

E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的影响 ..... 王港, 余海英, 李廷轩, 唐焯 (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, 张祯敏, 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)

# 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<sup>1</sup>, 任丹<sup>1</sup>, 吕贞英<sup>1</sup>, 张鹏<sup>1</sup>, 李锦超<sup>1</sup>, 陈勋文<sup>2</sup>, 王俊坚<sup>2\*</sup>

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃省绿洲资源环境与可持续发展重点实验室, 兰州 730070; 2. 南方科技大学环境科学与工程学院, 国家环境保护流域地表水-地下水污染综合防治重点实验室, 深圳 518055)

**摘要:** 研究不同种植方式下作物重金属吸收过程对重金属污染风险管控有重要意义. 以胡萝卜为例, 对比温室和大田种植方式下, 3个关键生长期6种重金属(As、Cd、Cr、Cu、Pb和Zn)的吸收转运特征, 结合根际土壤理化参数, 探讨种植方式对胡萝卜生物量和重金属含量随时间变化的影响并进行健康风险评价. 结果表明, 温室和大田种植方式具有以下共同点: ①生长过程中重金属含量、生物量和吸收量均呈先升高后下降或稳定的趋势; ②对As、Cd、Cr和Pb的吸收均为地上部累积型; ③可食部Cd含量超标, 生长期目标风险总系数>1具有潜在的不良健康风险, 主要风险由As和Cd贡献. 与大田相比较, 短期温室种植方式下胡萝卜成熟时间比大田提前约15 d; 幼苗期和生长旺盛期时温室种植地上部As、Cd和Pb含量显著降低( $P < 0.05$ ), 成熟期时重金属含量(除As)无显著差异; 温室种植地下部As和Cd的含量在幼苗期时降低( $P < 0.05$ ), As和Cd的吸收量在0~95 d显著降低( $P < 0.05$ ), 其余生长阶段重金属含量和吸收量均无显著差异; 通过短期种植方式的改变可以减少受污染农田蔬菜中重金属风险的可能性.

**关键词:** 温室; 大田; 胡萝卜; 重金属; 生长过程

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)02-1004-11 DOI: 10.13227/j.hjkk.202106059

## Effects of Greenhouse and Open-field Cultivation on Heavy Metal Uptake During Carrot Growth

CAO Chun<sup>1</sup>, REN Dan<sup>1</sup>, LÜ Zhen-ying<sup>1</sup>, ZHANG Peng<sup>1</sup>, LI Jin-chao<sup>1</sup>, CHEN Xun-wen<sup>2</sup>, WANG Jun-jian<sup>2\*</sup>

(1. Key Laboratory of Resource Environment and Sustainable Development of Oasis, Gansu Province, College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Integrated Surface Water-Groundwater Pollution Control, School of Environmental Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China)

**Abstract:** Clarifying the absorption dynamics of heavy metal(loid)s by crops under different cultivation methods is critical for risk management and control for heavy metal pollution. Here, taking carrots as an example, the pH, cation exchange capacity (CEC), and contents of heavy metals in soil and carrots were analyzed. We compared the absorption and transport characteristics of six metal(loid)s (As, Cd, Cr, Cu, Pb, and Zn) during the three key growth periods under greenhouse and open-field cultivation methods. In addition, the effects of planting methods on carrot biomass and heavy metal content over time were studied, and a health risk assessment was conducted. The results showed that the greenhouse and open-field cultivation methods had the following in common: ① As the carrots continuously grew, the metal uptake and biomass in the belowground part (edible part) and the metal(loid) concentrations in the aboveground and belowground parts both showed trends of increasing first and then decreasing or stabilizing. ② The absorption of As, Cd, Cr, and Pb in carrots was mostly accumulated in the aboveground part. ③ The content of Cd in the edible part exceeded the standard, and the total target hazard quotient was >1, indicating potential adverse health risks, most of which were contributed by As and Cd. Compared to that under open-field, the short-term greenhouse cultivation had a harvest time approximately 15 d earlier. The As, Cd, and Pb concentrations in the aboveground part during the seedling and fast-growing periods were significantly lower in the greenhouse than that in the open-field ( $P < 0.05$ ) but did not differ between greenhouse and open-field (except As) at the mature stage. The concentrations of As and Cd in the belowground part of greenhouse carrots were lower in the greenhouse than those of carrots grown in the open-field at the seedling stage ( $P < 0.05$ ). The absorption of As and Cd was decreased significantly from 0 to 95 d ( $P < 0.05$ ), and there was no significant difference in the metal concentration and absorption in the rest of the growth stages. The bioconcentration factors (BCF) of As, Cd, and Pb in the aboveground part in all stages and those of As and Cd in the belowground part in the seedling stage were lower in the greenhouse than that in the open-field. This study emphasizes the possibility of short-term changes in cultivation mode to reduce the risks of metal(loid)s in contaminated farmland vegetables.

**Key words:** greenhouse; open-field; carrot; heavy metal; growth process

重金属具有高毒性、持久性和易积累等特征, 其污染问题一直是环境领域的研究重点之一<sup>[1]</sup>. 土壤重金属污染会导致重金属在蔬菜中大量富集, 抑制蔬菜的生长并通过食物链迁移到人体内, 危害人体健康<sup>[2,3]</sup>. 根茎类的重金属吸收能力一般比叶菜类和瓜果类蔬菜较低, 具有在高污染区作为主要种植作物降低人体食用蔬菜的重金属摄入风险的潜力<sup>[4]</sup>. 胡萝卜

(*Daucus carota* L.) 属伞形科, 营养价值高, 在种植面积和市场价值方面都是世界十大最重要的蔬菜作物

收稿日期: 2021-06-07; 修订日期: 2021-07-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(41761074); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41807360)

作者简介: 曹春(1978~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为土壤污染修复和环境风险评估, E-mail: caochun@nwnu.edu.cn

\* 通信作者, E-mail: wangjj@sustech.edu.cn

之一<sup>[5]</sup>. 同时,在土壤重金属污染的背景下,研究环境因素对胡萝卜的重金属吸收和累积对于缓解重金属污染风险具有重要的现实意义.

近年来,许多研究主要围绕土壤理化性质、施肥水平和栽培方式等对植物重金属累积行为进行评价. 窦韦强等<sup>[6]</sup>的研究发现,土壤 pH 是影响重金属吸附的主要因子, pH 越高,土壤胶体的表面负电荷越高,有利于土壤对重金属的吸附,降低植物对重金属的吸收. Zhang 等<sup>[7]</sup>的研究表明不合理施肥会影响土壤和植物中重金属含量,施用氮、磷和钾肥能促进植物生长,但是引入的阴、阳离子可通过离子交换、与重金属络合或沉淀、或土壤酸化等方式影响土壤和植物中重金属的行为. 有研究还发现,与大田相比,温室为蔬菜提供了适宜的水热生长环境并降低光照强度<sup>[8]</sup>,增加蔬菜产量. 长期温室种植还可以通过改变环境参数与植物栽培方式进而改变土壤 pH、阳离子交换量和有机质含量<sup>[9]</sup>. 因为温室种植在一定压力下土壤-根界面产生更多的有机酸<sup>[10]</sup>,较高的温度增加土壤有机胶体的分解速率<sup>[11]</sup>,使得 pH 和 CEC 降低. 在较高的温度和微生物活性下也会加速土壤有机质的分解<sup>[12]</sup>. 温室栽培还可以通过减少土壤重金属向蔬菜的转运减轻蔬菜对重金属的吸收,由于温室栽培下土壤有机质(过度施用有机肥)对重金属的吸附水平较高<sup>[13]</sup>. 除此之外,植物自身吸收重金属是一个复杂的物理、化学和生物过程,受植物的种类、生长发育阶段等的影响. 植物生长发育期间,在膜转运蛋白的帮助下促进对土壤中营养和非营养性金属的吸收<sup>[14]</sup>. 理论上,蔬菜生物量在生长过程中逐渐增大时可能进一步导致植物中重金属总吸收量增加,但也会通过稀释效应降低重金属含量. 例如,Zhao 等<sup>[15]</sup>的研究发现向日葵中重金属的最大吸收量的时间取决于向日葵生物量达到最大值的时间. 目前,关于不同种植方式下胡萝卜生长时间(从播种到收获)内对重金属积累的影响尚不清楚,各生长期的管理过程通常不容易把控,因此难以满足以最大限度地减少蔬菜中污染物为基础的种植和管理需要.

如今,温室生产系统已广泛地应用于商品作物和蔬菜的生产<sup>[16]</sup>. 有关种植方式对蔬菜吸收重金属的影响研究发现,长期温室种植导致土壤理化性质的改变而影响作物对重金属的吸收,但仍缺乏研究评估短时间内从大田转向温室的环境变化下蔬菜不同生长阶段吸收重金属的动态情况和系统的健康风险评价. 本文以农田土壤-胡萝卜体系为研究对象,探讨温室和大田种植方式下胡萝卜生长期内重金属的变化趋势:①探究两种种植方式下胡萝卜根际土

壤理化性质、生物量和重金属含量的差异;②讨论不同种植方式下胡萝卜对重金属提取和富集的影响因素,了解可食部重金属吸收量的动态变化情况;③研究不同种植方式下对摄入胡萝卜的健康风险的影响,以期在高污染农田的蔬菜种植与管理方面提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

甘肃省白银市位于黄河上游,气候类型为中温带半干旱区向干旱区过渡,年均温 9.2℃,年均降水 244 mm<sup>[17]</sup>. 自 20 世纪 50 年代以来,白银市一直是重要的有色金属开采和冶炼基地,区域内东、西大沟分别汇聚了沿途工矿企业的工业废水和生活污水. 由于水资源有限,1960 年开始,当地农民使用经处理后的废水灌溉周围农田,导致农田重金属污染严重,2012 年起被政府禁止,目前采用引黄灌溉<sup>[18]</sup>. 在试验期间(2018 年 1~12 月),白银市附近观测站(36.55°N, 104.15°E)的月均降雨和气温的范围分别为 0.03~3.52 mm 和 -6.4~21.9℃(8 月降雨和气温分别为 3.52 mm 和 20.9℃). 本试验样地地理位置见图 1.

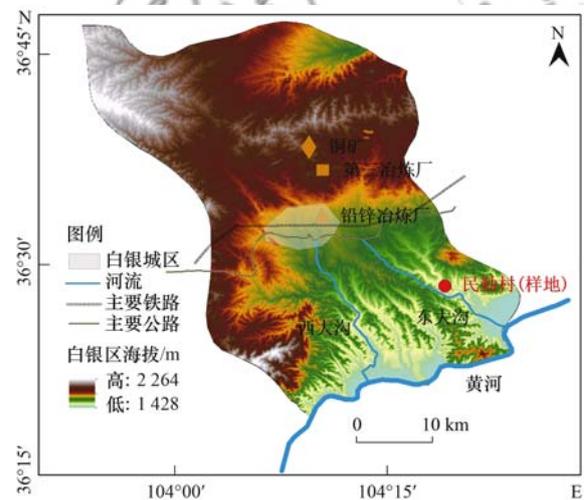


图 1 试验样地地理位置示意

Fig. 1 Geographic location of the experimental site

### 1.2 盆栽试验设计和管理

供试土壤为东大沟耕作层表土(0~20 cm),将土壤混匀之后备用. 供试土壤的理化性质与重金属含量信息:pH 为  $7.44 \pm 0.09$ , 土壤阳离子交换量(cation exchange capacity, CEC)为  $(12.03 \pm 0.33)$   $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $\omega(\text{As})$  为  $(27.83 \pm 1.38)$   $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $\omega(\text{Cd})$  为  $(8.02 \pm 0.55)$   $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $\omega(\text{Cr})$  为  $(59.69 \pm 4.44)$   $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $\omega(\text{Cu})$  为  $(85.39 \pm 4.16)$   $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $\omega(\text{Pb})$  为  $(116.93 \pm 9.09)$   $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $\omega(\text{Zn})$  为  $(387.73 \pm 21.39)$   $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  (平均值  $\pm$  标准

误差;  $n=5$ ). 土壤中 Cd 和 Zn 的含量高于农用地土壤污染风险管控标准(GB 15618-2018). 2018 年 4 月 27 日, 27 kg 土壤装入半径 25 cm 盆中, 每盆点播 3~5 粒胡萝卜种子, 种子购自中国甘肃省农业科学院. 设置 2 种植方式、8 次收集、3 个重复, 24 盆放入温室, 24 盆置于附近不遮挡阳光的大田上, 共计 48 盆. 两种种植方式下施肥种类和施肥量保持一致, 浇灌统一使用瓶装饮用纯净水( $19 \text{ L} \cdot \text{瓶}^{-1}$ , 诚德来品牌), 记录每次浇灌日期与浇灌量, 总浇灌量均为  $28.32 \text{ L}$  ( $n=14$ ).

### 1.3 样品收集

2018 年 6 月 16 日至 9 月 27 日每隔 15 d 收集一次样品, 包括胡萝卜根际土壤、地下和地上部. 根据胡萝卜生长情况将其分为幼苗期(2 次收集: 0~50 d, 51~65 d), 生长旺盛期(3 次: 66~80 d, 81~95 d, 96~110 d) 和成熟期(3 次: 111~125 d, 126~140 d, 141~155 d).

### 1.4 样品处理与测定

土壤样品前处理: 室温下阴干, 筛选研磨后, 用于测定土壤 pH、CEC 和重金属含量; 蔬菜样品前处理: 分地下和地上, 去离子水冲洗,  $60^\circ\text{C}$  烘干至恒重, 粉碎过筛(60 目), 分装用于测定重金属含量(以干重计).

土壤 pH 采用玻璃电极法(NY/T1121.2-2006); CEC 按照 NY/T 295~1995 进行测定; 蔬菜样品含水率采用直接干燥法测定, 含水率为 85%; 重金属含量用微波消解(MDS-15, 上海)和电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Agilent 7900, USA)测定. 样品分析使用标准物质为 GBW07456, 重金属元素的回收率范围为 87.5%~104.0%.

### 1.5 重金属吸收量

通过重金属含量与生物量的乘积得到植物体内的重金属吸收量, 其方程见式(1):

$$S = C_{\text{地下部}} \times B_{\text{地下部}} \times 10^{-3} \quad (1)$$

式中,  $S$  为重金属吸收量,  $\text{mg}$ ;  $C_{\text{地下部}}$  为地下部重金属含量,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $B_{\text{地下部}}$  为生物量(以干重计),  $\text{g}$ .

### 1.6 生物富集系数

生物富集系数(bioconcentration factors, BCF)是衡量重金属在植物-土壤中移动性的重要指标, 也可以解释植物吸收重金属的能力<sup>[19]</sup>. 其计算见式(2)和式(3):

$$\text{BCF}_{\text{地下部}} = C_{\text{地下部}} / C_{\text{土壤}} \quad (2)$$

$$\text{BCF}_{\text{地上部}} = C_{\text{地上部}} / C_{\text{土壤}} \quad (3)$$

式中,  $\text{BCF}_{\text{地下部}}$  和  $\text{BCF}_{\text{地上部}}$  分别为地下部和地上部生物富集系数;  $C_{\text{地下部}}$  和  $C_{\text{地上部}}$  分别为地下部和地上部重金属含量,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $C_{\text{土壤}}$  为根际土壤重金属含

量,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

### 1.7 健康风险评估

目标危险系数方法(target hazard quotient, THQ, 美国环保署)用式(4)计算, 以污染物暴露剂量与参考剂量的比值来表征非致癌风险水平<sup>[20]</sup>. 目标风险总系数(total THQ, TTHQ)由式(5)计算, 评估多种重金属造成的复合风险. TTHQ 小于 1 表示没有健康风险; 大于 1 表示存在潜在的健康风险, 需要采取相应防护措施; 大于 10 表示存在慢性毒性效应.

$$\text{THQ} = \frac{\text{DIM}}{\text{RfD}} = \frac{C_{\text{地下部}} \times C_F \times D_{\text{In}}}{B_{\text{ave}} \times \text{RfD}} \quad (4)$$

$$\text{TTHQ} = \sum_{i=1}^n \text{THQ} \quad (5)$$

式中, DIM 为重金属的每日摄入量,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $C_{\text{地下部}}$  为蔬菜地下部(可食部)重金属含量,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  (以干重计);  $C_F$  为转换系数, 因元素含量结果基于干重, 故采用 0.085 的转换系数用于鲜重与干重的换算<sup>[21]</sup>;  $D_{\text{In}}$  为每日食用的蔬菜重量[以鲜重计, 成人  $0.345 \text{ kg} \cdot (\text{人} \cdot \text{d})^{-1}$ ];  $B_{\text{ave}}$  为平均体重(成人  $62.7 \text{ kg}$ ); RfD 为重金属的日参考口服剂量, 采用美国环境保护局综合风险信息数据库(IRIS)获得的口服剂量<sup>[22]</sup>, 其中 As、Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 的 RfD 分别为  $0.0003$ 、 $0.001$ 、 $1.5$ 、 $0.04$ 、 $0.0035$  和  $0.3 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ .

### 1.8 数据统计分析

采用 IBM SPSS 22.0 和 Origin 2018 软件对样品数据进行处理和统计分析. 组间数据差异比较采用单因素方差分析(One-way ANOVA), 差异显著时( $P < 0.05$ )采用 Duncan 法进行多重比较. 相关性分析使用 Pearson 相关性检验.

## 2 结果与分析

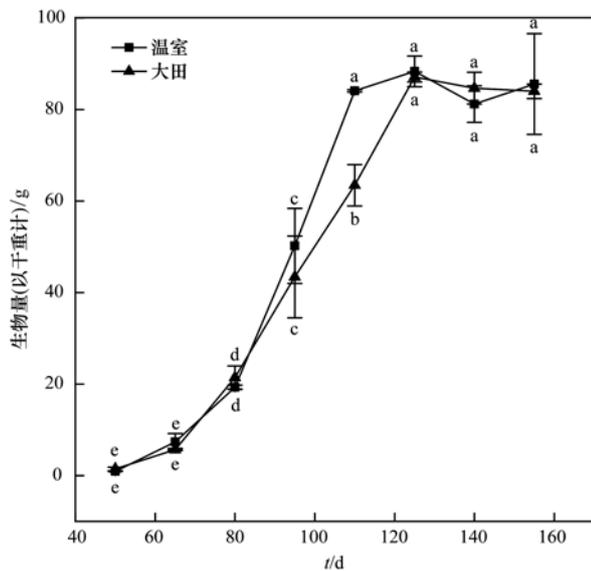
### 2.1 胡萝卜地下部生物量和根际土壤理化性质、重金属含量的变化

胡萝卜生长过程中土壤重金属含量和生物量(地下部)分别见表 1 和图 2. 两种种植方式下生物量随生长时间逐渐增加后趋于稳定, 无显著差异( $P > 0.05$ ), 温室胡萝卜达最大生物量的时间比大田提前约 15 d. 土壤 pH 变化范围分别为  $7.55 \sim 7.64$  和  $7.54 \sim 7.66$ , 生长期轻微波动, 呈弱碱性; 土壤 CEC 范围分别为  $9.72 \sim 10.11 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $10.34 \sim 10.52 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ . 不同种植方式下土壤 pH 和 CEC (除幼苗期)均无显著差异( $P > 0.05$ ). 温室土壤重金属含量仅幼苗期时显著低于大田( $P < 0.05$ ). 根据我国《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标

表 1 不同种植方式下胡萝卜生长过程中根际土壤重金属含量的变化<sup>1)</sup>/mg·kg<sup>-1</sup>Table 1 Changes in heavy metal (loid) contents in rhizosphere soil during carrot growth under different cultivation modes/mg·kg<sup>-1</sup>

生长时期	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn
温室:幼苗期	23.64 ± 1.38b	4.46 ± 0.22c	80.46 ± 4.14b	56.83 ± 4.13d	62.69 ± 1.33c	279.17 ± 8.34c
温室:生长旺盛期	23.23 ± 1.21b	5.35 ± 0.24a	67.97 ± 0.21bc	90.93 ± 5.71a	84.34 ± 3.33ab	354.06 ± 6.56ab
温室:成熟期	24.89 ± 0.01b	4.85 ± 0.50bc	54.55 ± 0.04d	76.10 ± 2.77c	79.50 ± 5.47b	344.07 ± 18.28b
大田:幼苗期	26.90 ± 0.61a	4.83 ± 0.16bc	99.35 ± 0.66a	80.28 ± 1.39b	80.41 ± 0.93a	363.69 ± 4.37a
大田:生长旺盛期	24.89 ± 2.18b	5.19 ± 0.56ab	68.21 ± 1.44cd	80.75 ± 1.22b	75.04 ± 3.5a	363.67 ± 9.80a
大田:成熟期	23.68 ± 1.27b	5.28 ± 0.30ab	58.24 ± 0.91d	78.40 ± 1.10bc	77.28 ± 1.45ab	355.35 ± 11.90ab
《土壤环境质量标准》 (GB 15618-2018)	25 (pH > 7.5)	0.6 (pH > 7.5)	250 (pH > 7.5)	100 (pH > 7.5)	170 (pH > 7.5)	300 (pH > 7.5)

1) 数据为平均值 ± 标准误差,同一重金属各生长期数据后不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )



不同小写字母表示具有显著差异的组别 ( $P < 0.05$ )

图 2 不同种植方式下胡萝卜地下部生物量随生长时间的变化

Fig. 2 Changes in belowground biomass of carrot with growing time under different planting methods

准》(GB 15618-2018), 两种种植方式下土壤中 Cd 和 Zn 含量高于标准  $0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

## 2.2 胡萝卜中重金属含量和吸收量的变化

如图 3 ~ 5, 两种种植方式下重金属含量(除 Cr) 和吸收量(可食部)在生长过程中均呈先升高后趋于下降或稳定的趋势。成熟期时可食部 Cd 含量(根据 85% 的含水率换算成基于鲜重的重金属含量)超过食品安全国家标准(GB 2762-2017)安全限值 ( $0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 超标率分别为 0.5% 和 11.3%。与大田相比较, 幼苗期和生长旺盛期时温室种植地上部 As、Cd 和 Pb 的含量均显著降低 ( $P < 0.05$ ), 其中 As 在各生长期分别下降 402.8%、412.8% 和 304.4%, Cd 分别下降 52.2%、55.7% 和 39.9%, Pb 分别下降 95.1%、89.8% 和 13.3%; 成熟期时, 重金属含量(除 As) 无显著差异 ( $P > 0.05$ )。温室种植地下部 As 和 Cd 含量仅幼苗期时显著低于大田 ( $P < 0.05$ ), 在 0 ~ 95 d 之间地下部 As 和 Cd 的吸收量

也显著低于大田。

## 2.3 胡萝卜中重金属的累积、分配特征

不同种植方式和生长期的胡萝卜的重金属 BCF (图 6) 均小于 1, 其中 Cd 最大, Pb 最小。生长过程中重金属的 BCF (除 Cr) 均呈先增加后下降或稳定的变化趋势。两种种植方式下, 幼苗期时 As、Cd、Cr 和 Pb 的 BCF 为地下 > 地上; 生长旺盛期和成熟期时 As、Cd、Cr 和 Pb 的 BCF 为地下 < 地上, 尤其是大田种植方式下。与大田相比, 温室种植地下部 As 和 Cd 的 BCF 仅幼苗期时显著降低 ( $P < 0.05$ ); 地上部 As、Cd 和 Pb 的 BCF 为温室 < 大田, 其中 As 在各时期分别降低 319.6%、374.0% 和 319.1%, Cd 分别降低 13.2%、53.4% 和 54.8%, Pb 分别降低 10.4%、123.4% 和 17.4%, 其余重金属的 BCF 无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

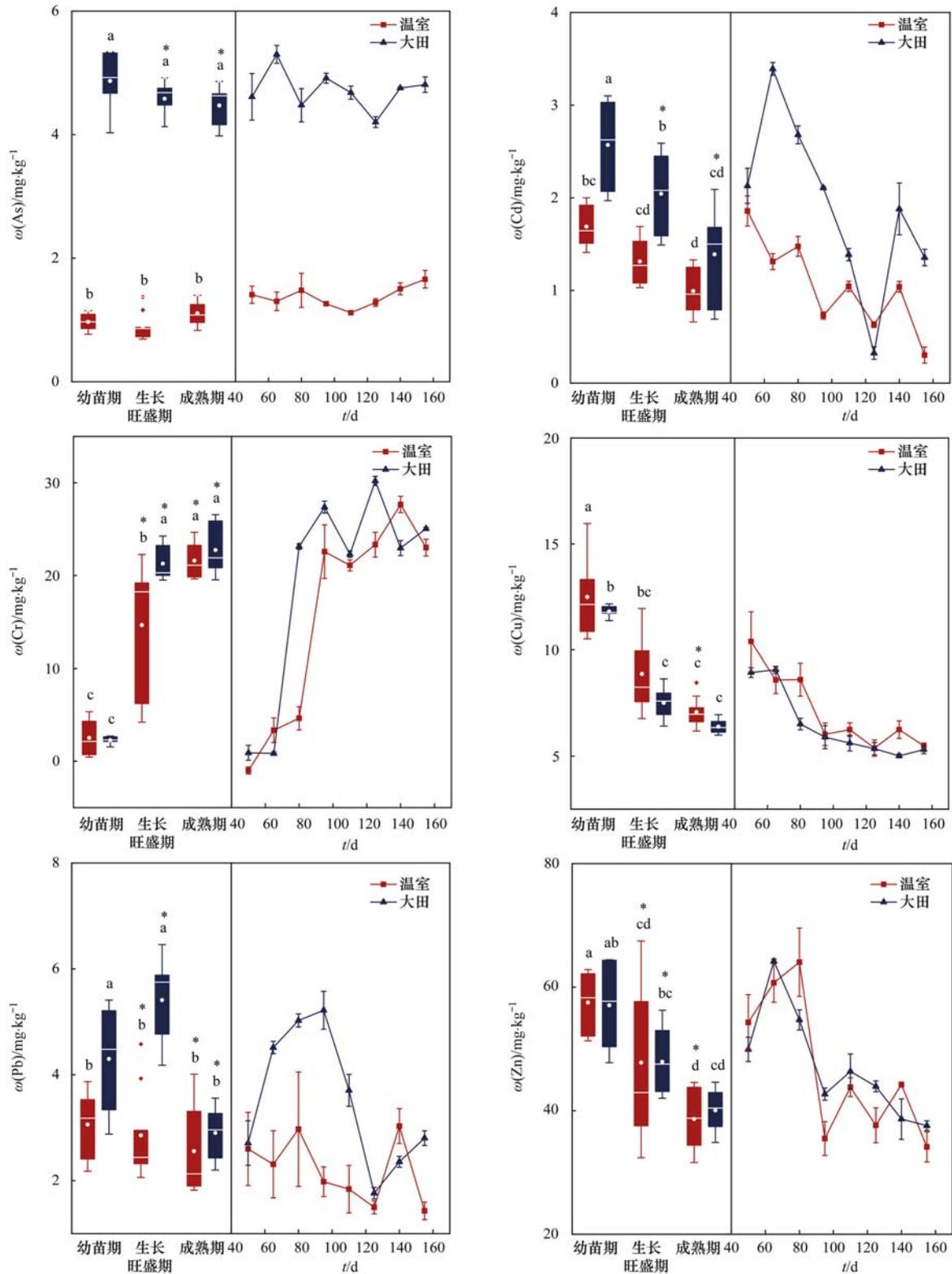
## 2.4 胡萝卜中重金属的健康风险评价

根据重金属的 THQ 和 TTHQ 值, 两种种植方式下胡萝卜生长过程中的健康风险呈下降趋势, 幼苗期最大, 成熟期最小, 其中主要健康风险是由 As 和 Cd 贡献的 [图 7(c) 和 7(d)]。成熟期时, 温室和大田的平均 TTHQ 值均大于 1, 分别为 1.70 和 1.67, 无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

## 3 讨论

### 3.1 温室种植缩短胡萝卜的成熟时间

以往的研究中, 温室种植可以提高蔬菜产量, 包括番茄、生菜和其他蔬菜<sup>[23]</sup>, 本研究中, 温室种植并未增加胡萝卜生物量(图 2), 但其生物量达到峰值的时间快于大田 15 d, 这主要是因为植物的生长发育及产量不仅受种植方式的影响还与各种生态因素综合作用相关<sup>[24]</sup>。温室透明塑料膜的覆盖, 使得土壤温度升高, 根系呼吸速率增大, 有利于促进植物的生长和光合作用, 使得植物鲜重和干重增加<sup>[25]</sup>。试验 110 d 时样地温度和降水量较高(8 月), 高温作用下生物量迅速达最大。大田胡萝卜在此期间生



不同小写字母表示不同种植方式下差异显著( $P < 0.05$ ), \*表示同时期不同部分之间达到显著差异水平( $P < 0.05$ ),下同

图3 不同种植方式下胡萝卜地上部生长过程中重金属含量的变化

Fig. 3 Changes in heavy metal(loid) contents in aboveground parts of carrots under different planting methods

长速率也较快,但受降水量的影响,土壤温度降低,在125 d左右才达到最大生物量。

两种种植方式下根际土壤中Cd和Zn含量不符合土壤环境质量标准(GB 15618-2018)对蔬菜生长的要求。由于供试土壤具有近50 a的工业废水灌

溉史,土壤重金属复合污染严重,例如Cao等<sup>[22]</sup>和He等<sup>[26]</sup>的研究中东大沟农田土壤样品中 $\omega(\text{Zn})$ 为 $(332 \pm 138) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $\omega(\text{Cd})$ 范围在 $0.68 \sim 5.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 超过了筛选值( $0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。另外,本研究还发现幼苗期时根际土壤CEC和重金属含量主

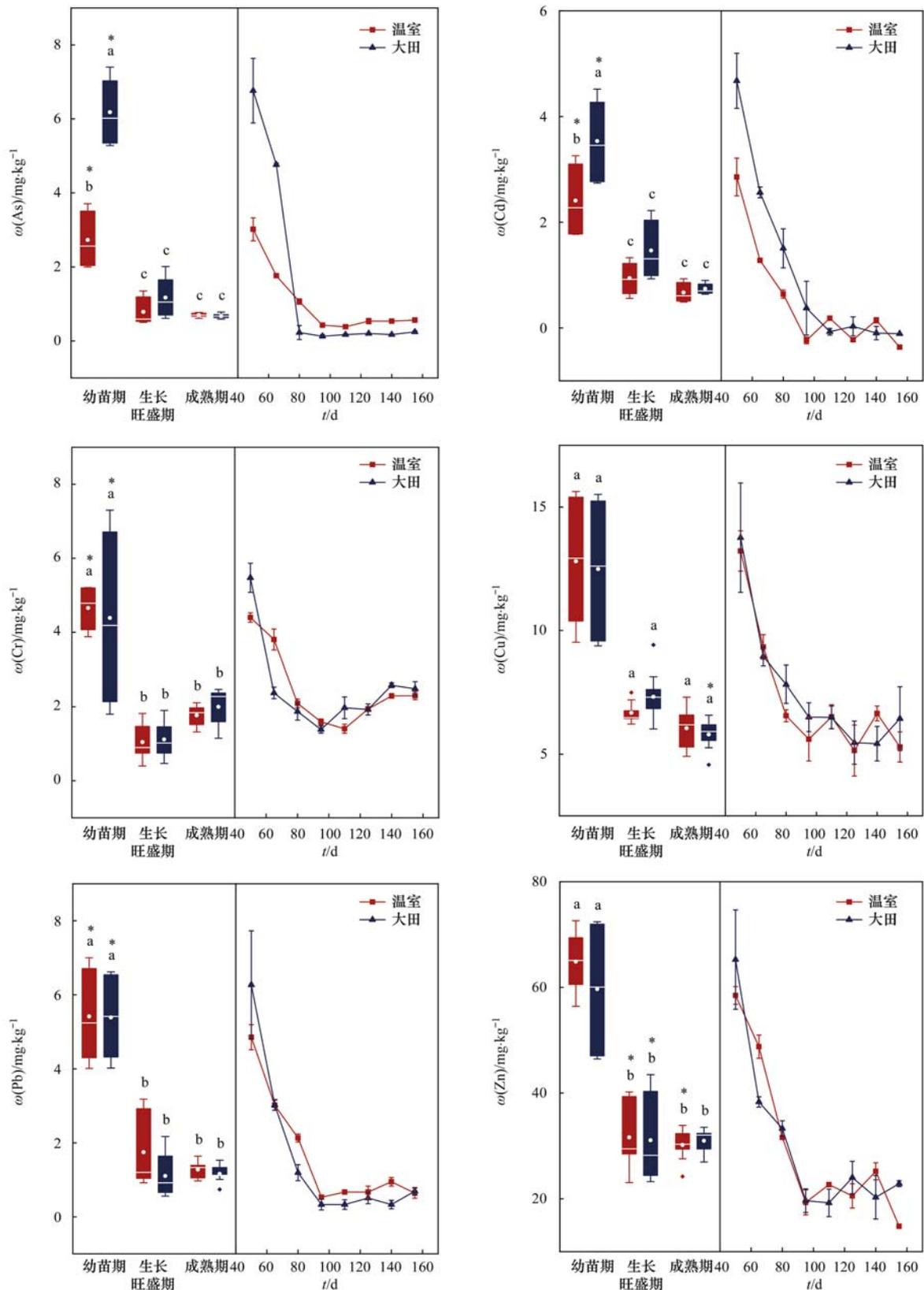


图 4 不同种植方式下胡萝卜地下部生长过程中重金属含量的变化

Fig. 4 Changes in heavy metal(loid) contents in the belowground part of carrots under different planting methods

要受种植方式的影响. 因为温室较高的气温,使土壤有机胶体分解加快<sup>[11]</sup>, CEC 含量降低. 虽然土壤有机胶体与有效态重金属发生络合反应或生成沉淀<sup>[27]</sup>,但对重金属全量影响较小. 由于本试验采用

盆栽种植,大田土壤重金属的动态变化受大气沉降的影响,同时盆栽试验抑制污染物的水平和垂直运移,且植株幼苗期对非生物胁迫最敏感<sup>[28]</sup>,更容易将重金属吸附在植物根系周围. 张润花等<sup>[29]</sup>的研究

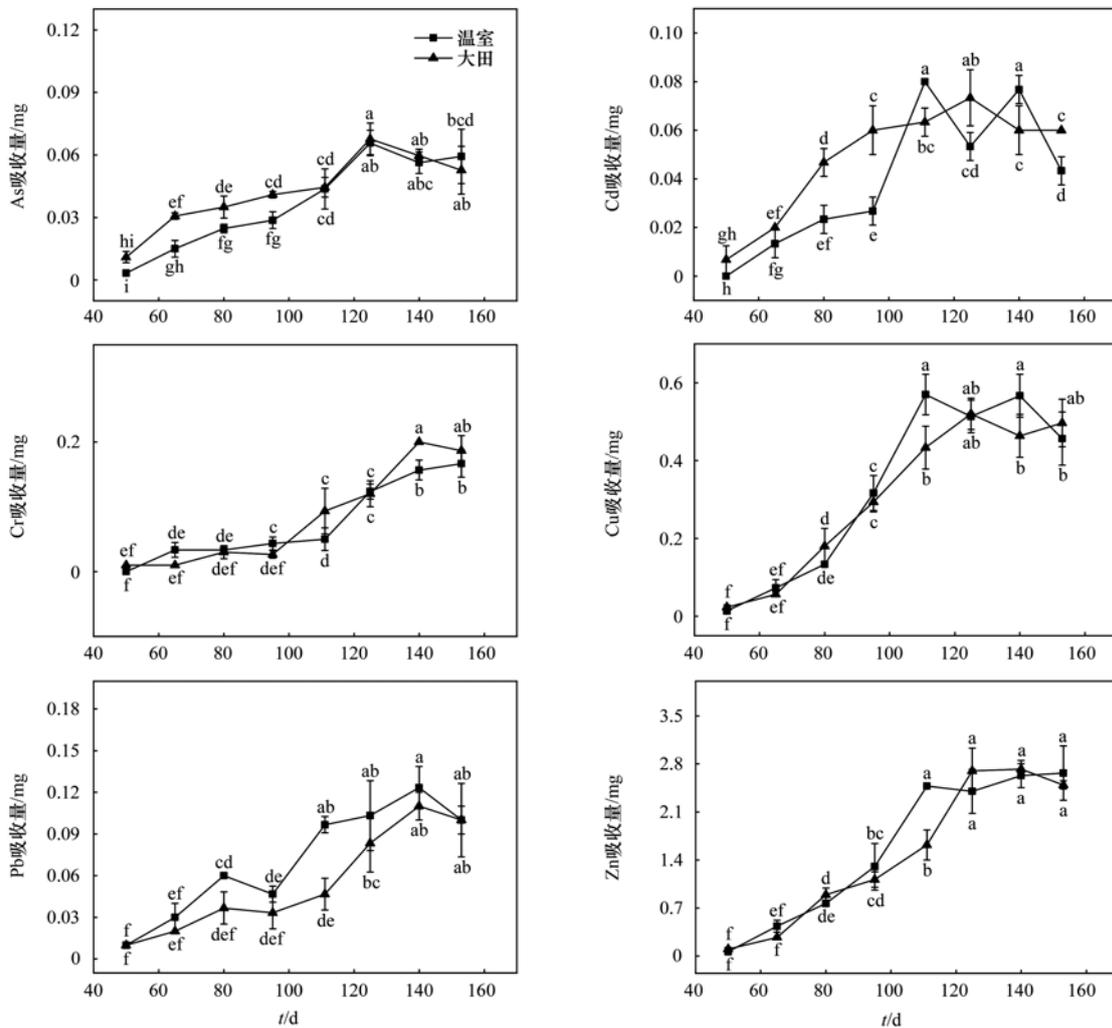


图5 不同种植方式下胡萝卜地下部(可食部)重金属吸收量随生长时间的变化

Fig. 5 Changes in heavy metal(loid) absorption in the belowground (edible part) of carrots with growth time under different planting methods

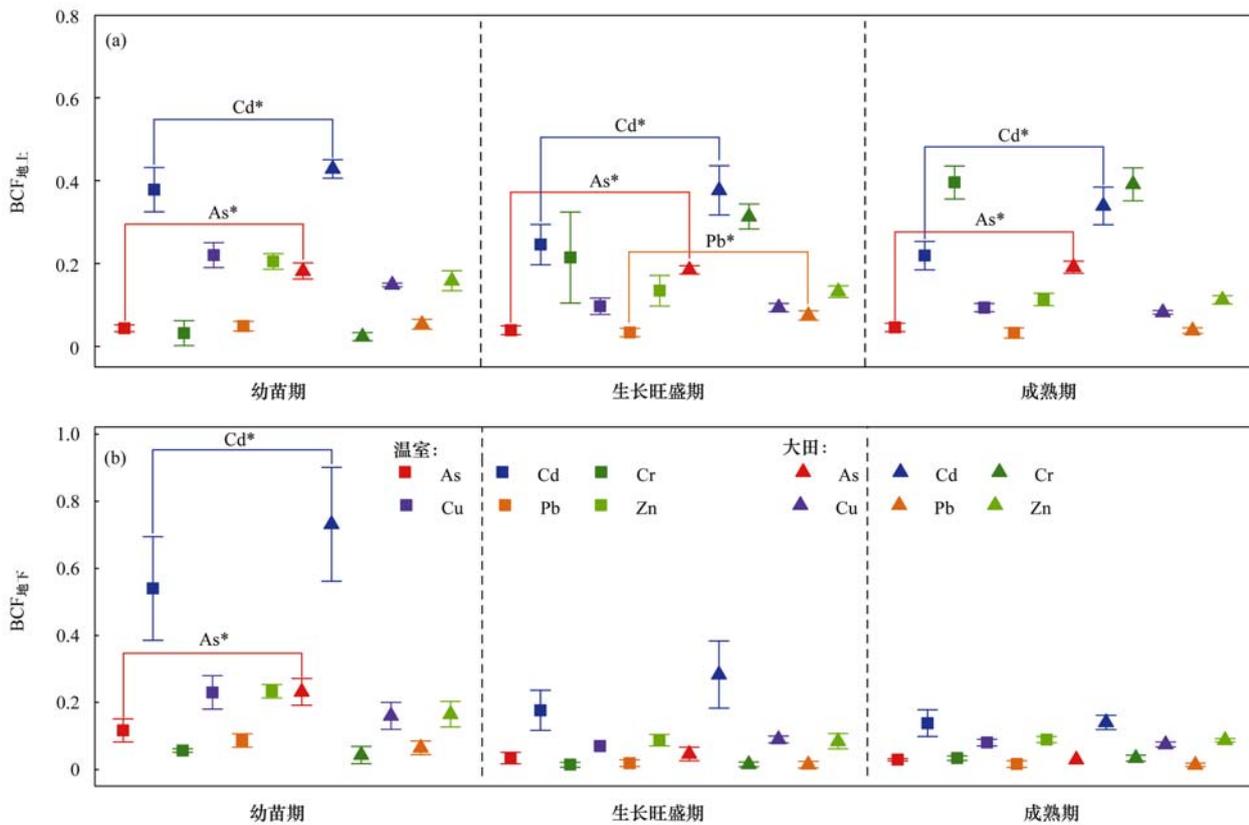
还发现温室蔬菜根系通常比大田栽培的浅且须根多. 因此与大田相比较, 幼苗期时温室胡萝卜在无外源重金属输入的情况下, 根系须根化提高单位面积根际土壤含量, 使得土壤重金属含量相对降低.

### 3.2 温室种植方式下胡萝卜重金属的含量和富集能力均降低

不同种植方式下胡萝卜中重金属含量和生物富集系数(BCF)均呈先增加后下降或不变的趋势(图3、4和图6), 主要因为胡萝卜生长过程中生物量的快速积累从而稀释了植物中的重金属含量<sup>[30]</sup>, 降低BCF. Chrysafopoulou等<sup>[31]</sup>在玉米吸收Pb的研究中也出现类似的结果. 值得注意的是, 只有地上部Cr在生长过程中呈先增加后趋于稳定的趋势, 这表明胡萝卜对重金属的积累可能涉及复杂的机制和过程, 种植方式的不同可能不是胡萝卜在不同生长阶段吸收这6种元素的决定因素. 重金属吸收量(地下部)在生长过程中的变化趋势与生物量一致(图2和图5). 根据Zhao等<sup>[15]</sup>和Li等<sup>[32]</sup>的研究发现植物组织对重金属的吸收量随生长时间的增加而增

加, 这与本文的研究结果相同. 有研究还发现<sup>[33]</sup>, 大多数植物更易将重金属储存在根部, 只有少数重金属被转移到地上. 相反, 在胡萝卜中大部分重金属的BCF为地下<地上, 这表明胡萝卜更易在地上部积累重金属, 加之其生物量普遍低于地下部, 因此, 食用地下部比地上部更能有效地避免重金属在人体内富集.

对比两种种植方式, 成熟期时胡萝卜可食部Cd含量均超过食品安全国家标准(GB 2762-2017), Cd的BCF也最大. 这一结果主要是因为土壤中Cd的含量相对较高, 且易被植物吸收<sup>[34]</sup>, 因此土壤Cd修复是一个高度优先的问题. 而温室和大田种植方式下植株内重金属含量、吸收量(可食部)和BCF的差异主要体现在幼苗期和生长旺盛期的As、Cd和Pb等. 与大田相比较, 幼苗期时温室种植地下部As和Cd的BCF显著降低. 植物地下部对重金属的吸收不仅与土壤理化性质和重金属含量有关还与植物生长发育有关<sup>[35]</sup>, 根据相关性分析结果, 幼苗期时土壤pH、CEC和重金属含量与地下部As和Cd的



\* 表示各重金属同时期不同种植方式之间达到显著差异水平 ( $P < 0.05$ )

图6 不同种植方式下胡萝卜生长过程中重金属的生物富集系数 (BCF)

Fig. 6 Bioaccumulation factors of heavy metal(loid)s during carrot growth under different planting methods

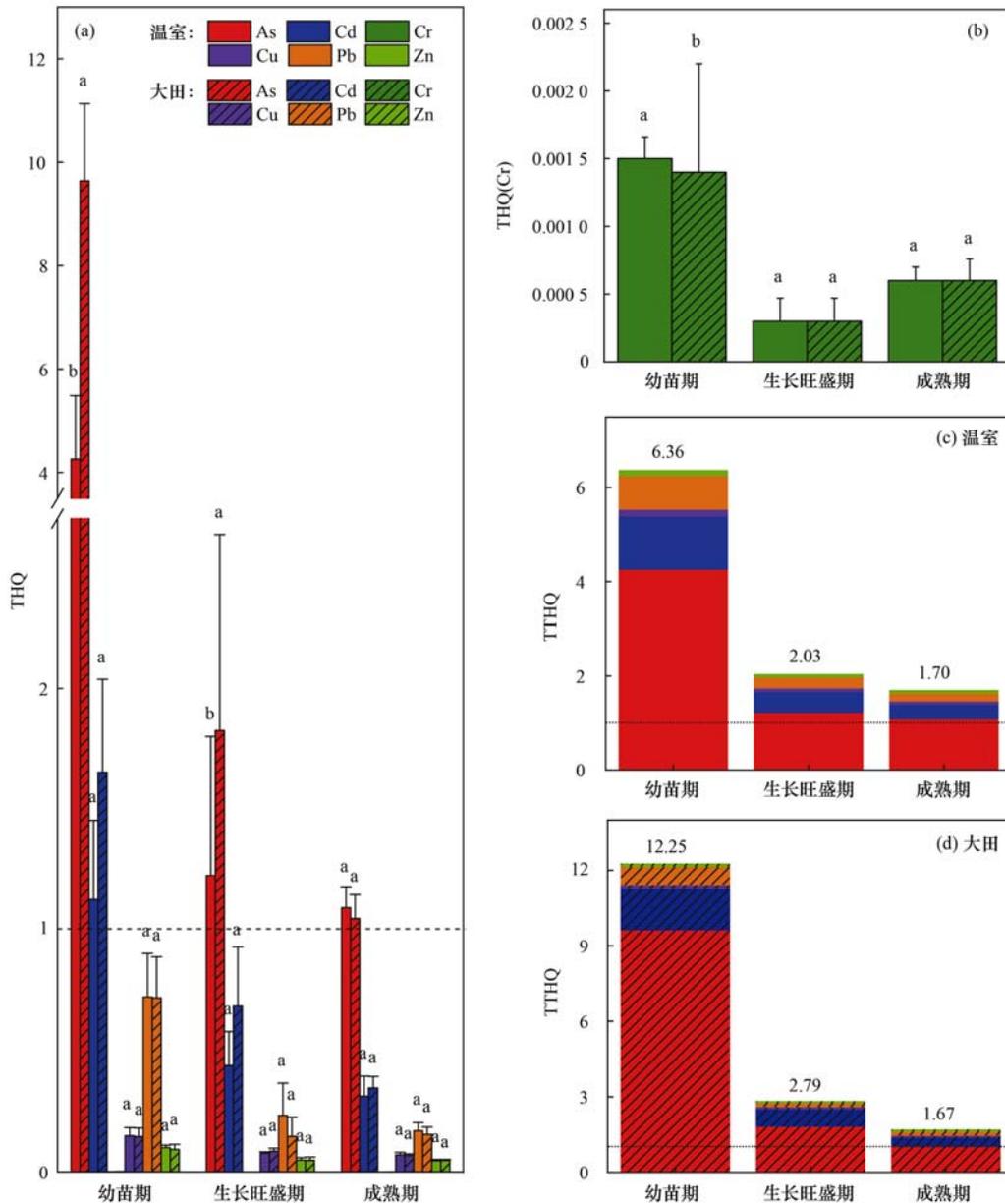
吸收关系不大(相关系数均  $< 0.28$ ,  $P > 0.05$ ),表明有其他因素参与了重金属含量的变化,如幼苗期时土壤重金属的生物有效性和生长条件.幼苗期是多种重金属吸收和植物生长的关键期<sup>[28]</sup>,植物在代谢过程中通过根系分泌物获取所需养分<sup>[36]</sup>,根系分泌物与重金属形成配合物<sup>[37]</sup>,从而将重金属从土壤矿物中提取出来.根系分泌物中最常见和最重要的组分为低分子有机酸,有机酸的来源主要有两种.植物可以从土壤中吸收碳源,在根中合成有机酸,并将其分泌到土壤中;植物可以在光合作用后利用空气中的  $\text{CO}_2$  在根中合成这些有机化合物,水稻中光合作用产生的有机酸大约占比  $0.16\%$ <sup>[38]</sup>.东南景天植株中约有  $2.3\%$  的有机酸为光合作用的产物<sup>[39]</sup>.本研究中,由于温室阻止了空气中的  $\text{CO}_2$  直接扩散到土壤中,且温室较高的温度和土壤微生物活性可能加速根系分泌物的分解,降低土壤重金属的有效性,导致胡萝卜对 As 和 Cd 的吸收降低.同时,在 95 d 之前温室胡萝卜可食部 As 和 Cd 的吸收量也低于大田,这主要是因为吸收量与重金属含量和生物量密切相关,在此期间胡萝卜累积生物量无显著差异(图2),表明在  $0 \sim 95$  d 之间地下部重金属的吸收量主要受其含量控制.

植物地上部对重金属的累积主要包括体内运输

和叶片吸收. Shahid 等<sup>[40]</sup>的研究表明蔬菜从叶片向根组织运输的重金属含量小于  $1\%$ . McBride 等<sup>[41]</sup>的研究认为 As 从作物地下部转移到地上受到生理障碍的影响.蔬菜中仅有  $3\%$  的 Pb 可从根迁移至地上部<sup>[42]</sup>.因此地上部 As 和 Pb 含量的差异主要与叶片吸收有关. De Temmerman 等<sup>[43]</sup>的研究中胡萝卜叶片 As 含量与大气沉降量具有良好的线性关系 ( $R^2 = 0.95$ ,  $P < 0.05$ ). He 等<sup>[26]</sup>通过铅同位素方法,对白银市农田土壤和蔬菜中重金属污染物的来源与迁移进行研究时也发现,叶片中 Pb 含量与当地存在的大气沉降密切相关.由于温室的屏蔽效应地上部 As 和 Pb 含量降低. Cd 是一种比其他金属更具植物可利用性的元素,蔬菜对 Cd 从根迁移到地上部的抑制作用小<sup>[44]</sup>,这与温室种植各生长期地下部与地上部 Cd 含量呈显著正相关(相关系数分别为  $0.96$ 、 $0.98$  和  $0.95$ ,  $P < 0.05$ )的结果一致,而大田种植仅生长旺盛期时地下部与地上部 Cd 含量呈显著正相关(相关系数为  $0.85$ ,  $P < 0.05$ )关系,表明地上部 Cd 含量可能受地下部 Cd 含量的影响,但也不排除植物通过叶片吸收 Cd,关于影响地上部 Cd 累积的决定性因素还需要进一步研究.

### 3.3 成人胡萝卜摄入重金属的健康风险评价

两种种植方式下胡萝卜各生长期的 TTHQ 值均



不同小写字母表示同种重金属同时期不同种植方式之间达到显著差异水平 ( $P < 0.05$ )

图7 不同种植方式下胡萝卜生长过程中重金属的目标危险系数 (THQ)

Fig. 7 Target hazard quotient (THQ) of heavy metals during carrot growth under different planting methods

存在健康风险,成熟期的 TTHQ 均最低,表明幼苗期时的健康风险较高,成熟期相对较低.与大田相比,成熟期时温室种植下 TTHQ 较大,但无显著差异,说明短期种植方式的改变对摄取胡萝卜的健康风险影响较小.两种种植方式下只有 As 和 Cd 的平均 THQ 值大于 1,虽然胡萝卜可食部 Cd 含量相对较小,但具有较高的 THQ 值,说明胡萝卜的健康风险不受种植方式的影响而取决于蔬菜可食部分重金属含量和其他因素如饮食习惯等<sup>[45]</sup>.本研究中胡萝卜在重金属复合污染情况下,As 和 Cd 造成的人体潜在风险大于其他 4 种重金属.以往的研究也发现<sup>[46]</sup>,白银区东大沟的 As、Cd、Cu 和 Pb 为主要的接触暴露的重金属.表明这些重金属应该作为确保健康安

全的主要修复目标.

#### 4 结论

(1)在具有近 50 a 污水灌溉史的东大沟供试土壤中,短期温室种植方式下胡萝卜提前 15 d 成熟,不同种植方式对生物量(可食部)、根际土壤理化性质(除幼苗期)和重金属含量影响较小.

(2)两种种植方式下,胡萝卜生长过程中重金属(除 Cr)含量和生物富集系数的变化趋势主要受生物量影响.从温室种植到大田种植的短期转变下重金属含量受种植方式的影响,地下部 As 和 Cd 含量(仅幼苗期)差异显著;地上部 As、Cd 和 Pb 含量和 BCF 均低于大田.可食部重金属含量仍较高,其

中 Cd 含量分别超标 0.5% 和 11.3%, 表明与其他重金属相比, Cd 更易被胡萝卜可食部吸收. 但总体而言, 胡萝卜更易在地上部积累重金属.

(3) 温室和大田种植方式下, 成年人摄入胡萝卜具有潜在的健康风险, 成熟期时健康风险相对较低, 分别为 1.70 和 1.67, 且主要风险由 As 和 Cd 贡献. 为确保食用胡萝卜的健康安全, 研究区的土壤修复策略应以 As 和 Cd 为主.

#### 参考文献:

- [1] 戴彬, 吕建树, 战金成, 等. 山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2015, **36**(2): 507-515.  
Dai B, Lü J S, Zhan J C, *et al.* Assessment of sources, spatial distribution and ecological risk of heavy metals in soils in a typical industry-based city of Shandong Province, Eastern China [J]. Environmental Science, 2015, **36**(2): 507-515.
- [2] 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.
- [3] 王洋洋, 李方方, 王笑阳, 等. 铅锌冶炼厂周边农田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.
- [4] 陈志良, 黄玲, 周存宇, 等. 广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价[J]. 环境科学, 2017, **38**(1): 389-398.  
Chen Z L, Huang L, Zhou C Y, *et al.* Characteristics and evaluation of heavy metal pollution in vegetables in Guangzhou [J]. Environmental Science, 2017, **38**(1): 389-398.
- [5] 李富荣, 徐爱平, 吴志超, 等. 大湾区根茎类蔬菜-农田土壤系统中 10 种重金属吸收特性及其种植安全性研究[J]. 生态环境学报, 2020, **29**(6): 1251-1259.  
Li F R, Xu A P, Wu Z C, *et al.* Study on the absorption characteristics of 10 heavy metal elements and planting safety in the rootstock vegetable-farmland soil system in the Greater Bay Area [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, **29**(6): 1251-1259.
- [6] 窦韦强, 安毅, 秦莉, 等. 土壤 pH 对镉形态影响的研究进展[J]. 土壤, 2020, **52**(3): 439-444.  
Dou W Q, An Y, Qin L, *et al.* Advances in effects of soil pH on cadmium form [J]. Soils, 2020, **52**(3): 439-444.
- [7] Zhang Z M, Wu X L, Tu C L, *et al.* Relationships between soil properties and the accumulation of heavy metals in different *Brassica campestris* L. growth stages in a Karst mountainous area [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, **206**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111150.
- [8] Li F L, Shi W, Jin Z F, *et al.* Excessive uptake of heavy metals by greenhouse vegetables [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2017, **173**, doi: 10.1016/j.gexplo.2016.12.002.
- [9] 李春芳, 曹见飞, 吕建树, 等. 不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险[J]. 环境科学, 2018, **39**(12): 5628-5638.  
Li C F, Cao J F, Lü J S, *et al.* Ecological risk assessment of soil heavy metals for different types of land use and evaluation of human health [J]. Environmental Science, 2018, **39**(12): 5628-5638.
- [10] Lu H L, Yan C L, Liu J C. Low-molecular-weight organic acids exuded by Mangrove (*Kandelia candel* (L.) Druce) roots and their effect on cadmium species change in the rhizosphere [J]. Environmental and Experimental Botany, 2007, **61**(2): 159-166.
- [11] Qin X L, Li Y Z, Han Y L, *et al.* Ridge-furrow mulching with black plastic film improves maize yield more than white plastic film in dry areas with adequate accumulated temperature [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, **262**, doi: 10.1016/j.agrformet.2018.07.018.
- [12] Campbell E E, Paustian K. Current developments in soil organic matter modeling and the expansion of model applications: a review [J]. Environmental Research Letters, 2015, **10**, doi: 10.1088/1748-9326/10/12/123004.
- [13] Cao C, Chen X P, Ma Z B, *et al.* Greenhouse cultivation mitigates metal-ingestion-associated health risks from vegetables in wastewater-irrigated agroecosystems [J]. Science of the Total Environment, 2016, **560-561**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.04.044.
- [14] DalCorso G, Manara A, Furini A. An overview of heavy metal challenge in plants: from roots to shoots [J]. Metallomics, 2013, **5**(9): 1117-1132.
- [15] Zhao X, Joo J C, Lee J K, *et al.* Mathematical estimation of heavy metal accumulations in *Helianthus annuus* L. with a sigmoid heavy metal uptake model [J]. Chemosphere, 2019, **220**: 965-973.
- [16] 黄标, 胡文友, 虞云龙, 等. 我国设施蔬菜产地土壤环境质量及管理对策[J]. 中国科学院院刊, 2015, **30**(S1): 257-265.  
Huang B, Hu W Y, Yu Y L, *et al.* Problems of soil environmental quality and their management strategies in greenhouse vegetable production of China [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2015, **30**(S1): 257-265.
- [17] 杨燕萍, 陈强, 王莉娜, 等. 西北工业城市冬季 PM<sub>2.5</sub> 污染特征及理化性质[J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5267-5275.  
Yang Y P, Chen Q, Wang L N, *et al.* Winter pollution characteristics and physicochemical properties of PM<sub>2.5</sub> in a northwest industrial city [J]. Environmental Science, 2020, **41**(12): 5267-5275.
- [18] 陈伟, 王婷. 白银市污灌区土壤-小麦系统镉赋存特征及其健康风险评价[J]. 核农学报, 2020, **34**(4): 878-886.  
Chen W, Wang T. Speciation features and health risk assessment of Cd in soil-wheat system in Baiyin sewage irrigation area in China [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, **34**(4): 878-886.
- [19] Liu B L, Ai S W, Zhang W Y, *et al.* Assessment of the bioavailability, bioaccessibility and transfer of heavy metals in the soil-grain-human systems near a mining and smelting area in NW China [J]. Science of the Total Environment, 2017, **609**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.07.215.
- [20] 田美玲, 钟雪梅, 张云霞, 等. 矿业活动影响区稻田土壤和稻米中重金属含量及健康风险[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2919-2926.
- [21] Tian M L, Zhong X M, Zhang Y X, *et al.* Concentrations and health risk assessments of heavy metal contents in soil and rice of mine contaminated areas [J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2919-2926.
- [21] Khan M U, Malik R N, Muhammad S. Human health risk from

- Heavy metal *via* food crops consumption with wastewater irrigation practices in Pakistan[J]. *Chemosphere*, 2013, **93**(10): 2230-2238.
- [22] Cao C, Zhang Q, Ma Z B, *et al.* Fractionation and mobility risks of heavy metals and metalloids in wastewater-irrigated agricultural soils from greenhouses and fields in Gansu, China [J]. *Geoderma*, 2018, **328**: 1-9.
- [23] 李莲芳, 朱昌雄, 曾希柏, 等. 吉林四平设施土壤和蔬菜中重金属的累积特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2936-2943.
- Li L F, Zhu C X, Zeng X B, *et al.* Accumulation characteristics of heavy metals in greenhouse soil and vegetables in Siping City, Jilin Province[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2936-2943.
- [24] Sinha V, Pakshirajan K, Chaturvedi R. Chromium tolerance, bioaccumulation and localization in plants: an overview [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, **206**: 715-730.
- [25] Zhang F, Li M, Zhang W J, *et al.* Ridge-furrow mulched with plastic film increases little in carbon dioxide efflux but much significant in biomass in a semiarid rainfed farming system[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, **244-245**: 33-41.
- [26] He B H, Wang W, Geng R Y, *et al.* Exploring the fate of heavy metals from mining and smelting activities in soil-crop system in Baiyin, NW China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, **207**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111234.
- [27] 姚荣江, 杨劲松, 谢文萍, 等. 沿海滩涂区土壤重金属含量分布及其有效态影响因素[J]. *中国生态农业学报*, 2017, **25**(2): 287-298.
- Yao R J, Yang J S, Xie W P, *et al.* Content and bioavailability factors of soil heavy metals in mudflat coastal areas[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, **25**(2): 287-298.
- [28] Madoz-Escande C, Santucci P. Weather-dependent change of cesium, strontium, barium and tellurium contamination deposited as aerosols on various cultures [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2005, **84**(3): 417-439.
- [29] 张润花, 李志国, 刘旭东, 等. 露地栽培向设施栽培转变对菜田土壤重金属含量及形态的影响[J]. *植物科学学报*, 2016, **34**(4): 575-582.
- Zhang R H, Li Z G, Liu X D, *et al.* Impact of cultivation change from open field to greenhouse on heavy metal contents and fractions of soil[J]. *Plant Science Journal*, 2016, **34**(4): 575-582.
- [30] Pulford I D, Watson C. Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees - a review [J]. *Environment International*, 2003, **29**(4): 529-540.
- [31] Chrysafopoulou E, Kadukova J, Kalogerakis N. A whole-plant mathematical model for the phytoextraction of lead (Pb) by maize [J]. *Environment International*, 2005, **31**(2): 255-262.
- [32] Li H S, Jiang L, You C M, *et al.* Dynamics of heavy metal uptake and soil heavy metal stocks across a series of Masson pine plantations[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **269**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122395.
- [33] 弭宝彬, 刘碧琼, 周火强, 等. 不同萝卜品种对5种重金属响应规律研究[J]. *核农学报*, 2020, **34**(5): 1119-1127.
- Mi B B, Liu B Q, Zhou H Q, *et al.* Study on response characteristics of different radishes genotypes to five heavy metals [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2020, **34**(5): 1119-1127.
- [34] 陈小华, 沈根祥, 白玉杰, 等. 不同作物对土壤中Cd的富集特征及低累积品种筛选[J]. *环境科学*, 2019, **40**(10): 4647-4653.
- Chen X H, Shen G X, Bai Y J, *et al.* Accumulation of Cd in different crops and screening of low-Cd accumulation cultivars [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(10): 4647-4653.
- [35] 施亚星, 吴绍华, 周生路, 等. 土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟[J]. *环境科学*, 2016, **37**(10): 3996-4003.
- Shi Y X, Wu S H, Zhou S L, *et al.* Simulation of the absorption, migration and accumulation process of heavy metal elements in soil-crop system[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(10): 3996-4003.
- [36] Rizwan M, Ali S, ur Rehman M Z, *et al.* A critical review on the effects of zinc at toxic levels of cadmium in plants [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(7): 6279-6289.
- [37] Montiel-Rozas M M, Madejón E, Madejón P. Effect of heavy metals and organic matter on root exudates (low molecular weight organic acids) of herbaceous species: an assessment in sand and soil conditions under different levels of contamination [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **216**: 273-281.
- [38] Lu Y H, Watanabe A, Kimura M. Contribution of plant photosynthates to dissolved organic carbon in a flooded rice soil [J]. *Biogeochemistry*, 2005, **71**: 1-15.
- [39] Tao Q, Zhao J W, Li J X, *et al.* Unique root exudate tartaric acid enhanced cadmium mobilization and uptake in Cd-hyperaccumulator *Sedum alfredii* [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **383**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121177.
- [40] Shahid M, Dumat C, Khalid S, *et al.* Cadmium bioavailability, uptake, toxicity and detoxification in soil-plant system [A]. In: Gunther F A, de Voogt P (Eds.). *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* [M]. Cham: Springer, 2017.
- [41] McBride M B, Shayler H A, Russell-Anelli J M, *et al.* Arsenic and lead uptake by vegetable crops grown on an old orchard site amended with compost[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2015, **226**, doi: 10.1007/s11270-015-2529-9.
- [42] Tommasini S, Davies G R, Elliott T. Lead isotope composition of tree rings as bio-geochemical tracers of heavy metal pollution: a reconnaissance study from Firenze, Italy [J]. *Applied Geochemistry*, 2000, **15**(7): 891-900.
- [43] De Temmerman L, Ruttens A, Waegeneers N. Impact of atmospheric deposition of As, Cd and Pb on their concentration in carrot and celeriac [J]. *Environmental Pollution*, 2012, **166**: 187-195.
- [44] 刘意章, 肖唐付, 熊燕, 等. 西南高镉地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(6): 2877-2884.
- Liu Y Z, Xiao T F, Xiong Y, *et al.* Accumulation of heavy metals in agricultural soils and crops from an area with a high geochemical background of cadmium, southwestern China [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(6): 2877-2884.
- [45] Liu B L, Ai S W, Naeem S, *et al.* Metal bioaccessibility in a wastewater irrigated soil-wheat system and associated human health risks: implications for regional thresholds [J]. *Ecological Indicators*, 2018, **94**: 305-311.
- [46] Zang F, Wang S L, Nan Z R, *et al.* Accumulation, spatio-temporal distribution, and risk assessment of heavy metals in the soil-corn system around a polymetallic mining area from the Loess Plateau, northwest China[J]. *Geoderma*, 2017, **305**: 188-196.

## 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 PN/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 )