

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

不同国家农用地土壤环境标准比较与启示
李勣之, 姜璐, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年2月

第43卷 第2期
Vol.43 No.2

目次

综述

- 不同国家农用地土壤环境标准比较与启示 李勤之, 姜蓉, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁 (577)
- 再生水水质稳定性评价指标与体系 张馨怡, 魏东斌, 杜宇国 (586)

研究报告

- 兰州市采暖期和非采暖期大气降尘重金属的分布特征及来源 黄文, 王胜利 (597)
- 基于多种新型受体模型的 PM_{2.5} 来源解析对比 王振宇, 李永斌, 郭凌, 宋志强, 许艳玲, 王丰, 梁维青, 史国良, 冯银厂 (608)
- 华中地区夏季 PM_{2.5} 中水溶性离子污染特征及来源分析 苏业旺, 刘威杰, 毛瑶, 程铨, 石明明, 许安, 李星谕, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (619)
- 淄博 2021 年元宵节 PM_{2.5} 水溶性离子污染特征 陈巧, 吴丽萍, 徐勃, 张向炎, 李梦辉, 赵雪艳, 杨文 (629)
- 浙江省大气颗粒物 PM_{2.5} 中全氟化合物污染特征分析及健康风险评估 李冰洁, 陈金媛, 刘铮铮, 王静, 何士冲 (639)
- 2001~2019 年气象条件对江苏省 PM_{2.5} 分布的影响 潘晨, 康志明 (649)
- 基于神经网络和数值模型的重点区域 PM_{2.5} 预报比较分析 高愈霄, 汪巍, 黄永海, 王晓彦, 朱媛媛, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (663)
- 2015~2020 年海南省臭氧时空变化及其成因分析 符传博, 徐文帅, 丹利, 佟金鹤 (675)
- 济南市城区夏季臭氧污染过程及来源分析 孙晓艳, 赵敏, 申恒青, 刘杨, 杜明月, 张文娟, 许宏宇, 范国兰, 公华林, 李青松, 李大秋, 高晓梅, 张丽娜 (686)
- 山东临沂大气夏季典型时段臭氧污染特征及其控制因素分析 杨雪, 安馨悦, 刘玉启, 江春美, 张鹏程, 李灵婕, 赵世阳, 张书源 (696)
- 基于气团老化程度对挥发性有机物分类改善 PMF 源解析效果 朱玉凡, 陈强, 刘晓, 张瑞欣, 郭文凯 (707)
- 日照市夏季 VOCs 物种空间分布特征及其对臭氧生成的影响 姚维杰, 王大玮, 谢付堂, 朱宏伟, 孟祥宇, 田雨, 刘航, 刘晓咏, 张宇婷, 雷山东, 孙业乐, 吴林, 潘小乐, 王自发 (714)
- 泰山大气卤代烃的长期变化趋势与来源 赵峰, 陈天舒, 董灿, 李洪勇, 刘子璐, 毕于健, 国兆新, 王新锋, 杨凌霄, 王韬, 王文兴, 薛丽坤 (723)
- 典型内燃叉车尾气挥发性有机物与正构烷烃的排放特征 周文钦, 李成, 刘俊文, 朱曼妮, 桂小亮, 余飞, 廖松地, 姜帆, 李光辉, 蒋斌, 郑君瑜 (735)
- 2000~2020 年黄河流域植被时空演化驱动机制 田智慧, 任祖光, 魏海涛 (743)
- 西南喀斯特流域土地利用对河流溶解无机碳及其同位素的影响 徐森, 李思亮, 钟君 (752)
- 生物炭添加对太湖滨岸带土壤氮矿化和淋失特征的影响 熊钰婷, 袁旭音, 周慧华, 高一丹, 汪宜敏 (762)
- 不同降雨条件下北运河河岸带类型对径流污染削减效果的影响 朱利英, 赵凯, 张俊亚, 王春荣, 魏源送 (770)
- 雨源型城市河流污染特征及水质联合评价: 以深圳龙岗河为例 毕业亮, 王华彩, 夏兵, 姜参参, 吴伟业, 李志林, 李诗敏, 宿辉, 白志辉, 徐圣君, 庄绪亮 (782)
- 廊坊市区径流污染时空分布特征及来源解析 潘欣荣, 左剑恶, 张宇, 门聪, 张丽萍, 黄守斌 (795)
- 北运河京津冀段河道浮游微生物群落多样性变化分析 郭芝芝, 苏振华, 邱琰茗, 郭道宇 (803)
- 河北省典型景观水体反硝化菌群落时空分布特征及驱动因素: 以石家庄为例 陈召莹, 张紫薇, 张甜娜, 周石磊, 张艺冉, 董宛佳, 于明会, 张一凡, 张家丰 (813)
- 青海湖流域有色可溶性有机物来源与特征分析 俞晓琴, 孟先强, 吴华武, 陈慧敏, 李宇阳, 朱俊羽, 郭燕妮, 姚磊 (826)
- 鄱阳湖丰枯情景对有色可溶性有机物生物可利用性及收支平衡的影响 郭燕妮, 姚晓龙, 陈慧敏, 俞晓琴, 李宇阳, 朱俊羽, 韩龙飞, 周蕾, 周永强 (837)
- 鄱阳湖沉积物溶解性有机质光谱特征 罗燕清, 万智巍, 晏彩霞, 聂明华, 丁明军, 鞠民, 刘赞 (847)
- 汤逊湖表层沉积物重金属污染与潜在生态风险评价 李星谕, 李朋, 苏业旺, 石明明, 胡天鹏, 毛瑶, 刘力, 张雅, 邢新丽, 祁士华 (859)
- 基于核密度估计的城市基础要素与街尘营养元素含量特征关联 王子娇, 李叙勇 (867)
- 新冠疫情下武汉典型饮用水水源中 DBPs 污染特征与风险评估 张坤峰, 昌盛, 涂响, 付青, 杨光, 樊月婷, 孙兴滨 (878)
- 铁改性石英砂过滤协同控制饮用水含氮消毒副产物和条件致病菌 齐鹏, 胡春, 邢学群, 毕志浩, 李泽松 (887)
- 氮掺杂生物炭催化臭氧对于布洛芬的降解特性与机制 柴铨, 许路, 金鑫, 石炬, 吴晨曦, 金鹏康 (896)
- 环糊精多孔聚合物对水中染料分子的吸附性能及主客效应 赵传靓, 王子婕, 闫仪, 徐慧, 周俊垣, 杨利伟, 王东升 (907)
- 冷冻 PN/A 颗粒污泥快速活化过程中的污泥形态与菌群演化特征分析 黄子恒, 张立, 崔舒惠, 张琦英, 文言, 钱飞跃 (920)
- 不同阳离子聚丙烯酰胺有机脱水剂对污泥脱水性能的影响 冯齐云, 高宝玉, 岳钦艳, 石伟杰, 冯春晖, 周继柱, 王国瑞 (928)
- 云南某矿区小流域土壤重金属健康风险评价 刘洋, 何朝辉, 牛学奎, 张迪, 潘波 (936)
- 山地平原过渡带耕地土壤重金属空间特征及潜在生态风险因素探析 张丁, 黄容, 高雪松 (946)
- 地累积指数法评价多金属环境质量的方法优化探索: 以农业发达地区为例 鞠铁男, 雷梅 (957)
- 西南地质高背景区蔬菜 Pb 的安全生产阈值与土地质量类别划分 穆德苗, 孙约兵 (965)
- 典型锰矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征及生态风险评价 黄钟霆, 易盛炜, 陈贝贝, 彭锐, 石雪芳, 李峰 (975)
- 矿业废弃地不同生态修复模式下植物多样性及重金属富集迁移特征 周鹏飞, 张世文, 罗明, 魏洪斌, 宋强, 方兵, 庄红娟, 陈弘扬 (985)
- 不同种植年限蔬菜大棚土壤特性、重金属累积和生态风险 任强, 孙瑞玲, 郑凯旋, 刘祎丹, 阮心玲, 王洋洋 (995)
- 温室与大田种植方式对胡萝卜生长过程中重金属吸收的影响 曹春, 任丹, 吕贞英, 张鹏, 李锦超, 陈勋文, 王俊坚 (1004)
- 两种淹水模式下施用钝化材料对镉污染农田水稻安全的影响 王港, 余海英, 李廷轩, 唐婵 (1015)
- 复合淋洗条件下农用地耕作层土壤去镉效率及其功能调节 曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (1023)
- 产多胺细菌调控根际细菌群落阻控小麦 Cd 吸收效应 李晓哲, 覃善梅, 陈兆进, 张君, 姚伦广, 李娜, 庞发虎, 韩辉 (1031)
- 土壤 *phoC* 和 *phoD* 微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应 杨文娜, 余冻, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 王子芳, 高明 (1040)
- 刺槐林恢复过程中土壤微生物碳降解酶的变化及与碳库组分的关系 李文杰, 张颖皎, 赵雅萍, 许森平, 任成杰, 杨改河, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娟, 韩新辉 (1050)
- 中亚热带不同林龄马尾松林土壤酶学计量特征 焦鹏宇, 郭文, 陈泽龙, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (1059)
- 稻田与旱地土壤中真菌和细菌对秸秆碳的利用特征 邓少虹, 郑小东, 毛婉琼, 陈香碧, 胡亚军, 程爱武, 何寻阳, 苏以荣 (1069)
- 模拟及实际根系分泌物对苤蓝土壤微生物群落的影响 韩博远, 张闻, 胡芳雨, 赵庆庆, 卢媛, 孔学, 吕俊岗 (1077)
- 德兴铜矿区抗生素抗性基因污染特征及其驱动因子 韩柳, 楼倩, 乔敏, 刘梦婷, 钟家有, 丁惠君 (1089)
- 陕西渭北旱塬区农田土壤有机质空间预测方法 尉芳, 刘京, 夏利恒, 徐仲伟, 龙小翠 (1097)
- 长三角农田轮作系统氨排放特征、转化机制和减排潜力 徐昶, 苗文亮, 倪远之, 沈根祥, 钱晓雍, 付侃, 高宗源, 王振旗 (1108)
- 《环境科学》征订启事(618) 信息(685, 935, 956)

西南地质高背景区蔬菜 Pb 的安全生产阈值与土地质量类别划分

穆德苗^{1,2}, 孙约兵^{1,2*}

(1. 东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030; 2. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津市农业环境与农产品安全重点实验室, 农业农村部产地环境污染防治重点实验室, 天津 300191)

摘要: 为确保西南地质高背景区与人类活动交互叠加的农田土壤 Pb 污染蔬菜品种的安全生产, 选取西南地区广泛食用的蔬菜作物 32 种, 利用相关性分析和多元线性回归分析等方法研究了土壤-蔬菜中 Pb 累积规律和关键制约因子, 西南地区农田土壤 Pb 生态安全阈值采用物种敏感度分布法确定。结果表明, 研究区土壤 $\omega(\text{Pb})$ 为 47.59 ~ 462.38 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 高于云南省土壤 Pb 背景值(90 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的 1.88 倍, 68.40% 的土壤样品超过农用地土壤污染风险管控标准的筛选值。蔬菜类作物可食用部分 $\omega(\text{Pb})$ 为 0.02 ~ 0.49 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 超标率达到 20.49%, 表现为: 叶菜类 > 根茎类 > 茄类 > 食用豆类 > 辣椒类。基于土壤 pH 值、OM 和 CEC 构建了蔬菜 Pb 吸收累积模型, 显示 pH 值为影响蔬菜 Pb 累积的首要关键因子。蔬菜 Pb 物种敏感度分布曲线显示叶菜类、茄类和食用豆类对 Pb 的敏感度较差, 根据蔬菜产地“优先保护、安全利用和严格管控”这 3 类区域土壤划分标准确定 Pb 阈值分别为: ≤ 100 、100 ~ 353 和 ≥ 353 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

关键词: 蔬菜; 铅(Pb); 物种敏感度分布法; 类别划分; 生态安全阈值

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)02-0965-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202105032

Safety Production Threshold and Land Quality Classification of Vegetable Pb in High Geological Background Area of Southwest China

MU De-miao^{1,2}, SUN Yue-bing^{1,2*}

(1. College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Agro-Environment and Agro-Product Safety, Key Laboratory of Original Agro-Environmental Pollution Prevention and Control, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China)

Abstract: In order to ensure the safe production of vegetables in Pb-contaminated farmland under the complex interactions of an extreme geological background area and human activities in Southwest China, 32 types of widely planted vegetable varieties in the southwest region were collected. Correlation analysis, multiple linear regression analysis, and other methods were used to study the accumulation of Pb in soil-vegetables and the key constraints. The threshold of soil Pb ecological security in farmland in southwest China was determined by the method of species sensitivity distribution. The results showed that $\omega(\text{Pb})$ of the soils was 47.59~462.38 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, which was 1.88 times higher than that of the background value of soil Pb in Yunnan Province (90 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), and 68.40% of the soil samples exceeded the screening value of the “Soil Environmental Quality Agricultural Land Soil Pollution Risk Management Standard” (GB 15618-2018). The content of Pb in the edible parts of vegetable crops ranged from 0.02 to 0.49 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, and the exceeding rate reached 20.49%. Pb concentration in the vegetables was in the decreasing sequence of leafy vegetables > roots and stems vegetables > eggplant vegetables > edible bean vegetables > pepper vegetables. Based on soil pH, OM, and CEC, the model of Pb accumulation in vegetables was constructed, in which pH was the first critical factor affecting Pb accumulation in vegetables. The sensitivity index of vegetable Pb species showed that leafy vegetables, eggplant vegetables, and a small number of frame bean vegetables were less sensitive to Pb. The soil Pb classification thresholds of the three types (priority protection, safe use, and strict control) of areas for vegetable safety production was ≤ 100 , 100-353, and ≥ 353 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively.

Key words: vegetable; lead (Pb); species sensitivity distribution method; classification; ecological security threshold

据统计^[1],我国耕地重金属污染面积达到2 000万 hm^2 ,占耕地总面积的 20%。然而,目前仍有约 80% 的重金属含量超标农田用于农作物生产,每年受重金属污染的粮食多达1 200万 t,造成直接经济损失达到 300 多亿^[2]。全国土壤污染状况调查公报显示^[3],Pb 点位超标率为 1.5%,呈现从西北到东南、从东北到西南方向逐渐上升的趋势。Pb 易在土壤中积累,影响作物产量和品质,并且可以通过食物链进入人体后引发贫血、萎缩性胃炎和严重危害神经系统等疾病^[4]。我国作为世界上蔬菜生产和消费的第一大国,土壤-蔬菜系统 Pb 污染问题广泛存在。

秦文淑等^[5]的研究通过调查广州市主要蔬菜市场的 12 种蔬菜,发现 Pb、Cr 和 Cd 超标率分别为 22.2%、38.9% 和 13.9%;刘娟等^[6]的研究对滇东 6 个市(州)农田土壤和农产品点位协同采样,农产品重金属 Pb 点位超标率为 11.9%;陈凤等^[7]的研究通过潜在生态风险指数对贵州省某典型锌冶炼区耕地土壤和主要谷类农作物(稻米、玉米和小麦)风

收稿日期: 2021-05-08; 修订日期: 2021-07-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800300); 国家自然科学基金项目(31971525)

作者简介: 穆德苗(1995~),女,硕士研究生,主要研究方向为污染土壤的修复技术, E-mail: 2542826077@qq.com

* 通信作者, E-mail: sunyuebing@aepi.org.cn

险进行评价,分析表明农作物存在 Pb、Cd、Zn 和 Cu 超标现象,食用该区域谷类农作物对成人和儿童均存在健康威胁.我国西南地区被认为是土壤 Pb 高背景值区域,主要来源于成土母质,是典型的碳酸盐岩地质高背景区,在高强度的人类活动叠加影响下,造成西南地区农田土壤 Pb 污染日趋严重^[8].因此,亟需在我国西南地区蔬菜产地开展土壤 Pb 质量类别划分,防控污染.

我国目前应用土壤环境质量标准(GB 15618-2018)中的风险筛选值和风险管控值“双值管理”,目的是有效地管理和防控农田土壤重金属污染,此标准可适用于所有农用地超过标准限值的土壤.在确定生态安全阈值的概率模型中一种主导的方法是物种敏感度分布法(species sensitivity distribution, SSD),其综合考虑了生物的有效性、土壤基本理化性质、物种的敏感度和污染物的主要来源等多种信息,被许多国家确立为制定污染物环境质量标准的核心方法^[9,10],目前国内开始用于农用地土壤重金属安全阈值的研究.窦伟强等^[11]的研究以农业农村部环境监测总站例行监测数据为基础,目的是保护 5%、50% 和 80% 的叶菜类蔬菜品种,通过物种敏感度分布法反推出叶菜类蔬菜产地土壤 Cd 环境质量类别划分阈值在 3 种不同土壤 pH 条件下(≤ 6.5 、 $6.5 \sim 7.5$ 和 ≥ 7.5).程菁靛等^[12]研究我国典型粮食产区水稻和土壤中 Pb 的协同调研数据,借助物种敏感度分布法,以保护不同比例水稻推导出“宜产、限产和禁产”区土壤 Pb 的含量.近年来,在我国土壤重金属 Pb 生态安全阈值方面的研究,主要关注于有准确污染来源下的研究,如污灌区^[13]、农业废弃物区^[14]和冶炼区^[15],但对于典型 Pb 地质高背景区农田土壤进行环境质量类别划分的研究却鲜见报道.

基于此,本研究通过测定西南某地质高背景区蔬菜和土壤 Pb 含量及土壤基本理化性质,研究影响蔬菜 Pb 富集的环境因子及累积规律,构建物种敏感度分布曲线(SSD)和多元线性回归模型探究当地土壤-蔬菜系统重金属 Pb 的富集特征,采用食品安全国家标准(GB 2762-2017)中 Pb 含量限值(蔬菜类 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),推导出符合当地蔬菜类农产品安全生产的农田土壤 Pb 生态安全阈值,以期为该地区农田土壤 Pb 环境质量标准的细化和风险防控提供技术支撑和参考依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

云南省安宁市坐落于东经 $102^{\circ}08' \sim 102^{\circ}37'$ 、北纬 $24^{\circ}31' \sim 25^{\circ}06'$,2020 年全国百强县之一,拥

有云南省最大的钢铁生产基地昆钢钢铁,集钢铁、盐矿、氮肥、磷肥厂和化工为一体的工业城市且地质背景复杂,主要成土母质为碳酸盐岩^[16].西南地区地质条件复杂,目前已发现多达 155 种矿产资源,其中,滇中矿产资源区矿产资源储量大,是全省的煤炭、铁、铜、铅和磷等矿产资源的主要产区^[16,17].研究区域位于螳螂川沿岸农田,螳螂川是滇池唯一出水口,流向自东北至西南,沿岸分布着众多钢铁冶金、磷肥化工和氯碱化工等企业,水质污染严重.本文研究面积 60.44 hm^2 ,地处滇中高原的东部边缘,地貌类型为螳螂川侵蚀地貌,海拔在 $1900 \sim 2000 \text{ m}$ 之间.土壤为山原红壤,气候属于中亚热带低纬度高海拔地区,年平均气温 14.9°C ,雨量充沛,年平均降水量约为 1000.5 cm ,年日照 2327.5 h .

1.2 供试材料

选择云南省广泛种植和食用的叶菜类蔬菜作物(18 种)、辣椒(3 种)、茄子(2 种)和食用豆类(9 种),具体蔬菜名称如表 1 所示.供试蔬菜作物种子均购置于安宁山海泉综合农贸市场.

1.3 试验设计

2020 年 6 月布置田间试验,共设置 96 个小区,每个小区种植一种作物,面积为 20 m^2 ($4 \text{ m} \times 5 \text{ m}$),每个小区随机排列设置 3 个重复,在种植过程中作物的田间管理与当地生产保持一致,按时施肥,除草和杀虫.2020 年 7 月 18 日收获辣椒、茄子和蔬菜样品,9 月 12 日收获食用豆类样品.每个采样点处采集多棵植株混匀约 0.5 kg ,与此同时采集作物样品对应的 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 根系土壤,混匀后约 1.5 kg 作为一个样点的土壤.

蔬菜样品用自来水冲洗干净,然后用超纯水冲洗 3 次后擦去表面水分称量蔬菜鲜重,放入烘箱中设置温度 105°C 杀青 30 min ,之后在 80°C 下烘干至样品恒重后称量蔬菜干重,测定蔬菜含水率.烘干后的蔬菜样品用研磨机粉碎,装入自封袋密封保存.对应的土壤样品剔除砂砾和植物根茎等残渣,风干后的土壤样品研磨分别过 20 目和 100 目尼龙筛,装于自封袋中备用.

1.4 样品分析测定

测定土壤理化性质的方法:利用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 容量法(NY/T 112162006)测定土壤有机质;采用土水比 1:2.5 的比例,之后利用 pH 计测定土壤的酸碱度(NY/T 13772007);土壤阳离子交换量(CEC)采用一次性平衡法测定.

土壤重金属 Pb 的测定:在 100 mL 锥形瓶中放入待测土样(称取 4.0 g),土壤与 DTPA 提取剂的比

表 1 种植蔬菜名称

Table 1 Planted vegetable name				
作物类别	序号	品种	品牌名称	采样日期(月-日)
叶菜类	1	生菜	耐抽苔 369 意大利生菜	07-18
	2	生菜	美国大速生	07-18
	3	生菜	结球生菜	07-18
	4	菠菜	色列斯-001	07-18
	5	菠菜	春农超级菠菜 3988	07-18
	6	上海青	真好吃	07-18
	7	油菜	白雪公主矮脚白	07-18
	8	碎叶苦苣	宏图种苗	07-18
	9	油麦菜	香甜无斑油麦	07-18
根茎类	10	葱	四季香葱	07-18
	11	香芹	建水白香芹	07-18
	12	茼蒿	精品小叶茼蒿	07-18
	13	韭菜	四季韭菜	07-18
	14	空心菜	顶级竹叶空心菜	07-18
	15	早生快菜	倍盛珍美	07-18
	16	小白菜	赣蔬爽快	07-18
	17	夏秋宝	夏秋宝胶白	07-18
	18	大白菜	青绿 78	07-18
茄果类	19	茄子	种都高科墨茄	07-18
	20	茄子	昆明紫长茄	07-18
	21	辣椒	原种朝天椒	07-18
	22	辣椒	京育甜杂辣	07-18
	23	辣椒	小扭扭椒	07-18
食用豆类	24	大豆	292 黄豆种	09-12
	25	豌豆	荷兰大菜豌	09-12
	26	豌豆	粉花小荚	09-12
	27	架豆	美国供给者(地豆)	09-12
	28	架豆	顶级奶油豆	09-12
	29	架豆	精品紫架豆	09-12
	30	架豆	将军一点红	09-12
	31	架豆	顶级无筋架豆王	09-12
	32	架豆	压塌架肉豆王	09-12

值均为 1:5,加入提取剂 0.005 mol·L⁻¹ DTPA 后浸提 2 h,在室温下(25℃)振荡 2 h,离心 10 min,取上清液过滤,然后测定土壤样品中 ω(有效态-Pb).利用 HNO₃-HClO₄-HF 体系消解土壤样品,测定土壤 ω(总量-Pb),进行质量控制时使用标准物质 SRMs-2586 控制.

植物样品的分析:采用 HNO₃ 消解,利用小麦粉(GBW08503c)进行质量控制.测定土壤、蔬菜样品中重金属 Pb 含量,均采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Ultimate 3000-i CAP QC).精密度和准确度均采用国家一级标准物质进行样品控制,土壤样品中所测元素的回收率均在 95%~102% 之间,测定的结果符合质量控制要求.

1.5 生物富集系数(BCF)

生物富集系数(BCF):蔬菜样品可食用部分 Pb 含量与土壤样品 Pb 含量比值,计算公式如下:

$$BCF = C_{crop}/C_{soil} \tag{1}$$

式中, C_{soil} 表示为土壤中的 Pb 总含量(mg·kg⁻¹),

C_{crop} 为作物可食用部分中 Pb 含量(mg·kg⁻¹).

1.6 SSD 曲线拟合及安全阈值的确定

根据重金属 Pb 的富集系数(BCF)把蔬菜样品按照大小排列,并按照顺序排列相应的序数 R,算出累积概率值(P),公式如下:

$$P = R/(N + 1) \tag{2}$$

式中, P 为作物所对应的累积概率数值, R 为蔬菜品种依据富集系数从小到大排列序号, N 为样本数.

在 Origin9.0 中以 1/BCF 为横坐标, P 为纵坐标,采用 Log-gistic 分布模型拟合不同品种蔬菜对重金属 Pb 的物种敏感度分布曲线,公式如下^[18]:

$$y = a \cdot [1 + (x/x_0)^b]^{-1} \tag{3}$$

式中, a、b 和 x₀ 均为拟合参数数值; y 为对应蔬菜品种的累积概率数值(%); x 为 1/BCF.

根据用 Log-gistic 分布模型拟合的 SSD 曲线,计算基于保护 80%、50% 和 5% 蔬菜品种所对应的 1/BCF 值^[19],根据文献[20]中不同作物 Pb 含量限值

计算出土壤中重金属 Pb 安全划分阈值,公式如下:

$$C_{soil} = C_{crop} / (1/HC_p) \tag{4}$$

式中, C_{soil} 为土壤中重金属 Pb 的环境质量类别划分阈值($mg \cdot kg^{-1}$); C_{crop} 为国家标准中作物 Pb 含量限值($0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); HC_p 代表保护 80%、50% 和 5% 作物所对应的 1/BCF 值.

1.7 数据分析

采用 SPSS 22.0 软件和 Excel 2010 程序完成试验数据的处理、试验数据的相关性分析和逐步回归分析,运用 Origin 9.1 软件绘制物种敏感度分布曲线.

2 结果与讨论

2.1 土壤理化性质与 Pb 含量特征

本试验区域土壤理化性质与 Pb 含量如表 2 所示. 试验区域土壤 pH 范围为 5.21 ~ 7.13, 平均值为 6.13 ± 0.37 , 以弱酸性土壤为主, 变异系数小于 15%, 属于弱变异水平. Hu 等^[21] 的研究表明, pH 较低的土壤种植的蔬菜更容易受到重金属的污染. ω [有机质(OM)] 为 $16.57 \sim 77.50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $(40.48 \pm 111.29) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有机质含量较高, 土壤较为肥沃. 阳离子交换量较低, 平均值为 $(5.18 \pm$

$1.58) \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, 范围为 $0.76 \sim 12.24 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$. 已有研究表明, 当土壤 $pH > 4$ 时, 土壤有机质的增加能够促进土壤 Pb 的活化^[22]. 农田土壤 ω (总量-Pb) 为 $47.59 \sim 462.38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $(169.52 \pm 21.14) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 是云南省土壤 Pb 背景值^[23] ($90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的 1.88 倍. 根据《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018) 规定, 土壤样品中有 68.40% 样品超过规定的筛选值, 17.29% 土壤样品超过规定的风险管控值, 表明种植区域已经受到 Pb 污染, 种植生产的蔬菜可能存在 Pb 污染风险. 土壤 ω (有效态-Pb) 较高, 平均值为 $(26.61 \pm 8.97) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 范围在 $6.56 \sim 53.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 并且变异系数超过 30%, 整体呈现中度变异水平, 可能的原因是汽车尾气和轮胎磨损产生的粉尘输入到土壤中, 也可能是化工和蓄电池等工厂企业废气排放出的重金属 Pb 进入大气中, 再经过大气沉降降落到土壤中, 在土壤中富集^[24,25]. 赵凯等^[26] 的研究表明, 坐落于高速公路附近或者交通繁忙区域周边的蔬菜基地内蔬菜 Pb 含量较高的一个关键原因是使用含 Pb 汽油. 重要的是, 叶菜类蔬菜表面吸附能力较强, 其表面主要富集来源于大气沉降的气态或尘态重金属 Pb^[27].

表 2 土壤基本理化性质与 Pb 含量¹⁾

Table 2 Basic physical and chemical properties and Pb content in test soils

项目	pH	ω (OM) / $g \cdot kg^{-1}$	CEC / $cmol \cdot kg^{-1}$	ω (有效态-Pb) / $mg \cdot kg^{-1}$	ω (总量-Pb) / $mg \cdot kg^{-1}$	ω (植物-Pb) / $mg \cdot kg^{-1}$	富集系数 /%
最小值	5.21	16.57	0.76	6.56	47.59	0.02	0.01
最大值	7.13	77.50	12.24	53.60	462.38	0.49	0.26
均值	6.13	40.48	5.18	26.61	169.52	0.18	0.13
标准差	0.37	11.29	1.58	8.97	21.14	0.12	0.07
变异系数	0.06	0.28	0.30	0.34	0.60	0.67	0.53
农用地土壤污染风险管控标准-筛选值	—	—	—	—	100.00	—	—
农用地土壤污染风险管控标准-管控值	—	—	—	—	400.00	—	—

1) 样品数为 288; “—”表示《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》规定中无此数据

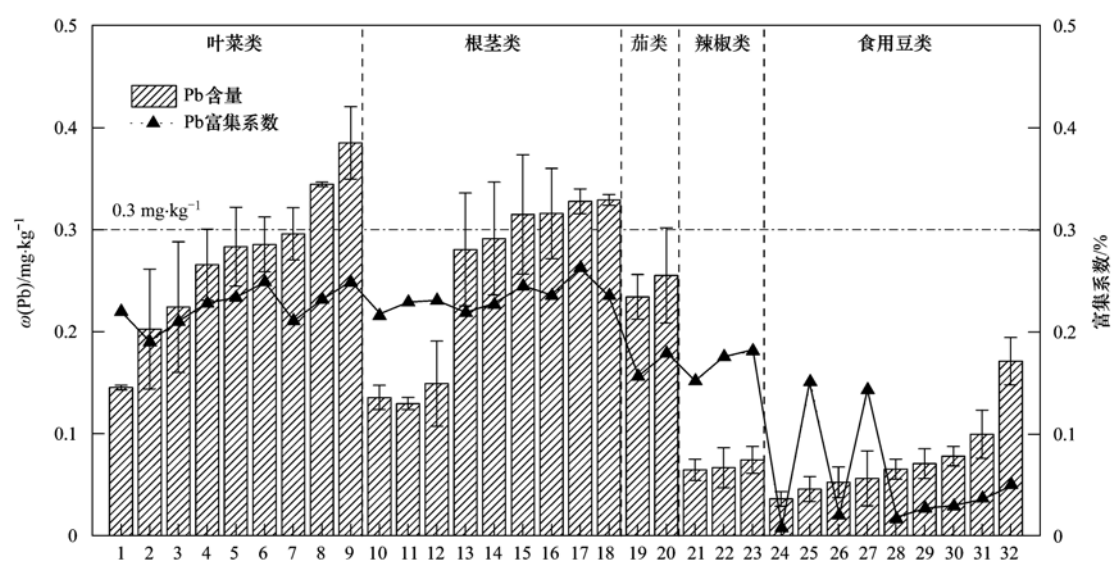
2.2 蔬菜类作物可食用部位对 Pb 富集特征及其关键影响因子

本试验区域种植 32 种蔬菜样品中, 蔬菜可食用部位 ω (总量-Pb) 以及富集系数如图 1 所示. 蔬菜可食用部分 ω (总量-Pb) 平均值是 $(0.18 \pm 0.12) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 范围在 $0.02 \sim 0.49 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间. 不同品种蔬菜重金属平均 ω (总量-Pb) 含量大小排列为: 叶菜类蔬菜 ($0.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 根茎类蔬菜 ($0.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 茄类蔬菜 ($0.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 食用豆类蔬菜 ($0.08 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 辣椒类蔬菜 ($0.07 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). 与《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762-2017) 标准中蔬菜重金属 Pb 的污染限值(蔬菜类 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 豆类蔬菜 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

相比, 本试验区域种植的蔬菜样品中重金属 Pb 超标率为 20.49%, 6 种蔬菜样品超过标准, 出现在根茎类和叶菜类蔬菜中, 其他品种蔬菜 Pb 均显示未超标, 且明显低于土壤中 Pb 的超标率(68.40%), 说明蔬菜产地存在土壤 Pb 超标而种植作物不超标的现象. 这与宗良纲等^[28] 的研究结果相似, 进行盆栽试验研究重金属 Cd 和 Pb 污染对 3 种叶菜类蔬菜(青菜、白菜和菠菜)生长影响, 结果表明蔬菜体内 Cd 和 Pb 累积含量与土壤中 Cd 和 Pb 含量呈显著线性相关. 已有研究认为叶菜类和茎菜类较其它蔬菜类别更易受到重金属污染, 可能由于重金属等污染物在叶片末端容易富集, 并且叶片生物量较多, 易吸收大气中气态的重金属, 导致其更易受到重金属污染^[29].

重金属 Pb 由土壤迁移到蔬菜样品中并累积, 然后通过食物链传递到人体, 对人体健康造成严重威胁. 生物富集系数是用于评估重金属从土壤到植物迁移的转移因子. 蔬菜样品 Pb 富集系数范围为 0.001%~0.263%, 变异系数为 0.53, 整体呈现中等至强变异水平, 其中叶菜类变异系数最大, 其变异水平最高. 对 Pb 平均富集系数大小排列为: 根茎类 (0.23%) > 叶菜类 (0.22%) > 茄类 (0.17%) > 辣椒类 (0.16%) > 食用豆类 (0.05%). 表明不同品种的蔬菜, 具有不同的基因型, 其蔬菜样品可食用部分对重金属 Pb 的吸收和富集能力具有明显差异, 推测

可能是土壤中不溶态的重金属能够被蔬菜植株所活化造成的, 蔬菜的品种不同把重金属从根际转运至地上部的迁移能力也不同, 富集能力较强的蔬菜其转运能力也会稍强, 因此, 重金属的含量在不同蔬菜中差异较明显^[30]. 其中, 重金属元素倾向于在植物代谢活跃的器官中富集, 而储存营养的器官相对富集较少, 对应植物各部位中重金属的含量从大到小排列为: 根 > 叶 > 枝 > 花 > 果 > 种子, 对于重金属富集能力在不同品种蔬菜中排列为根类菜 > 茎类菜 > 叶类菜 > 茄果类^[31], 这与本文结论相似, 根茎类和叶菜类蔬菜对 Pb 富集能力较强.



1. 油菜; 2. 色列斯 001; 3. 超级菠菜 3988; 4. 碎叶苦苣; 5. 上海青; 6. 结球生菜; 7. 油麦菜; 8. 意大利生菜; 9. 美国大速生; 10. 四季香葱; 11. 小叶茼蒿; 12. 青绿 78; 13. 小白菜; 14. 建水白香芹; 15. 旱生快菜; 16. 四季韭菜; 17. 夏秋宝胶白; 18. 顶级竹叶青空心菜; 19. 紫茄; 20. 墨茄; 21. 小扭扭椒; 22. 朝天椒; 23. 甜杂辣; 24. 压塌架豆王; 25. 292 黄豆; 26. 美国供给者; 27. 粉花小荚; 28. 顶级奶油豆; 29. 顶级架豆王; 30. 荷兰大菜碗; 31. 将军一点红; 32. 精品紫架豆

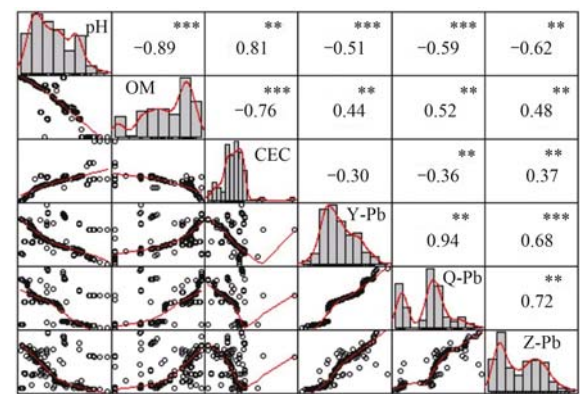
图 1 不同品种蔬菜 $\omega(\text{Pb})$ 与富集系数

Fig. 1 Pb contents and enrichment coefficients in different varieties of vegetables

为进一步阐明土壤重金属 Pb 污染对蔬菜质量安全的影响, 基于土壤-蔬菜样品的 Pb 数据并结合土壤理化性质, 探究土壤和蔬菜中重金属 ω (总量-Pb) 的关系. 在本文中, 蔬菜 and 土壤中 ω (总量-Pb) 与土壤基本理化性质之间的关系采用 Pearson 相关性分析, 如图 2 所示. 32 种蔬菜样品中 ω (总量-Pb) 与土壤 ω (总量-Pb) 呈显著正相关 ($R^2 = 0.724$, $P < 0.01$), 与土壤 ω (有效态-Pb) 呈现显著正相关 ($R^2 = 0.682$, $P < 0.01$). 随着土壤重金属 ω (总量-Pb) 的增加, 对应的土壤 ω (有效态-Pb) 也显著增加. 章明奎等^[32]的研究表明, 能够显著促进其他形态的 Pb 向可交换态 Pb 的转化是由于土壤的酸化, 从而造成土壤 Pb 的水溶性以及生物有效性显著增加. 土壤理化性质是影响重金属累积的关键因素, 其中 pH 值、土壤有机质 (OM) 和阳离子交换量 (CEC) 这 3

种性质的影响最为显著^[33]. 本研究中, 蔬菜 ω (总量-Pb) 与 pH 呈显著负相关性 ($R^2 = 0.622$, $P < 0.01$), 蔬菜 ω (总量-Pb) 与 CEC 呈显著正相关性 ($R^2 = 0.373$, $P < 0.01$), 蔬菜 ω (总量-Pb) 与 OM 呈显著正相关性 ($R^2 = 0.481$, $P < 0.01$). 土壤 pH 的下降和土壤有机质的积累能够对重金属生物有效性产生影响, pH 的下降容易造成土壤中的重金属活化, 以及土壤中生物有效性较高的交换态 Pb 以及水溶性 Pb 的含量和比例显著提高^[34]. 有机结合态 Pb 含量影响因素中最主要是有机质含量和 pH, 其中有机质含量与其呈极显著正相关^[35]. 试验区土壤 pH 值、OM 和 CEC 对土壤和蔬菜富集 Pb 的影响达到了不同程度的显著性水平, 其中 pH 值的影响最为显著.

根据相关性分析结果并利用 SPSS 22.0 逐步回



Y-Pb 表示土壤有效态 Pb 含量; Q-Pb 表示土壤总 Pb 含量; Z-Pb 表示蔬菜可食部 Pb 含量. 对角线左下方表示各属性数据的散点图; 对角线右上方表示两个属性间的相关性; 星号表示显著程度 (星号越多代表越显著)

图 2 土壤和蔬菜中 ω (总量-Pb) 与土壤理化性质的相关性关系
Fig. 2 Correlation between ω (total-Pb) in soil and vegetables and soil physical and chemical properties

归,拟合土壤理化性质(pH、OM、CEC)与Pb富集系数,构建Pb富集系数的逐步回归方程,结果如表3所示,表现出蔬菜Pb富集系数与土壤理化性质之间的线性关系.对于Pb富集系数的逐步回归方程确定变量只有pH值时,回归方程的确定系数为0.531($P < 0.01$),说明pH值能够控制逐步回归方程53.1%的变异水平;OM作为第二变量引入方程时,回归方程的确定系数改变为0.683($P < 0.01$),说明pH值和OM能控制逐步回归方程68.3%的变异水平,其中OM对回归方程准确度的贡献率确定为15.2%;当pH值、OM和CEC这3个影响因子全部引入时,回归方程的确定系数达到最高值,为0.781($P < 0.01$),能够解释蔬菜Pb富集系数78.1%的变异水平,CEC对回归方程准确度的贡献率确定为9.8%.因此,本研究使用基于pH值、OM和CEC构建的Pb三因子模型确定为: $\lg BCF = -0.366 \text{ pH} - 0.150 \lg(\text{OM}) + 0.091 \lg(\text{CEC}) - 3.835$,其中相关系数 R^2 确定为0.781,模型拟合效果最好.基于土壤理化性质而建立的经验模型优于其他模型,该模型能够很好地预测土壤理化性质对蔬菜富集重金属的影响,可为该区域土壤-蔬菜Pb生态安全阈值的研究提供理论依据^[36].

目前,国内对于农田土壤质量标准评价很少考虑到土壤性质的影响,且无法确保蔬菜的安全生产,

表 3 Pb 富集系数的逐步回归方程

回归方程	R^2	P
$\lg BCF = 0.372\text{pH} - 4.595$	0.531	<0.01
$\lg BCF = -0.410\text{pH} - 0.120 \lg(\text{OM}) - 4.484$	0.683	<0.01
$\lg BCF = -0.366 \text{ pH} - 0.150 \lg(\text{OM}) + 0.091 \lg(\text{CEC}) - 3.835$	0.781	<0.01

研究土壤-植物系统中重金属的累积关系,将对西南地区蔬菜的安全种植具有重要的指导意义.由相关性分析可知(图2),pH值、OM和CEC均能显著影响蔬菜 ω (总量-Pb),其中pH值与蔬菜 ω (总量-Pb)呈极显著负相关性($P < 0.01$),分析得出由于pH值的逐步增加,蔬菜样品对重金属Pb的富集能力逐渐降低,随着pH的升高,容易造成土壤对重金属的吸附固定能力增强,从而降低重金属有效态含量^[37];而与蔬菜 ω (总量-Pb)呈极显著正相关的是OM($P < 0.01$),在有机质与重金属的络合过程中,与有机质的吸附点位有关,吸附点位又与官能团的种类和数量有关.重金属能够被有机质的羧基、酚羟基等官能团电性引力吸附^[38,39].

CEC与蔬菜 ω (总量-Pb)呈极显著正相关($P < 0.01$),在CEC处于高含量时,增强土壤中重金属的有效性,增加植物根系与土壤溶液中离子的交换量,最终蔬菜中的重金属含量在一定程度上增加^[40].本研究计算所得生物有效性模型表明(表3),pH值、OM和CEC对模型准确度的贡献率分别为53.1%、15.2%和9.8%,其中对模型准确度的贡献率最大的是pH值,也验证了相关性分析的结果,杨阳等^[41]和史明易等^[42]的研究结论与本文的相一致.

2.3 不同蔬菜品种 Pb 敏感度分布曲线(SSD 曲线)与土壤生态安全阈值的确定

由于蔬菜产地土壤理化性质差异不明显,可直接采用蔬菜样品Pb富集系数构建物种敏感度分布曲线(SSD曲线).蔬菜产地重金属Pb的SSD曲线显示不同品种蔬菜对Pb的敏感度具有明显差异(图3),精品紫架豆、上海青、粉花小荚、碎叶苦苣、超级菠菜3988、顶级架豆王、甜杂辣、墨茄和紫茄位于SSD曲线的上端,对Pb的富集能力弱,敏感度差;美国供给者、顶级竹叶青空心菜、夏秋宝胶白、将军一点红、小扭扭椒、美国大速生、早生快菜、四季韭菜、色列斯001、压塌架豆王、小叶茼蒿和青绿78位于SSD曲线的下端,对Pb的富集能力强,敏感度也更高;小白菜、292黄豆、四季香葱、荷兰大菜豌、结球生菜、顶级奶油豆、意大利生菜、油麦菜、压塌架豆王、油菜和建水白香芹位于SSD曲线的中部,对Pb的富集能力以及敏感度处于中等水平.从蔬菜品种分析来看,叶菜类、茄类和少数架豆类大致分布在SSD曲线的上端,对Pb的敏感度较差;而根茎类蔬菜在SSD曲线的下端,对Pb的敏感度较强.由图3可知,蔬菜品种不同对Pb的敏感度差异影响显著,可能的原因是蔬菜自身的基因型差异造成的,其中茄类和食用豆类生长期

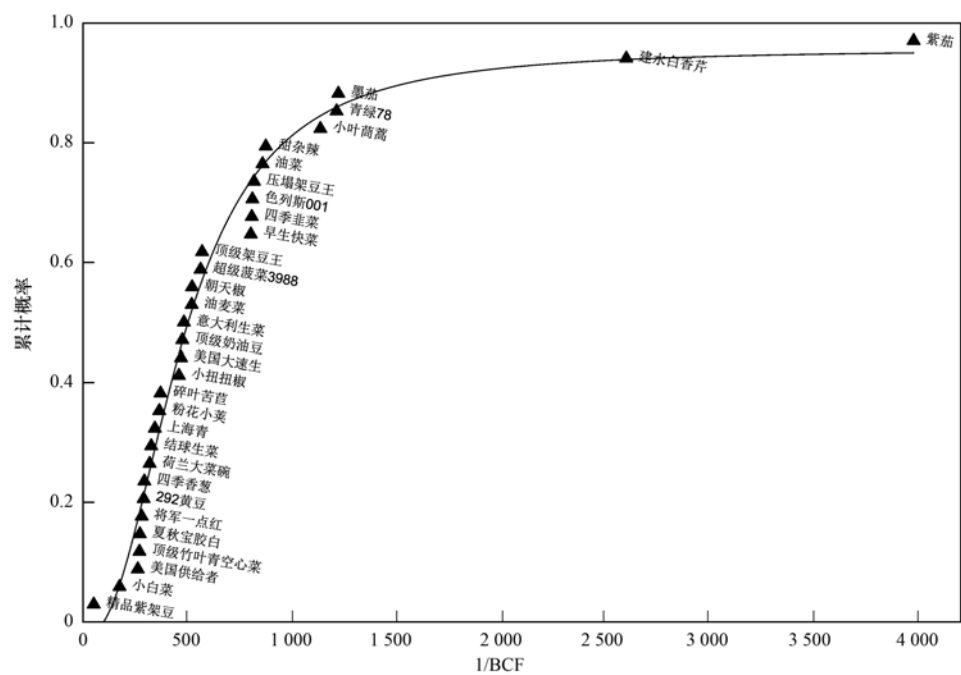


图3 蔬菜中Pb的SSD曲线

Fig. 3 Species sensitivity distribution curve of Pb in vegetables

较长,其他的都属于速生型蔬菜,生长期短.

土壤重金属生态阈值的确定能够为受污染农产品产地类别划分和土壤重金属污染的有效防控提供理论支撑. Punz 等^[43]和 Piechalak 等^[44]的研究将重金属对不同蔬菜的影响差异分为积累型、敏感型和排斥型这3类. 为了计算Pb的生态安全阈值,根据国家颁布的《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762-2017),推算出基于当地土壤情景下,以保护80%、50%和5%蔬菜品种不受农田土壤Pb污染的安全阈值. 本研究根据对Pb构建的物种敏感度分布曲线,得到土壤重金属Pb环境质量标准划分阈值,如表4所示. 当蔬菜产地土壤 $\omega(\text{总量-Pb}) \leq 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时意味着该区域适合绝大部分蔬菜的种植,可将该区域划分为优先保护类蔬菜产地;当蔬菜类产地 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} < \text{土壤}(\text{总量-Pb}) < 353 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,将该区划分为安全利用类蔬菜产地;当

蔬菜产地土壤 $\omega(\text{总量-Pb}) \geq 353 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,说明该区域已经不适合蔬菜的种植,可将该区划分为严格管控类蔬菜产地,当土壤Pb含量处于优先保护区时能保护80%蔬菜正常生长,可种植大部分蔬菜品种,一些高积累蔬菜品种如菠菜、辣椒和小白菜等种植需要采用以农艺调控为主的安全生产技术^[45],在种植过程中严格控制农业投入产物带来的重金属污染;当土壤中Pb的含量处于安全利用区时应禁止种植具有高富集能力的蔬菜,种植过程需要采用以农艺调控为主、土壤修复为辅的生产技术,并加强对土壤和蔬菜产品中Pb的协同监测^[46];当土壤中Pb的含量处于严格管控区时95%蔬菜容易受到Pb污染,已经不宜种植大部分蔬菜品种,应科学选择其他农作物或观赏性植物替代种植^[47]. 根据推算得出的Pb生态安全阈值,能够为该地区蔬菜种植品种的选择和污染农田土壤的风险管控提供理论依据.

表4 蔬菜类产地土壤Pb环境质量类别划分阈值¹⁾

Table 4 Classification threshold of Pb environmental quality in vegetable-producing areas				
Q/%	食品限量标准 /mg·kg ⁻¹	BCF/%	土壤生态安全划分阈值 /mg·kg ⁻¹	土壤质量类别
20	0.3	1.21	99.72	优先保护
50	0.3	0.95	211.27	安全利用
95	0.3	0.73	352.84	严格管控

1) Q 为作物所对应的累积概率数值

为了验证土壤Pb安全阈值的准确性,如图4所示. 对采集96对土壤-蔬菜样品独立进行数据的验证,推算出的土壤Pb环境质量类别划分阈值为横轴,蔬菜Pb标准限值为纵轴,划分为A、B、C和D

这4个区域分别代表点位样品土壤 $\omega(\text{Pb})$ 不超标蔬菜 $\omega(\text{Pb})$ 超标、土壤 $\omega(\text{Pb})$ 不超标蔬菜 $\omega(\text{Pb})$ 不超标、土壤 $\omega(\text{Pb})$ 超标蔬菜 $\omega(\text{Pb})$ 超标和土壤 $\omega(\text{Pb})$ 超标蔬菜 $\omega(\text{Pb})$ 不超标这4种情景. 96组验证数据

中土壤 ω (总量-Pb) 不超过阈值且蔬菜 ω (总量-Pb) 不超过国家限值($0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的样本数量占比为 82.30%, 落在 B 区域, 明显大于 80%, 土壤 ω (总量-Pb) 不超过阈值且蔬菜 ω (总量-Pb) 超过国家限值($0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的样本数量占比为 12.12%, 落在 A 区域; 土壤 ω (总量-Pb) 超过阈值($353 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)且蔬菜 ω (Pb) 不超过国家限值($0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的样本数量占比为 4.86%, 落在 D 区域, 说明本研究所划分的阈值具有一定的科学性和合理性。

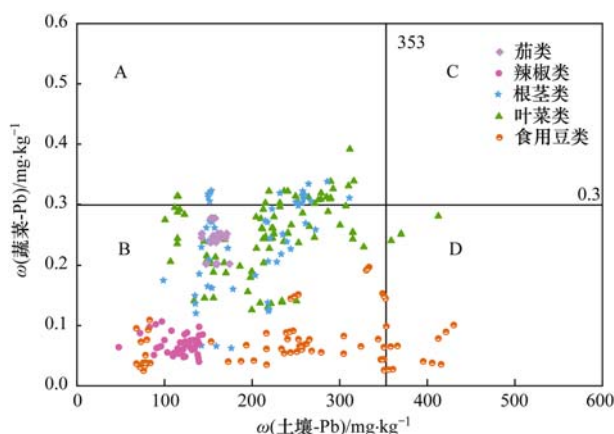


图4 土壤 Pb 含量划分阈值验证

Fig. 4 Verification of soil lead classification threshold

我国目前执行的土壤环境质量标准《农用地土壤污染风险管控标准》中的风险筛选值和管控值与计算出的 Pb 环境质量安全划分阈值进行比较, 本文推算出的蔬菜类优先保护类土壤 Pb 划分阈值($99.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)与国家标准的土壤污染风险筛选值($100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)相近, 但高于云南省背景值($90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 严格管控类土壤 Pb 划分阈值($353 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)低于国家标准中的土壤污染风险管控值($400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。由于现行的国家标准值是基于全国不同的土壤类型制定的, 土壤理化性质差异明显, 作物种类繁多。本研究得出的研究结果更接近于西南地区重金属污染土壤的实际情况和当地土壤基本理化性质, 使得划分阈值严于国家标准值。赵勇等^[48]的研究采用外源添加 Pb 的土培盆栽 ($\text{pH} = 7.11$), 建立了油麦菜、荆芥、蕹菜、生菜和苋菜与土壤中 Pb 含量的线性方程(R^2 为 $0.85 \sim 0.94$), 反推出荆芥、油麦菜、生菜、蕹菜和苋菜的土壤 Pb 阈值分别为 43.90 、 39.91 、 33.70 、 35.29 和 $34.54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 有研究计算出江苏省冲积土壤水稻土的 Pb 的安全阈值为 $36.54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[49]; 另有研究表明^[50], 叶菜类蔬菜对 Pb 的富集规律(小白菜和菜心土壤 pH 分别为 $5.83 \sim 6.73$ 和 $5.86 \sim 6.64$), 建立蔬菜和土壤 Pb 含量线性关系方程, 利用食品限量标准, 反推出适合种植菜心、小白菜的土壤 ω (总量-Pb) 分别是

$401.93 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $494.78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。不同蔬菜品种对 Pb 的富集能力有明显差异, 而蔬菜品种中叶菜类、根茎类蔬菜更容易吸收富集重金属 Pb。土壤理化性质对土壤 Pb 基准值的确定影响较大, 应根据具体土壤情景和蔬菜品种确定重金属 Pb 生态安全阈值。本试验于实际田间环境开展, 影响蔬菜富集重金属 Pb 的因素复杂多样, 基于 SSD 法计算得到的蔬菜产地土壤 Pb 的划分阈值与盆栽试验相比具有一定的差异性^[42]。考虑到我国农田土壤环境质量风险评价标准的不足, 之后将对应用 SSD 法计算土壤环境质量类别划分的科学性以及合理性进行验证和评估, 以期健全和完善我国西南地区土壤环境质量标准。

3 结论

(1) 蔬菜样品可食用部分 ω (总量-Pb) 为 $0.02 \sim 0.49 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $(0.18 \pm 0.12) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 对重金属 Pb 富集系数为 $0.01\% \sim 0.26\%$, 其中叶菜类 ω (Pb) 最大($0.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 变异系数也最大。在 5 种蔬菜类别中, Pb 富集系数排列为: 根茎类 > 叶菜类 > 茄类 > 辣椒类 > 食用豆类。

(2) 土壤 pH 值、OM 和 CEC 是影响蔬菜富集 Pb 的关键因子, 其构建的 3 因子模型为 $\lg \text{BCF} = -0.366\text{pH} - 0.150 \lg(\text{OM}) + 0.091 \lg(\text{CEC}) - 3.835$ ($R^2 = 0.781$, $P < 0.01$, $n = 288$)。

(3) 根据 32 种蔬菜构建的对 Pb 物种敏感度曲线分析表明, 叶菜类、茄类和架豆类(部分)大致分布在 SSD 曲线的上端, 对 Pb 富集能力弱, 敏感度也较差; 而根茎类蔬菜在 SSD 曲线的下端, 对 Pb 富集能力强, 敏感度也更高; 品种不同的叶菜类蔬菜对 Pb 的富集系数也存在较大差异。

(4) 目的是保护 95%、80% 和 50% 的蔬菜品种, 通过 Pb 物种敏感度分布曲线, 将西南地区农田土壤划分为优先保护类、安全利用类和严格管控类, 这 3 类区域 Pb 阈值划分确定为: ≤ 100 、 $100 \sim 353$ 和 $\geq 353 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [2] 傅国伟. 中国水土重金属污染的防治对策[J]. 中国环境科学, 2012, 32(2): 373-376.
Fu G W. Countermeasures for water and soil heavy metal pollution in China[J]. China Environmental Science, 2012, 32(2): 373-376.
- [3] 陈能场, 郑煜基, 何晓峰, 等. 《全国土壤污染状况调查公报》探析[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9): 1689-1692.
Chen N C, Zheng Y J, He X F, et al. Analysis of the report on the national general survey of soil contamination[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(9): 1689-1692.
- [4] 李志明, 吉庆勋, 杨曼利, 等. 我国农田土壤污染现状及防

- 治对策[J]. 河南农业, 2019, (23): 46-49.
- [5] 秦文淑, 邹晓锦, 仇荣亮. 广州市蔬菜重金属污染现状及对人体健康风险分析[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1638-1642.
- Qin W S, Zou X J, Qiu R L. Health risk of heavy metals to the general public in Guangzhou, China via consumption of vegetables[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(4): 1638-1642.
- [6] 刘娟, 李洋, 张敏, 等. 滇东农田土壤铅污染健康风险评价及基准研究[J]. 农业工程学报, 2021, 37(1): 241-250.
- Liu J, Li Y, Zhang M, et al. Health risk assessment and benchmark of lead pollution in agricultural soils in East Yunnan, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(1): 241-250.
- [7] 陈凤, 董泽琴, 王程程, 等. 锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评价[J]. 环境科学, 2017, 38(10): 4360-4369.
- Chen F, Dong Z Q, Wang C C, et al. Heavy metal contamination of soils and crops near a zinc smelter [J]. Environmental Science, 2017, 38(10): 4360-4369.
- [8] Clemens S, Aarts M G M, Thomine S, et al. Plant science: the key to preventing slow cadmium poisoning[J]. Trends in Plant Science, 2013, 18(2): 92-99.
- [9] 胡习邦, 曾东, 王俊能, 等. 应用物种敏感性分布评估苯胺的水生生态风险[J]. 生态环境学报, 2016, 25(3): 471-476.
- Hu X B, Zeng D, Wang J N, et al. Assessing aquatic ecological risk of aniline by species sensitivity distributions[J]. Ecological and Environmental Sciences, 2016, 25(3): 471-476.
- [10] DeForest D K, Schlekot C E. Species sensitivity distribution evaluation for chronic nickel toxicity to marine organisms[J]. Integrated Environmental Assessment and Management, 2013, 9(4): 580-589.
- [11] 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.
- [12] 程青靓, 赵龙, 杨彦, 等. 我国长江中下游水稻产区铅污染分区划分方法研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(1): 70-78.
- Cheng J L, Zhao L, Yang Y, et al. Classification methods for typical lead-contaminated rice production areas of the middle and lower Yangtze River in China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(1): 70-78.
- [13] 孟楠, 安平, 王萌, 等. 基于典型污灌区土壤筛选耐盐、Cd低吸收小麦品种[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(3): 409-414.
- Meng N, An P, Wang M, et al. Screening low-Cd wheat cultivars characterized with high salinity tolerance for typical sewage irrigation soils[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(3): 409-414.
- [14] 魏益华, 邱素艳, 张金艳, 等. 农业废弃物中重金属含量特征及农用风险评估[J]. 农业工程学报, 2019, 35(14): 212-220.
- Wei Y H, Qiu S Y, Zhang J Y, et al. Characteristic of heavy metal contents in agricultural wastes and agricultural risk assessment [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(14): 212-220.
- [15] 王金霞, 李谢玲, 何清明, 等. 三峡库区典型农业区土壤重金属污染特征及风险评价[J]. 农业工程学报, 2018, 34(8): 227-234.
- Wang J X, Li X L, He Q M, et al. Characterization and risk assessment of heavy metal pollution in agricultural soils in three gorge reservoir area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(8): 227-234.
- [16] 张健琳, 瞿明凯, 陈剑, 等. 中国西南地区金属矿开采对矿区土壤重金属影响的 Meta 分析[J]. 环境科学, 2021, 42(9): 4414-4421.
- Zhang J L, Qu M K, Chen J, et al. Assessing the effects of metal mining on soil heavy metal concentrations in southwest China based on meta-analysis [J]. Environmental Science, 2021, 42(9): 4414-4421.
- [17] 耿融, 吕品翰. 云南省矿产资源勘查开发与保护布局研究[J]. 价值工程, 2019, 38(18): 280-281.
- Geng R, Lv P H. Research on exploration, development and protection layout of mineral resources in Yunnan province [J]. Value Engineering, 2019, 38(18): 280-281.
- [18] Hickey G L, Craig P S. Competing statistical methods for the fitting of normal species sensitivity distributions: Recommendations for practitioners[J]. Risk Analysis, 2012, 32(7): 1232-1243.
- [19] 窦韦强, 安毅, 秦莉, 等. 我国南方水稻产地镉环境质量类别划分技术[J]. 环境科学, 2020, 41(12): 5562-5570.
- Dou W Q, An Y, Qin L, et al. Technological classification of cadmium quality in the rice producing areas of south China[J]. Environmental Science, 2020, 41(12): 5562-5570.
- [20] GB 2762-2017, 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].
- [21] Hu H X, Li J, Luan Y N. Meta-analysis of soil mercury accumulation by vegetables [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 1261.
- [22] 程会丹, 聂军, 鲁艳红, 等. 绿肥对土壤有机碳含量、质量及稳定性影响的研究进展[J]. 湖南农业科学, 2018, (8): 119-122.
- Cheng H D, Nie J, Lu Y H, et al. Research progress on the effects of green manure on quantity, quality and stability of soil organic carbon[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2018, (8): 119-122.
- [23] 成杭新, 李括, 李敏, 等. 中国城市土壤化学元素的背景值与基准值[J]. 地学前缘, 2014, 21(3): 265-306.
- Cheng H X, Li K, Li M, et al. Geochemical background and baseline value of chemical elements in urban soil in China [J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(3): 265-306.
- [24] 孙慧珍, 陆小静, 陈明月, 等. 哈尔滨市不同类型人工林土壤重金属含量[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 614-620.
- Sun H Z, Lu X J, Chen M Y, et al. Soil heavy metals concentration in different type plantations in Harbin City [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(3): 614-620.
- [25] 朱磊, 贾永刚, 潘玉英. 青岛北站规划区原场地表层土壤重金属污染研究[J]. 环境科学, 2013, 34(9): 3663-3668.
- Zhu L, Jia Y G, Pan Y Y. Study on pollution evaluation of heavy metal in surface soil of the original site of Qingdao north station [J]. Environmental Science, 2013, 34(9): 3663-3668.
- [26] 赵凯, 文典, 王其枫, 等. 广州市郊蔬菜重金属污染研究[J]. 广东农业科学, 2012, 39(11): 178-180.
- Zhao K, Wen D, Wang Q F, et al. Investigation of heavy metal pollution in vegetables in Guangzhou suburban [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2012, 39(11): 178-180.
- [27] 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, Hung 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.
- [28] 宗良纲, 孙静克, 沈倩宇, 等. Cd、Pb 污染对几种叶类蔬菜生长的影响及其毒害症状[J]. *生态毒理学报*, 2007, **2**(1): 63-68.
- Zong L G, Sun J K, Shen Q Y, *et al.* Impacts of cadmium and lead pollution in soil on leaf vegetables growth and toxic symptoms [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2007, **2**(1): 63-68.
- [29] 杜景东, 高凡, 王敬贤, 等. 京郊蔬菜重金属含量特征及安全评价[J]. *北京农学院学报*, 2014, **29**(3): 42-46.
- Du J D, Gao F, Wang J X, *et al.* Concentration analysis and health risk assessment of heavy metals in vegetables of Beijing suburban [J]. *Journal of Beijing University of Agriculture*, 2014, **29**(3): 42-46.
- [30] 黄玉源, 黄益宗, 李秋霞, 等. 广州市污水灌溉对菜地土壤和蔬菜的影响[J]. *环境化学*, 2005, **24**(6): 731-732.
- [31] Zurera-Cosano G, Moreno-Rojas R, Salmeron-Egea J, *et al.* Heavy metal uptake from greenhouse border soils for edible vegetables [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1989, **49**(3): 307-314.
- [32] 章明奎, 方利平, 张履勤. 酸化和有机质积累对茶园土壤铅生物有效性的影响[J]. *茶叶科学*, 2005, **25**(3): 159-164.
- Zhang M K, Fang L P, Zhang L Q. Effects of acidification and organic matter accumulation on lead bio-availability in tea garden soils [J]. *Journal of Tea Science*, 2005, **25**(3): 159-164.
- [33] 陈玉梅. 重金属低积累蔬菜种类筛选及胁迫下蔬菜对土壤重金属累积研究[D]. 杭州: 杭州师范大学, 2016.
- Chen Y M. Selection of low accumulation of heavy metals in vegetable varieties and Accumulation of heavy metals in vegetable under salt stress [D]. Hangzhou: Hangzhou Normal University, 2016.
- [34] 余涛, 杨忠芳, 钟坚, 等. 土壤中重金属元素 Pb、Cd 地球化学行为影响因素研究[J]. *地学前缘*, 2008, **15**(5): 67-73.
- Yu T, Yang Z F, Zhong J, *et al.* Factors affecting the geochemical behavior of heavy metal elements Pb and Cd in soil [J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, **15**(5): 67-73.
- [35] 万红友, 周生路, 陈杰, 等. 苏南经济快速发展区昆山市土壤铅形态含量及其影响因素[J]. *中国生态农业学报*, 2012, **20**(1): 87-92.
- Wan H Y, Zhou S L, Chen J, *et al.* Quantitative analysis of factors influencing soil Pb content in the high economic development region of South Jiangsu Province; a case study in Kunshan City [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, **20**(1): 87-92.
- [36] 高艺, 郑向群, 杨波. 不同类型土壤-小白菜中 Hg 转移的主控因素和预测模型[J]. *农业环境科学学报*, 2018, **37**(11): 2532-2540.
- Gao Y, Zheng X Q, Yang B. Major controlling factors and prediction models of Hg transfer from different soils to *Brassica chinensis* [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(11): 2532-2540.
- [37] 曹勤英, 黄志宏. 污染土壤重金属形态分析及其影响因素研究进展[J]. *生态科学*, 2017, **36**(6): 222-232.
- Cao Q Y, Huang Z H. Review on speciation analysis of heavy metals in polluted soils and its influencing factors [J]. *Ecological Science*, 2017, **36**(6): 222-232.
- [38] Qu J J, Song T, Liang J S, *et al.* Adsorption of lead (II) from aqueous solution by modified Auricularia matrix waste: A fixed-bed column study [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **169**: 722-729.
- [39] Reza A H M S, Jean J S, Lee M K, *et al.* The binding nature of humic substances with arsenic in alluvial aquifers of Chianan Plain, southwestern Taiwan [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2012, **114**: 98-108.
- [40] 丁琮, 陈志良, 李核, 等. 长株潭地区农业土壤重金属全量与有效态含量的相关分析[J]. *生态环境学报*, 2012, **21**(12): 2002-2006.
- Ding C, Chen Z L, Li H, *et al.* Correlation analysis of the heavy metal total contents and the available contents of agricultural soil in Chang-Zhu-Tan area [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, **21**(12): 2002-2006.
- [41] 杨阳, 李艳玲, 陈卫平, 等. 蔬菜镉(Cd)富集因子变化特征及其影响因素[J]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 399-404.
- Yang Y, Li Y L, Chen W P, *et al.* Variation characteristics of vegetables cadmium uptake factors and its relations to environmental factors [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 399-404.
- [42] 史明易, 王祖伟, 王嘉宝, 等. 基于富集系数对蔬菜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.
- [43] Punz F W, Sieghardt H. The response of roots of herbaceous plant species to heavy metals [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 1993, **33**(1): 85-98.
- [44] Piechalak A, Tomaszewska B, Baralkiewicz D, *et al.* Accumulation and detoxification of lead ions in legumes [J]. *Phytochemistry*, 2002, **60**(2): 153-162.
- [45] 韩峰, 高雪, 陈海燕. 不同种类蔬菜对土壤重金属的富集差异[J]. *贵州农业科学*, 2014, **42**(6): 129-132.
- Han F, Gao X, Chen H Y. Enrichment difference of different types of vegetables to heavy metals [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2014, **42**(6): 129-132.
- [46] 张帆, 谢玲玲, 弥宝彬, 等. 蔬菜对重金属镉富集研究进展[J]. *湖南农业科学*, 2017, (7): 127-130.
- Zhang F, Xie L L, Mi B B, *et al.* Research progress on heavy metal cadmium enrichment in vegetables [J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2017, (7): 127-130.
- [47] 杨侨, 赵龙, 孙在金, 等. 复合钝化剂对污灌区镉污染农田土壤的钝化效果研究[J]. *应用化工*, 2017, **46**(6): 1037-1041, 1050.
- Yang Q, Zhao L, Sun Z J, *et al.* Study on passivation effects of multi-passivators on the cadmium (Cd) contaminated soils in sewage irrigation area [J]. *Applied Chemical Industry*, 2017, **46**(6): 1037-1041, 1050.
- [48] 赵勇, 李红娟, 魏婷婷, 等. 土壤、蔬菜的铅污染相关性分析及土壤铅污染阈值研究[J]. *中国生态农业学报*, 2008, **16**(4): 843-847.
- Zhao Y, Li H J, Wei T T, *et al.* Relationship between soil Pb pollution and Pb contents in vegetables and pollution threshold of soil Pb [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, **16**(4): 843-847.
- [49] Egendorf S P, Spliethoff H M, Shayler H A, *et al.* Soil lead (Pb) and urban grown lettuce: Sources, processes, and implications for gardener best management practices [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, **286**(5), doi: 10.1016/J.JENVMAN.2021.112211.
- [50] Li F R, Wen D, Wang F H, *et al.* Derivation of soil Pb/Cd/As thresholds for safety of vegetable planting: A case study for pakchoi in Guangdong Province, China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, **18**(1): 179-189.

CONTENTS

A Comparative Study of Soil Environmental Standards for Agricultural Land Among Different Countries and Its Implication for China	LI Xu-zhi, JIANG Rong, WANG Guo-qing, <i>et al.</i>	(577)
Evaluation Parameters and System for Reclaimed Water Quality Stability	ZHANG Xin-yi, WEI Dong-bin, DU Yu-guo	(586)
Distribution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Atmospheric Deposition During Heating and Non-heating Period in Lanzhou	HUANG Wen, WANG Sheng-li	(597)
PM _{2.5} Source Apportionment Based on a Variety of New Receptor Models	WANG Zhen-yu, LI Yong-bin, GUO Ling, <i>et al.</i>	(608)
Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Pollution in PM _{2.5} During Summer in Central China	SU Ye-wang, LIU Wei-jie, MAO Yao, <i>et al.</i>	(619)
Pollution Characteristics of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During the Lantern Festival of 2021 in Zibo City	CHEN Qiao, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i>	(629)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Perfluorinated Compounds in PM _{2.5} in Zhejiang Province	LI Bing-jie, CHEN Jin-yuan, LIU Zheng-zheng, <i>et al.</i>	(639)
Impact of Meteorological Conditions on PM _{2.5} in Jiangsu Province from 2001 to 2019	PAN Chen, KANG Zhi-ming	(649)
Comparison and Analysis of PM _{2.5} Forecast in Key Areas Based on the Neural Network Model and Numerical Model	GAO Yu-xiao, WANG Wei, HUANG Yong-hai, <i>et al.</i>	(663)
Temporal and Spatial Variations in Ozone and Its Causes over Hainan Province from 2015 to 2020	FU Chuan-bo, XU Wen-shuai, DAN Li, <i>et al.</i>	(675)
Ozone Formation and Key VOCs of a Continuous Summertime O ₃ Pollution Event in Ji'nan	SUN Xiao-yan, ZHAO Min, SHEN Heng-qing, <i>et al.</i>	(686)
Pollution Characteristic and Control Factor Analysis of Atmospheric Ozone During Summer Typical Periods in Linyi, Shandong	YANG Xue, AN Xin-yue, LIU Yu-qi, <i>et al.</i>	(696)
Improved Performance of PMF Source Apportionment for Volatile Organic Compounds Based on Classification of VOCs' Aging Degree in Air Mass	ZHU Yu-fan, CHEN Qiang, LIU Xiao, <i>et al.</i>	(707)
Spatial Distribution Characteristics of VOCs and Its Impact on Ozone Formation Potential in Rizhao City in Summer	YAO Wei-jie, WANG Da-wei, XIE Fu-ying, <i>et al.</i>	(714)
Long-term Trends and Sources of Atmospheric Halocarbons at Mount Taishan, Northern China	ZHAO Feng, CHEN Tian-shu, DONG Can, <i>et al.</i>	(723)
Emission Characteristics of VOCs and <i>n</i> -alkanes from Diesel Forklifts	ZHOU Wen-qin, LI Cheng, LIU Jun-wen, <i>et al.</i>	(735)
Driving Mechanism of the Spatiotemporal Evolution of Vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2020	TIAN Zhi-hui, REN Zu-guang, WEI Hai-tao	(743)
Effects of Land Use on Riverine Dissolved Inorganic Carbon (DIC) and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in a Karst River Basin, Southwestern China	XU Sen, LI Si-liang, ZHONG Jun	(752)
Effects of Biochar Addition on Soil Nitrogen Mineralization and Leaching Characteristics in Riparian Zone of Taihu Lake	XIONG Yu-ting, YUAN Xu-yin, ZHOU Hui-hua, <i>et al.</i>	(762)
Impacts of Riparian Buffer Zone Type on Reduction in Runoff Pollution in the North Canal River Under Different Rainfall Events	ZHU Li-ying, ZHAO Kai, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i>	(770)
Pollution Characterization and Comprehensive Water Quality Assessment of Rain-source River: A Case Study of the Longgang River in Shenzhen	BI Ye-liang, WANG Hua-cai, XIA Bing, <i>et al.</i>	(782)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Runoff Pollution in Langfang City	PAN Xin-rong, ZUO Jian-e, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(795)
Analysis on Diversity of Plankton Microbial Community in the Beijing-Tianjin-Hebei Section of the North Canal River	GUO Zhi-zhi, SU Zhen-hua, DI Yan-ming, <i>et al.</i>	(803)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Bacterial Community Structure from Landscape Water in Hebei Province: Taking Shijiazhuang as Example	CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i>	(813)
Source and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Watershed of Lake Qinghai	YU Xiao-qin, MENG Xian-qiang, WU Hua-wu, <i>et al.</i>	(826)
Influences of Hydrological Scenarios on the Bioavailability, Fate, and Balance of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Poyang	GUO Yan-ni, YAO Xiao-long, CHEN Hui-min, <i>et al.</i>	(837)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Sediments from Poyang Lake	LUO Yan-qing, WAN Zhi-wei, YAN Cai-xia, <i>et al.</i>	(847)
Pollution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Tangxun Lake	LI Xing-yu, LI Peng, SU Ye-wang, SHI Ming-ming, <i>et al.</i>	(859)
Identifying Relationship Between Nutrient Contents in Road-Deposited Sediment and Urban Basic Elements Based on Kernel Density Estimation	WANG Zi-qiao, LI Xu-yong	(867)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of DBPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan Under the COVID-19 Pandemic	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, TU Xiang, <i>et al.</i>	(878)
Synergistic Control of Nitrogenous Disinfection By-products and Opportunistic Pathogens in Drinking Water by Iron-Modified Quartz Sand Filtration	QI Peng, HU Chun, XING Xue-ci, <i>et al.</i>	(887)
Degradation Characteristics and Mechanism of Ibuprofen by Ozone Catalyzed by Nitrogen-Doped Biochar	CHAI Cheng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i>	(896)
Adsorption Properties and Host-guest Effects of Porous Cyclodextrin Polymers for Dye Molecules in Water	ZHAO Chuan-liang, WANG Zi-jie, YAN Yi, <i>et al.</i>	(907)
Characterization of Sludge Morphology and Bacterial Community Evolution in the Rapid Activation of Freeze-stored PV/A Granular Sludge	HUANG Zi-heng, ZHANG Li, CUI Shu-hui, <i>et al.</i>	(920)
Effect of Different Cationic Polyacrylamide Organic Dehydrating Agents on Sludge Dewatering Performance	FENG Qi-yun, GAO Bao-yu, YUE Qin-yan, <i>et al.</i>	(928)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in a Small Watershed of a Mining Area in Yunnan	LIU Yang, HE Zhao-hui, NIU Xue-kui, <i>et al.</i>	(936)
Spatial Characteristics and Potential Ecological Risk Factors of Heavy Metals in Cultivated Land in the Transition Zone of a Mountain Plain	ZHANG Ding, HUANG Rong, GAO Xue-song	(946)
Geo-accumulation Index Method to Optimize the Evaluation Method of Polymetallic Environment Quality: Taking Developed Agricultural Areas as an Example	JU Tie-nan, LEI Mei	(957)
Safety Production Threshold and Land Quality Classification of Vegetable Pb in High Geological Background Area of Southwest China	MU De-miao, SUN Yue-bing	(965)
Pollution Properties and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around a Typical Manganese Mining Area	HUANG Zhong-ting, YI Sheng-wei, CHEN Bei-bei, <i>et al.</i>	(975)
Characteristics of Plant Diversity and Heavy Metal Enrichment and Migration Under Different Ecological Restoration Modes in Abandoned Mining Areas	ZHOU Peng-fei, ZHANG Shi-wen, LUO Ming, <i>et al.</i>	(985)
Soil Properties, Heavy Metal Accumulation, and Ecological Risk in Vegetable Greenhouses of Different Planting Years	REN Qiang, SUN Rui-ling, ZHENG Kai-xuan, <i>et al.</i>	(995)
Effects of Greenhouse and Open-field Cultivation on Heavy Metal Uptake During Carrot Growth	CAO Chun, REN Dan, LÜ Zhen-ying, <i>et al.</i>	(1004)
Effects of Different Amendments on Cadmium Accumulation in Rice Safety in Cadmium-Contaminated Farmland Under Two Flooding Treatments	WANG Gang, YU Hai-ying, LI Ting-xuan, <i>et al.</i>	(1015)
Effect of Composite Leaching on Cadmium Removal Efficiency in Plow Layer Soil of Agricultural Land and Its Functional Regulation	CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, <i>et al.</i>	(1023)
Polyamine-producing Bacteria Regulated the Community Structure of Rhizosphere Bacteria and Reduced the Absorption of Cd in Wheat	LI Xiao-zhe, QIN Shan-mei, CHEN Zhao-jin, <i>et al.</i>	(1031)
Responses of Soil <i>PhoC</i> and <i>PhoD</i> Gene Microbial Communities to the Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i>	(1040)
Changes in Soil Microbial Carbon-Degrading Enzymes and Their Relationships with Carbon Pool Components During the Restoration Process of <i>Robinia pseudoacacia</i>	LI Wen-jie, ZHANG Zhen-jiao, ZHAO Ya-ping, <i>et al.</i>	(1050)
Soil Enzyme Stoichiometric Characteristics of <i>Pinus massoniana</i> Plantations at Different Stand Ages in Mid-subtropical Areas	JIAO Peng-yu, GUO Wen, CHEN Ze-long, <i>et al.</i>	(1059)
Characteristics of Microbial Utilization for Crop Residue-Derived C in Paddy and Upland Soils	DENG Shao-hong, ZHENG Xiao-dong, MAO Wan-qiong, <i>et al.</i>	(1069)
Influence of Artificial Root Exudates and Actual Root Exudates on the Microbial Community in Pyrene-contaminated Soil	HAN Bo-yuan, ZHANG Wen, HU Fang-yu, <i>et al.</i>	(1077)
Pollution Characteristics and Driving Factors of Antibiotic Resistance Genes in Dexing Copper Mine	HAN Liu, LOU Qian, QIAO Min, <i>et al.</i>	(1089)
Spatial Prediction Method of Farmland Soil Organic Matter in Weiwei Dryland of Shaanxi Province	WEI Fang, LIU Jing, XIA Li-heng, <i>et al.</i>	(1097)
Emission Characteristics, Transformation Mechanism, and Reduction Potential of Ammonia Emissions from a Crop Rotation System in Yangtze River Delta	XU Chang, MIAO Wen-liang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i>	(1108)