

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第3期

Vol.35 No.3

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

青岛近海生物气溶胶中可培养微生物浓度及群落多样性的季节变化 祁建华, 武丽娟, 高冬梅, 金川 (801)

基于重庆本地碳成分谱的 PM_{2.5} 碳组分来源分析 张灿, 周志恩, 翟崇治, 白志鹏, 陈刚才, 姬亚芹, 任丽红, 方维凯 (810)

重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究 徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 张军科, 刘子锐, 胡波, 王跃思, 江长胜 (820)

基于气溶胶光学特性垂直分布的一次浮尘过程分析 王苑, 邓军英, 史兰红, 陈勇航, 张强, 王胜, 徐婷婷 (830)

基于悬铃木叶片重金属累积特性的大气污染分析和评价 刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 汪承润 (839)

典型染整企业定型机废气排放特征及潜在环境危害浅析 徐志荣, 王鹏, 王浙明, 许明珠, 吴剑波, 李嫣 (847)

火电厂大气污染物排放标准实施效果的数值模拟研究 王占山, 潘丽波 (853)

国IV天然气公交车实际道路颗粒物排放特性 楼狄明, 成伟, 冯谦 (864)

稻草和玉米秸秆烟尘中的正构脂肪醇 刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (870)

河口湿地近地面大气 CO₂ 浓度日变化和季节变化 张林海, 仝川, 曾从盛 (879)

三峡库区库中干流及支流水体夏季二氧化碳分压及扩散通量 李双, 王雨春, 操满, 钱慧君, 许涛, 周子然, 邓兵, 汪福顺 (885)

施用畜禽粪便堆肥的蔬菜地 CH₄、N₂O 和 NH₃ 排放特征 万合锋, 赵晨阳, 钟佳, 葛振, 魏源送, 郑嘉熹, 鄢玉龙, 韩圣慧, 郑博福, 李洪枚 (892)

干湿交替条件下不同晶型铁氧化物对水稻土甲烷排放的影响 张天娇, 汤佳, 庄莉, 熊格生, 刘志, 周顺桂 (901)

长江口邻近海域沉积物中生物硅溶解行为研究 吴彬, 吕伟香, 鲁超, 刘素美 (908)

汾河中下游浮游藻类群落特征及水质分析 王爱爱, 冯佳, 谢树莲 (915)

基于三维荧光光谱-平行因子技术联用的湖泊浮游藻化学分类学研究 陈小娜, 韩秀荣, 苏荣国, 石晓勇 (924)

三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质 (DOM) 的紫外-可见光谱特征 李璐璐, 江韬, 闫金龙, 郭念, 魏世强, 王定勇, 高洁, 赵铮 (933)

黄河口湿地表层沉积物中磷赋存形态的分析 于子洋, 杜俊涛, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (942)

太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素 揣小明, 杨柳燕, 程书波, 陈小锋, 穆云松 (951)

黄浦江溶解有机质光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系 董倩倩, 张艾, 李咏梅, 陈玲, 黄清辉 (958)

纳米零价铁降解水中多溴联苯醚 (PBDEs) 及降解途径研究 杨雨寒, 徐伟伟, 彭思侃, 卢善富, 相艳, 梁大为 (964)

铸铁还原氯乙酸的影响因素与机制研究 唐顺, 杨宏伟, 王小任, 解跃峰 (972)

磷回收对厌氧/好氧交替式生物滤池蓄磷/除磷的影响 张顺, 田晴, 汤曼琳, 李方 (979)

预处理方法对玉米芯作为反硝化固体碳源的影响 赵文莉, 郝瑞霞, 李斌, 张文怡, 杜鹏 (987)

陶粒 CANON 反应器的接种启动与运行 付昆明, 左早荣, 仇付国 (995)

冬季低温下 MBR 与 CAS 工艺运行及微生物群落特征 黄菲, 梅晓洁, 王志伟, 吴志超 (1002)

烷基多苷促进污泥水解产酸的研究 陈灿, 孙秀云, 黄诚, 沈锦优, 王连军 (1009)

高温厌氧消化中底物浓度对病原指示微生物杀灭的影响 操宏庆, 章菲菲, 李健, 童子林, 胡真虎 (1016)

兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价 李萍, 薛粟尹, 王胜利, 南忠仁 (1021)

珠江河口水域有机磷农药水生生态系统风险评价 郭强, 田慧, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民, 吴军年 (1029)

海州湾表层沉积物重金属的来源特征及风险评价 李飞, 徐敏 (1035)

再生水无计划间接补充饮用水的雌激素健康风险 吴乾元, 邵一如, 王超, 孙艳, 胡洪营 (1041)

瓦埠湖流域庄集镇农田土壤氮磷分布及流失风险评估 李如忠, 邹阳, 徐晶晶, 丁贵珍 (1051)

三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评估 张成, 陈宏, 王定勇, 孙荣国, 张金洋 (1060)

基于棕地的居民小区土壤重金属健康风险评价 陈星, 马建华, 李新宁, 刘德新, 李一蒙 (1068)

干旱区绿洲土壤氟污染生态风险评估研究 薛粟尹, 李萍, 王胜利, 南忠仁 (1075)

缙云山 3 种典型森林降雨过程及其氮素输入 孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 张会兰, 于雷, 刘婕 (1081)

三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响 韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 田耀武, 曾立雄, 吴东 (1091)

黄土丘陵区县域农田土壤近 30 年有机碳变化及影响因素研究: 以甘肃庄浪县为例 师晨迪, 许明祥, 邱宇洁, 张志霞, 张晓伟 (1098)

天然林土壤有机碳及矿化特征研究 杨添, 戴伟, 安晓娟, 庞欢, 邹建美, 张瑞 (1105)

不同土壤湿润速率下中性紫色土磷素淋溶的动态变化 张思兰, 石孝均, 郭涛 (1111)

硫酸对酸性红壤 pH 值与金属元素有效性的影响 杨波, 王文, 曾清如, 周细红 (1119)

6 种陕北适生豆科植物生长对原油污染土壤的响应 山宝琴, 张永涛, 曹巧玲, 康振妍, 李淑媛 (1125)

基于 N:P 化学计量特征的高寒草甸植物养分状况研究 张仁懿, 徐当会, 陈凌云, 王刚 (1131)

人工生物结皮的发育演替及表土持水特性研究 吴丽, 陈晓国, 张高科, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1138)

农田土壤自养微生物碳同化潜力及其功能基因数量、关键酶活性分析 陈晓娟, 吴小红, 简燕, 袁红朝, 周萍, 葛体达, 童成立, 邹冬生, 吴金水 (1144)

中亚热带马尾松林凋落物分解过程中的微生物与酶活性动态 宋影, 辜夕容, 严海元, 毛文韬, 吴雪莲, 万宇轩 (1151)

苏南地区香樟树皮中有机氯农药 (OCPs) 的污染水平及来源解析 周丽, 张秀蓝, 杨文龙, 李玲玲, 史双昕, 张利飞, 董亮, 黄业茹 (1159)

UV-B 辐射增强与 1,2,4-三氯苯污染复合胁迫对青菜生长的影响 刘翠英, 樊建凌, 徐向华 (1164)

Cu 和 Cd 胁迫下接种外生菌根真菌对油松根际耐热蛋白固持重金属能力的影响 张英伟, 柴立伟, 王东伟, 汪杰, 黄艺 (1169)

对硝基苯胺耐盐降解菌 S8 的筛选及特性研究 宋彩霞, 邓新平, 厉阆, 肖伟 (1176)

克雷伯氏菌生产絮凝剂 M-C11 的培养优化及其在污泥脱水中的应用 刘杰伟, 马俊伟, 刘彦忠, 杨娅, 岳东北, 王洪涛 (1183)

铅元素人为循环环境释放物形态分析 梁静, 毛建素 (1191)

污染排放与环境质量关系模型构建与应用 李名升, 孙媛, 陈远航, 张建辉 (1198)

微囊藻毒素微生物降解途径与分子机制研究进展 闫海, 王华生, 刘晓璐, 尹春华, 许倩倩, 吕乐, 马万彪 (1205)

《环境科学》征订启事 (809) 《环境科学》征稿简则 (819) 信息 (971, 978, 1050, 1175)

兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评估

李萍, 薛粟尹, 王胜利*, 南忠仁

(兰州大学资源环境学院, 兰州 730000)

摘要: 为探究大气降尘中重金属污染程度及存在的健康风险, 在兰州市设置 11 个采样点采集大气降尘, 分析降尘重金属含量. 结果表明, 兰州市大气降尘中 Cu、Pb、Cd、Cr、Ni、Zn、Mn 含量平均值分别为 82.22、130.31、4.34、88.73、40.64、369.23、501.49 mg·kg⁻¹, 除 Mn 以外其他元素在不同功能区差异较大. 富集因子分析显示, Mn 为轻微富集, Zn、Ni、Cu 和 Cr 富集因子较高, Pb 和 Cd 为极强富集. 地积累指数评价平均生态危害表明: Cr 在全年无实际污染, Cu、Ni、Zn、Pb 浓度处于轻度污染至偏重度污染之间, Cd 为严重至极度污染; 大气降尘重金属在 10 月~次年 3 月污染相对严重, 从 4~8 月污染程度较轻. 手-口途径摄入是降尘重金属引起非致癌风险的最主要途径, 儿童的非致癌风险大于成人, 总非致癌风险次序为 Pb > Cr > Cd > Cu > Ni > Zn, 所研究重金属非致癌风险都低于风险限值; 降尘中的 Cr、Cd、Ni 通过呼吸途径不具有致癌风险.

关键词: 大气降尘; 富集因子; 地积累指数; 健康风险评估; 兰州

中图分类号: X513; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)03-1021-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.03.029

Pollution Evaluation and Health Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Lanzhou

LI Ping, XUE Su-yin, WANG Sheng-li, NAN Zhong-ren

(College of Earth and Environment Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to evaluate the contamination and health risk of heavy metals from atmospheric deposition in Lanzhou, samples of atmospheric deposition were collected from 11 sampling sites respectively and their concentrations of heavy metals were determined. The results showed that the average contents of Cu, Pb, Cd, Cr, Ni, Zn and Mn were 82.22, 130.31, 4.34, 88.73, 40.64, 369.23 and 501.49 mg·kg⁻¹, respectively. There was great difference among different functional areas for all elements except Mn. According to the results, the enrichment factor score of Mn was close to 1, while the enrichment of Zn, Ni, Cu and Cr was more serious, and Pb and Cd were extremely enriched. The assessment results of geoaccumulation index of potential ecological risk indicated that the pollution of Cd in the atmospheric deposition of Lanzhou should be classified as extreme degree, and that of Cu, Ni, Zn, Pb as between slight and extreme degrees, and Cr as practically uncontaminated. Contaminations of atmospheric dust by heavy metals in October to the next March were more serious than those from April to August. Health risk assessment indicated that the heavy metals in atmospheric deposition were mainly ingested by human bodies through hand-mouth ingestion. The non-cancer risk was higher for children than for adults. The order of non-cancer hazard indexes of heavy metals was Pb > Cr > Cd > Cu > Ni > Zn. The non-cancer hazard indexes and carcinogen risks of heavy metals were both lower than their threshold values, suggesting that they will not harm the health.

Key words: atmospheric deposition; enrichment factor; geoaccumulation index; health risk assessment; Lanzhou

大气降尘是环境空气中粒径大于 10 μm 的固体颗粒物的总称, 降尘颗粒是包括无机非金属颗粒、金属颗粒和有机颗粒的不均匀混合物^[1]. 大气降尘除本身是有害物质外还是其他污染物的运载体和反应床^[2], 重金属以松散束缚的形式附着在降尘颗粒表面, 会导致重金属元素的不稳定性和潜在生物有效性^[3]. 重金属在地表环境中具有累积性^[4], 进入土壤-植物系统中的重金属通过食物链富集、浓缩和放大后危害人体健康^[5].

由于缺少相应的环境标准, 目前大气降尘重金属的污染评价主要借鉴沉积物重金属污染评价的方法, 如地积累指数法、污染负荷指数法、回归过量

分析法、潜在生态危害指数法等^[2]. 相比于其他评价方法, 地积累指数法除了考虑到人为污染因素、环境地球化学背景值外, 还考虑到由于自然成岩作用可能会引起背景值变动的因素, 弥补了其他评价方法的不足^[6].

国内外对大气降尘重金属健康风险的研究鲜有

收稿日期: 2013-07-01; 修订日期: 2013-09-04

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金项目(2012021111018); 兰州大学中央高校基本科研业务费专项(Lzujbky-2012-141); 国家自然科学基金项目(51178209, 91025015)

作者简介: 李萍(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气颗粒物污染与治理, E-mail: liping11@lzu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: wangshengl@lzu.cn

报道,国内相近研究仅在城市街道灰尘^[7,8],地铁站灰尘^[9]或其他不同城市功能区的地表灰尘^[10~12]的重金属中进行过. 1997~2000年,欧盟在伦敦、马德里、罗马、哥德堡等城市开展了铂族金属污染及其对人体和生态系统的风险评价研究^[13]. Ferreira-Baptista等^[14]在非洲城市罗安达,对儿童进行了地表灰尘重金属污染的健康风险评估.

本研究通过对兰州市不同功能区大气降尘重金属含量的分析调查,对大气降尘重金属污染进行富集因子评价和地积累指数评价,了解环境中重金属来源及污染程度及其时空变化规律. 借鉴国外已有的健康风险评价方法,根据国情对其部分参数进行修正后对大气降尘重金属的健康风险进行评估,以期改善城市重金属污染状况,保护居民身体健康提供依据.

1 材料与方法

1.1 采样点设置

根据功能区划在兰州市沿东西走向设置 11 个采样点(图 1),采样点位置和周边环境特征说明见表 1.

1.2 样品采集与分析

于 2010 年 6 月~2011 年 5 月(2010 年 9 月因人为原因未采样),共 11 个月,以月为周期对大气降尘连续收集. 采样期内的干湿沉降样品用内壁光

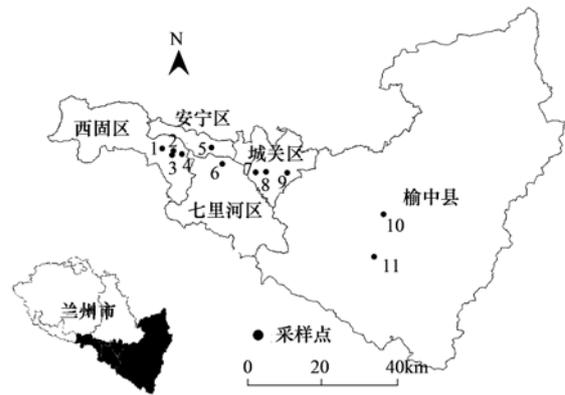


图 1 兰州市大气降尘采样点位

Fig. 1 Sampling locations of atmospheric deposition in Lanzhou

滑的降尘缸进行干法收集,所有采样器均置于当地居民或办公楼顶,采样点四周无高大遮挡物. 采样时用干净毛刷将采样缸中粉尘扫入样品袋密封,如遇雨雪天气,则同时收集降尘缸内液体,用蒸发皿蒸干后获得降尘样品. 每月采样后用去离子水彻底清洗采样缸,以继续采集下月样品. 样品带回实验室,剔除杂质后,称取一定量,用 $\text{HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$ 消解. 每批样品(40 个)采样相同试剂和步骤做 2 个试剂空白. 用 SOLAAR M6 型原子吸收分光光度计测量重金属浓度,扣除试剂空白后得到每个样品重金属含量. 实验用水均为去离子水,试剂为优级纯. 数据结果用 Microsoft Excel 和 SPSS 19 软件进行统计分析.

表 1 采样点位置及周边环境状况

Table 1 Sampling locations and surroundings

功能区	采样点	位置特征
混合区	1 兰光矿灯有限公司	4 个采样点相距较近,位于兰州市主要工业区西固区,采样点周边为工业,交通,居住级商业混合区域,临近多家大型工业企业
	2 兰棉厂家属院	
	3 甘肃省四建	
	4 兰州净水剂厂	
工业区	6 兰石集团	位于兰石厂车间旁,该公司为机械设备制造公司
交通区	7 市环保局	位于兰州中心城区,周边道路密集车流量大
文教区	9 西地所	位于道路旁,且周边有多家汽修店
	5 兰州交大	兰州交通大学教学楼顶
郊县	8 兰大逸夫楼	兰州大学校园内,远离主干道
	10 翠英山顶	均位于兰州城区东郊榆中县,工业污染源较少,以农田与林地为主 ^[15]
	11 榆中建设局	

1.3 富集因子法

富集因子是定量评价污染富集程度与污染来源的重要指标. 选择一定的参考系统下的某一元素作为参比元素,试样中污染元素的质量百分数与参比元素质量百分数的比值与参比系统中二者的质量百分数比值的比率即为富集因子.

$$EFs = (c_i/c_n)_{\text{样品}} / (c_i/c_n)_{\text{背景}}$$

式中, c_i 表示重金属元素 i 的浓度; c_n 表示标准化元素的浓度. 如果元素富集因子接近于 1, 可以认为该元素相对于土壤来源基本没有富集; 如果元素富集因子大于 10, 则表明元素除自然来源外还受人类活动影响^[16, 17].

1.4 地积累指数法

地积累指数 (geoaccumulation index) 是一种研

究水环境沉积物中重金属污染的定量指标,被广泛应用于研究现代沉积物、土壤中重金属的污染评价,以及街道灰尘重金属污染研究^[18]。地积累指数 I_{geo} 的计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{c_i}{k \times B_i} \right]$$

式中, c_i 表示污染物实测值, B_i 是该污染物的地质背景值^[19], k 为考虑到造岩运动可能引起背景值波动而设定的常数, $k = 1.5$ ^[2]。在目前的地质累积指数研究中,通常采用 Muller 的分级标准,具体分级方法见表 2。

表 2 Muller 地积累指数分级

地积累指数 (I_{geo})	分级	污染程度
$I_{geo} < 0$	0	无实际污染
$0 < I_{geo} < 1$	1	轻度污染
$1 < I_{geo} < 2$	2	中度污染
$2 < I_{geo} < 3$	3	中度至严重污染
$3 < I_{geo} < 4$	4	严重污染
$4 < I_{geo} < 5$	5	严重至极度污染
$I_{geo} > 5$	6	极度污染

1.5 健康风险评价方法

1.5.1 暴露量

国内健康风险评价主要采用美国国家环境保护署 (US EPA) 提出的土壤健康风险模型为基本框架,对其中部分参数进行修正后应用^[7]。本研究借鉴其他学者对城市街道灰尘重金属健康风险的评价方法对大气降尘中的重金属健康风险进行估算。根据模

型, Cd、Cu、Cr、Ni、Pb、Zn 都具有慢性非致癌风险,其中, Cd、Cr、Ni 具有致癌风险,由于 EPA 未给出摄入和皮肤接触致癌暴露量参考值,而只给出了呼吸途径暴露量参考值,因此本研究只考虑 Cd、Cr、Ni 经呼吸暴露途径所导致的致癌风险。模型假设居民主要通过手-口摄食、皮肤接触和吸入这 3 种暴露途径摄入大气降尘重金属。暴露公式计算如下:

$$ADD_{ing} = C \times \frac{EF \times ED}{AT \times BW} \times IngR \times CF \quad (1)$$

$$ADD_{inh} = C \times \frac{EF \times ED}{AT \times BW} \times \frac{InhR}{PEF} \quad (2)$$

$$ADD_{derm} = C \times \frac{EF \times ED}{AT \times BW} \times SL \times SA \times ABS \times CF \quad (3)$$

$$LADD_{inh} = C \times \frac{EF}{PEF \times AT} \times \left(\frac{InhR_{child} \times ED_{child}}{BW_{child}} + \frac{InhR_{adult} \times ED_{adult}}{BW_{adult}} \right) \quad (4)$$

式中, ADD_{ing} 为手-口摄食途径的降尘颗粒日平均暴露量 [$mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$], ADD_{inh} 为吸入途径的降尘颗粒日平均暴露量 [$mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$], ADD_{derm} 为皮肤接触途径的降尘颗粒日平均暴露量 [$mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$], $LADD_{inh}$ 为致癌重金属吸入途径的终身日平均暴露量 [$mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$], 其它参数的含义和取值见表 3^[20-23]。在参数选择时综合考虑 EPA 提出的土壤评价标准以及根据我国情况修正后的参数。

表 3 重金属日平均暴露量计算参数含义及其取值¹⁾

项目	参数	含义	单位	儿童取值	成人取值	文献
基础参数	C	重金属浓度	$mg \cdot kg^{-1}$	95% UCL	95% UCL	本研究
	EF	暴露频率	$d \cdot a^{-1}$	350	350	[23]
暴露行为参数	ED	暴露年限	a	6	24	[23]
	AT	平均暴露时间	d	365 × ED (非致癌作用) 365 × 70 (致癌作用)	365 × ED (非致癌作用) 365 × 70 (致癌作用)	[23]
	BW	平均体重	kg	15	55.9	[21]
	CF	单位转换	$kg \cdot mg^{-1}$	1×10^{-6}	1×10^{-6}	
手-口摄食	IngR	摄食降尘速率	$mg \cdot d^{-1}$	200	100	[23]
呼吸吸入	InhR	呼吸速率	$m^3 \cdot d^{-1}$	7.63	12.8	[24]
	PEF	颗粒物排放因子	$m^3 \cdot kg^{-1}$	1.32×10^9	1.32×10^9	[21]
皮肤接触	SL	皮肤黏着度	$mg \cdot cm^{-2}$	0.2	0.07	[22, 23]
	SA	暴露皮肤面积	$cm^2 \cdot d^{-1}$	899	1 701	[25]
	ABS	皮肤吸收因子	无量纲	0.001	0.001	[21]

1) 成人皮肤暴露面积根据文献按照男女比例 1:1 平均后得出

1.5.2 健康风险表征

重金属的非致癌及致癌风险的具体表达如式

(5) ~ (7) 所示, 研究中使用慢性中毒的参考剂量用以评价非致癌风险。假定受体接触的物质剂量在

参考值内,就认为没有危害;若超过参考值,则具有风险对暴露在街尘中的致癌风险的评价,使用终身的日平均暴露量进行计算.

$$HQ_{ij} = ADD_{ij}/RfD_{ij} \quad (5)$$

$$HI = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m HQ_{ij} \quad (6)$$

$$Risk = LADD \times SF \quad (7)$$

式中, HQ_{ij} 为非致癌风险商,表征单种污染物通过某一途径的非致癌风险; ADD_{ij} 为单种污染物的某一途径的非致癌风险量; RfD_{ij} 为该途径的参考剂量,表示在单位时间、单位体重摄入的不会引起人体不良反应的污染物最大量 [$mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$]; HI 为某种污染物多种暴露途径下总的非致癌风险,总 HI 为所有途径所有污染物总非致癌风险的加和. 一般认为,当 HQ_{ij} 或 $HI < 1$ 时,风险较小或可以忽略, HQ_{ij} 或 $HI > 1$ 时认为存在非致癌风险;斜率系数 (SF) 表示人体暴露于一定剂量某种污染物下产生致癌效应的最大概率 [$mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$]; $Risk$ 为致癌风险,表示癌症发生的概率,通常以单位数量人口出现癌症患者的比例表示,若 $Risk$ 在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 之间(即每 1 万 ~ 100 万人增加 1 个癌症患者),认为该物质不具备致癌风险.

2 结果与讨论

2.1 不同功能区重金属含量水平

从表 4 中看出,全市重金属 Cu、Pb、Cd、Cr、Ni、Zn、Mn 的含量平均值分别为 82.22、130.31、4.34、88.73、40.64、369.23、501.49 $mg \cdot kg^{-1}$. 各种金属浓度在不同功能区分布有明显差异,可能与降尘重金属来源有关. Cu 在各功能区浓度范围在

59.66 ~ 119.91 $mg \cdot kg^{-1}$ 之间,其中交通区浓度最高而郊区浓度最低. 现阶段研究认为^[26],大气颗粒物中的 Cu 来源于交通污染,Cu 通常用于汽车的刹车中以控制热量的传递以及汽车油泵材料的磨损产生. 交通区人口密度大,交通运输繁忙. 而榆中县为郊区,运输活动强度较城区低,因而 Cu 浓度较低. 另外,Cu 的变异系数是所有元素中最大的,为 0.43,说明 Cu 来源不稳定,受到更多的人为因素的干扰^[26]. 与此同时,交通区 Pb 浓度最高,为 146.68 $mg \cdot kg^{-1}$,这与汽车尾气排放有关. 虽然随着无铅汽油的使用^[27],汽车尾气对大气中 Pb 的影响有所减弱,但随着汽车数量的迅速增加以及之前排放的 Pb 的累积,交通污染源依然是大气环境中 Pb 的主要来源^[28]. Ni 和 Cr 分布均在工业区出现最高值,其次为距离大型工业企业较近的混合区. 是由于出现在大气环境中 Cr、Ni 这 2 种元素与金属冶炼密切相关^[29,30]. 降尘中的 Zn 有一部分受到工业生产的影响,另一部分来自于汽车轮胎的磨损^[31],因此 Zn 在工业区,交通区和混合区的降尘中浓度都较高,依次为 461.31、409.31、386.67 $mg \cdot kg^{-1}$. Ni、Cr 和 Zn 这 3 种元素的变异系数分别为 0.20、0.14 和 0.14,仅次于 Cu,相对其他元素亦受到很大程度的人为影响. Cd 在各区中浓度大小依次为郊区 > 交通区 > 文教区 > 工业区 > 混合区. 有研究表明^[28,32] 燃煤是 Cd 的主要来源,兰州郊区没有集中供暖,因此燃煤多数是缺乏处理无组织排放,这可能是导致郊区 Cd 较高的原因. Fe 和 Mn 在各功能区浓度差别并不是很大. 是由于 Fe、Mn 为地壳组成元素^[33],降尘中的 Fe、Mn 主要由自然来源(土壤颗粒)贡献,来源较稳定,因此变异系数低.

表 4 兰州市大气降尘重金属含量/ $mg \cdot kg^{-1}$

Table 4 Heavy metals concentration of atmospheric depositions in Lanzhou/ $mg \cdot kg^{-1}$

区域	Cu	Pb	Cd	Cr	Ni	Zn	Mn	Fe
混合区	76.10	118.23	3.68	89.93	49.19	386.67	573.66	18 693.05
工业区	87.65	122.45	3.89	143.22	52.87	461.31	556.05	19 232.81
交通区	118.40	146.68	4.66	88.29	33.46	409.31	472.41	20 057.06
文教区	78.13	134.18	4.60	89.21	39.59	376.26	477.48	19 402.41
郊区	59.66	119.91	4.67	71.95	33.64	295.82	472.48	18 789.35
平均	82.22	130.31	4.34	88.73	40.64	369.23	501.49	19 227.08
标准差	35.25	13.51	0.46	12.21	8.12	50.22	48.05	448.48
变异系数	0.43	0.10	0.11	0.14	0.20	0.14	0.10	0.02
95% UCL	88.70	132.79	4.42	90.98	42.13	378.46	510.32	19 309.52

2.2 富集因子分析

以 Fe 为参比元素分别计算不同季节重金属的富集因子见图 2. 各元素富集因子大小依次为 Cd >

Pb > Zn > Ni > Cu > Cr > Mn. 元素大致可分为 2 类: 第 1 类是 Mn,富集因子接近于 1,平均值为 1.26,为轻微富集,表明大气降尘中 Mn 主要来自于土壤颗

粒. 第2类是 Zn、Ni、Cu 和 Cr, 它们的富集因子大致在 1~10 之间, 除了来源于土壤颗粒之外还叠加

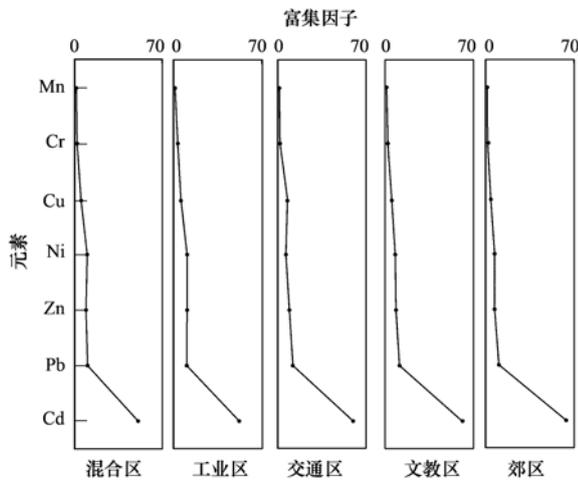


图2 大气降尘重金属富集因子

Fig. 2 Enrichment factors plotted against studied element

人为活动的影响. 第3类为 Pb 和 Cd, Pb 的富集因子平均值为 10.94, 显示该元素受到明显人为因素影响; Cd 的富集因子已经在 50.7~63.94 之间, 为极强富集, 人类活动成为大气中 Cd 的主要来源.

与 2.1 节的分析相似, Cr、Ni、Zn 在工业区富集因子都大于其他功能区, 可能是工业排放导致这 3 种元素污染比其他区域严重. Cu 和 Pb 在交通区富集因子最大, 也是因为人为交通活动影响导致的. 郊县大面积燃煤烟尘的无组织排放可能是导致该区域重金属 Cd 严重富集的重要原因. 除以上各功能区明确的人为污染物排放以外, 重金属污染富集同时受到地理环境和高空环流等条件的影响^[34].

2.3 地积累指数

经计算, 兰州市逐月大气降尘重金属地积累指数 (I_{geo}) 见表 5, 降尘重金属污染程度分级见表 6.

表5 兰州市各月大气降尘重金属地积累指数

Table 5 Heavy metal geoaccumulation indexes in each month in Lanzhou

元素	2010-06	2010-07	2010-08	2010-10	2010-11	2010-12	2011-01	2011-02	2011-03	2011-04	2011-05	年平均
Cu	0.78	0.99	0.99	1.14	1.44	1.21	1.23	1.95	1.22	0.84	0.78	1.18
Pb	2.19	2.19	2.27	2.43	2.29	1.83	2.07	2.05	2.56	2.01	1.87	2.18
Cd	4.23	3.97	3.47	4.66	4.97	4.50	4.86	4.80	5.29	4.26	4.10	4.55
Cr	-0.16	0.02	-0.17	0.17	-0.03	-0.03	-0.10	-0.02	-0.65	-0.69	-0.78	-0.19
Ni	1.68	1.63	1.71	2.00	1.64	2.02	1.91	1.95	1.79	1.87	1.87	1.83
Zn	1.78	1.87	1.87	2.27	2.32	1.90	1.89	1.90	1.84	1.53	1.51	1.90

表6 兰州市各月大气降尘重金属地积累指数分级

Table 6 Classification of the heavy metal geoaccumulation indexes in each month in Lanzhou

元素	2010-06	2010-07	2010-08	2010-10	2010-11	2010-12	2011-01	2011-02	2011-03	2011-04	2011-05	年平均
Cu	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	2
Pb	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3
Cd	5	4	4	5	5	5	5	5	6	5	5	5
Cr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ni	2	2	2	3	2	3	2	2	2	2	2	2
Zn	2	2	2	3	3	2	2	2	2	2	2	2

各元素污染程度从高到低为 $Cd > Pb > Zn > Ni > Cu > Cr$, 此顺序与富集因子分析结果一致. Cr 在全年的地积累指数分级为 0, 无实际污染. Cu 在全年的地积累指数分级为 0, 无实际污染. Cu 在 2010 年 10 月~次年 3 月之间地积累指数分级为中度污染, 其余时候为轻度污染. Ni 和 Zn 地积累指数分级除了在 10 月~12 月污染较严重, 其余月份为中度污染. Pb 除 2011 年 5 月污染程度为中度污染外, 在采样的其他时间都为中度至严重污染. Cd 的污染程度最重, 在 2010 年 6 月和 7 月分级为 4 级, 2011 年 3 月分级为 6 级达到最高级别, 其余时间为 5 级, 分级为严重至极度污染.

根据地积累指数评价结果, 除 Cr 外各元素污染均存在不同程度的环境风险, 而且这种环境风险有明显的季节变化规律. 重金属在 10 月~次年 3 月污染较严重, 4~8 月污染程度较轻. 这是由于兰州冬季气温低, 加上兰州地处河谷盆地, 风速小, 因此市区冬季逆温频发, 空气中污染物不易扩散^[35]. 另外, 每年 11 月~次年 3 月为兰州市采暖期, 各种采暖活动导致排放进入大气的污染物比夏季更多, 进一步加重了空气污染.

富集因子法和地积累指数法对降尘重金属的评价, 均引入背景值作为标准对重金属含量进行归一

化处理. 不仅有助于了解重金属分布的自然变化特征, 而且可以判别人类活动对环境的影响^[36]. 但富集因子着重于判断人为污染的存在以及人为活动造成污染的程度, 地积累指数法则考虑了包括人为因素在内的所有污染来源的污染结果, 是一种污染现状的全面评价. 本研究用富集因子评价空间上不同功能区的人为污染状况, 用地积累指数评价不同时

间重金属污染程度, 两种方法可以得到相似评价结果, 说明兰州市整体大气降尘重金属污染规律明显.

3 健康风险评价

3.1 暴露量

根据表 3 计算大气降尘重金属通过不同途径的暴露剂量如表 7.

表 7 大气降尘重金属不同途径暴露剂量

Table 7 Average daily doses for each metal and exposure pathway

元素	ADD _{ing}		ADD _{inh}		ADD _{derm}		LADD _{inh}
	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	
Cu	1.13×10^{-3}	1.52×10^{-4}	3.28×10^{-8}	1.48×10^{-8}	1.02×10^{-6}	1.81×10^{-7}	
Pb	1.70×10^{-3}	2.28×10^{-4}	4.91×10^{-8}	2.21×10^{-8}	1.53×10^{-6}	2.71×10^{-7}	
Cd	5.66×10^{-5}	7.59×10^{-6}	1.64×10^{-9}	7.36×10^{-10}	5.09×10^{-8}	9.04×10^{-9}	3.92×10^{-10}
Cr	1.16×10^{-3}	1.56×10^{-4}	3.36×10^{-8}	1.51×10^{-8}	1.05×10^{-6}	1.86×10^{-7}	8.07×10^{-9}
Ni	5.39×10^{-4}	7.23×10^{-5}	1.56×10^{-8}	7.01×10^{-9}	4.84×10^{-7}	8.61×10^{-8}	3.74×10^{-9}
Zn	4.84×10^{-3}	6.49×10^{-4}	1.40×10^{-7}	6.30×10^{-8}	4.35×10^{-6}	7.73×10^{-7}	

结果表明, 6 种重金属通过 3 种不同途径的非致癌风险暴露剂量从大到小依次为 Zn > Pb > Cr > Cu > Ni > Cd, 因为运用相同系数计算, 该顺序与大气降尘中重金属质量浓度大小依次顺序一致. 在 3 种途径中, 儿童每日暴露剂量均高于成人. 从暴露途径来看, 不论对于成人还是儿童, 均是通过手-口摄食为大气降尘重金属最主要暴露途径, 其次是皮肤接触暴露, 最次为呼吸吸入. Cd、Cr、Ni 这 3 种元素致癌重金属吸入途径的终身日平均暴露量远低于非致癌暴露剂量.

3.2 健康风险表征

根据公式, 计算出重金属的非致癌暴露风险. 从表 8 看出, 不同暴露途径非致癌风险都呈现儿童高于成人的特征. 在 3 种暴露途径中, 通过手-口摄食途径接触重金属的风险最高, 儿童手-口摄食途径风险占非致癌暴露总风险的 98.8%, 成人通过该途径暴露风险占总风险 98.1%. 不论对于成人或儿童, 不同重金属在 3 种暴露途径下总非致癌风险 HI 顺序为 Pb > Cr > Cd > Cu > Ni > Zn. 但 3 种途径的重金属暴露风险商 HQ 均小于美国环保局规定限值 1, 且所有重金属各途径的叠加风险未超过 1, 说明风险较小或可以忽略.

表 8 非致癌暴露参考剂量及暴露风险值

Table 8 Hazard quotient and risk for each element and exposure pathway

元素	RfD _{ing}	RfD _{inh}	RfD _{derm}	儿童				成人			
				HQ _{ing}	HQ _{inh}	HQ _{derm}	HI	HQ _{ing}	HQ _{inh}	HQ _{derm}	HI
Cu	3.70×10^{-2}	4.02×10^{-2}	1.90×10^{-3}	3.07×10^{-2}	8.15×10^{-7}	5.37×10^{-4}	3.12×10^{-2}	4.11×10^{-3}	3.67×10^{-7}	9.54×10^{-5}	4.21×10^{-3}
Pb	3.50×10^{-3}	3.52×10^{-3}	5.25×10^{-4}	4.85×10^{-1}	1.39×10^{-5}	2.91×10^{-3}	4.88×10^{-1}	6.51×10^{-2}	6.28×10^{-6}	5.17×10^{-4}	6.56×10^{-2}
Cd	1.00×10^{-3}	1.00×10^{-3}	5.00×10^{-5}	5.66×10^{-2}	1.64×10^{-6}	1.02×10^{-3}	5.76×10^{-2}	7.59×10^{-3}	7.36×10^{-7}	1.81×10^{-4}	7.77×10^{-3}
Cr	5.00×10^{-3}	2.86×10^{-5}	2.50×10^{-4}	2.33×10^{-1}	1.18×10^{-3}	4.18×10^{-3}	2.38×10^{-1}	3.12×10^{-2}	5.29×10^{-4}	7.43×10^{-4}	3.25×10^{-2}
Ni	2.00×10^{-2}	2.06×10^{-2}	1.00×10^{-3}	2.69×10^{-2}	7.56×10^{-7}	4.84×10^{-4}	2.74×10^{-2}	3.61×10^{-3}	3.4×10^{-7}	8.61×10^{-5}	3.70×10^{-3}
Zn	3.00×10^{-1}	3.00×10^{-1}	6.00×10^{-2}	1.61×10^{-2}	4.66×10^{-7}	7.25×10^{-5}	1.62×10^{-2}	2.16×10^{-3}	2.1×10^{-7}	1.29×10^{-5}	2.18×10^{-3}
总计				8.48×10^{-1}	1.19×10^{-3}	9.20×10^{-3}	8.58×10^{-1}	1.14×10^{-1}	5.37×10^{-4}	1.63×10^{-3}	1.16×10^{-1}

重金属健康风险的大小除了与暴露剂量相关以外, 也与重金属不同毒性有关. 大气颗粒物中的 Pb 能引起神经系统和血液系统的疾病, 尤其是儿童对其更为敏感, 威胁更大; Cd 也是一种有毒的重金属, 长期暴露在高浓度的 Cd 环境中会引起呼吸系统的疾病, 它还是一种致癌物质^[37]; Cr 和 Ni 离子是人体内重要的致癌物质之一, 过多的吸入会导致呼吸道癌变, 并且 Cr 也可能直接损伤基因, 导致基

因突变^[9]; 过多的 Cu 进入体内可出现恶心、呕吐、急性溶血和肾小管变形等中毒现象^[8]; Zn 是人体必需微量元素之一, 低剂量 Zn 有助于提高人体免疫力, 但过多的 Zn 能导致 Zn 中毒, 慢性 Zn 中毒表现为顽固性贫血、食欲下降^[38]. 根据风险评价规则, 某种暴露途径的参考剂量即 RfD_y 值表示在单位时间、单位体重摄取的不会引起人体不良反应的污染物最大量, 该值越大表示某元素健康风险越小. 以

上分析得出手-口摄食途径接触重金属的风险占总风险比例的绝大部分,比较手-口摄食途径的 RfD_{ing} 可知,6种重金属元素毒性从小到大依次为 $Zn < Cu < Ni < Cr < Pb < Cd$ 。因此在本研究中 Zn 的暴露剂量虽然是6种重金属中最大的,但暴露风险却最低; Cd 因浓度较小暴露剂量最小,但由于毒性大,暴露风险大; Cr 和 Pb 的暴露剂量较大且毒性大,因此暴露风险最高。尤其需注意通过手-口途径儿童 Pb 的暴露风险很大, HQ 已达到 0.86, 接近风险限值,城市降尘中的重金属 Pb 易对儿童健康造成伤害。

通过呼吸途径致癌风险暴露风险值的分析(表9),大气降尘中 Cd 、 Cr 和 Ni 致癌风险在 $10^{-9} \sim 10^{-7}$ 之间,均未超过 $10^{-6} \sim 10^{-4}$, 远远低于致癌风险量级,认为兰州市大气降尘重金属通过呼吸途径不具有致癌风险。

表9 呼吸途径致癌风险暴露风险值

Table 9 Slope factors for carcinogens and the carcinogenic risks

元素	SF	暴露风险
Cd	6.4	2.51×10^{-9}
Cr	42	3.39×10^{-7}
Ni	0.84	3.14×10^{-9}

4 结论

(1)大气降尘中 Cu 、 Pb 、 Cd 、 Cr 、 Ni 、 Zn 、 Mn 的含量平均值分别为 82.22、130.31、4.34、88.73、40.64、369.23、501.49 $mg \cdot kg^{-1}$ 。由于降尘中重金属来源不同,除 Mn 以外其他元素浓度在不同功能区分布有明显差异。

(2)富集因子分析表明; Mn 为轻微富集, Zn 、 Ni 、 Cu 和 Cr 富集因子较高,除了来源于土壤颗粒之外还叠加人为活动的影响, Pb 和 Cd 为极强富集,主要受人类活动影响。 Cr 、 Ni 、 Zn 在工业区富集因子都大于其他功能区, Cu 和 Pb 在交通区富集因子最大, Cd 在郊区最为富集。

(3)地积累指数评价大气降尘中重金属平均生态危害表明: Cr 在全年无实际污染, Cu 、 Ni 、 Zn 、 Pb 浓度处于轻度污染至偏重度污染之间。 Cd 的污染程度最重,分级为严重至极度污染。大气降尘重金属在10月~次年3月污染相对严重,从4~8月污染程度较轻。

(4)无论儿童还是成人,手-口途径摄入是降尘重金属引起非致癌风险的最主要途径。儿童的非致癌风险大于成人,总非致癌风险次序为 $Pb > Cr > Cd > Cu > Ni > Zn$ 。风险均低于限值,不会对人们身体健康造成危害。降尘中的 Cr 、 Cd 、 Ni 通过呼吸途径

不具有致癌风险。

参考文献:

- [1] 付宗敏. 大气降尘和 TSP 的地质化学特点及来源分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2011. 1-80.
- [2] 胡恭任, 戚红璐, 于瑞莲, 等. 大气降尘中重金属形态分析及生态风险评价[J]. 有色金属, 2011, **63**(2): 286-291.
- [3] Marx S K, Kamber B S, McGowan H A. Scavenging of atmospheric trace metal pollutants by mineral dusts: Inter-regional transport of Australian trace metal pollution to New Zealand [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(10): 2460-2478.
- [4] 邹海明, 李粉茹, 官楠, 等. 大气中 TSP 和降尘对土壤重金属累积的影响[J]. 中国农学通报, 2006, **22**(5): 393-395.
- [5] Zhao H R, Xia B C, Fan C, et al. Human health risk from soil heavy metal contamination under different land uses near Dabaoshan Mine, Southern China [J]. Science of the Total Environment, 2012, **417-418**: 45-54.
- [6] 贾振邦, 周华, 赵智杰, 等. 应用地积累指数法评价太子河沉积物中重金属污染[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2000, **25**(4): 525-530.
- [7] 李法云, 胡成, 张营, 等. 沈阳市街道灰尘中重金属的环境影响与健康风险评价[J]. 气象与环境学报, 2010, **26**(6): 59-64.
- [8] 唐荣莉, 马克明, 张育新, 等. 北京城市道路灰尘重金属污染的健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(8): 2006-2015.
- [9] 杨孝智, 陈扬, 徐殿斗, 等. 北京地铁站灰尘中重金属污染特征及健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(6): 944-950.
- [10] 王晓云, 马建华, 侯千, 等. 开封市幼儿园地表灰尘重金属积累及健康风险[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(3): 583-593.
- [11] 常静, 刘敏, 李先华, 等. 上海地表灰尘重金属污染的健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2009, **29**(5): 548-554.
- [12] 任春辉, 卢新卫, 李晓雪, 等. 宝鸡长青镇工业园区周围灰尘重金属污染特征及健康风险[J]. 地球与环境, 2012, **40**(3): 365-373.
- [13] Gómez B, Palacios M A, Gómez M, et al. Levels and risk assessment for humans and ecosystems of platinum-group elements in the airborne particles and road dust of some European cities [J]. Science of the Total Environment, 2002, **299**(1-3): 1-19.
- [14] Ferreira-Baptista L, Demiguel E. Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda, Angola; a tropical urban environment [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(25): 4501-4512.
- [15] 兰州市人民政府. 兰州简介 [EB/OL]. <http://www.lz.gansu.gov.cn/zjlz/lzgz/lzgz/>, 2013-03-27.
- [16] Liu Q T, Diamond M L, Gingrich S E, et al. Accumulation of metals, trace elements and semi-volatile organic compounds on exterior window surfaces in Baltimore [J]. Environmental

- Pollution, 2003, **122**(1): 51-61.
- [17] Torfs K, Van Grieken R. Chemical relations between atmospheric aerosols, deposition and stone decay layers on historic buildings at the mediterranean coast [J]. *Atmospheric Environment*, 1997, **31**(15): 2179-2192.
- [18] 秦松. 西固城区街道灰尘重金属含量的分布、来源及质量评价[D]. 兰州: 兰州大学, 2008. 50-53.
- [19] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 334-379.
- [20] 陈灿灿, 卢新卫, 王利军, 等. 宝鸡市街道灰尘重金属污染的健康风险评价[J]. *城市环境与城市生态*, 2011, **24**(2): 35-38.
- [21] DB11/T 656-2009, 场地环境评价导则[S].
- [22] U. S. Environmental Protection Agency. Soil Screening Guidance: Technical Background Document [M]. Washington, DC: Office of Solid Waste and Emergency Response, 1996. 1-447.
- [23] U. S. Environmental Protection Agency. Supplemental Guidance for Developing Soil Screening Levels for Super fund Sites [M]. Washington, DC: Office of Solid Waste and Emergency Response, 2002. 1-106.
- [24] 王宗爽, 武婷, 段小丽, 等. 环境健康风险评价中我国居民呼吸速率暴露参数研究[J]. *环境科学研究*, 2009, **22**(10): 1171-1175.
- [25] 王喆, 刘少卿, 陈晓民, 等. 健康风险评价中中国人皮肤暴露面积的估算 [J]. *安全与环境学报*, 2008, **8**(4): 152-156.
- [26] Huang S S, Tu J, Liu H Y, *et al.* Multivariate analysis of trace element concentrations in atmospheric deposition in the Yangtze River Delta, East China [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(36): 5781-5790.
- [27] 国家技术监督局. 中华人民共和国国家标准车用无铅汽油标准[M]. 北京: 中国标准出版社, 2000. 1-19.
- [28] 梅凡民, 徐朝友, 周亮. 西安市公园大气降尘中 Cu、Pb、Zn、Ni、Cd 的化学形态特征及其生物有效性[J]. *环境化学*, 2011, **30**(7): 1284-1290.
- [29] Manno E, Varrica D, Dongarra G. Metal distribution in road dust samples collected in an urban area close to a petrochemical plant at Gela, Sicily [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(30): 5929-5941.
- [30] Siegel F R. Environmental geochemistry of potentially toxic metals [M]. Berlin: Springer, 2001. 45-59.
- [31] 陶俊, 陈刚才, 赵琦, 等. 重庆市大气 TSP 中重金属分布特征[J]. *重庆环境科学*, 2003, **25**(12): 15-16, 19.
- [32] 廖自基. 微量元素的环境化学及生物效应 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992. 1-520.
- [33] 杜坚. 西安市可吸入颗粒物中重金属分布规律[J]. *陕西地质*, 2005, **23**(2): 76-83.
- [34] 倪刘建, 张甘霖, 阮心玲, 等. 南京市不同功能区大气降尘的沉降通量及污染特征 [J]. *中国环境科学*, 2007, **27**(1): 2-6.
- [35] 孙旭映, 尉元明, 庞朝云, 等. 兰州城区大气污染物分布特征分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2004, **18**(6): 15-18.
- [36] 胡恭任, 于瑞莲. 应用地积累指数法和富集因子法评价 324 国道塘头段两侧土壤的重金属污染[J]. *中国矿业*, 2008, **17**(4): 47-51.
- [37] 李凤菊, 邵龙义, 杨书申. 大气颗粒物中重金属的化学特征和来源分析[J]. *中原工学院学报*, 2007, **18**(1): 7-11.
- [38] 滕德智, 何作顺. 锌镉毒性研究进展[J]. *微量元素与健康研究*, 2012, **29**(1): 51-53.

CONTENTS

Concentration and Community Diversity of Microbes in Bioaerosols in the Qingdao Coastal Region	QI Jian-hua, WU Li-jing, GAO Dong-mei, <i>et al.</i> (801)
Carbon Source Apportionment of PM _{2.5} in Chongqing Based on Local Carbon Profiles	ZHANG Can, ZHOU Zhi-en, ZHAI Chong-zhi, <i>et al.</i> (810)
Observation of Atmospheric Pollutants in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	XU Peng, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (820)
A Floating-Dust Case Study Based on the Vertical Distribution of Aerosol Optical Properties	WANG Yuan, DENG Jun-ying, SHI Lan-hong, <i>et al.</i> (830)
Analysis and Assessment of Atmospheric Pollution Based on Accumulation Characterization of Heavy Metals in <i>Platanus acerifolia</i> Leaves	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (839)
Study on the Emission Characteristics and Potential Environment Hazards of the Heat-setting Machine of the Typical Dyeing and Finishing Enterprise	XU Zhi-rong, WANG Peng, WANG Zhe-ming, <i>et al.</i> (847)
Implementation Results of Emission Standards of Air Pollutants for Thermal Power Plants; a Numerical Simulation	WANG Zhan-shan, PAN Li-bo (853)
On Road Particle Emission Characteristics of a Chinese Phase IV Natural Gas Bus	LOU Di-ming, CHENG Wei, FENG Qian (864)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanols in Smoke from Rice and Maize Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (870)
Diurnal and Seasonal Variations of Surface Atmospheric CO ₂ Concentration in the River Estuarine Marsh	ZHANG Lin-hai, TONG Chuan, ZENG Cong-sheng (879)
Partial Pressure and Diffusion Flux of Dissolved Carbon Dioxide in the Mainstream and Tributary of the Central Three Gorges Reservoir in Summer	LI Shuang, WANG Yu-chun, CAO Man, <i>et al.</i> (885)
Emission of CH ₄ , N ₂ O and NH ₃ from Vegetable Field Applied with Animal Manure Composts	WAN He-feng, ZHAO Chen-yang, ZHONG Jia, <i>et al.</i> (892)
Effects of Different Iron Oxides on Methane Emission in Paddy Soil as Related to Drying/Wetting Cycles	ZHANG Tian-jiao, TANG Jia, ZHUANG Li, <i>et al.</i> (901)
Study on the Dissolution Behavior of Biogenic Silica in the Changjiang Estuary Adjacent Sea	WU Bin, LÜ Wei-xiang, LU Chao, <i>et al.</i> (908)
Phytoplankton Community Structure and Assessment of Water Quality in the Middle and Lower Reaches of Fenhe River	WANG Ai-ai, FENG Jia, XIE Shu-lian (915)
Lake Algae Chemotaxonomy Technology Based on Fluorescence Excitation Emission Matrix and Parallel Factor Analysis	CHEN Xiao-na, HAN Xiu-rong, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (924)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (933)
Distribution of Phosphorus in Surface Sediments from the Yellow River Estuary Wetland	YU Zi-yang, DU Jun-tao, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (942)
Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus Adsorption on Sediment in Lake Taihu and Lake Hulun	CHUAI Xiao-ming, YANG Liu-yan, CHENG Shu-bo, <i>et al.</i> (951)
Linking Optical Properties of Dissolved Organic Matter with NDMA Formation Potential in the Huangpu River	DONG Qian-qian, ZHANG Ai, LI Yong-mei, <i>et al.</i> (958)
Reductive Debromination of Polybrominated Diphenyl Ethers in Aquifer by Nano Zero-valent Iron: Debromination Kinetics and Pathway	YANG Yu-han, XU Wei-wei, PENG Si-kan, <i>et al.</i> (964)
Influencing Factors and Reaction Mechanism of Chloroacetic Acid Reduction by Cast Iron	TANG Shun, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (972)
Effect of Phosphorus Recovery on Phosphorous Bioaccumulation/Harvesting in an Alternating Anaerobic/Aerobic Biofilter System	ZHANG Shun, TIAN Qing, TANG Man-lin, <i>et al.</i> (979)
Effects of Pretreatment Methods on Corncob as Carbon Source for Denitrification	ZHAO Wen-li, HAO Rui-xia, LI Bin, <i>et al.</i> (987)
Start-Up by Inoculation and Operation of a CANON Reactor with Haydite as the Carrier	FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, QIU Fu-guo (995)
Diversity of Operation Performance and Microbial Community Structures in MBRs and CAS Processes at Low Temperature	HUANG Fei, MEI Xiao-jie, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1002)
Enhanced Hydrolysis and Acidification of Waste Activated Sludge by Alkyl Polyglycosides	CHEN Can, SUN Xiu-yun, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1009)
Effect of Substrate Concentration on Pathogen Indicators Inactivation During Thermophilic Anaerobic Digestion	CAO Hong-qing, ZHANG Fei-fei, LI Jian, <i>et al.</i> (1016)
Pollution Evaluation and Health Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Lanzhou	LI Ping, XUE Su-yin, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1021)
Ecological Risk Assessment of Organophosphorus Pesticides in Aquatic Ecosystems of Pearl River Estuary	GUO Qiang, TIAN Hui, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (1029)
Source Characteristics and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Surface Sediments of Haizhou Bay	LI Fei, XU Min (1035)
Health Risk Induced by Estrogens During Unplanned Indirect Potable Reuse of Reclaimed Water from Domestic Wastewater	WU Qian-yuan, SHAO Yi-ru, WANG Chao, <i>et al.</i> (1041)
Distribution Characteristics and Erosion Risk of Nitrogen and Phosphorus in Soils of Zhuangnu Town in Lake Wabuhu Basin	LI Ru-zhong, ZOU Yang, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1051)
Distribution and Risk Assessment of Mercury Species in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Cheng, CHEN Hong, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1060)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Residential Communities Built on Brownfields	CHEN Xing, MA Jian-hua, LI Xin-ning, <i>et al.</i> (1068)
Study on Ecological Risk Assessment Technology of Fluoride Pollution from Arid Oasis Soil	XUE Su-yin, LI Ping, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1075)
Rainfall Process and Nitrogen Input in Three Typical Forests of Jinyun Mountain	SUN Su-qi, WANG Yu-jie, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (1081)
Effects of Land Use and Landscape Pattern on Nitrogen and Phosphorus Exports in Lanlingxi Watershed of the Three Gorges Reservoir Area, China	HAN Li-yang, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (1091)
Changes and Influencing Factors of the Soil Organic Carbon in Farmland in the Last 30 Years on Hilly Loess Plateau; A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie, <i>et al.</i> (1098)
Organic Carbon and Carbon Mineralization Characteristics in Nature Forestry Soil	YANG Tian, DAI Wei, AN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1105)
Dynamic Change of Phosphorus Leaching of Neutral Purple Soil at Different Re-wetting Rate	ZHANG Si-lan, SHI Xiao-jun, GUO Tao (1111)
Effects of Thiourea on pH and Availability of Metal Ions in Acid Red Soil	YANG Bo, WANG Wen, ZENG Qing-ru, <i>et al.</i> (1119)
Growth Responses of Six Leguminous Plants Adaptable in Northern Shaanxi to Petroleum Contaminated Soil	SHAN Bao-qin, ZHANG Xiong-tao, CAO Qiao-ling, <i>et al.</i> (1125)
Plant N Status in the Alpine Grassland of the Qinghai-Tibet Plateau; Base on the N:P Stoichiometry	ZHANG Ren-yi, XU Dang-hui, CHEN Ling-yun, <i>et al.</i> (1131)
Development and Succession of Artificial Biological Soil Crusts and Water Holding Characteristics of Topsoil	WU Li, CHEN Xiao-guo, ZHANG Gao-ke, <i>et al.</i> (1138)
Carbon Dioxide Assimilation Potential, Functional Gene Amount and RubisCO Activity of Autotrophic Microorganisms in Agricultural Soils	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, JIAN Yan, <i>et al.</i> (1144)
Dynamics of Microbes and Enzyme Activities During Litter Decomposition of <i>Pinus massoniana</i> Forest in Mid-subtropical Area	SONG Ying, GU Xi-rong, YAN Hai-yuan, <i>et al.</i> (1151)
Levels and Possible Sources of Organochlorine Pesticides(OCPs) in Camphor (<i>Cinnamomum camphora</i>) Tree Bark from Southern Jiangsu, China	ZHOU Li, ZHANG Xiu-lan, YANG Wen-long, <i>et al.</i> (1159)
Combined Stress of Enhanced UV-B Radiation and 1,2,4-Trichlorobenzene Contamination on the Growth of Green Vegetable	LIU Cui-ying, FAN Jian-ling, XU Xiang-hua (1164)
Effect of Ectomycorrhizae on Heavy Metals Sequestration by Thermostable Protein in Rhizosphere of <i>Pinus tabulaeformis</i> Under Cu and Cd Stress	ZHANG Ying-wei, CHAI Li-wei, WANG Dong-wei, <i>et al.</i> (1169)
Isolation and Characterization of a Halotolerant <i>p</i> -nitroaniline Degrading Strain S8	SONG Cai-xia, DENG Xin-ping, LI Tian, <i>et al.</i> (1176)
Optimized Cultivation of a Bioflocculant M-C11 Produced by <i>Klebsiella pneumoniae</i> and Its Application in Sludge Dewatering	LIU Jie-wei, MA Jun-wei, LIU Yan-zhong, <i>et al.</i> (1183)
Speciation Analysis of Lead Losses from Anthropogenic Flow in China	LIANG Jing, MAO Jian-su (1191)
Establishment and Application of Pollutant Discharge-Environment Quality Model	LI Ming-sheng, SUN Yuan, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (1198)
Advances in the Pathway and Molecular Mechanism for the Biodegradation of Microcystins	YAN Hai, WANG Hua-sheng, LIU Xiao-lu, <i>et al.</i> (1205)

《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3月15日 35卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 3 Mar. 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