

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第11期

Vol.35 No.11

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊夏季近地层臭氧及其前体物体积分数变化特征	邵平, 安俊琳, 杨辉, 林旭, 吉东生 (4031)
亚青会期间南京污染气体与气溶胶中水溶性离子的分布特征	邹嘉南, 安俊琳, 王红磊, 邵平, 段卿, 薛国强, 庞博 (4044)
亚青会期间南京地区气溶胶浓度变化及其与能见度的关系	袁亮, 银燕, 李琦, 肖辉, 李力 (4052)
2013年10月长株潭城市群一次持续性空气污染过程特征分析	廖志恒, 范绍佳, 黄娟, 孙家仁 (4061)
在线单颗粒气溶胶质谱 SPAMS 对细颗粒物中主要组分提取方法的研究	付怀于, 闫才青, 郑玫, 蔡靖, 李小滢, 张延君, 周振, 傅忠, 李梅, 李磊, 张远航 (4070)
PM ₁₀ 可替代源成分谱的建立方法及其应用	陈强, 景毅, 吴焕波, 王芳 (4078)
夏季东海和南黄海一氧化氮的浓度分布、海-气通量和微生物消耗研究	王敬, 陆小兰, 杨桂朋, 徐冠球 (4085)
三峡库区典型农田小流域水体汞的时空分布特征	王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇 (4095)
浑太水系水体中不同粒径有机胶体荧光光谱特性	刘娜娜, 李斌, 刘瑞霞, 宋永会, 吴畏 (4103)
深圳湾流域 TN 和 TP 入海年通量变化规律研究	赵晨辰, 张世彦, 毛献忠 (4111)
滇池沉积物有机磷垂直分布特征及其生物有效性	熊强, 焦立新, 王圣瑞, 彭希琰 (4118)
金山湖闸坝型水体表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价	周晓红, 刘龙梅, 陈曦, 陈志刚, 张金萍, 李义敏, 刘彪 (4127)
西藏普莫雍错湖芯沉积物中重金属的垂向分布特征及生态风险评估	谢婷, 罗东霞, 杨瑞强 (4135)
西安市雨水径流中重金属季节性污染特征及分析	袁宏林, 李星宇, 王晓昌 (4143)
城市不同下垫面降雨径流多环芳烃 (PAHs) 分布及源解析	武子澜, 杨毅, 刘敏, 陆敏, 于英鹏, 汪青, 郑鑫 (4148)
粗放型绿色屋面填料的介质组成对出水水质的影响	陈昱霖, 李田, 顾俊青 (4157)
饮用水处理中不同来源生物活性炭微生物群落多样性和结构研究	杜尔登, 郑璐, 冯欣欣, 高乃云 (4163)
压力强化混凝除藻工艺中藻毒素安全性研究	蒋新跃, 栾清, 丛海兵, 徐思涛, 刘玉娇, 朱学源 (4171)
基于膜特征参数变化的蛋白质超滤过程膜污染研究	王旭东, 张银辉, 王磊, 张慧慧, 夏四清 (4176)
臭氧氧化水溶液中对乙酰氨基酚的机制研究	曹飞, 袁守军, 张梦涛, 王伟, 胡真虎 (4185)
电辅助微生物反应器降解苯并噻唑效能的研究	刘春苗, 丁杰, 刘先树, 程旺斌 (4192)
铁铜复合氧化物纳米吸附剂的制备、表征及 As(Ⅲ)吸附性能研究	张伟, 陈静, 张高生 (4198)
重金属铬胁迫下水蚯蚓的生理响应研究	楼菊青, 杨东叶, 曹永青, 孙培德, 郑平 (4205)
光质对蛋白核小球藻 (<i>Chlorella pyrenoidosa</i>) 生长特征及生化组成的影响研究	唐青青, 方治国, 嵇雯雯, 夏会龙 (4212)
常温低基质下碱度和溶解氧对厌氧氨氧化的影响	任玉辉, 王科, 李相昆, 马凯丽, 张杰 (4218)
Fe ²⁺ 和 Fe ³⁺ 对厌氧氨氧化污泥活性的影响	李祥, 黄勇, 巫川, 王孟可, 袁怡 (4224)
CSTR 中亚硝化颗粒污泥的变化过程研究	阴方芳, 刘文如, 王建芳, 吴鹏, 沈耀良 (4230)
盐度对好氧颗粒污泥硝化过程中 N ₂ O 产生量的影响	王珊珊, 梁红, 高大文 (4237)
硫酸盐还原反应器污泥驯化过程中微生物群落变化分析	曾国驱, 贾晓珊, 郑小红, 杨丽平, 孙国萍 (4244)
利用铅同位素方法量化不同端元源对南京土壤和长江下游悬浮物铅富集的影响	王成, 夏学齐, 张义, 廖启林, 杨忠芳, 季峻峰 (4251)
北京东南郊土壤剖面氟喹诺酮类抗生素分布特征	苏思慧, 何江涛, 杨蕾, 乔肖翠, 崔亚丰 (4257)
环境因素对土壤中几种典型四环素抗性基因形成的影响	张俊, 罗方园, 熊浩微, 焦少俊, 叶波平 (4267)
稻田土壤不同水分条件下硝化/反硝化作用及其功能微生物的变化特征	刘若萱, 贺纪正, 张丽梅 (4275)
典型岩溶土壤微生物丰度与多样性及其对碳循环的指示意义	靳振江, 汤华峰, 李敏, 黄炳富, 李强, 张家喻, 黎桂文 (4284)
变温环境对典型石灰土有机碳矿化的影响	王莲阁, 高岩红, 丁长欢, 慈恩, 谢德体 (4291)
铁氧化物与电子供体基质交互作用对红壤性水稻土中 DDT 还原脱氯影响	刘翠英, 徐向华, 王壮, 姚童言 (4298)
植物套种及化学强化对重金属污染土壤的持续修复效果研究	卫泽斌, 郭晓方, 吴启堂, 龙新宪 (4305)
不同取样尺度下亚高山草甸土壤呼吸的空间变异特征	李洪建, 高玉凤, 严俊霞, 李君剑 (4313)
不同开垦年限黑土温室气体排放规律研究	李平, 郎漫, 徐向华, 李煜珊, 朱淑娟 (4321)
转 Cry1Ac 基因抗虫棉与其亲本棉花根际真菌多样性的比较	潘建刚, 焦海华, 白志辉, 齐鸿雁, 马安周, 庄国强, 张洪勋 (4329)
天津污灌区内气态汞的污染特征及在叶菜类蔬菜中的富集	郑顺安, 韩允垒, 郑向群 (4338)
1-硝基芘和 1,2-萘醌的联合细胞毒性和致 DNA 损伤	尚羽, 蒋玉婷, 张玲, 李怡 (4345)
鸡粪堆肥有机物演化对重金属生物有效性影响研究	卜贵军, 于静, 邱慧慧, 罗世家, 周大寨, 肖强 (4352)
污泥预植重金属 Cu 炭化及炭中重金属的稳定性研究	窦晓敏, 陈德珍, 戴晓虎 (4359)
上层曝气式生物反应器填埋工艺特性的研究	田颖, 王坤, 徐期勇 (4365)
硝酸盐连续回灌对生物反应器填埋场 N ₂ O 产生的影响	卞荣星, 孙英杰, 李晶晶, 张欢欢 (4371)
中国碳强度下降和碳排放增长的行业贡献分解研究	蒋晶晶, 叶斌, 计军平, 马晓明 (4378)
泛长三角地区工业污染重心演变路径及其驱动机制研究	赵海霞, 蒋晓威, 崔建鑫 (4387)
基于污染防治技术模拟的造纸行业环境管理方法研究	张雪莹, 温宗国 (4395)
大气棕色碳的研究进展与方向	闫才青, 郑玫, 张远航 (4404)
《环境科学》征稿简则 (4094) 《环境科学》征订启事 (4126) 信息 (4243, 4266, 4274, 4328)	

西安市雨水径流中重金属季节性污染特征及分析

袁宏林, 李星宇*, 王晓昌

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

摘要: 为了探讨一年四季不同时段内城区各区域内雨水径流中重金属污染现状、变化特点、重金属之间的相关关系及污染源分析, 采集了西安市几条典型城市交通干道在 2013 年全年的雨水径流样品, 利用电感耦合等离子质谱仪 (ICP-MS) 测定其中重金属 Fe、Mn、Pb、Zn、Al、Cd 的含量, 对雨水径流中重金属季节性变化进行了分析。结果表明, 西安城区路面径流重金属污染严重, Fe 超国家标准 3 倍, 在全年中都保持较高的含量, 且浓度值随人为活动密集度增大而增加; Mn、Zn 在一年中呈现出: 冬季 > 秋季 > 夏季 > 春季的趋势; Pb 的浓度随着车流量的增加而增大, 表现出: 冬季 > 春季 > 夏季 > 秋季的趋势。因子分析表明, Fe、Al 被同一污染源——自然污染源所影响; Zn、Cd 受到人为污染源的影响较大; Mn、Pb 受到交通污染源的影响较大。

关键词: 雨水径流; 重金属; 四季变化; 因子分析; 西安

中图分类号: X131.2; X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)11-4143-05 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.11.014

Heavy Metals Pollution and Analysis of Seasonal Variation Runoff in Xi'an

YUAN Hong-lin, LI Xing-yu, WANG Xiao-chang

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to explore heavy metals pollution situation, changes in characteristics, the correlation between each heavy metal and pollution source analysis of Xi'an various regions in different season in one year. This study collected several samples of Xi'an rainfall typical urban trunk roads throughout the year in 2013 and used inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) to determine the level of Fe, Mn, Pb, Zn, Al, Cd of the samples, then, analyzed the seasonal change of heavy metal. Studies have shown that: the heavy metal of Xi'an road runoff pollutes seriously, the concentration of Fe over three times of the national standard and maintain the higher levels throughout the year, meanwhile the concentration with the intensity of human activities increases. The concentration of Mn and Zn in one year show a trends: winter > autumn > summer > spring. Pb concentration increases with the increase in traffic volume, while showing: winter > spring > summer > autumn. Factor analysis shows: Fe and Al was affected by the same sources-natural sources; Zn, Cd affected by anthropogenic sources of large; Mn, Pb affected by the larger traffic sources.

Key words: rainfall runoff; heavy metals; change in seasons; factor analysis; Xi'an

城市道路表面能够通过汽车尾气排放、轮胎和路面磨损以及油脂的渗漏等累积大量的悬浮颗粒、重金属等污染物质^[1~4], 降雨过程中, 雨水径流冲刷地表沉积物使得较多污染物进入雨水中, 严重危害着城市水体。有研究表明^[5], 城市道路地表径流是有毒污染物(如重金属等)进入地表水体的重要途径, 城市道路径流贡献了总污染负荷中 50% 的悬浮固体和 35% ~ 75% 的重金属。因此, 城市雨水重金属污染受到广泛重视。自 20 世纪后期至今, 国内外先后对路面径流雨水的重金属污染做了大量调查^[6~10], 我国对部分城市路面径流重金属污染的研究显示: 北京市路面径流雨水中主要含有 Pb、Zn、Al、Fe、Cu 等重金属, Pb、Zn 的含量分别达到 5 ~ 70 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、50 ~ 340 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 汽车保有量较大是导致道路径流水质中 Pb 含量较高的主要原因^[11~13]; 上海市路面径流雨水中含有较多的 Pb、Zn、Mn、Cd 等重金属, 其浓度分别为 0.29、60.2、11.1、

1.22 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 且主要以颗粒吸附态形式存在, 其中颗粒吸附态的铅含量最高^[14]; 天津市路面径流雨水中 Fe、Cr、Cd 的平均浓度分别为 387 ~ 586、61 ~ 94、7 ~ 12 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 且具有明显的径流初期冲洗效应^[15]。已有研究结果说明, 城市径流雨水中重金属污染较为严重, Pb、Zn、Fe、Cd、Mn 等是常见的重金属污染物, 但是由于各个城市的气候环境、市政建设状况、道路使用及养护水平等存在差异, 所以反映出不同城市雨水中主要重金属污染物的种类、污染水平、污染物来源也存在差异。因此开展城区路面径流雨水重金属污染研究需要针对城市的特点。本文以西安城区为对象, 针对径流雨水中 6 种重金属 (Pb、Zn、Al、Fe、Cd、Mn) 含量与路面类

收稿日期: 2014-03-27; 修订日期: 2014-06-23

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2009ZX07318-008-004)

作者简介: 袁宏林 (1965 ~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向是水体污染控制技术与理论, E-mail: hlyuan@xauat.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: 470959231@qq.com

型、道路功能、人类活动繁忙程度、季节变化等环境因素之间的关系开展研究,以期为西安市环境中重金属的防治提供科学依据。

1 样品采集与分析方法

1.1 采样点布置

西安雨量适中,四季分明。春季(3~5月)温暖、干燥、多风;夏季(6~8月)炎热多雨,多雷雨大风天气;秋季(9~11月)凉爽,气温速降,秋淋明显;冬季(12~次年2月)寒冷、多雾、少雨雪。为全面地研究西安城区路面径流雨水中重金属的特征情况,本研究根据西安城区现在的格局、下垫面情况、城市交通特点、不同功能区等特征选取了5个典型区域进行采样,采样点情况如图1所示,基本可以覆盖西安市路面现状的各种情况。



图1 采样点位置示意

Fig. 1 Situation of sampling point

1.2 采样方法及采集时间

采样过程严格按照《大气降水样品的采集与保存》(GB 13580.2-1992)执行。①采样瓶准备:在实验室将500 mL采样瓶经10%硝酸溶液浸泡24 h后,用超纯水(电阻率 $<18.25\text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$)反复冲洗采样瓶使之达到中性($\text{pH}=7$);再加一定量超纯水振

荡,用离子色谱法检测水中的 Cl^- ,若和超纯水相同,即为合格;然后晾干封盖、常温下保存于干净柜子中备用。②样品采集:2013年2月~2014年2月间,每次降雨时及时到达设定好的5个采样点,在道路雨水篦子下方用预先准备好的取样瓶采集径流雨水样品,滤去漂浮物后保留取样量约1 L,及时送至实验室进行预处理和测定分析。研究期间产生路面径流且能够满足取样量的有效降雨有23次,共计采集到23次有效样品。

1.3 分析方法

样品预处理:①将雨水样品经 $0.22\text{ }\mu\text{m}$ 滤头过滤,用滤后液润洗10 mL离心管2遍;②取2 mL滤后液置于离心管中并滴加0.1 mL优级纯硝酸液;③用超纯水(电阻率 $<18.25\text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$)将离心管中水样定容至10 mL。

重金属测定:采用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)对被检测物质进行定量分析。实验分析仪器为加拿大PerkinElmer公司制造的ELAN DRC-e型ICP-MS,指标检测下限为 $0.001\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

标准曲线:重金属标准样自国家标准物质网选购,标准样共6种(Pb、Zn、Al、Fe、Cd、Mn),浓度均为 $1\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。用超纯水(电阻率 $<18.25\text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$)分别将标准样配置成浓度为0、20、40、60、80、 $100\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的标准混合液,然后测定标准混合液得到标准曲线。实验期间,所测定标准曲线的线性相关系数均大于0.999。

2 结果与讨论

2.1 路面径流雨水中重金属含量

表1是研究期间所测定的23次有效降雨样品中6种重金属的浓度范围及全年平均值。从数据看,城市路面径流雨水中含有较多种类的重金属,与GB 3838-2002《地表水环境质量标准》相比,除了Cd未超标外,其他重金属均有超标现象;与国内外其它城市相比^[16~20],西安地区雨水中重金属Zn、Al、Fe、Mn明显高于上海、成都、贵阳以及日本、中国

表1 重金属含量测定结果/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Content of heavy mental in the runoff of each sampling site/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

采样点	Fe	Zn	Al	Mn	Pb	Cd
堡子村	119.4~330.7	67.67~142.44	27.12~57.82	24.62~176.96	5.58~12.89	0.01~0.39
小寨	914.1~1 016.9	116.02~277.83	109.18~164.64	13.85~381.84	5.66~15.91	0.03~0.67
城运公园	120.9~589.3	39.66~167.89	66.82~108.01	7.34~123.46	0.33~4.54	0.01~0.19
土门停车场	153.5~399.9	51.06~211.52	106.03~189.98	10.86~139.28	4.42~7.99	0.06~0.46
大学校园	139.9~689.7	107.31~215.06	34.43~81.65	9.19~165.39	1.43~5.57	0.15~0.87
全年平均值	407.8	137.92	95.50	96.54	6.31	0.25

台湾等的城市,说明西安地区的路面径流雨水中重金属污染状况较为严重。

2.2 重金属含量受地面环境影响特征

为了反映重金属含量受环境状况及下垫面影响特征,按照采样点的不同分别计算出全年 23 次样品中各种重金属含量的平均浓度,见图 2 所示。

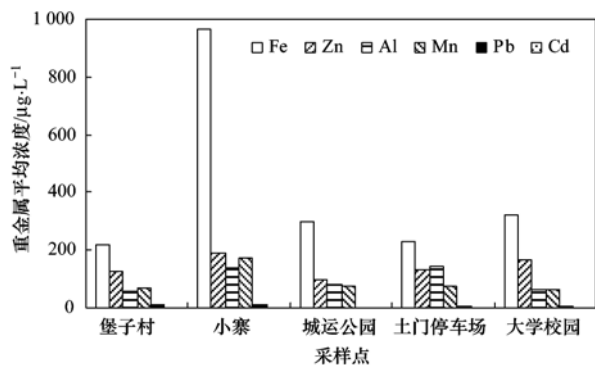


图 2 各采样点处路面径流雨水中重金属含量

Fig. 2 Average content of heavy metal in the runoff of each sampling site

图中显示: ①在每个采样点处, Fe 的含量明显高于其他重金属, 其次为 Zn、Al、Mn、Pb、Cd, 这与国内外其他城市主要重金属含量的趋势基本一致^[21-23]。原因是 Fe 元素在地壳中的含量本身较高, 释放到自然界的几率较其他元素要大, 造成任何环境状况中含量都较其它元素要高。②小寨、大学校园、城运公园等人流量大的地方 Fe 和 Zn 含量较其它地方高, 说明人类活动是影响 Fe、Zn 在路面聚集的重要因素。③小寨和土门停车场 Al 含量高于其他地方, 说明人流量、车流量都较大的地方容易造成 Al 的积累。④Mn 含量在各采样地点差距不大, 说明 Mn 在城市道路雨水中的含量较为均衡, 与下垫面及环境关系不大。⑤小寨、堡子村的车流量较大, 所测定的 Pb 含量较其他地方要高, 最少的是车流量较少的城运公园和校园, 说明机动车流量是造成路面径流雨水中含有 Pb 的主要原因。⑥从整体情况看, 人流量较小的堡子村重金属含量总体水平相对低于其他地方, 说明人流量大小是影响重金属含量的重要原因尤其是对 Fe 的影响; 路面材质对重金属含量影响并不明显。

2.3 重金属季节性变化

样品测定结果见图 3~6, 其中雨水样品中 Cd 的含量较低, 各点均值都在 $0.1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下, 低于《地表水环境质量标准》GB 3838-2002 中 I 类标准。从图 3~6 中可以看出, 一年中各种重金属变化趋势

略有不同。比较图 3~6 各季节平均含量, 每个采样点处径流雨水中 Al 季节性变化较小, 从 $67.12 \sim 189.98 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 这可能与 Al 的含量在地壳中仅次于氧和硅, 含量较大保持常量有关。而 Mn 一年中四季变化较大, 浓度变化大体为: 冬季 > 秋季 > 夏季 > 春季, 最大变化幅度从 $13.85 \sim 381.84 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。冬季最高可能与冬季燃煤中含有大量重金属有关。这与胡健等^[24]研究的贵阳市大气降水中重金属特征一致。相比而言, Zn 的变化幅度仅次于 Mn, 最大点变化幅度为 $51.06 \sim 200.45 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。超过《地表水环境质量标准》GB 3838-2002 中 I 类标准。

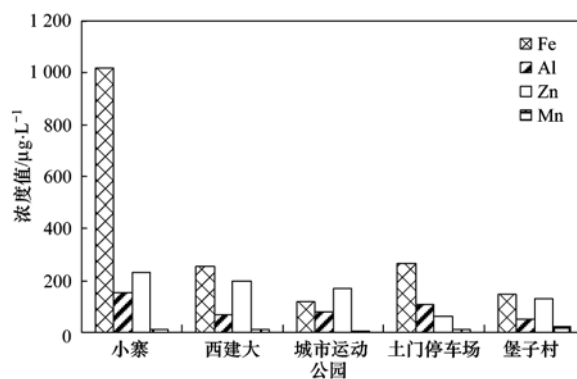


图 3 春季径流雨水中重金属含量平均值

Fig. 3 Average content of heavy metal of spring runoff

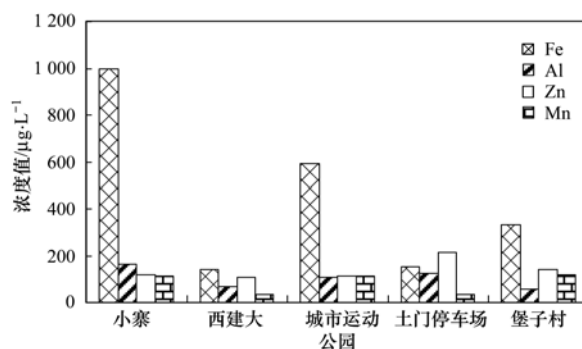


图 4 夏季径流雨水中重金属含量平均值

Fig. 4 Average content of heavy metal of summer runoff

从结果看, 小寨的 Fe 含量一年中均为所有检测点中最高的, 超过《城市供水水质标准》(CJ/T 206-2005) 中规定值 3 倍。城市运动公园的夏季和西安建筑科技大学的秋季时 Fe 含量均为一年中最大值。这是分别因为小寨是西安的商业中心人流量大, 城运公园在夏季时许多人会去运动, 大学校园秋季学生开学, 这表明人为活动是 Fe 含量的主要影响因素。

2.4 重金属因子分析

径流雨水中各重金属污染物之间存在一定的联

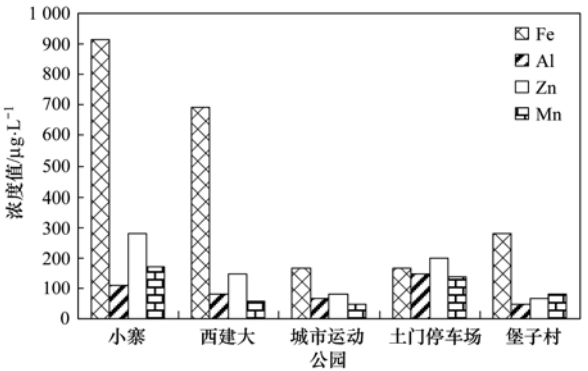


图5 秋季径流雨水中重金属含量平均值

Fig. 5 Average content of heavy mental of autumn runoff

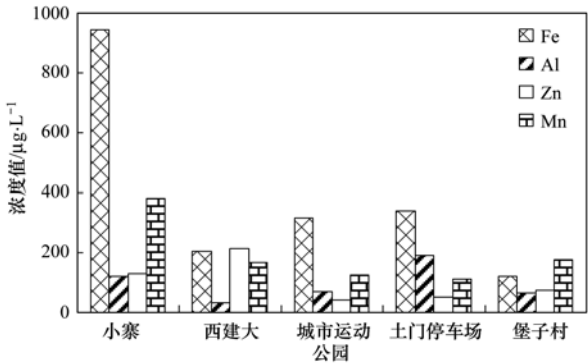


图6 冬季径流雨水中重金属含量平均值

Fig. 6 Average content of heavy mental of winter runoff

系,分析其之间的相关性,有助于研究重金属的潜在污染源,从而能够有针对性地去解决重要污染源所产生的污染,为污染控制措施提供依据.

表2所示为因子分析的核心内容,通过载荷系数大小可以分析不同公共因子所反映的主要指标的区别.从结果看,大部分因子解释性较好,但是仍有一个指标“Zn”解释能力较差,它在其中两个因子的载荷系数区别不大,因此接着采用因子旋转方法似因子载荷系数向0和1两极分化,使大的载荷更大,小的载荷更小,这样结果更具可解释性^[25].

表3显示了实施因子旋转后的载荷矩阵,可以看到,第一主因子在Fe、Al上具有较大的载荷系数,第二主因子在Mn、Pb指标上载荷系数较大,而第三主因子在Zn、Cd两个指标上的系数最大,此时各个因子的含义更加突出.

因子分析结果显示,第一个公因子主要在Fe、Al上具有较大的载荷系数,说明PAC1综合反映这两种重金属的变动情况,两者有共同的污染源,通过上一节的分析Fe、Al在自然界含量较高,因此称PAC1为自然污染源,是主要的影响因素.并且

PAC1在Fe、Al上的载荷系数为正值,说明西安地区径流雨水中的Fe、Al含量是一个递增的趋势,这与实际测量值相符. PAC2在Mn、Pb指标上载荷系数较大,代表了这两个方面有共同的污染源,即交通污染.其中,Pb元素作为汽车的标识元素,高含量与西安汽车保有量的不断增加有关. PAC3在Zn、Cd上的载荷系数较大,是人为污染源.这与汤洁等^[23]对哈尔滨大气降尘中重金属的研究结果基本一致.

表2 西安雨水重金属旋转前的因子载荷矩阵(成分矩阵)

Table 2 Factor loading matrix before rotating of heavy metals of rainoff in Xi'an			
	成分		
	PAC 1	PAC 2	PAC 3
Fe	0.959	-0.237	0.153
Al	0.749	-0.508	0.357
Zn	0.645	-0.203	-0.681
Mn	0.221	0.965	0.135
Pb	0.570	0.719	0.394
Cd	-0.281	-0.410	0.815

表3 西安雨水重金属旋转后的因子载荷矩阵(旋转成分矩阵)

Table 3 Factor loading matrix after rotating of heavy metals of rainoff in Xi'an			
	成分		
	PAC1	PAC 2	PAC 3
Fe	0.961	0.173	0.213
Al	0.965	-0.079	-0.096
Zn	0.426	-0.159	0.845
Mn	-0.196	0.974	0.111
Pb	0.286	0.957	-0.020
Cd	0.191	-0.216	-0.910

3 结论

(1)西安市城区径流雨水中重金属Fe、Zn、Mn、Pb的污染状况较为严重,Fe超过国家标准3倍以上,而Cd、Al的含量尚未超过标准.

(2)人类活动是影响径流雨水中重金属含量的重要因素,人流量和车流量大的地方Fe、Al和Zn含量高于其它地方;机动车流量是造成路面径流雨水中含有Pb的主要原因;Mn在城市道路雨水中的含量较为均衡,与下垫面及环境关系不大.

(3)冬季径流雨水中重金属含量普遍高于其他季节,尤其是Zn、Mn;燃煤是冬季雨水中重金属含量增高的主要原因;一年四季中,Mn、Zn的变化趋势为冬季>秋季>夏季>春季,Pb的变化趋势为冬季>春季>夏季>秋季.

(4)因子分析表明,Fe、Al被同一污染源——自然污染源所影响,Zn、Cd受到人为污染源的影响

较大, Mn、Pb 受到交通污染源的影响较大。

参考文献:

- [1] Deletic A, Orr D W. Pollution buildup on road surfaces[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2005, **131**(1): 49-59.
- [2] 解建元, 李贺, 石俊发. 路面雨水径流重金属赋存状态研究[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2010, **40**(5): 1019-1024.
- [3] Wei Q S, Zhu G F, Wu P, *et al.* Distributions of typical contaminant species in urban short-term storm runoff and their fates during rain events; a case of Xiamen City [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, **22**(4): 533-539.
- [4] Wang T, Xie S D. Assessment of traffic-related air pollution in the urban streets before and during the 2008 Beijing Olympic Games traffic control period [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(35): 5682-5690.
- [5] Ellis J B, Revitt D M, Harrop D O, *et al.* The contribution of highway surfaces to urban stormwater sediments and metal loadings[J]. *Science of Total Environment*, 1987, **59**: 339-349.
- [6] Lee J H, Bang K W, Ketchum L H, *et al.* First flush analysis of urban storm runoff[J]. *Science of the Total Environment*, 2002, **293**(1-3): 163-175.
- [7] Revitt D M, Morrison G M. Metal speciation variations within separate stormwater systems [J]. *Environmental Technology Letters*, 1987, **8**(1-12): 373-380.
- [8] Sansalone J J, Buchberger S G. Partitioning and first flush of metals in urban roadway storm water [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1997, **123**(2): 134-143.
- [9] Sansalone J J, Buchberger S G, Al-Abed S R. Fractionation of heavy metals in pavement runoff [J]. *Science of the Total Environment*, 1996, **189-190**: 371-378.
- [10] Brown J N, Peake B M. Sources of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in urban stormwater runoff[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **359**(1-3): 145-155.
- [11] 李海燕, 胡磊, 王崇臣. 道路雨水径流重金属含量测定[J]. *环境化学*, 2009, **28**(1): 145-146.
- [12] 侯培强, 任玉芬, 王效科, 等. 北京市城市降雨径流水质评价研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(1): 71-74.
- [13] 郭婧, 马琳, 史鑫源, 等. 北京城市道路降雨径流监测与分析[J]. *环境化学*, 2011, **30**(10): 1814-1815.
- [14] 聂发辉, 李田, 王朔. 上海市公路雨水径流中重金属的形态及分布特征[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2009, **36**(3): 76-80.
- [15] 李倩倩, 李铁龙, 赵倩倩, 等. 天津市路面雨水径流重金属污染特征[J]. *生态环境学报*, 2011, **20**(1): 143-148.
- [16] 林莉峰, 李田, 李贺. 上海市城区非渗透性地面径流的污染特性研究[J]. *环境科学*, 2007, **28**(7): 1430-1434.
- [17] 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): 52-56.
- [18] 武永锋. 贵阳市大气颗粒物、雨水及土壤中重金属的研究[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2008.
- [19] Miao C C, Chen F Y, Fei J L, *et al.* Sources of Cu, Zn, Cd and Pb in rainwater at a subtropical islet offshore northern Taiwan [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(11): 1919-1928.
- [20] Garnaud S, Mouchel J M, Chebbo G, *et al.* Heavy metal concentrations in dry and wet atmospheric deposits in Paris district: comparison with urban runoff[J]. *Science of the Total Environment*, 1999, **235**(1-3): 235-245.
- [21] Davis B, Birch G. Comparison of heavy metal loads in stormwater runoff from major and minor urban roads using pollutant yield rating curves [J]. *Environmental Pollution*, 2010, **158**: 2541-2545.
- [22] 甘华阳, 卓慕宁, 李定强, 等. 广州城市道路雨水径流的水质特征[J]. *生态环境*, 2006, **15**(5): 969-973.
- [23] 汤洁, 韩维峥, 李娜, 等. 哈尔滨市城区大气重金属沉降特征和来源研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, **31**(11): 3087-3091.
- [24] 胡健, 张国平, 刘从强. 贵阳市大气降水中的重金属特征[J]. *矿物学报*, 2005, **25**(3): 257-262.
- [25] 管后春, 李运怀, 彭苗枝, 等. 黄山城市土壤重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. *中国地质*, 2013, **40**(6): 1949-1958.

CONTENTS

Variation Characteristics of Surface Ozone and Its Precursors During Summertime in Nanjing Northern Suburb	SHAO Ping, AN Jun-lin, YANG Hui, <i>et al.</i> (4031)
Distribution Characteristics of Pollution Gases and Water Soluble Ion in Aerosol During the Asian Youth Games of Nanjing, China	ZOU Jia-nan, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4044)
Aerosol Concentration Variation in Nanjing During Asian Youth Games and the Relationship Between Aerosol Concentration and Visibility	YUAN Liang, YIN Yan, LI Qi, <i>et al.</i> (4052)
Characteristic Analysis of a Multi-day Pollution Event in Chang-Zhu-Tan Metropolitan Area During October 2013	LIAO Zhi-heng, FAN Shao-jia, HUANG Juan, <i>et al.</i> (4061)
Application of On-line Single Particle Aerosol Mass Spectrometry (SPAMS) for Studying Major Components in Fine Particulate Matter	FU Huai-yu, YAN Cai-qing, ZHENG Mei, <i>et al.</i> (4070)
Establishment and Application of Replaceable Source Profiles of PM ₁₀	CHEN Qiang, JING Yi, WU Huan-bo, <i>et al.</i> (4078)
Distribution, Flux and Biological Consumption of Carbon Monoxide in the East China Sea and the South Yellow Sea in Summer	WANG Jing, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (4085)
Spatial and Temporal Distribution of Mercury in Water of a Small Typical Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (4095)
Fluorescence Characteristics of Fractionated Colloidal Organic Matter in Freshwater from Hunhe and Taizihe Watersheds	LIU Na-na, LI Bin, LIU Rui-xia, <i>et al.</i> (4103)
Variations of Annual Load of TN and TP in the Deep Bay Watershed, Shenzhen	ZHAO Chen-chen, ZHANG Shi-yan, MAO Xian-zhong (4111)
Characteristics and Bioavailability of Organic Phosphorus from Different Sources of Sediments in Dianchi Lake	XIONG Qiang, JIAO Li-xing, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (4118)
Heavy Metals Distribution Characteristics and Ecological Risk Evaluation in Surface Sediments of Dammed Jinshan Lake	ZHOU Xiao-hong, LIU Long-mei, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4127)
Vertical Distribution Pattern and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Sediment Core from Pumoyum Co, Tibet	XIE Ting, LUO Dong-xia, YANG Rui-qiang (4135)
Heavy Metals Pollution and Analysis of Seasonal Variation Runoff in Xi'an	YUAN Hong-lin, LI Xing-yu, WANG Xiao-chang (4143)
Distribution and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Urban Rainfall Runoff	WU Zi-lan, YANG Yi, LIU Min, <i>et al.</i> (4148)
Influence of the Substrate Composition in Extensive Green Roof on the Effluent Quality	CHEN Yu-lin, LI Tian, GU Jun-qing (4157)
Investigation of the Microbial Diversity and Structure of Biological Activated Carbon from Different Sources in Drinking Water Treatment Process	DU Er-deng, ZHENG Lu, FENG Xin-xin, <i>et al.</i> (4163)
Microcystin Safety Study During <i>Cyanobacteria</i> Removal by Pressure Enhanced Coagulation Process	JIANG Xin-yue, LUAN Qing, CONG Hai-bing, <i>et al.</i> (4171)
Membrane Fouling Based on Change of Membrane Characteristic Parameters During Ultrafiltration of Protein	WANG Xu-dong, ZHANG Yin-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (4176)
Impact Factors and Degradation Mechanism for the Ozonation of Acetaminophen in Aqueous Solution	CAO Fei, YUAN Shou-jun, ZHANG Meng-tao, <i>et al.</i> (4185)
Degradation of Benzothiazole in Electro-Assisted Microbial Reactor	LIU Chun-miao, DING Jie, LIU Xian-shu, <i>et al.</i> (4192)
Preparation and Evaluation of Fe-La Composite Oxide Nanoabsorbent for As(III) Removal from Aqueous Solutions	ZHANG Wei, CHEN Jing, ZHANG Gao-sheng (4198)
Physiological Responses of Tubificidae to Heavy Metal Chromium Stress	LOU Ju-qing, YANG Dong-ye, CAO Yong-qing, <i>et al.</i> (4205)
Effects of Light Quality on the Growth Characteristics and Biochemical Component of <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	TANG Qing-qing, FANG Zhi-guo, JI Wen-wen, <i>et al.</i> (4212)
Influence of Alkalinity and DO on ANAMMOX Bioreactor at Normal Temperature and Low Substrate Concentration	REN Yu-hui, WANG Ke, LI Xiang-kun, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Fe ²⁺ and Fe ³⁺ on the Activity of ANAMMOX	LI Xiang, HUANG Yong, WU Chuan, <i>et al.</i> (4224)
Research on Change Process of Nitrosation Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	YIN Fang-fang, LIU Wen-ru, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (4230)
Effects of Salinity on N ₂ O Production During Nitrification Using Aerobic Granular Sludge	WANG Shan-shan, LIANG Hong, GAO Da-wen (4237)
Analysis of Microbial Community Variation in the Domestication Process of Sludge in a Sulfate-reducing Reactor	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan, ZHENG Xiao-hong, <i>et al.</i> (4244)
Quantifying the Influence of Different Matrices on Pb Accumulation in the Soil from Nanjing and Suspended Matter from the Lower of the Yangtze River with Pb Isotopic Technique	WANG Cheng, XIA Xue-qi, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4251)
Contamination Characteristics of Fluoroquinolones in Different Kinds of Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	SU Si-hui, HE Jiang-tao, YANG Lei, <i>et al.</i> (4257)
Effect of Environmental Factors on the Formation of Several Typical Tetracycline Resistance Genes in Soil	ZHANG Jun, LUO Fang-yuan, XIONG Hao-hui, <i>et al.</i> (4267)
Response of Nitrification/Denitrification and Their Associated Microbes to Soil Moisture Change in Paddy Soil	LIU Ruo-xuan, HE Ji-zheng, ZHANG Li-mei (4275)
Microbial Community Abundance and Diversity in Typical Karst Ecosystem to Indicate Soil Carbon Cycle	JIN Zhen-jiang, TANG Hua-feng, LI Min, <i>et al.</i> (4284)
Effects of Variable Temperature on Organic Carbon Mineralization in Typical Limestone Soils	WANG Lian-ge, GAO Yan-hong, DING Chang-huan, <i>et al.</i> (4291)
Influence of the Interaction Between Iron Oxide and Electron Donor Substances on 1,1,1-Trichloro-2,2-bis(<i>p</i> -chlorophenyl)ethane (DDT) Reductive Dechlorination in Hydragic Acrisols	LIU Cui-ying, XU Xiang-hua, WANG Zhuang, <i>et al.</i> (4298)
Continuous Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil by Co-Cropping System Enhanced with Chelator	WEI Ze-bin, GUO Xiao-fang, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (4305)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow at Different Sampling Scales	LI Hong-jian, GAO Yu-feng, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4313)
Study on Regularity of Greenhouse Gas Emissions from Black Soil with Different Reclamation Years	LI Ping, LANG Man, XU Xiang-hua, <i>et al.</i> (4321)
Comparison Between Transgenic Insect-Resistant Cotton Expressing CryI _{Ac} Protein and Its Parental Variety in Rhizospheric Fungal Diversity	PAN Jian-gang, JIAO Hai-hua, BAI Zhi-hui, <i>et al.</i> (4329)
Concentrations of Mercury in Ambient Air in Wastewater Irrigated Area of Tianjin City and Its Accumulation in Leafy Vegetables	ZHENG Shun-an, HAN Yun-lei, ZHENG Xiang-qun (4338)
Combined Effects of 1-Nitropyrene and 1,2-Naphthoquinone on Cytotoxicity and DNA Damage in A549 Cells	SHANG Yu, JIANG Yu-ting, ZHANG Ling, <i>et al.</i> (4345)
Influence of Organic Matter Evolution During Composting on the Bioavailability of Heavy Metals	BU Gui-jun, YU Jing, DI Hui-hui, <i>et al.</i> (4352)
Carbonization of Heavy Metal Cu Implanted Sewage Sludge and Stability of Heavy Metal in the Resulting Char	DOU Xiao-min, CHEN De-zhen, DAI Xiao-hu (4359)
Technological Characteristics of Bioreactor Landfill with Aeration in the Upper Layer	TIAN Ying, WANG Shen, XU Qi-yong (4365)
Impact of Nitrate Continuous Injection on N ₂ O Releases from Bioreactor Landfill	BIAN Rong-xing, SUN Ying-jie, LI Jing-jing, <i>et al.</i> (4371)
Research on Contribution Decomposition by Industry to China's Carbon Intensity Reduction and Carbon Emission Growth	JIANG Jing-jing, YE Bin, JI Jun-ping, <i>et al.</i> (4378)
Shifting Path of Industrial Pollution Gravity Centers and Its Driving Mechanism in Pan-Yangtze River Delta	ZHAO Hai-xia, JIANG Xiao-wei, CUI Jian-xin (4387)
Method for Environmental Management in Paper Industry Based on Pollution Control Technology Simulation	ZHANG Xue-ying, WEN Zong-guo (4395)
Research Progress and Direction of Atmospheric Brown Carbon	YAN Cai-qing, ZHENG Mei, ZHANG Yuan-hang (4404)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年11月15日 第35卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 11 Nov. 15, 2014

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行