

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第32卷 第12期

Vol.32 No.12

2011

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目 次

序	郝郑平 (3461)
我国工业 VOCs 减排控制与管理对策研究	王海林, 张国宁, 聂磊, 王宇飞, 郝郑平 (3462)
我国 VOC 类有毒空气污染物优先控制对策探讨	陈颖, 李丽娜, 杨常青, 郝郑平, 孙汉坤, 李瑶 (3469)
工业固定源 VOCs 治理技术分析评估	栾志强, 郝郑平, 王喜芹 (3476)
工业挥发性有机物排放控制的有效途径研究	江梅, 张国宁, 魏玉霞, 邹兰, 张明慧 (3487)
台湾地区 VOCs 污染控制法规、政策和标准	栾志强, 王喜芹, 郑雅楠, 刘平 (3491)
国外固定源 VOCs 排放控制法规与标准研究	张国宁, 郝郑平, 江梅, 王海林 (3501)
挥发性有机物税收政策对我国经济的影响分析	刘昌新, 王宇飞, 王海林, 郝郑平, 王铮 (3509)
民用生物质燃烧挥发性有机化合物排放特征	李兴华, 王书肖, 郝吉明 (3515)
北京及周边地区大气羰基化合物的时空分布特征初探	王琴, 邵敏, 魏强, 陈文泰, 陆思华, 赵越 (3522)
北京市 BTEX 的污染现状及变化规律分析	孙杰, 王跃思, 吴方堃 (3531)
上海城区典型污染过程 VOCs 特征及臭氧潜势分析	崔虎雄, 吴迺名, 高松, 段玉森, 王东方, 张懿华, 伏晴艳 (3537)
长沙大气中 VOCs 研究	刘全, 王跃思, 吴方堃, 孙杰 (3543)
佛山灰霾期挥发性有机物的污染特征	马永亮, 谭吉华, 贺克斌, 程远, 杨复沫, 余永昌, 谭赞华, 王洁文 (3549)
深圳市显著排放 VOCs 的园林植物调查与分析	 黄爱葵, 李楠, Alex Guenther, Jim Greenberg, Brad Baker, Michael Graessli, 白建辉 (3555)
北京地区城乡结合部大气挥发性有机物污染及来源分析	周裕敏, 郝郑平, 王海林 (3560)
北京城乡结合部空气中挥发性有机物健康风险评价	周裕敏, 郝郑平, 王海林 (3566)
城市污水处理厂恶臭挥发性羰基化合物的排放特征	周咪, 王伯光, 赵德骏, 张春林, 古颖纲 (3571)
城市污水处理厂挥发性卤代有机物的排放特征及影响因素研究	何洁, 王伯光, 刘舒乐, 赵德骏, 唐小东, 邹宇 (3577)
城市污水处理厂恶臭挥发性有机物的感官定量评价研究	刘舒乐, 王伯光, 何洁, 唐小东, 赵德骏, 郭薇 (3582)
植物释放挥发性有机物 (BVOC) 向二次有机气溶胶 (SOA) 转化机制研究	李莹莹, 李想, 陈建民 (3588)
NO ₃ 自由基与 3 种环醚的大气化学反应动力学研究	盖艳波, 葛茂发, 王炜罡 (3593)
3-甲基-3-丁烯基-1-醇与硫酸/过氧化氢混合溶液的吸收反应研究	王天鹤, 刘泽, 葛茂发, 王炜罡 (3599)
水中挥发性有机物的分析方法综评	许秀艳, 朱擎, 谭丽, 梁宵, 张颖, 滕思江 (3606)
新型动态针捕集阱技术分析大气中低浓度的 VOCs	李想, 陈建民 (3613)
大气中总挥发性有机硫化物检测方法的研究	王艳君, 郑晓玲, 何鹰, 张栋, 王保栋 (3617)
全自动阵列离子迁移谱仪连续监测挥发性有机化合物	 周庆华, 仓怀文, 鞠帮玉, 李林, 杜永斋, 陈创, 侯可勇, 李京华, 王卫国, 李海洋 (3623)
膜进样-单光子电离/化学电离-质谱仪在线检测水中 VOCs	 花磊, 吴庆浩, 侯可勇, 崔华鹏, 陈平, 赵无垠, 谢园园, 李海洋 (3628)
工业园区 TVOC 和恶臭的电子鼻检测技术研究	田秀英, 蔡强, 叶朝霞, 郭威, 卢岩文, 张永明 (3635)
电子鼻检测污染土壤中挥发性氯代烃的适用性研究	卜凡阳, 文晓刚, 万梅, 刘锐, 蔡强, 陈吕军, 张永明 (3641)
工业管道中丙烯酸酯类物质的监测与分析	吴彬, 张红燕, 陆林光 (3647)
硅改性制备疏水性沸石分子筛蜂窝体	王喜芹, 李凯, 魏冰, 栾志强 (3653)
氧化锰八面体分子筛的合成及其对苯催化氧化性能	李东艳, 刘海弟, 陈运法 (3657)
蜂窝状活性炭对 VOCs 的吸-脱附性能研究	韩忠娟, 罗福坤, 李泽清 (3662)
混合气体直接吸附分离回收过程研究	王红玉, 羌宁, 胡瑕 (3667)
生物滴滤降解氯苯废气的实验研究	周卿伟, 朱润晔, 胡俊, 张丽丽, 陈建孟 (3673)
复合吸收技术净化复杂工业有机废气	陈定盛, 岑超平, 唐志雄, 方平, 陈志航 (3680)
烘房 VOCs 废气治理技术路线探析	李泽清, 罗福坤 (3685)
Co ₃ O ₄ 纳米棒的制备及其对气相甲苯的催化氧化	闫清云, 李新勇, 肇启东, 曲振平 (3689)
Si 掺杂 TiO ₂ 纳米管阵列制备、表征及其光催化氧化降解室内典型 VOCs	邹学军, 李新勇, 曲振平, 王疆疆 (3694)
基于现场试验的石油类污染物自然衰减能力研究	贾慧, 武晓峰, 胡黎明, 刘培斌 (3699)
膜分离法处理加油站油气研究	朱玲, 陈家庆, 张宝生, 王建宏 (3704)
机动车加油过程中气液两相流动特性的 CFD 数值模拟	陈家庆, 张男, 王金惠, 朱玲, 尚超 (3710)
《环境科学》第 32 卷 (2011 年) 总目录	(3717)
《环境科学》征稿简则 (3679) 《环境科学》征订启事 (3684) 信息 (3554, 3616, 3622, 3672)	

民用生物质燃烧挥发性有机化合物排放特征

李兴华^{1,2}, 王书肖^{2*}, 郝吉明²

(1. 北京航空航天大学化学与环境学院, 北京 100191; 2. 清华大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点实验室, 北京 100084)

摘要:民用生物质燃烧是我国人为源挥发性有机物(VOCs)排放的主要来源. 采用罐采样-GC/MS 和 DNPH 衍生-HPLC 这 2 种方法联用采集和分析了 5 种主要民用生物质燃烧排放烟气中的 VOCs 组分, 并利用碳平衡法确定其排放系数. 研究表明, 秸秆和木柴等民用生物质燃烧总的 VOCs 排放系数分别为 $(4.37 \pm 2.23) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(2.12 \pm 0.77) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 秸秆燃烧排放高于木柴燃烧排放; 民用生物质燃烧排放 VOCs 中, 最为丰富的物种为芳香烃和醛类, 含量均在 25% 以上; 秸秆和木柴燃烧除卤代烃和腈类含量差异较大外, 其余物种分布比较类似; 秸秆和木柴燃烧 VOCs 排放总的臭氧生成潜势分别为 $(16.9 \pm 8.2) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(10.8 \pm 4.9) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 臭氧生成潜势比较高的物种依次为: 醛类、芳香烃和烯烃/炔烃, 其中醛类贡献基本在 50% 以上.

关键词:生物质燃烧; 挥发性有机化合物; 排放系数; 物种分布; 臭氧生成潜势

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)12-3515-07

Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emitted from Biofuel Combustion in China

LI Xing-hua^{1,2}, WANG Shu-xiao², HAO Ji-ming²

(1. School of Chemistry and Environment, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Biofuel combustion is an important source of VOCs in China. Measurements were conducted to determine the characteristics of VOCs emitted from combustion of 5 typical biofuels. A carbon mass balance method was used to determine VOCs emission factors. The emission factors of the total VOCs from agricultural residues and wood combustion are $(4.37 \pm 2.23) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $(2.12 \pm 0.77) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. The emission factors of the agricultural residues are higher than those of the wood. Aromatics and aldehydes dominate the VOC emissions, both accounting for over 25% of the total VOC emissions. Distribution of VOC components from agricultural residues and wood combustion are similar, except for halogenated hydrocarbons and nitriles. On the basis of measured emission factors and the published maximum incremental reactivity values for VOCs, the ozone forming potential (OFPs) of speciated VOCs is estimated. The results indicate that the average OFPs of the total VOCs from agricultural residues and wood combustion are $(16.9 \pm 8.2) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $(10.8 \pm 4.9) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. The components with the highest OFPs values are: aldehydes, aromatics and alkenes/alkynes. Aldehydes accounts for over 50% of the total OFPs.

Key words: biofuel combustion; VOCs; emission factors; distribution of VOC components; ozone forming potential (OFPs)

大气中的挥发性有机化合物(VOCs)是形成光化学氧化剂和二次有机气溶胶的主要前体物, 一些大气 VOCs 组分还会对人体健康造成危害^[1]. 民用生物质燃烧量大, 且燃烧设备简易、技术水平低下, 燃烧不充分, 排烟中含有大量的含碳颗粒物、一氧化碳、VOCs 等不完全燃烧产物, 是我国人为源 VOCs 排放的主要来源, 贡献达 18%^[2]; 但由于排放系数和生物质燃烧量等信息的可靠性和准确性差, 这一结果具有较大的不确定性^[3].

目前关于民用生物质燃烧 VOCs 的排放的研究较少. Zhang 等^[4]和 Tsai 等^[5]研究了我国家庭炉灶燃用薪柴、小麦秸秆和玉米秸秆等生物质的非甲烷碳氢化合物和羰基化合物排放, 未涉及水稻秸秆和高粱秆等使用量大的生物质燃料燃烧 VOCs 的排

放; 且在他们的研究中, 对每一种燃料的测试次数对于非甲烷碳氢化合物和羰基化合物排放分别仅有 1 次和 2 次, 不确定性大, 有必要对该数据予以补充和完善. Wang 等^[6]测试了我国民用生物质燃烧 VOCs 的排放, 采用不锈钢罐采集排放烟气, 利用气相色谱/质谱(GC/MS)分析包括羰基化合物在内的 VOCs, 由于大部分羰基化合物物种具有极性和反应活性, 在采样和分析过程中会降解或发生化学反应, 该方法会导致羰基化合物结果误差较大. 2, 4-二硝基苯肼(DNPH)衍生化及高效液相色谱(HPLC)分

收稿日期: 2011-06-08; 修订日期: 2011-07-04

基金项目: 环保公益性行业科研专项(201009001, 2011467003)

作者简介: 李兴华(1972~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为燃烧源大气污染物的形成、排放、影响与控制, E-mail: lixinghua@buaa.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: shxwang@tsinghua.edu.cn

析技术是应用最为广泛、发展成熟的测量大气中甲醛和其它羰基化合物的标准方法^[7]。

本研究选取我国农村应用普遍的秸秆和薪材等生物质燃料,采用罐采样-GC/MS 和 DNPH 衍生-HPLC 这 2 种方法联用采集和分析 VOCs,系统深入地研究我国民用生物质燃烧 VOCs 的排放特征,研究结果将有助于改善排放清单的不确定性。

1 材料与方法

1.1 生物质燃料和炉灶的选择

生物质燃料选取我国农村应用普遍的秸秆和木柴,秸秆选取我国 4 种主要的农作物秸秆,包括水稻秸秆、玉米秸秆、小麦秸秆和高粱秆燃料自然风干,将实验用的燃料取少量用密封袋密封带回实验室进行工业分析与元素分析。炉灶选取改良炉灶,设有烟囱和炉篦,为我国农村家庭典型炉灶。

1.2 实验燃烧过程模拟和实验过程描述

在农村日常的炊事过程中,生物质燃料在炉灶内的燃烧过程相当不稳定,导致炊事过程中烟气的排放也会变化,为了使测试具有一定的代表性,必须确定一个和实际的炊事过程类似的周期。本研究参考国际通用的“煮水法”并结合我国国家标准^[8,9],并作适当的调整,确定本研究的实验周期,包括大火和小火阶段,大火阶段指在尽可能短的时间内将一定量的水从常温加热至沸点,小火阶段则指用文火慢慢地煮将水温维持在沸点或稍低于沸点。

在正式进行每组炉灶和燃料组合实验之前,先开展预实验以熟悉实验过程和确定实验周期。预实验对主要的参数(主锅水达到沸点所需时间、热效率、实验周期)达到比较满意的结果(相对标准偏差 <20%)为止。

在整个实验过程中,请实验所在家庭农妇负责添加燃料,燃料形式、点火方式、燃料分次添加量均按照农村实际情况。实验过程中记录时间、水温、水的质量、燃料用量和剩余灰量等,并取少量灰样用密封袋密封带回实验室进行碳含量分析。

直接从烟囱中抽取少量烟气经自行研制的稀释采样系统稀释^[10],稀释倍数为约 30~60,高温烟气稀释至大气环境温度,稀释后的烟气在停留室的停留时间约 60~80 s,模拟固定燃烧源产生的高温烟气排放到大气中的冷却、稀释、凝结等物理化学过程。

采用 Tedlar 气袋为主体的采样系统捕集气体进行后续化学分析,采集经稀释系统稀释冷却后的气

体。整个采样系统按气流方向依次为过滤器、小型采样泵、流量计、20 L Tedlar 采样袋, Teflon 软管连接上述各部件。通过调节流量计,使样品气体在整个采样过程内充满 20 L Tedlar 采样袋。采样结束后,将 20 L Tedlar 采样袋内气体导入 2 个 1 L Tedlar 采样袋和 1 个 3 L 不锈钢罐。1 L Tedlar 采样袋送回实验室分析 CH₄、非甲烷碳氢化合物(NMHCs)、CO₂ 和 CO, 3 L 不锈钢罐(Entech, USA)用于分析 VOCs。Tedlar 采样袋采用美国杜邦公司生产的 Tedlar 膜材加工制作而成, Tedlar 膜材比 Teflon 材料渗透性更小,且与采集的气体化合物不发生化学反应。采样前使用高纯氮气作为清洗气体,将采样袋抽成真空,然后充入氮气,保持几分钟后再对其抽真空,重复上述步骤 3 次,最后一次抽真空后备用。不锈钢罐内壁经电抛光和硅烷化处理,以减少容器内壁表面活性区,保证罐内样品的稳定性和回收率,高活性的 NMHC 在罐内的衰减很低。采样前参照 US EPA TO-15 提供的方法清洗采样罐,使用高纯氮气作为清洗气体,将不锈钢罐抽成真空(内部压力 <40 Pa),然后充入氮气逐渐加压至 206 kPa,保持几分钟后再对其抽真空,重复上述步骤 3 次,最后一次抽真空时保证罐内压力低于 15 Pa 备用。

采用涂有 DNPH 的采样管(Waters, USA)捕集气体,气体中的羰基化合物与 DNPH 进行衍生反应,生成稳定产物。采用完毕后将采样管密封,放入冰箱保存待分析。整个采样系统按气流方向依次为过滤器、采样管、流量计、小型采样泵,采用 Teflon 软管连接上述各部件,实验过程中采样流量为 1 L·min⁻¹左右。

同时采用石英滤膜捕集颗粒物,用于分析颗粒物中有机碳(OC)和元素碳(EC)等含碳组分,采样滤膜的准备:事先将石英膜放置在 450℃ 的马弗炉烘烤 4 h,去除含碳成分。采集的石英滤膜样品包裹铝箔避光密封保存于保温箱中,保温箱内装有冰袋,运回实验室后立刻放入冰箱冷冻保存。

采样系统示意图如图 1 所示。

采样系统在现场安装完毕后,调试所有的仪器,待整个系统一切正常稳定后方可开始正式采样,严格按照仪器的操作规程进行操作。

采样过程中密切监视仪器的工作状态,如压力表、流量计和指示灯等,并做好记录,如出现故障,记录并作相应处理。

进行重复实验,对于每一种燃料,实验次数为 3~5 次。

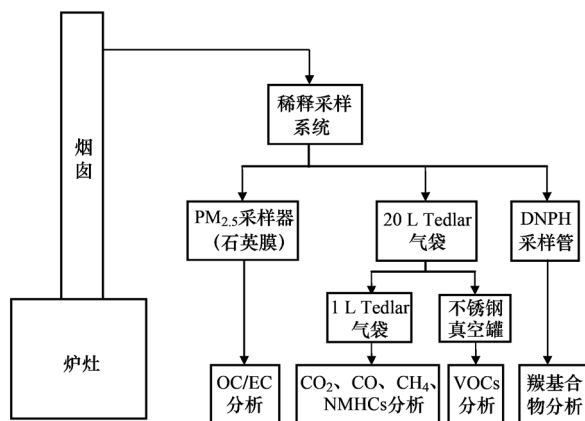


图1 采样系统示意

Fig. 1 Flow chart of the sampling system

实验前,按照上述采样方法采集净化后的稀释气体作为背景浓度值。

1.3 分析方法

采用气相色谱(HP 5890)装配氢火焰离子检测器(FID)检测 Tedlar 采样袋中的 CO_2 、 CO 、 CH_4 和 NMHCs 成分^[11]。气样中的 CO_2 和 CO 通过配备的镍触媒催化系统, 375℃ 时在氢气的作用下将转化成 CH_4 , 然后通过 FID 检测。气样中的 CH_4 直接由 FID 进行检测。NMHCs 的测定按照 HJ/T 38-1999 进行^[12]; 测定总烃的含量, 减去甲烷含量, 两者之差即为 NMHCs 含量; 同时以除烃空气求氧的空白值, 以扣除总烃色谱峰中的氧峰干扰。通过化合物的相对保留时间定性, 用峰面积外标法定量, 标准曲线由多个不同浓度级组成, 所有化合物标准曲线相关系数都超过了 0.996, 标样购自国家标准物质中心。

采用元素分析仪(Exeter Analytical Inc., Model CE-440)分析生物质和灰样中 C、H、N 元素。颗粒物中含碳组分采用碳分析仪(DRI, Model 2001)按照 IMPROVE TOR 方法测试^[13]。

不锈钢罐中的气体样品先通过预浓缩仪(Entech Instruments Inc., Model 7100), 在富集 VOCs 样品同时脱除其中的水和 CO_2 ; 随后解析后进入气相色谱-质谱联用仪器(Agilent Inc., Model 7890A/5975C)进行定性与定量分析。色谱柱为 HP-PONA 毛细管柱(50 m × 0.2 mm, ID × 0.5 μm)。GC 色谱柱的工作升温程序: -20℃, 保持 1 min; 以 5℃·min⁻¹ 速率升温至 0℃, 保持 1 min; 以 10℃·min⁻¹ 速率升温至 100℃; 以 5℃·min⁻¹ 速率升温至 150℃; 最后以 12℃·min⁻¹ 速率升温至 260℃。质谱仪(MS)工作参数设置如下: 离子源温度为 180℃, 扫描方式为全扫描, 扫描质量数范围为 30 ~ 260, 1

min 扫描次数 5.6。标准气体为美国环保署 TO-14 校准标气和 PAMS 校准标气(Spectra Gases Inc.); 本研究对标准气体进行 5 点标准曲线制作, 各种化合物标准曲线的线性相关系数均大于 0.99^[6]。

将 DNPH 吸附管上采集的样品用乙腈缓慢冲洗下来, 用于分析羰基化合物, 用 2 mL 容量瓶定量, 然后用 HPLC-UV 检测(PerkinElmer Series 200 UV/VIS Detector)。分析色谱柱为 Brownlee Column (Spheri-5-RP-18, 250 mm × 4.6 mm)。采用等度洗脱, 流动相为乙腈和水, 比例为 6:4, 流速为 1 mL·min⁻¹。UV 检测波长为 360 nm。样品进样量为 20 μL。通过化合物的相对保留时间定性, 用峰面积外标法定量, 标准曲线由 4 个不同浓度级组成, 所有化合物标准曲线相关系数都超过了 0.999, 13 种羰基化合物衍生物(甲醛、乙醛、丙酮、丙烯醛、丙醛、丁烯醛、2-丁酮、异-丁烯醛、丁醛、苯甲醛、戊醛、*m*-甲苯甲醛、己醛)标样购自 AccuStandard 公司。

1.4 VOCs 排放系数的确定

采用碳平衡法计算排放系数。碳平衡法计算方法见文献[14], 其基本原理是燃烧的碳的质量等于以气态和颗粒态排放的碳的质量^[14], 即:

$$C_f - C_a = C_{\text{CO}_2} + C_{\text{CO}} + C_{\text{CH}_4} + C_{\text{NMHCs}} + C_{\text{PM}} \quad (1)$$

式中 C_f 、 C_a 、 C_{CO_2} 、 C_{CO} 、 C_{CH_4} 、 C_{NMHCs} 和 C_{PM} 分别为生物质、灰样及 CO_2 、 CO 、 CH_4 、NMHCs 和颗粒物中碳的质量。为了得到排放气体的净浓度, 背景浓度必须予以扣除。通过式(1)可以推导出上述气态和颗粒态排放系数。VOCs 的排放系数则根据其 CO_2 浓度的比值予以确定。

本研究中 VOCs 的排放系数以燃用单位质量干基燃料的形式给出, 其单位分别是 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。干基燃料由燃料质量和燃料含湿量得来。

2 结果与分析

2.1 生物质燃料工业分析与元素分析

本研究选取的生物质燃料的工业分析与元素分析的结果如表 1。

本研究在冬季干燥季节进行, 燃料自然风干, 其水分均在 10% 以下; 木柴挥发份、碳含量、热值最高, 而灰分最低; 水稻秸秆则挥发份、碳含量、热值最低, 而灰分最高。

2.2 民用生物质燃烧 VOCs 排放系数

本研究定量分析出 61 种 VOCs, 并按照化学结构, 将 61 种 VOC 分为烷烃、烯烃/炔烃、卤代烃、芳香烃、醇类、腈类、酯类、醛类、酮类及其他, 共 10 类

表 1 生物质燃料工业分析和元素分析

Table 1 Analysis of biofuel compositions

项目	指标	水稻 秸秆	玉米 秸秆	小麦 秸秆	高粱秆	木柴	项目	指标	水稻 秸秆	玉米 秸秆	小麦 秸秆	高粱秆	木柴
工业分析 (收到基) /%	水分(M_{ar})	7.53	6.39	5.39	5.50	6.23	元素分析 (收到基) /%	C	39.35	42.56	42.83	46.34	46.99
	挥发份(V_{ar})	65.44	70.81	67.64	76.96	77.08		H	5.10	5.58	5.45	5.78	5.79
	固定碳(FC_{ar})	15.96	17.94	18.34	14.89	15.07		N	0.79	1.07	0.53	0.50	0.50
	灰分(A_{ar})	11.07	4.87	8.62	2.65	1.62		$Q_d^{1)}/MJ\cdot kg^{-1}$	13.82	15.16	15.48	16.77	16.97

1) 低位热值

物种;其中醛类、酮类化合物采用 DNPH 衍生法采样和 HPLC 进行分析,共定量分析出 12 种羰基化合物,异丙烯醛和正丁醛的结果合并给出;其余 8 类物种采用罐采样和 GC/MS 分析,共定量分析出 49 种化合物,其中间二甲苯和对二甲苯合并给出.表 2 给出了民用生物质燃烧 61 种 VOCs 及分类物种的排放系数结果.

测试的 4 种秸秆平均总的 VOCs 排放系数为 $(4.37 \pm 2.23) g\cdot kg^{-1}$,木柴总的 VOCs 排放系数为 $(2.12 \pm 0.77) g\cdot kg^{-1}$,总的来讲,前者要大于后者,这可能燃料结构差异有关,木柴类燃料结构密实,虽其挥发份含量高,但析出速度慢,析出的挥发份易于在炉内完全燃烧,导致 VOCs 排放相对偏低.Wang 等^[6]测试我国几种民用生物质燃烧排放的 VOCs 在 $0.18 \sim 26.57 g\cdot kg^{-1}$ 范围,其结果波动范围相差 2 个数量级,本研究结果在上述范围内;Wang 等^[6]除观测到 VOC 排放系数受到燃料类型影响外,还与炉灶类型和测试季节因素相关.

Zhang 等^[4]测试获得我国家庭炉灶 2 种秸秆(小麦秸秆和玉米秸秆)和木柴燃烧 16 种羰基化合物的平均排放系数分别为 $0.40 g\cdot kg^{-1}$ 和 $0.53 g\cdot kg^{-1}$;本研究的结果分别为 $1.56 g\cdot kg^{-1}$ 和 $1.15 g\cdot kg^{-1}$,高于上述结果.

Tsai 等^[5]测试获得我国家庭炉灶 2 种秸秆(小麦秸秆和玉米秸秆)和木柴燃烧 54 种非甲烷碳烃化合物的平均排放系数分别为 $0.73 \sim 2.28 g\cdot kg^{-1}$ 和 $1.36 \sim 2.21 g\cdot kg^{-1}$;本研究的结果分别为 $1.20 \sim 4.52 g\cdot kg^{-1}$ 和 $0.41 \sim 0.90 g\cdot kg^{-1}$,两者结果相比,秸秆排放数据比较接近,木柴排放数据本研究要低于以前的研究.

氯甲烷、乙腈是生物质燃烧排放的标识性 VOC 物种,本研究中各种生物质燃料燃烧排放烟气中均检测到一定量的氯甲烷、乙腈;其中以小麦秸秆燃烧氯甲烷排放系数最高,木柴燃烧氯甲烷排放系数最低;木柴燃烧乙腈排放系数则明显高于秸秆燃烧.

表 2 民用生物质燃烧 VOCs 排放系数/ $mg\cdot kg^{-1}$

Table 2 EFs of VOCs from biofuel combustion/ $mg\cdot kg^{-1}$

序号	物种	水稻秸秆	玉米秸秆	小麦秸秆	高粱秆	木柴
	烷烃	$39.8 \pm 28.7^{1)}$	27.5 ± 13.9	78.4 ± 90.3	136.6 ± 227.5	64.6 ± 44.5
1	丁烷	2.9 ± 2.7	3.0 ± 3.4	16.7 ± 21.6	5.7 ± 11.6	8.0 ± 5.4
2	戊烷	4.0 ± 1.3	3.1 ± 2.1	1.6 ± 3.2	15.3 ± 31.0	9.2 ± 5.7
3	己烷	2.1 ± 0.9	3.2 ± 3.3	6.4 ± 6.6	87.4 ± 192.6	6.8 ± 2.2
4	1-庚烷	5.5 ± 7.7	3.2 ± 0.7	8.1 ± 7.8	0.8 ± 0.8	3.0 ± 2.3
5	庚烷	23.2 ± 14.6	12.6 ± 11.6	43.9 ± 56.4	19.3 ± 24.7	32.3 ± 32.5
6	辛烷	1.5 ± 2.6	1.6 ± 1.3	1.2 ± 0.9	3.3 ± 3.7	2.8 ± 2.1
7	十二烷	0.6 ± 0.8	0.8 ± 0.9	0.6 ± 0.5	4.8 ± 9.3	2.5 ± 3.0
	烯烃/炔烃	206.6 ± 153.2	112 ± 36.5	669.1 ± 641.7	94.1 ± 49.7	115.4 ± 41.6
8	丙炔	8.8 ± 4.0	4.8 ± 1.7	30.3 ± 25.1	5.8 ± 4.3	3.3 ± 1.0
9	1-丁烯	83.1 ± 85	47.3 ± 9.8	209 ± 224	23.1 ± 10.7	37.4 ± 9.1
10	1,3-丁二烯	11.2 ± 8.9	11.5 ± 4.5	82 ± 72.7	9.8 ± 9.2	7.8 ± 3.6
11	丁烯炔	6.8 ± 4.7	3.7 ± 2.4	24 ± 19.2	3.8 ± 4.4	1.6 ± 1.6
12	反-2-丁烯	15.3 ± 15.3	9.6 ± 1.6	39.4 ± 39.1	9.0 ± 6.6	11.6 ± 2.8
13	顺-2-丁烯	5.9 ± 5.9	4.6 ± 4.3	7.0 ± 7.0	6.8 ± 3.4	2.3 ± 1.3
14	1,2-丁二烯	1.8 ± 2.0	0.1 ± 0.3	7.6 ± 6.4	0.2 ± 0.4	1.5 ± 2.4
15	正戊烯	15.7 ± 14.5	8.8 ± 8.4	30.1 ± 37.2	3.2 ± 4.9	3.4 ± 4.5
16	异戊二烯	12 ± 13	3.4 ± 2.5	67.8 ± 67.2	3.1 ± 1.7	10.8 ± 2.8
17	反-2-戊烯	5.0 ± 5.0	1.0 ± 1.6	31.1 ± 31	7.4 ± 10.2	11.6 ± 5.3
18	1,3-环戊二烯	12.3 ± 14.4	6.3 ± 6.1	108 ± 82.4	17.1 ± 17.1	11.9 ± 7.2

续表 2

序号	物种	水稻秸秆	玉米秸秆	小麦秸秆	高粱秆	木柴
19	环戊烯	3.3 ± 2.3	2.0 ± 1.3	5.6 ± 4.8	0.9 ± 0.6	1.3 ± 1.0
20	正己烯	21.6 ± 29.6	8.8 ± 6.5	22.3 ± 20.9	3.9 ± 3.1	7.9 ± 6.3
21	1-辛烯	3.6 ± 5.1	0.9 ± 1.3	5.0 ± 6.5	ND ²⁾	2.8 ± 2.6
	卤代烃	174.3 ± 61.3	267 ± 61.1	645.6 ± 596.6	133 ± 73.8	55.8 ± 11.7
22	氯甲烷	162 ± 60.5	234.1 ± 50.9	627.8 ± 609.8	110 ± 61.5	44.2 ± 11.5
23	氯乙烯	8.3 ± 14.4	12.8 ± 17.9	9.3 ± 10.8	8.4 ± 6.3	ND
24	二氯甲烷	4.0 ± 2.8	20.1 ± 32.4	8.5 ± 10.3	14.6 ± 14.5	11.6 ± 4.6
	芳香烃	1 607 ± 830	1 058 ± 513	3 774 ± 1 812	1 344 ± 820	547 ± 136
25	苯	1 093 ± 556	783 ± 353	2 576 ± 1 235	895 ± 525	276 ± 98.6
26	甲苯	198.8 ± 151.7	120.8 ± 51.1	566.7 ± 328.4	153 ± 111.9	86.7 ± 42.5
27	乙苯	16.1 ± 17.7	10.5 ± 11	63.9 ± 40.8	17.5 ± 24.2	11.7 ± 6.2
28	间、对二甲苯	46.4 ± 49	10.2 ± 10.9	46.5 ± 21.5	36.6 ± 38.1	11.6 ± 7.8
29	苯乙烯	73.5 ± 26	56 ± 41	279.9 ± 54.5	68.8 ± 79.1	24.6 ± 6.3
30	邻二甲苯	112.3 ± 49.7	14 ± 28.9	108 ± 154.4	47.2 ± 96.2	47.8 ± 32.3
31	正丙苯	1.6 ± 2.0	2.1 ± 2.9	3.8 ± 1.2	5.1 ± 10.5	3.0 ± 1.9
32	间乙基甲苯	3.1 ± 5.4	5.9 ± 7.6	2.7 ± 5.5	8.0 ± 17.8	5.7 ± 1.5
33	对乙基甲苯	ND	1.9 ± 2.6	2.0 ± 0.6	3.9 ± 8.1	1.6 ± 1.3
34	1, 3, 5-三甲苯	2.1 ± 2.1	3.6 ± 5.1	6.1 ± 3.0	3.9 ± 6.7	4.7 ± 2.1
35	邻乙基甲苯	0.8 ± 1.1	1.9 ± 2.1	2.2 ± 1.2	3.4 ± 7.0	1.8 ± 1.4
36	1, 2, 4-三甲苯	1.5 ± 2.7	8.9 ± 9.8	13.6 ± 4.3	11.5 ± 21.6	10.5 ± 4.2
37	1, 2, 3-三甲苯	17.3 ± 23.7	6.5 ± 8.9	14.1 ± 4.6	10.5 ± 16.9	11.8 ± 4.3
38	茚	12.6 ± 14.2	6.9 ± 9.7	52.3 ± 7.2	20 ± 28	14 ± 4.3
39	蔡	27.5 ± 11.6	26.4 ± 28	36.4 ± 25.8	60.8 ± 68.3	35 ± 27.1
	醇类	129.3 ± 138.3	48.6 ± 70.9	16.3 ± 8	266 ± 474.5	52.4 ± 77.8
40	乙醇	129.3 ± 138.3	48.6 ± 70.9	16.3 ± 8	266 ± 474.5	52.4 ± 77.8
	腈类	22.9 ± 1.8	18.1 ± 6.4	61.4 ± 12.1	16.6 ± 14.1	85.5 ± 171.7
41	乙腈	11.3 ± 4.9	7.5 ± 4.7	26.7 ± 10.2	5.8 ± 8.5	80.6 ± 174.3
42	2-丙烯腈	5.3 ± 4.4	6.6 ± 4.9	19 ± 12.5	2.9 ± 3.6	0.2 ± 0.5
43	氰苯	6.3 ± 5.9	4.1 ± 5.9	15.6 ± 10.5	7.9 ± 8.1	4.7 ± 6.4
	酯类	6.3 ± 7.6	15.3 ± 7.5	70.8 ± 93.7	7.1 ± 2.5	14.1 ± 12.5
44	乙酸甲酯	5.6 ± 8.2	10.7 ± 3.6	68.6 ± 95.6	3.0 ± 2.3	11 ± 10.5
45	乙酸丁酯	0.7 ± 1.2	4.6 ± 4.3	2.2 ± 2.8	4.1 ± 4	3.2 ± 3.1
	醛类	1 693 ± 1 774	817 ± 432	1 950 ± 999	1 186 ± 697	1 064 ± 592
46	甲醛	616.1 ± 556.5	153.8 ± 216.3	393.2 ± 301.2	518.8 ± 226.1	378.6 ± 148.4
47	乙醛	586.7 ± 667.3	331 ± 347.7	955 ± 947.6	316.7 ± 241.3	290.5 ± 181.8
48	丙醛	146.7 ± 156	104.5 ± 124.3	187.5 ± 158	44 ± 45.4	73.4 ± 56.5
49	巴豆醛	69.5 ± 93.8	41.4 ± 29.4	44.4 ± 35.5	35 ± 48.8	53.9 ± 39.6
50	异丁烯醛 + 正丁醛	133.4 ± 159.8	42.9 ± 38.7	138.7 ± 101	65.8 ± 58.1	77.7 ± 64.6
51	苯甲醛	104.8 ± 110.8	60 ± 43.8	85.8 ± 42.1	105.8 ± 91.9	55.4 ± 30.9
52	戊醛	4.6 ± 5.3	46.5 ± 36.5	73.4 ± 77.6	54.8 ± 56.7	61 ± 55.6
53	间-甲苯甲醛	5.1 ± 5.0	22.5 ± 27	10 ± 10.7	15.6 ± 22.9	4.4 ± 7.3
54	己醛	25.8 ± 34	13.8 ± 19.9	62.3 ± 34.9	29 ± 13.2	69 ± 43.8
	酮类	167.3 ± 205.3	130.2 ± 166.9	212.4 ± 172.8	93.4 ± 104.1	81.8 ± 51.5
55	丙酮	137 ± 169.7	116 ± 152.4	177.1 ± 151.7	85 ± 102	70.1 ± 49.6
56	2-丁酮	30.3 ± 35.5	14.2 ± 15	35.3 ± 24.1	8.4 ± 7.1	11.7 ± 5.1
	其他	32.9 ± 21.3	36.4 ± 8.1	97.9 ± 49	24.1 ± 21	37.8 ± 12.1
57	呋喃	11.4 ± 16.3	14 ± 3.4	32.8 ± 29.6	6.9 ± 3.4	13 ± 7.9
58	2-甲基呋喃	3.5 ± 1.9	9.7 ± 2.9	18.1 ± 17.8	3.5 ± 3.7	13.9 ± 6.1
59	苯并呋喃	18 ± 7.4	12.6 ± 6.3	47 ± 6.6	13.7 ± 15.2	10.9 ± 2.8
	合计	4 079 ± 2 951	2 530 ± 1 094	7 576 ± 4 344	3 300 ± 2 048	2 118 ± 765

1) 结果表示为平均值 ± 标准偏差; 2) 未检出或低于背景值

2.3 VOCs 组分排放分布

将每一种生物质燃料排放的各类 VOC 物种的排放系数除以总的 VOC 排放系数,归一化得到各物种的质量分数,得到各物种的分布关系,如图 2 所示. 生物质燃烧排放最为丰富的物种为芳香烃和醛类,含量均在 25% 以上. 由于本研究只采用质谱检测,未能检测到 C2~C3 的烷烃和烯烃,可能使得烷烃和烯烃的排放比例偏低. 秸秆和木柴燃烧除卤代烃和腈类含量差异较大外,其余物种分布比较类似.

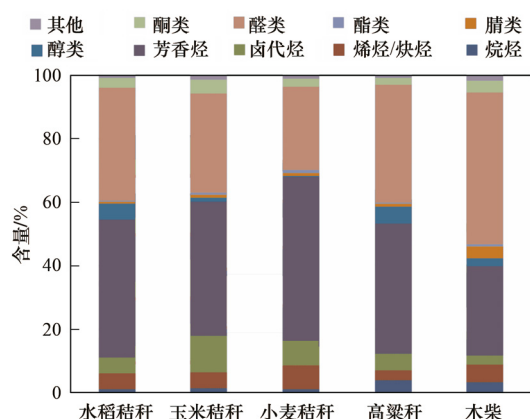


图 2 民用生物质燃烧 VOCs 排放物种分布

Fig. 2 Distribution of VOCs components emitted from biofuel combustion

秸秆和木柴燃烧排放的醛酮类化合物中含量最为丰富的物种为甲醛、乙醛、两者含量均占醛酮类化合物 20% 以上,且薪材和秸秆燃烧排放的醛酮类化合物的分布比较类似.

秸秆和木柴燃烧排放的芳香烃类化合物中含量最为丰富的物种为苯和甲苯,其中苯的含量占芳香烃类化合物多在 50% 以上;苯与甲苯的比值(B/T)经常用来指示 VOC 的来源. 高的 B/T 值(>1)可能是来源于生物质燃料燃烧、木炭或煤燃烧. 在本研究中, B/T 值为 5.9 ± 1.8 .

2.4 民用生物质燃烧 VOCs 排放的臭氧生成潜势分析

为了评价民用生物质燃烧排放的 VOCs 的化学活性,生成臭氧的潜势,采用增量反应活性指标加以评价^[15]. 单个 VOC 物种的臭氧生成潜势(OFP)按下式计算:

$$\text{OPT}(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}) = \text{MIR} \times \text{EF} \quad (2)$$

式中, OPT 表示单位生物质燃烧生成 O₃ 的量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), MIR 为单个 VOC 物种的最大增量反应活性 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), EF 为单个 VOC 物种的排放系数

($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$). 总的臭氧生成潜势等于各 VOC 物种的臭氧生成潜势之和.

MIR 取自 Carter 给出的数据库,对于数据库中没物种,取相类似物种的 MIR 值^[16].

秸秆和木柴燃烧 VOCs 排放总的臭氧生成潜势(以 O₃ 计)分别为 $(16.9 \pm 8.2) \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(10.8 \pm 4.9) \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 臭氧生成潜势比较高的物种依次为: 醛类、芳香烃和烯烃/炔烃,其中醛类贡献基本在 50% 以上. 秸秆燃烧排放 VOCs 中,臭氧生成潜势高的单个化合物依次为: 甲醛、乙醛、苯、甲苯和丙醛; 木柴燃烧排放 VOCs 中,臭氧生成潜势高的单个化合物依次为: 甲醛、丙醛、巴豆醛和异丁烯醛 + 正丁醛.

3 结论

(1) 秸秆和木柴等民用生物质燃烧总的 VOCs 排放系数分别为 $(4.37 \pm 2.23) \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $(2.12 \pm 0.77) \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 秸秆燃烧排放高于木柴燃烧排放; 各种生物质燃料燃烧排放烟气中均检测到一定量的氯甲烷、乙腈等生物质燃烧排放的标识性 VOC 物种.

(2) 民用生物质燃烧排放 VOCs 中,最为丰富的物种为芳香烃和醛类,含量均在 25% 以上; 秸秆和木柴燃烧除卤代烃和腈类含量差异较大外,其余物种分布比较类似.

(3) 秸秆和木柴燃烧 VOCs 排放总的臭氧生成潜势(以 O₃ 计)分别为 $(16.9 \pm 8.2) \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(10.8 \pm 4.9) \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 臭氧生成潜势比较高的物种依次为: 醛类、芳香烃和烯烃/炔烃,其中醛类贡献基本在 50% 以上.

参考文献:

- [1] 唐孝炎, 张远航, 邵敏. 大气环境化学[M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2006. 70-79.
- [2] Wei W, Wang S X, Chatani S, *et al.* Emission and speciation of non-methane volatile organic compounds from anthropogenic sources in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42** (20): 4976-4988.
- [3] 魏巍, 王书肖, 郝吉明. 中国人为源 VOC 排放清单不确定性研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(2): 305-312.
- [4] Zhang J F, Smith K R. Emissions of carbonyl compounds from various cookstoves in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, **33**(14): 2311-2320.
- [5] Tsai S M, Zhang J F, Smith K R, *et al.* Characterization of non-methane hydrocarbons emitted from various cookstoves used in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37** (13): 2869-2877.
- [6] 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.
- [7] 李晓华, 陆思华, 邵敏. 大气中含氧挥发性有机物(OVOCs)的测量技术[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2006, **42**(4): 548-554.
- [8] VITA (Volunteers in Technical Assistance, Inc.). Testing the efficiency of wood-burning cookstoves; International Standards [S]. Arlington, VA, USA. 1985.
- [9] GB 4363-84, 民用柴炉、柴灶热性能测试方法[S].
- [10] 李兴华, 段雷, 易红宏, 等. 固定燃烧源颗粒物稀释采样系统的研制与应用[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(3): 458-463.
- [11] 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.
- [12] 国家环境保护总局. HJ/T 38-1999 固定污染源排气中非甲烷总烃的测定——气相色谱法[S]. 1999.
- [13] Chow J C, Watson J G, Pritchett L C, *et al.* The DRI thermal/optical reflectance carbon analysis system: description, evaluation and application in U. S. air quality studies [J]. *Atmospheric Environment*, 1993, **27**(8):1185-1201.
- [14] Zhang J, Smith K R, Ma Y, *et al.* Greenhouse gases and other airborne pollutants from household stove in China: a database for emission factors[J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(26): 4537-4549.
- [15] Carter W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds [J]. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 1994, **44**:881-899.
- [16] Carter W P L. VOC reactivity data [EB/OL]. <http://www.engr.ucr.edu/~carter/reactdat.htm#data>, 2003-02-05.

CONTENTS

Preface	HAO Zheng-ping(3461)
Study on Control and Management for Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) in China	
.....	WANG Hai-lin, ZHANG Guo-ning, NEI Lei, <i>et al.</i> (3462)
Countermeasures for Priority Control of Toxic VOC Pollution	CHEN Ying, LI Li-na, YANG Chang-qing, <i>et al.</i> (3469)
Evaluation of Treatment Technology of Volatile Organic Compounds for Fixed Industrial Resources	LUAN Zhi-qiang, HAO Zheng-ping, WANG Xi-qin(3476)
Emission Control Way of Volatile Organic Compounds in Industry	JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, WEI Yu-xia, <i>et al.</i> (3487)
Regulations and Policies for Control of Volatile Organic Compounds and the Emission Standards in Taiwan	
.....	LUAN Zhi-qiang, WANG Xi-qin, ZHENG Ya-nan, <i>et al.</i> (3491)
Study on Foreign Regulations and Standards of Stationary Sources VOCs Emission Control	ZHANG Guo-ning, HAO Zheng-ping, JIANG Mei, <i>et al.</i> (3501)
VOCs Tax Policy on China's Economy Development	LIU Chang-xin, WANG Yu-fei, WANG Hai-lin, <i>et al.</i> (3509)
Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emitted from Biofuel Combustion in China	LI Xing-hua, WANG Shu-xiao, HAO Ji-ming(3515)
Spatial and Temporal Variations of Ambient Carbonyl Compounds in Beijing and Its Surrounding Areas	
.....	WANG Qin, SHAO Min, WEI Qiang, <i>et al.</i> (3522)
Analysis on Status Pollution and Variation of BTEX in Beijing	SUN Jie, WANG Yue-si, WU Fang-kun(3531)
Characteristics of Ambient VOCs and Their Role in O ₃ Formation; A Typical Air Pollution Episode in Shanghai Urban Area	
.....	CUI Hu-xiong, WU Ya-ming, GAO Song, <i>et al.</i> (3537)
Observation and Study on Atmospheric VOCs in Changsha City	LIU Quan, WANG Yue-si, WU Fang-kun, <i>et al.</i> (3543)
Characteristics of Volatile Organic Compounds During Haze Episode in Foshan City	
.....	MA Yong-liang, TAN Ji-hua, HE Ke-bin, <i>et al.</i> (3549)
Investigation on Emission Properties of Biogenic VOCs of Landscape Plants in Shenzhen	
.....	HUANG Ai-kui, LI Nan, Alex Guenther, <i>et al.</i> (3555)
Pollution and Source of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Urban-rural Juncture Belt Area in Beijing	
.....	ZHOU Yu-min, HAO Zheng-ping, WANG Hai-lin(3560)
Health Risk Assessment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Urban-rural Juncture Belt Area	ZHOU Yu-min, HAO Zheng-ping, WANG Hai-lin(3566)
Source Emission Characteristics of Malodorous Volatile Organic Carbonyls from a Municipal Sewage Treatment Plant	
.....	ZHOU Mi, WANG Bo-guang, ZHAO De-jun, <i>et al.</i> (3571)
Source Emission Characteristics and Impact Factors of Volatile Halogenated Organic Compounds from Wastewater Treatment Plant	
.....	HE Jie, WANG Bo-guang, LIU Shu-le, <i>et al.</i> (3577)
Quantification Assessment of the Relationship Between Chemical and Olfactory Concentrations for Malodorous Volatile Organic Compounds	
.....	LIU Shu-le, WANG Bo-guang, HE Jie, <i>et al.</i> (3582)
Study on Transformation Mechanism of SOA from Biogenic VOC Under UV-B Condition	LI Ying-ying, LI Xiang, CHEN Jian-min(3588)
Kinetic Studies on the Gas-phase Reactions of NO ₃ Radicals with Three Cyclic Ethers	GAO Yan-bo, GE Mao-fa, WANG Wei-gang(3593)
Uptake of 3-methyl-3-buten-1-ol into Aqueous Mixed Solution of Sulfuric Acid and Hydrogen Peroxide	WANG Tian-he, LIU Ze, GE Mao-fa, <i>et al.</i> (3599)
An Overview on Analytical Method of Volatile Organic Compounds in Water	XU Xiu-yan, ZHU Qing, TAN Li, <i>et al.</i> (3606)
Determination of Low Concentration VOCs in Air by a Newly Designed Needle Trap Device	LI Xiang, CHEN Jian-min (3613)
Research on Determination of Total Volatile Organic Sulfur Compounds in the Atmosphere	
.....	WANG Yan-jun, ZHENG Xiao-ling, HE Ying, <i>et al.</i> (3617)
Automatic Continuous Monitoring of Volatile Organic Compounds Using Ion Mobility Spectrometer Array	
.....	ZHOU Qing-hua, CANG Huai-wen, JU Bang-yu, <i>et al.</i> (3623)
Development of a Membrane Inlet-Single Photon Ionization/Chemical Ionization-Mass Spectrometer for Online Analysis of VOCs in Water	
.....	HUA Lei, WU Qing-hao, HOU Ke-yong, <i>et al.</i> (3628)
Detection of TVOC and Odor in Industrial Park Using Electronic Nose	TIAN Xiu-ying, CAI Qiang, YE Zhao-xia, <i>et al.</i> (3635)
Applicability of an Electronic Nose for Detection of Volatile Chlorinated Hydrocarbons in Soil	
.....	BU Fan-yang, WEN Xiao-gang, WAN Mei, <i>et al.</i> (3641)
Test and Analysis of Acrylic Acid Ester in Industry Pipelines	WU Bin, ZHANG Hong-yan, LU Lin-guang(3647)
Preparation of Honeycombed Monolithic Zeolite and Hydrophobic Modification with SiCl ₄	WANG Xi-qin, LI Kai, WEI Bing, <i>et al.</i> (3653)
Synthesis of Manganese Oxide Octahedral Molecular Sieve and Their Application in Catalytic Oxidation of Benzene	LI Dong-yan, LIU Hai-di, CHEN Yun-fa(3657)
Adsorption-Desorption Performance of Honeycomb-Shaped Activated Carbon	HAN Zhong-juan, LUO Fu-kun, LI Ze-qing(3662)
Process of Adsorption and Separating Recovery Solvents from Vapor Mixture Directly	WANG Hong-yu, QIANG Ning, HU Xia(3667)
BTF Performance Treating a Chlorobenzene-Contaminated Gas Stream	ZHOU Qing-wei, ZHU Run-ye, HU Jun, <i>et al.</i> (3673)
Purification of Complicated Industrial Organic Waste Gas by Complex Absorption	CHEN Ding-sheng, CEN Chao-ping, TANG Zhi-xiong, <i>et al.</i> (3680)
Analysis of the Treatment Technology Pathway of VOCs Released from Oven	LI Ze-qing, LUO Fu-kun(3685)
Fabrication of Co ₃ O ₄ Nanorods and Its Catalytic Oxidation of Gaseous Toluene	YAN Qing-yun, LI Xin-yong, ZHAO Qi-dong, <i>et al.</i> (3689)
Preparation, Characterization of Si Doped TiO ₂ Nanotubes and Its Application in Photocatalytic Oxidation of VOCs	
.....	ZOU Xue-jun, LI Xin-yong, QU Zhen-ping, <i>et al.</i> (3694)
Research of the Natural Attenuation Capacity of Oil Pollutants Based on <i>in-situ</i> Experiment	JIA Hui, WU Xiao-feng, HU Li-ming, <i>et al.</i> (3699)
Experimental Research of Oil Vapor Pollution Control for Gas Station with Membrane Separation Technology	
.....	ZHU Ling, CHEN Jia-qing, ZHANG Bao-sheng, <i>et al.</i> (3704)
CFD Numerical Simulation onto the Gas-Liquid Two-Phase Flow Behavior During Vehicle Refueling Process	
.....	CHEN Jia-qing, ZHANG Nan, WANG Jin-hui, <i>et al.</i> (3710)

《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)

2011年12月15日 32卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Founded in 1976)

Vol. 32 No. 12 Dec. 15, 2011

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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内 外 公 开 发 行