

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第5期

Vol.35 No.5

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究	唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 乔利平, 王红丽, 周敏, 陈明华, 陈长虹, 王倩, 李贵玲, 李莉, 黄海英, 张钢锋 (1623)
南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析	薛国强, 朱彬, 王红磊 (1633)
2011年春季沙尘天气影响下上海大气颗粒物及其化学组分的变化特征	李贵玲, 周敏, 陈长虹, 王红丽, 王倩, 楼晟荣, 乔利平, 唐喜斌, 李莉, 黄海英, 陈明华, 黄成, 张钢锋 (1644)
结合外场观测分析珠三角二次有机气溶胶的数值模拟	郭晓霜, 司徒淑婷, 王雪梅, 丁翔, 王新明, 闫才青, 李小滢, 郑玫 (1654)
2013年夏季嘉兴市一次光化学事件的观测分析	沈利娟, 李莉, 吕升, 张孝寒, 吴博, 章国骏, 王翥 (1662)
移动监测法测量厦门春秋季节近地面 CO ₂ 的时空分布	李燕丽, 邢振雨, 穆超, 杜可 (1671)
秸秆烟尘和灰烬中元素碳的稳定同位素组成	刘刚, 李久海, 徐慧, 吴丹, 刘艳 (1680)
连续测量大气·OH的化学电离飞行时间质谱仪的研制	窦健, 花磊, 侯可勇, 蒋蕾, 谢园园, 赵无垠, 陈平, 王卫国, 田地, 李海洋 (1688)
我国重点城市水源及水厂出水中乙草胺的残留水平	于志勇, 金芬, 李红岩, 安伟, 杨敏 (1694)
巢湖水体组分垂向分布特征及其对水下光场的影响	马孟泉, 张玉超, 钱新, 马荣华, 段洪涛 (1698)
京杭大运河(杭州段)典型断面水生植物多样性调查及其与水环境相关性研究	陆胤, 许晓路, 张德勇, 王莉, 朱旭妮, 冯凤, 周巧君, 谢鹏 (1708)
合肥市典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价	李如忠, 刘科峰, 钱靖, 杨继伟, 张翩翩 (1718)
重庆园博园龙景湖新建初期内源氮磷分布特征及扩散通量估算	潘延安, 雷沛, 张洪, 单保庆, 李杰 (1727)
千岛湖库区及其主要入库河流水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评价	唐访良, 张明, 徐建芬, 阮东德, 陈峰, 吴志旭, 程新良 (1735)
九龙江流域潜在病原菌污染分析	侯丽媛, 胡安谊, 马英, 于昌平 (1742)
江湖关系变化对鄱阳湖沉积物重金属分布及生态风险影响	刘婉清, 倪兆奎, 吴志强, 王圣瑞, 曾清如 (1750)
鄱阳湖-乐安河湿地水土环境中重金属污染的时空分布特征	简敏菲, 李玲玉, 徐鹏飞, 陈朴青, 熊建秋, 周雪玲 (1759)
典型岩溶水系统中溶解性有机质的运移特征	姚昕, 邹胜章, 夏日元, 许丹丹, 姚敏 (1766)
基于扰动分析方法的 AnnAGNPS 模型水文水质参数敏感性分析	席庆, 李兆富, 罗川 (1773)
混合胁迫条件下蓝藻运动特性研究	孙秀秀, 丛海兵, 高郑娟, 崔朝杰, 曹倩倩 (1781)
不同波长和强度光照对水体汞还原的影响	李希嘉, 钟紫旋, 孙荣国, 杨鲲, 王定勇 (1788)
地下水中常见离子对纳米零价铁除 Se(IV) 动力学的影响	杨文君, 郭迎庆, 杜尔登 (1793)
溴氧化铋可见光催化降解高效氯氟酯的研究	彭一莱, 赵小蓉, 贾漫珂, 周薇, 黄应平 (1798)
石墨烯基磁性复合材料吸附水中亚甲基蓝的研究	常青, 江国栋, 胡梦璇, 黄佳, 唐和清 (1804)
电化学氧化 PFOA 阳极材料筛选及其机制研究	卓琼芳, 邓述波, 许振成, 余刚 (1810)
典型抗生素在中国西南地区某污水处理厂中的行为和归趋	甘秀梅, 严清, 高旭, 张怡昕, 訾成方, 彭绪亚, 郭劲松 (1817)
颗粒状大孔阴树脂去除有机物以及缓解膜污染的效果与机制	何欢, 董秉直, 许光红, 闫昭辉 (1824)
石墨-活性炭纤维复合电极电吸附处理含盐废水的研究	周贵忠, 王兆丰, 王珣, 李文倩, 李少香 (1832)
酞基甲基化聚苯乙烯的制备及废水生化处理应用	张华雨, 许晴, 牛春梅, 王亚君, 侯正浩, 李绍英, 陈延明, 廉静, 吴士彬, 郭建博 (1838)
FePMo ₁₂ 催化电化学反应降解染料废水的研究	王栗, 岳琳, 郭建博, 杨景亮, 廉静, 罗晓, 王开红 (1843)
实际污水培养好氧颗粒污泥及其特性研究	杨淑芳, 张健君, 邹高龙, 杜至力 (1850)
SFBR 中好氧颗粒污泥的培养及特性研究	龙焙, 杨昌柱, 濮文虹, 杨家宽, 白俊, 王晶, 周玄月, 蒋国盛, 李春阳, 刘福标 (1857)
不同好/厌氧区容积负荷对生物膜/颗粒污泥耦合工艺脱氮除磷的影响	尹航, 刘畅, 高辉, 高大文 (1866)
黄原酸化废弃污泥吸附 Cu ²⁺ 研究	岑艳, 全向春, 姜晓满 (1871)
轮叶黑藻和穗花狐尾藻对铜的吸收机制研究	薛培英, 李国新, 赵全利 (1878)
不同烧制温度下玉米秸秆生物炭的性质及对苯的吸附性能	黄华, 王雅雄, 唐景春, 朱文英 (1884)
北京常见绿化树种叶片富集重金属能力研究	李少宁, 孔令伟, 鲁绍伟, 陈波, 高琛, 石媛 (1891)
泰州市区重金属污染的薛袋法与路生法评价研究	陈勤, 方炎明, 颜赞, 陈步金 (1901)
放牧对呼伦贝尔草甸草原土壤呼吸温度敏感性的影响	王旭, 闫瑞瑞, 邓钰, 闫玉春, 辛晓平 (1909)
苹果园土壤呼吸的变化及生物和非生物因素的影响	王蕊, 郭胜利, 刘庆芳, 张彦军, 姜继超, 郭慧敏, 李如剑 (1915)
重庆铁山坪森林土壤汞释放通量的影响因子研究	王琼, 罗遥, 杜宝玉, 叶芝祥, 段雷 (1922)
上海市郊区养殖场周边环境砷含量特征	奚功芳, 周守标, 丁海城, 姚春霞, 孔娟娟 (1928)
不同施氮量下水稻分蘖期光合碳向土壤碳库的输入及其分配的量化研究: ¹³ C 连续标记法	谭立敏, 吴昊, 李卉, 周萍, 李科林, 王久荣, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1933)
污灌区盐分累积对土壤汞吸附行为影响的模拟研究	郑顺安, 李晓华, 徐志宇 (1939)
石灰干化污泥稳定后土壤中 Pb、Cd 和 Zn 浸出行为的研究	李翔, 宋云, 刘永兵 (1946)
大连市海产品中短链氯化石蜡的含量与分布研究	虞俊超, 王宝盛, 王亚韩, 孟梅, 陈茹, 江桂斌 (1955)
应用生物配体模型(BLM)研究辽河与太湖水体中铜对大型溞的急性毒性	周腾耀, 曹莹, 覃璐玫, 张亚辉, 曾鸿鸣, 闫振广, 刘征涛 (1962)
氧化铜纳米颗粒对水稻幼苗根系代谢毒性的研究	王淑玲, 张玉喜, 刘汉柱, 辛华 (1968)
吐温 80 对苏云金芽孢杆菌降解三苯基锡的促进机制	黄捷, 叶锦韶, 尹华, 彭辉, 马嘉雯, 唐立椿, 王惜若 (1974)
牛粪混合液微生物燃料电池长期运行稳定性研究	焦燕, 张国栋, 赵庆良 (1981)
针铁矿对城市生活垃圾有机组分厌氧发酵的影响	杨露露, 岳正波, 陈天虎, 王进 (1988)
城市生活垃圾集装箱转运过程中污染物产生状况研究	王晓媛, 刘殷华, 汪飞, 黄长缨, 陆峰, 谢冰 (1994)
铈插层黏土负载铁催化剂在 H ₂ S 选择性催化氧化过程中催化性能的研究	孙超, 张鑫, 郝郑平, 窦广玉, 孙春宝 (2002)
脱硫酸类水滑石衍生复合氧化物不同方法的制备与表征	祝春蕾, 王海林, 孙春宝 (2010)
固定污染源排气中 PM _{2.5} 采样方法综述	蒋靖坤, 邓建国, 李振, 李兴华, 段雷, 郝吉明 (2018)
产甲烷微生物研究概况	李煜珊, 李耀明, 欧阳志云 (2025)
《环境科学》征稿简则(1961) 《环境科学》征订启事(1967) 信息(1643, 1687, 1803, 1837)	

长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究

唐喜斌^{1,2}, 黄成^{2,3}, 楼晟荣^{2,3}, 乔利平^{2,3}, 王红丽^{2,3}, 周敏^{2,3}, 陈明华², 陈长虹^{2,3*}, 王倩^{2,3}, 李贵玲^{1,2}, 李莉^{2,3}, 黄海英², 张钢锋²

(1. 华东理工大学资源与环境工程学院, 上海 200237; 2. 上海市环境科学研究院国家环境保护城市大气复合污染成因与防治重点实验室(筹), 上海 200233; 3. 上海市大气颗粒物污染防治重点实验室, 上海 200433)

摘要: 为获取长三角地区秸秆燃烧污染物排放因子及其颗粒物成分谱, 利用自行设计开发的开放式燃烧源排放测试系统, 选取小麦、水稻、油菜、豆秸和薪柴等5类典型作物秸秆, 分别采用露天焚烧和炉灶燃烧2种燃烧方式, 实测其气态污染物和颗粒物排放特征。结果表明, 露天燃烧各类秸秆的CO、NO_x和PM_{2.5}平均排放因子约为28.7、1.2和2.65 g·kg⁻¹, 由于炉灶氧含量相对较低, 燃烧不充分, 其污染物排放因子总体高于露天燃烧, 分别为81.9、2.1和8.5 g·kg⁻¹。各类秸秆中, 油菜的排放水平相对较高。含碳组分(OC和EC)是生物质秸秆燃烧产生PM_{2.5}的主要组成, 在露天燃烧中OC和EC的质量分数分别占(38.92 ± 13.93)%和(5.66 ± 1.54)%; 炉灶燃烧中OC和EC分别为(26.37 ± 10.14)%和(18.97 ± 10.76)%。Cl⁻、K⁺等水溶性离子也有较大贡献, 在露天燃烧中分别为(13.27 ± 6.82)%和(12.41 ± 3.02)%; 在炉灶燃烧中分别为(16.25 ± 9.34)%和(13.62 ± 7.91)%。小麦、水稻、油菜和豆秸等作物秸秆露天燃烧排放颗粒物的K⁺/OC值分别为0.30、0.52、0.49和0.15, 这些特征值可用于判断长三角区域空气质量受秸秆燃烧排放影响的程度, 为大气污染源解析提供直接的判断依据。

关键词: 秸秆燃烧; PM_{2.5}; 气态污染物; 排放因子; 成分谱

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)05-1623-10 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2014.05.001

Emission Factors and PM Chemical Composition Study of Biomass Burning in the Yangtze River Delta Region

TANG Xi-bin^{1,2}, HUANG Cheng^{2,3}, LOU Sheng-rong^{2,3}, QIAO Li-ping^{2,3}, WANG Hong-li^{2,3}, ZHOU Min^{2,3}, CHEN Ming-hua², CHEN Chang-hong^{2,3}, WANG Qian^{2,3}, LI Gui-ling^{1,2}, LI Li^{2,3}, HUANG Hai-ying², ZHANG Gang-feng²

(1. School of Resources and Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of the Cause and Prevention of Urban Air Pollution Complex, Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China; 3. Shanghai Key Laboratory of Atmospheric Particle Pollution Prevention, Shanghai 200433, China)

Abstract: The emission characteristics of five typical crops, including wheat straw, rice straw, oil rape straw, soybean straw and fuel wood, were investigated to explore the gas and particulates emission of typical biomass burning in Yangzi-River-Delta area. The straws were tested both by burning in stove and by burning in the farm with a self-developed measurement system as open burning sources. Both gas and fine particle pollutants were measured in this study as well as the chemical composition of fine particles. The results showed that the average emission factors of CO, NO_x and PM_{2.5} in open farm burning were 28.7 g·kg⁻¹, 1.2 g·kg⁻¹ and 2.65 g·kg⁻¹, respectively. Due to insufficient burning in the low oxygen level environment, the emission factors of stove burning were higher than those of open farm burning, which were 81.9 g·kg⁻¹, 2.1 g·kg⁻¹ and 8.5 g·kg⁻¹, respectively. Oil rape straw had the highest emission factors in all tested straws samples. Carbonaceous matter, including organic carbon(OC) and element carbon(EC), was the foremost component of PM_{2.5} from biomass burning. The average mass fractions of OC and EC were (38.92 ± 13.93)% and (5.66 ± 1.54)% by open farm burning and (26.37 ± 10.14)% and (18.97 ± 10.76)% by stove burning. Water soluble ions such as Cl⁻ and K⁺ had a large contribution. The average mass fractions of Cl⁻ and K⁺ were (13.27 ± 6.82)% and (12.41 ± 3.02)% by open farm burning, and were (16.25 ± 9.34)% and (13.62 ± 7.91)% by stove burning. The K⁺/OC values of particles from wheat straw, rice straw, oil rape straw and soybean straw by open farm burning were 0.30, 0.52, 0.49 and 0.15, respectively, which can be used to evaluate the influence on the regional air quality in YRD area from biomass burning and provide direct evidence for source apportionment.

Key words: straw burning; PM_{2.5}; air pollutants; emission factor; source profile

收稿日期: 2013-09-16; 修订日期: 2013-12-09

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201409008, 201209007, 201209001); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41205122); 上海市科委项目(11231200500); 上海市重大科技专项(沪环科2013-03); 中国科学院战略性先导科技专项(XDB05020300, XDB020300)

作者简介: 唐喜斌(1988~), 男, 硕士, 主要研究方向为大气污染物排放特征, E-mail: thytnb@163.com

* 通讯联系人, E-mail: chenhc@saes.sh.cn

生物质燃烧是大气中气态污染物和颗粒物的一个重要来源,对全球大气环境、气候变化及生态系统具有重要影响^[1~5],生物质燃烧排放的 CO、NO_x、非甲烷碳烃(NMHC)参与大气光化学反应,是对流层臭氧生成的重要前体物^[6,7]。生物质燃烧排放的颗粒物中包含大量的有机碳(OC)和元素碳(EC)及无机水溶性离子等组分^[8~10],这些组分直接或间接影响太阳辐射从而改变大气的辐射平衡^[8,11,12]、大气光化学性质,引起大气灰霾现象^[13]。

我国是一个农业大国,薪柴和农作物秸秆作为家庭炊事和取暖用的燃料被广泛使用,收割后部分秸秆在田间直接焚烧。近年来,由于生物质燃烧造成的区域大气污染事件屡见不鲜^[14~18]。Duan 等^[14]通过研究大气颗粒物中 OC 与水溶性 K⁺ 的比值发现,周边地区生物质燃烧对北京区域灰霾污染有重要影响。朱佳雷等^[15]利用长三角秸秆焚烧大气污染物排放清单,通过区域大气环境模拟系统(RegAEMS)对一次重霾污染天气事件进行模拟,结果显示秸秆焚烧可导致区域大气中 PM₁₀、CO 浓度上升 30% 以上,黑碳和有机物对消光的贡献明显增强;苏中地区、外省秸秆焚烧对此次重霾污染的贡献分别达到 32.4%、33.3%。尹聪等^[16]利用卫星遥感的火点和云覆盖信息,结合气团后向轨迹分析,探讨了秸秆焚烧对南京空气质量的影响,结果发现在逆温及较大湿度的条件下,秸秆焚烧促进了灰霾的形成,并造成了严重的空气污染。伍德侠等^[17]在合肥郊区 3 个站点连续实时监测碳黑气溶胶,研究其在秸秆焚烧的变化特征和来源,结果表明秸秆燃烧期间大气中碳黑气溶胶平均浓度是正常时期的 1.73 倍,秸秆焚烧是碳黑气溶胶的重要来源。Ding 等^[18]结合大气成分和气象的综合观测及数值模拟等方法给出了生物质燃烧和化石燃料燃烧排放对局地气温和降水造成影响的直接证据。

目前我国有关生物质秸秆燃烧排放的研究仍然较少。祝斌等^[19]采用自制的模拟装置和稀释通道,测定了中国粮食主产区玉米、小麦和水稻在不同燃烧状态下 PM_{2.5} 的排放因子。发现与其它类别的生物质燃烧相比,秸秆燃烧的排放因子较高,且闷火燃烧是明火燃烧排放的 2.4~11.5 倍。Li 等^[20]在田野模拟了小麦和玉米秸秆露天焚烧,并研究了气态污染物和颗粒物的排放特征,发现颗粒质量呈单峰分布,峰值在 0.26~0.38 μm 范围,位于积聚模态。Cao 等^[21]通过自制的燃烧塔模拟了水稻、小麦、玉

米、高粱在农村日常炊事的燃烧过程,并计算了气态污染物和颗粒物及水溶性无机离子的排放因子。上述研究为我国建立生物质秸秆燃烧排放的数据库提供了宝贵的基础数据。然而,这些研究大部分在实验室条件下进行,且集中在华北地区,而针对长三角地区典型作物秸秆燃烧排放的研究并不多见。由于供氧量和环境差异,测量环境和现场实际情况可能存在一定的差异,测量结果不尽相同^[19~25]。为此,本研究在上海选取了长三角地区典型的小麦、水稻、油菜、大豆和薪柴等秸秆,开展田间焚烧和传统炉灶燃烧两种燃烧条件下的气态污染物和颗粒物、碳组分、无机离子和元素等成分谱测试,旨在为建立秸秆燃烧源精细化排放清单以及来源解析提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 开放式燃烧源排放测试系统

1.1.1 露天秸秆焚烧

图 1 所示为本研究搭建的开放式燃烧源排放测试系统。该系统由烟罩、烟道、引风机、稀释系统、气态污染物在线分析系统、四通道颗粒物采样器等部分组成。为了减少对样品的污染,烟罩与烟道均由不锈钢制成。烟道尾端安装引风机将烟气引出,烟道内气体设计流速为 4 m·s⁻¹。稀释系统采用专为固定源排放测试设计的颗粒物二级稀释器(FPS-4000,芬兰 Dekati 公司),一级稀释为热稀释,利用加热后的零空气对烟气进行初步稀释,使样品气的湿度降低;二级稀释为冷稀释,利用室温下的零空气将烟气稀释,使其温度接近环境温度。测试中采用的稀释倍数在 14~35 倍之间。从稀释系统出来的 CO 和 NO_x 等气态组分采用 Ecotech 公司生产 CO 监测仪(EC9810B)与 NO_x 监测仪(EC9841B)测量。部分烟气接入四通道颗粒物采样器,4 个采样通道均装配 PM_{2.5} 切割器,其中 2 个通道用特氟龙滤膜采样,采集到的颗粒物样品用于称重以及无机离子和元素分析;另 2 个通道用石英膜采样,用于有机碳(OC)和元素碳(EC)分析。

样品采用德国 Sartorius 公司生产的 CP225D 电子天平称重,精度为 0.01 mg。颗粒物中 OC、EC 采用美国 DRI-2001A 型 OC/EC 测定仪热光透射法(TOT)^[26]测定。采样前先将石英膜放置在 450℃ 马弗炉中烧烤 4 h,以去除含碳组分。颗粒物中的水溶性无机离子采用美国 Dionex 公司生产的 ICS2000 型离子色谱检测,元素组分采用法国 JOBIN-YVON

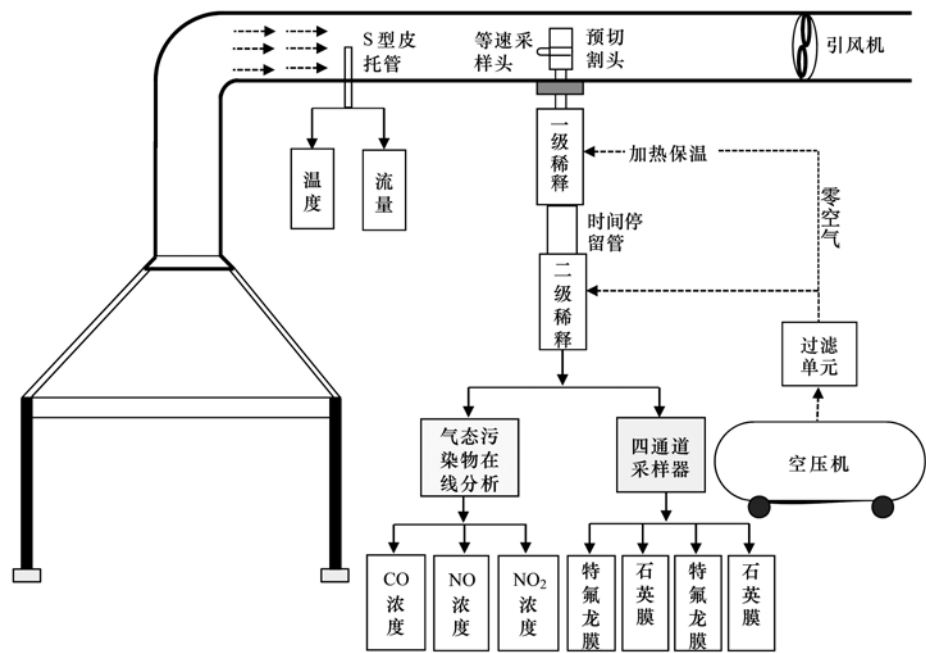


图1 开放式燃烧源排放测试系统示意

Fig. 1 Schematic diagram of measurement system for open fire sources

公司生产的 ULTIMA 型电感耦合等离子体直读光谱技术(ICP-AES)测定.

1.1.2 家用炉灶燃烧

家庭炉灶测试系统的搭建与野外秸秆燃烧过程一致,测试过程中将 S 型皮托管和采样切割头直接插入炉灶烟囱中进行测试和采样,参见图 1.

1.2 测试过程

野外秸秆焚烧测试过程中,将一定量的秸秆放置在距烟罩下方 0.5 m 的地面上引燃. 样品的采集从秸秆点燃后产生烟气开始,直至秸秆熄灭不再冒烟后截至,整个燃烧过程以明火燃烧为主. 实验过程中记录开始与结束时间、秸秆用量,每种秸秆重复 2 次平行实验.

炉灶燃烧测试在上海郊区农户家炉灶中开展,为使实验有一定的代表性,采取国际通用的“煮水法”进行实验^[27],每种秸秆重复 2 次平行实验. 由于样品量不足,薪柴、大豆秸秆仅有一次测量结果

1.3 生物质秸秆选取

选取当地农村普遍使用并经过自然风干后的薪柴以及小麦、水稻、油菜、大豆这 4 种农作物秸秆作为测试材料. 表 1 所示为各类秸秆的工业分析结果. 从中可见,各类秸秆含水率在 10.9% ~ 12.5% 之间;灰分在 1.67% ~ 12.97% 之间,其中,水稻和小麦的灰分显著高于其他秸秆;各类秸秆低位热值在 13.21 ~ 16.25 MJ·kg⁻¹ 之间,薪柴、油菜和大豆的热值略高于水稻和小麦.

表 1 生物质秸秆的工业分析与元素分析

Table 1 Analysis of biofuel compositions

项目	指标	水稻	小麦	大豆	油菜	薪柴
工业分析(收到基)/%	水分(M_{ar})	12.5	10.9	11.6	12.3	12.2
	挥发分(V_{ar})	59.08	60.52	66.31	66.31	69
	固定碳(FC_{ar})	15.82	15.61	17.08	17.93	17.13
	灰分(A_{ar})	12.6	12.97	5.01	3.46	1.67
元素分析(收到基)/%	全硫(S_T)	0.15	0.11	0.12	0.25	0.05
	碳(C)	40.41	33.46	39.4	39.01	39.39
	氢(H)	5.05	4.9	5.85	5.68	5.34
	氮(N)	1.04	0.72	0.6	0.22	0.46
	氧(O)	28.25	36.94	37.42	39.08	40.89
	低位热值(Q_d)/MJ·kg ⁻¹	13.21	13.82	14.8	14.65	16.25

1.4 排放因子的计算方法

根据 Andreae 等^[28]对排放因子的定义,同时参考 Zhang 等^[29]的计算方法,气态污染物排放因子的计算方法如下:

$$E_{ij} = \frac{10^{-6}}{m_{\text{dry}}} \int_{t_0}^{t_f} A_s \bar{u} \varphi_j \text{DR} \frac{M_j}{22.4} dt \quad (1)$$

式中, E_{ij} 表示 i 类秸秆 j 类气态污染物的排放因子 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); m_{dry} 表示秸秆燃烧干基量 (kg); t_0 和 t_f 分别表示开始时间和结束时间; A_s 表示烟道横截面积 (m^2); $\bar{u}$ 表示烟道气体平均流速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); φ_j 表示稀释通道 j 气态污染物的体积分数 (10^{-9}); DR 表示稀释比; M_j 表示 j 类气态污染物的摩尔质量 ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$).

依据 Zhang 等^[29]的计算方法, $\text{PM}_{2.5}$ 的排放因子计算公式如下:

$$E_i = \frac{t}{m_{\text{dry}}} A_s \bar{u} \frac{m_i}{V_i} \text{DR} \quad (2)$$

式中, E_i 表示 i 类秸秆的 $\text{PM}_{2.5}$ 或其组分的排放因子 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); t 表示采样时长 (s); m_{dry} 表示秸秆燃烧干基量 (kg); A_s 表示烟道横截面积 (m^2); $\bar{u}$ 表示烟道内烟气的平均流速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); m_i 为特氟龙滤膜捕集到的物种净重 (g); V_i 表示 i 类秸秆颗粒物采样体积 (m^3); DR 表示稀释比.

2 结果与讨论

2.1 生物质秸秆露天和炉灶燃烧的气态污染物排放因子

表 2 为本研究测得的生物质秸秆露天和炉灶燃烧的气态污染物排放因子. 从中可见, 露天燃烧的

各类秸秆 CO 和 NO_x 平均排放因子分别在 $20.6 \sim 34.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.08 \sim 1.42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, NO/NO_2 的比值为 $3.2 \sim 4.7$. 炉灶燃烧的各类秸秆 CO 和 NO_x 平均排放因子分别在 $31.4 \sim 133.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.65 \sim 2.43 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, NO/NO_2 的比值为 $8.2 \sim 26.4$. 测试发现, 秸秆在炉灶燃烧中气态污染物排放明显高于露天燃烧, 同类秸秆在炉灶中燃烧产生的 CO 和 NO_x 排放因子分别是露天燃烧排放的 $2.5 \sim 3$ 倍和 $1.5 \sim 2$ 倍. 与秸秆露天燃烧相比, 炉灶的燃烧空间相对较小, 供气量有限, 空燃比较低, 燃料燃烧不充分, 致使 CO 排放显著较高, NO/NO_2 比值较高进一步说明炉灶中氧含量相对较低, 使 NO 向 NO_2 的转化速率相对较慢. 同时, 炉灶的燃烧温度显著高于露天焚烧, 有利于 NO_x 的生成, 因此, 炉灶燃烧的气态污染物排放总体高于露天焚烧.

从不同的秸秆类型来看, 油菜秸秆的 CO 排放因子普遍较高, 露天和炉灶燃烧分别为 $(34.3 \pm 0.2) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(133.5 \pm 45.0) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 实测发现, 油菜秸秆燃烧过程中通常伴有浓密的白烟, 已有研究发现这些白烟为秸秆热解产生的可燃性挥发性物^[28]. 水稻露天燃烧的 NO_x 排放因子较高, 约为 $(1.42 \pm 0.46) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 薪柴炉灶燃烧的 NO_x 排放因子最高, 达到 $2.43 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. NO_x 的生产机制相对复杂, 与燃料中的氮含量和燃烧温度均密切相关^[30,31], 而燃烧温度在较大程度上会受到热值的影响. 各类秸秆中, 除油菜秸秆因氮含量和热值偏低, NO_x 排放因子显著较低, 其他秸秆的 NO_x 排放因子基本相近.

表 2 生物质燃料露天和炉灶燃烧气态污染物排放因子¹⁾/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 2 Emission factors of gaseous pollutants from field and stove burning of crop straw/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

秸秆种类	露天燃烧				炉灶燃烧			
	小麦	水稻	油菜	大豆	水稻	油菜	大豆	薪柴
CO	20.6 ± 3.6	27.7 ± 1.0	34.3 ± 0.2	32.3	82.0 ± 2.4	133.5 ± 45.0	80.7 ± 23.6	31.4
NO	0.98 ± 0.0	1.08 ± 0.38	0.9 ± 0.06	0.89	1.83 ± 0.19	1.47 ± 0.25	2.11 ± 0.79	2.29
NO_2	0.21 ± 0.09	0.34 ± 0.07	0.22 ± 0.09	0.19	0.19 ± 0.01	0.18 ± 0.01	0.08 ± 0.03	0.14
NO_x	1.19 ± 0.02	1.42 ± 0.46	1.12 ± 0.15	1.08	2.02 ± 0.21	1.65 ± 0.23	2.19 ± 0.77	2.43

1) 排放因子为每 kg 干基产生的污染物排放量

2.2 气态污染物排放因子与其它研究的比较

表 3 为本研究气态污染物实测排放因子与其它文献的比较. 从中可见, 本研究测得的各类秸秆燃烧的气态污染物排放因子与其他研究成果基本相近. 其中, 露天燃烧的 NO、 NO_x 排放因子与 Zhang 等^[32]的研究结果相似, CO 排放因子与刘丽华等^[30]、Sahai

等^[33]研究结果相近, 但是与 Zhang 等^[32]相比偏低, 这可能与测试过程的燃烧条件等因素有关. 炉灶燃烧排放的 CO 和 NO_x 排放因子总体在 Cao 等^[21]的研究结果范围内. 总体来看, 虽然实验方法有所差异, 但本研究实验结果与相关文献具有可比性, 反映了秸秆燃烧气态污染物排放的基本特征.

表 3 本研生物质秸秆露天和炉灶燃烧气态污染物排放因子与其它文献的比较/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
Table 3 Comparison with published emission factors of gas pollutions from crop straw burning/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

燃烧方式	秸秆类型	CO	NO	NO ₂	NO _x	文献
露天	水稻	30				[4]
		44.12 ± 0.36				[30]
		64.2 ± 4.9	1.02 ± 0.03	0.79 ± 0.05	1.81 ± 0.09	[32]
		27.7 ± 1.0	1.08 ± 0.38	0.34 ± 0.07	1.42 ± 0.45	本研究
	小麦	60 ± 23			3.3 ± 1.7	[20]
		22.19 ± 0.77				[30]
		141.2 ± 14.8	0.79 ± 0.13	0.32 ± 0.06	1.12 ± 0.19	[32]
		28.1 ± 20.1	0.78 ± 0.71	0.56 ± 0.47	1.7 ± 1.68	[33]
		20.6 ± 3.6	0.98 ± 0.0	0.21 ± 0.09	1.19 ± 0.09	本研究
		32.61 ± 1.08				[30]
		34.3 ± 0.2				本研究
	大豆	29.41 ± 3.13				[30]
		32.3				本研究
	水稻	67.98 ± 25.58	3.09 ± 0.91	0.33 ± 0.17	3.43 ± 1.08	[21]
		104.5 ± 18.4			0.42 ± 0.13	[34]
		70.3 ± 2.3				[35]
		82.0 ± 2.4	1.83 ± 0.19	0.19 ± 0.01	2.02 ± 0.20	本研究
炉灶	大豆	47 ± 10.09				[35]
		72.3 ± 0.5				[36]
		80.7 ± 23.6				本研究
	薪柴	60.3 ± 13.2			1.11 ± 0.28	[34]
		38.4 ± 11.8				[35]
		23.6 ± 4.25			0.52 ± 0.48	[37]
		42 ± 0.17				[38]
		31.40			2.43	本研究

2.3 生物质燃料露天和炉灶燃烧 PM_{2.5} 及 OC、EC 的排放因子

表 4 为秸秆在露天和炉灶燃烧条件下 PM_{2.5} 及含碳组分的排放因子。从中可见,露天燃烧的各类秸秆 PM_{2.5} 平均排放因子在 1.84 ~ 3.32 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, OC 平均排放因子在 0.75 ~ 1.08 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, EC 平均排放因子在 0.11 ~ 0.23 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, OC/EC 的比值在 4.7 ~ 8.1 之间。炉灶燃烧的各类秸秆 PM_{2.5} 平均排放因子在 4.36 ~ 12.77 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, OC 平均排放因子在 1.29 ~ 3.35 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, EC 平均排放因子在 0.91 ~ 1.80 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, OC/EC 的比值在 0.9 ~ 3.7 之间。测试发现,不同燃烧方式产生的 PM_{2.5} 排放水平差异较大,炉灶燃烧的 PM_{2.5} 排放因子明显高于露天燃烧,约为露天燃烧排放的 3 ~ 4 倍,主要是由于炉灶内燃烧空间有限,空气供给不足,秸秆处于缺氧燃烧状态,炉灶燃烧的 EC 在 PM_{2.5} 中的比重显著高于露天燃烧,其它研究也有类似结果^[19,39]。此外,在炊事过程中人为添加秸秆,也会导致灰烬浮起进入烟气,使颗粒物浓度进一步增加^[40]。

从不同的秸秆类型来看,油菜的 PM_{2.5} 排放因子最高,露天和炉灶燃烧可分别达到 (3.32 ± 0.56)

$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 (12.77 ± 3.42) $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, OC/EC 比值也低于其他秸秆类型,与其他秸秆相比,油菜秸秆的水分和挥发分含量均相对较高,更易造成不完全燃烧,导致细颗粒高排放。大豆在各类秸秆中的 PM_{2.5} 排放因子相对较低,露天和炉灶燃烧可分别达到 1.84 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 (7.71 ± 0.91) $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 炉灶燃烧中薪柴的 PM_{2.5} 排放因子最低可达 4.36 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

OC/EC 比值是表征大气中细颗粒污染特征和来源的重要指标。已有研究表明,以化石燃料燃烧排放为主导的城市大气中 OC/EC 的比值一般在 3 左右^[41],而受柴油车排放影响的大气中 OC/EC 比值在 1.1 左右^[42]。Li 等^[20]报道农作物秸秆露天燃烧颗粒物的 OC/EC 的均值为 8.1。Ryu 等^[43,44]研究了韩国光州在不同时段收获季节的秸秆燃烧期空气中颗粒物的化学组成,发现 PM_{2.5} 颗粒中的 OC/EC 的比值在 6.5 ~ 8.3 之间,Chuang 等^[45]在生物质燃烧源附近测得的 OC/EC 的比值为 5.7 ± 0.6。本研究所得各类秸秆露天燃烧排放的 OC/EC 均值为 6.9,其中大豆秸秆最高,为 8.1;油菜秸秆最低为 4.7,可用于表征长三角地区环境空气中细颗粒污染受秸秆露天焚烧影响的判断依据^[43,44,46,47]。

表 4 生物质露天和炉灶燃烧 PM_{2.5}及组分的排放因子¹⁾

Table 4 Emission factors of PM_{2.5} Emissions from field and stove burning of crop straw

秸秆种类	露天燃烧				炉灶燃烧			
	小麦	水稻	油菜	大豆	水稻	油菜	大豆	薪柴
PM _{2.5} /g·kg ⁻¹	2.39 ± 0.33	3.03 ± 0.70	3.32 ± 0.56	1.84	9.14 ± 0.23	12.77 ± 3.42	7.71 ± 0.91	4.36
OC/g·kg ⁻¹	0.97 ± 0.13	0.75 ± 0.18	1.08 ± 0	1.05	3.35 ± 0.57	1.63 ± 0.72	2.12 ± 1.04	1.29
EC/g·kg ⁻¹	0.12 ± 0.02	0.11 ± 0.03	0.23 ± 0.09	0.13	0.91 ± 0.28	1.80 ± 0.71	1.35 ± 0.06	1.50
OC/PM _{2.5} /%	41	25	33	57	37	13	27	30
EC/PM _{2.5} /%	5	4	7	7	10	14	18	34
OC/EC	8.1	6.8	4.7	8.1	3.7	0.9	1.6	0.9

1) 排放因子为每 kg 干基产生的污染物排放量

2.4 本研生物质露天和炉灶燃烧 PM_{2.5} 及 OC、EC 的排放因子与其它文献的比较

表 5 所示为本研生物质露天和炉灶燃烧 PM_{2.5} 及含碳组分排放因子与其它文献的比较。由于秸秆燃烧测定的排放因子受实验方法、燃烧条件、燃烧状态(明火与闷烧)、秸秆的物理化学性质(如秸秆种类、含水量、碳氮含量、密度、等)的影响^[19,33,48,49], 所得的排放因子不尽相同。由表 5 可见, 本研究测得小麦和水稻露天燃烧的 PM_{2.5} 排放因子与已有研究相比

略低, 主要是由于本研究露天燃烧过程以明火燃烧为主, 秸秆燃烧相对充分。此外, 采用烟罩法易使一定量的烟气在实验过程中逃逸, 导致捕捉到的烟气量偏低。炉灶燃烧排放的 PM_{2.5} 及含碳组分排放因子与其他研究成果基本接近, 具有一定的代表性。此外, 各研生物质的 OC/EC 比值存在较大差异, 可能受秸秆种类和燃烧条件等因素的影响, 说明开展本地化的实测研究对于掌握该地区秸秆燃烧的实际排放特征和成分谱资料具有十分重要的意义。

表 5 本研生物质露天和炉灶燃烧 PM_{2.5} 排放因子与其它文献的比较

Table 5 Comparison with published emission factors of PM_{2.5} from crop straw burning

燃烧方式	秸秆类型	污染物排放因子/g·kg ⁻¹			OC/EC	文献
		PM _{2.5}	OC	EC		
露天	小麦	5.45	2.1	0.79	2.66	[9]
		7.6 ± 4.1	2.7 ± 0.1	0.49 ± 0.12	5.51	[20]
		3.00 ± 0.6	1.90 ± 1.11	0.35 ± 0.16	5.43	[50]
		4.71 ± 0.04	1.23 ± 0.03	0.52 ± 0.00	2.37	[51]
		2.39 ± 0.33	0.97 ± 0.13	0.12 ± 0.02	8.08	本研究
	水稻	3.3	0.9	0.46	1.96	[9]
		12.95 ± 0.30	8.94 ± 0.42	0.17 ± 0.04	52.59	[51]
		8.30 ± 2.70	2.74 ± 0.89	0.48 ± 0.16	5.71	[52]
		4.2				[53]
		3.03 ± 0.7	0.75 ± 0.18	0.11 ± 0.03	6.82	本研究
炉灶	水稻	6.28 ± 1.59	2.01 ± 0.67	0.49 ± 0.21	4.10	[21]
		1.66 ~ 1.94	1.06 ~ 1.07	0.09 ~ 0.11	10.65	[25]
		6.39 ± 0.51	1.5 ± 0.6	0.75 ± 0.43	2.00	[36]
		9.3 ± 4.1	2 ~ 12.4	0.1 ~ 0.4	28.80	[54]
		9.14 ± 0.23	3.35 ± 0.57	0.91 ± 0.28	3.68	本研究
	大豆	3.28 ± 0.87	0.89 ± 0.15	0.94 ± 0.04	0.95	[25]
		5.46 ± 0.22	1.17 ± 0.18	1.37 ± 0.04	0.85	[36]
		9.7	4.27	0.78	5.47	[54]
		7.71 ± 0.91	2.12 ± 1.04	1.35 ± 0.06	1.57	本研究
	油菜	16.8 ± 4.8	1.75 ± 0.63	2.34 ± 0.92	0.72	[36]
		5.6 ~ 42.1	1.9 ~ 11.9	0.4 ~ 1.6	6.90	[54]
		12.77 ± 3.42	1.63 ± 0.72	1.35 ± 0.06	1.21	本研究
	薪柴	8.5 ± 1.6	4.0 ± 0.9	1.5 ± 0.3	2.67	[24]
		2.21 ~ 4.58	0.41 ~ 1.43	1.03 ~ 3.26	0.40	[25]
		4.35 ± 1.96				[55]
		4.36	1.29	1.50	0.86	本研究

2.5 不同秸秆燃烧排放的 $PM_{2.5}$ 化学成分谱特征

图 2 所示为生物质秸秆在不同燃烧条件下的 $PM_{2.5}$ 化学成分谱. 从中可见,露天燃烧排放颗粒物中 OC 的质量分数相对较高,平均为 $(38.92 \pm 13.93)\%$; 炉灶燃烧的 OC 质量分数为 $(26.37 \pm 10.14)\%$. 露天燃烧排放颗粒物中 EC 的质量分数为 $(5.66 \pm 1.54)\%$, 炉灶燃烧的 EC 质量分数为 $(18.97 \pm 10.76)\%$.

从燃烧类型来看,秸秆露天燃烧排放颗粒物中 OC 的含量明显高于炉灶燃烧,炉灶燃烧排放颗粒物中 EC 的含量高于露天燃烧,说明炉内燃烧空气供应有限以及炉膛内空气混合不均匀,易导致秸秆处于高温缺氧燃烧状态,使 EC 排放显著较高,而露天焚烧时氧含量较为充分,导致 OC 排放相对较高^[10,56].

从秸秆类型来看,薪柴燃烧排放的 EC 组分含量最高,其在炉灶燃烧过程中产生的 EC 质量分数可达 34.4%,这与 Roden 等^[24]、Shen 等^[36,57] 实测的木材以及枫树、橡树等薪柴燃烧产生的 EC 百分含量(分别为 21% 和 43%)基本一致,这主要是由于木材中木质素含量较高^[58],较高的木质素含量有利于碳黑的形成^[40]. 同时,薪柴的挥发分含量相对较高,且结构密实,在燃烧时挥发分析出速度较慢,使其易于在炉内完全燃烧,减少了 OC 的生成比重.

其他组分中, Cl^- 、 K^+ 在各秸秆燃烧排放的水溶性离子组分中的含量最为丰富, Cl^- 在露天燃烧排放颗粒物中的含量在 6.64% ~ 21.03% 之间,在炉灶燃烧排放颗粒物中的含量在 14.01% ~ 29.37% 之间; K^+ 离子在露天燃烧排放颗粒物中的含量在 8.65 ~ 16.01% 之间,在炉灶燃烧排放颗粒物中的含量在 11.94% ~ 24.37% 之间,与其它的研究成果基本一致^[9,20,21]. 由于秸秆燃烧排放颗粒物中的 K^+ 含量丰富,形态单一且化学性质稳定,因此 K^+ 经常被作为生物质燃烧的指示物^[59,60]. 据有关文献报道,生物质燃烧排放的新鲜颗粒中含有大量 KCl,在老化过程中, KCl 通过与 HNO_3 、 H_2SO_4 发生多相反应生成 KNO_3 、 K_2SO_4 ,从而影响颗粒物的吸湿性以及颗粒物的成云凝结核的效率,最终对大气能见度和气候产生影响^[61,62].

由于秸秆燃烧产生的颗粒物中含有大量 K^+ 和 OC,因此,通常采用 K^+/OC 的比值来表征秸秆燃烧排放, Duan 等^[14] 研究了秸秆燃烧对北京市空气颗粒物中有机碳的贡献,发现当大气颗粒物中 K^+/OC 值在 0.19 ~ 0.21 左右时,可认为是受到了小麦秸秆露天燃烧的影响. Ryu 等^[43] 在韩国光州的研究发现,秸秆燃烧期间大气中 $PM_{2.5}$ 的 K^+/OC 值在 0.18 ~ 0.39 之间. 本研所得长三角地区小麦、水稻、油菜和豆秸等作物秸秆露天燃烧的 K^+/OC 值分别

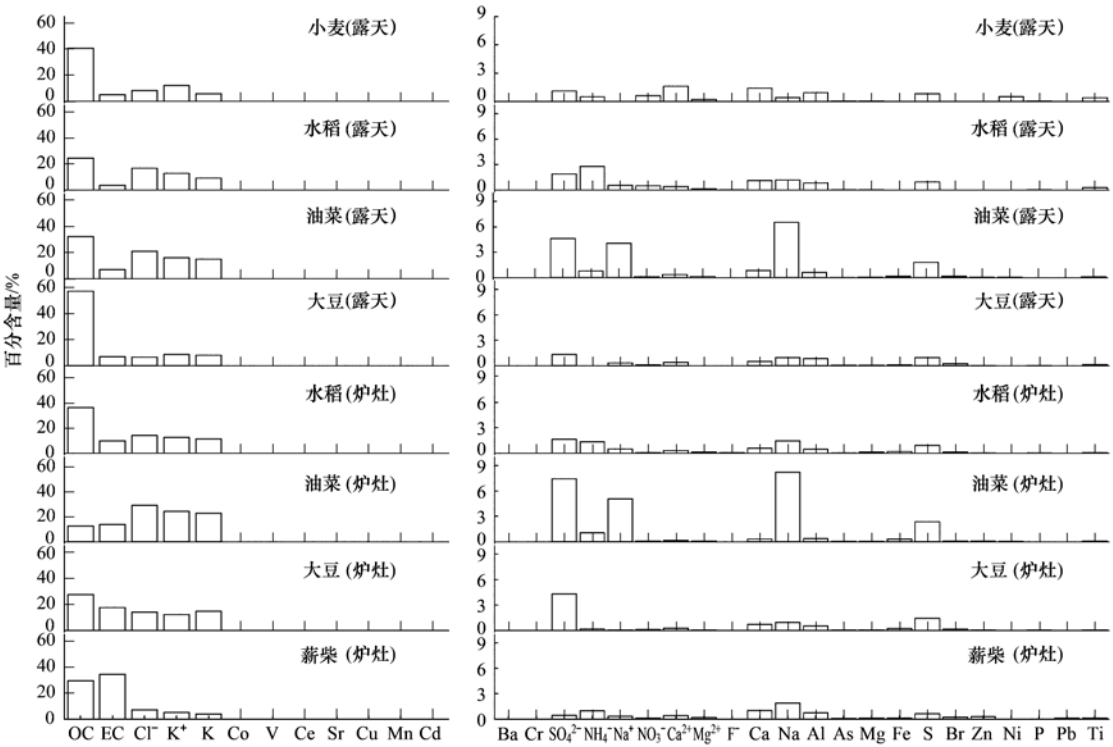


图 2 生物质燃料露天和炉灶燃烧排放 $PM_{2.5}$ 源谱

Fig. 2 Source profile of $PM_{2.5}$ Emissions from crop straw burning

为 0.30、0.52、0.49 和 0.15, 这些特征值可用于判断区域空气质量受秸秆燃烧排放影响的程度, 为大气污染来源解析提供直接的判断依据。

3 结论

(1) 选取 5 类长三角典型农作物秸秆, 采用露天焚烧和炉灶燃烧的现场实测方法, 开展了气态污染物和颗粒物排放测试研究。研究发现, 露天燃烧的各类秸秆 CO 平均排放因子在 $20.6 \sim 34.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, NO_x 平均排放因子在 $1.08 \sim 1.42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, NO/NO_2 的比值在 3.2~4.7 之间。炉灶燃烧的各类秸秆 CO 平均排放因子在 $31.4 \sim 133.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, NO_x 平均排放因子在 $1.65 \sim 2.43 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, NO/NO_2 的比值在 8.2~26.4 之间。炉灶燃烧比露天燃烧高, 炉内供气量等燃烧条件对排放有重要影响。

(2) 露天燃烧的各类秸秆 $\text{PM}_{2.5}$ 平均排放因子在 $1.84 \sim 3.32 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, OC 平均排放因子在 $0.75 \sim 1.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, EC 平均排放因子在 $0.11 \sim 0.23 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, OC/EC 在 4.7~8.1 之间。炉灶燃烧的各类秸秆 $\text{PM}_{2.5}$ 平均排放因子在 $4.36 \sim 12.77 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, OC 平均排放因子在 $1.29 \sim 3.35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, EC 平均排放因子在 $0.91 \sim 1.80 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, OC/EC 在 0.9~3.7 之间。露天燃烧排放的 OC/EC 和秸秆燃烧季节大气中测得的基本相近, 各类秸秆中, 油菜的排放因子较高。

(3) 含碳组分(OC 和 EC)是生物质燃料燃烧产生 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒物的主要组成, 在露天燃烧中 OC 和 EC 的平均比重分别为 $(38.92 \pm 13.93)\%$ 、 $(5.66 \pm 1.54)\%$; 炉灶燃烧中 OC 和 EC 的平均含量分别为 $(26.37 \pm 10.14)\%$ 、 $(18.97 \pm 10.76)\%$ 。水溶性 Cl^- 、 K^+ 也有较大贡献, 其他研究也有类似结果。小麦、水稻、油菜和豆秸等作物秸秆露天燃烧的 K^+/OC 值分别为 0.30、0.52、0.49 和 0.15, 可用于判断长三角区域空气质量受秸秆燃烧排放影响的程度, 为大气污染来源解析提供直接的判断依据。

参考文献:

- [1] Allen A G, Miguel A H. Biomass burning in the Amazon: characterization of the ionic component of aerosols generated from flaming and smoldering rainforest and savannah [J]. Environmental Science & Technology, 1995, **29**(2): 486-493.
- [2] Yang Y, Zhang X X, Korenaga T. Distribution of polynuclear aromatic hydrocarbons (PAHs) in the soil of Tokushima, Japan [J]. Water, Air and Soil Pollution, 2002, **138**(1-4): 51-60.
- [3] Yang H H, Tsai C H, Chao M R, *et al.* Source identification and size distribution of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons during rice straw burning period [J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(7): 1266-1274.
- [4] Miura Y, Kanno T. Emissions of trace gases (CO_2 , CO, CH_4 , and N_2O) resulting from rice straw burning [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1997, **43**(4): 849-854.
- [5] Keshtkar H, Ashbaugh L L. Size distribution of polycyclic aromatic hydrocarbon particulate emission factors from agricultural burning [J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(13): 2729-2739.
- [6] Lee M. Hydrogen peroxide, methyl hydroperoxide and formaldehyde in air impacted by biomass burning [D]. Island: University of Rhode Island, 1995. 13-15.
- [7] Koppmann R, Von Czapiewski K, Reid J S. A review of biomass burning emissions, part I: gaseous emissions of carbon monoxide, methane, volatile organic compounds, and nitrogen containing compounds [J]. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 2005, **5**(5): 10455-10516.
- [8] Lioussse C, Penner J E, Chuang C, *et al.* A global three-dimensional model study of carbonaceous aerosols [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1996, **101**(D14): 19411-19432.
- [9] 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, 1997, **102**(D3): 3683-3699.
- [10] Rau J A. Composition and size distribution of residential wood smoke particles [J]. Aerosol Science and Technology, 1989, **10**(1): 181-192.
- [11] Abel S J, Highwood E J, Haywood J M, *et al.* The direct radiative effect of biomass burning aerosols over southern Africa [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2005, **5**(7): 1999-2018.
- [12] 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.
- [13] 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. 38-39.
- [14] 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.
- [15] 朱佳雷, 王体健, 邓君俊, 等. 长三角地区秸秆焚烧污染物排放清单及其在重霾污染天气模拟中的应用[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(12): 3045-3055.
- [16] 尹聪, 朱彬, 曹云昌, 等. 秸秆焚烧影响南京空气质量的成因探讨[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(2): 207-213.
- [17] 伍德侠, 魏庆农, 魏健琰, 等. 秸秆焚烧期的碳黑气溶胶观测及研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(12): 3304-3309.
- [18] Ding A J, Fu C B, Yang X Q, *et al.* Intense atmospheric pollution modifies weather: a case of mixed biomass burning with fossil fuel combustion pollution in eastern China [J].

- Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, **13** (20): 10545-10554.
- [19] 祝斌, 朱先磊, 张元勋, 等. 农作物秸秆燃烧 $PM_{2.5}$ 排放因子的研究[J]. 环境科学研究, 2005, **18**(2): 29-33.
- [20] Li X H, Wang S X, Duan L, *et al.* Particulate and trace gas emissions from open burning of wheat straw and corn stover in China [J]. Environmental Science & Technology, 2007, **41** (17): 6052-6058.
- [21] Cao G L, Zhang X Y, Gong S L, *et al.* Investigation on emission factors of particulate matter and gaseous pollutants from crop residue burning [J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, **20**(1): 50-55.
- [22] Dhammapala R, Claiborn C, Simpson C, *et al.* Emission factors from wheat and Kentucky bluegrass stubble burning: comparison of field and simulated burn experiments [J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(7): 1512-1520.
- [23] Jimenez J R, Claiborn C S, Dhammapala R S, *et al.* Methoxyphenols and levoglucosan ratios in $PM_{2.5}$ from wheat and Kentucky bluegrass stubble burning in eastern Washington and northern Idaho [J]. Environmental Science & Technology, 2007, **41**(22): 7824-7829.
- [24] Roden C A, Bond T C, Conway S, *et al.* Emission factors and real-time optical properties of particles emitted from traditional wood burning cookstoves [J]. Environmental Science & Technology, 2006, **40**(21): 6750-6757.
- [25] Li X H, Wang S X, Duan L, *et al.* Carbonaceous aerosol emissions from household biofuel combustion in China [J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43** (15): 6076-6081.
- [26] Chow J C, Watson J G, Chen L W, *et al.* Refining temperature measures in thermal/optical carbon analysis [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2005, **5**(11): 2961-2972.
- [27] VITA (Volunteers in Technical Assistance, Inc), Testing the efficiency of wood-burning cookstoves: International Standards [S]. Arlington, VA, USA. 1985.
- [28] Andreae M O, Merlet P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2001, **15**(4): 955-966.
- [29] 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.
- [30] 刘丽华, 蒋静艳, 宗良纲. 农业残留物燃烧温室气体排放清单研究: 以江苏省为例[J]. 环境科学, 2011, **32**(5): 1242-1248.
- [31] Lacaux J P, Brustet J M, Delmas R, *et al.* Biomass burning in the tropical savannas of Ivory Coast: An overview of the field experiment Fire of Savannas (FOS/DECAFE 91) [J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 1995, **22**(1-2): 195-216.
- [32] Zhang H F, Ye X N, Cheng T T, *et al.* A laboratory study of agricultural crop residue combustion in China: Emission factors and emission inventory [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(36): 8432-8441.
- [33] 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.
- [34] Wang S X, Wei W, Du L, *et al.* Characteristics of gaseous pollutants from biofuel-stoves in rural China [J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(27): 4148-4154.
- [35] Wei W, Zhang W, Hu D, *et al.* Emissions of carbon monoxide and carbon dioxide from uncompressed and pelletized biomass fuel burning in typical household stoves in China [J]. Atmospheric Environment, 2012, **56**: 136-142.
- [36] Shen G F, Yang Y F, Wang W, *et al.* Emission factors of particulate matter and elemental carbon for crop residues and coals burned in typical household stoves in China [J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44** (18): 7157-7162.
- [37] Zhang J, Smith K R, Ma Y, *et al.* Greenhouse gases and other airborne pollutants from household stoves in China: a database for emission factors [J]. Atmospheric Environment, 2000, **34** (26): 4537-4549.
- [38] Zhang J, Smith K R, Uma R, *et al.* Carbon monoxide from cookstoves in developing countries: 1. Emission factors [J]. Chemosphere-Global Change Science, 1999, **1**(1-3): 353-366.
- [39] Zárate O D, Ezcurra A, Lacaux J P, *et al.* Emission factor estimates of cereal waste burning in Spain [J]. Atmospheric Environment, 2000, **34**(19): 3183-3193.
- [40] Wiinikka H, Gebart R. The influence of fuel type on particle emissions in combustion of biomass pellets [J]. Combustion Science and Technology, 2005, **177**(4): 741-763.
- [41] Zhang X Y, Wang Y Q, Zhang X C, *et al.* Carbonaceous aerosol composition over various regions of China during 2006 [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2008, **113** (D14): 111-121.
- [42] Watson J G, Chow J C, Houck J E. $PM_{2.5}$ chemical source profiles for vehicle exhaust, vegetative burning, geological material, and coal burning in Northwestern Colorado during 1995 [J]. Chemosphere, 2001, **43**(8): 1141-1151.
- [43] Ryu S Y, Kim J E, Zhuanshi H, *et al.* Chemical composition of post-harvest biomass burning aerosols in Gwangju, Korea [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2004, **54** (9): 1124-1137.
- [44] Ryu S Y, Kwon B G, Kim Y J, *et al.* Characteristics of biomass burning aerosol and its impact on regional air quality in the summer of 2003 at Gwangju, Korea [J]. Atmospheric Research, 2007, **84**(4): 362-373.
- [45] Chuang M T, Chou C C K, Sopajaree K, *et al.* Characterization of aerosol chemical properties from near-source biomass burning in the northern Indochina during 7-SEAS/Dongsha experiment [J]. Atmospheric Environment, 2012, **78**: 72-81.
- [46] Huang K, Fu J S, Hsu N C, *et al.* Impact assessment of biomass

- burning on air quality in Southeast and East Asia during BASE-ASIA [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **78**: 291-302.
- [47] Ram K, Sarin M M. Spatio-temporal variability in atmospheric abundances of EC, OC and WSOC over Northern India [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2010, **41**(1): 88-98.
- [48] Johnson M, Edwards R, Frenk C A, *et al.* In-field greenhouse gas emissions from cookstoves in rural Mexican households [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(6): 1206-1222.
- [49] Lobert J M, Warnatz J. Emissions from the combustion process in vegetation [A]. In: Crutzen P J, Goldammer J G (Eds.). *Fire in the Environment* [C]. Chichester: John Wiley Sons, 1993. 15-37.
- [50] Dhammapala R, Claiborn C, Jimenez J, *et al.* Emission factors of PAHs, methoxyphenols, levoglucosan, elemental carbon and organic carbon from simulated wheat and Kentucky bluegrass stubble burns [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(12): 2660-2669.
- [51] 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.
- [52] Oanh N T K, 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.
- [53] Christian T J, Kleiss B, Yokelson R J, *et al.* Comprehensive laboratory measurements of biomass-burning emissions: 1. Emissions from Indonesian, African, and other fuels [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**(D23): 4719-4732.
- [54] 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.
- [55] McDonald J D, Zielinska B, Fujita E M, *et al.* Fine particle and gaseous emission rates from residential wood combustion [J]. *Environmental Science & Technology*, 2000, **34**(11): 2080-2091.
- [56] 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*, 2004, **109**(D14): 203-246.
- [57] Shen G F, Wei S Y, Wei W, *et al.* Emission factors, size distributions, and emission inventories of carbonaceous particulate matter from residential wood combustion in rural China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(7): 4207-4214.
- [58] 刘荣厚, 牛卫生, 张大雷. 生物质热化学转换技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [59] Andreae M O. Soot carbon and excess fine potassium: Long-range transport of combustion-derived aerosols [J]. *Science*, 1983, **220**(4602): 1148-1151.
- [60] 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.
- [61] Li J, Pósfai M, Hobbs P V, *et al.* Individual aerosol particles from biomass burning in southern Africa: 2, Compositions and aging of inorganic particles [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**(D13): 1-12.
- [62] Gaudichet A, Echalar F, Chatenet B, *et al.* Trace elements in tropical African savanna biomass burning aerosols [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1995, **22**(1-2): 19-39.

CONTENTS

Emission Factors and PM Chemical Composition Study of Biomass Burning in the Yangtze River Delta Region	TANG Xi-bin, HUANG Cheng, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1623)
Size Distributions and Source Apportionment of Soluble Ions in Aerosol in Nanjing	XUE Guo-qiang, ZHU Bin, WANG Hong-lei (1633)
Characteristics of Particulate Matters and Its Chemical Compositions During the Dust Episodes in Shanghai in Spring, 2011	LI Gui-ling, ZHOU Min, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (1644)
Numerical Modeling Analysis of Secondary Organic Aerosol (SOA) Combined with the Ground-based Measurements in the Pearl River Delta Region	GUO Xiao-shuang, SITU Shu-ping, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (1654)
Observation of a Photochemical Event in Jiaying During Summer 2013	SHEN Li-juan, LI Li, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (1662)
Spatial and Temporal Variations of Near Surface Atmospheric CO ₂ with Mobile Measurements in Fall and Spring in Xiamen, China	LI Yan-li, XING Zhen-yu, MU Chao, <i>et al.</i> (1671)
Isotope Compositions of Elemental Carbon in the Smoke and Ash from Crop Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, XU Hui, <i>et al.</i> (1680)
Development of a Chemical Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometer for Continuous Measurements of Atmospheric Hydroxyl Radical	DOU Jian, HUA Lei, HOU Ke-yong, <i>et al.</i> (1688)
Residual Levels of Acetochlor in Source Water and Drinking Water of China's Major Cities	YU Zhi-yong, JIN Fen, LI Hong-yan, <i>et al.</i> (1694)
Vertical Distribution of Water Quality and Its Influence on Underwater Light Field in Lake Chaohu	MA Meng-xiao, ZHANG Yu-chao, QIAN Xin, <i>et al.</i> (1698)
Correlation Between Aquatic Plant Diversity and Water Environment in the Typical Sites of Hangzhou Section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	LU Yin, XU Xiao-lu, ZHANG De-yong, <i>et al.</i> (1708)
Nitrogen and Phosphate Pollution Characteristics and Eutrophication Evaluation for Typical Urban Landscape Waters in Hefei City	LI Ru-zhong, LIU Ke-feng, QIAN Jing, <i>et al.</i> (1718)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Sediments and Estimation of the Nutrients Fluxes in Longjing Lake, Chongqing City, During the Initial Impoundment Period	PAN Yan-an, LEI Pei, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (1727)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides (OCPs) in the Water of Lake Qiandao and Its Major Input Rivers	TANG Fang-liang, ZHANG Ming, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (1735)
Distribution of Potential Pathogenic Bacteria in the Jiulong River Watershed	HOU Li-yuan, HU An-yi, MA Ying, <i>et al.</i> (1742)
Influence of the River-lake Relation Change on the Distribution of Heavy Metal and Ecological Risk Assessment in the Surface Sediment of Poyang Lake	LIU Wan-qing, NI Zhao-kui, WU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1750)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Heavy Metals Pollution in the Water, Soil and Sediments Environment of the Lean River-Poyang Lake Wetland	JIAN Min-fei, LI Ling-yu, XU Peng-fei, <i>et al.</i> (1759)
Dissolved Organic Matter (DOM) Dynamics in Karst Aquifer Systems	YAO Xin, ZOU Sheng-zhang, XIA Ri-yuan, <i>et al.</i> (1766)
Sensitivity Analysis of AnnAGNPS Model's Hydrology and Water Quality Parameters Based on the Perturbation Analysis Method	XI Qing, LI Zhao-fu, LUO Chuan (1773)
Movement Characteristics of <i>Cyanobacteria</i> Under Stress of Water-Lifting Aeration	SUN Xiu-xiu, CONG Hai-bing, GAO Zheng-juan, <i>et al.</i> (1781)
Influence of Light Wavelength and Intensity on the Reduction of Divalent Mercury in Aquatic System	LI Xi-jia, ZHONG Zi-xuan, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (1788)
Dynamic Effects of Commonly Co-Existing Anions on the Removal of Selenite from Groundwater by Nanoscale Zero-Valent Iron	YANG Wen-jun, GUO Ying-qing, DU Er-deng (1793)
BiOBr Promoted the Photocatalytic Degradation of Beta-cypermethrin Under Visible Light	PENG Yi-zhu, ZHAO Xiao-rong, JIA Man-ke, <i>et al.</i> (1798)
Adsorption of Methylene Blue from Aqueous Solution onto Magnetic Fe ₃ O ₄ /Graphene Oxide Nanoparticles	CHANG Qing, JIANG Guo-dong, HU Meng-xuan, <i>et al.</i> (1804)
Selection of Electrochemical Anodic Materials for PFOA Degradation and Its Mechanism	ZHUO Qiong-fang, DENG Shu-bo, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (1810)
Occurrence and Fate of Typical Antibiotics in a Wastewater Treatment Plant in Southwest China	GAN Xiu-mei, YAN Qing, GAO Xu, <i>et al.</i> (1817)
Effects and Mechanism on Removing Organics and Reduction of Membrane Fouling Using Granular Macro-Porous Anion Exchange Resin in Drinking Water Treatment	HE Huan, DONG Bing-zhi, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (1824)
Research on Treatment of High Salt Wastewater by the Graphite and Activated Carbon Fiber Composite Electrodes	ZHOU Gui-zhong, WANG Zhao-feng, WANG Xuan, <i>et al.</i> (1832)
Preparation and Application of the Quinonyl Chloromethylation Polystyrene in Biological Treatment of Wastewater	ZHANG Hua-yu, XU Qing, NIU Chun-mei, <i>et al.</i> (1838)
Enhanced Electro-Catalytic Oxidation of Dye Wastewater with FeMo ₁₂ Adopted Catalyst	WANG Li, YUE Lin, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (1843)
Formation and Characterization of Aerobic Granules in a Pilot-scale Reactor for Real Wastewater Treatment	YANG Shu-fang, ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, <i>et al.</i> (1850)
Research on Cultivation of Aerobic Granular Sludge and Its Characteristics in Sequencing Fed Batch Reactor	LONG Bei, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1857)
Effect of Different Volume Loading of Aerobic/Anaerobic Zone on Nitrogen and Phosphorus Removal by Biofilm and Granular Sludge Coupling Process	YIN Hang, LIU Chang, GAO Hui, <i>et al.</i> (1866)
Adsorption of Cu ²⁺ by Xanthate-Functionalized Waste Sludge	CEN Yan, QUAN Xiang-chun, JIANG Xiao-man (1871)
Mechanisms of Copper Uptake by Submerged Plant <i>Hydrilla verticillata</i> (L. f.) Royle and <i>Myriophyllum spicatum</i> L.	XUE Pei-ying, LI Guo-xin, ZHAO Quan-li (1878)
Properties of Maize Stalk Biochar Produced Under Different Pyrolysis Temperatures and Its Sorption Capability to Naphthalene	HUANG Hua, WANG Ya-xiong, TANG Jing-chun, <i>et al.</i> (1884)
Beijing Common Green Tree Leaves' Accumulation Capacity for Heavy Metals	LI Shao-ming, KONG Ling-wei, LU Shao-wei, <i>et al.</i> (1891)
Assessment of Heavy Metal Contamination by Moss-bag Method and Road-dust Method for Taizhou Urban Area	CHEN Qin, FANG Yan-ming, YAN Yun, <i>et al.</i> (1901)
Effect of Grazing on the Temperature Sensitivity of Soil Respiration in Hulunber Meadow Steppe	WANG Xu, YAN Rui-rui, DENG Yu, <i>et al.</i> (1909)
Variation Characteristic in Soil Respiration of Apple Orchard and Its Biotic and Abiotic Influencing Factors	WANG Rui, GUO Sheng-li, LIU Qing-fang, <i>et al.</i> (1915)
Influencing Factors of Mercury Emission Flux from Forest Soil at Tieshanping, Chongqing	WANG Qiong, LUO Yao, DU Bao-yu, <i>et al.</i> (1922)
Characteristics of Arsenic Content in the Livestock Farms' Surrounding Environment in Shanghai Suburbs	XI Gong-fang, ZHOU Shou-biao, DING Hai-cheng, <i>et al.</i> (1928)
Input and Distribution of Rice Photosynthesized Carbon in the Tillering Stage Under Different Nitrogen Application Following Continuous ¹³ C Labeling	TAN Li-min, WU Hao, LI Hui, <i>et al.</i> (1933)
Simulation Study on the Effect of Salinity on the Adsorption Behavior of Mercury in Wastewater-Irrigated Area	ZHENG Shun-an, LI Xiao-hua, XU Zhi-yu (1939)
Leaching Behavior of Pb, Cd and Zn from Soil Stabilized by Lime Stabilized Sludge	LI Xiang, SONG Yun, LIU Yong-bing (1946)
Levels and Distribution of Short Chain Chlorinated Paraffins in Seaford from Dalian, China	YU Jun-chao, WANG Thanh, WANG Ya-wei, <i>et al.</i> (1955)
Application of Biotic Ligand Model for the Acute Toxicity of Copper to <i>Daphnia magna</i> in Water of Liaohe River and Taihu Lake	ZHOU Teng-yao, CAO ying, QIN Lu-mei, <i>et al.</i> (1962)
Phytotoxicity of Copper Oxide Nanoparticles to Metabolic Activity in the Roots of Rice	WANG Shu-ling, ZHANG Yu-xi, LIU Han-zhu, <i>et al.</i> (1968)
Enhancing Effect of Tween 80 on Degradation of Triphenyltin by <i>Bacillus thuringiensis</i>	HUANG Jie, YE Jin-shao, YIN Hua, <i>et al.</i> (1974)
Long-term Performance of Microbial Fuel Cell Using Manure as Substrate	JIAO Yan, ZHANG Guo-dong, ZHAO Qing-liang (1981)
Influence of Goethite on Anaerobic Fermentation of Organic Fraction of Municipal Solid Waste (OFMSW)	YANG Lu-lu, YUE Zheng-bo, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (1988)
Pollutants Produced in Municipal Refuse Container During Transfer Process	WANG Xiao-yuan, LIU Yin-hua, WANG Fei, <i>et al.</i> (1994)
Selective Catalytic Oxidation of H ₂ S over Supported Fe Catalysts on CeO ₂ -Intercalated Laponite Clay	SUN Chao, ZHANG Xin, HAO Zheng-ping, <i>et al.</i> (2002)
Preparation by Different Methods and Characterization of Desulfurization Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	ZHU Chun-lei, WANG Hai-lin, SUN Chun-bao (2010)
Sampling Methods for PM _{2.5} from Stationary Sources: a Review	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2018)
A Research Overview of Methanogens	LI Yu-shan, LI Yao-ming, OUYANG Zhi-yun (2025)

《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)

2014年5月15日 35卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 5 May 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人