

目次

河北南部城市臭氧和 VOCs 的污染特征及传输贡献 赵江伟, 聂赛赛, 于玉洁, 王帅, 崔建升, 王玮, 任晓伟, 朱烁 (4775)

基于卫星和地面监测的河西走廊 O₃ 浓度时空分布及潜在源区分析 李锦超, 曹春, 方锋, 唐千惠, 梁朕月 (4785)

海南岛臭氧污染时空变化及敏感性特征 符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅 (4799)

华东地区对流层 O₃ 和前体物 HCHO 及 NO₂ 的时空特征 王晓雯, 刘昊霞, 王扬, 宋宜凯 (4809)

2006 ~ 2020 年广东省大气甲醛排放演变特征 明桂英, 朱曼妮, 沙青娥, 张雪驰, 饶思杰, 陈诚, 刘慧琳, 郑君瑜 (4819)

淄博市涂装行业 VOCs 排放水平及减排潜力 黄玥润, 杨文, 王秀艳, 王雨燕, 程颖, 王帅 (4832)

西安市城市降尘和土壤尘 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 中碳组分特征 沈利娟, 王红磊, 孙杰娟, 刘诗云, 刘焕武, 赵天良 (4843)

长江流域径流模拟及其对极端降雨的响应 高爽, 遆超普, 汤水荣, 王心亮, 王慧勇, 孟磊, 颜晓元 (4853)

黄河流域内蒙古段水化学同位素特征及水体转化关系 裴森森, 段利民, 苗平, 潘浩, 崔彩琪, 张波, 籍健勋, 罗艳云, 刘廷玺 (4863)

古堆泉域岩溶地下水水化学特征及成因 唐春雷, 申豪勇, 赵春红, 王志恒, 谢浩, 赵一, 梁永平 (4874)

华北平原典型城市(石家庄)地下水重金属污染源解析与健康风险评价 陈慧, 赵鑫宇, 常帅, 宋圆梦, 卢梦淇, 赵波, 陈昊达, 高赛, 王琳静, 崔建升, 张璐璐 (4884)

湖南东江湖表层沉积物重金属的空间分布、形态及生态风险 张同亮, 衣丽霞, 黎常成, 袁首枢, 豆奕轩, 田胜艳, 林尚璇 (4896)

太湖水华前表层水 CDOM 的光谱特征与来源解析 王永强, 卢少勇, 黄蔚, 韩镇阳, 国晓春 (4906)

白洋淀典型水域 COD 的组成及各组分贡献 李琦, 张超, 张文强, 温胜芳, 单保庆, 季恺悦 (4915)

白洋淀典型抗生素的源解析及其特定源风险评估 宋圆梦, 赵波, 卢梦淇, 赵鑫宇, 陈慧, 陈昊达, 高赛, 王琳静, 崔建升, 张璐璐 (4927)

雅鲁藏布江中游河流生态系统健康状态对水环境因子的响应 李晓东, 杨清, 刘惠秋, 巢欣, 杨胜烟, 巴桑 (4941)

鄱阳湖典型河湖交汇区浮游植物现状分析 于新平, 陈宇炜, 刘金福, 王俊颖, 徐光锋, 邹浩月, 陈楠, 夏雨 (4954)

不同臭熏程度下城市河道浮游植物群落结构、多样性和功能群 张琪琪, 曾劼, 尹卓, 冯杰, 刘静, 修宇鑫, 刘国, 许春阳 (4965)

反硝化脱氮对太湖蓝藻水华态势的影响 李昌杰, 许海, 詹旭, 张铮惠, 朱梦圆, 邹伟, 肖曼, 倪子怡, 朱慧 (4977)

密云水库入库河流微生物群落演替对氮素形态转化的影响 辛苑, 张耀方, 李添雨, 叶芝茵, 申佩弘, 魏源送, 高超龙, 宋舒兴, 张俊亚 (4985)

城市尾水氮代谢过程中芽孢杆菌对微藻作用机制 赵志瑞, 马超, 颜嘉晨, 李书缘, 李晴, 胡紫如, 呼庆, 刘硕, 万敬敏 (4996)

高效异养硝化-好氧反硝化菌 *Glutamicibacter* sp. WS1 低温下对多种氮源的脱氮特性及氮代谢机制 魏渤惠, 罗晓, 吕鹏翼, 马文凯, 苏金卫, 李伟, 崔建升 (5006)

大环内酯类抗生素在饮用水处理过程中的污染特征及其氯化反应机制 岑霞, 程思宇, 石宗民, 谢卓鸿, 张凌菱, 杨滨, 应光国 (5017)

不同堆肥工艺处理的城市污水污泥对滨海湿地土壤中养分释放特征和潜力的影响 贾培寅, 王馨, 花玉婷, 姜志翔 (5025)

淮河流域安徽段水体和沉积物微塑料赋存特征及风险评估 张海强, 高良敏, 葛娟, 赵兴兰, 张振, 慕明, 邱宇辉 (5036)

黄河三角洲湿地表层沉积物中微塑料的分布、来源和风险评估 耿娜, 赵广明, 张大海, 袁红明, 李先国 (5046)

固原市农田土壤微塑料的分布特征及风险评估 马贵, 丁家富, 周悦, 周炎炎, 廖影云, 海金涛, 王欢 (5055)

鄱阳湖湿地淹水与非淹水状态下微塑料表面细菌群落分布特征 赵俊凯, 陈旭, 胡婷婷, 廖轶颖, 邹龙, 简敏菲, 刘淑丽 (5063)

聚苯乙烯微塑料对铜绿假单胞菌生物膜形成和结构变化的影响 陶辉, 于多, 杨兰, 陈泽扬, 周灵沁, 罗雲鑫 (5071)

聚苯乙烯微塑料对小白菜生长、生理生化及冠层温度特性的影响 郭冰林, 丰晨晨, 陈悦, 林迪, 李岚涛 (5080)

聚乙烯与磺胺二甲噻啶复合胁迫对大豆种子萌发及幼苗生长生理特征的影响 赵肖琼, 张恒慧, 赵润柱, 张新梅 (5092)

离子类型、强度和铁氧化物影响下微塑料的迁移行为及模型计算 张然, 于可飞, 黄磊, 陈雅丽, 马杰, 徐莉萍, 李永涛 (5102)

土地利用和气候变化对农牧交错带生态系统服务的影响 徐文彬, 饶良懿 (5114)

有机碳流失对土壤侵蚀的响应及其驱动因素: 基于 Meta 分析 刘小岚, 黄金权, 齐瑜洁, 李威闻, 刘纪根, 陈燕飞, 高绣纺 (5125)

平衡施肥与秸秆覆盖对紫色土坡耕地养分及其化学计量的影响 张高宁, 徐绮雯, 何丙辉, 李天阳, 冯梦蝶, 梁珂 (5135)

稀土-重金属共污染土壤中真菌群落结构特征及主导影响因素 罗颖, 李敬伟, 袁浩, 包智华 (5145)

周年轮作休耕对土壤 AMF 群落和团聚体稳定性的影响 鲁泽让, 夏梓泰, 芦美, 赵吉霞, 李永梅, 王自林, 范茂攀 (5154)

华北平原典型城市土壤微生物群落时空变化规律及其驱动因子 赵鑫宇, 陈慧, 常帅, 宋圆梦, 赵波, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐 (5164)

高量秸秆还田配施芽孢杆菌对沙化土壤细菌群落及肥力的影响 聂扬眉, 步连燕, 陈文峰, 安德荣, 韦革宏, 王红雷 (5176)

基于大田试验的铅镉复合污染土壤中甜糯玉米低积累特性 唐乐斌, 李龙, 宋波, 董心月, 韦美溜 (5186)

不同阻控措施对生菜中镉铅累积及品质的影响 周洪印, 李嘉琦, 包立, 夏运生, 王晟, 吴龙华, 张乃明 (5196)

纳米氧化铜对镉胁迫下小油菜生理生化和重金属累积的影响 王诗琪, 孙约兵, 黄青青, 徐应明, 董如茵, 孟庆尧 (5204)

不同污染区巨菌草生物炭内源污染物分布及其生物毒性 刘莉雅, 崔红标, 刘笑生, 张雪, 董婷婷, 章腾, 周静 (5214)

CuFeO₂ 改性生物炭对四环素的吸附特性 刘国成, 张新旺, 信帅帅, 王倩文, 阎清华, 周成智, 辛言君 (5222)

基于 Meta 分析的全氟化合物对鱼类生态毒性效应 陆宏, 周锦阳, 杨帆, 王蓓莉, 程治文, 申哲民, 袁涛 (5231)

基于 PMF 模型的县域尺度土壤重金属来源分析及风险评估 郑永立, 温汉辉, 蔡立梅, 罗杰, 汤端阳, 武妙, 李慧, 李鼎 (5242)

基于 PMF-PCA/APCS 与 PERI 的菏泽油田牡丹种植区表层土壤重金属潜在来源识别及生态风险评估 赵庆令, 李清彩, 安茂国, 于林松, 万鑫, 曹付恒, 韩文撑, 陈娟, 王天鸽 (5253)

重庆市煤矸山周边农产品镉健康风险评价及土壤环境基准值推导 马杰, 余泽蕾, 王胜蓝, 邓力, 孙静, 刘萍, 徐敏 (5264)

安徽典型硫铁矿集中开采区土壤重金属污染特征及来源解析 贾晗, 刘军省, 王晓光, 鞠林雪, 何鑫, 周建伟, 张羲 (5275)

湘东北典型河源区土壤重金属分布特征、来源解析及潜在生态风险评估 杨振宇, 廖超林, 邹炎, 谢伍晋, 陈晓威, 张驭飞 (5288)

不同含量外源镉在土壤中的变化特征 周子阳, 庞瑞, 宋波 (5299)

CO₂ 泡沫混凝土碳封存潜力分析 张源, 他旭鹏, 覃述兵, 郝佑民 (5308)

综合环境社会经济指标的优先污染物筛选方法研究: 以电子废物拆解为例 陈源, 蔡震, 李金惠 (5316)

《环境科学》征订启事(4808) 《环境科学》征稿简则(4831) 信息(4842, 5124, 5153)

不同阻控措施对生菜中镉铅累积及品质的影响

周洪印^{1,2}, 李嘉琦^{2,3}, 包立^{2,3}, 夏运生^{2,3}, 王晟^{1,2}, 吴龙华⁴, 张乃明^{2,3*}

(1. 云南农业大学植物保护学院, 昆明 650201; 2. 云南省土壤培肥与污染修复工程实验室, 昆明 650201; 3. 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 4. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要: 为探索受重金属镉(Cd)和铅(Pb)复合污染农田的安全利用技术, 实现农产品安全生产, 采用盆栽试验, 以低铅镉累积品种生菜(KCW)为供试材料, 研究2种土壤钝化剂和5种叶面阻控剂对生菜中Cd和Pb累积及品质的影响。结果表明, 不同阻控措施对生菜土壤pH值影响不同, 其中施用45 g·m⁻²生物炭基钝化剂对提升土壤pH值差异最显著, 较CK提高了0.8个单位; 施用72 g·m⁻²腐殖酸钝化剂对降低生菜土壤pH值差异最显著, 较CK显著降低了0.25个单位。在所有阻控措施中, 施用45 g·m⁻²生物炭基钝化剂对土壤有效态Cd含量的降低效果最好, 较CK显著降低53%, 施用135 g·m⁻²生物炭基钝化剂对土壤有效态Pb含量的降低效果最好, 较CK显著降低64%。喷施0.8% FAK-Zn叶面阻控剂不仅对降低生菜可食部Cd、Pb含量的阻控效果最佳, 分别较CK显著降低77%和60%, 且还显著降低生菜可食部Cd、Pb富集系数和根部向可食部的转运系数。不同阻控措施对生菜营养品质影响不同, 其中0.4% FAK-Zn叶面阻控剂对可溶性蛋白提升效果最佳; 0.6% FAK-Zn对可溶性糖提升效果最佳, 0.4% FAK-Zn阻控剂对维生素C含量提升效果最佳。总之, 施用生物炭基钝化剂可有效地修复受Cd和Pb复合污染的生菜土壤, 而喷施FAK-Zn叶面阻控剂可有效地抑制生菜中Cd和Pb富集吸收转移, 并能改善提升生菜营养品质, 为重金属复合污染的蔬菜安全生产提供理论依据, 促进资源与环境的循环利用。

关键词: 重金属; 富集; 生菜; 阻控措施; 品质

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)09-5196-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202210056

Effects of Different Control Measures on Cadmium and Lead Accumulation and Quality in Lettuce

ZHOU Hong-yin^{1,2}, LI Jia-qi^{2,3}, BAO Li^{2,3}, XIA Yun-sheng^{2,3}, WANG Sheng^{1,2}, WU Long-hua⁴, ZHANG Nai-ming^{2,3*}

(1. College of Plant Protection, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. Yunnan Soil Fertilization and Pollution Remediation Engineering Laboratory, Kunming 650201, China; 3. College of Resources and Environmental Sciences, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 4. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: To explore the safe utilization technology of farmland polluted by the heavy metals cadmium (Cd) and lead (Pb) and to realize the safe production of agricultural products, a pot experiment was conducted to investigate the effects of two soil passivators and five foliar inhibitors on Cd and Cd-accumulation and quality of lettuce with low Pb and Cd accumulation (KCW). The results showed that different control measures had different effects on the soil pH value of lettuce, and the application of 45 g·m⁻² biochar-based passivator had the most significant difference in improving the soil pH value, which was increased by 0.8 units compared with that in CK. By using 72 g·m⁻² of humic acid passivator yielded notable difference in reducing the soil pH value of lettuce. A reduction of 0.25 units was achieved compared with that in CK. Among all the control measures, the application of 45 g·m⁻² biocharcoal-based passivation agent had the best effect on reducing soil available Cd content, which was significantly reduced by 53% compared with that in CK, and the application of 135 g·m⁻² biocharcoal-based passivation agent had the best effect on reducing soil available Pb content, which was significantly reduced by 64% compared with that in CK. Spraying 0.8% FAK-Zn foliar inhibitor not only had the best control effect on reducing Cd and Pb contents in the edible parts of lettuce, which were significantly reduced by 77% and 60%, respectively, compared with that in CK, but it also significantly reduced Cd and Pb enrichment coefficients and transport coefficients from the root to the edible parts of the lettuce. Different control measures had different effects on the nutritional quality of lettuce, and 0.4% FAK-Zn foliar inhibitor had the best effect on soluble protein. The 0.6% FAK-Zn had the best effect on soluble sugar, and the 0.4% FAK-Zn inhibitor had the best effect on vitamin C content. The application of biocarbon-based passivator could effectively repair lettuce soil polluted by Cd and Pb, whereas the application of FAK-Zn leaf surface inhibitor could effectively inhibit the accumulation, absorption, and transfer of Cd and Pb in lettuce; improve the nutritional quality of lettuce; provide a theoretical basis for safe production of vegetables polluted by heavy metals; and promote the recycling of resources and environment.

Key words: heavy metals; enrichment; lettuce; control measures; quality

随着我国工农业的快速发展, 土壤重金属污染严重, 耕地土壤重金属污染形势日益严峻。我国遭受不同程度重金属污染的土壤已经接近2 000万hm², 其中铅(Pb)和镉(Cd)污染引起的生态环境、食品安全及区域人体健康风险最为严重, 有报告显示, 全国土壤中污染物点位超标率达16.1%, 其中耕地土壤的点位超标率达19.4%, 重金属是重要的污染物质, Cd和Pb的点位超标率分别为

7.0%和1.5%^[1,2]。重金属Cd和Pb作为生物体的一种非必需元素, 具有毒性大, 迁移性强的特点^[3], 易在蔬菜等农作物中富集^[4]。在不同蔬菜品种中, 叶菜类蔬菜最易受Cd影响^[5], 有研究表明,

收稿日期: 2022-10-08; 修订日期: 2022-11-22

基金项目: NSFC-云南联合基金重点项目(U2002210)

作者简介: 周洪印(1995~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为重金属环境行为与作物效应, E-mail: 1605202632@qq.com

* 通信作者, E-mail: zhangnaiming@sina.com

叶菜类蔬菜 Cd 的积累大于根茎类和茄果类^[6~8]. 土壤重金属含量超过安全值就会对蔬菜生长产生毒害作用,严重影响人体健康^[9~12]. 因此,减少毒性 Cd 和 Pb 在叶菜食用部位的积累对保障食品安全生产至关重要.

目前,在阻控蔬菜对重金属 Cd 和 Pb 吸收累积方面已有大量的研究. 贺希格都楞等^[13]在盆栽条件下,利用扫帚菜与白菜轮作,有效降低白菜可食部 Cd 含量,达到“边生产边修复”的目的. Su 等^[14]研究发现,白菜与不同品种油菜轮作后 Cd 含量下降. 然而, Cd 的超富集植物与主栽蔬菜的轮间套作不仅降低蔬菜产量而且增加了农艺措施的难度,同时,低 Cd 积累蔬菜品种及超积累植物的研究工作当前大多尚处在实验室试验阶段. Tack 等^[15]研究发现,水肥措施能够促进菠菜重金属的稳态转化,降低菠菜 Cd 含量,减少农产品特别是植株可食用部分对土壤重金属的吸收和转移,确保安全生产. 然而由于生产成本问题,水肥措施在蔬菜田间生产实践中运用还较少,而且可能会引起土壤的理化性质变化,产生二次污染. 目前钝化修复技术是土壤重金属污染修复的重要方法之一,其钝化效率高、成本低且种类丰

富,具有良好的前景^[16]. 施用叶面阻控剂是实现重金属污染农田作物安全生产的重要修复措施,因其具有肥效好、使用方便、养分利用高和环境友好等特点,使得叶面阻控剂在农田土壤重金属污染修复和作物安全生产方面已成为重要研究方向^[17,18].

目前叶面阻控剂的研究主要集中在水稻等粮食作物上进行,且大多尚处于实验室研究阶段,针对蔬菜的研究报道较少. He 等^[19]曾报道,人们通过吃蔬菜摄入的 Cd 几乎占人体总 Cd 含量的 70%. 蔬菜领域中的 Cd 污染,是一个需要解决的关键且困难的问题. 因此,寻求有效途径降低土壤重金属污染和蔬菜中重金属含量,保障蔬菜质量安全,对推动农业可持续发展具有迫切而重要的意义.

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤:由采自云南省昆明市云南农业大学农场没有受污染的山地表层红壤(0~20 cm)和云南省曲靖市罗平县以堵勒村受重金属镉铅复合污染的耕层土样(0~20 cm)均匀混合而成. 供试土壤的基本化学性质如表 1.

表 1 供试土壤的主要化学属性

Table 1 Main chemical properties of tested soil

项目	pH	$\omega/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$							
		有机质	碱解氮	速效磷	速效钾	全镉	全铅	有效镉	有效铅
数值	6.47	16.93	40.05	20.21	73.15	13.55	215.65	3.93	43.96

供试蔬菜:选取低累积的生菜品种(名称:万农快菜王,缩写:KCW,来源:山东),种子从云南省昆

明市呈贡农资市场购买.

供试土壤钝化剂和叶面阻控剂详见表 2.

表 2 供试土壤钝化剂和叶面阻控剂信息

Table 2 Information of tested soil passivators and leaf surface inhibitors

编号	名称	缩写	来源	pH
1	生物炭基	T _C	实验室自制	11.15
2	天壤一号	T _{FZ}	新疆双龙腐殖酸公司	5.22
3	EDTA 二钠叶面阻控剂	Y _{CM}	实验室配制	2.20
4	FAK-Zn 叶面阻控剂	Y _{FAK}	实验室配制	4.81
5	降镉灵叶面阻控剂	Y _{SI}	佛山市铁人环保科技有限公司	9.36
6	无机型叶面阻控剂	Y _K	实验室配制	4.22
7	前海万物生植物干细胞水溶肥	Y _{WAN}	深圳万物生生物科技控股有限公司	9.12

1.2 试验设计

盆栽试验于 2020 年 9~11 月在云南农业大学后山阳光大棚内进行,共设计 16 个处理,包括 2 种土壤钝化剂处理和 5 种叶面阻控剂处理. 具体处理见(表 3),每处理重复 3 次.

向盆钵中装土,每盆装土 8 kg,然后向土壤钝化剂处理盆中分别添加钝化剂(生物质炭和腐殖酸),将钝化剂和土壤混匀,保持土壤含水量为田间持水量的 65% 左右,待稳定 5 d 后播种. 常规水肥管理,

出苗 5 d 后进行间苗,每盆保留 4 株长势相近的生菜幼苗,生长 5 d 后向叶面阻控剂处理的生菜叶片的正面和背面均匀喷施叶面阻控剂,于 2020 年 11 月 20 收样.

1.3 样品采集与测定分析

植株样品采集:每盆选择有代表性的生菜 2 株,分成地上部和地下部两个部分,先用自来水冲洗,再用蒸馏水淋洗 3 次. 将洗净晾干的植物样品按根、茎和叶分类后,将茎叶分别取出一半样品,在 105℃

烘箱中杀青 30 min,然后在 65℃烘干至恒重,研磨,过 200 目筛,分装于一次性塑料袋中,备用.另一半新鲜植物样品用于测定植株品质.

土壤样品采集:每盆取植株地下部根系周围的土壤,取回后分别经自然通风干燥,磨碎,过 2 mm、0.149 mm 筛,分装于一次性塑料袋中,备用.

表 3 钝化剂和叶面阻控剂盆栽处理

Table 3 Treatment with passivators and foliar inhibitors

处理	编号	处理设置
对照	CK	不施调理剂
土壤钝化剂	T _{C1}	45 g·m ⁻² 生物炭基钝化剂
	T _{C2}	90 g·m ⁻² 生物炭基钝化剂
	T _{C3}	135 g·m ⁻² 生物炭基钝化剂
	T _{FZ1}	36 g·m ⁻² 腐殖酸钝化剂
	T _{FZ2}	54 g·m ⁻² 腐殖酸钝化剂
	T _{FZ3}	72 g·m ⁻² 腐殖酸钝化剂
	叶面阻控剂	Y _{CM1}
Y _{CM2}		3% EDTA 二钠叶面阻控剂
Y _{CM3}		4% EDTA 二钠叶面阻控剂
Y _{FAK1}		0.4% FAK-Zn 叶面阻控剂
Y _{FAK2}		0.6% FAK-Zn 叶面阻控剂
Y _{FAK3}		0.8% FAK-Zn 叶面阻控剂
Y _K		0.25% 磷酸二氢钾
Y _{SI}		降镉灵
Y _{WAN}		万物生

测定分析:土壤 pH 值用蒸馏水以水土比为 5:1 浸提后,采用 EZ-9909 五合一水质测试仪(YierYi, 中国)测定;土壤重金属 Cd 和 Pb 全量测定采用 HF-HClO₄-HNO₃ 消煮;土壤中有有效态 Cd 和 Pb 含量测定采用 DTPA(二乙三胺五乙酸)浸提,原子荧光法测定;生菜根部和可食部 Cd 和 Pb 含量测定采用电感耦合等离子体质谱仪,采用了植物标准物质 GBW100351[(0.42 ± 0.02) mg·kg⁻¹] 进行质量控制,Cd 和 Pb 回收率为 80%~95%;生菜中可溶性蛋白含量测定采用考马斯亮蓝法;生菜中可溶性糖含量测定采用蒽酮比色法;生菜中维生素 C 含量测定采用紫外分光光度法.

本试验中生菜 Cd 和 Pb 富集系数的计算公式如下:

$$BCF = C/C_{soil} \quad (1)$$

式中,BCF 为 Cd 和 Pb 富集系数;C 为生菜可食部分 Cd 和 Pb 含量;C_{soil} 为生菜根际土壤中 Cd 和 Pb 含量.

本试验中生菜 Cd 和 Pb 转运系数的计算公式如下:

$$TF = C/C_{root} \quad (2)$$

式中,TF 为 Cd 和 Pb 转运系数;C 为生菜地上可食部分 Cd 和 Pb 含量;C_{root} 为生菜地下根中 Cd 和 Pb 含量.

1.4 数据分析

本研究所有数据均采用 Excel 2016 进行统计,使用 SPSS 20.0 进行数据分析,通过 Duncan 法进行差异显著性分析.图表采用 Excel 2016 制作.

2 结果与分析

2.1 不同阻控措施对生菜根际土壤 pH 的影响

土壤酸碱度是土壤重要的化学性质之一,土壤 pH 的改变会影响土壤对 Cd 离子的吸附行为^[20].不同阻控措施对生菜土壤 pH 值影响不同,如图 1 所示.在施用两种钝化剂处理中,施用生物炭基钝化剂显著提高了土壤 pH,且土壤 pH 与生物炭基施用量呈显著正相关($P < 0.05$),与对照相比,随钝化剂用量增加从小到大 pH 值依次增加 0.64、0.72 和 0.8 个单位.而施用腐殖酸钝化剂却降低了土壤 pH,且土壤 pH 与腐殖酸施用量呈显著负相关($P < 0.05$),与对照相比,随钝化剂用量增加从小到大 pH 值依次降低 0.05、0.15 和 0.25 个单位.钝化剂的组成和理化性质是影响土壤 pH 的主要因素之一^[21],供试钝化剂生物炭基本身 pH 值为 11.15,施入土壤中明显能增加土壤 pH 值,腐殖酸钝化剂 pH 值为 5.22,施入土壤中能降低土壤 pH.张静静等^[21]和赵庆圆等^[22]的研究也表明,添加生物炭能提高土壤 pH 值且土壤 pH 随生物炭施用量的增加而增高,单一施用腐殖酸会显著降低土壤 pH.

在喷施 5 种叶面阻控剂中,Y_{WAN} 和 Y_{FAK3} 处理显著增加了土壤 pH,较 CK 显著增加 0.11 和 0.07 个单位;而 Y_K 处理显著降低土壤 pH,较 CK 显著降低 0.15 个单位;其他处理对生菜土壤 pH 均无显著变化.

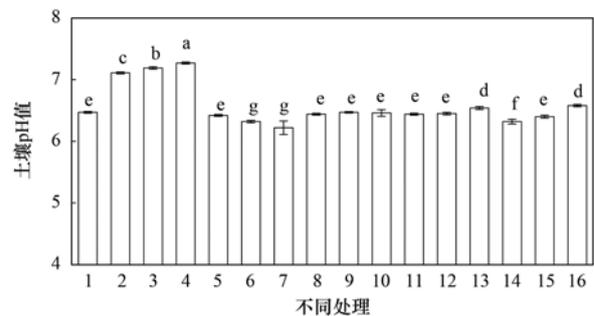


图 1 不同处理条件下生菜土壤的 pH 值

Fig. 1 The pH value of lettuce soil under different treatment conditions

2.2 不同阻控措施对生菜根际土壤有效态 Cd 和 Pb 含量的影响

施用土壤钝化剂和喷洒叶面阻控剂对生菜土壤

有效态 Cd 和 Pb 含量有不同程度的影响,如图 2 和图 3 所示. 在所有阻控处理中,与对照相比, T_{C1} 处理对降低土壤有效态 Cd 含量差异最显著,较 CK 显著降低 53%,说明施用 $45 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 生物炭基钝化剂对土壤有效态 Cd 含量的降低效果最好;而 T_{C3} 处理对降低土壤有效态 Pb 含量差异最显著,较 CK 显著降低 64%,说明施用 $135 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 生物炭基钝化剂对土壤有效态 Pb 含量的降低效果最好. 在施用 2 种钝化剂处理下,2 种钝化剂处理均显著降低土壤有效态 Cd 和 Pb 含量($P < 0.05$). 阻控效果:生物炭基钝化剂 > 腐殖酸钝化剂. 且生物炭基钝化剂对生菜土壤有效态 Cd 含量的阻控效果与其施用量呈负相关;对有效态 Pb 含量的降低效果与其施用量呈正相关. 在喷施 5 种叶面阻控剂处理下,不同叶面阻控剂处理均显著降低土壤有效态 Cd 和 Pb 含量($P < 0.05$),其中 Y_{CM3} 处理对降低土壤有效态 Cd 含量差异最显著,说明 4% EDTA 二钠叶面阻控剂对土壤有效态 Cd 含量的降低效果最好,较 CK 显著降低 46%,且降低效果与 EDTA 二钠叶面阻控剂喷施浓度呈显著正相关($P < 0.05$);而 Y_{FAK2} 处理对降低土壤有效态 Pb 含量差异最显著,较 CK 显著降低 43%.

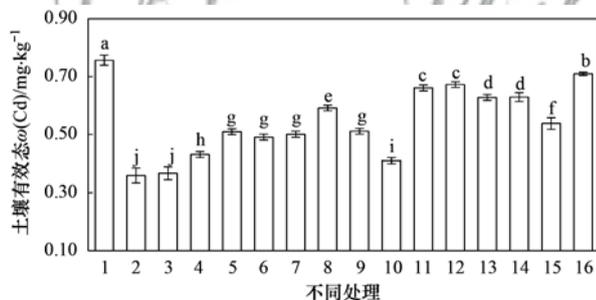


图 2 不同处理条件下生菜根际土壤有效态 Cd 含量

Fig. 2 Content of available Cd in lettuce rhizosphere soil under different treatment conditions

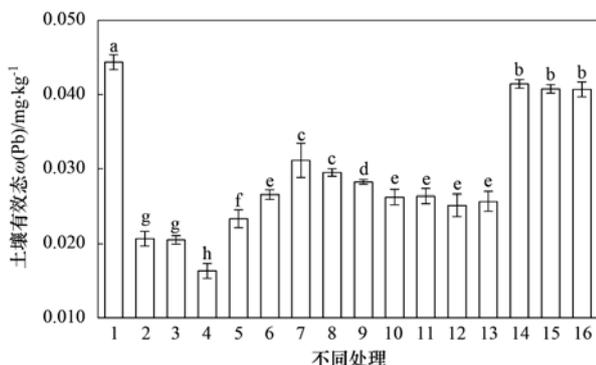


图 3 不同处理条件下生菜根际土壤有效态 Pb 含量

Fig. 3 Content of available Pb in lettuce rhizosphere soil under different treatment condition conditions

2.3 不同阻控措施对生菜可食部位 Cd 和 Pb 含量的影响

在所有处理中,与对照相比, Y_{FAK3} 处理对降低生菜可食部 Cd 含量效果最显著,较 CK 显著降低 77%;对降低生菜可食部 Pb 含量最明显,较 CK 降低 60%. 说明 0.8% FAK-Zn 叶面阻控剂对降低生菜可食部 Cd 和 Pb 含量效果最好,且降低效果与喷施浓度呈显著正相关($P < 0.05$),如图 4 和图 5 所示. 在施用 2 种钝化剂处理下,两种钝化剂处理均显著降低生菜可食部 Cd 和 Pb 含量($P < 0.05$),生物炭基对生菜可食部 Cd 和 Pb 含量的钝化效果比腐殖酸处理更佳,其中 T_{C1} 处理对降低生菜可食部 Cd 含量差异最显著,较 CK 显著降低 53%,且降低效果与施用量呈显著负相关($P < 0.05$);而 T_{C3} 处理对降低土壤有效态 Pb 含量差异最显著,较 CK 显著降低 58%,且降低效果与施用量呈显著正相关($P < 0.05$). 在喷施 5 种叶面阻控剂处理下,与对照相比,不同叶面阻控剂处理均显著降低生菜可食部 Cd 和 Pb 含量($P < 0.05$),降幅分别为 4%~77% 和 18%~60%,其中 Y_{FAK3} 处理对降低生菜可食部 Cd 和 Pb 含量差异最明显,而 Y_{WAN} 处理对生菜可食部

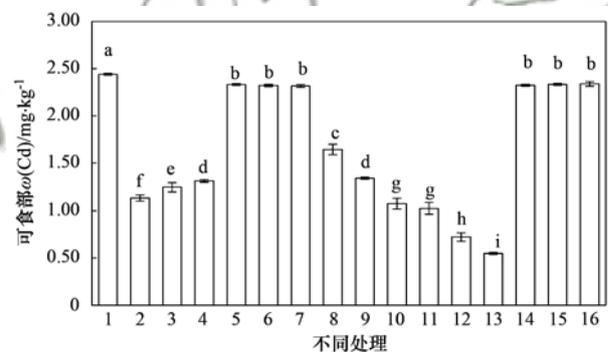


图 4 不同处理条件下生菜可食部位 Cd 含量

Fig. 4 Cd content in edible parts of lettuce under different treatment conditions

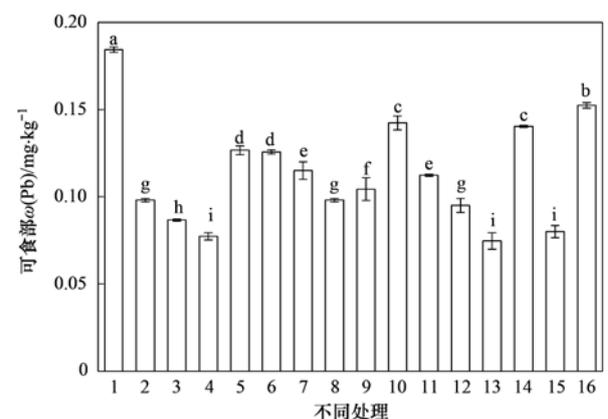


图 5 不同处理条件下生菜可食部位 Pb 含量

Fig. 5 Pb content in edible parts of lettuce under different treatment conditions

Cd 和 Pb 含量的降幅最小。

2.4 不同阻控措施对生菜 Cd 和 Pb 富集系数的影响

生物富集系数代表生菜对土壤 Cd 和 Pb 的吸收富集能力,富集系数越大其吸收富集 Cd 和 Pb 的能力越强.不同处理下生菜的 Cd 和 Pb 富集系数见表 4,所有处理中,与对照相比, Y_{FAK3} 处理对降低 KCW 可食部 Cd 富集系数差异最显著,较 CK 显著降低 78%,说明 0.8% FAK-Zn 叶面阻控剂对降低生菜可食部 Cd 生物富集系数效果最好;且 Y_{FAK3} 处理也显著降低生菜的 Pb 富集系数,较 CK 显著降低 30%. 在施用 2 种钝化剂处理下,不同梯度的生物炭基处理均显著降低生菜的 Cd 和 Pb 富集系数,较 CK 处理降幅分别为 6%~7% 和 19%~28% ($P < 0.05$),其中 T_{C1} 处理对降低生菜的 Cd 富集系数差异最显著,较 CK 显著降低 7%;而 T_{C3} 处理对降低生菜的 Pb 富集系数差异最显著,较 CK 显著降低 28%. 不同梯度的腐殖酸处理显著增加生菜的 Cd

富集系数,较 CK 处理增幅为 39%~46% ($P < 0.05$),而对生菜的 Pb 富集系数无显著差异 ($P > 0.05$). 在喷施 5 种叶面阻控剂处理下,不同梯度的 EDTA 二钠和 FAK-Zn 两种叶面阻控剂处理均显著降低生菜的 Cd 富集系数,较 CK 处理降幅为 12%~78% ($P < 0.05$),其中 Y_{FAK3} 处理对降低生菜可食部 Cd 富集系数差异最显著,较 CK 显著降低 78%. 而不同梯度的 EDTA 二钠和 FAK-Zn 两种叶面阻控剂处理对生菜的 Pb 富集系数影响各不相同,其中 Y_{CM3} 和 Y_{FAK1} 处理显著增加生菜铅的富集系数,分别较 CK 显著增加 3% 和 21%,其他梯度均显著降低生菜的 Pb 富集系数. Y_K 与 Y_{SI} 处理显著增加生菜的 Cd 富集系数,分别较 CK 显著增加 15% 和 39%,而 Y_{WAN} 处理对生菜的 Cd 富集系数无显著差异. Y_K 、 Y_{SI} 和 Y_{WAN} 处理显著降低生菜的 Pb 富集系数,分别较 CK 显著降低 19%、52% 和 10%.

表 4 不同处理条件下生菜可食部 Cd 和 Pb 富集系数和体内转移系数¹⁾

Table 4 Cd and Pb enrichment coefficients and in vivo transfer coefficients of edible parts of lettuce under different treatment conditions

处理	可食部富集系数		根部向可食部的转运系数	
	Cd	Pb	Cd	Pb
CK	0.109 ± 0.003c	0.232 ± 0.002de	0.541 ± 0.006d	0.695 ± 0.004d
T_{C1}	0.101 ± 0.001d	0.187 ± 0.010g	0.528 ± 0.003d	0.556 ± 0.006g
T_{C2}	0.101 ± 0.01d	0.177 ± 0.002h	0.565 ± 0.004cd	0.531 ± 0.003h
T_{C3}	0.102 ± 0.001d	0.166 ± 0.003i	0.509 ± 0.003d	0.491 ± 0.003i
T_{FZ1}	0.154 ± 0.002a	0.265 ± 0.002b	0.764 ± 0.002ab	0.764 ± 0.002b
T_{FZ2}	0.159 ± 0.001a	0.237 ± 0.007cd	0.788 ± 0.007a	0.718 ± 0.007c
T_{FZ3}	0.152 ± 0.002a	0.227 ± 0.003ef	0.782 ± 0.010ab	0.713 ± 0.002c
Y_{CM1}	0.096 ± 0.003d	0.187 ± 0.002g	0.447 ± 0.143e	0.555 ± 0.004g
Y_{CM2}	0.086 ± 0.002e	0.208 ± 0.005f	0.439 ± 0.009e	0.617 ± 0.003f
Y_{CM3}	0.086 ± 0.003e	0.240 ± 0.002c	0.440 ± 0.010e	0.623 ± 0.009f
Y_{FAK1}	0.056 ± 0.004f	0.281 ± 0.006a	0.260 ± 0.003f	0.552 ± 0.004g
Y_{FAK2}	0.038 ± 0.002g	0.228 ± 0.002e	0.178 ± 0.007g	0.685 ± 0.006e
Y_{FAK3}	0.024 ± 0.004h	0.162 ± 0.002i	0.150 ± 0.004g	0.484 ± 0.004i
Y_K	0.125 ± 0.005b	0.187 ± 0.002g	0.617 ± 0.002c	0.835 ± 0.004a
Y_{SI}	0.151 ± 0.008a	0.111 ± 0.003j	0.723 ± 0.004b	0.327 ± 0.008j
Y_{WAN}	0.114 ± 0.006c	0.208 ± 0.001f	0.548 ± 0.007d	0.624 ± 0.008f

1) 数据为 3 个重复的平均值 ± 标准误差; 不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 相同字母表示不显著, 下同

2.5 不同阻控措施对生菜体内 Cd 和 Pb 转运系数的影响

转运系数是指重金属在植株体内的转运,转运系数越大表明重金属向下一个器官的迁移能力越强.不同阻控措施处理下生菜的 Cd 和 Pb 转运系数见表 4,在所有处理中,与对照相比, Y_{FAK3} 处理对降低生菜的 Cd 转移系数差异最显著,较 CK 显著降低 72%,且 Y_{FAK3} 处理也显著降低生菜的 Pb 转移系数,较 CK 显著降低 53%. 说明 0.8% FAK-Zn 叶面阻控剂有效抑制了生菜的 Cd 和 Pb 由地下部向地上部转移.

在施用 2 种钝化剂处理下,与 CK 相比,不同梯

度的生物炭基处理对生菜的 Cd 转运系数无显著差异,而不同梯度的生物炭基处理却显著降低生菜的 Pb 转运系数,抑制了生菜的 Pb 由地下部向地上部转移.不同梯度的腐殖酸处理明显增加了生菜的 Cd 和 Pb 转移系数,说明施用腐殖酸一定程度上促进了生菜的 Cd 和 Pb 由地下部向地上部转移.在喷施 5 种叶面阻控剂处理下,与对照相比,不同梯度的 EDTA 二钠和 FAK-Zn 两种叶面阻控剂均显著降低生菜的 Cd 和 Pb 转运系数; Y_K 处理显著增加生菜的 Cd 和 Pb 转运系数; Y_{SI} 和 Y_{WAN} 两个处理对生菜的 Cd 转运系数无显著差异,而对生菜的 Pb 转运系数却表现相反效果.

2.6 不同阻控措施对生菜营养品质的影响

不同叶面阻控剂对生菜营养品质指标影响差异不同(表5)。在15个阻控处理下可溶性蛋白含量范围为2.56~4.09 mg·g⁻¹。与对照相比,除0.8% FAK-Zn叶面阻控剂对生菜可溶性蛋白含量无显著变化外,其他阻控处理均显著提高了生菜可溶性蛋白含量,其中0.4% FAK-Zn阻控剂对提高生菜可溶性蛋白含量效果最佳,可溶性蛋白含量为4.09 mg·g⁻¹,较CK显著增加64%。在所有阻控处理下生菜可溶性糖含量范围为9.40~12.97 mg·g⁻¹。施用2种土壤钝化剂后可溶性糖提高8.50%~44.15%,其中以54 g·m⁻²腐殖酸对生菜可溶性糖含量提升效果最佳,较CK显著增加44.15%;喷施叶面阻控剂后可溶性糖提高22.77%~49.62%,其中0.6% FAK-Zn阻控剂对提升生菜可溶性糖含量效果最佳,较CK显著增加49.62%。所有阻控处理下生菜可食部维生素C含量范围为18.04~22.39 mg·(100 g)⁻¹,其中54 g·m⁻²腐殖酸、72 g·m⁻²腐殖酸、0.8% FAK-Zn和4% EDTA二钠阻控剂处理与CK相比,均降低了可食部维生素C含量[19.08 mg·(100 g)⁻¹],但差异不显著;其中喷施0.4% FAK-Zn阻控剂处理对提升生菜维生素C含量最佳,含量达到22.39 mg·(100 g)⁻¹,较CK显著增加17.3%。

表5 不同处理条件下生菜可食部位可溶性蛋白、可溶性糖和维生素C含量

Table 5 Content of soluble protein, soluble sugar, and vitamin C in edible parts of lettuce under different treatment conditions

处理	可溶性蛋白含量 /mg·g ⁻¹	可溶性糖含量 /mg·g ⁻¹	维生素C含量 /mg·(100 g) ⁻¹
CK	2.61 ± 0.37c	8.67 ± 0.45f	19.08 ± 0.53cdef
T _{C1}	2.73 ± 0.23ab	9.90 ± 0.28def	19.88 ± 0.17bcde
T _{C2}	3.11 ± 0.46ab	11.17 ± 0.57bcd	21.37 ± 1.02ab
T _{C3}	2.96 ± 0.08ab	9.40 ± 0.70ef	20.83 ± 0.81ab
T _{FZ1}	2.68 ± 0.30ab	12.28 ± 0.89ab	19.92 ± 0.34bcde
T _{FZ2}	3.17 ± 0.09ab	11.94 ± 0.21abc	18.42 ± 0.67ef
T _{FZ3}	3.09 ± 0.18ab	12.49 ± 0.48ab	18.87 ± 0.85def
Y _{CM1}	3.17 ± 0.10ab	12.67 ± 0.58ab	21.32 ± 0.57ab
Y _{CM2}	4.04 ± 0.18a	12.00 ± 0.28abc	20.67 ± 0.35bc
Y _{CM3}	2.75 ± 0.17ab	10.64 ± 0.63cde	18.25 ± 0.56f
Y _{FAK1}	4.09 ± 0.16a	11.93 ± 1.96abc	22.39 ± 0.64a
Y _{FAK2}	3.30 ± 0.30b	12.97 ± 0.06a	21.27 ± 1.00ab
Y _{FAK3}	2.56 ± 0.49c	11.06 ± 0.73bcd	18.04 ± 1.31f
Y _K	3.19 ± 0.17ab	11.94 ± 1.67abc	20.07 ± 1.90bcd
Y _{SI}	3.06 ± 0.68ab	12.33 ± 0.83ab	20.77 ± 1.00ab
Y _{WAN}	2.74 ± 0.60ab	12.58 ± 0.40ab	21.13 ± 0.45ab

3 讨论

3.1 施用土壤钝化剂对生菜中Cd和Pb累积特征的影响

本研究施用两种不同梯度的生物炭基、腐殖酸

土壤钝化剂对低累积品种生菜土壤中有有效态Cd和Pb含量具有一定的降低效果(图2和图3),并且施用生物炭基还能显著提高土壤pH值(图1),这与Wang等^[23]和毕冬雪等^[24]研究的结果一致。因为一方面生物炭或腐殖酸添加到受重金属污染的土壤后,可以直接吸附或固持土壤中的重金属离子,从而降低土壤溶液中重金属离子浓度,另一方面能通过提高土壤pH值来降低重金属生物有效性,其作用原理主要包括改善土壤物理性质和化学性质、调控土壤微生物活性、降低重金属生物有效性等^[25]。已有研究表明生物炭的多孔、比表面积大和表面丰富的官能团(—OH、—COOH、C=O等)使得生物炭对重金属具有较强的吸附能力。Deng等^[26]研究发现生物炭表面官能团C=C对Cd的吸附有重要作用,N—C=O对于铅的去除有效。Liang等^[27]研究指出生物炭钝化剂包括吸附和沉淀作用,能有效去除土壤和水体中的Pb、Zn和Cd。本研究施用生物炭降低土壤中Cd和Pb含量和植株中Cd和Pb含量的效果明显优于施用腐殖酸的效果(图4和图5),并且不同梯度的生物炭处理显著降低生菜Pb的转运系数,抑制了生菜体内Pb含量由地下部向地上部转移(表4)。生物炭表面有许多如羧基和羟基等含氧官能团及负电荷,能够吸附固定重金属,降低其移动性。于静静等^[28]研究也证明在土壤中施加生物炭比有机质更有利于促进土壤团聚体的形成,从而导致土壤中重金属离子形态发生变化,进一步抑制土壤重金属向植株体内转移。

3.2 叶面阻控剂对生菜中Cd和Pb累积特征的影响

本研究结果表明,所有叶面阻控剂处理均对土壤中有有效态Cd和Pb含量和植株中Cd和Pb含量的阻控效果明显,其中4% EDTA二钠叶面阻控剂对土壤中有有效态Cd含量的阻控效果最明显(图2),这与吴龙华等^[29]研究发现EDTA可明显降低土壤对重金属吸收的研究结果相似,EDTA对Pb和Cd具有很强的螯合能力。所有叶面阻控剂处理中,施用FAK-Zn叶面阻控剂对降低生菜可食部Cd和Pb含量效果最佳(图4和图5)。主要原因是叶面阻控剂富含多种作物生长所需营养元素,如硅、锌和硼等,这些微量元素可以显著影响作物对重金属Cd的吸收,还能促进其生长和提高其抗逆性^[30~32]。本研究还表明,在喷施不同叶面阻控剂后,低Cd累积品种生菜Cd和Pb的转移系数也表现出明显差异,喷施FAK-Zn叶面阻控剂不但显著降低生菜可食部Cd和Pb含量,并且还显著降低生菜Cd和Pb富集系数和转运系数,有效抑制了生菜根部Cd和Pb含量向可食部转移(表4),这与陈志琴等^[33]研究的结果

一致,叶菜可食部位 Cd 含量与富集系数和转运系数存在显著正相关关系. Zn 施入后引发与 Cd 的离子拮抗作用,增强了光合产物以及对 Cd 的螯合作用,增强膜的稳定性,降低了植物对 Cd 的转运和吸收^[34,35]. Fe 和 Zn 都能减少 ROS 的生成,降低 Cd 对植株的氧化胁迫^[36].

4 结论

(1) 不同阻控措施对生菜土壤 pH 值影响不同,其中施用 45% 生物炭基钝化剂对提高生菜土壤 pH 值差异最显著,施用 72 g·m⁻² 腐殖酸钝化剂对降低生菜土壤 pH 值差异最显著.

(2) 所有阻控措施中,施用 45 g·m⁻² 和 135 g·m⁻² 的生物炭基钝化剂分别对土壤有效态 Cd 和 Pb 含量的阻控效果最好,施用生物炭基钝化剂对生菜土壤有效态 Cd 和 Pb 含量的阻控效果优于叶面阻控剂.

(3) 所有阻控措施中,喷施 0.8% FAK-Zn 叶面阻控剂不仅对降低生菜可食部 Cd 和 Pb 含量效果最佳,还显著降低生菜可食部 Cd 和 Pb 富集系数和根部向可食部的转运系数,对生菜可食部 Cd 富集系数的阻控效果最好;且其阻控效果与喷施浓度呈显著正相关,喷施 FAK-Zn 叶面阻控剂比施用土壤钝化剂更有效地抑制生菜中 Cd 和 Pb 含量由根部向可食部转移吸收.

(4) 所有阻控措施中,喷施 0.4% FAK-Zn 阻控剂对可溶性蛋白提升效果最佳;喷施 0.6% FAK-Zn 阻控剂对可溶性糖提升效果最佳;喷施 0.4% FAK-Zn 阻控剂对维生素 C 含量提升效果最好,说明喷施 FAK-Zn 叶面阻控剂比施用土壤钝化剂更能提升生菜的营养品质.

参考文献:

- [1] 环境保护部, 国土资源部. 环境保护部和国土资源部发布全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201404/t20140417_270670.htm, 2014-04-17.
- [2] Niu L L, Yang F X, Xu C Y, *et al.* Status of metal accumulation in farmland soils across China: From distribution to risk assessment[J]. *Environmental Pollution*, 2013, **176**: 55-62.
- [3] Al-Othman Z A, Ali R, A-Othman A M, *et al.* Assessment of toxic metals in wheat crops grown on selected soils, irrigated by different water sources[J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2012, **9**(S2): S1555-S1562.
- [4] 蔡峥, 齐越, 杨红, 等. 土壤重金属镉污染现状、危害及治理措施[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, **11**(7): 2286-2294.
Qi Z, Qi Y, Yang H, *et al.* Status, harm and treatment measures of heavy metal cadmium pollution in soil[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2020, **11**(7): 2286-2294.
- [5] Wang J J, Yu N, Mu G M, *et al.* Screening for Cd-safe cultivars of Chinese cabbage and a preliminary study on the mechanisms of Cd accumulation [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, **14**(4), doi: 10.3390/ijerph14040395.
- [6] 杨晖, 梁巧玲, 赵鹏, 等. 7 种蔬菜型作物重金属积累效应及间作鸡眼草对其重金属吸收的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, **26**(6): 209-214.
Yang H, Liang Q L, Zhao L, *et al.* The cumulative effect on heavy metal of seven kinds of vegetable crops and effects on heavy metal absorption of intercropping *Kummerowia striata* [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, **26**(6): 209-214.
- [7] 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.
- [8] 万家悦, 彭位华, 贺希格都楞, 等. 镉在典型蔬菜可食部位富集特征及其健康风险评估[J]. *中国计量大学学报*, 2019, **30**(2): 255-264.
Wan J Y, Peng W H, HEXIGE D L, *et al.* Characteristics of cadmium enrichment in edible parts of typical vegetables and its health risk assessment [J]. *Journal of China Jiliang University*, 2019, **30**(2): 255-264.
- [9] 李超, 艾绍英, 唐明灯, 等. 矿物调理剂对稻田土壤镉形态和水稻镉吸收的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, **51**(11): 2143-2154.
Li C, Ai S Y, Tang M D, *et al.* Effects of a mineral conditioner on the forms of Cd in paddy soil and Cd uptake by rice [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, **51**(11): 2143-2154.
- [10] Jiang Y X, Chao S H, Liu J W, *et al.* Source apportionment and health risk assessment of heavy metals in soil for a township in Jiangsu Province, China [J]. *Chemosphere*, 2017, **168**: 1658-1668.
- [11] 李宏薇, 尚二萍, 张红旗, 等. 耕地土壤重金属污染时空变异对比——以黄淮海平原和长江中游及江淮地区为例[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(9): 3464-3473.
Li H W, Shang E P, Zhang H Q, *et al.* Comparative research on spatio-temporal variability of heavy metal pollution in cultivated soils—A case study of Huang-Huai-Hai Plain and middle reaches of the Yangtze River and Jianghuai region [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(9): 3464-3473.
- [12] Xue S G, Shi L Z, Wu C, *et al.* Cadmium, lead, and arsenic contamination in paddy soils of a mining area and their exposure effects on human HEPG2 and keratinocyte cell-lines [J]. *Environmental Research*, 2017, **156**: 23-30.
- [13] 贺希格都楞, 万家悦, 杨佳敏, 等. 扫帚菜-白菜轮作对白菜镉吸收的影响[J]. *生物工程学报*, 2020, **36**(3): 508-517.
Hexige D L, Wan J Y, Yang J M, *et al.* Effects of *Kochia scoparia-Brassica rapa* rotation on Cd uptake by *Brassica rapa* [J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2020, **36**(3): 508-517.
- [14] Su D C, Jiao W P, Zhou M, *et al.* Can cadmium uptake by Chinese cabbage be reduced after growing Cd-accumulating rapeseed? [J]. *Pedosphere*, 2010, **20**(1): 90-95.
- [15] Tack F M G. Watering regime influences Cd concentrations in cultivated spinach [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, **186**: 201-206.
- [16] 周春海, 张振强, 黄志红, 等. 不同钝化剂对酸性土壤中重金属的钝化修复研究进展[J]. *中国农学通报*, 2020, **36**(33): 71-79.
Zhou C H, Zhang Z Q, Huang Z H, *et al.* Passivation and

- remediation of heavy metals in acid soil with different passivators: a research progress [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, **36**(33): 71-79.
- [17] 于焕云, 崔江虎, 乔江涛, 等. 稻田镉磷污染阻控原理与技术应用[J]. *农业环境科学学报*, 2018, **37**(7): 1418-1426.
Yu H Y, Cui J H, Qiao J T, *et al.* Principle and technique of arsenic and cadmium pollution control in paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(7): 1418-1426.
- [18] 邓思涵. 不同类型叶面铁肥阻控水稻富集镉的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2019.
Deng S H. The study on the control of cadmium enrichment in rice by different foliar iron fertilizers [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2019.
- [19] He S Y, He Z L, Yang X E, *et al.* Soil Biogeochemistry, plant physiology, and phytoremediation of cadmium-contaminated soils [J]. *Advances in Agronomy*, 2015, **134**: 135-225.
- [20] 冯敬云, 聂新星, 刘波, 等. 镉污染农田原位钝化修复效果及其机理研究进展[J]. *农业资源与环境学报*, 2021, **38**(5): 764-777.
Fang J Y, Nie X X, Liu B, *et al.* Efficiency of in-situ passivation remediation in cadmium - contaminated farmland soil and its mechanism: A review [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, **38**(5): 764-777.
- [21] 张静静, 朱爽阁, 朱利楠, 等. 不同钝化剂对微碱性土壤镉、镍形态及小麦吸收的影响[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 460-468.
Zhang J J, Zhu S G, Zhu L N, *et al.* Effects of different amendments on fractions and uptake by winter wheat in slightly alkaline soil contaminated by cadmium and nickel [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 460-468.
- [22] 赵庆圆, 李小明, 杨麒, 等. 磷酸盐、腐殖酸与粉煤灰联合钝化处理模拟铅镉污染土壤[J]. *环境科学*, 2018, **39**(1): 389-398.
Zhao Q Y, Li X M, Yang Q, *et al.* Passivation of simulated Pb and Cd-contaminated soil by applying combined treatment of phosphate, humic acid, and fly ash[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(1): 389-398.
- [23] Wang D Y, Qing C L, Guo T Y, *et al.* Effects of humic acid on transport and transformation of mercury in soil-plant systems[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1997, **95**(1): 35-43.
- [24] 毕冬雪, 邓亚娟, 孟凡德, 等. 腐殖质纳米颗粒对镉污染土壤的修复[J]. *环境工程学报*, 2018, **12**(5): 1295-1302.
Bi D X, Deng Y J, Meng F D, *et al.* Humic nanoparticles for remediation of Cd-contaminated soils [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2018, **12**(5): 1295-1302.
- [25] 冯英, 马路瑶, 王琼, 等. 我国土壤-蔬菜作物系统重金属污染及其安全生产综合农艺调控技术[J]. *农业环境科学学报*, 2018, **37**(11): 2359-2370.
Feng Y, Ma L Y, Wang Q, *et al.* Heavy-metal pollution and safety production technologies of soil-vegetable crop systems in China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(11): 2359-2370.
- [26] Deng J Q, Liu Y G, Liu S B, *et al.* Competitive adsorption of Pb (II), Cd(II) and Cu(II) onto chitosan-pyromellitic dianhydride modified biochar[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2017, **506**: 355-364.
- [27] Liang Y, Cao X D, Zhao L, *et al.* Biochar-and phosphate-induced immobilization of heavy metals in contaminated soil and water: implication on simultaneous remediation of contaminated soil and groundwater[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(6): 4665-4674.
- [28] 于静静, 蔡德宝, 陈秀文, 等. 生物炭和腐植酸对丹江口库区土壤团聚体的影响[J]. *河南农业科学*, 2021, **50**(11): 87-96.
Yu J J, Cai D B, Chen X W, *et al.* Effect of Biochar and Humic acid addition on the soil aggregate of Danjiangkou reservoir [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2021, **50**(11): 87-96.
- [29] 吴龙华, 骆永明. 铜污染土壤修复的有机调控研究Ⅲ. EDTA和低分子量有机酸的效应[J]. *土壤学报*, 2002, **39**(5): 679-685.
Wu L H, Luo Y M. Chelate-enhanced phytoremediation of copper polluted soil Ⅲ. effects of EDTA and low-molecule weight organic acids[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, **39**(5): 679-685.
- [30] 李燕婷, 李秀英, 肖艳, 等. 叶面肥的营养机理及应用研究进展[J]. *中国农业科学*, 2009, **42**(1): 162-172.
Li Y T, Li X Y, Xiao Y, *et al.* Advances in study on mechanism of foliar nutrition and development of foliar fertilizer application [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, **42**(1): 162-172.
- [31] Feng R W, Wei C Y, Tu S X. The roles of selenium in protecting plants against abiotic stresses[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2013, **87**: 58-68.
- [32] Liao G J, Wu Q H, Feng R W, *et al.* Efficiency evaluation for remediating paddy soil contaminated with cadmium and arsenic using water management, variety screening and foliage dressing technologies[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, **170**: 116-122.
- [33] 陈志琴, 刘奇珍, 林强, 等. 不同叶菜品种镉积累评价及降低镉积累的措施[J]. *农业环境科学学报*, 2022, **41**(8): 1671-1681.
Chen Z Q, Liu Q Z, Lin Q, *et al.* Evaluation of cadmium accumulation in different leafy vegetable cultivars and approaches for reducing accumulation [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, **41**(8): 1671-1681.
- [34] Sarwar N, Ishaq W, Farid G, *et al.* Zinc-cadmium interactions: Impact on wheat physiology and mineral acquisition [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, **122**: 528-536.
- [35] Duan M M, Wang S, Huang D Y, *et al.* Effectiveness of simultaneous applications of lime and zinc/iron foliar sprays to minimize cadmium accumulation in rice [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **165**: 510-515.
- [36] Hussain A, Ali S, Rizwan M, *et al.* Zinc oxide nanoparticles alter the wheat physiological response and reduce the cadmium uptake by plants [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **242**: 1518-1526.

CONTENTS

Pollution Characteristics and Transport contributions of Ambient Ozone and Volatile Organic Compounds in Southern Hebei Cities	ZHAO Jiang-wei, NIE Sai-sai, YU Yu-jie, <i>et al.</i> (4775)
Temporal and Spatial Distributions of O ₃ Concentration and Potential Source Area Analysis of Hexi Corridor Based on Satellite and Ground Monitoring	LI Jin-chao, CAO Chun, FANG Feng, <i>et al.</i> (4785)
Spatial and Temporal Variations in Ozone Pollution and Sensitivity Characteristics in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (4799)
Temporal and Spatial Characteristics of Troposphere O ₃ and Precursors HCHO and NO ₂ in East China	WANG Xiao-wen, LIU Min-xia, WANG Yang, <i>et al.</i> (4809)
Evolution Characteristics of Atmospheric Formaldehyde Emissions in Guangdong Province from 2006 to 2020	MING Gui-ying, ZHU Man-ni, SHA Qing-e, <i>et al.</i> (4819)
VOCs Emission Level and Emission Reduction Potential of Coating Industry in Zibo	HUANG Yue-run, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> (4832)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Components in PM ₁₀ and PM _{2.5} of Road Dust Fall and Soil Dust in Xi'an	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, SUN Jie-juan, <i>et al.</i> (4843)
Runoff Simulation and Its Response to Extreme Precipitation in the Yangtze River Basin	GAO Shuang, TI Chao-pu, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (4853)
Water Chemical Isotope Characteristics and Water Transformation Relationship in Mongolian Section of the Yellow River Basin	PEI Sen-sen, DUAN Li-min, MIAO Ping, <i>et al.</i> (4863)
Hydrochemical Characteristics and Formation Causes of Ground Karst Water Systems in Gudui Spring Catchment	TANG Chun-lei, SHEN Hao-yong, ZHAO Chun-hong, <i>et al.</i> (4874)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Groundwater of Shijiazhuang, a Typical City in North China Plain	CHEN Hui, ZHAO Xin-yu, CHANG Shuai, <i>et al.</i> (4884)
Spatial Distribution, Speciation, and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Dongjiang Lake, Hunan Province	ZHANG Tong-liang, YI Li-xia, LI Chang-cheng, <i>et al.</i> (4896)
Spectral Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Surface Water of Taihu Lake Before Cyanobacterial Blooming	WANG Yong-qiang, LU Shao-yong, HUANG Wei, <i>et al.</i> (4906)
Chemical Oxygen Demand(COD) Composition and Contribution in Typical Waters of Baiyangdian Lake	LI Qi, ZHANG Chao, ZHANG Wen-qiang, <i>et al.</i> (4915)
Source Apportionment and Source-specific Risk of Typical Antibiotics in Baiyangdian Lake	SONG Yuan-meng, ZHAO Bo, LU Meng-qi, <i>et al.</i> (4927)
Response of River Ecosystem Health Status to Water Environmental Factors in the Middle Reaches of Yarlung Zangbo River	LI Xiao-dong, YANG Qing, LIU Hui-qiu, <i>et al.</i> (4941)
Analysis on the Current Situation of Phytoplankton in the Typical River- Lake Ecotone of Lake Poyang	YU Xin-ping, CHEN Yu-wei, LIU Jin-fu, <i>et al.</i> (4954)
Phytoplankton Community Structure, Diversity, and Functional Groups in Urban River Under Different Black and Odorous Levels	ZHANG Qi-qi, ZENG Jie, YIN Zhuo, <i>et al.</i> (4965)
Influence of Denitrification on Cyanobacterial Blooms Trends in Lake Taihu, China	LI Chang-jie, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (4977)
Effects of Nitrogen Speciation Transformation on Microbial Community Succession in Input Rivers of Miyun Reservoir	XIN Yuan, ZHANG Yao-fang, LI Tian-yu, <i>et al.</i> (4985)
Action Mechanism of <i>Bacillus</i> on Microalgae During Nitrogen Metabolism in Urban Tailwater	ZHAO Zhi-ni, MA Chao, YAN Jia-chen, <i>et al.</i> (4996)
Nitrogen Removal Characteristics and Metabolism Mechanism of High-Efficiency Cold-Tolerant Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium <i>Glutamicibacter</i> sp. WS1 for Various Nitrogen Sources at Low Temperature	WEI Bo-hui, LUO Xiao, LÜ Peng-yi, <i>et al.</i> (5006)
Pollution Characteristics of Macrolide Antibiotics During Drinking Water Treatment and Their Chlorination Reaction Mechanism	CEN Xia, CHENG Si-yu, SHI Zong-min, <i>et al.</i> (5017)
Effects of Different Biochar and Effective Microorganism Agent Improvement Approaches on the Nutrient Release Characteristics and Potential of Compost	JIA Pei-yin, WANG Xin, HUA Yu-ting, <i>et al.</i> (5025)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water and Sediments of Anhui Section of Huaihe River Basin	ZHANG Hai-qiang, GAO Liang-min, GE Juan, <i>et al.</i> (5036)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Microplastics in Surface Sediments of Yellow River Delta Wetland	GENG Na, ZHAO Guang-ming, ZHANG Da-hai, <i>et al.</i> (5046)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Farmland Soil in Guyuan	MA Gui, DING Jia-fu, ZHOU Yue, <i>et al.</i> (5055)
Distribution Characteristics of Microplastic Surface Bacterial Communities Under Flooded and Non-flooded Conditions in Nanjishan Wetland of Poyang Lake	ZHAO Jun-kai, CHEN Xu, HU Ting-ting, <i>et al.</i> (5063)
Influence of Polystyrene Microplastics on the Formation and Structural Change of <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Biofilm	TAO Hui, YU Duo, YANG Lan, <i>et al.</i> (5071)
Effects of Polystyrene Microplastics on Growth, Physiology, Biochemistry, and Canopy Temperature Characteristics of Chinese Cabbage Pakchoi (<i>Brassica chinensis</i> L.)	GUO Bing-lin, FENG Chen-chen, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5080)
Effects of Combined Stress of Polyethylene and Sulfamethazine on Seed Germination, Seedling Growth, and Physiological Characteristics of Soybean	ZHAO Xiao-qiong, ZHANG Heng-hui, ZHAO Run-zhu, <i>et al.</i> (5092)
Transport and Model Calculation of Microplastics Under the Influence of Ionic Type, Strength, and Iron Oxide	ZHANG Ran, YU Ke-fei, HUANG Lei, <i>et al.</i> (5102)
Impacts of Land Use and Climate Change on Ecosystem Services in Agro-pastoral Ecotone	XU Wen-bin, RAO Liang-yi (5114)
Response of Organic Carbon Loss to Soil Erosion and Its Drivers; A Meta-analysis	LIU Xiao-lan, HUANG Jin-quan, QI Yu-jie, <i>et al.</i> (5125)
Effects of Balanced Fertilization and Straw Mulching on Soil Nutrients and Stoichiometry in Purple Soil Slope	ZHANG Gao-ning, XU Qi-wen, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (5135)
Characteristics and Dominant Influencing Factors of the Fungal Community Structure in Soils Co-contaminated with Rare Earth Elements and Heavy Metals	LUO Ying, LI Jing-wei, YUAN Hao, <i>et al.</i> (5145)
Effects of Annual Crop Rotation and Fallow on Soil AMF Community and Aggregate Stability	LU Ze-rang, XIA Zi-tai, LU Mei, <i>et al.</i> (5154)
Spatial-temporal Changes and Driving Factors of Soil Microbial Communities in a Typical City of North China Plain	ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, CHANG Shuai, <i>et al.</i> (5164)
Effect of High-volume Straw Returning and Applying <i>Bacillus</i> on Bacterial Community and Fertility of Desertification Soil	NIE Yang-mei, BU Lian-yan, CHEN Wen-feng, <i>et al.</i> (5176)
Low Accumulation Characteristics of Sweet-waxy Maize in Pb and Cd Complex Contaminated Soils Based on Field Trials	TANG Le-bin, LI Long, SONG Bo, <i>et al.</i> (5186)
Effects of Different Control Measures on Cadmium and Lead Accumulation and Quality in Lettuce	ZHOU Hong-yin, LI Jia-qi, BAO Li, <i>et al.</i> (5196)
Effects of Nano-copper Oxide on Physiobiochemical Properties of <i>Brassica chinensis</i> L. and Its Heavy Metal Accumulation Under Cadmium Stress	WANG Shi-qi, SUN Yue-bing, HUANG Qing-qing, <i>et al.</i> (5204)
Distribution and Biototoxicity of Endogenous Pollutants in <i>Pennisetum</i> sp. Biochar from Different Polluted Areas	LIU Li-ya, CUI Hong-biao, LIU Xiao-sheng, <i>et al.</i> (5214)
Adsorption Characteristics of Tetracycline by CuFeO ₂ -modified Biochar	LIU Guo-cheng, ZHANG Xin-wang, XIN Shuai-shuai, <i>et al.</i> (5222)
Ecological Toxic Effect of Perfluorinated Compounds on Fish Based on Meta-analysis	LU Hong, ZHOU Jin-yang, YANG Fan, <i>et al.</i> (5231)
Source Analysis and Risk Assessment of Heavy Metals in Soil of County Scale Based on PMF Model	ZHENG Yong-li, WEN Han-hui, CAI Li-mei, <i>et al.</i> (5242)
Potential Source Identification and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Soil of Heze Oil Peony Planting Area Based on PMF-PCA/APCS and PERI	ZHAO Qing-ling, LI Qing-cai, AN Mao-guo, <i>et al.</i> (5253)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Cadmium in Farmland Soils around the Gangue Heap of Coal Mine, Chongqing	MA Jie, SHE Ze-lei, WANG Sheng-lan, <i>et al.</i> (5264)
Pollution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Pyrite Concentrated Mining Area in Anhui Province	JIA Han, LIU Jun-xing, WANG Xiao-guang, <i>et al.</i> (5275)
Distribution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical River Source Areas of Northeastern Hunan Province	YANG Zhen-yu, LIAO Chao-lin, ZOU Yan, <i>et al.</i> (5288)
Variation Characteristics of Exogenous Cadmium with Different Contents in Red Soil	ZHOU Zi-yang, PANG Rui, SONG Bo (5299)
Analysis of Carbon Storage Potential of CO ₂ Foamed Concrete	ZHANG Yuan, TA Xu-peng, QIN Shu-bing, <i>et al.</i> (5308)
Research on the Screening Method of Priority Pollutants with Integrated Environmental Socio-economic Indicators: Example of E-waste Dismantling	CHEN Yuan, CAI Zhen, LI Jin-hui (5316)