

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第5期

Vol.34 No.5

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于过氧化物的消毒技术研究进展 刁海玲, 赵三平, 周文 (1645)

环境损害评估: 国际制度及对中国的启示 张红振, 曹东, 於方, 王金南, 齐霖, 贾倩, 张天柱, 骆永明 (1653)

不同国家基于健康风险的土壤环境基准比较研究与启示 徐猛, 颜增光, 贺萌萌, 张超艳, 侯红, 李发生 (1667)

蚯蚓堆肥及蝇蛆生物转化技术在有机废弃物处理应用中的研究进展 张志剑, 刘萌, 朱军 (1679)

基于生态分区的我国湖泊营养盐控制目标研究 刁晓君, 席北斗, 何连生, 邓祥征, 吴锋, 王鹏腾 (1687)

我国东北地区地表水酸化现状 徐光仪, 康荣华, 罗遥, 段雷 (1695)

西安市对渭河水质的影响分析 于婕, 李怀恩 (1700)

极端干旱水文年(2011年)夏季珠江口溶解氧的分布特征及影响因素研究 叶丰, 黄小平, 施震, 刘庆霞 (1707)

应用相平衡分配法建立湘江衡阳段沉积物重金属质量基准 韩超南, 秦延文, 郑丙辉, 张雷, 曹伟 (1715)

长江口海域底栖生态环境质量评价——AMBI和M-AMBI法 蔡文倩, 孟伟, 刘录三, 朱延忠, 周娟 (1725)

温州城市降雨径流中 BOD₅ 和 COD 污染特征及其初始冲刷效应 王骏, 毕春娟, 陈振楼, 周栋 (1735)

影响悬浮颗粒物吸收系数测量的相关因素研究 余小龙, 沈芳, 张晋芳 (1745)

香溪河库湾春季 pCO₂ 与浮游植物生物量的关系 袁希功, 黄文敏, 毕永红, 胡征宇, 赵玮, 朱孔贤 (1754)

紊流脉动强度对藻类生长及水环境的影响研究 雷雨, 龙天渝, 伞磊, 安强, 黄宁秋 (1761)

高铁酸钾对水中藻类及其次生臭味污染物二甲基三硫醚同步去除研究 马晓雁, 张泽华, 王红宇, 胡仕斐, 李青松 (1767)

纳米 Fe₃O₄-H₂O₂ 非均相 Fenton 反应催化氧化邻苯二酚 何洁, 杨晓芳, 张伟军, 王东升 (1773)

水中萘普生的紫外光降解机制及其产物毒性研究 马杜娟, 刘国光, 吕文英, 姚锴, 周丽华, 谢成屏 (1782)

酸活化赤泥催化臭氧氧化降解水中硝基苯的效能研究 康雅凝, 李华楠, 徐冰冰, 齐飞, 赵伦 (1790)

镉污染应急处置含镉絮体稳定性实验研究 柳王荣, 魏清伟, 杨仁斌, 许振成, 曾东 (1797)

基于光学在线监测及形态学研究的絮凝体强度分析方法 金鹏康, 冯永宁, 王宝宝, 王晓昌 (1802)

不同电子供体下三氯苯酚的还原脱氯机制研究 王金泉, 胡梦蝶, 马邕文, 黄明智 (1808)

壳聚糖季铵盐磁性颗粒的制备及其对甲基橙的吸附效果 张璐璐, 胡筱敏, 英诗颖, 王芳 (1815)

城市污水二级出水超滤膜污染与膜特性的研究 孟晓荣, 张海珍, 王磊, 王旭东, 赵亮 (1822)

倒置 A²/O-MBR 处理城市污水的中试研究 张健君, 邹高龙, 杨淑芳, 丁星, 王莉, 毛乾庄, 杨丹 (1828)

不同电子供体的硫自养反硝化脱氮实验研究 袁莹, 周伟丽, 王晖, 何圣兵 (1835)

短程同步硝化反硝化过程的脱氮与 N₂O 释放特性 梁小玲, 李平, 吴锦华, 王向德 (1845)

基于固相萃取的水中多种有毒有害有机污染物富集方法优化 张明全, 李锋民, 吴乾元, 胡洪营 (1851)

多环麝香污染胁迫对蚯蚓特异性蛋白基因表达的影响 陈春, 刘潇威, 郑顺安, 周启星, 李松 (1857)

浙江省制药行业典型挥发性有机物臭氧产生潜力分析及健康风险评价 徐志荣, 王浙明, 许明珠, 何华飞 (1864)

苯系物光催化开环降解产物低级醛类的健康效应 赵伟荣, 廖求文, 杨亚楠, 戴九松 (1871)

四川妇女血清中多溴联苯醚的浓度水平与组成特征 邵敏, 陈永亨, 李晓宇 (1877)

咪唑类离子液体毒性的 QSAR/QSPR 研究 赵继红, 赵永升, 张宏忠, 张香平 (1882)

宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征 樊新刚, 米文宝, 马振宁, 王婷玉 (1887)

内蒙古包头白云鄂博矿区及尾矿区周围土壤稀土污染现状和分布特征 郭伟, 付瑞英, 赵仁鑫, 赵文静, 郭江源, 张君 (1895)

福建省重点城市路面尘负荷及化学组成研究 郑桢, 杨冰玉, 吴水平, 王新红, 陈晓秋 (1901)

重金属污染场地电阻率法探测数值模拟及应用研究 王玉玲, 能昌信, 王彦文, 董路 (1908)

丛枝菌根真菌对稀土尾矿中大豆生长和稀土元素吸收的影响 郭伟, 赵仁鑫, 赵文静, 付瑞英, 郭江源, 张君 (1915)

海洋细菌 N3 对几种赤潮藻的溶藻效应 史荣君, 黄洪辉, 齐占会, 胡维安, 田梓杨, 戴明 (1922)

1 株分离自煤矿废水的铁硫氧化细菌 LY01 的鉴定及其氧化特性研究 刘玉娇, 杨新萍, 王世梅, 梁银 (1930)

1 株苯并[a]芘高效降解菌的筛选与降解特性 蔡瀚, 尹华, 叶锦韶, 常晶晶, 彭辉, 张娜, 何宝燕 (1937)

2,2',4,4'-四溴联苯醚的好氧微生物降解 张姝, Giulio Franco, 李晓豹, 卢晓霞, 侯珍, 杨君君 (1945)

养猪废水培养微生物絮凝剂产生菌群 B-737 及发酵特性 裴瑞林, 信欣, 张雪乔, 周迎芹, 姚力, 羊依金 (1951)

1997~2011年北京市空气中酸性物质与降水组分变化趋势的相关性分析 陈圆圆, 田贺忠, 杨懂艳, 邹本东, 鹿海峰, 林安国 (1958)

黄山降水酸度及电导率特征分析 石春娥, 邓学良, 吴必文, 洪杰, 张苏, 杨元建 (1964)

夏季黄山不同高度大气气溶胶水溶性离子特征分析 文彬, 银燕, 秦彦硕, 陈魁 (1973)

广州秋季灰霾污染过程大气颗粒物有机酸的污染特征 谭吉华, 赵金平, 段菁春, 马永亮, 贺克斌, 杨复沫 (1982)

福建省三大城市冬季 PM_{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征 陈衍婷, 陈进生, 胡恭任, 徐玲玲, 尹丽倩, 张福旺 (1988)

上海市含碳大气颗粒物的粒径分布 袁宁, 刘卫, 赵修良, 王广华, 姚剑, 曾友石, 刘邃庆 (1995)

上海市浦东新区二次气溶胶生成的估算 崔虎雄, 吴迺名, 段玉森, 伏晴艳, 张懿华, 王东方, 王茜 (2003)

沙尘暴期间上海市大气颗粒物元素地球化学特征及其物源示踪意义 钱鹏, 郑祥民, 周立旻 (2010)

厦门秋季近郊地面 CO₂ 浓度变化特征研究 李燕丽, 穆超, 邓君俊, 赵淑惠, 杜可 (2018)

GC-MS 和 GC-ECD 同时在线观测本底大气中的 HCFC-142b 郭立峰, 姚波, 周凌晔, 李培昌, 许林 (2025)

城市居家环境空气真菌群落结构特征研究 方治国, 欧阳志云, 刘芄, 孙力, 王小勇 (2031)

城市污水处理厂挥发性芳香烃的气味指纹及定量评价研究 郭薇, 王伯光, 唐小东, 刘舒乐, 何洁, 张春林 (2038)

内河多点分散码头大气污染叠加影响特征 刘建昌, 李兴华, 徐洪磊, 程金香, 王忠岱, 肖杨 (2044)

义马煤中铅的热稳定性及转化行为研究 刘瑞卿, 王钧伟 (2051)

基于能源消费情景模拟的北京市主要大气污染物和温室气体协同减排研究 谢元博, 李巍 (2057)

《环境科学》征订启事(1652) 《环境科学》征稿简则(1789) 信息(1807, 1821, 1881, 1987) 专辑征稿通知(1863)

上海市浦东新区二次气溶胶生成的估算

崔虎雄, 吴迺名, 段玉森, 伏晴艳, 张懿华, 王东方, 王茜

(上海市环境监测中心, 上海 200030)

摘要: 利用2010年5~10月不同日最高 O_3 小时浓度($O_{3,max}$)下 PM_{10} 浓度变化评估不同 O_3 浓度水平下二次气溶胶生成量。CO作为一次颗粒物的标志物, O_3 作为光化学反应水平的指示物种。结果表明不同光化学水平条件下, PM_{10} 中一次与二次气溶胶浓度及比例存在较大差异。随着光化学水平的增加, PM_{10} 中一次气溶胶排放浓度增长不大(0.036~0.044 $mg \cdot m^{-3}$),二次气溶胶的生成量却呈数倍增长(0.018~0.055 $mg \cdot m^{-3}$);二次与一次气溶胶浓度的比例也从49.8%增加到124.5%。 $O_{3,max}$ 出现的时间也随着光化学水平的增强由13:00推迟到14:00,二次气溶胶生成的主要时段也从11:00~20:00增加到09:00~20:00;此外, $PM_{2.5}$ 中主要组分 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、OC等比例随着光化学水平(即 $O_{3,max}$ 浓度)的不同而存在一定差异,当 $O_{3,max} < 0.10 mg \cdot m^{-3}$ 时, $PM_{2.5}$ 主要由12.0%有机碳(OC)、18.7%硫酸盐、13.1%硝酸盐和4.5%元素碳(EC)组成,而 $O_{3,max} > 0.20 mg \cdot m^{-3}$ 时, $PM_{2.5}$ 主要由20.0%有机碳(OC)、22.9%硫酸盐、23.1%硝酸盐和4.7%元素碳(EC)组成。说明 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、OC受光化学水平影响较大。

关键词: 二次气溶胶; 光化学反应; 臭氧; 气溶胶组分

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2013)05-2003-07

Secondary Aerosol Formation Through Photochemical Reactions Estimated by Using Air Quality Monitoring Data in the Downtown of Pudong, Shanghai

CUI Hu-xiong, WU Ya-ming, DUAN Yu-sen, FU Qing-yan, ZHANG Yi-hua, WANG Dong-fang, WANG Qian
(Shanghai Environmental Monitoring Center, Shanghai 200030, China)

Abstract: Analyses of diurnal patterns of PM_{10} in the downtown of Pudong, Shanghai have been performed in this study at different daily ozone maximum concentrations ($O_{3,max}$) from May to October, 2010. In order to evaluate secondary aerosol formation at different ozone levels, CO was used as a tracer for primary aerosol, and $O_{3,max}$ was used as an index for photochemical activity. Results show that along with increasing of O_3 concentration, the concentration of primary and secondary aerosol was increased respectively from 0.036 to 0.044 $mg \cdot m^{-3}$ and from 0.018 to 0.055 $mg \cdot m^{-3}$. The ratio of secondary to primary aerosol was increased from 49.8% to 124.5%. Furthermore, along with the increase of $O_{3,max}$ the forming time of $O_{3,max}$ and secondary aerosol was changed respectively from 13:00 to 14:00 and from 11:00-20:00 to 09:00-20:00. At the same time, the chemical composition of $PM_{2.5}$ was different at different photochemical levels. $PM_{2.5}$ was composed of 12.0% organic carbon (OC), 18.7% sulfate (SO_4^{2-}), 13.1% nitrate (NO_3^-) and 4.5% element carbon (EC) when $O_{3,max}$ was $< 0.10 mg \cdot m^{-3}$ and $PM_{2.5}$ was composed of 20.0% organic carbon (OC), 22.9% sulfate, 23.1% nitrate and 4.7% element carbon (EC) with $O_{3,max} > 0.20 mg \cdot m^{-3}$. These results approved that the photochemical reactivity promoted the production of SO_4^{2-} , NO_3^- and OC.

Key words: secondary aerosol; photochemical reaction; ozone; chemical composition

空气中的颗粒物是固态、液态等物质的混合体,会随着化学组成和粒径的变化而发生变化;气溶胶颗粒物的直接排放主要由于道路机动车辆和道路扬尘等;以及在大气中通过复杂的化学反应生成二次颗粒物。硫酸氨、硝酸铵、有机碳OC是主要的二次气溶胶的组成成分^[1~6];活性有机气体,比如甲苯、间、对二甲苯等能够通过大气化学氧化反应生成二次有机气溶胶^[7];进而影响 $PM_{2.5}$ 的质量浓度。

过去10年间,上海市空气质量发生了显著的改善,但空气质量状况不容乐观。因此,即使降低当地 PM_{10} 一次排放源,由于光化学反应臭氧生成等产生

的二次气溶胶仍不容忽视^[8~12]。目前,国内外对二次气溶胶的研究主要通过手工滤膜采样+离子色谱法测量其化学离子组分来估算二次气溶胶生成的水平^[13~20];夏季细粒子是 PM_{10} 的主要组成部分,其主要的二次水溶性离子 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 浓度高于其它季节,证明夏季高 O_3 浓度有利于促进二次气溶胶的生成^[15,21~24]。受采样和分析手段、分辨率和投

收稿日期: 2012-08-07; 修订日期: 2012-11-06

基金项目: 上海市环保科研项目(沪环科2012-01); 环境保护公益性行业科研专项(201009001); 上海市科委科研计划项目(11231200502)

作者简介: 崔虎雄(1986~),男,硕士,工程师,主要研究方向为环境空气自动监测与气溶胶分析等, E-mail: cuihx@semc.gov.cn

入限制,使得手工采样分析方法应用受限;目前,已有利用自动采样和分析仪器方法(分辨率高达1 h)在国内外多个城市对测量颗粒物中离子组分浓度展开观测与研究^[25~29];而这往往在经济、技术、时间和精力等方面要求投入较大,且难以真正做到实时在线监测以及单一方法和技术均无法做到测量全部的二次组分,需要组合相关分析手段来进行测量^[30]. 已有研究利用常规自动监测因子及数据开展对二次气溶胶生成的估算^[31],该方法简单、方便,可在多个常规空气子监测站点展开应用.

本研究主要借鉴文献^[31]的方法,利用CO来作为机动车、海盐、扬尘等自然源一次排放的示踪物;日最高臭氧小时浓度($O_{3,max}$)用来作为衡量光化学活动水平的重要指数;选择2010年5~10月臭氧浓度最高的月份^[8],对上海市浦东城区二次气溶胶的生成进行估算.

1 材料与方法

1.1 数据来源

PM_{10} 、CO和 O_3 以及 $PM_{2.5}$ 细颗粒的手工采样位于浦东中心城区,采样位置距地面约20 m,站点周边主要为住宅区和商业区,是典型的城区监测点. PM_{10} 、CO和 O_3 每天24 h连续运行监测, PM_{10} 型号为Thermo 1405,CO型号为API300E, O_3 型号为API400E;自动监测质控措施严格按照相关专业技术规范进行,每周进行一次零点和跨点检查和校准,每两周进行一次精密度检查; PM_{10} 切割头每两个月进行一次清洗.

$PM_{2.5}$ 细颗粒的手工采样:每次样品的采集时间为前一天中午12:00至当天中午11:00,采样时间误差 $< \pm 0.5$ h. 采样设备为四通道 $PM_{2.5}$ 采样器(RP2300),采样滤膜采用Teflon膜和石英膜,A通道放置Teflon膜用于称重计算颗粒物质量浓度,B通道和C通道放置石英滤膜用于测定颗粒物中的离子组分和碳组分,D通道根据需要采集不同滤膜材质的全程空白样和平行样.

样品采集回来后保存在冰箱中(4℃以下),每月集中平衡称重,并在2个月内完成化学组分分析.其中,水溶性离子组分采用离子色谱进行测定(Dionex ICS2000),由浦东新区环境监测站进行,测定的离子项目包括 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 F^- 、 Cl^- 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等,每批次实验均使用国家环境保护部标样所的内控标样确保分析质量;碳组分分析采用热光法进行(DRI2001A),由环境保护部

华南环境科学研究所进行测定,测定项目包括有机碳(OC)和元素碳(EC),为确保仪器稳定性,每次采样前均利用标准蔗糖溶液校正仪器参数,并测试仪器空白,详见文献^[30].

1.2 数据处理

本研究主要选择2010年5~10月(光化学反应最强烈的月份)对二次气溶胶生成量的影响进行研究.CO和 O_3 分别用来作为机动车排放一次源和光化学活动水平的二次来源指示物种.光化学活动水平的评价是基于每天小时 O_3 最大浓度值进行评价.当光化学活动水平比较低($< 0.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)时,观测 PM_{10} 浓度主要来自于一次源排放(包括海盐);然后利用小时 PM_{10}/CO 值来代表一次气溶胶排放情况;当光化学活动水平 $O_{3,max} > 0.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, PM_{10} 一次排放浓度用以上的比值乘以CO浓度来估算,二次气溶胶浓度估算利用观测的 PM_{10} 浓度减去 PM_{10} (一次).

众所周知,光化学反应生成的二次气溶胶主要产生于细颗粒物中,在此用 PM_{10} 代替 $PM_{2.5}$,主要由于 PM_{10} 有较成熟的国家规范(包括质控质保措施)可以执行,来确保数据的准确性和有效性;随后选择部分 $PM_{2.5}$ 数据进行验证,在 $O_3 > 0.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,二次生成的气溶胶占 $PM_{2.5}$ 的77.8%,占 $PM_{2.5}$ 的55.4%;这暗示了 PM_{10} 中二次气溶胶中在 $PM_{2.5}$ 中占据主导作用.

1.3 光化学水平的分类

为了有效证明 PM_{10} 中二次气溶胶的影响, $O_{3,max}$ 用来作为光化学反应水平的指示物种(由于二次气溶胶的生成与光化学水平密切相关).为了了解不同光化学水平条件下对二次气溶胶影响的差异,依据日均小时 $O_{3,max}$ 浓度将其分为4类: $< 0.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ($n=61$)、 $0.10 \sim 0.16 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ($n=71$)、 $0.16 \sim 0.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ($n=22$)和 $> 0.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ($n=17$).

为了进一步测试该分类所代表光化学活动水平的合理性,进一步对不同光化学水平($O_{3,max}$)条件下 PM_{10} 和CO日变化特征进行分析(图1).图1显示,随着光化学水平增强, PM_{10} 的日变化特征存在明显差异,低光化学水平条件下, PM_{10} 日变化呈现为明显的双峰变化特征,高光化学水平条件下却呈现单峰的变化特征;CO的日变化规律随光化学水平的变化均呈现早晚双峰的变化特征.由以上可知,在低光化学水平($O_{3,max}$)条件下, PM_{10} 与CO日变化均呈现早晚双峰的变化特征,说明存在较为一致的排放源;但高光化学水平条件下时,几乎没有任何相关

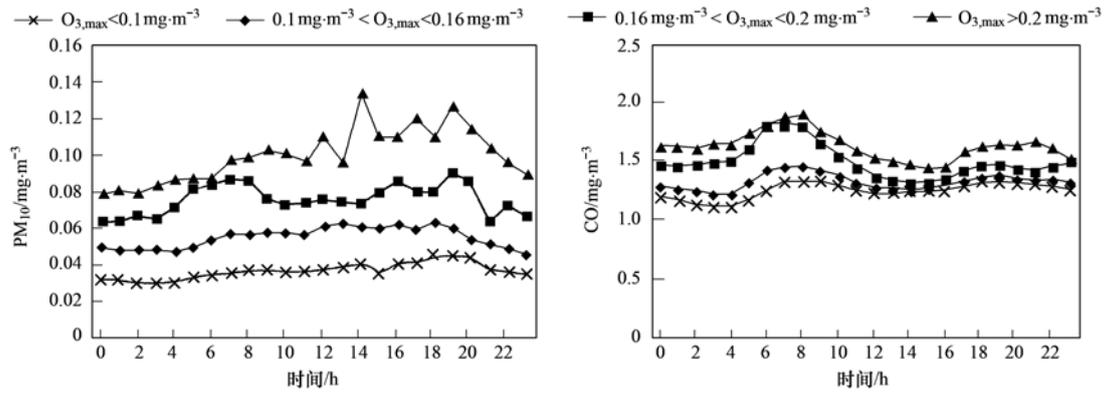


图1 不同光化学水平条件($O_{3,max}$)下 PM_{10} 和CO日变化特征

Fig. 1 Daily variation of PM_{10} and CO at different $O_{3,max}$ levels

性. 这说明在高光化学水平条件下, 大气发生更为强烈的光化学反应, 从而生成更多的二次气溶胶, 使得 PM_{10} 中二次气溶胶组分的比例增大^[31].

1.4 二次气溶胶的估算

PM_{10} 中一次、二次气溶胶的估算主要参考文献[16]的方法进行, 一次气溶胶的计算公式如下:

$$(PM_{10})_{p,M,h} = CO_{M,h} \times (PM_{10}/CO)_{p,L,h}$$

$$(PM_{10})_{p,LH,h} = CO_{LH,h} \times (PM_{10}/CO)_{p,L,h}$$

$$(PM_{10})_{p,H,h} = CO_{H,h} \times (PM_{10}/CO)_{p,L,h}$$

式中, p 代表一次污染物; h 代表 1 d 中时刻数; L 代表 $O_{3,max} < 0.1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$; M 代表 $0.10 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3} < O_{3,max} < 0.16 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$; LH 代表 $0.16 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3} < O_{3,max} < 0.20 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$; H 代表 $O_{3,max} > 0.20 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$.

二次气溶胶采用以下的估算公式:

$$(PM_{10})_{sec,M,h} = (PM_{10})_{obs,M,h} - (PM_{10})_{p,M,h}$$

$$(PM_{10})_{sec,LH,h} = (PM_{10})_{obs,LH,h} - (PM_{10})_{p,LH,h}$$

$$(PM_{10})_{sec,H,h} = (PM_{10})_{obs,H,h} - (PM_{10})_{p,H,h}$$

式中, sec 代表二次污染物; obs 代表观测的 PM_{10} 浓度.

2 结果与讨论

2.1 不同光化学水平条件下气象传输条件

为了进一步减少其它因素对该方法二次气溶胶生成估算的影响, 对不同光化学水平条件下的风向风频图进行统计分析. 由图 2 可见, 不同光化学水平条件下的风向均以南风 and 东南风为主, 并且均有小幅北风的影响; 这说明不同光化学水平条件下, 风向对其影响可以忽略不计; 也即说明不同光化学水平条件下污染物的来源极为接近.

2.2 不同光化学水平下一次气溶胶和二次气溶胶

的变化特征

图 3 显示了不同光化学水平条件下 PM_{10} 中二次与一次气溶胶的排放浓度及比例. 从中可知: $O_{3,max}$ 浓度为 $0.1 \sim 0.16$ 、 $0.16 \sim 0.20$ 和 $> 0.2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 二次占一次气溶胶的比例呈现较大差异; 当 $O_{3,max}$ 在 $0.1 \sim 0.16 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, PM_{10} 中的二次气溶胶浓度占一次气溶胶的 49.8%, 占总 PM_{10} 浓度的 33.2%; 当 $O_{3,max}$ 在 $0.16 \sim 0.20 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, PM_{10} 中的二次气溶胶浓度占一次气溶胶的 85.5%, 占总 PM_{10} 浓度的 46.1%; 当 $O_{3,max} > 0.2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, PM_{10} 中的二次气溶胶浓度超过一次气溶胶, 其比值为 124.5%, 占总 PM_{10} 浓度的 55.4%. 从绝对浓度来看, 不同臭氧活动水平下, 一次排放的 PM_{10} 浓度差异不大 ($0.0365 \sim 0.0443 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$), 但 PM_{10} 中二次生成量却呈数倍的差异 ($0.0182 \sim 0.0552 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$). 这说明, 光化学活动对颗粒物生成的影响较大. Chang 等^[31] 利用该方法对台北的二次气溶胶进行估算, 并指出当 $O_{3,max} > 0.258 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, 二次气溶胶在 PM_{10} 中的贡献为 43%, 这明显低于本研究结果; 说明高光化学水平条件下, 上海市二次气溶胶生成潜势及生成量均高于台北.

2.3 不同光化学活动水平下 PM_{10} 、 PM_{10}/CO 比值变化

基于 2010 年 5 ~ 10 月光化学活动的分类, PM_{10} 、 PM_{10}/CO 和 O_3 日均值浓度变化详见图 4. 随着光化学水平 (即 $O_{3,max}$) 的增强, O_3 浓度呈现越陡的单峰日变化特征, PM_{10}/CO 出现高值时间段持续更长, 说明更多时间存在二次气溶胶的生成. 当 $O_{3,max}$ 浓度小于 $0.1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, PM_{10} 和 O_3 浓度均较低, 并且小时变化幅度较小; 当 $O_{3,max}$ 浓度在 $0.10 \sim 0.16 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, PM_{10} 浓度变化不明显, O_3 呈现相对较

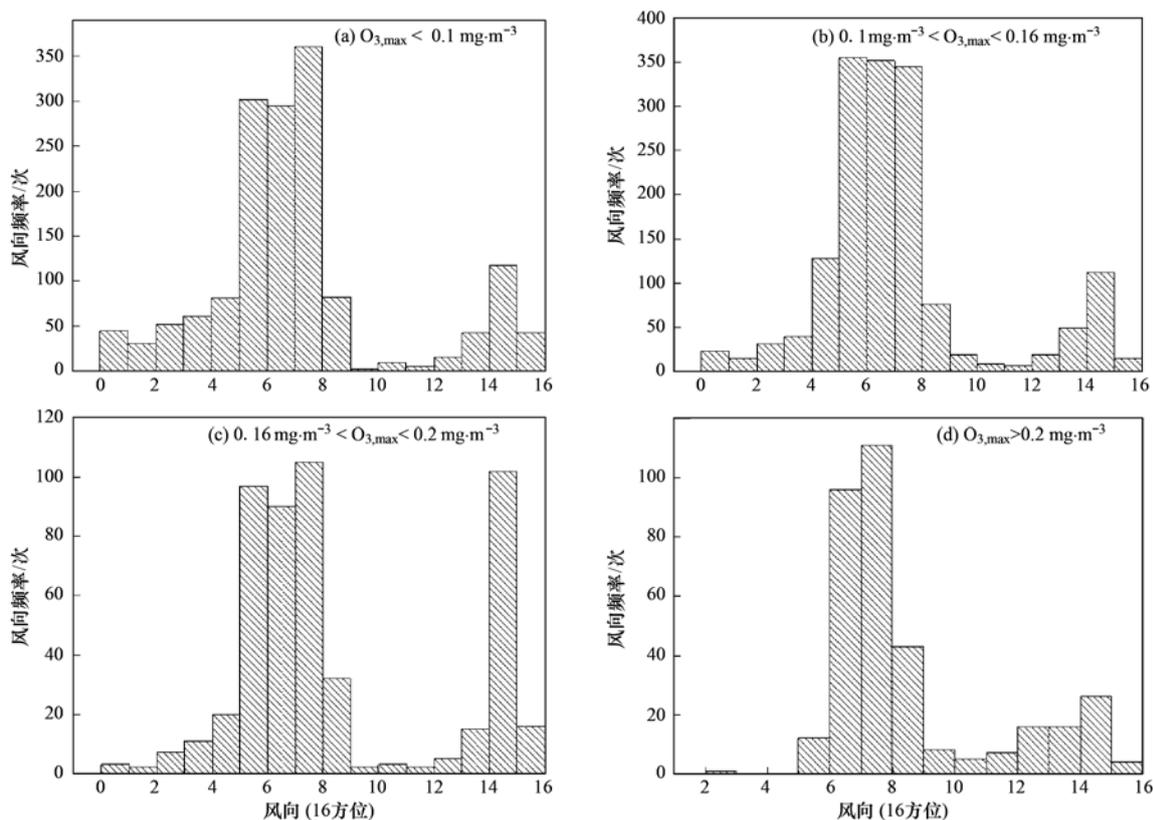


图 2 不同光化学水平条件 ($O_{3,max}$) 下风频图

Fig. 2 Variation of wind direction at different $O_{3,max}$ levels

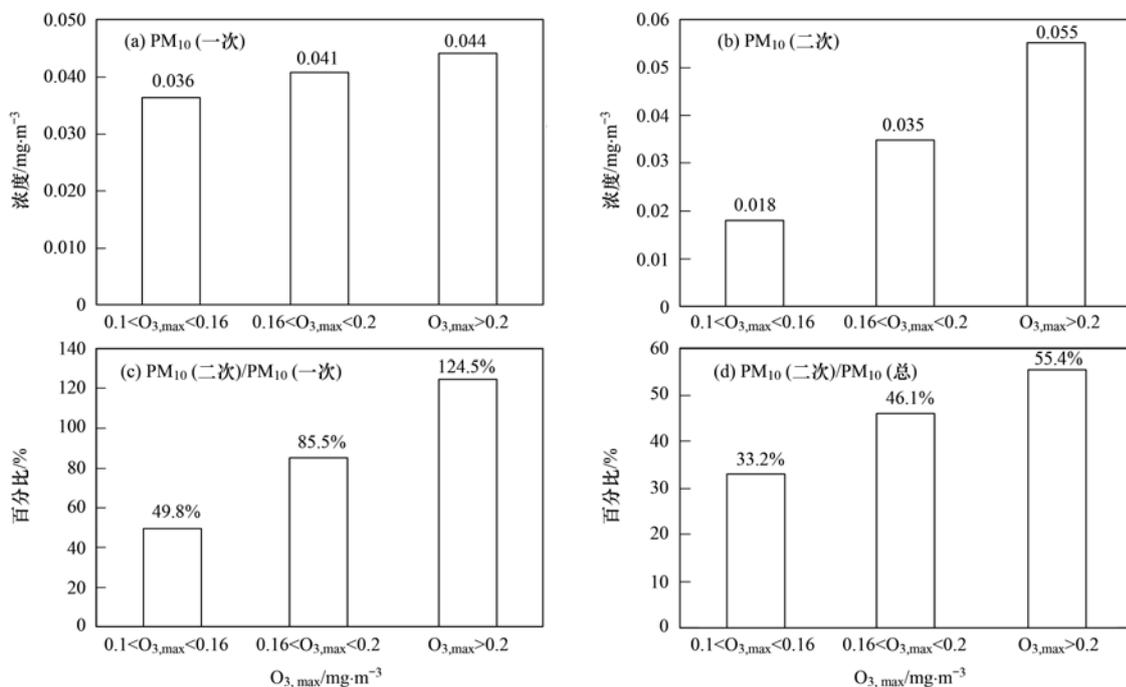
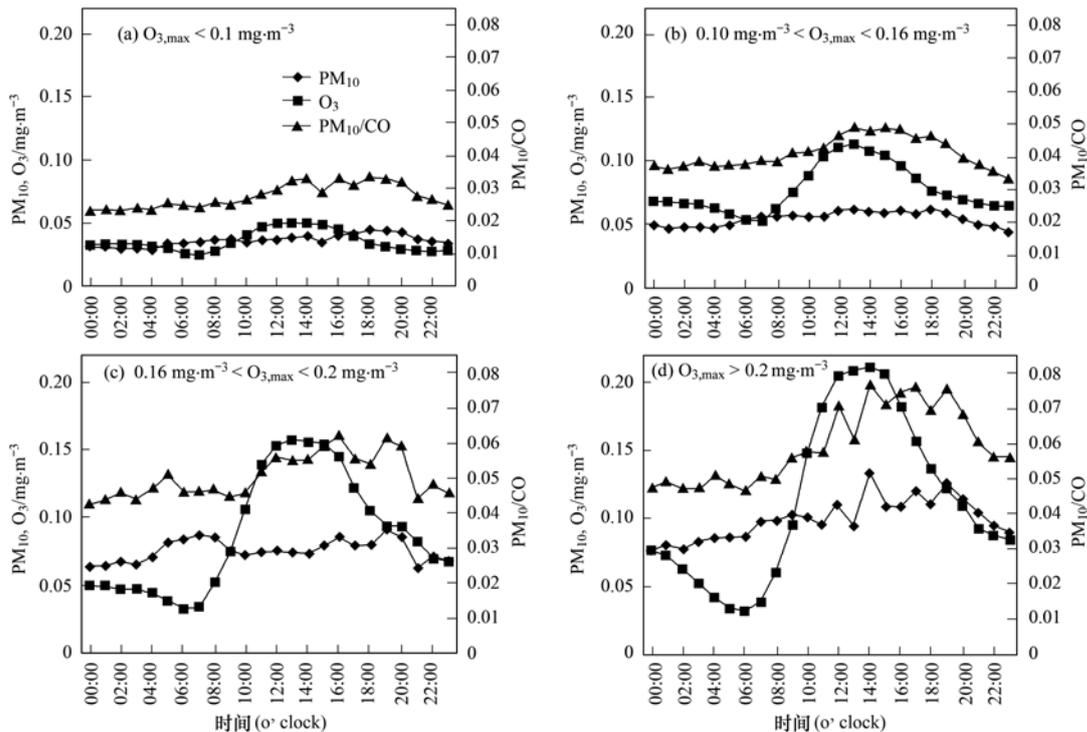


图 3 不同 $O_{3,max}$ 条件下, PM_{10} 中一次和二次气溶胶的浓度及比例

Fig. 3 Variation of concentration and ratio of primary and secondary aerosol in PM_{10} at different $O_{3,max}$ levels

为明显的单峰日变化特征, O_3 最大小时浓度出现在 13:00, 其值为 $0.113 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, PM_{10}/CO 在 13:00 ~

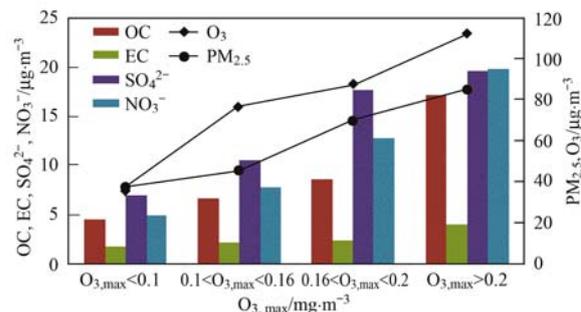
18:00 较高, 说明该段时间是该光化学水平条件下二次气溶胶生成的主要时段. 当 $O_{3,max}$ 浓度在 0.16

图4 不同 $O_{3,max}$ 条件下, PM_{10} 、 O_3 和 PM_{10}/CO 日变化特征Fig. 4 Daily variation of PM_{10} , O_3 and PM_{10}/CO at different $O_{3,max}$ levels

$\sim 0.20 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, PM_{10} 和 O_3 浓度的日变化特征更为明显,最大 O_3 浓度出现在 13:00, 其值为 $0.158 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, PM_{10}/CO 值从 11:00 开始迅速增加,直至下午 20:00 以后才逐步变小,说明该光化学水平条件下二次气溶胶生成的主要时段更长。当 $O_{3,max}$ 浓度 $> 0.20 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, O_3 最大小时浓度发生在 14:00, 其浓度为 $0.212 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, PM_{10}/CO 从 09:00 开始迅速增加,直至下午 20:00 才逐步变小,说明光化学水平继续升高,二次气溶胶开始的生成时间会有所提前。由以上可知,光化学活动水平越强, O_3 浓度越高, $O_{3,max}$ 出现的时间有所延后(从 13:00 ~ 14:00),二次气溶胶生成主要时段也有所延长,并且光化学活动水平越强,二次气溶胶开始生成的时间就越早。

2.4 $PM_{2.5}$ 中观测主要成分与二次气溶胶估算关系

由于光化学反应生成的二次气溶胶以细粒子为主,因此,进一步利用观测的 $PM_{2.5}$ 质量浓度与组分数据进行分析 and 验证。图 5 显示了不同 $O_{3,max}$ 条件下, $PM_{2.5}$ 、 O_3 和 $PM_{2.5}$ 组分变化特征。随着光化学水平(即 $O_{3,max}$ 浓度)增加, $PM_{2.5}$ 及其二次主要组分 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、OC 均呈现迅速增加的变化特征;说明根据 $O_{3,max}$ 浓度对光化学活动水平进行分类,能合理并且有效地反映出二次主要组分 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、OC

图5 不同 $O_{3,max}$ 条件下, O_3 、 $PM_{2.5}$ 和其组分变化特征Fig. 5 Variation of O_3 , $PM_{2.5}$ mass concentration and chemical composition of $PM_{2.5}$ at different $O_{3,max}$ levels

随着光化学水平的变化特征。

目前,由于光化学反应生成的二次气溶胶准确定量主要通过比值法^[32]、气溶胶生成潜势^[6]等方法来初步估算,尚存在很大的确定性;在此利用直接观测到的主要组分的浓度与估算得到的浓度进行比较分析存在一定的不足,但也可反映出该方法的合理性,详见图 6。从中可见,该方法估算 $PM_{2.5}$ 中二次气溶胶生成量与实验室测量分析的结果存在较好的一致性,尤其在高臭氧浓度污染条件下,其一致性最好。该方法对颗粒物中二次气溶胶生成量估算的不确定性尚需要通过更加准确的方法和数据进行验证。

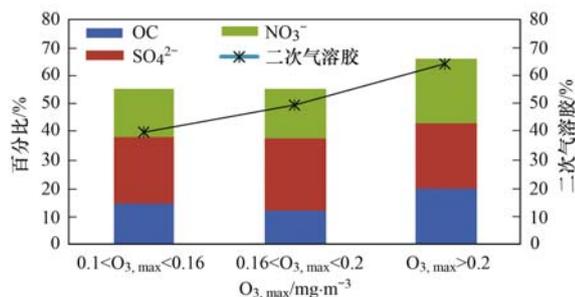


图6 不同 $O_{3,max}$ 条件下, $PM_{2.5}$ 中主要二次组分与估算二次气溶胶的变化特征

Fig. 6 Variation of estimated secondary aerosol and major chemical composition of $PM_{2.5}$ at different $O_{3,max}$ levels

3 结论

(1) 利用不同 $O_{3,max}$ 反映不同光化学水平结合 PM_{10}/CO 初步估算上海浦东城区 PM_{10} 中一次与二次气溶胶浓度水平。

(2) 不同光化学水平条件下, PM_{10} 中一次与二次气溶胶的变化特征存在较大差异。光化学水平较低时, PM_{10} 中的二次气溶胶浓度占一次气溶胶比例的 49.8%; 光化学水平较高时, PM_{10} 中的二次气溶胶浓度超过一次气溶胶, 其比值高达 124.5%。不同光化学活动水平下, 一次气溶胶排放的 PM_{10} 浓度差异不大 ($0.0365 \sim 0.0443 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$), 但 PM_{10} 中二次生成组分却呈数倍的差异 ($0.0182 \sim 0.0552 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$), 说明由于光化学反应生成大量的二次气溶胶。

(3) 不同光化学水平条件下, $O_{3,max}$ 及二次气溶胶生成的时间存在较大差异。随着光化学水平的增强, $O_{3,max}$ 出现的时间由 13:00 推迟到 14:00, 二次气溶胶生成的主要时段也从 11:00 ~ 20:00 增加到 09:00 ~ 20:00, 增加 2 h, 说明光化学水平增强, 二次气溶胶生成的时间范围扩大。

(4) $PM_{2.5}$ 中主要组分 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、OC 浓度随着光化学水平 (即 $O_{3,max}$ 浓度) 增加呈现增加的变化特征, 其主要二次组分浓度与二次气溶胶估算结果存在较好的一致性, 说明该方法具有一定合理性。

参考文献:

[1] Harrison R M, Deacon A R, Jones M R. Sources and processes affecting concentrations of PM_{10} and $PM_{2.5}$ particulate matter in Birmingham (UK) [J]. *Atmospheric Environment*, 1997, **31** (24): 4103-4117.
 [2] Emmerson K M, MacKenzie A R, Owen S M, et al. A Lagrangian model with simple primary and secondary aerosol scheme 1: comparison with UK PM_{10} data [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2004, **4**(8): 2161-2170.

[3] 白志鹏, 李伟芳. 二次有机气溶胶的特征和形成机制[J]. *过程工程学报*, 2008, **8**(1): 202-208.
 [4] Kleindienst T E, Lewandowski M, Offenberg J H, et al. Contribution of primary and secondary sources to organic aerosol and $PM_{2.5}$ at SEARCH network sites [J]. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 2010, **60**(11): 1388-1399.
 [5] Cabada J C, Pandis S N, Subramanian R, et al. Estimating the secondary organic aerosol contribution to $PM_{2.5}$ using the EC tracer method-Special issue of *Aerosol Science and Technology* on findings from the fine particulate matter supersites program [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2004, **38**(S1): 140-155.
 [6] Barthelmie R J, Pryor S C. Secondary organic aerosols: formation potential and ambient data [J]. *Science of the Total Environment*, 1997, **205**(2-3): 167-178.
 [7] K Na, Sawant A A, Song C, et al. Primary and secondary carbonaceous species in the atmosphere of Western Riverside County, California [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38** (9), 1345-1355.
 [8] 张元茂, 郑叶飞, 楼文艳. 上海市中心城区臭氧污染水平和变化状况[J]. *环境监测管理与技术*, 2003, **15**(5): 15-20.
 [9] Ye B M, Ji X L, Yang H Z, et al. Concentration and chemical composition of $PM_{2.5}$ in Shanghai for a 1-year period [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(4): 499-510.
 [10] Cheung V T F, Wang T. Observational study of ozone pollution at a rural site in the Yangtze Delta of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(29): 4947-4958.
 [11] 伏晴艳. 上海市空气污染排放清单及大气中高浓度细颗粒物的形成机制[D]. 上海: 复旦大学, 2009. 2-40.
 [12] 吴晓璐. 长三角地区大气污染物排放清单研究[D]. 上海: 复旦大学, 2009. 2-40.
 [13] Turnbull A B, Harrison R M. Major component contributions to PM_{10} composition in the UK atmosphere [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(19): 3129-3137.
 [14] Aneja V P, Wang B Y, Tong D Q, et al. Characterization of major chemical components of fine particulate matter in North Carolina [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2006, **56**(8): 1099-1107.
 [15] Turpin B J, Huntzicker J J. Identification of secondary organic aerosol episodes and quantitation of primary and secondary organic aerosol concentrations during SCAQS [J]. *Atmospheric Environment*, 1995, **29**(23): 3527-3544.
 [16] 吕文英, 徐海娟, 王新明. 广州城区秋季大气 $PM_{2.5}$ 中主要水溶性无机离子分析[J]. *环境科学与技术*, 2010, **33**(1): 98-101.
 [17] 刘子锐, 王跃思, 刘全, 等. 鼎湖山秋季大气细粒子及其二次无机组分的污染特征及来源[J]. *环境科学*, 2011, **32** (11): 3160-3166.
 [18] 赵亚南, 王跃思, 温天雪, 等. 贡嘎山大气气溶胶中水溶性无机离子的观测与分析研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(1): 9-13.
 [19] 徐宏辉, 王跃思, 温天雪, 等. 北京大气气溶胶中水溶性离子的粒径分布和垂直分布[J]. *环境科学*, 2007, **28**(1): 14-19.

- [20] 毛华云,田刚,黄玉虎,等.北京市大气环境中硫酸盐、硝酸盐粒径分布及存在形式[J].环境科学,2011,32(5):1237-1241.
- [21] 高晓梅,王韬,周杨,等.泰山春、夏两季大气颗粒物及其水溶性无机离子的粒径分布特征[J].环境化学,2011,30(3):686-692.
- [22] 徐宏辉,王跃思,杨勇杰,等.泰山顶夏季大气气溶胶中水溶性离子的浓度及其粒径分布研究[J].环境科学,2008,29(2):305-309.
- [23] 韩月梅,沈振兴,曹军骥,等.西安市大气颗粒物中水溶性无机离子的季节变化特征[J].环境化学,2009,28(2):261-266.
- [24] 陶俊,张仁健,董林,等.夏季广州城区细颗粒物 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{1.0}$ 中水溶性无机离子特征[J].环境科学,2010,31(7):1417-1423.
- [25] Weber R, Orsini D, Duan Y, *et al.* Intercomparison of near real time monitors of $PM_{2.5}$ nitrate and sulfate at the U. S. Environmental Protection Agency Atlanta Supersite[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(D7): 8421.
- [26] 刘君峰.大气细粒子化学组分在线监测系统及其实时变化特征[D].广州:广州地球化学研究所,2007.2-40.
- [27] 唐静玥,曾立民,胡敏,等.利用气体-气溶胶在线测量技术研究乌鲁木齐颗粒物水溶性组分与气体污染[J].环境科学学报,2009,29(11):2250-2258.
- [28] 寿幼平.济南大气 $PM_{2.5}$ 中无机离子在线观测研究[D].济南:山东大学,2010.3-20.
- [29] 杜欢欢.上海大气气溶胶化学特征及其对灰霾形成影响[D].上海:复旦大学,2011.3-17.
- [30] 张懿华,段玉森,高松,等.上海城区典型空气污染过程中细颗粒污染特征研究[J].中国环境科学,2011,31(7):1115-1121.
- [31] Chang S C, Lee C T. Secondary aerosol formation through photochemical reactions estimated by using air quality monitoring data in Taipei City from 1994 to 2003 [J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(19): 4002-4017.
- [32] 王东方,高松,段玉森,等.上海中心城区冬季 $PM_{2.5}$ 中有机碳和元素碳组成变化特征[J].环境科学与技术,2012,35(7):55-72.

CONTENTS

Advances in Peroxide-Based Decontaminating Technologies	XI Hai-ling, ZHAO San-ping, ZHOU Wen (1645)
Environmental Damage Assessment; International Regulations and Revelation to China	ZHANG Hong-zhen, CAO Dong, YU Fang, <i>et al.</i> (1653)
Human Health Risk-Based Environmental Criteria for Soil: A Comparative Study Between Countries and Implication for China	XU Meng, YAN Zeng-guang, HE Meng-meng, <i>et al.</i> (1667)
Organic Waste Treatment by Earthworm Vermicomposting and Larvae Bioconversion: Review and Perspective	ZHANG Zhi-jian, LIU Meng, ZHU Jun (1679)
Strategies of Nutrients Control in Lakes Based on Ecoregions of Lakes in China	DIAO Xiao-jun, XI Bei-dou, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (1687)
Current Status of Surface Water Acidification in Northeast China	XU Guang-yi, KANG Rong-hua, LUO Yao, <i>et al.</i> (1695)
Impact Analysis of Xi'an to the Water Quality of Weihe River	YU Jie, LI Huai-en (1700)
Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Its Affecting Factors in the Pearl River Estuary During the Summer of the Extremely Drought Hydrological Year 2011	YE Feng, HUANG Xiao-ping, SHI Zhen, <i>et al.</i> (1707)
Application of Equilibrium Partitioning Approach to Establish Sediment Quality Criteria for Heavy Metals in Hengyang Section of Xiangjiang River	HAN Chao-nan, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (1715)
Assessing the Benthic Ecological Status in Yangtze River Estuary Using AMBI and M-AMBI	CAI Wen-qian, MENG Wei, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (1725)
Pollution Load and the First Flush Effect of BOD ₅ and COD in Urban Runoff of Wenzhou City	WANG Jun, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1735)
Influencing Factors in Measuring Absorption Coefficient of Suspended Particulate Matters	YU Xiao-long, SHEN Fang, ZHANG Jin-fang (1745)
Relationship Between pCO ₂ and Algal Biomass in Xiangxi Bay in Spring	YUAN Xi-gong, HUANG Wen-min, BI Yong-hong, <i>et al.</i> (1754)
Effects of Turbulent Fluctuation Intensity on the Growth of Algae and Water Environment	LEI Yu, LONG Tian-yu, SAN Lei, <i>et al.</i> (1761)
Simultaneous Removal of Algae and Its Odorous Metabolite Dimethyl Trisulfide in Water by Potassium Ferrate	MA Xiao-yan, ZHANG Ze-hua, WANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1767)
Catalyzed Oxidation of Catechol by the Heterogeneous Fenton-like Reaction of Nano-Fe ₃ O ₄ -H ₂ O ₂ System	HE Jie, YANG Xiao-fang, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1773)
Photodegradation of Naproxen in Aqueous Systems by UV Irradiation: Mechanism and Toxicity of Photolysis Products	MA Du-juan, LIU Guo-guang, LÜ Wen-ying, <i>et al.</i> (1782)
Catalytic Ozonation of Nitrobenzene in Water by Acidification-activated Red Mud	KANG Ya-ning, LI Hua-nan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1790)
Experimental Studies on Stability of Floes from Cadmium Pollution Emergency Treatment	LIU Wang-rong, GUO Qing-wei, YANG Ren-bin, <i>et al.</i> (1797)
Evaluation of Floc Strength Based on Morphological Analysis and Optical Online Monitoring	JIN Peng-kang, FENG Yong-ning, WANG Bao-bao, <i>et al.</i> (1802)
Mechanism of Reductive Dechlorination of Trichlorophenol with Different Electron Donors	WAN Jin-quan, HU Meng-die, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (1808)
Preparation of Magnetic Quaternary Chitosan Salt and Its Adsorption of Methyl Orange from Water	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, YING Shi-ying, <i>et al.</i> (1815)
Membrane Fouling by Secondary Effluent of Urban Sewage and the Membrane Properties	MENG Xiao-rong, ZHANG Hai-zhen, WANG Lei, <i>et al.</i> (1822)
Treatment of Municipal Wastewater Using the Combined Reversed A ² /O-MBR Process	ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, YANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1828)
Study on Sulfur-based Autotrophic Denitrification with Different Electron Donors	YUAN Ying, ZHOU Wei-li, WANG Hui, <i>et al.</i> (1835)
Nitrogen Removal and N ₂ O Emission Characteristics During the Shortcut Simultaneous Nitrification and Denitrification Process	LIANG Xiao-ling, LI Ping, WU Jin-hua, <i>et al.</i> (1845)
Optimization of Solid-Phase Extraction for Enrichment of Toxic Organic Compounds in Water Samples	ZHANG Ming-quan, LI Feng-min, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (1851)
Polycyclic Musks Exposure Affects Gene Expression of Specific Proteins in Earthworm <i>Eisenia fetida</i>	CHEN Chun, LIU Xiao-wei, ZHENG Shun-an, <i>et al.</i> (1857)
Health Risk Assessment and Ozone Formation Potentials of Volatile Organic Compounds from Pharmaceutical Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, WANG Zhe-ming, XU Ming-zhu, <i>et al.</i> (1864)
Health Effect of Volatile Aldehyde Compounds in Photocatalytic Oxidation of Aromatics Compounds	ZHAO Wei-rong, LIAO Qiu-wen, YANG Ya-nan, <i>et al.</i> (1871)
Compositions and Distribution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in Serum of Women from Sichuan Province	SHAO Min, CHEN Yong-heng, LI Xiao-yu (1877)
QSAR/QSPR for Predicting the Toxicity of Imidazolium Ionic Liquids	ZHAO Ji-hong, ZHAO Yong-sheng, ZHANG Hong-zhong, <i>et al.</i> (1882)
Spatial and Temporal Characteristics of Heavy Metal Concentration of Surface Soil in Hebin Industrial Park in Shizuishan Northwest China	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ning, <i>et al.</i> (1887)
Distribution Characteristic and Current Situation of Soil Rare Earth Contamination in the Bayan Obo Mining Area and Baotou Tailing Reservoir in Inner Mongolia	GUO Wei, FU Rui-ying, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1895)
Road Dust Loading and Chemical Composition at Major Cities in Fujian Province	ZHENG An, YANG Bing-yu, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1901)
Numerical Simulation and Application of Electrical Resistivity Survey in Heavy Metal Contaminated Sites	WANG Yu-ling, NAI Chang-xin, WANG Yan-wen, <i>et al.</i> (1908)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Rare Earth Elements Uptake of Soybean Grown in Rare Earth Mine Tailings	GUO Wei, ZHAO Ren-xin, ZHAO Wen-jing, <i>et al.</i> (1915)
Algicidal Activity Against Red-tide Algae by Marine Bacterial Strain N3 Isolated from a HABs Area, Southern China	SHI Rong-jun, HUANG Hong-hui, QI Zhan-hui, <i>et al.</i> (1922)
Isolation, Identification and Oxidizing Characterization of an Iron-Sulfur Oxidizing Bacterium LY01 from Acid Mine Drainage	LIU Yu-jiao, YANG Xin-ping, WANG Shi-mei, <i>et al.</i> (1930)
Isolation of an Effective Benzo[a]pyrene Degrading Strain and Its Degradation Characteristics	CAI Han, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1937)
Aerobic Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether	ZHANG Shu, Franco Giulio, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (1945)
Piggery Wastewater Cultivating Biofloculant-Producing Flora B-737 and the Fermentation Characteristics	PEI Rui-lin, XIN Xin, ZHANG Xue-qiao, <i>et al.</i> (1951)
Correlation Between Acidic Materials and Acid Deposition in Beijing During 1997-2011	CHEN Yuan-yuan, TIAN He-zhong, YANG Dong-yan, <i>et al.</i> (1958)
Characteristics of Precipitation pH and Conductivity at Mt. Huang	SHI Chun-e, DENG Xue-liang, WU Bi-wen, <i>et al.</i> (1964)
Chemical Characteristics of Water-Soluble Components of Aerosol Particles at Different Altitudes of the Mount Huang in the Summer	WEN Bin, YIN Yan, QING Yan-shuo, <i>et al.</i> (1973)
Pollution Characteristics of Organic Acids in Atmospheric Particles During Haze Periods in Autumn in Guangzhou	TAN Ji-hua, ZHAO Jing-ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (1982)
Characterization of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in Three Major Cities in Fujian Province, China	CHEN Yan-ting, CHEN Jin-sheng, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1988)
Size Distribution of Carbonaceous Particulate Matter in Atmosphere of Shanghai, China	YUAN Ning, LIU Wei, ZHAO Xiu-liang, <i>et al.</i> (1995)
Secondary Aerosol Formation Through Photochemical Reactions Estimated by Using Air Quality Monitoring Data in the Downtown of Pudong, Shanghai	CUI Hu-xiong, WU Ya-ming, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (2003)
Geochemical Characteristics and Sources of Atmospheric Particulates in Shanghai During Dust Storm Event	QIAN Peng, ZHENG Xiang-min, ZHOU Li-min (2010)
Near Surface Atmospheric CO ₂ Variations in Autumn at Suburban Xiamen, China	LI Yan-li, MU Chao, DENG Jun-jun, <i>et al.</i> (2018)
<i>In-situ</i> Measurement of Background Atmospheric HCFC-142b Using GC-MS and GC-ECD Method	GUO Li-feng, YAO Bo, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (2025)
Airborne Fungal Community Composition in Indoor Environments in Beijing	FANG Zhi-guo, OUYANG Zhi-yun, LIU Peng, <i>et al.</i> (2031)
Study on Quantification Assessment and Odor Fingerprint of Volatile Aromatic Hydrocarbons from Sewage Treatment Plant	GUO Wei, WANG Bo-guang, TANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (2038)
Superposition Impact Character of Air Pollution from Decentralization Docks in a Freshwater Port	LIU Jian-chang, LI Xing-hua, XU Hong-lei, <i>et al.</i> (2044)
Thermal Stability and Transformation Behaviors of Pb in Yima Coal	LIU Rui-qing, WANG Jun-wei (2051)
Synergistic Emission Reduction of Chief Air Pollutants and Greenhouse Gases Based on Scenario Simulations of Energy Consumptions in Beijing	XIE Yuan-bo, LI Wei (2057)

《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)

2013年5月15日 34卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 5 May 15, 2013

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