

文章编号: 1005-0906(2010)01-0070-07

磷、铝胁迫对玉米幼苗生长和养分吸收的影响

章爱群¹, 崔雪梅¹, 李淑艳¹, 贺立源²

(1. 孝感学院生命科学技术学院, 湖北 孝感 432100; 2. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

摘要: 选取 5 个基因型玉米品种, 采用营养液培养, 研究低磷和铝毒条件下不同基因型玉米苗期生长状况及对磷、钾、钙、镁、铁、锌的吸收。结果表明, 耐低磷基因型玉米品种适应低磷的能力较强, 具有较长的根系和较大的根干重, 株高受低磷的影响明显小于敏感基因型玉米品种。低磷胁迫增大了植株的根冠比, 改变了植株对营养元素的吸收及其地上部和根系的分配。铝胁迫下, 铝敏感基因型玉米品种根伸长受到铝的抑制作用大于耐铝基因型玉米品种, 各种营养元素的吸收累积明显受抑制, 耐铝基因型玉米品种地上部和根系相对干重下降较少, 而敏感基因型玉米品种相对干重显著下降。

关键词: 玉米; 基因型; 低磷; 铝毒; 养分吸收**中图分类号:** S513.01**文献标识码:** A

Effects of Phosphorus Deficiency and Al toxicity on Growth and Nutrient Absorption of Maize Seedling

ZHANG Ai-qun¹, CUI Xue-mei¹, LI Shu-yan¹, HE Li-yuan²

(1. College of Plant Science and Technology, Xiaogan University, Xiaogan 432100;

2. College of Resource and Environment Sciences of Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: Five typical maize genotypes were used in this experiment to investigate the effects of phosphorus and aluminum stress on their growth and P, K, Ca, Mg, Fe, Zn uptake at seedling stage. The results showed that low-P tolerant maize genotypes had longer roots and larger dry root weight than low-P sensitive maize genotype, and the plant height of low-P tolerant maize genotypes were less affected by the phosphorus deficiency than that of sensitive genotypes. Under low phosphorus condition, the ratio of root to shoot in all genotypes increased, uptaking and distribution of P, K, Ca, Mg, Fe, Zn between roots and shoots also changed. Under stress of aluminum condition, accumulation of P, K, Ca, Mg, Fe, Zn was seriously affected, the root length and relative dry weigh of Al-tolerant maize genotypes were less affected by the Al toxicity than those of Al-sensitive genotypes.

Key words: Maize; Genotype; Low-P; Al toxicity; Nutrient absorption

磷是植物生长发育必须的营养元素, 土壤缺磷已成为限制作物生长与产量的主要因素之一^[1]。土壤中的全磷量很高, 但作物可以吸收利用的有效磷却很低^[2]。近年来, 利用作物品种自身种质来提高对土壤磷素的利用已经成为解决磷素障碍最经济有效的途径之一^[3]。作物不同品种在缺磷时存在产量差异, 除了磷效率差异以外, 与其他元素吸收与分配的关系却很少有报道^[4~6]。玉米自交系和杂交种的耐铝

性存在广泛的遗传变异, 具有耐铝性遗传改良的基因潜力^[7~9]。有关铝对玉米根系生长的影响以及玉米耐铝机理的研究已有一些报道。过量活性 Al^{3+} 会抑制根对矿质元素的吸收和转运; 铝与磷在根表或质外体发生吸附—沉淀反应, 减少了磷进入根内以及向地上部的运输^[10]; Al^{3+} 是阳离子通道阻断剂, 长时间阻断 K^{+} 通道导致地上部出现缺钾症状^[11]; 铝胁迫下, 铝敏感基因型大麦根系和地上部 N、P、K、Ca、Mg、Zn 等养分含量显著减少, 耐铝基因型受影响较小^[12]。

本研究选择苗期对低磷、酸铝差异明显的 5 个基因型玉米品种为供试材料, 探讨低磷和铝毒胁迫对不同玉米基因型的生长、矿质元素吸收的影响, 为进一步研究玉米对低磷和铝毒胁迫的耐性机理及其

收稿日期: 2009-01-11; 修回日期: 2009-06-04

基金项目: 湖北省教育厅科学技术研究项目(Q20092604)

作者简介: 章爱群(1974-), 女, 武汉人, 讲师, 博士, 从事植物耐非生物逆境研究。Tel: 13035158522

E-mail: munkchoria@tom.com

相互关系提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

对国内外不同遗传背景的 300 份玉米自交系进行苗期土培筛选,选择苗期对酸铝、低磷差异明显的 5 个基因型为供试材料。其中,M02 和 M08 为酸铝低磷双耐基因型,M11 为耐低磷不耐酸铝基因型,M05 为低磷敏感基因型,M12 为酸铝低磷双敏感基因型。供试玉米自交系种子由华中农业大学玉米室及中国农业大学玉米研究中心提供。

1.2 营养液培养

设对照(CK)、低磷(-P)、对照加铝(CK+Al³⁺)3 个处理,重复 3 次。其中对照处理(KH₂PO₄)用量为 0.25 mmol/L,低磷为 2.5 μmol/L,加铝处理(AlCl₃·6H₂O)用量为 0.1 mmol/L。各处理除磷和铝用量有差异外,其他肥料用量一致。采用 Magnavaca 的玉米营养液配方,大量元素 Ca(NO₃)₂·4H₂O 3.52 mmol/L,NH₄NO₃ 1.30 mmol/L,KCl 0.43 mmol/L,K₂SO₄ 0.58 mmol/L,KNO₃ 0.56 mmol/L,Mg(NO₃)₂·6H₂O 0.86 mmol/L,Fe(NO₃)₃·9H₂O 0.08 mmol/L,HEDTA 0.08 mmol/L,KH₂PO₄ 0.25 mmol/L;微量元素 MnCl₂·4H₂O 9.11 μmol/L,H₃BO₃ 25.41 μmol/L,ZnSO₄·7H₂O 2.36 μmol/L,CuSO₄·5H₂O 0.62 μmol/L,Na₂MoO₄·2H₂O 0.83 μmol/L,pH 值 4.3。

采用长方形塑料盒(33 cm × 45 cm × 56 cm),盒外涂黑油漆遮光。种子经 0.1% HgCl₂ 表面灭菌 15 min,冲洗后播于沙盘。出苗后切去胚乳,移入 1/2 玉米营养液,3 d 后改用全营养液。幼苗长至 3 叶期后进行加铝(营养液中加 AlCl₃)和低磷处理。培养期间每天通气 5 ~ 10 min,自然光照,每 5 d 更换 1 次营养液。处理 18 d 后测量根系长度和株高,并在苗期取地上部和根系样品,70℃烘干称重,HNO₃-HClO₄-H₂SO₄(8:1:1)混合液消煮。钼锑抗比色法测磷,火焰光度法测钾,原子吸收法测钙、镁、铁、锌含量。

2 结果与分析

2.1 磷胁迫对不同基因型玉米苗期生长的影响

营养液培养试验表明,在低磷胁迫条件下,M05 和 M12 地上部表现为植株矮小、细弱,老叶枯死加快,新叶生长缓慢,下部叶片呈暗紫色;M02、M08、M11 在同样的低磷条件下叶色正常,生长良好,长势与正常磷条件下差异不大。在供试的 5 个材料中,3 个耐低磷基因型 M02、M08 和 M11 平均株高较高,当外界磷浓度变化时其变化幅度相对较小。当磷浓度为 2.5 μmol/L 时,M11 根长变幅相对较小,M02 和 M08 根长有所增加;M05 在低磷胁迫时根系生长明显受到抑制,根长减少 32.8%,变化幅度大,可见该基因型对低磷极为敏感(图 1)。

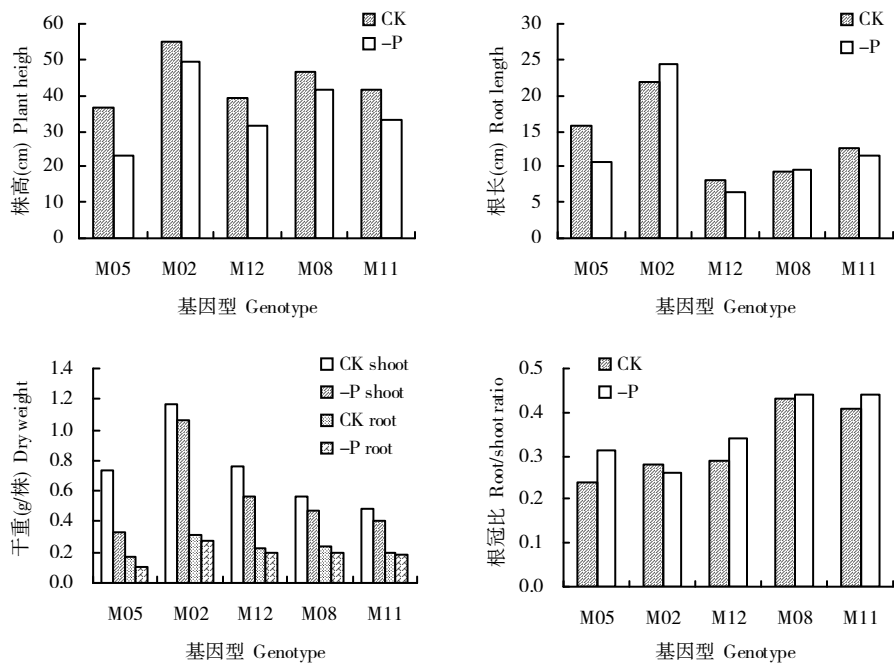


图 1 磷胁迫对不同基因型玉米生长的影响

Fig.1 Effects of P-stress on plant growth of different maize genotypes

不同玉米基因型的地上部在低磷胁迫下均受到不同程度抑制,M05、M12 地上部生物量下降55.45%

和 26.75%，而 M02、M08 和 M11 分别下降 9.94%、16.17%和 17.69%。以低磷处理的植株干物质重与对照植株干物质重的比值作为磷效率系数，M05、M02、M08 和 M11 地上部的磷效率系数分别为 0.45、0.90、0.86 和 0.84；地下部的磷效率系数分别为 0.58、0.85、0.82 和 0.88。在低磷胁迫下，不同基因型根冠比也有较大差别，M05、M12 根冠比增加 29.51%和 17.62%，而 M02、M08 和 M11 根冠比变幅为 -4.99%~7.31%。说明低磷胁迫下，低磷敏感基因型玉米磷效率系数低，地上部生长严重受抑制；耐低磷基因型通过调整体内磷的分配，增强吸磷能力，保证植株正常生长。

2.2 铝胁迫对不同基因型玉米苗期生长的影响

受铝胁迫的玉米根系形态发生明显变化，根尖肿胀、弯曲变形。铝对植物毒害的最典型症状表现

为对根伸长的抑制。从图 2 可以看出，不同基因型玉米经 $AlCl_3(0.1\text{ mmol/L})$ 处理后，根长均比对照短。M02 和 M08 的相对根长值比其他基因型大，为 88.47%和 90.22%；M12 和 M11 相对根长值较小，为 50.62%和 66.49%；M05 居中，为 76.21%。铝处理后，M02 和 M08 相对株高分别为 95.19%和 87.12%，变化幅度较小；M12 和 M11 相对株高则小于 80%。在 $0.1\text{ mmol/L } Al^{3+}$ 胁迫条件下，不同基因型根冠比差异不大，但玉米地上部和根系干重均受到较大影响。处理 18 d 后，M02 和 M08 表现较强的耐铝性，地上部相对干重为 86.93%和 80.84%，根系相对干重为 75.26%和 79.17%；而 M12 和 M11 地上部生物量降幅为 44.30%和 27.21%，根系生物量降幅为 41.54%和 33.33%。

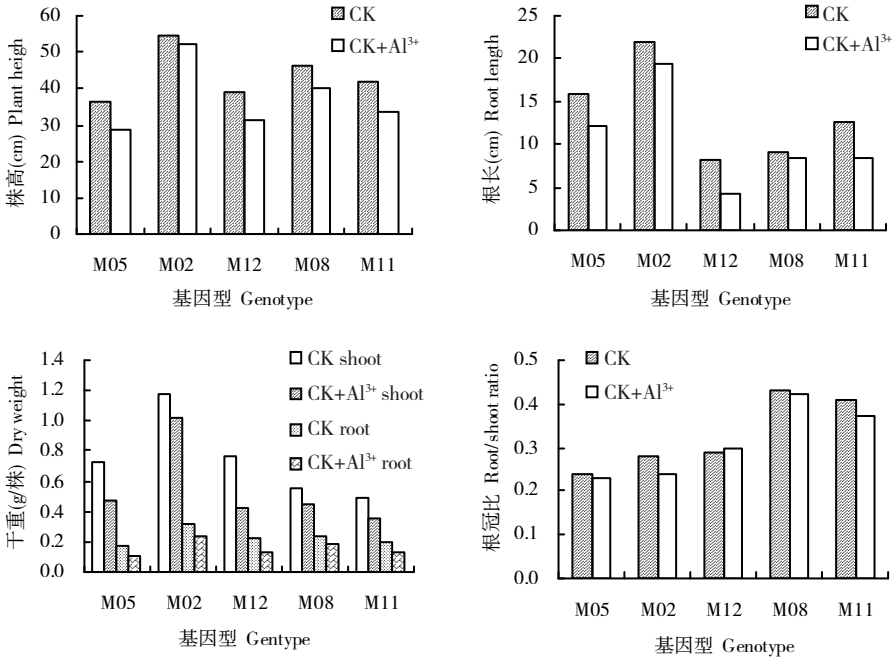


图 2 铝胁迫对不同基因型玉米生长的影响

Fig.2 Effect of Al-stress on plant growth of different maize genotypes

2.3 磷胁迫对不同基因型玉米苗期磷吸收、运输和分配的影响

低磷胁迫下，地上部和根系磷含量均表现出极显著下降趋势。相关分析表明，低磷胁迫下，地上部、根系干重与相应部位磷含量相关不显著($r=-0.242$, $r=-0.389$)。从表 1 可以看出，低磷处理时玉米植株地上部和根系磷累积量明显低于正常磷处理时的磷累积量，M02、M08 和 M11 累积的磷显著多于 M05；基因型间相对磷累积量（低磷水平的磷累积量 / 正常磷水平的磷累积量）达显著差异，低磷胁迫下植株地

上和根系干重与相应部位磷累积量呈极显著相关水平(地上部 $r=0.905^{**}$ ，根系 $r=0.718^{**}$)。从地上部和根系的磷素分配比例看，低磷胁迫使磷素向根系转移比例增加，以满足其生长利用。

2.4 铝胁迫对不同基因型玉米苗期磷吸收、运输和分配的影响

在 0.1 mmol/L 的铝胁迫下，各基因型玉米根系和地上部磷含量有增加的趋势，但未达到显著水平；根系和地上部磷累积量则下降，且 M02 和 M08 能吸收累积较多的磷，其根系和地上部相对磷累积量明

显高于其他 3 个基因型。相关分析表明,相对磷含量与耐铝性无相关性(地上部 $r=0.476$, 根系 $r=0.213$), 而相对磷积累量与耐铝性呈极显著(地上部 $r=0.913^{**}$, 根系 $r=0.782^{**}$)相关水平。

表 1 磷胁迫对不同基因型玉米苗期地上部、根系磷含量及积累量的影响

Table 1 Effects of P application on P content and accumulation of shoot and root of different maize genotypes at seedling stage

基因型 Genotype	处 理 Treatment	磷含量(%) P content		磷素积累量(mg/ 株) P accumulation			分配比例(%) Ratio of distribution	
		地上部 Shoot	根 系 Root	地上部 Shoot	根 系 Root	全 株 Total	地上部 Shoot	根 系 Root
M05	CK	0.58	0.40	4.29	0.69	4.98	86.1	13.9
	-P	0.20(0.35)	0.19(0.48)	0.66(0.15)	0.19(0.28)	0.85(0.17)	77.3	22.7
M02	CK	0.68	0.38	7.99	1.23	9.22	86.7	13.3
	-P	0.20(0.30)	0.17(0.46)	2.16(0.27)	0.48(0.39)	2.64(0.29)	81.8	18.2
M12	CK	0.84	0.25	6.38	0.55	6.94	92.0	8.0
	-P	0.25(0.29)	0.07(0.26)	1.38(0.22)	0.13(0.23)	1.50(0.22)	91.6	8.4
M08	CK	0.70	0.37	3.90	0.90	4.79	81.3	18.7
	-P	0.23(0.33)	0.17(0.44)	1.09(0.28)	0.34(0.38)	1.43(0.30)	76.4	23.6
M11	CK	0.67	0.35	3.28	0.70	3.98	82.4	17.6
	-P	0.28(0.42)	0.22(0.62)	1.13(0.34)	0.38(0.55)	1.52(0.38)	74.6	25.4

注:括号中的数据代表磷相对积累量(-P/CK),用于不同基因型间进行比较。下表同。
Note: The numbers in brackets mean the relative phosphorus uptake, namely -P/CK, which were used to compare the different genotypes.
The same as the following tables.

表 2 铝胁迫对不同基因型玉米苗期地上部、根系磷含量及积累量的影响

Table 2 Effects of Al-stress on P content and accumulation of shoot and root of different maize genotypes at seedling stage

基因型 Genotype	处 理 Treatment	磷含量(%) P content		磷素积累量(mg/ 株) P accumulation			分配比例(%) Ratio of distribution	
		地上部 Shoot	根 系 Root	地上部 Shoot	根 系 Root	全 株 Total	地上部 Shoot	根 系 Root
M05	CK	0.58	0.40	4.29	0.69	4.98	86.1	13.9
	+Al	0.74 (1.26a)	0.41 (1.03a)	3.53 (0.82b)	0.46 (0.66c)	3.99 (0.80b)	88.4	11.6
M02	CK	0.68	0.38	7.99	1.23	9.22	86.7	13.3
	+Al	0.79 (1.16a)	0.42 (1.10a)	8.03 (1.01a)	1.02 (0.83ab)	9.05 (0.98a)	88.7	11.3
M12	CK	0.84	0.25	6.38	0.55	6.94	92.0	8.0
	+Al	0.69 (0.83b)	0.31 (1.23a)	2.94 (0.46c)	0.40 (0.72bc)	3.34 (0.48c)	88.1	11.9
M08	CK	0.70	0.37	3.90	0.90	4.79	81.3	18.7
	+Al	0.72 (1.03a)	0.45 (1.20a)	3.24 (0.83b)	0.85 (0.95a)	4.09 (0.85b)	79.2	20.8
M11	CK	0.67	0.35	3.28	0.70	3.98	82.4	17.6
	+Al	0.72 (1.08a)	0.24 (0.69b)	2.57 (0.78b)	0.32 (0.46d)	2.89 (0.73b)	89.0	11.0

2.5 磷胁迫对不同基因型玉米苗期养分吸收的影响

从表 3 和表 4 看出,低磷处理影响各基因型对营养元素的吸收。在低磷条件下,根系 K、Mg 含量下降,Ca 含量增加。M05 和 M12 根系 Zn 含量下降,M02、M08 和 M11 根系 Zn 含量增加。地上部 K 含量下降,M05 的 Mg、Zn 含量下降,M02、M08 和 M11 的

Mg、Zn 含量增加。低磷胁迫使 M05 地上部和根系中各元素积累量显著下降,但 M02、M08 和 M11 地上部和根系中各元素积累量变化无规律性,有些元素积累量小幅下降,有些元素积累量则较正常磷条件下有所增加。耐低磷基因型植株地上部和根系中各元素的积累量明显多于磷敏感基因型,且 K、Mg、Zn 的相对积累量在基因型间差异显著。

表 3 磷胁迫对不同基因型玉米苗期营养元素含量的影响

Table 3 Effects of P-stress on K, Ca, Mg, Zn, Fe content and accumulation in different genotypes of maize at seedling stage

基因型 Genotype	处 理 Treatment	地上部 Shoot					根 系 Root				
		K(%)	Ca(%)	Mg(%)	Zn(mg/kg)	Fe(mg/kg)	K(%)	Ca(%)	Mg(%)	Zn(mg/kg)	Fe(mg/kg)
M05	CK	4.88	0.66	0.54	56.19	583.99	3.65	0.52	0.44	78.98	2 130.39
	-P	3.82	0.69	0.49	52.93	598.79	2.74	0.59	0.43	76.48	2 353.24
M02	CK	6.58	0.65	0.48	61.15	490.78	3.26	0.64	0.40	57.62	575.42
	-P	5.29	0.77	0.54	75.77	593.84	2.69	0.67	0.32	66.26	439.66
M12	CK	5.19	0.65	0.52	38.62	537.71	2.29	0.33	0.25	33.14	1 278.89
	-P	4.26	0.59	0.54	49.69	587.98	1.22	0.34	0.23	16.73	1 350.17
M08	CK	4.10	0.90	0.58	58.44	649.91	2.25	0.38	0.32	45.05	1 332.66
	-P	4.11	0.83	0.58	63.22	556.21	1.91	0.36	0.30	62.38	1 632.02
M11	CK	5.30	0.75	0.46	70.18	548.90	2.55	0.37	0.35	73.15	1 510.72
	-P	4.64	0.79	0.56	81.17	459.68	3.97	0.42	0.21	75.68	1 559.51

表 4 磷胁迫对不同基因型玉米苗期营养元素积累量的影响

Table 4 P stress on nutrient accumulation of different genotypes maize seedlings

部 位 Parts	基因型 Genotype	处 理 Treatment	K(mg/ 株)	Ca(mg/ 株)	Mg(mg/ 株)	Zn(μg/ 株)	Fe(μg/ 株)
地上部	M05	CK	35.77	4.87	3.96	41.21	428.26
		-P	12.49(0.35c)	2.24(0.46)	1.60(0.41c)	17.29(0.42c)	195.61(0.46)
	M02	CK	77.18	7.60	5.62	71.75	575.85
		-P	55.94(0.72ab)	8.09(1.06)	5.73(1.02a)	80.06(1.12a)	627.49(1.09)
	M12	CK	39.44	4.98	3.97	29.35	408.66
		-P	23.70(0.60b)	3.29(0.66)	3.00(0.76b)	27.66(0.94ab)	327.31(0.80)
	M08	CK	22.84	5.01	3.31	32.53	361.78
		-P	19.18(0.84a)	3.89(0.78)	2.69(0.81b)	29.50(0.91ab)	259.57(0.72)
	M11	CK	25.96	3.67	2.23	34.39	268.96
		-P	18.73(0.72ab)	3.21(0.87)	2.26(1.01a)	32.74(0.95ab)	185.41(0.69)
根 系	M05	CK	6.33	0.90	0.76	13.69	369.27
		-P	2.74(0.43c)	0.59(0.65)	0.44(0.58)	7.65(0.56c)	235.32(0.64)
	M02	CK	10.54	2.06	1.29	18.63	186.05
		-P	7.45(0.71b)	1.84(0.89)	0.89(0.69)	18.33(0.98b)	121.64(0.65)
	M12	CK	4.96	0.71	0.54	7.18	277.09
		-P	2.28(0.46c)	0.61(0.86)	0.44(0.82)	3.12(0.43c)	252.03(0.91)
	M08	CK	5.40	0.91	0.76	10.81	319.84
		-P	3.87(0.72b)	0.73(0.80)	0.61(0.81)	12.68(1.17a)	331.84(1.04)
	M11	CK	5.11	0.75	0.71	14.63	302.14
		-P	7.01(1.37a)	0.74(0.99)	0.37(0.53)	13.37(0.91b)	275.51(0.91)

2.6 铝胁迫对不同基因型玉米苗期养分吸收的影响

表 5 铝胁迫对不同基因型玉米苗期营养元素含量的影响

Table 5 Effects of Al-stress on K, Ca, Mg, Zn, Fe content and accumulation in different genotypes of maize at seedling stage

基因型 Genotype	处 理 Treatment	地上部 Shoot					根 系 Root				
		K(%)	Ca(%)	Mg(%)	Zn(mg/kg)	Fe(mg/kg)	K(%)	Ca(%)	Mg(%)	Zn(mg/kg)	Fe(mg/kg)
M05	CK	4.88	0.66	0.54	56.19	583.99	3.65	0.52	0.44	78.98	2 130.39
	+Al	4.71	0.54	0.41	61.70	546.11	3.10	0.63	0.47	56.58	1 764.11

续表 5 Continued 5

基因型 Genotype	处 理 Treatment	地上部 Shoot					根 系 Root				
		K(%)	Ca(%)	Mg(%)	Zn(mg/kg)	Fe(mg/kg)	K(%)	Ca(%)	Mg(%)	Zn(mg/kg)	Fe(mg/kg)
M02	CK	6.58	0.65	0.48	61.15	490.78	3.26	0.64	0.40	57.62	575.42
	+Al	5.66	0.67	0.45	51.86	497.94	3.25	0.49	0.32	72.20	804.29
M12	CK	5.19	0.65	0.52	38.62	537.71	2.29	0.33	0.25	33.14	1 278.89
	+Al	3.78	0.56	0.43	52.15	528.68	1.82	0.30	0.30	33.14	1 688.07
M08	CK	4.10	0.90	0.59	58.44	649.91	2.25	0.38	0.32	45.05	1 332.66
	+Al	3.77	0.70	0.41	75.77	548.28	2.44	0.46	0.34	77.45	1 396.32
M11	CK	5.30	0.75	0.46	70.18	548.90	2.55	0.37	0.35	73.15	1 510.72
	+Al	4.84	0.91	0.43	79.08	451.65	1.36	0.84	0.17	61.32	1 486.38

表 6 铝胁迫对不同基因型玉米苗期营养元素积累量的影响
Table 6 Al stress on nutrient accumulation of different genotypes maize seedlings

部 位 Parts	基因型 Genotype	处 理 Treatment	K(mg/ 株)	Ca(mg/ 株)	Mg(mg/ 株)	Zn(μg/ 株)	Fe(μg/ 株)
地上部	M05	CK	35.77	4.87	3.96	41.21	428.26
		+Al	22.60(0.63)	2.61(0.54)	1.95(0.49)	29.61(0.72)	262.13(0.61)
	M02	CK	77.18	7.60	5.62	71.75	575.85
		+Al	57.75(0.75)	6.83(0.90)	4.59(0.82)	52.89(0.74)	507.90(0.88)
	M12	CK	39.44	4.98	3.97	29.35	408.66
		+Al	15.99(0.41)	2.38(0.48)	1.80(0.45)	22.07(0.75)	223.81(0.55)
	M08	CK	22.84	5.01	3.31	32.53	361.78
		+Al	16.96(0.74)	3.13(0.62)	1.86(0.56)	34.10(1.05)	246.73(0.68)
	M11	CK	25.96	3.67	2.23	34.39	268.96
		+Al	17.27(0.67)	3.23(0.88)	1.55(0.69)	28.21(0.82)	161.09(0.60)
根 系	M05	CK	6.33	0.90	0.76	13.69	369.27
		+Al	3.46(0.55)	0.70(0.77)	0.52(0.69)	6.32(0.46)	196.99(0.53)
	M02	CK	10.54	2.06	1.29	18.63	186.05
		+Al	7.90(0.75)	1.20(0.58)	0.79(0.61)	17.57(0.94)	195.71(1.05)
	M12	CK	4.96	0.71	0.54	7.18	277.09
		+Al	2.31(0.46)	0.38(0.53)	0.38(0.71)	4.20(0.58)	213.82(0.77)
	M08	CK	5.40	0.91	0.76	10.81	319.84
		+Al	4.63(0.86)	0.88(0.97)	0.65(0.86)	14.72(1.36)	265.30(0.83)
	M11	CK	5.11	0.75	0.71	14.63	302.14
		+Al	1.82(0.36)	1.12(1.50)	0.23(0.32)	8.18(0.56)	198.18(0.66)

铝处理可降低各基因型植株钾含量,使地上部镁、铁含量下降,锌含量增加。M02 和 M08 根系锌含量增加,而其他基因型根系锌含量下降。从表 5 和表 6 可以看出,铝胁迫使玉米植株地上部和根系中各元素积累量普遍下降,耐铝基因型地上部和根系中钾、铁积累量明显多于铝敏感基因型,根系中锌积累量显著高于其他基因型玉米。

3 结 论

缺磷逆境中植物常常通过根系适应性反应来提

高对磷的吸收能力^[14,15]。本研究结果显示,低磷胁迫下,低磷敏感基因型 M05 根系生长严重受抑制,降幅高达 32.8%,而耐低磷基因型根长甚至有所增加^[16]。通过对植株生物量的分析表明,除 M02 外,4 个材料在低磷处理下根冠比均有不同程度的增加,但不同基因型根冠比增加的程度不同。低磷胁迫下,耐低磷基因型玉米根系干重和地上部干重少量减少,低磷敏感基因型玉米则显著下降,且地上部干重降幅高达 55.45%,远远大于根系干重降幅。植株地上部、根系生物量和磷积累量结果显示,低磷胁迫下,不同基

因型玉米的磷效率越高,磷素累积量就越多,适应低磷胁迫的能力就越强。

根系性状作为耐铝毒评价指标为大量研究所采用^[17]。本研究对生物学性状和营养特性的分析结果表明,各基因型耐铝性评价结果与以前在土培试验中对酸性土壤铝毒的耐性筛选结果基本一致。在 0.1 mmol/L Al^{3+} 处理条件下,铝对植物的毒害作用首先表现在对根伸长的抑制,铝敏感基因型玉米根伸长受到铝的抑制作用大于耐铝基因型。铝胁迫下,各基因型根冠比差异不大,这是由于植物在铝胁迫条件下根系生长受抑制必然影响对各种营养元素的吸收积累。耐铝基因型地上部和根系相对于重下降较少,而敏感基因型相对于重显著下降。

在铝毒或低磷胁迫条件下,双耐基因型玉米仍然具有维持正常生长的能力,并获得与对照相当或接近的生物重。本研究发现,敏感基因型对各元素的吸收累积由于铝毒或低磷胁迫而严重下降,说明胁迫条件下植物矿质元素代谢的差异可能是不同基因型差异的一个重要组成部分。而双耐基因型在胁迫处理下能吸收较多的矿质营养,为形成较高的生物产量奠定良好的基础。因此繁育双耐玉米品种可节约磷肥,获得最大的经济效益。

参考文献:

- [1] Wissuwa M. How do plants achieve tolerance to phosphorus deficiency? Small causes with big effects[J]. Plant Physiology, 2003, 133(4): 1947–1958.
- [2] 王庆仁,李继云,李振声. 植物高效利用土壤难溶态磷研究动态及展望[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(2): 107–116.
- [3] Foches D, Claassen N, Jungk A. Phosphorus efficiency of plant I: External and internal P uptake efficiency of different plant species[J]. Plant Soil, 1998, 110: 101–109.
- [4] 郭再华,贺立源,黄 魏,等. 耐低磷水稻筛选与鉴定[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(5): 642–648.
- [5] 邢宏燕,王二明,李 滨,等. 有效利用土壤磷的小麦种质筛选方法研究[J]. 作物学报, 2000, 26(6): 839–844.
- [6] 廖 星,李志玉,王江薇,等. 甘蓝型油菜耐缺磷种质筛选指标的研究[J]. 中国农业科学, 1999, 32: 107–111.
- [7] 章爱群,贺立源,李德华,等. 酸胁迫对不同基因型玉米生长和养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4): 548–553.
- [8] 章爱群,贺立源,李德华,等. 酸胁迫对不同基因型玉米生长和钙镁养分吸收的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2007, 13(6): 796–798.
- [9] Magnavaca R, Gardner C O, Clark R B. Evaluation of inbred maize lines for aluminum tolerance in nutrient solution. In: Gabelman F W, Loughman B C eds, Genetics Aspects of Plant Mineral Nutrition[M]. Hague, Netherlands: Martinus Nijhoff Publishers, 1987, 255–265.
- [10] Kiss S. Antagonism of magnesium and aluminium in bean and wheat [J]. Acta Agronomica Hungaria, 1989, 38: 219–229.
- [11] Gassmann W, Schroeder J I. Inward-rectifying K channels in root hairs of wheat A mechanism for aluminum-sensitive low affinity K uptake and membrane potential control[J]. Plant Physiol, 1994, 105: 1399–1408.
- [12] 郭天荣,张国平,卢王印,等. 铝胁迫对不同耐铝大麦基因型干物质积累与铝和养分含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3): 324–330.
- [13] Urrea-Gomez R, Ceballos H, Pandey S, et al. A greenhouse screening technique for acid soil tolerance in maize[J]. Agron J., 1996, 88: 806–812.
- [14] 李 锋,潘晓华,刘水英,等. 低磷胁迫对不同水稻品种根系形态和养分吸收的影响[J]. 作物学报, 2004, 30(5): 438–442.
- [15] Narang R A, Altmann T. Phosphate acquisition heterosis in Arabidopsis thaliana: a morphological and physiological analysis[J]. Plant & Soil, 2001, 234(1): 91–97.
- [16] 郭再华,贺立源,徐才国. 磷水平对不同耐低磷水稻苗根系生长及氮、磷、钾吸收的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2006, 12(4): 449–452.
- [17] Cancado G M A, Loguerio L L, Martins P R, et al. Hematoxylin staining as a phenotypic index for aluminium tolerance selection in tropical maize (*Zea mays* L.)[J]. Theor. Appl. Genet., 1999, 99: 747–754.

(责任编辑:尹 航)