

柱花草适应酸性缺磷土壤的基因型 差异及可能的生理机制

杜育梅¹, 白昌军¹, 田江², 严小龙², 刘国道¹

(1 中国热带农业科学院 热带品种资源研究所, 海南 儋州 571737;

2 华南农业大学 根系生物学研究中心, 广东 广州 510642)

摘要:通过田间和水培试验,探讨了柱花草适应酸性缺磷土壤的基因型差异及其可能的生理机制。田间试验表明,12个供试柱花草对酸性缺磷土壤的适应性具有显著的基因型差异,并且这种差异主要来自于磷效率的高低。其中头状柱花草(Capitata)、马弓形柱花草(Fine stem)、Mineirao柱花草(Mineirao)和CIAT1517柱花草(CIAT1517)属于磷低效不敏感型;热研2号柱花草(Reyan2)、热研5号柱花草(Reyan5)、GC1581柱花草(GC1581)和TPRC2001-1柱花草(TPRC2001-1)属于磷高效敏感型;西卡柱花草(Seca)属于磷高效不敏感型,有钩柱花草(Verano)、灌木柱花草(Seabrana)和TPRC2001-2柱花草(TPRC2001-2)表现不稳定。在田间试验结果的基础上,挑选出适应性差异较大的TPRC2001-1、Fine stem和Verano进行水培试验,结果发现,在水培条件下,柱花草的磷效率和磷吸收效率具有明显的基因型差异,而磷利用效率基因型间差异不显著。此外,虽然低磷胁迫能显著提高供试柱花草叶部和根部酸性磷酸酶的活性,但其基因型差异不显著。表明柱花草对酸性缺磷土壤的适应性具有显著的基因型差异,并且这种差异主要来自磷吸收效率,而与酸性磷酸酶活性等磷利用效率指标没有直接的相关关系。

关键词:柱花草; 酸性缺磷土壤; 磷效率; 酸性磷酸酶活性

中图分类号:S541.9

文献标识码:A

文章编号:1001-411X(2008)04-0006-06

Genotypic Variations of *Stylosanthes* in Adaptation to Low-P Acid Soils and the Possible Physiological Mechanisms

DU Yu-mei¹, BAI Chang-jun¹, TIAN Jiang², YAN Xiao-long², LIU Guo-dao¹

(1 Institute of Tropical Crops Genetic Resources, Chinese Academy of Tropical Agriculture Science,

Danzhou 571737, China; 2 Root Biology Center, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: In this study, a field experiment was carried out to investigate the genotypic variations of the 12 tested *Stylosanthes* (stylo) genotypes in adaptation to low-P acid soils and the physiological mechanisms. The results from field showed that there were significant variations of the 12 tested stylo genotypes in adaptation to low-P acid soils and these variations mainly attributed by the differences of their P efficiencies. In which, Capitata, Fine stem, Mineirao and CIAT1517 were low P efficient and non-responsive. Reyan2, Reyan5, GC1581 and TPRC2001-1 were high P efficient and responsive. Seca was high P efficient but non-responsive, while the other three varieties Verano, Seabrana, and TPRC2001-2, were unstable. Based on the results from the field experiment, three genotypes contrasting in P efficiency, Fine stem, Verano and TPRC2001-1, were selected for a further nutrient solution culture. The results showed that there were significant genotypic variations in both P efficiency and P acquisition efficiency, but no in

收稿日期:2008-03-05

作者简介:杜育梅(1982—),女,硕士研究生; 通讯作者:刘国道(1963—),男,研究员,博士,E-mail: Liuguodao@scuta.edu.cn

基金项目:国家973计划项目“中国西部牧草、乡土草遗传及选育的基础研究”(2007CB108903)

P utilization efficiency. Furthermore, low P availability could increase the activities of acid phosphatase (APase) in both leaves and roots, but it lacked of genotypic differences. It was concluded that there were significant variations of stylo in adaptation to low-P acid red soils and these variations are mainly attributed to P acquisition efficiency but not the traits of P utilization efficiency such as APase activity.

Key words: *Stylosanthes*; low-P acid soil; P efficiency; acid phosphatase activity

柱花草 *Stylosanthes* 原产于南美洲及加勒比海地区,是热带、亚热带地区重要的豆科牧草和饲料植物资源,主要用于人工草地建设、天然草地改良、林、果、草生态工程建设等^[1]。由于柱花草具有生物固氮能力、适应性强、抗性广和耐酸瘦土壤等特点,在治理水土流失和退耕还林(草)中发挥重要作用。在热带亚热带地区,由于高温多雨造成养分大量淋失以及土壤中的铁、铝等对磷素强烈的固定作用,大部分土壤中有效磷含量较低^[2-3],土壤缺磷已成为华南地区限制柱花草产量提高的重要因素之一。在长期缺磷胁迫下,植物进化形成了一系列适应缺磷土壤的形态、生理生化及分子机制。其中,酸性磷酸酶活性的提高和分泌是植物适应低磷胁迫的重要机制之一^[4]。因此,低磷胁迫下植物体内酸性磷酸酶活性高低常被用作判断磷效率的重要指标^[4-5]。但是,酸性磷酸酶活性与柱花草磷效率的相关性鲜见报道。本研究通过大田试验,探讨了12个不同基因型柱花草对酸性缺磷红壤的适应性,系统评价了柱花草磷效率的基因型差异。并选取磷效率差异较大的3个柱花草基因型,在水培条件下对其总磷效率、磷吸收效率和磷利用效率进行了全面评价;同时在不同时间段,分析了柱花草组织内部酸性磷酸酶活性,以期探讨组织内部酸性磷酸酶活性与柱花草磷效率的关系。

1 材料与方法

1.1 柱花草田间试验

试验于2006年在海南省儋州市中国热带农业科学院品种资源研究所牧草基地(东经19°30′、北纬109°30′、海拔149 m)进行,试验土壤为赤红壤,土壤的基本理化性状为:pH 4.52,有机质8.70 g·kg⁻¹,全氮0.43 g·kg⁻¹,全磷0.29 g·kg⁻¹,全钾0.73 g·kg⁻¹,速效磷1.25 mg·kg⁻¹,速效钾102.11 mg·kg⁻¹,速效氮89.42 mg·kg⁻¹,测定方法见文献[6]。采用12个基因型柱花草为材料:热研2号柱花草 *Stylosanthes guianensis* cv. Reyan NO. 2、热研5

号柱花草 *S. guianensis* cv. Reyan NO. 5、头状柱花草 *S. capitata*、有钩柱花草 *S. hamata* cv. Verano、西卡柱花草 *S. scabra* cv. Seca、灌木柱花草 *S. seabrana* CIAT2534、马弓形柱花草 *S. hippocampoides* Mohl.、GC1581 柱花草 *S. guianensis* GC 1581、Mineirao 柱花草 *S. guianensis* cv. Mineirao、CIAT1517 柱花草 *S. guianensis* CIAT 1517、TPRC2001-1 柱花草 *S. guianensis* TPRC 2001-1 和 TPRC2001-2 柱花草 *S. guianensis* TPRC 2001-2。以下分别简称为 Reyan2、Reyan5、Capitata、Verano、Seca、Seabrana、Fine stem、GC1518、Mineirao、CIAT1517、TPRC2001-1、TPRC2001-2。

设不施磷(LP)和正常施磷(120 kg·hm⁻²重过磷酸钙,HP)2个处理,重复3次,完全随机区组设计。将柱花草种子在80℃的热水中浸泡1 min,于培养皿中催芽1 d后,将已露白的种子播于育苗杯中,育苗6周后移栽。试验小区面积为3 m²,株行距40 cm×50 cm,每小区种3排,小区间距离80 cm。在移栽60 d后采样测定每3株地上生物量和磷浓度。

土壤施肥量:氮、磷、钾肥和微量元素肥料混匀后以底肥的方式一次性施入,其中氮肥(尿素)40 kg·hm⁻²;钾肥(K₂SO₄)80 kg·hm⁻²;微量元素肥料 [$m(\text{MgSO}_4) : m(\text{ZnSO}_4) : m_{\text{硼砂}} = 4 : 1 : 1$): Mg 5.0 kg·hm⁻¹、Zn 2.5 kg·hm⁻¹、B 1.5 kg·hm⁻¹。

1.2 柱花草水培试验

采用大田试验中磷效率差异显著的3个柱花草基因型为材料,即有钩柱花草、马弓形柱花草和 TPRC2001-1 柱花草。

试验于2007年在华南农业大学根系生物学研究中心网室进行,采用营养液水培方法,营养液设5个磷处理,即10(CK)、50、100、250和500 μmol·L⁻¹KH₂PO₄,4次重复的完全随机区组设计。营养液采用1/2Hoagland营养液,营养液中营养元素的浓度为(mmol·L⁻¹): 2.5 KNO₃、2.5 Ca(NO₃)₂·4H₂O、4.57×10⁻³ MnCl₂·4H₂O、0.25 K₂SO₄、1.0 MgSO₄·7H₂O、0.38×10⁻³ ZnSO₄·7H₂O、1.57×

$10^{-4} \text{ CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、 $0.09 \times 10^{-4} (\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、 $23.13 \times 10^{-3} \text{ H}_3\text{BO}_3$ 和 $0.082 \text{ Fe-EDTA}(\text{Na})$ 。将种子用 1.1 的方法催芽后于砂床上育苗,待长出 3~4 片真叶后移栽。水培系统中均连有 2 个自动通气装置,每间隔 15 min 通气 15 min,营养液每 2 周换 1 次,每天观察水位、测定 pH,当箱中营养液水位明显下降时用去离子水补充到刻度线,并保持 pH 5.8 左右。分别于移栽后的 60 和 90 d 采样测定每 2 株植株地上部生物量、磷浓度以及叶部、根部酸性磷酸酶活性。

1.3 生物量的测定和磷效率表示方法

生物量测定:材料收获后,植株在 105°C 下杀青 30 min,然后于 75°C 烘至恒质量,称取干物质质量代表植株生物量。烘干后的样品粉碎后用干灰化-钼锑抗比色法测定植株磷浓度^[6]。将磷浓度乘以地上部植株生物量即得地上部磷含量。参照 Tabatabai 等^[7]的方法测定根部和叶部酸性磷酸酶活性。

植物磷效率一般以低磷条件下植株的生物量、产量或磷的累积量为指标^[8-9]。根据 Lynch^[10]对养分效率和植物施肥的反应程度分类标准,将供试柱花草的磷效率和对磷肥的反应划分为 4 种不同的类型,即 I. 磷低效不敏感型:产量低于在高、低磷处理下的平均值; II. 磷低效高敏感型:产量在低磷处理下低于其平均值,但在高磷处理下高于平均值; III. 磷高效高敏感型:高、低磷下,产量均高于在高、低磷处理下的平均值; IV. 磷高效不敏感型:产量在低磷处理下高于平均值,但在高磷下低于平均值。

1.4 数据分析

所有数据均用 Microsoft Excel 2003 (Microsoft Company, USA) 进行平均数和标准差计算,并利用 SAS (SAS Institute Inc, Cary, NC, USA) 统计软件进行双因素方差分析。

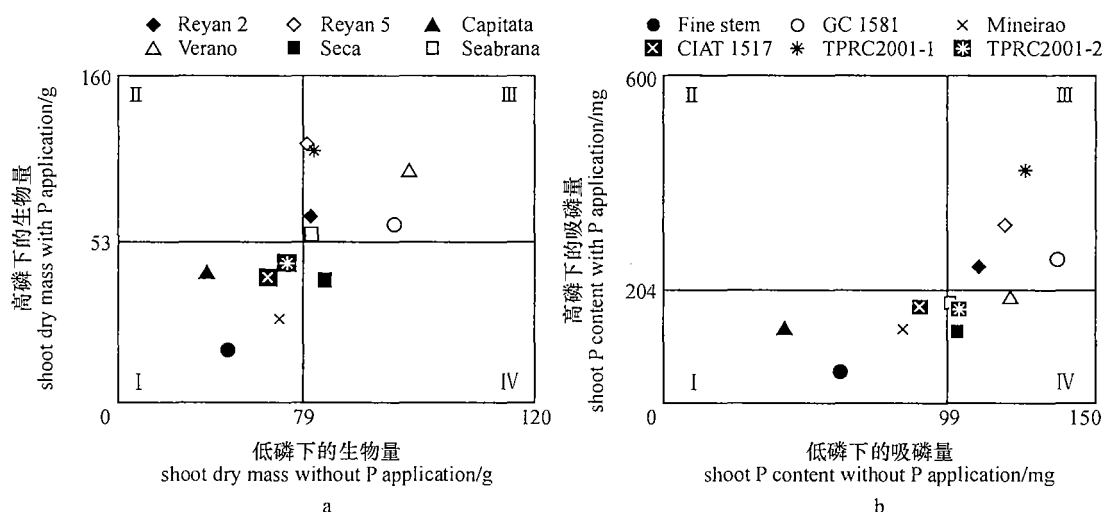
2 结果与分析

2.1 田间试验中不同基因型柱花草磷效率类型

供试柱花草对酸性缺磷土壤的适应性具有显著基因型差异,表现在不同磷处理下,12 个供试柱花草的生物量和磷吸收量均达 0.001 极显著的基因型差异 ($F_{\text{生物量}} = 9.99^{***}$, $F_{\text{磷吸收量}} = 12.55^{***}$, 图 1)。

本试验根据 Lynch^[10]对磷效率的评价方式,以植株生物量作为衡量植物总磷效率的指标,对供试柱花草的总磷效率进行分类。结果(图 1)表明, Capitata、Fine stem、Mineirao、CIAT1517 和 TPRC2001-2 属于磷低效不敏感型(图 1a-I); Reyan2、Reyan5、Verano、Seabrana、GC1581 和 TPRC2001-1 属于磷高效敏感型(图 1a-III); Seca 属于磷高效不敏感型(图 1a-IV)。

以植物磷吸收量作为衡量植物磷吸收效率的指标^[8]。供试柱花草磷吸收效率的分布趋势如图 1b 所示: Capitata、Fine stem、Mineirao 和 CIAT1517 为低效不敏感型图(1b-I); Reyan2、Reyan5、GC1581 和 TPRC2001-1 属于高效敏感型(图 1b-III); Verano、Seabrana、TPRC2001-2 和 Seca 属于高效不敏感型(图 1b-IV)。



图中中间分划线分别为高低磷条件下该生长指标的平均值($n=3$); I:低效,不敏感型; II:低效,敏感型; III:高效,敏感型; IV:高效,不敏感型
The dividing points in the figure are the means of the corresponding parameters ($n=3$). I: low efficiency, low responsive; II: low efficiency, high responsive; III: high efficiency, high responsive; IV: high efficiency, low responsive

图 1 不同磷处理下柱花草磷效率分类

Fig. 1 Classification of P efficiency for the 12 tested stylo genotypes

2.2 水培条件下磷有效性对柱花草生长的影响

水培条件下,磷的有效性显著影响柱花草的生长,并且这种影响具有显著的基因型差异(表1). Fine stem 和 TPRC2001-1 的地上生物量随着培养介

质中磷浓度的增加显著增加,但是,Verano 地上部生物量随着磷浓度的增加变化不大. 在完全不供磷的情况下,Verano 的地上部生物量最大,TPRC2001-1 居中,Fine stem 最小.

表1 磷有效性对柱花草地上部生物量(g)的影响¹⁾

Tab.1 Effects of P availability on shoot dry mass (g) of three tested stylo genotypes in nutrient solution

$c_P/(\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$		60 d			90 d		
		Fine stem	Verano	TPRC 2001-1	Fine stem	Verano	TPRC2001-1
10(CK)		0.46 ± 0.06	1.73 ± 0.16	1.24 ± 0.17	1.30 ± 0.24	2.71 ± 0.36	2.25 ± 0.40
50		1.92 ± 0.10	1.37 ± 0.09	2.64 ± 0.19	5.29 ± 0.99	3.05 ± 0.27	5.59 ± 0.25
100		2.02 ± 0.13	1.01 ± 0.07	2.69 ± 0.20	5.53 ± 0.66	2.42 ± 0.52	7.08 ± 0.54
250		2.52 ± 0.18	0.86 ± 0.11	3.11 ± 0.31	7.24 ± 0.49	1.96 ± 0.31	7.84 ± 0.93
500		2.47 ± 0.28	1.41 ± 0.15	3.02 ± 0.25	6.70 ± 0.50	4.22 ± 1.18	6.69 ± 1.09
F	P		19.22 ***			16.02 ***	
	G		62.96 ***			28.98 ***	
	P × G		12.28 * *			4.64 * *	

1)表中所有数据均是4次重复的平均值±标准误;P:磷处理,G:基因型,P×G:磷处理和基因型的交互作用;*:0.01>P>0.001;***:P<0.001

不同磷浓度对柱花草地上部吸磷量有着显著的影响,而且存在着明显的基因型差异(表2). 随着磷浓度的提高,3个柱花草基因型地上部吸磷量显著增加. 其中 TPRC2001-1 地上吸磷量随介质磷浓度增

加增长速度最快,Fine stem 居中,Vernao 最小. 在缺磷条件下,Vernao 的地上部吸磷量最大,尤其在处理60 d 时,其地上部吸磷量分别是 Fine stem 和 TPRC2001-1 的4.07 和1.48 倍.

表2 磷有效性对柱花草地上部吸磷量(g)的影响¹⁾

Tab.2 Effects of P availability on shoot P content (g) of three tested stylo genotypes in nutrient solution

$c_P/(\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$		60 d			90 d		
		Fine stem	Verano	TPRC 2001-1	Fine stem	Verano	TPRC2001-1
	10(CK)	0.46 ± 0.08	1.87 ± 0.10	1.26 ± 0.10	1.94 ± 0.33	4.13 ± 0.57	3.19 ± 0.48
	50	3.97 ± 0.16	3.00 ± 0.10	6.03 ± 0.49	11.29 ± 1.97	7.05 ± 0.37	11.72 ± 1.11
	100	7.07 ± 0.62	4.10 ± 0.31	8.61 ± 0.74	19.69 ± 2.11	9.31 ± 1.95	28.41 ± 2.30
	250	11.17 ± 0.94	4.16 ± 0.50	13.09 ± 1.53	39.68 ± 2.87	10.27 ± 1.67	43.32 ± 4.82
	500	11.44 ± 1.15	7.65 ± 0.86	15.84 ± 0.99	39.75 ± 2.70	26.01 ± 7.72	42.14 ± 6.35
F	P		97.47 ***			55.74 ***	
	G		55.47 ***			27.70 ***	
	P × G		8.60 ***			5.32 ***	

1)表中所有数据均是4次重复的平均值±标准误;P:磷处理,G:基因型,P×G:磷处理和基因型的交互作用;***:P<0.001

磷利用效率(表3)也常被用于判断磷效率的指标之一,它是指单位磷所产生的干物质量^[9]. 本试验中,3个基因型柱花草磷利用效率均随着营养液中磷浓度的升高而降低,但在2个采样时期,柱花草磷利用效率基因型间差异都不显著.

2.3 水培条件下磷有效性对柱花草叶部和根部酸性磷酸酶活性的影响

酸性磷酸酶活性的提高被视为植物在低磷条

件下的适应性反应之一,因此常被作为判断磷效率的重要指标^[4-5]. 本试验中,低磷胁迫显著提高了叶部和根部酸性磷酸酶的活性(表4、5). 而且,在不同时期,其酸性磷酸酶活性的变化存在着基因型的差异. 在处理了60 d 时,Verano 根部酸性磷酸酶活性明显高于其他2个基因型. 但是,叶部酸性磷酸酶的活性在2个处理时期都不存在基因型的差异.

表3 磷有效性对柱花草磷吸收效率($\text{kg} \cdot \text{mg}^{-1}$)的影响¹⁾Tab.3 Effects of P availability on P utilization efficiency ($\text{kg} \cdot \text{mg}^{-1}$) of three tested stylo genotypes in nutrient solution

$c_P/(\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	60 d			90 d		
	Fine stem	Verano	TPRC 2001-1	Fine stem	Verano	TPRC2001-1
10(CK)	1.01 ± 0.05	0.92 ± 0.06	0.97 ± 0.06	0.66 ± 0.01	0.66 ± 0.01	0.70 ± 0.03
50	0.48 ± 0.02	0.46 ± 0.02	0.44 ± 0.02	0.46 ± 0.02	0.43 ± 0.02	0.46 ± 0.02
100	0.29 ± 0.01	0.25 ± 0.00	0.31 ± 0.01	0.28 ± 0.01	0.26 ± 0.01	0.28 ± 0.01
250	0.23 ± 0.00	0.21 ± 0.00	0.24 ± 0.01	0.18 ± 0.00	0.19 ± 0.00	0.18 ± 0.00
500	0.21 ± 0.00	0.18 ± 0.00	0.19 ± 0.01	0.17 ± 0.01	0.16 ± 0.00	0.17 ± 0.01
<i>F</i>	416.27***			685.37***		
<i>G</i>	2.89 ^{ns}			1.29 ^{ns}		
<i>P</i> × <i>G</i>	0.61 ^{ns}			1.44 ^{ns}		

1)表中所有数据均是4次重复的平均值±标准误。P:磷处理;G:基因型,P×G:磷处理和基因型的交互作用;ns:不显著,***: $P < 0.001$

表4 不同磷浓度对柱花草叶部酸性磷酸酶活性($\mu\text{mol} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)的影响¹⁾Tab.4 Leaf APase activity ($\mu\text{mol} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) affected by P availability

$c_P/(\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	60 d			90 d		
	Fine stem	Verano	TPRC 2001-1	Fine stem	Verano	TPRC2001-1
10(CK)	2.81 ± 0.36	1.82 ± 0.18	2.68 ± 0.44	2.16 ± 0.22	2.65 ± 0.28	1.71 ± 0.20
50	2.63 ± 0.04	1.89 ± 0.13	2.01 ± 0.41	2.16 ± 0.48	1.01 ± 0.22	1.92 ± 0.38
100	1.29 ± 0.22	1.44 ± 0.12	1.70 ± 0.30	1.04 ± 0.19	1.42 ± 0.15	1.38 ± 0.12
250	2.26 ± 0.48	2.20 ± 0.32	2.19 ± 0.48	1.24 ± 0.18	1.32 ± 0.20	2.69 ± 0.79
500	1.42 ± 0.18	1.30 ± 0.22	1.45 ± 0.17	1.06 ± 0.16	1.11 ± 0.23	0.82 ± 0.07
<i>P</i>	7.34***			6.11**		
<i>F</i> <i>G</i>	1.88 ^{ns}			0.15 ^{ns}		
<i>P</i> × <i>G</i>	0.89 ^{ns}			2.40*		

1)表中所有数据均是4次重复的平均值±标准误,P:磷处理,G:基因型,P×G:磷处理和基因型的交互作用;ns:不显著,* : $0.05 > P > 0.01$,** : $0.01 > P > 0.001$,***: $P < 0.001$

表5 不同磷浓度对柱花草根部酸性磷酸酶活性($\mu\text{mol} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)的影响¹⁾Tab.5 Root APase activity ($\mu\text{mol} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) affected by P availability

$c_P/(\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	60 d			90 d		
	Fine stem	Verano	TPRC 2001-1	Fine stem	Verano	TPRC2001-1
10(CK)	1.61 ± 0.32	2.70 ± 0.31	2.12 ± 0.39	2.01 ± 0.30	2.12 ± 0.17	1.66 ± 0.49
50	1.64 ± 0.19	2.02 ± 0.25	1.33 ± 0.06	1.15 ± 0.22	1.06 ± 0.07	1.46 ± 0.08
100	1.11 ± 0.13	1.49 ± 0.12	0.96 ± 0.08	1.32 ± 0.28	1.19 ± 0.35	1.32 ± 0.18
250	0.87 ± 0.02	1.30 ± 0.09	0.89 ± 0.05	$1.39 \pm (0.21)$	1.20 ± 0.17	1.92 ± 0.47
500	0.98 ± 0.05	1.43 ± 0.10	0.99 ± 0.06	0.96 ± 0.13	1.13 ± 0.18	1.10 ± 0.25
<i>P</i>	19.35***			4.77**		
<i>F</i> <i>G</i>	14.10***			0.49 ^{ns}		
<i>P</i> × <i>G</i>	0.97 ^{ns}			0.80 ^{ns}		

1)表中所有数据均是4次重复的平均值±标准误,P:磷处理,G:基因型,P×G:磷处理和基因型的交互作用;ns:不显著,* * : $0.01 > P > 0.001$,***: $P < 0.001$

3 讨论

田间试验表明,12个供试柱花草对酸性缺磷土壤的适应性具有显著的基因型差异,并且这种差异

主要来自于磷效率的高低.本试验对柱花草在酸性低磷红壤上的适应性进行了磷效率的分类划分,发现不同柱花草磷效率存在显著的基因型差异.不同基因型柱花草在总磷效率中的分布与在磷吸收效率

中的分布非常相似,例如 Reyan2、Reyan5 和 TPRC2001-1 的总磷效率与磷吸收效率均属于高效敏感型,而 Capitata、Fine stem、Mineirao 和 CIAT1517 均属于低效不敏感型。说明柱花草的总磷效率和磷吸收效率关系密切。而且在随后的水培试验中,笔者发现柱花草总磷效率和磷吸收效率基因型间差异显著,磷利用效率基因型间差异不显著,进一步肯定了柱花草磷利用效率对柱花草整体磷效率贡献不大,整体磷效率由吸收效率决定,这一结论与徐青萍^[11]等在大豆上研究结果一致。

在低磷胁迫下,胞内酸性磷酸酶活性的提高是植物适应低磷胁迫的机制之一^[4]。一般认为植物胞内酸性磷酸酶能够有效地分解衰老部位的多聚磷复合物,实现磷的重新分配和再利用,从而提高植物对磷的利用效率^[4]。但是,我们的试验结果显示,磷高效的基因型 TPRC2001-1 叶部酸性磷酸酶活性在低磷胁迫下最低。而且,处理 60 d 后,磷低效的基因型 Verano 根部酸性磷酸酶活性显著高于其他 2 个基因型。这些结果说明柱花草胞内酸性磷酸酶活性的高低与磷吸收效率和利用效率没有直接的关系。在三叶草^[12]、小麦^[13]、菜豆^[14]、玉米^[15]和大豆^[16]上的研究也表明,提高胞内酸性磷酸酶活性只是植物对低磷胁迫的广泛适应性机理之一,但是酸性磷酸酶的活性与植物磷效率没有直接的相关性。

另外,我们在水培试验中发现 Fine stem 的磷效率表现与田间试验结果不同,原因可能是:水培条件下介质有效养分分布均匀,且环境 pH 为 5.8,比较适合柱花草的生长;田间环境影响柱花草生长的因素较多,如土壤肥力分布不均。而且,在酸性土壤中,铝毒的危害也可能是限制该柱花草生长的原因之一。因此,柱花草适应酸性缺磷土壤的机理还需要进一步的研究。

参考文献:

- [1] 白昌军,刘国道. 高产抗病圭亚拉柱花草综合性状评价[J]. 热带作物学报, 2004, 25(2): 87-94.
- [2] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 901-921.
- [3] 严小龙,黄志武,罗仁骏,等. 关于作物磷效率的遗传学研究[J]. 土壤, 1992, 24(2): 101-105.
- [4] DUFF STEPHEN M G, GAUTAM S, PLAXTOM W C. The role of acid phosphatase in plant phosphorus metabolism [J]. *Physiologia Plantarum*, 1994, 90: 791-800.
- [5] TANDANO T, SAKAI T. Secretion of acid phosphatase by the roots of several crop species under phosphorus deficient conditions [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1991, 37: 129-140.
- [6] 劳家桢. 土壤农化分析手册[M]. 北京: 农业出版社, 1988.
- [7] TABATABAI M A, BREMNER J M. Use of *p*-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1969, 1: 301-307.
- [8] CLARK R B. Physiology of cereals for mineral nutrient uptake, use, and efficiency[M]//BALIGAR V C, DUNCAN R R. *Crops as Enhancers of Nutrient Use*, San Diego: Academic Press. 1990, 131-209.
- [9] 严小龙,张福锁. 植物营养遗传学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997.
- [10] LYNCH J. The role of nutrient - efficient crops in modern agriculture [J]. *Journal of Crop Production*, 1998, 1(2): 241-264.
- [11] 徐青萍,罗超云,廖红,等. 大豆不同品种对磷胁迫反应的研究[J]. 大豆科学, 2003, 22(2): 108-114.
- [12] MDANCHLAN K D. Acid phosphatase activity of intact roots and phosphorus nutrition in plants: I : Assay conditions and phosphatase activity[J]. *The Australian Journal of Agriculture Research*, 1980, 31: 429-440.
- [13] HUNTER D A, MCMANUS M T. Comparison of acid phosphatases in two genotypes of white clover with different responses to applied phosphate [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1999, 22: 679-692.
- [14] YAN X L, LIAO H, MELANIE C T, et al. Induction of a major leaf phosphatase does not confer adaptation to low phosphorus availability in common bean [J]. *Plant Physiology*, 2001, 125: 1901-1911.
- [15] KAEPLER S M, YUN S J. Induction of maize acid phosphatase activities under phosphorus starvation [J]. *Plant and Soil*, 2001, 237: 109-115.
- [16] TIAN J, LIAO H, YAN X L, et al. Phosphorus starvation-induced expression of leaf acid phosphatase isoforms in soybean [J]. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45: 1037-1042.

【责任编辑 周志红】