

李鸣凤, 张炜, 张志华, 等. 不同形态硼对油菜苗期光合生理特性的影响[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(6): 80-86.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.06.011

不同形态硼对油菜苗期光合生理特性的影响

李鸣凤¹, 张炜², 张志华², 刘新伟², 赵竹青²

1. 武汉生物工程学院园林园艺学院, 武汉 430415;
2. 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 为了探明有机硼(硼酸二甘油酯)是否具有硼肥的功效, 采用水培的方法, 以“华油杂9号”为试验材料, 研究硼酸和硼酸二甘油酯2种不同形态硼对油菜生长的影响和硼吸收利用的差异。结果显示, 缺硼处理导致油菜叶片增厚、卷曲、生物量降低, 而施用有机硼或无机硼均能促进油菜的生长; 0.25 $\mu\text{mol/L}$ 低硼处理下, 无机硼比有机硼更有利于油菜的生长, 25 $\mu\text{mol/L}$ 适硼处理下, 有机硼和无机硼对油菜总生物量具有相似的效果; 无论处于低硼还是适硼环境, 施用有机硼后油菜叶片叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素等光合色素含量均显著高于施用无机硼; 25 $\mu\text{mol/L}$ 适硼处理下, 施用有机硼后光合速率较施用无机硼显著提高28.9%, 叶片积累的淀粉粒增多, 油菜单株硼吸收量显著增加11.7%, 且主要增加的部位是油菜地上部。以上结果表明, 适硼环境下, 有机硼与无机硼在油菜上具有类似的生理功能, 有机硼较无机硼更有利于油菜对硼的吸收累积和向上运输, 促进光合色素的生成, 从而提高光合效率。

关键词 油菜; 有机硼; 无机硼; 光合特性; 硼吸收; 硼分配

中图分类号 S565.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)06-0080-07

硼(B)是植物必需微量营养元素, 硼缺乏被认为是全世界最严重的农业问题之一^[1-2]。油菜对硼的需求量较大, 湖北省是中国油菜播种面积最大的省份, 油菜总产量约占全国的20%, 然而湖北省耕地土壤平均有效硼含量仅为0.33 mg/kg, 低于高产优质油菜需硼临界值0.50 mg/kg, 全省约80%的油菜地属于缺硼土壤^[3-4], 目前湖北省大面积种植的甘蓝型油菜对缺硼尤其敏感^[5-6]。

植物硼主要以稳定单酯或双酯复合物的形式存在于细胞壁, 硼在植物体内移动性差是导致植物缺硼的原因之一^[7]。硼充足的环境下, 硼在木质部通过蒸腾作用随水分转运; 硼缺乏的环境下, 硼的再利用需借助韧皮部转运, 然而硼稳定地存在于细胞壁, 且韧皮部的碱性条件使硼易于被固定, 造成硼转运效率低下^[8]。Brown等^[9]研究显示硼在富含醇类植物的老叶和幼叶间的浓度差异不大, 而在其他种类植物中老、幼叶间的浓度差异较大。Hu等^[10]进一步在芹菜韧皮部和桃花花蜜中分离鉴定了硼多元醇复合物, 解释了硼在富含醇类植物韧皮部迁移的机制。

因此, 将硼有机化形成硼多元醇复合物可能是促进硼在植物韧皮部再利用的有效手段。

传统的硼肥多为无机态, 施用量较低时, 硼在植物体韧皮部移动性小, 难以满足植物顶端生长旺盛的组织对硼的需求。值得注意的是, 硼缺乏和毒害的范围很窄, 土施无机硼的浓度略高于最佳施用量就可能对作物产生毒害, 而水溶性硼肥浓度易控制, 配合滴灌或叶面喷施, 不易发生毒害现象, 且用量少, 效率高。最新微量元素叶面肥料的国家标准中, 关于微量元素叶面硼肥含量指标为高于100 g/L(以元素B计)^[11]。传统的硼肥主要包括硼砂、硼酸和其他硼镁肥, 其中硼溶解度较低, 难以达到叶面肥料标准, 且无机硼肥与其他无机肥料, 如氮磷钾同时溶解时, 其溶解度下降, 更易析出。有机硼是硼酸或硼酸根离子与糖醇中2个邻位顺式羟基发生脱水反应而形成的环状结构^[12], 绝大多数有机硼化合物仅为硼酸与醇类的简单混合, 难以明确两者是否发生了反应, 或反应是否完全, 这类混合物促进植物生长的机制并不明确^[13-14], 而利用成分明确且含硼量高的有

收稿日期: 2023-07-18

基金项目: 湖北省教育厅科学研究计划指导性项目(B2022303); 湖北省创新创业训练计划项目(S202212362036)

李鸣凤, E-mail: 767957740@qq.com

通信作者: 赵竹青, E-mail: zzq@mail.hzau.edu.cn

机硼开展试验则是解决上述问题的基础和关键。笔者所在课题组前期经过大量探索合成了稳定的有机硼:硼酸二甘油酯,其形态为粘稠状,研究发现硼酸二甘油酯比硼酸具有更高的溶解度,具有作为液体硼肥原料的潜力。本研究在此基础上主要验证2个假设:(1)有机硼与无机硼是否具有相似的肥效,(2)不同形态硼是否影响植物对硼的吸收和转运,进而影响其生长,旨在进一步阐明硼在植物生长发育中的利用机制,为新型液态硼肥的研发推广提供科学依据和技术支持。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

试验在华中农业大学微肥楼光照培养室进行,油菜品种为“华油杂9号”。营养液 Hoagland 配方:5.04 mmol/L KNO_3 , 5.00 mmol/L $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 1.99 mmol/L $\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 1.03 mmol/L KH_2PO_4 ;微量元素采用 Arnon 配方:9.14 $\mu\text{mol/L}$ $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 0.38 $\mu\text{mol/L}$ $\text{H}_2\text{MoO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 0.77 $\mu\text{mol/L}$ $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0.32 $\mu\text{mol/L}$ $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 和 50.00 $\mu\text{mol/L}$ $\text{Fe}(\text{III})\text{-EDTA}$ 。油菜种子经1%次氯酸钠消毒,去离子水多次冲洗,浸种24 h后于25℃下催芽1 d,挑选露白长度一致的种子置于纱网上水培,5 d后移苗种植于塑料遮光盆(307 mm×212 mm×87 mm)。营养液每5 d更换1次,第一次使用1/4浓度营养液,第二次使用1/2浓度营养液,以后均用全量营养液,处理30 d后测定相关指标。

以叶片硼含量达20 mg/kg的施硼量25 $\mu\text{mol/L}$ 作为适量的施硼量,以0.25 $\mu\text{mol/L}$ 浓度的硼作为低硼处理,设置5个试验处理:不施硼、0.25 $\mu\text{mol/L}$ 硼酸二甘油酯、25 $\mu\text{mol/L}$ 硼酸二甘油酯、0.25 $\mu\text{mol/L}$ 硼酸、25 $\mu\text{mol/L}$ 硼酸,每个处理种植4盆,每盆种植6株,每6株油菜为1个生物学重复。

1.2 测定指标与方法

1) 光合速率测定。油菜种植30 d后,通过便携式光合速率仪(Li-6400XT, LI-COR)对油菜完全展开的新叶(从顶部向下舒张开的第3片)进行光合测定,其光合参数为:光强1200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;叶片表面温度25℃;空气相对湿度为:65%; CO_2 浓度:400 $\mu\text{mol}/\text{mol}$;气体流速300 mol/s,记录叶片净光合作用、气孔导度、胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率。

2) 叶面积测定。油菜种植30 d后,使用叶面积仪(Yaxin-1241,雅欣理仪)测定油菜完全展开的新叶面积。

3) 叶绿素和类胡萝卜素含量的测定。取油菜完全展开的新叶,剪碎后加入95%乙醇于黑暗中萃取,分别测定665、649和470 nm处的吸光度值,计算叶绿素和类胡萝卜素含量,色素含量以叶片的鲜质量计。

4) 石蜡切片。将油菜完全展开的新叶固定于甲醛-乙酸-乙醇固定液(FAA),经浸蜡包埋、切片、制片、脱蜡、番红固绿染色、封片后,于植物荧光显微镜(ECLIPSE CI, NIKON)下观察,拍照。

5) 干物质质量。将收获的植物样品冲洗干净,分为根系、地上部2部分,于105℃的烘箱中杀青30 min,75℃下烘干至恒质量。

6) 硼元素的测定。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定硼含量。

1.3 数据处理

数据处理采用Excel软件作图,SPSS statistics 17.0软件进行统计和差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同形态硼对油菜苗期农艺性状的影响

由图1可知,缺硼严重影响油菜的生长,油菜整株生长瘦弱,根系细长,叶面积小,新叶皱缩;同时叶片厚度增加,细胞紧密,淀粉粒较少。施用无机硼(IB)和有机硼(OB)均促进了油菜地上部和根系的生长。

与对照(CK)相比,施用无机硼和有机硼后油菜生物量均显著增加(表1)。0.25 $\mu\text{mol/L}$ 施硼量处理下,施用有机硼后,油菜根系生物量较施用无机硼显著增加11.1%,地上部和油菜单株生物量分别显著降低11.4%和9.1%,表明在低硼处理下,无机硼主要促进油菜地上部的生长,有机硼更能促进油菜根系的生长。25 $\mu\text{mol/L}$ 施硼量处理下,施用有机硼后,油菜根系生物量较施用无机硼显著增加10.0%,油菜地上部和总生物量无显著变化,根冠比显著增加25.0%,表明在适量硼处理下,施用有机硼和无机硼对油菜总生物量具有相似的效果,其中有机硼更有利于油菜根系的生长。

2.2 不同形态硼对油菜苗期光合作用相关指标的影响

对幼苗期油菜的功能叶面积和单株叶面积测定结果显示(表2),0.25 $\mu\text{mol/L}$ 施硼量处理下,施用有机硼后,功能叶面积和单株叶面积较施用无机硼分别显著降低4.4%和9.9%;25 $\mu\text{mol/L}$ 施硼量处理下,施用无机硼和有机硼后,油菜功能叶面积和单株

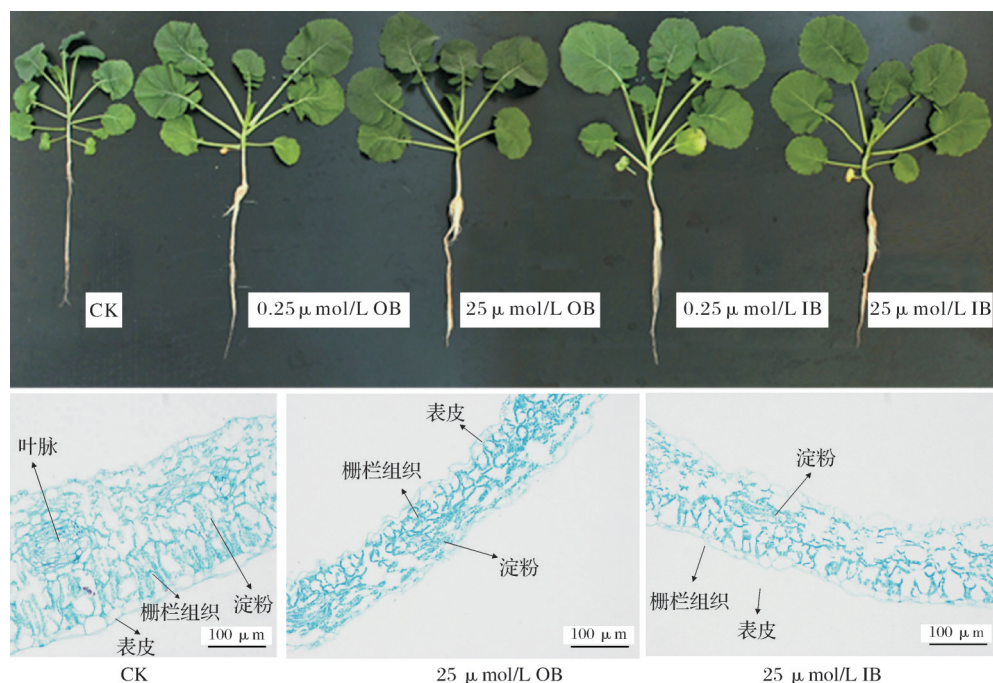


图1 不同类型硼肥施用下油菜苗期的生长情况

Fig.1 The growth and development of rapeseed seedlings under different types of boron fertilizers

表1 不同类型硼肥施用下油菜幼苗的干物质累积

Table 1 Dry matter accumulation in rapeseed seedlings under different types of boron fertilizers

处理 Treatment	地上部质量/(g/株) Shoot	根质量/(g/株) Root	总干质量/(g/株) Total dry weight	根冠比 R/S
CK	0.51±0.04c	0.03±0.00c	0.54±0.04c	0.06c
0.25 μmol/L OB	1.09±0.02b	0.10±0.00a	1.20±0.02b	0.09a
0.25 μmol/L IB	1.23±0.03a	0.09±0.01b	1.32±0.03a	0.07b
CK	0.51±0.04b	0.03±0.00c	0.54±0.04b	0.06c
25 μmol/L OB	1.19±0.01a	0.11±0.00a	1.31±0.02a	0.10a
25 μmol/L IB	1.19±0.02a	0.10±0.01b	1.29±0.02a	0.08b
ANOVA				
C	NS	**	*	NS
B	**	**	**	**
C×B	**	NS	**	NS

注:同列数值后不同小写字母代表处理间差异显著($P<0.05$),*和**分别代表0.05和0.01水平上差异显著,NS代表没有显著差异,下同。Note:Different lowercase letters indicate significant difference between treatments ($P<0.05$). * and ** represent significant differences at 0.05 and 0.01 levels. NS indicates no significant difference. The same as below.

叶面积均无显著变化。结果表明,在低硼环境下,无机硼肥更有利于油菜叶片的生长,适硼环境下,两者之间无显著差别。

光合色素含量测定结果显示(表2),0.25 μmol/L施硼量处理下,施用有机硼后,油菜叶片叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素较施用无机硼均显著增加,增幅分别为20.0%、15.1%和32.7%;25 μmol/L施硼量处理下,油菜叶片叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素含量显著增加,表明施用有机硼后,油菜功能叶面积和单株叶面积虽与施用无机硼无显著差异,但有机硼较

无机硼更有利于油菜叶片光合色素的合成。

光合指标的测定结果显示(表3),缺硼显著降低了油菜光合速率、气孔导度、胞间CO₂浓度和蒸腾速率;无论在低硼还是适硼环境,施用有机硼较施用无机硼的光合速率均显著增加,增幅分别为42.4%和28.9%;0.25 μmol/L施硼量处理下,施用有机硼后,油菜气孔导度、胞间CO₂浓度和蒸腾速率较施用无机硼均显著增加;25 μmol/L施硼量处理下,施用有机硼后,油菜气孔导度和蒸腾速率较施用无机硼显

表2 不同类型硼肥施用下油菜苗期的叶面积及色素含量

处理 Treatment	功能叶面积/cm ² Functional leaf area	单株叶面积/cm ² Plant leaf area	叶绿素 a/(mg/kg) Chlorophyll a	叶绿素 b/(mg/kg) Chlorophyll b	类胡萝卜素/(mg/kg) Carotenoids
CK	29.24±1.37c	146.53±3.91c	842.22±49.33c	365.39±13.61c	130.33±7.133c
0.25 μmol/L OB	68.08±2.04b	300.84±5.47b	1 773.92±51.37a	654.82±20.67a	392.58±5.30a
0.25 μmol/L IB	71.21±2.54a	333.70±9.52a	1 478.37±61.14b	568.87±27.82b	295.89±16.60b
CK	29.24±1.37b	146.53±3.91b	842.22±49.33c	365.39±13.61c	130.33±7.133c
25 μmol/L OB	73.38±3.98a	309.47±4.91a	1 809.33±74.03a	678.96±37.39a	375.38±5.43a
25 μmol/L IB	70.94±2.72a	310.48±11.39a	1 599.63±48.86b	587.69±37.23b	329.07±34.05b
ANOVA					
C	NS	NS	*	NS	NS
B	**	**	**	**	**
C×B	*	**	NS	NS	*

表3 不同类型硼肥施用下油菜苗期的光合特性

处理	光合速率/ [μmol/(m ² ·s)]	气孔导度/ [mol/(m ² ·s)]	胞间 CO ₂ 浓度/ (μmol/mol)	蒸腾速率/ [mmol/(m ² ·s)]
Treatment	Photosynthetic rate	Stomatal conductance	Intercellular CO ₂ concentration	Transpiration rate
CK	30.59±1.96c	0.40±0.07b	296.56±16.30a	5.43±0.87c
0.25 μmol/L OB	80.05±4.23a	1.16±0.10a	310.95±10.55a	14.00±0.71a
0.25 μmol/L IB	56.23±3.86b	0.49±0.08b	249.84±17.47b	7.54±0.92b
CK	30.59±1.96c	0.40±0.07c	296.56±16.30c	5.43±0.87c
25 μmol/L OB	86.03±3.43a	1.36±0.11a	316.59±12.43b	18.02±0.88a
25 μmol/L IB	66.73±4.26b	0.83±0.06b	343.94±12.60a	11.34±0.59b
ANOVA				
C	**	**	**	**
B	**	**	**	**
C×B	**	**	**	**

著增加 63.9% 和 58.9%, 而胞间 CO₂ 浓度显著降低 8.0%。结果表明, 有机硼较无机硼更有利于提高油菜叶片光合效率。

2.3 不同形态硼对油菜各部位硼含量、硼吸收量和硼分配比例的影响

由表4可知, 无论施用无机硼或者有机硼, 油菜地上部硼的吸收量均显著高于根部, 表明地上部是硼积累的主要部位。0.25 μmol/L 施硼量处理下, 施用有机硼后, 油菜地上部硼含量较施用无机硼无显著变化, 根部硼含量显著降低 12.4%, 油菜地上部和根部硼吸收量和分配比均无显著变化; 25 μmol/L 施硼量处理下, 施用有机硼后, 油菜地上部硼含量和吸收量较施用无机硼分别显著增加 14.3% 和 14.6%, 油菜根部硼含量和吸收量分别显著降低 26.7% 和 15.4%, 单株硼吸收量显著增加 11.7%。相比施用无

机硼, 施用有机硼后油菜地上部的硼分配比例显著增加。以上结果表明, 施用有机硼较无机硼更有利于油菜对硼的吸收累积和向上运输。

3 讨论

硼是植物生长必需的微量营养元素, 大量研究表明缺硼抑制植物根的伸长, 幼叶的膨胀、茎开裂、花朵的形成和种子的萌发等^[2, 15-17], 特别是对于油菜、蔬菜和果树等需硼量较高的经济作物, 植物叶片需硼量约为 20~70 mg/kg^[2, 18-19]。本研究结果显示, 缺硼后油菜幼叶出现卷曲、皱缩、增厚的现象, 25 μmol/L 不同形态硼均可使叶片硼含量累积达到 20 mg/kg 以上, 保证油菜的正常生长发育, 表明在 25 μmol/L 适硼处理下, 无机硼或有机硼对油菜生物量具有相似的效果。前期研究也证明施用无机硼或有机硼均可

表4 不同类型硼肥施用下油菜幼苗各部分硼含量、硼吸收量和硼分配
Table 4 Boron content, boron absorption and boron distribution in various parts of rapeseed seedlings under different types of boron fertilizers

处理 Treatment	硼含量/(mg/kg) Boron concentration		硼吸收量/(μg /株) Boron accumulation			硼分配/% Boron distribution	
	地上部 Shoot	根部 Root	地上部 Shoot	根部 Root	单株 Total	地上部 Shoot	根部 Root
CK	6.62 \pm 0.96b	13.88 \pm 1.05b	3.42 \pm 0.69b	0.40 \pm 0.01b	3.81 \pm 0.70b	89.37 \pm 1.62a	10.63 \pm 1.62a
0.25 $\mu\text{mol/L}$ OB	11.78 \pm 1.72a	14.59 \pm 1.56b	12.86 \pm 1.72a	1.51 \pm 0.19a	14.37 \pm 1.75a	89.40 \pm 1.60a	10.60 \pm 1.60a
0.25 $\mu\text{mol/L}$ IB	9.78 \pm 1.76a	16.65 \pm 0.36a	12.05 \pm 2.34a	1.46 \pm 0.11a	13.51 \pm 2.29a	88.89 \pm 2.34a	11.11 \pm 2.34a
CK	6.62 \pm 0.96c	13.88 \pm 1.05c	3.42 \pm 0.69c	0.40 \pm 0.01c	3.81 \pm 0.70c	89.37 \pm 1.62b	10.63 \pm 1.62a
25 $\mu\text{mol/L}$ OB	27.69 \pm 2.83a	23.04 \pm 1.53b	33.05 \pm 3.55a	2.63 \pm 0.23b	35.68 \pm 3.68a	92.60 \pm 0.63a	7.40 \pm 0.63b
25 $\mu\text{mol/L}$ IB	24.23 \pm 2.28b	31.41 \pm 0.72a	28.83 \pm 2.53b	3.11 \pm 0.18a	31.94 \pm 2.48b	90.21 \pm 1.07b	9.79 \pm 1.07a
ANOVA							
C	**	**	**	**	**	*	*
B	**	**	**	**	**	*	NS
C \times B	**	**	**	**	**	NS	NS

以有效缓解棉花的缺硼症状^[20]。以上结果说明,有机硼和无机硼具有类似的肥效,可缓解作物的缺硼症状,因此有机硼可作为液体硼肥的有效成分。

缺硼导致光合效率的降低已在柑橘^[21]、槟榔^[22]和甜菜^[23]等植物中被证实。本研究结果显示缺硼显著降低了油菜光合速率。一方面是因为缺硼抑制了油菜幼苗的生长,叶片发育不良,导致光合叶面积减少,另一方面是因为缺硼导致植物叶片的叶绿素等光合色素的含量降低,从而导致光合效率降低。值得注意的是,无论是低硼处理还是适硼处理,施用有机硼均较施用无机硼使油菜叶片具有更高的光合效率;同时在适硼处理下,两者的功能叶面积和单株叶面积均无显著差异,推测油菜幼苗期光合叶面积并不是有机硼和无机硼影响油菜光合效率的主要因素。叶绿素含量的提高可以促进叶片对光能的捕获与利用,从而促进植物的光合效率。相比施用无机硼,施用有机硼后,油菜叶片叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素含量均显著增加,同时油菜叶片的气孔导度显著增加,这可能是有机硼提高油菜光合效率的主要因素。适硼处理下,有机硼提高油菜光合效率,而油菜生物量无显著变化,可能原因在于油菜水培的时间较短,后续需在大田或盆栽试验中进一步验证。

低硼环境下,大多数植物的新生幼叶容易表现出明显的缺硼症状,主要原因在于硼主要以稳定单酯或双酯复合物的形式存在于细胞壁,在植物体内的移动性较弱^[24]。闫磊等^[13]研究表明有机态多元醇络合硼较无机态硼酸更有利于植物的吸收利用,

并且在植物体内移动性更强。本研究试验结果表明,无论施用有机硼还是无机硼均可以有效提高油菜幼苗硼含量,0.25 $\mu\text{mol/L}$ 低硼处理下,油菜地上部和根部硼的分配比例无显著差异。25 $\mu\text{mol/L}$ 适硼处理下,相比施用无机硼,施用有机硼后,单株油菜硼吸收量显著增加11.7%,且油菜地上部的硼分配比例显著增加,表明施用有机硼较无机硼更有利于油菜对硼的吸收累积和向上运输。Hu等^[10]研究指出糖醇可与硼在植物韧皮部形成硼多元醇复合物,韧皮部富含糖醇化合物物种与不含糖醇物种相比,能更高效的转运硼。这些证据表明硼在植物韧皮部的移动取决于植物的种类和硼的形态。本研究明确了施用无机硼或有机硼均可以有效缓解油菜幼苗的缺硼症状,施用有机硼能显著提高油菜的光合效率,促进油菜对硼的吸收累积和向上运输,但是油菜吸收有机硼后在植物体内吸收利用和再转运的形态尚未可知,进一步解答这些问题,将有助于阐释有机硼在油菜或其他植物中的再利用机制。

参考文献 References

- [1] SHORROCKS V M. The occurrence and correction of boron deficiency[J]. Plant and soil, 1997, 193(1): 121-148.
- [2] RERKASEM B, JAMJOD S, PUSADEE T. Productivity limiting impacts of boron deficiency, a review[J]. Plant and soil, 2020, 455(1/2): 23-40.
- [3] POMMERENIG B, JUNKER A, ABREU I, et al. Identification of rapeseed (*Brassica napus*) cultivars with a high tolerance to boron-deficient conditions [J/OL]. Frontiers in plant science, 2018, 9: 1142 [2023-07-18]. <https://doi.org/10.3389/>

- fpls.2018.01142.
- [4] 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. ZOU J, LU J W, LIAO Z W, et al. Study on response of rapeseed to boron application and critical level of soil available B in Hubei Province [J]. Scientia agricultura sinica, 2008, 41(3): 752-759 (in Chinese with English abstract).
- [5] HUA Y P, ZHOU T, DING G D, et al. Physiological, genomic and transcriptional diversity in responses to boron deficiency in rapeseed genotypes [J]. Journal of experimental botany, 2016, 67(19):5769-5784.
- [6] WANG Y Q, ZHAO Z, WANG S L, et al. Genotypic differences in the synergistic effect of nitrogen and boron on the seed yield and nitrogen use efficiency of *Brassica napus* [J]. Journal of the science of food and agriculture, 2021, 102(9): 3563-3571.
- [7] CHEN Z Q, HU Z J, PENG J X, et al. Boron isotopic fractionation in *Brassica napus* L. plants during plant growth under hydroponic conditions [J]. Plant and soil, 2023, 485(1/2): 411-423.
- [8] BRDAR-JOKANOVIĆ M. Boron toxicity and deficiency in agricultural plants [J/OL]. International journal of molecular sciences, 2020, 21(4): 1424 [2023-07-18]. <https://doi.org/10.3390/ijms21041424>.
- [9] BROWN P H, HU H N. 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] HU H, PENN S G, LEBRILLA C B, et al. Isolation and characterization of soluble boron complexes in higher plants (the mechanism of phloem mobility of boron) [J]. Plant physiology, 1997, 113(2):649-655.
- [11] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 微量元素叶面肥料: GB/T 17420—2020 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020. State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Foliar microelement fertilizer: GB/T 17420—2020 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020 (in Chinese).
- [12] TANG Y P, LUO L, THONG Z, et al. Recent advances in membrane materials and technologies for boron removal [J]. Journal of membrane science, 2017, 541:434-446.
- [13] 闫磊,姜存仓,董肖昌,等.多元醇络合硼对油菜苗期生长及生理特性的影响[J].华中农业大学学报,2017,36(2):38-44. YAN L, JIANG C C, DONG X C, et al. Effects of polyol-chelated boron fertilizers on physiological characteristics of rapeseed seedlings [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2017, 36(2):38-44 (in Chinese with English abstract).
- [14] 李腾升,魏倩倩,黄明丽,等.糖醇螯合硼在农业上的应用研究进展[J].土壤学报,2021,58(6):1393-1403. LI T S, WEI Q Q, HUANG M L, et al. Research progresses on the application of sugar alcohol chelated fertilizers in agriculture [J]. Acta pedologica sinica, 2021, 58(6): 1393-1403 (in Chinese with English abstract).
- [15] SOTTA N, BIAN B, PENG D H, et al. Local boron concentrations in tuberous roots of Japanese radish (*Raphanus sativus* L.) negatively correlate with distribution of brown heart [J]. Plant physiology and biochemistry, 2019, 136:58-66.
- [16] DO CARMO MILAGRES C, MAIA J T L S, VENTRELLA M C, et al. Anatomical changes in cherry tomato plants caused by boron deficiency [J]. Brazilian journal of botany, 2019, 42(2):319-328.
- [17] MATTHES M S, ROBIL J M, MCSTEEN P. From element to development: the power of the essential micronutrient boron to shape morphological processes in plants [J]. Journal of experimental botany, 2020, 71(5):1681-1693.
- [18] MARSCHNER H. Mineral nutrition of higher plants [M]. London: Academic Press, 2012.
- [19] ONUH A F, MIWA K. Regulation, diversity and evolution of boron transporters in plants [J]. Plant and cell physiology, 2021, 62(4):590-599.
- [20] 李鸣凤,彭文勇,何华,等.外施不同形态硼对棉花吸收利用硼及其他矿质元素的影响[J].棉花学报,2021,33(5):385-392. LI M F, PENG W Y, HE H, et al. Effects of different forms of boron on absorption and utilization of boron and other mineral elements in cotton [J]. Cotton science, 2021, 33(5): 385-392 (in Chinese with English abstract).
- [21] 张林,刘磊超,王宇函,等.有机态和无机态硼对柑橘枳橙砧木生长及生理的影响[J].园艺学报,2019,46(1):135-142. ZHANG L, LIU L C, WANG Y H, et al. Different influences of organic and inorganic boron fertilizers on citrange rootstock growth and physiology characters [J]. Acta horticulturae sinica, 2019, 46(1):135-142 (in Chinese with English abstract).
- [22] 曹先梅,刘立云,李佳.缺硼槟榔幼苗的生理反应和根系发育特征[J].植物营养与肥料学报,2020,26(2):386-392. CAO X M, LIU L Y, LI J. Physiological response and root development of areca-nut seedlings under boron deficiency [J]. Journal of plant nutrition and fertilizers, 2020, 26(2):386-392 (in Chinese with English abstract).
- [23] 张晓文,谭苏娜,孟哲,等.外源硼通过调节叶面积和气孔导度影响甜菜生长[J].植物生理学报,2019,55(12):1777-1784. ZHANG X W, TAN S N, MENG Z, et al. Exogenous boron affects the growth of beet by regulation of leaf area and stomatal conductance [J]. Plant physiology journal, 2019, 55(12):1777-1784 (in Chinese with English abstract).
- [24] BOGIANI J C, SAMPAIO T F, ABREU-JUNIOR C H, et al. Boron uptake and translocation in some cotton cultivars [J]. Plant and soil, 2014, 375(1):241-253.

Effects of different forms of boron on photosynthetic and physiological characteristics of rapeseed seedlings

LI Mingfeng¹, ZHANG Wei², ZHANG Zhihua², LIU Xinwei², ZHAO Zhuqing²

1. *College of Landscape Architecture and Horticulture, Wuhan University of Bioengineering, Wuhan 430415, China;*

2. *College of Resources and Environment/Microelement Research Center, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China*

Abstract “Huayouza 9” was used to study the differences in the growth and boron absorption and utilization of rapeseed with two different forms of boron including boric acid and diglycerol borate under water culture to explore whether organic boron (diglycerol borate) has the effect of boron fertilizer. The results showed that boron deficiency treatment led to thickening, curling of rapeseed leaves, and decreased biomass, while the application of organic or inorganic boron promoted the growth of rapeseed. Inorganic boron was more conducive to the growth of rapeseed than organic boron under the treatment with low boron ($0.25 \mu\text{mol/L}$). Organic and inorganic boron had similar effects on the total biomass of rapeseed under the treatment with suitable boron ($25 \mu\text{mol/L}$). Whether in a low boron or suitable boron environment, the content of photosynthetic pigments including chlorophyll a, chlorophyll b and carotenoids in rapeseed leaves after applying organic boron was significantly higher than that of rapeseed treated with inorganic boron. The photosynthetic rate of rapeseed after applying organic boron was significantly increased by 28.9% compared to applying inorganic boron under the treatment with suitable boron ($25 \mu\text{mol/L}$). The accumulation of starch grains in leaves increased. The boron absorption per plant of rapeseed significantly increased by 11.7%, with the main increase being in the aboveground part of rapeseed. It is indicated that organic and inorganic boron have similar physiological functions in rapeseed under suitable boron environment. Organic boron is more conducive to the absorption, accumulation, and upward transportation of boron in rapeseed compared to inorganic boron, promoting the generation of photosynthetic pigments and thereby improving photosynthetic efficiency.

Keywords rapeseed; organic boron; inorganic boron; photosynthetic characteristic; boron absorption; boron distribution

(责任编辑:葛晓霞)