

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第8期

Vol.36 No.8

2015

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16S rRNA 基因测序法分析北京霾污染过程中 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 细菌群落特征	王步英, 郎继东, 张丽娜, 方剑火, 曹晨, 郝吉明, 朱昕, 田埂, 蒋靖坤 (2727)
北京城区冬季降尘微量元素分布特征及来源分析	熊秋林, 赵文吉, 郭道宇, 陈凡涛, 束同同, 郑晓霞, 赵文慧 (2735)
北京市典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物污染特征	程婧晨, 崔彤, 何万清, 聂磊, 王军玲, 潘涛 (2743)
基于实际道路交通流信息的北京市机动车排放特征	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 曲松 (2750)
夏季珠江三角洲地区 PM _{2.5} 化学组分特征及其对大气能见度的影响	杨毅红, 瞿群, 刘随心, 李雄, 钟佩仪, 陶俊 (2758)
隧道工人的 PM ₁₀ 职业暴露特征调查分析及其健康风险评价	向华丽, 杨俊, 仇珍珍, 雷万雄, 曾婷婷, 兰志财 (2768)
基于在线监测的江苏省大型固定燃煤源排放清单及其时空分布特征	张英杰, 孔少飞, 汤莉莉, 赵天良, 韩永翔, 于红霞 (2775)
柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源	朱建佳, 陈辉, 巩国丽 (2784)
长江口-浙闽沿岸沉积色素的分布特征及其指示意义	李栋, 姚鹏, 赵彬, 王金鹏, 潘慧慧 (2791)
“引江济太”过程中长江-望虞河-贡湖氮、磷输入特征研究	潘晓雪, 马迎群, 秦延文, 邹华 (2800)
重庆市典型城镇区地表径流污染特征	王龙涛, 段丙政, 赵建伟, 华玉妹, 朱端卫 (2809)
调水调沙对黄河下游颗粒有机碳运输的影响	张婷婷, 姚鹏, 王金鹏, 潘慧慧, 高立蒙, 赵彬, 李栋 (2817)
青藏高原冰川区可溶性有机碳含量和来源研究	严芳萍, 康世昌, 陈鹏飞, 柏建坤, 李洋, 胡召富, 李潮流 (2827)
岩溶区地下水补给型水库表层无机碳时空变化特征及影响因素	李建鸿, 蒲俊兵, 袁道先, 刘文, 肖琼, 于爽, 张陶, 莫雪, 孙平安, 潘谋成 (2833)
室内模拟不同因子对岩溶作用与碳循环的影响	赵瑞一, 吕现福, 段逸凡 (2843)
新乡市地表水体 HCHs 和 DDTs 的分布特征及生态风险评价	冯精兰, 余浩, 刘书卉, 刘梦琳, 孙剑辉 (2849)
青木关地下河系统中不同含水介质下正构烷烃对比研究	梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 江泽利, 廖昱, 谢正兰, 张媚 (2857)
三峡库区长寿湖水体不同形态汞的空间分布特征	白薇扬, 张成, 赵锋, 唐振亚, 王定勇 (2863)
燃煤电厂周围渔业养殖行为对水生生态环境中汞形态变化的影响	梁鹏, 王远娜, 尤琼智, 高雪飞, 何杉杉 (2870)
运用硫同位素、氮氧同位素示踪厘清湖地下河硫酸盐、硝酸盐来源	李瑞, 肖琼, 刘文, 郭芳, 潘谋成, 于爽 (2877)
藻华聚集的生态效应: 对凤眼莲叶绿素和光合作用的影响	刘国锋, 何俊, 杨轶中, 韩士群 (2887)
DOM 对被动采样技术的影响与应用	于尚云, 周岩梅 (2895)
蛋白质对 PVDF 超滤膜污染行为的界面微观作用力解析	王旭东, 周森, 孟晓荣, 王磊, 黄丹曦, 夏四清 (2900)
水环境中碳纳米管对沙丁胺醇降解的影响	汪祺, 韩佳芮, 魏博凡, 周磊, 张亚, 杨曦 (2906)
β -In ₂ S ₃ 的制备及其太阳光下降解土霉素	艾翠玲, 周丹丹, 张嵘嵘, 邵享文, 雷英杰 (2911)
排水管道沉淀物氮释放特性的研究	陈红, 卓琼芳, 许振成, 王劲松, 魏清伟 (2918)
生物膜 CANON 反应器中沉积物影响及其成因分析	付昆明, 王会芳, 左早荣, 仇付国 (2926)
ABR-MBR 一体化工艺节能降耗措施优化研究	吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 刘捷, 沈耀良 (2934)
两个 CANON 污水处理系统中氨氧化古菌的丰度和多样性研究	高景峰, 李婷, 张树军, 樊晓燕, 潘凯玲, 马谦, 袁亚林 (2939)
ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥形成机制及其除污效能研究	巫恺澄, 吴鹏, 徐乐中, 李月寒, 沈耀良 (2947)
珠江三角洲地区土壤有机氯农药分布特征及风险评价	窦磊, 杨国义 (2954)
广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价	吴洋, 杨军, 周小勇, 雷梅, 高定, 乔鹏伟, 杜国栋 (2964)
开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险	段海静, 蔡晓强, 阮心玲, 全致琦, 马建华 (2972)
我国西南地区氮饱和马尾松林土壤和植物 ¹⁵ N 自然丰度对长期氮施加的响应	刘文静, 康荣华, 张婷, 朱婧, 段雷 (2981)
黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征	李婷, 邓强, 袁志友, 焦峰 (2988)
开顶式气室原位研究水稻根系对大气汞浓度升高的响应	陈剑, 王章玮, 张晓山, 秦普丰, 陆海军 (2997)
接种丛枝菌根真菌对蜈蚣草吸收砷的影响	郑文君, 王明元 (3004)
水稻种植对黑土微生物生物量和碳源代谢功能的影响	赵志瑞, 崔丙健, 侯彦林, 刘上千, 王岩 (3011)
固定化菌剂载体材料腐解产物对污染土壤中苈解吸的影响	全冬丽, 双生晴, 李晓军, 邓万荣, 赵然然, 贾春云, 巩宗强 (3018)
零价铁和碱激发矿渣稳定/固定化处理铬渣研究	陈忠林, 李金春子, 王斌远, 樊磊涛, 沈吉敏 (3026)
Fe ³⁺ 负载凹凸棒土 (Fe/ATP) 结构表征及其稳定化修复镉 (Cd) 机制研究	杨蓉, 李鸿博, 周永莉, 陈静, 王琳玲, 陆晓华 (3032)
原位生物修复提高多环芳烃污染土壤农用安全性	焦海华, 潘建刚, 徐圣君, 白志辉, 王栋, 黄占斌 (3038)
镉-八氯代二苯并呋喃复合污染土壤中紫茉莉对镉的修复能力	张杏丽, 邹威, 周启星 (3045)
不同水分条件对蜈蚣草修复砷污染土壤的影响	刘秋辛, 阎秀兰, 廖晓勇, 林龙勇, 杨静 (3056)
磷矿粉和腐熟水稻秸秆对土壤铅污染的钝化	汤帆, 胡红青, 苏小娟, 付庆灵, 朱俊 (3062)
洛克沙肿在青菜及土壤中的残留及降解特性	邵婷, 姚春霞, 沈源源, 张玉洁, 苏楠楠, 周守标 (3068)
3 种典型有机污染物对 2 种水生生物的急性毒性及安全评价	杨扬, 李雅洁, 崔益斌, 李梅 (3074)
石油污染物对海底微生物燃料电池性能的影响及加速降解效应	孟瑶, 付玉彬, 梁生康, 陈伟, 柳昭慧 (3080)
Cu-Mn-Ce/ 分子筛催化剂吸附甲苯后的微波原位再生及床层温度分布探究	虎雪姣, 卜龙利, 梁欣欣, 孟海龙 (3086)
热处理对猪粪高固厌氧消化产甲烷能力的影响	胡玉瑛, 吴静, 王士峰, 曹知平, 王凯军, 左剑恶 (3094)
磷石膏对麦田 CO ₂ 排放和小麦产量的影响及其经济环境效益分析	李季, 吴洪生, 高志球, 尚小厦, 郑培慧, 印进, Kakpa Didier, 任迁琪, Ogou Katchele Faustin, 陈素云, 徐亚, 姚童言, 李炜, 钱景珊, 马世杰 (3099)
全氟和多氟烷基化合物的环境风险评估研究现状、不确定性与趋势分析	郝薛文, 李力, 王杰, 曹燕, 刘建国 (3106)
《环境科学》征订启事 (2757)	
《环境科学》征稿简则 (2767)	
信息 (2734, 2783, 3073, 3079)	

夏季珠江三角洲地区 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分特征及其对大气能见度的影响

杨毅红^{1,2}, 瞿群², 刘随心^{3*}, 李雄⁴, 钟佩仪², 陶俊²

(1. 电子科技大学中山学院, 化学与生物工程学院, 中山 528402; 2. 环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655; 3. 中国科学院地球环境研究所, 西安 710075; 4. 广西气象服务中心, 南宁 530022)

摘要: 于 2010 年夏季在珠三角主要城市广州、佛山、东莞、深圳、珠海以及广州郊区从化同步采集 $\text{PM}_{2.5}$ 样品, 利用热光反射碳分析仪和离子色谱分别分析样品中有机碳/元素碳和水溶性离子浓度, 并同步收集能见度和气象数据. 在此基础上对珠三角主要城市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中主要化学成分的浓度水平和空间分布特征进行分析, 并利用 IMPROVE 方程重建大气消光系数, 探讨 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要化学组分对大气能见度的影响. 结果发现, 观测期间珠三角地区 $\text{PM}_{2.5}$ 中的主要化学成分空间分布特征明显, 广州、佛山和东莞浓度较高, 珠海和深圳浓度较低. $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、有机物(OM)、EC 和 NH_4NO_3 对夏季珠三角大气消光系数贡献率分别为 39%、31%、12% 和 13%.

关键词: 霾; 空间分布; $\text{PM}_{2.5}$; 化学组分; 大气能见度

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)08-2758-10 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2015.08.005

Chemical Compositions in $\text{PM}_{2.5}$ and Its Impact on Visibility in Summer in Pearl River Delta, China

YANG Yi-hong^{1,2}, QU Qun², LIU Sui-xin^{3*}, LI Xiong⁴, ZHONG Pei-yi², TAO Jun²

(1. School of Chemistry and Biology, Zhongshan Institute, University of Electronic Science and Technology of China, Zhongshan 528402, China; 2. South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655, China; 3. Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China; 4. Guangxi Meteorological Service Center, Nanning 530022, China)

Abstract: Aerosol samples of $\text{PM}_{2.5}$ were collected simultaneously at 6 sites from five cities (Guangzhou urban, Conghua (suburban of Guangzhou), Foshan, Dongguan, Shenzhen and Zhuhai) in Pearl River Delta region during the summer of 2010. The concentrations of organic carbon (OC), elemental carbon (EC) and water-soluble ions were determined by thermal/optical carbon analyzer and ion chromatography, respectively. The characteristics of $\text{PM}_{2.5}$, OC, EC and ions, spatial distribution were discussed. Moreover, ambient light extinction coefficients were reconstructed by IMPROVE formula. The results showed that spatial distribution characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ and its chemical compositions were obviously different. The $\text{PM}_{2.5}$ in Guangzhou, Foshan and Dongguan were higher than those in Zhuhai and Shenzhen. The contributions of $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, OM, EC and NH_4NO_3 to ambient light extinction coefficient were 39%, 31%, 12% and 13%, respectively.

Key words: haze; spatial distribution; $\text{PM}_{2.5}$; chemical composition; visibility

由于我国经济的快速发展,化石燃料的大量消耗,使得我国东部沿海大部分地区霾天气频繁发生^[1-3]. 现有的研究表明,霾天气的发生与大气环境中 $\text{PM}_{2.5}$ (指空气动力学直径 $< 2.5 \mu\text{m}$ 的大气颗粒物)密切相关^[4-7]. $\text{PM}_{2.5}$ 的主要化学成分如硫酸盐、硝酸盐、有机物和元素碳等均具有较强的消光能力^[8,9]. 因此,了解区域内 $\text{PM}_{2.5}$ 中主要化学成分及其浓度特征对于进一步了解区域大气能见度下降或霾天气的成因具有重要意义.

广东省位于我国南部,面积 $42\,794 \text{ km}^2$,人口近 3 870 万,是全国经济最发达的地区之一,同时也是我国大气污染重点控制区之一. 近几十年来,珠三

角地区大气能见度呈明显下降趋势^[2]. 目前,对珠三角有关大气能见度下降问题的研究主要集中于广州,对珠三角其它城市的研究报道很少^[6,10-22]. 因此,同步开展该区域主要城市 $\text{PM}_{2.5}$ 中主要化学成分特征研究,对于较为全面地了解珠三角区域性大气能见度下降的原因,制定切实可行的治理政策具有重要的指导作用.

考虑到夏季南海季风的影响,珠三角地区大气 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在夏季较低,其主要化学成分一定程度上

收稿日期: 2014-11-24; 修订日期: 2015-03-21

作者简介: 杨毅红 (1982 ~), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为大气化学与大气环境, E-mail: yang_yihong@163.com

* 通讯联系人, E-mail: lsx@ieecas.cn

可以代表珠三角本地污染背景,对于进一步研究其它季节 PM_{2.5} 区域性输送和能见度下降研究具有重要参考价值. 为此,本研究于 2010 年 8 月 7~21 日连续 15 d 在深圳、东莞、广州、从化、佛山、珠海等珠三角这 6 个地点同步采集 24 h PM_{2.5} 样品,并获取 PM_{2.5} 中主要化学成分 OC、EC 和水溶性离子等浓度数据,同步还收集了能见度、风速、温湿度、降雨等气象资料. 在此基础上,分析了珠三角主要城市和郊区 PM_{2.5} 中主要化学成分空间分布特征,并定量评估 PM_{2.5} 中主要化学成分与大气能见度之间的关系.

1 材料与方法

1.1 采样地点

珠江三角洲是西江、北江和东江流入南海冲积沉淀而形成的三角洲,位于广东省中南部,珠江下

游,南海北部,毗邻香港和澳门,是我国重要的加工制造和高新技术产业基地,也是我国经济发展最迅速、最发达的区域之一. 其地处热带和亚热带,受亚热带季风气候影响,冬季少雨多吹北风,夏季多雨多吹南风.

据地理位置本研究选取珠江三角洲地区深圳、东莞、广州、从化、佛山和珠海这 6 个采样地点同步采集 PM_{2.5} 样品. 具体采样位置的分布见表 1 和图 1.

1.2 样品采集

于 2010 年 8 月 7~21 日利用美国 MiniVol 颗粒物采样器 (air metrics corporation) 每天采集一个 PM_{2.5} 样品. 采样时间为当日的 10:00 到次日的 10:00. 整个观测期间每个点位采集 15 个样品 (其中深圳为 13 个样品), 2 个空白样品. 采样器流量为 5.0 L·min⁻¹, 使用的滤膜为直径 47 mm 的石英

表 1 珠三角观测点位概况

Table 1 Surrounding environment of the sampling sites in Pearl River Delta				
城市	采样点位	采样高度/m	经纬度	备注
深圳	洪湖公园	8	22°34'55"N, 114°07'43"E	城市
东莞	东莞第二水厂	20	23°03'37"N, 113°44'55"E	城市
广州	华南环境科学研究所	50	23°07'26"N, 113°21'17"E	城市
佛山	南海政协	25	23°01'59"N, 113°08'15"E	城市
从化	英豪学校	20	23°41'47"N, 113°42'08"E	郊区
珠海	中山大学珠海分校	50	22°20'49"N, 113°35'05"E	郊区

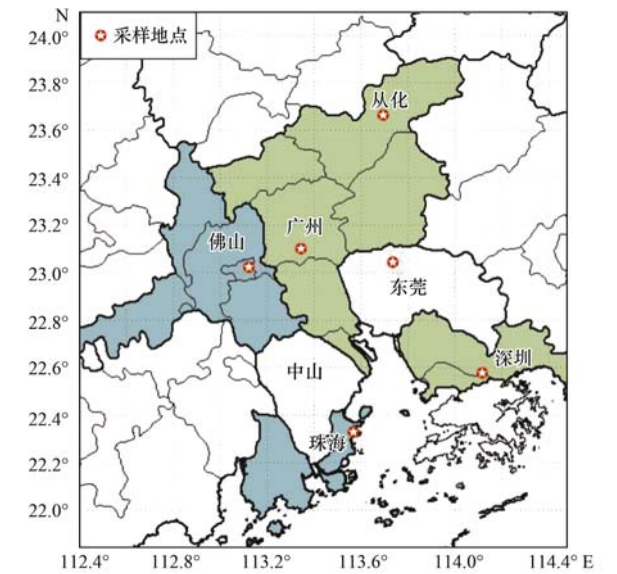


图 1 珠江三角洲六采样点位置分布示意
Fig. 1 Geographical locations of 6 sampling sites in Pearl River Delta

膜 (Whatman, England). 滤膜在采样前用 800℃ 高温灼烧 4 h, 冷却后放在恒温恒湿箱 (温度 20~

23℃, 相对湿度 35%~45%) 平衡 24 h, 然后再进行称重. 称重方法依据美国 EPA 规定方法用精度为 1 μg 的电子天平进行称量, 且前后两次称量的误差小于 10 μg^[23].

1.3 样品化学成分分析

所有样品的 OC (organics carbon) 和 EC (element carbon) 分析采用美国沙漠研究所研制 DRI Model 2001 热光碳分析仪 (Thermal/Optical Carbon Analyzer). 应用 IMPROVE 热光反射的实验方法, 该方法的主要测试原理见文献[24].

剪取四分之一的石英膜加入 10 mL 去离子水 ($R > 18.2 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$), 超声萃取 1 h, 采用 0.45 μm 的过滤器过滤定容, 用中国科学院地球环境研究所气溶胶实验室的 Dionex-600 型离子色谱仪对水溶性离子进行分析. 具体分析方法见文献[25].

1.4 其它数据收集

气象数据来源于各城市当地气象站. 具体数据包括能见度、风速、风向、温度、相对湿度、大气压和降雨量等气象因子资料. 采样期间, 气象数据汇总见表 2.

表 2 采样期间的气象条件

Table 2 Selected meteorological parameters during the sampling period					
采样点	平均气压 /kPa	日均气温 /℃	相对湿度/%	平均风速 /m·s ⁻¹	降水量/mm
从化	1 00. 40	27. 9	80. 8	1. 31	60. 3
广州	1 00. 40	29. 3	72. 3	1. 37	135. 8
佛山	1 00. 80	29. 8	75. 0	1. 97	118. 9
东莞	— ¹⁾	28. 5	75. 6	2. 12	34. 7
深圳	—	28. 8	75. 9	1. 79	64. 3
珠海	—	28. 8	81. 3	2. 28	79. 9
总平均	1 00. 53	28. 9	76. 8	1. 81	82. 7

1) “—”表示无数据

日均能见度由每天 4 个时次的能见度计算得到. 计算方法是先将每天 4 个时次的能见度换算成大气消光系数求其几何均值,再将消光系数的均值换算成能见度^[3]. 消光系数 b_{ext} 根据公式(1)得到^[26].

$$b_{\text{ext}} = 3.912 \times 10^6 / \nu \quad (1)$$

式中, ν 为能见度,消光系数单位为 Mm^{-1} .

1.5 数据分析方法

1.5.1 $\text{PM}_{2.5}$ 质量重建

根据 IMPROVE $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度重建公式^[27],利用 $\text{PM}_{2.5}$ 的化学组分重建 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度. 具体公式如下:

$$\text{PM}_{2.5} = (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 + \text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{OM} + \text{EC} + [\text{FS}] + [\text{SS}] \quad (2)$$

式中, $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4] = 1.375 \times [\text{SO}_4^{2-}]$; $[\text{NH}_4\text{NO}_3] = 1.29 \times [\text{NO}_3^-]$; $[\text{OM}]$ (organic matter) $= 1.8 \times [\text{OC}]$; $[\text{FS}]$ (fine soil) $= 2.2 \times \text{Al} + 2.49 \times \text{Si} + 1.63 \times \text{Ca} + 2.42 \times \text{Fe} + 1.94 \times \text{Ti}$; $[\text{SS}]$ (sea salt) $= 1.8 \times [\text{Cl}^-]$. 由于缺少同步测量的气溶胶重金属元素分析数据,细土壤尘成分被归入未测组分当中. 未测组分还包括水分、不可溶金属元素及其它未知成分.

1.5.2 消光系数重建

采用美国 IMPROVE 研究计划得到的颗粒物消光系数 (b_{ext}) 公式,计算珠三角 6 个采样点大气颗粒物的消光系数. 具体 IMPROVE 方程如下:

$$b'_{\text{ext}} = b'_{\text{ap}} + b'_{\text{sp}} \quad (3)$$

$$b'_{\text{ap}} = 10 \times [\text{EC}] \quad (4)$$

$$\begin{aligned} b'_{\text{sp}} = & 2.2 \times f_s(\text{RH}) \times [\text{Small}(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4] + \\ & 4.8 \times f_L(\text{RH}) \times [\text{Large}(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4] + \\ & 2.4 \times f_s(\text{RH}) \times [\text{Small NH}_4\text{NO}_3] + \\ & 5.1 \times f_L(\text{RH}) \times [\text{Large NH}_4\text{NO}_3] + \\ & 2.8 \times [\text{Small OM}] + 6.1 \times [\text{Large OM}] + \\ & 1.7 \times f_{\text{ss}}(\text{RH}) \cdot [\text{SS}] + \\ & 1 \times [\text{FS}] + 0.6[\text{CM}] \end{aligned} \quad (5)$$

式中,当 $[\text{Total } X] < 20 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, $[\text{Large } X] = [\text{Total } X]^2 / (20 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$; 当 $[\text{Total } X] > 20 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, $[\text{Large } X] = [\text{Total } X]$; $[\text{Small } X] = [\text{Total } X] - [\text{Large } X]$. 式中 X 分别为 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 NH_4NO_3 和 OM. 考虑到 $\text{PM}_{2.5}$ 中未测量的化学成分 (主要是金属元素和非水溶性物质) 也会导致散射消光,其消光效率与 FS 相类似,也有研究在消光重建中考虑这一部分,取得比较理想的效果^[20]. 因此本研究增加这部分 (other) 对消光系数的贡献,消光效率为 $1 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$. 因此原 IMPROVE 消光系数方程 (5) 进行如下修正:

$$\begin{aligned} b'_{\text{sp}} = & 2.2 \times f_s(\text{RH}) \times [\text{Small}(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4] + 4.8 \times \\ & f_L(\text{RH}) \times [\text{Large}(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4] + 2.4 \times \\ & f_s(\text{RH}) \times [\text{Small NH}_4\text{NO}_3] + 5.1 \times f_L(\text{RH}) \times \\ & [\text{Large NH}_4\text{NO}_3] + 2.8 \times [\text{Small OM}] + \\ & 6.1 \times [\text{Large OM}] + 1.7 \times f_{\text{ss}}(\text{RH}) \cdot [\text{SS}] + \\ & 1 \times [\text{FS}] + 0.6[\text{CM}] + [\text{others}] \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$ 、 $[\text{NH}_4\text{NO}_3]$ 、 $[\text{OM}]$ 、 $[\text{SS}]$ 计算同公式 (2). $[\text{FS}] = [\text{fine soil}]$, CM (coarse mass) $= [\text{PM}_{10}] - [\text{PM}_{2.5}]$, $[\text{others}] = [\text{PM}_{2.5}] - 1.375 [\text{SO}_4^{2-}] - 1.29 [\text{NO}_3^-] - 1.8 [\text{OC}] - [\text{FS}] - [\text{EC}]$. b'_{ap} 、 b'_{sp} 单位为 Mm^{-1} , 化学组分 $[\text{SO}_4^{2-}]$ 、 $[\text{NO}_3^-]$ 、 $[\text{Cl}^-]$ 、 $[\text{Ca}^{2+}]$ 、 $[\text{PM}_{10}]$ 、 $[\text{PM}_{2.5}]$ 、 $[\text{OC}]$ 、 $[\text{EC}]$ 单位为 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. RH 为相对湿度, $f_s(\text{RH})$ 、 $f_L(\text{RH})$ 和 $f_{\text{ss}}(\text{RH})$ 为相对湿度增长系数,其取值参见文献 [28]. 由于粗粒子 CM 对 b_{sp} 的贡献很小^[20],且本研究未同步测量 PM_{10} 浓度,因此忽略 CM 对 b_{sp} 的贡献.

2 结果与讨论

2.1 珠三角地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间分布特征

夏季珠三角地区 $\text{PM}_{2.5}$ 总平均浓度为 $(36.0 \pm 17.5) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 小于我国空气质量标准 (GB 3095-

2012) 中 PM_{2.5} 的日均值二级标准 75 μg·m⁻³ (见表 3). 其浓度水平与我国南部北部湾地区夏季 PM_{2.5} 浓度相当 (38.4 ± 17.7) μg·m⁻³ [29], 高于沿海城市青岛 (30.1 μg·m⁻³) 和厦门 (25.2 μg·m⁻³) [24], 但显著低于北京 (117.2 μg·m⁻³)、长春 (59.6 μg·m⁻³)、天津 (103.2 μg·m⁻³)、重庆 (116.3 μg·m⁻³)、杭州 (90.6 μg·m⁻³)、上海 (52.2 μg·m⁻³)、武汉 (70.8 μg·m⁻³) 等城市 [24]. 总体来讲, 珠三角主要城市夏季 PM_{2.5} 浓度相对较低, 接近于国家 PM_{2.5} 的日均值一级标准.

表 3 夏季珠三角地区 PM_{2.5} 中主要化学成分浓度¹⁾/μg·m⁻³

Table 3 Chemical component concentrations in PM _{2.5} during summer in Pearl River Delta/μg·m ⁻³							
项目	深圳 (n = 13)	东莞 (n = 15)	广州 (n = 15)	佛山 (n = 15)	从化 (n = 15)	珠海 (n = 15)	总平均 (n = 88)
PM _{2.5}	22.7 ± 5.8	46.5 ± 19.2	45.3 ± 12.0	49.4 ± 17.8	30.6 ± 6.2	19.6 ± 9.5	36.0 ± 17.5
OC	4.2 ± 1.4	7.9 ± 3.1	8.2 ± 2.3	9.4 ± 2.7	5.9 ± 1.5	3.3 ± 1.8	6.5 ± 3.1
EC	1.8 ± 0.9	3.5 ± 1.4	3.3 ± 1.3	3.4 ± 1.2	1.6 ± 0.5	0.9 ± 0.8	2.4 ± 1.5
F ⁻	0.00 ± 0.00	0.07 ± 0.08	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.01 ± 0.04	0.01 ± 0.04
Cl ⁻	0.1 ± 0.1	0.5 ± 0.8	0.2 ± 0.2	0.4 ± 0.5	0.1 ± 0.2	0.0 ± 0.0	0.2 ± 0.4
NO ₃ ⁻	1.3 ± 0.8	4.0 ± 2.5	3.7 ± 1.6	3.6 ± 2.3	1.0 ± 0.4	1.6 ± 0.9	2.6 ± 2.0
SO ₄ ²⁻	4.1 ± 1.7	7.4 ± 3.4	7.7 ± 2.6	8.8 ± 3.8	6.9 ± 1.5	4.1 ± 2.0	6.6 ± 3.1
nss-SO ₄ ²⁻	3.9 ± 1.7	7.2 ± 3.3	7.5 ± 2.6	8.5 ± 3.7	6.7 ± 1.4	4.0 ± 1.9	6.3 ± 3.1
Na ⁺	0.7 ± 0.2	0.7 ± 0.2	1.2 ± 0.4	1.3 ± 0.4	0.9 ± 0.2	0.4 ± 0.2	0.8 ± 0.4
NH ₄ ⁺	0.1 ± 0.1	0.8 ± 1.2	0.9 ± 1.0	1.2 ± 1.3	0.5 ± 0.4	0.0 ± 0.1	0.6 ± 1.0
K ⁺	0.1 ± 0.1	0.3 ± 0.3	0.3 ± 0.3	0.4 ± 0.2	0.2 ± 0.1	0.0 ± 0.1	0.2 ± 0.2
nss-K ⁺	0.0 ± 0.1	0.3 ± 0.3	0.2 ± 0.1	0.3 ± 0.2	0.1 ± 0.1	0.0 ± 0.1	0.2 ± 0.2
Mg ²⁺	0.0 ± 0.0	0.1 ± 0.0	0.1 ± 0.0	0.1 ± 0.0	0.1 ± 0.0	0.1 ± 0.0	0.1 ± 0.1
Ca ²⁺	0.2 ± 0.2	0.5 ± 0.3	1.0 ± 0.4	1.0 ± 0.4	0.7 ± 0.2	0.4 ± 0.4	0.6 ± 0.4

1) n 为样品数, nss-SO₄²⁻ = SO₄²⁻ - 0.252Na⁺, nss-K⁺ = K⁺ - 0.037Na⁺

从 PM_{2.5} 的空间分布上看, 不同城市之间浓度差异较大. 海滨城市深圳和珠海的浓度最低 (分别为 22.7 μg·m⁻³ 和 19.6 μg·m⁻³), 主要受到南海季风的影响, 清洁的海洋气流有利于污染物的稀释, 此外较少的工业排放也是导致上述两个城市 PM_{2.5} 浓度较低的主要原因. 佛山大气 PM_{2.5} 浓度最高, 达到 (49.4 ± 17.8) μg·m⁻³. 其次为东莞和广州城区, 其 PM_{2.5} 分别为 (46.5 ± 19.2) μg·m⁻³ 和 (45.3 ± 12.0) μg·m⁻³, 主要与当地高强度的污染物排放有关 [30]. 相对沿海点位珠海和深圳而言, 位于珠三角夏季下风向的从化郊区点位 PM_{2.5} 浓度为 (30.6 ± 6.2) μg·m⁻³, 略高于深圳和珠海, 可能是受到上风向污染物的输送影响.

2.2 主要化学成分空间分布特征

2.2.1 碳组分空间分布特征

观测期间, 珠三角地区城市大气 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 的总平均浓度分别为 (6.5 ± 3.1) μg·m⁻³ 和 (2.4 ± 1.5) μg·m⁻³ (见表 4), 分别占 PM_{2.5} 质量浓度的 18.2% 和 6.5%. 总碳 (TC = OC + EC) 占 PM_{2.5} 质量浓度为 33.2%. 与 2002 年和 2006 年珠三角城市夏季 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 观测结果对比 (见表 4), 本研究观测期间 OC 和 EC 浓度较 2002 年观测结果有明显下降, 而与 2006 年 OC 观测结果比较接近, EC 有

明显下降. 可见近几年珠三角的大气污染控制措施对碳组分的削减效果比较明显.

与毗邻的北部湾地区 [29] 夏季 OC 和 EC 观测结果对比, 珠三角 OC 浓度相对较低, 而 EC 浓度相对较高. 与京津冀、长三角及中部地区的大城市如北京、天津、上海、重庆、武汉等比较 (见表 4), 珠三角夏季 OC 和 EC 浓度相对较低. 总体来看, 珠三角地区夏季 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 浓度处于相对较低的水平.

从 OC 和 EC 空间分布上看, 从化、广州、佛山、东莞、深圳、佛山、珠海等地大气 OC、EC 浓度空间分布特征明显 (见图 2), 其中 OC 浓度顺序为: 佛山 > 广州 > 东莞 > 从化 > 深圳 > 珠海, EC 浓度顺序为: 东莞 > 佛山 > 广州 > 深圳 > 从化 > 珠海. 整体上看, 佛山、东莞、广州的 OC 和 EC 浓度明显高于从化、深圳、珠海, 其中前 3 个城市大气 OC、EC 平均浓度分别为后 3 个城市的 1.9 和 2.3 倍.

通常 OC 和 EC 之间的相关性关系可以用来判断碳气溶胶的主要来源 [34]. 由图 3 可见, 观测期间珠三角地区不同城市 OC 和 EC 的相关性较好 (R²: 0.66 ~ 0.85), 可见观测期间珠三角各采样点的 OC 和 EC 有一定的共源性. 其中, 东莞的相关系数最高 (R = 0.92, P < 0.001), 珠海相关系数相对最低

表 4 国内部分地区和城市 OC、EC 浓度比较/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 4 Comparisons of OC and EC of other areas and cities in China/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

地区	城市/类型	类型	采样时间	OC	EC	文献
珠三角地区	地区总平均	城区	2010 年夏季	6.5	2.4	本研究
	地区总平均	混合	2006 年夏季	5.3	5.7	[31]
		混合	2006 年冬季	8.4	6.5	[31]
	地区总平均	混合	2002 年夏季	9.2	4.1	[32]
	地区总平均	混合	2001 年冬季	14.7	6.1	[33]
	广州	城区	2004 年夏季	17.5	5.7	[22]
	香港	城区	2004 年夏季	11.3	4.3	[22]
		背景地区	2004 年夏季	5.6	1.4	[22]
北部湾地区	地区总平均	城区	2009 年夏季	9.4	2.2	[29]
		郊区	2009 年夏季	8.8	1.4	[29]
长三角地区	上海	城区	2003 年夏季	13.3	2.9	[24]
	杭州	城区	2003 年夏季	17.1	3.6	[24]
京津冀地区	北京	城区	2003 年夏季	17.2	4.6	[24]
	天津	城区	2003 年夏季	16.5	3.7	[24]
中部地区	重庆	城区	2003 年夏季	25.1	8.0	[24]
	武汉	城区	2003 年夏季	14.2	3.0	[24]

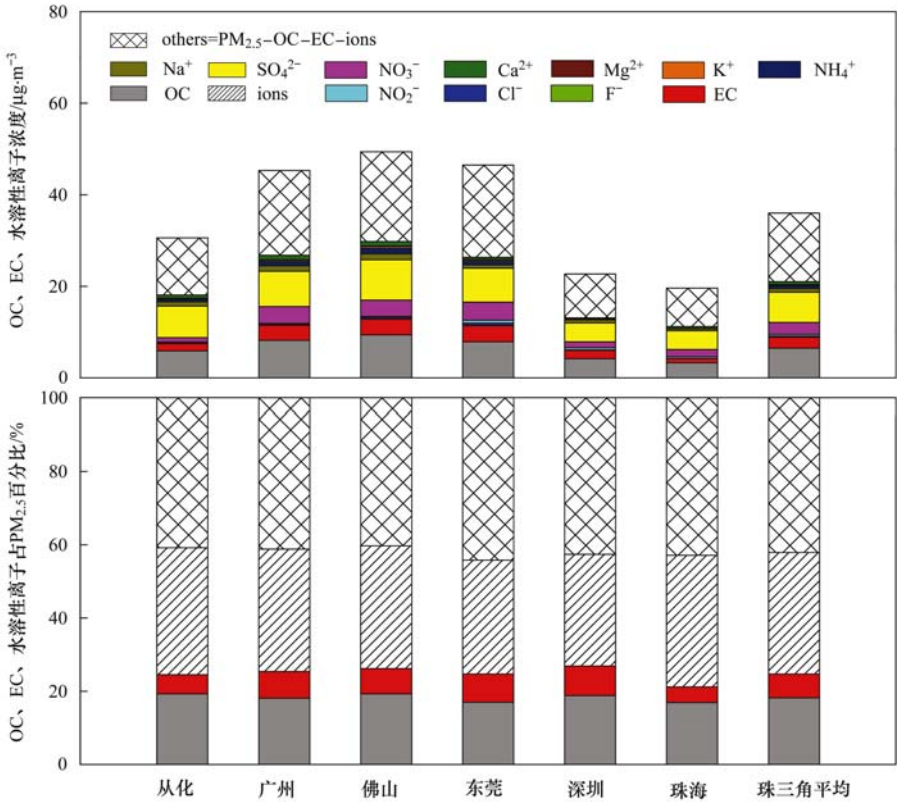


图 2 珠三角不同城市 $\text{PM}_{2.5}$ 中 OC、EC、水溶性离子浓度分布及其占 $\text{PM}_{2.5}$ 的百分比

Fig. 2 Distribution of OC, EC and ions concentrations, and its percentage of $\text{PM}_{2.5}$ in Pearl River Delta cities

($R=0.81, P<0.001$). 6 个采样点 OC 和 EC 回归方程的斜率介于 1.31 ~ 2.69, 其中深圳最低, 从化最高. 根据燃煤、机动车排放和生物质燃烧等不同类型排放源的 OC/EC 平均比值 (分别为 2.7、1.1 和 9.0^[35]), 可以判断珠三角夏季 OC 和 EC 主要来

源是机动车.

特别值得注意的是, 珠三角地区 OC/EC 平均值为 3.1, 变化范围为 1.7 ~ 7.9, 空间分布特征也很明显: 珠海 (4.6) > 从化 (3.8) > 佛山 (2.9) > 深圳 (2.6) = 广州 (2.6) > 东莞 (2.3) (见表 5). 各个采

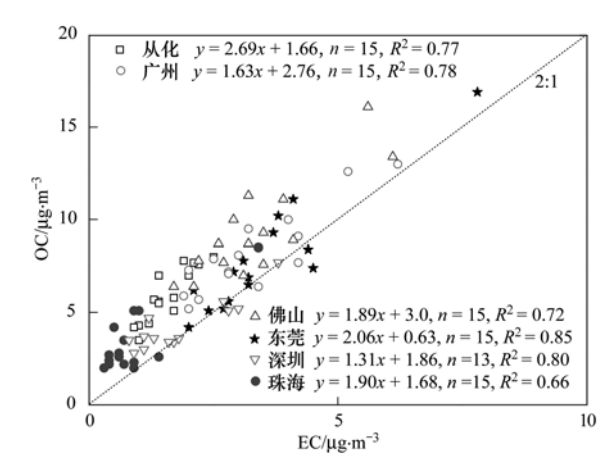


图3 OC 和 EC 的相关关系

Fig. 3 Correlations between organic carbon and elemental carbon

样点 OC/EC 算术比值明显高于 OC 与 EC 回归斜率,可见夏季珠三角地区二次反应生成的有机碳 (SOC) 对 OC 的贡献也比较明显。

为进一步了解 SOC 对各观测点 OC 的贡献,利用最小 OC/EC 值方法间接估算珠三角各采样点 SOC 的形成量,其计算方程式为 $SOC = OC_{tot} - EC \times (OC/EC)_{min}$, 式中, OC_{tot} 为总有机碳, $(OC/EC)_{min}$ 为观测最小比值^[36]。估算结果见表 5。从中可知,从化与珠海 SOC 占 OC 比例高达 45% 以上,广州、佛山、东莞、深圳 SOC 占 OC 比例在 20% ~ 30% 之间。已有的研究表明,珠三角地区二次有机气溶胶以植被排放源形成为主^[37]。从化与珠海相对植被覆盖率较高,主要来源于植被排放的挥发性有机物 (VOCs) 在高温和高辐射强度的夏季更易于转化成 SOC^[38]。

表 5 珠三角地区 OC/EC、SOC、SOC/OC 结果统计

Table 5 Statistics of OC/EC, SOC, SOC/OC in Pearl River Delta				
位置	样本数	OC/EC	SOC / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	SOC/OC /%
从化	15	3.8	2.8	46.7
广州	15	2.6	2.1	26.1
佛山	15	2.9	2.1	22.7
东莞	15	2.3	2.1	25.4
深圳	13	2.6	1.1	27.7
珠海	15	4.6	1.8	53.9
总平均	88	3.1	2.0	33.9

2.2.2 水溶性离子空间分布特征

2010 年夏季珠三角地区大气 PM_{2.5} 中总水溶性离子总平均值为 $(12.1 \pm 6.8) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 占 PM_{2.5} 的平均质量分数为 $33.2\% \pm 5.5\%$ (见图 2), 表明水溶性组分是珠三角地区大气细粒子的主要组分之一。

与国内其他城市夏季水溶性离子占 PM_{2.5} 的比例相比,比西安^[28] (55%) 和北京^[29] (46%) 低,与上海^[30] (32%) 相当。珠三角夏季总水溶性离子浓度空间分布特征为:佛山 $[(17.0 \pm 8.4) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}] >$ 广州 $[(15.3 \pm 5.2) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}] >$ 东莞 $[(14.8 \pm 7.9) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}] >$ 从化 $[(10.6 \pm 2.2) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}] >$ 珠海 $[(7.1 \pm 3.7) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}] >$ 深圳 $[(7.0 \pm 3.2) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$ 。

观测期间珠三角地区各城市大气 PM_{2.5} 中阴离子浓度变化趋势基本一致 (见表 3): $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{NO}_2^- > \text{Cl}^- > \text{F}^-$ 。阳离子浓度变化趋势不同城市间存在明显差异,其中从化、广州、深圳为: $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$; 东莞为: $\text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$; 佛山为: $\text{Na}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$; 珠海为: $\text{Na}^+ = \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{NH}_4^+ = \text{K}^+$ 。总体上, SO_4^{2-} 和 NO_3^- 是夏季珠三角地区最主要的两种水溶性离子, 占总离子浓度百分比为 $(76.3 \pm 7.2)\%$ 。

通常城市地区大气硫酸盐主要来源于大气中 SO₂ 的氧化^[39]。已有源谱研究表明,珠三角地区 90% 以上的 SO₂ 来源于电厂和工业排放^[30]。佛山、广州、东莞等观测点 nss-SO₄²⁻ 浓度较高 (分别为 8.5、7.5、7.2 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 从化、珠海和深圳 nss-SO₄²⁻ 浓度相对较低 (分别为 6.7、4.0、3.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 与已有的珠三角 SO₂ 排放清单结果基本一致^[40]。NO₃⁻ 主要由大气中 NO_x 的转化形成, 而 NO_x 主要来源于人为源, 如机动车排放、工业排放等。在珠三角地区, 87% 的 NO_x 来源于电厂和机动车排放^[30]。本次观测期间, 东莞 (4.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、广州 (3.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 和佛山 (3.6 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 的 NO₃⁻ 浓度明显高于深圳 (1.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、从化 (1.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 和珠海 (1.6 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 表明前 3 个城市 NO_x 排放量更大。这一结果与珠三角地区 NO_x 排放清单结果也基本一致^[40]。NH₄⁺ 主要来源于人类活动排放, 其浓度排序为佛山 > 广州 > 东莞 > 从化 > 深圳 > 珠海。城市地区 Ca²⁺ 离子常来源于道路交通和建筑工地活动^[41], 珠三角地区 Ca²⁺ 浓度均排在阳离子浓度的前 3 位, 可能与亚运前期大规模基建活动有关。

为了了解珠三角地区气溶胶的酸碱性, 分别将阴阳离子的质量浓度转换为当量浓度。具体转换公式如下。

$$\text{阳离子当量} = \text{Na}^+ / 23 + \text{NH}_4^+ / 18 +$$

$$K^+ / 39 + Mg^{2+} / 12 + Ca^{2+} / 20 \quad (7)$$

$$\text{阴离子当量} = F^- / 19 + Cl^- / 35.5 + NO_3^- / 62 + SO_4^{2-} / 48 \quad (8)$$

由图4可见,阴阳离子之间呈极显著的相关关系,反映了本研究所观测的9种主要离子成分为 $PM_{2.5}$ 的主要离子.所有样品均位于阴阳离子当量比值1:1线之上,表明珠三角地区夏季大气 $PM_{2.5}$ 均呈酸性^[42].回归方程的斜率表明,不同珠三角城市 $PM_{2.5}$ 的酸性程度不同,其中深圳和珠海 $PM_{2.5}$ 明显偏酸性,下风向从化 $PM_{2.5}$ 接近中性.

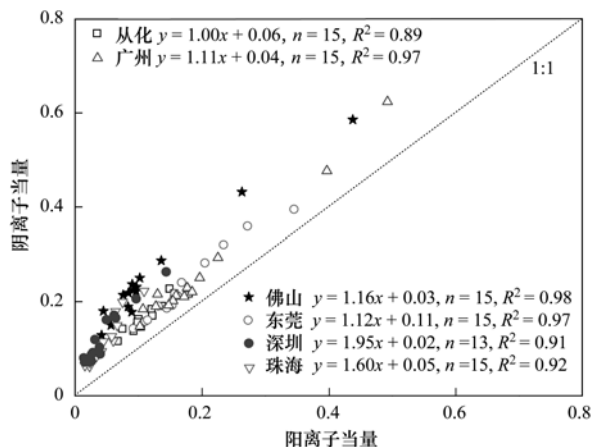


图4 阴阳离子相关关系

Fig. 4 Total anions versus total cations

2.2.3 $PM_{2.5}$ 质量重建

为进一步了解测量的化学成分能否体现 $PM_{2.5}$ 浓度特征,根据IMPROVE质量浓度重建公式,利用 $PM_{2.5}$ 的化学组分重建 $PM_{2.5}$ 质量浓度.由图5可见,重建 $PM_{2.5}$ 浓度与实测值之间的Pearson相关系数较高,均大于0.90,斜率范围为0.70~0.75,约26%的质量未能重建,这部分主要包括水分、无机元素以及未知成分.总体来讲,含碳气溶胶(OM+EC)、硫酸

酸盐和硝酸盐是 $PM_{2.5}$ 的主要成分,其所占比例分别为40.0%、24.7%和8.8%.上述主要化学组分能较好地代表 $PM_{2.5}$ 质量浓度.

2.3 大气消光系数重建及其主要贡献因子

利用IMPROVE方程对珠三角主要城市的大气消光系数进行重建,从化、广州、佛山、东莞、深圳和珠海观测期间实测消光系数与重建消光系数相关性较好(R^2 分别为0.54、0.62、0.70、0.57、0.52和0.76).除了广州外,其它各点位的大气消光系数重建值均小于实测值(见图6).导致上述重建效果相对较差的原因可能是实测消光系数由每日4次观测的能见度换算而来,而消光系数重建值 b'_{ext} 是由24 h $PM_{2.5}$ 样品化学成分换算而来,因此两者之间必然受到能见度瞬时变化的影响.总体来讲,重建值 b'_{ext} 基本能反映珠三角大气消光系数的实际变化趋势.因此IMPROVE方程可以用于初步判别观测期间珠三角各城市大气消光系数的贡献因子及其贡献率.

夏季珠三角地区各个点位大气消光系数重建值 b'_{ext} 见表6.从中可知,珠三角夏季大气消光系数重建值 b'_{ext} 为 $(193 \pm 115) Mm^{-1}$,范围为58~699 Mm^{-1} . b'_{ext} 最大值出现在东莞,次高值出现在佛山,这与上述两个城市较高的 $PM_{2.5}$ 浓度趋势一致.尽管珠三角夏季 $PM_{2.5}$ 浓度较低,但重建值 b'_{ext} 还是存在大于391 Mm^{-1} (对应的能见度为10 km)的情况,即还是发生了霾天气.综合来看,观测期间珠三角大气消光系数最主要的贡献因子是 $(NH_4)_2SO_4$ 和OM,其贡献率分别达到39%和31%,两者贡献之和高达70%;其次为EC和 NH_4NO_3 ,其贡献率分别为12%和13%;海盐及其它成分贡献较小,仅有5%(见图6).

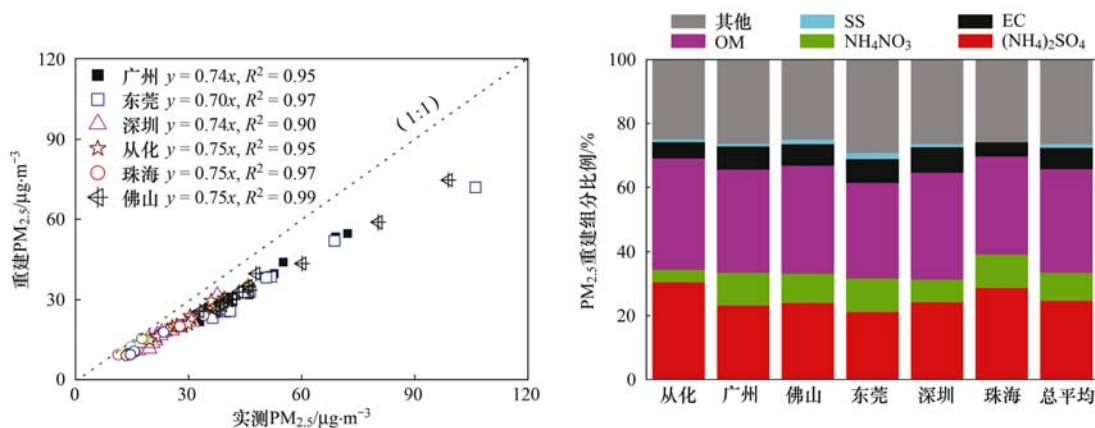


图5 基于化学组分珠三角6个地区 $PM_{2.5}$ 质量浓度重建

Fig. 5 Reconstruction of $PM_{2.5}$ mass concentrations by chemical compositions in Pearl River Delta

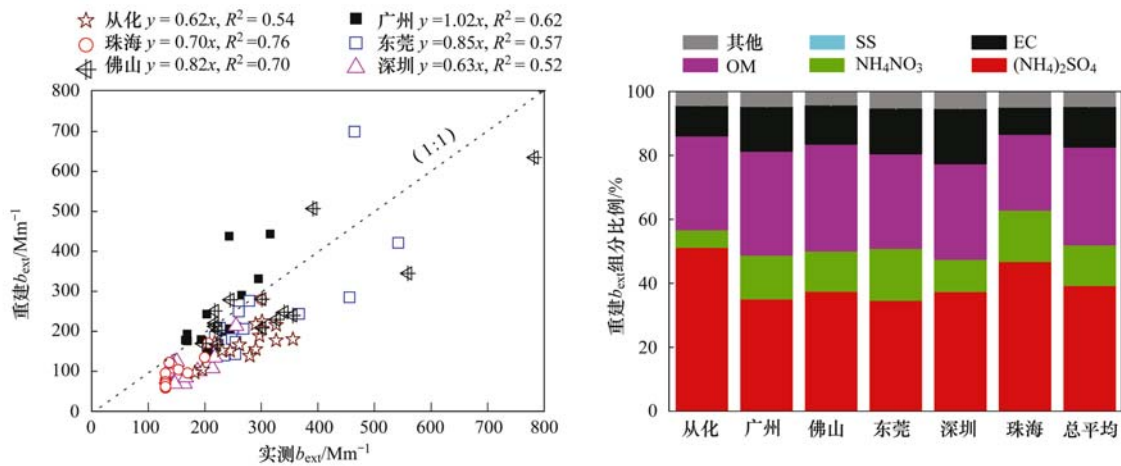


图 6 珠三角夏季重建 b'_{ext} 与 b_{ext} 相关关系、重建消光系数主要贡献因子的贡献率

Fig. 6 Measured versus reconstructed light extinction coefficients and contribution factors in summer in Pearl River Delta

表 6 珠三角地区大气重建消光系数 b'_{ext} 结果统计/ Mm^{-1}

Table 6 Statistics of reconstructed light extinction coefficients in Pearl River Delta/ Mm^{-1}

位置	样本数	平均值	标准差	最小值	最大值
从化	15	170	39	97	225
广州	15	240	95	143	443
佛山	15	280	129	167	635
东莞	15	249	144	140	699
深圳	13	107	38	68	213
珠海	15	103	58	58	280
总平均	88	193	115	58	699

各观测点重建值 b'_{ext} 的空间分布为:佛山 > 东莞 > 广州 > 从化 > 深圳 > 珠海, 与其大气 PM_{2.5} 的变化趋势基本一致. 由图 6 可知, 在珠三角地区, (NH₄)₂SO₄ 是能见度下降最主要的贡献者, 其贡献率在 34% ~ 52% 之间; 其次是 OM, 其贡献率范围为 23% ~ 34%; EC 和 NH₄NO₃ 贡献率均在 5% ~ 17% 之间, SS 和其它成分贡献之和均小于 6%. 其中, 从化和珠海 (NH₄)₂SO₄ 贡献率均超过 46%, 可见在污染较轻的地区, 硫酸盐对能见度的下降的贡献率可高达一半以上; 珠海的 OM 贡献率相对较低为 24%, 广州、佛山、东莞、深圳的 OM 贡献率均超过 29%, 可见在大城市地区机动车和 SOC 对能见度的影响不容忽视. 总体来讲, 进一步的加强对燃煤和机动车的控制才能有效地缓解大气能见度下降的问题.

3 结论

(1) 2010 年夏季珠三角地区 PM_{2.5} 日均质量浓度为 $(36.0 \pm 17.5) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 接近于国家 PM_{2.5} 的日

均值一级标准. PM_{2.5} 中主要化学成分 OC、EC 和总水溶性离子浓度分别为 (6.5 ± 3.1) 、 (2.4 ± 1.5) 和 $(12.1 \pm 6.8) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$.

(2) 珠三角地区 PM_{2.5} 中主要化学成分空间分布特征明显, 佛山、东莞和广州 PM_{2.5} 中主要化学成分 (OC、EC 和水溶性离子) 明显高于从化、深圳和珠海.

(3) (NH₄)₂SO₄ 是珠三角地区能见度下降最主要的贡献者, 其贡献率在 34% ~ 52% 之间; 其次是 OM, 其贡献率范围为 23% ~ 34%.

参考文献:

[1] 宋宇, 唐孝炎, 方晨, 等. 北京市能见度下降与颗粒物污染的关系[J]. 环境科学学报, 2003, 23(4): 468-471.

[2] Deng X J, Tie X X, Wu D, *et al.* Long-term trend of visibility and its characterizations in the Pearl River Delta (PRD) region, China [J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(7): 1424-1435.

[3] 戴永立, 陶俊, 林泽健, 等. 2006-2009 年我国超大城市霾天气特征及影响因子分析[J]. 环境科学, 2013, 34(8): 2925-2932.

[4] Wu D, Tie X X, Li C C, *et al.* An extremely low visibility event over the Guangzhou region: A case study [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(35): 6568-6577.

[5] Cheung H C, Wang T, Baumann K, *et al.* Influence of regional pollution outflow on the concentrations of fine particulate matter and visibility in the coastal area of southern China [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(34): 6463-6474.

[6] Tao J, Cao J J, Zhang R J, *et al.* Reconstructed light extinction coefficients using chemical compositions of PM_{2.5} in winter in Urban Guangzhou, China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2012, 29(2): 359-368.

[7] Cheng Y F, Wiedensohler A, Eichler H, *et al.* Aerosol optical properties and related chemical apportionment at Xinken in Pearl

- River Delta of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42** (25): 6351-6372.
- [8] Watson J G. Visibility: Science and regulation [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2002, **52**(6): 628-713.
- [9] Tao J, Zhang L, Ho K F, *et al.* Impact of PM_{2.5} chemical compositions on aerosol light scattering in Guangzhou-the largest megacity in South China [J]. *Atmospheric Research*, 2014, 135-136: 48-58.
- [10] 陶俊, 张仁健, 许振成, 等. 广州冬季大气消光系数的贡献因子研究[J]. *气候与环境研究*, 2009, **14**(5): 484-490.
- [11] Tao J, Ho K F, Chen L, *et al.* Effect of chemical composition of PM_{2.5} on visibility in Guangzhou, China, 2007 spring [J]. *Particology*, 2009, **7**(1): 68-75.
- [12] Tan J H, Duan J C, He K B, *et al.* Chemical characteristics of PM_{2.5} during a typical haze episode in Guangzhou [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(6): 774-781.
- [13] Tan J H, Duan J C, Chen D H, *et al.* Chemical characteristics of haze during summer and winter in Guangzhou [J]. *Atmospheric Research*, 2009, **94**(2): 238-245.
- [14] 刘新望, 张远航, 曾立民, 等. 广州市大气能见度影响因子的贡献研究[J]. *气候与环境研究*, 2006, **11**(6): 733-738.
- [15] 陈静, 吴兑, 刘啟汉. 广州地区低能见度事件变化特征分析[J]. *热带气象学报*, 2010, **26**(2): 156-164.
- [16] 张剑鸣, 陶俊, 张仁健, 等. 2008 年 1 月广州大气污染特征及能见度观测研究[J]. *环境科学研究*, 2008, **21**(6): 161-165.
- [17] 刘永红, 冯婷, 蔡铭. 2009 年广州能见度变化规律及主要影响因素分析[J]. *中国环境监测*, 2012, **28**(3): 32-36.
- [18] 张芷言, 王宝民, 邓雪娇, 等. 广州地区 PM₁ 质量浓度对能见度的影响以及气溶胶吸湿增长因子[J]. *中国科学院大学学报*, 2014, **31**(3): 397-402.
- [19] 邓涛, 吴兑, 邓雪娇, 等. 广州地区一次严重灰霾过程的垂直探测[J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, **44**(10): 2307-2314.
- [20] Jung J S, Lee H L, Kim Y J, *et al.* Aerosol chemistry and the effect of aerosol water content on visibility impairment and radiative forcing in Guangzhou during the 2006 Pearl River Delta campaign [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, **90** (11): 3231-3244.
- [21] Guo S L, Tan J H, Ma Y L, *et al.* Characteristics of atmospheric non-methane hydrocarbons during high PM₁₀ episodes and normal days in Foshan, China [J]. *Atmospheric Research*, 2011, **101** (3): 701-710.
- [22] Duan J C, Tan J H, Cheng D X, *et al.* Sources and characteristics of carbonaceous aerosol in two largest cities in Pearl River Delta Region, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(14): 2895-2903.
- [23] Chow J C, Watson J G. Guideline on speciated particulate monitoring [R]. United States Environmental Protection Agency. 1998.
- [24] Cao J J, Lee S C, Chow J C, *et al.* Spatial and seasonal distributions of carbonaceous aerosols over China [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112**: D22S11.
- [25] Zhang T, Cao J J, Tie X X, *et al.* Water-soluble ions in atmospheric aerosols measured in Xi'an, China: Seasonal variations and sources [J]. *Atmospheric Research*, 2011, **102** (1-2): 110-119.
- [26] 麦卡特尼 E J. 大气光学: 分子和粒子散射[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [27] Lowenthal D H, Kumar N. PM_{2.5} mass and light extinction reconstruction in IMPROVE [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2003, **53**(9): 1109-1120.
- [28] Pitchford M, Maim W, Schichtel B, *et al.* Revised algorithm for estimating light extinction from IMPROVE particle speciation data [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2007, **57**(11): 1326-1336.
- [29] 杨毅红, 陶俊, 高健, 等. 中国北部湾地区夏季大气碳气溶胶的空间分布特征[J]. *环境科学*, 2013, **34**(11): 4152-4158.
- [30] Zheng J Y, Zhang L J, Che W W, *et al.* A highly resolved temporal and spatial air pollutant emission inventory for the Pearl River Delta region, China and its uncertainty assessment [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(32): 5112-5122.
- [31] Huang H, Ho K F, Lee S C, *et al.* Characteristics of carbonaceous aerosol in PM_{2.5}: Pearl Delta River Region, China [J]. *Atmospheric Research*, 2012, **104-105**: 227-236.
- [32] Cao J J, Lee S C, Ho K F, *et al.* Spatial and seasonal variations of atmospheric organic carbon and elemental carbon in Pearl River Delta Region, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38** (27): 4447-4456.
- [33] Cao J J, Lee S C, Ho K F, *et al.* Characteristics of carbonaceous aerosol in Pearl River Delta Region, China during 2001 winter period [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(11): 1451-1460.
- [34] Cachier H, Lioussé C, Pertuisot M H, *et al.* African fire particulate emission and atmospheric influence [A]. In: *Biomass Burning and Global Change*[M]. Cambridge: MIT Press, 1996: 428-440.
- [35] Watson J G, Chow J C, Houck J E. PM_{2.5} chemical source profiles for vehicle exhaust, vegetative burning, geological material, and coal burning in Northwestern Colorado during 1995 [J]. *Chemosphere*, 2001, **43**(8): 1141-1151.
- [36] 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.
- [37] 程艳丽, 李湉湉, 白郁华, 等. 珠江三角洲区域大气二次有机气溶胶的数值模拟[J]. *环境科学*, 2009, **30**(12): 3441-3447.
- [38] 郑君瑜, 郑卓云, 王兆礼, 等. 珠江三角洲天然源 VOCs 排放量估算及时空分布特征[J]. *中国环境科学*, 2009, **29**(4): 345-350.
- [39] Seinfeld J H, Pandis S N. *Atmospheric chemistry and physics*:

- from air pollution to climate change[M]. New York: John Wiley & Sons, 1998.
- [40] 郑君瑜, 张礼俊, 钟流举, 等. 珠江三角洲大气面源排放清单及空间分布特征[J]. 中国环境科学, 2009, **29**(5): 455-460.
- [41] Shen Z, Arimoto R, Cao J, *et al.* Seasonal variations and evidence for the effectiveness of pollution controls on water-soluble inorganic species in total suspended particulates and fine particulate matter from Xi'an, China [J]. Journal of Air & Waste Management Association, 2008, **58**(12): 1560-1570.
- [42] Tao J, Shen Z X, Zhu C S, *et al.* Seasonal variations and chemical characteristics of sub-micrometer particles (PM₁) in Guangzhou, China [J]. Atmospheric Research, 2012, **118**: 222-231.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjkx.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过 20 字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式,左起顶格书写,3 级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:

期刊:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

会议文集:作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在 3 个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:hjkx@rcees.ac.cn;网址:www.hjkx.ac.cn

CONTENTS

Characterizing Beijing's Airborne Bacterial Communities in PM _{2.5} and PM ₁₀ Samples During Haze Pollution Episodes Using 16S rRNA Gene Analysis Method	WANG Bu-ying, LANG Ji-dong, ZHANG Li-na, <i>et al.</i> (2727)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Dustfall Trace Elements During Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (2735)
Pollution Characteristics of Aldehydes and Ketones Compounds in the Exhaust of Beijing Typical Restaurants	CHENG Jing-chen, CUI Tong, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (2743)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Beijing Based on Actual Traffic Flow Information	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2750)
Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Visibility in Summer in Pearl River Delta, China	YANG Yi-hong, QU Qun, LIU Sui-xin, <i>et al.</i> (2758)
Health Risk Assessment of Tunnel Workers Based on the Investigation and Analysis of Occupational Exposure to PM ₁₀	XIANG Hua-li, YANG Jun, QIU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (2768)
Analysis on Emission Inventory and Temporal-Spatial Characteristics of Pollutants from Key Coal-Fired Stationary Sources in Jiangsu Province by On-Line Monitoring Data	ZHANG Ying-jie, KONG Shao-fei, TANG Li-li, <i>et al.</i> (2775)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation and Its Water Vapor Sources in Eastern Qaidam Basin	ZHU Jian-jia, CHEN Hui, GONG Guo-li (2784)
Distribution Characteristics of Sedimentary Pigments in the Changjiang Estuary and Zhe-Min Coast and Its Implications	LI Dong, YAO Peng, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (2791)
Nutrients Input Characteristics of the Yangtze River and Wangyu River During the "Water Transfers on Lake Taihu from the Yangtze River"	PAN Xiao-xue, MA Ying-qun, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (2800)
Pollution Characteristics of Surface Runoff of Typical Town in Chongqing City	WANG Long-tao, DUAN Bing-zheng, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (2809)
Effect of Water and Sediment Regulation on the Transport of Particulate Organic Carbon in the Lower Yellow River	ZHANG Ting-ting, YAO Peng, WANG Jin-peng, <i>et al.</i> (2817)
Concentration and Source of Dissolved Organic Carbon in Snowpits of the Tibetan Plateau	YAN Fang-ping, KANG Shi-chang, CHEN Peng-fei, <i>et al.</i> (2827)
Variations of Inorganic Carbon and Its Impact Factors in Surface-Layer Waters in a Groundwater-Fed Reservoir in Karst Area, SW China	LI Jian-hong, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2833)
Modeling the Influencing Factors of Karstification and Karst Carbon Cycle in Laboratory	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, DUAN Yi-fan (2843)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of HCHs and DDTs in Surface Water Bodies in Xinxiang	FENG Jing-lan, YU Hao, LIU Shu-hui, <i>et al.</i> (2849)
Comparison Study of the Alkanes in Different Aquifer Medium Under Qingmuguan Underground System	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (2857)
Spatial Distribution Characteristics of Different Species Mercury in Water Body of Changshou Lake in Three Gorges Reservoir Region	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2863)
Influence of Marine Aquaculture Around Coal Power Plant on Mercury Species Change in Aquatic Ecological Environment	LIANG Peng, WANG Yuan-na, YOU Qiong-zhi, <i>et al.</i> (2870)
Using $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ and $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$, $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ to Trace the Sources of Sulfur and Nitrate in Lihu Lake Underground Water, Guangxi, China	Li Rui, XIAO Qiong, LIU Wen, <i>et al.</i> (2877)
Ecological Effects of Algae Blooms Cluster: The Impact on Chlorophyll and Photosynthesis of the Water Hyacinth	LIU Guo-feng, HE Jun, YANG Yi-zhong, <i>et al.</i> (2887)
Influence of Natural Dissolved Organic Matter on the Passive Sampling Technique and Its Application	YU Shang-yun, ZHOU Yan-mei (2895)
Adhesion Force Analysis of Protein Fouling of PVDF Ultrafiltration Membrane Using Atomic Force Microscope	WANG Xu-dong, ZHOU Miao, MENG Xiao-rong, <i>et al.</i> (2900)
Influence of CNTs on Photodegradation of Salbutamol in Water Environment	WANG Qi, HAN Jia-rui, WEI Bo-fan, <i>et al.</i> (2906)
Preparation of $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$ and Catalytic Degradation of Oxytetracycline Under Solar Light Irradiation	AI Cui-ling, ZHOU Dan-dan, ZHANG Rong-rong, <i>et al.</i> (2911)
Nitrogen Release Performance of Sediments in Drainage Pipeline	CHEN Hong, ZHUO Qiong-fang, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (2918)
Analysis of Precipitation Formation in Biofilm CANON Reactor and Its Effect on Nitrogen Removal	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (2926)
Optimization of Energy Saving Measures with ABR-MBR Integrated Process	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2934)
Abundance and Community Composition of Ammonia-Oxidizing Archaea in Two Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Systems	GAO Jing-feng, LI Ting, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2939)
Formation Mechanism of Aerobic Granular Sludge and Removal Efficiencies in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2947)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Soil of Pearl River Delta Economic Zone	DOU Lei, YANG Guo-yi (2954)
Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil in Du'an Autonomous County of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China	WU Yang, YANG Jun, ZHOU Xiao-yong, <i>et al.</i> (2964)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Its Health Risk of Surface Dusts from Parks of Kaifeng, China	DUAN Hai-jing, CAI Xiao-qiang, RUAN Xin-ling, <i>et al.</i> (2972)
Responses of Soil and Plant ^{15}N Natural Abundance to Long-term N Addition in an N-Saturated <i>Pinus massoniana</i> Forest in Southwest China	LIU Wen-jing, KANG Rong-hua, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (2981)
Latitudinal Changes in Plant Stoichiometric and Soil C, N, P Stoichiometry in Loess Plateau	LI Ting, DENG Qiang, YUAN Zhi-You, <i>et al.</i> (2988)
Open-top Chamber for <i>in situ</i> Research on Response of Mercury Enrichment in Rice to the Rising Gaseous Elemental Mercury in the Atmosphere	CHEN Jian, WANG Zhang-wei, ZHANG Xiao-shan, <i>et al.</i> (2997)
Influence of Uranium in <i>Pteris vittata</i> L. Inoculated by Arbuscular Mycorrhizal Fungus	ZHENG Wen-jun, WANG Ming-yuan (3004)
Impact on the Microbial Biomass and Metabolic Function of Carbon Source by Black Soil During Rice Cultivation	ZHAO Zhi-rui, CUI Bing-jian, HOU Yan-lin, <i>et al.</i> (3011)
Effect of Decomposing Products of Immobilized Carriers on Desorption of Pyrene in Contaminated Soil	TONG Dong-li, SHUANG Sheng-qing, LI Xiao-jun, <i>et al.</i> (3018)
Solidification/Stabilization of Chromite Ore Processing Residue (COPR) Using Zero-Valent Iron and Lime-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag	CHEN Zhong-lin, LI Jin-chunzi, WANG Bin-yuan, <i>et al.</i> (3026)
Stabilization of Cadmium Contaminated Soils by Ferric Ion Modified Attapulgite (Fe/ATP): Characterizations and Stabilization Mechanism	YANG Rong, LI Hong-bo, ZHOU Yong-li, <i>et al.</i> (3032)
Improving Agricultural Safety of Soils Contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by In Situ Bioremediation	JIAO Hai-hua, PAN Jian-gang, XU Sheng-jun, <i>et al.</i> (3038)
Competence of Cd Phytoremediation in Cd-OCDF Co-contaminated Soil Using <i>Mirabilis jalapa</i> L.	ZHANG Xing-li, ZOU Wei, ZHOU Qi-xing (3045)
Effects of Soil Moisture on Phytoremediation of As-Contaminated Soils Using As-Hyperaccumulator <i>Pteris vittata</i> L.	LIU Qiu-xin, YAN Xiu-lan, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3056)
Effects of Phosphate Rock and Decomposed Rice Straw Application on Lead Immobilization in a Contaminated Soil	TANG Fan, HU Hong-qing, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3062)
Residue and Degradation of Roxarsone in the System of Soil-Vegetable	SHAO Ting, YAO Chun-xia, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3068)
Acute Toxicity and Safety Assessment of Three Typical Organic Pollutants to Two Aquatic Organisms	YANG Yang, LI Ya-jie, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (3074)
Effects of Oil Pollutants on the Performance of Marine Benthonic Microbial Fuel Cells and Its Acceleration of Degradation	MENG Yao, FU Yu-bin, LIANG Sheng-kang, <i>et al.</i> (3080)
Microwave In-situ Regeneration of Cu-Mn-Ce/ZSM Catalyst Adsorbed Toluene and Distribution of Bed Temperature	HU Xue-jiao, BO Long-li, LIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3086)
Impact of Thermal Treatment on Biogas Production by Anaerobic Digestion of High-solid-content Swine Manure	HU Yu-ying, WU Jing, WANG Shi-feng, <i>et al.</i> (3094)
Impact of Phosphogypsum Wastes on the Wheat Growth and CO ₂ Emissions and Evaluation of Economic-environmental Benefit	LI Ji, WU Hong-sheng, GAO Zhi-qiu, <i>et al.</i> (3099)
Status Quo, Uncertainties and Trends Analysis of Environmental Risk Assessment for PFASs	HAO Xue-wen, LI Li, WANG Jie, <i>et al.</i> (3106)

《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)

2015年8月15日 第36卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 8 Aug. 15, 2015

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