

重金属低积累玉米品种的稳定性和环境适应性分析

伍 钧¹, 吴传星¹, 孟晓霞², 杨 刚¹, 沈 飞¹, 李 艳¹, 张 倩¹

(1.四川农业大学资源环境学院, 成都 611130 2.四川省环境保护科学研究院, 成都 610041)

摘 要 选择当地大面积推广的 5 个玉米品种: 正红 311(1)、成单 30(2)、川单 428(3)、隆单 8(4)和川单 418(5) 种植于四川射洪县玉米示范区的 7 个试点, 通过 AMMI 模型研究品种和环境交互效应对玉米籽粒积累重金属能力的影响, 旨在获得对重金属吸收具有低积累性和环境适应性较好的玉米品种。结果表明, Cu 的品种效应(SS, 平方和)占总效应的 77.6%, 玉米籽粒低积累 Cu 的性状有很高的重现性, 而 As、Hg、Pb、Zn、Cr 5 种重金属元素品种与环境交互效应同品种、环境效应比较占主导作用, 分别为 63.4%、74.3%、50.3%、69.2%和 57.5%。通过双标图分析, 比较了不同玉米品种籽粒富集重金属能力的大小和稳定顺序。AMMI 模型为研究品种×地点交互效应对作物积累重金属能力的影响和评价品种稳定性提供了较好的分析方法, 对于低重金属积累品种的准确筛选和成功应用具有重要意义。

关键词 玉米; 重金属; 低吸收; 品种与环境; AMMI 模型

中图分类号: X503.231 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2011)11-2160-08

The Analysis of Stability and Adaptability on Low Accumulation of Heavy Metals in Various Cultivars of *Zea Mays*

WU Jun¹, WU Chuan-xing¹, MENG Xiao-xia², YANG Gang¹, SHEN Fei¹, LI Yan¹, ZHANG Qian¹

(1.College of Resource and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2.Sichuan Research Institute of Environmental Protection, Chengdu 610041, China)

Abstract Five widely planted locally maize cultivars (No1 :Zhenghong 311; No2 :Chengdan 30; No3 :Chuandan 428; No4 :Longdan 8; No5 :Chuandan 418), as experimental materials, were planted in seven experimental sites in Shehong County in Sichuan Province, and AMMI Model and biplot pattern were used to evaluate how interaction of breed and environment affect Corn kernels' ability to accumulate heavy metals. Results from analysis through AMMI Model showed that as far as Corn kernels' ability to accumulate Cu be concerned, the contributions from breed, interaction of breed and environment and environment were 77.6%, 18.3% and 3.9% respectively; as for Corn kernels' ability to accumulate Cr, As and Pb, the contributions from breed were respectively 37.5%, 23.2% and 31.8%, the contributions from interaction of breed and environment were 57.5%, 63.4% and 50.3% respectively, the contributions from environment were 5%, 13.4% and 17.9% respectively; for Hg and Zn, the contributions from environment were 16.8% and 19.2% respectively, and the contributions from interaction of breed and environment were 74.3% and 69.2% respectively. The results from analysis through biplot pattern showed that as for the stability for Corn kernels accumulating As, No2>No3>No1>No4>No5; as for Corn kernels' ability to accumulate As, No5>No3>No1>No4>No2. As for the stability of Corn kernels accumulating Hg, No5>No3>No2>No1>No4; as for Corn kernels' ability to accumulate Hg, No4>No2>No5>No3>No1. As for the stability of Corn kernels accumulating Cu, No5>No1>No4>No2>No3; as for Corn kernels' ability to accumulate Cu, No3>No1>No4>No2≈No5. As for the stability of Corn kernels accumulating Pb, No2>No5>No4>No3>No1; as for Corn kernels' ability to accumulate Pb, No2>No1≈No5>No3>No4. The stability of Corn kernels accumulating Cr and Zn, and Corn kernels' ability to accumulate Cr and Zn were not analyzed due to their effects not reaching significant level. This study was helpful for properly choosing maize cultivars so as

收稿日期 2011-05-14

基金项目 科技部“十一五”科技支撑计划(2008BAD44B0X-4) 四川省科技厅重点项目“四川主要农区面源污染控制与土壤生态修复技术与示范”(2007NGY006)

作者简介 伍 钧(1962—),男,四川中江人,博士,教授,主要研究方向为污染环境的生态修复。E-mail: wuj1962@163.com

to keep the heavy metals content at the safe level according to the impacts of breed, interact of breed and environment and environment on Corn kernels' accumulating heavy metals. At the same time, it was feasible that the AMMI Model is used to evaluate impacts of different factors on Corn kernels' accumulating heavy metals.

Keywords *Zea Mays*; heavy metals; low accumulation; genotypic and environmental; AMMI model

随着工农业生产的发展,全球农田土壤中有毒有害重金属含量呈急剧增加之势^[1]。土壤是农业生产的直接载体,受重金属污染的土壤,其农作物可食用部分重金属含量高,通过食物链进入人或动物体内进一步富集,引起慢性重金属中毒,危害人体健康^[2-3]。因此,如何有效地降低农作物可食用部分重金属的含量,已日益受到人们的关注。而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,从而减少粮食的有毒有害重金属含量,被国内外普遍认为是现实可行的途径^[4]。迄今为止,筛选重金属低积累品种的方法仍在探索阶段,多数研究方法是通过外加重金属的室内盆栽或大田试验,探讨作物可食用部分重金属含量在种内或种间的差异。已有研究表明,玉米^[5]、水稻^[6]、油菜^[7]、莴苣^[8]、番茄^[9]等存在重金属低积累的作物品种。

由于土壤理化性质和农艺管理措施导致土壤重金属的生物有效性改变,作物品种在不同地区吸收重金属的能力不一致,这给低积累作物品种的筛选工作带来了困难^[10-11]。筛选出作物可食用部分对重金属具有低积累性的品种,种植在不同条件的土壤上,这种低积累性状是否能重复出现,对于不同的土壤环境作物是否有较好的适应性,是广大研究者急待解决的问题。大量研究表明,作物吸收重金属的能力受品种、环境、品种和环境交互(G×E)作用的影响^[12-13]。研究作物低积累重金属能力的稳定性,有利于筛选出对不同环境具有较好适应性的低积累品种,对品种的准确筛选和成功应用具有重要意义^[14-15]。

加性主效和乘积交互作用模型(Addition Main effects and Multiplication Interaction Model,简称 AMMI 模型)已经被广泛用于评价品种的稳定性和适应性,与常规的方差分析和线性回归模型相比,其应用范围更广而且更有效,适用于研究品种与环境互作等复杂的生物现象^[14,16-17]。AMMI 模型已应用到甜玉米、水稻、小麦产量的稳定性评价,并获得较好的效果^[13,17-18]。然而有关 AMMI 模型应用在作物对重金属积累与富集能力评价方面的研究报道尚为鲜见,本文将 AMMI 模型运用到重金属低积累的玉米品种筛选中,研究了品种和环境交互效应对玉米籽粒积累重金属能力的影响,旨在获得对重金属具有低积累性和较好稳定性的玉米品种。

1 材料与方法

1.1 材料与实验设计

试验于 2008 年 4 月在四川射洪县新华村玉米示范区进行,选用当地大面积推广的 5 个玉米品种:正红 311(1)、成单 30(2)、川单 428(3)、隆单 8(4)和川单 418(5)种植于 1~7 号试点(土壤类型为紫色土)。采用“双三零”分带种植模式:每个处理种 2 带,每带种 2 行,行距为 50 cm,带宽为 200 cm,窝距为 44.5 cm 和 33.4 cm,每穴植双株。田间管理按当地大田生产进行,各试点土壤全量重金属含量见表 1。

1.2 取样与重金属含量分析

玉米成熟时,按 S 形取样法采取每个品种玉米 10 株,同时采集相对应的土壤样品(0~20 cm)组成混

表 1 7 个试点土壤基本理化性质(mg·kg⁻¹)

Table 1 Physical and chemical properties of the tested soil in 7 locations(mg·kg⁻¹)

试点	土壤基本理化性质			土壤全量重金属含量					
	碱解氮	速效钾	有效磷	Hg	As	Cu	Pb	Cr	Zn
1	68.04	262.3	146.5	0.061	11.59	22.89	26.90	44.84	83.23
2	87.93	105.6	117.5	0.182	8.966	20.84	21.97	31.18	81.11
3	94.65	76.19	88.10	0.153	10.30	17.63	23.51	31.64	86.53
4	47.44	72.48	49.04	0.250	9.910	17.83	18.71	48.14	92.08
5	77.27	99.99	115.6	0.244	7.341	18.34	20.87	118.27	91.68
6	88.23	193.7	141.5	0.182	7.742	35.10	19.73	89.58	79.98
7	82.59	132.2	164.8	0.207	8.583	18.91	21.03	109.11	80.51

合土样。玉米籽粒在 80 ℃烘箱中烘 24 h，粉碎，过 100 目筛。土壤样品于室温自然风干，去除石块、根系等杂质后，磨细，过 20 目和 100 目筛。籽粒采用混合酸 HNO₃+HClO₄(4+1)消解制备成待测液，土壤 Hg 和 As 采用王水水浴消解制备待测液，Cu、Zn、Cr、Pb 采用 HNO₃+HClO₄+HCl 消解制备待测液。其中 Hg、As 采用氢化物-原子荧光光谱法测定，其他元素采用火焰原子吸收光谱法测定。

1.3 统计分析

玉米籽粒对土壤重金属吸收能力的大小可通过富集系数来反映，富集系数=籽粒重金属含量/土壤重金属含量，结果见表 2 所示。

利用 AMMI 模型对玉米籽粒的富集系数进行分析。AMMI 模型是将方差分析和主成分分析结合在一个模型中，同时具有可加而后可乘分量的数学模型^[15]，其方程式为：

表 2 不同试点玉米籽粒的富集系数

Table 2 Coefficients of Heavy metal concentration in maize gains from 7 locations

品种	试点	玉米籽粒重金属富集系数					
		Hg	As	Cu	Pb	Cr	Zn
正红 311	1	0.139 7	0.003 8	0.072 1	0.003 5	0.002 4	0.383 3
	2	0.021 1	0.011 0	0.090 9	0.002 5	0.007 3	0.348 0
	3	0.038 4	0.011 2	0.149 7	0.002 1	0.009 7	0.306 0
	4	0.024 0	0.009 5	0.107 7	0.002 1	0.003 8	0.281 4
	5	0.104 6	0.009 5	0.116 2	0.001 5	0.008 5	0.298 6
	6	0.042 0	0.011 5	0.104 3	0.001 6	0.004 6	0.311 5
	7	0.033 9	0.005 3	0.147 0	0.002 4	0.002 5	0.308 3
成单 30	1	0.049 8	0.002 1	0.084 1	0.002 0	0.004 3	0.266 9
	2	0.106 6	0.002 8	0.073 7	0.002 6	0.002 0	0.286 9
	3	0.106 2	0.002 6	0.049 3	0.002 8	0.003 7	0.318 9
	4	0.137 6	0.002 8	0.065 9	0.002 1	0.003 2	0.259 5
	5	0.120 3	0.003 9	0.124 7	0.002 3	0.002 2	0.263 8
	6	0.081 0	0.003 7	0.108 7	0.002 2	0.003 5	0.322 3
	7	0.224 9	0.003 4	0.088 0	0.002 3	0.001 9	0.304 3
川单 428	1	0.110 1	0.011 0	0.224 7	0.001 4	0.009 4	0.254 0
	2	0.033 9	0.006 3	0.180 9	0.002 1	0.011 6	0.224 3
	3	0.098 4	0.007 6	0.276 2	0.001 7	0.011 9	0.268 5
	4	0.047 2	0.012 5	0.230 5	0.002 2	0.010 9	0.308 7
	5	0.058 8	0.010 1	0.206 5	0.002 0	0.003 6	0.263 5
	6	0.057 8	0.010 0	0.217 0	0.001 8	0.003 4	0.307 6
	7	0.032 2	0.008 1	0.152 1	0.002 1	0.003 5	0.315 9
隆单 8	1	0.061 8	0.001 7	0.075 3	0.002 1	0.006 3	0.274 0
	2	0.230 0	0.002 7	0.102 0	0.002 3	0.006 7	0.285 7
	3	0.118 8	0.015 3	0.115 4	0.001 6	0.004 3	0.312 2
	4	0.841 0	0.015 6	0.122 2	0.001 5	0.008 4	0.348 1
	5	0.043 9	0.003 5	0.124 0	0.001 2	0.009 1	0.262 5
	6	0.120 0	0.006 5	0.059 1	0.000 8	0.010 1	0.191 9
	7	0.112 2	0.004 1	0.125 3	0.002 0	0.010 9	0.368 4
川单 418	1	0.187 0	0.002 2	0.068 3	0.002 1	0.003 1	0.322 9
	2	0.053 3	0.003 5	0.086 7	0.002 2	0.001 3	0.292 7
	3	0.052 0	0.005 0	0.101 6	0.002 2	0.003 7	0.266 0
	4	0.058 9	0.008 2	0.069 8	0.002 4	0	0.290 2
	5	0.068 8	0.017 8	0.072 9	0.002 4	0.001 0	0.243 2
	6	0.064 5	0.011 1	0.098 5	0.002 3	0.007 7	0.306 8
	7	0.029 9	0.029 5	0.083 6	0.002 4	0.007 0	0.341 4

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \sum \lambda_s Y_{is} \delta_{js} + \rho_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

式中 y_{ijk} 是第 i 个品种在环境 j 的第 k 次重复的观察值 μ 代表总体平均值 α_i 是第 i 品种与总平均的离差 β_j 是第 j 环境与总平均的离差 λ_s 是第 s 个交互效应主成分轴(interaction principal component axis, IPCA)的特征值 Y_{is} 是第 i 轴品种主成分得分 δ_{js} 是环境主成分得分 s 是在模型主成分轴的总个数 ρ_{ij} 是提取 p 个 IPCA 轴后留下的残差 ε_{ijk} 是试验误差。倍加性参数的方便取值为 $\lambda_s^{0.5} Y_{is}$ 和 $\lambda_s^{0.5} \delta_{js}$, 它们的乘积为品种与环境的互作效应, 品种(或环境)在其相应 IPCA 轴上的得分就可度量其自身互作效应的大小, 它们能最大程度地鉴别品种和环境的敏感程度。

双标图可以直观地描绘和分析品种与环境交互作用的模式, 以 IPCA1 作横坐标、IPCA2 作纵坐标, 并分别利用品种和环境在相应 IPCA 轴上的得分可以把所有品种和环境同时投影到一张 IPCA1-IPCA2 坐标图上, 这样更深层次地解释品种×地点互作效应, 进一步鉴别品种对环境的敏感程度^[14]。

2 结果与分析

2.1 玉米籽粒重金属积累能力的 AMMI 分析

由 AMMI 模型分析表明(表 3), 环境、品种及二者互作效应对玉米籽粒积累重金属的能力有明显影响, 它们的相对作用大小因重金属种类不同而有一定的差异。

从表 3 可知, 不同玉米品种和不同试点间的玉米籽粒富集 Hg、As、Pb 的能力差异均达到极显著或显著水平, 且品种与环境互作效应(G×E)也达到了极显著或显著水平, 说明不同的玉米品种富集重金属的能力存在差异, 环境也是导致玉米积累重金属差异的原因之一, 同时, 玉米籽粒富集重金属能力的差异受到

品种基因型和环境因素的交互影响。不同玉米品种间对 Cu 富集能力差异达到极显著水平, 说明籽粒中 Cu 含量的差异主要受品种的控制, 具有较高的稳定性, 稳定性分析也表明 Cu 的基因型效应最大, 其基因效应(SS, 平方和)占总效应的 77.6%, 其次为品种与环境互作效应, 占总效应的 18.3%, 环境效应仅占 3.9%, 说明在不同的土壤环境, 玉米籽粒低 Cu 积累的性状都有较高的重现性, 即品种控制明显强于环境因子影响; Cr、As、Pb 3 种重金属元素的品种效应分别占 37.5%、23.2% 和 31.8%, 而品种与环境互作效应分别占 57.5%、63.4% 和 50.3%, 环境效应分别占总效应的 5.0%、13.4% 和 17.9%, 说明对玉米籽粒富集 Cr、As、Pb 能力差异起作用的大小顺序为环境与品种互作>品种>环境; 而 Hg 和 Zn 的环境效应分别为 16.8% 和 19.2%, 其品种与环境互作分别为 74.3% 和 69.2%。对于 Cr、Hg、Pb、As、Zn 5 种元素, 其环境与品种互作效应占主导作用, 说明在不同的土壤环境, 籽粒重金属含量可能有显著差别, 因此在种植时, 应注意结合相应的农艺措施, 降低重金属在土壤环境中的有效性。

2.2 品种的稳定性分析

双标图能更直观地解释品种×地点互作效应, 进一步鉴别品种对环境的敏感程度。由于 Cr、Zn 元素各效应未达到显著水平, 这里仅对 Hg、Pb、As、Cu 4 种元素进行双标图分析。

图 1 纵轴方向表示品种与环境的交互效应(IP-CA1), 横轴表示玉米籽粒重金属的富集系数(IP-CA2), IPCA1 值较小的品种说明品种与环境互作效应较小, 为稳定的品种, 所以对重金属吸收具有低积累性且较好稳定的品种是对应最左边且靠近水平线的品种。由图 1 可知, 品种 2、品种 3 的品种与环境交互作用小, 表现稳定。而品种 5、品种 4 的 IPCA1 值远

表 3 玉米籽粒重金属的 AMMI 分析

Table 3 The results of AMMI analysis for gain heavy metal concentration

变异来源	Hg		As		Cu		Cr		Pb		Zn	
	SS	F	SS	F	SS	F	SS	F	SS	F	SS	F
总的	1.901		0.001 12		0.103 6		0.000 40		7.47E-06		0.052	
品种	0.168	88.379**	0.000 26	56.562**	0.080 4	81.615**	0.000 15	4.786	2.38E-06	103.028**	0.007	3.577
环境	0.321	112.844**	0.000 15	22.257*	0.004 1	2.781	1.13E-05	0.235	1.33E-06	38.285**	0.010	3.610
G×E	1.412	124.145**	0.000 71	25.734*	0.019 0	3.220	0.000 23	1.196	3.76E-06	27.050**	0.036	3.165
PCA1	1.374	322.074**	0.000 55	52.602**	0.009 9	4.448	0.000 15	2.133	0.000 003	57.529**	0.020	4.658
PCA2	0.033	10.088*	0.000 11	14.063*	0.006 1	3.578	4.72E-05	0.839	4.4E-07	10.755*	0.011	3.260
PCA3	0.003	1.441	4.92E-05	8.551	0.002 2	1.845	5.08E-06	0.126	3.1E-07	10.634*	0.004	1.644

注 SS, 平方和; * 和 ** 分别代表差异显著和极显著。

Note SS, Sum of square; * and ** significance at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

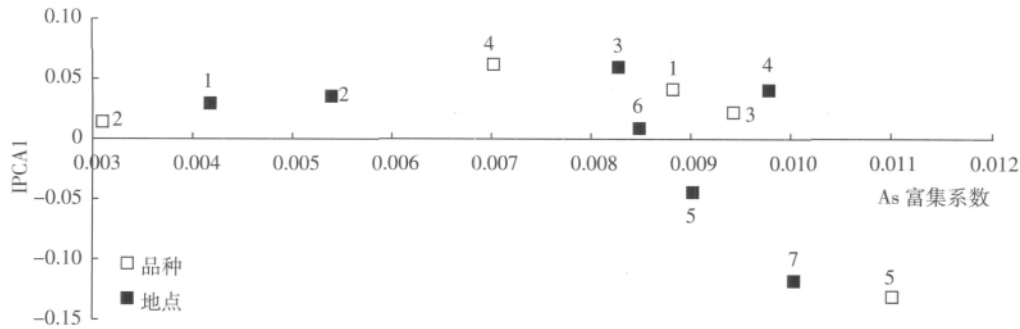


图 1 As 富集系数和品种与环境互作效应的双标图

Figure 1 The results of AMMI analysis on coefficient of As concentration and interaction of genotypic and environmental

离水平线,说明对环境较敏感。品种 2、品种 4 的富集系数较小,而品种 3、品种 5 的富集系数较大。另外,图 1 还表达了品种对不同地点的适应性信息,过零点水平线上下的品种与位于同侧地点之间的互作为正向,与另一侧地点间的互作为负向。品种 1、2、3、4 与试点 1、2、3、4 和 6 有正向交互作用,与试点 5、7 有负向交互作用,表明上述品种在试点 1、2、3、4 和 6 有较好的适应性,而品种 5 与试点 5、7 有较好的适应性。品种 2 (成单 30)可作为 As 污染农田的低积累稳定品种。

不同玉米品种籽粒富集 As 的稳定顺序为 2(成单 30)>3(川单 428)>1(正红 311)>4(隆单 8)>5(川单 418);籽粒富集 As 能力顺序为 5(川单 418)>3(川单 428)>1(正红 311)>4(隆单 8)>2(成单 30)。

从图 2 可知,除品种 4 外,其他品种的 IPCA1 值较小,都比较稳定。品种 4 的 Hg 富集系数较大,且对环境很敏感,在种植时应尽量避免选择此类品种。

不同玉米品种籽粒富集 Hg 的稳定顺序为 5(川单 418)>3(川单 428)>2(成单 30)>1(正红 311)>4(隆单 8);籽粒富集 Hg 能力顺序为 4(隆单 8)>2(成单 30)>5(川单 418)>3(川单 428)>1(正红 311)。

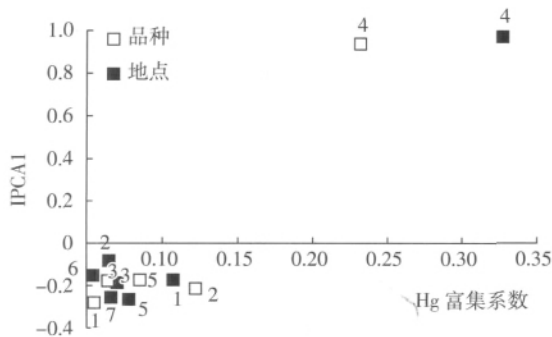


图 2 Hg 富集系数和品种与环境互作效应的双标图

Figure 2 The results of AMMI analysis on coefficient of Hg concentration and interaction of genotypic and environmental

从图 3 可知,横纵方向上品种比试点更分散,说明品种的变异大于试点的变异,也就是说,同一品种在各试点富集重金属的能力差异不大,而各品种间富集能力差异较大。品种 3 有最大的富集系数和较差的稳定性,而品种 5 有较小的富集系数和较好的稳定性。Cu 元素是植物和人体必需的营养元素,但是过量的 Cu 仍会对人体产生严重的危害。品种 5 (川单 418)籽粒 Cu 富集系数均值为 0.083 1,假定农田土壤 Cu 含量达到土壤环境质量的二级 (Cu 含量 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 收获的川单 418 籽粒 Cu 含量为 $8.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,低于国家食品卫生标准的阈值 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。因此,川单 418 可作为中、低度 Cu 污染农田的低积累品种。

不同玉米品种籽粒富集 Cu 的稳定顺序为 5(川单 418)>1(正红 311)>4(隆单 8)>2(成单 30)>3(川单 428);籽粒富集 Cu 能力顺序为 3(川单 428)>1(正红 311)>4(隆单 8)>2(成单 30)≈5(川单 418)。

从图 4 可知,试点和品种都比较分散,说明环境和品种导致玉米籽粒富集 Pb 的能力差异相当。品种 2、3、5 与试点 1、2、6 有较好的适应性,品种 1、4 与试点 3、4、5 和 7 有较好的适应性。匡少平等^[19]研究发现

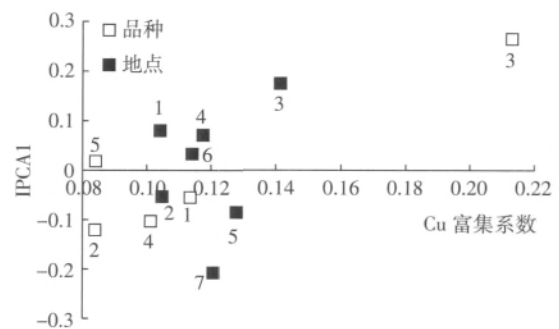


图 3 Cu 富集系数和品种与环境互作效应的双标图

Figure 3 The results of AMMI analysis on coefficient of Cu concentration and interaction of genotypic and environmental

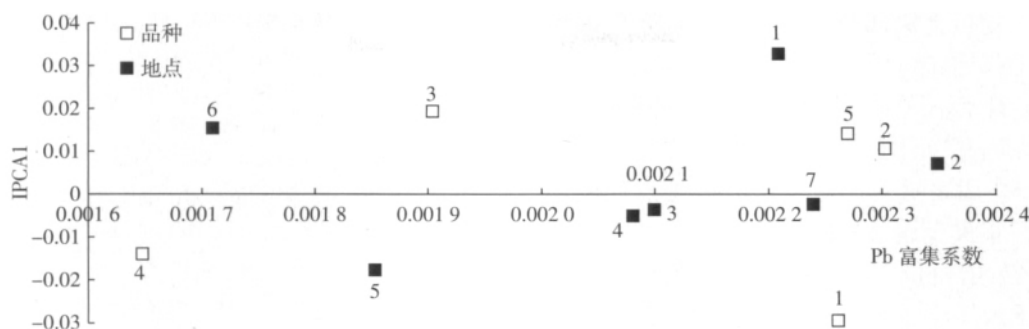


图4 Pb富集系数和品种与环境互作效应的双标图

Figure 4 The results of AMMI analysis on coefficient of Pb concentration and interaction of genotypic and environmental

鲁玉1号籽粒的富集系数为0.0077,对Pb有较强的积累能力。而代全林^[20]研究发现,在土壤Pb含量达到 $595.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的情况下,仍有52%的玉米品种籽粒Pb含量未超过 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,籽粒的富集系数小于0.00034。这说明不同品种的玉米累积Pb的规律存在差异。本研究5个玉米品种籽粒Pb富集系数的平均值在0.0016~0.0023之间,说明这些品种在Pb轻度污染的农田种植是安全的,然而在土壤Pb含量达到土壤环境质量标准二级或三级的限定值时,低积累性状是否能重现,有待进一步研究。

不同玉米品种籽粒富集Pb的稳定顺序为2(成单30)>5(川单418)>4(隆单8)>3(川单428)>1(正红311);籽粒富集Pb能力顺序为2(成单30)>1(正红311)≈5(川单418)>3(川单428)>4(隆单8)。

3 讨论

我国有大面积受重金属污染的农田,在这些农田上收获的作物可食用部分重金属含量往往超过国家粮食卫生标准的几倍甚至是几十倍。通过筛选低积累重金属的作物品种来减少食物链重金属富集被证明是经济、可行的^[13]。然而,目前筛选出的重金属低积累的作物品种在实际生产中,其低积累性状是否能重现,是急待解决的问题。本研究表明,即使在重金属含量相近的土壤上,玉米积累重金属的能力仍存在显著的差异。正红311在4号试点(土壤Hg含量 $0.250 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和5号试点(Hg含量 $0.244 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)籽粒Hg富集系数分别为0.0240和0.1046;川单428在2、3号试点(土壤Hg含量相差 $0.029 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的富集系数相差达到3倍以上;隆单8在5、6号试点(土壤As含量相差 $0.401 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)籽粒富集系数也相差近3倍。这说明作物品种在不同土壤条件下累积重金属能力不一致,这是由于土壤理化性状、土壤微生物、根际氧化

膜、根际分泌物、不同耕作制度和不同重金属及其相互协同与拮抗作用等因素都会影响到作物对重金属元素的吸收^[21]。作物与其周围环境存在着极其密切的关系,不能把作物与环境任何一方看成是更重要的,两者是统一的^[22]。只有理解品种、环境以及二者互作效应才能更好地解释作物累积重金属的规律。

本研究中,品种、环境及品种与环境互作对玉米籽粒吸收Hg、As、Pb、Cu含量的影响均达到极显著或显著水平,进一步证实了通过筛选和选育品种从而减少其籽粒Hg、As、Pb和Cu含量的可能性。Cr、Hg、Pb、As、Zn 5种重金属元素,品种与环境互作效应占主导作用。作物吸收的重金属主要来源于土壤,其积累量主要取决于土壤重金属含量^[23-24],因此,在种植作物时应结合农艺措施或外源添加剂降低土壤重金属的生物有效性^[25-26]。有学者研究表明硝酸钙、碳酸氢铵、钙镁磷肥、磷酸二氢钙、硫酸钾比尿素、过磷酸钙、氯化钾等有利于降低土壤重金属的生物有效性^[27-28]。而Cu品种效应占主导地位,说明玉米籽粒低积累Cu的性状有较高的重现性,这为Cu低积累玉米品种在生产上的广泛应用带来了希望。筛选得到川单418可作为Cu污染农田的低积累稳定品种,其低积累性状是否由遗传基因所控制有待进一步研究。

4 结论

农作物品种区域试验,作物品种和环境存在交互(G×E)作用。本实验中,除Cu元素之外,As、Hg、Zn、Cr、Pb 5种重金属元素品种和环境交互作用对玉米籽粒重金属含量有主导作用。我国存在大面积中、低度重金属污染的农田,将筛选得到的低积累作物品种种植在这些未知重金属浓度的土壤上,可食用部分重金属含量是否依然低于国家粮食卫生标准,这是衡量选育的低重金属积累品种是否具有推广价值的重要标

志。筛选出作物可食用部分对重金属具有低积累性(即含量低于国家粮食卫生标准),且这种低积累性状可重复出现,对于不同的土壤环境有较好的适应性,是科学界急待解决的问题。AMMI 模型的提出及在这一领域的初步应用表明,它为研究品种×地点互作效应和评价低积累重金属品种的稳定性与环境适应性提供了一个较好的分析方法,通过 AMMI 模型的双标图能直观地反映 5 个玉米品种籽粒富集重金属能力的大小和稳定顺序,这对评价、培育、推广作物品种具有指导意义。

参考文献:

- [1] McLaughlin M J, Parker D R, Clarke J M. Metals and micronutrients—food safety issues[J]. *Field Crops Res*, 1999, 60 :143–163.
- [2] 朱宇恩, 赵 焱, 李 强, 等. 北京城郊污灌土壤—小麦(*Triticum aestivum*)体系重金属潜在健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(2) :263–270.
- ZHU Yu-en, ZHAO Ye, LI Qiang, et al. Potential influences of heavy metal in “Soil–Wheat(*Triticum aestivum*)” system on human health :A case study of sewage irrigation area in Beijing, China[J]. *Journal of Agro–Environment Science*, 2011, 30(2) :263–270.
- [3] 肖青青, 王宏斌, 赵 宾, 等. 云南个旧市郊农作物重金属污染现状及健康风险[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(2) :271–281.
- XIAO Qing-qing, WANG Hong-bin, ZHAO Bin, et al. Heavy metal pollution in crops growing in suburb of Gejiu City, Yunnan Province, China :Present situation and health risk[J]. *Journal of Agro–Environment Science*, 2011, 30(2) :271–281.
- [4] Zhang G P, Fukami M, Sekimoto H. Influence of cadmium on mineral concentrations and yield components in wheat genotypes differing in Cd tolerance at seeding stage[J]. *Field Crops Res*, 2002, 77 :93–98.
- [5] Florijn P J, van Beusichem M L. Uptake and distribution of cadmium in maize inbred lines[J]. *Plant and Soil*, 1993, 150 :25–32.
- [6] 徐燕玲, 陈能场, 徐胜光, 等. 低镉累积水稻品种的筛选方法研究 :品种与类型[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(7) :1346–1352.
- XU Yan-ling, CHEN Neng-chang, XU Sheng-guang, et al. Breeding rice cultivars with low accumulation of cadmium :Cultivars versus type[J]. *Journal of Agro–Environment Science*, 2009, 28(7) :1346–1352.
- [7] 王激清, 刘 波, 苏德纯. 超积累镉油菜品种的筛选[J]. 河北农业大学学报, 2003, 1(1) :15–19.
- WANG Ji-qing, LIU Bo, SU De-chun. Selection of oilseed rapeseed as a hyperaccumulator for cadmium[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2003, 1(1) :15–19.
- [8] Costa G, Morel J L. Efficiency of H⁺-ATPase activity on cadmium uptake by four cultivars of lettuces[J]. *J Plant Nutr*, 1994, 17(4) :627–637.
- [9] 朱 芳, 方 炜, 杨中艺. 番茄吸收和积累 Cd 能力的品种间差异[J]. 生态学报, 2006, 26(12) :4071–4075.
- ZHU Fang, FANG Wei, YANG Zhong-yi. Variations of Cd absorption and accumulation of 36 *Lycopersicon esculentum* cultivars[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(12) :4071–4075.
- [10] 荆旭慧, 李恋卿, 潘根兴. 不同环境下土壤作物系统中重金属元素迁移分配特点[J]. 生态环境, 2007, 16(3) :812–817.
- JING Xu-hui, LI Lian-qing, PAN Gen-xing. The feature of heavy metals mobility and allocation in soil–crop systems of different environment[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(3) :812–817.
- [11] 杨超光, 豆 虎, 梁永超. 硅对土壤外源镉活性和玉米吸收镉的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(1) :116–121.
- YANG Chao-guang, DOU Hu, LIANG Yong-chao. Influence of silicon on cadmium availability and cadmium uptake by maize in cadmium-contaminated soil [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38 (1) :116–121.
- [12] Clarke J M. The research on heredity for Cd content of a hardy wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 1998, 18(4) :10–12.
- [13] 程旺大, 张国平. 晚粳稻籽粒中 As、Cd、Cr、Ni、Pb 等重金属含量的基因型与环境效应及其稳定性[J]. 作物学报, 2006, 32(4) :573–579.
- CHENG Wang-da, ZHANG Guo-ping. Genotypic and environmental variation and their stability of As, Cr, Cd, Ni and Pb concentrations in the grains of Japonica rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(4) :573–579.
- [14] 张 泽, 鲁 成, 向仲怀. 基于 AMMI 模型的品种稳定性分析[J]. 作物学报, 1998, 24(3) :304–309.
- ZHANG Ze, LU Cheng, XIANG Zhong-huai. Analysis of variety stability based on AMMI model[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1998, 24(3) :304–309.
- [15] Wu Y Q. Application of AMMI mode to analyze regional trial data of rice I. Yield stability of hybrid rice cross on the test[J]. *Journal of Zhanjiang Ocean University*, 1999, 19(4) :55–59.
- [16] 唐启义, 冯光明. DPS 数据处理系统[M]. 北京 :科学出版社, 2006 :529–538.
- TANG Qi-yi, FENG Guang-ming. DPS Processing System[M]. Beijing :Science Press, 2006 :529–538.
- [17] 吴渝生, 李本逊, 顾红波. 甜玉米品种稳定性的 AMMI 模型分析[J]. 华中农业大学学报, 2003, 22(1) :4–8.
- WU Yu-sheng, LI Ben-xun, GU Hong-bo. Analysis of sweet corn variety stability based on AMMI model[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2003, 22(1) :4–8.
- [18] 高海涛, 王书子, 王翠玲, 等. AMMI 模型在旱地小麦区域试验中的应用[J]. 麦类作物学报, 2003, 23(4) :43–46.
- GAO Hai-tao, WANG Shu-zi, WANG Cui-ling, et al. Application of AMMI model in data analysis of regional trial of dryland wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2003, 23(4) :43–46.
- [19] 匡少平, 徐 仲, 张书圣. 玉米对土壤中重金属 Pb 的吸收特性与污染防治[J]. 安全与环境学报, 2002(2) :28–31.
- KUANG Shao-ping, XU Zhong, ZHANG Shu-shen. Phytoavailability of corns to heavy metal Pb content in the soils and its benefit to the environmental amelioration[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2002(2) :28–31.
- [20] 代全林, 袁剑刚, 方 炜. 玉米各器官积累 Pb 能力的品种间差异[J]. 植物生态学报, 2005, 29(6) :992–999.
- DAI Quan-lin, YUAN Jian-gang, FANG Wei. Differences of Pb accumulation among plant tissues of 25 *Zea mays* varieties[J]. *Acta Phytoc-*

cologica Sinica, 2005, 29(6) :992-999.

- [21] 杭小帅, 周健民, 王火焰. 常熟市高风险区水稻籽粒重金属污染特征及评价[J]. 中国环境科学, 2009, 29(2) :130-135.
HANG Xiao-shuai, ZHOU Jian-min, WANG Huo-yan. Heavy metal pollution characteristics and assessment of rice grain from a typical high risk area of Changshu City, Jiangsu Province[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(2) :130-135.
- [22] Wang X, Dai Y B, Jiang D, et al. Yield-formation and source-sink characteristics of rice genotypes under two different eco-environments[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(4) :615-619.
- [23] Nan Z R, Chao C Y, Chen F H, et al. Relations between soil properties and selected heavy metal concentration in spring wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in contaminated soils[J]. *Water Air Soil Pollution*, 2002, 133 :205-213.
- [24] 杨春刚, 廖西元, 章秀福. 不同基因型水稻籽粒对镉积累的差异[J]. 中国水稻科学, 2006, 20(6) :660-662.
YANG Chun-gang, LIAO Xi-yuan, ZHANG Xiu-fu. Genotypic difference in cadmium accumulation in brown rice[J]. *Chinese J Rice Sci*, 2006, 20(6) :660-662.
- [25] 杨晓英, 杨劲松, 黄 铮, 等. 螯合剂对铅污染土壤上玉米幼苗生长及铅积累特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2) :482-

486.

- YANG Xiao-ying, YANG Jin-song, HUANG Zheng, et al. Influence of chelators application on the growth and lead accumulation of maize seedlings in Pb-contaminated soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2) :482-486.
- [26] 岳 平. 添加化学改良剂对海南岛砖红壤中铅的化学形态与转化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(5) :1791-1795.
YUE Ping. Chemical forms and transformations of Pb in granitic latosol on Hainan island through adding chemical amendments [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(5) :1791-1795.
- [27] 吴启堂, 王光寿. 不同水稻、菜心品种和化肥形态对作物吸收累积镉的影响[J]. 华南农业大学学报, 1995, 15(4) :1-6.
WU Qi-tang, WANG Guang-shou. Effect of crop cultivare and chemical fertilizers on the cadmium accumulation in plants[J]. *Journal of Hua Nan Agricultural University*, 1995, 15(4) :1-6.
- [28] 焦 鹏, 高建培, 王宏钺, 等. N、P、K 肥对玉米幼苗吸收和累积重金属的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(6) :1094-1102.
JIAO Peng, GAO Jian-pei, WANG Hong-bin, et al. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on heavy metal uptake and accumulation by maize seedlings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(6) :1094-1102.

更正

《农业环境科学学报》2011 年第 10 期 1925 页原

重金属与农药复合污染研究现状及展望

潘 攀^{1,2}, 杨俊诚^{2*}, 邓世槐^{1*}, 姜慧敏², 张建峰², 李玲玲², 沈 飞¹

(1. 四川农业大学资源环境学院, 四川 雅安 625014; 2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

更正为

重金属与农药复合污染研究现状及展望

潘 攀^{1,2}, 杨俊诚^{2*}, 邓仕槐^{1*}, 姜慧敏², 张建峰², 李玲玲², 沈 飞¹

(1. 四川农业大学资源环境学院, 四川 雅安 625014; 2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)