

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第7期

Vol.35 No.7

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

区域污染对本底地区气溶胶光学特性及辐射强迫影响的地基和卫星遥感观测研究	张小玲, 夏祥鳌, 车慧正, 汤洁, 唐宜西, 孟伟, 董瑶 (2439)
北京上甸子区域大气本底站甲基氯仿在线观测研究	姚波, 周凌晔, 刘钊, 张根, 夏玲君 (2449)
浙江临安大气本底站 CO 浓度及变化特征	方双喜, 周凌晔, 栾天, 马千里, 王红阳 (2454)
南京北郊夏季大气颗粒物中有机碳和元素碳的污染特征	段卿, 安俊琳, 王红磊, 缪青 (2460)
西安冬季非灰霾天与灰霾天 PM _{2.5} 中水溶性有机氮污染特征比较	程玉婷, 王格慧, 孙涛, 成春雷, 孟静静, 任艳芹, 李建军 (2468)
沙尘天气对兰州市 PM ₁₀ 中主要水溶性离子的影响	王芳, 陈强, 张文煜, 郭勇涛, 赵连彪 (2477)
上海大气降水中细菌气溶胶的多样性研究	梁宗敏, 杜睿, 杜鹏瑞, 王亚玲, 李梓铭 (2483)
重庆主城区降水中重金属的分布特征及其沉降量	彭玉龙, 王永敏, 覃蔡清, 王定勇 (2490)
宁波人为源 VOC 清单及重点工业行业贡献分析	李璇, 王雪松, 刘中, 吴梁, 翁燕波, 胡杰 (2497)
包装印刷行业挥发性有机物控制技术评估与筛选	王海林, 王俊慧, 祝春蕾, 聂磊, 郝郑平 (2503)
氨水混合吸收剂脱除 CO ₂ 实验研究	夏芝香, 项群扬, 周旭萍, 方梦祥 (2508)
焦炉烟气中二噁英类物质排放水平研究	孙鹏程, 李晓璐, 成钢, 陆勇, 吴昌敏, 罗锦洪 (2515)
2012 年夏季长江口颗粒有机碳、氮分布特征及其来源	邢建伟, 钱薇微, 绳秀珍 (2520)
千岛湖水体悬浮颗粒物吸收特性及其典型季节差异	王明珠, 张运林, 施坤, 高冀, 刘刚, 蒋浩 (2528)
千岛湖溶解氧的动态分布特征及其影响因素分析	殷燕, 吴志旭, 刘明亮, 何剑波, 虞左明 (2539)
太湖夏季水体中尿素的来源探析	韩晓霞, 朱广伟, 许海, Steven W. Wilhelm, 秦伯强, 李兆富 (2547)
鄱阳湖阻隔湖泊浮游植物群落结构演化特征: 以军山湖为例	刘霞, 钱奎梅, 谭国良, 邢久生, 李梅, 陈宇炜 (2557)
不同营养湖泊沉积物中 ²¹⁰ Pb _{ex} 和营养盐垂向分布特征及相关性分析	王小雷, 杨浩, 顾祝军, 张明礼 (2565)
地下水硝酸盐污染抽出处理优化方法模拟研究	姜烈, 何江涛, 姜永海, 刘菲 (2572)
预压力混凝沉淀除藻工艺中 DOC 变化规律研究	陈雯婧, 丛海兵, 徐亚军, 王巍, 蒋新跃, 刘玉娇 (2579)
类水滑石 Mg/Zn/Al 焙烧产物对高氯酸盐的吸附	王红宇, 刘艳 (2585)
粉煤灰对阴离子水溶性混合染料的吸附动力学	孙德帅, 郑强强, 张晓东, 方龙 (2590)
SDS 对两性修饰膨润土吸附 Cd ²⁺ 的影响	王建涛, 孟昭福, 杨亚提, 杨淑英, 李彬, 马麟莉, 许绍娥 (2596)
老化的生物质炭性质变化及对非吸持的影响	唐伟, 郭悦, 吴景贵, 黄兆琴, 代静玉 (2604)
TiO ₂ 光催化降解 PFOA 的反应动力学及机制研究	李明洁, 喻泽斌, 陈颖, 王莉, 刘晴, 刘钰鑫, 何丽丽 (2612)
荧光猝灭法研究洛克沙肿与腐殖酸的相互作用	朱江鹏, 梅婷, 彭云, 葛思怡, 李时银, 王国祥 (2620)
改性活性炭纤维电芬顿降解苯酚废水性能研究	马楠, 田耀金, 杨广平, 谢鑫源 (2627)
催化铁强化低碳废水生物反硝化过程的探讨	王梦月, 马鲁铭 (2633)
聚丁二酸丁二醇酯 (PBS) 为反硝化固体碳源的脱氮特性研究	刘佳, 沈志强, 周岳溪, 曹蓉, 李元志 (2639)
某造纸厂废水中二噁英含量及其电子束辐照降解	青宪, 黄锦琼, 余小巍, 张素坤, 杨艳艳, 任明忠, 温玉龙 (2645)
嘉兴市规模化养猪场沼液水质调查研究	卫丹, 万梅, 刘锐, 王根荣, 张讯达, 文晓刚, 赵远, 陈吕军 (2650)
提高污泥碱性发酵挥发酸积累的新方法	李晓玲, 彭永臻, 柴同志, 朱建平, 王淑莹 (2658)
滴水湖及其水体交换区沉积物和土壤中 PAHs 的分布及生态风险评价	郭雪, 毕春娟, 陈振楼, 王薛平 (2664)
舟山近海水体和沉积物中多环芳烃分布特征	江敏, Le Huy Tuan, 梅卫平, 阮慧慧, 吴昊 (2672)
青藏高原湖泊流域土壤与牧草中多环芳烃和有机氯农药的污染特征与来源解析	谢婷, 张淑娟, 杨瑞强 (2680)
福建鹭峰山脉土壤有机氯农药分布特征及健康风险评价	黄焕芳, 祁士华, 瞿程凯, 李绘, 陈文文, 张莉, 胡婷, 石燎 (2691)
不同功能区表层土中全氟化合物污染指纹及其来源解析	张鸿, 赵亮, 何龙, 柴之芳, 沈金灿, 杨波 (2698)
桑沟湾溶解态无机砷的分布、季节变化及影响因素	李磊, 任景玲, 刘素美, 蒋增杰, 杜金洲, 方建光 (2705)
引黄灌区不同尺度农田土壤重金属空间分布及污染评价: 以银川市兴庆区为例	王幼奇, 白一茹, 王建宇 (2714)
三峡水库消落区土壤、植物汞释放及其在斑马鱼体的富集特征	李楚娴, 孙荣国, 王定勇, 赵铮, 张金洋, 马明, 张成 (2721)
广东典型海水养殖区沉积物及鱼体中磺胺类药物的残留及其对人体的健康风险评价	何秀婷, 王奇, 聂湘平, 杨永涛, 程章 (2728)
青岛市区大气降尘重金属对人体健康风险的评价	张春荣, 吴正龙, 姚春卉, 高宗军 (2736)
焦炉排放多环芳烃与人体健康风险评价研究	伯鑫, 王刚, 温柔, 赵春丽, 吴铁, 李时蓓 (2742)
Cd、Cu 和 Pb 复合污染对蚯蚓抗氧化酶活性的影响	王辉, 谢鑫源 (2748)
3 种氯酚对嗜热四膜虫的毒性效应	李雅洁, 崔益斌, 蒋丽娟, 窦静, 李梅 (2755)
施硅方式对稻米镉阻隔潜力研究	陈喆, 铁柏清, 雷鸣, 刘孝利, 叶长城, 罗梅梅, 毛懿德 (2762)
保护性耕作对茬冬小麦土壤 CO ₂ 和 N ₂ O 排放的影响	潘莹, 胡正华, 吴杨周, 孙银银, 盛露, 陈书涛, 肖启涛 (2771)
渭北生草果园土壤有机碳矿化及其与土壤酶活性的关系	贾曼莉, 郭宏, 李会科 (2777)
蒸汽-空气混合注射修复 TCE 污染的二维土箱实验研究	王宁, 彭胜, 陈家军 (2785)
铜离子对双室微生物燃料电池电能输出的影响研究	牟姝君, 李秀芬, 任月萍, 王新华 (2791)
连续流强制通风槽式污泥堆肥工艺的温室气体和氨气排放特征	赵晨阳, 魏源送, 葛振, 钟佳, 才兴, 张媛丽, 李洪枚 (2798)
冬季猪粪固体堆放过程中 NH ₃ 、N ₂ O 和 NO 排放特征研究	丁钢强, 韩圣慧, 袁玉玲, 罗琳, 王立刚, 李虎, 李萍 (2807)
填埋场渗滤液腐殖酸随填埋龄的变化特性及模型研究	黄友福, 许心雅, 范良鑫, 方艺民 (2816)
渗滤液反渗透浓缩液回灌出水水质变化规律的研究	王东梅, 刘丹, 刘庆梅, 陶丽霞, 刘颖 (2822)
中国铅流变化的定量分析	马兰, 毛建素 (2829)
半短程亚硝化与厌氧氨氧化联合脱氮工艺微生物特征研究进展	赵志瑞, 侯彦林 (2834)
《环境科学》征稿简则 (2679)	
《环境科学》征订启事 (2735)	
信息 (2476, 2556, 2713, 2770)	

青岛市区大气降尘重金属对人体健康风险的评价

张春荣¹, 吴正龙², 姚春卉³, 高宗军¹

(1. 山东科技大学山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室, 青岛 266590; 2. 山东科技大学学生工作处, 青岛 266590; 3. 山东省煤田地质局第五勘探队, 泰安 271000)

摘要: 在青岛市区采集大气降尘、土壤样品各89件, 并分析化验了样品中Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn等的含量。在这些分析化验结果的基础上, 应用美国EPA人体暴露风险评价方法, 对青岛市区大气降尘重金属对人体的健康风险进行评价。结果表明, 市南、市北、崂山区大气降尘重金属Cd、Cr、Cu、Hg、Pb、Zn平均值的含量最高, 比李沧、城阳区和黄岛区污染严重。大气降尘重金属平均值与相应土壤比, 除市南、市北、崂山区大气降尘Hg的平均含量低于土壤均值外, 其它均高于土壤。整体来看青岛市区大气降尘重金属对人体健康的风险差异不大, 危害较小; 但如果市南、崂山和城阳区大气降尘Cr、Pb一直保持这种高浓度, 则有4个采样点可能对人体的健康造成危害; 且不同途径、不同种类的大气降尘重金属累积将明显加大危害人体健康的风险。

关键词: 大气降尘; 重金属; 健康; 风险; 评价; 青岛市

中图分类号: X502; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)07-2736-06 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.07.042

Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Dust of Qingdao City

ZHANG Chun-rong¹, WU Zheng-long², YAO Chun-hui³, GAO Zong-jun¹

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Depositional Mineralization & Sedimentary Minerals, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. Department of Student Affairs, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 3. The Fifth Prospecting Team of Shandong Provincial Bureau of Coal Geology, Taian 271000, China)

Abstract: Based on the 89 atmospheric dust samples and soil samples that were collected around Qingdao, we tested and analyzed the contents of Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn. Based on these analysis results, the risk of heavy metals in atmospheric dusts to human health were assessed by using the US EPA Health Risk Assessment Model. Analysis showed that the average contents of Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn in the atmospheric dust of Shinan, Shibei and Laoshan districts were the highest. Therefore, the air pollution of these districts was more serious than the districts of Licang, Chengyang and Huangdao. Comparing the average contents of heavy metals in atmospheric dust with those in soil, we found that only the content of Hg in atmospheric dust collected from the districts of Shinan, Shibei and Laoshan was lower than that in the corresponding soil. All the contents of other heavy metals in atmospheric dust were higher than those in corresponding soil. As a whole, the heavy metals in atmospheric dust of Qingdao City showed slight difference and were less harmful to human health. However, it was harmful in some samples to human health if the contents of Cr and Pb in atmospheric dusts of Shinan, Laoshan and Chengyang districts were always kept at such high densities. Besides, the accumulation of heavy metals in atmospheric dust through various approaches and categories may obviously increase the risk of damaging human health.

Key words: atmospheric dust; heavy metal; health; risk; assessment; Qingdao City

随着城市经济的飞速发展, 机动车量的急剧增加, 城市大气降尘量明显增加, 对空气质量的影响日趋严重, 尤其是其携带的重金属, 可以通过手-口、呼吸和皮肤等途径进入人体, 导致人体机能功能性障碍和不可逆性损伤^[1,2], 因此, 大气降尘重金属对人体健康的危害已引起人们的广泛关注。国外主要是欧盟从1999年开展的铂族金属污染对人体和生态系统的风险评价研究开始的^[3]; 国内也开展了大量的研究, 如胡恭任等^[4]对泉州市大气降尘重金属的生态环境风险进行了评价, 孙广义等^[5]、梅凡民等^[6]、喻超等^[7]对大气降尘中重金属的生物有效性进行了研究。但是对于大气降尘重金属对人体健康风险的研究较少, 因此, 本研究拟在青岛市区开展大

气降尘、土壤样品采集和化验分析工作, 并在样品化验分析结果的基础上, 分析大气降尘重金属对人体健康的风险, 以期对青岛市区大气降尘重金属的污染控制和治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

青岛市区地处太平洋的西岸、黄海之滨、山东

收稿日期: 2013-11-29; 修订日期: 2014-02-26

基金项目: 山东省国土资源大调查项目(2006709); 国家自然科学基金项目(71303140); 水利部公益性行业科研专项(201301089); 山东科技大学“群星计划”项目(qx2013309)

作者简介: 张春荣(1973~), 女, 博士, 工程师, 主要研究方向为环境地质和水文水资源, E-mail: zcrsdust@126.com

半岛的南端,紧紧环绕着胶州湾,属于北温带季风气候区,空气湿润,夏季无酷暑,冬季无严寒,面临太平洋,自然风较大。青岛市是山东省东部重要的经济中心城市,是国家级历史文化名城和风景旅游、度假胜地。近年来,青岛市不断进行工业产业结构调整,现已形成了市南市北崂山区-青岛市核心区域,积极发展现代服务业、高新技术产业和文化旅游业;李沧城阳区积极发展信息家电、汽车船舶、生物医药、商贸物流业等;黄岛区则主要发展石油化工、橡胶塑料、信息家电、商贸物流业等。

1.2 样品采集

为研究青岛市区大气降尘重金属对人体健康的风险,于2009年8、9月严格按照《区域生态地球化学评价技术要求》进行了青岛市区大气降尘、土壤样品的采集工作。

大气降尘样品布设采用网格布样法,利用MapGIS软件在数字底图上按照2 km×2 km网格进行采样点的布设;实地采样过程中,选取周边(25 m×25 m)没有遮挡雨、风、雪的高大树木或者高大建筑物,并充分考虑风向、地形等因素,躲避开烟囱等污染源,利用GPS确定采样点的实际坐标位置,并生成采样点分布图(图1)。样品采集为1.5~2.0 m高度门、窗等建筑物边角部位的大气降尘,每份样品重100 g,共计采集大气降尘样品89件。大气降尘样品采集后用干净的130目尼龙筛过筛^[8,9],除去树叶、木屑等杂物备用。

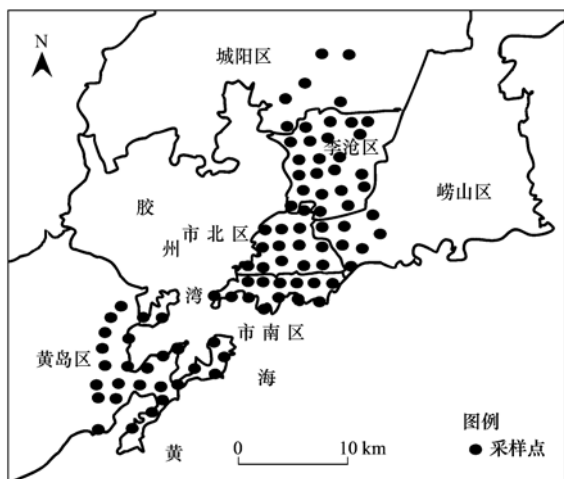


图1 青岛市区采样点分布示意

Fig. 1 Scatter diagram of samples in the area of Qingdao City

土壤样品采样点与大气降尘样品点位相同(图1)。土壤样品采样点选择在大气降尘采样点的周围堆积历史较长的土壤。在采样点周围50 m范围内多点采集0~20 cm的表层土壤,混合均匀形成一个

土壤样品,每份样品重500 g,共计采集89件。待样品自然干燥后,用干净的20目尼龙筛过筛^[10],除去土壤中的杂物或砾石,然后用玛瑙无污染样品制备机具将样品粉碎至粒径小于100目备用。

1.3 样品分析方法

对采集的大气降尘和土壤样品生物毒性显著的Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn进行了化验分析。其中Cd采用石墨炉原子吸收分光光度法测定,检测限0.03 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; Cr、Pb用X射线荧光光谱法(XRF)测定,检测限为5 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、2 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; Hg采用原子荧光光谱法(AFS)测定,检测限为2 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$; Cu、Ni、Zn用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定,检测限分别为1、2、4 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$;回收率介于97.1%~102.8%之间^[11,12]。所采集的样品全部由武汉综合岩矿测试中心化验分析。

为保证分析结果的可靠有效,按照《中国地质调查局地质调查技术标准·土壤地球化学评价样品分析技术要求(试行)》采用了重复样品分析、密码抽查等方法对大气降尘、土壤样品的化验分析质量进行了严格的监控,确保分析数据准确无误。本研究数据分析是在EXCEL中运行的。

2 结果与讨论

2.1 大气降尘重金属的特征

根据青岛市大气降尘、土壤样品化验分析结果和南京市、石家庄市、哈尔滨市的研究情况进行统计分析,得到重金属的统计情况表(表1)。

根据表1可以看出,市南市北崂山区大气降尘Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb和Zn的总量为0.361~7.079、77.7~1684.6、52.4~608.7、0.04~0.655、23.9~96.7、109.6~2223、334.4~18900 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为1.744、243.6、166.1、0.214、46.8、328.2和2975.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。变异系数为Zn>Pb>Cr>Cd>Hg>Cu>Ni,其中Ni的变异系数最小为29%;其它重金属元素的变异系数均大于50%,时空分布非常不均匀。与相应土壤重金属含量比,大气降尘重金属的平均含量除Hg低于土壤值外,其它均高于土壤值,尤其是Cd、Cr、Cu、Pb、Zn,在土壤值的5倍以上,可能受到人为因素的明显影响。一般说来Cd主要来源于化石燃料燃烧、冶炼、化工、电镀、印染、垃圾焚烧等^[16],Cu主要来源于焦炭的粉尘等^[17],Cr被广泛应用于制造不锈钢、汽车零件、磁带和录像带等,Pb是交通运输污染的标志性元素^[18],Zn主要来自于含铅汽油的燃

烧和汽车轮胎磨损产生的粉尘^[19],因此市南市北崂山区大气降尘 Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 应与交通活动污染和高新技术产业引起的工业污染有关。

李沧城阳区大气降尘 Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的总量为 0.364 ~ 3.319、70.2 ~ 356.9、35.6 ~ 212.4、0.04 ~ 0.786、18.2 ~ 101.7、68.6 ~ 1 284 和 226.3 ~ 17 050 mg·kg⁻¹,平均值为 1.284、149.2、91.1、0.169、43.6、204.9 和 1 687.6 mg·kg⁻¹. 变异系数为 Zn > Pb > Hg > Cd > Ni > Cr > Cu,其中 Cu、Cr、Ni 的变异系数小于 50%,其它重金属元素的变异系数均大于 50%,时空分布非常不均匀.与相应土壤重金属含量比,大气降尘重金属的平均含量均高于土壤值,尤其是 Pb、Zn,在土壤值的 5 倍以上,可能受到人为因素的明显影响,与李沧城阳区商贸物流业交通活动污染有关。

黄岛区大气降尘 Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的总量为 0.396 ~ 1.766、44.8 ~ 888、56.8 ~ 1 208、0.031 ~ 0.97、25.2 ~ 257.4、84.3 ~ 443.5 和 317.8 ~ 21 710 mg·kg⁻¹,平均值为 0.908、144.4、164.8、0.181、61.5、165.2 和 2 069.5 mg·kg⁻¹. 变异系数为

Zn > Cu > Hg = Cr > Ni > Pb > Cd,其中 Cd 的变异系数最小为 37%,其它重金属元素的变异系数均大于 50%,时空分布非常不均匀.与相应土壤重金属含量比,大气降尘重金属的平均含量均高于土壤值,尤其是 Cd、Cu、Pb、Zn,在土壤值的 5 倍以上,可能受到人为因素的明显影响,与黄岛区商贸物流业交通活动污染和石油化工、橡胶塑料等工业污染有关。

青岛市区大气降尘重金属平均值中市南市北崂山区除 Ni 外均为最高;李沧城阳区的 Cd、Cr、Pb 较高,Cu、Hg、Ni、Zn 最低;黄岛区的 Ni 最高,Cu、Hg、Zn 较高,Cd、Cr、Pb 最低,整体来看市南市北崂山区污染较重。

青岛市区大气降尘重金属平均值与南京市、石家庄市和哈尔滨市相比,其中 Cr、Zn 均为最高,Hg 均为最低,而其它重金属元素则具有一定的差异.整体来看市南市北崂山区大气降尘重金属与南京市含量相当;李沧城阳区和黄岛区与石家庄含量相当.但是由于青岛市区与南京市、石家庄市和哈尔滨市研究结果在时间上存在差异,此对比只能大体说明青岛市区大气降尘污染的状况。

表 1 重金属的统计情况表
Table 1 Statistics of heavy metals

地区	项目	指标	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
青岛市南市北崂山区(34)	大气降尘	最小值/mg·kg ⁻¹	0.361	77.7	52.4	0.04	23.9	109.6	334.4
		最大值/mg·kg ⁻¹	7.079	1 684.6	608.7	0.655	96.7	2 223	18 900
		平均值/mg·kg ⁻¹	1.744	243.6	166.1	0.214	46.8	328.2	2 975.8
		标准偏差	1.29	283.43	99.64	0.13	13.73	396.58	4 619.65
		变异系数/%	74	116	60	62	29	121	155
		土壤/mg·kg ⁻¹	0.217	49.5	32.11	0.493	18.1	66.0	117.9
青岛李沧城阳区(28)	大气降尘	最小值/mg·kg ⁻¹	0.364	70.2	35.6	0.04	18.2	68.6	226.3
		最大值/mg·kg ⁻¹	3.319	356.9	212.4	0.786	101.7	1 284	17 050
		平均值/mg·kg ⁻¹	1.284	149.2	91.1	0.169	43.6	204.9	1 687.6
		标准偏差	0.74	54.47	33.10	0.14	18.50	223.42	3 355.65
		变异系数/%	58	37	36	84	42	109	199
		土壤/mg·kg ⁻¹	0.267	53.8	25.9	0.069	20.7	40.3	95.9
青岛黄岛区(27)	大气降尘	最小值/mg·kg ⁻¹	0.396	44.8	56.8	0.031	25.2	84.3	317.8
		最大值/mg·kg ⁻¹	1.766	888	1208	0.97	257.4	443.5	21 710
		平均值/mg·kg ⁻¹	0.908	144.4	164.8	0.181	61.5	165.2	2 069.5
		标准偏差	0.33	151.58	214.00	0.19	51.05	86.94	4 325.81
		变异系数/%	37	105	130	105	83	53	209
		土壤/mg·kg ⁻¹	0.124	40.0	17.5	0.054	18.2	28.8	68.5
南京市 ^[13]		大气降尘/mg·kg ⁻¹	5.8	95.8	121	0.57	51.7	331	798
石家庄市 ^[14]		大气降尘/mg·kg ⁻¹	4.36	96	74.9	0.346	30.6	140	1 020
哈尔滨市 ^[15]		大气降尘/mg·kg ⁻¹	1.46	87.13	104.9	0.25	27	117.15	370.77

2.2 大气降尘重金属对人体健康的风险

2.2.1 大气降尘重金属暴露模型与参数

大气降尘通常是指粒径在 10 μm 以上可以靠

重力作用自然降落到地面的大气颗粒物,但在静止空气中 10 μm 以下的尘粒也能沉降,因此大气降尘也包括部分粒度较细的大气颗粒物^[20],因此可以经

手-口直接摄入、皮肤接触和呼吸等 3 种途径进入人体,根据美国 EPA 人体暴露风险评价方法,其健康风险计算模型为式(1)~(3)所示^[21].

经手-口途径日平均暴露量(ADD_{ing}):

$$ADD_{ing} = \frac{c \times CF \times EF}{AT} \times \left(\frac{IngR_{child} \times ED_{child}}{BW_{child}} + \frac{IngR_{adult} \times ED_{adult}}{BW_{adult}} \right) \quad (1)$$

经呼吸途径日平均暴露量(ADD_{inh}):

$$ADD_{inh} = \frac{c \times EF}{PEF \times AT} \times \left(\frac{InhR_{child} \times ED_{child}}{BW_{child}} + \frac{InhR_{adult} \times ED_{adult}}{BW_{adult}} \right) \quad (2)$$

经皮肤接触日平均暴露量(ADD_{derm}):

$$ADD_{derm} = \frac{c \times CF \times SL \times ABS \times EF}{AT} \times \left(\frac{SA_{child} \times ED_{child}}{BW_{child}} + \frac{SA_{adult} \times ED_{adult}}{BW_{adult}} \right) \quad (3)$$

其中模型变量取值参考美国 EPA 土壤健康风险评价方法、我国场地环境评价指南以及国内外相关研究. 式中, c 为实测大气降尘重金属的浓度,单位为 $mg \cdot kg^{-1}$; $IngR$ 为经手-口摄入的大气降尘频率,其中少年儿童取值为 $200 \text{ mg} \cdot d^{-1}$,成人取值为 $100 \text{ mg} \cdot d^{-1}$ ^[22]; CF 为转换系数,取为 $1 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot mg^{-1}$ ^[22,23]; EF 暴露频率选取为 $365 \text{ d} \cdot a^{-1}$; ED 暴露年限,假定人的生命周期为 71 a ^[24],其中儿童期为 18 a ,成年期为 53 a ; BW 为平均体重,少年儿童取体重平均值 32 kg ,成人取体重平均值 59 kg ^[24]; AT 平均暴露时间为假定人的生命周期 71 a 乘以 $365 \text{ d} \cdot a^{-1}$ ^[24]; $InhR$ 为呼吸频率,少年儿童取平均值为 $8.61 \text{ m}^3 \cdot d^{-1}$,成人取平均值为 $13.77 \text{ m}^3 \cdot d^{-1}$ ^[24]; PEF 大气降尘产生因子取默认值 1.36

$\times 10^9 \text{ m}^3 \cdot kg^{-1}$ ^[22]; SA 为暴露皮肤表面积,取不同季节暴露面积的平均值,其中少年儿童取为 0.713 m^2 ,成人取为 2.344 m^2 ^[22]; SL 为皮肤黏着度取 $2000 \text{ mg} \cdot (m^2 \cdot d)^{-1}$ ^[25]; ABS 为皮肤吸收因子取为 0.001 ^[22,23].

2.2.2 大气降尘重金属对人体的健康风险表征

大气降尘重金属 Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 不同暴露途径的健康风险 HQ 和不同途径、不同种类的大气降尘重金属累积对人类的健康风险计算方法,如式(4)~(6).

$$HQ_{i,j} = \frac{ADD_{i,j}}{RfD_{i,j}} \quad (4)$$

$$HI_i = \sum HQ_{i,j} \quad (5)$$

$$HI_{i,j} = \sum HI_i \quad (6)$$

式中, $HQ_{i,j}$ 为 j 途径的重金属元素 i 对人体的健康风险; $ADD_{i,j}$ 为 j 途径的重金属元素 i 的日平均暴露量,单位为 $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$; $RfD_{i,j}$ 为 j 途径的重金属元素 i 的日暴露健康风险参考剂量,单位为 $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$,表示每天每 kg 人体摄取的重金属元素不会引起人体不良反应的污染物最大量; HI_i 为大气降尘重金属 i 的健康风险, $HI_{i,j}$ 为大气降尘重金属累积的健康总风险. 当 HQ、HI 小于等于 1.0 时,认为大气降尘重金属对人体的健康风险危害较小或没有明显伤害;当 HQ、HI 大于 1.0 时,认为大气降尘重金属有可能对人体造成危害.

表 2 列出了不同暴露途径的大气降尘重金属 Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 对人体的健康风险参考剂量 RfD,运用公式(4)~(6)计算青岛市区不同暴露途径的大气降尘重金属对人体的健康风险 HQ 和健康风险 HI,得到表 3、表 4.

表 2 不同暴露途径的重金属参考剂量/ $\mu g \cdot (kg \cdot d)^{-1}$

Table 2 Average daily doses for each heavy metal and exposure pathway/ $\mu g \cdot (kg \cdot d)^{-1}$

项目	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
RfD _{ing}	1.00	3.000 0	40.0	0.300	20.00	3.500	300
RfD _{inh}	1.00	0.028 6	40.2	0.015	20.60	3.520	300
RfD _{derm}	0.01	0.060 0	12.0	0.086	5.40	0.525	60

根据表 3 可以看出,青岛市区不同途径的大气降尘重金属 Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 对人体健康的风险的平均值差异不大,均明显小于 1,说明整体来看青岛市区不同途径的大气降尘重金属对人体的健康危害较小;但是市南区有 1 个点 Cr 经手-口、皮肤途径和市南、崂山、城阳区各有 1 个点 Pb 经皮肤途径对人体的健康风险 HI 大于 1,说明市南区、

崂山区和城阳区大气降尘 Cr、Pb 如果一直保持这种高浓度,有 4 个采样点可能通过皮肤、手-口途径对人体的健康造成危害.

根据表 4 可以看出,不同途径的大气降尘重金属 Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 对人体健康的风险累积的平均值差异不大,均明显小于 1,说明整体来看青岛市区大气降尘 Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn

表 3 青岛市区不同暴露途径的大气降尘重金属对人体健康风险

Table 3 Characteristics table for the HQ of heavy metals in the atmospheric dustfall to human health under various exposure approaches in the area of Qingdao City

途径	项目	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
手-口	最小值	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00
	最大值	0.02	1.60	0.09	0.01	0.04	1.81	0.21
	平均值	0.00	0.17	0.01	0.00	0.00	0.20	0.02
呼吸	最小值	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	最大值	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	平均值	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
皮肤	最小值	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	最大值	0.05	1.99	0.01	0.00	0.00	0.30	0.03
	平均值	0.01	0.22	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00

表 4 青岛市区大气降尘重金属对人体健康的风险

Table 4 Characteristics table for the HI of heavy metals for each heavy metal in the atmospheric dustfall to human health in the area of Qingdao City

项目	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	综合
最小值	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.20
最大值	0.07	3.60	0.09	0.01	0.04	2.11	0.23	3.96
平均值	0.01	0.39	0.01	0.00	0.01	0.23	0.02	0.67

对人体的健康危害较小;但 Cr、Pb 的最大值却大于 1,尤其是市南区 Cr,达到 3.60,明显大于手-口途径或皮肤途径的大气降尘 Cr 对人体的健康风险,说明不同途径的大气降尘 Cr、Pb 对人体的健康风险累积,将明显加大危害人体健康的风险.不同种类的大气降尘重金属 Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 累积对人体健康总风险的平均值小于 1,说明整体来看青岛市区大气降尘重金属累积对人体健康的风险较小;但是其最大值却明显大于 1,且与大气降尘重金属 Cr、Cd、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 对人体健康的风险最大值相比,均明显偏大,说明不同种类的大气降尘重金属累积将明显加大危害人体健康的风险.

3 结论

(1)根据青岛市区大气降尘重金属的特征分析,可以得出市南市北崂山区、李沧城阳区、黄岛区大气降尘重金属 Cr、Cd、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 时空分布非常不均匀,除市南市北崂山区大气降尘 Hg 的平均含量低于土壤值外,其它均高于土壤值,尤其是市南市北崂山区的 Cd、Cr、Cu、Pb、Zn,李沧城阳区的 Pb、Zn、黄岛区的 Cd、Cu、Pb、Zn,均在土壤值的 5 倍以上,可能受到人为因素的明显影响.市南市北崂山区与李沧城阳区和黄岛区相比,大气降尘重金属平均值除 Ni 外均为最高,污染较重.

(2)根据青岛市区大气降尘重金属 Cr、Cd、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 对人体的健康风险分析,可以

得出整体来看青岛市区大气降尘重金属对人体健康的风险差异不大,危害较小;但是市南区、崂山区和城阳区大气降尘 Cr、Pb 如果一直保持这种高浓度,就有 4 个采样点可能通过皮肤、手-口途径对人体的健康造成危害.且不同途径、不同种类的大气降尘重金属累积将明显加大危害人体健康的风险.

参考文献:

[1] Abrahams P W. Soils; their implications to human health [J]. Science of the Total Environment, 2002, 291(1-3): 1-32.

[2] 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.

[3] Gomez B, Palacios M A, Gomez 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.

[4] 胡恭任, 于瑞莲, 林燕萍, 等. TCLP 法评价泉州市大气降尘重金属的生态环境风险[J]. 矿物学报, 2013, 33(1): 1-9.

[5] 孙广义, 闭向阳, 李仲根, 等. 武汉市幼儿园降尘 Pb 污染特征及其生物有效性[J]. 环境科学, 2011, 32(11): 3305-3311.

[6] 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.

[7] 喻超, 凌其聪, 彭振宇, 等. 城市工业区环境系统中的 Cd 污染循环及其健康风险——以杭州市半山工业区为例[J]. 环境科学学报, 2011, 31(11): 2474-2484.

[8] 于瑞莲, 胡恭任, 戚红璐, 等. 泉州市不同功能区大气降尘

- 重金属污染及生态风险评价[J]. 环境化学, 2010, **29**(6): 1086-1090.
- [9] 刘章现, 王国贞, 郭瑞, 等. 河南省平顶山市大气降尘的化学特征及其来源解析[J]. 环境化学, 2011, **30**(4): 826-831.
- [10] DD 2005-01, 多目标区域地球化学调查规范(1:250 000) [S].
- [11] 吕建树, 张祖陆, 刘洋, 等. 日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价[J]. 地理学报, 2012, **67**(7): 971-984.
- [12] 代杰瑞, 王学, 董建, 等. 山东省东部地区土壤重金属污染及其生态环境效应[J]. 地球科学与环境学报, 2012, **34**(4): 74-79.
- [13] 黄顺生, 华明, 金洋, 等. 南京市大气降尘重金属含量特征及来源研究[J]. 地学前缘, 2008, **15**(5): 161-166.
- [14] 蔡奎, 栾文楼, 李随民, 等. 石家庄市大气降尘重金属元素来源分析[J]. 地球与环境, 2012, **40**(1): 37-43.
- [15] 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.
- [16] 郭广慧, 陈同斌, 宋波, 等. 中国公路交通的重金属排放及其对土地污染的初步估算[J]. 地理研究, 2007, **26**(5): 922-930.
- [17] 陈兴茂, 冯丽娟, 李先国, 等. 青岛地区大气气溶胶中微量金属的时空分布[J]. 环境化学, 2004, **23**(3): 334-340.
- [18] 于瑞莲, 胡恭任, 袁 星, 等. 大气降尘中重金属污染源解析研究进展[J]. 地球与环境, 2009, **37**(1): 73-79.
- [19] Pagotto C, Remy N, Legret M, *et al.* Heavy metal pollution of road dust and roadside soil near a major rural highway [J]. Environmental Technology, 2001, **22**(3): 307-319.
- [20] 张新民, 柴发合, 孙新章. 大气降尘研究进展[J]. 中国人口·资源与环境, 2008, **18**(专刊): 658-662.
- [21] 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.
- [22] U. S. Environmental Protection Agency. Supplemental Guidance for Developing Soil Screening Levels for Superfund Sites [EB/OL]. <http://www.epa.gov/superfund/health/conmedia/soil/pdfs/ssgmarch01.pdf>, 2001-03-27.
- [23] Ferreira-Baptista L, De Miguel E. Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda, Angola: a tropical urban environment [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(25): 4501-4512.
- [24] 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.
- [25] 姜林, 王岩. 场地环境评价指南[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004. 45-47.

CONTENTS

Observation Study on Aerosol Optical Properties and Radiative Forcing Using the Ground-based and Satellite Remote Sensing at Background Station During the Regional Pollution Episodes	ZHANG Xiao-ling, XIA Xiang-ao, CHE Hui-zheng, <i>et al.</i>	(2439)
<i>In-situ</i> Measurement of Atmospheric Methyl Chloroform at the Shangdianzi GAW Regional Background Station	YAO Bo, ZHOU Ling-xi, LIU Zhao, <i>et al.</i>	(2449)
Distribution of CO at Lin'an Station in Zhejiang Province	FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, LUAN Tian, <i>et al.</i>	(2454)
Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in Atmospheric Particles in Nanjing Northern Suburb in Summer	DUAN Qing, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(2460)
Characteristics of Water-soluble Organic Nitrogen of PM _{2.5} in Xi'an During Wintertime Non-haze and Haze Periods	CHENG Yu-ting, WANG Ge-hui, SUN Tao, <i>et al.</i>	(2468)
Effect of Sand Dust Weather on Major Water-soluble Ions in PM ₁₀ in Lanzhou, China	WANG Fang, CHEN Qiang, ZHANG Wen-yu, <i>et al.</i>	(2477)
Diversity of Bacterial Areasols in Precipitation of Shanghai Area	LIANG Zong-min, DU Rui, DU Peng-rui, <i>et al.</i>	(2483)
Concentrations and Deposition Fluxes of Heavy Metals in Precipitation in Core Urban Areas, Chongqing	PENG Yu-long, WANG Yong-min, QIN Cai-qing, <i>et al.</i>	(2490)
Anthropogenic VOC Emission Inventory and Contribution from Industrial Sources in Ningbo	LI Xuan, WANG Xue-song, LIU Zhong, <i>et al.</i>	(2497)
Evaluation and Selection of VOCs Treatment Technologies in Packaging and Printing Industry	WANG Hai-lin, WANG Jun-hui, ZHU Chun-lei, <i>et al.</i>	(2503)
Experimental Study on CO ₂ Absorption by Aqueous Ammonia-based Blended Absorbent	XIA Zhi-xiang, XIANG Qun-yang, ZHOU Xu-ping, <i>et al.</i>	(2508)
Preliminary Investigation on Emission of PCDD/Fs and DL-PCBs Through Flue Gas from Coke Plants in China	SUN Peng-cheng, LI Xiao-lu, CHENG Gang, <i>et al.</i>	(2515)
Distribution and Source of Particulate Organic Carbon and Particulate Nitrogen in the Yangtze River Estuary in Summer 2012	XING Jian-wei, XIAN Wei-wei, SHENG Xiu-zhen	(2520)
Characteristics of Optical Absorption Coefficients and Their Differences in Typical Seasons in Lake Qiandaohu	WANG Ming-zhu, ZHANG Yun-lin, SHI Kun, <i>et al.</i>	(2528)
Dynamic Distributions of Dissolved Oxygen in Lake Qiandaohu and Its Environmental Influence Factors	YIN Yan, WU Zhi-xu, LIU Ming-liang, <i>et al.</i>	(2539)
Source Analysis of Urea-N in Lake Taihu During Summer	HAN Xiao-xia, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i>	(2547)
Phytoplankton Community Structure and Its Succession in Isolated Lakes of Poyang-Junshan Lake	LIU Xia, QIAN Kui-mei, TAN Guo-liang, <i>et al.</i>	(2557)
Vertical Distribution and Relationship Between ²¹⁰ Pb _{ex} Activities and Nutrients in Sediment Cores of Two Different Eutrophication Level Lakes	WANG Xiao-lei, YANG Hao, GU Zhu-jun, <i>et al.</i>	(2565)
Simulation of Nitrate Pollution in Groundwater Using Pump-and-treat Optimization Method	JIANG Lie, HE Jiang-tao, JIANG Yong-hai, <i>et al.</i>	(2572)
Variation of Water DOC During the Process of Pre-pressure and Coagulation Sedimentation Treatment	CHEN Wen-jing, CONG Hai-bing, XU Ya-jun, <i>et al.</i>	(2579)
Adsorption of Perchlorate by Calcined Mg/Zn/Al Layered Double Hydroxides	WANG Hong-yu, LIU Yan	(2585)
Adsorption Kinetic Mechanism of Ionic Soluble Dye Mixture on Fly Ash	SUN De-shuai, ZHENG Qiang-qiang, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i>	(2590)
Effect of SDS on the Adsorption of Cd ²⁺ onto Amphoteric Modified Bentonites	WANG Jian-tao, MENG Zhao-fu, YANG Ya-ti, <i>et al.</i>	(2596)
Structural Changes of Aged Biochar and the Influence on Phenanthrene Adsorption	TANG Wei, GUO Yue, WU Jing-gui, <i>et al.</i>	(2604)
Photocatalytic Degradation Kinetics of Perfluorooctanoic Acid (PFOA) in TiO ₂ Dispersion and Its Mechanism	LI Ming-jie, YU Ze-bin, CHEN Ying, <i>et al.</i>	(2612)
Characterizing the Interaction Between Roxarsone and Humic Acid by Fluorescence Quenching Experiment	ZHU Jiang-peng, MEI Ting, PENG Yun, <i>et al.</i>	(2620)
Modification of Activated Carbon Fiber for Electro-Fenton Degradation of Phenol	MA Nan, TIAN Yao-jin, YANG Guang-ping, <i>et al.</i>	(2627)
Investigation of Enhanced Low Carbon Wastewater Denitrification by Catalytic Iron	WANG Meng-yue, MA Lu-ming	(2633)
Denitrification Performance of PBS as a Solid Carbon Source of Denitrification	LIU Jia, SHEN Zhi-qiang, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i>	(2639)
Concentrations, Distribution Characteristics and Electron Beam Radiolysis Degradation of PCDD/Fs in Waste Water from a Paper Mill	QING Xian, HUANG Jin-qiong, YU Xiao-wei, <i>et al.</i>	(2645)
Study on the Quality of Digested Piggery Wastewater in Large-Scale Farms in Jiaxing	WEI Dan, WAN Mei, LIU Rui, <i>et al.</i>	(2650)
New Ways to Improve Volatile Fatty Acids Accumulation in Sludge Alkaline Fermentation System	LI Xiao-ling, PENG Yong-zhen, CHAI Tong-zhi, <i>et al.</i>	(2658)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments and Soils from Dishui Lake and Its Water Exchange Areas	GUO Xue, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i>	(2664)
Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and Sediment from Zhoushan Coastal Area, China	JIANG Min, Le Huy Tuan, MEI Wei-ping, <i>et al.</i>	(2672)
Contamination Levels and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Soils and Grasses from Lake Catchments in the Tibetan Plateau	XIE Ting, ZHANG Shu-juan, YANG Rui-qiang	(2680)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Soil from Jiufeng Mountain Range in Fujian, China	HUANG Huan-fang, QI Shi-hua, QU Cheng-kai, <i>et al.</i>	(2691)
Pollution Fingerprints and Sources of Perfluorinated Compounds in Surface Soil of Different Functional Areas	ZHANG Hong, ZHAO Liang, HE Long, <i>et al.</i>	(2698)
Distribution, Seasonal Variation and Influence Factors of Dissolved Inorganic Arsenic in the Sanggou Bay	LI Lei, REN Jing-ling, LIU Su-hui, <i>et al.</i>	(2705)
Distribution of Soil Heavy Metal and Pollution Evaluation on the Different Sampling Scales in Farmland on Yellow River Irrigation Area of Ningxia; A Case Study in Xingqing County of Yinchuan City	WANG You-qi, BAI Yi-ru, WANG Jian-yu	(2714)
Release of Mercury from Soil and Plant in Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area and Its Accumulation in Zebrafish	LI Chu-xian, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i>	(2721)
Residues and Health Risk Assessment of Sulfonamides in Sediment and Fish from Typical Marine Aquaculture Regions of Guangdong Province, China	HE Xiu-ting, WANG Qi, NIE Xiang-ping, <i>et al.</i>	(2728)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Dust of Qingdao City	ZHANG Chun-rong, WU Zheng-long, YAO Chun-hui, <i>et al.</i>	(2736)
Health Risk Assessment of Coke Oven PAHs Emissions	BO Xin, WANG Gang, WEN Rou, <i>et al.</i>	(2742)
Effects of Combined Pollution of Cd, Cu and Pb on Antioxidant Enzyme Activities of Earthworm in Soils	WANG Hui, XIE Xin-yuan	(2748)
Toxicity of Three Chlorophenols to Protozoa <i>Tetrahymena thermophila</i>	LI Ya-jie, CUI Yi-Bin, JIANG Li-juan, <i>et al.</i>	(2755)
Phytoexclusion Potential Studies of Si Fertilization Modes on Rice Cadmium	CHEN Zhe, TIE Bo-qing, LEI Ming, <i>et al.</i>	(2762)
Effects of Conservation Tillage on Soil CO ₂ and N ₂ O Emission During the Following Winter-Wheat Season	PAN Ying, HU Zheng-hua, WU Yang-zhou, <i>et al.</i>	(2771)
Mineralization of Soil Organic Carbon and Its Relationship with Soil Enzyme Activities in Apple Orchard in Weibei	JIA Man-li, GUO Hong, LI Hui-ke	(2777)
Steam and Air Co-injection in Removing TCE in 2D-Sand Box	WANG Ning, PENG Sheng, CHEN Jia-jun	(2785)
Effect of Cu ²⁺ on the Power Output of Dual-chamber Microbial Fuel Cell	MU Shu-jun, LI Xiu-fen, REN Yue-ping, <i>et al.</i>	(2791)
Emissions of Greenhouse Gas and Ammonia from Sewage Sludge Composting by Continuous Aerated Turning Pile	ZHAO Chen-yang, WEI Yuan-song, GE Zhen, <i>et al.</i>	(2798)
Emissions of NH ₃ , N ₂ O, and NO from Swine Manure Solid Storage in Winter	DING Gang-qiang, HAN Sheng-hui, YUAN Yu-ling, <i>et al.</i>	(2807)
Variation Characteristics and Mathematical Model of Humic Substances in Landfill Leachates with Different Landfill Ages	HUANG You-fu, XU Xin-ya, FAN Liang-xin, <i>et al.</i>	(2816)
Research on the Variation Regularity of Effluent from the Leachate Reverse Osmosis Concentrate Recirculation	WANG Dong-mei, LIU Dan, LIU Qing-mei, <i>et al.</i>	(2822)
Quantitative Analysis on the Changes in Anthropogenic Lead Flows of China	MA Lan, MAO Jian-su	(2829)
Research Progress in Microbiological Characteristics in Combined N ₂ Removal Process by Partial Nitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation	ZHAO Zhi-rui, HOU Yan-lin	(2834)

《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7月15日 第35卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 7 Jul. 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