

不同土壤含水率对红豆杉幼苗叶片 气体交换和叶绿素荧光特性的影响

张玉豪,姚素梅,孟 丽,邓 哲

(河南科技学院生命科技学院,河南 新乡 453003)

摘 要:以太行红豆杉幼苗为材料,将土壤含水率阈值分别设置为田间持水率的90%~100%(W1)、80%~90%(W2)、70%~80%(W3)、60%~70%(W4)和50%~60%(W5),定时测量红豆杉幼苗的叶片气体交换参数和叶绿素荧光参数,并于试验后期测量红豆杉幼苗的生长状况。结果表明:红豆杉幼苗叶片叶绿素相对含量、气孔导度、净光合速率和蒸腾速率在W2处理达到最大值,分别比W5增长了10.17%、35.91%、53.03%和85.60%。且W2土壤含水率处理下红豆杉幼苗叶片 qP 、 ETR 和 $Y(II)$ 值最高,分别比W5增长了15.38%、30.74%和21.76%。随着土壤含水率的下降,红豆杉幼苗叶片 NPQ 升高,叶片热耗散能力增强,W5的 NPQ 值达1.4347,比W1增长了36.78%。W2显著提升了叶片 $rETR_{max}$ 和半饱和光强 I_k ,与W1、W3、W4和W5相比, $rETR_{max}$ 分别增长了24.40%、4.93%、12.60%和26.15%; I_k 分别增长了25.06%、7.70%、18.20%和27.08%。不同土壤含水率处理对红豆杉幼苗生长指标影响显著,W2处理的红豆杉幼苗株高、地径和叶面积指数 LAI 值分别为58.95 cm、7.76 mm和4.01,且显著高于其他处理。因此,在试验阈值范围内,土壤含水率阈值为80%~90%(W2)时有利于红豆杉幼苗光合作用的进行和植株的生长。

关键词:红豆杉幼苗;土壤含水率;叶片气体交换;叶绿素荧光特性;生长状况

中图分类号:S791.49;Q945.11 **文献标志码:**A

Effect of different soil moisture contents on leaf gas exchange and chlorophyll fluorescence characteristics of *Taxus chinensis* seedlings

ZHANG Yuhao, YAO Sumei, MENG Li, DENG Zhe

(School of Life Science and Technology, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang, Henan 453003, China)

Abstract: In order to find out the effects of different soil moisture contents on leaf gas exchange and chlorophyll fluorescence characteristics of *Taxus chinensis* seedlings, this experiment used potting of Tai Hang *Taxus chinensis* seedlings as test material and set the soil moisture contents at 90%~100% (W1), 80%~90% (W2), 70%~80% (W3), 60%~70% (W4), and 50%~60% (W5) of the field water holding capacity. The gas exchange parameters and chlorophyll fluorescence characteristics of *Taxus chinensis* seedlings were measured regularly, and the growth of *Taxus chinensis* seedlings was measured in the later stage of the experiment. The results showed that the chlorophyll relative content, stomatal conductance, net photosynthetic rate, and transpiration rate of *Taxus chinensis* seedlings leaves reached the maximum with W2 treatment, which increased by 10.17%, 35.91%, 53.03%, and 85.60%, respectively, compared with those of W5. The qP 、 ETR and $Y(II)$ values of leaves of *Taxus chinensis* seedlings with W2 soil moisture content were the highest, which increased 15.38%, 30.74%, and 21.76% compared with W5, respectively. With decreasing soil moisture content, the NPQ of *Taxus chinensis* seedlings leaves increased, the heat dissipation ability of leaves increased, and the NPQ value of W5 reached 1.4347, which increased 36.78% than that of W1. Compared with W1, W3, W4, and W5, the $rETR_{max}$ of W2 leaves increased by 24.40%, 4.93%, 12.60%, and 26.15%, and the I_k in the W2 leaves increased by 25.06%,

收稿日期:2020-02-26

修回日期:2020-08-03

基金项目:全国中药资源普查项目(财社[2017]183号);河南省科技攻关计划项目(0624420016)

作者简介:张玉豪(1993-),男,河南柘城人,硕士生,研究方向为作物水肥高效利用。E-mail:yuhazhang@126.com

通信作者:姚素梅(1974-),女,河南柘城人,教授,硕士生导师,主要从事农业水资源高效利用、作物高产栽培理论与技术研究。E-mail:sumeiy@126.com

7.70%, 18.20%, and 27.08%, respectively. Different soil moisture content treatments had significant influence on growth index of *Taxus chinensis* seedlings, and the plant height, ground diameter, and LAI values of *Taxus chinensis* seedlings treated with W2 were 58.95 cm, 7.76 mm and 4.01, respectively, which were significantly higher than other treatments. Therefore, in the range of test threshold, the threshold of soil moisture content was W2, which is most suitable for the photosynthesis and plant growth of *Taxus chinensis* seedlings.

Keywords: *Taxus chinensis* seedlings; soil moisture content; leaf gas exchange parameters; chlorophyll fluorescence characteristics; growth status

红豆杉具有珍贵的药用价值,是我国一级重点保护植物,其主要有效药用成分紫杉醇能够抑制癌细胞的繁殖与转移,对癌症有很好的疗效^[1-3]。如今,癌症患者的数量不断增加,紫杉醇的需求量逐渐增大,由于通过组织培养或真菌发酵等途径获取紫杉醇的成本高、产量低、步骤复杂,因此,从红豆杉属植株中直接提取紫杉醇是解决紫杉醇供应不足的有效途径^[4-6]。但由于红豆杉生长缓慢,且对生长环境有很高的要求,野生红豆杉资源十分有限。近些年野生红豆杉被人类大肆采伐,致使野生红豆杉呈濒危状态^[7]。土壤水分是影响植物生长发育的重要因素之一^[8],探究出适合红豆杉生长的土壤含水率阈值对红豆杉人工驯化栽培技术的研究具有十分重要的意义。但前人对红豆杉栽培技术的研究多集中在不同土壤基质^[9]、光照^[10]和温度^[11]对红豆杉生理和生长的影响,而不同土壤含水率对红豆杉幼苗光合特性影响的研究不够深入且报道甚少,本试验通过设定不同的土壤含水率阈值,研究不同土壤含水率对红豆杉幼苗叶片气体交换参数和叶绿素荧光特性的影响,为红豆杉的人工驯化栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2018 年 3—6 月在位于河南省新乡市的河南科技学院药用植物栽培场(113°54'E,35°18'N)进行,该地属大陆性季风气候,多年平均降水量 600 mm 左右,多年平均气温 14.4℃。栽培场顶部采用铁皮棚进行遮雨,四周用 6 针型遮阳网进行遮阴处理,遮阳棚用钢架制造,高约 3 m,红豆杉幼苗盆栽所用盆的直径和高度均为 30 cm。

1.2 试验设计

试验以 30 盆生长一致的 5 a 生太行红豆杉幼苗盆栽为材料,将红豆杉幼苗盆栽分成 5 组并均匀放置在阴凉通风的防雨棚中,用称重法将 5 组红豆杉幼苗的土壤含水率阈值分别控制在田间持水率的 90%~100% (W1)、80%~90% (W2)、70%~80%

(W3)、60%~70% (W4)、50%~60% (W5)。每 2 d 测量 1 次土壤含水率,若土壤含水率低于设定的阈值下限则浇水至阈值上限。其中红豆杉幼苗盆栽所用基质的成分是稻壳:土:鸡粪=3:3:1,其田间持水率为 21% (质量含水率)。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 红豆杉幼苗叶片气体交换参数和叶绿素相对含量 (SPAD 值) 的测定 采用 Li-6400 型便携式光合测定仪于晴朗天气的上午 9:00—11:00 随机选取各处理具有代表性的植株 3 株测定其叶片的净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、胞间二氧化碳浓度 (C_i) 和蒸腾速率 (T_r) 等叶片气体交换参数。由于红豆杉叶片较小不能铺满叶室,测量时同时夹取 4 片叶子,使其相互平行不重叠且与叶室垂直,测量上述各指标后用游标卡尺测量叶片宽度,换算出实际叶面积,用于数据处理。采用日本产 SPAD-502 型叶绿素仪测定红豆杉叶片的叶绿素相对含量,测量时,所有处理在同一冠层处选取叶片,每个处理选取 10 片叶片,每片叶用叶绿素仪重复测定 20 次,取其平均值 (SPAD 值)。

1.3.2 红豆杉幼苗叶片叶绿素荧光参数和快速光曲线 ($r(ETR-PAR)$) 的测定 采用德国 WALZ 公司生产的 PAM-2500 型便携式叶绿素荧光仪于晴天上午 9:00—11:00 测量红豆杉幼苗叶片的叶绿素荧光参数和快速光曲线。测量时,选择各处理相同冠层处的叶片进行活体测量。测量前先将暗适应叶夹夹在叶片上,让叶片进行 20 min 以上的暗适应,然后测量叶片的慢速动力学曲线,得到 F_0 、 F_m 、 qP 、 NPQ 、 ETR 和 $Y(II)$ 等荧光参数,并根据所测定的荧光参数计算最大光合量子产量 F_v/F_m ($F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m$) 和 PS II 潜在活性 F_v/F_0 ($F_v/F_0 = (F_m - F_0)/F_0$)。测量快速光曲线时,将光合有效辐射 PAR 分别设置为 0、1、5、30、63、100、140、197、270、362、473、618、784、980、1 159、1 385、1 662 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。采用 1980 年 Platt 等^[12]提出的拟合方程 (式 1) 对快速光曲线进行拟合:

$$P = P_m \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot PAR/P_m}) \cdot e^{-\beta \cdot PAR/P_m} \tag{1}$$

式中, P 为光合速率,即相对电子传递速率 $rETR$, P_m 为最大光合速率,即最大相对电子传递速率 $rETR_{max}$, α 为初始斜率, β 为光抑制参数。

半饱和光强 (I_k) 的计算公式为:

$$I_k = P_m/\alpha$$

1.3.3 红豆杉幼苗生长状况的测定 于试验结束前测量各处理红豆杉幼苗的株高、地茎和叶面积指数 (LAI) 等生长指标。从盆栽的盆沿处到植株顶端的距离记为红豆杉幼苗的株高。与盆栽盆沿等高处的株干直径为红豆杉幼苗的地径。采用 LAI-2200 型冠层分析仪于每日的日出前或日落后光线比较均匀时测量各处理的叶面积指数 (LAI 值)。

1.4 数据分析与处理

采用 SAS 统计软件中的 ANOVA 过程对数据进行方差分析。利用 Microsoft Excel 2013 对数据进行处理和绘图。

2 结果与分析

2.1 不同土壤含水率对红豆杉幼苗叶片气体交换参数和 SPAD 值的影响

从表 1 得知,随着土壤含水率的下降红豆杉幼苗叶片的 SPAD 值呈先升高后下降趋势,W2 处理的 SPAD 值最大且与 W1、W4 和 W5 处理差异显著。各处理间净光合速率、气孔导度和蒸腾速率的变化趋势与叶绿素相对含量的趋势基本相似,均在 W2 处理达到最大值,分别比 W1 增长了 24.65%、19.71%和 49.37%,比 W5 增长了 53.03%、35.91%和 85.60%。但在各处理叶片的胞间 CO_2 浓度无显著差异,表明土壤含水率过高和过低均不利于红豆杉幼苗叶片叶绿素的积累和气孔的开放,使叶片的净光合速率下降。其中,W2 处理的红豆杉幼苗叶片 SPAD 值和净光合速率最大,有利于红豆杉幼苗光合作用的进行。

2.2 不同土壤含水率对红豆杉幼苗叶片叶绿素荧光特性的影响

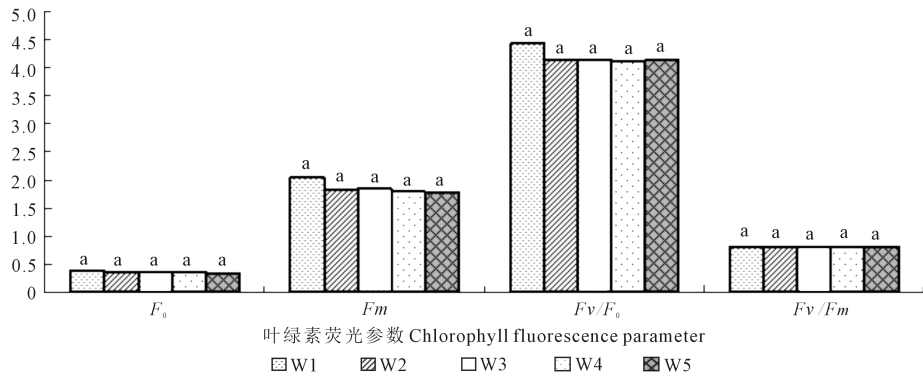
2.2.1 不同土壤含水率对红豆杉幼苗叶片叶绿素荧光参数 F_0 、 F_m 、 F_v/F_0 和 F_v/F_m 的影响 $PS II$ 最大光合量子产量 F_v/F_m 能够反映出 $PS II$ 最大光能转化效率,在植物未受到胁迫时, F_v/F_m 的数值一般在 0.8 左右^[13]。从图 1 得知,本试验中,各处理 F_v/F_m 的数值均在 0.8 左右且无显著差异,各处理红豆杉幼苗叶片的初始荧光产量 F_0 、最大荧光产量 F_m 和 $PS II$ 潜在活性 F_v/F_0 均无显著差异。表明 50%~100% 的土壤含水率均未能使红豆杉幼苗叶片的光合机构受到损伤,低土壤含水率处理的红豆杉幼苗叶片 $PS II$ 仍保持较高的潜在活性。

2.2.2 不同土壤含水率对红豆杉幼苗叶片叶绿素荧光参数 qP 、 NPQ 、 ETR 和 $Y(II)$ 的影响 光化学淬灭系数 qP 可表示叶绿素吸收的光能用于光化学反应的大小,能够反映出植物 $PS II$ 反应中心将光能转化成电势能的能力^[14]。非光化学淬灭系数 NPQ 能够表示光合色素吸收的光能以热能的形式散去的部分,在干旱等逆境环境下, NPQ 数值增大,植物通过增大热耗散来避免过剩光能对光合系统造成损伤^[15-16]。电子传递速率 ETR 能够反映实际光强条件下的表观电子传递速率^[17],实际光化学效率 $Y(II)$ 常用来表示植物光合作用电子传递的量子产额,可反映出植物叶片光合电子传递速率的快慢^[18]。从图 2 得知,随着土壤含水率的降低,红豆杉幼苗叶片 qP 、 ETR 和 $Y(II)$ 的趋势先升后降,在 W2 处理处达到最大值,分别比 W5 增长了 15.38%、30.74%和 21.76%。随着土壤含水率的下降,红豆杉幼苗叶片 NPQ 升高,叶片热耗散能力增加,W5 的 NPQ 值达 1.4347,比 W1 增长了 36.78%,且差异显著。表明 W2 处理能够显著增大 $PS II$ 反应中心的开

表 1 不同处理红豆杉幼苗叶片气体交换参数和 SPAD 值

Table 1 Leaf gas exchange parameters and SPAD value of <i>Taxus chinensis</i> seedlings under different treatments					
处理 Treatment	SPAD 值 SPAD value	净光合速率 Net photosynthetic rate /($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	气孔导度 Stomatal conductance /($mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	胞间 CO_2 浓度 Intercellular CO_2 concentration /($\mu mol \cdot mol^{-1}$)	蒸腾速率 Transpiration rate /($mmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)
W1	57.49±1.40b	4.26±0.23c	0.0411±0.0049ab	274.99±48.44a	0.630±0.060bc
W2	59.47±1.50a	5.31±0.46a	0.0492±0.0090a	284.82±14.86a	0.941±0.100a
W3	58.51±1.12ab	4.80±0.30b	0.0491±0.0129a	269.87±42.77a	0.776±0.238b
W4	55.14±2.08c	4.08±0.20c	0.0424±0.0008ab	287.50±27.33a	0.670±0.010b
W5	53.98±1.72c	3.47±0.43d	0.0362±0.0182b	269.65±12.53a	0.507±0.227c

注:同列中不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$),下同。
Note; Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.



注：图中不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。
Note: The different lowercase letters in the figure indicate the significant difference among treatments ($P < 0.05$). The same below.

图 1 不同处理的红豆杉幼苗叶片叶绿素荧光参数 F_0 、 F_m 、 F_v/F_m 和 F_v/F_0
Fig.1 Chlorophyll fluorescence parameters F_0 , F_m , F_v/F_m , and F_v/F_0 in leaves of *Taxus chinensis* seedlings under different treatments

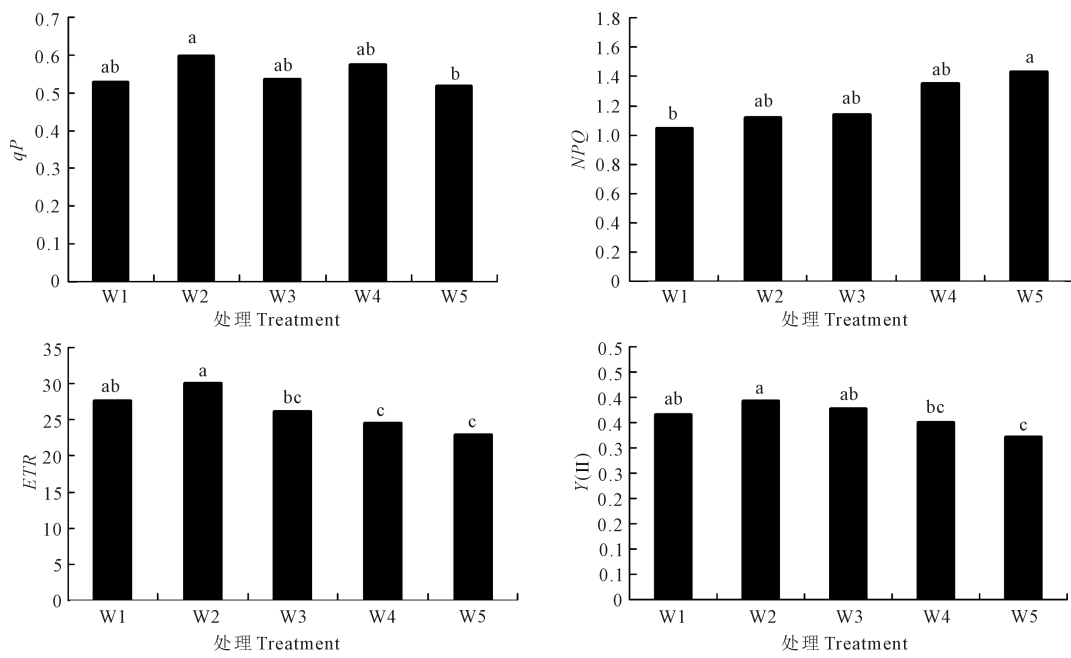


图 2 不同处理的红豆杉幼苗叶片叶绿素荧光参数 qP 、 NPQ 、 ETR 和 $Y(II)$
Fig.2 Chlorophyll fluorescence parameters qP , NPQ , ETR and $Y(II)$ in leaves of *Taxus chinensis* seedlings under different treatments

放程度,有利于光能向电势能的转化,增大了电子传递速率。随着土壤含水率的降低,红豆杉幼苗通过增大热耗散的形式抵御干旱,避免红豆杉幼苗光合系统受到损伤。

2.2.3 不同土壤含水率对红豆杉幼苗叶片快速光曲线($r(ETR- PAR)$)的影响 由图 3 可知,5 个处理的 $rETR$ 快速光拟合曲线趋势相似,W1 和 W5 处理的 $rETR$ 快速光拟合曲线基本一致,各处理 $rETR$ 随 PAR 的增大迅速升高,当 $PAR > 400 \mu mol \cdot m^2 \cdot s^{-1}$ 时, $rETR$ 增速放缓,之后趋于稳定。W2 处理的红豆

杉幼苗叶片 $rETR$ 值最大,W5 处理的红豆杉幼苗叶片 $rETR$ 值最小,W1、W3 和 W4 处理的红豆杉幼苗叶片 $rETR$ 值位于 W2 和 W5 处理之间。从表 2 可知,各处理的拟合参数最大相对电子传递速率 $rETR_{max}$ 值和半饱和光强 I_k 值存在显著差异,初始斜率 α 值无显著差异,其中,W5 处理的 $rETR_{max}$ 和 I_k 数值最小,W2 叶片 $rETR_{max}$ 和半饱和光强 I_k 数值最大,与 W1、W3、W4 和 W5 相比,W2 叶片 $rETR_{max}$ 增长了 24.40%、4.93%、12.60% 和 26.15%, I_k 增长了 25.06%、7.70%、18.20% 和 27.08%。初始斜率 α 能

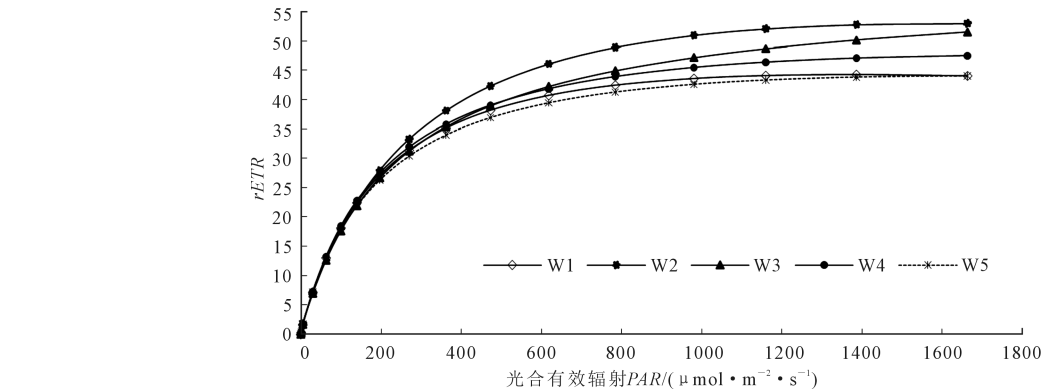


图 3 不同处理的红豆杉幼苗叶片 $rETR$ 快速光曲线

Fig.3 Rapid light curveof $rETR$ in leaves of *Taxus chinensis* seedlings under different treatments

够表示光化学反应的启动速率,半饱和光强 I_k 能够表示植株的耐强光能力^[19-20]。试验表明,50%~100%的土壤含水率未能影响红豆杉幼苗叶片光化学反应的启动速率,但 W2 处理能够显著增大红豆杉幼苗叶片的 $rETR_{max}$ 和耐强光能力,使红豆杉幼苗叶片有较强的光合电子传递能力。

2.3 不同土壤含水率对红豆杉幼苗生长状况的影响

从表 3 得知,不同土壤含水率能够显著影响红豆杉幼苗的生长状况,不同处理的红豆杉幼苗株高、地径和叶面积指数 LAI 值均于试验后期出现差异。其中,W2 处理的红豆杉幼苗株高、地径和叶面积指数 LAI 值最大,分别为 58.95 cm、7.76 mm 和 4.01,且与其他处理差异显著,W1 处理的红豆杉幼苗株高显著低于 W2~W4 处理,地径显著低于 W2~W3 处理,W5 处理的红豆杉幼苗各生长指标最小且与其他处理差异显著,表明土壤含水率过高和过低均不利于红豆杉幼苗的生长,W2 处理为适合红豆杉幼苗生长的土壤含水率阈值。

3 讨 论

土壤水分状况能够显著影响植物叶片的光合特性,适宜的土壤水分含量可使植物的光合效率达到最大,而土壤水分含量过高或过低均会使植物的光合效率降低^[21-22]。本试验中,不同土壤含水率对红豆杉幼苗的叶片气体交换参数有着显著影响。红豆杉幼苗叶片的叶绿素相对含量、气孔导度、蒸腾速率和净光合速率均在土壤含水率阈值为 W2 时达到最大值,当土壤含水率阈值为 W1、W4 和 W5 时,叶绿素相对含量开始显著下降,而气孔导度在 W5 处理时才开始显著降低,可能是因为叶片气孔开度的变化与蒸腾量和根系吸水等因素有关^[23],W5

表 2 不同处理红豆杉幼苗叶片快速光曲线 Platt 模型拟合参数

Table 2 Fitting parameters of Platt model of rapid light curve of <i>Taxus chinensis</i> seedlings under different treatments			
处理 Treatment	$rETR_{max}$	α	I_k
W1	41.10±1.51c	0.197±0.008a	208.32±4.49cd
W2	51.13±2.35a	0.197±0.014a	260.54±7.49a
W3	48.73±2.06ab	0.202±0.010a	241.92±9.29b
W4	45.40±2.36b	0.206±0.009a	220.42±8.14c
W5	40.53±0.85c	0.198±0.004a	205.02±6.00d

表 3 不同处理的红豆杉幼苗生长性状

Table 3 Growth characteristics in *Taxus chinensis* seedlings under different treatments

处理 Treatment	株高/cm Plant height	地径/mm Ground diameter	叶面积指数 Leaf area index
W1	52.93±1.42c	6.12±0.27c	3.47±0.23b
W2	58.95±1.26a	7.76±0.27a	4.01±0.18a
W3	53.97±1.02b	7.11±0.28b	3.21±0.32b
W4	54.80±0.65b	6.03±0.22c	2.39±0.09c
W5	49.30±0.94d	5.95±0.10c	2.50±0.19c

处理土壤含水率低,根系吸水量小于蒸腾量,叶片通过减小气孔的开放程度来应对干旱环境。叶绿素荧光作为光合作用的探针,能够反映出叶片光能吸收和光化学反应等光合作用过程^[24-25],且可以在不破坏叶片的前提下快速、准确地判断植物的光合特性、胁迫迫状态和光保护能力^[26]。本试验中,各处理红豆杉幼苗叶片 F_0 、 F_m 、 F_v/F_m 、 F_v/F_0 和初始斜率 α 等参数无显著差异, NPQ 呈上升趋势,表明 5 个处理的红豆杉幼苗叶片光合机构未受到破坏,低土壤含水率处理的红豆杉幼苗叶片可以通过增加热耗散的方式抵御干旱环境,从而使 PS II 反应中心仍保持较高的潜在活性和光化学反应启动速率。但在 W2 土壤含水率阈值下,红豆杉幼苗叶片的 PS II 反应中心开放程度最大,电子传递速率最快,

叶片的耐强光能力最大,可以将捕获的光能最大程度地转化成电势能,从而提升了红豆杉幼苗叶片的光合电子传递能力,增强红豆杉幼苗的光合能力。因此,土壤含水率阈值为 W2 时有利于红豆杉幼苗光合作用的进行。

植物光合作用的增强会促进植物干物质的积累,从而改善植物的生长状况,提升作物的产量^[27]。本试验中,不同土壤含水率对红豆杉幼苗的光合作用影响显著,在试验后期,各处理红豆杉幼苗株高、地径和叶面积指数 *LAI* 值等生长指标均表现出了差异。其中,在 W2 土壤含水率阈值下,红豆杉幼苗的株高、地径和叶面积指数 *LAI* 值达到最大,且与其他各处理相比差异显著,因此,在试验土壤含水率阈值范围内,W2 处理是适合红豆杉幼苗生长的最佳土壤含水率阈值。

4 结 论

1)不同土壤含水率能够显著影响红豆杉幼苗的叶片气体交换参数和叶绿素荧光特性。红豆杉幼苗叶片叶绿素相对含量、气孔导度、净光合速率和蒸腾速率在 W2 处理达到最大值,且 W2 土壤含水率处理下红豆杉幼苗叶片 *qP*、*ETR* 和 *Y(II)* 值最高。随着土壤含水率的下降,红豆杉幼苗叶片 *NPQ* 升高,叶片热耗散能力增强,W5 处理的 *NPQ* 值达 1.4347。W2 显著增大了叶片 *rETR_{max}* 和半饱和光强 *I_k*,因此,在试验阈值范围内,土壤含水率阈值为 W2 时有利于红豆杉幼苗光合作用的进行。

2)不同土壤含水率能够显著影响红豆杉幼苗的生长状况。W2 处理的红豆杉幼苗株高、地径和叶面积指数 *LAI* 值最大,分别为 58.95 cm、7.76 mm 和 4.01,且与其他处理差异显著。因此,在试验阈值范围内,土壤含水率阈值为 W2 时(田间持水率的 80%~90%)最适合红豆杉幼苗的生长。

参 考 文 献:

[1] 史彩霞,姜毅,马聪明,等.红豆杉的药用价值及在中医中药中的临床应用[J].中药与临床,2018,9(1):63-65.

[2] Kohler J,Goldspiel B R.Evaluation of new drug paclitaxel(taxol) [J]. Pharmacotherapy,1994,14:3-34.

[3] 王楠楠,黄飞华.红豆杉有效成分及其药理作用研究进展[J].浙江中医杂志,2018,53(8):621-623.

[4] 于少帅,孙启武,张小平,等.南方红豆杉人工引种及野生植株活性成分含量及分布[J].应用生态学报,2012,23(10):2641-2647.

[5] Vongpaseuth K, Roberts S C. Advancements in the understanding of paclitaxel metabolism in tissue culture [J].Current Pharmaceutical Bi-

otechnology, 2007, 8(4):219-236.

[6] 程广有,高峰,葛春华,等.中国境内东北红豆杉天然群体紫杉醇含量变异规律[J].北京林业大学学报,2005,27(4):7-11.

[7] 陈易展,刘蔚漪,张玉薇,等.南方红豆杉濒危现状分析与保护对策[J].林业勘察计,2018,38(3):66-69.

[8] 王宏博,李丽光,王笑影,等.基于 MODIS 数据的土壤含水率监测方法研究综述[J].土壤通报,2011,42(1):243-249.

[9] 刘柿良,杨秀利,马明东,等.曼地亚红豆杉(*Taxus media cv "Hicksii"*)栽培基质中适宜的锰、锌、铜浓度及采收时期研究[J].植物营养与肥料学报,2015,21(2):439-448.

[10] 刘彤,金慧颖,徐浩玉,等.不同光照条件下东北红豆杉幼苗光合特性日变化[J].北京林业大学学报,2015,37(10):67-72.

[11] 马小军,丁万隆,陈震.温度对东北红豆杉种子萌发的影响[J].中国中药杂志,1996,(1):20-22.

[12] Platt T, Gallegos C L, Harrison W G. Photoinhibition of photosynthesis in natural assemblages of marine phytoplankton [J]. Journal of Marine Research, 1980,38:687-701.

[13] 翟秀明,唐敏,胡方洁,等.高温干旱胁迫对茶树叶绿素荧光特性的影响[J].南方农业,2019,13(4):46-49,59.

[14] 班宜辉,徐舟影,李静,等.叶绿素荧光分析技术在实验教学中的应用[J].实验技术与管理,2019,36(9):172-175.

[15] 李江鹏,刘海俊,黄志午,等.光谱对水稻灌浆期剑叶光合及叶绿素荧光特性的影响[J].中国农业科学,2019,52(16):2768-2775.

[16] 阿力木·阿布来提,姚怀柱,宋云飞,等.海涂土壤结构改良对水稻叶绿素荧光参数和产量的影响[J].应用生态学报,2019,30(10):3435-3442.

[17] 郭春芳,孙云,唐玉海,等.水分胁迫对茶树叶片叶绿素荧光特性的影响[J].中国生态农业学报,2009,17(3):560-564.

[18] 唐敏,翟秀明,侯渝嘉,等.不同茶树品种(系)叶绿素荧光参数季节性差异研究[J].西南农业学报,2015,28(1):79-83.

[19] 周振翔,李志康,陈颖,等.叶绿素含量降低对水稻叶片光抑制与光合电子传递的影响[J].中国农业科学,2016,49(19):3709-3720.

[20] 侯红乾,林洪鑫,刘秀梅,等.长期施肥处理对双季晚稻叶绿素荧光特征及籽粒产量的影响[J].作物学报,2020,46(2):280-289.

[21] 张淑勇,夏家宝,张光灿,等.黄河三角洲贝壳堤岛叶底珠叶光合作用对 CO₂ 浓度及土壤水分的响应[J].生态学报,2014,34(8):1937-1945.

[22] 李建查,闫帮国,潘志贤,等.干热河谷番茄苗期叶片光合效率的土壤水分阈值效应[J].热带作物学报,2019,40(11):2278-2284.

[23] 张坤,刘小勇.土壤不同含水量对早酥梨光合特性的影响[J].干旱地区农业研究,2013,31(1):107-111.

[24] 刘文瑜,杨发荣,黄杰,等.干旱胁迫对藜麦幼苗生长和叶绿素荧光特性的影响[J].干旱地区农业研究,2019,37(4):171-177.

[25] 里程辉,刘志,王宏,等.干旱胁迫下不同中间砧对“岳冠”苹果叶片光合特性及叶绿素荧光特性的影响[J].干旱地区农业研究,2019,37(5):83-91.

[26] 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):2780-2787.

[27] 段素梅,杨安中,吴文革,等.孕穗期干旱胁迫对超级稻后期光合性能及产量的影响[J].干旱地区农业研究,2017,35(6):104-108,260.