

## 玉米自交系耐铝性评价及根系形态解剖特征

李德华<sup>1,2</sup> 贺立源<sup>1</sup> 刘武定<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>华中农业大学资源环境学院,湖北武汉 430070;<sup>2</sup>孝感学院生物系,湖北孝感 432100)

**摘要** 采用营养液培养方法,对9个玉米自交系的耐铝性进行了评价,并对其中两个耐铝性不同的典型自交系的根系形态和解剖特征进行了比较。结果表明,玉米自交系在含铝营养液中的耐铝性评价结果与酸性土壤上的耐酸性筛选结果基本一致。耐铝基因型具有苏木精着色程度较低、种子根相对伸长率和植株相对生物量较高的共同特点。种子根相对伸长率、苏木精染色指数与植株的耐铝性具有显著的相关性。种子根相对伸长率是一快速简便、准确可靠的耐铝性鉴定指标。铝胁迫下,两个耐铝性不同的典型玉米自交系根系形态和解剖特征具有明显差异,耐铝基因型明显优于铝敏感基因型。

**关键词** 玉米;耐铝性评价;根系形态解剖特征  
中图分类号: S513

## The Al-Tolerance Evaluation and Anatomical Characteristics of Roots in Inbred Lines of Maize

LI De-Hua<sup>1,2</sup>, HE Li-Yuan<sup>1</sup>, LIU Wu-Ding<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> College of Resources and Environmental Sciences of Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, Hubei; <sup>2</sup> Department of Biology of Xiaogan University, Xiaogan 432100, Hubei, China)

**Abstract** The Al-tolerance of 9 inbred lines of maize and part of their F<sub>1</sub> generations that had different reactions to acid soil were evaluated, and their morphological and anatomical characteristics were contrasted with those of Al-sensitive typical inbred line, by means of hydroponics. The results indicated that the evaluation of Al-tolerant inbred lines grown in nutrient solution with aluminum kept basically consistent with the screening results in acid soil. The Al-tolerant lines had lower hematoxylin dye index, higher RSRL and higher relative biomass in comparison with Al-sensitive lines. There were significant correlations between the relative seminal root length (RSRL), hematoxylin dye index, and the Al-tolerance of the plant. That means RSRL can be used as a simple, convenient and accurate index for Al-tolerance evaluation. There were significant difference of morphological and anatomical characteristics between two typical inbred lines, Al-tolerant genotypes were distinctly better than Al-sensitive ones.

**Key words** Maize; Al-tolerance estimation; Root morphological and anatomical characters

酸性土壤上的铝毒害是限制作物生产的主要因子之一,但不同的作物、同一作物的不同品种间,其耐铝性可能存在差异,在玉米、大豆、水稻、大麦、小麦、苜蓿、马铃薯、番茄等作物中都观察到耐铝性的基因型差异<sup>[1,2]</sup>。我们在试验中也发现,不同玉米自交系对酸、铝的耐性具有基因型差异<sup>[3,4]</sup>。

植物铝毒害最容易识别的形态症状就是根的生长受到抑制,肉眼可见的铝毒害症状包括根伸长生长的抑制<sup>[5]</sup>、根尖膨大<sup>[6]</sup>、表皮脱落<sup>[7]</sup>等。由于根尖

比成熟的根部组织积累更多的铝,因而根尖被认为是铝毒害的最初作用部位<sup>[5,8]</sup>。在含铝营养液中,种子根净增长度和种子根相对伸长率可用于玉米耐铝性的早期鉴定<sup>[1,9]</sup>。苏木精染色广泛用于细胞遗传研究,也可用于玉米早期无损伤性的耐铝性鉴定<sup>[10,11]</sup>。

本文采用营养液培养方法,以苏木精染色指数、种子根相对增加长度及植株苗期相对生物量等指标对不同玉米自交系的耐铝性进行了评价,并对各耐

基金项目:引进国际先进农业科学技术计划(948项目)(971007)资助。

作者简介:李德华(1959-),男,副教授,博士,主要从事植物营养遗传和逆境生理研究。E-mail: hbdhli@sohu.com

Received(收稿日期):2003-05-21, Accepted(接受日期):2003-12-21.

铝性鉴定指标进行了比较。对其中两个耐铝性不同的典型自交系的根系形态和解剖特征进行了比较研究。

## 1 材料和方法

### 1.1 不同玉米自交系的耐铝性评价

1.1.1 种子根相对长度测定 选用本室筛选的7个对酸性土壤反应不同的玉米自交系,编号见表1。种子经0.1% HgCl<sub>2</sub>表面灭菌15 min,冲洗后播于培养皿(90 mm ×20 mm)中的滤纸(0.2 mmol/L CaCl<sub>2</sub>浸湿)上,在28℃黑暗条件下培养5 d。以单株为重复单位。测量最初种子根长度(ISRL),然后转入加铝的玉米营养液处理。采用Magnavaca的玉米营养液配方<sup>[4]</sup>。设0(CK)、0.1、0.2、0.3、0.4 mmol/L KAl(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(最终pH 4.0)5个铝处理。采用长方形塑料盒(28 cm ×12 cm ×9 cm)在光照培养室中培养。培养温度为28℃,每日14 h光照、10 h黑暗,通气10 min,隔天更换一次营养液。处理3 d后分别测量对应幼苗的最终种子根长(FRSL)。每处理测量10~15个植株。计算自交系各处理种子根净增长度(Net seminal root length, NSRL) (NSRL = FRSL - ISRL)和种子根相对伸长率(Relative seminal root length, RSRL) [RSRL = NSRL (+ Al) / NSRL (CK)]。按以上方法进一步对9个玉米自交系及2个杂种F<sub>1</sub>[设0(CK)、0.1、0.2 mmol/L KAl(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>3个铝处理]于处理后3 d和7 d分别测定NSRL和RSRL,并用苏木精染色。

1.1.2 种子根苏木精染色 上述处理7 d后的种子根经200 mL蒸馏水浸泡15 min,后用50 mL 0.2%苏木精水溶液染色20 min,再用蒸馏水冲洗至无浮色。苏木精着色程度分为0~5级,完全不着色记为0,最大着色记为5<sup>[11]</sup>。以单株为重复单位,各自交系及杂种每处理观察记录10个根尖。

1.1.3 植株相对生物量 自交系种子播于砂盘,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。培养和处理方法同前<sup>[4]</sup>,15 d后收获,并将地上部与根系分开,70℃烘干称重。相对生物量为加铝与不加铝(CK)处理的干重之比。3次重复,每重复随机抽查6个植株。

### 1.2 典型耐铝性自交系根系形态和根尖解剖结构

1.2.1 材料 选用上述植株相对生物量试验中的Z<sub>01</sub>(耐铝)和Z<sub>02</sub>(铝敏感)两个典型玉米自交系为

材料。

1.2.2 根系生长动态 分别于处理后1 d、3 d、7 d、15 d和20 d随机抽取3个植株,测定根长、根体积和根鲜重,重复3次。其中,根长测定只限于处理后1 d和3 d的样品。根长测定采用十字交叉法,根体积测定采用排水法。

1.2.3 根尖解剖结构 分别于处理后3 h、6 h、24 h、3 d、10 d、20 d取样。每处理取根尖3~5枚置安培瓶中。3 h、6 h、24 h的样品用卡诺氏液固定6 h后转入70%乙醇保存,用于根尖压片。其他样品用FAA固定并保存于其中,用于钨红整染和石蜡切片。压片采用铁醋酸洋红染色,石蜡切片采用爱氏苏木精整染。OLYMPUS显微镜观察摄影<sup>[12]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 玉米自交系耐铝性评价

2.1.1 不同耐铝性玉米自交系种子根净增长度和相对伸长率 玉米自交系根系生长受抑制程度随铝处理浓度增加而增加,0.1、0.2、0.3、0.4 mmol/L Al<sup>3+</sup>处理3 d,7个自交系的种子根净增长度分别为4.88、3.90、2.41和2.10 mm,相对伸长率依次为0.82、0.65、0.40和0.39(表1)。从表1还可看出,0.2 mmol/L Al<sup>3+</sup>为一较适宜的铝处理浓度,处理3 d后,铝敏感类型种子根相对伸长率已小于0.5,而耐铝和中等类型无明显差异,种子根相对伸长率依次为0.76和0.75。0.3、0.4 mmol/L Al<sup>3+</sup>处理3 d,耐铝类型受抑也很明显,各类自交系间的差异已不显著。

对9个玉米自交系及2个杂种F<sub>1</sub>玉米自交系根系生长的进一步分析表明,0.1 mmol/L Al<sup>3+</sup>和0.2 mmol/L Al<sup>3+</sup>处理7 d,11个材料种子根净增长度(NSRL)平均值分别为5.87和4.35 mm,相对伸长率(RSRL)平均值分别为0.76和0.58(表2)。方差分析表明,在0.1 mmol/L Al<sup>3+</sup>浓度下处理3 d和7 d,种子根相对伸长率自交系间差异不显著,而在0.2 mmol/L Al<sup>3+</sup>浓度下则分别达到显著和极显著水平(表2)。

2.1.2 玉米自交系耐铝性差异 对处理7 d自交系间耐铝性差异显著的指标的多重比较结果表明,种子根净增长度与自交系耐铝性并无明显的一致性,尤其是在0.1 mmol/L Al<sup>3+</sup>浓度下,种子根净增长度以Z<sub>07</sub>(耐铝)最大,但敏感自交系Z<sub>02</sub>也可有较大的净增长度(表2)。

表1 不同玉米自交系种子根净增长度和相对伸长率  
Table 1 NSRL and RSRL among various inbred lines of maize

自交系 Inbred lines	种子根净增长度 NSRL (mm)					种子根相对伸长率 RSRL			
	Al <sup>3+</sup> (mmol/L)					Al <sup>3+</sup> (mmol/L)			
	0.0 (CK)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.1	0.2	0.3	0.4
Z <sub>01</sub> (T)	9.30 ±0.59	6.98 ±0.94	6.51 ±0.63	3.21 ±0.74	2.72 ±0.94	0.75 ±0.10	0.70 ±0.16	0.35 ±0.08	0.29 ±0.10
Z <sub>03</sub> (T)	3.02 ±0.28	2.60 ±0.28	2.31 ±0.22	1.37 ±0.25	1.12 ±0.36	0.86 ±0.09	0.76 ±0.07	0.45 ±0.14	0.37 ±0.09
Z <sub>07</sub> (T)	4.53 ±1.03	4.12 ±0.72	3.71 ±0.59	2.40 ±0.45	2.34 ±0.48	0.91 ±0.16	0.82 ±0.13	0.53 ±0.10	0.52 ±0.11
Z <sub>08</sub> (M)	8.56 ±0.57	8.39 ±0.80	5.91 ±0.75	2.90 ±0.28	2.95 ±0.38	0.98 ±0.06	0.69 ±0.04	0.34 ±0.03	0.34 ±0.04
Z <sub>09</sub> (M)	3.59 ±0.39	3.43 ±0.62	2.88 ±0.37	2.01 ±0.41	1.11 ±0.34	0.95 ±0.17	0.80 ±0.10	0.55 ±0.07	0.31 ±0.07
Z <sub>02</sub> (S)	6.68 ±0.67	4.88 ±0.37	3.21 ±0.39	2.26 ±0.29	2.29 ±0.34	0.73 ±0.11	0.48 ±0.05	0.34 ±0.04	0.34 ±0.05
Z <sub>04</sub> (S)	6.22 ±0.52	3.79 ±0.42	2.80 ±0.25	2.71 ±0.27	2.30 ±0.34	0.72 ±0.15	0.45 ±0.07	0.43 ±0.04	0.37 ±0.05
Mean	5.96	4.88	3.90	2.41	2.10	0.82	0.65	0.40	0.35
T	5.62	4.57	4.18	2.33	2.06	0.84	0.76	0.44	0.39
M	6.08	5.87	4.40	2.46	2.03	0.97	0.75	0.45	0.33
S	6.45	4.34	3.01	2.49	2.3	0.73	0.47	0.39	0.36

Notes: NSRL = net seminal root length; RSRL = relative seminal root length. T = Al-tolerant, S = sensitive, M = medium.

表2 玉米自交系耐铝性差异

Table 2 The difference of Al-tolerance among various inbred lines of maize

自交系及杂种 Line	Al <sup>3+</sup> 处理 7 d					Al <sup>3+</sup> 处理 15 d
	0.1 mmol/L Al <sup>3+</sup>		0.2 mmol/L Al <sup>3+</sup>		苏木精染色指数 Hematoxylin dye index	植株相对生物量 Relative biomass
	根净增长度 NSRL	根相对伸长率 RSRL	根净增长度 NSRL	根相对伸长率 RSRL		
Z <sub>01</sub> (T)	5.54 bcd	0.83	4.14 bc	0.62 cde	0.83 d	0.95 ab
Z <sub>03</sub> (T)	4.69 cd	0.90	4.23 bc	0.81 abc	1.86 c	0.75 bc
Z <sub>07</sub> (T)	8.52 a	0.86	7.21 a	0.73 abcd	1.50 cd	0.97 a
Z <sub>08</sub> (M)	5.48 bcd	0.66	3.17 cd	0.38 fg	3.83 a	0.66 cd
Z <sub>09</sub> (M)	7.07 abc	0.80	5.62 b	0.64 bcd	4.14 a	0.73 c
Z <sub>02</sub> (S)	7.20 ab	0.73	4.23 bc	0.43 efg	4.17 a	0.56 cd
Z <sub>04</sub> (S)	3.38 d	0.59	1.54 e	0.25 g	3.86 a	0.45 d
Z <sub>05</sub> (S)			2.14 de	0.54 def	2.33 bc	0.47 d
Z <sub>06</sub> (S)			2.07 de	0.53 def	2.86 b	
H <sub>1</sub> (Z <sub>01</sub> × Z <sub>02</sub> )			7.79 a	0.83 ab	1.83 c	0.98 a
H <sub>2</sub> (Z <sub>05</sub> × Z <sub>03</sub> )	7.88 ab	0.94	7.76 a	0.92 a	1.67 cd	
Mean	5.87	0.76	4.35	0.58	2.08	0.72
CV	39.9	不显著 P=0.27	34.9	33.5	37.5	15.3
类型 Kind						
T	6.25	0.83	5.19	0.72	1.40	0.89
M	6.27	0.73	4.40	0.52	3.98	0.70
S	5.29	0.66	1.92	0.45	3.30	0.49
H	7.88	0.94	7.78	0.88	1.75	0.98

Notes: T = Al-tolerant, S = sensitive, M = medium, H = hybrid. Analysis with SAS, SSR, = 0.05.

在 0.2 mmol/L Al<sup>3+</sup> 胁迫下,种子根相对伸长率与自交系耐铝性有较好的一致性。耐铝(T)、中等耐铝(M)及铝敏感(S)自交系种子根相对伸长率平均值分别为 0.72、0.52 和 0.45。从表 2 还可看出,杂种 H<sub>1</sub> 和 H<sub>2</sub> 种子根相对伸长率均大于 0.8,表现较强的杂种优势。

苏木精染色分级结果及相对生物量两个指标自交系间差异均达显著水平。3 类耐铝性不同的自交系(T、M、S)植株相对生物量平均值依次为 0.89、0.70 和 0.49。3 个耐铝自交系(Z<sub>01</sub>、Z<sub>03</sub>、Z<sub>07</sub>)对苏木精着色程度较低,染色指数平均为 1.40,而 4 个铝敏感自交系染色指数平均为 3.3,其中 Z<sub>02</sub> 可高达 4.17。

但中等耐铝类型(Z<sub>08</sub>、Z<sub>09</sub>)染色指数也较高,平均为 3.98,接近铝敏感自交系。杂种(H<sub>1</sub>、H<sub>2</sub>)对苏木精着色程度较低,平均为 1.75,与耐铝类型较接近(表 2)。

2.1.3 苏木精染色指数、主根生长及植株相对生物量的相关关系 在 2 种铝处理浓度下,苏木精染色指数与种子根相对伸长率、地上部相对生物量及植株相对生物量存在显著或极显著的负相关关系,而与种子根净增长度相关不显著。在 0.2 mmol/L Al<sup>3+</sup> 处理浓度下,植株地上部相对生物量与苏木精染色指数、种子根相对伸长率均具有显著的相关关系,但与种子根净增长度相关不显著(表 3)。这是

因为种子根净增长长度除了与铝胁迫有关,也与自交系自身生长特性有关。表3的结果还表明,种子根相对伸长率是一较好的耐铝性指标,与植株地上部及整株相对生物量间存在很好的相关关系( $r$ 分别为0.6740\*和0.7304\*)。此外,0.2 mmol/L  $Al^{3+}$ 处理是一较适宜的处理浓度。在此处理浓度下,耐铝与铝敏感自交系间差异较大,有利于其耐铝性的评价,而且根系各耐铝性指标与地上部间的相关性均较好。

### 2.2 耐铝性不同的典型玉米自交系根系形态和根尖解剖结构

2.2.1 根长和相对根长 自交系根系长度变化如图1所示。铝处理3 d后,两自交系根系生长均

受到不同程度的抑制。耐铝自交系  $Z_{01}$  受抑制程度明显较轻,根系相对长度可达0.87,而敏感自交系只有0.58(图1)。

2.2.2 根系体积和生物量的动态变化 随着铝处理时间的增长,两自交系根系生物量和体积均受到不同程度的抑制,铝处理2周后,这种抑制尤为明显。但耐铝自交系  $Z_{01}$  受抑制程度较铝敏感自交系  $Z_{02}$  轻,其根系的相对生物量始终在0.8以上,处理20 d后,仍达对照的86%。而铝敏感自交系处理3 d后,其根系生物量即较对照下降25%,处理20 d后,根系生物量只有对照的58%(图2)。根系体积和根系生物量的变化基本一致,耐铝自交系  $Z_{01}$  受抑制程度始终较敏感自交系  $Z_{02}$  轻(图3)。

表3 苏木精染色与主根生长及相对生物量的相关关系

Table 3 The relationship among relative biomass, RSRL and hematoxylin dye

		根净增长长度 NSRL	根相对伸长率 RSRL	地上部相对生物量 Relative biomass of shoots	植株相对生物量 Relative biomass of plant
苏木精染色指数	0.1 mmol/L $Al^{3+}$	-0.2773	-0.7259*	-0.7856*	-0.7980*
Hematoxylin dye index	0.2 mmol/L $Al^{3+}$	-0.4293	-0.6976*	-0.7924**	-0.6077*
种子根净增长长度	0.1 mmol/L $Al^{3+}$		0.5670	-0.0078	0.6825
NSRL	0.2 mmol/L $Al^{3+}$		0.8082**	0.5289	0.8742**
种子根相对伸长率	0.1 mmol/L $Al^{3+}$			0.6079	0.8071*
RSRL	0.2 mmol/L $Al^{3+}$			0.6740*	0.7304*
地上部相对生物量	0.1 mmol/L $Al^{3+}$				0.6211
Relative biomass of shoots	0.2 mmol/L $Al^{3+}$				0.7780*

Notes:  $n = 7, 9, 11$  then  $r_{0.05} = 0.754, 0.666, 0.602$ ;  $r_{0.01} = 0.874, 0.798, 0.735$ .

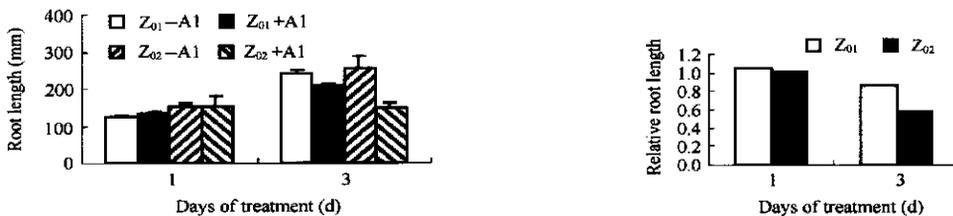


图1 铝对玉米自交系根系长度及相对长度的影响

Fig. 1 Effects of aluminum on root length and relative length in inbred lines of maize

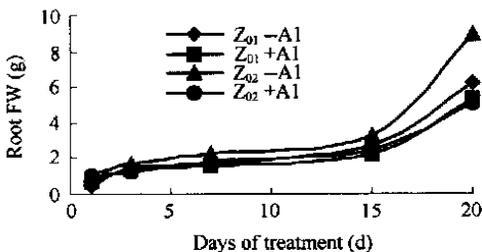


图2 铝对玉米自交系根系生物量的影响

Fig. 2 Effects of aluminum on root biomass in inbred lines of maize

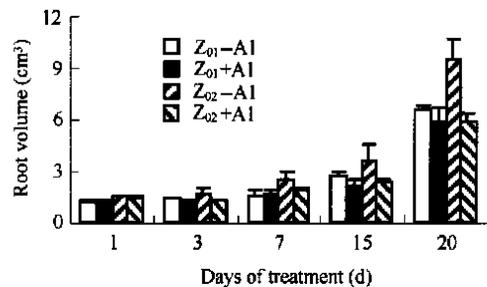


图3 铝对玉米自交系根系体积的影响

Fig. 3 Effects of aluminum on root volume in inbred lines of maize

2.2.3 根系解剖特征 压片观察结果显示,铝处理 3 h 后,铝敏感自交系  $Z_{02}$  根尖细胞有丝分裂即受到明显抑制,24 h 后细胞分裂完全停止(图版 -D)。处理 3 d 后,观察到铝敏感自交系  $Z_{02}$  根尖明显膨大,根系纵切片显示,其表皮脱落,皮层细胞坏死(图版 -I,J);而耐铝自交系  $Z_{01}$  受到的抑制则明显较轻(图版 -B,F)。

处理 3 d 后,可观察到耐铝自交系  $Z_{01}$  根尖包被有一层黏胶状物质,可被钉红染色,具有果胶类物质的性质(图版 -G)。

### 3 讨论

铝离子毒害是酸性土壤上作物生长最主要的限制因子,它可导致 40% 耕地上的作物减产<sup>[13]</sup>。玉米栽培种多数对铝敏感,但不同品种、自交系和杂交种的耐铝性均存在广泛的遗传变异,具有耐铝性改良的基因潜力<sup>[1,9]</sup>。本研究结果显示,所用玉米自交系材料对铝胁迫的反应具有基因型差异。耐铝类型具有苏木精着色程度较低、根系生长受抑制程度相对较低和植株相对生物量较高的共同特点。相反,铝敏感自交系根系对铝的排斥能力较弱,根系含铝量较高,反应在对苏木精的着色程度较深,种子根相对伸长率较低,根系生长明显受阻,最后造成植株生物量显著下降。

选择适当的胁迫方式和筛选指标,寻求尽可能灵敏的能表达基因型差异的试验手段,是筛选结论准确可靠的保证。根部性状作为耐铝性的评价指标为大量研究所采用。测定溶液培养中根长(主根)对  $Al^{3+}$  的反应,已成为植物耐铝性鉴定的通用方法。Magnavaca (1982) 研究认为,在营养液培养中,采用根长法评价玉米自交系耐铝性的最佳铝浓度为 6 mg/L,目前已发展成为热带玉米种质耐铝性筛选的有效方法,且与其他筛选技术具有很好的相关性<sup>[1]</sup>。在本试验中,0.2 mmol/L  $Al^{3+}$  (5.4 mg/L) 为一适宜的铝处理浓度,在这种胁迫条件下,种子根净增长度(NSRL)和相对伸长率(RSRL)变幅较大,自交系及杂种间差异显著。处理时间以 7 d 较好,可使耐铝与铝敏感自交系间差异较大,且与自交系的耐铝性相关性较好,有利于玉米自交系的耐铝性评价。

本文将玉米种子根相对伸长率(RSRL)定义为铝胁迫与对照的种子根净增长之比,由于考虑了各

自交系根系生长的自身特性,因此较种子根净增长度(NSRL)更适宜于耐铝性的评价。在本研究中,RSRL 与植株地上部及整株相对生物量之间相关显著,各自交系的耐铝性评价结果与以前土培试验中的耐酸性筛选结果<sup>[3]</sup>基本一致。而 NSRL 与植株相对生物量相关不显著,这与 Magnavaca 等的研究结果一致,他们的分析表明,在铝(0.185 mmol/L  $Al^{3+}$ )处理条件下,最初(铝处理前)种子根长(ISRL)与 NSRL 存在极显著的相关关系,但与 RSRL 相关不显著<sup>[8]</sup>。因此,测定 RSRL 可作为一种快速简便、准确可靠的耐铝性鉴定方法。

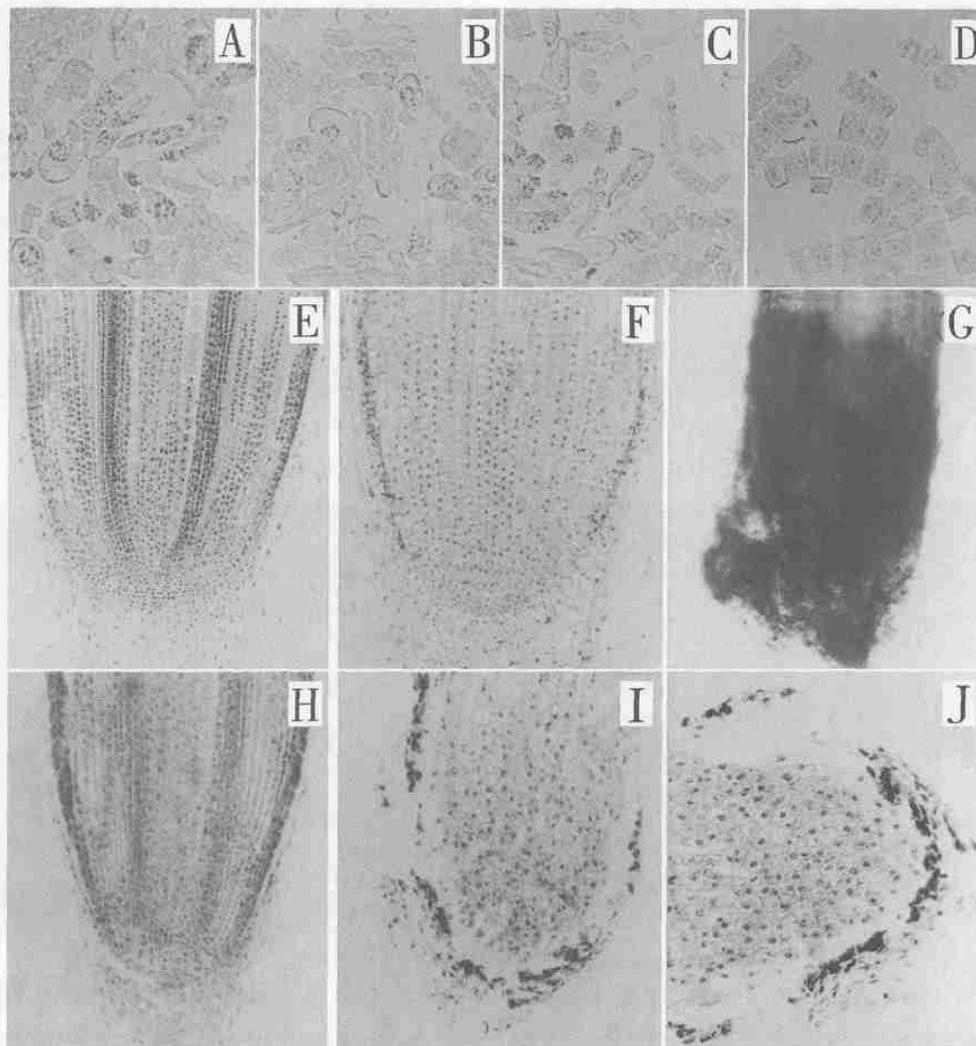
关于高等植物铝毒的机理目前知之甚少,许多方面尚停留在假说阶段<sup>[14,15]</sup>。一般认为,铝毒症状是由于  $Al^{3+}$  与根尖的相互作用导致根的发育被抑制所引起的,铝对植物的毒害,在细胞、组织水平上的表现为抑制细胞分裂和伸长、破坏膜的结构和功能。Morimura 等(1978)用 1 mol/L  $AlCl_3$  处理洋葱根尖,2 h 后即可观察到细胞分裂受阻,8 h 后细胞分裂完全停止<sup>[8]</sup>。本研究结果显示,铝敏感自交系在铝处理 3 h 后即可观察到根尖分生组织细胞有丝分裂受阻,24 h 已完全停止;铝处理 3 d 后,根尖明显膨大,根系表皮脱落,皮层细胞坏死,根长、根系体积和生物量等均受到显著的抑制,而耐铝基因型根系受抑制程度则明显较轻。

钉红常用于植物显微化学中果胶质类物质的鉴定<sup>[12]</sup>。本研究发现,耐铝自交系  $Z_{01}$  在铝处理 3 d 后的根尖可观察到包被有一层可被钉红染色的黏胶状物质,估计这也是此材料耐铝的机制之一。因为附着在植物根尖上的黏胶可与土壤中的铝结合,减少根尖对铝的接触机会<sup>[16]</sup>。根系分泌的黏胶中含有约 3% 的酸性糖,酸性糖分子上的游离羧基可能使它具有结合铝的能力<sup>[17]</sup>。研究发现,有黏胶附着的根经过铝处理后分别测定保留和除去黏胶的根尖含铝量,结果前者大于后者,这说明玉米根系分泌的黏胶物质可以和铝结合<sup>[18]</sup>。如果根尖确实是铝毒害的原初部位,它可能也是耐铝植物表现较强的对铝毒害的抵抗作用的部位。

### References

- [1] Cancado G M A, Loguercio L L, Martins P R, Parentoni S N, Paiva E, Borem A, Lopes M A. Hematoxylin staining as a phenotypic index

- for aluminum tolerance selection in tropical maize (*Zea mays* L.). *Theor Appl Genet*, 1999, **99**:747 - 754
- [2] Huang B-Q (黄邦全), Bai J-H (白景华), Xue X-Q (薛小桥). Advances in studies on aluminum toxicity and tolerance in plants. *Chinese Bulletin of Botany* (植物学通报), 2001, **18**:385 - 395
- [3] He L-Y (贺立源), Xu S-Z (徐尚忠), Li J-S (李建生). Biologic and nutrient characters of maize tolerance to acid soil at seedling stage. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2000, **26**:205 - 209
- [4] Li D-H (李德华), He L-Y (贺立源), Liu W-D (刘武定). Organic acid secretion from roots in the Al-tolerant and Al-sensitive maize inbred lines. *J Plant Physiol Mol Biol* (植物生理与分子生物学学报), 2003, **29**(2):114 - 120
- [5] Delhaize E, Ryan P R. Aluminum toxicity and tolerance in plants. *Plant Physiol*, 1995, **107**:315 - 321
- [6] Jones D L, Kochian L V. Aluminum inhibition of 1,4,5-trisphosphate signal transduction pathway in wheat roots: a role in aluminum toxicity? *Plant Cell*, 1995, **7**:1 913 - 1 922
- [7] Larsen P B, Degenhardt J, Tai C Y, Stenzler L M, Howell S H, Kochian L V. Arabidopsis mutants with increased aluminum resistance exhibit altered patterns of aluminum accumulation and organic acid release from roots. *Plant Physiol*, 1998, **117**: 9 - 17
- [8] Mbrimula S, Takahashi E, Matsumoto H. Association of aluminum with nuclei and inhibition of cell division in onion (*Allium cepa*) roots. *Z. Pflanzenphysiol*, 1978, **88**:395 - 401
- [9] Magnavaca R. Genetics Aspects of Plant Mineral Nutrition. Martinus Nijhoff Publishers, 1987. 201 - 212
- [10] Ryan P R, Ditomaso J M, Kochian L V. Aluminum toxicity in roots: an investigation of spatial sensitivity and role of the cap. *J Exp Bot*, 1993, **44**:437 - 446
- [11] Jorge R A, Arruda P. Aluminum-induced organic acids exudation by roots of an aluminum-tolerant tropical maize. *Phytochemistry*, 1997, **45**:675 - 681
- [12] 王灶安主编. 植物显微技术. 北京:农业出版社, 1992(in Chinese)
- [13] Ma J F, Ryan P R, Delhaize E. Aluminum tolerance in plants and the complexing role of organic acids. *TRENDS in Plant Science*, 2001, **6**: 273 - 278
- [14] Taylor G J, McDonald-Stephens J L, Hunter D B. Direct measurement of aluminum uptake and distribution in single cell of *Chara corallina*. *Plant Physiol*, 2000, **123**:987 - 996
- [15] Yamamoto Y, Kobayashi Y, Matsumoto H. Lipid peroxidation is an early symptom triggered by aluminum, but not the primary cause of elongation inhibition in pea roots. *Plant Physiol*, 2001, **125**:199 - 208
- [16] Henderson M, Ownby J D. The role of root cap mucilage secretion in aluminum tolerance in wheat. *Curr Top Plant Biochem Physiol*, 1991, **10**:134 - 141
- [17] Moody S F, Clarke A E, Bacic A. Structural analysis of secreted slime from wheat and cowpea roots. *Phytochem*, 1988, **27**:2 857 - 2 861
- [18] Li X-F (黎晓峰), Ma J-F (马建锋), Matsumoto H (松本英明). Root-cap mucilage binds aluminum and accumulates organic acid in *Zea mays* L. *J Plant Physiol Mol Biol* (植物生理与分子生物学学报), 2002, **28**:121 - 126



图版说明

A、B、C、D: 铝处理后 24 h 根尖细胞有丝分裂情况(压片, × 160)。

A: 耐铝自交系 Z<sub>01</sub> CK; B: Z<sub>01</sub> + Al, 细胞分裂受到的抑制较轻; C: 铝敏感自交系 Z<sub>02</sub> CK; D: Z<sub>02</sub> + Al, 细胞分裂已完全停止。

E、F、H、I、J: 铝处理 3 d 根尖解剖特征(石蜡切片, E、F、H、I: × 60, J: × 100)。

E: Z<sub>01</sub> CK; F: Z<sub>01</sub> + Al, 根尖受到的抑制较轻; H: Z<sub>02</sub> CK; I、J: Z<sub>02</sub> + Al, 根尖膨大, 根系表皮脱落, 皮层细胞坏死。

G: 耐铝自交系 Z<sub>01</sub> 根尖整体制片(铝处理 3 d 钌红整体染色, × 24)。

根尖包被一层可被钌红染色的黏胶状物质, 具有果胶类物质的性质。

Explanation of Plate

A, B, C, D: The mitosis of cell in root tip after 24 h by Al treatment (squash method, × 160).

A: Z<sub>01</sub> (Al-tolerant inbred line) CK; B: Z<sub>01</sub> + Al, Cell fission was inhibited slightly; C: Z<sub>02</sub> (Al-sensitive inbred line) CK; D: Z<sub>02</sub> + Al, Cell fission have stopped completely.

E, F, H, I, J: The anatomical characteristics of root tip after 3 d by Al treatment (paraffin section, E, F, H, I: × 60, J: × 100).

E: Z<sub>01</sub> CK; F: Z<sub>01</sub> + Al, Root growth was inhibited slightly; H: Z<sub>02</sub> CK; I, J: Z<sub>02</sub> + Al, Root tip expanded, epidermis desquamated, cell necrosis of cortex.

G: The whole dye by ruthenium red in root of Z<sub>01</sub> (after 3 d by Al treatment, × 24).

Root tip was surrounded with mucilage, which could be dyed by ruthenium red and had similar characteristics with pectin.