

# 磷酸二氢钾对脐橙陷痕果发生及果皮细胞壁代谢的影响

李娟<sup>1,2</sup>, 罗伟金<sup>2</sup>, 陈杰忠<sup>2,\*</sup>, 姚青<sup>2</sup>, 万继锋<sup>2</sup>, 黄战威<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>仲恺农业工程学院园艺园林学院, 广州 510225; <sup>2</sup>华南农业大学园艺学院, 广州 510642)

**摘要:** 研究‘卡拉卡拉’(*Citrus sinensis* Osbeck ‘Cara Cara’)和‘纽荷尔’(*Citrus sinensis* Osbeck ‘Newhall’)脐橙果实膨大期叶面喷施钾肥(0.2%  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ )后, 成熟期陷痕果发生率、果皮细胞壁物质成分、细胞壁代谢相关酶活性的变化规律及其关系。结果表明,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 处理对卡拉卡拉脐橙和纽荷尔脐橙的果皮厚度、硬度及其均匀度有不同程度的影响, 卡拉卡拉脐橙的陷痕果发生率显著降低。纽荷尔脐橙的细胞壁代谢以及果皮力学性能受 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 的影响较小, 陷痕果率无显著变化。果皮果胶酶、纤维素酶、木聚糖酶、过氧化物酶活性的降低可以减缓果皮原果胶、纤维素和半纤维素成分的降解, 降低果实成熟过程中果皮软化的速度, 减少陷痕果的发生。

**关键词:** 脐橙; 陷痕果率; 磷酸二氢钾; 果皮; 细胞壁代谢

**中图分类号:** S 666

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0513-353X (2011) 07-1235-08

## Effects of Spraying $\text{KH}_2\text{PO}_4$ on Cell-wall Metabolism of Pericarp and Pitting Fruit Rate in Navel Orange

LI Juan<sup>1,2</sup>, LUO Wei-jin<sup>2</sup>, CHEN Jie-zhong<sup>2,\*</sup>, YAO Qing<sup>2</sup>, WAN Ji-feng<sup>2</sup>, and HUANG Zhan-wei<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Department of Horticulture, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China; <sup>2</sup>College of Horticulture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** Based on the different incidence of pitting fruit, two navel orange cultivars ‘Cara cara’ navel orange (*Citrus sinensis* Osbeck ‘Cara Cara’) and ‘Newhall’ navel orange (*Citrus sinensis* Osbeck ‘Newhall’) were used to research on cell wall composition, related enzymes in cell wall metabolism of peel and pitting fruit rate with the  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  foliar application during ripening. The results showed that the difference existed in the peel thickness, hardness and homogeneity between ‘Cara Cara’ and ‘Newhall’ navel orange with the  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  spraying, the pitting fruit rate of ‘Cara Cara’ navel orange was significantly decreased. There was a few effects on cell-wall metabolism and pericarp character in ‘Newhall’ than ‘Cara Cara’ navel orange, and there have no significant difference in pitting fruit rate of ‘Newhall’ between  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  foliar application and control. The decreasing of polygalacturonase (PG), cellulose (CX), xylanase (Xyn), and peroxidase (POD) activities maybe low the decomposition of protopectin, hemicellulose and cellulose, increase peel hardness and thickness, low pitting fruit incidence.

**收稿日期:** 2010-12-01; **修回日期:** 2011-06-08

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (30871692, 3100892); 广东省农业攻关项目 (2006B20301010, 2008A020100022); 农业部行业科技子项目 (nyhyzx07-09); 广东省岭南水果创新体系项目; 教育部博士点基金项目 (20104404110012)

\* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: cjzlx@scau.edu.cn)

**Key words:** navel orange; pitting fruit rate;  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ; peel; cell wall metabolism

几乎所有柑橘品种的果实都有陷痕果现象,不同品种的陷痕果发生率不同(陈杰忠等,1999,2002,2005; Brower, 2004; 李娟, 2006, 2009; 李娟等, 2008, Li et al., 2009)。柑橘陷痕果发生是裂果的前期表现,症状为果皮的白皮层溃裂,表皮层下陷(邹河清和许建楷, 1995)。

有研究认为果皮陷痕是局部组织养分短缺,某个代谢环节受到干扰,造成果皮发育障碍,抵抗外界胁迫因子能力减弱,在外界强光、高温、干旱等因素刺激下导致陷痕果或裂果发生,果皮中磷、钾营养对这一生理失调过程产生巨大影响(许建楷等, 1994; Bower, 2004)。钾能维持细胞较高渗透压和膨压,为细胞分裂、细胞壁延伸及细胞扩张提供动力(廖红和严小龙, 2003)。南方红壤土由于雨水较多,土壤淋溶严重,酸性较大,幼果期磷、钾营养缺乏(肖家欣等, 2004; 刘桂东等, 2010)。增施钾肥可使果实细胞壁加厚,增强生物膜对水的束缚力,不易受冻受旱等影响。幼果期施用钾肥可以增加果皮厚度,增强果皮抗破裂能力,减轻采前裂果(Ali et al., 2000)。磷的缺乏导致果皮增厚,尤其是果皮结构疏松;磷供应充足果皮变薄(陈杰忠, 2003),磷、钾的盈亏与果实生长发育密切相关(庄伊美, 1994; Quinones et al., 2007)。

关于 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 与陷痕果以及裂果果皮细胞壁物质代谢的报道较少。陈杰忠等(2002)和李娟(2009)的研究表明柑橘果皮及其细胞壁P、K元素含量与陷痕果发生密切相关。因此,在果实膨大期研究 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 处理对柑橘果皮细胞壁代谢的影响,深入揭示磷、钾元素处理下柑橘果实发育过程中陷痕果形成的生理机制,可为生产上防止柑橘陷痕果形成提供科学指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点及供试材料

试验在广东省中山市南朗镇杨氏果园进行,果园土壤为沙壤土,园区气候条件和生产管理水平一致。选取生长正常,树势大体相近,花期和成熟期一致,无病虫害的8年生红橘砧木‘纽荷尔’脐橙(*Citrus sinensis* Osbeck ‘Newhall’)和‘卡拉卡拉’脐橙(*Citrus sinensis* Osbeck ‘Cara Cara’)各20株,从2008年9月29日开始,每隔10 d调查一次陷痕果率。调查方法为:对每株树上的所有果( $C_1$ )和陷痕果( $C_2$ )分别进行计数,单株重复。陷痕果率 $C_0$ (%) =  $(C_2 / C_1) \times 100$ 。每次统计完毕即摘除陷痕果。

### 1.2 K元素的处理及试验方法

2008年8月1日和15日对卡拉卡拉脐橙和纽荷尔脐橙的植株和果实进行清水(对照)和钾肥(0.2% $\text{KH}_2\text{PO}_4$ )叶面喷施处理,每个处理10株。在果实成熟期调查各处理陷痕果率(方法同上)。2008年9月29日—11月19日,每10 d采样1次,每株树采4个果(在树冠中部东南西北4个方向各取1个果),单株重复。鲜样取回实验室后先用无离子水冲洗,再用双蒸水冲洗干净,将在田间标记好的果实的阴、阳面正常果和陷痕果皮,切成小块(长1 cm × 宽1 cm × 厚2 cm)大小, -80℃冷冻,备用各项分析。

果皮厚度使用日本三丰公司(Mitutoyo)生产的防水防油数显卡尺(型号:500-673)测量,测量部位是每个果实阴面、阳面果腹。果皮硬度使用美国英特朗公司生产的Instron5542单立柱台式电子万能材料试验机测定,测量探头为圆形,直径为8 mm,移动速度为400 mm · min<sup>-1</sup>,每个果实的不同部位测3次。果皮N含量的测定采用蒸馏定氮法,P含量的测定采用钒钼黄比色法,K含量的测

定采用火焰光度计法（鲁如坤，2000）。

提取和测定果皮细胞壁物质（CWM）（Siddiqui et al., 1996）；测定果皮细胞壁多聚半乳糖醛酸酶（PG）（Pathak et al., 2000）、果胶甲酯酶（PME）（Hagerman & Austin, 1986）、纤维素酶（CX）、过氧化物酶（POD）及多酚氧化酶（PPO）活性（赵亚华和高向阳，2000）；果皮细胞壁成分和代谢相关酶测定分别重复 3 次取平均值。

所有数据经过 Microsoft Office Excel 和 SPSS 分析软件统计分析。

2 结果与分析

2.1 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>处理对脐橙陷痕果率的影响

自然条件下卡拉卡拉脐橙与纽荷尔脐橙果实在不同生长发育阶段陷痕果发生率不同（图 1），9 月 29 日至 10 月 18 日为卡拉卡拉陷痕果高发期，10 月下旬陷痕果率逐渐降低，11 月份陷痕果发生率不到 1%，说明卡拉卡拉脐橙属于高陷痕果率品种，而纽荷尔脐橙陷痕果率一直很低。

在果实膨大期叶面喷施KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>，至果实成熟期进行调查统计，卡拉卡拉脐橙的陷痕果率显著降低 14%，而纽荷尔脐橙的陷痕果率没有降低（表 1）。

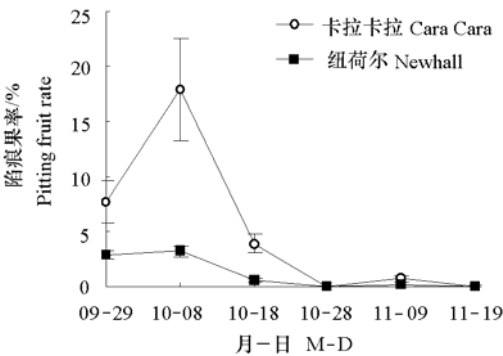


图 1 卡拉卡拉脐橙和纽荷尔脐橙陷痕果发生率的变化  
Fig. 1 Difference on pitting fruit rate of Cara Cara and Newhall navel oranges

表 1 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>处理对卡拉卡拉脐橙和纽荷尔脐橙成熟期陷痕果率的影响（2008 年）  
Table 1 Effects of KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> foliar application on pitting fruit rate of the Cara Cara and Newhall navel oranges

品种 Cultivar	处理 Treatment	陷痕果率/% Pitting fruit rate
卡拉卡拉 Cara Cara	对照 Control	34.10 ± 7.00 a
	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	20.12 ± 4.10 b
纽荷尔 Newhall	对照 Control	7.23 ± 1.01 c
	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	8.07 ± 1.03 c

注：经 DMRT 测验，不同小写字母代表差异达显著水平，*P* < 0.05。  
Note: DMRT test in table 1, different small letters means significant difference at *P* < 0.05 level.

2.2 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>处理对脐橙果皮厚度和硬度的影响

从图 2 和图 3 看出，纽荷尔脐橙的果皮较厚，较硬。果实阳面的果皮比阴面果皮厚，并且较硬。两品种中，以卡拉卡拉脐橙的阴、阳面果皮厚度差异较大。纽荷尔脐橙的阴、阳面果皮厚度和硬度从 10 月 8 日开始降低；而卡拉卡拉脐橙从 9 月 29 日起已开始下降。陷痕果高发期（9 月 29 日—10 月 18 日）与果皮厚度变幅较大的时期相伴（图 1）。

在果实膨大期喷施KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>后，卡拉卡拉脐橙果皮阴面与阳面厚度和硬度均显著增加，阴面果皮的厚度和硬度均显著小于阳面果皮的厚度和硬度，而且阴阳两面果皮硬度差异缩小；纽荷尔脐橙 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>处理后阴、阳面果皮厚度和硬度略有增加，但与对照没有显著性差异（表 2）。

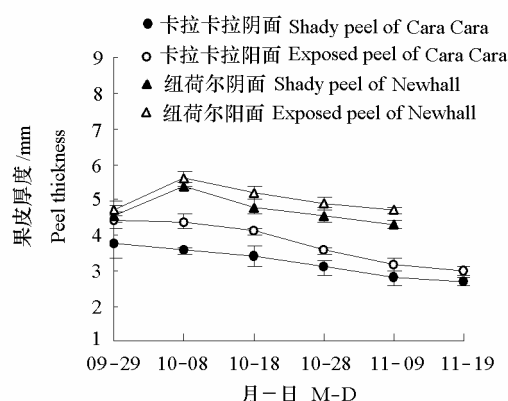


图 2 卡拉卡拉脐橙和纽荷尔脐橙果皮厚度变化的比较  
Fig. 2 The difference in fruit peel thickness of the Cara Cara and Newhall navel oranges

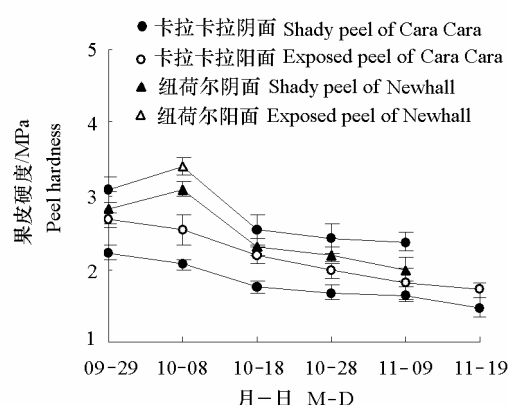


图 3 卡拉卡拉脐橙和纽荷尔脐橙阴阳面果皮硬度变化的比较  
Fig. 3 Difference in fruit peel hardness of the Cara Cara and Newhall navel oranges

表 2  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 处理对卡拉卡拉脐橙果皮厚度和硬度的影响 (2010-10-08)  
Table 2 Effects of  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  foliar application on peel thickness and hardness of Cara Cara navel orange

品种 Cultivar	处理 Treatment	果皮厚度/mm Peel thickness		果皮硬度/MPa Peel hardness	
		阴面 Shady peel	阳面 Exposed peel	阴面 Shady peel	阳面 Exposed peel
卡拉卡拉 Cara Cara	对照 Control	$3.50 \pm 0.13$ e	$3.90 \pm 0.20$ d	$2.06 \pm 0.23$ d	$2.78 \pm 0.28$ c
	$\text{KH}_2\text{PO}_4$	$4.58 \pm 0.03$ c	$5.25 \pm 0.02$ b	$2.99 \pm 0.12$ b	$2.91 \pm 0.13$ b
纽荷尔 Newhall	对照 Control	$5.40 \pm 0.10$ a	$5.60 \pm 0.20$ a	$3.01 \pm 0.10$ b	$3.20 \pm 0.14$ a
	$\text{KH}_2\text{PO}_4$	$5.45 \pm 0.16$ a	$5.70 \pm 0.14$ a	$3.26 \pm 0.13$ a	$3.30 \pm 0.17$ a

注: 经 DMRT 测验, 不同小写字母代表差异达显著水平,  $P < 0.05$ 。

Note: DMRT test in table 2, different small letters means significant difference at  $P < 0.05$  level.

## 2.3 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 处理对脐橙成熟期果皮N、P、K含量的影响

在陷痕果高发期, 未进行 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 处理的陷痕果高发品种卡拉卡拉脐橙与陷痕果低发品种纽荷尔脐橙果皮中N、P含量无显著差异, 而K含量以低发陷痕果率品种纽荷尔脐橙为高(表3), 说明果皮K含量在陷痕果的发生上可能起到一定的作用。

卡拉卡拉和纽荷尔脐橙在果实膨大期经 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 喷施后, 在陷痕果高发期其果皮N、K含量均比对照的显著升高, P含量与对照无显著差异(表3)。

表 3 卡拉卡拉脐橙和纽荷尔脐橙果皮 N、P、K 含量的差异 (2010-10-08)

Table 3 N, P and K contents of peel between Cara Cara and Newhall navel orange

/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

品种 Cultivar	处理 Treatment	N	P	K
卡拉卡拉 Cara Cara	对照 Control	$9.98 \pm 0.13$ b	$0.76 \pm 0.04$ a	$5.67 \pm 0.13$ c
	$\text{KH}_2\text{PO}_4$	$10.81 \pm 0.09$ a	$0.81 \pm 0.06$ a	$7.54 \pm 0.07$ b
纽荷尔 Newhall	对照 Control	$10.23 \pm 0.17$ b	$0.75 \pm 0.03$ a	$7.46 \pm 0.52$ b
	$\text{KH}_2\text{PO}_4$	$10.95 \pm 0.03$ a	$0.79 \pm 0.01$ a	$8.56 \pm 0.08$ a

注: 同一列经 DMRT 测验, 不同小写字母代表差异达显著水平,  $P < 0.05$ 。

Note: DMRT test in each column, different small letters means significant difference at  $P < 0.05$  level.

## 2.4 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 处理对脐橙成熟期果皮细胞壁成分的影响

### 2.4.1 卡拉卡拉和纽荷尔脐橙阴、阳面果皮细胞壁成分的比较

卡拉卡拉脐橙阴、阳面果皮细胞壁原果胶、半纤维素和纤维素含量均有显著差异, 以阳面果皮

为高；而纽荷尔脐橙阴、阳面果皮的细胞壁原果胶、半纤维素和纤维素含量差异都不显著（表 4）。卡拉卡拉脐橙阳面果皮纤维素含量显著高于阴面，可能增强其果皮细胞的机械强度，减少了果皮陷痕的发生；其阴、阳面果皮细胞壁成分差异较纽荷尔脐橙的大，容易导致其果皮细胞壁结构不均匀，力学性能差异大以及陷痕果的发生。

表 4 卡拉卡拉脐橙和纽荷尔脐橙阴、阳面果皮细胞壁成分的差异（2010 - 10 - 08）  
Table 4 Different contents of cell wall fractions in peels of fruit shady and exposed sides on Cara Cara and Newhall navel orange

品种 Cultivar	果皮部位 Peel position	原果胶/% Protopectin	半纤维素/% Hemicellulose	纤维素/% Cellulose
卡拉卡拉 Cara Cara	阴面 Shady peel	0.45 ± 0.08 c	1.54 ± 0.31 c	51.02 ± 2.36 b
	阳面 Exposed peel	0.63 ± 0.05 b	2.96 ± 0.46 b	60.05 ± 1.25 a
纽荷尔 Newhall	阴面 Shady peel	0.97 ± 0.09 a	6.54 ± 0.17 a	62.32 ± 1.26 a
	阳面 Exposed peel	1.05 ± 0.07 a	6.26 ± 0.42 a	61.17 ± 1.13 a

注：同一列经 DMRT 测验，不同小写字母代表差异达显著水平， $P < 0.05$ 。  
Note: DMRT test in each column, different small letters means significant difference at  $P < 0.05$  level.

2.4.2  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 处理对脐橙果皮细胞壁成分的影响

从表 5 可见，在陷痕果高发期未进行 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 喷施的脐橙果皮原果胶含量、半纤维素和纤维素含量以低陷痕果率品种纽荷尔脐橙为高。纽荷尔脐橙陷痕果率低可能与果皮原果胶、纤维素含量较高而增大了果皮细胞壁的机械强度有关。

$\text{KH}_2\text{PO}_4$ 处理能显著增加卡拉卡拉脐橙果皮原果胶、半纤维素和纤维素含量。其半纤维素含量的增加使果皮细胞生长能力和果皮细胞松弛度的增加，纤维素含量增加也增大了果皮细胞壁的硬度及抗陷痕能力，使陷痕果率降低。而 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 处理后纽荷尔脐橙果皮细胞壁成分的含量略有增加，但是未达显著性差异，这也可能是 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 处理没有显著降低其陷痕果率的原因之一。

表 5  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 处理对卡拉卡拉脐橙和纽荷尔脐橙果皮细胞壁成分的影响（2010 - 10 - 08）  
Table 5 Effects of  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  foliar application on cell wall fractions in peels of Cara Cara and Newhall navel orange fruits

品种 Cultivar	处理 Treatment	原果胶/% Protopectin	半纤维素/% Hemicellulose	纤维素/% Cellulose
卡拉卡拉 Cara Cara	对照 Control	0.54 ± 0.02 c	2.25 ± 0.08 c	55.54 ± 0.71 b
	$\text{KH}_2\text{PO}_4$	0.63 ± 0.04 b	5.93 ± 0.08 b	62.17 ± 1.27 a
纽荷尔 Newhall	对照 Control	1.01 ± 0.07 a	6.42 ± 0.39 a	61.75 ± 1.81 a
	$\text{KH}_2\text{PO}_4$	1.12 ± 0.04 a	7.35 ± 0.47 a	62.27 ± 1.25 a

注：同一列经 DMRT 测验，不同小写字母代表差异达显著水平， $P < 0.05$ 。  
Note: DMRT test in each column, different small letters means significant difference at  $P < 0.05$  level.

2.5  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 处理对脐橙成熟期果皮细胞壁代谢相关酶活性的影响

2.5.1 卡拉卡拉和纽荷尔脐橙阴、阳面果皮细胞壁代谢相关酶活性的比较

如表 6 所示，纽荷尔脐橙阴、阳面果皮细胞壁除了果胶酶有显著性差异以外，其他酶活性差异不显著。高陷痕果率品种卡拉卡拉脐橙阴、阳面果皮中木聚糖酶和  $\beta$  - 半乳糖苷酶活性无显著差异，而果胶酶、过氧化物酶、纤维素酶和果胶甲酯酶均以阳面果皮为高，可能因为阳面果皮接受的光照多于阴面果皮，也可能是阴面果皮细胞壁成分被细胞壁酶降解的速度小于合成的速度，使阴面果皮的硬度低于阳面果皮（表 2）。

表 6 卡拉卡拉脐橙和纽荷尔脐橙阴、阳面果皮细胞壁代谢相关酶活性 (2010 - 10 - 08)

Table 6 Difference of enzymy activities in peels of fruit shady and exposed sides on Cara Cara and Newhall navel orange

品种 Cultivar	果皮部位 Peel position	果胶酶/ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mg}^{-1}$ ) PG	纤维素酶/ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ ) EC	$\beta$ -半乳糖苷酶/ ( $\text{mmol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ ) $\beta$ -Gal	果胶甲酯酶/ ( $\text{U} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ ) PE	木聚糖酶/ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ ) Xyn	过氧化物酶/ ( $\text{U} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ ) POD
卡拉卡拉	阴面 Shady peel	4.16 $\pm$ 0.01 b	17.99 $\pm$ 0.32 b	3.48 $\pm$ 0.11 a	14.41 $\pm$ 0.07 b	88.40 $\pm$ 2.91 a	61.00 $\pm$ 0.28 b
Cara Cara	阳面 Exposed peel	4.83 $\pm$ 0.12 a	18.94 $\pm$ 0.13 a	3.43 $\pm$ 0.06 a	16.03 $\pm$ 0.11 a	92.58 $\pm$ 1.17 a	70.56 $\pm$ 1.39 a
纽荷尔	阴面 Shady peel	3.46 $\pm$ 0.02 d	13.31 $\pm$ 0.10 c	3.23 $\pm$ 0.08 b	11.23 $\pm$ 0.21 c	74.53 $\pm$ 2.36 b	52.97 $\pm$ 1.26 c
Newhall	阳面 Exposed peel	3.85 $\pm$ 0.06 c	13.50 $\pm$ 0.27 c	3.32 $\pm$ 0.06 b	11.43 $\pm$ 0.29 c	77.54 $\pm$ 1.23 b	55.49 $\pm$ 1.33 c

注：同一列经 DMRT 测验，不同小写字母代表差异达显著水平， $P < 0.05$ 。

Note: DMRT test in each column, different small letters means significant difference at  $P < 0.05$  level.

### 2.5.2 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 处理对脐橙果皮细胞壁代谢相关酶活性的影响

未经 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 喷施处理的卡拉卡拉、纽荷尔脐橙果皮中纤维素酶和 $\beta$ -半乳糖苷酶活性没有显著差异，而果胶酶、果胶甲酯酶、木聚糖酶、过氧化物酶活性则以卡拉卡拉脐橙为高（表 7）。卡拉卡拉脐橙果皮中较高的果胶酶、果胶甲酯酶活性能使果皮中的原果胶加速转化为水溶性果胶；其较高的过氧化物酶活性可降低了细胞壁的延伸性，使细胞壁硬化；较高的木聚糖酶活性加速了纤维素的降解，降低果皮的硬度。

$\text{KH}_2\text{PO}_4$ 处理能显著降低卡拉卡拉脐橙果皮的果胶酶、纤维素酶、果胶甲酯酶、过氧化物酶活性；但对纽荷尔脐橙处理后，其果皮除果胶酶、纤维素酶活性的降低显著外，其他酶活性降低均不显著（表 7）。可见，在一定程度上 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 处理能减弱卡拉卡拉脐橙果皮原果胶水解；而纤维素和过氧化物酶活性的降低，使得细胞壁强度降低，可能减弱果皮的力学性能。

表 7  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 处理对卡拉卡拉脐橙和纽荷尔脐橙果皮细胞壁代谢相关酶活性的影响 (2010 - 10 - 08)

Table 7 Effects of  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  foliar application on enzymy activities in peels of Cara Cara and Newhall navel orange fruits

品种 Cultivar	处理 Treatment	果胶酶/ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mg}^{-1}$ ) PG	纤维素酶/ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ ) EC	$\beta$ -半乳糖苷酶/ ( $\text{mmol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ ) $\beta$ -Gal	果胶甲酯酶/ ( $\text{U} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ ) PE	木聚糖酶/ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ ) Xyn	过氧化物酶/ ( $\text{U} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ ) POD
卡拉卡拉	对照 Control	4.49 $\pm$ 0.02 a	18.46 $\pm$ 1.16 a	3.95 $\pm$ 0.01 a	15.20 $\pm$ 0.02 a	109.49 $\pm$ 1.81 a	65.78 $\pm$ 1.09 a
Cara Cara	$\text{KH}_2\text{PO}_4$	3.53 $\pm$ 0.04 b	15.51 $\pm$ 0.64 b	3.34 $\pm$ 0.01 a	12.80 $\pm$ 0.01 b	88.89 $\pm$ 1.16 b	43.89 $\pm$ 0.02 c
纽荷尔	对照 Control	3.48 $\pm$ 0.06 b	18.00 $\pm$ 0.58 a	3.58 $\pm$ 0.37 a	11.33 $\pm$ 0.12 c	76.54 $\pm$ 2.80 c	54.23 $\pm$ 0.80 b
Newhall	$\text{KH}_2\text{PO}_4$	3.15 $\pm$ 0.12 c	17.32 $\pm$ 0.13 b	3.55 $\pm$ 0.46 a	11.17 $\pm$ 0.15 c	76.30 $\pm$ 2.18 c	50.10 $\pm$ 1.39 b

注：同一列经 DMRT 测验，不同小写字母代表差异达显著水平， $P < 0.05$ 。

Note: DMRT test in each column, different small letters means significant difference at  $P < 0.05$  level.

## 3 讨论

本研究发现：卡拉卡拉脐橙属于高陷痕果率品种，纽荷尔脐橙属于低陷痕果率品种，在陷痕果高发期，纽荷尔脐橙阴、阳面果皮的厚度、硬度及其均匀度明显大于高陷痕果率品种卡拉卡拉脐橙，卡拉卡拉脐橙果皮厚度和硬度降低的时期早于纽荷尔脐橙，降低幅度大于纽荷尔脐橙，卡拉卡拉脐橙阴、阳面果皮厚度和硬度的不均匀可能是其高陷痕果率的原因之一。这与高飞飞等（1994）在红江橙上研究结果一致，果皮薄、弹性差是其裂果易感性的主要原因。Merrill（1970）也认为薄果皮降低了果皮的伸长性，导致了陷痕果的发生。

细胞壁PG、果胶甲酯酶活性较高，水解细胞壁中的原果胶的速度快，果胶分子降解快，细胞壁性质易发生剧烈变化（李雄彪和吴倚，1993）。高的纤维素酶、过氧化物酶、木聚糖酶活性可导致纤维素降解，意味着果皮细胞壁易解体 and 果实易软化（Redgwell et al., 1997），因细胞壁成分原果胶、

纤维素、半纤维素成分的降低会导致细胞壁结构松懈(颜季琼等, 1998)。本研究中, 高陷痕果率发生期末进行 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 处理的卡拉卡拉脐橙其果皮细胞壁中果胶酶、果胶甲酯酶、过氧化物酶、木聚糖酶活性显著高于低陷痕果率品种纽荷尔脐橙, 其果皮原果胶、半纤维素、纤维素含量显著低于纽荷尔脐橙, 阴、阳面果皮细胞壁代谢的差异显著大于纽荷尔脐橙, 使得卡拉卡拉脐橙果皮硬度、厚度不均匀和变化剧烈, 纽荷尔脐橙相反。在果实膨大期喷施 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 显著降低卡拉卡拉和纽荷尔脐橙果皮的果胶酶、纤维素酶活性, 但是因为纽荷尔脐橙本是陷痕果低发品种,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 处理对其细胞壁代谢以及果皮力学性能(果皮厚度、硬度)的影响较卡拉卡拉脐橙小, 陷痕果率没有降低。这与陈杰忠等(1999, 2002)、Bower(2004)、李娟(2006, 2009)、李娟等(2008)的研究结果一致, 果胶甲酯酶的高活性和水溶性果胶的高含量对陷痕果的发生有极大的影响, 在果实膨大期进行 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 处理, 随着果实的成熟, 可减少其果皮果胶甲酯酶的活性增加速度, 降低原果胶的分解, 细胞不易分离, 部分果皮不易内陷, 陷痕果出现的机会可能降低。在果实膨大期进行 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 处理, 影响果皮细胞壁代谢和果皮理化性质(包括果皮厚度、硬度的变化)的变化而导致品种间陷痕果发生率不同。

在果实膨大期对卡拉卡拉和纽荷尔脐橙喷施 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 后, 果皮P含量没有明显改变, N、K含量显著升高, 卡拉卡拉果皮厚度、硬度均显著增加, 阴、阳面果皮硬度差异缩小, 而纽荷尔脐橙果皮厚度、硬度均无显著性变化。这与Monselise等(1976)发现的结果相近, 幼果期施K肥能降低某些柑橘品种形成陷痕果的机会。可能因为幼果期果皮N含量的增加使果皮的光合作用加速, 光合产物增加, 而幼果期果皮适度增加K含量能够维持其细胞较高的渗透压和膨压, 形成的潜在动力使果皮细胞分裂、扩张和细胞壁延伸速度加快, 从而改变了果皮的厚度、硬度和细胞壁的连接程度, 促使细胞壁代谢相关酶, 如果胶酶、纤维素酶、过氧化物酶、木聚糖酶活性降低, 导致其原果胶转化为可溶性果胶的能力减弱, 纤维素、半纤维素含量增加, 果皮抗破裂能力增强, 陷痕果的发生率降低。

## References

- Ali A, Summers L L, Klein G J, Lovatt C J. 2000. Albedo breakdown in california. *Proceedings of the International Society of Citriculture*, 2: 1090 - 1093.
- Bower J P. 2004. The physiological control of citrus creasing. *Acta Horticulturae*, 632: 111 - 115.
- Chen Jie-zhong. 2003. Fruit tree planting (South China edition). Beijing: China Agriculture Press: 1 - 300. (in Chinese)
- 陈杰忠. 2003. 果树栽培学各论(南方本). 北京: 中国农业科技出版社: 1 - 300.
- Chen Jie-zhong, Lü Xue-juan, Ye Zi-xing, Yao Qing, Wu Ling. 2002. Study on relation between mineral nutrition levels and creasing peel in mature orange. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 8 (3): 367 - 371. (in Chinese)
- 陈杰忠, 吕雪娟, 叶自行, 姚青, 伍玲. 2002. 柑桔皱果皮与果皮及细胞壁矿质元素关系研究. *植物营养与肥料学报*, 8 (3): 367 - 371.
- Chen Jie-zhong, Wu Ling, Peng Liang-zhi. 1999. Study on the relation between PME activity of the peel and fruit cracking in citrus. *South China Fruits*, 28 (3): 8 - 10. (in Chinese)
- 陈杰忠, 伍玲, 彭良志. 1999. 柑桔果皮果胶甲酯酶活性与裂果关系的研究. *中国南方果树*, 28 (3): 8 - 10.
- Chen Jie-zhong, Ye Zi-xing, Zhou Bi-yan, Xu Chun-xiang, Li Juan. 2005. Effects of pectins and pectinesterase activity on creasing fruit formation in orange (*Citrus sinensis* Osbeck). *Acta Horticulturae Sinica*, 35 (2): 202 - 206. (in Chinese)
- 陈杰忠, 叶自行, 周碧燕, 徐春香, 李娟. 2005. 柑橘果皮果胶及酶活性对皱果皮形成的影响. *园艺学报*, 35 (2): 202 - 206.
- Gao Fei-fei, Huang Hui-bai, Xu Jian-kai. 1994. An investigation on the cause of fruit cracking in 'Hong Jiang' orange. *Journal of South China Agricultural University*, 15 (1): 34 - 39. (in Chinese)
- 高飞飞, 黄辉白, 许建楷. 1994. 红江橙裂果原因的探讨. *华南农业大学学报*, 15 (1): 34 - 39.
- Hagerman A E, Austin P J. 1986. Continuous spectrophotometric assay for plant pectin methylesterase. *Agric Food Chem*, 34: 440 - 444.
- Li J, Zhang P P, Chen J Z, Yao Q, Jiang Y M. 2009. Cellular wall metabolism in citrus fruit pericarp and its relation to creasing fruit rate. *Scientia*

- Horticulturae, 122: 45 – 50.
- Li Juan. 2006. Creasing fruits and related research of the cell-wall metabolism in citrus [M. D. Dissertation]. Guangzhou: South China Agricultural University. (in Chinese)
- 李 娟. 2006. 柑橘皱果皮与果皮细胞壁代谢关系的研究 [硕士论文]. 广州: 华南农业大学.
- Li Juan. 2009. Cell wall metabolism and related gene isolation of pitting fruit peel in citrus [Ph. D. Dissertation]. Guangzhou: South China Agricultural University. (in Chinese)
- 李 娟. 2009. 柑橘陷痕果发生与果皮细胞壁代谢及相关基因的研究 [博士论文]. 广州: 华南农业大学.
- Li Juan, Chen Jie-zhong, Hu You-li, Zhou Bi-yan, Yao Qing, Hu Zhi-qun. 2008. Effect of soil moisture on cell-wall metabolism of pericarp in citrus. Acta Ecologica Sinica, 28 (2): 486 – 492. (in Chinese)
- 李 娟, 陈杰忠, 胡又厘, 周碧燕, 姚 青, 胡志群. 2008. 水分胁迫对柑橘果皮细胞壁结构及代谢的影响. 生态学报, 28 (2): 486 – 492.
- Li Xiong-biao, Wu Qi. 1993. Plant cell wall. Beijing: Peking University Press. (in Chinese)
- 李雄彪, 吴 倚. 1993. 植物细胞壁. 北京: 北京大学出版社.
- Liao Hong, Yan Xiao-long. 2003. Advanced plant nutrition. Beijing: Science Press: 114 – 239. (in Chinese)
- 廖 红, 严小龙. 2003. 高级植物营养. 北京: 科学出版社: 114 – 239.
- Liu Gui-dong, Jiang Cun-cang, Wang Yun-hua, Peng Shu-ang, Chen Guo-biao, Zhong Ba-lian, Zeng Qing-luan. 2010. Analysis and evaluation on basic nutrient contents in the soil of navel orange orchards in southern Jiangxi. South China Fruits, 39 (1): 1 – 38. (in Chinese)
- 刘桂东, 姜存仓, 王运华, 彭抒昂, 陈国标, 钟八连, 曾庆奎. 2010. 赣南脐橙园土壤基本养分含量分析与评价. 中国南方果树, 39 (1): 1 – 38.
- Lu Ru-kun. 2000. Soil agriculture chemical analysis method. Beijing: China Agriculture Science and Technology Press: 296 – 336. (in Chinese)
- 鲁如坤. 2000. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社: 296 – 336.
- Merrill R K. 1970. Extensibility of pericarp tissue in growing citrus fruits. Plant Physiology, 46: 778 – 781.
- Monselise S P, Weiser M, Shafir N, Goren R, Goldschmidt E E. 1976. Creasing of orange peel-physiology and control. Journal of Horticultural Science, 51: 341 – 351.
- Pathak N, Mishra S, Sanwal G G. 2000. Purification and characterization of polygalacturonase from banana fruit. Phytochemistry, 54: 147 – 152.
- Quinones A, Martinez-Alcantara B, Legaz F. 2007. Influence of irrigation system and fertilization management on seasonal distribution of N in the soil profile and on N-uptake by citrus trees. Agriculture Ecosystems & Environment, 122 (3): 399 – 409.
- Redgwell R J, MacRae E, Hallett I. 1997. *In vivo* and *in vitro* swelling of cell walls during fruit ripening. Planta, 203 (2): 162 – 173.
- Siddiqui S, Brackmann A, Strief J, Bangerth F. 1996. Controlled atmosphere storage of apples: Cell wall composition and fruit softening. Hort Sci, 71: 613 – 620.
- Xiao Jia-xin, Peng Shu-ang, Zhang Hong-yan. 2004. Studies on dynamics of calcium and potassium during fruit development of parthenocarpic and self-pollinated citrus varieties. Acta Horticulturae Sinica, 31 (1): 7 – 10. (in Chinese)
- 肖家欣, 彭抒昂, 张红艳. 2004. 单性结实与自花结实柑橘果实发育中钙钾动态的研究. 园艺学报, 31 (1): 7 – 10.
- Xu Jian-kai, Chen Jie-zhong, Zou He-qing, Ye Tai-he, Li Fu-cheng. 1994. Studies on the relation between calcium and fruit-cracking in ‘Hong Jiang’ sweet orange. Journal of South China Agricultural University, 13 (3): 77 – 81. (in Chinese)
- 许建楷, 陈杰忠, 邹河清, 叶泰和, 黎富成. 1994. 钙与红江橙裂果的关系研究. 华南农业大学学报, 13 (3): 77 – 81.
- Yan Ji-qiong, Zhang Xiao-qi, Long Cheng. 1998. Cell wall structure and function on higher plants. Beijing: Science Press: 93 – 112. (in Chinese)
- 颜季琼, 张孝琪, 龙 程. 1998. 高等植物细胞壁的结构和功能的分子生物学基础. 北京: 科学出版社: 93 – 112.
- Zhao Ya-hua, Gao Xiang-yang. 2000. Biochemical experimental technique. Guangzhou: South China University of Technology Press: 40 – 42. (in Chinese)
- 赵亚华, 高向阳. 2000. 生物化学实验技术教程. 广州: 华南理工大学出版社: 40 – 42.
- Zhuang Yi-mei. 1994. Citrus nutrition and fertilization. Beijing: China Agriculture Press. (in Chinese)
- 庄伊美. 1994. 柑桔营养与施肥. 北京: 中国农业出版社.
- Zou He-qing, Xu Jian-kai. 1995. Studies on the relation between peel anatomical structure and fruit-cracking in ‘Hong Jiang’ sweet orange. Journal of South China Agricultural University, 16 (1): 90 – 96. (in Chinese)
- 邹河清, 许建楷. 1995. 红江橙的果皮结构与裂果的关系研究. 华南农业大学学报, 16 (1): 90 – 96.