

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第4期

Vol.34 No.4

**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

|                                                        |                                                                   |
|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 唐山大气颗粒物中水溶性无机盐的观测研究                                    | 苗红妍, 温天雪, 王丽, 李杏茹, 王跃思 (1225)                                     |
| 鼎湖山 PM <sub>10</sub> 中水溶性离子浓度特征分析                      | 赵亚南, 王跃思, 温天雪, 刘全 (1232)                                          |
| 北京夏冬季霾天气下气溶胶水溶性离子粒径分布特征                                | 黄怡民, 刘子锐, 陈宏, 王跃思 (1236)                                          |
| 深圳市 PM <sub>10</sub> 化学组成与时空分布特征                       | 云慧, 何凌燕, 黄晓峰, 兰紫娟, 李响, 曾立武 (1245)                                 |
| 福州城市及郊区冬、夏两季大气中多环芳烃特征研究                                | 易志刚, 黄幸然, 毕峻奇, 郭萍萍, 郑丽丽 (1252)                                    |
| 河西走廊及兰州地区典型有机氯农药的大气残留及时空分布特征                           | 丁中原, 毛潇萱, 马子龙, 田慧, 郭强, 黄韬, 高宏, 李军, 张干 (1258)                      |
| 淄博市大气污染特征模型模拟及环境容量估算                                   | 薛文博, 王金南, 杨金田, 雷宇, 燕丽, 贺晋瑜, 韩宝平 (1264)                            |
| 香溪河秋季水-气界面温室气体通量日变化观测及影响因素分析                           | 黄文敏, 朱孔贤, 赵玮, 余博识, 袁希功, 冯瑞杰, 毕永红, 胡征宇 (1270)                      |
| 变异系数法评价人类活动对地下水环境的影响                                   | 赵微, 林健, 王树芳, 刘记来, 陈忠荣, 寇文杰 (1277)                                 |
| 基于 ArcSWAT 模型的长乐江流域非点源氮素污染源识别和分析                       | 邓欧平, 孙嗣咏, 吕军 (1284)                                               |
| 西安周边河流溶解无机碳浓度及同位素组成初探                                  | 郭威, 李祥忠, 刘卫国 (1291)                                               |
| 滇池流域宝象河暴雨径流初始冲刷效应                                      | 郭怀成, 向男, 周丰, 王永华, 李发荣, 朱翔, 毛国柱, 于书霞, 李娜, 盛虎, 杨永辉, 何成杰, 王翠榆 (1298) |
| 三峡库区沉积物秋冬初的磷释放通量估算                                     | 牛凤霞, 肖尚斌, 王雨春, 刘德富, 黎国育, 王亮, 纪道斌, 杨正健 (1308)                      |
| 海南东部河流、河口及近岸水域颗粒态重金属的分布及污染状况                           | 辛成林, 任景玲, 张桂玲, 郭亚平, 张国玲, 刘素美 (1315)                               |
| 黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征                                  | 吴斌, 宋金明, 李学刚 (1324)                                               |
| 扎龙湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价                             | 叶华香, 臧淑英, 张丽娟, 张玉红 (1333)                                         |
| 上海市典型疏浚泥重金属生态风险评价                                      | 唐庆丽, 程金平, 高昊旻, 姚磊, 蒋真毅, 吴旻, 谢翠松, 梁海, 王鹤, 皮帅帅, 余朝毅 (1340)          |
| 我国沿海地区城镇污水处理厂污泥重金属污染状况及其处置分析                           | 张灿, 陈虹, 余忆玄, 王立军, 韩建波, 陶平 (1345)                                  |
| 江苏某地长江、太湖水源水及出厂水中有机物雌激素活性的比较                           | 金涛, 吕学敏, 曾一凡, 张冰冰, 马鲲鹏, 姜朴, 唐非 (1351)                             |
| 北京市污水处理厂中邻苯二甲酸酯污染水平及其归趋                                | 周益奇, 刘云霞 (1357)                                                   |
| 降解 DMF 引起污泥毒性及其毒性空间分布特性研究                              | 胡园园, 杨娜, 丁毅, 徐文璐, 陈秀荣, 艾奇峰, 陈善佳, 王利鹏, 黄华 (1363)                   |
| 渤海湾有机锡污染对野生脉红螺的生态风险                                    | 安立会, 张燕强, 宋双双, 刘玥, 高俊敏, 陈浩, 赵兴茹, 雷坤, 郑丙辉 (1369)                   |
| 巨牡蛎 ( <i>Crassostrea</i> sp.) 对燃煤电厂脱硫海水中汞的生物累积         | 刘锡尧, 袁东星, 陈耀瑾 (1374)                                              |
| 咪唑盐离子液体对蚯蚓急性毒性及体重影响研究                                  | 黄若男, 范军杰, 涂宏志, 谭凌燕, 刘惠君, 徐冬梅 (1380)                               |
| 铝盐混凝除砷影响因素及机制研究                                        | 陈桂霞, 胡承志, 朱灵峰, 童华卿 (1386)                                         |
| 混凝和活性炭吸附去除微污染源水中 DON 的研究                               | 刘冰, 余国忠, 古励, 赵承美, 李清飞, 翟慧敏 (1392)                                 |
| 活性炭催化臭氧氧化扑热息痛的机制研究                                     | 王佳裕, 戴启洲, 鱼杰, 颜亦舟, 陈建孟 (1402)                                     |
| 氯酚溶液的 $\gamma$ 辐照还原降解研究                                | 彭云霞, 何仕均, 龚文琪, 王建龙 (1411)                                         |
| C/N 比对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响分析                                | 袁怡, 黄勇, 邓慧萍, 盛学敏, 潘杨, 李祥 (1416)                                   |
| 以甲醇为碳源生物反硝化过程释放一氧化二氮的试验研究                              | 翟晓峰, 蒋成爱, 吴光学, 曾运涛 (1421)                                         |
| 固体纤维素类废物作为反硝化碳源滤料的比选                                   | 李斌, 郝瑞霞 (1428)                                                    |
| 基于能源回收的城市污水厌氧氨氧化生物脱氮新工艺                                | 卢健聪, 高大文, 孙学影 (1435)                                              |
| 多模式厌氧/缺氧/好氧污水处理工艺的稳态与动态模拟                              | 周振, 吴志超, 王志伟, 杜兴治, 蒋玲燕, 邢灿 (1442)                                 |
| 高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较                                 | 赵志瑞, 马斌, 张树军, 李滨, 白志辉, 王晓辉, 庄国强, 张洪助 (1448)                       |
| 活性污泥絮体的分形结构分析                                          | 阮晓东, 刘俊新 (1457)                                                   |
| 负荷交替法快速培养好氧硝化颗粒污泥的研究                                   | 沈娜, 杨昌柱, 濮文虹, 罗应东 (1464)                                          |
| 预加不同比例不同粒径好氧颗粒对 SBR 中好氧颗粒污泥形成的影响                       | 熊光城, 濮文虹, 杨昌柱 (1472)                                              |
| 同时回收氮磷提高碱性发酵污泥脱水性能的机制研究                                | 张超, 陈银广, 顾国维 (1479)                                               |
| 利用流式细胞仪分选技术研究湖泊真核超微藻的遗传多样性                             | 谢薇薇, 袁伊, 王张伟, 孔繁翔, 史小丽 (1485)                                     |
| 阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻的化感作用                                     | 郭亚丽, 傅海燕, 黄国和, 高攀峰, 柴天, 严滨, 廖欢 (1492)                             |
| 象山港国华电厂强增温海域浮游动物群落结构和多样性的时空特征                          | 朱艺峰, 黄简易, 林霞, 杨莹, 邢超, 严小军 (1498)                                  |
| 环氧树脂降解嗜盐菌的筛选及其处理高盐环氧树脂废水的特性研究                          | 王进, 徐真, 彭书传, 夏明山, 岳正波, 陈天虎 (1510)                                 |
| 铜绿假单胞菌胞内酶粗提液对十溴联苯醚的降解                                  | 史广宇, 尹华, 叶锦韶, 彭辉, 张娜, 何宝燕 (1517)                                  |
| 酵母提取物对葡萄糖发酵生产生物破乳菌 <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1 的影响   | 黄翔峰, 王凯, 黎明霞, 王彩林, 陆丽君, 刘佳 (1524)                                 |
| 玉米秸秆厌氧降解复合菌系的微生物群落结构                                   | 乔江涛, 郭荣波, 袁宪正, 师晓爽, 许晓晖, 范晓蕾, 邱艳玲 (1531)                          |
| 红霉素对产甲烷菌的抑制及其驯化                                        | 刘子旭, 孙力平, 李玉友, 邱春生 (1540)                                         |
| 4 种 NAPLs 污染物在二维砂箱中的指进锋面形态特征研究                         | 杨宾, 李慧颖, 伍斌, 杜晓明, 李发生 (1545)                                      |
| 污灌区土壤中多环芳烃的垂直分布及可能来源                                   | 姚林林, 张彩香, 李佳乐, 廖小平, 王焰新 (1553)                                    |
| 呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价                                 | 郭伟, 孙文惠, 赵仁鑫, 赵文静, 付瑞英, 张君 (1561)                                 |
| 水稻光合同化碳在土壤不同粒径、密度分组中的分配特征                              | 李苗苗, 聂三安, 陈晓娟, 罗璐, 朱捍华, 石辉, 葛体达, 童成立, 吴金水 (1568)                  |
| 亚热带不同稻田土壤微生物量碳的剖面分布特征                                  | 盛浩, 周萍, 袁红, 廖超林, 黄运湘, 周清, 张杨珠 (1576)                              |
| 施用堆腐有机肥对水稻土中六氯苯脱氯降解影响                                  | 刘翠英, 蒋新 (1583)                                                    |
| 螯合剂和生物表面活性剂对 Cu、Pb 污染壤土的淋洗修复                           | 刘霞, 王建涛, 张萌, 王力, 杨亚提 (1590)                                       |
| 不同温度下烧制的秸秆炭对可变电荷土壤吸附 Pb(II) 的影响                        | 蒋田雨, 姜军, 徐仁扣, 周立祥, 王世梅 (1598)                                     |
| 绿色木霉改性玉米秸秆溢油吸附剂的制备及其性能研究                               | 蓝丹琳, 彭丹, 郭楚玲, 朱超飞, 薛秀玲, 党志 (1605)                                 |
| 改性与成型层状氢氧化镁铝对不同水体中 PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> 的脱除性能 | 邢坤, 王海增 (1611)                                                    |
| 羧基化碳纳米管载铂催化剂对微生物燃料电池阴极氧还原性能的影响                         | 涂丽杏, 朱能武, 吴平霄, 李平, 吴锦华 (1617)                                     |
| 新型生物质活性炭烟气脱硫研究                                         | 刘洁岭, 汤争光, 陈杰, 蒋文举, 江霞 (1623)                                      |
| 城市工业行业能源消费强度等级划分方法及应用                                  | 毛建素, 马兰 (1628)                                                    |
| 厦门城市化进程中的居民食物碳消费及其环境负荷                                 | 闫祯, 崔胜辉, 李桂林, 任引, 徐礼来 (1636)                                      |
| 《环境科学》征订启事 (1283)                                      |                                                                   |
| 《环境科学》征稿简则 (1332)                                      |                                                                   |
| 信息 (1350, 1509, 1582, 1644)                            |                                                                   |
| 专辑征稿通知 (1523)                                          |                                                                   |

# 深圳市PM<sub>2.5</sub>化学组成与时空分布特征

云慧, 何凌燕, 黄晓锋\*, 兰紫娟, 李响, 曾立武

(北京大学深圳研究生院城市人居环境科学与技术实验室, 深圳 518055)

**摘要:** 于2008-12-30~2009-12-25, 在深圳市宝安区、罗湖区和盐田区各设置一个采样点采集大气细粒子PM<sub>2.5</sub>, 分析了PM<sub>2.5</sub>中主要的水溶性离子组分、有机碳和元素碳, 同时结合气象条件, 对深圳市PM<sub>2.5</sub>的化学组成及时空分布特征进行了研究. 结果表明, 深圳市PM<sub>2.5</sub>污染总体上呈现西高东低的空间分布特点, 但是SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>和NH<sub>4</sub><sup>+</sup>的空间差异不大, 说明深圳PM<sub>2.5</sub>污染具有明显的区域传输特征. OC/EC值自西向东逐渐升高, 说明深圳西部地区受一次源排放影响更为显著. 受亚热带海洋性季风气候的影响, 深圳市PM<sub>2.5</sub>总体污染程度表现为秋冬高、夏春低的特点, 各主要组分的质量浓度变化也均有类似的特征. 与2004年深圳的类似观测结果比较发现, 该地区脱硫措施显著降低了PM<sub>2.5</sub>中硫酸盐浓度, 而机动车尾气对PM<sub>2.5</sub>的贡献变得更加重要.

**关键词:** PM<sub>2.5</sub>; 化学组成; 空间分布; 季节变化; 深圳市

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)04-1245-07

## Characterising Seasonal Variation and Spatial Distribution of PM<sub>2.5</sub> Species in Shenzhen

YUN Hui, HE Ling-yan, HUANG Xiao-feng, LAN Zi-juan, LI Xiang, ZENG Li-wu

(Key Laboratory for Urban Habitat Environmental Science and Technology, Shenzhen Graduate School of Peking University, Shenzhen 518055, China)

**Abstract:** To investigate the effect of meteorological characteristics on PM<sub>2.5</sub> chemical composition and the spatial distribution of different PM<sub>2.5</sub> species in Shenzhen, 24-h PM<sub>2.5</sub> samples were collected every six days from December 2008 to December 2009. The sampling network included an industrial site at Baoan, an urban site at Luohu and a seaside site at Yantian. Water-soluble inorganic ions and carbonaceous material (organic carbon and elemental carbon) were analyzed. The industrial site showed a much higher concentration than that of other two sites of organic matter, elemental carbon and nitrate, which presented the obvious difference of local emissions. But for the concentration of sulfate and ammonium of three different sites nearly stayed at the same level and indicated that they were mainly influenced by regional transport. OC/EC had the characteristics of the industrial site < the urban site < the seaside site, which implied that the industrial site had less secondary organic matter and more primary pollution sources. As the subtropical maritime monsoon climate is the dominant meteorological feature of the Pearl River Delta with a southwesterly transport and abundant rain in spring and summer, in contrast to a northwesterly transport and little rain in fall and winter, the PM<sub>2.5</sub> pollution was much more serious in winter than in summer. Compared with the results of the similar experiment in 2004, the concentration of sulfate in PM<sub>2.5</sub> has significantly declined because of the measures of reducing the emission of sulfur dioxide. But the pollution of vehicle emissions has become significant.

**Key words:** PM<sub>2.5</sub>; chemical composition; spatial distribution; seasonal variation; Shenzhen

近年来, 国内对大气颗粒物细粒子(PM<sub>2.5</sub>)污染的关注程度越来越高. PM<sub>2.5</sub>对大气环境质量和人体健康有着非常重要的影响<sup>[1~4]</sup>, 能够导致灰霾的形成并降低大气能见度<sup>[5,6]</sup>, 对人体呼吸系统有明显的损伤, 且可能增加暴露人群的死亡风险<sup>[7~10]</sup>. 根据以往的研究, 我国主要城市大气PM<sub>2.5</sub>质量浓度较高<sup>[11~14]</sup>, 平均浓度水平甚至超过100 μg·m<sup>-3</sup>, 已经成为影响我国城市大气环境质量的重要污染物. 在2012年3月我国新颁布的国家空气质量标准中, 已经将PM<sub>2.5</sub>列为常规监测指标, PM<sub>2.5</sub>是未来我国大气污染防治的重点.

深圳市作为中国第一个经济特区, 社会经济发

展快速, 工业化和城市化水平高, 人口密集, 交通发达, 机动车保有量逐年增加. 与此同时, 城市大气环境质量却逐渐恶化, 灰霾天气频发, 2009年深圳市年均灰霾天数达到115 d. 深圳市PM<sub>2.5</sub>的污染贡献一方面来自本地污染源的直接排放, 如电厂、工业企业、机动车尾气等的排放以及道路和建设扬尘等. 另一方面, 深圳市地处中国珠三角东岸, 珠三角地区目前已经形成了以广州、珠海、中山、东莞、

收稿日期: 2012-06-24; 修订日期: 2012-08-21

基金项目: 深圳市环境科研课题项目

作者简介: 云慧(1988~), 女, 硕士, 主要研究方向为大气环境化学,  
E-mail: yun-hui-1988@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: huangxf@pku.edu.cn

深圳、香港等城市为中心的特大城市群,各个城市排放的大气污染物可以通过区域传输相互影响.此外,深圳受亚热带海洋性季风气候影响,夏季盛行西南季风,湿润多雨,冬季主导东北风,干燥少雨,大气环境质量在不同季节差异很大.目前国内对  $\text{PM}_{2.5}$  的研究缺乏全年长期观测的数据,本研究于 2009 年在深圳市设置了 3 个采样点,采集了全年的  $\text{PM}_{2.5}$  样品,分析了深圳市全年  $\text{PM}_{2.5}$  的化学组成特征及其空间和季节变化规律,以期为我国城市  $\text{PM}_{2.5}$  污染防治提供科学依据.

## 1 材料与方法

深圳市地处广东省南部,东临大亚湾和大鹏湾,西濒珠江口和伶仃洋,南边与香港相联,北部与东莞、惠州两城市接壤(图 1).本研究的 3 个采样点位分别设在宝安区文汇中学楼顶( $22^{\circ}34'37''\text{N}$ ,  $113^{\circ}53'45''\text{E}$ )、罗湖区洪湖公园内的环境空气自动监测站上( $22^{\circ}33'49''\text{N}$ ,  $114^{\circ}07'14''\text{E}$ )以及盐田区大梅沙附近的中兴通讯研究院楼顶( $22^{\circ}35'42''\text{N}$ ,  $114^{\circ}18'06''\text{E}$ ).三点位依次代表了深圳市西部工业区、中部市区及东部滨海旅游区的空气污染水平和特征.



图 1 深圳市采样点位示意

Fig. 1 Location of three sampling sites

本研究使用美国哈佛大学专利  $\text{PM}_{2.5}$  采样器及石英纤维膜进行样品采集,采样流速均设为  $16.7 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ .从 2008-12-30 ~ 2009-12-25 每 6 d 采样一次,每次采样时间为 24 h. 3 个采样点的有效样品数依次为 58、56、55. 使用 ICS-2500 离子色谱(Dionex, USA)对样品中的水溶性无机离子  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{K}^+$  等进行分析.使用热/光碳质分析仪(2001 A 型,美国沙漠研究所)对有机碳(OC)、元素碳(EC)进行分析,升温程序为 IMPROVE 方法<sup>[15,16]</sup>.样品具体分析过程见本小组以往的研究<sup>[17]</sup>.将有机碳质量乘以经验常数 1.6 获得有机物(OM)的质量<sup>[18]</sup>.由于实验过程中部分

批次膜片  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  这 3 种离子的本底浓度较高,为保证实验数据的有效性和准确性,文中没有使用相关的数据.

## 2 结果与讨论

### 2.1 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度及化学组成的空间分布和季节变化

本研究主要分析了  $\text{PM}_{2.5}$  中的 7 种组分:有机物、元素碳、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{K}^+$  和  $\text{Cl}^-$ .前 5 种组分在 Hagler 等<sup>[19]</sup>分析的 2002 ~ 2003 年深圳  $\text{PM}_{2.5}$  中占 79%,在牛彧文等<sup>[20]</sup>分析的 2004 年深圳  $\text{PM}_{2.5}$  中占 78% (夏季)和 83% (冬季),这表明在深圳  $\text{PM}_{2.5}$  中前 5 种组分所占比例较高,而对广州和香港  $\text{PM}_{2.5}$  样品的分析也表明了类似结果<sup>[21~25]</sup>.因此,本研究分析的组分可以代表  $\text{PM}_{2.5}$  的大部分质量,采用  $\text{rPM}_{2.5}$  表示这 7 种组分质量浓度的加和.

深圳各采样点  $\text{PM}_{2.5}$  主要组分的质量浓度如表 1 所示,宝安区、罗湖区及盐田区 3 个点位  $\text{rPM}_{2.5}$  的平均质量浓度依次为  $42.3$ 、 $31.0$  及  $28.9 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ .该浓度远低于表 2 中广州市近几年<sup>[21~24]</sup>报道的  $\text{PM}_{2.5}$  水平,与香港 2004 ~ 2005 年<sup>[25]</sup>报道的水平较接近.总体上,深圳市  $\text{PM}_{2.5}$  污染程度呈现自西向东递减的趋势,其中宝安点是背景点盐田的 1.5 倍,说明深圳的  $\text{PM}_{2.5}$  重污染区在西部,这与深圳西部分布较多的工业园有关.在本地污染源排放较少的盐田点,其  $\text{rPM}_{2.5}$  的质量浓度略低于中部市区的罗湖点,说明深圳市细粒子污染的本底水平较高,受到污染物区域传输的影响大.在  $\text{rPM}_{2.5}$  中(图 2),有机物所占比例自西向东依次为 36.6%、34.4% 及 29.6%;  $\text{SO}_4^{2-}$  所占比例依次为 27.5%、31.4% 及 39.2%.这两种组分约占所有组分的 64% ~ 68%.元素碳、 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NH}_4^+$  所占比例均在 10% 左右,  $\text{K}^+$  和  $\text{Cl}^-$  所占比例最低,在 2% 左右.此外,深圳作为典型的沿海城市,海盐对  $\text{PM}_{2.5}$  的贡献是不能忽视的,虽然文中没有  $\text{Na}^+$  数据,但牛彧文<sup>[26]</sup>测得的深圳 2004 年夏季和冬季的  $\text{Na}^+$  浓度均低于  $1.0 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,由此估测海盐对深圳  $\text{PM}_{2.5}$  的贡献率不超过 10%,其中海盐源对  $\text{SO}_4^{2-}$  的贡献率在 3% 左右,对  $\text{K}^+$  的贡献在 5% 左右<sup>[27~29]</sup>.

由图 3 可知,深圳  $\text{PM}_{2.5}$  中的有机物、元素碳和  $\text{NO}_3^-$  都有显著的空间差异,质量浓度均为宝安 > 罗湖 > 盐田.其中,宝安点有机物的浓度约为盐田点的 1.8 倍,在  $\text{PM}_{2.5}$  中所占比例也明显高于盐田点

表 1 各采样点 PM<sub>2.5</sub> 主要化学组分的质量浓度/μg·m<sup>-3</sup>

| 项目                            | 宝安区 (n = 58) |       |      |      | 罗湖区 (n = 56) |      |      |      | 盐田区 (n = 55) |      |      |      |
|-------------------------------|--------------|-------|------|------|--------------|------|------|------|--------------|------|------|------|
|                               | 最小值          | 最大值   | 均值   | 标准偏差 | 最小值          | 最大值  | 均值   | 标准偏差 | 最小值          | 最大值  | 均值   | 标准偏差 |
| OM                            | 4.3          | 51.0  | 15.5 | 9.8  | 1.2          | 31.0 | 10.7 | 6.6  | 1.4          | 29.8 | 8.5  | 5.5  |
| EC                            | 1.5          | 15.1  | 5.0  | 2.9  | 0.059        | 11.8 | 3.7  | 2.5  | 0.18         | 5.3  | 2.2  | 1.4  |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | 1.6          | 27.5  | 11.6 | 7.2  | 0.85         | 21.3 | 9.7  | 5.8  | 1.1          | 34.2 | 11.3 | 7.8  |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 0.60         | 33.2  | 4.9  | 6.3  | 0.23         | 14.4 | 2.7  | 3.3  | 0.11         | 8.8  | 2.2  | 2.3  |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | 0.18         | 10.0  | 3.9  | 2.3  | 0.088        | 6.8  | 3.2  | 1.8  | 0.18         | 8.4  | 3.2  | 2.0  |
| Cl <sup>-</sup>               | 0.068        | 5.4   | 0.74 | 1.0  | 0.059        | 2.8  | 0.44 | 0.47 | 0.028        | 6.8  | 0.80 | 1.3  |
| K <sup>+</sup>                | 0.068        | 2.3   | 0.70 | 0.61 | 0.054        | 2.3  | 0.50 | 0.45 | 0.078        | 2.6  | 0.64 | 0.57 |
| rPM <sub>2.5</sub>            | 9.6          | 136.1 | 42.3 | 26.8 | 3.2          | 80.0 | 31.0 | 18.0 | 4.2          | 85.6 | 28.9 | 17.4 |

表 2 近年来珠三角典型城市 PM<sub>2.5</sub> 及其化学组成质量浓度比较/μg·m<sup>-3</sup>

| 城市 采样点说明            |  | 采样时间                    | PM <sub>2.5</sub> | OM   | EC   | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | 加和/PM <sub>2.5</sub> | 文献   |
|---------------------|--|-------------------------|-------------------|------|------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------|------|
| 广州 万顷沙(远郊点)         |  | 2004-05-15 ~ 2004-05-27 | 59.0              | 23.8 | 10.5 | 12.7                          | 5.8                          | 5.0                          | 98%                  | [21] |
| 广州 白云、荔湾、海珠、天河四点位平均 |  | 2004-08-02 ~ 2004-10-10 | 97.5              | 49.9 | 11.9 | 31.9                          | 2.5                          | 6.1                          | 105%                 | [22] |
| 广州 华南环境科学协会楼顶(市区点)  |  | 2007-04-01 ~ 2007-04-30 | 79.2              | 23.7 | 8.1  | 21.6                          | 9.5                          | 7.3                          | 89%                  | [23] |
| 广州 同上               |  | 2010-01-01 ~ 2010-01-31 | 103.3             | 18.9 | 7.8  | 17.8                          | 13.0                         | 6.5                          | 62%                  | [24] |
| 香港 荃湾(城市点)          |  | 2004-11-03 ~ 2005-10-29 | 39.0              | 11.8 | 6.0  | 13.2                          | 1.6                          | 4.1                          | 94%                  | [25] |
| 香港 鹤嘴(农村点)          |  | 2004-11-03 ~ 2005-10-29 | 28.4              | 6.9  | 2.1  | 11.9                          | 0.8                          | 3.1                          | 87%                  | [25] |
| 深圳 三点位平均            |  | 2008-12-30 ~ 2009-12-25 | 34.1              | 11.5 | 3.6  | 10.9                          | 3.3                          | 3.4                          | 96%                  | 本研究  |

(图 2). 颗粒物中的有机物既可来自石油、生物质等的直接燃烧排放,也可来自挥发性有机物的二次反应生成. 因此,深圳 PM<sub>2.5</sub> 中有机物的背景浓度水平已较高,同时还受到局地污染源的较大贡献. 元素碳主要来自一次燃烧源的排放,NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 主要来自氮氧化物的二次转化,宝安点元素碳与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度均为盐田点的 2.3 倍,因此深圳西部地区的元素碳受本地排放影响很大,同时西部地区有更多的氮氧化物排放源.

3 个采样点 PM<sub>2.5</sub> 中 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的质量浓度略有差异,但总体水平相当接近,尤其是背景点盐田与宝安点基本相等,在一定程度上说明 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 是一个典型的区域污染物,在较大尺度内分布比较均匀. 此外,

NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 的空间差异也不太显著,主要是由于大部分 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 以 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 的形式存在,因此 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 的空间分布特征与 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 类似. 尽管 K<sup>+</sup> 和 Cl<sup>-</sup> 的质量浓度均较低,但是盐田点高于罗湖点,且与宝安点的浓度接近,这是由于盐田点靠近海边、受海盐影响更显著.

由于元素碳来自一次燃烧源,且在大气中比较稳定,而有机碳除了一次排放还有二次光化学反应生成,因此 OC/EC 的值可用于间接反映某地大气中二次有机物的贡献情况,通常认为当 PM<sub>2.5</sub> 中 OC/EC 的值超过 2 就有显著的二次有机碳的生成<sup>[30]</sup>. 由图 3 各采样点 PM<sub>2.5</sub> 中 OC/EC 的比对情况可见,深圳市自西向东 OC/EC 的值逐渐升高,说明深圳西部

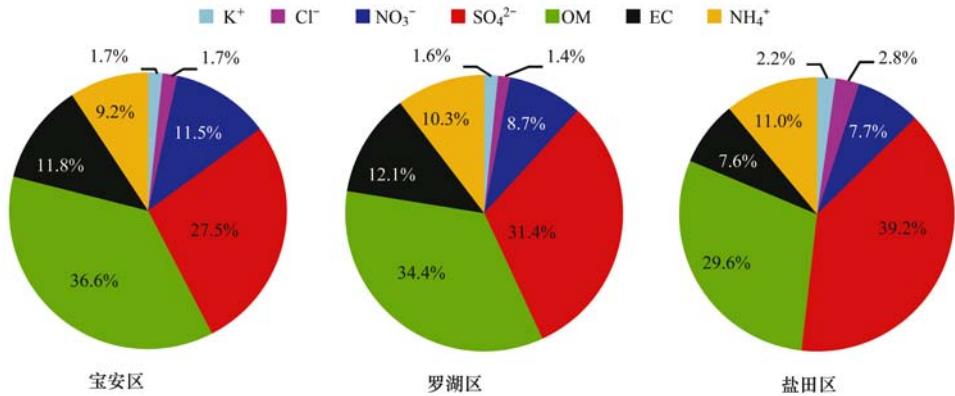


图 2 rPM<sub>2.5</sub> 的组成比例

Fig. 2 Composition of rPM<sub>2.5</sub>

地区二次有机物的贡献要小于东部背景区,深圳西部受到一次燃烧源排放的影响更为显著.

表 3 给出了各采样点之间同种组分的相关系数,宝安点和罗湖点之间,各个组分的相关系数范

围是 0.73~0.93,均具有较高的相关性,这与它们都属市区点的特征一致.盐田点属于郊区点位,因此与市区两个点位的污染物变化趋势相关性不高.

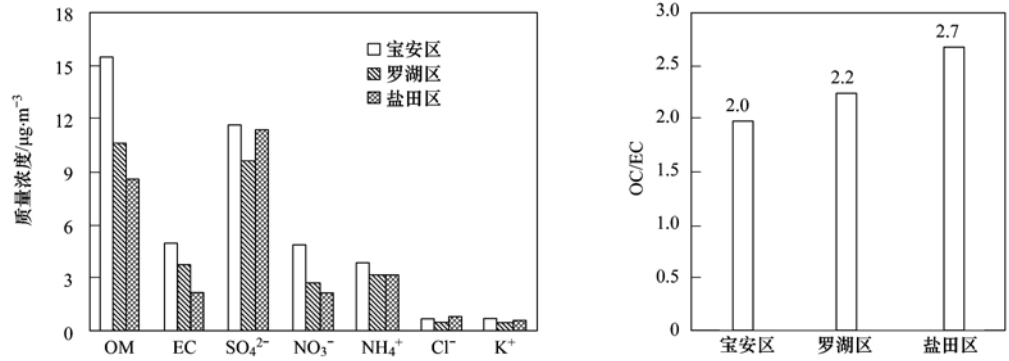


图 3  $\text{PM}_{2.5}$  主要组分的平均质量浓度及 OC/EC

Fig. 3 Average concentration of the main species of  $\text{PM}_{2.5}$  and the rate of OC and EC

表 3 各采样点之间同种组分的相关关系

Table 3 Correlation of the main species of  $\text{PM}_{2.5}$  between different sites

| 采样点     | 相关系数 $R$ |      |                    |                 |                 |               |              |
|---------|----------|------|--------------------|-----------------|-----------------|---------------|--------------|
|         | OM       | EC   | $\text{SO}_4^{2-}$ | $\text{NO}_3^-$ | $\text{NH}_4^+$ | $\text{Cl}^-$ | $\text{K}^+$ |
| 宝安区-罗湖区 | 0.85     | 0.84 | 0.73               | 0.93            | 0.81            | 0.87          | 0.84         |
| 宝安区-盐田区 | 0.54     | 0.30 | 0.57               | 0.55            | 0.60            | 0.21          | 0.22         |
| 罗湖区-盐田区 | 0.52     | 0.38 | 0.64               | 0.64            | 0.69            | 0.36          | 0.24         |

深圳市大气  $\text{PM}_{2.5}$  污染具有显著的季节变化特征,从图 4 上看出,2009 年 3 个采样点  $\text{rPM}_{2.5}$  质量浓度的时间变化趋势基本一致,在 1 月、2 月、10~12 月污染比较突出,其中 10 月表现为污染上升期;3~9 月污染较轻,且相对比较稳定,浓度最低的情况出现在 7 月.全年多次出现重污染过程(对应图中的峰值),其中 7 月 10 日和 8 月 9 日出现了夏季少见的重污染过程,都是受到台风外围下沉气流影响导致的污染累积.从化学组成来看,引起  $\text{rPM}_{2.5}$  质量浓度变化的主要是硫酸盐和有机物,某些重污染时段硝酸盐的增加也十分显著.

气象条件的季节规律是造成大气污染季节变化的重要原因,亚热带海洋性季风气候是珠江三角洲的主要气象特征,这对深圳近地面颗粒物累积、去除以及区域传输等方面有着十分重要的影响.表 4 中给出了深圳市 2009 年的气温、相对湿度、降水量、风向风速及大气边界层高度的月均变化.深圳市大气  $\text{PM}_{2.5}$  污染的季节变化特征与气象条件有着密切的关系;1 月、2 月、10~12 月大气边界层较低,不利于污染物稀释扩散;同时几乎没有降雨过程,污染物可以在较长时间内停留在大气中;另外

主导风向偏北,利于北方污染地区的污染物传输到深圳本地.3 月尽管边界层也相当低,仍主导偏北风,但降雨增多,雨水的冲刷导致空气比较洁净.4~9 月各项气象因素都有利于改善大气污染状况:一是大气边界层升高,近地面污染物得以稀释和扩散;二是降水过程较强,污染物去除明显;三是主导风向偏东偏南,气团主要来自洁净的洋面,区域传输的贡献很小.这与 Louie 等<sup>[31]</sup>研究气象条件对香港地区大气细粒子季节变化影响的研究结果是一致的.

2.2 2009 年与 2004 年  $\text{PM}_{2.5}$  各组分质量浓度的比较

牛彧文等<sup>[20]</sup>于 2004 年夏季 6 月 17 日~7 月 1 日及冬季 11 月 20 日~12 月 7 日在宝安区文汇中学点对  $\text{PM}_{2.5}$  进行了为期各 15 d 的采集,采样时间约为 24 h.对应其采样时段及采样地点,选取本研究中宝安点 6 月 4 日~7 月 4 日(6 个样品)及 11 月 1 日~12 月 7 日(6 个样品)的样品数据进行分析,并与 2004 年所得数据进行比较.

如表 5 所示,相比于 2004 年,2009 年夏季和冬季  $\text{PM}_{2.5}$  中的有机物、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{K}^+$  的质量浓度都有所下降,降幅从 20% 到 68% 不等,冬季的降幅

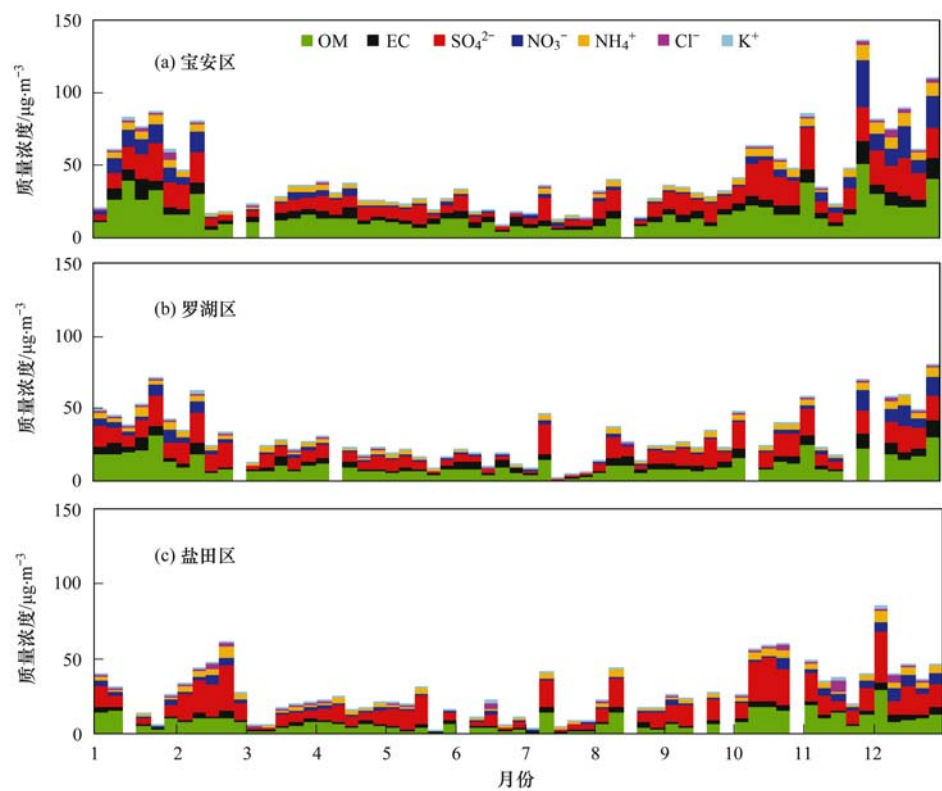


图4 rPM<sub>2.5</sub>质量浓度的时间变化趋势

Fig. 4 Time series of the concentration of rPM<sub>2.5</sub> and its main species

表4 2009年深圳基本气象条件

Table 4 Meteorological characteristics of different months in 2009 in Shenzhen

| 月份 | 平均气温/℃ | 平均相对湿度/% | 降水量/mm | 平均风速/m·s <sup>-1</sup> | 主导风向 | 大气边界层高度 <sup>1)</sup> /m |
|----|--------|----------|--------|------------------------|------|--------------------------|
| 1  | 14.6   | 53       | 0.2    | 2.5                    | 东北偏北 | 690 *                    |
| 2  | 20.8   | 74       | 1.0    | 2.2                    | 东    | 700 *                    |
| 3  | 19.1   | 79       | 176.3  | 2.4                    | 东北偏北 | 710 *                    |
| 4  | 22.1   | 72       | 125.5  | 2.7                    | 东    | 860                      |
| 5  | 25.5   | 79       | 268.8  | 2.5                    | 东    | 900                      |
| 6  | 27.9   | 77       | 192.9  | 2.2                    | 西南   | 840                      |
| 7  | 28.9   | 75       | 254.9  | 2.5                    | 西南   | 910                      |
| 8  | 29.1   | 77       | 217.4  | 2.0                    | 东北偏东 | 940                      |
| 9  | 28.7   | 70       | 282.4  | 2.6                    | 东北   | 930                      |
| 10 | 26.1   | 62       | 18.6   | 2.1                    | 东北   | 800                      |
| 11 | 19.5   | 63       | 32.6   | 2.6                    | 东北偏北 | 740                      |
| 12 | 16.5   | 69       | 40.4   | 2.4                    | 东北偏北 | 640                      |

1) \* 为2010年同月份的测定结果

明显低于夏季,这与冬季污染物的区域传输特征有关. 比较近年来广州市 PM<sub>2.5</sub> 及其化学组成的相关文献(表2),发现从2004~2010年广州市 PM<sub>2.5</sub> 中 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 质量浓度也均有大幅下降,这说明珠三角地区采取的脱硫措施已有成效,“十一五”期间广东省二氧化硫排放量由129.4万t下降到105.1万t,降幅18.8%. 另一方面,深圳市夏季的元素碳质量浓度2009年比

2004年有所增加,说明本地一次燃烧源的增强;而冬季则有所降低,说明元素碳区域来源的降低. NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的质量浓度无论夏季或冬季,2009年比2004年均有所增加. 元素碳与氮氧化物都是机动车尾气排放的主要污染物,2004~2009年深圳市机动车保有量从66万辆增加到145万辆,由此可见,机动车尾气排放对深圳市 PM<sub>2.5</sub> 的贡献越来越重要.

表 5 2004 年及 2009 年 PM<sub>2.5</sub> 化学组成质量浓度比较/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 5 Comparison of the concentration of chemical species in PM<sub>2.5</sub> between 2004 and 2009/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

| 项目                            | 夏季     |        |                   | 冬季     |        |                   |
|-------------------------------|--------|--------|-------------------|--------|--------|-------------------|
|                               | 2004 年 | 2009 年 | 2004 ~ 2009 年降幅/% | 2004 年 | 2009 年 | 2004 ~ 2009 年降幅/% |
| OM                            | 11.7   | 8.5    | 27                | 31.7   | 25.3   | 20                |
| EC                            | 2.1    | 3.8    | -82               | 12.9   | 7.3    | 44                |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | 8.6    | 4.2    | 52                | 23.9   | 17.3   | 28                |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 1.1    | 1.2    | -7                | 6.4    | 10.8   | -68               |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | 3.8    | 1.2    | 68                | 7.4    | 5.9    | 21                |
| K <sup>+</sup>                | 0.4    | 0.2    | 55                | 2.2    | 1.2    | 46                |
| 加和                            | 27.7   | 19.1   | 31                | 84.5   | 67.6   | 20                |

3 结论

(1) 深圳市宝安区、罗湖区及盐田区 3 个点位 PM<sub>2.5</sub> 的 7 种主要组分总质量浓度的平均值依次为 42.3、31.0 及 28.9  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 表明深圳市大气细粒子污染程度呈现自西向东递减的趋势, 深圳西部宝安区大气污染严重.

(2) 有机物、元素碳和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的平均质量浓度受局地排放影响, 均呈现自西向东递减的趋势; OC/EC 值则自西向东逐渐升高, 表明深圳西部受到一次燃烧源排放的影响更显著; 而 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 的空间差异不大, 表明这两种组分都是典型的区域传输污染物.

(3) 2009 年深圳市大气 PM<sub>2.5</sub> 在 1 月、2 月、10 ~ 12 月污染比较突出, 3 ~ 9 月污染较轻. 这种季节变化特征主要与珠三角亚热带海洋性季风气候有关, 其中最主要的影响因素是降雨量、风向及大气边界层高度.

(4) 比较 2009 年与 2004 年深圳夏季和冬季 PM<sub>2.5</sub> 中主要组分的质量浓度, 发现有机物、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 的质量浓度均有所降低, 而 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和元素碳的质量浓度有上升趋势, 说明深圳市的脱硫措施取得了一定的效果, 而机动车尾气排放对 PM<sub>2.5</sub> 的贡献越来越重要.

致谢: 感谢深圳市气象局为本研究提供有效的气象数据.

参考文献:

[ 1 ] Vedral S. Ambient particles and health: lines that divide [ J ]. Journal of the Air and Waste Management Association, 1997, **47** (5): 551-581.

[ 2 ] National Research Council. Research Priorities for Airborne Particulate Matter: I Immediate Priorities and a Long-Range Research Portfolio [ M ]. Washington, DC: National Academy Press, 1998.

[ 3 ] National Research Council. Research Priorities for Airborne Particulate Matter: II Evaluating Research Progress and

Updating the Portfolio [ M ]. Washington, DC: National Academy Press, 1999.

[ 4 ] National Research Council. Research Priorities for Airborne Particulate Matter: III Early Research Progress [ M ]. Washington, DC: National Academy Press, 2001.

[ 5 ] Watson J G. Visibility: Science and regulation [ J ]. Journal of the Air and Waste Management Association, 2002, **52** (6): 628-713.

[ 6 ] Chow J C, Bachmann J D, Wierman S S G, *et al.* Visibility: science and regulation [ J ]. Journal of the Air and Waste Management Association, 2002, **52** (9): 973-999.

[ 7 ] Dockery D W, Pope C A, Xu X P, *et al.* An association between air pollution and mortality in six U. S. cities [ J ]. New England Journal of Medicine, 1993, **329** (24): 1753-1759.

[ 8 ] Pope C A, Thun M J, Namboodiri M M, *et al.* Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of U. S. adults [ J ]. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 1995, **151** (3\_pt\_1): 669-674.

[ 9 ] Pope C A, Dockery D W. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect [ J ]. Journal of Air and Waste Management Association, 2006, **56** (6): 709-742.

[ 10 ] Franklin M, Koutrakis P, Schwartz P. The role of particle composition on the association between PM<sub>2.5</sub> and mortality [ J ]. Epidemiology, 2008, **19** (5): 680-689.

[ 11 ] Yang F, Tan J, Zhao Q, *et al.* Characteristics of PM<sub>2.5</sub> speciation in representative megacities and across China [ J ]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, **11** (11): 5207-5219.

[ 12 ] 邓利群, 李红, 柴发合, 等. 北京东北部城区大气细粒子与相关气体污染特征研究 [ J ]. 中国环境科学, 2011, **31** (7): 1064-1070.

[ 13 ] Gu J X, Bai Z P, Li W F, *et al.* Chemical composition of PM<sub>2.5</sub> during winter in Tianjin, China [ J ]. China Particuology, 2011, **9** (3): 215-221.

[ 14 ] Han B, Kong S F, Bai Z P, *et al.* Characterization of Elemental Species in PM<sub>2.5</sub> Samples Collected in Four Cities of Northeast China [ J ]. Water Air and Soil Pollution, 2010, **209** (1-4): 15-28.

[ 15 ] Chow J C, Watson J G, Pritchett L C, *et al.* The DRI Thermal/Optical Reflectance carbon analysis system: description, evaluation and applications in U. S. air quality studies [ J ].

- Atmospheric Environment. Part A. General Topics, 1993, **27** (8): 1185-1201.
- [16] Chow J C, Watson J G, Crow D, *et al.* Comparison of IMPROVE and NIOSH carbon measurements [J]. Aerosol Science and Technology, 2001, **34**(1): 23-34.
- [17] He L Y, Hu M, Zhang Y H, *et al.* Fine particle emissions from on-road vehicles in the Zhujiang Tunnel, China [J]. Environmental Science and Technology, 2008, **42**(12): 4461-4466.
- [18] He L Y, Huang X F, Xue L, *et al.* Submicron aerosol analysis and organic source apportionment in an urban atmosphere in Pearl River Delta of China using high-resolution aerosol mass spectrometry[J]. Journal of Geophysical Research, 2011, **116**: D12304, doi: 10.1029/2010JD014566.
- [19] Hagler G S W, Bergin M H, Salmon L G, *et al.* Source areas and chemical composition of fine particulate matter in the Pearl River Delta region of China [J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(20): 3802-3815.
- [20] 牛彧文, 何凌燕, 胡敏, 等. 深圳冬、夏季大气细粒子及其二次组分的污染特征[J]. 中国科学 B 辑: 化学, 2006, **36** (2): 173-180.
- [21] Pathak R K, Wang T, Ho K F, *et al.* Characteristics of summertime PM<sub>2.5</sub> organic and elemental carbon in four major Chinese cities: Implications of high acidity for water-soluble organic carbon (WSOC) [J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(2): 318-325.
- [22] Wang X H, Bi X H, Sheng G Y, *et al.* Chemical composition and sources of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> aerosols in Guangzhou, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2006, **119**(1-3): 425-439.
- [23] Tao J, Ho K F, Chen L G, *et al.* Effect of chemical composition of PM<sub>2.5</sub> on visibility in Guangzhou, China, 2007 spring [J]. China Particuology, 2009, **7**(1): 68-75.
- [24] Tao J, Cao J J, Zhang R J, *et al.* Reconstructed light extinction coefficients using chemical compositions of PM<sub>2.5</sub> in winter in urban Guangzhou, China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2012, **29**(2): 359-368.
- [25] So K L, Guo H, Li Y S. Long-term variation of PM<sub>2.5</sub> levels and composition at rural, urban, and roadside sites in Hong Kong: Increasing impact of regional air pollution [J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(40): 9427-9434.
- [26] 牛彧文. 深圳大气细粒子和降水的化学组成特征[D]. 北京: 北京大学, 2006. 32-34.
- [27] Keene W C, Pszenny A A P, Galloway J N, *et al.* Sea-salt corrections and interpretation of constituent ratios in marine precipitation[J]. Journal of Geophysical Research. 1986, **91** (D6): 6647-6658.
- [28] Reddy L A K, Kulshrestha U C, Satyanarayana J, *et al.* Chemical characteristics of PM<sub>10</sub> aerosols and air mass trajectories over Bay of Bengal and Arabian Sea during ICARB [J]. Journal of Earth System Science, 2008, **117**(S1): 345-352.
- [29] Guo Y T, Zhang J, Wang S G, *et al.* Long-term characterization of major water-soluble inorganic ions in PM<sub>10</sub> in coastal site on the Japan Sea [J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 2011, **68** (4): 299-316.
- [30] Chow J C, Watson J G, Lu Z Q, *et al.* Descriptive analysis of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> at regionally representative locations during SJVAQS/AUSPEX [J]. Atmospheric Environment, 1996, **30** (12): 2079-2112.
- [31] Louie P K K, Watson J G, Chow J C, *et al.* Seasonal characteristics and regional transport of PM<sub>2.5</sub> in Hong Kong [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(9): 1695-1710.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                        |                                                                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Water-soluble Inorganic Salts in Ambient Aerosol Particles in Tangshan .....                                                                                                           | MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Li, <i>et al.</i> (1225)           |
| Characterization of Water-soluble ions in PM <sub>2.5</sub> at Dinghu Mount .....                                                                                                      | ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1232)         |
| Characteristics of Mass Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Winter Haze Days of Beijing .....                                                         | HUANG Yi-min, LIU Zi-rui, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1236)            |
| Characterising Seasonal Variation and Spatial Distribution of PM <sub>2.5</sub> Species in Shenzhen .....                                                                              | YUN Hui, HE Ling-yan, HUANG Xiao-feng, <i>et al.</i> (1245)          |
| Characteristics of PAHs in the Atmosphere in Winter and Summer in the Urban and Suburban of Fuzhou .....                                                                               | YI Zhi-gang, HUANG Xing-ran, BI Jun-qi, <i>et al.</i> (1252)         |
| Seasonal Variation and Spatial Distribution of Typical Organochlorine Pesticides in the Atmosphere of Hexi Corridor and Lanzhou, Northwest China .....                                 | DING Zhong-yuan, MAO Xiao-xuan, MA Zi-long, <i>et al.</i> (1258)     |
| Simulation of Air Pollution Characteristics and Estimates of Environmental Capacity in Zibo City .....                                                                                 | XUE Wen-bo, WANG Jin-nan, YANG Jin-tian, <i>et al.</i> (1264)        |
| Diurnal Changes in Greenhouse Gases at Water-Air Interface of Xiangxi River in Autumn and Their Influencing Factors .....                                                              | HUANG Wen-min, ZHU Kong-xian, ZHAO Wei, <i>et al.</i> (1270)         |
| Influence of Human Activities on Groundwater Environment Based on Coefficient Variation Method .....                                                                                   | ZHAO Wei, LIN Jian, WANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1277)              |
| Nitrogen Non-Point Source Pollution Identification Based on ArcSWAT in Changhe River .....                                                                                             | DENG Ou-ping, SUN Si-yang, LÜ Jun (1284)                             |
| Study on the Content and Carbon Isotopic Composition of Water Dissolved Inorganic Carbon from Rivers Around Xi'an City .....                                                           | GUO Wei, LI Xiang-zhong, LIU Wei-guo (1291)                          |
| First Flush Effects of Storm Events of Baoxiang River in Lake Dianchi Watershed .....                                                                                                  | GUO Huai-cheng, XIANG Nan, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (1298)           |
| Estimation of Releasing Fluxes of Sediment Phosphorous in the Three Gorges Reservoir During Late Autumn and Early Winter .....                                                         | NIU Feng-xia, XIAO Shang-bin, WANG Yu-chun, <i>et al.</i> (1308)     |
| Distributions and Pollution Status of Heavy Metals in the Suspended Particles of the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan .....                                                | XIN Cheng-lin, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (1315)   |
| Environmental Characteristics of Heavy Metals in Surface Sediments from the Huanghe Estuary .....                                                                                      | WU Bin, SONG Jin-ming, LI Xue-gang (1324)                            |
| Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Zhalong Wetland .....                                                                            | YE Hua-xiang, ZANG Shu-ying, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (1333)     |
| Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals of the Typical Dredged Mud in Shanghai .....                                                                                                | TANG Qing-li, CHENG Jin-ping, GAO Hao-min, <i>et al.</i> (1340)      |
| Pollution Characteristics of Heavy Metals in Sludge from Wastewater Treatment Plants and Sludge Disposal in Chinese Coastal Areas .....                                                | ZHANG Can, CHEN Hong, YU Yi-xuan, <i>et al.</i> (1345)               |
| Comparison of the Estrogenic Activity of Organic Compounds in Source Water and Finished Water from the Yangtze River and Taihu Lake in Certain Areas of Jiangsu Province .....         | JIN Tao, LÜ Xue-min, ZENG Yi-fan, <i>et al.</i> (1351)               |
| Occurrence and Fate of Phthalates in Wastewater Treatment Plants in Beijing, China .....                                                                                               | ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia (1357)                                       |
| Research on Sludge Toxicity Caused by DMF Biodegradation and Toxicity Spatial Distribution in Sludge Flocs .....                                                                       | HU Yuan-yuan, YANG Na, DING Yi, <i>et al.</i> (1363)                 |
| Study on the Ecological Risk of Wild Veined Rapa Whelk ( <i>Rapana venosa</i> ) Exposed to Organotin Compounds in Bohai Bay, China .....                                               | AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, SONG Shuang-shuang, <i>et al.</i> (1369) |
| Bioaccumulation of Mercury in <i>Crassostrea</i> sp. Exposed to Waste Seawater Discharged from a Coal-fired Power Plant Equipped with a Seawater Flue-gas Desulfurization System ..... | LIU Xi-yao, YUAN Dong-xing, CHEN Yao-jin (1374)                      |
| Effects of Imidazolium Chloride Ionic Liquids on the Acute Toxicity and Weight of Earthworm .....                                                                                      | HUANG Ruo-nan, FAN Jun-jie, TU Hong-zhi, <i>et al.</i> (1380)        |
| Influencing Factors and Mechanism of Arsenic Removal During the Aluminum Coagulation Process .....                                                                                     | CHEN Gui-xia, HU Cheng-zhi, ZHU Ling-feng, <i>et al.</i> (1386)      |
| Removal of DON in Micro-polluted Raw Water by Coagulation and Adsorption Using Activated Carbon .....                                                                                  | LIU Bing, YU Guo-zhong, GU Li, <i>et al.</i> (1392)                  |
| Mechanism of Catalytic Ozonation for the Degradation of Paracetamol by Activated Carbon .....                                                                                          | WANG Jia-yu, DAI Qi-zhou, YU Jie, <i>et al.</i> (1402)               |
| Reductive Degradation of Chlorophenols in Aqueous Solution by Gamma Irradiation .....                                                                                                  | PENG Yun-xia, HE Shi-jun, GONG Wen-qi, <i>et al.</i> (1411)          |
| Effect of C/N Ratio on Nitrite Accumulation During Denitrification Process .....                                                                                                       | YUAN Yi, HUANG Yong, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (1416)             |
| Nitrous Oxide Emission During Denitrification for Activated Sludge Acclimated with Methanol as the Organic Carbon .....                                                                | ZHAI Xiao-feng, JIANG Cheng-ai, WU Guang-xue, <i>et al.</i> (1421)   |
| Comparison and Optimization of Cellulose Carbon Source for Denitrification Filter .....                                                                                                | LI Bin, HAO Rui-xia (1428)                                           |
| A Novel Municipal Wastewater Treating Process for Energy Production and Autotrophic Nitrogen Removal Based on ANAMMOX .....                                                            | LU Jian-cong, GAO Da-wen, SUN Xue-ying (1435)                        |
| Modeling and Dynamic Simulation of the Multimode Anaerobic/Anoxic/Aerobic Wastewater Treatment Process .....                                                                           | ZHOU Zhen, WU Zhi-chao, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1442)           |
| Comparing Microbial Community of High Ammonia Wastewater and Municipal Sewage in a Partial Nitrification System .....                                                                  | ZHAO Zhi-rui, MA Bin, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (1448)            |
| Analysis of the Fractal Structure of Activated Sludge Flocs .....                                                                                                                      | RUAN Xiao-dong, LIU Jun-xin (1457)                                   |
| Rapid Cultivation of Aerobic Nitrifying Granular Sludge with Alternate Loading Method .....                                                                                            | SHEN Na, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1464)           |
| Acceleration of the Formation of Aerobic Granules in SBR by Inoculating Different Proportions and Different Diameters of Mature Aerobic Granules .....                                 | XIONG Guang-cheng, PU Wen-hong, YANG Chang-zhu (1472)                |
| Mechanisms of the Improvement in Dewaterability of Alkaline Fermented Sludge by Simultaneous Ammonium and Phosphate Recovery .....                                                     | ZHANG Chao, CHEN Yin-guang, GU Guo-wei (1479)                        |
| Use of Flow Cytometric Sorting to Assess the Diversity of Eukaryotic Picophytoplankton of Lakes .....                                                                                  | XIE Wei-wei, GONG Yi, WANG Zhi-xue, <i>et al.</i> (1485)             |
| Allelopathy Effects of Ferulic Acid and Coumarin on <i>Microcystis aeruginosa</i> .....                                                                                                | GUO Ya-li, FU Hai-yan, HUANG Guo-he, <i>et al.</i> (1492)            |
| Spatiotemporal Characteristics of Zooplankton Community Structure and Diversity in the Strong Temperature Increment Seawaters near Guohua Power Plant in Xiangshan Bay .....           | ZHU Yi-feng, HUANG Jian-yi, LIN Xia, <i>et al.</i> (1498)            |
| Screening of Epoxy-degrading Halophiles and Their Application in High-salt Wastewater Treatment .....                                                                                  | WANG Jin, XU Zhen, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (1510)              |
| Biodegradation of Decabromodiphenyl Ether by Intracellular Enzyme Obtained from <i>Pseudomonas aeruginosa</i> .....                                                                    | SHI Guang-yu, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1517)             |
| Influence of Yeast Extract on the Fermentation of Glucose by the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1 .....                                                               | HUANG Xiang-feng, WANG Kai, LI Ming-xia, <i>et al.</i> (1524)        |
| Phylogenetic Analysis of Methanogenic Corn Stalk Degrading Microbial Communities .....                                                                                                 | QIAO Jiang-tao, GUO Rong-bo, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (1531)   |
| Inhibition of Methanogenium by Erythromycin and Its Domestation .....                                                                                                                  | LIU Zi-xu, SUN Li-ping, LI Yu-you, <i>et al.</i> (1540)              |
| Sand Box Study on Fingering Front Morphology for NAPLs Infiltrated in Homogeneous Porous Media .....                                                                                   | YANG Bin, LI Hui-ying, WU Bin, <i>et al.</i> (1545)                  |
| Vertical Distribution and Possible Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Sewage Area Soil .....                                                                                | YAO Lin-lin, ZHANG Cai-xiang, LI Jia-le, <i>et al.</i> (1553)        |
| Characteristic and Evaluation of Soil Pollution by Heavy Metal in Different Functional Zones of Hohhot .....                                                                           | GUO Wei, SUN Wen-hui, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1561)             |
| Distribution Characteristics of Rice Photosynthesized Carbon in Soil Aggregates of Different Size and Density .....                                                                    | LI Miao-miao, NIE San-an, CHEN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1568)       |
| Profile of Soil Microbial Biomass Carbon in Different Types of Subtropical Paddy Soils .....                                                                                           | SHENG Hao, ZHOU Ping, YUAN Hong, <i>et al.</i> (1576)                |
| Effect of Composting Organic Fertilizer Supplies on Hexachlorobenzene Dechlorination in Paddy Soils .....                                                                              | LIU Cui-ying, JIANG Xin (1583)                                       |
| Remediation of Cu-Pb-Contaminated Loess Soil by Leaching with Chelating Agent and Biosurfactant .....                                                                                  | LIU Xia, WANG Jian-tao, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (1590)             |
| Effects of Different Temperatures Biochar on Adsorption of Pb(II) on Variable Charge Soils .....                                                                                       | JIANG Tian-yu, JIANG Jun, XU Ren-kou, <i>et al.</i> (1598)           |
| Preparation and Performance Investigation of <i>Trichoderma viride</i> -Modified Corn Stalk as Sorbent Materials for Oil Spills .....                                                  | LAN Zhou-lin, PENG Dan, GUO Chu-ling, <i>et al.</i> (1605)           |
| Removal of PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> from Solution, Wastewater and Seawater by Modification and Granulation Magnesium and Aluminium Layered Double Hydroxide .....                 | XING Kun, WANG Hai-zeng (1611)                                       |
| Influence of Carboxylic Carbon Nanotube Supported Platinum Catalyst on Cathode Oxygen Reduction Performance of MFC .....                                                               | TU Li-xing, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1617)          |
| Flue Gas Desulfurization by a Novel Biomass Activated Carbon .....                                                                                                                     | LIU Jie-ling, TANG Zheng-guang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1623)       |
| Method for Grading Industrial Sectors in Energy Consumption and Its Application .....                                                                                                  | MAO Jian-su, MA Lan (1628)                                           |
| Dynamics and Environmental Load of Food Carbon Consumption During Urbanization: A Case Study of Xiamen City, China .....                                                               | YAN Zhen, CUI Sheng-hui, LI Gui-lin, <i>et al.</i> (1636)            |

# 《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4月15日 34卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 4 Apr. 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)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                               | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>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<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE )<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717                                                                                                                             | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>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<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>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<br>(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