

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

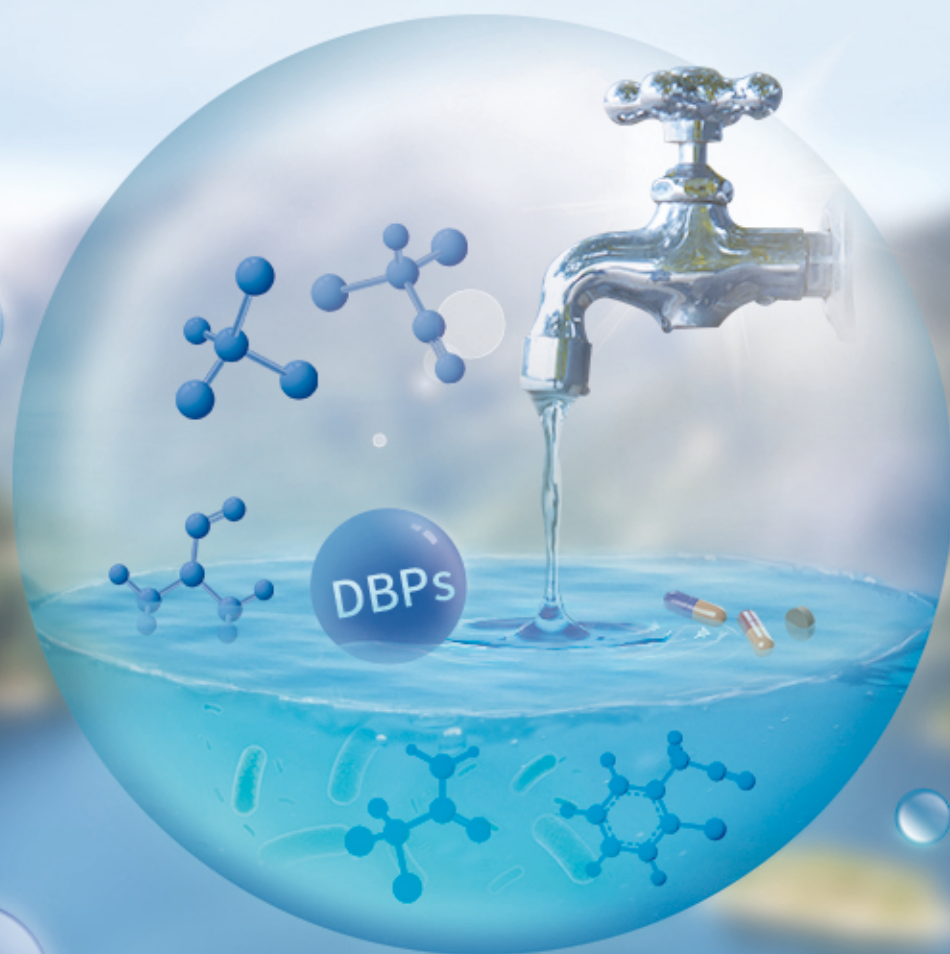
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

饮用水中的消毒副产物及其控制策略

楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年11月

第42卷 第11期
Vol.42 No.11

目次

综述与专论

- 饮用水中的消毒副产物及其控制策略 楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华 (5059)
生物炭吸附硫化氢机制与影响因素研究进展 徐期勇, 梁铭坤, 许文君, 黄丹丹 (5086)

研究报告

- 1998~2016 中国八大经济区植被覆盖对 $PM_{2.5}$ 浓度时空分布的影响 杨玉莲, 杨昆, 罗毅, 喻臻钰, 孟超, 李岑 (5100)
COVID-19 疫情期间北京市两次重霾污染过程大气污染物演变特征及潜在源区分析 赵德龙, 田平, 周崑, 肖伟, 盛久江, 王飞, 杜远谋, 黄梦宇, 何晖, 丁德平 (5109)
汾渭平原临汾市 2019 年春节期间大气污染特征与来源解析 刘威杰, 胡天鹏, 毛瑶, 许安, 苏业旺, 李星谕, 程铖, 石明明, 梁莉莉, 邢新丽, 张家泉, 祁士华 (5122)
石家庄市大气污染物的季节性时空特征及潜在源区 聂赛赛, 王帅, 崔建升, 刘大喜, 陈静, 田亮, 贺博文, 沈梦宇 (5131)
天津市冬季空气湿度对 $PM_{2.5}$ 和能见度的影响 丁净, 唐颖潇, 郝天依, 姚青, 蔡子颖, 张裕芬, 韩素芹 (5143)
承德市 $PM_{2.5}$ 中碳质组分的季节分布特征及来源解析 贺博文, 聂赛赛, 王帅, 冯亚平, 姚波, 崔建升 (5152)
中国生活源挥发性有机物排放清单 梁小明, 陈来国, 沈国锋, 卢清, 刘明, 陆海涛, 任璐, 孙西勃, 林奎, 梁明易, 叶代启, 陶澍 (5162)
2011~2019 年中国工业源挥发性有机物排放特征 刘锐源, 钟美芳, 赵晓雅, 卢诗文, 田俊泰, 李银松, 侯墨, 梁小明, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启 (5169)
基于 LHS-MC 青岛市工业源 VOCs 排放清单及不确定性 徐琬莹, 付飞, 吕建华, 李瑞凡, 邵蕊, 和慧, 李淑芬, 左华 (5180)
典型橡胶制品业 VOCs 排放特征及对周边环境的影响 王海林, 辛国兴, 朱立敏, 薛松, 聂磊, 郝润 (5193)
沈阳市不同功能区挥发性有机物分布特征及臭氧生成潜势 库盈盈, 任万辉, 苏枫棋, 于兴娜 (5201)
天津城区夏冬季典型污染过程中 BTEX 变化特征及其健康风险评估 韩婷婷, 李颖若, 蒲维维, 姚青, 刘敬乐, 吴进, 张楠楠, 李梓铭, 马志强 (5210)
郑州市大气氨排放清单及驱动力分析 计尧, 王琛, 卢轩, 张欢, 尹沙沙 (5220)
基于 GAMs 模型分析成都市气象因子交互作用对 O_3 浓度变化的影响 张莹, 倪长健, 冯鑫媛, 王式功, 张小玲, 张家熙, 李运超 (5228)
长江干流表层水体悬浮物的空间变化特征及遥感反演 李建鸿, 黄昌春, 查勇, 王川, 尚娜娜, 郝维月 (5239)
河北省夏季降雨溶解性有机物光谱特征的空间分布、来源解析及氮素响应 张紫薇, 周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 董宛佳, 甄瑞吟, 张馨童, 姚波, 崔建升 (5250)
城镇与城郊污染河道中 DOM 成分分布与影响因素 朱奔, 陈浩, 丁国平, 孙晓楠, 刘辉, 叶建锋 (5264)
北京城市河流河水和沉积物中微塑料的组成与分布 胡嘉敏, 左剑恶, 李颀, 谢珍雯, 陈磊 (5275)
太湖西岸地表水中极性有机污染物非靶向筛查与生态风险评估 卢昕妍, 王菲, 张丽敏, 任晓鸣, 于南洋, 韦斯 (5284)
河水-地下水交互带沉积物中抗生素和代谢产物提取方法优化及其分布特征 李玉琼, 童蕾, 严涵, 尤悦, 卢钰茜, 刘慧 (5294)
白洋淀清淤示范区沉积物中抗生素和多环芳烃的分布特征与风险评估 王同飞, 张伟军, 李立青, 张美一, 廖桂英, 王东升 (5303)
雄安新区唐河污水库残留污染物对地下水水化学动态的作用机制 张志雄, 王仕琴, 张依章, 冯文钊 (5312)
基于时间序列模型的饮用水源地重金属健康风险分析与预测 姬超, 侯大伟, 谢丽, 孙华, 李发志, 周宇, 邓爱萍, 沈红军, 包广静, 王逸南 (5322)
千河下游水体-沉积物重金属空间分布、风险及影响因素 高煜, 王国兰, 金梓函, 张军, 耿雅妮 (5333)
巢湖流域丰水期可溶态重金属空间分布及污染评价 何苗, 刘桂建, 吴蕾, 齐翠翠 (5346)
洪泽湖围栏养殖对表层沉积物重金属含量影响与生态风险评估 瞿鑫源, 张鸣, 谷孝鸿, 阚可聪, 毛志刚, 陈辉辉, 曾庆飞 (5355)
成都市地表水天然水化学变化特征及影响因素 许秋瑾, 赖承钺, 丁瑶, 王照丽, 程中华, 于涛 (5364)
雷州半岛地下水化学特征及控制因素分析 彭红霞, 侯清芹, 曾敏, 黄长生, 师环环, 皮鹏程, 潘羽杰 (5375)
粤港澳大湾区陆源氮污染来源结构与空间分布 董斯齐, 黄翀 (5384)
红壤丘陵区小流域典型土地利用的面源氮磷输出特征 房志达, 苏静君, 赵洪涛, 胡炼, 李叙勇 (5394)
减氮条件下不同施肥模式对稻田氮素淋溶流失的影响 姜海斌, 张克强, 邹洪涛, 马璇骏, 渠清博, 谷艳茹, 沈仕洲 (5405)
互花米草入侵对胶州湾湿地土壤磷赋存形态的影响 沙梦乔, 柴娜, 赵洪涛, 刘春井, 丁文超, 谢文霞 (5414)
基于 16S rRNA 高通量测序的北运河水体及沉积物微生物群落组成对比分析 彭柯, 董志, 邱琰茗, 郭道宇 (5424)
硅改性花生壳生物炭对水中磷的吸附特性 赵敏, 张小平, 王梁嵘 (5433)
高锰酸钾改性松木生物炭对 Pb(II) 的吸附特性 莫贞林, 曾鸿鹄, 林华, Asfandiyar Shahab, 石清亮, 张华 (5440)
混合金属氧化物/碳复合材料的制备及其对 Pb(II) 的吸附性能 卢予沈, 宗莉, 于惠, 牟斌, 王爱勤 (5450)
负载型钛凝胶的制备及其吸附去除三价砷的性能 孙晔洋, 周畅, 甘永海, 吴兵党, 张淑娟 (5460)
一体式短程硝化-厌氧氨氧化工艺启动过程的亚硝酸盐调控 左富民, 郑蕊, 隋倩雯, 钟慧, 陈彦霖, 魏源送 (5472)
生物炭和秸秆还田对紫色土旱坡地土壤团聚体与有机碳的影响 邓华, 高明, 龙翼, 赖佳鑫, 王莹燕, 王子芳 (5481)
紫色土旱坡地不同坡位土壤有机碳组分含量对施肥管理的响应 徐曼, 余添, 王富华, 王丹, 王莹燕, 杨文娜, 高明, 王子芳 (5491)
南阳盆地东部山区土壤重金属分布特征及生态风险评估 赖书雅, 董秋瑶, 宋超, 杨振京 (5500)
城郊农田土壤多环芳烃污染特征及风险评估 张秀秀, 卢晓丽, 魏宇宸, 朱昌达, 潘剑君 (5510)
我国东部沿海地区蔬菜中重金属累积分布特征及居民膳食暴露评估 孙帅, 耿柠波, 郭崔崔, 张保琴, 卢宪波, 张海军, 陈吉平 (5519)
典型矿区周边农业用地农产品安全风险及影响因素 霍彦慧, 王美娥, 谢天, 姜蓉, 陈卫平 (5526)
稻田土壤 Cd 污染与安全种植分区: 以重庆市某区为例 曹淑珍, 母悦, 崔敬鑫, 刘安迪, 程先, 符远航, 魏世强, 张进忠 (5535)
镉污染大田条件下不同品种水稻镉积累的特征及影响因素 王宇豪, 杨力, 康愉晨, 陈小红, 彭杰, 李佳欣, 陈文清 (5545)
纳米膜覆盖对畜禽粪便好氧堆肥进程及恶臭气体排放的影响 李永双, 孙波, 陈菊红, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮 (5554)
《环境科学》征订启事 (5108) 《环境科学》征稿简则 (5151) 信息 (5249, 5263, 5283)

典型矿冶区周边农业用地农产品安全风险及影响因素

霍彦慧^{1,2}, 王美娥^{1*}, 谢天¹, 姜蓉¹, 陈卫平^{1,2}

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 土壤重金属污染所引发的农产品安全风险日趋严重. 以湖南省某典型矿冶区周边农业用地为研究区域, 通过分析土壤及农产品重金属含量, 揭示了研究区域农业用地土壤重金属污染特征及农产品安全风险, 并应用主成分分析及相关性分析手段探明了主要影响因素. 结果表明, 研究区土壤主要重金属污染物为 Cd、Cu、Pb 和 Zn, 平均含量分别为 9.12、358、303 和 185 mg·kg⁻¹, pH 值范围为 4.67~7.22, 严格管控类别占比达 100%; 同种农产品对不同重金属元素的富集情况不同, 重金属含量总体表现为: Zn > Cu > Pb > Cd, 富集系数 (BCF) 值为: Cd > Zn > Cu > Pb, 其中农产品 Pb 和 Cd 超标现象较为严重, 超标率分别达 78% 和 41%, 具有较高的食用安全风险; 不同种类农产品对同一种金属元素富集情况总体表现为叶菜类高于薯类和茄果类; 农产品重金属含量可以由 2 个主成分反映, 主成分 1 方差贡献率高达 88.0%, 主要受土壤重金属影响 ($P < 0.01$); 富集特征除受农产品种类影响外, 还可由土壤 pH 值、阳离子交换量 (CEC) 和有机质 (SOM) 含量进行调控 (r 为 $-0.407 \sim -0.641$, $P < 0.05$). 结果表明, 研究区农业用地土壤和农产品均存在多种重金属复合污染, 农产品安全风险较高, 须规避农作物种植, 对污染土壤采取一定的修复管控措施以降低相应风险.

关键词: 农产品; 重金属; 富集特征; 农业用地; 风险

中图分类号: X171.5; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)11-5526-09 DOI: 10.13227/j.hjks.202103036

Security Risk and Influencing Factors of Agro-Products in Farmland Soil Around a Typical Mining Smelter

HUO Yan-hui^{1,2}, WANG Mei-e^{1*}, XIE Tian¹, JIANG Rong¹, CHEN Wei-ping^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The security risks of heavy metal pollution in agro-products are becoming increasingly serious. This paper investigated the heavy metal contamination of farmland soils and agro-products around a typical mining smelter in Hunan province, and explored the influencing factors based on principal component and correlation analyses. The results showed that the soils were significantly contaminated by heavy metals, with a mean concentrations of Cd, Cu, Pb, and Zn of 9.12, 358, 303, and 185 mg·kg⁻¹, respectively, pH range from 4.67 to 7.22. All the sites included were under strict control. With regards to the agro-products, the concentration of heavy metal elements were different, and the order of heavy metal concentrations was Zn > Cu > Pb > Cd, with an order of biological enrichment factor (BCF) of Cd > Zn > Cu > Pb. Over-the-standard elements in agro-products included Pb and Cd at 78% and 41%, respectively, which indicated a higher security risk from these products. The accumulation of the same heavy metals in leaf vegetables were generally higher than sweet potatoes and solanaceous vegetables. The heavy metal concentrations in soils corresponded to the first principal component ($P < 0.01$), with the variance reaching 88.0%, which dominated the sources of Cd, Cu, Pb, and Zn in agro-products. The enrichment characteristics were mainly affected by the type of crops, and was also regulated by the soil pH, cation exchange capacity, and soil organic matter (the correlation coefficients of r were $-0.407 \sim -0.641$, $P < 0.05$). In conclusion, there was a combined heavy metal pollution and high risk in soils and agro-products. Therefore, the planting of crops in the study area should be avoided, and soil remediation measures should be implemented to reduce security risks.

Key words: agricultural products; heavy metal; enrichment characteristics; farmland soil; risk

我国已步入“十四五”推动农业农村高质量发展的重要阶段, 其中保障农产品安全是农业高质量发展的基础和关键^[1]. “食以安为先, 食以土为本”, 土壤是农产品的根基所在, 也是保障农产品安全的根本所在, 而我国农业用地污染面广且污染格局多样, 其中, 重金属是农业用地的主要污染物, 可在农业种植系统中积累和迁移, 并通过农产品进入食物链, 由此带来的农产品安全风险与人体健康风险不容忽视^[2~4]. 为保障农产品质量安全, 我国相关法律要求“对可能影响农产品质量安全的潜在危害进行风险分析和评估”. 现阶段, 对于农产品安全风险评估主要有两类方法, 其一是基于食品安全国家标准 (GB 2762-2017) 中污染元素的限定值, 对农产品合

格率或超标率进行计算; 其二是引入相关膳食暴露评估模型, 对污染元素的健康风险作出评估^[5~10]. 已有研究表明, 工矿区周边农业用地农产品质量安全问题突出^[8,9]. 但不同类型的工矿业活动, 所引起的重金属污染特征有所不同, 再结合农田土壤空间异质性和农业种植结构差异等因素, 导致土壤重金属污染所引起的农产品安全风险不尽相同^[7~13]. 因此, 除摸清农产品实际污染情况外, 厘清典型情境

收稿日期: 2021-03-04; 修订日期: 2021-04-22

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFC1800306, 2019YFC1805805)

作者简介: 霍彦慧 (1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为污染生态学, E-mail: huoyanhui18@mails.ucas.ac.cn

* 通信作者, E-mail: mewang@rcees.ac.cn

中农产品安全风险的影响因素,更有助于锁定监管重点,守住安全底线。

农业农村部办公厅在相关行动方案中提出,要着力消除农产品质量安全隐患,对于问题易发多发地区加大排查力度^[14]。铜冶炼厂是三废污染相对严重的行业之一,Cd、Cu 和 Pb 等重金属元素通过烟气沉降、废水过滤泥饼和尾矿堆放等途径进入到周围环境,对周边农业用地造成一定的影响,是典型的问题易发地区^[15,16]。而且,矿冶区周边多为家庭经营模式下的农业生产活动,具有农产品生产规模小、生产种类繁多和生产地点分散等特征,是农产品质量安全的监管盲区,存在农产品安全风险不明的情况^[5,17]。因此,本文在素有有色金属之乡之称的湖南省,选取某典型铜冶炼厂周边 2 km 范围内的农业用地作为研究对象,通过分析这些农业用地土壤与农产品的污染特征及影响因素,揭示农产品安全风险及其调控因子,以期污染场地周边农业用地农产品安全风险的产生及机制研究提供基础数据,并为提高土地安全利用率和保障农产品质量安全提供技术支撑,对推动污染场地周边农业可持续发展具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 样品采集

研究区位于湖南省衡阳市,属于亚热带季风气候。铜冶炼厂周边 2 km 范围内农业用地以红壤和黄壤为主,多为家庭经营模式,呈零散分布,每块农业用地面积为 10 ~ 50 m² 不等,种植作物种类丰富,多为薯类、叶菜类和茄果类。样品采集于 2019 年 10 月,该时期土壤条件相对温和,避免了作物对土壤的短期影响,且为当地常食农产品的收获期。以冶炼厂为中心,根据不同空间位置和距离随机选取 12 块农业用地作为调查样点,分别在每个样点采用 5 点法采集 0 ~ 15 cm 的表层混合土壤样品,在野外将土壤样品均匀混合,通过四分法,采集 1 kg 左右的土壤样品运回实验室^[18]。

同时,在采集土壤的相应样方范围内,采取主栽农作物的可食用部分,包括番薯及番薯叶 [*Ipomoea batatas* (L.) Lam.]、萝卜菜 (*Raphanus sativus* L.)、空心菜 (*Ipomoea aquatica* Forssk.)、小白菜 (*Brassica chinensis* L.) 和辣椒 (*Capsicum annuum* L.) 共 27 份,按照生物学特征分类,其中薯类 6 份,茄果类 5 份,叶菜类 16 份。

1.2 样品化学分析

本研究通过四酸消煮法 (HCl、HNO₃、HF 和 HClO₄) 对土壤进行消解,采用电感耦合等离子体质

谱仪 (ICP-MS, NexION 300X, PE, USA) 测量土壤中 Cd、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb 和 Zn 的含量^[18]。采用 GSS-27 作为质控标准物质,7 种元素的标准回收率在 82% ~ 109% 之间。

土壤粒径由激光粒度分析仪 (Mastersizer 2000, Malvern, UK) 测定,并参照美国土壤粒度分类标准划分黏粒、粉粒、砂粒,对土壤质地进行分类^[19]。将土壤进行酸化处理低温烘干后,利用元素分析仪 (Vario MAX cube, Elementar, Germany) 根据干式燃烧法分别对处理土壤中有有机碳与未处理土壤中总氮 (TN) 的含量进行测定,并将有机碳含量乘以 Van Bemmelen 因数 1.724 得到土壤有机质 (SOM) 含量^[20]。将土壤样品和去离子水按照质量体积比 1:2.5 混合振荡后,取上清液,测定土壤样品的 pH 值^[21]。土壤阳离子交换量 (CEC) 参照标准 (HJ 889-2017),使用 1.66 cmol·L⁻¹ Co(NH₃)₆Cl₃ 溶液浸提 2 mm 风干土,分光光度计 (Lambda25, PE, China) 记录 475 nm 处吸光度,换算为土壤 CEC^[22]。

土壤重金属有效态参照标准 (HJ 804-2016),对 2 mm 风干土采用二乙烯三胺五乙酸 (DTPA) 浸提法,取上清液用电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-OES, Prodigy7, Leeman, USA) 测定重金属 Cd、Cu、Pb 和 Zn 的有效态含量^[23]。

农产品样品经去离子水冲洗后于 105℃ 下杀青 0.5 h, 60℃ 烘至恒重,使用球磨仪粉碎后应用微波消解法 (GB 5009.268-2016) 在微波消解仪 (Multiwave PRO, Anton Paar, Austria) 中进行消解,取消解液用 ICP-MS 测定农产品中重金属 Cd、Cu、Pb 和 Zn 的含量^[24]。采用 GSB-27 作为质控标准物质,4 种元素的标准回收率在 86% ~ 107% 之间。

1.3 数据分析

1.3.1 基于 Nemerow 法的综合肥力指数计算

土壤肥力是土壤基本性质的综合反映,也是影响作物生长发育的重要因子。采用国际普遍使用的 Nemerow 法对土壤综合肥力进行评价,其计算公式如下^[25]:

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\left[\left(\frac{C_i}{S_i}\right)_{\min}^2 + \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{S_i}\right)^2\right]} \times \frac{1}{2} \times \left(\frac{n-1}{n}\right) \quad (1)$$

式中, $P_{\text{综}}$ 为土壤肥力综合指数; C_i 为土壤中指标 i 的实测值; S_i 为土壤中指标 i 的评价标准值,本研究选取南方地区耕地土壤肥力诊断与评价 (NY/T 1749-2009) 中的建议标准值作为相应指标的评价标准值; C_i/S_i 为单项肥力指数,当单项肥力指数 $C_i/S_i > 3$ 时,在计算 $P_{\text{综}}$ 时,以 $C_i/S_i = 3$ 计; $(C_i/S_i)_{\min}$ 为单项肥力指数中的最小值; n 为参与评价的土壤

肥力指标个数^[25,26].

1.3.2 生物富集系数计算

生物富集系数 (biological enrichment factor, BCF)表示生物富集、累积和吸收能力,是生物体内某种元素含量与其生境中该元素含量的比值,常用作评估农作物重金属累积风险,其计算公式如下^[11]:

$$BCF = \frac{\text{农产品中污染物含量}}{\text{土壤中污染物含量}} \quad (2)$$

1.3.3 日均饮食重金属摄入量计算

饮食重金属每日摄入量(daily intake, DI)取决于农产品中重金属含量与农产品的每日摄入量,人体每日食物重金属摄入量计算公式如下^[2]:

$$DI = C_m \times C_f \times W_f \quad (3)$$

式中, C_m 为农产品干重的重金属含量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); C_f 为干重和鲜重的转换系数 0.085; W_f 为每日摄入量 [$\text{kg}\cdot(\text{人}\cdot\text{d})^{-1}$],成人和儿童日均摄入量分别为 $0.345 \text{ kg}\cdot(\text{人}\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $0.232 \text{ kg}\cdot(\text{人}\cdot\text{d})^{-1}$.

1.3.4 统计分析

采用 Microsoft Excel 2016 进行数据处理,应用 Origin 2019 进行图形处理;对标准化后的土壤重金属元素数据进行聚类分析;对土壤重金属含量与农产品重金属含量进行回归分析.运用 SPSS 25.0 对数据进行 Kolmogorov-Smirnov 标准正态分布检验 (K-S test);对不同种类农产品的重金属含量及 BCF 值进行多重比较,其中方差同质的变量选取

Scheffé's 法,方差不同质的变量选取 Games-Howell 检验方法;对土壤理化性质、农产品重金属含量和 BCF 值进行 Spearman 相关性分析.使用 Past3.0 对标准化后的农产品重金属含量数据进行主成分分析.

2 结果与分析

2.1 研究区土壤重金属污染物识别及污染状况

研究区农业用地土壤理化性质如表 1 所示.土壤机械组成中粉粒所占比重最高,且比较稳定,参照美国土壤质地标准进行分类,确定研究区农业用地以粉壤土为主^[19].土壤整体上为酸性土壤 ($\text{pH} < 6.5$),仅一个位点的土壤 pH 值大于 7.研究区各土壤样点中 SOM、CEC 和 TN 含量的高低趋势基本一致,其中 SOM 平均质量分数为 2.48%,整体高于 (NY/T 1749-2009)中的建议标准值 1.25%;CEC 平均值为 $10.2 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,大部分低于建议标准值 $12 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$;TN 平均质量分数为 0.12%,略高于建议标准值 0.1%.参照式 (1),选取土壤 pH 值、SOM、CEC 与 TN 共 4 项指标,根据修正的 Nemerow 法计算土壤的单项肥力指数,如表 1 所示,相关指标的大小排序为: $\text{SOM} = \text{pH} > \text{TN} > \text{CEC}$.各点位土壤肥力综合指数为 0.9~1.5,参照 (NY/T 1749-2009)土壤肥力等级评价,研究区各点位土壤肥力均处于Ⅱ级,属一般水平,其中土壤 CEC 为主要限制因子^[26].

表 1 土壤理化性质统计学概况

Table 1 Statistics of chemical and physical properties in soil samples

项目	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%	pH	CEC/ $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	SOM/%	TN/%
最小值	5.47	50.1	11.9	4.67	5.8	1.34	0.06
最大值	32.53	77.6	31.8	7.22	14.5	3.33	0.16
平均值	17.8	62.9	19.2	5.94	10.2	2.48	0.12
变异系数/%	49.3	11.9	35.5	13.7	29.5	26.6	24.4
单项肥力指数	—	—	—	2.0	0.8	2.0	1.2

1) “—”表示无相关数据

研究区农业用地土壤重金属含量如表 2 所示,7 种所测重金属含量,除 Mn 元素以外,几何均值相对于湖南省背景值均有不同程度的超标情况^[27].其

中,土壤 Cd 含量的最小值已高达 $2.88 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;同样累积较高的重金属元素还有 Cu 和 Pb,最大值均超过 $1\,000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.采用单一样本的 K-S 检验对所

表 2 本研究采集土壤样品重金属含量统计分析

Table 2 Statistics of heavy metal concentrations in the soil samples

项目	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
最小值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	2.88	35.0	126	105	14.6	64.4	87.7
最大值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	30.6	78.4	1 937	438	41.9	1 515	451
变异系数/%	82.4	24.0	113	42.4	32.1	102	56.2
几何平均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	9.12	56.0	358	215	24.9	303	185
湖南省背景值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.126	71.4	27.3	459	31.9	29.7	94.4
超过背景值样点百分比/%	100	16.7	100	0.00	16.7	100	91.7
超过风险筛选值样点百分比/%	100	0	100	—	0	91.7	25.0
超过风险管控值样点百分比/%	100	0	—	—	—	25	—
$P(\text{K-S})$	0.001	>0.200	0.000	>0.200	>0.200	0.004	0.003

1) “—”表示无相关数据

有样点中 7 种元素含量的数据进行分析,结果发现,研究区土壤中重金属 Cd、Cu、Pb 和 Zn 的含量成非正态分布,且从变异系数来看, CV 均大于 50%,表明这 4 种元素受人类活动影响较大^[18,28]。

对标准化后的土壤重金属含量数据进行系统聚类分析的结果表明, 7 种元素可以分为 2 组(图 1): 第 1 组包括 Cd、Cu 和 Pb; 第 2 组包括 Zn、Mn、Cr 和 Ni。同时结合土壤重金属元素含量与背景值的相比结果,可以发现: 第 1 组的 Cd、Cu 和 Pb 在土壤中累积较为严重; 其次,第 2 组中 Mn、Cr 和 Ni 这 3 种元素含量的几何均值均低于当地背景值,并且相对于背景值的超标率较低,由此可以认为这 3 种元素因人为活动导致的累积程度较轻; 最后,尽管 Zn 元素含量的几何均值约为背景值的 2 倍,且相对于背景值的超标率高达 91.7%,但是相对于土壤中同样高累积的 Cd、Cu 和 Pb 元素,其变异系数较小。铜精矿常与 Cd、Pb 元素伴生,因此, Cd、Cu 和 Pb 被视为铜冶炼生产活动中产生的点源污染物; 然而, Zn 元素则是常见的非点源污染物,除了铅锌矿等特殊矿冶活动,农业化肥、畜禽养殖、垃圾堆放和交通运输等常见的人类活动均能够向土壤中输入 Zn 元素,这可能也是 Zn 元素与 Cd、Cu 和 Pb 在聚类分析结果中属于不同组的原因^[15,28~30]。综合以上结果,认为 Cd、Cu、Pb 和 Zn 这 4 种元素为研究区农业用地土壤中的主要重金属污染物。

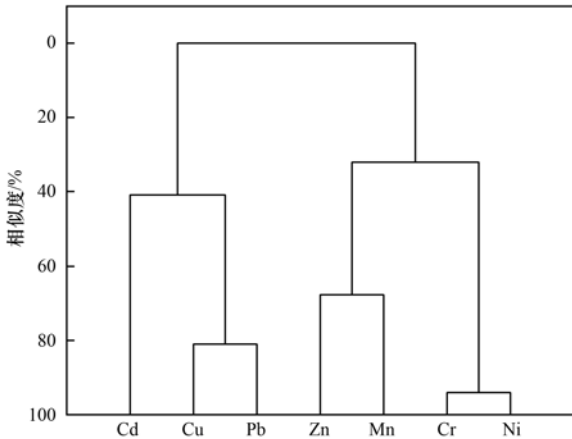


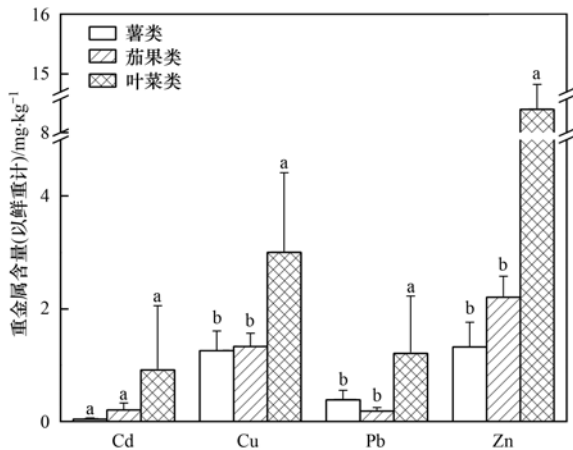
图 1 基于 Person 相关系数的元素聚类树
Fig. 1 Cluster tree of elements based on Pearson's correlation coefficient

进一步参照土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(GB 15618-2018)中相应污染元素的风险筛选值与管控值,对土壤重金属污染风险进行评估,结果如表 2 所示,所调查的农业用地中,土壤 Cd 含量均高于管制值,污染最为严重; 土壤 Cu 含量均超过筛选值; 土壤 Pb 含量基于风险筛选值的超标率也高达 91.7%,且部分点位土壤 Pb 含量高于管控

值^[31]。以 GB 15618-2018 作为评价标准,将土壤环境质量分为优先保护(低于筛选值)、安全利用(介于筛选值与管控值之间)和严格管控(高于管控值)3 个类别^[31]。在所调查的农业用地各点位中,均存在含量高于风险管控值的污染元素,取各污染元素中最严重的类别,所有点位土壤均处于严格管控类别。因此,综合来看,研究区农业用地土壤污染风险高,对农产品质量安全存在较高风险。

2.2 主要农产品重金属含量及其累积特征

针对研究区农业用地土壤中的主要污染物 Cd、Cu、Pb 和 Zn,分析农产品可食用部位中 Cd、Cu、Pb 和 Zn 的含量,并参照式(2)计算 BCF 值,结果如图 2 和图 3 所示。首先, Cd、Cu、Pb 和 Zn 这 4 种重金属在农产品中的含量(以鲜重计)范围分别为 0.02 ~ 4.47、0.66 ~ 5.66、0.11 ~ 4.09 和 0.74 ~ 26.3 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,富集系数(BCF)范围分别为 0.03 ~ 2.19、0.01 ~ 0.19、0.01 ~ 0.07 和 0.05 ~ 0.81,除萝卜菜和小白菜两种叶菜类样品的 Cd 富集系数大于 1 以外,其余农产品各重金属富集系数均小于 1; 其次,整体而言,叶菜类各重金属含量及富集系数普遍高于茄果类和薯类,表明叶菜类的重金属富集能力更强,安全风险更高; 第三,农产品可食用部位 Cd 与 Zn 的富集系数普遍高于 Cu 与 Pb 的富集系数,表明土壤中 Cd 和 Zn 的活性相对较高,更易从土壤向作物中迁移富集,易被农产品尤其是被叶菜类农产品所吸收。



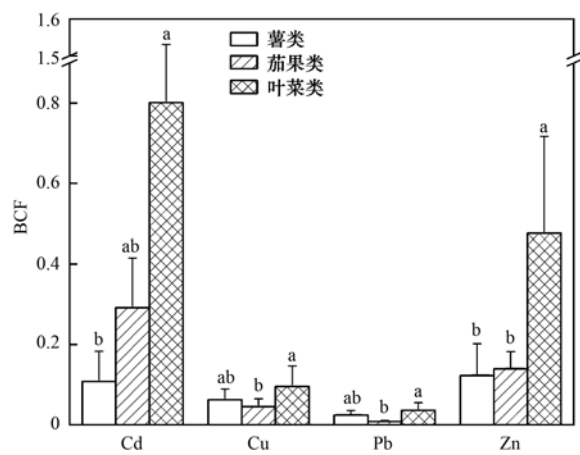
不同小写字母表示重金属含量在不同农产品
种类中存在显著性差异 ($P < 0.05$)

图 2 不同农产品重金属含量

Fig. 2 Heavy metal concentrations in different agricultural products

不同种类作物对重金属元素吸收的生理生化机制各有不同^[12]。但经多重比较分析后,表现在 3 类农产品中的 Cd 含量差异并不显著,可能原因为研究区土壤中 Cd 含量较高,且有效态占比为 36% ~ 58% 不等,在土壤-作物系统中迁移性较强,掩盖了

作物种类对重金属富集的影响;而自身迁移性较弱的元素 Cu、Pb 和 Zn,受叶片蒸腾作用这一驱动力的影响,易于向叶片中迁移累积,也因此代谢活跃的叶类器官中,重金属 Cu、Pb 和 Zn 的含量显著高于薯类和茄果类的营养储存器官^[11,32,33]. 本研究中土壤性质与元素特性不仅影响了农产品对重金属的绝对积累量,也影响着农产品的重金属富集系数,出现了薯类与茄果类的 BCF 值无显著差异的现象. 总体而言,野外自然环境下,农产品的重金属富集能力是作物自身性质与环境交互作用的结果.



不同小写字母表示富集系数在不同农产品种类中存在显著性差异 ($P < 0.05$)

图3 不同农产品重金属富集系数
Fig. 3 Bio-accumulation factor (BCF) of heavy metals in different agricultural products

2.3 研究区主要农产品安全风险分析

基于污染物最大限制标准评估农产品质量安全是一种直观有效的方法. 在此,将农产品中元素 Cd 和 Pb 的含量以鲜重计算,与食品安全国家标准 (GB 2762-2017) 中污染元素限定值相比 (表 3),农产品中 Pb 和 Cd 超标现象较为严重,超标率分别达 78% 和 41%. 其中,薯类农产品 Cd 含量未超标,但 Pb 污染严重,为标准限值的 0.64 ~ 3.38 倍,超标率达 83.3%;茄果类农产品中 Cd 和 Pb 超标率均达 100%,其中 Cd 含量为标准限制的 1.76 ~ 8.87 倍, Pb 含量为标准限值的 1.07 ~ 2.93 倍;叶菜类农产品中 Pb 含量为标准限值的 1.17 ~ 13.6 倍,超标率达 100%, Cd 含量为标准限制的 0.26 ~ 22.3 倍,除番薯叶以外的叶菜 Cd 含量均超标^[34].

我国未将食品中的元素 Cu 和 Zn 作为污染物指标,其含量限定值没有现行评价标准,但 Cu 和 Zn 在饮食中的摄入量具有一定的限定值,因此,结合检测到的 27 份农产品重金属含量平均值,依据式 (3),进一步计算矿区周边成人和儿童日均饮食重金属摄入量 (DI),并与国际可接受的每日安全摄入量 (PTDI) 进行比较,见表 3^[2]. 各元素 DI 值均在 PTDI 允许范围以内, Cu 和 Zn 摄入量远小于限定值,但其中成人 Cd 摄入量逼近限定值, Pb 摄入量达到限定值的 75.5%,风险不容忽视^[2]. 虽然本研究未考虑当地居民的饮食习惯与膳食比例及其他摄入途径及摄入食物,计算所得的 DI 结果具有一定的局限

表3 研究区农产品污染情况及重金属日均饮食摄入量

Table 3 Pollution levels statistics of agro-products and the dietary intake of heavy metals in the study area

项目	类型	Cd	Cu	Pb	Zn
薯类污染元素含量	限定值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.1	—	0.2	—
	超标率/%	0	—	83.3	—
茄果类污染元素含量	限定值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.05	—	0.1	—
	超标率/%	100	—	100	—
叶菜类污染元素含量	限定值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.2	—	0.3	—
	超标率/%	67	—	100	—
日均饮食摄入量	成人/ $\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$	68	631	151	1210
	儿童/ $\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$	45	424	102	813
	限定值/ $\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$	70	6 500	200	33 000

1) “—”表示无相关数据

性,但结合土壤污染风险与农产品中污染元素含量超标情况,仍可表明,该地区农产品途径摄入重金属对居民健康存在较高的风险,其中污染元素 Cd 和 Pb 构成的风险较大^[33].

2.4 农产品安全风险的影响因素分析

因数据未通过正态性检验,采用非参数 Spearman 相关性分析探求土壤性质与重金属含量之间的相互关系 (表 4),发现农产品中,除污染元素 Pb 以外的其

他重金属元素含量均与土壤重金属总量和 DTPA 可提取有效态含量之间具显著相关性,且相关系数一定程度上反映出重金属生物有效组分更易被农作物所吸收. 农产品中污染元素 Pb 含量与土壤重金属含量无显著相关,可能原因为农产品中 Pb 含量还易受到大气沉降等其他污染源的影响^[29,30].

土壤理化性质虽与农产品重金属含量无显著相关,但与土壤重金属含量和农产品重金属富集系数

显著相关. 其中, pH 与土壤重金属含量及 Cd 富集系数呈负相关, 主要因为 pH 会影响重金属吸附-解析过程, 低 pH 可增加重金属尤其是碳酸盐结合态 Cd 的流动性, 更有利于土壤中 Cd 向作物中迁移; SOM 和 CEC 与土壤重金属含量呈正相关, 与 Cu 富集系数呈显著负相关, 可能因为 SOM 和

CEC 可以吸附土壤中重金属, 影响土壤重金属的结合分布, 降低重金属由土壤向作物迁移的能力^[11,13,35]. 以上同时表明, 土壤理化性质对农作物重金属富集能力具有一定的调控作用. 此外, 本研究的土壤中 Cu 和 Pb 有效态含量基本一致, 呈极显著相关($r=0.990$, $P<0.01$).

表 4 研究区土壤理化性质与农产品重金属含量相关性分析(Spearman)结果¹⁾

Table 4 Spearman rank correlation between the chemical and physical properties in soil and agricultural product samples						
统计指标	pH	SOM	CEC	农产品 Cd	农产品 Cu	农产品 Zn
土壤 Cd	0.127	0.137	0.561 **	0.394 *	0.345	0.240
土壤 Cu	-0.513 **	0.399 *	0.240	0.451 *	0.338	0.195
土壤 Pb	-0.676 **	0.448 *	0.192	0.521 **	0.404 *	0.409 *
土壤 Zn	0.044	0.459 *	0.800 **	0.478 *	0.266	0.304
Cu-DTPA	-0.590 **	0.351	0.114	0.598 **	0.479 *	0.311
Pb-DTPA	-0.590 **	0.351	0.114	0.598 **	0.479 *	0.311
Zn-DTPA	-0.113	-0.133	0.365	0.652 **	0.530 **	0.594 **
BCF-Cd	-0.407 *	-0.115	-0.133	0.885 **	0.686 **	0.857 **
BCF-Cu	-0.062	-0.641 **	-0.494 **	0.223	0.567 **	0.545 **

1) * 表示显著相关性 $P<0.05$, ** 表示显著相关性 $P<0.01$

如图 4 所示,主成分分析中,薯类、茄果类和叶菜类农产品明显分开,表明不同种类农产品的重金属含量有一定差异. 根据主成分分析结果,提取了 2 个特征值,其中第一主成分方差贡献率高达 88.0%,且土壤各元素重金属含量均与主成分 1 得分之间具显著相关性($P<0.05$). 在以土壤重金属含量为自变量,农产品对应元素含量为因变量的回归分析中, Cd 和 Pb 的决定系数 R^2 分别达到 0.43 和 0.33 ($P<0.01$). 农产品分类后,土壤重金属含量与主成分 1 得分之间的关系更为显著,同样做回归分析:薯类农产品中, Cd ($R^2=0.75$, $P<0.01$); 茄果类, Pb ($R^2=0.81$, $P<0.01$); 叶菜类, Cd ($R^2=0.52$, $P<0.01$). 第二主成分中具有较高载荷的重金属元素为 Pb, 方差贡献率为 9.0%, 可能是因为大气干湿降

尘中的 Pb 元素也是影响农产品尤其是叶菜类重金属含量的重要因素之一^[30,33]. 总体而言,土壤重金属含量是影响研究区农产品重金属含量的主控因子,土壤理化性质对农产品重金属含量影响不显著($P>0.05$).

3 讨论

农业用地土壤重金属污染往往伴随着农产品安全风险,孙清斌等^[36]的研究对大冶矿区周边农业用地调查发现,土壤 Cu 和 Cd 污染严重,且与非矿区相比,矿区蔬菜 Pb 和 Cd 超标率更高. 杨胜香等^[9]的研究发现,湘西花垣铅锌矿区和锰矿区土壤的主要污染元素为 Cd,其次为 Mn、Pb 和 Zn,重金属累积导致当地农产品中 Pb 和 Cd 污染严重,不宜食用. 也有研究表明,矿区周边农业用地土壤存在轻度、中度污染,但农产品安全风险尚可接受^[6,8]. 本文研究区与其他类型矿区和非矿区的农业用地相比,土壤 Cd、Cu 和 Pb 污染较为严重,相应叶菜类、薯类和茄果类农产品中 Cd、Cu 和 Pb 的含量也较高^[7-9]. 与多数研究相一致的是,同种农产品的重金属元素含量大致表现为: $Zn>Cu>Pb>Cd$,不同农产品对同一重金属元素的富集程度总体表现为叶菜类高于根菜类和茄果类^[11,37]. 其中,叶菜易累积重金属,可能因为叶片气孔分布较为广泛,表面蒸发量大,蒸腾作用较强,且易受大气粉尘中污染物的影响;薯类等可食用部位与土壤直接接触,可以直接从土壤中吸收金属元素;而茄果类的果柄等组织对重金属向果实部分的运输具有阻碍作用,一定程度

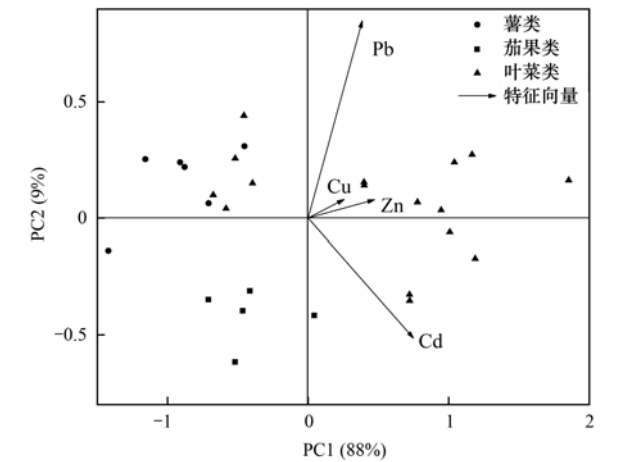


图 4 农产品重金属元素主成分分析

Fig. 4 Principal component analysis of heavy metals in different agricultural products

上降低了茄果类农产品的安全风险^[38,39]。

BCF 常被作为重金属在土壤-作物系统中迁移富集特征的重要指标,本研究中农产品不同重金属元素 BCF 值的大小规律为: $Cd > Zn > Cu > Pb$, 其中 Cd 和 Zn 大于 Cu 和 Pb 这一现象与多数研究相一致,表明一般情况下土壤中 Cd 和 Zn 的活性较高,更易从土壤向作物中迁移富集,也反映出元素本身的化学性质是影响其在土壤-作物系统中迁移的重要因素^[32,40,41]。BCF 值也常被作为衡量重金属生物有效性的指标,同类农产品在不同地区 BCF 值不同,在于土壤重金属生物有效性不同,本研究中农产品 Cd 的 BCF 值均高于孙硕等^[40]对同类农产品 BCF 的统计值,一定程度上反映出研究区土壤中的 Cd 具有较高的生物有效性,易被农作物根系所吸收,对农产品质量安全的风险较高^[41]。除元素本身化学性质与农产品种类的影响之外,土壤 pH、CEC 和 SOM 含量对农产品的重金属含量及 BCF 值均有影响^[7,11,13,42]。窦韦强等^[42]对我国主要蔬菜基地例行监测数据进行分析,土壤 pH 值对农产品富集 Cd 的影响达到显著负相关水平,这与本研究的结果一致,主要原因为低 pH 可以活化土壤重金属,增加可交换态 Cd 含量。陈洁等^[13]的研究发现农作物重金属 Cd 的 BCF 值与土壤 CEC 和 SOM 呈负相关,而本研究中发现的是重金属元素 Cu 的 BCF 值与土壤 CEC 和 SOM 呈负相关, Cd 的 BCF 值与 CEC 和 SOM 的关系不显著,可能与土壤污染特征等因素有关。

主成分分析及相关性分析表明,研究区农产品重金属含量主要来源于土壤重金属。但周艳等^[28]的研究发现,农产品与土壤重金属含量并无显著相关性,可能是本研究区土壤重金属污染程度过高,某种程度上掩盖了土壤理化性质的作用及其他重金属来源的影响。尽管存在部分农产品重金属含量未超标现象,可以筛选出重金属富集能力较低的农产品,并且通过改善土壤理化性质对农产品的重金属富集能力进行调控,但鉴于研究区土壤重金属含量较高且生物有效性较高,其单位质量农产品尤其是叶菜类农产品的重金属含量不容乐观,存在较高的农产品安全风险。此外,本研究基于农产品计算所得的每日饮食摄入中 Cd 和 Pb 的摄入量,远高于 Xie 等^[2]的研究所得的矿区周边相应 DI 值,且根据现场调查,当地有出现血铅超标案例。因此,本研究建议该矿冶区周边农业用地规避农作物的种植,对土壤重金属污染采取一定的修复管控措施。

4 结论

(1) 矿冶区周边农业用地土壤肥力一般,存在

Cd、Cu、Pb 和 Zn 多种重金属复合污染,其中 Cd 污染情况最为严重,均超过风险管控值,处于严格管控类别。

(2) 同种农产品对不同重金属元素的富集情况有所不同,农产品 Cd 和 Pb 超标现象较为严重;不同农产品对同种重金属元素的富集情况也有所不同,其中叶菜类农产品富集能力较强,安全风险更高。

(3) 研究区农产品中重金属含量与土壤重金属含量之间相关性明显,主成分分析表明,农产品 Cd、Cu、Zn 和 Pb 主要来源于土壤重金属,部分 Pb 含量来源于大气沉降;农产品重金属富集特征除受农产品种类影响外,还可由土壤 pH 值、CEC 含量和 SOM 含量进行调控。

参考文献:

- [1] 钱永忠, 金芬. 农产品质量安全学科建设成效与科技需求展望[J]. 农产品质量与安全, 2021, (1): 5-9.
Qian Y Z, Jin F. Achievements and S&T demand prospects of discipline construction of agro-products quality and safety[J]. Quality and Safety of Agro-Products, 2021, (1): 5-9.
- [2] Xie W S, Peng C, Wang H T, et al. Health risk assessment of trace metals in various environmental media, crops and human hair from a mining affected area[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017, 14(12), doi: 10.3390/ijerph14121595.
- [3] 陈卫平, 杨阳, 谢天, 等. 中国农田土壤重金属污染防治挑战与对策[J]. 土壤学报, 2018, 55(2): 261-272.
Chen W P, Yang Y, Xie T, et al. Challenges and countermeasures for heavy metal pollution control in farmlands of China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(2): 261-272.
- [4] 骆永明, 滕应. 中国土壤污染与修复科技研究进展和展望[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1137-1142.
Luo Y M, Teng Y. Research progresses and prospects on soil pollution and remediation in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5): 1137-1142.
- [5] 李如忠, 潘成荣, 徐晶晶, 等. 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[J]. 环境科学, 2013, 34(3): 1076-1085.
Li R Z, Pan C R, Xu J J, et al. Contamination and health risk for heavy metals via consumption of vegetables grown in fragmentary vegetable plots from a typical nonferrous metals mine city[J]. Environmental Science, 2013, 34(3): 1076-1085.
- [6] 邹素敏, 杜瑞英, 文典, 等. 大宝山矿区某农田蔬菜重金属污染状况及健康风险评估[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(6): 568-575.
Zou S M, Du R Y, Wen D, et al. Heavy metals pollution in vegetables grown on some farmlands around Dabaoshan mine and its healthy risk evaluation[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2016, 33(6): 568-575.
- [7] 湛天丽, 黄阳, 何腾兵, 等. 贵州铜仁汞矿区主要农产品重金属污染及其健康风险评估[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(4): 1524-1529.
Zhan T L, Huang Y, He T B, et al. Heavy metal pollution and health risk in major agricultural products in Tongren mercury mine area, Guizhou[J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(4): 1524-1529.

- [8] 蒋宗宏, 陆凤, 马先杰, 等. 贵州铜仁典型锰矿区土壤及蔬菜重金属污染特征及健康风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2020, **37**(2): 293-300.
Jiang Z H, Lu F, Ma X J, *et al.* Characteristics and health risk assessments of heavy metals in soils and vegetables in manganese mining areas in Tongren county, Guizhou province, China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2020, **37**(2): 293-300.
- [9] 杨胜香, 易浪波, 刘佳, 等. 湘西花垣矿区蔬菜重金属污染现状与健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(1): 17-23.
Yang S X, Yi B L, Liu J, *et al.* Heavy metals concentrations and health risk in vegetables grown on Mn and Pb/Zn mineland in Huayuan county, west Hunan province, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, **31**(1): 17-23.
- [10] 吴燕明, 吕高明, 周航, 等. 湘南某矿区蔬菜中 Pb、Cd 污染状况及健康风险评估[J]. 生态学报, 2014, **34**(8): 2146-2154.
Wu Y M, Lv G M, Zhou H, *et al.* Contamination status of Pb and Cd and health risk assessment on vegetables in a mining area in southern Hunan[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **34**(8): 2146-2154.
- [11] 史明易, 王祖伟, 王嘉宝, 等. 基于富集系数对蔬菜地土壤重金属的安全阈值研究[J]. 干旱区资源与环境, 2020, **34**(2): 130-134.
Shi M Y, Wang Z W, Wang J B, *et al.* Study on safety threshold of heavy metals in vegetable soils based on bioaccumulation factor[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, **34**(2): 130-134.
- [12] 杜俊杰, 李娜, 吴永宁, 等. 蔬菜对重金属的积累差异及低积累蔬菜的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(6): 1193-1201.
Du J J, Li N, Wu Y N, *et al.* Variation in accumulation of heavy metals in vegetables and low accumulation vegetable varieties: A review[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(6): 1193-1201.
- [13] 陈洁, 王娟, 王怡雯, 等. 影响不同农作物富集系数的土壤因素[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 2031-2039.
Chen J, Wang J, Wang Y W, *et al.* Influencing factors of cadmium bioaccumulation factor in crops[J]. Environmental Science, 2021, **42**(4): 2031-2039.
- [14] 农业农村部办公厅. 农业农村部办公厅关于印发《2020 年农产品质量安全专项整治“利剑”行动方案》的通知[J]. 中华人民共和国农业农村部公报, 2020, (6): 48-51.
- [15] 韩明霞, 孙启宏, 乔琦, 等. 中国火法铜冶炼污染物排放情景分析[J]. 环境科学与管理, 2009, **34**(12): 40-44.
Han M X, Sun Q H, Qiao Q, *et al.* Pollutants emission scenario analysis of China's copper smelter industry[J]. Environmental Science and Management, 2009, **34**(12): 40-44.
- [16] 马倩玲, 郭泉. 铜冶炼企业的环境影响评价[J]. 有色金属, 2009, **61**(1): 125-128.
Ma Q L, Guo Q. Environmental impact assessment for copper extractive metallurgy industry[J]. Nonferrous Metals, 2009, **61**(1): 125-128.
- [17] 周利航, 赵哲, 魏珂. 农户经营模式下的农产品质量安全风险及其治理研究[J]. 农家参谋, 2020, (15): 86.
- [18] 王美娥, 彭驰, 陈卫平. 宁夏干旱地区工业区对农田土壤重金属累积的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(9): 3532-3539.
Wang M E, Peng C, Chen W P. Impacts of industrial zone in arid area in Ningxia province on the accumulation of heavy metals in agricultural soils[J]. Environmental Science, 2016, **37**(9): 3532-3539.
- [19] 吴克宁, 赵瑞. 土壤质地分类及其在我国应用探讨[J]. 土壤学报, 2019, **56**(1): 227-241.
Wu K N, Zhao R. Soil texture classification and its application in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, **56**(1): 227-241.
- [20] Rawlins B G, Vane C H, Kim A W. *et al.* Methods for estimating types of soil organic carbon and their application to surveys of UK urban areas[J]. Soil Use and Management, 2008, **24**(1): 47-59.
- [21] HJ 962-2018, 土壤 pH 值的测定 电位法[S].
HJ 962-2018, Soil-determination of pH-potentiometry[S].
- [22] HJ 889-2017, 土壤 阳离子交换量的测定 三氯化六氨合钴浸提-分光光度法[S].
HJ 889-2017, Soil quality-determination of cation exchange capacity (CEC)-hexamminecobalt trichloride solution-spectrophotometric method[S].
- [23] HJ 804-2016, 土壤 8 种有效态元素的测定 二乙烯三胺五乙酸浸提-电感耦合等离子体发射光谱法[S].
HJ 804-2016, Soil-determination of bioavailable form of eight elements-extraction with buffered DTPA solution-inductively coupled plasma optical emission spectrometry[S].
- [24] GB 5009.268-2016, 食品安全国家标准 食品中多元素的测定[S].
- [25] 邓小军, 陈晓龙, 唐健, 等. 基于 Nemerow 法的森林土壤肥力综合指数评价[J]. 草业学报, 2016, **25**(7): 34-41.
Deng X J, Chen X L, Tang J, *et al.* Assessment of forest soil fertility using an integrated index based on the Nemerow method[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, **25**(7): 34-41.
- [26] NY/T 1749-2009, 南方地区耕地土壤肥力诊断与评价[S].
NY/T 1749-2009, Soil fertility diagnosis and evaluation method of farmland in Southern China[S].
- [27] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [28] 周艳, 万金忠, 李群, 等. 铅锌矿区玉米中重金属污染特征及健康风险评价[J]. 环境科学, 2020, **41**(10): 4733-4739.
Zhou Y, Wan J Z, Li Q, *et al.* Heavy metal contamination and health risk assessment of corn grains from a Pb-Zn mining area[J]. Environmental Science, 2020, **41**(10): 4733-4739.
- [29] 陈雅丽, 翁莉萍, 马杰, 等. 近十年中国土壤重金属污染源解析研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(10): 2219-2238.
Chen Y L, Weng L P, Ma J, *et al.* Review on the last ten years of research on source identification of heavy metal pollution in soils[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(10): 2219-2238.
- [30] Hou Q Y, Yang Z F, Ji J F, *et al.* Annual net input fluxes of heavy metals of the agro-ecosystem in the Yangtze River delta, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2014, **139**: 68-84.
- [31] GB 15618-2018, 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].
GB 15618-2018, Soil environmental quality risk control standard for soil contamination of agricultural land[S].
- [32] Lei M, Zhang Y, Khan S, *et al.* Pollution, fractionation, and mobility of Pb, Cd, Cu, and Zn in garden and paddy soils from a Pb/Zn mining area[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, **168**(1-4): 215-222.
- [33] McGrath S P, Zhao F J. Concentrations of metals and metalloids in soils that have the potential to lead to exceedance of maximum limit concentrations of contaminants in food and feed[J]. Soil Use and Management, 2015, **31**(S1): 34-45.

- [34] GB 2762-2017, 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].
- [35] Yang Y, Chang A C, Wang M E, *et al.* Assessing cadmium exposure risks of vegetables with plant uptake factor and soil property[J]. *Environmental Pollution*, 2018, **238**: 263-269.
- [36] 孙清斌, 尹春芹, 邓金锋, 等. 大冶矿区土壤-蔬菜重金属污染特征及健康风险评价[J]. *环境化学*, 2013, **32**(4): 671-677.
- Sun Q B, Yin C Q, Deng J F, *et al.* Characteristics of soil-vegetable pollution of heavy metals and health risk assessment in Daye mining area[J]. *Environmental Chemistry*, 2013, **32**(4): 671-677.
- [37] 涂春艳, 陈婷婷, 廖长君, 等. 矿区农田蔬菜重金属污染评价和富集特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2020, **39**(8): 1713-1722.
- Tu C Y, Chen T T, Liao C J, *et al.* Pollution assessment and enrichment characteristics of heavy metals in farmland vegetables near a mining area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, **39**(8): 1713-1722.
- [38] 陈志良, 黄玲, 周存宇, 等. 广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价[J]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 389-398.
- Chen Z L, Huang L, Zhou C Y, *et al.* Characteristics and evaluation of heavy metal pollution in vegetables in Guangzhou[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 389-398.
- [39] Sun F F, Wang F H, Wang H, *et al.* Soil threshold values of total and available cadmium for vegetable growing based on field data in Guangdong province, South China[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2013, **93**(8): 1967-1973.
- [40] 孙硕, 李菊梅, 马义兵, 等. 河北省蔬菜大棚土壤及蔬菜中重金属累积分析[J]. *农业资源与环境学报*, 2019, **36**(2): 236-244.
- Sun S, Li J M, Ma Y B, *et al.* Accumulation of heavy metals in soil and vegetables of greenhouses in Hebei province, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, **36**(2): 236-244.
- [41] 马宏宏, 彭敏, 刘飞, 等. 广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 449-459.
- Ma H H, Peng M, Liu F, *et al.* Bioavailability, translocation, and accumulation characteristic of heavy metals in a soil-crop system from a typical carbonate rock area in Guangxi, China[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 449-459.
- [42] 窦韦强, 安毅, 秦莉, 等. 叶菜类蔬菜产地镉环境质量类别划分技术研究[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(9): 3942-3951.
- Dou W Q, An Y, Qin L, *et al.* Study on the classification technology of the environmental quality category of cadmium in leaf vegetable production area [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(9): 3942-3951.



CONTENTS

Disinfection By-products in Drinking Water and Their Control Strategies: A Review	CHU Wen-hai, XIAO Rong, DING Shun-ke, <i>et al.</i> (5059)
Advances in Mechanism and Influencing Factors Affecting Hydrogen Sulfide Adsorption by Biochar	XU Qi-yong, LIANG Ming-shen, XU Wen-jun, <i>et al.</i> (5086)
Effect of Vegetation Coverage on the Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentration in China's Eight Major Economic Regions from 1998 to 2016	YANG Yu-lian, YANG Kun, LUO Yi, <i>et al.</i> (5100)
Evolution and Potential Source Apportionment of Atmospheric Pollutants of Two Heavy Haze Episodes During the COVID-19 Lockdown in Beijing, China	ZHAO De-long, TIAN Ping, ZHOW Wei, <i>et al.</i> (5109)
Characteristics and Origin Analysis of Air Pollution During the Spring Festival in Linfen, Fenwei Plain	LIU Wei-jie, HU Tian-peng, MAO Yao, <i>et al.</i> (5122)
Spatio-Temporal Characteristics and Potential Source Areas of Seasonal Atmospheric Pollution in Shijiazhuang	NIE Sai-sai, WANG Shuai, CUI Jian-sheng, <i>et al.</i> (5131)
Impact of Air Humidity on PM _{2.5} Mass Concentration and Visibility During Winter in Tianjin	DING Jing, TANG Ying-xiao, HAO Tian-yi, <i>et al.</i> (5143)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Chengde	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, WANG Shuai, <i>et al.</i> (5152)
Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Inventory from Domestic Sources in China	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SHEN Guo-feng, <i>et al.</i> (5162)
Characteristics of Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission in China from 2011 to 2019	LIU Rui-yuan, ZHONG Mei-fang, ZHAO Xiao-ya, <i>et al.</i> (5169)
VOCs Emission Inventory and Uncertainty Analysis of Industry in Qingdao Based on Latin Hypercube Sampling and Monte Carlo Method	XU Wan-ying, FU Fei, LÜ Jian-hua, <i>et al.</i> (5180)
Emission Characteristics and Environment Impacts of VOCs from Typical Rubber Manufacture	WANG Hai-lin, XIN Guo-xing, ZHU Li-min, <i>et al.</i> (5193)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Different Functional Zones of Shenyang, China	KU Ying-ying, REN Wan-hui, SU Cong-cong, <i>et al.</i> (5201)
Characteristics of BTEX and Health Risk Assessment During Typical Pollution Episodes in Summer and Winter in Tianjin Urban Area	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, PU Wei-wei, <i>et al.</i> (5210)
Atmospheric NH ₃ Emission Inventory and Analysis of the Driving Force in Zhengzhou City	JI Yao, WANG Chen, LU Xuan, <i>et al.</i> (5220)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of O ₃ Concentrations Based on GAMs Model in Chengdu	ZHANG Ying, NI Chang-jian, FENG Xin-yuan, <i>et al.</i> (5228)
Spatial Variation Characteristics and Remote Sensing Retrieval of Total Suspended Matter in Surface Water of the Yangtze River	LI Jian-hong, HUANG Chang-chun, ZHA Yong, <i>et al.</i> (5239)
Spatial Distribution Characteristics of the Spectrum, Source Analysis, and Nitrogen Response of Dissolved Organic Matter in Summer Rainfall in the Hebei Province	ZHANG Zi-wei, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (5250)
Distribution and Influencing Factors of DOM Components in Urban and Suburban Polluted Rivers	ZHU Yi, CHEN Hao, DING Guo-ping, <i>et al.</i> (5264)
Composition and Distribution of Microplastics in the Water and Sediments of Urban Rivers in Beijing	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Di, <i>et al.</i> (5275)
Nontarget Screening and Ecological Risk Assessment of Polar Organic Pollutants in Surface Water on the West Bank of Taihu Lake	LU Xin-yan, WANG Fei, ZHANG Li-min, <i>et al.</i> (5284)
Optimization of Extraction Methods and Distribution Characteristics of Antibiotics and Metabolites in Sediments of a River Water-Groundwater Interaction Zone	LI Yu-qiong, TONG Lei, YAN Han, <i>et al.</i> (5294)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Desilting Demonstration Area in Baiyangdian Lake	WANG Tong-fei, ZHANG Wei-jun, LI Li-qing, <i>et al.</i> (5303)
Dynamic Mechanisms of Groundwater Quality by Residual Contaminants of the Tanghe Wastewater Reservoir in Xiong'an New Area	ZHANG Zhi-xiong, WANG Shi-qin, ZHANG Yi-zhang, <i>et al.</i> (5312)
Analysis and Prediction of Health Risk from Heavy Metals in Drinking Water Sources Based on Time Series Model	JI Chao, HOU Da-wei, XIE Li, <i>et al.</i> (5322)
Spatial Distribution, Risk, and Influencing Factors of River Water-Sediment Heavy Metals in the Lower Reaches of the Qianhe River	GAO Yu, WANG Guo-lan, JIN Zi-han, <i>et al.</i> (5333)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake Basin During the Wet Season	HE Miao, LIU Gui-jian, WU Lei, <i>et al.</i> (5346)
Impact of Enclosure Culture on Heavy Metal Content in Surface Sediments of Hongze Lake and Ecological Risk Assessment	ZI Xin-yuan, ZHANG Ming, GU Xiao-hong, <i>et al.</i> (5355)
Natural Water Chemistry Change in the Surface Water of Chengdu and Impact Factors	XU Qiu-jin, LAI Cheng-yue, DING Yao, <i>et al.</i> (5364)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Groundwater in the Leizhou Peninsula	PENG Hong-xia, HOU Qing-qin, ZENG Min, <i>et al.</i> (5375)
Land-based Nitrogen Pollution Source Structure and Spatial Distribution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DONG Si-qi, HUANG Chong (5384)
Output Characteristics of Nitrogen and Phosphorus from Non-Point Source Pollution of Typical Land Use in A Micro-Watershed in Hilly Red Soil Region	FANG Zhi-da, SU Jing-jun, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i> (5394)
Effects of Different Fertilization Patterns on Nitrogen Leaching Loss from Paddy Fields Under Reduced Nitrogen	JIANG Hai-bin, ZHANG Ke-qiang, ZOU Hong-tao, <i>et al.</i> (5405)
Effects of <i>Spartina alterniflora</i> Invasion on Soil Phosphorus Forms in the Jiaozhou Bay Wetland	SHA Meng-qiao, CHAI Na, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i> (5414)
Contrasting Analysis of Microbial Community Composition in the Water and Sediments of the North Canal Based on 16S rRNA High-Throughput Sequencing	PENG Ke, DONG Zhi, DI Yan-ming, <i>et al.</i> (5424)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution by Si-modified Peanut Shell Biochar	ZHAO Min, ZHANG Xiao-ping, WANG Liang-rong (5433)
Adsorption Characteristics of Pb(II) on Eucalyptus Biochar Modified by Potassium Permanganate	MO Zhen-lin, ZENG Hong-hu, LIN Hua, <i>et al.</i> (5440)
Preparation of Mixed Metal Oxide/Carbon Composites and Its Adsorption Performance for Pb(II)	LU Yu-shen, ZONG Li, YU Hui, <i>et al.</i> (5450)
Fabrication of Supported Titanium Xerogel Adsorbent and Performance Evaluation for Arsenite Removal	SUN Ye-yang, ZHOU Chang, GAN Yong-hai, <i>et al.</i> (5460)
Nitrite Regulation During Start-up of Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	ZUO Fu-min, ZHENG Rui, SUI Qian-wen, <i>et al.</i> (5472)
Effects of Biochar and Straw Return on Soil Aggregate and Organic Carbon on Purple Soil Dry Slope Land	DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (5481)
Response of Soil Organic Carbon Content in Different Slope Positions to Fertilization Management in Purple Soil Sloping Fields	XU Man, YU Luo, WANG Fu-hua, <i>et al.</i> (5491)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	LAI Shu-ya, DONG Qiu-yao, SONG Chao, <i>et al.</i> (5500)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Suburban Farmland Soil	ZHANG Xiu-xiu, LU Xiao-li, WEI Yu-chen, <i>et al.</i> (5510)
Accumulation Characteristics and Dietary Exposure Estimation of Heavy Metals in Vegetables from the Eastern Coastal Region of China	SUN Shuai, GENG Ning-bo, GUO Cui-cui, <i>et al.</i> (5519)
Security Risk and Influencing Factors of Agro-Products in Farmland Soil Around a Typical Mining Smelter	HUO Yan-hui, WANG Mei-e, XIE Tian, <i>et al.</i> (5526)
Cd Pollution and Safe Planting Zoning in Paddy Soils: A Case Study in a District of Chongqing	CAO Shu-zhen, MU Yue, CUI Jing-xin, <i>et al.</i> (5535)
Characteristics and Influencing Factors of Cadmium Accumulation in Different Rice Varieties Under Cadmium Contaminated Field Conditions	WANG Yu-hao, YANG Li, KANG Yu-chen, <i>et al.</i> (5545)
Effects of Nano-membrane on Aerobic Composting Process and Odor Emission of Livestock Manure	LI Yong-shuang, SUN Bo, CHEN Ju-hong, <i>et al.</i> (5554)