

# 高硼胁迫对纽荷尔脐橙幼苗微量元素吸收与分配的影响

胡萍, 陈玉花, 周高峰, 姚锋先, 管冠, 钟八莲, 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:** 研究高硼胁迫对纽荷尔脐橙幼苗微量元素 (B、Mn、Fe、Cu、Zn、Mo) 吸收与分配的影响, 以期为脐橙的硼肥营养生理和生产中科学施用微量元素提供理论依据。以纽荷尔脐橙幼苗为试材, 利用营养液培养方法进行高硼处理 (B: 200  $\mu\text{mol/L}$ ) 和适硼处理 (B: 20  $\mu\text{mol/L}$ , 对照), 测定根、砧木茎、上部接穗茎、下部接穗茎、上部叶、下部叶 6 个部位微量元素的含量, 并计算各部位微量元素积累量和分配率。高硼胁迫下纽荷尔脐橙幼苗根干物重显著下降, 其他部位干物重没有明显变化, 且各部位 B 含量和积累量均显著增加, B 在叶片中的分配率也明显提高。Mn、Fe、Zn、Mo 主要在根部富集, 高硼胁迫使各部位中的 Mn 含量显著下降, 根部 Fe 含量和积累量也显著降低, 但各部位中 Mn、Cu、Mo 的分配率无明显变化; 高硼胁迫显著降低了下部叶 Cu 含量, 也使上部接穗茎 Zn 含量和积累量显著下降, 并且根部和砧木茎 Mo 含量显著增加。

**关键词:** 高硼胁迫; 纽荷尔脐橙; 微量元素; 吸收; 分配

硼 (B) 是植物正常生长发育必需的微量元素之一<sup>[1]</sup>, 在细胞壁组成、细胞膜稳定、碳水化合物代谢以及植物激素代谢等方面均起着重要作用<sup>[2-5]</sup>。柑橘中存在缺硼和硼毒害现象, 其中缺硼可以通过施用硼肥进行矫正<sup>[6]</sup>, 但是由于硼缺乏与硼毒害之间的范围很窄, 因此不合理地施用硼肥很容易造成硼毒害现象的发生。研究发现硼过量会严重影响柑橘的产量和品质<sup>[7]</sup>。目前, 对于高硼的研究主要集中在植物形态学、解剖学、光合作用、抗氧化系统等问题上<sup>[8-11]</sup>, 但高硼胁迫对柑橘体内微量元素吸收与分配的影响研究较少。因而本试验以纽荷尔脐橙幼苗作为试验材料, 研究了脐橙在高硼胁迫下对微量元素的反应差异, 以期为脐橙的硼肥营养生理和生产中科学施用微量元素提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

从赣州市赣县江口镇无病毒苗圃基地选取长势一致的一年生纽荷尔脐橙 (*Citrus sinensis* Osbeck

‘Newhall’) 幼苗为试材, 砧木为枳橙 [*C. sinensis* (L.) Osb.  $\times$  *Poncirus trifoliata* (L.) Raf.]。本试验中所选取的幼苗砧木茎粗为 6 ~ 8 mm, 有两次抽梢, 上部抽梢叶片定义为上部叶 (8 ~ 11 片), 下部抽梢叶片定义为下部叶 (8 ~ 11 片)。移植时将全部幼苗从基质中移出, 用自来水除去根和叶片上的土块、杂质等, 再用一级水将幼苗冲洗干净, 移入盛有 4 L 营养液的黑色塑料桶中培养, 每桶中种 1 株幼苗。在开始处理之前, 幼苗上部叶和下部叶的硼含量分别为 (23.7  $\pm$  2.7) 和 (18.6  $\pm$  1.6) mg/kg。

### 1.2 试验设计和管理

采用营养液培养的方法, 营养液配方参考 Hoagland 和 Arnon 配方<sup>[12]</sup>, 再经过适当的调整, 基础营养液的组成为: 3 mmol/L  $\text{KNO}_3$ , 2 mmol/L  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ , 1 mmol/L  $\text{MgSO}_4$ , 0.5 mmol/L  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ , 9  $\mu\text{mol/L}$   $\text{MnCl}_2$ , 1.6  $\mu\text{mol/L}$   $\text{ZnSO}_4$ , 0.3  $\mu\text{mol/L}$   $\text{CuSO}_4$ , 0.1  $\mu\text{mol/L}$   $\text{Na}_2\text{MoO}_4$ , 50  $\mu\text{mol/L}$  Fe-EDTA, 所用试剂均为分析纯。试验设适量硼 (20  $\mu\text{mol/L}$ , MB)、高硼 (200  $\mu\text{mol/L}$ , HB) 2 个处理, 硼以硼酸的形式加入, 每个处理 5 个重复, 每个重复 1 株幼苗。幼苗用 1/2 完全营养液培养 2 周后用全量营养液进行培养, 营养液每 5 d 更换 1 次, 每隔 2 h 通气 15 min。试验在赣南师范大学玻璃温室自然光照条件下进行, 保持室内温度 25 ~ 32  $^\circ\text{C}$ , 湿度 45% ~ 80%。

收稿日期: 2019-06-13; 录用日期: 2019-07-14

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

作者简介: 胡萍 (1995-), 女, 江西泰和人, 在读硕士研究生, 研究方向为柑橘营养生理。E-mail: 2082377009@qq.com。

通讯作者: 刘桂东, E-mail: lgd@gnnu.cn。

### 1.3 样品采集与处理

培养 50 d 后收样, 将植株分为根、砧木茎、上部接穗茎、下部接穗茎、上部叶、下部叶 6 个部分, 将全部样品用一级水冲洗干净, 并用吸水纸擦干, 放入烘箱中 75℃ 烘干至恒重。用精度为 0.01 g 的电子天平测定其干物质重量, 再将样品用研钵磨碎后, 过 0.45 mm 筛, 放入干净的离心管中保存。

### 1.4 微量元素的测定

称取磨碎的样品根 0.3 g、茎 0.2 g、叶 0.2 g, 放在瓷坩埚中, 在电炉中预先炭化, 炭化后再转入马弗炉中高温缓缓升温至 500℃ 下干灰化 5 h, 待冷却用 10 mL 5% HNO<sub>3</sub> 溶解, 用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS, Agilent 7900, USA) 测定微量元素 B、Mn、Fe、Cu、Zn、Mo 的含量。

### 1.5 数据处理及统计分析

硼积累量 (μg/株) = 硼含量 (mg/kg) × 干物重 (g)  
各部位微量元素分配率 (%) = 各部位微量元素积累量 / 总积累量 × 100

试验数据采用软件 SAS 9.1.3 进行统计分析, 同一部位适硼和高硼处理之间干物重、元素含量以及元素积累量的比较用独立样本 *t* 检验, 显著水平为  $P < 0.05$ , 使用 Excel 2010 进行图表制作。

## 2 结果与分析

### 2.1 高硼胁迫对纽荷尔脐橙幼苗干物重的影响

从表 1 可以看出, 与适硼相比, 高硼胁迫下纽荷尔脐橙幼苗根部干物重显著下降, 其他部位干物重无明显变化。

表 1 适硼和高硼条件下纽荷尔脐橙各部位干物重

植株部位	干物重 (g)	
	适硼	高硼
上部叶	1.77 ± 0.07a	1.85 ± 0.08a
下部叶	2.04 ± 0.27a	2.19 ± 0.04a
上部接穗茎	0.72 ± 0.06a	0.73 ± 0.05a
下部接穗茎	1.82 ± 0.22a	1.99 ± 0.13a
砧木茎	2.23 ± 0.18a	2.22 ± 0.31a
根	7.09 ± 0.48a	5.90 ± 0.42b

注: 同一行不同小写字母表示同一部位不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

### 2.2 高硼胁迫对纽荷尔脐橙幼苗微量元素吸收的影响

#### 2.2.1 高硼胁迫对纽荷尔脐橙幼苗硼吸收的影响

由表 2 可知, 高硼胁迫下各部位 B 含量均显著高于适硼处理, 根、砧木茎、下部接穗茎、上部接穗茎、下部叶、上部叶分别增加了 53.2%、36.4%、23.8%、28.6%、284.2%、250.1%。并且与对照相比, 高硼胁迫下各部位 B 积累量显著增加。其中, 上部叶增加 256.7%; 下部叶增加 313.5%; 上部接穗茎增加 21.0%; 下部接穗茎增加 27.2%; 砧木茎增加 33.2%, 根部增加 24.1%。

表 2 适硼和高硼条件下纽荷尔脐橙各部位硼含量和硼积累量

植株部位	硼含量 (mg/kg)		硼积累量 (μg/株)	
	适硼	高硼	适硼	高硼
上部叶	53.5 ± 1.7b	187.3 ± 13.4a	97.1 ± 4.9b	346.5 ± 8.7a
下部叶	39.9 ± 3.5b	153.3 ± 11.7a	81.1 ± 10.5b	335.5 ± 11.9a
上部接穗茎	11.2 ± 1.3b	14.4 ± 1.8a	8.5 ± 1.1b	10.3 ± 0.3a
下部接穗茎	8.4 ± 0.9b	10.4 ± 1.0a	16.2 ± 2.2b	20.6 ± 2.1a
砧木茎	8.8 ± 1.0b	12.0 ± 1.3a	20.5 ± 2.6b	27.2 ± 3.4a
根	9.4 ± 0.7b	14.4 ± 0.9a	67.7 ± 1.5b	84.0 ± 9.2a

#### 2.2.2 高硼胁迫对纽荷尔脐橙幼苗锰吸收的影响

从表 3 可以看出, 以适硼为对照, 各部位 Mn 含量在高硼胁迫下均显著下降。高硼胁迫使根、砧木茎、下部接穗茎、上部接穗茎、下部叶、上部叶分别降低了 21.40%、22.75%、21.35%、31.86%、20.53%、43.07%。同时除下部叶外, 其他各部位 Mn 积累量也显著降低, 上部叶、上部接穗茎、下部接穗茎、砧木茎、根部分别降低了 41.14%、35.21%、25.30%、25.13%、34.49%, 此结果表明, 脐橙苗 Mn 含量的变化对高硼胁迫很敏感, 显著抑制了各部位 Mn 的含量和积累量。

表 3 适硼和高硼条件下纽荷尔脐橙各部位锰含量和锰积累量

植株部位	锰含量 (mg/kg)		锰积累量 (μg/株)	
	适硼	高硼	适硼	高硼
上部叶	106.1 ± 11.4a	60.4 ± 4.6b	191.9 ± 18.0a	113.0 ± 10.2b
下部叶	52.4 ± 2.3a	41.6 ± 4.8b	106.5 ± 10.7a	91.4 ± 7.5a
上部接穗茎	43.0 ± 5.1a	29.3 ± 1.9b	32.2 ± 1.7a	20.9 ± 0.6b
下部接穗茎	23.6 ± 2.1a	18.5 ± 2.5b	45.1 ± 4.5a	33.7 ± 1.2b
砧木茎	15.2 ± 2.4a	11.7 ± 0.5b	35.5 ± 4.5a	26.6 ± 3.4b
根	178.8 ± 32.0a	140.5 ± 8.7b	207.6 ± 201.0a	791.0 ± 132.2b

#### 2.2.3 高硼胁迫对纽荷尔脐橙幼苗铁吸收的影响

由表 4 可知高硼胁迫与适硼相比, 根中 Fe 含量和积累量分别降低了 17.66%、31.17%, 但在茎和叶中 Fe 含量和积累量均无显著变化。

表 4 适硼和高硼条件下纽荷尔脐橙各部位铁含量和铁积累量

植株部位	铁含量 (mg/kg)		铁积累量 (μg/株)	
	适硼	高硼	适硼	高硼
上部叶	178.5 ± 2.8a	171.4 ± 7.8a	324.7 ± 23.0a	319.8 ± 13.9a
下部叶	179.0 ± 8.9a	172.9 ± 4.5a	365.9 ± 57.8a	378.8 ± 17.4a
上部接穗茎	45.9 ± 3.8a	45.0 ± 2.1a	35.0 ± 5.6a	31.0 ± 2.5a
下部接穗茎	43.0 ± 4.3a	48.6 ± 5.2a	81.5 ± 7.1a	96.8 ± 14.0a
砧木茎	52.6 ± 1.9a	65.7 ± 8.9a	117.4 ± 12.4a	141.6 ± 27.3a
根	1 240.0 ± 86.0a	1 020.9 ± 55.8b	8 810.7 ± 1 182.1a	6 064.5 ± 820.9b

2.2.4 高硼胁迫对纽荷尔脐橙幼苗铜吸收的影响

由表 5 可知, 以适硼为对照, 高硼处理使下部叶 Cu 含量和积累量显著下降, 分别降低了 24.44%、16.35%, 但是其他部位 Cu 含量和积累量没有明显差异, 并且整株 Cu 积累量有下降趋势。

表 5 适硼和高硼条件下纽荷尔脐橙各部位铜含量和铜积累量

植株部位	铜含量 (mg/kg)		铜积累量 (μg/株)	
	适硼	高硼	适硼	高硼
上部叶	50.3 ± 4.1a	49.7 ± 2.3a	91.2 ± 7.9a	92.8 ± 5.1a
下部叶	126.8 ± 7.2a	95.8 ± 8.0b	256.8 ± 24.5a	214.8 ± 12.3b
上部接穗茎	28.0 ± 2.1a	24.7 ± 1.6a	19.7 ± 3.9a	15.8 ± 2.4a
下部接穗茎	19.0 ± 1.1a	22.0 ± 1.4a	40.5 ± 4.8a	43.5 ± 4.6a
砧木茎	34.2 ± 2.8a	31.5 ± 3.4a	67.6 ± 8.0a	60.6 ± 14.9a
根	9.0 ± 1.3a	9.9 ± 0.6a	64.8 ± 2.6a	58.5 ± 8.3a

2.2.5 高硼胁迫对纽荷尔脐橙幼苗锌吸收的影响

表 6 显示, 以适量硼为对照, 高硼胁迫下 Zn 含量在上部接穗茎和砧木茎中显著下降, 但其他部位没有显著差异。并且高硼胁迫使上部接穗茎 Zn 积累量显著下降了 13.17%, 其他各部位没有显著差异。

表 6 适硼和高硼条件下纽荷尔脐橙各部位锌含量和锌积累量

植株部位	锌含量 (mg/kg)		锌积累量 (μg/株)	
	适硼	高硼	适硼	高硼
上部叶	20.1 ± 0.7a	19.6 ± 2.8a	35.6 ± 1.2a	36.0 ± 4.0a
下部叶	20.5 ± 1.4a	20.8 ± 2.3a	42.3 ± 6.9a	45.4 ± 4.6a
上部接穗茎	25.4 ± 0.6a	22.0 ± 0.8b	18.4 ± 1.1a	16.0 ± 0.8b
下部接穗茎	24.5 ± 1.6a	22.7 ± 1.8a	44.5 ± 4.6a	45.2 ± 4.4a
砧木茎	12.0 ± 0.5a	10.8 ± 0.6b	26.8 ± 3.7a	24.0 ± 3.3a
根	35.5 ± 3.0a	37.3 ± 0.1a	252.7 ± 36.8a	220.4 ± 34.4a

2.2.6 高硼胁迫对纽荷尔脐橙幼苗钼吸收的影响

如表 7 所示, 与适量硼相比, 高硼胁迫使根部、砧木茎 Mo 含量增加了 22.86%、48.48%, 下部接穗茎、下部叶降低了 18.13%、20.12%, 并且高硼胁迫使上部叶的 Mo 积累量增加了 19.51%, 其他部位 Mo 积累量没有明显变化。

表 7 适硼和高硼条件下纽荷尔脐橙各部位钼含量和钼积累量

植株部位	钼含量 (mg/kg)		钼积累量 (μg/株)	
	适硼	高硼	适硼	高硼
上部叶	0.21 ± 0.03a	0.26 ± 0.02a	0.41 ± 0.02b	0.49 ± 0.02a
下部叶	0.17 ± 0.02a	0.13 ± 0.01b	0.35 ± 0.08a	0.29 ± 0.01a
上部接穗茎	0.37 ± 0.04a	0.37 ± 0.01a	0.28 ± 0.03a	0.27 ± 0.02a
下部接穗茎	0.44 ± 0.01a	0.36 ± 0.05b	0.80 ± 0.08a	0.71 ± 0.05a
砧木茎	0.19 ± 0.02b	0.29 ± 0.02a	0.44 ± 0.09a	0.65 ± 0.12a
根	2.11 ± 0.10b	2.60 ± 0.25a	14.95 ± 1.42a	15.24 ± 2.15a

2.3 高硼胁迫对纽荷尔脐橙幼苗微量元素分配的影响

由图 1 可知, 纽荷尔脐橙中的 B 和 Cu 元素主要分配在叶片中, 而 Mn、Fe、Zn、Mo 元素大多积累在根部。与适硼相比, 高硼胁迫下叶片 B 分配率显著升高, 根和茎中 B 分配率显著降低; 根中 Fe、Zn 元素分配率有下降趋势, 其他部位 Fe 元素分配率有上升趋势, Zn 元素在上部叶中分配率也有上升趋势, 但均未达到显著差异。高硼条件下纽荷尔脐橙幼苗各部位中的 Mn、Cu、Mo 元素分配率均无明显变化。

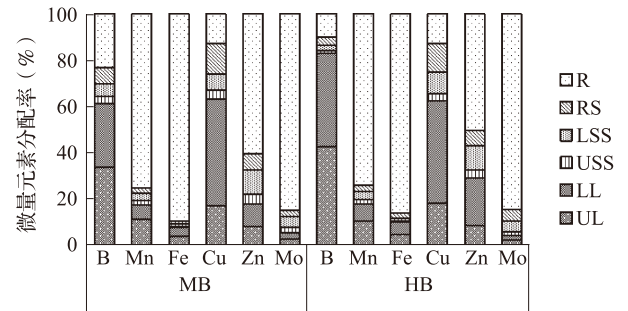


图 1 适硼和高硼条件下纽荷尔脐橙各部位微量元素分配率  
注: MB: 适硼; HB: 高硼; R: 根; RS: 砧木茎; LSS: 下部接穗茎; USS: 上部接穗茎; LL: 下部叶; UL: 上部叶。

3 讨论

在本试验中, 与适硼相比, 高硼胁迫下纽荷尔脐橙幼苗根干物重显著下降, 说明脐橙对硼毒害反应最敏感的部位是根系, 这与方益华<sup>[13]</sup>的研究结果一致。但是地上部分干物重却没有明显变化, 脐橙为木本植物, 需在长期的养分胁迫条件下, 地上部分才会表现出可见症状<sup>[14-15]</sup>, 而本试验的培养时间相对较短 (培养 50 d), 尚没有出现明显的可见症状。

本试验中叶片是脐橙各组织中 B 含量最高的部位。高硼胁迫下叶片中的 B 含量和积累量大幅度增加, 其中叶片 B 含量增加了 2 ~ 3 倍, 根和茎也增

加了 20% 左右, 这和卢晓佩<sup>[16]</sup>的研究结果相似, 并且叶片中 B 分配率也由 61.21% 变为 82.76%, 同时由于根干重占整个植株的比例最大, 所以根的分配率大于茎, 这与 Sheng 等<sup>[17]</sup>在纽荷尔脐橙和朋娜脐橙上的研究结论一致。

本试验结果表明, 纽荷尔脐橙幼苗中的 Mn、Fe、Zn、Mo 元素主要在根部大量积累, 唐铎腾等<sup>[18]</sup>在雌雄青杨以及季海宝<sup>[19]</sup>在雷竹上也发现了类似规律, 说明这种现象存在于不同种类植物中。高硼胁迫下脐橙各部位 Mn 含量和积累量显著降低, 说明硼毒害严重影响了纽荷尔脐橙幼苗对 Mn 的吸收与转运。此结果与报道的棉花研究结果一致, 即随着硼浓度的升高, 棉花各部位 Mn 含量均显著下降<sup>[20]</sup>。脐橙中 Fe 元素主要分配在根部, 与 Mn 相似, 高硼胁迫使脐橙根部 Fe 含量、积累量以及分配率显著降低。郭金耀等<sup>[21]</sup>研究发现, 适量的硼和铜可以促进盐藻细胞的生长, 过高或过低的硼浓度都会抑制细胞的生长。本试验结果表明高硼胁迫显著降低了下部叶 Cu 含量和积累量, 但无论适硼还是高硼条件下, 下部叶中的 Cu 含量都属于较高水平, 可能是苗圃育苗期间长期大量使用波尔多液等含铜农药使得铜在下部叶中过多积累<sup>[22]</sup>。本试验高硼胁迫使脐橙上部接穗茎 Zn 含量和积累量显著下降, 且根中的 Zn 分配率也显著降低, 这与 Hosseini 等<sup>[23]</sup>发现玉米中高 B 与 Zn 相互拮抗的结论一致。目前多数研究表明, 硼和钼在植物体内呈现相互促进的作用<sup>[24]</sup>, 本试验结论与之一致, 高硼胁迫增加了脐橙根部和砧木茎 Mo 含量, 且上部叶 Mo 的积累量显著增加。

#### 4 结论

高硼条件下纽荷尔脐橙幼苗根部的干物重下降, 地上部干物重没有显著变化。脐橙各部位 B 含量和积累量均显著增加, B 在叶片中的分配率也显著提高。

高硼胁迫对纽荷尔脐橙幼苗不同部位微量元素的影响具有显著差异。Mn、Fe、Zn、Mo 主要在脐橙根部富集, 高硼胁迫使各部位中的 Mn 含量显著下降, 根部 Fe 含量和积累量也显著降低, 但各部位中 Mn、Cu、Mo 的分配率无明显变化; 高硼胁迫显著降低了下部叶 Cu 含量, 也使上部接穗茎 Zn 含量和积累量显著下降, 并且根部和砧木茎 Mo 含量显著增加。

#### 参考文献:

- [1] Warington K. The effect of boric acid and borax on the broad bean and certain other plants [J]. *Annals of Botany*, 1923, 37: 629-672.
- [2] Riaz M, Yan L, Wu X W, et al. Boron supply maintains efficient antioxidant system, cell wall components and reduces aluminum concentration in roots of trifoliate orange [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2019, 137: 93-101.
- [3] Voxeur A, Fry S C. Glycosylinositol phosphorylceramides from *Rosa* cell cultures are boron-bridged in the plasma membrane and form complexes with rhamnogalacturonan II [J]. *The Plant Journal*, 2014, 79 (1): 139-149.
- [4] Camacho C, Gonzalez F. Boron deficiency causes a drastic decrease in nitrate content and nitrate reductase activity, and increases the content of carbohydrates in leaves from tobacco plants [J]. *Planta*, 1999, 209 (4): 528-536.
- [5] Eggert K, von Wiréi N. Response of the plant hormone network to boron deficiency [J]. *New Phytologist*, 2017, 216 (3): 868-881.
- [6] 姜存仓, 王运华, 刘桂东, 等. 赣南脐橙叶片黄化及施硼效应研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15 (3): 656-661.
- [7] Swietlik D. Interaction between zinc deficiency and boron toxicity on growth and mineral nutrition of sour orange seedlings [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1995, 18 (6): 1191-1207.
- [8] Maria P P, Antonio L, Caterina L, et al. Long- and short-term effects of boron excess to root form and function in two tomato genotypes [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2016, 109: 9-19.
- [9] Huang J H, Cai Z J, Wen S X, et al. Effects of boron toxicity on root and leaf anatomy in two *Citrus* species differing in boron tolerance [J]. *Trees*, 2014, 28 (6): 1653-1666.
- [10] Landi M, Remorini D, Pardossi A, et al. Boron excess affects photosynthesis and antioxidant apparatus of greenhouse *Cucurbita pepo* and *Cucumis sativus* [J]. *Journal of Plant Research*, 2013, 126 (6): 775-786.
- [11] Murat A, Askim H S, Ismail T, et al. The effects of boron toxicity on root antioxidant systems of two chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars [J]. *Plant and Soil*, 2009, 314: 99-108.
- [12] Hoagland D R, Arnon D I. The water-culture method for growing plants without soil [J]. *California Agriculture Experimental Station*, 1950, 347: 357-359.
- [13] 方益华. 高硼胁迫对油菜光合作用的影响研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2001, 7 (1): 109-112.
- [14] 王南南, 彭抒昂, 刘永忠. 柑橘硼营养研究现状与展望 [J]. *华中农业大学学报*, 2015, 34 (4): 137-143.
- [15] 桑雯. 硼毒下柑橘根叶蛋白质组学研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2013.
- [16] 卢晓佩. 不同硼敏感型柑橘砧木对硼胁迫的响应差异及机理

- [D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
- [17] Sheng O, Song S W, Chen Y J, et al. Effects of exogenous B supply on growth, B accumulation and distribution of two navel orange cultivars [J]. *Trees*, 2009, 23 (1): 59-68.
- [18] 唐铎腾, 周荣, 张胜. 雌雄青杨幼苗对磷缺乏差异响应的离子组学研究 [J]. *山地学报*, 2017, 35 (5): 669-676.
- [19] 季海宝. 集约经营雷竹林植株离子组变化研究 [D]. 杭州: 浙江农林大学, 2011.
- [20] Ahmed N, Abid M, Ahmad F, et al. Impact of boron fertilization on dry matter production and mineral constitution of irrigated cotton [J]. *Pakistan Journal of Botany*, 2011, 43(6): 2903-2910.
- [21] 郭金耀, 杨晓玲. 硼铜组合对盐藻生长与物质积累的影响 [J]. *安徽农业科学*, 2010, 38 (3): 1212-1214.
- [22] 郑重禄. 过量铜胁迫对柑橘影响的研究进展 (1) [J]. *浙江柑橘*, 2018, 35 (3): 2-7.
- [23] Hosseini S M, Maftoun M N, Karimian N, et al. Effect of zinc × boron interaction on plant growth and tissue nutrient concentration of corn [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2007, 30 (5): 773-781.
- [24] 刘鹏. 硼胁迫对植物的影响及硼与其它元素关系的研究进展 [J]. *农业环境科学学报*, 2002, 21 (4): 372-374.

### Effects of high boron stress on the absorption and distribution of trace elements in Newhall navel orange plants

HU Ping, CHEN Yu-hua, ZHOU Gao-feng, YAO Feng-xian, GUAN Guan, ZHONG Ba-lian, LIU Gui-dong\* (College of Life Sciences, Gannan Normal University, National Navel Orange Engineering Research Center, Ganzhou Jiangxi 341000)

**Abstract:** The effects of high boron stress on the absorption and distribution of trace elements (B, Mn, Fe, Cu, Zn, Mo) in young plants of Newhall navel orange were revealed, in order to provide a theoretical basis for the nutritional physiology of boron fertilizer and the scientific application of trace elements in production. In this experiment, young plants of Newhall navel orange were used as test materials, and the young plants were treated with high boron treatment (B: 200  $\mu\text{mol/L}$ ) and moderate boron treatment (B: 20  $\mu\text{mol/L}$ , control) by nutrient solution culture method. The young plants of Newhall navel orange were divided into roots, stem of rootstocks, upper stem of scions, lower stem of scion, upper leaves and lower leaves. The concentrations of trace elements were determined, and the accumulation and distribution of elements in each part were calculated. Under the high boron stress, the dry weight of roots of young plants of Newhall navel orange decreased significantly, and the dry weight of other parts did not change significantly, and the concentration and accumulation of B in all parts increased significantly, and the distribution rate of B in leaves increased significantly. Mn, Fe, Zn and Mo were mainly enriched in the roots. The high boron stress reduced the Mn concentration in each part significantly, and the Fe concentration and accumulation in the roots were also decreased significantly, but the distribution rate of Mn, Cu and Mo in each part were not obviously changed. The change of high boron stress significantly reduced the concentration of Cu in the lower leaves, and also decreased the concentration and accumulation of Zn in the upper stems, and the Mo concentration in roots and rootstocks increased significantly.

**Key words:** high boron stress; Newhall navel orange; trace elements; absorption; distribution

[上接第 145 页]

two types of N fertilizer. The growth of oilseed rape was obviously improved by the application of N fertilizer. The most significant difference was branch number at maturity stage between the full dose U and CRU. The growth indicators showed different ranges of decline with the reducing of N fertilizer, and reached a significant level when N fertilizer reduced at 50%. Rapeseed yield of CRU with the full dose of N fertilizer reached 2 513  $\text{kg}/\text{hm}^2$ . The relative yield gap between U and CRU was 6.9%, and showed an increase trend with the reducing of N fertilizer. The changes of pod number were the main cause of yield difference, since both of the seed number and seed weigh remain at a relatively stable level. The N uptake was decreased by the reducing of N fertilizer, and the CK treatment had the lowest value (38.2  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ). CRU showed a greater N absorption capacity than U at the same N fertilizer supply, which resulted in the N recovery efficiency having a slight difference among the different N fertilizer rate (ranged from 58.2% to 66.0%). On the basis of the present recommended N application rate (180  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ), reducing conventional urea may cause nutrient uptake shortage and yield loss, but reducing controlled-release urea within 30% could maintain relatively stable yield level in the low or medium level of soil nitrogen supply.

**Key words:** oilseed rape; controlled-release urea; yield; N use efficiency; reducing N application