

文章编号 :1003-8701(2011)04-0012-06

脯氨酸含量与玉米耐盐碱鉴定

张春宵¹ 杨书华^{1,2} 刘文国^{3*} 李晓辉^{1*}

(1. 吉林省农业科学院生物技术研究中心, 长春 130033; 2. 东北农业大学农学院, 哈尔滨 150030;
3. 吉林省农业科学院玉米研究所, 吉林 公主岭 136100)

摘要: 渗透调节能力是植物抗逆性的最基本特征之一。作为一种重要的渗透调节物质, 本文概要介绍了脯氨酸在植物体内的自然分布、生物合成和代谢途径、累积机理、其累积与植物的渗透调节的关系、累积的生理作用以及脯氨酸在玉米耐盐碱种质筛选中的应用等。

关键词: 脯氨酸; 玉米; 盐碱胁迫

中图分类号: S513.01

文献标识码: A

Identification of Proline Content and Salt-alkali Tolerance of Maize

ZHANG Chun-xiao¹, YANG Shu-hua^{1,2}, LIU Wen-guo^{3*}, LI Xiao-hui^{1*}

(1. Center of Biotechnology Research, Academy of Agricultural Sciences of Jilin Province, Changchun 130033; 2. College of Agronomy, Northeast Agricultural University, Harbin 150030; 3. Maize Research Institute, Academy of Agricultural Sciences of Jilin Province, Gongzhuling 136100, China)

Abstract: Osmotic regulation ability is an essential character for plants to stress tolerance. As an important osmotic regulation substance, proline was discussed in the paper, which include its natural distribution, biosynthesis and metabolize pathway, accumulated mechanism, the relationship between proline accumulation and osmotic regulation, physiological function of proline accumulation in plants, as well as its usage in screening maize germplasms with salt-alkali tolerance.

Keywords: Proline; Maize; Saline-alkali stress

大量的研究表明, 无论是干旱、盐碱胁迫, 它对植物造成一个共同的影响就是植物细胞的水分亏缺和渗透胁迫。在这种胁迫条件下, 植物细胞主动形成并积累一定量小分子物质 (包括从外界吸收的无机离子和在细胞内合成的小分子有机物), 提高溶质浓度, 调节胞内渗透势, 使其在低渗透生境中仍能从外界吸收水分, 保证植物正常的生长和发育。人们把这种现象称为渗透调节 (Osmotic regulation)^[1]。作为目前所知分布最广 (动

物、植物、真菌、藻类中都有脯氨酸的累积) 的渗透调节物质, 脯氨酸 (N-Acetyl-L-proline) 在积累到很高的浓度时, 对细胞也是无毒害的, 所以又称之为相容性溶质, 其在植物渗透调节中起着非常重要的作用。本文概要介绍了脯氨酸在植物体内的自然分布、生物合成和代谢途径、累积机理、其累积与植物的渗透调节的关系、累积的生理作用以及脯氨酸在玉米耐盐碱种质筛选中的应用等。

1 植物体内脯氨酸的自然分布

脯氨酸是可溶性渗透物质, 中性 pH 条件下不带电, 在水中溶解度较高, 高浓度的脯氨酸对大分子与溶剂的相互作用没有或仅有很小的影响。脯氨酸在植物发育中起重要作用, 游离脯氨酸的累积量与植物的发育阶段、器官的类型有关^[2], 一般光合器官和生殖器官高于其他部位。游离脯氨酸的分配对植物的自我保护起着重要的作用, 各

收稿日期: 2011-01-04

基金项目: 2007 年吉林省科技厅省长基金项目 (20076016), 2009 年农业部转基因重大专项 (2009ZX08003-018B)

作者简介: 张春宵 (1984-), 男, 研究实习员, 硕士, 从事玉米耐盐碱机理研究和种质资源鉴定。

通讯作者: 李晓辉, 男, 博士, 副研究员, E-mail: lixiaohui2002lix@163.com

刘文国, 男, 研究员, E-mail: Liuwenguo168@163.com

组织中脯氨酸含量的多少,直接关系到其抗逆性的强弱。陈托兄等^[3]研究发现,抗盐植物中游离脯氨酸多集中于代谢旺盛的光合器官和生殖器官,其脯氨酸的含量是其他部位的数倍到数十倍,在盐胁迫下植物优先保护上述器官。余光辉等^[4]研究证明,在水分胁迫下,假俭草(*Eremochlo ophiuroides*)叶片中脯氨酸的含量高于茎部和根部,这体现了叶片的“代谢源”地位。通常认为,脯氨酸大多在植物的根中合成,而产物大部分被运输到地上部分^[5]。根部作为水分胁迫最敏感的部位,在水分胁迫下,其脯氨酸的合成不足以满足其对渗透胁迫的需要,其积累的脯氨酸有可能是由叶片通过维管束运输到根部以应对渗透胁迫,Verslues和 Ueda 等^[6-10]都支持这种推论。

2 植物体内脯氨酸的生物合成和代谢途径

2.1 植物体内脯氨酸的生物合成

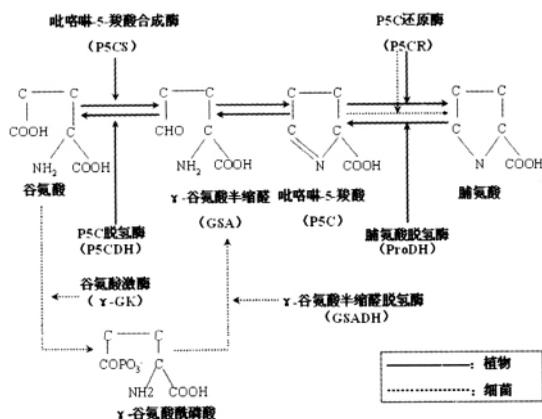


图1 细菌脯氨酸合成途径及植物脯氨酸合成和代谢途径图解

植物体内的脯氨酸合成、累积及代谢是一个受非生物胁迫和细胞内脯氨酸浓度调控的生理生化过程。已证明植物体内存在2条脯氨酸合成途径(图1),根据起始氨基酸命名为谷氨酸(Glu)途径和鸟氨酸(Orn)途径,2条途径因植物种类和生长期不同而各自起着重要作用。从整体来说,在个体发育的早期阶段,异养型营养占优势,鸟氨酸途径占主导地位,而谷氨酸作为脯氨酸合成的起始底物显然存在于个体发育的整个阶段。由于脯氨酸合成与植物体内的氮素水平有关,在渗透胁迫条件和低氮条件下谷氨酸途径占主导地位,而在非胁迫条件及高氮条件下鸟氨酸又居于主导地位^[11]。

谷氨酸途径:谷氨酸通过吡咯啉-5-羧酸合成酶(Δ^1 -pyrroline-5-carboxylate synthetase,

P5CS)和吡咯啉-5-羧酸还原酶(Δ^1 -pyrroline-5-carboxylate reductase, P5CR)两个关键酶先后两次催化还原反应完成的,其间通过两个中间产物-谷氨酰半缩醛(GSA)和吡咯啉-5-羧酸(P5C)。

鸟氨酸途径:鸟氨酸是在鸟氨酸 δ -氨基转移酶(ornithine-oxo-acid trans-aminase, δ -OAT)的作用下,发生转氨反应,丢失 δ -氨基基团,生成谷氨酸半醛(GSA),后通过谷氨酸途径生成脯氨酸^[12]。

2.2 植物体内脯氨酸的代谢途径

脯氨酸降解过程基本是合成途径的逆转。渗透胁迫下脯氨酸的分解通常被抑制,一旦胁迫解除,脯氨酸首先在线粒体中被脯氨酸脱氢酶(PDH)氧化成吡咯啉-5-羧酸(P5C),P5C可在吡咯啉-5-羧酸脱氢酶(P5CDH)的作用下生成谷氨酸,PDH和P5CDH是高等植物脯氨酸降解成谷氨酸的关键酶,PDH结合于线粒体内膜。

总之,胁迫条件下植物在胞质中主要依靠谷氨酸途径合成并积累脯氨酸,胁迫解除后脯氨酸在线粒体中由脯氨酸脱氢酶催化降解为谷氨酸,这种代谢的区室化分布避免了物质的无效循环。

3 胁迫条件下脯氨酸的累积机理

无论是哪种逆境,植物体内均积累脯氨酸,尤其是高盐和干旱胁迫,可比原始含量增加几十倍到几百倍^[1]。王玮等^[13]研究表明,玉米植株在严重水分胁迫下,随着胁迫时间的延长,脯氨酸含量及其对渗透调节的贡献一直在增加,脯氨酸积累对提高植物的抗逆性具有重要意义。在胁迫条件下,脯氨酸累积主要是通过3种不同的途径实现的,即效应细胞的从头合成、脯氨酸降解过程的降低、脯氨酸特异转移系统的参与,实现脯氨酸“源”(效应细胞)到“库”(靶细胞)的分配^[14]。在胁迫条件下,脯氨酸的累积机制,一般认为是激活了脯氨酸合成酶基因的表达,而抑制了脯氨酸降解酶基因的转录活性^[15]。

3.1 脯氨酸的累积与其合成有关

植物体内脯氨酸合成在细胞质中完成,有谷氨酸途径和鸟氨酸途径。其中谷氨酸途径在渗透胁迫条件下占主要地位,植物体内脯氨酸合成受几种机制调控。P5CS是脯氨酸合成的限制酶,P5CS反馈调节在控制植物处于正常和胁迫条件下脯氨酸的水平中起着重要作用。在胁迫条件下,尽管P5CS受到脯氨酸的反馈抑制^[16],但由于

P5CS 基因的超强表达^[14],植物仍能持续合成脯氨酸并建造脯氨酸库。同时,也有研究表明,在渗透胁迫引起的脯氨酸积累中,P5CS 的基因表达可能比 P5CR 基因起着更为重要的作用^[17]。

3.2 脯氨酸累积与降解的关系

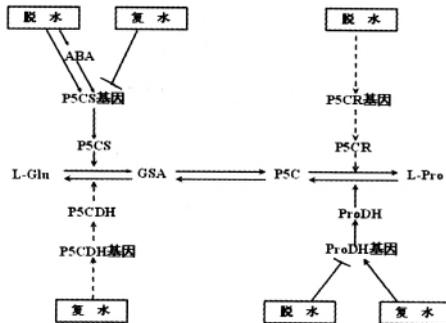


图 2 拟南芥在脱水和复水过程中脯氨酸合成酶基因(P5CS)和降解酶基因(ProDH)相互交替活化与钝化的动态

→表示启动;-|表示抑制;实箭头表示正常情况;
虚箭头表示非正常出现的情况

降解过程是指在线粒体中被脯氨酸脱氢酶 PDH 氧化成 P5C,后者在 P5CDH 作用下生成谷氨酸。一般认为,PDH 是脯氨酸降解的关键酶,在渗透胁迫下,脯氨酸的氧化降解过程受到抑制,PDH 转录活性下降,导致脯氨酸含量增加。而胁迫解除后,此过程被激活,脯氨酸降解,含量下降。

研究指出,干旱、盐渍化和冷胁迫都可以引发脯氨酸的合成与积累,并揭示它是在 ABA 的介导下产生的,即这些逆境首先引起 ABA 的合成和积累,然后经 ABA 的介导合成脯氨酸^[18]。通过应用拟南芥的 ABA 缺失和 ABA 不敏感突变体的进一步研究揭示,P5CS 基因在水胁迫下的表达存在依赖 ABA 和不依赖于 ABA 的两种不同的途径。

上述结果说明,在渗透胁迫过程中,脯氨酸的积累是作为其生物合成的活化及其降解代谢的钝化两方面作用的结果;而在复水/解除渗透胁迫的植物体中,脯氨酸含量的迅速减少,则是前两者相反过程的结果,即是生物合成被钝化和降解被活化的结果。它的实质是反映线粒体的代谢功能及其酶基因的表达对脱水和复水这两个过程的适应性变化,并反映它在转录水平上的调节^[19]。

4 脯氨酸累积与植物的渗透调节

在胁迫条件下,由于外界水势低,水不仅不能进入细胞,而且还导致细胞脱水,因而造成渗透胁迫。

渗透调节剂的作用,是通过它们在细胞内的积累,将细胞内的水势降低到细胞外的水势之下,从而使外界水能够进入细胞。

脯氨酸主要分布于细胞质中,在干旱和盐渍化逆境中的植物会发生脯氨酸等相容性溶质的迅速合成与积累,它们的高浓度对细胞质不会产生毒害作用。但是多年来,脯氨酸累积与植物耐渗透胁迫的关系一直有争议,争论的焦点在于脯氨酸累积是由于渗透胁迫引起植物损伤的征兆,还是植物耐渗透胁迫的原因。有人认为脯氨酸累积是逆境下植物生存的一种适应性,不具有维持生长的作用,甚至认为,脯氨酸并不具有适应性,仅仅是胁迫下植物伤害的病理结果,与胁迫抗性无关^[20]。但是脯氨酸累积与植物耐渗透胁迫之间存在着明显正相关的观点已被大量研究证实^[11,21]。对于脯氨酸累积提高植物耐渗透胁迫主要有下面两种推测:(1)脯氨酸的合成主要在线粒体中进行,主要分布于线粒体及细胞基质中,从而提高细胞质的渗透压,平衡细胞质与液泡间的渗透压差^[11,22-23],使渗透胁迫下的叶绿体和线粒体仍能维持较好的水分状况,保证光合作用和呼吸作用的运行。(2)在盐生和抗盐植物中,脯氨酸的积累可能促使 Na^+ 从细胞质向液泡中转移,它们可能通过调节液泡离子载体蛋白和液泡膜 H^+ 泵 V-ATPase 活性起作用^[19]。

5 脯氨酸累积的生理作用

5.1 提高负荷蛋白和膜结构的稳定性

脯氨酸对有氧呼吸和能量代谢过程有很好的保护作用,能保护柠檬酸脱氢酶、苹果酸脱氢酶、琥珀酸脱氢酶、延胡索酸脱氢酶和细胞色素氧化酶的活性;它们作为分子伴侣对酶在逆境中的变构起修饰作用;并保护线粒体复合体 II 的电子传递^[24]。脯氨酸能保护膜结构在高温和低温的完整性;并能解除 Na^+ 对酶活性的毒害^[25-26]。

5.2 保护叶绿体光合系统 II(PSII)的活性

脯氨酸能够有效地保护和修补叶绿体光合系统 II(PSII)在逆境中的伤害^[27-29];并能稳定 Rubisco 酶的构型,保护它在逆境(如盐胁迫)中不被钝化^[30]。

5.3 降低膜脂过氧化

脯氨酸对防御膜脂过氧化起着重要的作用。首先,减少了活性氧的产生,其次还能充当活性氧的清除剂^[31-32]。从这两个方面明显降低了逆境胁迫中活性氧对膜脂过氧化的危害,也使膜脂过氧化产物 MDA 显著降低^[33]。

6 脯氨酸在玉米耐盐碱种质筛选中的应用

玉米在我国农业生产中占有举足轻重的地位。玉米虽然是耐盐碱能力(承受全部或部分盐碱胁迫而不致引起或较小引起伤害的能力)较差的农作物,但它的生长季节正是降雨量丰富的夏季,苗期正遇雨季。由于雨水能够压低盐层,冲淡盐分浓度,为保证基本苗和形成一定产量提供了有利条件,而保苗又是耐盐栽培最重要环节。所以,与其他农作物相比,具有一定耐盐碱能力的玉米,可以在严重的盐碱地上生长并形成较高产量。因此,深入研究玉米耐盐碱生理机制,构建耐盐碱鉴定技术体系,筛选耐盐碱玉米种质,充分利用盐碱化土地,大幅度地提高玉米产量意义重大。

本课题组以郑单 958 及其双亲自交系为试材,在不同盐碱胁迫浓度下进行种子萌发试验,进行发芽率、相对电导率、脯氨酸含量、SOD、MDA 含量等生理生化指标测定,基于样品易于提取、测定流程简单、测定结果重现性好、测定指标与盐碱性状相关性好等原则,筛选确立用于耐盐碱玉米种质筛选鉴定的适宜盐碱浓度和适宜的生理生化指标,构建玉米耐盐碱筛选技术体系。利用已构建玉米耐盐碱筛选技术体系对我国骨干玉米自交系和吉林省主推玉米杂交种进行筛选,同时利用大田生产对已构建的玉米耐盐碱筛选技术体系进行

验证,最终获得一批耐盐碱玉米自交系和杂交种。

6.1 不同盐碱胁迫条件下玉米杂交种郑单 958 及其双亲自交系脯氨酸含量的变化

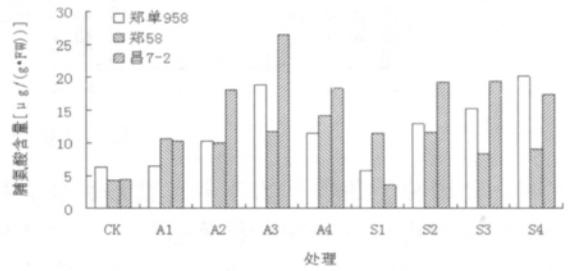


图 3 盐碱胁迫对玉米幼苗 Pro 含量的影响

本课题组对玉米杂交种郑单 958 及其双亲自交系在 4 个浓度水平的 Na_2CO_3 溶液(12.5、25、37.5、50 mmol/L)胁迫下和 4 个浓度水平的 NaCl 溶液(50、100、150、200 mmol/L)胁迫下进行脯氨酸含量测定^[34]结果表明(图 3)除 50 mmol/L NaCl 胁迫下各材料脯氨酸含量与 CK(清水)变化不大外,其它各处理后玉米幼苗脯氨酸含量均比 CK 有显著提高,且随着胁迫程度的增加而增加,但在(50 mmol/L Na_2CO_3)胁迫下脯氨酸含量有所下降,高 Na^+ (200 mmol/L NaCl)胁迫下脯氨酸含量不再增高,这可能与玉米本身耐盐碱能力较低有关,过高 pH 和过高 Na^+ 浓度已经远远超出了脯氨酸的调节能力范围, P5CS 和 PDH 都受到抑制,导致脯氨酸含量不再增加。方差分析(表 1)可知,除 12.5 mmol/L Na_2CO_3 和 50 mmol/L NaCl 处理下

表 1 盐碱胁迫下玉米幼苗 Pro 含量的新复极差比较

Na_2CO_3 处理下玉米叶片 Pro 含量				NaCl 处理下玉米叶片 Pro 含量			
浓度(mmol/L)	含量[$\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{FW})$]	显著水平		浓度(mmol/L)	含量[$\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{FW})$]	显著水平	
		5%	1%			5%	1%
37.5	19.03	a	A	200	15.53	a	A
50	14.62	ab	AB	100	14.54	ab	A
25	12.74	ab	AB	150	14.34	ab	A
12.5	9.09	bc	AB	50	6.88	bc	B
CK	5.02	c	B	CK	5.02	c	B

脯氨酸含量与对照差异不显著外,其它各浓度胁迫下的玉米材料的脯氨酸含量与对照均存在显著差异。

6.2 盐碱胁迫下 69 份玉米自交系和 31 份玉米杂交种脯氨酸含量的比较分析

本课题组基于郑单 958 及其双亲,从不同胁迫水平中最终筛选确定了适宜的盐碱胁迫浓度(25 mmol/L 的 Na_2CO_3 和 100 mmol/L 的 NaCl),并在此胁迫条件下对 69 份玉米自交系和 31 份玉米杂交种^[35]脯氨酸含量进行了测定(图 4,图 5)。

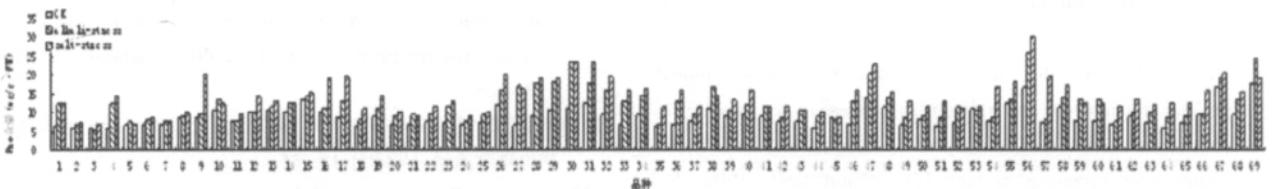


图 4 盐碱胁迫对玉米自交系幼苗 Pro 含量的影响

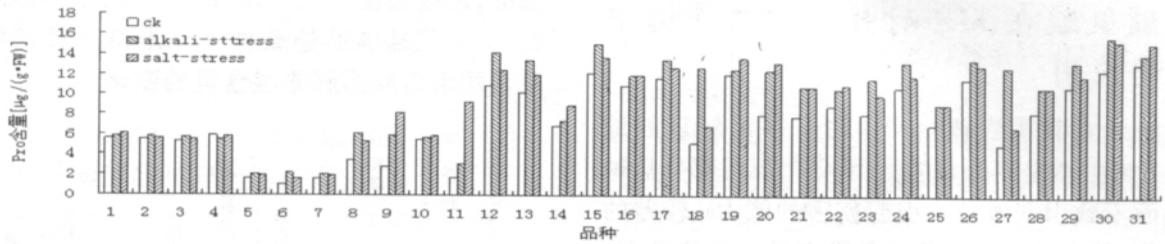


图5 盐碱胁迫对玉米杂交种幼苗 Pro 含量的影响

结果表明：盐碱胁迫条件下的玉米自交系和杂交种的脯氨酸含量均与对照存在显著差异，这种差异为耐盐碱种质的筛选提供了较可靠的试验依据。

7 结 语

综上所述，脯氨酸是植物抗逆的重要调节物质，能够通过多种生理机制提高植物的抗逆性，其在农作物体内的含量是反应植物耐性的重要指标之一。然而，干旱、盐碱等非生物胁迫对农作物的生长发育的影响极其复杂，牵涉到一系列的生理生化反应，仅凭脯氨酸含量不能准确地反映植物的干旱、盐碱耐性，只有通过多指标测定与大田生产相结合的综合评价方法才能够准确地鉴定作物的耐性。

参考文献：

- [1] 潘瑞炽,董愚得. 植物生理学(第三版)[M]. 北京:高等教育出版社,2001:326-328.
- [2] Maggio A, Miyazaki S, Veronese P, et al. Does proline accumulation play an active role in stress-induced growth reduction[J]. Plant J, 2002, 31(6): 699.
- [3] 陈托兄,张金林,陆妮,等. 不同类型抗盐植物整株水平游离脯氨酸的分配[J]. 草业学报,2006,15(1):36-41.
- [4] 余光辉. 水分胁迫下假俭草脯氨酸累积的 ABA, Ca²⁺ 调节[D]. 广州:华南师范大学,2003.
- [5] Armengaud P, Thiery L, Buhat N, et al. Transcriptional regulation of proline biosynthesis in *Medicago truncatula* reveals developmental and environmental specific features [J]. Physiol Plant, 2004(120): 442-450.
- [6] Nanjo T, Kobayashi M, Yoshida Y, et al. Biological functions of proline in morphogenesis and osmotolerance revealed in antisense transgenic *Arabidopsis thaliana* [J]. Plant J, 1999, 18(2): 185.
- [7] Girousse C, Bournoville R, Bonnemain J L. Water deficit-induced changes in concentrations in proline and some other amino acids in the phloem sap of alfalfa [J]. Plant Physiol, 1996(111): 109-113.
- [8] Rentsch D, Hirner B, Schmelzer E, et al. Salt stress-induced proline transporters and salt stress-repressed broad specific amino acid permeases identified by suppression of a yeast amino acid targeting mutant [J]. Plant Cell, 1996 (8):

1437-1446.

- [9] Verslues P E, Sharp R E. Proline Accumulation in Maize (*Zea mays* L.) Primary roots at low water potentials. Metabolic source of increased proline deposition in the elongation Zone[J]. Plant Physiol, 1999(119): 1349.
- [10] Ueda A, Shiwm M, Sanmiya K, et al. Functional Analysis of Salt-Inducible proline transporter of Barley Roots[J]. Plant and Cell Physiology, 2001(42): 1282-1289.
- [11] Delauney A J, Hu C A A, Kishor P B K, et al. Cloning of ornithine aminotransferase cDNA from *Vigna* acutifolia by trans-complementation in *Escherichia coli* and regulation of proline biosynthesis[J]. J Biol Chem 1993(268): 18673-18678.
- [12] Song S Q, Lei Y B, Tian X R. Proline Metabolism and Cross-Tolerance to Salinity and Heat Stress in Germinating Wheat Seeds [J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2005, 52(6): 793-800.
- [13] 王玮,李德全,李春香,等. 水分胁迫对抗旱性不同的玉米品种根、叶渗透调节能力及渗透调节物质的影响 [J]. 华北农学报, 2000, 15(增刊) 8-15.
- [14] 李玲,余光辉,曾富华. 水分胁迫下植物脯氨酸累积的分子机理[J]. 华南师范大学学报(自然科学版) 2003(1) 126-134.
- [15] Peng Z, Liu Q, Uerma D P S. Reciprocal regulation of pyrroline-5-carboxylate synthetase and proline dehydrogenase genes controls proline levels during and after osmotic stress in plants[J]. At Gen Genet, 1996(253): 334-341.
- [16] Kishor P B K, Hong Z, Mia G H, et al. Overexpression of proline-5-carboxylate synthetase increases proline production and confers osmo-tolerance in transgenic plants[J]. Plant Physiol, 1995(108): 1387-1394.
- [17] Yoshida Y, Kiyosue T, Nakashima K, et al. Regulation of levels of proline as an osmolyte in plant under water stress [J]. Plant Cell Physiol. 1997(38): 1095-1102.
- [18] Hare P D, Cress W A, Van Staden J. Proline synthesis and degradation: a model system for elucidating stress-related signal transduction[J]. J Exp Bot, 1999(50): 413-434.
- [19] 简令成,王红. 逆境植物细胞生物学[M]. 北京:科学出版社,2009:240-251.
- [20] Tully R.E., Hanson A.D., Nelsen C.H.E. Proline accumulation in water-stressed barley leaves in relation to translocation and the nitrogen-budget [J]. Plant Physiol, 1979(63): 518-523.
- [21] 汤章城. 逆境条件下植物脯氨酸的累积及其可能的意义[J]. 植物生理学通讯, 1984(1): 15-21.
- [22] Glenn E P, Brown J J. Salt tolerance and crop potential of halophytes[J]. Crit Rev Plant Sci., 1999(18): 227-255.

- [23] Leigh R A, Ahmad N, Wyn Jones RG. Assessment of glycinebetaine and praline compartmentation by analysis of isolated beet vacuoles[J]. *Planta*, 1981(153): 34-41 .
- [24] Chen T H, Murata N. Enhancement of tolerance of abiotic stress by metabolic engineering of betaines and other compatible solutes[J]. *Curr Opin Biotechnol.*, 2002(5): 250-257 .
- [25] Wang W, Vinocur B, Altman A. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: towards genetic engineering for stress tolerance[J]. *Planta*, 2003(218): 1-14 .
- [26] Tester M, Davenport R. Na⁺Tolerance and Na⁺ Transport in Higher Plants[J]. *Ann Bot.*, 2003(91): 503-527 .
- [27] 刘凤华, 郭岩, 古冬梅, 等. 转甜菜碱醛脱氢酶基因植物的耐盐性研究[J]. *遗传学报*, 1997(24): 54-58 .
- [28] Alia, Kondo Y, Sakamoto A, et al. Enhancement of the tolerance to light stress of transgenic *Arabidopsis* plants that express the *codA* gene for a bacterial choline oxidase [J]. *Plant Mol Biol.*, 1999(40): 279-288 .
- [29] Olmstrom K, Somersalo S, Mandal A, et al. Improved tolerance to salinity and low temperature in transgenic tobacco producing glycine betaine [J]. *J Exp Bot.*, 2000 (51): 177-185 .
- [30] Park E J, Jeknic Z, Sakamoto A, et al. Genetic engineering of glycinebetaine synthesis in tomato protects seeds, plants, and flowers from chilling damage[J]. *Plant J.*, 2004 (40): 474-487 .
- [31] Hayashi H, Alia, Mustardy L, et al. Transformation of *Arabidopsis thaliana* with the *codA* gene for choline oxidase: accumulation of glycinebetaine and enhanced tolerance to salt and cold stress[J]. *Plant J.*, 1997(12): 133-142 .
- [32] Smirnoff N, Cumbes Q J. Hydroxyl radical scavenging activity of compatible solutes[J]. *Phytochemistry*, 1989(28): 1057-1060 .
- [33] 蒋明义, 郭绍川. 氧化胁迫下稻苗体内积累的脯氨酸的抗氧化作用[J]. *植物生理学报*, 1997(23): 347-352 .
- [34] 张春宵, 刘晓鑫, 郝东云, 等. 玉米杂交种郑单 958 及其双亲自交系耐盐碱性分析[J]. *玉米科学*, 2009, 17(6): 39-44 .
- [35] 张春宵. 玉米耐盐碱鉴定技术体系构建与耐盐碱种质筛选[D]. 东北农业大学, 2010 .

(上接第 11 页)

3 讨 论

通过对 9 个 XGY 高油玉米自交系形态性状的初步鉴定表明, 9 份材料中 1、3、6、7 与 3 个高油玉米自交系的形态性状相差不大, 并且综合产量、品质性状来看, 基本上符合高油玉米自交系的要求, 可以直接与其它高油自交系或普通玉米自交系组配杂交种, 把高产、优良的特性组合到 F1 代中去。我们已做了 30 多个组合, 进入下一阶段试验鉴定。而其它的 5 个高油玉米自交系的形态性状与常用的 3 个高油玉米自交系形态性状比较生育期大体一致, 基本上能适应当地的生态环境, 但高油玉米自交系突出表现为子粒品质好, 叶片

保绿性强, 可利用部分材料改良它们的品质, 由于品质性状基本明确, 株高、穗位、生育期和常用的 3 个高油玉米自交系相差不大, 甚至有的还优于它们, 不良的就是大部分的 XGY 高油玉米自交系穗部性状没有常用的 3 个高油玉米自交系的穗部性状优良, 有待以后进一步改良。

参考文献:

- [1] 宋同明. 迎接高油玉米新世纪 [A]. 玉米遗传育种国际学术讨论会论文集[C]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 20-30 .
- [2] 宋同明. 高油玉米种质资源的快速创新 [J]. *玉米科学*, 2001, 9(4): 3-5 .
- [3] 祝丽英, 池书敏, 刘志增, 等. 甲基磺酸乙酯(EMS)在创造玉米新种质中的应用[J]. *玉米科学*, 2001, 9(3): 14-17 .
- [4] 郭平毅. 生物统计学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2006 .