

不同酸度模拟酸雨对重庆缙云山 2 种阔叶树 光合特性的影响

唐晓芬, 王彬^①, 王玉杰, 王云琦

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要: 以生长于重庆缙云山国家级自然保护区内的粉叶新木姜子 (*Neolitsea aurata* var. *glauca* Yang) 和四川大头茶 [*Polyspora speciosa* (Kochs) B. M. Barthol. et T. L. Ming] 2 年生幼苗为实验材料, 研究了不同 pH 值的模拟酸雨对叶片气体交换参数、光响应曲线和光响应参数的影响, 并比较了 2 树种对模拟酸雨的抗性。结果表明: 四川大头茶叶片的各项气体交换参数和光响应参数总体上高于粉叶新木姜子。随模拟酸雨 pH 值降低, 粉叶新木姜子叶片的净光合速率 (Pn)、气孔导度 (Gs) 和蒸腾速率 (Tr) 逐渐降低且总体上显著低于对照 (pH 5.6 模拟酸雨); 四川大头茶叶片的 Pn、Gs 和 Tr 值在 pH 2.0 模拟酸雨作用下显著低于对照、在 pH 3.5 模拟酸雨作用下显著高于对照; 但不同 pH 值模拟酸雨对 2 树种叶片的水分利用效率总体上无显著影响。经不同 pH 值模拟酸雨处理后 2 树种叶片的光响应曲线与对对照明显不同。与对照相比, 经 pH 2.0、pH 2.5 和 pH 3.5 模拟酸雨处理后粉叶新木姜子叶片的最大净光合速率 (P_{max})、光饱和点 (LSP) 和表观量子产量 (AQY) 总体上显著降低, 光补偿点 (LCP) 显著升高; 其暗呼吸速率 (Rd) 在 pH 2.0 和 pH 3.5 模拟酸雨作用下显著高于对照、在 pH 2.5 模拟酸雨作用下显著低于对照。四川大头茶叶片的 P_{max} 和 LSP 值在 pH 2.0 和 pH 2.5 模拟酸雨作用下显著低于对照, 但在 pH 3.5 模拟酸雨作用下显著高于对照; 其 LCP 和 Rd 值在 pH 2.5 和 pH 3.5 模拟酸雨作用下显著低于对照, 但在 pH 2.0 模拟酸雨作用下均高于对照; 其 AQY 值在 pH 2.0、pH 2.5 和 pH 3.5 模拟酸雨作用下均低于对照。研究结果显示: 酸性较强 (pH 2.0 和 pH 2.5) 的模拟酸雨均可抑制 2 树种的光合作用, 而酸性较弱 (pH 3.5) 的模拟酸雨对四川大头茶的光合作用有一定的促进作用, 表明四川大头茶对酸雨的抗性相对强于粉叶新木姜子。

关键词: 模拟酸雨; 粉叶新木姜子; 四川大头茶; 气体交换参数; 光合特性; 抗酸性

中图分类号: Q948.11; X517 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2015)04-0045-07

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2015.04.06

Effect of simulated acid rain with different acidities on photosynthetic characteristics of two broad-leaved trees in Jinyun Mountain of Chongqing TANG Xiaofen, WANG Bin^①, WANG Yujie, WANG Yunqi (College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2015, 24(4): 45-51

Abstract: Taking 2-year-old seedlings of *Neolitsea aurata* var. *glauca* Yang and *Polyspora speciosa* (Kochs) B. M. Barthol. et T. L. Ming grown in Jinyun Mountain National Nature Reserve of Chongqing as experimental materials, effects of simulated acid rain with different pH values on gas exchange parameters, light response curve and light response parameters of leaf were researched, and resistance of two tree species to simulated acid rain was compared. The results show that all gas exchange parameters and light response parameters of leaf of *P. speciosa* are generally higher than those of *N. aurata* var. *glauca*. With reducing of pH value of simulated acid rain, net photosynthetic rate (Pn), stomatal conductance (Gs) and transpiration rate (Tr) of leaf of *N. aurata* var. *glauca* decrease gradually and are generally significantly lower than those of the control (simulated acid rain with pH 5.6). Pn, Gs and Tr values of leaf of *P. speciosa* under simulated acid rain with pH 2.0 are significantly lower than those of

收稿日期: 2015-02-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31100515); 高等学校博士学科点专项科研基金(20110014120001)

作者简介: 唐晓芬(1988—), 女, 山东临沂人, 硕士, 主要从事酸雨沉降及森林生态水文方面的研究。

^①通信作者 E-mail: wangbin1836@bjfu.edu.cn

the control, while those under simulated acid rain with pH 3.5 are significantly higher than those of the control. Effect of simulated acid rain with different pH values on water use efficiency of leaf of two tree species is generally not significant. Light response curve of leaf of two tree species after treated by simulated acid rain with different pH values is obviously different from that of the control. Compared with the control, the maximum net photosynthetic rate (P_{max}), light saturation point (LSP) and apparent quantum yield (AQY) of leaf of *N. aurata* var. *glauca* generally decrease significantly and light compensation point (LCP) increases significantly after treated by simulated acid rain with pH 2.0, pH 2.5 and pH 3.5, and its dark respiration rate (Rd) under simulated acid rain with pH 2.0 and pH 3.5 is significantly higher and that under simulated acid rain with pH 2.5 is significantly lower than that of the control. P_{max} and LSP values of leaf of *P. speciosa* under simulated acid rain with pH 2.0 and pH 2.5 are significantly lower and those under simulated acid rain with pH 3.5 are significantly higher than those of the control, its LCP and Rd values under simulated acid rain with pH 2.5 and pH 3.5 are significantly lower and those under simulated acid rain with pH 2.0 are higher than those of the control, and its AQY value under simulated acid rain with pH 2.0, pH 2.5 and pH 3.5 is lower than those of the control. It is suggested that simulated acid rain with stronger acidity (pH 2.0 and pH 2.5) can inhibit photosynthesis of two tree species, while simulated acid rain with weaker acidity (pH 3.5) has a certain promotion effect on photosynthesis of *P. speciosa*, which indicating that resistance of *P. speciosa* to acid rain is comparatively stronger than that of *N. aurata* var. *glauca*.

Key words: simulated acid rain; *Neolitsea aurata* var. *glauca* Yang; *Polyspora speciosa* (Kochs) B. M. Barthol. et T. L. Ming; gas exchange parameter; photosynthetic characteristics; acid resistance

酸雨是目前全球最严重的环境问题之一。据报道^[1-2],中国已经成为全球范围内仅次于欧洲和北美洲的第3大酸雨区。酸雨通过影响植物的光合作用降低森林生态系统的生产力,从而对森林生态系统的健康发展产生严重影响,因而,有关酸雨对植物的伤害机制及植物对酸雨的抗性机制受到了研究者的关注。

酸雨对植物的形态结构及生理代谢有明显影响^[3-4],可抑制植物的株高及地径生长;酸雨通过对植物叶片的直接伤害,破坏光合组织、降低光合速率,并导致叶绿素含量减低,且随酸雨 pH 值的下降叶绿素 *a* 与叶绿素 *b* 的含量比值减小^[5-6];此外,植物叶片,尤其是幼叶的受害面积随酸雨 pH 值的降低而增大^[5]。酸雨对植物光合作用的影响因酸雨 pH 值的不同而异。台湾桤木 [*Alnus formosana* (Burkill) Makino] 叶片的净光合速率(Pn)和蒸腾速率(Tr)随酸雨酸度的下降呈上升趋势,在 pH 2.5 酸雨的影响下其叶片的 Pn 值达最低点^[7];萱草 [*Hemerocallis fulva* (Linn.) Linn.] 叶片的 Pn 值、气孔导度(Gs)和 Tr 值随酸雨 pH 值的下降均呈先下降后上升的趋势^[8];樟树 [*Cinnamomum camphora* (Linn.) J. Presl] 幼苗的 Pn、Gs 和 Tr 值等也因酸雨 pH 值的影响而有不同的变化趋势^[9]。

重庆是中国西南部受酸雨危害最严重的地区之一,从2001年至2010年,酸雨频率逐年增加、酸雨 pH

值逐年降低,但有关酸雨对该区域的植物分布、生长及生理生态特性的影响尚未充分了解。粉叶新木姜子(*Neolitsea aurata* var. *glauca* Yang)和四川大头茶 [*Polyspora speciosa* (Kochs) B. M. Barthol. et T. L. Ming]是重庆缙云山广泛分布的阔叶树种,也是主要的水源涵养树种^[10-11],生态地位重要。作者通过人工模拟酸雨,研究不同 pH 值酸雨对粉叶新木姜子和四川大头茶叶片光合参数的影响,探究酸雨对这2个树种光合特性的影响及不同树种对酸雨的抗性差异,以期三峡库区退耕还林工程中的植被建设以及该区域林分的合理配置和树种选择提供研究数据。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆缙云山国家级自然保护区内,地理坐标为东经 106°22'、北纬 29°45';最高处海拔 951.5 m,相对高度 600 m。属于典型的中亚热带常绿阔叶林生物气候带,年均气温 13.6 °C,年平均降水量 1 611.8 mm,年平均蒸发量 777.1 mm。土壤以酸性黄壤(pH 4.0 ~ pH 4.5)和水稻土为主。

1.2 研究方法

1.2.1 模拟酸雨配制及处理方法 选择株高和胸径相近、冠幅相似且生长状态良好的2年生粉叶新木姜子和四川大头茶幼苗,移栽于高 35 cm、口径 30 cm、底

径 20 cm 的栽培盆中,盆栽土壤为当地黄壤土,每盆 1 株。对苗木进行正常管理,于稳定环境中培养 1 a 后用于模拟酸雨处理。

根据当地自然降雨的主要化学成分配制模拟酸雨,按 $n(\text{SO}_4^{2-}):n(\text{NO}_3^-) = 5:1$ 的比例配制酸雨母液,然后用蒸馏水和酸雨母液混合配制成 pH 2.0、pH 2.5、pH 3.5 和 pH 5.6(对照)的模拟酸雨,每处理 3 盆,各 3 次重复,即每处理共 9 盆。根据实验区内多年的月平均降水量以及降水规律,于 2011 年 6 月 1 日至 2012 年 6 月 30 日喷洒模拟酸雨溶液,每周喷洒 2 次,每次喷洒量约为 15 mm(约 1 060 mL)。处理期间若遇降雨,用塑料薄膜遮盖盆栽苗,以避免自然降雨的干扰。

1.2.2 叶片光合参数的测定方法 于 2012 年 7 月 4 日 13:00 至 17:00,采用 LI-6400 XT 便携式光合仪(美国 LI-COR 公司)测定各处理叶片的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和水分利用效率^[12];测定时 CO_2 浓度设为 $380 \sim 400 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 、叶室温度约 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 、空气相对湿度 60%。为了绘制光响应曲线,分别将光合有效辐射强度(PAR)设置为 2 000、1 700、1 500、1 200、1 100、900、700、500、300、200、150、100、50、20 和 $0 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,每种植物每个 PAR 梯度随机选取 3~5 片位于枝干中上部的成熟叶片,测定叶片的净光合速率,并据此绘制光响应曲线。参照文献^[13]计算最大净光合速率、光饱和点、光补偿点、表观量子产量和暗呼吸速率。

1.3 数据处理统计

利用 Origin 8.0 软件进行数据处理和作图,利用 SPSS 18.0 软件进行统计分析,并采用单因素方差分析(one-way ANOVA)进行差异显著性分析。

2 结果和分析

2.1 模拟酸雨对 2 个树种叶片气体交换参数的影响

不同 pH 值的模拟酸雨对粉叶新木姜子和四川大头茶叶片净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)和水分利用效率(WUE)的影响见表 1。

2.1.1 对 P_n 值的影响 由表 1 可见:随着模拟酸雨 pH 值的降低,粉叶新木姜子叶片的 P_n 值呈逐渐降低的趋势,而四川大头茶叶片的 P_n 值呈先升高后降低的趋势;且经不同 pH 值的模拟酸雨处理后,粉叶新木姜子叶片的 P_n 值均小于四川大头茶。

经 pH 2.0、pH 2.5 和 pH 3.5 模拟酸雨处理后粉叶新木姜子叶片 P_n 值分别较对照(pH 5.6 模拟酸雨)下降了 91.2%、77.0% 和 20.5%,其中,pH 2.0 和 pH 2.5 模拟酸雨处理组的 P_n 值与对照差异显著($P < 0.05$)。经 pH 2.0 和 pH 2.5 模拟酸雨处理后四川大头茶叶片 P_n 值均低于对照,较对照分别降低了 79.6% 和 34.2%,且 pH 2.0 模拟酸雨处理组的 P_n 值与对照差异显著;经 pH 3.5 模拟酸雨处理后四川大头茶叶片 P_n 值较对照提高了 45.5%,且差异显著。

2.1.2 对 G_s 值的影响 由表 1 可见:随模拟酸雨 pH 值的降低,粉叶新木姜子叶片 G_s 值呈逐渐降低的趋势,而四川大头茶叶片 G_s 值呈先升高后降低的趋势;除对照组外,pH 2.0、pH 2.5 和 pH 3.5 模拟酸雨处理组粉叶新木姜子叶片 G_s 值均小于四川大头茶。

经 pH 2.0、pH 2.5 和 pH 3.5 模拟酸雨处理后粉叶新木姜子叶片的 G_s 值分别较对照降低了 79.5%、66.7% 和 17.9%,差异显著。经 pH 2.0 模拟酸雨处理后四川大头茶叶片的 G_s 值较对照降低了 54.8%,差异显著;而经 pH 2.5 和 pH 3.5 模拟酸雨处理后四川大头茶叶片的 G_s 值分别较对照提高了 45.2% 和 64.5%,差异均达显著水平。

2.1.3 对 T_r 值的影响 由表 1 可见:随模拟酸雨 pH 值的降低,粉叶新木姜子叶片的 T_r 值呈逐渐降低的趋势,而四川大头茶叶片的 T_r 值呈先升高后降低的趋势;且经不同 pH 值的模拟酸雨处理后,粉叶新木姜子叶片的 T_r 值均小于四川大头茶。

经 pH 2.0、pH 2.5 和 pH 3.5 模拟酸雨处理后粉叶新木姜子叶片 T_r 值分别较对照降低了 83.1%、72.4% 和 33.1%,差异显著。经 pH 2.0 和 pH 2.5 模拟酸雨处理后四川大头茶叶片 T_r 值分别较对照降低了 51.9% 和 12.0%,其中 pH 2.0 模拟酸雨处理组的 T_r 值与对照差异显著;pH 3.5 模拟酸雨处理组四川大头茶叶片 T_r 值较对照提高了 63.6%,差异显著。

2.1.4 对 WUE 值的影响 由表 1 可见:随模拟酸雨 pH 值的降低,粉叶新木姜子叶片 WUE 值呈“高一低—高”的波动趋势,而四川大头茶叶片 WUE 值呈“低—高一低”的波动趋势;且经不同 pH 值的模拟酸雨处理后,粉叶新木姜子叶片 WUE 值均大于四川大头茶。

经 pH 2.0 和 pH 3.5 模拟酸雨处理后粉叶新木姜子叶片 WUE 值均高于对照,而经 pH 2.5 模拟酸雨处理后其 WUE 值低于对照,但差异均不显著。经

表1 不同 pH 值模拟酸雨对粉叶新木姜子和四川大头茶叶片气体交换参数的影响 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾Table 1 Effect of simulated acid rain with different pH values on gas exchange parameters of leaves of *Neolitsea aurata* var. *glauca* Yang and *Polyspora speciosa* (Kochs) B. M. Barthol. et T. L. Ming ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

酸雨 pH 值 pH value of acid rain	各种类的 Pn/ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ Pn of each species		各种类的 Gs/ $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ Gs of each species		各种类的 Tr/ $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ Tr of each species		各种类的 WUE/ $\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ WUE of each species	
	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2
pH 2.0	0.160±0.070b	0.431±0.113c	0.008±0.000d	0.014±0.003d	0.087±0.001d	0.313±0.184c	4.110±0.510a	1.282±0.341b
pH 2.5	0.420±0.040b	1.387±0.234b	0.013±0.001c	0.045±0.002b	0.142±0.004c	0.573±0.045b	3.050±0.370a	2.951±0.523a
pH 3.5	1.450±0.120a	3.069±0.323a	0.032±0.006b	0.051±0.001a	0.344±0.007b	1.065±0.110a	3.989±0.260a	1.867±0.142a
pH 5.6 (CK)	1.825±0.130a	2.109±0.082b	0.039±0.008a	0.031±0.001c	0.514±0.006a	0.651±0.052b	3.587±0.620a	2.531±0.730a

¹⁾ Pn: 净光合速率 Net photosynthetic rate; Gs: 气孔导度 Stomatal conductance; Tr: 蒸腾速率 Transpiration rate; WUE: 水分利用效率 Water use efficiency. S1: 粉叶新木姜子 *Neolitsea aurata* var. *glauca* Yang; S2: 四川大头茶 *Polyspora speciosa* (Kochs) B. M. Barthol. et T. L. Ming. 同列中不同的小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference among different treatments ($P < 0.05$).

pH 2.5 和 pH 3.5 模拟酸雨处理后四川大头茶叶片 WUE 值分别高于和低于对照,但均无显著差异;而经 pH 2.0 模拟酸雨处理后四川大头茶叶片 WUE 值较对照降低了 49.4%,差异显著。

综合分析结果显示:模拟酸雨对粉叶新木姜子叶片气体交换参数有明显的影响,且 pH 值越低抑制作用越明显。而不同 pH 值模拟酸雨对四川大头茶叶片气体交换参数则有不同的影响,其中,经 pH 3.5 模拟酸雨处理后,四川大头茶叶片的 Pn、Gs 和 Tr 值均不同程度升高,而经 pH 2.0 和 pH 2.5 模拟酸雨处理后其气体交换参数总体上不同程度减小。

2.2 模拟酸雨对 2 个树种叶片光响应曲线和光响应参数的影响

2.2.1 对光响应曲线的影响 经不同 pH 值模拟酸

雨处理后粉叶新木姜子和四川大头茶叶片的光响应曲线分别见图 1。由图 1 可见:随光合有效辐射强度的增大,经不同 pH 值模拟酸雨处理后 2 树种叶片的 Pn 值总体上先急剧提高然后趋于稳定。

粉叶新木姜子叶片的 Pn 值在对照条件下最高,在 pH 3.5、pH 2.5 和 pH 2.0 模拟酸雨处理下依次降低;而且,在 pH 2.0 模拟酸雨处理下叶片的 Pn 值明显波动。说明粉叶新木姜子叶片对光的利用率受到酸雨抑制,且模拟酸雨 pH 值越低抑制作用越强。

四川大头茶叶片的 Pn 值在 pH 3.5 模拟酸雨处理下最高,且高于对照;在 pH 2.5 和 pH 2.0 模拟酸雨处理下依次降低,并低于对照;其中,经 pH 2.0 模拟酸雨处理后四川大头茶叶片的 Pn 值与对照的差异最大。说明酸度较强 (pH 2.5 和 pH 2.0) 的模拟酸雨

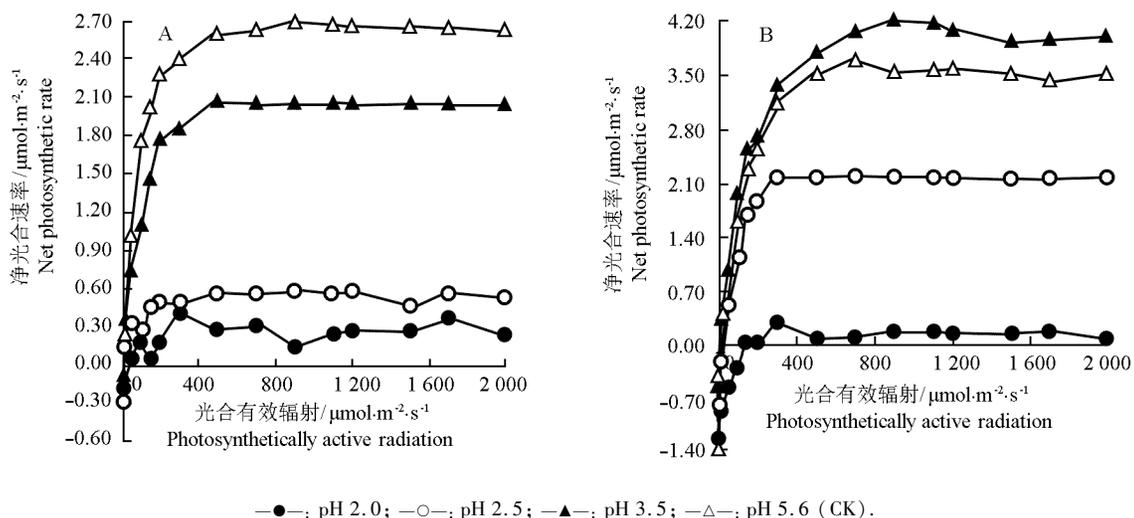


图1 经不同 pH 值模拟酸雨处理后粉叶新木姜子 (A) 和四川大头茶 (B) 叶片的光响应曲线

Fig. 1 Light response curves of leaves of *Neolitsea aurata* var. *glauca* Yang (A) and *Polyspora speciosa* (Kochs) B. M. Barthol. et T. L. Ming (B) after treated by simulated acid rain with different pH values

对四川大头茶叶片的光能利用能力有一定抑制作用,但酸度较低(pH 3.5)的模拟酸雨对其叶片的光能利用能力则有一定的提升作用。

2.2.2 对光响应参数的影响 经不同 pH 值模拟酸雨处理后粉叶新木姜子和四川大头茶叶片的光响应参数见表2。由表2可见:与对照(pH 5.6 模拟酸雨)相比较,在 pH 2.0、pH 2.5 和 pH 3.5 模拟酸雨处理下粉叶新木姜子叶片最大净光合速率(P_{\max})分别降低了 2.419 、 2.142 和 $0.619 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,其中在 pH 2.0 和 pH 2.5 模拟酸雨处理下其 P_{\max} 值与对照差异显著。经 pH 2.0 和 pH 2.5 模拟酸雨处理后粉叶新木姜子叶片光饱和点(LSP)分别比对照低 31.256 和 $43.202 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,而经 pH 3.5 模拟酸雨处

理后其 LSP 值比对照升高了 $41.594 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,且均有显著差异。与对照相比较,经 pH 2.0、pH 2.5 和 pH 3.5 模拟酸雨处理后粉叶新木姜子叶片的光补偿点(LCP)分别升高了 149.154 、 73.154 和 $14.029 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,均差异显著。经 pH 2.0、pH 2.5 和 pH 3.5 模拟酸雨处理后粉叶新木姜子叶片表观量子产量(AQY)均低于对照,其中,pH 2.0 和 pH 2.5 模拟酸雨处理组与对照差异显著。经 pH 2.0 和 pH 3.5 模拟酸雨处理后粉叶新木姜子叶片暗呼吸速率(Rd)分别比对照高 0.103 和 $0.093 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,而经 pH 2.5 模拟酸雨处理后其 Rd 值则比对照低 $0.029 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,且均有显著差异。

由表2 还可见:经 pH 2.0 和 pH 2.5 模拟酸雨处

表2 不同 pH 值模拟酸雨对粉叶新木姜子和四川大头茶叶片光响应参数的影响($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 2 Effect of simulated acid rain with different pH values on light response parameters of leaves of *Neolitsea aurata* var. *glauca* Yang and *Polyspora speciosa* (Kochs) B. M. Barthol. et T. L. Ming ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

酸雨 pH 值 pH value of acid rain	粉叶新木姜子的光响应参数 Light response parameters of <i>Neolitsea aurata</i> var. <i>glauca</i>				
	$P_{\max}/\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	LSP/ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	LCP/ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	AQY	Rd/ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
pH 2.0	0.284±0.093b	913.739±9.675c	153.000±2.576a	0.001±0.000b	0.153±0.067a
pH 2.5	0.561±0.185b	901.793±5.700c	77.000±2.246b	0.003±0.000b	0.021±0.007c
pH 3.5	2.084±0.471a	986.589±7.602a	17.875±1.050c	0.008±0.001a	0.143±0.057a
pH 5.6(CK)	2.703±0.270a	944.995±8.956b	3.846±0.981d	0.013±0.003a	0.050±0.004b
酸雨 pH 值 pH value of acid rain	四川大头茶的光响应参数 Light response parameters of <i>Polyspora speciosa</i>				
	$P_{\max}/\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	LSP/ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	LCP/ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	AQY	Rd/ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
pH 2.0	0.209±0.060d	760.545±5.976d	191.800±7.406a	0.005±0.000b	0.959±0.140a
pH 2.5	2.287±0.340c	855.927±6.713c	33.000±3.560b	0.012±0.002a	0.396±0.041b
pH 3.5	4.159±0.458a	1053.515±9.570a	1.933±0.250c	0.015±0.002a	0.029±0.006c
pH 5.6(CK)	3.669±0.580b	960.517±7.890b	41.278±3.074b	0.018±0.004a	0.743±0.053a

¹⁾ P_{\max} : 最大净光合速率 The maximum net photosynthetic rate; LSP: 光饱和点 Light saturation point; LCP: 光补偿点 Light compensation point; AQY: 表观量子产量 Apparent quantum yield; Rd: 暗呼吸速率 Dark respiration rate. 同列中不同的小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference among different treatments ($P < 0.05$).

理后四川大头茶叶片 P_{\max} 值分别较对照低 3.460 和 $1.382 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,而经 pH 3.5 模拟酸雨处理后其 P_{\max} 值较对照高 $0.490 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,且均有显著差异。经 pH 2.0 和 pH 2.5 模拟酸雨处理后四川大头茶叶片 LSP 值均低于对照,而经 pH 3.5 模拟酸雨处理后其 LSP 值则高于对照,且均有显著差异。经 pH 2.5 和 pH 3.5 模拟酸雨处理后四川大头茶叶片 LCP 值低于对照,而经 pH 2.0 模拟酸雨处理后其 LCP 值高于对照,其中,pH 3.5 和 pH 2.0 模拟酸雨处理组的 LCP 值与对照差异显著。经 pH 2.0、pH 2.5 和 pH 3.5 模拟酸雨处理后四川大头茶叶片的 AQY 值均低于对照,且仅 pH 2.0 模拟酸雨处理组的 AQY

值与对照差异显著。经 pH 2.5 和 pH 3.5 模拟酸雨处理后四川大头茶叶片的 Rd 值均显著低于对照,而经 pH 2.0 模拟酸雨处理后其 Rd 值高于对照但差异不显著。

由表2 还可见:在对照组中,四川大头茶叶片的 P_{\max} 、LSP、LCP 和 Rd 值均明显大于粉叶新木姜子,而 2 树种叶片的 AQY 值差异较小。

3 讨论和结论

李志国等^[14]认为:pH 值低于 4.0 的酸雨可导致乐东拟单性木兰 [*Parakmeria lotungensis* (Chun et C.

H. Tsoong) Y. W. Law] 幼苗叶片的净光合速率 (Pn)、气孔导度 (Gs)、蒸腾速率 (Tr)、水分利用效率 (WUE) 和气孔限制值 (Ls) 等指标降低。本研究中, 在 pH 2.0 ~ pH 3.5 模拟酸雨处理条件下, 随模拟酸雨 pH 值降低粉叶新木姜子叶片的 Pn 值越低, 这与田大伦等^[12]的“同一季节樟树叶片的日均 Pn 值随酸雨酸度的降低而上升”的结果相一致。但也有研究结果显示: 酸雨强度的提高对植物光合作用的影响不明显, 而且在酸雨胁迫的不同时期不同浓度的酸雨处理对植物 Pn 值的影响也有差异^[9,15]; 由于研究对象的不同或酸雨 pH 值的差异, 酸雨对植物光合速率的影响效应也可能不同^[16]。除经 pH 3.5 模拟酸雨处理后四川大头茶叶片的 Pn 值显著高于对照 (pH 5.6 模拟酸雨) 外, 经 pH 2.0 和 pH 3.5 的模拟酸雨处理后四川大头茶叶片的 Pn 值均低于对照, 说明在该模拟酸雨条件下四川大头茶的光合作用受到抑制。经不同 pH 值的模拟酸雨处理后粉叶新木姜子叶片 Pn 值均小于四川大头茶, 说明四川大头茶的有机物积累速率高于粉叶新木姜子。

当酸雨降落到植物叶片上时, 先后破坏叶表面的蜡质、角质层及表皮, 并通过损害气孔运动影响植物的生理生化代谢^[17], 因此, 酸雨通过抑制叶片气孔导度影响植物与外界的气体和水交换, 并直接影响植物的光合作用和蒸腾作用。本研究中, 粉叶新木姜子叶片 Gs 值均随模拟酸雨 pH 值的降低而降低, 且在不同 pH 值模拟酸雨间差异显著, 表明模拟酸雨显著抑制其 Gs 值, 其中, 经 pH 2.0 模拟酸雨处理后粉叶新木姜子叶片 Gs 值降幅最大, 这与台湾栎木^[7]和红花木莲 [*Manglietia insignis* (Wall.) Bl.] 等植物^[18]对酸雨的响应规律类似。与对照相比, 经 pH 2.5 和 pH 3.5 模拟酸雨处理后四川大头茶叶片 Gs 值升高, 但经 pH 2.0 模拟酸雨处理后其 Gs 值降低, 说明 pH 2.5 和 pH 3.5 模拟酸雨对该树种叶片的气孔导度有一定促进作用, 而酸度较高 (pH 2.0) 的模拟酸雨则对其叶片气孔导度有一定的抑制作用。陈睿^[19]也指出扁竹兰 (*Iris confusa* Sealy) 和黄菖蒲 (*I. pseudacorus* Linn.) 的 Gs 值在酸雨作用下表现出低酸度 (pH 4.0 ~ pH 3.0) 时促进、高酸度 (pH 值小于 3.0) 时抑制的趋势。经 pH 2.0 模拟酸雨处理后粉叶新木姜子和四川大头茶叶片的 Gs 值均显著低于对照, 说明酸度较高 (pH 2.0) 的模拟酸雨对 2 树种叶片气孔导度的影响最严重; 酸雨对茶梅 (*Camellia sasanqua* Thunb.) 和柚

木 (*Tectona grandis* Linn. f) 也有相似的影响^[20-21], 可能与“较低 pH 值的酸雨中存在大量 H⁺, 破坏了保卫细胞的离子平衡, 并导致气孔功能紊乱^[22]”有关。

本研究中, 经 pH 2.0 和 pH 2.5 模拟酸雨处理后粉叶新木姜子和四川大头茶叶片的 Tr 值均降低, 说明酸雨削弱了 2 树种叶片的蒸腾作用, 并且酸雨的酸度越高对蒸腾作用的抑制效应越强; 而经 pH 3.5 模拟酸雨处理后四川大头茶叶片的 Tr 值显著大于对照, 表明酸度较低 (pH 3.5) 的模拟酸雨可一定程度促进四川大头茶叶片的蒸腾作用。酸雨对蒸腾作用的这种影响可能与其对气孔导度的影响有关, 酸雨通过影响植物对水分的利用影响其光合作用效率。经 pH 2.0 ~ pH 3.5 的模拟酸雨处理后四川大头茶叶片 WUE 值的变化总体上较小, 说明该树种在遭受酸雨胁迫时通过对气孔的调节作用减少水分蒸腾, 从而维持较稳定的水分利用效率^[23]。而经不同 pH 值模拟酸雨处理后粉叶新木姜子叶片的 WUE 值均高于四川大头茶, 这与前者的蒸腾效率较低有关。

不同植物种类间的净光合速率存在较大差异, 这可能是由植物叶片对光的利用率及对 CO₂ 的同化效率差异引起的; 而叶片最大净光合速率 (P_{max}) 是在最佳和最合适环境下叶片的最大光合能力的体现。本研究结果显示: 经 pH 2.0 和 pH 2.5 模拟酸雨处理后粉叶新木姜子和四川大头茶叶片的 P_{max} 值均显著降低, 表明 pH 2.0 和 pH 2.5 模拟酸雨引起 2 树种叶片光合结构的破坏、削弱了叶片的最大光合能力。光饱和点 (LSP) 是度量植物利用强光能力的指标, 而光补偿点 (LCP) 是度量植物对弱光利用能力的指标, 2 个指标分别反映了植物对光辐射的利用范围。经 pH 2.0 模拟酸雨处理后粉叶新木姜子和四川大头茶叶片的 LSP 值均低于对照、LCP 值均高于对照, 表明在这样强度的酸雨作用下 2 树种叶片对强光和弱光的利用能力减弱、对光辐射的利用范围降低, 其中对弱光利用能力的降低可能是造成 2 树种 P_{max} 显著下降的原因。经 pH 2.5 模拟酸雨处理后, 粉叶新木姜子和四川大头茶叶片的 LSP 值低于对照, 而前者叶片的 LCP 值高于对照, 后者的 LCP 值则低于对照, 表明 2 树种叶片对光辐射的利用范围均降低。经 pH 3.5 模拟酸雨处理后 2 树种叶片的 LSP 值均高于对照, 而粉叶新木姜子叶片的 LCP 值高于对照、四川大头茶叶片的 LCP 值低于对照, 表明经酸度较低的酸雨胁迫后 2 树种叶片对强光的利用能力不同程度增强、对光辐

射的利用范围增大。王强等^[24]认为,在 pH 2.5 和 pH 3.5 模拟酸雨胁迫条件下乌药 [*Lindera aggregata* (Sims) Kosterm.] 叶片的 LSP 值低于对照、LCP 值高于对照;齐泽民^[25]认为:pH 2.5 和 pH 3.5 模拟酸雨可导致杜仲 (*Eucommia ulmoides* Oliver) 的 LSP 值降低、LCP 值升高。这些结果均与本研究结果存在一定差异,表明不同种类植物对酸雨的抗性不同,其光合作用受酸雨的影响程度也不同。在 pH 2.0 ~ pH 3.5 模拟酸雨处理下,粉叶新木姜子和四川大头茶叶片的表观量子产量(AQY)均低于对照,也表明经不同酸度的酸雨胁迫后叶片对光的利用能力减弱。经 pH 2.0 模拟酸雨处理后粉叶新木姜子和四川大头茶叶片的暗呼吸速率(Rd)均有一定程度提高,表明在强酸雨的作用下,2 树种叶片内的线粒体遭到破坏,加剧了叶片对光合产物的消耗。

在对照条件下,四川大头茶叶片的 P_{max} 、LSP、LCP 和 Rd 值均明显高于粉叶新木姜子,说明前者叶片的光合能力较强、对强光的利用率高、对光合产物的消耗也较大;而后者在弱光环境下光合能力较强、其较低的 Rd 值可以降低对光合产物的消耗,有助于干物质的积累。供试 2 树种叶片的 AQY 值差异较小,说明它们的光能转换能力相差不明显。

综合分析结果显示:粉叶新木姜子叶片的光合作用在 pH 2.0、pH 2.5 和 pH 3.5 模拟酸雨胁迫条件下均受到不同程度的抑制,而四川大头茶叶片的光合作用在 pH 2.0 和 pH 2.5 模拟酸雨胁迫条件下受到抑制,但 pH 3.5 模拟酸雨处理对四川大头茶叶片的光合作用有一定的促进作用。因此,相对而言,四川大头茶对模拟酸雨的抗性强于粉叶新木姜子。

参考文献:

- [1] 冯宗炜. 中国酸雨对陆地生态系统的影响和防治对策[J]. 中国工程科学, 2000, 2(9): 5-11, 28.
- [2] TAO F L, FENG Z W. Terrestrial ecosystem sensitivity to acid deposition in South China[J]. Water, Air and Soil Pollution, 2000, 118: 231-244.
- [3] 张向峰, 王玉杰, 李云霞, 等. 模拟酸雨对盆栽马尾松叶片光合特性的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(1): 197-202.
- [4] 付晓萍, 田大伦. 酸雨对植物的影响研究进展[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(4): 23-27.
- [5] 肖 艳, 黄建昌, 刘少娟, 等. 模拟酸雨对 12 种园林植物的伤害及敏感性反应[J]. 西南农业大学学报: 自然科学版, 2004, 26(3): 270-273, 276.
- [6] 廖广社, 许建新, 许 涵, 等. 模拟酸雨对黄槐幼苗生长的影响

[J]. 广东园林, 2005, 31(5): 37-41.

- [7] 黄桂芬, 吴承祯, 洪 伟, 等. 模拟酸雨对台湾桫木光合特性的影响[J]. 亚热带农业研究, 2012, 8(4): 263-269.
- [8] 魏湘潭, 于晓英, 熊 旋, 等. 模拟酸雨对萱草光合特性的影响[J]. 北方园艺, 2009(6): 175-177.
- [9] 赵巍巍, 江 洪, 马元丹. 模拟酸雨胁迫对樟树幼苗光合作用和水分利用特性的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2013, 30(2): 179-186.
- [10] 赵洋毅, 王玉杰, 王云琦, 等. 渝北不同模式水源涵养林植物多样性及其与土壤特征的关系[J]. 生态环境学报, 2009, 18(16): 2260-2266.
- [11] 雷声坤, 王玉杰, 王云琦, 等. 缙云山三种典型阔叶树光合生理特性研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(2): 189-194, 200.
- [12] 田大伦, 付晓萍, 方 晰, 等. 模拟酸雨对樟树幼苗光合特性的影响[J]. 林业科学, 2007, 43(8): 29-35.
- [13] 叶子飘, 于 强. 一个光合作用光响应新模型与传统模型比较[J]. 沈阳农业大学学报, 2007, 38(6): 771-775.
- [14] 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.
- [15] 金 清, 江 洪, 余树全, 等. 酸雨胁迫对亚热带典型树种幼苗生长与光合作用的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(6): 3322-3327.
- [16] 鲁美娟, 江 洪, 余树全, 等. 模拟酸雨对山核桃和杨梅光合生理特征的影响[J]. 生态学杂志, 2009, 28(8): 1476-1481.
- [17] 林慧萍. 酸雨对陆生植物的影响机理[J]. 福建林业科技, 2005, 32(1): 60-64.
- [18] 李志国, 姜卫兵, 翁忙玲, 等. 常绿阔叶林 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.
- [19] 陈 睿. 模拟酸雨对鸢尾属两种地被植物的影响[D]. 成都: 四川农业大学林学院, 2010: 20-25.
- [20] 赵 栋, 潘远智, 邓仕槐, 等. 模拟酸雨对茶梅生理生态特性的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(15): 3191-3198.
- [21] 郑飞翔, 温达志, 旷远文, 等. 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.
- [22] HOGAN G D. Effect of simulated acid rain on physiology, growth and foliar nutrient concentrations of sugar maple[J]. Chemosphere, 1998, 36: 633-638.
- [23] 唐 玲, 李倩中, 李淑顺, 等. 鸡爪槭光合特性对模拟酸雨的响应[J]. 生态环境学报, 2012, 21(7): 1241-1246.
- [24] 王 强, 金则新, 彭礼琼, 等. 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.
- [25] 齐泽民. 模拟酸雨对杜仲 (*Eucommia ulmoides* Oliver.) 的生理生态特性的影响[D]. 重庆: 西南师范大学生命科学学院, 2001: 12-13.

(责任编辑: 张明霞)