

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2020.01.016

不同光强对 6 个欧美杨无性系苗期生长及光合特性的影响

王明援, 刘 宁, 李 波, 刘成功, 丁昌俊, 黄秦军*

(林木遗传育种国家重点实验室, 国家林业和草原局林木培育重点实验室, 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091)

摘要: [目的] 研究 6 个欧美杨无性系生长及光合特性对不同光强的响应差异, 为欧美杨苗期快速选育高光效优良品种提供一定的理论依据。[方法] 在大田用遮阴网设置 CK (100% 自然光强)、L1 (55% 自然光强) 和 L2 (20% 自然光强), 测定欧美杨的苗高增长量、叶片形态、光合速率、叶绿素荧光特性、叶绿素含量及矿质元素含量。[结果] 除 11-26-9 外, 无性系的苗高总生长量随着光强的降低呈下降趋势; 随着光强的降低, 不同无性系的叶片形态变化趋势不一致, 3 个光强下无性系间的单叶面积、叶形指数和比叶面积存在差异; 无性系在 L2 处理下的净光合速率 (P_n) 最低, 胞间 CO_2 浓度 (C_i) 最高; 3 个处理下, 11-26-8 的气孔导度均最大; 在 L1 与 L2 下, 11-26-9 的 F_v/F_0 值均最大; 无性系的叶绿素 b 含量与叶绿素总含量呈现相同的变化趋势; 11-26-4、11-26-8 和 11-36-26 的钾、钙、镁元素含量随着光强的降低而增加。[结论] 不同无性系对光强变化的适应策略不同, 部分无性系的高生长和净光合速率随着光强的降低而减小, 降低光强没有破坏无性系的 PS II 结构。多数无性系的总叶绿素含量、矿质元素含量随着光强的降低而升高。11-36-26 无性系的生长势及抗弱光能力较弱。

关键词: 欧美杨; 光强; 光合生理; 元素含量

中图分类号: S718.43

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2020)01-0123-08

光是植物生长最重要的生态因子之一, 植物适应光环境变化的能力决定了它的分布模式和物种丰度^[1-3]。光照强度影响植物的光合作用, 进而影响植物的形态和生理生化特征^[4-5]。有研究表明: 适度遮阴有助于植物苗高和地径的生长, 随着光照强度的降低, 植物的净光合速率、气孔导度、水分利用效率和蒸腾速率逐渐减小^[6-9]。

杨树 (*Populus L.*) 因其生长快, 生态适应范围广, 成为我国人工林的主要造林树种之一^[10]。随着经济的发展, 我国对短周期工业用材林的需求越来越高, 通过杂交得到的优良杨树无性系, 可以有效提高人工林木材产量, 缓解木材供应短缺问题^[11]。欧美杨在我国东北、华北和长江流域等地区广泛种植, 是速生丰产用材林建设的重要树种之一, 具有

很高的经济、社会和生态效益。缩短选育优良杨树品种的时间是杨树育种工作者的目标。通过对 6 个不同地点的试验林数据筛选, 以得到的 6 个生长差异明显的欧美杨杂交无性系为试验材料进行遮阴试验, 分析欧美杨杂交无性系对不同光强的响应差异, 以期为欧美杨苗期快速选育高光效优良品种提供一定的理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验材料为基因型不同的 6 个杂交欧美杨无性系, 编号分别为: 11-21-8、11-26-4、11-26-8、11-26-9、11-32-1、11-36-26, 亲本对照表见表 1。2018 年 3 月中旬用 1 年生植株硬枝扦插, 在温室

收稿日期: 2019-04-10 修回日期: 2019-10-07

基金项目: “十二五”农村领域国家科技计划课题“阔叶树速生丰产林定向培育技术研究 (2015BAD09B02)

* 通讯作者: 黄秦军, 博士, 研究员. E-mail: huangqj@caf.ac.cn

表1 欧美杨无性系亲本对照表

Table 1 Comparison table of *Populus × euramericana* clones

无性系Clones	亲本Parents
11-21-8	DH(丹红杨 <i>P. deltoides</i> CL. 'Danhong')× N50-8(欧洲黑杨 <i>P. nigra</i>)
11-26-4	DH(丹红杨 <i>P. deltoides</i> CL. 'Danhong')× N146-4(欧洲黑杨 <i>P. nigra</i>)
11-26-8	DH(丹红杨 <i>P. deltoides</i> CL. 'Danhong')× N146-8(欧洲黑杨 <i>P. nigra</i>)
11-26-9	DH(丹红杨 <i>P. deltoides</i> CL. 'Danhong')× N146-9(欧洲黑杨 <i>P. nigra</i>)
11-32-1	ZS8(中石8号 Zhongshi 8)× N23-1(欧洲黑杨 <i>P. nigra</i>)
11-36-26	ZS8(中石8号 Zhongshi 8)× N31-26(欧洲黑杨 <i>P. nigra</i>)

培养。2018年5月下旬将生长良好且苗高一致的植株移植至中国林业科学研究院林业研究所通州试验基地。

1.2 遮阴处理

在移植苗充分缓苗后,于2018年7月中旬进行遮阴处理。用不同密度的遮阴网搭建高为2 m的遮阴棚。8:00—17:00每隔1.5 h使用光照计在3个处理下随机多点测量距离地面1.5 m处的光照强度,连续3 d测量后进行光强计算得出:CK(全光照,100%自然光强)、L1(3针遮阴网,55%自然光强)和L2(6针遮阴网,20%自然光强)。每处理各无性系幼苗30株,3次重复,株行距为50 cm×60 cm。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 形态指标测定 处理开始时测量每株无性系苗高作为起始值,每隔15 d测定1次苗高,计算幼苗高增长量(ΔH)。在遮阴处理30 d时,每个处理每个无性系摘取3株平均株的第5~7片功能叶,使用Yaxin-1241叶面积仪,测量叶片叶面积、叶长和叶宽,烘干称质量,计算叶片叶形指数及比叶面积。

叶形指数=叶长/叶宽

比叶面积=叶面积/叶干质量

1.3.2 光合相关指标测定 遮光处理40 d时,在晴天上午9:00—11:00使用LI-6400便携式光合测定仪(Li-COR公司生产,使用红蓝光源,设定光量子密度为 $1\ 200\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, CO_2 浓度为 $400\ \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)。测定平均株的第5~7片功能叶的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和蒸腾速率(Tr)。于夜间22:00—23:00使用MINI-PAM-II(德国WALZ公司生产)测定平均株叶片叶绿素荧光参数 F_v/F_0 和 F_v/F_m 。

1.3.3 叶片叶绿素含量及钾、钙、镁元素含量测定 遮光处理45 d时,取平均株的第5~7片功能

叶,称取0.10 g新鲜叶片,用95%乙醇提取过夜,在665.0、649.0 nm下测定吸光率并换算叶绿素a、叶绿素b含量^[12]。将叶片烘干研磨,用原子吸收光谱法测量叶片中钾、钙、镁元素含量。

1.4 数据处理

利用SPSS 21.0软件进行多重比较,用Duncan新复极差法进行显著性分析;使用OriginPro 8.5绘图。

2 结果与分析

2.1 不同光强对无性系幼苗形态指标的影响

2.1.1 不同光强对苗高增长量的影响 由图1可知:在L1和L2处理下,无性系苗高增长量最大与最小的无性系分别为11-21-8、11-36-26。L1、L2处理下的苗高增长量与CK相比,11-36-26的苗高减少量最大,11-26-9的苗高减少量最小。除11-26-9无性系在L1处理下总苗高增长量大于CK外,其他无性系总苗高增长量随光强的降低呈下降趋势。

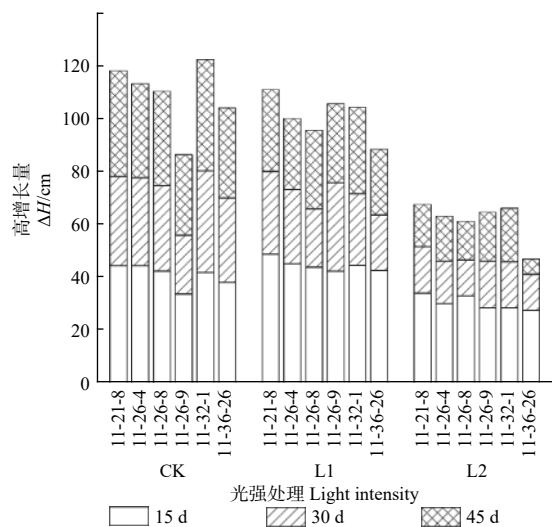


图1 无性系苗高增长量

Fig. 1 High growth of clones

2.1.2 不同光强对叶片形态的影响 表 2 表明: 无性系的单叶面积在 3 个光强处理间均存在差异, 不同无性系叶片形态对光强变化响应不一; 11-26-4、11-36-26 无性系的单叶面积随光强的降低而减

小, 11-21-8、11-26-9、11-32-1 的叶面积在 L1 处理下最大。同一处理不同无性系的叶面积间对比, 在 CK 和 L1 处理下, 11-26-4 的叶面积最大; 在 L2 处理下, 11-26-8 的叶面积最大。

表 2 不同光强对欧美杨无性系叶片形态的影响

Table 2 Effects of different light intensity on leaf morphology of *Populus ×euramericana* clones

指标Index	无性系Clones	CK	L1	L2	P值P value
单叶面积 Leaf area/(mm ²)	11-21-8	11 847.46±805.86bcAB	12 620.14±879.34aB	10 431.59±1 518.99aA	0.001
	11-26-4	17 602.53±1 642.15 dB	16 003.44±4 425.53bB	11 051.69±1 508.91aA	0.000
	11-26-8	16 696.88±1 203.92 dB	12 701.98±1 909.21aA	13 796.94±2 825.83bA	0.001
	11-26-9	8 634.07±974.04aA	11 690.68±1 221.13aB	9 472.27±1 540.65aA	0.000
	11-32-1	10 871.51±1 260.91bA	10 993.80±1 559.52aA	9 222.67±1 461.17aA	0.026
	11-36-26	12 711.49±1 063.16cA	12 463.87±2 115.70aA	10 828.74±1 025.15aA	0.026
	P值P value	0.000	0.001	0.000	—
叶形指数 Leaf shape index	11-21-8	1.11±0.03bcA	1.13±0.06bA	1.16±0.05cA	0.055
	11-26-4	1.06±0.05bA	1.07±0.12abA	1.05±0.05abA	0.931
	11-26-8	1.07±0.04bcA	1.14±0.07bA	1.11±0.07bcA	0.098
	11-26-9	1.05±0.06bA	1.10±0.06bA	1.09±0.06bcA	0.171
	11-32-1	0.98±0.07aA	0.96±0.12aA	0.99±0.09aA	0.854
	11-36-26	1.13±0.04cA	1.10±0.09bA	1.08±0.06bcA	0.272
	P值P value	0.000	0.002	0.000	—
比叶面积 Specific leaf area/(cm ² ·g ⁻¹)	11-21-8	60.47±2.08aA	79.76±4.10abB	95.54±3.68aC	0.000
	11-26-4	58.18±2.64aA	74.34±1.76aB	93.51±1.51aC	0.000
	11-26-8	68.34±3.27abA	76.94±4.62aA	105.59±4.63bB	0.000
	11-26-9	71.85±5.12bA	88.34±0.61bB	107.90±3.34bC	0.000
	11-32-1	67.64±6.52abA	87.93±5.59bB	96.30±1.45aB	0.001
	11-36-26	58.93±3.04aA	75.81±4.82aB	100.48±3.28abC	0.000
	P值P value	0.005	0.003	0.001	—

注: 数据为均值±标准差; 小写字母表示同一光强处理下无性系间的显著差异, 大写字母表示同一无性系在不同光强处理间的显著差异, 显著性水平为 0.01, 下同。

Notes: Data structure: mean ± standard deviation. The lowercase letter represents the significant difference between clones treated with the same light intensity, and the capital letter represents the significant difference between clones treated with different light intensity, the significance level was 0.01, the same below.

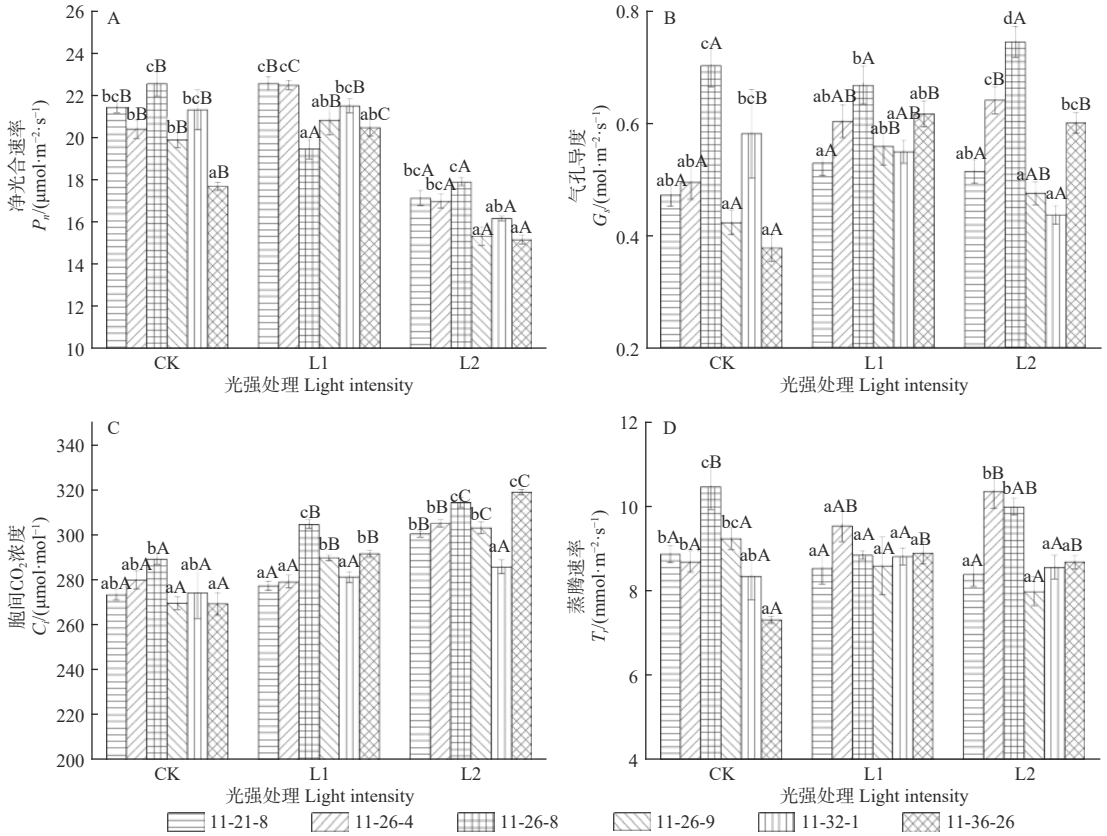
3 个光强下, 各无性系间叶片叶形指数及比叶面积均存在差异; 11-32-1 的叶形指数最小, 11-26-4 的比叶面积最小, 11-26-9 的叶面积最大。光照强度的变化对 11-26-4、11-32-1 的叶形指数影响最小。无性系的比叶面积在不同光强处理间大部分差异显著, 随着光照强度的减弱, 无性系的比叶面积呈增加趋势, 11-36-26 无性系的比叶面积变化幅度最大, L2 比 CK 增加了 70.51%。

2.2 不同光强对欧美杨光合特性的影响

2.2.1 不同光强对欧美杨光合参数的影响 图 2-A

表明: 不同无性系的净光合速率在不同光强处理间具有显著差异, 且同一处理不同无性系间也存在差异。11-26-8 的净光合速率在 CK 和 L2 处理为同处理所有无性系中最大, 但在 L1 处理下最小。3 个光强处理间, L2 处理各无性系的净光合速率最小; 11-26-8 无性系的净光合速率在 CK 最大, 其他 5 个无性系的净光合速率在 L1 处理下最大。

图 2-B 表明: 同一光强处理下, 不同无性系间的气孔导度存在差异; 11-26-8 无性系在 3 个光强下的气孔导度值均最大; CK、L1 和 L2 处理, 气



注：小写字母表示同一光强处理下无性系间的显著差异，大写字母表示同一无性系在不同光强处理间的显著差异，显著性水平为0.01，下同。

Notes: The lowercase letter represents the significant difference between clones treated with the same light intensity, and the capital letter represents the significant difference between clones treated with different light intensity, the significance level was 0.01, the same below.

图2 不同光强对6个欧美杨无性系光合参数的影响

Fig. 2 Effect of different light intensity on photosynthetic parameters of 6 *Populus x euramericana* clones

孔导度最小的无性系分别是11-36-26、11-21-8和11-32-1。光强的变化对11-21-8、11-26-8的气孔导度影响不显著；11-21-8、11-26-9、11-36-26的气孔导度值均为L1>L2>CK；11-26-4的气孔导度随光强的降低而增加，但11-32-1正好相反。

图2-C表明：胞间CO₂浓度随着光强的降低，总体呈上升趋势；仅11-32-1对光强变化的响应不显著，其他5个无性系均差异显著。6个无性系的胞间CO₂浓度在同一光强下存在差异，11-36-26在CK下胞间CO₂浓度最小，但L2处理下值最大；11-26-8的胞间CO₂浓度在CK与L1下最大。

图2-D表明：无性系间的蒸腾速率在CK与L2下存在差异，在L1下差异不显著；在L1与L2下，11-26-4的蒸腾速率均最大，与蒸腾速率最小的11-21-8和11-26-9分别相差1.00、2.37 mmol·m⁻²·s⁻¹；随着光强的降低，各无性系的蒸腾速率呈不同的变化趋势，11-21-8、11-26-9的蒸腾速率随着光强的降低呈下降趋势，11-26-4呈上升趋势。

2.2.2 不同光强对欧美杨叶绿素荧光参数的影响

图3表明：3个光强处理下，无性系间的PS II潜在光化学活性(F_v/F_0)与最大光化学效率(F_v/F_m)均存在差异；光强的变化对11-26-4、11-26-8、11-32-1和11-36-26的 F_v/F_0 、 F_v/F_m 产生较大影响。图3-A表明：在CK下，11-26-4的 F_v/F_0 值最大；在L1、L2下，11-26-9的 F_v/F_0 值均最大；11-21-8、11-26-4、11-32-1、11-36-26无性系的 F_v/F_0 值随着光强的降低而下降；11-32-1在各处理间差异显著。图3-B表明：在CK下，11-36-26的 F_v/F_m 值最小；在L1、L2下，11-26-9的 F_v/F_m 最大；除11-26-9外，其他无性系的 F_v/F_m 值随光强降低呈下降趋势。

2.3 不同光强对叶片叶绿素含量的影响

图4表明：所有无性系的叶绿素b含量与叶绿素总含量呈相同的变化趋势；在CK、L1下，11-26-9的叶绿素a和叶绿素b含量均最小，但在L2下叶绿素a含量为最大；在3个处理下，11-36-

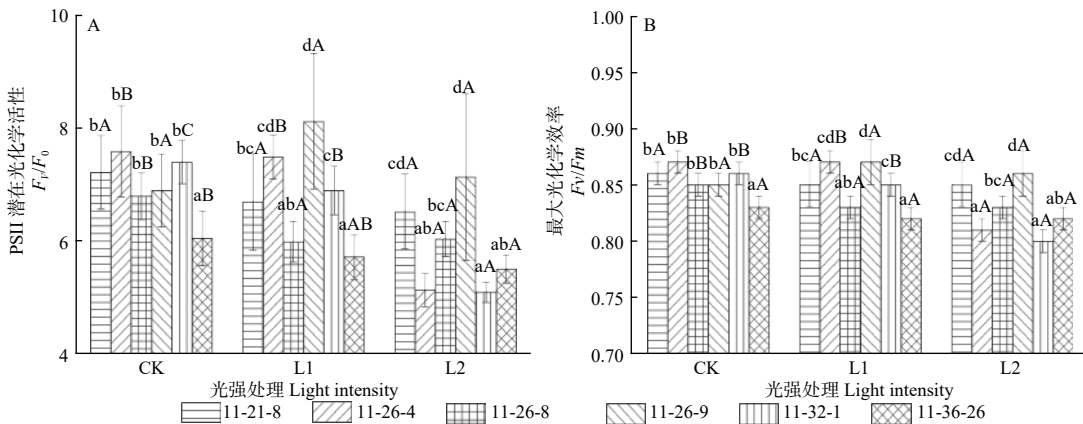
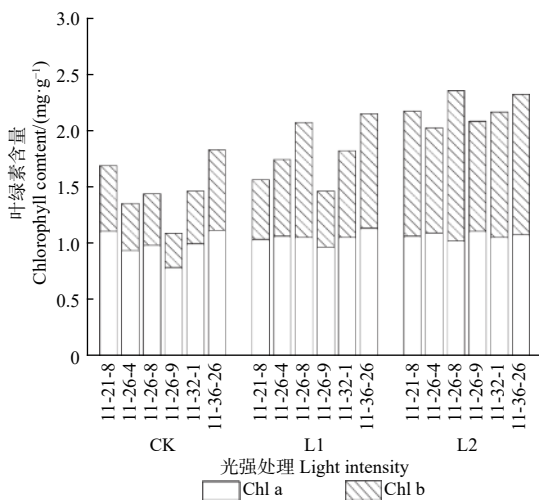
图 3 不同光强对欧美杨无性系 F_v/F_0 、 F_v/F_m 的影响Fig. 3 Effect of different light intensity on F_v/F_0 、 F_v/F_m of 6 *Populus x euramericana* clones

图 4 不同光强处理对叶绿素含量的影响

Fig. 4 Effect of different light intensity on chlorophyll content

26 在各光处理下的叶绿素 a 和叶绿素 b 含量均大于无性系整体的均值; 除 11-21-8 外, 其它 5 个无性系的总叶绿素含量随着光强降低而增加。

2.4 不同光强对叶片钾、钙和镁元素含量的影响

表 3 表明: 光强的变化对无性系的元素含量有较大影响, 仅 11-32-1 的钾元素含量在 3 个处理间差异不显著; 随着光强降低, 无性系叶片钾元素含量逐渐增加, 11-21-8 的钾元素含量增幅最大; 在 CK 与 L1 下, 11-21-8 的钾元素含量最小, 但在 L2 下最大。11-21-8、11-26-4、11-26-8 和 11-36-26 的钙元素含量随着光强降低逐渐升高; 11-26-9、11-32-1 的钙元素含量在 3 个处理间排序为 L2>CK>L1。在 CK、L2 下, 11-32-1 的镁元素含量最大; 11-21-8 的镁元素含量在 3 个处理间的大小为 L1>L2>CK, 11-26-4、11-26-8、11-26-9 与

11-36-26 的镁元素含量随着光强的降低而增加。

3 讨论

光强作为重要的环境生态因子之一, 与植物的形态建成和生长都有着密切的关系^[13-14]。本试验结果表明: 随着光强的降低, 多数无性系的苗高总生长量逐渐降低; 在遮阴处理 15 d 时, 所有无性系的苗高增长量均为 L1>CK>L2; 在遮阴处理 45 d 时, 仅 11-26-9 的苗高总增长量在 L1 处理下最大, 短期适当降低光强有助于无性系的苗高生长, 但幼苗长期处于弱光环境中, 严重影响其高生长。光照不足可能会降低植物的光合作用强度, 进而影响植物的生长速率和碳元素积累^[15]。L2 处理下的 11-36-26 在 30~45 d 内封顶, 可能是该无性系对光强变化较敏感, 生长势较弱, 降低光强易改变其生长节律。随着光强的降低, 不同无性系的叶片形态变化趋势不一, 无性系间的叶面积、叶形指数及比叶面积差异显著; 在 CK 与 L1 处理下, 11-26-4 的叶面积最大, 由于其具有较大的叶面积, 比叶面积较小; 在 L1 和 L2 处理下, 11-32-1 的叶面积、叶形指数均为同处理所有无性系的最小值, 其叶片的宽度均大于长度。光强的变化对 11-26-4 的叶面积影响显著, 该无性系的 L2 比 CK 处理下的叶面积降低了 37.22%。随着光强的降低, 无性系的比叶面积呈增加趋势。在 3 个光强处理下, 比叶面积最大的无性系是 11-26-9, 可能因为其具有较大的比叶面积, 所以, 在 L1、L2 处下具有较大的高增长量。

净光合速率 (P_n) 是衡量植物在逆境条件下光合生理应激能力的重要参数^[16]。 P_n 的大小可用来

表3 不同光照强度对欧美杨无性系叶片矿质元素的影响

Table 3 Effects of different light intensity on mineral element of *Populus ×euramericana* clones

元素Element	无性系Clones	CK	L1	L2	P值P value
钾 Potassium/(mg·g ⁻¹)	11-21-8	11.15±0.34aA	12.10±0.13aB	13.25±0.20aC	0.000
	11-26-4	11.30±0.30abA	12.74±0.21aB	13.21±0.23aB	0.000
	11-26-8	11.70±0.36abA	12.48±0.61aAB	13.05±0.24aB	0.023
	11-26-9	12.04±0.25abA	12.33±0.19aAB	13.07±0.40aB	0.014
	11-32-1	12.30±0.47bA	12.34±0.34aA	12.80±0.13aA	0.224
	11-36-26	11.54±0.56abA	12.79±0.26aB	13.18±0.18aB	0.004
	P值P value	0.028	0.164	0.299	—
钙 Calcium/(mg·g ⁻¹)	11-21-8	8.85±2.31aA	14.35±0.97aB	14.86±0.77aB	0.005
	11-26-4	10.55±1.24aA	11.91±0.94aaAB	15.64±1.69aB	0.008
	11-26-8	9.44±1.96aA	11.44±2.11aaA	13.95±1.55aA	0.070
	11-26-9	13.70±0.15aA	13.54±1.52aA	15.86±0.94aA	0.060
	11-32-1	10.47±2.44aA	9.19±0.53aA	15.46±0.51aB	0.004
	11-36-26	8.43±2.40aA	11.09±1.58aaAB	14.04±0.74aB	0.020
	P值P value	0.061	0.008	0.227	—
镁 Magnesium/(mg·g ⁻¹)	11-21-8	3.87±0.55abA	5.21±0.39bA	4.91±0.45abA	0.029
	11-26-4	3.54±0.51abA	4.06±0.16aA	4.62±0.32abA	0.029
	11-26-8	3.41±0.15abA	3.95±0.22aA	4.11±0.39aA	0.047
	11-26-9	4.09±0.18abA	4.29±0.32aAB	4.90±0.21abB	0.015
	11-32-1	4.29±0.22bAB	3.78±0.47aA	5.01±0.11bB	0.008
	11-36-26	3.20±0.44aA	4.27±0.24aB	4.56±0.11abB	0.003
	P值P value	0.029	0.002	0.027	—

衡量植物的光合能力，导致 P_n 下降的主要原因可能是气孔限制，也可能是非气孔限制^[17-18]。本试验结果显示：在 L2 处理下无性系的 P_n 最低，而 C_i 最高，由此可以推断，L2 处理 P_n 下降的主要原因可能是非气孔限制。这可能是长期弱光处理导致叶肉细胞光合活性降低， CO_2 同化效率下降，所以，无性系在 L2 的 C_i 最高。在 CK、L2 处理下，11-26-8 的 P_n 最大，其高增长量较大；11-36-26 的 P_n 最小，其高增长量较小。各无性系的气孔导度 (G_s) 和蒸腾速率 (Tr) 随光强的减弱呈不同的变化趋势。不同光处理间，11-21-8、11-26-8 和 11-26-9 无性系的 Tr 均是 CK 下最大。有研究表明，在强光条件下，植物可通过大量蒸腾失水来降低植物体内的温度为体内生理活动的正常进行创造条件^[19]。这 3 个无性系可能通过强蒸腾作用来降低温度，以维持正常的生理活动。11-26-4 和 11-36-26 的 G_s 与 Tr 在不同处理间呈相同的变化趋势，可能是 G_s 的增加促使这 2 个无性系的蒸腾速率上升。

对于植物的光合作用机理及植物对环境响应机理的研究，叶绿素荧光参数分析是一种反应灵敏、操作简便且对植物无侵扰的方法^[20]。本试验无性系的 PS II 潜在光化学活性 (F_v/F_0) 及光能转化率 (F_v/F_m) 在 3 个光强处理间呈现相同的变化趋势。正常情况下，没有遭受环境胁迫并经过充分暗适应植物叶片的 F_v/F_m 是比较恒定的，一般为 0.80 ~ 0.85^[21]。本试验处理下的所有无性系的 F_v/F_m 值均大于 0.80，降低光强没有破坏无性系的 PS II 结构。不同光处理间，11-26-9 的 F_v/F_0 、 F_v/F_m 在 L1 最大，说明该无性系的 PS II 在 L1 活性最高，且 11-26-9 的苗高增长量、 P_n 及 G_s 也在 L1 处理最大，显示其在适度降低光强的条件下，光合生理活性较优。植物通过光合色素捕获光能进行光合作用，光照强度的大小会影响色素的形成和分布，进而影响光合作用^[22-23]。除 11-21-8 无性系外，无性系的总叶绿素含量随光强的降低而升高；在 CK 与 L2 处理下，11-26-9、11-26-4 的总叶绿素含量均较少，11-36-

26最高,但11-36-26的高增长量与 P_n 没有呈现相同的趋势,可能是无性系的基因型不同。有研究表明,降低光强会减少色素的光氧化伤害和改变叶绿体结构,无性系的叶绿体含量增多是为了捕获更多的光能^[24-25]。3个处理间相比,11-21-8的总叶绿素含量为L2>CK>L1,与净光合速率的变化趋势相反,虽然在L1处理下叶绿素a和叶绿素b含量降低,但没有影响该无性系的净光合速率。

光为矿质营养的吸收与代谢过程提供能量^[26],因此,光强的变化必然会对植物营养元素的吸收运输与分配产生影响。钾、钙、镁元素是植物生长不可缺少的矿质元素,它们是细胞结构的物质组成成分、渗透调节物质和细胞信号转导信使等^[27]。本试验结果显示:随着光强的降低,多数无性系的钾、钙、镁元素含量呈上升趋势;11-21-8的钙元素含量变幅最大,11-36-26的镁元素含量增加最多。不同无性系的矿质营养元素对光强变化的响应不同,钾、钙元素含量的升高对细胞渗透势调节有重要作用。降低光强,11-26-4、11-26-8、11-26-9与11-36-26无性系的镁元素升高,叶绿素含量也增加。

4 结论

通过对6个杂交欧美杨无性系的光强控制试验,发现适当短期降低光强有助于提高多数无性系的高生长,但长期的弱光条件影响无性系的高生长。不同无性系对光强变化的适应策略不同,部分无性系的高生长与光合参数随光强的降低而逐渐减小;降低光强没有破坏无性系的PS II结构,多数无性系的总叶绿素含量、矿质元素含量随着光强的降低而升高;11-36-26无性系的生长势及抗弱光能力较弱。根据本研究结论,筛选高光效杂交欧美杨无性系,不能仅以高生长为主要参照指标,需结合无性系的净光合速率、叶绿素含量及矿质营养元素含量指标综合评定。高增长量大、净光合速率高、叶绿素含量低、矿质营养元素含量高的无性系对光的利用效率较高。

参考文献:

- [1] Bazzaz, F A. Plant in changing environments: linking physiological, population and community ecology[M]. London: Cambridge University Press, 1996: 13-40.
- [2] Poorter L. Light dependent changes in biomass allocation and their importance for growth of rain forest tree species[J]. Functional Ecology, 2001, 15(1): 113-123.
- [3] Feng Y L, Cao K F, Feng Z L, *et al.* Acclimation of lamina mass per unit area, photosynthetic characteristics and dark respiration to growth light regimes in four tropical rainforest species[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(6): 901-910.
- [4] 刁俊明,陈桂珠.光强对无瓣海桑幼苗的生长和光合特性的影响[J].林业科学研究,2008,21(4): 486-492.
- [5] 徐琳煜,刘守赞,白岩,等.不同光强处理对三叶青光合特性的影响[J].浙江农林大学学报,2018,35(3): 467-475.
- [6] 石凯,李泽,张伟建,等.不同光照对油桐幼苗生长、光合日变化及叶绿素荧光参数的影响[J].中南林业科技大学学报,2018,38(8): 35-42, 50.
- [7] 钱龙梁,薛源,曹福亮,等.生物遮阴对银杏幼苗生长的影响[J].中南林业科技大学学报,2018,38(10): 21-26.
- [8] 吕程瑜,刘艳红.不同遮荫条件下梓叶槭幼苗生长与光合特征的种源差异[J].应用生态学报,2018,29(7): 2307-2314.
- [9] 张东来,张玲,葛文志.不同光环境对胡桃楸幼苗生物量及光合生理的影响[J].森林工程,2017,33(5): 8-11.
- [10] 方升佐.中国杨树人工林培育技术研究进展[J].应用生态学报,2008,19(10): 2308-2316.
- [11] 康向阳.科学推进无性系林业[J].科学新闻,2018(7): 62-64.
- [12] Holden M, Goodwin T W. Chlorophyll in Chemistry and Biochemistry of Plant Pigments[M]. London: Academic Press, 1956: 1-37.
- [13] Monsi M. On the Factor Light in plant communities and its importance for matter production[J]. annals of botany, 2004, 95(3): 549-567.
- [14] Whipco C W, Hangarter R P. Phototropism: bending towards enlightenment[J]. Plant Cell, 2006, 18(5): 1110-1119.
- [15] Zhang S B, Hu H, Xu K, *et al.* Flexible and reversible responses to different irradiance levels during photosynthetic acclimation of *Cypridium guttatum*[J]. Journal of Plant Physiology, 2007, 164(5): 611-620.
- [16] 刘亚丽,王庆成,杨远彪,等.水分胁迫对脂松幼苗生长和光合特性的影响[J].东北林业大学学报,2011,39(4): 33-36.
- [17] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1982, 33(3): 317-345.
- [18] 许大全.光合作用气孔限制分析中的一些问题[J].植物生理学通讯,1997,33(4): 241-244.
- [19] 郑娇,郭文霞,康文,等.遮阴对油松幼苗光合特性及固碳能力的影响[J].东北林业大学学报,2013,41(5): 39-43.
- [20] Schreiber U, Bilger W, Neubauer C. Chlorophyll fluorescence as a noninvasive indicator for rapid assessment of in vivo photosynthesis[J]. Ecological Studies, 1995, 100: 49-70.
- [21] 许大全.植物光胁迫研究中的几个问题[J].植物生理学通讯,2003,39(5): 493-495.
- [22] 孙小玲,许岳飞,马鲁沂,等.植株叶片的光合色素构成对遮阴的响应[J].植物生态学报,2010,34(8): 989-999.
- [23] 姜武,姜卫兵,李志国.园艺作物光合性状的种质差异及遗传表现研究进展[J].经济林研究,2007,25(4): 102-108.

- [24] Atanasova L, Stefanov D, Yordanov I, *et al.* Comparative characteristics of growth and photosynthesis of sun and shade leaves from normal and pendulum walnut (*Juglans regia* L.) trees[J]. *Photosynthetica*, 2003, 41(2): 289-292.
- [25] Murchie E H, Horton P. Contrasting patterns of photosynthetic acclimation to the light environment are dependent on the differential expression of the responses to altered irradiance and spectral quality[J]. *Plant, Cell & Environment*, 1998, 21(2): 139-148.
- [26] Clark, R. B. Effect of light and water stress on mineral element composition of plants[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1981, 3(5): 853-885.
- [27] 武维华. 植物生理学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 101-104.

Effects of Light Intensity on the Growth and Photosynthetic Characteristics of Six *Populus* × *euramericana* Clones at Seedling Stage

WANG Ming-yuan, LIU Ning, LI Bo, LIU Cheng-gong, DING Chang-jun, HUANG Qin-jun

(State Key Laboratory of Forest Genetics and Tree Breeding, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, National Forestry and Grassland Administration, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: [Objective] In order to provide a theoretical basis for rapid breeding of high light efficiency varieties of *Populus* × *euramericana* clones at seedling stage, the response of growth and photosynthetic characteristics of six *P.* × *euramericana* clones to light intensity were studied. [Method] The CK (100% natural light intensity), L1 (55% natural light intensity) and L2 (20% natural light intensity) were set in the field. The height growth, leaf morphology, photosynthetic rate, chlorophyll fluorescence characteristics, chlorophyll content and mineral element content of *P.* × *euramericana* seedlings were determined. [Result] Except for *P. deltoides* CL. ‘Danhong’ × N146-9 *P. nigra*, the total height growth of all clones decreased with the decrease of light intensity; With the weakening of light intensity, the leaf morphological changes of clones were inconsistent, and there were differences in single leaf area, leaf type index and specific leaf area among the clones under the three light intensities. The net photosynthetic rate of the clones was the lowest under the treatment L2, while the intercellular CO₂ concentration was the highest. The stomatal conductance of 11-26-8 was the highest under the three treatments. Under L1 and L2, the F_v/F_0 values of *P. deltoides* CL. ‘Danhong’ × N146-9 *P. nigra* were the highest. The chlorophyll b content in clones showed the same change trend with the total chlorophyll content. The contents of potassium, calcium and magnesium in *P. deltoides* CL. ‘Danhong’ × N146-4 *P. nigra*, *P. deltoides* CL. ‘Danhong’ × N146-8 *P. nigra* and *Zhongshi 8* × N31-26 *P. nigra* increased with the decrease of light intensity. [Conclusion] The adaptation strategies of different clones to the change of light intensity are different. The height growth and net photosynthetic rate of some clones decrease with the decrease of light intensity, and the decrease of light intensity will not destroy the PS II structure of clones. The total chlorophyll content and mineral element content of most clones increase with the decrease of light intensity. Both the growth potential and weak light resistance of *Zhongshi 8* × N31-26 *P. nigra* are weak.

Keywords: *Populus* × *euramericana*; light intensity; photosynthetic physiology; element content

(责任编辑: 徐玉秀)