磷对不同磷效率基因型大豆保护酶的影响

敖 雪,谢甫绨,张惠君,刘婧琦
(沈阳农业大学农学院,辽宁 沈阳 110161)

摘 要:选用不同磷效率型大豆品种,设低磷(0 kg·hm^{-2})、中磷(82.5 kg·hm^{-2})和高磷(165 kg·hm^{-2})3 个磷处理,测定了不同磷效率基因型大豆叶片的 SOD、POD 和 CAT 的活性及 MDA 含量的变化,并探讨了这些指标与产量的关系。结果表明,低磷条件下,磷高效品种的 SOD、POD 和 CAT 的活性在整个生育时期均保持较高水平,而 MDA 含量较低。中磷和高磷对磷高效品种 SOD 和 POD 活性影响较小,生育后期 CAT 活性下降减缓,且可以增加磷低效品种生育后期的 SOD 和 POD 活性,使 CAT 活性下降时期延迟至鼓粒期。与低磷条件相比,在中、高磷条件下,磷高效品种的 MDA 含量分别下降了 10.0% 和 4.8%,磷低效品种分别下降了 20.9% 和 17.9%。说明磷高效品种具有较强的植株活性氧清除能力,能保持生物膜结构的稳定性,使其具有抵抗低磷胁迫的能力,从而获得较高产量。

关键词:大豆;磷效率;保护酶系统;膜脂过氧化
中图分类号:S565.1 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-9841(2009)01-0067-05

Effect of Phosphorus on Protective Enzymes of Soybean Cultivars with Different Phosphorus Efficiencies

AO Xue, XIE Fu-ti, ZHANG Hui-jun, LIU Jing-qi
(Agronomy College of Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, Liaoning, China)

Abstract: Soybean is sensitive to phosphorus in the whole growth stage. Our objective is to compare activity of SOD, POD, CAT, MDA content, and the relationships between them and yield in soybean cultivars with different phosphorus efficiencies under low phosphorus (0 kg·ha^{-1}), medium phosphorus (82.5 kg·ha^{-1}) and high phosphorus levels (165 kg·ha^{-1}) in Shenyang from 2006-2007. The results showed that activities of SOD, POD, CAT of high phosphorus efficiency cultivars (HPEC) increased with the growth of soybean, and MDA content was lower under low-phosphorus stress. Medium and high phosphorus application had little influence on activities of SOD and POD of HPEC, and activity of CAT slowly declined in the late growth stage, and the activities of SOD and POD of low phosphorus efficiency cultivars (LPEC) increased in the late growth stage, and the decreasing time of CAT activity of LPEC was delayed to the seed filling stage. Compared to low phosphorus treatment, MDA content of HPEC declined by 10.0% and 4.8%, LPEC declined 20.9% and 17.9%, respectively, under medium phosphorus and high phosphorus levels. A strong ability of scavenging active oxygen and good membrane stability was one of reasons which soybean cultivars with high phosphorus efficiency resisted the stress of low phosphorus and had a higher yield.

Key words: Soybean; Phosphorus efficiency; Protective enzyme activities; Membrane lipid peroxide

磷是植物生长发育不可缺少的营养元素之一,不仅是植物体内许多重要化合物的组分,而且还以多种途径参与植物代谢。大量的研究结果表明,植物在衰老过程中以及多种逆境条件下,细胞内活性氧产生与清除之间的平衡遭到破坏,积累起来的活性氧就会对细胞产生伤害[1]。矿质营养元素的缺乏及毒害元素的富集[2-3],也会引起植物体内活性氧代谢不平衡和相应的清除系统的改变。近几年,对水稻和甘蔗等在磷胁迫下保护酶系统与植物抗逆性的关系的研究[1,4]结果表明,不同植物种类甚至同种植物不同品种的保护酶系统在逆境条件下的变化趋势和幅度有所不同;植物抗逆性的大小

收稿日期:2008-08-19
基金项目:辽宁省科技厅科技基金资助项目(2006201008);辽宁省教育厅创新团队资助项目(2006T116)。
作者简介:敖雪(1979-),女,博士研究生,研究方向为大豆耐低磷育种。E-mail:cymkaheihei@yahoo.com.cn。
通讯作者:谢甫绨,教授,博士生导师。E-mail:snsoybean@yahoo.com.cn。

与植物保护酶系统的活性变化有一定的关系。有关于植物在逆境条件下的膜脂过氧化反应和保护酶系统超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性的变化已广泛用于植物对逆境机理的研究[5]。大豆是喜磷作物,缺磷时产量有所下降,大豆的抗病性以及在低温和干旱下与保护酶系统的变化关系有过研究,认为保护酶系统对大豆抗逆过程起重要调节作用[6-8],但在不同磷处理下磷效率基因型大豆品种保护酶系统的比较研究尚少报道。在低磷、中磷和高磷条件下,研究了不同生育时期,不同磷效率基因型大豆叶片 SOD、POD 和 CAT 活性及 MDA 含量的变化,从保护酶系统角度探讨了大豆品种产量差异的生理机制。

1　材料与方法

1.1　试验设计

试验于 2006 ~ 2007 年在沈阳农业大学试验农场进行。试验地土壤碱解氮 78.51 $mg \cdot kg^{-1}$、速效磷 2.1 $mg \cdot kg^{-1}$、速效钾 5.01 $g \cdot kg^{-1}$。试材来自于磷胁迫鉴定试验,从 226 个大豆品种(系)中筛选出的磷高效和磷低效品种[9]。其中磷高效品种为锦豆 33 号、大黄豆、辽豆 13 号和辽豆 16 号;磷低效品种为铁丰 3 号和锦 8-14。采用裂区设计,3 次重复。为了免除其他元素对试验结果的干扰,以五氧化二磷(P_2O_5)作底肥,分低磷(0 $kg \cdot hm^{-2}$)、中磷(82.5 $kg \cdot hm^{-2}$)和高磷(165 $kg \cdot hm^{-2}$)3 个处理。小区为 5 行区,行距 0.6 m,株距 0.11 m,基本苗数 15 万株 $\cdot hm^{-2}$,小区面积为 15 m^2。2006 年播期为 5 月 1 日,2007 年为 4 月 26 日,生育期间管理一致。成熟时取样考种,包括百粒重、单株粒重等。收获时每小区取中间 3 行,每行取 3 m 长,测产面积为 5.4 m^2,折算成公顷产量。

1.2　生理指标测定

在大豆苗期、开花期、结荚期、鼓粒期和鼓粒末期分别测定以下各项指标和性状。超氧化物歧化酶的测定参考邹琦等[10]的方法;过氧化物酶的测定参考朱广廉等[11]和张宪政等[12]的邻甲氧基苯酚法;过氧化氢酶的测定参考曾韶西等[13]和张宪政等[12]高锰酸钾滴定法;丙二醛的测定参照李合生[14]的方法。

1.3　数据分析

用 SPSS15.0 和 Excel2003 对数据进行统计与分析。

2　结果与分析

2.1　不同磷效率品种的保护酶活性和丙二醛含量比较

2.1.1　*超氧化物歧化酶*　在低磷条件下,磷高效品种的超氧化物歧化酶(SOD)活性除在开花期较低外,其它生育时期 SOD 活性变化较小,且在分枝期和结荚期 SOD 活性极显著的高于磷低效品种。而磷低效品种的 SOD 活性在生育后期(R5 ~ R6 期)下降较快,下降幅度达到 17%。说明在低磷条件下,磷高效品种在整个生育时期可以保持较高水平的 SOD 活性,在生育后期叶片开始衰老时,仍能保持较高的抗氧化能力。

在中高磷条件下,从 R1 到 R5 期,磷高效品种在中磷条件下增加了 87.9%,高磷条件下增加 59.4%,而磷低效品种分别增加了 120.4% 和 93.5%,R5 到 R6 期,两类型品种 SOD 活性均有所下降,磷高效品种在中磷条件下降幅为 11.1%,高磷条件下为 17.5%,磷低效品种降幅分别为 20.8% 和 24.5%。在生育中后期(R3 ~ R5 期),中、高磷条件下,磷高效品种的 SOD 活性较低磷条件的分别增加了 7.7% 和 7.2%,而磷低效品种分别增加了 34.3% 和 35%。说明生殖生长阶段,磷高效品种在三种磷条件下,均能保持较高 SOD 活性,并在生育后期叶片衰老时,也能保持较高 SOD 水平,而磷低效品种对磷浓度反映较敏感。

2.1.2　*过氧化物酶*　不同磷效率品种的过氧化物酶(POD)活性列入表 2。由表 2 可以看出,低磷条件下,在分枝期和开花期磷高效品种的 POD 活性低于磷低效品种的,到了结荚期以后,磷高效品种的 POD 活性极显著高于磷低效品种的。在中磷条件下,磷高效品种 POD 活性在 R5 期达到最高值,而磷低效品种的在 R6 期达到最高。高磷条件下,除分枝期外的其他时期磷高效品种的 POD 活性均较低磷条件下的有所下降。说明低磷胁迫可使磷高效品种 POD 活性增强。

表 1 不同磷效率基因型大豆不同生育时期超氧化物歧化酶的比较

Table 1 Comparison on superoxide dismutase of soybean cultivars with different phosphorus efficiencies at different growth stages/units · g^{-1}FW

磷水平 P level	分枝期 Branching stage		开花期(R1) Blooming stage		结荚期(R3) Podding stage		鼓粒期(R5) Grain filling stage		鼓粒末期(R6) Late grain filling stage	
	磷高效 HPE	磷低效 LPE	磷高效 HPE	磷低效 LPE	磷高效 HPE	磷低效 LPE	磷高效 HPE	磷低效 LPE	磷高效 HPE	磷低效 LPE
低磷 Low P	721.0Aa	470.8Ba	511.4ba	554.6aa	733.4Aa	534.9Bb	763.3Bb	869.1Ab	776.8aa	721.2 aa
中磷 Medium P	632.4ab	491.0ba	448.0ab	423.0ac	769.9Ba	862.6Aa	841.6Ba	932.2Aa	748.3 aa	738.3 aa
高磷 High P	553.7ac	501.6aa	510.0aa	502.9ab	790.3Ba	851.3Aa	812.8Bab	973.1Aa	670.6 ab	734.6 aa

表中数据表示磷效率品种的平均值。数字后第一列不同大、小写字母表示在相同磷处理下不同磷效率品种平均值间的 0.05 和 0.01 水平上差异显著,数字后第二列字母表示同一磷效率品种在不同磷处理下 0.05 水平上的差异显著性。

Values in the table show the averages of soybean cultivars with different phosphorus efficiencies; Values followed by a different letter in first column are significantly different at the 0.01 and 0.05 probability level under the same phosphorus level. After data second column letter indicated significance of the same variety under different phosphorus level at the 0.05 probability level. HPE: High phosphorus efficiency; LPE: Low phosphorus efficiency. The same as bellow.

表 2 磷效率基因型大豆不同生育时期过氧化物酶活性的比较

Table 2 Comparison on peroxidase activity of soybean cultivars with different phosphorus efficiencies at different growth stages/$\Delta A470 \cdot g^{-1}FW \cdot min^{-1}$

磷水平 Plevel	分枝期 Branching stage		开花期(R1) Blooming stage		结荚期(R3) Podding stage		鼓粒期(R5) Grain filling stage		鼓粒末期(R6) Late grain filling stage	
	磷高效 HPE	磷低效 LPE	磷高效 HPE	磷低效 LPE	磷高效 HPE	磷低效 LPE	磷高效 HPE	磷低效 LPE	磷高效 HPE	磷低效 LPE
低磷 Low P	17.8Bb	21.1Aa	18.5Ba	21.4Ab	33.2Aa	25.0Ba	67.5Aa	41.3Bb	49.6Aa	26.9Bb
中磷 Medium P	20.3aa	18.6aa	15.2Bb	22.6Aa	28.0ac	25.0aa	60.9Aa	39.2Bc	43.6Ba	61.7Aa
高磷 High P	18.5ab	19.8aa	16.2Bb	20.3Ac	30.4Ab	23.0Ba	62.5Aa	48.4Ba	44.6aa	27.8bb

2.1.3 过氧化氢酶 两类型品种过氧化氢酶(CAT)见表 3,从整个生育时期来看,除分枝期外,磷高效品种的 CAT 随磷浓度变化较小,而磷低效品种的 CAT 除 R6 时期外,随磷浓度增加有所增长。在低磷条件下,磷高效品种的 CAT 活性在 R5 和 R6 时期显著或极显著的高于磷低效品种的。磷高效品种的 CAT 从 R5 期开始迅速下降,到 R6 期时下降 81.1%,而磷低效品种的在 R3 期就开始下降,到 R6 期时下降 90.0%。中、高磷条件下,磷高效品种的的 CAT 变化规律与低磷条件下相同,分别下降 58.7% 和 73.9%,而磷低效品种下降的时期推后,从 R5 期开始下降,分别下降 98.3% 和 85.2%。由此看出,施磷不但可以使磷高效品种生育后期 CAT 活性下降减缓,而且可以使磷低效品种的 CAT 活性下降时期延迟。

表 3 磷效率基因型大豆不同生育时期过氧化氢酶活性的比较

Table 3 Comparison on catalase activity of soybean cultivars with different phosphorus efficiencies at different growth stages/$mgH_2O_2 \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$

磷水平 Plevel	分枝期 Branching stage		开花期(R1) Blooming stage		结荚期(R3) Podding stage		鼓粒期(R5) Grain filling stage		鼓粒末期(R6) Late grain filling stage	
	磷高效 HPE	磷低效 LPE	磷高效 HPE	磷低效 LPE	磷高效 HPE	磷低效 LPE	磷高效 HPE	磷低效 LPE	磷高效 HPE	磷低效 LPE
低磷 Low P	7.7ab	6.0ab	10.7aa	10.6ab	10.0a ab	10.0ab	11.1Aa	6.5Bb	2.1aa	1.0bb
中磷 Medium P	10.3aa	9.9aa	10.4aa	10.7ab	9.7ab	10.5aa	10.9Ba	11.5Aa	2.5Aa	0.2Bc
高磷 High P	8.5Bb	10.7Aa	9.2Bb	11.1Aa	10.6aa	10.7aa	11.1aa	11.5aa	2.9aa	1.7ba

2.1.4 丙二醛含量 磷高效和磷低效品种生育过程中,叶片膜脂过氧化产物丙二醛(MDA)含量呈逐渐增加的趋势(表 4)。低磷条件下,与磷低效品种相比,磷高效品种的膜脂过氧化程度较轻,表现为磷

高效品种的 MDA 含量显著或极显著的低于磷低效品种的。中磷条件下,除结荚期外,其它生育时期均为磷高效品种的 MDA 含量低于磷低效品种的。高磷条件下,磷高效品种 MDA 含量均低于磷低效品种的。从整个生育时期来看,与低磷条件相比,在中、高磷条件下,磷高效品种的 MDA 含量分别下降 10.0% 和 4.8%;磷低效品种分别下降 20.9% 和 17.9%。说明磷高效品种的 MDA 含量对磷浓度变化较钝感,并且整个生育时期的膜脂过氧化程度都较小,能更好的清除体内的过氧化物。

表 4　磷效率基因型大豆不同生育时期丙二醛含量的比较

Table 4　Comparison on MDA content of soybean cultivars with different phosphorus efficiencies at different growth stages/nmol·g^{-1}FW

磷水平 Plevel	分枝期 Branching stage		开花期(R1) Blooming stage		结荚期(R3) Podding stage		鼓粒期(R5) Grain filling stage		鼓粒末期(R6) Late grain filling stage	
	磷高效 HPE	磷低效 LPE	磷高效 HPE	磷低效 LPE	磷高效 HPE	磷低效 LPE	磷高效 HPE	磷低效 LPE	磷高效 HPE	磷低效 LPE
低磷 Low P	285.5ba	383.9aa	388.8Ba	545.6Aa	379.5Ba	520.0Aa	338.4Bb	530.8Aa	466.1Ba	582.9Aa
中磷 Medium P	258.0Ba	380.3Aa	293.1Bc	370.8Ab	363.2a ab	330.1ac	398.5ba	453.6ab	404.8ab	462.9ab
高磷 High P	285.3Ba	400.3Aa	333.8ab	359.3ab	320.1Bb	420.3Ab	361.8Bab	455.5Ab	425.2a ab	429.2ab

2.2　不同磷效率品种的产量比较

从不同磷效率品种的产量(见表 5)可以看出,在低磷条件下,磷高效品种的产量显著高于磷低效品种。随着施磷量的增加,磷高效品种和磷低效品种的产量都有不同程度的增加,但增加的幅度有明显的差异。磷高效品种在中磷条件下和高磷条件下分别比低磷处理增加了 13.6% 和 15.3%,而磷低效品种分别增加了 13.4% 和 34.8%。说明磷高效品种的产量受磷的影响较小,即使在较低的磷浓度下,也能获得较高产量。而磷低效品种只有在较高磷浓度下,才能发挥出较好的产量水平。

表 5　不同磷效率品种产量比较

Table 5　Comparison on yield of soybean cultivars with different phosphorus efficiencies

类型 Group	品种 Cultivar	产量 Yield/kg·hm^{-2} 低磷 Low P	中磷 Medium P	高磷 High P
磷高效 HPE	锦豆 33 号 Jindou 33	2327	2861	2721
	大黄豆 Dahuangdou	2176	2625	2712
	辽豆 13 号 Liaodou 13	2929	3004	3068
	辽豆 16 号 Liaodou 16	2383	2661	3090
	平均值 Average	2453A	2788A	2898A
磷低效 LPE	铁丰 3 号 Tiefeng 3	1741	1972	2471
	锦 8-14 Jin 8-14	1832	2079	2344
	平均值 Average	1787B	2025B	2408B

3　结论与讨论

植物的 SOD 是一种典型的诱导酶,外部环境条件的改变能影响 SOD 的活性水平,植物在逆境环境下受到的伤害以及植物对逆境抵抗能力往往与体内的 SOD 等活性水平有关。结果表明:在低磷条件下,磷高效品种 SOD 活性整个生育时期变化都较小,并且在生育后期仍能保持较高活性。POD 和 CAT 活性在生殖生长阶段较高,后期仍能保持较高水平。在中、高磷条件下,磷高效品种保护酶系统变化较小,而磷低效品种的保护酶活性在生育后期增强。

植物在逆境及衰老条件下遭受伤害时,往往发生脂膜的过氧化作用,丙二醛是植物细胞膜脂过氧化的产物之一,其含量的高低在一定程度上能反映脂膜的过氧化水平和膜结构的受害程度及植株的自我修复能力[15]。有研究表明,低磷胁迫导致甘蔗、水稻的丙二醛含量增加,且耐性差的品种较明显和较早发生衰老[16-17]。结果表明:低磷胁迫能使大豆叶片 MDA 含量增加,表明低磷引起了植物体内活性氧的积累和膜脂过氧化作用的加剧,但低磷引起磷高效品种的 MDA 的增量明显小于磷低效品种的。说明磷高效品种膜脂过氧化程度较轻,并且具有较好的损伤修复能力。

综上所述,低磷胁迫一方面会激发大豆叶片产生更多的自由基、加快膜脂过氧化、导致体内 MDA

含量增加。另一方面会导致叶片保护酶系统活性的增强、加快自由基的清除、减轻膜脂过氧化、降低体内 MDA 的含量,构成一个动态平衡系统。磷高效品种,由于其保护酶活性较高,而且对低磷胁迫危害反应迅速,在低磷胁迫下具有更强的自由基清除能力,膜脂过氧化程度小。而磷低效品种,由于其保护酶活性较低,在低磷胁迫下抵制膜脂过氧化能力较弱,从而导致体内 MDA 含量大幅增长。具有较强的植株活性氧清除能力,保持生物膜结构的稳定性,是磷高效品种抵抗低磷胁迫并获得较高产量的生理机制之一。

参考文献

[1] 潘晓华,刘水英,李锋,等. 低磷胁迫对不同水稻品种叶片膜质过氧化及保护酶活性的影响[J]. 中国水稻科学,2003 ,17(1):57 - 60. (Pan X H ,Liu S Y,Li F ,et al. Effect of low - phosphorus stress on membrane lipid peroxidation and protective enzyme activities in rice leaves of different cultivars[J] . Chinese Journal of Rice Science,2003,17(1):57-60.)

[2] 刘厚诚,邝炎华,陈日远. 缺磷胁迫下长豇豆幼苗膜脂过氧化及保护酶活性的变化[J]. 园艺学报,2003,30(2):215-217. (Liu H C,Kuang Y H,Chen R Y. Changes of lipid peroxidation and activities of protective enzymes in asparagus bean seedlings under phosphorus- deficiency stress[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2003,30(2):215-217.)

[3] 张玉霞,李志刚,张玉玲,等. 缺磷胁迫对大豆膜脂过氧化及保护酶活性的影响[J]. 中国农学通报,2004,20(4):196-198. (Zhang Y X,Li Z G,Zhang Y L,et al. Influence of lipid peroxidation and activities of protective enzymes in soybean under phosphorus deficiency stress[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2004,20(4):196-198.)

[4] 万美亮,邝炎华,陈建勋. 缺磷胁迫对甘蔗膜质过氧化及保护酶系统活性的影响[J] . 华南农业大学学报,1999,20(2):1-6. (Wan M L ,Kuang Y H ,Chen J X. Studies on membrane lipid peroxidation and protective enzyme activities of sugarcanes under phosphorus deficiency[J] . Journal of South China Agricultural University,1999 ,20(2):1-6.)

[5] Bowler C ,Van Montagu M,Inze D. Superoxide dismutase and stress tolerance[J]. Annual Review of Plant Molecular Biology, 1992,43:86- 116.

[6] 郝晶,张立军,谢甫绨. 低温对大豆不同耐冷性中萌发期保护酶活性的影响[J]. 大豆科学. 2007,26(2):171-175. (Hao J, Zhang L J,Xie F T. Effects of the low temperature on defense enzyme activities of dieferent chilling- tolerant soybean cultivars during the germination [J]. Soybean Science, 2007, 26 (2): 171-175.)

[7] 任丽丽,高辉远. 低温弱光胁迫对野生大豆和大豆栽培种光系统功能的影响[J]. 植物生理与分子生物学学报,2007,33(4): 333-340. (Ren L L,Gao H Y. Effects of chilling stress under weak light on functions of photosystems in leaves of wild soybean and cultivatar soybean[J]. Journal of Plant Physiology and Molecular Biology,2007,33(4):333-340.)

[8] 李志刚,董丽杰,宋书宏,等. 磷素和干旱胁迫对大豆叶片活性氧和保护酶系统的影响[J]. 作物杂志,2007,6:35-37. (Li Z G,Dong L J,Song S H,et al. Effect of Phosphorus and drought stress on active oxygen and system of protective enzymes in soybean leaves[J]. Crops,2007,6:35-37.)

[9] 李志刚,谢甫绨,宋书宏. 大豆高效利用磷素基因型的筛选[J]. 中国农学通报,2004,20(5):126-129. (Li Z G,Xie F T, Song S H . The selection of high phosphorus using efficient soybean genotype[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2004,20(5): 126-129.)

[10] 邹琦. 植物生理实验指导[M]. 北京:中国农业出版社,2000: 97-99. (Zou Q. Guidance of plant physiology experiment[M] . Beijing:Agricultural Press,2000:97-99.)

[11] 朱广廉. 植物生理学实验[M]. 北京:北京大学出版社,1990: 229-232. (Zhu G L. Plant physiology experiment[M] . Beijing: Beijing University Press,1990:229-232.)

[12] 张宪政. 作物生理研究法[M]. 北京:农业出版社,1992:210-212. (Zhang X Z. Grop physiology research method [M] . Beijing: Agricultural Press,1992:210-212.)

[13] 曾韶西,王以柔,刘鸿先. 低温光照下与黄瓜子叶片叶绿素降低有关的酶促反应[J]. 植物生理与分子生学学报,1991, (17):177-182. (Zeng S X,Wang Y R,Liu H X. Some enzymatic reactions related to chlorophyll degradation in cucumber cotyledons under chilling in the light[J]. Acta Photophysiologica Sinica, 1991,(17):177-182.)

[14] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社,2002:134-135. (Li H S. Principle and technology of plant physiology and biochemistry experiment[M]. Beijing:High Education Press of China,2002:134-135.)

[15] 陈少裕. 膜脂过氧化对植物细胞的伤害[J]. 植物生理学通讯, 1991 ,27 (2):84-90. (Chen S Y. Injure of plasma membrane oxidation for plant cell[J]. Plant Physiology Communication,1991,27 (2):84-90.)

[16] 万美亮,邝炎华. 甘蔗耐低磷基因型的筛选及其部分生理特征的研究[J] . 华南农业大学学报,1999 ,20 (1):45 - 50 . (Wan M L,Kuang Y H. Studies on screening for low phosphorus tolerating genotypes and some relative physiological traits of sugarcane [J]. Journal of South China Agricultural University, 1999 ,20 (1):45-50.)

[17] 李锋,李木英,潘晓华,等. 不同水稻品种幼苗适应低磷胁迫的根系生理生化特性[J]. 中国水稻科学,2004 ,18 (1):48-52. (Li F,Li M Y,Pan X H,et al. Biochemical and physiological characteristics in seedlings roots of different rice cultivars under low-phosphorus stress[J]. Chinese Journal of Rice Science,2004,18 (1) :48-52.)