

缺镁、铁、硼胁迫对 4 个柑橘砧木生长及养分吸收的影响

韩 佳, 周高峰, 李娇虹, 刘永忠, 彭抒昂*

(华中农业大学园艺植物生物学教育部重点实验室, 武汉 430070)

摘 要: 通过水培方式分别研究了缺镁、铁、硼处理对枳、香橙、红橘、崇义野橘 4 种柑橘砧木植株和根系生长及养分吸收的影响。结果表明: 缺镁处理下, 红橘在株高、叶片数、叶绿素含量、总根长、总根表面积及镁吸收速率等变化中表现出较强的抗缺镁特性, 崇义野橘次之, 枳、香橙较差; 缺铁处理下, 香橙在株高、叶片数、植株干样质量、总根体积、总根表面积和铁吸收速率等变化中表现出较强的抗缺铁特性, 红橘次之, 枳、崇义野橘较差; 缺硼处理下, 红橘在总根数、总根表面积、总根体积及硼吸收速率的变化中表现出较强的抗缺硼能力, 而崇义野橘的地上部较耐缺硼, 香橙、枳则表现出不耐缺硼。

关键词: 柑橘; 砧木; 水培; 镁; 铁; 硼; 胁迫

中图分类号: S 666

文献标志码: A

文章编号: 0513-353X (2012) 11-2105-08

Effects of Magnesium, Iron, Boron Deficiency on the Growth and Nutrition Absorption of Four Major Citrus Rootstocks

HAN Jia, ZHOU Gao-feng, LI Qiao-hong, LIU Yong-zhong, and PENG Shu-ang*

(Key Laboratory of Horticultural Plant Biology, Huazhong Agricultural University, Ministry of Education of China, Wuhan 430070, China)

Abstract: The effects of magnesium (Mg), iron (Fe) and boron (B) deficiency on growth and physiological characteristics in shoots and roots of four citrus rootstocks{Trifoliate orange [*Poncirus trifoliata* (L.) Raf.], Fragrant citrus (*Citrus junos* Sieb. ex Tanaka), Red tangerine (*Citrus reticulata* Blanco) and Congyi wild mandarin (*Citrus reticulata*)} were investigated by using hydroponic culture. Results indicated that the plant height, total leaves, chlorophyll content, total roots length, total roots surface and Mg specific absorption rate were better in red tangerine than those in other rootstocks under the treatment of Mg deficiency. In the treatment of Fe deficiency, the plant high, total leaves, dry weight of plant, total roots volume, total roots surface and Fe specific absorption rate were better in fragrant citrus than those in other rootstocks. In B deficiency treatment, the roots number of tips, total roots surface, total roots volume and B specific absorption rate in Red tangerine and the plant high, total leaves and dry weight of shoot in Congyi wild mandarin were better than those in other rootstocks, respectively.

Key words: citrus; rootstock; hydroponic; Mg; Fe; B; deficiency

收稿日期: 2012-06-02; 修回日期: 2012-10-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30871687); 公益性行业科研专项 (201203075)

* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: ganjuli_2002@mail.hzau.edu.cn; Tel: 027-87288339)

中国柑橘产区大多分布在土壤质地条件较差的山地, 养分淋失严重或因土壤酸碱度不适而呈现养分难以吸收的状态。赣南地处中亚热带南缘, 属典型的亚热带湿润气候, 土壤酸性重、质地粘重, 属沙漏性土壤 (王瑞东 等, 2011)。近年来, 赣南众多柑橘园陆续出现大面积的叶片缺素黄化、叶脉肿大和爆裂, 特别是有机肥施用少的红壤和沙质土果园尤其严重 (肖家欣 等, 2006; 凌丽俐 等, 2010; Chen et al., 2012)。在四川, 柑橘主要分布在石灰性的紫色土壤上, 其碳酸钙含量高, 一般为 5%~10%, pH 7.5~8.5, 导致许多柑橘园内发生了不同程度的石灰诱导缺铁黄化症, 在严重的果园, 其黄化株率可达 69% (吉前华 等, 1998)。这些问题的存在, 导致柑橘缺素现象日益严重。在众多的缺素症中, 又以缺 Mg、Fe、B 最为普遍和突出 (凌丽俐 等, 2010)。另一方面, 不同砧木对不同养分在吸收、运转和利用的能力上存在着显著差异, 可通过改换或靠接不同砧木来改善树体营养状况 (Storey & Walker, 1999)。因此, 了解柑橘主要砧木在缺素条件下的生长差异对生产具有较直接的指导和实践意义。

中国柑橘栽培长期以枳为主导砧木, 近年研究表明, 枳砧具有后期不亲和、抗旱性差等弱点, 制约着柑橘产量和品质的提升; 香橙是甜橙的优良砧木之一, 根深, 具有抗病、抗逆性强等特点, 在西南柑橘产区应用较多 (Sheng et al., 2009); 红橘根系发达, 须根多, 在重庆、福建等地应用广泛; 崇义野橘是 20 世纪 70 年代末在崇义原始林中发现的, 截止到目前, 对其研究还停留在分类和育种两方面 (刘勇 等, 2005)。针对赣南、四川等缺素严重的柑橘产区问题, 以 4 种常用柑橘砧木为材料, 研究其抗缺素能力的强弱, 以期筛选抗缺素柑橘砧木提供理论和试验依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料 with 处理

试验于 2011 年 6—11 月在华中农业大学柑橘基地温室进行。4 种砧木: 枳 [*Poncirus trifoliata*(L.) Raf.]、香橙 (*Citrus junos* Sieb. ex Tanaka)、红橘 (*Citrus reticulata* Blanco) 和崇义野橘 (*Citrus reticulata*)。选择籽粒饱满无缺损的种子, 置于黑暗的恒温培养箱中催芽。待芽萌发后, 选取株高一致、5~7 片叶的幼苗进行水培处理。每个处理 3 个重复, 每个重复 20 株, 完全随机区组设计, 常规栽培管理, 定时通气, 每 5 d 更换 1 次营养液。

试验设 4 个处理。对照: 1/2 Hoagland 和 Aron 全浓度营养液栽培; 缺镁 (-Mg): 含 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Mg 的全浓度营养液栽培; 缺铁 (-Fe): 含 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe 的全浓度营养液栽培; 缺硼 (-B): 含 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ B 的全浓度营养液栽培。

正式处理前, 每处理每重复各随机取 5 株幼苗测定植株初始的营养元素水平。缺素处理从 6 月初开始, 10 月初缺素症状明显后进行采样测定。

1.2 测定方法

用 Epson Expression 10000XL 根系分析仪测定总根表面积、总根长、总根体积及总根数。用美国产 LI-3100C 叶面积仪测定叶面积。

光合色素含量按照混合液法测定 (林仁辉, 2009)。

矿质营养元素的提取参考 Storey 和 Treeby (2002) 的方法, 采用等离子体发射光谱仪 (美国 Thermo 公司 IRIS Advan 型 ICP-AES) 测定。

计算营养相对吸收率: $\text{SAR} (\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}) = [(\ln R_2 - \ln R_1) / (T_2 - T_1)] \times [(M_2 - M_1) / (R_2 - R_1)]$ 。其中, T_2 和 T_1 表示处理天数, R_2 和 R_1 表示处理后和初始的根干样质量, M_2 和 M_1 表示处理后

和初始的整株镁、铁、硼含量 (Sheng et al., 2009)。

试验数据用 SAS 和 EXCEL 软件进行分析, 用 *LSD* 法比较差异显著性水平。

2 结果与分析

2.1 缺镁、铁、硼对柑橘砧木地上部的影响

在缺镁处理下, 砧木植株中下部叶片出现不同程度的失绿, 叶脉两侧生不规则水渍状黄斑, 并向叶缘处扩展 (图 1, A、D 和 G)。与对照相比, 缺镁处理显著降低了各柑橘砧木植株的株高、叶面积、叶绿素含量及地上部干样质量, 也显著降低了枳和崇义野橘的叶片数 (表 1)。各品种中, 枳在缺镁情况下株高等各指标变化最明显, 其次是香橙, 相对而言, 红橘和崇义野橘变化较小。缺镁条件下, 枳严重矮化, 叶片数显著减少, 崇义野橘次之, 红橘株高仅比对照降低了 11%, 而叶片数无变化。红橘缺镁后叶绿素含量只减少了 31%, 而枳与香橙叶片明显黄化, 叶绿素含量降低了 70% 以上。同时, 枳、香橙、红橘、崇义野橘的地上部干样质量分别降低了 49%、24%、14%、12%, 可见红橘与崇义野橘在缺镁条件下的干物质积累能力较强。

缺铁处理后, 柑橘砧木植株顶部叶片叶肉失绿至黄白色、叶脉呈明显绿色网纹状 (图 1, B、E 和 H)。各砧木叶绿素含量显著降低, 只有对照的 20% ~ 30% (表 1)。缺铁对其它指标的影响因品种而异, 其中香橙的株高、叶片数及地上部干样质量与对照相比没有显著变化, 叶面积变化在不同品种之间为最小, 仅比对照降低了 14%; 枳、红橘和崇义野橘的株高、叶片数、叶面积及地上部干样质量对缺铁的反应基本相同, 不过红橘的变化略低于枳和崇义野橘, 而崇义野橘的变化要低于枳。



图 1 柑橘砧木缺 Mg、Fe、B 处理 4 个月后的缺素症状

A、B、C: 枳分别在缺 Mg、缺 Fe、缺 B 处理下表现的缺素症状; D、E、F: 香橙分别在缺 Mg、缺 Fe、缺 B 处理下表现的缺素症状; G、H、K: 红橘分别在缺 Mg、缺 Fe、缺 B 处理下表现的缺素症状。

Fig. 1 Symptoms of different citrus rootstock plants at 4 months after Mg, Fe, B deficient treatment

A, B, C: Deficiency symptom of Trifoliate orange in Mg, Fe, B deficiency; D, E, F: Deficiency symptom of Fragrant citrus in Mg, Fe, B deficiency; G, H, K: Deficiency symptom of Red tangerine in Mg, Fe, B deficiency.

表 1 缺 Mg、缺 Fe、缺 B 对柑橘砧木株高、叶片数、叶面积、叶绿素 (a + b) 含量及地上部干样质量的影响

Table 1 Effects of Mg, Fe and B deficiency on plant height, total leaves, leaf area, chlorophyll (a + b) content and dry weight of shoot in citrus rootstocks

砧木品种 Rootstock	处理 Treatment	株高/ cm Height	叶片数 Total leaves	叶面积/ cm ² Leaf area	叶绿素 (a + b) 含量/ (mg · g ⁻¹) Chl.(a + b) content	地上部干样质量/ g Dry weight of shoot
枳 Trifoliate orange	对照 Control	57.53 ± 1.48	41.25 ± 0.85	133.53 ± 1.76	4.83 ± 0.05	2.02 ± 0.04
	- Mg	40.08 ± 1.10** (- 30%)	23.70 ± 0.14** (- 43%)	91.58 ± 1.91** (- 31%)	1.31 ± 0.13** (- 72%)	1.04 ± 0.08** (- 49%)
	- Fe	37.19 ± 1.39** (- 35%)	33.92 ± 0.87** (- 18%)	77.14 ± 4.35** (- 42%)	1.03 ± 0.07** (- 79%)	1.24 ± 0.05** (- 39%)
	- B	19.93 ± 0.54** (- 65%)	18.50 ± 0.91** (- 55%)	45.61 ± 1.88** (- 66%)	2.35 ± 0.13** (- 51%)	1.01 ± 0.04** (- 50%)
香橙 Fragrant citrus	对照 Control	37.03 ± 2.57	32.17 ± 1.24	211.22 ± 3.46	4.10 ± 0.10	1.81 ± 0.6
	- Mg	31.36 ± 1.32* (- 15%)	30.08 ± 0.73 ^{ns}	174.65 ± 4.41** (- 17%)	1.20 ± 0.27** (- 71%)	1.38 ± 0.04* (- 24%)
	- Fe	34.80 ± 1.69 ^{ns}	31.58 ± 1.02 ^{ns}	182.32 ± 5.71** (- 14%)	1.05 ± 0.09** (- 74%)	1.86 ± 0.06 ^{ns}
	- B	15.78 ± 0.97** (- 57%)	27.92 ± 1.65* (- 13%)	90.13 ± 4.85** (- 57%)	2.16 ± 0.16** (- 47%)	0.92 ± 0.05** (- 49%)
红橘 Red tangerine	对照 Control	25.52 ± 0.73	23.75 ± 0.57	192.18 ± 3.89	4.14 ± 0.05	1.77 ± 0.05
	- Mg	22.71 ± 0.99** (- 11%)	22.75 ± 0.79 ^{ns}	167.34 ± 4.06** (- 13%)	2.85 ± 0.16** (- 31%)	1.53 ± 0.07* (- 14%)
	- Fe	18.27 ± 0.57** (- 28%)	19.58 ± 0.49** (- 18%)	125.72 ± 3.35** (- 35%)	1.20 ± 0.08** (- 73%)	1.26 ± 0.03** (- 29%)
	- B	16.55 ± 0.76** (- 35%)	17.17 ± 0.61** (- 28%)	96.45 ± 2.47** (- 50%)	2.27 ± 0.08** (- 45%)	0.97 ± 0.03** (- 45%)
崇义野橘 Congyi wild mandarin	对照 Control	41.63 ± 0.83	36.08 ± 0.34	216.89 ± 2.41	4.54 ± 0.16	2.77 ± 0.04
	- Mg	34.67 ± 0.91** (- 17%)	33.08 ± 0.56** (- 8%)	196.07 ± 2.84** (- 10%)	2.41 ± 0.08** (- 47%)	2.43 ± 0.03** (- 12%)
	- Fe	27.87 ± 0.65** (- 33%)	28.42 ± 0.48** (- 21%)	137.46 ± 3.43** (- 37%)	1.19 ± 0.07** (- 74%)	1.78 ± 0.03** (- 36%)
	- B	32.49 ± 0.88** (- 22%)	31.25 ± 0.58** (- 13%)	152.43 ± 4.88** (- 30%)	2.40 ± 0.07** (- 47%)	1.44 ± 0.04** (- 48%)

注: 括号内的数值表示当处理结果显著低于或高于对照时, 该处理下的数值与正常处理 (对照) 相比下降 (-) 或者升高 (+) 的百分比 (%). * 表示差异显著 ($P < 0.05$), ** 表示差异极显著 ($P < 0.01$), ns 表示不显著。

Note: Values in parenthesis denote percentages (%) of decreases (-) or increases (+) of each measured parameters against the control condition (control) when their difference is significant. * Significant influence at $P < 0.05$, ** Significant influence at $P < 0.01$.

缺硼处理下, 柑橘砧木出现叶片黄化并且扭曲皱缩, 叶脉变黄, 继而主、侧脉肿大木栓化, 最后爆裂的缺硼症状 (图 1, C、F 和 K)。各品种的株高、叶片数、叶面积、叶绿素含量及地上部干样质量均有显著的变化, 其中红橘和崇义野橘的变化低于枳和香橙 (表 1)。相比正常的硼处理, 崇义野橘的株高、叶片数、叶面积分别降低了 22%、13%、30%, 均为不同品种中变化最小, 而香橙和枳的株高、叶面积变化显著, 表现为植株高度矮化, 叶片皱缩。红橘的叶绿素含量及地上部干样质量的变化均为 45%, 为品种间变化最小, 崇义野橘略低于红橘, 香橙次之, 枳最差。

2.2 缺镁、铁、硼对柑橘砧木根系的影响

总体来说, 缺硼处理对砧木根系影响最大, 其次是缺铁处理, 而缺镁处理的影响较小 (表 2)。缺镁情况下, 红橘的总根长、总根数、总根表面积、总根体积及根干样质量与对照相比均无显著变化, 而其它 3 种砧木根系的生理指标都显著降低 (崇义野橘的根干样质量除外)。相对来说, 崇义野橘的总根长和总根数均比对照降低了一半, 总根表面积也降低了 39%, 枳和香橙的变化低于崇义野橘 (表 2)。缺铁处理下, 香橙的总根长、总根数、总根表面积、总根体积均无显著变化, 根干样质量相比对照增加了 33%, 其他 3 个砧木品种均有显著变化: 其中崇义野橘根系受到了严重阻碍, 总根长、总根数、总根表面积和总根体积均减少了 50% 以上, 根干样质量也比对照少 1/3, 枳次之, 减少 30% ~ 50%, 而红橘除总根长无显著变化外, 其它变幅在 10% ~ 40% 之间, 略低于枳 (表 2)。

总体而言, 缺硼处理显著降低了各砧木品种的总根长、总根数、总根表面积、总根体积及根干样质量 (表 2)。其中红橘的总根数、总根表面积及根干样质量的变化均为 4 种砧木中最小, 且总根体积与对照相比无变化。枳、香橙和崇义野橘在缺硼处理下, 各根系指标均大幅度降低, 其中枳的总根长、总根数的变化较大, 香橙的总根体积、根干样质量的变化较大, 而崇义野橘的总根长、总

根表面积变化较大。

表 2 缺 Mg、缺 Fe、缺 B 对柑橘砧木总根长、总根数、总根表面积、总根体积及根干样质量的影响

Table 2 Effects of Mg, Fe and B deficiency on plant total root length, number of tips, total root surface area, total root volume and dry weight of root in citrus rootstocks

砧木品种 Rootstock	处理 Treatment	总根长/mm Total root length	总根数 Number of tips	总根表面积/mm ² Total root surface area	总根体积/mm ³ Total root surface	根干样质量/g Dry weight of root
枳 Trifoliate orange	对照 Control	751.67 ± 8.04	542.42 ± 8.14	143.14 ± 2.93	2.164 ± 0.06	0.65 ± 0.03
	- Mg	467.46 ± 8.54** (- 38%)	393.42 ± 8.81** (- 27%)	89.39 ± 3.13** (- 38%)	1.365 ± 0.06** (- 37%)	0.34 ± 0.02** (- 48%)
	- Fe	414.96 ± 9.64** (- 45%)	370.33 ± 6.41** (- 32%)	85.11 ± 4.75** (- 41%)	1.391 ± 0.06** (- 36%)	0.47 ± 0.04** (- 28%)
	- B	272.14 ± 7.44** (- 64%)	195.67 ± 2.55** (- 64%)	67.74 ± 4.76** (- 53%)	1.335 ± 0.06** (- 38%)	0.54 ± 0.02** (- 17%)
香橙 Fragrant citrus	对照 Control	268.15 ± 4.37	251.67 ± 4.68	86.09 ± 5.51	2.207 ± 0.07	0.51 ± 0.05
	- Mg	194.15 ± 4.54** (- 28%)	171.75 ± 6.33** (- 32%)	57.30 ± 2.63** (- 33%)	1.352 ± 0.06** (- 39%)	0.35 ± 0.02** (- 31%)
	- Fe	272.00 ± 10.16 ^{ns}	264.00 ± 10.64 ^{ns}	88.76 ± 7.26 ^{ns}	2.315 ± 0.09 ^{ns}	0.76 ± 0.06** (+33%)
	- B	163.28 ± 7.64** (- 39%)	95.50 ± 6.55** (- 62%)	43.16 ± 3.53** (- 50%)	0.919 ± 0.09** (- 58%)	0.36 ± 0.03** (- 29%)
红橘 Red tangerine	对照 Control	177.20 ± 5.82	199.01 ± 5.29	56.05 ± 2.68	1.413 ± 0.08	0.67 ± 0.03
	- Mg	177.49 ± 7.22 ^{ns}	212.08 ± 6.55 ^{ns}	52.03 ± 3.31 ^{ns}	1.235 ± 0.05 ^{ns}	0.62 ± 0.04 ^{ns}
	- Fe	157.53 ± 8.81 ^{ns}	170.42 ± 7.66** (- 14%)	41.96 ± 1.96** (- 25%)	0.893 ± 0.04** (- 37%)	0.56 ± 0.02** (- 16%)
	- B	92.41 ± 6.77** (- 48%)	94.00 ± 4.95** (- 53%)	39.13 ± 2.67** (- 30%)	1.264 ± 0.07 ^{ns}	0.55 ± 0.03** (- 17%)
崇义野橘 Congyi wild mandarin	对照 Control	435.07 ± 3.84	297.17 ± 4.63	122.90 ± 2.91	2.780 ± 0.08	0.81 ± 0.03
	- Mg	196.38 ± 3.28** (- 55%)	140.58 ± 4.62** (- 53%)	75.58 ± 2.26** (- 39%)	1.914 ± 0.09** (- 31%)	0.72 ± 0.04 ^{ns}
	- Fe	169.43 ± 6.14** (- 61%)	102.07 ± 8.36** (- 66%)	50.94 ± 1.56** (- 59%)	1.257 ± 0.02** (- 55%)	0.53 ± 0.02** (- 35%)
	- B	155.38 ± 8.47** (- 64%)	115.08 ± 5.89** (- 61%)	50.54 ± 2.47** (- 59%)	1.495 ± 0.06** (- 46%)	0.63 ± 0.02** (- 22%)

注: 括号内的数值表示当处理结果显著低于或高于对照时, 该处理下的数值与正常处理(对照)相比下降(-)或者升高(+)的百分比(%). * 表示差异显著 ($P < 0.05$), ** 表示差异极显著 ($P < 0.01$), ns 表示不显著。

Note: Values in parenthesis denote percentages (%) of decreases (-) or increases (+) of each measured parameters against the control condition (control) when their difference is significant. * Significant influence at $P < 0.05$, ** Significant influence at $P < 0.01$.

2.3 不同缺素处理对柑橘砧木根系镁、铁、硼相对吸收率的影响

2.3.1 缺 Mg 处理对柑橘砧木 Mg 相对吸收率的影响

缺镁处理显著降低了各砧木品种根系的镁相对吸收率(图 2), 其中, 红橘的镁相对吸收率降低了 47%, 枳、香橙、崇义野橘则分别降低了 62%、56%、61%, 表明红橘在缺镁的条件下根系吸收能力最强, 香橙次之, 枳、崇义野橘较差。

2.3.2 缺 Fe 处理对柑橘砧木 Fe 相对吸收率的影响

缺铁处理对各砧木品种植株根系的铁相对吸收率的影响非常显著(图 3)。其中, 香橙降低 50%, 在 4 种砧木中变化最小, 表明香橙在缺铁环境下根系吸收铁能力较好。枳、红橘、崇义野橘分别降低了 72%、66%、69%, 表明红橘根系的铁吸收能力稍逊与香橙, 而枳最差。

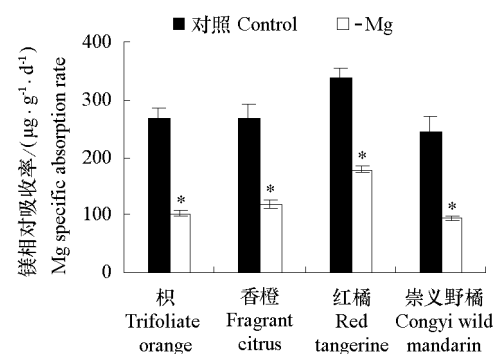


图 2 缺 Mg 处理对柑橘砧木植株镁相对吸收率的影响

* 表示处理显著低于对照 ($P < 0.05$), 下同。

Fig. 2 Effect of Mg deficiency in nutrient solution on root Mg specific absorption rate of different citrus rootstock plants

* indicated that the value of treatment was significantly lower than that in the control. The same below.

2.3.3 缺 B 处理对柑橘砧木 B 相对吸收率的影响

如图 4 所示, 4 种砧木植株根系的硼相对吸收率在缺硼处理下均有较大幅度的降低。品种间比较后得知, 红橘降低了 58%, 枳、香橙、崇义野橘分别降低了 72%、72%、70%, 红橘在缺硼环境下其根系对硼的吸收能力要显著大于其它 3 种砧木, 崇义野橘较红橘次之, 枳和香橙最差。

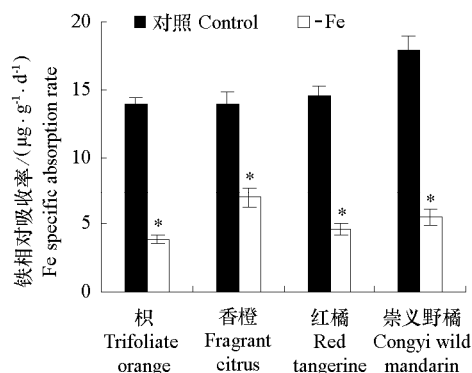


图 3 缺铁处理对柑橘砧木植株铁相对吸收率的影响

Fig. 3 Effect of Fe deficiency in nutrient solution on root Fe absorption rate of different citrus rootstock plants

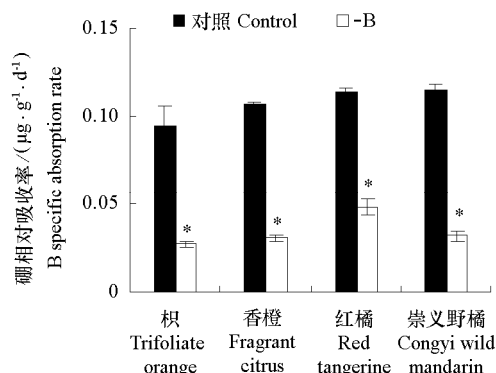


图 4 缺 B 处理对柑橘砧木植株硼相对吸收率的影响

Fig. 4 Effect of B deficiency in nutrient solution on root B absorption rate of different citrus rootstock plants

3 讨论

3.1 4 种柑橘砧木抗缺镁能力比较

镁存在于植物叶片内叶绿素分子中心 (汪洪和褚天铎, 1999), 柑橘的叶脉肿大与爆裂并不仅仅出现在缺硼树上, 老叶片的叶脉肿大爆裂列为甜橙缺镁的重要特征之一 (彭良志 等, 2010)。本研究表明, 缺镁处理显著降低了柑橘砧木植株的叶绿素含量, 与缺镁后植株地上部出现的黄化症状相一致。另外, 缺镁处理显著降低了柑橘砧木的总根面积、总根体积及根系对镁的相对吸收率, 说明缺镁处理降低了根系的长势和营养吸收能力。镁缺乏显著降低了‘春见’橘橙株高、根长、根系活力、叶绿素含量及各部位干样质量, 均以无镁处理的对应值变化幅度最大 (申燕 等, 2011)。

各缺素处理中, 红橘地上部各指标变化最小, 根系各指标无显著变化, 表明红橘最抗缺镁, 尤其是根系的抗缺镁能力非常强。崇义野橘地上部的变化仅次于红橘, 其根干样质量也无显著变化, 也表现出较高的抗缺镁能力, 而枳和香橙的地上部及根系各指标中都变化显著, 对缺镁比较敏感, 但香橙要比枳更耐缺镁。缺镁处理下各砧木根系的镁相对吸收率均显著降低, 其中红橘的降低最少, 表明红橘根系对镁的吸收能力最强, 枳最差。有研究显示, 缺镁条件下, 大豆根系受到明显抑制, 这将使得根逐渐失去吸收营养素的能力 (王芳 等, 2004)。

3.2 4 种柑橘砧木抗缺铁能力比较

铁是植物必需的中量元素, 是叶绿素合成中某些酶或酶辅基的活化剂, 影响着叶绿素的形成 (张译升 等, 2008)。缺铁处理下, 植株顶部叶片黄化, 植株矮小, 铁相对吸收率明显降低。本研究表明, 缺铁处理下, 香橙的株高、叶面积及总根长、总根数、总根表面积、总根体积都无显著变化, 且根干样质量相比对照增加了 33%, 说明香橙根系在缺铁处理下的长势和吸收能力较强。香橙近根尖端在缺铁处理下有大量侧根且根尖肿大, 原因可能是在胁迫环境下, 根系通过增加吸收表面积来

满足自身需要, 植株会利用自身的调节机制, 刺激那些能够直接吸收或获取元素的器官的生长 (Hermans et al., 2006; Potters et al., 2007)。此外, 红橘的株高、叶片数、叶面积及根系的总根长、根表面积等指标的变化较小, 表现出较强的抗缺铁特性, 枳次之, 崇义野橘对缺铁最敏感。缺铁处理显著降低了各砧木根系的铁相对吸收率, 其中香橙根系吸收铁能力最高, 红橘次之, 枳最差。谢永红等 (2003) 对资阳香橙、红橘和枳进行比较, 得出资阳香橙最耐缺铁胁迫, 红橘次之, 枳最差。Maribela 等 (2005) 比较得出, 香橙最耐缺铁, 枳橙和红橘次之, 枳最差。本试验结果与他们的结果一致。

3.3 4 种柑橘砧木抗缺硼能力比较

高等植物对缺硼反应最迅速的是根系, 缺硼引起根尖生长组织细胞分裂和延伸严重受阻 (韩霜, 2007)。缺硼处理下, 植株严重矮化, 根长变短, 根尖肿大。Sheng 等 (2009) 指出缺硼后柑橘砧木倾向于先降低生物量来维持体内的硼含量, 从而满足体内硼的生理需求。崇义野橘在缺硼处理下的株高、叶片数及叶面积的变化均不显著, 地上部长势较好, 说明缺硼对其地上部的影响较小。红橘的总根数、总根表面积、总根体积及根干样质量变化较小, 说明红橘在缺硼后侧根变粗, 增强了根系吸收能力, 表明其根系抗缺硼能力较强。枳、香橙的根系长势较弱, 崇义野橘长势最弱, 相比崇义野橘的地上部, 根系较弱可能是吸收的硼主要输送到了地上部的缘故, 有待进一步研究。缺硼处理下各砧木的硼相对吸收率显著降低, 红橘降低最少, 表明红橘对硼的吸收能力最强。Bellaloui 和 Brown (1998) 研究表明根系体积和根干样质量的下降也会影响植株地上部的生长, 因为降低了根系吸收养分的能力。

3.4 小结

在缺镁、铁、硼胁迫下, 4 种柑橘砧木植株生长各形态指标及根系对所缺元素的相对吸收率都存在着显著的差异。缺镁处理下, 红橘具有较强的抗缺镁特性, 崇义野橘次之, 枳壳、香橙稍逊; 缺铁处理下, 香橙表现出较强的抗缺铁特性, 红橘次之, 枳壳、崇义野橘较差; 缺硼处理下, 红橘根系具有较强的抗缺硼能力, 而崇义野橘地上部较耐缺硼, 香橙、枳壳不耐缺硼; 缺硼对砧木株高、叶片数、叶面积及地上部干重的影响要大于缺铁对其的影响, 缺镁的影响最小, 而对叶绿素含量的影响则是: 铁 > 镁 > 硼。另外, 缺硼对柑橘砧木根系的影响也大于缺铁、镁对根系的影响。

综上所述, 4 种柑橘砧木的抗缺镁能力为红橘 > 崇义野橘 > 香橙 > 枳壳; 抗缺铁能力为香橙 > 红橘 > 枳壳 > 崇义野橘; 抗缺硼能力为红橘 > 崇义野橘 > 香橙 > 枳壳。这与生产上的表现大体一致。

References

- Bellaloui B, Brown P H. 1998. Cultivar differences in boron uptake and distribution in celery (*Apium graveolens*), tomato (*Lycopersicon esculentum*) and wheat (*Triticum aestivum*). *Plant Soil*, 198: 153 - 158.
- Chen Li-song, Han Shuang, Qi Yi-ping, Yang Lin-tong. 2012. Boron stresses and tolerance in citrus. *African Journal of Biotechnology*, 11: 5961 - 5969.
- Han Shuang. 2007. Effects of boron deficiency on physiology and biochemistry in citrus [M. D. Dissertation]. Fujian: Fujian Agriculture and Forestry University. (in Chinese)
- 韩 霜. 2007. 缺硼对柑橘生理生化的影响 [硕士学位论文]. 福建: 福建农林大学.
- Hermans C, Hammond J P, White P J, Verbruggen N. 2006. How do plants respond to nutrient shortage by biomass allocation? *Trends Plant Sci*, 11: 610 - 617.
- 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.
- Lin Ren-hui. 2009. Studies on magnesium nutritive physiology of pakchoi [M. D. Dissertation]. Fujian: Fujian Agriculture and Forestry University. (in Chinese)
- 林仁辉. 2009. 小白菜镁素营养生理研究[硕士学位论文]. 福建: 福建农林大学.
- Ling Li-li, Peng Liang-zhi, Chun Chang-pin, Cao Li, Jiang Cai-lun, Lei Ting. 2010. Relationship between leaf yellowing degree and nutrimental elements levels in navel orange (*Citrus sinensis* Osbeck) leaves in southern Jiangxi Province of China. Scientia Agricultura Sinica, 43 (17): 3602 - 3607. (in Chinese)
- 凌丽俐, 彭良志, 淳长品, 曹立, 江才伦, 雷霆. 2010. 赣南纽荷尔脐橙叶片黄化与营养元素丰缺的相关性. 中国农业科学, 43 (17): 3602 - 3607.
- Liu Yong, Wu Bo, Liu De-chun, Sun Zhong-hai. 2005. On genetic diversity of Jiangxi native citrus and its wild varieties based on ssr markers. Journal of Jiangxi Agricultural University, 27 (4): 486 - 490. (in Chinese)
- 刘勇, 吴波, 刘德春, 孙中海. 2005. 江西柑橘地方品种资源及野生近缘种 SSR 分子标记. 江西农业大学学报, 27 (4): 486 - 490.
- Maribela Pestana, Amarilis de Varennes, Javier Abadia, Eugenio Araujo Faria. 2005. Differential tolerance to iron deficiency of citrus rootstocks grown in nutrient solution. Scientia Horticulturae, 104: 25 - 36.
- Peng Liang-zhi, Zhang Guang-yue, Chun Chang-pin, Wang Zhen-xing, Guo Chun-gui, Ling Li-li, Lai Jiu-jiang, Jiang Cai-lun. 2010. Study on the relationship between leaf yellowing with vein swelling or cracking and Mg, B element concentrations in Newhall Navel Orange leaves. South China Fruits, 39 (4): 1 - 5. (in Chinese)
- 彭良志, 张广越, 淳长品, 王振兴, 郭春贵, 凌丽俐, 赖九江, 江才伦. 2010. 纽荷尔脐橙叶片黄化和叶脉肿胀与镁硼丰缺关系研究. 中国南方果树, 39 (4): 1 - 5.
- Potters G, Pasternak T P, Guisez Y, Palme K J, Jansen M A K. 2007. Stress-induced morphogenic responses: Growing out of trouble? Trends Plant Sci, 12: 98 - 105.
- Shen Yan, Xiao Jia-xin, Yang Hui, Zhang Shao-ling. 2011. Effects of Magnesium stress on growth, distribution of several mineral elements and leaf ultrastructure of 'Harumi' Tangor. Acta Horticulturae Sinica, 38 (5): 849 - 858. (in Chinese)
- 申燕, 肖家欣, 杨慧, 张绍铃. 2011. 镁胁迫对 '春见' 橘橙生长和矿质元素分布及叶片超微结构的影响. 园艺学报, 38 (5): 849 - 858.
- Sheng O, Yan X, Peng S A, Deng X X, Fang Y W. 2009. Seasonal changes in nutrient concentrations of 'Newhall' and 'Skagg's Bonanza' navel oranges. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 40: 3061 - 3076.
- Storey R, Treeby M T. 2002. Nutrient uptake into navel oranges during fruit development. Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 77: 91 - 99.
- Storey R, Walker R R. 1999. Citrus and salinity. Scientia Horticulturae, 78: 39 - 81.
- Wang Fang, Liu Peng, Zhu Jing-wen. 2004. Effect of magnesium (Mg) on root activity, chlorophyll content and membrane permeability of soybean. Journal of Agro-Environment Science, 23 (2): 235 - 239. (in Chinese)
- 王芳, 刘鹏, 朱靖文. 2004. 镁对大豆根系活力叶绿素含量和膜透性的影响. 农业环境科学学报, 23 (2): 235 - 239.
- Wang Hong, Zhu Tian-duo. 1999. The progress of study on Magnesium nutrition in plants. Chinese Bulletin of Botany, 16 (3): 245 - 250. (in Chinese)
- 汪洪, 褚天铎. 1999. 植物镁素营养的研究进展. 植物学通报, 16 (3): 245 - 250.
- Wang Rui-dong, Jiang Cun-chang, Liu Gui-dong, Wang Yun-hua, Peng Shu-ang, Zeng Qing-luan. 2011. Status and analysis on available boron content in soil of Gannan navel orange orchards. South China Fruits, 40 (4): 1 - 7. (in Chinese)
- 王瑞东, 姜存仓, 刘桂东, 王运华, 彭抒昂, 曾庆奎. 2011. 赣南脐橙产区果园土壤有效硼含量的现状与分析. 中国南方果树, 40 (4): 1 - 7.
- Xiao Jia-xin, Yang Xiang, Peng Shu-ang, Deng Xiu-xin, Fang Yi-wen. 2006. Relationship between boron deficiency occurrence and annual changes in contents of boron and sugar of Newhall navel orange. Acta Horticulturae Sinica, 33 (2): 350 - 359. (in Chinese)
- 肖家欣, 严翔, 彭抒昂, 邓秀新, 方贻文. 2006. 纽荷尔脐橙缺硼表现与其硼、糖含量年变化的关系. 园艺学报, 33 (2): 356 - 359.
- Xie Yong-hong, Lü Bin, Chen Xue-nian. 2003. Effects of leaf pigment and mineral nutrition in double stress of iron and sodium bicarbonate on citrus rootstock. Southwest Horticulture, 31 (4): 1 - 3. (in Chinese)
- 谢永红, 吕斌, 陈学年. 2003. 铁和碳酸氢钠双重胁迫对柑橘砧木叶片色素和矿质营养的影响. 西南园艺, 31 (4): 1 - 3.
- Zhang Yi-sheng, Wang Yong-bing, Li Li-ya, Guo Chang-hong. 2008. Molecular mechanism of iron uptake in plants. Natural Sciences Journal of Harbin Normal University, 24 (4): 85 - 88. (in Chinese)
- 张译升, 王永斌, 李丽娅, 郭长虹. 2008. 植物吸收铁营养元素的分子机制研究进展. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 24 (4): 85 - 88.