

光强对黑麦草萌发生长、叶片叶绿素含量及光系统 II 的影响

张 辉,王 荷,张蓓蓓,武悦萱,王苗苗

(陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室,宝鸡文理学院,陕西 宝鸡 721013)

摘 要:以常见景观植物黑麦草为试验材料,探究 6 种不同光照强度对水培黑麦草萌发生长、叶片叶绿素含量和光系统 II 的影响。结果表明:光强为 $300\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时水培黑麦草萌发及生长最好,发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数分别为 93%、23.67%、57.28 和 211.58,根长、芽长分别为 3.04 cm 和 4.01 cm,该光强下叶片叶绿素含量显著高于其它光强处理($P<0.05$),叶绿素 a、b 及总叶绿素含量分别为 0.71 、 $0.27\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $0.98\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$;随着光强的增强,最大荧光(F_m)、PS II 的最大光化学效率(F_v/F_m)和光化学性能指数(PIabs)呈现先升高后下降的趋势,300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光强下 F_m 、 F_v/F_m 和 PIabs 值都达到最大;叶绿素荧光快速诱导曲线(OJIP)受光强影响较大,以 I 点差异较显著,对 OJIP 曲线进行标准化后差异较小;OJIP 曲线参数分析表明 PSII 供体侧在 6 组光强下无显著差异,随着光强增强,单位反应中心吸收(ABS/RC)、捕获(TRo/RC)和传递(ETo/RC)也随着增强,但单位反应中心热耗散(DIo/RC)减小,PSII 受体侧在 $500\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 条件下电子传递受阻。

关键词:黑麦草;光强;萌发生长;叶绿素含量;光系统 II

中图分类号:S688.4 **文献标志码:**A

Effects of light intensity on germination, growth, chlorophyll content and photosystem II of leaves in Ryegrass(*Lolium Perenne* L)

Zhang Hui, Wang He, Zhang Bei-bei, Wu Yue-xuan, Wang Miao-miao
(Key Laboratory of Disaster Survey and Mechanism Simulation of Shaanxi Province/
Baoji University of Arts and Sciences, Baoji, Shaanxi 721013, China)

Abstract: Using common ryegrass(*Lolium Perenne* L) as a test material, the effects of six different light intensities on germination, growth, chlorophyll content and photosystem II of leaves in ryegrass were studied. The results showed that: (1) When the light intensity was $300\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, the ryegrass was the best for germination and growth. The germination rate, germination potential, germination index and vigor index were 93%, 23.67%, 57.28 and 211.88, respectively. The root length and shoot length were 3.04 cm and 4.01 cm, respectively; the chlorophyll content of leaves under this light intensity was significantly higher than that of other light intensity treatments ($P<0.05$), and the chlorophyll a, b and total chlorophyll were 0.71, 0.27 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ and 0.98 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$; (2) With the increase of light intensity, the maximum fluorescence (F_m), the maximum photochemical efficiency of PSII (F_v/F_m) and PIabs showed a trend of increasing first and then decreasing, while the values of F_m , F_v/F_m and PIabs reached the maximum under light intensity $300\ \text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; OJIP was greatly affected by light intensity, with significant difference at point I, and the OJIP curve was normalized with little difference.; (4) OJIP curve parameters showed that there was no significant difference in light intensity of the six donor groups on the PSII, with the increase of light intensity, per reaction center absorption (ABS/RC), capture (TRo/RC) and transfer (ETo/RC) also increases, but the heat dissipation (DIo/RC) per reaction center decreases, and the elec-

tron transfer of PSII receptor side is blocked at light intensity 500 μmol · m⁻² · s⁻¹.

Keywords: ryegrass (*Lolium Perenne* L); light intensity; germination and growth; chlorophyll content; PSII

光照条件是植物正常生长发育中最重要的环境因子之一,光合作用过程中吸收光能的是叶绿体色素(叶绿素 a 和叶绿素 b)和类胡萝卜素,其中叶绿素是主要的光能吸收物质,直接影响植物光合过程中光能的利用,研究表明叶绿体色素含量与其光合能力有较好的相关性^[1]。植物的光合作用对环境因子变化非常敏感,光强因子就是其中之一^[2],当光能过剩并高于植物光饱和点后 PSII 部位会发生光抑制的现象^[3],而弱光环境又会影响植物的光合效率。叶绿素荧光可以迅速、准确、无损伤地检测到光胁迫下植物光合作用的状态,通过分析荧光参数的变化可以直接观测胁迫对植株的影响^[4]。植物经过暗适应后暴露在可见光下,荧光值会随时间有所变化,形成的曲线就是叶绿素荧光诱导曲线(OJIP)。这条曲线能够反映 PSII 的初始光化学反应及光合机构的结构和状态等变化^[5-7]。

黑麦草是一种禾本科草本植物,由于其营养价值高,生长较快,种植范围广,所以它不仅是一种优质的牧草,同时也有很大的商业用途。黑麦草经常被当做草坪用在高尔夫球道和城市绿地。黑麦草作为草坪用草时不仅受到太阳光照的影响也会受到人工光源的影响。目前有关黑麦草的研究较多,主要集中在黑麦草的重金属吸附能力及各胁迫对黑麦草生长生理的影响方面^[8-10],但黑麦草作为绿地景观植物,受到光照影响的研究报道较少。其中,李雪琴^[11]通过对比 4 种草坪用草叶绿素荧光特性,发现黑麦草耐光抑制能力较弱。因此,本研究选取不同光照强度对黑麦草进行水培试验,结合萌发生长状况、叶片叶绿素含量及叶绿素荧光特性,分析光照对黑麦草生长及生理的影响。

1 材料与方法

1.1 材料与处理方法

丹麦绅士多年生黑麦草(宝鸡市林业局提供),选取颗粒饱满种子,用 0.1% HgCl₂ 浸泡消毒 10 min,消毒后用纯水冲洗 3 遍。在干净的培养皿里铺上滤纸,将种子用镊子摆放在滤纸上,每个培养皿中整齐摆放 100 粒种子,并且保持培养皿湿润。将培养皿放入 Fytosys 人工气候箱中,昼夜时间为 14 h/10 h,温度为 25℃/15℃。设计 6 组不同光强处理 L1、L2、L3、L4、L5 和 L6,分别为 100、200、300、400、500 μmol · m⁻² · s⁻¹和 600 μmol · m⁻² · s⁻¹,每个光

强 6 次重复。观察种子萌发,以胚芽长度超过种子长度二分之一视为发芽,第三天开始记录发芽数。

1.2 测定方法

1.2.1 种子生长指标的测定 芽长为胚轴与芽之间的过渡点开始到芽末端的长度;根长为胚轴与根之间的过渡点开始到根末端的长度^[12]。

发芽率^[13](%) = 7 d 发芽种子数/供试种子数 × 100%。

发芽势^[14](%) = 3 d 发芽种子数/供试种子数 × 100%。

发芽指数^[13] $GI = \sum (Gt/Dt)$

其中, G_i 为发芽指数; G_t 为第 t 天的发芽数; D_t 为相应的发芽天数。

活力指数^[15] $VI = \text{发芽指数}(GI) \times \text{芽长度}(\text{cm})$ 。

1.2.2 叶绿素含量测定 将水培第 7 天的黑麦草叶片剪下称取 0.2 g,用 25 ml 95%乙醇提取叶片叶绿素,并利用分光光度计分别在波长 665、649、470 nm 下测定吸光度,计算叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和叶绿素 a/b 的值^[16]。

1.2.3 快速叶绿素荧光诱导动力学曲线的测定 在水培黑麦草第 7 天上午 9 : 00,随机选取黑麦草叶片,经过 20 min 暗适应,利用德国 Walz 公司生产 Mini-Imaging-PAM 荧光仪进行快速叶绿素荧光诱导曲线测定,得出 OJIP 曲线。同时,得到的参数分别为:暗适应后最小荧光强度(F_o);暗适应后最大荧光(F_m);PSII 最大光化学效率(F_v/F_m);捕获光能与热耗散能量的比例(F_v/F_o);OJIP 荧光诱导曲线初始斜率(M_o);单位反应中心吸收的能量(ABS/RC);单位反应中心捕获的用于还原 QA 的能量(TR_o/RC);单位反应中心捕获的用于电子传递的能量(ET_o/RC);单位反应中心热耗散的能量(DI_o/RC);PSII 捕获能量从 QA 传递到 QB 的效率(ψ_o);用于电子传递的量子比率(ϕE_o);用于热耗散的量子比率(ϕDo);以吸收光能为基础的性能指数(PI_{abs})。

1.3 数据处理

利用 Excel 2010 进行基础数据整理;SPSS 19.0 进行 one way-ANOVA 分析^[17],用 LSD 法进行显著性检验和多重比较;采用 Origin 8.0 作图^[18]。

2 结果与分析

2.1 不同光强对水培黑麦草种子萌发和根芽生长的影响

种子的萌发能力可以通过发芽率、发芽势、发

芽指数及活力指数表现出来。由表 1 可看出随着光照强度从 L1 升至 L6 后水培黑麦草发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数都有一个先上升再下降的趋势。不同光照处理间发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数均达显著差异(表 1)。在 L3 光照处理下黑麦草种子发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数均达到最大值。L3 处理下黑麦草发芽率显著高于其他处理($P<0.05$)。发芽势和发芽指数在 L3 处理下与其他 5 组光照有显著差异($P<0.05$),说明在

L3 处理下黑麦草的种子发芽整齐且迅速。活力指数是种子发芽速率和生长量的综合反映,从表 1 可以看出在 L3 处理下黑麦草活力指数最大,显著高于其他 5 组光强处理且有差异显著($P<0.05$)。从表 1 可以看出 L3 和 L4 处理下,水培黑麦草生长最好。根长、芽长均达到最大值,但两组之间差异不显著($P>0.05$)。L1 和 L2 处理下及 L5、L6 根芽长度没有明显差异($P>0.05$)。但 L3 和 L4 与其他 4 组处理有显著差异($P<0.05$)。

表 1 不同光照处理对水培黑麦草种子萌发和根芽生长的影响
Table 1 Effects on seed germination and root growth of ryegrass under different light intensities in hydroponic

光照强度 Light intensities	发芽率/% Germination rate	发芽势/% Germination potential	发芽指数 Germination index	活力指数 Vigor index	芽长/cm Shoot length	根长/cm Root length
L1	82.67±0.01c	0.35±0.01c	43.73±2.48c	145.15±11.93c	3.32±0.10b	2.38±0.12c
L2	87.33±0.02b	27.67±0.02b	48.04±0.71b	167.01±2.26b	3.48±0.07b	2.65±0.22b
L3	93.00±0.03a	32.67±0.03a	52.78±2.00a	211.58±14.66a	4.01±0.17a	3.04±0.08a
L4	87.67±0.06b	28.67±0.06b	41.79±2.57c	169.29±8.68b	4.05±0.06a	2.98±0.08a
L5	81.33±0.03c	24.33±0.03bc	40.559±2.20c	117.07±8.07d	2.89±0.11c	2.02±0.07d
L6	74.33±0.02c	22.33±0.02c	35.70±2.19d	96.02±10.09e	2.69±0.25c	1.88±0.16d
<i>F</i> 值 <i>F</i> value	12.92 **	4.84 *	23.92 **	50.42 **	47.39 **	40.19 *

注:表中数据为平均值±标准差;不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。* $P<0.05$, ** $P<0.01$ 。下同。
Note: The values presented were the mean±standard errors; different letters means different significance at $P<0.05$ level. * $P<0.05$, ** $P<0.01$. The same below.

2.2 不同光强处理下水培黑麦草叶绿素含量比较

叶绿素是叶片光合功能的重要性状之一,其含量高低反应了叶片生理功能的强弱,将直接影响叶片的光合能力^[19]。从表 2 可以看出,叶绿素 a 和叶绿素 a/b 随着光照强度的增加有一个先升高后降低的趋势,且不同光照处理下黑麦草叶片叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素及叶绿素 a/b 有显著差异。光强为 L3 时,总叶绿素含量最高,叶片叶绿体可以吸收更多的光能,光合效能较强。L3 处理下叶绿素 a 含量分别高出 L1、L4、L5、L6 处理 7.04%、21.13%、22.54%和 30.99% ($P<0.05$)。L3 处理下叶绿素 b 含量比 L1、L2、L5 和 L6 处理分别高出 4.7%、33.33%、3.7%和 25.93% ($P<0.05$)。叶绿素 a/b 反映捕光色素复合体 II 在总叶绿素的结构中所占的比例,能够说明捕光能力的强弱,从表 2 可以看出在 L2 处理下水培黑麦草捕光能力是最强。

2.3 不同光强对水培黑麦草叶片叶绿素荧光特性的影响

2.3.1 对水培黑麦草叶片 F_o 和 F_m 的影响 从图 1 中可以看出,光照处理从 L1 到 L6,初始荧光(F_o)呈下降趋势,最高值出现在 L2 处理,最小值出现在 L6 处理,L2 显著高于 L4、L5、L6($P<0.05$),但与 L1、

L3 处理差异不显著($P>0.05$),L2 处理下 F_o 比 L4、L5 和 L6 处理下分别高出 22.68%、31%和 35.13%。最大荧光(F_m)随着光强的增强先上升再下降,最大值出现在 L3 处理下,显著高于其他 5 组处理($P<0.05$),且分别比 L1、L2、L4、L5 和 L6 处理高出 10.62%、5.34%、23.51%、39.48%和 40.26%。

表 2 不同光强处理对水培黑麦草叶片叶绿素含量的影响
Table 2 Effects on chlorophyll content of ryegrass leaves under different light intensities in hydroponic

光照强度 Light intensity	叶绿素 a Chlorophyll a /(mg·g ⁻¹ FW)	叶绿素 b Chlorophyll b /(mg·g ⁻¹ FW)	总叶绿素 Chlorophyll /(mg·g ⁻¹ FW)	叶绿素 a/b Chlorophyll a/b
L1	0.66±0.00b	0.25 ±0.01b	0.91 ±0.01b	2.65 ±0.09b
L2	0.71±0.00a	0.18 ±0.00d	0.89±0.01c	3.85 ±0.06a
L3	0.71±0.01a	0.27 ±0.01a	0.98±0.00a	2.63 ±0.0b
L4	0.56±0.00c	0.27 ±0.01ab	0.82±0.00d	2.10 ±0.0c
L5	0.55±0.01c	0.26 ±0.01b	0.81 ±0.01e	2.16 ±0.07c
L6	0.49 ±0.00d	0.20 ±0.01c	0.69 ±0.01f	2.50 ±0.06d
<i>F</i> 值 <i>F</i> value	1408.17 **	109.14 **	257.14 **	257.74 **

2.3.2 对水培黑麦草叶片 F_v/F_m 和 PI_{abs} 的影响 最大光化学效率(F_v/F_m)是指 PSII 反应中心内原初光能转化效率,通过叶片发生光抑制来衡量它受胁迫的程度, F_v/F_m 值越低说明植物受到的光抑

制越高^[20-21]。由图 2 可以看出,随着光强的变大, Fv/Fm 都在 0.78 左右, L3 处理最高, 且与 L1、L5 和 L6 处理存在显著差异 ($P<0.05$), 分别高出 3.04%、4.08% 和 2.53%。

光化学性能指数 (PIabs) 是一个能够反映植物光合综合性能的参数^[22], 对逆境和胁迫反应灵敏^[23]。从图 2 可以看出 PIabs 的趋势跟 Fv/Fm 一致, 先升高再降低, L3 处理下值最大, 且显著高于 L1、L4、L5 和 L6 处理, 分别高出 12.23%、6.38%、14.89% 和 15.96%。

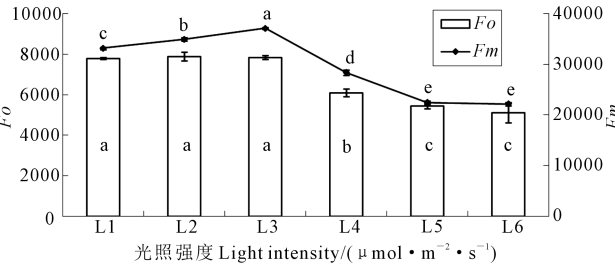


图 1 不同光强处理对水培黑麦草叶片初始荧光 (F_o) 和最大荧光 (F_m) 的影响

Fig. 1 Effects on the initial fluorescence (F_o) and maximum fluorescence (F_m) of ryegrass leaves under different light intensities in hydroponic

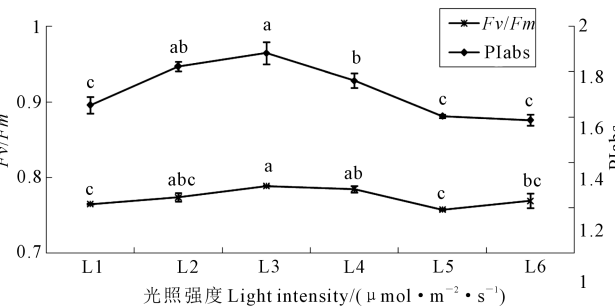


图 2 不同光强处理对水培黑麦草叶片 Fv/Fm 及 PIabs 的影响

Fig. 2 Effects on Fv/Fm and PIabs of ryegrass leaves under different light intensities in hydroponic

2.4 不同光强对水培黑麦草叶片叶绿素荧光诱导曲线的影响

植物快速叶绿素荧光诱导动力学曲线 (OJIP) 可以反映出大量关于 PSII 反应中心原初光化学反应的信息^[24]。J 相的荧光强度升高是由于 Q_B 不能及时接受来自 Q_A^- 的电子将它还原, 而导致 Q_A^- 大量积累, I 相和 P 相分别是由于快还原型 PQ 库和慢还原型 PQ 库被完全还原造成的。从图 3 (A) 可以看出, 6 种光强处理下的水培黑麦草 OJIP 曲线变化趋势是基本相同, 但荧光值差异较大。其中, O 点 (0.02 ms) 的差异不太明显, 但能看出 L5、L6 处理低

于其他 4 组; 从 J 点 (2 ms) 开始, 不同光强处理下荧光值有所差异, 其中 L3 处理下荧光值最高, 分别比 L1、L2、L4、L5 和 L6 处理高出 8.38%、7.11%、15.1%、37.12% 和 44.67%; I 点 (30 ms) 时不同处理间荧光值差异显著, 以 L3 的值最高, 分别比 L1、L2、L4、L5 和 L6 处理高出 12.74%、8.7%、25.27%、46.02% 和 49.18%; P 点为稳定荧光值, 也就是最大荧光 F_m , 大小为 $L3>L2>L1>L4>L5>L6$ 。6 种光照强度下黑麦草叶片的 OJIP 曲线变化规律基本相同, 在 I 点和 P 点 6 种光强处理下的黑麦草叶片的荧光值差异较大。

利用相对可变荧光 (V_t) 进行标准化后绘制的 OJIP 曲线能够克服叶片表面附属物、照光面积、色素含量、材料厚度、仪器电压等各种因素影响, 而使 OJIP 曲线更加准确, $V_t = (F_t - F_o) / (F_m - F_o)$ (F_t 指实时荧光数值)^[25]。图 3 (B) 是用 V_t 标准化后的 OJIP 曲线, 从图中可以看出 6 种光强处理下的 OJIP 曲线形态较相似, 不同光强处理下的水培黑麦草 OJIP 曲线差异不明显, 说明电子传递速率与过程差异较小。

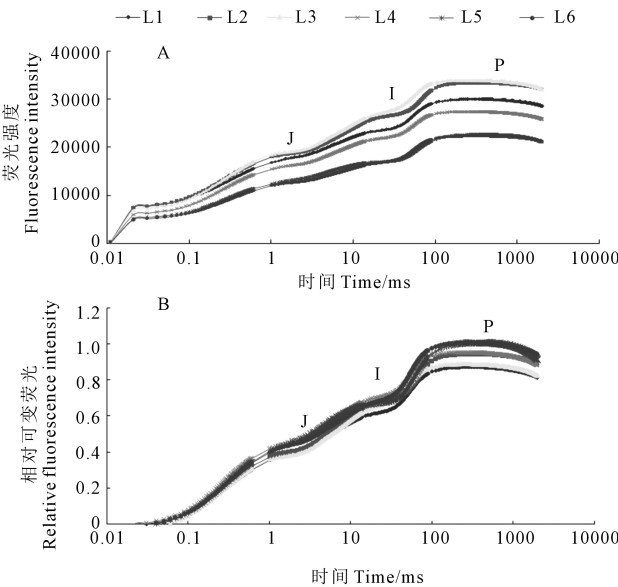


图 3 不同光强处理下水培黑麦草快速叶绿素荧光诱导曲线及相对可变荧光诱导曲线

Fig. 3 The dynamic curves of chlorophyll fluorescence induction and relative chlorophyll fluorescence under different light intensities treatments

当 PSII 供体侧放氧复合体 OEC 受到伤害时, 在 J 点前叶绿素荧光强度会上升出现 K 点, F_k 一般指 OJIP 曲线在 300 μm 左右时的叶绿素荧光值^[26], 对 O-J 部分进行标准化可以得到参数 W_k , 用来反映 K 点的变化: $W_k = (F_k - F_o) / (F_j - F_o)$ ^[27]。

从图 4 可以看出,水培黑麦草叶片相对可变荧光参数 W_k 在光强变化下并没有显著变化 ($P>0.05$), V_j (J 点的相对可变荧光) 随着光强增加有所增加,但差异也不显著。

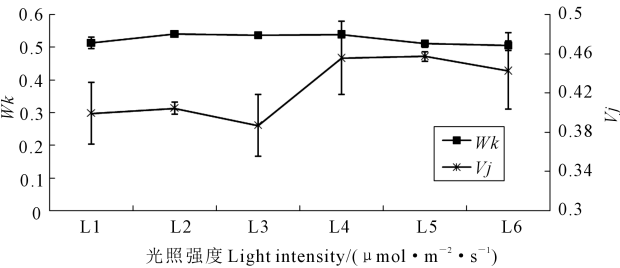


图 4 不同光强条件对水培黑麦草叶片 V_j 、 W_k 的影响
Fig. 4 Effects on V_j and W_k of ryegrass leaves under different light intensities in hydroponic

2.5 不同光强对水培黑麦草叶片 PSII 供体侧、反应中心、受体侧的影响

从图 3 可以看出,在不同光强处理下水培黑麦草 OJIP 曲线中并未出现 K 点,图 4 中 6 组光强处理下 V_j 、 W_k 值之间并无显著差异,表明 SPII 供体侧并没有受到光强变化的影响,因此进而分析其他参数对叶片 PSII 的影响。

Mo 、 Sm 、 ϕEo 、 ψo 等参数主要反映 PSII 受体侧

表 3 不同光强处理对水培黑麦草叶片 Mo 、 Sm 、 ΦEo 、 ψo 、 ABS/RC 、 TRo/RC 、 ETo/RC 及 DIo/RC 的影响
Table 3 Effects on Mo , Sm , ΦEo , ψO , ABS/RC , TRo/RC , ETo/RC and DIo/RC of ryegrass leaves under different light intensities in hydroponic

光照强度 Light intensity	Mo	Sm	ΦEo	ψo	ABS/RC	TRo/RC	ETo/RC	DIo/RC
L1	0.92±0.14a	322.71±3.45b	0.40±0.01b	0.54±0.01a	2.52±0.05c	1.88±0.06c	1.13±0.04a	0.60±0.02c
L2	0.93±0.06a	332.89±9.63ab	0.44±0.01a	0.57±0.02a	2.56±0.07c	2.00±0.07bc	1.10±0.01ab	0.60±0.05c
L3	0.95±0.09a	345.96±5.90a	0.45±0.01a	0.57±0.01a	2.61±0.02c	2.01±0.10bc	1.10±0.01ab	0.62±0.00c
L4	0.96±0.07a	333.62±11.93ab	0.43±0.01a	0.56±0.01a	2.75±0.05b	2.13±0.13ab	1.09±0.02bc	0.65±0.02c
L5	1.05±0.25a	321.79±0.95b	0.40±0.01b	0.52±0.01a	2.81±0.11b	2.16±0.03a	1.08±0.01bc	0.75±0.05b
L6	0.88±0.02a	261.21±12.38c	0.39±0.01b	0.51±0.01a	3.15±0.13a	2.16±0.21a	1.05±0.01c	0.86±0.02a
F	0.59	37.09 **	16.71 **	0.98	37.18 **	6.21 *	5.25 *	36.67 **

3 结论与讨论

由不同光强处理下种子萌发和生长状况可以看出(表 3),L3 光强强度是最适宜黑麦草种子生长的光照条件。这与前人研究相同,说明黑麦草为弱光性植物^[11]。

叶绿素含量能够反映出植物的光合能力,其中干旱、盐分及光强都是影响植物叶绿素含量的重要环境因子^[28-30]。从水培黑麦草研究过程中可以看出它在 L3 光强处理下叶绿素含量高于其他光强处理,而且通过叶绿素 a/b 的值变化可以看出光强增

的变化,PSII 受体侧包括 Q_A 、 Q_B 、PQ 库等^[23]。从表 3 中可以看出在 L5 处理下 Mo 值最高,说明此时 Q_A 被还原的速率最快, Q_A^- 向下传递电子的能力最小,但 6 组光强条件下 Mo 值并没有显著差异。同时 L3 处理下 Sm 值最大,且显著低于其他光照处理,说明 L3 处理下 Q_A^- 被还原所需要的能量最大。随着光强的增大 Sm 值先升高再降低。 ϕEo 、 ψo 分别表示受体侧电子传递体,将捕获光能的电子传递到电子传递链中超过 Q_A^- 电子受体的量子产额以及相对电子传递效率,由表 3 中可以看出,在 L3 处理下 ϕEo 、 ψo 最大,但 ψo 在不同光强下并没有显著差异,说明光强的变化并没有对相对电子传递效率产生明显的影响。

PSII 反应中心吸收、捕获、电子传递及热耗散能量可以通过参数 ABS/RC 、 TRo/RC 、 ETo/RC 和 DIo/RC 来表示。随着光强从 L1 升至 L6, ABS/RC 、 TRo/RC 和 DIo/RC 都随光强增大而增大,单位热耗散 ETo/RC 随光强增加而减小。

由 F 值可以看出, Mo 和 ψo 处理间没有差异, TRo/RC 和 ETo/RC 有显著差异, Sm 、 ΦEo 、 ABS/RC 和 DIo/RC 有极显著差异,以 ABS/RC 差异最大。

大的过程并不利于叶绿素 a 的形成,叶绿素 a 含量的降低既影响了光能的吸收也影响光能转化(表 2)。

水培黑麦草的 Fo 和 Fm 都随着光强的增大先升高再减小。由 Fo 的变化可以看出色素吸收光能的变化是植物在自然状态下光合作用强弱的表现,一般来讲, Fo 值越低说明光能利用越高^[31],而 Fo 的变化也可以用来推测反应中心可能发生的保护机制的状况和天线色素被激发后的电子密度^[32-33]。在 L1 和 L2 处理下初始荧光值最大,此时水培黑麦草 PSII 反应中心遭到了破坏,光能利用较低。当光

强升至 L3 时,初始荧光较大幅度降低,光能利用达到最大。随着光强的不断增大 F_m 变化趋势也是先显著降低再缓慢升高。说明在弱光环境下水培黑麦草的电子反应程度最大,对弱光的适应性也是最强的, F_m 下降也就是说明水培黑麦草叶片的电子反应程度低,电子不活跃。 F_v/F_m 只会在受到胁迫时值才会下降,随着光强增大使得水培黑麦草出现了光抑制,L3 处理下受到的光抑制最弱。而 F_v/F_m 的下降是由于 F_o 的升高和 F_m 的减小共同影响。 PI_{abs} 可以准确反映植物光合机构的整体状态^[34],在 L3 处理下 PI_{abs} 最高,综合 F_v/F_m 来看,L3 处理下水培黑麦草的光合性能最强。L3 处理下 F_v/F_m 和 PI_{abs} 相比 PI_{abs} 对外界环境的变化更为敏感,能更好地反应植物光合性能。

通过 OJIP 曲线能够直观看出水培黑麦草叶片 PSII 光合变化,6 组光强处理下的 OJIP 曲线趋势相同仅荧光值大小不同,快速叶绿素荧光动力学曲线在 J 点处的荧光值差异较大,通过相对可变荧光 OJIP 曲线和相对可变荧光差值 OJIP 曲线可以清楚的观察出各个光照条件下 J 点的差异。从 J 点到 I 点之间 L2 和 L6 条件下水培黑麦草 PSII 反应中心捕获的能量中电子传递比例较高,在电子越过 Q_A 的过程中及从 Q_A^- 向 Q_B 传递过程中耗散能量较小。相对荧光 OJIP 曲线 6 组光强处理下近乎重合,通过对 V_j 和 W_k 参数分析,发现在 6 组光强不存在差异,光强变大并未对水培黑麦草叶片造成损伤。

从 PSII 供体侧、反应中心和受体侧参数变化可以具体了解到水培黑麦草的光合过程。供体侧参数 W_k 并无差异说明光强变化对 PSII 供体侧没有影响。随着光强变大 ABS/RC 增加,TRo/RC 和 ERo/RC 也增加,但 DIo/RC 减小,即反应中心吸收能量增加,捕获光能的能力和传递电子能力增加,但热耗散减小。

PSII 受体侧 M_o 值在 L5 处理下达到最大值,与其他处理并未达到显著性差异, M_o 值升高说明受体 Q_A 被还原的速率快, Q_A 所得到的电子较多用于自身还原而没有继续往下传递^[35]。 Sm 、 ϕE_o 和 ψ_o 在 L6 处理下最小,此时 PSII 受体侧电子传递体减少,用于电子传递的量子产额和相对电子传递速率都有所下降。表明在光强升至 L6 时 PSII 供体侧的 Q_A^- 累积,电子传递受阻。

综上所述可以看出,随着光照强度增加,水培黑麦草种子的萌发,生长情况、叶绿素含量、叶绿素荧光参数以及叶绿素荧光动力学曲线都有相对统一的先升高再降低的趋势。L3 光强处理下黑麦草种子萌发、生长、叶片叶绿素含量及叶绿素荧光特性最佳,因此可以推断在该试验中 L3 可能是水培黑麦草的最适光照强度。但由于试验条件,设备及仪器等的限制,没有进行较多的光强设置,在以后的试验中,还将继续补充较多的光强处理,分析最佳的光照强度。

参 考 文 献:

[1] 杨逢建, 庞海河, 张学科, 等. 光胁迫对南方红豆杉叶片中叶绿体色素和紫杉醇含量的影响[J]. 植物研究, 2007, 27(5): 556-558.

[2] Salgado-Luarte C, Gianoli E. Herbivory may modify functional responses to shade in seedlings of a light-demanding tree species [J]. Functional Ecology, 2011, 25 (3): 492-499

[3] 王萍, 张希石, 石磊. 干旱胁迫下沙芥幼苗叶片光合特性和叶绿素荧光参数变化 [J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(3): 159-163.

[4] Sharp R E, Poroyko V, Hejlek L G, et al. Root growth maintenance during water deficits: physiology to functional genomics [J]. Journal of Experimental Botany, 2004, 54 (407): 2343-2351.

[5] Zushi K, Matsuzoe N. Using of chlorophyll a fluorescence OJIP transients for sensing salt stress in the leaves and fruits of tomato [J]. Scientia Horticulturae, 2017, 219(5): 216-221.

[6] Ćepl J, Holá D, Stejskal J, et al. Genetic variability and heritability of chlorophyll a fluorescence parameters in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) [J]. Tree Physiology, 2016, 36(7): 883-895.

[7] Srinivasarao C, Shanker A K, Kundu S, et al. Chlorophyll fluorescence induction kinetics and yield responses in rainfed crops with variable potassium nutrition in K deficient semi-arid alfisols [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B, 2016(7), 160: 86-95

[8] Zahra Y, Jila B, Reza S. The efficiency of lolium perenne for phytoremediation of anthracence in polluted soils in the presence of Bacillus aerophilus [J]. Petroleum Science and Technology, 2017, 35(7): 647-652.

[9] Zhao X, He X D, Zhang J L. Effects of Modifiers on Physiological Metabolism of Lolium perenne Seedlings in Diesel-polluted Soils [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2017, 34(4): 384-389.

[10] Tilaki GAD, Behtari B. Alleviation of ionic and osmotic stress of salinity in seedling of Lolium Perenne L. with halopriming treatments growing in an hydroponic system [J]. Journal of Plant Nu-

- trition, 2017, 40(2): 219-226.
- [11] 李雪芹, 徐礼根, 金松恒, 等. 4 种草坪草叶绿素荧光特性的比较 [J]. 园艺学报, 2006, 33(1): 164-167.
- [12] 王婷婷, 臧淑艳, 马原, 等. 生活污水铜和铅对黄瓜种子萌发及其幼苗生长的其影响 [J]. 沈阳化工大学学报, 2015, 29(2): 107-112.
- [13] 王文萍, 黄占斌, 毕涛, 等. 再生水及重金属 Pb/Cd 对种子萌发和成苗的影响 [J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(2): 81-84.
- [14] 郑世英, 王丽燕, 商学芳, 等. 铅胁迫对玉米种子萌发及叶片渗透调节物质含量的影响 [J]. 安徽农业科学, 2006, 34(21): 5471-5472.
- [15] 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: 134-137.
- [16] 杨持. 生态学实验与实习 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 30-35.
- [17] William M, Terry S. 统计学 [M]. 美国: 机械工业出版社, 2009: 43-76.
- [18] 方安平, 叶卫平. Origin 8.0 实用指南 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [19] 马东辉, 赵长星, 王月福, 等. 施氮量和花后土壤含水量对小麦旗叶光合特性和产量的影响 [J]. 生态学报, 2008, 28(10): 4896-4901.
- [20] 周建, 杨立峰, 郝峰鸽. 低温胁迫对广玉兰幼苗光合集叶绿素荧光特性的影响 [J]. 西北植物学报, 2009, 29(1): 136-142.
- [21] 陈辰, 何小定, 秦金舟, 等. 4 种含笑叶片叶绿素荧光参数 Fv/Fm 特性比较 [J]. 安徽农业大学学报, 2013, 40(1): 32-37.
- [22] Hermans C, Smeyers M, Rodriguez R M, Eyletters M, Strasser R J, Delhaye J P. Quality assessment of urban trees: a comparative study of physiological characterization, airborne imaging and on site fluorescence monitoring by the OJIP-test [J]. Journal of Plant Physiology, 2003, 160(1): 81-90.
- [23] 田明爽, 宋美珍, 范术丽, 等. 棉花早熟芽黄突变体叶绿素荧光动力学特性研究 [J]. 棉花学报, 2011, 23(5): 414-421.
- [24] 贾浩, 郝建波, 曹洪波, 等. 遮荫对‘保佳红’桃树叶片快速叶绿素荧光诱导动力学曲线的影响 [J]. 西北植物学报, 2015, 35(9): 1861-1867.
- [25] 邱念伟, 周峰, 顾祝军, 等. 5 种松属树种光合功能及叶绿素快相荧光动力学特征比较 [J]. 应用生态学报, 2012, 23(5): 1181-1187.
- [26] 李鹏民, 高辉远, Reto J, 等. 快速叶绿素荧光诱导动力学分析在光合作用研究中的应用 [J]. 植物生理与分子生物学学报, 2005, 31(6): 559-566.
- [27] Strasser B J. Donor side capacity of photosystem II probed by chlorophyll a fluorescence transients [J]. Photosynthesis Research, 1997, 52(2): 147-155.
- [28] 湛端玉, 欧静, 王丽娟, 等. 干旱胁迫对接种 ERM 真菌桃叶柱菌幼苗叶绿素含量及荧光参数的影响 [J]. 南方农业学报, 2016, 47(7): 1164-1170.
- [29] 段瑞军, 吴朝波, 王蕾, 等. 镉胁迫对海雀稗脯氨酸、可溶性糖和叶绿素含量及氮、磷、钾吸收的影响 [J]. 江苏农业学报. 2016, 32(2): 357-361.
- [30] 张浩, 高友丽, 陈勇, 等. 水稻种衣剂对秧苗生理生化及叶绿素荧光参数的影响 [J]. 西北植物学报, 2015, 35(2): 315-021.
- [31] 张珍明, 任春光, 张玉武, 等. 施肥处理对青钱柳幼苗叶绿素荧光特性的影响 [J]. 北方园艺, 2016, (16): 160-164.
- [32] 陈兰兰, 郭圣茂, 刘辉, 等. 薄荷叶片在春季的荧光特性研究 [J]. 北方园艺, 2015, (2): 22-25.
- [33] 梁士楚, 李凤, 田华丽, 等. 3 种浮水植物叶绿素荧光特性的比较研究 [J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2012(3): 252-256.
- [34] Heerden PDRV, Strasser R J, Krüger GHJ. Reduction of dark chilling stress in N₂-fixing soybean by nitrate as indicated by chlorophyll a fluorescence kinetics [J]. Physiologia Plantarum, 2004, 121(2): 239-249.
- [35] 徐志防, 罗广华. 强光及外源活性氧对莴苣叶绿素荧光的影响 [J]. 植物生理学报, 1998, 3(3): 279-284.