

DOI:10.11913/PSJ.2095-0837.2018.40586

王璐怡, 冯锦霞, 陈志成, 万贤崇. 杨品种‘普瑞’和‘107’对模拟酸雨胁迫的生理响应[J]. 植物科学学报, 2018, 36(4): 586-594

Wang LY, Feng JX, Chen ZC, Wan XC. Differences in physiological characteristics of *Populus × euramericana* varieties ‘Purui’ and ‘107’ under simulated acid rain stresses[J]. *Plant Science Journal*, 2018, 36(4): 586-594

杨品种‘普瑞’和‘107’对模拟酸雨胁迫的生理响应

王璐怡, 冯锦霞*, 陈志成, 万贤崇

(中国林业科学研究院林业新技术研究所, 北京 100091)

摘要: 通过测定杨(*Populus × euramericana*)抗硫新品种‘普瑞’和‘107’在3种梯度酸雨胁迫下的各项生理指标, 研究酸雨胁迫对2个杨品种影响的差异。结果显示, 在酸雨胁迫下, ‘普瑞’叶片受伤害程度明显轻于‘107’, 可以维持较稳定的光合作用, 显示出较强的抗酸雨胁迫能力。酸雨胁迫下, ‘107’光合作用强度显著下降, 非气孔因素是其下降的主要原因。酸雨在一定程度上破坏了2个杨品种的水分平衡, 尤其对‘107’的影响程度更为明显, 但气孔关闭不是引起其光合作用强度下降的主要原因。研究结果表明杨品种‘普瑞’在酸雨环境下具有更强耐受性。

关键词: ‘普瑞’; ‘107’; 胁迫; 酸雨; 生理特征

中图分类号: Q945.78

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2018)04-0586-09

Differences in physiological characteristics of *Populus × euramericana* varieties ‘Purui’ and ‘107’ under simulated acid rain stresses

Wang Lu-Yi, Feng Jin-Xia*, Chen Zhi-Cheng, Wan Xian-Chong

(Research Institute of Forestry New Technology, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: We analyzed changes in the physiological indexes of *Populus × euramericana* varieties ‘Purui’ and ‘107’ under different degrees of acid rain stresses. The experiment established three different acid rain gradients (CK, moderate stresses, severe stresses). Under severe stresses, the leaf surface of ‘Purui’ showed sporadic dry spots, whereas ‘107’ already showed symptoms under moderate stresses. Under an acid environment, ‘Purui’ exhibited a certain resistance to acid rain and maintained normal growth and photosynthetic capacity after moderate and severe stresses. However, for ‘107’, acid rain caused a significant decrease in photosynthesis, with non-stomatal factors found to be the main reason leading to its decline. Furthermore, acid rain impacted the water balance, especially for ‘107’, but stomatal closure was not the main reason for the decline in photosynthesis intensity. Thus, ‘Purui’ expressed significantly stronger resistance to acid rain than ‘107’.

Key words: ‘Purui’; ‘107’; Simulated acid rain; Stress; Physiological characteristics

二氧化硫(SO₂)是主要的大气污染物之一, 有“大气污染元凶”之称。SO₂易溶于水, 在空气中被氧化形成硫酸, 导致降水中的pH值下降, 形成酸

雨。随着工业的发展, 我国已成为世界第三大重酸雨区, 出现酸雨的城市比例已接近40%, 并正在以城市为中心向远郊和农村扩散, 雨水的酸性也

收稿日期: 2018-01-11, 退修日期: 2018-02-06。

基金项目: 中国林业科学研究院林业新技术研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(CAFINT2014K09)。

This work was supported by a grant from the Fundamental Research Funds of Research Institute of Forest New Technology (CAF-INT2014K09)。

作者简介: 王璐怡(1992-), 女, 硕士研究生, 研究方向为植物生理生态(E-mail: wly6323@163.com)。

* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: jxf@caf.ac.cn)。

愈来愈强^[1]。叶片是植物地上部分直接受到酸雨伤害的器官，酸雨会破坏叶片中的细胞器、膜系统、叶肉等组织，影响植物正常的生理生化反应，致使叶片表面形成枯斑^[2]。酸雨普遍通过降低光合作用强度的方式减少植物有机物的积累，使植株生长缓慢甚至死亡^[3,4]。光合作用强度的下降可能是由于叶片光合面积减少、细胞器膜系统损伤导致光合系统紊乱或气孔导度下降。酸雨沉降到地面后会降低土壤 pH 值，引起土壤酸化，加重土壤养分流失，增加有毒重金属的活性，从而降低根系对水分和养分的吸收，进而间接抑制植物的正常生长^[5,6]。土壤酸化还会限制植物根系的生长发育，根生物量和根体积均随土壤 pH 值的降低呈明显的下降趋势^[7]。此外，土壤酸化也会影响植物的水分运输^[8]，降低根系水分导度和叶片水势，而根系导水率的降低会增大木质部栓塞，从而使植株水分失衡，引起气孔关闭进而影响植株生长^[9]。

‘普瑞’是杨(*Populus × euramericana*)抗硫新品种(品种权号：20120047)^[10]，能在 SO₂ 污染的环境中存活且生长旺盛。而 SO₂ 在空气中可以转化成酸雨，因此杨抗 SO₂ 和抗酸雨的能力间可能存在一定关联。本研究以在 SO₂ 抗性方面具有显著差别的杨品种‘普瑞’和‘107’为材料，通过喷浇的方式模拟酸雨胁迫，测定 2 个杨品种扦插苗的生物量、光合作用参数、水分相关参数、叶绿素荧光等指标，阐明酸雨抑制杨光合作用的机制，以期为‘普瑞’的推广应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

本实验在中国林业科学研究院科研温室中完成。于 2015 年 3 月，将一年生杨品种‘107’和‘普瑞’扦插苗栽于盆中，盆直径 18 cm，高 20 cm，每盆 1 株。栽培基质为体积比，椰糠：泥炭：土砂 = 1：1：1，每周定时补水。于 2015 年 7 月初，选取生长基本一致的扦插苗，随机分成 3 组(编号 1、2、3)，每组 24 株(‘107’和‘普瑞’各 12 株)，保证处理前组间植株的苗高和地径无显著差异(表 1)。

1.2 模拟实验酸雨溶液的配制

本研究参考南方地区天然酸雨中的化学成分，选取 K₂SO₄(0.660 mg/L)、Na₂SO₄(0.988 mg/L)、

表 1 处理前扦插苗的苗高和地径
Table 1 Seeding height and ground diameter of the cuttings before experimental treatment

品种 Variety	组 Group	苗高 (cm) Height	地径 (mm) Ground diameter
‘普瑞’	1	79.15 ± 2.53	7.94 ± 0.10
	2	75.35 ± 1.15	7.94 ± 0.18
	3	78.15 ± 3.40	7.78 ± 0.18
‘107’	1	62.00 ± 1.37	7.33 ± 0.27
	2	61.33 ± 1.55	7.38 ± 0.20
	3	61.00 ± 0.78	7.37 ± 0.22

注：重复数为 9 ~ 12 个(平均值 ± 标准误)。
Note: Means ± SE are shown (n = 9 - 12).

CaCl₂(2.613 mg/L)、NH₄NO₃(0.772 mg/L)及 (NH₄)₂SO₄(1.442 mg/L)，调节去离子水的浓度得到原溶液。将含有 SO₄²⁻与 NO₃⁻(质量比为 5：1 的浓硫酸和浓硝酸混合液)的酸雨母液(pH1)添加到原溶液中^[11]，分别配置成 pH 值为 3.5、4.5 和 5.6 的模拟酸雨溶液，用于植物叶面喷洒。另外，配置 pH 值分别为 3.0、4.0、5.0 的模拟酸雨溶液用于土壤灌注。由于土壤具有一定的缓冲能力，本研究在预实验中发现，采用 pH 值 3.0、4.0、5.0 的模拟酸雨溶液灌注土壤后，测得的土壤 pH 值约为 3.5、4.5 和 5.6。

1.3 实验方法

为了使实验条件更加接近自然环境，采用如下实验方法：每 7 d 向叶片喷施一次模拟酸雨溶液，至叶片表面挂满水珠呈且自然滴落状态；同时向土壤中浇灌 2 L 模拟酸雨溶液酸化土壤，喷、灌共重复 5 次。实验设置 3 个处理：(1)叶面喷施(pH3.5)同时土壤浇灌(pH3.0)酸雨溶液(pH3.5 + pH3.0，重度胁迫)；(2)叶面喷施(pH4.5)同时土壤浇灌(pH4.0)酸雨溶液(pH4.5 + pH4.0，中度胁迫)；(3)叶面喷施(pH5.6)同时土壤浇灌(pH5.0)酸雨溶液为对照(pH5.6 + pH5.0，CK)。胁迫处理 35 d 后进行实验。

1.4 测定方法

1.4.1 生物量的测定

每组随机选取杨品种‘107’和‘普瑞’各 6 株，取其全部叶片、茎和根部，放入烘箱中，105℃杀青 10 min，于 70℃下恒温烘干 48 h，测定干重及根冠比(根系干重/地上部分干重)。

1.4.2 光合作用参数的测定

于晴朗天气，采用 LI-6400 XT 光合测定系统

(LI-COR, 美国)测定从植株顶端向下第 4、5、6 片叶子的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、胞间二氧化碳浓度(C_i)、气孔限制值(L_s)和水分利用效率(WUE)。仪器采用开放式气路, CO_2 浓度为 $398\text{ }\mu\text{mol/L}$, 选择红蓝光源叶室, 光合有效辐射为 $1200\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。水分利用效率的计算公式为: 水分利用效率(WUE) = 净光合速率/蒸腾速率, 气孔限制值(L_s) = $1 - \text{胞间二氧化碳浓度}(C_i) / \text{大气二氧化碳浓度}(C_a)$ 。

1.4.3 叶绿素荧光的测定

采用 Li-6400 XT 测定初始荧光(F_o), 光强为 $1200\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, 光照 20 min 后, 施加饱和脉冲为 $7000\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 的光强 0.8 s, 测定暗适应下最大荧光(F_m), 根据公式计算荧光参数, 光系统 II 中的最大光化学效率(F_v/F_m): $F_v/F_m = (F_m - F_o) / F_m$; 光化学淬灭(q_p): $q_p = (F_m' - F_s) / (F_m' - F_o)$; 非光化学淬灭(NPQ): $NPQ = (F_m - F_m') / F_m'$ 和实际光化学量子产量(Φ_{PSII}): $\Phi_{PSII} = (F_m' - F_s) / F_m'$ [12]。

1.4.4 水势、栓塞和根系导水率的测定

于晴天选取之前测定光合作用的叶片, 在 12:00 - 14:00 时采用便携式压力室(SAPSII 3115, USA)测定叶片的正午水势[13]。然后, 将整个枝干浸没在水中, 截取约 5 cm 长的茎段用于测定导水损失率 PLC(Percentage loss of conductivity)。采用 25 mmol/L 的 KCl 溶液测定 PLC 值, 先在 4 kPa 的压力下得到初始导水率(K_i), 再用 0.175 MPa 压力冲洗茎段 10 ~ 15 min, 最后在 4 kPa 的压力下得到最大导水率(K_{max}), 计算公式为: $\text{PLC}(\%) = (1 - K_i/K_{max}) \times 100\%$ [14,15]。用导水损失率 PLC 表征木质部栓塞程度。将截取完枝干剩下的部分, 在水中剥去约为 8 mm 长的茎干皮层, 将露出的木质部套上硅胶软管, 并注满除去气泡的蒸馏水, 平衡一段时间后, 使用高压液流仪测定根系导水率[16,17]。

1.4.5 相对电导率的测定

用蒸馏水将叶片洗净、擦干, 用直径 10 mm 的打孔器取 20 个圆片放入试管中, 加入 20 mL 蒸馏水, 抽真空 1 h, 室温下保持 3 ~ 4 h, 测定电导率 S_1 ; 沸水浴 10 min 后, 冷却后平衡 1 h, 测定电导率 S_2 , 同时测定蒸馏水电导率 S_0 。相对电

导率的计算公式为: 相对电导率(%) = $(S_1 - S_0) / (S_2 - S_0) \times 100\%$ [18]。

1.5 结果统计及分析方法

采用 SPSS 21.0 软件进行方差分析和差异显著性比较。采用 SigmaPlot 12.5 软件作图。数据处理后, 均通过实验组/对照组的百分比计算, 采用归一化形式显示实验组与对照组之间的差异。

2 结果与分析

2.1 叶片受酸雨胁迫的伤害程度

研究结果发现, 杨品种‘普瑞’和‘107’受酸雨胁迫后, 叶片均会出现枯斑现象。随着酸雨酸度的增加, 杨 2 个品种的叶片受伤害程度随之加重, 但‘普瑞’的受损程度明显轻于‘107’(图 1)。

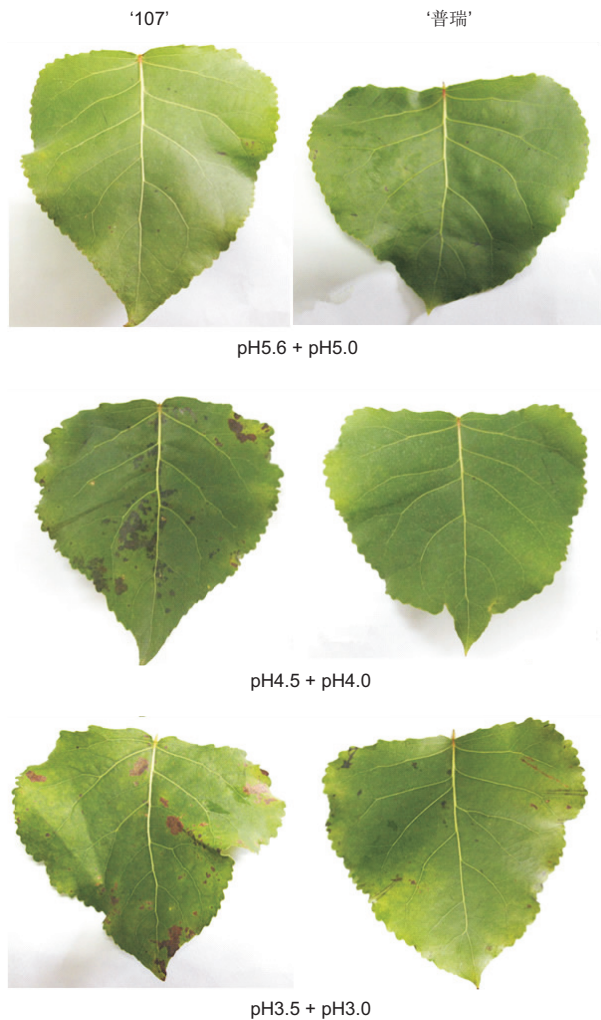


图 1 不同处理下 2 种杨叶片受酸雨胁迫后的表现形态
Fig. 1 Apparent leaf morphology of the two *Populus x euramericana* varieties under acid rain stresses (pH shows the simulated acidity of spray and water)

2.2 酸雨胁迫对光合作用的影响

研究表明，与对照相比，杨品种‘普瑞’在中度胁迫下的 C_i 、 G_s 、 L_s 、 T_r 和 WUE 值的变化均没有达到显著水平 ($P > 0.05$)；而在重度胁迫下，‘普瑞’的 P_n 值比对照下降了 14.2%，差异显著 ($P < 0.05$)。而‘107’的 P_n 值在中度胁迫下比对照显著降低了 19%；在重度胁迫下，其 P_n 、 G_s 、 T_r 、 L_s 值分别较对照降低了 40%、25.4%、30% 和 15%， C_i 值升高了 7.4%，差异均达到显著水平 ($P < 0.05$) (表 2)。

2.3 酸雨胁迫对叶绿素荧光的影响

研究表明，杨品种‘普瑞’和‘107’的 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 q_P 值均随酸雨胁迫加重均呈下降趋势，而 NPQ 值逐渐升高，‘107’的变化趋势比‘普瑞’更加显著。‘107’在中度胁迫下， F_v/F_m 比值和 NPQ 值与对照已有显著差异； Φ_{PSII} 和 q_P 在重度胁迫下与对照相比有显著降低，而 F_o 显著升高 ($P < 0.05$)；‘普瑞’在重度胁迫下 F_v/F_m 比值和 NPQ 值才与对照组差异显著 (表 3)。

2.4 酸雨胁迫对生物量的影响

本研究发现，‘普瑞’随着胁迫加重，叶面积、叶生物量、茎生物量和根冠比均没有显著变化 ($P > 0.05$)；而‘107’，在中度和重度胁迫下，叶、茎、根的生物量及叶面积与对照相比均显著下降 ($P < 0.05$) (图 2、图 3)。

与对照组相比，‘普瑞’的地径生长量和高生长量均没有显著变化 ($P > 0.05$)；而‘107’的高生长量在重度胁迫下显著减小，地径生长量在中度和重度胁迫下分别下降了 27.3% 和 42.5%，差异显著 ($P < 0.05$) (表 4)。

2.5 酸雨胁迫对‘普瑞’和‘107’细胞膜透性的影响

本研究发现，随着胁迫的加重，‘普瑞’和‘107’叶片细胞膜透性均逐渐增加。‘普瑞’叶片细胞膜透性在重度胁迫下显著高于对照 21.9% ($P < 0.05$)；‘107’叶片细胞膜透性在中度和重度胁迫下分别高于对照 32.8% 和 22.3%，差异显著 ($P < 0.05$) (图 4)。

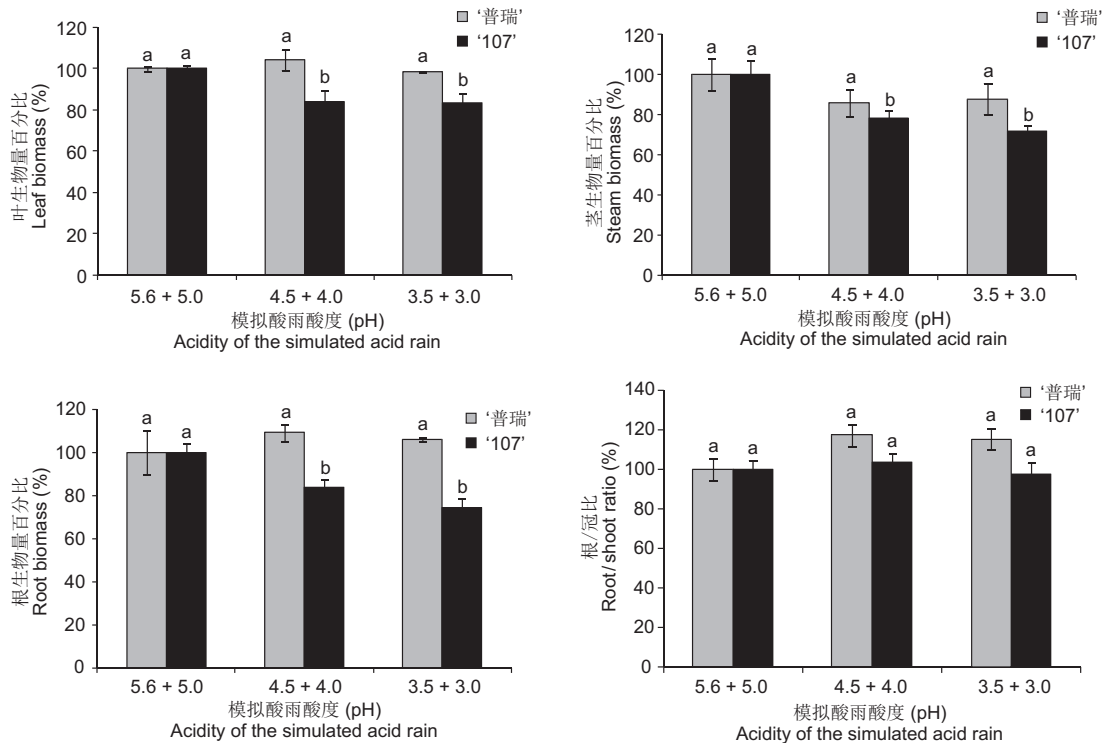
表 2 模拟酸雨处理下‘普瑞’和‘107’的光合作用参数
Table 2 Normalized photosynthesis parameters of ‘Purui’ and ‘107’ varieties under acid rain stresses

品种 Variety	酸度 (pH) Acidity	净光合速率 P_n (%)	气孔导度 G_s (%)	胞间 CO_2 C_i (%)	气孔限制值 L_s (%)	蒸腾作用 T_r (%)	水分利用效率 WUE (%)
‘普瑞’	5.6 + 5.0	100.0 ± 4.1 a	100.0 ± 8.9 a	100.0 ± 1.0 a	100.0 ± 2.6 a	100.0 ± 5.3 a	100.0 ± 5.7 a
	4.5 + 4.0	101.3 ± 1.8 a	85.0 ± 7.3 a	100.1 ± 1.4 a	101.0 ± 5.3 a	101.2 ± 6.2 a	101.8 ± 6.3 a
	3.5 + 3.0	85.8 ± 2.9 b	79.1 ± 8.0 a	102.3 ± 1.3 a	93.9 ± 3.2 a	109.6 ± 12.4 a	93.1 ± 9.3 a
‘107’	5.6 + 5.0	100.0 ± 1.4 a	100.0 ± 5.9 a	100.0 ± 1.1 b	100.0 ± 2.7 a	100.0 ± 10.8 a	100.0 ± 10.0 a
	4.5 + 4.0	81.1 ± 1.8 b	95.6 ± 7.9 a	104.3 ± 1.5 a	94.2 ± 4.0 ab	83.5 ± 8.1 ab	96.7 ± 9.9 a
	3.5 + 3.0	59.9 ± 2.3 c	74.5 ± 4.5 b	107.4 ± 1.2 a	85.1 ± 3.6 b	71.1 ± 6.8 b	83.4 ± 8.1 a

注：同行不同字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。表中值为平均值 ± 标准误。下同。
Notes: Different letters refer to significant differences in each parameter between different treatment acidities ($P < 0.05$). Means ± SE are shown. Same below.

表 3 模拟酸雨处理下‘普瑞’与‘107’的叶绿素荧光参数
Table 3 Normalized chlorophyll fluorescence parameters of ‘Purui’ and ‘107’ varieties under acid rain stresses

品种 Variety	酸度 (pH) Acidity	最小初始荧光 F_o	最大光化学效率 F_v/F_m	实际光化学量子效率 Φ_{PSII}	光化学淬灭系数 q_P	非光化学淬灭系数 NPQ
‘普瑞’	5.6 + 5.0	100.0 ± 2.1 a	100.0 ± 0.2 a	100.0 ± 10.0 a	100.0 ± 8.2 a	100.0 ± 1.7 b
	4.5 + 4.0	99.8 ± 4.4 a	99.4 ± 0.3a	89.9 ± 3.8 a	97.5 ± 3.5 a	100.7 ± 2.3 b
	3.5 + 3.0	103.8 ± 3.0 a	98.5 ± 0.8b	88.1 ± 7.7 a	85.1 ± 6.8 a	106.4 ± 1.1 a
‘107’	5.6 + 5.0	100.0 ± 1.7 b	100.0 ± 0.2 a	100.0 ± 1.7 a	100.0 ± 1.2 a	100.0 ± 0.9 c
	4.5 + 4.0	103.3 ± 1.3 b	98.5 ± 0.8 b	95.1 ± 4.7 a	96.6 ± 2.8 a	109.7 ± 2.0 b
	3.5 + 3.0	109.0 ± 1.2 a	95.9 ± 0.2 c	79.8 ± 3.1 b	79.1 ± 1.3 b	116.4 ± 1.8 a



不同字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。
Different letters refer to significant differences between different treatment acidities ($P < 0.05$). Same below.

图 2 模拟酸雨处理下‘普瑞’与‘107’植株的生物量

Fig. 2 Normalized biomass of ‘Purui’ and ‘107’ varieties under acid rain stresses

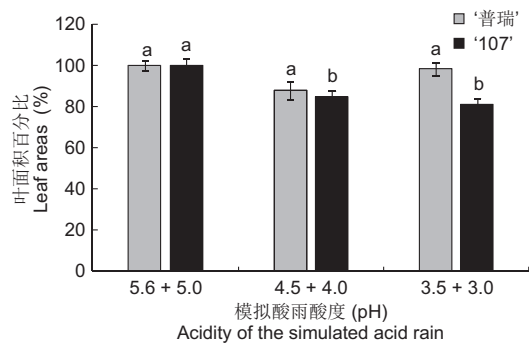


图 3 模拟酸雨处理下‘普瑞’与‘107’植株的叶面积

Fig. 3 Normalized leaf area of ‘Purui’ and ‘107’ varieties under acid rain stresses

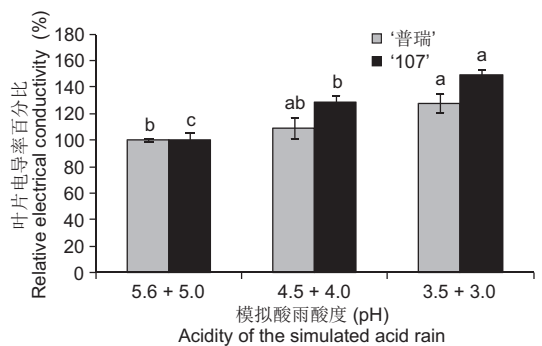


图 4 模拟酸雨处理下‘普瑞’与‘107’细胞质膜透性

Fig. 4 Normalized permeability of cell membranes of ‘Purui’ and ‘107’ varieties under acid rain stresses

表 4 模拟酸雨处理下‘普瑞’与‘107’植株的生长量

Table 4 Normalized relative growth of ‘Purui’ and ‘107’ varieties under acid rain stresses

品种 Variety	酸度 (pH) Acidity	地径 (mm) Ground diameter	高 (cm) Height
‘普瑞’	5.6 + 5.0	100.0 ± 4.2 a	100.0 ± 6.3 a
	4.5 + 4.0	90.3 ± 10.1 a	94.4 ± 3.2 a
	3.5 + 3.0	79.7 ± 3.1 a	98.3 ± 5.5 a
‘107’	5.6 + 5.0	100.0 ± 5.4 a	100.0 ± 2.2 a
	4.5 + 4.0	72.7 ± 5.1 b	96.3 ± 1.6 a
	3.5 + 3.0	57.4 ± 7.0 b	87.2 ± 1.8 b

2.6 酸雨胁迫对‘普瑞’和‘107’水分运输的影响

研究表明，与对照相比，‘普瑞’的栓塞和根系导水率没有显著差异，而‘107’在重度胁迫下的根系导水率显著下降了 35%，栓塞显著增加了 73% ($P < 0.05$) (图 5)。随着胁迫的加重，2 种杨叶片水势均呈显著下降的趋势，但‘107’在重度胁迫下的叶片水势较对照下降了 0.1%，而‘普瑞’下降了 15.7%，但两者差异均达到显著水平 ($P < 0.05$) (图 6)。

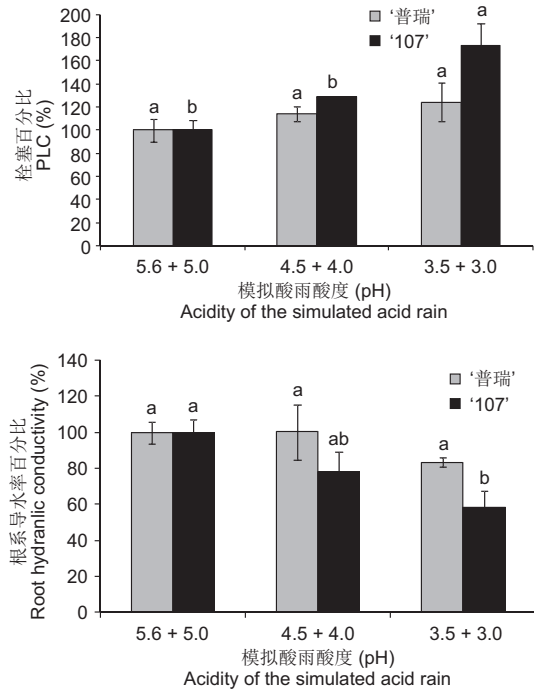


图 5 模拟酸雨处理下‘普瑞’与‘107’的栓塞和根系导水率

Fig. 5 Normalized PLC and root hydraulic conductivity of ‘Purui’ and ‘107’ varieties under acid rain stresses

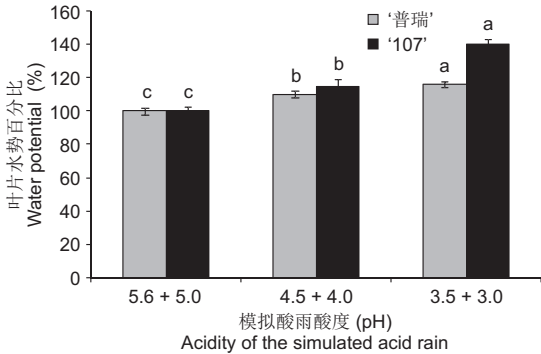


图 6 模拟酸雨处理下‘普瑞’与‘107’的叶片水势

Fig. 6 Normalized water potential of the leaves of ‘Purui’ and ‘107’ varieties under acid rain stresses

3 讨论

本研究通过比较杨 2 个品种对模拟酸雨的生理响应，发现‘普瑞’在酸雨胁迫环境下，叶片受伤程度明显轻于‘107’，可以维持相对稳定的光合作用、水分平衡和细胞膜透性，从而保持正常生长，显示出较强的抗酸雨胁迫能力。

酸雨对植物叶片具有直接的伤害，可破坏叶片细胞膜系统，使其出现枯斑，严重时会导致坏死^[19,20]，进而破坏植物的光合系统，降低叶片光

合速率^[21,22]。本研究发现，‘普瑞’的叶片较‘107’更耐酸雨危害，可能是因为‘普瑞’较‘107’具有更强的叶片表皮防御功能，‘普瑞’叶面角质层比‘107’厚约 21%^[23]，从而降低了酸雨的伤害，这可能是‘普瑞’抗酸雨的第一屏障。

光合作用是植物有机物质积累、生长发育的基础，受植物本身生理特性和环境因素的共同影响^[24]。酸雨可通过多种途径导致植株光合作用强度下降。气孔是植物体与外界环境进行气体交换的通道，调节蒸腾、光合等生理过程，气孔是植物应对酸雨胁迫的主要防御门户。在胁迫环境下，植株可以通过气孔关闭响应机制实现自我保护^[25]。气孔关闭降低了气孔导度，降低叶片蒸腾作用，同时减少 CO₂ 的进入，影响植物光合作用。研究表明，‘普瑞’的光合作用受酸雨胁迫的影响不显著，而酸雨胁迫显著降低了‘107’的光合作用强度。酸雨也显著降低了‘107’的气孔导度，与此同时，胞间 CO₂ 浓度没有下降反而升高，因而随酸雨胁迫加重，气孔限制值显著降低。一般认为，在胁迫环境下，气孔导度较小，通过气孔进入到叶肉细胞的 CO₂ 也就较少，可能导致气孔限制值升高，但胞间 CO₂ 浓度受气孔开度和叶肉细胞对 CO₂ 需求的协同影响^[26]，在酸雨胁迫下，虽然气孔导度较小，但由于叶片的光系统遭到破坏，导致叶肉细胞中的 CO₂ 未能及时被固定利用，从而使胞间 CO₂ 浓度保持在较高水平，因此，气孔限制值逐渐降低。虽然在胁迫环境下 2 个品种的气孔导度有所下降，但仍维持在相对较高的水平，所以，气孔导度并不是限制光合作用的主要因素，非气孔因素即光合结构遭到破坏可能是酸雨环境下制约光合作用的主要因素，即‘107’光合速率降低是受到非气孔因素限制。

叶绿素荧光动力学参数可表征植物叶片光系统的吸收、传递、耗散、分配光能的能力^[27]。本研究结果表明，中度酸雨胁迫并未显著影响‘普瑞’杨的 F_v/F_o 比值 (PS II 原初光能转化效率)，而‘107’的 F_v/F_o 比值在中度胁迫时就开始表现出显著的降低。实际光化学量子效率变化趋势与 F_v/F_o 比值一致，随胁迫的加重，‘普瑞’依然维持着较高的实际光化学量子效率，有利于为光合碳同化提供足够的能量，这与‘普瑞’在酸雨胁迫下可以维持生长的结果一致。光化学淬灭 (q_p) 和非光化学

淬灭(NPQ)反映了叶片吸收的光能用于光化学反应和热耗散的比例^[28]。本文通过比较杨2个品种气体交换和叶绿素荧光参数发现,酸雨胁迫显著降低了‘107’的净光合速率 P_n 值,同时光系统Ⅱ的光化学效率和实际光量子利用效率下降,非光化学淬灭明显升高,导致光能利用效率显著下降;重度胁迫下叶片有效散热所依赖的蒸腾速率显著下降,多余的光能无法用于电子传递,也不能以热耗散的形式散失,导致吸收的光能大量累积在光系统部分,引发光系统Ⅱ结构和功能的破坏,降低了反应中心光化学活性,从而抑制了光合作用。这些结果证明,‘107’光合作用下降是非气孔因素限制所致。在酸雨环境下,‘普瑞’光系统Ⅱ可以保持较稳定的光能利用效率,多余的光能通过蒸腾作用散失,维持稳定的光合作用。此外,叶片表面出现枯斑致使植物的有效光合面积减少,总光合固碳能力减弱,直接影响有机物积累和生长^[29]。

酸雨会直接造成土壤酸化,也会加强土壤中一些金属离子的活性,降低土壤水势^[30],继而导致植株根系发育不良、活力下降,影响根系对水分和矿质元素的吸收,增加植株木质部导管发生空穴化和栓塞化的危险。木质部导管是植物体内水分长距离运输的主要通道,木质部导管栓塞化影响植物水分运输,进而影响光合速率和生长状况^[31]。酸雨淋溶叶片后会破坏其角质层,增大细胞膜透性,加剧叶片失水,同时伴随土壤酸化导致的根系吸水量下降,进一步加剧植株体内水分匮乏,从而增加木质部栓塞的危险^[19]。本研究表明,酸雨胁迫显著抑制了‘107’根系生物量和根系导水率,进而降低了叶片水势,增大了茎木质部栓塞,降低了叶片气孔导度。但由于植株生长在湿润的环境(科研温室,空气湿度高达70%~80%)中,并没有进行干旱处理,尽管‘107’的水分状况比‘普瑞’受酸雨影响大,但2个品种都没有出现严重的水分失衡。有研究表明,栓塞在20%以下对植物水分运输不会产生严重的影响^[17]。本研究中,‘107’最大栓塞为12%,因此酸雨胁迫对‘107’水分运输的影响并不是植株生长缓慢的主要原因。内聚力-张力学说(Cohesion-tension, C-T)是解释植物体内水分长距离运输的主要理论。叶面蒸腾所产生的低水势(张力)提供一种吸力,通过木质部中的连续水柱将张力逐渐传递至根部,致使根表面有足够低的水

势可以从土壤中吸收水分,并将水提升到树冠部分^[32-34]。酸雨胁迫显著降低了‘普瑞’和‘107’的根系导水率,可能是因为在温室环境下,空气湿度大,植物蒸腾需求较小,叶片导管的张力并不是很大,致使根系吸收水分受阻。

参考文献:

- [1] 高敬. 2016 中国环境状况公报[N]. 中国环境报, 2017-06-07(T02).
- [2] Rakwal R, Agrawal GK, Kubo A, Yonekura M, Tamogami S. Defense/stress responses elicited in rice seedlings exposed to the gaseous air pollutant sulfur dioxide[J]. *Environ Exp Bot*, 2003, 49(3): 223-235.
- [3] Khan MR, Khan MM. Plants response to diseases in sulphur dioxide stressed environment [J]. *Plant Pathol*, 2011, 10(1): 1-12.
- [4] Chen J, Wang WH, Wu FH, Zheng HL. Photosynthetic and antioxidant responses of *Liquidambar formosana* and *Schima superba* seedlings to sulfuric-rich and nitric-rich simulated acid rain[J]. *Plant Physiol Biochem*, 2013, 64: 41-51.
- [5] Ebhin MR, Masto RE, Chhonkar PK, Singh D, Patra AK. Changes in soil biological and biochemical characteristics in a long-term field trial on a subtropical inceptisol[J]. *Soil Biol Biochem*, 2006, 38(7): 1577-1582.
- [6] Singh A, Agrawal M. Acid rain and its ecological consequences[J]. *J Exp Biol*, 2007, 29(1): 15-24.
- [7] 唐琨, 朱伟文, 周文新, 易镇邪, 屠乃美. 土壤 pH 对植物生长发育影响的研究进展[J]. 作物研究, 2013, 27(2): 207-212.
- [8] Tang K, Zhu WW, Zhou WX, Yi ZX, Tu NM. Research progress on effects of soil pH on plant growth and development[J]. *Crop Research*, 2013, 27(2): 207-212.
- [9] 杨启良, 张富仓, 刘小刚, 王玺, 张楠, 戈振扬. 植物水分运输过程中的调控机制研究进展[J]. 生态学报, 2011, 31(15): 4427-4436.
- [10] Yang QL, Zhang FC, Liu XG, Wang X, Zhang N, Ge ZY. Research progress on regulation mechanism for the process of water transport in plants[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(15): 4427-4436.
- [11] 张翠萍, 孟平, 李建中, 万贤崇. 磷元素和土壤酸化交互作用对核桃幼苗光合特性的影响[J]. 植物生态学报, 2014, 38(12): 1345-1355.
- [12] Zhang CP, Meng P, Li JZ, Wan XC. Interactive effects of soil acidification and phosphorus deficiency on photosynthetic characteristics and growth in *Juglans regia* seedlings[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, 38

- (12): 1345–1355.
- [10] 万贤崇, 张存义, 冯锦霞, 白坤栋, 程国华, 张兆欣. 杨树抗硫新品种‘普瑞’[J]. 林业科学, 2012, 48(12): 160.
Wan XC, Zhang CY, Feng JX, Bai KD, Cheng GH, Zhang ZX. A new poplar variety ‘Purui’ of resistant to SO_2 [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, 48(12): 160.
- [11] 张胜楠. 模拟酸雨的不同喷淋方式对小白菜的生长、生理及营养品质[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- [12] Roháček K. Chlorophyll fluorescence parameters: the definitions, photosynthetic meaning, and mutual relationships [J]. *Photosynthetica*, 2002, 40(1): 13–29.
- [13] Scholander PF, Hammel HT, Bradstreet EA, Bradstreet ED. Sap pressure in vascular plants[J]. *Science*, 1965, 148(3668): 339–346.
- [14] Sperry JS, Donnelly JR, Tyree MT. A method for measuring hydraulic conductivity and embolism in xylem [J]. *Plant Cell Environ*, 1988, 11(1): 35–40.
- [15] 靳欣, 徐洁, 白坤栋, 冯锦霞, 张劲松, 万贤崇. 从水分结构比较3种共存木本植物的抗旱策略[J]. 北京林业大学学报, 2011, 33(6): 135–141.
Jin X, Xu J, Bai KD, Feng JX, Zhang JS, Wan XC. Comparison of drought strategies of three co-existing woody plants by their hydraulic structures[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2011, 33(6): 135–141.
- [16] Wan XC, Zwiazek JJ. Mercuric chloride effects on root water transport in aspen seedlings[J]. *Plant Physiol*, 1999, 121(3): 939–946.
- [17] 郭建荣. 木本植物银桦根压及其昼夜周期与影响因素的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2016.
- [18] 中国科学院上海植物生理研究所, 上海市植物生理学会编. 现代植物生理学实验指南[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [19] Yoshida K, Shibasaki R, Takami CR. Response of gas exchange rates in *Abies firma* seedlings to various additional stresses under acid fog stress[J]. *J Forestry Res*, 2004, 9(3): 195–203.
- [20] 董莲春, 俞飞, 刘美华, 余树全, 汪赛, 伊力塔. 不同酸雨梯度下3种酸雨处理对茶树幼苗叶绿素荧光和光合特性的影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(9): 3495–3504.
Dong LC, Yu F, Liu MH, Yu SQ, Wang S, Yi LT. Effects of three kinds of acid rain treatments on chlorophyll fluorescence and photosynthetic characteristics of *Camellia sinensis* under different acid rain gradients[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(9): 3495–3504.
- [21] 邱栋梁, 刘星辉, 郭素枝. 模拟酸雨对龙眼叶片气体交换及叶绿素荧光参数的影响[J]. 植物生态学报, 2002, 26(4): 441–446.
Qiu DL, Liu XH, Guo SZ. Effects of simulated acid rain stress on gas exchange and chlorophyll fluorescence parameters in leaves of longan[J]. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2002, 26(4): 441–446.
- [22] 马博英, 徐礼根, 蒋德安. 模拟酸雨对假俭草叶绿素荧光特性的影响[J]. 林业科学, 2006, 11(11): 8–11.
Ma BY, Xu LG, Jiang DA. Effects of simulated acid rain on chlorophyll fluorescence characteristics in *Eremochloa ophiuroides*[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 11(11): 8–11.
- [23] 徐洁, 白坤栋, 万贤崇, 程国华, 张存义, 张兆欣. 欧美杨107杨抗硫无性系的变异及其抗氧化保护系统对 SO_2 响应[J]. 林业科学, 2011, 47(2): 66–71.
Xu J, Bai KD, Wan XC, Cheng GH, Zhang CY, Zhang ZX. Responses of poplar (*Populus × euramericana* cv. ‘74/76’) SO_2 -resistant clone to SO_2 fumigation and the variation in antioxidant systems[J]. *Scientia silvae sinicae*, 2011, 47(2): 66–71.
- [24] Sofo A, Dichio B, Montanaro G, Xiloyannis C. Photosynthetic performance and light response of two olive cultivars under different water and light regimes[J]. *Photosynthetica*, 2009, 47(4): 602–608.
- [25] 陶巧静, 付涛, 项锡娜, 李波, 吴月燕, 周伟军. 模拟酸雨对西洋杜鹃生理生态特性的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(8): 2020–2027.
Tao QJ, Fu T, Xiang XN, Li B, Wu YY, Zhou WJ. Effects of simulated acid rain on the physiological and ecological characteristics of *Rhododendron hybridum*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(8): 2020–2027.
- [26] Farquhar GD, Sharkey TD. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. *Annu Rev Plant Physiol*, 1982, 33: 317–345.
- [27] 蒋达波, 宗秀虹, 李帮秀, 宗学风, 王三根. 氮素胁迫对玉米光合及叶绿素荧光参数的影响[J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2015, 40(1): 135–139.
Jiang DB, Zong XH, Li BX, Zong XF, Wang SG. Effects of nitrogen stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of maize[J]. *Journal of Southwest China Normal University: Natural Science Edition*, 2015, 40(1): 135–139.
- [28] Farias ME, Martinazzo EG, Bacarin MA. Chlorophyll fluorescence in the evaluation of photosynthetic electron transport chain inhibitors in the pea[J]. *Revista Ciência Agro-nomica*, 2016, 47(1): 633–643.
- [29] Randewig D, Hamisch D, Eiblmeier M, Boedecker C, Kreuzwieser J, et al. Oxidation and reduction of sulfite contribute to susceptibility and detoxification of SO_2 in *Populus × canescens* leaves[J]. *Trees*, 2014, 28: 399–411.
- [30] Maxwell K, Johnson GN. Chlorophyll fluorescence—a prac-

- tical guide[J]. *J Exp Bot*, 2000, 51(345): 659–668.
- [31] Santiago LS, Goldstein G, Meinzer FC, Fisher JB, Machado K, *et al.* Leaf photosynthetic traits scale with hydraulic conductivity and wood density in Panamanian forest canopy trees[J]. *Oecologia*, 2004, 140(4): 543–550.
- [32] Tyree MT. The ascent of water[J]. *Nature*, 2003, 423(26): 923.
- [33] 万贤崇, 孟平. 植物体内长距离运输的生理生态学机制[J]. 植物生态学报, 2007, 31(5): 804–813.
- Wan XC, Meng P. Physiological and ecological mechanisms of long-distance water transport in plants: a review of recent issues[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2007, 31(5): 804–813.
- [34] 代永欣, 王林, 万贤崇. 干旱导致树木死亡机制研究进展[J]. 生态学杂志, 2015, 34(11): 3228–3236.
- Dai YX, Wang L, Wan XC. Progress on researches of drought-induced tree mortality mechanisms[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(11): 3228–3236.

(责任编辑: 周 媛)

欢迎订阅 2019 年《植物资源与环境学报》

全国中文核心期刊 中国科技核心期刊

中国科学引文数据库核心期刊 RCCSE 中国核心学术期刊(A⁺)

季刊, 单价 20 元, 邮发代号: 28–213, 国内统一连续出版物号: CN 32–1339/S

《植物资源与环境学报》为江苏省中国科学院植物研究所和江苏省植物学会联合主办的学术刊物, 国内外公开发行人。本刊为全国中文核心期刊(北大)、中国科技核心期刊、中国科学引文数据库核心期刊(CSCD)和 RCCSE 中国核心学术期刊(A⁺), 并为 BA、CA、CAB、Elsevier's、中国生物学文摘、中国环境科学文摘、中国科学引文数据库、万方数据——数字化期刊群、中国学术期刊(光盘版)、超星期刊域出版平台和中文科技期刊数据库等国内外著名刊库收录。2013 年荣获“首届江苏省新闻出版政府奖·期刊奖”及江苏省精品科技期刊项目; 2015 年荣获“第六届江苏省科技期刊金马奖·精品期刊奖”及江苏省精品科技期刊Ⅲ类项目; 2016 年和 2017 年均荣获江苏省精品科技期刊 I 类项目。

本刊围绕植物资源与环境两个中心命题, 报道我国植物资源的考察、开发利用和植物物种多样性保护, 自然保护区与植物园的建设和管理, 植物在保护和美化环境中的作用, 环境对植物的影响以及植物资源和植物环境有关学科领域的原始研究论文、研究简报和综述等。凡从事植物学、生态学、自然地理学以及农、林、园艺、医药、食品、轻化工和环境保护等领域的科研、教学、技术人员及决策者均可以从本刊获得相关学科领域的研究进展和信息。

本刊为季刊, 大 16 开本, 每期 120 页。全国各地邮局均可订阅, 每期定价 20 元, 全年 80 元。若错过征订时间或需补齐 1992 年至 2017 年各期, 请直接与编辑部联系邮购。1992 年至 1993 年每年 8 元; 1994 年至 2000 年每年 16 元; 2001 年至 2005 年每年 24 元; 2006 年至 2008 年每年 40 元; 2009 年至 2011 年每年 60 元; 2012 年至 2018 年每年 80 元(均含邮资, 如需挂号另付挂号费 3 元)。

编辑部地址: 江苏省南京市中山门外 江苏省中国科学院植物研究所内(邮编 210014); 电话: 025-84347014; QQ: 2219161478; E-mail: zwzybjb@163.com。本刊目前只接收在线投稿, 投稿网址: <http://zwzy.cnbg.net>, 欢迎使用并提出宝贵意见。

欢迎订阅! 欢迎投稿!