

# ‘南丰蜜橘’缺铁、锰、锌的症状及其光合特性和营养状况研究

周高峰, 李碧娴, 付燕玲, 管冠, 姚锋先, 刘桂东\*

(赣南师范大学生命科学学院, 国家脐橙工程技术研究中心, 江西赣州 341000)

**摘要:** 为明确‘南丰蜜橘’缺 Fe、Mn、Zn 元素的症状, 揭示其对光合特性和营养状况的影响, 以 2 年生砧砧‘南丰蜜橘’幼苗为试验材料, 进行砂培盆栽缺素试验。结果表明, 缺 Fe 处理后, ‘南丰蜜橘’初级新叶呈现黄绿化, 但叶脉仍为绿色, 次级新叶淡黄色, 新出小叶甚至为白色, 叶脉也呈白色, 有的次级新梢茎尖枯死, 且较正常新叶变得小而狭长; 缺 Mn 处理后, 初级新叶叶脉间出现肋骨状突起, 突起部位黄化; 次级新叶叶脉呈绿色网状, 脉间失绿, 有的叶片出现褐色斑点; 缺 Zn 处理下, 初级新叶出现黄色斑点, 后期斑点连成片呈现不规则的黄化区域, 次级新叶则出现黄化失绿, 有大量黄化斑点, 同时伴有小叶簇生症状, 且次级新叶显著变小, 长宽比显著上升。缺 Fe、Mn 和 Zn 均显著降低了‘南丰蜜橘’初级新叶的叶绿素含量, 但各处理的降幅存在显著差异 (缺 Fe > 缺 Mn > 缺 Zn)。缺 Fe 处理下的老叶和初级新叶, 以及缺 Mn 和 Zn 处理下的初级新叶叶片光合作用均受到显著抑制。缺 Fe、Mn 和 Zn 处理后, 除显著降低植株各部位 Fe、Mn 和 Zn 的含量, 对其他矿质元素的含量也有不同程度的影响。

**关键词:** 柑橘; 幼苗; 微量元素; 症状; 光合特性; 诊断

**中图分类号:** S 666

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0513-353X (2019) 04-0691-10

## Effects of Iron, Manganese and Zinc Deficiency on the Symptom, Photosynthetic Characteristics and Nutrient Status of ‘Nanfeng’ Tangerine

ZHOU Gaofeng, LI Bixian, FU Yanling, GUAN Guan, YAO Fengxian, and LIU Guidong\*

(National Navel Orange Engineering Research Center, Life Science College, Gannan Normal University, Ganzhou, Jiangxi 341000, China)

**Abstract:** To ascertain the symptoms, photosynthetic characteristics and nutrient status of ‘Nanfeng’ tangerine under Fe, Mn, Zn deficiency, pot experiment was conducted. The results showed that, after 210 d of Fe deficiency treatment, yellow-green interveinal chlorosis symptom was observed, but the veins are still green in the primary new leaves of ‘Nanfeng’ tangerine, while the secondary new leaves were primrose yellow, even the new leaves and veins were white, and the secondary new leaves become small and narrow. After 210 d of Mn deficiency treatment, convex and concave leaf with yellow colour appeared in the primary new leaves, while the secondary new leaf veins are green reticulate and interveinal chlorosis, even some leaves show brown spots. In the Zn deficiency treatment, yellow spots were found in primary new

**收稿日期:** 2018-12-11; **修回日期:** 2019-04-08

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (31501717; 31701871); 江西省重点研发计划项目 (20161BBF60069)

\* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: lgd@gnnu.cn; Tel: 13667076091)

leaves, and these spots become bigger and irregular yellow areas were appeared in the end of this experiment, while the whole secondary new leaves were yellowing with a lot of yellow spots, and the rosetting leaves were small and narrow. Photosynthetic pigment was decreased significantly under Fe, Mn, Zn deficiency treatments, but the decreasing amplitude was  $Fe > Mn > Zn$ . Photosynthesis of both old leaves and primary new leaves were inhibited by Fe deficiency, but only in primary new leaves under Mn, Zn deficiency conditions. Fe, Mn, Zn deficiency treatments significantly influenced not only the Fe, Mn, Zn concentration, but also other mineral nutrient concentrations of 'Nanfeng' tangerine.

**Keywords:** citrus; seedling; micronutrient; symptom; photosynthetic characteristics; diagnosis

‘南丰蜜橘’ (*Citrus reticulata* Blanco) 色泽金黄, 皮薄核少, 汁多化渣, 甜酸适口, 营养丰富 (许晶晶 等, 2014)。但近年来随着产业的发展, 果实品质却急剧下降, 而树体营养状况和土壤理化性质的改变是其中最重要的原因 (郑苍松, 2015)。有研究表明品质差的‘南丰蜜橘’叶片中严重缺乏 Ca 和 Mg 元素, 但微量元素对果实品质形成的影响报道较少 (杨水平 等, 2005)。在对‘南丰蜜橘’主产区 75 个果园进行土壤和叶片 Mn 含量分析时发现 Mn 缺乏的果园占 22.7% (应介官 等, 2016)。Zn 缺乏是中国及世界柑橘产区面临的共同问题 (Hacisalihoglu & Kochian, 2003; 付行政 等, 2014)。王泽义和李祖章 (2006) 指出中国大部分‘南丰蜜橘’园土壤有效 Zn 含量在亏缺临界值边缘。占旭等 (2015) 对江西省南丰县 126 个‘南丰蜜橘’园进行土壤和叶片 Zn 含量分析, 发现土壤有效 Zn 平均含量为  $1.29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 缺 Zn 果园比例为 50.8%; 叶片 Zn 平均含量为  $22.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 缺 Zn 果园比例为 39.7%。缺 Fe 虽然在南丰县‘南丰蜜橘’园中尚未有报道, 但‘南丰蜜橘’已被其他地区广泛引种, 而这些地区可能遭遇土壤缺 Fe 或土壤呈碱性等情况, 如四川省柑橘产区 (李学柱 等, 1986; 吉前华 等, 1998)、东南沿海柑橘产区 (张昌记 等, 2009) 等。

近年来, 果农开始注重微肥的施用, 但是对‘南丰蜜橘’微量营养元素缺乏的症状和微肥的精准施用标准尚不清楚。本研究中以枳砧‘南丰蜜橘’幼苗为材料, 通过砂培试验研究其在缺 Fe、Mn 和 Zn 时的症状、矿质营养状况以及光合特性的变化, 以期在生产上解决‘南丰蜜橘’微量营养元素缺乏的症状识别提供理论依据, 为通过微肥的精准施用改善果实品质的研究提供基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与处理

试验于 2017 年 4—11 月在国家脐橙工程技术研究中心资源圃 (江西赣州) 温室进行。以 2 年生枳 [*Poncirus trifoliata* (L.) Raf.] 砧‘南丰蜜橘’ (*Citrus reticulata* Blanco) 为材料, 选取育苗基质相同生长相对一致的‘南丰蜜橘’幼苗, 每株保留 1 个抽梢, 将该梢的叶片定义为老叶。参照刘桂东等 (2017) 的方法将植株移栽至装有 6 L 左右石英砂和珍珠岩 (1:1, 体积比) 的黑色塑料桶中, 每桶 1 棵。大棚的温度控制在  $22 \sim 28 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 相对湿度为 50% ~ 75%。砂培基本营养液为 1/2 剂量 Hoagland 和全剂量 Arnon (Hoagland & Arnon, 1950)。

设置 3 个处理和 1 个对照。缺 Fe 处理: 含  $0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  Fe 的基本营养液; 缺 Mn、缺 Zn 处理: 不含 Mn、Zn 的基本营养液; 对照: 基本营养液; 用 NaOH 调至 pH ( $6.0 \pm 0.2$ )。为了防止盐分在基质中累积, 每周用 10 L 去离子水浇灌植株, 而后用 3 L 营养液浇灌, 确保有过量溶液从盆底淋出, 营养液每 2 d 浇灌 1 次。每组均为 6 个单独植株 (重复), 处理持续 210 d。

砂培缺素处理植株 5 月上旬开始抽新梢, 待新梢长势稳定后每株保留 2 个新梢并定义为初级新梢, 其上叶片定义为初级新叶; 8 月上旬在初级新梢上保留 2 个新梢定义为次级新梢, 其上叶片定义为次级新叶, 11 月中旬缺素症状明显后进行采样测定。

## 1.2 光合特性及矿质元素含量测定

叶片光合特性测定在 9 月中旬, 即缺素处理 150 d 时进行。对照和处理植株每株随机选取老叶和初级新叶各 6 片, 采用便携式光合测定系统 LI-6400XT 测定叶片净光合速率 ( $P_n$ )、蒸腾速率 ( $T_r$ )、胞间二氧化碳浓度 ( $C_i$ ) 及气孔导度 ( $G_s$ ) 参数。并对上述选取的叶片进行叶绿素含量测定 (Zhou et al., 2014)。

缺素处理 210 d 后, 对照和处理植株每株随机选取老叶和次级新叶各 6 片, 用于植株叶面积和叶片长宽比的测定。叶面积用 LI-3100C 叶面积仪测定, 并利用坐标纸测量叶片的长宽比。将植株分成根、砧木茎、接穗茎、初级新梢、次级新梢、老叶、初级新叶和次级新叶 8 部分, 在 75 °C 烘箱中烘干至恒重。粉碎后, 每份样品称取干样 0.30 g 左右, 先在电炉上碳化直至无黑烟, 随后放入马弗炉中 500 °C 灰化 6 h。然后用 10 mL 5% 的  $HNO_3$  溶解, 用 ICP-MS 测定矿质营养元素的含量。

## 1.3 数据处理与统计分析

所有数据采用 SAS 9.4 软件进行分析, 不同处理之间的差异显著性分析采用 One-way ANOVA 的 Tukey 进行检验, 显著水平为  $P < 0.05$ 。

所有数据使用 SigmaPlot 12.0 软件进行作图。

# 2 结果与分析

## 2.1 ‘南丰蜜橘’缺铁、缺锰、缺锌的症状

缺 Fe 处理后, ‘南丰蜜橘’初级新叶呈现缺 Fe 的典型症状, 即整个叶片失绿, 呈现淡黄绿色, 但叶脉仍为绿色; 次级新叶则呈现淡黄色, 有的次级新梢茎尖已经枯死 (图 1, A、F)。初级和次级新叶变小而狭长, 单叶面积与对照相比分别下降了 11.3% 和 39.6%; 次级新叶长宽比与对照相比则显著提高了 18.4%, 但初级新叶无显著变化 (表 1)。

缺 Mn 处理后, ‘南丰蜜橘’初级新叶叶脉间出现肋骨状突起, 叶片凸凹不平, 突起的部位黄化; 次级新叶叶脉呈绿色网状, 脉间失绿, 有的叶片出现褐色斑点 (图 1, B、G)。次级新叶单叶面积与对照相比显著下降 (降低了 16.2%), 但对初级新叶叶面积无影响; 初级和次级新叶的长宽比均无显著变化 (表 1)。

缺 Zn 处理下, ‘南丰蜜橘’初级新叶出现黄色斑点, 后期斑点连成片呈现不规则的黄化区域, 次级新叶则出现黄化失绿, 有大量黄化斑点, 同时伴有小叶簇生症状 (图 1, C、D、H)。次级新叶单叶面积与对照相比显著下降 (降低了 20.3%), 长宽比显著上升 (上升了 24.3%), 而初级新叶变化不显著 (表 1)。

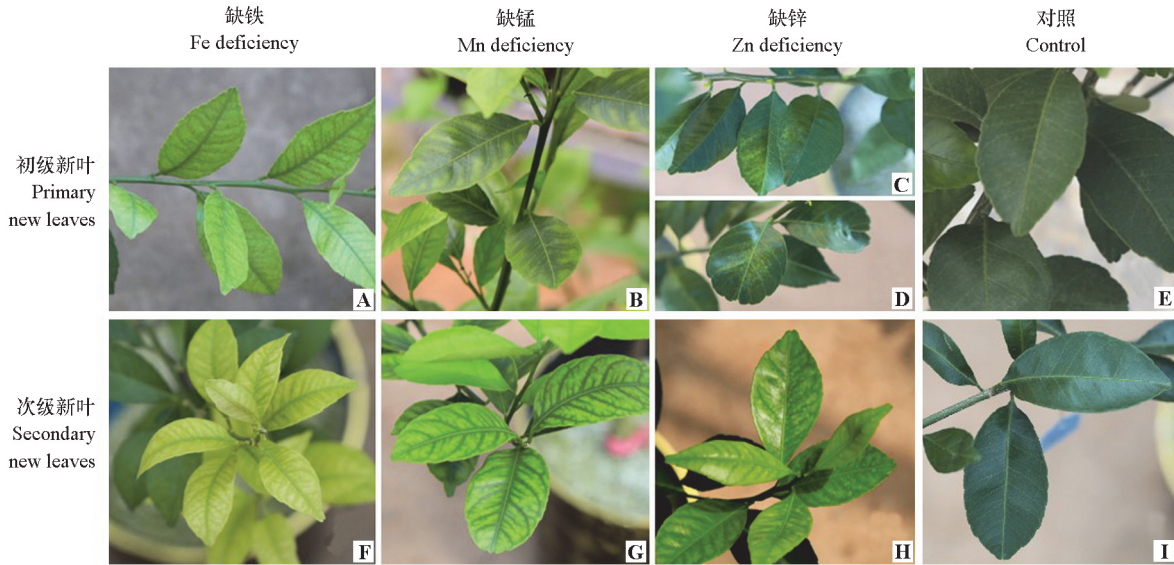


图 1 缺铁、缺锰和缺锌处理 210 d 后‘南丰蜜橘’的缺素症状  
 Fig. 1 Symptoms of 'Nanfeng' tangerine after 210 d of Fe, Mn and Zn deficiency treatments

表 1 缺铁、缺锰和缺锌对‘南丰蜜橘’叶面积和叶片长宽比的影响  
 Table 1 Effects of Fe, Mn and Zn deficiency on the leaf area and leaf length-width ratio of 'Nanfeng' tangerine

处理 Treatment	单叶面积/cm <sup>2</sup> Leaf area		长宽比 Length-width ratio	
	初级新叶 Primary new leaf	次级新叶 Secondary new leaf	初级新叶 Primary new leaf	次级新叶 Secondary new leaf
对照 Control	16.38 ± 1.25 a	16.27 ± 0.44 a	1.90 ± 0.03 a	1.85 ± 0.03 b
缺铁 Fe deficiency	14.53 ± 0.91 b	9.83 ± 0.28 c	2.01 ± 0.08 a	2.19 ± 0.04 a
缺锰 Mn deficiency	15.89 ± 0.67 a	13.63 ± 0.38 b	1.85 ± 0.06 a	1.78 ± 0.05 b
缺锌 Zn deficiency	17.24 ± 0.84 a	12.96 ± 0.10 b	1.82 ± 0.04 a	2.30 ± 0.10 a

注：差异显著水平 5%，下同。

Note: Significant difference at 5% level, the same below.

## 2.2 缺铁、缺锰、缺锌对叶片光合特性的影响

### 2.2.1 叶绿素

由图 2 可知，缺 Fe、Mn 和 Zn 均显著降低了‘南丰蜜橘’初级新叶的叶绿素 a 含量，但各处理的降幅存在显著差异（缺 Fe > 缺 Mn > 缺 Zn），老叶的叶绿素 a 含量各处理均无显著变化；初级新叶的叶绿素 b 含量只在缺 Fe 处理时显著下降，而老叶的叶绿素 b 含量则只是在缺 Zn 处理时显著下降；总叶绿素含量的影响趋势与叶绿素 a 相同。

### 2.2.2 光合指标

如图 3 所示，老叶  $P_n$  值与对照相比在缺 Fe 处理下显著下降，但对缺 Mn、Zn 处理无显著影响，初级新叶在 3 个缺素处理下叶片  $P_n$  值均显著下降，其中缺 Fe 降幅最大；老叶  $G_s$  受缺素影响趋势与  $P_n$  值相似，而初级新叶中缺 Fe 和缺 Zn 处理显著下降；缺 Fe 处理老叶和初级新叶  $C_i$  值显著上升，但缺 Mn、Zn 对老叶无影响，初级新叶  $C_i$  显著降低；缺 Fe 处理‘南丰蜜橘’老叶和初级新叶  $T_r$  值同样受到显著抑制，但缺 Mn 处理与对照相比无显著差异，缺 Zn 处理仅初级新叶中的  $T_r$  值降低。

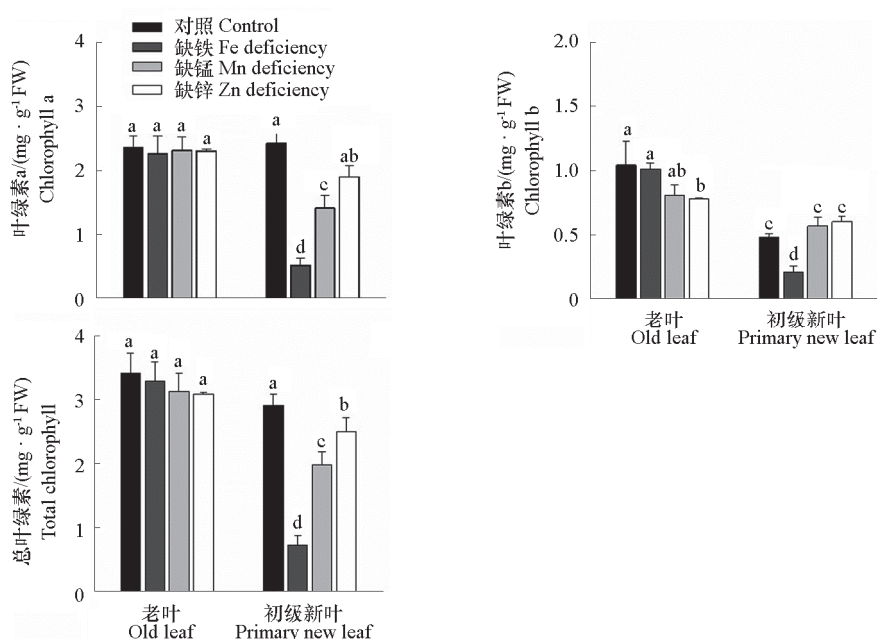


图2 缺铁、缺锰、缺锌对‘南丰蜜橘’叶片光合色素含量的影响

不同小写字母表示处理间在5%水平差异显著。下同。

Fig. 2 Effects of Fe, Mn and Zn deficiency on photosynthetic pigment in leaves of ‘Nanfeng’ tangerine  
 Different small letters indicated significant difference among treatments at 5% level. The same below.

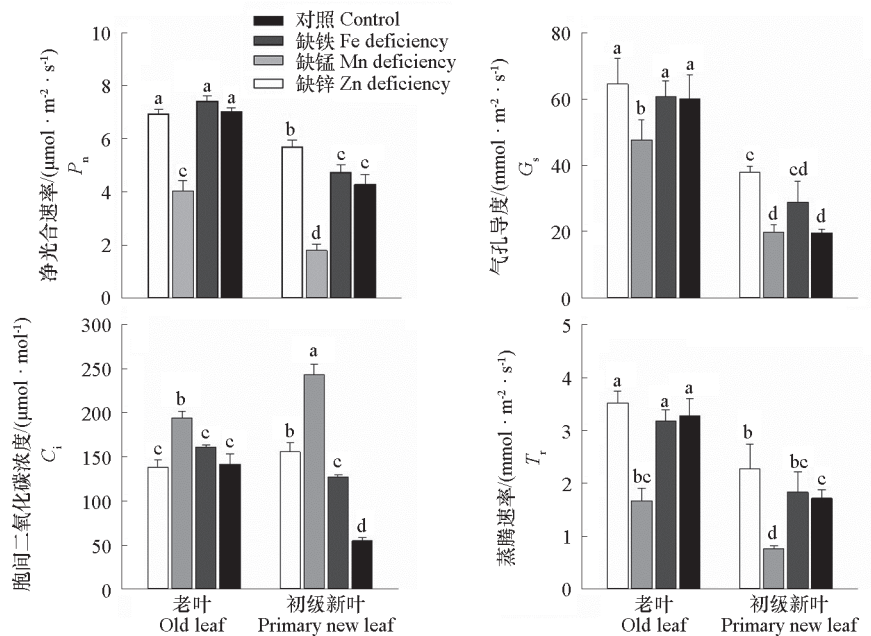


图3 缺铁、缺锰、缺锌对‘南丰蜜橘’叶片光合特性的影响

Fig. 3 Effects of Fe, Mn and Zn deficiency on photosynthetic characteristics of ‘Nanfeng’ tangerine

### 2.3 缺铁、缺锰、缺锌对植株各部位矿质营养元素含量的影响

如表2所示, ‘南丰蜜橘’植株各部位P含量在缺Fe处理时, 与对照相比, 除在次级新叶中显

著下降外, 在其他各部位均显著上升; 缺 Mn 处理仅显著提高根中 P 的含量, 对其他部位无显著影响; 缺 Zn 处理显著降低了初级和次级新叶中的 P 含量。对于 K 含量, 缺 Fe 处理显著提高了除根以外其他各部位的 K 含量, 缺 Fe 和缺 Mn 处理的根中 K 含量显著下降; 缺 Zn 处理则仅显著降低了接穗茎中的 K 含量。‘南丰蜜橘’ Ca 含量仅在缺 Fe 处理的根中显著上升, 但在老叶和初级新叶中表现为显著下降; 缺 Mn 处理则只显著降低了老叶的 Ca 含量; 缺 Zn 处理提高了初级和次级新叶中的 Ca 含量, 但接穗茎中的 Ca 含量显著下降。Mg 含量在缺 Fe 和缺 Mn 处理时, 除对缺 Mn 次级新叶无影响外, 其他各部位均显著下降。

如表 2 所示, 与对照相比, 总体上缺素处理的植株各部位相应元素含量均显著下降。但 Fe 含量在缺 Zn 处理时只有初级新叶和根中显著下降, 缺 Mn 处理时接穗茎中 Fe 含量甚至显著提高。对于 Mn, 缺 Zn 处理降低了接穗茎中的含量, 但在缺 Fe 处理时, 除砧木茎和接穗茎外其他各部位却表现为显著上升。各处理对 Zn 含量影响不大, 仅在缺 Fe 处理的接穗茎中显著上升。各处理对‘南丰蜜橘’各部位 B 含量影响不大, 缺 Fe 处理降低初级新叶、老叶和根中的 B 含量; 缺 Mn、缺 Zn 处理则整体无显著影响。

表 2 缺铁、缺锰、缺锌对‘南丰蜜橘’植株各部位矿质营养元素含量的影响

Table 2 Mineral nutrition concentrations in different parts of 'Nanfeng' tangerine plants under Fe, Mn and Zn deficiency treatments

部位 Part of plant	处理 Treatment	P/%	K/%	Ca/%	Mg/%
次级新叶 Secondary new leaf	对照 Control	0.233 ± 0.007 a	2.21 ± 0.01 bc	2.38 ± 0.29 b	0.544 ± 0.004 a
	缺铁 Fe deficiency	0.178 ± 0.006 b	2.89 ± 0.10 a	2.54 ± 0.10 b	0.408 ± 0.079 b
	缺锰 Mn deficiency	0.258 ± 0.025 a	2.48 ± 0.06 b	2.62 ± 0.25 b	0.421 ± 0.113 ab
	缺锌 Zn deficiency	0.132 ± 0.002 c	1.93 ± 0.08 c	3.31 ± 0.31 a	0.564 ± 0.027 a
初级新叶 Primary new leaf	对照 Control	0.112 ± 0.006 b	1.73 ± 0.23 b	3.62 ± 0.37 b	0.468 ± 0.028 a
	缺铁 Fe deficiency	0.150 ± 0.005 a	2.56 ± 0.04 a	2.79 ± 0.14 c	0.332 ± 0.016 b
	缺锰 Mn deficiency	0.113 ± 0.002 b	1.62 ± 0.31 b	3.52 ± 0.11 b	0.310 ± 0.075 b
	缺锌 Zn deficiency	0.099 ± 0.001 c	1.77 ± 0.45 b	4.22 ± 0.55 a	0.483 ± 0.090 a
老叶 Old leaf	对照 Control	0.108 ± 0.008 b	1.37 ± 0.08 b	3.92 ± 0.12 a	0.419 ± 0.018 a
	缺铁 Fe deficiency	0.139 ± 0.001 a	2.03 ± 0.05 a	3.04 ± 0.01 c	0.319 ± 0.010 c
	缺锰 Mn deficiency	0.107 ± 0.012 b	1.47 ± 0.01 b	3.50 ± 0.23 b	0.371 ± 0.016 b
	缺锌 Zn deficiency	0.095 ± 0.004 b	1.49 ± 0.01 b	3.77 ± 0.27 ab	0.413 ± 0.057 a
接穗茎 Stem of scion	对照 Control	0.050 ± 0.009 b	0.38 ± 0.03 b	1.05 ± 0.12 a	0.169 ± 0.036 a
	缺铁 Fe deficiency	0.098 ± 0.010 a	0.52 ± 0.01 a	0.98 ± 0.07 a	0.130 ± 0.003 b
	缺锰 Mn deficiency	0.050 ± 0.011 b	0.36 ± 0.02 b	1.02 ± 0.09 a	0.135 ± 0.018 b
	缺锌 Zn deficiency	0.047 ± 0.006 b	0.26 ± 0.05 c	0.88 ± 0.07 a	0.159 ± 0.005 a
根 Root	对照 Control	0.156 ± 0.019 c	3.02 ± 0.08 a	1.38 ± 0.01 b	0.482 ± 0.008 a
	缺铁 Fe deficiency	0.470 ± 0.048 a	1.37 ± 0.30 c	2.22 ± 0.09 a	0.247 ± 0.005 c
	缺锰 Mn deficiency	0.175 ± 0.013 b	2.51 ± 0.14 b	1.44 ± 0.12 b	0.319 ± 0.044 b
	缺锌 Zn deficiency	0.159 ± 0.011 c	2.87 ± 0.33 ab	1.49 ± 0.04 b	0.466 ± 0.033 a
部位 Part of plant	处理 Treatment	Fe/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	Mn/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	Zn/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	B/ (mg · kg <sup>-1</sup> )
次级新叶 Secondary new leaf	对照 Control	78.4 ± 5.7 a	20.20 ± 0.74 b	27.52 ± 0.76 a	154.0 ± 8.6 a
	缺铁 Fe deficiency	49.0 ± 0.8 b	29.87 ± 2.03 a	29.91 ± 5.71 a	177.7 ± 7.6 a
	缺锰 Mn deficiency	79.0 ± 3.8 a	8.18 ± 0.31 c	29.78 ± 6.85 a	175.1 ± 3.1 a
	缺锌 Zn deficiency	80.9 ± 1.8 a	18.53 ± 1.72 b	13.87 ± 2.00 b	163.2 ± 15.6 a
初级新叶 Primary new leaf	对照 Control	91.4 ± 9.6 a	25.23 ± 2.25 b	29.19 ± 0.54 a	202.8 ± 20.1 a
	缺铁 Fe deficiency	53.0 ± 5.0 c	37.50 ± 4.02 a	30.23 ± 2.69 a	177.5 ± 2.4 b
	缺锰 Mn deficiency	91.3 ± 4.0 a	19.93 ± 2.43 c	27.40 ± 1.16 ab	217.6 ± 7.2 a
	缺锌 Zn deficiency	75.8 ± 4.9 b	28.65 ± 2.21 b	23.13 ± 0.01 b	235.8 ± 25.2 a
老叶 Old leaf	对照 Control	92.4 ± 2.8 a	35.03 ± 3.01 b	30.19 ± 2.39 a	209.2 ± 5.0 a
	缺铁 Fe deficiency	62.2 ± 3.1 b	46.54 ± 1.00 a	32.84 ± 0.07 a	160.4 ± 1.0 b
	缺锰 Mn deficiency	96.6 ± 3.8 a	32.53 ± 6.05 b	33.16 ± 3.28 a	211.6 ± 26.0 a
	缺锌 Zn deficiency	81.2 ± 9.9 a	39.50 ± 0.11 ab	26.29 ± 1.93 a	221.6 ± 7.4 a
接穗茎 Stem of scion	对照 Control	35.3 ± 0.7 b	3.54 ± 0.08 a	19.10 ± 1.37 b	10.1 ± 2.4 a
	缺铁 Fe deficiency	28.5 ± 3.2 c	3.62 ± 0.34 a	23.68 ± 3.00 a	9.8 ± 1.2 a
	缺锰 Mn deficiency	43.3 ± 0.6 a	2.40 ± 0.19 b	19.09 ± 2.91 b	12.0 ± 1.4 a
	缺锌 Zn deficiency	38.8 ± 6.7 b	2.31 ± 0.23 b	15.93 ± 6.11 c	9.0 ± 0.9 a
根 Root	对照 Control	175.2 ± 0.1 a	48.65 ± 2.34 b	42.71 ± 4.83 a	24.6 ± 4.7 a
	缺铁 Fe deficiency	96.7 ± 9.2 c	83.78 ± 8.88 a	40.46 ± 5.63 a	18.9 ± 0.9 b
	缺锰 Mn deficiency	167.9 ± 8.6 a	13.57 ± 0.33 c	36.63 ± 0.30 a	25.6 ± 1.2 a
	缺锌 Zn deficiency	152.3 ± 9.2 b	48.51 ± 2.00 b	29.99 ± 1.19 b	24.4 ± 0.6 a



## 3 讨论

### 3.1 ‘南丰蜜橘’缺铁、缺锰、缺锌的症状

通过砂培试验进行缺素处理, 将缺素症状分成老叶、初级新叶和次级新叶加以识别, 发现其症状显著不同。这为精确识别缺素症状, 尤其是较难识别的微量元素缺乏症状提供了帮助。

柑橘缺 Fe 症状在柑橘微量元素缺乏的症状中比较容易识别, 由于其在植物体内的不可移动性, 因此通常表现为幼叶失绿, 叶脉呈网状绿色; 严重时幼叶黄白化, 叶脉失绿, 甚至茎尖枯萎坏死 (González-Mas et al., 2009)。本研究中通过砂培缺 Fe 处理后, ‘南丰蜜橘’初级新叶呈现缺 Fe 的典型症状, 即整个叶片失绿, 呈现黄绿化, 但叶脉仍为绿色; 次级新叶则呈现淡黄色, 有的次级新梢茎尖已经枯死。这与前人在其他柑橘上的缺 Fe 研究得到的结论 (Pestana et al., 2005; 韩佳等, 2012) 基本一致。该结果同样表明枳砧 ‘南丰蜜橘’对缺 Fe 非常敏感, 可能是由于其砧木为枳导致的, 前人研究表明, 含有枳遗传背景的枳及其杂交种对缺 Fe 表现为中等敏感或非常敏感 (Sudahono et al., 1994; Srivastava et al., 2015)。

Mn 在植物体中作为酶的辅助因子参与呼吸作用、氮代谢、碳水化合物的转化和光合作用等生理生化过程 (廖红和严小龙, 2003; Taiz & Zeiger, 2010)。但 Mn 在柑橘植株体内不易移动, 因此植物缺 Mn 通常从新叶开始。柑橘缺 Mn 初期叶肉失绿, 叶脉呈现绿色网状, 叶片突起, 边缘褶皱; 后期叶片出现褐色斑点, 呈灼烧状, 并停止生长 (Ogata, 1962; Srivastava et al., 2015)。但在田间, 缺 Mn 的症状常常被识别较晚, 因为其初期症状通常被缺 Fe 或缺 Zn 掩盖, 有时缺 Mn 的症状会与缺 Fe、缺 Zn 甚至是 B 毒害的症状相似 (Zekri & Obreza, 2014)。这也是本试验将这 3 种元素缺乏一起研究的原因。本研究结果表明, 缺 Mn 处理后, ‘南丰蜜橘’初级新叶叶脉间出现肋骨状突起, 叶片凸凹不平, 突起的部位黄化; 次级新叶叶脉呈绿色网状, 脉间失绿, 有的叶片出现褐色斑点, 与前人报道的症状 (Ogata, 1962; Srivastava et al., 2015) 基本一致。

柑橘缺 Zn 的症状最早有报道是在 20 世纪 30 年代, 其报道的主要症状是叶片斑驳黄化 (mottle-leaf)。柑橘缺 Zn 的典型症状是斑驳黄化外, 还有叶小而簇生呈莲丛状 (rosette)、节间缩短植株矮小; 果实小而畸形, 果皮厚, 果肉木质化 (Chapman, 1968; Srivastava et al., 2015)。本研究结果表明, 缺 Zn 处理下, ‘南丰蜜橘’初级新叶出现黄色斑点, 后期斑点连成片呈现不规则的黄化区域; 次级新叶则出现黄化失绿, 严重的出现斑点状黄化, 同时伴有小叶簇生症状。与对照相比, 叶片显著变小、变窄, 与前人报道一致。

### 3.2 ‘南丰蜜橘’缺铁、锰、锌对光合特性的影响

柑橘 Fe、Mn、Zn 元素缺乏不仅田间症状相似, 而且均直接或间接影响植株光合作用, 因此这 3 种元素常常被一起研究。本研究结果表明, 在缺 Fe、Mn、Zn 胁迫下, ‘南丰蜜橘’初级新叶的叶绿素含量和光合作用均受到了显著抑制, 尤其是缺 Fe 条件下, 老叶也受到显著影响。姚宇洁和姜存仓 (2017) 研究表明, 缺 Fe 胁迫不仅显著降低了枳和枳橙两种柑橘砧木叶片叶绿素的含量, 同时也改变了其叶绿体的超微结构, 片层结构模糊, 嗜锻体数增加, 叶绿体长度、厚度与对照相比均显著降低。本研究结果同样表明, ‘南丰蜜橘’缺 Fe 处理 150 d 后, 此时初级新叶尚无显著症状, 但其叶片叶绿素含量和光合性能却均显著受到抑制。这为田间早期诊断 ‘南丰蜜橘’缺 Fe 提供了一个辅助方法。

Mn 在植物中是维持叶绿体结构的必需元素, 同时 Mn 最明确的功能是参与 H<sub>2</sub>O 的光解和电子

传递, 可以将  $H_2O$  分解并释放出  $O_2$  和电子, 再将所产生的电子传递给光系统 II (Taiz & Zeiger, 2010)。因此缺 Mn 胁迫下, 植物的光合作用受影响最显著。在本研究中, 缺 Mn 处理下的‘南丰蜜橘’初级新叶叶绿素含量和  $P_n$  值与对照相比均显著下降。

Zn 在植物光合作用中参与  $CO_2$  的水合作用, 同时也参与光合色素的生物合成 (Broadley et al., 2007)。徐春丽等 (2010) 对椪柑和不知火杂柑的研究表明, 缺 Zn 胁迫不仅抑制柑橘的光合作用还可以改变其光合日变化曲线峰型。同样椪柑和纽荷尔脐橙在低 Zn 土壤环境下生长, 其光合色素和光合作用也受到显著抑制 (Chen et al., 2014; 张佳伟 等, 2017)。本研究的结果同样表明, ‘南丰蜜橘’初级新叶在缺 Zn 胁迫 150 d 后, 其光合色素含量、叶片光合性能均受到了显著抑制。

综上所述, ‘南丰蜜橘’缺 Fe、Mn、Zn 均影响其光合作用, 但影响的部位和指标各不相同。而这些光合指标是在其典型缺 Fe、Mn、Zn 症状出现之前测定的, 因此可以通过光合指标的测定辅助诊断 ‘南丰蜜橘’的缺 Fe、Mn、Zn 状况。也为田间早期诊断 ‘南丰蜜橘’的缺素提供了一个辅助方法。

### 3.3 ‘南丰蜜橘’缺铁、锰、锌对其他矿质元素含量的影响

植物在养分亏缺时可以自身调控养分离子的平衡。本研究表明, 缺 Fe、Mn 和 Zn 处理不仅影响 ‘南丰蜜橘’自身元素的含量, 同时对其他矿质元素的含量也有不同程度的影响。张朝红等 (2002) 的研究表明, 缺 Fe 胁迫能促进 ‘砀山酥梨’ Zn 的吸收, 抑制 Ca、Mn 的吸收。姚宇洁和姜存仓 (2016) 以卡里佐枳橙实生苗为材料探讨缺 Fe 胁迫对其矿质元素含量的改变, 结果表明: 植株各部位 Fe 含量显著下降, 同时根部 Ca、Mn 含量也显著降低, 而根部 Mg、Zn 含量则显著增加。柑橘另一种砧木枳中, 缺 Fe 同样促进了 Zn、Mg 的吸收, 抑制 Ca 的吸收 (王明元, 2011)。而本研究表明, ‘南丰蜜橘’在 Fe 胁迫下其 Ca 含量在初级新叶和老叶中也显著下降, 但根中却显著增加。其可能的原因是缺 Fe 抑制 ‘南丰蜜橘’ Ca 向地上部的转运, 导致了根部 Ca 元素的积累。植株 Mn 含量除在接穗茎以外各部位均显著增加, 这与前人研究结果截然相反; 前人在两种柑橘的研究结果均显示, 缺 Fe 促进了 Zn、Mg 的吸收, 但本研究的结果显示 ‘南丰蜜橘’各部位 Mg 含量均显著下降, 对 Zn 则没有显著影响。但有研究表明一定浓度的  $Mn^{2+}$  和  $Zn^{2+}$  可以诱导 *FRO2*、*IRT1* 和 *NRAMP3* 等基因的表达, 而这些基因在柑橘响应缺 Fe 胁迫中发挥着重要的调控作用 (Martínez-Cuenca et al., 2013), 这或许是 Mn 和 Zn 含量没有显著下降的原因之一。另外本研究的结果还表明, 除 P 在次级新叶和 K 在根中的含量显著下降外, 在植株其他各部位均显著升高, 其原因可能是植株生物量的显著降低造成的元素积累。

关于柑橘缺 Mn 对其他矿质元素吸收影响的报道较少。本研究中 ‘南丰蜜橘’缺 Mn 处理时, 植株各部位 P 含量无显著下降, 甚至在根中显著增加; 但 K、Mg 的含量在根中表现为显著下降, 且 Mg 含量在其他各部位也呈显著下降趋势, 其原因尚未知。另外, 本研究结果表明缺 Zn 处理会导致初级和次级新叶 Ca 含量的增加, 同时抑制 Fe 的吸收, 这一结果与前人在大麦上的研究结果 (Graham et al., 1987) 相似。但是, 本研究同样发现初级和次级新叶中 P 的含量显著下降, 这与前人在小麦和大麦中的研究结果相反, 在这两种作物中缺 Zn 导致 P 过量 (Lombnaes & Singh, 2003)。因此, 关于 ‘南丰蜜橘’缺 Fe、Mn 和 Zn 对其他矿质元素吸收转运的机理尚需要进一步研究。

## References

- Broadley M R, White P J, Hammond J P, Zelko I, Lux A. 2007. Zinc in plants. *New Phytologist*, 173 (4): 677 - 702.  
Chapman H D. 1968. The mineral nutrition of citrus//Reuther W, Batchelor L D, Webber H J. The citrus industry. Vol. 2. University of California



- Division of Agricultural Science Berkeley: 127 - 289.
- Chen Y Y, Hu C Y, Xiao J X. 2014. Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation on the growth, zinc distribution and photosynthesis of two citrus cultivars grown in low-zinc soil. *Trees*, 28: 1427 - 1436.
- Fu Xing-zheng, Peng Liang-zhi, Xing Fei, Ling Li-li, Chun Chang-Pin, Jiang Cai-lun, Cao Li. 2014. Zinc deficiency in citrus: current studies and future perspectives. *Journal of Fruit Science*, 31 (1): 132 - 139. (in Chinese)  
付行政, 彭良志, 邢飞, 凌丽俐, 淳长品, 江才伦, 曹立. 2014. 柑橘缺锌研究进展与展望. *果树学报*, 31 (1): 132 - 139.
- Gonzálezmas M C, Joséllosa M, Quijano A, Fornerginer M A. 2009. Rootstock effects on leaf photosynthesis in ‘Navelina’ trees grown in calcareous soil. *HortScience*, 44 (2): 280 - 283.
- Graham R D, Welch R M, Grunes D L, Cary E E, Norvell W A. 1987. Effect of zinc deficiency on the accumulation of boron and other mineral nutrients in barley. *Soil Science Society of America Journal*, 51 (3): 652 - 657.
- Hacisalihoglu G, Kochian L V. 2003. How do some plants tolerate low levels of soil zinc? Mechanisms of zinc efficiency in crop plants. *New Phytologist*, 159 (2): 341 - 350.
- Han Jia, Zhou Gao-feng, Li Qiao-hong, Liu Yong-zhong, Peng Shu-ang. 2012. Effects of magnesium, iron, boron deficiency on the growth and nutrition absorption of four major citrus rootstocks. *Acta Horticulturae Sinica*, 39 (11): 2105 - 2112. (in Chinese)  
韩佳, 周高峰, 李峤虹, 刘永忠, 彭抒昂. 2012. 缺镁、铁、硼胁迫对4个柑橘砧木生长及养分吸收的影响. *园艺学报*, 39 (11): 2105 - 2112.
- Hoagland D R, Arnon D I. 1950. The water-culture method for growing plants without soil. *California Agricultural Experiment Station Circular*, 347: 1 - 32.
- Ji Qian-hua, Li Yu-tang, Wang Yong-qing. 1998. Research progress of lime-induced chlorosis in citrus trees. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 16 (3): 365 - 369. (in Chinese)  
吉前华, 李玉堂, 王永清. 1998. 石灰性土壤上柑橘缺铁黄化研究进展. *四川农业大学学报*, 16 (3): 365 - 369.
- Li Xue-zhu, Luo Ze-min, Li Xiao-yi. 1986. Study on the reason of citrus yellowing in Sichuan basin. *South China Fruits*, (3): 1 - 5. (in Chinese)  
李学柱, 罗泽民, 李小仪. 1986. 四川盆地紫色土柑橘黄化减产原因研究. *中国南方果树*, (3): 1 - 5.
- Liao Hong, Yan Xiao-long. 2003. *Advanced plant nutrition*. Beijing: Science Press: 227 - 230. (in Chinese)  
廖红, 严小龙. 2003. *高级植物营养学*. 北京: 科学出版社: 227 - 230.
- Liu Gui-dong, Li Bi-xian, Hu Ping, Guan Guan, Yao Feng-xian, Zhong Ba-lian, Zhou Gao-feng. 2017. Early-mature bud sports of navel orange and differential analysis of mineral element content of their parents. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 37 (8): 21 - 25. (in Chinese)  
刘桂东, 李碧娴, 胡萍, 管冠, 姚锋先, 钟八莲, 周高峰. 2017. 脐橙早熟芽变及其亲本幼苗矿质元素含量差异分析. *热带农业科学*, 37 (8): 21 - 25.
- Lombnaes P, Singh B R. 2003. Varietal tolerance to Zinc deficiency in wheat and barley grown in chelatorbuffered nutrient solution and its effect on uptake of Cu, Fe, and Mn. *Journal of Plant Nutrition Soil Science*, 166 (1): 76 - 83.
- Martínez-Cuenca Mary-Rus, Quiñones Ana, Iglesias Domingo J, Forner-Giner M Ángeles, Primo-Millo Eduardo, Legaz Francisco. 2013. Effects of high levels of zinc and manganese ions on Strategy I responses to iron deficiency in citrus. *Plant Soil*, 373 (1 - 2): 943 - 953.
- Ogata, R. 1962. Studies on manganese deficiency in citrus I: on the deficient symptom, leaf analysis and applications of manganese. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*: 31 (4): 45 - 54.
- Pestana M, Varennes A D, Abadía J, Faria E A. 2005. Differential tolerance to iron deficiency of citrus rootstocks grown in nutrient solution. *Scientia Horticulturae*, 104 (1): 25 - 36.
- Srivastava J N, Sharma P K, Dutta U, Srivastava A K, Kumar R. 2015. *Nutritional disorders of citrus and their management*//Awasthi L P. Recent advances in the diagnosis and management of plant diseases. India: Springer Press: 285 - 294.
- Sudahono, Byrne D H, Rouse R E. 1994. Greenhouse screening of citrus rootstocks for tolerance to bicarbonate-induced iron chlorosis. *HortScience A Publication of the American Society for Horticultural Science*, (2): 113 - 116.
- Taiz L, Zeiger E. 2010. *Plant Physiology*. 5th ed. Sunderland: Sinauer Associates, Inc.: 93.
- Wang Ming-yuan. 2011. Effects of iron deficiency and bicarbonate stress on mineral nutrition in poncirus trifoliata. *Northern Horticulture*, (18):

- 9 - 11. (in Chinese)
- 王明元. 2011. 缺铁和重碳酸盐胁迫对枳实生苗矿质元素的影响. 北方园艺, (18): 9 - 11.
- Wang Ze-yi, Li Zu-zhang. 2006. Soil nutrient status and fertilizer management technique of Nanfeng tangerine. Xiandai Horticulture, (6): 3 - 6. (in Chinese)
- 王泽义, 李祖章. 2006. 南丰蜜橘土壤营养状况及土壤施肥管理技术. 现代园艺, (6): 3 - 6.
- Xu Chun-li, Xiao Jia-xin, Qi Xiaoxiao, Zhang Shao-ling. 2010. Effect of Zn stress on photosynthetic characteristic and their correlation of the two varieties of citrus. Journal of Biology, 27 (6): 42 - 45. (in Chinese)
- 徐春丽, 肖家欣, 齐笑笑, 张绍铃. 2010. 锌胁迫对两种柑橘幼苗光合特性日变化及其相关性的影响. 生物学杂志, 27 (6): 42 - 45.
- Xu Jing-jing, Zhou Jun, Guan Shan-hong, Zeng Xiaojun, Fu Ying, Lu Hui. 2014. Developmental status and countermeasures of citrus agricultural products with geographical indication in Jiangxi Province. Journal of Southern Agriculture, 45 (8): 1514 - 1518. (in Chinese)
- 许晶晶, 周 军, 管珊红, 曾小军, 付 英, 卢 慧. 2014. 江西省橘类地理标志农产品发展现状与对策. 南方农业学报, 45 (8): 1514 - 1518.
- Yang Shui-ping, Huang Yang-hui, Rao Xin-hua, Li Fang-qing. 2005. The contrastive analysis of eight element in the leaves of tangerines and it's influence on fruit quality. Journal of East China Institute of Technology, 28 (3): 263 - 265. (in Chinese)
- 杨水平, 黄阳辉, 饶新华, 李芳清. 2005. 蜜橘叶片中八种元素的对比分析及其对果实品质的影响. 东华理工大学学报, 28 (3): 263 - 265.
- Yao Yu-jie, Jiang Cun-cang. 2016. Effect of Fe deficiency on the elements content in trifoliate orange rootstock and FTIR profiles. South China Fruits, 45 (6): 10 - 14. (in Chinese)
- 姚宇洁, 姜存仓. 2016. 缺铁胁迫下枳橙实生苗矿质元素的改变及 FTIR 特征分析. 中国南方果树, 45 (6): 10 - 14.
- Yao Yu-jie, Jiang Cun-cang. 2017. Photosynthetic characteristics and chloroplast ultrastructure of citrus rootstocks under iron deficiency stress. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 23 (5): 1345 - 1351. (in Chinese)
- 姚宇洁, 姜存仓. 2017. 缺铁胁迫柑橘砧木幼苗的光合特性和叶绿体超微结构. 植物营养与肥料学报, 23 (5): 1345 - 1351.
- Ying Jie-guan, Liu Xiu-hong, Li Jiang-bo, Wu Qun, Peng Shu-ang, Jiang Cun-cang. 2016. Analysis of Cu and Mn contents in the soil and leaves of citrus orchards in Nanfeng and Quzhou. South China Fruits, 45 (6): 15 - 18. (in Chinese)
- 应介官, 刘秀红, 李江波, 吴 群, 彭抒昂, 姜存仓. 2016. 江西南丰和浙江衢州柑橘园土壤及叶片铜、锰营养状况调查. 中国南方果树, 45 (6): 15 - 18.
- Zhang Chang-ji, Chen Cong, Xu Ji-quan. 2009. Citrus - an efficient economic forest for saline-alkali land along the subtropical coast. Forestry of China, (11): 34. (in Chinese)
- 张昌记, 陈 聪, 许基全. 2009. 柑橘——亚热带沿海盐碱地的高效经济林. 中国林业, (11): 34.
- Zhang Jia-wei, Liu Xiao, Peng Shu-ang. 2017. Effects of zinc deficiency on the physiologies and biochemistries of two citrus grafted plants. South China Fruits, 46 (6): 6 - 9. (in Chinese)
- 张佳伟, 刘 晓, 彭抒昂. 2017. 缺锌对枳砧和枳橙砧纽荷尔脐橙生理的影响. 中国南方果树, 46 (6): 6 - 9.
- Zhang Zhao-hong, Wang Yue-jing, Li Yan. 2002. Effect of Iron deficiency on contents of nutrient elements and photosynthetic characteristic of leaves in pear trees. Journal of Northwest Forestry College, 17 (4): 9 - 11. (in Chinese)
- 张朝红, 王跃进, 李 琰. 2002. 缺铁黄化对酥梨叶片营养元素含量和光合特性的影响. 西北林学院学报, 17 (4): 9 - 11.
- Zhan Xu, Liu Xiu-hong, Ying Jie-guan, Peng Shu-ang, Jiang Cun-cang. 2015. Analysis of Zn contents in the soil and leaves of citrus orchards in Nanfeng and Quzhou. South China Fruits, 44 (3): 56 - 58. (in Chinese)
- 占 旭, 刘秀红, 应介官, 彭抒昂, 姜存仓. 2015. 江西南丰和浙江衢州柑橘产区土壤及叶片锌含量分析. 中国南方果树, 44 (3): 56 - 58.
- Zheng Cang-song. 2015. Relationships between fruit quality and soil-plant nutrients of Nanfeng tangerine and regulation by fertilization application [Ph. D. Dissertation]. Wuhan: Huazhong Agricultural University. (in Chinese)
- 郑苍松. 2015. 南丰蜜橘果实品质与土壤—树体营养的关系及其调控[博士论文]. 武汉: 华中农业大学.
- Zhou Gao-feng, Peng Shu-ang, Liu Yong-zhong, Wei Qing-jiang, Han Jia, Islam Md Zahidul. 2014. The physiological and nutritional responses of seven different citrus rootstock seedlings to boron deficiency. Trees Structure Function, 28: 295 - 307.