园艺学报，2017，44 (10)：1914－1924.
Acta Horticulturae Sinica
doi：10.16420/j.issn.0513-353x.2017-0374；http：//www. ahs. ac. cn

茄子单性结实差异表达序列鉴定及分析

郭亚鹤，赵　祯，张　映，连　勇，陈钰辉，刘富中*
（中国农业科学院蔬菜花卉研究所，北京 100081）

摘　要：利用实时荧光定量 PCR 技术，研究茄子单性结实 SSH-cDNA 文库中的 96 条 EST 序列在单性结实自交系和非单性结实自交系果实发育过程中的表达模式。分析表明，在低温条件下，相对表达量有显著差异的 EST 序列有 31 条，总体上调表达的 EST 序列有 17 条，总体下调表达的 EST 序列有 14 条。通过 NCBI 对 EST 序列进行 Blastx 比对，得到与其同源性高的序列信息。其中 5 条 EST 与抵御低温相关，6 条 EST 与植物激素代谢相关，多条 EST 与植物代谢过程中的蛋白质和碳水化合物合成相关，1 条 EST 无比对结果，可能为新基因。差异表达序列可作为研究茄子单性结实和耐低温的候选基因。

关键词：茄子；单性结实；果实发育；差异表达序列；实时荧光定量 PCR
中图分类号：S 641.1　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**0513-353X（2017）10-1914-11

Identification and Analysis of Parthenocarpic Differentially Expressed Sequences in Eggplant

GUO Yahe，ZHAO Zhen，ZHANG Ying，LIAN Yong，CHEN Yuhui，and LIU Fuzhong*
（*Institute of Vegetables and Flowers*，*Chinese Academy of Agricultural Sciences*，*Beijing* 100081，*China*）

Abstract：The expression patterns of 96 Unique ESTs from the eggplant parthenocarpic SSH-cDNA liabries were identified in the fruit different development stages of both of parthenocarpic and non-parthenocarpic eggplant lines by qPCR method. The results showed that，31 ESTs were significantly different in the relative expression in the eggplant fruits（ovary）development under the condition of low temperature，of which 17 ESTs were up-regulated and 14 ESTs were down-regulated. The analyses of sequences of ESTs indicated that 5 sequences were related to resistance to low temperature，6 sequences were associated with plant hormone metabolism. Some sequences were related to the synthesis of protein and carbohydrate in plant metabolic processes，and 1 EST may be a new gene. Together，some differentially expressed sequences could be used as the candidate genes of the parthenocarpy and low temperature tolerance of eggplant.

Keywords：eggplant；parthenocarpy；development；differentially expressed sequence；qPCR

茄子在温室反季节栽培及春季露地早熟栽培条件下，开花期常由于低温引起授粉受精不良、落花落果。茄子单性结实性能克服低温引起的落花落果，坐果能力增强，产量显著提高，同时还可改

收稿日期：2017－07－03；**修回日期：**2017－10－10
基金项目：国家自然科学基金项目（31572122）；中国农业科学院科技创新工程项目（CAAS-ASTIP-IVFCAAS）；农业部园艺作物生物学与种质创制重点实验室项目
* 通信作者 Author for correspondence（E-mail：lfzcaas@126.com）

进果实品质，降低栽培成本（刘富中 等，2005；张映 等，2009）。因此，研究茄子单性结实特性及分离克隆单性结实基因，对选育耐低温、适宜保护地和露地早春栽培、优质无籽或少籽的茄子品种，具有重要的意义。

研究者先后对茄子单性结实特性（田时炳 等，1999；刘富中 等，2005）、相关内源激素种类和含量变化（武彦荣 等，2009；张伟春 等，2009；李艳玮 等，2013）、胚胎及果实发育解剖特点（张伟春 等，2008）、遗传规律（田时炳 等，2003；刘富中 等，2008）和 AFLP 分子标记（刘富中 等，2008；Shimomura et al.，2010）等进行了研究，并通过转入外源嵌合基因 *DefH9-iaaM* 获得转基因单性结实茄子（Rotino et al.，1997），克隆获得与茄子果实发育相关的甲硫氨酸亚砜还原酶 A 基因 *SmMsrA*（张映 等，2011）和生长素反应蛋白基因 *SmIAA19*（张伟伟 等，2014），但有关茄子单性结实基因的分离克隆尚未见报道。

周亚君等（2010）利用 SSH 技术构建了茄子单性结实果实不同发育时期的抑制差减 cDNA 文库，获得 384 个高质量 Unique ESTs。本试验中应用 Real-time PCR 技术，研究 96 个 EST 在不同结实性果实中的表达特性，以期获得茄子单性结实相关基因，为进一步克隆茄子单性结实基因，深入研究其表达和调控机制奠定基础。

1　材料与方法

1.1　材料

茄子（*Solanum melongena* L.）单性结实自交系 D-10 是由耐寒性强的圆茄单性结实株经多代自交选育而成；非单性结实自交系 03-2 是从圆茄地方品种中经多代单株系统选育而成（刘富中 等，2005）。

试验材料于 2014 年春季定植于中国农业科学院蔬菜花卉研究所试验基地。门茄开花期日最低温度变化在 7 ～ 15 ℃时，D-10 的单性结实特性可完全表达，产生无籽果实；03-2 授粉受精和果实生长发育受阻，果实未膨大。

分别取两自交系低温时期（门茄）花前 2 d（－2 d）、开花当天（0 d）、花后 2、4、6、10 和 15 d（2、4、6、10 和 15 d）的子房或果实，液氮冷冻，于－80 ℃冰箱中保存备用。

1.2　茄子总 RNA 的提取与 cDNA 第一链的合成

单性结实自交系和非单性结实自交系的门茄各时间点分别取 3 个子房或者果实作为一份材料，液氮研磨，用 TransGen EasyPure^{TM} Plant RNA Kit 提取总 RNA。1.0%琼脂糖凝胶电泳检测总 RNA 的完整性，利用紫外分光光度计测定其浓度和纯度。将每个时间点检测合格的 RNA 取 5 μg，应用 TransGen TransScipt Ⅱ First-Strand cDNA Synthesis SuperMix 试剂盒合成 cDNA 第一链。

1.3　荧光定量 PCR 引物的设计

应用 Primer Premier 5.0 软件，设计扩增 EST 序列的特异引物，退火温度为 55～59 ℃，扩增产物大小主要在 80～200 bp，引物一般与靶 DNA 无错配、无二聚体和二级结构。将引物在 Oligo 6 软件中进行验证，在 https：//solgenomics.net/网站中检测引物扩增的序列具有特异性。PCR 扩增产物用 1.2%琼脂糖凝胶电泳进行检测，确定引物扩增的退火温度、有效性和特异性。以 *Actin* 为内参基因。

1.4 荧光定量 PCR 分析

所有 PCR 均设 3 次重复。反应体系 10 μL：稀释后的 cDNA 模板（30 ng · μL^{-1}）3 μL，10 μmol · L^{-1} 的 Primer-F 及 Primer-R 各 0.5 μL，SYBR Green Master Mix 5 μL，H_2O 1 μL。PCR 反应程序为：95 ℃ 预变性 10 min；95 ℃ 10 s，57 ℃ 20 s，72 ℃ 30 s，45 个循环后做熔解曲线（95 ～ 65 ℃，0.1 ℃ · s^{-1}）。将 D-10 花后 4 d 的 cDNA 模板按 5^{-1}、5^{-2}、5^{-3}、5^{-4}、5^{-5} 的浓度稀释，分别扩增内参基因和差异表达序列，根据其 CT 值获得内参基因和差异表达序列的扩增效率和标准曲线。具体参考张映（2011）的方法，使用 Excel 2010 软件处理数据。

2 结果与分析

2.1 荧光定量 PCR 基因特异引物

根据从构建的抑制差减文库中挑选出的 96 条差异表达的 unigene 的核苷酸序列，设计特异引物，琼脂糖凝胶电泳检测 PCR 扩增产物，确定 96 条引物能有效扩增，且扩增产物为单一条带，表明设计的引物具有特异性（表 1），可用于荧光定量 PCR 分析。

表 1 部分荧光定量 PCR 引物

Table 1 Part of the real time PCR primers

引物名称 Primer name	上游引物（5′－3′） Forward primer	下游引物（5′－3′） Reverse prime	片段大小/bp Sequence size
Actin	ATCCAGCCTTCACCATTCCA	GGTCATCAT CTCCGGTTTGC	150
Z160	CAGACGGAGGCACAATTTGT	GCGTTTCTTTGCTAGTGTGC	150
Z182	CGTTCAGCCGCTCATTCATT	CCATTCAACCGATCATGGCT	152
Z187	GTATTTCACTCCCTCCC	TCGGCATTCAGGACACTA	183
Z536	CACCAGCTTAGGACCTCTGT	ATGATAAGACGGGACAGGGC	134
Z701	TTGTGGAATTTGCCGTGCAG	CCCTGTAACAAGGGCACTCA	80
Z712	TTGACCCTCCTCAAACGACA	CGGACAATTTGAGCCCCTTT	202
F600	TCCCAACCAAGAAGTCCCAG	ATGTGACCTCGATTTGGGGT	174
F626	TGGATGCCATCTTAAGACCAGT	GCTATGTTCCGGGGCAAAAT	154
F1452	AGTCCCAACACTTCTGGTCT	ATGTGCAGCCAGAAATCCGA	170
F1699	ATTTTGCAGCAGAAGCGAGC	ATGCAGGCCTTGACACATTG	104
F1934	CTGGGGCTGTTTCCTCTACA	GCCATCATCCATTGCAAGCT	211
F2111	GTGGGAATCTGAGGTGGCTA	TCTCTCACCATTCAAAGCCCT	193
zheng116	GGTTCAAGTACGGAGAGGCT	TCATACGACTCCACCACCAC	155
zheng395	CGATTTGCTTGGCTTGGCTG	TCGACATCCCCATTCAGCAC	215
fan11	TCACTTGAGAGGCAGCTTGA	TGGCTTCCTTCCATCAACCT	152
1-contig16	TTGCTGCCTCTGGTATCTC	GTCCATCCCATTCTTCGT	104
1-contig42	GAGTGGTGAAGCGTTGAGGA	ACCAAACCACGTCAACCAGT	138
2-C188	CGTCTCGCTGATAGGAAGGT	TCCACTGGTTGCTGTCCTTA	180

2.2 差异表达序列的 qRT-PCR 分析

96 条 EST 序列在单性结实自交系 D-10 与非单性结实自交系 03-2 果实（子房）发育过程中的相对表达量的比值大于 2，表示 EST 序列在 D-10 中表达量高于 03-2（表中用“+”表示）；相对表达量的比值小于 0.5，表示 EST 序列在 D-10 中表达量低于 03-2（表中用“-”表示），相对表达量的比值大于等于 0.5 且小于等于 2，表示 EST 序列在 D-10 和 03-2 中的表达量没有明显差异（表中“0”表示）。表 2 表明，每个 EST 序列在不同结实性茄子果实发育的 7 个时期中的相对表达量的比值存在差异。

表 2　单性结实自交系 D-10 与非单性结实自交系 03-2 果实（子房）不同发育时期的部分 ESTs 序列相对表达量的比值

Table 2　The ratio of relative expression of part of ESTs in different stages during fruit（ovary）development between the parthenocarpy inbred lines D-10 and nonparthenocarpy inbred lines 03-2

EST 编号 EST No.	相对表达量的比值 Ratio of relative expression						
	－2 d	0 d	2 d	4 d	6 d	10 d	15 d
Z160	0.4（-）	0.1（-）	1.0（0）	20.4（+）	3.6（+）	0.8（0）	3.0（+）
Z182	0.9（0）	0.4（-）	0.3（-）	0.2（-）	1.1（0）	1.0（0）	0.2（-）
Z187	1.3（0）	1.3（0）	0.1（-）	0.1（-）	1.2（0）	0.7（0）	1.2（0）
Z536	1.0（0）	0.8（0）	1.7（0）	0.3（-）	0.2（-）	0.5（0）	0.1（-）
Z701	1.1（0）	1.2（0）	1.5（0）	17.9（+）	29.0（+）	0.3（-）	1.2（0）
Z712	1.5（0）	0.3（-）	0.3（-）	0.6（0）	1.6（0）	2.5（+）	1.2（-）
F600	0.5（0）	0.5（0）	0.7（0）	5.9（+）	2.1（+）	2.5（+）	1.9（0）
F626	1.3（0）	1.0（0）	3.8（+）	10.1（+）	1.0（0）	3.1（+）	4.9（+）
F1452	2.7（+）	0.4（-）	0.6（0）	7.0（+）	2.1（+）	1.1（0）	1.1（0）
F1699	2.6（+）	0.4（-）	0.7（0）	3.5（+）	2.0（0）	0.9（0）	0.4（-）
F1934	0.8（0）	1.3（0）	2.4（+）	0.3（-）	0.2（-）	0.2（-）	0.1（0）
F2111	1.5（0）	0.2（0）	1.5（0）	0.03（-）	0.1（-）	0.3（-）	0.1（+）
zheng116	9.8（+）	0.5（0）	0.5（0）	4.2（+）	3.7（+）	2.8（+）	10.9（+）
zheng395	1.1（0）	0.2（-）	0.2（-）	1.1（0）	0.4（-）	0.3（-）	0.4（-）
fan11	0.6（0）	0.2（-）	8.1（+）	2.0（0）	0.6（0）	0.1（-）	2.9（+）
1-contig16	3.7（+）	0.3（-）	0.4（-）	10.4（+）	11.5（+）	6.3（+）	1.3（0）
1-contig42	0.6（0）	0.01（-）	1.3（0）	0.9（0）	0.2（-）	0.01（-）	1.7（0）
2-C188	0.7（0）	0.6（0）	1.2（0）	9.0（+）	5.5（+）	0.5（0）	0.6（0）

注：数据为 D-10 与 03-2 相对表达量的比值。“+”表示 D-10 与 03-2 相对表达量的比值大于 2.0；“-”表示相对表达量比值小于 0.5；“0”表示 0.5 ≤ 相对表达量比值 ≤ 2.0。

Note：The data represented the ratio of relative expression between D-10 and 03-2.“+”represented the ratio of relative expression between D-10 and 03-2 is greater than 2.0，“+”represented the ratio is less than 0.5，“0”represented 0.5 ≤ the ratio of relative expression.

相对表达量大于 2 的上调序列数，小于 0.5 的下调序列数和差异表达的序列总数见表 3。在－2、4 和 6 d 相对表达量上调的序列数较其他时期多，且－2、4 d 相对表达量上调的序列数显著多于相对表达量下调的序列数；0 和 2 d 相对表达上调的序列数较少，而相对表达量下调的序列数较多；10 和 15 d 相对表达量上调的序列数减少，相对表达量下调的序列数增加。在－2 d 差异表达序列总数最少，为 39 条，其次是 6 d，为 46 条；0 和 15 d 差异表达序列总数最多，分别为 64 条和 60 条，其他 3 个时期差异表达序列总数在 53 ~ 56 条之间。推测开花前后（－2、0、2 和 4 d）是决定果实能否正常膨大的关键时期，而花后 10、15 d 差异表达序列数较高，可能与果实进入快速膨大期有关，该推测有待进一步验证。

表 3　单性结实自交系 D-10 与非单性结实自交系 03-2 果实（子房）不同发育时期差异表达的 EST 数

Table 3　The number of differential expression ESTs in the different development stages of fruit（ovary）between the parthenocarpy inbred lines D-10 and nonparthenocarpy inbred lines 03-2

花后天数 Days after flowering	相对表达量上调的序列数 Number of high relative expression ESTs	相对表达量下调的序列数 Number of low relative expression ESTs	差异表达的序列总数 The total number of differential expression ESTs
－2	36	3	39
0	6	58	64
2	7	46	53
4	39	16	55
6	27	19	46
10	13	33	56
15	20	40	60

2.3 茄子子房（果实）发育过程中差异表达的序列分析

采用实时荧光定量 PCR 分析 EST 在单性结实自交系 D-10 和非单性结实自交系 03-2 果实不同发育时期的表达情况，结果表明，在茄子果实（子房）发育的 7 个时期中相对表达量有显著差异的 EST 序列有 31 条。其中，在单性结实自交系 D-10 中表达量总体高于非单性结实自交系 03-2 表达量的 EST 序列，即上调表达的序列，共 17 条；D-10 中表达量总体低于 03-2 表达量的 EST 序列，即下调表达的序列，共 14 条。

如图 1 所示，Z160 在花后 4、6 d 的 D-10 中表达量分别是 03-2 表达量的 20 倍、4 倍；Z701 与 Z160 表达趋势相似，在花后 4 d、6 d 的 D-10 中表达量分别是 03-2 表达量的 18 倍、29 倍。

F600 和 F626 具有相同的表达规律。二者在 D-10 中，开花前 2 d 至开花后 2 d，其表达量变化不大，之后逐渐升高，至开花后 4 d 表达量最高，之后逐渐减少；而在 03-2 果实的发育过程中表达量变化不大，一直处于较低的水平。F600 和 F626 可能在低温下单性结实果实的发育过程中起重要的作用。

F1699 在单性结实自交系 D-10 中，开花后 2 d 的表达量急剧升高，显著高于非单性结实自交系 03-2 中的表达量，而在 03-2 中一直处于较低水平，该基因可能对茄子单性结实果实的发育具有重要意义。

zheng116 和 1-contig16 在开花前 2 d 和花后 4、6、10 及 15 d 的 5 个时期中，单性结实自交系 D-10 中的表达量高于非单性结实自交系 03-2 中表达量，而在非单性结实自交系 03-2 果实中的表达量变化不大。

Z182 和 F2111 在单性结实自交系 D-10 和非单性结实自交系 03-2 果实发育过程中具有相同的表达模式，呈逐渐下降趋势。开花当天到花后 4 d，Z182 在 D-10 中的表达量明显低于 03-2 中的表达量，而开花后 4 d 到 15 d，F2111 在 D-10 中表达量明显低于 03-2，其可能在低温下单性结实果实的发育过程中的调控机理不同。

F1934 在单性结实自交系 D-10 和非单性结实自交系 03-2 果实发育过程中具有相反的表达模式。在 D-10 中开花前的表达量最高，且随果实的发育而逐渐降低，在 03-2 中花后 2 d 表达量开始升高，之后明显高于其在 D-10 中的表达量。

zheng395 和 1-congtig42 在单性结实自交系 D-10 和非单性结实自交系 03-2 果实发育过程中的表达趋势相似，在 D-10 果实发育不同时期的表达量大多低于 03-2 的表达量，可能在单性结实果实的发育过程中起负调控作用。

31 条 EST 序列在 NCBI 中 BlastX 比对，得到与其同源性高的序列信息（表 4）。结果表明：Z160、Z712、F1699、2-C188 和 zheng395 与植物抗逆性相关；Z187、F1229、F1452、zheng116、fan11 和 1-contig16 与植物激素合成相关；F1493 和 F2111 是果实生长发育过程中相关的酶类；Z182、Z443、Z614、Z701、Z743、F626、F1105、F1109、F1934 和 2-C71 是代谢过程中的蛋白质；F600、F1699、zheng374、fan58 和 1-contig42 与蛋白质合成相关；fan28 与糖类等碳水化合物代谢相关；Z731 是一种水通道蛋白；F1741 是延长因子；Z536 在 NCBI 中无比对结果，推测是一个新基因。

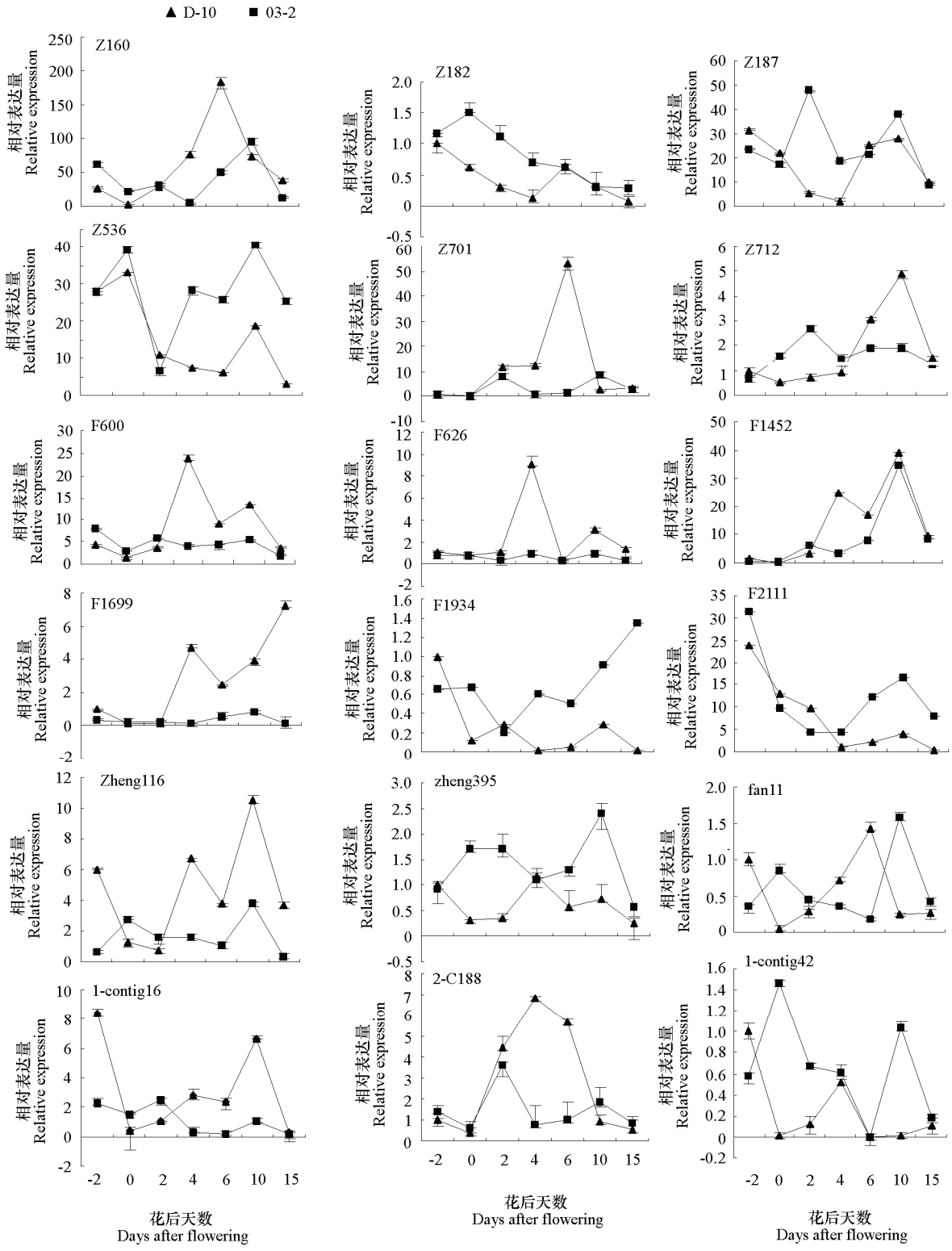


图 1　单性结实自交系 D-10 与非单性结实自交系 03-2 部分差异表达的 EST 的相对表达量分析

Fig. 1　The relative expression analysis of some differential expression ESTs between the parthenocarpy inbred lines D-10 and nonparthenocarpy inbred lines 03-2

表 4　差异表达序列 BlastX 结果

Table 4　The BlastX result of differentially expressed sequences

EST 编号 EST No.	同源比对结果 BlastX result	来源 Source	E 值 E-value
Z160	防御素　Defensin protein precursor	辣椒　*Capsicum annuum*	3E-17
Z182	类 S6 40S 核糖体蛋白　40S ribosomal protein S6-like	马铃薯　*Solanum tuberosum*	2E-77
Z187	甲硫氨酸合酶　Methionine synthase	马铃薯　*Solanum tuberosum*	1E-58
Z443	假定蛋白 NCLIV_068840　Hypothetical protein NCLIV_068840	犬新孢子虫　*Neospora caninum*	6E-66
Z536	无比对结果　No matched result		
Z614	光反应系统 I 中 III 亚基的叶绿素蛋白 Photosystem I reaction center subunit III，chloroplastic	烟草　*Nicotiana tomentosiformis*	7E-69
Z701	抗菌肽 Snakin-1　Antimicrobial peptide snakin-1	马铃薯　*Solanum tuberosum*	3E-33
Z712	肽酰脯氨酸顺反异构酶 CYP37 Peptidyl-prolyl cis-trans isomerase CYP37，chloroplastic isoform X3	番茄　*Solanum lycopersicum*	2E 74
Z731	类 PIP2-1 水通道蛋白　Aquaporin PIP2-1-like	番茄　*Solanum lycopersicum*	4E-101
Z743	叶绿体蛋白　Phospho-2-dehydro-3-deoxyheptonate aldolase 2，chloroplastic	番茄　*Solanum lycopersicum*	1E-127
F600	结合蛋白，葡萄糖调控蛋白聚合物 1 Luminal-binding protein 1，glucose-regulated protein homolog 1	烟草　*Nicotiana tabacum*	7E-97
F626	微管蛋白 β-1　Tubulin beta-1 chain-like，partial	芜菁　*Brassica rapa*	2E-38
F1105	花粉特异表达蛋白 C13　Pollen-specific protein C13	番茄　*Solanum lycopersicum*	5E-63
F1109	假定蛋白 PHAVU_002G308700g　Hypothetical protein PHAVU_002G308700g	菜豆　*Phaseolus vulgaris*	2E-19
F1229	精胺合酶　SPM1	番茄　*Solanum lycopersicum*	2E-19
F1452	生长素诱导蛋白　Auxin-induced protein PCNT115	烟草　*Nicotiana tabacum*	9E-44
F1493	类 G11A 蛋白激酶　Protein kinase G11A-like	马铃薯　*Solanum tuberosum*	2E-79
F1699	谷胱甘肽 S－转移酶 T1　Glutathione S-transferase T1	番茄　*Solanum lycopersicum*	3E-72
F1741	延长因子 1-γ-2　Elongation factor 1-gamma 2-like	番茄　*Solanum lycopersicum*	6E-67
F1934	富含亮氨酸的重复序列丝氨酸/苏氨酸蛋白激酶 LRR receptor-like serine/threonine-protein kinase FEI 2-like	马铃薯　*Solanum tuberosum*	8E-107
F2111	肉桂酸羧化酶　Cinnamate 4-hydroxylase	茄子　*Solanum melongena*	1E-79
zheng116	脱落酸受体　Abscisic acid receptor PYL4-like	马铃薯　*Solanum tuberosum*	4E-164
zheng374	假定转录调节因子　Transcription regulator，putative	蓖麻　*Ricinus communis*	9E-51
zheng395	类 E3 泛素连接酶 SUD1　Probable E3 ubiquitin ligase SUD1-like	马铃薯　*Solanum tuberosum*	0
fan11	类 SEP3 MADS-box　SEPALLATA3-like MADS-box	番茄　*Solanum lycopersicum*	2E-83
fan28	葡糖－6－磷酸 1－脱氢酶，类叶绿素蛋白 Glucose-6-phosphate 1-dehydrogenase 4，chloroplastic-like	马铃薯　*Solanum tuberosum*	6E-102
fan58	类 70-1 微管相关蛋白　Microtubule-associated protein 70-1-like	马铃薯　*Solanum tuberosum*	8E-102
1-contig16	5－甲硫基腺苷－1－磷酸异构酶（MTNA） 5-methylthioribose-1-phosphate isomerase-like	马铃薯　*Solanum tuberosum*	7E-124
1-contig42	雌蕊特异生长蛋白　Pistil-specific extensin-like protein-like	马铃薯　*Solanum tuberosum*	9E-132
2-C71	微管蛋白 α-3　Tubulin alpha-3 chain	水稻　*Oryza sativa* Indica Group	3E-111
2-C188	内质网应激蛋白　Stress-associated endoplasmic reticulum protein 2-like	烟草　*Nicotiana sylvestris*	3E-38

3　讨论

本试验中对前期构建的 SSH-cDNA 文库中的 96 条 EST 序列进行相对表达量分析，获得 31 条在单性结实和非单性结实自交系中差异表达的序列，分别与低温胁迫、植物激素合成代谢和信号转导及植物代谢过程中的蛋白质和碳水化合物合成相关。

本研究中获得 5 条与抵御低温胁迫相关的差异表达序列。

Z160 在单性结实自交系开花后的表达量显著升高，其与辣椒中的防御素同源。植物激素和低温均可介导植物防御素的产生，低温也可以诱导冬小麦产生防御素从而防御冬小麦在低温胁迫下受到伤害（Penninckx et al.，1996；Koikea et al.，2002）。前期研究发现，单性结实自交系 D-10 的单性结实性在低温下诱导表达，形成单性结实果实（刘富中 等，2005；张映 等，2009），表明在单性结实果实中高表达量的 Z160，有利于单性结实果实抵御低温的伤害。

2-C188 与烟草的内质网应激蛋白同源。内质网应激蛋白是一种重要的抗逆蛋白，2-C188 在 D-10

中的表达量显著高于 03-2，这可能对 D-10 抵御低温胁迫更有利。

F1699 在单性结实自交系中，开花后 2 d 的表达量急剧升高，显著高于其在非单性结实自交系 03-2 中的表达量，在 03-2 中的表达量一直处于较低的水平。F1699 与谷胱甘肽 S－转移酶（GST）同源，研究表明，GST 在逆境胁迫和细胞转导中有非常重要的作用，能有效提高拟南芥、玉米、水稻对低温胁迫的抗性（Zhao et al.，2006）；甘薯中的 *IBGST* 基因是诱导型表达基因，在冷胁迫下表达量升高（刘珣 等，2009）。GST 在逆境胁迫中主要通过清除胁迫产生的过氧化物来保护植物免受伤害（Dixon et al.，1998；Wagner et al.，2002；Gong et al.，2005）。前期研究表明，低温下自然授粉的单性结实自交系果实可正常生长发育，形成单性结实果实，非单性结实自交系 03-2 的子房不能正常发育成果实（刘富中 等，2005；张映 等，2009），推测 Z160、2-C188 和 F1699 可能对茄子低温下单性结实果实的发育和抵抗低温胁迫具有重要意义。

Z712 与肽酰脯氨酸顺反异构酶同源，肽酰脯氨酸顺反异构酶是一种分子伴侣，具有调节信号转导的作用。研究表明该酶在番茄、玉米和油菜中对植物抵御逆境胁迫有非常重要的作用（Küllertz. et al.，1999；Oh et al.，2006）。

zheng395 与 E3 泛素蛋白连接酶同源。E3 泛素蛋白可以调节蛋白的泛素化，与植物的胁迫反应、细胞的凋亡等代谢途径相关。zheng395 在单性结实自交系中的整体表达量低于非单性结实。该基因在茄子中的作用机制还不明确，其是否与茄子抵御低温胁迫相关，需要进一步的研究。

本研究中同时获得 3 条与多胺合成代谢密切相关的差异表达序列，推测其可能对单性结实果实发育有重要作用。

Z187 与马铃薯的甲硫氨酸合酶同源，该酶是生成甲硫氨酸的关键酶类。F1229 与番茄的精胺合酶同源，精胺合酶是精胺代谢过程中的关键酶。1-contig16 与马铃薯的 MTNA 同源，5－甲硫基腺苷－1－磷酸异构酶（5-methylthioribose-1-phosphate isomerase，MTNA）参与甲硫氨酸循环途径，该途径是甲硫腺苷生成甲硫氨酸的代谢过程，最终合成产物是精胺和亚精胺。1-contig16 在开花前 2 d 和花后 4 d 至花后 15 d，5 个时期中在 D-10 中表达量高于 03-2 中表达量。研究表明，果实发育初期高水平的多胺有利于茄子单性结实果实发育（李艳玮 等，2013）。

已克隆的茄子甲硫氨酸亚砜还原酶 A 基因 *SmMsrA*，其在低温条件下单性结实自交系开花当天子房中 *SmMsrA* 的表达量显著高于非单性结实自交系（张映 等，2011），VIGS 分析表明 *SmMsrA* 基因正向调控茄子果实的发育（赵祯 等，2015）。

本研究还得到多条与生长素、乙烯、脱落酸合成代谢及细胞凋亡相关的差异序列。

fan11 与参与植物生长素合成代谢的 *MADS-box* 同源，与番茄中 *SEPALLATA3-like MADS-box* 一致性为 96%。*MADS-box* 基因调控种子的发育（Angenent et al.，1995；Colombo et al.，1995）。S*EP* 转录因子活性降低、丧失可引起胚珠发育功能的缺失，导致胚珠转变为心皮组织，无法发育成正常种子（Pinyopich et al.，2003；Favaro et al.，2003），从而产生单性结实果实。F1452 与生长素诱导蛋白 *PCNT115* 同源性最高，F1452 在 D-10 果实发育初期的表达量高于 03-2 的表达量。研究表明，子房中高含量的 IAA 与茄子单性结实的形成密切相关（Rotino et al.，1997；李香景 等，2012；李艳玮 等，2013）。已克隆的茄子 S*mIAA19* 基因可能与茄子果实的发育及单性结实的形成有关（张伟伟 等，2014），fan11 和 F1452 可能通过改变生长素的信号途径来影响茄子的单性结实。

F1934 与马铃薯中的 *FEI2* 同源，*FEI2* 参与乙烯合成中 ACC 途径的信号转导。近年来在拟南芥和番茄中的研究证明，乙烯可通过调控生长素的作用以及通过乙烯信号传导作用引起果实的自发膨大，形成单性结实（Adam，2000；Lin et al.，2008）。F1934 在低温条件下的单性结实自交系 D-10

中开花后下调表达，其可能通过调控乙烯的表达促进果实的发育。

zheng116 与参与脱落酸代谢中的脱落酸受体 *PYL4* 同源。脱落酸受体可以与脱落酸发生特异性识别，从而使脱落酸参与植物的代谢调节（Bueso et al.，2014）。zheng116 在开花前（－2 d）和果实发育的后期在 D-10 中的表达量显著上升，且表达量显著高于 03-2，03-2 中该序列表达量没有显著变化。茄子果实发育初期较高的 ABA 水平有利于果实发育和单性结实（李艳玮 等，2013），zheng116 可能参与了茄子果实（子房）发育初期的代谢调节。

Z182 与马铃薯的 40S 核糖体蛋白 *S6* 同源性很高。40S 核糖体蛋白 *S6* 在动物中的研究较多，植物中还没有相关报道。40S 核糖体蛋白 *S6* 在细胞周期和凋亡过程中发挥着一定作用（Volarević & Thomas，2001；Lohrum et al.，2003）。在果实发育初期 Z182 的高表达量可能有利于茄子果实中蛋白质的合成和细胞周期生成，在果实发育的后期 Z182 表达量的降低可能与细胞的凋亡相关。Z536 在 NCBI 中没有可匹配的同源基因，可能是一个新基因。

单性结实自交系 D-10 属于温度敏感型材料，开花结果期最低温度在 7～15 ℃之间时，表现单性结实，非单性结实自交系 03-2 低温下果实不能正常膨大（刘富中 等，2005）。推测抵御低温胁迫和植物激素相关的基因，通过与合成蛋白质和碳水化合物相关的基因相互作用，共同调节单性结实果实的发育，这些基因的功能有待进一步研究。

References

Adam V S. 2000. The molecular basis for the initiation of fruit development and parthenocarpy[Ph. D. Dissertatuon]. Adelaide：The University of Adelaide.

Angenent G C，Franken J，Busscher M，van Dijken A，van Went J L，Dons H J M，van Tunen A. 1995. A novel class of MADS-box genes is involved in ovule development in petunia. Plant Cell，(7)：1569－1582.

Bueso E，Rodriguez L，Lorenzo-Orts L，Gonzalez-Guzman M，Sayas E，Munoz-Bertomeu J，Ibanez C，Serrano R，Rodriguez P L. 2014. The single-subunit RING-type E3 ubiquitin ligase RSL1 targets PYL4 and PYR1 ABA receptors in plasma membrane to modulate abscisic acid signaling. The Plant Journal，80：1057－1071.

Colombo L，Franken J，Koetje E，van Went J，Dons H J M，Angenent G C，van Tunen A J. 1995. The petunia MADS-box gene FBP11 determines ovule identity. Plant Cell，(7)：1859－1868.

Dixon D P，Cummins I，Cole D J，Edwards R. 1998. Glutathione-mediated detoxification systems in plants. Current Opinion in Plant Biology，1 (3)：258－266.

Favaro R，Pinyopich A，Battaglia R，Kooiker M，Borghi L，Ditta G，Martin F Yanofsky，Martin M Kater，Colombo L. 2003. MADS-box protein complexes control carpel and ovule development in *Arabidopsis*. The Plant Cell，15：2603－2611.

Gong H B，Hu W W，Jiao Y X，Pua E C. 2005. Molecular characterization of a Phi-class mustard（*Brassica juncea*）glutathione *S*-transferase gene in *Arabidopsis thaliana* by 5′-deletion analysis of its promoter. Plant Cell Reports，24 (7)：439－447.

Koikea M，Okamotoa T，Tsudab S，Imaib R. 2002. A novel plant defensin-like gene of winter wheat is specifically induced during cold acclimation. Biochemical and Biophysical Research Communications，298 (1)：46－53.

Küllertz G，Liebau A，Rücknagel P，Schierhorn A，Diettrich B，Fischer G，Luckner M. 1999. Stress-induced expression of cyclophilins in proembryonic masses of *Digitalis lancaa* does not protect against freezing/thawing stress. Planta，208 (4)：599－605.

Li Xiang-jing，Liu Fu-zhong，Zhang Ying，Li Yan-wei，Chen Yu-hui，Lian Yong. 2012. Research progress on eggplant parthenocarpy. Chnia Vegatebales，(6)：8－14. (in Chinese)
李香景，刘富中，张 映，李艳玮，陈钰辉，连 勇. 2012. 茄子单性结实研究进展. 中国蔬菜，(6)：8－14.

Li Yan-wei，Liu Fu-zhong，Chen Yu-hui，Zhang Ying，Zhang Wei-wei，Lian Yong. 2013. Effect of temperature on endogenous hormones contents during parthenocarpic eggplant ovary（fruit）development. China Vegetables，(22)：32－38. (in Chinese)

李艳玮，刘富中，陈钰辉，张 映，张伟伟，连　勇. 2013. 温度对茄子单性结实子房（果实）发育过程中内源激素含量的影响. 中国蔬菜，(22)：32－38.

Lin Z，Arciga-Reyes L，Zhong S，Alexander L，Hackett R，Wilson I，Grierson D. 2008. SlTPR1，a tomato tetratricopeptide repeat protein，interacts with the ethylene receptors NR and LeETR，modulating ethylene and auxin responses and development. Journal of Experimental Botany，59 (15)：4271－4287.

Liu Fu-zhong，Lian Yong，Chen Yu-hui，Song Yan. 2005. The effect of temperature and bud stage treatment on parthenocarpic gene expression of eggplant. Acta Horticulturae Sinica，32 (6)：1021－1025. (in Chinese)

刘富中，连　勇，陈钰辉，宋　燕. 2005. 温度和蕾期去雄及去柱头处理对茄子单性结实性的影响．园艺学报，32 (6)：1021－1025.

Liu Fu-zhong，Wan Xiang，Chen Yu-hui，Lian Yong，Song Ming. 2008. Inheritance of the eggplant parthenocarpy and AFLP molecular marker. Acta Horticulturae Sinica，35 (9)：1305－1309. (in Chinese)

刘富中，万　翔，陈钰辉，连　勇，宋　明. 2008. 茄子单性结实基因的遗传分析及 AFLP 分子标记. 园艺学报，35 (9)：1305－1309.

Liu Xun，He Bo-wen，Zhang Yi-zheng. 2009. Stress-responsive expression analysis of glutathione-*S*-transferase gene of *Ipomoea batatas*（L.）Lam. Hereditas（Beijing），31 (8)：859－864. (in Chinese)

刘　珣，何博文，张义正. 2009. 甘薯谷胱甘肽－S－转移酶基因在胁迫条件下的表达分析. 遗传，31 (8)：859－864.

Lohrum M A E，Ludwig R L，Kubbutat M H G，Hanlon1 M，Vousden K H. 2003. Regulation of HDM2 activity by the ribosomal protein L11. Cancer Cell，3：577－587.

Oh K C，Ivanchenko M G，White T J，Lomax T L. 2006. The diageotropica gene of tomato encodes a cyclophilin：a novel player in auxin signaling. Planta，224 (1)：133－144.

Penninckx I A，Eggermont K，Terras F R，Thomma B P，De Samblanx G W，Buchala A，Métraux J P，Manners J M，Broekaert W F. 1996. Pathogen-induced systemic activation of a plant defensin gene in *Arabidopsis* follows a salicylic acid-independent pathway. The Plant Cell，8 (12)：2309－2323.

Pinyopich A，Ditta G S，Baumann E，Wisman E，Yanofsky M F. 2003. Unraveling the redundant roles of MADS-box genes during carpel and fruit development. Nature，424：85－88.

Rotino G L，Elena P，Michela Z，Hans S，Angelo S. 1997. Genetic engineering of parthenocarpic plants. Nature Biotechnology，15：1398－1401.

Shimomura K，Koga T，Sueyoshi T，Hamachi Y. 2010. Development and suitability of DNA markers for breeding of parthenocarpic eggplant. Horticultural Research（Japan），9 (1)：13－17.

Tian Shi-bing，Liu Jun-zhao，Pi Wei，Zhao Xiao-feng，Yang Zhi-yuan. 1999. The observation test of eggplant parthenocarpy at low temperature reported for the first time. China Vegetables，(5)：28. (in Chinese)

田时炳，刘君绍，皮　伟，赵晓凤，杨治元. 1999. 低温下茄子单性结实观察试验初报. 中国蔬菜，(5)：28.

Tian Shi-bing，Liu Fu-zhong，Wang Yong-qing，Luo Zhang-yong，Chen Yi-kang，Liu Jun-shao，Lian Yong. 2003. Genetic ananlysis of parthenocarpy eggplant. Acta Horticulturae Sinica，30 (4)：413－416. (in Chinese)

田时炳，刘富中，王永清，罗章勇，陈义康，刘君绍，连　勇. 2003. 茄子单性结实性的遗传分析. 园艺学报，30 (4)：413－416.

Volarević S，Thomas G. 2001. Role of S6 phosphorylation and S6 kinase in cell growth. Progress in Nucleic Acid Research and Molecular Biology，65：101－127.

Wagner U， Edwards R，Dixon D P，Mauch F. 2002. Probing the diversity of the *Arabidopsis* glutathione *S*-transferase gene family. Plant Molecular Biology，49 (5)：515－532.

Wu Yan-rong，Guo Xiu-lin，Gao Xiu-rui，Li Bing，Pan Xiu-qing. 2009. Changes of endogenous hormones contents during flowering stage of parthenocarpic eggplant. Journal of Hebei Agricultural Science，13 (9)：14－16. (in Chinese)

武彦荣，郭秀林，高秀瑞，李　冰，潘秀清. 2009. 茄子单性结实系开花期内源激素含量的变化. 河北农业科学，13 (9)：14－16.

Zhang Wei-chun，Wei Yu-tang，Wang Jing，He Ming，Tang Ping. 2008. Observation of embryo development and fruit anatomic structure of parthenogenetic and non-parthenogenetic eggplants. Journal of Shenyang Agricultural University，39 (5)：534－537. (in Chinese)

张伟春，魏毓棠，王　静，何　明，唐　萍. 2008. 茄子单性结实与非单性结实自交系胚胎发育及果实解剖结构的观察. 沈阳农业大学学报，39 (5)：534－537.

Zhang Wei-chun，Wei Yu-tang，Wang Jing，He Ming，Tang Ping，Du Xue-jing. 2009. The relationship between endogenous hormone and parthenocarpy in the eggplant fruitlets. Journal of Shenyang Agricultural University，40 (1)：3－6. (in Chinese)
张伟春，魏毓棠，王　静，何　明，唐　萍，杜雪晶. 2009. 茄子子房内源激素含量与单性结实的关系. 沈阳农业大学学报，40 (1)：3－6.

Zhang Wei-wei，Liu Fu-zhong，Zhang Ying，Zhao Zhen，Chen Yu-hui，Lian Yong. 2014. Cloning and characterization of IAA family gene *SmIAA19* in eggplant. Acta Horticulturae Sinica，41 (11)：2231－2240. (in Chinese)
张伟伟，刘富中，张　映，赵　祯，陈钰辉，连　勇. 2014. 茄子生长素诱导基因 *SmIAA19* 的克隆和分析. 园艺学报，41 (11)：2231－2240

Zhang Ying. 2011. Construction of parthenocarpy SSH cDNA libraries and parthenocarpy related genes cloning in eggplant［Ph. D. Dissertation］. Beijing：Chinese Agriculture University. (in Chinese)
张　映. 2011. 茄子单性结实抑制差减文库的构建和相关基因的克隆［博士论文］. 北京：中国农业大学.

Zhang Ying，Chen Yu-hui，Zhang Zhen-xian，Fang Zhi-yuan，Lian Yong，Liu Fu-zhong. 2011. cDNA cloning and characterization of a eggplant peptide methionine sulfoxide reductase（*SmMsrA*）. Acta Horticulturae Sinica，3 (8)：1469－1478. (in Chinese)
张　映，陈钰辉，张振贤，方智远，连　勇，刘富中. 2011. 茄子甲硫氨酸亚砜还原酶（*SmMsrA*）基因 cDNA 全长的克隆和分析. 园艺学报，38 (8)：1469－1478.

Zhang Ying，Liu Fu-zhong，Chen Yu-hui，Lian Yong. 2009. Characteristics of eggplant parthenocarpy at low temperature. China Vegetables，(2)：16－20. (in Chinese)
张　映，刘富中，陈钰辉，连　勇. 2009. 低温下茄子单性结实特性的研究. 中国蔬菜，(2)：16－20.

Zhao F Y，Wang X Y，Zhao Y X，Zhang H. 2006. Transferring the *Suaeda salsa* glutathione *S*-transferase and catalase genes enhances low temperature stress resistance in transgenic rice seedlings. Journal of Plant Physiology and Molecular Biology，32 (2)：231－238.

Zhao Zhen，Liu Fu-zhong，Zhang Ying，QI Dong-xia，Chen Yu-hui，Lian Yong. 2015. VIGS expression vector construction and expression analyses of *SmMsrA* gene in eggplant. Acta Horticulturae Sinica，42 (8)：1495－1504. (in Chinese)
赵　祯，刘富中，张　映，齐东霞，陈钰辉，连　勇. 2015. 茄子 *SmMsrA* 基因 VIGS 表达载体的构建及表达分析. 园艺学报，42 (8)：1495－1504.

Zhou Ya-jun，Chen Yu-hui，Liu Fu-zhong，Zhang Ying，Lian Yong. 2010. Isolation of parthenocarpy related ESTs in parthenocarpic eggplant using suppression subtraction hybridization（SSH）. Acta Horticulturae Sinica，37 (12)：1944－1952. (in Chinese)
周亚君，陈钰辉，刘富中，张　映，连　勇. 2010. 利用抑制差减杂交技术分离茄子单性结实相关 ESTs. 园艺学报，37 (12)：1944－1952.