

模拟酸雨对马尾松叶绿素荧光特性的影响

沈 燕¹, 伊力塔^{1,2}, 殷秀敏³, 余树全^{1,2}, 刘美华^{1,2}, 管杰然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 亚热带森林培育国家重点实验室培育基地, 浙江 临安 311300; 3. 杭州之江园林绿化艺术有限公司, 浙江 杭州 310053)

摘要: 以马尾松 *Pinus massoniana* 为供试材料, 采用土培盆栽的方法研究了重度酸雨(pH 2.5), 中度酸雨(pH 4.0) 和对照(pH 5.6)处理下不同季节马尾松叶片的叶绿素荧光特性。结果表明: 经过 2 a 的酸雨喷施, 马尾松幼苗叶片的 F_v/F_m 和 F_v/F_o 等荧光参数变化较为一致, 均随着 pH 值的升高而降低, 而且随着处理时间的延续实际光化学量子产量(y_{ield})也呈现相同的趋势, 说明马尾松在酸雨胁迫下, 其叶片的 PS II 原初光能的转换效率、激发能利用情况和电子传递效率都受到一定的影响, 从而不利于其进行光合作用及生长, 故在酸雨严重的地区, 马尾松的生长不是很好, 不适合大范围种植。图 3 参 22

关键词: 森林生态学; 酸雨胁迫; 马尾松; 叶绿素荧光特性; 季节

中图分类号: S718.5 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2013)-05-0706-08

Acid rain stress with leaf chlorophyll fluorescence in *Pinus massoniana*

SHEN Yan¹, Yilita^{1,2}, YIN Xiumin³, YU Shuquan^{1,2}, LIU Meihua^{1,2}, GUAN Jieran¹

(1. School of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. The Nurturing Station for the State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 3. Hangzhou Z-River Landscape Art Co. Ltd., Hangzhou 310053, Zhejiang, China)

Abstract: Using a portable PAM-2100 fluorometer, potted plants of *Pinus massoniana* were used to study chlorophyll fluorescence parameters in different seasons, with three levels of simulated acid rain stress (heavy stress, pH 2.5; moderate stress, pH 4.0; and control pH 5.6). Results showed that maximum efficiency of photosystem II in the dark (F_v/F_m) and potential photochemical efficiency (F_v/F_o) were decreased with increased pH values of acid rain after two years of acid rain spraying. And actual photochemical quantum (y_{ield}) also showed the same trend with time. Our results indicated that efficiency of primary conversion of light energy of PS II, the efficiency of potential photosynthetic quantum conversion and the photosynthetic electron transport rate were negatively affected under acid rain stress, which was adverse to plant growth. Thus, *P. massoniana* is unsuitable for widespread planting in areas of heavy acid rain. [Ch, 3 fig. 22 ref.]

Key words: forest ecology; acid rain stress; *Pinus massoniana*; characteristics of chlorophyll fluorescence; seasonal changes

随着工业的发展, 中国的酸雨呈蔓延之势, 成为继欧洲、北美之后成为世界第 3 个重大酸雨区^[1]。就浙江省而言, 自 20 世纪 80 年代以来, 由于社会经济的高速发展, 带动了能源消费的快速增长。与此同时, 大量煤炭等能源的消费, 造成浙江省工业二氧化硫排放量不断上升、降水 pH 值不断下降, 以及酸雨率不断升高^[2-3]。2008 年的数据表明, 浙江省临安市燃煤排放产生的 SO_4^{2-} 仍然是临安地区降水酸化的主要无机致酸组分^[4]。酸雨会对植物叶片和根系造成不同程度的伤害; 酸雨在减弱植物光合作用和蒸

收稿日期: 2012-10-15; 修回日期: 2013-01-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31100325); 浙江省自然科学基金资助项目(Y3110200, Y5110226); 浙江省教育厅资助项目(Y201017730)

作者简介: 沈燕, 从事森林生态学研究。E-mail: 710847698@qq.com。通信作者: 伊力塔, 副教授, 博士, 从事恢复生态学研究。E-mail: yilita@126.com

腾作用的同时，加速植物的呼吸作用；酸雨还淋洗植物营养元素(如 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+})的析出，造成植物营养失衡，使得植物的生长呈现出负生物效应^[5]，从而影响到整个森林生态系统的发展与平衡。关于酸雨影响森林植物生理的研究主要表现在以下2个方面：酸雨胁迫对植物叶片膜透性和体内酶的抗性机制的研究^[6-8]；酸雨胁迫对植物叶绿素荧光特性、光合放氧和水分生理生态的影响的研究^[9-15]。酸雨对作为其主要受体的森林生态系统的危害已经得到广泛重视并已形成共识，已经有较多相关亚热带乔木树种对酸雨响应的研究案例，如蒋馥蔚等^[11]在研究酸雨胁迫对黑壳楠 *Lindera megaphylla* 生理生态影响的试验中发现，酸雨胁迫显著影响了黑壳楠的气孔导度(G_s)，蒸腾速率(T_r)和水分利用效率(E_{wu})，且酸雨和季节的交互效应极显著影响到植物的胞间二氧化碳(C_i)浓度和蒸腾速率。此外，黑壳楠的最大净光合速率(A_{max})，表观量子效率(E_{AQ})，光补偿点(P_{LC})和暗呼吸速率(R_d)对酸雨胁迫敏感。重度酸雨胁迫严重影响黑壳楠的生理生长，在酸雨危害严重地区(如浙江)不适宜大量栽植黑壳楠。马尾松 *Pinus massoniana* 是中国亚热带地区特有的乡土树种和荒山恢复的先锋树种，广泛分布于南方多省(区)。目前，国内对于马尾松生长及生理过程受酸雨影响方面的研究较少。本研究经过2 a的酸雨喷施试验，并利用叶绿素荧光分析技术，研究不同强度(重度酸雨pH 2.5，中度酸雨pH 4.0和对照pH 5.6)模拟酸雨胁迫下，马尾松植株叶片的叶绿素荧光特性，揭示马尾松光合生理以及生长过程对酸雨的响应机制，为进一步研究酸雨对马尾松的影响及其对酸雨的反馈作用提供基础数据，也可以为园林绿化树种的筛选和科学管理提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验地设在浙江农林大学(30°16' N, 119°44' E)苗圃。属中亚热带季风气候区，温暖湿润，四季分明，具有春天多雨，夏季湿热，秋高气爽，冬日干冷的气候特征。全年日照时数为1 847.3 h，全年降水量为1 628.6 mm，全年平均气温为16.4 °C，1月平均气温为3.8 °C，7月平均气温为28.6 °C，极端最高气温为40.4 °C，极端最低气温为-9.2 °C，年无霜期250 d左右。土壤为红黄壤。

1.2 实验材料

选择1年生，长势健康、生长一致且同种源的实生马尾松幼苗。

1.3 实验方法

选取长势基本一致的健康马尾松幼苗，盆栽于控根育苗容器中(内径22 cm，深27 cm)，用红黄壤进行栽培，1株·盆⁻¹，并进行常规苗木管理；随机分成3个组，选15盆·处理⁻¹进行模拟酸雨处理。酸雨配置方法根据浙江省酸性降水中的平均离子组成及通常模拟酸雨实验中常采用的配比^[2,11,14,16]，按 $H_2SO_4:HNO_3$ (体积比)=8:1的比例配制母液，用水稀释成pH值分别为2.5，4.0和5.6的酸雨溶液。分别作为：重度酸雨(pH 2.5)，中度酸雨(pH 4.0)和酸雨对照(pH 5.6)的处理。同时，根据浙江临安地区多年月均降水量，喷淋约130 mL·盆⁻¹酸雨(与当地总降水量基本持平)，1个月喷洒3~5次。期间适当浇水。试验处理时间为2009年3月初到2010年12月底。为避免自然降水干扰，喷施模拟酸雨期间用塑料薄膜遮挡。实验期间不施肥，仅去除一些杂草。

1.4 测定方法

本研究采用便携式调制叶绿素荧光仪 PAM-2100(Walz, Germany)进行马尾松叶片叶绿素荧光各参数测定。选择晴天上午9:00-11:00分别于2009年7月、2009年11月、2010年4月、2010年9月和2010年11月各进行连体测定。重复5次·梯度⁻¹。

测量数据：原初荧光(F_0)，最大荧光(F_m)，光系统II(PS II)的最大光化学效率(F_v/F_m)和计算得到暗适应后的PS II的潜在活性(F_v/F_0)；光适应下PS II实际光化学量子产量(y_{ield})；光化学猝灭(q_p)和非光化学猝灭系数(q_N)。其中， F_v/F_m 在测定前，叶片经过20 min的暗适应。

2 结果分析

2.1 不同pH值酸雨处理对马尾松叶绿素荧光参数的动态响应

研究表明，在暗适应和光适应下，原初荧光(F_0)和最大荧光(F_m)，光系统II的最大光化学效率

(F_v/F_m)和暗适应后的 PS II 的潜在活性(F_v/F_0)在重度酸雨(pH 2.5)、中度酸雨(pH 4.0)和对照(pH 5.6)处理下,随季节,分别表现出基本一致的变化规律,即 F_0 和 F_m 在 2009 年 7 月份(夏季)都有 1 个最低值,其余月份都较平缓; F_v/F_m 和 F_v/F_0 在 2010 年 11 月(冬季)均有 1 个最低值,2009 年 9 月和 2010 年 9 月(秋季)则都具有最高值(图 1)。

从图 1 可以看出:PS II 实际光化学量子产量(y_{ield}),光化学猝灭(q_p)和非光化学猝灭系数(q_n)也均表现出基本一致的变化规律。即 F_0 和 F_m 在 2009 年 7 月时在不同 pH 值酸雨处理下都均为达到最低值,2009 年 11 月较 2009 年 7 月有 1 个较大的提高,然后又降低,2010 年 4 月、2010 年 9 月、2010 年 11 月趋于平缓。 F_v/F_m , F_v/F_0 和实际光化学量子产量(y_{ield})在 2010 年 4 月时在不同酸雨处理下其值最低,其余月份较高。以上变化也可以间接说明 F_v/F_m 和 F_v/F_0 的变化取决于 F_v 的变化。 q_n 和 q_p 则表现为相反的变化趋势,即在 2009 年 11 月时 q_n 相对较低,而 q_p 则相对较高,其余月份都较平缓。

因此,从实验结果初步判断,经过 2 a 的酸雨处理,马尾松叶片叶绿素荧光参数随时间变化而呈现不同的变化规律,而不同 pH 值酸雨处理对马尾松叶片叶绿素荧光参数影响差异不显著,且与对照处理(pH 5.6)无显著差异,说明酸雨胁迫强度并非引起叶绿素荧光参数产生变化的主导因素。根据温国胜等^[17]研究发现,光能是植物光合作用的能量基础,光能超过光合机构所利用的能量或不足都会造成光抑制,即光合结构遭到破坏,引起 PS II 伤害和光保护反应,从而引起荧光参数的变化。温度和水分也对植物有胁迫作用,影响植物细胞内酶的活性和对离子的吸收从而影响植物光合作用。即在 2010 年 4 月临安的天气状况多为阴雨天气,光照强度不足,导致马尾松幼苗由于光能不足而引起光抑制,光抑制是一种光保护过程,会影响其光合作用;且当时气温较低,低温会影响蛋白质的活性,甚至使其失活。低温时马尾松幼苗细胞内与光合作用和离子吸收有关的酶的活性下降,间接的影响了其光合作用的强度。

2.2 不同酸雨浓度处理对马尾松叶绿素荧光参数的影响

2.2.1 暗适应参数的影响

①酸雨对马尾松原初荧光(F_0)的影响。由图 2 可知:经过 2 a 的酸雨喷施后,马尾松幼苗的 F_0 在 5 个月份中差异性不完全相同。2009 年 7 月、2010 年 9 月和 2010 年 11 月,3 种酸雨处理条件下的马尾松幼苗的 F_0 之间都没有存在显著差异($P>0.05$);而 2009 年 11 月,中度酸雨胁迫处理(pH 4.0)条件下的马尾松幼苗的 F_0 显著高于重度酸雨胁迫处理(pH 2.5, $P<0.05$),极显著高于对照处理(pH 5.6, $P<0.01$),重度酸雨胁迫处理(pH 2.5)显著高于对照处理(pH 5.6, $P<0.05$);2010 年 4 月,中度酸雨胁迫处理(pH 4.0)条件下的马尾松幼苗的 F_0 显著高于对照处理(pH 5.6, $P<0.05$),极显著高于重度酸雨胁迫处理(pH 2.5, $P<0.01$),对照处理(pH 5.6)显著高于重度酸雨胁迫处理(pH 2.5, $P<0.05$)。由上可知:在 2 a 的酸雨喷施的过程中,相同年份,马尾松幼苗的 F_0 在中度酸雨(pH 4.0)条件下具有最高值。 F_0 常常被认为是 PS II 反应中心的开放程度,其与叶绿素浓度有关,且叶绿素浓度越高,PS II 反应中心的破坏程度越大。当 PS II 反应中心受到破坏时,会使 F_0 增大。在中度酸雨胁迫下, F_0 值最大,PS II 反应中心处于完全开放(即 PS II 反应中心受到破坏程度最大),马尾松幼苗叶片中的叶绿素浓度最大。说明在酸雨的胁迫下,马尾松幼苗光合作用结构受到破坏,无法进行正常的光合作用。

②酸雨对马尾松最大荧光(F_m)的影响。由图 2 可知:经过 2 a 的酸雨喷施后,马尾松幼苗的 F_m 在 5 个月份中差异性不完全相同。2009 年 7 月、2009 年 11 月、2010 年 4 月和 2010 年 9 月,3 种酸雨处理条件下的马尾松幼苗的 F_m 之间都没有存在显著差异($P>0.05$);而 2010 年 11 月,中度酸雨胁迫处理(pH 4.0)条件下的马尾松幼苗的 F_m 显著高于对照处理(pH 5.6, $P<0.05$),极显著高于重度酸雨胁迫处理(pH 2.5, $P<0.01$)。 F_m 是 PS II 反应中心处于完全关闭时的荧光产量,其可反映 PS II 的电子传递情况。由上可知,在 2 a 的酸雨喷施的过程中,相同年份,在重度酸雨(pH 2.5),中度酸雨(pH 4.0)和对照(pH 5.6)处理下马尾松幼苗的 F_m 与酸雨强度无关。说明酸雨没有阻碍 PS II 的电子传递。

③PS II 原初光能转化效率(F_v/F_m)和暗适应后的 PS II 的潜在活性(F_v/F_0)的影响。叶绿素荧光参数可反映光合机构内在一系列重要的调节过程。 F_v/F_m 反映了植物叶片 PS II 原初光能转化效率,反映植物潜在的最大光合能力。 F_v/F_0 表示光反应中心 PS II 的潜在活性。前者用于反应 PS II 的电子传递情况,后者反应 PS II 反应中心内禀光能转换效率,不受物种生长条件的影响。由图 2 可知:经过 2 a 的酸雨喷施后,相同的年份,除 2010 年 11 月有一定差异以外,马尾松幼苗的 F_v/F_m 和 F_v/F_0 随酸雨强度的增强差异不显著。2009 年 7 月、2009 年 11 月、2010 年 4 月,各酸雨处理条件的马尾松幼苗的 F_v/F_m 和 F_v/F_0 的值之间差异不显著;2010

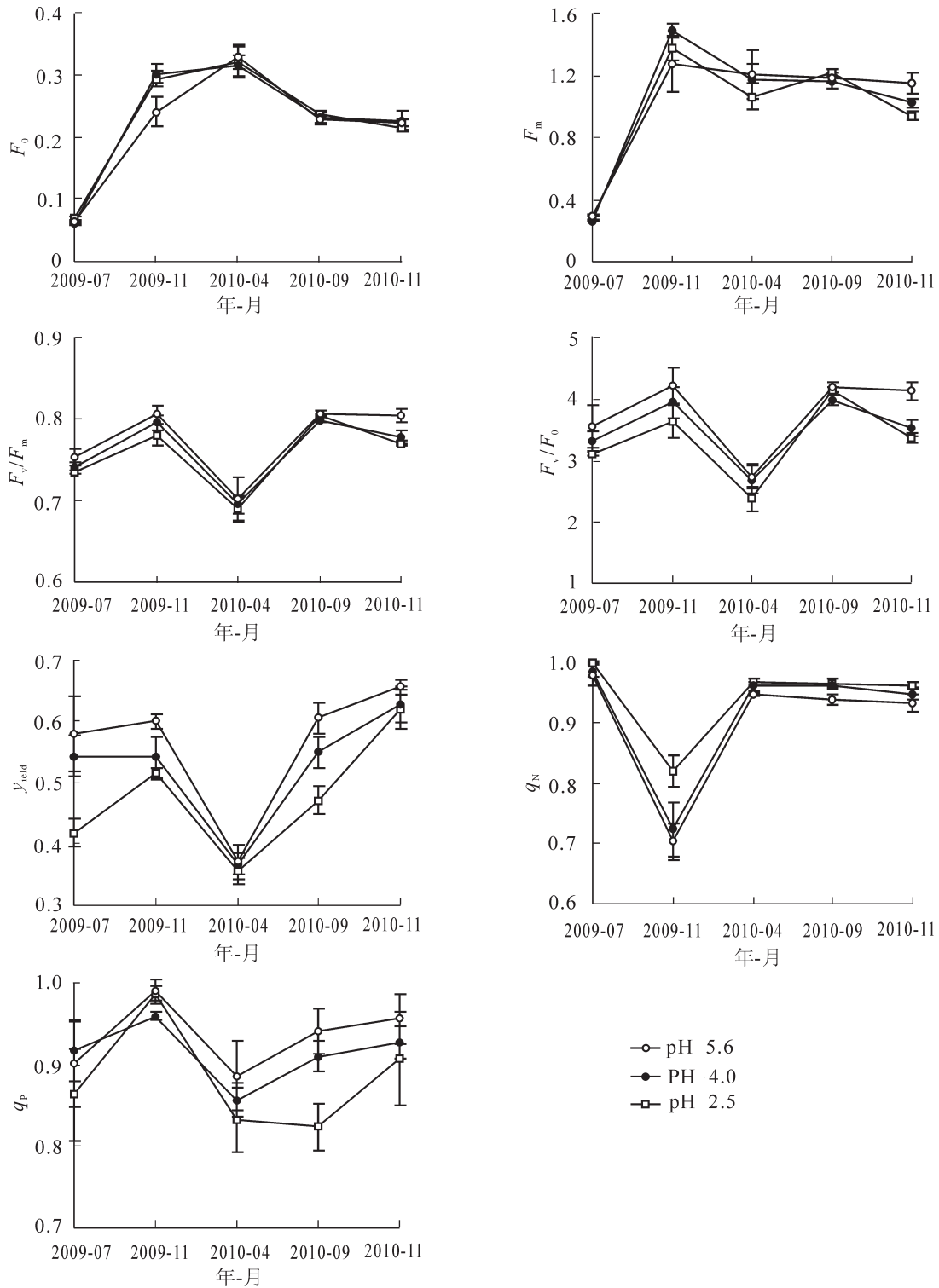


图 1 不同酸雨浓度下马尾松叶绿素荧光参数(平均值±标准误差)

Figure 1 Line charts of chlorophyll fluorescence parameters of *Pinus massoniana* under the different pH values of rain in the same months (mean ± ES)

年 11 月，对照(pH 5.6)条件下的马尾松幼苗的 F_v/F_m 和 F_v/F_0 的值极显著高于重度酸雨(pH 2.5)条件下与中度酸雨(pH 4.0)条件下 ($P < 0.05$)，而后两者之间差异不显著 ($P > 0.05$)。由上可知：经过 2 a 酸雨喷淋后，在相同年份，马尾松幼苗叶片的 PS II 原初光能转化效率和暗适应后的 PS II 的潜在活性在重度酸雨(pH 2.5)条件下和中度酸雨(pH 4.0)条件下都有极明显下降，说明在重度酸雨(pH 2.5)和中度酸雨(pH 4.0)条件下马尾松幼苗受到胁迫，酸性环境使得马尾松幼苗叶片中的蛋白质(酶)活性降低，则相关的电子传递受阻，光能转换效率降低，不利于光合作用，从而影响马尾松幼苗生长。

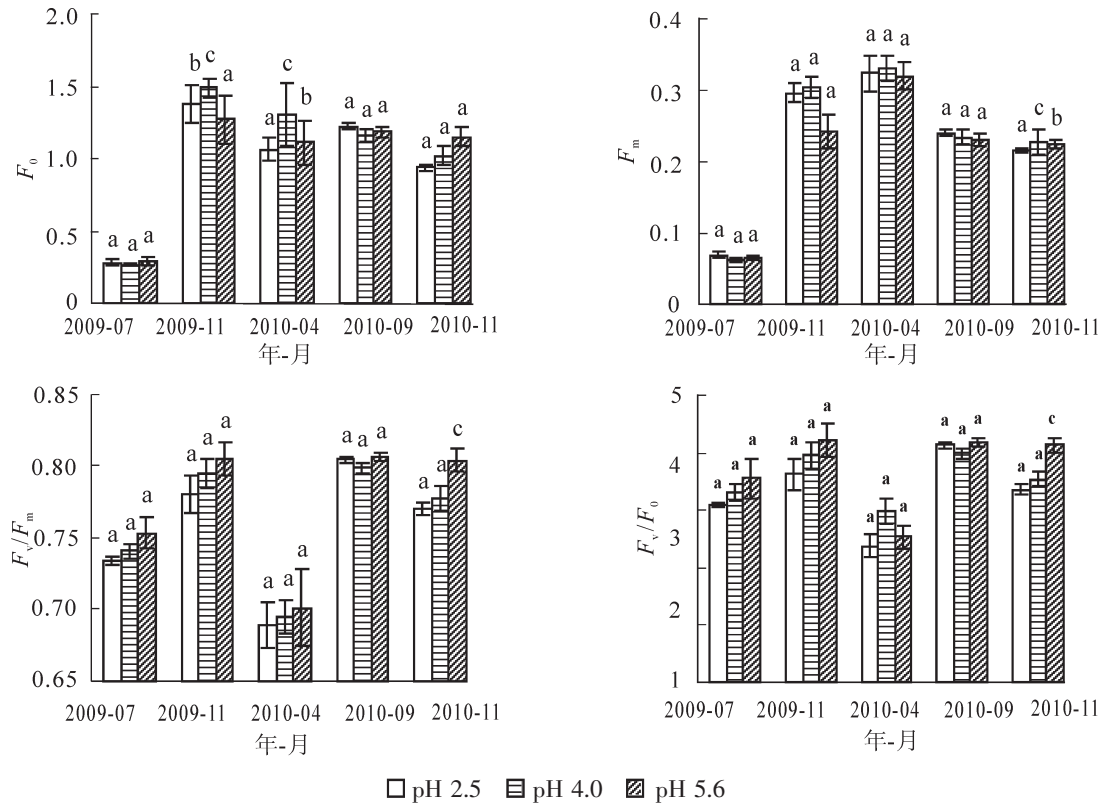


图2 酸雨对马尾松叶绿素暗适应荧光参数的影响(平均值±标准误差)

Figure 2 Effect of acid rain on the dark adaptation chlorophyll fluorescence parameters of *Pinus massoniana* in different years (mean±SE)

2.2.2 光适应参数的影响 ①酸雨对马尾松 PS II 光合电子传递量子效率(y_{ield})的影响。由图 3 可知:随酸度增强,实际光化学量子产量 y_{ield} 值降低,但相同月份不同 pH 值酸雨下马尾松幼苗叶片的 y_{ield} 值之间的差异性不尽相同。2009 年 7 月、2010 年 4 月、2010 年 11 月,马尾松幼苗叶片的 y_{ield} 值在各酸雨处理条件之间的差异不显著($P>0.05$); 2009 年 11 月,对照(pH 5.6)条件下的马尾松幼苗叶片 y_{ield} 极显著高于重度酸雨(pH 2.5)和中度酸雨(pH 4.0)条件($P<0.05$),而后两者之间差异不显著($P>0.05$); 2010 年 11 月,对照(pH 5.6)条件下的马尾松幼苗叶片 y_{ield} 极显著高于重度酸雨(pH 2.5, $P<0.01$),显著高于中度酸雨(pH 4.0, $P<0.05$)。综上所述,不同年份马尾松幼苗叶片的 PS II 实际光化学量子产量,在对照组(pH 5.6)条件下具有最大值,且随着酸雨的增强,马尾松幼苗叶片的 y_{ield} 值减小。说明酸雨对马尾松的 PS II 的活性反应中心有一定程度破坏,使得 PS II 受体电子传递能力下降,即抑制了 PS II 的功能和碳同化的功能^[18],降低了马尾松幼苗对光量子的吸收利用能力。②酸雨对马尾松非光化学猝灭系数(q_N)的影响。由图 3 可知:在相同的年份,非光化学猝灭系数 q_N 随着酸度的增强, q_N 值有增大的趋势,且在不同年份 3 个酸雨梯度之间差异性也不尽相同。2009 年 7 月和 2010 年 11 月,在不同 pH 值酸雨处理条

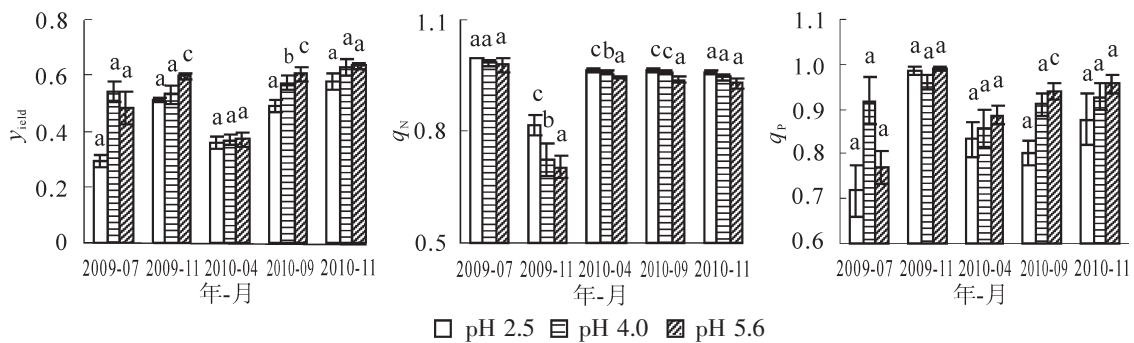


图3 酸雨对马尾松叶绿素荧光光适应参数的影响(平均值±标准误差)

Figure 3 Effect of acid rain on light adaptation chlorophyll fluorescence parameters of *Pinus massoniana* in different years (mean±SE)

件下的马尾松幼苗叶片的 q_N 值之间没有显著差异 ($P < 0.05$); 2009 年 11 月和 2010 年 4 月, 马尾松幼苗叶片的 q_N 在重度酸雨 (pH 2.5) 条件下出现最大值, 且与其他处理及对照组差异显著 ($P < 0.05$); 2010 年 9 月, 马尾松幼苗叶片的 q_N 在重度酸雨 (pH 2.5) 和中度酸雨 (pH 4.0) 条件下出现最大值且差异不显著, 而与对照组差异显著 ($P < 0.05$)。由此可知, 在重度酸雨 (pH 2.5) 条件下, 马尾松幼苗叶片 q_N 具有最大值, 说明幼苗在重度酸雨 (pH 2.5) 条件下具有较低的光化学性能, 即酸雨对 PS II 的功能有所抑制, 从而没能充分利用所吸收的光能, 不能更好地进行光合作用, 从而对于强酸雨的伤害的抵御能力降低。

③酸雨对马尾松光化学猝灭 (q_P) 的影响。由图 3 可知, 在相同的年份, 光化学猝灭系数 q_P 在 2009 年 7 月、2009 年 11 月、2010 年 4 月、2010 年 11 月, 在各酸雨处理条件下的马尾松幼苗叶片的 q_P 值之间没有显著差异 ($P > 0.05$); 2010 年 9 月, 马尾松幼苗叶片的 q_N 在对照 (pH 5.6) 条件下极显著高于重度酸雨 (pH 2.5) 和中度酸雨 (pH 4.0) 条件, 而后两者差异不显著 ($P > 0.05$)。由此可知, 在对照 (pH 5.6) 条件下光化学猝灭 q_P 具有最大值, 即由于没有受到酸雨胁迫, 马尾松幼苗可以充分利用所吸收的光能, 从而抵御强酸雨的伤害, 而在酸雨胁迫下, PS II 的功能有所抑制, 光合作用减弱, 生长受到影响。

3 讨论与结论

植物叶绿素含量能反映植物光合产物积累的情况, 且与植物的光合能力大小紧密相关。叶绿素荧光参数 F_v/F_m 和 F_v/F_o 是研究植物光合生理状态的重要参数, F_v/F_m 反映了植物叶片 PS II 原初光能转化效率^[19], 反映植物潜在的最大光合能力。 F_v/F_o 表示光反应中心 PS II 的潜在活性。本研究结果表明, 在不同年份相同季节, 马尾松幼苗叶片的 F_v/F_m 和 F_v/F_o 有一致的变化趋势, 4 月份最低, 可能是由于叶片内蛋白质 (酶) 受到温度的影响, 导致酶活性降低, 光合作用所需离子的吸收受到影响, 叶片的光合作用和呼吸作用都受到影响, 从而叶绿素的积累和循环受到影响, 也有可能是由于光能不足以满足光合机构所需利用的能量而造成光抑制, 即光合结构遭到破坏, 引起 PS II 伤害和光保护反应, 从而引起荧光参数的变化^[20-21]。这表明不同年份, 酸雨对马尾松幼苗叶片的叶绿素荧光参数影响是一致的, 即在相同年份, 不同程度的酸雨对马尾松叶片叶绿素荧光参数影响不大, 说明马尾松幼苗叶片的叶绿素荧光参数的变化规律是由于季节变化, 且马尾松在低温弱光条件下, 其光合作用和生长状况都将受到一定影响, 其影响机制仍需进一步深入研究分析。

在不同程度酸雨作用下, 在相同年份, 在重度酸雨 (pH 2.5) 条件下和中度酸雨 (pH 4.0) 条件下, 马尾松幼苗叶片的 PS II 原初光能转化效率和暗适应后的 PS II 的潜在活性都有极明显下降, 说明马尾松幼苗受到酸雨的胁迫, 叶片内蛋白质 (酶) 受到环境 pH 的影响, 酶活性降低, 相关电子传递受到阻碍, 光能转换效率随之降低。

叶片的 y_{ield} 值反映了 PS II 反应中心在环境胁迫下的实际原初光能捕获效率, 也是实际的 PS II 反应中心进行光化学反应的效率。本研究中, 在不同年份相同季节, 马尾松幼苗 y_{ield} 和 F_v/F_m , F_v/F_o 有一致的变化趋势, 在 4 月份, 马尾松植株的 y_{ield} 值明显低于另几个月份, 说明马尾松幼苗并不能很好地适应春秋季节较低的光照强度, 低温弱光会使得马尾松幼苗的光能捕获效率减少, 从而导致其光化学反应效率, 光合作用潜力下降。且在对照处理 (pH 5.6) 下, 马尾松幼苗的实际原初光能捕获效率明显高于重度酸雨 (pH 2.5) 和中度酸雨 (pH 4.0) 条件, 说明马尾松幼苗叶片的实际原初光能捕获效率受到酸雨胁迫后, 可能使 PS II 反应中心受到伤害, 光合结构破坏, 活性下降, 光合电子传递受阻, 从而影响马尾松幼苗正常光合作用的进行。

非光化学猝灭系数 q_N 值的大小反映了 PS II 反应中心对天然色素吸收过量光能后的热耗散能力及光合机构的损伤程度, 反映了叶片对激发能利用情况, 热耗散可以防御过剩光能的破坏^[22]。本试验中, 不同程度酸雨处理下的马尾松幼苗的 q_N 值在重度酸雨 (pH 2.5) 和中度酸雨 (pH 4.0) 胁迫下大于对照处理 (pH 5.6), 由于当 PS II 反应中心天线色素吸收了过量的光能, 如不能及时地耗散, 将对光合机构造成失活或破坏, 当及时耗散后, 对光合机构起一定的保护作用, 可能是因为在酸雨胁迫下, 马尾松幼苗大量能量耗散, 小部分能量被利用, 从而导致其不能更好地进行光合作用, 最终抑制马尾松的生长。

光化学猝灭系数 q_P 值的大小反映的是 PS II 原初电子受体 Q_A 的氧化还原状态和 PS II 开放中心的数目, 其值越大, 说明 PS II 具有较高的电子传递活性。不同程度酸雨处理下的马尾松幼苗的 q_P 值除在

2010年11月份时,对照处理(pH 5.6)条件下,极显著高于重度酸雨(pH 2.5)和中度酸雨(pH 4.0)条件以外,其他观察月份都表现为无明显差异。表明马尾松幼苗在2 a的酸雨胁迫过程中,起初其电子传递活性并未受到酸雨的影响,而若长期遭到酸雨胁迫,则可能导致其电子传递活性降低,从而进一步影响光能的利用效率。

综上所述,本研究通过对马尾松幼苗2 a的酸雨胁迫,对马尾松幼苗荧光生理研究发现,随着时间的推移,在酸雨胁迫条件下马尾松幼苗叶片的PS II原初光能的转换效率、激发能利用情况和电子传递效率都受到一定的影响,从而不利于其进行光合作用及生长。研究表明,酸雨的胁迫影响马尾松幼苗的光合作用系统有一定的影响,因此,在酸雨灾害严重的地区不适合大范围栽植马尾松。但由于本研究对不同梯度酸雨处理的马尾松幼苗荧光特性仅进行了2 a的研究,随着时间的推移和马尾松年龄的增大,马尾松的荧光特性是否会发生变化尚需进一步研究。

参考文献:

- [1] 王文兴. 中国酸雨成因研究[J]. 中国环境科学, 1994, **14**(5): 323 – 329.
WANG Wenxing. Progress in research of acid rain in China[J]. *China Environ Sci*, 1994, **14**(5): 323 – 329.
- [2] 徐德才. 酸雨污染与防治: 浙江区域酸雨趋势与防治对策[J]. 能源环境保护, 1995, **9**(4): 25 – 28.
XU Decai. Pollution and acid rain control: Zhejiang regional trends and control strategies of acid rain[J]. *Energy Environ Prot*, 1995, **9**(4): 25 – 28.
- [3] 宋晓东, 江洪, 余树全, 等. 浙江省酸雨的空间分布格局及其未来变化趋势预测[J]. 环境污染与防治, 2009, **31**(1): 13 – 16.
SONG Xiaodong, JIANG Hong, YU Shuquan, et al. Spatial distribution and forecast of acid rain in Zhejiang Province [J]. *Environ Poll & Cont*, 2009, **31**(1): 13 – 16.
- [4] 牛彧文, 顾骏强, 俞向明, 等. 长三角区域背景地区降水化学特征[J]. 环境化学, 2010, **29**(3): 358 – 362.
NIU Yuwen, GU Junqiang, YU Xiangming, et al. The long triangle area background area precipitation chemical characteristics[J]. *Environ Chem*, 2010, **29**(3): 358 – 362.
- [5] 黄辉, 黄朝法. 酸雨对植物生理生态特性的影响研究进展[J]. 林业勘察设计, 2008(1): 46 – 49.
HUANG Hui, HUANG Chaofa. Acid rain on plant physiological ecology characteristics influence research progress [J]. *For Prospect Des*, 2008(1): 46 – 49.
- [6] 周青, 黄晓华. 酸雨对陆地生态系统影响与防治研究[J]. 自然杂志, 2002, **24**(6): 316 – 320.
ZHOU Qing, HUANG Xiaohua. Injure of acid rain on terrestrial ecosystem and its control [J]. *Nat Mag*, 2002, **24**(6): 316 – 320.
- [7] 齐泽民, 钟章成, 邓君. 模拟酸雨对杜仲叶氮代谢的影响 [J]. 植物生态学报, 2001, **25**(5): 544 – 548.
QI Zemin, ZHONG Zhangcheng, DENG Jun. The effects of simulated acid rain on nitrogen metabogen of *Eucommia ulmoides* leaves[J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2001, **25**(5): 544 – 548.
- [8] 齐泽民, 钟章成, 邓君, 等. 模拟酸雨对杜仲叶膜脂过氧化及氮代谢的影响 [J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2001, **26**(1): 38 – 44.
QI Zemin, ZHONG Zhangcheng, DENG Jun, et al. Effects of simulated acid rain on lipid peroxidation of membrane and nitrogen metabolism of *Eucommia ulmoides* leaves[J]. *J Southwest China Nor Univ Nat Sci*, 2001, **26**(1): 38 – 44.
- [9] 刘昊, 余树全, 江洪, 等. 模拟酸雨对山核桃叶绿素荧光参数、叶绿素和生长的影响[J]. 浙江林学院学报, 2009, **26**(1): 32 – 37.
LIU Hao, YU Shuquan, JIANG Hong, et al. Chlorophyll fluorescence of *Carya cathayensis* with simulated acid rain [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2009, **26**(1): 32 – 37.
- [10] 李万超, 江洪, 曾波, 等. 模拟酸雨对青冈和木荷幼苗光合响应特性的影响[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2008, **30**(7): 98 – 103.
LI Wanchao, JIANG Hong, ZENG Bo, et al. Effects of simulated acid rain on photosynthesis in *Schima superba* and *Quercus glauca*[J]. *J Southwest China Univ Nat Sci Ed*, 2008, **30**(7): 98 – 103.
- [11] 蒋馥蔚, 江洪, 李巍, 等. 酸雨胁迫下黑壳楠幼苗在夏季和秋季的生理生态特性[J]. 生态环境, 2008, **17**

- (6): 2374 – 2380.
- JIANG Fuwei, JIANG Hong, LI Wei, *et al.* Effects of acid rain stress on physiological characters of *Lindera megaphylla* Hemsl. seedlings in summer and autumn[J]. *Ecol Environ*, 2008, **17**(6): 2374 – 2380.
- [12] 谢寅峰, 杨万红, 陆美蓉, 等. 模拟酸雨胁迫下珙毛箬竹光合特性的影响[J]. 应用生态学报, 2008, **19**(6): 1179 – 1184.
- XIE Yanfeng, YANG Wanhong, LU Meirong, *et al.* Effects of silicon on photosynthetic characteristics of *Indocalamus barbatus* under simulated acid rain stress [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2008, **19**(6): 1179 – 1184.
- [13] 谢寅峰, 杨万红, 杨阳, 等. 外源一氧化氮对模拟酸雨胁迫下箬竹(*Indocalamus barbatus*)光合特性的影响[J]. 生态学报, 2007, **27**(12): 5193 – 5201.
- XIE Yanfeng, YANG Wanhong, YANG Yang, *et al.* Effects of exogenous nitric oxide on photosynthetic characteristic of *Indocalamus barbatus* under a simulated acid rain stress condition[J]. *Acta Ecol Sin*, 2007, **27**(12): 5193 – 5201.
- [14] 齐泽民, 钟章成. 模拟酸雨对杜仲光合生理及生长的影响[J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2006, **31**(2): 151 – 156.
- QI Zemin, ZHONG Zhangcheng. Effect of simulate acid rain on the photosynthesis, physiology and growth of *Eucommia ulmoides* Oliv[J]. *J Southwest China Nor Univ Nat Sci Ed*, 2006, **31**(2): 151 – 156.
- [15] 郑飞翔, 温达志, 旷远文. 模拟酸雨对柚木幼苗生长-光合与水分利用的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2006, **14**(2): 93 – 99.
- ZHENG Feixiang, WEN Dazhi, KUANG Yuanwen. The influence of acid rain on the *Tectona grandis* seedling growth and the effects on the use of photosynthesis and water [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2006, **14**(2): 93 – 99.
- [16] 李志国, 翁忙玲, 姜武, 等. 模拟酸雨对乐东拟单性木兰幼苗部分生理指标的影响[J]. 生态学杂志, 2007, **26**(1): 31 – 34.
- LI Zhiguo, WENG Mangling, JIANG Wu, *et al.* Effect of simulate acid rain on the physiological index of *Parakmeria lotungensis* seedlings[J]. *Chin J Ecol*, 2007, **26**(1): 31 – 34.
- [17] 温国胜, 田海涛, 张明如, 等. 叶绿素荧光分析技术在林木培育中的应用[J]. 应用生态学报, 2006, **17**(10): 1973 – 1977.
- WEN Guosheng, TIAN Haitao, ZHANG Mingru, *et al.* Chlorophyll fluorescence analysis technology in the application of forest cultivation [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2006, **17**(10): 1973 – 1977.
- [18] 邱栋梁, 刘星辉. 模拟酸雨对龙眼叶片叶绿素 a 荧光特性的影响[J]. 园艺学报, 2000, **27**(3): 177 – 181.
- QIU Dongliang, LIU Xinghui. The influence of acid rain on the fluorescent characteristic of *Dimocarpus longgana* chlorophylla[J]. *Acta Horti Sin*, 2000, **27**(3): 177 – 181.
- [19] MAXWELL K, JOHNSON G N. Chlorophyll fluorescence: a practical guide [J]. *J Exp Bot*, 2000, **51**: 659 – 668.
- [20] 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, Yilita, YU Shuquan, *et al.* Effects of acid rain stress on gas exchange and chlorophyll fluorescence in leaves of *Schima superba* seedlings [J]. *Ecol Environ Sci*, 2010, **19**(7): 1556 – 1562.
- [21] 殷秀敏, 余树全, 江洪, 等. 酸雨胁迫对秃瓣杜英幼苗叶片叶绿素荧光特性和生长的影响[J]. 应用生态学报, 2010, **21**(6): 1374 – 1380.
- YIN Xiumin, YU Shuquan, JIANG Hong, *et al.* Effects of acid rain stress on *Eleocarpus glabripetalus* seedlings leaf chlorophyll fluorescence characteristics and growth[J]. *Chin J Appl Ecol*, 2010, **21**(6): 1374 – 1380.
- [22] HUNTER N P, OQUIST G, HURRY V M. Photosynthesis, photoinhibition and low temperature acclimation in cold tolerant plants [J]. *Photosyn Res*, 1993, **37**: 19.