

引用格式:

张文科, 宋程威, 魏冬峰, 石兆勇, 侯小改. 丛枝菌根对干旱胁迫下油用牡丹幼苗光化学活性的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(5): 523–529.

ZHANG W K, SONG C W, WEI D F, SHI Z Y, HOU X G. Effect of arbuscular mycorrhiza on photochemical activity of oil tree peony seedlings under drought stress[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2021, 47(5): 523–529.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



丛枝菌根对干旱胁迫下油用牡丹幼苗光化学活性的影响

张文科¹, 宋程威¹, 魏冬峰², 石兆勇¹, 侯小改^{1*}

(1.河南科技大学农学院, 河南 洛阳 471023; 2.洛阳科技职业学院马克思主义学院, 河南 洛阳 471822)

摘 要:采用盆栽法,对重度干旱(土壤相对含水量为 30%)和轻度干旱(土壤相对含水量为 55%)胁迫 3 d 和 6 d 的接种丛枝菌根真菌(*Gigaspora rosea*)的油用牡丹‘凤丹’幼苗叶片叶绿素荧光参数进行测定。结果显示:与未接菌相比,干旱胁迫下接菌‘凤丹’的 PSII 潜在活性 F_v/F_o 和性能指数 PI_{abs} 均升高;重度干旱胁迫 3、6 d,接菌‘凤丹’的 M_o 和 V_j 较未接菌处理分别显著降低 14.5%、29.8%和 12.9%和 16.2%, ϕ_{Eo} 和 ϕ_o 分别显著提高 9.7%、52.2%和 8%、23.6%;与未接菌相比,轻度干旱胁迫 3、6 d,接菌‘凤丹’的单位面积吸收的光能 ABS/CS_o 、单位面积捕获的光能 Tr_o/CS_o 、单位面积电子传递的量子产额 ET_o/CS_o 、单位面积传递到 PS I 末端的量子产额 RE_o/CS_o 均提高,但不显著;重度干旱胁迫 3、6 d,接菌‘凤丹’的 Tr_o/CS_o 、 ET_o/CS_o 和单位面积反应中心数 RC/CS_m 分别显著提高 37.8%、41.1%、47.7%、73.8%、50.1%、141.8%;干旱胁迫下,接菌‘凤丹’的调节性能量耗散量子产量 $Y(NPQ)$ 均显著高于未接菌处理,非调节性能量耗散量子产量 $Y(NO)$ 显著低于未接菌处理。表明,丛枝菌根可以提高干旱胁迫下(尤其是重度干旱下)PSII 反应中心活性,增加对光能的吸收和捕获,提高电子传递能力和光化学效率,同时将剩余的光能以热耗散的形式散发,从而避免光损伤,进而提高干旱胁迫下油用牡丹幼苗的光化学活性和抗旱性。

关 键 词: 油用牡丹; 叶绿素荧光; PSII 反应中心活性; 光化学效率; 丛枝菌根; 干旱胁迫

中图分类号: S682.1⁺901

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2021)05-0523-07

Effect of arbuscular mycorrhiza on photochemical activity of oil tree peony seedlings under drought stress

ZHANG Wenke¹, SONG Chengwei¹, WEI Dongfeng², SHI Zhaoyong¹, HOU Xiaogai^{1*}

(1.College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China; 2.Luoyang Vocational College of Science and Technology, Luoyang, Henan 471822, China)

Abstract: The chlorophyll fluorescence parameters of potted oil peony ‘Fengdan’ seedlings inoculated with arbuscular mycorrhizal fungus *Gigasporarosea* under severe drought(soil relative water content is 30%) and mild drought(soil relative water content is 55%) stress for 3 and 6 days were compared and analyzed. The results showed that the potential PSII activity F_v/F_o and performance index PI_{abs} of ‘Fengdan’ seedlings inoculated with arbuscular mycorrhiza were increased under different drought stress compared with the non-inoculated seedlings. Compared with the non-inoculated treatment, in inoculated ‘Fengdan’ with 3 and 6 days under severe drought stress, M_o significantly decreased by 14.5% and 29.8% respectively; V_j significantly decreased by 12.9% and 16.2% respectively; ϕ_{Eo} significantly increased by 9.7% and 52.2% respectively; and ϕ_o significantly increased by 8% and 23.6%, respectively. Compared with the non-inoculated treatment, in inoculated ‘Fengdan’ with mild drought stress for 3days and 6 days, absorption of energy per unit

收稿日期: 2020-12-05

修回日期: 2021-06-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1804233); 河南省教育厅项目(19A2180002)

作者简介: 张文科(1995—),男,河南周口人,硕士研究生,主要从事牡丹生理生态研究,815318227@qq.com; *通信作者,侯小改,教授,主要从事牡丹生理生态与分子生物学研究, hkdhxg@haust.edu.cn

area(ABS/CS_0), capture of light energy per unit area(Tr_0/CS_0), quantum yield electron transferred per unit area(ET_0/CS_0), quantum yield transferred at the end of PS I per unit area(RE_0/CS_0) were improved, but with no significant difference. Compared with the non-inoculated treatment, in inoculated 'Fengdan' with under severe drought stress for 3 and 6 days, Tr_0/CS_0 were significantly increased by 37.8% and 41.1% respectively, ET_0/CS_0 significantly increased by 47.7% and 73.8% respectively, and the number of response centers per unit area(RC/CS_m) significantly increased by 50.1% and 141.8%, respectively. Under drought stress, regulatory energy dissipation quantum yield $Y(NPQ)$ of inoculated 'Fengdan' was significantly higher than that of non-inoculated 'Fengdan', and non-regulatory energy dissipative quantum yield $Y(NO)$ was significantly lower than that of non-inoculated. The research showed that arbuscular mycorrhizal can improve PSII reaction center activity under the drought stress, especially under the severe drought, increase the absorption and capture of light energy, improve the efficiency of electron transfer ability and light chemistry, at the same time, more remaining energy distributed in the form of heat dissipation, avoid the light damage, then improve drought resistance and photochemical activity of oil tree peony seedlings under drought stress.

Keywords: oil tree peony; chlorophyll fluorescence; PSII reactive center activity; photochemical efficiency; arbuscular mycorrhiza; drought stress

油用牡丹种仁出油率约 27%，不饱和脂肪酸含量超过 90%^[1-3]。水分不足会导致牡丹生长受阻^[4]。侯小改等^[5]发现干旱胁迫会降低牡丹的叶绿素含量，降低牡丹的光合潜力。孔祥生等^[6]认为水分胁迫会造成牡丹超氧阴离子及过氧化氢等活性氧累积，对细胞膜系统造成伤害。刘俊娟^[7]研究表明，干旱可引起牡丹光合机构可逆失活或遭破坏，减弱光能转化。

丛枝菌根是陆地生态系统中分布最广泛的共生体之一，可以提高植物抗逆性^[8-9]。已有研究发现，丛枝菌根可以提高缺水时杨树的水分利用效率和净光合速率，进而减少生物量的损失^[10]。宋凤鸣等^[11]认为丛枝菌根可促使在干旱环境下的植株产生更多的渗透调节物质，进而减轻细胞膜受损程度，提高植物的光同化能力。鲁珊珊等^[12]研究发现，丛枝菌根可以通过气孔因素和非气孔因素来提高中度干旱胁迫下蓝莓的光合效率，进而提高其抗旱性。陈丹明等^[13]研究表明，丛枝菌根真菌可以提高牡丹的叶绿素含量，促进牡丹的生长。

快速叶绿素荧光诱导动力学能够探测出光系统对光能吸收、捕获以及受体侧电子传递的变化，饱和脉冲理论可以探究碳同化开始后植物所吸收光能的分配机制^[14-15]。笔者以油用牡丹‘凤丹’为试验材料，分析丛枝菌根对干旱胁迫下‘凤丹’光化学活性的影响，以期为提高油用牡丹的抗旱性提供新思路。

1 材料与方法

1.1 材料

供试材料为 1 年生油用牡丹‘凤丹’。丛枝菌根菌种为 *Gigaspora rosea*，去除其宿主植物玉米和苏丹草的地上部分，将根段剪碎后与土壤拌匀后作为菌剂接种物。

1.2 试验设计

试验于 2018 年 10 月在河南科技大学牡丹种植基地进行。试验共设 5 个处理：CK，正常浇水(土壤相对含水量 75%)，不接菌；T1，轻度干旱(土壤相对含水量 55%)，不接菌；T2，轻度干旱(土壤相对含水量 55%)，接菌；T3，重度干旱(土壤相对含水量 30%)，不接菌；T4，重度干旱(土壤相对含水量 30%)，接菌。每个处理 5 次重复。培养容器规格为 25 cm×15 cm。培养基质为园土与草炭土，质量比 1:1，过筛、121℃灭菌 2 h。将长势一致的‘凤丹’幼苗根部在质量浓度为 0.6 g/L 的苯菌灵溶液中浸泡 3 min 后移栽。接菌处理每盆加入含有 150 g 菌剂的 1.5 kg 基质后移栽。移栽后精细管理，定期浇水，采用称重法控制土壤相对含水量保持在 75% 左右。至 2019 年 5 月 20 日开始进行干旱胁迫，分别于干旱胁迫后 3 d 和 6 d 测定‘凤丹’的叶绿素荧光参数。

1.3 测定项目

1.3.1 快速叶绿素荧光诱导动力学曲线测定

于晴天 9:00—11:00，选择顶叶下面长势良好的

第 1 片复叶, 避开其主叶脉, 采用植物效率分析仪 M-PEA(英国 Hansatech), 在饱和脉冲光下暴露 1 s 后测定快速叶绿素荧光诱导动力学曲线, 各处理重复 5 次。获得参数: PSII 潜在活性 F_v/F_o 、PSII 最大光化学效率 F_v/F_m 、以吸收光能为基础的性能指数 PI_{abs} 、单位面积吸收的光能 ABS/CS_o 、单位面积捕获的光能 Tr_o/CS_o 、以单位面积电子传递的量子产额 ET_o/CS_o 、单位面积传递到 PS I 末端的量子产额 RE_o/CS_o 、单位面积反应中心数目 $RC/CS_m=(ABS/CS_m)/(ABS/RC)$ 、OJIP 荧光诱导曲线的初始斜率 $M_o=4(F_{300\mu s}-F_o)/(F_m-F_o)$ 、在 J 点的相对可变荧光强度 $V_j=(F_j-F_o)/(F_m-F_o)$ 、在 I 时的相对可变荧光强度 $V_i=(F_i-F_o)/(F_m-F_o)$ 、用于电子传递的量子产额 $\Psi_{Eo}=ET_o/ABS$ 、反应中心捕获的激子中用来推动电子传递链中超过 Q_A 的其他电子受体的激子占用来推动 Q_A 还原激子的比率 $\Psi_o=(1-V_j)$ 。

1.3.2 叶绿素荧光参数的测定

选取顶叶下长势良好的第 1 片复叶, 避开主叶脉, 于晴天 9:00—11:00 使用超便携式调制叶绿素荧光仪 MINI-PAM-II(德国 Walz)测定叶绿素荧光参数。各处理重复 5 次。将‘凤丹’叶片暗适应 30 min 后再测定叶绿素荧光动力学曲线(FI)。测得的参数包括 PSII 实际光量子产量 $Y(II)$ 、调节性能量耗散量子产量 $Y(NPQ)$ 、非调节性能量耗散量子产量 $Y(NO)$, 取曲线中到达稳定的 3 个值的平均值作为测量值。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 22.0 软件进行数据处理和分析; 采用 LSD 法进行显著性检验及方差分析。

2 结果与分析

2.1 丛枝菌根对干旱胁迫下‘凤丹’幼苗 PSII 光化学性能的影响

由表 1 可知, 与对照相比, 轻度干旱胁迫 3 d 后, 未接菌的‘凤丹’幼苗的 F_v/F_o 值显著下降 9.7%, 接菌处理较未接菌处理提高 9%; 重度干旱胁迫 3 d 后, 未接菌处理的 F_v/F_o 值较对照显著下降 15.5%, 接菌处理较未接菌处理显著提高 9%。重度干旱 6 d 后, 未接菌的‘凤丹’幼苗的 F_v/F_o 值显著下降 63.9%,

接菌处理较未接菌处理显著提高 69.5%。重度干旱胁迫 3 d 后, 未接菌‘凤丹’幼苗较对照显著下降 3.3%; 重度干旱胁迫 6 d 后, 未接菌处理的 F_v/F_m 较对照显著下降 28.6%, 接菌处理较未接菌处理显著提高 23.9%。轻度干旱胁迫 3 d、轻度干旱胁迫 6 d、重度干旱胁迫 3 d、重度干旱胁迫 6 d, 未接菌‘凤丹’幼苗的 PI_{abs} 较对照分别显著降低 28.9%、42.6%、53.7%、94.2%; 与未接菌处理相比, 接菌处理‘凤丹’幼苗的 PI_{abs} 分别提高 4%、28.7%、36.3%、274%, 其中重度干旱胁迫 6 d 后差异显著。

表 1 干旱胁迫下接种和未接种丛枝菌根真菌的‘凤丹’幼苗的 F_v/F_m 、 F_v/F_o 和 PI_{abs}

Table 1 F_v/F_m , F_v/F_o and PI_{abs} of ‘Fengdan’ inoculated with or without arbuscular mycorrhizal fungi under different drought stress conditions

处理	F_v/F_o		F_v/F_m		PI_{abs}	
	3 d	6 d	3 d	6 d	3 d	6 d
CK	4.32a	3.91a	0.812a	0.796a	12.29a	8.55a
T1	3.90bc	3.43a	0.796ab	0.773ab	8.68b	4.91b
T2	4.25ab	3.64a	0.809a	0.784ab	9.03b	6.32b
T3	3.65d	1.41c	0.785b	0.568d	5.65c	0.50d
T4	3.98abc	2.39b	0.798ab	0.704bc	7.70bc	1.87c

同列不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

2.2 丛枝菌根对干旱胁迫下‘凤丹’幼苗 PSII 受体侧的影响

与对照相比, 未接菌‘凤丹’幼苗在轻度干旱胁迫 3 d、6 d 的 M_o 分别提高 20.7%和 33.1%(表 2), 在重度干旱胁迫 3 d、6 d 下分别显著提高 59.6%和 162.2%; 与未接菌处理相比, 接菌处理的在轻度干旱处理 3 d 和 6 d 的 M_o 降低 8.2%和 5.4%, 在重度干旱胁迫 3 d 和 6 d 分别显著降低 14.5%和 29.8%。轻度干旱胁迫 3 d, 未接菌‘凤丹’幼苗的 ϕ_{Eo} 较对照下降 5.5%、轻度干旱胁迫 6 d、重度干旱胁迫 3 d 和 6 d 分别显著下降 13.1%、15.7%、57.4%; 与未接菌处理相比, 重度干旱胁迫 3 d 和 6 d, 接菌处理的 ϕ_{Eo} 分别提高 9.7%和 52.2%, 差异显著。与对照相比, 轻度干旱胁迫 3 d 和 6 d, 未接菌‘凤丹’幼苗的 ϕ_o 分别下降 3.8%和 10.5%; 在重度干旱胁迫 3 d 和 6 d 时分别显著下降 13%和 40.6%。重度干旱胁迫 3 d 和 6 d, 接菌‘凤丹’幼苗的 ϕ_o 较对照显著提高 8%和 23.6%。轻度干旱胁迫 3 d 和 6 d, 未接菌‘凤丹’幼苗的 V_i 较对照升高 9.4%和 22.8%; 重度干旱

胁迫 3 d 和 6 d 后分别升高 32.4%和 88%。与未接菌处理相比, 轻度干旱胁迫 3 d, 接菌‘凤丹’幼苗的 V_j 无明显变化, 轻度干旱胁迫 6 d 下降 14.5%; 重度干旱胁迫 3 d 和 6 d, 分别下降 12.9%和 16.2%,

差异显著。未接菌‘凤丹’幼苗的 V_i 在轻度干旱胁迫后无明显变化, 重度干旱胁迫 3 d 和 6 d, 分别升高 5.3%和 4.9%。

表 2 干旱胁迫下接种和未接种丛枝菌根真菌的‘凤丹’幼苗的 M_o 、 ϕ_{Eo} 、 ϕ_o 、 V_j 、 V_i

Table 2 M_o , ϕ_{Eo} , ϕ_o , V_j and V_i of ‘Fengdan’ seedlings inoculated with or without arbuscular mycorrhizal fungi under different drought stress conditions

处理	M_o		V_j		V_i		ϕ_{Eo}		ϕ_o	
	3 d	6 d	3 d	6 d	3 d	6 d	3 d	6 d	3 d	6 d
CK	0.203c	0.251c	0.287b	0.316c	0.734	0.732	0.578a	0.544a	0.713a	0.684a
T1	0.245bc	0.334bc	0.314b	0.388c	0.742	0.730	0.546ab	0.473b	0.686a	0.612a
T2	0.265b	0.317bc	0.323b	0.339c	0.776	0.752	0.548ab	0.518ab	0.677a	0.661a
T3	0.324a	0.658a	0.380a	0.594a	0.773	0.768	0.487d	0.232d	0.620b	0.406c
T4	0.277b	0.462b	0.331b	0.498b	0.785	0.808	0.534c	0.353c	0.669a	0.502b

同列不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

2.3 丛枝菌根对干旱胁迫下‘凤丹’幼苗 PSII 反应中心的影响

从表 3 可知, 轻度干旱胁迫 3 d 和 6 d, 重度干旱胁迫 3 d 和 6 d 后, 与未接菌处理相比, 接菌处理的 ABS/CS_o 分别提高 7.4%、9.5%、35%和 12.3%, 其中重度干旱 3 d 处理间差异显著。轻度干旱胁迫 3 d 后, 未接菌‘凤丹’幼苗的 Tr_o/CS_o 较对照升高 11.3%, 轻度干旱胁迫 6 d、重度干旱胁迫 3 d 后分别降低 7.7%和 11.6%, 重度干旱胁迫 6 d 后显著降低 25.7%; 轻度干旱胁迫 3 d 和 6 d, 接菌‘凤丹’幼苗的 Tr_o/CS_o 与未接菌处理相比分别提高 9.2%和 11.1%, 重度干旱胁迫 3 d 和 6 d 分别显著提高 37.8%和 41.1%。轻度干旱胁迫 3 d, 未接菌‘凤丹’幼苗的 ET_o/CS_o 较对照提高 7.2%, 接菌处理较不接菌处理提高 7.7%; 与对照相比, 轻度干旱胁迫 6 d、重度干旱胁迫 3 d 和 6 d, 未接菌‘凤丹’幼苗的 ET_o/CS_o

分别显著降低 17.6%、22.5%、56.1%, 接菌处理较未接菌处理显著提高 20.1%、47.7%和 73.8%。轻度干旱胁迫 3 d, 与对照相比, 未接菌‘凤丹’幼苗的 RE_o/CS_o 提高 10%, 与接菌处理相比提高 5.3%; 轻度干旱胁迫 6 d, 未接菌‘凤丹’幼苗的 RE_o/CS_o 较对照降低 7.8%; 重度干旱胁迫 3 d, 未接菌‘凤丹’幼苗的 RE_o/CS_o 较对照降低 23.9%, 接菌处理较未接菌处理提高 31.1%; 重度干旱胁迫 6 d, 与对照相比, 未接菌‘凤丹’幼苗的 RE_o/CS_o 显著降低 38.4%, 接菌处理较未接菌处理提高 18.3%。轻度干旱胁迫 3 d 和 6 d, 重度干旱胁迫 3 d 和 6 d, 与对照相比, 未接菌‘凤丹’幼苗的 RC/CS_m 分别降低 6.9%、23.2%、35.2%、73.8%, 在轻度干旱 6 d, 重度干旱 3 d 和 6 d 达到显著性差异; 接菌处理较未接菌处理分别提高 11.7%、9.6%、50.1%、141.8%, 在重度干旱 3 d 和 6 d 差异显著。

表 3 干旱胁迫下接种和未接种丛枝菌根真菌的‘凤丹’幼苗 ABS/CS_o 、 Tr_o/CS_o 、 ET_o/CS_o 、 RE_o/CS_o 和 RC/CS_m

Table 3 ABS/CS_o , Tr_o/CS_o , ET_o/CS_o , RE_o/CS_o and RC/CS_m of ‘Fengdan’ seedlings inoculated with or without arbuscular mycorrhizal fungi under different drought stress conditions

处理	ABS/CS_o		Tr_o/CS_o		ET_o/CS_o		RE_o/CS_o		RC/CS_m	
	3 d	6 d	3 d	6 d	3 d	6 d	3 d	6 d	3 d	6 d
CK	5073ab	6233b	4117ab	4962a	2934ab	3394a	1078ab	1335a	30 876a	30 641a
T1	5760ab	5927b	4584ab	4581a	3145a	2798b	1186a	1231ab	28 750a	23 526bc
T2	6185a	6491ab	5004a	5089a	3388a	3361a	1123ab	1261ab	32 127a	25 786ab
T3	4640b	6571ab	3639b	3688b	2273b	1491c	820b	823b	19 998b	8016d
T4	6280a	7381a	5016a	5202a	3357a	2591b	1075ab	974ab	30 021a	19 385c

同列不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

2.4 丛枝菌根对干旱胁迫下‘凤丹’幼苗碳同化反应启动后光能分配的影响

由表 4 可以看出, 与对照相比, 轻度干旱胁迫

3 d 和 6 d, 重度干旱 3 d 和 6 d, 未接菌‘凤丹’幼苗的 $Y(II)$ 分别显著降低 15.8%、72.9%、23.4%和 78.7%; 与未接菌处理相比, 轻度干旱及重度干旱 3

d, 接菌处理的 Y(II) 提高 6.3% 和 14.3%, 差异不显著; 轻度干旱胁迫 6 d 和重度干旱胁迫 6 d, 接菌处理较未接菌处理分别显著提高 48.9% 和 58.7%。轻度干旱胁迫 3 d 和重度干旱 3 d, 未接菌‘凤丹’幼苗的 Y(NPQ) 较对照分别提高 3% 和 12.1%, 接菌处理较未接菌处理分别显著提高 39.7% 和 29.1%; 轻度干旱胁迫 6 d 和重度干旱 6 d, 未接菌‘凤丹’幼苗的 Y(NPQ) 较对照显著升高 146.6% 和 164.1%, 接菌处理较未接菌处理分别显著提高 32.5% 和 31.8%。轻度干旱胁迫 3 d 和 6 d, 重度干旱胁迫 3 d 和 6 d, 与对照相比, 未接菌‘凤丹’幼苗的 Y(NO) 显著提高 23.8%、50.7%、32% 和 52.7%; 与未接菌处理相比, 接菌处理显著降低 18.7%、32.1%、22.7% 和 31.9%。

表 4 干旱胁迫下接种和未接种丛枝菌根真菌的‘凤丹’幼苗的 Y(II)、Y(NPQ)、Y(NO)

Table 4 Y(II), Y(NPQ) and Y(NO) of ‘Fengdan’ seedlings inoculated with or without arbuscular mycorrhizal fungi under different drought stress conditions

处理	Y(II)		Y(NPQ)		Y(NO)	
	3 d	6 d	3 d	6 d	3 d	6 d
CK	0.531a	0.512a	0.132b	0.131c	0.337b	0.357b
T1	0.447b	0.139cd	0.136b	0.323b	0.417a	0.538a
T2	0.475ab	0.207b	0.186a	0.428a	0.339b	0.365b
T3	0.407b	0.109d	0.148b	0.346b	0.445a	0.545a
T4	0.465ab	0.173bc	0.191a	0.456a	0.344b	0.371b

同列不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

3 结论与讨论

姜英等^[16]发现丛枝菌根可以减轻干旱对柚木的光抑制, 提高木棉的 PSII 的潜在活性。本研究结果表明, 未接菌处理‘凤丹’幼苗的 F_v/F_o 降低, 但是接菌‘凤丹’幼苗的 F_v/F_o 在轻度干旱胁迫时与未接菌处理相比有所升高, 在重度干旱时显著升高, 说明丛枝菌根可以提高干旱胁迫环境下‘凤丹’的 PSII 反应中心活性, 且随着干旱程度的加深, 作用更为明显。轻度干旱胁迫和重度干旱胁迫 3 d 均未使‘凤丹’幼苗 F_v/F_m 有明显变化, 接菌较未接菌也无显著差异。重度干旱胁迫 6 d, 未接菌‘凤丹’ F_v/F_m 显著降低, 接菌的 F_v/F_m 较未接菌处理显著升高。有研究发现, F_v/F_m 对干旱胁迫并不敏感, 而以吸收光能为基础的性能参数 PI_{abs} 包含了光能吸收、捕获和转化三个方面来综合反映光系统活性, 因此敏感性优于 F_v/F_m ^[17]。本研究发现, 干旱使未接菌‘凤丹’幼苗的 PI_{abs} 显著降低, 接菌则使干旱胁迫处理下‘凤

丹’的 PI_{abs} 升高, 且随着干旱时间的延长和干旱程度的加剧, PI_{abs} 升高的幅度更大。这说明丛枝菌根可减轻干旱对‘凤丹’的光抑制, 增强其光合系统结构与功能的整体性, 随着干旱胁迫时间延长和程度加深效果更为明显。这与马坤等^[18]在木棉中的研究结果一致。

M_o 、 ϕ_{Eo} 、 ϕ_o 等参数可反映 PSII 受体侧的变化^[19]。重度干旱胁迫下未接菌的‘凤丹’ M_o 明显升高, 接菌使重度干旱胁迫下‘凤丹’的 M_o 明显降低, ϕ_{Eo} 、 ϕ_o 显著升高, 说明丛枝菌根可减少干旱胁迫环境下‘凤丹’幼苗光能中用来还原 Q_A 的能量所占比例, 提高电子传递效率, 这可能是因为丛枝菌根可缓解干旱胁迫对‘凤丹’幼苗 PSII 受体侧的伤害。 V_j 、 V_i 表示在 J 点和 I 点 Q_A^- 的积累量, 反映了在 J 点和 I 点关闭的反应中心数量^[20]。‘凤丹’幼苗在干旱胁迫环境中 V_j 和 V_i 升高, 说明干旱胁迫会引起反应中心关闭。接菌将重度干旱胁迫的 V_j 显著降低, V_i 却没有显著变化, 这说明丛枝菌根可通过减少在 J 相的 Q_A^- 积累量来降低干旱对电子传递的抑制。表明丛枝菌根可将反应中心捕获的激子更多地用于电子传递, 减少 Q_A^- 积累量, 进而提高电子传递效率。这可能也是接菌可使干旱胁迫下‘凤丹’幼苗最大光化学效率提高的原因之一。

干旱会导致反应中心的降解或失活, 增加剩余有活动反应中心的负担, 使 ABS/CS、Tr/CS 减少, 最终导致 ET/CS、RE/CS 和 RC/CS 下降^[21]。本研究发现, 轻度干旱胁迫 3 d 时, ‘凤丹’幼苗的 ABS/CS_o、Tr/CS_o 没有降低, 反而有所升高, ET/CS_o 和 RE/CS_o 却降低, 这可能是由于轻度干旱使 PSII 陷入了能量陷阱, 持续吸收光能, 却不传递光能, 从而对反应中心造成了进一步伤害^[22]。接菌后, 干旱胁迫下‘凤丹’幼苗的 ABS/CS_o、Tr/CS_o、ET/CS_o 和 RC/CS_m 都有所上升, 且重度干旱胁迫下提高的幅度更大, 这说明丛枝菌根能增加干旱胁迫(尤其是重度干旱胁迫)下单位面积内反应中心数量, 吸收和捕获较多的光能, 而且具有较强的电子传递能力, 从而维持‘凤丹’幼苗 PSII 反应中心在干旱环境下的活性。这与张妮娜^[23]在柑橘上的研究结果一致。

干旱胁迫可通过影响光系统活性而改变光能分配^[24-25]。干旱胁迫后, 未接菌‘凤丹’幼苗的 Y(II) 降低, Y(NPQ) 和 Y(NO) 升高, 说明干旱造成光能

中用于光化学反应的比例减小,热耗散和造成光系统损伤的能量增加。干旱胁迫 3 d,未接菌‘凤丹’调节性能量耗散量子产量没有明显增加,而调节性能量耗散量子产量却显著提高,这可能是因为未接菌的‘凤丹’光系统对干旱的调节机制不灵敏,过剩的能量没有及时以热量的形式散发,从而导致光系统损伤。谢晓红^[26]认为,丛枝菌根可以提高逆境下甜瓜的热耗散能力,进而保护光系统中心不被过量的光能破坏。本研究结果表明,处于干旱环境的‘凤丹’幼苗接菌后 Y(NPQ)明显升高,Y(NO)显著降低;Y(II)在干旱胁迫 3 d 后有所升高,在干旱胁迫 6 d 后达到显著水平。这表明丛枝菌根能够维持干旱胁迫下‘凤丹’幼苗的热耗散能力,降低光反应中心的热损伤程度,将更多的光能用于光化学反应,从而提高‘凤丹’的光合能力。

综上,在干旱胁迫条件下,丛枝菌根可以提高油用牡丹‘凤丹’PSII 反应中心潜在活性和单位面积反应中心数量,增加对光能的吸收和捕获,并显著提高热耗散能力,显著降低干旱对光反应中心的损害,减小 Q_A 被还原的速率和 Q_A 积累量,从而增强电子传递,提高光化学效率,维持较高的光化学活性,在重度干旱胁迫下,这种作用的效果更为明显。

参考文献:

- [1] 李晓青,韩继刚,刘焯,等.不同地区凤丹经济性状及其籽油脂肪酸成分分析[J].粮食与油脂,2014,27(4):43-46.
LI X Q, HAN J G, LIU Z, et al. Economic characteristics investigation and seed oil fatty acid composition analysis of *Paeonia ostii* plants in different areas[J]. Cereals & Oils, 2014, 27(4): 43-46.
- [2] 修宇,吴国栋,陈德忠,等.牡丹绿化油用品种繁殖栽培技术[J].北京林业大学学报,2017,39(1):112-118.
XIU Y, WU G D, CHEN D Z, et al. Propagation and afforestation techniques of tree peonies for greening and seed oil production[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2017, 39(1): 112-118.
- [3] 史瑞雪,王惠玲.种植植物油脂新食品原料的营养生理功效比较研究[J].粮食与食品工业,2016,23(6):13-19.
SHI R X, WANG H L. The comparative study on the nutritional physiological functions in the special vegetable oils of the novel food[J]. Cereal & Food Industry, 2016, 23(6): 13-19.
- [4] 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.
ZHANG W, XU X Y, SHI S B, et al. Photosynthetic characteristics of *Paeonia rockii* and its response to soil drought stress[J]. Molecular Plant Breeding, 2020, 18(7): 2358-2365.
- [5] 侯小改,段春燕,刘素云,等.不同土壤水分条件下牡丹的生理特性研究[J].华北农学报,2007,22(3):80-83.
HOU X G, DUAN C Y, LIU S Y, et al. Physioecological characteristics of tree peony under different soil water conditions[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2007, 22(3): 80-83.
- [6] 孔祥生,张妙霞,王学永,等.水分胁迫下2个牡丹品种生理生化差异比较[J].林业科学,2011,47(9):162-167.
KONG X S, ZHANG M X, WANG X Y, et al. Comparative studies on the physiological and biochemical characteristics of two *Paeonia suffruticosa* varieties under water stress[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(9): 162-167.
- [7] 刘俊娟.高温干旱胁迫对牡丹叶 PS II 功能及光能分配的影响[J].北方园艺,2019(11):72-79.
LIU J J. Effects of high temperature and drought stress on PSII function and light distribution in peony leaves with different resistance[J]. Northern Horticulture, 2019(11): 72-79.
- [8] 田蜜,陈应龙,李敏,等.丛枝菌根结构与功能研究进展[J].应用生态学报,2013,24(8):2369-2376.
TIAN M, CHEN Y L, LI M, et al. Structure and function of arbuscular mycorrhiza: a review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 4(8): 2369-2376.
- [9] ZHOU Q, RAVNSKOV S, JIANG D, et al. Changes in carbon and nitrogen allocation, growth and grain yield induced by arbuscular mycorrhizal fungi in wheat (*Triticum aestivum* L.) subjected to a period of water deficit[J]. Plant Growth Regulation, 2015, 75(3): 751-760.
- [10] LIU T, SHENG M, WANG C Y, et al. Impact of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth, water status, and photosynthesis of hybrid poplar under drought stress and recovery[J]. Photosynthetica, 2015, 53(2): 250-258.
- [11] 宋凤鸣,刘建华,刘登彪,等.3种丛枝菌根真菌对任豆生长和抗旱性的影响研究[J].西南林业大学学报(自然科学),2018,38(6):97-105.
SONG F M, LIU J H, LIU D B, et al. Effects of 3 kinds of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and drought resistance of *Zenia insignis*[J]. Journal of Southwest Forestry University(Natural Sciences), 2018, 38(6): 97-105.
- [12] 鲁珊珊,陈乒乓,刘微,等.干旱胁迫条件下 AM 真菌对蓝莓光合特性及矿质元素含量的影响[J].中国农学通报,2019,35(5):31-35.
LU S S, CHEN P P, LIU W, et al. Arbuscular mycorrhizal fungus affects the photosynthetic characteristics and mineral element concentration of blueberry under drought

- stress[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(5): 31–35.
- [13] 陈丹明, 郭娜, 郭绍霞. 丛枝菌根真菌对牡丹生长及相关生理指标的影响[J]. 西北植物学报, 2010, 30(1): 131–135.
- CHEN D M, GUO N, GUO S X. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and some physiological indices of *Paeonia suffruticosa*[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2010, 30(1): 131–135.
- [14] 宋贺, 蒋廷玲, 许振柱, 等. 玉米光合生理参数对全生育期干旱与拔节后干旱过程的响应[J]. 生态学报, 2019, 39(7): 2405–2415.
- SONG H, JIANG Y L, XU Z Z, et al. Response of photosynthetic physiological parameters of maize to drought during the whole growth period and after the jointing stage[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(7): 2405–2415.
- [15] 张兴华, 高杰, 杜伟莉, 等. 干旱胁迫对玉米品种苗期叶片光合特性的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(1): 154–159.
- ZHANG X H, GAO J, DU W L, et al. Effects of drought stress on photosynthetic characteristics of maize hybrids at seedling stage[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(1): 154–159.
- [16] 姜英, 刘雄盛, 李娟, 等. 干旱胁迫下丛枝菌根真菌对柚木光合及荧光参数的影响[J]. 森林与环境学报, 2019, 39(6): 608–615.
- JIANG Y, LIU X S, LI J, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the photosynthetic characteristics and fluorescence parameters of *Tectona grandis* seedlings under drought stress[J]. Journal of Forest and Environment, 2019, 39(6): 608–615.
- [17] 原佳乐, 马超, 冯雅岚, 等. 不同抗旱性小麦快速叶绿素荧光诱导动力学曲线对干旱及复水的响应[J]. 植物生理学报, 2018, 54(6): 1119–1129.
- YUAN J L, MA C, FENG Y L, et al. Response of chlorophyll fluorescence transient in leaves of wheats with different drought resistances to drought stresses and rehydration[J]. Plant Physiology Journal, 2018, 54(6): 1119–1129.
- [18] 马坤, 王彦淇, 杨建军, 等. 不同干旱胁迫条件下丛枝菌根真菌对木棉叶绿素荧光参数的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2017, 26(3): 35–43.
- MA K, WANG Y Q, YANG J J, et al. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on chlorophyll fluorescence parameters of *Bombax ceiba* under different drought stress conditions[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2017, 26(3): 35–43.
- [19] 王飞, 孙增光, 焦念元, 等. 芝麻与花生间作对芝麻功能叶光合荧光特性的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(11): 3787–3794.
- WANG F, SUN Z G, JIAO N Y, et al. The effects of sesame/peanut intercropping on photosynthetic fluorescence characteristics in functional leaf of sesame[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(11): 3787–3794.
- [20] 王飞, 刘领, 武岩岩, 等. 玉米花生间作改善花生铁营养提高其光合特性的机理[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(5): 901–913.
- WANG F, LIU L, WU Y Y, et al. Mechanism of maize intercropping peanut improving iron nutrition to increase photosynthetic performance of peanut[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(5): 901–913.
- [21] 高杰, 张仁和, 王文斌, 等. 干旱胁迫对玉米苗期叶片光系统 II 性能的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(5): 1391–1396.
- GAO J, ZHANG R H, WANG W B, et al. Effects of drought stress on performance of photosystem II in maize seedling stage[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(5): 1391–1396.
- [22] 鲁建荣, 李向义, 薛伟, 等. 两种荒漠植物叶片脱水下水分生理和 PS II 活性特征[J]. 西北植物学报, 2013, 33(7): 1427–1434.
- LU J R, LI X Y, XUE W, et al. Characteristics of leaf dehydration on water relation and photosystem II activity in two desert plants[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2013, 33(7): 1427–1434.
- [23] 张妮娜. 接种丛枝菌根真菌(AMF)对盆栽柑橘幼苗抗旱性的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- ZHANG N N. Influences of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) inoculation on drought resistance mechanism of the potted *Citrus* plantlets[D]. Chongqing: Southwest University, 2018.
- [24] 朱成刚, 陈亚宁, 李卫红, 等. 干旱胁迫对胡杨 PSII 光化学效率和激能耗散的影响[J]. 植物学报, 2011, 46(4): 413–424.
- ZHU C G, CHEN Y N, LI W H, et al. Effect of drought stress on photochemical efficiency and dissipation of excited energy in photosystem II of *Populus euphratica*[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2011, 46(4): 413–424.
- [25] 徐祥增, 张金燕, 张广辉, 等. 光强对三七光合能力及能量分配的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(1): 193–204.
- XU X Z, ZHANG J Y, ZHANG G H, et al. Effects of light intensity on photosynthetic capacity and light energy allocation in *Panax notoginseng*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(1): 193–204.
- [26] 谢晓红. 丛枝菌根真菌对弱光及盐胁迫下甜瓜生长和光合作用的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2016.
- XIE X H. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and photosynthesis in melon seedlings under weak light with salt stress[D]. Ya'an, China: Sichuan Agricultural University, 2016.

责任编辑: 罗慧敏

英文编辑: 罗维