

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

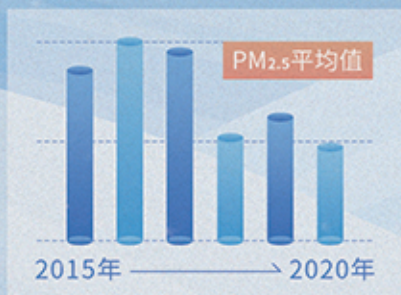
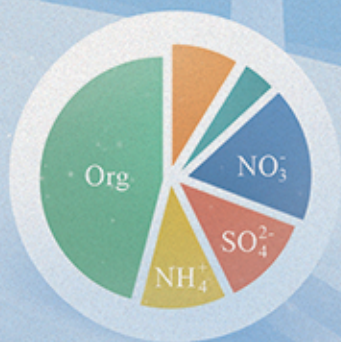
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

北京冬季奥运会历史同期大气PM_{2.5}污染特征分析

刘玥晨, 满睿琪, 裴彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意,
曾立民, 吴志军, 胡敏



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2022年8月

第43卷 第8期
Vol.43 No.8

目次

北京冬季奥运会历史同期大气 PM _{2.5} 污染特征分析·····	刘玥晨, 满睿琪, 袁彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意, 曾立民, 吴志军, 胡敏 (3895)
天津城区 2019 年 2~3 月气溶胶粒径分布特征观测分析·····	郝团, 蔡子颖, 刘敬乐, 王晓佳, 姚青 (3903)
长江中游地区 PM _{2.5} 重污染过程的典型天气环流分型及区域传输影响·····	王莹, 智协飞, 白永清, 董甫, 张玲 (3913)
滇中典型工矿城市大气干湿沉降重金属等元素特征及健康风险评价·····	范晨子, 刘永兵, 袁继海, 郭威, 孙冬阳, 刘成海 (3923)
典型工业城市夏季 VOCs 污染特征及反应活性·····	秦涛, 李丽明, 王信梧, 杨文, 王晓丽, 徐勃, 耿春梅 (3934)
大连市夏季 VOCs 化学反应活性及来源·····	朱轲欣, 刘立忠, 刘焕武, 罗静期, 高冉冉 (3944)
河南省 18 个城市大气污染物分布特征、区域来源和传输路径·····	刘光瑾, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 王克 (3953)
京津冀臭氧污染特征、气象影响及基于神经网络的预报效果评估·····	朱媛媛, 刘冰, 桂海林, 李健军, 汪巍 (3966)
2006~2020 年中国大气本底站 BC 气溶胶的时空分布特征·····	王红磊, 颜雪, 沈利娟, 柳竞先, 赵天良, 管小彬, 赵德龙 (3977)
钢铁生产行业二噁英污染特征变化及其排放因子·····	杨艳艳, 谢丹平, 付建平, 陈晓燕, 尹文华, 韩静磊, 张素坤, 张璐, 肖滔 (3990)
长江流域着生藻类群落结构的格局及其生态评价·····	胡愈忻, 曹亮, 屈仁超, 黄杰, 胡圣, 周正, 王英才, 张静 (3998)
基于蒙特卡洛模拟与 PMF 模型的黄河流域沉积物重金属污染评价及源解析·····	庞阔, 李敏, 刘璐, 杨璐, 赵洪军 (4008)
梯级拦河堰对典型山地城市河流重金属元素的滞留效应: 以重庆市梁滩河为例·····	王超, 贾伯阳, 潘成勇, 何文战, 叶秋, 罗杉山, 张夏武 (4018)
基于土壤流失的农业面源 TN 和 TP 排海系数估算·····	王有霄, 黄翀, 刘高焕, 赵忠贺, 李贺, 刘庆生 (4032)
河湟谷地不同时空尺度下土地利用及空间格局对水质的影响·····	李好好, 黄懿梅, 郭威, 侯宏洋, 范梦苑, 齐照平, 贾鹏辉, 郭庆波 (4042)
联合 PMF 模型与稳定同位素的地下水污染溯源·····	张涵, 杜昕宇, 高菲, 曾卓, 程思茜, 许懿 (4054)
江西锦江流域抗生素污染特征与生态风险评价·····	李佳乐, 王萌, 胡发旺, 董一慧, 孙占学, 王瑶, 卫承芳, 燕雯 (4064)
天津市地表水中新型优先污染物筛选与管控对策·····	吴颜岐, 宋帅, 史雅娟, 刘莹, 杨胜杰 (4074)
宁夏第三排水沟中药物和个人护理品 (PPCPs) 的污染特征与生态风险评估·····	李富娟, 高礼, 李凌云, 郑兰香, 马兰, 杨桂钦 (4087)
再生水河道浮游生物多样性季节变化分析: 以北运河为例·····	袁训超, 王敏, 郭道宇, 吴东丽 (4097)
太湖草、藻湖区沉积物 WSOM 组成和分子结构分析·····	杜瑛珣, 戴家如, 张巧颖, 刘静静, 黄秀琳, 安世林, 文帅龙 (4108)
太湖氧化亚氮 (N ₂ O) 排放特征及潜在驱动因素·····	刘朝荣, 朱俊羽, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 杨艳, 周永强 (4118)
海绵城市生物滞留带重金属污染特征及风险评价·····	雷晓玲, 邱丽娜, 魏泽军, 杨程, 何博 (4127)
玉米芯和稻草秸秆强化潜流人工湿地对低 C/N 污水的处理效果·····	胡曼利, 郝庆菊, 马容真, 陈柯沁, 罗师旭, 江长胜 (4136)
环境 pH 条件下 Fe ²⁺ 活化过二硫酸盐降解有机污染物的效能与影响因素·····	刘颖, 郭依玮, 乔俊莲, 孙远奎 (4146)
新疆沙雅县不同植物类型农田环境中典型农药残留及其风险评价·····	谢宣宣, 艾力江·努尔拉, 买合木提·巴拉提, 仲乃福, 李南鑫 (4154)
宁夏养鸡场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征·····	沈聪, 张俊华, 刘吉利, 韩新宁, 尚天浩, 代金霞 (4166)
宁夏石嘴山市农用地土壤硒的富集因素·····	王莹, 刘海燕, 王泽晶, 张晓东, 王登红 (4179)
地块尺度重金属污染风险耕地安全利用区划方法·····	王锐, 余京, 李瑜, 周蛟, 贾中民, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (4190)
姜湖贡米产地土壤重金属空间分布、源解析及生态风险评价·····	于林松, 万方, 范海印, 康桂玲, 刘辉, 王东平, 徐佳 (4199)
基于特定源风险评估模型的小麦籽粒铅超标风险预测·····	杨阳, 李艳玲, 牛硕, 陈卫平, 王天齐, 王美娥 (4212)
柳州地源性镉异常区稻米重金属累积效应与健康风险·····	朱亮亮, 王佛鹏, 唐乐斌, 肖乃川, 董心月, 韦美溜, 宋波 (4219)
不同玉米品种 Cd、Pb、Zn 和 As 积累与转运特性·····	任超, 肖建辉, 李竞天, 杜倩倩, 朱利文, 王浩, 朱瑞颖, 赵海洋 (4232)
橡胶草 (TKS) 对铅镉污染农田土壤的修复潜力·····	张恒, 熊明彪, 王乾鑫, 孙博文, 饶逸驰, 程章, 徐小逊, 杨占彪, 鲜骏仁, 朱雪梅, 杨绍平, 杨远祥 (4253)
3 种地被竹对重金属复合污染农田土壤的修复潜力·····	张颖, 赵欣, 张圣虎, 漆丹, 王博, 陈引, 陆建刚 (4262)
连续施肥对双季稻镉硅累积效应的影响·····	彭华, 邓凯, 石宇, 魏维, 柳赛花, 纪雄辉 (4271)
改性壳聚糖负载氧化硅调控水稻对砷吸收与转运的影响·····	杨嘉仪, 孙梦强, 肖羽堂, 韦行, 张建强, 陈志良 (4282)
不同螯合剂和有机酸对苍耳修复镉复合污染土壤的影响·····	张雅睿, 黄益宗, 保琼莉, 魏祥东, 铁柏清, 张盛楠, 韩甘, 黄永春 (4292)
水分管理对稻田土壤铁氧化物形态转化的影响及其与酶活性变化的耦合关系·····	李明远, 张小婷, 刘汉斌, 魏世强 (4301)
外源 Fe 调控根系微生物群落结构和功能对水稻 Cd 积累的影响·····	郑沈, 黄道友, 李波, 马天池, 许超, 朱奇宏, 朱捍华, 张泉 (4313)
不同降水下覆盖与缓释肥减量对油菜土壤微生物群落结构的影响·····	冯军, 石超, Hafiz Athar Hussain, 刘永波, 刘天朋, 李永洪, 刘俊峰, 王龙昌 (4322)
基于高通量测序和代谢组学解析重金属污染对农田微生物群落组成和功能的影响·····	庞发虎, 李晓琦, 段莉阳, 陈彦, 姬明飞, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (4333)
汞矿区周边农田土壤微生物群落结构特征及其环境驱动因子·····	陈芬, 余高, 孙约兵, 张红丽, 田霞, 夏蓓 (4342)
岩溶湿地与稻田土壤团聚体细菌群落结构的比较·····	冷蒙, 靳振江, 肖筱怡, 熊丽媛, 李雪松 (4353)
戴云山土壤微生物碳源利用效率的海拔变异规律及影响因素·····	吕坤, 王晶晶, 吴国朋, 林思诺, 苏延桂, 黄刚 (4364)
长期秸秆还田对水稻根系碳矿化与激发效应的影响·····	刘峰, 王云秋, 张昀, 祝贞科, 吴金水, 葛体达, 李宇虹 (4372)
秸秆还田配施生物炭对关中平原夏玉米产量和土壤 N ₂ O 排放的影响·····	白金泽, 刘镇远, 宋佳杰, 李娜, 于琦, 郝嘉琪, 许宏伟, 程博豪, 王兴, 冯永忠 (4379)
聚苯乙烯纳米塑料对大蒜生长生理的影响·····	邱陈陈, 李国新, 李青松, 颜昌宙 (4387)
微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响·····	王志超, 张博文, 倪嘉轩, 杨文焕, 李卫平 (4394)
氢燃料电池汽车动力系统生命周期评价及关键参数对比·····	陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 付佩 (4402)
《环境科学》征订启事 (4211) 《环境科学》征稿简则 (4312) 信息 (3922, 4031, 4107)	

不同玉米品种 Cd、Pb、Zn 和 As 积累与转运特性

任超^{1,2}, 肖建辉^{1,2}, 李竞天¹, 杜倩倩¹, 朱利文¹, 王浩¹, 朱瑞祯¹, 赵海洋¹

(1. 河南省地质矿产勘查开发局第一地质矿产调查院, 洛阳 471000; 2. 河南省金银多金属成矿系列与深部预测重点实验室, 洛阳 471000)

摘要: 通过田间试验,研究了 22 个玉米品种同时在未污染、轻度、中度和重度重金属 Cd、Pb、Zn 和 As 复合污染农田土壤条件下,玉米植株各部位对 Cd、Pb、Zn 和 As 的富集和转运特性,并对 Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Ni 和 Zn 这 8 种重金属元素进行了主成分分析和相关性分析,探讨了玉米植株吸收 Cd、Pb、Zn 和 As 含量与土壤中重金属元素形态含量的关系。结果表明: ①玉米植株不同部位 Cd 和 Zn 含量分布规律为: 穗上茎叶 > 穗下茎叶 > 根 > 籽粒, Pb 分布规律为: 根 > 穗下茎叶 > 穗上茎叶 > 籽粒, As 分布规律为: 根 > 穗上茎叶 > 穗下茎叶 > 籽粒,分布规律的不同与作物本身积累特性以及研究区土壤中 Cd、Pb、Zn 和 As 的环境活性高低密切相关。②22 个玉米品种遗传背景的较大差异造成品种间 Cd 和 Pb 的积累具有显著差异 ($P < 0.05$),表现为 4 种趋势: Cd 和 Pb 复合高积累品种,单一 Cd 或 Pb 低积累品种(低 Cd 高 Pb、低 Pb 高 Cd),Cd 和 Pb 复合低积累品种。其中 3 个品种籽粒 Cd 含量超过国家食品安全标准,14 个品种茎叶 Cd 含量超过国家饲料卫生标准;所有品种茎叶和籽粒 Pb 含量均未超标,但部分品种籽粒 Pb 含量接近限值具有超标风险;不同玉米品种茎叶和籽粒 As 含量均远低于标准限值,表现出稳定的低积累特性;不同玉米品种茎叶 Zn 含量随土壤 Zn 含量的升高而升高,但籽粒 Zn 含量维持在满足植株正常生长的阈值范围内。③研究区玉米植株中 Cd、Pb、Zn 和 As 具有一定的同源性,主要受土壤中 Cd、Pb、Zn 和 As 污染物含量超标的影响较为深刻,这说明矿山采选和尾矿堆存带来的人为来源,玉米植株中 Cu 元素受到一定人为污染来源的影响,但影响程度有限;玉米植株中 Hg、Ni 和 Cr 元素间具有一定的同源性,说明成土母质和风化产物累积的自然来源。④玉米植株各部位 Cd、Pb、Zn 和 As 元素含量,以及 Cr 和 Ni 元素含量均具有极显著正相关性 ($P < 0.01$),Cd、Pb、Zn 和 As 元素在植物体内的运输机制可能有共同之处,从玉米根部向地上部迁移方面表现出协同效应,Cr 和 Ni 元素同样如此。而玉米茎叶中 Hg 与 Cd、Pb、Zn 和 As 元素,以及籽粒中 Hg 与 Cd、Hg、As、Pb、Cr、Ni 和 Zn 元素均表现出一定的拮抗作用。⑤采用对照优选法将同时满足: 茎叶 Cd、Pb 和 As 含量未超过国家饲料卫生标准,籽粒 Cd、Pb 和 As 含量未超过国家食品安全标准,籽粒 Cd、Pb 和 As 聚类分析为低积累类群,植株茎叶和籽粒 Cd、Pb 和 As 富集和转运系数较低作为优选条件,筛选出 C18(先玉 335)可作为 Cd、Pb 和 As 复合低积累且籽粒 Zn 含量维持在正常水平的优选玉米品种,适宜在北方工矿企业周边重金属复合污染农田推广应用。

关键词: 玉米; 重金属复合污染; 低积累; 富集转运; 协同效应; 环境活性

中图分类号: X171.5; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)08-4232-21 DOI: 10.13227/j.hjxx.202107117

Accumulation and Transport Characteristics of Cd, Pb, Zn, and As in Different Maize Varieties

REN Chao^{1,2}, XIAO Jian-hui^{1,2}, LI Jing-tian¹, DU Qian-qian¹, ZHU Li-wen¹, WANG Hao¹, ZHU Rui-zhen¹, ZHAO Hai-yang¹

(1. No.1 Institute of Geological and Mineral Resources Survey, Henan Bureau of Geoexploration and Mineral Development, Luoyang 471000, China; 2. Key Laboratory of Au-Ag-Polymetallic Deposit Series and Deep-seated Metallogenic Prognosis of Henan Province, Luoyang 471000, China)

Abstract: The enrichment and translocation characteristics of Cd, Pb, Zn, and As by various parts of maize plants were investigated using field experiments in 22 maize varieties simultaneously under uncontaminated, low, middle, and serious heavy metal Cd, Pb, Zn, and As complex-contaminated farmland soil conditions. The relationship between the uptake of Cd, Pb, Zn, and As by maize plants and the morphological content of heavy metals in the soil was also discussed through principal component analysis and correlation analysis of the concentrations of eight heavy metals, including Cd, Hg, As, Pb, Cr, Cu, Ni, and Zn. The results showed that: ① the distribution pattern of Cd and Zn contents in different parts of the maize plant was as follows: upper stalk > lower stalk > root > seed, the distribution pattern of Pb was as follows: root > lower stalk > upper stalk > seed, and the As distribution pattern was: root > upper stalk > lower stalk > seed. The different distribution patterns were closely related to the accumulation characteristics of the crop itself and the environmental activity of Cd, Pb, Zn, and As in the soil of the study area. ② There were significant differences in Cd and Pb accumulation among 22 maize cultivars due to their genetic background ($P < 0.05$), which showed four trends: Cd and Pb compound high-accumulation varieties, single Cd or Pb low-accumulation varieties (low Cd and high Pb, low Pb and high Cd), and Cd and Pb compound low-accumulation varieties. Among them, the content of Cd in the grain of the three varieties exceeded the national food safety standard, and the content of Cd in the stem and leaf of 14 varieties exceeded the national food health standard. The Pb content in stems, leaves, and grains of all cultivars did not exceed the standard, but the Pb content in grains of some cultivars was close to the limit and had the risk of exceeding the standard. The content of As in the stem, leaf, and grain of different maize varieties was much lower than the standard limit value, showing a stable low-accumulation characteristic. The content of Zn in the stem and leaf of different maize varieties increased with the increase in the content of Zn in soil, but the content of Zn in grain remained within the threshold of normal plant growth. ③ Cd, Pb, Zn, and As in maize plants in the study area had a certain homology and were mainly affected by the

收稿日期: 2021-07-14; 修订日期: 2022-01-07

基金项目: 中央土壤污染防治专项(2110402-农村环境保护)

作者简介: 任超(1987~),男,高级工程师,主要研究方向为土壤污染修复, E-mail: renchaodkyy@163.com

excessive levels of Cd, Pb, Zn, and As pollutants in the soil. This showed that anthropogenic sources were brought about by mine extraction and tailings stockpiles, whereas Cu elements in maize plants were affected by certain anthropogenic pollution sources, though to a limited extent. Hg, Ni, and Cr in maize plants had a certain homology; this showed the natural source of soil parent material and weathering product accumulation. ④ The contents of Cd, Pb, Zn, and As elements in various parts of the corn plant, as well as the contents of Cr and Ni elements all had a very significant positive correlation ($P < 0.01$). The transport mechanisms of Cd, Pb, Zn, and As elements in the plant may have a common. However, there was a synergistic effect in the migration from the root of the corn to the upper part of the ground, and the same was true for the elements of Cr and Ni. The elements of Hg and Cd, Pb, Zn, and As in the corn stems and leaves and Hg and Cd, Pb, Zn, and As in grains all showed certain antagonistic effects. ⑤ The comparison method simultaneously satisfied the following requirements: the contents of Cd, Pb, and As in stems and leaves did not exceed the national food hygiene standards, and the contents of Cd, Pb, and As in the grains did not exceed the national food safety standards. The cluster analysis of Cd, Pb, and As in grains was a low-accumulation group, and the enrichment and transport coefficients of Cd, Pb, and As in the stems and leaves and grains were low as the optimal conditions. C18 (Xianyu 335) could be selected as the optimal maize variety with low accumulation of Cd, Pb, and As and normal Zn content in grain, which is suitable for promoting and applying in the heavy metal complex-polluted farmland around industrial and mining enterprises in north China.

Key words: corn; heavy metal compound pollution; low accumulation; enrichment and transport; synergistic effect; environmental activity

粮食安全是当前我国农业生产面临的重大问题,如何防治农田重金属污染,实现区域性大面积重金属污染耕地安全利用,已成为全球农业环境科学研究领域的难点与热点^[1]. 通过选育低重金属积累品种来降低作物对重金属的吸收和积累,从而降低粮食重金属含量已被国内、外相关学者普遍认为是实现重金属污染耕地安全利用的有效途径^[2]. 研究区位于我国中部重要的钨钼铅锌多金属成矿区河南省栾川县,该区域被誉为“世界钼都”,但矿山开采、选冶和尾矿堆存等人类活动导致周边农田土壤重金属 Cd、Pb、Zn 和 As 复合污染形势严峻,已成为我国耕地和农产品重金属污染问题最为突出和典型的区域之一. 河南又是我国的粮食主产区,小麦和玉米等大宗农产品的生产基地,其农业生产在确保我国粮食安全中占有举足轻重的地位. 玉米作为世界上主要粮食作物之一,种植区广泛且生物量大、产量高,除了直接供人食用外,还广泛用于动物饲料、乙醇、高果糖浆、甜味剂和酒的生产^[3],而我国北方玉米种植区土壤 Cd、Pb、Zn 和 As 污染的严重程度令人担忧,筛选对重金属胁迫具有一定抗性并且籽粒中重金属 Cd、Pb 和 As 低积累且 Zn 含量在安全范围内的优良玉米品种,对合理利用重金属污染农田具有一定的实践意义.

作物本身对重金属污染的敏感程度和积累能力不同,重金属的吸收、转运、分配和积累在不同作物品种间存在差异性^[4]. 以往研究针对禾谷类作物以单一镉或铅低积累品种的重视程度较高,近年来研究关注热点逐渐从单一重金属污染变得复杂多样^[5]. 目前,低积累作物品种筛选的相关研究涉及水稻^[6]、小麦^[7]、玉米^[8]和大麦^[9]等禾谷类作物,叶菜类、花菜类、根茎类、茄果类和豆类等蔬菜类作物^[10],以及油料、芝麻、烟草、药材、棉花和苧麻等重点经济作物. 目前,关于复合污染条件下的多元素低积累品种已有一定的研究基础^[11],但多侧重于作物对重金属吸收积累的差异和品种筛选,而在不同含量重金属复合污染土壤条件下,作物对多重金

属元素互作和低积累机制研究少有报道. 同时由于盆栽试验具有一定的局限性,受大田环境因素的影响,低积累品种田间重现性和稳定性较差. 本研究选取了豫西地区大面积种植的 22 个玉米品种,同时在未污染、轻度、中度和重度重金属复合污染农田中开展低积累玉米品种的田间筛选试验,研究了不同污染浓度条件下玉米植株各部位对 Cd、Pb、Zn 和 As 的积累和转运差异,同时对 Cd、Pb、Zn、As、Cu、Ni、Cr 和 Hg 进行了主成分和相关性分析,探讨了玉米植株不同部位多元素互作机制. 通过大田对比试验,更能反映出低积累品种的耐受程度和积累特性,从而筛选出稳定可靠的重金属 Cd、Pb 和 As 复合低积累且 Zn 含量安全的玉米品种,以期为北方工矿企业周边重金属复合污染农田安全利用工作提供技术支撑.

1 材料与方法

1.1 试验区概况

河南省洛阳市栾川县地处豫西山丘陵区,农作物种植为一年一季,以春播玉米为主,无灌溉习惯,属旱作雨养农业. 试验区位于栾川县石宝沟钨钼铅锌多金属矿区周边污染农田 SBG-3 号地块,根据试验田本身土壤重金属污染程度由低到高依次划分为 4 个试验区,分别为对照组区和试验组 (1 ~ 3 区),面积均为 1 000 m²,各试验区均设置玉米种植小区 C1 ~ C22 区,小区之间田埂小路相隔.

1.2 供试材料

1.2.1 供试土壤

供试土壤类型为褐土,质地为粉砂质壤土,pH 值 7.92,CEC 为 11.53 cmol·kg⁻¹, ω (有机质)为 13.15 g·kg⁻¹, ω (全氮)为 0.61 g·kg⁻¹, ω (全磷)为 3.23 g·kg⁻¹, ω (全钾)为 12.68 g·kg⁻¹, ω (碱解氮)为 56.00 mg·kg⁻¹, ω (有效磷)为 12.25 mg·kg⁻¹, ω (速效钾)为 57.75 mg·kg⁻¹. 各试验田分区均为自然条件下污染农田土壤,表层(0 ~ 20 cm)土壤重金属含量见表 1. 其中对照组区的 Cd、

Pb、Zn 和 As 含量低于风险筛选值,试验组 1~3 区的 Cd、Pb、Zn 和 As 含量高于风险筛选值,且含量依次增加,对照筛选值试验组重金属 Cd 含量超标

3.02~6.93 倍,Pb 含量超标 1.56~4.36 倍,Zn 含量超标 1.28~2.90 倍,As 含量超标 1.10~1.77 倍.各试验组土壤 Cu、Cr、Ni 和 Hg 均未超标.

表 1 各试验区供试土壤(0~20 cm) pH 值与重金属含量

Table 1 The pH value and heavy metal content of soil (0-20 cm) in each test area

试验田分区	pH	$\omega/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$							
		Cd	Pb	Zn	As	Cu	Cr	Ni	Hg
对照组区($n=22$)	8.00	0.53	73.31	179.64	12.06	56.47	49.08	40.91	0.027
试验组 1 区($n=22$)	7.92	1.81	264.60	383.05	27.38	74.62	39.77	28.85	0.022
试验组 2 区($n=22$)	7.74	2.42	438.50	527.09	30.38	67.36	39.90	23.06	0.023
试验组 3 区($n=22$)	8.00	4.16	741.41	870.45	44.15	92.79	32.43	19.40	0.017
筛选值(GB 15618-2018)	>7.5	0.6	170	300	25	100	250	190	3.4
管控值(GB 15618-2018)	>7.5	4.0	1 000	—	100	—	1 300	—	6.0

1.2.2 供试玉米品种

本试验选取栾川地区大面积推广种植的 22 个玉米品种,编号 C1~C22(表 2),种子购自栾川县种子公司.

表 2 供试玉米品种

Table 2 Test maize varieties

编号	品种名称	编号	品种名称
C1	登海 3721	C12	安玉 12
C2	登海 3622	C13	浚单 20
C3	秀青 74-9	C14	农玉 16
C4	秀青 835	C15	强硕 88
C5	亿科 254	C16	玉农 76
C6	东单 159	C17	安农 591
C7	裕丰 303	C18	先玉 335
C8	中金 368	C19	鑫玉 16
C9	承玉 5	C20	豫玉 22
C10	正大 12	C21	创玉 358
C11	滑玉 12	C22	美锋 0808

1.3 试验设计

根据试验田重金属含量划分 4 个试验分区,每个试验分区设置 22 个玉米品种种植小区,每个种植小区设 5 次重复,各小区田间管理措施保持一致.2019 年 4 月 15~18 日进行播种,播种同时施用磷酸二铵 $75\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ (约 $50\text{ kg}\cdot\text{亩}^{-1}$)作为底肥,并于大喇叭口期追施 $45\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ (约 $30\text{ kg}\cdot\text{亩}^{-1}$)磷酸二铵和 $30\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ (约 $20\text{ kg}\cdot\text{亩}^{-1}$)尿素,9 月 2~8 日收获玉米.

1.4 样品采集与测定

待玉米成熟后,协同采取土壤样品和成熟期玉米植株样品.土壤样品经自然风干、过 2 mm 尼龙筛粗磨、过 0.15 mm 尼龙筛细磨后备用.玉米植株样品分根、穗下茎叶(第一穗节以下)、穗上茎叶(第一穗节以上)和籽粒这 4 个部分取样,根和茎叶新鲜样品经去离子水清洗后,采用组织破碎机粉碎成浆状备用,籽粒经去离子水清洗、

自然晾干、磨碎(过 0.25~0.40 mm 尼龙筛)混匀后备用.

对照组区和试验组 1~3 区分别按照梅花 5 点法各采集 1 组表层(0~20 cm)混合土壤样品进行理化性质分析.pH 采用玻璃电极法,机械组成采用密度计法,有机质采用重铬酸钾容量法,阳离子交换量采用氯化铵-乙酸铵交换法,全氮采用凯氏定氮法,全磷、全钾采用四酸消解-电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES),碱解氮采用碱解-扩散法,有效磷采用碳酸氢钠浸提-电感耦合等离子体发射光谱法,速效钾采用乙酸铵浸提-电感耦合等离子体发射光谱法.

4 个试验分区 88 个种植小区按照梅花 5 点各采集 1 组土壤样品进行 Cd、Pb、Zn、As、Cu、Ni、Cr 和 Hg 全量及 Cd、Pb、Zn 和 As 不同形态含量测试.土壤样品 Cd、Pb、Zn、Cu、Ni 和 Cr 全量采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS),As 和 Hg 采用氢化物发生-原子荧光光谱法(HG-AFS),土壤 Cd、Pb、Zn 和 As 形态含量采用 Tessier 修正顺序七步提取法.每个种植小区分别采集玉米籽粒样品 5 组,各种植小区分别采集根、穗上茎叶和穗下茎叶样品各 1 组(五点混合),作物样品进行 Cd、Pb、Zn、As、Cu、Ni、Cr 和 Hg 全量测试,其中 Cd、Pb、Zn、As、Cu、Ni 和 Cr 全量采用 ICP-MS 法,Hg 全量采用 HG-AFS 法.

1.5 数据统计分析

对样品测试数据进行分类整理,采用 Excel 2019、Origin 2021b 和 SPSS 26 等软件进行数据整理、统计分析和绘图分析.

富集系数(BCF) = 玉米各部位 Cd 和 Pb 含量/土壤中 Cd 和 Pb 含量

转运系数(TF) = 玉米地上各部位 Cd 和 Pb 含量/玉米根部 Cd 和 Pb 含量

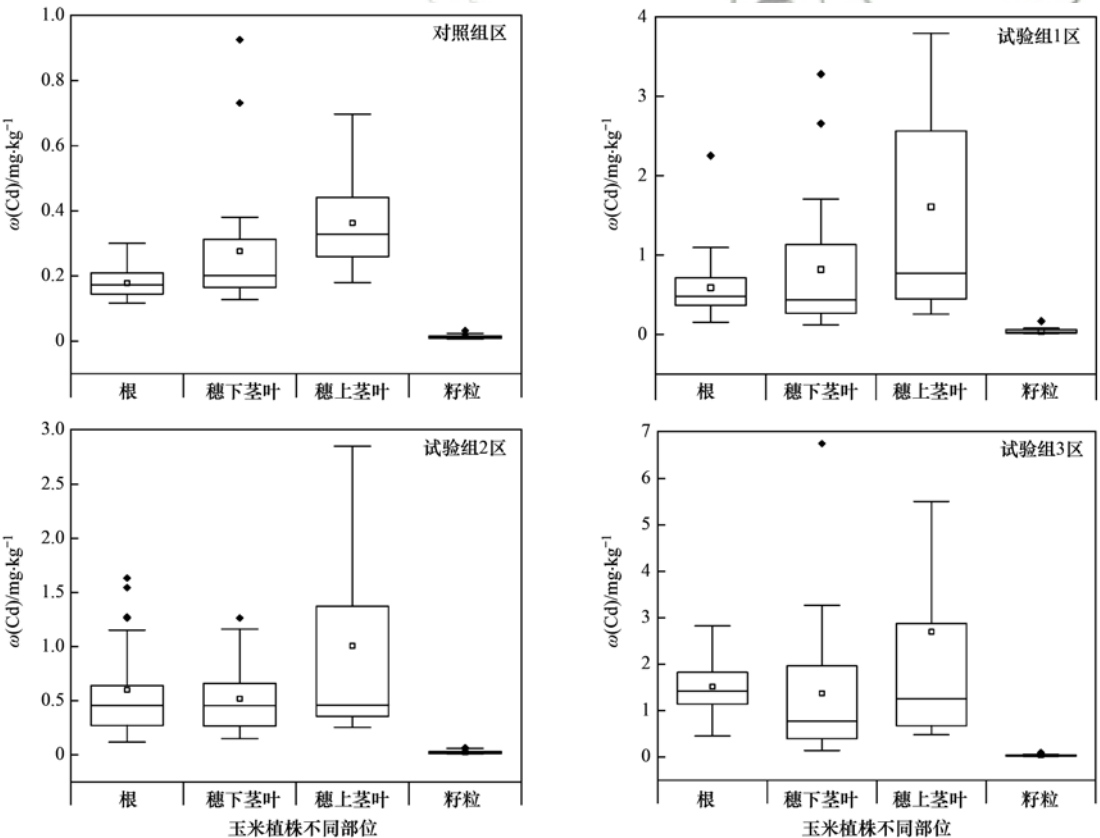
2 结果与分析

2.1 不同玉米品种植株各部位 Cd、Pb、Zn 和 As 含量差异分析

2.1.1 玉米植株不同部位 Cd、Pb、Zn 和 As 含量分布规律

由图 1~4 可知,对照组区和试验组 1~3 区玉米根 $\omega(\text{Cd})$ 分别为 0.12~0.30、0.15~2.25、0.12~1.63 和 0.45~2.83 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 玉米穗下茎叶 $\omega(\text{Cd})$ 分别为 0.13~0.93、0.12~3.28、0.15~1.26 和 0.14~6.75 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 玉米穗上茎叶 $\omega(\text{Cd})$ 分别为 0.18~0.70、0.25~8.19、0.25~4.52 和 0.48~20.61 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 籽粒 $\omega(\text{Cd})$ 分别为 0.005~0.086、0.008~0.482、0.005~0.153 和 0.008~0.159 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 分布规律为: 穗上茎叶>穗下茎叶>根>籽粒. 对照组区和试验组 1~3 区玉米

根 $\omega(\text{Pb})$ 分别为 1.21~5.69、0.97~17.42、1.78~22.28 和 4.88~92.83 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 玉米穗下茎叶 $\omega(\text{Pb})$ 分别为 0.55~4.91、0.62~3.66、0.86~3.34 和 0.61~13.61 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 玉米穗上茎叶 $\omega(\text{Pb})$ 分别为 1.00~1.68、0.92~2.74、1.30~2.85 和 0.48~5.73 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 籽粒 $\omega(\text{Pb})$ 分别为 0.002~0.012、0.006~0.086、0.009~0.163 和 0.003~0.153 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 分布规律为: 根>穗下茎叶>穗上茎叶>籽粒. 总体来看,玉米植株不同部位吸收 Cd、Pb、Zn 和 As 的规律不同,Cd 和 Zn 在玉米植株中含量分布规律一致: 穗上茎叶>穗下茎叶>根>籽粒,表现为茎叶部的积累量更大. 而 Pb 和 As 在玉米植株中含量总体分布规律均为: 根>茎叶>籽粒,表现为根部的积累量更大,差异在于 Pb 表现为穗下茎叶>穗上茎叶,As 表现为穗上茎叶>穗下茎叶.



矩形盒底端、中横线、顶端分别表示下四分位数、中位数和上四分位数,上下边缘(短横线)分别表示 1.5IQR 范围内的最大和最小值;空心圆点表示均值;实心圆点表示超出 1.5IQR 范围异常值;下同

图 1 各试验区玉米植株不同部位 Cd 含量对比

Fig. 1 Comparison of Cd content in different parts of maize plants in each test area

2.1.2 不同玉米品种植株 Cd、Pb、Zn 和 As 含量差异分析

由图 5 可知,不同玉米品种植株(根、茎叶和籽粒)Cd 含量存在显著差异($P<0.05$). 其中茎叶部 Cd 含量(穗下与穗上茎叶平均值)超过《饲料卫生

标准》(GB 13078-2017)植物性饲料原料标准(1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的玉米品种为: 试验组 1 区的 C8、C13、C15~C17 和 C19~C21, 试验组 2 区的 C8、C15、C17 和 C19~C21, 试验组 3 区的 C2、C4~C8、C12、C15~C17 和 C19~C21. 表明随着土壤中 Cd 全量的

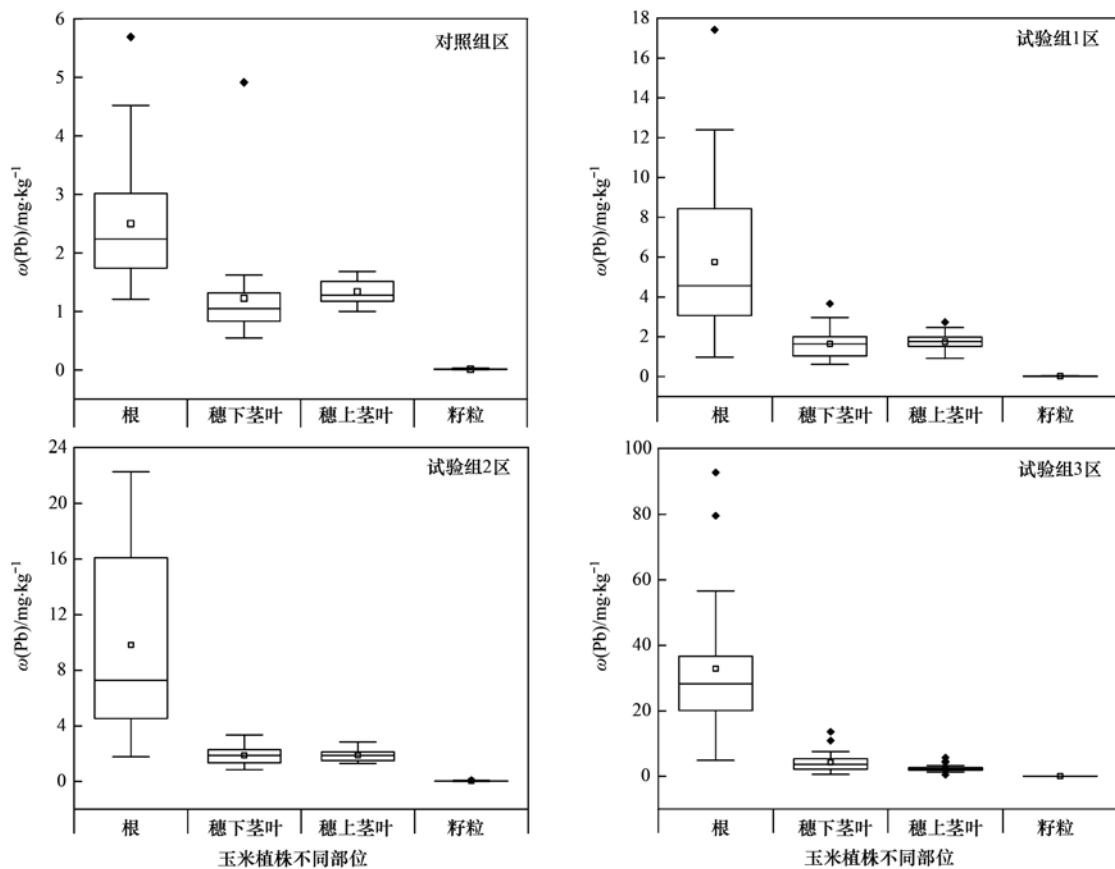


图2 各试验区玉米植株不同部位 Pb 含量对比

Fig. 2 Comparison of Pb content in different parts of maize plants in each test area

增高,上述14个品种在土壤Cd胁迫条件下,植株茎叶部对Cd的积累量也随之增加且明显高于其他品种(C1、C3、C9~C11、C14、C18和C22),表现出茎叶部高积累特性.而籽粒Cd含量超过《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2017)谷物Cd限值($0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的玉米品种为:试验区1区C20,试验区3区C8和C15,表明这3个品种由茎叶向籽粒转运的Cd含量高于其他品种,表现出籽粒高积累特性.由图6可知,各试验组不同玉米品种茎叶部Pb含量均未超过《饲料卫生标准》(GB 13078-2017)饲草、粗饲料及其加工产品限值 $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,籽粒Pb含量均未超过谷物Pb限值 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.大量的Pb主要集中在根部,少量的Pb通过根部向茎叶部运输、茎叶部向籽粒再转运.但C1、C3~C9、C11~C13、C17和C20等玉米品种茎叶和籽粒在土壤Pb胁迫条件下对Pb呈现高积累趋势.总体来看,不同玉米品种籽粒Cd和Pb含量高低与茎叶Cd和Pb含量高低趋势基本保持一致,说明籽粒Cd和Pb含量更多取决于地上部对Cd和Pb的积累和转运程度,而并非根部的吸收富集程度.籽粒的积累程度远低于茎叶和根部,则主要受控于植物营养和繁殖器官为适应Cd和Pb引起的毒性效应而进化的复杂防御机制.由图7可知,各试验区籽粒 $\omega(\text{Zn})$

均维持在正常水平(小于 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),试验组籽粒Zn含量略高于对照组,而试验区1~3区间籽粒Zn含量差异不大,表明在土壤Zn含量增高条件下,不同玉米品种对Zn的吸收量均能保持在满足生长的阈值范围内.由图8可知,各试验组供试玉米品种茎叶 $\omega(\text{As})$ 维持在较低水平 $0.09 \sim 0.71 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,远低于饲草原料干草及其加工产品限值 $4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;籽粒 $\omega(\text{As})$ 维持在较低水平 $0.003 \sim 0.038 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,远低于谷物限值 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,品种间植株地上部(茎叶、籽粒)As含量差异不大,表现为各玉米品种本身对As的低积累特性.

2.2 不同玉米品种籽粒重金属Cd和Pb含量的聚类分析

由于试验区22个玉米品种籽粒As含量均维持在较低水平(远低于标准谷物限值),故主要针对研究区不同玉米品种籽粒Cd和Pb进行聚类分析.图9和图10分别为采用系统聚类分析方法对22个玉米品种籽粒Cd和Pb含量的聚类分析结果.对照组区和试验区1~3区Cd低积累类群(I)、中等积累类群(II)和高积累类群(III)玉米籽粒 $\omega(\text{Cd})$ 分别为 $0.0111 \sim 0.0246$ 、 $0.0213 \sim 0.0671$ 和 $0.0323 \sim 0.166 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;Pb低积累类群(I)、中等积累类群(II)和高积累类群(III)玉米籽粒 $\omega(\text{Pb})$ 分别为

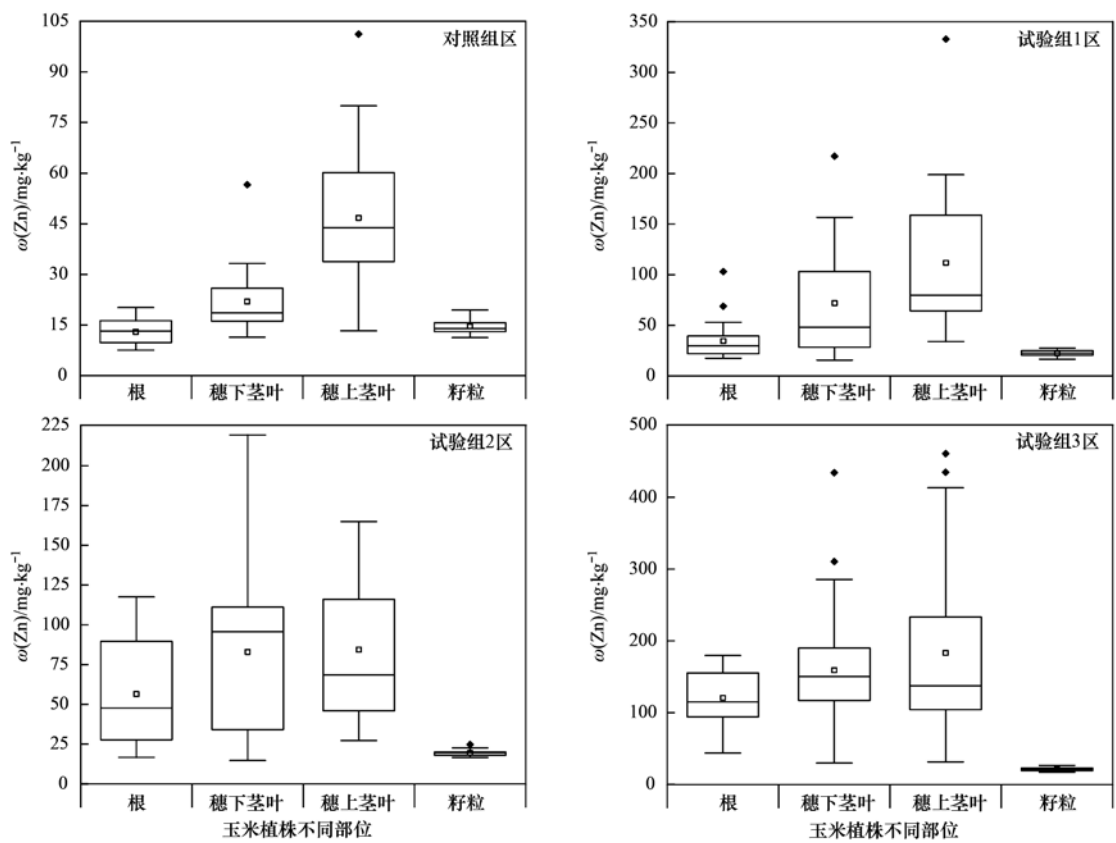


图3 各试验区玉米植株不同部位 Zn 含量对比

Fig. 3 Comparison of Zn content in different parts of maize plants in each test area

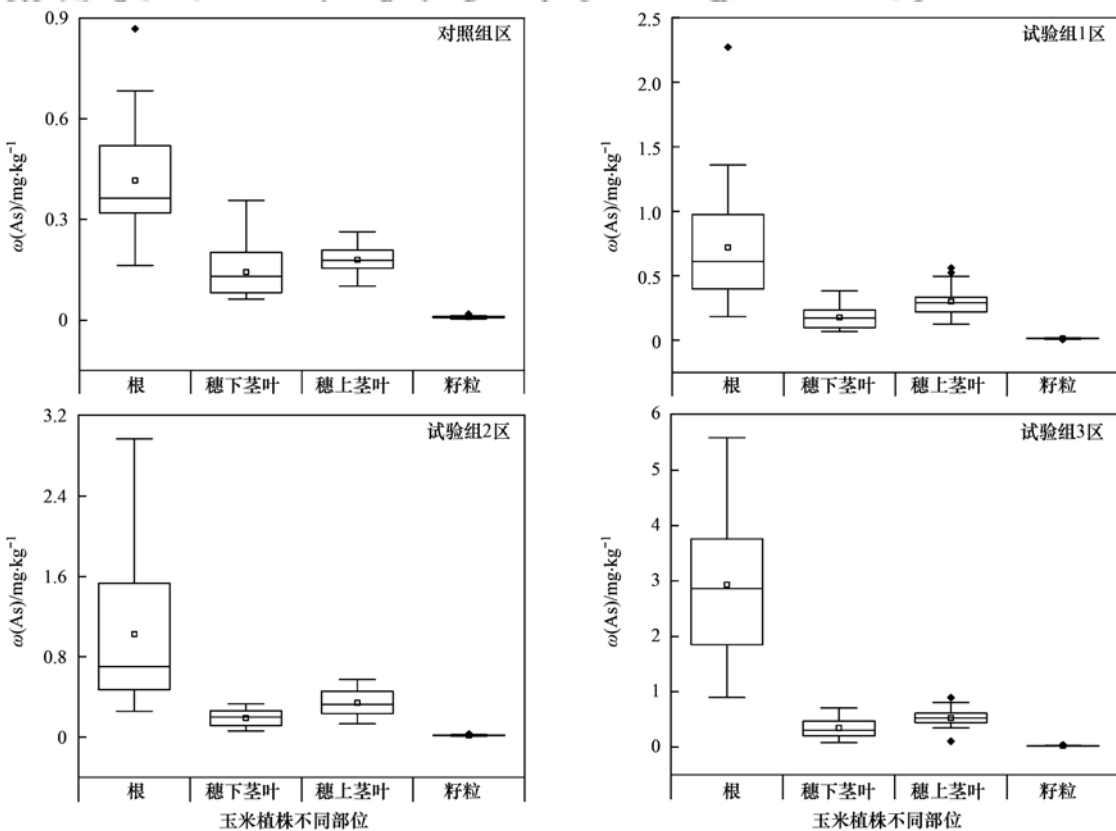
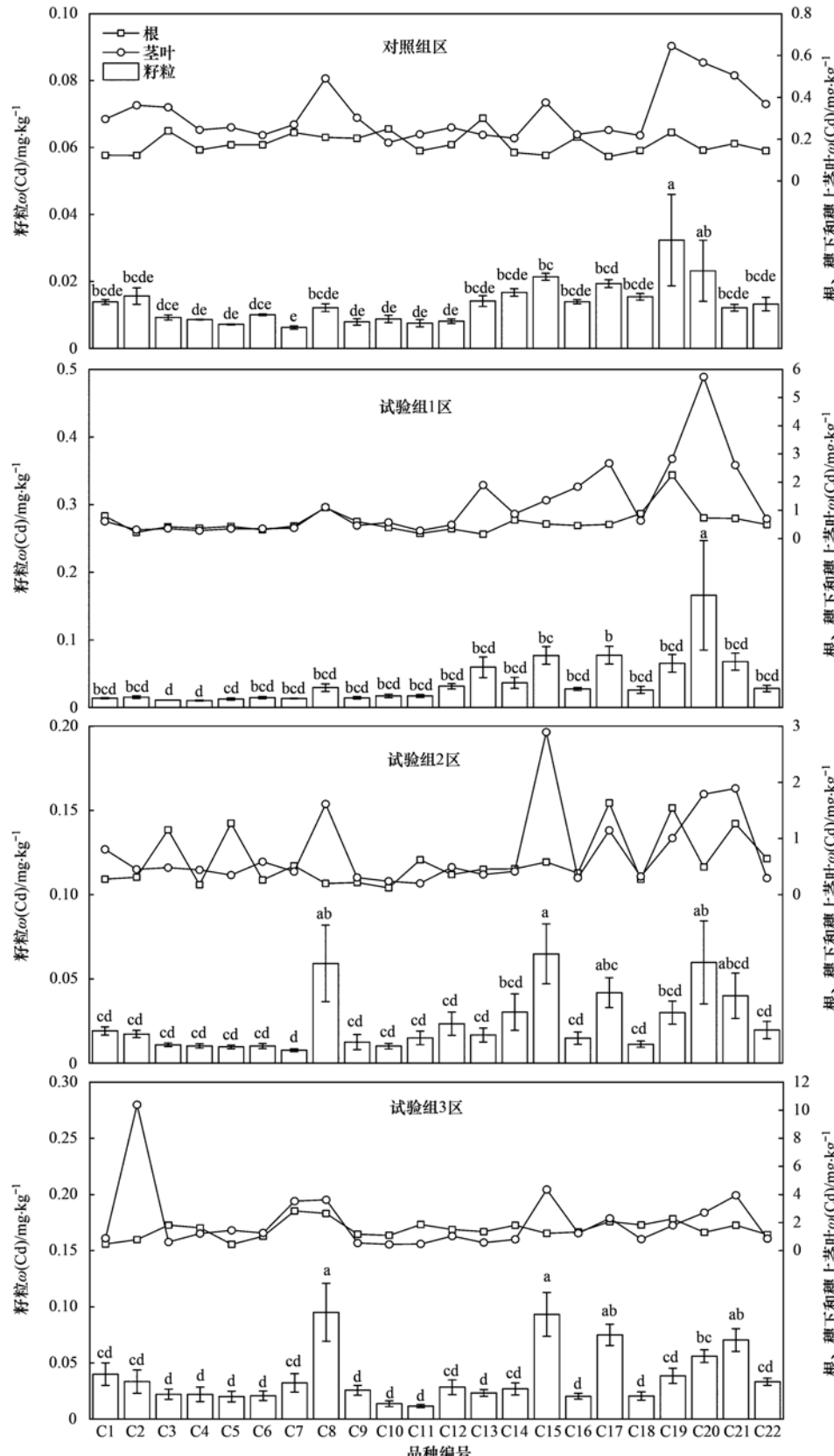


图4 各试验区玉米植株不同部位 As 含量对比

Fig. 4 Comparison of As content in different parts of maize plants in each test area



不同小写字母表示不同玉米品种籽粒重金属含量差异显著 ($P < 0.05$), 下同

图 5 各试验区不同玉米品种植株各部位 Cd 含量

Fig. 5 Cd content in different parts of maize varieties in each test area

0.008 43 ~ 0.030 7、0.017 8 ~ 0.072 9 和 0.027 4 ~ 0.098 8 mg·kg⁻¹. 同一品种在 4 组不同污染含量条

件下籽粒 Cd 和 Pb 积累特性表现出明显的差异性, Cd 和 Pb 低积累品种是一个相对概念, 随着各试验

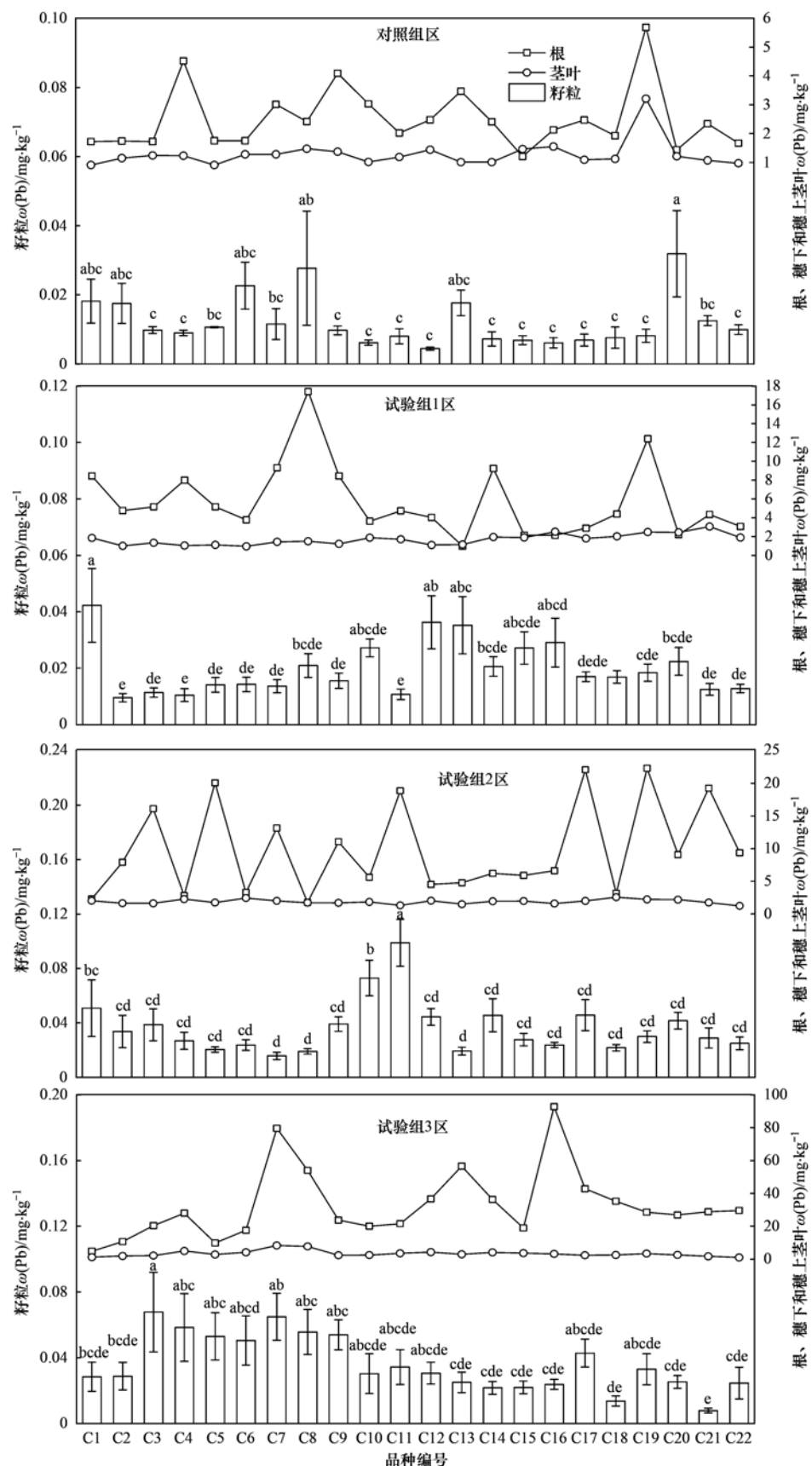


图 6 各试验区不同玉米品种植株各部位 Pb 含量

Fig. 6 Pb content in different parts of maize varieties in each test area

小区土壤 Cd 和 Pb 含量的依次增加,低积累类群与高积累类群的稳定性逐渐显现. 故考察一个品种的 Cd 和 Pb 低积累特性,要考虑该品种在不同污染浓度条件下低积累的稳定性. 本研究综合不同玉米品

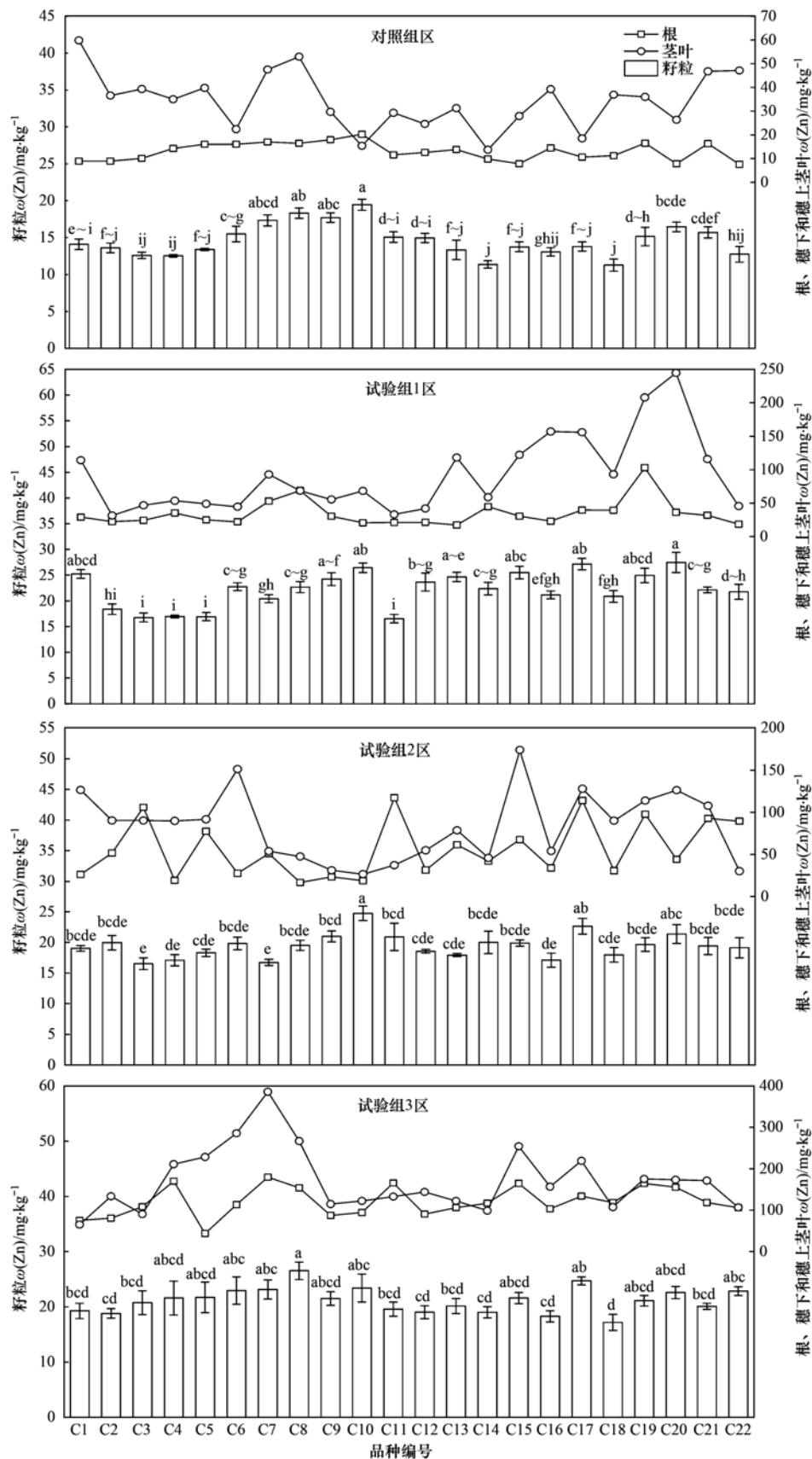


图 7 各试验区不同玉米品种植株各部位 Zn 含量

Fig. 7 Zn content in different parts of maize varieties in each test area

种在对照组区和试验组 1~3 区聚类分析结果,选择在对照组区和试验组 1~3 区结果一致的品种

作为优选低积累类群,其中 C1~C7、C9~C12、C16、C18 和 C22 属于籽粒 Cd 低积累类群玉米品

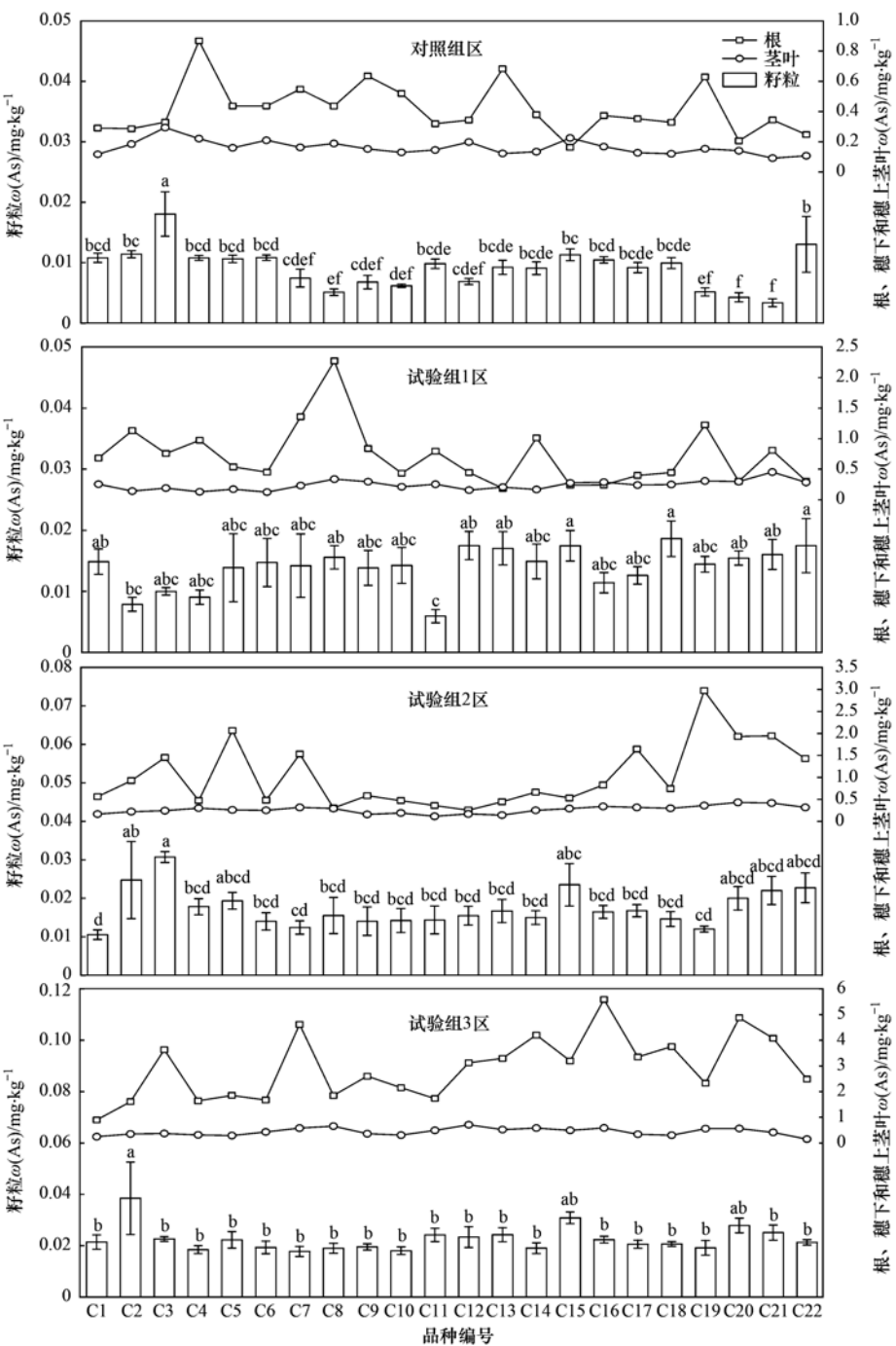


图8 各试验区不同玉米品种植株各部位 As 含量

Fig. 8 As content in plant parts of different maize varieties in each test area

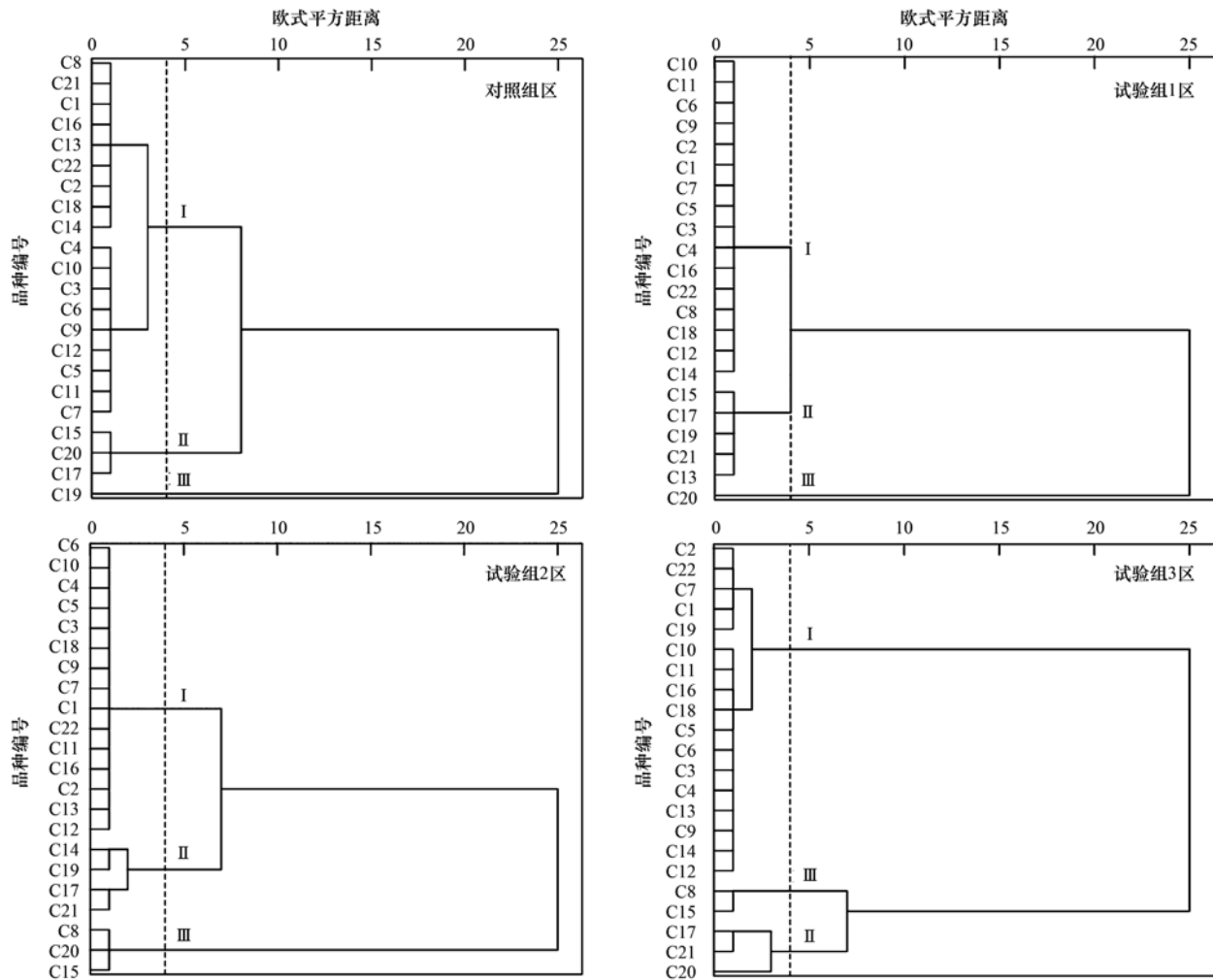
种,C14、C18、C19、C21 和 C22 属于籽粒 Pb 低积累类群玉米品种,而 C18 和 C22 同时为 Cd 和 Pb 低积累类群的玉米品种,可作为籽粒 Cd 和 Pb 复合低积累的优选品种.

2.3 不同玉米品种对 Cd 和 Pb 的富集和转运特性分析

2.3.1 不同玉米品种对 Cd 的富集和转运特性分析

由图 11 可知,供试的 22 个玉米品种不同部位 Cd 富集和转运系数具有显著差异($P < 0.05$). 对照组区和试验组 1~3 区玉米根部 BCF_{Cd} 分别为 0.216

~0.436、0.057~1.472、0.028~0.640 和 0.114~0.620; 茎叶 BCF_{Cd} 分别为 0.216~1.683、0.043~1.791、0.036~0.515 和 0.051~1.082; 籽粒 BCF_{Cd} 分别为 0.012~0.059、0.006~0.091、0.002~0.031 和 0.002~0.023. 玉米植株各部位富集 Cd 能力为: 茎叶 > 根 > 籽粒. 对照组区、试验组 1~3 区玉米茎叶 TF_{Cd} 分别为 0.512~4.955、0.352~4.470、0.244~4.949 和 0.132~2.657; 籽粒 TF_{Cd} 分别为 0.027~0.173、0.017~0.387、0.008~0.298 和 0.006~0.086. 玉米植株地上部转运 Cd 能



虚线表示欧氏平方距离取值, I、II 和 III 表示系统聚类别

图9 各试验区不同玉米品种籽粒 Cd 含量聚类分析

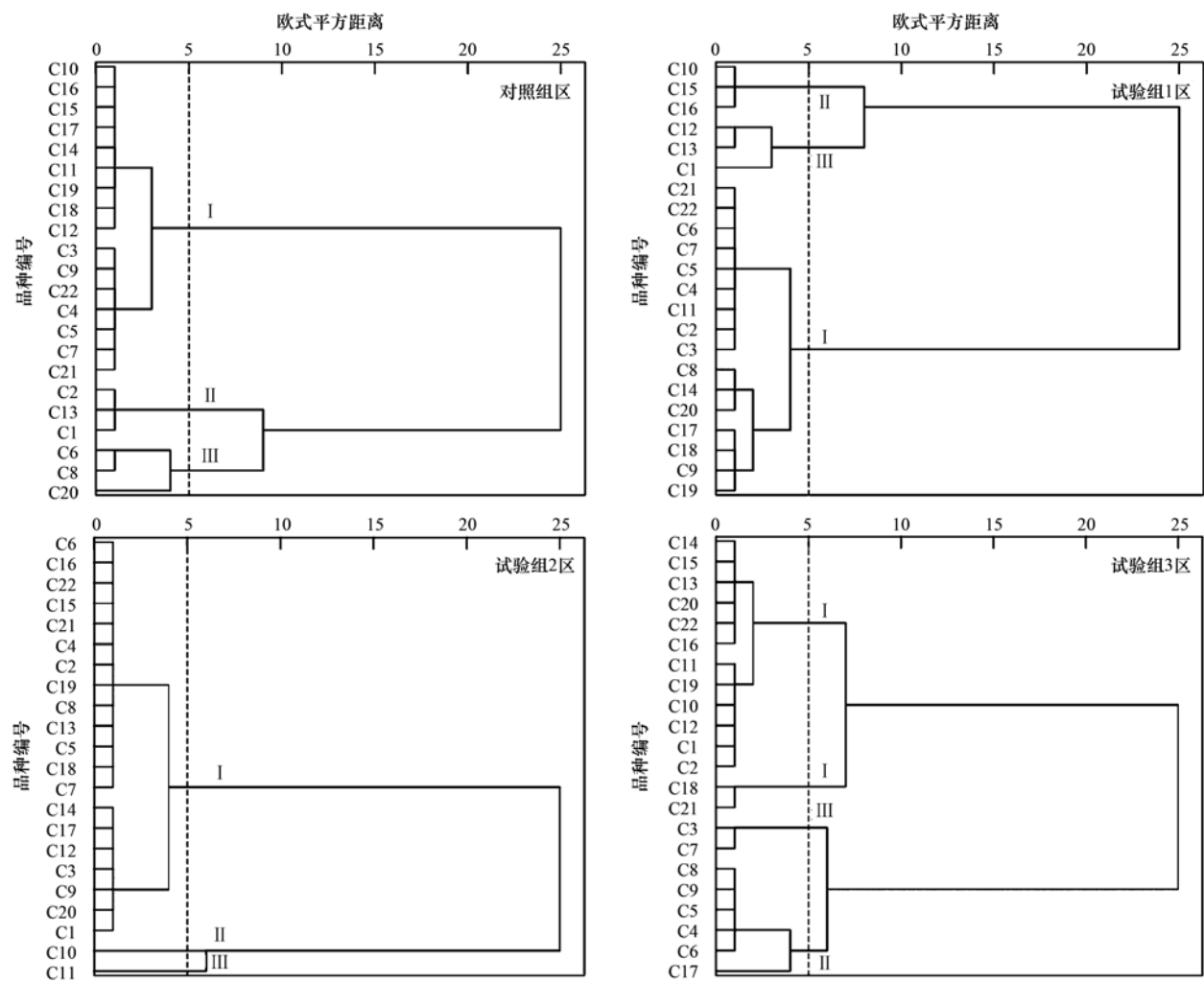
Fig. 9 Cluster analysis of Cd content in different maize varieties in each test area

力为: 茎叶 > 籽粒. 对于低积累作物来说, 富集系数要比单纯植物地上部重金属含量更为重要^[12], 为考察玉米品种在不同污染含量条件下的综合抗性, 本研究将同时满足: ①籽粒 Cd 含量未超过国家食品安全标准限值、茎叶 Cd 含量未超过国家饲料卫生标准限值的品种; ②聚类分析籽粒为 Cd 低积累类群的品种; ③玉米茎叶富集和转运系数较低的品种 (BCF_{Cd} 平均值 < 1、 TF_{Cd} 平均值 < 1); ④玉米籽粒富集和转运系数较低的品种 (BCF_{Cd} 平均值 < 0.1、 TF_{Cd} 平均值 < 0.1) 作为筛选条件; 筛选出 C3、C11 和 C18 为 Cd 低积累优选品种.

2.3.2 不同玉米品种对 Pb 的富集和转运特性分析

由图 12 可知, 供试的 22 个玉米品种不同部位 Pb 富集和转运系数具有显著差异 ($P < 0.05$). 对照组区、试验组 1~3 区玉米根部 BCF_{Pb} 分别为 0.020 ~ 0.080、0.003 ~ 0.112、0.005 ~ 0.087 和 0.008 ~ 0.139; 茎叶 BCF_{Pb} 分别为 0.008 ~ 0.069、0.001 ~ 0.023、0.001 ~ 0.020 和 0.001 ~ 0.016; 籽粒 BCF_{Pb}

分别为 0.000 1 ~ 0.000 7、0.000 03 ~ 0.000 56、0.000 04 ~ 0.000 48 和 0.000 002 ~ 0.000 032. 玉米植株各部位富集 Pb 能力为: 根 > 茎叶 > 籽粒. 对照组区、试验组 1~3 区玉米茎叶 TF_{Pb} 分别为 0.213 ~ 1.104、0.077 ~ 1.179、0.071 ~ 1.016 和 0.045 ~ 0.282; 籽粒 TF_{Pb} 分别为 0.001 ~ 0.022、0.001 ~ 0.036、0.001 ~ 0.022 和 0.000 3 ~ 0.005 8. 玉米植株地上部转运 Pb 能力为: 茎叶 > 籽粒. 总体来看, 研究区玉米植株各部位 Pb 富集和转运系数远低于 Cd, 本研究将同时满足: ①籽粒 Pb 含量未超过国家食品安全标准限值、茎叶 Pb 含量未超过国家饲料卫生标准限值的品种; ②聚类分析籽粒为 Cd 低积累类群的品种; ③玉米茎叶富集和转运系数较低的品种 (BCF_{Pb} 平均值 < 1、 TF_{Pb} 平均值 < 1); ④玉米籽粒富集和转运系数较低的品种 (BCF_{Pb} 平均值 < 0.01、 TF_{Pb} 平均值 < 0.01) 作为筛选条件; 筛选出 C14、C18、C19、C21 和 C22 为 Pb 低积累优选品种.



虚线表示欧氏平方距离取值，I、II 和 III 表示系统聚类类别

图 10 各试验区不同玉米品种籽粒 Pb 含量聚类分析

Fig. 10 Cluster analysis of Pb content in grains of maize varieties in each test area

2.4 玉米植株不同部位重金属元素主成分分析

为进一步解析玉米植株各部位重金属来源和元素间相关性,对各试验区玉米植株不同部位重金属含量进行主成分分析. 采用 KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 和 Bartlett (Bartlett's test of sphericity) 法对玉米根部、穗下茎叶、穗上茎叶和籽粒中重金属含量的原数据进行检验,KMO 值分别为 0.681、0.760、0.566 和 0.625,均大于最小值 0.5,Bartlett 球度检验的相伴概率均为 0.000,小于显著性水平 0.05,表示重金属数据适合进行主成分分析^[13]. 由图 13 可知,玉米植株根部、穗下茎叶、穗上茎叶和籽粒重金属元素分别提取了 3 个特征值成分,各部位主成分分别累积解释了总方差的 86.04%、82.80%、70.42% 和 70.35%,表明对 3 个主成分进行分析可以得到 Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Ni 和 Zn 这 8 种重金属含量数据的大部分信息. 玉米根部第一、第二和第三主成分中具有较高载荷的重金属元素分别为 As、Pb、Cd、Zn 和 Cu (51.82%), Ni、Cr 和 Hg

(23.90%), Hg 和 Cr (10.32%); 玉米穗下茎叶第一、第二和第三主成分中具有较高载荷的重金属元素分别为 Pb、As、Cd、Zn 和 Cr (45.13%), Hg、Ni、Cu 和 Cr (27.84%), Cu 和 Cr (9.84%); 玉米穗上茎叶第一、第二和第三主成分中具有较高载荷的重金属元素分别为 Pb、Zn、As 和 Cd (33.97%), Cu、Ni、Cr 和 Hg (24.66%), Ni、Cu、Hg、Cr 和 Cd (11.79%); 玉米籽粒第一、第二和第三主成分中具有较高载荷的重金属元素分别为 Zn、As、Cu、Cd 和 Pb (33.51%), Ni、Cr 和 Pb (21.81%), Hg 和 Cr (15.02%). 总体来看,第一主成分主要支配玉米植株中 Cd、Pb、Zn 和 As 的来源,这 4 种元素的相关性较强,具有一定的同源性,主要受土壤中 Cd、Pb、Zn 和 As 含量污染超标的影响较为深刻,第一主成分代表了矿山采选和尾矿堆存带来的人为来源. 第二和第三主成分主要支配玉米植株中 Hg、Ni、Cr 和 Cu 的来源,这些元素在土壤中的含量维持在正常水平,受外源污染的影响较小,主要来源于成土母质和风化产物

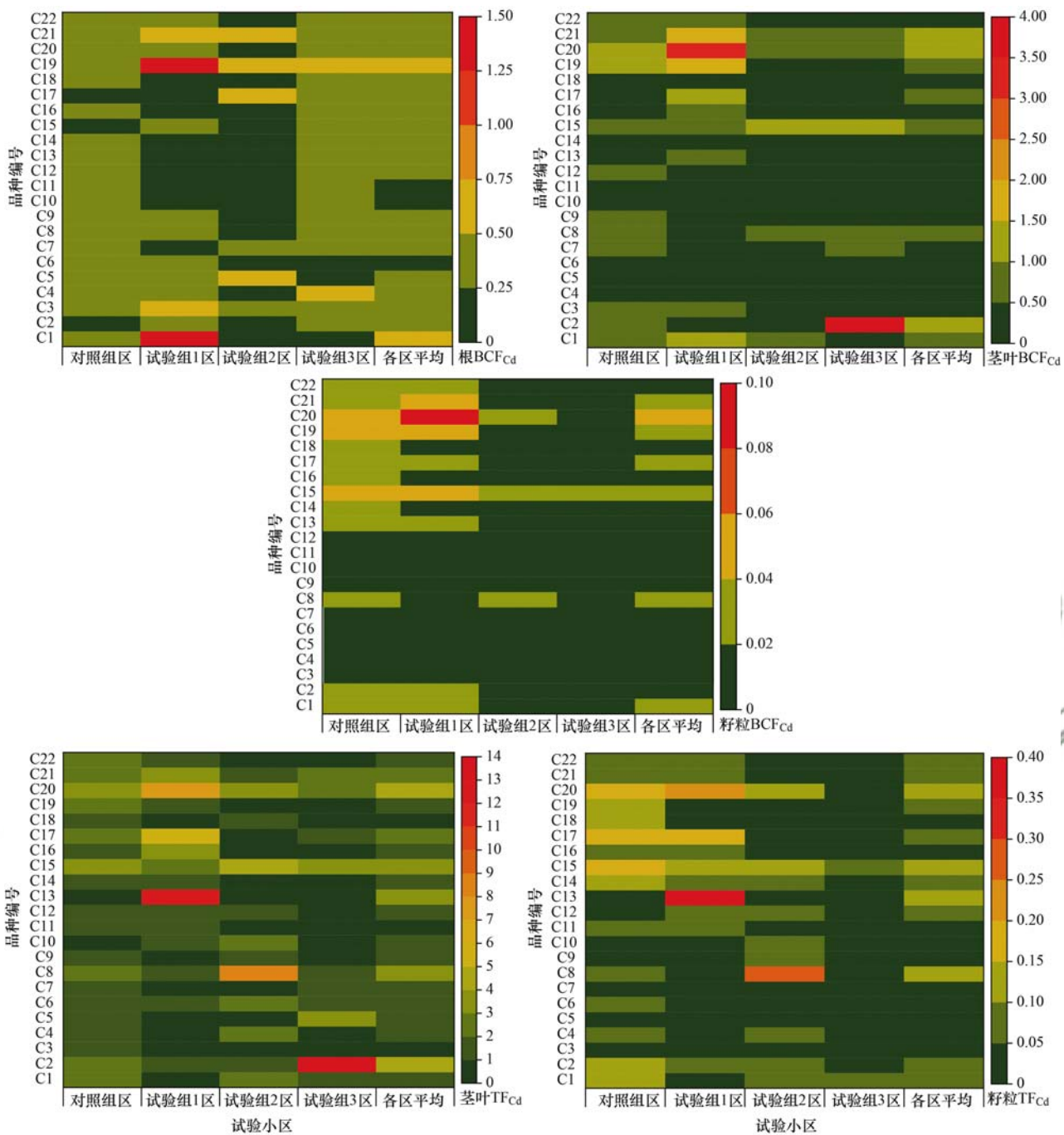


图 11 各试验区不同玉米品种各部位 Cd 富集和转运系数热图

Fig. 11 Heat maps of Cd enrichment and transport coefficients in different parts of maize varieties in each test area

累积的重金属影响,第二和第三主成分代表了自然来源. 重金属元素间的距离反映了元素含量间的相关性^[14],玉米植株各部位 Cd、Pb、Zn 和 As 之间的距离均较近,显示出较强的相关性,相对而言,Ni 和 Cr 也具有较强相关性,与 Cd、Pb、Zn 和 As 表现出较强的异源性. 而 Cu 在根部与籽粒中与 Cd、Pb、Zn 和 As 间的距离较近,以及 Cu 在茎叶部与 Hg 间的距离较近,显示出一定的相关性. Hg 在籽粒中与其他元素距离较远,表现出一定的负相关性.

2.5 玉米植株不同部位重金属元素含量相关性分析

研究区位于豫西钨钼铅锌多金属成矿区,矿区

周边农田土壤中重金属污染往往伴生,存在复杂的交互作用,Cd、Pb、Zn、As、Cu、Ni、Cr 和 Hg 相互作用对植物生长、植物体内元素的吸收转运及其生理生化方面具有影响,可能是协同效应,也可能是拮抗效应^[15]. 图 14 是对照组区和试验组 1~3 区玉米植株根、穗下茎叶、穗上茎叶和籽粒 Cd、Pb、Zn、As、Cu、Cr、Ni 和 Hg 元素间的相关性分析结果. 总体来看,玉米植株各部位吸收重金属元素的相关性趋势明显,不同部位对重金属元素的吸收具有一定的差异性,根部吸收各元素的正相关性高于茎叶和籽粒. 其中玉米植株各部位对 Cd、Pb、Zn 和 As 元

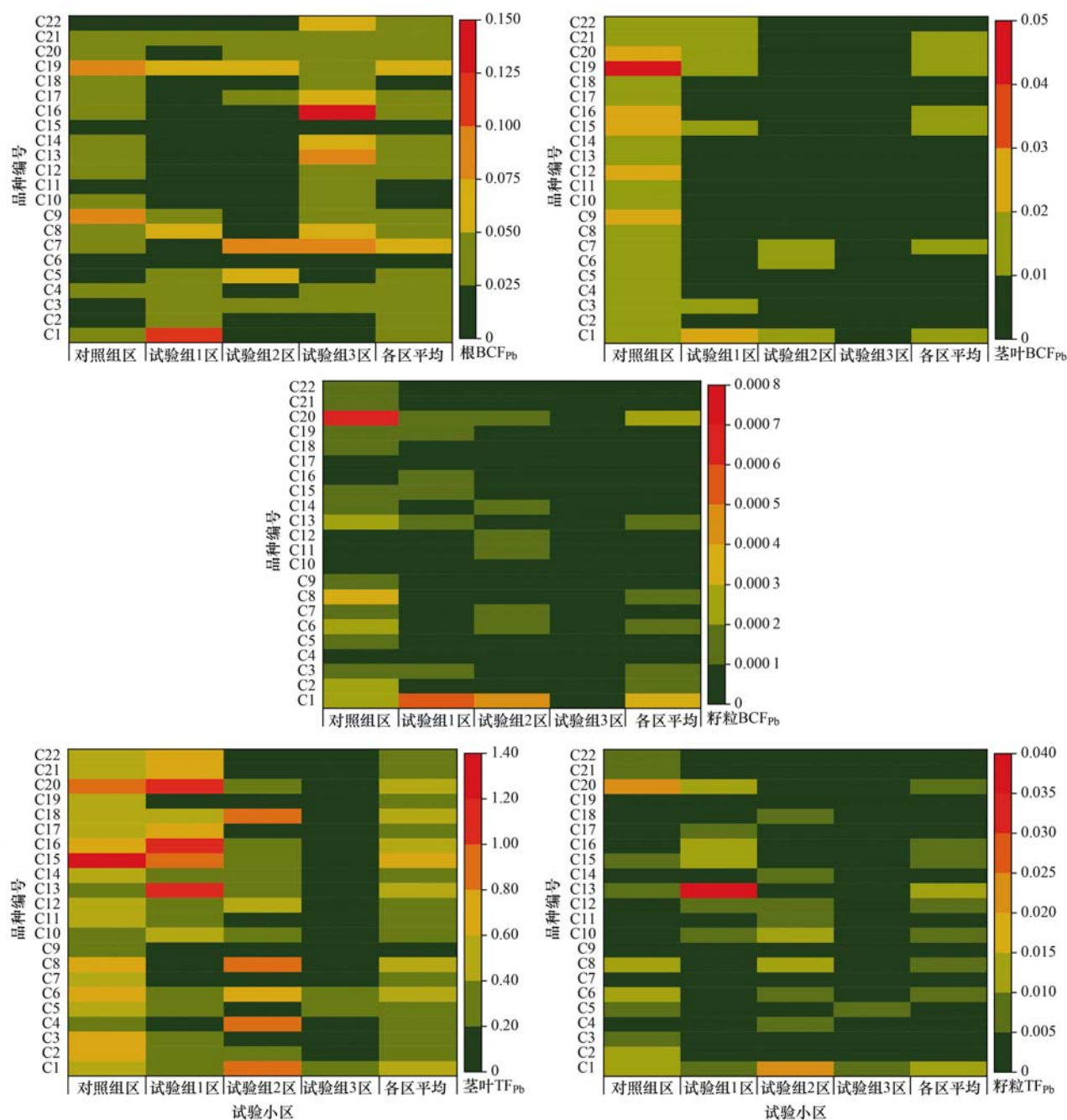


图 12 各试验区不同玉米品种各部位 Pb 富集和转运系数热图

Fig. 12 Heat maps of Pb enrichment and transport coefficients in different parts of maize varieties in each test area

素的吸收具有极显著正相关性 ($P < 0.01$). Cu 在玉米不同部位与 Cd、Pb、Zn 和 As 元素的相关性具有一定的差异性, 表现为: 在玉米根部和籽粒中 Cu 与 Cd、Pb、Zn 和 As 元素具有极显著正相关性 ($P < 0.01$), 在玉米茎叶中 Cu 与 Cd、Pb、Zn 和 As 元素相关性较弱 ($P > 0.05$). Cr、Ni 和 Hg 元素在玉米根部和茎叶中具有显著正相关性 ($P < 0.05$), 而 Hg 与 Cd、Pb、Zn 和 As 在玉米地上部呈现明显的负相关性. Cr、Ni 和 Hg 元素在玉米籽粒中具有一定的差异性, 表现为: Cr 和 Ni 元素在玉米籽粒中具有极显著正相关性 ($P < 0.01$), 而 Hg 与 Cd、Pb、Zn、As、

Ni 和 Cr 元素在玉米籽粒中呈现一定的负相关性. 以上结果表明, Cd、Pb、Zn 和 As 元素在植物体内的运输机制具有共同之处, 从玉米根部向地上部迁移方面表现出协同效应, Cr 和 Ni 元素亦是如此. 而在茎叶中 Hg 与 Cd、Pb、Zn 和 As 元素, 以及籽粒中 Hg 与 Cd、Pb、Zn、As、Ni 和 Cr 元素均表现出一定的拮抗作用. Cd、Pb、As、Ni、Cr 和 Hg 不是植物生长所必需的元素, 但它们在植物中的运输是由 Zn、Fe、Mn、Cu、Ca 和 Mg 等必需元素的转运体介导的^[16], 通过占用特异度低的必需元素的离子通道进入植物细胞, 再通过转运通道与转运蛋白结合, 以

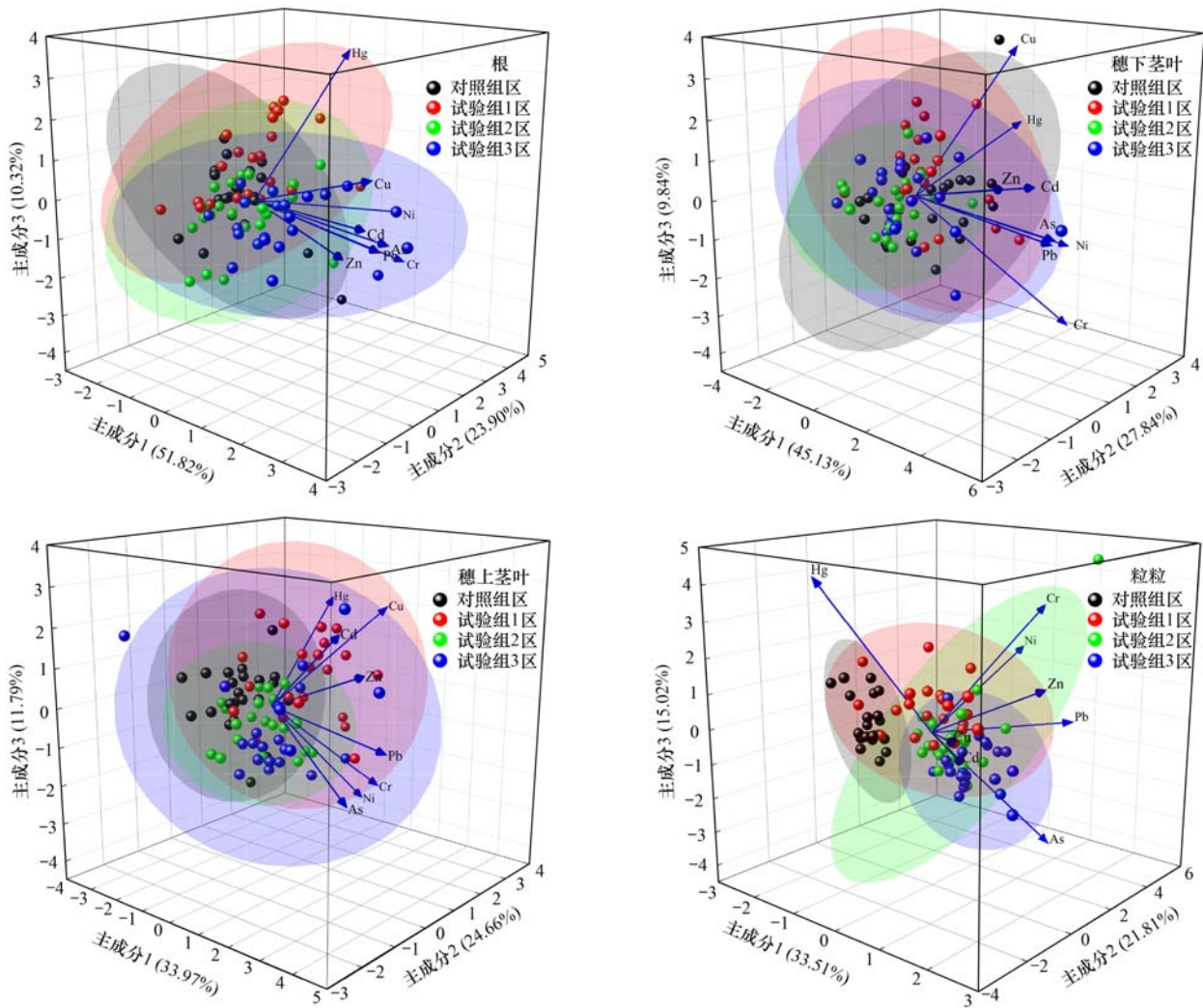


图 13 供试玉米品种不同部位重金属元素主成分分析

Fig. 13 Principal component analysis of heavy metal elements in different parts of maize varieties

共质体途径进入根表皮细胞^[17]. 有研究表明, 由于重金属元素化学性质的相似性和代谢途径的关联性, 植物在吸收和运输 Cd、Pb、As、Ni、Cr 和 Hg 等非必需元素与 Zn、Fe、Mn、Cu、Ca 和 Mg 等基本矿质营养元素的吸收和转运能力密切相关, 基本矿质营养元素的转运体参与了离子态重金属元素的摄取和转运^[18], 且类似亲缘关系的转运体已被确定特征^[19]. 虽然 Zn 和 Cu 是植物生长必需的微量元素之一, 在植物生长过程中起着重要的作用, 但是土壤中 Zn 和 Cu 过量也会对植物造成一定的毒害^[20].

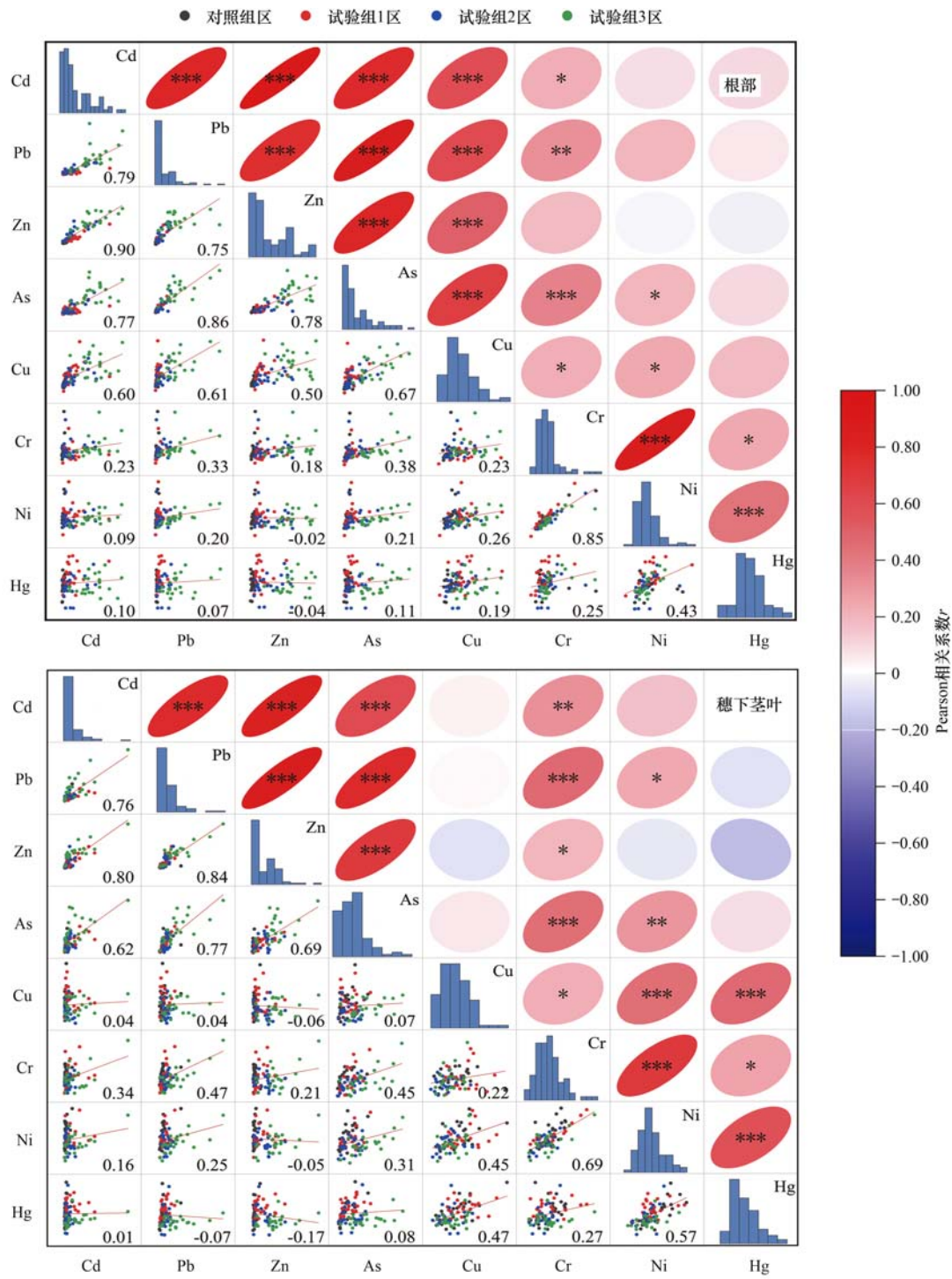
3 讨论

玉米植株各部位 Cd、Pb、Zn 和 As 含量分布规律不尽相同, 不同组织部位对重金属转运和区隔能力的差异是导致其富集能力不同的原因之一. 植物对重金属的富集能力一般为: 地下部分 > 地上部分、吸收器官 > 输导器官、同化器官 > 繁殖器官, 这是由于这些重金属在植物体内的转运能力相对较

弱, 重金属离子被根吸收后, 一般通过必需元素的运输途径或者离子通道转运至其他部位, 因而转运能力差的离子地上积累就少^[21]. 低积累作物从土壤中吸收的 Cd、Pb 和 As 只有很少量转运到籽粒中, 大部分 Cd、Pb 和 As 被截留在根部以及茎叶部分, 植物通过细胞的解毒作用、有毒重金属的代谢拮抗作用, 降低 Cd、Pb 和 As 向籽粒的转运, 实现对营养器官和繁殖器官的保护^[22]. ①本研究中 Cd 在茎叶部的积累高于根部, 且穗上茎叶明显高于穗下茎叶, 这与杜彩艳等^[23]的研究结论一致(茎叶 > 根 > 籽粒), 与陈建军等^[24]的研究结论不一致(根 > 茎叶 > 籽粒), 分析 Cd 在植物各部位含量除了与作物本身不同器官的积累特性有关, 也与 Cd 在土壤中环境活性和地上部的蒸腾作用密切相关. 研究区土壤中离子交换态 Cd 含量与玉米植株根部、穗下茎叶、穗上茎叶和籽粒 Cd 含量相关系数 r 分别为 0.68**、0.39**、0.24* 和 0.23*, 呈极显著正相关 ($P < 0.01$) 和显著正相关 ($P < 0.05$), 表明离子交换态

Cd 含量与玉米植株各部位 Cd 积累量密切相关. 4 个试验区土壤中 Cd 离子交换态含量分别为 0.094、0.347、0.610 和 0.941 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占全量的质量分数分别为 15.96%、19.75%、24.47% 和 25.66%, 离子交换态 Cd 含量较结合态和残余态 Cd 含量随全量的升高更为明显, 表现出很高的化学活性和迁移性, 更易被植物吸收积累, 而木质部对 Cd 的远距离运

输成为地上部 Cd 积累的关键^[25], 表现为茎叶部对 Cd 的积累量大于根部, 从而导致 22 个供试玉米品种中 3 个品种籽粒 Cd 含量超过国家食品安全标准, 14 个品种茎叶 Cd 含量超过国家饲料卫生标准. 另外, 重金属向地上部运输还受蒸腾作用的影响, 有研究认为^[26], 蒸腾作用越强, 重金属向茎叶中运输的越多, 也是导致玉米植株 Cd 含量穗上茎叶 > 穗下

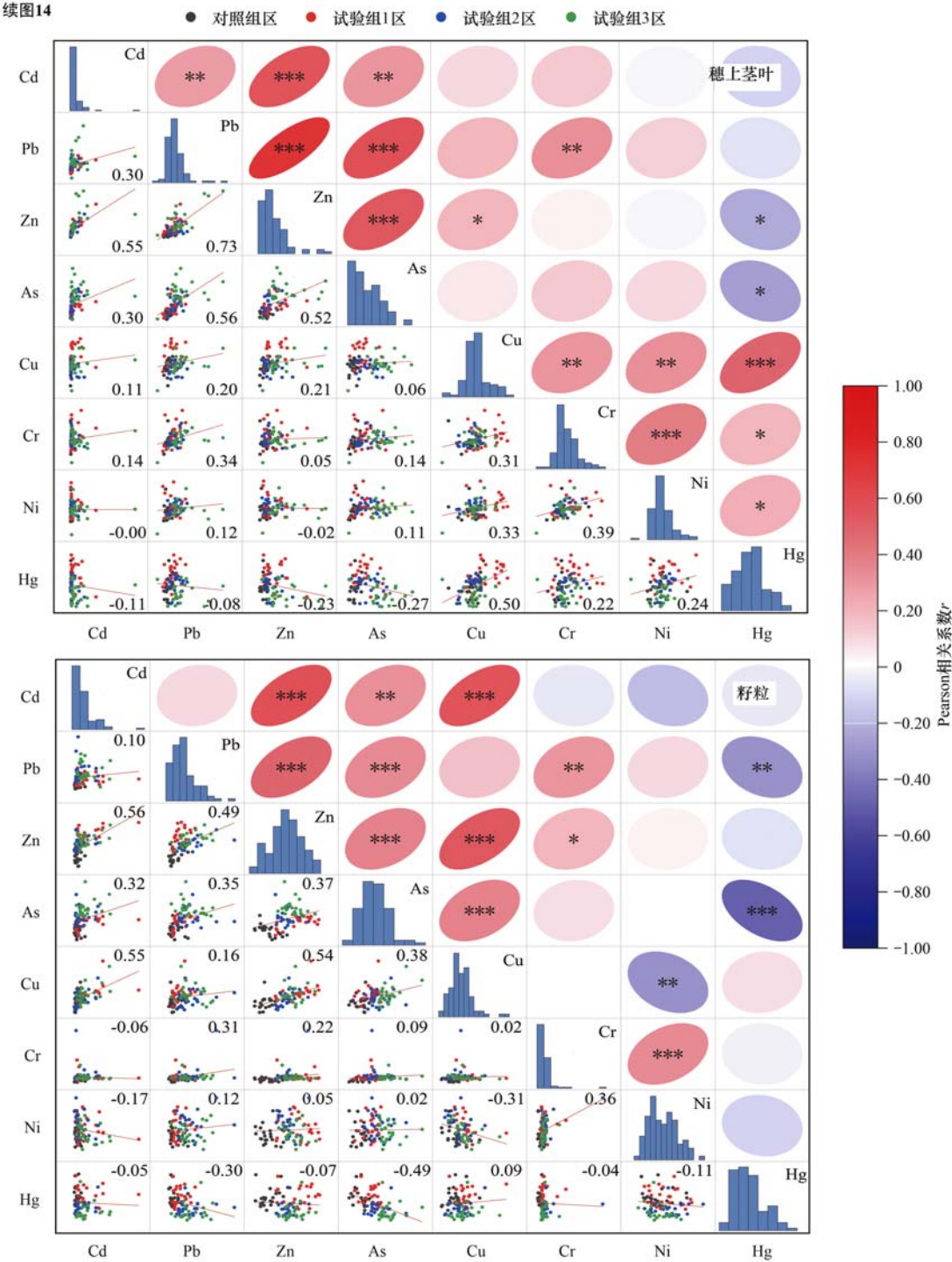


对角线为变量直方分布, 左下角为变量矩阵散点线性拟合和皮尔逊相关系数 ($n = 88$), 右上角是相关性系数 (形状表示 95% 置信椭圆, 椭圆方向表示相关性正负, 颜色表示相关系数大小) 和显著性水平 (* 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, *** 表示 $P < 0.001$)

图 14 供试玉米品种不同部位重金属元素含量相关性分析

Fig. 14 Correlation analysis of heavy metal contents in different parts of tested maize varieties

续图14



茎叶 > 根部的原因之一. ②研究区试验组 1 ~ 3 区土壤 Cd、Pb、Zn 和 As 含量均超过了风险筛选值,而玉米籽粒中积累的 Cd、Pb、Zn 和 As 含量具有显著差异,这与土壤中不同重金属元素形态含量分布规律的差异密切相关. 由图 15 可知,各试验区土壤中 Cd、Pb、Zn 和 As 随着总量的升高,离子交换态、弱结合态(碳酸盐结合态、腐殖酸结合态、铁锰氧化物结合态)、强结合态(强有机结合态)和硅酸盐残余态均有不同程度地提升,但不同重金属元素交换态、结合态和残余态的提升幅度差异明显,表现为 3 种趋势: Cd 以离子交换态、Pb 和 Zn 以结合态、As

以硅酸盐残余态提升最为明显,从形态含量分布规律可以看出 Pb、Zn 和 As 的环境活性和迁移性明显低于 Cd,这与供试玉米品种籽粒 Cd 出现超标现象,而 Pb 和 As 含量均未超过国家食品安全标准,Zn 含量维持在正常水平(小于 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的结果相一致. 籽粒中 Pb 的积累量低于限值,但由于随 Pb 全量的增加 Pb 离子交换态含量也有一定程度的提升,导致部分品种籽粒 Pb 含量接近限值,具有超标风险;而土壤中 As 含量主要以硅酸盐残余态为主,且随 As 全量的增加,As 离子交换态含量基本不变,22 个供试玉米品种籽粒 As 含量始终维持在较低水平.

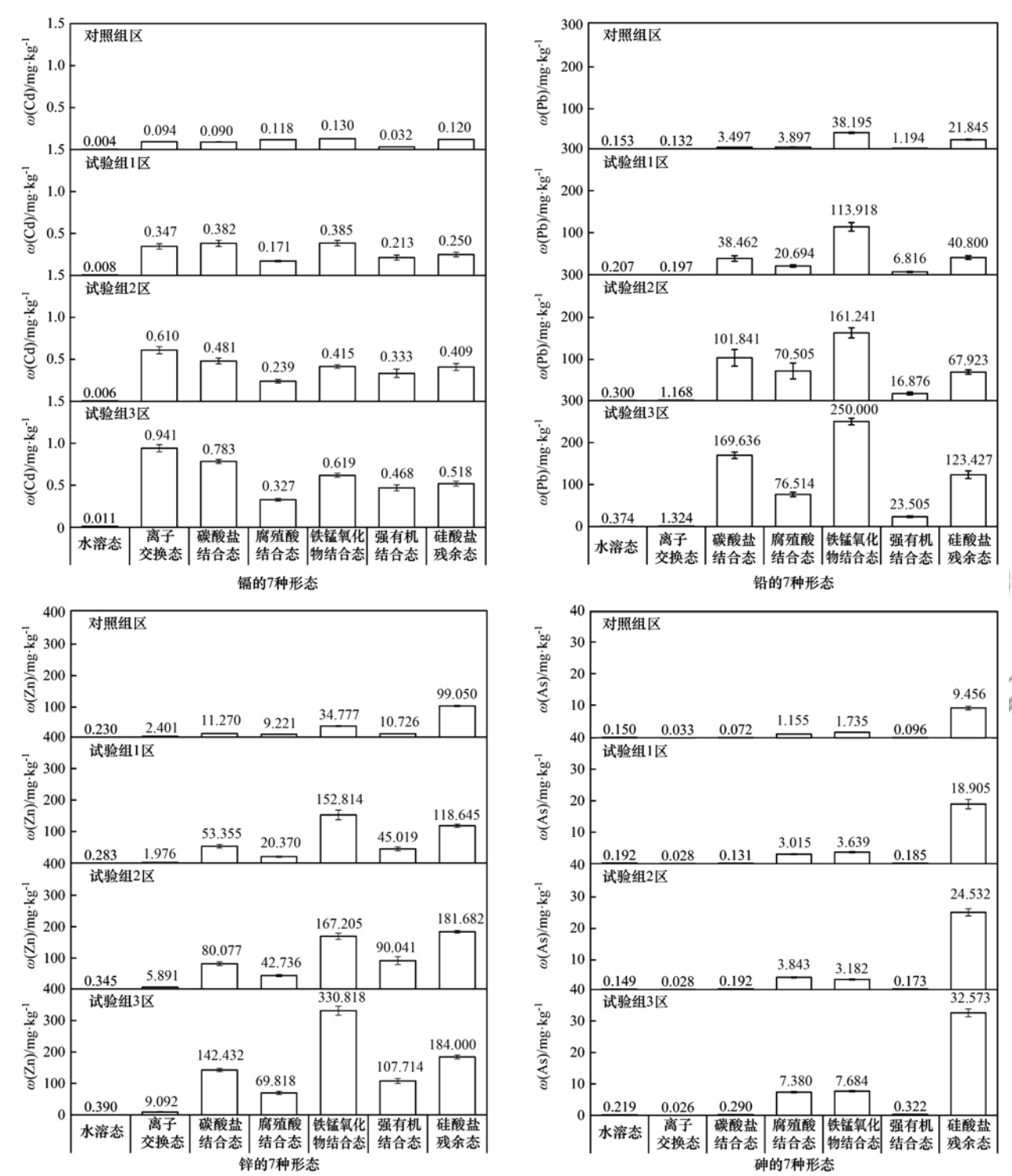


图 15 各试验区表层土壤(0~20 cm) Cd、Pb、Zn 和 As 的 7 种形态含量

Fig. 15 Seven speciation contents of Cd, Pb, Zn, and As in the topsoil (0-20 cm) of each test area

随着对照组区,试验组 1~3 区土壤重金属 Cd、Pb 全量和离子交换态含量的依次增加,22 个玉米品种对 Cd、Pb 的积累出现了明显的差异性,表现出 4 种趋势:①Cd 和 Pb 复合高积累品种,如高 Cd 高 Pb 品种 C8、C17 和 C20;②单一 Cd 或 Pb 低积累品种,如低 Cd 高 Pb 品种 C1、C9、C10 和 C11,低 Pb 高 Cd 品种 C21;③Cd 和 Pb 复合低积累品种,如低 Cd 低 Pb 品种 C18. 这与试验选取的 22 个玉米品种

遗传背景差异较大有关,不同品种玉米 Cd 和 Pb 离子吸收转运的调节过程和作用机制不同,进而造成品种间 Cd 和 Pb 含量和分布的较大差异^[27]. 本研究筛选出 C3、C11 和 C18 为 Cd 低积累优选品种, C14、C18、C19、C21 和 C22 为 Pb 低积累优选品种,叠加后筛选出 C18(先玉 335)为 Cd 和 Pb 复合低积累品种,这与孙洪欣等^[28]在河北省保定市污灌区针对华北地区 9 个玉米品种田间小区试验筛选出

先玉 335 低积累 Cd 和 Pb 潜力品种的结果一致,也进一步验证了该品种在适宜生态区 Cd 和 Pb 复合低积累的地域环境稳定性. 通常认为低积累植物对重金属的排斥机制包括两个方面,一是减少根部对重金属的吸收,二是重金属在根部通过区室化保存,限制向地上部转移^[29]. 运用分子标记技术(SSR)确定重金属低积累特性的稳定性和各种质间的亲缘关系,为重金属低积累作物育种亲本的选配提供了依据^[30],但植物对污染物的吸收、积累及其解毒机制等一系列基础理论问题仍有待于进一步的深入研究.

土壤-农作物系统重金属累积并非简单的线性关系^[31],作物对重金属的吸收能力大小受作物本身遗传因素和外界环境条件共同调控^[32],土壤中重金属的含量和形态、土壤的理化性质和营养元素、气候条件等均能影响作物对重金属的吸收积累^[33]. 目前尚无统一筛选标准对重金属高、低积累作物品种进行区分和界定. 不同领域对重金属低积累品种的界定有不同的标准,食品安全领域侧重于强调低积累品种的农产品要符合国家安全标准,而在生态修复领域则侧重于强调其吸收能力和富集系数要小于某一特定值. 由于目前筛选和认定重金属低积累品种的方法较多,如排序法、分级法、富集和转运系数法等,人们对 Cd 和 Pb 低积累品种的筛选、认定还没有形成统一的标准. 各种方法都有一定的合理性,也有不少争论^[34]. 但相关研究都遵循一个共同的基础,即该品种即便种植于污染环境,其可食部分积累的特定污染物含量仍低于食品安全标准,可以满足安全食用和消费. 有研究认为重金属低积累品种筛选标准应包含以下 4 个方面^[35]: ①可食部位特定污染物的含量低于国家或国际的食品安全标准; ②富集系数(BCF) < 1; ③转运系数(TF) < 1; ④能够耐受污染物的毒性,其地上部生物量不受太大影响. 有研究认为低积累作物筛选除了保障重金属低积累外^[36],还应具有当地适应性、多金属抗性等特征,且筛选出的作物的可食用部分对重金属表现出低积累特性要能够重复出现(大田三季以上)^[37]. 但以上划定标准中关于可食部分 BCF 和 TF 小于 1 的限定过于宽泛,本研究中部分玉米品种富集和转运系数小于 1 但仍出现籽粒 Cd 含量超标现象,且供试玉米品种中 Cd 的富集和转运系数均远高于 Pb. 故笔者认为,针对不同重金属元素和不同作物类型,以保障食品安全为底线,亟需建立低积累作物品种对照优选的评价体系,且在大田条件下低积累特性应具有年际和地域环境稳定性的特征. 由于我国土壤重金属复合污染情况较多,本研究同时

考虑玉米品种对 Cd、Pb、Zn 和 As 多胁迫因素的耐受性,并通过 4 个梯度污染含量小区试验,确保筛选的低积累品种在低、中和高镉铅含量条件下, Cd 和 Pb 积累量差异相对较小,不随重金属污染物含量的差异和胁迫条件而出现超标风险,进一步验证了在轻度、中度和重度污染农田土壤中低积累品种的稳定性,对多金属矿区周边复合污染农田土壤安全利用工作具有现实意义.

4 结 论

(1) 玉米植株不同部位 Cd 和 Zn 含量分布规律为: 穗上茎叶 > 穗下茎叶 > 根 > 籽粒; Pb 分布规律为: 根 > 穗下茎叶 > 穗上茎叶 > 籽粒; As 分布规律为: 根 > 穗上茎叶 > 穗下茎叶 > 籽粒. Cd 和 Zn 表现为茎叶部积累富集,而 Pb 和 As 表现为根部积累富集,分布规律的不同与作物本身积累特性和研究区土壤中 Cd、Pb、Zn 和 As 元素环境活性高低密切相关.

(2) 研究区玉米植株中 Cd、Pb、Zn 和 As 具有一定的同源性,主要受土壤中 Cd、Pb、Zn 和 As 污染物含量超标的影响较深,说明矿山采选和尾矿堆存带来的人为来源,而玉米植株中 Cu 元素受人为污染来源影响的程度有限;玉米植株中 Hg、Ni 和 Cr 元素间具有一定的同源性,说明成土母质和风化产物累积的自然来源.

(3) 玉米植株各部位 Cd、Pb、Zn 和 As 元素含量,以及 Cr 和 Ni 元素含量均具有极显著正相关性($P < 0.01$),表明 Cd、Pb、Zn 和 As 元素从玉米根部向地上部迁移具有一定的协同效应, Cr 和 Ni 元素亦是如此. 而玉米茎叶中 Hg 与 Cd、Pb、Zn 和 As 元素,以及籽粒中 Hg 与 Cd、Hg、As、Pb、Cr、Ni 和 Zn 元素均表现出一定的拮抗作用.

(4) 供试玉米品种在不同含量 Cd、Pb、Zn 和 As 复合污染土壤条件下,通过对照优选法筛选出 C3(秀青 74-9)、C11(滑玉 12)和 C18(先玉 335)为 Cd 低积累建议品种, C14(农玉 16)、C18(先玉 335)、C19(蠡玉 16)、C21(创玉 358)和 C22(美锋 0808)为 Pb 低积累建议品种,而 C18(先玉 335)可作为 Cd、Pb 和 As 复合低积累,且 Zn 含量维持在正常水平的优选玉米品种.

参考文献:

- [1] 黄道友,朱奇宏,朱捍华,等. 重金属污染耕地农业安全利用研究进展与展望[J]. 农业现代化研究, 2018, 39(6): 1030-1043.
Huang D Y, Zhu Q H, Zhu H H, et al. Advances and prospects of safety agro-utilization of heavy metal contaminated farmland soil [J]. Research of Agricultural Modernization, 2018, 39(6):

- 1030-1043.
- [2] 李元, 祖艳群. 重金属污染生态与生态修复[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [3] Darron V W. 玉米籽粒镉低积累基因型的筛选与相关机理的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [4] 杜志鹏, 向丹, 苏德纯. 不同 Cd 积累能力大白菜吸收转运 Cd 的差异性[J]. 生态环境学报, 2018, **27**(11): 2150-2155.
- Du Z P, Xiang D, Su D C. Difference in absorption and transform of Cd by *Brassica pekinensis* L. with different Cd accumulation ability[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, **27**(11): 2150-2155.
- [5] 王娟, 苏德纯. 基于文献计量的小麦玉米重金属污染农田修复治理技术及效果分析[J]. 农业环境科学学报, 2021, **40**(3): 493-500.
- Wang J, Su D C. Analysis of the effects of heavy metal pollution remediation technologies in wheat and maize fields based on bibliometrics[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, **40**(3): 493-500.
- [6] 林小兵, 周利军, 王惠明, 等. 不同水稻品种对重金属的积累特性[J]. 环境科学, 2018, **39**(11): 5198-5206.
- Lin X B, Zhou L J, Wang H M, et al. Accumulation of heavy metals in different rice varieties[J]. Environmental Science, 2018, **39**(11): 5198-5206.
- [7] 王怡雯, 芮玉奎, 李中阳, 等. 冬小麦吸收重金属特征及与影响因素的定量关系[J]. 环境科学, 2020, **41**(3): 1482-1490.
- Wang Y W, Rui Y K, Li Z Y, et al. Characteristics of heavy metal absorption by winter wheat and its quantitative relationship with influencing factors[J]. Environmental Science, 2020, **41**(3): 1482-1490.
- [8] 周艳, 万金忠, 李群, 等. 铅锌矿区玉米中重金属污染特征及健康风险评价[J]. 环境科学, 2020, **41**(10): 4733-4739.
- Zhou Y, Wan J Z, Li Q, et al. Heavy metal contamination and health risk assessment of corn grains from a Pb-Zn mining area[J]. Environmental Science, 2020, **41**(10): 4733-4739.
- [9] Chen Q, Wu F B. Breeding for low cadmium accumulation cereals[J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE B, 2020, **21**(6): 442-459.
- [10] Zhong T Y, Xue D W, Zhao L M, et al. Concentration of heavy metals in vegetables and potential health risk assessment in China[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2018, **40**(1): 313-322.
- [11] Zhang Y Z, Fang B H, Teng Z N, et al. Screening and verification of rice varieties with low cadmium accumulation[J]. Agricultural Science & Technology, 2019, **20**(3): 1-10.
- [12] Zhao F J, Lombi E, McGrath S P. Assessing the potential for zinc and cadmium phytoremediation with the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*[J]. Plant and Soil, 2003, **249**(1): 37-43.
- [13] 周艳, 陈樯, 邓绍坡, 等. 西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2884-2892.
- Zhou Y, Chen Q, Deng S P, et al. Principal component analysis and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils around a Pb-Zn mine in southwestern China[J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2884-2892.
- [14] 张连科, 李海鹏, 黄学敏, 等. 包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析[J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 1139-1146.
- Zhang L K, Li H P, Huang X M, et al. Soil heavy metal spatial distribution and source analysis around an aluminum plant in Baotou[J]. Environmental Science, 2016, **37**(3): 1139-1146.
- [15] 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 等. Cd、Zn 交互作用对三七景天根系形态和重金属吸收积累的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 470-479.
- Guo J M, Yang J X, Yang J, et al. Interaction of Cd and Zn affecting the root morphology and accumulation of heavy metals in *Sedum aizoon*[J]. Environmental Science, 2019, **40**(1): 470-479.
- [16] Clemens S, Ma J F. Toxic heavy metal and metalloid accumulation in crop plants and foods[J]. Annual Review of Plant Biology, 2016, **67**: 489-512.
- [17] 王晓娟, 王文斌, 杨龙, 等. 重金属镉(Cd)在植物体内的转运途径及其调控机制[J]. 生态学报, 2015, **35**(23): 7921-7929.
- Wang X J, Wang W B, Yang L, et al. Transport pathways of cadmium (Cd) and its regulatory mechanisms in plant[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, **35**(23): 7921-7929.
- [18] Ghosh R, Roy S. Cadmium toxicity in plants: unveiling the physicochemical and molecular aspects [A]. In: Cadmium Tolerance in Plants[C]. America: Academic Press, 2019. 223-246.
- [19] Clemens S, Aarts M G M, Thomine S, et al. Plant science: the key to preventing slow cadmium poisoning[J]. Trends in Plant Science, 2013, **18**(2): 92-99.
- [20] 陈亚茹, 张巧凤, 付必胜, 等. 中国小麦微核心种质籽粒铅、镉、锌积累差异性分析及低积累品种筛选[J]. 南京农业大学学报, 2017, **40**(3): 393-399.
- Chen Y R, Zhang Q F, Fu B S, et al. Differences of lead, cadmium and zinc accumulation among Chinese wheat mini-core collections germplasms and screening for low Pb, Cd and Zn accumulative cultivars in grains [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2017, **40**(3): 393-399.
- [21] 冯英, 马璐瑶, 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.
- [22] Belimov A A, Safronova V I, Tsyganov V E, et al. Genetic variability in tolerance to cadmium and accumulation of heavy metals in pea (*Pisum sativum* L.) [J]. Euphytica, 2003, **131**(1): 25-35.
- [23] 杜彩艳, 张乃明, 雷宝坤, 等. 不同玉米(*Zea mays*)品种对镉锌积累与转运的差异研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(1): 16-23.
- Du C Y, Zhang N M, Lei B K, et al. Differences of cadmium and zinc accumulation and translocation in different varieties of *Zea mays*[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, **36**(1): 16-23.
- [24] 陈建军, 于蔚, 祖艳群, 等. 玉米(*Zea mays*)对镉积累与转运的品种差异研究[J]. 生态环境学报, 2014, **23**(10): 1671-1676.
- Chen J J, Yu W, Zu Y Q, et al. Variety difference of Cd accumulation and translocation in *Zea mays*[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, **23**(10): 1671-1676.
- [25] Uraguchi S, Mori S, Kuramata M, et al. Root-to-shoot Cd translocation via the xylem is the major process determining shoot and grain cadmium accumulation in rice [J]. Journal of Experimental Botany, 2009, **60**(9): 2677-2688.
- [26] 张玉秀, 于飞, 张媛雅, 等. 植物对重金属镉的吸收转运和

- 累积机制[J]. 中国生态农业学报, 2008, **16**(5): 1317-1321.
- Zhang Y X, Yu F, Zhang Y Y, *et al.* Uptake, translocation and accumulation of cadmium in plant[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, **16**(5): 1317-1321.
- [27] Liang C Z, Xiao H J, Hu Z Q, *et al.* Uptake, transportation, and accumulation of C₆₀ fullerene and heavy metal ions (Cd, Cu, and Pb) in rice plants grown in an agricultural soil[J]. Environmental Pollution, 2018, **235**: 330-338.
- [28] 孙洪欣, 赵全利, 薛培英, 等. 不同夏玉米品种对镉、铅积累与转运的差异性田间研究[J]. 生态环境学报, 2015, **24**(12): 2068-2074.
- Sun H X, Zhao Q L, Xue P Y, *et al.* Variety difference of cadmium and lead accumulation and translocation in summer maize [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, **24**(12): 2068-2074.
- [29] Baker A J M. Accumulators and excluders-strategies in the response of plants to heavy metals[J]. Journal of Plant Nutrition, 1981, **3**(1-4): 643-654.
- [30] 赵文锦, 黎用朝, 李小湘, 等. 镉低积累水稻资源的镉积累稳定性及遗传相似性分析[J]. 植物遗传资源学报, 2020, **21**(4): 819-826.
- Zhao W J, Li Y C, Li X X, *et al.* Stability of cadmium accumulation and genetic similarity analysis in low-accumulation rice resources[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2020, **21**(4): 819-826.
- [31] 陈卫平, 杨阳, 谢天, 等. 中国农田土壤重金属污染防治挑战与对策[J]. 土壤学报, 2018, **55**(2): 261-272.
- Chen W P, Yang Y, Xie T, *et al.* Challenges and countermeasures for heavy metal pollution control in farmlands of China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, **55**(2): 261-272.
- [32] 邓婷, 吴家龙, 卢维盛, 等. 不同玉米品种对土壤镉富集和转运的差异性[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(6): 1265-1271.
- Deng T, Wu J L, Lu W S, *et al.* Differences in cadmium accumulation and translocation in different *Zea mays* cultivars [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(6): 1265-1271.
- [33] 陈洁, 王娟, 王怡雯, 等. 影响不同农作物镉富集系数的土壤因素[J]. 环境科学, 2021, **41**(4): 2031-2039.
- Chen J, Wang J, Wang Y W, *et al.* Influencing factors of cadmium bioaccumulation factor in crops [J]. Environmental Science, 2021, **41**(4): 2031-2039.
- [34] 陈彩艳, 唐文帮. 筛选和培育镉低积累水稻品种的进展和问题探讨[J]. 农业现代化研究, 2018, **39**(6): 1044-1051.
- Chen C Y, Tang W B. A perspective on the selection and breeding of low-Cd rice [J]. Research of Agricultural Modernization, 2018, **39**(6): 1044-1051.
- [35] Liu W T, Zhou Q X, Zhang Y L, *et al.* Lead accumulation in different Chinese cabbage cultivars and screening for pollution-safe cultivars[J]. Journal of Environmental Management, 2010, **91**(3): 781-788.
- [36] 杨树深, 孙衍芹, 郑鑫, 等. 重金属污染农田安全利用: 进展与展望[J]. 中国生态农业学报, 2018, **26**(10): 1555-1572.
- Yang S S, Sun Y Q, Zheng X, *et al.* Safe utilization of farmland contaminated with heavy metals in China: progress and outlook [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, **26**(10): 1555-1572.
- [37] 陈亮妹, 李江遐, 胡兆云, 等. 重金属低积累作物在农田修复中的研究与应用[J]. 作物杂志, 2018, **34**(1): 16-24.
- Chen L M, Li J X, Hu Z Y, *et al.* Review on application of low accumulation crops on remediation of farmland contaminated by heavy metals[J]. Crops, 2018, **34**(1): 16-24.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution in Beijing During the Historical Period of the 2022 Olympic Winter Games	LIU Yue-chen, MAN Rui-qi, QIU Yan-ting, <i>et al.</i>	(3895)
Observation Analyses of Aerosol Size Distribution Properties from February to March, 2019 in Tianjin Urban Area	HAO Jian, CAI Zi-ying, LIU Jing-le, <i>et al.</i>	(3903)
Analysis of Typical Weather Circulation Patterns of Heavy PM _{2.5} Pollution and the Transport Pattern in the Yangtze River Middle Basin	WANG Ying, ZHI Xie-fei, BAI Yong-qing, <i>et al.</i>	(3913)
Characteristics of Heavy Metals and Other Elements in Atmospheric Dry and Wet Deposition and Health Risk Assessment of a Typical Industrial and Mining City in Central Yunnan	FAN Chen-zi, LIU Yong-bing, YUAN Ji-hai, <i>et al.</i>	(3923)
Characteristics and Reactivity of VOCs in a Typical Industrial City in Summer	QIN Tao, LI Li-ming, WANG Xin-wu, <i>et al.</i>	(3934)
Chemical Reaction Activity and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Summer in Dalian	ZHU Ke-xin, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i>	(3944)
One-year Simulation of Air Pollution in Central China, Characteristics, Distribution, Inner Region Cross-transmission, and Pathway Research in 18 Cities	LIU Guang-jin, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i>	(3953)
Characteristics of Ozone Pollution, Meteorological Impact, and Evaluation of Forecasting Results Based on a Neural Network Model in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, GUI Hai-lin, <i>et al.</i>	(3966)
Temporal and Spatial Variations in Black Carbon Aerosol in Different Atmospheric Background Stations in China from 2006 to 2020	WANG Hong-lei, YAN Xue, SHEN Li-juan, <i>et al.</i>	(3977)
Pollution Characteristics and Emission Factors of PCDD/Fs from Iron and Steel Industry	YANG Yan-yan, XIE Dan-ping, FU Jian-ping, <i>et al.</i>	(3990)
Community Composition and Assessment of the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, CAO Liang, QU Ren-chao, <i>et al.</i>	(3998)
Evaluation and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Sediments of the Yellow River Basin Based on Monte Carlo Simulation and PMF Model	PANG Kuo, LI Min, LIU Lu, <i>et al.</i>	(4008)
Retention Effect of Heavy Metals in Rivers of a Typical Mountainous City by Cascade Weirs; A Case Study of Liangtan River in Chongqing	WANG Chao, JIA Bo-yang, PAN Cheng-yong, <i>et al.</i>	(4018)
Estimation of Agricultural Non-point Source TN and TP Export Coefficients Based on Soil Loss	WANG You-xiao, HUANG Chong, LIU Gao-huan, <i>et al.</i>	(4032)
Influence of Land Use and Land Cover Patterns on Water Quality at Different Spatio-temporal Scales in Hehuang Valley	LI Hao-hao, HUANG Yi-mei, GUO Wei, <i>et al.</i>	(4042)
Groundwater Pollution Source Identification by Combination of PMF Model and Stable Isotope Technology	ZHANG Han, DU Xin-yu, GAO Fei, <i>et al.</i>	(4054)
Antibiotic Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment in Jinjiang River Basin, Jiangxi Province	LI Jia-le, WANG Meng, HU Fa-wang, <i>et al.</i>	(4064)
Screening and Control Measures for New Priority Pollutants in Surface Water of Tianjin	WU Yan-qi, SONG Shuai, SHI Ya-juan, <i>et al.</i>	(4074)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i>	(4087)
Analysis of the Seasonal Changes in Planktonic Microbial Diversity in Urban River Supplied with Reclaimed Water: A Case Study of the North Canal River	YUAN Xun-chao, WANG Min, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i>	(4097)
Spectroscopic and Molecular Characterization of Water Soluble Organic Matter from Sediments in the Macrophyte-dominated and Algae-dominated Zones of Taihu Lake	DU Ying-xun, DAI Jia-ru, ZHANG Qiao-ying, <i>et al.</i>	(4108)
Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) from Lake Taihu and the Corresponding Potential Driving Factors	LIU Chao-rong, ZHU Jun-yu, LI Yu-yang, <i>et al.</i>	(4118)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Bioretention Systems of Sponge Cities	LEI Xiao-ling, QIU Li-na, WEI Ze-jun, <i>et al.</i>	(4127)
Treatment Effect of Corncob and Rice Straw Enhanced Subsurface Flow Constructed Wetland on Low C/N Ratio Wastewater	HU Man-li, HAO Qing-ju, MA Rong-zhen, <i>et al.</i>	(4136)
Investigation of the Performance of Organic Contaminant Degradation by Fe ²⁺ /PDS Under Environmentally Relevant pH Conditions	LIU Ying, GUO Yi-wei, QIAO Jun-lian, <i>et al.</i>	(4146)
Typical Pesticide Residues and Their Risk Assessment in Farmland Environment of Different Plant Types in Shayu County, Xinjiang	XIE Xuan-xuan, NUERLA Ailijiang, BALATI Maihemuti, <i>et al.</i>	(4154)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Poultry Farm in Ningxia	SHEN Cong, ZHANG Jun-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i>	(4166)
Enrichment Factors of Soil-Se in the Farmland in Shizuishan City, Ningxia	WANG Ying, LIU Hai-yan, WANG Ze-jing, <i>et al.</i>	(4179)
Zoning and Safe Utilization Method of Heavy Metal Contaminated Cultivated Land at Block Scale	WANG Rui, YU Jing, LI Yu, <i>et al.</i>	(4190)
Spatial Distribution, Source Apportionment, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Jianghugongmi Producing Area, Shandong Province	YU Lin-song, WAN Fang, FAN Hai-yin, <i>et al.</i>	(4199)
Assessing the Lead Accumulation Risks of Wheat Grain by Developing a Source-Specific Accumulation Risk Assessment Model	YANG Yang, LI Yan-ling, NIU Shuo, <i>et al.</i>	(4212)
Accumulation Effects and Health Risks of Heavy Metals in Rice in Location-based Cadmium Anomaly Area in Liuzhou	ZHU Liang-liang, WANG Fu-peng, TANG Le-bin, <i>et al.</i>	(4219)
Accumulation and Transport Characteristics of Cd, Pb, Zn, and As in Different Maize Varieties	REN Chao, XIAO Jian-hui, LI Jing-tian, <i>et al.</i>	(4232)
Remediation Potential of <i>Taraxacum kok-saghyz</i> Rodin on Lead and Cadmium Contaminated Farmland Soil	ZHANG Heng, XIONG Ming-biao, WANG Qian-xin, <i>et al.</i>	(4253)
Remediation Potential of Three Dwarf Bamboos on Farmland Soils Contaminated with Mixed Heavy Metals	ZHANG Ying, ZHAO Xin, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i>	(4262)
Impacts of Uptake and Accumulation of Cd on Double Rice-Paddy Soil by Silicon Fertilizer Continuous Application	PENG Hua, DENG Kai, SHI Yu, <i>et al.</i>	(4271)
Effect of Modified Chitosan Loaded with Silica on Arsenic Uptake and Transport in Rice	YANG Jia-yi, SUN Meng-qiang, XIAO Yu-tang, <i>et al.</i>	(4282)
Effect of Chelating Agents and Organic Acids on Remediation of Cadmium and Arsenic Complex Contaminated Soil Using <i>Xanthium sibiricum</i>	ZHANG Ya-rui, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(4292)
Effects of Water Management on the Transformation of Iron Oxide Forms in Paddy Soils and Its Coupling with Changes in Cadmium Activity	LI Ming-yuan, ZHANG Xiao-ting, LIU Han-yi, <i>et al.</i>	(4301)
Effects of Iron Intensity-regulated Root Microbial Community Structure and Function on Cadmium Accumulation in Rice	ZHENG Shen, HUANG Dao-you, LI Bo, <i>et al.</i>	(4313)
Effects of Mulching and Slow-release Fertilizer Application Reduction on Soil Microbial Community Structure in Rapeseed Field Under Two Different Rainfall Conditions	FENG Jun, SHI Chao, Hafiz Athar Hussain, <i>et al.</i>	(4322)
High-Throughput Sequencing Combined with Metabonomics to Analyze the Effect of Heavy Metal Contamination on Farmland Soil Microbial Community and Function	PANG Fa-hu, LI Xiao-qi, DUAN Li-yang, <i>et al.</i>	(4333)
Characteristics of Microbial Community Structure in the Surrounding Farmlands of a Mercury Mining Area and Its Environmental Driving Factors	CHEN Fen, YU Gao, SUN Yue-bing, <i>et al.</i>	(4342)
Comparison of Bacterial Community Structure in Soil Aggregates Between Natural Karst Wetland and Paddy Field	LENG Meng, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i>	(4353)
Elevational Pattern and Control Factors of Soil Microbial Carbon Use Efficiency in the Daiyun Mountain	LÜ Kun, WANG Jing-jing, WU Guo-peng, <i>et al.</i>	(4364)
Effect of Long-term Straw Returning on the Mineralization and Priming Effect of Rice Root-carbon	LIU Feng, WANG Yun-qi, ZHANG Yun, <i>et al.</i>	(4372)
Effects of Straw Returning and Biochar Application on Summer Maize Yield and Soil N ₂ O Emission in Guanzhong Plain	BAI Jin-ze, LIU Zhen-yuan, SONG Jia-jie, <i>et al.</i>	(4379)
Effects of Polystyrene Nanoplastics (PS-NPs) on the Physiology of <i>Allium sativum</i> L.	QIU Chen-chen, LI Guo-xin, LI Qing-song, <i>et al.</i>	(4387)
Effect of Microplastics on Soil Water Infiltration and Evaporation	WANG Zhi-chao, ZHANG Bo-wen, NI Jia-xuan, <i>et al.</i>	(4394)
Life Cycle Assessment and Key Parameter Comparison of Hydrogen Fuel Cell Vehicles Power Systems	CHEN Yi-song, LAN Li-bo, HAO Zhuo, <i>et al.</i>	(4402)