

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第4期

Vol.35 No.4

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

2008 ~2012 年上海黑碳浓度变化特征分析 王洪强,贺千山,陈勇航,亢燕铭 (1215)

乌鲁木齐市东南郊一次降雪过程的化学组成及其悬浮态颗粒形态特征 陆辉,魏文寿,崔彩霞,何清,王瑶 (1223)

典型地区大气中多溴联苯醚和新型溴代阻燃剂的水平及组成分布 吴辉,金军,王英,李明圆,何松洁,徐萌,孙一鸣 (1230)

某焦化厂周边大气 PM₁₀ 重金属来源及健康风险评价 董婷,李天昕,赵秀阁,曹素珍,王贝贝,马瑾,段小丽 (1238)

基于车流和大气污染物浓度同步增量的机动车平均排放因子估算方法 李润奎,赵彤,李志鹏,丁文军,崔晓勇,许群,宋现锋 (1245)

珠江三角洲地区硫和氮沉降临界负荷研究 孙成玲,谢绍东 (1250)

低温等离子体-生物法处理硫化氢气体研究 李华琴,何觉聪,陈洲洋,黎宝仁,黄倩茹,张再利,魏在山 (1256)

太子河流域莠去津的空间分布及风险评价 郑磊,张依章,张远,朱鲁生,王志强 (1263)

一种大批量测定沉积物微量间隙水样品中溶解态磷和铁含量的方法 王燕,朱春刚,许笛,丁士明 (1271)

外源营养盐输入后水体中营养盐浓度的时空变化 傅玲,赵凯,王国祥,欧媛,范娟,毛丽娜,张佳,韩睿明 (1278)

基于物理过程的矿区地下水污染风险评价 孙法圣,程品,张博 (1285)

重庆典型岩溶地下水系统水文地球化学特征研究 杨平恒,卢丙清,贺秋芳,陈雪彬 (1290)

重庆老龙洞地下河流域氮、磷及微生物污染调查研究 蓝家程,杨平恒,任坤,陈雪彬,徐昕,胡宁 (1297)

苦草 (*Vallisneria spiralis*) 根系对沉积物中各形态磷的影响 李振国,王国祥,张佳,马久远,魏宏农,俞振飞 (1304)

循环廊道湿地中氮归趋过程模拟研究 彭剑峰,宋永会,袁鹏,张雪妍,胡小明 (1311)

不同环境因素下太湖中四环素的自然消减 段伦超,王凤贺,纪莹雪,张帆,赵斌,王国祥 (1318)

再生水中 5 种抗生素抗性菌的紫外线灭活及复活特性研究 黄晶晶,汤芳,席劲璇,庞宇辰,胡洪营 (1326)

二级处理出水的 UV-TiO₂ 消毒及大肠杆菌和粪肠球菌复活试验 王西峰,龚昕,胡晓莲,任伯帜 (1332)

水中 C₆₀ 纳米颗粒的稳定性研究 方华,沈冰冰,荆洁,陆继来,王媛 (1337)

XDLVO 理论解析不同离子条件下海藻酸钠微滤膜污染 赵应许,纵瑞强,高欣玉,谢慧君,殷永泉,梁爽 (1343)

纳米零价铁催化过氧化氢强化修复 4-氯硝基苯污染地下水的研究 付融冰 (1351)

共存氯苯类同系物对六氯苯厌氧降解活性的影响 王琪,刘辉,姜林,唐军 (1358)

硫酸盐还原生物滤池对含镉废水去除效果试验研究 吴宣,谭科艳,胡希佳,顾远,杨宏 (1366)

基于氮平衡原理对南方污水处理厂中试脱氮工艺调控策略研究 姜应和,刘佩炬,王磊,田中凯,刘小英 (1372)

模拟电镀污泥阴离子浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响 陈燕,黄芳,谢鑫源 (1377)

电活性生物膜介导 Cu²⁺ 生物还原的试验研究 刘毅,周顺桂,袁勇,刘志 (1384)

模拟废旧线路板生物浸出液中铜的回收 程丹,朱能武,吴平霄,邹定辉,邢翊佳 (1391)

填埋垃圾浸提液与地下水污染物组成差异及成因 何小松,余红,席北斗,崔东宇,潘红卫,李丹 (1399)

化学合成施氏矿物与 H₂O₂ 共存体系下光化学处理垃圾渗滤液的研究 王鹤茹,宋永伟,徐峙辉,崔春红,周立祥 (1407)

处理 BPA 模拟废水的 SBR 工况参数对污泥有机毒性的影响研究 杨娜,陈秀荣,林逢凯,黄华,章斐,赵骏,丁毅 (1414)

剩余污泥厌氧消化甲烷生成势与产甲烷菌群多样性的比较研究 董慧岭,季民 (1421)

锰氧化菌 *Aminobacter* sp. H1 的分离鉴定及其锰氧化机制研究 晏平,姜理英,陈建孟,何智敏,肖少丹,蒋铁锋 (1428)

1 株铁基质自养反硝化菌的脱氮特性 王弘宇,杨开,张倩,季斌,陈丹,孙宇翀,田俊 (1437)

碘普罗胺降解菌 *Pseudomonas* sp. I-24 共代谢降解性能研究 徐冰洁,高品,薛昱,何梦琦,吴凡 (1443)

利用流式细胞术研究鞘氨醇单胞菌 GY2B 降解非过程中细菌表面特性的变化 张梦露,党志,伍凤姬,梁旭军,郭楚玲,卢桂宁,杨琛 (1449)

毒性有机物 BPA 与普通小球藻的相互影响特性研究 陈善佳,陈秀荣,闫龙,赵建国,章斐,江子建 (1457)

缺镁胁迫对普通小球藻光合生理及油脂积累的影响 王珊,赵树欣,魏长龙,于水燕,史吉平,张保国 (1462)

微囊藻毒素对水稻根系生长和抗氧化系统的影响 王妮敏,邓琦,邹华,梁婵娟 (1468)

东北春大豆品种东生 1 号对臭氧胁迫的响应 张巍巍,王光华,王美玉,刘晓冰,冯兆忠 (1473)

生物结皮的发育演替与微生物生物量变化 吴丽,张高科,陈晓国,兰书斌,张德禄,胡春香 (1479)

老化土壤中铅对赤子爱胜蚓生长及繁殖的影响 陈丽红,刘征涛,方征,王晓南,王婉华 (1486)

土壤重金属镉标准值差异比较研究与建议 赵晓军,陆泗进,许人骥,李伯苓,吴国平,魏复盛 (1491)

藏北可可西里地区土壤元素背景值研究 柏建坤,王建力,李潮流,康世昌,陈鹏飞 (1498)

三峡库区香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析 胥焘,王飞,郭强,聂小倩,黄应平,陈俊 (1502)

浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析 厉炯慧,翁珊,方婧,黄佳蕾,陆芳华,卢宇浩,张洪铭 (1509)

西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征 张海珍,唐宇力,陆骏,周虹,徐芸茜,陈川,赵赞,王美娥 (1516)

生活垃圾焚烧厂周边土壤汞污染特征及评价 解惠婷,张承中,徐峰,李海凤,田振宇,唐琛,刘文彬 (1523)

上海滴水湖周边土壤和沉积物对磷的吸附特征 诸葛祥真,毕春娟,陈振楼,张焕焕,倪玮怡 (1531)

SDBS/Na⁺ 对红壤胶体悬液稳定性的影响 唐颖,李航,朱华玲,田锐,高晓丹 (1540)

稳定化处理对矿渣中重金属迁移转化的影响研究 赵述华,陈志良,张太平,潘伟斌,彭晓春,车融,欧英娟,雷国建,周鼎 (1548)

藻类水体 Cd²⁺ 毒性快速监测新方法研究 段静波,刘文清,张玉钧,赵南京,殷高方,肖雪,余晓娅,方丽 (1555)

用于 1,3-二硝基苯快速检测的免疫传感器研究 龙峰,施汉昌,王洪臣,盛建武 (1561)

Mg/Al 水滑石微波共沉淀法合成及其对 BrO₃⁻ 吸附性能的研究 钟琼,李欢 (1566)

污染场地修复决策支持系统的几个关键问题探讨 廖晓勇,陶欢,阎秀兰,赵丹,林龙勇,李尤 (1576)

城市区域土壤铅含量空间变异的多尺度研究进展 杨孟,李凤英,刁一伟,吴丹 (1586)

水中细菌内毒素污染特性及检测方法研究进展 张灿,刘文君,张明露,田芳,杨毅,安代志 (1597)

六价铬细菌还原的分子机制研究进展 李斗,赵由才,宋立岩,尹雅洁,王洋清,徐中慧 (1602)

农副食品加工工业高浓度废水的厌氧膜生物反应器技术 魏源送,郁达伟,曹磊 (1613)

《环境科学》征稿简则(1427) 《环境科学》征订启事(1497) 信息(1383, 1390, 1398, 1560)

某焦化厂周边大气 PM₁₀ 重金属来源及健康风险评价

董婷^{1,2}, 李天昕¹, 赵秀阁², 曹素珍^{2,3}, 王贝贝², 马瑾², 段小丽^{2*}

(1. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083; 2. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 3. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 为了解焦化厂周边大气 PM₁₀ 中重金属的来源及健康风险, 于 2012 年 6 月采集了某焦化厂周边的 PM₁₀. 使用微波消解-ICP-MS 方法进行重金属含量的检测, 并采用美国 EPA 人体暴露风险评价模型对大气颗粒物重金属进行人群健康风险的初步评价. 结果表明, 焦化厂周边 PM₁₀ 中 10 种重金属元素的浓度变化范围较大, 在 $3.06 \times 10^{-5} \sim 1.77 \times 10^{-2} \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间, 其中 Cr 的浓度最高, Co 的浓度最低, 致癌物质的浓度高于非致癌物质的浓度. 焦化厂是其周边大气 PM₁₀ 重金属的主要来源, Ni 是主要的污染重金属. 健康风险评价结果显示, 成人的致癌风险比儿童大, 工业区和学校存在较大致癌风险. 而儿童的非致癌风险是最大的, 居住区的非致癌风险不容忽视. 致癌物质中 Cd、Cr 和 As 存在较大的潜在致癌风险, Ni 和 Co 存在一定的潜在风险, 非致癌物质中 Mn 的非致癌风险很大, 应引起相关部门的重视.

关键词: 焦化厂; 大气; 重金属; 来源; 健康风险评价

中图分类号: X513; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)04-1238-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.2014.04.004

Source and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Ambient Air PM₁₀ from One Coking Plant

DONG Ting^{1,2}, LI Tian-xin¹, ZHAO Xiu-ge², CAO Su-zhen^{2,3}, WANG Bei-bei², MA Jin², DUAN Xiao-li²

(1. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: To investigate the sources and health risk of heavy metals in ambient air PM₁₀ from the coking plant, the PM₁₀ in the air around one coking plant was collected in June 2012. Then the heavy metals concentrations in PM₁₀ were tested by the microwave-ICP-MS method. Furthermore, the USEPA's human exposure assessment model was applied to preliminarily evaluate the human health risks of the heavy metals in air particulate matter. The results show that the concentrations of 10 kinds of heavy metals in PM₁₀ from the coking plant vary significantly, ranging from $3.06 \times 10^{-5} \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ to $1.77 \times 10^{-2} \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, of which the concentration of Cr is the highest, while the concentration of Co is the lowest, and the concentration of the carcinogenic substances is higher than that of the non-carcinogenic substances. The coking plant is identified to be the major source of the heavy metals in ambient air PM₁₀, and Ni is the main polluting heavy metal. Moreover, the heavy risk assessment results reveal that the carcinogenic risks for adults are higher than children, while the carcinogenic risks in industrial areas and school relatively large. The non-carcinogenic risks for children are the highest in all the population, and the non-carcinogenic risks in residential area can not be ignored. Among the carcinogenic substances, the potential carcinogenic risks of Cd, Cr and As are comparatively large, Ni and Co have certain potential risks. Whereas, among the non-carcinogenic substances, the non-carcinogenic risks of Mn is great. Consequently, relevant departments should pay close attention to this situation.

Key words: coking plant; air; heavy metals; source; health risk assessment

焦化厂是污染较重的企业,其排放的大气颗粒物中所含的污染物种类较多,对人体的危害较大^[1].有关研究表明^[2],某焦化厂周边大气降尘中的重金属含量远高于对照区和其他城市(贵阳、韶关等),焦化厂对其周围大气降尘重金属含量有较大的贡献. Gorka^[3]通过对焦化厂周边灰尘的调查,提出焦化厂是大气中重金属的排放来源. 重金属元素能够在气溶胶上富集(颗粒越细,富集能力越强),经呼吸作用在人体内沉积,导致人体机能障碍和不可逆性损伤^[4~7].

PM₁₀是可吸入颗粒,也是多种有害物质进入人体的重要载体. 据报道,大气颗粒物中约 75% ~ 90% 的重金属分布在 PM₁₀ 中^[8]. 某些重金属元素具有致癌性,其对人体的健康有较大的风险. 在焦化厂健康风险评价中,王静等^[9]对某焦化厂空气中的 PAHs 的污染现状开展了研究,并根据 PAHs 浓度对

收稿日期: 2013-08-10; 修订日期: 2013-10-14

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201109064, 2010467046)

作者简介: 董婷(1988~),女,硕士,主要研究方向为重金属环境健康风险评价, E-mail: dt894038281@163.com

* 通讯联系人, E-mail: duan_jasmine@126.com

焦化工人职业暴露 PAHs 的健康风险进行了评价, 也有对焦化废水处理厂大气 PAHs 进行健康风险评价研究^[10]. 国内外对土壤、水及灰尘中重金属健康风险评价研究较多, 而对于大气重金属这方面的研究相对较少, 仅有对捷克的摩拉维亚市^[11]、南京市^[12]、深圳市^[13]以及国内某机场周边^[14]等进行过大气重金属的健康风险研究. 对于污染场地周边的研究也只有对铅锌矿进行过大气重金属健康风险评价^[15], 目前国内外鲜见对焦化厂周边大气重金属的健康风险进行研究.

随着焦化行业的迅猛发展, 污染物排放量也大量增加, 进而导致环境污染问题和人群健康风险问题. 本研究着眼于焦化厂周边大气重金属污染, 先对采集的焦化厂周边大气 PM₁₀ 中重金属含量进行定量分析, 进而进行重金属的来源解析, 并根据中国现有的暴露评价参数对重金属经呼吸途径的人体健康风险进行评价, 以期对周边人群防范重金属健康风险提供依据.

1 材料与方法

1.1 样品的采集

为了避免冬季大量使用煤炭取暖等带来的误差, 因此于 2012 年 6 月 2~5 日在焦化厂附近进行 PM₁₀ 的采集, 包括厂界周边、焦化厂附近某小学、周边某宾馆和某住宅小区. 选择人群活动较多的工业区、商业区、学校以及居住区这 4 个区域进行布点采样, 每个区域附近采 3 个点, 共 12 个采样点, 采样点位分布如图 1 所示. 采样期间均是晴天, 微风 (偏北风小于 3 级), 采样尽量在较宽敞通风较好的地方. 采样点周边除焦化厂外无其他大型企业及污染源, 也无大型的公路.

本研究样品采集采用美国 PALL 公司生产的石



图 1 采样点位分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling point

英滤膜, 采样前将石英滤膜用锡箔纸包好置于马弗炉中进行 400℃ 高温干燥处理. 采样泵选用青岛崂山 KC-120H 型智能中流量恒流采样器, 流量为 100 L·min⁻¹, 采样时间持续 24 h. 采样后的滤膜置于干燥器中保存, 待分析.

1.2 样品前处理

将采样后的石英滤膜称重后剪碎于聚四氟乙烯管中, 加入 9 mL 浓 HNO₃ (MOS 级, 北京化学试剂研究所), 待冷消化反应 0.5 h 后, 加入 1 mL 40% HF (优级纯, 北京化工厂), 置于微波消解仪 (CEM, MARS5) 内进行微波消解. 微波消解后的消化液用超纯水 (18 MΩ·cm) 全部转移至赶酸管中, 于 110℃ 下在石墨重金属消解仪 (海能, SH230) 上进行赶酸, 至管内剩一滴消解液, 用超纯水将其全部转移至 15 mL 聚四氟乙烯瓶, 用称重法定容至 10 g. 将定容后的提取液过滤后, 摇匀并置于 -4℃ 冰箱中冷藏待测. 消化过程同步操作试剂空白样品及加标回收样品.

1.3 样品的测定及分析

采用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) (Agilent, 7500a) 对已前处理的标样、试剂空白和样品溶液进行重金属浓度的测定. 在优化仪器工作参数后, 以双内标铑 (Rh) 和铼 (Re) (中国地质科学院) 以及调谐液 (Agilent, USA) 进行校正, 以满足 ICP-MS 仪器的测定要求. 仪器校正后, 用 5% 硝酸稀释多元素混合标准溶液 (1 mg·L⁻¹) (国家标准物质信息中心), 配制浓度分别为 0、5、10、20、50 和 100 μg·L⁻¹ 系列标准溶液, 制作标准曲线. 标准曲线做好后, 将试剂空白、加标样和样品溶液分别引入仪器进行重金属元素的测定. 本研究分析的重金属元素包括 Cd、Cr、As、Ni、Co、Pb、Zn、Cu、Mn 和 V 等 10 种 (砷是类金属, 但其性质与重金属的性质很类似, 且砷是煤的一种主要指示物, 焦化厂排出的烟尘中的砷进入人体会损害人体的健康, 因此本研究中将砷列入重金属研究中). 样品处理中全过程进行严格的质量控制, 样品测试的相对标准差 RSD 控制在 5% 内, 且加标样品的加标回收率均在 87%~110% 之间, 保证测量方法和数据的可靠性和准确性.

1.4 数据分析

采用 SPSS 16.0 统计分析软件、Origin 9.0、Crystal Ball 水晶球风险评估软件 (版本: 11.1.1.1.00) 和 Excel 2007 进行结果的统计学分析及其他分析.

1.5 重金属健康风险评价

1.5.1 健康风险评价模型

本研究采用的是美国环保局推荐的人体暴露健康风险评价模型,对采集的焦化厂周边大气 PM₁₀ 中 10 种重金属元素对人体的健康风险进行评价. 因为大气中的污染物主要以呼吸途径进入人体^[16],所以本研究中主要考虑呼吸途径的健康风险,将消化道、手口接触以及皮肤途径产生的健康风险忽略,所计算出的健康风险会比实际偏小. 本研究分成年男性、成年女性和儿童分别进行这 10 种重金属元素的健康风险评价,并根据中国人群的特点,选取现有的适合中国人群的暴露参数进行健康风险评价. 本研究中 Cd、Cr、As、Ni 和 Co 属于致癌物质(无阈化合物),Pb、Zn、Cu、Mn 和 V 属于非致癌物质(有阈化合物)^[17].

非致癌物质通常用日均暴露剂量 ADD(average daily dose)表示,致癌物质一般用终身日均暴露剂量 LADD(lifetime average daily dose)表示,计算公式如下^[18,19]:

$$\text{ADD/LADD} = \frac{c \times \text{IR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (1)$$

式中,ADD 为日均暴露剂量,mg·(kg·d)⁻¹; LADD 为终身日均暴露剂量,mg·(kg·d)⁻¹; c 为污染物浓度,mg·m⁻³; IR 为呼吸速率,m³·d⁻¹; EF 为暴露频率,d·a⁻¹; ED 为暴露持续时间,a; BW 为体重,kg; AT 为平均暴露时间,d.

对于致癌污染物,根据终身日均暴露剂量(LADD),可得到其致癌风险,以 ILCR(incremental lifetime cancer risk,终生增量致癌风险)表示,计算公式如下^[18-20]:

$$\text{ILCR} = \text{LADD} \times \text{SF} \quad (2)$$

式中,ILCR 为终生增量致癌风险,表示人群癌症发生的概率,通常以单位数量人口出现癌症患者的比例表示,就是平常所说的风险值(risk). 若 ILCR 在 10⁻⁶ ~ 10⁻⁴之间(即每 1 万人到 100 万人增加 1 个

癌症患者),认为该物质不具备致癌风险^[21,22]; SF 为致癌斜率因子(slope factor),[mg·(kg·d)⁻¹]⁻¹,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.

对于非致癌物质,根据日均暴露剂量(ADD),以 HQ(hazard quotient,危险系数)作为非致癌风险评估的衡量指标,得到单一污染物非致癌风险. 计算公式如下^[18-20]:

$$\text{HQ} = \frac{\text{ADD}}{\text{RfD}} \quad (3)$$

式中,ADD 为非致癌元素日均暴露剂量,mg·(kg·d)⁻¹; RfD 为参考剂量(reference dose),mg·(kg·d)⁻¹.

当 HQ ≤ 1 时,风险较小或可以忽略; HQ > 1 时,存在非致癌风险.

1.5.2 参数的选择

由于我国在暴露参数研究方面缺乏基础数据的支持,所做的健康风险评价中一般都引用美国的暴露参数. 但随着中国暴露参数研究的发展,本研究在现有研究^[23,24]的基础上选用了适合中国人群的暴露参数,使目标人群的暴露剂量越接近实际结果,健康风险评价的结果更合理更准确. 经呼吸途径进入人体的相关暴露参数见表 1.

表 1 经呼吸途径进入人体的暴露参数

项目	成年男性	成年女性	儿童(1~6岁)	文献
IR/m ³ ·d ⁻¹	19.02	14.17	5	[17,23]
BW/kg	62.7	54.4	15	[17,23]
EF/d·a ⁻¹	350	350	350	[17]
ED/a	30	30	6	[17]
AT(致癌)/d	70×365	70×365	70×365	[13]
AT(非致癌)/d	30×365	30×365	6×365	[13,17]

本研究中选取的 10 种重金属元素都是大气污染中有毒有害且关注度较高的物质,其致癌强度系数(SF)和参考剂量(RfD)可以从美国综合危险度数据库(IRIS)等有关数据库直接获得^[25],见表 2.

表 2 10 种重金属经呼吸途径进入人体的剂量-反应参数

致癌物质	Cd	Cr	As	Ni	Co
SF ^[13,25-27] /[mg·(kg·d) ⁻¹] ⁻¹	8.40	42.00	15.10	0.84	9.80
非致癌物质	Pb	Zn	Cu	Mn	V
RfD ^[26,28,29] /mg·(kg·d) ⁻¹	3.50×10 ⁻³	3.00×10 ⁻¹	4.00×10 ⁻²	1.43×10 ⁻⁵	7.00×10 ⁻³

2 结果与讨论

2.1 大气重金属浓度特征

采样期间某焦化厂周边大气 PM₁₀ 中 10 种重金属元素浓度如表 3 所示.

由表 3 可以看出,研究区域大气 PM₁₀ 中重金属

表3 某焦化厂周边大气 PM₁₀ 中 10 种重金属浓度情况¹⁾
Table 3 Concentration of heavy metals in PM₁₀ from a coking plant

项目	元素名称	浓度范围/mg·m ⁻³	平均浓度/mg·m ⁻³	国家标准(GB 3095-2012)/mg·m ⁻³
致癌物质	Cd	1.44 × 10 ⁻⁵ ~ 1.51 × 10 ⁻⁴	1.12 × 10 ⁻⁴ ± 3.49 × 10 ⁻⁵	5.00 × 10 ⁻⁶
	Cr	8.64 × 10 ⁻⁴ ~ 2.57 × 10 ⁻²	1.77 × 10 ⁻² ± 9.22 × 10 ⁻³	2.50 × 10 ⁻⁸
	As	2.74 × 10 ⁻⁴ ~ 1.03 × 10 ⁻²	6.63 × 10 ⁻³ ± 2.63 × 10 ⁻³	6.00 × 10 ⁻⁶
	Ni	2.52 × 10 ⁻⁵ ~ 3.62 × 10 ⁻⁴	2.85 × 10 ⁻⁴ ± 9.43 × 10 ⁻⁵	—
	Co	1.20 × 10 ⁻⁶ ~ 1.89 × 10 ⁻⁴	3.06 × 10 ⁻⁵ ± 5.06 × 10 ⁻⁵	—
非致癌物质	Pb	4.59 × 10 ⁻⁵ ~ 6.56 × 10 ⁻⁴	2.67 × 10 ⁻⁴ ± 1.91 × 10 ⁻⁴	5.00 × 10 ⁻⁴
	Zn	5.78 × 10 ⁻⁴ ~ 2.16 × 10 ⁻³	1.27 × 10 ⁻³ ± 5.34 × 10 ⁻⁴	—
	Cu	5.66 × 10 ⁻⁵ ~ 1.68 × 10 ⁻³	1.14 × 10 ⁻³ ± 4.95 × 10 ⁻⁴	—
	Mn	1.54 × 10 ⁻⁴ ~ 6.45 × 10 ⁻⁴	3.37 × 10 ⁻⁴ ± 1.35 × 10 ⁻⁴	—
	V	1.38 × 10 ⁻⁵ ~ 1.46 × 10 ⁻⁴	6.35 × 10 ⁻⁵ ± 4.72 × 10 ⁻⁵	—
合计		2.03 × 10 ⁻³ ~ 4.20 × 10 ⁻²	2.78 × 10 ⁻² ± 1.34 × 10 ⁻²	—

1) 国家标准(GB 3095-2012)中的数值是环境大气中某种元素各种形态的浓度总和,且都是年平均值,Cr 的值是 Cr⁶⁺ 形态的标准值

元素平均浓度范围在 3.06 × 10⁻⁵ ~ 1.77 × 10⁻² mg·m⁻³ 之间,平均浓度由高到低为:Cr > As > Zn > Cu > Mn > Ni > Pb > Cd > V > Co. 总体来说,致癌物质的浓度高于非致癌物质的浓度,与国内一些研究^[13,26] 的污染特征类似. 其中,Cd、Cr 和 As 严重超标,但因采取的是年平均标准,加上测出来的是元素各种形态的总和,所以其超标结果反映的是一个

短期的超标结果. 由于这几种元素都是致癌物质,对人体和环境的危害是较大的,应当引起相关部门的重视.

2.2 大气重金属来源

由大气 PM₁₀ 中重金属的浓度特征,用 SPSS 软件进行相关性分析和主成分分析进行来源解析,结果如下表 4 和表 5 所示.

表4 某焦化厂周边大气 PM₁₀ 中重金属元素之间的相关性¹⁾
Table 4 Correlation of heavy metals in PM₁₀ from a coking plant

	Cd	Cr	As	Ni	Co	Pb	Zn	Cu	Mn	V
Cd	1.000	0.685 *	0.712 **	0.866 **	0.157	-0.100	0.376	0.553	0.045	0.004
Cr		1.000	0.702 *	0.858 **	0.074	0.366	0.695 *	0.664 *	0.264	0.486
As			1.000	0.873 **	0.491	-0.013	0.407	0.888 **	0.382	0.258
Ni				1.000	0.244	0.128	0.639 *	0.859 **	0.215	0.408
Co					1.000	0.058	0.079	0.424	0.778 **	0.028
Pb						1.000	0.538	0.034	0.580 *	0.783 **
Zn							1.000	0.605 *	0.326	0.805 **
Cu								1.000	0.306	0.490
Mn									1.000	0.412
V										1.000

1) * * 表示在 P < 0.01 水平(双侧)上极显著相关,* 表示在 P < 0.05 水平(双侧)上显著相关

表5 不同重金属元素在前 3 个主成分中的因子载荷¹⁾

Table 5 Factor loading of different heavy metals in the top three principal components

重金属	旋转后主成分载荷		
	主成分 1	主成分 2	主成分 3
Cd	0.682	-0.568	-0.131
Cr	0.867	-0.070	-0.290
As	0.855	-0.383	0.214
Ni	0.926	-0.323	-0.146
Co	0.406	0.017	0.890
Pb	0.389	0.850	-0.107
Zn	0.781	0.342	-0.332
Cu	0.875	-0.225	0.073
Mn	0.508	0.489	0.666
V	0.628	0.666	-0.270
贡献率/%	51.499	21.504	16.029
累计贡献率/%	51.499	73.003	89.032

1) 表中正值表示正的贡献率,负值表示负的贡献率

由表 4 和表 5 可以看出,Ni 是某焦化厂周边大气中主要的重金属,其次是 Cu 和 Cr,在第一主成分中贡献率分别为 92.6%、87.5% 和 86.7%. 而第一主成分在整体成分中的贡献率达到了 51.499%,第二和第三主成分贡献率分别为 21.504% 和 16.029%,前 3 个成分累计贡献率达到 89.032%. 而在相关性分析中,Ni 与 Zn、Cu 在 P < 0.05 和 P < 0.01 水平上显著相关. Cu 还与 Cr、Zn 在 P < 0.05 水平上显著相关和 As 在 P < 0.01 水平上极显著相关. Cr 还与 As、Zn 在 P < 0.05 水平上显著相关. 这说明 Ni、Zn、Cr、Cu 和 As 可能来自相同污染源.

有研究表明^[30],大气颗粒物中 Ni 和 As 主要来

源于燃煤燃油排放的废气, Cr、Cu 和 Zn 主要来源于工业粉尘, 此 5 种重金属的来源和相关性与本研究是类似的. 也有研究发现, Zn 主要来源于机动车尾气和燃煤源^[31], Cu 主要来自柴油燃烧^[32]. 燃煤是焦化厂的主要生产原材料, 而燃煤又是 Cd、Zn 和 As 等大气颗粒污染物的主要来源, 焦化厂排放的粉尘、烟尘中含有的金属元素会在大气颗粒物上大量富集^[2], 且这几种元素都是致癌物质, 对人体的健康损害较大. 这些研究都进一步支持了该地区大气 PM₁₀ 中重金属主要来源是工业排放, 由于周边无其他污染源, 所以第一主成分可能代表工业源. 而在第二主成分中, Pb 和 V 具有较高的正载荷, 而大气中的 Pb 与煤炭的消耗量有关, 且会通过消耗产生的粉煤灰吸入或通过手口活动进入人体, 特别是儿童, 造成人体血铅的升高^[33], 但是 Pb 也存在复合污染, V 主要来源于燃煤燃油排放的废气^[30]. 第二主成分与第一主成分来源类似, 可能代表燃煤源. 综上所述, 焦化厂可能对周边大气 PM₁₀ 中重金属贡献最大. 第三主成分中主要成分是 Co 和 Mn, Co 主要来源于风沙尘^[30], Mn 主要来源于土壤扬尘^[34], 所以第三主成分可能是自然源.

2.3 大气重金属健康风险评价

根据表 1 和表 2 所选取的参数和公式(1)~(3), 计算出某焦化厂周边大气 PM₁₀ 中 10 种重金属元素通过呼吸途径对成年男性、成年女性和儿童的健康风险, 其评价结果如图 2~图 5 所示.

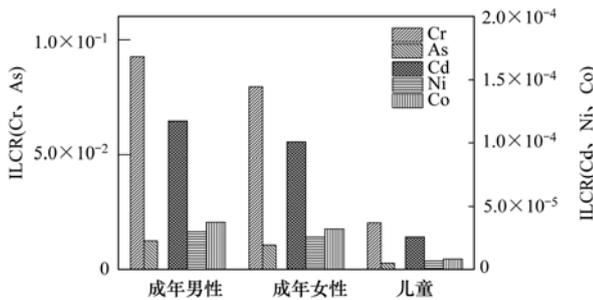


图 2 人群致癌健康风险

Fig. 2 Map of carcinogenic risk for populations

由图 2~5 可以看出, 对于 5 种元素的致癌风险来说, 成人比儿童的风险要大, 且成年男性要比成年女性大, 在地区的致癌风险上, 工业区和学校中的致癌风险较高. 而对于 5 种元素非致癌风险来说, 对儿童的风险是最大的, 这与深圳的类似研究^[13]结果一致. 儿童是比成人更加敏感的风险受体, 且儿童会有更多途径^[35], 如手口活动等, 所以应针对儿童给予更多关注, 加上学校的致癌风险较高, 对儿童的健康

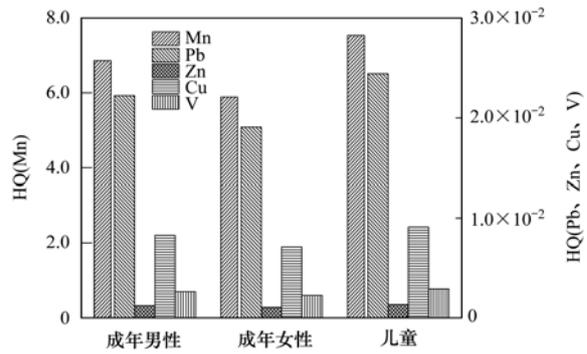


图 3 人群非致癌健康风险

Fig. 3 Map of non-carcinogenic risk for populations

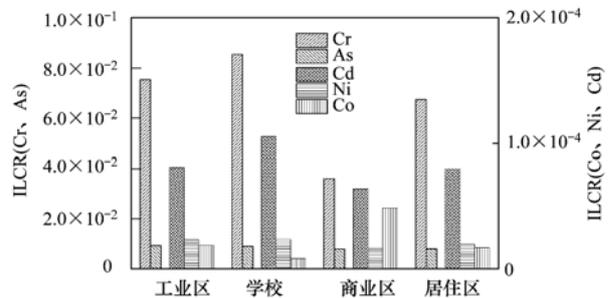


图 4 地区致癌健康风险

Fig. 4 Map of carcinogenic risk for regions

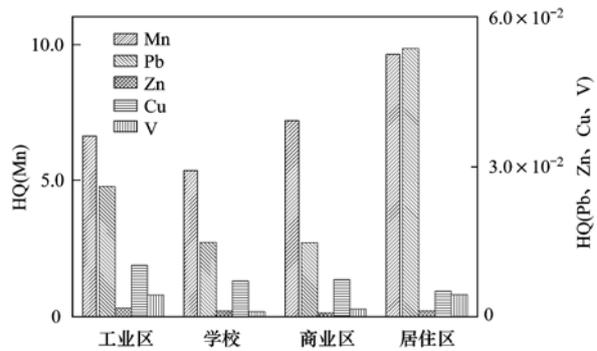


图 5 地区非致癌健康风险

Fig. 5 Map of non-carcinogenic risk for regions

风险应更加严格控制和管理以进行防治. 地区的非致癌风险中居住区的风险较高, 引起对居室健康风险的思考. 由于人群大部分活动时间是在居室内活动, 因此对此结果应特别重视, 尤其室内铅污染应是重点管理和防治对象.

在本研究中, Cd、Cr 和 As 的 ILCR 超过了 10^{-4} , 最大的达到 9.26×10^{-2} , 说明存在较大的潜在致癌风险, Ni 和 Co 的 ILCR 在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 之间, 但还是存在一定的潜在风险, 需采取一些防护措施. 而在非致癌物质中, 除了 Mn 之外, 其余 4 种元素的 $HQ < 1$, 理论风险值较小, 说明在可接受范围内, Mn 则具有很大的非致癌风险, HQ 竟高达 6.85. 但是

也有文献报道^[36],当 $0.1 < HQ < 1$ 时,对于属于易感人群的老年人群体,仍有可能对其身体健康产生危害。

2.4 不确定性分析

本研究具有一定的局限性和不足,本研究中采用的现有调查暴露参数可能并不适用于研究区域的人群,使得健康风险有一定的偏差.在本研究中采样量较小,也使得结果有一定的偶然性。

由于采样中会受到天气等外界因素的干扰,本研究中采样期间天气对样品采集过程几乎无影响,但实验过程中会有各种干扰,使得测得的颗粒物重金属浓度存在不确定性.采样时间和地点也存在不确定性,而且每个人生理学差异和生活习惯、居住环境都不一样,所采用的暴露参数不一定适用每个人,使健康风险值更具有不确定性.为降低健康风险评价中无法避免的不确定性,采用蒙特卡洛模型对其进行分析,描述其中个体风险的分布.使用水晶球软件 Crystal Ball 对上述典型存在致癌风险的元素 Cd、Cr 和 As 的致癌风险进行不确定性分析,从其质量浓度、人体质量及呼吸速率 3 个不确定因素分布中独立抽取样本,其中重金属元素质量浓度数据用正态分布来表征,人体质量数据采用对数正态分布来表征^[29,37],呼吸速率采用三角分布表征,重复计算 5 000 次,以表征不同人长期暴露于焦化厂周边环境大气的可能致癌风险,计算结果中 Cd、Cr 和 As 致癌风险是以高风险的成年男性的暴露参数计算.结果如图 6~8 所示。

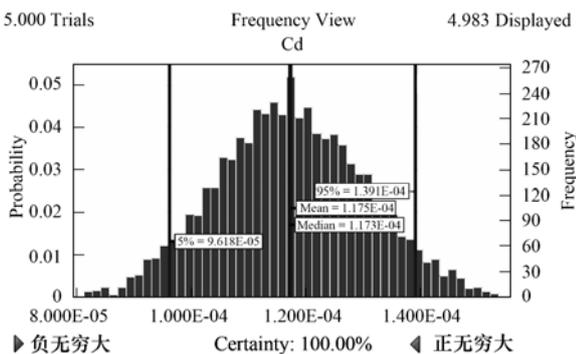


图 6 Cd 致癌风险评估

Fig. 6 Carcinogenic risk of exposure to Cd

图 6~8 中 Cd、Cr 和 As 的平均值、中位数、95% 和 5% 的值代表了暴露人群中平均值、中位数和上下限值的致癌风险.从中可以看出,焦化厂周边大气中 Cd、Cr 和 As 人群暴露的致癌风险基本不存在偏斜,表明确实存在较大的人群潜在致癌风险,需要引起高度的重视。

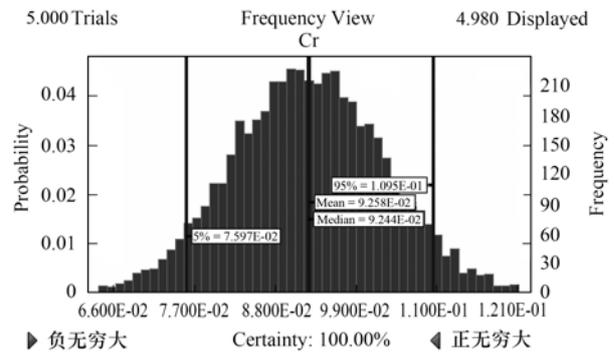


图 7 Cr 致癌风险评估

Fig. 7 Carcinogenic risk of exposure to Cr

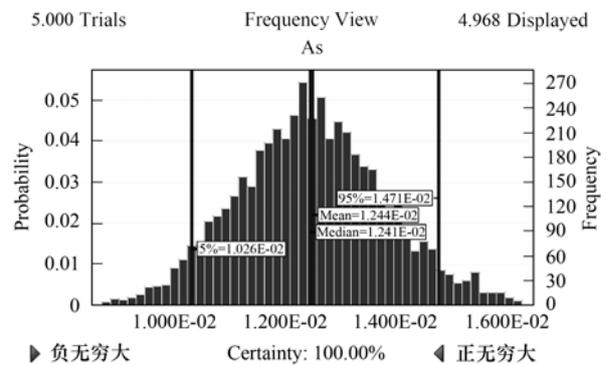


图 8 As 致癌风险评估

Fig. 8 Carcinogenic risk of exposure to As

3 结论

(1)采集的某焦化厂周边大气样品中 10 种重金属的浓度范围在 $3.06 \times 10^{-5} \sim 1.77 \times 10^{-2} \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间,相差 3 个数量级,其中 Cr 的浓度最高,Co 的浓度最低.致癌物质的浓度总体高于非致癌物质的浓度,致癌物质中 Cd、Cr 和 As 都严重超标。

(2)由相关性分析和主成分分析表明,某焦化厂是周边环境大气 PM₁₀ 中重金属的重要来源,Ni 是大气中主要的重金属。

(3)健康风险评价结果显示,对于致癌风险,成人比儿童的风险要大,其中成年男性要比成年女性大,工业区和学校存在较大风险.对于非致癌风险,儿童的非致癌风险是最大的,居住区的风险也不容忽视。

(4)致癌物质中 Cd、Cr 和 As 存在较大的潜在致癌风险,Ni 和 Co 存在一定的潜在风险.非致癌物质中 Mn 的非致癌风险很大,对于 Mn 的风险需采取一定的防护措施。

参考文献:

- [1] 段小燕,杨金龙.某焦化厂作业场所污染水平及作业工人身体状况调查[J].职业与健康,2003,19(7):29-30.

- [2] 杨光冠, 张磊, 张占恩. 焦化厂附近大气降尘量及降尘中金属元素的分析[J]. 苏州科技学院学报(工程技术版), 2006, **19**(4): 49-53.
- [3] Gorka P. The Knurów coking plant in Knurów, as a source of emission of heavy metals[J]. Fuel and Energy Abstracts, 2002, **43**(4): 291.
- [4] Mohanraj R, Azeez P A, Priscilla T. Heavy metals in airborne particulate matter of Urban Coimbatore [J]. Environmental Contamination and Toxicology, 2004, **47**(2): 162-167.
- [5] Cyrus J, Stölzel M, Stolze M, *et al.* Elemental composition and sources of fine and ultrafine ambient particles in Erfurt, Germany [J]. Science of the Total Environment, 2003, **305**(1-3): 143-156.
- [6] Donaldson K, Stone V, Borm P J A, *et al.* Oxidative stress and calcium signaling in the adverse effects of environmental particles (PM₁₀) [J]. Free Radical Biology and Medicine, 2003, **34**(11): 1369-1382.
- [7] Xiu G L, Jin Q X, Zhang D N, *et al.* Characterization of size-fractionated particulate mercury in Shanghai ambient air [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(3): 419-427.
- [8] Ravindra K, Mittal A K, Grieken R V. Health risk assessment of urban suspended particulate matter with special reference to polycyclic aromatic hydrocarbons: a review [J]. Reviews on Environmental Health, 2001, **16**(3): 169-189.
- [9] 王静, 朱利中, 沈学优. 某焦化厂空气中 PAHs 的污染现状及健康风险评价[J]. 环境科学, 2003, **24**(1): 135-138.
- [10] Zhang W H, Wei C H, Feng C H, *et al.* Coking wastewater treatment plant as a source of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) to the atmosphere and health-risk assessment for workers [J]. Science of the Total Environment, 2012, **432**: 396-403.
- [11] Sadvoska V. Health risk assessment of heavy metals adsorbed in particulates [J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2012, **68**: 211-214.
- [12] Hu X, Zhang Y, Ding Z H, *et al.* Bioaccessibility and health risk of arsenic and heavy metals (Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn and Mn) in TSP and PM_{2.5} in Nanjing, China [J]. Atmospheric Environment, 2012, **57**: 145-152.
- [13] 杜金花, 张宜升, 何凌燕, 等. 深圳某地区大气 PM_{2.5} 中重金属的污染特征及健康风险评价[J]. 环境与健康杂志, 2012, **29**(9): 838-840.
- [14] 汤驰, 叶芝祥, 李再波, 等. 机场周边环境大气 PM₁₀ 中重金属的污染特征及健康风险评价[J]. 环境与健康杂志, 2012, **29**(1): 77-79.
- [15] Qu C S, Ma Z W, Yang J, *et al.* Human exposure pathways of heavy metals in a lead-zinc mining area, Jiangsu Province, China [J]. Public Library of Science One, 2012, **7**(11): e46793.
- [16] 刘新会, 牛军峰, 史江红. 环境与健康[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2009.
- [17] 北京市环境保护科学研究院, DB11/T 656-2009. 场地环境评价导则[S]. 北京: 北京市质量技术监督局, 2009.
- [18] 段小丽. 暴露参数研究方法及其在环境健康风险评价中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [19] EPA. Risk assessment guidance for superfund volume I : human health evaluation manual. (Part F, Supplemental guidance for inhalation risk assessment) Final [S]. EPA, 1989.
- [20] 刘玉燕, 刘浩峰, 刘敏. 乌鲁木齐市地表灰尘重金属含量及其健康风险[J]. 干旱区研究, 2009, **26**(5): 750-754.
- [21] 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.
- [22] Ma J H, Singhirunusorn W. Distribution and health risk assessment of heavy metals in surface dusts of Maha Sarakham Municipality [J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2012, **50**: 280-293.
- [23] 王宗爽, 段小丽, 刘平, 等. 环境健康风险评价中我国居民暴露参数探讨[J]. 环境科学研究, 2009, **22**(10): 1164-1170.
- [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] USEPA. Integrated Risk Information System (IRIS) [EB/OL] <http://www.epa.gov/iris/>, 2013-10-14.
- [26] 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.
- [27] EPA. Risk assessment guidance for superfund volume I : human health evaluation manual. Supplemental guidance. "standard default exposure factors" interim final [S]. EPA, 1991.
- [28] Li P H, Kong S F, Geng C M, *et al.* Assessing hazardous risks of vehicle inspection workers' exposure to particulate heavy metals in their work place [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2013, **2**(13): 255-265.
- [29] 王钊, 韩斌, 倪天茹, 等. 天津市某社区老年人 PM_{2.5} 暴露痕量元素健康风险评估[J]. 环境科学研究, 2013, **26**(8): 913-918.
- [30] 陈发荣. 大气中 TSP 和 PM₁₀ 采集方法及其元素分析研究 [D]. 厦门: 厦门大学, 2004.
- [31] 张晶, 陈宗良, 王玮. 北京市大气小颗粒物的污染源解析 [J]. 环境科学学报, 1998, **18**(1): 62-67.
- [32] 陈建华, 王玮, 刘红杰, 等. 北京市交通路口大气颗粒物污染特征研究 (I)——大气颗粒物污染特征及其影响因素 [J]. 环境科学研究, 2005, **18**(2): 34-38.
- [33] Liang F, Zhang G L, Tan M G, *et al.* Lead in children's blood is mainly caused by coal-fired ash after phasing out of leaded gasoline in Shanghai [J]. Environmental Science and Technology, 2010, **44**(12): 4760-4765.
- [34] 位楠楠, 刘卫, 肖德涛, 等. 隧道大气细颗粒物及其元素的粒径分布特征[J]. 环境科学研究, 2011, **24**(5): 475-481.
- [35] Zheng N, Liu J S, Wang Q C, *et al.* Heavy metals exposure of children from stairway and sidewalk dust in the smelting district, northeast of China [J]. Atmospheric Environment, 2010, **44**(27): 3239-3245.
- [36] De Miguel E, Iribarren I, Chacón E, *et al.* Risk-based evaluation of the exposure of children to trace elements in playgrounds in Madrid (Spain) [J]. Chemosphere, 2007, **66**(3): 505-513.
- [37] 王秀艳, 高爽, 周家岐, 等. 餐饮油烟中挥发性有机物风险评估[J]. 环境科学研究, 2012, **25**(12): 1359-1363.

CONTENTS

Analysis of Characteristics of Black Carbon Concentration in Shanghai from 2008 to 2012	WANG Hong-qiang, HE Qian-shan, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (1215)
Chemical Characteristics and Insoluble Particulates' Surface Morphology of a Snowfall Process in the Southeastern Suburb of Urumqi	LU Hui, WEI Wen-shou, CUI Cai-xia, <i>et al.</i> (1223)
Comparative Study of the Level and Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers and New Brominated Flame Retardants in the Atmosphere of Typical Urban WU Hui, JIN Jun, WANG Ying, <i>et al.</i> (1230)
Source and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Ambient Air PM ₁₀ from One Coking Plant	DONG Ting, LI Tian-xin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1238)
Estimation of Average Traffic Emission Factor Based on Synchronized Incremental Traffic Flow and Air Pollutant Concentration	LI Run-kui, ZHAO Tong, LI Zhi-peng, <i>et al.</i> (1245)
Study on Critical Loads of Sulfur and Nitrogen in the Pearl River Delta	SUN Cheng-ling, XIE Shao-dong (1250)
Hydrogen Sulfide Removal by the Combination of Non-Thermal Plasma and Biological Process	LI Hua-qin, HE Jue-cong, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (1256)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Atrazine in Taizi River Basin, China	ZHENG Lei, ZHANG Yi-zhang, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1263)
Development of a Method for Measuring Dissolved Reactive Phosphorus (DRP) and Dissolved Ferrous Iron in Large Batch in Pore Water Samples of Sediments with Micro-volumes WANG Yan, ZHU Chun-gang, XU Di, <i>et al.</i> (1271)
Temporal and Spatial Variation of Water Nutrient Level After Exogenous Nutrient Input	FU Ling, ZHAO Kai, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (1278)
Physical Process Based Risk Assessment of Groundwater Pollution in the Mining Area	SUN Fa-sheng, CHENG Pin, ZHANG Bo (1285)
Hydrogeochemical Characteristics of a Typical Karst Groundwater System in Chongqing	YANG Ping-heng, LU Bing-qing, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (1290)
Investigation of Nitrogen, Phosphorus and Microbial Contamination in Laolongdong Underground River System of Chongqing	LAN Jia-cheng, YANG Ping-heng, REN Kun, <i>et al.</i> (1297)
Effects on Phosphorus Fraction Distribution in Sediment by Roots of <i>Vallisneria natans</i>	LI Zhen-guo, WANG Guo-xiang, ZHANG Jia, <i>et al.</i> (1304)
Modeling Nitrogen Transformation in a Novel Circular-Flow Corridor Wetland	PENG Jian-feng, SONG Yong-hui, YUAN Peng, <i>et al.</i> (1311)
Natural Attenuation of Tetracycline in the Water of Taihu Lake Under Different Environmental Conditions	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, JI Ying-xue, <i>et al.</i> (1318)
Inactivation and Reactivation of Antibiotic-Resistant Bacteria During and After UV Disinfection in Reclaimed Water	HUANG Jing-jing, TANG Fang, XI Jin-ying, <i>et al.</i> (1326)
Photoreactivation of <i>Escherichia coli</i> and <i>Enterococcus faecalis</i> in the Secondary Effluent Disinfected by UV-TiO ₂	WANG Xi-feng, GONG Xin, HU Xiao-lian, <i>et al.</i> (1332)
Stability of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, SHEN Bing-bing, JING Jie, <i>et al.</i> (1337)
Fouling Behavior of Sodium Alginate During Microfiltration at Various Ionic Compositions; XDLVO Approach	ZHAO Ying-xu, ZONG Rui-qiang, GAO Xin-yu, <i>et al.</i> (1343)
Enhanced Remediation of 4-Chloronitrobenzene Contaminated Groundwater with Nanoscale Zero-valence Iron (nZVI) Catalyzed Hydrogen Peroxide (H ₂ O ₂)	FU Rong-bing (1351)
Effect of the Coexistence of Chlorobenzene Homologue on Anaerobic Degradation of Hexachlorobenzene	WANG Qi, LIU Hui, JIANG Lin, <i>et al.</i> (1358)
Research on Removal Efficiency of Cd(II)-bearing Wastewater by Sulfate-reducing Biological Filter	WU Xuan, TAN Ke-yan, HU Xi-jia, <i>et al.</i> (1366)
Control Strategies of Nitrogen Removal Process in a Pilot Test of the Southern WWTP Based on the Nitrogen Balance	JIANG Ying-he, LIU Pei-ju, WANG Lei, <i>et al.</i> (1372)
Effect of Simulated Inorganic Anion Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	CHEN Yan, HUANG Fang, XIE Xin-yuan (1377)
Microbial Reduction of Cu ²⁺ Mediated by Electroactive Biofilms	LIU Yi, ZHOU Shun-gui, YUAN Yong, <i>et al.</i> (1384)
Copper Recovery from Artificial Bioleaching Lixivium of Waste Printed Circuit Boards	CHENG Dan, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1391)
Difference of Contaminant Composition Between Landfill Leachates and Groundwater and Its Reasons	HE Xiao-song, YU Hong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1399)
Photochemical Degradation of Landfill Leachate Facilitated by Combined Schwertmannite and H ₂ O ₂	WANG He-ru, SONG Yong-wei, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (1407)
Effects of Operating Parameters on Organic Toxicity of Sludge Treating Synthetic Bisphenol A Wastewater	YANG Na, CHEN Xiu-rong, LIN Feng-kai, <i>et al.</i> (1414)
Comparative Study on Biological Methane Potential and Methanogen Biodiversity in the Anaerobic Digestion of Excess Sludge	DONG Hui-yu, JI Min (1421)
Isolation and Identification of Mn Oxidizing Bacterium <i>Aminobacter</i> sp. H1 and Its Oxidation Mechanism	YAN Ping, JIANG Li-ying, CHEN Jian-meng, <i>et al.</i> (1428)
Nitrate Removal by a Strain of Nitrate-Dependent Fe(II)-Oxidizing Bacteria	WANG Hong-yu, YANG Kai, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (1437)
Study on the Iopromide-Degrading Characteristics of Strain <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 via Co-Metabolism	XU Bing-jie, GAO Pin, XUE Gang, <i>et al.</i> (1443)
Using Flow Cytometry to Explore the Changes of <i>Sphingomonas</i> sp. GY2B Bacterial Surface Characteristics in the Process of Degrading Phenanthrene ZHANG Meng-lu, DANG Zhi, WU Feng-ji, <i>et al.</i> (1449)
Research on Characteristic of Interrelationship Between Toxic Organic Compound BPA and <i>Chlorella vulgaris</i>	CHEN Shan-jia, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i> (1457)
Effect of Magnesium Deficiency on Photosynthetic Physiology and Triacylglyceride(TAG) Accumulation of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Shan, ZHAO Shu-xin, WEI Chang-long, <i>et al.</i> (1462)
Effects of Microcystins on Growth and Antioxidant System of Rice Roots	WANG Wei-min, DENG Yu, ZOU Hua, <i>et al.</i> (1468)
Responses of Soybean Cultivar Dongsheng-1 to Different O ₃ Concentrations in Northeast China	ZHANG Wei-wei, WANG Guang-hua, WANG Mei-yu, <i>et al.</i> (1473)
Development and Succession of Biological Soil Crusts and the Changes of Microbial Biomasses	WU Li, ZHANG Gao-ke, CHEN Xiao-guo, <i>et al.</i> (1479)
Effects of Lead on the Growth and Reproduction of <i>Eisenia fetida</i> with Aged Soils	CHEN Li-hong, LIU Zheng-tao, FANG Zheng, <i>et al.</i> (1486)
Soil Heavy Metal Cadmium Standard Limit and Range of Background Value Research	ZHAO Xiao-jun, LU Si-jin, XU Ren-ji, <i>et al.</i> (1491)
Study on Soil Element Background Values of the Hoh Xil Area in North Tibet	BAI Jian-kun, WANG Jian-li, LI Chao-liu, <i>et al.</i> (1498)
Transfer Characteristic and Source Identification of Soil Heavy Metals from Water-Level-Fluctuating Zone Along Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir Area XU Tao, WANG Fei, GUO Qiang, <i>et al.</i> (1502)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological Risk Analysis for Soil Around Haining Electroplating Industrial Park	LI Jiong-hui, WENG Shan, FANG Jing, <i>et al.</i> (1509)
Sources and Spatial Distribution of Typical Heavy Metal Pollutants in Soils in Xihu Scenic Area	ZHANG Hai-zhen, TANG Yu-li, LU Jun, <i>et al.</i> (1516)
Distribution and Assessment of Mercury in the Ambient Soil of a Municipal Solid Waste Incinerator	XIE Hui-ting, ZHANG Cheng-zhong, XU Feng, <i>et al.</i> (1523)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Soils and Sediments Surrounding Dishui Lake in Shanghai	ZHUGE Xiang-zhen, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1531)
Impact of SDBS/Na ⁺ on Red Soil Colloidal Stability	TANG Ying, LI Hang, ZHU Hua-ling, <i>et al.</i> (1540)
Effects of Stabilization Treatment on Migration and Transformation of Heavy Metals in Mineral Waste Residues	ZHAO Shu-hua, CHEN Zhi-liang, ZHANG Tai-ping, <i>et al.</i> (1548)
Study on a New Method of Fast Monitoring Toxicity of Cd ²⁺ by Algal in Water	DUAN Jing-bo, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, <i>et al.</i> (1555)
Immunosensor for Rapid Detection of 1,3-Dinitrobenzene	LONG Feng, SHI Han-chang, WANG Hong-chen, <i>et al.</i> (1561)
Mg/Al Layered Double Hydroxides Prepared by Microwave-Assisted Co-Precipitation Method for the Removal of Bromate	ZHONG Qiong, LI Huan (1566)
Discussion on Several Key Points of Decision Support System for Remediation of Contaminated Sites	LIAO Xiao-yong, TAO Huan, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (1576)
A Review of Multi-Scale Studies on Spatial Variation of the Lead (Pb) Concentration in Urban Soils	YANG Meng, LI Feng-ying, DIAO Yi-wei, <i>et al.</i> (1586)
Review on Characteristics and Detecting Assay of Bacterial Endotoxin Contamination in Water Environment	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (1597)
Advances in Molecular Mechanism of Bacterial Reduction of Hexavalent Chromium	LI Dou, ZHAO You-cai, SONG Li-yan, <i>et al.</i> (1602)
Anaerobic Membrane Bioreactors for Treating Agricultural and Food Processing Wastewater at High Strength	WEI Yuan-song, YU Da-wei, CAO Lei (1613)

《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4月15日 35卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 4 Apr. 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