

# 土壤施硼对菊花光合色素和生理生化指标的影响

刘盼盼, 肖梓蝶, 黄开为, 王鹏飞, 李天鹏, 杨兰芳\*

(湖北大学资源环境学院, 武汉 430062)

**摘要:** 为了认识硼对菊花生理生化过程的影响, 进行了土壤施硼 0、0.2、0.5、1.0、2.5、5.0 和 10.0  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的盆栽菊花试验, 测定了菊花生长期叶片的光合色素、可溶性糖、维生素 C、脯氨酸 (Pro)、丙二醛 (MDA) 含量和过氧化氢酶 (CAT) 活性。结果表明, 适当的施硼有益于菊花开花和株高增加, 但施硼超过 2.5  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时, 菊花开花延迟。施硼 2.5  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  处理显著增加了菊花叶片叶绿素的含量, 维持稳定的 Chl.a/Chl.b 和类胡萝卜素含量。土壤施硼 0.2 ~ 10.0  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  增加了菊花植株旺长期叶片可溶性糖含量; 施硼 0.2 ~ 5.0  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  处理降低了菊花开花期叶片可溶性糖含量, 而施硼 10  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  处理却使其增加。施硼 0.2 和 0.5  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  处理增加了菊花旺长期叶片 CAT 的活性, 5.0 和 10.0  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  处理则使其降低; 而施硼 0.2 ~ 10.0  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  均显著增加了开花期叶片 CAT 的活性。施硼 0.5 ~ 2.5  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  显著增加了开花期叶片的维生素 C 含量, 而施硼 5.0 和 10.0  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  则显著降低维生素 C 的含量。土壤施硼使开花期菊花叶片脯氨酸的含量降低了 7.9% ~ 75.5%, 施硼量越高, 降幅越大。施硼 0.2 ~ 2.5  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  处理对开花期菊花叶片 MDA 含量无显著影响, 而施硼 5.0 和 10.0  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  则显著增加了 MDA 的含量。本试验中适宜的土壤施硼量应不超过 2.5  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

**关键词:** 菊花; 土壤施硼; 光合色素; 生理生化指标; 适宜施硼量

**中图分类号:** S 682.1<sup>+1</sup>

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0513-353X (2019) 06-1183-09

## Effects of Soil Boron Applications on Photosynthetic Pigments and Physiologic-biochemical Indexes of *Chrysanthemum*

LIU Panpan, XIAO Zidie, HUANG Kaiwei, WANG Pengfei, LI Tianpeng, and YANG Lanfang\*

(School of Resource and Environmental Science, Hubei University, Wuhan 430062, China)

**Abstract:** A pot experiment of cultivating chrysanthemum with soil boron applications at 0, 0.2, 0.5, 1.0, 2.5, 5.0 and 10.0  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  was conducted to understand the effects of boron on the physiology and biochemistry of chrysanthemum, in which the content of photosynthetic pigments, soluble sugar, vitamin C, proline (Pro), malondialdehyde (MDA) and the activity of catalase (CAT) were measured during the growth of chrysanthemum. The results showed that the suitable soil boron applications improved the flowering and increased the height of chrysanthemum, but the excessive applications delayed the flowering. The rate of 2.5  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  increased the content of chlorophyll, helped maintain the stable

**收稿日期:** 2019-03-01; **修回日期:** 2019-05-27

**基金项目:** 国家大学生创新训练项目 (201710512025)

\* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: lfyang@hubeu.edu.cn)

value of chlorophyll a to chlorophyll b and the content of carotenoid in chrysanthemum leaves. Soil boron application rates of 0.2 - 10.0 mg · kg<sup>-1</sup> increased the content of soluble sugar during the fast growing period, and the application of rates between 0.2 to 5.0 mg · kg<sup>-1</sup> decreased and that of 10.0 mg · kg<sup>-1</sup> increased the content of soluble sugar during the flowering period. The applications of 0.2 and 0.5 mg · kg<sup>-1</sup> increased and 5.0 and 10.0 mg · kg<sup>-1</sup> decreased the CAT activity in chrysanthemum leaves during the fast growing period, but all applications increased the CAT activity during flowering period. The vitamin C content in chrysanthemum leaves increased by boron applications of 0.5 to 2.5 mg · kg<sup>-1</sup>, but decreased by applications of 5.0 and 10.0 mg · kg<sup>-1</sup>. The content of Pro in chrysanthemum leaves decreased 7.9% - 75.5% as the rate of soil boron applications varied. The boron applications of 0.2 to 2.5 mg · kg<sup>-1</sup> had no significant effect on the content of MDA, but the applications of 5.0 and 10.0 mg · kg<sup>-1</sup> increased the content of MDA significantly. In conclusion, the suitable soil boron application rate for the growth of chrysanthemum under this experiment was under 2.5 mg · kg<sup>-1</sup>.

**Keywords:** chrysanthemum; *Dendranthma morfolium*; soil boron application; photosynthetic pigment; physiological-biochemical index; suitable boron application rate

硼是植物重要的必需微量营养元素 (Uluşık et al., 2018), 在植物生长和发育中发挥着广泛作用, 与生物膜及细胞壁的结构与功能、酚和激素的代谢、碳水化合物的代谢与运输、蛋白质和核酸的代谢、植物的繁殖等都有密切的关系 (施益华和刘鹏, 2002; 陆欣和谢英荷, 2011)。缺硼或硼过量都会影响植物的生长和发育 (王春利, 2001; Reid, 2010)。硼营养管理不仅有益于植物的生长, 增加植物产量, 也有益于提高营养品质 (Alia et al., 2017; Nadeem et al., 2019), 但硼对菊花生长发育和生理生化指标的影响方面的研究还鲜见报道。通过土壤施硼的盆栽菊花试验, 分析测定生长期间的一些生理生化指标, 探讨硼对生理生化过程的影响, 为栽培和养分管理提供科学依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 试验材料

菊花 (*Dendranthma morfolium*) 品种为 ‘满天星’, 小菊, 也叫千头菊, 为武汉市解放公园提供的扦插苗, 移栽时幼苗有 4~6 片叶, 苗高 10 cm 左右。所用土壤为黄棕壤。土壤采回后自然晾干, 剔除植物残体和石块后过 5 mm 筛备用。土壤有机质、全氮和全磷含量分别为 16.54、1.18 和 0.47 g · kg<sup>-1</sup>, 碱解氮、速效磷和有效硼含量分别为 65.30、29.25 和 0.22 mg · kg<sup>-1</sup>, 土壤 pH 为 6.73。

### 1.2 盆栽试验

所用钵为近似圆台形塑料钵, 高 15.5 cm, 底部直径 12 cm, 口径 22 cm, 体积 3.3 L。设置土壤加硼量 0 (对照)、0.2、0.5、1.0、2.5、5.0 和 10.0 mg · kg<sup>-1</sup>, 硼的来源为硼酸, 配制溶液, 装盆拌土时与土壤混合均匀。每盆种植大小相近的菊花苗 1 株, 每处理 3 盆重复。土壤中施用 N、P、K 分别为 200、100 和 200 mg · kg<sup>-1</sup> 作基肥 (用硫酸铵、磷酸二氢钾和氯化钾配制成含 N、P、K 分别为 20、10、20 mg · mL<sup>-1</sup> 的混合溶液, 拌土时按每 kg 土加入 10 mL, 拌匀即可)。于 2017 年 6 月 12 日拌土装盆和移栽, 每盆装土 3.0 kg, 浇水至土壤含水量为 25%。每天进行水分管理, 并注意观察长势和防虫治病。所有钵放置在长方形推车上, 雨天推进遮雨棚内, 非雨天推到网室下。试验场

地位于武汉市湖北大学校园内沙湖边。

### 1.3 生理生化指标的测定

分别于 2017 年 10 月上旬（菊花旺长期）和 12 月上旬（菊花开花期）采样，每盆剪取靠近植株顶部的 2~3 片完全展开叶作为样品。

旺长期的样品用 95%乙醇提取，通过分光光度法测定提取液在 470、649、665 nm 处的吸光度，计算叶绿素 a (Chl.a)、叶绿素 b (Chl.b) 和类胡萝卜素 (Car.) 的含量（王学奎，2006）。旺长期和开花期样品采用苯酚—浓硫酸显色分光光度法测定可溶性糖含量，利用高锰酸钾容量法测定 CAT 活性（王学奎，2006）。开花期样品采用钼酸铵分光光度法测定维生素 C 含量（萧浪涛和王三根，2005），采用茛三酮显色分光光度法测定脯氨酸 (Pro) 含量，采用硫代巴比妥酸显色多波长分光光度法测定 MDA 的含量（王学奎，2006）。

运用 Excel 2013 计算平均值与标准差，作图和进行 *t* 检验，运用 SPSS 22 进行单因素方差分析和多重比较 (*LSD* 法)，显著水平  $P < 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 施硼对菊花长势的影响

从图 1 可以看出，适当的土壤施硼有利于菊花开花，而施硼 5.0 和 10.0  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  则使菊花开花延迟，随施硼量增加，菊花株高呈增加的趋势，在 2.5  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时达到最高，随着施硼水平进一步增加，株高又呈下降趋势，但与 2.5  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  处理的差异不明显。



图 1 土壤施硼对菊花长势的影响

Fig. 1 Effects of soil boron applications on the growth of chrysanthemum

### 2.2 施硼对菊花叶片光合色素含量的影响

由表 1 可知，土壤施硼对菊花叶片光合色素含量有显著影响。与对照相比，施硼 2.5  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

显著增加菊花叶片 Chl.a 和 Chl.a+b 的含量, 施硼 0.2 mg · kg<sup>-1</sup> 增加 Chl.b 和 Chl.a+b 的含量, 除施硼 2.5 mg · kg<sup>-1</sup> 外, 其余处理显著降低了菊花叶片 Car. 的含量。除施硼 1.0 和 2.5 mg · kg<sup>-1</sup> 之外, 其余处理显著降低了 Chl.a/Chl.b 的比值。由此可见, 土壤施硼, 不仅影响菊花的叶绿素含量, 也会改变叶绿素的构成。

表 1 土壤施硼处理下菊花叶片的光合色素含量  
Table 1 The content of photosynthetic pigments in chrysanthemum leaves under soil boron applications

B/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	含量/ (mg · g <sup>-1</sup> ) Content				
	Chl.a	Chl.b	Chl.a+b	Car.	Chl.a/Chl.b
0 (对照 Control)	1.27 ± 0.02 bc	0.54 ± 0.01 b	1.81 ± 0.03 cd	0.19 ± 0.01 a	2.33 ± 0.02 a
0.2	1.27 ± 0.07 b	0.63 ± 0.06 a	1.91 ± 0.06 a	0.16 ± 0.01 b	2.02 ± 0.09 d
0.5	1.20 ± 0.05 cd	0.54 ± 0.02 b	1.74 ± 0.08 de	0.17 ± 0.01 b	2.25 ± 0.02 bc
1.0	1.29 ± 0.01 b	0.56 ± 0.01 b	1.85 ± 0.01 bc	0.17 ± 0.01 b	2.30 ± 0.03 ab
2.5	1.40 ± 0.03 a	0.62 ± 0.01 a	2.01 ± 0.04 a	0.20 ± 0.01 a	2.27 ± 0.04 ab
5.0	1.20 ± 0.05 cd	0.55 ± 0.02 b	1.75 ± 0.08 de	0.18 ± 0.01 b	2.20 ± 0.01 c
10.0	1.15 ± 0.03 cd	0.52 ± 0.02 b	1.67 ± 0.04 e	0.17 ± 0.01 b	2.23 ± 0.03 bc

注: 不同小写字母表示处理间差异达到 0.05 的显著水平。

Note: The different letters stand for the significant difference at 0.05 level.

### 2.3 施硼对菊花叶片可溶性糖含量的影响

图 2 表明, 土壤施硼水平显著影响菊花旺长期和开花期叶片的可溶性糖含量。开花期菊花叶片的可溶性糖含量显著高于旺长期。在旺长期, 所有施硼处理的菊花叶片可溶性糖含量显著高于对照, 而且施硼 2.5、5.0 和 10.0 mg · kg<sup>-1</sup> 处理显著高于施硼 0.2、0.5 和 1.0 mg · kg<sup>-1</sup> 处理; 在开花期, 除了施硼 10.0 mg · kg<sup>-1</sup> 处理的可溶性糖含量显著高于对照外, 其余处理均显著低于对照。

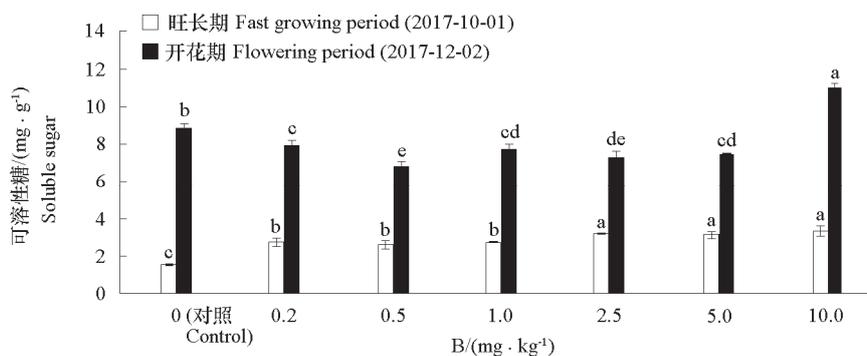


图 2 施硼对菊花叶片可溶糖含量的影响

不同小写字母表示相同时期不同处理间差异达到了 0.05 水平, 下同。

Fig. 2 The effects of soil boron applications on the content of soluble sugar in chrysanthemum leaves

Different letters stand for the significant difference among the treatments during the same stage at 0.05 level, the same below.

### 2.4 施硼对菊花叶片 CAT 活性的影响

由图 3 可知, 土壤施硼显著影响菊花叶片的 CAT 活性。在旺长期, 低施硼量处理 (0.2 和 0.5 mg · kg<sup>-1</sup>) 显著增加了 CAT 活性, 而高施硼量处理 (5.0 和 10.0 mg · kg<sup>-1</sup>) 则显著降低了 CAT 活性; 在开花期, 所有施硼处理均显著增加了菊花叶片的 CAT 活性, 较同期对照增加 13% ~ 107%, 以 0.2

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的增幅最高,  $5.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的增幅最低。由此可见, 土壤施硼对不同时期菊花叶片 CAT 活性的影响不同, 不同施硼量对菊花叶片 CAT 活性的影响也不同。

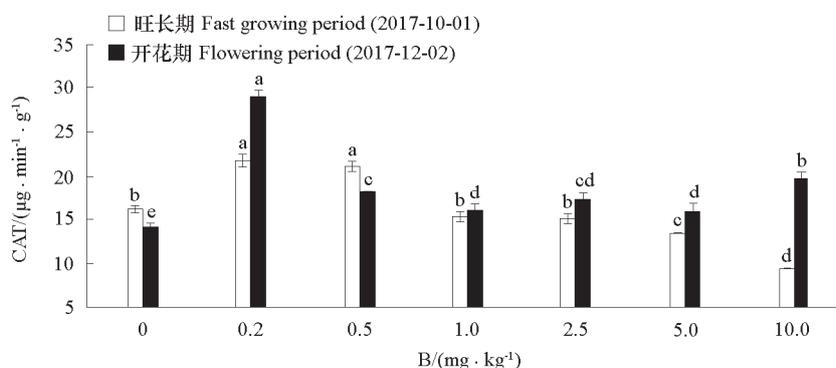


图3 施硼对菊花叶片 CAT 活性的影响  
Fig. 3 Effects of soil boron applications on CAT activity in chrysanthemum leaves

## 2.5 施硼对菊花叶片维生素 C 含量的影响

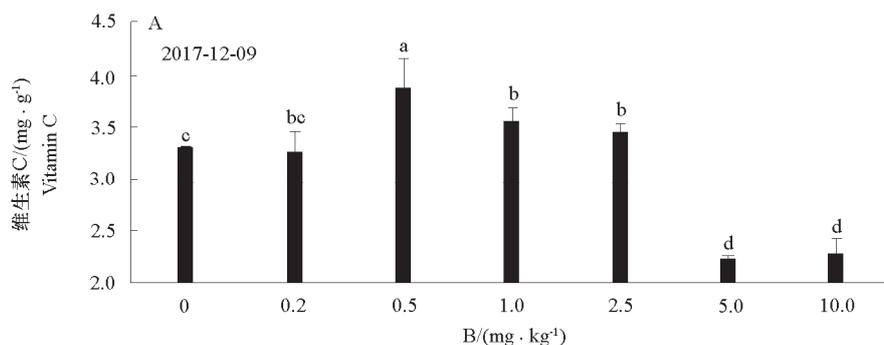
由图 4, A 可知, 不同施硼水平对菊花开花期叶片维生素 C 含量的影响不同。施硼  $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  对维生素 C 含量无显著影响, 施硼  $0.5$ 、 $1.0$  和  $2.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  显著增加了维生素 C 的含量, 而高施硼量 ( $5.0$  和  $10.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 处理则显著降低了菊花叶片维生素 C 的含量, 分别比对照降低了  $32.8\%$  和  $31.1\%$ 。这说明适当的土壤施硼可以增加菊花叶片的维生素 C 含量, 而过量则会降低维生素 C 含量。

## 2.6 施硼对菊花叶片 Pro 含量的影响

由图 4, B 可知, 所有施硼处理均显著降低了菊花开花期叶片的 Pro 含量, 降低幅度在  $7.9\% \sim 75.5\%$ , 高施硼量 ( $5.0$  和  $10.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 处理的降幅都在  $70\%$  以上。

## 2.7 施硼对菊花叶片 MDA 含量的影响

由图 4, C 可知, 中低施硼量 ( $0.2$ 、 $0.5$ 、 $1.0$  和  $2.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 的处理对菊花开花期叶片 MDA 含量的影响不明显, 而高施硼量 ( $5.0$  和  $10.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 处理则显著高于对照, 以  $10.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的 MDA 含量最高, 比对照高  $41\%$ 。



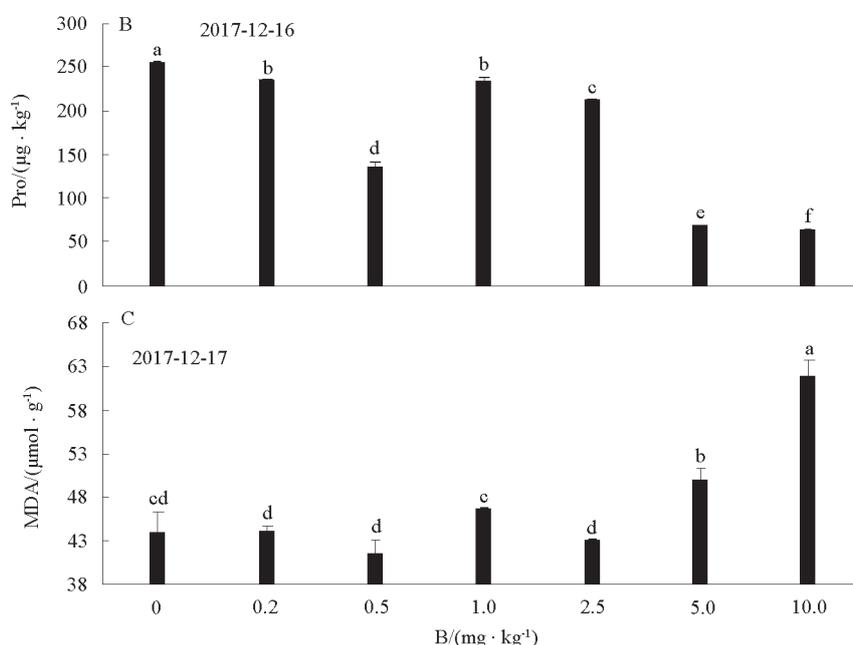


图4 施硼对菊花叶片维生素C (A)、脯氨酸(B)和丙二醛(C)含量的影响

Fig. 4 Effects of soil boron applications on the content of vitamin C (A), Pro (B) and MDA (C) in chrysanthemum leaves

### 3 讨论

#### 3.1 硼对菊花叶片光合色素的影响

在本试验的土壤施硼范围内,施硼对菊花叶片光合色素含量和Chl.a/Chl.b值均有显著影响,这证明硼能影响菊花的光合作用。水培拟南芥试验的结果也表明硼处理影响叶绿素含量,硼水平不同其影响也不同(Chen et al., 2014)。水培试验表明硼处理影响罗勒的叶绿素含量和构成,但对不同品种影响不一样(Landi et al., 2013)。由此可见,硼对植物光合色素的影响因硼处理水平和植物品种而异。本试验中菊花叶绿素含量的结果基本与上述罗勒的一致,与拟芥南的不完全一致;本试验中类胡萝卜素含量的结果与上述罗勒的相近但不完全一致,主要原因可能由于植物类型和研究方法不同,罗勒是水培试验,本试验为土培试验,另外罗勒的试验没有设置空白处理。Archana (2013)的研究表明水培芥菜硼含量不足或者过量都会降低Chl.a、Chl.b和类胡萝卜素的含量,而Chl.a/Chl.b值则随硼处理水平增加而降低,本试验结果与之基本一致,只是本试验中Chl.a/Chl.b在2.5 mg·kg<sup>-1</sup>下最高,其余施硼处理均显著降低。土壤盆栽番茄试验的结果表明,与施硼0.45 mg·kg<sup>-1</sup>相比,不接种根瘤菌下,10、20和50 mg·kg<sup>-1</sup> 3个施硼水平均降低了叶片叶绿素含量,但三者之间无显著差异;在接种根瘤菌下,只有50 mg·kg<sup>-1</sup>的处理使叶片叶绿素含量显著下降(Sirajuddin et al., 2016)。本试验结果与之不大一致,除了植物类型不同外,与其土壤硼处理水平较高有关。硼作为植物的必须营养元素,缺乏和过量都对植物不利。水培柠檬橙的试验表明,叶绿素和类胡萝卜素的含量在合适的硼水平下最高,缺硼和硼过量下光合色素的含量均下降(Shah et al., 2017);水培柑橘苗试验也表明,缺硼和硼过量都会显著降低Chl.a、Chl.b的含量和Chl.a/Chl.b比值(Han et al., 2009);水

培小麦试验结果发现, 5 和 10  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  的硼处理均使叶绿素显著降低 (Eser & Aydemir, 2016); 田间试验结果则发现, 适当的土壤施硼有利于增加黄果柑叶片的叶绿素总量、Chl.a 和 Chl.b 含量, 硼过量或不足都会降低叶绿素含量, 施硼可改变 Chl.a/Chl.b 比值 (熊博 等, 2016); 土壤盆栽试验表明, 与对照相比, 施硼 10 ~ 50  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  均使两种杨树的叶绿素含量显著降低, 但耐硼胁迫的新疆杨能维持较高的 Chl.a/Chl.b 比值, 而俄罗斯杨 Chl.a/Chl.b 比值显著下降 (吴秀丽 等, 2015)。本试验结果与这些研究基本一致, 证明硼是影响植物的叶绿素含量与构成的重要元素, 硼不足或过量均不利于叶绿素形成, 因此硼是通过影响叶绿素的形成和构成而影响植物的光合作用。

### 3.2 硼对菊花生理生化指标的影响

施硼有利于菊花旺盛生长期叶片中可溶性糖的形成, 而促进开花期叶片中的可溶性糖向其他部位转运, 而开花期高硼处理的叶片可溶性糖含量显著高于对照, 说明硼过量不利于叶片中糖的转运。本试验结果与用 MS 基质培养拟南芥的研究结果 (Kayihan et al., 2016) 一致, 证明硼是与植物叶片可溶性糖的形成和转运有关的微量营养元素。

本试验结果与水培柠檬橙 (Shah et al., 2017)、土壤盆栽杨树 (吴秀丽 等, 2015) 和试管培养苹果苗 (Molassiotis et al., 2006) 的结果一致: 叶片 CAT 活性随施硼水平增加呈先增后降的趋势。当前研究文献中, 由于植物类型、栽培方法、施硼水平不同, 硼对植物 CAT 活性的影响结果也各不相同。水培芥菜的试验表明, 缺硼或硼过量都会导致芥菜叶片和根系中的 CAT 活性升高 (Archana, 2013); 土壤施硼栽培葡萄的试验发现, 高硼处理显著增加叶片 CAT 的活性 (Gunes et al., 2006); 土壤施硼 10 ~ 50  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  均增加番茄叶片的 CAT 活性 (Sirajuddin et al., 2016); 黄果柑的田间施硼试验也发现, 虽然不同时期叶片酶活性不同, 不同施硼水平酶活性也不同, 但是与对照相比, 所有施硼处理均增加 CAT 活性 (熊博 等, 2016)。本试验中菊花开花期的结果与这些结果类似, 即施硼处理增加叶片 CAT 活性。水培大麦苗的硼处理试验表明, 5 和 10  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  的硼处理增加了硼敏感大麦品种叶片的酶活性, 对硼不敏感的品种叶片酶活性无显著影响 (Karabal et al., 2003); 水培柑橘试验结果表明, 缺硼和硼过量都会降低叶片的 CAT 活性 (Han et al., 2009); 5 和 10  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  硼处理均增加了水培小麦叶片和根系 CAT 活性, 10  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  处理的酶活性显著高于 5  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  的 (Eser & Aydemir, 2016)。所有这些结果表明硼对 CAT 活性的影响与植物类型及品种、栽培方法和施硼水平有关; 本试验还表明, 硼对菊花 CAT 活性的影响也受生长阶段的影响。

脯氨酸 (Pro) 累积被认为是植物对多种非生物胁迫的普遍生理响应, 其具有稳定亚细胞结构、清除游离自由基、缓冲氧化还原电位、螯合重金属和调节细胞壁功能等多方面的作用 (Kaur & Asthir, 2015)。本试验结果表明, 土壤施硼降低了菊花叶片的 Pro 含量, 在施硼 5.0 和 10.0  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的情况下, 降幅在 70% 以上。这与苹果苗 (南芝润和范月仙, 2008) 和水培枳橙 (刘磊超 等, 2016) 上的结果一致; 与水培小麦 (Eser & Aydemir, 2016)、田间黄果柑 (熊博 等, 2016) 和水培西瓜 (陈晟等, 2016) 的试验结果不一致。反映了不同植物类型、培养条件和施硼水平对叶片 Pro 含量的影响不同。

本试验中, 5  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  以上施硼水平的叶片 MDA 含量显著升高, 说明已经达到了毒害菊花生长的水平。水培罗勒 (Landi et al., 2013)、水培小麦苗 (Han et al., 2009)、黄果柑田间试验 (熊博 等, 2016)、试管培养苹果苗 (Molassiotis et al., 2006)、土壤盆栽葡萄 (Gunes et al., 2006)、水培大麦 (Karabal et al., 2003)、MS 基质培养拟芥南 (Kayihan et al., 2016) 等的研究结果也表明, 硼过量都会显著增加叶片的 MDA 含量, 证明硼过量对植物的危害是增加膜脂过氧化损伤。刘磊超等 (2016) 的试验发现无论是叶面施硼还是根系施硼, 水培枳橙砧木苗叶片 MDA 含量虽有降低, 但与对照相

比均无显著差异, 其原因是其施硼量较低, 故没有造成植物的损伤, 这与本试验在土壤施硼  $2.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  及其以下时, 菊花叶片 MDA 含量与对照无显著差异一致。水培柠檬橙叶片 MDA 的含量随施硼浓度增加而增加 (Shah et al., 2017), 这主要是其施硼水平较高, 最低的施硼量就已经达到了足量的水平, 其他属于过量, 导致 MDA 含量增加, 本试验的结果与之相符。由此可见, 环境中硼过量毒害植物的机理之一是导致植物的膜脂过氧化损伤。

综上, 本试验中土壤施硼量在  $2.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  及其以下时, 对菊花生理生化过程具有有益作用, 超过  $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  会产生不良影响。

## References

- Alia M S, Elhamahmy M A, El-Shiekh A F. 2017. Mango trees productivity and quality as affected by boron and putrescine. *Scientia Horticulturae*, 2016: 248 - 255.
- Archana N P. 2013. Antioxidant responses and water status in Brassica seedlings subjected to boron stress. *Acta Physiol Plant*, 35: 697 - 706.
- Chen M, Mishra S, Scott A, Heckathorn S A, Frantz J M, Krause C. 2014. Proteomic analysis of *Arabidopsis thaliana* leaves in response to acute boron deficiency and toxicity reveals effects on photosynthesis, carbohydrate metabolism, and protein synthesis. *Journal of Plant Physiology*, 171: 235 - 242.
- Chen Sheng, Shi Mu-tian, Wu Yu-fen, Li Yong-yu. 2016. Boron stress on some physiological indexes of different watermelon genotypes. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 32 (16): 56 - 60. (in Chinese)
- 陈 晟, 施木田, 吴宇芬, 李永裕. 2016. 硼胁迫对不同基因型西瓜部分生理指标的影响. *中国农学通报*, 32 (16): 56 - 60.
- Eser A, Aydemir T. 2016. The effect of kinetin on wheat seedlings exposed to boron. *Plant Physiology and Biochemistry*, 108: 158 - 164.
- Gunes A, Soylemezoglu G, Inal A, Bageci E G, Coban S, Sahin O. 2006. Antioxidant and stomatal responses of grapevine (*Vitis vinifera* L.) to boron toxicity. *Scientia Horticulturae*, 110: 279 - 284.
- Han S, Tang N, Jiang H X, Yang L T, Li Y, Chen L S. 2009. CO<sub>2</sub> assimilation, photosystem II photochemistry, carbohydrate metabolism and antioxidant system of citrus leaves in response to boron stress. *Plant Science*, 176: 143 - 153.
- Karabal E, Yücel M, Öktem H A. 2003. Antioxidant responses of tolerant and sensitive barley cultivars to boron toxicity. *Plant Science*, 164: 925 - 933.
- Kaur G, Asthir B. 2015. Proline: a key player in plant abiotic stress tolerance. *Biologia Plantarum*, 59: 609 - 619.
- Kayihan D S, Kayihan C, Ciftci Y Ö. 2016. Excess boron responsive regulations of antioxidative mechanism at physio-biochemical and molecular levels in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Physiology and Biochemistry*, 109: 337 - 345.
- Landi M, Pardossi A, Remorini D, Guidi L. 2013. Antioxidant and photosynthetic response of a purple-leaved and a green-leaved cultivar of sweet basil (*Ocimum basilicum*) to boron excess. *Environmental and Experimental Botany*, 85: 64 - 75.
- Liu Chao-chao, Jiang Cun-cang, Dong Xiao-chang, Liu Gui-dong, Lu Xiao-pei. 2016. Effects of different ways of boron applications on the physiologies and biochemistries of navel orange rootstock. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 35 (1): 69 - 73. (in Chinese)
- 刘磊超, 姜存仓, 董肖昌, 刘桂东, 卢晓佩. 2016. 不同施硼方式对枳橙砧木生理生化特性的影响. *华中农业大学学报*, 35 (1): 69 - 73.
- Lu Xin, Xie Ying-he. 2011. *Soil Fertilizer Science*. Beijing: Chinese Agriculture University Press: 244 - 245. (in Chinese)
- 陆 欣, 谢英荷. 2011. *土壤肥科学*. 北京: 中国农业大学出版社: 244 - 245.
- Molassiotis A, Sotiropoulos T, Tanou G, Diamantidis G, Therios I. 2006. Boron-induced oxidative damage and antioxidant and nucleolytic responses in shoot tips culture of the apple rootstock EM 9 (*Malus domestica* Borkh). *Environmental and Experimental Botany*, 56: 54 - 62.
- Nadeem F, Farooq M, Nawaz A, Ahmad R. 2019. Boron improves productivity and profitability of bread wheat under zero and plough tillage on alkaline calcareous soil. *Field Crops Research*, 239: 1 - 9.
- Nan Zhi-run, Fan Yue-xian. 2008. Advance of researches on catalase in plants. *Anhui Agriculture Science Bulletin*, 14 (5): 27 - 29. (in Chinese)
- 南芝润, 范月仙. 2008. 植物过氧化氢酶的研究进展. *安徽农学通报*, 14 (5): 27 - 29.
- Reid R. 2010. Can we really increase yields by making crop plants tolerant to boron toxicity? *Plant Science*, 178: 9 - 11.

- Shah A, Wu X, Ullah A, Fahad S, Muhammad R, Yan L, Jiang C. 2017. Deficiency and toxicity of boron: alterations in growth, oxidative damage and uptake by citrange orange plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 145: 575 - 582.
- Shi Yi-hua, Liu Peng. 2002. A review of advances in physiological function of boron in plants. *Subtropical Plant Science*, 13 (2): 64 - 69. (in Chinese)
- 施益华, 刘 鹏. 2002. 硼在植物体内生理功能研究进展 (综述). *亚热带植物科学*, 13 (2): 64 - 69.
- Sirajuddin, Khan A, Ali L, Chaudhary H J, Munis M F H, Bano A, Masood S. 2016. *Bacillus pumilus* alleviates boron toxicity in tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) due to enhanced antioxidant enzymatic activity. *Scientia Horticulturae*, 200: 178 - 185.
- Uluisik I, Karakaya H C, Koc A. 2018. The importance of boron in biological systems. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 45: 156 - 162.
- Wang Chun-li. 2001. Physiological injury caused by deficient boron in plants. *Plant Physiology Journal*, 37 (4): 352 - 355. (in Chinese)
- 王春利. 2001. 植物缺硼的生理伤害. *植物生理学通讯*, 37 (4): 352 - 355.
- Wang Xue-kui. 2006. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press: 134 - 281. (in Chinese)
- 王学奎. 2006. 植物生理生化试验原理与技术. 2 版. 北京: 高等教育出版社: 134 - 281.
- Wu Xiu-li, Ou Yong-bin, Yuan Gai-huan, Chen Yong-fu, Wang Yang, Yao Yin-an. 2015. Physiological responses of two poplar species to high boron stress. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39 (4): 407 - 415. (in Chinese)
- 吴秀丽, 欧庸彬, 原改换, 陈永富, 王 阳, 姚银安. 2015. 两种杨树对高硼胁迫的生理响应. *植物生态学报*, 39 (4): 407 - 415.
- Xiao Lang-tao, Wang San-gen. 2005. Techniques of plant physiological experiment. Beijing: Agriculture Press: 211 - 215. (in Chinese)
- 萧浪涛, 王三根. 2005. 植物生理学试验技术. 北京: 中国农业出版社: 211 - 215.
- Xiong Bo, Ye Shuang, Qiu Xia, Li Qing-nan, Gu Xian-jie, Sun Guo-chao, Luo Hua, Wang Zhi-hui. 2016. Effect of boron on physiological and antioxidant enzymes activity of Huangguogan. *Acta Agriculturae Zhejiang*, 28 (7): 1171 - 1176. (in Chinese)
- 熊 博, 叶 霜, 邱 霞, 李清南, 古咸杰, 孙国超, 罗 华, 汪志辉. 2016. 硼对黄果柑生理及抗氧化酶活性的影响. *浙江农业学报*, 28 (7): 1171 - 1176.