

不同施肥方式对巨柏苗木生长及光合作用的影响

幸福梅*, 柳文杰, 张兴强, 李紫帅

(西藏农牧学院资源与环境学院, 西藏 林芝 860000)

摘要: 以巨柏(*Cupressus gigantea*) 2 年生播种苗为材料, 研究指数施肥(EF)、2 倍指数施肥(DEF)、平均施肥(CF)对巨柏苗生长及光合作用的影响。结果表明: 施肥后巨柏苗苗高、地径、生物量、新生根总根长、表面积、体积均明显高于不施肥对照(CK)。不同施肥方式下巨柏苗的苗高、地径、生物量等均在 EF 时显著高于 CF 和 DEF 时, 其中 EF 时地上、地下鲜质量和地上、地下干质量分别较 CK 时增加了 592.34%, 71.10%, 461.39% 和 168.89%。EF 时新生根长度最大, 为 1 464.78 cm, 较 CK 时增加了 68.20%, CF 和 DEF 时新生根总根长较 CK 时分别增加了 34.45% 和 15.47%。CK、CF 和 DEF 时净光合速率日变化均在 10:00 出现第一个峰值, 14:00 出现最大峰值; EF 时净光合速率日变化峰值出现在 14:00, 且显著高于其他 3 组处理。巨柏苗的日均净光合速率和水分利用效率在 EF 和 DEF 时显著高于 CF 和 CK 时。巨柏苗在不同施肥条件下的光响应曲线差异明显, EF 时苗木的光补偿点最小, 约为 CK 时的 63.37%, 表观量子效率在 EF 时最大, CK 时最小, 可见 EF 可增强巨柏苗对弱光的利用; 但各处理下光饱和点差异不大, 均在 $1\ 400\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 左右时达到饱和。综上, 采用 EF 能有效促进巨柏苗生长、生根及光合作用能力, 各方面表现最佳。

关键词: 巨柏苗; 施肥; 生长; 光合作用

中图分类号: S 566.3

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2022)05-0880-08

巨柏(*Cupressus gigantea*) 又名雅鲁藏布江柏木, 为柏科(Cupressaceae) 柏木属(*Cupressus*) 常绿乔木, 属西藏特有树种^[1]。仅分布于雅江中游朗县至米林、林芝一带, 海拔 3 000~3 400 m, 沿江漫滩和灰石露头阶地阳坡的中下部。巨柏有较古老的地史, 其对研究柏科植物的系统发育和西藏植被的发生发展及其与环境的关系有重要意义。由于自然历史因素和现代人类活动的影响, 巨柏个体数量日益减少, 分布地域逐渐狭窄、孤立, 处于濒危状态, 现为国家一级重点保护的濒危树种^[2-4]。

巨柏在大力采种育苗营造人工林的过程中, 不仅苗木需求量大而且对苗木质量的要求也较高。合理施肥是提高苗木质量、培育优质壮苗的重要手段^[5]。科学施肥不仅可满足苗木不同生长时期所需养分, 提高苗木养分的利用效率和生物量的积累, 进而提升苗木规格, 而且可避免多余肥料所造成的环境污染^[6-11]。本研究以 2 年生巨柏苗为试验材料, 分析不同施肥方式

对巨柏苗地上部分与地下新生根生长以及光合作用的影响, 以期珍稀濒危种质巨柏人工培育过程中科学施肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在西藏农牧学院林学实验苗圃内(29°40'13" N, 94°20'12" E) 完成, 试验地属高原温带半湿润气候, 海拔 2 970 m, 年平均气温 8.7 °C, 年平均降水量 650 mm, 年均日照 2 022.20 h, 无霜期 180 d。

2016 年 3 月下旬将长势良好、生长相对一致的 2 年生巨柏播种苗 100 株(苗高 25.4 cm, 地径 3.81 mm) 栽植于规格为 24 cm×30 cm×24 cm(底径×上口径×高) 的塑料花盆中, 每盆一株。培育基质为沙壤土, 基质 pH 6.23, 有机碳含量 54 g/kg, 全氮 3.67 g/kg, 全磷 1.48 g/kg, 全钾 3.62 g/kg, 每盆装土 13.5 kg。苗

收稿日期: 2021-03-16 录用日期: 2021-09-01

基金项目: 国家自然科学基金(31960304); 西藏农牧学院林学学科创新团队建设项目(藏财预指 2020-001); 西藏农牧学院研究生创新项目(YJS2020-24)

* 通信作者: xzxinfumei@163.com

引文格式: 幸福梅, 柳文杰, 张兴强, 等. 不同施肥方式对巨柏苗木生长及光合作用的影响[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2022, 61(5): 880-887.

Citation: XIN F M, LIU W J, ZHANG X Q, et al. Effects of different fertilization methods on growth and photosynthesis of *Cupressus gigantea* seedlings[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2022, 61(5): 880-887. (in Chinese)



木缓苗至 6 月初开始用不同施肥方式进行处理,供试肥料为桂湖生产的复合肥料(N、P₂O₅和 K₂O 的质量比为 13∶5∶7),总养分质量分数≥25%,7 月底施肥结束后进行常规管理及光合指标测定,9 月 20 日测定生长指标后结束试验。

1.2 试验方法

1.2.1 施肥方法

- 1) 平均施肥(CF)
- 每次施肥量 $N_t = N_T/t$,式中, N_t 为第 t 次施肥时的施肥量, N_T 为总施肥量, t 为施肥次数^[12]。
- 2) 指数施肥(EF)
- 依据公式 $N_t = N_s(e^r - 1) - N_{T,t-1}$ 确定施肥量。式中: N_s 为施肥前巨柏苗的初始 N 含量; $N_{T,t-1}$ 为前 $t-1$ 次累积的施 N 量; r 为相对增加率,其计算公式为 $N_T = N_s(e^r - 1)$,其中, N_T 和 N_s 参考 2015 年测定的苗木初期和生长结束时的 N 含量确定(N_T 为 863 mg/株, N_s 为 12.28 mg/株),计算得 r 值约为 0.53^[7,13]。
- 3) 2 倍指数施肥(DEF)
- 每次施肥量为 EF 的 2 倍。
- 施肥以 N 为标准,用定量的水溶解后施入。
- 基于以上施肥方法及巨柏苗年生长规律,施肥试验时间间隔设为 7 d,总施肥次数为 8 次,设不施肥对照(CK)、CF、EF、DEF 共 4 个处理,各处理的施肥量详见表 1。

表 1 不同施肥处理的施肥量
Tab.1 Amount of fertilizer in different fertilization treatments mg/株

次数	日期	CK	CF	EF	DEF
1	6 月 5 日	0	300	17.34	34.68
2	6 月 12 日	0	300	28.27	56.54
3	6 月 19 日	0	300	65.67	131.34
4	6 月 26 日	0	300	110.47	220.94
5	7 月 3 日	0	300	203.30	406.60
6	7 月 10 日	0	300	345.39	690.78
7	7 月 17 日	0	300	603.44	1 206.88
8	7 月 24 日	0	300	1 026.20	2 052.40
合计		0	2 400	2 400.08	4 800.16

1.2.2 指标测定

- 1) 生长指标
- 2016 年 9 月 20 日从各处理中选择 10 株进行苗

高、地径、生物量及新生根形态的测定。其中生物量和新生根测定是将整个苗木挖出后进行破坏性取样,根系挖出后用流水冲洗干净(小心操作以防根系被水冲走)后测定。取其中 5 株进行生物量测定,测定时将植株分地上、地下两部分分别放入烘箱,在 80 ℃烘干至恒量后称量,根冠比=地下干质量/地上干质量。

新生根测定时每个处理取 5 株,分别采集新生根,清洗干净后应用 Epson perfection V700 photo 根系扫描系统和 WinRhizo 根系图像分析系统对各单株新生根系进行长度、表面积和体积的测定分析。待全部根样扫描完成后,将各单株根样置于 80 ℃烘箱中烘干至恒量,测定各单株根样的生物量。各单株比根长(cm/g)=各单株根样的新生根长(cm)/各单株根样的生物量(g)^[14]。

2) 光合指标

光合测定在 2016 年 8 月 5 日进行,从 4 组施肥处理的各重复中选择 5 株苗的成熟叶片,用 Li-6400XT 便携式光合系统测定仪测定。在日进程 8:00—18:00 期间测定其净光合速率(net photosynthetic rate, P_n)、蒸腾速率(transpiration rate, Tr)、气孔导度(stomatal conductance, G_s)及胞间 CO₂ 浓度(intercellular CO₂ concentration, C_i)。由于巨柏叶片不能充满叶室,在光合测定完成后用 Microtek Phantom 3500 扫描仪扫描各处理叶片,通过 UTHSCSA 图像分析系统测定叶面积,之后重新换算 P_n 、 Tr 、 G_s 和 C_i ,并计算水分利用效率(water use efficiency, WUE), $WUE = P_n/Tr$ 。

光响应测定时设定温度为 20 ℃,CO₂ 含量为 400 μmol/mol,光强设置从高至低依次为 2 000,1 800,1 600,1 400,1 200,1 000,800,600,400,250,180,120,80,50,25,0 μmol/(m² · s)。测定 P_n ,并绘制光响应曲线,得到相应的拟合方程,计算光补偿点(light compensation point, LCP)、光饱和点(light saturation point, LSP)、表观量子效率(apparent quanyum efficiency, AQY)、最大净光合速率(maximum net photosynthetic rate, P_{max})、暗呼吸速率(dark respiration rate, R_d)和光合有效辐射(photosynthetically available radiation, PAR)参数值^[14]。

1.3 数据处理

试验基础数据采用 Excel 2010 软件统计处理,用 DPS 7.05 系统对数据进行方差分析,处理间各指标的显著性比较采用新复极差(Duncan)法,用 Origin 9.0 软件作图,利用蔡时青等^[15]的光合作用计算软件来拟合光合特征参数,并利用模型计算相关指标。

2 结果与分析

2.1 不同施肥方式对巨柏苗生长的影响

2.1.1 苗高和地径

由表 2 可知:不同施肥处理下巨柏苗的苗高表现为 EF>DEF>CF>CK,巨柏苗在 EF 时最高,平均苗高达 37.17 cm,CF、EF 和 DEF 时苗高之间差异不显

表 2 不同施肥方式对巨柏苗苗高和地径的影响
Tab. 2 Effects of different fertilization methods on height and ground diameter of *C. gigantea* seedlings

处理	苗高/cm	地径/mm	高径比
CK	29.61±2.46 ^b	4.09±0.93 ^c	73.3±7.8 ^a
CF	35.02±1.32 ^a	5.32±0.84 ^b	67.3±8.8 ^{ab}
EF	37.17±1.89 ^a	6.32±0.76 ^a	59.2±6.9 ^c
DEF	36.58±1.54 ^a	5.77±0.77 ^{ab}	64.0±7.5 ^{bc}

注:同列数据后的上标不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平有显著性差异,下同。

表 3 不同施肥方式对巨柏苗生物量的影响

Tab. 3 Effects of different fertilization methods on biomass of *C. gigantea* seedlings

处理	地上鲜质量/g	地下鲜质量/g	地上干质量/g	地下干质量/g	根冠比
CK	2.09±0.88 ^d	3.08±0.16 ^c	1.01±0.49 ^d	0.45±0.06 ^d	0.51±0.03 ^a
CF	6.47±0.74 ^c	3.15±0.19 ^c	2.76±0.26 ^c	0.85±0.04 ^c	0.29±0.02 ^b
EF	14.47±0.81 ^a	5.27±0.27 ^a	5.67±0.52 ^a	1.21±0.08 ^a	0.22±0.02 ^c
DEF	10.30±0.96 ^b	4.15±0.29 ^b	4.04±0.72 ^b	1.09±0.08 ^b	0.28±0.02 ^b

2.1.3 新生根生长

由表 4 可知:不同施肥处理下巨柏苗的新生根总长度、表面积及体积均在 EF 时最大.新生根总长度在各施肥处理之间均差异显著($P<0.05$),EF 时新生根总长度最大,为 1 464.78 cm,较 CK 时增加 68.20%,CF 和 DEF 时新生根总长度较 CK 时分别增加 34.45%

著,而 CK 与其余 3 个施肥处理之间均存在显著差异($P<0.05$).苗木地径在不同施肥处理下的变化趋势与苗高基本一致,EF 时地径最大(6.32 mm),与 CK (4.09 mm)和 CF(5.32 mm)之间差异显著($P<0.05$).苗木高径比在 CK 时最大,平均达 73.3,与 EF 和 DEF 之间均差异显著($P<0.05$),EF 时高径比最小,较 CK 时降低了 19.24%.

2.1.2 生物量

由表 3 可知:地上、地下鲜质量和地上、地下干质量在不同施肥处理下表现出基本一致的变化趋势,均为 EF 时最大,DEF 时次之,CF 时再次之,CK 时最小;且除 CF 与 CK 时地下鲜质量之间差异不显著外,上述 4 个生物量指标在 4 个处理之间均差异显著($P<0.05$).地上、地下鲜质量和地上、地下干质量在 EF 时分别较 CK 时增加了 592.34%,71.10%,461.39%和 168.89%.苗木根冠比在 CK 时最大,EF 时最小,且与其他 2 个处理之间差异显著($P<0.05$),但 CF 和 DEF 之间差异不显著,EF 时较 CK 时降低了 56.86%.

和 15.47%.新生根表面积在 EF 时达 159.44 cm²,显著大于其他处理($P<0.05$),CF 和 DEF 之间差异不显著,CK 时新生根表面积最小.新生根体积在 EF 时最大,为 1.46 cm³,与 CF 和 CK 之间差异显著($P<0.05$),CK 时新生根体积最小.新生根生物量在 DEF 时显著大于其他处理($P<0.05$),EF 时新生根生物量

表 4 不同施肥方式对巨柏苗新生根生长的影响

Tab. 4 Effects of different fertilization methods on new root growth of *C. gigantea* seedlings

处理	总长度/cm	表面积/cm ²	体积/cm ³	生物量/g	比根长/(m·g ⁻¹)
CK	870.85±38.3 ^d	106.85±7.8 ^c	1.06±0.16 ^c	0.41±0.06 ^c	2.12±0.18 ^b
CF	1 170.85±90.6 ^b	134.01±13.1 ^b	1.23±0.29 ^b	0.48±0.09 ^c	2.45±0.11 ^a
EF	1 464.78±56.2 ^a	159.44±12.8 ^a	1.46±0.19 ^a	0.78±0.10 ^b	1.87±0.12 ^c
DEF	1 005.60±83.6 ^c	134.38±11.1 ^b	1.39±0.16 ^{ab}	0.88±0.10 ^a	1.15±0.09 ^d

为 DEF 时的 88.64%,CF 和 CK 时新生根生物量相对较小且二者之间差异不显著。新生根比根长在各处理间均存在显著差异($P<0.05$),CF 时最大,CK 时次之,DEF 时最小。

2.2 不同施肥处理下巨柏苗的光合特征

2.2.1 不同光合指标的日进程

1) P_n

由图 1(a)可知:CK、CF 和 DEF 时 P_n 日变化均呈现“双峰型”,10:00 出现第一个峰值,14:00 出现最大峰值,有明显的“光合午休”现象;DEF 时 P_n 日变化的第一个峰值为 $10.67\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,高于其他处理,14:00 达最大峰值且明显高于 CK 和 CF。EF 时 P_n 日变化呈“单峰型”,其峰值出现在 14:00,达 $17.24\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,且明显高于其他处理。

从表 5 可以看出:巨柏苗日均 P_n 在 EF 时最大,达 $10.27\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;DEF 和 CF 时日均 P_n 较 EF 时分别下降近 11.39%和 39.82%;CK 时日均 P_n 最小,仅为 EF 时的 41.48%。

2) G_s

由图 1(b)可知:各施肥处理下巨柏苗 G_s 均呈现“双峰型”,10:00 出现最大峰值,14:00 出现第二个峰值;EF 和 DEF 时 G_s 明显大于另 2 个处理,CK 时 G_s 在全天各时刻均最小。

从表 5 可以看出:巨柏苗日均 G_s 在 EF 和 DEF 时最大,为 $0.10\text{ mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,CF 时降为 $0.07\text{ mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,CK 时最小,仅为 EF 时的 50%。

3) C_i

由图 1(c)可知:不同施肥处理下巨柏苗 C_i 日变化表现为 8:00 时最高,随着时间后延而逐渐降低;CK、CF 和 DEF 时均在 14:00 达最低值,之后又有所增加;EF 在 16:00 达最低值后又逐渐增大。

从表 5 可以看出:巨柏苗日均 C_i 大小依次为 $\text{EF}>\text{DEF}>\text{CF}>\text{CK}$,CK 时日均 C_i 仅为 EF 时的 70.51%。

4) Tr

由图 1(d)可知:不同施肥处理下巨柏苗 Tr 日变

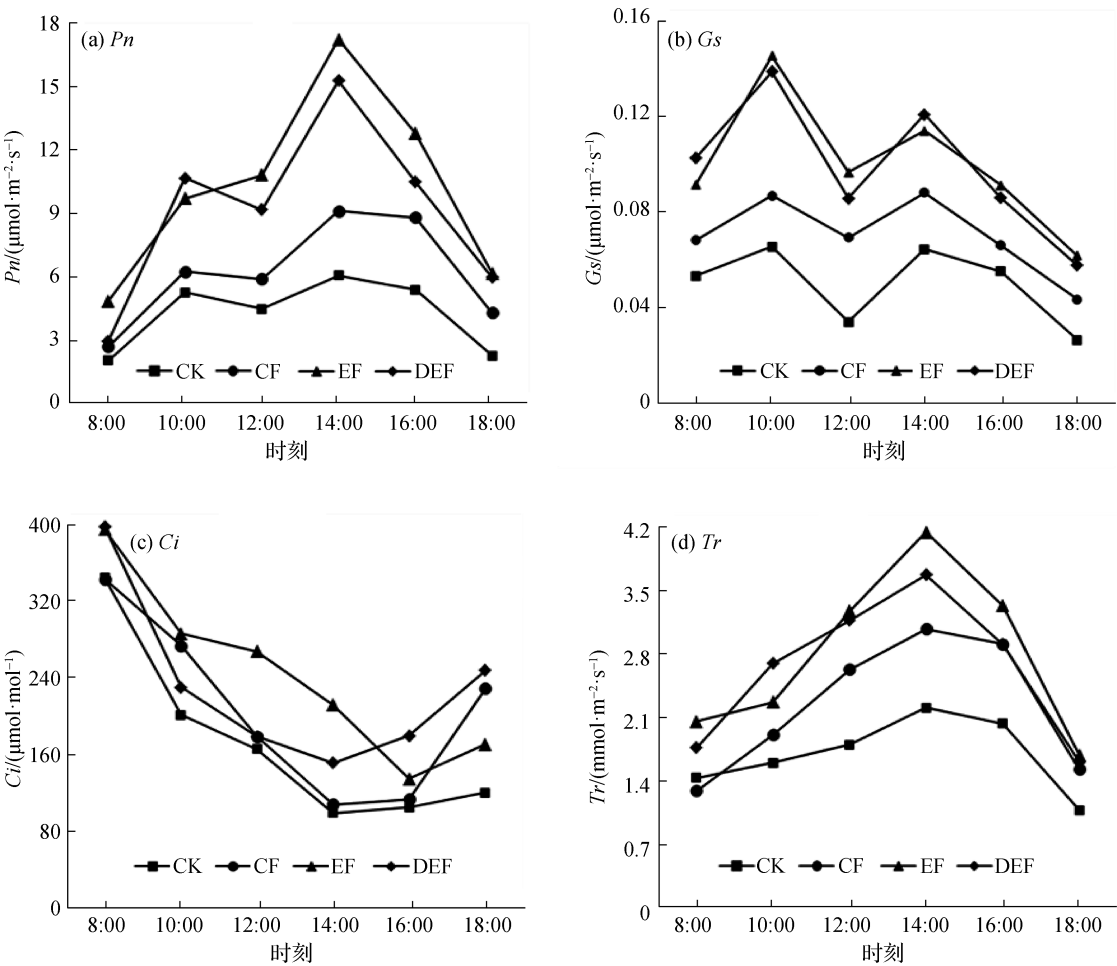


图 1 不同施肥处理下巨柏苗光合主要特征值的日进程

Fig. 1 Daily process of main photosynthetic characteristic values of *C. gigantea* seedlings at different fertilization treatments

表 5 不同施肥处理下巨柏苗主要光合特征值的日均值

Tab. 5 Daily average values of main photosynthetic characteristic values of *C. gigantea* seedlings at different fertilization treatments

处理	$P_n/$ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	$G_s/$ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	$C_i/$ ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)	$Tr/$ ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	$WUE/$ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
CK	4.26 ± 0.72^d	0.05 ± 0.01^c	171.90 ± 8.16^c	1.68 ± 0.06^c	2.46 ± 0.09^c
CF	6.18 ± 0.96^c	0.07 ± 0.01^b	207.16 ± 12.29^b	2.21 ± 0.09^b	2.75 ± 0.12^b
EF	10.27 ± 0.62^a	0.10 ± 0.02^a	243.78 ± 10.19^a	2.78 ± 0.10^a	3.62 ± 0.11^a
DEF	9.10 ± 0.86^b	0.10 ± 0.01^a	230.39 ± 13.16^{ab}	2.62 ± 0.10^{ab}	3.36 ± 0.14^{ab}

化均呈现“单峰型”，峰值出现在 14:00；各处理从 8:00 开始增加，且随着时间后延逐渐增大，在 14:00 达最大值后逐渐降低，直至 18:00 达最小值；不同施肥处理下 Tr 峰值大小依次为 $EF > DEF > CF > CK$ ，其值分别为 4.13, 3.66, 3.06 和 2.20 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

从表 5 可以看出：巨柏苗日均 Tr 在 EF 时最大，但其与 DEF 间无显著差异；CK 时日均 Tr 最小，为 EF 时的 60.43%。

5) WUE

图 2 所示为不同施肥处理下巨柏苗 WUE 的日变化，其日进程在不同施肥处理下基本呈“双峰型”：各处理在 10:00 出现第一个峰值，EF、DEF、CF 和 CK 时分别为 4.30, 3.98, 3.30 和 3.30 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ，12:00 达谷值；除 CF 在 16:00 和 14:00 的 WUE 相差不大外，其余 3 个处理均在 14:00 出现第二个峰值，此时 EF 和 DEF 的峰值几乎相等，而 CK 和 CF 的峰值较 10:00 时略有下降。

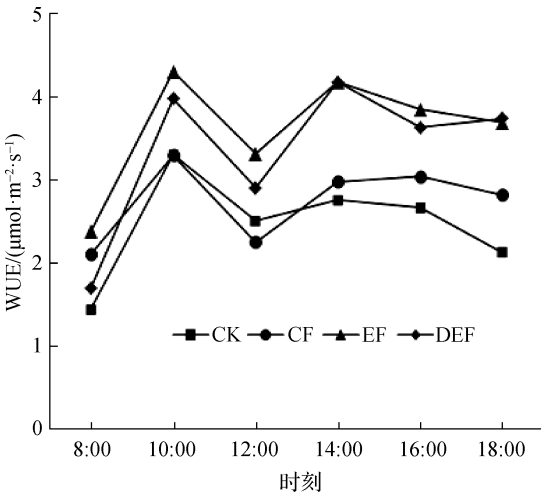


图 2 不同施肥处理下巨柏苗 WUE 的日进程
Fig. 2 Daily process of WUE of *C. gigantea* seedlings at different fertilization treatments

从表 5 可以看出：巨柏苗的日均 WUE 在 EF 时最大，DEF 时略有降低，但与 EF 时差异不显著；日均

WUE 在 CK 时最小，且显著低于 EF 和 DEF 时 ($P < 0.05$)。

2.2.2 P_n -PAR 光响应曲线

如图 3 所示，各施肥处理下巨柏苗的光响应曲线变化趋势相似，但光响应值存在明显差异。总体来看，各处理在 PAR 为 0~800 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时， P_n 随着 PAR 的增长迅速增加，EF 时增幅最大，DEF 时次之，二者明显高于 CF 和 CK 时，CK 时增幅最小。在 PAR 为 800~1 200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时， P_n 增加缓慢，增幅减小。巨柏苗叶片在 EF 时受 PAR 变化的影响程度最大，而 CF 与 CK 对 PAR 的影响程度较小。当 PAR 为 1 200~2 000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时，巨柏苗 P_n 值增加缓慢并基本趋于稳定，表明已达到 LSP。

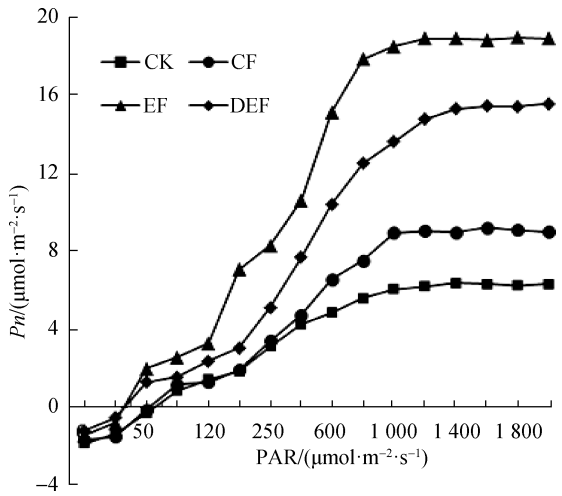


图 3 不同施肥处理下巨柏苗的光响应曲线
Fig. 3 Light response curve of *C. gigantea* seedlings at different fertilization treatments

通过拟合指数方程计算得出巨柏苗的 LCP 和 LSP。由表 6 可知：巨柏苗在不同施肥处理下 LCP 值在 DEF 和 EF 时相对较小，CK 时最大，约为 EF 和 DEF 时的 1.5 倍。LSP 值在各处理间差异不大，DEF 时略大于其他处理。AQY 在 EF 时最大，DEF 时次之，CK 时最小。 P_{max} 在 EF 时达最大值 18.90 $\mu\text{mol}/$

($\text{m}^2 \cdot \text{s}$), CK 时 $P_{\max}$ 为 EF 时的 32.80%, R_d 值为 R_d 值表现为 $\text{CK} > \text{CF} > \text{EF} > \text{DEF}$. 除 CK 外其余各处理相关系数 R^2 达 0.99 以上.

表 6 巨柏苗 P_n -PAR 光响应曲线的主要参数
Tab. 6 Main parameters of the P_n -PAR curve of *C. gigantea* seedlings

处理	LCP/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	LSP/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	AQY	$P_{\max}$ / ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	R_d / ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	R^2
CK	62.28	1 363.83	0.023	6.20	1.83	0.984
CF	57.69	1 345.78	0.024	9.19	1.67	0.996
EF	39.47	1 387.33	0.048	18.90	1.41	0.998
DEF	40.32	1 412.16	0.042	15.27	1.12	0.991

3 讨论与结论

3.1 合理施肥时苗木生长的促进作用

合理施肥可促进苗木生长,加速新陈代谢,提高苗木生物量及品质,增加苗木合格率^[16-17]. 施肥对苗木来说最直观的反映是苗高、地径等形态指标的变化,本研究施肥条件下巨柏苗的苗高、地径均明显高于对照,张金浩等^[18]、李国雷等^[19]、王冉等^[7]、王力朋等^[20]分别对南洋杉(*Araucaria cunninghamii*)、栓皮栎(*Quercus variabilis*)、沉香(*Aquilaria malaccensis* 和 *A. sinensis*)和楸树(*Catalpa bungei*)等的研究与本研究结果一致. 本研究中不同施肥方式下巨柏苗的苗高、地径、生物量等均在 EF 时显著高于 CF 和 DEF,刘欢等^[10]对杉木苗的研究同样表明 EF 较 CF 对生长的促进效果更强,可见 EF 有利于苗木生长,促进苗木生物量的累积及苗木对养分的吸收利用效率^[21]. 这可能是由于 EF 与其他施肥方式相比能较大程度地满足巨柏苗在不同生长时期对养分的需求,且 EF 时生长较稳定,进而有利于苗木的生长^[5,22]. 本研究中地上、地下生物量均在 EF 时最大,CK 时最小,表明施肥会在促进苗木长高的同时加大巨柏苗根系的生物量,从而提高根系对肥料的吸收能力^[23];但根冠比为 $\text{CK} > \text{CF} > \text{DEF} > \text{EF}$,这可能是由于施肥后促进苗木根系的生长,提高了苗木根系对矿质元素及水分的吸收和运输能力,进而促进了其地上部分的生长^[24]. 土壤养分不仅促进根系生物量的增加,根系形态对施肥也同样敏感. 众多研究表明,施 N 肥不仅能够促进根系总根长的增加,而且对根表面积、根体积的增加效果显著^[7,25]. 本研究中巨柏苗新生根的总根长、表面积、体积在各施肥处理时均大于 CK 时,且 EF 时最大,说明

施肥增加了养分供应,促进了光合效率,根系中光合作用产物积累增多,促进了根系生长^[26].

3.2 合理施肥对苗木光合性能的促进作用

光合作用是植物生长、发育及代谢的物质基础,植株的自身适应性与环境因子均会明显影响植物的光合特性^[27]. 研究表明,光合效率与施肥有密切关系,合理施肥能显著提高叶片的光合性能,增加植株的生长量和干物质累积,从而提升植株品质^[28]. 本研究中,相对于 CK,不同施肥处理下巨柏苗的光合性能均有显著提高,苗木 P_n 在 EF 和 DEF 时是 CK 的 2 倍以上,说明 EF 对巨柏苗的光合作用具有明显的促进作用,这与王益明等^[29]对山核桃(*Carya cathayensis*)的研究结果一致. 巨柏苗在 EF 和 DEF 时的 WUE 明显高于 CK 时,可见在苗木生长期合理充足的养分供应能够极大地促进巨柏苗的生长,并有利于加强苗木的光合作用和 WUE. 巨柏苗在不同施肥处理下的光响应曲线差异明显,EF 时苗木的 LCP 值较小,CK 时最大. LCP 值能反映植物叶片利用弱光的能力, LCP 值越低表示植物叶片利用弱光的能力就越强^[30],可见在 EF 和 DEF 时巨柏苗叶片对弱光的利用能力提高. LSP 值能反映植物叶片利用强光的能力,本研究中各施肥处理下巨柏苗的 LSP 值差异不大,说明施肥不能提高巨柏苗利用强光的能力,在一定光强下苗木光合作用达到饱和. AQY 值是由光合作用对光响应曲线在 $\text{PAR}=0$ 时的斜率计算得出,其值越大表明植物在弱光下的光能利用效率越强^[15],本研究中 EF 和 DEF 时 AQY 值明显高于 CF 和 CK 时,可见 EF 和 DEF 可增强巨柏苗对弱光的利用.

本研究结果显示:1) 施肥有利于提高巨柏苗生长、养分积累及新生根生长,其中 EF 的促进作用最显著;2) EF 有利于提高巨柏苗的光合性能,各施肥方式

下巨柏苗对强光的利用能力差异不大,但 EF 和 DEF 可明显增强巨柏苗对弱光的利用. 综上可见 EF 能有效提高巨柏苗的光合作用能力,有利于光合作用产物的形成和累积,促进苗木生长. 但对于精准化培育巨柏苗,今后还需长期持续性开展针对 N、P、K 等养分元素的合理配施及其与水的耦合试验,为巨柏田间规模化优质壮苗的培育提供依据.

参考文献:

- [1] 吴征镒. 西藏植物志: 第 1 卷[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 386.
- [2] 王景升, 郑维列, 潘刚. 巨柏种子活力与濒危的关系[J]. 林业科学, 2005, 41(4): 37-41.
- [3] 中国科学院植物研究所, 中国科学院长春地理研究所. 西藏植被[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 58, 143.
- [4] 汪松, 解炎. 中国物种红色名录: 第 1 卷[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 305.
- [5] 王爱斌, 张流洋, 宋慧芳, 等. 磷肥施用方式对蓝莓苗木生长及养分吸收的影响[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(2): 114-123.
- [6] WEI H X, XU C Y, MA L Y, et al. Nutrient uptake of *Larix olgensis* seedlings in response to different exponential regimes[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(3): 685-690.
- [7] 王冉, 李吉跃, 张方秋, 等. 不同施肥方法对马来沉香和土沉香苗期根系生长的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(1): 98-106.
- [8] DUMROESE R K, PAGE-DUMROESE D S, SALIFU K F, et al. Exponential fertilization leaching fractions, and early out planting performance of *Pinus monticola* seedlings: nutrient uptake efficiency[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2005, 35(12): 2961-2968.
- [9] MENDOZA R, BAILLERES M, GARCÍA I, et al. Phosphorus fertilization of a grass-legume mixture: effect on plant growth, nutrients acquisition and symbiotic associations with soil microorganisms[J]. Journal of Plant Nutrition, 2016, 39(5): 691-701.
- [10] 刘欢, 王超琦, 吴家森, 等. 氮素指数施肥对杉木无性系苗生长及养分含量的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3123-3128.
- [11] 杨阳, 施皓然, 及利, 等. 指数施肥对紫椴实生苗生长和根系形态的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(2): 91-97.
- [12] 李素艳, 孙向阳, 刘凯英. 指数施肥技术在草坪培育中的应用[J]. 北京林业大学学报, 2003, 25(4): 44-48.
- [13] DUMROESE R K, PAGE-DUMROESE D S, SALIFU K F, et al. Exponential fertilization of *Pinus monticola* seedlings: nutrient uptake efficiency, leaching fractions, and early outplanting performance[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2005, 35(12): 2961-2967.
- [14] 幸福梅, 王玉婷, 李生茂, 等. 不同温度对巨柏幼苗光合及生根的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2019, 45(1): 102-108.
- [15] 蔡时青, 许大全. 大豆叶片 CO₂ 补偿点和光呼吸的关系[J]. 植物生理学报, 2000, 26(6): 545-550.
- [16] 周维. 氮磷钾配比施肥对格木幼苗生长及光合特性影响的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2016: 5-7.
- [17] HAWKINS B J, BURGESS D, MITCHELL A K. Growth and nutrient dynamics of western hemlock with conventional or exponential greenhouse fertilization and planting in different fertility conditions [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2005, 35(4): 1002-1016.
- [18] 张金浩, 周再知, 杨晓清, 等. 氮素营养对肯氏南洋杉幼苗生长、根系活力及氮含量的影响[J]. 林业科学, 2014, 50(2): 31-36.
- [19] 李国雷, 祝燕, 蒋乐, 等. 指数施肥对栓皮栎容器苗生长和氮积累的影响[J]. 东北林业大学学报, 2012, 40(11): 6-9.
- [20] 王力朋, 晏紫伊, 李吉跃, 等. 指数施肥对楸树无性系生物量分配和根系形态的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(23): 7452-7462.
- [21] 徐嘉科, 陈闻, 王晶, 等. 不同施肥方式对红楠生长及营养特性的影响[J]. 生态学杂志, 2015, 34(5): 1241-1245.
- [22] SALIFU K F, TIMMER V R. Nutrient retranslocation response of *Picea mariana* seedlings to nitrogen supply [J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(3): 905-913.
- [23] 张程, 郝龙飞, 刘婷岩, 等. 指数施肥对白桦裸根苗养分动态的影响[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(10): 24-29.
- [24] HODGE A. The plastic plant: root responses to heterogeneous supplies of nutrients [J]. New Phytologist, 2004, 162(1): 9-24.
- [25] FARLEY R A, FITTER A H. The responses of seven co-occurring woodland herbaceous perennials to localized nutrient-rich patches [J]. Journal of Ecology, 1999, 87(5): 849-859.
- [26] 谭飞, 胡红玲, 胡庭兴, 等. 不同施肥水平对桢楠多胚苗生长及光合生理的影响[J]. 西北植物学报, 2016, 36(6): 1172-1181.
- [27] 郭喜军, 谢军红, 李玲玲, 等. 氮肥用量及有机无机肥配比对陇中旱农区玉米光合特性及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(5): 806-816.
- [28] 庞永磊, 王凤新, 黄泽军, 等. 适宜施氮钾水平提高滴灌秋茶的产量及品质[J]. 农业工程学报, 2019, 35(24): 98-103.

[29] 王益明,万福绪,胡菲,等. 指数施肥对美国山核桃苗期光合生理特性的影响[J]. 水土保持研究,2018,25(5): 187-191,198.

[30] 王欢利,曹福亮,刘新亮. 高温胁迫下不同叶色银杏嫁接苗光响应曲线的拟合[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2015,39(2):14-20.

Effects of different fertilization methods on growth and photosynthesis of *Cupressus gigantea* seedlings

XIN Fumei*, LIU Wenjie, ZHANG Xingqiang, LI Zishuai

(Resources & Environment College, Tibet Agricultural and Animal Husbandry University, Linzhi, 860000, China)

Abstract: The effects of exponential fertilization (EF), double exponential fertilization (DEF) and mean fertilization (CF), respectively on the growth and photosynthesis of two-year-old *Cupressus gigantea* seedlings were studied. The results suggested that after fertilization, the seedling height, ground diameter, biomass, total root length, surface area and volume of new roots were significantly higher than those of the control ones without fertilization (CK). The seedling height, ground diameter and biomass of *C. gigantea* with EF were significantly higher than those with CF and DEF. Compared with CK, the aboveground and underground fress mass, the aboveground and underground dry mass with EF were increased by 592.34%, 71.10%, 461.39% and 168.89%, respectively. The maximum total length of new roots was 1 464.78 cm with EF, which was longer than that with CK by 68.20%, and the total length of new roots increased by 34.45% and 15.47%, respectively with CF and DEF compared with CK. The first peak value of net photosynthetic rates appeared at 10:00 for CK, CF and DEF, and the maximum value appeared at 14:00. The peak value of net photosynthetic rates for those with EF appeared at 14:00, which was significantly higher than those with the other three treatments. The average daily net photosynthetic rate and water use efficiency of *C. gigantea* seedlings with EF and DEF were significantly higher than those with CF and CK. The light response curves at different fertilization treatments showed obvious differences. The light compensation point of seedlings with EF was the smallest, which was about 63.37% of that with CK. The apparent quantum efficiency was the largest with EF and the smallest with CK. Thus, EF can enhance the utilization of weak light. However, there was no significant difference in the light saturation point among the different treatments, about 1 400 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. As a conclusion, EF can effectively promote the growth, rooting and photosynthetic capacity of *C. gigantea* seedlings, with best performance.

Keywords: *Cupressus gigantea* seedling; fertilization; growth; photosynthesis

(责任编辑:徐婷婷)