

大豆品种苗期根系性状的遗传变异及其与耐逆境胁迫的关系

刘莹^{1,2}, 盖钧镒¹, 吕慧能¹

(1. 南京农业大学大豆研究所, 国家大豆改良中心, 作物遗传与种质创新国家重点实验室, 南京 210095;
2. 河北工程学院, 邯郸 056038)

摘要 从301份黄淮海和长江中下游地区代表性大豆地方品种和育成品种(系)中按根系类型选取62份,用以研究不同生态区大豆苗期根系性状的遗传特点、与地上部性状的相关以及与逆境胁迫的关系。大豆苗期一级侧根数、主根长、根干重、总根长和根体积等性状,在品种间、各苗龄间均存在显著遗传变异。不同生态区间生长进度不同,长江中下游晚熟品种的根干重、总根长、根体积发育速度较快,而北方早熟品种的根系发育较慢。根系性状与整株干重呈高度相关;根干重、根总长和根体积的相对值与耐旱平均隶属函数值,一级侧根数、主根长、总根长、根体积、根干重的相对值与耐铝毒平均隶属函数值呈极显著相关,且根系性状的相对值在品种间存在显著变异,可用做耐逆性选择的根系指标。黄淮海区品种的耐旱相关根系性状值高于长江中下游区品种,表明耐旱种质的相关根系性状具有生态适应性。

关键词 大豆;耐逆相关根系性状;遗传变异;

中图分类号 S 565.110.417 **文献标识码** A **文章编号** 1000-9841(2007)02-0127-07

GENETIC VARIATION OF ROOT TRAITS AT SEEDLING STAGE AND THEIR RELATIONSHIP WITH STRESS TOLERANCE IN SOYBEAN

LIU Ying^{1,2}, GAI Jun-yi¹, LÜ Hui-neng¹

(1. Soybean Research Institute of Nanjing Agricultural University, National Center for Soybean Improvement, National Key Laboratory for Crop Genetics and Germplasm Enhancement, Nanjing 210095; 2. Hebei University of Engineering, Handan 056038)

Abstract Sixty two accessions of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) selected from 301 representative entries from Huanghuaihai and Middle - Lower Changjiang Valleys according to their root performance were used to study their genetic variation of root traits at seedling stage and their relationship with above - ground traits and tolerance to abiotic stresses. Dry root weight, total root length and root volume of accessions from Middle - Lower Changjiang Valleys with later maturity developed more quickly than those

收稿日期:2006-09-28

基金项目:国际原子能机构资助项目(303-D2-CPR-10815)农业部948项目(201013(A));国家自然科学基金项目(30490250)

作者简介:刘莹(1966-),女,讲师,在职博士研究生,从事大豆耐逆性的遗传育种研究,现在河北工程学院工作。

通讯作者:盖钧镒教授,中国工程院院士,博士生导师。Tel:025-84395405; E-mail: sri@njau.edu.cn

from Huanghuaihai Valleys with earlier maturity. The correlations between these root traits and whole plant dry weight were pretty high, those between the mean membership index of drought tolerance and the relative values of total root length, root volume and dry root weight per plant were all significant at 0.01 level and so did for the correlations between mean membership index of aluminum toxin tolerance and the stressed to unstressed relative values of number of lateral roots, tap root length, total root length, root volume and dry root weight. These relative root traits had wide variation among accessions and could be used for identification of drought and aluminum tolerance.

Key words Soybean (*Glycine max* (L.) merr.); Root traits related to stress tolerance; Genetic variation

作物根系是植株的支柱,生长所需矿物质和水的吸收器官,光合产物的储存器官。作物根系还是干旱、盐碱、土壤酸化、离子毒害、营养亏缺等逆境胁迫首先作用的器官,逆境通过影响根系活动从而间接地影响到植株地上部的生长发育。因此,了解根系本身的特点及其与逆境条件的关系,对大豆改良具有重要意义。由于根系生长在地下,根区环境的复杂性及根系研究方法和手段的局限性使大豆根系性状的研究与改良相对滞后,迄今还未与大豆高产稳产育种有明确的挂钩。

前人对根系性状,包括形态、构型、生理、解剖、生态以及分子生物学方面曾有一些初步研究^[1-12],但对不同生态地区大豆品种根系性状发育特点及其与耐逆境关系的研究还未见有报道。本文拟从不同生态地区大豆品种根系形态比较入手,对大豆根系遗传特性、与非生物逆境的关系进行初步探讨,旨在为大豆根系及其相关生理性状的改良,大豆高产和耐逆境育种提供依据。

1 材料与方 法

1.1 供试材料的选用

从关内各生态区选取 301 份材料,于根系形态稳定的结荚鼓粒期大田挖根观察根系形态。根据根系形态的不同从中选取黄淮海和长江中下游地区的代表性材料 62 份供试验。

1.2 干旱胁迫试验

分别在 2001 年 6 月、2002 年 7 月于国家大豆改良中心江浦实验基地网室内进行。详细方法参见文献[14]。

1.3 铝毒胁迫试验

2002 年 7 月于南京农业大学江浦实验基地网室内进行。盆钵规格和试验设计同上^[14]。

1.4 低磷胁迫试验

2002 年 7 月于南京农业大学江浦实验基地网室内进行。试验设计和种植情况同上。设高磷(1 000 μM)、低磷(0.2 μM)两个处理。营养液配方为: K₂SO₄0.75 mM; KCl 0.1 mM; Ca(NO₃)₂ mM; H₃BO₃1 μM; MnSO₄1 μM; CuSO₄0.1 μM; (NH₄)₅Mo₇O₂₄0.005 μM; ZnSO₄10 μM; FeEDTA 10 mM。培养 10 d 后收获植株,采用 H₂SO₄-H₂O₂消煮—钒钼黄比色法测定植株 P 含量。

植株的处理和性状考查同 1.2,根据植株低磷处理磷含量与高磷处理磷含量的比值对耐低磷性进行分级。

2 结果与分析

2.1 正常条件下不同地区大豆品种根系的特点与遗传变异

表 1 结果,在根系的生长发育各时期(V₂、V₃和 V₄),长江中下游品种的根干重、总根长、根体积均发展较快,而黄淮海一带品种均相对较慢,其中 V₄ 期 2 年重复观察的结果相同(2002 年未测定一级侧根数和主根长);一级侧根数和主根长在根系的生长发育各阶段中无一定的生态规律性。大豆品种间根系性状在不同苗龄期均存在极显著的遗传变异,V₂ 期的遗传变异系数为 13.46%~45.25%,V₃ 期为 14.10%~42.15%,V₄ 期为 11.13%~39.98%,均具有较大的遗传变异和丰富的选择潜力。

表1 不同生态地区不同苗龄大豆根系性状表现

Table 1 Root traits performance of soybeans at three seedling stages from two regions

年份,苗龄 Year,Seedling stage	原产地或来源 Source	指标 Indicator	根干重(g) Dry root weight	总根长(cm) Total root length	根体积(cm ³) Root volume	一级侧根数 Number of lateral roots	主根长(cm) Tap root length	
2001 V4	黄淮 HHH	\bar{y}_1	0.285	639.5	0.677	110	28.7	
		\bar{y}_2	0.370	802.5	0.927	1122	8.6	
	长江中下游 LMC	\bar{y}	0.328	721.0	0.802	111	28.7	
		s_g	0.091	196.36	0.295	12.35	8.87	
	全群 Whole	Min.	0.178	412.3	0.486	94	16.5	
		Max.	0.481	1156.3	1.282	131	49.0	
	F	GCV(%)	27.74	27.23	36.78	11.13	30.91	
		F	73.6**	68.0**	60.3**	2.0**	71.4**	
	2002 V4	黄淮 HHH	\bar{y}_1	0.260	615.2	0.608		
			\bar{y}_2	0.352	794.1	0.882		
长江中下游 LMC		\bar{y}	0.306	704.7	0.745			
		s_g	0.104	197.75	0.298			
全群 Whole		Min.	0.136	385.6	0.407			
		Max.	0.512	1103.2	1.26			
F		GCV(%)	33.99	28.06	39.98			
		F	60.5**	30.9**	78.1**			
2002 V3		黄淮 HHH	\bar{y}_1	0.161	519.5	0.415	96	26.8
			\bar{y}_2	0.226	612.9	0.590	105	26.8
	长江中下游 LMC	\bar{y}	0.194	566.2	0.503	100.5	26.8	
		s_g	0.075	127.48	0.212	18.28	3.78	
	全群 Whole	Min.	0.091	339.4	0.204	77	22.0	
		Max.	0.338	901.4	0.986	167	36.0	
	F	GCV(%)	38.66	22.52	42.15	18.19	14.10	
		F	27.7**	11.0**	5.7**	5.8**	1.7**	
	2002 V2	黄淮 HHH	\bar{y}_1	0.077	247.9	0.203	60	15.4
			\bar{y}_2	0.090	268.0	0.239	61	15.2
长江中下游 LMC		\bar{y}	0.084	258.0	0.221	61	15.3	
		s_g	0.036	66.38	0.100	15.77	2.06	
全群 Whole		Min.	0.047	174.3	0.107	40	11.8	
		Max.	0.166	431.4	0.482	88	18.8	
F		GCV(%)	42.86	25.73	45.25	25.85	13.46	
		F	67.8**	29.9**	47.8**	12.0**	3.7**	

注: ** 为在 0.01 水平上显著。Note: ** means significant at 0.01 level. HHH = Huang - Huai - Hai Region; LMY = Lower and Middle

Changjiang Valleys. \bar{y} = mean; s_g = genotypic standard deviation; GCV = genotypic coefficient of variation. The same is true for the later tables.

2.2 逆境胁迫下不同地区根系性状的表现

逆境胁迫下根系生长发育各阶段中的表现与正常条件下的相似(表2),即长江中下游品种的根干重、总根长、根体积较黄淮海一带品种发展快,而一级侧根数和主根长在根系的生长发育各阶段中无一定的生态规律性。

逆境条件下根系性状均存在极显著的遗传变异,水分胁迫根系性状的遗传变异系数为 12.61% ~ 30.64%,铝毒胁迫的为 20.15% ~ 37.86%,低磷胁迫的为 13.76% ~ 44.71%,均具有较大的遗传变

异和丰富的选择潜力。

除低磷胁迫外,逆境胁迫下根系性状较适宜条件有所减少。水分胁迫下,长江中下游品种的根干重、总根长、根体积的减少量大于黄淮海一带品种,前者减少量为 26.49% ~ 35.20%,后者为 16.72% ~ 19.56%,2 年重复结果相同;侧根数和主根长的变化不大。铝毒胁迫下,不同地区品种根系各性状的减少量较为明显,但无一致的生态规律性。低磷胁迫下的根系各性状变化不明显,可能是由于处理时间较短而未及表现。

表2 逆境胁迫下根系性状及与适宜条件相比的减少量(%)

Table 2 Root traits performance under stress conditions and reduction amount from normal conditions (%)

处理(年份) Treatment (Year)	原产地 或来源 Source	指标 Indicator	根干重 Dry root weight	总根长 Total root length	根体积 Root volume	一级侧根数 Number of lateral roots	主根长 Tap root length
水分胁迫 Drought stress (2001)	黄淮 HHH	\bar{y}_1	0.235(17.54)	514.4(19.56)	0.564(16.72)	108(1.89)	28.8(-0.35)
		\bar{y}_2	0.272(26.49)	576.4(28.17)	0.601(35.20)	108(3.68)	26.2(8.4)
	长江中下游 LMC 全群 Whole	\bar{y}	0.254	545.4	0.583	108	27.5
		s_g	0.049	118.75	0.137	13.62	8.75
		Min.	0.153	356.4	0.365	83	13.0
		Max.	0.346	797.4	0.834	141	44.5
		GCV(%)	19.29	21.77	23.50	12.61	31.82
F		37.5**	27.0**	38.5**	4.9**	38.6**	
水分胁迫 Drought stress (2002)	黄淮 HHH	\bar{y}_1	0.202(22.22)	488.3(20.63)	0.519(14.69)		
		\bar{y}_2	0.247(29.88)	554.2(30.21)	0.571(35.24)		
	长江中下游 LMC 全群 Whole	\bar{y}	0.225	521.3	0.545		
		s_g	0.064	128.13	0.167		
		Min.	0.118	309.6	0.324		
		Max.	0.336	769.8	0.917		
		GCV(%)		28.44	24.58	30.64	
F		34.4**	21.9**	39.5**			
铝毒胁迫 Aluminum toxin stress	黄淮 HHH	\bar{y}_1	0.114(29.18)	323.8(37.67)	0.290(30.13)	74(22.94)	19.5(27.08)
		\bar{y}_2	0.156(30.97)	405.7(33.81)	0.401(32.03)	77(26.32)	19.7(26.38)
	长江中下游 LMC 全群 Whole	\bar{y}	0.135	364.8	0.346	75.5	19.6
		s_g	0.048	120.66	0.131	17.68	3.95
		Min.	0.067	186.87	0.105	58.1	13.6
		Max.	0.224	657.79	0.621	121.0	27.0
		GCV(%)		35.56	33.08	37.86	23.42
F		14.41**	14.13**	19.55**	4.56**	1.79**	
低磷胁迫 Low phosphorus stress	黄淮 HHH	\bar{y}_1	0.079(-2.60)	260.6(-5.12)	0.205(-0.99)	58(3.28)	14.6(5.08)
		\bar{y}_2	0.091(-1.11)	275.5(-2.80)	0.237(0.84)	58(4.92)	15.1(0.40)
	长江中下游 LMC 全群 Whole	\bar{y}	0.085	268.1	0.221	58	14.9
		s_g	0.038	67.52	0.096	14.78	2.05
		Min.	0.050	167.27	0.103	38	11.1
		Max.	0.177	412.35	0.432	85	19.3
		GCV(%)		44.71	25.18	43.44	25.48
F		72.1**	23.1**	42.2**	13.3**	3.7**	

注:括号内为逆境条件下比适宜条件下的减少量。

Note:In parentheses are the reductions under stress conditions from normal conditions.

2.3 大豆根系性状及地上部性状相互间的关系

由表3可见,根系性状各指标间除侧根数和主根长外均存在很高的相关。根系各性状与地上部干

重相关极显著,特别在各指标与整株干重之间表现尤为突出。

表3 大豆根系性状及地上部性状相互间的相关分析
Table 3 Correlations among root and shoot traits in soybean

性状 Trait	2001					2002			
	Wp	Ws	Wr	Tlr	Vr	Wp	Ws	Wr	Tlr
Wr	0.94 **	0.89 **				0.95 **	0.91 **		
Tlr	0.81 **	0.77 **	0.86 **			0.81 **	0.78 **	0.85 **	
Vr	0.88 **	0.85 **	0.90 **	0.91 **		0.82 **	0.79 **	0.84 **	0.87 **
Lrn	0.54 **	0.56 **	0.44 **	0.54 **	0.59 **				
Lrt	0.24 *	0.25 *	0.17	0.19	0.1				

注: *、** 分别表示在 0.5、0.01 水平下显著。Wp = 整株干重, Ws = 地上部干重, Wr = 地下部干重, Tlr = 总根长, Vr = 根体积, Lrn = 一级侧根数, Lrt = 主根长

Note: * and ** mean significant at 0.5 and 0.01 level, respectively. Wp = Dry plant weight; Ws = Dry shoot weight; Wr = Dry root weight; Tlr = Total root Length; Vr = Root volume; Lrn = Number of lateral roots; Lrt = Tap root length.

2.4 耐逆性与根系性状的相关

表4显示,根干重、总根长、根体积与耐旱性无相关,而比根干重、比总根长、比根体积与平均耐旱

隶属函数值的相关均呈极显著正相关,该3个根系相对性状可能作为鉴定大豆苗期耐旱的间接指标。

表4 大豆根系性状与平均耐旱隶属函数值的相关
Table 4 Correlations between root traits and drought tolerance

年份 Year	根干重	根总长	根体积	比根干重	比根总长	比根体积
	Dry root weight	Total root length	Root volume	Dry root weight/ plant dry weight	Total root length/ plant dry weight	Root volume/ plant dry weight
2001	-0.21	0.10	-0.05	0.63 **	0.81 **	0.77 **
2002	-0.23	0.17	0.07	0.66 **	0.79 **	0.81 **

注:比根干重、比根体积、比总根长分别为干旱条件下的根干重、根体积、总根长与整株干重之比值。

Note: Dry root weight/plant dry weight, total root length/plant dry weight, root volume/plant dry weight are dry root weight per plant dry weight, total root length per plant dry weight, root volume per plant dry weight, respectively.

对铝毒胁迫下的侧根数、主根长、总根长、根体积、根干重及其与对照之比值同耐铝毒平均隶属函数值进行相关分析,结果表明各根系性状比值与耐

铝毒性呈极显著正相关(表5),表明该5个根系相对性状亦可能作为鉴定大豆苗期耐铝毒的间接指标。

表5 根系性状与耐铝毒平均隶属函数的相关分析
Table 5 Correlations between root traits and aluminum tolerance

侧根数 Number of lateral roots	主根长 Tap root length	总根长 Total root length	根体积 Root volume	根干重 Dry root weight	侧根数比 Relative number of lateral roots	主根长比 Relative tap root length	总根长比 Relative total root length	根体积比 Relative root volume	根干重比 Relative dry root weight
-0.26 *	0.55 **	0.34 **	0.20	-0.01	0.67 **	0.74 **	0.81 **	0.81 **	0.93 **

注:侧根数比、主根长比、总根长比、根体积比、根干重比分别为铝毒胁迫与非胁迫相应根系性状之比值。

Note: Relative number of lateral roots, Relative tap root length, Relative total root length, Relative root volume and Dry root weight are ratio values of the stressed to unstressed ones, respectively.

大豆根系性状在不同磷处理下经方差分析均无显著性差异,因而未发现与耐低磷相关的根系性状。

2.5 耐逆相关根系性状的变异

表6中不同生态区耐逆相关根系性状表现不同,黄淮海区品种2年的耐旱相关根系性状值均高

于长江中下游区品种,而耐铝毒相关根系性状二地区间差异不明显。对与耐逆境相关的根系性状统计分析的结果表明,耐旱相关根系性状在品种之间的遗传变异系数为 10.32% ~ 22.91%,耐铝毒相关根系性状在品种之间的遗传变异系数为 12.13% ~ 28.55%,均具有较大的遗传变异和选择潜力,适合

用于耐逆根系性状的选择。

表6 不同生态区大豆耐逆相关根系性状

Table 6 Performance of root traits related to stress tolerance

生态区 Eco-region	指标 Indicator	耐旱 Drought tolerance						耐铝毒 Aluminum tolerance				
		2001年			2002年			2002年比根				
		干重 Dry root weight/ plant dry weight	比根 总长 Total root length/ plant dry weight	比根 体积 Root volume/ plant dry weight	比根 干重 Dry root weight/ plant dry weight	比总 根长 Total root length/ plant dry weight	比根 体积 Root volume/ plant dry weight	根干 重比 Relative dry root weight	侧根 数比 Relative number of lateral roots	主根 长比 Relative tap root length	总根 长比 Relative total root length	根体 积比 Relative root volume
黄淮海 HHH	\bar{y}_1	0.26	0.597.1	0.626	0.268	649.7	0.661	0.706	0.783	0.739	0.699	0.624
长江中下游 LMC	\bar{y}_2	0.243	536.0	0.564	0.255	577.6	0.590	0.695	0.730	0.729	0.682	0.671
全群 Whole	\bar{y}	0.252	566.6	0.595	0.262	613.7	0.626	0.700	0.757	0.734	0.691	0.648
	s_g	0.026	129.83	0.136	0.032	125.21	0.113	0.095	0.181	0.089	0.151	0.185
	Min.	0.215	415.25	0.431	0.225	445.07	0.45	0.56	0.397	0.486	0.33	0.365
	Max.	0.339	739.96	0.797	0.351	905.19	0.84	0.901	0.984	0.897	0.97	0.958
	GCV(%)	10.32	22.91	22.86	12.21	20.40	18.05	13.57	23.91	12.13	21.85	28.55
	F	17.53**	28.96**	25.16**	21.33**	29.68**	22.34**	33.26**	31.32**	39.16**	31.97**	42.84**

2.6 不同耐逆品种相关根系性状的变异特点

从表7可知,1级耐旱品种耐旱相关根系性状中的比根总长、比根体积明显高于5级耐旱品种,可作为较理想的耐旱相关根系性状指标;而1级耐铝

毒品种的5个相关根系性状均明显高于5级耐铝毒品种,表明这5个根系性状均可作为耐铝毒较好根系性状指标,其中根总长比和根体积比更为理想。

表7 不同耐逆品种相关根系性状的比较

Table 7 Comparisons of relative root traits between the tolerant and not tolerant

耐性 级别 Tolerance scale	指标 Indicator	耐旱试验 Drought tolerance test				耐铝毒试验 Aluminum tolerance test				
		比根干重 Dry root weight/ plant dry weight	比根 总长 Total root length/ plant dry weight	比根 体积 Root volume/ plant dry weight	根干 重比 Relative dry root weight	侧根数比 Relative number of lateral roots	主根 长比 Relative tap root length	总根 长比 Relative total root length	根体 积比 Relative root volume	
		1级	\bar{y}	0.297	733.19	0.732	0.851	0.86	0.78	0.806
	s_g	0.030	94.47	0.07	0.039	0.095	0.088	0.082	0.087	
	Min.	0.272	590.44	0.632	0.828	0.81	0.72	0.77	0.733	
	Max.	0.353	822.57	0.796	0.843	0.92	0.88	0.97	0.976	
	GCV(%)	10.10	12.88	9.56	4.58	11.05	11.28	10.17	10.14	
5级	\bar{y}	0.239	506.18	0.487	0.575	0.565	0.53	0.41	0.399	
	s_g	0.025	57.20	0.050	0.032	0.075	0.061	0.042	0.059	
	Min.	0.217	415.52	0.433	0.560	0.49	0.49	0.37	0.33	
	Max.	0.258	559.66	0.548	0.590	0.65	0.59	0.44	0.47	
	GCV(%)	10.46	11.30	10.27	5.57	13.27	11.51	10.24	14.79	

3 讨论

3.1 大豆根系性状的遗传特点及其与地上部的相关性

大豆根系性状各指标均存在广泛的遗传变异,这是对根系优良性状进行选择的基础。

不同生态区根系发育程度不同,南方晚熟品种

苗期根系发育速度大于北方黄淮地区品种,而根系性状各指标间及与地上部性状间除侧根数和主根长外均存在很高的相关,特别在各指标与整株干重之间表现尤为突出,因而不同生态区品种间对根系性状指标绝对值直接进行选择的可比性较差,同生态区内的可比性较好。

黄淮海地区干旱较重,该区品种的耐旱相关根系性状值高于长江中下游区品种,表明耐旱种质的

相关根系性状具有生态适应性,这一点与前人抗旱性具有生态适应性的结论相一致,反过来又表明根系性状相对值的重要性。

3.2 耐逆性与根系性状的关系

研究表明,根干重、根体积、总根长等根系性状的绝对值与耐旱性(以平均耐旱隶属函数值为指标)间未发现相关,而比根干重、比根体积、比总根长等相对值则均呈极显著相关,1级耐旱品种耐旱相关根系性状中的比根重、比根总长、比根体积均高于5级耐旱品种;同样,与耐铝性极显著相关的根重比、根体积比、总根长比、主根长比、一级侧根数比也均为相对值。这可能是由于材料熟期组不同,根系性状发育程度不同,而在比较材料特别是来源于不同生态区材料之间根系数量性状时采用了消除发育程度差异的相对值为标准,因而显现出内在的相关性,由此作者认为,采用根系性状的相对值作为各品种之间相互比较的标准应该更为合理。

参 考 文 献

- [1] 杨秀红,吴宗璞,张国栋.不同年代大豆品种根系性状演化的研究[J].中国农业科学,2001,34(3):292-295.
- [2] 廖红,严小龙.菜豆根构型对低磷胁迫的适应性变化及基因型差异[J].植物学报,2000,42(2):158-163.
- [3] F L Liu, M N Andersen, C R. Jensen. Root signal controls pod growth in drought-stressed soybean during the critical, abortion-sensitive phase of pod development[J]. Field Crops Research, 2004, 85:159-166.
- [4] 王宏,郑丕尧,王树安,等.大豆不同耐旱性品种根系性状的比较研究 I. 形态特征及解剖组织结构[J]. 中国油料, 1981,(1):32-37.
- [5] Garcia A, Gonzalez MC. Morphological marker for the early selection of drought-tolerant rice varieties[J]. Cultivate Tropical, 1997,18;(2) 47-50.
- [6] Sloane, R J, R P Patterson, T E Carter. Field drought tolerance of soybean plant introduction[J]. Crop Science, 1990,(30): 118-123.
- [7] Lazof D B, Goldsmith J G, Rufty T W, et al. Rapid uptake of aluminum into cells of intact soybean root tips. A micro analytical study using secondary ion mass spectrometry[J]. Plant Physiol., 1994,106(3):1107-1114.
- [8] Nielsen K L., Lynch J. Carbon cost of root systems: an architectural approach[J]. Plant Soil, 1994,165:161-169.
- [9] Sartain J B, E J Kamprath. Aluminum tolerance of soybean cultivars based on root elongation in solution culture compared with growth in acid soil[J]. Agronomy Journal, 1998, 70: 17-20.
- [10] Foy C D, T E Carter Jr., JA Duke. Correlation on shoot and root growth and its role in selecting for aluminum tolerance in soybean[J]. Journal Plant Nutrition,1993, 16(2): 305-325.
- [11] Spehar C R. Aluminum tolerance of soybean genotypes in short term experiments[J]. Euphytica,1994, 76:73-80.
- [12] Hudak, C M, R P Patterson. Root distribution and soil moisture depletion pattern of a drought-resistant soybean plant introduction[J]. Agronomy. Journal,1996,(88):478-486.
- [13] 刘莹,盖钧镒,吕慧能,等.大豆耐旱种质鉴定和相关根系性状的遗传与 QTL 定位[J]. 遗传学报,2005,32(8): 855-863.
- [14] 刘莹,盖钧镒.大豆耐铝毒的鉴定和相关根系性状的遗传分析[J]. 大豆科学,2004,23(3):164-168.