

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.11
第40卷 第11期

目次

2018年中国长江三角洲地区气溶胶的垂直分布特征 沈吉, 曹念文(4743)

2018年石家庄市秋冬季典型霾污染特征 宿文康, 鲍晓磊, 倪爽英, 赵卫凤(4755)

武汉市PM_{2.5}化学组分时空分布及聚类分析 张会涛, 田瑛泽, 刘保双, 杨佳美, 郁佳, 官攀, 吴建会, 张裕芬(4764)

郑州市某生活区大气PM_{2.5}中重金属污染特征及生态、健康风险评估 何瑞东, 张轶舜, 陈永阳, 靳孟洁, 韩士杰, 赵金帅, 张瑞芹, 燕启社(4774)

厦门市降水中金属元素含量分布特征及来源解析 王珊珊, 程奕枫, 颜金培, 胡恭任(4783)

2015~2017年上海郊区大气新粒子生成特征 霍俊涛, 王新宁, 段玉森, 伏晴艳, 陈冰怡(4791)

太原市秋冬季大气污染特征和输送路径及潜在源区分析 闫世明, 王雁, 郭伟, 李莹, 张逢生(4801)

东北区域空气质量时空分布特征及重度污染成因分析 陈卫卫, 刘阳, 吴雪伟, 鲍秋阳, 高枫亭, 张学磊, 赵红梅, 张世春, 修艾军, 程天海(4810)

艾比湖流域气溶胶光学厚度时空演变及影响因素 陈香月, 丁建丽, 王敬哲, 葛翔宇, 梁静(4824)

中国住宅室内BTEX浓度水平及其影响因素 侯贝贝, 尹奕卉, 裴晶晶, 刘俊杰(4833)

石家庄地区芳香族化合物的污染特征及来源分析 杨阳, 李杏茹, 刘水桥, 杨玉磊, 赵清, 陈曦, 徐静(4841)

郑州市碳素行业无组织VOCs排放特征分析及健康风险评估 张轶舜, 王佳, 韩士杰, 何瑞东, 陈永阳, 靳孟洁, 赵庆炎, 张瑞芹, 燕启社(4847)

典型化工行业有害VOCs排放清单及长三角地区应用 鲁君, 黄奕玮, 黄成(4856)

2013~2017年江苏省人为源氨排放清单的建立及特征 侯新红, 于兴娜, 沈丽, 赵睿东, 王国祯, 张毓秀(4862)

焦化厂建筑物和生产设施表面PAHs的赋存特征及健康风险 赵一澍, 廖晓勇, 李尤, 罗俊鹏, 龚雪刚, 侯艺璇(4870)

中国南海流沙湾中雄激素、糖皮质激素和孕激素的污染特征及其生态风险评价 杨雷, 张晋娜, 徐敏, 彭涛, 史文俊, 石义静, 应光国(4879)

岩溶流域洪水过程水化学动态变化及影响因素 原雅琼, 孙平安, 苏钊, 于爽, 钟丽华, 何师意, 徐茜(4889)

长江水体常量和微量元素的来源、分布与向海输送 吴文涛, 冉祥滨, 李景喜, 王昊, 李梦露, 刘军, 臧家业(4900)

望虞河西岸河网重金属污染特征及生态风险评价 徐晨, 王沛芳, 陈娟, 袁秋生, 胡斌(4914)

不同雨强对太湖河网河道入湖营养盐负荷影响 陈洁, 朱广伟, 许海, 詹旭, 朱梦圆, 笪文怡, 黄亚文(4924)

合肥市十八联圩湿地表层沉积物营养盐与重金属分布及污染评价 陈姗, 许凡, 谢三桃, 郭天星, 彭久赞, 雷琦, 张玮, 王丽卿(4932)

三峡库区不同河段支流丰水期叶绿素a和营养盐的空间分布特征 杨凡, 杨正健, 纪道斌, 苏青青, 龙良红, 刘心愿, 王耀耀, 赵冲(4944)

丹江口水库氮磷内源释放对比 王志齐, 刘新星, 姚志宏, 姚伦广, 常跃, 刘卓初, 曹连海(4953)

不同沉水植物净水能力与植株体细菌群落组成相关性 李琳, 岳春雷, 张华, 李贺鹏, 杨乐, 王瑀(4962)

纳米氧化锌粒径对人工湿地性能及微生物群落的影响 王森, 任伶, 刘琳琳, 李颖, 张振, 孔范龙(4971)

水生植物生物质炭去除水体中氮磷性能 刘舒蕾, 彭慧君, 杨佳怡, 肖琳(4980)

MgO改性莲蓬壳生物炭的制备及其磷吸附特性 王盛华, 朱丹晨, 邵敬爱, 向家涛, 杨海平, 易娟, 张世红, 陈汉平(4987)

微塑料对短流程膜工艺中膜污染的影响 王博东, 薛文静, 吕永涛, 苗瑞, 马百文(4996)

基于铁锰泥的除砷颗粒吸附剂制备及其比较 曾辉平, 于亚萍, 吕赛赛, 李冬, 张杰(5002)

氯氧铁非均相催化过氧化氢降解罗丹明B 张少朋, 陈瑞, 白淑琴, 刘锐平(5009)

天津市规模化奶牛养殖场废水中典型抗生素处理效果及生态风险评估 陈乾, 赵润, 牟美睿, 白鸽, 史宏伟, 刘海学, 吴惠惠(5015)

废水处理系统中抗生素抗性基因分布特征 姚鹏城, 陈嘉瑜, 张永明, 温东辉, 陈吕军(5024)

全程自养脱氮耦合反硝化除磷的启动及稳定运行 印雯, 陈亚, 张钰, 徐乐中, 吴鹏, 刘文如(5032)

FeCl₃-生化耦合技术调控未知诱因的污泥膨胀 魏东洋, 肖才林, 周雯, 李睿华, 曹茜(5040)

污泥龄对除磷亚硝化颗粒系统的影响 李冬, 刘博, 王文琪, 曹美忠, 李帅, 张杰(5048)

厌氧氨氧化耦合反硝化工艺的启动及微生物群落变化特征 宋壮壮, 吕爽, 刘哲, 时兴东, 潘傲, 张智(5057)

基质暴露水平对ANAMMOX微生物活性及生物量的影响 陈方敏, 高佳琦, 黄勇, 胡羽婷, 李祥, 顾澄伟, 谈新伟, 殷记强, 方文焯, 倪敏(5066)

太浦河流域农田土壤重金属污染特征与来源解析 李伟迪, 崔云霞, 曾撑撑, 朱永青, 彭月, 王凯, 李士俊(5073)

土壤重金属污染风险筛选值划分方法:以Cd为例 王锐, 张凤雷, 徐姝姝, 张永文(5082)

半壁山金矿矿业活动区砷赋存的矿物特征及其对农田土壤砷累积的影响 温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 李鸣凤(5090)

土壤调理剂对镉污染稻田修复效果 周利军, 武琳, 林小兵, 王惠明, 刘晖, 张鸿燕, 胡敏, 石利萍, 张云, 黄欠如(5098)

改性蒙脱土对稻田土壤甲基汞的阻控修复 韩怡新, 何天容, 王祖波(5107)

铈锰改性生物炭对土壤As的固定效应 梁婷, 李莲芳, 朱昌雄, 叶婧(5114)

温和预氧化提高后续生物修复石油污染土壤 徐金兰, 王慧芳, 王荣, 章秋菊, 王杰(5124)

重金属污染农田生菜根际重金属固定细菌群落组成及其阻控效应 王铁军, 苏楠楠, 雷鹏, 邱明洋, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉(5133)

双氰胺和3,4-二甲吡唑磷酸盐对蔬菜种植土壤氨氧化细菌和古菌的影响 郭俊丽, 刘毅, 魏文学, 葛体达, 王光军(5142)

不同再生水灌溉方式对土壤-辣椒系统中细菌群落多样性及病原菌丰度的影响 崔丙健, 高峰, 胡超, 李中阳, 樊向阳, 崔二革(5151)

黄土高原地区两种土地利用方式CO₂和N₂O排放特征 韩佳乐, 郝珊, 刘振杰, 张曼, 张阿凤(5164)

生物质炭对华北平原4种典型土壤N₂O排放的影响 张秀玲, 孙贇, 张水清, 岳克, 曹红亮, 林杉(5173)

优化施肥模式对我国热带地区水稻-豇豆轮作系统N₂O和CH₄排放的影响 胡玉麟, 汤水荣, 陶凯, 何秋香, 田伟, 秦兴华, 伍延正, 孟磊(5182)

《环境科学》征订启事(4995) 《环境科学》征稿简则(5039) 信息(4782, 4979, 5056)

厦门市降水中金属元素含量分布特征及来源解析

王珊珊^{1,2}, 程奕枫², 颜金培¹, 胡恭任^{1,2*}

(1. 国家海洋局海洋-大气化学与全球变化重点实验室, 厦门 361021; 2. 华侨大学化工学院, 厦门 361021)

摘要: 利用电感耦合等离子体质谱仪对厦门市雨水中包括稀土元素在内的41种金属元素含量及铅同位素比值进行测定, 并通过富集因子法、同位素示踪法以及正定矩阵分解法(PMF)联用对其来源进行判定. 结果表明, 厦门市雨水中金属元素总质量浓度表现为冬季郊区($213.964 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) > 冬季城区($176.357 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) > 夏季郊区($75.401 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), 其中, 以Mn、Ni、Cu、Zn、Ba和Sr为主. 稀土元素含量存在季节和区域间差异, 其标准化配分模式与各潜在源均不一致, 表明其来源相对复杂. 富集因子分析表明Ni、Cu、Zn和Cd受人为源影响显著, 而Be、Ti、V、Mn、Cr、Co、Ga、Rb、Y、Cs、REEs、Th和U受到自然源影响更大; 铅同位素示踪结果表明降水中铅受燃煤源影响较大, 其贡献率为63.67%, 受土壤母质层、垃圾焚烧、机动车尾气和水泥尘共同影响的贡献率为36.33%. PMF结合富集因子、同位素示踪法分析结果表明, 降水中元素总体受到燃煤源、自然源、工业源和交通源的共同影响.

关键词: 降雨; 金属元素; 含量; 来源; 同位素; 正定矩阵分解法(PMF)

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)11-4783-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201904134

Distribution Characteristics and Sources of Metal Elements in Rainwater in Xiamen

WANG Shan-shan^{1,2}, CHENG Yi-feng², YAN Jin-pei¹, HU Gong-ren^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Global Change and Marine-Atmospheric Chemistry, Xiamen 361021, China; 2. College of Chemical Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Forty-one metal elements, including rare earth elements and the lead isotope ratio in rain water in Xiamen were measured by inductively coupled plasma mass spectrometry. Sources of metal elements were identified by combined enrichment factor, isotope analysis, and positive matrix factorization analysis. The results showed that the concentration sequence of total metal elements in rainwater in Xiamen was winter-suburban ($213.964 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) > winter-urban ($176.357 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) > summer-suburban ($75.401 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$). There were seasonal and regional differences in the content of rare earth elements, and their standardized distribution patterns were inconsistent with each potential source, indicating that their sources were relatively complex. Enrichment factor analysis showed that Ni, Cu, Zn, and Cd were significantly affected by human sources, whereas Be, Ti, V, Mn, Cr, Co, Ga, Rb, Y, Cs, rare earth elements, Th, and U were mainly affected by natural sources. The result of Pb-isotopic-analysis showed that Pb in rainwater was significantly affected by coal sources with a contribution rate of 63.67%, and soil parent material, garbage incineration, motor vehicle exhaust, and cement dust with a contribution rate of 36.33%. The result of positive matrix factorization combined with the enrichment factor and isotope method showed that the metal elements in rainwater were affected by coal burning, natural sources, industry, and traffic.

Key words: rainwater; metal elements; concentration; source; isotope; positive matrix factorization

随着工业化不断加深, 各领域不断创造经济价值的同时也对环境造成了一定威胁, 各行业产生的金属元素随粉尘、废气、废水等途径排入大气、水、土壤中, 进而在植物、水及土壤中积累, 对生态环境造成威胁, 同时, 金属元素尤其是重金属元素能够通过食物链进入人体, 引起人体神经系统损伤、心血管疾病, 甚至引发癌症^[1,2]. 稀土元素作为金属元素中的一类, 在人体中过量累积同样会影响儿童智力^[3]. 大气中的金属元素能够通过降水进入地球表面, 进而在食物链中传递, 进入人体. 因此, 测定降雨中金属元素含量特征, 分析其来源, 对判定其对生态和人体威胁程度和有效治理十分必要.

富集因子(EF)法是判断研究对象受人为扰动程度的一种源解析方法^[4], 但其仅能大致区分人为

源和自然源对研究对象的影响程度, 源解析结果存在一定误差. 同位素示踪法能够准确判定示踪元素来源^[5], 但仅能判断特定元素来源, 无法完成对多元素来源的同时示踪. 正定矩阵因子法(positive matrix factorization, PMF)是美国环保署开发的判断多元素来源的分析方法^[6], 但其源解析建立在通过以往研究对各元素来源的认知基础上, 各元素来源存在时间及空间差异, 因此PMF分析也存在相应

收稿日期: 2019-04-14; 修订日期: 2019-05-23

基金项目: 国家海洋局海洋-大气化学与全球变化重点实验室开放基金项目(GCMAC1607); 国家自然科学基金项目(21477042); 2018福建省大学生创新创业训练计划项目(201810385094)

作者简介: 王珊珊(1991~), 女, 博士, 主要研究方向为大气环境化学, E-mail: sswang335@foxmail.com

* 通信作者, E-mail: grhu@hqu.edu.cn

的误差. 综上, 需要多方法联用对降雨中金属元素体系来源进行准确解析.

国内外已对降雨中的一些金属元素含量分布进行过研究^[7, 8], Pan 等^[9]对中国南部 10 个采样点干湿沉降中示踪元素进行分析, 结果表明干湿沉降中存在明显的季节变化, 而湿沉降季节变化不明显. 王华等^[10]对成都市降雨中重金属元素含量进行测定, 结果表明其受人为影响严重. 徐宏林等^[11]对湖北省云梦县干湿沉降中重金属沉降通量进行测定分析, 发现各重金属形态存在差异. 但对降雨中包括稀土元素在内的多元素及铅同位素示踪方面的研究还罕见报道. 厦门市作为我国重要的东南沿海城市, 其空气质量在全国名列前茅, 素有“海上花园城市的美称”, 每年吸引大量游客到此观光旅游. 但有研究报道, 其大气中金属元素仍然对人体健康存在威胁^[12]. 本文对厦门市降雨中包括稀土元素在内的 41 种金属元素含量进行测定, 利用 EF 分析法、同位素示踪法以及 PMF 法联用, 准确解析降雨中金属元素体系来源, 以期对厦门市污染防治提供可靠依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

为对比不同区域降雨中金属元素含量特征及来源, 本研究分别选取郊区 (厦门市华侨大学化工学院教学楼顶) 以及城区采样点 (厦门市瑞景小学教学楼顶), 两采样点均距地面高约 20 m (图 1); 为

对比不同季节含量特征及来源, 分别采集夏季及冬季样品, 见表 1. 采样使用自制降水收集罐, 每次采样前用超纯水清洗采样器漏斗和聚乙烯塑料瓶, 以防止降水样品受到污染. 降雨开始时即开始采样, 直至收集降雨 3 L, 每次降水结束后, 将样品在 1 h 内送回实验室分析.



图 1 厦门市降雨采样示意

Fig. 1 Sampling sites for rainwater in Xiamen

1.2 样品处理与分析

1.2.1 金属元素含量测定

取适量雨水样品用 0.45 μm 过滤器过滤后置于 50 mL 聚四氟乙烯坩埚中, 加入 0.8 mL 硝酸 (MOS 级) 及 1~2 滴 HF (MOS 级), 拧紧盖子于 130 $^{\circ}\text{C}$ 加热 5 h 后取出坩埚, 打开盖子赶走挥发性有机物后再次拧紧盖子, 于 180 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱内加热 12 h, 取出坩埚, 冷却后向其中加入 0.5 mL 硝酸 (MOS

表 1 2014 年厦门市降雨采集时间

Table 1 Sampling time for rainwater in Xiamen in 2014

夏季		冬季			
样品编号 (郊区)	采样日期	样品编号 (郊区)	采样日期	样品编号 (城区)	采样日期
H1	08-12	h1	11-30	r1	11-30
H2	08-13	h2	12-03	r2	12-03
H3	08-14	h3	12-19	r3	12-19
H4	08-18	h4	12-25	r4	12-25
H5	08-19	h5	12-26	r5	12-26

级) 继续蒸干, 向坩埚内加入 0.2 mL ($50 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) Rh 内标液, 同时加入稀硝酸 (体积比为 3:1), 再次将坩埚置于 140 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱内加热 5 h. 用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS, Elan ERE e, Perkin Elmer) 测定金属元素 [Li、Be、Sc、Ti、V、Mn、Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Ga、Rb、Y、Nb、Mo、Cd、Sb、Cs、Ba、轻稀土元素 (LREEs)、重稀土元素 (HREEs)、W、Tl、Pb、Bi、Th、U 和 Sr] 含量.

1.2.2 铅同位素测定

雨水样品用 0.45 μm 过滤器过滤后置于聚

四氟乙烯离心管中, 加入 5 mL HNO_3 ($0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 而后置于 70 $^{\circ}\text{C}$ 超声仪中加热 30 min, 用 5% HNO_3 定容至 50 mL, 用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS, Agilent 7500cx, Agilent) 测定铅同位素值.

1.2.3 质量控制

每批样品随机选取一个样品进行平行实验, 相对标准偏差小于 10%. 所用器皿均用超纯水清洗 3 遍后浸泡于 10% 硝酸超过 24 h, 再用超纯水清洗 3 遍, 烘干, 密封备用.

1.2.4 数据处理

分歧系数计算公式:

$$CD_{jk} = \sqrt{\frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \left(\frac{x_{ij} - x_{ik}}{x_{ij} + x_{ik}} \right)^2} \quad (1)$$

式中, CD_{jk} 为不同区域/季节元素间的分歧系数; p 为采样天数; x_{ij} 和 x_{ik} 为各采样点/时间元素质量浓度 ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$). 通常, CD_{jk} 接近 0 时, 表明各采样点/时间元素来源相近; 当 CD_{jk} 大于 0.2 时, 表明各采样点/时间元素具有不同来源^[13].

EF 计算见公式 (2):

$$EF = \frac{(C_i/C_n)_{\text{样品}}}{(C_i/C_n)_{\text{背景}}} \quad (2)$$

式中, EF 为富集因子; C_i 为待测元素含量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); C_n 为参比元素含量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). 通常, EF 值大于 10 时, 表示受人为扰动程度大; 当 EF 值小于 10 时, 受自然源影响较大.

同位素二元混合模型计算公式如下:

$$R_s = f_1 R_1 + f_2 R_2 \quad (3)$$

$$f_1 + f_2 = 1 \quad (4)$$

式中, R_s 、 R_1 和 R_2 分别为样品、污染源 1 和污染源 2 中铅同位素比值, f_1 和 f_2 分别为污染源 1 和污染源 2 的贡献率.

PMF 结果由 EPA PMF 5.0 软件生成; 文中作图由 Origin 8.5 完成; 所有数据计算由 Excel 2016 软件处理完成.

2 结果与讨论

2.1 雨水中金属元素含量特征

监测期间厦门市雨水中 41 种金属元素总质量浓度见图 2. 表现为冬季郊区 ($213.964 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) > 冬季城区 ($176.357 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) > 夏季郊区 ($75.401 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), 其中, 以 Mn、Ni、Cu、Zn、Ba 和 Sr 为主, 占金属元素总量的 92.452% ~ 97.394%, 但是均低于《中华人民共和国地表水环境质量标准 GB 3838-2002》中的 I 类标准^[14], 表明厦门市降雨中金属元素污染并不严重. 时间上: 金属元素总含量表现为冬季郊区 > 夏季郊区, 这与厦门市为亚热带海洋性季风气候有关, 夏季湿润多雨, 冬季干燥少雨, 导致冬季污染物在大气中累积时间长, 浓度高, 经降水冲刷后进入雨水中可溶性金属元素浓度也偏高; 另外, 厦门市夏季易受海洋干净气团影响, 而冬季易受北方气团影响, 见图 3; 来自中国北部的高污染气团亦会加重厦门市冬季大气污染程度, 导致冬季大气中金属元素偏高. 空间上: 金属元素总含量表现为冬季郊区 > 冬季城区. 厦门市工业多分布于郊区, 导致郊区受污染源排放影响更大, 此外厦门市城区防尘洒水措施相对郊区更好, 污染物易被去除.

厦门市雨水中各金属元素含量与其他城市对比见表 2. 与同为沿海城市深圳相比, 除 V 和 Sb 外,

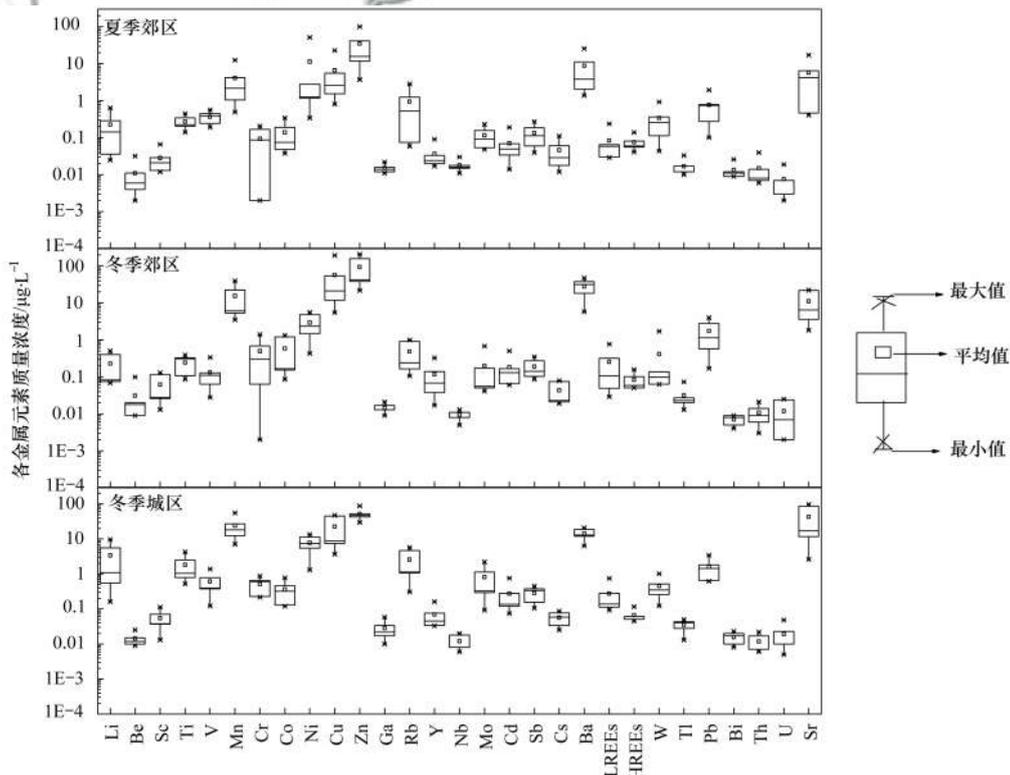


图2 雨水中各金属元素质量浓度

Fig. 2 Mass concentrations of metal elements in rainwater

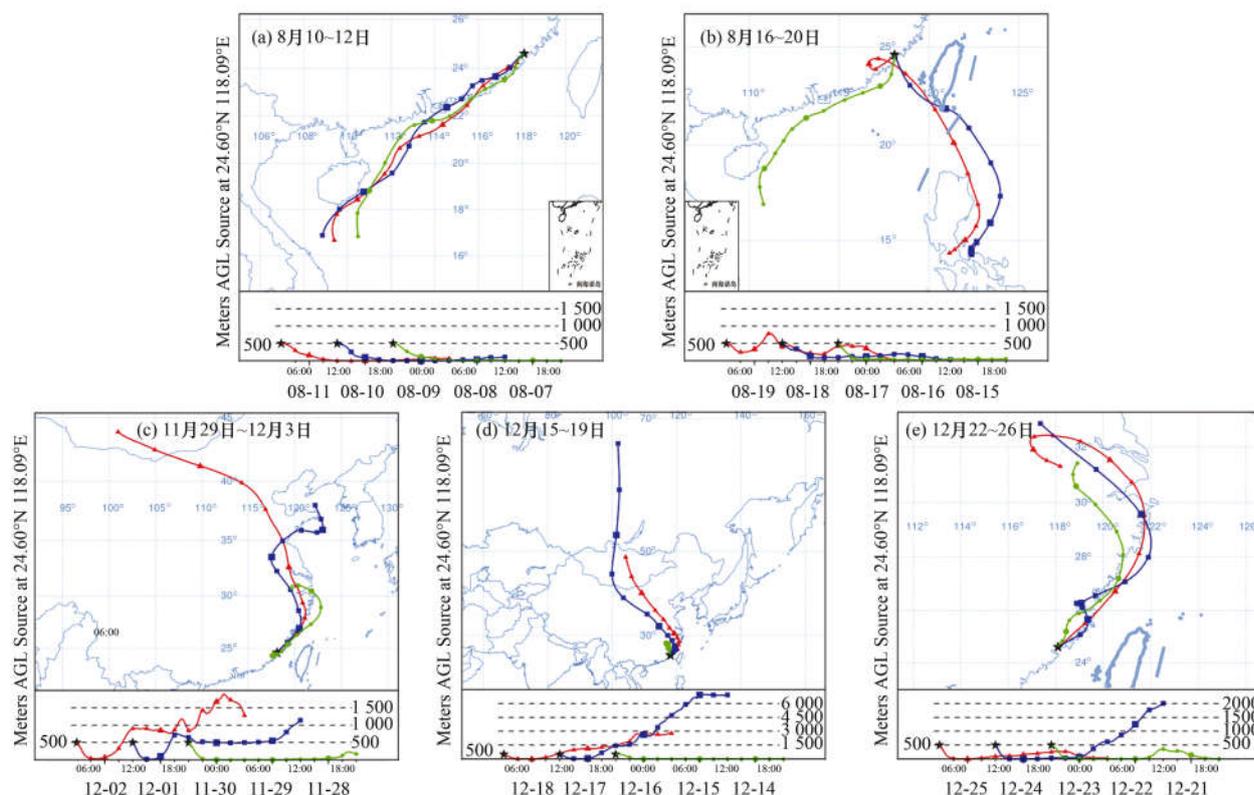


图3 后向气团轨迹图

Fig. 3 Backward air mass trajectory

表2 各地区降水中金属元素含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ Table 2 Concentrations of metals in rainwater in different areas/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

项目	厦门(本研究)	深圳 ^[15]	拉萨 ^[16]	太原 ^[17]	唐山 ^[18]	土耳其 ^[19]	韩国 ^[20]
Li	1.276 1	—	—	—	—	12.000 0	—
Be	0.018 7	—	—	—	—	—	—
Sc	0.048 3	—	0.009 0	—	—	—	—
Ti	0.777 1	—	—	—	—	17.000 0	—
V	0.370 4	1.483 3	0.013 0	—	1.400 0	—	0.160 0
Mn	14.488 9	5.023 3	0.007 0	35.536 0	21.800 0	21.800 0	2.550 0
Cr	0.365 9	0.226 7	0.017 0	1.177 0	1.0	5.900 0	—
Co	0.363 3	0.073 3	0.004 0	—	1.200 0	11.400 0	—
Ni	7.358 9	0.590 0	0.049 0	2.491 0	1.400 0	4.600 0	0.410 0
Cu	28.825 5	2.070 0	0.034 0	2.491 0	5.400 0	20.500 0	1.840 0
Zn	60.028 0	20.400 0	0.022 0	45.292 0	88.700 0	89.600 0	—
Ga	0.019 3	—	—	—	—	—	—
Rb	1.335 8	—	—	—	—	—	—
Y	0.074 7	—	—	—	—	—	—
Nb	0.013 2	—	—	—	—	—	—
Mo	0.374 5	—	—	—	—	—	—
Cd	0.176 5	0.146 7	0.009 0	0.291 0	0.300 0	13.300 0	0.060 0
Sb	0.203 1	0.236 7	—	—	—	—	—
Cs	0.048 9	—	0.001 0	—	—	—	—
Ba	17.015 3	—	—	23.484 0	—	17.100 0	1.680 0
LREEs	0.204 1	—	—	—	—	—	—
HREEs	0.075 2	—	—	—	—	—	—
W	0.402 1	—	—	—	—	—	—
Tl	0.027 6	—	—	—	—	—	—
Pb	1.369 8	1.363 3	0.002 0	0.634 0	18.300 0	10.400 0	1.210 0
Bi	0.012 0	—	0.000 3	—	—	—	—
Th	0.012 5	—	—	—	—	—	—
U	0.012 9	—	0.000 1	—	—	—	—
Sr	19.942 2	1.320 0	—	14.998 0	—	16.400 0	—

厦门市雨水中各金属元素含量均高于深圳^[15]；与中国西部城市拉萨相比，厦门市雨水中所有金属元素均高于拉萨^[16]，这与我国城市化发展不平衡，东部城市工业发达而西部匮乏有关；Ni、Cu、Zn、Pb 和 Sr 含量高于中国北方城市太原^[17]；Ni、Cu 和 Sr 含量同样高于中国北方城市唐山^[18] 以及土耳其^[19]；而各金属元素含量均高于韩国^[20]，表明厦门大气污染治理还存在一定的提升空间。

2.2 雨水中稀土元素含量特征

监测期间厦门市雨水中稀土元素含量夏季郊区 (Nd > Ce > La > Pr > Dy > Er > Yb > Eu > Yb > Eu > Lu > Tb > Sm > Gd > Tm > Ho)、冬季郊区 (Ce > La > Nd > Pr > Dy > Sm > Er > Yb > Gd > Eu > Ho > Tb > Lu > Tm) 及冬季城区 (Ce > La > Nd > Pr > Sm > Dy

> Yb > Gd > Er > Eu > Ho > Tb > Lu > Tm) 顺序之间存在差异，表明其来源可能不同。由 LREEs/HREEs 值可知，厦门市雨水中稀土元素表现为夏季重稀土富集 (LREEs/HREEs = 0.976 9)，冬季轻稀土富集 (郊区：LREEs/HREEs = 2.281 6；城区 LREEs/HREEs = 3.527 6)。用北美页岩对稀土元素进行标准化，其中海水数据源自文献[21,22]，潜在源数据源自文献[23]，见图 4。可知厦门市雨水中标准化稀土元素 La 至 Pr 呈上升趋势，Nd 元素略有亏损，Sm 至 Lu 呈锯齿状分布，而除汽油车及柴油车尾气外，其他潜在源配分模式相对平缓，汽油车及柴油车重稀土部分有下降趋势，可知雨水样品中稀土元素配分模式与各潜在源均不相同，表明其受未知源或复杂混合源的影响。

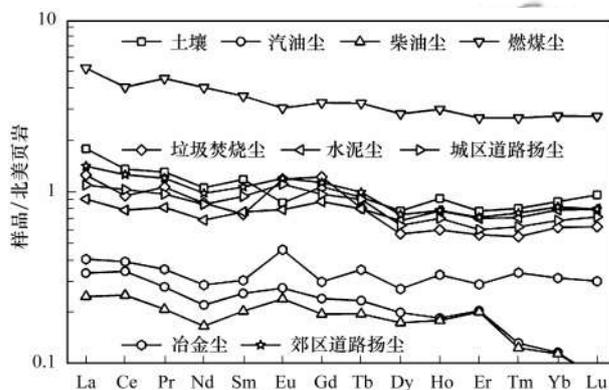
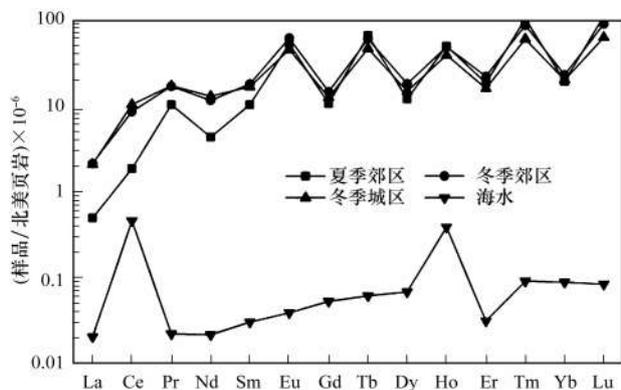


图 4 稀土元素配分模式

Fig. 4 Distribution patterns of rare earth elements

2.3 雨水中各金属元素来源解析

2.3.1 分歧系数

各元素之间的分歧系数见图 5。空间上：Li、Ti、V、Rb、Mo 和 Sr 分歧系数大于 0.2，表明以上

元素城郊之间来源存在差异。时间上：Be、V、Mn、Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Y、Ba 和 LREEs 分歧系数大于 0.2，表明其夏季与冬季来源存在差异。而 Sc、Ga、Nb、Cd、Sb、Cs、HREEs、W、Tl、Pb、Bi、Th

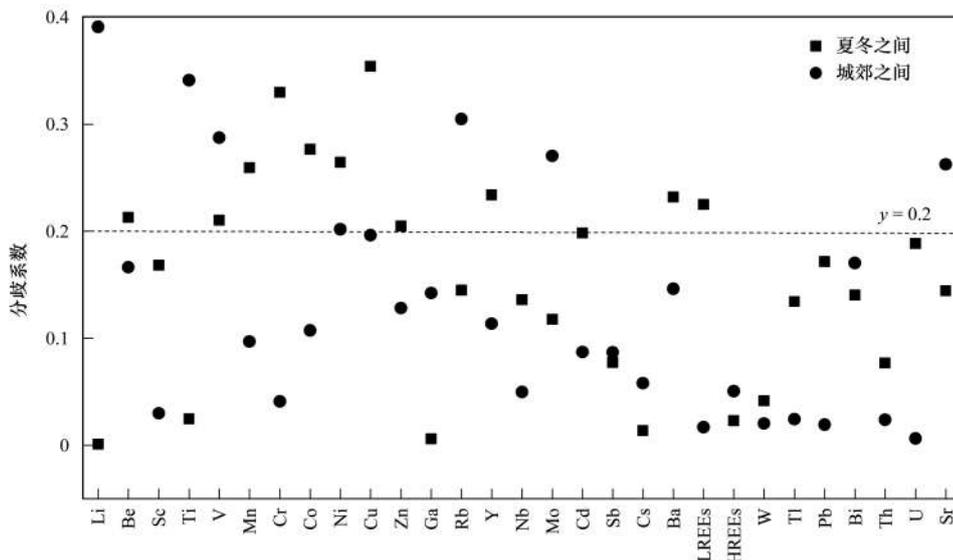


图 5 各金属元素分歧系数

Fig. 5 Coefficient of differences for each element

和 U 在夏冬及城郊之间分歧系数均小于 0.2, 表明其来源大致相同.

2.3.2 富集因子

由于 Sc 元素在地壳中广泛存在、变异系数小且与其他元素相关性较高, 因此本研究选择 Sc 元素为参

比元素, 计算金属元素富集因子, 见图 6. Ni、Cu、Zn 和 Cd 富集因子值高, 受人为源影响显著; Sb、Sr 和 W 富集因子也大于 10, 受到一定程度的人为影响; 而 Be、Ti、V、Mn、Cr、Co、Ga、Rb、Y、Cs、REEs、Th 和 U 富集因子小于 10, 受到自然源影响更大.

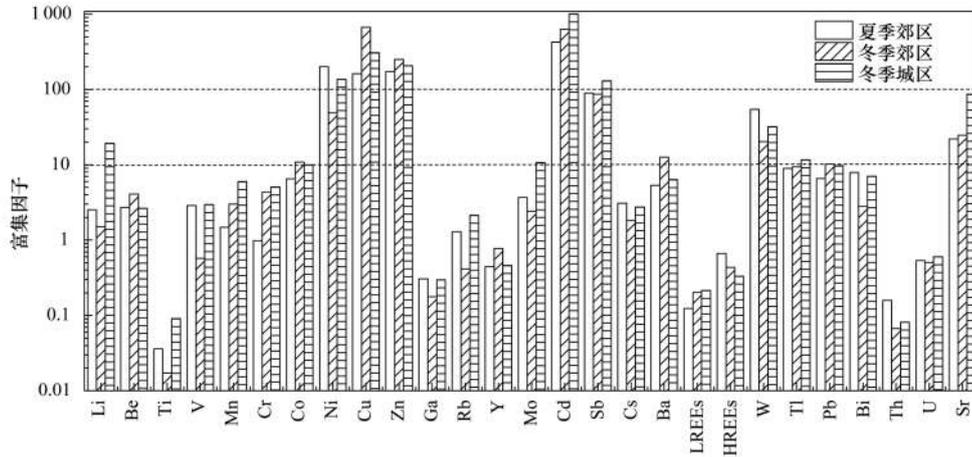


图 6 各元素富集因子

Fig. 6 Enrichment factor of each element

2.3.3 同位素示踪

根据变异系数可知, 厦门市雨水中 Pb 元素在不同季节、不同区域间来源大致相同, 本文仅选用夏季郊区样品作为代表与其他潜在污染源一同进行铅同位素测定, 分析其来源 (图 7). 雨水样品中 $2.248 < {}^{208}\text{Pb}/{}^{207}\text{Pb} < 2.291$, 在燃煤源 ($2.143 < {}^{208}\text{Pb}/{}^{207}\text{Pb} < 2.161$) 与其他潜在源 (土壤母质层、机动车尾气、垃圾焚烧、水泥为 $2.428 < {}^{208}\text{Pb}/{}^{207}\text{Pb} < 2.492$) 之间; $16.31 < {}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb} < 16.78$, 同样也在燃煤源 ($15.75 < {}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb} < 15.77$) 与其他潜在源 ($17.82 < {}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb} < 18.69$) 之间. 若令燃煤源为潜在源 1, 而其他源为潜在源 2, 则雨水样品与潜在源 1 和 2 之间具有较好的线性关系 ($r=0.989$, $P < 0.01$), 因此选用二元混合模型对雨水样品中铅来源进行定量分析, 得到结果是潜在源 1 的贡献率为

63.67%, 而潜在源 2 的贡献率为 36.33%, 即厦门市雨水中铅受燃煤影响较大, 燃煤对其贡献率为 63.67%, 而土壤母质层、机动车尾气、垃圾焚烧及水泥对其共同贡献率为 36.33%.

2.3.4 PMF 分析

由 PMF 软件对厦门市不同季节 (夏季、冬季) 及不同区域 (郊区、城区) 雨水样品中金属元素来源解析结果见图 8. 夏季郊区共有 3 个来源. 源 1 中 Be、Sc、Ti、V、Ga、Nb、Cd、HREEs、Pb、Bi 和 U 具有较高负载, 其中 Pb 元素负载为 63.0%, 与燃煤源对铅同位素贡献率分析结果 (63.67%) 相近, 因此, 认为源 1 为燃煤源; 源 2 中 Ti、Nb 及 Mo 负载较高, 由 2.3.2 节可知, 以上 3 种元素在夏季郊区富集因子均未超过 10, 受人为干扰小, 因此判定源 2 为自然源; 源 3 中 Li、Be、Sc、Mn、Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Rb、Y、Mo、Cd、Sb、Cs、Ba、LREEs、W、Tl、Th 及 Sr 具有较高负载, 其中 Cr、Ni 常常用于电镀行业^[24], V 和 Ni 是重油燃烧的产物^[25], Zn 和 Cu 常源于刹车片和轮胎磨损^[26], 因此认为源 3 为工业及交通混合源.

冬季郊区同样具有 3 个来源. 源 1 中 Be、Ga、HREEs、Tl、Pb 及 Bi 负载较高, 其中 Pb 元素负载为 61.6%, 同样与铅同位素分析结果相近, 因此判定源 1 为燃煤源; 源 2 中 Ti、Cr、Ga、Cd、Ba、LREEs、HREEs、Bi 及 U 负载较高, 其中除 Cd 与 Ba 外, 其他元素 EF 值在冬季郊区均小于 10, 表明其受人为源干扰较小, 因此判定此源为自然源. 同

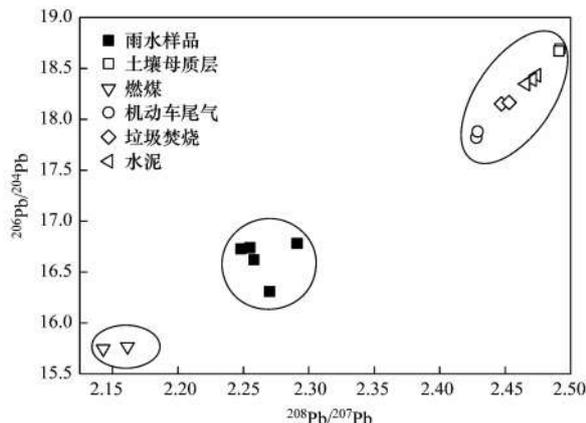


图 7 雨水及各潜在源样品中 ${}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}$ 与 ${}^{208}\text{Pb}/{}^{207}\text{Pb}$

Fig. 7 ${}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}$ vs ${}^{208}\text{Pb}/{}^{207}\text{Pb}$ in rainwater and each potential source

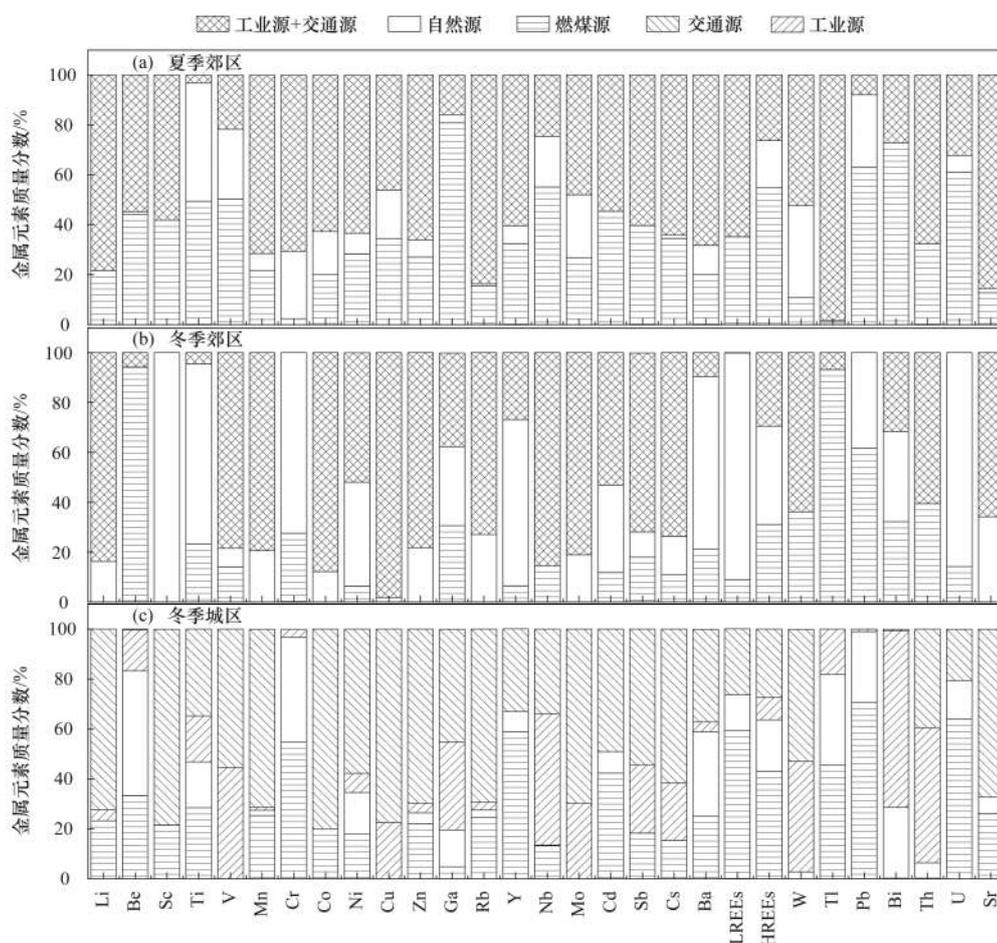


图8 PMF 因子分布

Fig. 8 Factor distribution of PMF analysis

时,采样期间郊区采样点周围有建筑施工进行,扬尘过多导致土壤中的Cd和Ba大量进入大气中,而后随湿沉降进入雨水中,导致其EF含量过高;源3具有Li、V、Mn、Cr、Ni、Cu、Zn、Ga、Rb、Y、Nb、Mo、Cd、Sb、Cs、W、Bi、Th和Sr元素的较高负载,认为此源为工业及交通的混合源。

冬季城区具有4个来源.源1具有Cr、Y、Cd、LREEs、HREEs、Tl、Pb及U的较高负载,同样地,Pb元素负载(70.7%)与同位素分析结果相似,认为此源为燃煤源;源2中Be、Cr和Ba元素负载较高,同时此3种元素EF值在冬季城区均小于10,因此认为源2为自然源;源3中V、Nb、W、Bi、Th负载较高,V和W也常常用于合金工业的生产,因此,认为此源为工业源;源4中Li、Sc、Ti、V、Mn、Co、Ni、Ga、Cu、Zn、Ga、Rb、Mo、Cd、Sb、Cs、Ba、Th和Sr负载较高,认为此源为交通源。

综上,厦门市降水中金属元素在不同季节不同地区受各污染源影响略有差异,但总体受燃煤源、自然源、工业源以及交通源的影响.此外,城区受交通源影响元素种类较多,影响较大,这与厦门市城区车流量较大有关。

3 结论

(1)厦门市降水中金属元素含量表现为冬季郊区 > 冬季城区 > 夏季郊区,各元素含量均低于《中华人民共和国地表水环境质量标准 GB 3838-2002》中的I类标准,但是Ni、Cu、Sr含量高于国内外其他城市.稀土元素含量存在季节和区域间差异,其标准化配分模式与各潜在源均不一致,来源相对复杂。

(2)Ni、Cu、Zn、Cd富集因子值高,受人为源影响显著;而Be、Ti、V、Mn、Cr、Co、Ga、Rb、Y、Cs、REEs、Th和U富集因子小于10,受到自然源影响更大。

(3)Pb元素主要受燃煤影响,其贡献率为63.67%,而土壤母质层、机动车尾气、垃圾焚烧及水泥共同对Pb元素的贡献率为36.33%.厦门市降水中各金属元素不同季节不同地区受各污染源影响略有差异,但总体受燃煤源、自然源、工业源以及交通源的影响。

参考文献:

[1] Mbengue S, Alleman L Y, Flament P. Bioaccessibility of trace

- elements in fine and ultrafine atmospheric particles in an industrial environment [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2015, **37**(5): 875-889.
- [2] Zuckerman A J. IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to Humans[J]. *Journal of Clinical Pathology*, 1995, **48**(7): 691.
- [3] 范广勤, 姚兆康, 郑辉列, 等. 儿童稀土暴露的健康效应研究[J]. *卫生研究*, 2004, **33**(1): 23-28.
Fan G Q, Yuan Z K, Zheng H L, *et al.* Study on the effects of exposure to rare earth elements and health-responses in children aged 7-10 years[J]. *Journal of Hygiene Research*, 2004, **33**(1): 23-28.
- [4] Rubio B, Nombela M A, Vilas F. Geochemistry of major and trace elements in sediments of the Ria de Vigo (NW Spain): an assessment of metal pollution [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2000, **40**(11): 968-980.
- [5] Sturges W T, Barrie L A. Stable lead isotope ratios in arctic aerosols: evidence for the origin of arctic air pollution [J]. *Atmospheric Environment* (1967), 1989, **23**(11): 2513-2519.
- [6] Norris G, Duvall R. EPA positive matrix factorization (PMF) 5.0 fundamentals and user guide [M]. Washington: Environmental Protection Agency, 2014. 14-17.
- [7] 张亚爽. 东南沿海典型港口城市大气降水中的重金属[J]. *环境科学与技术*, 2015, **38**(3): 131-135.
Zhang Y S. Heavy metals in atmospheric precipitation from a typical seaport in southern China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **38**(3): 131-135.
- [8] Gao J J, Tian H Z, Cheng K, *et al.* Seasonal and spatial variation of trace elements in multi-size airborne particulate matters of Beijing, China: mass concentration, enrichment characteristics, source apportionment, chemical speciation and bioavailability[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **99**: 257-265.
- [9] Pan Y P, Wang Y S. Atmospheric wet and dry deposition of trace elements at 10 sites in Northern China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(2): 951-972.
- [10] 王华, 马宁, 杨晓静, 等. 成都市雨水中的重金属特征[J]. *地球与环境*, 2010, **38**(1): 49-53.
Wang H, Ma N, Yang X J, *et al.* Heavy metal characteristics of rainwater in Chengdu [J]. *Earth and Environment*, 2010, **38**(1): 49-53.
- [11] 徐宏林, 李定远, 杨军, 等. 湖北省云梦县重金属元素大气干湿沉降通量初探[J]. *资源环境与工程*, 2015, **29**(6): 816-821.
Xu H L, Li D Y, Yang J, *et al.* Preliminary study on flux of atmospheric dry and wet deposition of heavy metal elements in Yunmeng county, Hubei province[J]. *Resources Environment & Engineering*, 2015, **29**(6): 816-821.
- [12] 王珊珊, 于瑞莲, 胡恭任, 等. 厦门市大气 PM_{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评估[J]. *地球与环境*, 2017, **45**(3): 336-341.
Wang S S, Yu R L, Hu G R, *et al.* Pollution characteristic and health risk of heavy metals in PM_{2.5} of Xiamen city, China[J]. *Earth and Environment*, 2017, **45**(3): 336-341.
- [13] Eiguren-Fernandez A, Miguel A H, Froines J R, *et al.* Seasonal and spatial variation of polycyclic aromatic hydrocarbons in vapor-Phase and PM_{2.5} in southern California urban and rural communities[J]. *Aerosol Science and Technology*, 2004, **38**(5): 447-455.
- [14] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].
- [15] 蒋冰艳, 何龙, 陈德华, 等. 深圳近海区域降水中重金属湿沉降通量及源解析[J]. *环境化学*, 2018, **37**(7): 1460-1473.
Jiang B Y, He L, Chen D H, *et al.* Wet deposition flux and sources of heavy metals in precipitation in the coastal area of Shenzhen[J]. *Environmental Chemistry*, 2018, **37**(7): 1460-1473.
- [16] Guo J M, Kang S C, Huang J, *et al.* Seasonal variations of trace elements in precipitation at the largest city in Tibet, Lhasa[J]. *Atmospheric Research*, 2015, **153**: 87-97.
- [17] 叶艾玲, 程明超, 张璐, 等. 太原市夏季降水中溶解态重金属特征及来源[J]. *环境科学*, 2018, **39**(7): 3075-3081.
Ye A L, Cheng M C, Zhang L, *et al.* Characteristics and sources of dissolved heavy metals in summer precipitation of Taiyuan city, China[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3075-3081.
- [18] 李月梅, 潘月鹏, 王跃思, 等. 华北工业城市降水中金属元素污染特征及来源[J]. *环境科学*, 2012, **33**(11): 3712-3717.
Li Y M, Pan Y P, Wang Y S, *et al.* Chemical characteristics and sources of trace metals in precipitation collected from a typical industrial city in northern China [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(11): 3712-3717.
- [19] Cukurluoglu S. Sources of trace elements in wet deposition in Pamukkale, Denizli, western Turkey [J]. *Environmental Forensics*, 2017, **18**(1): 83-99.
- [20] Kim J E, Han Y J, Kim P R, *et al.* Factors influencing atmospheric wet deposition of trace elements in rural Korea[J]. *Atmospheric Research*, 2012, **116**: 185-194.
- [21] 葛坦, 田野, 王强. 北海半岛水体混合过程的稀土元素分布特征[J]. *中国稀土学报*, 2008, **26**(6): 753-759.
Ge T, Tian Y, Wang Q. Distribution of rare earth elements during estuarine mixing in Beihai peninsula, Guangxi [J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 2008, **26**(6): 753-759.
- [22] Martin J M, Høgdahl O, Philippot J C. Rare earth element supply to the Ocean [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1976, **81**(18): 3119-3124.
- [23] Wang S S, Yu R L, Hu G R, *et al.* Distribution and source of rare earth elements in PM_{2.5} in Xiamen, China [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2017, **36**(12): 3217-3222.
- [24] Sun J W, Hu G R, Yu R L, *et al.* Human health risk assessment and source analysis of metals in soils along the G324 Roadside, China, by Pb and Sr isotopic tracing [J]. *Geoderma*, 2017, **305**: 293-304.
- [25] Ledoux F, Kfoury A, Delmaire G, *et al.* Contributions of local and regional anthropogenic sources of metals in PM_{2.5} at an urban site in northern France [J]. *Chemosphere*, 2017, **181**: 713-724.
- [26] Sawyer R F, Harley R A, Cadle S H, *et al.* Mobile sources critical review: 1998 NARSTO assessment [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(12-14): 2161-2181.

CONTENTS

Characteristics of Aerosol Vertical Distribution over the Yangtze River Delta Region of China in 2018	SHEN Ji, CAO Nian-wen (4743)
Characteristics of Haze Pollution Episodes During Autumn and Winter in 2018 in Shijiazhuang	SU Wen-kang, BAO Xiao-lei, NI Shuang-ying, <i>et al.</i> (4755)
Spatial Temporal Characteristics and Cluster Analysis of Chemical Components for Ambient PM _{2.5} in Wuhan	ZHANG Hui-tao, TIAN Ying-ze, LIU Bao-shuang, <i>et al.</i> (4764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Atmospheric PM _{2.5} in a Living Area of Zhengzhou City	HE Rui-dong, ZHANG Yi-shun, CHEN Yong-yang, <i>et al.</i> (4774)
Distribution Characteristics and Sources of Metal Elements in Rainwater in Xiamen	WANG Shan-shan, CHENG Yi-feng, YAN Jin-pei, <i>et al.</i> (4783)
First Long-Term Study of Atmospheric New Particle Formation in the Suburb of Shanghai from 2015 to 2017	HUO Jun-tao, WANG Xin-ning, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (4791)
Characteristics, Transportation, Pathways, and Potential Sources of Air Pollution During Autumn and Winter in Taiyuan	YAN Shi-ming, WANG Yan, GUO Wei, <i>et al.</i> (4801)
Spatial and Temporal Characteristics of Air Quality and Cause Analysis of Heavy Pollution in Northeast China	CHEN Wei-wei, LIU Yang, WU Xue-wei, <i>et al.</i> (4810)
Spatiotemporal Evolution and Driving Mechanism of Aerosol Optical Depth in the Ebinur Lake Basin	CHEN Xiang-yue, DING Jian-li, WANG Jing-zhe, <i>et al.</i> (4824)
Concentration Levels and Impact Factors of Benzene Series in Chinese Residential Building	HOU Bei-bei, YIN Yi-hui, PEI Jing-jing, <i>et al.</i> (4833)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Aromatic Compounds in Shijiazhuang	YANG Yang, LI Xing-ru, LIU Shui-qiao, <i>et al.</i> (4841)
Emission Characteristics Analysis and Health Risk Assessment of Unorganized VOCs in the Carbon Industry, Zhengzhou	ZHANG Yi-shun, WANG Jia, HAN Shi-jie, <i>et al.</i> (4847)
Hazardous Volatile Organic Compound Emission Inventory Study and Its Application in a Typical Chemical Industry in the Yangtze River Delta	LU Jun, HUANG Yi-wei, HUANG Cheng (4856)
Establishment and Characteristics of an Artificial Ammonia Emissions Inventory in Jiangsu Province from 2013 to 2017	HOU Xin-hong, YU Xing-na, SHEN Li, <i>et al.</i> (4862)
Occurrence Characteristics and Health Risks of PAHs on the Surface of Buildings and Devices in the Coking Plant	ZHAO Yi-shu, LIAO Xiao-yong, LI You, <i>et al.</i> (4870)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Androgens, Glucocorticoids, and Progesterone in the Liusha Bay, South China Sea	YANG Lei, ZHANG Jin-na, XU Min, <i>et al.</i> (4879)
Dynamic Changes in Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in the Karst Watershed Flood Process	YUAN Ya-qiong, SUN Ping-an, SU Zhao, <i>et al.</i> (4889)
Sources, Distribution, and Fluxes of Major and Trace Elements in the Yangtze River	WU Wen-tao, RAN Xiang-bin, LI Jing-xi, <i>et al.</i> (4900)
Contaminant Characteristics and Ecological Risk Assessments of Heavy Metals from River Networks in the Western Area of the Wangyu River	XU Chen, WANG Pei-fang, CHEN Juan, <i>et al.</i> (4914)
Influence of Rainfall Intensity on the Nutrient Loading from an Inflowing River in the Plain River Network of the Taihu Catchment	CHEN Jie, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (4924)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments from Shibalianwei Wetland in Hefei, Anhui Province, China	CHEN Shan, XU Fan, XIE San-tao, <i>et al.</i> (4932)
Spatial Distribution Characteristics of Chlorophyll-a and Nutrient Salts in Tributaries of Different River Sections in the Three Gorges Reservoir Area During the Flood Season	YANG Fan, YANG Zheng-jian, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4944)
Endogenous Release of Nitrogen and Phosphorus in the Danjiangkou Reservoir	WANG Zhi-qi, LIU Xin-xing, YAO Zhi-hong, <i>et al.</i> (4953)
Correlation Between Water Purification Capacity and Bacterial Community Composition of Different Submerged Macrophytes	LI Lin, YUE Chun-lei, ZHANG Hua, <i>et al.</i> (4962)
Size-dependent Effects of Zinc Oxide Nanoparticles on Performance and Microbial Community Structure of a Constructed Wetland	WANG Sen, REN Ling, LIU Lin-lin, <i>et al.</i> (4971)
Removal of Nitrogen and Phosphorus from Water by Biomass Carbon of Aquatic Plants	LIU Shu-lei, PENG Hui-jun, YANG Jia-yi, <i>et al.</i> (4980)
Preparation of MgO Modified Lotus Shell Biochar and Its Phosphorus Adsorption Characteristics	WANG Sheng-hua, ZHU Dan-chen, SHAO Jing-ai, <i>et al.</i> (4987)
Effects of Microplastics on Membrane Fouling During a Shortened Ultrafiltration Membrane Process	WANG Bo-dong, XUE Wen-jing, LÜ Yong-tao, <i>et al.</i> (4996)
Preparation and Comparison of Arsenic Removal Granular Adsorbent Based on Iron-Manganese Sludge	ZENG Hui-ping, YU Ya-ping, LÜ Sai-sai, <i>et al.</i> (5002)
Catalytic Degradation of Rhodamine B by FeOCl Activated Hydrogen Peroxide	ZHANG Shao-peng, CHEN Yu, BAI Shu-qin, <i>et al.</i> (5009)
Treatment Effect and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Wastewater from Large-scale Dairy Farms in Tianjin	CHEN Qian, ZHAO Run, MOU Mei-ru, <i>et al.</i> (5015)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Wastewater Treatment Plants	YAO Peng-cheng, CHEN Jia-yu, ZHANG Yong-ming, <i>et al.</i> (5024)
Start-up and Stable Operation of CANON Coupled with Denitrifying Phosphorus Removal	YIN Wen, CHEN Ya, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (5032)
Control of Sludge Bulking Caused by Unknown Reason Through FeCl ₃ Coupled with Biochemical Methods	WEI Dong-yang, XIAO Cai-lin, ZHOU Wen, <i>et al.</i> (5040)
Effects of Solid Retention Time on the Phosphorus Removal and Nitrosation Granules System	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, <i>et al.</i> (5048)
Start-up of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification Process and Changes in Microbial Community Characteristics	SONG Zhuang-zhuang, LÜ Shuang, LIU Zhe, <i>et al.</i> (5057)
Influence of Substrate Exposure Level on ANAMMOX Microbial Activity and Biomass	CHEN Fang-min, GAO Jia-qi, HUANG Yong, <i>et al.</i> (5066)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils in the Taige Canal Valley	LI Wei-di, CUI Yun-xia, ZENG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (5073)
Method of Dividing the Value of Soil Heavy Metal Pollution Risk Screening: Using Cd as an Example	WANG Rui, ZHANG Feng-lei, XU Shu-shu, <i>et al.</i> (5082)
Mineral Characteristics of Arsenic in the Active Area of the Banbishan Gold Mine and Its Effect on Arsenic Accumulation in Farmland Soil	WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, SHEN Jun-feng, <i>et al.</i> (5090)
Remediation of Cadmium Contaminated Paddy Fields Using Soil Conditioners	ZHOU Li-jun, WU Lin, LIN Xiao-bing, <i>et al.</i> (5098)
Inhibition and Remediation of Methylmercury Contaminated Soil by Use of Modified Montmorillonite	HAN Yi-xin, HE Tian-rong, WANG Zu-bo (5107)
Cerium-manganese Modified Biochar Immobilizes Arsenic in Farmland Soils	LIANG Ting, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5114)
Improving Bioremediation of Crude Oil-contaminated Soil by Mild Pre-oxidation	XU Jin-lan, WANG Hui-fang, WANG Rong, <i>et al.</i> (5124)
Community Structure of Heavy Metal Immobilized Bacteria in the Lettuce (<i>Lactuca sativa</i> L.) Rhizosphere in Soil Polluted by Heavy Metals and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Lettuce	WANG Tie-jun, SU Nan-nan, LEI Peng, <i>et al.</i> (5133)
Impact of Dicyandiamide (DCD) and 3,4-Dimethylpyrazole Phosphate (DMPP) on Ammonia-oxidizing Bacteria and Archaea in a Vegetable Planting Soil	GUO Jun-li, LIU Yi, WEI Wen-xue, <i>et al.</i> (5142)
Effect of Different Reclaimed Water Irrigation Methods on Bacterial Community Diversity and Pathogen Abundance in the Soil-Pepper Ecosystem	CUI Bing-jian, GAO Feng, HU Chao, <i>et al.</i> (5151)
Characteristics of CO ₂ and N ₂ O Emissions Under Two Land Use Types in the Loess Plateau of China	HAN Jia-le, HAO Shan, LIU Zhen-jie, <i>et al.</i> (5164)
Effects of Biochar on N ₂ O Emission from Four Typical Soils in the North China Plain	ZHANG Xiu-ling, SUN Yun, ZHANG Shui-qing, <i>et al.</i> (5173)
Effects of Optimizing Fertilization on N ₂ O and CH ₄ Emissions in a Paddy-Cowpea Rotation System in the Tropical Region of China	HU Yu-lin, TANG Shui-rong, TAO Kai, <i>et al.</i> (5182)