

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第1期

Vol.36 No.1

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2013年夏季典型光化学污染过程中长三角典型城市O ₃ 来源识别	李浩, 李莉, 黄成, 安静宇, 严茹莎, 黄海英, 王杨君, 卢清, 王倩, 楼晟荣, 王红丽, 周敏, 陶士康, 乔利平, 陈明华(1)
厦门冬春季大气VOCs的污染特征及臭氧生成潜势	徐慧, 张晗, 邢振雨, 邓君俊(11)
近10年海南岛大气NO ₂ 的时空变化及污染物来源解析	符传博, 陈有龙, 丹利, 唐家翔(18)
稻草烟尘中有机碳/元素碳及水溶性离子的组成	洪蕾, 刘刚, 杨孟, 徐慧, 李久海, 陈惠雨, 黄柯, 杨伟宗, 吴丹(25)
气相色谱-脉冲氦离子化检测法(GC-PDHID)分析大气中分子氢(H ₂)浓度	栾天, 方双喜, 周凌晔, 王红阳, 张根(34)
小浪底水库影响下的黄河花园口站和小浪底站pCO ₂ 特征及扩散通量	张永领, 杨小林, 张东(40)
夏季中国东海生源有机硫化物的分布及其影响因素研究	李江萍, 张洪海, 杨桂朋(49)
基于Landsat 8影像估算新安江水库总悬浮物浓度	张毅博, 张运林, 查勇, 施坤, 周永强, 王明珠(56)
温瑞塘河流域水体污染时空分异特征及污染源识别	马小雪, 王腊春, 廖玲玲(64)
人类活动影响下水化学特征的影响: 以西江中上游流域为例	于爽, 孙平安, 杜文越, 何师意, 李瑞(72)
太湖梅梁湾不同形态磷周年变化规律及藻类响应研究	汪明, 武晓飞, 李大鹏, 李祥, 黄勇(80)
鄱阳湖沉积物可转化态氮分布特征及其对江湖关系变化的响应	沈洪艳, 张绵绵, 倪兆奎, 王圣瑞(87)
影响浑太河流域大型底栖动物群落结构的环境因子分析	李艳利, 李艳粉, 徐宗学(94)
水华生消过程对巢湖沉积物微生物群落结构的影响	刁晓君, 李一葳, 王曙光(107)
蓝藻水华聚集对水葫芦生理生态的影响	吴婷婷, 刘国锋, 韩士群, 周庆, 唐婉莹(114)
汞在小浪底水库的赋存形态及其时空变化	程柳, 毛宇翔, 麻冰涓, 王梅(121)
三峡库区典型农田小流域土壤汞的空间分布特征	王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇, 余亚伟(130)
三峡库区农林复合小流域水体汞的时空变化特征	赵铮, 王娅, 木志坚, 王定勇(136)
环境条件对三峡库区消落带土壤中邻苯二甲酸二丁酯向上覆水静态迁移释放的影响	宋娇艳, 木志坚, 王强, 杨志丹, 王法(143)
三峡库区消落带土壤中溶解性有机质(DOM)吸收及荧光光谱特征	高洁, 江韬, 李璐璐, 陈雪霜, 魏世强, 王定勇, 闫金龙, 赵铮(151)
舟山渔场有色溶解有机物(CDOM)的三维荧光-平行因子分析	周倩倩, 苏荣国, 白莹, 张传松, 石晓勇(163)
太原市小店污灌区地下水中多环芳烃与有机氯农药污染特征及分布规律	李佳乐, 张彩香, 王焰新, 廖小平, 姚林林, 刘敏, 徐亮(172)
厦门杏林湾水系表层沉积物中PAHs分析与风险评估	程启明, 黄青, 廖祯妮, 苏丽, 刘兴强, 唐剑锋(179)
两种不同的地下水污染风险评价体系对比分析: 以北京市平原区为例	王红娜, 何江涛, 马文洁, 许真(186)
大冶湖滨岸带重金属水-土迁移特征与风险评价	张家泉, 李秀, 张全发, 李琼, 肖文胜, 王永奎, 张建春, 盖希光(194)
铁盐絮凝法从阳宗海湖水中除砷研究与现场扩大试验	陈景, 张曙, 杨项军, 黄章杰, 王世雄, 王莞, 韦群燕, 张艮林, 肖军(202)
铋银氧化物混合物高效氧化降解四溴双酚A的研究	陈满堂, 宋洲, 王楠, 丁耀彬, 廖海星, 朱丽华(209)
一种纳米级不定形碳对水中四环素的吸附研究	吴亦潇, 李爱民, 汪的华, 张维昊(215)
磁性壳聚糖衍生物对阴离子染料的吸附行为	张聪璐, 胡筱敏, 赵研, 苏雷(221)
腐殖酸-高岭土复合体形成机制及对三氯乙烯的吸附	朱晓婧, 何江涛, 苏思慧(227)
降温过程对ANAMMOX工艺城市污水处理系统中微生物群落的影响	赵志瑞, 苗志加, 李铎, 崔丙健, 万敬敏, 马斌, 白志辉, 张洪勋(237)
FISH-NanoSIMS技术在环境微生物生态学上的应用研究	陈晨, 柏耀辉, 梁金松, 袁林江(244)
微囊藻毒素-LR对恶臭假单胞菌细胞活性和表面特性的影响	邓庭进, 叶锦韶, 彭辉, 刘芷辰, 刘则华, 尹华, 陈烁娜(252)
微生物除臭剂的筛选、复配及其除臭条件的优化	曾苏, 李南华, 盛洪产, 贺琨, 胡子全(259)
舟山青浜岛水体及海产品中有机氯农药的分布和富集特征	张泽洲, 邢新丽, 顾延生, 桂福坤, 祁士华, 黄焕芳, 瞿程凯, 张莉(266)
四川凉山藏彝青少年头发中多氯联苯污染水平的研究	周莹, 孙一鸣, 金军, 雷建容, 秦贵平, 何雪珠, 林尤静(274)
铜、毒死蜱单一与复合暴露对蚯蚓的毒性作用	徐冬梅, 王彦华, 王楠, 饶桂维(280)
外源硒对黄瓜抗性、镉积累及镉化学形态的影响	熊仕娟, 刘俊, 徐卫红, 谢文文, 陈蓉, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体(286)
厦门市道路灰尘中铂族元素的污染特征	洪振宇, 洪有为, 尹丽倩, 陈进生, 陈衍婷, 徐玲玲(295)
洋河流域不同土地利用类型土壤硒(Se)分布及影响因素	商靖敏, 罗维, 吴光红, 徐兰, 高佳佳, 孔佩儒, 毕翔, 程志刚(301)
不同钝化剂对重金属污染土壤稳定化效应的研究	吴烈善, 曾东梅, 莫小荣, 吕宏虹, 苏翠翠, 孔德超(309)
畜禽粪便有机肥中Cu、Zn在不同农田土壤中的形态归趋和有效性动态变化	商和平, 李洋, 张涛, 苏德纯(314)
华南某市生活垃圾组成特征分析	张海龙, 李祥平, 齐剑英, 陈永亨, 方建德(325)
生物沥浸耦合类Fenton氧化调理城市污泥	刘昌庚, 张盼月, 蒋娇娇, 曾成华, 黄毅, 徐国印(333)
基于平面波导型荧光免疫传感器的双酚A检测适用性研究	徐玮琦, 张永明, 周小红, 施汉昌(338)
一种新型“Turn-on”荧光探针用于硫化氢可视化检测	刘春霞, 马兴, 魏国华, 杜宇国(343)
典型黄土区油松树干液流变化特征分析	张涵丹, 卫伟, 陈利顶, 于洋, 杨磊, 贾福岩(349)
利用巨藻发酵产氢气与挥发性有机酸的研究	赵晓娟, 范晓蕾, 郭荣波, 薛志欣, 杨智满, 袁宪正, 邱艳玲(357)
人工纳米颗粒在水体中的行为及其对浮游植物的影响	李曼璐, 姜玥璐(365)
《环境科学》征订启事(251) 《环境科学》征稿简则(294) 信息(236, 243, 273, 300)	

稻草烟尘中有机碳/元素碳及水溶性离子的组成

洪蕾, 刘刚*, 杨孟, 徐慧, 李久海, 陈惠雨, 黄柯, 杨伟宗, 吴丹

(南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044)

摘要: 选取我国6种稻草, 通过自制的生物质焚烧装置模拟秸秆露天焚烧. 采用 Model 2001A 热/光分析仪和 ISC 2000/ISC 3000 离子色谱仪测定了阴燃、明燃烟尘中有机碳(OC)、元素碳(EC)与水溶性离子的含量. 结果表明, 明燃条件下稻草中 OC 排放因子(EF_{OC})均值为 $(6.37 \pm 1.86) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, EC 排放因子(EF_{EC})均值为 $(1.07 \pm 0.30) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 阴燃条件下稻草中 EF_{OC} 均值为 $(37.63 \pm 6.26) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, EF_{EC} 均值为 $(4.98 \pm 1.42) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 同一品种稻草燃烧排放出的 PM、OC 与 EC 变化趋势一致. 明燃时稻草中的 OC/EC 均值为 5.96, 阴燃时比值均值为 7.80, OC/PM 几乎不受燃烧状态的影响, 阴燃、明燃时 EC/PM 分别在 0.06~0.08、0.08~0.11 范围内, 通过 EC/PM 比值可以初步判断燃烧状态的趋势, 两种燃烧方式中排放的 OC、EC 相关性达到 0.97, 在 0.01 水平上相关性显著. 阴离子中, Cl^- 含量最高, 明燃时稻草中 Cl^- 的排放因子均值为 $(0.246 \pm 0.150) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 阴燃下为 $(0.301 \pm 0.274) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 明燃时 K^+ 排放因子均值为 $(0.118 \pm 0.051) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 阴燃时排放因子远低于明燃排放量, 均值为 $(0.053 \pm 0.031) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 水溶性 Na^+ 在阴燃条件下的排放因子均高于明燃状态下的排放. 明燃条件下水溶性离子间的相关性比阴燃时显著. 通过 OC/EC 比值可以将稻草与石化燃料及其他一些生物质燃烧区分开, 而水溶性离子中的 K^+/Na^+ 、 Cl^-/Na^+ 比值也可以将稻草与一些树木类焚烧区别开来.

关键词: 秸秆燃烧; 有机碳; 元素碳; 水溶性离子; 排放因子

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)01-0025-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.01.004

Composition of Organic Carbon/Elemental Carbon and Water-soluble Ions in Rice Straw Burning

HONG Lei, LIU Gang*, YANG Meng, XU Hui, LI Jiu-hai, CHEN Hui-yu, HUANG Ke, YANG Wei-zong, WU Dan

(School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Six types of rice straw were selected in China in this paper, the homemade biomass combustion devices were used to simulate the outdoor burning. The concentrations of organic carbon(OC), elemental carbon(EC) and water-soluble ions in particular matter produced by the flaming and smoldering were analyzed using Thermal Optical Carbon Analyzer (Model 2001A) and Ion Chromatography(ISC 2000/ISC 3000). The results showed that the mean value of OC(EF_{OC}) and EC(EF_{EC}) emission factors were $(6.37 \pm 1.86) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $(1.07 \pm 0.30) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ under the flaming conditions, respectively, while under the smoldering conditions the two mean values were $(37.63 \pm 6.26) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $(4.98 \pm 1.42) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. PM, OC and EC emitted from the same kind of rice straw had similar change trends. The average values of OC/EC under flaming and smoldering were 5.96 and 7.80, and the value of OC/PM was almost unchanged along with the combustion state. Nevertheless, the values of EC/PM under flaming and smoldering were 0.06-0.08 and 0.08-0.11, respectively. The trend of combustion state could be determined using the ratio of EC/PM and the R^2 of emitted OC and EC through those two types of combustion reached 0.97, which was significantly correlated at the 0.01 level. Among the anions, Cl^- showed the highest concentration, the results indicated that the average value of Cl^- emission factor was $(0.246 \pm 0.150) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ under flaming, while it was $(0.301 \pm 0.274) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ under smoldering. However, A big difference between flaming and smoldering was found in the average value of K^+ emission factor, where $(0.118 \pm 0.051) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ of the former was significantly higher than the latter $(0.053 \pm 0.031) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. When it came to Na^+ , the result of smoldering was significantly higher than that of flaming. The correlation between water-soluble ions in flaming was more significant than smoldering. Rice straw burning could be distinguished from fossil fuels and some other biomass burning by the OC/EC ratio, and it could also be distinguished from sort of trees burning by the ratio of K^+/Na^+ , Cl^-/Na^+ in water-soluble ions.

Key words: straw burning; organic carbon; elemental carbon; water-soluble ions; emission factor

农作物秸秆在收获季节集中焚烧, 产生大量的气体及气溶胶组分, 严重降低城市的空气质量^[1~3], 使灰霾天气发生的几率增加, 对全球大气环境、全球气候系统及生态系统都产生重要影响^[4~6]. 秸秆焚烧排放大气颗粒物的主要组分为碳质颗粒与无机

水溶性离子, 碳质颗粒主要由有机碳(OC)和元素碳

收稿日期: 2014-07-02; 修订日期: 2014-08-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41073019); 江苏省自然科学基金项目(BK20130998)

作者简介: 洪蕾(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染防治与控制, E-mail: dailyap@126.com

* 通讯联系人, E-mail: liugang650104@sina.com

(EC)组成^[7,8]. OC 与 EC 是碳质气溶胶重要物质成分,对太阳辐射产生负和正的强迫作用,OC 主要散射太阳辐射,降低大气层温度,EC 吸收太阳辐射从而使大气层升温^[9]. 水溶性离子是气溶胶的重要组成部分,与吸湿性有机物可以成为云凝结核,从而直接削弱太阳辐射^[10].

生物质燃烧排放的烟尘总伴随着高浓度的 OC, EC 为有机质不完全燃烧的产物^[11], OC/EC 的比值关系可以确定燃烧过程中阴燃、明燃的主次^[12],不同燃烧源碳质组分的组成(OC/EC)有较大的差别:石化燃料燃烧排放颗粒物中 OC/EC 值一般小于 0.4^[13],生物质燃烧主要释放有机碳组分,OC/EC 比值介于 9.4~21.6,大气气溶胶中的 OC/EC 值约为 2.8~6.2^[14~17]. 生物质燃烧释放的颗粒物中富含 K,颗粒物中水溶性 K 离子是指示生物质燃烧最经典的方法^[18],通过它可对污染源进行定性定量研究^[19]. 近年来,对秸秆焚烧过程中的碳质颗粒及无机水溶性离子的研究主要侧重于明燃条件,阴燃以及阴、明燃两种燃烧状态下详细对比却鲜有报道. 本研究通过自制的生物质焚烧装置,对秸秆在阴燃、明燃两种燃烧条件下排放的 OC、EC 以及主要的无机水溶性离子进行测定,分析 OC、EC 及无机水溶性离子在两种燃烧状态下排放特征,以及 OC、EC 与 PM 之间的排放规律,探讨秸秆露天焚烧过程中真实状况,以为大气环境控制与空气污染控制提供可靠的资料及科学依据.

1 材料与方法

1.1 实验装置

采用自制实验室生物质焚烧装置来模拟农作物秸秆露天焚烧,使燃烧条件处于可控制的状态下. 装置包含 3 个部分,分别为燃烧装置、降温装置和采样装置(如图 1). 燃烧装置包括升降台、烟尘收集罩底盘、电热炉、烟尘收集罩、可调变压器及热电偶温度计. 烟尘收集罩底盘位于升降台上,电热炉放置在烟尘收集罩底盘上. 燃烧过程中,升降台托住收集罩底盘与烟尘收集罩密合,电热炉在收集罩腔内使秸秆焚烧. 真空泵的抽速为 $4 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$,排放出的烟尘随着真空泵的作用依次通过装有冷却液的烟尘收集罩、置于冷却槽中的 U 型管,这两次冷却作用使烟尘迅速降温,最后温度保持在 40°C 以下被分级采样器收集.

1.2 焚烧实验及烟尘采集

选取 6 种稻草作为实验样品,分别为浙江临海

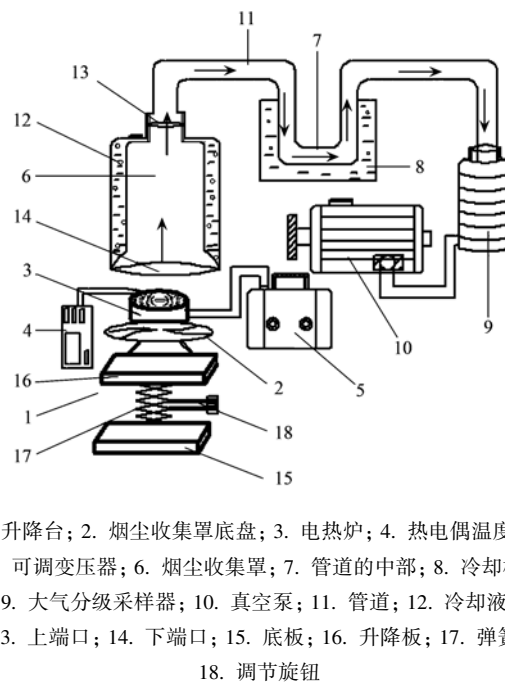


图 1 燃烧装置示意

Fig. 1 Combustion device

市的内 2 优 6 号与杨两优 6 号、安徽舒城县的 II 优 279 与宁粳 1 号、江苏邳州市的红粮 166(邳州 1 号)与 II 优 728(邳州 2 号),测定各类秸秆的含水量,在实验室用密封袋封装好. 燃烧实验前,除去秸秆上的杂物、灰尘并在室内自然风干,剪成 6 cm 长度小段. 将制备好的秸秆样品放置在电热炉上,调节可调变压器控制电热炉电压,从而达到不同的温度要求. 经过多次实验总结,电压调至 220 V,秸秆样品取 3 g 左右,秸秆处于明显的明燃状态,出现火焰;电压调节至 175 V,秸秆样品均取 1 g 左右,秸秆处于明显的阴燃状态,出现火星但无火焰. 大气采集器在每次焚烧开始时立即开启采样,明燃焚烧保持采样 10 min,阴燃焚烧保持采样 15 min. 采样所用的玻璃纤维滤膜在使用前于 500°C 马弗炉内灼烧 2 h,冷却后置于干燥器中在室温下平衡 24 h,再称量使用,采样后的滤膜同样在室温下平衡 24 h 后再称重,每种秸秆样品均进行 2 次平行燃烧实验.

1.3 样品分析

使用 Model 2001A 热/光碳分析仪(DRI,美国)测定样品中的 OC、EC. 截取一定面积的已采样玻璃纤维滤膜,放入热光炉中,采用 Improve A-glass 协议程序升温,第一阶段在纯氮气环境下按一定温度梯度(150°C - 300°C - 450°C - 550°C)升温加热,使滤膜上的有机物气化,第二阶段在通入含 2% 氧气的氮气环境下进行,按一定温度梯度(600°C - 800°C -

900℃)继续加热样品,测出 OC₁、OC₂、OC₃、OC₄、EC₁、EC₂、EC₃。用 FID 检测,在测定过程中用 633 nm 的激光全程照射样品,准确界定 OC 碳化形成的焦化碳(POC)。样品测试完毕后,OC 定义为 OC₁ + OC₂ + OC₃ + OC₄ + POC; EC 定义为 EC₁ + EC₂ + EC₃-POC。在实验期间,每天对仪器进行检漏,当样品炉压力在 15 s 内变化不超过 0.01 psi 视为不漏气,每天进样分析前高温烘烤样品炉 10 min 除尽残留杂质气体,使用 He/CH₄ 进行校准,保证初始和最终 FID 信号漂移在 ±3 以内、校准峰面积相对偏差在 5% 以内,每隔一周进行流量平衡校准。每个膜样品进 2 次平行样分析,每分析 10 个样品抽取第一个进行重复分析,确保前后两次测量误差在 10% 以内进行后续样品膜分析,同时做样品空白。

对 8 种水溶性离子(K⁺、NH₄⁺、Na⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻)进行测定,截取阴明燃采样滤膜八分之一张,剪碎后置于 15 mL 聚丙烯具盖离心管中,加 10 mL 去离子水,超声振荡提取 30 min。将提取液经离心机离心(3 000 r·min⁻¹)2 min,用孔径为 0.22 μm 的亲水性滤膜过滤,通过 ISC 2000/ISC 3000(Dionex,美国)离子色谱测定分析。阴离子分析柱型号为 ASRS-4 mm,淋洗液为 KOH 溶液(25 mmol·L⁻¹);阳离子分析柱型号为 CSRS-4 mm,淋洗液为甲磺酸水溶液(32 mmol·L⁻¹)。淋洗液流量为 1 mL·min⁻¹,进样量 20 μL。每天仪器开启后走基线

至少 60 min 进行平衡校准,进样前先注射一针去离子水以除尽残留的杂质,每分析 10 个样品抽取第一个进行重复分析,确保前后两次测量误差在 10% 以内进行后续样品膜分析,同时做样品空白。

2 结果与讨论

2.1 阴燃、明燃烟尘中 EF_{PM}、EF_{OC}、EF_{EC}

生物质燃烧排放的烟尘中一般含有较高溶度的 OC,EC 是有机质不完全燃烧的产物^[11],本研究是通过燃烧实验测得燃料消耗量和颗粒物排放量来获得排放因子。稻草阴燃、明燃中 PM、OC、EC 排放情况如表 1 所示,明燃时 6 种稻草 EF_{PM}、EF_{OC}、EF_{EC} 均值分别为(13.46 ± 2.71)、(6.37 ± 1.86)、(1.07 ± 0.30) g·kg⁻¹。阴燃条件下稻草 EF_{PM}、EF_{OC}、EF_{EC} 均值分别为(80.43 ± 14.22)、(37.63 ± 6.26)、(4.98 ± 1.42) g·kg⁻¹。表 2 列举出相关文献中稻草排放因子,本研究中稻草明燃时 EF_{OC} 与 Hays 等^[23]研究结果接近,明燃时的 EF_{PM}、EF_{EC} 高出文献数值,而阴燃条件下 EF_{OC}、EF_{PM} 与 EF_{EC} 数值则高出文献值数倍,研究中对阴燃的定义为:秸秆燃烧时出现火星但无火焰。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。因此燃烧条件、燃料用量,以及颗粒物的采样过程等因素可能是造成本研究与表 2 中数据差别较大的原因。

表 1 稻草阴燃、明燃烟尘中 EF_{EC}、EF_{OC}、EF_{PM}/g·kg⁻¹

Table 1 EF_{OC},EF_{EC},EF_{PM}for rice straws in flaming and smoldering/g·kg⁻¹

稻草品种	明燃			阴燃		
	EF _{PM}	EF _{OC}	EF _{EC}	EF _{PM}	EF _{OC}	EF _{EC}
内 2 优 6 号	10.77 ± 1.36	4.96 ± 0.26	0.89 ± 0.30	99.17 ± 0.81	43.15 ± 6.81	6.45 ± 0.87
邳州 1 号	13.64 ± 0.30	6.28 ± 0.13	1.34 ± 0.21	80.57 ± 7.89	39.18 ± 4.38	5.53 ± 0.81
邳州 2 号	16.61 ± 0.54	7.19 ± 0.76	1.31 ± 0.01	88.65 ± 11.72	40.83 ± 4.58	5.65 ± 1.51
Ⅱ 优 279	11.08 ± 1.56	5.55 ± 0.86	0.84 ± 0.21	56.22 ± 4.45	28.57 ± 2.14	2.93 ± 0.17
杨两优 6 号	11.84 ± 0.93	5.51 ± 1.27	0.88 ± 0.02	80.02 ± 2.95	37.45 ± 3.06	5.16 ± 0.32
宁粳 1 号	16.83 ± 7.71	8.7 ± 3.96	1.15 ± 0.55	77.92 ± 19.07	36.62 ± 8.80	4.18 ± 1.65
均值	13.46 ± 2.71	6.37 ± 1.86	1.07 ± 0.30	80.43 ± 14.22	37.63 ± 6.26	4.98 ± 1.42

表 2 稻草排放因子^[20~26]/g·kg⁻¹

Table 2 Emission factors of rice straws during burning/g·kg⁻¹

项目	EF _{PM}	EF _{EC}	EF _{OC}	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	文献
明燃	5.3	0.86										[17]
	3.49											[18]
		0.5	0.94	0.021	0.21	0.48	0.016		0.94	0.008	0.12	[19]
		0.17 ± 0.04	8.94 ± 0.42									[20]
		0.49 ± 0.22	10.53 ± 4.87	0.03 ± 0.05	0.44 ± 0.2	0.64 ± 0.38	0.04 ± 0.02		0.83 ± 0.42	0.03 ± 0.02	0.18 ± 0.06	[21]
				0.065	0.01	0.538	0.049	0.004	0.68	0.029	0.161	[22]
	6.28 ± 1.59	0.49 ± 0.21	2.01 ± 0.67	0.077 ± 0.035	0.003 ± 0.008	0.715 ± 0.533	0.061 ± 0.029	0.006 ± 0.005	0.855 ± 0.491	0.047 ± 0.076	0.182 ± 0.072	[23]
	13.46 ± 2.71	1.07 ± 0.30	6.37 ± 1.86	0.101 ± 0.033	0.176 ± 0.088	0.118 ± 0.051	0.022 ± 0.013	0.113 ± 0.056	0.246 ± 0.150	0.070 ± 0.076	0.090 ± 0.051	本研究
		0.37 ± 0.11	8.77 ± 4.81	0.05 ± 0.06	0.27 ± 0.18	0.82 ± 0.65	0.05 ± 0.03		1.14 ± 0.59	0.02 ± 0.01	0.22 ± 0.12	[21]
	80.43 ± 14.22	4.98 ± 1.42	37.63 ± 6.26	0.280 ± 0.070	0.407 ± 0.304	0.053 ± 0.031	0.050 ± 0.071	0.331 ± 0.091	0.301 ± 0.274	0.128 ± 0.137	0.163 ± 0.097	本研究

2.2 阴燃、明燃烟尘中 PM、OC、EC 组成比较

不同种类的稻草在阴燃、明燃条件下 EF_{PM} 、 EF_{OC} 、 EF_{EC} 变化情况如图 2 所示,明燃时同一种秸秆的 EF_{PM} 、 EF_{OC} 与 EF_{EC} 相应曲线同时升高或降低,三者变化趋势相似,宁梗 1 号的 EF_{OC} 为最高,同时其 EF_{PM} 、 EF_{EC} 也相应较高,内 2 优 6 号的 EF_{OC} 较低,其 EF_{PM} 、 EF_{EC} 也较低. 图 2(b) 所示为 6 种稻草

阴燃时 EF_{PM} 、 EF_{OC} 、 EF_{EC} 曲线图,三者仍保持一致的变化趋势,与明燃状况相似,阴燃中 II 优 279 的 EF_{PM} 、 EF_{OC} 、 EF_{EC} 均为最低,内 2 优 6 号的 EF_{PM} 、 EF_{OC} 、 EF_{EC} 均为最高. 这种情况可能是因为某种稻草燃烧时排放 OC 含量较多,同时转化为 EC 的量也较多,从而导致同一种稻草 EF_{PM} 、 EF_{OC} 与 EF_{EC} 具有一致的变化趋势.

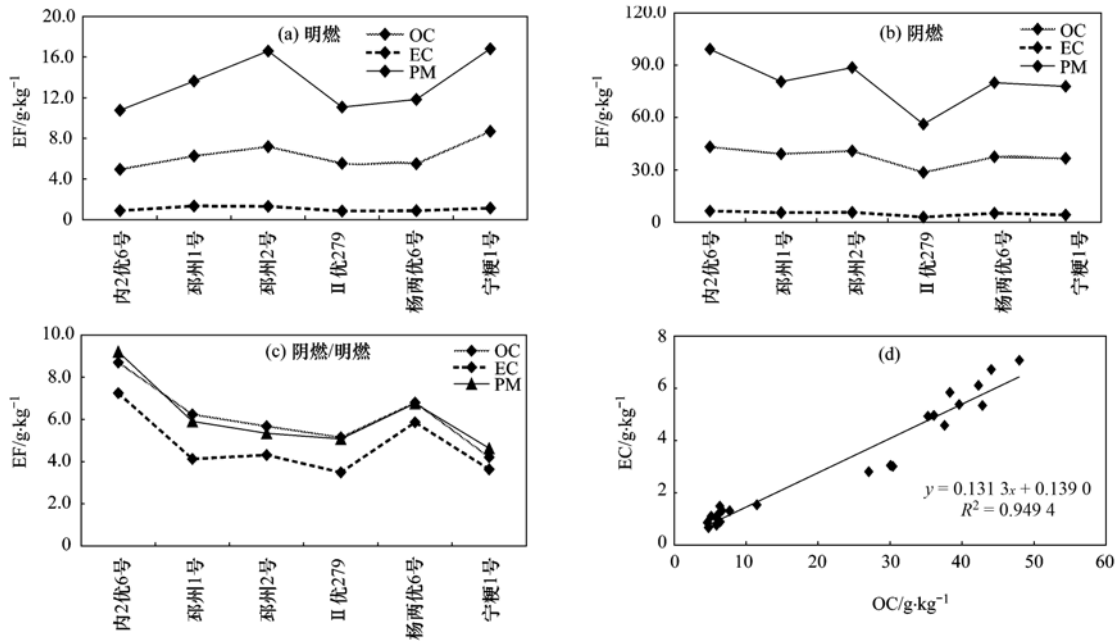


图 2 稻草阴燃、明燃中 EF_{PM} 、 EF_{OC} 、 EF_{EC}

Fig. 2 EF_{PM} , EF_{OC} , EF_{EC} for rice straws in flaming and smoldering

Ortiz 等^[27]测定了西班牙 3 种谷物秸秆在不同燃烧状态下的颗粒物排放因子,发现秸秆阴燃状态下的排放因子均值约是明火燃烧状态的 12 倍,Liousse 等^[20]研究结果表明,对于典型秸秆而言,闷火燃烧的排放因子是明火燃烧的 3 倍左右,使用 1 a 与 15 a 两种炉龄的炉子对 4 种农作物秸秆进行燃烧实验,两种不同年份的煤炉排放因子相差可达到 2 倍左右^[22],由此可见,炉子的老化对燃烧性能的影响不能忽略,不同的燃烧状态以及燃烧装置条件对排放因子的影响较大. 本研究中阴燃、明燃时稻草排放的 OC、EC 占 PM 的质量分数均值如表 3 所示,明燃中 OC 占

PM 的 47.28%,EC 占 PM 的 7.94%,Cao 等^[26]研究中明燃时 OC 占 PM 质量分数为 32.01%,EC 占 7.80%. 虽然稻草阴燃排放 OC、EC 是明燃时的数倍,但阴燃中 OC、EC 占 PM 中的比例与明燃时相近,分别为 46.79%、6.2%. PM、OC、EC 各自在阴燃、明燃下的比值如图 2(c) 所示,阴燃时 PM 的排放约是明燃时的 6 倍,OC 约为 6 倍,EC 约为 5 倍,其中内 2 优 6 号的 PM、OC 与 EC 的阴、明燃排放比均为最高,宁梗 1 号的排放比相对较低. 同一品种秸秆的 PM、OC、EC 在阴燃、明燃两种燃烧状态下的 3 条比值线的走势接近,具有一致的趋势.

表 3 稻草 PM 中各组分的质量分数/%

Table 3 Average chemical composition in PM/%

项目	OC	EC	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	总量
明燃	47.28	7.94	0.83	1	0.89	0.17	1.42	2.16	0.52	0.85	63.06
阴燃	46.79	6.2	0.35	0.07	0.41	0.06	0.5	0.36	0.21	0.19	55.14

2.3 稻草燃烧烟尘中 PM 及 OC/EC 特征分析

石化燃料(煤、石油、天然气)燃烧排放颗粒物中 OC/EC 值一般小于 0.4^[13],大气气溶胶中的 OC/EC 比值介于 2.8~6.2^[14~17]. 生物质燃烧中 OC/EC 较高,不同种类的生物质燃烧源的 OC/EC 值存在差别:温热带松柏在阴燃、明燃条件下 OC/EC 范围为 3~78,均值为 35,落叶在两种燃烧条件下 OC/EC 范围为 9~43,均值为 23.6,草原植被在阴、明燃时 OC/EC 范围为 19~44,均值为 31^[28~30],森林火灾释放出颗粒中的 OC/EC 比值范围为 5~713,最小的值是在明燃阶段,最高值是在阴燃阶段^[31]. Hays 等^[23]研究表明,稻草在明燃条件下,OC/EC 的平均比值为 31(16~58),阴燃条件下比值则为 23(11~40). 本研究中稻草燃烧时 OC/EC 比值范围为 4.69~9.75,明燃状态下 OC/EC 均值约为 6(4.69~7.57),阴燃状态下 OC/EC 均值为 7.8(6.69~9.75),同一种秸秆阴燃的比值均高于明燃时的比值,这与其他研究者的 OC/EC 为 2.0~6.2^[32~34]接近. 与树木类燃烧相比较可得稻草在阴燃、明燃中 OC/EC 比值的变化范围明显较小,且数

值小于草原植被燃烧.

如表 4 所示,OC/PM 的数值在阴燃、明燃条件下两者接近,可以猜测稻草燃烧时排放的 OC 在 PM 中的所占的比例不受燃烧状态的影响. 类似的研究显示明燃中 EC/PM_{2.5}为 0.058~0.116,阴燃中比值为 0.047~0.053,明燃状态下 EC/PM_{2.5}含有较高的比值,可能是因为明燃具有较高的温度,从而使更多的有机物转化成 EC^[35]. 本研究中 EC/PM 在阴燃、明燃中对比较明显,明燃下的比值范围为 0.08~0.11,阴燃下的比值范围为 0.06~0.08,因此可以从 EC 与 PM 的比值中初步判断燃烧状态的趋势.

Turpin 等^[36]通过研究 OC 与 EC 之间的关系,可以区分碳质气溶胶的来源,若 EC 和 OC 之间的相关性好,则表明 OC、EC 来自相同的污染源. 本研究中秸秆两种燃烧排放的 OC 与 EC 相关性如图 2(d)所示,相关系数达到 0.97,在 0.01 水平上相关性显著,说明 Turpin 关于碳质气溶胶来源分析对稻草燃烧阴燃、明燃两种条件均可以运用,是否对来源其他种类秸秆阴明燃两种条件下排放烟尘中的 OC、EC 都适合,则还需要更多的实验来证明.

表 4 稻草阴燃、明燃中 PM、EC、OC 比值

Table 4 Relationship between PM, OC and EC for rice straws in flaming and smoldering

稻草品种	明燃				阴燃			
	OC/EC	OC/PM	EC/PM	(OC + EC)/PM	OC/EC	OC/PM	EC/PM	(OC + EC)/PM
内 2 优 6 号	5.57	0.53	0.09	0.54	6.69	0.5	0.07	0.5
邳州 1 号	4.69	0.52	0.11	0.56	7.08	0.55	0.08	0.55
邳州 2 号	5.49	0.49	0.09	0.51	7.23	0.52	0.07	0.52
Ⅱ 优 279	6.61	0.56	0.09	0.58	9.75	0.57	0.06	0.56
杨两优 6 号	6.26	0.53	0.08	0.54	7.26	0.53	0.07	0.53
宁粳 1 号	7.57	0.6	0.08	0.59	8.76	0.54	0.06	0.52
均值	5.96	0.54	0.09	0.55	7.80	0.53	0.07	0.53

2.4 阴燃、明燃烟尘中水溶性离子排放分析

6 种稻草阴燃、明燃烟尘中水溶性离子的排放因子如表 5 所示. 3 种阴离子 Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻ 被测定,排放因子数值变化范围从低于检测限到 (0.824 ± 0.373) g·kg⁻¹. 在阴燃、明燃两种条件下,3 种阴离子中,Cl⁻ 排放因子均较高,SO₄²⁻ 排放因子次之. 明燃下稻草中 Cl⁻ 排放因子均值为 (0.264 ± 0.150) g·kg⁻¹,这与文献[23,24]中结论相似. 阴燃下 Cl⁻ 的排放因子均值为 (0.301 ± 0.274) g·kg⁻¹. 测定的 5 种阳离子包括 K⁺、NH₄⁺、Na⁺、Mg²⁺、Ca²⁺,排放因子数值变化范围从低于检出限到 (0.937 ± 0.262) g·kg⁻¹. 在明燃条件下,稻草中 NH₄⁺ 排放因子最高,均值为 (0.176 ± 0.088) g·kg⁻¹,K⁺ 排放因子次之,均值为 (0.118 ±

0.051) g·kg⁻¹,Mg²⁺ 与 Na⁺ 的排放因子较低,均值分别为 (0.113 ± 0.056) g·kg⁻¹, (0.101 ± 0.033) g·kg⁻¹,Ca²⁺ 排放因子最低,为 (0.022 ± 0.013) g·kg⁻¹. 当稻草处于阴燃状态时,NH₄⁺ 排放因子最高,为 (0.407 ± 0.304) g·kg⁻¹,Mg²⁺ 与 Na⁺ 的排放因子均值分别为 (0.331 ± 0.091) g·kg⁻¹、(0.280 ± 0.070) g·kg⁻¹,K⁺ 排放因子变化较大,阴燃时低至 (0.053 ± 0.031) g·kg⁻¹,与 Ca²⁺ 排放因子 (0.050 ± 0.071) g·kg⁻¹ 接近.

稻草阴燃、明燃中各种离子在 PM 中的所占质量分数均值如表 3 所示,Cao 等^[26]研究得出明燃时 K⁺ 在 PM 中的质量分数为 11.39%,Cl⁻ 为 13.61%,Park 等^[37]研究发现,稻草焚烧时细颗粒物中 K⁺ 所占质量分数为 1.77%,Cl⁻ 占 2.96%. 本研究中明

燃时 Cl^- 在 PM 中的比值相对较低,为 2.16%, K^+ 所占的质量分数为 1%, Ca^{2+} 所占质量分数最少,为 0.17%,阴燃时由于 PM 的排放升高数倍,使得水溶性离子在 PM 中的比例均降低, K^+ 仅占 0.07% 的比例, Cl^- 占 0.36%。8 种水溶性离子中, K^+ 、 NH_4^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 这 6 种离子的测定值均高于检出限,利用 SPSS 软件分析得出这 6 种离子的相

关性。如表 6 所示,明燃条件下 NH_4^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 与 K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 与 NH_4^+ ,以及 Na^+ 与 Cl^- 均呈现显著的正相关性,说明阳离子主要以氯化物的形式存在,阴燃条件下离子间的相关性无明显燃时显著,仅在 Na^+ 与 K^+ 、 Cl^- 与 NH_4^+ 间有较为显著的正相关性,因此燃烧条件不一样,无机水溶性离子的存在形式也不一样。

表 5 阴燃、明燃中水溶性离子的排放因子/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
Table 5 Emission factors of water-soluble ions in flaming and smoldering/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

稻草品种	项目	K^+	NH_4^+	Na^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}
内 2 优 6 号	明燃	0.090 ± 0	0.106 ± 0.043	0.110 ± 0.014	0.170 ± 0.008		0.158 ± 0.012		0.037 ± 0.015
	阴燃	0.035 ± 0.007	0.131 ± 0.029	0.275 ± 0.007	0.205 ± 0.026	0.054 ± 0.040	0.100 ± 0.042		0.305 ± 0.094
邳州 1 号	明燃	0.180 ± 0.014	0.267 ± 0.060	0.140 ± 0.014	0.190 ± 0.045	0.044	0.401 ± 0.073	0.043	0.106 ± 0.041
	阴燃	0.105 ± 0.021	0.596 ± 0.049	0.405 ± 0.035	0.429 ± 0.112	0.172	0.317 ± 0.071	0.090	0.234
邳州 2 号	明燃	0.205 ± 0.064	0.326 ± 0.056	0.160 ± 0.007	0.138 ± 0.004	0.018 ± 0.003	0.526 ± 0.059	0.011	0.121 ± 0.008
	阴燃	0.070 ± 0.014	0.937 ± 0.262	0.280 ± 0.028	0.390 ± 0.034	0.015	0.824 ± 0.373	0.055	0.093 ± 0.025
II 优 279	明燃	0.100 ± 0	0.157 ± 0.072	0.070 ± 0	0.042 ± 0.017	0.012	0.189 ± 0.003		0.104
	阴燃	0.035 ± 0.007	0.253 ± 0.148	0.215 ± 0.049	0.365 ± 0.234	0.005	0.189 ± 0.040		0.089 ± 0.088
杨两优 6 号	明燃	0.085 ± 0.007	0.112 ± 0.042	0.090 ± 0	0.084 ± 0.045	0.013 ± 0.004	0.161 ± 0.033		0.121 ± 0.001
	阴燃	0.020 ± 0	0.226 ± 0.103	0.215 ± 0.007	0.231 ± 0.103		0.104 ± 0.066	0.361 ± 0.228	0.160 ± 0.074
宁粳 1 号	明燃	0.145 ± 0.035	0.175 ± 0.018	0.100 ± 0.014	0.092 ± 0.055	0.025 ± 0.010	0.311 ± 0.004	0.155	0.198 ± 0.062
	阴燃	0.055 ± 0.007	0.290 ± 0.176	0.290 ± 0.099	0.370 ± 0.216		0.190 ± 0.020	0.184 ± 0.040	0.054 ± 0.019

表 6 阴燃、明燃中水溶性离子的相关性¹⁾
Table 6 Correlation among water-soluble ions in flaming and smoldering

项目	离子	K^+	NH_4^+	Na^+	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}
明燃	K^+	1	0.973 **	0.855 *	0.45	0.992 **	0.353
	NH_4^+		1	0.831 *	0.38	0.979 **	0.255
	Na^+			1	0.764	0.866 *	-0.046
	Mg^{2+}				1	0.41	-0.428
	Cl^-					1	0.346
	SO_4^{2-}						1
阴燃	K^+	1	0.69	0.927 **	0.793	0.513	0.079
	NH_4^+		1	0.431	0.669	0.961 **	-0.259
	Na^+			1	0.553	0.23	0.358
	Mg^{2+}				1	0.554	-0.485
	Cl^-					1	-0.327
	SO_4^{2-}						1

1) ** 为在 0.01 水平上显著相关; * 为在 0.05 水平上显著相关

8 种离子在两种燃烧状态下总体上未呈现出如 OC/EC 所有的变化规律。图 3 为稻草在阴燃、明燃条件下 Cl^- 的排放因子,两种燃烧状态下邳州 2 号的 Cl^- 排放因子均较高,内 2 优 6 号排放值均最低,且 Cl^- 的排放受稻草品种的影响较大,不同型号的稻草 Cl^- 排放因子差异明显,阴燃时最高值约是最低值的 8 倍。

图 4 为稻草在阴燃、明燃条件下 K^+ 的排放因子,在多种农作物秸秆中(麦秸、稻草、棉花秸秆、

玉米秸秆)麦秸中 K^+ 排放因子最高^[25],生物质燃烧的水溶性 K 被称为示踪元素,通过它可以对污染源进行定性定量研究^[19]。阴燃、明燃条件下,稻草中 K^+ 的排放受品种的影响较大,明燃条件下邳州 2 号的 K^+ 排放因子最高,阴燃状态下邳州 1 号排放出的 K^+ 最高。杨两优 2 号在阴燃、明燃下水溶性 K^+ 排放都为最低,从图 4 中可以得出,两种燃烧条件下 K^+ 排放呈现出显著的特征,阴燃条件下稻草中的 K^+ 排放均低于明燃中的排放。

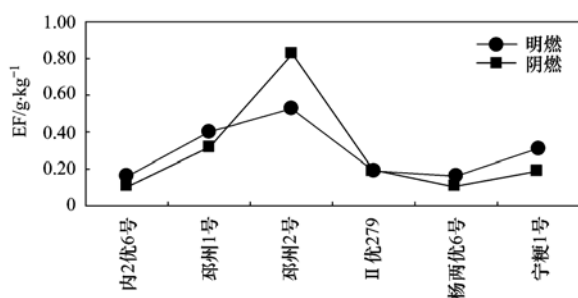
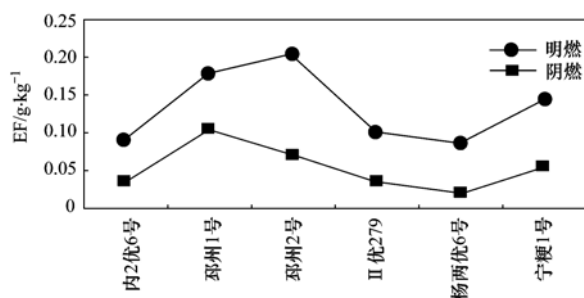
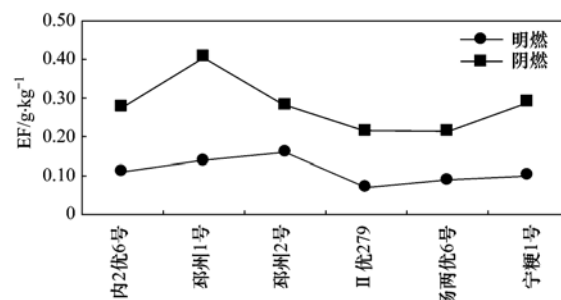
图3 阴燃、明燃中 Cl^- 的排放因子Fig. 3 Emission factors of Cl^- in flaming and smoldering图4 阴燃、明燃中 K^+ 的排放因子Fig. 4 Emission factors of K^+ in flaming and smoldering

图5为稻草在阴燃、明燃条件下 Na^+ 的排放因子,明燃时邳州1号 Na^+ 排放因子较高,阴燃时稻草中的邳州2号 Na^+ 排放因子较高。在两种燃烧条件下 Na^+ 排放也呈现出显著的特征,即无论秸秆的种类,阴燃状态下 Na^+ 排放因子均高于明燃时的排放,Zhang 等^[24]测定稻草在阴燃、明燃时 Na^+ 的排放因子,均值分别为 $(0.05 \pm 0.06) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $(0.03 \pm 0.05) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。本研究中稻草中 Na^+ 在阴燃条件下的排放为明燃条件下的2.8倍,而 K^+ 在明燃下的排放是阴燃下的2.2倍,产生这种变化原因可能受到当地土壤成分以及施用的化肥的影响,但不同的燃烧状态是导致这种现象的主要原因,水溶性 K^+ 与 Na^+ 这种排放特征可以对水稻燃烧状态做出初步判定,但这种规律性的变化对其他种类秸秆是否适合还需进一步研究。

对稻草中 OC/Na^+ 、 K^+/Na^+ 、 Cl^-/Na^+ 进行分析,明燃中各比值分别为60、1.2、2.5;阴燃中各个比值则分别为138、0.18、1.0。Lin 等^[38]对莲雾农业残留物焚烧烟尘中的颗粒物进行研究,细颗粒物中 OC/Na^+ 、 K^+/Na^+ 、 Cl^-/Na^+ 的比值分别为318、10.2、10.5,松叶、樱桃树叶、银杏树叶、枫叶焚烧细颗粒物中 K^+/Na^+ 比值分别为37、2.4、83、27, Cl^-/Na^+ 的比值分别为22、6.8、65和33^[37],可以

图5 阴燃、明燃中 Na^+ 的排放因子Fig. 5 Emission factors of Na^+ in flaming and smoldering

发现5种树木类的 K^+/Na^+ 、 Cl^-/Na^+ 的数值均远高于稻草中的比值。因此在生物质焚烧烟尘中可以通过 K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 等离子之间的关系将稻草与上述树木类焚烧区分开来。

3 结论

(1)6种稻草在阴燃、明燃条件下焚烧,阴燃时 EF_{PM} 、 EF_{OC} 、 EF_{EC} 以及 OC/EC 比值均高于明燃下的数值,与草原植被、森林大火、松柏、落叶焚烧相比,稻草燃烧中的 OC/EC 比值明显较小,且变化范围不大。 OC/PM 几乎不受燃烧状态的影响, EC/PM 在两种燃烧状态下呈现出不同的比值范围,可以根据 EC/PM 比值初步判断燃烧状态的趋势。阴燃、明燃中秸秆燃烧排放的 OC 、 EC 线性相关系数达到0.96,在0.01水平上相关性显著。

(2)8种水溶性离子中, Cl^- 在阴燃、明燃下含量均较高,阳离子中 NH_4^+ 含量较高,明燃条件下离子间的相关性比阴燃时显著,且燃烧状态不同,水溶性离子的存在形式不一样。6种稻草中 Na^+ 、 K^+ 的排放因子受燃烧状态的影响呈现出规律性变化, Na^+ 在阴燃条件下排放因子均大于明燃时排放, K^+ 在阴燃时排放均小于明燃时的排放。稻草焚烧中 K^+/Na^+ 、 Cl^-/Na^+ 比值与部分树木类焚烧有显著的区别,可以通过 K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 等离子之间的关系将稻草与这些树木类焚烧区分开来。

参考文献:

- [1] 段凤魁,鲁毅强,狄一安,等. 秸秆焚烧对北京市空气质量的影响[J]. 中国环境监测, 2001, 17(3): 8-11.
- [2] 杭维琦,陈建江. 野外燃烧秸秆对环境的影响与防治[J]. 环境监测管理与技术, 2000, 12(2): 36-37.
- [3] Duan F K, Liu X D, 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(9): 1275-1282.
- [4] Andreae M O. Biomass burning: its history, use, and

- distribution and its impact on environmental quality and global climate [A]. In: Levine J S (ed.). Global biomass burning: Atmospheric, climatic, and biospheric implications [M]. The MIT Press, 1991. 3-21.
- [5] Mittal S K, Singh N, Agarwal R, *et al.* Ambient air quality during wheat and rice crop stubble burning episodes in Patiala [J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(2): 238-244.
- [6] Mandalakis M, Gustafsson Ö, Alsberg T, *et al.* Contribution of biomass burning to atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons at three European background sites [J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39**(9): 2976-2982.
- [7] Reddy M S, Venkataraman C. Inventory of aerosol and sulphur dioxide emissions from India. Part II—biomass combustion [J]. Atmospheric Environment, 2002, **36**(4): 699-712.
- [8] 胡海清, 周振宝, 焦燕. 俄罗斯森林火灾现状统计分析[J]. 世界林业研究, 2006, **19**(2): 74-78.
- [9] Menon S, Hansen J, Nazarenko L, *et al.* Climate effects of black carbon aerosols in China and India [J]. Science, 2002, **297**(5590): 2250-2253.
- [10] Penner J E, Dickinson R E, O'Neill C A. Effects of aerosol from biomass burning on the global radiation budget [J]. Science, 1992, **256**(5062): 1432-1434.
- [11] Bond T C, Streets D G, Yarber K F, *et al.* A technology - based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984-2012), 2004, **109**(D14): D14203.
- [12] Chu S H. Stable estimate of primary OC/EC ratios in the EC tracer method [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(8): 1383-1392.
- [13] 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.
- [14] 邓丛蕊. 中国大气气溶胶中生物质燃烧的源追踪及灰霾的形成机制[D]. 上海: 复旦大学, 2011.
- [15] 李新妹, 于兴娜. 灰霾期间气溶胶化学特性研究进展[J]. 中国科技论文在线, 2011, **6**(9): 661-664.
- [16] 陈魁, 银燕, 魏玉香, 等. 南京大气PM_{2.5}中碳组分观测分析[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(8): 1015-1020.
- [17] Tan J H, Duan J C, He K B, *et al.* Chemical characteristics of PM_{2.5} during a typical haze episode in Guangzhou [J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, **21**(6): 774-781.
- [18] Andreae M O. Soot carbon and excess fine potassium: Long-range transport of combustion-derived aerosols [J]. Science, 1983, **220**(4602): 1148-1151.
- [19] Chow J C. Measurement methods to determine compliance with ambient air quality standards for suspended particles [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 1995, **45**(5): 320-382.
- [20] Lioussé C, Penner J E, Chuang C, *et al.* A global three - dimensional model study of carbonaceous aerosols [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984-2012), 1996, **101**(D14): 19411-19432.
- [21] Jenkins B M, Turn S Q, Williams R B, *et al.* Atmospheric pollutant emission factors from open burning of agricultural and forest biomass by wind tunnel simulations. Volume 2. Results, cereal crop residues. Final report [R]. United States: California University, 1996.
- [22] Wei S Y, Shen G F, Zhang Y Y, *et al.* Field measurement on the emissions of PM, OC, EC and PAHs from indoor crop straw burning in rural China [J]. Environmental Pollution, 2014, **184**: 18-24.
- [23] 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.
- [24] Zhang Y S, Shao M, Lin Y, *et al.* Emission inventory of carbonaceous pollutants from biomass burning in the Pearl River Delta Region, China [J]. Atmospheric Environment, 2013, **76**: 189-199.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Ortiz de Zárate I, Ezcurra A, Lacaux J P, *et al.* Emission factor estimates of cereal waste burning in Spain [J]. Atmospheric Environment, 2000, **34**(19): 3183-3193.
- [28] Oros D R, Simoneit B R T. Identification and emission factors of molecular tracers in organic aerosols from biomass burning Part 1. Temperate climate conifers [J]. Applied Geochemistry, 2001, **16**(13): 1513-1544.
- [29] Oros D R, Simoneit B R T. Identification and emission factors of molecular tracers in organic aerosols from biomass burning Part 2. Deciduous trees [J]. Applied Geochemistry, 2001, **16**(13): 1545-1565.
- [30] Oros D R, Abas M R B, 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.
- [31] Alves C A, Vicente A, Monteiro C, *et al.* Emission of trace gases and organic components in smoke particles from a wildfire in a mixed-evergreen forest in Portugal [J]. Science of the Total Environment, 2011, **409**(8): 1466-1475.
- [32] Turn S Q, Jenkins B M, Chow J C, *et al.* Elemental characterization of particulate matter emitted from biomass burning: Wind tunnel derived source profiles for herbaceous and wood fuels [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984-2012), 1997, **102**(D3): 3683-3699.
- [33] Kleeman M J, Robert M A, Riddle S G, *et al.* Size distribution of trace organic species emitted from biomass combustion and meat charbroiling [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**

- (13): 3059-3075.
- [34] Kim Oanh N T, Ly B T, Tipayarom D, *et al.* Characterization of particulate matter emission from open burning of rice straw [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(2): 493-502.
- [35] Clarke A G, Karani G N. Characterisation of the carbonate content of atmospheric aerosols [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1992, **14**(1-4): 119-128.
- [36] Turpin B J, Huntzicker J J. Identification of secondary organic aerosol episodes and quantitation of primary and secondary organic aerosol concentrations during SCAQS [J]. *Atmospheric Environment*, 1995, **29**(23): 3527-3544.
- [37] Park S S, Sim S Y, Bae M S, *et al.* Size distribution of water-soluble components in particulate matter emitted from biomass burning [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **73**: 62-72.
- [38] Lin C C, Huang K L, Tsai J H, *et al.* Characteristics of water-soluble ions and carbon in fine and coarse particles collected near an open burning site [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **51**: 39-45.

CONTENTS

Ozone Source Apportionment at Urban Area during a Typical Photochemical Pollution Episode in the Summer of 2013 in the Yangtze River Delta	LI Hao, LI Li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Winter and Spring in Xiamen	XU Hui, ZHANG Han, XING Zhen-yu, <i>et al.</i> (11)
Temporal and Spatial Characteristics of Atmospheric NO ₂ over Hainan Island and the Pollutant Sources in Recent 10 Years	FU Chuan-bo, CHEN You-long, DAN Li, <i>et al.</i> (18)
Composition of Organic Carbon/Elemental Carbon and Water-soluble Ions in Rice Straw Burning	HONG Lei, LIU Gang, YANG Meng, <i>et al.</i> (25)
Gas Chromatography with a Pulsed Discharge Helium Ionization Detector for Measurement of Molecular Hydrogen(H ₂) in the Atmosphere	LUAN Tian, FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (34)
Partial Pressure of CO ₂ and CO ₂ Degassing Fluxes of Huayankou and Xiaolangdi Station Affected by Xiaolangdi Reservoir	ZHANG Yong-ling, YANG Xiao-lin, ZHANG Dong (40)
Distribution of Biogenic Organic Dimethylated Sulfur Compounds and Its Influencing Factors in the East China Sea in Summer	LI Jiang-ping, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (49)
Remote Sensing Estimation of Total Suspended Matter Concentration in Xin'anjiang Reservoir Using Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> (56)
Spatio-temporal Characteristics and Source Identification of Water Pollutants in Wenritang River Watershed	MA Xiao-xue, WANG La-chun, LIAO Ling-ling (64)
Effect of Hydrochemistry Characteristics Under Impact of Human Activity: A Case Study in the upper Reaches of the Xijiang River Basin	YU Shi, SUN Ping-an, DU Wen-yue, <i>et al.</i> (72)
Annual Variation of Different Phosphorus Forms and Response of Algae Growth in Meiliang Bay of Taihu Lake	WANG Ming, WU Xiao-fei, LI Da-peng, <i>et al.</i> (80)
Distribution of Transferable Nitrogen in Poyang Lake Sediments and Its Response to the Variation of River-Lake Relationship	SHEN Hong-yan, ZHANG Mian-mian, NI Zhao-kui, <i>et al.</i> (87)
Effect of Environmental Factors on Macroinvertebrate Community Structure in the Huntai River Basin in the Huntai River Basin	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue (94)
Effects of Outbreak and Extinction of Algal Blooms on the Microbial Community Structure in Sediments of Chaohu Lake	DIAO Xiao-jun, LI Yi-wei, WANG Shu-guang (107)
Impacts of Algal Blooms Accumulation on Physiological Ecology of Water Hyacinth	WU Ting-ting, LIU Guo-feng, HAN Shi-qun, <i>et al.</i> (114)
Speciation and Spatial-temporal Variation of Mercury in the Xiaolangdi Reservoir	CHENG Liu, MAO Yu-xiang, MA Bing-juan, <i>et al.</i> (121)
Spatial Distribution of Mercury in Soils of a Typical Small Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (130)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in Water of Agro-forestry and Livestock Compound Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	ZHAO Zheng, WANG Ya, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (136)
Effect of External Condition on the Static Migration and Release of Dibutyl-phthalate in the Soil of the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir to the Overlying Water	SONG Jiao-yan, MU Zhi-jian, WANG Qiang, <i>et al.</i> (143)
Ultraviolet-Visible(UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter(DOM) in Soils of Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Region	GAO Jie, JIANG Tao, LI Lu-lu, <i>et al.</i> (151)
Characterization of Chromophoric Dissolved Organic Matter(CDOM) in Zhoushan Fishery Using Excitation-Emission Matrix Spectroscopy(EEMs) and Parallel Factor Analysis(PARAFAC)	ZHOU Qian-qian, SU Rong-guo, BAI Ying, <i>et al.</i> (163)
Pollution Characteristics and Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Groundwater at Xiaodian Sewage Irrigation Area, Taiyuan City	LI Jia-le, ZHANG Cai-xiang, WANG Yan-xin, <i>et al.</i> (172)
Risk Assessment and Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments of Xinglin Bay Suburb Rivers of Xiamen	CHENG Qi-ming, HUANG Qing, LIAO Zhen-ni, <i>et al.</i> (179)
Comparative Analysis of Two Different Methods for Risk Assessment of Groundwater Pollution: A Case Study in Beijing Plain	WANG Hong-na, HE Jiang-tao, MA Wen-jie, <i>et al.</i> (186)
Transportation and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Water-Soil from the Riparian Zone of Daye Lake, China	ZHANG Jia-quan, LI Xiu, ZHANG Quan-fa, <i>et al.</i> (194)
Arsenic Removal by Coagulation Process and the Field Expanding Experiments for Yangzonghai Lake	CHEN Jing, ZHANG Shu, YANG Xiang-jun, <i>et al.</i> (202)
Efficient Oxidative Degradation of Tetrabromobisphenol A by Silver Bismuth Oxide	CHEN Man-tang, SONG Zhou, WANG Nan, <i>et al.</i> (209)
Removal of Tetracycline by a Kind of Nano-Sized Amorphous Carbon	WU Yi-xiao, LI Ai-min, WANG Di-hua, <i>et al.</i> (215)
Adsorption Behavior of Anionic Dyes onto Magnetic Chitosan Derivatives	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, ZHAO Yan, <i>et al.</i> (221)
Forming Mechanism of Humic Acid-Kaolin Complexes and the Adsorption of Trichloroethylene	ZHU Xiao-jing, HE Jiang-tao, SU Si-hui (227)
Impact on the Microbial Community of Municipal Sewage in the ANAMMOX System During the Cooling Process	ZHAO Zhi-rui, MIAO Zhi-jia, LI Duo, <i>et al.</i> (237)
Application of FISH-NanoSIMS Technique in Environmental Microbial Ecology Study	CHEN Chen, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (244)
Influence of Microcystin-LR on Cell Viability and Surface Characteristics of <i>Pseudomonas putida</i>	DENG Ting-jin, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i> (252)
Screening, Combination of Microbial Deodorizer and the Optimization of Its Deodorizing Conditions	ZENG Su, LI Nan-hua, SHENG Hong-chan, <i>et al.</i> (259)
Distribution and Enrichment Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Halobios from Qingbang Island in Zhoushan, China	ZHANG Ze-zhou, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i> (266)
Levels of Polychlorinated Biphenyls in Tibetan and Yi Adolescents' Hair from Liangshan Prefecture, Sichuan Province	ZHOU Ying, SUN Yi-ming, JIN Jun, <i>et al.</i> (274)
Effects of Single and Co-Exposure of Cu and Chlorpyrifos on the Toxicity of Earthworm	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, WANG Nan, <i>et al.</i> (280)
Effect of Exogenous Selenium on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Cucumber(<i>Cucumis sativus</i> L.)	XIONG Shi-juan, LIU Jun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (286)
Pollution Characteristics of Platinum Group Elements in Road Rust in Xiamen	HONG Zhen-yu, HONG You-wei, YIN Li-qian, <i>et al.</i> (295)
Spatial Distribution of Se in Soils from Different Land Use Types and Its Influencing Factors Within the Yanghe Watershed, China	SHANG Jing-min, LUO Wei, WU Guang-hong, <i>et al.</i> (301)
Immobilization Impact of Different Fixatives on Heavy Metals Contaminated Soil	WU Lie-shan, ZENG Dong-mei, MO Xiao-rong, <i>et al.</i> (309)
Form Tendency and Bio-availability Dynamics of Cu and Zn in Different Farm Soils After Application of Organic Fertilizer of Livestock and Poultry Manures	SHANG He-ping, LI Yang, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (314)
Analysis of Composition Characteristics of Municipal Solid Waste in South China	ZHANG Hai-long, LI Xiang-ping, QI Jian-ying, <i>et al.</i> (325)
Sewage Sludge Conditioning by Bioleaching Combined with Fenton-like Oxidation	LIU Chang-geng, ZHANG Pan-yue, JIANG Jiao-jiao, <i>et al.</i> (333)
Applicability of Bisphenol A Detection by a Planar Waveguide Fluorescent Biosensor	XU Wei-qi, ZHANG Yong-ming, ZHOU Xiao-hong, <i>et al.</i> (338)
A New "Turn-on" Fluorescent Probe for Visual Detection of Hydrogen Sulfide	LIU Chun-xia, MA Xing, WEI Guo-hua, <i>et al.</i> (343)
Analysis of Sap Flow Characteristics of the Chinese Pine in Typical Loess Plateau Region of China	ZHANG Han-dan, WEI Wei, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (349)
Simultaneous Production of Hydrogen and Volatile Fatty Acid from <i>Macrocystis pyrifera</i>	ZHAO Xiao-xian, FAN Xiao-lei, GUO Rong-bo, <i>et al.</i> (357)
Behaviors of Engineered Nanoparticles in Aquatic Environments and Impacts on Marine Phytoplankton	LI Man-lu, JIANG Yue-lu (365)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年1月15日 第36卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 1 Jan. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱(海淀区双清路 18 号, 邮政编码: 100085) 电话: 010-62941102, 010-62849343 传真: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京 399 信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国 内 定 价: 120.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行