

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  
李勳之, 姜榕, 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<sub>2.5</sub>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<sub>2.5</sub>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<sub>2.5</sub>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<sub>2.5</sub>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<sub>2.5</sub>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<sub>2.5</sub>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, 谢付莹, 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, 邱琰蓉, 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 ..... 陈召堂, 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, 张绮英, 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性的影响 ..... 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, 余烁, 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, 张颖敏, 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镉污染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) 《环境科学》征稿简则(761) 信息(685, 935, 956)

# 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<sup>1,2</sup>, 孙瑞玲<sup>3</sup>, 郑凯旋<sup>1,2</sup>, 刘祎丹<sup>1,2</sup>, 阮心玲<sup>1,2,4</sup>, 王洋洋<sup>1,2,4\*</sup>

(1. 河南大学环境与规划国家级教学示范中心, 开封 475004; 2. 河南大学地理与环境学院, 开封 475004; 3. 河南省濮阳市生态环境局濮阳县分局, 濮阳 457100; 4. 河南大学河南省土壤重金属污染控制与修复工程研究中心, 开封 475004)

**摘要:**以河南省汝州市杨楼镇蔬菜大棚土壤为研究对象,探究不同种植年限蔬菜大棚土壤理化性质、重金属总量和赋存形态的差异规律,并利用单项潜在生态风险指数法和综合潜在生态风险指数法对不同种植年限大棚土壤中重金属的潜在生态风险进行评估。结果表明,与对照组相比,蔬菜大棚土壤 pH 均有所提高,有机质、速效磷和碱解氨等肥力组分有一定程度的累积,但过氧化氢酶活性呈下降趋势。相关性分析显示,种植年限与 pH 值( $P < 0.05$ )和有机质( $P < 0.01$ )呈显著正相关,与过氧化氢酶活性呈显著负相关( $P < 0.01$ )。蔬菜大棚土壤重金属含量随着蔬菜大棚种植年限的增加而增加,其中 Cu、Zn 和 Cd 的增加最为明显,最大增幅分别为 129.14%、204.17% 和 161.11%。蔬菜大棚土壤重金属弱酸提取态和可还原态含量所占的比例也会随着蔬菜大棚种植年限逐渐增加,而残渣态所占比例逐渐减少,从而造成土壤重金属更容易被植物吸收。单项潜在生态风险指数评价结果显示,蔬菜大棚土壤中 Cd 随着种植年限的增加具有很强的生态风险,而 Cu、Pb、Zn 和 Ni 则属于轻度生态风险,综合潜在生态风险指数评价显示,各种种植年限蔬菜大棚土壤重金属均具有较强或很强的生态风险。

**关键词:**种植年限; 大棚土壤; 重金属; 形态; 风险评估

中图分类号: X53; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)02-0995-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202104248

## Soil Properties, Heavy Metal Accumulation, and Ecological Risk in Vegetable Greenhouses of Different Planting Years

REN Qiang<sup>1,2</sup>, SUN Rui-ling<sup>3</sup>, ZHENG Kai-xuan<sup>1,2</sup>, LIU Yi-dan<sup>1,2</sup>, RUAN Xin-ling<sup>1,2,4</sup>, WANG Yang-yang<sup>1,2,4\*</sup>

(1. National Demonstration Center for Environmental and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, China; 2. College of Geography and Environmental Science, Henan University, Kaifeng 475004, China; 3. Bureau of Ecology and Environment of Puyang County Branch, Puyang 457100, China; 4. Henan Engineering Research Center for Control & Remediation of Soil Heavy Metal Pollution, Henan University, Kaifeng 475004, China)

**Abstract:** The vegetable greenhouse soils in Yanglou Town, Ruzhou City, Henan Province were taken as the research object in the present study to explore the difference in soil physical and chemical properties and the total and fraction of heavy metals of different planting years. The potential ecological risks of heavy metals in greenhouse soils with different planting years were assessed by using single and comprehensive potential ecological risk index methods. The results showed that the soil pH of vegetable greenhouses increased, and fertility factors such as organic matter, available phosphorus, and alkali-hydrolyzable nitrogen accumulated to a certain extent compared to the control group, whereas catalase showed a decreasing trend. Correlation analysis showed that the planting years were significant positively correlated with pH ( $P < 0.05$ ) and organic matter ( $P < 0.01$ ) and significant negatively correlated with catalase ( $P < 0.01$ ). The amount of heavy metals in the vegetable greenhouse soils increased with the increase in planting years, among which Cu, Zn, and Cd increased most obviously, with maximum increases of 129.14%, 204.17%, and 161.11%, respectively. The proportion of acid-soluble and reducible heavy metals in the vegetable greenhouse soils also increased gradually with the planting years, and the proportion of residual heavy metals decreased correspondingly, which resulted in the heavy metals transforming into fractions easily absorbed by plants. The results of the single potential ecological risk index showed that Cd in vegetable greenhouse soils had a strong ecological risk with the increase in planting years, whereas Cu, Pb, Zn, and Ni were in the mild risk category. The comprehensive potential ecological risk index showed that the heavy metals in the vegetable greenhouse soils of different planting years have reached a strong or very strong ecological risk.

**Key words:** planting years; greenhouse soil; heavy metals; fraction; risk assessment

1980 年以来,蔬菜产业在我国迅速发展,蔬菜大棚技术的应用对我国蔬菜种植业来说是一次全新的技术革命,为我国带来了全新的蔬菜种植和管理方式。2017 年我国蔬菜年产量高达 7.9 亿 t,接近全世界的 1/2<sup>[1]</sup>。近些年,随着精准扶贫工作的持续推进,蔬菜产业已成为推动乡村振兴的重要支柱产业,我国蔬菜种植面积持续上升,2018 年,我国蔬菜种植面积达到了  $2.044 \times 10^7 \text{ hm}^2$ <sup>[1]</sup>。大棚蔬菜由于经济收益高,在我国蔬菜种植业中占据十分重要的地位。

然而在种植过程中,许多菜农盲目追求高产,过量使用化肥和农药,造成大棚土壤理化性质发生改变<sup>[2]</sup>和重金属积累<sup>[3]</sup>,从而使蔬菜产量下降、品质降低,造成严重的经济损失和环境问题。有研究显

收稿日期: 2021-04-23; 修订日期: 2021-07-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51704093); 中国博士后科学基金项目(2020M682284); 河南省科技发展计划项目(212102310503); 河南省高校科技创新团队支持计划项目(21IRTSTHN008); 河南大学大学生创新创业训练计划项目(201910475097)

作者简介: 任强(1998~),男,硕士研究生,主要研究方向为土壤重金属污染评价与防治, E-mail: 1610131137@vip.henu.edu.cn

\* 通信作者, E-mail: wangyy@henu.edu.cn

示,随着蔬菜大棚种植年限的延长,土壤有机质、全氮和全磷均呈增加的趋势,土壤 pH 值明显降低<sup>[2]</sup>;蔬菜大棚长期高强度种植会造成土壤团粒粒径丰度降低,影响土壤的稳定性<sup>[4]</sup>;蔬菜大棚种植年限对土壤微生物群落及多样性也有显著影响<sup>[5]</sup>.蔬菜大棚长期连作不仅会影响土壤的理化特性和生物特性,还会对土壤重金属含量产生严重影响.

重金属作为典型持久性有毒污染物,在土壤中可以通过迁移、转化、富集等途径影响农产品质量,最终通过食物链危害人体健康<sup>[6~8]</sup>.植物可以通过根部吸收土壤重金属并在可食用部分积累,当人们食用受重金属污染的食物时,将引发重金属的毒性效应<sup>[8]</sup>.相关研究显示,黄壤农田土壤中 Cr 和 Pb 会随着种植年限的增加出现明显累积,Cu 含量随着种植年限的增加呈现出波浪式递增的变化特征<sup>[9]</sup>.万红友等<sup>[10]</sup>的研究发现随着种植年限的增加,菜地土壤 CEC 略有升高,菜地土壤中 Hg、As、Cr 和 Ni 含量呈下降趋势,但是蔬菜中重金属含量却出现了一定程度的上升.此外,由于设施农田对土壤肥力需求较高,含微量重金属肥料的长期大量施用也会导致重金属在土壤中累积<sup>[11]</sup>.Chen 等<sup>[12]</sup>的研究指出重金属能够在温室土壤中积累,进而被果蔬吸收影响人体健康.虽然重金属在农田中积累及对农作物的危害已经有较多学者研究,但分析设施农田种植年限与土壤的理化性质、重金属含量及重金属潜在生态风险关系的研究甚少,且目前国内潜在生态风险评估主要用于工矿业重金属污染场地<sup>[13~16]</sup>,针对农业活动区特别是蔬菜大棚土壤重金属的研究并不多见.

本文以河南省汝州市杨楼镇蔬菜大棚土壤为研究对象,分析不同种植年限蔬菜大棚表层土壤理化性质、重金属含量和赋存形态的变化规律,并采用单项和综合潜在生态风险指数法对蔬菜大棚土壤重金属生态风险进行评价.

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

供试土壤采自河南省汝州市杨楼镇某村的蔬菜大棚,该地区位于河南省中西部,位于东经 112°31'~113°07',北纬 33°56'~34°20'之间,属于温带大陆性季风气候,四季分明,冬春二季鲜有雨雪,天气较为干燥;夏季气温高雨量集中;秋季凉爽,天气晴朗.年平均气温为 14.8℃,年平均日照数为 2 258.8 h,年平均降水量为 606.5 mm.土壤类型为潮土,适宜种植蔬菜.

选择种植年限分别为 5、7、10 和 24 a 的 12 个

蔬菜大棚,每种棚龄的蔬菜大棚选取 3 个进行土壤样品采集.利用梅花形布点法进行采样,采样深度为 0~20 cm,每个大棚采样 3 个,每个采样点采集 5 个土壤样品混匀,选择附近常规农田(CK1)和露天菜地土壤样品(CK2)作为对照,其中 CK1 以小麦和玉米常年轮作为主,CK2 是近 5 年由常规农田转变成的露天菜地,主要以种植萝卜和白菜为主,二者均以施用化肥为主,但单位施肥量远少于蔬菜大棚土壤.样品采集后装入自封袋中,带回实验室,在室内去除石块、植物根茎叶等杂质后,自然风干后冷藏待用.蔬菜大棚的种植和施肥情况见表 1.

表 1 蔬菜大棚种植和施肥情况

连作年限	种植作物	肥料种类
CK1	麦子	化肥
CK2	叶菜类和根菜类	化肥
5 a	叶菜类	农家肥和化肥
7 a	叶菜类	化肥
10 a	叶菜类	有机肥和化肥
24 a	瓜果类和根菜类	化肥

### 1.2 实验方法

土壤理化性质测定方法:pH 值测定采用 pH 计(土水比为 1:5);有机质测定采用重铬酸钾容量法;阳离子交换量(CEC)测定采用 NH<sub>4</sub>OAc-NH<sub>4</sub>Cl 法;速效磷测定采用碳酸氢钠法;速效钾测定采用 NH<sub>4</sub>OAc 浸提-火焰光度计法;脱氢酶测定采用 TTC 法;过氧化氢酶测定采用高锰酸钾容量法;碱解氮测定采用扩散法;具体测定方法参考鲍士旦<sup>[17]</sup>主编的土壤农化分析.

土壤中 Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的总量测定采用 HNO<sub>3</sub>-HF-HClO<sub>4</sub> 消煮法.具体为:0.100 0 g 土壤样品加入 6 mL 硝酸,摇匀放置过夜,将过夜后的样品放置赶酸器上,在 120℃ 条件下持续加热 1 h,冷却 10 min;加入 3.5 mL 氢氟酸,摇匀,在 140℃ 条件下持续加热 1 h,冷却 10 min;加入 2 mL 高氯酸,在 160℃ 条件下持续加热 1 h,取出冷却 0.5 h,最后加入 1 mL 1:1 硝酸,定容过滤,使用电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES, ICAP6200, 英国)测定滤液重金属含量.

Cd、Cu、Pb、Zn 和 Ni 的形态分布采用优化的 BCR 连续提取法进行提取,具体为:0.500 0 g 样品经以下 4 个步骤顺序提取:①0.11 mol·L<sup>-1</sup> 醋酸溶液[(22±5)℃],振荡 16 h 提取弱酸提取态;②0.1 mol·L<sup>-1</sup> NH<sub>2</sub>OH·HCl 溶液[pH 值为 2,(22±5)℃]振荡 16 h 提取可还原态;③30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 水浴 1 h[(85±2)℃,重复两次],再用 1 mol·L<sup>-1</sup> NH<sub>4</sub>Ac 溶液[pH 值为 2,(22±5)℃]振荡 16 h 提

取可氧化态;④残渣态用土壤全量重金属消解方法消解前3步剩余的土壤残渣.重金属各形态含量使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, X SERIES2,美国)测定.

### 1.3 潜在生态风险评价

利用单项潜在生态风险指数法和综合潜在生态风险指数法对蔬菜大棚土壤重金属污染现状进行评价.计算公式如下:

$$C_r^i = C^i / C_n^i \quad (1)$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_r^i \quad (2)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \quad (3)$$

式中,  $C_r^i$  为第  $i$  种重金属的污染系数;  $C^i$  为底泥样品中第  $i$  种重金属的浓度;  $C_n^i$  为第  $i$  种重金属的元素背景值;  $E_r^i$  为第  $i$  种重金属的潜在生态风险系数;  $T_r^i$  为第  $i$  种重金属的毒性系数; RI 为多种重金属的综合潜在风险指数.

本研究采用河南省主要元素的土壤环境背景值<sup>[18]</sup>作为评价标准,重金属的毒性系数采用徐争启等<sup>[19]</sup>计算的结果为准,通过马建华等<sup>[20]</sup>的方法对污染指数分级标准进行适当调整(表2),通过比较说明不同种植年限对蔬菜大棚土壤重金属累积的影响.

表2 单项和综合潜在生态风险指数分级  
Table 2 Classification of single and comprehensive potential ecological risk index

潜在生态风险 $E_r^i$ 范围	单项生态风险程度	潜在生态风险指数 RI 范围	总的潜在生态风险程度
$E_r^i < 30$	轻度	$RI < 50$	轻度
$30 \leq E_r^i < 60$	中等	$50 \leq RI < 100$	中等
$60 \leq E_r^i < 120$	较强	$100 \leq RI < 200$	较强
$120 \leq E_r^i < 240$	很强	$RI \geq 200$	很强
$E_r^i \geq 240$	极强		

### 1.4 数据分析

利用 Excel 2016 对原始数据进行处理,利用 Origin8.0 和 IBM SPSS Statistics 21 对数据进行绘图和统计分析,采用单因素方差分析(ANOVA)评价指标的差异显著性( $P < 0.05$ ).所有指标的值均以相同种植年限大棚土壤相应指标的平均值  $\pm$  标准差表示.

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同种植年限对蔬菜大棚土壤理化性质的影响

不同种植年限蔬菜大棚土壤理化性质变化如表3所示.随着种植年限的延长,土壤 pH 值呈现先上升后下降的趋势,5 a 种植大棚土壤 pH 值较常规农田土壤上升 0.96 个单位;与常规农田土壤相比,蔬

菜大棚土壤有机质、速效磷、速效钾和碱解氮均呈现不同程度的富集,种植年限 5 a 时大棚土壤有机质、速效磷、速效钾和碱解氮含量分别较常规农田土壤增加了 68.23%、200.89%、5.13% 和 77.07%;土壤 CEC 呈现增加的趋势,种植年限 5 a 时大棚土壤 CEC 含量较露天土壤增加了 24.82%;同一种种植年限蔬菜大棚土壤脱氢酶活性波动较大,但不同种植年限土壤脱氢酶的活性(均值)无显著性差异,而过氧化氢酶活性则呈现下降趋势,24 a 种植大棚土壤过氧化氢酶活性较常规农田土壤下降了 22.29%.

据报道,不同肥料的施用对土壤 pH 的影响不同,5 a 和 10 a 分别以施用农家肥和有机肥为主,同时施用少量的化肥,因此 pH 值较对照组(CK2)无显著性差异,该结果与王金林等<sup>[21]</sup>的研究报道一致.7 a 和 24 a 种植年限的土壤以施用化肥为主,与对照组相比 pH 值均出现了显著的增加,而前期报道显示长期施用化肥会导致土壤酸化和 pH 值降低<sup>[21]</sup>,本研究中 pH 升高可能与部分农户向大棚土壤中添加草木灰或石灰以调节土壤环境有关.土壤 pH 值变化会影响土壤物理、化学和生物特性,进而影响土壤肥力和养分的有效性<sup>[22]</sup>,但是长期过度施肥也会降低土壤过氧化氢酶的活性<sup>[23]</sup>.与速效钾和碱解氮相比,随着种植年限的延长,土壤速效磷含量的增幅最大,主要由于磷素不易挥发和不易淋溶,且容易被土壤固定,常年大量施用磷肥或含磷复合肥导致土壤中磷素出现了一定的累积<sup>[24]</sup>.施用有机肥能够显著提高土壤碱解氮含量,原因是土壤中 95% 以上的氮素为有机氮<sup>[25]</sup>,而有机肥和农家肥的施用成为了土壤氮素的主要来源,且相关性分析显示碱解氮和有机质的含量呈显著正相关(表4).总的来说,随着种植年限的变化,土壤 pH 值及速效磷、速效钾和有机质等理化性质均出现了显著的变化,这与前人的研究结果一致<sup>[26,27]</sup>.

相关性分析显示(表4),种植年限与土壤 pH 值、有机质、速效磷和 CEC 呈正相关,与 pH 值的相关系数为 0.387,达到显著相关水平( $P \leq 0.05$ ),与有机质的相关系数为 0.529,达到极显著相关水平( $P \leq 0.01$ );种植年限与速效钾、碱解氮、脱氢酶、过氧化氢酶活性呈负相关,与过氧化氢酶活性的相关系数为 0.482,达到极显著相关水平( $P \leq 0.01$ ).表明种植年限对 pH 值、有机质和过氧化氢酶活性的影响较大,对土壤其它理化性质的影响较小.有机质、速效磷、速效钾和碱解氮两两之间呈显著正相关( $P \leq 0.01$ ),说明其具有同源性,均来源于种植过程中各种肥料的施用<sup>[28]</sup>.

表 3 不同种植年限大棚土壤理化性质<sup>1)</sup>

Table 3 Physical and chemical properties of greenhouse soil in different planting years

理化指标	种植年限					
	CK1	CK2	5 a	7 a	10 a	24 a
pH	5.36 ± 0.37a	6.57 ± 0.33b	6.32 ± 0.23b	7.26 ± 0.31c	6.28 ± 0.25b	7.13 ± 0.20c
ω(有机质)/%	2.68 ± 0.41b	1.70 ± 0.12a	2.86 ± 0.14b	2.00 ± 0.30a	2.58 ± 0.14b	2.68 ± 0.26b
ω(速效磷)/mg·kg <sup>-1</sup>	3.98 ± 1.57ab	3.37 ± 0.57ab	10.14 ± 3.39d	2.38 ± 0.41a	6.08 ± 1.05c	5.15 ± 1.17bc
ω(速效钾)/mg·kg <sup>-1</sup>	376.28 ± 58.64d	148.98 ± 11.54a	395.58 ± 61.57d	234.09 ± 24.23b	317.33 ± 51.63c	176.22 ± 15.88a
ω(碱解氮)/mg·kg <sup>-1</sup>	108.13 ± 28.94ab	101.80 ± 44.46ab	180.26 ± 48.39c	121.52 ± 26.33ab	142.91 ± 34.80bc	88.33 ± 38.70a
CEC/cmol·kg <sup>-1</sup>	2.74 ± 0.07a	2.78 ± 0.10ab	3.42 ± 0.09d	2.76 ± 0.09a	2.88 ± 0.07bc	2.98 ± 0.09c
脱氢酶/mg·(kg·h) <sup>-1</sup>	0.94 ± 0.19a	0.59 ± 0.07a	1.25 ± 0.74a	0.96 ± 0.28a	1.93 ± 1.34a	1.00 ± 0.52a
过氧化氢酶/mL·(g·20 min) <sup>-1</sup>	1.30 ± 0.15bc	1.57 ± 0.22d	1.45 ± 0.14cd	1.61 ± 0.16d	0.96 ± 0.18a	1.22 ± 0.25b

1) 不同小写字母表示不同种植年限大棚土壤相应指标存在显著差异 ( $P < 0.05$ )

表 4 不同种植年限蔬菜大棚土壤理化性质的相关性分析<sup>1)</sup> ( $n=9$ )

Table 4 Correlation analysis of soil physical and chemical properties in different planting years

种植年限	pH 值	有机质	速效磷	速效钾	碱解氮	CEC	脱氢酶	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 酶	
种植年限	1								
pH 值	0.387 *	1							
有机质	0.529 **	-0.126	1						
速效磷	0.077	-0.467 **	0.675 **	1					
速效钾	-0.173	-0.505 **	0.622 **	0.721 **	1				
碱解氮	-0.256	-0.358 *	0.488 **	0.559 **	0.731 **	1			
CEC	0.034	-0.357 *	0.649 **	0.796 **	0.657 **	0.487 **	1		
脱氢酶	-0.167	-0.255	-0.166	0.099	-0.039	0.246	-0.053	1	
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 酶	-0.482 **	0.453 **	-0.553 **	-0.258	-0.265	-0.128	0.010	-0.018	1

1) \* 表示  $P < 0.05$ , \*\* 表示  $P < 0.01$

## 2.2 不同种植年限对蔬菜大棚土壤重金属总量的影响

不同种植年限蔬菜大棚土壤中 Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 的含量如图 1 所示. 从中可知, 与对照组相比, 各种种植年限蔬菜大棚土壤中重金属的含量均出现了一定程度的增加. 与 CK1 和 CK2 相比, 种植年限为 5 a 和 24 a 的大棚土壤中 Ni 含量具有明显的差异性[图 1(a)]. 土壤中 Cu 的含量在 5 a 连续种植的蔬菜大棚中浓度达到最高, 与 CK2 相比, 土壤中 Cu 含量增加了 129.18% [图 1(b)], 种植年限为 10 a 和 24 a 时土壤中 Cu 含量仍显著高于 CK1 和 CK2. 与露天菜地相比, 种植 5 a 的蔬菜大棚土壤中 Zn 含量显著提高了 204.43% [图 1(c)], 种植 7、10 和 24 a 的蔬菜土壤中 Zn 含量呈上升趋势, 但含量远小于 5 a 种植. 由图 1(d) 可知, 与 CK2 相比, 种植 5、7、10 和 24 a 的大棚土壤中 Cd 含量均呈现上升趋势, 平均上升幅度分别为 15.79%、68.42%、26.31% 和 147.37%. 大棚土壤中 Pb 含量与 Ni 相似 [图 1(e)], 种植 7 和 10 a 的大棚土壤中 Ni 含量与 CK1 相比无显著变化, 但 5、7 和 24 a 的大棚土壤中 Pb 含量与 CK1 相比具有差异性.

蔬菜大棚土壤重金属含量较对照组在一定程度上有所增加, 其中 Cu、Zn 和 Cd 的增加最为明显, 说明随着蔬菜大棚种植年限的延长, 土壤中的重金属

都有一定程度的累积<sup>[29-31]</sup>, 而 Pb 和 Cd 更容易被植物富集且具有较强的生物毒性, 可能会造成较大的健康风险<sup>[32]</sup>. 任顺荣等<sup>[33]</sup>的研究显示长期施不同肥料土壤中 Cu、Zn 和 Cd 含量均呈上升趋势, 有机肥的施用可以显著提高 Cu 和 Zn 的含量, 而 Cd 的累积则主要源于所施用的磷肥. 同时, 前期研究显示市售饲料中 Cu 和 Zn 含量较高, 从而导致养殖废水及牲畜粪便中含有较多的 Cu 和 Zn, 而当动物粪便或养殖废水被用作有机肥施入农田后, 可造成土壤中 Cu 和 Zn 的含量显著偏高<sup>[34]</sup>. 因此, 在种植 5 a 的蔬菜大棚土壤中出现重金属含量的峰值, 可能是由于菜农在短期内施用了大量含重金属的农家肥造成了土壤中多种重金属的显著累积<sup>[35]</sup>.

## 2.3 不同种植年限对蔬菜大棚土壤重金属形态的影响

不同种植年限蔬菜大棚土壤中 Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 形态分布如图 2 所示. 由图 2(a) 可知, 弱酸提取态和可氧化态 Ni 的平均含量占比基本保持不变, 可还原态 Ni 的含量有显著的增加, 而残渣态 Ni 的含量占比则呈现逐年降低的趋势, 种植年限为 24 a 时残渣态 Ni 含量占比较 CK1 降低了 5.52%. 弱酸提取态和可还原态 Cu 含量占比先增加后降低, 蔬菜大棚土壤 Cu 主要以残渣态存在, 其变化趋势与总 Cu 含量变化相反 [图 2(b)]. 与 CK1 相比, 种植

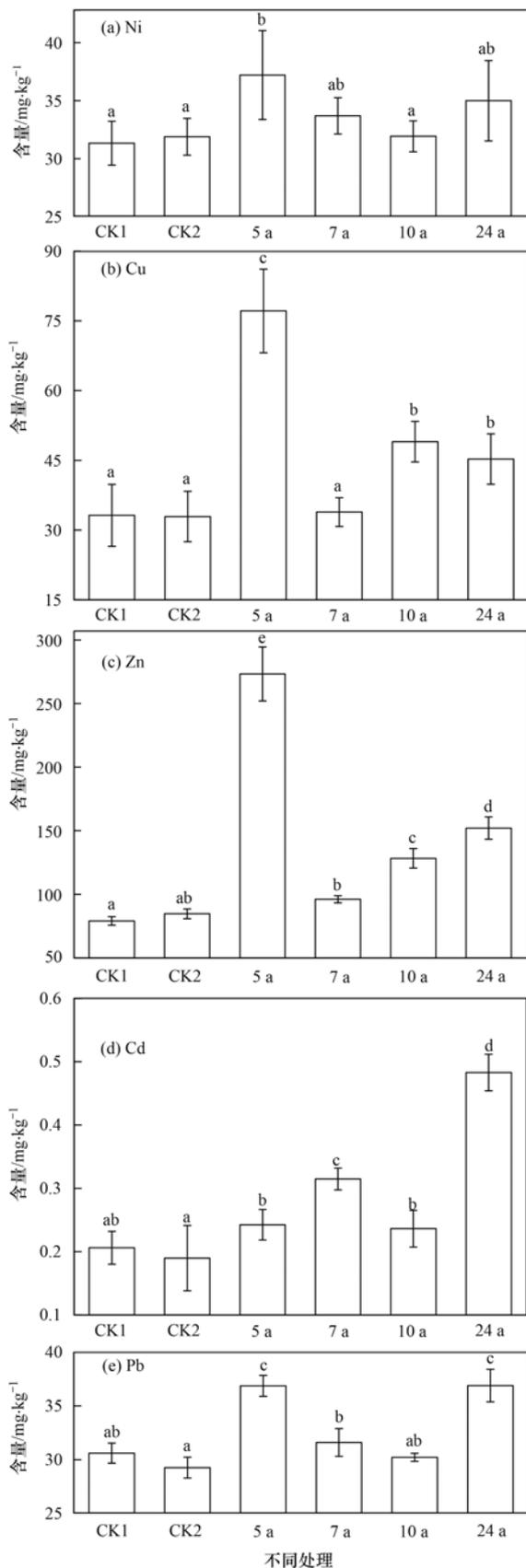


图1 不同种植年限土壤 Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 含量

Fig. 1 Contents of Ni, Cu, Zn, Cd, and Pb in soil of different planting years

5 a 的大棚土壤中弱酸提取态 Cu 占比增加了 93.36%, 可还原态 Cu 占比例增加了 232.06%, 残

渣态 Cu 占比减少了 31.65%。在种植 5 a 的大棚土壤中弱酸提取态和可还原态 Zn 平均含量占比为 23.22% 和 36.13%, 可氧化态 Zn 含量所占比例较低, 在 2.89% 和 4.15% 之间[图 2(c)]。由图 2(d) 所示, 可还原态 Cd 是蔬菜大棚土壤中 Cd 的主要存在形态, 其占比在 44.79% 和 55.74% 之间, 土壤中弱酸提取态 Cd 含量占比与种植年限呈现一定的正相关, 种植 24 a 的蔬菜大棚土壤中残渣态 Cd 占比较 CK2 减少 30.04%, 且土壤中残渣态 Cd 总体含量呈“W”型变化。各种种植年限的蔬菜大棚土壤中弱酸提取态 Pb 含量占比极低, 不超过 0.1% [图 2(e)], 可还原态和残渣态 Pb 总体占据 90% 以上且二者变化趋势相反, 可氧化态 Pb 含量随着种植年限的增加变化不明显, 与 CK1 相比, 种植 24 a 的蔬菜大棚土壤中可还原态 Pb 所占比例增加 13.31%, 残渣态 Pb 占比减少 12.96%。

随着种植年限的增加, 蔬菜大棚土壤中弱酸提取态和可还原态重金属含量所占的比例逐渐增加, 而残渣态占比逐渐减少。弱酸提取态是重金属在碳酸盐矿物上构成的共沉淀结合态<sup>[36]</sup>, 当土壤 pH 降低, 该形态重金属易释放而进入环境<sup>[37]</sup>。反之, 当土壤 pH 和氧化还原电位较高时, 有利于可还原态重金属的形成<sup>[37]</sup>。长期的耕作和施肥能够影响土壤重金属有效态(弱酸提取态 + 可还原态 + 可氧化态)含量, 这与施肥的带入和土壤理化性质的改变有关, 特别是受 CEC、速效磷和 pH 值的影响<sup>[11]</sup>。赵一鸣等<sup>[38]</sup>的研究指出, 土壤 pH 值与有机物结合态和铁锰氧化态含量呈正相关关系, 该研究结果与本研究基本一致。总的来说, 随着种植年限的增加以及大棚土壤中肥料和农药的大量施用, 土壤中重金属逐渐向活性更高的形态转化, 重金属更易被农作物吸收从而进入人体, 增加了对人体健康危害的风险<sup>[39]</sup>。

#### 2.4 不同种植年限蔬菜大棚土壤重金属的生态风险评估

从表 5 可知, 土壤中 Ni、Zn 和 Pb 的单项潜在生态风险指数平均值均小于 30, 属于轻度风险等级, Cu 含量在种植 7 a 大棚土壤中略高, 其生态风险指数平均值为 37.02, 达到中等风险等级。Cd 在 CK1、CK2、5 a 和 10 a 种植大棚土壤中的单项潜在生态风险指数均大于 60, 属于较强风险程度, 在 7 a 和 24 a 种植大棚土壤中的单项潜在生态风险指数高达 146.34 和 216.38, 属于很强风险程度, 原因可能是 7 a 和 24 a 种植蔬菜大棚土壤 pH 值高于其他种植年限的大棚土壤, 而 pH 升高有利于铁-锰结合态及碳酸盐结合态 Cd 的形成, 可交换态 Cd 含量明显下降<sup>[38]</sup>, 因此不利于植物吸收, 从而导致 Cd 在土

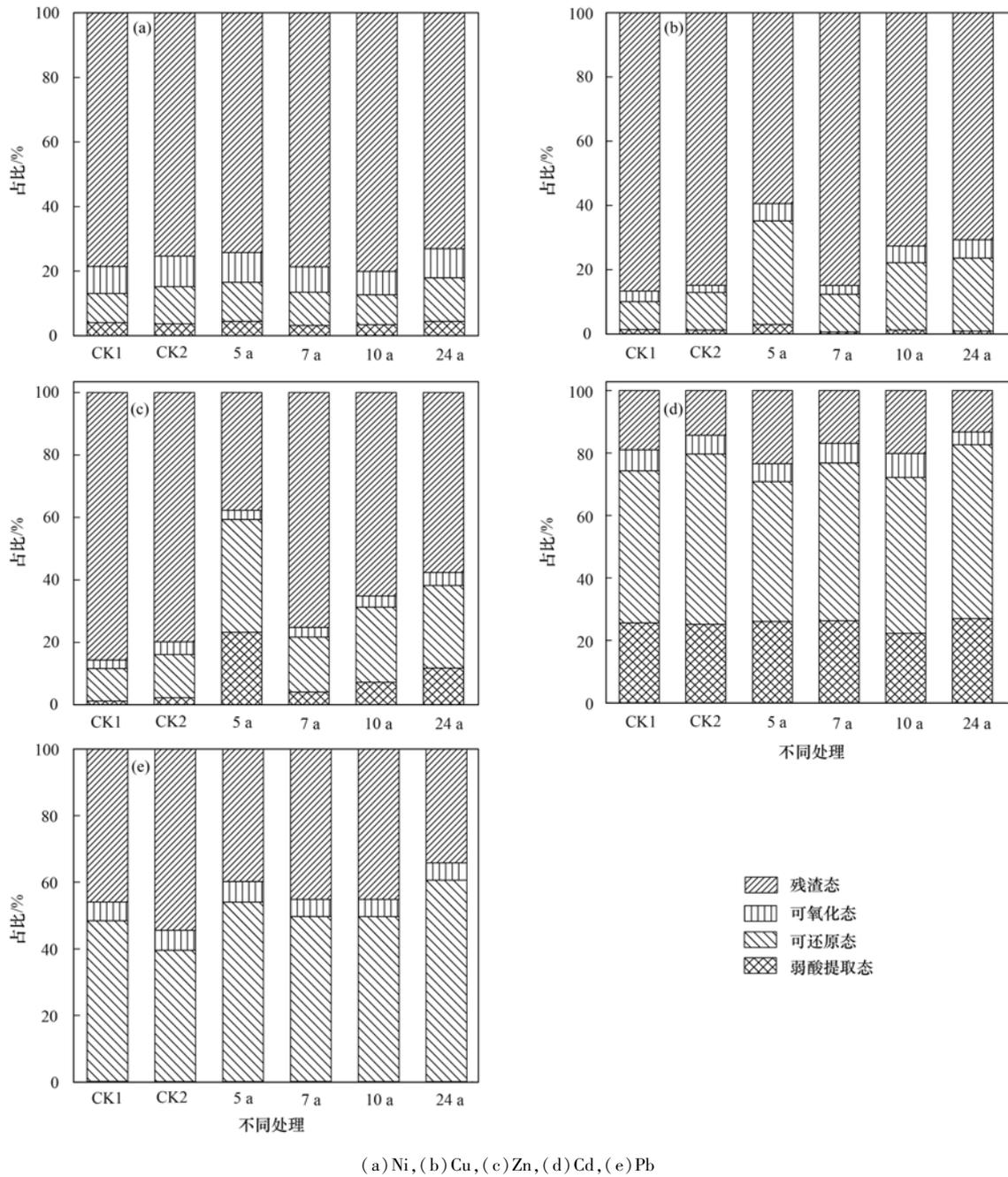


图 2 不同种植年限土壤 Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 形态分布

Fig. 2 Fraction distributions of Ni, Cu, Zn, Cd, and Pb in soil of different planting years

表 5 不同种植年限蔬菜大棚土壤重金属单项潜在生态风险指数

Table 5 Single potential ecological risk index of heavy metals in vegetable greenhouse soil with different planting years

重金属	$E_i^p$					
	CK1	CK2	5 a	7 a	10 a	24 a
Ni	5.71	5.82	6.37	6.64	5.93	6.21
Cu	8.30	8.22	18.85	37.02	11.99	13.88
Zn	1.26	1.35	3.84	1.77	2.05	2.41
Cd	95.10	87.58	102.89	146.34	112.90	216.38
Pb	6.86	6.56	8.65	7.09	6.96	8.89

壤中大量累积.此外,由于 Cd 易被多种农作物吸收和富集<sup>[40]</sup>,因此,蔬菜大棚土壤中 Cd 含量的增加对农产品安全及人体健康具有较大的威胁.

蔬菜大棚土壤重金属的综合潜在生态风险指数

如图 3 所示.从中可知,各种种植年限土壤重金属的综合潜在生态风险均达到了较强等级,且 24 a 种植大棚土壤重金属的综合潜在风险指数大于 200,达到了很强生态风险等级,且根据国家土壤环境质量农

业用地管控标准(GB 15618-2018),Cu、Zn 和 Cd 在部分大棚土壤中存在超标(风险筛选值)的现象.因此,建议在连续耕作的大棚中种植不易富集 Cu、Zn 和 Cd 的农作物,可以一定程度上减少作物对重金属的吸收,从而降低对人体健康的潜在影响<sup>[29]</sup>.

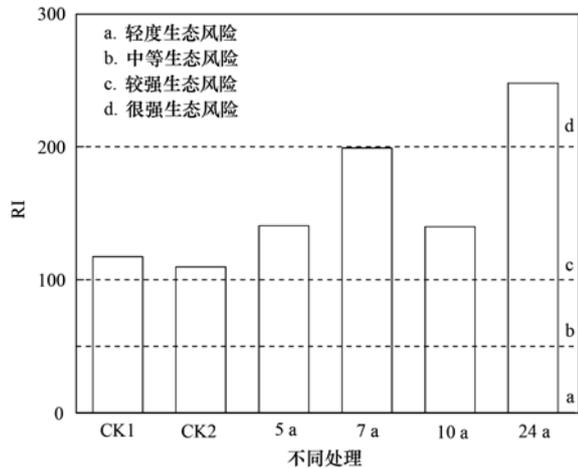


图3 不同种植年限蔬菜大棚土壤重金属综合潜在生态风险指数  
Fig. 3 Comprehensive potential ecological risk index of heavy metals in vegetable greenhouse soils with different planting years

### 3 结论

(1) 与对照组土壤相比,7 a 和 24 a 种植的蔬菜大棚土壤 pH 有所提高,有机质、速效磷和碱解氮等肥力组分在 5 a 种植土壤也有一定程度的累积,过氧化氢酶活性呈下降趋势;种植年限与土壤 pH 和有机质呈显著正相关,与过氧化氢酶的活性呈显著负相关。

(2) 各种种植年限蔬菜大棚土壤中 Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 含量与对照组相比都有所增加,其中 Cu、Zn 和 Cd 含量的增加幅度在 5 a 种植大棚土壤中最大.且随着种植年限的增加,土壤中重金属弱酸提取态和可还原态含量的增加会加速重金属在土壤-作物系统中迁移。

(3) 大棚土壤中 Cd 随着种植年限的增加具有很强的生态风险,除 7 a 种植土壤的 Cu 单项潜在生态风险指数达到中等风险等级,Pb、Zn、Ni 和其他种植年限土壤中的 Cu 均属于轻度污染风险级别.根据综合潜在生态风险指数,种植 24 a 的蔬菜土壤具有很强生态风险,其他各种种植年限的大棚土壤重金属均具有较强生态风险。

#### 参考文献:

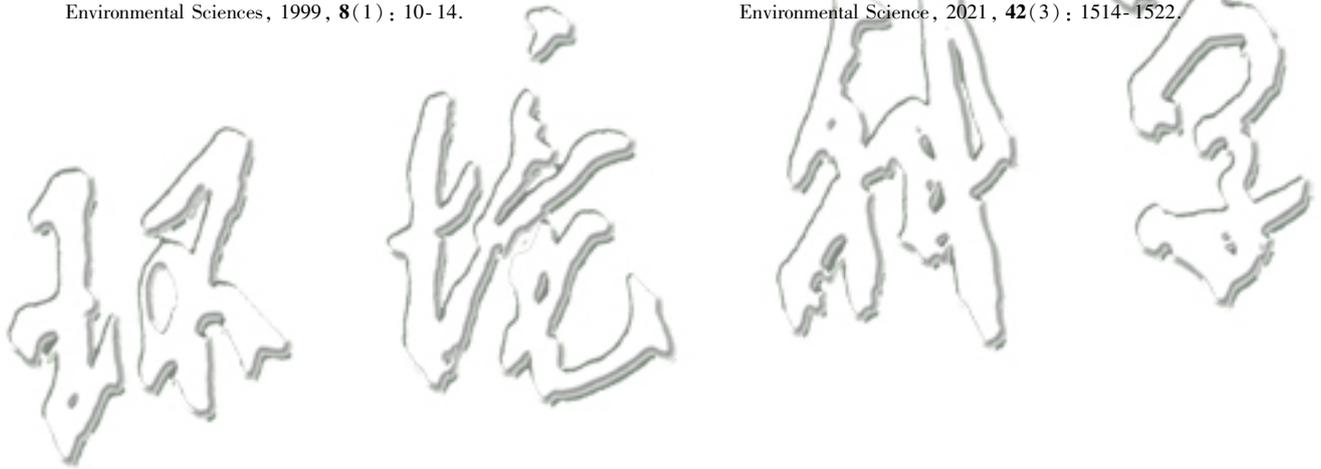
[ 1 ] 毛盛勇,叶植材. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.  
[ 2 ] 高新昊,张英鹏,刘兆辉,等. 种植年限对寿光设施大棚土壤生态环境的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(5): 1452-1459.  
Gao X H, Zhang Y P, Liu Z H, et al. Effects of cultivating years

on soil ecological environment in greenhouse of Shouguang City, Shandong Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(5): 1452-1459.

- [ 3 ] 邓焕广,董杰,张菊,等. 不同种植年限蔬菜大棚土壤磷含量及形态变化研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6): 271-275.  
Deng H G, Dong J, Zhang J, et al. Study on changes of arsenic content and speciation in soil of vegetable greenhouse with different cultivating years [ J ]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(6): 271-275.  
[ 4 ] 王珊,毛玲,廖浩,等. 种植年限对植烟土壤团聚体组成与稳定性的影响[J]. 西南农业学报, 2017, 30(6): 1421-1425.  
Wang S, Mao L, Liao H, et al. Effects of soil aggregates composition and stability with different planting years in tobacco [ J ]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2017, 30(6): 1421-1425.  
[ 5 ] 闫庚戌,范丙全. 大棚蔬菜种植年限、种植茬口对土壤微生物的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019, (4): 187-192.  
Yan G X, Fan B Q. Effect of vegetable planting years and rotation in greenhouse on soil microorganisms [ J ]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2019, (4): 187-192.  
[ 6 ] Mapanda F, Mangwayana E N, Nyamangara J, et al. Uptake of heavy metals by vegetables irrigated using wastewater and the subsequent risks in Harare, Zimbabwe [ J ]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2007, 32(15-18): 1399-1405.  
[ 7 ] Türkođogan M K, Kilicel F, Kara K, et al. Heavy metals in soil, vegetables and fruits in the endemic upper gastrointestinal cancer region of Turkey [ J ]. Environmental Toxicology and Pharmacology, 2003, 13(3): 175-179.  
[ 8 ] 段昌群. 无公害蔬菜生产理论与调控技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006.  
[ 9 ] 柳小兰,王科,王道平,等. 碳酸盐岩地区不同种植年限的黄壤重金属含量特征及评价[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(16): 308-312.  
Liu X L, Wang K, Wang D P, et al. Characteristics and evaluation of heavy metal content in yellow soil with different planting ages in carbonate areas [ J ]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(16): 308-312.  
[ 10 ] 万红友,周生路,赵其国. 不同种植年限菜地土壤基本性质和重金属含量变化[J]. 河南农业科学, 2006, (11): 79-82.  
Wan H Y, Zhou S L, Zhao Q G. Variation of basic property and heavy metal contents in vegetable soils with different planting years[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2006, (11): 79-82.  
[ 11 ] 夏文建,张丽芳,刘增兵,等. 长期施用化肥和有机肥对稻田土壤重金属及其有效性的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(5): 2469-2479.  
Xia W J, Zhang L F, Liu Z B, et al. Effects of long-term application of chemical fertilizers and organic fertilizers on heavy metals and their availability in reddish paddy soil [ J ]. Environmental Science, 2021, 42(5): 2469-2479.  
[ 12 ] Chen Z K, Muhammad I, Zhang Y X, et al. Transfer of heavy metals in fruits and vegetables grown in greenhouse cultivation systems and their health risks in Northwest China[J]. Science of the Total Environment, 2021, 766, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142663.  
[ 13 ] 胡国成,张丽娟,齐剑英,等. 贵州万山汞矿周边土壤重金属污染特征及风险评价[J]. 生态环境学报, 2015, 24(5): 879-885.

- Hu G C, Zhang L J, Qi J Y, *et al.* Contaminant characteristics and risk assessment of heavy metals in soils from Wanshan mercury mine area, Guizhou Province [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, **24**(5): 879-885.
- [14] 黄顺红, 杨伊, 李倩, 等. 铅锌矿区土壤重金属空间分布及生态风险评价[J]. *环境科学与技术*, 2016, **39**(2): 186-192.
- Huang S H, Yang Y, Li Q, *et al.* Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in soil around lead-zinc mining area [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **39**(2): 186-192.
- [15] 农泽喜, 覃朝科, 林达红, 等. 广西某铅锌矿区土壤重金属纵向污染特征及风险评估[J]. *矿产与地质*, 2018, **32**(2): 358-362.
- Nong Z X, Qin C K, Lin D H, *et al.* Vertical pollution characteristic and potential ecological risk assessment of heavy metals of soil in a Pb-Zn mining area [J]. *Mineral Resources and Geology*, 2018, **32**(2): 358-362.
- [16] 阳文锐, 王如松, 李锋. 废弃工业场地有机氯农药分布及生态风险评价[J]. *生态学报*, 2008, **28**(11): 5454-5460.
- Yang W R, Wang R S, Li F. Organochlorine pesticides distribution and ecological risk assessment in a abandoned industrial site [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(11): 5454-5460.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [18] 邵丰收, 周皓韵. 河南省主要元素的土壤环境背景值[J]. *河南农业*, 1998, (10): 28.
- [19] 徐争启, 倪师军, 虞先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. *环境科学与技术*, 2008, **31**(2): 112-115.
- Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, *et al.* Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **31**(2): 112-115.
- [20] 马建华, 韩昌序, 姜玉玲. 潜在生态风险指数法应用中的一些问题[J]. *地理研究*, 2020, **39**(6): 1233-1241.
- Ma J H, Han C X, Jiang Y L. Some problems in the application of potential ecological risk index [J]. *Geographical Research*, 2020, **39**(6): 1233-1241.
- [21] 王金林, 闻禄, 陈平, 等. 长期不同施肥对茶园土壤 pH、茶叶产量可持续性和品质的影响[J]. *中国农学通报*, 2021, **37**(8): 84-88.
- Wang J L, Wen L, Chen P, *et al.* Effects of long-term fertilization on soil pH, yield sustainability and quality of tea [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, **37**(8): 84-88.
- [22] 曾路生, 高岩, 李俊良, 等. 寿光大棚菜地酸化与土壤养分变化关系研究[J]. *水土保持学报*, 2010, **24**(4): 157-161.
- Zeng L S, Gao Y, Li J L, *et al.* Changes of acidification and nutrient accumulation in greenhouse vegetable soils in Shouguang [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, **24**(4): 157-161.
- [23] 黄容, 高明, 万毅林, 等. 秸秆还田与化肥减量配施对稻-菜轮作下土壤养分及酶活性的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4446-4456.
- Huang R, Gao M, Wan Y L, *et al.* Effects of straw in combination with reducing fertilization rate on soil nutrients and enzyme activity in the paddy-vegetable rotation soils [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4446-4456.
- [24] 曹舰艇, 杨红, 彭艳, 等. 藏东南不同种植年限蔬菜大棚土壤 pH 及养分的变化特征[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2019, **47**(8): 117-126.
- Cao J T, Yang H, Peng Y, *et al.* Changing characteristics of soil pH and nutrients in vegetable greenhouses with different planting years in Southeast Tibet [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2019, **47**(8): 117-126.
- [25] 孙福来, 张延霞, 庞祥锋, 等. 长期定位施肥对土壤有机质和碱解氮及冬小麦产量的影响[J]. *土壤通报*, 2007, **38**(5): 1016-1018.
- Sun F L, Zhang Y X, Pang X F, *et al.* Effects of long-term fertilization on soil organic matter, available nitrogen and wheat yield [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, **38**(5): 1016-1018.
- [26] 黄晶淼, 刘国鑫, 刘佩杭, 等. 不同种植年限苹果园根际土壤养分、pH 及微生物的相关性[J]. *山西农业科学*, 2020, **48**(8): 1263-1266.
- Huang J M, Liu G X, Liu P H, *et al.* Correlation of nutrient, pH and microorganism in rhizosphere soil of apple orchard with different cultivation years [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2020, **48**(8): 1263-1266.
- [27] 张晓梅, 程亮. 种植年限对设施蔬菜土壤养分和环境的影响[J]. *中国瓜菜*, 2020, **33**(1): 48-54.
- Zhang X M, Cheng L. Effects of different planting ages on the nutrients and environment in vegetable greenhouse soils [J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2020, **33**(1): 48-54.
- [28] 张菊, 董杰, 邓焕广, 等. 山东聊城不同种植年限蔬菜大棚土壤理化性质的演变[J]. *土壤通报*, 2016, **47**(5): 1119-1125.
- Zhang J, Dong J, Deng H G, *et al.* Temporal changes of soil physicochemical properties in vegetable greenhouses in Liaocheng, Shandong province [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, **47**(5): 1119-1125.
- [29] 刘雅明, 王祖伟, 王子璐, 等. 长期种植对设施菜地土壤中重金属分布的影响及生态风险评估[J]. *天津师范大学学报(自然科学版)*, 2020, **40**(6): 54-61, 80.
- Liu Y M, Wang Z W, Wang Z L, *et al.* Impact of long-term planting on heavy metal distribution in greenhouse soil and ecological risk assessment [J]. *Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition)*, 2020, **40**(6): 54-61, 80.
- [30] 茹淑华, 耿暖, 张国印, 等. 河北省典型蔬菜产区土壤和蔬菜中重金属累积特征研究[J]. *生态环境学报*, 2016, **25**(8): 1407-1411.
- Ru S H, Geng N, Zhang G Y, *et al.* Heavy metals accumulation in soil and vegetable collected from typical vegetable production areas in Hebei Province [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, **25**(8): 1407-1411.
- [31] 王素萍, 杜雷, 郭翠英, 等. 种植年限及栽培方式对菜田土壤重金属积累的影响[J]. *湖北农业科学*, 2020, **59**(24): 88-91, 98.
- Wang S P, Du L, Guo C Y, *et al.* Effects of planting years and cultivation methods on heavy metal accumulation in vegetable soil [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2020, **59**(24): 88-91, 98.
- [32] 李艳玲, 陈卫平, 杨阳, 等. 济源市平原区农田重金属污染特征及综合风险评估[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(6): 2229-2236.
- Li Y L, Chen W P, Yang Y, *et al.* Heavy metal pollution characteristics and comprehensive risk evaluation of farmland across the eastern plain of Jiyuan city [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(6): 2229-2236.
- [33] 任顺荣, 邵玉翠, 高宝岩, 等. 长期定位施肥对土壤重金属

- 含量的影响[J]. 水土保持学报, 2005, **19**(4): 96-99.  
Ren S R, Shao Y C, Gao B Y, *et al.* Effects of long-term located fertilization on heavy-metal content of soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, **19**(4): 96-99.
- [34] 王洋洋, 李方方, 王笑阳, 等. 铅锌冶炼厂周边冰天土壤重金属污染空间分布特征及风险评估[J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 437-444.  
Wang Y Y, Li F F, Wang X Y, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metal contamination in surface farmland soil around a lead and zinc smelter[J]. Environmental Science, 2019, **40**(1): 437-444.
- [35] 王媛媛. 长期定位施肥对保护地土壤团聚体组成与重金属分布的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.  
Wang Y Y. Soil aggregate composition characteristic and its effects on tomato yield and fruit quality in the soil amended with straw and lime in greenhouse [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020.
- [36] 魏俊峰, 吴大清, 彭金莲, 等. 广州城市水体沉积物中重金属形态分布研究[J]. 土壤与环境, 1999, **8**(1): 10-14.  
Wei J F, Wu D Q, Peng J L, *et al.* A study on heavy metal speciation in sediments from Guangzhou water body[J]. Soil and Environmental Sciences, 1999, **8**(1): 10-14.
- [37] 韩春梅, 王林山, 巩宗强, 等. 土壤中重金属形态分析及其环境学意义[J]. 生态学杂志, 2005, **24**(12): 1499-1502.  
Han C M, Wang L S, Gong Z Q, *et al.* Chemical forms of soil heavy metals and their environmental significance [J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, **24**(12): 1499-1502.
- [38] 赵一鸣, 董颖博, 林海, 等. 土壤理化性质对重金属形态的影响[J]. 农业工程, 2018, **8**(12): 38-43.  
Zhao Y M, Dong Y B, Lin H, *et al.* Influence of soil physical and chemical properties on forms of heavy metals [J]. Agricultural Engineering, 2018, **8**(12): 38-43.
- [39] 邵涛, 刘真, 黄开明, 等. 油污染土壤重金属赋存形态和生物有效性研究[J]. 中国环境科学, 2000, **20**(1): 57-60.  
Shao T, Liu Z, Huang K M, *et al.* Study on the speices and the bioavailabilities of heavy metals in oil-polluted soil [J]. China Environmental Science, 2000, **20**(1): 57-60.
- [40] 马宏宏, 彭敏, 郭飞, 等. 广西典型岩溶区农田土壤-作物系统 Cd 迁移富集影响因素[J]. 环境科学, 2021, **42**(3): 1514-1522.  
Ma H H, Peng M, Guo F, *et al.* Factors affecting the translocation and accumulation of cadmium in a soil-crop system in a typical karst Area of Guangxi Province, China [J]. Environmental Science, 2021, **42**(3): 1514-1522.



## 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> in Zhejiang Province	LI Bing-jie, CHEN Jin-yuan, LIU Zheng-zheng, <i>et al.</i>	( 639 )
Impact of Meteorological Conditions on PM <sub>2.5</sub> in Jiangsu Province from 2001 to 2019	PAN Chen, KANG Zhi-ming	( 649 )
Comparison and Analysis of PM <sub>2.5</sub> 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 <sub>3</sub> 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 Weibei 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 )