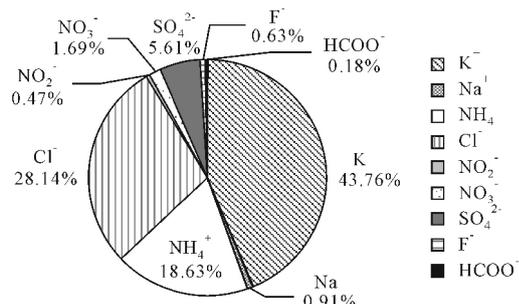


图1 玉米秸秆燃烧颗粒态水溶性离子的分布情况
Fig.1 The distribution of water-soluble ions from corn straws burning

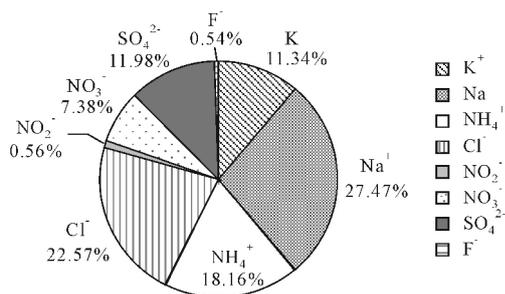


图2 水稻秸秆燃烧颗粒态水溶性离子的分布情况
Fig.2 The distribution of water-soluble ions from rice straws burning

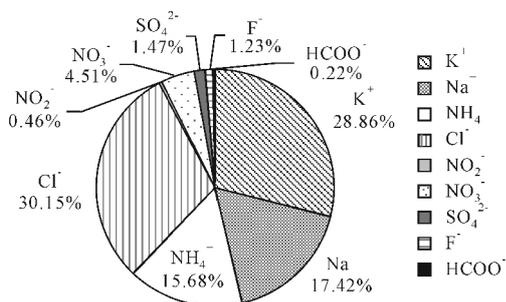


图3 小麦秸秆燃烧颗粒态水溶性离子的分布情况
Fig.3 The distribution of water-soluble ions from wheat straws burning

NO_3^-/SO_4^{2-} 比值是否 >1 用来判断城市是以流动源 (如汽车) (>1) 为主, 还是固定源 (如燃煤) (<1) 为主^[26]。本研究中玉米、水稻和小麦燃烧样品 NO_3^-/SO_4^{2-} 的质量比分别为 0.30、0.62 和 3.07, 小麦燃烧样品 NO_3^-/SO_4^{2-} 比值 >1。虽然秸秆燃烧排放的 SO_2 和 NO_x 的总量不大, 但利用该参数判断大气污染时, 需要考虑秸秆燃烧的影响。

2.3 无机元素的排放特征

2.3.1 无机元素的排放因子

玉米、水稻和小麦燃烧排放颗粒物无机元素排放因子 (见表 4)。从表 4 可以看出, 作为植物生长元素的 K、Ca、P 和 Mg 在 4 种秸秆燃烧颗粒态样品中均为主要元素, 其中 K 的排放因子最大, 为 47 532~84 666 $\mu\text{g}/\text{kg}$; 其次是 Ca, 排放因子为 2 140~5 787 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。重金属元素中, Zn、Pb 和 Cu 在 3 种秸秆燃烧颗粒态样

品中含量较高, 排放因子分别为 235~496、146~219 和 48~237 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

表 4 农作物秸秆燃烧烟气无机元素排放因子
Table 4 Concentration of inorganic elements from crop straws burning smoke ($\mu\text{g}/\text{kg}$)

元素	排放因子				
	玉米秸秆	水稻秸秆	小麦秸秆		
植物生长元素	K	84 666	5 3627	47 532	
	Ca	2 140	2 762	5 787	
	P	1 201	1 479	3 640	
	Mg	338	609	727	
	Zn	235	315	496	
	Pb	219	146	184	
	Cu	73	48	237	
	Cd	101	18	7.8	
	重金属元素	Rb	102	191	62
		Ba	20	102	51
Sr		6.3	8.7	14	
Mn		18	23	26	
Ti		15	30	66	
Zr		3.4	4.3	7.2	
Mo		3.1	0.6	3.3	
V		1.1	2.8	4.9	
Ag		0.3	0.4	0.6	

部分元素用来指示不同污染源, K 和 K^+ 可以用来指示生物质燃烧^[23]; 目前大气中 Pb 和 Zn 主要来自煤燃烧和机动车排放, V 来自重油燃烧, Zn、Cu 和 Ni 来自于冶炼厂和煤燃烧^[27]; 而 Si、Al、Ti 和 Fe 则主要来源于自然扬尘^[28]。本研究中 K 的富集与以往研究结果一致, 而含量较高的 Ca、P、Mg 等生长元素及 Zn、Pb 和 Cu 等重金属元素, 它们的排放因子由植物生理特征和当地土壤元素含量决定。这就导致不同地区秸秆燃烧中元素具有差异性。因此, 单一使用上述元素应用在不同大气污染源的示踪上有一定误差, 需要结合特征比值或其他分子标志物来确定污染源。

2.3.2 无机元素排放特征

表 5 为 K、Ca、P 和 Mg 4 种植物生长元素在秸秆燃烧颗粒物中元素所占排放因子比例。

表 5 主要的植物生长元素在秸秆燃烧颗粒态样品中元素所占比例
Table 5 The ratio of main plant growth elements to total elements from crop straws burning smoke (%)

元素	玉米秸秆	水稻秸秆	小麦秸秆
K	95	90	81
Ca	2.4	4.6	9.8
P	1.4	2.5	6.2
Mg	0.4	1.0	1.2
总计	99	98	98

K 为排放因子最高的元素, 在玉米、水稻和小麦燃烧元素中的排放因子比例分别为 95%、90% 和 81%; 4 种营养元素在元素中的比例达到了 98% 以上。重金属在无机元素中的分布情况见图 4。Zn 所占比例为

0.3%~0.8% ,Pb 所占比例为 0.2%~0.3%。这些重金属在元素中所占比例较小 ,但其对人体健康的危害不容忽视。

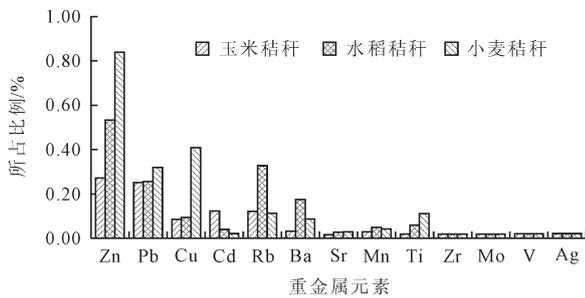


图4 重金属在秸秆燃烧排放无机元素中的分布
Fig.4 The ratios of heavy metals to total inorganic elements from crop straws burning smoke

2.4 秸秆燃烧颗粒态 K^+/OC 和 K/Ca 特征

段凤魁等^[23]发现非秸秆燃烧期 K^+/OC (排放因子比,下同)范围为 0.043~0.046,而秸秆燃烧期高达 0.19~0.21,高 K^+/OC 可指示生物质燃烧。Chow 等^[20]发现居民燃木取暖 K^+/OC 为 0.03;热带草原大火^[30]在 0.08~0.10 之间;Andreae 等^[31]研究农田焚烧 K^+/OC 值在 0.04~0.13 之间;唐喜斌等^[13]得到小麦和水稻秸秆燃烧排放 $PM_{2.5}$ 颗粒 K^+/OC 值分别为 0.30 和 0.52。本研究玉米、水稻和小麦 K^+/OC 分别为 0.20、0.06 和 0.28,两者的研究结果都表明秸秆焚烧排放颗粒物的 K^+/OC 值高于居民燃木取暖,可以作为秸秆燃烧来源的指标。

Hedberg 等^[32]测定了取暖桦木燃烧颗粒物中的无机元素,发现木材燃烧 K/Ca (排放因子比,下同)范围为 30~330,可以区分交通源(0.8 ± 0.15)。本研究中玉米、水稻和小麦燃烧颗粒态 K/Ca 的比值分别为 39.57、19.41 和 8.21,略低于取暖木材燃烧,但远高于交通排放,可以区分交通源。

3 结论

(1)收集玉米、水稻和小麦秸秆模拟露天燃烧排放的颗粒物,对样品中碳质组分、水溶性离子和无机元素进行测定,研究其排放因子及特征比值。研究发现,秸秆燃烧 OC 和 EC 的排放因子范围分别为 169~1707 和 91~300 mg/kg ,水稻秸秆燃烧排放 OC 最多; EC 排放因子的范围为 91~300 mg/kg ,玉米秸秆燃烧排放 EC 最多, OC 的排放因子远高于 EC 。

(2) K^+ 、 Na^+ 、 NH_4^+ 和 Cl^- 为秸秆燃烧水溶性离子排放的主要组成,所占比例为 80%~92%。 K^+ 、 Na^+ 和 Cl^- 分别是玉米、水稻和小麦燃烧排放最高的水溶性离子,排放因子分别为 91、231 和 49 mg/kg ,这 3 种水溶性离子来源于植物本身,可以用于区分秸秆燃烧与其他排放源。

(3)植物生长元素 K 、 Ca 、 P 和 Mg 是秸秆燃烧排放的主要元素,占总元素排放因子之和的比例为 98%~99%。 K 排放因子最高,为 47532~84666 $\mu g/kg$;其次是 Ca ,其排放因子为 2140~5787 $\mu g/kg$ 。重金属元素中 Zn 、 Pb 和 Cu 在 3 种秸秆燃烧样品中含量较高,排放因子分别为 235~496、146~219 和 48~237 $\mu g/kg$,重金属元素在秸秆燃烧排放颗粒物中所占比例较小,但其对人体健康的危害不容忽视。

(4)农作物秸秆燃烧源的 OC/EC 比值可以用于区分森林燃烧、落叶树燃烧及草类燃烧等生物质燃烧源,也可用来区分重型柴油车、地面扬尘、家庭天然气及香烟等不同大气污染源。 K^+/OC 比值可以区分秸秆燃烧与居民燃木取暖, K/Ca 比值可以区分秸秆燃烧与交通源,这些比值可以为秸秆燃烧源解析提供更多的判断依据。

【参考文献】

- [1] Ogunjobi K O, He Z, Kim K W, et al. Aerosol optical depth during episodes of Asian dust storms and biomass burning at Kwangju, South Korea[J]. Atmospheric Environment, 2004 (38): 1313-1323.
- [2] Schkolnik G, Chand D, Hoffer A, et al. Constraining the density and complex refractive index of elemental and organic carbon in biomass burning aerosol using optical and chemical measurements[J]. Atmospheric Environment, 2007 (41): 1107-1118.
- [3] 刘刚,李久海,徐慧,等. 麦秸烟尘中正构脂肪醇和正构烯烃的化学组成[J]. 中国环境科学, 2014, 34(6): 1420-1428.
- [4] 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.
- [5] Crutzen P J, Andreae M O. Biomass burning in the tropics: impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles[J]. Science, 1990(250): 1669-1678.
- [6] Sahai S, Sharma C, Singh D P, et al. A study for development of emission factors for trace gases and carbonaceous particulate species from in situ burning of wheat straw in agricultural fields in India[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(39): 9173-9186.
- [7] 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.
- [8] Viana M, Lopez J M, Querol X, et al. Tracers and impact of open burning of rice straw residues on PM in eastern Spain[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(8): 1941-1957.
- [9] Cheng M T, Horng C L, Su Y R, et al. Particulate matter characteristics during agricultural waste burning in Taichung City, Taiwan[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 165

- (13) :187-192.
- [10] 王丹, 屈文军, 曹国良, 等. 秸秆燃烧排放颗粒物的水溶性组分分析及其排放因子[J]. 中国粉体技术, 2007, 13(5) : 31-34.
- [11] Zhang Yuanxun, Shao Min, Zhang Yuanhang, et al. Source profiles of particulate organic matters emitted from cereal straw burnings[J]. Journal of Environmental Sciences, 2007 (19) :167-175.
- [12] 张鹤丰. 中国农作物秸秆燃烧排放气态颗粒态污染物排放特征的实验室模拟[D]. 上海: 复旦大学, 2009 :60-61.
- [13] 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.
- [14] Simoneit B R T, Rogge W F, Lang Q, et al. Molecular characterization of smoke from campfire burning of pine wood (*Pinus elliottii*) [J]. Chemosphere: Global Change Science, 2000(2) :107-122.
- [15] 王真真, 谭吉华, 毕新慧, 等. 三种农作物秸秆燃烧颗粒态多环芳烃排放特征[J]. 中国环境科学, 2015, 35(4) :1065-1071.
- [16] 王真真. 广州市典型生物质燃烧源污染物排放清单及分子标志物的研究[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2009 :21-22.
- [17] Adams F, Liu X D. Characterization of Biomass Burning Particles European Research Course on Atmosphere [M]. Boutron C, France: EDP Sciences, Les Ulis, 2000 :83-99.
- [18] Watson J G, Chow J C, Lu Z, et al. Chemical mass balance source apportionment of PM₁₀ during the southern California air quality study[J]. Aerosol Science and Technology, 1994 (21) :1-36.
- [19] Wang Zhenzhen, Bi Xinhui, Sheng Guoying, 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.
- [20] Watson J G, Chow J C. Source characterization of major emission sources in the Imperial and Mexicali Valleys along the US/Mexico border[J]. Science of the Total Environment, 2001(276) :33-47.
- [21] Hildemann L M, Mazurek M A, Cass G R, et al. Quantitative characterization of urban sources of organic aerosol by high-resolution gas chromatography[J]. Environment Science Technology, 1991, 25(7) :1311-1325.
- [22] Oros D R, Abas M R, Omar N Y M J, et al. Identification and emission factors of molecular tracers in organic aerosols from biomass burning Part 3. grasses[J]. Applied Geochemistry, 2006, 21(6) :919-940.
- [23] Duan F, Liu X, Yu T, et al. Identification and estimate of biomass burning contribution to the urban aerosol organic carbon concentrations in Beijing[J]. Atmospheric Environment, 2004(38) :1275-1282.
- [24] 於丙军, 刘友良. 植物中的氯、氯通道和耐氯性[J]. 植物学报, 2004, 21(4) :402-410.
Yu Bingjun, Liu Youliang. Chlorine, chloride channel and chlorine tolerance in plants[J]. Bulletin of Botany, 2004, 21(4) :402-410.(in Chinese)
- [25] 王家玉. 以钠代钾在水稻上的效应及其机理研究[J]. 浙江农业学报, 1993, 5(4) :197-202.
Wang Jiayu. The effect of Na-K substitution in rice and its mechanism[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 1993, 5(4) : 197-202.(in Chinese)
- [26] 李彩霞, 李彩亭, 曾光明, 等. 长沙市夏季 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 中水溶性离子的污染特征[J]. 中国环境科学, 2007, 27(5) : 599-603.
Li Caixia, Li Caiting, Zeng Guangming, et al. Pollution characteristics of water-soluble ions in atmospheric PM₁₀ and PM_{2.5} in Changsha City in summer[J]. China Environmental Science, 2007, 27(5) :599-603.(in Chinese)
- [27] Huang X, Olmez L, Aras N K. Emissions of trace elements from motor vehicles potential marker elements and source composition profile[J]. Atmospheric Environment, 1994, 28(8) :1385-1391.
- [28] Dallarosa J, Telxeira E C, Meira L, et al. Study of the chemical elements and polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric particles of PM₁₀ and PM_{2.5} in the urban and rural areas of south Brazil [J]. Atmospheric Environment, 2008 (89) :76-92.
- [29] Chow J C, Watson J G. Review of PM_{2.5} and PM₁₀ apportionment for fossil fuel combustion and other sources by chemical mass balance receptor model[J]. Energy and Fuels, 2002 (16) :222-260.
- [30] Maenhaut W, Salma I, Cafmeyer J, et al. Regional atmospheric aerosol composition and sources in the eastern Transvaal, South Africa, and impact of biomass burning[J]. Journal of Geophysical Research, 1996, 101(D19) :23631-23650.
- [31] Andreae M O, Merlet P. Emissions of trace gases and aerosols from biomass burning[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2001(15) :955-966.
- [32] Hedberg E, Kristensson A, Ohlsson M, et al. Chemical and physical characterization of emissions from birch wood combustion in a wood stove[J]. Atmospheric Environment, 2002 (36) :4823-4837.