

# 不同耐铝性玉米自交系的营养特性

李德华<sup>1,2</sup>, 贺立源<sup>2</sup>, 李建生<sup>3</sup>, 刘武定<sup>2</sup>

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

3 中国农业大学农学与生物技术学院,北京 100094)

**摘要:** 采用溶液培养方法,研究了三类不同耐铝性玉米自交系的营养特性。耐铝自交系根系对  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  的平均吸收速率与对照相同或略有提高,而多数敏感自交系显著下降。铝处理后,各自交系对磷的吸收能力均呈下降趋势,铝敏感自交系降幅相对较大。各自交系对钾的吸收表现不一,与自交系耐铝性无明显关系。根系和地上部铝含量随铝处理浓度增加而增加,且敏感自交系根系铝含量增幅较大。植株吸收的铝主要集中在根系部位,自交系地上部相对铝含量与耐铝性无相关关系。铝处理可使多数自交系根系钙、镁含量降低,但耐铝自交系与对照无显著差异。铝处理后,地上部钙含量均高于根系;铝处理可显著降低耐铝自交系根系镁含量,但地上部相对镁含量高于敏感自交系。铝处理下,多数自交系根系钾含量有所降低,但与耐铝性无相关性。铝处理可使多数自交系根系和地上部铁、锰、铜、锌含量降低,不同耐铝性自交系类型间具有差异。

**关键词:** 自交系玉米; 铝胁迫; 营养特性

中图分类号: S513; Q945.78 文献标识码: A 文章编号: 1008-505X(2004)04-0374-06

## The characteristics of nutrition in maize with different Al-tolerant

LI De-hua<sup>1,2</sup>, HE Li-yuan<sup>2</sup>, LI Jian -sheng<sup>3</sup>, LIU Wu-ding<sup>2</sup>

(1 Dept. of Biology of Xiaogan Univ., Xiaogan, Hubei 432100, China; 2 College of Resour. and Environ. Sci of Huazhong Agric. Univ., Wuhan 430070, China; 3 College of Agron. and Bio-tech., CAU, Beijing100094, China)

**Abstract:** The characteristics of nutrition was studied in maize of inbred lines with different Al-tolerance by soluble culture. The results indicate that the average absorption rates of  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  of Al-tolerant inbred lines were similar or slightly higher than that of CK, however the absorption rates decreased significantly in Al-sensitive inbred lines. The absorption capability of phosphorus of inbred lines tended to decline after treated with Al, and the Al-sensitive inbred lines decreased more sharply. The absorption capability of  $\text{K}^+$  of inbred lines was difference, the Al contents in plant were higher than that CK when treated with Al and increased with Al rates. and Al contents in root of Al-sensitive inbred lines increased more than that of Al-tolerant inbred lines. Al absorbed by plant mainly concentrates in roots under Al stress. There was not correlation between the relative Al content in shoot and the Al-tolerant ability. The contents of Ca and Mg in most inbred lines decreased except Z01 and Z07 (both Al-tolerant inbred line) when treated with Al and the content of Ca in shoot of inbred lines were higher than that in root, but not difference found in them. The Mg content in root of Z01 (Al-tolerant) dropped significantly with Al treatment, but relative Mg content in shoot of Z01 was higher than that of Z02 (Al-sensitive). The K content of inbred lines with Al treatment slightly reduced, however, the relative content of K wasn't consistent with Al-tolerance ability. The content of Fe, Mn, Cu and Zn of inbred lines showed same declining trend by Al treatment, but the difference of relative content among three kinds of inbred lines in the experiment was found.

收稿日期: 2003-07-17 修改稿收到日期: 2003-10-08

基金项目: 国家 863 项目(2001AA241051)资助。

作者简介: 李德华(1959—),男,湖北孝感人,副教授,博士,主要从事植物营养和逆境生理研究。

**Key words:** inbred maize; Al-stress; characteristic of nutrition

酸性土壤上限制植物生长的因素主要是铝的毒害和磷、钙、镁等营养元素的缺乏,它可导致耕地作物减产 40%<sup>[1-2]</sup>。大量研究表明,铝对植物营养元素吸收具抑制作用。铝离子通过与膜上特殊通道受体结合位点结合,阻碍  $\text{Ca}^{2+}$  在膜上的整合,导致根尖细胞  $\text{Ca}^{2+}$  净吸收下降,原生质  $\text{Ca}^{2+}$  缺乏, $\text{Ca}^{2+}$  平衡破坏,进而影响细胞结构和功能<sup>[3-4]</sup>。 $\text{Al}^{3+}$  与  $\text{Mg}^{2+}$  竞争在根质外体上的结合位点,导致  $\text{Mg}^{2+}$  的吸收下降<sup>[5]</sup>。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。作物受铝毒后,与脂肪、蛋白质和核酸结合的磷显著减少,己糖的磷酸化作用明显受到抑制<sup>[6]</sup>。 $\text{Al}^{3+}$  是阳离子通道阻断剂,可阻断小麦根细胞的  $\text{K}^{+}$  和  $\text{Ca}^{2+}$  通道,长时间阻断  $\text{K}^{+}$  通道,会导致地上部出现缺钾症状<sup>[7]</sup>。

在发展中国家,大约 800 万  $\text{hm}^2$  玉米生长在酸性土壤上,通过育种手段,选育耐酸、铝的玉米基因型将是解决酸性土壤铝毒问题的有效途径之一。本研究以筛选出的耐铝性不同的三类玉米自交系为材料,研究铝胁迫对不同耐铝性类型苗期钙、镁、磷、钾、铁、锰等元素吸收和分布的影响,以探讨不同耐铝性玉米自交系类型的营养特性。并对两个典型玉米自交系营养特性与耐铝性的关系进行了比较。

## 1 材料与方法

### 1.1 自交系对营养元素的吸收速率影响试验

供试材料为典型耐铝(Z01、Z03、Z07)、中等耐铝(Z08、Z09)及铝敏感(Z02、Z04、Z05)等 8 个玉米自交系。种子于沙盘中出苗后切去胚乳,随机分为两份,每份 60 株,分别移入两个流动培养池(9.5 m × 0.5 m × 0.35 m)中培养(上设活动雨蓬),储液池体积 2200 L。先用 1/2 玉米营养液培养 3 d,后补充为全营养液。采用 Magnavaca 的玉米营养液配方, pH 4.3<sup>[8]</sup>。幼苗长至三叶期后,进行三价铝(营养液中加  $\text{AlCl}_3$ )处理。试验设不施铝(CK)和施铝( $\text{Al}^{3+}$  0.1 mmol/L)2 个处理(一培养池施铝,另一池为对照)。培养期间每天早晚各循环流动通气 1 h,并调节 pH。自然光照。每周补充 1/4 营养液成分,2 周后全部更换一次。

铝处理 10 d 后,每处理随机抽取 2 株幼苗,先置于自来水中 24 h,后改用蒸馏水饥饿 24 h。然后置于盛有 300 mL 玉米营养液的烧杯中,在日光下吸收

5 h,重复 3 次,分别取样分析。根据吸收前后溶液的体积和浓度变化计算 Ca、Mg、P、K 的吸收量。以元素平均吸收速率(每小时每克鲜根的吸收量)表示自交系对该原素的吸收能力。以相对吸收速率(铝处理平均吸收速率/对照平均吸收速率)表示自交系对铝胁迫的反应。营养液中各元素的分析方法:Ca、Mg 用原子吸收法;P 用铝锑抗比色法;K 用火焰光度法。以各类自交系的平均值表示该类型对铝胁迫的反应。

### 1.2 铝对自交系营养元素吸收及分配试验

将流动培养 15 d 的玉米自交系,每处理随机抽取一行(6 株植株),分开地上部与根系,于 70℃ 烘干,供植株养分分析,重复 3 次。

另取两个典型玉米自交系 Z01(耐铝)和 Z02(铝敏感)采用静止(20 L 塑料盒)培养法培养,营养液成分及处理方法同前。试验设 0(CK),0.1,0.2 mmol/L 3 个铝处理浓度。培养期间每天通气 5~10 min 并调节 pH。自然光照。每 2 d 更换一次营养液。处理 15 d 后随机抽取 6 株植株,将地上部与根系分开,70℃ 烘干后分别称重,计算干物重和相对生物量(铝处理与对照干重之比),并进行养分分析,重复 3 次。

根系和地上部元素含量测定 P 用铝锑抗比色法;其他元素用 ICP 分析<sup>[9]</sup>。自交系的元素相对含量为铝处理与对照的含量之比( $\text{Al}/\text{CK}$ );以各类自交系元素相对含量的平均值表示该类自交系对铝胁迫的反应。

## 2 结果分析

### 2.1 不同耐铝性玉米自交系对营养元素吸收差异

各自交系对  $\text{Ca}^{2+}$  的吸收速率具有差异。耐铝自交系除 Z07 下降外,Z01 和 Z03 对 Ca 的平均吸收速率与对照相同或略有提高。而敏感自交系 Z05 较对照下降 20% 以上。三类自交系,耐铝(T)、中等耐铝(M)和敏感(S)自交系对 Ca 的相对吸收速率( $\text{Al}/\text{CK}$ )平均为 0.98、0.93 和 0.87;各自交系对  $\text{Mg}^{2+}$  的吸收差异与  $\text{Ca}^{2+}$  大致相同,耐铝性不同的三类自交系(T、M、S)对  $\text{Mg}^{2+}$  的相对吸收速率平均依次为 1.06、1.01 和 0.84。铝处理后,各自交系对 P 的吸收能力均呈下降趋势,其中铝敏感自交系降幅较大,自交系 Z02 吸收速率较对照下降 36%。T、M、S 三类自交系对 P 的相对吸收速率平均依次为

0.80, 0.81 和 0.71; 但对 K 的吸收表现不一, 其相对吸收速率平均分别为 0.93、0.78 和 0.81(表 1)。在耐铝自交系中, Z01 和 Z03 的表现基本一致, 铝胁迫下对 Ca、Mg、P、K 仍具有较强的吸收能力, 而 Z07

对 Ca、Mg、P 的吸收速率明显低于对照。3 个敏感自交系在铝胁迫下, 对 Ca、Mg、P、K 的吸收能力均呈下降趋势(表 1)。

表 1 不同耐铝性玉米自交系对种营养元素的平均吸收速率

Table 1 The mean absorption ratio of some nutrients elements in different Al-tolerant inbred lines of maize

自交系 Inbred lines	Ca[mg/(h·g), Root FW]		Mg[mg/(h·g), Root FW]		P[μg/(h·g), Root FW]		K[mg/(h·g), Root FW]	
	CK	Al	CK	Al	CK	AL	CK	AL
Z01(T)	5.17±0.34	6.01±0.49	0.22±0.01	0.27±0.02	11.8±2.31	9.73±0.96	0.13±0.01	0.15±0.01
Z03(T)	6.65±0.42	6.69±0.48	0.26±0.02	0.29±0.02	8.35±0.97	7.84±0.07	0.14±0.02	0.10±0.02
Z07(T)	5.25±0.17	4.03±0.31	0.18±0.01	0.15±0.01	16.1±4.89	10.1±2.93	0.11±0.01	0.10±0.02
Z08(M)	6.26±0.10	6.73±0.04	0.22±0.00	0.25±0.01	16.0±0.84	10.3±2.69	0.26±0.01	0.16±0.01
Z09(M)	4.61±0.16	3.63±0.13	0.19±0.01	0.16±0.01	7.92±0.05	7.77±0.48	0.13±0.01	0.13±0.01
Z02(S)	3.67±0.20	3.74±0.12	0.16±0.01	0.15±0.01	9.93±1.75	6.33±0.14	0.14±0.00	0.11±0.01
Z04(S)	5.89±0.33	4.50±0.18	0.20±0.01	0.17±0.01	8.82±1.16	6.31±0.27	0.16±0.02	0.11±0.00
Z05(S)	6.09±0.28	5.03±0.95	0.21±0.01	0.16±0.06	8.38±0.21	6.43±0.76	0.10±0.01	0.10±0.01
类型 Kinds	Ca (Al/CK)		Mg (Al/CK)		P (Al/CK)		K (Al/CK)	
T	0.98±0.12		1.06±0.12		0.80±0.09		0.93±0.10	
M	0.93±0.14		1.01±0.14		0.81±0.17		0.78±0.19	
S	0.87±0.08		0.84±0.05		0.71±0.04		0.81±0.11	

T: 耐铝 Al-tolerant, M: 中等耐铝 medium Al-tolerant, S: 铝敏感 Al-sensitive, 下同 Same as follows.

## 2.2 不同耐铝性玉米自交系体内营养元素含量的差异

2.2.1 不同类型自交系根系和地上部 Al 含量及分配 铝处理后, 各类自交系根系和地上部铝含量均显著高于对照。但各类自交系的增幅不同, 铝敏感

类型(S)根系 Al 相对含量(Al/CK)均明显高于耐铝类型(T)和中等耐铝类型(M)。地上部 Al 相对含量则是耐铝自交系明显低于另外两种类型(表 2)。从植株部位看, 铝主要集中在根系, 各类自交系地上部与根系的含量比(地上部/根系)均小于 1。

表 2 不同耐铝性玉米自交系 Al 含量及分配(μg/g, DW)

Table 2 The Al content and distribution of maize with different Al-tolerant inbred lines

耐铝性 Al tolerance	根系 Roots			地上部 Shoots			地上部/根系 S/R	
	CK	Al	Al/CK	CK	Al	Al/CK	CK	Al
T	238.3	514.7	2.5	45.8	257.6	6.2	0.2	0.5
M	203.9	546.8	2.7	53.6	286.7	10.8	0.3	0.5
S	115.6	482.9	4.3	45.5	434.6	9.2	0.4	0.8

2.2.2 铝胁迫对植株营养元素含量的影响 铝处理可降低多数自交系根系钙含量, 三类自交系比较, 无论根系还是地上部, Ca 相对含量(Al/CK)均以中等耐铝类型最低; 铝可使植株体内镁的含量降低, 耐铝类型根系相对镁含量显著低于敏感自交系, 而地上部二者间无显著差异, 因为多数敏感自交系地上部相对镁含量降幅更大。自交系根系和地上部磷含量基本相同, 各类自交系相对磷含量表现不一, 但与其耐铝性无相关性; 铝处理可使多数自交系根系钾

含量降低, 但相对钾含量与自交系耐铝性也无相关性关系。两种处理条件下, 大多数自交系地上部钾含量高于根系钾含量(表 3)。

三类自交系比较, 根系的相对铁含量以耐铝类型最高, 而地上部又以中等耐铝类型最高。铝胁迫下, 多数自交系的根系和地上部锰含量均低于对照; 地上部锰含量显著高于根系, 铝处理后更为明显。从三种自交系类型相对锰含量看, 根系以耐铝类型最高, 而地上部则以铝敏感类型较高。铝胁迫下, 根

系和地上部铜含量均显著或极显著低于对照,但其中耐铝自交系 Z01 的根系铜含量与对照无显著差异;三种类型自交系根系相对铜含量仍以耐铝类型

较高,而地上部则三种类型无明显差异。耐铝自交系根系锌相对含量较高,而地上部锌含量则低于另两种类型(表 3)。

表 3 不同耐铝性玉米类型元素相对含量 (Al/CK)

Table 3 The relative content of nutrients (Al/CK) of maize with different Al-tolerant inbred lines

耐铝性 Al-tolerance	Ca	Mg	P	K	Fe	Mn	Cu	Zn
根系 Root								
T	0.95±0.09	0.73±0.05	0.95±0.14	0.81±0.10	1.27±0.44	0.88±0.13	0.91±0.14	1.15±0.35
M	0.74±0.01	0.81±0.11	0.90±0.03	0.95±0.03	0.95±0.01	0.82±0.17	0.85±0.13	0.66±0.06
S	0.91±0.04	0.84±0.05	1.00±0.08	0.84±0.06	0.94±0.04	0.76±0.06	0.65±0.06	0.99±0.19
地上部 Shoot								
T	1.05±0.10	0.82±0.04	0.92±0.08	0.93±0.08	0.84±0.08	0.86±0.06	0.83±0.08	0.97±0.39
M	0.86±0.01	0.90±0.06	0.90±0.05	0.84±0.06	1.04±0.25	0.80±0.07	0.83±0.19	1.21±0.35
S	1.03±0.08	0.80±0.09	0.96±0.10	1.03±0.06	0.91±0.05	0.94±0.15	0.82±0.07	1.10±0.16

### 2.3 耐铝和铝敏感自交系玉米的营养特性与耐铝性比较

2.3.1 耐铝性差异 耐铝和铝敏感玉米自交系对铝处理的反应不同。在 0.1 mmol/L  $Al^{3+}$  胁迫条件下,耐铝自交系 Z01 表现较强的耐铝性,根系和地上部单株生物量(干重)和相对生物量(Al/CK)均高

于敏感品系 Z02,处理 15 d 后,其根系和地上部干重分别为对照的 91% 和 88%。而敏感自交系 Z02 根系和地上部相对生物量分别为 59% 和 51%。然而,在 0.2 mmol/L  $Al^{3+}$  胁迫下,两自交系相对生物量均大幅降低,二者间无显著差异(图 1)。

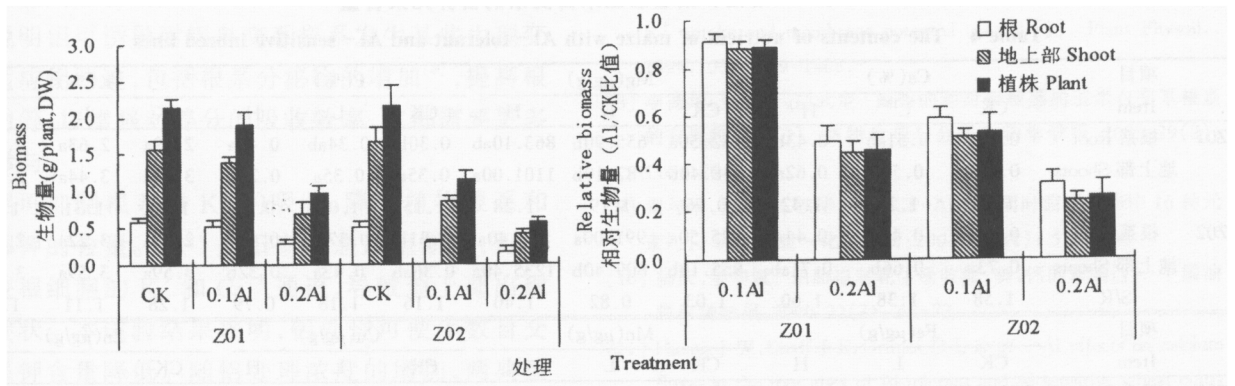


图 1 耐铝和铝敏感玉米自交系单株生物量(A)和相对生物量(B)

Fig. 1 The biomass (A) and relative biomass (B) of maize with Al-tolerant (Z01) and Al-sensitive (Z02) inbred lines

2.3.2 元素含量差异 两典型自交系根系和地上部铝含量均随铝处理浓度的增加而显著增加。在 0.1mmol/L 的  $Al^{3+}$  胁迫下,两自交系铝含量增幅不同,敏感自交系 Z02 增幅大于耐铝自交系 Z01。这在根系中表现更为明显,Z01 和 Z02 分别为对照的 9.8 倍和 18.4 倍。在 0.2mmol/L 的  $Al^{3+}$  胁迫下,两典型自交系根系铝含量无显著差别;均较对照大幅增加(约 50 倍),自交系间无显著性差异。但耐铝自交系 Z01 地上部相对铝含量(Al/CK)较敏感自交系

Z02 低,分别为 9.1 和 14.6。铝处理后,植株吸收的铝主要集中在根系部位,两自交系根系铝含量均显著高于地上部(图 2)。

在 0.1mmol/L 铝浓度下,两自交系根系钙含量均有降低,而地上部钙含量变化不明显。耐铝自交系 Z01 在 0.1mmol/L 铝胁迫下地上部相对钙含量高于敏感自交系 Z02,但在 0.2mmol/L 铝浓度时差异不显著。而根系相对钙含量 Z02 略高于 Z01,尤其是在 0.2 mmol/L 铝浓度下差异显著。0.1mmol/L 铝处理

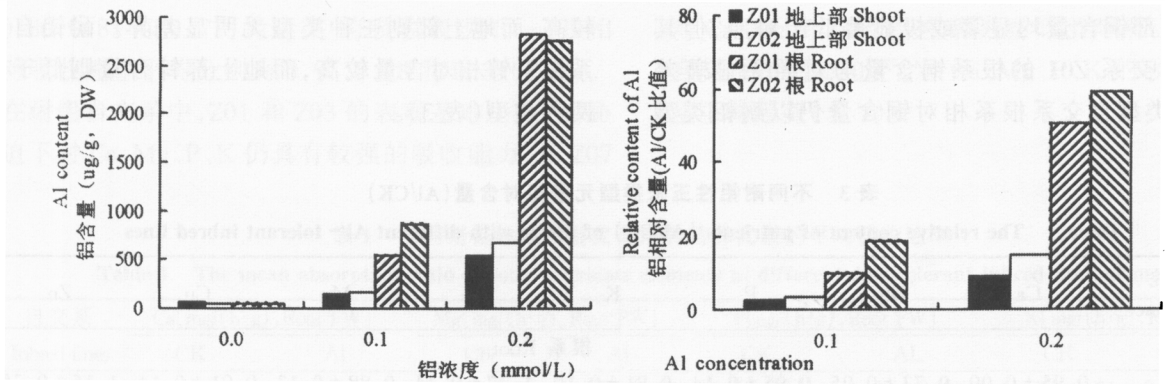


图 2 耐铝和铝敏感玉米自交系的 Al 含量及相对 Al 含量

Fig. 2 Al content (A) and relative Al content (B) of maize with Al-tolerant and Al-sensitive inbred lines

可显著降低 Z01 根系镁含量,而根系相对镁含量 (Al/CK) 低于敏感自交系 Z02。相反,耐铝自交系 Z01 地上部相对镁含量高于敏感自交系 Z02。而在 0.2 mmol/L 的铝胁迫下,两自交系根系和地上部相对镁含量均无显著差异。在 0.1mmol/L 的铝胁迫下,两自交系根系和 Z02 地上部磷含量均有高于对照的趋势,但未达到显著水平。随着铝处理浓度增加,两自交系地上部磷含量显著降低,而根系磷含量则显著增加。耐铝自交系 Z01 地上部磷含量降幅

较大,相反其根系磷含量增幅较大。随铝处理浓度的增加,两自交系地上部钾含量均有所降低,但二者间无显著差异;各处理条件下,地上部钾含量均高于根系(表 4)。

表 4 还看出,在 0.1mmol/L 的铝胁迫下,两自交系地上部铁含量均有所降低,而根系铁含量则显著高于对照。各处理条件下,两自交系的根系铁含量均明显高于地上部。铝胁迫对两自交系锰、铜、锌等微量元素含量也具有不同程度的影响。

表 4 耐铝和铝敏感玉米自交系的营养元素含量

Table 4 The contents of nutrient of maize with Al-tolerant and Al-sensitive inbred lines

项目 Item	Ca(%)			Mg(μg/g)			P(%)			K(%)		
	CK	L <sup>1)</sup>	H <sup>2)</sup>	CK	L	H	CK	L	H	CK	L	H
Z01 根系 Root	0.55a	0.51ab	0.43b	882.50a	655.90b	863.10ab	0.30b	0.34ab	0.42a	2.39a	2.63a	2.77a
地上部 Shoots	0.60a	0.59a	0.62a	848.40b	782.10b	1101.00a	0.35a	0.35a	0.25b	3.48a	3.44a	2.92b
S/R	1.10	1.14	1.42	0.96	1.19	1.28	1.15	1.03	0.60	1.46	1.31	1.06
Z02 根系 Root	0.46a	0.47a	0.44a	925.50a	991.00a	880.40a	0.31b	0.37ab	0.40a	2.80a	3.22a	2.80a
地上部 Shoots	0.73a	0.66b	0.71ab	955.10b	809.40b	1235.40a	0.36ab	0.43a	0.32b	3.59a	3.59a	3.09b
S/R	1.58	1.38	1.60	1.03	0.82	1.40	1.16	1.18	0.79	1.28	1.11	1.10
项目 Item	Fe(μg/g)			Mn(μg/g)			Cu(μg/g)			Zn(μg/g)		
	CK	L	H	CK	L	H	CK	L	H	CK	L	H
Z01 根系 Root	779.40b	1393.30a	1149.30ab	15.02b	12.30b	28.52a	9.19b	9.12b	22.23a	20.03a	15.62b	18.33ab
地上部 Shoots	505.10a	336.30a	564.30a	13.75b	12.79b	19.74a	8.70ab	6.57b	10.32a	7.91b	8.30b	16.13a
S/R	0.65	0.24	0.49	0.92	1.04	0.69	0.95	0.72	0.46	0.39	0.53	0.88
Z02 根系 Root	967.30b	1134.6.a	1118.10b	10.35c	10.46ab	24.74a	13.71b	11.14b	22.05a	13.94a	16.58a	16.94a
地上部 Shoots	402.10ab	286.60b	614.10a	15.73b	11.26b	29.68a	12.30a	7.44b	10.83a	16.67a	8.34b	13.54ab
S/R	0.42	0.25	0.55	1.52	1.08	1.20	0.90	0.67	0.49	1.20	0.50	0.81

1) Al<sup>3+</sup> 0.1mmol/L; 2) Al<sup>3+</sup> 0.2mmol/L.

### 3 讨论

植物对铝元素表现为非代谢性吸收,当 Al 浓度由 0 增至 20 mg/L 时,花生根、茎、叶部平均 Al 含量增幅分别达到 913.6%、610.2% 和 281.9%,根部

铝含量较高,占 74%,茎和叶分别为 7% 和 19%<sup>[10]</sup>。本研究结果也显示,铝胁迫下植株吸收的铝主要集中在根系部位,各自交系地上部与根系的含量比(地上部/根系)均小于 1。根系相对铝含量自交系间具有显著性差异且与自交系耐铝性有关。根系铝含量

以敏感自交系 Z02 增幅最大,而耐铝自交系 Z01 和 Z07 相对铝含量较低。地上部相对铝含量各自交系间也具有显著差异,但与耐铝性未见平行关系。

Huang 等<sup>[11]</sup>认为,铝在质膜外层起作用,阻塞钙流入的通道。在大麦中,Al 处理引起根中 Ca 含量的急剧减少,4mg/L Al 条件下,耐性品种比敏感品种 Ca 含量高一倍以上<sup>[12]</sup>。本研究结果显示,铝处理可使多数自交系根系钙含量降低,但耐铝自交系 Z01 和 Z07 根系可保持较高的钙浓度,与对照无显著差异。与铝不同,铝处理后,地上部钙含量均高于根系,但各自交系间无显著差异。

铝对植物体内的镁含量有负效应,但同时镁也可增强植物的耐铝性。溶液培养中,当 Mg/Al > 2.0 时,镁就可以减轻铝毒<sup>[13]</sup>。本试验条件下,铝处理可显著降低植株根系和地上部镁含量。地上部相对镁含量以敏感自交系降幅更大。与此相反,耐铝自交系根系相对镁含量(Al/CK)则显著低于敏感自交系。因为镁是光合色素叶绿素的组成成分之一,缺镁必然导致光合作用受抑制,影响植株干物质生产。

对耐铝和铝敏感自交系的研究结果显示,随着铝处理浓度增加,地上部磷含量显著降低。相反,根系磷含量则显著增加,且以耐铝自交系 Z01 增幅较大。说明铝可诱导耐铝自交系根系发生某些生理变化以适应铝胁迫,包括根系分泌物的增加<sup>[8]</sup>,提高根系活力等,以增强对养分的吸收效率,这都需要更多的磷参与。

铝可抑制根系对 K<sup>+</sup> 的吸收,降低植物根系和地上部钾的含量。Al<sup>3+</sup> 是阳离子通道阻断剂,可阻断小麦根细胞的 K<sup>+</sup> 和 Ca<sup>2+</sup> 通道,导致地上部出现缺钾症状。本试验结果表明,铝处理可使多数自交系根系钾含量降低。随铝处理浓度的增加,两典型自交系地上部钾含量均有所降低,但二者间无显著差异。

本研究结果还表明,0.1mmol/L Al<sup>3+</sup> 是一较适宜的铝胁迫浓度。在此浓度铝胁迫作用下,具不同适应性的品种,在相对生物量及元素相对含量方面可表现出更大的差异。例如,耐铝和铝敏感自交系

根系相对铝含量在 0.1mmol/L Al<sup>3+</sup> 浓度下差异显著,但在 0.2mmol/L Al<sup>3+</sup> 浓度下无显著差异,说明自交系的耐受性有一定限度。因此,选择适当的铝胁迫浓度在种质资源抗逆性的筛选评估工作上具有重要意义。

#### 参 考 文 献:

- [1] Kochian L V. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants [J]. Annu. Rev. Plant physiol. Plant Mol. Biol., 1995, 46: 237-260.
- [2] Ma J F, Ryan P R, Delhaize E. Aluminum tolerance in plants and the complexing role of organic acids [J]. TRENDS in Plant Science, 2001, 6: 273-278.
- [3] Delhaize E, Craig S, Beaton C D *et al.* Aluminum tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) I. Uptake and distribution of aluminum in root apices [J]. Plant Physiol., 1993, 103: 685-693.
- [4] Taylor G J. The physiology of aluminum tolerance in higher plant [J]. Commun in Soil Sci. Plant Anal., 1998, 19: 1179-1194.
- [5] Zhao X J, Sucoff E, Stadelmann E. Al<sup>3+</sup> and Ca<sup>2+</sup> alteration of membrane permeability of *Quereus rubra* root cortex cell [J]. Plant Physiol., 1987, 83: 159-162.
- [6] Pfeffer P E, Tu S I, Gerasimowicz W V *et al.* In Vivo P NMR studies of corn root tissue and its uptake of toxic metal [J]. Plant Physiol., 1986, 80: 77-84.
- [7] Gassmann W, Schroeder J I. Inward-rectifying K<sup>+</sup> channels in root hairs of wheat. A mechanism for aluminum-sensitive low-affinity K<sup>+</sup> uptake and membrane potential control [J]. Plant Physiol., 1994, 105: 1399-1408.
- [8] 李德华, 贺立源, 刘武定. 耐铝的和对铝敏感的玉米自交系根系的有机酸分泌 [J]. 植物生理与分子生物学学报, 2003, 29(2): 114-120.
- [9] 贺与平, 催娅, 王淑华, 等. ICP-AES 法同时测定烟草中 16 种元素 [J]. 理化检验—化学分册, 2001, 37(11): 510-516.
- [10] 杨庆, 金华斌. 铝胁迫对花生吸收氮, 磷, 钙的影响 [J]. 中国油料作物学报, 2000, 22(2): 68-73.
- [11] Huang J W, Shaff J E, Grunes D L *et al.* Al effects on calcium fluxes at the root apex of Al-tolerant and Al-sensitive wheat cultivates [J]. Plant Physiol., 1992, 98: 230-237.
- [12] 周建华, 潘建伟, 朱陆元. 铝胁迫下大麦根过氧化物酶同工酶及根中 Al、Ca、和 P 含量的变化 [J]. 浙江农业学报, 2001, 13(4): 190-196.
- [13] Kiss S. Antagonism of magnesium and aluminum in bean and wheat [J]. Acta Agronomica Hungaria, 1989, 38: 219-229.