园艺学报，2018，45 (2)：279–288.
Acta Horticulturae Sinica
doi：10.16420/j.issn.0513-353x.2017-0412；http：//www. ahs. ac. cn

番茄嫁接苗根穗互作对其耐冷性的影响

韩 敏[1]，曹逼力[1]，刘树森[2]，徐 坤[1,*]

（[1] 山东农业大学园艺科学与工程学院，山东果蔬优质高效生产协同创新中心/农业部黄淮地区园艺作物生物学与种质创制重点实验室，山东泰安 271018；[2] 山东省寿光市三木种苗有限公司，寿光市尧水街国家现代种业创新创业研发基地（寒桥），山东寿光 262704）

摘 要：以耐冷性强的番茄‘060112’（R）和冷敏感番茄‘060911’（S）为试材，采用靠接法进行嫁接，形成双根双穗嫁接苗 RS/RS，嫁接苗成活后，通过断根或断穗，设 RS/RS、RS/R、RS/S、R/RS、R/S、R/R、S/RS、S/R、S/S 共 9 个处理，置于光强 22 klx、光周期 12 h/12 h 的光照培养箱内，测定昼夜温度 10 ℃/3 ℃低温胁迫 9 d 及 25 ℃/15 ℃常温恢复 3 d 过程中嫁接苗的冷害指数、根系活力、电解质渗透率及渗透调节物质含量，探讨番茄根系、接穗及其互作效应对嫁接苗耐冷性的影响。经统计分析表明，低温胁迫过程中，具“R”根系或接穗的嫁接苗组合中，以 R/R 处理冷害指数较低，而具“S”根系或接穗的嫁接苗组合中，以 S/S 处理的冷害指数较高，同时 R/R 的叶片及根系电解质渗透率最低，可溶性糖及脯氨酸含量最高，R/RS、RS/R、RS/S、S/RS 等处理的冷害指数、电解质渗透率、可溶性糖及脯氨酸含量均介于 R/R 与 S/S 之间，表明冷敏感的 S 根系或接穗均降低了嫁接苗中 R 的耐冷性，而耐冷性强的 R 根系或接穗均提高了嫁接苗中 S 的耐冷性。RS/RS 处理的耐冷性高于 S/RS 而低于 R/RS，表明根系在增强嫁接苗耐冷性中的作用大于接穗；而具“RS”根或穗的嫁接苗中，以 RS-R 的耐冷性显著高于 RS-S，且互作效应的 *P* 值小于 0.01，表明根、穗对嫁接苗耐冷性存在显著的互作效应。低温胁迫处理前，不同耐冷性番茄根系活力、根系及叶片电解质渗透率、可溶性糖及脯氨酸含量等无显著差异，但低温胁迫 9 d 后，常温恢复 3 d 时，不同处理间均表现出显著差异。

关键词：番茄；砧木；嫁接；低温胁迫；耐冷性

中图分类号：S 641.2 **文献标志码**：A **文章编号**：0513-353X（2018）02-0279-10

Effects of Rootstock and Scion Interaction on Chilling Tolerance of Grafted Tomato Seedlings

HAN Min[1]，CAO Bili[1]，LIU Shusen[2]，and XU Kun[1,*]

（[1]*College of Horticulture Science and Engineering*，*Shandong Agricultural University*，*Shandong Collaborative Innovation Center of Fruit & Vegetable Quality and Efficient Production*，*Key Laboratory of Biology and Genetic Improvement of Horticultural Crops in Huang-Huai Region*，*Ministry of Agriculture*，*Tai'an*，*Shandong* 271018，*China*；[2]*Shandong Shouguang Sanmu Seedling Corporation Limited*，*Shouguang Yaoshui Street National Modern Seed Industry Innovation and Entrepreneurship Research and Development Base*（*Hanqiao*），*Shouguang*，*Shandong* 262704，*China*）

Abstract: In order to investigate the effect of tomato rootstock，scion and their potential interaction on chilling tolerance，we grafted chilling-sensitive tomato cultivar ‘060911’（S）and chilling-resistant tomato

---

收稿日期：2017–12–29；**修回日期**：2018–01–31

基金项目：山东省现代农业产业技术体系专项基金项目（SDAIT-05-05）；山东省“双一流”学科建设项目（SYL2017YSTD06）

* 通信作者 Author for correspondence（E-mail：xukun@sdau.edu.cn）

cultivar‘060112’（R）. We then selectively removed rootstock or scion from the grafted seedlings RS/RS，and incubated the newly formed 9 kinds of seedlings，*i.e.*，RS/RS，RS/R，RS/S，R/RS，S/RS，S/R，R/S，R/R，S/S in the growth chamber with light intensity of 22 klx and photoperiod 12 h/12 h. The seedlings were treated with low temperature at 10 ℃/3 ℃ for 9 days and recovered at 25 ℃/15 ℃ for 3 days. Chilling injury index，root activity，electrolyte leakage and osmotic adjustment substances were measured after the chilling treatment and after the recovery. Grafted seedlings behaved similarly in root activity，electrolyte leakage of root and leaf，soluble sugar and proline content before the chilling treatment，but showed significant difference after the chilling treatment and after the recovery. Among these 9 kinds of grafted seedlings，S/S seedlings displayed the highest while R/R seedlings displayed the lowest chilling injury index. Meanwhile，R/R seedlings showed the lowest electrolyte leakage，and the highest content of soluble sugar and proline. Meanwhile，R/R seedlings showed the lowest electrolyte leakage，and the highest content of soluble sugar and proline. While R/RS，RS/R，RS/S，S/RS seedlings were intermediate between R/R and S/S regarding the chilling injury index，electrolyte leakage，soluble sugar and proline content. Results indicated that both rootstock and scion are important for chilling tolerance. We further found that rootstock conferred higher chilling resistance than scion，due to the fact that the chilling tolerance of RS/RS was higher than that of S/RS，but lower than R/RS. Moreover，the chilling tolerance of RS-R was significantly higher than that of RS-S，and the *P* value of interaction was less than 0.01. The results showed that rootstock and scion had significant interaction effect on the chilling tolerance of grafted seedlings.

Keywords：tomato；rootstock；grafting；low temperature stress；cold resistance

番茄（*Solanum lycopersicum* L.）是中国冬春设施栽培面积最大的喜温性蔬菜之一，易受低温弱光的影响，导致其生长发育缓慢，产量品质下降（王丽娟 等，2006）。而嫁接栽培在增强作物抗逆性（于贤昌 等，1997；Venem et al.，2008；Schwarz et al.，2010），促进植株生长发育（Francisco et al.，2010）等方面具有重要作用。Gao 等（2008，2016）的研究表明，低温胁迫下，茄子嫁接苗叶片的冷害指数及电解质渗透率显著低于自根苗，脯氨酸及可溶性蛋白含量显著高于自根苗，耐冷性明显增强。Liu 等（2014）在烟草上的研究表明，抗性砧木嫁接苗叶片脯氨酸含量升高，抗旱能力显著增强。Xing 等（2014）采用耐盐性强的南瓜砧木嫁接黄瓜，可显著提高叶片可溶性糖含量，有效缓解盐胁迫对嫁接苗生长的抑制作用。Li 等（2008）研究则发现，耐冷性强的黄瓜砧木嫁接苗根系活力增加，耐冷性增强。因嫁接苗是由来自不同个体的根系及接穗组成的复合体，接穗生长所需的水分和矿质元素需要根系提供，根系生长所需的碳水化合物则依靠接穗供给，因此，接穗不可避免地也会影响嫁接苗的生理特性和生长发育。Etehadnia 等（2008）研究发现，耐盐性强的马铃薯接穗嫁接苗的耐盐性显著增强，Martinez-Rodriguez 等（2008）在番茄上及 Ai 等（2010）在黄瓜上的研究结果一致。前人的研究还表明，砧木和接穗均可显著影响黄瓜（于贤昌 等，1998）、茄子（张晓艳和徐坤，2009）嫁接苗的抗冷性，以及大豆（Serraj & Sinclair，1996）、葡萄（Tramontini et al.，2013）嫁接苗的抗旱性。可见，砧木和接穗均可对嫁接苗的抗逆性产生显著影响。但关于根、穗及其互作效应在增强番茄嫁接苗耐冷性方面各自作用的大小并不清楚。为此，本试验中以耐冷性显著不同的 2 个番茄砧木为试材，研究互为根、穗不同组合嫁接苗在低温胁迫条件下植株冷害指数、根系活力、电解质渗透率、渗透调节物质含量的变化，明确根系、接穗及其互作效应在增强番茄嫁接

苗耐冷性中的作用大小，为低温季节番茄嫁接栽培合理选用根穗品种提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料与设计

试验于 2015—2016 年在山东农业大学进行。供试材料为耐冷番茄‘060112’（R）和冷敏感番茄‘060911’（S）。种子催芽后播种于 108 孔穴盘内，浇 Hoagland’s 营养液培养至五叶一心时，采取靠接法嫁接，组成双根双穗嫁接苗，移栽于 32 孔穴盘内继续培养。

嫁接苗恢复生长后，通过断根或断穗，形成 9 个不同的“根/穗”组合处理（R/R、R/RS、R/S、RS/R、RS/RS、RS/S、S/R、S/RS、S/S）。每处理共 60 钵，均分为 3 组作为 3 次重复。待接穗长出 3 片新叶后，移入光强 22 klx、光周期 12 h/12 h 的 GXZ-500D 智能光照培养箱内，先在昼/夜温度为 20 ℃/10 ℃条件下预处理 2 d，后置于昼/夜温度为 10 ℃/3 ℃下条件下进行低温处理 9 d，之后在昼/夜温度为 25 ℃/15 ℃下恢复 3 d。试验过程中调查各处理嫁接苗冷害指数，并取样测定幼苗根系及上数第 2 ~ 3 片展开叶片相关指标。

1.2　测定项目与方法

冷害分级标准：0 级，幼苗挺拔，无任何异常症状；1 级，幼苗仅基部叶片边缘有轻度的皱缩萎蔫；2 级，幼苗半数以下叶片皱缩萎蔫，叶柄轻微下垂；3 级，幼苗半数以上叶片皱缩萎蔫，叶柄明显下垂；4 级，整株叶片皱缩萎蔫，基部叶片枯黄。冷害指数（%）=（1 × N1 + 2 × N2 + 3 × N3 + 4 × N4 + 0 × N0）/（处理总株数 × 4）× 100，式中 N 为相应冷害级的苗数。

幼苗根系活力采用氯化三苯基四氮唑（TTC）法，丙二醛含量采用硫代巴比妥酸比色法，可溶性糖含量采用蒽酮比色法（赵世杰　等，2002）测定，电解质渗透率用美国产 ORION TDS 电导仪测定，脯氨酸含量采用酸性茚三酮显色法（李合生　等，2000）测定。

试验数据采用 Excel 及 DPS 软件，依据裂区试验设计进行统计处理。

2　结果与分析

2.1　低温胁迫下不同根穗组合嫁接苗冷害指数的变化

表 1 是 9 种根/穗组合番茄嫁接苗在低温胁迫与常温恢复过程中 12 种接穗（双穗分别检测其一，表示为 RS-R 和 RS-S）的冷害指数。为了分析根因素和穗因素及其互作对冷害指数的影响，分别将相同根和相同穗组合嫁接苗的冷害指数取平均数，进行多重比较，结果（表 2）表明，根因素和穗因素对冷害指数均表现出显著影响（根因素和穗因素的 P 值均小于 0.01），且均以 R 作为根系（R/RS-R、R/RS-S、R/S 和 R/S）或作为接穗（RS/R、R/R 和 S/R）嫁接苗的冷害指数较低，以 RS 为根系或接穗的次之，以 S 为根系或接穗的较高。如低温胁迫 9 d 时，分别以 R、RS 和 S 为根系的嫁接苗冷害指数分别为 16.00%、32.75%和 57.75%，以 R 为根系的仅是以 S 为根系的 27.71%；而 R、RS-R、RS-S 和 S 接穗的冷害指数分别为 27.33%、32.00%、39.00%和 43.67%，R 接穗的为 S 的 62.58%，表明根系对嫁接苗冷害指数的影响大于接穗。根 × 穗互作的 P 值均小于 0.05，表明二者对嫁接苗冷害指数的影响也存在显著的互作效应。

表 1　不同根或穗组合番茄嫁接苗冷害指数的变化

Table 1　Changes of chilling injury index of grafted tomato seedlings with different roots or scion combinations %

根/穗组合 Root/scion combination	测定的接穗 Scion	低温处理天数（+ 恢复天数）Low temperature stress days（+ Recovery days）						
		0	1	3	6	9	9 + 1	9 + 3
RS/RS	RS-R	0	7.00 ± 2.05	6.00 ± 1.76	22.00 ± 2.47	28.00 ± 2.34	21.00 ± 1.84	14.00 ± 1.53
	RS-S	0	9.00 ± 1.06	10.00 ± 3.03	26.00 ± 1.87	38.00 ± 1.33	23.00 ± 1.68	16.00 ± 1.33
RS/R	R	0	5.00 ± 2.16	4.00 ± 2.26	19.00 ± 3.01	23.00 ± 2.27	17.00 ± 1.48	13.00 ± 1.14
RS/S	S	0	10.00 ± 1.35	12.00 ± 2.83	30.00 ± 1.66	42.00 ± 3.02	31.00 ± 1.22	17.00 ± 2.15
R/RS	RS-R	0	4.00 ± 1.27	2.00 ± 2.77	8.00 ± 3.12	13.00 ± 1.63	10.00 ± 2.04	7.00 ± 2.46
	RS-S	0	7.00 ± 2.14	6.00 ± 1.95	12.00 ± 2.83	17.00 ± 2.33	13.00 ± 2.25	10.00 ± 3.26
R/R	R	0	2.00 ± 3.15	2.00 ± 2.05	7.00 ± 1.94	12.00 ± 1.92	8.00 ± 2.46	5.00 ± 2.77
R/S	S	0	9.00 ± 2.57	7.00 ± 2.06	14.00 ± 2.64	22.00 ± 1.86	17.00 ± 2.67	12.00 ± 2.27
S/RS	RS-R	0	8.00 ± 1.83	8.00 ± 1.45	38.00 ± 2.36	55.00 ± 1.72	43.00 ± 3.17	20.00 ± 3.08
	RS-S	0	13.00 ± 2.03	15.00 ± 2.35	44.00 ± 1.75	62.00 ± 1.61	48.00 ± 2.89	23.00 ± 2.53
S/R	R	0	12.00 ± 3.05	10.00 ± 2.94	35.00 ± 3.04	47.00 ± 2.06	34.00 ± 3.09	19.00 ± 1.83
S/S	S	0	2.00 ± 1.67	15.00 ± 1.93	50.00 ± 2.05	67.00 ± 2.14	55.00 ± 1.05	28.00 ± 2.06

注：R：耐冷番茄‘060112’；S：冷敏感番茄‘060911’。RS-R 和 RS-S 分别代表双穗中的 R 和 S 穗。下同。

Note：R：Chilling-resistant tomato‘060112’；S：Chilling-sensitive tomato cultivar‘060911’. RS-R and RS-S represent the R and S scion in the double scion，respectively. The same below.

表 2　相同根或穗组合番茄嫁接苗冷害指数平均数的多重比较

Table 2　Multiple comparison of average number of chilling injury index of grafted tomato seedlings with same roots or scion combinations %

因子 Factor	根或穗（组合） Root or scion（Combination）	低温处理天数（+ 恢复天数）Low temperature stress days（+ Recovery days）						
		0	1	3	6	9	9 + 1	9 + 3
根 Root	RS（RS/RS-R，RS/RS-S，RS/R，RS/S）	0	7.75 b	8.00 b	24.25 b	32.75 b	23.00 b	15.00 b
	R（R/RS-R，R/RS-S，R/R，R/S）	0	5.50 c	4.25 c	10.25 c	16.00 c	12.00 c	8.50 c
	S（S/RS-R，S/RS-S，S/R，S/S）	0	8.75 a	12.00 a	41.75 a	57.75 a	45.00 a	22.50 a
穗 Scion	RS-R（RS/RS-R，R/RS-R，S/RS-R）	0	6.33 b	5.33 c	22.67 c	32.00 c	24.67 c	13.67 ab
	RS-S（RS/RS-S，R/RS-S，S/RS-S）	0	9.67 a	10.33 b	27.33 b	39.00 b	28.00 b	16.33 a
	R（RS/R，R/R，S/R）	0	6.33 b	5.33 c	20.33 d	27.33 d	19.67 d	12.33 b
	S（RS/S，R/S，S/S）	0	7.00 b	11.33 a	31.33a	43.67 a	34.33 a	19.00 a
P 值	根 Root	0	0	0	0	0	0	0
P value	穗 Scion	0	0	0	0	0	0	0
	根 × 穗 Root × Scion	0	0	0	0	0.002	0	0.018

注：表中数值后不同小写字母表示处理间差异达 0.05 显著水平。下同。

Note：Values in the table followed by different lowercase letters are significant at 0.05 level，respectively. The same below.

2.2　低温胁迫下不同根穗组合嫁接苗根系活力的变化

低温胁迫下不同处理番茄嫁接苗根系活力均不断下降，常温恢复后又明显升高（表 3）。如表 4 所示，分别将相同根和相同穗组合嫁接苗的根系活力取平均值进行多重比较，可见，低温胁迫前，不同处理根穗组合嫁接苗的根系活力差异不显著，低温胁迫及常温恢复过程中则均表现出极显著差异，且无论是作为根系还是作为接穗，均以 R 较高，S 较低，而 RS 双根或双穗组合居中，但 RS 根中以 RS-R（双根系 RS 中的 R 根）的根系活力显著高于 RS-S（双根系 RS 中的 S 根）。如低温胁迫 9 d 时，R 根系活力为 99.91 μg · g^{-1}，较 S 根高 122.12%，RS-R 根较 RS-S 根高 25.43%；以 R 为接穗的嫁接苗根系活力较 S 穗的高 20.55%，但增幅较 R 根系比 S 根系嫁接苗的增加幅度显著降低，说明尽管接穗也影响根系活力，但不及根系的作用大。除低温胁迫前根、穗对嫁接苗根系活力的交互效应不显著外，低温胁迫及常温恢复条件下根穗间均存在显著（$P \leqslant 0.05$）或极显著（$P \leqslant 0.01$）

的交互效应。

表 3　不同根或穗组合番茄嫁接苗根系活力的变化

Table 3　Changes of root activity of grafted tomato seedlings with different roots or scion combinations　μg · g-1

根/穗组合 Root/Scion combination	测定的根系 Root	低温处理天数（+ 恢复天数）Low temperature stress days（+ Recovery days）						
		0	1	3	6	9	9 + 1	9 + 3
RS/RS	RS-R	239.15 ± 9.11	216.58 ± 8.61	162.16 ± 6.24	117.85 ± 5.32	71.89 ± 7.64	108.89 ± 2.14	140.83 ± 4.22
	RS-S	240.18 ± 8.64	205.81 ± 3.89	141.24 ± 9.64	100.02 ± 9.68	60.94 ± 2.14	93.83 ± 11.41	125.95 ± 2.15
R/RS	R	238.06 ± 4.58	220.47 ± 5.77	188.94 ± 7.73	136.94 ± 2.78	97.57 ± 9.71	126.53 ± 9.12	157.64 ± 8.12
S/RS	S	239.20 ± 6.63	200.98 ± 8.93	124.39 ± 3.11	80.18 ± 4.73	43.54 ± 6.32	70.64 ± 12.24	110.97 ± 8.06
RS/R	RS-R	240.04 ± 9.46	217.41 ± 2.55	170.22 ± 3.46	125.14 ± 9.94	83.12 ± 4.59	113.74 ± 9.06	145.85 ± 5.08
	RS-S	239.04 ± 7.21	207.38 ± 6.52	145.08 ± 8.11	108.76 ± 8.21	63.78 ± 8.54	99.74 ± 15.04	127.47 ± 1.14
R/R	R	238.79 ± 2.64	222.78 ± 5.58	199.90 ± 9.14	143.54 ± 1.59	110.08 ± 2.45	129.31 ± 8.14	166.91 ± 7.12
S/R	S	239.81 ± 9.85	201.87 ± 9.15	127.64 ± 9.64	84.95 ± 10.21	50.81 ± 6.50	77.03 ± 13.62	114.18 ± 3.09
RS/S	RS-R	237.94 ± 7.58	211.06 ± 7.32	151.04 ± 7.02	115.14 ± 3.14	68.87 ± 5.43	104.13 ± 8.08	133.31 ± 6.16
	RS-S	239.11 ± 7.94	205.54 ± 1.68	135.56 ± 7.61	92.08 ± 12.37	53.78 ± 7.33	85.78 ± 13.14	120.84 ± 9.28
R/S	R	240.58 ± 5.48	218.79 ± 7.16	180.54 ± 5.03	129.64 ± 6.05	92.08 ± 9.36	118.32 ± 7.02	151.89 ± 1.29
S/S	S	237.97 ± 9.05	198.34 ± 8.21	120.02 ± 9.54	77.08 ± 15.05	40.58 ± 8.40	66.17 ± 11.19	104.13 ± 9.72

表 4　相同根或穗组合番茄嫁接苗根系活力平均数的多重比较

Table 4　Multiple comparison of average number of root activity of grafted tomato seedlings with same roots or scion combinations　μg · g-1

因子 Factor	根或穗（组合）Root or scion（Combination）	低温处理天数（+ 恢复天数）Low temperature stress days（+ Recovery days）						
		0	1	3	6	9	9 + 1	9 + 3
根 Root	RS-R（RS-R/RS，RS-R/R，RS-R/S）	239.04 a	215.02 a	161.14 a	119.38 a	74.63 a	108.92 b	140.00 b
	RS-S（RS-S/RS，RS-S/R，RS-S/S）	239.44 a	206.24 b	140.63 b	100.41 b	59.50 b	93.12 c	124.75 c
	R（R/RS，R/R，R/S）	239.14 a	220.68 c	189.79 b	136.71 c	99.91 c	124.72 a	158.81 a
	S（S/RS，S/R，S/S）	238.99 a	200.40 d	124.02 c	80.74 d	44.98 d	71.28 d	109.76 d
穗 Scion	RS（RS-R/RS，RS-S/RS，R/RS，S/RS）	239.15 a	210.96 e	154.18 d	108.75 e	68.48 e	99.97 b	133.85 b
	R（RS-R/R，RS-S/R，R/R，S/R）	239.42 a	212.36 f	160.71 e	115.69 e	76.95 f	104.96 a	138.60 a
	S（RS-R/S，RS-S/S，R/S，S/S）	238.90 a	208.43 g	146.79 f	103.49 f	63.83 g	93.60 c	127.54 c
P 值	根 Root	0.967	0	0	0	0	0	0
P value	穗 Scion	0.783	0	0	0	0	0	0
	根 × 穗 Root × Scion	0.995	0	0.001	0	0	0.024	0

2.3　低温胁迫对不同根穗组合嫁接苗叶片渗透调节物质含量的影响

表 5、表 6 表明，低温胁迫前不同处理番茄嫁接苗叶片电解质渗透率、可溶性糖及脯氨酸含量均无显著差异，而低温胁迫则显著提高了其含量，但 R 根或 R 穗嫁接苗叶片的脯氨酸及可溶性糖含量均显著高于 RS 及 S。如低温胁迫 9 d 时，R 穗嫁接苗叶片可溶性糖含量分别比 RS-R、RS-S、S 穗的高 3.22%、17.22%、23.90%，脯氨酸含量分别高 3.71%、9.04%、13.66%。低温胁迫下电解质渗透率以 S 根或 S 穗处理的叶片较高，R 较低，RS-S、RS-R 居中。如低温胁迫 9 d 时，分别以 S、RS-S、RS-R、R 为接穗的叶片电解质渗透率分别比胁迫前增加了 236.10%、222.29%、194.97%、179.89%。常温恢复下，各处理番茄嫁接苗叶片电解质渗透率、可溶性糖及脯氨酸含量均显著下降，且除低温胁迫前外，根、穗对叶片电解质渗透率、可溶性糖及脯氨酸含量的影响均表现出极显著（$P \leq 0.01$）的互作效应。

表 5 不同根或穗组合番茄嫁接苗叶片生理特性的变化

Table 5 Changes of physiological character of leaves in grafted tomato seedlings with different roots or scion combinations

根/穗组合 Root/Scion combination	接穗 Scion	电解质渗透率/% Electrolyte permeability 0 d	9 d	（9 + 3）d	可溶性糖/（mg · g^{-1} FW） Soluble sugar 0 d	9 d	（9 + 3）d	脯氨酸/（μg · g^{-1}FW） Proline 0 d	9 d	（9 + 3）d
RS/RS	RS-R	14.49 ± 1.25	42.04 ± 1.41	26.98 ± 1.25	1.32 ± 0.22	6.97 ± 0.65	2.56 ± 0.54	115.94 ± 5.18	333.81 ± 4.23	173.22 ± 3.68
	RS-S	14.48 ± 1.75	49.02 ± 2.04	33.95 ± 0.98	1.42 ± 0.24	6.07 ± 0.88	2.36 ± 0.55	115.82 ± 3.77	313.07 ± 5.32	162.80 ± 4.55
RS/R	R	14.52 ± 2.50	41.15 ± 1.12	26.11 ± 1.98	1.31 ± 0.31	7.11 ± 0.78	2.67 ± 0.64	116.17 ± 4.12	340.75 ± 3.61	174.56 ± 4.08
RS/S	S	14.52 ± 1.25	49.76 ± 1.25	34.69 ± 2.11	1.46 ± 0.36	5.90 ± 1.01	2.20 ± 0.74	116.13 ± 6.15	305.98 ± 3.72	161.70 ± 5.15
R/RS	RS-R	14.39 ± 1.12	35.41 ± 1.22	21.65 ± 1.45	1.36 ± 0.26	8.02 ± 0.85	2.82 ± 0.71	115.15 ± 4.33	387.69 ± 3.73	191.39 ± 4.88
	RS-S	14.47 ± 2.02	39.04 ± 2.03	24.98 ± 0.87	1.27 ± 0.25	7.63 ± 1.02	2.94 ± 0.68	115.79 ± 5.13	375.55 ± 3.84	179.11 ± 5.13
R/R	R	14.53 ± 2.05	30.12 ± 1.67	18.98 ± 1.59	1.35 ± 0.11	8.43 ± 0.93	3.01 ± 0.84	116.21 ± 3.75	409.69 ± 6.33	207.24 ± 6.05
R/S	S	14.51 ± 1.55	39.87 ± 0.95	25.88 ± 1.27	1.30 ± 0.20	7.53 ± 0.69	2.74 ± 0.52	116.06 ± 6.05	364.16 ± 4.05	177.22 ± 6.03
S/RS	RS-R	14.44 ± 1.65	51.04 ± 1.87	48.27 ± 1.07	1.39 ± 0.33	4.59 ± 0.92	2.14 ± 0.74	115.51 ± 3.82	282.50 ± 6.02	159.60 ± 4.82
	RS-S	14.58 ± 1.75	51.97 ± 0.97	41.28 ± 1.05	1.42 ± 0.37	3.55 ± 1.00	2.03 ± 0.55	116.60 ± 5.66	266.30 ± 3.58	147.40 ± 4.64
S/R	R	14.37 ± 0.55	50.22 ± 1.76	39.58 ± 2.08	1.34 ± 0.32	4.69 ± 0.74	2.20 ± 0.69	114.96 ± 4.92	290.80 ± 5.22	160.71 ± 3.89
S/S	S	14.47 ± 0.85	56.03 ± 1.04	49.88 ± 0.99	1.40 ± 0.27	2.87 ± 0.67	1.97 ± 0.49	115.72 ± 4.62	246.01 ± 5.05	127.44 ± 5.26

表 6 相同根或穗组合番茄嫁接苗叶片生理特性平均数的多重比较

Table 6 Multiple analysis of average number of physiological character of leaves in grafted tomato seedlings with same roots or scion combinations

因子 Factor	根或穗（组合） Root or scion（Combination）	电解质渗透率/% Electrolyte permeability 0 d	9 d	（9 + 3）d	可溶性糖/（mg · g^{-1} FW） Soluble sugar 0 d	9 d	（9 + 3）d	脯氨酸/（μg · g^{-1} FW） Proline 0 d	9 d	（9 + 3）d
根	RS（RS/RS-R，RS/RS-S，RS/R，RS/S）	14.50 a	45.49 b	30.43 b	1.37 a	6.52 b	2.45 b	116.02 a	323.40 b	168.07 b
Root	R（R/RS-R，R/RS-S，R/R，R/S）	14.48 a	36.11 c	22.87 c	1.32 a	7.90 a	2.88 a	115.80 a	384.27 a	188.74 a
	S（S/RS-R，S/RS-S，S/R，S/S）	14.46 a	52.32 a	44.75 a	1.39 a	3.93 c	2.08 c	115.70 a	271.40 c	148.79 c
穗	RS-R（RS/RS-R，R/RS-R，S/RS-R）	14.44 a	42.83 c	32.30 b	1.35 a	6.53 a	2.51 b	115.53 a	334.67 b	174.74 b
Scion	RS-S（RS/RS-S，R/RS-S，S/RS-S）	14.51 a	46.68 b	33.40 b	1.37 a	5.75 b	2.44 c	116.07 a	318.31 c	163.10 c
	R（RS/R，R/R，S/R）	14.47 a	40.50 d	28.22 c	1.33 a	6.74 a	2.63 a	115.78 a	347.08 a	180.84 a
	S（RS/S，R/S，S/S）	14.50 a	48.55 a	36.82 a	1.38 a	5.44 b	2.30 d	115.97 a	305.38 d	155.45 d
P 值	根 Root	0.880	0	0	0.482	0	0	0.928	0	0
P value	穗 Scion	0.969	0	0.001	0.866	0	0	0.947	0	0
	根 × 穗 Root × Scion	0.975	0	0	0.780	0.003	0	0.975	0	0

2.4 低温胁迫对不同根穗组合嫁接苗根系渗透调节物质含量的影响

低温胁迫前不同处理番茄嫁接苗根系电解质渗透率、可溶性糖及脯氨酸含量无显著差异，低温胁迫下均显著升高，常温恢复后又显著下降，且以 R 根或 R 穗嫁接苗根系的电解质渗透率较低，可溶性糖及脯氨酸含量较高，S 根或 S 穗嫁接苗则刚好相反，RS 根或 RS 穗嫁接苗居中，但 RS-R 根中的电解质渗透率显著低于 RS-S，而可溶性糖及脯氨酸含量则相反（表 7，表 8）。如低温胁迫 9 d 时，RS-R 根的电解质渗透率比 RS-S 低 11.42%，而可溶性糖及脯氨酸含量分别高 18.08%、5.49%，且除低温胁迫前外，根和穗之间均存在极显著（$P \leqslant 0.01$）的互作效应。

表 7　不同根或穗组合番茄嫁接苗根系生理特性的变化

Table 7　Changes of physiological character of roots in grafted tomato seedlings with different roots or scion combinations

根/穗组合 Root/Scion combination	根系 Root	电解质渗透率/% Electrolyte permeability			可溶性糖/（mg · g^{-1} FW） Soluble sugar			脯氨酸/（μg · g^{-1} FW） Proline		
		0 d	9 d	（9 + 3）d	0 d	9 d	（9 + 3）d	0 d	9 d	（9 + 3）d
RS/RS	RS-R	21.84 ± 2.14	54.72 ± 1.35	39.82 ± 2.04	0.81 ± 0.17	4.09 ± 0.76	2.67 ± 0.63	59.84 ± 6.24	232.03 ± 4.11	121.81 ± 4.91
	RS-S	22.75 ± 1.99	61.23 ± 2.02	43.59 ± 1.83	0.82 ± 0.11	3.46 ± 0.71	2.30 ± 0.32	59.75 ± 7.13	227.46 ± 6.53	105.43 ± 6.32
R/RS	R	22.91 ± 3.02	49.04 ± 1.28	31.56 ± 1.88	0.81 ± 0.20	4.67 ± 0.51	3.01 ± 0.52	59.91 ± 5.96	272.53 ± 3.86	129.32 ± 5.24
S/RS	S	21.99 ± 1.84	69.25 ± 3.01	49.63 ± 2.79	0.82 ± 0.16	3.01 ± 0.63	2.13 ± 0.69	58.99 ± 6.57	191.63 ± 5.25	102.53 ± 5.66
RS/R	RS-R	22.19 ± 3.08	52.24 ± 2.09	37.54 ± 3.03	0.78 ± 0.19	4.21 ± 0.42	2.80 ± 0.44	59.19 ± 4.86	240.79 ± 6.33	123.66 ± 4.81
	RS-S	22.54 ± 2.55	60.14 ± 2.23	42.63 ± 2.15	0.80 ± 0.23	3.56 ± 0.55	2.43 ± 0.36	60.54 ± 5.11	228.33 ± 5.46	110.83 ± 5.65
R/R	R	21.48 ± 3.07	41.35 ± 1.63	28.76 ± 3.01	0.77 ± 0.14	4.96 ± 0.62	3.24 ± 0.39	58.48 ± 4.71	291.83 ± 6.57	136.91 ± 5.83
S/R	S	22.15 ± 3.02	67.43 ± 3.05	48.09 ± 2.83	0.77 ± 0.15	3.12 ± 0.76	2.16 ± 0.47	59.15 ± 5.81	198.45 ± 4.97	103.54 ± 6.43
RS/S	RS-R	21.65 ± 2.25	55.96 ± 2.43	40.55 ± 2.57	0.81 ± 0.09	3.85 ± 0.33	2.56 ± 0.58	58.65 ± 6.55	230.15 ± 5.15	119.85 ± 6.45
	RS-S	23.07 ± 2.89	62.57 ± 2.45	44.77 ± 2.26	0.79 ± 0.12	3.27 ± 0.59	2.27 ± 0.72	60.07 ± 7.05	210.57 ± 6.33	105.75 ± 4.54
R/S	R	21.74 ± 3.03	50.18 ± 1.81	32.87 ± 3.09	0.80 ± 0.21	4.51 ± 0.64	2.92 ± 0.63	58.74 ± 6.17	261.88 ± 4.63	127.24 ± 5.53
S/S	S	22.36 ± 2.53	78.03 ± 1.78	57.76 ± 1.99	0.80 ± 0.10	2.44 ± 0.73	1.91 ± 0.71	59.36 ± 5.57	153.26 ± 5.26	85.41 ± 6.41

表 8　相同根或穗组合番茄嫁接苗根系生理特性平均数的多重比较

Table 8　Multiple analysis of average number of physiological character of roots in grafted tomato seedlings with same roots or scion combinations

因子 Factor	根或穗（组合） Root or scion（Combination）	电解质渗透率/% Electrolyte permeability			可溶性糖/（mg · g^{-1} FW） Soluble sugar			脯氨酸/（μg · g^{-1} FW） Proline		
		0 d	9 d	（9 + 3）d	0 d	9 d	（9 + 3）d	0 d	9 d	（9 + 3）d
根	RS-R（RS-R/RS，RS-R/R，RS-R/S）	21.89 a	54.31 c	39.30 c	0.80 a	4.05 b	2.68 b	59.23 a	234.32 b	121.77 b
Root	RS-S（RS-S/RS，RS-S/R，RS-S/S）	22.79 a	61.31 b	43.66 b	0.80 a	3.43 c	2.33 c	60.12 a	222.12 c	107.34 c
	R（R/RS，R/R，R/S）	22.04 a	46.86 d	31.06 d	0.79 a	4.72 a	3.06 a	59.04 a	275.41 a	131.16 a
	S（S/RS，S/R，S/S）	22.17 a	71.57 a	51.83 a	0.79 a	2.86 d	2.07 d	59.17 a	181.11 d	97.16 d
穗	RS（RS-R/RS，RS-S/RS，R/RS，S/RS）	22.37 a	58.56 b	41.15 b	0.81 a	3.81 b	2.53 b	59.62 a	230.91 b	114.77 b
Scion	R（RS-R/R，RS-S/R，R/R，S/R）	22.09 a	55.29 c	39.26 c	0.78 a	3.96 a	2.66 a	59.34 a	239.85 a	118.74 a
	S（RS-R/S，RS-S/S，R/S，S/S）	22.21 a	61.69 a	43.99 a	0.80 a	3.52 c	2.41 c	59.21 a	213.97 c	109.56 e
P 值	根 Root	0.641	0	0	0.999	0	0	0.641	0	0
P value	穗 Scion	0.979	0	0	0.786	0	0	0.979	0	0
	根 × 穗 Root × Scion	0.992	0	0	1.000	0	0.005	0.992	0	0.002

3　讨论

低温引发叶片皱缩、萎蔫等症状是植物冷害最直观的表现（田丹青　等，2011）。Cao 等（2011）研究表明，低温能够显著抑制油棕幼苗的生长，其叶片冷害指数随低温胁迫时间的延长而显著增加。本研究中，低温胁迫 3 d 时，S 为根或穗的嫁接苗冷害指数较 1 d 时显著升高，而 R 为根或穗的嫁接苗则在 1 ~ 3 d 内有所下降，这可能是初期的低温胁迫对耐冷性较强的 R 嫁接苗起到了一定的锻炼作用，而冷敏感的 S 则受到了低温损伤。但随着低温处理时间的延长，冷害胁迫逐步加重，各处理嫁接苗的冷害指数均持续增加，但仍以 R 为根或穗的嫁接苗冷害指数显著低于 S 为根或穗的嫁接苗。

前人研究表明，嫁接可有效增强西瓜、辣椒植株的根系活力和细胞膜的稳定性，从而提高其耐冷性（刘慧英　等，2003；王洪涛　等，2010）。本研究中，不仅耐冷性强的根系可增强细胞膜的稳定性，减少溶质的外流，耐冷性强的接穗也有相同的效果，表明耐冷性强的根、穗均可提高嫁接苗的

耐冷性，由此进一步证实了砧木与接穗双方的抗冷特性是获得嫁接苗抗冷性的关键这一观点（于贤昌 等，1998）。但耐冷性弱的根、穗则可导致嫁接苗细胞膜稳定性的下降，致使溶质外流增多，表明其对嫁接苗的耐冷性产生了负效应，与此相似，于贤昌等（1998）的研究也证实，选用较南瓜砧木耐冷性低的黄瓜品种作为接穗，在一定程度上可削弱砧木根系的抗冷性。不仅如此，本研究中不同根系或接穗组合嫁接苗中均以“R”的冷害指数及电解质渗透率较小，以“S”较大，双根或双穗组合“RS”居中，且“RS”根或穗中又以“RS-R”的细胞膜稳定性显著高于“RS-S”，表明根、穗对嫁接苗耐冷性存在显著的互作效应。

细胞膜作为植物冷害的原初反应部位，在低温胁迫下易由液晶状态变成凝结状态，从而引起细胞膜的损伤及膜酶功能的改变（Thomashow，1999），但低温胁迫下植物体可通过产生渗透调节物质来调控相应的生理代谢途径，以此降低或消除对植物造成的伤害（徐澜 等，2015；薄晓培 等，2016），而游离脯氨酸和可溶性糖是植物体内与抗逆关系最为密切的渗透调节物质（李阳阳 等，2016；姚海梅 等，2016）。本试验低温胁迫期间，具 S 接穗或根系的嫁接苗 RS/R、R/RS、S/RS、RS/S 中 R 叶片及根系的可溶性糖及脯氨酸含量均低于 R/R，表明耐冷性弱的 S 接穗或根系均起到了降低 R 抗冷性的作用；而具 R 接穗或根系的嫁接苗 RS/R、R/RS、S/RS、RS/S 中 S 叶片及根系的可溶性糖及脯氨酸含量则均高于 S/S，表明耐冷性强的 R 接穗或根系均提高了 S 的抗冷性。但由于 RS/RS 中的 R 与 S 叶片和根系的可溶性糖及脯氨酸含量均相应高于 S/RS，而低于 R/RS，表明根系在增强嫁接苗耐冷性中的作用大于接穗。

低温能显著抑制作物根系的生长，破坏根系膜系统，致使细胞膜透性的增加（罗宁 等，2014），根系活力下降（Li et al.，2008），严重阻碍了根系对养分的吸收和转运（吕德国 等，2010），最终导致植株生长发育不良。高青海等（2006）的研究表明，利用抗性砧木进行嫁接可显著缓解低温胁迫对茄子根系的损伤程度。本试验中，不仅 R/S 组合嫁接苗中 R 的根系活力显著高于 S/S 组合中的 S 根系，且 S/R 组合中 S 的根系活力也显著高于 S/S 组合，表明耐冷性强的根系或接穗均能显著增强嫁接苗的根系活力，提高其耐冷性。而 R/S 及 S/R 组合嫁接苗中 R 或 S 的根系活力均显著低于 R/R 组合，表明耐冷性弱的根、穗均可导致嫁接苗根系活力的下降，从而削弱嫁接苗的耐冷性。本研究中还发现，RS/RS 既有 R 根系又有 S 根系，其双根系吸收能力应强于 R/RS 和 S/RS，但 RS/RS 在低温胁迫下的根系活力仅强于 S/RS，而不及 R/RS，这可能是由于 RS/RS 组合中 S 根、穗在低温胁迫过程中产生了不耐低温的信号，如植物激素（Aloni et al.，2010）及特定的 RNA 分子（Harada，2010；孙敬爽 等，2014）等，削弱了嫁接苗中 R 的抗冷性，其具体作用机制还有待进一步研究。

References

Ai Z，Bie Z L，Yuan H，Liu Z X，Li Q. 2010. Effects of scion and rootstock genotypes on the anti-oxidant defense systems of grafted cucumber seedlings under NaCl stress. Soil Science and Plant Nutrition，56 (2)：263 – 271.

Aloni B，Cohen R，Karni L，Aktas H，Edelstein M. 2010. Hormonal signaling in rootstock-scion interactions. Scientia Horticulturae，127 (2)：119 – 126.

Bo Xiao-pei，Wang Meng-xin，Cui Lin，Wang Jin-he，Han Bao-yu. 2016. Evaluation on correlations of three kinds of osmoregulation substances in tea fresh leaves with low temperature during winter and spring respectively and their difference among cultivars. Scientia Agricultura Sinica，49 (19)：3807 – 3817. (in Chinese)

薄晓培，王梦馨，崔　林，王金和，韩宝瑜. 2016. 茶树 3 类渗透调节物质与冬春低温相关性及其品种间的差异评价. 中国农业科学，49 (19)：3807 – 3817.

Cao H X，Sun C X，Shao H B，Lei X T. 2011. Effects of low temperature and drought on the physiological and growth changes in oil palm seedlings.

African Journal of Biotechnology，10 (14)：2630 – 2637.

Etehadnia M，Waterer D，Jong H D，Tanino K K. 2008. Scion and rootstock effects on ABA-mediated plant growth regulation and salt tolerance of acclimated and unacclimated potato genotypes. Journal of Plant Growth Regulation，27 (2)：125 – 140.

Francisco F B，Sanchez-Bel P，Estan M T，Martinez-Rodriguez M M，Moyano E，Morales B，Campos J F，Garcia-Abellán J O，Egea M I，Fernández-Garcia N，Romojaro F，Bolarín M C. 2010. The effectiveness of grafting to improve tomato fruit quality. Scientia Horticulturae，(125)：211 – 217.

Gao Q H，Wu Y，Jia S S，Huang S C，Lu X M. 2016. Effect of rootstock on the growth，photosynthetic capacity and osmotic adjustment of eggplant seedlings under chilling stress and recovery. Pak J Bot，48 (2)：461 – 467.

Gao Q H，Xu K，Wang X F，Wu Y. 2008. Effect of grafting on cold tolerance in eggplant seedling. Acta Horticulturae，(771)：167 – 174.

Gao Qing-Hai，Wu Yan，Xu Kun，Gao Hui-yuan. 2006. Responses of grafted eggplant seedling roots to low temperature stress. Chinese Journal of Applied Ecology，17 (3)：390 – 394. (in Chinese)

高青海，吴　燕，徐　坤，高辉远. 2006. 茄子嫁接苗根系对低温环境胁迫的响应. 应用生态学报，17 (3)：390 – 394.

Harada T. 2010. Grafting and RNA transport via phloem tissue in horticultural plants. Scientia Horticulturae，125 (4)：545 – 550.

Li He-sheng，Sun Qun，Zhao Shi-jie. 2000. Plant physiology biochemistry experiment principle and technology. Beijing：Higher Education Press：164 – 194. (in Chinese)

李合生，孙　群，赵世杰. 2000. 植物生理生化学实验原理和技术. 北京：高等教育出版社：164 – 194.

Li J Y，Tian H X，Li X G，Meng J J，He Q W. 2008. Higher chilling tolerance of grafted cucumber seedling leaves upon exposure to chilling stress. Agricultural Sciences in China，7 (5)：570 – 576.

Li Yang-yang，Geng Qing-yun，Fei Cong，Fan Hua. 2016. Physiological responses of sugar beet（*Beta vulgaris*）to drought stress during vegetative development period under drip irrigation. Chinese Journal of Applied Ecology，27 (1)：201 – 206. (in Chinese)

李阳阳，耿青云，费　聪，樊　华. 2016. 滴灌甜菜叶丛生长期对干旱胁迫的生理响应. 应用生态学报，27 (1)：201 – 206.

Liu Hui-ying，Zhu Zhu-jun，Lü Guo-hua，Qian Qiong-qiu. 2003. Study on relationship between physiological changes and chilling tolerance in grafted watermelon seedlings under low temperature stress. Scientia Agricultura Sinica，36 (11)：1325 – 1329. (in Chinese)

刘慧英，朱祝军，吕国华，钱琼秋. 2003. 低温胁迫下西瓜嫁接苗的生理变化与耐冷性关系的研究. 中国农业科学，36 (11)：1325 – 1329.

Liu J J，Li J Q，Su X H，Xia Z L. 2014. Grafting improves drought tolerance by regulating antioxidant enzyme activities and stress-responsive gene expression in tobacco. Environmental and Experimental Botany，107：173 – 179.

Luo Ning，Wei Shi，Li Jing，Gu Wang-rong，He Dan，Qu Tian-ming，Qiao Tian-chang，Yang Zheng-fang. 2014. Effects of low temperature stress on root system characteristics and electric conductivity of maize seedlings. Chinese Journal of Ecology，33 (10)：2694 – 2699. (in Chinese)

罗　宁，魏　湜，李　晶，顾万荣，贺　丹，曲天明，乔天长，杨振芳. 2014. 低温胁迫对玉米苗期根系特征及电导率的影响. 生态学杂志，33 (10)：2694 – 2699.

Lü De-guo，Wang Ying，Qin Si-jun，Ma Huai-yu，Liu Guo-cheng，Du Guo-dong，Meng Qian. 2010. Effects of cool and cold conditions on nitrogen uptake kinetics in *Malus baccata* Borkh. seedlings. Acta Horticulturae Sinica，37 (9)：1493 – 1498. (in Chinese)

吕德国，王　英，秦嗣军，马怀宇，刘国成，杜国栋，孟　倩. 2010. 冷凉条件对山荆子幼苗根系氮素吸收动力学参数的影响. 园艺学报，37 (9)：1493 – 1498.

Martinez-Rodriguez M M，Estan M T，Moyano E，Garcia-Abellan J O，Flores F B，Campos J F，Al-Azzawi M J，Flowers T J，Bolarn M C. 2008. The effectiveness of grafting to improve salt tolerance in tomato when an‘excluder’genotype is used as scion. Environmental and Experimental Botany，63：392 – 401.

Schwarz D，Rouphael Y，Colla G，Venema J K. 2010. Grafting as a tool to improve tolerance of vegetables to abiotic stresses：thermal stress，water stress and organic pollutants. Scientia Horticulturae，127：162 – 171.

Serraj R，Sinclair T R. 1996. Processes contributing to N_2-fixation insensitivity to drought in the soybean cultivar Jackson. Crop Science，36：961 – 968.

Sun Jing-shuang，Li Shao-feng，Dong Chen-xi，Sun Chang-zhong. 2014. Research progress and prospect of long distance transmission of RNA molecules in grafted plants. Scientia Silvae Sinicae，50 (11)：158 – 165. (in Chinese)

孙敬爽，李少峰，董辰希，孙长忠. 2014. 嫁接植物体中 RNA 分子长距离传递研究进展. 林业科学，50 (11)：158－165.

Thomashow M F. 1999. Plant cold acclimation：freezing tolerance genes and regulatory mechanisms. Annual Review of Plant Biology，50 (50)：571－599.

Tian Dan-qing，Ge Ya-ying，Pan Gang-min，Shen Xiao-lan，He Yong，Zhang Zhi，Liu Xiao-jing，Zhu Zhu-jun. 2011. Morphological and physiological characteristics of different cultivars of *Anthurium andraenum* under chilling stress. Acta Horticulturae Sinica，38 (6)：1173－1179. (in Chinese)

田丹青，葛亚英，潘刚敏，沈晓岚，何　勇，张　智，刘晓静，朱祝军. 2011. 低温胁迫对 3 个红掌品种叶片形态和生理特性的影响. 园艺学报，38 (6)：1173－1179.

Tramontini S，Vitali M，Centioni L，Schubert A. 2013. Rootstock control of scion response to water stress in grapevine. Environmental & Experimental Botany，93 (3)：20－26.

Venem J H，Dijk B E，Bax J M，Hasselt P R V，Elzenga J T M. 2008. Grafting tomato（*Solanum lycopersicum*）onto the rootstock of a high-altitude accession of *Solanum habrochaites* improves suboptimal-temperature tolerance. Environmental and Experimental Botany，63：359－367.

Wang Hong-tao，Ai Xi-zhen，Zheng Nan，Jiang Fei，Li Qing-ming. 2010. Effects of graft on lipid peroxidation and antioxidative enzyme activities of *Capsicum annum* seedlings under low temperature and weak light intensity. Chinese Journal of Applied Ecology，21 (5)：1289－1294. (in Chinese)

王洪涛，艾希珍，郑　楠，姜　飞，李清明. 2010. 嫁接对低温弱光下辣椒幼苗膜脂过氧化及抗氧化酶活性的影响. 应用生态学报，21 (5)：1289－1294.

Wang Li-juan，Li Tian-lai，Qi Hong-yan，Zhao Ming-xing，Hao Wen-hui. 2006. Effects of long term sub low temperature on growth and development and dry matter distribution in tomato. Journal of Shenyang Agricultural University，37 (3)：300－303. (in Chinese)

王丽娟，李天来，齐红岩，赵明兴，郝文辉. 2006. 长期夜间亚低温对番茄生长发育及光合产物分配的影响. 沈阳农业大学学报，37 (3)：300－303.

Xing W W，Li L，Gao P，Li H，Shao Q S，Shu S，Sun J，Guo S R. 2014. Effects of grafting with pumpkin rootstock on carbohydrate metabolism in cucumber seedlings under $Ca(NO_3)_2$ stress. Plant Physiology and Biochemistry，16：1－9.

Xu Lan，Gao Zhi-qiang，An Wei，Yuan Ya-qi，Li Yan-liang. 2015. Low temperature response and cold tolerance at spike differentiation stage of winter wheat varieties sowed in spring. Chinese Journal of Applied Ecology，26 (6)：1679－1686. (in Chinese)

徐　澜，高志强，安　伟，原亚琦，李彦良. 2015. 冬麦春播小麦穗分化阶段对低温胁迫的响应及耐寒性. 应用生态学报，26 (6)：1679－1686.

Yao Hai-mei，Li Yong-sheng，Zhang Tong-zhen，Zhao Juan，Wang Chan，Wang Han-ning，Fang Yong-feng. 2016. Effects of combined drought and salinity stress on germination and physiological characteristics of maize（*Zea mays*）. Chinese Journal of Applied Ecology，27 (7)：2301－2307. (in Chinese)

姚海梅，李永生，张同祯，赵　娟，王　婵，王汉宁，方永丰. 2016. 旱—盐复合胁迫对玉米种子萌发和生理特性的影响. 应用生态学报，27 (7)：2301－2307.

Yu Xian-chang，Xing Yu-xian，Ma Hong，Wei Min. 1998. Effect of different rootstocks and scions on chilling tolerance in grafted cucumber seedlings. Scientia Agricultura Sinica，31 (2)：41－47. (in Chinese)

于贤昌，邢禹贤，马　红，魏　珉. 1998. 不同砧木与接穗对黄瓜嫁接苗抗冷性的影响. 中国农业科学，31 (2)：41－47.

Yu Xian-chang，Xing Yu-xian，Ma Hong，Wei Min，Feng Xin. 1997. Study on low temperature tolerance in grafted cucumber seedlings. Acta Horticulturae Sinica，(4)：348－352. (in Chinese)

于贤昌，邢禹贤，马　红，魏　珉，冯　鑫. 1997. 黄瓜嫁接苗抗冷特性研究. 园艺学报，(4)：348－352.

Zhang Xiao-yan，Xu Kun. 2009. Effect of interaction between rootstock and scion on chilling tolerance of grafted eggplant seedlings under low temperature and light conditions. Scientia Agricultura Sinica，42 (10)：3734－3740. (in Chinese)

张晓艳，徐　坤. 2009. 低温弱光条件下砧穗互作对茄子嫁接苗抗冷性的影响. 中国农业科学，42 (10)：3734－3740.

Zhao Shi-jie，Shi Guo-an，Dong Xin-chun. 2002. Techniques of plant physiological experiment. Beijing：Chinese Agricultural Science and Technology Press. (in Chinese)

赵世杰，史国安，董新纯. 2002. 植物生理学实验指导. 北京：中国农业科学技术出版社.