

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第8期

Vol.37 No.8

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国地区二次有机气溶胶的时空分布特征和来源分析	陈卓,刘峻峰,陶玮,陶澍 (2815)
中国民用煤燃烧排放细颗粒物中重金属的清单	刘海彪,孔少飞,王伟,严沁 (2823)
基于长时间序列的北京 PM _{2.5} 浓度日变化及气象条件影响分析	苗蕾,廖晓农,王迎春 (2836)
2004~2015年北京市清洁点臭氧浓度变化特征	
程念亮,李云婷,张大伟,陈添,魏强,孙彤卉,王步英,富佳明,何乐为,程兵芬,皮帅,马立光,崔继宪,孟凡 (2847)	
抗战胜利70周年大阅兵期间石家庄大气细颗粒物在线来源解析	
周静博,李治国,路娜,徐曼,杨鹏,高康宁,王建国,靳伟 (2855)	
成都平原大气颗粒物中无机水溶性离子污染特征	蒋燕,贺光艳,罗彬,陈建文,王斌,杜云松,杜明 (2863)
嘉兴市春季一次持续雾霾过程中气象条件与污染物变化特征分析	
沈利娟,王红磊,李莉,吕升,袁婧,张孝寒,章国骏,王翥 (2871)	
泉州市大气降尘中金属元素污染特征及来源解析	张棕巍,胡恭任,于瑞莲,刘贤荣,胡起超,王晓明 (2881)
城市室内灰尘重金属水平、影响因素及健康风险:以贵阳市为例	李晓燕,汪浪,张舒婷 (2889)
桂林市酸雨变化特征及来源分析	郭雅思,于爽,黎泳珊,孙平安,何若雪 (2897)
农田土壤施用系列新型氮肥后气态氮(NH ₃ 和N ₂ O)减排效果比较:以夏玉米季为例	范会,姜姗姗,魏茨,蒋静艳 (2906)
青海南部高原积雪期与生长季高寒草甸土壤CO ₂ 、CH ₄ 和N ₂ O通量的观测	吴建国,周巧富 (2914)
三峡库区香溪河秋末至中冬CO ₂ 和CH ₄ 分压特征分析	张军伟,雷丹,肖尚斌,张成,穆晓辉,刘佳,李迎晨 (2924)
气候变化对于桥水库总磷与溶解氧的潜在影响分析	张晨,刘汉安,高学平,张文娜 (2932)
三峡库区小流域土地利用结构变化及其氮素输出控制效应:以兰陵溪小流域为例	
吴东,黄志霖,肖文发,曾立雄,韩黎阳 (2940)	
入湖河流水质对土地利用时空格局的响应研究:以洱海北部流域为例	项颂,庞燕,储昭升,胡小贞,孙莉,薛力强 (2947)
库湾营养盐循环对三峡库区营养盐运输的影响:以草堂河为例	王晓彤,罗光富,操满,王雨春,汪福顺,邓兵 (2957)
农田溪流人工深潭地貌格局暂态存储特征分析	李如忠,黄青飞,钱靖,殷晓曦,韦林 (2964)
农田排水沟渠水体-底泥中溶质氮分布特征试验研究	李强坤,胡亚伟,宋常吉,彭聪 (2973)
三峡库区典型消落带土壤微生物生物量碳、氮的变化特征及其影响因素探讨	
柴雪思,雷利国,江长胜,黄哲,范志伟,郝庆菊 (2979)	
重金属在河口区潮汐界面与盐度界面响应规律研究	刘静,郑丙辉,刘录三,马迎群,林岗璇,汪星,夏阳 (2989)
深圳地区全氟辛酸磺酸的环境多介质迁移和归趋行为研究	崔晓宇,张鸿,罗骥,张若冰 (3001)
柘林湾表层沉积物中有机氯农药的分布特征及生态风险评价	卫亚宁,潘佳钊,宋玉梅,郭鹏然,王毅 (3007)
北运河水体中荧光溶解性有机物空间分布特征及来源分析	陈永娟,胡玮璇,庞树江,王晓燕 (3017)
昌邑滨海湿地沉积物的放射性核素水平与环境指示意义	王启栋,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁,曹磊 (3026)
甯醇对南山老龙洞地下水粪便污染的指示	廖昱,孙玉川,王尊波,梁作兵,张远瞩 (3034)
漳沱河冲洪积扇地下水中酚酸酯的污染现状与分布特征	昌盛,赵兴茹,刘琰,耿梦娇,肖肖翠 (3041)
雨季不同土地利用下表层岩溶泉中脂肪酸来源分析	张媚,孙玉川,谢正兰,余琴,赵瑞一,梁作兵 (3049)
Zn系LDHs覆膜改性人工湿地沸石基质除磷机制	张翔凌,黄华玲,郭露,陈巧珍,阮聪颖,冷玉洁 (3058)
Ce ³⁺ 与Cu ²⁺ 协同强化芬顿体系氧化苯酚的效能与机制研究	张剑桥,迟惠中,宋阳,罗从伟,江进,马军 (3067)
Pt/生物炭电极反应器处理水中腐殖酸的研究	丁文川,向星光,曾晓岚,厉晓宇,梁国强, M. M. Mian (3073)
石墨烯-TiO ₂ 光催化剂复合板制备及其对五氯酚的催化降解	徐琪,周泽宇,王洪涛 (3079)
单偶氮染料AY17的光催化降解动力学及机制	阳海,魏宏庆,胡乐天,胡倩,阳立平,刘华杰,易翔,易兵 (3086)
硫自养反硝化处理高含氟光伏废水可行性	马航,朱强,朱亮,李祥,黄勇,魏凡凯,杨朋兵 (3094)
膜曝气-生物膜反应器生物强化处理阿特拉津废水运行性能	刘春,于长富,张静,陈晓轩,张磊,杨景亮 (3101)
ABR工艺ANAMMOX耦合短程硝化协同脱氮处理城市污水	吴鹏,张诗颖,宋吟玲,徐乐中,沈耀良,张婷 (3108)
活性污泥厌氧Fe(III)还原氨氧化现象初探	李祥,林兴,杨朋兵,黄勇,刘恒蔚 (3114)
低浓度氨氮废水单级自养脱氮EGSB反应器的快速启动	顾书军,方芳,李凯,刘勇,郭劲松,陈猷鹏,蒋甫阳 (3120)
超低溶解氧条件下的EBPR系统除磷性能	马娟,宋璐,俞小军,李璐,孙雷军,孙洪伟,李光银 (3128)
活性污泥表面性质对絮凝沉降性能与出水悬浮物的影响	何志江,赵媛,张源凯,王洪臣,齐鲁,尹训飞,张晓军 (3135)
山东省典型金矿区土壤重金属空间特征分析与环境风险评估	
王菲,吴泉源,吕建树,董玉龙,曹文涛,康日斐,曹见飞 (3144)	
电子垃圾拆解区土壤重金属空间异质性及分布特征	赵科理,傅伟军,叶正钱,戴巍 (3151)
我国18种不同理化性质的土壤对硒酸盐的吸附解吸作用研究	冯璞阳,李哲,者渝芸,黄杰,梁东丽 (3160)
流动搅动法研究针铁矿对亚砷酸盐的吸附特征	李鑫,杨军,饶伟,王代长,杜光辉,化党领,刘世亮,刘红恩 (3169)
聚羧基铝柱撑硅藻土的制备及其对水溶液中Cu ²⁺ 、Zn ²⁺ 的吸附特性	朱健,雷明婧,王平,张伟丽,陈仰 (3177)
新型污泥基吸附材料制备及其氨氮去除性能评价	王文东,刘荟,张银婷,杨生炯 (3186)
纳米复合水凝胶的制备及其对重金属离子的吸附	朱倩,李正魁,张一品,韩华杨,王浩 (3192)
鼠李糖脂与β-环糊精复合提取预测污染土壤中PAHs的生物有效性	
张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,王芳,王代长,蒋新 (3201)	
不同磷水平下丛枝菌根真菌对纳米氧化锌生物效应的影响	景新新,苏志忠,邢红恩,王发园,石兆勇,刘雪琴 (3208)
中美水生生物基准受试物种敏感性差异研究	王晓南,闫振广,余若祯,王婉华,陈丽红,刘征涛 (3216)
贫营养和痕量抗生素对质粒抗生素抗性适应度代价的影响	林文芳,陈胜,万堃,王春明,林惠荣,于鑫 (3224)
不同氨水平下间作对玉米土壤硝化势和氨氧化微生物数量的影响	吕玉,周龙,龙光强,汤利 (3229)
《环境科学》征订启事(3025) 《环境科学》征稿简则(3057) 信息(3072, 3085, 3143)	

泉州市大气降尘中金属元素污染特征及来源解析

张棕巍¹, 胡恭任¹, 于瑞莲^{1*}, 刘贤荣¹, 胡起超¹, 王晓明²

(1. 华侨大学化工学院环境科学与工程系, 厦门 361021; 2. 核工业北京地质研究院分析测试研究中心, 北京 100029)

摘要: 测定了泉州市不同功能区大气降尘中 23 种金属元素的含量, 采用多种方法对其富集程度、污染水平及生态风险进行评价, 并用多元统计分析法结合 Pb、Sr 同位素示踪对污染来源进行解析。结果表明: 泉州市大气降尘中不同金属含量空间分布差异较大; 富集因子和地累积指数表明, Cd、Hg、Zn、Ca、Pb、Cu、Ni、Sr 的富集程度及污染水平相对较高; 生态风险指数显示, 所有功能区的多元素综合潜在生态风险程度极高, 由高到低顺序为工业区 > 交通繁忙区 > 商业区 > 居住区 > 风景区 > 农业区; Cd 和 Hg 的潜在生态危害程度极高, 二者对综合潜在生态风险指数的贡献达 95.56%。多元统计分析结果表明, V、Fe、Ba、Bi、Ni、Sr、Pb、Cs、Sc、Zn、Cd 主要来源于工业污染和交通排放, Th、U、Rb、Y、Ti 主要来源于土壤尘, Li、Mn、Cu、Hg、Cr、Co、Ca 主要来源于燃煤。铅同位素三元混合模型计算得到降尘中铅来源主要为土壤母质 (29.41% ~ 64.00%)、燃煤尘 (22.53% ~ 60.48%) 和汽车尾气 (3.13% ~ 13.47%); ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 和 1/Sr 分布图显示降尘中锶来源主要为燃煤尘和汽车尾气。

关键词: 泉州市; 大气降尘; 金属元素; 源解析; Pb、Sr 同位素

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)08-2881-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2016.08.008

Characteristics and Source Apportionment of Metals in the Dustfall of Quanzhou City

ZHANG Zong-wei¹, HU Gong-ren¹, YU Rui-lian^{1*}, LIU Xian-rong¹, HU Qi-chao¹, WANG Xiao-ming²

(1. Department of Environmental Science and Engineering, College of Chemical Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 2. Center of Analysis, Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China)

Abstract: Concentrations of 23 metal elements in the dustfall collected from different functional areas of Quanzhou City, China, were determined. Several methods were applied to assess the enrichment degree, pollution level and potential ecological risk of the above elements. The sources of the above elements were analyzed based on the multivariate statistical analysis combining Pb and Sr isotopic tracing technology. The results showed that the concentrations of metals in the dustfall presented significant spatial difference. The results of enrichment factor and geo-accumulation index indicated that Cd, Hg, Zn, Ca, Pb, Cu, Ni and Sr showed relatively higher enrichment degree and pollution level. The results of ecological risk index showed that the comprehensive ecological risk of heavy metals was very high in the dustfall of all functional areas with the sequence of industrial area > heavy traffic area > commercial area > residential area > scenic area > agricultural area. Cd and Hg showed extremely high potential ecological risk, and they contributed 95.56% to the comprehensive potential ecological risk index. The multivariate statistical analysis demonstrated that the elements of V, Fe, Ba, Bi, Ni, Sr, Pb, Cs, Sc, Zn, Cd were mainly from industrial and vehicle emissions; Th, U, Rb, Y, Ti were mainly derived from soil dust; Li, Mn, Cu, Hg, Cr, Co, Ca were mainly from coal combustion. The contribution ranges of parent soil, coal combustion and vehicle emission to the Pb in the dustfall were 29.41% - 64.00%, 22.53% - 60.48% and 3.13% - 13.47%, respectively, as calculated by a ternary hybrid model; The plots of ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr vs 1/Sr showed that Sr in the dustfall was dominated by coal combustion and vehicle emission.

Key words: Quanzhou City; dustfall; metal element; source apportionment; Pb and Sr isotopes

大气降尘是城市主要污染因子之一^[1~3]。随着城市化不断发展, 城市大气降尘量及降尘中各种污染物不断增加。大气降尘可作为载体, 将其携带的重金属等污染物输入到地表, 影响陆地及水体生态系统^[4]。重金属不能被微生物降解, 在环境中具有累积性, 并可通过食物链威胁人们的健康与安全, 对生态环境构成潜在威胁^[5~7]。

泉州市位于我国福建省东南沿海, 是海峡西岸经济繁荣带和厦漳泉经济开发带的重要组成部分。随着泉州市经济的迅速发展, 化石燃料的消耗量不断增加; 同时, 汽车保有量的激增使机动车尾气排放量剧增, 泉州市空气质量呈下降趋势。目前对泉

州市大气降尘中重金属元素的污染特征、生态风险评价等方面开展了一些研究, 得出 Cu、Zn、Pb、Cd、Cr 等的污染较严重^[8,9]。然而以上研究中涉及的重金属元素种类不多且未对其具体来源及其贡献率开展系统地深入研究, 为弥补这些方面的不足, 本文分析了泉州市不同功能区大气降尘中的 23 种金属元素含量及铅锶同位素组成, 利用富集因子法、地累积

收稿日期: 2016-01-08; 修订日期: 2016-03-29

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 (2014J01159); 华侨大学 2014 级研究生科研创新能力培育项目 (435)

作者简介: 张棕巍 (1992 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境监测与评价, E-mail: 17750669760@163.com

* 通讯联系人, E-mail: ruiliany@hqu.edu.cn

指数法和潜在生态风险指数法对金属元素富集程度、污染水平及生态风险进行评价,用多元统计分析结合铅锶同位素示踪进行污染源解析,以期为泉州市大气污染防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集和预处理

2007 年 11 月~2008 年 1 月,在天气保持晴朗干燥至少 3 d 后,选择晴朗无大风的天气,在泉州市 6 大不同功能区布设采样点,共采集 33 个大气降尘样品,包括:交通繁忙区(J2~J4、J15、J3-1、J16),商业区(J8~J12、J14),工业区(J17、J18、J22、J231~J233、J40、J41),居住区(J1、J5~J7、J13、J27、J30、J52、J53),风景区(J19、J34)和农业区(J38、J39)。对每个采样点,在高度为 1.5~2.0 m 的一定范围内(半径约 10 m 的范围)用毛刷扫集玻璃、物件表面上的降尘于洁净信封中。所采集的样品在 35℃ 烘干,过 150 目尼龙筛,筛下样装入洁净自封袋保存备用。

1.2 样品的分析测定

降尘中的 Hg 采用王水进行水浴消解,用原子荧光光谱仪(AFS, AF-640 型,北京瑞利公司)测定;其它金属元素采用 HCl + HNO₃ + HF 微波消解,Fe、Mn 用原子吸收光谱仪(AAS, TAS-986 型,北京普析通用公司)测定,其它元素(Zn、Ni、Pb、Cu、Cr、V、Co、Cd、Sc、Li、Rb、Sr、Ba、Y、Bi、Th、U、Cs、Ti 和 Ca)用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, ELEMENT XR 型,德国 Finnigan-MAT 公司)测定。实验过程中,每批样品处理时,均随机抽取一个样品作 3 次平行实验,同时做全程试剂空白,并以土壤标准样(ESS-3,中国环境监测总站)做全程质量监控。Hg 测定结果的相对标准偏差(RSD)小于 2.5%,Fe、Mn 测定结果的 RSD 均小于 5.0%,其它金属元素测定结果的 RSD 均小于 10.0%。

Pb、Sr 同位素比值分析中,样品的处理及测定均在核工业北京地质研究院分析测试研究中心同位素超净实验室中完成。同位素分离、纯化及测定方法见文献[10]。Pb、Sr 同位素比值的测定精度分别优于 0.005%、0.001%,满足 Pb、Sr 同位素示踪所要求的精度。

2 结果与讨论

2.1 泉州市大气降尘中金属元素含量水平

泉州市不同功能区大气降尘金属元素含量见表

1。降尘中不同金属元素含量有较大差异,Cd、Hg、Co、Ni、Zn、Pb、Ca、V、Cr、Cu、Bi 等的变异系数(CV)较大,说明它们的来源较复杂。V、Ni、Zn、Sr、Cd、Bi、Fe 在工业区的平均含量高于其他功能区,这主要与工业区内工业废气及粉尘的排放有关。我国目前还没有针对大气降尘中金属含量的标准,本文用福建省海岸带土壤元素背景值^[11]作对比。Cd、Hg、Zn、Ca、Pb、Cu、Ni、Sr 的平均含量分别是背景值的 46.7、29.5、11.7、7.6、6.6、5.5、4.9 和 4.3 倍,说明它们的富集程度相对较高。

2.2 降尘中金属元素污染评价

2.2.1 富集因子法

富集因子(EF)可用以评价元素富集程度,也可用来区分污染源。其计算公式为:

$$EF = (C_i/C_n)_{\text{sample}} / (C_i/C_n)_{\text{background}} \quad (1)$$

式中, C_i 为金属元素 i 的含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), C_n 为参比元素的含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。根据参比元素选择条件^[12],可用作参比元素的有 Al、Zr、Li、Ti、Sc、Cs、Ca、Fe、Rb 等,本研究以 Li、Ti、Sc、Cs、Fe 为候选参比元素,对候选参比元素与其余元素之间进行相关性分析,发现 Ti、Fe 与其余元素的相关性相对较好,而 Ti 的 CV 相对更小,且其化学稳定性较好,因此本文选 Ti 作为参比元素。若大气颗粒物中某元素的 EF 接近于 1,可认为土壤尘(自然源)是主导源;若 $EF > 5$,则可认为非土壤源(即人类活动)对其有显著贡献^[13]。

表 2 为泉州市各功能区大气降尘中金属元素的平均 EF 值。Cd 和 Hg 在各功能区的 EF 值均较高(13.15~93.74),说明这两元素富集较严重。Cd 在不同功能区大气降尘中的 EF 值顺序:工业区(93.74) > 居住区(86.75) > 风景区(68.71) > 商业区(52.30) > 交通繁忙区(46.70) > 农业区(23.70),最大值出现在居住区的采样点 J5(235.95),这可能与该采样点附近大量建筑活动(建筑设备和施工车辆)有关。风景区两个采样点位于清源山,Cd 的 EF 值偏高可能与山中交通干道产生的扬尘和汽车尾气有关。Hg 在不同功能区大气降尘中的 EF 值顺序:交通繁忙区(59.91) > 商业区(55.60) > 工业区(48.50) > 居住区(30.28) > 风景区(23.49) > 农业区(13.15)。Zn 在各功能区也均有富集,其平均 EF 值顺序:工业区(39.68) > 商业区(11.62) > 交通繁忙区(10.81) > 居住区(10.64) > 风景区(6.14) > 农业区(5.58)。Pb 在除农业区外的其他功能区均有富集,尤其是居住区

和交通繁忙区($EF > 10$). Cu、Ca、Ni 在交通繁忙区、商业区、工业区和居住区均存在一定富集(EF 值 6.05 ~ 15.82). 此外,Cr 在交通繁忙区(6.74)和商业区(5.04),Sr 在商业区(5.70)、工业区(9.26)和居住区(6.70),Bi 在工业区(7.25)、居住区(5.27)和农业区(6.63)存在一定富集; Co 只在交通繁忙区存在一定富集($EF = 8.05$). 其余元素在

各功能区均没有富集. 不同功能区的大气降尘中金属元素富集程度有所不同. 总体来看,农业区受到的人为污染程度最小.

2.2.2 地累积指数法

Müller^[14]于1969年提出地累积指数(I_{geo})法,用于研究水体沉积物中金属元素污染程度,现被广泛用于沉积物、土壤及街道灰尘的金属污染评价研

表 1 泉州市不同功能区大气降尘中金属元素含量/ $mg \cdot kg^{-1}$
Table 1 Concentrations of metals in the dustfall from different functional areas in Quanzhou City/ $mg \cdot kg^{-1}$

位置	样号	Li	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr
交通繁忙区	J2	24.07	8.682	3 220	58.46	286.7	1 206	23.35	74.38	174.7	666.5	129.7	223.2
	J3	27.46	8.702	3 045	62.59	104.4	944.0	14.07	64.01	111.3	1 108	124.7	240.4
	J4	25.14	7.312	3 137	49.18	186.7	1124	12.07	102.1	224.0	722.4	113.6	249.8
	J15	23.60	9.216	3 375	61.70	510.1	1311	14.38	93.63	169.6	543.1	144.8	202.3
	J3-1	24.00	9.577	3 167	51.30	108.0	896.7	147.0	78.04	211.9	521.8	122.9	205.6
	J16	23.85	9.452	3 220	51.38	75.82	904.0	137.1	68.32	214.3	528.1	125.9	194.5
	平均	24.69	8.824	3 194	55.77	212.0	1064	57.99	80.09	184.3	681.7	126.9	219.3
商业区	J8	32.78	8.741	3 380	63.32	195.7	1134	12.98	102.9	196.6	616.5	125.6	270.0
	J9	25.30	8.562	3 248	65.08	122.5	1343	18.44	90.42	293.6	1 187	123.7	273.1
	J10	23.52	7.336	3 178	63.52	168.8	958.0	9.721	92.28	188.6	836.2	115.2	230.4
	J11	33.47	8.114	2 995	64.00	162.0	977.5	16.79	84.15	186.3	647.7	137.1	239.3
	J12	23.15	7.630	2 927	55.41	159.3	960.1	11.04	62.25	118.2	574.9	119.0	230.6
	J14	28.76	9.598	2 947	57.22	105.1	1 124	120.5	78.46	163.3	484.2	122.8	276.1
	平均	27.83	8.330	3 112	61.43	152.2	1 083	31.58	85.07	191.1	724.4	123.9	253.3
风景区	J19	12.74	7.305	2 516	47.10	10.15	904.9	6.410	3.684	15.53	101.4	140.9	134.6
	J34	17.84	7.747	1 997	54.50	21.31	782.9	4.496	11.51	30.13	406.0	135.1	161.9
	平均	15.29	7.526	2 257	50.80	15.73	843.9	5.453	7.596	22.83	253.7	138.0	148.2
工业区	J17	26.26	9.083	3 525	39.11	93.80	750.0	9.693	51.99	157.1	3357	103.4	341.4
	J18	25.46	9.413	3 800	39.63	87.86	818.2	10.39	46.03	136.1	3569	100.6	333.6
	J22	28.18	9.226	2 363	105.6	178.6	1 026	14.22	163.9	110.2	610.0	88.85	350.8
	J231	21.24	10.48	4 462	252.0	237.5	1 300	27.49	318.6	121.6	1 725	163.8	729.4
	J232	10.70	11.97	2 163	72.72	35.23	627.5	17.33	81.03	121.7	4 068	122.4	178.5
	J233	27.56	13.95	2 539	235.4	81.37	1 354	25.33	248.2	117.7	3766	101.7	404.2
	J40	28.70	10.09	1 947	58.30	25.33	1 346	8.060	44.81	32.19	369.4	29.75	258.6
	J41	23.56	9.746	1 979	79.28	39.53	1 239	11.13	56.17	53.55	452.6	65.75	369.8
	平均	23.96	10.49	2 847	110.2	97.40	1 058	15.45	126.3	106.3	2240	97.01	370.8
居住区	J27	25.40	8.786	3 044	157.2	149.9	1 200	9.588	149.1	204.9	708.0	160.5	518.8
	J30	20.46	8.526	2 025	71.64	53.95	776.1	8.020	22.29	98.15	831.8	112.2	249.0
	J13	28.77	6.986	2 424	49.00	307.5	700.0	15.03	232.6	155.9	816.9	115.8	211.9
	J52	25.36	7.006	1 824	64.60	62.07	630.7	9.226	50.73	75.83	295.0	91.1	174.7
	J53	24.24	9.026	1 859	85.32	68.41	1 405	12.08	65.15	73.59	604.6	95.7	257.2
	J1	23.09	7.240	4 370	45.89	206.5	1 419	10.61	101.8	62.17	582.5	117.9	175.8
	J7	24.12	6.867	2 852	47.01	90.09	954.3	9.481	41.27	59.42	448.0	124.6	153.1
	J5	26.80	10.66	3 376	68.09	80.20	1 233	11.60	41.37	56.12	229.0	144.0	285.0
	J6	25.98	9.702	3 309	60.42	71.76	1 282	13.82	48.47	69.90	265.3	153.5	227.0
	平均	24.91	8.311	2 787	72.13	121.2	1 067	11.05	83.63	95.11	531.2	123.9	250.3
农业区	J38	28.24	10.55	2 698	40.30	16.33	1 209	4.608	15.39	15.53	227.2	77.09	131.2
	J39	28.86	9.786	2 220	106.3	37.03	1 186	9.022	14.51	30.75	306.6	143.1	116.0
	平均	28.55	10.17	2 459	73.31	26.68	1 198	6.815	14.95	23.14	266.90	110.08	123.61
土壤背景值		20.80	11.90	4 200	79.70	40.70	507.0	9.480	17.40	22.40	83.60	160.0	60.00
Min		10.70	6.867	1 824	39.11	10.15	627.5	4.496	3.684	15.53	101.4	29.75	116.0
Max		33.47	13.95	4 462	252.0	510.1	1419	147.0	318.6	293.6	4 068	163.8	729.4
Mean		24.81	9.001	2 883	75.23	125.4	1061	23.79	84.83	122.7	975.0	118.0	260.6
CV/%		20.03	17.21	23.39	65.22	59.10	21.56	88.66	84.52	55.70	113.3	23.17	47.37

续表 1

位置	样号	Y	Cd	Cs	Ba	Pb	Bi	Th	U	Fe	Hg	Ca
交通繁忙区	J2	28.98	1.846	3.282	723.0	338.6	1.010	15.90	5.495	26 583	1.565	44 590
	J3	27.44	2.045	4.169	713.4	553.1	1.617	13.37	4.931	22 251	4.163	64 420
	J4	22.09	1.691	3.273	1165	174.9	1.650	9.165	3.420	27 302	1.977	89 936
	J15	31.42	1.512	3.713	745.9	189.4	1.214	15.20	5.117	31 194	4.128	19 415
	J3-1	30.82	2.417	3.571	705.3	328.2	1.721	15.96	5.230	24 205	0.602	64 420
	J16	30.70	3.246	3.502	699.7	272.4	1.363	15.28	5.179	22 021	4.814	22 823
	平均	28.57	2.126	3.585	792.0	309.4	1.429	14.15	4.895	25 593	2.875	50 934
商业区	J8	27.62	2.432	4.222	791.6	231.6	2.508	15.15	5.422	25 199	0.634	64 040
	J9	30.96	1.670	3.428	1039	468.8	2.167	15.62	5.598	40 693	5.113	67 170
	J10	22.99	2.061	3.282	683.7	209.3	1.718	9.581	3.422	21 694	4.557	43 697
	J11	25.27	1.729	4.498	848.9	161.0	2.964	13.32	4.350	29 565	0.130	32 700
	J12	25.51	1.429	3.231	714.9	166.6	1.454	11.55	3.561	26 996	0.214	41 947
	J14	24.77	4.522	3.387	599.8	250.8	3.022	9.404	4.233	20 854	4.985	74 696
	平均	26.19	2.307	3.675	779.7	248.0	2.305	12.44	4.431	27 500	2.605	54 042
风景区	J19	20.78	2.222	1.608	477.7	40.88	0.802	22.70	5.740	24 590	0.543	5 558
	J34	26.82	2.157	8.800	773.5	153.1	1.360	16.21	6.892	22 545	0.976	551
	平均	23.80	2.190	5.204	625.6	96.99	1.081	19.46	6.316	23 568	0.760	3 054
工业区	J17	19.92	5.281	4.939	857.0	204.9	3.528	26.78	4.455	28 026	1.970	8 098
	J18	21.60	5.199	4.493	868.0	213.1	3.487	26.86	6.156	42 028	1.450	63 944
	J22	15.16	2.536	5.310	1 028	149.8	3.156	10.34	3.432	66 631	0.663	12 402
	J231	36.10	3.494	2.301	1 688	833.0	3.102	20.46	7.486	145 584	0.918	9 056
	J232	17.86	6.790	3.620	793.3	169.4	1.448	11.52	3.348	32 130	3.638	11 327
	J233	21.10	3.466	4.672	1 839	268.8	4.470	10.31	3.544	105 228	3.872	13 268
	J40	17.95	1.390	2.254	569.3	89.84	2.056	4.563	1.916	48 010	0.503	20 100
	J41	16.06	1.528	3.924	812.1	111.7	2.770	7.739	3.188	57 643	1.837	78 341
	平均	20.72	3.710	3.939	1 057	255.1	3.002	14.82	4.190	65 660	1.856	27 067
居住区	J27	32.46	3.820	9.086	1 866	573.6	5.972	19.46	7.120	125 489	2.384	14 494
	J30	21.16	2.966	5.616	689.9	290.2	1.820	13.07	4.140	25 942	0.503	44 836
	J13	19.95	3.954	4.051	911.2	291.0	1.264	8.265	3.432	7 585	4.730	12 768
	J52	14.78	1.512	2.070	684.1	296.8	1.610	13.12	3.890	22 155	0.125	35 298
	J53	17.44	2.726	5.198	922.7	389.4	3.456	12.84	4.720	58 850	0.186	31 850
	J1	21.63	1.615	3.038	873.7	327.0	0.922	9.030	4.020	28 599	0.665	30 564
	J7	19.91	1.290	3.770	693.1	143.8	0.995	9.004	3.893	17 912	1.195	20 817
	J5	38.29	11.38	3.848	650.8	271.6	0.967	19.24	5.779	47 714	0.481	75 777
	J6	34.87	1.040	3.417	719.0	118.5	0.868	18.18	5.659	44 726	0.740	28 122
	平均	24.50	3.367	4.455	890.0	300.2	1.986	13.58	4.739	42 108	1.223	32 725
农业区	J38	11.49	0.468	3.402	518.1	51.92	1.574	10.75	2.690	31 253	0.601	9 053
	J39	14.10	1.118	4.324	1 641	127.1	3.192	11.66	3.702	59 878	0.381	60.70
	平均	12.80	0.793	3.863	1 080	89.53	2.383	11.20	3.196	45 566	0.491	4 557
土壤背景值		23.00	0.060	6.440	423.0	39.00	0.640	27.28	4.660	34 000	0.063	4 600
Min		11.49	0.468	1.608	477.7	40.88	0.802	4.563	1.916	7 585	0.125	60.70
Max		38.29	11.38	9.086	1 866	833.0	5.972	26.86	7.486	145 584	5.113	89 936
Mean		23.88	2.805	4.039	888.0	256.4	2.158	13.99	4.580	41 245	1.856	35 035
CV/%		27.88	74.58	38.41	40.13	61.42	53.94	37.50	28.94	73.93	83.70	68.56

究,其计算公式:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left[\frac{C_i}{k \times B_i} \right] \tag{2}$$

式中, C_i 为降尘中重金属元素 i 的实测含量; B_i 为 i 的环境背景值,本研究采用福建省海岸带土壤元素背景值^[11]. 考虑造岩运动引起的背景值波动设定了常数 k (一般取 $k=1.5$).

根据 I_{geo} 值,元素污染水平可分为如下 6 级: I_{geo}

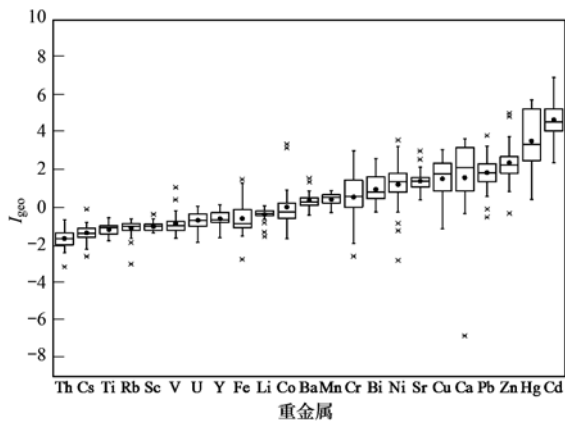
<0 ,无污染; $0 \leq I_{\text{geo}} < 1$,轻污染; $1 \leq I_{\text{geo}} < 2$,偏中度污染; $2 \leq I_{\text{geo}} < 3$,中度污染; $3 \leq I_{\text{geo}} < 4$,偏重度污染; $4 \leq I_{\text{geo}} < 5$,重度污染; $I_{\text{geo}} \geq 5$,严重污染.

图 1 为泉州市大气降尘中各金属元素的 I_{geo} 分布. 将各元素平均 I_{geo} 值与 I_{geo} 分级标准对比可知, Th、Cs、Ti、Rb、Sc、V、U、Y、Fe、Li 没有受到污染; Co、Ba、Mn、Cr、Bi 污染程度较轻; Ni、Sr、Cu、Ca、Pb 受到偏中度污染; Zn 受到了中度污染;

表 2 泉州市各功能区大气降尘金属富集因子

Table 2 Enrichment factors of metals in the dustfall from different functional areas of Quanzhou City						
元素	交通繁忙区	商业区	风景区	工业区	居住区	农业区
Li	1.56	1.81	1.41	1.85	1.95	2.37
Sc	0.97	0.95	1.20	1.43	1.13	1.47
V	0.92	1.04	1.21	2.10	1.49	1.66
Cr	6.74	5.04	0.76	3.35	4.56	1.17
Mn	2.75	2.88	3.11	3.41	3.30	4.07
Co	8.05	4.64	1.06	2.51	1.88	1.28
Ni	6.05	6.57	0.87	10.69	7.60	1.48
Cu	10.81	11.43	1.99	7.04	6.96	1.84
Zn	10.81	11.62	6.12	39.68	10.64	5.58
Rb	1.04	1.05	1.62	0.90	1.22	1.22
Sr	4.82	5.70	4.71	9.26	6.70	3.53
Y	1.63	1.54	1.98	1.36	1.64	0.97
Cd	46.70	52.30	68.71	93.74	86.75	23.70
Cs	0.73	0.77	1.65	0.98	1.13	1.05
Ba	2.47	2.48	2.87	3.82	3.37	4.62
Pb	10.53	8.52	5.00	8.77	12.75	4.12
Bi	2.95	4.88	3.28	7.25	5.27	6.63
Th	0.68	0.61	1.32	0.76	0.80	0.71
U	1.38	1.28	2.58	1.30	1.62	1.20
Fe	0.99	1.09	1.30	2.93	1.94	2.38
Hg	59.91	55.60	23.49	48.50	30.28	13.15
Ca	14.74	15.82	1.13	9.90	11.55	1.54

Hg 则污染偏重,Cd 达到了重度污染级别,其中部分采样点降尘中 Cd、Hg、Zn 的 I_{geo} 值超过 5,达到严重污染程度.



箱的两端分别代表上、下四分位数,箱中的横线
和 · 分别代表中位数和平均值,箱须为最大值
和最小值的变化范围,* 表示离散的异常值

图 1 泉州市大气降尘中金属元素地累积指数 (I_{geo})
评价结果箱形图

Fig. 1 Box plot of I_{geo} for evaluation of metals
in the dustfall of Quanzhou City

2.2.3 潜在生态危害指数法

潜在生态危害指数法是 Hakanson^[15] 根据毒物性质及环境行为特点,从沉积学角度提出的对土壤或沉积物中毒物污染进行评价的方法. 根据这一方

法,某一区域大气降尘中第 i 种重金属的潜在生态危害系数 (E_r^i) 及沉积物中多种重金属的潜在危害指数 (RI) 可分别表示为:

$$E_r^i = T_r^i \cdot \frac{C^i}{C_n^i} \tag{3}$$

$$RI = \sum_{i=1}^m E_r^i = \sum_{i=1}^m \left(T_r^i \cdot \frac{C^i}{C_n^i} \right) \tag{4}$$

式中, C^i 为大气降尘中金属元素 i 的实测浓度; C_n^i 为元素 i 的背景值, 本文选用福建省海岸带土壤元素背景值; T_r^i 为 i 的毒性系数, 反映其毒性水平和生物对其敏感程度. 采用该法评价泉州市不同功能区大气降尘中 V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb、Hg、Ti 的潜在生态危害水平, 上述各元素的毒性系数分别取 2、2、1、5、5、5、1、30、5、40、1^[16].

本研究根据元素种类及其毒性系数对各生态风险程度所对应的 RI 限值, 依据文献 [8] 进行适当调整后的评价标准见表 3.

泉州市大气降尘中各元素的平均 E_r^i 表现为 Cd (1 402) > Hg (1 178) > Pb (32.87) > Cu (27.40) > Ni (24.38) > Co (12.55) > Zn (11.66) > Cr (6.16) > Mn (2.09) > V (1.89) > Ti (0.69). 各元素对大气降尘中重金属潜在生态风险指数贡献见图 2. 可见, Cd 和 Hg 的贡献较大 (分别为 51.93% 和

43.63%)。不同功能区大气降尘重金属的 RI 值范围为 640.1~6 073.1,均达到了极高生态风险程度,不同功能区大气降尘中多元素综合潜在生态风险顺序为:工业区(3 171.7) > 交通繁忙区(3 045.6) > 商业区(2 943.9) > 居住区(2 566.6) > 风景区(1 607.0) > 农业区(742.1)。

表 3 潜在生态风险评价指标和等级划分

Table 3 Evaluation index and grade division of potential ecological risk

单元素潜在生态危害系数(E_i^i)	多元素潜在生态危害指数(RI)	潜在生态风险程度
<40	<110	生态危害低
40~80	110~220	生态危害中等
80~160	220~440	生态危害较高
160~320	≥440	生态危害高
≥320		生态危害极高

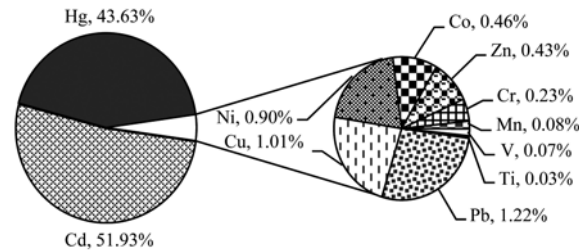


图 2 泉州市大气降尘中不同重金属对潜在生态风险指数的贡献

Fig. 2 Contribution of heavy metals to the potential ecological risk index in the dustfall of Quanzhou City

2.3 金属元素污染源分析

2.3.1 聚类分析

聚类分析是对类似的对象进行分类组合的分析过程,可用于重金属来源判别。采用离差平方和法(Ward's method)和欧氏距离法(Euclidean distance)将泉州市大气降尘中金属元素进行 R 型变量聚类分析,结果如图 3 所示。降尘中金属可分为三类:第一类为 V、Fe、Ba、Bi、Ni、Sr、Pb、Cs、Sc、Zn、Cd,其中 V、Ni 多用于工业生产^[17](如电镀、合金生产和钢铁制造等),Zn 为冶金尘特征元素,同时橡胶轮胎的磨损也会产生 Zn^[18],Pb 和 Cd 是机动车尾气中的重要元素^[19]。故第一类代表工业和交通污染源;第二类为 Th、U、Rb、Y、Ti,变异系数小且几乎都无富集,代表土壤自然源;第三类为 Li、Mn、Cu、Hg、Cr、Co、Ca,其中 Cr、Mn、Hg、Co 是典型的燃煤排放物^[20,21],故第三类代表燃煤源。综上可知,工业、交通、燃煤和土壤尘是泉州市大气降尘中金属元素的主要来源。

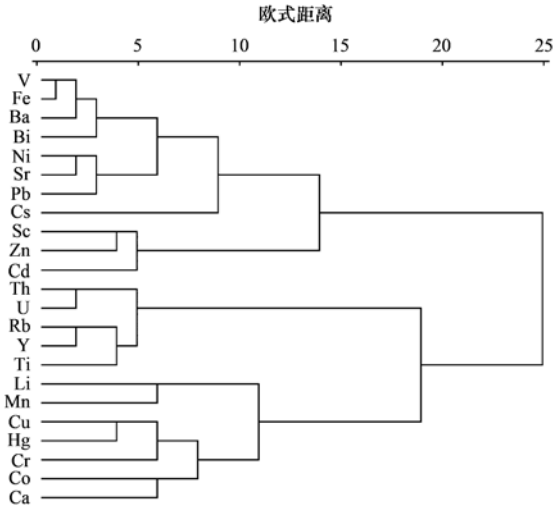


图 3 泉州市大气降尘中金属的聚类分析结果

Fig. 3 Cluster result for metals in the dustfall of Quanzhou City

2.3.2 同位素示踪污染源

按前述讨论,泉州市工业区、交通繁忙区、商业区和居住区大气降尘中重金属的综合潜在生态风险相对更高,Pb、Sr 也主要在上述 4 个功能区相对富集,本研究测定了上述 4 功能区中共 20 个降尘样品的 Pb、Sr 同位素组成(见表 4),并结合潜在污染源的 Pb、Sr 同位素特征,分析泉州市大气降尘中 Pb、Sr 主要来源。

表 4 泉州大气降尘中 Pb、Sr 同位素组成

Table 4 Isotope ratios of Pb and Sr in the dustfall of Quanzhou City

功能区	样号	$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{208}\text{Pb}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
交通繁忙区	J2	1.161 4	0.474 17	0.710 330
	J3	1.160 2	0.473 97	0.710 362
	J4	1.168 7	0.475 45	0.710 183
商业区	J8	1.171 4	0.476 65	0.710 165
	J10	1.167 3	0.475 39	0.710 244
	J11	1.170 0	0.476 42	0.710 373
	J14	1.165 8	0.474 72	0.709 986
工业区	J17	1.172 3	0.476 51	0.710 852
	J18	1.175 2	0.477 60	0.707 550
	J22	1.171 2	0.475 88	0.709 485
	J232	1.175 9	0.476 12	0.709 316
	J40	1.165 3	0.474 48	0.709 910
	J41	1.143 0	0.470 97	0.709 409
居住区	J27	1.165 9	0.474 56	0.710 336
	J30	1.170 1	0.475 81	0.710 646
	J13	1.164 1	0.474 67	0.710 160
	J53	1.164 6	0.473 64	0.710 316
	J5	1.164 2	0.474 35	0.710 194
	J6	1.191 6	0.485 15	0.710 159
	J7	1.169 0	0.475 98	0.710 652

(1) 铅同位素来源示踪 不同铅源具有不同的 Pb 同位素比值特征,且比值不受环境中物理化

学过程的影响,因此 Pb 同位素比值已被广泛应用于物源识别^[22]. 潜在污染源组分的数据来自文献^[23],它们之间的²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb、²⁰⁶Pb/²⁰⁸Pb相差较大,因此可有效示踪泉州市大气降尘铅污染来源. 以²⁰⁶Pb/²⁰⁸Pb对²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb作图(见图4),发现大气降尘与燃煤尘和土壤母质(自然源)接近,而离汽车尾气尘相对较远. 工业区样品 J41(²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb和²⁰⁶Pb/²⁰⁸Pb值分别为1.143 0、0.470 97)完全落在燃煤尘范围,因该采样点位于南埔火电厂燃烧设备附近,明显受到燃煤影响. 居住区样品 J6 位于郊区,靠近土壤母质,说明该点的大气降尘主要受控于土壤扬尘.

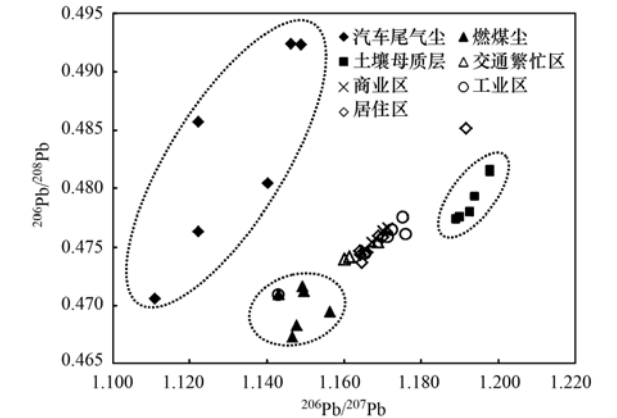


图4 泉州市大气降尘²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb和²⁰⁶Pb/²⁰⁸Pb分布
Fig. 4 Plot of ²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb vs ²⁰⁶Pb/²⁰⁸Pb
in the dustfall of Quanzhou City

定量解析是目前污染源解析的一大难题. 铅同位素指纹分析技术在定量解析铅污染源时具有独特的优势^[24]. 根据 Monna 等^[25]提出的三元混合模型,计算燃煤、汽车尾气和土壤母质对泉州市不同功能区大气降尘铅来源的贡献率. 计算公式如下:

$$f_1R_1 + f_2R_2 + f_3R_3 = R_s \quad (5)$$

$$f_1N_1 + f_2N_2 + f_3N_3 = N_s \quad (6)$$

$$f_1 + f_2 + f_3 = 1 \quad (7)$$

式中, R_s 和 N_s 分别为降尘样品的²⁰⁶Pb/²⁰⁸Pb和²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb; R_1 、 R_2 、 R_3 分别为3个主要污染源的²⁰⁶Pb/²⁰⁸Pb; N_1 、 N_2 、 N_3 分别为3个主要污染源的²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb; f_1 、 f_2 、 f_3 对应为3个主要污染源的贡献率(%). 计算结果见表5. 从中可见,泉州市大气降尘中的Pb主要来源于土壤母质和燃煤尘,平均贡献率分别为45.45%(范围29.41%~64.00%)和45.13%(范围22.53%~60.48%);汽车尾气平均贡献率为9.42%(范围3.13%~13.47%).

(2) 锶同位素来源示踪 与铅同位素比值类

表5 不同铅来源相对贡献率的计算结果/%

Table 5 Calculation result of relative contribution
of different lead sources/%

功能区	样号	汽车尾气	燃煤	自然源
交通繁忙区	J2	10.29	57.71	32.00
	J3	10.64	59.94	29.41
	J4	8.80	43.51	47.69
	平均值	9.91	53.72	36.37
商业区	J8	12.59	32.20	55.21
	J10	10.23	44.72	45.04
	J11	12.98	34.85	52.16
	J14	8.10	50.96	40.94
工业区	平均值	10.98	40.68	48.34
	J17	10.67	32.99	56.34
	J18	13.47	22.53	64.00
	J22	8.23	38.69	53.08
居住区	J232	3.80	34.36	61.84
	J40	7.24	53.17	39.59
	平均值	8.68	36.35	54.97
总均值	J27	6.94	52.25	40.81
	J30	9.24	39.83	50.93
	J13	9.88	52.22	37.90
	J53	3.13	60.48	36.39
	J5	7.87	54.82	37.31
	J7	11.58	38.97	49.45
	平均值	8.11	49.76	42.13
	总均值	9.42	45.13	45.45

似,锶同位素比值也可作为环境指示剂^[26]. 利用所研究对象中⁸⁷Sr/⁸⁶Sr和1/Sr作图,可以很好地示踪其中Sr的来源^[27]. 泉州市大气降尘⁸⁷Sr/⁸⁶Sr和1/Sr分

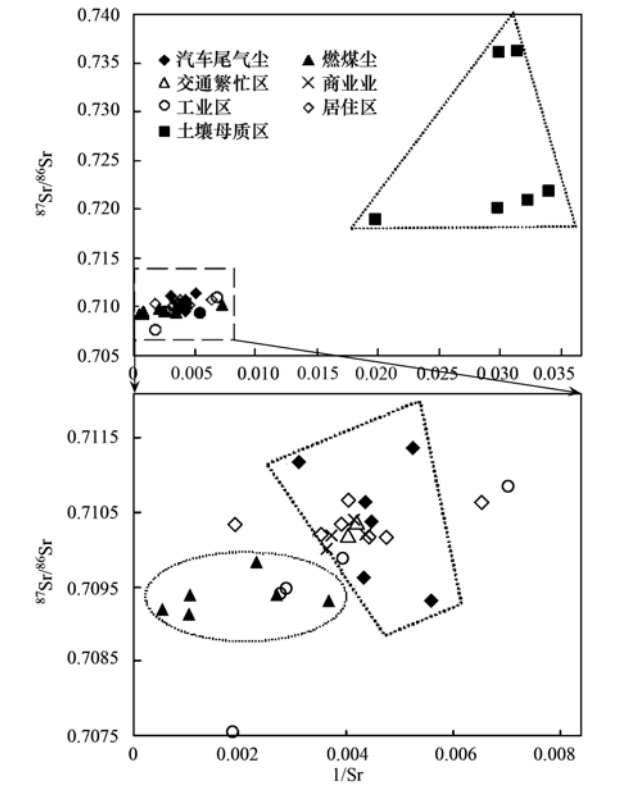


图5 泉州市大气降尘中⁸⁷Sr/⁸⁶Sr和1/Sr的分布

Fig. 5 Plot of ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr vs 1/Sr in the dustfall of Quanzhou City

布如图 5 所示,所有样品点远离土壤母质,大部分样品点 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值落在燃煤尘和汽车尾气中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值范围内,表明交通和燃煤是泉州市大气降尘中锶的主要来源,而几乎不受土壤母质的影响。

3 结论

(1)泉州市大气降尘中不同金属元素含量空间分布差异较大。Cd、Hg、Zn、Ca、Pb、Cu、Ni、Sr 的富集程度及污染水平相对较高。所有功能区的多元素综合潜在生态风险程度极高,由高到低顺序为工业区>交通繁忙区>商业区>居住区>风景区>农业区;Cd 和 Hg 的潜在生态危害程度极高,二者对综合潜在生态风险指数的贡献达 95.56%。

(2)聚类分析结果表明:V、Fe、Ba、Bi、Ni、Sr、Pb、Cs、Sc、Zn、Cd 主要来源于工业污染和交通排放,Th、U、Rb、Y、Ti 主要来源于土壤尘,Li、Mn、Cu、Hg、Cr、Co、Ca 主要来源于燃煤。铅同位素三元混合模型计算得到降尘中铅主要受土壤母质(范围 29.41%~64.00%,平均 45.45%)、燃煤尘(范围 22.53%~60.48%,平均 45.13%)和汽车尾气(范围 3.13%~13.47%,平均 9.42%)的影响; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $1/\text{Sr}$ 分布图显示降尘中锶来源主要为燃煤尘和汽车尾气。

参考文献:

- [1] Tripathi B D, Tripathi A, Misra K. Atmospheric dustfall deposits in Varanasi City[J]. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*, 1991, **25**(1): 109-112.
- [2] Vallack H W, Shillito D E. Suggested guidelines for deposited ambient dust[J]. *Atmospheric Environment*, 1998, **32**(16): 2737-2744.
- [3] 代杰瑞,祝德成,庞绪贵,等. 济宁市近地表大气降尘地球化学特征及污染来源解析[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(1): 40-48.
- [4] Akhter M S, Madany I M. Heavy metals in street and house dust in Bahrain[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1993, **66**(1-2): 111-119.
- [5] Qiao Q Q, Huang B C, Zhang C X, *et al.* Assessment of heavy metal contamination of dustfall in northern China from integrated chemical and magnetic investigation [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **74**: 182-193.
- [6] Chen B, Stein A F, Maldonado P G, *et al.* Size distribution and concentrations of heavy metals in atmospheric aerosols originating from industrial emissions as predicted by the HYSPLIT model [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **71**: 234-244.
- [7] Schaumann F, Borm P J, Herbrich A, *et al.* Metal-rich ambient particles (Particulate Matter_{2.5}) cause airway inflammation in healthy subjects [J]. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 2004, **170**(8): 898-903.
- [8] 于瑞莲,胡恭任,戚红璐,等. 泉州市不同功能区大气降尘重金属污染及生态风险评价[J]. *环境化学*, 2010, **29**(6): 1086-1090.
- [9] 胡恭任,于瑞莲,林燕萍,等. TCLP 法评价泉州市大气降尘重金属的生态环境风险[J]. *矿物学报*, 2013, **33**(1): 1-9.
- [10] 于瑞莲,张伟芳,胡恭任,等. 晋江河口沉积物重金属污染历史与来源[J]. *环境科学研究*, 2015, **28**(6): 907-914.
- [11] 刘用清. 福建省海岸带土壤环境背景值研究及其应用[J]. *海洋环境科学*, 1995, **14**(2): 68-73.
- [12] 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**(1): 65-72.
- [13] Gao Y, Nelson E D, Field M P, *et al.* Characterization of atmospheric trace elements on PM_{2.5} particulate matter over the New York-New Jersey harbor estuary [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(6): 1077-1086.
- [14] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geochemical Journal*, 1969, **2**(3): 108-118.
- [15] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [16] 徐争启,倪师军,庾先国,等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. *环境科学与技术*, 2008, **31**(2): 112-115.
- [17] 李尉卿. 大气气溶胶污染化学基础[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2010. 88-96.
- [18] Rogge W F, Hildemann L M, Mazurek M A, *et al.* Sources of fine organic aerosol. 3. Road dust, tire debris, and organometallic brake lining dust: roads as sources and sinks[J]. *Environmental Science & Technology*, 1993, **27**(9): 1892-1904.
- [19] 郭广慧,陈同斌,宋波,等. 中国公路交通的重金属排放及其对土地污染的初步估算[J]. *地理研究*, 2007, **26**(5): 922-930.
- [20] 杨弘,张君秋,王维,等. 太原市大气颗粒物中重金属的污染特征及来源解析[J]. *中国环境监测*, 2015, **31**(2): 24-28.
- [21] Pacyna J M, Pacyna E G. An assessment of global and regional emissions of trace metals to the atmosphere from anthropogenic sources worldwide[J]. *Environmental Reviews*, 2001, **9**(4): 269-298.
- [22] Cong Z Y, Kang S C, Luo C L, *et al.* Trace elements and lead isotopic composition of PM₁₀ in Lhasa, Tibet[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(34): 6210-6215.
- [23] 胡恭任,于瑞莲,郑志敏. 铅稳定同位素在沉积物重金属污染溯源中的应用[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(5): 1326-1331.
- [24] Cheng H F, Hu Y A. Lead (Pb) isotopic fingerprinting and its applications in lead pollution studies in China: a review[J]. *Environmental Pollution*, 2010, **158**(5): 1134-1146.
- [25] Monna F, Lancelot J, Croudace I W, *et al.* Pb isotopic composition of airborne particulate material from France and the southern United Kingdom: implications for Pb pollution sources in urban areas[J]. *Environmental Science & Technology*, 1997, **31**(8): 2277-2286.
- [26] Charalampides G, Manoliadis O. Sr and Pb isotopes as environmental indicators in environmental studies [J]. *Environment International*, 2002, **28**(3): 147-151.
- [27] Widory D, Liu X D, Dong S P. Isotopes as tracers of sources of lead and strontium in aerosols (TSP & PM_{2.5}) in Beijing[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(30): 3679-3687.

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Source Attribution of SOA in China	CHEN Zhuo, LIU Jun-feng, TAO Wei, <i>et al.</i> (2815)
Emission Inventory of Heavy Metals in Fine Particles Emitted from Residential Coal Burning in China	LIU Hai-biao, KONG Shao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (2823)
Diurnal Variation of PM _{2.5} Mass Concentration in Beijing and Influence of Meteorological Factors Based on Long Term Date	MIAO Lei, LIAO Xiao-nong, WANG Ying-chun (2836)
Characteristics of Ozone Background Concentration in Beijing from 2004 to 2015	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2847)
Online Sources about Atmospheric Fine Particles During the 70th Anniversary of Victory Parade in Shijiazhuang	ZHOU Jing-bo, LI Zhi-guo, LU Na, <i>et al.</i> (2855)
Pollution Characteristics of Inorganic Water-soluble Ions in Atmospheric Particulate Matter in Chengdu Plain	JIANG Yan, HE Guang-yan, LUO Bin, <i>et al.</i> (2863)
Observation Analysis on the Characteristics of Meteorological Elements and Pollutants During a Continuous Fog and Haze Episode in Spring in Jiaying City	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LI Li, <i>et al.</i> (2871)
Characteristics and Source Apportionment of Metals in the Dustfall of Quanzhou City	ZHANG Zong-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2881)
Level and the Courses of Heavy Metals and Its Risk Assessment in Indoor Dust of City: Take Guiyang as a Case	LI Xiao-yan, WANG Lang, ZHANG Shu-ting (2889)
Chemical Characteristics and Source of Acid Precipitation in Guilin	GUO Ya-si, YU Shi, LI Yong-shan, <i>et al.</i> (2897)
Assessment of Gaseous Nitrogen (NH ₃ and N ₂ O) Mitigation After the Application of a Range of New Nitrogen Fertilizers in Summer Maize Cultivation	FAN Hui, JIANG Shan-shan, WEI Ying, <i>et al.</i> (2906)
Soil CO ₂ , CH ₄ and N ₂ O Fluxes from Alpine Meadows on the Plateau of Southern Qinghai Province During Snow Cover Period and Growing Seasons	WU Jian-guo, ZHOU Qiao-fu (2914)
Partial Pressure of Carbon Dioxide and Methane from Autumn to Winter in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	ZHANG Jun-wei, LEI Dan, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2924)
Potential Impacts of Climate Change on Phosphorus and DO in Yuqiao Reservoir	ZHANG Chen, LIU Han-an, GAO Xue-ping, <i>et al.</i> (2932)
Land Use Structure Change and Its Control Effect of Nitrogen Output in a Small Watershed of Three Gorges Reservoir Area: A Case Study of Lanlingxi Watershed	WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (2940)
Response of Inflow Water Quality to Land Use Pattern in Northern Watershed of Lake Erhai	XIANG Song, PANG Yan, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (2947)
Effect of Nutrient Cycles in Tributaries on the Transport of Nutrient in the Three Gorge Reservoirs: A Case Study of Caotang River	WANG Xiao-tong, LUO Guang-fu, CAO Man, <i>et al.</i> (2957)
Transient Storage Characteristics of Artificial Pool Geomorphic Structure in an Agricultural Headwater Stream	LI Ru-zhong, HUANG Qing-fei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (2964)
Distribution Characteristics of Solute Nitrogen in the Water-Sediment of Farmland Drainage Ditch	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, SONG Chang-ji, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics and Influencing Factors of Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir	CHAI Xue-si, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2979)
Response Behaviors of Heavy Metals at Tidal Currents Interface and Salinity Interface in the Estuary Area	LIU Jing, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (2989)
Simulation of Multimedia Transfer and Fate of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) in Shenzhen Region	CUI Xiao-yu, ZHANG Hong, LUO Ji, <i>et al.</i> (3001)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Sediments of Zhelin Bay in Guangdong Province, China	WEI Ya-ning, PAN Jia-chuan, SONG Yu-mei, <i>et al.</i> (3007)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Dissolved Organic Matter in Beiyun River	CHEN Yong-juan, HU Wei-xuan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (3017)
Distribution and Environmental Significances of Radionuclides in the Sediment of the Changyi Coastal Wetland	WANG Qi-dong, SONG Jin-ning, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (3026)
Fecal Contamination in Laolongdong Underground River as Measured by the Sterol Biomarkers	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3034)
Distribution Characteristics and Pollution Status of Phthalate Esters in the Groundwater of Hutuo River Pluvial Fan	CHANG Sheng, ZHAO Xing-nu, LIU Yan, <i>et al.</i> (3041)
Impacts of Land Use on the Source of Dissolved Fatty Acids in Epikarst Spring During Rainy Season	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3049)
Mechanisms of Phosphorus Removal by Modified Zeolites Substrates Coated with Zn-LDHs in Laboratory-scale Vertical-flow Constructed Wetlands	ZHANG Xiang-ling, HUANG Hua-ling, GUO Lu, <i>et al.</i> (3058)
Synergistic Enhancement on Oxidation of Phenol by Fenton Processes by Adding Ce ³⁺ and Cu ²⁺ Ions	ZHANG Jian-qiao, CHI Hui-zhong, SONG Yang, <i>et al.</i> (3067)
Removal of Humic Acid from Water Using Pt/biochar Electrode Reactor	DING Wen-chuan, XIANG Xing-guang, ZENG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3073)
Generation of Graphene-titanium Dioxide Nanotubes Catalytic Board and Its Photocatalysis Capability to Degrade Pentachlorophenol	XU Qi, ZHOU Ze-yu, WANG Hong-tao (3079)
Photocatalytic Degradation Kinetics and Mechanism of Monoazo Dye Acid Yellow 17 by UV/TiO ₂ in Aqueous Solution	YANG Hai, WEI Hong-qin, HU Le-tian, <i>et al.</i> (3086)
Feasibility of Sulfur-based Autotrophic Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (3094)
Operation Performance of a Bioaugmented Membrane-aerated Biofilm Reactor Treating Atrazine Wastewater	LIU Chun, YU Chang-fu, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3101)
Nitrogen Removal of Municipal Wastewater by ANAMMOX Coupled Shortcut Nitrification in Anaerobic Baffled Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (3108)
Simultaneous Ferric Reduction with Ammonia Oxidation Phenomena in Activated Sludge in Anaerobic Environment	LI Xiang, LIN Xing, YANG Peng-bing, <i>et al.</i> (3114)
Rapid Start-up of One-stage Autotrophic Nitrogen Removal Process in EGSB Reactor for Wastewater with Low Concentration of Ammonia	GU Shu-jun, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (3120)
Phosphorus Removal Performance in EBPR System under Extra-low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3128)
Influence of Activated Sludge Surface Properties on Flocculating Settling and Effluent Suspend Solid	HE Zhi-jiang, ZHAO Yuan, ZHANG Yuan-kai, <i>et al.</i> (3135)
Spatial Characteristics and Environmental Risk of Heavy Metals in Typical Gold Mining Area of Shandong Province	WANG Fei, WU Quan-yuan, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (3144)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in an E-waste Dismantling Area and Their Distribution Characteristics	ZHAO Ke-li, FU Wei-jun, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (3151)
Selenate Adsorption and Desorption in 18 Kinds of Chinese Soil with Their Physicochemical Properties	FENG Pu-yang, LI Zhe, ZHE Yu-yun, <i>et al.</i> (3160)
Adsorption Characteristics of Arsenite on Goethite by Flow Stirring Method	LI Xin, YANG Jun, RAO Wei, <i>et al.</i> (3169)
Preparation of Poly-hydroxy-aluminum Pillared Diatomite and Characteristics of Cu ²⁺ , Zn ²⁺ Adsorption on the Pillar in Aqueous Solutions	ZHU Jian, LEI Ming-jing, WANG Ping, <i>et al.</i> (3177)
Preparation and NH ₄ ⁺ -N Removal Performance of a Novel Filter Substrate Made from Sludges	WANG Wen-dong, LIU Hui, ZHANG Yin-ting, <i>et al.</i> (3186)
Preparation of Nanocomposite Hydrogel and Its Adsorption of Heavy Metal Ions	ZHU Qian, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (3192)
Prediction of PAHs Bioavailability in Spiked Soil by Composite Extraction with Hydroxypropyl-β-cyclodextrin and Rhamnolipid	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (3201)
Biological Effects of ZnO Nanoparticles as Influenced by Arbuscular Mycorrhizal Inoculation and Phosphorus Fertilization	JING Xin-xin, SU Zhi-zhong, XING Hong-en, <i>et al.</i> (3208)
Difference of Species Sensitivities for Aquatic Life Criteria in China and the USA	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, YU Ruo-zhen, <i>et al.</i> (3216)
Effects of Low-level Nutrition and Trace Antibiotics on the Fitness Cost of Plasmids Bearing Antibiotic Resistance	LIN Wen-fang, CHEN Sheng, WAN Kun, <i>et al.</i> (3224)
Effect of Different Nitrogen Rates on the Nitrification Potential and Abundance of Ammonia-oxidizer in Intercropping Maize Soils	LÜ Yu, ZHOU Long, LONG Guang-qiang, <i>et al.</i> (3229)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 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)

2016年8月15日 第37卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 8 Aug. 15, 2016

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行