

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第3期

Vol.37 No.3

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

一种气溶胶测量仪器标定系统的设计及性能评估	陈小彤, 蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 郝吉明 (789)
空气细菌真菌污染的分级评价构建方法	张华玲, 姚大军, 张雨, 方子梁 (795)
2014年北京APEC期间大气醛酮污染物的污染特征与来源分析	何晓朗, 谭吉华, 郭送军, 马永亮, 贺克斌 (801)
北京市夏季不同O ₃ 和PM _{2.5} 污染状况研究	王占山, 张大伟, 李云婷, 董欣, 孙瑞雯, 孙乃迪 (807)
2013年1月南京北郊霾天气气溶胶的光学特性	王利朋, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 周瑶瑶 (816)
上海典型持续性PM _{2.5} 重度污染的数值模拟	常炉予, 许建明, 周广强, 吴剑斌, 谢英, 余钟奇, 杨辰 (825)
厦门室内多溴二苯醚的沉降通量、季节变化与人体暴露水平	韩文亮, 刘豫, 陈海明, 陈兴童, 范涛 (834)
复合催化膜生物反应器处理一氧化氮废气研究	黎宝仁, 陈洲洋, 王剑斌, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (847)
环胶州湾污水处理厂排放口溶解有机氮生物可利用潜力研究	孔秀君, 张鹏, 杨南南, 梁生康 (854)
面向GOCI数据的太湖总磷浓度反演及其日内变化研究	杜成功, 李云梅, 王桥, 朱利, 吕恒 (862)
三峡库区支流澎溪河水华高发期环境因子和浮游藻类的时空特征及其关系	周川, 蔚建军, 付莉, 崔玉洁, 刘德富, 姜伟, Douglas Haffner, 张磊 (873)
三峡库区消落带水体DOM不同分子量组分三维荧光特征	陈雪霜, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 闫金龙 (884)
黄河河南段水体中正构烷烃的分布特征与来源解析	冯精兰, 席楠楠, 张飞, 刘书卉, 孙剑辉 (893)
岩溶地下河流域表层土壤有机氯农药分布特征及来源分析	谢正兰, 孙玉川, 张媚, 余琴, 徐昕 (900)
长期不同耕作方式下紫色水稻土和上覆水中汞及甲基汞的分布特征	王欣悦, 唐振亚, 张成, 王永敏, 王定勇 (910)
长江口沉积物重金属赋存形态及风险特征	尹肃, 冯成洪, 李扬飏, 殷立峰, 沈珍瑶 (917)
巢湖表层沉积物营养盐和重金属分布及污染评价	熊春晖, 张瑞雷, 吴晓东, 冯立辉, 王丽卿 (925)
三峡库区典型支流库湾消落带沉积泥沙特征及重金属评价	王永艳, 文安邦, 史忠林, 严冬春, 朱波, 唐家良 (935)
海河干流水产品汞污染特征及摄入风险评估	童银栋, 张巍, 邓春燕, 王学军 (942)
三峡库区干支流落干期消落带土壤可转化态氮含量及分布特征	何立平, 刘丹, 于志国, 周斌, 杨振宇, 兰国新, 郭冬琴, 林俊杰 (950)
三峡水库消落带土壤与优势植物淹水后对土-水系统汞形态的影响	梁丽, 王永敏, 张成, 余亚伟, 安思危, 王定勇 (955)
不同灌溉模式下水稻田径流污染试验研究	周静雯, 苏保林, 黄宁波, 管毓堂, 赵堃 (963)
富营养化城市景观水体表观污染下的悬浮颗粒物粒度分布特征	贡丹燕, 潘杨, 黄勇, 包伟, 李倩倩 (970)
间歇曝气对垂直潜流人工湿地脱氮效果的影响	汪健, 李怀正, 甄葆崇, 刘振东 (980)
非水溶性醌加速菌GWF生物还原高氯酸盐的研究	张媛媛, 郭延凯, 张超, 梁晓红, 田秀蕾, 牛文钰, 廉静, 郭建博 (988)
紫外辐射对腐殖酸溶液理化性质及其混凝性能的影响	王文东, 张轲, 范庆海, 郑丹 (994)
类水滑石复合材料吸附去除水中硫酸根离子	顾怡冰, 马邕文, 万金泉, 王艳, 关泽宇 (1000)
富里酸对重金属在沉积物上吸附及形态分布的影响	李雨清, 何江, 吕昌伟, 樊明德, 王维, 张瑞卿, 谢志磊, 汪精华, 于波, 恩和, 丁涛 (1008)
铁有机骨架材料的快速合成及对阴离子染料的吸附性能	孙德帅, 刘亚丽, 张晓东, 秦婷婷 (1016)
富里酸-膨润土复合体对氟的吸附特性	方敦, 田华婧, 叶欣, 何次利, 但悠梦, 魏世勇 (1023)
3种低分子量有机酸对紫色土吸附菲的影响	谢黎, 陈本寿, 张进忠, 卢松, 江韬 (1032)
HDTMA改性蒙脱土对土壤Cr(VI)的吸附稳定化研究	蒋婷婷, 喻恺, 罗启仕, 吉敏, 林匡飞 (1039)
水热处理时间对污泥中氮磷钾及重金属迁移的影响	王兴栋, 林景江, 李智伟, 赵焕平, 余广伟, 汪印 (1048)
煤制气废水总酚负荷对反硝化的抑制效应研究	张玉莹, 陈秀荣, 王璐, 李佳慧, 徐燕, 庄有军, 于泽亚 (1055)
硫自养反硝化耦合厌氧氨氧化脱氮条件控制研究	周健, 黄勇, 刘忻, 袁怡, 李祥, 完颜德卿, 丁亮, 邵经纬, 赵蓉 (1061)
低温下活性污泥膨胀的微生物群落结构研究	端正花, 潘留明, 陈晓欧, 王秀朵, 赵乐军, 方乐琪 (1070)
游离氨(FA)耦合曝气时间对硝化菌活性的抑制影响	孙洪伟, 吕心涛, 魏雪芬, 赵华南, 马娟, 方晓航 (1075)
1株Arthrobacter arilaitensis菌的耐冷异养硝化和好氧反硝化作用	何腾霞, 倪九派, 李振轮, 孙权, 冶青, 徐义 (1082)
海洋菌株y3的分离鉴定及其异养硝化-好氧反硝化特性	孙庆花, 于德爽, 张培玉, 林学政, 徐光耀, 李津 (1089)
几种不同方法估算农田表层土壤固碳潜力:以甘肃庄浪县为例	师晨迪, 许明祥, 邱宇洁 (1098)
不同耕作方式下土壤水分状况对土壤呼吸的初期影响	张延, 梁爱珍, 张晓平, 陈升龙, 孙冰洁, 刘四义 (1106)
绿肥间作和秸秆覆盖对冬季油菜根际土壤有机碳及土壤呼吸的影响	周泉, 王龙昌, 熊瑛, 张赛, 杜娟, 赵琳璐 (1114)
黑岱沟露天煤矿排土场不同植被复垦土壤酶活性及理化性质研究	方瑛, 马任甜, 安韶山, 赵俊峰, 肖礼 (1121)
黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落与土壤C、N、P、K化学计量学特征	张海东, 汝海丽, 焦峰, 薛超玉, 郭美丽 (1128)
包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析	张连科, 李海鹏, 黄学敏, 李玉梅, 焦坤灵, 孙鹏, 王维大 (1139)
砷污染土壤复合淋洗修复技术研究	陈寻峰, 李小明, 陈灿, 杨麒, 邓琳静, 谢伟强, 钟宇, 黄斌, 杨伟强, 张志贝 (1147)
以预处理剩余污泥为燃料MFC产电性能及不连续供电的可行性	赵艳辉, 赵阳国, 郭亮 (1156)
废弃物焚烧飞灰中持久性自由基与二噁英及金属的关联探究	王天娇, 陈彤, 詹明秀, 郭颖, 李晓东 (1163)
淘汰落后产能政策对我国重点工业行业二噁英类减排的影响	耿静, 吕永龙, 任丙南, 王铁宇 (1171)
《环境科学》征订启事 (1138)	
《环境科学》征稿简则 (1155)	
信息 (824, 853, 883)	

2014 年北京 APEC 期间大气醛酮污染物的污染特征与来源分析

何晓朗¹, 谭吉华², 郭送军^{1*}, 马永亮³, 贺克斌³

(1. 广西大学环境学院, 南宁 530004; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 清华大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084)

摘要: 于 2014 年 11 月北京 APEC 会议前后, 调查了大气醛酮污染物的变化规律及污染特征. 结果表明甲醛、乙醛和丙酮是主要污染物, 占总醛酮污染物的 82.66%, 特别是甲醛, 约占 40.12%. APEC 会议期间北京采取相关措施后, 总醛酮污染物浓度下降了 64.10%, 醛酮污染物在会议前后的变化趋势与 PM_{2.5} 等污染物相似. 会议期间和会议后甲醛、乙醛、丙酮和总醛酮污染物之间 (R^2 为 0.67~0.98) 的相关性较好, 说明其有相同来源; 但会议前的相关性较弱, (R^2 为 0.11~0.42 和 0.16~0.94), 说明其来源不同. 计算所得的诊断参数如 C1/C2、C2/C3 和 OC/EC 比值显示, 会议前来自汽车尾气与燃煤的复合源, 而会议期间和会议后燃煤排放比例增加, 特别是在会议后.

关键词: 北京 APEC; 醛酮污染物; 变化规律; 污染特征; 尾气与燃煤

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)03-0801-06 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2016.03.003

Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Carbonyls During the 2014 Beijing APEC

HE Xiao-lang¹, TAN Ji-hua², GUO Song-jun^{1*}, MA Yong-liang³, HE Ke-bin³

(1. School of the Environment, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Pollution characteristic and variation trend of atmospheric carbonyls were investigated in November during the 2014 Beijing APEC. Formaldehyde, acetaldehyde and acetone were the dominant carbonyls, accounting for 82.66% of total carbonyls, and especially, formaldehyde accounted for 40.12% of total carbonyls. Atmospheric concentrations of total carbonyls decreased by around 64.10% after the clean air policy was carried out during the Beijing APEC, and the variation trend of carbonyls showed a similar pattern to those of other pollutants like PM_{2.5} during the APEC. Strong correlations (R^2 of 0.67-0.98) were observed among formaldehyde, acetaldehyde, acetone and total carbonyls during and after the APEC, indicating that they had similar sources; however, poor correlations (R^2 of 0.11-0.42 and 0.16-0.94, respectively) were observed before the APEC, implying different emission sources for ambient carbonyls. The calculated ratios of C1/C2, C2/C3 and OC/EC indicated that both vehicles and coal emissions were responsible for atmospheric carbonyls before the APEC, and emissions from coal burning were the major contributor to atmospheric carbonyls during and after the APEC, especially after the APEC.

Key words: the Beijing APEC; carbonyl pollutants; variation trend; pollution characteristic; exhaust and coal burning

甲醛、乙醛和丙烯醛等醛酮类物质因其具有刺激性、毒害性、致癌性和诱变性而备受关注^[1]. 由于具有不稳定的 C=O, 这类物质成为烃类发生光化学反应的中间体, 通过复杂的光化学反应生成自由基、二次有机气溶胶 (secondary organic aerosol, SOA), 并促使有机酸和臭氧、过氧乙酰硝酸酯 (peroxyacetyl nitrate, PAN) 等氧化剂的生成, 影响空气质量^[2~4]. 研究表明, 汽车尾气^[5] 和工业排放^[6, 7]、餐饮油烟^[8] 等一次污染是城市大气中醛酮等挥发性污染物的重要来源, 约占大气中甲醛的 76%^[9]. 本研究选择 2014 年北京市 APEC 会议前后进行大气醛酮污染物连续性观测, 旨在了解机动

车限行与管控、燃煤和工厂企业停限产等空气质量保障措施对北京市大气醛酮污染物的影响.

1 材料与方法

1.1 样品采集

采样点位于北京石景山区中国科学院大学科研楼楼顶 (39.91°N, 116.24°E), 距地面高约 30 m. 该

收稿日期: 2015-09-21; 修订日期: 2015-11-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41475116, 41373109, 41163008); 大气复合污染来源与控制重点实验室基金项目 (SCAPC201401); 广西自然科学基金项目 (2014GXNSFAA118301, 2013GXNSFAA019286)

作者简介: 何晓朗 (1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气有机污染, E-mail: hexl1019@163.com

* 通讯联系人, E-mail: guosj@gxu.edu.cn

采样点附近无明显的工业区和局地污染源。采样期分为 2014 年 10 月 29~31 日、11 月 6~12 日、11 月 13~15 日这 3 个阶段共 13 d;其中 2014 年 10 月 29~31 日代表 APEC 会议前期,北京未采取机动车单双号限行并受到重度雾霾天气影响,其 $PM_{2.5}$ 日均值约为 $138 \mu g \cdot m^{-3}$; 2014 年 11 月 6~12 日代表 APEC 会议期间; 2014 年 11 月 13~15 日代表会议后期。从 11 月 3 日开始便实行机动车限行与管控措施,11 月 5 日开始受弱冷空气影响,11 月 11 日再次受到冷空气的影响,有利于污染物扩散, $PM_{2.5}$ 日均值约为 $45 \mu g \cdot m^{-3}$ 。每天 4 个时段(07:00~09:00、12:00~14:00、17:00~19:00、21:00~23:00)间隔采样,每个样品采集 2 h,共采集到 52 个大气样品。采样时将涂布 DNPH 的吸附管与真空泵连接(Gast, USA),为避免大气氧化剂的影响采样管前安装一个碘化钾过滤管。同时,本研究利用美国 Tisch TE-6070 大流量($1.13 m^3 \cdot min^{-1}$)采样器,于 10 月 29 日~11 月 15 日,同步采集了 18 个 24 h 大气中细颗粒物样品到经过 550℃ 马弗炉灼烧后的石英滤膜上,用于分析细颗粒物中的水溶性有机碳(Water-soluble organic compound, WSOC)、有机碳(Organic carbon, OC)和元素碳(Element carbon, EC)。

1.2 样品分析

醛酮化合物的分析方法见文献[3, 10, 11]。采集的样品用 2 mL 乙腈缓慢地洗脱下来,用 2 mL 容量瓶定容,然后 10 μL 样品通过自动进样器注入高效液相色谱(LC-20AD; 日本岛津)。分析条件: Agilent RP-C18 反相柱(250 mm $\times$ 4.6 mm $\times$ 5 μm); 流动相(乙腈和水)梯度 60% 乙腈(20 min), 70%~100% 乙腈(3 min), 100% 乙腈(6 min); 60%~100% 乙腈(5 min); 然后 60% 乙腈(5 min); 流动相速率 1 mL $\cdot$ min⁻¹; 紫外检测波长 360 nm。用 6 个浓度(范围 0.15~10 $\mu g \cdot mL^{-1}$)的标样对仪器进行校正,基本包括大气样品的浓度范围。检测到污染物的浓度和响应值线性关系较好($R^2 > 0.995$),重复分析的相对标准偏差(SD)小于 5%,用混合标样的最小浓度连续进样 7 次得仪器检测限(0.05~0.15 $\mu g \cdot m^{-3}$)。颗粒物中 OC 和 EC 分析用由美国沙漠所 DRI Model 2001A 热/光碳分析仪测定, WSOC 采用总有机碳(total organic carbon, TOC)分析技术,详细程序见文献[12, 13]。

2 结果与讨论

2.1 北京 APEC 会议前后醛酮污染物的变化特征

在样品中检测到甲醛、乙醛、丙烯醛、丙酮、

丙醛、甲基丙烯醛、巴豆醛、2-丁酮、丁醛、苯甲醛、环己酮、异戊醛、戊醛、*p/m/o*-甲基苯甲醛、己醛和 2,5-二甲基苯甲醛共 17 种醛酮化合物。甲醛、乙醛和丙酮是浓度最高的 3 种污染物(见表 1),占总醛酮化合物的质量分数为 82.66%, 甲醛占 40.12%, 乙醛占 18.51%, 而丙酮则占 24.03%。3 种主要污染物的平均浓度序列顺序为: 甲醛($17.30 \mu g \cdot m^{-3}$) > 丙酮($8.07 \mu g \cdot m^{-3}$) > 乙醛($6.14 \mu g \cdot m^{-3}$), 与 2008~2009 年冬季浓度相比(甲醛 $4.55 \mu g \cdot m^{-3}$, 乙醛 $5.65 \mu g \cdot m^{-3}$, 丙酮 $13.65 \mu g \cdot m^{-3}$)^[14], 甲醛和丙酮浓度分别增加和减少, 这可能是因为 2010 年前北京市区内仍存在大量工厂企业, 而丙酮主要来源于工厂的直接排放, 甲醛浓度的增加说明光化学复合污染程度加剧。异戊醛只是在会议前灰霾天的样品中检测到, 浓度为 $0.86 \mu g \cdot m^{-3}$, 但在会议期间和会议后均未检出; 另外戊醛也在会议前表现出较高浓度值 $1.44 \mu g \cdot m^{-3}$, 广州冬季灰霾天^[15]时戊醛和异戊醛浓度达到 $10 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $0.67 \mu g \cdot m^{-3}$, 明显高于非灰霾天时戊醛($0.59 \mu g \cdot m^{-3}$)和异戊醛($0.44 \mu g \cdot m^{-3}$)的水平, 可知异戊醛和戊醛在灰霾天时浓度增加。

从图 1 看出会议期间采取了空气质量保证措施后醛酮污染物浓度明显下降, 总醛酮污染物浓度的下降幅度达到 64.10%, 与付强等^[16]于 2007 年对北京实施车辆管制后醛酮污染物下降幅度 67% 一致; 特别地, 甲醛浓度降低了 78.61%, 大于 2008 年北京奥运会期间的 24.21%, 说明冬季醛酮污染物受人为活动影响较大; 只来源于人类活动的丙醛由 $1.20 \mu g \cdot m^{-3}$ 下降到了 $0.66 \mu g \cdot m^{-3}$ ^[9]; 乙醛浓度减少的幅度较小, 仅为 41.46%, 与奥运会时的 28% 不同^[17]。会议后醛酮污染物的浓度并没有明显增加, 这可能是污染物在空气中浓度的增加需要一定的富集和转换过程。另一方面, 会议前的最大风速仅为 $7.2 km \cdot h^{-1}$, 多为东北风或北风, 但在会议期间和会议后的最大风速分别达 $43.2 km \cdot h^{-1}$ 和 $25.2 km \cdot h^{-1}$ 且多为北风或西北风, 有利于污染物扩散。另外, 北京市环境监测站资料显示 APEC 会议期间 VOCs 排放削减了 33.6%, SO_2 、 NO_x 、 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 等平均削减了 50%。可见, 限行停产等措施对缓解空气污染有一定的疗效, 但会议期间和会议后受强西北风的影响也是醛酮污染物浓度降低的重要原因。

由于受到冷风过境的影响, 醛酮污染物浓度在 11 月 11 日和 11 月 12 日这两天显著低于其他时

表 1 APEC 会议前后醛酮污染物浓度变化/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 1 Variations in concentrations of carbonyl pollutants before and after the 2014 Beijing APEC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

污染物	会议前	会议期间	会议后	平均值	质量分数/%
甲醛	44.90 ± 13.19	9.60 ± 3.94	7.06 ± 1.87	17.30 ± 16.82	40.12 ± 11.52
乙醛	8.77 ± 0.97	5.13 ± 2.97	6.25 ± 2.15	6.14 ± 2.83	18.51 ± 5.64
丙酮	13.82 ± 4.54	6.14 ± 2.56	7.16 ± 2.36	8.07 ± 4.37	24.03 ± 6.03
丁醛	2.46 ± 0.36	0.75 ± 0.45	0.85 ± 0.40	1.15 ± 0.83	2.98 ± 0.77
异戊醛	0.86 ± 0.39	—	—	0.86 ± 0.39	1.10 ± 0.53
戊醛	1.44 ± 1.45	0.29 ± 0.09	—	1.01 ± 1.29	1.27 ± 1.11
丙醛	1.20 ± 0.17	0.66 ± 0.46	0.80 ± 0.34	0.80 ± 0.44	2.27 ± 0.87
苯甲醛	1.48 ± 0.36	0.60 ± 0.30	0.46 ± 0.30	0.80 ± 0.52	1.88 ± 0.63
己醛	1.06 ± 0.25	0.68 ± 0.28	0.64 ± 0.22	0.75 ± 0.31	2.39 ± 0.81
环己酮	1.04 ± 0.26	0.60 ± 0.25	0.46 ± 0.29	0.68 ± 0.35	1.74 ± 0.64
<i>m/o</i> -甲基苯甲醛	0.55 ± 0.11	0.63 ± 0.22	0.81 ± 0.41	0.63 ± 0.27	2.46 ± 1.50
<i>p</i> -甲基苯甲醛	0.57 ± 0.29	0.63 ± 0.22	0.70	0.60 ± 0.25	1.60 ± 1.24
2,5-二硝基苯甲醛	0.37 ± 0.10	0.58 ± 1.39	0.38 ± 0.16	0.48 ± 1.02	1.58 ± 2.30
丙烯醛	0.54 ± 0.12	0.63	—	0.57 ± 0.10	1.16 ± 0.52
甲基丙烯醛	0.45 ± 0.24	0.22 ± 0.05	0.22 ± 0.10	0.30 ± 0.19	0.71 ± 0.26
巴豆醛	0.43 ± 0.23	0.23 ± 0.06	0.31 ± 0.10	0.28 ± 0.17	0.69 ± 0.22
2-丁酮	0.34 ± 0.31	0.23 ± 0.09	—	0.28 ± 0.12	0.54 ± 0.27
总醛酮浓度	79.18 ± 15.72	27.53 ± 11.29	26.01 ± 8.25	40.71 ± 7.47	—

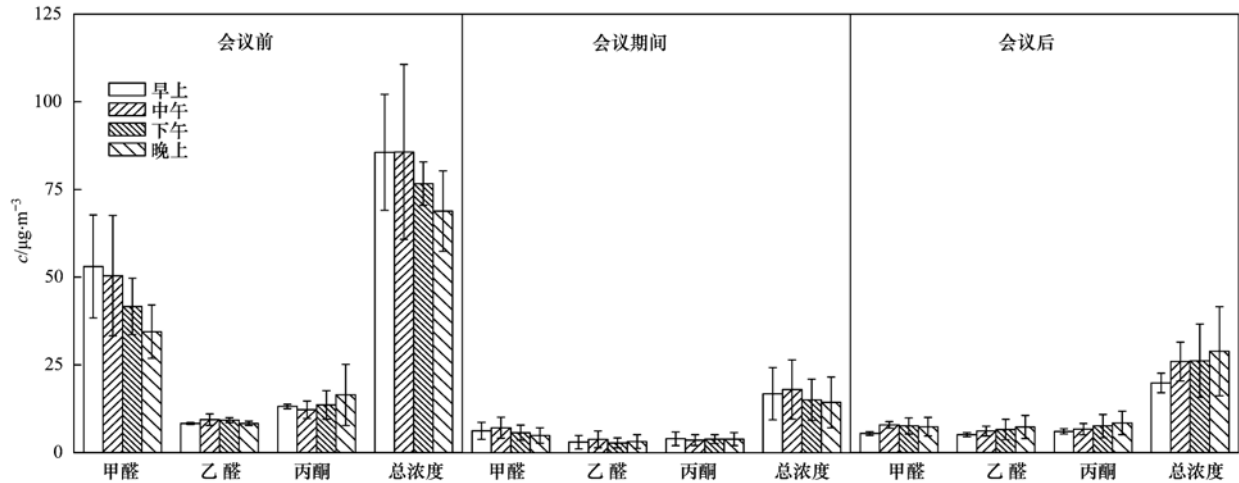


图 1 APEC 会期前后醛酮污染物的变化特征

Fig. 1 Variation characteristics of carbonyl pollutants before and after the 2014 Beijing APEC

段. 甲醛在会议前从早到晚浓度逐渐降低,会议期间甲醛、乙醛和总浓度在每天中午 12:00 ~ 14:00 达到最大,随后浓度逐渐降低,这是因为中午时段的温度(8.7 ~ 21.7℃)和光照强度(5 400 ~ 57 800 lx)均达到最大;在会议前和会议后日变化分别呈逐渐下降和上升的趋势. Duan 等^[13]在北京夏季检测到 3 种主要污染物均在中午达到最大值,此时光化学反应生成成为主要来源^[18, 19],但是在秋冬季节主要来自汽车和工厂企业的直接排放^[20, 21],日变化规律并不明显^[3]. 丙酮在白天达到最小值而在夜间达到最大值,这可能是因为其光解速率小于甲醛和乙醛,在大气中具有积累效应,另外,丙酮是常用的工业溶

剂,也可能是因为夜间有不明确的人为源和夜间温度下降使大气混合层下降,丙酮来不及扩散而富集^[22, 23].

为了更好地评估大气复合污染中醛酮污染物,选择大气灰霾污染的元凶 PM_{2.5} 和水溶性有机物(甲醛、乙醛等主要醛酮污染物易溶于水)与之进行比较,结果显示 APEC 会议前后(10 月 29 日 ~ 11 月 15 日)的 PM_{2.5}(监测点为奥体中心)和同步监测的细颗粒物中水溶性有机物(WSOC)与醛酮化合物(Carbonyl compounds, CCs)的浓度归一化处理后的变化趋势(图 2)表明,醛酮污染物与水溶性有机物、PM_{2.5}相关性较大,分别为 0.79 和 0.60. 上文提到

醛酮污染物在会议期间和会议后的浓度均明显低于会议前,PM_{2.5}和 WSOC 也在会议期间显著降低,并在会议后(11 月 13 日)逐渐增加,究其原因,除了停止 APEC 会议期间的各项空气质量保障措施,11 月 15 日开始集中供暖燃烧大量化石燃料也是主要因素^[21].

2.2 醛酮污染物及其与气象因素的关系

醛酮污染物浓度的变化会受到温度、湿度、风速和光照强度等气象因素的影响^[2]. 表 2 显示 3 种主要污染物与温度的相关性(R^2 为 0.25 ~ 0.41)低于 Guo 等^[3]在钦州龙门岛的结果(R^2 为 0.63 ~ 0.93),可见此时温度(范围 -3 ~ 21.7℃)的变化对醛酮污染物影响不大,与光照强度的相关性(R^2 为 -0.21 ~ 0.02)也可说明污染物的形成与光化学反

应关系不大. 相比之下,湿度显示了较大的相关性(R^2 为 0.57 ~ 0.63),这可能是因为湿度增加促使空气中醛酮污染物的富集,特别是在光照辐射较弱的灰霾天气条件下^[24]. 如上所述,在 11 月 11 日和 11 月 12 日两天北京市受到冷空气的影响,污染物扩散条件好,浓度与风速呈现明显的负相关关系(R^2 为 -0.68 ~ -0.37). 丙酮在会议前后与总醛酮污染物的相关性有很大差别,会议前 R^2 为 0.16,但在会议期间和会议后分别达到了 0.92 和 0.98;在会议前甲醛、乙醛和丙酮三者之间表现较低的相关性(R^2 为 -0.11 ~ 0.42),说明在会议前来源复杂;但会议期间(R^2 为 0.67 ~ 0.90)和会议后(R^2 为 0.87 ~ 0.98)相关性较好,可见会议期间和会议后具有相似来源.

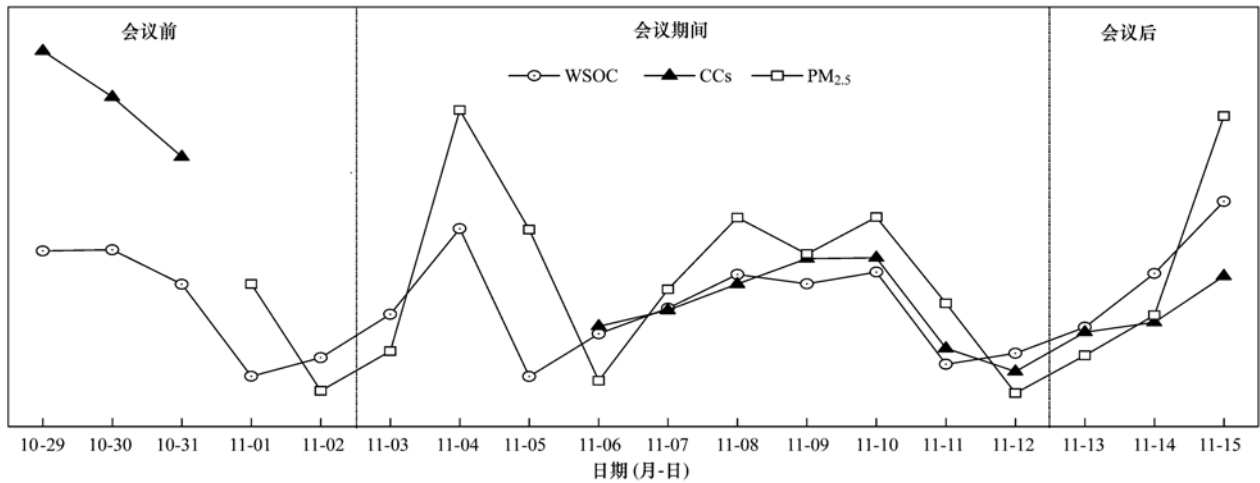


图 2 APEC 会议期间 PM_{2.5}、醛酮化合物和水溶性有机物浓度变化趋势

Fig. 2 Variations of PM_{2.5}, CCs and WSOC before and after the APEC

表 2 醛酮污染物及其与主要气象因素的相关性分析

Table 2 Correlations of carbonyl pollutants with main meteorological factors

污染物	会议前			会议期间			会议后			温度	湿度	光照强度	风速
	甲醛	乙醛	丙酮	甲醛	乙醛	丙酮	甲醛	乙醛	丙酮				
甲醛	1			1			1			0.41	0.57	0.02	-0.37
乙醛	0.42	1		0.79	1		0.92	1		0.35	0.51	0.02	-0.68
丙酮	-0.11	0.31	1	0.67	0.90	1	0.87	0.98	1	0.25	0.63	-0.21	-0.56
总醛酮污染物	0.94	0.61	0.16	0.88	0.95	0.92	0.93	0.98	0.98	0.42	0.63	-0.05	-0.49

2.3 诊断比值分析

甲醛/乙醛 (C1/C2) 和乙醛/丙醛 (C2/C3) 常用来判断醛酮污染物的可能来源,一般地,C1/C2 浓度比在城区为 1 ~ 2 而在乡村或森林则为 10 以上,因此可以用 C1/C2 浓度比来推断甲醛的生物来源;而 C2/C3 浓度比可作为推断人为来源的有效指标,因为人们认为丙醛仅来源于人类活动. 表 3 显示 C1/C2 在会议前达到 5.11 ± 1.40,会议期间和会议后逐

渐降低,但是 C1/C2 在会议期间的范围 (1.29 ~ 9.41) 变化大,并在早上时段的比值最大 3.08 ± 2.55,这可能是因为夜间不确定的人为排放增加,大气混合层高度下降^[23]使污染物富集,夜间 C1/C2 达到最低是因为甲醛干沉降速率要高于乙醛^[15];会议后 C1/C2 (0.95 ~ 1.43) 与文献报道的北京和广州夏秋^[25-27]季节相符,也就是说在会议后醛酮污染物不同于会议前和会议期间,主要来自于机动车

人为源和光化学反应的复合污染源^[27],但是整个监测阶段 C1/C2(0.95 ~ 9.41)要明显高于 2010 年以前冬季的水平 0.70^[14],即甲醛比重有所增加.

另一方面,C2/C3 在会议前后变化不明显,与 C1/C2 一样在会议期间 C2/C3 的变化幅度(5.70 ~ 15.71)很大,并在下午晚高峰时达到最大值,这可能是因为机动车限行措施让该时段汽车排放的醛酮污染物减少,丙醛浓度降低,而早上和晚上 C2/C3 比下午要低(丙醛浓度增加)也佐证了可能夜间存在人为排放增加的现象;本研究中 C2/C3 要高于在 2010 年以前在北京检测到的比值 0.53,可说明近几

年采取工厂搬迁、尾气净化等措施取得一定成效,人为源的比例降低.对比表 3 和表 4 可知会议前 C1/C2 高于会议期间和会议后以及其他城市,与以生物源为主的青藏高原(C1/C2 = 0.38)^[28]对比可知在灰霾天时醛酮污染物主要来源于汽车尾气等人为源,会议前灰霾天 C1/C2(3.54 ~ 8.48)要明显高于广州冬季灰霾天(0.59 ~ 1.24),说明在北京冬季,尤其是灰霾天时甲醛浓度水平很高,应引起高度重视;会议期间和会议后的 C1/C2 与其他城市相当;会议前后 C2/C3 呈现出较高值不同于其他城市,具有很大的差异,难以根据此来判断污染源.

表 3 APEC 会议前、会议期和会议后甲醛/乙醛(C1/C2)和乙醛/丙醛(C2/C3)比值变化

时段	会议前		会议期间		会议后	
	C1/C2	C2/C3	C1/C2	C2/C3	C1/C2	C2/C3
早上	6.44 ± 1.85	6.76 ± 0.27	3.08 ± 2.55	9.46 ± 2.88	1.07 ± 0.03	8.99 ± 0.66
中午	5.30 ± 0.95	7.27 ± 0.57	2.11 ± 0.65	8.82 ± 2.51	1.32 ± 0.14	6.85 ± 0.62
下午	4.58 ± 1.16	7.63 ± 0.92	2.14 ± 0.35	10.11 ± 3.81	1.19 ± 0.14	8.20 ± 0.76
晚上	4.13 ± 0.74	7.82 ± 1.03	1.77 ± 0.48	9.87 ± 3.44	1.05 ± 0.13	8.10 ± 0.71
平均值	5.11 ± 1.40	7.37 ± 0.78	2.28 ± 1.50	9.57 ± 3.15	1.16 ± 0.15	8.04 ± 0.99
范围	3.54 ~ 8.48	6.55 ~ 8.71	1.29 ~ 9.41	5.70 ~ 15.71	0.95 ~ 1.43	6.18 ~ 9.61

表 4 北京 APEC 会议期间与我国其他城市之间 C1/C2 和 C2/C3 的比较

采样地点	采样时间	C1/C2	C2/C3	文献
广州	2005 年 11 月(正常天)	0.69 ~ 1.06	13	[15]
广州	2005 年 12 月(灰霾天)	0.59 ~ 1.24	5.93	[15]
上海	2007 年 7 月	1.36	24.51	[23]
西安	2010 年 1 月	0.57 ~ 1.43		[4]
香港	2011 ~ 2012 年	1.8 ~ 3.7	2.1 ~ 3.7	[2]
贵阳	2008 ~ 2009 年	0.84		[18]
成都	2010 ~ 2011 年	0.95 ~ 5.24	7.23	[20]
武汉	2010 ~ 2011 年	0.70 ~ 2.52	8.61	[20]
钦州	2012 年 1 月	0.95 ~ 2.98	1.39 ~ 5.62	[11]
北京	2004 年 11 月 ~ 2005 年 10 月	1.45		[25]
北京	2006 年 8 月	1.75 ~ 5.33	3.34 ~ 6.07	[13]
北京	2006 年 8 月、10 月,2007 年 1 月	0.69 ~ 1.19	3.20 ~ 5.58	[26]
北京(APEC 会议前)	2014 年 10 月(灰霾天)	3.54 ~ 8.48	6.55 ~ 8.71	本研究
北京(APEC 会议期)	2014 年 11 月	1.29 ~ 9.41	5.70 ~ 15.71	本研究
北京(APEC 会议后)	2014 年 11 月	0.95 ~ 1.43	6.18 ~ 9.61	本研究

2.4 有机碳(OC)和元素碳(EC)比值

醛酮污染物是大气中重要的二次有机物,而元素碳(EC)能够作为一次有机碳的示踪物^[12],故有机碳和元素碳的相关性和比值可间接判断醛酮污染物的来源^[29].OC 和 EC 在会议前中后期的相关性分别达到 0.85、0.92 和 0.91,可说明 OC 主要来源于一次有机碳,并且从会议期间开始比重有所增加.OC/EC 的范围为 3.2 ~ 8.8,研究表明当 OC/EC 大

于 2 说明存在二次有机碳,即可间接说明醛酮化合物可能来自于光化学生成.OC/EC 在 1.0 ~ 4.2 表明主要来源于汽油和柴油车的尾气排放,2.5 ~ 10.5 之间表明源为燃煤排放;会议前 OC/EC 在 3.2 ~ 6.2 范围内,会议期间为 4.0 ~ 8.8,会议后为 4.6 ~ 8.2,据此可判断会议前含碳气溶胶来自于机动车尾气和燃煤排放的复合源,而会议期间机动车限行和会议后燃煤集中供暖使得燃煤排放比例增加.

3 结论

在所检测出的醛酮污染物中,甲醛、乙醛和丙酮是主要污染物,其中甲醛的浓度最高,尤其是灰霾天. 会议前灰霾天时浓度较大,会议期间采取措施后总醛酮污染物浓度大幅度下降,但会议后浓度逐渐增加. 醛酮污染物变化规律与 $\text{PM}_{2.5}$ 等污染物相似,即在会议期间浓度大幅下降,会议后逐渐增加. 会议期间机动车排放的比例降低,会后开始集中供暖使燃煤排放取代机动车排放成为主要来源. 会议前受灰霾天气影响甲醛浓度很高,但人为污染源相对减少,可见近期环保行动初见成效;但相比于其他城市污染仍然严重,需要采取更为长久有效的环保措施.

参考文献:

- [1] Chung J W, Lee M E, Kang S T, *et al.* Concentration distribution of carbonyl compounds in an industrial shipbuilding complex[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2014, **18**(4): 927-932.
- [2] Cheng Y, Lee S C, Huang Y, *et al.* Diurnal and seasonal trends of carbonyl compounds in roadside, urban, and suburban environment of Hong Kong [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **89**: 43-51.
- [3] Guo S J, He X L, Chen M, *et al.* Photochemical production of atmospheric carbonyls in a rural area in southern China [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2014, **66**(4): 594-605.
- [4] Ho K F, Ho S S H, Dai W T, *et al.* Seasonal variations of monocarbonyl and dicarbonyl in urban and sub-urban sites of Xi'an, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, **186**(5): 2835-2849.
- [5] Dong D, Shao M, Li Y, *et al.* Carbonyl emissions from heavy-duty diesel vehicle exhaust in China and the contribution to ozone formation potential [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26**(1): 122-128.
- [6] Styler S A. Apportioning aldehydes: quantifying industrial sources of carbonyls [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, **30**(1): 132-134.
- [7] Chen W T, Shao M, Lu S H, *et al.* Understanding primary and secondary sources of ambient carbonyl compounds in Beijing using the PMF model [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(6): 3047-3062.
- [8] 程婧晨, 崔彤, 何万清, 等. 北京市典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物污染特征[J]. *环境科学*, 2015, **36**(8): 2743-2749.
- [9] Li Y, Shao M, Lu S H, *et al.* Variations and sources of ambient formaldehyde for the 2008 Beijing Olympic games [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(21-22): 2632-2639.
- [10] Guo S J, Chen M, Tan J H. Seasonal and diurnal characteristics of atmospheric carbonyls in Nanning, China [J]. *Atmospheric Research*, 2016, **169**: 46-53.
- [11] Guo S J, Chen M, He X L, *et al.* Seasonal and diurnal characteristics of carbonyls in urban air in Qinzhou, China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2014, **14**(6): 1653-1664.
- [12] 谭吉华, 赵金平, 段青春, 等. 广州典型灰霾期有机碳和元素碳的污染特征[J]. *环境污染与防治*, 2009, **31**(3): 105-108.
- [13] Duan J C, Guo S J, Tan J H, *et al.* Characteristics of atmospheric carbonyls during haze days in Beijing, China [J]. *Atmospheric Research*, 2012, **114-115**: 17-27.
- [14] Zhang Y J, Mu Y J, Liu J F, *et al.* Levels, sources and health risks of carbonyls and BTEX in the ambient air of Beijing, China [J]. *Journal of Environmental Science*, 2012, **24**(1): 124-130.
- [15] Lü H X, Cai Q Y, Wen S, *et al.* Carbonyl compounds in the ambient air of hazy days and clear days in Guangzhou, China [J]. *Atmospheric Research*, 2009, **94**(3): 363-372.
- [16] 付强, 吕怡兵, 吕天峰, 等. 北京市车辆管制前后大气中挥发性有机污染物的变化[J]. *环境化学*, 2008, **27**(6): 826-830.
- [17] Xu Z, Liu J F, Zhang Y J, *et al.* Ambient levels of atmospheric carbonyls in Beijing during the 2008 Olympic Games [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, **22**(9): 1348-1356.
- [18] Pang X B, Lee X Q. Temporal variations of atmospheric carbonyls in urban ambient air and street canyons of a Mountainous city in Southwest China [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(17): 2098-2106.
- [19] 徐竹, 庞小兵, 牟玉静. 北京市大气和降雨中醛酮化合物的污染研究[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(12): 1948-1954.
- [20] Ho K F, Ho S S H, Huang R J, *et al.* Spatiotemporal distribution of carbonyl compounds in China [J]. *Environmental Pollution*, 2015, **197**: 316-324.
- [21] 王琴, 邵敏, 魏强, 等. 北京及周边地区大气羰基化合物的时空分布特征初探[J]. *环境科学*, 2011, **32**(12): 3522-3530.
- [22] 黄娟, 冯艳丽, 熊斌, 等. 上海市大气羰基化合物水平研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(9): 2701-2706.
- [23] Huang J, Feng Y L, Li J, *et al.* Characteristics of carbonyl compounds in ambient air of Shanghai, China [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2008, **61**(1): 1-20.
- [24] Pang X B, Mu Y J, Lee X Q, *et al.* Influences of characteristic meteorological conditions on atmospheric carbonyls in Beijing, China [J]. *Atmospheric Research*, 2009, **93**(4): 913-919.
- [25] Pang X B, Mu Y J. Seasonal and diurnal variations of carbonyl compounds in Beijing ambient air [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(33): 6313-6320.
- [26] 许嘉钰, 高阳. 北京市城区大气羰基化合物的季节变化[J]. *环境科学*, 2009, **30**(3): 625-630.
- [27] 王伯光, 刘灿, 吕万明, 等. 广州大气挥发性醛酮类化合物的污染特征及来源研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(3): 631-636.
- [28] Mu Y J, Pang X B, Quan J N, *et al.* Atmospheric carbonyl compounds in Chinese background area: a remote mountain of the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112**(D22): D22302.
- [29] 于海斌, 薛荔栋, 郑晓燕, 等. APEC 期间京津冀及周边地区 $\text{PM}_{2.5}$ 中碳组分变化特征及来源[J]. *中国环境监测*, 2015, **31**(2): 48-52.

CONTENTS

Development and Performance Evaluation of a Supramicron Particle Generation System for Aerosol Instrument Calibration	CHEN Xiao-tong, JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (789)
Establishment of Assessment Method for Air Bacteria and Fungi Contamination	ZHANG Hua-ling, YAO Da-jun, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (795)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Carbonyls During the 2014 Beijing APEC	HE Xiao-lang, TAN Ji-hua, GUO Song-jun, <i>et al.</i> (801)
Different Air Pollution Situations of O ₃ and PM _{2.5} During Summer in Beijing	WANG Zhan-shan, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (807)
Aerosol Optical Properties in the Northern Suburb of Nanjing During Haze Days in January 2013	WANG Li-peng, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (816)
A Numerical Study of Typical Heavy Air Pollution Episode of PM _{2.5} in Shanghai	CHANG Lu-yu, XU Jian-ming, ZHOU Guang-qiang, <i>et al.</i> (825)
Indoor Deposition Flux, Seasonal Variations and Human Exposure Levels of Polybrominated Diphenyl Ethers in Xiamen, China	HAN Wen-liang, LIU Yu, CHEN Hai-ming, <i>et al.</i> (834)
Nitric Oxide Removal with a Fe-TiO ₂ /PSF Hybrid Catalytic Membrane Bioreactor	LI Bao-ren, CHEN Zhou-yang, WANG Jian-bin, <i>et al.</i> (847)
Potential Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen in the Discharge Outlets of Sewage Treatment Plants Around the Jiaozhou Bay	KONG Xiu-jun, ZHANG Peng, YANG Nan-nan, <i>et al.</i> (854)
Inversion Model and Daily Variation of Total Phosphorus Concentrations in Taihu Lake Based on GOCI Data	DU Cheng-gong, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (862)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Phytoplankton During Algal Bloom Season in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	ZHOU Chuan, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (873)
Three-dimensional Fluorescence Spectral Characteristics of Different Molecular Weight Fractionations of Dissolved Organic Matter in the Water-level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (884)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Water from Yellow River in Henan Section	FENG Jing-lan, XI Nan-nan, ZHANG Fei, <i>et al.</i> (893)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in Surface Soil in Karst Underground River Basin	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (900)
Effects of Long-term Different Tillage Methods on Mercury and Methylmercury Contents in Purple Paddy Soil and Overlying Water	WANG Xin-yue, TANG Zhen-ya, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (910)
Speciation and Risk Characteristics of Heavy Metals in the Sediments of the Yangtze Estuary	YIN Su, FENG Cheng-hong, LI Yang-yang, <i>et al.</i> (917)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrient and Heavy Metals in Surface Sediments from Lake Gehu in Southern Jiangsu Province, China	XIONG Chun-hui, ZHANG Rui-lei, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (925)
Characteristics of Deposited Sediment and Assessment of Heavy Metals in Typical Tributaries Bay Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	WANG Yong-yan, WEN An-bang, SHI Zhong-lin, <i>et al.</i> (935)
Pollution Characteristics Analysis and Risk Assessment of Total Mercury and Methylmercury in Aquatic Products of the Haihe Stem River	TONG Yin-dong, ZHANG Wei, DENG Chun-yan, <i>et al.</i> (942)
Distribution and Content of Transferable Nitrogen in the Soil of Water Level Fluctuating Zones of Mainstream and Its Tributary of Three Gorges Reservoir Areas During the Dry Period	HE Li-ping, LIU Dan, YU Zhi-guo, <i>et al.</i> (950)
Effect of Soil and Dominant Plants on Mercury Speciation in Soil and Water System of Water-Level-Fluctuation Zone in the Three Gorges Area	LIANG Li, WANG Yong-min, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (955)
Runoff Pollution Experiments of Paddy Fields Under Different Irrigation Patterns	ZHOU Jing-wen, SU Bao-lin, HUANG Ning-bo, <i>et al.</i> (963)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Eutrophic Urban Landscape Water Body	GONG Dan-yan, PAN Yang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (970)
Effect of Intermittent Aeration on Nitrogen Removal Efficiency in Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland	WANG Jian, LI Huai-zheng, ZHEN Bao-chong, <i>et al.</i> (980)
Effect of Non-dissolved Quinone on Perchlorate Reduction by Strain GWF	ZHANG Yuan-yuan, GUO Yan-kai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (988)
Effects of UV Radiation on the Physicochemical Properties and Coagulation Properties of Humic Acid Solution	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (994)
Removal of Sulfate Ions from Aqueous Solution by Adsorption with Hydrotalcite-like Composite	GU Yi-bing, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (1000)
Effects of Fulvic Acid on Adsorption and Form Distribution of Heavy Metals on Sediments	LI Yu-qing, HE Jiang, LÜ Chang-wei, <i>et al.</i> (1008)
Rapid Synthesis of Metal Organic Framework and Its Adsorption Properties on Anionic Dyes	SUN De-shuai, LIU Ya-li, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (1016)
Adsorption Properties of Fluorine onto Fulvic Acid-Bentonite Complex	FANG Dun, TIAN Hua-jing, YE Xin, <i>et al.</i> (1023)
Influence of Three Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Adsorption of Phenanthrene in Purple Soil	XIE Li, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1032)
Adsorptive Stabilization of Soil Cr(VI) Using HDTMA Modified Montmorillonite	JIANG Ting-ting, YU Kai, LUO Qi-shi, <i>et al.</i> (1039)
Effects of Hydrothermal Treatment Time on the Transformations of N, P, K and Heavy Metals in Sewage Sludge	WANG Xing-dong, LIN Jing-jiang, LI Zhi-wei, <i>et al.</i> (1048)
Inhibition of Denitrification by Total Phenol Load of Coal Gasification Wastewater	ZHANG Yu-ying, CHEN Xiu-rong, WANG Lu, <i>et al.</i> (1055)
Element Sulfur Autotrophic Denitrification Combined Anaerobic Ammonia Oxidation	ZHOU Jian, HUANG Yong, LIU Xin, <i>et al.</i> (1061)
Changes of Microbial Community Structure in Activated Sludge Bulking at Low Temperature	DUAN Zheng-hua, PAN Liu-ming, CHEN Xiao-ou, <i>et al.</i> (1070)
Synergetic Inhibitory Effect of Free Ammonia and Aeration Phase Length Control on the Activity of Nitrifying Bacteria	SUN Hong-wei, LÜ Xin-tao, WEI Xue-fen, <i>et al.</i> (1075)
Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification of the Hypothermia Aerobic Denitrification Bacterium: <i>Arthrobacter arilaitensis</i>	HE Teng-xia, NI Jiu-pai, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1082)
Isolation, Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain y3 Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (1089)
Estimation of Topsoil Carbon Sequestration Potential of Cropland Through Different Methods: A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie (1098)
Priming Effects of Soil Moisture on Soil Respiration Under Different Tillage Practices	ZHANG Yan, LIANG Ai-zhen, ZHANG Xiao-ping, <i>et al.</i> (1106)
Effects of Green Manure Intercropping and Straw Mulching on Winter Rape Rhizosphere Soil Organic Carbon and Soil Respiration	ZHOU Quan, WANG Long-chang, XIONG Ying, <i>et al.</i> (1114)
Heidaigou Opencast Coal Mine: Soil Enzyme Activities and Soil Physical and Chemical Properties Under Different Vegetation Restoration	FANG Ying, MA Ren-tian, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1121)
C, N, P, K Stoichiometric Characteristic of Leaves, Root and Soil in Different Abandoned Years in Loess Plateau	ZHANG Hai-dong, RU Hai-li, JIAO Feng, <i>et al.</i> (1128)
Soil Heavy Metal Spatial Distribution and Source Analysis Around an Aluminum Plant in Baotou	ZHANG Lian-ke, LI Hai-peng, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (1139)
Mixture Leaching Remediation Technology of Arsenic Contaminated Soil	CHEN Xun-feng, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (1147)
Performance of Electricity Generation and Feasibility of Discontinuous Power Supply of MFC by Using Pretreated Excess Sludge as Fuel	ZHAO Yan-hui, ZHAO Yang-guo, GUO Liang (1156)
Correlation of Persistent Free Radicals, PCDD/Fs and Metals in Waste Incineration Fly Ash	WANG Tian-jiao, CHEN Tong, ZHAN Ming-xiu, <i>et al.</i> (1163)
Effects of Eliminating Backward Production Capacities on Reduction of Dioxin Emissions in Key Industries	GENG Jing, LÜ Yong-long, REN Bing-nan, <i>et al.</i> (1171)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2016年3月15日 第37卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 3 Mar. 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	欧阳自远	Editor-in-Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees.ac.cn http://www.hjkx.ac.cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@rcees.ac.cn http://www.hjkx.ac.cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@mail.sciencep.com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@mail.sciencep.com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行