

叶施硼、锌对油用牡丹‘凤丹’光合特性和矿质元素含量的影响

魏双雨,吉文丽*,杨丹怡

(西北农林科技大学 风景园林艺术学院,陕西 杨陵 712100)

摘 要:以油用牡丹品种‘凤丹’为试验材料,研究硼肥、锌肥作为叶面肥喷施对其光合特性、叶片矿质元素含量、叶绿素含量的影响,为合理的油用牡丹栽培施肥技术提供理论依据。结果表明,叶施硼肥和锌肥能有效的增大自然状态下‘凤丹’日平均净光合速率(P_n)和气孔导度(G_s),单施硼肥、单施锌肥和硼锌配施日平均净光合速率较对照组分别高 16.46%、19.35% 和 37.43%,增大了光合产物的积累。通过模型对光响应曲线和 CO_2 响应曲线进行拟合得出喷施硼肥和锌肥能够显著增大‘凤丹’潜在光合能力 P_{nmax} 值和 A_{max} 值,最大值分别可达 $15.12 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 和 $34.59 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,同时对其表观量子效率(AQY)、初始羧化效率(ACE)、光饱和点(LSP)和 CO_2 饱和点(CSP)也有所提高,使其能够适应更宽广的光照强度和 CO_2 浓度范围。施用硼肥和锌肥叶片叶绿素含量(Chl)有显著提高,Chla/Chlb 值增大;对叶片矿质元素氮、磷、铁、锰、硼、锌含量影响较大。所有结果均以硼肥和锌肥配合施用效果最佳。

关键词:‘凤丹’牡丹;硼肥;锌肥;光合特性;矿质元素

中图分类号:S685.11 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2019)02-0140-08

Effects of Boron and Zinc Foliar Application on Photosynthetic Characteristics and Mineral Elements of Oil Tree Peony *Paeonia ostii* ‘Feng Dan’

WEI Shuang-yu,JI Wen-li*,YANG Dan-yi

(College of Landscape Architecture and Arts,Northwest A&F University,Yangling 712100,Shaanxi,China)

Abstract: Taking common variety of *Paeonia ostii* ‘Feng Dan’ as material, and using foliar spray method, the effects of boron and zinc fertilizer on photosynthetic characteristics, mineral elements content and chlorophyll content in leaf were examined to provide theoretical basis for the rational cultivation and fertilization of oil tree peony. The results showed that foliar fertilization with boron and zinc could effectively increase daily average net photosynthetic rate efficiency (P_n) and stomatal conductance (G_s) of ‘Feng Dan’ under natural conditions. The average net photosynthetic rates of single use of boron, zinc and combined use of both elements were 16.46%, 19.35% and 37.43% higher than that of the control, which increased the accumulation of photosynthetic products. Through fitting the model to the light response curve and the CO_2 response curve, it was found that spraying boron and zinc fertilizer could increase the potential photosynthetic capacity P_{nmax} and A_{max} of ‘Feng Dan’ significantly, with the maximum values of $15.12 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ and $34.59 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, and at the same time, its apparent quantum efficiency (AQY), initial carboxylation efficiency (ACE), light saturation point (LSP) and CO_2 saturation point (CSP) were also improved, allowing it to adapt to a broader range of light intensity and CO_2 concentration range. The chlorophyll content (Chl) increased significantly through spraying boron and zinc fertilizer, and the value of Chla/Chlb was also improved. The application of boron and zinc also affected the contents of the mineral el-

收稿日期:2018-05-17 修回日期:2018-06-26

基金项目:林业公益性行业科研重大专项(201404701);杨凌示范区科技计划项目(2017NY-16)。

作者简介:魏双雨,女,在读硕士,研究方向:园林植物栽培生理。E-mail:weisy@nwfufu.edu.cn

* 通信作者:吉文丽,女,博士,副教授,博士生导师,研究方向:园林植物种质资源。E-mail:jiwenli@nwsuaf.edu.cn

elements in the leaves with different degrees, especially nitrogen, phosphorus, iron, manganese, boron and zinc. All results were the best in the combined application of boron and zinc fertilizer.

Key words: *Paeonia ostii* ‘Feng Dan’; boron fertilizer; zinc fertilizer; photosynthetic characteristics; mineral element

牡丹(*Paeonia suffruticosa*)是一种原产于我国的著名观赏植物^[1],属芍药科芍药属。近年来被用做新兴的木本油料作物的油用牡丹是指结实能力强、产油率($\geq 22\%$)高,能够用来加工食用牡丹籽油的牡丹类型^[2]。牡丹籽油是国家卫生部批准的新资源食用油^[3],经科学研究鉴定被认为是目前发现最利于人体健康、最有营养的油脂,它富含丰富的不饱和脂肪酸,总不饱和脂肪酸约为 92.42%,其中 α -亚麻酸高达 41.86 %,使得牡丹籽油的营养价值超过现有食用油,多项指标均优于“液体黄金”橄榄油^[4-5]。‘凤丹’(*Paeonia ostii* ‘Feng Dan’)是目前油用牡丹最广泛的种植品种之一,结籽多,出油高而且适应范围广,耐干旱、瘠薄,粗放管理^[6-7]。在干旱缺水的西北地区具有很高的应用推广价值。

微量元素包括铁、锰、铜、锌、硼、钼、氯等营养元素。在植物的生长过程中需求量很少,但是对植物的生长发育和代谢过程起着非常重要的作用。例如硼能刺激花粉的萌发和花粉管的伸长,使授粉能顺利进行^[8]。微量元素还能够影响作物的产量以及作物的品质,甚至还关系到人类的饮食健康问题^[9]。例如缺锌是全球人类健康中严重的微量营养缺乏问题,影响全球 1/3 以上的人口^[10-12],而微量元素 70%来源于植物。锌和硼都是高等植物的必需元素,已知其参与光合作用、氮固定、呼吸作用等生化活动^[13],对小麦、芝麻、水稻等作物产量和品质都有影响^[14-16]。这些微量元素有不同的施用方法,例如土施和叶面喷施。叶面喷肥具有用量少、分布均匀、快速吸收利用的优点。在石灰性土壤条件下,叶面喷锌提高作物籽粒锌含量的增加幅度可达 6%~115%,比土施锌肥更为有效^[17]。

目前在油用牡丹的栽培中,人们往往只重视 N、P、K 肥的施用而忽略微量元素的使用,这不仅限制了油用牡丹产量,而且导致籽粒中微量营养元素浓度较低。因此,开展微量元素对油用牡丹影响的研究,对提高油用牡丹产量和改善人类膳食营养摄入等方面具有重要意义。而在西北地区土壤中,硼和锌是普遍缺乏的微量营养元素^[18],本研究利用叶面喷肥的方法,从光合速率、表观量子效率、叶片矿质元素含量和叶绿素含量等角度探讨硼元素和锌元素对油用牡丹‘凤丹’光合特性的影响,为合理的油用牡丹栽培施肥技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地点位于陕西省杨陵区五泉镇西北农林科技大学油用牡丹试验基地。该地区属大陆性季风型气候区,年降水量 635.1 mm,年均气温 12.9℃,年均日照时数 2 163.8 h,全年 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温为 4 184℃。供试田块为关中黄壤土,田间管理良好,地块平整,肥力均匀。采用五点取样法对试验地土壤进行理化性质检测,检测结果为:pH 值为 8.5,有机质含量 23.82 g/kg,全 N 含量 0.79 g/kg,有效 P 含量 15.26 mg/kg,速效 K 含量 164.78 mg/kg,有效 Zn 0.58 mg/kg,有效 B 0.34 mg/kg。

1.2 试验材料与设计

供试材料选用用 6 年生‘凤丹’牡丹品种。供试肥料锌肥(Zn)使用硫酸锌,硼肥(B)使用硼酸。经文献分析和预试验,确定硫酸锌的施用浓度为 0.25%,硼酸的施用浓度也为 0.25%。试验设置 4 个处理:C1:单施浓度为 0.25%的硼肥;C2:混合施用浓度为 0.25%的硼肥和 0.25%的锌肥;C3:单施浓度为 0.25%的锌肥;C4:空白对照处理。每个处理设 3 个重复,每个重复设置小区面积 5 m \times 6 m=30(m²),小区随机排列,每 2 个小区之间设 0.1 m 间隔。采用叶面喷肥的方法,分别在牡丹大风铃期(4 月初)、盛花期(4 月中旬)和花后展叶期(4 月下旬)各喷施 1 次,每个重复喷施微量元素水溶液 2 kg,空白对照组喷施等量蒸馏水。喷施时间选在无风雨的阴天进行。除叶面喷肥外,其他养护管理措施同一般栽植。

1.3 测定项目和方法

光合作用日变化:采用美国 LI-COR 公司生产的 LI-6400XT 便携式光合作用测定系统测定各重复的光合日变化。主要测定指标有:净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、空气 CO₂ 浓度(C_a)、胞间 CO₂ 浓度(C_i)、气温(T_a)、相对湿度(RH)和光合有效辐射(PAR)。于最后一次叶面喷肥后 2 周的正常晴天 8:00—18:00 测定,每隔 2 h 测定 1 次。每小区随机选取 6 株,每株选取 3 个向阳面枝条,自顶部向下数第 3 片叶片为测定对象。叶室为普通叶室,面积 6 cm²。

光响应曲线:仪器同上采用 6400-02B 红蓝光

源,将光合有效辐射 PAR 梯度设置为 2 000、1 800、1 600、1 400、1 200、1 000、800、600、400、200、150、100、50、20 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 0 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, CO_2 注入系统设定值为 400 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。每小区选取 3 株,每株选取相同部位 3 片叶,测量前对叶片进行 20 min 光诱导。通过光响应模型^[19-20]拟合计算各处理的表现量子效率(AQY)、最大净光合速率($P_{n\text{max}}$)、暗呼吸速率(R_d)、光饱和点(LSP)、光补偿点(LCP),拟合方程为:

$$P_n = \alpha(1 - \beta \times I) \times I / (1 + \gamma \times I) - R_d \quad (1)$$

式中, I 指光合有效辐射, R_d 为暗呼吸速率, α 指光响应曲线的初始斜率, β 和 γ 为系数。

CO_2 响应曲线:仪器同上采用 CO_2 注入系统和 LED 红蓝光源,将 CO_2 浓度梯度设置为 400、300、200、150、100、50、400、400、600、800、1 000、1 200、1 500、1 800、2 000 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,光合有效辐射 PAR 设定为 1 500 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。通过 CO_2 响应模型^[21]拟合计算出各处理的初始羧化效率(α)、光合能力(A_{max})、饱和胞间 CO_2 浓度(CSP)、 CO_2 补偿点(CCP)、光呼吸速率(R_p)及决定系数。拟合方程为:

$$P_n(C_i) = a \times (1 - b \times C_i) \times C_i / (1 + c \times C_i) - R_p \quad (2)$$

式中, P_n 为净光合速率, C_i 为胞间 CO_2 浓度, R_p 为光呼吸速率, a 是 CO_2 响应曲线的初始羧化效率, b 和 c 为系数。

叶片矿质元素含量:于光合作用测定完成后采摘每个重复的新鲜叶片,测其矿质元素含量。通过凯氏定氮法分离测定N的含量;钼钒黄比色法测有

效P;使用火焰光度计(FP640 型)测定K 含量;原子吸收分光光度法测定Ca、Mg、Fe、Mn、Cu、和Zn 的含量,测Ca 含量时加入释放剂氯化锶防干扰,有效B 采用姜黄素比色法测定^[22]。

叶绿素含量:采用丙酮、乙醇混合液法提取叶绿素,浸提后使用日本岛津UV-2450 紫外可见分光光度计测定每个样品的光谱图像,选取波长在 645、663 nm 下的吸光值,计算叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素含量(mg/g)^[23]。

1.4 数据处理

使用 Excel2010 进行数据整理,SPSS20.0 进行方差分析、Duncan 多重比较等,采用 Sigmaplot10.0 绘制相应图表,图表中数据均为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 叶面喷肥对光合日变化的影响

由图 1 可知,试验期间光合有效辐射(PAR)在 1 d 内的变化早晚较低而中午高,在 12:00 达到最大值。空气中 CO_2 浓度(C_a)先降低后升高,植物经过一夜的呼吸作用,而且早上光照较弱光合作用吸收 CO_2 速率较慢,因此早上 C_a 处于最高状态,最大值为 431.16 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,之后随着光照强度变大光合作用变强, C_a 逐渐降低,傍晚时稍有上升。由于直接受到阳光照射,气温(T_a)随着 PAR 的增加而升高,14:00 达到最高 33.52℃,之后缓慢下降。空气相对湿度(RH)日变化趋势与 PAR 和 T_a 相反,呈先下降后上升趋势,早上 8:00 最高之后下降,到 14:00 达到最低值,之后开始回升。

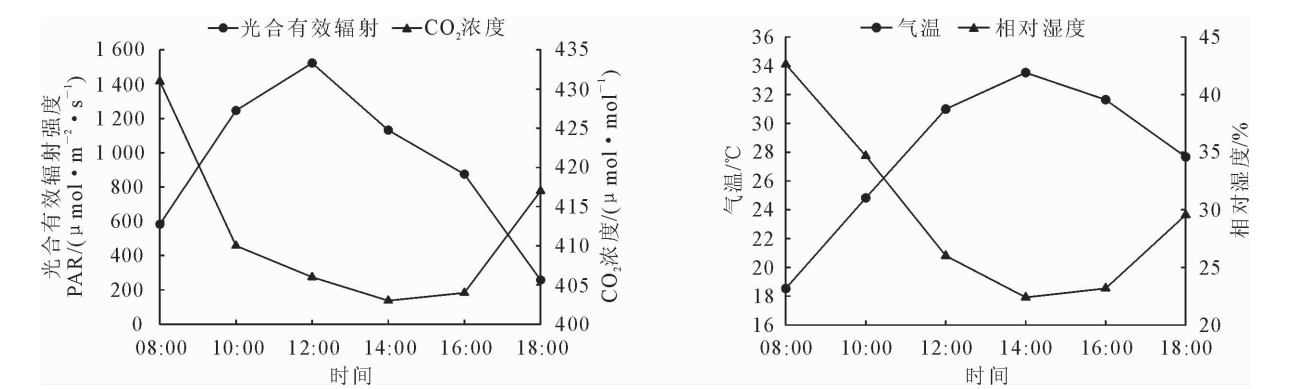


图 1 光合有效辐射(PAR)、 CO_2 浓度(C_a)、气温(T_a)、相对湿度(RH)的日变化

Fig. 1 Diurnal changes of PAR , C_a , T_a and RH during the experimental period

从图 2 可以看出,在自然状态下处理组和空白对照组‘凤丹’净光合速率(P_n)日变化呈“双峰型”。峰值出现在 10:00 和 16:00,在 14:00 左右存在明显的“光合午休”现象。就日平均净光合速率而言,3 种喷肥处理组显著($P<0.05$)高于空白对照组(5.53 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),其中硼锌配施组 C2 日平均净光合速

率最高(7.60 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),单施硼 C1、单施锌 C3 和硼锌配施 C2 较对照组日平均净光合速率分别提高了 16.46%、19.35% 和 37.43%。对于峰值处理组 and 对照组上午峰值明显高于下午峰值,上午峰值和下午峰值 C2 (12.05、6.47 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 显著 ($P<0.05$) 高于 C1、C3 和 C4。

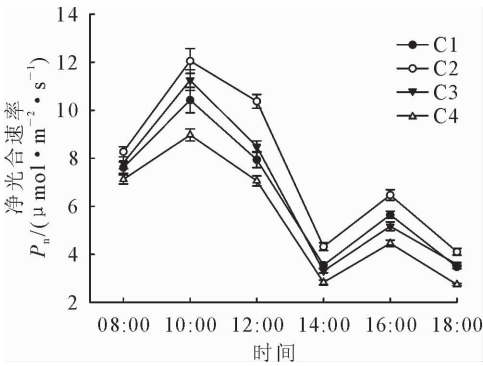


图2 叶施硼、锌对‘凤丹’光合作用日变化的影响
Fig. 2 Effects of foliar application of boron and zinc on the photosynthesis diurnal changes of ‘Feng Dan’

由图3可知,各处理气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r)在1 d内整体趋势都呈现先升高后降低,其中气孔导度峰值出现在10:00,8:00—10:00急剧上升,10:00—12:00随着温度的升高蒸腾速率变大,植物体为了减少水分的散失气孔逐渐关闭且下降速

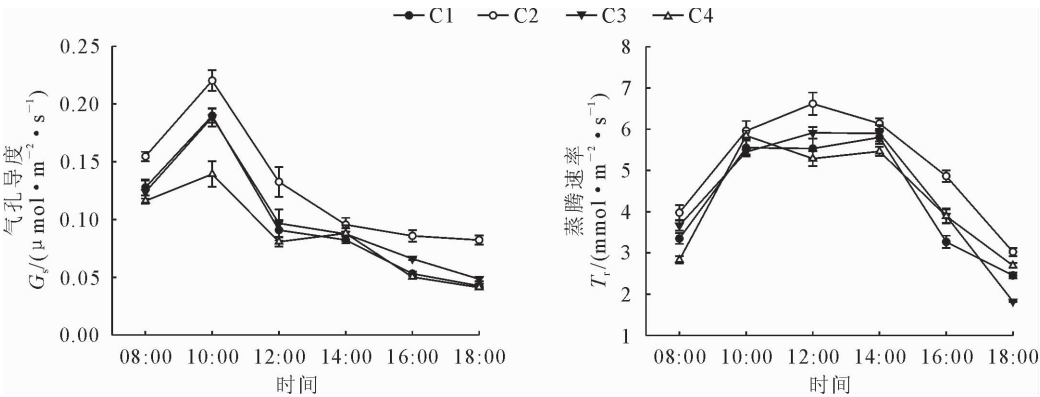


图3 叶施硼、锌对‘凤丹’气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r)日变化的影响
Fig. 3 Effects of foliar application of boron and zinc on diurnal changes of G_s and T_r of ‘Feng Dan’

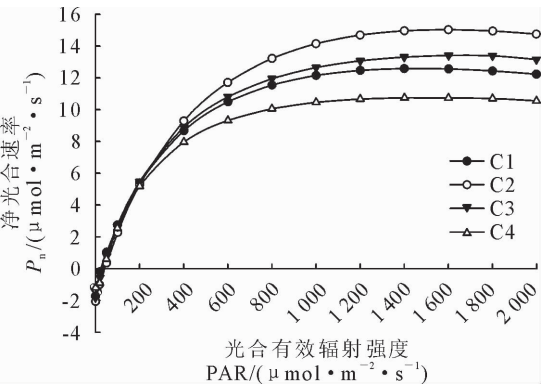


图4 叶施硼、锌对‘凤丹’光响应曲线的影响
Fig. 4 Effects of foliar application of boron and zinc on the light response curve of ‘Feng Dan’

由表1可知,C1、C2和C3 AQY显著($P < 0.05$)高于空白对照组,C2与C3之间AQY差异不显著($P > 0.05$)。 P_{nmax} 值是表征光合潜力的参数,叶片 P_{nmax} 越大表明植株的光合潜力越大,本试验中

度较快,12:00以后缓慢下降,与 P_n 变化一致。C1、C3处理气孔导度峰值显著($P < 0.05$)高于对照组,C2处理在1 d内气孔导度都高于其他组,在峰值处极显著($P < 0.01$)高于对照组。各施肥处理蒸腾速率在12:00达到最大值,而对照组蒸腾速率最大值出现在10:00,各组蒸腾速率在10:00—14:00变幅较小,14:00后迅速下降。

2.2 叶面喷肥对光响应曲线的影响

通过双曲线修正模型对每个处理组的光响应值进行拟合,得到理想的结果($R^2 = 0.998 \sim 0.999$,图4,表1)。由图4可知,各处理下‘凤丹’叶片光合速率在光合有效辐射强度0~1 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 逐渐增大,1 200~1 800 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 维持在较稳定的水平,此时C2处理组的净光合速率值最大。当光合有效辐射强度 $> 1\,800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,净光合速率略微有些下降,出现光抑制现象。

C2处理 P_{nmax} 值达到最大15.12 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。‘凤丹’施肥组最大净光合速率潜能显著高于空白对照组($P < 0.05$),C1和C3之间差异不显著($P > 0.05$),C2处理 P_{nmax} 值比C4、C1、C3分别高40.65%、17.30%、12.67%。 R_d 是揭示活的植物活细胞呼吸作用强度的指标。施肥处理组 R_d 显著高于对照组。C2处理 R_d 最大,消耗最多。C1和C3处理 R_d 差异不显著。表1同时展示了各处理之间在光饱和点LSP和光补偿点LCP方面的差异性。喷施硼、锌能显著增大光饱和点,使植株能够适应更宽广的光强范围,具有更大的光合能力和光能捕获能力。其中C2处理LSP达到最大值1 775.02 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,比对照组高出20.37%。C1与C2较对照组LSP也有显著提高。由于喷肥处理较对照组呼吸消耗多,所以LCP较高。

2.3 叶面喷肥对 CO_2 响应曲线的影响

通过双曲线修正模型对每个处理组的 CO_2 响

应值进行拟合,得到理想的结果($R^2=0.997\ 5\sim 0.999\ 6$,图 5,表 2)。由图 5 可知,各处理下叶片光合速率在胞间 CO_2 浓度 $0\sim 1\ 200\ \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 逐渐增大,且当胞间 CO_2 浓度 $<400\ \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 时上升快速,之后缓慢上升, $1\ 200\sim 1\ 400\ \mu\text{mol}\cdot$

mol^{-1} 维持在较稳定的水平,此时 C2 处理组的净光合速率值最大。当胞间 CO_2 浓度 $>1\ 400\ \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 时,净光合速率略微有些下降。相同 C_i 条件下喷肥处理组净光合速率明显高于对照组,表明喷肥可以提高‘凤丹’对 CO_2 的利用能力。

表 1 叶施硼、锌对‘凤丹’光响应参数比较

Table 1 The light-response parameters comparison of ‘Feng Dan’ with spraying boron and zinc					
处理	表观量子效率 AQY	最大净光合速率 $P_{n\max}$ $/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	光饱和点 LSP $/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	光补偿点 LCP $/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	暗呼吸速率 R_d $/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$
C1	$0.052\pm0.010\ 2\text{b}$	$12.89\pm1.16\text{b}$	$1\ 612.47\pm25.47.6\text{b}$	$35.56\pm3.3\text{b}$	$1.734\pm0.13\text{a}$
C2	$0.064\pm0.001\ 3\text{a}$	$15.12\pm0.89\text{a}$	$1\ 775.02\pm33.52\text{a}$	$41.13\pm2.16\text{a}$	$2.068\pm0.07\text{a}$
C3	$0.060\pm0.008\ 6\text{ab}$	$13.42\pm1.07\text{b}$	$1\ 676.66\pm28.36\text{b}$	$36.06\pm0.83\text{ab}$	$1.823\pm0.04\text{a}$
C4	$0.047\pm0.009\ 4\text{c}$	$10.75\pm1.04\text{c}$	$1\ 474.64\pm24.18\text{c}$	$32.98\pm2.2\text{b}$	$1.197\pm0.04\text{b}$

注:同列的不同字母表示处理差异显著,小写字母表示 5% 水平,大写字母表示 1% 水平。下同。

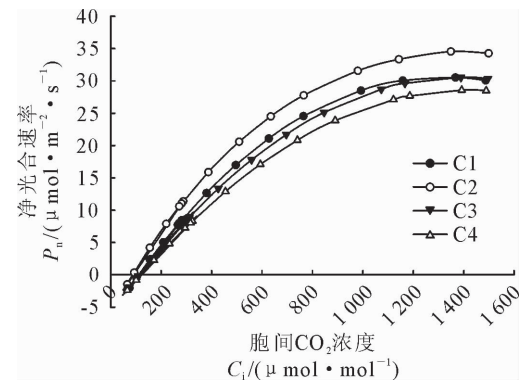


图 5 叶施硼、锌对‘凤丹’ CO_2 响应曲线的影响

Fig. 5 Effects of foliar application of boron and zinc on the carbon dioxide response curve of ‘Feng Dan’

由表 2 可知,C3 和 C2 处理 ACE 显著($P<0.05$)高于空白对照组。 A_{\max} 值代表着光合能力,本试验中施肥组与对照组 A_{\max} 值差异显著($P<0.05$),表明施肥能有效地增大‘凤丹’光合能力,C2 处理 A_{\max} 值最大达到 $34.59\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,分别比对照组、C1、C3 高 20.90% 、 13.26% 、 13.15% 。 R_p 为光呼吸速率,施肥处理的 R_p 较对照组有所提高但差异不显著。喷施硼、锌能显著增大 CSP,使植株能够适应更宽广的 CO_2 浓度范围,有更大的吸收利用 CO_2 的能力。其中 C2 处理 CSP 达到最大值 $1\ 454.84\ \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,比对照组高出 9.92% 。C2 处理 CCP 最低,其他各处理之间 CCP 差异不显著。

表 2 叶施硼、锌对‘凤丹’ CO_2 响应参数比较

Table 2 The carbon dioxide response parameters comparison of ‘Feng Dan’ with spraying boron and zinc					
处理	初始羧化效率 ACE	光合能力 A_{\max} $/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	饱和胞间 CO_2 浓度 CSP $/(\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1})$	CO_2 补偿点 CCP $/(\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1})$	光呼吸速率 R_p $/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$
C1	$0.053\pm0.007\text{bc}$	$30.54\pm0.96\text{b}$	$1\ 392.69\pm26.07\text{b}$	$111.74\pm8.48\text{a}$	$5.71\pm0.68\text{a}$
C2	$0.074\pm0.009\text{a}$	$34.59\pm1.23\text{a}$	$1\ 454.84\pm31.02\text{a}$	$87.59\pm8.62\text{b}$	$6.11\pm0.79\text{a}$
C3	$0.061\pm0.005\text{b}$	$30.57\pm1.37\text{b}$	$1\ 417.17\pm25.69\text{ab}$	$110.87\pm11.05\text{a}$	$5.86\pm0.66\text{a}$
C4	$0.048\pm0.002\text{c}$	$28.61\pm0.82\text{c}$	$1\ 323.56\pm23.77\text{c}$	$118.82\pm9.95\text{a}$	$5.48\pm0.32\text{a}$

2.4 叶面喷肥对叶片矿质元素含量的影响

由表 3 可知,喷施锌、硼能够有效地提高叶片 N、P 含量,C2 和 C3 与对照组间 N 元素含量差异显著($P<0.05$),C1 与 C3 之间 P 含量差异不显著($P>0.05$),C2 K 含量达到 $13.65\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 显著高于对照组,但与 C1、C3 之间差异不显著,施肥处理对 Ca、Mg 含量影响不显著,单施锌肥和硼锌配施对铁、锰含量影响较大,均显著高于对照组,但单施硼肥对铁、锰含量影响差异不显著,2 种肥对铜含量影响均不显著,喷施锌、硼能迅速增大叶片锌含量与硼含量,对于叶片锌含量锌处理组与非锌处理组显示出极显著差异性($P<0.01$),最大含锌量较对照组

高 114.24% ,对于叶片硼含量硼处理组与非硼处理组显示出极显著差异性($P<0.01$),最大含硼量较对照组高 88.29% 。

2.5 叶面喷肥对叶片叶绿素含量的影响

由图 6A 可知,施肥处理 Chla、Chlb、Chla+b 含量均显著高于对照组,C2 处理 Chla 显著($P<0.05$)高于其他组,C1 和 C3 之间 Chla 差异不显著($P>0.05$),3 种不同施肥处理间 Chlb 含量差异不显著,C1 与 C3 之间总叶绿素含量差异不显著,C2 总叶绿素含量最高 $13.076\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,比对照组、C1、C3 总叶绿素含量分别高 29% 、 10.26% 、 7.60% 。由图 6B 可知,C1、C2 和 C3 处理 Chla/b 值显著高

表 3 叶施硼、锌对‘凤丹’叶片矿质元素含量的影响

Table 3 Effects of foliar application of boron and zinc on the mineral elements content of ‘Feng Dan’

处理	大量元素/(g·kg ⁻¹)				
	N	P	K	Ca	Mg
C1	28.32±0.85bc	3.58±0.22bc	12.46±0.46ab	15.51±0.95a	5.39±0.87a
C2	37.43±2.01a	4.23±0.95a	13.65±0.73a	16.39±1.52a	5.75±0.72a
C3	31.58±3.45b	3.64±0.25bc	12.25±0.64ab	15.27±1.67a	5.42±0.73a
C4	24.94±2.73c	2.46±0.11c	11.87±0.80b	14.65±1.59a	5.23±0.45a

处理	微量元素/(mg·kg ⁻¹)				
	Fe	Mn	Cu	Zn	B
C1	136.75±11.68bc	64.32±4.42bc	12.76±0.90a	32.58±3.37Bc	53.21±4.28Ab
C2	218.47±25.24a	92.37±7.61a	13.15±1.38a	57.74±4.54Aa	60.29±5.34Aa
C3	176.18±6.51b	76.25±5.06b	12.48±1.23a	54.96±3.23Ab	36.47±3.76Bc
C4	129.62±10.08c	55.86±4.69c	12.29±1.17a	26.95±2.39Cd	32.02±2.83Cd

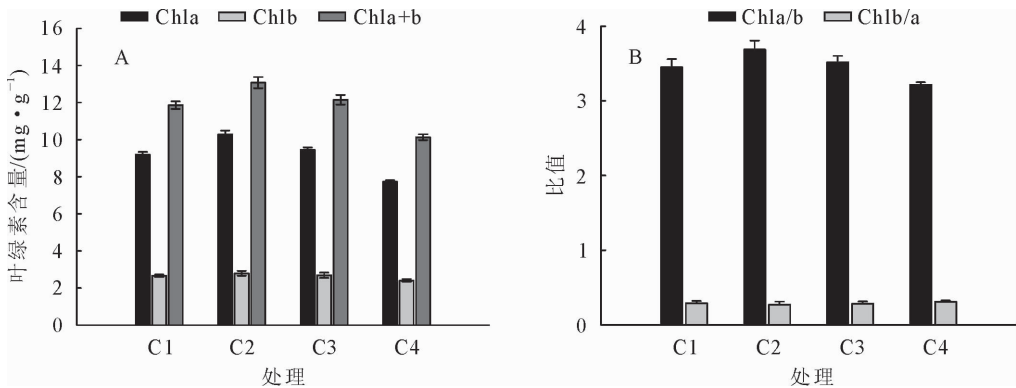


图 6 叶施硼、锌对‘凤丹’叶绿素含量的影响

Fig. 6 Effects of foliar application of boron and zinc on the chlorophyll content of ‘Feng Dan’

于对照组,Chlb/a 值较低,说明喷施硼肥和锌肥能提高叶绿素含量和捕光能力,C1 和 C3 之间 Chla/b 值差异不显著,但二者都与 C2 处理差异显著。

3 结论与讨论

光合作用是自然界中物质和能量的根本源泉^[24]。净光合速率反映叶片固定 CO₂、积累有机物的能力^[25],与作物产量在本质上存在着正相关关系^[26],产量的高低从根本上来讲是由叶片的光合能力和光合速率的高低决定的,因此作物生长的目标即是尽可能地提高其光合速率,增加干物质积累,进而提高产量。气孔是植物与外界环境进行 CO₂、O₂ 和 H₂O 等气体交换的通道,其孔径的大小直接决定着植物叶片蒸腾作用的强弱和光合作用速率的快慢^[27],进而影响物质积累。本试验中自然状态下各处理‘凤丹’光合日变化呈“双峰型”有明显的“光合午休”现象,此结果与张志浩^[28]等研究结果一致。喷施锌肥和硼肥有效地提高了‘凤丹’一天内净光合速率的平均值和峰值,增加了干物质的积累,这与宗毓铮^[29]报道喷施适量浓度的硼和锌提高苜蓿叶片

净光合速率的研究结果一致。施肥后气孔导度的日平均值和峰值较对照组有所增加。尤其在气温迅速升高的 10:00—12:00,为减少水分散失,气孔关闭,气孔导度迅速下降,净光合速率降低,但施肥处理气孔导度仍较空白对照组大,此结果说明喷施硼肥和锌肥有助于叶片抵御午间的高温,维持较大的净光合速率。

光响应曲线和 CO₂ 响应曲线反映植物在不同光照和不同 CO₂ 浓度下潜在光合能力,受叶绿素含量、呼吸作用等多种因素影响^[30]。本试验中对光响应值和 CO₂ 响应值进行拟合相关系数较高,能很好地反映不同处理对不同光照条件和不同 CO₂ 浓度下的净光合速率变化。AQY 反映了植物光合作用对光能的利用效率^[26],ACE 反映了植物光合作用对 CO₂ 的利用效率。试验中喷施锌、硼处理 AQY、ACE 均显著高于空白对照组,说明锌肥和硼肥可以显著提高‘凤丹’叶片对光能的转化效率和对 CO₂ 的利用效率。P_{nmax} 和 A_{max} 表现了植物叶片的最大光合潜力^[31-32],施肥处理较空白对照组 P_{nmax} 值和 A_{max} 值有显著提高,说明喷肥能增大‘凤丹’潜在光

合能力,同时施肥组 LSP 和 CSP 也有所提高,表明了施肥能使‘凤丹’适应更宽广的光照强度和 CO₂ 浓度,同时表示了喷肥后具有更大的光合能力、光能捕获的能力和吸收利用 CO₂ 的能力^[33]。其中锌硼配施处理效果最佳,说明锌肥和硼肥有协同作用。试验中通过对比各处理光合日变化和光响应值得出,在相同光合有效辐射下‘凤丹’对红蓝光源的光能利用率要高于自然光源,这是由于叶片在进行光合作用时光合色素主要吸收太阳光中的红光和蓝紫光。

矿质元素是作物生长发育、产量形成和品质提高的物质基础,是影响其生长发育的主要因子^[34]。本试验中喷施 Zn、B 对‘凤丹’N、P 含量影响显著,施肥处理对钙含量影响不显著,可能由于黄壤土 pH 值较高,叶片钙含量普遍较高,所以差异不显著。铁是叶绿素合成的原料^[24],试验中锌硼配施和单施锌显著增加了铁元素的含量,与叶绿素含量增加明显保持一致。喷施锌、硼在短期内能大幅提高叶片锌含量和硼含量。这一结果与 D. L. Ojeda-Barrios^[35]在山核桃试验研究中一致和南丽丽^[36]在苜蓿试验研究中一致。

叶绿素是植物光合作用过程中吸收光能的主要色素^[37]。叶绿素含量是定量计算植物生理反应的重要参考系统^[38],也是决定光合速率高低和干物质积累量的一项重要因素^[39],其高低直接影响到植物光合作用的强弱。试验表明,喷施硼肥、锌肥和喷锌配施能显著增大叶片 Chla、Chlb、Chla+b 的含量,有利于提高光合速率,从而增加干物质的积累,增大产量。叶绿素 a、b 比值 Chla/Chlb 反映捕光色素复合体Ⅱ在所有含叶绿素的结构中所占比例,该比值高说明捕光能力强,试验中施硼肥和锌肥对二者比值提高显著,增强了‘凤丹’光能利用率。

参考文献：

[1] 洪德元,潘开玉.芍药属牡丹组的分类历史和分类处理[J].植物分类学报,1999,37(4):351-368.
HONG D Y,PAN K Y. Taxonom ical history and revision of *Paonia* sect. Moutan (Paeoniaceae)[J]. Acta Phytotaxonomica Sinica,1999,37(4):351-368. (in Chinese)

[2] 周琳,王雁.我国油用牡丹开发利用现状及产业化发展对策[J].世界林业研究,2014,27(1):68-71.
ZHOU L,WANG Y. Development and utilization of oilseed peony and its industrial development strategy in China[J]. World Forestry Research,2014,27(1):68-71. (in Chinese)

[3] 中华人民共和国卫生部公告 2011 年第 9 号[Z]. 中华人民共和国卫生部公报,2011(4):7.

[4] 周海梅,马锦琦,苗春雨,等.牡丹籽油的理化指标和脂肪酸成分分析[J].中国油脂,2009,34(7):72-74.

ZHOU H M,MA J Q,MIAO C Y,*et al.* Physicochemical indexes and fatty acid composition of peony seed oil[J]. China Oils and Fats,2009,34(7):72-74. (in Chinese)

[5] 李凯,周宁,李赫宇.牡丹花、牡丹籽成分与功能研究进展[J].食品研究与开发,2012,33(3):228-230.
LI K,ZHOU N,LI H Y. Composition and function research of peony flowers and peony seeds[J]. Food Research and Development,2012,33(3):228-230. (in Chinese)

[6] 史国安,焦封喜,焦元鹏,等.中国油用牡丹的发展前景及对策[J].中国粮油学报,2014,29(9):124-128.
SHI G A,JIAO F X,JIAO Y P,*et al.* Development prospects and strategies of oil tree peony industry in China[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association,2014,29(9):124-128. (in Chinese)

[7] 李林昊,张延龙,牛立新,等.秦岭地区‘凤丹’牡丹居群果期相关性状的表型多样性研究[J].西北林学院学报,2015,30(4):127-131.
LI L H,ZHANG Y L,NIU L X,*et al.* Phenotypic variations of fruiting-related traits of populations in *Paeonia ostii* ‘Feng Dan’ native to Qinling Mountains[J]. Journal of Northwest Forestry University,2015,30(4):127-131. (in Chinese)

[8] IWAI H,HOKURA A,OISHI M,*et al.* The gene responsible for borate cross-linking of pectin rhamnogalacturonan-II is required for plant reproductive tissue development and fertilization[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2006,103(44):11659-116592.

[9] SAADATI S,MOALLEMI N,MORTAZAVI S,*et al.* Effects of zinc and boron foliar application on soluble carbohydrate and oil contents of three olive cultivars during fruit ripening[J]. Scientia Horticulturae,2013,164:30-34.

[10] GRAHAM R D,SENADHIRA D,ORTIZ-MONASTERIO I. A strategy for breeding staple-food crops with high micronutrient density (reprinted from plant nutrition for sustainable food production and environment,1997)[J]. Soil Science and Plant Nutrition,1997,43(Supp. 1):1153-1157.

[11] ALEXANDER J S. Global impacts of human mineral malnutrition[J]. Plant and Soil,2010,335(1/2):133-154.

[12] KENNETH H B,RIVERA J A,BHUTTA Z,*et al.* International zinc nutrition consultative group (IZiNCG) technical document # 1. assessment of the risk of zinc deficiency in populations and options for its control[J]. Food and Nutrition Bulletin,2004,25(Supp. 1):99-203.

[13] CAKMAK I,KURZ H,MARSCHNER H. Short-term effects of boron,germanium and high light-intensity on membrane-permeability in boron deficient leaves of sunflower[J]. Physiologia Plantarum,1995,95(1):11-18.

[14] 刘美英,高炳德,吕福虎. 锌肥、硼肥及其交互作用对春小麦籽粒品质的影响[J]. 干旱区资源与环境,2016,30(1):175-179.
LIU M Y,GAO B D,LV F H. Effects of Zinc fertilizer,Boron fertilizer and their interaction on the grain quality of spring wheat[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2016,30(1):175-179. (in Chinese)

[15] 王苏影,颜廷献,徐宝庆,等. 配施硼、锌肥及施用方法对芝麻生长及产量的影响[J]. 江西农业学报,2014,26(12):35-37.
WANG S Y,YAN T X,XU B Q,*et al.* Effects of combined

application and application methods of Boron and Zinc fertilizer on growth and yield of sesame[J]. ACTA Agriculturae Jiangxi,2014,26(12):35-37. (in Chinese)

[16] 刘宗海,李玉平,蔡兰英. 赤水紫泥泡冬田水稻施用锌、硼肥效应分析[J]. 耕作与栽培,2016(4):24-25,38,82.

LIU Z H,LI Y P,CAI L Y. Effect of Zn,B fertilizers on rice in purple caly and soaked field of Chishui[J]. Tillage and Cultivation,2016(4):24-25,38,82. (in Chinese)

[17] ZHANG Y Q,SHI R L,REZAUL K M,*et al.* Iron and Zinc concentrations in grain and flour of winter wheat as affected by foliar application[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2010,58(23):11227-12268.

[18] 刘 铮. 中国土壤微量元素[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1979:92-130.

[19] YE Z P. A new model for relationship between irradiance and the rate of photosynthesis in *Oryza sativa*[J]. Photosynthetica,2007,45(4):637-640.

[20] YE Z P,YU Q. A coupled model of stomatal conductance and photosynthesis for winter wheat[J]. Photosynthetica,2008,46(4):637-640.

[21] 叶子飘,于强. 光合作用对胞间和大气 CO₂ 响应曲线的比较[J]. 生态学杂志,2009,28(11):2233-2238.

YE Z P,YU Q. A comparison of response curves of winter wheat photosynthesis to flag leaf intercellular and air CO₂ concentrations[J]. Chinese Journal of Ecology,2009,28(11):2233-2238. (in Chinese)

[22] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000:325-328.

[23] PORRA R J. The chequered history of the development and use of simultaneous equations for the accurate determination of chlorophylls a and b[J]. Photosynthesis Research,2002,73(1-3):149-156.

[24] 潘瑞炽,王小菁,李娘辉. 植物生理学[M]. 4 版. 北京:高等教育出版社,2001:55-98.

[25] VELICKA R,MARCINKEVICIENE A,RIMKEVICIENE M. Photosynthetic characteristics and productivity of spring rape plants as related to crop density[J]. Russian Journal of Plant Physiology,2007,54(4):545-552.

[26] 许大全. 光合作用效率[M]. 上海:上海科学技术出版社,2002:163-166.

[27] HETHERINGTON A M,WOODWARD F I. The role of stomata in sensing and driving environmental change[J]. Nature,2003,424(6951):901-908.

[28] 张志浩,杨玉珍,李娟,等. 油用牡丹凤丹光合特性[J]. 江苏农业科学,2018,46(5):113-116.

ZHANG Z H,YANG Y Z,LI J,*et al.* Photosynthetic characteristics of *Paeonia ostii* [J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2018,46(5):113-116. (in Chinese)

[29] 宗毓铮. 四种微肥喷施对紫花苜蓿光合特性与元素吸收及有机物转运的影响[D]. 杨陵:西北农林科技大学,2010.

[30] 李敏,吉文丽,张恒,等. 外源 Ca²⁺ 对油用牡丹凤丹白幼苗光合特性的影响[J]. 西北林学院学报,2017,32(5):39-45.

LI M,JI W L,ZHANG H,*et al.* Effects of exogenous calcium on photosynthetic characteristics and biomass of oil *Paeonia ostii* ‘Fengdan White’[J]. Journal of Northwest Forestry University,2017,32(5):39-45. (in Chinese)

[31] 熊彩云,曾伟,肖发明,等. 木荷种源间光合作用参数分析[J]. 生态学报,2012,32(11):3628-3634.

XIONG C Y,ZENG W,XIAO F M,*et al.* An analysis of photosynthetic parameters among *Schima superba* provenances [J]. ACTA Ecologica Sinica,2012,32(11):3628-3634. (in Chinese)

[32] WATLING J R,PRESS M C,QUICK W P. Elevated CO₂ induces biochemical and ultrastructural changes in leaves of the C-4 cereal sorghum[J]. Plant Physiology,2000,123(3):1143-1152.

[33] ANDRADE F H,CALVINO P,CIRILO A,*et al.* Yield responses to narrow rows depend on increased radiation interception[J]. Agronomy Journal,2002,94(5):975-980.

[34] 李贻铨,杨承栋. 中国林木施肥与营养诊断研究现状[J]. 世界林业研究,1998(3):59-66.

LI Y Q,YANG C D. status of the research in fertilization and nutrient diagnosis of forest soil in China[J]. World Forestry Research,1998(3):59-66. (in Chinese)

[35] OJEDA-BARRIOS D L,PEREA-PORTILLO E,HERNANDEZ-RODRIGUEZ O A,*et al.* Foliar fertilization with Zinc in pecan trees[J]. Hortscience,2014,49(5):562-566.

[36] 南丽丽,师尚礼,陈建纲,等. 硼锌配施对苜蓿矿质元素和碳水化合物含量的影响[J]. 中国草地学报,2013,35(1):23-28,54.

NAN L L,SHI S L,CHEN J G,*et al.* Effects of B and Zn on mineral element and carbohydrate of *Alfalfa* [J]. Chinese Journal of Grassland,2013,35(1):23-28,54. (in Chinese)

[37] MAXWELL K,JOHNSON G N. Chlorophyll fluorescence-a practical guide[J]. Journal of Experimental Botany,2000,51(345):659-668.

[38] WITTMANN C,ASCHAN G,PFANZ H. Leaf and twig photosynthesis of young beech (*Fagus sylvatica*) and aspen (*Populus tremula*) trees grown under different light regime [J]. Basic and Applied Ecology,2001,2(2):145-154.

[39] GARTY J,TAMIR O,HASSID I,*et al.* Photosynthesis,chlorophyll integrity,and spectral reflectance in lichens exposed to air pollution[J]. Journal of Environmental Quality,2001,30(3):884-893.