

## 叶施钙、硼对苹果果实糖含量及叶片矿质元素的影响

董瑞文 朱斌 张新忠 王忆 吴婷 韩振海\*

(中国农业大学 农学与生物技术学院,北京 100193)

**摘要** 为探究叶面喷施 Ca、B 后苹果果实糖含量和叶片中 P、K 增加的原因,分别以 20 年生富士/八楞和一年生的富士/SH6 嫁接苗为试材,前者在座果期(盛花期后 10 d)叶面喷施 10.00 g/L 的  $\text{CaCl}_2$ 、果实迅速生长期(盛花后 85 d)叶面喷施 1.05 g/L 的  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ,之后测定叶片光合作用、叶片与果实的矿质元素及相关糖含量、叶片 6-磷酸-山梨醇脱氢酶(S6PDH)活性;后者在嫁接苗长到 6 月时叶面分别涂抹 10.00 g/L 的  $\text{CaCl}_2$  和 1.05 g/L 的  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ,之后测定叶片光合作用、矿质元素。结果显示:1)喷施 Ca、B 后,从盛花后 85 d 开始,叶片 S6PDH 活性增强、山梨醇含量增加,果实中的果糖和总糖含量在生长后期也显著增加;2)Ca、B 处理后,叶片净光合速率、蒸腾速率和气孔导度显著加强;3)在涂抹 Ca、B 后,叶片中其他矿质元素 Mn、Zn、Cu、K 也显著增加。上述结果表明,喷施 Ca、B 能够提高苹果叶片光合作用,进而通过增加光合产物来提高果实的糖含量;Ca、B 加强了叶片蒸腾作用,使得其他矿质元素可能随着蒸腾流运输到叶片而得到增加。

**关键词** Ca;B;苹果;光合作用;总糖

中图分类号 S 661.1

文章编号 1007-4333(2016)09-0057-11

文献标志码 A

## Effect of foliar B and Ca on fruit sugar and leaf minerals in apple

DONG Rui-wen, ZHU Bin, ZHANG Xin-zhong, WANG Yi, WU Ting, HAN Zhen-hai\*

(College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 10019, China)

**Abstract** To explore the reason why the sugar in fruit and P, K in leaf were increased in apple, 20-year-old Fuji/Baleng and 1-year-old Fuji/SH6 were chosen as experimental materials, the former was treated with leaf spraying 10 g/L  $\text{CaCl}_2$  at fruit set stage (10 days after full bloom) and 1.05 g/L  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  at rapid fruit growth stage (85 days after full bloom). Minerals and soluble sugars in leaves and fruits, photosynthesis and 6-phosphate-sorbitol dehydrogenase (S6PDH) activity were analyzed after foliar application of Ca or B. The latter one was treated with leaf daubing 10 g/L  $\text{CaCl}_2$  and 1.05 g/L  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ , photosynthesis and minerals in leaves were analyzed afterwards. The results showed 1) Leaf spraying Ca or B resulted in a significant increase in S6PDH activity from 85 days after full bloom, accompanied with the increase of leaf sorbitol concentrations. Subsequently, fruit fructose and total soluble sugar contents were significantly increased at later growth stage. 2) Net photosynthesis rate, transpiration rate and stomatal conductance of B/Ca-applied-leaves were significantly increased. 3) Mn, Zn, Cu and K contents of potted apple trees after the application of  $\text{CaCl}_2$  and  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  were significantly increased. The results indicate that leaf spraying of Ca and B can induced a dramatic increase in sugar content of fruit by improving apple leaf photosynthesis. The increase in leaf mineral elements levels after foliar application of Ca or B may be associated with the increase of transpiration.

**Keywords** calcium; boron; apple; photosynthesis; soluble sugar

含糖量是苹果品质的重要指标。矿质元素对果实品质、尤其是果实糖酸含量有重要作用,除 N 在生产实践中常常因施用过多而降低品质外,其他元

素特别是 B 和 Ca 等元素往往因缺乏而影响果实品质,适时、适量补充矿质元素对果树的营养生长和生殖生长具有重要作用。

收稿日期:2015-04-04

基金项目:国家科技支撑计划(2014BAD16B03-2)

第一作者:董瑞文,硕士研究生,E-mail:drwen1989@163.com

通讯作者:韩振海,教授,主要从事果树逆境与分子生物学研究,E-mail:rschan@cau.edu.cn

许多学者研究认为,叶面喷施 Ca、B 能有效增加果实糖含量。甜菜定植 60 d 后,叶面喷 B 能显著提高蔗糖含量<sup>[1]</sup>,对富士苹果叶面喷施硼酸,也可显著提高果实成熟期可溶性总糖含量<sup>[2]</sup>,而对 Aonla 鹅莓 (*Embllica officinalis* Gaertn),叶面喷施 1.5% 的 Ca 可显著提高可溶性固形物和总糖含量<sup>[3]</sup>。前人<sup>[4]</sup>的研究发现叶片中超过一半的 Ca 存在于叶绿体中;Knypl 等<sup>[5]</sup>发现, $K^+$  和  $Ca^{2+}$  对叶绿素的积累有显著作用。喷施 Ca 可以提高叶绿素 a 和 b 含量<sup>[6]</sup>,因此,烟草叶面喷施  $CaCl_2$  可显著提高净光合速率和  $Fv/Fm$ <sup>[7]</sup>。硼参与碳水化合物的代谢,直接影响植物的生长,间接影响光合效率<sup>[8]</sup>。在甜樱桃盛花期喷施硼,可显著提高光合色素含量,此外,B、Ca 也能加速同化物在植物体中的积累和运输。苹果、梨、油桃、橙等果实的发育后期,蔗糖磷酸合成酶、蔗糖合成酶、山梨醇脱氢酶等与糖积累密切相关的酶活性迅速提高<sup>[9-11]</sup>。弱光条件下的番茄喷施 1.5%  $CaCl_2$ 、0.1% 硼砂、1.5% 葡萄糖、0.3% 磷酸二氢钾,可显著提高果实中蔗糖合成酶、蔗糖磷酸合成酶的活性,进而提高果实中可溶性糖含量的积累<sup>[12]</sup>,通过人工磷双分子膜硼酸还可以促进糖的运输<sup>[13]</sup>。

硼、钙还能增加其他矿质元素的含量,夏广清等<sup>[14]</sup>研究发现喷施钙、镁有利于番茄幼苗对 P、K、Ca、Mg 的吸收;以“翠冠”梨树苗为试验材料,茎中 P、Ca、Mg、Zn、Mn 和 Cu 浓度随营养液 B 浓度增加而提高<sup>[15]</sup>。

Ca、B 对其他作物糖含量的提高有较多的报道,但在苹果上却报道较少。在之前本课题组的研究中发现,在富士座果期喷施  $CaCl_2$ 、迅速生长期喷施  $Na_2B_4O_7$  均能显著提高成熟期果实总糖含量,并且还能弥补叶片因为套袋而损失的 P、K 元素<sup>[16]</sup>。然而,Ca、B 是以何种途径提高了苹果果实的糖含量还不得而知,并且叶片中 P、K 元素增加的原因也无法知晓。本试验以大田多年生果树作为喷施对象,并以温室中嫁接苗作为涂抹对象,在它们的叶片上施用 Ca、B,旨在进一步探究叶片喷施 Ca、B 之后苹果果实糖含量及叶片中其他矿质元素增加的原因。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料及处理

#### 1.1.1 喷施试验的设计

试验于 2012 和 2013 年在北京市昌平区营坊村果园重复进行。试验选取了 20 年生的富士/八楞作

为试验材料,分别于座果期(盛花后 10 d)在叶片喷施 10 g/L 的  $CaCl_2$ ,快速生长期(盛花后 85 d)喷施 1.05 g/L 的  $Na_2B_4O_7$ (清水作为对照),具体操作参照 Lu 等<sup>[17]</sup>的试验描述。试验采用随机区组设计,一共有喷 Ca、喷 B、喷清水 3 个处理,每个处理重复 3 次,每次重复中包含 3 株树作为试验材料。在喷肥后 0(喷后 1 h)、5、10、15 d,以后每隔 15 d 采集果实和果实周围的叶片,每个重复取 3 个苹果和 10 片叶子,用冰盒和液氮保存带回实验室。其中喷肥后 0、5、10 d 的样品仅用于矿质元素测定,喷肥后 15 d 至成熟期的样品用于矿质元素、可溶性糖和淀粉、叶片酶活性等指标的测定。喷肥后每隔 15 d 进行一次光合作用相关参数(净光合速率、蒸腾速率、气孔导度)的测定。

#### 1.1.2 涂抹试验的设计

试验于 2013 和 2014 年在北京市昌平区八口试验基地温室大棚中进行。以一年生富士/SH6 为试验材料,3 月将幼苗种植在塑料盆(直径 20 cm,高 30 cm)中,1 周灌溉 1 次,6 月当枝条长至 80~90 cm 长时,分别将 10 g/L 的  $CaCl_2$  和 1.05 g/L 的  $Na_2B_4O_7$ (清水作为对照)涂抹于(从顶梢数)第 8、9 和 10 片叶子表面。涂抹方法为:用移液器吸取 200  $\mu$ L 溶液滴在上述 3 片叶子正面,然后用玻璃棒均匀地将溶液涂抹至整个叶片。试验采用随机区组设计,每个处理设 3 次重复,每次重复有 3 株嫁接苗。涂抹完溶液后,在 0、1、3、5、7、14、30、60、90 d 测量涂抹叶的光合作用相关参数(净光合速率、蒸腾速率和气孔导度)。然后将叶片采集用冰盒带回实验室,用于测定矿质元素。

### 1.2 测定方法

可溶性糖和淀粉的提取方法参考 Lu 等<sup>[17]</sup>,含量用蒽酮比色法测定<sup>[18]</sup>,山梨醇、蔗糖、果糖含量的测定采用高效液相色谱法<sup>[19]</sup>。色谱柱采用 LUNA 氨基柱  $NH_2$ ,250 mm $\times$ 4.6 mm。色谱条件:柱温为 40  $^{\circ}C$ ,流速 2 mL/min,RID 示差检测器,流动相为乙腈与水体积比为 80:20,每次进样 20  $\mu$ L,根据样品峰面积和标准曲线计算山梨醇、蔗糖、果糖含量。

矿质元素提取和测定方法参考 Lu 等<sup>[17]</sup>,用电感耦合等离子发射光谱仪(ICP-AS)(OPTIMA3300DV,Perkin Elmer,Shelton,CT,USA)测定 Ca、B、P、K、Zn、Mg、Cu 等元素含量,氩气流速 15 L/min,进样量 1.5 mL/min。

光合作用采用 6400 便携式光合仪(LI-

6400XT, LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA)测定,测定的指标包括净光合速率、气孔导度、蒸腾速率。在晴天 9:00—11:00 测定各处理叶片光合作用参数,每个重复选择 3 片叶,每个叶片测定 3 次,所有测定在标准环境下:采用红外光源,光合光子通量为  $1\ 200\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,叶片温度为  $25\ ^\circ\text{C}$ , $\text{CO}_2$  胞间浓度为  $400\ \mu\text{mol}/\text{mol}$ 。

酶的提取参照 Keller 等<sup>[20]</sup>的方法,S6PDH 的活性测定参照 Negm 等<sup>[21]</sup>改进的方法。

### 1.3 数据分析

采用 Excel 2007 和 SPSS 18.0 软件对试验数据进行统计分析,用邓肯新复极差法<sup>[22]</sup>在  $P \leq 0.05$  的检验水平上比较处理间的差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 喷施 Ca、B 对苹果果实和叶片中 Ca、B 含量的影响

为了验证叶片喷施 Ca、B 之后对苹果的作用,首先需要验证喷施的 Ca、B 是否被叶片有效吸收,同时也要检测如果叶片吸收了 Ca、B,是否能往果实中运输从而作用于果实,因此,首先测定了苹果叶片和果实中 Ca、B 的含量。

表 1 的结果表明,叶面喷施  $\text{CaCl}_2$  之后,2012 年叶片的 Ca 含量在盛花后 10~70 d 显著增加,在 2013 年喷 Ca 使得叶片 Ca 含量在 10~40、70~85、115~130 d 均显著高于对照。而与对照相比,2012 年喷 Ca 处理后果实中的 Ca 含量在盛花后 15~55 d 显著增加,但在 2013 年则没有明显的变化。叶面喷施  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  后,在 2 年的试验中,叶片中的 B 含量在喷施后均持续高于对照,但在果实里仅有个别样点有显著差异。喷施 Ca、B 均能显著增加叶片各自元素的含量,但对果实中的 Ca、B 几乎没有影响。

### 2.2 喷施 Ca、B 对苹果叶片和果实中各类糖含量的影响

表 2 结果表明,叶面喷施 Ca、B 之后能够促进苹果叶片和果实总糖的积累。在喷 Ca 处理后,叶片的总糖分别在 2012 年盛花后 100~145 d,2013 年盛花后 55~85、115~160 d 显著高于对照。在喷 B 处理后,叶片中的总糖分别在 2012 年盛花后 100~145 d,2013 年盛花后 115~145 d 显著高于对照。无论喷 B 还是喷 Ca 处理,与对照相比,2 年果实中的总糖含量均在最后 2 个时期 160~180 d 显著提高。

对淀粉而言,除了喷 B 处理在 2012 年盛花后

115~180 d 显著增加叶片淀粉含量外,其余的处理对叶片和果实的淀粉含量均无显著、连续的影响。

图 1 结果显示,在喷 Ca 处理后,叶片的蔗糖含量分别在 2012 年盛花后 85~115 d、2013 年盛花后 40~55 d、100~115 d 显著高于对照。在 2 年间,喷 B 处理的叶片蔗糖含量在盛花后 100~160 d 均显著高于对照。果实中蔗糖含量在后期才表现出增高的趋势,喷 Ca 处理后,果实蔗糖含量仅在 2012 年盛花后 180 d 和 2013 年盛花后 145 d 高于对照,而喷 B 处理在 2 年均盛花后 145~160 d 高于对照。

图 2 结果表明,和对照相比,喷 Ca 处理的叶片中山梨醇含量在 2012 年盛花后 85~145 d 显著高于对照,在 2013 年盛花后 100~145 d 显著高于对照。而 2 年的试验中喷 B 处理的规律一致,叶片中山梨醇含量在盛花后 100~145 d 均显著增加。但是果实中山梨醇则无显著持续的变化,仅在 2012 年喷 B 处理盛花后 160~180 d 显著高于对照。

尽管果糖在苹果叶片中检测不到,但果糖在苹果果实中是一种主要的可溶性糖<sup>[23]</sup>。在图 3 中可以看到,随着盛花期时间的推移,果糖在果实中逐渐积累,果糖含量在成熟期达到最大值。在 2012 年的试验中,除了盛花后 130 d 外,果实的果糖含量分别在喷 Ca 处理的盛花后 85~180 d、喷 B 处理的盛花后 100~180 d 显著提高。这一结果在 2013 年也具有 consistency,果实中果糖的含量在喷 Ca 或喷 B 处理后都在盛花后 100~180 d 显著提高。

叶片喷 Ca 后,S6PDH 的活性在 2012 年盛花后 85~145 d 显著升高,在 2013 年盛花后 100~160 d (除了 115 d)显著升高。叶片喷 B 以后,S6PDH 的活性在 2012 年盛花后 100~145 d (除了 130 d)显著升高,在 2013 年盛花后 145~180 d 显著升高(图 4)。

### 2.3 分别喷施和涂抹 Ca、B 对苹果叶片光合作用的影响

总体而言,叶片喷施 Ca、B 后,2012—2013 这 2 年的净光合速率具有相同的规律。喷 Ca 处理的净光合速率在盛花后 25~160 d 连续增加,而喷 B 处理在盛花后 115~160 d 连续增加。和对照相比,叶片喷施 Ca 以后,叶片气孔导度在前期(2012 年的盛花后 25 d,2013 年盛花后 25~55 d)和后期(2012 年盛花后 115~160 d,2013 年盛花后 130~145 d)均能显著提高。在叶片喷施 B 后,叶片的气孔导度分别在 2012 年盛花后 130~145 d 和 2013 年盛花后 115~145 d 显著提高(图 5)。

表1 喷施Ca、B后不同时期苹果叶片和果实中Ca和B的含量

Table 1 Ca and B contents in leaf and fruit after foliar sprays of  $\text{CaCl}_2$  and  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  at different stage

元素 Mineral	器官 Organ	年份 Year	处理 Treatment	盛花后时间/d Days after full bloom														
				10	15	20	25	40	55	70	85	100	115	130	145	160	180	
Ca/ (mg/g)	叶片	2012	CK	11.64 b	10.53 b	12.81 b	16.41 b	15.01 b	15.46 b	19.43 b	18.91 a	20.63 a	21.92 a	21.34 a	20.11 a	19.83 a	20.76 a	
			$\text{CaCl}_2$	16.55 a	18.06 a	17.36 a	18.21 a	19.48 a	20.15 a	21.99 a	20.55 a	21.62 a	22.48 a	22.33 a	19.03 a	18.64 a	22.66 a	
			CK	13.08 b	18.24 b	15.63 b	17.17 b	17.73 b	20.93 a	22.72 b	23.86 b	25.58 a	25.03 b	28.75 b	24.58 a	28.00 a	30.08 a	
		2013	$\text{CaCl}_2$	15.58 a	20.58 a	17.23 a	19.85 a	21.55 a	22.18 a	24.64 a	25.93 a	26.87 a	30.33 a	32.33 a	26.73 a	30.42 a	31.52 a	
			CK	11.74 a	7.85 b	3.62 b	2.02 b	1.34 b	1.11 b	1.14 a	1.23 a	1.88 a	2.15 a	1.01 a	0.97 a	0.89 a	1.22 a	
			$\text{CaCl}_2$	13.30 a	10.15 a	4.88 a	3.64 a	1.60 a	1.27 a	1.27 a	1.24 a	2.26 a	2.18 a	1.23 a	1.02 a	0.80 a	1.45 a	
	果实	2012	CK	9.50 a	6.83 a	3.92 a	2.82 a	1.74 a	1.39 a	1.31 a	1.10 a	1.52 a	1.77 a	2.46 a	1.09 a	0.96 a	0.76 a	
			$\text{CaCl}_2$	11.03 a	6.76 a	3.99 a	2.88 a	1.90 a	1.42 a	1.40 a	1.09 a	1.21 a	1.46 a	2.12 a	0.95 a	0.89 a	0.76 a	
			CK	38.08	44.75	22.50	24.96	37.42	39.25	35.00	32.83 b	29.00 b	28.92 b	32.33 b	53.42 b	53.75 b	32.83 b	
		2013	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$															
			CK	35.75	38.33	56.58	56.50	41.08	41.92	38.92	44.17 b	36.25 b	37.08 b	33.08 b	32.00 b	32.08 b	32.58 a	
			$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$															
B/ (mg/kg)	2012	CK	51.63	46.17	28.75	28.67	31.04	26.00	13.75	16.75 a	12.50 a	15.58 a	39.96 a	43.54 a	42.92 a	28.55 a		
		$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$																
		CK	36.50	46.33	58.67	37.25	33.92	28.00	26.67	24.50 a	18.42 a	20.00 a	19.92 a	19.75 a	21.25 a	21.58 b		
	2013	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$																
		CK	22.83 a	20.67 a	20.92 a	21.08 a	20.50 a	22.25 a	26.50 a	22.83 a	20.67 a	20.92 a	21.08 a	20.50 a	22.25 a	26.50 a		
		$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$																

注:表中的数据同一列中不同字母表示在  $P=0.05$  水平上差异显著。

Note: different lowercase letters in the same column denote significant difference at 0.05 level.

表 2 喷施 Ca、B 后不同时期苹果叶片和果实中总糖和淀粉的含量

Table 2 Typical winter wheat cultivars from 1950s to 2000s in Haihe Lowland Plain

成分 Ingredient	器官 Organ	年份 Year	处理 Treatment	盛花后时间/d Days after full bloom/d											mg/g
				25	40	55	70	85	100	115	130	145	160	180	
总糖	叶片	2012	CK	23.14 a	20.16 a	22.98 a	20.84 b	25.94 a	14.29 b	17.47 b	14.82 b	16.41 b	26.54 a	19.23 b	
			CaCl <sub>2</sub>	23.41 a	17.45 a	20.93 a	24.56 a	25.41 a	16.46 a	23.15 a	18.86 a	18.45 a	26.82 a	21.43 b	
			Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	20.23 a	25.50 a	17.58 a	18.55 a	23.94 a	24.16 a						
	2013	CK	16.00 a	20.35 a	12.92 b	18.81 b	19.59 b	10.74 b	24.00 b	18.13 b	17.62 b	20.85 a			
		CaCl <sub>2</sub>	17.62 a	19.67 a	17.25 a	21.79 a	22.24 a	20.21 a	12.82 a	23.14 b	22.49 a	21.94 a	23.57 a		
		Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	19.55 a	13.76 a	20.23 a	20.23 a	22.33 a								
果实	2012	CK	25.81 a	40.11 a	45.53 a	47.09 a	58.51 a	72.68 a	69.67 b	75.13 a	95.51 a	103.89 b	121.67 b		
		CaCl <sub>2</sub>	24.98 a	39.54 a	45.76 a	46.39 a	57.16 a	73.46 a	72.86 b	78.23 a	97.34 a	118.95 a	134.38 a		
		Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	76.76 a	74.96 a	76.15 a	97.29 a	118.92 a								
	2013	CK	23.17 a	35.07 a	39.07 a	42.44 b	50.03 a	61.88 a	62.80 a	71.92 b	91.98 a	100.16 b	100.41 b		
		CaCl <sub>2</sub>	22.20 a	34.36 a	38.47 a	45.17 a	51.82 a	61.96 a	61.70 a	78.13 a	93.01 a	104.81 a	105.53 a		
		Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	59.09 a	62.82 a	78.18 a	94.51 a	107.20 a								
淀粉	叶片	2012	CK	11.39 a	11.95 a	9.89 b	11.49 a	11.99 a	11.06 a	9.96 b	10.29 b	11.51 b	7.27 b	7.97 b	
			CaCl <sub>2</sub>	12.32 a	11.03 a	11.06 a	11.11 a	12.71 a	10.47 a	11.30 b	10.82 b	10.77 b	7.16 b	8.03 a	
			Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	10.71 a	12.01 a	12.03 a	12.61 a	8.87 a	9.47 a						
	2013	CK	3.52 a	4.39 a	3.41 a	3.43 a	3.54 a	3.87 b	4.29 a	4.46 a	5.03 a	4.55 a	4.56 b		
		CaCl <sub>2</sub>	3.60 a	4.51 a	3.37 a	4.28 a	3.52 a	4.04 b	4.50 a	4.30 a	4.84 a	4.90 a	5.57 a		
		Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	4.59 a	4.34 a	4.23 a	5.08 a	5.15 a								
果实	2012	CK	6.43 a	9.19 a	15.18 a	21.47 a	21.17 a	16.62 a	12.57 a	6.01 b	7.18 a	4.49 a	3.01 b		
		CaCl <sub>2</sub>	6.39 a	8.81 a	14.44 a	20.87 a	19.63 a	16.37 a	12.37 a	8.06 a	6.39 a	5.49 a	3.35 b		
		Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	16.71 a	13.15 a	7.57 b	8.76 a	4.26 a								
2013	CK	5.63 a	6.43 a	8.03 b	9.55 a	10.15 a	10.69 a	10.23 a	6.16 a	2.56 a	1.56 a	1.36 a			
	CaCl <sub>2</sub>	5.61 a	6.98 a	10.10 a	10.63 a	10.28 a	12.17 a	10.41 a	5.98 a	3.11 a	1.52 a	1.47 a			
	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	12.48 a	10.27 a	6.97 a	2.31 a	1.66 a									

注：表中的数据同一列中不同字母表示在  $P=0.05$  水平上差异显著。  
 Note: The different lowercase letters in the same column denoted significant difference at 0.05 level.

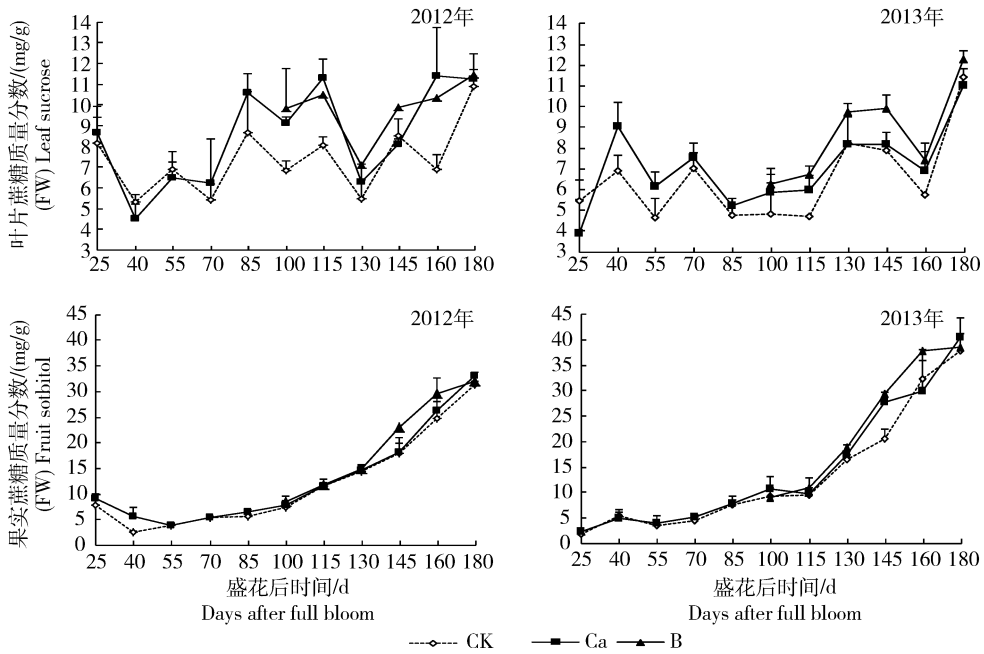


图1 喷施Ca、B后不同时期苹果叶片和果实中蔗糖的含量

Fig. 1 Sucrose content in leaf and fruit after foliar application of  $\text{CaCl}_2$  and  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  at different growth stage

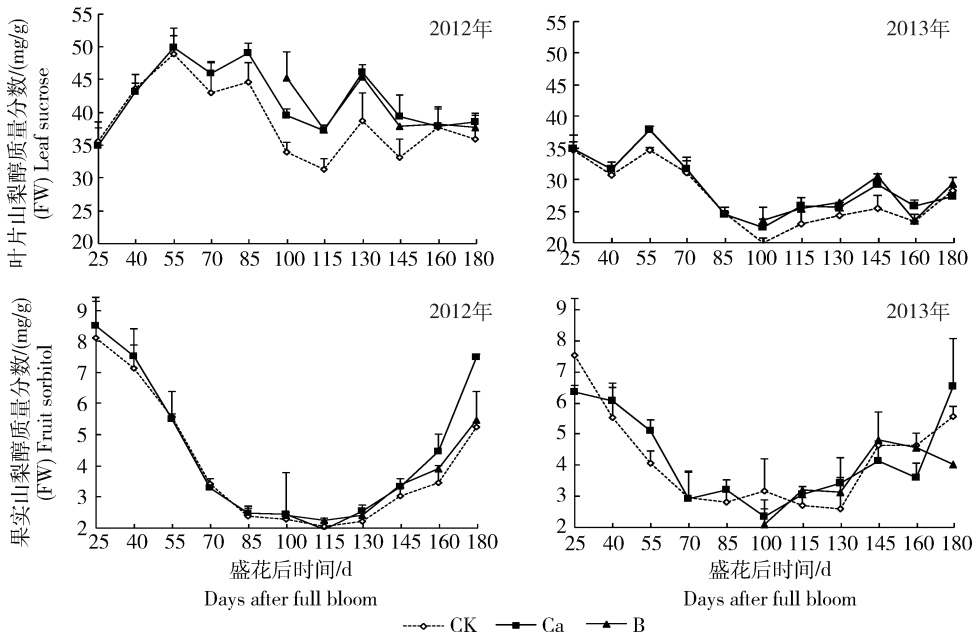


图2 喷施Ca、B后不同时期苹果叶片和果实中山梨醇的含量

Fig. 2 Sorbital content in leaf and fruit after foliar application of  $\text{CaCl}_2$  and  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  at different growth stage

在嫁接苗上涂抹Ca、B之后,分别在2年测定涂抹叶片上的光合作用参数,其中,在2013年的试验中,由于处理后1周内持续阴雨天气,致使3、5 d 2个样点的光合数据未能测得。在2013年的试验中,涂Ca处理从第7天开始持续增加叶片的净光合速率,涂B处理在7~14、60~90 d显著高于对照;在2014年的试验中,涂抹B、Ca后叶片的净光合速

率在0~30 d持续高于对照。对于蒸腾速率来说,在2013年,Ca、B处理后分别在1~30和7~14 d显著高于对照;在2014年,Ca、B处理均在1~30 d显著提高了叶片的蒸腾速率。从2年的气孔导度数据来看,2013年没有显著差异,而在2014年Ca、B处理分别在涂抹后1~7和1~30 d显著提高了叶片的气孔导度。

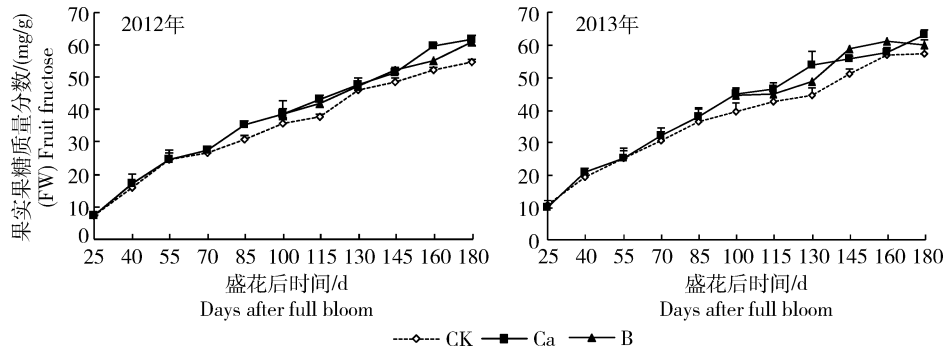


图 3 喷施 Ca、B 后不同时期苹果果实中果糖的含量

Fig. 3 Fructose content in fruit after foliar application of  $\text{CaCl}_2$  and  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  at different growth stage

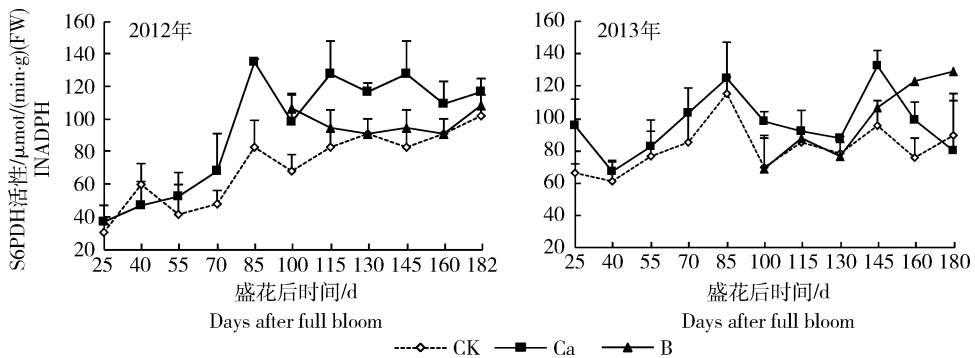


图 4 喷施 Ca、B 后不同时期苹果叶片 S6PDH 活性

Fig. 4 S6PDH activity in leaf after foliar sprays of  $\text{CaCl}_2$  and  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  at different stage

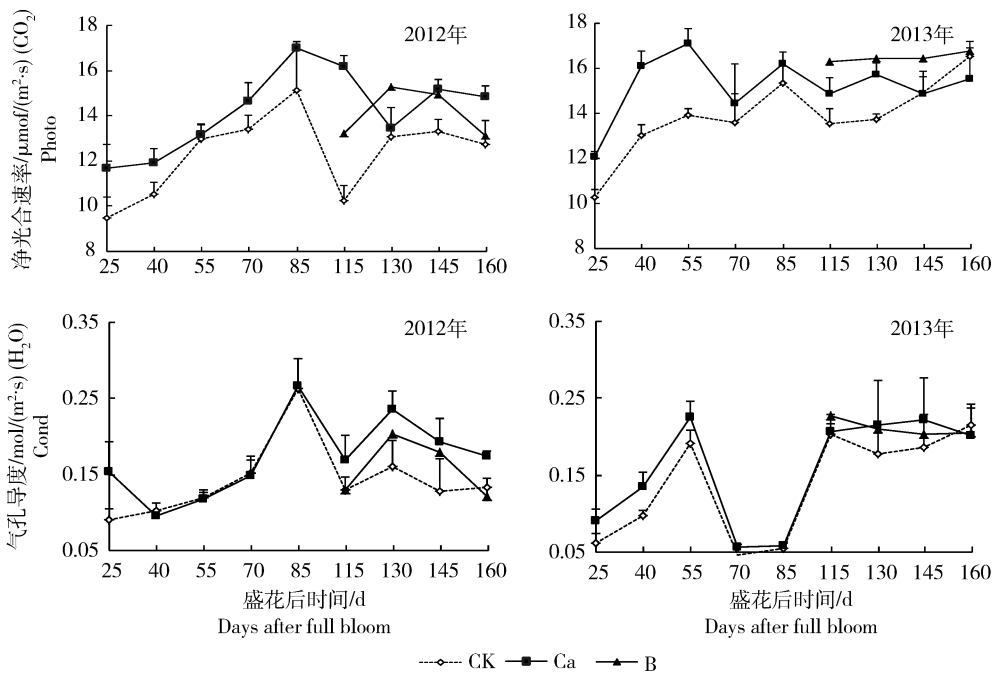


图 5 喷施 Ca、B 对不同时期苹果叶片净光合速率和气孔导度

Fig. 5 Net photosynthesis rate and stomatal conductance in leaf after spraying  $\text{CaCl}_2$  and  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  at different growth stage

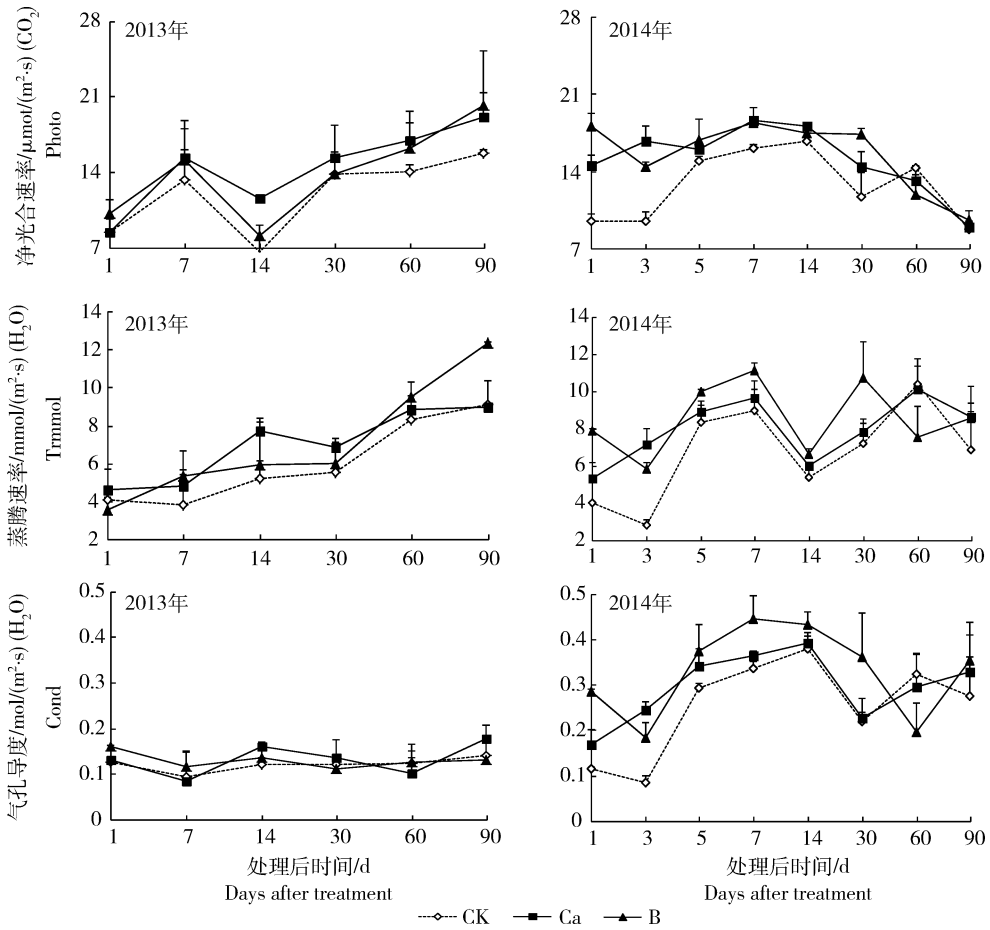


图6 涂抹Ca、B后不同时期苹果嫁接苗叶片净光合速率、蒸腾速率和气孔导度

Fig. 6 Net photosynthesis rate, transpiration rate and stomatal conductance in leaf of potted apple trees after the applications of  $\text{CaCl}_2$  and  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$

#### 2.4 2014年涂抹Ca、B对嫁接苗叶片中矿质元素含量的影响

在2014年的涂抹试验中,除了测定了叶片的光合作用以外,还测了叶片中各类矿质元素,通过分析可以看出,涂抹Ca、B之后,Mn的含量在0~7 d显著高于对照;涂抹Ca之后,Zn的含量在第1天剧烈地增加,随后慢慢恢复到正常值,在1~7 d均显著高于对照,涂B之后在3~7 d也显著增加了Zn的含量。涂抹Ca、B后,除了第5天以外,从处理当天到第7天均显著提高了叶片的Cu含量;除了第3天外,0~5 d均显著提高了叶片的K含量。(图7)

### 3 讨论

叶片喷施Ca和B能够增加果实的糖含量,这一点已经得到了广泛的共识。Khoshghalb等<sup>[24]</sup>发现在座果期后一个月、之后每隔2周对5种亚洲梨

品种喷施5%的Ca、B,可显著提高成熟期果实中果糖、葡萄糖、山梨醇、蔗糖的含量。叶面喷Ca显著提高甜瓜(*Cucumis melo* L.)蔗糖含量<sup>[25]</sup>。叶面喷B显著提高菠萝、西瓜(*Citrullus lanatus* Thunb.)、番石榴(*Punica granatum* L.)、甜菜(*Beta vulgaris* L.)总糖、还原糖及非还原糖含量<sup>[26-28]</sup>。本试验发现在座果期(盛花后10 d)喷施10 g/L  $\text{CaCl}_2$ ,迅速生长期(盛花后85 d)喷施1.05 g/L的 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 可以显著提高成熟期苹果果实的总糖含量,在喷肥以后,果实的果糖在盛花后85 d开始快速增加,并且在成熟期时果糖的增加使得总糖含量也相应的增加了。

在叶面喷施Ca和B后,叶片增加的同化物是由于光合作用增强引起的。在喷肥试验中,叶片喷施Ca、B之后,净光合速率和气孔导度分别在盛花后25~130 d和盛花期后100~145 d表现出显著



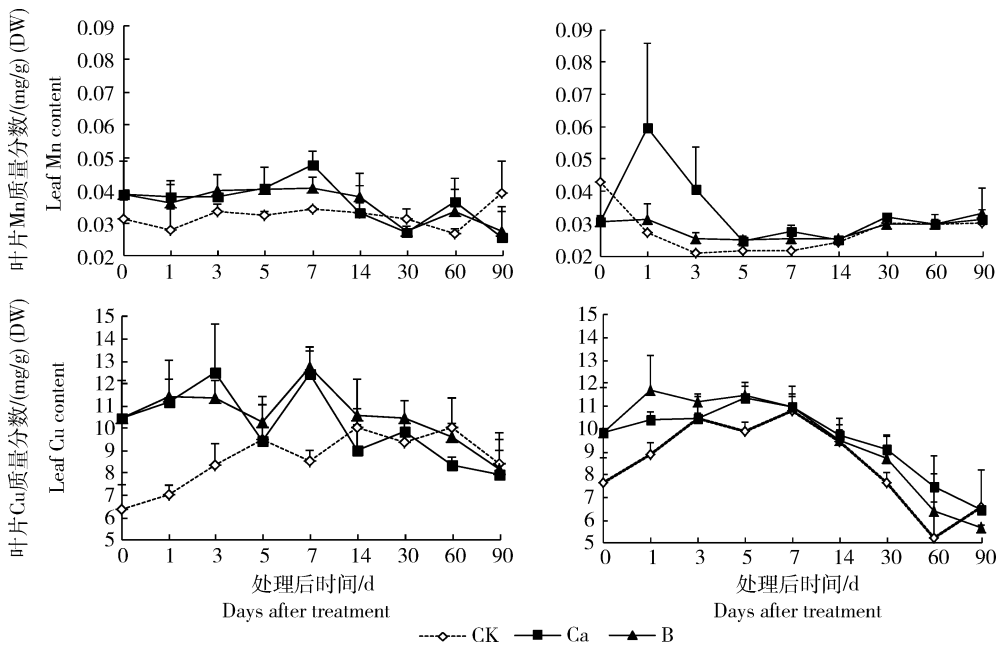


图 7 涂抹 Ca、B 后不同时期苹果嫁接苗叶片中 Mn、Zn、Cu、K 的含量

Fig. 7 Mn, Zn, Cu and K contents of potted apple trees after the applications of CaCl<sub>2</sub> and Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>

的、持续的增加。增加的量分别在(CO<sub>2</sub>) 1.28 和 1.52 μmol/(m<sup>2</sup>·s) 以上, 相当于增加了 5% 和 6%; 在涂抹试验中, 叶片涂抹 Ca、B 后, 净光合速率、蒸腾速率和气孔导度也在 Ca、B 处理后也得到了持续的增强。Ai 等<sup>[29]</sup> 指出喷施 10 mmol/L CaCl<sub>2</sub> 能显著提高黄瓜 10% 的光合作用能力。在新红星苹果中, 根外喷施 0.1% 硼酸在生长前期能促进叶绿素的形成, 生长后期延缓叶绿素的降解, 从而使光合速率升高<sup>[30]</sup>。对桃喷施钙后, 叶片的栅栏组织的厚度从 63.5 增至 107.4 μm, 叶绿体和栅栏组织厚度的增加可以提高光合作用<sup>[31]</sup>。硼肥可促进紫花苜蓿光合产物从叶向茎的运输, 茎中可溶性糖含量增加, 提高 39% 的叶片光合速率和 70% 的叶绿素含量<sup>[32]</sup>。上述的研究都说明了 Ca、B 能够增强光合作用, 改变叶绿体或叶片的组织结构, 而光合作用的增强带来了同化产物的增多, 这与本试验中叶片糖含量的显著增加是一致的, 山梨醇和蔗糖作为苹果的 2 种主要的光合产物, 在 Ca、B 处理后它们在叶片中的含量均有显著的提高。

在苹果韧皮部转运的碳水化合物中, 山梨醇占了其中的 80% 甚至更多, 它是主要的碳水化合物源<sup>[33-35]</sup>, 在 2 年的喷肥试验中, 叶面喷施 Ca 和 B 以后, 叶片中的山梨醇含量在盛花后 100~145 d 持续增加, 喷 Ca 以后叶片中山梨醇的增加量在 4.42

mg/g (FW) 以上, 喷 B 处理的增加量在 4.69 mg/g (FW) 以上, 同时 Ca、B 处理后叶片中山梨醇合成关键酶 S6PDH 在后期均显著高于对照, 与叶片中山梨醇含量提高的时期一致。山梨醇是苹果主要的同化产物, 除了光合作用的增强提高了叶片山梨醇含量外, S6PDH 活性的增强也是叶片中的山梨醇含量提高的原因之一。但 2 年试验中果实的山梨醇并无显著变化, 原因可能是山梨醇运输到果实中会很快地被转化成其他形式的糖<sup>[35]</sup>。

本课题组之前的研究发现在坐果期喷施 Ca 对果实淀粉积累没有显著的影响, 迅速生长期喷 B 提高了成熟期淀粉的含量<sup>[17]</sup>, 这与本试验的结果一致, 2 年的喷肥试验结果显示, 喷 Ca 对成熟期果实淀粉无显著影响, 2012 年喷 B 处理显著提高成熟期淀粉含量, 而在 2013 年却无影响, 这可能是年份间气候差异造成的, 其中 2013 年试验基地阴雨天气较多, 可能影响了淀粉的积累。另外, 从果实的整个发育过程来看, 果实中的淀粉含量并不受喷 Ca、B 的持续影响, 这就说明 Ca、B 对果实发育过程中淀粉的积累和转化并没有显著的促进或抑制作用。

从果实中 4 种可溶性糖含量可以看出, 果糖是苹果果实中最主要的糖, 这与先前的报道一致<sup>[36]</sup>。本试验发现从盛花后 85 d 开始, 果实中的总糖和果糖分别开始迅速积累。其中喷施 Ca 和 B 分别显著

促进了盛花后 100 d 到成熟期的果实果糖的积累, 而山梨醇、蔗糖并未发现显著和持续变化, 这就说明喷施 Ca、B 引起的果糖含量提高是果实近成熟期和成熟期总糖含量提高的前提。而果实果糖含量的提高是否跟山梨醇在果实中的转化途径有关还需进一步探究。

以阿克苏地区的骏枣 (*Ziziphus jujuba* Mill.) 为试材, 在幼果期和膨大期喷钙肥能显著增加果实中各微量元素<sup>[37]</sup>。在之前的研究也发现, 喷 Ca、B 均能弥补苹果叶片由于套袋引起的 P、K 损失<sup>[16]</sup>。在苹果生长后期光合作用的提高和根部的矿质元素的吸收息息相关, 由此通过叶面喷施 Ca、B 增加了叶片的矿质元素。叶片喷施 Ca、B 之后, 气孔导度和蒸腾速率同净光合速率一起得到了增加, 这些发现为矿质元素含量的增加提供了可能的解释, 即叶片气孔的张开和蒸腾速率的加强, 使得矿质元素随着蒸腾流从根部吸收并运输到叶片中。

## 4 结 论

在苹果中, 坐果期喷 Ca、快速生长期喷 B 均能提高叶片的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度, 增强 S6PDH 的活性, 进而增加山梨醇含量。从盛花后 85 d 到果实成熟, 果实中果糖和可溶性总糖都显著的增加, 并且 Ca、B 能增加其他矿质元素的含量。因此, 在生长后期 B 和 Ca 对提高果实果糖和总糖是十分必要的。

## 参 考 文 献

- [1] Armin M, Asgharipour M R. Effect of time and concentration of boron foliar application on yield and quality of sugar beet [J]. *Asian Journal of Plant Sciences*, 2011, 10(5): 307-311
- [2] 唐岩, 宋来庆, 孙燕霞, 赵玲玲, 刘美英, 李元军, 刘学卿, 姜中武. 叶面喷施硼肥对富士苹果果实品质和香气成分的影响[J]. *山东农业科学*, 2014, 46(1): 70-72  
Tang Y, Song L Q, Sun Y X, Zhao L L, Liu M Y, Li Y J, Liu X Q, Jiang Z W. Effect of foliage application of boric acid on quality and aroma components of Fuji apple[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2014, 46(1): 70-72 (in Chinese)
- [3] Tripathi V K, Shukla H S. Influence of calcium chloride and calcium nitrate on physico-chemical composition of aonla 'Banarasi'[J]. *Acta Horticulturae*, 2011, 890: 371-374
- [4] Stocking C R, Onget A. The intercellular distribution of some metallic elements in leaves[J]. *American Journal of Botany*, 1962, 49: 284-289
- [5] Knypl J S, Rennert A. Stimulation of growth and chlorophyll synthesis in detached cotyledons of cucumber by potassium [J]. *Zeitschrift für Pflanzenphysiologie*, 1970, 62: 97-107
- [6] Cakmak I, Römheld V. Boron deficiency-induced impairments of cellular functions in plants[J]. *Plant & Soil*, 1997, 193(1/2): 71-83
- [7] Tan W, Meng Q W, Brestic M, Olsovaska K, Yang X H. Photosynthesis is improved by exogenous calcium in heat-stressed tobacco Plants[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2011, 168(17): 2063-2071
- [8] Thurzó S, Szabó Z, Nyéki J, Silva A P, Nagy P T. Effect of boron and calcium sprays on photosynthetic pigments, total phenols and flavonoid content of sweet cherry (*Prunus avium* L)[J]. *Acta Horticulturae*, 2010, 868: 457-461
- [9] 宋焯, 刘金豹, 王孝娣, 翟衡. 苹果加工品种的糖积累与蔗糖代谢相关酶活性[J]. *果树学报*, 2006, 23(1): 1-4  
Song Y, Liu J B, Wang X T, Zhai H. Sugar accumulation and related enzyme activities in sugar metabolism of processing apple cultivars[J]. *Journal of Fruit Science*, 2006, 23(1): 1-4 (in Chinese)
- [10] Moriguchi T, Abe K, Sanada T, Yamki S. Levels and role of sucrose synthase, sucrose-phosphate synthase, and acid invertase in sucrose accumulation in fruit of Asian pear[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1992, 117(2): 274-278
- [11] Song K J, Hwang J H, Ahn S Y. Seasonal changes of enzyme activity related to sugar metabolism in leaves of apple cultivars differing in maturity [J]. *Journal of Korean Society Horticulture Science*, 2003, 44(2): 211-214
- [12] 王博, 齐红岩. 叶面喷施次数对弱光下番茄蔗糖代谢的影响[J]. *西北农业学报*, 2009, 1(6): 201-204  
Wang B, Qi H Y. Effect of spray times of foliar fertilizer on the sucrose metabolism of tomato under low light [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2009, 1(6): 201-204 (in Chinese)
- [13] Westmark P R, Gardiner S J, Smith B D. Selective monosaccharide transport through lipid bilayers using boronic acid carriers[J]. *Journal of American Chemical Society*, 1996, 118(45): 11093-11100
- [14] 夏广清, 杨金. 钙镁肥不同用量对番茄植株和果实矿质元素吸收的影响[J]. *北方园艺*, 2005(2): 44-45  
Xia G Q, Yang J. Effect of themineral elements absorption of tomato and fruit by the application of different dosage of calcium and magnesium[J]. *Northern Horticulture*, 2005(2): 44-45 (in Chinese)
- [15] 王纪忠, 陶书田, 齐开杰, 周宏胜, 张绍玲. 硼在梨树苗不同部位的分布及与其他元素分配的关系[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(6): 1240-1245  
Wang J Z, Tao S T, Qi K J, Zhou H S, Zhang S L. Boron distribution and its relationships with the allocation of other nutrient elements in different parts of pear seedlings[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(6): 1240-1245 (in

- Chinese)
- [16] Zhu B, Lu Y Q, Zhang X Z, Wang Y, Liu H P, Han Z H. Reduced late-season leaf potassium and phosphorus levels influence decreases in sugar contents of bagged apple fruit[J]. *Acta Physiol Plant*, 2014, 36(6): 1577-1584
- [17] Lu Y Q, Liu H P, Wang Y, Zhang X Z, Han Z H. Synergistic roles of leaf boron and calcium during the growing season in affecting sugar and starch accumulation in ripening apple fruit [J]. *Acta Physiol Plant*, 2013, 35(8): 2483-2492
- [18] 高俊凤. 植物生理学实验指导. 北京: 高等教育出版社, 2006: 144-148  
Gao J F. *Experimental Guidance for Plant Physiology* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 144-148 (in Chinese)
- [19] 胡志群, 王惠聪, 胡桂兵. 高效液相色谱测定荔枝果肉中的糖、酸和维生素 C [J]. *果树学报*, 2005, 22(5): 582-585  
Hu Z Q, Wang H C, Hu G B. Measurement of sugar, organic acids and vitamin C in litchi fruit by high performance liquid chromatography [J]. *Journal of Fruit*, 2005, 22(5): 582-585 (in Chinese)
- [20] Keller F, Ludlow M M. Carbohydrate metabolism in drought-stressed leaves of pigeon pea (*Cajanus*) [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1993, 44(8): 1351-1359
- [21] Negm F B, Loescher W H. Characterization and partial purification of aldose-6-phosphate reductase from apple leaves [J]. *Plant Physiology*, 1981, 67(1): 139-142
- [22] Harter H L. Critical values for Duncan's new multiple range test [J]. *Biometrics*, 1960, 16(4): 671-685
- [23] Ackermann J, Fischer M, Amad B R. Changes in, and during and of (*Glockenapfel*) [J]. *Journal of Agricultural of Food and Chemistry*, 1992, 40(7): 1131-1134
- [24] Khoshghalb H, Arzani K, Malakouti M J. Effect of Ca, Zn and B spray application on preharvest fruit drop, sugar and nutrient contents and on some quantitative and qualitative fruit characteristics in some Asian pear (*Pyrus serotina* Rehd) cultivars [J]. *Iranian Journal of Horticultural Science*, 2013, 44(2): 149-159
- [25] 李天来, 李骥尧, 刘轶飞. 硝酸钙对嫁接网纹甜瓜果实糖含量及糖代谢相关酶活性的影响 [J]. *中国蔬菜*, 2011, 14: 15-22  
Li T L, Li Q Y, Liu Y F. Effect of calcium nitrite on sugar content and sugar-metabolic enzyme activities in grafted Muskmelon fruit [J]. *Chinese Vegetables*, 2011, 14: 15-22 (in Chinese)
- [26] Kar P L, Sema A, Maiti C S, Singh A K, Bendangsengla A. Effects of zinc and boron on fruit and quality traits in pineapple (*Ananas comosus* L) [J]. *South Indian Horticulture*, 2002, 50(1/6): 44-48
- [27] Awasthi P, Lal S. Effect of calcium, boron and zinc foliar sprays on the yield and quality of guava (*Psidium guajava* L) [J]. *Pantnagar Journal of Research*, 2009, 7(2): 223-225
- [28] 李立梅, 吴元华, 赵秀香. 硼对西瓜蔗糖代谢的影响及对黄瓜绿斑驳花叶病毒的抗性诱导 [J]. *中国农业大学学报*, 2010, 15(3): 57-62  
Li L M, Wu Y H, Zhao XX. Effect of boron on sucrose accumulation in watermelon and boron-induced resistance to Cucumber [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2010, 15(3): 57-62 (in Chinese)
- [29] Ai X Z, Wang X F, Cui Z F, et al. Effect of calcium on photosynthesis of cucumber under low light intensity and sub-optimal temperature [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(9): 1865-1871
- [30] 梁长梅, 温鹏飞. 根外施硼对新红星苹果树光合速率年变化的影响 [J]. *山西农业大学学报*, 2001, 45(3): 45-47  
Liang C M, Wen P F. Effect of leaf spraying boron on annual variation of photosynthesis in Starkrimson apple trees [J]. *Journal of Shanxi Agricultural University*, 2001, 45(3): 45-47 (in Chinese)
- [31] Park J Y, Son I C, Kim D I. Effects of foliar spray of calcium hydroxide on shoot growth and fruit quality in 'Daewol' peach [*Prunus persica* (L) Batsch] [J]. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 2010, 29: 102-108
- [32] 宗毓铮, 王雯玥, 韩清芳, 丁瑞霞, 贾志宽, 聂俊峰. 喷施喷肥对紫花苜蓿光合作用及可溶性糖源库间转运的影响 [J]. *作物学报*, 2010, 36(4): 665-672  
Zong Y Z, Wang W Y, Han Q F, Ding R X, Jia Z K, Nie J F. Effects of different levels of boron fertilizer on alfalfa photosynthesis and source-sink translocation of soluble carbohydrate in alfalfa [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(4): 665-672 (in Chinese)
- [33] Webb K L, Burley J W A. Sorbitol translocation in apple [J]. *Science*, 1962, 137: 766
- [34] Bielecki R L. Accumulation and translocation of sorbitol in apple phloem [J]. *Australian Journal of Biological Sciences*, 1969, 22: 611-620
- [35] Loescher W H, Marlow G C, Kennedy R A. Sorbitol metabolism and source-sink interconversions in developing apple leaves [J]. *Plant Physiology*, 1982, 70: 335-339
- [36] 王永章, 张大鹏. 红富士苹果果实蔗糖代谢与酸性转化酶和蔗糖合酶关系的研究 [J]. *园艺学报*, 2001, 28(3): 259-261  
Wang Y Z, Zhang D P. A study on the relationship of Fuji apple fruit sugar metabolism and acid invertase and sucrose synthase [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2001, 28(3): 259-261 (in Chinese)
- [37] 于婷. 钙和镁对骏枣果实品质及中微量元素的影响 [D]. 新疆: 新疆农业大学, 2012  
Yu T. The effect of calcium and magnesium on the quality and some secondary and trace elements of *Ziziphus jujube* Mill [D]. Xinjiang: Xinjiang Agricultural University, 2012 (in Chinese)