

土壤干旱及复水对侧柏叶绿素荧光参数的影响

张玉玉¹, 王进鑫^{2,3}, 马 戎¹, 吕国利¹, 冯树林¹

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学

资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 3.农业部 西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为了研究不同程度土壤干旱及旱后复水对侧柏幼苗叶绿素荧光参数的影响,以盆栽 1 年生侧柏幼苗为试验材料,设置 4 个水分梯度[土壤相对含水量(RSWC)为:40%,52.16%,70%,87.84%],以充分供水(RSWC 为 100%)为对照,经干旱胁迫 60 d 后复水,测定了复水前及复水后 2,24,48,72 h 叶绿素荧光参数。结果显示:随着土壤干旱胁迫程度的加剧,侧柏幼苗 PSII 的最大光化学量子产量 Fv/Fm、相对光合电子传递速率 ETR 和实际光化学量子产量 Yield 总体上呈现下降的趋势,而非光化学淬灭系数 NPQ 则呈现上升的趋势,其中土壤相对含水量为 40% 的重度胁迫 Fv/Fm、ETR 和 Yield 分别比对照下降 1.1%,4.5%,4.9%,而 NPQ 比对照增加 22.6%。复水后叶绿素荧光都得到了恢复,在复水 24 h 除 70% 的处理其他处理 Fv/Fm 达到最大,其中重度胁迫 40% 的处理比对照上升 3.1%。在复水 48 h 各胁迫处理 Yield、ETR 达到了最大值,40% 的重度胁迫分别比对照上升 1.0%,1.2%。由此可知,干旱胁迫尤其是重度胁迫,虽然对侧柏幼苗 PSII 有一定的破坏,对光合作用有一定程度的影响,但复水后各指标都得到了相应的恢复。

关键词:侧柏; 叶绿素荧光参数; 干旱胁迫; 旱后复水

中图分类号:Q945.78

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)02-0242-06

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2021.02.034

Effects of Drought and Rewatering on Chlorophyll Fluorescence Parameters of *Platycladus orientalis*

ZHANG Yuyi¹, WANG Jinxin^{2,3}, MA Xu¹, LÜ Guoli¹, FENG Shulin¹

(1.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.College of Natural Resources and Environment, Northwest

A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.Key Laboratory of Plant Nutrition

and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To study the effects of different degrees of soil drought stress and rehydration on chlorophyll fluorescence parameters of *Platycladus orientalis* seedlings, one-year-old *Platycladus orientalis* seedlings were used as experimental materials, and four water gradients [relative soil water content (RSWC): 40%, 52.16%, 70%, 87.84%] were set, 100% RSWC (with adequate water supply) was kept as control. Drought stress was imposed for 60 days and then the plants were rewatered up to 100% RSWC. The chlorophyll fluorescence parameters were measured before rewatering and after 2, 24, 48 and 72 hours of rewatering. The maximum photochemical quantum yield (Fv/Fm), relative photosynthetic electron transfer rate (ETR) and actual photochemical quantum yield (Yield) of *Platycladus orientalis* PSII showed the downward trend with the increasing water stress, while the non-photochemical quenching coefficient (NPQ) showed an upward trend. In case of 40% RSWC, Fv/Fm, ETR and Yield decreased by 1.1%, 4.5% and 4.9%, respectively, whereas NPQ increased by 22.6% compared with the control. After rewatering, chlorophyll fluorescence parameters of *Platycladus orientalis* were restored in all the treatments to varying extent, Fv/Fm reached the maximum in the treatments (except 70% RSWC) after 24 hours of rewatering, and in 40% RSWC, Fv/Fm increased 3.1% compared with that of the control. In contrast, Yield and ETR reached the

收稿日期:2020-05-09

修回日期:2020-05-25

资助项目:国家自然科学基金(31670713);国家重点研发计划项目课题(2017YFC0504402);榆林市林业科技计划项目(K403021528)

第一作者:张玉玉(1992—),女,甘肃镇原人,硕士研究生,研究方向为林草生态工程。E-mail:2659047523@qq.com

通信作者:王进鑫(1962—),男,甘肃镇原人,教授,博士生导师,主要从事旱区人工林生态系统水分运移调控与生态恢复理论研究。E-mail:jwang118@126.com

maximum in all the treatments after 48 hours of rewatering, and in 40% RSWC, Yield and ETR increased by 1.0% and 1.2%, respectively, compared to the control. Drought stress, especially severe stress (40% RSWC) had a certain damaging effect to PS II of *Platycladus orientalis* and a certain degree of influence on photosynthesis, but after rewatering, the indicators could be restored correspondingly.

Keywords: *Platycladus orientalis*; chlorophyll fluorescence parameters; drought stress; rewatering

由于自然界的降雨脉冲及人为灌溉等原因,不仅在干旱半干旱地区经常会出现土壤缺水和干湿交替的现象,而且在南方等非干旱地区也经常会出现季节性干旱。干旱胁迫是影响植物生长、生理生化的主要限制因子。当植物处于干旱环境时,会通过调动自身的生理生化过程或启动自我的保护机制来避免自身受到伤害^[1-2]。植物当前的生长状态不仅与过去的水分历时有关,而且与当前所处的水分环境有关。Acevedo 等^[3]研究发现,植物经受一定强度的干旱胁迫后复水,因干旱造成的生长抑制及生物量的损失等可以弥补,复水后植物会出现短暂的加速生长。侧柏 [*Platycladus orientalis* (L.) Franco] 属常绿乔木,常为阳坡造林树种,也是常用的园林绿化及困难立地植被恢复树种。适应性强,对土壤要求不严,在酸性、中性、石灰性和轻盐碱土壤中均可生长。既耐干旱瘠薄,又喜生于湿润肥沃排水良好的钙质土壤,除青海、新疆外全国均有分布。因此,本文研究耐旱喜湿的典型造林树种侧柏经干旱胁迫后复水对其叶绿素荧光参数影响。

在正常的环境条件下,植物叶片叶绿素所吸收的太阳光能通过 3 个途径来消耗,分别是光合电子传递、叶绿素荧光发射和热耗散,而这 3 个途径之间存在着一定的彼此消长的相互关系,光合作用和热耗散的变化都会引起叶绿素荧光参数相应的变化^[4]。作为联系环境和植物光合作用的内在指标叶绿素荧光参数,近些年来,广泛作为研究植物在干旱、高温、低温、强光等逆境胁迫条件下抗逆性指标的有效探针^[5-10]。在干旱胁迫的条件下,叶绿素荧光参数会发生一定的变化,Guo 等^[11]对黑枸杞 (*Lycium ruthenicum* Murr) 经干旱胁迫后的研究发现 NPQ 增加,最大荧光、最大量子产量等降低,说明干旱胁迫影响了 PS II 反应中心的开放性。Lang 等^[12]研究连翘 (*Forsythia suspensa*) 幼苗经土壤干旱胁迫后,RSWC 从 51.84% 下降到 37.52% 时, NPQ 有增加的趋势,当 RSWC 低于 37.52% 时, Fv/Fm, Yield, NPQ 和 qP 显著降低。刘筱等^[13]研究干旱胁迫对何首乌 (*Polygonum multiflora* Thunb.) 叶绿素荧光参数的影响表明,随着干旱胁迫的加剧, Fv/Fm 和 ETR 值呈现出先升后降的趋势,而 NPQ 则呈现降低趋势。杨文权等^[14]研究干旱及复水对小冠花 (*Coronilla varia* L.)

叶绿素荧光参数的影响显示,干旱胁迫天数过长及胁迫程度过大不仅会影响小冠花的光合作用,还会使小冠花的光反应中心受损;但由于小冠花有一定的抗旱性,胁迫解除后,光合作用能很快恢复至正常水平,叶绿素荧光参数 (Fv/Fm, Yield, ETR, NPQ 等) 也能快速恢复到原始的水平。

植物在生长发育过程中,均呈现出一定的阶段性变化规律,且在不同生长阶段对环境的要求也存在着明显的异质性^[15-16]。王进鑫等^[17]研究发现,对侧柏幼树蒸腾耗水影响较大的是生长盛期的土壤供水状况。因此,侧柏幼苗在生长盛期对土壤水分的响应更加明显。张慕黎^[18]研究侧柏经干旱胁迫后光合速率随着胁迫程度的加剧逐渐降低,复水后胁迫程度越小其恢复能力越强。庞云龙^[19]研究侧柏幼树光合速率、蒸腾速率在复水 24 h 后均有不同程度的恢复。目前有关侧柏生长与土壤水分之间关系的研究,多以光合作用的研究为主,而对光合作用内在探针即叶绿素荧光参数的研究较少。因此,本文研究生长盛期侧柏幼苗经过不同程度土壤干旱胁迫及早后复水对叶绿素荧光参数的影响,分析叶绿素荧光参数与土壤干旱及早后复水之间的关系,掌握侧柏幼苗对干旱胁迫的响应机制,进一步反映土壤干旱及早后复水对侧柏光合作用的影响,从而为侧柏在逆境条件下更好的生长提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地点和材料

试验在陕西杨凌西北农林科技大学南校区防雨旱棚 (108°07'E, 34°16'N) 内进行,采用旱棚人工控水的方法进行布设。该地区属于暖温带半湿润大陆性季风气候,降水季节分配不均匀,有 78% 的雨量集中在 5—9 月,且时有暴雨出现。年平均相对湿度 70% 左右,年平均气温 12.9℃, 1 月平均气温 -1.2℃, 7 月平均气温 26.0℃, ≥10℃ 年有效积温 4 169.2℃, 年干燥度 1.1。

试验选取地径、株高和根系基本一致的 1 a 生侧柏幼苗,冲洗根系后用吸水纸吸干苗木表面水分,记录地径、株高和鲜重,于 2018 年 3 月 15 栽植在口径 29 cm、深 27 cm 统一规格的塑料桶中,每桶栽植 2 株,并对其进行编号。栽培基质为瘠土,通透性良好,田间持水量为

22.3%，充分风干后，进行过筛，除去石砾、结核及林草根系，充分混匀后每盆装 10 kg。采用边埋边压边提苗的方式栽植，并在土层表面铺盖 2 kg 石砾以减少土体表面蒸发。浇灌一定体积的水，以保证苗木成活。然后放置室外自然透风塑料旱棚内，使侧柏幼苗盆栽土壤水分维持在田间持水量的 80%~90%。

1.2 试验设计

本试验土壤干旱胁迫程度参照王进鑫^[17]，吉增宝^[20]等的研究，设置 4 个土壤水分梯度[土壤相对含水量(RSWC)为 40%，52.16%，70%，87.84%]，每个处理 4 个重复，另设一个对照(RSWC 为 100%，充分供水)。干旱胁迫外的所有时间内按照 100% 相对含水量对各处理供水，试验期间栽培基质保持自然肥力，不施肥。整个试验过程中，以大棚内自然温度和光照为主，采用人为适时控制补水的办法，使土壤水分达到试验要求。

2018 年 6 月 15 日开始对侧柏幼苗盆栽进行水分控制，将表面的石砾去掉，增大土壤蒸发或适当补水，使其在 6 月 20 日的土壤相对含水量达到 40%，52.16%，70%，87.84%，对照组幼苗盆栽土壤相对含水量保持 100%。采用称重法对侧柏盆栽进行控水处理，历时 60 d。于 8 月 21 日上午 8:30—11:30 对其叶绿素荧光相关指标进行复水前测定，8 月 22 日早晨 6:30 对各处理进行复水(按土壤相对含水量 100% 复水)，分别于复水后 2, 24, 48, 72 h 对其指标进行测定。

1.3 叶绿素荧光参数测定

使用德国 WALZ 公司生产的便携式调制叶绿素荧光仪 mini-PAM2500 对侧柏叶片进行活体测定。试验于 8 月 21 日上午 8:30 开始，测定前先对各处理进行暗适应 30 min，然后分别测定其相应指标。用弱测量光测定初始荧光 F_0 [强度低于 $1 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]，接着照射饱和脉冲光[强度大于 $7000 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 0.8 s]测得最大荧光 F_m ，根据 F_0 和 F_m 计算 PSII 的最大光化学量子产量 $F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m$ 。等荧光恢复到 F_0 附近打开光化光[$606 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]进行荧光诱导，约 4~5 min 荧光达到稳态测量，再次打开饱和脉冲测量即时荧光(F)、即时最大荧光(F_m')，根据 F 和 F_m' 计算 PSII 实际光化学量子产量 $\text{Yield} = (F_m' - F)/F_m'$ 。相对光合电子传递速率(ETR)和非光化学淬灭系数(NPQ)可直接读取。

1.4 数据处理

数据统计分析采用 Microsoft Excel 和 SPSS 软件结合进行，使用单因素方差分析(one-way ANOVA)，并运用 Duncan 检验方法来确定每个指标在各处理间差异的显著性。

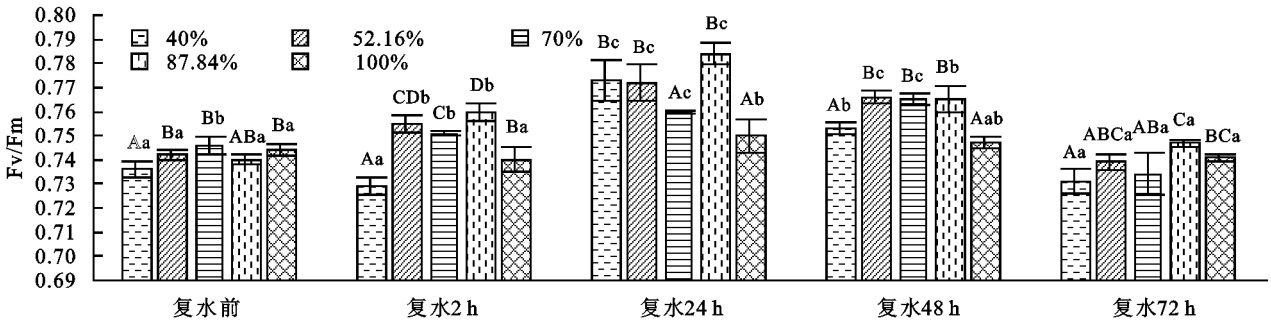
2 结果与分析

2.1 侧柏幼苗最大光化学量子产量 F_v/F_m 对土壤干旱及旱后复水的响应

叶绿素荧光参数 F_v 与 F_m 的比值(F_v/F_m)是 PSII 最大光化学量子产量，能反映 PSII 反应中心最大原初光化学量子效率，在正常的环境条件下生长的植物， F_v/F_m 值的变化范围极小， F_v/F_m 是反应光抑制程度的可靠指标和良好的探针^[21]。由图 1 可以看出，侧柏幼苗 F_v/F_m 随着土壤干旱胁迫程度的加剧呈现先降后升再降的趋势，各处理差异显著($p < 0.05$)。复水后，不同干旱胁迫条件下侧柏幼苗 F_v/F_m 随着复水时间的延长呈现先增大后减小的趋势，在复水 24 h 除 70% 的处理其他处理都达到最大值，之后缓慢降低。70% 的处理在复水 48 h 达到最大值，与对照差异显著，比对照增加了 2.4%。而复水 72 h 重度胁迫(40%)比对照下降了 1.3%，与对照差异显著，这说明侧柏幼苗 F_v/F_m 对复水做出了短暂的恢复，而轻度胁迫 87.84% 的处理仍比对照高了 0.8%，与对照差异不显著。复水 2~48 h 各处理与对照相比差异极显著($p < 0.01$)，复水 72 h 各处理与对照差异显著($p < 0.05$)，同一胁迫处理在不同的复水时段差异极显著($p < 0.01$)。说明侧柏幼苗对复水能做出及时的响应，随着复水的进行各处理及时恢复并超过对照，出现补偿效应。

2.2 侧柏幼苗实际光化学量子产量 Yield 对土壤干旱及旱后复水的响应

实际光化学量子产量 Yield 是 PSII 实际光化学量子效率，反映了 PSII 反应中心有部分关闭的情况下实际原初光能捕获效率，即用于光化学反应所占 PSII 吸收光能的比例。复水前侧柏幼苗 Yield 随着土壤干旱胁迫程度的加剧逐渐降低，其中重度胁迫 40% 的处理比对照降低了 4.9%，各处理与对照差异极显著($p < 0.01$)。随着复水时间的延长，各胁迫处理 Yield 先增大后减小，其中土壤相对含水量为 87.84% 的处理在复水 24 h 达最大值比对照上升了 2.3%，与对照差异显著，在复水 48 h 其他胁迫处理下 Yield 达到最大值，其中 70% 的处理比对照升高了 1.4%，与对照差异显著(图 2)。Yield 值越大，说明光能转化效率越高，形成的光合产物就越多。对侧柏幼苗 Yield 进行方差分析发现，不同复水时段各处理与对照差异极显著($p < 0.01$)，同一胁迫处理在不同的复水时段差异显著($p < 0.05$)。说明土壤干旱胁迫在侧柏幼苗的耐旱阈值内，幼苗 Yield 经土壤干旱胁迫后复水都得到了相应的恢复并在复水 48 h 各处理出现了补偿效应，之后出现降低的趋势。



注:图中大写字母表示同一时间各处理差异的显著性 ($p < 0.05$),小写字母表示同一处理不同恢复时间差异的显著性 ($p < 0.05$)。

图 1 不同程度土壤干旱及旱后复水对侧柏幼苗 Fv/Fm 的影响

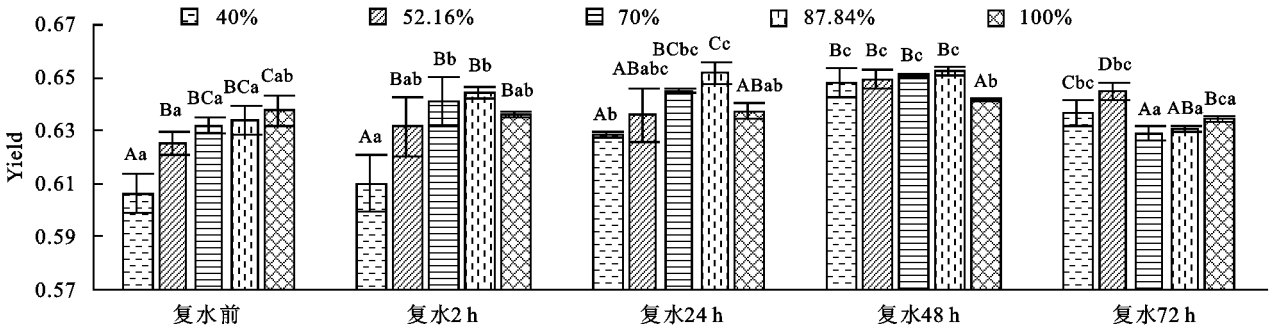


图 2 不同程度土壤干旱及旱后复水对侧柏幼苗 Yield 的影响

2.3 侧柏幼苗相对光合电子传递速率 ETR 对土壤干旱及旱后复水的响应

相对光合电子传递速率 ETR 是光合机构吸收光能之后发生电荷分离,产生的电子,沿着电子传递链向下传递的速率。由图 3 可以看出,侧柏幼苗 ETR 值随着土壤干旱胁迫程度的增加呈现出先降后升再降的趋势,各处理与对照差异极显著 ($p < 0.01$),其重度胁迫 40% 的处理比对照下降了 4.5%。复水后 ETR 值呈现先增大后减小的趋势,在复水 48 h 各处理 ETR 达最大值,其中重度胁迫 40% 的处理比对

照增加了 1.2%,与对照差异显著,在复水 72 h 后又呈现下降的趋势。在复水 2 h 和 24 h 随着复水的进行各处理与对照差异极显著 ($p < 0.01$),复水 48 h 和 72 h 各处理与对照差异显著 ($p < 0.05$),同一胁迫处理在不同的复水时段差异极显著 ($p < 0.01$)。说明侧柏幼苗随着土壤干旱胁迫程度的加剧,光合作用逐渐下降,而这种胁迫对侧柏幼苗没有造成不可逆的损伤,随着复水的进行,幼苗能及时调节自身的生理机制,使其快速恢复并在复水 48 h 各处理超过对照出现补偿效应。

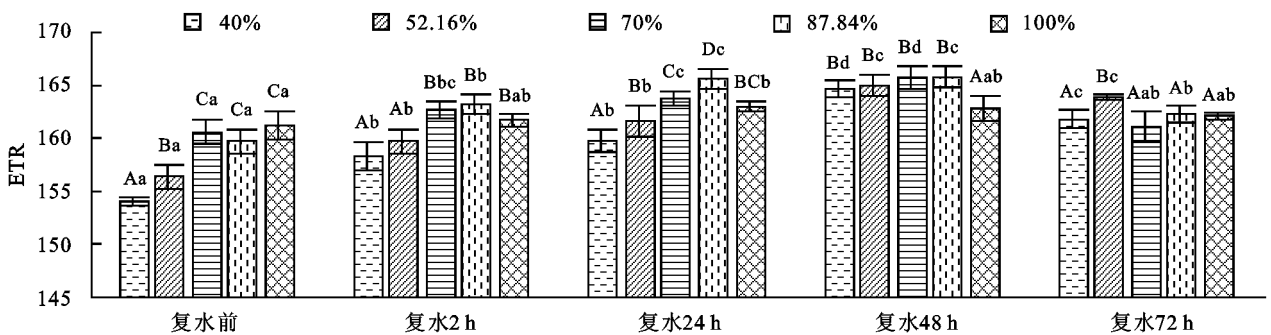


图 3 不同程度土壤干旱及旱后复水对侧柏幼苗 ETR 的影响

2.4 侧柏幼苗非光化学淬灭系数 NPQ 对土壤干旱及旱后复水的响应

非光化学淬灭系数 NPQ 是 PS II 反应中心天线色素吸收的光能不能用于光合电子传递,而以热的形式耗散掉多余的那部分光能的比例,热耗散对植物光合机构免受破坏起到积极的作用。由图 4 可以看出,复水前随着土壤干旱胁迫程度的加剧,侧柏幼苗

NPQ 值逐渐升高,其中重度胁迫 40% 的处理比对照增加了 22.6%,与对照差异极显著 ($p < 0.01$)。NPQ 增大说明侧柏以增加热耗散的方式来降低光抑制对其产生的伤害,NPQ 的基础是天线复合体的结构重组,作为一个重要的光保护机制,广泛的存在于植物体和各种藻类中^[22]。随着复水时间的推移,NPQ 值整体上呈现降低的趋势,其中 40% 的处理在复水 2 h 和 24 h 这两个时

间段呈现上升的趋势,这可能是由于重度胁迫使侧柏幼苗光保护机制破坏严重,复水后幼苗没有及时恢复或 NPQ 对复水响应比较缓慢的原因,在复水 48 h 后开始降低,72 h 低于对照。随着复水的进行,各处理与对

照差异极显著($p < 0.01$),同一胁迫处理在不同的复水时段差异极显著($p < 0.01$)。说明侧柏幼苗经过不同程度的土壤干旱胁迫后 NPQ 受到影响,但是随着复水的进行,这种影响都是可以消除的。

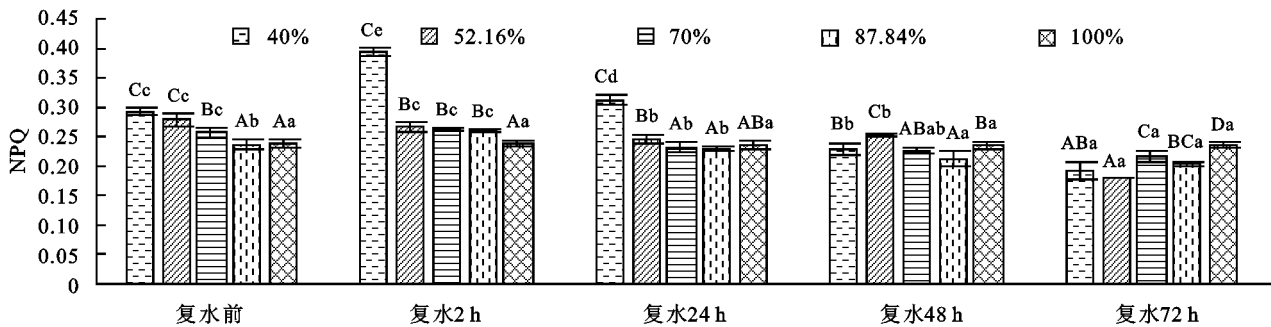


图 4 不同程度土壤干旱及旱后复水对侧柏幼苗 NPQ 的影响

3 讨论与结论

3.1 讨论

植物叶绿素荧光参数作为光合作用内在的有效探针,是研究植物抗旱性的良好指标。叶绿素荧光技术检测到的植物发出的叶绿素荧光信号包含了大量的光合作用信息,而这些信息与植物本身受胁迫程度和自身的营养关系密切^[23]。叶绿素荧光技术所检测到的叶绿素荧光信息主要是来自于植物叶绿体 PSII 反应中心天线色素蛋白复合体中的叶绿素 a 分子^[24]。

Fv/Fm 是 PS II 反应中内禀光能的转换效率,能反映 PS II 利用光能的能力。结果表明,随着土壤干旱胁迫程度的增大,侧柏幼苗 Fv/Fm 值呈现先降后升再降的趋势,不同土壤干旱胁迫对侧柏幼苗 Fv/Fm 都有影响,重度胁迫 40% 的处理与对照差异显著,其他处理差异不显著,这可能是由于侧柏耐旱性较强,不同程度土壤干旱胁迫 60 d 对侧柏幼苗 Fv/Fm 的影响也不是很明显,只有重度胁迫对幼苗 Fv/Fm 影响显著。这一结果与董果等^[25]对侧柏叶绿素荧光特性的研究结果一致。卢福顺等^[26]研究表明只有在重度干旱胁迫的条件下,Fv/Fm 才会出现显著的变化。复水后,侧柏幼苗 Fv/Fm 呈现先增加后减小的趋势,在复水 24 h 各处理出现补偿效应,说明即使重度胁迫对侧柏幼苗 Fv/Fm 有显著的影响,但这种影响是可以通过复水来消除的,所以土壤干旱胁迫对侧柏幼苗 Fv/Fm 的影响是可逆的,这与李晓梅等^[27]对两种辣椒(*Capsicum annuum* L.)叶绿素荧光参数的研究一致。

Yield 能反映植物对吸收的太阳光能的转换能力。经过不同程度土壤干旱胁迫后,侧柏幼苗 Yield 随着胁迫程度的加剧而下降,由此说明不同程度土壤干旱胁迫使得侧柏幼苗 PS II 反应中心受到一定的损

伤,抑制了光合作用的原初反应,这与孙志勇等^[28]对杂交鹅掌楸(*Liriodendron chinense* × *L. tulipifera*)和张国盛等^[29]对 6 种树叶绿素荧光参数的研究结果一致。复水后侧柏幼苗 Yield 值不断升高,并出现了补偿现象,在复水 72 h 开始缓慢下降,这可能是由于复水后测定时间比较短,侧柏幼苗耐旱性较强,对复水做出了短暂的恢复响应后,随着长时间的复水,幼苗在生理上又做出了不同的响应机制,这一结论还需后期进一步验证。

叶绿素荧光参数 ETR 能反映光合机构运转调节的规律。结果发现在重度胁迫的条件下,侧柏幼苗相对光合电子传递速率 ETR 值急剧下降,这一结果与马仁义等^[30]的研究一致,表明侧柏幼苗的生长对土壤水分有一定的需求。复水后逐渐恢复并超过对照,复水 72 h 出现了下降的趋势,说明侧柏幼苗 PS II 反应中心因土壤干旱胁迫而遭到破坏,光合速率降低,复水后幼苗能及时调整自身光保护机制,使其逐渐恢复。这一结果与蒙祖庆等^[31]对油菜(*Brassica napus* L.)叶绿素荧光参数的响应和王振夏等^[32]对枫杨(*Pterocarya stenoptera* C. DC.)幼苗经土壤湿干交替变化叶绿素荧光的响应结果一致。

植物非光化学淬灭 NPQ 对植物光合机构免受破坏起到了积极的作用。试验结果表明,侧柏幼苗 NPQ 随着土壤干旱胁迫程度的加剧呈现逐渐上升的趋势,其中 87.84% 与对照差异不显著,其他处理与对照差异显著。在复水后有缓慢的下降趋势。而在复水 2 h 和复水 24 h 经过重度胁迫 40% 处理的侧柏幼苗 NPQ 依然在上升,这可能是由于重度胁迫使侧柏幼苗光保护机制破坏严重,复水后没有及时恢复,或者幼苗 NPQ 对复水响应比较缓慢的原因,这一结果还有待验证。复水 48 h 之后幼苗 NPQ 开始逐渐降低,说明不同程度的土壤干旱胁迫对侧柏幼苗 NPQ

有明显的影 响,随着复水的进行,各处理及时恢复。

植物叶片的叶绿素荧光参数是研究植物抗逆性的可靠指标,能快速有效地反映植物对土壤水分变化的响应,本试验侧柏幼苗经 60 d 不同程度土壤干旱胁迫后,通过增加热耗散(NPQ)与降低原初光能转换效率(F_v/F_m)和相对光合电子传递速率(ETR)来实现对 PS II 反应中心的保护。有学者^[18]研究发现生长盛期侧柏光合速率、蒸腾速率随着土壤干旱胁迫程度的加剧逐渐降低,复水 72 h 后光合速率的恢复度呈现出轻度胁迫处理大于重度胁迫,蒸腾速率在土壤相对含水量为 52.16% 的处理恢复度最大为 0.69。而侧柏幼苗叶绿素荧光参数在复水后得到恢复,所有处理在复水 48 h 出现补偿效应,说明侧柏幼苗经过不同程度土壤干旱胁迫后,对光合机构造成了一定的破坏,但由于侧柏耐旱性较强,前期干旱胁迫对其没有造成不可逆的破坏,通过后期复水的进行得到恢复,并出现补偿现象。

3.2 结 论

经过不同程度土壤干旱胁迫 60 d 的侧柏幼苗, F_v/F_m 随着土壤干旱胁迫程度的增大呈现先降后升再降的趋势,但不同程度土壤干旱胁迫对侧柏幼苗 F_v/F_m 影响较小,复水后得到了补偿,在复水 24 h 和 48 h 各胁迫程度出现了补偿现象,其中 87.84% 的处理在复水 24 h 比对照升高了 4.5%,与对照差异显著,出现超补偿现象。Yield 随着胁迫程度的加剧而下降,复水后 Yield 不断升高,在复水 48 h 出现了超补偿现象,复水 72 h 开始缓慢下降。在重度胁迫的条件下,侧柏幼苗 ETR 急剧下降,40% 的处理比对照降低了 4.5%,与对照差异显著。复水后逐渐恢复并超过对照,复水 72 h 出现了下降的趋势。NPQ 随着干旱胁迫程度的增加呈现上升的趋势,复水后有了缓慢的下降,而在复水 2 h 和 24 h 经过重度胁迫(40%)的侧柏幼苗 NPQ 依然在上升,复水 48 h 开始缓慢下降。说明不同程度的土壤干旱胁迫对侧柏幼苗 PS II 反应中心有一定的损伤,降低了 PS II 原初光能转化效率,抑制 PS II 反应中心的光化学活性,进而破坏了侧柏幼苗光合作用的原初反应过程。但这种破坏是可以通过复水来弥补的。因此侧柏幼苗 PS II 能够耐受较长时间的干旱胁迫,从而为侧柏能在逆境条件下更好的生长提供技术支撑。

参考文献:

[1] Balaguer L, Pugnaire F I, Martínez-Ferri E, et al. Ecophysiological significance of chlorophyll loss and reduced photochemical efficiency under extreme aridity in *Stipa tenacissima* L. [J]. *Plant and Soil*, 2002, 240(2): 343-352.

- [2] Georgieva V, Moteva M, Kazandjiev V. Impact of climate change on water supply of winter wheat in Bulgaria [J]. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 2007, 72(1): 39-44.
- [3] Acevedo E, Hsiao T C, Henderson D W. Immediate and subsequent growth responses of maize leaves to changes in water status [J]. *Plant Physiology*, 1971, 48(5): 631-636.
- [4] 郑淑霞,上官周平. 8 种阔叶树种叶片气体交换特征和叶绿素荧光特性比较 [J]. *生态学报*, 2006, 26(4): 1080-1087.
- [5] 崔秋芳,常海荣,陈家林,等. 树冠遮蔽对侧柏生长和叶绿素荧光的影响 [J]. *西北林学院学报*, 2016, 31(2): 28-32.
- [6] 汤飞洋,金荷仙,唐宇力. 不同程度干旱胁迫对 4 个杜鹃品种叶绿素荧光参数的影响 [J]. *西北林学院学报*, 2017, 32(5): 64-68, 108.
- [7] 刘泽彬,程瑞梅,肖文发,等. 遮荫对中华蚊母树苗期生长及光合特性的影响 [J]. *林业科学*, 2015, 51(2): 129-136.
- [8] 孟鹏,安宇宁,白雪峰. 沙地赤松光合及叶绿素 a 快相荧光动力学特性 [J]. *生态学报*, 2016, 36(11): 3469-3478.
- [9] 任子蓓,王俊玲,史宝胜. 热胁迫对连翘离体叶圆片光系统 II 活性的影响 [J]. *林业科学*, 2015, 51(4): 44-51.
- [10] 谭晓红,段爱国,何彩云,等. 干旱胁迫对杨树气体交换与荧光参数的影响 [J]. *林业科学研究*, 2010, 23(2): 202-208.
- [11] Guo Y Y, Yu H Y, Kong D S, et al. Effects of drought stress on growth and chlorophyll fluorescence of *Lycium ruthenicum* Murr. seedlings [J]. *Photosynthetica*, 2016, 54(4): 524-531.
- [12] Lang Y, Wang M, Xia J B, et al. Effects of soil drought stress on photosynthetic gas exchange traits and chlorophyll fluorescence in *Forsythia suspensa* [J]. *Journal of Forestry Research*, 2018, 29(1): 45-53.
- [13] 刘筱,王锐洁,杨淑君,等. 干旱胁迫对何首乌生长和叶绿素荧光参数的影响 [J]. *河南农业科学*, 2019, 48(1): 56-62.
- [14] 杨文权,顾沐宇,寇建村,等. 干旱及复水对小冠花光合及叶绿素荧光参数的影响 [J]. *草地学报*, 2013, 21(6): 1130-1135.
- [15] Dambreville A, Lauri P E, Normand F, et al. Analysing growth and development of plants jointly using developmental growth stages [J]. *Annals of Botany*, 2015, 115(1): 93-105.
- [16] Chen J, Kang S, Du T, et al. Modeling relations of tomato yield and fruit quality with water deficit at different growth stages under greenhouse condition [J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 146: 131-148.
- [17] 王进鑫,黄宝龙,王明春,等. 侧柏幼树不同生长阶段对水分的敏感性与蒸腾效率 [J]. *生态学报*, 2005, 25(4): 711-718.

(下转第 255 页)

- 的动态影响分析[J].气象科学,2014,34(4):443-449.
- [24] 查良松,陈晓红,吉中会,等.1970—2008 年安徽省气温时空格局变化[J].地理研究,2010,29(4):641-654.
- [25] 刘永婷,徐光来,尹周祥,等.全球变化背景下安徽近 55 a 气温时空变化特征[J].自然资源学报,2017,32(4):680-691.
- [26] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].2 版.北京:气象出版社,2007.
- [27] 王怀清,殷剑敏,孔萍,等.鄱阳湖流域千年旱涝变化特点及 R/S 分析[J].长江流域资源与环境,2015,24(7):1214-1220.
- [28] 冯新灵,罗隆诚,邱丽丽,等.成都未来气候变化趋势的 R/S 分析[J].长江流域资源与环境,2008,17(1):83-87.
- [29] Grinsted A, Moore J C, Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series[J]. Nonlinear Processes in Geophysics, 2004,11(5/6):561-566.
- [30] 张克新,潘少明,曹立国,等.横断山区季风期水分盈亏量时空变化特征及其与若干气候指数的相关性分析[J].自然资源学报,2014,29(11):1869-1877.
- [31] 郝振纯,孙乐强.我国 1961—2009 年气温变化规律分析[J].河海大学学报:自然科学版,2011,39(6):595-691.
- [32] 赵军,师银芳,王大伟,等.1961—2008 年中国大陆极端气温时空变化分析[J].干旱区资源与环境,2012,27(3):52-56.
- [33] 牛旭,严俊霞,李红建.1951—2011 年山西省极端气温变化基本特征研究[J].干旱区资源与环境,2014,28(4):73-78.
- [34] Griffiths G M, Chambers L E, Haylock M R et al. Change in mean temperature as a predictor of extreme temperature change in the Asia-Pacific region [J]. International Journal of Climatology, 2005, 25 (10): 1301-1330.
- [35] 王琼,张明军,王圣杰,等.1962—2011 年长江流域极端气温事件分析[J].地理学报,2013,68(5):611-625.
- [36] Li Z, He Y, Theakstone W H, et al. Altitude dependency of trends of daily climate extremes in southwestern China, 1961—2008[J]. Journal of Geographical Sciences, 2012,22(3):416-430.
- [37] Ling Y, Zhang J Y, Dong W J. Vegetation effects on mean daily maximum and minimum surface air temperatures over China [J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(9):900-905.
- [38] Yang Y J, Wu B W, Shi C, et al. Impacts of urbanization and station-relocation on surface air temperature series in Anhui province, China [J]. Pure and Applied Geophysics, 2013,170(11):1969-1983.
- [39] 贾艳青,张勃,张耀宗,等.城市化对长三角地区极端气温影响的时空分异研究[J].自然资源学报,2017,32(5):814-828.

(上接第 247 页)

- [18] 张慕黎.刺槐和侧柏苗木对干旱及旱后复水的生理反应研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2009.
- [19] 庞云龙.旱后复水对侧柏和元宝枫幼树生长及生理特性的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2008.
- [20] 吉增宝,王进鑫.干旱胁迫对侧柏幼树某些生理特性的影响[J].西北林学院学报,2009,24(6):6-9.
- [21] 赵丽英,邓西平,山仑.不同水分处理下冬小麦旗叶叶绿素荧光参数的变化研究[J].中国生态农业学报,2007,15(1):63-66.
- [22] Goss R, Lepetit B. Biodiversity of NPQ[J]. Journal of Plant Physiology, 2015,172:13-32.
- [23] Li X, Feng W, Zeng X C. Advances in chlorophyll fluorescence analysis and its uses[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2006,26(10):2186-2196.
- [24] 刘雷震,武建军,周洪奎,等.叶绿素荧光及其在水分胁迫监测中的研究进展[J].光谱学与光谱分析,2017,37(9):130-137.
- [25] 董果,戴勳,赵勇,等.侧柏叶温及叶绿素荧光特性对土壤水分胁迫的响应[J].中国水土保持科学,2014,12(1):68-74.
- [26] 卢福顺,石瑛,王凤义.干旱和复水对马铃薯叶绿素荧光参数的影响[J].中国马铃薯,2013,27(4):203-207.
- [27] 李晓梅,盛积贵.干旱和复水对 2 种辣椒叶绿素荧光参数的影响[J].西南农业学报,2016,29(11):2567-2572.
- [28] 孙志勇,季孔庶.干旱胁迫对 4 个杂交鹅掌楸无性系叶绿素荧光特性的影响[J].西北林学院学报,2010,25(4):35-39.
- [29] 张国盛,郝蕾,闫子娟,等.6 种树种叶片叶绿素荧光动力学参数对土壤水分变化的响应[J].生态学杂志,2017,36(11):87-93.
- [30] 马仁义,张茜,张强,等.持续干旱对侧柏和祁连圆柏叶片水分状况及光合作用的影响[J].干旱区研究,2010,27(1):88-96.
- [31] 蒙祖庆,宋丰萍,刘振兴,等.干旱及复水对油菜苗期光合及叶绿素荧光特性的影响[J].中国油料作物学报,2012,34(1):40-47.
- [32] 王振夏,魏虹,吕茜,等.枫杨幼苗对土壤水分湿—干交替变化光合及叶绿素荧光的响应[J].生态学报,2013,33(3):888-897.