

引用格式:

魏祯祯, 严宁宁, 牛童非, 郭大龙, 郭丽丽, 侯小改. 茉莉酸甲酯处理的油用牡丹干旱下的光合及生理特性[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2022, 48(2): 175–180.

WEI Z Z, YAN N N, NIU T F, GUO D L, GUO L L, HOU X G. Photosynthetic and physiological characteristics of oil tree peony treated with methyl jasmonate under drought[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2022, 48(2): 175–180.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



茉莉酸甲酯处理的油用牡丹干旱下的光合及生理特性

魏祯祯¹, 严宁宁¹, 牛童非¹, 郭大龙², 郭丽丽^{1*}, 侯小改¹

(1.河南科技大学农学院, 河南 洛阳 471023; 2.河南科技大学园艺与植物保护学院, 河南 洛阳 471023)

摘要:以油用牡丹‘凤丹’为材料, 整株喷施4种浓度(50、100、200、400 $\mu\text{mol/L}$)的茉莉酸甲酯(MeJA), 以喷施清水处理为对照(CK), 连续喷施3 d后进行干旱处理再复水, 在‘凤丹’到达中度、重度干旱2 d及复水2 d后取样, 测定‘凤丹’叶片的渗透调节物质含量、丙二醛(MDA)含量、光合色素含量, 同时对光合指标进行测定。结果表明: 200 $\mu\text{mol/L}$ MeJA 处理后, 中度干旱的‘凤丹’幼苗的脯氨酸含量最高, 较CK显著提高250.34%, 净光合速率、气孔导度和蒸腾速率最大, 较CK分别提高25.73%、68.0%、43.04%; ‘凤丹’的叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素含量在400 $\mu\text{mol/L}$ MeJA 处理下达到最高, 较CK分别提高了33.33%、26.09%、34.48%; 喷施200 $\mu\text{mol/L}$ MeJA 后, 重度干旱的‘凤丹’幼苗可溶性糖含量达到最大值, 净光合速率最大, 较CK提高了41.73%; 蒸腾速率和胞间 CO_2 浓度在400 $\mu\text{mol/L}$ MeJA 处理下最高, 分别较CK提高了74.07%和13.44%; 复水后, 适宜浓度的MeJA 处理使光合生理指标均得到不同程度的恢复。表明外源MeJA 处理能增强‘凤丹’幼苗对干旱的抵抗能力, 提高‘凤丹’幼苗的光合速率、光合色素和渗透调节物质含量, 降低干旱对细胞膜的损伤, 以200 $\mu\text{mol/L}$ MeJA 处理效果最佳。

关键词: ‘凤丹’; 茉莉酸甲酯; 干旱; 光合特性; 生理特性

中图分类号: S565.901

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2022)02-0175-06

Photosynthetic and physiological characteristics of oil tree peony treated with methyl jasmonate under drought

WEI Zhenzhen¹, YAN Ningning¹, NIU Tongfei¹, GUO Dalong², GUO Lili^{1*}, HOU Xiaogai¹

(1.College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China; 2.College of Horticulture and Plant Protection, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China)

Abstract: Using the oil tree peony ‘Fengdan’ as the material, the whole plant was sprayed with four concentrations(50, 100, 200, 400 $\mu\text{mol/L}$) of methyl jasmonate(MeJA), with spraying clear water treatment as the control(CK). After continuous spraying for 3 d, the plants were subjected to drought stress and then re-watered, and ‘Fengdan’ samples were taken respectively after 2 d of moderate drought, 2 d of severe drought and 2 d of re-hydration. The content of osmotic regulators, malondialdehyde(MDA), photosynthetic pigment content, and photosynthetic indicators in ‘Fengdan’ leaves were measured. The results showed that after induction treatment with 200 $\mu\text{mol/L}$ MeJA, the proline content of ‘Fengdan’ seedlings with moderate drought was the highest, which was significantly increased by 250.34% compared with CK; the net photosynthetic rate, stomatal conductance and transpiration rate of ‘Fengdan’ seedlings with moderate

收稿日期: 2020-09-02

修回日期: 2022-01-05

基金项目: 河南省自然科学基金项目(202300410119); 河南省高校科技创新人才支持计划(22HASTIT036); 河南省中原学者支持计划(212101510003)

作者简介: 魏祯祯(1996—), 女, 河南郑州人, 硕士研究生, 主要从事牡丹抗旱栽培与分子生物学研究, z35089658@163.com; *通信作者, 郭丽丽, 博士, 副教授, 主要从事牡丹生理生态与分子生物学研究, guolili@haust.edu.cn

drought were the highest, which were respectively 25.73%, 68.0% and 43.04% higher than those in CK; the contents of chlorophyll a, chlorophyll b and carotenoid reached the highest under 400 $\mu\text{mol/L}$ MeJA treatment, which were increased by 33.33%, 26.09% and 34.48% respectively compared with CK. For the 'Fengdan' seedlings with 200 $\mu\text{mol/L}$ MeJA and suffered severe drought, the soluble sugar content reached the maximum, the net photosynthetic rate increased by 41.73% compared with CK. The transpiration rate and intercellular CO_2 concentration were the highest under 400 $\mu\text{mol/L}$ MeJA treatment, which were respectively 74.07% and 13.44% higher than that with CK. The increase in the content of these indicators alleviated the increase in the content of MDA. After re-hydration, appropriate concentration of MeJA treatment can restore to different degrees the above-mentioned photosynthetic physiological indicators. The results showed that exogenous MeJA treatment could enhance the resistance of 'Fengdan' seedlings to drought, increase the photosynthetic rate, photosynthetic pigments and osmotic adjustment substances contents of 'Fengdan' seedlings, and reduce the damage to cell membrane caused by drought. Treatment with 200 $\mu\text{mol/L}$ MeJA showed the best alleviation effect.

Keywords: *Paeonia ostii* 'Fengdan'; methyl jasmonate; drought stress; photosynthesis characteristics; physiological characteristics

油用牡丹在其适生地区经常遭遇由水资源不足引起的干旱胁迫, 导致其新陈代谢紊乱, 生长发育受阻^[1]。范海霞等^[2]研究表明, 干旱胁迫会造成牡丹渗透调节系统失衡, 超氧化物歧化酶等抗氧化酶活性升高, 细胞质膜受损。王岑涅^[3]发现, 干旱胁迫会降低天彭牡丹的株高、叶柄长, 阻碍当年生枝的增长, 抑制牡丹生长。石欣隆等^[4]研究表明, 长时间的干旱胁迫会造成 H_2O_2 等物质累积, 损伤植物细胞膜系统。

MeJA 是一种广泛存在于植物体内的植物激素, 外施 MeJA 能够激发植物防御基因的表达, 诱导植物的化学防御反应, 提高植物抗逆性^[5-6]。孙明升等^[7]研究表明, 外源 MeJA 可减少干旱胁迫下格木细胞 ROS 含量, 促进光合色素形成, 保护光合结构, 提高光合色素含量, 增强抗旱性。代崇雯等^[8]发现, 外源 MeJA 诱导处理可降低干旱胁迫下红椿氧化胁迫水平, 开启抗氧化保护系统, 清除活性氧, 降低 H_2O_2 和 MDA 含量, 提高植物对干旱胁迫的抵抗能力。金微微等^[9]研究发现, 施加 MeJA 可以通过提高气孔开度, 降低光合机构损伤来提高干旱胁迫下烤烟的光合能力, 促进烤烟生长。孙晓梵^[10]发现, 外源 MeJA 可使干旱胁迫下狗牙根硝酸还原酶等氮代谢关键酶活性提高, 促进脯氨酸等物质合成, 维持细胞渗透压和内环境稳定。笔者以 3 年生油用牡丹'凤丹'实生苗为试材, 采用整株叶面喷施的方法, 探究干旱对外源 MeJA 处理的'凤丹'光合及生理特性的影响, 以期在生产中利用外源植

物激素提高牡丹抗旱性提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

3 年生油用牡丹'凤丹'植株, 购自河南洛阳国际牡丹园。

1.2 试验设计

采用整株喷施法, 分别对'凤丹'喷施 50 $\mu\text{mol/L}$ (T1)、100 $\mu\text{mol/L}$ (T2)、200 $\mu\text{mol/L}$ (T3)、400 $\mu\text{mol/L}$ (T4) 茉莉酸甲酯(MeJA)溶液 200 mL, 每个处理设置 5 个重复, 对照(CK)采用等量清水进行喷施, 以叶片上、下表面均匀布满细雾状小水滴而不滴落为宜。连续处理 3 d 后, 对'凤丹'进行逐渐干旱处理, 其间每天观测植株的表型特征, 根据植株萎蔫程度的 3 个等级, 来判定干旱程度: 0 级, 叶片平展, 茎直立, 植株生长旺盛, 正常植株; I 级, 整株叶片下垂, 且向叶背部卷曲, 茎直立, 中度干旱; II 级, 整株叶片下垂向叶背部卷曲, 部分老叶失绿变褐, 茎失水萎蔫下垂, 重度干旱。分别在植株达到中度、重度干旱 2 d 及复水 2 d 后选取生长状况一致的倒三叶叶片, 于晴天 09:00—11:00, 使用 Li-6400 便携式光合仪测定其净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率等光合指标; 同时取其叶片, 液氮速冻后 $-80\text{ }^\circ\text{C}$ 保存, 测定可溶性糖含量^[11]、MDA 含量和光合色素含量^[12]。

1.3 数据分析

采用 Excel 2010 对数据进行整理; 运用 SPSS 19.0 进行方差分析和显著性分析。

2 结果与分析

2.1 茉莉酸甲酯处理的‘凤丹’干旱下渗透调节物质的变化

由表 1 可知, 喷施 MeJA 后进行干旱及复水处理, T1、T2 和 T4 的‘凤丹’叶片的脯氨酸含量均高于 CK 的。喷施 MeJA 后保持正常供水, T2 脯氨酸含量最高, 比对照增加了 52.38%。喷施 MeJA 后中度干旱时, T3 的脯氨酸含量最高, 较对照显著提高 250.34%; 达到重度干旱时, MeJA 处理对脯氨酸的积累均有一定的抑制作用。复水 2 d 后, T4 的

幼苗脯氨酸含量最高, 与对照相比增加了 162.47%。说明喷施 MeJA 处理抑制了细胞脱水, 稳定了组织代谢过程, 提高了‘凤丹’的抗旱性。正常供水时, 喷施 MeJA 增加了‘凤丹’幼苗叶片的可溶性糖的积累, 可溶性糖含量相较 CK 分别增加了 7.98%、9.52%、13.56%和 21.76%, T4 的可溶性糖含量显著高于对照; 中度干旱时, 可溶性糖含量下降。重度干旱时, T3 的可溶性糖含量最高, 达到 24.06 mg/g。

喷施 MeJA 后进行正常水分管理, ‘凤丹’叶片中的 MDA 含量无显著变化; 中度和重度干旱时, 喷施 MeJA 的‘凤丹’的 MDA 含量均低于 CK, 说明喷施 MeJA 缓解了 MDA 的积累, 其中以 T2 处理的效果最好。

表 1 喷施 MeJA 的‘凤丹’幼苗干旱下的脯氨酸和可溶性糖及 MDA 含量

处理	脯氨酸含量/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)			
	正常供水	中度干旱	重度干旱	复水 2 d
CK	5.25±2.38	(2.86±0.14)e	(10.26±0.11)a	(3.89±0.03)d
T1	7.87±0.68	(9.11±0.03)c	(10.23±0.05)b	(9.85±0.03)c
T2	8.00±0.96	(9.52±0.06)b	(9.40±0.03)a	(9.88±0.03)c
T3	6.47±0.68	(10.02±0.14)a	(10.08±0.03)a	(10.01±0.04)b
T4	6.55±1.09	(8.78±0.08)d	(10.14±0.004)a	(10.21±0.04)a
处理	可溶性糖含量/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)			
	正常供水	中度干旱	重度干旱	复水 2 d
CK	(18.80±1.52)b	(33.70±0.08)a	(23.87±0.05)a	(23.01±0.19)b
T1	(20.30±0.88)ab	(20.94±0.47)bc	(19.23±1.04)b	(21.40±0.11)c
T2	(20.59±0.45)ab	(17.81±2.89)c	(19.31±0.75)b	(23.34±0.54)ab
T3	(21.35±0.46)ab	(21.01±0.31)bc	(24.06±0.16)a	(23.31±0.26)ab
T4	(22.89±0.73)a	(23.54±0.88)b	(23.43±0.09)a	(24.02±0.07)a
处理	MDA 含量/($\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}$)			
	正常供水	中度干旱	重度干旱	复水 2 d
CK	0.036±0.008	(0.153±0.009)c	(0.090±0.006)a	(0.049±0.002)c
T1	0.036±0.004	(0.038±0.001)bc	(0.050±0.002)b	(0.095±0.001)a
T2	0.038±0.002	(0.027±0.009)c	(0.028±0.004)c	(0.042±0.003)d
T3	0.037±0.002	(0.046±0.007)bc	(0.068±0.008)b	(0.056±0.002)b
T4	0.033±0.008	(0.055±0.004)b	(0.061±0.006)b	(0.030±0.001)e

同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

2.2 茉莉酸甲酯处理的‘凤丹’干旱下的光合色素的变化

由表 2 可知, 与 CK 相比, 正常供水的‘凤丹’幼苗喷施 MeJA 对叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量的影响不显著。喷施 MeJA 后中度干旱时,

T4 的叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素较 CK 的增加了 33.33%、26.09%和 34.48%; 重度干旱时, 各处理‘凤丹’叶片的光合色素含量均降低; 复水 2 d 后, T4 的‘凤丹’幼苗叶片叶绿素 a 和类胡萝卜素含量达到最大值; 喷施 MeJA 的‘凤丹’幼苗叶片叶绿

素 b 含量均高于对照的, 但差异不显著。

表 2 喷施 MeJA 的‘凤丹’幼苗干旱下的光合色素含量

处理	叶绿素 a 含量			
	正常供水	中度干旱	重度干旱	复水 2 d
CK	1.51±0.19	(1.59±0.17)b	(2.24±0.23)a	(1.54±0.06)a
T1	1.25±0.22	(1.21±0.05)c	(1.73±0.07)b	(0.54±0.01)b
T2	1.18±0.25	(1.19±0.03)c	(1.40±0.02)b	(1.27±0.08)a
T3	1.30±0.02	(1.88±0.11)ab	(1.35±0.10)b	(1.30±0.22)a
T4	1.38±0.05	(2.12±0.04)a	(1.48±0.16)b	(1.70±0.17)a
处理	叶绿素 b 含量			
	正常供水	中度干旱	重度干旱	复水 2 d
CK	0.60±0.07	(0.69±0.11)ab	(0.97±0.14)a	0.64±0.02
T1	0.87±0.27	(0.49±0.03)bc	(0.72±0.05)b	0.86±0.02
T2	0.79±0.20	(0.45±0.02)c	(0.56±0.06)b	0.87±0.35
T3	0.51±0.02	(0.85±0.09)a	(0.58±0.03)b	0.81±0.14
T4	0.58±0.10	(0.87±0.03)a	(0.58±0.05)b	0.72±0.05
处理	类胡萝卜素含量			
	正常供水	中度干旱	重度干旱	复水 2 d
CK	0.30±0.03	(0.29±0.03)b	(0.44±0.02)a	(0.33±0.01)a
T1	0.25±0.04	(0.26±0.009)b	(0.36±0.02)b	(0.17±0.01)b
T2	0.24±0.05	(0.26±0.002)b	(0.30±0.01)bc	(0.36±0.02)a
T3	0.28±0.02	(0.37±0.01)a	(0.27±0.01)c	(0.27±0.09)bc
T4	0.29±0.02	(0.39±0.02)a	(0.28±0.04)c	(0.37±0.04)a

同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

2.3 茉莉酸甲酯处理的‘凤丹’干旱下的光合特性的变化

由表 3 可知, 喷施 MeJA 后正常供水, ‘凤丹’幼苗植株光合能力较强, 有较高的净光合速率; 中度和重度干旱时, T3 的净光合速率较对照分别提

高 25.73%和 41.73%; 复水 2 d 后, 喷施 MeJA 处理提高了‘凤丹’叶片净光合速率, 以 T2 处理增幅最大, 表明外源 MeJA 处理可有效提高‘凤丹’幼苗叶片的净光合速率, 增强植物的光合作用强度。

表 3 喷施 MeJA 的‘凤丹’幼苗干旱下的生理特性

处理	净光合速率/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{g}^{-1}$)				蒸腾速率/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)			
	正常供水	中度干旱	重度干旱	复水 2 d	正常供水	中度干旱	重度干旱	复水 2 d
CK	6.86±0.72	(5.17±0.67)ab	(2.78±0.51)b	(1.63±0.09)c	(2.21±0.17)a	(1.58±0.11)c	(0.54±0.10)b	(0.50±0.03)b
T1	5.78±0.51	(4.12±0.31)b	(3.68±0.50)ab	(4.69±0.31)a	(1.93±0.20)ab	(1.52±0.04)c	(0.81±0.17)ab	(0.80±0.10)b
T2	5.09±0.44	(5.79±0.60)ab	(3.46±0.19)ab	(5.24±0.38)a	(1.82±0.14)ab	(2.05±0.12)ab	(0.68±0.02)ab	(1.57±0.46)a
T3	6.77±0.83	(6.50±0.74)a	(3.94±0.16)a	(2.02±0.19)c	(2.17±0.15)ab	(2.26±0.08)a	(0.85±0.07)ab	(0.83±0.22)b
T4	6.09±0.91	(6.46±0.63)a	(3.50±0.21)ab	(3.14±0.14)b	(1.65±0.22)b	(1.94±0.11)b	(0.94±0.03)a	(1.53±0.07)a
处理	胞间 CO_2 浓度/($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)				气孔导度/($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)			
	正常供水	中度干旱	重度干旱	复水 2 d	正常供水	中度干旱	重度干旱	复水 2 d
CK	271.78±6.25	317.90±2.57	(248.48±2.11)c	(100.04±1.40)b	0.26±0.06	(0.25±0.02)b	(0.03±0.006)b	(0.02±0.002)c
T1	285.59±5.36	379.01±2.06	(268.82±5.67)ab	(116.19±11.18)b	0.27±0.08	(0.26±0.01)b	(0.05±0.013)a	(0.04±0.006)bc
T2	281.20±4.18	377.74±2.14	(257.40±4.62)bc	(172.18±27.44)a	0.22±0.05	(0.40±0.03)a	(0.04±0.003)ab	(0.09±0.029)a
T3	292.31±13.47	375.22±2.56	(268.52±9.40)abc	(107.29±20.92)b	0.28±0.06	(0.42±0.03)a	(0.05±0.006)a	(0.04±0.012)bc
T4	256.30±9.15	373.88±3.88	(281.87±10.65)a	(140.09±1.40)ab	0.21±0.06	(0.36±0.03)a	(0.05±0.007)a	(0.07±0.003)ab

同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

中度干旱时, CK 处理的蒸腾速率迅速降低, 喷施 MeJA 提高了‘凤丹’的蒸腾速率, T2、T3、T4 的叶片的蒸腾速率分别较对照提高了 29.75%、43.04%、22.78%; 重度干旱时, T4 的蒸腾速率达到最大值, 较 CK 提高了 74.07%。

MeJA 处理后正常供水, T1、T2、T3 的‘凤丹’幼苗叶片胞间 CO₂ 浓度分别较 CK 提高了 5.08%、3.40%、7.55%; 中度干旱时, MeJA 处理间的‘凤丹’叶片胞间 CO₂ 浓度的差异不显著; 重度干旱时, T1、T2、T3、T4 的胞间 CO₂ 浓度比 CK 分别提高了 8.19%、3.59%、8.07%、13.44%。

喷施 MeJA 后中度干旱, ‘凤丹’幼苗叶片的气孔导度增加, T3 的叶片的气孔导度达到最大值, 较 CK 增加 68.0%; 复水 2 d 后, T2 的‘凤丹’叶片气孔导度较 CK 增加 350.0%, 达到显著水平。

3 结论与讨论

渗透调节能够促进细胞内有机或无机溶质的积累。脯氨酸和可溶性糖作为重要的渗透调节物质, 其主要作用是保护器官和细胞功能, 提高植物对胁迫的适应性^[13-14]。在干旱条件下, 通过渗透调节可以使细胞膨胀并保持平衡, 使植物能够抵御干旱^[15]。本试验中, 外源 MeJA 处理后进行干旱处理, ‘凤丹’叶片内脯氨酸和可溶性糖含量增加, 说明‘凤丹’植株在逆境下开启了自我保护机制, 促使细胞内渗透调节物质的合成与积累, 这与杨艺等^[16]、兰彦平等^[17]研究 MeJA 对干旱胁迫下棉花、苹果叶片的脯氨酸和可溶性糖变化结果相似, 适宜浓度 MeJA 处理能够增强‘凤丹’植株在干旱下的自我调节机制, 提高自身的抗旱能力。MDA 是细胞膜脂过氧化作用的主要产物之一, 其含量作为氧化应激导致脂质过氧化的指标, 直接反映植物遭受逆境伤害程度, 间接反映植物组织的抗氧化能力的强弱^[18-19]。经过外源 MeJA 处理后, ‘凤丹’MDA 含量显著下降, 说明 MeJA 能缓解干旱对‘凤丹’叶片细胞膜的伤害, 逐步恢复细胞膜系统, 这与董桃杏等^[20]对水稻叶片的研究结果一致。

叶绿素是光合作用细胞器叶绿体的主要成分之一, 相对叶绿素含量与光合作用速率呈正相关, 干旱胁迫下叶绿素含量减少是氧化胁迫的典型症状, 这可能是光合色素的氧化、膜的分解和活性氧

对叶绿体破坏的结果^[21-22]。PÉREZ 等^[23]研究表明, 茉莉酸甲酯蒸汽可促进金冠苹果皮中 β-胡萝卜素的合成和叶绿素的降解。本试验结果表明, 随着干旱程度增加, ‘凤丹’叶片的叶绿素 a、叶绿素 b 含量和类胡萝卜素含量逐渐升高, 此结果与刘济明等^[24]对干旱胁迫下米槁幼苗的叶绿素 a、叶绿素 b 含量变化趋势的研究结果一致。外源 MeJA 处理‘凤丹’叶片与同期对照相比, 叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量均降低, 推测 MeJA 可能通过加速细胞质中的分解代谢过程和光氧化作用, 加速叶绿体衰老, 降低‘凤丹’叶片叶绿素的合成^[25]。

研究表明, 干旱胁迫阻碍作物的气体交换, 可能与气孔阻力增加、光合作用机制受损、叶片过早衰老、叶绿体脂质氧化以及色素和蛋白质结构的改变有关, 干旱胁迫下气孔或者非气孔因素都能导致光合速率下降^[26-27]。气孔是水分损失和 CO₂ 吸收排放的通道, 气孔关闭和对 CO₂ 进入细胞的限制是干旱胁迫导致光合速率下降的主要原因之一^[28]。气孔关闭使叶片失去 CO₂, 光合碳同化作用减弱, 有利于光呼吸、CO₂ 固定减少和光合速率的降低。在轻度或中度干旱胁迫下, 气孔关闭导致叶片内部 CO₂ 浓度降低是叶片光合速率降低的主要原因; 重度干旱胁迫通过引起叶绿素含量的变化, 继而影响叶绿素的成分, 破坏光合结构, 从而抑制植物的光合作用^[29-30]。本研究中, 不同浓度 MeJA 处理使‘凤丹’在干旱中的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO₂ 浓度与对照相比有不同程度升高, 推断外源 MeJA 处理可能通过调节气孔导度、提高碳同化酶活性、保护叶绿体结构等来提高‘凤丹’的光合作用速率。

外源 MeJA 处理可以增强植株对干旱的抵御能力, 综合考虑生产中经济成本的因素, 选取 MeJA 200 μmol/L 处理最为适宜。

参考文献:

- [1] 张雯, 徐先英, 师生波, 等. 紫斑牡丹(*Paeonia rockii*) 的光合特性及对土壤干旱胁迫的响应[J]. 分子植物育种, 2020, 18(7): 2358-2365.
- [2] 范海霞, 赵飒, 辛国奇, 等. 外源褪黑素对干旱胁迫下牡丹幼苗生理特性的影响[J]. 生物技术通报, 2020, 36(6): 63-72.
- [3] 王岑涅. 天彭牡丹‘红丹兰’对干旱胁迫的生理生态响应研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2011.

- [4] 石欣隆, 杨月琴, 薛娴, 等. 壳寡糖对干旱胁迫下‘凤丹’幼苗生长及生理特性的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(2): 120–126.
- [5] 马超, 冯雅岚, 张均, 等. 外源茉莉酸甲酯对干旱胁迫下小麦花后内源激素含量及产量形成的影响[J]. 植物生理学报, 2017, 53(6): 1051–1058.
- [6] 袁斌玲, 王瑞敏, 陈颖, 等. NaCl 处理下茉莉酸甲酯对金叶银杏光合色素、抗氧化性及黄酮代谢的调控作用[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(2): 64–71.
- [7] 孙明升, 胡颖, 陈旋, 等. 外源调节物质对干旱胁迫下格木幼苗生理特性的影响[J]. 林业科学, 2020, 56(10): 165–172.
- [8] 代崇雯, 刘亚敏, 刘玉民, 等. 3 种外源物质对干旱胁迫下红椿生理特性的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(2): 48–56.
- [9] 金微微, 张会慧, 王炎, 等. 茉莉酸甲酯对干旱及复水下烤烟幼苗光合特性和抗氧化酶的影响[J]. 干旱区地理, 2011, 34(6): 933–940.
- [10] 孙晓梵. 外源 MeJA、氮素对狗牙根抗旱性影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2021.
- [11] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [12] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [13] BLUM A. Osmotic adjustment is a prime drought stress a daptive engine in support of plant production[J]. Plant Cell & Environment, 2017, 40(1): 4–10.
- [14] ZHANG X Y, FANG Z W, LIU H N, et al. Exogenous calcium-induced physiological and biochemical changes in tree peony (*Paeonia* section *Moutan* DC.) under drought stress[J]. Photosynthetica, 2019, 57(4): 904–911.
- [15] ZHAO Z L, NIU S Y, FANG Q, et al. Genome-wide analysis of gene and microRNA expression in diploid and autotetraploid *Paulownia fortunei*(seem) hemsl. under drought stress by transcriptome, microRNA, and degradome sequencing[J]. Forests, 2018, 9(2): 88.
- [16] 杨艺, 常丹, 王艳, 等. 茉莉酸甲酯对棉花抗旱效果的影响[J]. 西北农业学报, 2016, 25(9): 1333–1341.
- [17] 兰彦平, 周军, 曹慧, 等. 茉莉酸对苹果气孔运动及抗旱性的影响[J]. 果树学报, 2001, 18(3): 133–135.
- [18] LI Y, ZHANG S S, JIANG W S, et al. Cadmium accumulation, activities of antioxidant enzymes, and malondialdehyde (MDA) content in *Pistia stratiotes* L[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2013, 20(2): 1117–1123.
- [19] ZHAO D Q, ZHANG X Y, FANG Z W, et al. Physiological and transcriptomic analysis of tree peony (*Paeonia* section *moutan* DC.) in response to drought stress[J]. Forests, 2019, 10(2): 135.
- [20] 董桃杏, 蔡昆争, 曾任森. 干旱胁迫下茉莉酸甲酯对水稻叶片质膜透性及无机离子含量的影响[J]. 华北农学报, 2010, 25(1): 136–140.
- [21] 徐培洲, 李云, 袁澍, 等. 叶绿体缺乏水稻突变体中光系统蛋白和叶绿素合成特性的研究[J]. 中国农业科学, 2006, 39(7): 1299–1305.
- [22] ANJUM S A, XIE X Y, WANG L C, et al. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress[J]. African Journal of Agricultural Research, 2011, 6(9): 2026–2032.
- [23] PÉREZ G. PEREZ, SANZ C, RICHARDSON D G, et al. Methyl jasmonate vapor promotes β -carotene synthesis and chlorophyll degradation in ‘Golden Delicious’ apple peel[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 1993, 12(3): 163–167.
- [24] 刘济明, 李佳, 文爱华, 等. 米槁幼苗光合色素与光合特征对干旱胁迫的响应[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(9): 171–174.
- [25] WASTERNAK C. Jasmonates: an update on biosynthesis, signal transduction and action in plant stress response, growth and development[J]. Annals of Botany, 2007, 100(4): 681–697.
- [26] 李泽, 谭晓风, 卢锟, 等. 干旱胁迫对两种油桐幼苗生长、气体交换及叶绿素荧光参数的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(5): 1515–1524.
- [27] SAMARAH N H, ALQUDAH A M, AMAYREH J A, et al. The effect of late-terminal drought stress on yield components of four barley cultivars[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2009, 195(6): 427–441.
- [28] MAFAKHERI A, SIOSEMARDEH A, BAHRAMNEJAD B, et al. Effect of drought stress on yield, proline and chlorophyll contents in three chickpea cultivars[J]. Australian Journal of Crop Science, 2010, 4(8): 580–585.
- [29] FLEXAS J, BOTA J, LORETO F, et al. Diffusive and metabolic limitations to photosynthesis under drought and salinity in C3 plants[J]. Plant Biology, 2004, 6(3): 269–279.
- [30] CORNIC G. Drought stress inhibits photosynthesis by decreasing stomatal aperture-not by affecting ATP synthesis[J]. Trends in Plant Science, 2000, 5(5): 187–188.

责任编辑: 罗慧敏

英文编辑: 罗维