

28个玉米品种子粒对重金属的吸附特性及苗期敏感性研究

段小健¹, 曲比伍合², 李仁飞², 柯永培^{1,2}, 余学杰^{1,2}, 张英豪¹, 石海春^{1,2}

(1. 四川农业大学农学院, 四川 温江 611130; 2. 四川正红生物技术有限责任公司, 成都 610213)

摘要: 为明确28个玉米品种苗期的耐重金属性和子粒对重金属的吸收特性, 本研究通过测定重金属Cd、Pb、Cr、Zn、Cu单一胁迫对玉米幼苗株高等11个生理生化指标的影响, 评价玉米幼苗对重金属的耐受性。通过测定不同玉米品种在四川省3个生态区的子粒重金属含量, 评价子粒的重金属吸附特性。结果表明, 根据苗期重金属耐受性可将28个玉米品种分为4类, 其中瑞玉612和正红412为强耐重金属品种, 正红818等13个品种为耐重金属品种, 正红510等5个品种为中等耐重金属品种, 中单808等8个品种为重金属敏感型品种。根据子粒对重金属的吸附特性可分为4类, 正红205等12个品种子粒重金属含量最低, 正红510等3个品种子粒重金属含量最高, 瑞玉612等13个品种重金属含量处于中等水平。综合以上结果, 正红818等13个品种的苗期重金属耐受性强, 且子粒对重金属的吸附低, 表明这些品种具有较高的推广应用安全性。

关键词: 玉米; 重金属胁迫; 重金属吸附; 苗期敏感性

中图分类号: S513.01

文献标识码: A

Study on Heavy Metal Absorption Characteristics and Seedling Sensitivity of 28 Maize Varieties

DUAN Xiao-jian¹, QUBI Wu-he², LI Ren-fei², KE Yong-pei^{1,2}, YU Xue-jie^{1,2},
ZHANG Ying-hao¹, SHI Hai-chun^{1,2}

(1. College of Agronomy, Sichuan Agricultural University, Wenjiang 611130;

2. Sichuan Zhenghong Bio Co., Ltd., Chengdu 610213, China)

Abstract: In order to clarify the heavy metal tolerance (HMT) of 28 maize varieties at seedling stage and the absorption characteristics of heavy metals in kernels at mature stage, this study evaluated the tolerance of seedlings to heavy metals by investigated the effects of a single heavy metal stress, such as Cd, Pb, Cr, Zn, and Cu, on 11 physiological and biochemical indexes of the maize seedling, and the heavy metal adsorption characteristics of the kernels of different maize varieties by measuring the heavy metal content (HMC) of the kernels in three ecological zones in Sichuan Province. The results showed that the tested varieties could be classified into four groups according to the HMT at seedling stage. Ruiyu612 and ZH412 were highly tolerant to heavy metals, 13 varieties were tolerant, 5 varieties were moderately tolerant, and 8 varieties were heavy metal-sensitive varieties. The tested varieties could be divided into four classes according to the heavy metals absorption characteristics of kernels. 12 varieties had the lowest HMC in kernels, 3 varieties had the highest HMC in kernels, and 13 varieties had medium HMC in grains. Taken together, the results indicated that 13 varieties, such as Zhenghong818, had high seedling HMT and low HMC in kernels, suggesting that these varieties have a high degree of safety for popularization and application.

Key words: Maize; Heavy metal stress; Heavy metal adsorption; Sensitivity at seedling stage

录用日期: 2022-12-31

基金项目: 四川省农业科技成果转化项目(2022NZZJ0001)、四川重大科技专项(2022ZDZX0013)、四川重点研发项目(2021YFZ0017)、成都市科技创新平台项目(2019-YF04-00022-JH)

作者简介: 段小健(1996-), 四川西昌人, 硕士, 研究方向为农艺与种业。E-mail: 778167205@qq.com

曲比伍合和段小健为本文共同第一作者。

石海春为本文通信作者。E-mail: haichun169@163.com

玉米是世界三大粮食作物之一,市场需求量大,种植面积广,具有重要战略地位^[1-3]。西南山地玉米区是我国三大玉米主产区之一,因农村工业化、城镇化发展,耕地土壤污染日趋严重,其中重金属是重要的污染源之一^[4,5]。目前,研究者对重金属镉(Cd)胁迫下不同植物的积累差异、生理生化响应等方面研究较多^[6-8],但对铅(Pb)、铬(Cr)、铜(Cu)、锌(Zn)等其他重金属对玉米影响的研究相对较少,且多集中研究单一重金属的胁迫耐性,较少同时考虑对多种金属的综合耐性评价和探讨苗期敏感性与子粒吸附特性之间的相关性。为此,本研究通过室内水培和大田种植,用主成分分析法和隶属函数法评价28个玉米品种苗期对5种重金属的敏感性,利用基于改进AHP法的加权综合指数法评价子粒的重金属吸收

特性,筛选对重金属低风险的品种供西南山地玉米区推广应用,同时探讨玉米苗期对重金属的耐受性与成熟期子粒对重金属的吸附特性之间的相关性,从而为玉米品质育种提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为四川正红生物技术有限责任公司2018–2022年度审定品种正红431等共计11个和2020–2022年度选育潜力新品种组合正红325等共计15个,供试品种名称相关信息见表1。选用玉米杂交种成单30(川审玉2004002,四川平丘组区试对照种,CK1)和中单808(国审玉2006037,CK2)作为对照。

表1 供试品种名称
Table 1 The name of tested varieties

名 称	品种来源	备 注	名 称	品种来源	备 注
Name	Source of variety	Remark	Name	Source of variety	Remark
正红431	K365×K143	鄂审玉2018013、滇审玉米2018039号 和国审玉20200421	正红205	K169×K121	潜力新品种
正红507	K169×K61	川审玉20210002、国审玉20210609	正红406	K365×ZNC442	潜力新品种
正红818	K143×K115	国审玉20210610	正红435	ZNC442×K101	潜力新品种
正红807	K143×K201	国审玉20220489	正红447	K305×K718	潜力新品种
正红510	K143×K311	桂审玉2019012、川审玉20200014	正红622	K591×K148	潜力新品种
正红412	K305×K352	川审玉20190006	正红675	K221×K152	潜力新品种
正红509	K353×K305	川审玉20200005	正红787	K152×成自205	潜力新品种
正红613	K148×K123	川审玉20200012	正红841	K143×K521	潜力新品种
正红733	K305×K162	川审玉20210008	正红909	K143×K103	潜力新品种
正红816	K61×K311	滇审玉米2021144号	正红985	K248×成自205	潜力新品种
瑞玉612	K365×K182	川审玉20210012	正红989	K143×K316	潜力新品种
正红325	K322×K843	潜力新品种	瑞玉006	K169×K252	潜力新品种
正红069	K143×K922	潜力新品种	瑞玉563	K143×K191	潜力新品种

1.2 玉米苗期对重金属胁迫的生理生化响应研究

选取大小均匀、子粒饱满的种子进行水培试验。用10% H₂O₂对种子进行消毒,浸泡10 min后,用去离子水将H₂O₂冲洗干净,然后将种子播于湿润的石英砂中,并放入光照培养箱中进行培养(光照16 h、温度25℃和黑暗8 h、温度20℃)。待3叶1心时,将幼苗移至Hoagland营养液中水培,适应性生长3 d后,分别向营养液中添加CdCl₂·2.5H₂O、Pb(NO₃)₂、K₂Cr₂O₇、ZnSO₄·7H₂O、CuSO₄·5H₂O重金属溶液进行单一胁迫处理,其重金属胁迫浓度分别以Cd²⁺、Pb²⁺、Cr⁶⁺、Zn²⁺、Cu²⁺计,浓度均设置为100 mg/L,以不添加重金属溶液为对照,每个处理设置3次生物学重复,营养液3 d更换一次,期间不间断缓慢鼓

入空气,保证营养液通气良好,于胁迫表型明显时期如叶片出现明显卷缩、萎蔫、变黄等症状时(约重金属胁迫7 d后),测定株高等11个指标,其测定指标及方法见表2。

1.3 子粒对重金属吸附特性评价

2021年春季在四川双流、内江和简阳3个试验点种植相应材料,各点土壤基本理化性质和重金属含量等见表3。每点田间按间比法排列,不设重复,6行区,行距80 cm,窝距50 cm,每行7窝,每窝2株,密度45 000株/hm²,每个品种(小区)人工套袋授粉20株,待成熟时收获。委托南京卡文思检测技术有限公司测定子粒Cd、Pb、Cr、Zn、Cu含量,以3点平均值作为数据分析的基础。

表2 测定指标及方法
Table 2 Determination index and method

测定指标 Determination index	测定方法 Determination method	测定指标 Determination index	测定方法 Determination method
株高	测量胚芽鞘节至最长叶叶尖长度	超氧化物歧化酶 SOD	氮蓝四唑光还原法
根长	测量幼苗株间红点到主根根尖的高度	脯氨酸 PRO	磺基水杨酸法
根冠比	干燥称量法	可溶性糖 SS	蒽酮硫酸法
叶绿素	丙酮-乙醇浸提法	可溶性蛋白 SP	考马斯亮蓝 G-250 法
丙二醛	硫代巴比妥酸法	重金属含量 Content of heavy metals	等离子体发射光谱法(ICP)
过氧化物酶	愈创木酚法		

表3 3个试点土壤基本理化性质和重金属含量
Table 3 Basic physical and chemical properties and heavy metals content of three pilot soils

地点 Site	酸碱度 pH	有机质 (g/kg) OM	全氮 (g/kg) TN	全磷 (g/kg) TP	全钾 (g/kg) TK	镉 (mg/kg) Cd	铅 (mg/kg) Pb	铬 (mg/kg) Cr	锌 (mg/kg) Zn	铜 (mg/kg) Cu
双流	6.2	23.19	1.26	0.43	14.82	0.38	32.27	109.61	147.71	42.48
内江	6.3	25.29	1.43	0.33	16.66	0.34	24.74	92.79	111.19	31.35
简阳	6.5	20.05	1.08	0.41	14.13	0.49	22.68	79.09	91.98	28.42

1.4 数据处理与分析

数值的统计和分析使用 Microsoft Excel 2019, 相关性、主成分和聚类分析等使用 SPSS 25.0 软件。为消除各变量间的量纲关系,使数据具有可比性,通过 SPSS 25.0 对各性状的耐重金属系数进行数据标准化处理后再进行主成分分析。

1.4.1 苗期耐重金属性评价

$$X_i = \text{处理测定值} / \text{对照测定值}, i = 1, 2, 3 \cdots n \tag{1}$$

用3次生物学重复的平均值计算各鉴定指标的耐重金属系数 X_i 。

$$W_i = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}, i = 1, 2, 3 \cdots n \tag{2}$$

式(2)中, W_i 表示第*i*个主分的权重, P_i 为第*i*个主分的贡献率。

$$U_i = \frac{T_i - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}}, i = 1, 2, 3 \cdots n \tag{3}$$

式(3)中, U_i 表示各个主成分的隶属函数值, T 表示不同玉米品种在各个主分的综合得分, T_{\max} 和 T_{\min}

代表各品种综合得分的最大值和最小值。

$$D_i = \sum_{i=1}^n [U_i \times W_i], i = 1, 2, 3 \cdots n \tag{4}$$

式(4)中 D_i 值为苗期耐单一重金属的综合评价

$$D_{\text{综}} = \sum W_i \times D_i, i = 1, 2, 3 \cdots n \tag{5}$$

式(5)中 $D_{\text{综}}$ 是各品种苗期耐5种重金属的综合评价

1.4.2 重金属权重系数的确定

构建基于3标度的改进 AHP 法确定5种重金属污染物的权重时,依据《粮食(含谷物、豆类、薯类)及制品中铅、铬、镉、汞、硒、砷、铜、锌等8种元素限量》(NY 861-2004)^[9](表4)中粮食作物的重金属限值构造比较矩阵 $B=(b_{ij})_{n \times n}$:

$$b_{ij} = \begin{pmatrix} & \text{Cd} & \text{Pb} & \text{Cr} & \text{Zn} & \text{Cu} \\ \text{Cd} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \text{Pb} & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \text{Cr} & 2 & 2 & 1 & 0 & 0 \\ \text{Zn} & 2 & 2 & 2 & 1 & 2 \\ \text{Cu} & 2 & 2 & 2 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{6}$$

表4 粮食及制品中重金属元素限量标准
Table 4 Limits of eight elements in cereals, legume, tubes, and its product mg/kg

项目 Item	镉 Cd	铅 Pb	铬 Cr	锌 Zn	铜 Cu
限量	0.05	0.40	1.00	50.00	10.00

再利用构造的比较矩阵B,求出判断矩阵C=(Cij)_{n×n},见公式(7):

$$C_{ij}=\begin{Bmatrix} & \text{Cd} & \text{Pb} & \text{Cr} & \text{Zn} & \text{Cu} \\ \text{Cd} & 1 & 3 & 5 & 9 & 7 \\ \text{Pb} & 1/3 & 1 & 3 & 7 & 5 \\ \text{Cr} & 1/5 & 1/3 & 1 & 5 & 3 \\ \text{Zn} & 1/7 & 1/7 & 1/5 & 1 & 1/3 \\ \text{Cu} & 1/9 & 1/5 & 1/3 & 3 & 1 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

由判断矩阵Cij计算出这5种重金属污染物的最大特征值及其特征向量,并进行一致性检验,结果表明,Cd、Pb、Cr、Zn、Cu的权重依次为0.510 0、0.263 8、0.129 6、0.032 9、0.063 6,计算结果(CR=0.0529<0.1)表明,构造的判断矩阵满足层次分析法要求,通过一致性检验。

1.4.3 玉米子粒重金属吸附特性评价

玉米子粒重金属吸附特性用重金属综合污染指数(ICP)来判断,其计算方法采用加权平均法。计算方法为 $ICP=\sum W_i \times IP_i$ 。式中,ICP表示重金属综合污染指数,W_i表示某一元素的权重,IP_i表示是某一重金属的污染指数($IP_i=C_i/S_i$),C_i表示某一重金属实测值在3个试验点的平均值,S_i代表我国规定的粮食中的重金属限量值。

2 结果与分析

2.1 供试品种苗期耐重金属性评价

2.1.1 苗期耐单一重金属综合评价值

通过公式(1)计算出各品种在Cd、Pb、Cr、Zn、Cu单一胁迫下,不同指标的耐重金属系数;通过公式(2)、(3)、(4)计算出各品种耐5种重金属的综合评价值(表5)。供试品种的D₁值范围为0.343~0.888,平均值为0.525,D₁值大于成单30的品种有9个,大于中单808的有22个;D₂值范围为0.281~0.706,平均值为0.466,除瑞玉563外,其余25个玉米品种的D₂值均大于成单30和中单808;D₃值范围为0.229~0.790,平均值为0.452,除瑞玉563、正红807和瑞玉006外,其余23个玉米品种的D₃值均大于成单30和中单808;D₄值范围为0.228~0.868,平均值为0.518,D₄值大于成单30和中单808的有19个品种;D₅值范围为0.122~0.768,平均值为0.398,除正红447外,其余25个品种的D₅值均高于中单808,高于成单30的有正红205等22个品种。表明不同玉米品种苗期对重金属胁迫的敏感程度存在较大差异。

表5 28个玉米品种苗期耐单一重金属综合评价值
Table 5 Comprehensive evaluation of single heavy metal tolerance of 28 maize varieties at seedling stage

杂交种 Hybrid	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	杂交种 Hybrid	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅
成单30	0.561	0.296	0.316	0.436	0.279	正红985	0.612	0.507	0.474	0.548	0.312
中单808	0.406	0.281	0.326	0.407	0.194	正红069	0.579	0.454	0.451	0.528	0.534
正红431	0.546	0.572	0.392	0.665	0.478	正红841	0.574	0.449	0.543	0.388	0.411
正红507	0.622	0.459	0.545	0.456	0.395	正红406	0.371	0.396	0.334	0.352	0.340
正红818	0.603	0.565	0.422	0.868	0.290	正红787	0.441	0.333	0.336	0.333	0.345
正红510	0.446	0.623	0.348	0.490	0.455	正红435	0.540	0.501	0.526	0.734	0.491
正红412	0.767	0.615	0.621	0.617	0.645	瑞玉563	0.481	0.288	0.321	0.228	0.334
正红509	0.459	0.537	0.699	0.782	0.666	正红325	0.372	0.388	0.370	0.449	0.320
正红613	0.563	0.618	0.545	0.593	0.512	瑞玉006	0.410	0.348	0.229	0.294	0.232
正红733	0.516	0.479	0.462	0.740	0.507	正红205	0.507	0.456	0.362	0.516	0.282
正红816	0.770	0.474	0.389	0.488	0.349	正红675	0.478	0.314	0.497	0.272	0.268
瑞玉612	0.888	0.706	0.662	0.835	0.768	正红447	0.351	0.375	0.473	0.371	0.122
正红622	0.509	0.567	0.790	0.488	0.588	平均值	0.525	0.466	0.452	0.518	0.398
正红807	0.343	0.420	0.286	0.494	0.334	标准差	0.129	0.113	0.134	0.168	0.153
正红909	0.467	0.473	0.393	0.587	0.225	变异系数(%)	0.245	0.243	0.297	0.323	0.385
正红989	0.520	0.562	0.557	0.544	0.463						

注:D₁、D₂、D₃、D₄、D₅值分别表示各玉米品种苗期耐重金属Cd、Pb、Cr、Zn、Cu的综合评价值。
Note: D₁, D₂, D₃, D₄ and D₅ values respectively represent the comprehensive evaluation of Cd, Pb, Cr, Zn and Cu tolerance of maize varieties at seedling stage.

2.1.2 苗期耐重金属综合评价值

根据公式(5)计算各供试品种苗期对5种重金属

耐性的综合评价值D_综。从表6可以看出,26个玉米品种的综合耐重金属性均优于中单808,瑞玉612等

18个品种优于成单30,依 $D_{综}$ 值对各品种的苗期耐重金属性进行排序,并按照欧氏距离、离差平方和法进行聚类分析,可将28个玉米品种分为4类,第Ⅰ类为强耐重金属品种,包含瑞玉612、正红412;第Ⅱ类为耐重金属品种,包含正红816、正红818和正红507等13个品种;第Ⅲ类为中等耐重金属品种,包含正红510和正红205等5个品种;第Ⅳ类为重金属敏感型品种,包含中单808和瑞玉006等8个品种。

表6 28个玉米品种苗期耐重金属综合评价值
Table 6 Comprehensive evaluation of heavy metals tolerance of 28 maize varieties at seedling stage

杂交种 Hybrid	$D_{综}$ $D_{comprehensive}$	耐重金属等级 Heavy metals resistance level	杂交种 Hybrid	$D_{综}$ $D_{comprehensive}$	耐重金属等级 Heavy metals resistance level
瑞玉612	0.801	强耐重金属	正红733	0.506	耐重金属
正红412	0.695	强耐重金属	正红510	0.482	中等耐重金属
正红816	0.607	耐重金属	正红205	0.461	中等耐重金属
正红613	0.573	耐重金属	正红909	0.447	中等耐重金属
正红622	0.565	耐重金属	成单30	0.437	中等耐重金属
正红818	0.558	耐重金属	正红675	0.417	中等耐重金属
正红507	0.549	耐重金属	瑞玉563	0.392	重金属敏感
正红985	0.545	耐重金属	正红787	0.389	重金属敏感
正红509	0.534	耐重金属	正红325	0.375	重金属敏感
正红989	0.533	耐重金属	正红406	0.370	重金属敏感
正红431	0.533	耐重金属	正红807	0.360	重金属敏感
正红435	0.531	耐重金属	正红447	0.359	重金属敏感
正红069	0.525	耐重金属	瑞玉006	0.355	重金属敏感
正红841	0.521	耐重金属	中单808	0.349	重金属敏感

注: $D_{综}$ 值表示各玉米品种苗期耐5种重金属的综合评价值。
Note: $D_{comprehensive}$ value represent the comprehensive evaluation of 5 heavy metals tolerance of maize varieties at seedling stage.

2.2 供试品种子粒对重金属的吸附特性分析

2.2.1 供试品种子粒重金属含量

表7 供试品种的子粒重金属含量及标准限量
Table 7 Content and standard limit of heavy metals in grains of tested varieties

杂交种 Hybrid	镉 Cd	铅 Pb	铬 Cr	锌 Zn	铜 Cu	杂交种 Hybrid	镉 Cd	铅 Pb	铬 Cr	锌 Zn	铜 Cu
成单30	0.284	0.125	0.749	11.137	2.654	正红069	0.006	0.077	2.216	23.241	3.362
中单808	0.153	0.108	0.683	10.733	3.129	正红841	0.010	0.105	0.751	19.600	3.036
正红431	0.186	0.193	0.817	10.655	3.318	正红406	0.011	0.285	0.566	23.601	2.521
正红507	0.175	0.200	0.687	11.098	3.024	正红787	0.015	0.325	0.663	25.647	2.554
正红818	0.146	0.139	0.584	11.816	2.435	正红435	0.014	0.089	0.535	23.941	3.043
正红510	0.291	0.247	0.521	12.959	2.359	瑞玉563	0.005	0.109	0.786	21.119	2.745
正红412	0.089	0.079	0.748	12.217	3.183	正红325	0.010	0.088	0.674	22.954	2.247
正红509	0.056	0.252	0.832	9.559	1.731	瑞玉006	0.011	0.087	0.744	20.663	2.276
正红613	0.123	0.110	0.650	12.706	2.537	正红205	0.006	0.067	0.762	21.109	2.385
正红733	0.081	0.069	0.494	10.832	1.416	正红675	0.005	0.182	0.912	21.248	3.492
正红816	0.060	0.145	0.425	14.636	2.176	正红447	0.007	0.078	0.764	21.367	1.830
瑞玉612	0.053	0.067	0.375	10.622	2.825	最小值	0.005	0.067	0.375	8.603	1.416
正红622	0.142	0.107	0.611	10.859	1.431	最大值	0.291	0.325	2.216	25.647	3.492
正红807	0.038	0.094	0.454	12.029	2.593	平均值	0.092	0.139	0.723	15.580	2.601
正红909	0.097	0.189	0.552	10.080	2.246	标准差	0.093	0.070	0.324	5.653	0.562
正红989	0.266	0.141	0.893	11.201	3.105	变异系数(%)	1.015	0.505	0.448	0.363	0.216
正红985	0.232	0.131	0.807	8.603	3.177	标准限量	0.050	0.400	1.000	50.000	10.000

将供试的28个玉米品种子粒重金属含量平均值列于表7,根据《粮食(含谷物、豆类、薯类)及制品中重金属限量标准》(NY 861-2004)中重金属污染物在粮食作物中的限量值,子粒Cd超标率达57.14%,Cr超标率为3.57%,其他3种重金属含量均未超过标准限定值。各品种的子粒重金属含量存在明显差异,子粒Cd含量范围为0.005~0.291 mg/kg,平均值为0.092 mg/kg,除正红510外,其余25个品种的Cd含量均低于成单30,低于中单808的有正红818、正红622等21个品种;子粒Pb含量范围在0.067~0.325 mg/kg,平均值为0.139 mg/kg,其中Pb含量低于成单30的品种有14个,低于中单808的品种有12个;子粒Cr含量范围为0.375~2.216 mg/kg,平均值为0.723 mg/kg,Cr含量低于成单30的品种有16个,低

于中单808的品种有13个;子粒Zn含量范围在8.603~25.647 mg/kg,平均值为15.580 mg/kg,其中Zn含量低于成单30的品种有8个,低于中单808的品种有5个;子粒Cu含量范围为1.416~3.492 mg/kg,平均值为2.601 mg/kg,Cu含量低于成单30的品种有21个,低于中单808的品种有15个。可见,不同玉米品种的子粒重金属含量存在较大差异。

2.2.2 供试品种子粒重金属吸附的综合评价
通过改进AHP加权综合指数法计算各玉米品种的子粒重金属综合污染指数,结果列于表8。各品种的综合污染指数变幅为0.235~3.218,供试品种的综合污染指数除正红510外,均低于成单30;低于中单808的有正红818、正红622等21个品种,按

表8 供试品种的综合污染指数
Table 8 Comprehensive pollution index of tested varieties

杂交种	污染指数	污染等级	杂交种	污染指数	污染等级
Hybrid	ICP	Pollution level	Hybrid	ICP	Pollution level
正红205	0.235	低度	正红509	0.864	中低
正红447	0.244	低度	正红733	0.949	中低
瑞玉563	0.258	低度	正红412	1.087	中低
正红325	0.275	低度	正红909	1.202	中低
瑞玉006	0.290	低度	正红613	1.433	中度
正红841	0.297	低度	正红622	1.610	中度
正红435	0.304	低度	正红818	1.678	中度
正红675	0.321	低度	中单808	1.742	中度
正红406	0.403	低度	正红507	2.030	中度
正红069	0.437	低度	正红431	2.163	中度
正红787	0.485	低度	正红985	2.578	中度
正红807	0.534	低度	正红989	2.948	中高
瑞玉612	0.661	中低	成单30	3.105	中高
正红816	0.781	中低	正红510	3.218	中高

照欧氏距离、离差平方和法对其进行聚类分析,可分为4类,正红205、正红447、瑞玉563等12个品种子粒重金属含量最低,表明它们对重金属具有低积累性;正红510、正红989和成单30子粒重金属含量高,表明它们的重金属超标风险较大;瑞玉612、正红816等13个品种重金属含量中等水平。

2.3 玉米苗期耐重金属性与子粒重金属吸收特性的相关性

将供试玉米品种苗期的耐重金属性综合评价与成熟期子粒的综合污染指数进行相关性分析,相关系数仅为0.207,相关系数较低且未达到显著水平,表明二者无明显的相关关系,说明在育种实践

中,不能简单地通过苗期的耐重金属性来预测成熟期子粒的重金属吸收特性。

3 结论与讨论

3.1 供试品种苗期耐重金属胁迫的生理生化响应
玉米在苗期对重金属的敏感性强弱,会显著影响玉米幼苗的生长发育,特定的形态指标和生理生化指标可以反映玉米品种对重金属的耐性^[10-12]。对多个生理生化指标的耐重金属系数进行计算,再通过隶属函数法和主成分分析等综合指标法计算作物的耐重金属综合评价,可以准确地评价不同品种对重金属污染的耐受性^[13-15]。本研究表明,供试的

28个玉米品种中,瑞玉612等12个品种的耐Cd性强;正红510等9个品种的耐Pb性强;正红622等4个品种的耐Cr性强;正红818等9个品种的耐Zn性强;正红509等11个品种的耐Cu性强。通过计算各品种苗期对5种重金属耐受性的综合评价值并进行聚类分析,可将它们分为4类,第Ⅰ类为强耐重金属品种,包含瑞玉612和正红412;第Ⅱ类为耐重金属品种,包含正红818和正红507等13个品种;第Ⅲ类为中等耐重金属品种,包含正红510等5个品种;第Ⅳ类为重金属敏感型品种,包含中单808和瑞玉006等8个品种。另外,26个品种苗期对重金属的综合耐受性均强于中单808,强于成单30的有瑞玉612和正红412等18个品种。

3.2 供试品种子粒对重金属吸附的差异表现

土壤重金属污染是现今全球范围内最为严重的环境难题之一^[16,17]。不同作物和同一作物不同品种对重金属的积累存在显著差异,这就为筛选重金属低积累作物品种奠定了理论和物质基础^[18,19]。本研究通过基于改进AHP的加权综合指数法计算各玉米品种的重金属复合污染程度并进行聚类分析,结果表明,各品种的综合污染指数变幅为0.235~3.218,其中正红205和正红325等12个品种的综合污染指数相对较低;另外,除正红510外,其余25个品种的综合污染指数均低于对照成单30,正红818等21个品种低于对照中单808,表明从子粒的重金属污染程度来看,其应用前途更优。

3.3 玉米苗期对重金属的耐受性与子粒对重金属的吸附特性间的相关性

相关性分析可为目标性状的选择制定间接选择方案。本研究表明,玉米苗期对重金属的综合耐受性与成熟期子粒的重金属综合污染指数间没有明显的相关性,证明在育种实践中不能简单地根据苗期对重金属的耐受性来预测成熟期子粒对重金属的吸附特性。

3.4 供试品种的应用潜力评价

西南山地玉米区是我国第三大玉米主产区,由于农村工业化、城镇化发展,耕地土壤污染严重,重金属是其主要污染源之一^[20,21]。重金属不仅会使植物的新陈代谢、光合作用等受阻,对植物造成不可逆的损害^[22~24],还可能随农产品进入食物链,对人类造成严重的健康风险^[25,26]。因此,选育并推广苗期对重金属耐受性强且子粒对重金属具有低积累的玉米新品种,十分重要且紧迫。本研究中,相比对照成单30和中单808,正红818、正红733、正红412和正红205等13个品种苗期对重金属的综合耐受力相对较强,

且子粒对重金属的吸附性相对较低,表明它们的推广应用品质安全性更高。此外,本研究中的瑞玉006等7个玉米新品种苗期对重金属较为敏感,建议避免在重金属污染严重的区域推广应用,同时加强苗期的田间管理工作。

参考文献:

- [1] 赵久然,王 帅,李 明,等.玉米育种行业创新现状与发展趋势[J].植物遗传资源学报,2018,19(3):435-446.
ZHAO J R, WANG S, LI M, et al. Current status and perspective of maize breeding[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2018, 19(3): 435-446. (in Chinese)
- [2] 周书灵,张英彦.玉米生产效率的微观测度及对比分析—基于玉米主产区868个地块的调研[J].玉米科学,2018,26(6):165-169.
ZHOU S L, ZHANG Y Y. Micro measurement and comparative analysis of maize production efficiency—Based on the investigation of 868 plots in the main maize producing areas[J]. Journal of Maize Sciences, 2018, 26(6): 165-169. (in Chinese)
- [3] 封志明,孙 通,杨艳昭.2003-2013年中国粮食增产格局及其贡献因素研究[J].自然资源学报,2016,31(6):895-907.
FENG Z M, SUN T, YANG Y Z. Study on the spa-tiotemporal patterns and contribution factors of China's grain output increase during 2003-2013[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(6): 895-907. (in Chinese)
- [4] 宋 伟,陈百明,刘 琳.中国耕地土壤重金属污染概况[J].水土保持研究,2013,20(2):293-298.
SONG W, CHEN B M, LIU L. Soil heavy metal pollution of cultivated land in China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(2): 293-298. (in Chinese)
- [5] 杨克诚,向 葵,潘光堂,等.西南玉米新品种应具备的特征特性及区域主推品种的选择[J].玉米科学,2010,18(1):146-148.
YANG K C, XIANG K, PAN G T, et al. Characteristics of new maize varieties in southwest region and selection of main extending maize varieties[J]. Journal of Maize Sciences, 2010, 18(1): 146-148. (in Chinese)
- [6] 陈丽丽,田 爽,鲁伟丹,等.镉胁迫对3种植物生长及镉吸收和积累的影响[J].新疆农业科学,2022,59(4):1009-1015.
CHEN L L, TIAN S, LU W D, et al. Effects of cadmium stress on growth in three plants and cadmium uptake and its accumulation[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2022, 59(4): 1009-1015. (in Chinese)
- [7] 郑萌盟,谭艾娟,吕世明,等.耐镉浮萍筛选、鉴定及其对镉的富集效果[J].环境工程学报,2022,16(2):471-480.
ZHENG M M, TAN A J, LÜ S M, et al. Screening, identification and enrichment effects of cadmium-tolerant duckweeds[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(2): 471-480. (in Chinese)
- [8] 刘 娟,赵欢蕊,刘永华,等.外源硫诱导玉米镉胁迫耐性的生理机制研究[J].玉米科学,2019,27(5):101-108.
LIU J, ZHAO H R, LIU Y H, et al. Physiological analysis of surplus sulfur on alleviating cadmium stress in maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2019, 27(5): 101-108. (in Chinese)
- [9] 农业部.粮食(含谷物、豆类、薯类)及制品中铅、铬、镉、汞、硒、砷、

- 铜、锌等八种元素限量:NY 861-2004[S].北京:中国标准出版社,2005.
- [10] 魏 畅,焦秋娟,柳海涛,等.镉暴露条件下玉米生长及根系构型分级特征研究[J].草业学报,2022,31(3):101-113.
- WEI C, JIAO Q J, LIU H T, et al. Physiological effects of different Cd concentrations on maize root architecture and classification[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(3): 101-113. (in Chinese)
- [11] 张 珂,厉萌萌,刘德权,等.镉胁迫对小麦、玉米种子萌发及幼苗生长的影响[J].种子,2019,38(5):90-94.
- ZHANG K, LI M M, LIU D Q, et al. Effects of cadmium stress on seed germination and seedling growth of wheat and maize[J]. Crops, 2019, 38(5): 90-94. (in Chinese)
- [12] 单长卷,徐新娟,孙海丽,等.茉莉酸对镉胁迫下玉米幼苗叶片生理特性的影响[J].玉米科学,2016,24(3):99-102.
- SHAN C J, XU X J, SUN H L, et al. Effects of jasmonic acid on the leaf physiological characteristics of maize seedlings under cadmium stress[J]. Journal of Maize Sciences, 2016, 24(3): 99-102. (in Chinese)
- [13] 许志敏,刘燕珍,陈 琳,等.铜锌复合胁迫对8种观赏草种子萌发特性及幼苗生长的影响[J].河南农业科学,2020,49(3):129-137.
- XU Z M, LIU Y Z, CHEN L, et al. Effects of copper and zinc combined stress on seed germination and seedling growth of ornamental grasses[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2020, 49(3): 129-137. (in Chinese)
- [14] 刘 艺,李 冰,鲁宝君,等.多指标综合评价不同产区蓝莓的品质[J].北方园艺,2020(8):15-23.
- LIU Y, LI B, LU B J, et al. Comprehensive evaluation of blueberry quality in different producing areas by multiple indicators[J]. Northern Horticulture, 2020(8): 15-23. (in Chinese)
- [15] 陈梦妮,杜天庆,张泽宇,等.苗期甜高粱和玉米对土壤Pb胁迫的响应及抗性评价[J].中国农业大学学报,2016,21(11):17-23.
- CHEN M N, DU T Q, ZHANG Z Y, et al. Resistance evaluation and response of sweet sorghum and corn during seedling stage under Pb stress[J]. Journal of China Agricultural University, 2016, 21(11): 17-23. (in Chinese)
- [16] DOLEV N, KATZ Z, LUDMER Z, et al. Natural amino acids as potential chelators for soil remediation[J]. Environmental Research, 2020, 183: 109140.
- [17] 张桃林,王兴祥.推进土壤污染防治与修复厚植农业高质量发展根基[J].土壤学报,2019,56(2):251-258.
- ZHANG T L, WANG X X. Prevention and remediation of soil contamination to strengthen the foundation for green and high-quality agricultural development in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(2): 251-258. (in Chinese)
- [18] 弭宝彬,刘碧琼,戴雄泽,等.不同基因型芥菜对5种重金属累积差异性研究[J].中国农学通报,2021,37(26):40-49.
- MI B B, LIU B Q, DAI X Z, et al. The accumulation of five heavy metals in different genotypes of brassica juncea[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(26): 40-49. (in Chinese)
- [19] 杨素勤,程海宽,张 彪,等.不同品种小麦Pb积累差异性研究[J].生态与农村环境学报,2014,30(5):646-651.
- YANG S Q, CHENG H K, ZHANG B, et al. Differences in Pb accumulation between wheat varieties[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2014, 30(5): 646-651. (in Chinese)
- [20] 成 瑾,袁旭音,章海燕,等.云贵地区磷矿分布区农田土壤重金属污染特征及对农产品质量的影响[J].生态与农村环境学报,2021,37(5):636-643.
- CHENG J, YUAN X Y, ZHANG H Y, et al. Characteristics of heavy metal pollution in soils of Yunnan-Guizhou phosphate ore areas and their effects on quality of agricultural products[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, 37(5): 636-643. (in Chinese)
- [21] 张小敏,张秀英,钟太洋,等.中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究[J].环境科学,2014,35(2):692-703.
- ZHANG X M, ZHANG X Y, ZHONG T Y, et al. Spatial distribution and accumulation of heavy metal in arable land soil of China [J]. Environmental Science, 2014, 35(2): 692-703. (in Chinese)
- [22] RIZWAN M, ALI S, ADREES M, et al. A critical review on effects, tolerance mechanisms and management of cadmium in vegetables [J]. Chemosphere, 2017, 182: 90-105.
- [23] 石德杨,李艳红,董树亨.铅胁迫对夏玉米淀粉粒度分布特性及子粒产量、品质的影响[J].玉米科学,2013,21(4):72-76.
- SHI D Y, LI Y H, DONG S T. Effects of Pb stress on starch granule size distribution, yield and quality character in grains of summer maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2013, 21(4): 72-76. (in Chinese)
- [24] 梁烜赫,曹铁华.重金属对玉米生长发育及产量的影响[J].玉米科学,2010,18(4):86-88.
- LIANG X H, CAO T H. Effects of heavy metal growth, development and yield of maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2010, 18(4): 86-88. (in Chinese)
- [25] 韩晋仙,李二玲.山西寿阳县玉米子粒重金属含量及健康风险评估[J].干旱区资源与环境,2022,36(5):160-165.
- HAN J X, LI E L. Heavy metals contents and health risk assessment of corn kernels growing in Shouyang county, Shanxi province [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(5): 160-165. (in Chinese)
- [26] SINHA V, MANIKANDAN N A, PAKSHIRAJAN K, et al. Continuous removal of Cr(VI) from wastewater by phytoextraction using Tradescantia pallida plant based vertical subsurface flow constructed wetland system[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2016, 119: 96-103.

(责任编辑:栾天宇)