

外源油菜素内酯对油用牡丹‘凤丹’生理特性的影响

肖瑞雪, 吕静霞, 贾长松, 王晓静, 张利霞, 郭丽丽, 薛娴, 侯小改*

河南科技大学农学院, 河南洛阳471023

摘要: 为明确外源油菜素内酯(BR)对油用牡丹‘凤丹’(*Paeonia ostii* ‘Fengdan’)生理特性的影响, 从而为油用牡丹丰产栽培提供理论依据, 本研究以‘凤丹’为试验材料, 在果实膨大期采用整株喷施法, 以不同浓度(0、0.025、0.05、0.1和0.2 mg·L⁻¹) BR溶液处理‘凤丹’植株, 测定不同时期‘凤丹’叶片的生理指标。结果表明, 随着生育进程的推进, ‘凤丹’叶片的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)和叶绿素含量均呈下降趋势, 超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性以及可溶性蛋白(SP)、可溶性糖(SS)、脯氨酸(Pro)和丙二醛(MDA)含量呈升高趋势。与对照相比, 外源BR处理显著提高了‘凤丹’叶片的 P_n 、 G_s 和 T_r , 显著增加了叶绿素和渗透调节物质含量以及抗氧化酶活性, 并降低了膜脂过氧化产物含量。在本试验条件下, 喷施0.05 mg·L⁻¹ BR处理显著提高了叶片的抗氧化能力, 最有利于提高‘凤丹’光合能力。

关键词: ‘凤丹’; 油菜素内酯; 生理特性

当前, 我国油脂油料进口率平均年增长达35.3%, 而食用油自给率已从本世纪初的60%下降到37%, 解决食用油供给不足问题刻不容缓(王瑞元2011)。牡丹籽油作为新资源食品, 对于提高我国木本植物食用油的自给率具有重要意义。牡丹(*Paeonia suffruticosa*)为芍药科芍药属木本植物, 在我国已有1 500多年的栽培历史, 主要用于丹皮和牡丹籽油的生产, 是一种很好的药食兼备植物。其种子中含有丰富的不饱和脂肪酸, 即亚麻酸、油酸、亚油酸等, 约占脂肪酸总量的93%。这些优质的不饱和脂肪酸具有改善心血管功能、抗炎、抗氧化、增强免疫力、降血脂、降血糖等保健作用, 其中 α -亚麻酸参与细胞膜和生物酶合成, 具有保护视力、增强智力和抗衰老等功效, 含量高达45.41%~45.92% (韩雪源等2014; Gao等2018; 张东等2017)。牡丹籽油作为一种极具开发潜力的营养保健油(代慧慧等2016), 提高其原料牡丹籽粒产量及品质具有重要意义。

油菜素内酯(brassinosteroid, BR)是一种新型、高效的植物激素, 能解除植物的光抑制现象, 提高植物的净光合速率(net photosynthetic rate, P_n)、最大光化学效率、光系统II光能捕获效率、实际光化学效率和光能转换效率, 对植物的光合效率有显著促进效果(Anuradha和Rao 2009)。研究表明, 外源BR处理可通过提高叶片抗氧化酶活性、叶绿素含量和蒸腾速率(transpiration rate, T_r), 从而显著提高作物的净光合速率, 提升其光合能力, 加快蔗糖运输, 提高细胞内可溶性糖含量, 促进蛋白质代

谢和有机物质积累, 促进植物生长发育, 最终提高作物产量(马金虎等2015; 李蒙等2015)。目前, 人们对BR应用方面的研究主要集中在番茄(*Solanum lycopersicum*) (Cui等2016)、玉米(*Zea mays*) (马金虎等2015)、黄瓜(*Cucumis sativus*) (彭小琴等2015)等蔬菜作物上, 在油料作物方面的研究与应用甚少。夏季处于结实期的牡丹‘凤丹’受自然高温、强光、干旱等因素的影响, 植株叶片会发生黄化、枯萎、凋零等现象, 光合作用受抑制, 植株的生长发育受到严重影响。本研究以油用‘凤丹’为材料, 在果实膨大期采用整株喷施法, 研究了外源BR对结实期‘凤丹’生理特性的影响, 以期油用牡丹的丰产栽培提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概述

试验于2017年在河南科技大学牡丹试验基地(34°33'N 112°16'E)进行, 试验地土壤含17.56 g·kg⁻¹有机质、1.33 g·kg⁻¹全氮、85.7 mg·kg⁻¹碱解氮、16.35 mg·kg⁻¹速效磷、109.31 mg·kg⁻¹速效钾。试验期间日气温变化如图1所示。

1.2 试验材料与试验设计

供试材料为九年生‘凤丹’(*Paeonia ostii* T. Hong & J. X. Zhang), 选取长势、大小均匀一致的

收稿 2018-07-02 修定 2018-08-19

资助 国家自然科学基金(31370697)、河南省高校重点科研项目(17A180003)和河南省科技攻关项目(162102110095)。

* 通讯作者(hxg382@126.com)。

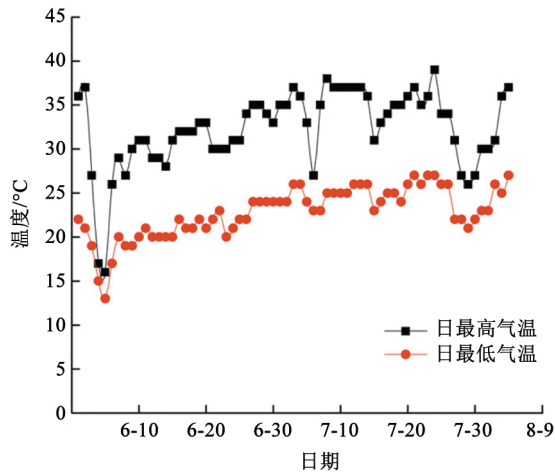


图1 试验期间日气温变化

Fig.1 Daily temperature changes during the test

‘凤丹’100株,采用随机区组设计的方法,设置不同浓度(0、0.025、0.05、0.1、0.2 mg·L⁻¹)BR(购自上海绿泽生物科技有限责任公司)溶液5个处理,每个处理20株,以备后续试验。采用整株喷施法,于6月1日18:00进行全株BR喷施试验,以叶片上下表面滴水为标准(彭小琴等2015),BR喷施量约为每株100 mL。

1.3 测定指标与方法

在常规田间管理条件下,分别于6月16日、7月1日、7月16日、7月26日、8月3日进行光合指标测定,从每个处理中选取5片生长状况一致且受光均匀的倒三叶叶片,采用LI-6400便携式光合仪(LI-COR, Lincoln, Nebraska, USA)测定‘凤丹’叶片

的净光合速率、气孔导度(stomatal conductance, G_s)、胞间CO₂浓度(intercellular CO₂ concentration, C_i)和蒸腾速率。

于同期进行采样,每个处理随机挑选5株采集倒三叶,经液氮速冻后置于-80°C冰箱中保存,用于生理生化指标测定。采用蒽酮乙酸乙酯法测定可溶性糖(soluble sugar, SS)含量(李合生2000),采用氮蓝四唑法测定超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性,采用愈创木酚氧化法测定过氧化物酶(peroxidase, POD)活性,采用考马斯亮蓝G250法测定可溶性蛋白(soluble protein, SP)含量,采用硫代巴比妥酸法测定丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量,采用磺基水杨酸法测定脯氨酸(proline, Pro)含量,采用浸提法测定光合色素含量(王学奎2006)。

1.4 数据处理与分析

用Excel 2007和SPSS 16.0软件进行数据统计及显著性分析,并运用Origin 8.0软件进行绘图。

2 实验结果

2.1 不同浓度BR对‘凤丹’叶片中抗氧化酶活性的影响

SOD和POD作为植物体内重要的抗氧化酶,参与植物的生理代谢,在清除植物体内活性氧的过程中起关键作用(Shao等2008)。由图2可知,在初始阶段(6月份),SOD和POD活性较低,随着植株衰老,活性氧自由基逐渐积累,引起植物的应激反应,SOD和POD活性随之增加。经不同浓度BR溶

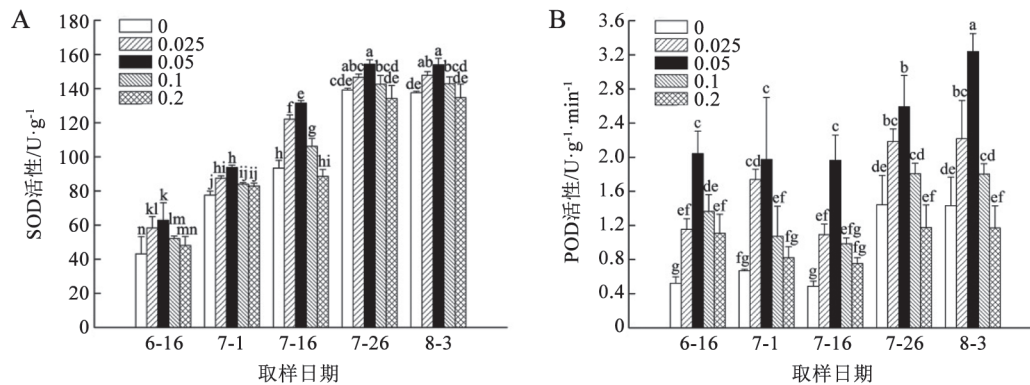


图2 不同浓度BR对‘凤丹’叶片中抗氧化酶活性的影响

Fig.2 Effect of BR at different concentrations on antioxidant enzyme activities in *P. ostii* ‘Fengdan’ leaves

图例中数值单位均为mg·L⁻¹,下图同此。

液处理后, SOD和POD活性在 $0.025\sim 0.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ BR范围内均高于对照, 说明外源BR通过调节‘凤丹’叶片的抗氧化酶活性增强了植株抗氧化能力。在不同时期, 随着喷施BR溶液浓度的增加, SOD和POD活性均呈现先升后降的趋势, 在 $0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ BR处理下达最大值, 此时与对照相比POD活性分别显著增加2.92、1.94、3.00、0.80和1.27倍。这些结果表明外源BR对‘凤丹’叶片的抗氧化酶活性的调节作用受浓度影响, 适宜浓度BR能够显著促进叶片抗氧化酶活性增加, 减轻活性氧对植株的损害。

2.2 不同浓度BR对‘凤丹’叶片中渗透调节物质的影响

可溶性糖和可溶性蛋白是植物体内重要的渗透调节物质, 能提高细胞的保水能力。由图3-A和B可知, 这两种渗透调节物质在整个生育进程中均呈逐渐上升趋势, 可能是由于6~8月为‘凤丹’的生殖生长时期, 此时植株生长代谢旺盛, 光合产物大量积累, 为果实及种子的发育提供了物质保障。经不同浓度BR溶液处理后, 不同时期叶片的可溶

性糖和可溶性蛋白含量均呈先升后降的趋势, 当BR浓度为 $0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时达最大值, 此时可溶性糖含量随时间推移比对照依次增加22%、14%、32%、41%和49%, 可溶性蛋白比对照依次增加57%、32%、32%、16%和16%, 说明外源BR溶液能够调节‘凤丹’植株体内渗透调节物质的含量, 在一定程度上增强植株对夏季炎热环境的适应能力, 有利于植株的正常生长发育。

MDA是膜脂过氧化产物, 可作为植株受自由基毒害程度的指标之一(成波等2015)。由图3-C可知, 在试验早期(7月中旬之前), ‘凤丹’叶片中MDA含量变化趋势不明显, 维持在较稳定水平。随着时间推移, 植株叶片中MDA含量显著增加, 这可能与环境温度的升高导致叶片中活性氧自由基增多、细胞膜结构受到破坏有关。在不同时期, 喷施BR溶液后各处理的MDA含量均低于对照(除7月1日 $0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ BR以外); 且随着BR溶液喷施浓度的升高, MDA含量均呈先下降后上升的趋势; 当BR浓度为 $0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, MDA含量达最低值。这些结果表明叶面喷施BR溶液能够在一定程度上抑制

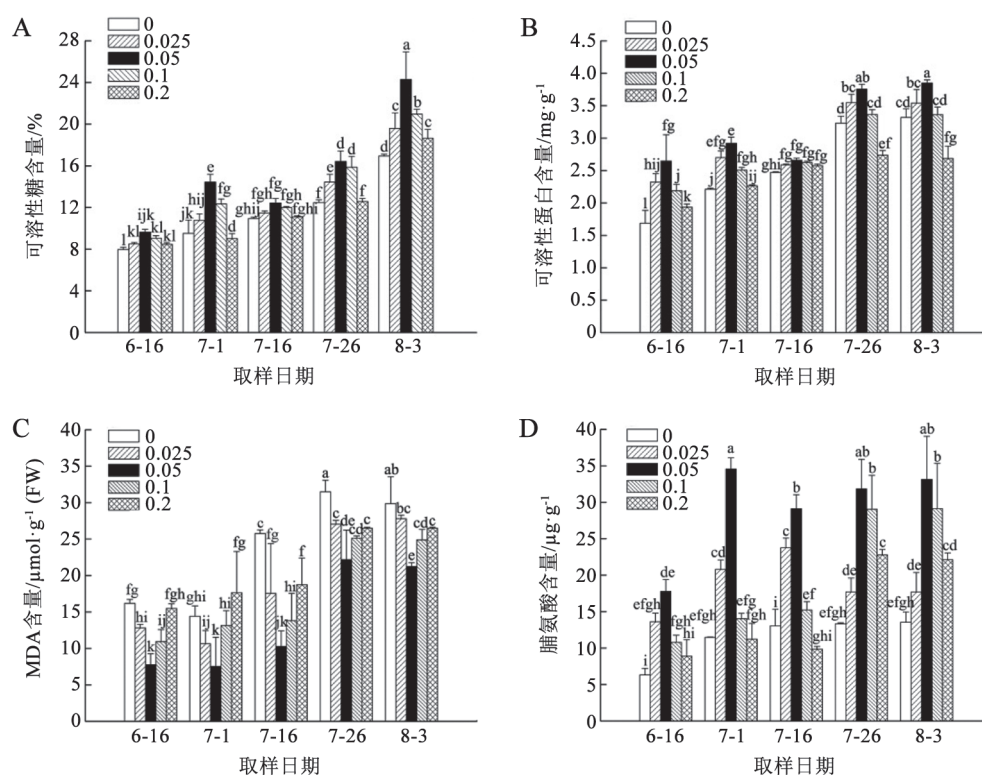


图3 不同浓度BR对‘凤丹’叶片中渗透调节物质含量的影响

Fig.3 Effect of BR at different concentrations on osmotic regulating substances in *P. ostii* 'Fengdan' leaves

膜质过氧化反应的发生,降低植株受伤害的程度,促进植株正常生长发育。

脯氨酸可作为细胞膜和酶类的保护物质及自由基清除剂,促进蛋白质的水合作用,维持细胞的稳定性,并在细胞质的渗透平衡方面起重要作用。由图3-D可知,脯氨酸含量在6月份维持在较低水平,随着植株衰老,脯氨酸含量迅速上升,7、8月份其含量波动浮动较小,趋于稳定。在不同时期,随着喷施BR溶液浓度的升高,脯氨酸含量均呈现先升高后下降的趋势,在0.05 mg·L⁻¹ BR处理下达最大值,与同时期对照相比分别增加1.82、2.01、4.14、1.39和1.45倍,说明外源BR处理能够增加‘凤丹’叶片中脯氨酸含量,维持细胞的稳定性,提高植株的代谢水平。

2.3 不同浓度BR对‘凤丹’叶片光合特性的影响

植物净光合速率越大,表明植物固定CO₂的能力即光合作用能力越强。图4-A显示,在6月中旬‘凤丹’叶片有着较高的净光合速率;在7、8月份夏季高温条件下净光合速率均在较低水平,而外源BR处理对‘凤丹’叶片净光合速率产生了促进作用,

各时期不同浓度BR处理下净光合速率比对照均有所提高。随着BR处理浓度的增加,不同时期‘凤丹’叶片的净光合速率均呈现先上升后下降的趋势;在BR浓度为0.05 mg·L⁻¹时,净光合速率均达到最大值,分别比同时期对照处理显著增加52%、129%、61%、74%和41%。外源BR处理对净光合速率有促进作用,且随浓度的变化促进作用的程度也发生变化。

气孔是植物叶片与外界进行气体交换的主要通道,而气孔导度代表气孔张开的程度,可反映植物的光合作用能力大小(Zhu等2002)。图4-B显示,在整个试验期间(6~8月),‘凤丹’叶片在6月气孔导度最大,随着生育进程的推进,气孔导度逐渐降低,说明气孔导度随植株的衰老逐渐减小。不同时期喷施BR溶液处理的气孔导度均高于同时期对照处理,在BR浓度为0.025和0.05 mg·L⁻¹时均达显著水平。随着BR处理浓度的增加,不同时期‘凤丹’叶片的气孔导度均呈现先升后降的趋势;在BR浓度为0.05 mg·L⁻¹时,气孔导度均达到最大值,分别比同时期对照处理增加68%、80%、81.25%、87.5%和

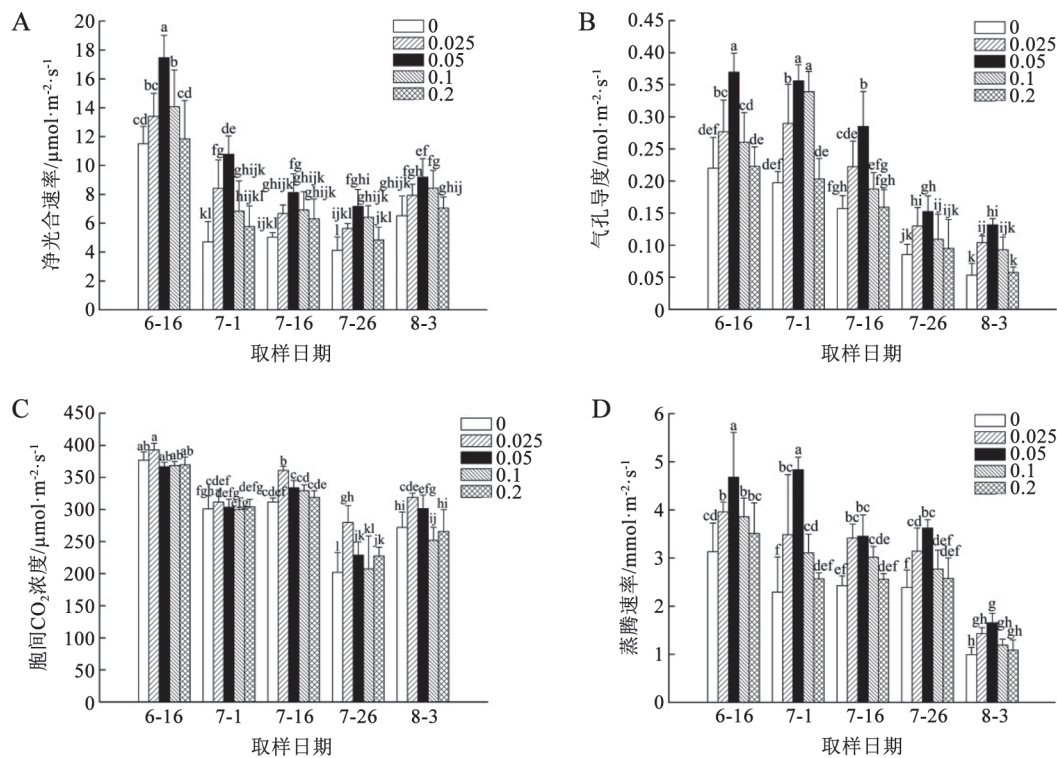


图4 不同浓度BR对‘凤丹’叶片光合指标的影响

Fig.4 Effect of BR at different concentrations on photosynthetic indexes of *P. ostii* 'Fengdan' leaves

160%。由此可见, 喷施BR处理能够促进夏天高温季节‘凤丹’植株叶片气孔张开, 增加气孔导度, 有利于吸收更多的CO₂, 间接促进植株光合作用的增强。

胞间CO₂浓度与植物的光合速率密切相关, 是判断植物是否为气孔因素的重要指标之一(Sharkey等1982)。图4-C显示, 外源BR处理下‘凤丹’的胞间CO₂浓度变化幅度较小; 且不同BR处理中, 以0.025 mg·L⁻¹处理的胞间CO₂浓度最高, 与净光合速率和气孔导度的变化趋势存在差异。当BR处理浓度为0.05 mg·L⁻¹时, 气孔导度上升, 胞间CO₂浓度略有下降, 说明叶肉细胞光合能力上升。当BR处理浓度为0.2 mg·L⁻¹时, 气孔导度呈下降趋势, 但胞间CO₂浓度无明显变化, 说明光合能力随之下降。这些结果表明外源BR能影响植株叶肉细胞活性从而调节光合速率。

植物光合作用形成的干物质量与植物蒸腾作用散失的水分呈正相关。图4-D显示, 在整个试验期间(6~8月), ‘凤丹’叶片在6月蒸腾速率最大, 随着生育进程的推进, 蒸腾速率逐渐降低, 与气孔导度的变化趋势相似。在不同时期, ‘凤丹’叶片的蒸腾

速率均呈现先升高后降低的趋势, 在BR浓度为0.05 mg·L⁻¹时达到最大值, 分别比同时期对照增加50%、111%、42%、52%和67%。高蒸腾速率可提高根系吸水能力, 并可降低叶温, 对夏季高温条件下‘凤丹’叶片有很好的保护作用。

2.4 不同浓度BR对‘凤丹’叶片中光合色素的影响

光合色素含量的变化直接影响植物对光能的吸收, 指示植物光合作用与生活力的大小, 并参与植物干物质的积累(Emes等2003)。由图5可知, 除0.05 mg·L⁻¹ BR处理外的其他所有处理从6月中旬到7月上旬, 叶绿素a、b与总叶绿素的含量均呈下降趋势, 从7月中旬到8月上旬基本保持稳定, 变化幅度较小。BR溶液处理后, 叶绿素a、b与总叶绿素的含量均高于同时期对照处理。在不同时期, 随着BR浓度的增加, 叶绿素a、b与总叶绿素的含量均呈现先上升后下降的趋势, 均在0.05 mg·L⁻¹处理时达最大值; 其中, 叶绿素a分别比同时期对照处理显著增加23%、62%、26%、57%和64%, 叶绿素b含量显著增加24%、168%、37.5%、110%和75%, 总叶绿素含量显著增加23%、87%、30%、

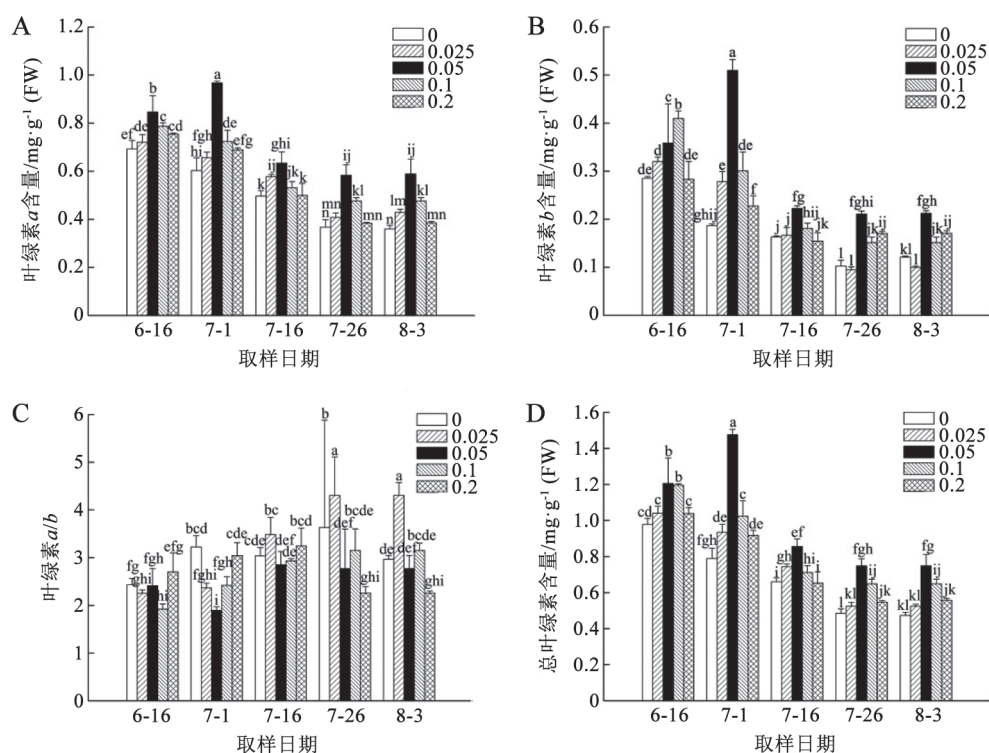


图5 不同浓度BR对‘凤丹’叶片中光合色素的影响

Fig.5 Effect of BR at different concentrations on photosynthetic pigments in *P. ostii* ‘Fengdan’ leaves

36%和60%，说明喷施适宜浓度BR溶液能够提高‘凤丹’植株的光合色素水平，增强植株的光能利用效率，进而促进植株光合能力的提升。

3 讨论

6~8月适逢夏季，受高温强光影响，‘凤丹’植株体内活性氧大量积累，使部分核酸及蛋白质结构受到破坏；同时膜脂过氧化产物含量增加，使细胞膜的损伤加剧；叶片色素含量下降，逐渐黄化、衰老，进而导致植株气孔导度和蒸腾速率下降，最终造成‘凤丹’植株光合能力减弱，严重限制了油用牡丹的高产增收(寿光耀2016)。植物体内活性氧的大量积累同时会诱导抗氧化酶系统启动并清除活性氧，防止植物产生的有毒物质对细胞膜造成损害，维持细胞的正常代谢活动(Du等2014; 马丽峰等2015)。本研究中，在不同时期，抗氧化酶(SOD和POD)活性以及可溶性糖、可溶性蛋白与脯氨酸的含量均随BR浓度的升高呈先升高后降低的趋势，在适宜浓度(0.05 mg·L⁻¹) BR溶液处理下达到最大值；而MDA的变化趋势正好相反，随BR浓度的升高呈先下降后上升的趋势，在BR为0.05 mg·L⁻¹时达到最小值，说明喷施适宜浓度的BR可能促进植物体内抗氧化酶的合成或调节特定基因的转录与翻译从而使抗氧化酶激活(Bajguz 2000)，进而调节相关代谢酶的水平，清除活性氧自由基，缓解膜脂过氧化程度，使植株细胞膜结构趋于稳定(宋吉轩等2015)，此外还能维持渗透平衡，调节水分平衡，防止细胞脱水，增强细胞保水能力，保障植株正常的生理代谢，提高植株的抗逆性，最终促进其生长发育，这与前人在谷子(*Panicum italicum*) (钟妍婷等2015)、番茄(Ali等2006)、草莓(*Fragaria × ananassa*) (忻雅等2015)上的研究结果相似。

植物进行光合作用时，气孔因素和非气孔因素均会影响其光合速率。本研究中，在不同时期，随着BR浓度的升高，‘凤丹’植株叶片的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率均呈现先升高后降低的趋势，而胞间CO₂浓度处于波动状态，无明显变化规律。因此推断，外源BR处理可能是通过调节非气孔因素，即调节蒸腾作用、降低叶片温度、提高叶肉细胞活性来影响‘凤丹’光合电子传递及光合碳同化等光合过程，进而提高‘凤丹’光合作用能

力的。胡文海等(2006)等人研究表明，外源BR处理可显著提高黄瓜叶片的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率，对胞间CO₂浓度无显著影响，与本研究结果类似。叶绿素含量与植物体中各类色素蛋白复合物的功能密切相关，叶绿素中含有的叶绿素a和叶绿素b具有吸收、传递和转化光能的作用；在某种程度上，叶绿素含量越高，植物光合作用能力越强(徐培洲等2006)。有研究表明，BR能够通过提高植物叶片中叶绿素含量以及碳酸酐酶和核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶/加氧酶(ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase, RuBisCO)活性，进而提高植物的净光合速率，促进有机物合成和植株生长发育，从而最终提高作物产量(李蒙等2015)。本试验中，在不同时期，‘凤丹’叶片中叶绿素a、叶绿素b和总叶绿素含量总体上呈先上升后下降的趋势，并在BR浓度为0.05 mg·L⁻¹时达到最大值，与净光合速率的变化趋势一致，这可能是由于外源BR通过影响聚光色素复合体附着蛋白的表达或叶绿素合成和降解过程中的关键酶来促进‘凤丹’植株叶片叶绿素合成(Hasan等2011)，提高植株光合机构对CO₂利用效率，从而增强其光合能力的。郝建军等(1990)研究表明，外源BR处理可使玉米幼苗的光合速率和叶绿素含量显著提高，但其认为光合作用的提高并不是通过对光合系统的直接活化，而是经过较长时间的生化过程实现的。王传凯和郭淼(2017)研究发现，外源BR处理可提高裸燕麦(*Avena nuda*)的叶绿素含量，增强其光合作用，促进有机物质的积累，这与本研究结果相似，但不同之处在于裸燕麦的最佳处理浓度为0.1和1 mg·L⁻¹，这可能与不同植物对BR的敏感性不同有关。

适宜浓度的外源BR喷施处理显著提高了‘凤丹’结实期叶片中抗氧化酶活性，增强了其抗氧化能力，显著抑制了膜脂过氧化反应的发生，降低了膜脂过氧化产物的含量，并提高了渗透调节物质的含量，对清除‘凤丹’体内活性氧自由基、维持细胞渗透势、提高植株细胞的保水能力、稳定代谢平衡有重要的促进作用，有效缓解了‘凤丹’叶片的衰老进程，延缓了植株叶绿素降解速率，最终促使结实期‘凤丹’植株的光合能力明显提升，为其籽粒的丰产增收奠定了基础。就处理浓度而言，BR为0.05 mg·L⁻¹时处理效果最好。

参考文献(References)

- Ali B, Hayat S, Hasan SA, et al (2006). Effect of root applied 28-homobrassinolide on the performance of *Lycopersicon esculentum*. *Sci Hortic*, 110 (3): 267–273
- Anuradha S, Rao SSR (2009). Effect of 24-epibrassinolide on the photosynthetic activity of radish plants under cadmium stress. *Photosynthetica*, 47 (2): 317–320
- Bajguz A (2000). Effect of brassinosteroids on nucleic acids and protein content in cultured cells of *Chlorella vulgaris*. *Plant Physiol Biochem*, 38 (3): 209–215
- Cheng B, Lian HF, Liu SQ, et al (2015). Effects of sulfur and selenium combination fertilizing on the growth, quality and antioxidant ability of *Allium sativum* during senescence. *Plant Physiol J*, 51 (1): 44–50 (in Chinese with English abstract) [成波, 连海峰, 刘世琦等(2015). 硫硒配施对衰老期大蒜生长、品质及抗氧化能力的影响. *植物生理学报*, 51 (1): 44–50]
- Cui L, Zou Z, Zhang J, et al (2016). 24-Epibrassinolide enhances plant tolerance to stress from low temperatures and poor light intensities in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Funct Integr Genomics*, 16 (1): 29–35
- Dai HH, Wei AC, Li XD, et al (2016). Research progress in the development and application of peony seed oil. *Cereals Oils*, 29 (1): 4–6 (in Chinese with English abstract) [代慧慧, 魏安池, 李晓栋等(2016). 牡丹籽油开发应用的研究进展. *粮食与油脂*, 29 (1): 4–6]
- Du F, Shi H, Zhang X, et al (2014). Responses of reactive oxygen scavenging enzymes, proline and malondialdehyde to water deficits among six secondary successional seral species in Loess Plateau. *PLoS ONE*, 9 (6): e98872
- Emes MJ, Bowsher CG, Hedley C, et al (2003). Starch synthesis and carbon partitioning in developing endosperm. *J Exp Bot*, 54 (382): 569–575
- Gao LL, Li YQ, Wang ZS, et al (2018). Physicochemical characteristics and functionality of tree peony (*Paeonia suffruticosa* Andr.) seed protein. *Food Chem*, 240: 980–988
- Han XY, Zhang YL, Niu LX, et al (2014). Fatty acid composition of ‘Fengdan’ peony seed oils from different growing regions. *Food Sci*, 35 (22): 181–184 (in Chinese with English abstract) [韩雪源, 张延龙, 牛立新等(2014). 不同产地‘凤丹’牡丹籽油主要脂肪酸成分分析. *食品科学*, 35 (22): 181–184]
- Hao J, Xuan M, He R (1990). Effect of brassinolide (BR) on the rate of photosynthesis and respiration in maize seedlings. *J Shenyang Agr Univ*, 21 (1): 43–47 (in Chinese) [郝建军, 玄美淑, 何若韞(1990). 油菜素内酯对玉米幼苗光合速率与呼吸速率的影响. *沈阳农业大学学报*, 21 (1): 43–47]
- Hasan SA, Hayat S, Ahmad A (2011). Brassinosteroids protect photosynthetic machinery against the cadmium induced oxidative stress in two tomato cultivars. *Chemosphere*, 84 (10): 1446–1451
- Hu W, Huang L, Mao W, et al (2006). Role of brassinosteroids in the regulation of photosynthetic apparatus in cucumber leaves. *Acta Horti Sin*, 33 (4): 762–766 (in Chinese with English abstract) [胡文海, 黄黎锋, 毛伟华等(2006). 油菜素内酯对黄瓜苗期叶片光合机构调节作用的研究. *园艺学报*, 33 (4): 762–766]
- Li H (2000). Principle and Technology of Plant Physiological and Biochemical Experiments. Beijing: Higher Education Press (in Chinese) [李合生(2000). 植物生理生化实验原理与技术. 北京: 高等教育出版社]
- Li M, Shu S, Guo S, et al (2015). Effect of 24-brassinolides on photosynthetic characteristics and fruit quality of cherry tomato. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 35 (1): 138–145 (in Chinese with English abstract) [李蒙, 束胜, 郭世荣等(2015). 24-表油菜素内酯对樱桃番茄光合特性和果实品质的影响. *西北植物学报*, 35 (1): 138–145]
- Ma JH, Xing GF, Yang XH, et al (2015). Effects of exogenous EBR and NO signal on antioxidant system and low response gene expression under cold stress on maize embryo. *Chin J Appl Ecol*, 26 (5): 1411–1418 (in Chinese with English abstract) [马金虎, 邢国芳, 杨小环等(2015). 外源EBR和NO信号对低温胁迫下玉米种胚抗氧化系统和低温响应基因表达的影响. *应用生态学报*, 26 (5): 1411–1418]
- Ma LF, Li ZT, Yang KJ, et al (2015). Effects of submergence on growth and antioxidant enzymes activities of sensitive rice (*Oryza sativa*) seedlings. *Plant Physiol J*, 51 (7): 1082–1090 (in Chinese with English abstract) [马丽峰, 李佐同, 杨克军等(2015). 没顶淹水对敏感性水稻幼苗生长及抗氧化酶活性的影响. *植物生理学报*, 51 (7): 1082–1090]
- Peng XQ, Hui ZM, Zhang H, et al (2015). Effects of 24-epibrassinolide on photosynthetic characteristics and resistance system in grape leaves after pesticide treatment. *Agr Res Arid Areas*, 33 (3): 130–138 (in Chinese with English abstract) [彭小琴, 惠竹梅, 张晖等(2015). 24-表油菜素内酯对农药处理下葡萄叶片光合特性和抗逆性的影响. *干旱地区农业研究*, 33 (3): 130–138]
- Qian G (2016). Effects of high temperature stress on physiological and biochemical changes of different varieties of tree peony (dissertation). Luoyang: Henan University of Science and Technology (in Chinese with English abstract) [蹇光耀(2016). 高温胁迫对不同牡丹品种生理生化特性的影响(学位论文). 洛阳: 河南科技大学]
- Shao HB, Chu LY, Shao MA, et al (2008). Higher plant antioxidants and redox signaling under environmental stresses. *CR Biol*, 331 (6): 433–441
- Sharkey TD, Imai K, Farquhar GD, et al (1982). A direct confirmation of the standard method of estimating intercellular partial pressure of CO₂. *Plant Physiol*, 69 (3): 657–659
- Song JX, Li JH, Liu MR, et al (2015). Effects of brassinosteroid application on osmotic adjustment and antioxidant

- enzymes in *Leymus chinensis* under drought stress. *Acta Pratacult Sin*, 24 (8): 93–102 (in Chinese with English abstract) [宋吉轩, 李金还, 刘美茹等(2015). 油菜素内酯对干旱胁迫下羊草渗透调节及抗氧化酶的影响研究. *草业学报*, 24 (8): 93–102]
- Wang CK, Guo M (2017). Effects of brassinolide on growth morphology and physiological characters of *Avena nuda* under room and high temperature stresses. *J South Agr*, 48 (7): 1173–1177 (in Chinese with English abstract) [王传凯, 郭淼(2017). 油菜素内酯对裸燕麦常温和高温胁迫下生长形态及生理特性的影响. *南方农业学报*, 48 (7): 1173–1177]
- Wang R (2011). Development trend and status of edible oil market at home and abroad. *China Oils Fats*, 36 (6): 1–6 (in Chinese) [王瑞元(2011). 国内外食用油市场的现状与发展趋势. *中国油脂*, 36 (6): 1–6]
- Wang X (2006). *Principle and Technology of Plant Physiological and Biochemical Experiments*. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press (in Chinese) [王学奎(2006). *植物生理生化实验原理和技术*. 第2版. 北京: 高等教育出版社]
- Xin Y, Zhang Q, Qiu JR, et al (2015). Effects of brassinolide on quality and stress tolerance of summer strawberry seedlings. *Acta Agr Zhejiangensis*, 27 (10): 1735–1738 (in Chinese with English abstract) [忻雅, 张青, 裘劫人等(2015). 油菜素内酯对夏季草莓育苗素质及耐逆性的影响. *浙江农业学报*, 27 (10): 1735–1738]
- Xu PZ, Li Y, Yuan S, et al (2006). Studies of photosystem complexes and chlorophyll synthesis in chlorophyll-deficient rice mutant *W1*. *Sci Agr Sin*, 39 (7): 1299–1305 (in Chinese with English abstract) [徐培洲, 李云, 袁澍等(2006). 叶绿素缺乏水稻突变体中光系统蛋白和叶绿素合成特性的研究. *中国农业科学*, 39 (7): 1299–1305]
- Zhang D, Xue Y, Duan Z, et al (2017). Analysis and comparison of chemical composition in peony seed oil and flaxseed oil. *China Oils Fats*, 42 (10): 34–38 (in Chinese with English abstract) [张东, 薛雅琳, 段章群等(2017). 牡丹籽油和亚麻籽油化学组成分析与比较. *中国油脂*, 42 (10): 34–38]
- Zhong Y, Yuan X, Liu Z, et al (2015). Effects of brassinolide on agronomic and physiological properties of foxtail millet. *Crops*, (2): 124–128 (in Chinese with English abstract) [钟妍婷, 原向阳, 刘哲等(2015). 油菜素内酯处理对谷子农艺性状和生理特性的影响. *作物杂志*, (2): 124–128]
- Zhu GJ, Jiang GM, Hao NB, et al (2002). Relationship between ecophysiological features and grain yield in different soybean varieties. *Acta Bot Sin*, 44 (6): 725–730

Effect of exogenous brassinosteroid on physiological characteristics of *Paeonia ostii* ‘Fengdan’

XIAO Rui-Xue, LÜ Jing-Xia, JIA Chang-Song, WANG Xiao-Jing, ZHANG Li-Xia, GUO Li-Li, XUE Xian, HOU Xiao-Gai*

College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China

Abstract: The effect of exogenous brassinosteroid (BR) on physiological characteristics of *Paeonia ostii* ‘Fengdan’ was investigated to provide a theoretical basis for high-yield cultivation of oil tree peony (*Paeonia* sect. *Moutan*). In the fruit enlargement period, the plants were treated with different concentrations (0, 0.025, 0.05, 0.1 and 0.2 mg·L⁻¹) of BR solution by the whole body spraying method, and the physiology indicators of leaves at different stages were determined. With the development of ‘Fengdan’, leaf net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), transpiration rate (T_r) and chlorophyll contents all showed downward trends. The activities of superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD), and the contents of soluble protein (SP), soluble sugar (SS), proline (Pro) and malondialdehyde (MDA) increased. Compared to the control, exogenous BR treatment significantly increased P_n , G_s and T_r of ‘Fengdan’ leaves, significantly increased the content of chlorophyll, osmotic regulating substances, and the activities of antioxidant enzymes, and decreased the contents of membrane peroxidation products. In this experiment, spraying 0.05 mg·L⁻¹ BR significantly increased the antioxidant capacity of the leaves, which is the most beneficial to the improvement of photosynthetic capacity of ‘Fengdan’.

Key words: *Paeonia ostii* ‘Fengdan’; brassinosteroid; physiological characteristics

Received 2018-07-02 Accepted 2018-08-19

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (31370697), Henan Provincial Key Scientific Research Project (17A180003), and Henan Province Science and Technology Research Project (162102110095).

*Corresponding author (hxg382@126.com).