

多元醇络合硼对油菜苗期生长及生理特性的影响

闫磊 姜存仓 董肖昌 吴秀文 Muhammad Riaz 卢晓佩

华中农业大学资源与环境学院/微量元素研究中心, 武汉 430070

摘要 以油菜品种 Cao221167 为试验材料, 采用水培方法, 研究山梨醇(S)、山梨醇-硼(SB)、甘露醇(M)、甘露醇-硼(MB)、丙三醇(G)、丙三醇-硼(GB)、硼酸(BA)、缺硼(B0)等不同硼处理对油菜农艺性状、根系活力、色素含量以及各部位硼的吸收分布的影响。结果表明: 仅添加有机多元醇处理(S、M 和 G)的油菜幼苗各项形态和生理特性(株高、地上部干鲜质量、色素含量和根系活力)与缺硼处理无差异, 而有机多元醇和硼酸络合后各指标均提高, 说明有机多元醇与硼酸形成的有机多元醇络合硼对油菜幼苗生长起促进作用。有机多元醇络合硼处理(SB、MB 和 GB)和硼酸处理比较表明, 有机多元醇络合硼和硼酸均能促进植株生长, 但有机多元醇络合硼对油菜幼苗生长以及生理特性的营养作用更显著; 其中, 甘露醇-硼处理促进油菜幼苗干鲜质量的提高, 总干鲜质量较硼酸处理分别增加 40.56% 和 17.29%; 不同有机多元醇络合硼处理和硼酸处理的油菜各部位钾、钙、镁等元素含量均高于缺硼处理; 丙三醇-硼处理比硼酸处理显著提高油菜叶片色素含量、根系活力以及地上部硼含量。

关键词 油菜; 硼肥; 硼酸; 多元醇络合硼; 生理特性

中图分类号 S 565.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2017)02-0038-07

硼是高等植物生长所必需的元素, 在植物生殖生长、维持细胞壁结构和细胞膜透性等方面具有重要作用^[1-2]。硼还是开花结实所必需的微量元素^[3]。缺硼会引起植物正常生理代谢等方面的变化^[4], 影响作物产量、品质和代谢过程^[5-6]。除此之外, 硼与植物体内的多种矿质元素之间也有着密切的联系^[4]。虽然硼在自然界中广泛存在, 但大多数硼在土壤中都被固定, 能够被植物直接吸收的有效硼只占很小的一部分^[7]。另外, 硼在植物体内难以移动。因此, 植物缺硼现象在世界范围内广泛存在。研究^[8]发现, 硼在植物体内以多种形态存在。高等植物体内硼的移动性与植物的光合作用初产物的种类有密切的关系, 当植物的光合产物为顺式二元醇(如山梨醇)时, 硼在植物体内的移动性会大大提高^[9-10]。Brown 等^[11]在测定芹菜韧皮部汁液中硼复合物的含量时, 发现硼与甘露醇、山梨醇和果糖形成了稳定的复合物。有研究^[12]认为硼酸属于典型的路易斯酸, 溶于水后电离出的 $B(OH)_4^-$ 能够与某些多羟基化合物(山梨醇、甘露醇、丙三醇等)发生酯化反应生成稳定的配合物从而使移动性提高。研

究^[9,13]表明, 硼被动吸收效率主要由培养介质中硼的浓度及植物体内硼与甘露醇、山梨醇或果糖等形成的稳定复合物类型决定, 并已证明硼可通过韧皮部转移。Hu 等^[14]分别在桃花外蜜腺及芹菜韧皮部汁液中分离鉴定山梨醇-硼-山梨醇及甘露醇-硼-甘露醇复合物。而山梨醇是蔷薇科植物主要的光合产物、运输物质及储藏物质, 它广泛存在于苹果、梨、樱桃、杏等蔷薇科植物中, 其他科植物体内不含山梨醇或含量很少^[15]。由于蔷薇科植物中含有大量山梨醇, 硼可以与之结合形成稳定硼-糖醇复合物, 有效提高硼转运与再分配能力^[16]。

施用硼肥具有明显的增产效果, 涉及到的作物多达 132 种^[17]。传统的硼肥多为无机态, 虽然能够被植物吸收, 但在植物体内的移动性很小, 难以满足植物顶端生长旺盛的组织对硼的需求。探索寻找对植物吸收利用硼更加有效的新型硼肥, 对于提高作物产量, 改善植物硼营养具有重要意义。因此, 新型硼肥的施用已成为当前提高作物产量与品质的有效农业措施, 特别是有机络合硼。但如今有些学者质疑是有机多元醇或是络合不完全的有机多元醇对植

收稿日期: 2016-07-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271320); 中央高校基本科研业务费专项(2013PY093)

闫磊, 硕士研究生, 研究方向: 植物营养与施肥研究. E-mail: 421655346@qq.com

通信作者: 姜存仓, 博士, 教授, 研究方向: 植物营养机制与施肥. E-mail: jcc2000@mail.hzau.edu.cn

株生长起的促进作用而非络合完全的有机硼。本研究采用水培方法,探索不同形态硼肥对油菜苗期生长及生理特性的影响,以期进一步阐明硼在植株上的利用机制,并为新型硼肥的研制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验在华中农业大学光照室进行,油菜(*Brassica campestris*)品种为Cao221167。营养液为Hoagland配方:0.51 g/L KNO_3 、0.14 g/L K_2HPO_4 、1.18 g/L $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、0.49 g/L $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、0.05 g/L Fe-EDTA。微量元素采用Arnon(1950)配方:1.78 mg/L $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、0.074 9 mg/L $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、0.23 mg/L $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、0.242 mg/L $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 。

油菜种子经1%次氯酸钠消毒30 min后用去离子水冲洗多次,并用去离子水浸种24 h后于25℃下催芽2 d,然后挑选大小一致的种子置于纱网上水培,1周后移苗,种植在220 mL黑色塑料遮光杯中。设置不施硼(B0)、硼酸(25 $\mu\text{mol/L}$,简写BA)、山梨醇(25 $\mu\text{mol/L}$,简写S)、山梨醇-硼(为25 $\mu\text{mol/L}$,山梨醇与硼酸物质的量1:1络合反应^[18-19],简写SB)、甘露醇(为25 $\mu\text{mol/L}$,简写M)、甘露醇-硼(为25 $\mu\text{mol/L}$,甘露醇与硼酸物质的量1:1络合反应^[18-19],简写MB)、丙三醇(为50 $\mu\text{mol/L}$,简写G)、丙三醇-硼(为25 $\mu\text{mol/L}$,丙三醇与硼酸物质的量以2:1络合反应^[18],简写GB),共8个处理,各处理重复4次。试剂为分析纯,使用一级水(硼含量 $<0.5 \mu\text{mol/L}$)。营养液每5 d更换

1次,第1次使用1/4当量,第2次使用1/2当量,以后均用全量营养液。控制室温18~25℃。处理20 d后出现明显缺硼症状时收获。

1.2 测定方法

将幼苗从营养液中取出,将植株分为根系、地上部2部分,样品用双蒸水反复冲洗,确保无硼离子引入。在105℃的烘箱中青杀30 min,然后在75℃下烘干至恒质量,称质量后粉碎过筛。

利用Epson PERFECTION V700型号根系分析仪对根系形态进行扫描。样品收获后,将粉碎样品灰化后使用0.1 mol/L的HCl溶液浸提,取滤液用姜黄素比色法测硼,原子吸收光度计法测钙、镁,火焰光度计法测钾。TTC法测根系活力。分光光度法测叶片色素含量。参数计算,根冠比=根生物量/地上部生物量。

1.3 数据处理

数据处理采用Excel软件,Origin 8.6 (USA, Origin Lab Corp.)作图,应用统计分析软件SAS 9.1.3对各处理试验数据进行均值、标准差、差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同硼处理对油菜幼苗生长及农艺性状的影响

从图1看出,仅添加有机多元醇处理(M、S和G)与缺硼处理(B0)均严重影响植株生长发育,油菜幼苗生长缓慢,根系膨大加粗,叶片发黄,叶缘干枯。无机硼处理(BA)和有机络合硼处理(SB、MB和GB)均促进了油菜的生长。

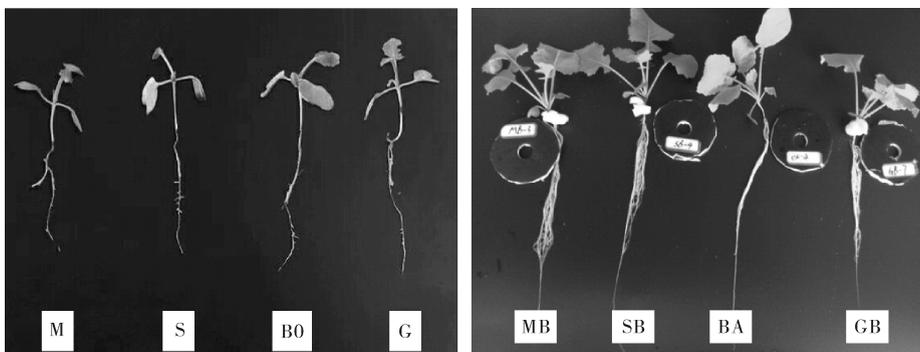


图1 不同硼处理对油菜幼苗长势的影响

Fig.1 Effects of different boron treatments on the growth of rape seedlings

由表1可知,不同加硼处理的油菜植株长势均优于缺硼处理。缺硼处理与单纯有机多元醇处理相

比并无明显差异,说明单纯的有机多元醇处理(S、M和G)并不能促进植株生长。对于不同形态硼处理,

有机多元醇络合硼处理株高显著高于无机硼酸处理条件下植株长势最好,说明有机多元醇络合硼处理,SB、MB 和 GB 处理下油菜幼苗株高分别比 BA 处理比无机硼酸处理更有利于促进植株地上部的处理提高 31.85%、26.83% 和 26.06%,其中 SB 处生长。

表 1 不同硼处理对油菜幼苗株高以及根系参数的影响

Table 1 Effects of different boron treatments on plant height and root scanning dates in different rape seedlings

处理 Treatment	株高/cm Plant height	总根长/cm Length	根表面积/cm ² Surface area	根系平均直径/mm Average diameter	根体积/cm ³ Root volume
B0	4.10d	35.18b	17.23b	0.64c	0.28ba
S	3.98d	28.55b	17.06b	0.66bc	0.27ba
M	5.41dc	38.21b	20.48b	0.76a	0.30a
G	4.26dc	36.42b	17.75b	0.71ba	0.30a
BA	12.95b	421.66a	33.20a	0.24d	0.19c
SB	17.08a	479.24a	38.17a	0.24d	0.22c
MB	16.43a	477.72a	39.23a	0.24d	0.24bc
GB	16.33a	405.53a	34.39a	0.24d	0.21c

此外,加硼处理下油菜幼苗总根长、根表面积都显著高于缺硼处理。缺硼处理与有机多元醇处理相比,总根长、根表面积、根系平均直径、根体积等指标差异不明显,说明有机多元醇处理不能促进植株地下部的生长。另外,缺硼处理根系直径和根系总体积明显高于加硼处理,可能是缺硼处理下油菜幼苗根系根基部膨大、开裂,且根系的伸长和发育受阻,侧根较少,只有较粗的直根系,所以根系直径及其总体积明显大于加硼处理。相对 BA 处理,除 GB 处理总根长未有增加外,SB 和 MB 2 种处理总根长、根表面积均较 BA 处理均有增加趋势,且根系总体积明显高于无机硼酸处理,说明 SB 和 MB 2 种处理比无机硼酸更有利于油菜根系发育。

加硼处理各部位干鲜质量、根冠比与缺硼处理均存在显著性差异(表 2)。有机多元醇处理与缺硼处理的油菜幼苗长势以及各部位干鲜质量、根冠比并无明显差异。有机多元醇络合硼处理以及无机硼

酸处理的油菜幼苗各部位干、鲜质量均比缺硼处理显著增加。不同硼肥对油菜幼苗根系生长发育影响不同,与无机硼酸处理相比,有机多元醇络合硼处理(SB、MB 和 GB)根系干鲜质量增加且达到显著性差异,其中 MB 处理植株根系干鲜质量差异最明显,分别较 BA 处理增加了 21.57% 和 40.74%。不同形态硼处理对油菜幼苗地上部生长也存在不同的影响,有机多元醇络合硼处理地上部干鲜质量较无机硼酸处理有所提高,其中 MB 处理地上部干鲜质量增加最多,分别增加 16.74% 和 40.00%。植株总干鲜质量加硼处理明显高于缺硼处理,且有机多元醇络合硼处理整株干鲜质量比无机硼酸处理均有所提高。并且,有机多元醇络合硼处理(SB、MB 和 GB)的根冠比显著高于无机 BA 处理。因此,有机多元醇络合硼能更好地促进油菜幼苗植株的生长,其中促进根系生长的程度要远远大于地上部生长程度。

表 2 不同硼处理对油菜幼苗各种生长指标的影响

Table 2 Effects of different boron treatments fresh weight and dry weight and root/shoot in different rape seedlings

处理 Treatment	根/g Root		地上部/g Stem		总质量/g TW		根冠比 R/S
	鲜质量 FW	干质量 DW	鲜质量 FW	干质量 DW	总鲜质量 TFW	总干质量 TDW	
B0	0.02c	0.003d	0.35c	0.03c	0.37c	0.035c	0.067c
S	0.02c	0.002d	0.23c	0.03c	0.25c	0.036c	0.059c
M	0.03c	0.003d	0.38c	0.04c	0.41c	0.047c	0.061c
G	0.02c	0.002d	0.23c	0.03c	0.25c	0.036c	0.073bc
BA	0.51b	0.027c	4.06b	0.30b	4.57b	0.323b	0.091b
SB	0.60a	0.036ab	4.51ab	0.31b	5.16ab	0.350b	0.116a
MB	0.62a	0.038a	4.74b	0.42a	5.36a	0.454a	0.095ba
GB	0.61a	0.030bc	4.68b	0.33b	5.28a	0.356b	0.093ba

注 Note:FW; Fresh weight; DW; Dry weight; TW; Total weight; TFW; Total fresh weight; TDW; Total dry weight; R/S; Root/shoot.

2.2 不同硼处理对油菜幼苗各部位硼含量的影响

各处理之间油菜幼苗各部位硼含量存在显著差异(图 2),缺硼植株硼含量显著低于加硼植株,但仅添加有机多元醇的 S、G 和 M 处理与 B0 相比地上部硼含量没有显著差异。然而,有机多元醇络合硼处理(BA、SB 和 GB)地上部硼含量比无机 BA 处理

显著增加,说明有机多元醇络合硼能更好地促进油菜地上部对硼的吸收,其中 GB 处理的幼苗地上部硼含量最高。不同形态硼处理之间,有机多元醇络合硼处理植株地下部硼含量也高于无机硼酸处理,但未达到显著差异。其中,SB 和 MB 处理的根系硼含量增加比较明显。

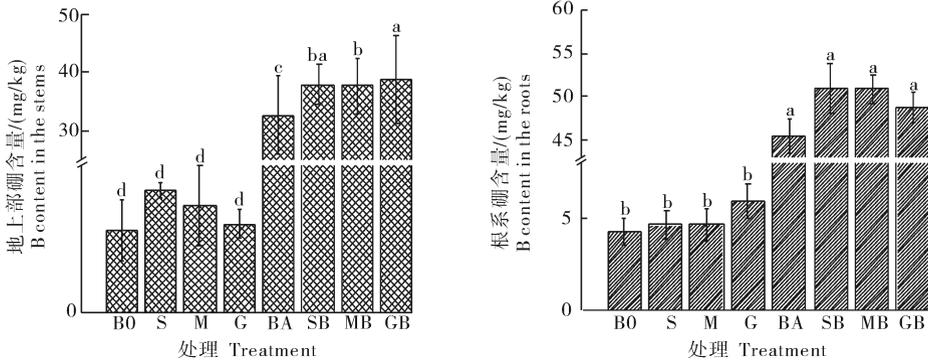


图 2 不同硼处理对油菜幼苗各部位硼含量的影响

Fig.2 Effects of different boron treatments on B content in different rape seedlings

2.3 不同硼处理对油菜幼苗各部位钾、钙、镁含量的影响

由表 3 看出,加硼处理油菜幼苗各部位 K、Ca 和 Mg 含量分别高于缺硼植株,且达到显著性差异;不同类型有机多元醇处理下各部位 K、Ca 和 Mg 含量与缺硼处理相比并无明显差异。不同类型硼肥对油菜幼苗地上部 K 含量影响不大,但是 SB 处理下油菜幼苗根系 K 含量显著高于 BA 处理,比 BA 处理增加了 20.50%。根系中 Ca 含量有机多元醇络合硼处理 SB、MB 和 GB 下分别比无机 BA 处理增

加了 28.18%、43.01% 和 27.57%,说明有机多元醇络合硼比无机硼酸能更好地促进植株根系钙含量的吸收,且 MB 处理下对根系钙含量的提高作用最大;对地上部钙含量分析来看,各种处理下 Ca 含量较 B0 处理均有不同程度的提高,但是不同处理之间并无显著差异。另外,缺硼处理对植株根系和地上部 Mg 含量影响差异不明显,但是加硼处理之后 Mg 在地下部增加量远远高于根系增加量,是根系增加量的近 2 倍。并且,加硼处理后油菜幼苗中地上部钙镁含量显著高于根系,而钾含量正好相反。

表 3 不同硼处理对油菜幼苗各部位钾、钙、镁含量的影响

Table 3 Effects of the different boron treatments on K, Ca and Mg content in different rape seedlings

处理 Treatment	K		Ca		Mg	
	根 Root	地上部 Stem	根 Root	地上部 Stem	根 Root	地上部 Stem
B0	1.40d	0.86b	0.76b	1.86c	0.18b	0.19b
S	1.66d	0.86b	0.78b	1.97bc	0.19b	0.25b
M	1.50d	0.91b	0.76b	2.09ba	0.16b	0.24b
G	1.23d	0.88b	0.72b	2.19a	0.14b	0.27b
BA	2.91b	1.41a	0.89a	1.97bc	0.22a	0.40a
SB	3.50a	1.45a	1.14a	2.08ba	0.22a	0.42a
MB	2.22c	1.38a	1.28a	2.01bac	0.22a	0.41a
GB	2.62cb	1.66a	1.14a	1.98bac	0.23a	0.41a

2.4 不同络合物对油菜幼苗色素含量的影响

图 3 比较了不同有机多元醇络合硼和无机硼酸对油菜幼苗色素含量的影响。由图 3 可以看出,有机多元醇络合硼处理色素总含量明显高于无机硼酸处理,SB、MB 和 GB 处理色素总含量分别比 BA 处

理增加了 9.32%、13.76% 和 27.17%。有机多元醇络合硼有利于提高油菜幼苗中色素含量,且 GB 处理不仅对色素总含量提升优势较明显,其叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量均最高,分别比 BA 处理提高了 25.60%、32.17% 和 27.18%,且对叶绿素

b 增加优势更明显。另外,所有处理下的油菜幼苗植株色素中叶绿素 a 含量所占比例最大,类胡萝卜素次之,叶绿素 b 含量所占比例最小。

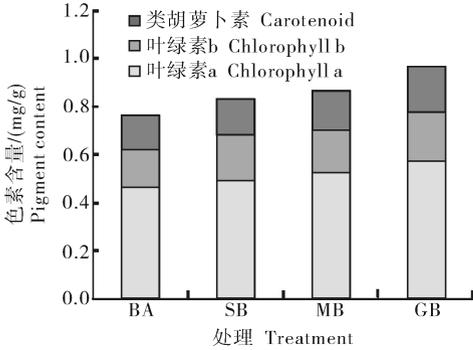


图 3 不同硼络合物对油菜幼苗色素含量的影响

Fig.3 Effects of different boron complexes treatments on pigment content in different rape seedlings

2.5 不同硼络合物对油菜幼苗根系活力的影响

由图 4 可知,除 SB 处理外,MB、GB 处理根系活力均显著高于 BA 处理,其中 MB、GB 处理根系活力较 BA 处理分别增加 50.62%、65.64%。因此,有机多元醇络合硼比无机硼酸能增加油菜根系活力,促进根系的生长发育。

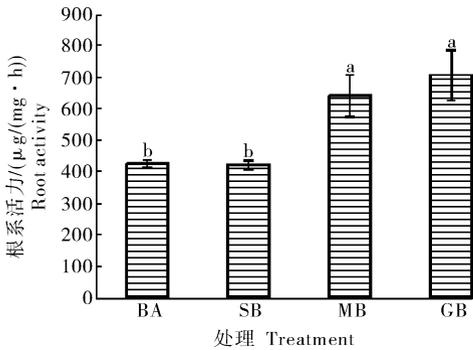


图 4 不同硼络合物对油菜幼苗根系活力的影响

Fig.4 Effects of different boron complexes treatments on root activity in different rape seedlings

3 讨论

3.1 不同有机多元醇络合硼对油菜生长的影响

油菜缺硼新叶生长缓慢,叶皱缩,新老叶呈暗绿色,根系发育不良,根茎膨大,主侧根均变短变粗^[20],甚至会导致病株死亡。本试验中油菜幼苗生长至第 7 天时根系便出现明显差异,而地上部第 10 天出现差异,15 d 左右缺硼处理和仅添加有机多元醇的油菜幼苗根系发育不良、根茎膨大。叶片开始出现皱缩,往下翻卷,呈暗绿色。第 20 天时根系伸

长和发育受阻,根基部膨大、开裂,侧根较少。叶片呈紫红色,有斑点出现,接近枯萎死亡。段蔚^[18]运用多元醇络合硼对油菜幼苗生长及营养元素吸收试验研究表明,有机多元醇络合硼能促使硼从植物的成熟组织向幼嫩组织转移,且有机多元醇络合硼相比无机硼酸能够促进油菜幼苗的生长发育。冯素明等^[21]在水稻研究中证明有机硼肥可增加水稻产量,并且提高叶片中叶绿素含量^[22]以及根系活力。本试验表明,油菜苗期只添加有机多元醇与缺硼处理相比各指标无差异,而加硼处理叶片色素含量以及根系活力显著高于缺硼处理,并且有机多元醇络合硼各指标与无机硼酸处理相比优势明显。说明只添加有机多元醇对植株生长并无促进作用,无机硼酸和有机多元醇络合成的有机硼肥对植株长势明显好于无机硼酸处理。刘磊超等^[23]在研究柑橘砧木中也有相似结果。

3.2 不同类型硼肥对油菜苗期生理特性的影响

徐建明等^[24]研究表明,山梨醇硼肥较无机硼酸更能提高小麦幼苗根及叶片中硼浓度。本试验结果显示,加硼处理下油菜幼苗各部位硼含量显著高于缺硼处理,且有机多元醇络合硼较无机硼酸增加效果明显。原因可能是有机多元醇络合硼较无机硼酸更有利于作物幼苗的吸收利用,在体内移动性更强,显著提高油菜幼苗根及叶片中硼浓度。另外,油菜幼苗在加硼处理下根系硼含量高于地上部,结果与段蔚^[18]研究结果一致,说明有机多元醇络合硼对根系影响作用明显高于地上部,更多的硼被油菜幼苗根系吸收,少量的硼通过木质部运输到地上部供植物吸收,供应植株的生长。

硼与植物体内多种元素含量关系密切。硼与钾的关系非常复杂,不同条件下两者所表现出的关系不同。吴秀文等^[25]研究表明,缺钾阻碍棉花对硼的吸收利用,缺硼不利于棉花对钾的吸收利用。刘武定等^[26]对棉花的研究发现,施硼时中量钾促进棉花对硼的吸收。段蔚^[18]对油菜的研究也发现硼钾有相互促进的关系。刘磊超^[19]在柑橘试验中证明加硼促进了枳橙各部位的钾含量。本试验中,施加不同形态硼肥相比缺硼处理植株体内钾含量显著提高,证明加硼有利于促进油菜幼苗各部位钾含量的吸收^[18],原因可能是硼能够维持细胞膜完整性从而减少了钾离子的渗漏^[27]。施硼会促进植物对钙的吸收和运输,增加植株体内的钙含量^[28]。本试验中,油菜幼苗补充硼元素显著增加植株体内各部位

钙含量,油菜根系中Ca含量在SB、MB和GB处理均比BA处理有所增加。刘磊超^[19]在枳橙砧木试验也有类似结果,原因可能是硼参与细胞壁结构的形成,植物体内90%以上的硼存在于细胞壁^[29]。不同的作物硼与镁之间关系不同。年夫照等^[30]在甘蓝型油菜上的试验表明,在低硼条件下油菜硼、镁元素均表现出拮抗作用。而刘磊超^[19]在柑橘砧木研究中发现硼、镁是相互促进作用。本试验也表明,缺硼条件下油菜幼苗植株中镁含量较低,随着硼的加入,植株体内各部位镁含量显著提高。

综上所述,本研究表明仅添加有机多元醇(S、M和G)油菜幼苗各项形态指标(株高、地上部干鲜质量、色素含量和根系活力)以及生理特性与缺硼条件下无明显差异。不同形态有机多元醇络合硼处理(SB、MB和GB)和无机硼酸处理(BA)均能促进植株的生长,且有机多元醇络合硼对油菜幼苗生长以及生理特性的影响更显著;其中,MB处理对油菜幼苗干鲜质量促进作用最明显。GB处理显著提高油菜叶片色素含量、根系活力以及地上部硼含量;有机多元醇络合硼对油菜各部位钾、钙、镁含量与无机硼酸差异不显著,但其各元素含量均高于缺硼处理。

参 考 文 献

[1] O'NEILL M A, ISHII T, ALBERSHEIM P, et al. Rhamnolacturonan: II. Structure and function of a borate cross-linked cell wall pectic polysaccharide[J]. Annual review of plant biology, 2004, 55: 109-139.

[2] 姚元涛, 宋鲁彬, 张丽霞, 等. 茶树硼素营养研究现状与展望[J]. 山东农业科学, 2009(4): 80-82.

[3] IWAI H, HOKURA A, OISHI M, et al. The gene responsible for borate cross-linking of pectin rhamnolacturonan-II is required for plant reproductive tissue development and fertilization[J]. Proceedings of the national academy of sciences USA, 2006, 103: 16592-16597.

[4] 刘磊超, 姜存仓, 刘桂东, 等. 低硼胁迫对柑橘枳橙砧木生长及营养生理的影响[J]. 华中农业大学学报, 2015, 34(3): 64-68.

[5] 龚新明, 关军锋, 张继涛, 等. 钙、硼营养对黄冠梨品质和果面褐斑病发生的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(4): 942-947.

[6] 邹娟, 鲁剑巍, 廖志文, 等. 湖北省油菜施硼效果及土壤有效硼临界值研究[J]. 中国农业科学, 2008, 41(3): 752-759.

[7] SHORROCKS V M. The occurrence and correction of boron deficiency[J]. Plant and soil, 1997, 193 (1/2): 121-148.

[8] WANGR D, LIU G D, LIU L C, et al. Relationship between leaf

chlorosis and different boron forms in trifoliolate orange seedlings under excessive boron supply[J]. Soil science and plant nutrition, 2014, 60: 325-332.

[9] BROWN P H, HU H. Phloem mobility of boron is species dependent: evidence for phloem mobility in sorbitol-rich species[J]. Annals of botany, 1996, 77(5): 497-506.

[10] LEHTO T, KALLIO E, APHALO P J. Boron mobility in two coniferous species[J]. Annals of botany, 2000, 86(3): 547-550.

[11] BROWN P H, SHELPS B J. Boron mobility in plants[J]. Plant and soil, 1997, 193: 85-101.

[12] 陈经涛. 硼酸与多羟基醇反应机理研究[J]. 中国西部科技, 2007(9): 1-2.

[13] BROWN P H, HU H. Boron uptake by sunflower, squash and cultured tobacco cells[J]. Plant physiology, 1994, 91(3): 435-441.

[14] HU H, PENN S G, LEBRILLA C B, et al. Isolation and characterization of soluble B-complexes in higher plants. The mechanism of phloem mobility of boron[J]. Plant physiology, 1997, 113(2): 649-655.

[15] 周睿, 束怀瑞. 高等植物中的山梨醇及其代谢[J]. 植物生理学通讯, 1993, 29(5): 384-390.

[16] 刘桂东, 姜存仓, 王运华, 等. 硼对两种不同砧木“纽荷尔”脐橙叶片硼形态影响的差异[J]. 中国农业科学, 2011, 44(5): 982-989.

[17] SILKE W, THOMAS E, VICTORIA F, et al. Absorption and mobility of foliar-applied boron in soybean as affected by plant boron status and application as a polyol complex[J]. Plant and soil, 2011, 344(1): 283-293.

[18] 段蔚. 多元醇络合硼对油菜幼苗生长及营养元素吸收的功效[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.

[19] 刘磊超. 枳橙砧木对硼吸收利用营养机理的初步研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.

[20] 韩配配, 秦璐, 李银水, 等. 不同营养元素缺乏对甘蓝型油菜苗期生长和根系形态的影响[J]. 中国油料作物学报, 2016, 38(1): 88-97.

[21] 冯素明, 吴兰田, 薛平乐, 等. 有机态硼肥在水稻上应用效果试验研究[J]. 农业科技通讯, 2012(10): 36-37.

[22] 宗毓铮, 王雯玥, 韩清芳, 等. 喷施硼肥对紫花苜蓿光合作用及可溶性糖源库间运转的影响[J]. 作物学报, 2010, 36(4): 665-672.

[23] 刘磊超, 姜存仓, 董肖昌, 等. 不同施硼方式对枳橙砧木生理生化特性的影响[J]. 华中农业大学学报, 2016, 35(1): 69-73.

[24] 徐建明, 汪鑫, 罗玉明, 等. 两种形态硼对小麦幼苗叶绿素荧光参数保护酶活性的影响[J]. 华北农学报, 2010, 24(2): 149-155.

[25] 吴秀文, 姜存仓, 郝艳淑, 等. 不同钾硼水平下棉花生长及钾硼利用效率的差异[J]. 中国土壤与肥料, 2016(2): 95-98.

[26] 刘武定, 皮美美, 吴礼树. 棉花硼、钾营养相互关系的研究[J]. 土壤学报, 1987, 24(1): 43-50.

[27] 王震宇, 张福锁, 王贺, 等. 缺硼与低温对黄瓜幼苗一些生理反应的影响[J]. 植物生理学报, 1998, 24(1): 59-64.

[28] YAMAUCHI I, HARA T, SONODA Y. Effects of boron defi-

ciency and calcium supply on the calcium metabolism in tomato plant[J], *Plant and soil*, 1986, 93(2): 223-230.

1250-1255.

[29] 王纪忠, 陶书田, 齐开杰, 等. 喷硼对梨果硼、钙含量及石细胞形成相关酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(5):

[30] 年夫照, 石磊, 徐芳森, 等. 硼镁营养对不同硼效率甘蓝型油菜品种苗期硼形态的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(6): 633-637.

Effects of polyol-chelated boron fertilizers on physiological characteristics of rapeseed seedlings

YAN Lei JIANG Cuncang DONG Xiaochang WU Xiuwen MUHAMMAD Riaz LU Xiaopei

College of Resource and Environment, Research Center of Trace Element, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract The rapeseed cultivar Cao221167 was used to study the effects of inorganic boric acid (BA), sorbitol (S), sorbitol boron (SB), mannitol (M), mannitol boron (MB), glycerol (G), glycerol boron (GB), inorganic and organic polyol complexes of boron on agronomic traits including root activity, pigment content, boron distribution and absorption in different parts of rapeseed seedlings in hydroponics. The results showed that there was no significant difference in the morphological and physiological characteristics of rapeseed seedlings including plant height, fresh shoot and dry weight, pigment content and root activity by only adding polyols (S, M and G) compared with boron (B₀). Parameters of organic polyol and BA complexation were improved. The polyol-chelated boron and BA promoted the growth of plants but the nutritional effects of complex boron on rape seedling growth and physiological characteristics were more significant. MB increased the fresh weight and dry weight of rapeseed seedling. Total dry weight and fresh weight of MB treatment were 40.56% and 17.29% higher than that of BA treatment. The contents of potassium, calcium, magnesium and other elements in rapeseed seedling treated by organic polyol complexes with different BA and GB were higher than that of B₀ treatment. Ratio of GB to BA significantly increased the pigment content, root activity and the content of boron in rapeseed leaves.

Keywords rapeseed; boron fertilizer; boric acid; polyol-chelated boron; physiological characteristics

(责任编辑: 陆文昌)