

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

马 坤¹, 王彦淇¹, 杨建军², 李 璐^{1,①}, 王 颖¹, 马焕成¹

(1. 西南林业大学 国家林业局西南地区生物多样性保育重点实验室, 云南 昆明 650224;

2. 云南省林业调查规划院大理分院, 云南 大理 671000)

摘要: 为了探明丛枝菌根真菌(AMF)与木棉(*Bombax ceiba* Linn.)抗旱性的关系,采用盆栽法对不同干旱胁迫条件下接菌组(1 g 土壤含 100 个 AMF 孢子)和未接菌组木棉叶绿素荧光参数进行了比较分析。结果表明:中度干旱胁迫(土壤相对含水量 45%~50%)和重度干旱胁迫(土壤相对含水量 30%~35%)条件下接菌组的初始荧光(F_0)均低于未接菌组;与对照(土壤相对含水量 65%~70%)相比,重度干旱胁迫 5、15 和 35 d,接菌组的 F_0 值分别升高了 10.39%、20.93%和 14.14%,未接菌组的 F_0 值分别升高了 26.95%、48.75%和 71.35%。接菌组的 PS II 最大光化学效率(F_v/F_m)和 PS II 潜在活性(F_v/F_0)在中度和重度干旱胁迫 5、15 和 35 d 均高于未接菌组。与对照相比,重度干旱胁迫 5、15 和 35 d,接菌组的 F_v/F_m 值分别降低了 9.09%、6.85%和 22.06%,未接菌组的 F_v/F_m 值分别降低了 10.67%、16.21%和 52.78%;接菌组的 F_v/F_0 值分别降低了 28.14%、22.43%和 46.01%,未接菌组的 F_v/F_0 值分别降低了 28.38%、48.20%和 75.96%。总体来看,在中度和重度干旱胁迫条件下,接菌组的 PS II 实际光量子产量 [$Y(II)$]、PS II 非调节性能量耗散的量子产量 [$Y(NO)$]、光化学淬灭系数(qP)和光合电子传递速率(ETR)高于对照,而 PS II 调节性能量耗散的量子产量 [$Y(NPQ)$]和非光化学淬灭系数(qN)低于对照;未接菌组的 $Y(II)$ 、 qP 、 qN 和 ETR 值低于对照,而 $Y(NO)$ 和 $Y(NPQ)$ 值则高于对照。研究结果显示:AMF 能够减轻干旱尤其是重度干旱胁迫条件下木棉受伤和光抑制的程度,并提高其叶片 PS II 反应中心的活性,从而增强木棉在干旱胁迫条件下的生存能力。

关键词: 木棉; 丛枝菌根真菌(AMF); 叶绿素荧光参数; 干旱胁迫

中图分类号: Q945.78; Q948.112+.3; S792.99 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2017)03-0035-09

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2017.03.05

Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on chlorophyll fluorescence parameters of *Bombax ceiba* under different drought stress conditions MA Kun¹, WANG Yanqi¹, YANG Jianjun², LI Lu^{1,①}, WANG Ying¹, MA Huancheng¹ (1. Key Laboratory of Biodiversity Conservation in Southwest China, State Forestry Administration, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2. Dali Institute of Forestry Survey and Planning Institute of Yunnan Province, Dali 671000, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2017, 26(3): 35-43

Abstract: To figure out the relationship between arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and drought resistance of *Bombax ceiba* Linn., chlorophyll fluorescence parameters of *B. ceiba* of inoculation (1 g soil containing 100 spores of AMF) and non-inoculation groups under different drought stress conditions were compared and analyzed by using pot-culture method. The results show that initial fluorescence (F_0) of inoculation group is lower than that of non-inoculation group under moderate drought stress (soil relative water content of 45% - 50%) and severe drought stress (soil relative water content of 30% - 35%) conditions. Compared with the control (soil relative water content of 65% - 70%), at severe drought

收稿日期: 2016-11-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31260175; 31560207); 云南省教育厅科学研究基金产业化培育项目(2016CYH14)

作者简介: 马 坤(1990—),男,云南曲靖人,硕士研究生,主要研究方向为森林培育学。

①通信作者 E-mail: lilu@swfu.edu.cn

stress for 5, 15, and 35 d, F_o value of inoculation group increases by 10.39%, 20.93%, and 14.14%, respectively, that of non-inoculation group increases by 26.95%, 48.75%, and 71.35%, respectively. The maximum photochemical efficiency of PS II (F_v/F_m) and potential activity of PS II (F_v/F_o) of inoculation group are higher than those of non-inoculation group at moderate and severe drought stresses for 5, 15, and 35 d. Compared with the control, at severe drought stress for 5, 15, and 35 d, F_v/F_m value of inoculation group decreases by 9.09%, 6.85%, and 22.06%, respectively, and that of non-inoculation group decreases by 10.67%, 16.21%, and 52.78%, respectively; F_v/F_o value of inoculation group decreases by 28.14%, 22.43%, and 46.01%, respectively, and that of non-inoculation group decreases by 28.38%, 48.20%, and 75.96%, respectively. In general, under moderate and severe drought stress conditions, effective quantum yield of PS II [$Y(II)$], quantum yield of non-regulated energy dissipation of PS II [$Y(NO)$], photochemical quenching coefficient (qP), and photosynthetic electron transport rate (ETR) of inoculation group are higher than those of the control, while quantum yield of regulated energy dissipation of PS II [$Y(NPQ)$] and non-photochemical quenching coefficient (qN) are lower than those of the control; $Y(II)$, qP , qN , and ETR values of non-inoculation group are lower than those of the control, while $Y(NO)$ and $Y(NPQ)$ values are higher than those of the control. It is suggested that AMF can reduce the damage and photoinhibition degrees of *B. ceiba* under drought stress (especially severe drought stress) condition and improve the activity of PS II reaction center of leaf, thus enhance the survivability of *B. ceiba* under drought stress condition.

Key words: *Bombax ceiba* Linn.; arbuscular mycorrhizal fungi (AMF); chlorophyll fluorescence parameter; drought stress

干热河谷是指高温、低湿的河谷地带,大多分布于热带或亚热带地区,气候炎热少雨,水土流失严重,许多植物在干热河谷难以存活,导致该区域内许多生态恢复林的保存率过低^[1-3]。木棉(*Bombax ceiba* Linn.)隶属于木棉科(Bombacaceae)木棉属(*Bombax* Linn.),为落叶大乔木,是干热河谷中河谷型萨王纳植被的建群种,其在干热河谷长势良好,具有较好的适应性^[4],对干热河谷的生态恢复具有重要作用。

丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)能够与80%陆生植物形成互惠共生关系,具有丰富的物种多样性^[5-6],并且,对已经被破坏的生态系统的植被恢复和重建具有重要作用^[7-9]。AMF对逆境中寄主植物的生长具有一定促进作用,可改善植株的水分供应,促进植株对养分的吸收,进而增强植株在逆境中的光合能力及抗逆性^[9-14]。叶绿素荧光与植物光合作用的各反应过程关系密切,是研究植物光合生理特性与逆境相互关系的理想探针,能够快速、灵敏、无损伤的探测逆境对植物光合作用的影响及植物受胁迫的生理状态^[15-17]。

伍建榕等^[18]的研究结果表明:在云南干热河谷,AMF与木棉根系普遍存在互惠共生关系。然而,在干热河谷,AMF对木棉叶片光合作用尤其是叶绿素荧光参数是否有调节作用尚未明确,亟待研究。鉴于此,本研究对不同干旱胁迫条件下接种和未接种

AMF的木棉幼苗叶片10个叶绿素荧光参数的变化进行了比较分析,以期对干热河谷生态系统的植被恢复和重建提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 材料

在云南省红河州个旧市保和乡冷墩村采集野生木棉植株的种子及其细根(直径小于2 mm)周围0~40 cm土层的土壤,由西南林业大学林学院微生物实验室采用湿筛-倾析法^[18]收集土壤中丛枝菌根真菌(AMF)的孢子,使用白车轴草(*Trifolium repens* Linn.)进行扩繁(每盆接种20个AMF孢子,使用无菌水浇水),获得接菌土(1 g土壤含100个AMF孢子)。

1.2 方法

1.2.1 处理方法 挑选籽粒饱满的木棉种子进行消毒,在超净工作台上将种子接种到铺有1层湿润滤纸(用灭菌蒸馏水浸湿)的灭菌培养皿(直径10 cm)中,每皿25粒种子,置于温度30℃、空气相对湿度75%、光照度2 000 lx、光照时间12 h·d⁻¹的人工气候箱内进行催芽;种子露白后(2014年3月)播种到装有3 kg土壤的培养盆(上口径27.0 cm、下口径15.0 cm、高度16.5 cm)中,每盆播种3粒种子。其中,接菌组土壤为2.85 kg灭菌土和0.15 kg接菌土的混合

土壤,未接菌组土壤为灭菌土。接菌组和未接菌组各27盆,置于西南林业大学温室大棚内进行培养,棚内温度25℃~30℃,每2d浇水1次,间苗,每盆保留1株幼苗。

于2014年9月对上述幼苗进行对照(CK)、中度和重度干旱胁迫处理,各处理组的土壤相对含水量分别为65%~70%、45%~50%和30%~35%,每个处理组9盆,平均分成3组,每组视为1个重复。采用称量法控制土壤相对含水量,于每天18:00称量后补充散失的水分,使土壤相对含水量保持在设定范围内。分别在干旱胁迫1、5、15和35d的9:00至12:00测定叶片的叶绿素荧光参数。

1.2.2 叶绿素荧光参数测定 参照钱永强等^[19]的方法,使用PAM-2500便携式调制叶绿素荧光仪(德国Walz公司)测定各处理组叶片的叶绿素荧光参数。选取植株中上部健康复叶中的第3枚小叶,暗适应30min后,在饱和光照强度 $2000\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 条件下测量初始荧光(F_0)、最大荧光(F_m)和PS II最大光化学效率(F_v/F_m);光适应下,在仪器上直接读取PS II实际光量子产量 $[Y(\text{II})]$ 、PS II调节性能量耗散的量子产量 $[Y(\text{NPQ})]$ 、PS II非调节性能量耗散的量子产量 $[Y(\text{NO})]$ 、光化学淬灭系数(qP)、非光化学淬灭系数(qN)和光合电子传递速率(ETR)。每个处理组随机选取6株植株进行检测,每株测定3枚小叶。其中,PS II潜在活性(F_v/F_0)根据公式“ $F_v/F_0 = (F_m - F_0)/F_0$ ”计算。

1.3 数据处理及统计分析

采用EXCEL 2010软件对实验数据进行统计和分析;采用SPSS 13.0统计分析软件对相关数据进行Duncan's多重比较。

2 结果和分析

2.1 木棉叶片 F_0 、 F_m 、 F_v/F_m 和 F_v/F_0 值的比较

不同干旱胁迫条件下接种和未接种丛枝菌根真菌(AMF)的木棉叶片初始荧光(F_0)、最大荧光(F_m)、PS II最大光化学效率(F_v/F_m)和PS II潜在活性(F_v/F_0)的比较结果见表1。

2.1.1 F_0 值的比较 由表1可见:在对照(土壤相对含水量65%~70%)条件下,接菌组木棉的 F_0 值随时间延长呈逐渐升高的变化趋势,并在胁迫1、15和35d高于未接菌组;在中度干旱胁迫(土壤相对含水

量45%~50%)和重度干旱胁迫(土壤相对含水量30%~35%)条件下,接菌组和未接菌组的 F_0 值均随时间延长呈逐渐升高的趋势,并且接菌组的 F_0 值低于未接菌组。与未接菌组相比,中度干旱胁迫条件下接菌组的 F_0 值在胁迫1、5、15和35d分别降低了11.69%、15.73%、12.57%和10.50%,重度干旱胁迫条件下接菌组的 F_0 值则在胁迫1、5、15和35d分别降低了1.34%、19.81%、12.61%和28.71%。

由表1还可见:在中度干旱胁迫条件下,接菌组的 F_0 值在胁迫1、5、15和35d分别较对照降低了8.11%、2.60%、11.05%和18.18%;未接菌组的 F_0 值在胁迫1、5和15d分别较对照升高了7.69%、6.59%和9.38%,而在胁迫35d却较对照降低了2.16%。在重度干旱胁迫条件下,接菌组的 F_0 值在胁迫5、15和35d分别较对照升高了10.39%、20.93%和14.14%,而在胁迫1d却较对照降低了0.68%;未接菌组的 F_0 值在胁迫1、5、15和35d分别较对照升高了4.20%、26.95%、48.75%和71.35%。差异显著性分析结果表明:中度干旱胁迫35d接菌组的 F_0 值显著($P<0.05$)低于对照,重度干旱胁迫15d接菌组的 F_0 值显著高于对照;重度干旱胁迫15和35d未接菌组的 F_0 值也显著高于对照。

2.1.2 F_m 值的比较 由表1可见:在对照条件下,接菌组木棉的 F_m 值随时间延长呈先升高后降低的变化趋势,并在胁迫1、5和15d分别较未接菌组升高了14.61%、0.30%和0.32%;在中度干旱胁迫条件下,接菌组的 F_m 值在胁迫1、5和35d分别较未接菌组升高了3.32%、12.26%和6.25%;在重度干旱胁迫条件下,接菌组的 F_m 值在胁迫1、5和35d分别较未接菌组降低了2.15%、10.43%和6.78%。

由表1还可见:在中度干旱胁迫条件下,接菌组的 F_m 值在胁迫1和5d分别较对照降低了9.06%和5.11%,而在胁迫15和35d却分别较对照升高了0.16%和1.45%;未接菌组的 F_m 值在胁迫5和35d分别较对照降低了15.21%和10.98%,而在胁迫1和15d却分别较对照升高了0.88%和5.22%。在重度干旱胁迫条件下,接菌组的 F_m 值在胁迫1、5和35d分别较对照降低了23.20%、14.86%和22.42%,而在胁迫15d却较对照升高了1.74%;未接菌组的 F_m 值在胁迫1、5、15和35d分别较对照降低了10.04%、4.67%、3.16%和22.41%。差异显著性分析结果表明:重度干旱胁迫1、5和35d接菌组的 F_m 值显著低

于对照,中度干旱胁迫5 d以及重度干旱胁迫1和35 d未接菌组的 F_m 值也显著低于对照。

2.1.3 F_v/F_m 值的比较 由表1可见:在对照条件下,接菌组木棉的 F_v/F_m 值随时间延长呈先保持稳定之后逐渐下降的变化趋势,并在胁迫1和5 d高于未接菌组,而在胁迫15和35 d却低于未接菌组;在中度干旱胁迫条件下,接菌组的 F_v/F_m 值在胁迫1、5、15和35 d分别较未接菌组升高了5.48%、14.93%、1.35%和8.82%;在重度干旱胁迫条件下,接菌组的 F_v/F_m 值在胁迫5、15和35 d分别较未接菌组升高了4.48%、9.68%和55.88%。

由表1还可见:在中度干旱胁迫条件下,接菌组的 F_v/F_m 值在胁迫15和35 d分别较对照升高了2.74%和8.82%,而在胁迫1和5 d却与对照持平;未接菌组的 F_v/F_m 值在胁迫1、5和35 d分别较对照

降低了2.67%、10.67%和5.56%,而在胁迫15 d却与对照持平。在重度干旱胁迫条件下,接菌组的 F_v/F_m 值在胁迫1、5、15和35 d分别较对照降低了9.09%、9.09%、6.85%和22.06%;未接菌组的 F_v/F_m 值在胁迫1、5、15和35 d分别较对照降低了5.33%、10.67%、16.21%和52.78%。差异显著性分析结果表明:重度干旱胁迫5、15和35 d接菌组的 F_v/F_m 值显著低于对照,重度干旱胁迫15和35 d未接菌组的 F_v/F_m 值也显著低于对照。

2.1.4 F_v/F_o 值的比较 由表1可见:在对照条件下,接菌组木棉的 F_v/F_o 值随时间延长呈逐渐下降的变化趋势,并在胁迫1和5 d高于未接菌组,而在胁迫15和35 d却低于未接菌组;在中度干旱胁迫条件下,接菌组的 F_v/F_o 值在胁迫1、5、15和35 d分别较未接菌组升高了23.47%、41.92%、10.80%和26.72%;

表1 不同干旱胁迫条件下接种和未接种丛枝菌根真菌(AMF)的木棉叶片初始荧光(F_o)、最大荧光(F_m)、PS II最大光化学效率(F_v/F_m)和PS II潜在活性(F_v/F_o)的比较($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 1 Comparison on initial fluorescence (F_o), the maximum fluorescence (F_m), the maximum photochemical efficiency of PS II (F_v/F_m), and potential activity of PS II (F_v/F_o) in leaves of *Bombax ceiba* Linn. inoculated and not inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) under different drought stress conditions ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

处理组 ²⁾ Treatment group ²⁾	不同时间接菌组的 F_o 值 F_o value of inoculation group at different times				不同时间未接菌组的 F_o 值 F_o value of non-inoculation group at different times			
	1 d	5 d	15 d	35 d	1 d	5 d	15 d	35 d
	CK	1.48±0.03a	1.54±0.13a	1.72±0.23b	1.98±0.15a	1.43±0.16a	1.67±0.30a	1.60±0.26b
S1	1.36±0.24a	1.50±0.15a	1.53±0.17b	1.62±0.21b	1.54±0.23a	1.78±0.37a	1.75±0.32b	1.81±0.14b
S2	1.47±0.27a	1.70±0.39a	2.08±0.07a	2.26±0.63a	1.49±0.08a	2.12±0.70a	2.38±0.32a	3.17±0.09a

处理组 ²⁾ Treatment group ²⁾	不同时间接菌组的 F_m 值 F_m value of inoculation group at different times				不同时间未接菌组的 F_m 值 F_m value of non-inoculation group at different times			
	1 d	5 d	15 d	35 d	1 d	5 d	15 d	35 d
	CK	6.51±0.58a	6.66±0.30a	6.34±0.38a	6.20±0.59a	5.68±0.35a	6.64±0.35a	6.32±0.48a
S1	5.92±0.39ab	6.32±0.20ab	6.35±0.15a	6.29±0.53a	5.73±0.29a	5.63±0.91b	6.65±0.34a	5.92±1.19ab
S2	5.00±0.55b	5.67±0.66b	6.45±0.15a	4.81±1.14b	5.11±0.20b	6.33±0.28ab	6.12±0.52a	5.16±0.13b

处理组 ²⁾ Treatment group ²⁾	不同时间接菌组的 F_v/F_m 值 F_v/F_m value of inoculation group at different times				不同时间未接菌组的 F_v/F_m 值 F_v/F_m value of non-inoculation group at different times			
	1 d	5 d	15 d	35 d	1 d	5 d	15 d	35 d
	CK	0.77±0.02a	0.77±0.01a	0.73±0.02a	0.68±0.02a	0.75±0.03a	0.75±0.03a	0.74±0.06a
S1	0.77±0.03a	0.77±0.02a	0.75±0.04a	0.74±0.05a	0.73±0.03a	0.67±0.12a	0.74±0.04a	0.68±0.09a
S2	0.70±0.07a	0.70±0.04b	0.68±0.01b	0.53±0.03b	0.71±0.01a	0.67±0.09a	0.62±0.04b	0.34±0.09b

处理组 ²⁾ Treatment group ²⁾	不同时间接菌组的 F_v/F_o 值 F_v/F_o value of inoculation group at different times				不同时间未接菌组的 F_v/F_o 值 F_v/F_o value of non-inoculation group at different times			
	1 d	5 d	15 d	35 d	1 d	5 d	15 d	35 d
	CK	3.39±0.32a	3.34±0.22a	2.72±0.27a	2.13±0.16a	3.01±0.43a	3.03±0.53a	3.07±1.05a
S1	3.42±0.48a	3.25±0.36a	3.18±0.41a	2.94±0.74a	2.77±0.43a	2.29±0.99a	2.87±0.64a	2.32±0.86a
S2	2.48±0.77b	2.40±0.43b	2.11±0.12b	1.15±0.15b	2.43±0.15ab	2.17±0.80a	1.59±0.21b	0.63±0.01b

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant difference ($P < 0.05$).

²⁾ CK: 对照(土壤相对含水量65%~70%) The control (soil relative water content of 65%~70%); S1: 中度干旱胁迫(土壤相对含水量45%~50%) Moderate drought stress (soil relative water content of 45%~50%); S2: 重度干旱胁迫(土壤相对含水量30%~35%) Severe drought stress (soil relative water content of 30%~35%).

在重度干旱胁迫条件下,接菌组的 F_v/F_o 值在胁迫 1、5、15 和 35 d 分别较未接菌组升高了 2.06%、10.60%、32.70%和 82.54%。

由表 1 还可见:在中度干旱胁迫条件下,接菌组的 F_v/F_o 值在胁迫 1、15 和 35 d 分别较对照升高了 0.89%、16.91%和 38.03%,而在胁迫 5 d 却较对照降低了 2.70%;未接菌组的 F_v/F_o 值在胁迫 1、5、15 和 35 d 分别较对照降低了 7.97%、24.42%、6.51%和 11.45%。在重度干旱胁迫条件下,接菌组的 F_v/F_o 值在胁迫 1、5、15 和 35 d 分别较对照降低了 26.84%、28.14%、22.43%和 46.01%,未接菌组的 F_v/F_o 值在胁迫 1、5、15 和 35 d 分别较对照降低了 19.27%、28.38%、48.20%和 75.96%。差异显著性分析结果表明:重度干旱胁迫 1、5、15 和 35 d 接菌组的 F_v/F_o 值显著低于对照,重度干旱胁迫 15 和 35 d 未接菌组的 F_v/F_o 值也显著低于对照。

2.2 木棉叶片 $Y(II)$ 、 $Y(NPQ)$ 和 $Y(NO)$ 值的比较

不同干旱胁迫条件下接种和未接种丛枝菌根真菌 (AMF) 的木棉叶片 PS II 实际光量子产量 [$Y(II)$]、PS II 调节性能量耗散的量子产量 [$Y(NPQ)$] 和 PS II 非调节性能量耗散的量子产量 [$Y(NO)$] 的比较结果见表 2。

2.2.1 $Y(II)$ 值的比较 由表 2 可见:在对照(土壤相对含水量 65%~70%)条件下,接菌组木棉的 $Y(II)$ 值随时间延长呈“降低—升高—降低”的变化趋势,并在胁迫 1 d 高于未接菌组,而在胁迫 5、15 和 35 d 却低于未接菌组;在中度干旱胁迫(土壤相对含水量 45%~50%)条件下,接菌组的 $Y(II)$ 值在胁迫 1、5 和 15 d 分别较未接菌组升高了 8.70%、43.75%和 82.76%,而在胁迫 35 d 却较未接菌组降低了 8.89%;在重度干旱胁迫(土壤相对含水量 30%~35%)条件下,接菌组的 $Y(II)$ 值在胁迫 1、5、15 和 35 d 分别较未接菌组升高了 140.00%、170.00%、388.89%和 80.95%。

由表 2 还可见:在中度干旱胁迫条件下,接菌组的 $Y(II)$ 值在胁迫 1 d 较对照降低了 19.35%,而在胁迫 5、15 和 35 d 却分别较对照升高了 21.05%、43.24%和 46.43%;未接菌组的 $Y(II)$ 值在胁迫 1、5 和 15 d 分别较对照降低了 17.86%、30.43%和 34.09%,而在胁迫 35 d 却较对照升高了 2.27%。在重度干旱胁迫条件下,接菌组的 $Y(II)$ 值在胁迫 1、5、15 和 35 d 分别较对照升高了 16.13%、42.11%、

18.92%和 35.71%,未接菌组的 $Y(II)$ 值在胁迫 1、5、15 和 35 d 分别较对照降低了 46.43%、56.52%、79.55%和 52.27%。差异显著性分析结果表明:中度干旱胁迫 15 和 35 d 接菌组的 $Y(II)$ 值显著 ($P < 0.05$) 高于对照,中度干旱胁迫 15 d 以及重度干旱胁迫 1、5、15 和 35 d 未接菌组的 $Y(II)$ 值显著低于对照。

2.2.2 $Y(NPQ)$ 值的比较 由表 2 可见:在对照条件下,接菌组木棉的 $Y(NPQ)$ 值随时间延长呈“升高—降低—升高”的变化趋势,并在胁迫 1 和 5 d 低于未接菌组,而在胁迫 5、15 和 35 d 却高于未接菌组;在中度干旱胁迫条件下,接菌组的 $Y(NPQ)$ 值在胁迫 1、5 和 15 d 分别较未接菌组降低了 39.13%、5.56%和 54.84%,而在胁迫 35 d 却与未接菌组持平;在重度干旱胁迫条件下,接菌组的 $Y(NPQ)$ 值在胁迫 1、5、15 和 35 d 分别较未接菌组降低了 13.33%、19.44%、52.50%和 59.45%。

由表 2 还可见:在中度干旱胁迫条件下,接菌组的 $Y(NPQ)$ 值在胁迫 1、5、15 和 35 d 分别较对照降低了 31.71%、20.93%、57.58%和 41.03%;未接菌组的 $Y(NPQ)$ 值在胁迫 1 和 15 d 分别较对照升高了 4.55%和 10.71%,在胁迫 5 d 较对照降低了 20.00%,而在胁迫 35 d 与对照持平。在重度干旱胁迫条件下,接菌组的 $Y(NPQ)$ 值在胁迫 1、5、15 和 35 d 分别较对照降低了 4.88%、32.56%、42.42%和 61.54%;未接菌组的 $Y(NPQ)$ 值在胁迫 1、15 和 35 d 分别较对照升高了 2.27%、42.86%和 60.87%,而在胁迫 5 d 较对照降低了 20.00%。差异显著性分析结果表明:中度干旱胁迫 15 和 35 d 以及重度干旱胁迫 5、15 和 35 d 接菌组的 $Y(NPQ)$ 值显著低于对照,重度干旱胁迫 15 和 35 d 未接菌组的 $Y(NPQ)$ 值显著高于对照。

2.2.3 $Y(NO)$ 值的比较 由表 2 可见:在对照条件下,接菌组木棉的 $Y(NO)$ 值随时间延长呈“升高—降低—升高”的变化趋势,并在胁迫 5 和 15 d 高于未接菌组,而在胁迫 1 和 35 d 与未接菌组持平;在中度干旱胁迫条件下,接菌组的 $Y(NO)$ 值在胁迫 1、5 和 15 d 分别较未接菌组降低了 16.67%、8.33%和 21.95%,而在胁迫 35 d 却较未接菌组升高了 6.25%;在重度干旱胁迫条件下,接菌组的 $Y(NO)$ 值在胁迫 1、5 和 15 d 分别较未接菌组降低了 35.90%、15.09%和 27.45%,而在胁迫 35 d 却较未接菌组升高了 7.14%。

由表2还可见:在中度干旱胁迫条件下,接菌组的 $Y(NO)$ 值在胁迫5、15和35 d分别较对照升高了15.79%、10.35%和3.03%,而在胁迫1 d却较对照降低了7.41%;未接菌组的 $Y(NO)$ 值在胁迫1、5和15 d分别较对照升高了11.11%、50.00%和51.85%,而在胁迫35 d却较对照降低了3.03%。在重度干旱胁迫条件下,接菌组的 $Y(NO)$ 值在胁迫5、15和35 d

分别较对照升高了18.42%、27.59%和36.36%,而在胁迫1 d却较对照降低了7.41%;未接菌组的 $Y(NO)$ 值在胁迫1、5、15和35 d分别较对照升高了44.44%、65.63%、88.89%和27.27%。差异显著性分析结果表明:重度干旱胁迫15和35 d接菌组的 $Y(NO)$ 值显著高于对照,重度干旱胁迫1、5、15和35 d未接菌组的 $Y(NO)$ 值也显著高于对照。

表2 不同干旱胁迫条件下接种和未接种丛枝菌根真菌(AMF)的木棉叶片PS II实际光子产量[$Y(II)$]、PS II调节性能量耗散的量子产量[$Y(NPQ)$]和PS II非调节性能量耗散的量子产量[$Y(NO)$]的比较($\bar{x} \pm SD$)¹⁾
Table 2 Comparison on effective quantum yield of PS II [$Y(II)$], quantum yield of regulated energy dissipation of PS II [$Y(NPQ)$], and quantum yield of non-regulated energy dissipation of PS II [$Y(NO)$] in leaves of *Bombax ceiba* Linn. inoculated and not inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) under different drought stress conditions ($\bar{x} \pm SD$)¹⁾

处理组 ²⁾ Treatment group ²⁾	不同时间接菌组的 $Y(II)$ 值 $Y(II)$ value of inoculation group at different times				不同时间未接菌组的 $Y(II)$ 值 $Y(II)$ value of non-inoculation group at different times			
	1 d	5 d	15 d	35 d	1 d	5 d	15 d	35 d
CK	0.31±0.02a	0.19±0.02a	0.37±0.02b	0.28±0.07b	0.28±0.05a	0.23±0.06a	0.44±0.04a	0.44±0.09a
S1	0.25±0.06a	0.23±0.06a	0.53±0.06a	0.41±0.03a	0.23±0.05ab	0.16±0.08a	0.29±0.08b	0.45±0.04a
S2	0.36±0.12a	0.27±0.09a	0.44±0.04b	0.38±0.04b	0.15±0.05b	0.10±0.04b	0.09±0.02c	0.21±0.02b

处理组 ²⁾ Treatment group ²⁾	不同时间接菌组的 $Y(NPQ)$ 值 $Y(NPQ)$ value of inoculation group at different times				不同时间未接菌组的 $Y(NPQ)$ 值 $Y(NPQ)$ value of non-inoculation group at different times			
	1 d	5 d	15 d	35 d	1 d	5 d	15 d	35 d
CK	0.41±0.02a	0.43±0.07a	0.33±0.02a	0.39±0.09a	0.44±0.06a	0.45±0.05a	0.28±0.01b	0.23±0.06b
S1	0.28±0.09a	0.34±0.06ab	0.14±0.04c	0.23±0.08b	0.46±0.07a	0.36±0.13ab	0.31±0.03ab	0.23±0.04b
S2	0.39±0.09a	0.29±0.08b	0.19±0.06b	0.15±0.01b	0.45±0.05a	0.36±0.08ab	0.40±0.11a	0.37±0.04a

处理组 ²⁾ Treatment group ²⁾	不同时间接菌组的 $Y(NO)$ 值 $Y(NO)$ value of inoculation group at different times				不同时间未接菌组的 $Y(NO)$ 值 $Y(NO)$ value of non-inoculation group at different times			
	1 d	5 d	15 d	35 d	1 d	5 d	15 d	35 d
CK	0.27±0.04a	0.38±0.05a	0.29±0.01b	0.33±0.02b	0.27±0.04b	0.32±0.04b	0.27±0.04b	0.33±0.03b
S1	0.25±0.02a	0.44±0.06a	0.32±0.02b	0.34±0.05b	0.30±0.05b	0.48±0.18ab	0.41±0.10ab	0.32±0.06b
S2	0.25±0.04a	0.45±0.04a	0.37±0.02a	0.45±0.02a	0.39±0.02a	0.53±0.07a	0.51±0.12a	0.42±0.03a

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant difference ($P < 0.05$).

²⁾ CK: 对照(土壤相对含水量65%~70%) The control (soil relative water content of 65%~70%); S1: 中度干旱胁迫(土壤相对含水量45%~50%) Moderate drought stress (soil relative water content of 45%~50%); S2: 重度干旱胁迫(土壤相对含水量30%~35%) Severe drought stress (soil relative water content of 30%~35%).

2.3 木棉叶片 qP 、 qN 和 ETR 值的比较

不同干旱胁迫条件下接种和未接种丛枝菌根真菌(AMF)的木棉叶片光化学淬灭系数(qP)、非光化学淬灭系数(qN)和光合电子传递速率(ETR)的比较结果见表3。

2.3.1 qP 值的比较 由表3可见:在对照(土壤相对含水量65%~70%)条件下,接菌组木棉的 qP 值随时间延长呈“降低—升高—降低”的变化趋势,并在胁迫1 d与未接菌组持平,而在胁迫5、15和35 d却低于未接菌组;在中度干旱胁迫(土壤相对含水量45%~50%)条件下,接菌组的 qP 值在胁迫1、5和15 d分别较未接菌组升高了9.62%、13.33%和

69.57%,而在胁迫35 d却较未接菌组降低了19.51%;在重度干旱胁迫(土壤相对含水量30%~35%)条件下,接菌组的 qP 值在胁迫1、5、15和35 d分别较未接菌组升高了130.30%、120.00%、300.00%和2.38%。

由表3还可见:在中度干旱胁迫条件下,接菌组的 qP 值在胁迫1 d与对照持平,而在胁迫5、15和35 d却分别较对照升高了6.25%、16.42%和17.86%;未接菌组的 qP 值在胁迫1、5和15 d分别较对照降低了8.77%、26.83%和39.47%,而在胁迫35 d却较对照升高了12.33%。在重度干旱胁迫条件下,接菌组的 qP 值在胁迫1、5、15和35 d分别较对照升高了33.33%、

37.50%、13.43%和 53.57%;未接菌组的 qP 值在胁迫 1、5 和 15 d 分别较对照降低了 42.11%、51.22% 和 75.00%,而在胁迫 35 d 却较对照升高了 15.07%。差异显著性分析结果表明:中度干旱胁迫 15 d 以及重度干旱胁迫 15 和 35 d 接菌组的 qP 值显著 ($P<0.05$) 高于对照,中度干旱胁迫 15 d 以及重度干旱胁迫 1、5 和 15 d 未接菌组的 qP 值显著低于对照。

2.3.2 qN 值的比较 由表 3 可见:在对照条件下,接菌组木棉的 qN 值随时间延长呈先降低后升高的变化趋势,并在胁迫 1 和 5 d 低于未接菌组,而在胁迫 15 和 35 d 却高于未接菌组;在中度干旱胁迫条件下,接菌组的 qN 值在胁迫 1、5、15 和 35 d 分别较未接菌组降低了 1.32%、3.45%、32.14% 和 5.36%;在重度干旱胁迫条件下,接菌组的 qN 值在胁迫 1 d 较未接菌组升高了 15.49%,而在胁迫 5、15 和 35 d 却分别较未接菌组降低了 7.27%、22.95% 和 47.50%。

由表 3 还可见:在中度干旱胁迫条件下,接菌组的 qN 值在胁迫 1 d 较对照升高了 4.17%,而在胁迫 5、15 和 35 d 却分别较对照降低了 13.85%、43.28% 和 23.19%;未接菌组的 qN 值在胁迫 1 d 与对照持

平,在胁迫 5 和 15 d 分别较对照降低了 19.44% 和 11.11%,而在胁迫 35 d 却较对照升高了 5.66%。在重度干旱胁迫条件下,接菌组的 qN 值在胁迫 1 d 较对照升高了 13.89%,而在胁迫 5、15 和 35 d 却分别较对照降低了 21.54%、29.85% 和 39.13%;未接菌的 qN 值在胁迫 1、5 和 15 d 分别较对照降低了 6.58%、23.61% 和 3.17%,而在胁迫 35 d 却较对照升高了 50.94%。差异显著性分析结果表明:中度和重度干旱胁迫 15 和 35 d 接菌组的 qN 值显著低于对照,重度干旱胁迫 35 d 未接菌组的 qN 值显著高于对照。

2.3.3 ETR 值的比较 由表 3 可见:在对照条件下,接菌组木棉的 ETR 值随时间延长呈“降低—升高—降低”的变化趋势,并在胁迫 1 d 高于未接菌组,而在胁迫 5、15 和 35 d 低于未接菌组;在中度干旱胁迫条件下,接菌组的 ETR 值在胁迫 1、5 和 15 d 分别较未接菌组升高了 12.32%、32.97% 和 88.32%,而在胁迫 35 d 却较未接菌组降低了 9.05%;在重度干旱胁迫条件下,接菌组的 ETR 值在胁迫 1、5、15 和 35 d 分别较未接菌组升高了 116.21%、128.02%、407.67% 和 92.08%。

表 3 不同干旱胁迫条件下接种和未接种丛枝菌根真菌(AMF)的木棉叶片光化学淬灭系数(qP)、非光化学淬灭系数(qN)和光合电子传递速率(ETR)的比较($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 3 Comparison on photochemical quenching coefficient (qP), non-photochemical quenching coefficient (qN), and photosynthetic electron transport rate (ETR) in leaves of *Bombax ceiba* Linn. inoculated and not inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) under different drought stress conditions ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

处理组 ²⁾ Treatment group ²⁾	不同时间接菌组的 qP 值 qP value of inoculation group at different times				不同时间未接菌组的 qP 值 qP value of non-inoculation group at different times			
	1 d	5 d	15 d	35 d	1 d	5 d	15 d	35 d
CK	0.57±0.09ab	0.32±0.03ab	0.67±0.01b	0.56±0.13b	0.57±0.09a	0.41±0.08a	0.76±0.05a	0.73±0.09ab
S1	0.57±0.13ab	0.34±0.08ab	0.78±0.04a	0.66±0.07b	0.52±0.11ab	0.30±0.09ab	0.46±0.12b	0.82±0.06a
S2	0.76±0.09a	0.44±0.09a	0.76±0.01a	0.86±0.06a	0.33±0.12b	0.20±0.05b	0.19±0.06c	0.84±0.09a
处理组 ²⁾ Treatment group ²⁾	不同时间接菌组的 qN 值 qN value of inoculation group at different times				不同时间未接菌组的 qN 值 qN value of non-inoculation group at different times			
	1 d	5 d	15 d	35 d	1 d	5 d	15 d	35 d
CK	0.72±0.04ab	0.65±0.08a	0.67±0.03a	0.69±0.07a	0.76±0.05a	0.72±0.06a	0.63±0.03a	0.53±0.08b
S1	0.75±0.09ab	0.56±0.07a	0.38±0.07b	0.53±0.11b	0.76±0.06a	0.58±0.14ab	0.56±0.08a	0.56±0.08b
S2	0.82±0.04a	0.51±0.10ab	0.47±0.10b	0.42±0.02b	0.71±0.03a	0.55±0.09ab	0.61±0.17a	0.80±0.08a
处理组 ²⁾ Treatment group ²⁾	不同时间接菌组的 ETR 值 ETR value of inoculation group at different times				不同时间未接菌组的 ETR 值 ETR value of non-inoculation group at different times			
	1 d	5 d	15 d	35 d	1 d	5 d	15 d	35 d
CK	19.03±2.06a	11.87±1.54ab	13.07±0.61b	9.70±2.63b	17.70±4.03a	13.87±3.35a	15.53±1.33a	15.50±3.03a
S1	16.77±4.58a	13.47±3.68ab	18.70±2.10a	14.37±1.33a	14.93±3.73a	10.13±4.56ab	9.93±2.68b	15.80±1.33a
S2	22.27±7.21a	16.03±5.17a	15.23±1.32b	13.83±0.21a	10.30±3.55ab	7.03±2.61b	3.00±0.56c	7.20±0.70b

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant difference ($P<0.05$).

²⁾ CK: 对照(土壤相对含水量 65%~70%) The control (soil relative water content of 65%~70%); S1: 中度干旱胁迫(土壤相对含水量 45%~50%) Moderate drought stress (soil relative water content of 45%~50%); S2: 重度干旱胁迫(土壤相对含水量 30%~35%) Severe drought stress (soil relative water content of 30%~35%).

由表3还可见:在中度干旱胁迫条件下,接菌组的 ETR 值在胁迫1 d 较对照降低了11.88%,而在胁迫5、15和35 d 却分别较对照升高了13.48%、43.08%和48.14%;未接菌组的 ETR 值在胁迫1、5和15 d 分别较对照降低了15.65%、26.96%和36.06%,而在胁迫35 d 却较对照升高了1.94%。在重度干旱胁迫条件下,接菌组的 ETR 值在胁迫1、5、15和35 d 分别较对照升高了17.03%、35.05%、16.53%和42.58%,未接菌组的 ETR 值在胁迫1、5、15和35 d 分别较对照降低了41.81%、49.32%、80.68%和53.55%。差异显著性分析结果表明:中度干旱胁迫15和35 d 以及重度干旱胁迫35 d 接菌组的 ETR 值显著高于对照,中度干旱胁迫15 d 以及重度干旱胁迫5、15和35 d 未接菌组的 ETR 值显著低于对照。

3 讨论和结论

由于干热河谷气候炎热、干燥^[20],因此,生长在干热河谷中的植物经常面临干旱缺水的问题。在干旱胁迫条件下,植物体内会发生一系列生理生化反应,光合作用是植物对逆境较为敏感的反应过程之一。叶绿素荧光参数与植物光合作用密切相关,是检验植物受伤害程度的重要指标^[19,21-23]。在胁迫环境中,植物叶片初始荧光(F_0)升高,表明植物叶片PS II 反应中心遭到破坏,部分失活^[20-25]。在中度干旱胁迫(土壤相对含水量45%~50%)和重度干旱胁迫(土壤相对含水量30%~35%)下,接菌组木棉的 F_0 值均低于未接菌组,说明接种丛枝菌根真菌(AMF)对木棉叶片PS II 反应中心具有一定的保护作用。中度干旱胁迫35 d 接菌组木棉的 F_0 值低于对照(土壤相对含水量65%~70%),这可能是AMF和干旱胁迫共同作用的结果,具体原因有待进一步研究。最大荧光(F_m)、PS II 最大光化学效率(F_v/F_m)和PS II 潜在活性(F_v/F_0)也与植物叶片PS II 反应中心的活性密切相关^[16]。通常情况下,植物的 F_v/F_m 值为0.8左右,但在高温或干旱等胁迫环境中降低^[15,17]。本研究中,重度干旱胁迫5、15和35 d 接菌组木棉的 F_v/F_m 和 F_v/F_0 值均高于未接菌组,并且显著低于对照,说明在重度干旱胁迫条件下,接种AMF能够减轻木棉叶片受伤害和光抑制的程度,提高叶片PS II 反应中心的活性,从而增强其抗旱能力,这可能是木棉能够在干热河谷中生长为高大乔木的原因之一。

植物叶片PS II 反应中心通过PS II 实际光量子产量[$Y(II)$]、PS II 调节性能量耗散的量子产量[$Y(NPQ)$]和PS II 非调节性能量耗散的量子产量[$Y(NO)$]3个途径进行光能的转化和耗散,且三者总和为1或接近1^[19]。本研究中,接菌组和未接菌组木棉叶片PS II 反应中心对光能的转化和耗散途径并不一致。与对照相比,接菌组木棉的 $Y(II)$ 值在中度干旱胁迫5、15和35 d 以及重度干旱胁迫1、5、15和35 d 升高,其 $Y(NO)$ 值在中度和重度干旱胁迫5、15和35 d 升高,而其 $Y(NPQ)$ 值却在中度和重度干旱胁迫1、5、15和35 d 降低;未接菌组木棉的 $Y(II)$ 值在中度干旱胁迫1、5和15 d 以及重度干旱胁迫1、5、15和35 d 降低,而其 $Y(NO)$ 值在中度干旱胁迫1、5和15 d 以及重度干旱胁迫1、5、15和35 d 升高,其 $Y(NPQ)$ 值在中度干旱胁迫1和15 d 以及重度干旱胁迫1、15和35 d 升高。

光化学淬灭系数(qP)能够反映植物叶片PS II 反应中心的电子传递活性,而非光化学淬灭系数(qN)则能够反映植物叶片PS II 反应中心以热耗散形式损失的光能。本研究中,与对照相比,接菌组木棉的 qP 值在中度干旱胁迫5、15和35 d 以及重度干旱胁迫期间升高,而未接菌组木棉的 qP 值则在中度和重度干旱胁迫1、5和15 d 降低,说明接种AMF能够提高木棉叶片PS II 反应中心的电子传递活性。与对照相比,接菌组木棉的 qN 值在中度和重度干旱胁迫1 d 升高,而在胁迫5、15和35 d 降低;未接菌组木棉的 qN 值在中度和重度干旱胁迫5和15 d 降低,而在胁迫35 d 升高。造成上述结果的原因可能是接种AMF后木棉植株的抗旱性明显提高,另外,也可能是未接种AMF的木棉根系在后期培养过程中生长出少量的AMF,具体原因有待进一步的深入研究。

综上所述,在干旱胁迫条件下,接种AMF能够在一定程度上减轻木棉叶片受伤害和光抑制的程度,并且对其叶片PS II 反应中心具有一定的保护作用,从而提高木棉的抗旱能力。

参考文献:

- [1] 金振洲. 云南元江干热河谷半萨王纳植被的植物群落学研究[J]. 广西植物, 1999, 19(4): 289-302.
- [2] 赵高卷, 徐兴良, 马焕成, 等. 红河干热河谷木棉种群的天然更新[J]. 生态学报, 2016, 36(5): 1342-1350.
- [3] RUTTEN G, PRATI D, HEMP A, et al. Plant-soil feedback in East-African savanna trees[J]. Ecology, 2016, 97(2): 294-301.

- [4] 郑艳玲, 马焕成, ROBERT S, 等. 环境因子对木棉种子萌发的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(2): 382-388.
- [5] BRUNDRETT M C. Mycorrhizal associations and other means of nutrition of vascular plants; understanding the global diversity of host plants by resolving conflicting information and developing reliable means of diagnosis[J]. Plant and Soil, 2009, 320(1): 37-77.
- [6] 王宇涛, 辛国荣, 李韶山. 丛枝菌根真菌最新分类系统与物种多样性研究概况[J]. 生态学报, 2013, 33(3): 834-843.
- [7] HARTNETT D C, WILSON G W T. Mycorrhizae influence plant community structure and diversity in tallgrass prairie[J]. Ecology, 1999, 80(4): 1187-1195.
- [8] KLIRONOMOS J N, MCCUNE J, HART M, et al. The influence of arbuscular mycorrhizae on the relationship between plant diversity and productivity[J]. Ecology Letters, 2000, 3(2): 137-141.
- [9] YANG Y R, SONG Y Y, SCHELLER H V, et al. Community structure of arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Robinia pseudoacacia* in uncontaminated and heavy metal contaminated soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 86: 146-158.
- [10] GONG M G, TANG M, CHEN H, et al. Effects of two *Glomus* species on the growth and physiological performance of *Sophora davidii* seedlings under water stress[J]. New Forests, 2013, 44(3): 399-408.
- [11] LI Z, WU N, LIU T, et al. Effect of arbuscular mycorrhizal inoculation on water status and photosynthesis of *Populus cathayana* males and females under water stress[J]. Physiologia Plantarum, 2015, 155(2): 192-204.
- [12] 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.
- [13] ZUCCARINI P, OKUROWSKA P. Effects of mycorrhizal colonization and fertilization on growth and photosynthesis of sweet basil under salt stress[J]. Journal of Plant Nutrition, 2008, 31(3): 497-513.
- [14] DE ANDRADE S A L, DOMINGUES A P, Jr, MAZZAFERA P. Photosynthesis is induced in rice plants that associate with arbuscular mycorrhizal fungi and are grown under arsenate and arsenite stress[J]. Chemosphere, 2015, 134: 141-149.
- [15] 王春萍, 雷开荣, 李正国, 等. 低温胁迫对水稻幼苗不同叶龄叶片叶绿素荧光特性的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2012, 21(3): 38-43.
- [16] 陈 梅, 唐运来. 高温胁迫下莴菜的叶绿素荧光特性[J]. 生态学杂志, 2013, 32(7): 1813-1818.
- [17] 叶 波, 吴永波, 邵 维, 等. 高温干旱复合胁迫及复水对构树(*Broussonetia papyrifera*)幼苗光合特性和叶绿素荧光参数的影响[J]. 生态学杂志, 2014, 33(9): 2343-2349.
- [18] 伍建榕, 汪 洋, 赵春燕, 等. 云南干热河谷地区木棉科植物丛枝菌根真菌的调查研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(1): 205-210.
- [19] 钱永强, 周晓星, 韩 蕾, 等. Cd^{2+} 胁迫对银芽柳PS II叶绿素荧光响应曲线的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(20): 6134-6142.
- [20] 刘方炎, 李 昆, 孙永玉, 等. 横断山区干热河谷气候及其对植被恢复的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(12): 1386-1391.
- [21] 李 强, 罗延宏, 余东海, 等. 低氮胁迫对耐低氮玉米品种苗期光合及叶绿素荧光特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5): 1132-1141.
- [22] 杨志晓, 丁燕芳, 张小全, 等. 赤星病胁迫对不同抗性烟草品种光合作用和叶绿素荧光特性的影响[J]. 中国烟草学报, 2015, 35(12): 4146-4154.
- [23] 李旭新, 刘炳响, 郭智涛, 等. NaCl 胁迫下黄连木叶片光合特性及快速叶绿素荧光诱导动力学曲线的变化[J]. 应用生态学报, 2013, 24(9): 2479-2484.
- [24] GUO D P, GUO Y P, ZHAO J P, et al. Photosynthesis rate and chlorophyll fluorescence in leaves of stem mustard (*Brassica juncea* var. *tsatsai*) after turnip mosaic virus infection[J]. Plant Science, 2005, 168(1): 57-63.
- [25] 曹岩坡, 戴 鹏, 戴素英. 丛枝菌根真菌(AMF)对低温胁迫下黄瓜幼苗生长及叶绿素荧光参数的影响[J]. 河北农业科学, 2016, 20(1): 34-37.

(责任编辑: 佟金凤)