

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第3期

Vol.34 No.3

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

BP网络框架下MODIS气溶胶光学厚度产品估算中国东部PM _{2.5}	郭建平, 吴业荣, 张小曳, 李小文(817)
北京市近地层颗粒物浓度与气溶胶光学厚度相关性分析研究	林海峰, 辛金元, 张文煜, 王跃思, 刘子锐, 陈传雷(826)
气象因素对长三角背景地区甲烷浓度的影响分析	浦静姣, 徐宏辉, 顾骏强, 马千里, 方双喜, 周凌晔(835)
密闭化填埋作业条件下的场内恶臭污染分布情况与分析	路鹏, 吴世新, 戴志锋, 张晓辉, 苏昭辉, 周小飞, 代占国, 卢旭飞, 郑斌, 沈凯, 卫潘明(842)
冬季中国东海海水中挥发性卤代烃的分布特征和海-气通量	何真, 陆小兰, 杨桂朋(849)
2000~2010年大鹏湾颗粒有机物的年变化和年际变化	李绪录, 周毅频, 夏华永(857)
渤海湾浮游植物与环境因子关系的多元分析	周然, 彭士涛, 覃雪波, 石洪华, 丁德文(864)
青藏高原淡水湖泊水化学组成特征及其演化	王鹏, 尚英男, 沈立成, 伍坤宇, 肖琼(874)
漳卫南运河流域非点源污染负荷估算及最佳管理措施优选	徐华山, 徐宗学, 刘品(882)
面向对象的湖泊污染控制智能工程设计方法	邹锐, 周璟, 刘永, 朱翔, 赵磊, 阳平坚, 郭怀成(892)
九龙江口湿地植物凋落物对沉积物有机质赋存的贡献	罗专溪, 邱昭政, 王振红, 颜昌宙(900)
修复达标土壤回填对地下水环境影响的层次化评估方法应用研究	钟茂生, 姜林, 姚珏君, 樊艳玲, 夏天翔, 李婷婷, 田美影(907)
去除地下水中硝酸盐的渗透性反应墙研究	李秀利, 杨君君, 卢晓霞, 张姝, 侯珍(914)
北京城区雨水管道沉积物污染负荷研究	李海燕, 徐波平, 徐尚玲, 崔爽(919)
城市污水处理厂及其受纳水体中5种典型PPCPs的赋存特征和生态风险	温智皓, 段艳平, 孟祥周, 陈玲(927)
城市景观娱乐水体微生物风险评价	孙傅, 沙婧, 张一帆, 刘彦华(933)
模拟曝气生物滤池去除邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯试验研究	李伟, 赵晶, 余健, 任文辉(943)
膜生物反应器处理工业废水中膜污染及膜过滤特性研究	范举红, 余素林, 张培帅, 兰亚琼, 刘锐, 陈吕军(950)
γ -Al ₂ O ₃ 负载磷钨酸催化强化电催化法处理水中酸性大红3R的研究	岳琳, 王开红, 郭建博, 杨景亮, 刘宝友, 廉静, 王涛(955)
活性炭催化过硫酸钠降解金橙G动力学	杨梅梅, 周少奇, 刘琳, 郑可(962)
ABR反应器处理碱减量印染废水的启动研究	杨波, 钟启俊, 李方, 田晴(968)
O ₃ -BAF深度处理制革废水中沿程污染物降解规律	余彬, 刘锐, 程家迪, 范举红, 李昌湖, 冉坤, 曹国华, 陈吕军(974)
规模化猪场养殖废水UASB-SFSBR-MAP处理工艺中试研究	王亮, 陈重军, 陈英旭, 吴伟祥(979)
连续流态下以城市污水培养好氧颗粒污泥及颗粒特性研究	牛姝, 段百川, 张祚薰, 刘士峰, 张家铭, 王聪, 周丹丹(986)
乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅰ)——模型的建立	张超, 陈银广(993)
乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅱ)——动力学模拟	张超, 陈银广(998)
乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅲ)——模型的应用	张超, 陈银广(1004)
三峡水库两条支流水-气界面CO ₂ 、CH ₄ 通量比较初探	李哲, 白镭, 郭劲松, 方芳, 蒋滔(1008)
不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异的影响因素	陈书涛, 刘巧辉, 胡正华, 刘艳, 任景全, 谢薇(1017)
黄土区农田和草地生态系统土壤呼吸差异及其影响因素	周小刚, 张彦军, 南雅芳, 刘庆芳, 郭胜利(1026)
层次化健康风险评估方法在苯污染场地的应用及效益评估	姜林, 钟茂生, 梁竞, 姚珏君, 夏天翔, 樊艳玲, 李敬东, 唐振强(1034)
海州湾潮滩重金属污染的历史记录	张瑞, 张帆, 刘付程, 尹福军, 丁迎军, 高金荣, 陈晶, 邵威(1044)
草海典型高原湿地表层沉积物重金属的积累、分布与污染评价	张清海, 林昌虎, 谭红, 林绍霞, 杨鸿波(1055)
大金山岛土壤重金属污染评价及相关性分析	程芳, 程金平, 桑恒春, 于金莲, 席磊, 皮帅帅(1062)
典型有色金属矿山城市小河流沉积物重金属形态分布及风险评估	李如忠, 姜艳敏, 潘成荣, 陈婧, 徐晶晶(1067)
典型有色金属矿业城市零星菜地蔬菜重金属污染及健康风险评估	李如忠, 潘成荣, 徐晶晶, 陈婧, 姜艳敏(1076)
城市表层土壤磁化率与重金属含量分布的相关性研究	陈秀端, 卢新卫, 杨光(1086)
典型热带林地土壤团聚体颗粒中重金属的分布特征及其环境意义	龚仓, 徐殿斗, 成杭新, 任雅阁, 刘志明, 刘应汉, 刘飞, 聂海峰, 郑祥, 马玲玲(1094)
生态沟渠底泥属性与磷吸附特性研究	张树楠, 贾兆月, 肖润林, 杨凤飞, 余红兵, 刘锋, 吴金水(1101)
三峡库区澎溪河底泥及消落区土壤磷的形态及吸附特性研究	孙文彬, 杜斌, 赵秀兰, 何丙辉(1107)
Triton X-100在黄土上的吸附行为及影响因素	钟金魁, 赵保卫, 朱琨, 钱小龙, 张杰西(1114)
新疆哈密地区有机氯农药大气、土壤残留特征、气-土交换及潜在生态风险	马子龙, 毛蒲萱, 丁中原, 高宏, 黄韬, 田慧, 郭强(1120)
青海省西宁市与天峻县大气中得克隆与十溴联苯醚的水平与来源	何畅, 金军, 马召辉, 王英, 扎西卓玛, 马丽花(1129)
太湖沉积物中多溴联苯醚和类二噁英多氯联苯的水平垂直分布	马召辉, 金军, 元学奎, 王英, 姜霞, 何松洁, 李明圆(1136)
典型电器工业区河涌沉积物中有机污染物特征分析	刘近, 邓代永, 许玫英, 孙国萍(1142)
柴油轿车颗粒多环芳烃的排放特性	谭丕强, 周舟, 胡志远, 楼狄明(1150)
机械炼焦过程生成飞灰中多环芳烃分布特征研究	牟玲, 彭林, 刘效峰, 白慧玲, 张建强(1156)
污泥干化床与芦苇床稳定化污泥中多环芳烃的含量比较	崔玉波, 孙红杰, 冉春秋, 李金凤, 谢瑶(1161)
固体添加剂对污泥焚烧过程中重金属迁移行为的影响	刘敬勇, 孙水裕, 陈涛(1166)
铸造废砂的环境毒性研究	张海凤, 王玉珏, 王劲磷, 黄天佑, 熊鹰(1174)
Cr ⁶⁺ 生物可利用度检测的微生物全细胞传感器CB10的构建及其响应特征	侯启会, 马安周, 庄绪亮, 庄国强(1181)
反硝化脱硫工艺中微生物群落结构及动态分析	于皓, 王爱杰, 陈川(1190)
农业废物好氧堆肥中环境因子对nirK、nirS和nosZ数量的影响	胡春晓, 陈耀宁, 张嘉超, 唐聪, 曾光明(1196)
蚯蚓体内过氧化物还原蛋白PRDX基因对土壤PAHs污染胁迫的转录响应	林康丽, 郑森林, 宋玉芳, 邱晓燕, 薛文玲(1204)
有序介孔碳载金/L-赖氨酸/纳米金修饰电极的制备及其对邻苯二酚、对苯二酚的检测响应研究	周耀渝, 汤琳, 李贞, 刘媛媛, 杨贵德, 伍梦诗, 雷晓霞, 曾光明(1211)
新建核电站风险信息沟通实证研究	贺桂珍, 吕永龙(1218)
《环境科学》征订启事(942) 《环境科学》征稿简则(992) 信息(932, 949, 1061, 1210) 专辑征稿通知(1173)	

典型有色金属矿业城市零星菜地蔬菜重金属污染及健康风险评估

李如忠¹, 潘成荣², 徐晶晶¹, 陈婧¹, 姜艳敏¹

(1. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009; 2. 安徽省环境科学研究院, 合肥 230071)

摘要:在铜陵惠溪河流域及铜陵有色金属冶炼厂周边零星菜地,选择35个点位采集8种蔬菜(226颗)及相应的土样,在对重金属As、Ni、Cu、Pb、Cd和Zn含量分析测试的基础上,开展蔬菜重金属污染评价、富集能力分析及健康风险评估。结果表明:①研究区土壤重金属污染严重,As、Ni、Cu、Pb、Cd和Zn平均含量分别达96.96、56.64、1247.82、313.59、6.743和600.96 mg·kg⁻¹,均显著高于铜陵市土壤元素背景值;②8种蔬菜重金属综合污染指数平均值,均超过重污染等级阈值3.0,达重污染水平;③蔬菜对Zn富集能力最强,其次是Ni和Cu,对As、Pb、Cd等的富集系数相对较小,蔬菜中6种重金属污染程度排序为Ni>Zn>Cu>Pb>As>Cd;④蔬菜重金属As、Ni、Cu、Pb、Cd和Zn相应的THQ值分别为17.92、1.01、10.14、0.73、0.21和1.93,其中As和Cu的非致癌风险贡献率最大,分别为56.10%和31.75%,是研究区蔬菜重金属危害的最重要元素;⑤成人经蔬菜途径进入人体的As、Ni、Cu、Pb、Cd和Zn,分别为324.38、1211.25、24326.25、176.25、12.75和34800 μg·d⁻¹;⑥蔬菜中As的目标致癌风险TR达8.06×10⁻³,远超过美国环保署(US EPA)推荐的可接受风险10⁻⁶~10⁻⁴和国际辐射防护委员会(ICRP)推荐的最大可接受风险值5.0×10⁻⁵,表明长期食用这些蔬菜可能带来较高的健康风险。

关键词:有色金属;零星菜地;重金属污染;健康风险;铜陵市

中图分类号:X820.4 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2013)03-1076-10

Contamination and Health Risk for Heavy Metals via Consumption of Vegetables Grown in Fragmentary Vegetable Plots from a Typical Nonferrous Metals Mine City

LI Ru-zhong¹, PAN Cheng-rong², XU Jing-jing¹, CHEN Jing¹, JIANG Yan-min¹

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Institute of Environmental Science, Hefei 230071, China)

Abstract: A systematic survey of As, Ni, Cu, Pb, Cd and Zn concentrations in eight kinds of vegetables (involving 226 samples) and their corresponding soils at 35 sampling sites in the fragmentary vegetable plots of a typical nonferrous metals mine city, Tongling, was carried out for assessing heavy metal pollution, bio-accumulation ability and potential health risk to local inhabitants due to exposure via consumption of vegetables. The results showed that: ① The soils of the studied vegetable plots were seriously contaminated by heavy metals and the mean concentrations of As, Ni, Cu, Pb, Cd and Zn reached 96.96, 56.64, 1247.82, 313.59, 6.743 and 600.96 mg·kg⁻¹, respectively, all significantly exceeding the soil background value of Tongling city; ② The mean values of integrated pollution index corresponding to eight varieties of vegetables were all higher than the threshold value (i. e. 3.0) of heavy pollution; ③ In general, the largest bioaccumulation factor of heavy metals in vegetables was As, followed by Ni and Cu, and the order of pollution degree of heavy metals in vegetables was Ni>Zn>Cu>Pb>As>Cd; ④ The target hazard quotients (THQs) of As, Ni, Cu, Pb, Cd and Zn were 17.92, 1.01, 10.14, 0.73, 0.21 and 1.93, respectively. Arsenic and copper were the major risk contributors for inhabitants since the THQs of them respectively mounted to 56.10% and 31.75% of the total THQ value according to the average vegetable consumption; ⑤ The estimated daily intake (DI) of As, Ni, Cu, Pb, Cd and Zn from vegetables was 324.38, 1211.25, 24326.25, 176.25, 12.75 and 34800 μg·d⁻¹ for adult residents, respectively; and ⑥ The target cancer risk (TR) of vegetables polluted by As to individual human health was 8.06×10⁻³, significantly higher than the management standard (i. e. 10⁻⁶-10⁻⁴) of United States Environmental Protection Agency (US EPA) and the standard (i. e. 5.0×10⁻⁵) of International Commission on Radiological Protection (ICRP), indicating that it was quite unsafe for the general population to consume vegetables from the studied fragmentary plots.

Key words: nonferrous metals; fragmentary vegetable plot; heavy metal pollution; health risk; Tongling City

蔬菜是日常生活中必不可少的食品之一,它可以为人们提供丰富而又廉价的各种维生素和矿物质。在土壤-蔬菜系统中,重金属不仅会对蔬菜的生长及生理生化过程产生影响,还能够土壤中积累

收稿日期:2012-06-06; 修订日期:2012-07-16

基金项目:安徽省环保厅环保公益项目(2011-010)

作者简介:李如忠(1970~),男,博士,教授,主要研究方向为水环境保护与环境风险评估,E-mail:Lrz1970@163.com

和在作物体内残留,并通过食物链的传递作用,最终进入人体中,使人产生慢性中毒,从而危害人体正常的新陈代谢和内脏器官。因此,在涉及重金属污染的诸多问题中,土壤-蔬菜(或粮食作物)系统重金属污染格外引人关注,并在土壤-蔬菜(或作物)系统重金属污染特征分析、富集和迁移能力评估等方面开展了大量工作^[1~4]。随着公众健康风险意识的增强,蔬菜重金属健康风险评估逐步成为国内外研究的一个热点课题^[5~8]。

近年来,我国加大了蔬菜、粮食等农作物重金属污染的监管力度,相继出台了一系列涉及农产品及其产地条件重金属污染的标准和规范,如文献^[9~11],并陆续制定了有关公众健康风险评估的技术导则,如《环境污染所致人群健康影响评价导则》、《环境影响评价技术导则——人体健康》、《污染场地风险评估技术导则》等,现正处于公开征求意见阶段,表明健康风险评估正在由理论研究层面逐步向实际应用转化。目前,有关土壤-蔬菜系统重金属污染及其健康风险的研究,大多都是针对一定规模或空间尺度的相对较为固定的菜地,对于城区内居民房前屋后私自开垦的零星菜地关注不多。铜陵市是一座有着3 000多年采冶铜历史的城市,铜产量居全国第1位,世界第8位,是典型的有色金属矿业城市^[12]。迄今为止,有关铜陵土壤、大气重金属污染的研究已有很多^[13,14],但对市区零星菜地土壤-蔬菜系统重金属污染及其健康风险还鲜有涉及。由于零星菜地多为自种蔬菜,因此被当地居民自身食用的几率更高。鉴于铜陵市的典型金属矿业城市背景,本研究拟以城区局部零星菜地蔬菜为例,开展蔬菜重金属污染及其健康风险评估,以期为正确引导居民蔬菜消费,降低重金属污染危害提供指导。

1 材料与方法

1.1 研究区域

铜陵市位于安徽省南部地区、濒临长江下游南岸,地处东经117°42'00"~118°10'06"、北纬30°45'12"~31°07'56"之间,人口 74×10^4 ,区域总面积1 113 km²,是一座集采矿、选矿、冶炼、铜材加工、铜拆解及铜业贸易等为一体的典型有色金属矿业城市。惠溪河长约15 km,是铜陵城区内为数不多的河流水体。该河发源于铜陵市南部郊外山区,河水在穿越城区边缘并经下游的狼尾湖转输后,进入毗邻的长江。

调查发现,在惠溪河源头(即碎石岭)和上游的

城郊结合部(即第四村民组下方),各有一座小型金矿,采矿废水经简单处理后排入惠溪河。笔者所在课题组曾对该河沉积物中重金属污染状况进行取样、分析,得到沉积物重金属Cd、Cu、Zn、Ni、Pb和As平均含量分别达17.785、2 244.87、1 636.72、99.90、513.63和709.05 mg·kg⁻¹。惠溪河中游河段两侧以居住用地为主,下游狼尾湖及周边地区原本为铜冶炼尾矿废渣堆放场,现已建成为铜陵市化工区,主要企业类型包括铜冶炼、硫磷化工、炼焦、染料化工、钢铁冶炼等。实地调查发现,在惠溪河沿岸滩地及周边居住区内,大量散布着居民私自开垦种植的零星菜地,且有些菜地还以惠溪河水作为灌溉水源。狼尾湖附近的一些居住小区,也都有零星的菜园存在。

1.2 样品采集与分析测试

2012年3月底,在惠溪河沿岸及狼尾湖周边零星分布的菜地中,选择规模相对较大且经常以惠溪河水作为灌溉用水的菜地,采集31个点位8种蔬菜,主要包括青菜、雪菜、油菜、蒜苗、菠菜、蚕豆、茼蒿和韭菜等。其中,油菜、菠菜、韭菜、茼蒿等为密植类型,由于采样时植株个体都还较小,为确保分析测试过程中所需要的蔬菜量,在每个采样点位处都采集了多颗植株。考虑到有色冶金企业对周边环境介质重金属污染较为突出,在位于铜陵市区西北部的铜陵有色金属冶炼厂周边零散菜地,也采集了4个位点的蔬菜样,包括青菜、雪菜和蒜苗等3种。由于蚕豆植株正处在花期,尚未结籽,因此这里将蚕豆秧苗作为分析对象,其它蔬菜则对可食用的茎叶部分进行分析。采样中,同步采集蔬菜根部的耕作土。最后,在35个采样点位(见图1)共计采集蔬菜样品226个,土样35份。

蔬菜先以自来水冲洗干净,再用去离子水洗3次,然后用滤纸吸干表面水珠后称取一定质量在100℃下烘至恒重,测定含水率,并将烘干蔬菜样研磨,密封保存。土壤样在实验室内自然风干、磨碎,过200目尼龙筛后,密封、干燥保存。分析测试的重金属包括Pb、Cu、Zn、Ni、As和Cd等6种,蔬菜样品采用HNO₃-HClO₄加热消解、土壤样品采用HCl-HF-HNO₃-HClO₄加热消解。土壤与蔬菜中As采用氢化物发生-原子荧光光谱法,以双道原子荧光光度计(AFS-820,中国)测定;蔬菜中其它重金属元素以石墨炉原子吸收分光光度计(AA-6300,日本)测定,土壤中其它重金属以火焰法原子吸收分光光度计(WFX-130A,中国)测定。所有样品均做相应的

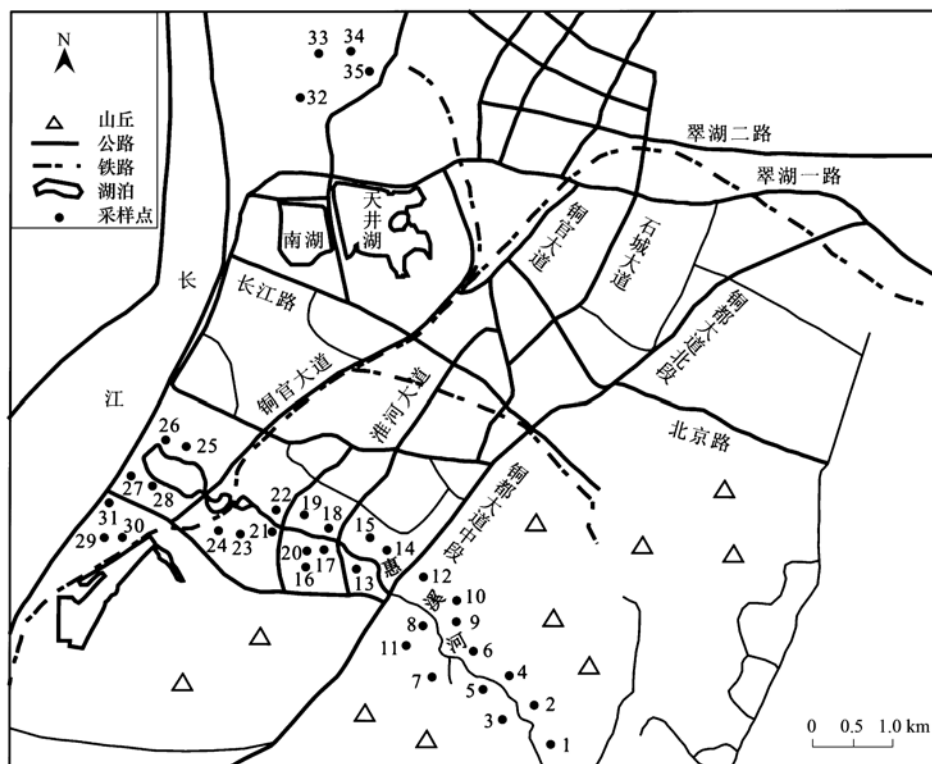


图1 采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites

试剂空白,并以标准溶液进行质量控制. 为与国内外相关标准和评价方法相一致,本研究在获得蔬菜烘干样重金属含量后,根据蔬菜样实测含水率数据,将其进一步转换为以鲜重计量的蔬菜重金属含量值.

1.3 蔬菜重金属污染评价方法

内梅罗综合污染指数是土壤或沉积物重金属污染评价中较为常用的方法. 目前,该方法已在蔬菜重金属污染评价方面得到应用^[15]. 其中,单项污染指数 P_i 按下述公式计算:

$$P_i = c_i / S_i \quad (1)$$

式中, P_i 为重金属 i 的污染指数, c_i 为蔬菜中重金属 i 的实测值, S_i 为蔬菜中重金属 i 的评价标准.

当 $P_i \leq 1$ 时,表示蔬菜未受污染; $P_i > 1$ 时,表示蔬菜受到污染.

综合污染指数计算方法如下:

$$P_{\text{综合}} = \sqrt{(P_{\text{max}}^2 + P_{\text{ave}}^2) / 2} \quad (2)$$

式中, $P_{\text{综合}}$ 为综合污染指数; P_{ave} 为各单项污染指数 P_i 的平均值, P_{max} 为单项污染指数最大值.

通常,设定综合污染指数 $P_{\text{综合}} \leq 0.7$ 为安全等级, $P_{\text{综合}} \leq 1.0$ 为警戒限, $P_{\text{综合}} \leq 2.0$ 为轻污染, $P_{\text{综合}} \leq 3.0$ 为中污染, $P_{\text{综合}} > 3.0$ 为重污染.

1.4 蔬菜重金属富集系数

蔬菜重金属的富集系数 (bio-accumulation factor, BAF) 是指植物中重金属含量与土壤中重金属含量的比值,它可以大致反映蔬菜在相同土壤重金属含量条件下对重金属的吸收能力^[16,17]. 富集系数数值越小,表明蔬菜吸收重金属的能力越差,抗土壤重金属污染的能力则越强. 相应的计算公式为^[18,19]:

$$\text{BAF} = c_{\text{蔬菜}} / c_{\text{土壤}} \quad (3)$$

式中, $c_{\text{蔬菜}}$ 和 $c_{\text{土壤}}$ 分别为蔬菜和对应土壤中重金属含量.

1.5 健康风险评价方法

研究区居民经由蔬菜摄入的重金属量,可采用日均摄入量 (daily intake, DI) 来度量,即:

$$\text{DI} = \text{FIR} \times c \quad (4)$$

式中, FIR 表示蔬菜的日摄取速率 ($\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$), 一般以鲜重计; c 表示蔬菜中重金属含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). 目前,联合国粮农组织和世界卫生组织 (FAO/WHO) 对部分重金属提出了人均日摄入可允许限量标准 (provisional tolerable daily intake, PTDI), FAO/WHO 食品添加剂联合专家委员会 (JECFA) 还对部分重金属提出了人体最大允许摄入量限值^[20].

目标危险系数 THQ (target hazard quotient, THQ) 和目标致癌风险 TR (target cancer risk, TR) 是由美国环保署 (US EPA) 推荐采用的健康风险评估模型。其中, THQ 是以污染物暴露剂量与参考剂量的比值来表征非致癌风险水平, 如果比值超过安全基准值 1.0, 说明该污染物对人体具有潜在健康风险; TR 则是以污染物暴露剂量与致癌强度指数的乘积反映致癌风险发生的可能性。THQ 和 TR 计算模型可以表示为^[21,22]:

$$THQ = \frac{EF \times ED \times FIR \times c}{RfD \times BW \times AT_n}$$

(5)

$$TR = \frac{EF \times ED \times FIR \times c \times CPS}{BW \times AT_c}$$

(6)

式中, EF 为暴露频率 ($d \cdot a^{-1}$); ED 为暴露年限 (a); FIR 和 c 的含义同上; RfD 为口服参考剂量 [$mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$]; BW 为人群的平均身体质量 (kg); AT_n 为非致癌源的平均暴露时间 ($ED \times 365 d \cdot a^{-1}$); CPS 表示致癌强度指数 ($kg \cdot d \cdot mg^{-1}$); AT_c 表示致癌效应持续时间 (期望寿命 $\times 365 d \cdot a^{-1}$)。

鉴于重金属对人体健康的影响一般是多种元素共同作用的结果, 则有^[21]:

$$TTHQ = THQ_1 + THQ_2 + \cdots + THQ_n$$

(7)

如果 $TTHQ \leq 1.0$, 表明没有明显的负面影响; $TTHQ > 1.0$, 表明对人体健康产生负面影响的可能性很大; 当 $TTHQ > 10.0$ 时, 表明存在慢性毒性效应^[23]。至于目标致癌风险 TR, 可根据美国环保署 (US EPA) 推荐的可接受风险值 ($10^{-6} \sim 10^{-4}$) 和国际辐射防护委员会 (ICRP) 推荐的最大可接受风险值 (5.0×10^{-5}), 判断长期食用受污染蔬菜导致的

人体致癌风险水平。

2 结果与分析

2.1 土壤与蔬菜重金属含量

研究区土壤重金属含量统计结果, 见表 1。铜陵市是一个酸雨污染较为严重的地区^[24]。土壤酸性环境条件提高了重金属的活性, 从而加大土壤重金属污染的生态风险水平^[25]。调查发现, 研究区菜地土壤 pH 值范围为 6.59~6.88, 平均值为 6.71, 属于中等偏酸水平。由表 1, 各种重金属元素平均含量均超过了铜陵市土壤元素背景值^[26], 且 As、Ni、Cu、Pb、Cd、Zn 平均值分别是背景值的 4.27、1.72、15.80、4.68、9.51、4.32 倍, 相应的超标点位所占比例分别为: 65.71%、85.71%、97.14%、80.0%、82.86%、80%; 6 种重金属污染程度排序: $Cu > Cd > Pb > Zn > As > Ni$ 。与文献^[27]中的二级标准相比 (pH 6.5~7.5), As、Ni、Cu、Pb、Cd、Zn 平均值分别是该标准值的 3.88、1.13、12.48、1.05、22.48、2.40 倍, 即均超过了二级标准, 特别是 As、Cu、Cd 和 Zn; 与中国的《绿色食品产地环境技术条件》(NY/T 391-2000) 相比, As、Cu、Pb、Cd 平均值分别是标准值的 4.85、20.80、6.27、22.48 倍, 即均显著超过了这一标准, 尤其是 Cd 和 Cu。

在 6 种金属元素中, 重金属 Ni 的变异系数显著低于其它元素, 表明不同采样点位之间土壤 Ni 含量的变化性相对较弱, 也即均匀性相对较好; 相应地, Cu 显著偏高的变异系数, 表明该元素空间分布的均匀性相对较差。总体上, 6 种重金属含量在空间上的变异性大小排序为: $Cu > Pb > As > Cd > Zn > Ni$ 。

表 1 菜地土壤重金属含量参数统计¹⁾

Table 1 Statistic values of heavy metal concentrations in soil from the fragmentary vegetable plots

项目	As	Ni	Cu	Pb	Cd	Zn
最大值/ $mg \cdot kg^{-1}$	441.38	101.46	11 423.65	1 406.54	28.946	2 842.29
最小值/ $mg \cdot kg^{-1}$	1.32	21.19	56.56	16.56	ND ¹⁾	27.65
平均值/ $mg \cdot kg^{-1}$	96.96	56.64	1247.82	313.59	6.743	600.96
变异系数/%	117.18	35.61	206.97	120.79	104.879	92.53
铜陵市土壤背景值/ $mg \cdot kg^{-1}$	22.70	33.00	79.00	67.00	0.709	139.00
国家土壤环境质量二级标准/ $mg \cdot kg^{-1}$	25.00	50.00	100.00	300.00	0.300	250.00
绿色食品产地环境技术条件/ $mg \cdot kg^{-1}$	20.00	—	60.00	50.00	0.300	—

1) ND 表示未检测出, 下同

由于我国食品卫生标准限值等针对的多是以鲜重计量的蔬菜重金属含量, 在测得蔬菜烘干样重金属含量测试结果后, 利用蔬菜含水率测定值, 计算得到蔬菜可食部分的重金属含量统计结果, 见表 2。由

变异系数可以看出, 35 个点位蔬菜中重金属 Zn 和 Ni 含量相对较为均匀, 其次是 As 和 Pb, 而 Cu 和 Cd 的空间变化性明显较强, 也即不同点位之间波动性较大。

表 2 蔬菜重金属含量参数统计(以鲜重计)

项目	As	Ni	Cu	Pb	Cd	Zn
最大值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	2.49	6.98	473.68	2.32	0.174	147.91
最小值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.24	1.82	4.74	0.23	ND	37.77
平均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.85	3.38	58.00	0.48	0.029	95.25
变异系数/%	61.18	38.46	161.66	75.00	137.931	28.02
食品中污染物限量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.05	0.60 ¹⁾	10.00 ²⁾	0.30	0.200	20.00 ³⁾
无公害蔬菜安全要求/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.50	—	—	0.20	0.050	—

1) FAO/WHO 食品法典委员会标准; 2) 《食品中铜限量卫生标准》(GB 15199-94); 3) 《食品中锌限量卫生标准》(GB 13106-94)

与中国《食品中污染物限量》标准(GB 2762-2005)相比,除 Cd 处在可接受范围内,蔬菜中 As、Ni 和 Pb 平均含量均超标,相应的超标倍数分别达 16.00、4.63、0.6 倍;与《农产品安全质量无公害蔬菜安全要求》标准(GB 18406.1-2001)相比,Cd 平均含量也低于标准值,As、Pb 平均含量则超标,超标倍数分别为 0.70 和 1.40 倍.根据《食品中污染物限量》等标准,计算得到 35 个蔬菜样本中 As、Ni、Cu、Pb、Cd 和 Zn 的超标率

分别达 100%、100%、91.43%、77.14%、0% 和 100%;而由《农产品安全质量无公害蔬菜安全要求》标准,35 个点位蔬菜中 As、Pb 和 Cd 的超标率分别为 71.43%、100% 和 14.29%.

2.2 蔬菜重金属污染评价

为评价蔬菜重金属污染程度,需要选择相应的污染评价标准.本研究采用的蔬菜重金属标准限值,见表 3.

表 3 蔬菜中重金属食品卫生标准限值

元素	标准限值	标准来源
As	$\leq 0.50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	《无公害蔬菜安全要求》(GB 18406.1-2001)
Ni	$\leq 0.60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	FAO/WHO 食品法典委员会标准
Cu	$\leq 10.00 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	《食品中铜限量卫生标准》(GB 15199-94)
Pb	$\leq 0.20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	《无公害蔬菜安全要求》(GB 18406.1-2001)
Cd	$\leq 0.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	《无公害蔬菜安全要求》(GB 18406.1-2001)
Zn	$\leq 20.00 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	《食品中锌限量卫生标准》(GB 13106-94)

根据表 3 的评价标准,利用式(1)和式(2),计算得到每个采样点位蔬菜中各重金属的单项污染指数和综合污染指数,结果见表 4.这里,编号 1~7、8~22 和 23~31 的采样点位分别位于惠溪河上游、中游和下游地区,编号 32~35 采样点位则处于铜陵市西北部冶金工业区内.

由表 4 的单项污染指数可以看出,研究区蔬菜重金属污染相当严重.在所有 35 个采样点位中,蔬菜中 As 超标(即单项污染指数 $P_i > 1$)的点位占 25 个,并以狼尾湖附近的隆门路青菜单项污染指数最大(4.98),狼尾湖上游焦化厂青菜和下游扫把沟菠菜也分别达 3.71 和 3.20.35 个点位蔬菜 Ni 均超标,最小污染指数高达 3.03,最大值为 11.63,出现在金岭道的蚕豆苗中,其次是店门口小学附近的蚕豆苗(10.44)和田屋小庄青菜(10.13),总体上不同点位蔬菜 Ni 污染程度较为接近.除编号为 1、6 和 8 采样点外,其他点位蔬菜 Cu 全部超标,其中金昌工业园青菜单项污染指数高达 47.37,扫把沟菠菜和青菜分别高达 27.27 和 25.64,狼尾湖雪菜和隆

门路青菜也都分别达 11.85 和 10.70,除此之外,其它点位基本维持在 1~4 之间.所有点位蔬菜 Pb 全部超标,焦化厂油菜中单项污染指数最大(11.62),其次是金岭道蚕豆苗(4.36)、店门口小学蚕豆苗(3.92)和田屋小庄青菜(3.80).而 Cd 仅在 5 个点位蔬菜中超标,扫把沟青菜单项污染指数最大(3.49),其次是金昌工业园的雪菜(3.26).35 个点位蔬菜 Zn 也都全部超标,单项污染指数变化范围为 1.89~7.40,最大单项污染指数出现在第四村民组的蚕豆苗中.由表 4,少数点位的极端情况明显抬高了蔬菜 Cu 污染指数均值,但就绝大多数点位看,蔬菜 Ni 和 Zn 污染可能更为严重一些.因此,判定蔬菜中 6 种重金属污染程度排序为: $\text{Ni} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{As} > \text{Cd}$.

就综合污染指数来看,除编号 3 污染指数 < 3.0 ,即属于中污染外,其他所有采样点蔬菜均 > 3.0 ,达到重污染程度,最高值甚至高达 34.34.惠溪河沿岸蔬菜重金属综合污染指数平均值大小排序为:上游(3.98) $<$ 中游(5.70) $<$ 下游(8.37),且蔬

表 4 蔬菜重金属污染评价结果

Table 4 Single factor index and integrated pollution index of heavy metals-contaminated vegetables

编号	具体位置	蔬菜	单项污染指数						综合指数
			As	Ni	Cu	Pb	Cd	Zn	
1	大倪村	青菜	1.12	7.54	1.00	2.83	0.27	3.28	5.66
2	大倪村	韭菜	1.26	4.70	3.75	1.76	0.12	3.89	3.79
3	大倪村	青菜	1.14	3.44	1.50	1.29	0.28	3.52	2.82
4	小倪村	蚕豆苗	0.58	4.00	1.21	1.50	0.04	1.89	3.03
5	小倪村	蚕豆苗	1.44	4.37	1.64	1.64	—	3.41	3.56
6	第四村民组	青菜	0.48	3.99	0.71	1.50	0.15	4.14	3.20
7	第四村民组	蚕豆苗	1.44	7.30	1.91	2.74	0.08	7.40	5.78
8	冶金排污口	油菜	0.51	8.11	0.47	3.04	0.43	3.11	6.02
9	冶金排污口	茼蒿	2.49	3.94	1.58	1.48	0.31	5.85	4.53
10	冶金排污口	青菜	1.83	6.63	1.47	2.49	0.27	4.34	5.10
11	冶金排污口	韭菜	0.79	5.61	1.87	2.10	—	4.08	4.46
12	田屋小庄	青菜	2.70	10.13	2.49	3.80	0.09	6.11	7.76
13	店门口小学	蚕豆苗	1.99	10.44	4.38	3.92	—	6.74	8.34
14	店门口小学	青菜	1.42	3.03	2.91	1.14	0.07	4.08	3.25
15	店门口小学	蒜苗	0.78	4.04	1.86	1.51	0.08	3.00	3.15
16	焦化厂	青菜	1.84	4.19	3.71	1.57	0.32	4.30	3.57
17	焦化厂	青菜	2.35	3.53	3.59	1.32	0.41	6.06	4.74
18	焦化厂	青菜	2.74	3.66	3.34	1.37	0.37	4.95	4.00
19	焦化厂	青菜	3.71	9.37	5.37	3.51	0.89	5.84	7.44
20	焦化厂	油菜	0.61	4.57	2.23	11.62	—	3.54	8.81
21	金岭道	青菜	2.13	6.81	4.81	2.55	0.56	4.87	5.45
22	金岭道	蚕豆苗	2.48	11.63	3.63	4.36	0.25	6.67	8.91
23	有机化工厂	青菜	0.56	5.38	2.78	2.02	0.78	4.65	4.25
24	有机化工厂	油菜	1.39	6.28	2.70	2.36	0.88	4.05	4.90
25	狼尾湖	雪菜	2.89	5.62	11.85	2.11	0.59	5.65	5.24
26	狼尾湖	青菜	1.23	6.10	3.39	2.29	1.63	5.51	4.92
27	扫把沟	菠菜	3.20	4.53	27.27	1.70	1.05	6.38	19.97
28	扫把沟	青菜	2.48	5.65	25.64	2.12	3.49	5.99	18.90
29	建华新村	蚕豆苗	1.19	3.44	2.10	1.29	0.52	6.03	4.60
30	建华新村	青菜	0.49	4.87	1.21	1.83	0.41	5.59	4.30
31	隆门路	青菜	4.98	3.58	10.70	1.34	0.85	5.49	8.21
32	皖江集团	青菜	0.58	4.24	3.59	1.59	0.58	4.54	3.67
33	金昌工业园	雪菜	2.13	4.86	5.43	1.82	3.26	4.66	4.64
34	金昌工业园	青菜	1.34	6.81	47.37	2.55	1.22	5.08	34.34
35	金昌工业园	蒜苗	0.98	4.94	3.54	1.85	0.14	2.01	3.84
	总平均值		1.69	5.64	5.80	2.40	0.66	4.76	6.72

菜中 As、Cu、Cd 和 Zn 也都具有这一变化特征。总体上,青菜、韭菜、蚕豆苗、油菜、茼蒿、蒜苗、雪菜和菠菜等 8 种蔬菜重金属污染综合指数平均值分别为 7.31、4.13、5.70、6.58、4.53、3.50、4.94 和 19.97,由此得到 8 种蔬菜重金属污染程度排序,即菠菜>青菜>油菜>蚕豆苗>雪菜>茼蒿>韭菜>蒜苗。由于菠菜、青菜、油菜等基本上都是当地居民日常生活中的主要蔬菜类型,从而加大了公众身体健康受损的可能。8 种蔬菜中每种重金属的单项及综合污染指数情况,见图 2。

2.3 蔬菜重金属富集系数

蔬菜重金属含量水平及其对土壤重金属的富集

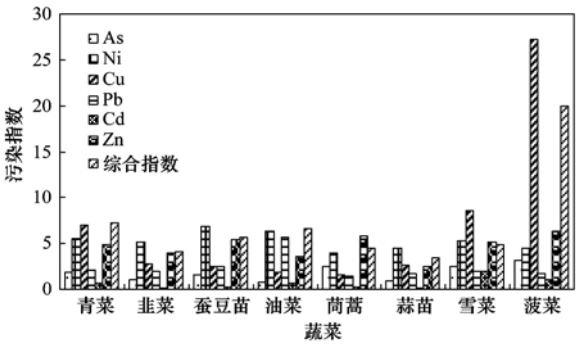


图 2 不同蔬菜的重金属污染指数

Fig. 2 Pollution index of heavy metals-contaminated vegetables

能力,直接关系到蔬菜生产和食用安全。本研究中,8

种蔬菜对各种重金属的富集系数,见表 5. 其中,Zn 的富集系数相对最高,有 27 个点位富集系数超过 0.10,且在编号 6、7、23 和 31 点位,富集系数值超过了 1.0,最高值达 3.972,明显较北京地区叶菜类蔬菜 Zn 富集系数高^[16]. 与文献[17~19]的北京地区叶菜类蔬菜相比,本研究区蔬菜 Ni 的富集系数偏高,而 Cu 和 As 的富集系数则大体相当. 此外,As 的富集系数也与蔡保松等^[28]的研究结果较为接近. Pb 平均富

集系数为 0.002,最大值仅为 0.024,这与文献[29,30]结果相似. 一般认为,重金属 Cd、Zn、Cu 活性较强,较易为植物吸收^[31]. 但在本研究中,蔬菜 Cd 的富集系数并不高,平均为 0.005,较 Zn、Ni、Cu 低 1~2 个数量级. 总体上,研究区蔬菜对 6 种重金属的富集能力排序为:Zn>Ni>Cu>As>Cd>Pb. 当然,蔬菜对重金属的富集能力取决于多种影响因素,因而上述结论只能作为一种大致的趋势分析.

表 5 研究区不同蔬菜重金属富集系数¹⁾

		Table 5 Bio-accumulation factor of heavy metals in vegetables					
蔬菜	数值	富集系数 BAF					
		As	Ni	Cu	Pb	Cd	Zn
青菜 (n=18)	范围	0.002~0.134	0.027~0.168	0.020~0.296	0.001~0.024	NA ¹⁾ ~0.035	0.072~3.972
	平均值	0.025	0.066	0.092	0.004	0.008	0.564
油菜 (n=3)	范围	0.001~0.004	0.042~0.057	0.008~0.026	0.001~0.008	NA~0.004	0.066~0.078
	平均值	0.003	0.050	0.020	0.004	0.003	0.072
雪菜 (n=2)	范围	0.036~0.230	0.055~0.108	0.034~0.201	0.001~0.003	0.008~0.013	0.122~0.591
	平均值	0.133	0.081	0.118	0.002	0.011	0.357
蒜苗 (n=2)	范围	0.003~0.017	0.037~0.055	0.022~0.036	0.001~0.002	0.001~0.001	0.052~0.149
	平均值	0.010	0.046	0.029	0.001	0.001	0.101
韭菜 (n=2)	范围	0.047~0.220	0.077~0.110	0.076~0.356	0.005~0.008	NA	0.256~0.677
	平均值	0.133	0.094	0.216	0.006	NA	0.467
菠菜 (n=1)	范围	0.013	0.037	0.024	0.001	0.002	0.108
	平均值	0.013	0.037	0.024	0.001	0.002	0.108
茼蒿 (n=1)	范围	0.003	0.023	0.015	0.001	0.001	0.041
	平均值	0.003	0.023	0.015	0.001	0.001	0.041
蚕豆苗 (n=6)	范围	0.008~0.220	0.040~0.207	0.039~0.214	0.001~0.012	NA~0.004	0.098~1.093
	平均值	0.064	0.091	0.095	0.006	0.003	0.469
总平均值		0.009	0.060	0.046	0.002	0.005	0.158

1) NA 表示因土壤或蔬菜中重金属元素含量未检出而无法计算相应的富集系数(下同)

2.4 重金属污染健康风险评估

考虑到蚕豆苗不是可食作物,在健康风险评价中不计蚕豆苗的影响. 于是,得到茎叶类蔬菜地上部分重金属 As、Ni、Cu、Pb、Cd 和 Zn 含量平均值,分别为 0.86、3.23、64.87、0.47、0.034 和 92.80 mg·kg⁻¹. 至于风险评估模型参数,参照文献[32,33],对成人蔬菜日摄取速率取 FIR=375 g·d⁻¹(以鲜重计);考虑到中国成年男性平均体重为 62.7 kg,女性为 54.5 kg,这里取成人平均体重 BW=60 kg. 鉴于我国男性人均期望寿命为 69.6 岁,女性为 73.3 岁,考虑将两者的平均值(即 71.4 岁)作为期望寿命^[34];暴露频率取 EF=365 d·a⁻¹. 参照文献[7,35],将期望寿命作为暴露年限,取 ED=71.4 a,则非致癌源的平均暴露时间 AT_n=71.4×365 d·a⁻¹. 同样,致癌效应持续时间也取 AT_c=71.4×365 d·a⁻¹. 至于口服参考剂量 RfD,对 As、Ni、Cu、Pb、Cd 和 Zn 分别取^[36,37]:3×10⁻⁴、2×10⁻²、4×10⁻²、4×10⁻³、1×10⁻³和 0.3 mg·(kg·d)⁻¹;至于

致癌强度指数 CPS,有足够的证据表明 As 可能对人体造成致癌风险,不妨对 As 取 CPS=1.50 kg·d·mg⁻¹^[37,38].

根据选定的模型参数,由式(4)定量估算成人每日经由蔬菜途径进入人体的 As、Ni、Cu、Pb、Cd 和 Zn,分别为 324.38、1 211.25、24 326.25、176.25、12.75 和 34 800 μg·d⁻¹. FAO/WHO 提出的重金属 Ni、Cu、Pb、Cd 和 Zn 人均日摄入可允许限量标准(PTDI)分别为^[20]:1 200、6 500、200、57~71、33 000 μg·d⁻¹. 显然,蔬菜中 Pb 和 Cd 处于可接受范围,Ni 和 Zn 稍微超标,Cu 则远超出了该标准. 根据 JECFA 提出的标准,人体最大允许 As 摄入量为 2 μg·(kg·d)⁻¹(以 60 kg 成人体重计)^[39]. 若将研究区通过蔬菜摄入人体的 As 量(324.38 μg·d⁻¹)除以成人平均体重 60 kg,得到摄入水平为 5.41 μg·(kg·d)⁻¹,显著超过了该限量. 因此,从日均摄入人体重金属量来看,As 和 Cu 是超标最严重的两种元素.

根据研究区蔬菜重金属平均含量及上述参数,由式(5)可以计算得到长期食用这些蔬菜可能带来的身体受损风险,其中 As、Ni、Cu、Pb、Cd 和 Zn 可能造成的目标危害系数 THQ 分别为 17.92、1.01、10.14、0.73、0.21 和 1.93,总目标危害系数 TTHQ = 31.94。由于 TTHQ > 10.0,因此蔬菜具有慢性毒性风险效应。这里,除 Pb 和 Cd 外,其他 4 种重金属的 THQ 均超过了安全基准值 1.0,特别是 As 和 Cu。各重金属对 TTHQ 的贡献率大小,见图 3。

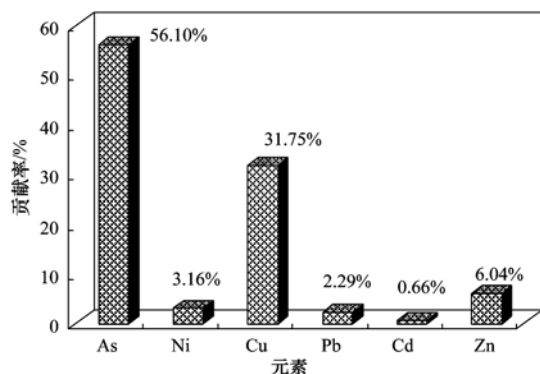


图 3 不同重金属非致癌风险贡献率

Fig. 3 Contribution of each heavy metal to non-cancer risk

同样,由式(6)可以计算得到 As 带来的目标致癌风险 TR,即 $TR = 8.06 \times 10^{-3}$,远超出了 USEPA 推荐的可接受风险范围 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 和国际辐射防护委员会(ICRP)推荐的最大可接受风险值 5.0×10^{-5} ,表明长期食用研究区蔬菜将是十分危险的。

3 讨论

目前,中国已基本建成了农产品质量标准体系,但仍然存在诸如体系不完善,配套性、科学性、实用性有待进一步提高等许多问题^[40]。与 Cd、Pb、As、Ni 等元素不同,重金属 Cu、Zn 是人体必需的微量元素。因此,针对是否应将 Cu、Zn 列入污染物名单,国内外意见都还不很统一。目前,国家卫生部正在公开征求废止《食品中铜限量卫生标准》(GB 15199-94)和《食品中锌限量卫生标准》(GB 13106-91)等标准的意见,引起了很大争议。尽管 Cu 和 Zn 是人体必需元素,但这并不意味着 Cu、Zn 对人体无害。实际上,摄取过量的 Cu、Zn 同样可能对人体造成伤害。如,人体内残存 Cu 量过高,将可能导致身体内脏器受损,特别是肝和胆,也有可能引起急性 Cu 中毒,引起急性肠胃炎等。因此,深圳市专门就无公害蔬菜设定了 Cu 限量标准^[41]。同样,过量的 Zn 也会影响人体健康,这是因为过量的 Zn 易引起

与 Zn 相结合的其他营养元素(如 Ca、P、Fe 等)的缺乏,并导致中毒^[42]。铜陵是一座以铜矿开采、选洗、冶炼、加工及贸易为主导产业的典型有色金属矿业城市,有着延绵 3 000 多年的采、冶铜历史,并形成了当地独特的铜文化。但与此同时,大量残存的尾矿废渣及堆放场地,也成为威胁当地生态安全和公众身体健康的潜在不利因素,本研究所得 THQ 和 TR 很好地印证了这一观点。铜陵各矿集区基本都为伴生铜、金、银、铁、铅、锌等多金属元素矿山,尾矿库尾砂及废渣中 Cu、Pb、Zn、As、Cd 等含量颇高。铜陵市现有建成区,很大一部分就是在原有铜矿冶炼尾矿废渣堆放场地上建设起来的,由于未能及时有效地清除干净,加之城区内有色金属冶炼、加工等企业插花式的分布格局,致使土壤和地表灰尘本底值中 Cu、Zn 等含量较高。毫无疑问,相对于非矿业城市地区,铜陵市城区居民面临的重金属污染风险明显偏高。笔者以为,在这一背景下,考虑蔬菜中 Cu、Zn 带来的健康影响是很有必要的。

尽管本研究所得的蔬菜重金属富集系数与其他学者非常接近,但因研究区土壤重金属本底值较高,致使单位质量蔬菜重金属含量很是可观,这从蔬菜中 Ni、Pb、Zn 单项污染指数全部超过 1.0,As 和 Cu 单项污染指数几乎都大于 1.0、综合污染指数几乎都超过 3.0,可以得到证明。虽然蔬菜可以富集空气、水和土壤中的重金属,但就本研究区域来看,土壤可能是蔬菜重金属的最主要来源。惠溪河为山间溪流,上游源头和中游各有一座小型金矿,沿岸零星菜地蔬菜浇灌用水基本来自河水,因此对菜地土壤重金属富集起到一定的作用。惠溪河下游的狼尾湖及周边地区毗邻长江,此地原本是铜矿冶炼废渣堆放场地,由于未能有效清除冶铜残渣,致使土壤重金属含量明显偏高,这可能正是惠溪河下游蔬菜重金属污染明显高于中、上游的原因所在。

图 4 展示了 35 个点位蔬菜中重金属 As、Ni、Cu、Pb、Cd 和 Zn 综合污染指数的相对大小比较结果。Cu 综合污染指数显著高于其他 5 种元素,相应的污染程度排序为:Cu > Ni > Pb > Zn > As > Cd。这与前述所得的污染程度排序结果,即 Ni > Zn > Cu > Pb > As > Cd 存在出入。究其原因,笔者以为,这是由内梅罗综合污染指数过于强调最大值的作用导致的。由表 4 还可以看出,Cu 和 Ni 平均值相差不大,但 Cu 的最大单项污染指数(47.37)显著高于 Ni(11.63),使得两者的综合污染指数差异悬殊。Pb 和 Zn 之间也因同样原因,出现排序颠倒的情况。笔

者以为,就本研究来看,重金属污染程度排序: $\text{Ni} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{As} > \text{Cd}$ 或许可以更好地反映研究区蔬菜重金属污染的实际状况。

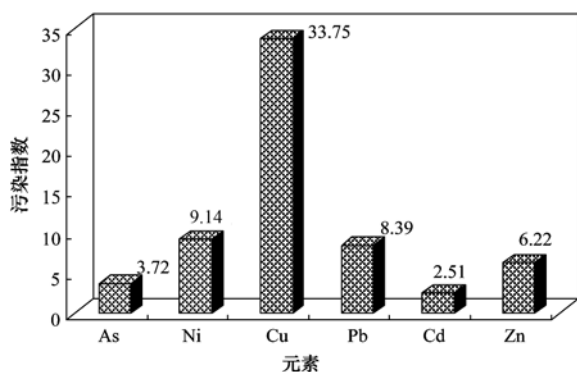


图4 蔬菜重金属综合污染指数

Fig. 4 Integrated pollution index of heavy metals in vegetables

4 结论

(1)铜陵市惠溪河流域及冶金工业区零星菜地土壤重金属污染较为严重,且平均值都显著超出了铜陵市土壤元素背景值,相应的污染程度排序为: $\text{Cu} > \text{Cd} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{As} > \text{Ni}$; 8种蔬菜重金属污染综合指数平均值分别为7.31、4.13、5.70、6.58、4.53、3.50、4.94和19.97,均达到重污染水平,相应的污染程度排序为:菠菜>青菜>油菜>蚕豆苗>雪菜>茼蒿>韭菜>蒜苗。

(2)成人经由蔬菜食用途径摄入的重金属As、Ni、Cu、Pb、Cd和Zn,分别为324.38、1211.25、24326.25、176.25、12.75和34800 $\mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ 。其中,Cu远超FAO/WHO提出的人均日摄入可允许限量标准,As也显著超过JECFA提出的人体最大允许摄入量限值。

(3)重金属As、Ni、Cu、Pb、Cd和Zn相应的THQ值分别为17.92、1.01、10.14、0.73、0.21和1.93。其中,As和Cu的非致癌风险贡献率分别高达56.10%和31.75%,是研究区蔬菜重金属危害的最主要元素。由于总目标危害系数 $\text{TTHQ} > 10.0$,因此蔬菜具有慢性毒性风险效应。

(4)蔬菜中As带来的目标致癌风险TR达 8.06×10^{-3} ,远超过US EPA推荐的可接受风险范围 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 和国际辐射防护委员会(ICRP)推荐的最大可接受风险值 5.0×10^{-5} ,表明长期食用研究区零星菜地蔬菜,可能带来较高的健康风险。

参考文献:

[1] Guttormsen G, Singh B R, Jeng A S. Cadmium concentration in vegetable crops grown in a sandy soil as affected by Cd levels in

fertilizer and soil pH[J]. Fertilizer Research, 1995, 41(1): 27-32.

[2] Emese S, Rita A, Katalin G, et al. Change of bioaccumulation of toxic metals in vegetables[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2009, 40(1-6): 285-293.

[3] Scheifler R, Gomot-de Vaulfleur A, Badot P M. Transfer of cadmium from plant leaves and vegetable flour to the snail *Helix aspersa*: bioaccumulation and effects[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2002, 53(1): 148-153.

[4] Sharma R K, Agrawal M, Marshall F M. Heavy metal (Cu, Zn, Cd and Pb) contamination of vegetables in urban India: a case study in Varanasi[J]. Environmental Pollution, 2008, 154(2): 254-263.

[5] 宋波,高定,陈同斌,等.北京市菜地土壤和蔬菜铬含量及其健康风险评估[J].环境科学学报,2006,26(10):1707-1715.

[6] Mansour S A, Gad M F. Risk assessment of pesticides and heavy metals contaminants in vegetables: a novel bioassay method using *Daphnia magna* Straus[J]. Food and Chemical Toxicology, 2010, 48(1): 377-389.

[7] Zheng N, Wang Q C, Zheng D M. Health risk of Hg, Pb, Cd, Zn, and Cu to the inhabitants around Huludao Zinc Plant in China via consumption of vegetables[J]. Science of the Total Environment, 2007, 383(1-3): 81-89.

[8] Bacigalupo C, Hale B. Human health risks of Pb and As exposure via consumption of home garden vegetables and incidental soil and dust ingestion: a probabilistic screening tool[J]. Science of the Total Environment, 2012, 423(1): 27-38.

[9] GB 18406.1-2001, 农产品安全质量无公害蔬菜安全要求[S].

[10] GB 2762-2005, 食品中污染物限量[S].

[11] NY/T 391-2000, 绿色食品产地环境技术条件[S].

[12] 周长进,董锁成,金贤峰,等.铜陵市矿业型工业城市发展中的环境问题及对策[J].资源调查与环境,2009,30(4):278-284.

[13] 殷汉琴,周涛发,陈永宁,等.铜陵市大气降尘中Cd元素污染特征及其对土壤的影响[J].地质论评,2011,57(2):218-222.

[14] 白晓宇,袁峰,李湘凌,等.铜陵矿区土壤重金属元素的空间变异及污染分析[J].地学前缘,2008,15(5):256-263.

[15] 崔旭,葛元英,张小红.晋中市部分蔬菜中重金属含量及其健康风险[J].中国农学通报,2009,25(21):335-338.

[16] 黄泽春,宋波,陈同斌,等.北京市菜地土壤和蔬菜的锌含量及其健康风险评估[J].地理研究,2006,25(3):439-448.

[17] 陈同斌,宋波,郑袁明,等.北京市菜地土壤和蔬菜镍含量及其健康风险[J].自然资源学报,2006,21(3):349-361.

[18] 郑袁明,宋波,陈同斌,等.北京市菜地土壤和蔬菜中铜含量及其健康风险[J].农业环境科学学报,2006,25(5):1093-1101.

[19] 陈同斌,宋波,郑袁明,等.北京市蔬菜和菜地土壤砷含量及其健康风险分析[J].地理学报,2006,61(3):297-310.

- [20] Ostapczuk P, Valenta P, Rützel H, *et al.* Application of differential pulse anodic stripping voltammetry to the determination of heavy metals in environmental samples [J]. Science of the Total Environment, 1987, **60**(1): 1-16.
- [21] 郑娜, 王起超, 郑冬梅. 基于 THQ 的锌冶炼厂周围人群食用蔬菜的健康风险分析[J]. 环境科学学报, 2007, **27**(4): 672-678.
- [22] Han B C, Jeng W L, Chen R Y, *et al.* Estimation of target hazard quotients and potential health risks for metals by consumption of seafood in Taiwan[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 1998, **35**(4): 711-720.
- [23] Paustenbach D J. Human and ecological risk assessment: theory and practice[M]. New York: John Wiley and Sons, 2002. 85-150.
- [24] 石春娥, 邱明燕, 张爱民, 等. 安徽省酸雨分布特征和发展趋势及其影响因子[J]. 环境科学, 2010, **31**(6): 1675-1681.
- [25] Sauvé S, Hendershot W, Allen H E. Solid-solution partitioning of metals in contaminated soils: dependence on pH, total metal burden, and organic matter [J]. Environmental Science and Technology, 2000, **34**(7): 1125-1131.
- [26] 安徽省地质调查院. 安徽省江淮流域生态地球化学调查[R]. 合肥, 2011.
- [27] GB 15618-1995, 国家土壤环境质量标准[S].
- [28] 蔡保松, 陈同斌, 廖晓勇, 等. 土壤砷污染对蔬菜砷含量及食用安全性的影响[J]. 生态学报, 2004, **24**(4): 711-717.
- [29] 邹晓锦, 仇荣亮, 周小勇, 等. 蔬菜重金属暴露接触对大宝山矿区及周边居民的健康风险[J]. 地理研究, 2008, **27**(4): 855-862.
- [30] 陈同斌, 宋波, 郑袁明, 等. 北京市菜地土壤和蔬菜铅含量及其健康风险评估[J]. 中国农业科学, 2006, **39**(8): 1589-1597.
- [31] 谢正苗, 李静, 陈建军, 等. 中国蔬菜地土壤重金属健康风险基准的研究[J]. 生态毒理学报, 2006, **1**(2): 172-179.
- [32] Wang X L, Sato T, Xing B S, *et al.* Health risks of heavy metals to the general public in Tianjing, China via consumption of vegetables and fish[J]. Science of the Total Environment, 2005, **350**(1-3): 28-37.
- [33] Li Y, Wang Y B, Gou X, *et al.* Risk assessment of heavy metals in soils and vegetables around non-ferrous metals mining and smelting sites, Baiyin, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2006, **18**(6): 1124-1134.
- [34] 李如忠, 周爱佳, 童芳, 等. 合肥市城区地表灰尘重金属分布特征及环境健康风险评价[J]. 环境科学, 2011, **32**(9): 2661-2668.
- [35] Bennett D H, Kastenber W E, McKone T E. A multimedia, multiple pathway risk assessment of atrazine: the impact of age differentiated exposure including joint uncertainty and variability [J]. Reliability Engineering and System Safety, 1999, **63**(2): 185-198.
- [36] US EPA (United States Environmental Protection Agency). Handbook for non-cancer health effects evaluation [S]. Washington DC: US Environmental Protection Agency, 2000.
- [37] Ferré-Huguet N, Martí-Cid R, Schuhmacher M, *et al.* Risk assessment of metals from consuming vegetables, fruits and rice grown on soils irrigated with waters of the ebro river in Catalonia, Spain[J]. Biology Trace Element Research, 2008, **123**(1-3): 66-79.
- [38] Han B C, Jeng W L, Hung T C, *et al.* Estimation of metal and organochlorine pesticide exposures and potential health threat by consumption of oysters in Taiwan[J]. Environmental Pollution, 2000, **109**(1): 147-156.
- [39] 师荣光, 周其文, 赵玉杰, 等. 不同土地利用类型下土壤-作物砷的积累特征及健康风险[J]. 土壤学报, 2011, **48**(4): 751-758.
- [40] 贾文坤, 王晶, 钱原铭, 等. 农产品污染物限量标准建设[J]. 中国农学通报, 2011, **27**(17): 168-173.
- [41] DB 440300T/21-2001, 无公害蔬菜[S].
- [42] 滕葭, 柳琪, 李倩, 等. 重金属污染对农产品的危害与风险评估[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010. 63-70.

CONTENTS

Estimation of PM _{2.5} over Eastern China from MODIS Aerosol Optical Depth Using the Back Propagation Neural Network	GUO Jian-ping, WU Ye-rong, ZHANG Xiao-ye, <i>et al.</i>	(817)
Comparison of Atmospheric Particulate Matter and Aerosol Optical Depth in Beijing City	LIN Hai-feng, XIN Jin-yuan, ZHANG Wen-yu, <i>et al.</i>	(826)
Impacts of Meteorological Factors on Atmospheric Methane Mole Fractions in the Background Area of Yangtze River Delta	PU Jing-jiao, XU Hong-hui, GU Jun-qiang, <i>et al.</i>	(835)
Dispersion and Analysis of Odor Pollution in Landfill Area Under the Enclosed Operation Condition	LU Peng, WU Shi-xing, DAI Zhi-feng, <i>et al.</i>	(842)
Distribution Characteristics and Sea-Air Fluxes of Volatile Halocarbons in the East China Sea in Winter	HE Zhen, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng	(849)
Intra- and Inter-annual Variabilities of Particulate Organic Matter in the Mirs Bay from 2000 to 2010	LI Xu-lu, ZHOU Yi-pin, XIA Hua-yong	(857)
Phytoplankton Assemblages and Their Relation to Environmental Factors by Multivariate Statistic Analysis in Bohai Bay	ZHOU Ran, PENG Shi-tao, QIN Xue-bo, <i>et al.</i>	(864)
Characteristics and Evolution of Hydrochemical Compositions of Freshwater Lake in Tibetan Plateau	WANG Peng, SHANG Ying-nan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i>	(874)
Estimation of Nonpoint Source Pollutant Loads and Optimization of the Best Management Practices (BMPs) in the Zhangweinan River Basin	XU Hua-shan, XU Zong-xue, LIU Pin	(882)
An Object-Oriented Intelligent Engineering Design Approach for Lake Pollution Control	ZOU Rui, ZHOU Jing, LIU Yong, <i>et al.</i>	(892)
Contribution of Plant Litters to Sediments Organic Matter in Jiulong River Estuary Wetland	LUO Zhuang-xi, QIU Zhao-zheng, WANG Zhen-hong, <i>et al.</i>	(900)
Application of Tiered Approach to Assess the Impact of Backfilling Remediated Soil on Groundwater	ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i>	(907)
Removal of Nitrate from Groundwater Using Permeable Reactive Barrier	LI Xiu-li, YANG Jun-jun, LU Xiao-xia, <i>et al.</i>	(914)
Research on Pollution Load of Sediments in Storm Sewer in Beijing District	LI Hai-yan, XU Bo-ping, XU Shang-ling, <i>et al.</i>	(919)
Occurrence and Risk Assessment of Five Selected PPCPs in Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water	WEN Zhi-hao, DUAN Yan-ping, MENG Xiang-zhou, <i>et al.</i>	(927)
Microbial Risk Assessment of Urban Water Bodies for Aesthetical and Recreational Uses	SUN Fu, SHA Jing, ZHANG Yi-fan, <i>et al.</i>	(933)
Study on Removal of Di-(2-Ethylhexyl) Phthalate by Using of Small-Scale Biological Aerated Filter	LI Wei, ZHAO Jing, YU Jian, <i>et al.</i>	(943)
Mechanism of Membrane Fouling and Filtration Characteristics in a Membrane Bioreactor for Industrial Wastewater Treatment	FAN Ju-hong, YU Su-lin, ZHANG Pei-shuai, <i>et al.</i>	(950)
Enhanced Electro-Chemical Oxidation of Acid Red 3R Solution with Phosphotungstic Acid Supported on γ -Al ₂ O ₃	YUE Lin, WANG Kai-hong, GUO Jian-bo, <i>et al.</i>	(955)
Degradation Kinetics of Activated Carbon Catalyzed Persulfate Oxidation Orange G	YANG Mei-mei, ZHOU Shao-qi, LIU Dan, <i>et al.</i>	(962)
Study on the Start-up of the Anaerobic Baffled Reactor for Treating Alkali-dewighting and Dyeing-printing Wastewater	YANG Bo, ZHONG Qi-jun, LI Fang, <i>et al.</i>	(968)
Study on the Pollutants Removal Performance Along the Advanced Treatment in Tannery Wastewater by O ₃ -BAF	YU Bin, LIU Rui, CHENG Jia-di, <i>et al.</i>	(974)
Effect of Pilot UASB-SFSBR-MAP Process for the Large Scale Swine Wastewater Treatment	WANG Liang, CHEN Chong-jun, CHEN Ying-xu, <i>et al.</i>	(979)
Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Municipal Wastewater and Studies on Its Characteristics Under the Continuous Flow	NIU Shu, DUAN Bai-chuan, ZHANG Zuo-li, <i>et al.</i>	(986)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (I) : Model Constitution	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang	(993)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (II) : Process Simulation	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang	(998)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (III) : Model Application	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang	(1004)
Comparative Study on Water-air CO ₂ , CH ₄ Flux in Two Tributaries in the Three Gorges Reservoir, China	LI Zhe, BAI Lei, GUO Jin-song, <i>et al.</i>	(1008)
Factors Influencing the Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Regimes	CHEN Shu-tao, LIU Qiao-hui, HU Zheng-hua, <i>et al.</i>	(1017)
Differences in Soil Respiration Between Cropland and Grassland Ecosystems and Factors Influencing Soil Respiration on the Loess Plateau	ZHOU Xiao-gang, ZHANG Yan-jun, NAN Ya-fang, <i>et al.</i>	(1026)
Application and Benefit Evaluation of Tiered Health Risk Assessment Approach on Site Contaminated by Benzene	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, LIANG Jin, <i>et al.</i>	(1034)
History of Heavy Metal Pollution from Tidal Flat in Haizhou Bay	ZHANG Rui, ZHANG Fan, LIU Fu-cheng, <i>et al.</i>	(1044)
Accumulation, Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Surface Sediment of Caohai Plateau Wetland, Guizhou Province	ZHANG Qing-hai, LIN Chang-hu, TAN Hong, <i>et al.</i>	(1055)
Assessment and Correlation Analysis of Heavy Metals Pollution in Soil of Dajinshan Island	CHENG Fang, CHENG Jin-ping, SANG Heng-chun, <i>et al.</i>	(1062)
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Stream Sediments from a Typical Nonferrous Metals Mining City	LI Ru-zhong, JIANG Yan-min, PAN Cheng-rong, <i>et al.</i>	(1067)
Contamination and Health Risk for Heavy Metals via Consumption of Vegetables Grown in Fragmentary Vegetable Plots from a Typical Nonferrous Metals Mine City	LI Ru-zhong, PAN Cheng-rong, XU Jing-jing, <i>et al.</i>	(1076)
Correlativity Study of the Distribution of Soil Magnetic Susceptibility and the Heavy Metal Contents in Xi'an City	CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei, YANG Guang	(1086)
Distribution Characteristics and Environmental Significance of Heavy Metals in Soil Particle Size Fractions from Tropical Forests in China	GONG Cang, XU Dian-dou, CHENG Hang-xin, <i>et al.</i>	(1094)
Study on Phosphorus Adsorption Characteristic of Sediments in an Ecological Ditch	ZHANG Shu-nan, JIA Zhao-yue, XIAO Run-lin, <i>et al.</i>	(1101)
Fractions and Adsorption Characteristics of Phosphorus on Sediments and Soils in Water Level Fluctuating Zone of the Pengxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir	SUN Wen-bin, DU Bin, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i>	(1107)
Sorption Behavior of Triton X-100 on Loess and Affecting Factors	ZHONG Jin-kui, ZHAO Bao-wei, ZHU Kun, <i>et al.</i>	(1114)
Residual Levels in Air, Soil and Soil-Air Exchange of Organochlorine Pesticides in Hami Region of Xinjiang and Its Potential Ecological Risk	MA Zi-long, MAO Xiao-xuan, DING Zhong-yuan, <i>et al.</i>	(1120)
Levels and Sources of Decabromodiphenyl Ether and Dechlorane Plus in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China	HE Chang, JIN Jun, MA Zhao-hui, <i>et al.</i>	(1129)
Vertical Distribution of PBDEs and DL-PCBs in Sediments of Taihu Lake	MA Zhao-hui, JIN Jun, QI Xue-kui, <i>et al.</i>	(1136)
Characteristics of Organic Pollutants in the Sediments from a Typical Electronics Industrial Zone	LIU Jin, DENG Dai-yong, XU Mei-ying, <i>et al.</i>	(1142)
Emission Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Exhaust Particles from a Diesel Car	TAN Pi-qiang, ZHOU Zhou, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i>	(1150)
Characterization of PAHs in Fly Ashes from Coke Production	MU Ling, PENG Lin, LIU Xiao-feng, <i>et al.</i>	(1156)
Comparison of PAHs Distribution in Stabilized Sludge by Sludge Drying Bed and Reed Bed	CUI Yu-bo, SUN Hong-jie, RAN Chun-qiu, <i>et al.</i>	(1161)
Effects of Adsorbents on Partitioning and Fixation of Heavy Metals in the Incineration Process of Sewage Sludge	LIU Jing-yong, SUN Shui-yu, CHEN Tao	(1166)
Environmental Toxicity of Waste Foundry Sand	ZHANG Hai-feng, WANG Yu-jue, WANG Jin-lin, <i>et al.</i>	(1174)
Construction and Properties of a Microbial Whole-cell Sensor CB10 for the Bioavailability Detection of Cr ⁶⁺	HOU Qi-hui, MA An-zhou, ZHUANG Xu-liang, <i>et al.</i>	(1181)
Structure and Dynamics of Microbial Community in the Denitrifying Sulfide Removal Process	YU Hao, WANG Ai-jie, CHEN Chuan	(1190)
Effects of Physico-chemical Parameters on the Abundance of the Denitrification-associated Genes <i>nirK</i> , <i>nirS</i> and <i>nosZ</i> During Agricultural Waste Composting	HU Chun-xiao, CHEN Yao-ning, ZHANG Jia-chao, <i>et al.</i>	(1196)
Impact of PAHs on the Expression of PRDX in Earthworm (<i>Eisenia fetida</i>)	LIN Kang-li, ZHENG Sen-lin, SONG Yu-fang, <i>et al.</i>	(1204)
Preparation of OMC-Au/L-Lysine/Au Modified Glassy Carbon Electrode and the Study on Its Detection Response to Hydroquinone and Catechol	ZHOU Yao-yu, TANG Lin, LI Zhen, <i>et al.</i>	(1211)
Risk Communication in Construction of New Nuclear Power Plant	HE Gui-zhen, LÜ Yong-long	(1218)

《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)

2013年3月15日 34卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 3 Mar. 15, 2013

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

国内外公开发行人