

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第10期

Vol.38 No.10

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国城市热岛时空特征及其影响因子的分析	曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 徐家平 (3987)
卫星遥感在 NO ₂ 总量控制中的应用	武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇 (3998)
京津冀城市群空气污染的模式总结与治理效果评估	王振波, 梁龙武, 林雄斌, 刘海猛 (4005)
南京北郊冬春季气溶胶数浓度变化特征分析	吴丹, 张璠, 刘刚, 吴明, 夏俊荣, 盖鑫磊, 李凤英, 杨孟 (4015)
冬季临安大气本底站气溶胶来源解析及其粒径分布特征	施双双, 王红磊, 朱彬, 林旭, 郭婷, 沙丹丹, 蒋琳, 张玉欣, 师远哲 (4024)
成都市大气颗粒物粒径分布及水溶性离子组成的季节变化特征	陶月乐, 李亲凯, 张俊, 李斯奇, 李晓东 (4034)
泉州市大气 PM _{2.5} 中水溶性离子季节变化特征及来源解析	张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 孙境蔚, 张棕巍, 许文质 (4044)
2011~2012 年北京大气 PM _{2.5} 中重金属的污染特征与来源分析	周雪明, 郑乃嘉, 李英红, 段菁春, 谭吉华, 张元勋, 贺克斌, 马永亮 (4054)
厦门海沧区 PM _{2.5} 中金属元素污染评价及来源分析	赵莉斯, 于瑞莲, 徐玲玲, 胡恭任, 吴鑫, 陈衍婷 (4061)
道路扬尘 PM _{2.5} 中金属元素污染特征及健康风险评估	张静, 张衍杰, 方小珍, 李凤华, 吴琳, 毛洪钧 (4071)
福建九仙山大气 PM ₁₀ 及部分化学组成的季节变化	魏雅, 林长城, 胡清华, 吴水平 (4077)
北京城区冬季空气污染时期 C2~C6 碳氢化合物含量特征	李月, 魏巍, 杨干, 陈东升, 程水源, 韩力慧 (4084)
2016 年北京市春节大气颗粒物污染特征激光雷达监测分析	石琳琳, 李令军, 李倩, 姜磊, 周一鸣, 李云婷, 刘保献, 张大伟 (4092)
廊坊市夏季臭氧体积分数影响因素及生成敏感性	李磊, 赵玉梅, 王旭光, 刘炜, 佟洁, 宋丽芸, 李怀瑞, 王清川 (4100)
人类活动对漓江地表水体水-岩作用的影响	赵海娟, 肖琼, 吴夏, 刘凡, 苗迎, 蒋勇军 (4108)
岩溶区水库冬季溶解有机质组成特征及来源:以桂林五里峡水库为例	卢晓斌, 彭文杰, 李强, 房君佳, 靳振江, 宋昂, 黄炳惠, 于爽 (4120)
岩溶关键带微量元素运移的时空变化:以豫西鸡冠洞为例	梁沙, 杨琰, 张娜, 孙喆, 张萍, 田宁, 凌新有, 任小敏 (4130)
龟石水库夏季富营养化状况与蓝藻水华暴发特征	苟婷, 马千里, 王振兴, 王丽, 姚玲爱, 许振成, 赵学敏, 梁荣昌, 蓝郁 (4141)
阿哈水库叶绿素 a 时空分布特征及其与藻类、环境因子的关系	罗宜富, 李磊, 李秋华, 焦树林, 李红梅, 陈峰峰 (4151)
天目湖沙河水库浮游植物群落结构的时空异质性	孙祥, 朱广伟, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 史浩辰, 杭心语, 徐涤非 (4160)
程海沉积物重金属时空变化及人为污染与潜在生态风险	于真真, 刘恩峰, 张恩楼, 林琪, 沈吉, 王荣, 李艳玲 (4169)
自然降雨条件下红壤坡地磷素随径流垂向分层输出特征	左继超, 郑海金, 奚同行, 王凌云, 聂小飞, 刘昭 (4178)
邻苯二甲酸酯在三峡库区消落带非淹水期土壤中污染特征及健康风险	杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4187)
滦河干流水体多环芳烃与有机氯农药季节性分布、组成及源解析	王乙震, 张世禄, 孔凡青, 袁媛 (4194)
潍坊滨海经济技术开发区饮用水中有机磷酸酯的水平及人体暴露风险评估	董政, 马玉龙, 李珺琪, 袁浩东, 金军, 王英 (4212)
道路灰尘中有机磷阻燃剂污染特征及人体暴露	李静, 王俊霞, 许婉婷, 尚荣双, 顾海东, 温耀进, 张丽君 (4220)
居民经手口途径摄入含 PAHs 颗粒物的致癌风险评价	佟瑞鹏, 杨校毅, 张磊, 程蒙召 (4228)
基于空间自相关的地下水脆弱性时空演变	刘宇, 兰双双, 张永祥, 李芳春, 侯树楷 (4236)
Ag-AgI/CN/MA 复合物的制备及其可见光催化性能	张塞, 张丽丽, 胡春 (4245)
凤眼莲对富营养化水体中氨氮化和反硝化微生物的影响	李洁, 蒋丽娟, 王晓琳, 肖琳 (4253)
利用含 Cu(II) 废水强化微生物燃料电池处理含 Cr(VI) 废水	熊晓敏, 吴夏芳, 贾红华, 雍晓雨, 周俊, 韦萍 (4262)
生态高负荷土地快速渗滤系统处理猪场废水的效能及微生态	宿程远, 刘凡凡, 钟余, 黄智, 郑鹏, 农志文, 卢宇翔 (4271)
细菌对城市污水中小球藻生长和油脂积累的影响	涂仁杰, 金文标, 韩松芳, 陈洪一 (4279)
污水处理厂消毒技术对抗生素抗性菌的强化去除	刘亚兰, 马岑鑫, 丁河舟, 邱勇, 李冰, 王硕, 李激 (4286)
AnMBR-A-MBR 和 A ² -MBR 工艺处理焦化废水效果与急性毒性物质特征对比	朱佳迪, 李菲菲, 陈吕军 (4293)
基于实时控制技术的 CANON 工艺稳定性运行	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (4302)
新型硫铁复合填料强化再生水深度脱氮除磷	周彦卿, 郝庆霞, 刘思远, 王雨沙 (4309)
连续流亚硝化中试反应器的启动及其能力提升	朱强, 刘凯, 董石语, 顾澄伟, 王凡, 李祥, 黄勇 (4316)
基于不同接种污泥复合型厌氧氨氧化反应器的快速启动特征	闫刚, 李田, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, Samwine Thomas (4324)
两段式曝气对好氧颗粒污泥脱氮性能的影响	王文啸, 卞伟, 王盟, 阚睿哲, 赵青, 梁东博, 李军 (4332)
醋糟高效厌氧消化体系构建	周云龙, 许之扬, 赵明星, 施万胜, 黄振兴, 何迪, 阮文权 (4340)
基于总量及形态的土壤重金属生态风险评价对比:以龙岩市适中镇为例	王蕊, 陈明, 陈楠, 刘冠男, 张二喜, 刘晓端, 张佳文 (4348)
锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评价	陈凤, 董泽琴, 王程程, 韦雪花, 胡宇, 张丽娟 (4360)
三峡库区典型消落带 CH ₄ 排放的变化特征及影响因素	柴雪思, 郝庆菊, 黄哲, 范志伟, 江长胜 (4370)
地膜覆盖对菜地生态系统 N ₂ O 排放的影响	冯迪, 郝庆菊, 张凯莉, 石将来, 石孝均, 江长胜 (4380)
不同用量竹炭对污泥堆肥过程温室气体排放的影响	向秋洁, 杨雨洽, 张成, 相欣奕, 木志坚 (4390)
半固态培养条件下烟曲霉去除土壤中镉	陈耀宁, 汪元南, 黎媛萍, 李辉, 陈艳容, 伍艳馨, 苟宇, 朱福造, 张道利, 刘耀, 曾光明 (4398)
猪粪堆肥过程中金霉素去除及重金属形态变化	温沁雪, 曹永森, 陈志强 (4405)
堆肥-生物强化对重度石油污染土壤的修复作用	吴蔓莉, 陈凯丽, 叶茜琼, 祁燕云, 徐会宁, 王卓, 薛鹏飞, 朱常琳 (4412)
微生物多样性对土壤碳代谢特征的影响	安丽芸, 李君剑, 严俊霞, 李洪建 (4420)
冬小麦田 O ₃ 气孔与非气孔沉降及风险评估	徐静馨, 郑有飞, 赵辉, 储仲芳, 黄积庆, 袁月 (4427)
中国西南酸雨区降水化学特征研究进展	周晓得, 徐志方, 刘文景, 武瑶, 赵童, 蒋浩 (4438)
《环境科学》征稿简则 (4261) 《环境科学》征订启事 (4270) 信息 (4186, 4404, 4446)	

厦门海沧区 PM_{2.5} 中金属元素污染评价及来源分析

赵莉斯^{1,2}, 于瑞莲^{1*}, 徐玲玲², 胡恭任¹, 吴鑫², 陈衍婷²

(1. 华侨大学环境科学与工程系, 厦门 361021; 2. 中国科学院城市环境研究所, 厦门 361021)

摘要: 为了了解金属元素的污染特征和潜在来源, 以及重金属元素的风险水平, 本研究于 2015 年 4 月至 2016 年 1 月采集了厦门海沧区不同类型站点四季大气 PM_{2.5} 样品 348 份, 用 X 射线荧光分析仪(XRF)测定了其中 K、Ca、Na、Mg、Al、Zn、Cu、Fe、Ti、As、V、Mn、Ba、Co 等 14 种金属元素的质量浓度. 本研究分析了码头、生活区、工业区和背景区这 4 个类型站点 PM_{2.5} 中金属元素的时空分布特征, 综合利用富集因子法和健康风险评价模型进行了金属元素的污染评价, 并采用相关性分析、主成分分析和后向气团轨迹初步探讨了金属元素的来源. 结果表明, 采样期间厦门海沧区 PM_{2.5} 中 14 种金属元素总质量浓度在 PM_{2.5} 中的占比为 5.4% ~ 10.6%. 金属元素总质量浓度的时空变化特征与 PM_{2.5} 的较为一致, 均表现为春冬季浓度高于夏秋季, 海润码头和新阳工业区分高于海沧分局和市委党校. 而夏季海润码头和海沧分局 PM_{2.5} 日均值超标率较高的现象, 与海润码头作业以及风向有关. 新阳工业区分 Zn 的质量浓度最高, 市委党校次之; 海润码头 V 的质量浓度最高, 夏季海沧分局易出现 V 的浓度高值; 均说明污染源站点(新阳工业区和海润码头)排放的污染物对其附近站点的金属元素质量浓度产生了影响. K 质量浓度冬季最高, As 超标现象出现在冬季和春季, 说明冬季生物质燃烧以及燃煤等燃烧排放对大气污染的影响较为严重. Cu、Zn、As、Co、Na 和 Mn 在各站点的富集因子范围为 67 ~ 8449, 富集均较严重. 非致癌重金属 Zn、Cu、Mn 风险值之和低于一般可接受的风险水平($1 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$), 其中 Mn 对总风险值的贡献范围为 74% ~ 88%. 综合相关性分析和主成分分析结果表明, 厦门海沧区 PM_{2.5} 中金属元素主要来源于地面扬尘、机动车排放、燃煤和工业排放以及船舶排放, 各来源分别可以解释变量的 34.5%、12.5%、10.6%、7.8%. 后向气团轨迹表明春、秋和冬季均受到局地气团的影响, 而夏季气团运动相对较强; 春冬季途经长三角内陆的气团可能导致 PM_{2.5} 浓度偏高.

关键词: PM_{2.5}; 厦门; 金属元素; 污染评价; 来源分析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)10-4061-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201702060

Pollution Assessment and Source Analysis of Metals in PM_{2.5} in Haicang District, Xiamen City, China

ZHAO Li-si^{1,2}, YU Rui-lian^{1*}, XU Ling-ling², HU Gong-ren¹, WU Xin², CHEN Yan-ting²

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 2. Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China)

Abstract: To determine the spatial-temporal distributions and potential sources of metals in PM_{2.5} and assess health risks from heavy metals, 348 PM_{2.5} samples were collected in the Haicang District of Xiamen, China from April 2015 to January 2016. Metals (K, Ca, Na, Mg, Al, Zn, Cu, Fe, Ti, As, V, Mn, Ba, Co) in PM_{2.5} were detected using an X-ray fluorescence analyzer (XRF). Pollution assessment was performed via enrichment factor calculation and health risk assessment. Potential sources were explored using Pearson's correlation coefficient, principal component analysis, and the HYSPLIT Trajectory Model. Results showed that the total concentration of 14 metal elements contributed to 5.4%-10.6% of PM_{2.5} during the sampling period. The total concentration of metals was higher in spring and winter than those in summer and autumn. The concentrations were higher in the port and the industrial areas than in residential areas and background locations, in agreement with the seasonal and spatial distribution of PM_{2.5}. The frequency of PM_{2.5} daily concentrations exceeding the Chinese Ambient Air Quality Standards was higher in the port and residential areas in the summer due to operations at the port and the wind direction. Zn concentration was the highest in the industrial area followed by the background location. Meanwhile, the highest concentration of V was observed in the port area; V concentration in the residential area was high in the summer. These variations in Zn and V indicated that the elements emitted in the polluted areas migrated easily to residential and background areas. K concentrations were the highest in winter and As showed a higher rate of exceeding the standard in winter and spring, indicating that activities, such as biomass burning and coal combustion in the winter severely impacted air quality. The enrichment factors of Cu, Zn, As, Co, Na, and Mn varied considerably, from 67 to 8,449. The total risk level for non-carcinogenic heavy metals (Zn, Cu, Mn) was lower than the average level of risk acceptance ($1 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$) and Mn contributed 74%-88% of the total risk level of Zn, Cu, and Mn. The combined results of the correlation analysis and the principal component analysis revealed that

收稿日期: 2017-02-14; 修订日期: 2017-04-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(21377042, 21477042); 福建省自然科学基金项目(2016J01065); 华侨大学研究生科研创新能力培育计划资助项目(1511315056)

作者简介: 赵莉斯(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境监测与评价, E-mail: lisi_zhao@163.com

* 通信作者, E-mail: ruiliany@hqu.edu.cn

metals in $PM_{2.5}$ were mainly came from re-suspension of ground dust, motor vehicle emissions, coal combustion, industrial emissions, and heavy oil combustion, with contributions of 34.5%, 12.5%, 10.6%, and 7.8% respectively. The HYSPLIT Trajectory Model showed that Xiamen was affected by the local air mass in spring, autumn, and winter, but not in summer. Moreover, the rise of $PM_{2.5}$ in spring and winter was attributed to air masses traveling through the Yangtze River Delta.

Key words: $PM_{2.5}$; Xiamen; metal elements; pollution assessment; source analysis

随着经济的高速发展, 大气 $PM_{2.5}$ (空气动力学当量直径 $\leq 2.5 \mu m$ 的颗粒物) 已成为很多城市的首要大气污染物^[1]. $PM_{2.5}$ 易富集空气中的有毒有害物质, 且在大气中停留时间长、输送距离远, $PM_{2.5}$ 浓度超标对空气质量及人类健康等有重要的影响^[2-6]. 金属元素是 $PM_{2.5}$ 中的重要组分 (占比一般 1% ~ 20%); 其中重金属 (如 Pb、As、Hg、Cd、Cr 等) 超标会对生态环境及人体健康产生威胁^[2,7-14], 因此开展大气 $PM_{2.5}$ 及其中金属元素的研究对于改善环境和保护人类健康意义重大. 国内 $PM_{2.5}$ 中金属元素的研究已广泛开展, 研究地区主要集中在大中城市, 对农村和背景地区的研究相对较少, 研究内容主要集中在 $PM_{2.5}$ 中金属元素的污染特征及来源分析及其中重金属健康风险评价^[15, 16].

厦门市是国家重点开发的厦漳泉经济开发区和海峡西岸繁荣带的重要组成部分^[17], 近年来城市化发展迅速, 给厦门市大气环境质量带来巨大压力和严峻挑战, 因此厦门市大气质量问题需引起重视. 目前已有学者研究了厦门市大气降尘和 $PM_{2.5}$ 中的元素特征, 例如温先华等^[18] 通过富集因子分析得出, 厦门市大气降尘中 Cu 和 Zn 在不同功能区 (商业区、居住区、交通区、工业区、旅游区) 都存在不同程度富集, 通过多元统计分析 (因子分析和聚类分析) 发现, 大气降尘中重金属主要来源于工业污染和交通源排放、土壤扬尘以及燃烧活动; Xu 等^[7] 和陈衍婷等^[19] 分析发现工业化和城市化进程

是影响厦门 $PM_{2.5}$ 及其中元素浓度的重要因素; 庄马展^[1] 发现厦门 $PM_{2.5}$ 中元素浓度及暴露风险受区域功能和排放影响. 然而对于大气 $PM_{2.5}$ 及其中金属元素时空变化特征, 并采用多种方法进行污染评价及来源分析的研究罕见报道, 因此本研究在厦门海沧区 4 个不同类型的站点采集 $PM_{2.5}$ 样品, 分析 $PM_{2.5}$ 中 14 种金属元素质量浓度的时空变化特征, 综合利用富集因子法、健康风险评价模型进行风险评价, 并使用相关性分析、主成分分析和后向气团轨迹对来源进行分析, 以期对厦门市大气 $PM_{2.5}$ 污染防治提供参考依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

选择厦门海沧区市委党校、海沧分局、新阳工业区和海润码头 4 个站点同步采集大气 $PM_{2.5}$ 样品, 这 4 个站点分别代表了背景区、生活区、工业区和码头的影响, 各采样点具体介绍见表 1. 采样时间为 2015 年 4 月 21 日 ~ 5 月 6 日、7 月 29 日 ~ 8 月 28 日、11 月 2 ~ 26 日和 2015 年 12 月 15 日 ~ 2016 年 1 月 3 日, 分别代表春、夏、秋、冬四季, 每天样品采集 > 20 h, 除去降雨 (暂停采样) 和仪器故障的影响, 市委党校四季采集样品数分别为 18、27、23、18 份, 海沧分局四季样品数分别为 18、26、25、16 份, 新阳工业区四季样品数分别为 23、22、25、19 份, 海润码头四季样品数分别为 23、23、24、18 份.

表 1 厦门市海沧区各采样点具体介绍

Table 1 Details of $PM_{2.5}$ sampling sites in the Haicang district in Xiamen City

点位名称	坐标	点位类型	站点描述
市委党校	117.94°E, 24.58°N	背景区	三面环山, 代表背景区环境, 但距离东孚工业区较近
海沧分局	118.04°E, 24.49°N	生活区	生活区, 周边有马青路等交通源
新阳工业区	118.01°E, 24.52°N	工业区	周围主要是机械、电子等工业污染源
海润码头	118.04°E, 24.45°N	码头	靠近码头, 代表码头船只和装卸活动的影响

采样仪器为 MiniVol 采样仪 (5 L·min⁻¹, Air Metrics 公司, 美国), 采样滤膜为聚碳酸酯膜 (φ 47 mm, Whatman 公司, 美国). 采样前后滤膜置于恒温恒湿箱 (温度 25℃ ± 2℃, 湿度 50% ± 2%) 中平衡 48 h, 采用十万分之一电子天平 (T-114 型, Sartorius 公司, 德国) 在称重室中称重, 利用称重结

果和采样体积计算 $PM_{2.5}$ 的质量浓度. 称重后的滤膜用铝箔纸包好, 用聚乙烯封口袋密封后冷藏在 -4℃ 的冰箱中保存以待进一步分析.

1.2 样品分析

使用 X 射线荧光分析仪 (XRF AxiosmAx, PANalytical B. V., 荷兰) 检测样品中 K、Ca、Na、

Mg、Al、Zn、Cu、Fe、Ti、As、V、Mn、Ba、Co 14 种金属元素. 仪器采用美国 MicroMatter 公司的聚碳酸酯滤纸作为标准物质建立工作曲线, 以 NIST SRM 2783 号标准物质进行质量控制, 测试结果误差小于 20%. 使用整张滤膜进行实验, 通过选择合适的分析线、分光晶体、准直器、过滤器、电压、电流、测试角度和脉冲高度等条件, 使得待测元素发射出较强的 X 荧光信号, 以提高分析线的灵敏度并达到很低的检出限. XRF 的 X 射线源由 4.0 kW 高功率, 高透过率、超尖锐端窗(75 m) 钨靶 X 光管构成, 检测器有两种, 闪烁探测器用于原子量大于 27 的元素分析, 流光探测器用于原子量小于 27 的元素分析, 每个样品照射 650 s. 每批样品均会测试空白膜, 分析时扣除空白膜中各元素本底值作为最终结果. 每 10 个样品做一组平行样, 平行实验的相对标准偏差(RSD)小于 10%.

2 结果与讨论

2.1 PM_{2.5} 及金属元素质量浓度分布特征

采样期间厦门市海沧区 4 个站点四季大气 PM_{2.5} 质量浓度分布见图 1. 厦门市海沧区 PM_{2.5} 年均值为 $(40.96 \pm 9.05) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 高于国家空气质量

二级标准(年均值 $35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), 低于海西城市群 PM_{2.5} 年均值 $(57.21 \pm 21.41) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ [19], 且低于 2014 年冬季厦门城区 $(74.38 \pm 21.71) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和郊区 $(81.19 \pm 28.60) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的研究结果 [20], 而与南京市青奥会期间 PM_{2.5} 浓度 $(26.39 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$ 和上海秋季非雾霾期间 PM_{2.5} 浓度 $(16 \pm 4) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ [21~22] 相比略高. 总体而言厦门市海沧区大气 PM_{2.5} 平均质量浓度季节性顺序: 冬季 $(53.79 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$ > 春季 $(40.55 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$ > 夏季 $(36.17 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$ > 秋季 $(33.35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$. 功能区 PM_{2.5} 平均质量浓度表现为: 海润码头 $(45.76 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$ > 新阳工业区 $(43.45 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$ > 市委党校 $(41.21 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$ > 海沧分局 $(33.43 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$, 根据《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 二级日均质量浓度限值 $(75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$, 海润码头夏季和冬季 PM_{2.5} 日均浓度的超标率分别为 8.7% 和 22.2%, 春秋季无超标现象; 新阳工业区春季和冬季的超标率分别为 8.7% 和 15.8%, 市委党校春、夏、秋和冬季的超标率分别为 5.6%、3.8%、4.5%、22.2%, 海沧分局仅夏季超标, 超标率为 3.8%.

不同功能区站点 PM_{2.5} 日均浓度的超标情况有明显差异. 海润码头和海沧分局夏季 PM_{2.5} 超标率

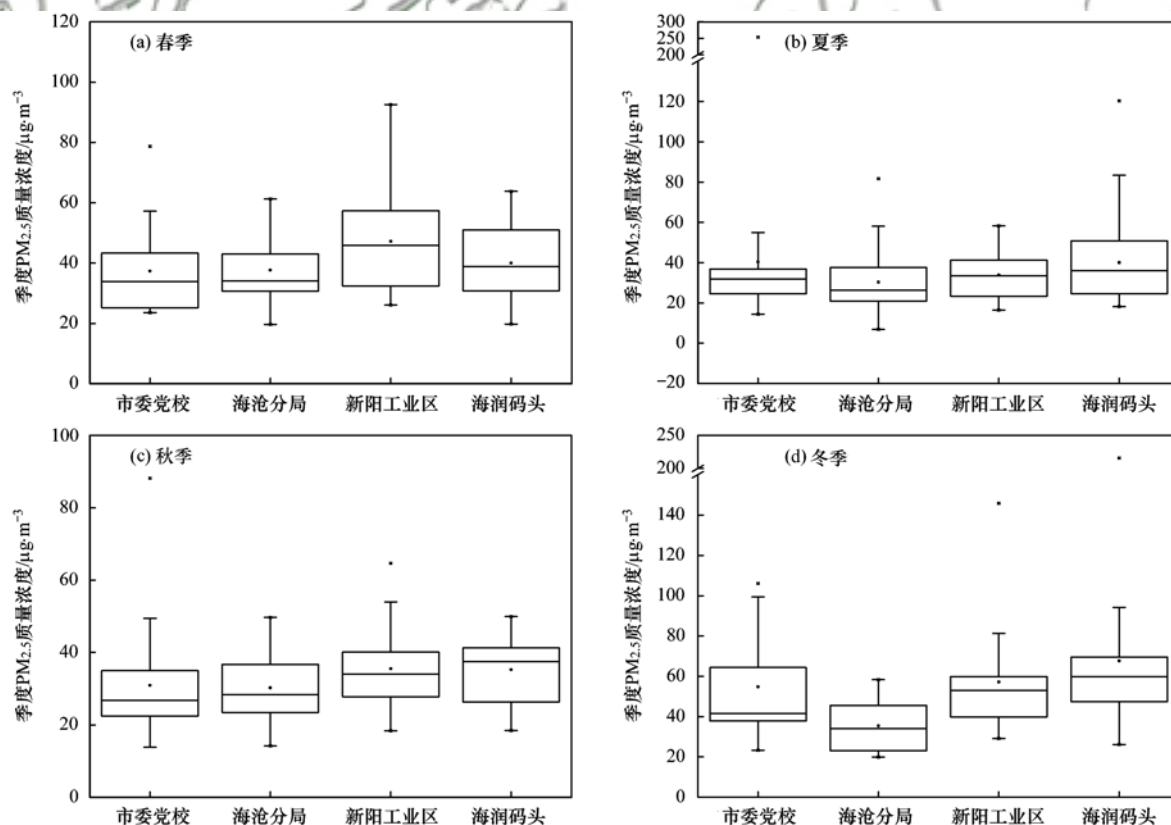


图 1 厦门市海沧区大气 PM_{2.5} 浓度水平

Fig. 1 Concentrations of PM_{2.5} in the Haicang District in Xiamen City

较高,原因是夏季该地区盛行东南风,海上船舶排放的污染物以及码头货船停靠、货车进行驶等作业活动排放的污染物均会对处于下风向的海润码头和海沧分局站点产生影响,导致 $\text{PM}_{2.5}$ 高值出现频率较高.各站点春季和(或)冬季超标率较高的现象与该段时间大气较为稳定、对流运动较弱的气象条件有关.市委党校作为背景区站点,其 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度的超标率相对其他站点较高,与其特殊的地理位置有关.市委党校位于天竺山上,周边人为活动较少,但其距离工业区不足 5 km,并且市委党校站点地处山坳处,倒凹字体的地形条件导致“山谷风”效应,把相对开阔的东南侧国道、高速公路汽车尾气及工业区废气吸入,同时该站点三面环山,污染物难以扩散出去,导致市委党校的颗粒物超标现象严重.

厦门市海沧区不同功能区四季金属元素 K、Ca、Na、Mg、Al、Zn、Cu、Fe、Ti、As、V、Mn、Ba、Co 的质量浓度总和在 $\text{PM}_{2.5}$ 的占比范围为 5.4% ~ 10.6%.大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中金属元素质量浓度的时空分布见图 2. 14 种金属元素的质量浓度呈现明显的季节性分布,总体表现为冬季 ($4\,283.90\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$) > 春季 ($3\,183.62\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$) > 秋季 ($2\,763.83\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$) > 夏季 ($2\,437.94\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$),与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的季节变化特征较为一致,表现为冬春季浓度较高,夏秋季

浓度较低的趋势.不同功能区金属元素质量浓度的变化为:新阳工业区 ($3\,501.12\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$) > 海润码头 ($3\,175.75\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$) > 市委党校 ($3\,146.79\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$) > 海沧分局 ($2\,845.65\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$).新阳工业区 Zn 的质量浓度最高,市委党校次之,Zn 是金属冶炼的标志物^[23],说明新阳工业区排放的污染物对其附近站点,即市委党校站点的金属元素浓度产生了影响.V、Mn 和 Ba 在海润码头的平均质量浓度最高,V 是重油燃烧的标志性元素^[24],海润码头 $\text{PM}_{2.5}$ 中 V 的质量浓度高于其他 3 个站点,说明海润码头受重油燃烧排放的影响;海沧分局站点 $\text{PM}_{2.5}$ 中 V 的质量浓度均值虽然夏季最低,但易出现 V 的浓度高值,说明了风向因素的影响,夏季南风频率较大,海沧分局位于海润码头的下风向,码头作业时容易影响到海沧分局的 V 浓度.有研究表明 K 是生物质排放的特征元素^[25~27],K 元素质量浓度季节变化特征表现为冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季,说明冬季生物质燃烧例如秸秆燃烧等排放对大气污染的影响较为严重.As 是燃煤烟尘的标志元素^[25],根据《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)规定的金属元素参考浓度限值,As 在所有站点均有超标现象,但超标率均低于 25%,在新阳工业区超标率最高(24%),而超标现象出现在冬季和春季,应引起重视.

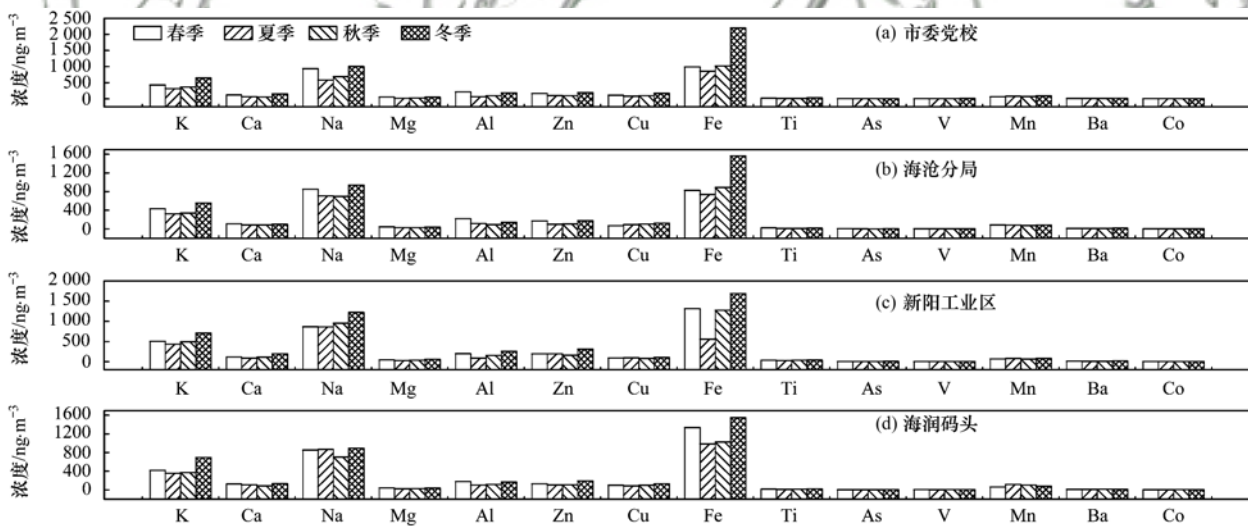


图2 厦门市海沧区不同季节 $\text{PM}_{2.5}$ 中金属元素的平均浓度

Fig. 2 Mean concentrations of metals in $\text{PM}_{2.5}$ during different seasons in Haicang District in Xiamen City

2.2 金属元素污染评价

2.2.1 富集因子法

富集因子计算公式如下:

$$EF = \frac{C_{i\text{ sample}}/C_{R\text{ sample}}}{C_{i\text{ background}}/C_{R\text{ background}}} \quad (1)$$

式中, $C_{i\text{ sample}}$ 、 $C_{R\text{ sample}}$ 为样品中金属元素 i 和参比元

素 R 的质量浓度 ($\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$), $C_{i\text{ background}}$ 、 $C_{R\text{ background}}$ 为厦门市 A 层土壤背景值^[28]中金属元素 i 和参比元素 R 的含量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). 本研究选取 Al 作为参比元素. 根据富集因子大小可将元素分为两类,当某种元素的富集因子值小于 10 时,可以认为是非富集的成分,元素主要来源于地壳;当富集因子增大到

$10 \sim 10^4$, 则可认为元素已富集, 受到人为污染源的影响^[29].

图 3 为厦门市海沧区大气 PM_{2.5} 中各金属元素富集因子的时空分布.

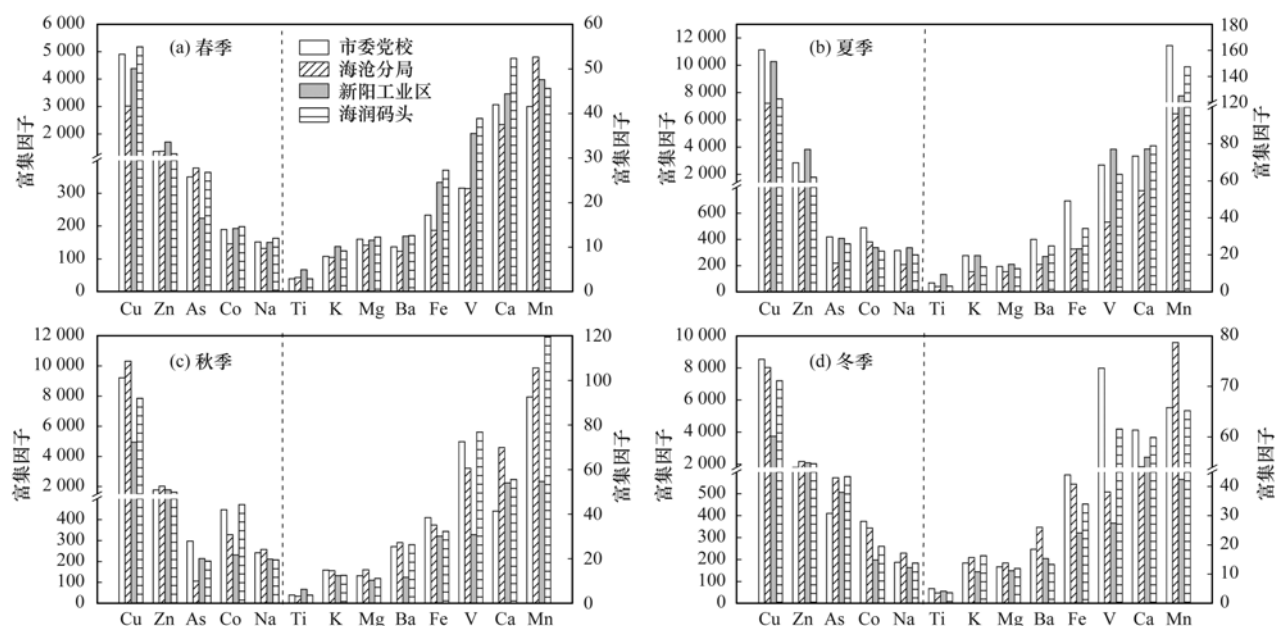


图 3 厦门市海沧区 PM_{2.5} 中金属元素的富集因子

Fig. 3 Enrichment factors of metals in PM_{2.5} in Haicang District in Xiamen City

总体上各金属元素富集因子年均值顺序为 Cu (7091) > Zn (1930) > As (351) > Co (306) > Na (214) > Mn (84) > Ca (57) > V (50) > Fe (31) > Ba (18) > K (13) > Mg (12) > Ti (4). 除 Ti 外, 其余金属元素富集因子均大于 10, 表明除 Ti 外, 其余金属元素受到不同程度的人为污染. Cu、Zn、As、Co、Na 和 Mn 在各站点的富集因子 EF 均很高 (67 ~ 8 449), 说明这 6 种元素富集较严重, 结果与陈衍婷等^[19] 研究结果较为一致. 以前的研究表明 Cu、Co、Fe、Mn 主要来源于工厂排放或机动车排放^[9,13,30~32], 但是新阳工业区这些元素的富集因子低于其他站点, 结果与新阳工业区参比元素 Al 质量浓度较高有关.

除 As、Ba 和 Fe 外, 其余金属元素在夏季富集因子最高 (PM_{2.5} 浓度较低); 除 As 外, 其余金属元素在春季富集因子最低 (PM_{2.5} 浓度较高), 说明这些金属元素的富集因子和 PM_{2.5} 浓度季节分布不一致. 原因可能是夏季降水频繁, 扬尘源对大气 PM_{2.5} 的贡献相比其他季节减小, 导致人为源排放的影响更为突出; 而春季浮尘情况较为严重, 扬尘对 PM_{2.5} 的贡献增加, 导致人为源的影响相对减弱. As 在冬季时 (PM_{2.5} 浓度最高) 富集因子最高, 秋季时 (PM_{2.5} 浓度最低) 富集因子最低, 和 PM_{2.5} 浓度的季节分布具有一致性; As 是燃煤烟尘排放的标志

元素, 说明了冬季燃煤活动对大气 PM_{2.5} 的贡献较大.

2.2.2 健康风险评价模型

本研究对 PM_{2.5} 中非致癌重金属 Zn、Cu 和 Mn 通过呼吸途径进入人体 (成年男性、成年女性和儿童青少年) 的健康风险进行评价. 暴露剂量计算公式为:

$$ADD = (C \times IR \times ED) / (BW \times AT) \quad (2)$$

式中, ADD 为非致癌物质日均暴露剂量 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]; C 为污染物的质量浓度 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$); IR 为呼吸速率 ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$); ED 为暴露持续时间 (d); BW 为体重 (kg); AT 为非致癌重金属平均暴露时间 (d). 体重采用 2010 年国民体质监测报告中全国平均值, 其余参数采用美国环保局推荐值, 取值见表 2.

非致癌重金属风险评价计算公式如下:

$$R = (ADD \times 10^{-6}) / (RfD \times 80.1) \quad (3)$$

式中, R 为人群年均超额危险度, 无量纲; RfD 为人均寿命参考剂量 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$], Zn、Cu 和 Mn 的 RfD 分别为 1.0×10^{-2} 、 2.0×10^{-3} 、 $3.0 \times 10^{-4} \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; 80.1 为厦门市 2015 年平均期望寿命 (2015 年厦门市卫生计生工作报告).

大气 PM_{2.5} 中 3 种重金属 (Zn、Cu 和 Mn) 通过呼吸对人体健康危害的健康风险评价结果见图 4.

从图 4 中可知, 3 种非致癌重金属 (Zn、Cu 和

Mn) 风险值之和范围为 $6.64 \times 10^{-10} \sim 1.22 \times 10^{-9}$, 均低于一般可接受的风险水平 $1 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$, 表明厦门海沧区各类人群通过呼吸暴露 $\text{PM}_{2.5}$ 中的非致癌重金属健康风险是可以接受的. 厦门海沧区大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中 3 种非致癌重金属 (Zn、Cu 和 Mn) 风险值

之和表现为成年男性 > 成年女性 $\approx$ 儿童青少年, 这与三者呼吸速率、户外暴露时间有关^[19]. 与上海^[33] 相比, 厦门海沧区 $\text{PM}_{2.5}$ 中 Cu 的风险值较高, 高出一个数量级; 而重金属 Zn 的风险值较低, 但处于同一数量级.

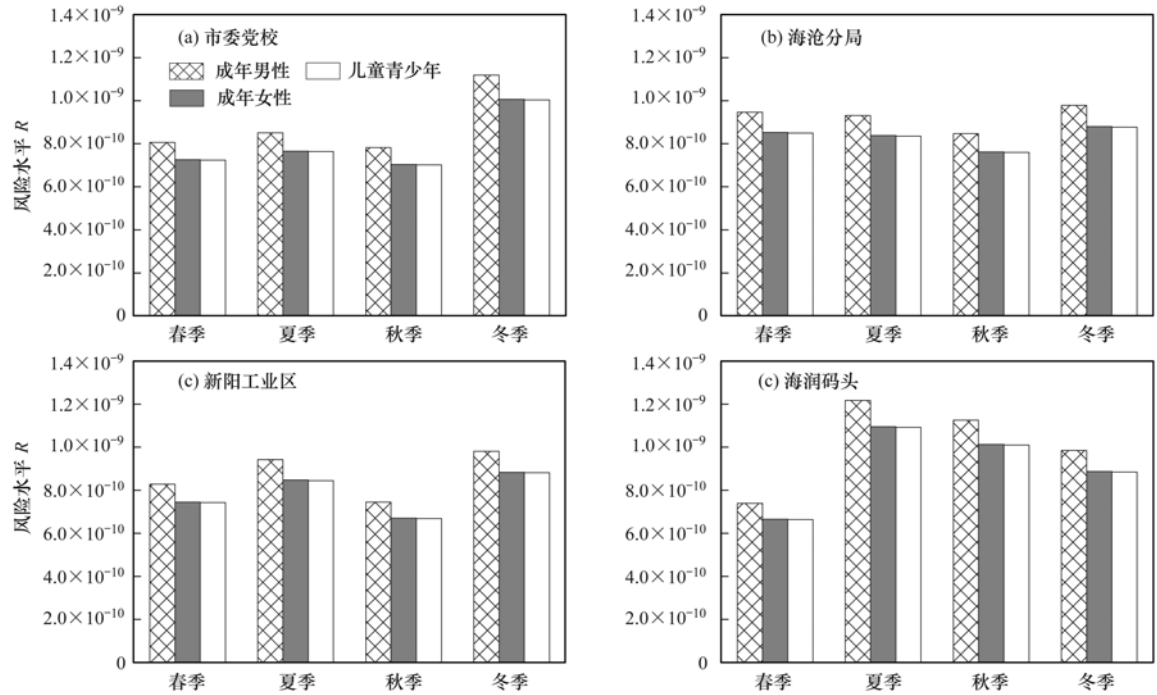


图 4 $\text{PM}_{2.5}$ 中 Zn、Cu 和 Mn 的健康风险评价
Fig. 4 Total health risk of Zn, Cu, and Mn in $\text{PM}_{2.5}$

表 2 暴露剂量计算参数值

人群	IR	ED	BW	AT
成年男性	15.2	30×365	69	30×365
成年女性	11.3	30×365	57	30×365
儿童青少年	8.7	18×365	44	18×365

Mn 对总风险值的贡献范围为 74% ~ 88%, 低于之前厦门的研究 (99.9%)^[1]. 海润码头大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中 3 种非致癌重金属 (Zn、Cu 和 Mn) 风险值之和年均值高于其他 3 个站点, 且夏季时海润码头的健康风险最高. 海润码头 Mn 质量浓度高于其他 3 个站点, Mn 的来源有煤炭燃烧、工业排放和土壤的二次扬尘^[34]. Mn 和 V 相关系数为 0.426 ($P < 0.01$), V 是重油燃烧的标志性元素^[32], 说明了海上和靠港船舶尾气排放以及二次扬尘对海润码头大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属浓度的影响. 夏季时厦门市盛行东南风, 海上和靠港船舶排放的大气污染物容易传输到位于下风向的海润码头站点, 导致颗粒物中重金属元素对人体健康危害水平升高.

2.3 金属元素污染源分析

2.3.1 相关性分析

运用 SPSS 17.0 软件对金属元素数据进行 Pearson 双侧相关性分析. 厦门海沧区大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中不同金属元素的相关系数矩阵如表 3 所示. 从中可知, 大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中 Mg、Al、K、Ca、Ti 之间两两显著相关, 它们是主要的地壳元素, 主要受到土壤颗粒物 (自然源) 的影响^[8]. Na 是海盐的标识物^[35], 但是其又与 Mg、Al、K、Ca 和 Ti 这些元素显著相关, 说明 Na 元素除了海盐来源外, 一定程度上也受地壳源的影响. As、Cu 相关性显著, 而 Cu、Fe、Co 相关性显著, 说明这 5 种金属元素污染来源具有一定同源性, 如工业排放.

2.3.2 主成分分析

运用 SPSS17.0 软件对金属元素数据进行因子分析, 因子载荷矩阵的变换采用方差极大 (Varimax) 旋转法, 本研究提取了特征值 > 1 的因子. 主成分分析结果见表 4.

厦门市海沧区 $\text{PM}_{2.5}$ 中各金属元素主成分分析共解析出 4 个因子, 可以解释所有变量的 65.4%.

表 3 厦门市海沧区 PM_{2.5} 中金属元素皮尔逊相关系数

Table 3 Pearson's correlation coefficients of metals in PM_{2.5} in Haicang District in Xiamen City

	K	Ca	Na	Mg	Al	Zn	Cu	Fe	Ti	As	V	Mn	Ba	Co
K	1.000													
Ca	0.557 **	1.000												
Na	0.676 **	0.709 **	1.000											
Mg	0.550 **	0.622 **	0.662 **	1.000										
Al	0.552 **	0.549 **	0.552 **	0.874 **	1.000									
Zn	0.610 **	0.445 **	0.556 **	0.499 **	0.446 **	1.000								
Cu	0.311 **	0.193 **	0.279 **	0.123	0.084	0.347 **	1.000							
Fe	0.484 **	0.301 **	0.438 **	0.239 **	0.162 *	0.424 **	0.531 **	1.000						
Ti	0.522 **	0.519 **	0.486 **	0.527 **	0.552 **	0.534 **	0.188 **	0.323 **	1.000					
As	0.339 **	0.351 **	0.245 *	0.299 **	0.240 *	0.366 **	0.424 **	0.127	0.206	1.000				
V	0.285 **	0.123	0.172 *	0.104	0.025	0.052	-0.033	0.400 **	0.069	-0.329 *	1.000			
Mn	-0.010	0.098	0.070	0.018	0.052	-0.136 *	-0.426 **	-0.461 **	0.076	0.006	0.422 **	1.000		
Ba	0.170 **	0.190 **	0.168 **	0.231 **	0.228 **	0.246 **	0.051	0.176 *	0.238 **	0.108	0.171 *	0.574 **	1.000	
Co	0.222 **	0.159	0.259 **	0.169	0.210 *	0.220 *	0.504 **	0.496 **	0.169	0.369 *	-0.240	0.252 **	0.095	1.000

1) * 表示 $P < 0.05$. (双侧), ** 表示 $P < 0.01$. , (双侧); 黑体字表示数值在 0.4 以上

表 4 厦门市海沧区 PM_{2.5} 中各金属元素主成分分析结果

Table 4 Principal component analysis results of metals in PM_{2.5} in Haicang District in Xiamen City

项目	PM _{2.5}	K	Ca	Na	Mg	Al	Zn	Cu	Fe	Ti	As	V	Mn	Ba	Co	成因率/%
F1	0.452	0.748	0.764	0.790	0.890	0.861	0.658	0.056	0.173	0.683	0.178	0.113	0.002	0.187	0.085	34.5
F2	0.465	0.352	0.096	0.231	-0.041	-0.101	0.372	0.765	0.784	0.136	0.219	0.100	-0.21	0.001	0.464	12.5
F3	0.150	-0.003	0.143	0.088	0.047	0.055	-0.038	0.014	-0.043	0.143	0.067	0.097	0.879	0.774	0.729	10.6
F4	0.317	0.198	0.026	0.111	-0.063	-0.087	-0.133	-0.171	0.042	-0.101	-0.506	0.829	0.159	-0.043	-0.073	7.8

1) 黑体字表示数值在 0.6 以上

主成分 1 解释了 34.5% 的总方差, 该主成分中 Zn、K、Al、Mg、Ca、Ti、Na 因子负载比较大(0.658 ~ 0.890), Al、Mg、Ca、Ti、Na、K 与地面扬尘有关^[13], Zn 是金属冶炼主要来源之一, K 是生物质排放的特征元素^[25~27], 可以认为是工业和生物质燃烧排放的污染物沉降后二次扬尘的特征, 因此主成分 1 代表地面扬尘. 主成分 2 中 Fe、Cu 的载荷值较高(0.784 和 0.765), Cu 主要来自机动车排放^[13], Cu 和 Fe 显著相关(表 3), 可能来源于同一污染源, 所以主成分 2 主要代表机动车排放, 贡献率为 12.5%. 主成分 3 中 Mn、Ba、Co 的载荷值最高(0.729 ~ 0.879), Co 为燃煤过程排放尘的特征元素^[9], Mn 的来源有煤炭燃烧、工业排放和土壤的二次扬尘^[34], 因此因子 3 代表燃煤和工业排放, 贡献率为 10.6%. 主成分 4 中 V 的载荷值最高(0.829), 因此因子 4 代表了重油燃烧, 其代表性来源为船舶排放, 贡献率为 7.8%. 因此, 厦门市海沧区 PM_{2.5} 的主要来源为地面扬尘、机动车排放、燃煤和工业排放, 另外船舶排放对大气 PM_{2.5} 的贡献不容忽视.

2.3.3 后向气团轨迹分析

应用 NOAA 的 HYSPLIT 模型进行后向气团轨迹分析, HYSPLIT 的地形采用 σ 坐标, 垂直方向上分为 28 层, 气象要素线性内插在各层上, 高度距地面 1000 m (<http://www.arl.noaa.gov/raedy/hysplit4.html>). 图 5 为采样期间厦门 72 h 后向气团轨迹示意.

由图 5 可知, 采样期间厦门市春季、秋季和冬季主要受到局地环流(53%、42%、56%)气团的影响, 局地环流气团不利于本地的污染扩散, 同时与周围地区输入气团形成相互影响; 另外冬季和春季还均受到途经长三角地区的气团(23%、26%)的影响, 容易将污染物携带至研究区域, 因此可能导致了冬季和春季 PM_{2.5} 浓度及其中金属元素浓度较高, 而秋季没有源自大陆的气团. 夏季的气团主要分为内陆气团[轨迹 1(26%)、2(22%)、3(19%)]和来自海洋的气团[轨迹 4(33%)], 而无局地气团的影响, 表明夏季大气扩散相对较强, 这也是夏季 PM_{2.5} 浓度相对低于其他季节的主要原因. 结合图 3 可知, 夏秋季 Na 元素的富集因子大于冬春季, 而

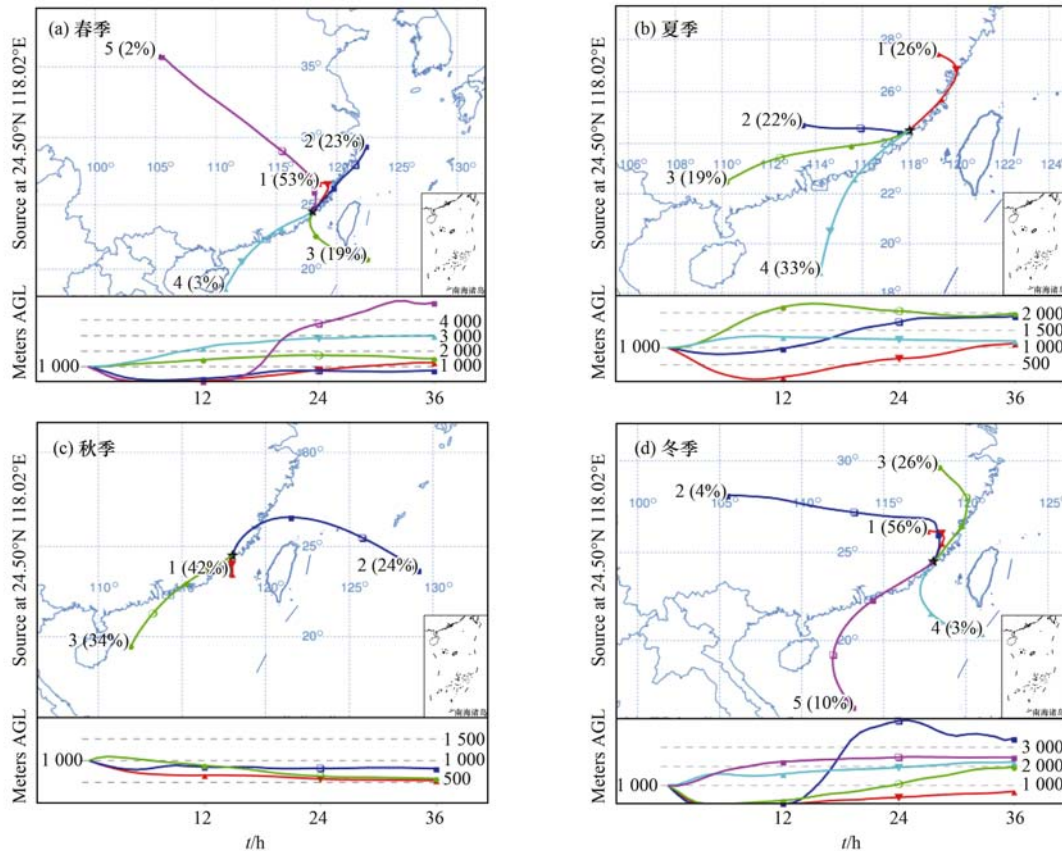


图5 厦门海沧区后向气团轨迹分析结果

Fig. 5 Results of HYSPLIT analysis of Haicang District in Xiamen City

Na 是最主要的海盐标志元素^[35], 夏秋季来自海洋的气团可能带来了更多的 Na 元素.

3 结论

(1) 采样期间厦门市海沧区 $PM_{2.5}$ 年均值为 $(40.96 \pm 9.05) \mu g \cdot m^{-3}$, $PM_{2.5}$ 中 14 种金属元素总质量浓度在 $PM_{2.5}$ 中的占比为 5.4% ~ 10.6%. 金属元素总质量浓度的时空变化特征与 $PM_{2.5}$ 的较为一致, 均表现为秋冬季浓度高于夏秋季, 海润码头和新阳工业区高于海沧分局和市委党校. 根据国家环境空气质量标准二级标准 ($75 \mu g \cdot m^{-3}$), 夏季海润码头和海沧分局 $PM_{2.5}$ 日均值超标率较高的现象, 与海润码头作业以及风向有关.

(2) 各金属元素中, Zn 的质量浓度表现为新阳工业区最高, 市委党校次之, 说明新阳工业区排放的污染物对其附近站点, 即市委党校站点的金属元素浓度产生了影响. 海润码头 V 的质量浓度最高, 夏季海沧分局易出现 V 的浓度高值, 说明了码头作业容易影响到下风向海沧分局的 V 浓度. K 质量浓度冬季最高, 说明冬季生物质燃烧例如秸秆燃烧等排放对大气污染的影响较为严重. As 超标现象出

现在冬季和春季, 说明了该季节燃煤烟尘的影响.

(3) 厦门市海沧区 $PM_{2.5}$ 中金属元素污染评价结果如下: Cu、Zn、As、Co、Na 和 Mn 在各站点的 EF 范围为 67 ~ 8 449, 说明这些金属元素受到明显人为污染; 3 种非致癌重金属 (Zn、Cu 和 Mn) 风险值之和均低于一般可接受的风险水平, Mn 对大气 $PM_{2.5}$ 中 3 种重金属总风险值的贡献范围为 74% ~ 88%.

(4) 综合相关性和主成分分析结果表明, 厦门海沧区 $PM_{2.5}$ 中金属元素主要来源于地面扬尘、机动车排放、燃煤和工业排放, 贡献率分别为 34.5%、12.5%、10.6%, 另外船舶排放对大气 $PM_{2.5}$ 的贡献 (7.8%) 不容忽视. 后向气团轨迹表明厦门市春季、秋季和冬季主要受到局地环流气团的影响, 而夏季气团运动相对较强; 秋冬季途经长三角内陆的气团可能导致 $PM_{2.5}$ 浓度偏高.

参考文献:

- [1] 庄马展. 厦门大气 $PM_{2.5}$ 中元素特征及重金属健康风险评价 [J]. 环境化学, 2016, 35(8): 1723-1732.
Zhuang M Z. Characteristic of elements in $PM_{2.5}$ and health risk assessment of heavy metals at Xiamen [J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(8): 1723-1732.

- [2] 冯茜丹, 党志, 黄伟林. 广州市秋季 PM_{2.5} 中重金属的污染水平与化学形态分析[J]. 环境科学, 2008, **29**(3): 569-575.
Feng X D, Dang Z, Huang W L. Pollution level and chemical speciation of heavy metals in PM_{2.5} during autumn in Guangzhou city[J]. Environmental Science, 2008, **29**(3): 569-575.
- [3] 石同幸, 董航, 杨轶骥, 等. 广州市中心城区冬季大气 PM_{2.5} 污染状况与居民每日死亡的关系[J]. 环境与健康杂志, 2015, **32**(6): 477-481.
Shi T X, Dong H, Yang Y J, *et al.* Association between PM_{2.5} air pollution and daily resident mortality in Guangzhou urban area in winter[J]. Journal of Environment and Health, 2015, **32**(6): 477-481.
- [4] Michiels H, Deutsch F, De Nocker L, *et al.* Human health impacts of PM_{2.5} and NO_x transport air pollution in Belgium[A]. In: Steyn D, Trini C S, (Eds.). Air Pollution Modeling and Its Application XXI. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security[M]. Dordrecht: Springer, 2011. 565-570.
- [5] Bell M L, Belanger K, Ebisu K, *et al.* Prenatal exposure to fine particulate matter and birth weight: variations by particulate constituents and sources[J]. Epidemiology, 2010, **21**(6): 884-891.
- [6] Wang J, Hu Z M, Chen Y Y, *et al.* Contamination characteristics and possible sources of PM₁₀ and PM_{2.5} in different functional areas of Shanghai, China[J]. Atmospheric Environment, 2013, **68**: 221-229.
- [7] Xu L L, Yu Y K, Yu J S, *et al.* Spatial distribution and sources identification of elements in PM_{2.5} among the coastal city group in the western Taiwan Strait region, China[J]. Science of the Total Environment, 2013, **442**: 77-85.
- [8] 林晓辉, 赵阳, 樊孝俊, 等. 南昌市秋季大气 PM_{2.5} 中金属元素富集特征及来源分析[J]. 环境科学, 2016, **37**(1): 35-40.
Lin X H, Zhao Y, Fan X J, *et al.* Enrichment characteristics and source analysis of metal elements in PM_{2.5} in autumn in Nanchang city[J]. Environmental Science, 2016, **37**(1): 35-40.
- [9] 杨卫芬, 银燕, 魏玉香, 等. 霾天气下南京 PM_{2.5} 中金属元素污染特征及来源分析[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(1): 12-17.
Yang W F, Yin Y, Wei Y X, *et al.* Characteristics and sources of metal elements in PM_{2.5} during hazy days in Nanjing[J]. China Environmental Science, 2010, **30**(1): 12-17.
- [10] 熊秋林, 赵文吉, 王皓飞, 等. 北京市春季 PM_{2.5} 中金属元素污染特征及来源分析[J]. 生态环境学报, 2016, **25**(7): 1181-1187.
Xiong Q L, Zhao W J, Wang H F, *et al.* Pollution characteristics and source analysis of metal elements in PM_{2.5} during spring in Beijing[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, **25**(7): 1181-1187.
- [11] 杜金花, 黄晓锋, 何凌燕, 等. 深圳市大气 PM_{2.5} 中金属元素的污染和来源特征[A]. 见: 中国环境科学学会 PM_{2.5} 监测及防治技术高级研讨会论文集[C]. 厦门: 中国环境科学学会, 2012.
- [12] 张晓茹, 孔少飞, 银燕, 等. 亚青会期间南京大气 PM_{2.5} 中重金属来源及风险[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(1): 1-11.
Zhang X R, Kong S F, Yin Y, *et al.* Sources and risk assessment of heavy metals in ambient PM_{2.5} during Youth Asian Game period in Nanjing[J]. China Environmental Science, 2016, **36**(1): 1-11.
- [13] 乔宝文, 刘子锐, 胡波, 等. 北京冬季 PM_{2.5} 中金属元素浓度特征和来源分析[J]. 环境科学, 2017, **38**(3): 876-883.
Qiao B W, Liu Z R, Hu B, *et al.* Concentration characteristics and sources of trace metals in PM_{2.5} during wintertime in Beijing[J]. Environmental Science, 2017, **38**(3): 876-883.
- [14] Liu B S, Li T K, Yang J M, *et al.* Source apportionment and a novel approach of estimating regional contributions to ambient PM_{2.5} in Haikou, China[J]. Environmental Pollution, 2017, **223**: 334-345.
- [15] 杨婧, 郭晓爽, 滕曼, 等. 我国大气细颗粒物中金属污染特征及来源解析研究进展[J]. 环境化学, 2014, **33**(9): 1514-1521.
Yang J, Guo X S, Teng M, *et al.* A review of atmospheric fine particulate matter associated trace metal pollutants in China[J]. Environmental Chemistry, 2014, **33**(9): 1514-1521.
- [16] Gao Y, Guo X Y, Ji H B, *et al.* Potential threat of heavy metals and PAHs in PM_{2.5} in different urban functional areas of Beijing[J]. Atmospheric Research, 2016, **178-179**: 6-16.
- [17] 林晓辉, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 铅同位素示踪研究城市大气 TSP 的来源[J]. 环境化学, 2015, **34**(8): 1567-1568.
- [18] 温先华, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 厦门市大气降尘中重金属生态风险评价与源解析[J]. 地球与环境, 2015, **43**(1): 1-7.
Wen X H, Hu G R, Yu R L, *et al.* Ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in dustfall of Xiamen city, China[J]. Earth and Environment, 2015, **43**(1): 1-7.
- [19] 陈衍婷, 杜文娇, 陈进生, 等. 海西城市群 PM_{2.5} 中重金属元素的污染特征及健康风险评估[J]. 环境科学, 2017, **38**(2): 429-437.
Chen Y T, Du W J, Chen J S, *et al.* Pollution characteristics of heavy metals in PM_{2.5} and their human health risks among the coastal city group along western Taiwan Straits Region, China[J]. Environmental Science, 2017, **38**(2): 429-437.
- [20] 胡起超, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 厦门市冬季大气 PM_{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征[J]. 地球与环境, 2016, **44**(3): 336-341.
Hu Q C, Hu G R, Yu R L, *et al.* Characteristics of organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) in PM_{2.5} in winter in Xiamen city, China[J]. Earth and Environment, 2016, **44**(3): 336-341.
- [21] 张恒, 周自强, 赵海燕, 等. 青奥会前后南京 PM_{2.5} 重金属污染水平与健康风险评估[J]. 环境科学, 2016, **37**(1): 28-34.
Zhang H, Zhou Z Q, Zhao H Y, *et al.* Pollution level and health risk assessment of heavy metals in atmospheric PM_{2.5} in Nanjing before and after the Youth Olympic Games[J]. Environmental Science, 2016, **37**(1): 28-34.
- [22] 周敏, 陈长虹, 王红丽, 等. 上海秋季典型大气高污染过程中有机碳和元素碳的变化特征[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(1): 181-188.
Zhou M, Chen C H, Wang H L, *et al.* The variation characteristics of organic and element carbon during air pollution episodes in autumn in Shanghai, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(1): 181-188.

- [23] 韩力慧, 张鹏, 张海亮, 等. 北京市大气细颗粒物污染与来源解析研究[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(11): 3203-3210.
Han L H, Zhang P, Zhang H L, *et al.* Pollution and source apportionment of atmospheric fine particles in Beijing[J]. China Environmental Science, 2016, **36**(11): 3203-3210.
- [24] 王伟, 孔少飞, 刘海彪, 等. 南京市春节前后大气 $PM_{2.5}$ 中重金属来源及健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(7): 2186-2195.
Wang W, Kong S F, Liu H B, *et al.* Sources and risk assessment of heavy metals in $PM_{2.5}$ around 2014 Spring Festival in Nanjing[J]. China Environmental Science, 2016, **36**(7): 2186-2195.
- [25] Hien P D, Binh N T, Truong Y, *et al.* Comparative receptor modelling study of TSP, PM_2 and PM_{2-10} in Ho Chi Minh City [J]. Atmospheric Environment, 2001, **35**(15): 2669-2678.
- [26] Cheng Y, Lee S, Gu Z L, *et al.* $PM_{2.5}$ and $PM_{10-2.5}$ chemical composition and source apportionment near a Hong Kong roadway [J]. Particuology, 2015, **18**: 96-104.
- [27] Duan J C, Tan J H, Wang S L, *et al.* Size distributions and sources of elements in particulate matter at curbside, urban and rural sites in Beijing [J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, **24**(1): 87-94.
- [28] 国家环境保护局, 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [29] 张秀芝, 鲍征宇, 唐俊红. 富集因子在环境地球化学重金属污染评价中的应用[J]. 地质科技情报, 2006, **25**(4): 65-72.
Zhang X Z, Bao Z Y, Tang J H. Application of the enrichment factor in evaluating of heavy metals contamination in the environmental geochemistry [J]. Geological Science and Technology Information, 2006, **25**(1): 65-72.
- [30] 姚青, 韩素芹, 蔡子颖. 天津采暖期大气 $PM_{2.5}$ 中重金属元素污染及其生态风险评价[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(9): 1596-1600.
Yao Q, Han S Q, Cai Z Y. The pollution characteristics and potential ecological risk of heavy metals in $PM_{2.5}$ during heating season in Tianjin [J]. China Environmental Science, 2013, **33**(9): 1596-1600.
- [31] Taiwo A M, Harrison R M, Shi Z B. A review of receptor modelling of industrially emitted particulate matter [J]. Atmospheric Environment, 2014, **97**: 109-120.
- [32] 洪也, 周德平, 马雁军, 等. 沈阳城区春节期间大气细颗粒物浓度及其来源[J]. 中国粉体技术, 2010, **16**(1): 23-27.
Hong Y, Zhou D P, Ma Y J, *et al.* Concentration and origin of atmospheric fine particles in Shenyang urban during the Spring Festival [J]. China Powder Science and Technology, 2010, **16**(1): 23-27.
- [33] 胡子梅, 王军, 陶征楷, 等. 上海市 $PM_{2.5}$ 重金属污染水平与健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(12): 3399-3406.
Hu Z M, Wang J, Tao Z K, *et al.* Pollution level and health risk assessment of heavy metals in $PM_{2.5}$, Shanghai [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(12): 3399-3406.
- [34] 刘凤玲, 卢霞, 吴梦龙, 等. 南京大气细粒子中重金属污染特征及来源解析[J]. 环境工程学报, 2014, **8**(2): 652-658.
Liu F L, Lu X, Wu M L, *et al.* Pollution characters and source apportionment of heavy metals in $PM_{2.1}$ in Nanjing [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, **8**(2): 652-658.
- [35] Kennish M J. Practical handbook of marine science [M]. Boca Raton: CRC Press, 1994.

CONTENTS

Correlation Analysis of the Urban Heat Island Effect and Its Impact Factors in China	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3987)
Application of Satellite Remote Sensing in NO _x Emission Control	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (3998)
Control Models and Effect Evaluation of Air Pollution in Jing-Jin-Ji Urban Agglomeration	WANG Zhen-bo, LIANG Long-wu, LIN Xiong-bin, <i>et al.</i> (4005)
Pollution Characteristics of Aerosol Number Concentration in Winter and Spring in a Northern Suburb of Nanjing	WU Dan, ZHANG Fan, LIU Gang, <i>et al.</i> (4015)
Source Apportionment and Size Distribution of Aerosols at Lin'an Atmosphere Regional Background Station During Winter	SHI Shuang-shuang, WANG Hong-lei, ZHU Bin, <i>et al.</i> (4024)
Seasonal Variations in Particle Size Distribution and Water-soluble Ion Composition of Atmospheric Particles in Chengdu	TAO Yue-le, LI Qin-kai, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4034)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Quanzhou City	ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4044)
Chemical Characteristics and Sources of Heavy Metals in Fine Particles in Beijing in 2011-2012	ZHOU Xue-ming, ZHENG Nai-jia, LI Ying-hong, <i>et al.</i> (4054)
Pollution Assessment and Source Analysis of Metals in PM _{2.5} in Haicang District, Xiamen City, China	ZHAO Li-si, YU Rui-lian, XU Ling-ling, <i>et al.</i> (4061)
Characteristics and Health Risk Assessment of Metallic Elements in PM _{2.5} Fraction of Road Dust	ZHANG Jing, ZHANG Yan-jie, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4071)
Seasonal Variations in PM ₁₀ and Associated Chemical Species in Jiuxian Mountain in Fujian Province	WEI Ya, LIN Chang-cheng, HU Qing-hua, <i>et al.</i> (4077)
Characteristics of C2-C6 Hydrocarbons During the Winter Air Pollution Period in Beijing Urban Area	LI Yue, WEI Wei, YANG Gan, <i>et al.</i> (4084)
Analysis of Atmospheric Particulate Matter Pollution Characteristics by LIDAR in Beijing During Spring Festival, 2016	SHI Lin-lin, LI Ling-jun, LI Qian, <i>et al.</i> (4092)
Influence Factors and Sensitivity of Ozone Formation in Langfang in the Summer	LI Lei, ZHAO Yu-mei, WANG Xu-guang, <i>et al.</i> (4100)
Impact of Human Activities on Water-Rock Interactions in Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i> (4108)
Distinguishing the Properties and Sources of the Dissolved Organic Matter in Karst Reservoir Water During Winter Using Three-Dimensional Fluorescence Spectrum Technology: A Case Study in Wulixia Reservoir of Guangxi Province	LU Xiao-xuan, PENG Wen-jie, LI Qiang, <i>et al.</i> (4120)
Analysis of Temporal and Spatial Variations in Trace Element Migration in Karst Critical Zone: An Example of Jiguan Cave, Henan	LIANG Sha, YANG Yan, ZHANG Na, <i>et al.</i> (4130)
Eutrophication and Characteristics of Cyanobacteria Bloom in the Summer in Guishi Reservoir	GOU Ting, MA Qian-li, WANG Zhen-xing, <i>et al.</i> (4141)
Spatial and Temporal Distribution of Chlorophyll a and Its Relationship to Algae and Environmental Factors in Aha Reservoir	LUO Yi-fu, LI Lei, LI Qiu-hua, <i>et al.</i> (4151)
Spatio-temporal Variations in Phytoplankton Community in Shahe Reservoir, Tianmuhu, China	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4160)
Spatio-temporal Variations, Contamination and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in the Sediments of Chenghai Lake	YU Zhen-zhen, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (4169)
Characteristics of Phosphorus Output Through Runoff on a Red Soil Slope Under Natural Rainfall Conditions	ZUO Ji-chao, ZHENG Hai-jin, XI Tong-hang, <i>et al.</i> (4178)
Occurrence, Distribution and Health Risk of the Phthalate Esters in Riparian Soil in the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (4187)
Seasonal Distribution, Composition, and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in the Main Stream of the Luanhe River	WANG Yi-zhen, ZHANG Shi-lu, KONG Fan-qing, <i>et al.</i> (4194)
Occurrence and Human Exposure Risk Assessment of Organophosphate Esters in Drinking Water in the Weifang Binhai Economic-Technological Development Area	DONG Zheng, MA Yu-long, LI Jun-qi, <i>et al.</i> (4212)
Contamination Characteristics and Human Exposure to Organophosphate Flame Retardants in Road Dust from Suzhou City	LI Jing, WANG Jun-xia, XU Wan-ting, <i>et al.</i> (4220)
Cancer Risk of Human Intake of PAH-Contaminated Particles Based on Hand-to-Mouth Activities	TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (4228)
Spatio-temporal Evolution of Groundwater Vulnerability Based on Spatial Autocorrelation	LIU Yu, LAN Shuang-shuang, ZHANG Yong-xiang, <i>et al.</i> (4236)
Preparation of Ag-AgI/CN/MA Composites and Their Visible-light Photocatalytic Performance	ZHANG Sai, ZHANG Li-li, HU Chun (4245)
Effect of <i>Eichhornia crassipes</i> on Ammonification and Denitrification Microorganisms in Eutrophic Freshwaters	LI Jie, JIANG Li-juan, WANG Xiao-lin, <i>et al.</i> (4253)
Utilization of Copper (II) Wastewater for Enhancing the Treatment of Chromium (VI) Wastewater in Microbial Fuel Cells	XIONG Xiao-min, WU Xia-yuan, JIA Hong-hua, <i>et al.</i> (4262)
Efficiency and Microecology of a Soil Infiltration System with High Hydraulic Loading for the Treatment of Swine Wastewater	SU Cheng-yuan, LIU Fan-fan, ZHONG Yu, <i>et al.</i> (4271)
Effects of Bacteria on the Growth of and Lipid Accumulation in <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivated in Municipal Wastewater	TU Ren-jie, JIN Wen-biao, HAN Song-fang, <i>et al.</i> (4279)
Enhanced Antibiotic Resistant Bacteria Removal from Wastewater Treatment Plant by Different Disinfection Technologies	LIU Ya-lan, MA Cen-xin, DING He-zhou, <i>et al.</i> (4286)
Coking Wastewater Treatment Efficiency and Comparison of Acute Toxicity Characteristics of the AnMBR-A-MBR and A ² -MBR Processes	ZHU Jia-di, LI Fei-fei, CHEN Li-jun (4293)
Stability of the CANON Process Based on Real-Time Control Technologies	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (4302)
Improving Nitrogen and Phosphorus Removal from Reclaimed Water Using a Novel Sulfur/Iron Composite Filler	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, LIU Si-yuan, <i>et al.</i> (4309)
Start-up and Capacity Enhancement of a Partial Nitrification Pilot Reactor in Continuous Flow	ZHU Qiang, LIU Kai, DONG Shi-yu, <i>et al.</i> (4316)
Quick Start-up Performance of Combined ANAMMOX Reactor Based on Different Inoculated Sludge Types	LÜ Gang, LI Tian, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (4324)
Effect of Two-Stage Aeration on Nitrogen Removal Performance of Aerobic Granular Sludge	WANG Wen-xiao, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (4332)
Construction of a High Efficiency Anaerobic Digestion System for Vinegar Residue	ZHOU Yun-long, XU Zhi-yang, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (4340)
Comparison of Ecological Risk Assessment Based on the Total Amount and Speciation Distribution of Heavy Metals in Soil: A Case Study for Longyan City, Fujian Province	WANG Rui, CHEN Ming, CHEN Nan, <i>et al.</i> (4348)
Heavy Metal Contamination of Soils and Crops near a Zinc Smelter	CHEN Feng, DONG Ze-qin, WANG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4360)
Characteristics and Influencing Factors of CH ₄ Emissions from the Drawdown Area of the Three Gorges Reservoir	CHAI Xue-si, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (4370)
Effects of Plastic Film Mulching on Nitrous Oxide Emissions from a Vegetable Field	FENG Di, HAO Qing-ju, ZHANG Kai-li, <i>et al.</i> (4380)
Effects of Bamboo Biochar on Greenhouse Gas Emissions During the Municipal Sludge Composting Process	XIANG Qiu-jie, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4390)
Removal of Cd from Soil by <i>Aspergillus fumigatus</i> in a Semi-solid Culture	CHEN Yao-ning, WANG Yuan-nan, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4398)
Removal of Chlortetracycline and Morphological Changes in Heavy Metals in Swine Manure Using the Composting Process	WEN Qin-xue, CAO Yong-sen, CHEN Zhi-qiang (4405)
Remediation of Petroleum-Contaminated Soil Using a Bioaugmented Compost Technique	WU Man-li, CHEN Kai-li, YE Xi-qiong, <i>et al.</i> (4412)
Effects of Microbial Diversity on Soil Carbon Mineralization	AN Li-yun, LI Jun-jian, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4420)
Ozone Deposition and Risk Assessment for a Winter Wheat Field; Partitioning Between Stomatal and Non-stomatal Pathways	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (4427)
Progress in the Studies of Precipitation Chemistry in Acid Rain Areas of Southwest China	ZHOU Xiao-de, XU Zhi-fang, LIU Wen-jing, <i>et al.</i> (4438)