

玉米重金属铅(Pb^{2+})含量的配合力分析与育种对策

赵雄伟¹, 金 枫², 曹艳花¹, 李芦江¹, 张永中¹, 张志明¹, 沈亚欧¹, 潘光堂¹, 林海建¹

(¹四川农业大学玉米研究所, 成都 611130; ²贵州省兴义市环保局, 兴义 562400)

摘要: 选择有代表性的 12 个玉米自交系, 按 Griffing4 模式组配获得 66 个组合(F_1), 用温室盆栽, 在 3 个 Pb^{2+} 污染水平下对叶片和子粒 Pb^{2+} 含量配合力和遗传参数进行分析。结果表明: 玉米叶片和子粒的 Pb^{2+} 含量一般配合力与特殊配合力差异均达到显著水平, 非加性方差大于加性方差, 遗传方差大于环境方差, 广义遗传率大于狭义遗传率, 该性状的变异主要来自遗传因素, 遗传力较强。玉米种质筛选过程中, 土壤 Pb^{2+} 浓度在 333.32 mg/kg 以下, 用亲本郑 58 组配的组合在筛选时不仅注重子粒 Pb^{2+} 含量未超标而且要注重叶片 Pb^{2+} 高富集, 其主要是兼顾饲料和粮食安全的同时进行土壤 Pb^{2+} 污染的生物修复; 土壤 Pb^{2+} 浓度高于 715.46 mg/kg 时, 用亲本 178 组配的组合筛选应注意叶片和子粒低 Pb^{2+} 积累的种质选育, 对今后在不同 Pb^{2+} 污染土壤中开展玉米品种筛选和规避污染育种策略的选择具有一定的指导意义。

关键词: 玉米; Pb^{2+} 胁迫; 配合力; 育种策略

Combining Ability Analysis for Pb^{2+} Content in Maize and the Corresponding Breeding Strategy

ZHAO Xiong-wei¹, JIN Feng², CAO Yan-hua¹, LI Lu-jiang¹, ZHANG Yong-zhong¹,

ZHANG Zhi-ming¹, SHEN Ya-ou¹, PAN Guang-tang¹, LIN Hai-jian¹

(¹Maize Research Institute of Sichuan Agriculture University, Chengdu 611130; ²Environmental Protection Bureau of Xingyi, Guizhou 562400)

Abstract: 66 hybrids(F_1) were got by crossing 12 selected typical inbred lines according to Griffing 4 model. The analysis of combining ability and genetic parameters were conducted for Pb^{2+} contents in leaves and kernels under 3 Pb^{2+} contamination levels via pot cultivating method in the greenhouse. According to the results, there were significant differences between general combining ability and special combining ability of Pb^{2+} content in maize leaves and kernels, and the non-additive variance was larger than the additive variances. The genetic variance was larger than the environmental variance, as well as the broad-sense heritability was larger than the narrow-sense heritability, indicating that this trait's variance is mainly from genetic factors with a higher hereditary capacity. During the germplasm screening process, when the soil Pb^{2+} concentration was lower than 333.32 mg/kg, Using combinations crossed by parent strain Zheng58 would focus on not only the Pb^{2+} content of kernels in standard, but also the high enrichment of Pb^{2+} content in leaves, the main purpose was to conduct bioremediation for Pb^{2+} contamination in soil while taking feed and food security into account. When the Pb^{2+} concentration was higher than 715.46 mg/kg, using combinations crossed by parent strain 178 should focus on selecting germplasm of low Pb^{2+} accumulation in leaves and kernels, and this would offer some certain guidance for screening maize varieties in Pb^{2+} contaminated soil in the future and selecting breeding strategy of avoiding pollution.

Key words: maize(*Zea mays* L.); Pb^{2+} stress; combining ability; breeding strategy

收稿日期: 2014-04-24 修回日期: 2014-06-07 网络出版日期: 2014-12-11

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.4996.S.20141211.2230.028.html>

基金项目: 国家自然科学基金(31201221)

第一作者研究方向为玉米逆境分子生物学。E-mail: zhaoxw198866@163.com

通信作者: 林海建, 研究方向为玉米逆境分子生物学与遗传育种。E-mail: linhj521@gmail.com

随着我国工矿“三废”的无序排放和含重金属制品的大量使用,农田土壤重金属污染随之加重,致使污染地区种植的农作物组织中重金属含量超标,严重影响植物的生长,最终以食物链的传递和累积方式危害人类健康^[1-2]。铅(Pb^{2+})是当前环境存量最大的重金属污染元素,也是最难控制的污染物^[3-4]。玉米作为重要的粮食、饲料和工业等原料的主要来源,其食品安全与国民的健康息息相关,当前,在我国 Pb^{2+} 污染对玉米造成的影响是不可忽视的,尤其在我国西南地区, Pb^{2+} 污染对玉米造成的危害尤为突出^[5]。

大量研究发现不同作物甚至同一作物的不同品种对 Pb^{2+} 的吸收和分配不同^[6-7]。利用这一特性,可以通过推广种植食用部位低 Pb^{2+} 积累的作物类型或品种,有效降低 Pb^{2+} 对人畜食用后的危害,这一策略已在玉米、水稻等作物上成功运用^[8-10]。曹莹等^[11]研究发现了 Pb^{2+} 从玉米根部至叶片的转运效率并不低,因此也要注重选育玉米叶片低 Pb^{2+} 积累的种质。近几年研究发现的香根草、印度芥菜等重金属修复植物虽然转运系数较高,但缺点是生物量较小、生长缓慢、吸附总量有限^[12],而且长时间的生物修复也不利于我国农业经济的发展。玉米对 Pb^{2+} 污染具有较好的耐性,根系发达,地上部分生物量大,栽培管理粗放,有潜力成为新的生物修复植

物^[13-14]。因此,玉米叶片高 Pb^{2+} 富集和子粒低 Pb^{2+} 积累品种的选育将成为重金属 Pb^{2+} 污染生物修复育种的重要目标之一。

本研究结合课题组前期试验结果^[15],筛选了具有代表性的12个玉米骨干自交系,按Grinffing4组配获得66个杂交组合,对自交系和杂交组合叶片和子粒中 Pb^{2+} 含量的配合力和相关遗传参数进行分析,探讨供试材料在 Pb^{2+} 污染土壤中的食品安全和修复利用价值,为今后针对土壤 Pb^{2+} 污染问题开展玉米品种筛选和规避污染育种策略的选择提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤采自四川农业大学多营农场(四川雅安),土壤经风干、压碎过5 mm筛,以备试验分析及玉米栽培,土壤中的 Pb^{2+} 含量为50.65 mg/kg,pH值6.53,全氮、全磷和全钾含量分别为3.42 g/kg、0.61 g/kg和10.35 g/kg。

1.2 供试材料

以12个自交系及按Griffing4模式组配获得的66个杂交组合 F_1 为供试材料。12个自交系由四川农业大学玉米研究所提供,自交系及所属类群见表1。

表1 供试玉米自交系及其所属类群
Table 1 The tested maize inbred lines and their heterotic groups

编号	自交系	类群	编号	名称	类群	编号	自交系	类群
Code	Lines	Heterotic group	Code	Lines	Heterotic group	Code	Lines	Heterotic group
1	郑 58	改良 Reid 群	5	R08	改良 Reid 群	9	Mol17	Lancaster 群
2	昌 7-2	唐四平头群	6	ES40	唐四平头群	10	178	PB 群
3	综 31	综合群	7	掖 478	Reid 群	11	S37	旅大红骨
4	齐 319	PB 群	8	沈 137	PB 群	12	B73	BSSS 群

1.3 试验方法

2012年4月在四川农业大学雅安多营农场温室大棚内进行试验。将供试土壤装入直径28 cm、深25 cm的塑料盆中,每盆装土15 kg。根据国家土壤环境质量标准,试验设置3个 Pb^{2+} 污染水平,污染水平1不添加 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 溶液,污染水平2和水平3则分别加入定量的 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 溶液。混匀后最终实测污染水平1、2、3浓度分别为50.65 mg/kg(土壤背景 Pb^{2+} 浓度)、333.32 mg/kg和715.46 mg/kg。挑选供试材料大小一致的种子,采用育苗盘育苗的

方式,待幼苗长至2~3片叶时,选择长势一致的幼苗移入塑料盆中,呈正三角形排列,每盆3株,每个材料种植4盆。水肥管理按玉米的常规管理进行。

1.4 样品采集与 Pb^{2+} 含量测定

待玉米成熟期后剪取供试材料的穗位叶片,清洗去污后在105℃下杀青,果穗收获脱粒后在65℃下烘至恒重。样品用万能粉碎机(型号:Z-750)粉碎,并过40目筛,装入样品塑料袋,最后用火焰原子吸收光谱法测定样品 Pb^{2+} 含量^[16]。 Pb^{2+} 标准溶液采用国家标准,每个样品3次重复,单位为mg/kg,用空白样(5%

HNO₃)作对照。用 DPS、SPSS 统计软件对所测的样品重金属含量进行方差、配合力以及遗传参数等分析。

2 结果与分析

2.1 玉米叶片和子粒 Pb²⁺ 含量的联合方差分析

对 3 个污染水平下的 66 个杂交组合叶片和

子粒 Pb²⁺ 含量进行联合方差分析。结果见表 2, Pb²⁺ 含量在污染水平间、基因型间、污染水平与基因型互作差异极显著。由此可以得出,玉米叶片和子粒 Pb²⁺ 含量的变异受基因型和环境共同控制。

表 2 叶片和子粒 Pb²⁺ 含量的污染水平间联合方差分析

Table 2 Joint analysis of variance for Pb²⁺ contents in leaves and kernels among different pollution levels

变异来源 Source of variation	自由度 <i>df</i>	叶片 Pb ²⁺ 含量 Leaves'Pb ²⁺ content		子粒 Pb ²⁺ 含量 Kernels'Pb ²⁺ content	
		<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>
污染水平 Pollution level	2	491120. 21	1842. 75 **	3300. 43	727. 05 **
基因型 Genetype	65	8215. 39	30. 82 **	351. 42	77. 42 **
基因型 × 污染水平 Genetype × Level	130	3643. 20	13. 67 **	308. 42	67. 94 **
试验误差 Experimental error	390	266. 52		4. 54	

*、** 分别表示在 0. 05、0. 01 水平差异显著,下同
*, **:Significant at 5% and 1% level, respectively, the same as below

2.2 自交系及各组合间子粒和叶片 Pb²⁺ 含量的变异

在 3 个污染水平下,供试自交系及组合叶片和

子粒 Pb²⁺ 含量的差异分析见表 3,自交系间及组合间叶片和子粒 Pb²⁺ 含量存在不同程度的差异。

表 3 自交系及其组合叶片和子粒中 Pb²⁺ 含量的变化

Table 3 Changes of Pb²⁺ contents in leaves and kernels of the inbred lines and hybrids

类型 Type	项目 Programe	叶片 Leaves			子粒 Kernels		
		污染水平 1	污染水平 2	污染水平 3	污染水平 1	污染水平 2	污染水平 3
		Level 1	Level 2	Level 3	Level 1	Level 2	Level 3
自交系 Inbred line	最大值(mg/kg) Max.	77. 56	235. 58	202. 92	0. 15	0. 84	4. 32
	最小值(mg/kg) Min.	10. 61	61. 87	76. 2	20. 10 μg/kg	80. 00 μg/kg	0. 13
	平均值(mg/kg) Mean	32. 83	101. 88	132. 54	0. 12	0. 25	2. 25
	标准差 <i>SD</i>	17. 57	47. 26	41. 45	25. 20 μg/kg	0. 12	0. 70
	变异系数(%) <i>CV</i>	53. 52	46. 38	31. 28	20. 83	48. 00	31. 11
	<i>F</i>	17. 41 **	50. 68 **	59. 71 **	5. 63	13. 14 *	87. 49 **
组合 Combination	最大值(mg/kg) Max.	140. 97	214. 90	288. 82	0. 19	1. 95	9. 62
	最小值(mg/kg) Min.	3. 89	27. 37	56. 14	40. 10 μg/kg	10. 00 μg/kg	0. 13
	平均值(mg/kg) Mean	49. 84	105. 94	149. 21	81. 90 μg/kg	0. 28	3. 38
	标准差 <i>SD</i>	30. 06	46. 2	50. 24	7. 48	0. 13	1. 18
	变异系数(%) <i>CV</i>	60. 32	43. 61	33. 67	9. 13	46. 43	34. 91
	<i>F</i>	22. 98 **	29. 01 **	80. 44 **	4. 68	64. 47 **	159. 68 **

在 3 个污染水平下 12 个自交系的测定结果,叶片 Pb²⁺ 含量的变异系数分别为 53. 52%、46. 38% 和 31. 28%,子粒的 Pb²⁺ 含量变异系数分别为 20. 83%、48. 00%、31. 11%。在污染水平 1 下,叶片 Pb²⁺ 含量范围为 10. 61 ~ 77. 56 mg/kg,子粒 Pb²⁺ 含量均未超标,自交系间叶片 Pb²⁺ 含量差异极显著,而子粒 Pb²⁺ 含量差异不显著。在污染水平 2 下,叶

片间 Pb²⁺ 含量平均值较污染水平 1 增加了 3. 10 倍,有 4 个自交系(昌 7-2、ES40、178、S37)子粒 Pb²⁺ 含量未超标,自交系间叶片和子粒 Pb²⁺ 含量差异极显著和显著。在污染水平 3 下,叶片 Pb²⁺ 含量较污染水平 2 增加了 1. 30 倍,自交系 178、ES40、S37 子粒的 Pb²⁺ 含量未超标(图 1),自交系间叶片和子粒 Pb²⁺ 含量差异极显著。

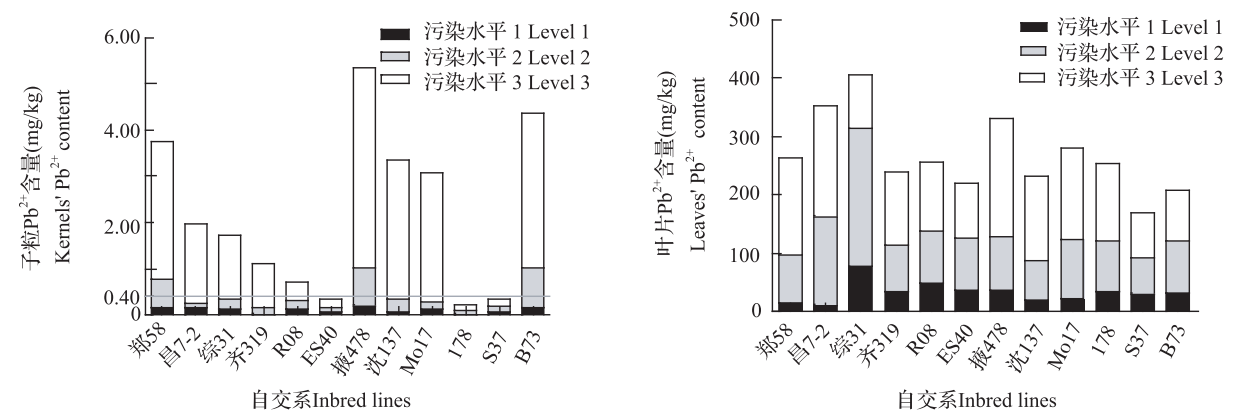
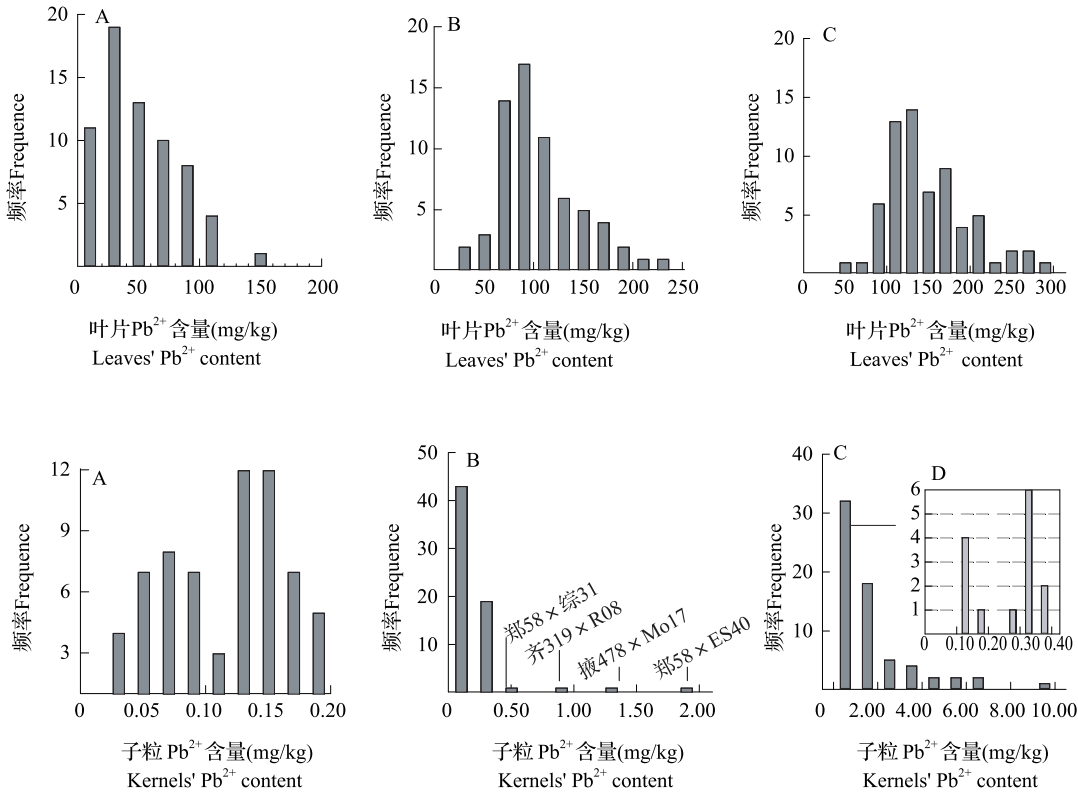


图1 3个污染水平下自交系子粒和叶片中Pb²⁺含量变化

Fig.1 The Pb²⁺ content changes in kernels and leaves of inbred lines under 3 Pb²⁺ levels

在3个污染水平下66个组合的测定结果,叶片Pb²⁺含量变异系数分别为60.32%、43.61%和33.67%,子粒Pb²⁺含量变异系数分别为9.13%、46.43%和34.91%。在污染水平1下,组合间叶片Pb²⁺含量差异极显著,而子粒Pb²⁺含量均未超标且差异不显著。在污染水平2下,组合间叶片Pb²⁺含量较污染水平1下增加了2.12倍,子粒Pb²⁺含量

除郑58×综31、齐319×R08、掖478×Mo17和郑58×ES40外其他组合均未超标,组合间叶片和子粒Pb²⁺含量差异极显著;在污染水平3下,组合间叶片Pb²⁺含量较污染水平2下增加了1.41倍,子粒Pb²⁺含量仅有14个未超标(图2),组合间叶片和子粒Pb²⁺含量差异极显著。



A: 在Pb²⁺污染水平1下;B:在Pb²⁺污染水平2下;C:在Pb²⁺污染水平3下;
D代表在污染水平3下子粒Pb²⁺含量未超标的数目

A:The level 1 under the Pb²⁺ stress,B:The level 2 under the Pb²⁺ stress,C:The level 3 under the Pb²⁺ stress,
D represented the under standard numbers of the Pb²⁺ content in kernels under the level 3

图2 3个Pb²⁺污染水平下组合叶片和子粒中Pb²⁺含量的分布

Fig.2 Distribution of Pb²⁺ content in kernels and leaves of combinations under 3 Pb²⁺ levels

综上所述,自交系及组合子粒和叶片的 Pb²⁺ 含量随土壤 Pb²⁺ 污染浓度的升高而升高,但污染水平 2 至水平 3 的增幅不如水平 1 至水平 2 的增幅,原因可能是随着 Pb²⁺ 胁迫的加剧,玉米体内启动了相应的防卫机制,限制了根系对 Pb²⁺ 的吸收。此外,在 3 个污染水平下,组合叶片和子粒中 Pb²⁺ 的平均含量均大于相应自交系,表明杂交组合对 Pb²⁺ 的吸收、转运能力较强。

表 4 叶片和子粒 Pb²⁺ 含量的配合力方差分析

Table 4 Variance analysis for combining ability of Pb²⁺ content in leaves and kernels

性状	土壤 Pb ²⁺ 含量 (mg/kg)	变异来源	自由度	均方	<i>F</i>
Trait	Soil Pb ²⁺ content	Source of variation	<i>df</i>	<i>MS</i>	
叶片 Pb ²⁺ 含量 Leaves'Pb ²⁺ content	污染水平 1 Level 1	一般配合力 GCA	11	1267. 41	35. 33 **
		特殊配合力 SCA	65	774. 88	21. 60 **
		误差 Error	154	35. 87	
	污染水平 2 Level 2	一般配合力 GCA	11	2948. 25	17. 12 **
		特殊配合力 SCA	65	1602. 15	9. 30 **
		误差 Error	154	172. 21	
	污染水平 3 Level 3	一般配合力 GCA	11	2841. 02	39. 49 **
		特殊配合力 SCA	65	2487. 45	34. 58 **
		误差 Error	154	71. 93	
子粒 Pb ²⁺ 含量 Kernels'Pb ²⁺ content	污染水平 1 Level 1	一般配合力 GCA	11	63. 14	1. 99
		特殊配合力 SCA	65	15. 53	0. 74
		误差 Error	154	20. 81	
	污染水平 2 Level 2	一般配合力 GCA	11	93. 26	3. 37
		特殊配合力 SCA	65	71. 62	1. 49
		误差 Error	154	14. 72	
	污染水平 3 Level 3	一般配合力 GCA	11	123. 72	14. 05 **
		特殊配合力 SCA	65	63. 73	8. 48 **
		误差 Error	154	71. 93	

2.4 不同 Pb²⁺ 浓度污染水平下自交系叶片和子粒 Pb²⁺ 含量的一般配合力分析

对 12 个自交系叶片和子粒 Pb²⁺ 含量的一般配

2.3 叶片和子粒 Pb²⁺ 含量的配合力方差分析

配合力方差分析结果见表 4,在 3 个污染水平下,12 个自交系叶片 Pb²⁺ 含量的一般配合力和 66 个组合的特殊配合力效应差异极显著。子粒 Pb²⁺ 含量的一般配合力和特殊配合力效应在污染水平 1 和 2 下差异不显著,而在污染水平 3 下差异极显著。

合力效应作多重比较结果见表 5,同一污染水平下,各自交系叶片和子粒 Pb²⁺ 含量的一般配合力表现差异极大,且存在正负两种效应。

表 5 叶片和子粒 Pb²⁺ 含量的一般配合力效应值多重比较

Table 5 Multi-comparison for GCA effects of Pb²⁺ content in leaves and kernels

自交系	叶片污染水平 Leaves level			子粒污染水平 3 Kemels level 3	自交系	叶片污染水平 Leaves level			子粒污染水平 3 Kemels level 3
	1	2	3			1	2	3	
郑 58	17. 72a	36. 67a	31. 70a	11. 43a	掖 478	-2. 96d	-7. 79de	7. 73bc	2. 16d
昌 7-2	-12. 37e	16. 68b	2. 71cd	-2. 79f	沈 137	5. 92c	-7. 99de	-0. 66e	3. 26c
综 31	10. 41b	10. 78bc	-8. 53f	1. 29d	Mo17	5. 20c	11. 95b	0. 86de	-0. 95e
齐 319	3. 35c	1. 11cd	0. 22de	-5. 06h	178	5. 77c	-11. 82e	11. 08b	-5. 72h
R08	-6. 01d	-22. 41f	-19. 23h	-2. 96fg	S37	-13. 12e	-13. 12ef	-15. 40gh	-1. 37e
ES40	-6. 94d	-8. 50de	-10. 41fg	4. 51b	B73	-6. 96d	-5. 54de	0. 46de	-3. 79g

同一列数字后跟不同字母者表示差异显著 ($P < 0. 05$)

Date followed by different letters within a column indicate significant difference at 0. 05 level

在污染水平 1 时,郑 58 和综 31 叶片 Pb^{2+} 含量的一般配合力效应值分别为 17.72、10.41,显著高于其他自交系;昌 7-2 和 S37 叶片 Pb^{2+} 含量的一般配合力效应值分别为 -12.37、-13.12,显著低于其他自交系。在污染水平 2 和 3 下,郑 58 叶片 Pb^{2+} 含量的一般配合力效应值分别为 36.67、31.70,显著高于其他自交系;R08 叶片 Pb^{2+} 含量的一般配合力效应值分别为 -22.41、-19.23,显著低于其他自交系。在污染水平 1 和水平 2 下利用自交系郑 58 配制杂交组合,易筛选出既能保障粮食安全又兼顾土壤修复的品种,用自交系 R08 配制杂交组合,易筛选出饲

料加工型组合。

在污染水平 3 下,178 和齐 319 子粒 Pb^{2+} 含量的一般配合力效应值分别为 -5.72、-5.06,显著低于其他自交系,在高污染水平下用 178 和齐 319 易组配出子粒 Pb^{2+} 含量未超标的组合。其余自交系一般配合力效应值相对较高,用其配制组合,不易得到子粒 Pb^{2+} 含量未超标的组合。

2.5 不同 Pb^{2+} 浓度污染水平下组合间叶片和子粒中 Pb^{2+} 含量的特殊配合力分析

66 个组合叶片和子粒 Pb^{2+} 含量的特殊配合力效应值见表 6。在污染水平 1 下,叶片 Pb^{2+} 含量的

表 6 组合间叶片和子粒 Pb^{2+} 含量的特殊配合力效应

Table 6 SCA effects of Pb^{2+} content in leaves and kernels of the combinations

组合 Combination	叶片污染水平 Leaves level			子粒污染水平 3 Kernels level 3	组合 Combination	叶片污染水平 Leaves level			子粒污染水平 3 Kernels level 3
	1	2	3	1		2	3		
郑 58 × 昌 7-2	-33.74	21.13	49.18	-11.47	齐 319 × 沈 137	49.92	-6.35	121.65	-5.35
郑 58 × 综 31	-0.57	-10.73	-17.28	56.56	齐 319 × Mo17	32.49	36.27	15.55	-1.14
郑 58 × 齐 319	-25.24	1.72	-85.93	-13.52	齐 319 × 178	-10.01	-2.72	-19.38	3.63
郑 58 × R08	44.10	19.16	-16.73	-13.33	齐 319 × S37	-28.72	8.12	0.92	1.72
郑 58 × ES40	35.90	52.02	85.73	66.02	齐 319 × B73	-6.95	-19.00	-11.38	1.70
郑 58 × 掖 478	21.63	59.08	119.71	-20.74	R08 × ES40	0.73	-9.51	-14.81	-7.19
郑 58 × 沈 137	14.75	-12.13	-66.11	45.90	R08 × 掖 478	-3.07	3.60	-29.73	-6.35
郑 58 × Mo17	9.39	-8.48	-84.25	-6.01	R08 × 沈 137	-7.47	14.86	-69.11	-8.34
郑 58 × 178	21.49	84.73	74.20	-12.87	R08 × Mo17	-30.37	-26.37	113.10	-2.12
郑 58 × S37	20.16	28.32	13.55	-15.71	R08 × 178	-6.84	-19.04	34.49	1.53
郑 58 × B73	27.03	-37.44	17.49	-14.80	R08 × S37	-1.24	8.56	-26.99	-1.32
昌 7-2 × 综 31	-16.09	42.93	-31.33	-5.65	R08 × B73	-2.96	-9.31	21.37	-0.40
昌 7-2 × 齐 319	47.84	14.77	53.60	0.70	ES40 × 掖 478	-26.22	9.20	-5.72	-12.31
昌 7-2 × R08	-12.52	-28.23	-37.90	-1.40	ES40 × 沈 137	2.13	-23.35	-30.85	-13.42
昌 7-2 × ES40	-21.30	-65.82	-58.68	-7.36	ES40 × Mo17	27.48	66.67	12.20	11.59
昌 7-2 × 掖 478	11.84	-55.90	-28.98	-6.51	ES40 × 178	15.24	-19.87	-53.32	-4.44
昌 7-2 × 沈 137	6.11	-12.94	-29.52	-7.62	ES40 × S37	-13.98	-26.29	-13.27	5.79
昌 7-2 × Mo17	-7.84	11.51	-37.23	-3.41	ES40 × B73	5.67	3.30	56.21	-6.36
昌 7-2 × 178	19.51	-37.42	39.31	1.36	掖 478 × 沈 137	-23.11	-29.35	-52.78	-12.57
昌 7-2 × S37	19.50	-1.17	-1.37	-0.93	掖 478 × Mo17	-7.21	-1.45	12.72	32.82
昌 7-2 × B73	10.43	83.84	-18.92	11.07	掖 478 × 178	-9.95	-5.59	3.86	-3.59
综 31 × 齐 319	-41.53	-43.43	-36.78	-3.38	掖 478 × S37	10.32	-30.10	20.22	-6.43
综 31 × R08	-17.50	-21.82	19.00	3.09	掖 478 × B73	11.36	27.44	-16.53	17.74
综 31 × ES40	-18.03	-9.10	44.06	-8.36	沈 137 × Mo17	30.57	24.93	59.33	-9.47
综 31 × 掖 478	1.72	-21.36	-79.93	6.32	沈 137 × 178	44.02	35.45	-20.03	2.25
综 31 × 沈 137	42.05	23.16	45.00	-11.70	沈 137 × S37	-35.48	6.52	-6.16	27.61
综 31 × Mo17	78.14	-76.55	-32.27	-7.49	沈 137 × B73	6.00	19.83	62.77	-6.62
综 31 × 178	3.78	-76.92	59.85	0.26	Mo17 × 178	-37.17	48.99	-26.24	-0.49
综 31 × S37	-30.55	-4.17	81.64	-5.56	Mo17 × S37	-16.78	-3.92	-26.51	-3.33
综 31 × B73	-20.46	-19.39	17.43	-4.65	Mo17 × 178	-8.08	-12.50	-26.70	-0.41
齐 319 × R08	10.88	10.01	-13.01	11.61	178 × S37	20.79	27.42	-0.47	1.44
齐 319 × ES40	-14.06	21.61	41.21	2.34	178 × B73	-8.65	-45.87	-12.43	2.36
齐 319 × 掖 478	23.97	38.47	-18.89	-4.25	S37 × B73	37.75	21.14	35.65	-0.49

特殊配合力效应变幅为 $-41.53 \sim 78.14$, 其负效应相对明显的 3 个组合分别为综 31 \times 齐 319、Mo17 \times 178、沈 137 \times S37, 正效应相对明显的 3 个组合分别为综 31 \times Mo17、齐 319 \times 沈 137、昌 7-2 \times 齐 319。在污染水平 2 时, 叶片 Pb^{2+} 含量的特殊配合力效应变幅为 $-76.92 \sim 84.73$, 其负效应相对明显的 3 个组合分别为综 31 \times 178、综 31 \times Mo17、昌 7-2 \times ES40, 正效应相对明显的 3 个组合分别为 ES40 \times Mo17、昌 7-2 \times B73、郑 58 \times 178。在污染水平 3 时, 叶片 Pb^{2+} 含量的特殊配合力效应变幅为 $-85.93 \sim 121.65$, 负效应相对明显的 3 个组合分别为郑 58 \times 齐 319、郑 58 \times Mo17、综 31 \times 掖 478, 正效应相对明显的 3 个组合为 R08 \times Mo17、郑 58 \times 掖 478、齐 319 \times 沈 137; 子粒 Pb^{2+} 含量的特殊配合力效应变幅为 $-20.74 \sim 66.02$, 负效应相对明显的 3 个组合为郑 58 \times 掖 478、郑 58 \times S37、郑 58 \times B73。

综合表 5 和表 6, 一般配合力与特殊配合力间关系较为复杂, 一般配合力效应高的亲本, 组配杂交后代的特殊配合力效应不一定是最优的。如在污染水平 3 下, 178 和齐 319 的子粒 Pb^{2+} 含量一般配合力为 -5.72 、 -5.06 , 但杂交组合齐 319 \times 178 的特殊配合力效应为 3.63 ; 杂交组合郑 58 \times 掖 478 的子粒 Pb^{2+} 含量特殊配合力为 -20.74 , 但亲本郑 58 和掖 478 的一般配合力效应分别为 11.43 、 2.16 。说明组合 Pb^{2+} 含量的特殊配合力效应与亲本的一般配合力效应间无必然联系, 不能简单地依据组合双亲的一般配合力效应推断其后代的特殊配合力效应。因此, 在后代分析中不仅要考虑到亲本的一般配合力而且还要考虑到其组合的特殊配合力。

2.6 叶片和子粒 Pb^{2+} 含量的遗传参数估计

对 3 个污染水平下叶片和污染水平 3 下子粒的 Pb^{2+} 含量的遗传参数估算结果由表 7 显示, 叶片和子粒中 Pb^{2+} 含量的非加性方差大于加性方差, 且非加性方差随土壤 Pb^{2+} 含量增大而增大, 说明此性状受非加性效应影响较大; 遗传方差大于环境方差, 广义遗传率大于狭义遗传率, 说明叶片和子粒 Pb^{2+} 含量性状的变异主要来自遗传因素, 遗传力较强, 可作为育种指标, 但稳定性较差, 因此应该在杂种后代早期进行世代选择, 收效较好。

2.7 组合叶片和子粒 Pb^{2+} 含量与父母本一般配合力的相关性分析

在重金属 Pb^{2+} 污染的土壤中, 控制叶片和子粒 Pb^{2+} 含量是杂交育种首要的选择目标, 对组合叶片

表 7 叶片和子粒 Pb^{2+} 含量的遗传参数估计值
Table 7 Estimate of hereditary parameter for leaves and kernels

遗传参数 Genetic parameter	叶片污染水平 Leaves level			子粒污染水平 3 Kernels Level 3
	1	2	3	
加性方差 Additive variance	70.36	318.07	50.51	8.57
非加性方差 Non-additive effect	739.14	1324.76	2415.52	259.88
遗传方差 Genetic variance	809.37	1642.82	2466.03	268.45
环境方差 Environmental variance	107.62	516.44	215.79	11.55
表型方差 Phenotypic variance	881.79	2000.23	2656.56	275.72
广义遗传率(%) Broad heritability	83.81	66.23	90.93	94.26
狭义遗传率(%) Narrow heritability	7.98	15.92	1.91	3.11

和子粒 Pb^{2+} 含量与父母本一般配合力进行相关性分析。由表 8 可见, 除污染水平 3 下组合叶片 Pb^{2+} 含量与母本一般配合力效应无关外, 其他水平下组合叶片和子粒 Pb^{2+} 含量均与父母本一般配合力效应呈显著正相关, 同时, 双亲平均一般配合力与组合叶片和子粒 Pb^{2+} 含量的相关系数大于父母本独自与组合的相关系数, 表明双亲的一般配合力对其组合叶片和子粒 Pb^{2+} 含量的高低存在一定的影响; 当双亲的叶片和子粒 Pb^{2+} 含量的平均一般配合力呈较高的负向效应时, 有较大可能组配出叶片和子粒 Pb^{2+} 含量低的杂交种, 反之亦然。由于父母本的一般配合力效应对子代叶片和子粒 Pb^{2+} 含量的贡献不一致, 因此在考虑平均一般配合力效应的同时, 还应注意不同污染水平下父母本各自的一般配合力大小, 如子代叶片部位在污染水平 1 下, 母本一般配合力贡献较大, 污染水平 2 和 3 下, 父本一般配合力贡献较大。

2.8 叶片与子粒 Pb^{2+} 含量的关系

对在 3 个污染水平下叶片和子粒 Pb^{2+} 含量进行相关分析发现, 相关系数 r 的绝对值为 0.11 , 小于 $r_{0.05(231)}$, 叶片与子粒间 Pb^{2+} 含量无关。结合表 3, 在污染水平 1 下, 所有组合的叶片 Pb^{2+} 含量平均值为 49.84 mg/kg , 子粒 Pb^{2+} 含量均未超标; 在污染水平 2 下, 所有组合的叶片 Pb^{2+} 含量平均值为 105.94 mg/kg , 有 93.94% 的组合子粒 Pb^{2+} 含量未超标; 在污染水

表 8 组合叶片和子粒 Pb²⁺ 含量与一般配合力效应的相关系数

Table 8 Correlation coefficient between Pb²⁺ content in leaves and kernels and GCA effect

性状 Trait	土壤 Pb ²⁺ 污染水平 Level of Pb ²⁺ pollution in soil	一般配合力 GCA		
		平均 Average	母本 Female parent	父本 Male parent
叶片 Pb ²⁺ 含量 Leaves'Pb ²⁺ content	污染水平 1	0.56 **	0.41 **	0.38 **
	污染水平 2	0.62 **	0.32 **	0.54 **
	污染水平 3	0.36 **	0.19	0.29 **
子粒 Pb ²⁺ 含量 Kernels'Pb ²⁺ content	污染水平 3	0.68 **	0.49 *	0.53 **

平 3 下,所有组合的叶片 Pb²⁺ 含量平均149.21 mg/kg,有 21.21% 的子粒 Pb²⁺ 含量未超标。因此,推测虽然叶片富集土壤中 Pb²⁺ 的能力较强,叶片和子粒之间可能存在一种显著降低 Pb²⁺ 转运效率的机制。

3 讨论

提高玉米在重金属污染土壤中利用价值的主要方向是叶片低吸收和子粒 Pb²⁺ 含量未超标,叶片高富集但子粒未超标,前者可用于粮食安全生产、饲料加工,后者在保障粮食安全的同时又进行了土壤修复。目前,玉米不同品种间对 Pb²⁺ 累积与转运存在明显差异^[11,17]。本研究结果也表明,组合间叶片和子粒中 Pb²⁺ 含量差异显著,而且叶片和子粒中的 Pb²⁺ 含量无关,培育出既能保障粮食安全又兼顾土壤修复的玉米品种是可行的。

柯庆明等^[18]认为子粒 Cd²⁺ 含量在世代间的遗传传递率较强。杨莉等^[19]研究认为子粒 Cd²⁺ 含量的一般配合力效应及二者的特殊配合力效应达到极显著水平,选育子粒低 Cd²⁺ 含量的组合,双亲的遗传改良和组合的评价筛选都很重要。本研究认为,叶片和子粒 Pb²⁺ 含量性状的变异主要来自遗传因素,遗传力较强,可作为育种指标,但稳定性较差,因此应该在杂种后代早期进行世代选择,收效较好。在中低污染(污染水平 1 和 2)土壤中,种植除郑 58 × 综 31、齐 319 × R08、掖 478 × Mo17 和郑 58 × ES40 外其他组合都能满足育种策略。在高 Pb²⁺ 污染(污染水平 3)土壤中,可种植用亲本 178 与郑 58 组配的组合。

选育品种时不仅考虑到自交系的一般配合力和组合的特殊配合力,还要对污染地区进行重金属种类和含量的检测,对土壤进行污染等级划分。根据具体育种目标选育出优良的玉米品种,将其种植于重金属污染的大田,可以在粮食安全生产、饲料加工和土壤重金属修复等问题上起到一定作用。

参考文献

[1] 殷恒霞,李霞,米琴,等. 镉、锌、铜胁迫对向日葵早期幼苗生长的影响[J]. 植物遗传资源学报,2009,10(2):290-294

[2] 潘琼,程运林. 土壤重金属污染现状调查与评价[J]. 环境与可持续发展,2013(6):47-49

[3] 崔斌,王凌,张国印,等. 土壤重金属污染现状与危害及修复技术研究进展[J]. 安徽农业科学,2012,40(1):373-375

[4] 张继舟,王宏韬,倪红伟,等. 我国农田土壤重金属污染现状、成因与诊断方法分析[J]. 土壤与作物,2012(4):212-218

[5] 杨刚,沈飞,钟贵江,等. 西南山地铅锌矿区耕地土壤和谷类产品重金属含量及健康风险评价[J]. 环境科学学报,2011,31(9):2014-2021

[6] Brennan M A, Shelley M L. A model of the uptake, translocation, and accumulation of lead (Pb) by maize for the purpose of phyto-extraction[J]. Ecol Engin, 1999, 12(3):271-297

[7] Ho W M, Ang L H, Lee D K. Assessment of Pb uptake, translocation and immobilization in kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) for phytoremediation of sand tailings[J]. J Envir Sci, 2007, 67(2):267-277

[8] Yu H, Wang J, Fang W, et al. Cadmium accumulation in different rice cultivars and screening for pollution-safe cultivars of rice[J]. Sci Total Environ, 2006, 370(2):302-309

[9] Dai Q L, Yuan J G, Fang W, et al. Differences on Pb accumulation among plant tissues of 25 varieties of maize (*Zea mays*) [J]. Front Earth Sci China, 2007, 2(3):303-308

[10] 李月芳,刘领,陈欣,等. 模拟铅胁迫下玉米不同基因型生长与铅积累及各器官间分配规律[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(12):2260-2267

[11] 曹莹,刘洋,王国驹,等. 铅-镉复合胁迫下玉米品种间积累铅、镉的差异[J]. 玉米科学,2009,17(1):80-85

[12] 黄免彦,邓耀明,戴松林,等. 几种植物对土壤中重金属修复性能研究[J]. 安徽农业科学,2011,39(7):3882-3883

[13] Pereira B F F, Abreu C A D, Romeiro S, et al. Pb-phytoextraction by maize in a Pb-EDTA treated oxisol[J]. Sci Agr, 2007, 64(1):52-60

[14] Ekmekçi Y, Tanyolac D, Ayhan B. A crop tolerating oxidative stress induced by excess lead:maize[J]. Acta Physiol Plant, 2009, 31(2):319-330

[15] Zhang Z M, Jin F, Wang C, et al. Difference between Pb and Cd accumulation in 19 elite maize inbred lines and application prospects[J]. J Biomed Biotechnol, 2012, 45(2):1-6

[16] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M], 5 版. 北京:高等教育出版社,2003:167-169

[17] 郭晓方,卫泽斌,丘锦荣,等. 玉米对重金属累积与转运的品种间差异[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(4):367-371

[18] 柯庆明,梁康迳,朱燕,等. 基因型与环境互作对食用稻米重金属积累特性遗传相关性的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(1):24-27

[19] 杨莉,曹应江,郑家奎,等. 水稻籽粒镉和砷含量的遗传效应分析[J]. 杂交水稻, 2010, 25(5):80-83