

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第10期

Vol.37 No.10

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目 次

北京地区空气重污染下雾凇和偏东风对 PM _{2.5} 清除作用	孙兆彬, 廖晓农, 王占山, 李梓铭, 赵秀娟, 花丛 (3679)
降雨对不同粒径气溶胶粒子碰撞清除能力	董群, 赵普生, 陈一娜 (3686)
北京冬季雾霾频发期 VOCs 源解析及健康风险评价	刘丹, 解强, 张鑫, 王海林, 闫志勇, 杨宏伟, 郝郑平 (3693)
浙江省制鞋行业挥发性有机物污染特征及其排放系数	徐志荣, 姚轶, 蔡卫丹, 李嫣, 许明珠, 王浙明 (3702)
2014 年 APEC 期间北京市 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 氧化性损伤能力研究	郭茜, 邵龙义, 王文华, 侯聪, 赵承美, 幸娇萍, 马施民 (3708)
武汉市洪山区夏季 PM _{2.5} 浓度、水溶性离子与 PAHs 成分特征及来源分析	孙焰, 祁士华, 张莉, 邢新丽, 杨丹, 胡天鹏, 瞿程凯 (3714)
基于快速聚类方法分析常州市区 PM _{2.5} 的统计特性	王振, 余益军, 徐圆青, 李艳萍, 夏京, 殷磊 (3723)
PM _{2.5} 在线水溶性离子与滤膜采集-实验室检测的比对分析	杨懂艳, 刘保献, 石爱军, 张大伟, 丁萌萌, 周健楠, 富佳明, 景宽 (3730)
树木模拟燃烧排放烟尘中水溶性离子的组成	刘刚, 黄柯, 李久海, 徐慧 (3737)
轻型汽油车排放颗粒物数浓度和粒径分布特征	樊筱筱, 蒋靖坤, 张强, 李振华, 何立强, 吴烨, 胡京南, 郝吉明 (3743)
基于台架测试的我国船用柴油机废气排放因子	邢辉, 段树林, 黄连忠, 韩志涛, 刘勤安 (3750)
西安城区地表灰尘中邻苯二甲酸酯分布、来源及人群暴露	张文娟, 王利军, 王丽, 史兴民, 卢新卫 (3758)
生活垃圾焚烧厂垃圾的汞含量与汞排放特征研究	段振亚, 苏海涛, 王凤阳, 李智坚, 李韶璞, 王书肖 (3766)
三峡库区消落带土壤中硫酸盐还原菌对汞甲基化作用的影响	陈瑞, 陈华, 王定勇, 向玉萍, 申鸿 (3774)
城市化进程对地下河中溶解态正构烷烃来源的影响	廖昱, 孙玉川, 沈立成, 梁作兵, 王尊波 (3781)
基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价	王成龙, 邹欣庆, 赵一飞, 李宝杰 (3789)
贡嘎山地区地表水化学特征及水环境质量评价	何晓丽, 吴艳宏, 周俊, 邴海健 (3798)
多元数理统计法研究太子河本溪城市段水体 DOM 紫外光谱特征	钱锋, 吴婕, 于会彬, 宋永会, 张美, 孔令昊, 何孟常 (3806)
地下水中溶解性有机物的垂直分布特征及成因	何小松, 张慧, 黄彩红, 李敏, 高如泰, 李丹, 席北斗 (3813)
昆明市不同功能区排水管道沉积物性质	常海东, 金鹏康, 付博文, 李雪兵, 贾锐珂 (3821)
滇池水生植物分布对沉积物间隙水磷浓度的影响	丁帅, 王圣瑞, 张蕊, 肖焱波, 焦立新, 李乐, 王忠诚, 尹诗诗 (3828)
紫色母岩覆盖层控制底泥磷释放的效果及机制	黄雪娇, 石纹豪, 倪九派, 李振轮 (3835)
排水循环灌溉下稻田磷素时空分布特征	焦平金, 许迪, 朱建强, 于颖多 (3842)
快速高效去除微囊藻的 GO/QPEI 复合纳米材料	李洁, 肖琳 (3850)
一体式生物净化-沉淀池对微污染水体污染物的强化去除性能	王文东, 刘荟, 马翠, 韩雨, 常妮妮 (3858)
生物粉末活性炭-超滤组合工艺对微污染水源水中臭味物质的去除效能及其微生物特性	宣雍祺, 周丽, 邓慧萍, 蔡宙, 李大鹏, 刘刚 (3864)
聚硅酸对不同形态铝沉积行为的影响	赵园园, 张玥, 李素英, 石宝友, 李贵伟, 孙改清 (3870)
典型南方水源氨基酸浓度变化与去除	刘伟, 蔡广强, 卢小艳, 刘丽君, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (3877)
O ₃ /UV 降解含氮杂环化合物喹啉	陈傲蕾, 常凤民, 汪翠萍, 徐恒, 吴静, 左剑恶, 王凯军 (3884)
蒽醌-2-磺酸钠促进 <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 脱色产氢机制与产能分析	胡金梅, 虞磊, 黄天寅 (3891)
2-丁烯醛生产废水中溶解性有机物的分级解析	孙秀梅, 宋广清, 席宏波, 周岳溪, 牛远方 (3899)
不同缺氧段硝酸盐氮浓度条件下连续流单污泥污水处理系统 PHA、TP 代谢	王晓玲, 员东丹, 白莉, 李紫棋, 余勇, 秦旭东, 张晓旭, 赵可 (3906)
长江口邻近海域沉积物中厌氧氨氧化细菌分布特征研究	付璐璐, 甄毓, 贺惠, 张玉, 米铁柱 (3914)
焦化废水活性污泥细菌菌群结构分析	蒙小俊, 李海波, 曹宏斌, 盛宇星 (3923)
黄土高原不同植被类型下土壤细菌群落特征研究	刘洋, 黄懿梅, 曾全超 (3931)
苯酚对活性污泥活性及微型动物群落结构的影响	胡小兵, 饶强, 唐素兰, 姜晶, 谢瑞桃, 郝文静, 钟梅英 (3939)
城市生活污水和生活垃圾渗滤液抗生素抗性基因污染的比较研究	黄福义, 李虎, 安新丽, 欧阳纬莹, 苏建强 (3949)
菌株 <i>Desulfovibrio</i> sp. CMX 的 DNRA 性能和影响因素	谢柄柯, 张玉, 王晓伟, 孙超越, 周集体 (3955)
生活污水灌溉对麦秸还田稻田氨挥发排放的影响	徐珊珊, 侯朋福, 范立慧, 薛利红, 杨林章, 王绍华, 李刚华 (3963)
模拟氮沉降对重庆缙云山马尾松林土壤呼吸和酶活性的季节性影响	曾清苹, 何丙辉, 李源, 夏力文, 杨龙龙, 邓雪梅, 李川 (3971)
生物炭添加和灌溉对温室番茄地土壤反硝化损失的影响	张文娟, 余冬立, Gamareldawla H. D. Agbna, 夏永秋 (3979)
土壤质地对自养固碳微生物及其同化碳的影响	王群艳, 吴小红, 祝贞科, 袁红朝, 隋方功, 葛体达, 吴金水 (3987)
土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟	施亚星, 吴绍华, 周生路, 王春辉, 陈浩 (3996)
组配改良剂对稻田系统 Pb、Cd 和 As 生物有效性的协同调控	王英杰, 邹佳玲, 杨文强, 周航, 廖柏寒 (4004)
几种有机物料对设施菜田土壤 Cd、Pb 生物有效性的影响	周贵宇, 姜慧敏, 杨俊诚, 张建峰, 张水勤, 梁雷 (4011)
蒙脱石对有机物料施入土壤磷形态和有效性的影响	宋贤威, 赵秀兰, 张进忠, 胡梦坤, 徐艳昭, 王明禹 (4020)
不同镉浓度及 pH 条件下纳米沸石对土壤镉形态及大白菜镉吸收的影响	秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟芬琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (4030)
黑麦草和牵牛花对铬耐受能力和积累效果的指标表征研究	董冰冰, 陈友媛, 惠红霞, 陆维佳, 杨秀卿, 刘逸凡 (4044)
挥发性甲基硅氧烷的体外代谢行为	黎敏丹, 郑国贸, 万伟, 胡建英 (4054)
中药渣与城市污泥好氧共堆肥的效能	宿程远, 郑鹏, 阮祁华, 覃菁菁, 卢宇翔, 李俊兵 (4062)
《环境科学》征订启事 (3827)	《环境科学》征稿简则 (4053)
信息 (3736, 3930, 4043)	

树木模拟燃烧排放烟尘中水溶性离子的组成

刘刚, 黄柯, 李久海, 徐慧

(南京信息工程大学江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044)

摘要: 模拟林火中生物质的两种燃烧方式, 明燃和闷燃, 对 10 种乔木的干树枝和绿树枝进行室内燃烧试验, 测定了排放烟尘中的水溶性离子。结果表明, 干树枝明燃烟尘中水溶性离子的平均总含量为 $(28.88 \pm 17.54) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 K^+ 是主要组分, 其平均排放因子为 $101.0 \sim 118.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。干树枝闷燃烟尘中水溶性离子的平均总含量为 $(6.38 \pm 2.79) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Cl^- 是主要组分, 其平均排放因子为 $101.1 \sim 245.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。绿树枝明燃烟尘中水溶性离子的平均总含量为 $(22.13 \pm 13.52) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 K^+ 是主要组分, 其平均排放因子为 $136.4 \sim 197.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。绿树枝闷燃烟尘中水溶性离子的平均总含量为 $(15.71 \pm 19.09) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 是主要成分, 其平均排放因子为 $298.6 \sim 869.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。两类树枝在每种燃烧条件下产生的烟尘中, Cl^- 与 K^+ 的含量均显著正相关。干树枝闷燃时 Cl^- 的排放因子与含水率显著正相关。燃烧条件、树种及含水率均对森林生物质烟尘中水溶性离子的组成及排放因子有明显的影响。这对估算大气中林火来源的污染物有参考意义。

关键词: 树枝; 燃烧; 水溶性离子; 烟尘; 排放因子

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)10-3737-06 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2016.10.009

Chemical Composition of Water-soluble Ions in Smoke Emitted from Tree Branch Combustion

LIU Gang, HUANG Ke, LI Jiu-hai, XU Hui

(Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Water-soluble ions in particulate matter (PM) from tree branch combustion were determined. The results showed that the average content of total water-soluble ions in flaming PM from dry branches was $(28.88 \pm 17.54) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. The major components included Cl^- , SO_4^{2-} , and K^+ , the mean emission factors (EFs) of which were in the range of 101.0 to $118.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. In addition, the mean content of the total ions in smoldering PM was $(6.38 \pm 2.79) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. The main constituents contained Na^+ , SO_4^{2-} , K^+ , and Cl^- , the mean EFs of which varied from 101.1 to $245.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. The average content of the total ions in flaming PM from green branches was $(22.13 \pm 13.52) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. Their major components were SO_4^{2-} , Cl^- , and K^+ , with mean EFs ranging from 136.4 to $197.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Furthermore, the mean content of all ions in smoldering PM derived from green branches was $(15.71 \pm 19.09) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. Cl^- , SO_4^{2-} , and Na^+ were the main components, with mean EFs varying from 298.6 to $869.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Significant correlations were found between the contents of Cl^- and K^+ in PM from dry and (or) green branches burned under each condition. Similar relation also existed between EFs of Cl^- from the dry branches burned in smoldering condition and the moisture in them. The EFs of Cl^- , K^+ , and Mg^{2+} were positively correlated with moisture while the green branches were burned in flaming condition. The EFs of Cl^- , Na^+ , NH_4^+ , and Mg^{2+} were significantly positively correlated with moisture as well when the fuels were combusted in smoldering condition. Combustion conditions, tree types, and moisture in wood fuels all had impacts on the chemical compositions and EFs of water-soluble ions in PM from tree branches. This may have significance in estimating the quantity of the pollutants from forest fires.

Key words: tree branch; combustion; water-soluble ion; smoke; emission factor

森林火灾在全球范围内经常发生。林火是大气气溶胶的重要来源之一。其对全球燃烧排放量的贡献高达 42%^[1]。这些排放物在大气化学和生物地球化学循环中都发挥了作用^[2~6]。其效应可达区域性规模^[7~9]。林火产生的烟羽可长距离传输,对遥远地区的空气质量具有潜在的影响^[10~14]。木柴燃烧排放颗粒物的空气动力学直径基本上均小于 $1 \mu\text{m}$ ^[15,16]。在林火产生的烟尘中, $\text{PM}_{2.5}$ 占 PM_{10} 质量的 91%^[17]。水溶性离子是林火烟尘中常见的成

分^[18,19]。 Cl^- 、 K^+ 、 NO_3^- 是其主要组分^[20]。在林下叶层和树干燃烧排放的烟尘中, 钾含量具有明显的差别^[21]。

目前,就燃烧条件和生物质种类等因素对林火烟尘中水溶性离子组成及其排放因子的影响,所进行的研究鲜见报道。本研究模拟林火中生物质的两

收稿日期: 2016-03-11; 修订日期: 2016-05-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41073019)

作者简介: 刘刚(1965~),男,教授,主要研究方向为大气污染物组成与源识别, E-mail: liugang650104@sina.com

烟尘中水溶性离子的含量取决于燃料类型、燃烧条件和土壤特性^[22]。由于此 10 种树枝采自很小的地理范围,土壤因素对其影响应该较小,树种可能是引起变化的主要原因。其总含量的平均值为 $(28.88 \pm 17.54) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。该值稍高于野火烟尘中水溶性离子的平均含量^[18],但远小于西地中海木柴烟中的平均含量^[23]。这可能是由燃烧条件或燃料类型的差别引起的。 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 等是水溶性离子的主要组分。这与松木燃烟中水溶性离子的组成存在差

异。后者的主要组分是 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} ^[16]。干树枝明火烟尘中 Cl^- 的平均含量仅是露天森林生物质烟尘的一半,而 K^+ 的平均含量与之基本相等^[20]。此外,这两种离子的平均含量也远低于砖炉中烧木柴产生的烟尘^[24]。这可能与树木的种类或生长环境不同有关。烟尘中 Cl^- 与 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 等阳离子显著正相关(表 1)。表明 Cl^- 主要与这 3 种阳离子的化合物形式存在。 SO_4^{2-} 与 Na^+ 、 NH_4^+ 等离子也显著正相关,说明该阴离子主要与这两种阳离子相结合。

表 1 干树枝明燃烟尘中水溶性离子含量的相关矩阵¹⁾

Table 1 Correlations of water-soluble ions in flaming PM from dry branches						
	Cl^-	SO_4^{2-}	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}
Cl^-	1	0.53	0.70 *	0.75 *	0.88 *	0.29
SO_4^{2-}		1	0.78 *	0.82 *	0.55	-0.01
Na^+			1	0.87	0.47	-0.01
NH_4^+				1	0.55	0.13
K^+					1	0.30
Mg^{2+}						1

1) * 表示在 0.05 水平上显著相关

干树枝在明燃条件下 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 等离子的平均排放因子最大且其非常接近 $(101.0 \sim 118.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1})$,而 Na^+ 、 NH_4^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 等离子的排放因子平均值则明显偏小(表 2)。其中 Cl^- 、 Na^+ 、 NH_4^+ 的排放因子与西印度农村家庭木柴的比较接

近^[25]。相关分析的结果显示, Cl^- 与 K^+ ($r=0.80$), Na^+ 与含水率 ($r=0.77$) 均显著正相关。说明在明燃条件下既可利用 EF_{Cl^-} 或者 EF_{K^+} 估算彼此的排放量。同时也说明干树枝中较高的含水率有利于 Na^+ 的排放。

表 2 干树枝烟尘中水溶性离子的排放因子(干基)/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 2 Emission factors of water-soluble ions for dry branches (fuel burned, dry basis)/mg·kg ⁻¹														
树种	Cl ⁻		SO ₄ ²⁻		Na ⁺		NH ₄ ⁺		K ⁺		Mg ²⁺		Ca ²⁺	
	明燃	阴烧	明燃	阴烧	明燃	阴烧	明燃	阴烧	明燃	阴烧	明燃	阴烧	明燃	阴烧
榿树	122.3	50.2	63.4		33.5	198.2	31.4	12.3	53.8	32.4	5.8	46.9		56.8
香樟	197.5	97.1	116.4	88.0	35.1	158.0	45.4		144.9	82.0	1.9	38.3		89.5
构树	129.2	39.7	132.8	87.9	24.1	207.9	32.0		150.1	169.7	5.7	54.8		109.7
麻栎	36.0	28.4	127.3	285.2	32.4	288.7	23.1	26.2	41.3	62.7	2.0	54.1	9.5	109.2
榔榆	22.4	17.6	90.5	43.0	17.5	325.9	21.1	34.8	34.4	39.4	1.9	33.0		41.9
雪松	67.1	65.8	132.0	261.1	36.7	213.1	45.9	13.2	39.4	51.7	4.9	57.9		99.6
刺槐	135.0	60.7	84.5	96.1	23.2	138.0	15.6		155.7	147.6	4.0	39.4		66.5
栎树	249.6	330.5	124.3	114.6	52.9	167.6	15.8	52.1	315.4	246.3	10.4	25.8		21.7
柳树	63.3	176.4	163.0	461.1	62.8	366.7	9.1	26.7	40.1	151.2	5.9	59.5	25.8	167.9
梧桐	160.0	144.2	110.3	706.4	58.8	393.4	33.6	83.9	34.6	93.3	9.8	64.3		128.6
均值	118.2	101.1	114.4	238.2	37.7	245.7	27.3	35.6	101.0	107.6	5.2	47.4	17.6	89.1

2.2 干树枝闷燃烟尘

在干树枝的闷烧烟尘中 7 种离子的平均总含量为 $(6.38 \pm 2.79) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,仅为明火烟尘的 22%。 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Cl^- 是主要离子组分(图 2)。相较于明火烟尘,闷烧烟尘中后 3 种离子的含量明显降低。烟尘中 Cl^- 与 K^+ ($r=0.86$)、 Mg^{2+} 与 Ca^{2+} ($r=0.72$) 等离子对的含量均显著正相关。表明在闷燃烟尘中前两种离子主要以氯化物的形式存在,后两

种离子可能以类似的可溶性盐形式存在。

闷燃条件下所有树种 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 等离子的排放因子均比明燃显著增大(表 2),其平均值是明燃的 5.1~9.1 倍。显然,闷燃条件更有利于 3 种离子的形成和排放。然而,大部分树种在闷燃时 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 、 K^+ 等的排放因子却比明燃明显减小,但对少数树种(例如栎树、柳树、梧桐)则相反。后三者含水率明显偏高。由此推断,除了燃烧

条件,树枝的含水率也影响这 4 种离子的排放。 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 分别由烟气中的 SO_2 和 NH_3 转化而来^[18]。Yokelson 等^[26]认为,烟尘中水溶性离子的含量强烈依赖于有焰燃烧量。显然,这至少不适用于 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 等离子。表 3 的相关分析结果显示, Cl^- 与 K^+ 、 SO_4^{2-} 与 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 等阳离子,

Mg^{2+} 与 Ca^{2+} ,其排放因子均显著正相关。这进一步说明在闷燃条件下, K^+ 主要以氯化物的形式排放, Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 等主要以硫酸盐的形式排放,硫酸镁和硫酸钙的排放量呈正比关系。另外, Cl^- 的排放因子与含水率显著正相关。表明在闷燃条件下干树枝中含水率的增加有利于 Cl^- 的排放。

表 3 干树枝闷燃烟尘中水溶性离子排放因子的相关矩阵¹⁾

	Cl^-	SO_4^{2-}	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	含水率
Cl^-	1	0.19	-0.02	0.47	0.74 *	-0.17	-0.12	0.85 *
SO_4^{2-}		1	0.73 *	0.58	-0.15	0.76 *	0.70 *	0.49
Na^+			1	0.49	-0.25	0.43	0.56	0.38
NH_4^+				1	0.43	-0.03	0.13	0.54
K^+					1	-0.27	-0.10	0.62
Mg^{2+}						1	0.84 *	0.10
Ca^{2+}							1	0.19
含水率								1

1) * 表示在 0.05 水平上显著相关

2.3 绿树枝明燃烟尘

在绿树枝的明燃烟尘中水溶性离子的平均总含量为 $(22.13 \pm 13.52) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,明显低于干树枝明燃烟尘的对值。与干树枝的明火烟尘类似,其主要离子组分包括 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 K^+ (图 3)。 Cl^- 与 K^+ ($r = 0.92$), SO_4^{2-} 与 Na^+ ($r = 0.89$)、 NH_4^+ ($r = 0.79$),以及 Na^+ 与 NH_4^+ ($r = 0.84$) 等 3 组离子的含量均显著正相关。这与干树枝明燃烟尘的类似。不过两者之间也有差别。具体表现在绿树枝明火烟尘中 Cl^- 与 Na^+ 、 NH_4^+ 等离子的相关性均不显著。说明两类树枝在明燃过程中生成的水溶性离子在存在形式上有一定的差异。

绿树枝明燃烟尘中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 等的排放因子远大于 Na^+ 、 NH_4^+ 、 Mg^{2+} 等离子(表 4)。这与干树枝的明火烟尘是类似的。但是,绿树枝明燃烟尘

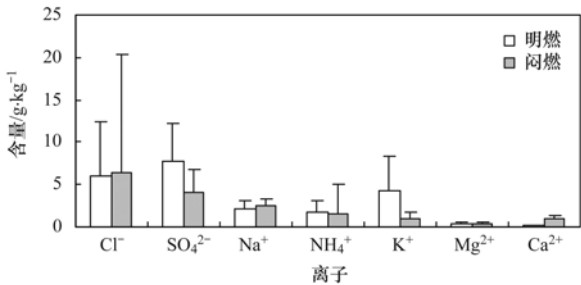


图 3 绿树枝烟尘中水溶性离子含量的变化

Fig. 3 Variation of concentrations for water-soluble ions in PM from green branches

中的离子,尤其是前 3 种离子,其排放因子普遍大于干树枝的明火烟尘。其原因可能是较高的含水率延长了绿树枝在明燃条件下的闷燃阶段,从而促进这些水溶性盐的生成和排放。表 5 的结果显示, Cl^- 与 NH_4^+ 、 K^+ 等离子, SO_4^{2-} 与 Na^+ , Na^+ 与 NH_4^+ , 其排

表 4 绿树枝烟尘中水溶性离子的排放因子(干基)/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

树种	Cl^-		SO_4^{2-}		Na^+		NH_4^+		K^+		Mg^{2+}		Ca^{2+}
	明燃	阴烧	明燃	阴烧	明燃	阴烧	明燃	阴烧	明燃	阴烧	明燃	阴烧	阴烧
榿树	830.2	6 610.8	196.1	591.4	84.4	606.1	95.2	1 552.0	559.9	344.6	22.4	95.4	
香樟	124.6	367.9	214.6	590.4	88.2	301.8			92.1	55.3	14.9	70.7	131.6
构树	75.3	219.9	23.2		34.1	239.7	12.2	7.0	87.0	66.1	5.8	59.1	
麻栎	34.2	49.2	152.5	226.5	28.9	149.9	24.7		31.0	32.9	11.2	54.8	111.4
榔榆	83.2	194.8	314.2	171.6	83.7	291.2	62.0	20.0	50.3	48.9	12.5	40.7	
雪松	96.6	69.8	199.0	313.5	51.7	289.2	70.3	48.5	35.4	59.5	10.4	60.7	63.1
刺槐	181.3	309.2	208.9	396.5	61.5	304.4	36.1	10.1	176.2	115.2	8.7	51.9	113.9
栎树	263.7	253.8	295.1	667.6	64.2	367.6	80.2	122.3	113.6	231.7	8.5	49.5	177.4
柳树	44.3	393.0	183.5	1330.1	38.9	217.4	11.8	38.1	109.0	141.2	15.7	39.4	112.6
梧桐	68.9	223.0	188.4	311.3	44.7	218.7	7.1	15.4	109.7	84.5	15.4	57.8	
均值	180.2	869.1	197.6	511.0	58.0	298.6	44.4	226.7	136.4	118.0	12.5	58.0	118.3

表 5 绿树枝明火烟尘中水溶性离子排放因子的相关矩阵¹⁾

Table 5 Correlations of EFs for water-soluble ions in flaming PM from green branches

	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	含水率
Cl ⁻	1	0.15	0.48	0.74 *	0.96 *	0.39	0.68 *
SO ₄ ²⁻		1	0.63 *	0.59	0.02	-0.06	-0.14
Na ⁺			1	0.82 *	0.40	-0.08	0.31
NH ₄ ⁺				1	0.55	-0.10	0.31
K ⁺					1	0.55	0.77 *
Mg ²⁺						1	0.70 *
含水率							1

1) * 表示在 0.05 水平上显著相关,下同

放因子均显著正相关. 此外,Cl⁻、K⁺、Mg²⁺等的排放因子还与含水率显著正相关. 显然,与干树枝明燃烟尘中水溶性离子的相关性相比,绿树枝与其差异十分明显. 这说明两类树枝在明燃条件下形成和排放水溶性离子的机制可能存在一定差异.

2.4 绿树枝闷燃烟尘

在绿树枝的闷燃烟尘中水溶性离子的平均总含量为(15.71 ± 19.09) g·kg⁻¹,明显低于其明燃烟尘的对应值,但却是干树枝闷燃烟尘平均值的 2.5 倍. Cl⁻、SO₄²⁻、Na⁺是水溶性离子的主要成分(图 3). 烟尘中 Cl⁻与 Na⁺、NH₄⁺、K⁺等离子之间,Na⁺与 NH₄⁺、K⁺、Mg²⁺等离子之间,以及 NH₄⁺与 K⁺之间,均存在显著的正相关关系(表 6). 说明在闷燃烟尘中氯化物是水溶性盐的主要存在形式.

大部分绿树枝在闷燃条件下 K⁺的排放因子比明火明显减小,而其他 6 种离子均明显增大(表 4). 后者是绿树枝明燃的 2.6 ~ 5.1 倍. 闷燃的温度比明燃低,不利于钾的挥发^[27],从而使钾离子的排放因子减小. 除此之外,闷燃更有利于其他多数水溶性盐的生成和排放. 这说明其他 6 种离子在闷燃时的生成或排放机制与 K⁺有差别. 与干树枝闷燃相

表 6 绿树枝闷燃烟尘中水溶性离子含量的相关矩阵

Table 6 Correlations of water-soluble ions in smoldering

PM from green branches						
	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺
Cl ⁻	1	0.06	0.69 *	0.99 *	0.71 *	0.57
SO ₄ ²⁻		1	0.09	0.00	0.43	-0.16
Na ⁺			1	0.74 *	0.78 *	0.67 *
NH ₄ ⁺				1	0.75 *	0.55
K ⁺					1	0.35
Mg ²⁺						1

比,绿树枝在闷燃时所有离子的平均排放因子均明显增大,特别是 Cl⁻、SO₄²⁻、NH₄⁺. 绿树枝在闷燃时比干树枝释放出更多的水蒸汽,这可能更能促进其释放的 SO₂、NH₃、HCl 等污染物与水反应而生成相应的离子. 除了钙离子,闷燃条件下氯离子的排放因子与其他阳离子均显著正相关(表 7). 说明这 4 种阳离子主要以氯化物的形式排放. 此外,Na⁺与 NH₄⁺、K⁺、Mg²⁺,NH₄⁺与 K⁺、Mg²⁺,其排放因子之间均显著正相关. Cl⁻、Na⁺、NH₄⁺、Mg²⁺等离子与含水率的显著相关性也表明,在闷燃条件下绿树枝中含水率的增加有利于氯化物的排放.

表 7 绿树枝闷燃烟尘中水溶性离子排放因子的相关矩阵

Table 7 Correlations of EFs for water-soluble ions in smoldering PM from green branches

	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	含水率
Cl ⁻	1	0.12	0.88 *	0.99 *	0.82 *	0.84 *	0.41	0.76 *
SO ₄ ²⁻		1	0.09	0.08	0.40	-0.06	0.25	0.40
Na ⁺			1	0.94 *	0.87 *	0.76 *	0.44	0.66 *
NH ₄ ⁺				1	0.84 *	0.89 *	0.70	0.80 *
K ⁺					1	0.58	0.71	0.60
Mg ²⁺						1	-0.12	0.80 *
Ca ²⁺							1	-0.37
含水率								1

3 结论

(1)燃烧条件和含水率对树枝排放烟尘中水溶性离子的组成及排放因子具有显著的影响. 在干树

枝的明燃烟尘中 Cl⁻、SO₄²⁻、K⁺是水溶性离子的主要组分. 在其闷燃烟尘中,Na⁺、SO₄²⁻、K⁺、Cl⁻是主要离子组分. 闷燃条件下所有树种 Na⁺、Mg²⁺、Ca²⁺等离子的排放因子均比明燃显著增大,而大部

分树种 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 、 K^+ 等的排放因子却比明燃明显减小。 Cl^- 的排放因子与含水率显著正相关。

(2) 在绿树枝的明燃和闷燃烟尘中, 主要水溶性离子组分分别与干树枝两种烟尘的类似。闷燃时 K^+ 的排放因子比明火明显减小, 而其他 6 种离子均明显增大。绿树枝明燃或闷燃时离子的排放因子普遍比干树枝明显增大。明燃时 Cl^- 、 K^+ 、 Mg^{2+} 等的排放因子与含水率显著正相关。闷燃时 Cl^- 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 Mg^{2+} 等的排放因子与含水率显著正相关。

(3) 在估算大气中林火来源的水溶性离子时, 应该同时考虑燃烧条件、林木种类及其含水率等因素的影响。这样才能得到更为可靠或准确的结论。

参考文献:

- [1] Ito A, Penner J E. Historical emissions of carbonaceous aerosols from biomass and fossil fuel burning for the period 1870-2000 [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, **19**(2): GB2028.
- [2] Furutani H, Meguro A, Iguchi H, *et al.* Geographical distribution and sources of phosphorus in atmospheric aerosol over the North Pacific Ocean [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, **37**(3): L03805.
- [3] Anttila P, Makkonen U, Hellén H, *et al.* Impact of the open biomass fires in spring and summer of 2006 on the chemical composition of background air in south-eastern Finland [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(26): 6472-6486.
- [4] Crutzen P J, Andreae M O. Biomass burning in the tropics: impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles [J]. *Science*, 1990, **250**(4988): 1669-1678.
- [5] Schimel D, Baker D. Carbon cycle: the wildfire factor [J]. *Nature*, 2002, **420**(6911): 29-30.
- [6] Yokelson R J, Urbanski S P, Atlas E L, *et al.* Emissions from forest fires near Mexico City [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, **7**(21): 5569-5584.
- [7] 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.
- [8] Jaffe D, Chand D, Hafner W, *et al.* Influence of fires on O_3 concentrations in the western U. S. [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(16): 5885-5891.
- [9] Liu Y, Kahn R A, Chaloulakou A, *et al.* Analysis of the impact of the forest fires in August 2007 on air quality of Athens using multi-sensor aerosol remote sensing data, meteorology and surface observations [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(21): 3310-3318.
- [10] Saarikoski S, Sillanpää M, Sofiev M, *et al.* Chemical composition of aerosols during a major biomass burning episode over northern Europe in spring 2006: experimental and modelling assessments [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(17): 3577-3589.
- [11] Sapkota A, Symons J M, Kleissl J, *et al.* Impact of the 2002 Canadian forest fires on particulate matter air quality in Baltimore City [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(1): 24-32.
- [12] Smolyakov B S, Makarov V I, Shinkorenko M P, *et al.* Effects of Siberian wildfires on the chemical composition and acidity of atmospheric aerosols of remote urban, rural and background territories [J]. *Environmental Pollution*, 2014, **188**: 8-16.
- [13] Wotawa G, Trainer M. The influence of Canadian forest fires on pollutant concentrations in the United States [J]. *Science*, 2000, **288**(5464): 324-328.
- [14] Youn D, Park R J, Jeong J I, *et al.* Impacts of aerosols on regional meteorology due to Siberian forest fires in May 2003 [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(7): 1407-1412.
- [15] Kortelainen M, Jokiniemi J, Nuutinen I, *et al.* Ash behaviour and emission formation in a small-scale reciprocating-grate combustion reactor operated with wood chips, reed canary grass and barley straw [J]. *Fuel*, 2015, **143**: 80-88.
- [16] Zhang H F, Wang S X, Hao J M, *et al.* Chemical and size characterization of particles emitted from the burning of coal and wood in rural households in Guizhou, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **51**: 94-99.
- [17] Vicente A, Alves C, Calvo A I, *et al.* Emission factors and detailed chemical composition of smoke particles from the 2010 wildfire season [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **71**: 295-303.
- [18] Alves C, Vicente A, Nunes T, *et al.* Summer 2009 wildfires in Portugal: emission of trace gases and aerosol composition [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(3): 641-649.
- [19] Vicente A, Alves C, Monteiro C, *et al.* Measurement of trace gases and organic compounds in the smoke plume from a wildfire in Penedono (central Portugal) [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(29): 5172-5182.
- [20] Balachandran S, Pachon J E, Lee S, *et al.* Particulate and gas sampling of prescribed fires in South Georgia, USA [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **81**: 125-135.
- [21] Zhang Y Y, Obrist D, Zielinska B, *et al.* Particulate emissions from different types of biomass burning [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **72**: 27-35.
- [22] Chen L W A, Verburg P, Shackelford A, *et al.* Moisture effects on carbon and nitrogen emission from burning of wild land biomass [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(14): 6617-6625.
- [23] Alves C, Gonçalves C, Fernandes A P, *et al.* Fireplace and woodstove fine particle emissions from combustion of western Mediterranean wood types [J]. *Atmospheric Research*, 2011, **101**(3): 692-700.
- [24] Shahid I, Kistler M, Mukhtar A, *et al.* Chemical composition of particles from traditional burning of Pakistani wood species [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **121**: 35-41.
- [25] Sen A, Mandal T K, Sharma S K, *et al.* Chemical properties of emission from biomass fuels used in the rural sector of the western region of India [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **99**: 411-424.
- [26] Yokelson R J, Crounse J D, DeCarlo P F, *et al.* Emissions from biomass burning in the Yucatan [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(15): 5785-5812.
- [27] Neary D G, Klopatek C C, DeBano L F, *et al.* Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis [J]. *Forest Ecology and Management*, 1999, **122**(1-2): 51-71.

CONTENTS

Scavenging Effect of Rime and East Wind on PM _{2.5} Under Air Heavy Pollution in Beijing	SUN Zhao-bin, LIAO Xiao-nong, WANG Zhan-shan, <i>et al.</i> (3679)
Impact of Collision Removal of Rainfall on Aerosol Particles of Different Sizes	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (3686)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of VOCs During the Haze Period in the Winter in Beijing	LIU Dan, XIE Qiang, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (3693)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Shoe-making Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, YAO Yi, CAI Wei-dan, <i>et al.</i> (3702)
Oxidative Capacity of the PM ₁₀ and PM _{2.5} in Beijing During 2014 APEC	GUO Qian, SHAO Long-yi, WANG Wen-hua, <i>et al.</i> (3708)
Concentration, Water-Soluble Ionic and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Composition and Sources of PM _{2.5} During Summer in Hongshan District, Wuhan	SUN Yan, QI Shi-hua, ZHANG Li, <i>et al.</i> (3714)
Statistical Characteristics of Urban Changzhou PM _{2.5} Based on <i>k</i> -means Analysis	WANG Zhen, YU Yi-jun, XU Pu-qing, <i>et al.</i> (3723)
Comparison Test Between On-line Monitoring of Water-soluble Ions and Filter-based Manual Methods for PM _{2.5}	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, SHI Ai-jun, <i>et al.</i> (3730)
Chemical Composition of Water-soluble Ions in Smoke Emitted from Tree Branch Combustion	LIU Gang, HUANG Ke, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (3737)
Number Concentration and Size Distribution of Particles Emitted by Light-duty Gasoline Vehicles	FAN Xiao-xiao, JIANG Jing-kun, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (3743)
Testbed-Based Exhaust Emission Factors for Marine Diesel Engines in China	XING Hui, DUAN Shu-lin, HUANG Lian-zhong, <i>et al.</i> (3750)
Distribution, Source and Human Exposure of Phthalic Acid Esters (PAEs) in Surface Dust in Urban Area of Xi'an City, China	ZHANG Wen-juan, WANG Li-jun, WANG Li, <i>et al.</i> (3758)
Mercury Emission Characteristics and Mercury Concentrations of Municipal Solid Waste in Waste Incineration Plants	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (3766)
Role of Sulfate-Reducing Bacteria in Mercury Methylation in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Rui, CHEN Hua, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3774)
Impact of Urbanization on the Sources of Dissolved <i>n</i> -alkane in Underground River	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (3781)
Source Apportionment and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water from Yangtze River, China; Based on PMF Model	WANG Cheng-long, ZOU Xin-qing, ZHAO Yi-fei, <i>et al.</i> (3789)
Hydro-chemical Characteristics and Quality Assessment of Surface Water in Gongga Mountain Region	HE Xiao-li, WU Yan-hong, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (3798)
UV-Visible Spectra Properties of DOM from Taizi River in Benxi City Section by Multivariable Analysis	QIAN Feng, WU Jie-yun, YU Hui-bin, <i>et al.</i> (3806)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter in Groundwater and Its Cause	HE Xiao-song, ZHANG Hui, HUANG Cai-hong, <i>et al.</i> (3813)
Sediment Characteristics of Sewer in Different Functional Areas of Kunming	CHANG Hai-dong, JIN Peng-kang, FU Bo-wen, <i>et al.</i> (3821)
Concentration of Phosphorus in Sediments Interstitial Water as Affected by Distribution of Aquatic Plants in Dianchi Lake	DING Shuai, WANG Sheng-rui, ZHANG Rui, <i>et al.</i> (3828)
Efficiency and Mechanism of Capping with Purple Parent Rocks to Control Phosphorus Release from Sediments	HUANG Xue-jiao, SHI Wen-hao, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (3835)
Temporal and Spatial Distribution of Phosphorus in Paddy Fields Under Cyclic Irrigation of Drainage Water	JIAO Ping-jin, XU Di, ZHU Jian-qiang, <i>et al.</i> (3842)
GO/QPEI Nanocomposite for Fast and High-capacity Removal of <i>M. Aeruginosa</i>	LI Jie, XIAO Lin (3850)
Enhanced Pollutant Removal Performance of an Integrated Biological Settling Tank from Micro-polluted Water Bodies	WANG Wen-dong, LIU Hui, MA Cui, <i>et al.</i> (3858)
Odorants Removal and Microbial Characteristics in Treatment of Micro-polluted Source Water with Biological Powdered Activated Carbon-Ultrafiltration Combined Process	XUAN Yong-qi, ZHOU Li, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (3864)
Effect of Polysilicic Acid on the Deposition Behavior of Different Aluminum Species	ZHAO Yuan-yuan, ZHANG Yue, LI Su-ying, <i>et al.</i> (3870)
Concentration Variation and Removal of Amino Acids in Typical Drinking Sources in the South of China	LIU Wei, CAI Guang-qiang, LU Xiao-yan, <i>et al.</i> (3877)
Degradation of the Nitrogenous Heterocyclic Compound Quinoline by O ₃ /UV	CHEN Ao-lei, CHANG Feng-min, WANG Cui-ping, <i>et al.</i> (3884)
Impact of Anthraquinone-2-sulfonic Acid on the MO Decolorization, Hydrogen Production and Energy Creation During Anaerobic Fermentation of <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 with Sucrose	HU Jin-mei, YU Lei, HUANG Tian-yin (3891)
Classification and Analysis of Dissolved Organic Matter in 2-Buternal Manufacture Wastewater	SUN Xiu-mei, SONG Guang-qing, XI Hong-bo, <i>et al.</i> (3899)
Concentration of Nitrate in Main Anoxic Stage and PHA, TP Metabolism for Nitrogen and Phosphorus Removal in Single Sludge System with Continuous Flow	WANG Xiao-ling, YUAN Dong-dan, BAI Li, <i>et al.</i> (3906)
Distribution Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Bacteria in Sediments from the Adjacent Seas of Yangtze Estuary	FU Lu-lu, ZHEN Yu, HE Hui, <i>et al.</i> (3914)
Bacterial Community Composition of Activated Sludge from Coking Wastewater	MENG Xiao-jun, LI Hai-bo, CAO Hong-bin, <i>et al.</i> (3923)
Soil Bacterial Communities Under Different Vegetation Types in the Loess Plateau	LIU Yang, HUANG Yi-mei, ZENG Quan-chao (3931)
Effects of Phenol on Activity and Microfauna Community Structure of Activated Sludge	HU Xiao-bing, RAO Qiang, TANG Su-lan, <i>et al.</i> (3939)
Comparative Investigation of Antibiotic Resistance Genes Between Wastewater and Landfill Leachate	HUANG Fu-yi, LI Hu, AN Xin-li, <i>et al.</i> (3949)
Performance and Influencing Factors of Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonium Process by the Strain <i>Desulfonitrospira</i> sp. CMX	XIE Bing-ke, ZHANG Yu, WANG Xiao-wei, <i>et al.</i> (3955)
Effect of Straw Incorporation and Domestic Sewage Irrigation on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	XU Shan-shan, HOU Peng-fu, FAN Li-hui, <i>et al.</i> (3963)
Seasonal Effect of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Respiration and Soil Enzyme Activity in Masson Pine Forest in Mt. Jinyun, Chongqing, China	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Biochar Amendment and Irrigation on Denitrification Losses in Greenhouse Tomato Fields	ZHANG Wen-juan, SHE Dong-li, Gamareldawla H. D. Agbna, <i>et al.</i> (3979)
Effects of Soil Texture on Autotrophic CO ₂ Fixation Bacterial Communities and Their CO ₂ Assimilation Contents	WANG Qun-yan, WU Xiao-hong, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3987)
Simulation of the Absorption, Migration and Accumulation Process of Heavy Metal Elements in Soil-crop System	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (3996)
Synergetic Control of Bioavailability of Pb, Cd and As in the Rice Paddy System by Combined Amendments	WANG Ying-jie, ZOU Jia-ling, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (4004)
Effects of Different Organic Materials on Bio-availability of Cd, Pb in a Contaminated Greenhouse Soil	ZHOU Gui-yu, JIANG Hui-min, YANG Jun-cheng, <i>et al.</i> (4011)
Effect of Montmorillonite on Fractions and Availability of Phosphorus in Soils Applied with Organic Fertilizer	SONG Xian-wei, ZHAO Xiu-lan, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4020)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Uptake by Chinese Cabbage at Different Soil pH and Cadmium Levels	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4030)
Characterization of Cr Tolerance and Accumulation in <i>Lolium perenne</i> L. and <i>Pharbitis purpurea</i> (L.) Voigt	DONG Bing-bing, CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, <i>et al.</i> (4044)
<i>In vitro</i> Metabolism of Volatile Methyl Siloxanes	LI Min-dan, ZHENG Guo-mao, WAN Yi, <i>et al.</i> (4054)
Efficiency of Aerobic Co-composting of Urban Sludge and Chinese Medicinal Herbal Residues	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, RUAN Qi-hua, <i>et al.</i> (4062)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 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)

2016年10月15日 第37卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 10 Oct. 15, 2016

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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