

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第5期

Vol.34 No.5

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于过氧化物的消毒技术研究进展	习海玲, 赵三平, 周文 (1645)
环境损害评估: 国际制度及对中国的启示	张红振, 曹东, 於方, 王金南, 齐霖, 贾倩, 张天柱, 骆永明 (1653)
不同国家基于健康风险的土壤环境基准比较研究与启示	徐猛, 颜增光, 贺萌萌, 张超艳, 侯红, 李发生 (1667)
蚯蚓堆肥及蝇蛆生物转化技术在有机废弃物处理应用中的研究进展	张志剑, 刘萌, 朱军 (1679)
基于生态分区的我国湖泊营养盐控制目标研究	刁晓君, 席北斗, 何连生, 邓祥征, 吴锋, 王鹏腾 (1687)
我国东北地区地表水酸化现状	徐光仪, 康荣华, 罗遥, 段雷 (1695)
西安市对渭河水质的影响分析	于婕, 李怀恩 (1700)
极端干旱水文年(2011年)夏季珠江口溶解氧的分布特征及影响因素研究	叶丰, 黄小平, 施震, 刘庆霞 (1707)
应用相平衡分配法建立湘江衡阳段沉积物重金属质量基准	韩超南, 秦延文, 郑丙辉, 张雷, 曹伟 (1715)
长江口海域底栖生态环境质量评价——AMBI和M-AMBI法	蔡文倩, 孟伟, 刘录三, 朱延忠, 周娟 (1725)
温州城市降雨径流中BOD ₅ 和COD污染特征及其初始冲刷效应	王骏, 毕春娟, 陈振楼, 周栋 (1735)
影响悬浮颗粒物吸收系数测量的相关因素研究	余小龙, 沈芳, 张晋芳 (1745)
香溪河库湾春季pCO ₂ 与浮游植物生物量的关系	袁希功, 黄文敏, 毕永红, 胡征宇, 赵玮, 朱孔贤 (1754)
紊流脉动强度对藻类生长及水环境的影响研究	雷雨, 龙天渝, 伞磊, 安强, 黄宁秋 (1761)
高铁酸钾对水中藻类及其次生臭味污染物二甲基三硫醚同步去除研究	马晓雁, 张泽华, 王红宇, 胡仕斐, 李青松 (1767)
纳米Fe ₃ O ₄ -H ₂ O ₂ 非均相Fenton反应催化氧化邻苯二酚	何洁, 杨晓芳, 张伟军, 王东升 (1773)
水中茶普生的紫外光降解机制及其产物毒性研究	马杜娟, 刘国光, 吕文英, 姚锐, 周丽华, 谢成屏 (1782)
酸活化赤泥催化臭氧氧化降解水中硝基苯的效能研究	康雅凝, 李华楠, 徐冰冰, 齐飞, 赵伦 (1790)
镉污染应急处置含镉絮体稳定性实验研究	柳玉荣, 魏清伟, 杨仁斌, 许振成, 曾东 (1797)
基于光学在线监测及形态学研究的絮凝体强度分析方法	金鹏康, 冯永宁, 王宝宝, 王晓昌 (1802)
不同电子供体下三氯苯酚的还原脱氯机制研究	万金泉, 胡梦蝶, 马邕文, 黄明智 (1808)
壳聚糖季铵盐磁性颗粒的制备及其对甲基橙的吸附效果	张聪璐, 胡筱敏, 英诗颖, 王芳 (1815)
城市污水二级出水超滤膜污染与膜特性的研究	孟晓荣, 张海珍, 王磊, 王旭东, 赵亮 (1822)
倒置A ² /O-MBR处理城市污水的中试研究	张健君, 邹高龙, 杨淑芳, 丁星, 王莉, 毛乾庄, 杨丹 (1828)
不同电子供体的硫自养反硝化脱氮实验研究	袁莹, 周伟丽, 王晖, 何圣兵 (1835)
短程同步硝化反硝化过程的脱氮与N ₂ O释放特性	梁小玲, 李平, 吴锦华, 王向德 (1845)
基于固相萃取的水中多种有毒有害有机污染物富集方法优化	张明全, 李锋民, 吴乾元, 胡洪营 (1851)
多环麝香污染胁迫对蚯蚓特异性蛋白基因表达的影响	陈春, 刘潇威, 郑顺安, 周启星, 李松 (1857)
浙江省制药行业典型挥发性有机物臭氧产生潜力分析及健康风险评价	徐志荣, 王浙明, 许明珠, 何华飞 (1864)
苯系物光催化开环降解产物低级醛类的健康效应	赵伟荣, 廖求文, 杨亚楠, 戴九松 (1871)
四川妇女血清中多溴联苯醚的浓度水平与组成特征	邵敏, 陈永亨, 李晓宇 (1877)
咪唑类离子液体毒性的QSAR/QSPR研究	赵继红, 赵永升, 张宏忠, 张香平 (1882)
宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征	樊新刚, 米文宝, 马振宁, 王婷玉 (1887)
内蒙古包头白云鄂博矿区及尾矿区周围土壤稀土污染现状和分布特征	郭伟, 付瑞英, 赵仁鑫, 赵文静, 郭江源, 张君 (1895)
福建省重点城市路面尘负荷及化学组成研究	郑桢, 杨冰玉, 吴水平, 王新红, 陈晓秋 (1901)
重金属污染场地电阻率法探测数值模拟及应用研究	王玉玲, 能昌信, 王彦文, 董路 (1908)
丛枝根真菌对稀土尾矿中大豆生长和稀土元素吸收的影响	郭伟, 赵仁鑫, 赵文静, 付瑞英, 郭江源, 张君 (1915)
海洋细菌N3对几种赤潮藻的溶藻效应	史荣君, 黄洪辉, 齐占会, 胡维安, 田梓杨, 戴明 (1922)
1株分离自煤矿废水的铁硫氧化细菌LY01的鉴定及其氧化特性研究	刘玉娇, 杨新萍, 王世梅, 梁银 (1930)
1株苯并[a]芘高效降解菌的筛选与降解特性	蔡瀚, 尹华, 叶锦韶, 常晶晶, 彭辉, 张娜, 何宝燕 (1937)
2,2',4,4'-四溴联苯醚的好氧微生物降解	张姝, Giulio Franco, 李晓豹, 卢晓霞, 侯珍, 杨君君 (1945)
养猪废水培养微生物絮凝剂产生菌群B-737及发酵特性	裴瑞林, 信欣, 张雪乔, 周迎芹, 姚力, 羊依金 (1951)
1997~2011年北京市空气中酸性物质与降水组分变化趋势的相关性分析	陈圆圆, 田贺忠, 杨懂艳, 邹本东, 鹿海峰, 林安国 (1958)
黄山降水酸度及电导率特征分析	石春娥, 邓学良, 吴必文, 洪杰, 张苏, 杨元建 (1964)
夏季黄山不同高度大气气溶胶水溶性离子特征分析	文彬, 银燕, 秦彦硕, 陈魁 (1973)
广州秋季灰霾污染过程大气颗粒物有机酸的污染特征	谭吉华, 赵金平, 段菁春, 马永亮, 贺克斌, 杨复沫 (1982)
福建省三大城市冬季PM _{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征	陈衍婷, 陈进生, 胡恭任, 徐玲玲, 尹丽倩, 张福旺 (1988)
上海市含碳大气颗粒物的粒径分布	袁宁, 刘卫, 赵修良, 王广华, 姚剑, 曾友石, 刘遂庆 (1995)
上海市浦东城区二次气溶胶生成的估算	崔虎雄, 吴迺名, 段玉森, 伏晴艳, 张懿华, 王东方, 王茜 (2003)
沙尘暴期间上海市大气颗粒物元素地球化学特征及其物源示踪意义	钱鹏, 郑祥民, 周立旻 (2010)
厦门秋季近郊地面CO ₂ 浓度变化特征研究	李燕丽, 穆超, 邓君俊, 赵淑惠, 杜可 (2018)
GC-MS和GC-ECD同时在线观测本底大气中的HCFC-142b	郭立峰, 姚波, 周凌晔, 李培昌, 许林 (2025)
城市居家环境空气真菌群落结构特征研究	方治国, 欧阳志云, 刘芃, 孙力, 王小勇 (2031)
城市污水处理厂挥发性芳香烃的气味指纹及定量评价研究	郭薇, 王伯光, 唐小东, 刘舒乐, 何洁, 张春林 (2038)
内河多点分散码头大气污染叠加影响特征	刘建昌, 李兴华, 徐洪磊, 程金香, 王忠岱, 肖杨 (2044)
义马煤中铅的热稳定性及转化行为研究	刘瑞卿, 王钧伟 (2051)
基于能源消费情景模拟的北京市主要大气污染物和温室气体协同减排研究	谢元博, 李巍 (2057)
《环境科学》征订启事(1652) 《环境科学》征稿简则(1789) 信息(1807, 1821, 1881, 1987) 专辑征稿通知(1863)	

福建省重点城市路面尘负荷及化学组成研究

郑桢^{1,2}, 杨冰玉^{1,2}, 吴水平^{1,2*}, 王新红^{1,2}, 陈晓秋³

(1. 厦门大学环境与生态学院, 厦门 361005; 2. 厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室, 厦门 361005; 3. 福建省环境监测中心站, 福州 350003)

摘要: 采集并分析了福建省重点城市厦门、漳州、泉州和莆田城区具有代表性的 57 个地面扬尘和 16 个土壤样品的 26 种无机元素、8 种水溶性离子和碳成分等组成。不同城市粒径 $\leq 100 \mu\text{m}$ 的路面尘负荷平均值在 $6.99 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 与 $10.11 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间, 而粒径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 的路面尘 ($\text{PM}_{2.5}$) 负荷平均值在 $4.0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $12.5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间。不同城市土壤尘和路面尘 $\text{PM}_{2.5}$ 中浓度最高的元素都是 Si、Ca、Al、Fe 和 K, 路面尘中 Ca 元素明显富集, 而主要人为来源的重金属元素如 Cu、Pb、Zn、Cr 在路面尘 $\text{PM}_{2.5}$ 中的浓度显著高于土壤尘。漳州城区路面尘 $\text{PM}_{2.5}$ 中二次离子 NH_4^+ 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 的含量明显高于其它地区, 厦门、漳州和泉州城区路面尘 $\text{PM}_{2.5}$ 中 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 之间都存在显著的正相关关系。四城市路面尘中有机碳 (OC) 的含量均高于济南、石家庄以及北京地面扬尘 OC 的含量, 元素碳 (EC) 的含量均低于北京地区路面扬尘 EC 的含量。泉州和莆田两地 OC 和 EC 的相关性较好, 说明路面尘中 OC 和 EC 有相同或相似的来源。质量平衡结果显示泉州和莆田路面尘 $\text{PM}_{2.5}$ 中含量最高的是土壤尘, 其次为有机物。按化学组成特征对路面尘 $\text{PM}_{2.5}$ 进行聚类解析, 得到受大气沉降影响、受土壤尘影响、受大气沉降和土壤尘共同作用以及受土壤尘和建筑尘共同作用 4 类样品。

关键词: 路面尘; 路面负荷; 化学组成; 质量平衡; 聚类分析

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)05-1901-07

Road Dust Loading and Chemical Composition at Major Cities in Fujian Province

ZHENG An^{1,2}, YANG Bing-yu^{1,2}, WU Shui-ping^{1,2}, WANG Xin-hong^{1,2}, CHEN Xiao-qiu³

(1. College of the Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 3. Environmental Monitoring Center Station of Fujian Province, Fuzhou 350003, China)

Abstract: A total of 57 road dust and 16 urban soil samples were collected from four cities, Xiamen, Zhangzhou, Quanzhou and Putian in Fujian Province, China. Twenty-six elements, eight water soluble ions, organic carbon and elemental carbon in the fraction of particulate diameter less than $2.5 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$) derived through a suspension chamber were analyzed. The average loading of road dust with diameter less than $100 \mu\text{m}$ in the four cities ranged from $6.99 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ to $10.11 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, while the loading of $\text{PM}_{2.5}$ ranged from $4.0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ to $12.5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$. Both the soil and road dust samples were characterized with much higher concentrations of Si, Ca, Al, Fe and K. But for the anthropogenic elements such as Cu, Pb, Zn, Cr and Ti, much lower levels were found in the soil $\text{PM}_{2.5}$ than those in the road dust $\text{PM}_{2.5}$. Significantly higher levels of NH_4^+ , NO_3^- and SO_4^{2-} were found in the road dust $\text{PM}_{2.5}$ from Zhangzhou in comparison with those from other cities in this study. The calcium ion (Ca^{2+}) content was significantly positively correlated with the Mg^{2+} content in the road dust $\text{PM}_{2.5}$ from Xiamen, Zhangzhou and Quanzhou. The levels of organic carbon (OC) in the road dust $\text{PM}_{2.5}$ in these four cities were higher than those reported in Jinan, Shijiazhuang and Beijing while the levels of elemental carbon (EC) were all lower than those in the urban road dust from Beijing. Significant positive correlation between EC and OC was found in samples from Quanzhou and Putian, suggesting the same and/or similar sources. The result of mass balance indicated that higher percentage compositions were soil and OM in both Quanzhou and Putian. Based on the cluster analysis, the 57 road dust samples were divided into four types; influenced by atmospheric deposition, influenced by soil dust, influenced by atmospheric deposition and soil dust, and influenced by soil and construction dust.

Key words: road dust; road surface loading; chemical composition; mass balance; cluster analysis

尽管城区路面尘有来自机动车尾气与大气颗粒物的沉降贡献, 但主要还是由邻近绿化带土壤和铺装路面 (主要为沥青路面和水泥路面) 的粗颗粒组成。有研究表明^[1], 道路扬尘主要由粒径较大的颗粒组成, 而机动车只排放粒径很小的颗粒。路面尘中粒径较大的粗颗粒, 在机动车频繁碾压下, 又有相

当一部分可转变为细颗粒。在外界动力 (风或其它

收稿日期: 2012-08-17; 修订日期: 2012-10-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40971257, 41171365); 环境保护公益性行业科研专项 (201009004); 福建省自然科学基金计划项目 (2009J05106)

作者简介: 郑桢 (1986 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气颗粒物的来源解析, E-mail: 523366532@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: wsp@xmu.edu.cn

机械扰动)作用下,路面尘中的细颗粒可经再悬浮过程进入大气,增加城区大气 $\text{PM}_{2.5}$ 的污染. 为此,了解城市路面尘中的细颗粒负载及化学组成,有助于进一步量化城市路面尘对大气 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献,进而可为地方环保部门制定有效的大气 $\text{PM}_{2.5}$ 减排措施提供科学依据.

国内已有很多城市开展了路面尘负载及化学组成的相关研究,如曹巍^[2]对济南市道路积尘的负荷及控制措施进行了探讨;樊守彬等^[3]采用美国环境保护署 AP-42 排放因子模型,估算了北京市城区主干道和郊区国道扬尘排放 PM_{10} 的强度;韩力慧等^[4]研究了北京地面扬尘的化学组成特征,并估算了地面扬尘对矿物气溶胶的贡献. 但在评估扬尘对大气 $\text{PM}_{2.5}$ 影响时,还需采用再悬浮箱的方法对不同空气动力学直径的颗粒分别进行采集和分析,才更接近实际情况^[5]. 本研究采集了福建省厦门、漳州、泉州和莆田这 4 个城市路面扬尘和土壤尘,并采用自制的再悬浮箱对路面尘和土壤尘中的细颗粒部分($\text{PM}_{2.5}$)进行了再悬浮采集与化学组成分析^[6],以获取福建省各地区路面建立本地化大气 $\text{PM}_{2.5}$ 源解析的路面尘源谱,以期为进一步解析大气 $\text{PM}_{2.5}$ 来源提供基础数据.

1 材料与方法

1.1 样品采集与预处理

本研究于 2011 年 7~8 月分别在漳州、厦门、泉州和莆田城区选择若干城区主干道,进行路面尘的采集,并同步收集了漳州、泉州和莆田城区的土壤尘样品. 路面尘采集时,采用扫帚分别扫取主干道两侧约 2 m^2 的路面尘,土壤尘采集时,用不锈钢勺挖取来自农田,绿化带,山坡表层的土壤样品,采样深度为 0.2 m . 所有路面尘和土壤尘样品均用密封袋装好贴上标签,带回实验室进行干燥和过筛(150 目,粒径 $\leq 100 \mu\text{m}$),干燥在恒温恒湿干燥箱内进行,温度 25°C ,湿度 20% ,再按照实验室已建立的再悬浮方法得到路面尘和土壤尘中粒径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 的细颗粒样品. 如图 1 所示样品经 150 目过筛后取 $5\sim 10 \text{ g}$ 放入进样头,由气泵吹气将样品喷洒进入悬浮箱,待样品混合稳定后,启动底部气泵,由悬浮箱底部左右两个颗粒物分级采样头(武汉天虹公司)平行收集粒径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 的细颗粒样品,采用聚丙烯滤膜和石英滤膜(直径 88 mm)进行平行收集,用于不同化学成分的分析,其中漳州、厦门、泉州和莆田路面尘粒径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 样品数分别为 12、

22、11 和 12 组,漳州、泉州和莆田土壤尘中 $\text{PM}_{2.5}$ 的细颗粒样品数分别为 6、3 和 7 组. 收集于聚丙烯滤膜上的颗粒用于无机元素的分析,收集于石英滤膜上的颗粒用于水溶性离子和碳成分的分析. 石英滤膜使用前经 600°C 马弗炉烘烤 8 h ,再同聚丙烯滤膜一起在温度 25°C ,湿度 20% 的条件下保存在恒温恒湿箱内,采样前和采样后各称量两次,保证两次误差控制在 0.0001 g .

1.2 粒径 $\leq 100 \mu\text{m}$ 和粒径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$) 的路面负荷

通过实验室过 150 目筛获取每个采样点粒径 $\leq 100 \mu\text{m}$ 的颗粒物,干燥后称重得到质量,再除以采样面积 4 m^2 ,得到每个采样点单位面积内的粒径 $\leq 100 \mu\text{m}$ 的颗粒物质量,得到粒径 $\leq 100 \mu\text{m}$ 的颗粒物的路面负荷,单位为 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$. 将过筛后的粗颗粒物通过再悬浮箱获取的粒径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 的细颗粒物即 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量除以进样量得到单位质量粒径 $\leq 100 \mu\text{m}$ 的颗粒物中 $\text{PM}_{2.5}$ 所占的质量分数,再将该值乘以粒径 $\leq 100 \mu\text{m}$ 的颗粒物的路面负荷得到路面尘 $\text{PM}_{2.5}$ 的路面负荷,单位为 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$.

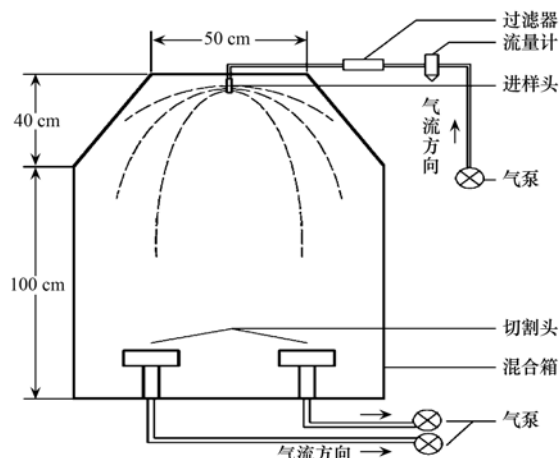


图 1 再悬浮装置示意

Fig. 1 Schematic of the dust resuspension chamber

1.3 分析方法

1.3.1 无机元素

截取 $1/4$ 张聚丙烯滤膜,采用日本岛津扫描型 X-射线荧光光谱仪(XRF-1800 型)分析了包括 Pb、Cs、Te、Cd、Br、Se、As、Ga、Cu、Ni、Co、Fe、Mn、Cr、V、Ti、Ca、K、Cl、S、Si、Al、Mg、Na、F、Zn 在内的 26 种元素. 本研究采用单标定量法,各个元素标准均采用美国 MicroMatter 公司的以聚碳酸酯气溶胶膜(元素平均含量 $50 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$)为基底的矫正用标准样品,样品分析前进行 PHA 矫正,确保仪器

状态的稳定. 仪器每运行 5 h, 随机选取一个标准样品测试, 偏差在 5% 以内, 认为仪器状态平稳, 可继续分析样品. 10% 的样品进行重复分析, 前后两次偏差不超过 10%, 最后经空白校正, 结果以 $\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$ 的形式给出.

1.3.2 水溶性离子分析

每张石英滤膜截取直径 36 mm 的小孔, 置于 PP 材质的离心管中用 MilliQ 水浸泡超声萃取 30 min, 用 0.22 μm 的一次性过滤头过滤, 滤液定容至 25 mL 后用双通道离子色谱仪 (PIC-10A, 青岛普仁) 对阴阳离子同时进行分析. 测试时, 阴离子淋洗液由 1.8 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaHCO_3 和 1.92 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaCO_3 混合溶液组成, 阳离子淋洗液为 3 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 甲烷磺酸. 采用阳离子分离柱 (Universal Cation 7 μ 100 mm $\times$ 4.6 mm, GRACE) 和阴离子分离柱 (NT-SA4A-SC 250 mm $\times$ 4.6 mm, 青岛普仁) 对样品中的阳离子 (Na^+ 、 K^+ 、 NH_4^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+}) 和阴离子 (Cl^- 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-}) 进行分离测定, 电导法检测. 分别配置不同浓度梯度的阴离子 (IC-MAN-01-1, AccuStandard) 和阳离子 (IC-MAN-02-1, Accustandard) 标准液, 建立工作曲线, 各离子标准曲线相关系数在 0.999 9 以上. 阳、阴离子最低检出限分别为 $\text{Na}^+ = 0.062 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $\text{NH}_4^+ = 0.040 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $\text{K}^+ = 0.087 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $\text{Mg}^{2+} = 0.029 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $\text{Ca}^{2+} = 0.056 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $\text{Cl}^- = 0.020 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $\text{NO}_3^- = 0.050 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $\text{SO}_4^{2-} = 0.083 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 对样品中的水溶性离子进行定性定量, 最后结果以 $\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$ 的形式给出.

1.3.3 碳成分

截取直径 15 mm 的小孔, 采用美国 Sunset 实验

室的 EC/OC 分析仪, 分析方法为热光法. 分析原理为将样品放在热光炉中, 在氦气的无氧气氛下程序升温, 逐步加热颗粒物样品, 得到 OC, 之后通入 10% 氧/氦混合气, 在有氧气氛下继续逐级升温, 使得样品中的元素碳完全氧化成二氧化碳 (CO_2). 无氧加热释放的有机碳经催化氧化炉转化生成的 CO_2 , 和有氧加热时段生成的 CO_2 , 均在还原炉中被还原成甲烷 (CH_4), 再由火焰离子化检测器 (FID) 定量检测. 整个程序过程中都有一束激光 (670 nm) 实时检测有机碳的焦化, 当透射光恢复到最初的光强时, 此刻作为 OC 与 EC 的分割点. 该分析方法的精密度为 $\pm 10\%$, 最低检测限 (以 C 计) 为 $2 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$.

2 结果与讨论

2.1 城区路面尘负荷分布特征

通过筛分和再悬浮, 分别得到路面尘中粒径 $\leq 100 \mu\text{m}$ 的颗粒和 $\text{PM}_{2.5}$ 的负载分布 (图 2). 不同城市路面尘中粒径 $\leq 100 \mu\text{m}$ 的颗粒的负载存在一定的差异, 其中莆田城区最高 (平均值为 $10.11 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$), 其次为泉州城区 ($8.91 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$), 而厦门 ($7.52 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) 和漳州 ($6.99 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) 处于较低水平. 与路面尘中粒径 $\leq 100 \mu\text{m}$ 的颗粒的负载相比较, 路面尘中 $\text{PM}_{2.5}$ 的差异更加显著, 其中在厦门、泉州和莆田城区的负载较高, 平均值均达到 $12.3 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 以上, 而漳州城区路面尘中 $\text{PM}_{2.5}$ 的负载均值在 $4.0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 左右. 路面尘中粒径 $\leq 100 \mu\text{m}$ 的颗粒中 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度受 $\text{PM}_{2.5}$ 的负载影响明显, 漳州城区该比值远低于其它城区. 因路面尘的负载受城市道路清扫、绿化带土壤和建筑施工车辆携带输入、

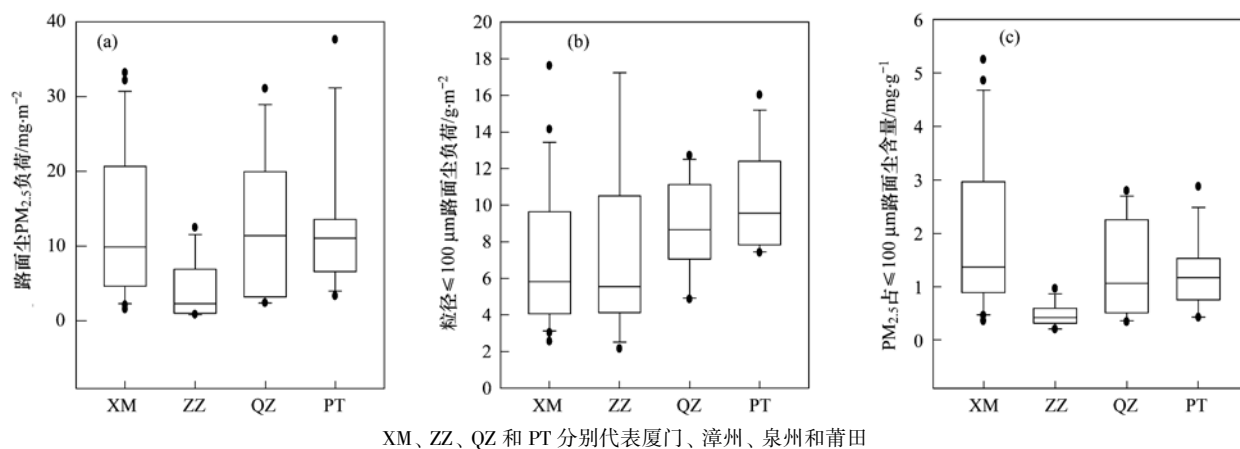


图 2 不同城区路面尘中粒径 $\leq 100 \mu\text{m}$ 的颗粒、 $\text{PM}_{2.5}$ 负荷及粒径 $\leq 100 \mu\text{m}$ 的颗粒中 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度

Fig. 2 Particulate diameter less than $100 \mu\text{m}$ and $\text{PM}_{2.5}$ loading, mass concentration of $\text{PM}_{2.5}$ to particulate diameter less than $100 \mu\text{m}$ in urban areas of different cities

车流量等多种因素的影响,路面尘中不同粒径颗粒的负载分布均呈现较为离散的规律. 按照曹巍^[2]在济南市道路积尘负荷测量基础上给出的道路积尘负荷限定标准参考值(主干道的机动车道),本研究中福建4城市主干道路面尘的负载属于中-差的水平范围,远大于华盛顿($3.25\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$)^[7]、萨克拉曼($0.0016\sim0.0543\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$)^[8]、爱荷华($0.4\sim2.9\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$)^[9]、北京($3.82\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$)^[10]等城市路面尘负载. 在居民对城市空气质量要求日益增强和城市化快速推进的背景下,应采用有效的冲洗后清扫的方式才能明显降低路面尘负载.

2.2 路面尘化学组成分析

2.2.1 无机元素分布特征

表1 路面尘和土壤尘PM_{2.5}的主要化学组成¹⁾/μg·mg⁻¹

Table 1 Major components of PM_{2.5} from road dust and urban soil dust/μg·mg⁻¹

组成	厦门路面尘	漳州		泉州		莆田	
		路面尘	土壤尘	路面尘	土壤尘	路面尘	土壤尘
Fe	47.44±21.27	49.91±11.37	74.58±20.47	42.89±11.60	43.79±2.11	46.86±12.16	30.15±9.13
Ca	79.96±30.02	57.05±18.01	18.51±10.46	64.50±22.75	18.94±3.10	60.14±21.52	13.07±8.74
K	15.34±3.40	13.27±2.57	13.13±6.36	15.21±3.68	17.19±5.10	18.96±6.06	13.10±9.06
Si	93.90±16.22	91.49±20.33	129.0±32.82	91.88±17.49	102.2±15.16	100.2±31.02	70.09±19.33
Al	44.08±6.45	40.77±16.45	88.28±19.75	41.80±10.69	55.74±7.75	46.20±15.82	37.13±14.82
Pb	4.16±3.30	12.97±5.45	7.59±5.37	5.62±4.49	1.63±0.53	4.68±2.52	2.34±1.44
Cu	1.18±0.80	4.12±1.91	2.18±1.56	1.55±1.03	0.47±0.10	1.32±0.71	0.71±0.42
Zn	4.78±3.20	12.80±4.40	6.25±4.19	6.00±4.34	1.75±0.36	4.87±2.85	0.64±0.40
Cr	1.53±1.08	4.98±1.89	2.50±1.78	2.18±1.74	0.69±0.17	1.73±0.92	0.92±0.48
Ti	4.01±0.79	5.11±2.54	9.67±5.67	3.49±1.05	4.50±0.66	3.88±1.00	2.92±1.03
∑26	343.91±85.85	392.32±81.47	401.84±116.21	327.99±82.82	268.54±25.76	337.86±102.19	188.20±49.78
Na ⁺	14.77±9.50	nd	nd	2.03±1.52	nd	14.23±10.74	3.29±3.22
NH ₄ ⁺	nd	7.29±7.71	2.54±2.57	1.34±2.18	nd	0.50±0.64	0.37±0.23
K ⁺	1.11±0.72	0.83±1.64	0.32±0.62	1.85±1.48	nd	1.36±2.00	0.33±0.46
Mg ²⁺	2.05±1.16	4.25±1.43	1.79±1.14	2.36±1.36	0.52±0.13	2.89±1.55	0.79±0.37
Ca ²⁺	21.94±10.04	41.81±12.75	12.19±7.10	41.48±9.84	10.54±2.58	24.53±12.53	6.25±3.50
Cl ⁻	0.12±0.28	10.61±4.89	6.14±4.73	2.51±1.75	nd	3.31±2.84	0.56±0.88
NO ₃ ⁻	2.45±3.26	8.19±3.46	2.59±1.58	2.63±1.76	0.75±0.64	1.79±1.44	0.73±0.54
SO ₄ ²⁻	1.02±2.28	76.93±32.69	27.49±18.25	26.89±14.13	4.26±0.93	5.17±3.32	0.53±0.69
OC	122.0±51.9	254.6±83.7	126.2±55.4	201.4±109.4	28.74±8.16	118.1±49.8	37.90±19.29
EC	11.26±6.09	17.99±6.68	2.87±1.62	7.51±3.30	0.67±0.32	3.79±4.21	1.06±1.03
OC/EC	10.84±8.52	14.15±12.53	43.98±34.20	26.81±33.15	42.90±25.5	31.15±11.83	35.75±18.73

1) nd 表示低于检测限

2.2.2 元素富集因子

富集因子EF(enrichment factor)分析方法被经常用来分析土壤中元素的富集程度和来源,以判断人为源与自然源对土壤中元素含量的贡献水平,表征元素的可能来源,富集因子又称富集系数. 本研究取Al为参比元素,其它元素取自福建省土壤元素背景值. 研究表明,当元素的富集因子EF<10时,则可认为是非富集的成分,主要来源于土壤地壳或岩石风化等自然源;当富集因子EF>10时,则认为

因所测26种元素中相当部分的元素含量较低,所以选择含量较高的10种元素进行分析(表1). 无论是路面尘还是土壤尘,含量最高的元素都是Si、Ca、Al、Fe和K,表明土壤尘对路面尘的贡献明显. 从Ca元素在路面尘中明显的富集趋势来看,路面尘可能同时受到建筑尘或/和水泥路面磨损的影响. 其它含量较低的重金属元素,如Pb、Cu、Zn及Cr等,在路面尘中也存在相对于土壤尘的富集趋势,与北京市公园道路尘中Cu、Pb、Zn的含量较为接近^[11]. 从表1的数据也可以看出,漳州城区路面尘和土壤尘PM_{2.5}中的Cu、Pb、Zn等重金属的含量显著高于其它地区,可能受漳州工业开发区工业活动的排放影响所致.

被富集了,主要来源于人为污染^[12].

元素富集因子 E_f 的计算公式为:

$$E_f = (C_i/C_r)/(X_i/X_r)$$

式中, E_f 为富集因子; C_i 为路面尘中元素的质量分数; C_r 为路面尘中选定的参比元素的质量分数,本研究选取Al做为参比元素; X_i 为参比系统中测量元素的质量分数; X_r 为参比系统中参比元素的质量分数. 其中, (C_i/C_r) 为路面尘项目, (X_i/X_r) 为参比系统.

从表 2 可以看出,Fe、K、Si 这 3 种元素富集因子均小于 10,可以判断主要来源于地壳.而 Ca、Pb、Cu、Zn、Ti 这 5 种元素富集因子均大于 10. Ca 元素主要受建筑尘影响较大,而像 Pb、Cu、Zn 这 3 种元素在 4 个城市的富集因子均达到30 000以上,明显富集,受人为污染影响很大.

表 2 四地路面尘无机元素富集因子

Table 2 Enrichment Factors of PM _{2.5} inorganic elements from road dust									
地点	Fe	Ca	K	Si	Pb	Cu	Zn	Cr	Ti
厦门	2.47	330.02	1.54	0.56	76 021.36	128 486.37	480 392.48	75 660.88	61.30
漳州	2.81	223.83	1.87	0.59	274 116.80	143 907.44	367 862.05	92 320.72	23.91
泉州	2.35	294.50	1.89	0.58	103 636.70	124 801.40	458 767.07	86 021.97	37.36
莆田	2.33	251.27	2.53	0.57	69 283.72	127 502.70	437 541.95	84 174.11	52.32

2.2.3 水溶性离子特征

表 1 中的数据显示,水溶性离子在路面尘中存在较显著的富集优势,以 Ca²⁺和 SO₄²⁻的浓度为最高.厦门城区路面尘 PM_{2.5}中二次离子 NO₃⁻的浓度高于 SO₄²⁻,明显不同于其它城市,显示其受汽车尾气的影响明显.漳州城区路面尘 PM_{2.5}中二次离子如 NH₄⁺、NO₃⁻和 SO₄²⁻的含量也明显高于其它地区,说明漳州城区大气颗粒物受农业面源排放(NH₄⁺来自 NH₃的转化)以及来源于机动车尾气催化剂失活的影响、工业排放(SO₄²⁻来自 SO₂的转化)和机动车尾气(NO₃⁻来自 NO_x的转化)的污染都较其它地区严重.相关性分析显示,路面尘中 NH₄⁺与 NO₃⁻及 SO₄²⁻之间都存在显著的正相关关系($P<0.05$),说明路面尘与大气细颗粒中二次离子的组成具有相似的特征^[13],路面尘中二次离子主要源于大气颗粒物的干沉降.土壤是 Mg²⁺和 Ca²⁺的共同来源,此外 Ca²⁺还可能来自于建材的生产及施工过程的排放^[14].本研究中漳州和泉州地区土壤尘中 Mg²⁺和 Ca²⁺存在显著的正相关关系($P<0.05$),所以可以根据路面尘中此两离子之间的相关性初步判断土壤尘对路面尘的影响强弱.相关性分析显示,厦门、漳州和泉州城区路面尘 PM_{2.5}中

Mg²⁺和 Ca²⁺之间都存在显著的正相关关系($P<0.05$),说明颗粒物中来自土壤尘的贡献要高于来自建筑尘的贡献,而莆田样品中 Mg²⁺和 Ca²⁺之间不存在相关性,表明莆田城区的土壤尘可能不是路面尘中 Mg²⁺和 Ca²⁺的主要来源.

2.2.4 碳成分特征

从表 1 和表 3 中给出的数据可以看出,四城市路面尘中 OC 的含量均高于济南、石家庄以及北京地面扬尘中 OC 的含量,而 EC 的含量均低于北京和济南城区路面扬尘中 EC 的含量.OC 与 EC 的关系可以用来评估排放特征,从表 4 可以看出泉州和莆田路面尘 PM_{2.5}中 OC 和 EC 在 0.01 显著水平下正相关,分别为 0.78 和 0.88.说明路面尘中 OC 和 EC 有相同或相似的来源,而厦门和漳州路面尘 PM_{2.5}中 OC 和 EC 的相关性较差,单一来源输入的可能性较小.从四地OC/EC比值来看 4 个城市土壤尘样品中该比值明显大于路面尘,可作为描述各城市两者组成上差异的指标之一.因路面尘 PM_{2.5}样品中 OC/EC 的比值远高于判别有机气溶胶的一次和二次来源的诊断比值(OC/EC=2),所以当城区大气 PM_{2.5}存在一定路面尘贡献时,采用诊断比值来判断大气有机气溶胶一次和二次来源时很可能出现偏差.

表 3 其它城市路面扬尘 OC、EC 组成特征/μg·mg⁻¹

Table 3 OC and EC composition profiles from road dust at other cities/μg·mg ⁻¹						
城市	OC	EC	TC	OC/EC	OC/TC/%	粒径/μm
济南 ^[15]	52.44	20.02	72.46	2.62	72.37	≤10
石家庄 ^[15]	97.52	8.94	106.46	10.91	91.60	≤10
北京 ^[10]	115.24	20.10	135.34	5.73	85.15	≤10
香港 ^[16]	120.21	10.05	130.26	11.96	92.28%	≤10

表 4 四城市路面尘 OC、EC 相关性

Table 4 Correlation between OC and EC at 4 cities				
OC、EC 相关性检验	厦门	漳州	泉州	莆田
皮尔逊相关系数 R	0.49*	0.29	0.78**	0.88**
双尾精密度	0.02	0.36	0.01	0.00

2.2.5 质量重构

质量平衡构成法由于其计算简单,且能清晰反映出物种的质量构成状况而被广泛应用于大气颗粒物的质量组成分析. PM_{2.5}的质量平衡通常按如下几类物种进行质量重构:有机物、EC、SO₄²⁻、NO₃⁻、

NH_4^+ 、土壤尘(指来源于地壳的无机物质)和微量元素.

对于大气颗粒物中的有机物,通常假定对应于每克碳含有 0.2 ~ 0.4 g 其它元素(如 O、H 和 N 等),即以 1.2 ~ 1.4 g 代表有机物相对于每克 OC 的平均分子质量^[17]. Turpin 等^[17]对这一做法的合理性进行了检验,认为对城市地区的气溶胶取 1.4 是合适的.

大气颗粒物中土壤尘通常以特定元素的氧化物浓度相加的方法进行估算,一般假定土壤尘由 6 种元素的氧化物(即 SiO_2 、 Al_2O_3 、 TiO_2 、 CaO 、 FeO 、 Fe_2O_3 和 K_2O)组成,其中包括构成大陆地壳物质最重要的 8 种化合物中的 6 种;另外 2 种氧化物 Na_2O 和 MgO 约分别占地壳物质质量的 3%^[18]. 本研究富集因子 EF 的分析结果表明:泉州和莆田路面尘中 K、Fe、Si 等元素主要是地壳来源,Ca 选取本地土壤尘的值计算.

因此,在考虑其它未包括的氧化物以及土壤尘的含水而进行修正(即增加 20% 的含量)之后^[19],本研究中土壤尘的构成为: $1.45[\text{K}] + 1.68[\text{Ca}] + 2.27[\text{Al}] + 2.57[\text{Si}] + 2.42[\text{Fe}] + 2.00[\text{Ti}]$.

图 3 和图 4 是泉州和莆田 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量平衡图,从中可以很清晰看出,泉州和莆田路面尘 $\text{PM}_{2.5}$ 中含量最高的组分都是土壤尘,泉州和莆田分别为 53.29% 和 49.57%,显示出路面尘主要来源于土壤尘的贡献,莆田地区有机物含量显著高于泉州地区,

微量元素所占质量分数差异不大,二次离子(SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+)所占质量分数较小,说明两地路面尘受二次气溶胶干沉降的影响较小.

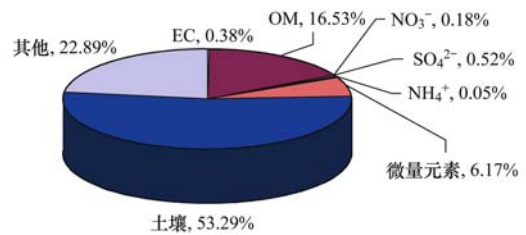


图 3 泉州路面尘 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量平衡

Fig. 3 $\text{PM}_{2.5}$ mass balance in road dust at Quanzhou

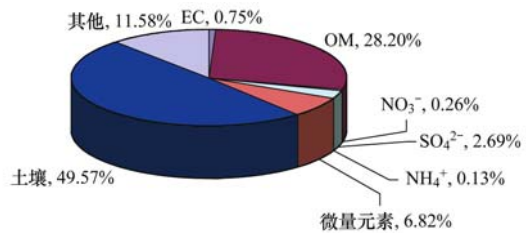


图 4 莆田路面尘 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量平衡

Fig. 4 $\text{PM}_{2.5}$ mass balance in road dust at Putian

3 聚类解析

根据路面尘 $\text{PM}_{2.5}$ 样品组成的差异,采用聚类分析(SPSS 10.0 for windows)方法得到 4 类样品(表 5). 第 1 类样品包括 ZZ1-ZZ2、ZZ4-ZZ8、ZZ10、ZZ12 和 QZ4 共 10 个样品(同一城市不同路段以数字

表 5 路面尘 $\text{PM}_{2.5}$ 的聚类分析/ $\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$

Table 5 Cluster analysis of road dust $\text{PM}_{2.5}$ / $\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$

项目	第 1 类	第 2 类	第 3 类	第 4 类
Fe	50.64 ± 11.59	41.81 ± 6.76	54.71 ± 18.11	74.33 ± 37.49
Ca	60.53 ± 17.12	64.22 ± 21.11	67.26 ± 22.20	118.87 ± 25.66
K	13.68 ± 2.63	15.20 ± 3.51	16.66 ± 5.36	23.09 ± 6.89
Si	92.34 ± 20.70	90.63 ± 16.09	103.39 ± 30.33	127.94 ± 25.48
Al	41.31 ± 16.62	42.97 ± 9.34	37.79 ± 14.56	56.40 ± 15.25
Pb	12.84 ± 4.93	3.89 ± 2.27	16.28 ± 3.74	7.60 ± 4.76
Cu	4.01 ± 1.41	1.10 ± 0.56	4.95 ± 2.60	2.25 ± 0.81
Zn	12.82 ± 3.42	4.22 ± 2.40	15.71 ± 4.77	8.39 ± 3.37
Cr	5.04 ± 1.62	1.45 ± 0.80	5.93 ± 1.91	2.91 ± 1.24
Ti	5.28 ± 2.77	3.75 ± 0.82	4.01 ± 1.65	4.78 ± 0.86
Na ⁺	0.34 ± 1.07	9.90 ± 9.18	2.72 ± 2.95	26.19 ± 8.09
NH ₄ ⁺	7.07 ± 7.40	0.25 ± 0.52	9.15 ± 7.43	0.16 ± 0.36
K ⁺	1.23 ± 1.78	1.19 ± 1.28	2.29 ± 3.13	1.35 ± 0.59
Mg ²⁺	4.28 ± 0.92	2.06 ± 1.16	5.44 ± 1.55	3.80 ± 0.81
Ca ²⁺	43.72 ± 11.07	24.62 ± 11.46	51.45 ± 9.42	39.63 ± 6.30
Cl ⁻	10.63 ± 5.21	1.57 ± 2.09	7.87 ± 5.35	1.75 ± 3.90
NO ₃ ⁻	8.52 ± 3.32	2.15 ± 2.55	7.04 ± 2.92	2.69 ± 1.58
SO ₄ ²⁻	77.11 ± 27.32	7.59 ± 9.87	75.87 ± 43.85	1.71 ± 3.81
OC	262.28 ± 46.24	115.80 ± 40.19	407.10 ± 18.60	206.84 ± 29.03
EC	17.19 ± 3.56	7.35 ± 6.22	14.39 ± 6.04	15.69 ± 8.13

为编号区分,下同),主要集中在漳州城区,主要特征为 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 等二次无机离子的含量较高,显示出城市大气颗粒物的组成特征,说明可能存在更多的干沉降输入;第2类样品包括 ZZ3、ZZ11、XM1-XM10、XM14-XM19、XM21-XM22、QZ1、QZ3、QZ5-QZ8、QZ10-QZ11、PT1-PT9、PT11-PT12 共 39 个样品,主要表现为较低的二次无机离子、重金属元素和碳成分,说明大气干沉降对第2类路面尘样品贡献较少,受邻近土壤尘的影响明显;第3类样品仅包括 ZZ9、QZ2 和 QZ9 等 3 个样品,重金属元素、二次无机离子及 OC 的含量较高,但 EC 的含量相对较低,相比于第1和2类样品,可能存在更多的生物质燃烧,大气干沉降的影响,田贺忠等^[20] 研究了中国生物质燃烧排放清单显示生物质燃烧对 OC 的贡献较大;第4类样品包括 XM11-XM13、XM20 和 PT10 等 5 个样品,区别于其它类别的主要特征为高含量的 Fe、Ca、Si、Al 等无机矿物元素和 Na^+ 以及很低浓度的 SO_4^{2-} ,可能受土壤尘和建筑尘共同影响。通过聚类分析方法,得到 4 类城区路面尘样品,可为进一步利用受体模型进行大气 $\text{PM}_{2.5}$ 的来源解析时提供本地化源谱参考。

4 结论

(1)福建省沿海重点城市城区路面尘负荷较高,可能对城区大气 $\text{PM}_{2.5}$ 存在潜在贡献。

(2)城区路面尘 $\text{PM}_{2.5}$ 中矿物元素含量与土壤尘相差不大,富集因子结果表明 Ca 元素主要受建筑尘影响较大,而像 Pb、Cu、Zn 这 3 种元素在 4 个城市明显富集,受人为污染影响很大。

(3)城区路面尘 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性二次无机离子主要来自大气沉降,而 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子受土壤尘的输入影响明显。

(4)质量重构结果显示泉州和莆田地区路面尘中含量最高的组分为土壤尘,其次为有机物,显示出土壤尘对路面尘的贡献巨大。

(5)聚类分析得到 4 类路面尘,其组成差异主要体现在二次无机离子以及矿物元素的含量上,可作为城区大气 $\text{PM}_{2.5}$ 来源解析受体模型的本地路面尘源谱。

参考文献:

- [1] 滕恩江, 胡伟, 吴国平, 等. 中国四城市空气中粗细颗粒物元素组成特征[J]. 中国环境科学, 1999, 19(3): 238-242.
- [2] 曹巍. 济南市市区道路积尘负荷的测定及控制措施[J]. 环境卫生工程, 2011, 19(4): 24-27.
- [3] 樊守彬, 田刚, 李钢, 等. 北京铺装道路交通扬尘排放规律研究[J]. 环境科学, 2007, 28(10): 2396-2399.
- [4] 韩力慧, 庄国顺, 程水源, 等. 北京地面扬尘的理化特性及其对大气颗粒物污染的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(1): 1-8.
- [5] Chow J C, Watson J G, Huock J E, *et al.* A laboratory resuspension chamber to measure fugitive dust size distributions and chemical compositions [J]. *Atmospheric Environment*, 1994, 28(21): 3463-3481.
- [6] 段恒秩, 钱冉冉, 吴水平, 等. 再悬浮装置在大气 $\text{PM}_{2.5}$ 源谱分析中的应用[J]. 环境科学, 2012, 33(5): 1452-1456.
- [7] Kantamaneni R, Adams G, Bamesberger L, *et al.* The measurement of roadway PM_{10} emission rates using atmospheric tracer ratio techniques[J]. *Atmospheric Environment*, 1996, 30(24): 4209-4223.
- [8] Ashbaugh L, Chang D, Flocchini R G, *et al.* Traffic generated PM_{10} "Hot Spots" [R]. Air Quality Group, Crocker Nuclear Laboratory. Davis: University of California, 1996.
- [9] Etyemezian V, Kuhns H, Gillies J, *et al.* Vehicle-based road dust emission measurement (Ⅲ): effect of speed, traffic volume, location, and season on PM_{10} road dust emissions in the Treasure Valley, ID [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(32): 4583-4593.
- [10] 陈建华, 王玮, 刘红杰, 等. 北京市交通路面扬尘负荷及源特征谱研究[A]. 见: 中国气象学会 2006 年年会. "大气成分与气候、环境变化"分会场论文集(2) [C]. 北京: 北京师范大学出版社, 2006. 1-8.
- [11] 韩东昱, 岑况, 龚庆杰. 北京市公园道路粉尘 Cu、Pb、Zn 含量及其污染评价[J]. 环境科学研究, 2004, 17(2): 10-13, 21.
- [12] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: its composition and evolution [M]. New York: Blackwell Publishing, 1985.
- [13] 张亚平, 鲁珍, 王丹, 等. 武汉市科教区冬春季 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度及水溶性离子分析[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(33): 16513-16515.
- [14] 李彩霞, 李彩亭, 曾光明, 等. 长沙市夏季 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子的污染特征[J]. 中国环境科学, 2007, 27(5): 599-603.
- [15] 冯银厂, 吴建会, 朱坦, 等. 济南市和石家庄市扬尘的化学组成[J]. 城市环境与城市生态, 2003, 16(S1): 57-59.
- [16] Ho K F, Lee S C, Chow J C, *et al.* Characterization of PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ source profiles for fugitive dust in Hong Kong [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(8): 1023-1032.
- [17] Turpin B J, Lim H J. Species contribution to $\text{PM}_{2.5}$ concentrations: revising common assumptions for estimating organic mass [J]. *Journal of Aerosol and Science*, 2001, 35(1): 602-610.
- [18] Andrews E, Saxena P, Musarra S, *et al.* Concentration and composition of atmospheric aerosols from the 1995 SEVAS experiment and a review of the closure between chemical and gravimetric measurements [J]. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 2000, 50(5): 648-664.
- [19] Malm W C, Sisler J F, Huffman D, *et al.* Spatial and seasonal trends in particle concentration and optical extinction in the United States [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(D1): 1347-1370.
- [20] 田贺忠, 赵丹, 王艳. 中国生物质燃烧大气污染物排放清单[J]. 环境科学学报, 2011, 31(2): 349-357.

CONTENTS

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

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年5月15日 34卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 5 May 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国 内 定 价: 90.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行