

模拟酸雨与光强处理对芒萁叶绿素及荧光特性的影响

吕钺香¹, 张明如², 邹伶俐¹

(1. 浙江农林大学 林业与生物技术学院, 浙江 临安 311300; 2. 浙江农林大学 风景园林与建筑学院, 浙江 临安 311300)

摘要: 以盆栽芒萁 *Dicranopteris dichotoma* 为研究对象, 通过人工遮阳及设置不同 pH 值的模拟酸雨复合处理的方式, 探讨 4 种光环境(全光, 遮光 30%, 遮光 50%, 遮光 80%)和 4 种酸液(pH 3.0, pH 4.0, pH 5.6, pH 7.0)下芒萁色素质量分数及叶绿素荧光参数的差异。结果表明: ①pH 4.0 和 pH 5.6 处理提高了芒萁 PS II 实际光化学效率(Y_{ield}), PS II 光化学效率(F_v/F_m), PS II 潜在活性(F_v/F_o)以及叶绿素 a, 叶绿素 b, 总叶绿素(a+b)和类胡萝卜素的的质量分数, pH 3.0 处理降低了荧光参数和色素质量分数。②随着遮光程度的增加, 芒萁荧光参数 Y_{ield} , F_v/F_m 和 F_v/F_o 值增大, Y_{ield} 在 80% 和 30% 遮光处理间均有显著差异($P < 0.05$), 叶绿素 a, 叶绿素 b, 总叶绿素(a+b)和类胡萝卜素的的质量分数亦呈现显著性增大趋势($P < 0.05$)。同时光照强度对芒萁色素质量分数和荧光参数的影响大于酸雨胁迫, 且无显著性交互作用。因此, 在 3 种遮光处理下, pH 5.6 和 pH 4.0 的酸液对芒萁叶绿素质量分数及荧光参数有促进作用; 而在同一酸液处理下, 随遮光程度增加芒萁叶绿素质量分数及荧光参数值趋于增大。图 3 表 2 参 25

关键词: 植物学; 芒萁; 模拟酸雨; 遮光处理; 叶绿素; 荧光

中图分类号: S745.11

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2015)01-0052-08

Chlorophyll fluorescence characteristics with simulated acid rain and light intensity treatments for *Dicranopteris dichotoma*

LÜ Chengxiang¹, ZHANG Mingru², ZOU Lingli¹

(1. School of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. School of Landscape and Architecture, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: The effects of a light intensity gradient and acid rain on chlorophyll fluorescence parameters and pigment content of *Dicranopteris dichotoma* were studied using treatments of four different light gradients (shading of 80%, 50%, 30%, and full sun) and pH levels (pH 3.0, pH 4.0, pH 5.6 and pH 7.0). Results showed that with pH 4.0 and pH 5.6 treatments, the actual photochemistry efficiency of PS II (Y_{ield}), photochemistry efficiency of PS II (F_v/F_m), potential activity of PS II (F_v/F_o), chlorophyll a (Chla), chlorophyll b (Chlb), total chlorophyll (Ct), and carotenoid (Car) content of *D. dichotoma* increased; whereas these parameters decreased with the pH 3.0 treatment. The chlorophyll fluorescence parameters Y_{ield} , F_v/F_m , and F_v/F_o increased with shading. Y_{ield} with 80% shading was significantly than 30% shading ($P < 0.05$). Chla, Chlb, Ct, and Car content were also significantly greater ($P < 0.05$). For pigment content and fluorescence parameters, the effects of light intensity and acid rain stress had no significant interactions, and light intensity had a significantly greater effect on the parameters than acid rain stress. Therefore, acidic liquids of pH 5.6 and pH 4.0 with shading of 80%, 50%, and 30% promoted chlorophyll content and fluorescence parameters, and as the degree of shading increased the chlorophyll content and chlorophyll fluorescence parameters also

收稿日期: 2014-03-05; 修回日期: 2014-03-31

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(LY13C160012)

作者简介: 吕钺香, 从事种群生态学研究。E-mail: lcxfighting@126.com。通信作者: 张明如, 教授, 博士, 从事森林植被恢复、外来树种入侵研究。E-mail: mrmrzh@sina.com

increased.[Ch, 3 fig. 2 tab. 25 ref.]

Key words: botany; *Dicranopteris dichotoma*; simulated acid rain; shading; chlorophyll fluorescence; pigment

芒萁 *Dicranopteris dichotoma* 广泛分布于中国长江以南各省区、朝鲜南部、日本、印度及越南^[1]。当森林植被退化后，活地被物层以芒萁为优势种连续密集地分布于马尾松 *Pinus massoniana* 单优群落、疏灌草丛等退化群落。芒萁形成单优层片后，将影响亚热带低山丘陵区森林群落的演替进程。George 等^[2-3]通过控制性试验，指出蕨类植物构成的“生态筛”对森林更新过程具有选择性作用。然而实际上，森林群落的乔木层片与草本层片具有相互影响、相互制约的生态关系。因此，为探究芒萁单优层片对森林更新的影响，需分析森林群落芒萁单优层片的适生条件。芒萁常在丘陵、荒坡林缘、马尾松单优群落和杉木 *Cunninghamia lanceolata* 单优群落的下层以及杨梅 *Myrica rubra* 茶园下连续成片分布^[4]，表明芒萁能够适应多种光环境，属于一种光生态幅较广的植物。值得注意的是，在亚热带低山丘陵地区，芒萁生长分布区的土壤类型为红壤和黄壤，因而传统的观点认为芒萁是一种典型的酸性土壤指示植物^[5]。然而，随着酸雨的影响日趋加重，在低山丘陵区常绿阔叶林程度不同的退化和酸雨的叠加影响下，芒萁的光合生理过程乃至形态生长必然会对光照条件和土壤酸化过程产生一定的生态响应。基于上述分析，提出本研究的命题：光强与酸雨联合影响下芒萁的光合生理过程的响应特征。已有研究从光抑制^[6-8]或者土壤酸化^[9-10]的单一角度，分析了许多植物的光合生理适应机制，而未考虑不同酸雨和光照强度组合条件下对植物生理生态特性的影响。因此，本研究利用叶绿素荧光分析仪和 UV-2550 紫外-可见分光光度计，测定比较分析在光强和酸雨胁迫处理下，盆栽芒萁的叶绿素荧光参数和叶片色素质量分数的变化特征，旨在探讨夏季不同酸雨胁迫强度和不同光照水平共同作用对芒萁叶绿素荧光参数和叶片色素质量浓度的影响，以期揭示芒萁对酸雨和光强的生态适应策略。

1 研究材料和方法

1.1 研究地区自然地理

试验地位于浙江省临安市浙江农林大学东湖校区(119°42'E, 30°14'N)，属中亚热带季风气候区，温暖湿润。年平均气温为 16.4℃，1 月的平均气温为 3.8℃，7 月的平均气温为 28.6℃，最高气温为 40.4℃，最低气温为 -9.2℃，年无霜期约 236 d，全年降水量 1 628.6 mm。2006–2011 年期间，临安大气本底站降水 pH 值各月均值均小于 pH 4.5，均达到强酸雨的程度^[11]；酸雨发生频率表现为夏季低、秋季高。

1.2 试验处理

供试材料取自浙江农林大学东湖校区北侧马尾松单优群落下层，选择长势良好且一致的芒萁植株(12.1 ± 0.7) cm，以林下表土为栽植基质，于 2011 年 4 月中旬移栽到高 27 cm，内径 22 cm 花盆中进行缓苗，用自来水浇灌。待芒萁成活后，2011 年 5 月 8 日进行不同的光照强度和酸液处理。具体处理：采用黑色尼龙网遮光，分别构建 4 个光强梯度即全光，30%，50%和 80%的遮光，同时在每个光强下设置 4 种不同 pH 值(pH 3.0, pH 4.0, pH 5.6 和 pH 7.0)的模拟酸雨处理。

酸液配置的方法：根据浙江省酸性降水的平均离子组成及通常模拟酸雨试验所惯用的配比，按 V(硫酸):V(硝酸)=8:1 的比例配制母液，用水稀释成 pH 3.0, pH 4.0 和 pH 5.6 的酸液。依据浙江省临安地区多年月均降水量确定喷淋量。同时，在各个遮光处理下，为对照组喷等量的 pH 7.0 水溶液，喷淋在 17:00–18:00 进行。15 盆·处理⁻¹，选择 3 盆芒萁南侧第 2~3 片完整的功能叶，用于测定荧光参数和叶片色素质量浓度。实验期间，用塑料薄膜遮挡自然降雨，不施肥，仅去除杂草。

1.3 研究测定方法

1.3.1 叶绿素荧光参数测定 于 2011 年 7 月 22 日(晴天)利用便携式调制叶绿素荧光仪(PAM-2100, Walz, 德国)测定芒萁孢子体叶片荧光参数。测定的主要参数：PS II 实际光化学效率(Y_{ield})，PS II 潜在活性(F_v/F_o)和 PS II 光化学效率(F_v/F_m)。

1.3.2 叶片色素质量分数测定和换算 于 2011 年 7 月 25 日(晴天)选取与叶绿素荧光测定相同的叶片，用体积分数 80%的丙酮在黑暗中提取 48 h，利用 UV-2550 紫外-可见分光光度计在 470, 646 和 663 nm

波长下测定叶绿素提取液的吸光值分别为 $D(470)$, $D(646)$ 和 $D(663)$, 采用 Liehtenthaler^[12] 提出的公式计算如下指标: 叶绿素 a 质量浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$): $\rho_a = 12.21 D(663) - 2.81 D(646)$; 叶绿素 b 质量浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$): $\rho_b = 20.13 D(646) - 5.03 D(663)$; 类胡萝卜素质量浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$): $\rho_c = (1\ 000 D(470) - 3.27 \rho_a - 104 \rho_b) / 229$; 叶绿素总质量浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$): $\rho_{a+b} = \rho_a + \rho_b$ 。根据提取液中叶绿素质量浓度, 换算为单位质量鲜叶片中色素质量分数($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)。

1.4 数据处理

用 Excel 进行数据处理, 利用 SPSS 13.0 统计分析软件进行显著性检验和相关性分析。

2 结果分析

试验结果显示: 在全光下经过 2011 年 5–7 月炎热的夏季后, 芒萁地上部分全部枯死(图 1), 表明夏季强光生境不适宜盆栽芒萁生长。因此, 选择 30%, 50% 和 80% 遮光处理下芒萁的荧光和叶片色素的测定指标进行比较分析。

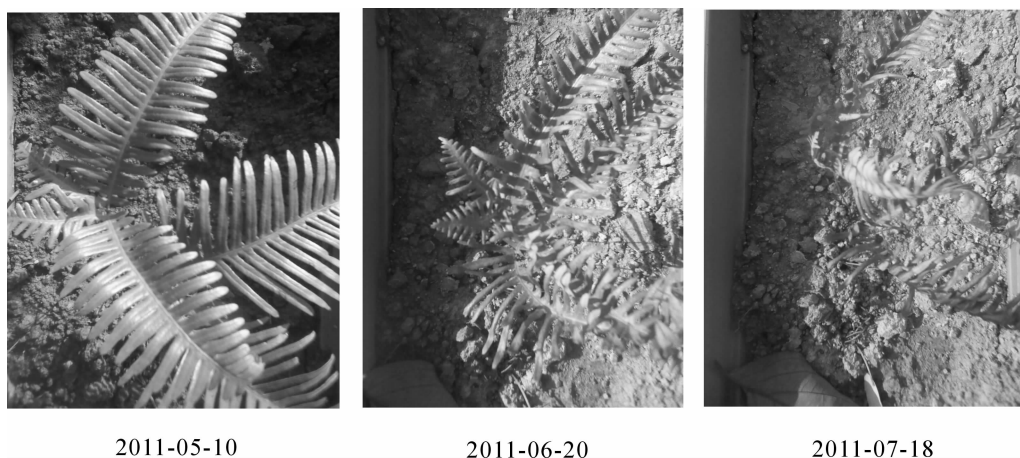


图 1 全光处理下芒萁不同时期的生长状态

Figure 1 Growth at different times of *Dicranopteris dichotoma* in full sunlight

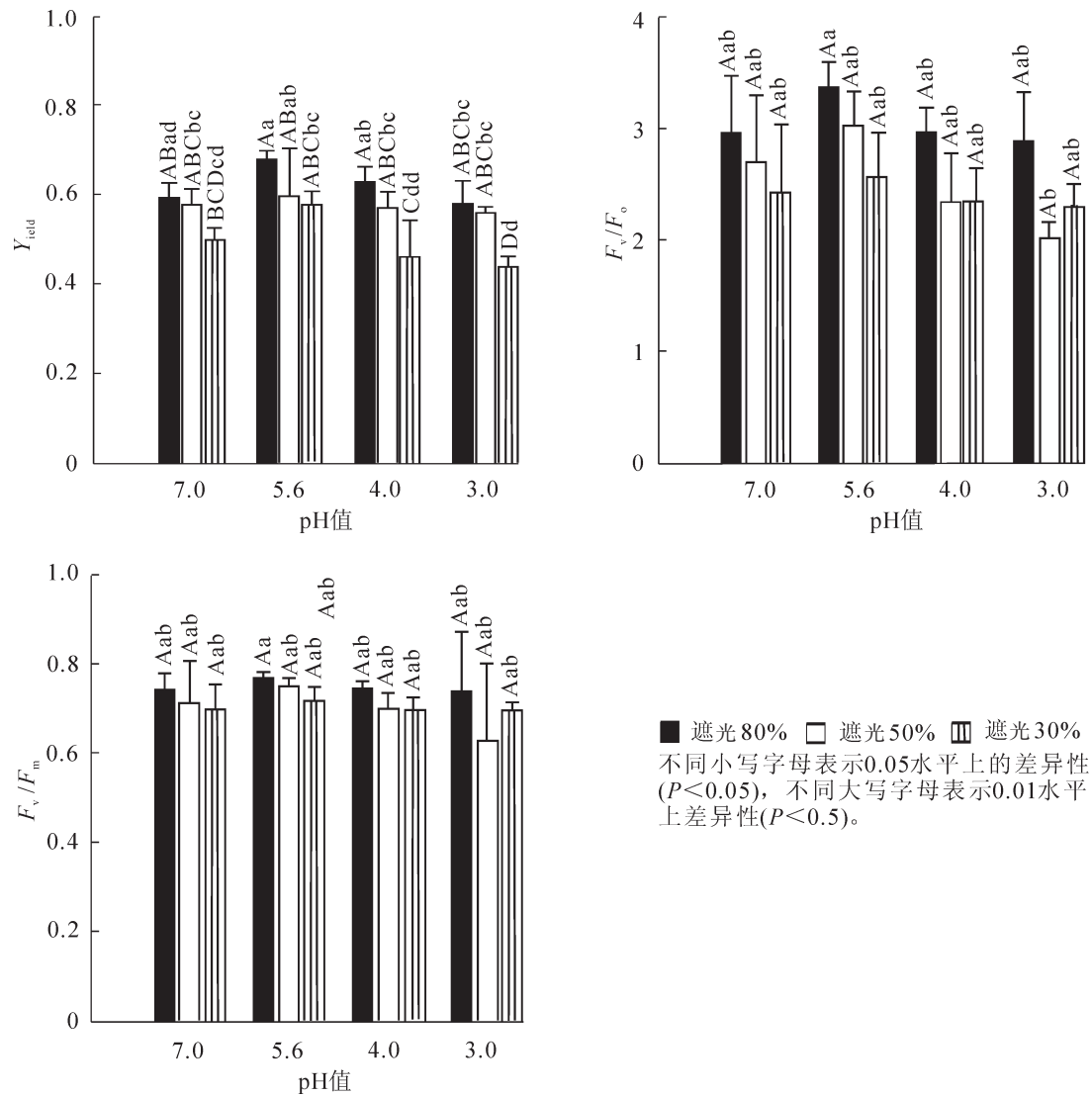
2.1 不同光强与酸液胁迫处理条件下芒萁荧光参数比较

图 2 为遮光和酸液双因素处理下芒萁叶绿素荧光参数的测定结果。由图 2 可知: 在同一遮光处理下, 芒萁的荧光参数 Y_{ield} (PS II 实际光化学效率)、 F_v/F_o (PS II 潜在活性) 和 F_v/F_m (PS II 光化学效率) 变化规律基本一致, 均表现为 $\text{pH } 5.6 > \text{pH } 4.0 > \text{pH } 7.0 > \text{pH } 3.0$ 。说明 pH 5.6 和 pH 4.0 酸液处理促使 Y_{ield} , F_v/F_o 和 F_v/F_m 增大, pH 3.0 酸液处理下 Y_{ield} , F_v/F_m 和 F_v/F_o 下降。但仅 80% 遮光条件下, pH 5.6 的酸液处理与 pH 3.0 处理下的 Y_{ield} 存在显著差异 ($P < 0.05$), 其余荧光参数在各酸液处理间均无显著差异。表明酸液胁迫对芒萁的 Y_{ield} 有显著影响, 而对其他叶绿素荧光参数影响较弱。

在相同的酸液处理与不同的遮光条件下, 芒萁叶片 Y_{ield} , F_v/F_m 和 F_v/F_o 表现出一致的特点, 即: 80% 遮光 > 50% 遮光 > 30% 遮光。暗适应参数 F_v/F_m 和 F_v/F_o 在不同遮光间差异性不显著 ($P > 0.05$)。 Y_{ield} 在 3 种遮光处理下存在一定差异性。当模拟酸雨在 pH 5.6 和 pH 7.0 时, 在 80% 和 30% 遮光处理下的 Y_{ield} 均存在显著差异 ($P < 0.05$), 当模拟酸雨在 pH 3.0 和 pH 4.0 时, 在 80% 和 30% 遮光处理下的 Y_{ield} 存在极显著差异 ($P < 0.01$)。说明随着遮光程度增加, 不同酸液胁迫下芒萁荧光参数 Y_{ield} , F_v/F_m 和 F_v/F_o 均呈现增加的趋势。酸液强度的增加会增大 Y_{ield} 在 80% 和 30% 遮光间的差异性。

2.2 不同光强与酸液胁迫处理条件下芒萁色素质量分数比较

图 3 为遮光和酸液双因素处理下芒萁叶片色素质量分数测定值。比较分析图 3 可知: 在相同遮光条件下, 芒萁的叶绿素 a, 叶绿素 b, 类胡萝卜素, 及总叶绿素变化趋势一致, 为 $\text{pH } 5.6 > \text{pH } 4.0 > \text{pH } 7.0 > \text{pH } 3.0$ 。在 80% 遮光条件下, pH 5.6 处理下的叶绿素 a, 叶绿素 b 和总叶绿素与 pH 3.0, pH 7.0 处理下的差异显著 ($P < 0.05$), 类胡萝卜素在 pH 5.6 和 pH 3.0 处理间也存在显著差异 ($P < 0.05$)。说明 pH 5.6 和 pH 4.0 的酸液处理提高了芒萁色素质量分数, pH 3.0 的酸液处理降低了色素质量分数。同时, 遮



不同小写字母表示 0.05 水平上的差异性 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示 0.01 水平上的差异性 ($P < 0.01$)。

图 2 不同遮光程度和酸液处理下芒萁叶绿素荧光参数比较

Figure 2 Comparison of chlorophyll fluorescence parameters of *Dicranopteris dichotoma* under different shadings and acid rain treatments

光程度的增加会增大 4 种色素在不同强度酸液处理下的差异。

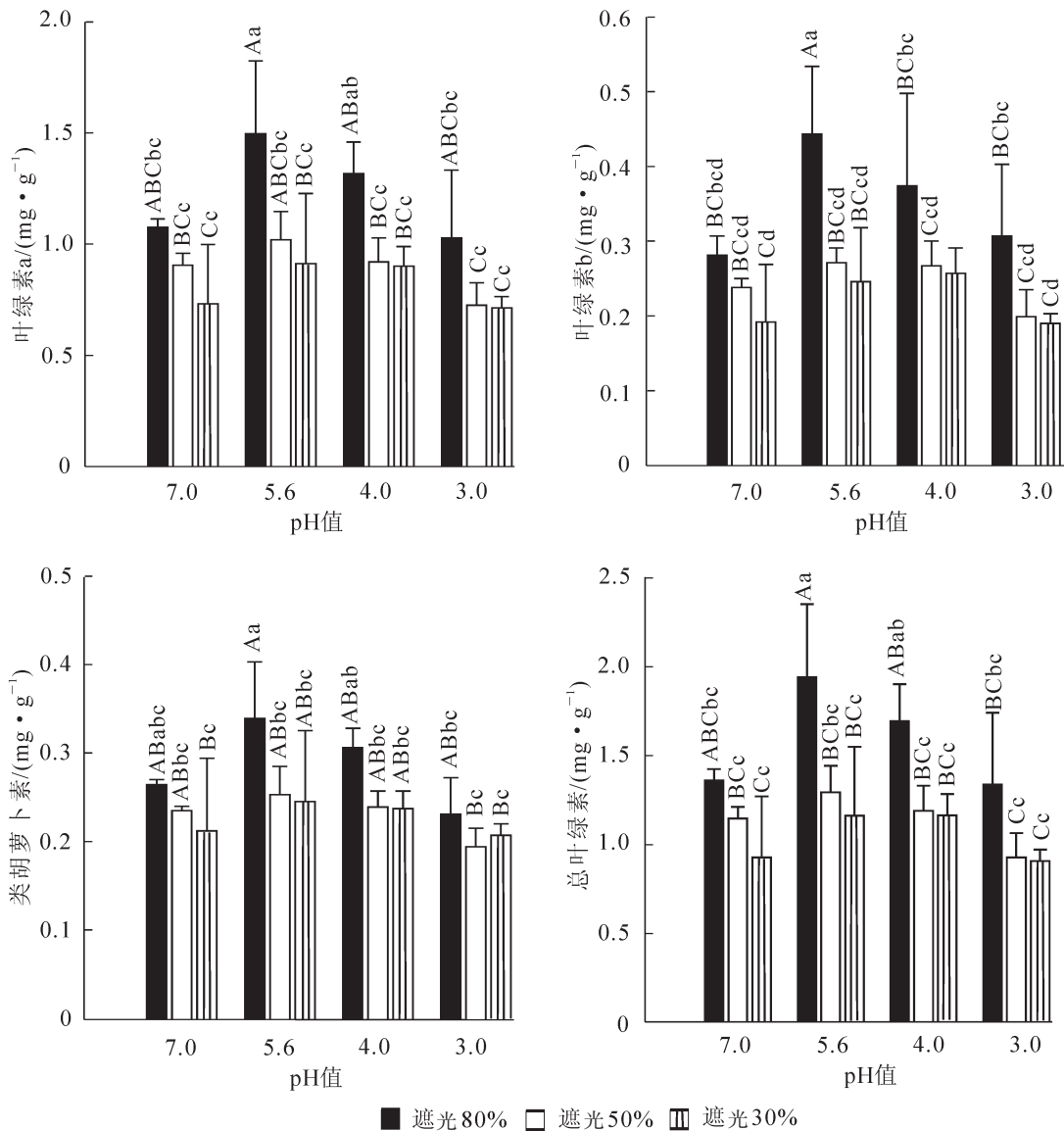
同一酸液强度下, 叶绿素 a, 叶绿素 b, 总叶绿素和类胡萝卜素质量分数大小顺序均表现为 80%遮光>50%遮光>30%遮光, 但差异性不尽相同。在 pH 5.6 处理下, 80%遮光下芒萁的叶绿素 a, 叶绿素 b, 总叶绿素和类胡萝卜素与 50%, 30%遮光处理下的差异显著 ($P < 0.05$); 在 pH 4.0 处理下, 除类胡萝卜素在遮光间无显著差异外, 叶绿素 a, 叶绿素 b, 总叶绿素差异性与 pH 5.6 处理相同。另外, pH 3.0 处理下芒萁的叶绿素 b 在 80%和 30%遮光间差异显著 ($P < 0.05$)。表明随着遮光程度的增加, 叶绿素 a, 叶绿素 b, 总叶绿素和类胡萝卜素质量分数呈现增大趋势, 且差异显著。

2.3 不同光强与酸液胁迫处理条件下芒萁荧光参数与色素质量分数的相关性分析

对不同光强和酸液胁迫处理条件下芒萁叶绿素荧光参数与色素质量分数指标作相关性分析(表 1)。由表 1 可知: Y_{ield} , F_v/F_m 和 F_v/F_0 与叶绿素 a, 叶绿素 b, 总叶绿素和类胡萝卜素之间均存在极显著正相关 ($P < 0.01$)。

2.4 光强、酸液及二因素交互作用对芒萁荧光参数和色素质量分数的影响

表 2 为光强、酸液及二因素交互作用对芒萁荧光参数和色素质量分数的双因素方差分析结果。比较分析表 2 可知, 光强对芒萁的 Y_{ield} , 叶绿素 a, 叶绿素 b, 总叶绿素和类胡萝卜素均产生极显著影响, 而对 F_v/F_0 具有显著影响, 对 F_v/F_m 无显著影响; 酸液对 Y_{ield} , 叶绿素 a, 叶绿素 b, 总叶绿素具有极显著影响,



不同小写字母表示 0.05 水平上的差异性 ($P<0.05$), 不同大写字母表示 0.01 水平上差异性 ($P<0.05$)。

图 3 不同遮光程度和酸液处理下芒萁色素质量分数比较

Figure 2 Comparison of pigment content of *Dicranopteris dichotoma* under different shadings and acid rain treatments

表 1 芒萁荧光参数与色素质量分数的相关性分析

Table 1 Correlation analysis between chlorophyll fluorescence parameters and pigment content of *Dicranopteris dichotoma*

项目	Y_{ield}	F_v/F_o	F_v/F_m	叶绿素 a	叶绿素 b	总叶绿素	类胡萝卜素
Y_{ield}	1						
F_v/F_o	0.935**	1					
F_v/F_m	0.904**	0.986**	1				
叶绿素 a	0.911**	0.888**	0.874**	1			
叶绿素 b	0.841**	0.804**	0.804**	0.965**	1		
总叶绿素	0.851**	0.811**	0.811**	0.972**	0.993**	1	
类胡萝卜素	0.809**	0.818**	0.832**	0.874**	0.811**	0.853**	1

说明: ** 表示在 0.01 水平下双尾检验相关性显著。

对类胡萝卜素有显著影响, 对 F_v/F_o 和 F_v/F_m 无显著影响; 光强和酸液的交互作用对各参数均无显著影响。

3 结论与讨论

伴随着地带性森林植被的退化和酸雨的日趋加重, 由林下遮光生境逐渐向全光条件转变意味着光照

表 2 光强、酸液及二因素交互作用对芒萁荧光参数和色素质量浓度的双因素方差分析

Table 2 *F*-values of two-way ANOVA for the effects of light intensity, acid rain and their interactions on response variables of *Dicranopteris dichotoma*

参数	光强		酸液		光强×酸液	
	<i>F</i>	显著性	<i>F</i>	显著性	<i>F</i>	显著性
Y_{ield}	20.559**	0.000**	5.57**	0.005**	0.937	0.487
F_v/F_o	4.287*	0.026*	1.707	0.192	0.299	0.931
F_v/F_m	2.572	0.097	1.259	0.311	0.465	0.827
叶绿素 a	15.752**	0.000**	4.974**	0.008**	0.511	0.794
叶绿素 b	18.492**	0.000**	5.65**	0.004**	0.835	0.555
总叶绿素	16.565**	0.000**	5.148**	0.007**	0.568	0.751
类胡萝卜素	7.274**	0.003**	4.355*	0.014*	0.479	0.817

说明：* 表示在 0.05 水平下双尾检验相关性显著；** 表示在 0.01 水平下双尾检验相关性显著。

强度不断增强而土壤 pH 值亦可能逐渐降低。因此，强酸性土壤和全光 2 个环境因子的胁迫作用及其组合影响，必然引起植物的光合生理主要参数和叶片色素含量发生相应的变化。此种变化过程可借助于荧光参数反映强酸性土壤和全光的联合胁迫效应，同时亦可通过叶片色素含量反映植物对光强条件由弱至强的适应特征。叶绿素荧光参数可反映光合机构内部一系列重要的调节过程， Y_{ield} 、 F_v/F_m 、 F_v/F_o 是研究植物光合生理状态的、重要的叶绿素荧光参^[13]， Y_{ield} 反映了 PS II 反应中心部分关闭情况下的实际原初光能捕获效率， F_v/F_m 反映 PS II 最大光能转换效率， F_v/F_o 表示光反应中心 PSII 的潜在活性。叶绿素是光合作用的光敏催化剂，它的重要性质表现为选择吸收不同波长的光谱，因而其含量和比例被视为植物适应与利用环境因子的重要指标^[14]。因此，在不同遮光强度和土壤 pH 值的条件下，芒萁叶片的荧光参数与色素含量的变化，表征芒萁对光照条件的适应范围以及对强光和酸性土壤的适应特征。

3.1 芒萁叶绿素荧光参数对不同光强和酸液胁迫的响应

在相同的遮光条件下，pH 5.6 和 pH 4.0 的酸液胁迫提高了芒萁荧光参数 Y_{ield} 、 F_v/F_m 和 F_v/F_o 的值，pH 3.0 酸液处理使荧光参数降低。由此说明：适度降低酸液的 pH 值(pH 5.6 和 pH 4.0)不会损伤芒萁的光合系统活性，相反具有一定的促进作用，表明芒萁对酸液有较强的适应能力。此研究结果与模拟酸雨对乌药 *Lindera aggregata* 幼苗的影响相同^[15]。同时酸液胁迫对芒萁 Y_{ield} 具有显著影响。本项试验与木荷 *Schima superba* 的研究结果是一致的，适度 pH 值的酸液可提高木荷暗反应参数，但并无显著性差异^[16]。而高浓度的酸液(pH 3.0)降低芒萁的荧光参数值，说明酸液胁迫使 PS II 反应中心受到伤害，光合电子传递受阻，进而影响芒萁正常光合作用的进行^[17]。由此表明，超过一定 pH 值， F_v/F_m 和 F_v/F_o 不能作为酸液胁迫的参数指标，而 Y_{ield} 能否作为验证芒萁受酸液胁迫的参数指标，还需进一步的试验加以论证。

在酸液强度相同的条件下，随着遮光程度的增加，芒萁叶绿素荧光参数 Y_{ield} 、 F_v/F_o 和 F_v/F_m 呈现增大趋势。 F_v/F_o 和 F_v/F_m 在不同遮光处理间的差异性不显著($P>0.05$)，而 Y_{ield} 在 80% 和 30% 遮光处理间差异显著($P<0.05$)。说明 Y_{ield} 对遮光反应敏感。刘悦秋等^[18-19]的研究结果与此类似。在所设置的遮光条件下， F_v/F_m 和 F_v/F_o 均高于全光条件处理，并且随着遮光程度的增强其值不断增加，表明芒萁具有较强的耐荫性。

3.2 芒萁色素质量分数对不同光强和酸液胁迫的响应

叶绿素质量分数是反映植物叶片光合作用及潜力的重要指标，受光强和酸液胁迫的影响^[20]。研究结果显示：在相同遮光条件下，随着酸液 pH 值的降低，叶绿素质量分数均有所下降，表明酸液胁迫加速了芒萁色素的降解，此研究与张珊珊等^[21]及马原^[22]研究结论一致。模拟酸雨的 pH 值越小，叶绿素质量分数越低。因此，芒萁叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和和类胡萝卜素的质量分数在酸液 pH 5.6 和 pH 4.0 的处理达到较高的水平。

在模拟酸雨 pH 值相同的条件下，芒萁叶片叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和和类胡萝卜素的质量分数随着遮光度增加而增大，但差异性不尽相同。前人的研究也获得相似的结论^[23]。遮光程度的增加会增大色素质量分数在不同遮光间的差异性^[24]。色素质量分数的提高是因为模拟酸雨提供了植物充足而土壤中未充足的 NO_3^- ，刺激了叶绿素的增加^[25]；而色素质量分数的降低是因为这种“施肥”作用不足以抵消

由酸雨胁迫产生的不良反应。芒萁叶片的叶绿素 a, 叶绿素 b, 总叶绿素质量分数的增加, 有利于提高捕光能力, 叶绿素 b 的增加能更有效地利用漫射光中较多的蓝紫光, 从而提高光合效能。

相关性分析表明, 芒萁的叶绿素荧光参数和色素各参数之间存在极显著正相关($P < 0.01$), 且芒萁在 pH 5.6 和 pH 4.0 酸液处理下色素质量分数较高, 具有较大的 PS II 活性, 而 pH 3.0 酸液胁迫产生一定的抑制作用。80%遮光提高了色素质量分数和荧光参数的值。同时, 光强对芒萁色素和荧光参数的影响大于酸液胁迫, 且无显著性交互作用。

本研究的结果还表明: 适度的酸液(pH 5.6 和 pH 4.0)对芒萁叶绿素质量分数以及荧光参数有一定的促进作用, 但强酸会破坏芒萁正常的光合功能; 芒萁叶绿素质量分数及荧光参数随着遮光程度的增加呈现增大趋势, 表明芒萁对弱光环境具有较强的适应性。

4 参考文献

- [1] 钱崇澍, 陈焕镛. 中国植物志: 第 2 卷[M]. 北京: 科学出版社, 1959: 116 – 121.
- [2] GEORGE L O, BAZZAZ F A. The fern understory as an ecological filter: growth and survival of canopy-tree seedlings [J]. *Ecology*, 1999, **80**(3): 846 – 856.
- [3] GEORGE L O, BAZZAZ F A. The fern understory as an ecological filter: emergence and establishment of canopy-tree seedlings [J]. *Ecology*, 1999, **80**(3): 833 – 845.
- [4] 张明如, 何明, 温国胜, 等. 芒萁种群特征及其对森林更新影响评述[J]. 内蒙古农业大学学报, 2010, **31**(4): 303 – 308.
- ZHANG Mingru, HE Ming, WEN Gousheng, *et al.* The characteristics of *Dicranopteris dichotoma* population and its effects on the forest regeneration [J]. *J Inner Mongolia Agric For Univ*, 2010, **31**(4): 303 – 308.
- [5] 侯学煜. 中国境内酸性土钙质土和盐碱土的指示植物[M]. 北京: 科学出版社, 1954.
- [6] 张智顺, 张庆费, 郑思俊, 等. 遮阴对几种绿化植物光合特性和生长的影响[J]. 东北林业大学学报, 2010, **38**(3): 47 – 49.
- ZHANG Zhishun, ZHANG Qingfei, ZHENG Sijun, *et al.* Effects of shades on photosynthetic characteristics and growth of species of afforestation plants [J]. *J Northeast For Univ*, 2010, **38**(3): 47 – 49.
- [7] 刘柿良, 马明东, 潘远智, 等. 不同光环境对桉木幼苗生长和光合特性的影响[J]. 应用生态学报, 2013, **24**(2): 351 – 358.
- LIU Shiliang, MA Mingdong, PAN Yuanzhi, *et al.* Effect of light regime on the growth and photosynthetic characteristics of *Alnus formosana* and *A. cremstogyne* seedling [J]. *J Appl Ecol*, 2013, **24**(2): 351 – 358.
- [8] SENEVIRATHNA A M W K, STIRLING C M, RODRIGO V H L. Growth, photosynthetic performance and shade adaptation of rubber (*Hevea brasiliensis*) grown in natural shade [J]. *Tree Physiol*, 2003, **23**(10): 705 – 712.
- [9] 曹春信, 周琴, 韩亮亮, 等. 模拟酸雨对油菜花期生理特性和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2010, **21**(8): 2057 – 2062.
- CAO Chunxin, ZHOU Qin, HAN Liangliang, *et al.* Effects of simulated acid rain on oilseed rape (*Brassica napus*) physiological characteristics at flowering stage and yield [J]. *J Appl Ecol*, 2010, **21**(8): 2057 – 2062.
- [10] 邱栋梁, 刘星辉, 郭素枝. 模拟酸雨胁迫下钙对龙眼光合功能的调节作用[J]. 应用生态学报, 2002, **13**(9): 1072 – 1076.
- QIU Dongliang, LIU Xinghui, *et al.* Regulation function of calcium on photosynthesis of *Dimocarpus longana* Lour. ‘Wulongling’ under simulated acid rain stress [J]. *J Appl Ecol*, 2002, **13**(9): 1072 – 1076.
- [11] 赵伟, 康丽莉, 林慧娟, 等. 临安大气本底站酸雨污染变化特征与影响因素分析[J]. 中国环境监测, 2012, **28**(4): 9 – 13.
- ZHAO Wei, KANG Lili, LIN Huijuan, *et al.* Characteristics and affecting factors analysis of acid rain at Lin’an atmosphere watch regional station [J]. *J Environ Monit China*, 2012, **28**(4): 9 – 13.
- [12] LICHTENTHALER H K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes [J]. *Methods Enzymol*, 1987, **148**: 350 – 382.
- [13] 柯世省, 金则新. 水分胁迫和温度对夏蜡梅叶片气体交换和叶绿素荧光特性的影响[J]. 应用生态学报, 2008, **19**(1): 43 – 49.

- KE Shisheng, JIN Zexin. Effects of water stress and temperature on gas exchange and chlorophyll fluorescence of *Sinocalycanthus chinensis* leaves [J]. *J Appl Ecol*, 2008, **19**(1): 43 – 49.
- [14] 王建华, 任士福, 史宝胜, 等. 遮荫对连翘光合特性和叶绿素荧光参数的影响[J]. 生态学报, 2011, **31**(7): 1811 – 1817.
- WANG Jianhua, REN Shifu, SHI Baosheng, *et al.* Effects of shades on the photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of *Forsythia suspensa* [J]. *J Acta Ecol Sin*, 2011, **31**(7): 1811 – 1817.
- [15] 王强, 金则新, 彭礼琼. 模拟酸雨对乌药幼苗生理生态特性的影响[J]. 浙江大学学报: 理学版, 2013, **40**(4): 447 – 455.
- WANG Qiang, JIN Zexin, PENG Liquong, *et al.* Effects of simulated acid on the ecophysiological characteristics of *Lindera aggregate* [J]. *J Zhejiang Univ Sci Ed*, 2013, **40**(4): 447 – 455.
- [16] 殷秀敏, 伊力塔, 余树全, 等. 酸雨胁迫对木荷叶片气体交换和叶绿素荧光参数的影响[J]. 生态环境学报, 2010, **19**(7): 1556 – 1562.
- YIN Xiumin, YI Lita, YU Shuquan, *et al.* Effects of acid stress on gas exchange and chlorophyll fluorescence in leaves of *Schima superb* seedlings [J]. *J Ecol Environ Sci*, 2010, **19**(7): 1556 – 1562.
- [17] 金清, 江洪, 余树全, 等. 酸雨胁迫对苦槠幼苗气体交换与叶绿素荧光的影响[J]. 植物生态学报, 2010, **34**(9): 1117 – 1124.
- JIN Qing, JIANG Hong, YU Shuquan, *et al.* Effects of acid rain stress on gas exchange and chlorophyll fluorescence of *Castanopsis sclerophylla* seedlings [J]. *J Plant Ecol*, 2010, **34**(9): 1117 – 1124.
- [18] 刘悦秋, 孙向阳, 王勇, 等. 遮阴对异株荨麻光合特性和荧光参数的影响[J]. 生态学报, 2007, **27**(8): 3457 – 3464.
- LIU Yueqiu, SUN Xiangyang, WANG Yong, *et al.* Effects of shades on the photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of *Urtica dioica* [J]. *J Acta Ecol Sin*, 2007, **27**(8): 3457 – 3464.
- [19] 刘建锋, 杨文娟, 江泽平, 等. 遮阴对濒危植物崖柏光合作用和叶绿素荧光参数的影响[J]. 生态学报, 2011, **31**(20): 5999 – 6004.
- LIU Jianfeng, YANG Wenjuan, JIANG Zeping, *et al.* Effects of shading on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters in leaves of the endangered plant *Thuja sutchuenensis* [J]. *J Acta Ecol Sin*, 2011, **31**(20): 5999 – 6004.
- [20] 余春珠, 温达志, 彭长连. 3 种木本植物对酸雨的敏感性和抗性[J]. 生态环境, 2005, **14**(1): 86 – 90.
- YU Chunzhu, WEN Dazhi, PENG Changlian. Sensitivity and resistance of three woody species to acid rain pollution [J]. *J Ecol Environ*, 2005, **14**(1): 86 – 90.
- [21] 张珊珊, 俞飞, 郭慧媛, 等. 酸雨与凋落物复合作用对柳杉叶片色素和反射光谱的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2014, **31**(2): 254 – 263.
- ZHANG Shanshan, YU Fei, GUO Huiyuan, *et al.* Pigment content and reflectance spectrum of *Cryptomeria fortunei* with acid and litter treatments [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2014, **31**(2): 254 – 263.
- [22] 马原. 模拟酸雨对天目山柳杉的影响[D]. 上海: 华东师范大学, 2007.
- MA Yuan. *Effect of Simulated Acid Rain on Cryptomeria fortunei* [D]. Shanghai: East China Normal University, 2007.
- [23] 崔培强, 姜卫兵, 翁忙玲, 等. 遮阴对紫叶李幼苗叶片色素含量及光合速率的影响[J]. 西北植物学报, 2010, **30**(11): 2286 – 2292.
- CUI Peiqiang, JIANG Weibing, WENG mangling, *et al.* Pigment content and net photosynthetic rates of leaves in purple leaf plum seedling under shading [J]. *J Bot Boreal-Occident*, 2010, **30**(11): 2286 – 2292.
- [24] 岳桦, 岳晓晶. 对开蕨对遮阴处理的响应[J]. 园艺学报, 2010, **37**(9): 1517 – 1522.
- YUE Hua, YUE Xiaojing. Responses of *Phyllitis japonica* shading treatment [J]. *J Horti Sin*, 2010, **37**(9): 1517 – 1522.
- [25] 李志国, 姜卫兵, 翁忙玲, 等. 常绿阔叶园林 6 树种(品种)对模拟酸雨的生理响应及敏感性[J]. 园艺学报, 2011, **38**(3): 512 – 518.
- LI Zhiguo, JIANG Weibing, WENG mangling, *et al.* Physiologic responses and sensitivity of six garden plants to simulated acid rain [J]. *J Horti Sin*, 2011, **38**(3): 512 – 518.