

# 盐胁迫对不同耐盐性枣树品种根系和叶片中多胺含量及多胺氧化酶活性的影响

徐呈祥<sup>1,2</sup>, 马艳萍<sup>1</sup>, 徐锡增<sup>2\*</sup>

(1. 肇庆学院生命科学学院, 广东 肇庆 526061; 2. 南京林业大学森林资源与环境学院, 南京 210037)

**摘要:** 为探讨枣(*Ziziphus jujuba* Mill.)树中多胺及多胺氧化酶活性与其耐盐性的关系,对耐盐性强的‘金丝小枣’和耐盐性弱的‘冬枣’2年生苗中不同状态和种类的多胺和多胺氧化酶活性进行了研究。结果表明,在120 mmol L<sup>-1</sup> NaCl盐胁迫下,枣树根系和叶片中的多胺含量升高,耐盐性强的品种的上升幅度显著大于耐盐性弱的品种;随着盐胁迫时间的延长,根系和叶片中多胺含量逐渐降低,耐盐性弱的品种的降低幅度显著大于耐盐性强的品种,叶中的多胺含量的降低幅度大于根中的,结合态多胺的降低幅度大于游离态多胺的,精胺和亚精胺的降低幅度大于腐胺的;两个品种根系和叶片中多胺氧化酶(PAO)活性均明显高于二胺氧化酶(DAO)活性,盐胁迫下耐盐性弱的品种酶活性增强幅度显著大于耐盐性强的品种。这些说明,枣树品种的耐盐性与其内源多胺的组成、含量有关,多胺氧化酶的种类与活性对盐胁迫的响应也密切相关,多胺积累有利于提高枣树品种的耐盐性。

**关键词:** ‘金丝小枣’; ‘冬枣’; 耐盐性; 多胺; 多胺氧化酶; 二胺氧化酶

doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2013.04.002

## Polyamine Contents and Polyamine Oxidase Activities in Roots and Leaves of Two Jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) Cultivars with Contrary Salt Tolerance under Salt Stress

XU Cheng-xiang<sup>1,2</sup>, MA Yan-ping<sup>1</sup>, XU Xi-zeng<sup>2\*</sup>

(1. College of Life sciences, Zhaoqing University, Zhaoqing 526061, China; 2. College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

**Abstract:** In order to investigate the relationship between salt tolerances of jujube cultivar and polyamine and polyamine oxidase, the polyamine contents and polyamine oxidase activities in two-year-old plants of ‘Jingsixiaozao’ with strong salt tolerance and ‘Dongzao’ with weak salt tolerance were studied. The results showed that under 120 mmol L<sup>-1</sup> NaCl salt stress, the polyamine contents in roots and leaves of two jujube cultivars enhanced, and increase degree of ‘Jingsixiaozao’ was significantly larger than that of ‘Dongzao’. As the extension of salt stress days, polyamine contents of roots and leaves decreased, and the decrease degree was in the order as: ‘Dongzao’ > ‘Jingsixiaozao’, leaves > roots, conjugated polyamines > free polyamines, spermine > spermidine, respectively. The activities of polyamine oxidases (PAO) were higher than that of diamine oxidases (DAO) in roots and leaves of the two jujube cultivars, the increase degree of weak salt tolerant cultivar ‘Dongzao’ was much greater than that of strong salt tolerant cultivar ‘Jingsixiaozao’ under salt stress. These indicate that salt tolerance of jujube cultivar has close correlation with composition and content of endogenous polyamines, and activity of polyamine

收稿日期: 2012-12-13

接受日期: 2013-03-21

基金项目: 肇庆学院第四轮重点建设学科(植物学)专项资金资助

作者简介: 徐呈祥(1963~), 教授, 博士, 从事植物生理学教学与研究。E-mail: xucx2005@sina.com

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xuxizeng@nifu.edu.com

oxidases. So, It is suggested that polyamine accumulation is beneficial to enhance salt tolerance of jujube cultivar.

**Key words:** ‘Jingsixiaozao’; ‘Dongzao’; Salt tolerance; Polyamines; Polyamine oxidases (PAO); Diamine oxidases (DAO)

植物体内的多胺(Polyamines, PAs)主要有腐胺(Putrescine, Put)、亚精胺(Spermidine, Spd)和精胺(Spermine, Spm) 3种,它们主要以游离态多胺(Free polyamines, F-PAs)、高氯酸(Perchloric acid, PCA)可溶性结合态多胺(PCA soluble conjugated polyamines, PSC-PAs)和高氯酸不可溶性结合态多胺(PCA insoluble conjugated polyamines, PISC-PAs) 3种状态存在<sup>[1]</sup>。多胺具有多聚阳离子特性,能与带负电荷的膜磷脂及酶蛋白结合,在渗透调节、蛋白质修饰、稳定膜结构等方面具有重要功能,被认为是一类与植物逆境生理有密切关系的物质<sup>[2-3]</sup>。然而,这些研究多以草本植物为试材,生理机制的普遍性还有待更多的实验验证<sup>[4-5]</sup>。枣(*Ziziphus jujuba* Mill.)是中国重要果树,栽培区域广阔,不同品种的耐盐性差异很大<sup>[6]</sup>。我们之前的研究表明,质膜、液胞膜和类囊体膜结合态多胺参与了枣树品种耐盐性表达,参与调节盐胁迫下枣叶细胞中溶质的跨膜运输<sup>[7]</sup>;外源多胺能提高盐胁迫下枣叶类囊体膜结合态多胺水平,显著抑制盐胁迫下枣叶类囊体膜 H<sup>+</sup>-ATPase 活性的降低,增强枣叶类囊体膜对盐离子进出的调控,使盐胁迫下叶绿体中的离子稳定状态得到维护<sup>[8]</sup>。本文报道盐胁迫下耐盐性不同的枣树品种器官水平上不同状态和种类多胺的含量水平及多胺氧化酶活性的响应,为探究枣树耐盐性与其内源多胺的关系提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料和处理

试验用枣(*Ziziphus jujube*)苗为2年生的‘金丝小枣’(‘Jinsixiaozao’)和‘冬枣’(‘Dongzao’)嫁接苗,酸枣砧木(实生苗),引自山东省果树研究所,于距根颈50 cm处定干,3月中旬定植于塑料(PVC)盆中,每盆1株。塑料盆下部具孔,盆高28 cm,上口直径30 cm,下口直径22 cm,石英砂基质,盆底置托盘。塑料温室中避雨栽培,自然光照。以1/2 Hoagland 溶液浇灌栽培至当年6月底、生长正常时,进一步选择发育良好、大小一致的植株,于7月上旬进行盐胁迫。处理用盐源为NaCl,处理液

为1/2 Hoagland 溶液 + 120 mmol L<sup>-1</sup> NaCl;对照为不加NaCl的1/2 Hoagland 溶液。用0.05 mol L<sup>-1</sup> HNO<sub>3</sub>或KOH调整pH值至6.5。每品种、每处理(含对照)6株,3次重复,共计72株(盆)。视天气情况,处理液每1~2 d浇灌1次,每次每盆浇灌500 mL,每浇灌2次用自来水冲洗石英砂1次。于处理后0 d、3 d、6 d、9 d、15 d时取样分析根系和叶片中F-PAs含量,于处理30 d时取样分析根系和叶片中3种状态多胺及各自主要多胺种类的含量,3次重复。根系样品为呈白色、未木质化的根尖。

### 1.2 多胺含量测定

F-PAs含量的测定参照刘俊和刘友良方法<sup>[9]</sup>。PSC-PAs、PISC-PAs含量的测定参照Kotzabasis等<sup>[1]</sup>的方法。多胺总含量为F-PAs、PSC-PAs、PISC-PAs含量之和,各状态多胺总含量是各自Put、Spd和Spm含量之和。

### 1.3 多胺氧化酶活性测定

称取鲜样0.50 g,加入1.6 mL 100 mmol L<sup>-1</sup>的磷酸缓冲液(pH 6.5),冰浴研磨,匀浆液于10000 ×g离心20 min (4 °C),吸取上清液(酶及蛋白质粗提液)200 μL,加入100 μL过氧化物酶(250 U mL<sup>-1</sup>)、200 μL N,N-二甲基苯胺/4-氨基氨基吡啶显色液(每100 mL 100 mmol L<sup>-1</sup>的磷酸缓冲液中含25 μL N,N-二甲基苯胺、10 mg 4-氨基氨基吡啶)和2.5 mL 100 mmol L<sup>-1</sup>的磷酸缓冲液(pH 6.5),加入100 μL 20 mmol L<sup>-1</sup>的Put或Spd启动反应,25 °C下反应30 min,分别测定二胺氧化酶(Diamine oxidases, DAO, EC 1.4.3.6)活性或多胺氧化酶(Polyamine oxidases, PAO, EC 1.5.3.3)活性,以1 min内A<sub>555 nm</sub>变化0.01为1个酶活力单位(U)<sup>[9]</sup>。

### 1.4 蛋白质含量测定

采用Bradford的方法<sup>[10]</sup>,以牛血清白蛋白(BSA)为标准蛋白,3次重复。

### 1.5 数据分析

实验所得数据,用SPSS 10.0软件进行统计

分析。各处理间的差异性均进行显著性分析( $P < 0.05$ )。

## 2 结果和分析

### 2.1 盐胁迫对枣根系和叶片中不同状态多胺含量的影响

两个品种的多胺总含量水平相当,但叶片的多胺含量明显高于根系的,且均以 F-PAs 最高,其次是 PSC-PAs,含量最低的是 PISC-PAs,3 种状态多胺含量的比例大致为 5 : 3 : 2。与对照相比,120 mmol L<sup>-1</sup> 盐胁迫 30 d,两个品种根系和叶片

中的多胺总含量分别降低了 8.8% 和 12.2%,‘冬枣’的分别降低了 25.7% 和 27.7%;同时,3 种状态多胺含量的降低幅度也因品种和器官不同而有较大差异:在根中,‘金丝小枣’的多胺含量与对照均无显著差异,而‘冬枣’的 PISC-PAs 含量与对照无显著差异、F-PAs 和 PSC-PAs 含量显著低于对照;在叶中,‘金丝小枣’的 PSC-PAs 含量显著降低、F-PAs 和 PISC-PAs 含量与对照无显著差异,而‘冬枣’中的 3 种状态多胺的含量均显著低于对照。因此,盐胁迫下两个品种体内 3 种状态多胺含量的降低幅度为:叶片 > 根系、F-Pas > PSC-Pas > PISC-PAs,耐盐性弱的‘冬枣’的降低幅度明显大于耐盐性强的‘金丝小枣’(图 1)。

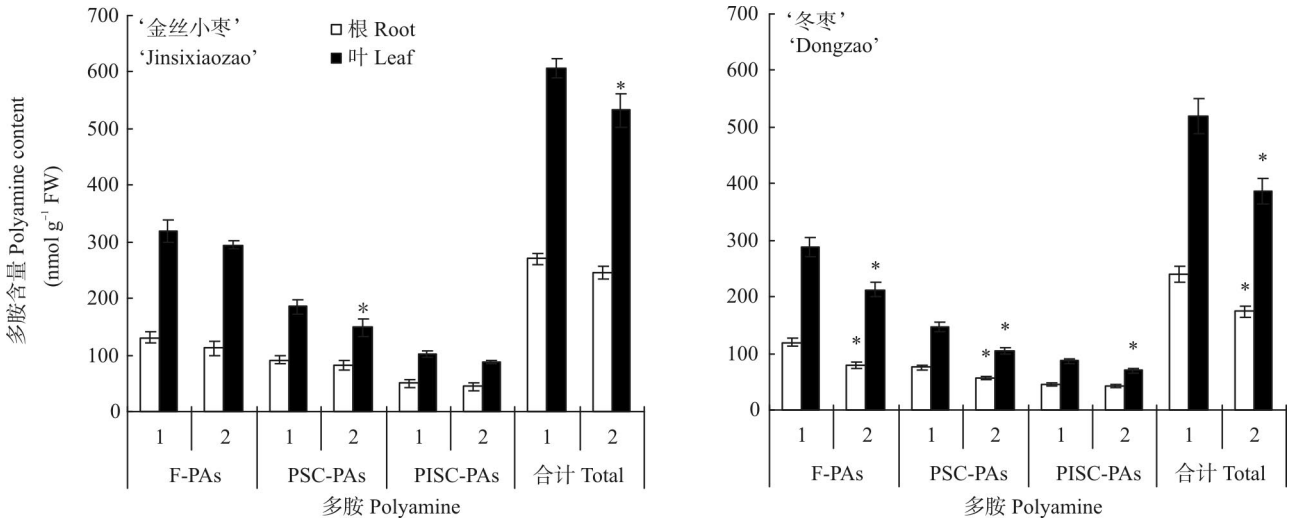


图 1 盐胁迫对枣树根系和叶片中多胺含量的影响。1. 对照; 2. 盐胁迫。\*:  $P < 0.05$ 。以下图表同。

Fig. 1 Effect of salt stress for 30 d on polyamine contents in roots and leaves of jujube cultivars. 1. Control; 2. Salt stress; \*:  $P < 0.05$ . The same is following Tables and Figures.

### 2.2 盐胁迫对枣根系和叶片中不同种类多胺含量的影响

参试的两个品种,无论盐胁迫与否,根系和叶片中的多胺均以 Put 含量为最高,其次为 Spd, Spm 含量最低, Spd 含量与 Spm 含量之和(Spd + Spm)仍明显低于 Put 含量(表 1、2)。

盐胁迫 30 d,两个品种根中 3 种状态的 Put 及总含量均降低,但‘金丝小枣’的与对照无显著差异,‘冬枣’的 F-Put 含量显著低于对照;在叶中,盐胁迫下‘金丝小枣’中 3 种状态的 Put 及其总含量均与对照无显著差异,且除 F-Put 含量降低外, PSC-Put 和 PISC-Put 及 Put 总含量均较对照升高,但‘冬枣’3 种状态的 Put 及总含量均降低,其中 F-Put 含

量显著低于对照。

盐胁迫下,两个品种根系和叶片中 Spd 含量均较对照降低,表现出比 Put 敏感的特性,且根系的响应比叶片更敏感,但‘金丝小枣’根中仅 PSC-Spd 含量显著降低、叶中 PSC-Spd 和 Spd 总含量显著低于对照,而‘冬枣’则是根中除 PISC-Spd 含量、叶中除 PSC-Spd 含量与对照无显著差异外,其余 2 种状态 Spd 含量及 Spd 总含量均显著低于对照,下降幅度达 41.1% ~ 71.6%。

盐胁迫下,两个品种根系和叶片中不同状态 Spm 含量均降低,下降幅度以叶片 > 根系、‘冬枣’ > ‘金丝小枣’。由表 1、表 2 可见,盐胁迫下,‘金丝小枣’和‘冬枣’根中 2 种结合态 Spm 含量均与对

表 1 盐胁迫对不同耐盐性枣树品种根系中多胺含量的影响

Table 1 Effect of salt stress for 30 d on polyamine contents in roots of jujube cultivars with different salt tolerance

品种 Cultivar	多胺 Polyamine	处理 Treatment	多胺 Polyamine (nmol g <sup>-1</sup> FW)			
			Put	Spd	Spm	Spd + Spm
‘金丝小枣’ ‘Jinsixiaozao’	F-PAs	对照 Control	98.5 ± 6.7	25.6 ± 5.2	6.1 ± 0.5	31.7 ± 4.5
		盐胁迫 Salt stress	89.0 ± 5.0	19.1 ± 2.4*	3.4 ± 0.8*	22.5 ± 2.7*
合计 Total	PSC-PAs	对照 Control	85.3 ± 0.4	5.5 ± 0.3	0.7 ± 0.2	6.1 ± 0.6
		盐胁迫 Salt stress	77.2 ± 4.1	4.5 ± 0.6	0.3 ± 0.2	4.8 ± 0.7
	PISC-PAs	对照 Control	36.3 ± 4.6	3.8 ± 0.1	9.4 ± 1.4	13.2 ± 2.5
		盐胁迫 Salt stress	33.9 ± 6.6	2.5 ± 0.1	7.8 ± 2.5	10.34 ± 2.4
合计 Total	对照 Control	217.1 ± 13.3	36.8 ± 1.8	16.2 ± 0.7	53.0 ± 2.5	
	盐胁迫 Salt stress	208.7 ± 11.6	30.1 ± 3.1*	11.4 ± 3.0*	41.5 ± 0.1*	
‘冬枣’ ‘Dongzao’	F-PAs	对照 Control	93.6 ± 1.7	20.1 ± 0.7	5.9 ± 1.7	26.1 ± 0.7
		盐胁迫 Salt stress	68.3 ± 6.5*	8.6 ± 0.7*	2.1 ± 0.5*	10.6 ± 1.1*
合计 Total	PSC-PAs	对照 Control	70.5 ± 1.5	8.5 ± 0.2	0.4 ± 0.1	8.5 ± 0.3
		盐胁迫 Salt stress	50.1 ± 2.1*	6.0 ± 1.1	0.1 ± 0.1	6.1 ± 1.2
	PISC-PAs	对照 Control	35.9 ± 2.7	4.6 ± 0.3	5.0 ± 0.7	9.6 ± 0.5
		盐胁迫 Salt stress	39.2 ± 4.2	0.3 ± 0.1*	3.4 ± 0.1	3.6 ± 0.3*
合计 Total	对照 Control	200.3 ± 6.6	29.2 ± 0.3	11.5 ± 0.8	40.6 ± 0.6	
	盐胁迫 Salt stress	152.4 ± 12.7*	16.9 ± 0.5*	5.5 ± 0.3*	22.4 ± 0.3*	

表 2 盐胁迫对不同耐盐性枣树品种叶片中多胺含量的影响

Table 2 Effect of salt stress for 30 d on polyamine contents in leaves of jujube cultivars with different salt tolerance

品种 Cultivar	多胺 Polyamine	处理 Treatment	多胺 Polyamine (nmol g <sup>-1</sup> FW)			
			Put	Spd	Spm	Spd + Spm
‘金丝小枣’ ‘Jinsixiaozao’	F-PAs	对照 Control	191.7 ± 12.2	102.5 ± 0.5	24.0 ± 1.1	126.6 ± 1.6
		盐胁迫 Salt stress	183.3 ± 13.8	90.6 ± 9.1	19.9 ± 2.4	110.4 ± 6.7
合计 Total	PSC-PAs	对照 Control	95.5 ± 8.1	81.9 ± 4.7	8.0 ± 1.1	89.9 ± 5.8
		盐胁迫 Salt stress	110.4 ± 8.4	34.8 ± 2.1*	3.7 ± 0.7*	38.2 ± 2.9*
	PISC-PAs	对照 Control	59.5 ± 1.4	26.4 ± 1.6	16.2 ± 5.7	42.6 ± 7.3
		盐胁迫 Salt stress	63.8 ± 1.3	20.9 ± 3.9	3.6 ± 1.2*	24.5 ± 2.9*
合计 Total	对照 Control	346.6 ± 12.2	210.9 ± 6.8	48.2 ± 7.8	259.1 ± 14.6	
	盐胁迫 Salt stress	362.5 ± 8.8	146.1 ± 13.0*	23.6 ± 2.6*	169.6 ± 0.4*	
‘冬枣’ ‘Dongzao’	F-PAs	对照 Control	182.5 ± 6.4	81.0 ± 18.7	24.5 ± 2.7	105.5 ± 15.9
		盐胁迫 Salt stress	151.2 ± 5.2*	47.7 ± 0.9*	12.9 ± 1.4*	60.6 ± 2.3*
合计 Total	PSC-PAs	对照 Control	76.0 ± 3.4	63.7 ± 5.6	6.1 ± 0.6	69.8 ± 6.4
		盐胁迫 Salt stress	84.5 ± 10.7	18.1 ± 3.1*	2.3 ± 0.5*	20.4 ± 3.6*
	PISC-PAs	对照 Control	59.4 ± 1.0	21.7 ± 0.9	5.0 ± 1.7	26.7 ± 0.9
		盐胁迫 Salt stress	55.0 ± 3.3	13.2 ± 1.7	2.6 ± 0.6	13.8 ± 1.1*
合计 Total	对照 Control	317.7 ± 12.9	166.4 ± 25.4	35.7 ± 3.9	202.1 ± 21.5	
	盐胁迫 Salt stress	290.6 ± 13.1	78.9 ± 5.6*	17.8 ± 1.4*	94.8 ± 7.0*	

照无显著差异,但两个品种的 F-Spm 含量和 Spm 总含量均显著低于对照,‘金丝小枣’的分别下降了 44.3% 和 29.6%,‘冬枣’的分别下降了 64.4% 和 52.9%;在叶中,‘金丝小枣’的 2 种结合态 Spm 含量显著低于对照,‘冬枣’则是除 PISC-Spm 含量外,其余 2 种 Spm 的含量及 Spm 总含量均显著低于对照。

盐胁迫下,两个品种根系和叶片中的(Spd + Spm)均较对照下降。在根中,‘金丝小枣’游离态的(Spd + Spm)和(Spd + Spm)总含量显著下降,下降幅度分别为 29.0% 和 21.7%;‘冬枣’游离态、高氯酸可溶性结合态及 3 种状态的总水平显著下降,下降幅度分别为 59.4%、62.5% 和 44.8%。叶中的(Spd + Spm)含量对盐胁迫的响应更敏感:‘冬枣’与之相关的全部 4 项指标、‘金丝小枣’除其游离态外的后 3 项指标的值均较对照显著下降,下降幅度

‘冬枣’为 42.6% ~ 70.8%、‘金丝小枣’为 12.8% ~ 42.5% (表 1, 2)。

因此,盐胁迫下,耐盐性不同的两个品种,无论‘金丝小枣’或‘冬枣’,均以 Put 含量降低幅度较小,其次是 Spm, Spd 的变化相对较大,尤其是‘冬枣’,而(Spd + Spm)水平的变化则是综合反映了 Spm、Spd 含量水平的响应特性。

### 2.3 盐胁迫下枣根系和叶片中游离态多胺含量的变化

由图 2 可见,在 7 月份,随生长期延长,‘金丝小枣’、‘冬枣’根系中各种 F-PAs 的含量均呈增加趋势,其中以 Put 含量的增加更明显,处理 30 d 时含量显著高于处理开始时(0 d),其余各种类含量的增加不明显;盐胁迫 3 d,两个品种根系中的 Put、Spd 含量及(Put + Spd)均显著高于同时期的对照,但盐胁迫 6 d、9 d 和 15 d 时,‘金丝小枣’根系中

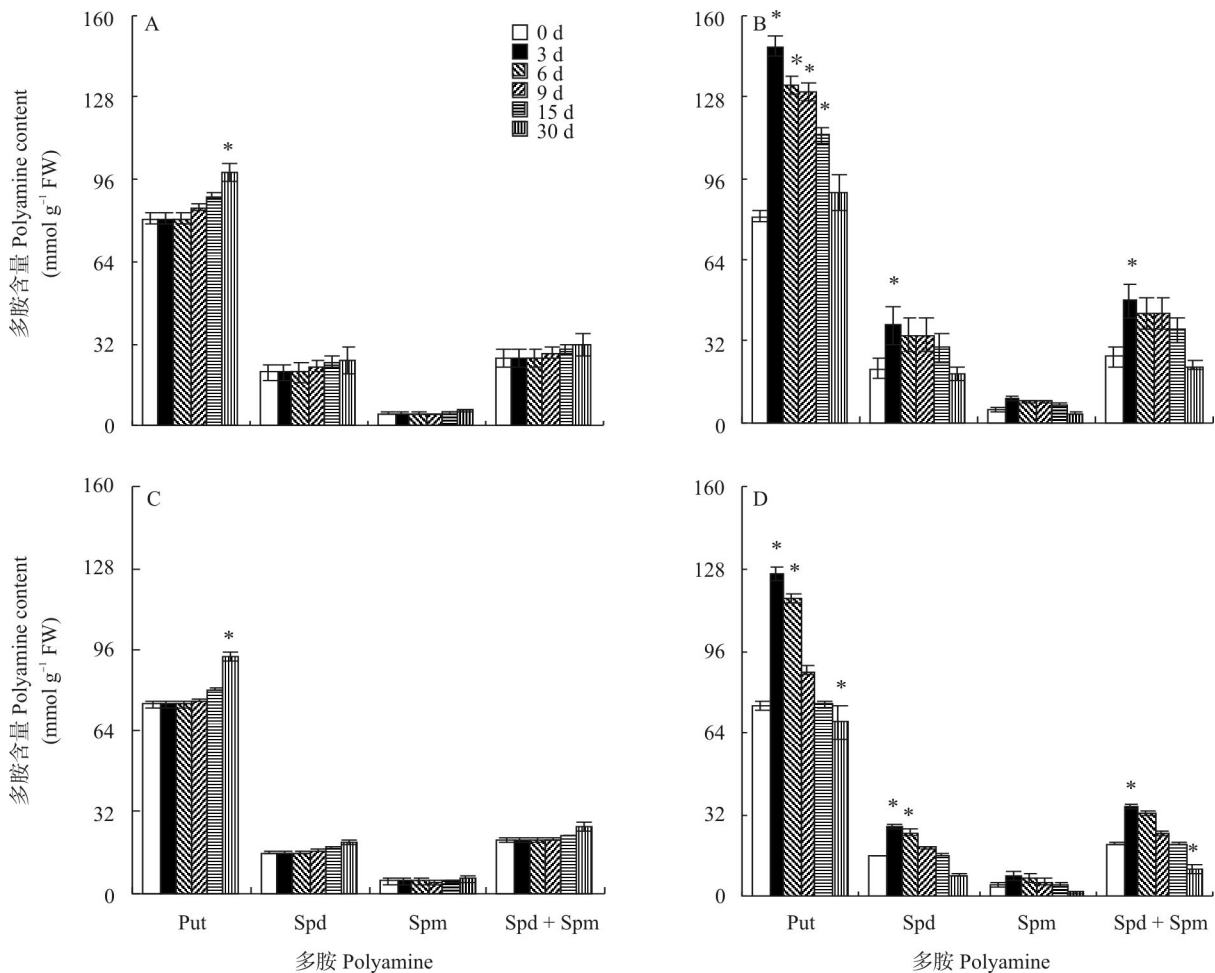


图 2 盐胁迫下枣树根系中游离态多胺含量的变化。A: ‘金丝小枣’对照; B: ‘金丝小枣’盐胁迫; C: ‘冬枣’对照; D: ‘冬枣’盐胁迫。  
 Fig. 2 Changes in free polyamine content in roots of jujube cultivars. A: Control of ‘Jinsixiaozao’; B: ‘Jinsixiaozao’ under salt stress; C: Control of ‘Dongzao’; D: ‘Dongzao’ under salt stress.

Put 含量均显著高于对照,至处理 30 d 时略低于对照,但无显著性差异,其它 F-Pas,如 Spd、Spm 的含量以及(Spd + Spm)的值均与对照无显著性差异。盐胁迫下,‘冬枣’根系中各种多胺含量的响应特点与‘金丝小枣’相似,处理 3 d,叶片中的 Put 含量显著高于对照,但此后大幅降低,至处理 30 d 时显著低于对照,并且,此时的(Spd + Spm)也显著低于对照。

在叶片中,随生长期延长,两个品种 F-PAs 含量变化规律均与根系的相似,但‘金丝小枣’在处理 30 d 时,非胁迫(对照)植株叶片中 Put、Spd 含量及(Put + Spd)均显著高于处理开始时(0 d),只有 Spm 含量没有显著升高,而‘冬枣’叶片中这些多胺的含量增加不明显(图 3)。同时,由图 3 可见,盐胁迫 3 d 和 6 d,‘金丝小枣’根系中 Put、Spd 含量及(Put + Spd)均较对照显著升高,此后显著降低,但均与对照无显著差异;盐胁迫下,‘冬枣’根系中各种 F-PAs 的含量随处理时间的延长其响应规律同‘金丝小

枣’相似,仅 Put、Spd 含量在处理 6 d 时显著高于对照,此后降低,甚至胁迫 30 d 时 Spd 含量及(Spd + Spm)显著低于对照,进一步表现出其多胺含量随处理时间延长而快速下降的特性。

#### 2.4 盐胁迫下枣根系和叶片中 PAO、DAO 活性的变化

两个枣树品种根系和叶片中的 PAO 活性明显高于 DAO,且根中的 PAO 活性高于叶中的,而根中和叶中的 DAO 活性相当。同时,在整个 7 月份,随生长期延长,2 种酶的活性均呈下降的趋势,根中的下降幅度大于叶中的。盐胁迫下,无论是‘金丝小枣’或‘冬枣’,它们根和叶中的 PAO、DAO 活性均显著升高,在长期(30 d)胁迫下更是成倍升高。胁迫 3 d 时的升高幅度为根中大于叶中,胁迫后期则叶中大于根中,‘冬枣’的升高幅度明显大于‘金丝小枣’,而且,短期(3 d)胁迫下,‘金丝小枣’根和叶中的 PAO、DAO 活性与对照未达显著差异,而‘冬

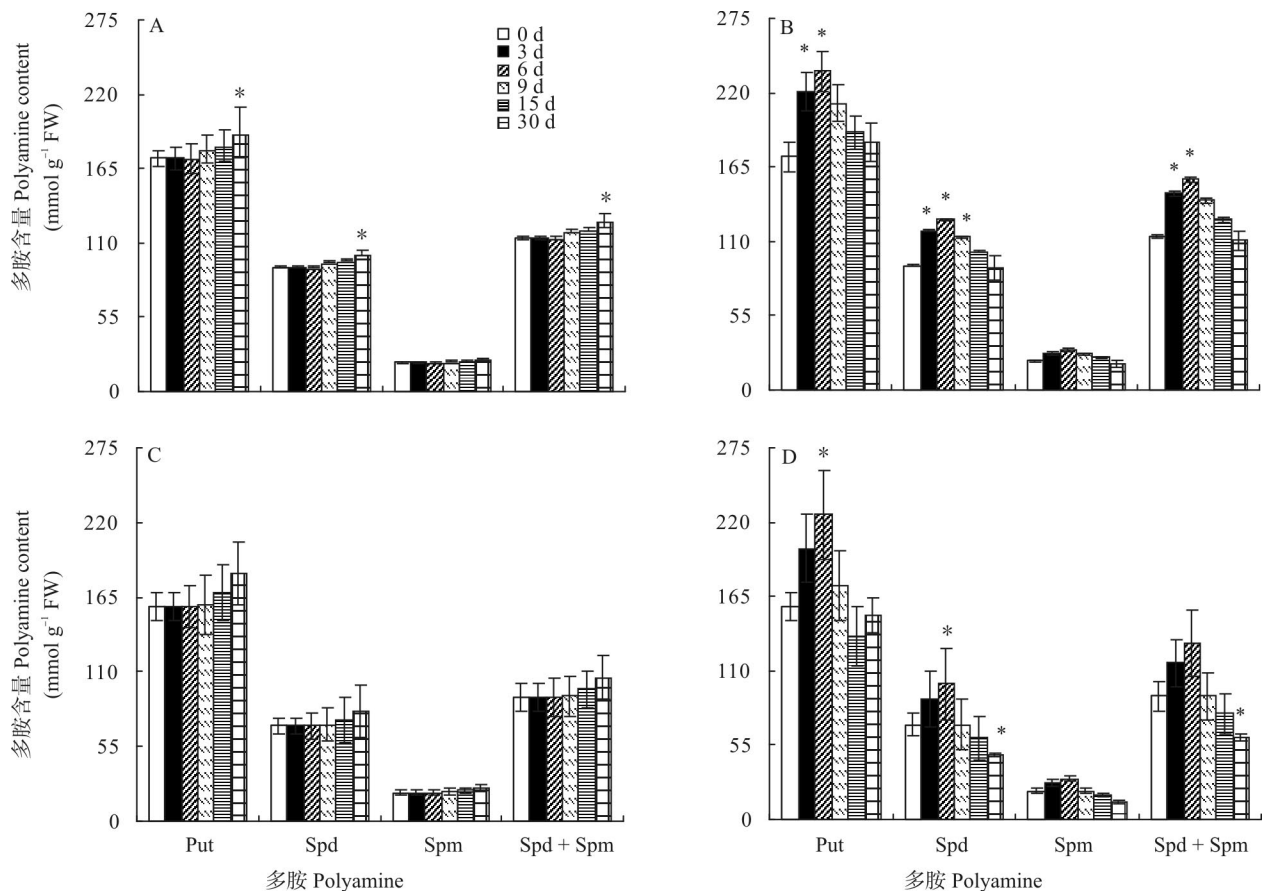


图 3 盐胁迫下枣树叶片中游离态多胺含量的变化。A: ‘金丝小枣’对照; B: 盐胁迫‘金丝小枣’; C: ‘冬枣’对照; D: 盐胁迫‘冬枣’。

Fig. 3 Changes in free polyamine content in leaves of two jujube cultivars. A: Control of ‘Jinsixiaozao’; B: ‘Jinsixiaozao’ under salt stress; C: Control of ‘Dongzao’; D: ‘Dongzao’ under salt stress.

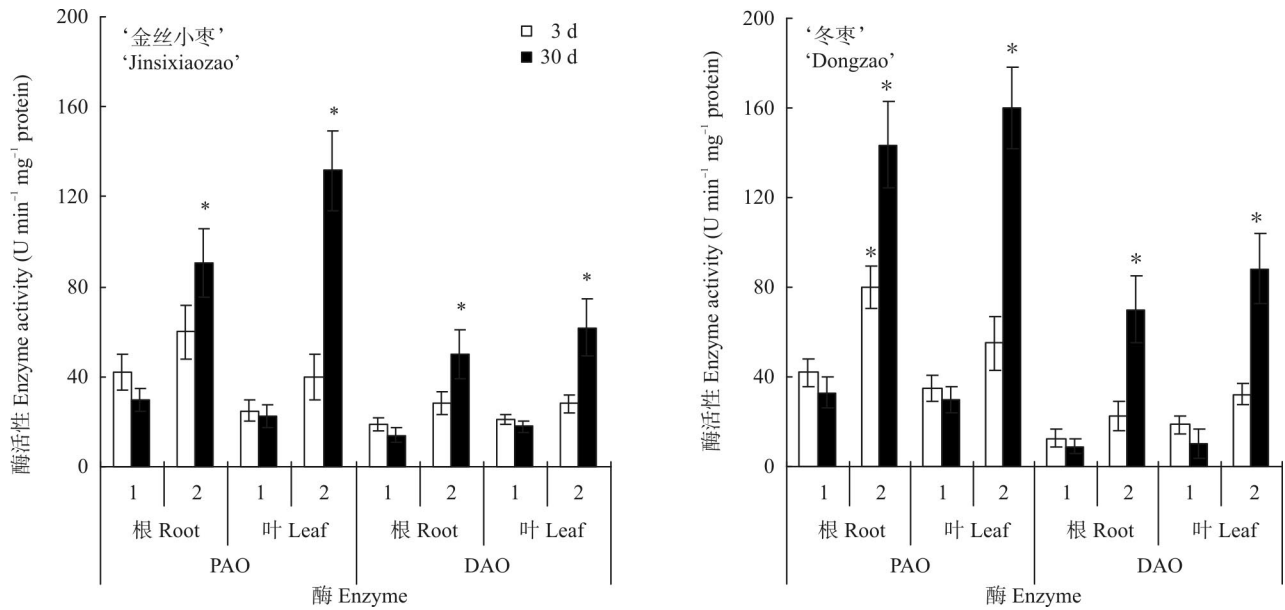


图4 盐胁迫对枣树根系和叶片中二胺氧化酶(DAO)、多胺氧化酶(PAO)活性的影响。1. 对照; 2. 盐胁迫。\*:  $P < 0.05$ 。

Fig. 4 Activities of DAO and PAO in root and leaves of two jujube cultivars under salt stress. 1. Control; 2. Salt stress; \*:  $P < 0.05$ .

枣’则基本上呈完全相反的态势,除根中DAO活性与对照无显著差异外,其余均达显著差异(图4)。

### 3 讨论

对非生物胁迫下植物体内多胺的形态、定位和功能的研究已有很多报道,但在枣属植物耐盐生理生态方面的研究迄今仅见本课题组。目前,在认识和理解多胺的作用机理方面已实现对多胺代谢基因的鉴定、转导和表达,在拟南芥(*Arabidopsis thaliana*)、水稻(*Oryza sativa*)、烟草(*Nicotiana tabacum*)、番茄(*Lycopersicon esculentum*)等多种植物上获得了转多胺基因植株并应用于相关研究<sup>[11-12]</sup>。这些研究结果的核心作用是了解植物在适应逆境中能否积累多胺、积累何种多胺、不同种类多胺转化与平衡的关系如何。多数研究认为,逆境胁迫下植物体内积累Put是一种受害表现,对植物适应逆境有益的主要是Spd和Spm<sup>[13]</sup>。然而,这些研究多以农作物为试材,生理机制的普遍性有待于更多的实验验证。

本研究以枣树为试材,短期(3 d)盐胁迫下,两个不同耐盐性品种的根系和叶片多胺含量水平都显著升高,上升幅度以Put > Spd > Spm;长期(30 d)盐胁迫下,两个品种的根系和叶片中多胺总水平都降低,但不同种类多胺含量水平的降低幅度因品种和器官而异,差异主要是耐盐性弱的品种降低幅度

显著大于耐盐性强的品种,3种状态多胺以结合态多胺含量水平的变化幅度最大,耐盐性强的品种含有更高水平的游离态多胺种类,叶片中甚至积累更高水平的Put,而耐盐性弱的品种则不然。这些结果强烈暗示:(1)枣树耐盐性的基因型差异是各个品种多胺响应差异的基础,砧-穗组合对枣树耐盐性有重要影响;(2)盐胁迫下,积累Put并不意味着抗性弱或受害重,同积累Spd和Spm一样,积累Put有利于提高枣树品种耐盐性,不同种类的多胺在提高枣树耐盐性中都有作用,这与我们利用外源多胺及其代谢抑制剂的试验结果一致<sup>[8]</sup>;(3)盐胁迫下,不同耐盐性枣树品种内源多胺的响应差别主要在于长期盐胁迫下不同多胺种类含量水平降低的幅度,结合态多胺向游离态多胺的转化可能起重要作用。因此,在枣树不同品种的耐盐机制中多胺代谢应是其中的一条路径。

植物内源多胺含量水平的变化是多胺生物合成与氧化降解共同作用的结果。能使多胺类物质氧化降解的酶类通称为多胺氧化酶,其中的两个关键酶是PAO和DAO。DAO对二胺底物具高亲和性,PAO则对三胺、四胺底物具很强亲和性;PAO主要存在于禾本科等单子叶植物中,DAO主要存在于豆科等双子叶植物中。PAO和DAO,除了在减少细胞中过量游离态多胺方面具重要作用外,其多样化的降解产物在植物生长发育和逆境适应中也具重要作用<sup>[14]</sup>。在禾本科、豆科植物中,

PAO 和 DAO 的活性相差极大,对其他种类植物中这 2 种酶的研究很少<sup>[15]</sup>。本文的测试结果清楚表明,枣树体内两种多胺氧化酶都有较高活性,但无论根系或叶片中,PAO 活性均明显强于 DAO;同时,盐胁迫刺激枣树体内 DAO 和 PAO 活性增强,其中耐盐性弱的品种升高幅度明显大于耐盐性强的品种,暗示枣树体内多胺的降解代谢存在多条路径,这两种氧化酶都参与盐胁迫下枣树体内多胺水平的调节。

### 参考文献

- [1] Kotzabasis K, Christkis-Hampsas M D, Ronbelakis-Angelakis K A. A narrow-bore HPLC method for the identification and quantitation of free, conjugated, and bound polyamines [J]. *Anal Biochem*, 1993, 214(2): 484–489.
- [2] Bitrián M, Zarza X, Altabella T, et al. Polyamines under abiotic stress: Metabolic crossroads and hormonal crosstalks in plants [J]. *Metabolites*, 2012, 2(4): 516–528.
- [3] Takahashi T, Kakehi J L. Polyamines: ubiquitous polycations with unique roles in growth and stress responses [J]. *Ann Bot*, 2010, 105(1): 1–6.
- [4] Echevarria-Machado I, Ramos-díaz A, Brito-Argáez L, et al. Polyamines modify the components of phospholipids-based signal transduction pathway in *Coffea arabica* L. cells [J]. *Plant Physiol Biochem*, 2005, 43(9): 874–881.
- [5] Gill S S, Tuteja N. Polyamines and abiotic stress tolerance in plants [J]. *Plant Signal Behav*, 2010, 5(1): 26–33.
- [6] Xu C X, Ma Y P, Xu X Z. Studies on salt tolerances of 15 jujube cultivars [J]. *Guangdong Agri Sci*, 2011(16): 31–32.  
徐呈祥, 马艳萍, 徐锡增. 15 个枣树品种耐盐性研究 [J]. *广东农业科学*, 2011(16): 31–32.
- [7] Xu C X, Xu X Z, Ma Y P, et al. Relationship between cultivar salt tolerance and conjugated polyamine level and H<sup>+</sup>-ATPase activity in leaf biomembrane of Chinese jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) [J]. *Plant Physiol J*, 2011, 47(8): 811–816.  
徐呈祥, 徐锡增, 马艳萍, 等. 枣品种耐盐性与叶片生物膜结合态多胺水平和 H<sup>+</sup>-ATP 酶活性的关系 [J]. *植物生理学报*, 2011, 47(8): 811–816.
- [8] Chen X W, Ma Y P, Xu C X, et al. Effects of exogenous polyamines and polyamine metabolism inhibitors on and chloroplastsionic homeostasis and thylakoid membrane conjugated H<sup>+</sup>-ATPase activity of *Ziziphus jujuba* Mill. under salt stress [J]. *J CS Univ For Techn*, 2012, 32(10): 1–8.  
陈雄伟, 马艳萍, 徐呈祥, 等. 多胺及其代谢抑制剂对盐胁迫下枣树叶体离子稳态和类囊体膜 H<sup>+</sup>-ATP 酶活性的影响 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2012, 32(10): 1–8.
- [9] Liu J, Liu Y L. The relations between polyamine types and forms and polyamine oxidase activities in barley seedlings under salt stress [J]. *J Plant Physiol Mol Biol*, 2004, 30(2): 141–146.  
刘俊, 刘友良. 盐胁迫下大麦幼苗多胺的种类和状态与多胺氧化酶活性的关系 [J]. *植物生理与分子生物学学报*, 2004, 30(2): 141–146.
- [10] Bradford M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding [J]. *Anal Biochem*, 1976, 72(1/2): 248–254.
- [11] Cuevas J C, López-Cobollo R, Alcazar R, et al. Putrescine is involved in Arabidopsis freezing tolerance and cold acclimation by regulating abscisic acid levels in response to low temperature [J]. *Plant Physiol*, 2008, 148(2): 1094–1105.
- [12] Cheng L, Zou Y J, Ding S L, et al. Polyamine accumulation in transgenic tomato enhances the tolerance to high temperature stress [J]. *J Int Plant Biol*, 2009, 51(5): 489–499.
- [13] Liu J, Zhang Y Y, Zhang W H, et al. Relationship between the levels and conversion of polyamines in the roots and salt tolerance in barley seedlings [J]. *J Nanjing Agri Univ*, 2005, 28(2): 7–11.  
刘俊, 张艳艳, 章文华, 等. 大麦根中多胺含量和转化与耐盐性的关系 [J]. *南京农业大学学报*, 2005, 28(2): 7–11.
- [14] An Z F, Jiang W, Liu Y L, et al. Hydrogen peroxide generated by copper amine oxidase is involved in abscisic acid-induced stomatal closure in *Vicia faba* [J]. *J Exp Bot*, 2008, 59(4): 815–825.
- [15] Kuznetsov V V, Shevyakova N I. Polyamines and stress tolerance of plants [J]. *Plant Stress*, 2007, 1(1): 50–71.