

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第6期

Vol.33 No.6

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国湖泊富营养化效应区域差异性分析	曹金玲, 许其功, 席北斗, 李小平, 杨柳燕, 江立文, 魏自民, 吴献花 (1777)
基于“源”“汇”景观格局指数的海河流域总氮流失评价	孙然好, 陈利顶, 王伟, 王赵明 (1784)
云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响	孟晓云, 于兴修, 泮雪芹 (1789)
深圳市沿岸表层海水中全氟化合物的残留特征及其分布规律	陈清武, 张鸿, 柴之芳, 沈金灿, 杨波 (1795)
典型电器工业区河涌沉积物中多环芳烃的分布、来源和潜在生态风险	邓代永, 邱孟德, 孙国萍, 郭俊, 张宏涛, 张琴, 许玫英 (1801)
珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价	谢文平, 王少冰, 朱新平, 陈昆慈, 潘德博, 洪孝友, 尹怡 (1808)
扎龙湿地南山湖沉积岩芯重金属污染特征及来源判别	苏丹, 臧淑英, 叶华香, 孙丽, 贾晓丹, 李苗 (1816)
汕头湾沉积物磷的形态分布与季节变化特征研究	赵建刚, 乔永民 (1823)
氮磷比对东海浮游植物群落生长影响的微宇宙实验	黄伟, 朱旭宇, 曾江宁, 寿鹿, 陈全震, 江志兵 (1832)
春季福建北部海域浙闽沿岸流消亡期浮游桡足类种类组成及其分布	王彦国, 林景宏, 王春光, 林茂 (1839)
滩涂红树林种植-养殖耦合系统中多环芳烃含量水平分析	陈冠秋, 李耀初, 黄晋沐, 南燕, 林茂宏 (1846)
四溴双酚 A 在 5 种巢湖鱼类体内的组织分布与生物浓缩因子研究	杨苏文, 王圣瑞, 闫振广, 张普青 (1852)
五氯酚对稀有鮑姆卵黄蛋白原及 p53 的诱导效应	熊力, 马永鹏, 张晓峰, 金帮明, 李伟, 苏永良, 毛思予, 刘堰 (1858)
全氟辛烷磺酸 (PFOS) 对斑马鱼卵黄蛋白原 mRNA 水平的影响	程艳, 崔媛, 党志超, 谢文平, 李海山, 殷缓缓, 陈会明 (1865)
水溶性有机物电子转移能力与荧光峰强度的关系研究	陶亚, 袁田, 周顺桂, 袁勇, 庄莉, 王辉亮 (1871)
MIEX 中试实验对二级出水中有机物去除的 3DEEM 解析	杨建, 高金华, 常江 (1878)
XDLVO 理论解析钙离子对腐殖酸反渗透膜污染的影响机制	姚淑娣, 高欣玉, 郭本华, 包南, 谢慧君, 梁爽 (1884)
栅藻 LX1 在水产养殖废水中的生长、脱氮除磷和油脂积累特性	马红芳, 李鑫, 胡洪管, 于茵, 巫寅虎 (1891)
氯化铁用于反硝化同步化学生物絮凝工艺研究	王宏杰, 董文艺, 刘莉莎, 韩贵超 (1897)
合成氨废水短程反硝化特性研究	李妍, 李泽兵, 马家轩, 王晓毅, 赵白航, 李军 (1902)
基于新型反应器的好氧颗粒污泥的稳定性控制	李志华, 杨帆, 李胜, 谢磊, 王晓昌 (1907)
采用非生长能量代谢参数表征颗粒污泥稳定性	李志华, 吴军, 李胜, 谢磊, 王晓昌 (1913)
酸-碱预处理促进剩余污泥厌氧消化的研究	袁光环, 周兴求, 伍健东 (1918)
小回流比条件下污泥浓度分区试验研究	史思, 王素兰, 李瑞, 邢传宏 (1923)
非离子表面活性剂对污泥调理脱水效果的影响	侯海攀, 濮文虹, 时亚飞, 于文华, 樊明明, 刘欢, 杨昌柱, 李野, 杨家宽 (1930)
中国空气污染指数变化特征及影响因素分析	李小飞, 张明军, 王圣杰, 赵爱芳, 马潜 (1936)
南京 3 类不同大气污染过程下气溶胶水溶性无机离子的特征研究	张秋晨, 朱彬, 苏继峰, 王红磊 (1944)
深圳市郊区大气中 PM _{2.5} 的特征分析	戴伟, 高佳琪, 曹罡, 欧阳峰 (1952)
餐饮业油烟的颗粒物分析	谭德生, 邝元成, 刘欣, 戴飞鸿 (1958)
Fe-MnO _x -CeO ₂ /ZrO ₂ 低温催化还原 NO 性能研究	刘荣, 杨志琴 (1964)
自然型氨基酸及其钾盐的 CO ₂ 吸收和再生特性	晏水平, 陈竞翔, 徐明亮, 艾平, 张衍林 (1971)
耕作方式对紫色水稻土农田生态系统 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	张军科, 江长胜, 郝庆菊, 唐其文, 程炳红, 李辉, 陈璐豪 (1979)
垄作覆膜条件下田间氨挥发及影响因素	上官宇先, 师日鹏, 李娜, 韩坤, 李会科, 王林权 (1987)
添加不同 N 源条件下典型除草剂对土壤呼吸和 N ₂ O 排放的影响	孙青, 史淳星, 石坤, 言儒斌, 蒋静艳, 吴以中 (1994)
某石墨阳极法氯碱生产场地二噁英污染特征分析	余立凤, 魏文侠, 田亚静, 吴广龙, 李培中, 赵丹 (2000)
脱硫石膏对酸化森林土壤短期修复效果的研究	罗遥, 康荣华, 余德祥, 谭炳全, 段雷 (2006)
岩溶山地土壤氧化铁形态及其与成土环境的关系	张治伟, 朱章雄, 傅瓦利, 文志林 (2013)
废弃尾矿库 15 种植物对重金属 Pb、Zn 的积累和养分吸收	施翔, 陈益泰, 王树凤, 李江川 (2021)
铬胁迫对 3 种草本植物生长及铬积累的影响	王爱云, 黄姗姗, 钟国锋, 徐刚标, 刘志祥, 申响保 (2028)
湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征	杨胜香, 田启建, 梁士楚, 周耀渝, 邹慧成 (2038)
增施 CO ₂ 对 C3 和 C4 植物根际氯氰菊酯残留浓度的影响	慕楠, 刁晓君, 王曙光, 王鹏腾, 李攀峰 (2046)
生物强化去除吡啶的特性及微生物种群动态变化分析	乔琳, 赵宏, 王建龙 (2052)
A/O MBR 处理生活污水效率与菌群多样性的关系	邝斌宇, 史青, Montcho Leon Monthero, 丁嫚, 温东辉 (2061)
石油污染土壤生物修复过程中氮循环功能基因的动态检测	吴彬彬, 卢滇楠, 刘铮 (2068)
武汉市儿童多途径铅暴露风险评估	郝汉舟, 陈同斌, 吴基良, 雷梅, 田辉, 祖文普, 钟学斌 (2075)
电子鼻预处理装置的开发及适用性研究	卜凡阳, 文晓刚, 万梅, 刘锐, 陈吕军, 张永明 (2083)
ToxTell 生物传感器在 Cu ²⁺ 、Cd ²⁺ 冲击活性污泥系统分析中的应用	王学江, 王鑫, 刘免, 吴真, 杨连珍, 夏四清 (2090)
环境样品免疫检测基质效应分析与控制	盛建武, 何苗, 施汉昌 (2095)
热等离子体熔融固化模拟医疗废物的研究	张璐, 严建华, 杜长明, 陆胜勇, 李晓东 (2104)
城市生活垃圾组分低温干燥特性及模型研究	吴亚娟, 刘红梅, 陆胜勇, 严建华, 李晓东 (2110)
厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场产气规律的研究	韩智勇, 刘丹, 李启彬 (2118)
处理垃圾渗滤液的 Fe/C 空气阴极 MFC 性能研究	唐玉兰, 彭漫, 于燕, 何亚婷, 傅金祥, 赵玉华 (2125)
基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤-石漠化关系研究	龙健, 廖洪凯, 李娟, 陈彩云 (2131)
北京市能源消费与经济增长关系的协整检验分析	陈操操, 张妍, 刘春兰, 王海华, 李铮 (2139)
《环境科学》征稿简则 (1877)	
《环境科学》征订启事 (1890)	
信息 (1822, 1857, 1896, 2138)	

深圳市郊区大气中 PM_{2.5} 的特征分析

戴伟, 高佳琪, 曹罡, 欧阳峰*

(哈尔滨工业大学深圳研究生院土木与环境工程学院, 深圳 518055)

摘要: 为了确定深圳市郊区大气中 PM_{2.5} 的污染特征, 本研究分析了 2009 年和 2010 年夏季和冬季 PM_{2.5} 样品中的水溶性离子和多环芳烃成分。结果表明, 深圳市郊区大气中 PM_{2.5} 的质量浓度很高, 夏季 53.9% 和冬季 100% 的样品超过了 WHO 的大气质量准则浓度。PM_{2.5} 中, 冬季最主要的 3 种离子是 SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 NH₄⁺。在夏季, 这 3 种离子在 PM_{2.5} 中的含量都会减少, 而 Cl⁻、Na⁺、K⁺、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 的含量会增多。另外, 冬季是多环芳烃浓度较高的季节, 其中萘、蒽、芘和苯并荧蒹是冬季 PM_{2.5} 中多环芳烃的主要成分。本研究还通过比值法和特征化合物法对深圳市郊区大气中的 PM_{2.5} 进行了源解析, 确定了 PM_{2.5} 的可能来源。

关键词: PM_{2.5}; 水溶性离子; 多环芳烃; 变化规律; 源解析

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2012)06-1952-06

Characterization of Atmospheric PM_{2.5} in the Suburb of Shenzhen

DAI Wei, GAO Jia-qi, CAO Gang, OUYANG Feng

(School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China)

Abstract: In this study, PM_{2.5} samples had been measured from the summer of 2009 to the winter of 2010 in a suburb of Shenzhen. The results indicated serious PM_{2.5} pollution in the suburb of Shenzhen. Seasonal and daily variations of water-soluble ions were discussed. SO₄²⁻, NO₃⁻ and NH₄⁺ were the most abundant ions in winter. In summer, the average contributions of Cl⁻, Na⁺, K⁺, Ca²⁺ and Mg²⁺ increased significantly, while SO₄²⁻, NO₃⁻ and NH₄⁺ decreased. Furthermore, Naphthalene, acenaphthylene, acenaphthene and benzo fluoranthene were the major PAHs in PM_{2.5}. Ratio analysis and characteristic compounds analysis were also used to determine the possible sources of PM_{2.5} in the suburb of Shenzhen.

Key words: PM_{2.5}; water-soluble ions; PAHs; seasonal and daily variations; source identification

PM_{2.5} 是大气中重要的污染物之一, 其来源及化学组成均非常复杂, 除了各种污染源的一次排放外, 还包括气态污染物经由复杂的大气光化学反应而形成的二次污染物^[1]。PM_{2.5} 因其对人体健康^[2~4]、气候及能见度的影响引起人们越来越广泛的关注^[5~7]。深圳市是一座典型的人口密度大且人口流动频繁的现代化城市。随着市政建设规模加大, 汽车保有量急剧增加等诸多环境因素的影响, 大气颗粒物污染已经成为大气污染的重要问题, 并一直威胁着人们的健康。另外, 珠江三角洲的区域性复合型污染日益严重^[8], 更加重了深圳市的大气污染。近年来, 随着一系列环保措施的实施, 虽然大气质量有所改善, 但颗粒物污染依然十分严峻。针对这些现象, 本研究对深圳市郊区大气中 PM_{2.5} 的浓度水平、主要成分、变化规律、可能来源等特征进行了分析, 以期政府及有关部门控制深圳市大气颗粒物污染提供科学依据和技术支持, 也对深圳市大气污染控制策略的制定具有重要的理论和实际意义。

1 材料与方法

1.1 采样

采样点设置在深圳市郊区——深圳大学城校区内(图 1)。采样点周围主要是居民区, 居民区内有多处市政建设和建筑施工。采样点南方约 800 m 处有 1 条交通要道, 上下班时段(07:00~08:00 和 17:00~18:00)车流量较大。除此之外, 附近没有其他严重的污染源。因此采集的 PM_{2.5} 样品可能主要来自于施工扬尘、机动车尾气和用于居民生活的燃料燃烧。

采样分别在 2009 年夏季(7 月)和冬季(12 月)、2010 年夏季(7 月和 8 月)和冬季(11 月和 12 月)进行。每个采样点各架设 1 台中流量 PM_{2.5} 采样器(KC6120, 中国崂山电子), 高度约为 20 m, 采样流量为 100 L·min⁻¹, 采样时间为连续 12 h。其中首日 08:00~20:00 为白天样品, 20:00~次日 08:00 为夜间样品。PM_{2.5} 样品被采集至 90 mm 石英滤膜(AQFA9050, 美国 Millipore)后保存。为了避免温度和湿度对滤膜质量的影响, 采样前后的石英滤膜都保存在恒温恒湿室(温度为 0~5℃, 湿度为 25%~30%)内 24 h 再进行称量。

收稿日期: 2011-07-22; 修订日期: 2012-01-16

作者简介: 戴伟(1984~), 男, 博士, 主要研究方向为大气颗粒物, E-mail: divecn@live.cn

* 通讯联系人, E-mail: ouyangf81@hotmail.com



图1 采样点示意

Fig. 1 Sampling site

1.2 分析方法

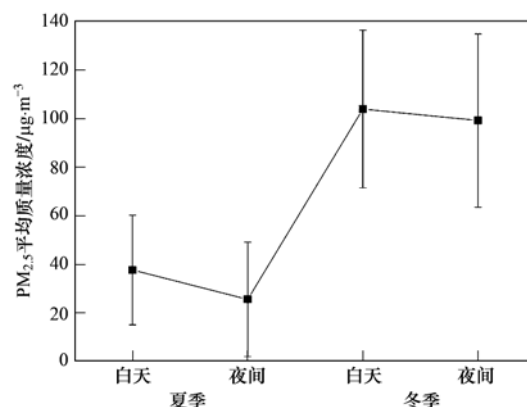
通过电子天平(灵敏度为 $\pm 10 \mu\text{g}$, BT25s, 德国 Sartorius)称量整张样品滤膜以确定 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量. 然后, 将 1/2 样品滤膜切碎, 置于 50 mL 超纯水中, 超声波提取 30 min, 提取液用于水溶性离子的分析. 其中 Cl^- 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 的质量浓度通过离子色谱(ICD-3000, 美国 DIONEX, 淋洗液为 $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH)进行分析, NH_4^+ 的质量浓度通过紫外分光光度计(UV-2450, 日本 Shimadzu)进行分析, Na^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+ 和 Ca^{2+} 的质量浓度通过火焰原子吸收分光光度计(6300C, 日本 Shimadzu)进行分析. 将剩下的 1/2 样品滤膜用索氏萃取法提取, 再用氮气吹脱至 1 mL, 通过气相色谱-质谱联用仪(7890A-5975c, 美国 Agilent)分析多环芳烃. 色谱柱型号为 DB-5, 采用程序升温, 初始温度 60°C , 停留 2 min, 再以 $4^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度升至 270°C , 停留 15 min. 质谱离子源温度 200°C , 电子倍增器电压 1.0 kV. 所有样品在进样前, 都通过 $0.45 \mu\text{m}$ 的针筒式微孔滤膜过滤器过滤.

2 结果与讨论

2.1 $\text{PM}_{2.5}$ 的变化规律

采样期间 $\text{PM}_{2.5}$ 的 12 h 平均质量浓度表示在图 2 中. 在夏季, 白天 $\text{PM}_{2.5}$ 的 12 h 平均质量浓度为 $37.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 夜间为 $25.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 在冬季, 白天 $\text{PM}_{2.5}$ 的 12 h 平均质量浓度为 $104.0 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 夜间为 $99.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$.

从图 2 中可以看出, $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度存在着显著的季节差异. 冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度明显高于夏季. 昼夜变化则夏季的更加明显, 白天的质量浓度比夜间高出 47.3%, 而冬季昼夜只相差 4.7%. 这可能是因为夏季深圳市海陆风更加频

图2 深圳市郊区 $\text{PM}_{2.5}$ 的平均质量浓度Fig. 2 Average mass concentrations of $\text{PM}_{2.5}$ in the suburb of Shenzhen

繁, 在白天海风把海水中的海盐粒子吹向陆地, 使大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度增加, 在夜间风把大气中的颗粒物从陆地吹向海洋, 使大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度降低.

目前中国还没有大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度标准, 所以选用世界卫生组织大气质量准则^[9] (WHO Air Quality Guideline) 中规定的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度作为参考. 大气质量准则规定, 大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 的 24 h 平均质量浓度应低于 $25 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 当达到这个水平时, 预期可以显著降低人体的健康风险. 采样期间每天 $\text{PM}_{2.5}$ 样品的 24 h 平均质量浓度, 可以通过同一天白天样品和夜间样品的 12 h 质量浓度取算术平均值得到. 在夏季, $\text{PM}_{2.5}$ 的 24 h 平均质量浓度为 $31.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 53.9% 的样品超过了大气质量准则浓度. 在冬季, $\text{PM}_{2.5}$ 的 24 h 平均质量浓度为 $100.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 所有冬季样品都超过了大气质量准则浓度. 结果表明, 深圳市郊区 $\text{PM}_{2.5}$ 污染很重, 特别是在冬季, $\text{PM}_{2.5}$ 的平均浓度是夏天的 3.2 倍. 这可能是因为, 深圳市冬季边界层高度较低, 使得大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 不易扩散. 而在夏季, 温度升高, 边界层高度也随之上升. 并且, 夏季还受到海洋性季风气候的影响, 降水增多, 也使得大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度显著降低^[10,11].

通过与国内几个主要城市的研究结果^[12,13] 对比发现(表 1), 深圳市夏季 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度明显低于广州市和上海市, 但是冬季则略高于 2 个城市. 总体来说, 这 3 大城市 $\text{PM}_{2.5}$ 都处于较高的浓度水平, 并且都表现出冬季浓度高于夏季的季节规律.

2.2 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子和多环芳烃的变化规律

2.2.1 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子的变化规律

深圳市郊区 $\text{PM}_{2.5}$ 中主要水溶性离子的 12 h 平均质量浓度表示在图 3 中. 与 $\text{PM}_{2.5}$ 平均质量浓度的变化相似,除 Mg^{2+} 和 K^{+} 离子外,夏季其他离子的质量浓度都比冬季低,并且白天的质量浓度都比夜间高.

表 1 深圳市、广州市和上海市 $\text{PM}_{2.5}$ 的平均质量浓度

Table 1 Average mass concentrations of $\text{PM}_{2.5}$ in the Shenzhen, Guangzhou and Shanghai			
城市	年份	夏季浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	冬季浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
深圳市	2009 ~ 2010	31.5 ± 18.8	100.3 ± 28.3
广州市	2008	53.7 ± 23.2	81.2 ± 61.4
上海市	2008	84.7 ± 43.5	97.7 ± 63.9

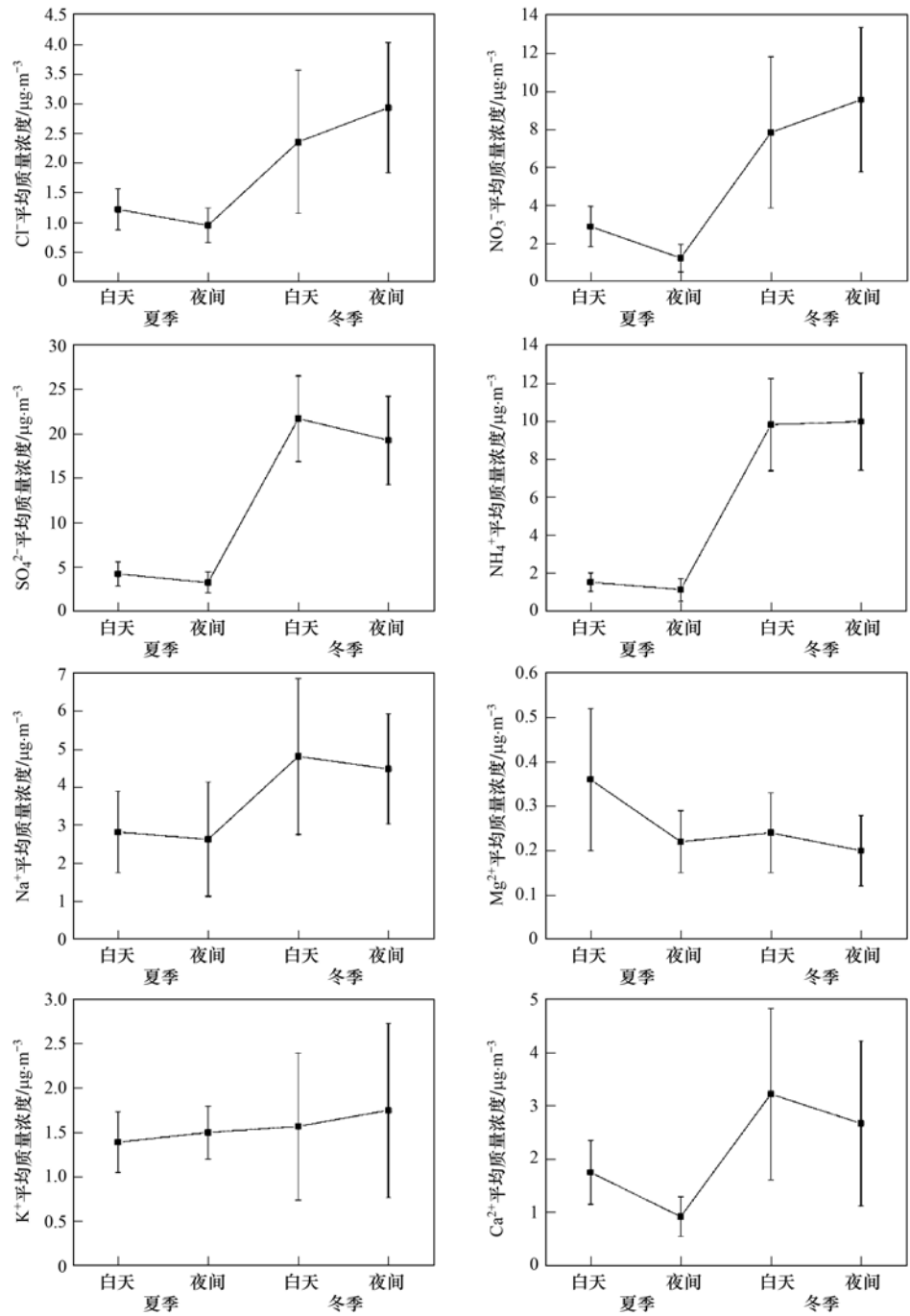


图 3 深圳市郊区 $\text{PM}_{2.5}$ 中主要水溶性离子的平均质量浓度

Fig. 3 Average mass concentrations of the major inorganic water-soluble ions in $\text{PM}_{2.5}$ in the suburb of Shenzhen

表 2 列出了深圳市郊区主要水溶性离子的 12 h 平均含量. 在冬季, $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子白天的累计

含量为 51.2%, 夜间为 54.2%. 其中, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 是冬季最主要的 3 种离子, 它们在 $\text{PM}_{2.5}$ 中的

含量占到了 40% 左右. 这 3 种离子被认为是大气中二次颗粒物的主要成分^[14]. 在夏季, 水溶性离子白天的累计含量为 41.7%, 夜间为 56.0%. 夏季 SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 的含量都有所减少, 而 Cl⁻、Na⁺、Mg²⁺、K⁺ 和 Ca²⁺ 的含量都有所增加. Cl⁻ 和这些金属阳离子可能主要来自于海盐粒子^[15]. 这种季

节的差异可能主要来自两方面的原因. 一方面, 夏季更好的大气扩散和降水条件, 降低了大气中二次颗粒物的浓度, 从而降低了 SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 在 PM_{2.5} 中的含量. 另一方面, 夏季深圳市受到海洋性季风气候的影响, 更加频繁的海风向陆地带来更多的海盐粒子, 增加了海盐离子在 PM_{2.5} 中的含量.

表 2 深圳市郊区 PM_{2.5} 中主要水溶性离子的平均含量

Table 2 Average contributions of the major inorganic water-soluble ions in PM _{2.5} in the suburb of Shenzhen				
水溶性离子	夏季白天含量/%	夏季夜间含量/%	冬季白天含量/%	冬季夜间含量/%
Cl ⁻	3.22 ± 1.80	4.46 ± 1.79	2.30 ± 1.20	3.12 ± 1.16
NO ₃ ⁻	6.38 ± 1.94	6.18 ± 2.17	7.44 ± 2.20	9.85 ± 2.74
SO ₄ ²⁻	10.02 ± 2.28	14.49 ± 4.51	21.65 ± 4.65	20.78 ± 3.90
NH ₄ ⁺	4.31 ± 2.46	6.02 ± 3.73	9.91 ± 2.85	11.02 ± 3.31
Na ⁺	8.51 ± 5.21	12.01 ± 6.08	4.81 ± 2.29	4.62 ± 1.78
Mg ²⁺	1.04 ± 0.68	1.08 ± 0.55	0.24 ± 0.09	0.21 ± 0.08
K ⁺	3.73 ± 1.58	6.66 ± 2.97	1.58 ± 0.87	1.76 ± 0.94
Ca ²⁺	4.47 ± 1.99	5.11 ± 3.01	3.29 ± 1.78	2.82 ± 1.64

2.2.2 PM_{2.5} 中多环芳烃的变化规律

冬季是 PM_{2.5} 中多环芳烃 (PAHs) 含量较高的季节^[16], 所以本研究重点对冬季深圳市郊区 PM_{2.5} 中多环芳烃的进行了分析. PM_{2.5} 中 15 种多环芳烃的 12 h 平均质量浓度和平均含量分别在表 3 中列出. 结果表明, 冬季深圳市郊区 PM_{2.5} 中多环芳烃的含量较高, 白天和夜间的总含量分别为 30.0% 和 42.5%. 萘、苊烯、苊和苯并荧蒹是 PM_{2.5} 中主要的多

环芳烃. 其中, 萘和苊烯被认为主要来自于建筑源, 而苊和苯并荧蒹主要来自于燃烧源. 有 13 种多环芳烃夜间的含量要高于白天, 其中茚并 (1,2,3-c,d) 芘和苯并 (g,h,i) 芘的昼夜差别最大. 茚并 (1,2,3-c,d) 芘和苯并 (g,h,i) 芘被认为是移动源的主要成分. 这可能是因为冬季夜间气温下降较快, 边界层高度降低明显, 更加减缓了这些多环芳烃的扩散速度, 而聚集在颗粒物上.

表 3 冬季深圳市郊区 PM_{2.5} 中多环芳烃的平均质量浓度和含量

Table 3 Average mass concentrations and contributions of PAHs in winter PM _{2.5} in the suburb of Shenzhen				
多环芳烃	白天浓度/μg·m ⁻³	夜间浓度/μg·m ⁻³	白天含量/%	夜间含量/%
萘	5.39 ± 0.90	5.15 ± 0.45	4.69 ± 0.37	5.39 ± 1.30
苊烯	4.13 ± 0.39	3.63 ± 0.90	3.64 ± 0.56	3.65 ± 0.25
苊	5.02 ± 0.60	4.93 ± 0.85	4.40 ± 0.48	5.11 ± 1.04
芴	2.45 ± 0.36	2.96 ± 0.64	2.14 ± 0.22	3.09 ± 0.87
菲	2.34 ± 0.30	2.74 ± 0.98	2.05 ± 0.24	2.88 ± 1.21
蒽	1.34 ± 0.33	1.54 ± 0.38	1.16 ± 0.21	1.57 ± 0.31
荧蒹	2.68 ± 0.32	3.18 ± 0.69	2.34 ± 0.13	3.25 ± 0.46
芘	2.23 ± 0.17	2.52 ± 0.48	1.96 ± 0.08	2.64 ± 0.79
䓗	1.12 ± 0.19	2.09 ± 0.83	0.98 ± 0.11	2.08 ± 0.55
苯并(a)蒽	1.01 ± 0.01	1.65 ± 0.66	0.88 ± 0.06	1.63 ± 0.43
苯并荧蒹	3.69 ± 0.36	5.28 ± 1.51	3.23 ± 0.29	5.65 ± 2.12
苯并(a)芘	1.12 ± 0.21	2.75 ± 1.66	0.99 ± 0.24	2.64 ± 1.32
二苯并(a,h)蒽	0.89 ± 0.18	0.83 ± 0.72	0.78 ± 0.13	0.82 ± 1.16
茚并(1,2,3-c,d)芘	1.79 ± 0.51	3.85 ± 1.99	1.55 ± 0.34	3.77 ± 1.48
苯并(g,h,i)芘	2.35 ± 0.37	3.85 ± 2.35	2.07 ± 0.41	3.69 ± 1.87

2.3 离子平衡(A/C)

离子平衡经常被用来评价大气颗粒物的酸碱程度^[17]. 通过阴离子/阳离子的比值来确定颗粒物的酸碱性, 比值 < 1, 说明颗粒物呈碱性, 比值 > 1, 说明颗粒物呈酸性. 首先通过公式 (1) 和 (2), 将离子的

质量浓度转化成阳离子当量和阴离子当量, 然后再进行颗粒物的离子平衡计算.

阳离子当量 = $c(\text{Cl}^-)/35.5 + c(\text{NO}_3^-)/62 + c(\text{SO}_4^{2-})/48$

阴离子当量 = $c(\text{NH}_4^+)/18 + c(\text{Na}^+)/23 +$

(1)

$c(\text{Mg}^{2+})/12 + c(\text{K}^+)/39 + c(\text{Ca}^{2+})/20$ (2)
式中, c 表示各离子的质量浓度。

深圳市郊区 $\text{PM}_{2.5}$ 样品阴离子/阳离子的比值表示在图 4 中。可以看出, 所有 $\text{PM}_{2.5}$ 样品比值都 < 1 , 这说明深圳市郊区的 $\text{PM}_{2.5}$ 呈碱性。这可能是因为大气中的土壤尘影响了硝酸根和硫酸根的循环^[18,19]。土壤尘中含有大量的金属阳离子, 当这些阳离子的含量超过颗粒物中的酸性阴离子时, 颗粒物就呈碱

性。另外, 夏季样品的比值要小于冬季, 说明夏季 $\text{PM}_{2.5}$ 的碱性更强。夏季大气中的 $\text{PM}_{2.5}$ 除了受到土壤尘的影响, 还会因为海风带来的海盐金属阳离子而增加碱性。同时, 更好的大气扩散和降水条件也降低了大气中 SO_x 和 NO_x 的含量, 从而抑制了 $\text{PM}_{2.5}$ 中酸性阴离子的产生。

2.4 源解析
2.4.1 离子成分的源解析

(1) 海洋源和陆地源的解析 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 和 K^+ 这 4 种离子是海水的主要成分, 首先假设 Na^+ 全部来自于海盐粒子, 然后通过比较海水中和样品中 $c(\text{Cl}^-)/c(\text{Na}^+)$ 、 $c(\text{SO}_4^{2-})/c(\text{Na}^+)$ 和 $c(\text{K}^+)/c(\text{Na}^+)$ 的比值, 来判断其他几种海盐离子主要是来自于海洋还是陆地。样品中各离子的比值在表 4 中列出。海水中 $c(\text{Cl}^-)/c(\text{Na}^+)$ 、 $c(\text{SO}_4^{2-})/c(\text{Na}^+)$ 和 $c(\text{K}^+)/c(\text{Na}^+)$ 分别为 0.25、1.81 和 0.036^[20]。深圳市郊区 $\text{PM}_{2.5}$ 中 Cl^- 与 Na^+ 的比值小于海水中的比例, 说明 Cl^- 主要来自于海洋。 SO_4^{2-} 和 K^+ 与 Na^+ 的比值大于海水中的比例, 说明这 2 种离子主要来自于陆地。并且, $c(\text{SO}_4^{2-})/c(\text{Na}^+)$ 表现出了明显的

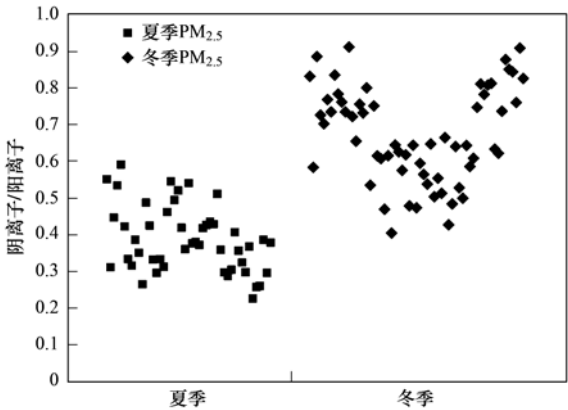


图 4 深圳市郊区 $\text{PM}_{2.5}$ 的离子平衡分析
Fig. 4 Ion balance of $\text{PM}_{2.5}$ in the suburb of Shenzhen

表 4 夏季和冬季深圳市郊区 $\text{PM}_{2.5}$ 中离子成分的比值分析

Table 4 Ionic ratio analysis of $\text{PM}_{2.5}$ in summer and winter in the suburb of Shenzhen

离子比值	夏季白天	夏季夜间	冬季白天	冬季夜间
$c(\text{Cl}^-)/c(\text{Na}^+)$	0.46 ± 0.17	0.40 ± 0.21	0.52 ± 0.36	0.68 ± 0.25
$c(\text{SO}_4^{2-})/c(\text{Na}^+)$	1.36 ± 0.60	1.27 ± 0.54	4.71 ± 1.41	4.39 ± 1.50
$c(\text{K}^+)/c(\text{Na}^+)$	0.56 ± 0.17	0.57 ± 0.22	0.24 ± 0.15	0.30 ± 0.15
$c(\text{nss-SO}_4^{2-})/c(\text{NO}_3^-)$	1.29 ± 0.64	2.04 ± 0.78	2.85 ± 0.99	2.09 ± 0.85

季节差异, 冬季的比值是夏季的 3.4 倍, 这说明冬季陆地上 SO_4^{2-} 的排放源较夏季更多。

(2) 移动源和固定源的解析 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 是颗粒物中的主要成分, 首先假设非海盐 SO_4^{2-} (nss-SO_4^{2-}) 主要来自于固定源, NO_3^- 主要来自于移动源, 通过分析 $c(\text{nss-SO}_4^{2-})$ 与 $c(\text{NO}_3^-)$ 的比值, 可以判断大气颗粒物主要是来自于移动源还是固定源^[21]。 nss-SO_4^{2-} 的计算方法^[22] 见公式(3)。从表 4 可以看出, 在深圳市郊区, 夏季 $\text{PM}_{2.5}$ 主要来自于移动源, 冬季主要来自于固定源。并且, 夏季的白天移动源贡献更多, 冬季的白天固定源的影响更显著。

$$\text{nss-SO}_4^{2-} = c(\text{SO}_4^{2-}) - 0.25 \times c(\text{Na}^+) \quad (3)$$

2.4.2 多环芳烃的源解析

$\text{PM}_{2.5}$ 中的多环芳烃来源比较复杂, 可以选取多环芳烃主要排放源的特征化合物, 通过特征化合物占 $\text{PM}_{2.5}$ 中总多环芳烃的比例, 来确定这些排放源对 $\text{PM}_{2.5}$ 的分担率。首先, $\text{PM}_{2.5}$ 的主要来源可以分为土

壤源、建筑源、燃烧源和移动源 4 类。然后, 选取各排放源的特征化合物^[23-25], 依次为: 萘和菲、蒽和苯并荧蒽、芘和苊、茚并(1,2,3-c,d)芘和苯并(g,h,i)芘。最后, 确定冬季深圳市郊区 $\text{PM}_{2.5}$ 主要排放源的分担率(表 5)。从表 5 中可以看出, 冬季 4 种主要排放源对 $\text{PM}_{2.5}$ 的总分担率在 70% 左右。其中, 建筑源分担率最高, 这主要是因为采样点附近多处市政建设和建筑施工所致。另外, 土壤源和燃烧源在白天对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献要高于夜间, 而移动源的在夜间的贡献

表 5 冬季深圳市郊区 $\text{PM}_{2.5}$ 主要排放源的分担率

Table 5 Percentage contributions of the major emission sources in winter $\text{PM}_{2.5}$ in the suburb of Shenzhen

主要排放源	白天分担率/%	夜间分担率/%
土壤源	19.6	16.7
建筑源	24.1	23.1
燃烧源	17.0	13.2
移动源	11.0	15.6
总计	71.8	68.5

更为明显. 这个结果也与 2.4.1 节中冬季移动源和固定源的解析结果相吻合.

3 结论

(1) 深圳市郊区 $\text{PM}_{2.5}$ 污染很严重, 并且有明显的季节特征. 冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度高于夏季. 这可能是因为, 冬季气温低, 边界层高度较低, 使得 $\text{PM}_{2.5}$ 不易扩散. 与冬季相比, 夏季 $\text{PM}_{2.5}$ 的昼夜变化更加明显. 这可能是因为夏季深圳市受到海陆风的影响更多.

(2) 在冬季, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 是冬季最主要的 3 种离子, 这 3 种离子被认为是大气中二次颗粒物的主要成分. 在夏季, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 的含量减少, Cl^- 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的含量增多, Cl^- 和这些金属阳离子可能主要来自于海盐粒子.

(3) 在冬季, 白天和夜间 $\text{PM}_{2.5}$ 中多环芳烃的含量分别为 30.0% 和 42.5%. 其中萘、蒽、芘和苯并荧蒽是 $\text{PM}_{2.5}$ 中主要的多环芳烃成分. 有 13 种多环芳烃夜间的含量要高于白天. 这可能也和冬季夜间较低的边界层高度有关.

(4) 通过对水溶性离子和多环芳烃的源解析, 发现深圳市郊区 $\text{PM}_{2.5}$ 中的 SO_4^{2-} 和 K^+ 主要来自于陆地, Cl^- 主要来自于海洋. 夏季 $\text{PM}_{2.5}$ 主要来自于移动源, 冬季主要来自于固定源. 并且, 冬季土壤源、建筑源、燃烧源和移动源对 $\text{PM}_{2.5}$ 的总分担率在 70% 左右, 其中建筑源分担率最高.

参考文献:

- [1] 车凤翔. 中国城市气溶胶危害评价 [J]. 中国粉体技术, 1999, 5(3): 4-10.
- [2] Pratsinis S, Novakov T, Ellis E C, *et al.* Carbon containing component of the Los Angeles aerosol: source apportionment and contributions to the visibility budget [J]. Journal of Air Pollution Control Association, 1984, 34(6): 643-650.
- [3] Countess R J, Wolff G T, Steven H C. The Denver winter aerosol: a comprehensive chemical characterization [J]. Journal of Air & Waste Management Association, 1980, 30(11): 1194-1200.
- [4] 邵龙义, 时宗波, 黄勤. 都市大气环境中可吸入颗粒物的研究 [J]. 环境保护, 2000, (1): 24-29.
- [5] Anderson T L, Carlson R J, Schwartz S E, *et al.* Climate forcing by aerosols-a hazy picture [J]. Science, 2003, 300(5622): 1103-1104.
- [6] IPCC. Climate change 2007-the physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [7] Millán M M. Climate/water-cycle feedbacks in the Mediterranean: the role of land-use changes and the propagation of perturbations at the regional and global scale [M]. Valencia Spain: Springer, 2007. 83-101.
- [8] 谢鹏, 刘晓云, 刘兆荣, 等. 珠江三角洲地区大气污染对人群健康的影响 [J]. 中国环境科学, 2010, 30(7): 997-1003.
- [9] World Health Organization. WHO air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide [M]. WHO, 2006. 9.
- [10] Duan F K, Liu X D, Yu T, *et al.* Identification and estimate of biomass burning contribution to the urban aerosol organic carbon concentrations in Beijing [J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(9): 1275-1282.
- [11] Guinot B, Cachier H, Sciare J, *et al.* Beijing aerosol: atmospheric interactions and new trends [J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112(D14): 14314.
- [12] 王杨君, 董亚萍, 冯加良, 等. 上海市 $\text{PM}_{2.5}$ 中含碳物质的特征和影响因素分析 [J]. 环境科学, 2010, 31(8): 1755-1761.
- [13] 朱李华, 陶俊, 张仁健, 等. 冬夏季广州城区碳气溶胶特征及其与 O_3 和气象条件的关联 [J]. 环境科学学报, 2010, 30(10): 1942-1949.
- [14] Amodio M, Andriani E, Cafagna I, *et al.* A statistical investigation about sources of PM in South Italy [J]. Atmospheric Research, 2010, 98(2-4): 207-218.
- [15] Hellebust S, Allanic A, O'Connor I P, *et al.* Sources of ambient concentrations and chemical composition of $\text{PM}_{2.5-0.1}$ in Cork Harbour, Ireland [J]. Atmospheric Research, 2010, 95(2-3): 136-149.
- [16] 王英锋, 张姗姗, 李杏茹, 等. 北京大气颗粒物中多环芳烃浓度季节变化及来源分析 [J]. 环境化学, 2010, 29(3): 369-375.
- [17] Verma S K, Deb M K, Suzuki Y, *et al.* Ion chemistry and source identification of coarse and fine aerosols in an urban area of eastern central India [J]. Atmospheric Research, 2010, 95(1): 65-76.
- [18] Yuan C S, Sau C C, Chen M C, *et al.* Mass concentration and size-resolved chemical composition of atmospheric aerosols sampled at the Pescadores Islands during Asian dust storm periods in the years of 2001 and 2002 [J]. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 2004, 15(5): 857-879.
- [19] Shen Z X, Arimoto R, Cao J J, *et al.* Seasonal variations and evidence for the effectiveness of pollution controls on water-soluble inorganic species in TSP and $\text{PM}_{2.5}$ from Xi'an, China [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2008, 58(12): 1560-1570.
- [20] McInnes L M, Covert D S, Quinn P K, *et al.* Measurements of chloride depletion and sulphur enrichment in individual sea-salt particles collected from the remote marine boundary layer [J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99(D4): 8257-8268.
- [21] Arimoto R, Duce R A, Savoie D L, *et al.* Relationships among aerosol constituents from Asia and the North Pacific during Pem-West A [J]. Journal of Geophysical Research, 1996, 101(D1): 2011-2023.
- [22] Millero F J, Sohn M I. Chemical oceanography [M]. Florida America: CRC Press, 1992. 511.
- [23] 侯辉, 郭清彬, 程学丰. 淮南市春季大气 PM_{10} 中多环芳烃的污染特征及来源 [J]. 环境监测管理与技术, 2009, 21(5): 58-61.
- [24] 刘国卿, 张干, 刘德全, 等. 深圳南头半岛冬季大气中 PAHs 的分布特征与来源 [J]. 中国环境科学, 2008, 28(7): 588-592.
- [25] 赵淑莉, 戴天有, 段小丽, 等. 北京城市空气中多环芳烃的污染特征 [J]. 环境科学研究, 2007, 20(3): 16-20.

CONTENTS

Regional Heterogeneity of Lake Eutrophication Effects in China	CAO Jin-ling, XU Qi-gong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1777)
Correlating Landscape Pattern with Total Nitrogen Concentration Using a Location-weighted Sink-source Landscape Index in the Haihe River Basin, China	SUN Ran-hao, CHEN Li-ding, WANG Wei, <i>et al.</i> (1784)
Impact of the Land-use Change on the Non-point Source Nitrogen Load in Yunneng Lake Watershed	MENG Xiao-yun, YU Xing-xiu, PAN Xue-qin (1789)
Residue Characteristics and Distributions of Perfluorinated Compounds in Surface Seawater Along Shenzhen Coastline	CHEN Qing-wu, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> (1795)
Distribution and Potential Ecological Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments from Typical Electronics Industrial Zone	DENG Dai-yong, QIU Meng-de, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (1801)
Residues and Potential Ecological Risk Assessment of Metal in Sediments from Lower Reaches and Estuary of Pearl River	XIE Wen-ping, WANG Shao-bing, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i> (1808)
Character and Sources Identification of Heavy Metals Contamination in Sediment from the Core Sediment in Nanshan Lake, the Zhalong Wetland	SU Dan, ZANG Shu-ying, YE Hua-xiang, <i>et al.</i> (1816)
Distribution Characteristics of Phosphorus Forms in Surface Sediments of the Shantou Bay in China	ZHAO Jian-gang, QIAO Yong-min (1823)
Microcosm Experiments on the Influence of Different N/P Ratios on Phytoplankton Community Growth in the East China Sea	HUANG Wei, ZHU Xu-yu, ZENG Jiang-ning, <i>et al.</i> (1832)
Species Composition and Distribution Characteristics of Pelagic Copepods in the Northern Sea of Fujian During Withdraw of Zhe-Min Coastal Current	WANG Yan-guo, LIN Jing-hong, WANG Chun-guang, <i>et al.</i> (1839)
PAHs Concentrations in Aquatic Products and Food Safety Evaluation in the Coupled Mangrove Planting-Aquaculture Ecological System	CHEN Guan-qiu, LI Yao-chu, HUANG Jin-mu, <i>et al.</i> (1846)
Tissue Distribution and Bioconcentration Factors of Tetrabromobisphenol A in Five Fishes in Lake Chaohu	YANG Su-wen, WANG Sheng-rui, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (1852)
Induction Effects of Pentachlorophenol on Vitellogenin and p53 in Chinese Rare Minnow (<i>Gobiocypris rarus</i>)	XIONG Li, MA Yong-peng, ZHANG Xiao-zheng, <i>et al.</i> (1858)
Effects of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) Exposure on Vitellogenin mRNA Level in Zebrafish (<i>Brachydanio rerio</i>)	CHENG Yan, CUI Yuan, DANG Zhi-chao, <i>et al.</i> (1865)
Relationship Between Electron Transfer Capacity and <i>Fluorescence Characteristics</i> of Dissolved Organic Matter	TAO Ya, YUAN Tian, ZHOU Shun-gui, <i>et al.</i> (1871)
Characterization of the Change in DOM During Municipal Secondary Effluent Treatment with Magnetic Ion Exchange Resin by 3DEEM	YANG Jian, GAO Jin-hua, CHANG Jiang (1878)
Reverse Osmosis Membrane Fouling by Humic Acid Using XDLVO Approach; Effect of Calcium Ions	YAO Shu-di, GAO Xin-yu, GUO Ben-hua, <i>et al.</i> (1884)
Growth, Removal of Nitrogen and Phosphorus, and Lipid Accumulation Property of <i>Scenedesmus</i> sp. LX1 in Aquaculture Wastewater	MA Hong-fang, LI Xin, HU Hong-ying, <i>et al.</i> (1891)
Iron Chloride for Simultaneous Denitrification and Chemical-Biological Flocculation Process	WANG Hong-jie, DONG Wen-yi, LIU Li-sha, <i>et al.</i> (1897)
Characteristic Research of Shortcut Denitrification in Synthetic Ammonia Industrial Wastewater Treatment Process	LI Yan, LI Ze-bing, MA Jia-xuan, <i>et al.</i> (1902)
Stability Control of Aerobic Granules Using an Innovative Reactor	LI Zhi-hua, YANG Fan, LI Sheng, <i>et al.</i> (1907)
Description of the Stability of Granules Using Nongrowth-related Parameters	LI Zhi-hua, WU Jun, LI Sheng, <i>et al.</i> (1913)
Enhancement of Anaerobic Digestion of Excess Sludge by Acid-Alkali Pretreatment	YUAN Guang-huan, ZHOU Xing-qiu, WU Jian-dong (1918)
Pilot Validation of Sludge Concentration Partition at Small Reflux Ratio Condition	SHI Si, WANG Su-lan, LI Rui, <i>et al.</i> (1923)
Influence of Non-ionic Surfactants on Sludge Dewaterability	HOU Hai-pan, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (1930)
Variation Characteristics and Influencing Factors of Air Pollution Index in China	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (1936)
Characteristics of Aerosol Water-Soluble Inorganic Ions in Three Types Air-Pollution Incidents of Nanjing City	ZHANG Qiu-chen, ZHU Bin, SU Ji-feng, <i>et al.</i> (1944)
Characterization of Atmospheric PM _{2.5} in the Suburb of Shenzhen	DAI Wei, GAO Jia-qi, CAO Gang, <i>et al.</i> (1952)
Analysis on Oil Fume Particles in Catering Industry Cooking Emission	TAN De-sheng, KUANG Yuan-cheng, LIU Xin, <i>et al.</i> (1958)
Low-Temperature Catalytic Reduction of NO over Fe-MnO _x -CeO ₂ /ZrO ₂ Catalyst	LIU Rong, YANG Zhi-qin (1964)
CO ₂ Absorption and Regeneration Performance of a Natural Amino Acid and Its Potassium Salt	YAN Shui-ping, CHEN Jing-ao, XU Ming-liang, <i>et al.</i> (1971)
Effects of Tillage-Cropping Systems on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Agro-Ecosystems in a Purple Paddy Soil	ZHANG Jun-ke, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (1979)
Factors Influencing Ammonia Volatilization in a Winter Wheat Field with Plastic Film Mulched Ridges and Unmulched Furrows	SHANGGUAN Yu-xian, SHI Ri-peng, LI Na, <i>et al.</i> (1987)
Effects of Typical Herbicides on Soil Respiration and N ₂ O Emissions from Soil Added with Different Nitrogen Fertilizers	SUN Qing, SHI Chun-xing, SHI Kun, <i>et al.</i> (1994)
Analysis of Characteristics of Dioxin Contamination in the Chlor-alkali Site that Uses Graphite Anode for Production	YU Li-feng, WEI Wen-xia, TIAN Ya-jing, <i>et al.</i> (2000)
Effect of Flue Gas Desulfurization Gypsum Application on Remediation of Acidified Forest Soil	LUO Yao, KANG Rong-hua, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2006)
Morphology of Soil Iron Oxides and Its Correlation with Soil-Forming Process and Forming Conditions in a Karst Mountain	ZHANG Zhi-wei, ZHU Zhang-xiong, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2013)
Pb, Zn Accumulation and Nutrient Uptake of 15 Plant Species Grown in Abandoned Mine Tailings	SHI Xiang, CHEN Yi-tai, WANG Shu-feng, <i>et al.</i> (2021)
Effect of Cr(VI) Stress on Growth of Three Herbaceous Plants and Their Cr Uptake	WANG Ai-yun, HUANG Shan-shan, ZHONG Guo-feng, <i>et al.</i> (2028)
Bioaccumulation of Heavy Metals by the Dominant Plants Growing in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, TIAN Qi-jian, LIANG Shi-chu, <i>et al.</i> (2038)
Effect of CO ₂ Fertilization on Residual Concentration of Cypermethrin in Rhizosphere of C3 and C4 Plant	MU Nan, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang, <i>et al.</i> (2046)
Bioaugmented Removal of Pyridine and the Microbial Community Dynamic Analysis	QIAO Lin, ZHAO Hong, WANG Jian-long (2052)
Relationship Between Sewage Treatment Efficiency and Bacterial Community Diversity in an A/O MBR	KUANG Bin-yu, SHI Qing, Montcho Leon Monthero, <i>et al.</i> (2061)
Dynamic Changes in Functional Genes for Nitrogen Cycle During Bioremediation of Petroleum-Contaminated Soil	WU Bin-bin, LU Dian-nan, LIU Zheng (2068)
Risk Assessment of Lead Exposure from Different Intake Pathways for Children in Wuhan City	HAO Han-zhou, CHEN Tong-bin, WU Ji-liang, <i>et al.</i> (2075)
Implementation of a Pretreatment Device for an Electronic Nose	BU Fan-yang, WEN Xiao-gang, WAN Mei, <i>et al.</i> (2083)
Copper and Cadmium Toxicities to Activated Sludge Investigated with ToxTell Biosensor	WANG Xue-jiang, WANG Xin, LIU Mian, <i>et al.</i> (2090)
Matrix Effect and Control of Immunoassay for Environmental Samples	SHENG Jian-wu, HE Miao, SHI Han-chang (2095)
Study on Vitrification of Simulated Medical Wastes by Thermal Plasma	ZHANG Lu, YAN Jian-hua, DU Chang-ming, <i>et al.</i> (2104)
Study on the Low Temperature Drying of Components of Municipal Solid Waste and Its Model Analysis	WU Ya-juan, LIU Hong-mei, LU Sheng-yong, <i>et al.</i> (2110)
Aerogenesis Evolution of the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill	HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin (2118)
Performance of Microbial Fuel Cells with Fe/C Catalyst Carbon Felt Air-Cathode for Treating Landfill Leachate	TANG Yu-lan, PENG Man, YU Yan, <i>et al.</i> (2125)
Relationships Between Soil and Rocky Desertification in Typical Karst Mountain Area Based on Redundancy Analysis	LONG Jian, LIAO Hong-kai, LI Juan, <i>et al.</i> (2131)
Energy Consumption and GDP Growth in Beijing: Cointegration and Causality Analysis	CHEN Cao-cai, ZHANG Yan, LIU Chun-lan, <i>et al.</i> (2139)

《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)

2012年6月15日 33卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 6 Jun. 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人