

锐药竹种子苗光合生理生态特性分析

张韞¹, 张国武², 冯云¹, 廉超¹, 夏念和³, 郭起荣^{1*}

(1. 国际竹藤中心, 国家林业局竹藤科学与技术重点开放实验室, 北京 100102; 2. 国家林业局桉树研究开发中心, 广东 湛江 524000; 3. 中国科学院华南植物园, 广州 510520)

摘要: 为了解引自埃塞俄比亚的锐药竹(*Oxytenanthera abyssinica*)幼苗的生长情况, 对 2 年生竹株的光合生理生态特性进行了研究。结果表明, 锐药竹的 Chl a/b 接近 2.3 : 1, Chl b 含量偏高, 说明具有一定的耐阴性。当光照强度为 800~1600 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 时, 未出现光抑制现象, 表明其对光照具有较强的适应性。锐药竹的表型性状与生理生态性状间存在较好的相关性。根据主成分分析, 确认 Chl b、 $\Phi\text{PS II}$ 、Chl a、Fo 为其主成分因子, 累计方差贡献率达 86.89%。根据种质聚类分析, 可划分为 4 个类型。因此, 锐药竹实生苗单株在表型、生理生态性状上存在较大差异, 具有遗传保育的形态、生理基础。

关键词: 锐药竹; 生理生态; 表型; 主成分分析; 聚类分析

doi: 10.11926/jtsb.3694

Research on Photosynthetic Eco-physiological Characteristics of *Oxytenanthera abyssinica* Seedlings

ZHANG Yun¹, ZHANG Guo-wu², FENG Yun¹, LIAN Chao¹, XIA Nian-he³, GUO Qi-rong^{1*}

(1. International Center for Bamboo and Rattan, Key Laboratory of Bamboo and Rattan Science and Technology of State Forestry Administration, Beijing 100102, China; 2. China Eucalypt Research Centre, State Forestry Administration, Zhanjiang 524022, Guangdong, China; 3. South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510520, China)

Abstract: In order to understand the growth of *Oxytenanthera abyssinica* introduced from Ethiopia in Africa, the photosynthetic physiological ecology characters of two-year-old seedlings planted in Zhanjiang, Guangdong Province, China were studied. The results showed that the Chl a/b value was about 2.3 : 1, the high Chl b content indicated that *O. abyssinica* had a certain tolerance of shade. When the light intensity ranged from 800 to 1600 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, the photo-inhibition of *O. abyssinica* was not appeared, showing strong light adaptability. There were good correlation between phenotypic traits and eco-physiological traits. According principal component analysis, the four factors, such as Chl b, $\Phi\text{PS II}$, Chl a and Fo, were principal components, their accumulated variance contribution rate was up to 86.89%. The all seedlings were divided into four types by the cluster analysis. Therefore, there were significant differences in phenotypic and eco-physiological characters among *O. abyssinica* individuals, which would be provided with morphology and physiological basis in genetic breeding.

Key words: *Oxytenanthera abyssinica*; Eco-physiology; Phenotype; Principal component analysis; Cluster analysis

作为与水稻(*Oryza sativa*)、玉米(*Zea mays*)、小麦(*Triticum aestivum*)等主要农作物同属于禾本科(Poaceae)的竹类植物, 因其生长速度快、用途广而

具有重要的经济、生态和社会价值, 是世界上重要的非木质林产品之一^[1]。竹类植物在全球的分布(不包括无天然分布的欧洲)可划分为三大区域, 即亚太

收稿日期: 2016-11-11

接受日期: 2017-01-09

基金项目: “948”非洲先进农业科技引进项目(2012-4-48)资助

This work was supported by the National Program of Introducing Advanced Agricultural Science and Technology from Africa (Grant No. 2012-4-48).

作者简介: 张韞(1991~), 女, 硕士研究生, 主要从事树木种质研究。E-mail: 13681062477@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: QRGUO@126.com

竹区、美洲竹区和非洲竹区^[2]。我国对亚太、美洲竹区的竹类研究、引进较多,而对于非洲竹区,由于社会、经济、交通等的限制,近几年才开始对非洲竹子资源加以研究、利用^[3-4]。

非洲竹类主要分布在非洲大陆和马达加斯加岛,是食品、药品、日用品、工艺品、家具等的重要植物资源^[3]。结合前人的研究结果^[5-9],本文对引自非洲的最主要经济竹种——锐药竹(*Oxytenanthera abyssinica*)开展了比较系统的光合生理生态特性研究。锐药竹原产地之一的非洲东部埃塞俄比亚,年均气温 10℃~27℃。温度和水分是限制锐药竹引种的重要因素,锐药竹在气温接近 0℃时即死亡或停止生长,其喜潮湿环境,在干旱地区可能表现出落叶性。引种试验地广东湛江最冷月均温 15.5℃,终年无霜雪,年均降水量 1417~1802 mm,与原产地的温度和降水条件等相似,符合科学引种的生态因子节律同步性^[10],为成功引种奠定了基本条件。

锐药竹是典型的短粗型丛生竹,丛内立竹较密集,秆木质、直立,壁厚或实心,具有重要的用材价值,我国不产。采集其种子,引进国内播种育苗,期望了解锐药竹的潜在分布区,发掘更多更好的造林材料。众所周知,竹子是长期依靠无性繁殖繁衍后代的兼性克隆植物^[11],本文着眼于锐药竹种子 F1 代的表型、光合生理生态的研究,对变异系数较大的表型和生理参数,进行主成分分析,筛选出主成分因子,进行聚类分析,选出不同类型的种质资源进行长期观察、试验,以加强种质繁育、培育更好的锐药竹林分。

1 材料和方法

1.1 材料

2012 年 3 月,在埃塞俄比亚阿法尔州(Afar Region)的 Sezem Kebeles 采集锐药竹(*Oxytenanthera abyssinica*)种子,保存于 4℃冰箱中。于 2013 年 6 月,在位于广东湛江的国家林业局国家级南方林木种苗示范基地试验育苗,共育成竹苗约 15000 株。当年 11 月,在国家林业局桉树中心桉树种质保存林内定植造林,约 0.67 hm²,造林地平缓,进行日常管理。于 2014 年开始,选择此定植林中 2 年生的锐药竹植株,随机抽样,标定 50 丛,进行表型、光合生理生态特性等的测定。

1.2 方法

表型性状的测定 2014 年 6 月和 11 月,在标定的 50 丛锐药竹植株中,随机选择 13 丛,测定竹丛内最大株高、最大地径、3 片最大叶片的叶面积、叶长、叶宽等,取 2 次测量的平均值。

光合生理生态参数的测定 2014 年 6 月随机选定生长健康的 30 丛作为样本,每丛确定 1 株,共计 30 株,挂牌并编号,做好标记。

叶绿素测定 从每株样株选择 3 片健康的功能叶,避光带回室内,剪碎后混匀,称取 0.10 g 左右,置于丙酮:乙醇:去离子水=4.5:4.5:1 的 10 mL 离心管中,黑暗保存。隔夜(叶片呈白色后)测定 663 nm 和 645 nm 处的吸光度值,以丙酮乙醇混合液为空白,计算叶绿素 a (Chl a)、叶绿素 b (Chl b)和叶绿素总含量。叶绿素 a=(12.71A₆₆₃-2.59A₆₄₅)×V/(1000×W);叶绿素 b=(12.88A₆₄₅-4.67A₆₆₃)×V/(1000×W);叶绿素总含量=(20.29A₆₄₅+8.04A₆₆₃)×V/(1000×W)。式中,V 为提取液体积,W 为鲜样质量。

荧光参数 于 2014 年 11 月晴朗天气的上午 8-11 时,采用 FMS-2 便携脉冲调制式荧光仪,测定样株的荧光参数。每株选择 3 片健康功能叶,光下测量最大荧光产量(Fm'),PS II 实际电子传递量子效率(ΦPS II);在隔光暗袋中暗处理 30 min 后,去掉隔光袋,测定暗适应参数,包括初始荧光(Fo)、最大荧光(Fm)、可变荧光(Fv)和最大光化学效率(Fv/Fm)。测定 3 次,取平均值。其中,ΦPSII=(Fm'-Fo)/Fm'; Fv/Fm=(Fm-Fo)/Fm。

光合参数 在标定的 50 丛定植林中,随机选择 15 丛,于 2014 年 11 月晴朗天气的上午 8-11 时,使用 LiCor-6400P 光合仪测定植株的光合参数^[12]。利用仪器配置的人工光源,将光合有效辐射分别设定为 1800、1600、1400、1200、1000、800、600、400、200、100、50、0 μmol m⁻²s⁻¹,测定净光合速率,并绘制光响应曲线。通过非直角双曲线模型计算,最大净光合速率(P_{max})等参数。

(1) 光补偿点(Lcp)通常用直线方程 Y=aX+b 在弱光下拟合,得到净光合速率(Y)-光合有效辐射(X)的模型。当 X=0 时的净光合速率即为暗呼吸速率(R_{day});当 Y=0 时的光合有效辐射即为光补偿点(Lcp);直线方程的斜率即为表观量子效率(α)。

(2) 光合速率

$$P_n = \frac{aPAR + P_{max} - \sqrt{(aPAR + P_{max})^2 - 4kaPARP_{max}}}{2k} - R_{day}$$

式中, P_n 为净光合速率, α 为表观量子效率, PAR 为光合有效辐射, P_{max} 为最大净光合速率, k 为光响应曲线曲角, R_{day} 为暗呼吸速率。

1.3 数据分析

应用 Excel 2013、Spss 22.0 等软件对数据进行统计和分析。Spss 22.0 对 Chl a 等 10 个生理生态参数的原始数据自动进行标准化处理, 得到各参数间相关系数的特征值、贡献率、累计贡献率, 进而确定主成分, 并以选出的主成分代表原有的 10 个生理生态参数, 进行系统聚类分析。

2 结果和分析

2.1 表型性状

对测定的锐药竹的相关表型性状参数列表, 以变异系数为指标来分析表型性状间的差异。由表 1 可见, 锐药竹地径的变异系数最高, 为 0.76; 叶长的变异系数最低, 为 0.20, 表明锐药竹各单株间表型性状存在较大差异。

因为试验株栽植在同一块平缓林地, 通过随机排列重复, 较好剔除了环境因素差异对生长因子的影响, 可以判定锐药竹性状变异来源主要是种子的遗传品质。一般来说, 丛生竹采伐比散生竹年限短, 通常 3 年即伐, 爷孙不见面。可以根据锐药竹的表型性状变异, 如地径、叶面积、株高等, 来筛选在生长、产量、抗性等方面具有要求的种质。

表 1 锐药竹表型性状及其变异

Table 1 Phenotypic character and its variation of *Oxytenanthera abyssinica* seedlings

	平均 Mean	最小值 Min	最大值 Max	极差 Range	标准差 SD	变异系数 CV
株高 Height (cm)	130.91	38	316	278	47.89	0.37
地径 Diameter (mm)	7.19	1.88	26.45	24.57	5.44	0.76
叶面积 Leaf are (cm ²)	47.56	21.98	113.53	91.55	18.86	0.4
叶长 Leaf length (cm)	14.91	9.89	24.07	14.17	2.97	0.2
叶宽 Leaf width (cm)	4.04	2.58	6.2	3.62	0.85	0.21

表 2 锐药竹实生苗叶绿素含量差异

Table 2 Variation of chlorophyll content of *Oxytenanthera abyssinica* seedlings

	平均值 Mean	最小值 Min	最大值 Max	变异幅度 Range	标准差 SD	变异系数 CV
Chl a (mg g ⁻¹)	2.45	1.25	2.93	1.68	0.31	0.13
Chl b (mg g ⁻¹)	1.11	0.44	1.72	1.27	0.30	0.27
Chl (a+b) (mg g ⁻¹)	3.90	1.90	4.78	2.87	0.66	0.17
Chl a/b	2.30	1.58	2.86	1.29	0.41	0.18

2.2 叶绿素含量

叶绿素(Chl a 和 Chl b)是主要的光和色素, 大多数的 Chl a 和全部的 Chl b 都是参与吸收和传递光能的色素, 一部分特殊的 Chl a 位于光反应系统复合体上, 参与光化学反应。从表 2 可见, 锐药竹种子苗的 Chl a/b 为 1.58~2.86, 平均为 2.30, 变异系数为 0.18。一般阳生植物的 Chl a/b, 约为 3:1, 而阴生植物的 Chl a/b 约为 2.3:1。有“阴生叶绿素”之称的 Chl b, 相较 Chl a, 可更有效地利用漫射光中较多的蓝紫光。此批锐药竹的 Chl a/b 约为 2.3:1, 说明其能够高效地利用波长较短的蓝紫光, 即使在光照不充足的情况下也能高效地进行光合作用, 具有一定的耐阴性。

同时, 锐药竹植株间 Chl b 含量存在较大差异, 变异系数达 0.27, 表明锐药竹植株间的耐阴性也存在较大差异。据此, Chl a/b 和 Chl b 可作为筛选耐阴性较强的种质材料的指标。

2.3 荧光参数

有效光化学量子产量(Φ_{PSII})是光系统 II 在关闭情况下的实际原初光能捕获效率, 一般通过叶片不经过暗适应, 在光下直接测得^[13]。 Φ_{PSII} 值越大, 其光能转化效率也就越高^[14]。从表 3 可见, 锐药竹 Φ_{PSII} 最小值为 0.259, 最大值为 0.777, 变异系数为 0.17, 表明锐药竹单株间实际光化学效率存在一定程度的变异, 这也可以为开展锐药竹种质资源选择提供生理依据。

光系统 II 的最大量子产量(Fv/Fm)反映了植物潜在的最大光合能力。Fv/Fm 值通常可以用来评判植物受到光抑制的程度。在正常光照条件下, Fv/Fm 为 0.75~0.85; 当光照受到抑制时, Fv/Fm<0.75, 数值越低表明植物受到的光抑制程度越大^[15]。从表 3 可见, Fv/Fm 的平均值为 0.75~0.85, 变异系数较小, 为 0.05, 说明锐药竹 PS II 光能转换效率正常。

表 3 叶绿素荧光参数差异分析

Table 3 Variation of fluorescence parameter

	平均值 Mean	最小值 Min	最大值 Max	极差 Range	标准差 SD	变异系数 CV
ΦPS II	0.654	0.259	0.777	0.518	0.113	0.17
Fo	61	39	98	59	11	0.18
Fv/Fm	0.814	0.677	0.875	0.197	0.042	0.05

2.4 光合参数

图 1 为锐药竹的光合作用-光响应的拟合曲线。当光合有效辐射(PAR)在 0~600 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 时, 随着 PAR 的增加, 光合速率迅速增加。PAR 在 0~50 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 时, 净光合速率(P_n)与 PAR 的线性关系为 $Y=0.018X-0.701$, 其光补偿点(LCP)为 38.90 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 与慈竹(*Bambusa emeiensis*)^[16]、马来甜龙竹(*Dendrocalamus asper*)^[17]的相当, 介于阴性植物(LCP<20 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)与阳性植物(LCP=50~100 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)之间, 表明锐药竹具有一定的耐阴能力, 与其 Chl b 含量相对较高的结果一致。

从锐药竹的光响应曲线可以看出, PAR 在 800~1600 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 时, 净光合速率仍保持在较高值, 未出现明显光抑制现象, 表现出较强的耐强光能力。同时, 锐药竹在光饱和点(Lsp)为 793.6 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 时, 最大净光合速率(P_{max})为 10.531 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 与

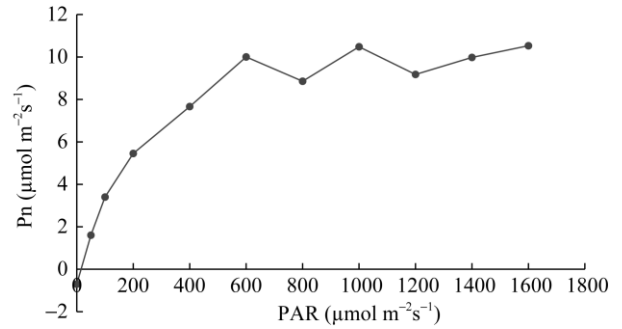


图 1 锐药竹的光响应曲线。PAR: 光合有效辐射; Pn: 净光合速率。

Fig. 1 Light response curve of *Oxytenanthera abyssinica*. PAR: Photosynthetic active radiation; Pn: Net photosynthetic rate.

黄竹(*D. membranaceus*)^[16]、绿竹(*D. oldhamii*)^[16]、马来甜龙竹^[17]等丛生竹的最大净光合速率相近。锐药竹作为非洲热带地区长期栽培的最重要的经济竹种之一, 引种到我国, 在光照方面表现了具有广泛的潜在引种区的信息, 可结合温度(限制性低温、有效积温)、降水量等因素, 为其引种栽培地选择提供依据。

2.5 表型性状与生理生态参数的相关性

对锐药竹的表型性状(株高、地径、叶面积和叶长)与生理参数(Chl a、Chl b、Chl a/b、ΦPS II、Fo 和 Fv/Fm)进行 Pearson 相关性分析(表 4), Pearson 相关系数用来衡量 2 个数据集合的线性关系, 相关系数的绝对值越大, 相关性越强, 反之越弱。可见, 叶长、叶面积与各项生理参数相关性好; 地径与各项生理参数相关性均不显著; 株高与 Chl a 极显著相关, 与 ΦPS II、Fo 显著相关。因此, 可利用锐药竹的表型性状与生理参数之间较好的相关特性,

表 4 锐药竹幼苗表型与生理参数间的相关系数

Table 4 Correlation coefficient between phenotypic and physiological characters of *Oxytenanthera abyssinica* seedlings

	株高 Height	地径 Diameter	叶面积 Leaf area	叶长 Leaf length	Chl a	Chl b	Chl a/b	ΦPS II	Fo	Fv/Fm
株高 Height										
地径 Diameter	0.776**									
叶面积 Leaf area	0.429**	0.194								
叶长 Leaf length	0.419**	0.192	0.966**							
Chl a	0.519**	0.292	0.574**	0.631**						
Chl b	0.235	-0.105	0.620**	0.670**	0.788**					
Chl a/b	0.160	0.148	0.187	0.189	0.122	-0.168				
ΦPS II	0.286*	0.201	0.372**	0.406**	0.373*	0.479**	0.291			
Fo	0.341*	0.111	0.338*	0.286*	0.733**	0.632**	0.211	0.448*		
Fv/Fm	0.233	0.256	0.342*	0.329*	0.178	0.327	0.371*	0.637**	-0.702**	

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

来进行表型选择。

2.6 生理生态参数的主成分分析

首先对这批锐药竹植株生理参数的原始数据进行标准化处理, 得到初始特征值、贡献率和累计贡献率(表 5), 根据累计贡献率 >85% 的原则, 筛选主成分因子, 再根据主成分进行聚类分析, 以筛选不同性状的种质类型。在主成分分析中, 一般以特征值作为主成分影响力度的指标, 并以 1 为标准, 如果特征值大于 1, 则提取该成分作为主成分。由表 5 看出, 可以提取 4 个主成分, 其方差贡献率分

别为 40.729%、22.340%、12.400% 和 11.421%, 累计贡献率为 86.890% (>85%), 可以认为这 4 个主成分涵盖了原始数据信息总量, 可作为主成分参数, 进行下一步的聚类分析。

将 Chl a 等 10 个生理参数标准化后, 进行线性组合。根据各指标相对应的特征向量决定权重系数, 权重系数代表了各指标对应于主成分的重要程度。从表 6 可见, 第一主成分中, Chl b 贡献最大; 第二主成分中, ΦPS II 贡献最大; 第三主成分中, Chl a 贡献最大; 第四主成分中, Fo 贡献最大, 因此, 选择这 4 个贡献率最大的生理生态参数进行种质聚类分析。

表 5 锐药竹实生苗的生理参数主成分分析

Table 5 Principal component analysis physiological characters of *Oxytenanthera abyssinica* seedlings

成分 Component	初始特征值 Initial eigenvalue			提取平方和载入 Extraction sums of squared loading			
	合计 Total	方差占比 % of square	累加 Cumulative (%)	合计 Total	方差占比 % of square	累加 Cumulative (%)	累加 Cumulative (%)
1	4.073	40.729	40.729	4.073	40.729	40.729	40.729
2	2.234	22.34	63.069	2.234	22.34	63.069	63.069
3	1.24	12.4	75.469	1.24	12.4	75.469	75.469
4	1.142	11.421	86.89	1.142	11.421	86.89	86.89
5	0.71	7.102	93.992				
6	0.394	3.937	97.929				
7	0.11	1.101	99.03				
8	0.056	0.561	99.591				
9	0.034	0.344	99.935				
10	0.006	0.065	100				

表 6 主成分分析下各项指标的特征向量

Table 6 Eigenvalues and variance contribution by principal component analysis

	成分 Elements					成分 Elements			
	1	2	3	4		1	2	3	4
Chl a	-0.372	0.359	0.735	-0.109	Fm'	0.262	0.360	0.028	-0.042
Chl b	-0.449	0.220	-0.168	0.061	ΦPS II	0.320	0.497	-0.367	0.141
Chl (a+b)	-0.395	0.355	0.024	-0.001	Fo	-0.097	-0.068	0.418	0.791
Chl a/b	0.401	-0.169	0.269	-0.114	Fm	0.276	0.420	0.207	0.349
Fo'	-0.079	0.145	0.067	-0.408	Fv/Fm	0.283	0.297	0.010	-0.192

2.7 种质聚类分析

以 4 个主成分对标定的 50 丛锐药竹进行聚类分析。采用最短距离法, 按亲疏相似程度聚成了 4 类(图 2)。

根据锐药竹 4 个类型的株系的表型、生理生态参数平均值(表 7), 可以看出, I 类株系的表型、生理参数总体最好, II、III、IV 类依次次之。为此, 采用该聚类拓扑图, 作为锐药竹种质筛选的依据, 我们已经对各类进行定株、挂牌, 供长期开展相关试验研究工作。

3 结论和讨论

以前由于经济、交通等条件的制约, 不能前往非洲进行更多的竹类调查与引种工作。2012 年开始, 我们对引自非洲的锐药竹种子苗, 开展了比较系统的光合生理生态的研究, 不仅有助于非洲当地竹类资源的发展与利用, 而且也能丰富我国竹类种质资源^[18], 增加竹子造林种类。由于竹子多数长期依赖无性繁殖育苗、造林, 繁衍后代, 其种子罕见。丛生竹长期依靠秆基芽眼(俗称“笋目”)一代一代繁

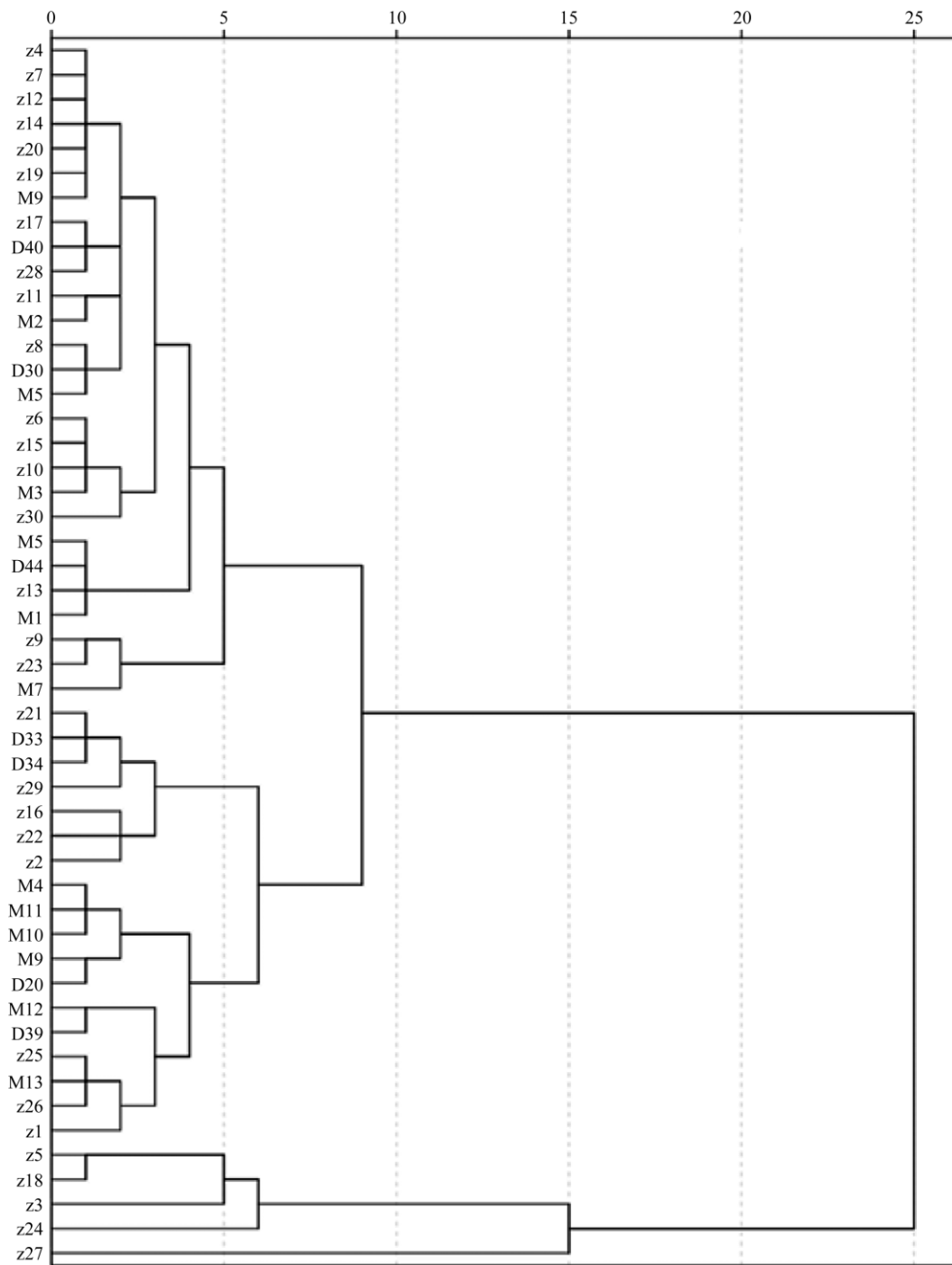


图 2 锐药竹实生苗基于生理主成分的种质聚类

Fig. 2 Dendrogram of *Oxytenanthera abyssinica* seedlings based on physiological principal components

表 7 各类型锐药竹的表型、生理参数

Table 7 Phenotypic and physiological parameters of *Oxytenanthera abyssinica* types

类型 Type	叶长 (cm) Leaf length	叶宽 (cm) Leaf width	叶面积 (cm ²) Leaf area	F _o	F _m	F _v /F _m	Φ PS II
I	15.29	4.16	49.76	60.95	365.99	0.83	0.71
II	14.18	3.84	44.25	60.61	305.33	0.80	0.62
III	13.98	3.82	41.40	62.00	295.83	0.79	0.50
IV	12.67	3.32	32.29	65.00	202.00	0.68	0.30

育, 老秆逐渐枯死, 不断更替, 形成越来越大的竹丛。种子的形成, 经过了有性繁殖阶段不同程度的遗传重组, 遗传多样性更加丰富, 适应环境能力更强。本研究的种子苗单株虽然造林定植在同一平缓林地, 但表型也存在较大差异, 这种差异应该首先推断为非环境饰变的遗传因素, 这也是本研究种质筛选的物质基础。根据其表型性状, 再经多点、多年试验, 有可能筛选适合当地环境的优异种质^[19-20]。

锐药竹定植林经过 2013 年至 2015 年的 3 年生长, 每年可见 1~2 次发笋成竹。2015 年冬在定植林随机挑选 10 丛植株, 平均直径为 6.5 cm, 变异范围为 3.2~8.6 cm, 植株已经与非洲原生动地的表型性状^[1]相近, 表现出良好的适应性。锐药竹不像毛竹 (*Phyllostachys edulis*) 的种子苗竹, 秆粗增长需要较长时间^[21], 有研究认为需要至少 8 年^[22]才能稳定。根据育种学规范, 我们将进一步与引种地湛江主产经济竹种的竹材、竹笋产量、品质、抗性、适应性等指标进行对照研究, 期望早日得到最终引种结论。

叶绿素含量与吸收和传递光能有关, 其含量越高, 越有利于吸收更多的光能用于光合作用^[23]。锐药竹叶绿素 b 含量偏高, 光补偿点偏低, 表明其具有一定的耐阴能力。且当光强达到 $1600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 时, 锐药竹净光合速率仍保持在较高水平, 未出现光抑制现象, 表明锐药竹还具有较强的耐强光能力, 对光照具有较强的适应性。有研究表明, 净光合速率有“丛生竹种 > 散生竹种 > 混生竹种”的规律^[24], 锐药竹也同样表现了丛生竹的典型光合速率特征。这些光合生理生态参数, 为其扩大引种地和栽培区提供了科学依据。

锐药竹表型性状与生理性状之间存在较好的相关性, 说明利用其表型性状来划分种质类型具有生理依据。锐药竹叶绿素含量的变异系数为 0.13~0.27, 荧光参数的变异系数为 0.05~0.18, 其生理性状的变异系数皆低于表型性状, 说明锐药竹生理性状的稳定性高于表型性状, 表明除了采用传统的表型性状筛选种质外, 还可以利用生理性状进行种质选育, 结果可以更精确。对锐药竹生理参数进行主成分分析表明, 4 个主成分的方差累计贡献率达 86.890%, 以此为基础, 我们进行了种质系统聚类分析和种质选择。以筛选出的种质材料, 与当地主栽种进行对照, 接受长期、持续的产量、品质、抗性等方面的测试, 再辅以遗传测定, 为选育出适合当地的优良种质, 加强锐药竹的竹林培育种质选择

提供了技术支持。

参考文献

- [1] WALTER S. Non Wood Forest Products in Africa: A Regional and National Overview [M]. Quebec: Food & Agriculture Organization, 2001: 11-13.
- [2] JIANG Z H. Bamboo and Rattan in the World [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2007: 2.
- [3] OHRNBERGER D. The Bamboos of the World: Annotated Nomenclature and Literature of the Species and the Higher and Lower Taxa [M]. Amsterdam: Elsevier, 1999, 309: 8-9.
- [4] LIAN C, FENG Y, ZHOU J M, et al. Investigation on bamboo species, resources and industry in Africa bamboo zone [J]. World For Res, 2014, 27(4): 75-82. doi: 10.13348/j.cnki.sjlyyj.2014.04.013.
廉超, 冯云, 周建梅, 等. 非洲竹区竹种类、资源与产业调查 [J]. 世界林业研究, 2014, 27(4): 75-82. doi: 10.13348/j.cnki.sjlyyj.2014.04.013.
- [5] ZHOU J M, LIAN C, FENG Y, et al. Effects of soaking with paclobutrazol on seeds germination and seedling leaf anatomical structure of *Oxytenanthera abyssinica* from Africa [J]. Acta Agri Univ Jiangxi, 2014, 36(2): 344-350. doi: 10.13836/j.jjau.2014056.
周建梅, 廉超, 冯云, 等. 多效唑浸种对非洲产锐药竹种子萌发及幼苗叶片解剖结构的影响 [J]. 江西农业大学学报, 2014, 36(2): 344-350. doi: 10.13836/j.jjau.2014056.
- [6] LIAN C. African bamboo species and genetic variation of *Oxytenanthera abyssinica*, *Oldeania alpina*, *Bambusa vulgaris* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2015: 21-27.
廉超. 非洲竹类及三种主要竹种的遗传变异研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2015: 21-27.
- [7] RAN H, ZHANG Y, ZHANG Y, et al. Study on surface wetting property of 4 Chinese and African bamboo species, including thick-walled bamboo [J]. For Mach Woodwork Equip, 2016, 44(5): 29-32.
冉洪, 张韞, 张莹, 等. 厚壁毛竹等 4 种中国和非洲竹材的表面润湿性能研究 [J]. 林业机械与木工设备, 2016, 44(5): 29-32.
- [8] ZHANG Y, ZHANG Y, LIAN C, et al. Study on the vascular bundle of *Oxytenanthera abyssinica* [J]. For Mach Woodwork Equip, 2016, 44(6): 31-33. doi: 10.3969/j.issn.2095-2953.2016.06.008.
张莹, 张韞, 廉超, 等. 锐药竹维管束特征研究 [J]. 林业机械与木工设备, 2016, 44(6): 31-33. doi: 10.3969/j.issn.2095-2953.2016.06.008.
- [9] LIAN C, ZHANG G W, FENG Y, et al. Seed characters and genetic variation of *Oxytenanthera abyssinica* [J]. Guihaia, 2016, 36(8): 943-948. doi: 10.11931/guihaia.gxzw201411038.
廉超, 张国武, 冯云, 等. 锐药竹的种子性状及分子遗传变异 [J]. 广西植物, 2016, 36(8): 943-948. doi: 10.11931/guihaia.gxzw201411038.

- [10] LIANG T R. Theory in introducing bamboos with the rhythm of ecological factors [J]. *J Bamb Res*, 1982, 1(1): 49–56.
梁泰然. 竹类引种的生态因子节律同步论 [J]. 竹子研究汇刊, 1982, 1(1): 49–56.
- [11] DONG M, YU F H, CHEN Y F, et al. Ecology of Cloned Plant [M]. Beijing: Science Press, 2011: 132.
董鸣, 于飞海, 陈玉福, 等. 克隆植物生态学 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 132.
- [12] WEI X, WANG M L, JIANG Y S, et al. The photosynthetic characteristics of *Camellia euphlebica* [J]. *Bull Bot Res*, 2007, 27(4): 434–438. doi: 10.3969/j.issn.1673-5102.2007.04.012.
韦霄, 王满莲, 蒋运生, 等. 显脉金花茶的光合生理特性研究 [J]. 植物研究, 2007, 27(4): 434–438. doi: 10.3969/j.issn.1673-5102.2007.04.012.
- [13] YOU X, GONG J R. Significance and application of chlorophyll fluorescence dynamics process parameters [J]. *J W China For Sci*, 2012, 41(5): 90–94. doi: 10.3969/j.issn.1672-8246.2012.05.017.
尤鑫, 龚吉蕊. 叶绿素荧光动力学参数的意义及实例辨析 [J]. 西部林业科学, 2012, 41(5): 90–94. doi: 10.3969/j.issn.1672-8246.2012.05.017.
- [14] ZHANG S R. Significance and discussion of chlorophyll fluorescence parameters [J]. *Chin Bull Bot*, 1999, 16(4): 444–448. doi: 10.3969/j.issn.1674-3466.1999.04.021.
张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论 [J]. 植物学通报, 1999, 16(4): 444–448. doi: 10.3969/j.issn.1674-3466.1999.04.021.
- [15] LIU B, CHEN C J, LIN D D, et al. Analyses of photosynthetic pigment content and chlorophyll fluorescence parameter in leaves of 21 provenances of *Phoebe bournei* [J]. *Acta Agri Univ Jiangxi*, 2014, 36(1): 115–121. doi: 10.3969/j.issn.1000-2286.2014.01.018.
刘宝, 陈存及, 林达定, 等. 21 个闽楠种源叶片光合色素含量及叶绿素荧光参数 [J]. 江西农业大学学报, 2014, 36(1): 115–121. doi: 10.3969/j.issn.1000-2286.2014.01.018.
- [16] WU Z Z, GAO G B, XIONG D L, et al. A study on light response curve of photosynthesis of nine sympodial bamboo species [J]. *J Bamb Res*, 2013, 32(2): 16–20. doi: 10.3969/j.issn.1000-6567.2013.02.005.
吴志庄, 高贵宾, 熊德礼, 等. 9 个主要丛生竹种光响应曲线的研究 [J]. 竹子研究汇刊, 2013, 32(2): 16–20. doi: 10.3969/j.issn.1000-6567.2013.02.005.
- [17] DU X H, DING X C, CHEN Y, et al. Comparison of the photosynthetic characteristics of *Dendrocalamus asper* introduced in different latitude regions [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci)*, 2012, 36(6): 53–57.
杜旭华, 丁兴萃, 陈岩, 等. 不同纬度引种地马来甜龙竹 (*Dendrocalamus asper*) 光合特性的比较 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2012, 36(6): 53–57.
- [18] JIANG Z H. Translated by GUO Q R. Forest Genetic Resources Conservation and Management [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2007: 3–8.
江泽慧. 郭起荣, 译. 森林遗传资源保护与管理 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2008: 3–8.
- [19] CAO K, ZHU G R, FENG Y B, et al. Comparison of photosynthetic characters in different apricot, plum and apricot plum and the screening of outstanding germplasm [J]. *J Plant Genet Resour*, 2007, 8(3): 331–335. doi: 10.3969/j.issn.1672-1810.2007.03.017.
曹珂, 朱更瑞, 冯义彬, 等. 杏、李和杏李光合特性比较及优异种质筛选 [J]. 植物遗传资源学报, 2007, 8(3): 331–335. doi: 10.3969/j.issn.1672-1810.2007.03.017.
- [20] YUAN H J, AN W, LI L H, et al. The investigation and cluster analysis of main morphological characters for germplasm of Chinese wolfberry [J]. *J Plant Genet Resour*, 2013, 14(4): 627–633.
袁海静, 安巍, 李立会, 等. 中国枸杞种质资源主要形态学性状调查与聚类分析 [J]. 植物遗传资源学报, 2013, 14(4): 627–633.
- [21] Liuzhou Institute of Forest in, Guangxi. The Seedling and Afforestation of Moso Bamboo [M]. Nanning: Guangxi People's Publishing House, 1972: 2–7.
广西柳州地区林业科学研究所. 毛竹种子育苗和造林 [M]. 南宁: 广西人民出版社, 1972: 2–7.
- [22] XU C Y. Contrastive analysis in forestation from mother culms and seedlings of *Phyllostachys edulis* [J]. *J Jiangsu For Sci Technol*, 2000, 27(5): 41–43.
许才元. 采用毛竹母竹和实生竹苗造林对比分析 [J]. 江苏林业科技, 2000, 27(5): 41–43.
- [23] ZHENG R, ZHENG W P, ZHENG Q F, et al. Comparison of chlorophyll fluorescence parameters in ornamental bamboo [J]. *J Fujian Coll For*, 2008, 28(2): 146–150. doi: 10.3969/j.issn.1001-389X.2008.02.011.
郑蓉, 郑维鹏, 郑清芳, 等. 观赏竹叶绿素荧光特性的比较研究 [J]. 福建林学院学报, 2008, 28(2): 146–150. doi: 10.3969/j.issn.1001-389X.2008.02.011.
- [24] WU Z Z, DU X H, XIONG D L, et al. A comparative study on photosynthetic characteristics of different types of bamboos [J]. *Ecol Environ Sci*, 2013, 22(9): 1523–1527. doi: 10.3969/j.issn.1674-5906.2013.09.010.
吴志庄, 杜旭华, 熊德礼, 等. 不同类型竹种光合特性的比较研究 [J]. 生态环境学报, 2013, 22(9): 1523–1527. doi: 10.3969/j.issn.1674-5906.2013.09.010.