

# 模拟秋季酸雨对三角枫叶片光合生理特性的影响

唐 玲,李倩中\*,李淑顺,闻 婧

(江苏省农业科学院园艺研究所,江苏省高效园艺作物遗传改良重点实验室,南京 210014)

**摘要:**以三角枫幼苗为材料,采用盆栽方法,研究了 pH 5.6、pH 4.0、pH 3.0 和 pH 2.0 酸度模拟酸雨胁迫对三角枫叶片光合生理特性的影响,以探讨酸雨胁迫下三角枫的光合生理响应机制。结果显示:(1)随着酸雨浓度的增加和胁迫时间的延长,三角枫叶片相对叶绿素含量下降幅度逐步增大;叶片丙二醛含量呈逐渐上升的趋势,且各处理均显著高于对照;叶片质膜透性和脯氨酸含量均呈先升高后降低的趋势,且 pH 2.0 处理的叶片质膜透性在试验 20 d 时迅速增大,升高幅度最大(146.3%)。(2)叶片净光合速率、蒸腾速率、水分利用效率、表观光能利用效率以及表观 CO<sub>2</sub> 利用效率在胁迫下也均呈显著下降趋势,且以 pH 3.0 和 pH 2.0 处理降幅最大。研究表明,pH 4.0 的模拟酸雨对三角枫叶片的光合生理指标无显著影响,而 pH≤3.0 的强酸雨胁迫使三角枫叶片叶绿素含量显著下降、膜保护系统受损、光合作用效率显著下降;三角枫能适应弱酸雨(pH≥4.0)环境,可作为酸雨地区的园林绿化树种。

**关键词:**三角枫;模拟酸雨;光合生理特性

中图分类号:Q945.78

文献标志码:A

## Effects of Stimulated Acid Rain in Autumn on Leaf Photosynthetic Characteristics in the Leaf of *Acer buergerianum* Miq.

TANG Ling, LI Qianzhong\*, LI Shushun, WEN Jing

(Institute of Horticulture, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Jiangsu Key Laboratory for Horticultural Crop Genetic Improvement, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** A pot experiment was conducted to explore the effects of stimulated acid rain treatments with different pH values (pH 5.6, pH 4.0, pH 3.0 and pH 2.0) in autumn on leaf photosynthetic physiological characteristics in the leaf of *Acer buergerianum* Miq. The results showed that: (1) the relative contents of chlorophyll in the leaf decreased with pH value of stimulated acid rain decreased, while content of MDA in the leaf increased. Membrane permeability and proline content firstly increased and then decreased during stimulated acid rain treatment. On the 20th day of the treatment, membrane permeability of plants growing under pH 2.0 reached the highest level of 146.3%. (2) The net photosynthetic rate, transpiration rate, water use efficiency as well as apparent light utilization efficiency and apparent CO<sub>2</sub> utilization efficiency significantly declined under stimulated acid rain treatments, especially under stimulated acid rain of pH 3.0 and 2.0. Comprehensive analysis showed that, stimulated acid rain treatment of pH 4.0 did not

收稿日期:2016-09-22;修改稿收到日期:2016-12-13

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金[CX(14)2027]

作者简介:唐 玲(1983—),女,硕士,助理研究员,主要从事观赏植物育种栽培及园艺工程技术研究。E-mail: tangling1983@126.com

\*通信作者:李倩中,研究员,主要从事观赏植物育种栽培及园艺工程技术研究。E-mail: liqianzhong2013@163.com

significantly affect leaf photosynthetic physiological characteristics, but stimulated acid rain at pH 3.0 and below make chlorophyll contents decreased, damage the membrane system and result in a significant decrease of photosynthetic rate. Also *A. buergerianum* Miq. is able to adapt to weak acid rain environment, that could be used as afforestation tree species in acid rain area.

**Key words:** *Acer buergerianum* Miq.; stimulated acid rain; photosynthetic physiological characteristics

酸雨是严重威胁世界环境的十大问题之一<sup>[1]</sup>。继西欧和北美之后,中国已成为世界第三大酸雨区<sup>[2]</sup>,江苏也成为中国较严重的酸雨污染区,尤其是苏南地区的酸雨发生频率一直居高不下,达到60%以上,且秋季是酸雨的高发季节<sup>[3]</sup>。中国酸雨化学组成属于硫酸型,但正在向硫酸-硝酸混合型转变, $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{NO}_3^-$ 以及 $\text{NH}_4^+$ 和 $\text{Ca}^{2+}$ 分别是降水中主要的阴阳离子<sup>[4]</sup>。21世纪初,政府通过节能减排等一系列措施,使 $\text{SO}_2$ 排放得到有效控制,而源于机动车排放的 $\text{NO}_x$ 对酸雨的贡献却逐渐增大,酸雨污染形势依然严峻<sup>[5]</sup>,直接或间接影响着植物的生理生态过程,使植物正面临着愈来愈严重的逆境威胁<sup>[6]</sup>。近年来,相关研究表明,酸雨可通过破坏植物叶片结构、降低叶绿素质量分数、改变叶绿素荧光特性和酶活性等对植物产生直接影响<sup>[7-9]</sup>。酸雨胁迫会使植物叶片中丙二醛、可溶性蛋白质和游离脯氨酸含量升高<sup>[10]</sup>,同时植株的净光合速率也有下降的趋势<sup>[11]</sup>。不同植物类型植物对不同酸度酸雨胁迫的反应敏感性不同。有研究表明,pH 5.0的轻度酸雨对金叶含笑、红花木莲等6种常绿阔叶树种幼苗未造成明显伤害,但在pH < 3.5时,叶片细胞膜透性增加,并导致细胞汁液pH值下降,叶绿素含量降低,进而影响光合作用<sup>[12]</sup>。也有研究发现,火炬松幼苗在pH 3.0酸雨处理下的蒸腾速率和净光合速率显著增大<sup>[13]</sup>。酸雨处理前期,高浓度的酸雨胁迫对苦槠幼苗叶绿素含量、光合生理参数有显著影响,但随着酸雨处理时间的延长,影响逐渐减小<sup>[14]</sup>。

三角枫(*Acer buergerianum* Miq.)为槭树科槭属落叶乔木,树干高耸,树姿优雅,冠如华盖,入秋叶红色,美丽动人,为中国自然分布的乡土色叶树种之一<sup>[15]</sup>,主产于中国长江中下游地区。三角枫生长快,耐旱、耐寒,耐修剪,萌芽力强,是理想的园林景观树种和丘陵岗地造林的先锋树种,值得大力推广应用<sup>[16]</sup>。目前对三角枫的研究较少,且多集中在栽培技术及抗旱生理特性方面,未见关于酸雨胁迫对三角枫光合特性影响的报道。因此,本试验通过模拟秋季酸雨对三角枫光合特性和抗性生理的影响进行研究,以期了解酸雨胁迫下三角枫的光合生理响

应机制,为三角枫在长江中下游地区的绿化应用和栽培管理提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

试验于2014年9~10月在江苏省农业科学院内进行。供试材料为三角枫(*Acer buergerianum* Miq.),苗木来源于江苏省农业科学院槭树资源圃。选用生长一致、株高110~120 cm的2年生实生苗,种植在内径30 cm、深25 cm的花盆中,盆土质量按照园土:基质:有机肥=1:1:1混合,常规管理。试验设4个不同浓度酸雨处理,每处理20盆,3次重复,随机区组设计。所有盆钵均置于下部通风的玻璃温室中,以避免天然降水影响。

### 1.2 试验处理

**1.2.1 酸雨的配置** 先将 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{NO}_3^-$ 按5:1的体积比(V:V)配制pH 1.0酸雨母液,再配制pH分别为2.0(重度)、3.0(中度)、4.0(轻度)和5.6(CK)共4个梯度的酸雨处理液,并经pH计(PHSJ-4A,上海精密科学仪器有限公司)校准。

**1.2.2 酸雨处理** 采用喷雾法喷施。从9月1日开始,根据预备实验中植株对模拟酸雨的敏感程度差异,每隔1 d喷施1次,共5次,每盆每次模拟酸雨喷施量200 mL(相当于2.8 mm降雨量),以叶片滴液为度,每次喷施酸雨时,用塑料袋套在花盆上以防土壤酸化。喷淋在下午16:00~18:00进行。

喷施完成的第2天开始进行叶片样品采集和光合特性测定,该天记为试验0 d,依此类推。之后,分别在试验20和40 d进行上述指标测定。相对叶绿素含量和生理指标的测定均选取植株中上部南向的叶片,3次重复。

### 1.3 指标测定和方法

**1.3.1 叶绿素含量** 采用便携式叶绿素测定仪(SPAD-502plus, Japanese))测定相对叶绿素含量(SPAD)。

**1.3.2 生理指标** 丙二醛(malonydial-dehyde, MDA)含量和游离脯氨酸含量的测定分别采用硫代巴比妥酸比色法<sup>[17]</sup>和茚三酮显色法测定<sup>[18]</sup>。质膜

相对透性采用电导率测定法<sup>[19]</sup>。

**1.3.3 光合作用指标** 选择晴朗无风天气,选取生长基本一致的植株完好的中上部成熟叶为测定对象,采用英国 PP SYSTEMS 公司的 CIRAS-2 光合仪测定系统,自 7:00~17:00 每隔 2 h 测定净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )等光合参数,3 次重复。并据此计算相关参数:水分利用效率( $WUE$ ) =  $P_n / T_r$ ; 表观光能利用效率( $LUE$ ) =  $P_n / PFD$ <sup>[20]</sup>; 表观  $\text{CO}_2$  利用效率( $CUE$ ) =  $P_n / C_i$ <sup>[21]</sup>。 $P_n$  日积分值(diurnal integral value of  $P_n$ ,  $DIV_{Pn}$ )和  $T_r$  日积分值(diurnal integral value of  $T_r$ ,  $DIV_{Tr}$ )分别表示一定时间内植物实际的光合净积累量和水分蒸腾量,根据每个时刻测定的数据,采用 Autocad 软件模拟植物  $P_n$  和  $T_r$  的日变化曲线,求出曲线与时间轴围成的面积,该面积即为在测定时间内的光合净积累量和水分蒸腾量<sup>[22]</sup>。 $WUE$ 、 $LUE$  和  $CUE$  取日均值。

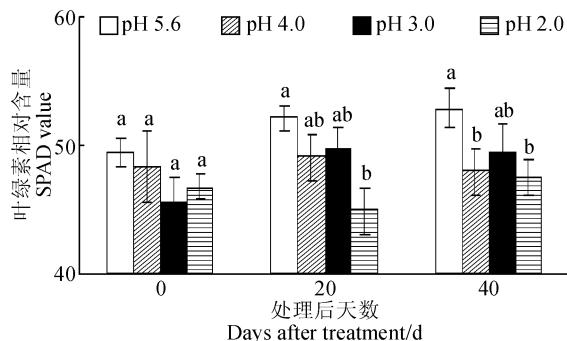
#### 1.4 数据处理

试验数据用 SigmaPlot 12.0 软件进行处理和作图,用 SPSS16.0 软件对数据进行差异显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 模拟酸雨对三角枫叶绿素相对含量的影响

由图 1 可以看出,随着模拟酸雨 pH 值的降低,三角枫叶片相对叶绿素含量(SPAD)在各时间点均有不同程度的下降。其中,各模拟酸雨处理三角枫叶片叶绿素相对含量在试验 0 d 时差异并不显著;试验 20 d 时, pH 4.0、3.0 和 2.0 处理的叶片 SPAD 分别比对照(pH 5.6)降低了 5.9%、4.6% 和 13.8%,且 pH 2.0 处理与对照差异达到显著水平( $P <$



同期不同字母表示处理间在 0.05 水平存在显著性差异;下同

图 1 模拟酸雨对三角枫叶绿素相对含量的影响

Different letters meant significant difference among treatments at 0.05 level; The same as below

Fig. 1 Effect of simulated acid rain on SPAD

value in leaves of *A. buergerianum* Miq.

$<0.05$ ); 试验 40 d 时,各处理叶片 SPAD 进一步降低,pH 4.0、3.0 和 2.0 处理与对照相比分别降低了 9.1%、6.0% 和 10.1%,且 pH 4.0 和 pH 2.0 处理与对照差异显著( $P < 0.05$ )。可见,在试验条件下,三角枫叶片叶绿素含量受到 pH 2.0 模拟酸雨处理的影响最大,其次是 pH 4.0 处理,而 pH 3.0 处理无显著影响。

### 2.2 模拟酸雨对三角枫叶片伤害指标的影响

**2.2.1 丙二醛(MDA)含量** MDA 是细胞膜系统与自由基反应生成的过氧化产物<sup>[23]</sup>,可以反映膜系统受过氧化伤害的程度。由图 2,A 可知,在试验 0 d 时,三角枫叶片 MDA 含量随着酸雨 pH 值的减小呈逐渐上升的趋势,且各处理均显著高于对照( $P <$

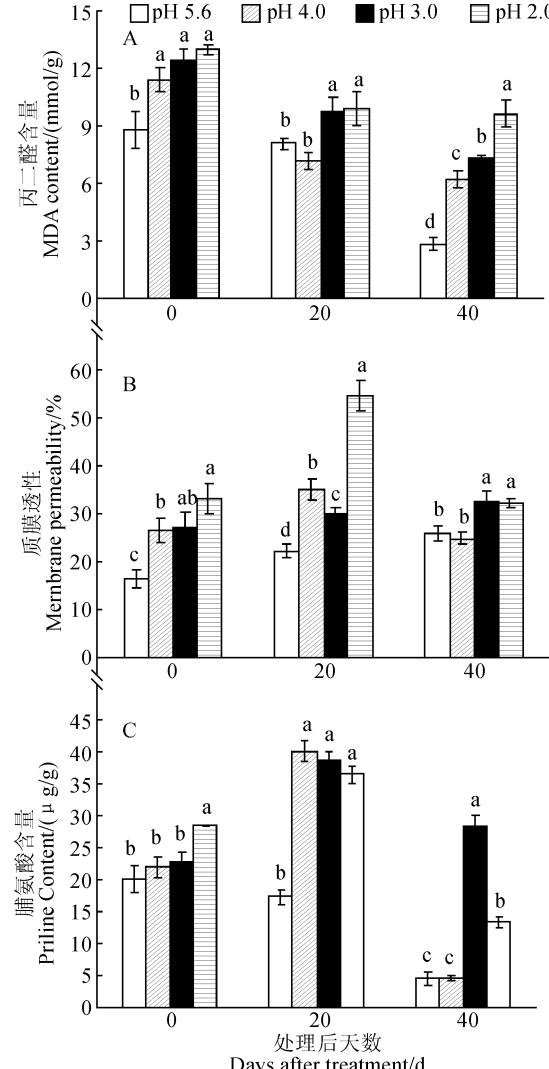


图 2 模拟酸雨对三角枫叶片 MDA(A)、质膜透性(B)和脯氨酸(C)含量的影响

Fig. 2 Effect of simulated acid rain on the content of MDA(A), the membrane permeability(B) and the content of proline(C) in leaves of *A. buergerianum* Miq.

0.05),但各酸雨处理间差异并不显著。试验 20 d 时,叶片 MDA 含量在各处理下均有不同程度降低。与对照相比,pH 3.0 和 2.0 处理的叶片 MDA 含量分别显著提高 20.6% 和 23.1%,而 pH 4.0 处理稍有降低,这表明此时酸度达到 3.0 和 2.0 的酸雨会对细胞膜系统产生明显损害,并且酸度越高损害越大,而植株对酸度 4.0 的酸雨还存在一定的抗性,伤害可能暂未显现出来。在试验 40 d 时,pH 4.0、3.0 和 2.0 处理叶片的 MDA 含量均比对照显著增加,分别是对照的 2.2、2.6 和 3.4 倍,且处理间也差异显著,说明随着模拟酸雨处理时间延长和酸性的增强,三角枫叶片受害程度也逐渐加深。

**2.2.2 质膜透性** 随着模拟酸雨胁迫时间的延长,三角枫叶片质膜透性在对照处理下逐渐升高,在其余处理下均呈先升高后降低的趋势(图 2,B)。试验 0 d 时,pH 4.0、3.0 和 2.0 处理的叶片质膜透性分别比对照显著增加 61.4%、65.9%、101.8%,pH 2.0 处理还显著高于 pH 4.0 处理。在试验 20 d 时,叶片质膜透性在各处理与对照间及各处理间均达到显著差异水平( $P < 0.05$ ),并以 pH 2.0 处理升高幅度最大,比对照增加 146.3%,而 pH 4.0 和 pH 3.0 处理分别比对照增加了 58.1% 和 34.6%,表明此时 pH 2.0 酸雨对生物膜和细胞造成了更严重损伤,植株对 pH 2.0 酸度的酸雨更为敏感。试验 40 d 时,pH 4.0 处理的叶片质膜透性与对照无显著差异,pH 3.0 和 2.0 处理仍比对照显著增加 26.3% 和 25.5%,但比试验 0 和 20 d 时的增幅有所降低,说明各酸雨胁迫对三角枫叶片质膜透性虽有一定影响,但未造成叶片永久性伤害,其中植株对 pH 4.0 的酸雨强度具有一定的抗性。

**2.2.3 脯氨酸含量** 随模拟酸雨胁迫时间的延长,三角枫叶片中游离脯氨酸含量在对照处理下呈现持续下降的趋势,在其余处理下呈现出先升后降的趋势,但各处理变化幅度不同(图 2,C)。试验 0d 时,仅 pH 2.0 处理的叶片脯氨酸含量显著高于对照( $P < 0.05$ ),而 pH 4.0 和 3.0 处理与对照相比无明显差异,说明植株对 pH 2.0 酸度的酸雨反应最为敏感。试验 20 d 时,各处理的叶片中脯氨酸含量的积累量均大幅度增加,pH 4.0、3.0 和 2.0 处理分别比对照增加 131.5%、123.1% 和 110.4%,这说明脯氨酸积累可能是植物受到胁迫的一种信号<sup>[24]</sup>。试验 40 d 时,pH 4.0 处理叶片游离脯氨酸含量与对照无显著差异,而 pH 3.0 和 2.0 处理则显著高于对照,分别是对照的 6.3 和 3.0 倍。

## 2.3 模拟酸雨对三角枫叶片光合特性的影响

**2.3.1 净光合速率日积分值( $DIV_{Pn}$ )** 由图 3,A 可知,随着胁迫时间的延长,各模拟酸雨处理三角枫叶片的净光合速率日积分值( $DIV_{Pn}$ )均呈下降的趋势,只是各处理下降幅度不同;与对照相比,pH 4.0、3.0 和 2.0 处理的三角枫叶片  $DIV_{Pn}$  在各时间点均有不同程度地下降,且大多达到显著水平,但下降幅度不同。其中,pH 4.0、3.0 和 2.0 处理的在试验 0 d 时分别比相对对照降低了 4.2%、21.7% 和 36.4%,在试验 20 d 时分别比对照显著降低了 33.4%、17.6% 和 16.7%,在试验 40 d 分别比对照显著降低了 31.4%、48.0% 和 61.4%,下降幅度比试验 20 d 时更大,各处理间存在显著差异。可见,模拟酸雨不利于三角枫的光合产物净积累,且酸雨酸度越大,处理时间越长,三角枫光合能力越弱。

**2.3.2 蒸腾速率日积分值( $DIV_{Tr}$ )** 随着胁迫时间的延长,三角枫叶片的蒸腾速率日积分值( $DIV_{Tr}$ )在 pH 2.0 处理下呈先升后降的趋势,其余酸雨处理均逐渐下降(图 3,B)。在试验 0 d 时,pH 4.0 处理的  $DIV_{Tr}$  与对照相比变化不大,但 pH 3.0 处理的  $DIV_{Tr}$  最大并显著高于对照 40.1%,而 pH 2.0 处理的  $DIV_{Tr}$  最小并显著低于对照 23.6%;在试验 20 d 时,所有酸雨胁迫处理叶片的  $DIV_{Tr}$  与对照均无明显差异;而在试验 40 d 时,所有酸雨胁迫处理  $DIV_{Tr}$  均比对照不同程度下降,且 pH 3.0 和 2.0 处理达到显著水平。说明三角枫叶片在受到模拟酸雨胁迫伤害后蒸腾作用增强以缓解酸雨伤害,但随着胁迫时间延长,叶片进行蒸腾作用的能力减弱。

**2.3.3 水分利用效率(WUE)** 图 3,C 显示,各酸雨处理三角枫叶片的水分利用效率日均值(WUE)均随胁迫时间逐渐降低。其中,pH 4.0 模拟酸雨处理的 WUE 在整个胁迫过程中均与对照无显著差异;pH 3.0 模拟酸雨处理的 WUE 在试验 0 d 和 20 d 时分别比对照显著降低了 7.8% 和 21.2%,但在试验 40 d 时也与对照无显著差异;pH 2.0 模拟酸雨处理的 WUE 在试验 0、20 和 40 d 时分别比对照显著降低了 24.5%、24.8% 和 36.6%。表明植株水分利用效率在 pH 4.0 酸度的模拟酸雨胁迫下未受到显著影响,在 pH 3.0 酸雨胁迫前中期受到显著抑制,而在 pH 2.0 酸度模拟酸雨胁迫过程中均受到显著抑制,且随胁迫时间延长而加重。

**2.3.4 表观光能利用效率(LUE)和表观 CO<sub>2</sub> 利用效率(CUE)** 图 3,D、E 显示,在试验 0 d 时,三角枫叶片表观光能利用效率日均值(LUE)和表观 CO<sub>2</sub>

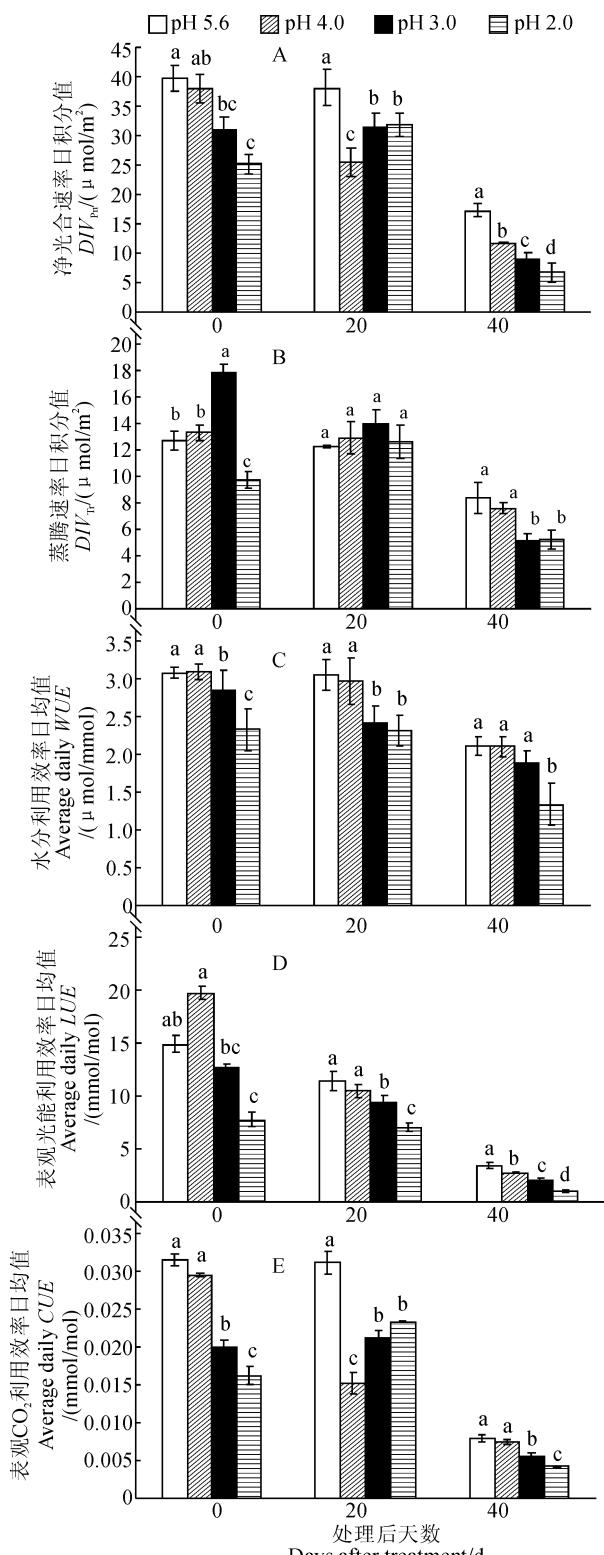


图3 模拟酸雨对三角枫叶片净光合速率日积分值(A)、蒸腾速率日积分值(B)、水分利用效率日均值(C)、表观光能利用效率日均值(D)和表观CO<sub>2</sub>利用效率日均值(E)的影响

Fig. 3 Effect of simulated acid rain on DIV<sub>pn</sub>(A), DIV<sub>tr</sub>(B), average daily WUE(C), average daily LUE(D) and average daily CUE(E) in leaves of *A. buergerianum* Miq.

利用效率日均值(CUE)在pH 4.0处理下均与对照无显著差异,在pH 3.0处理下分别低于和显著低于对照,而在pH 2.0处理下均显著低于对照,且pH 2.0降低幅度最大。说明试验初期三角枫叶片表观光能利用效率和表观CO<sub>2</sub>利用效率在pH 4.0的模拟酸雨胁迫下未受到抑制,甚至表观光能利用效率得到促进,而在低于pH 4.0酸度的酸雨胁迫下均受到明显抑制。在试验20 d时,各酸雨处理的LUE和CUE均不同程度地低于对照,且除pH 4.0处理的LUE外均达到显著水平;各处理的LUE随酸雨酸度降低而降低,CUE则随酸雨酸度降低而升高;此时叶片LUE以pH 2.0处理的最低,仅为对照的61.9%,而CUE以pH 4.0处理降幅最大,仅是对照的48.9%。试验40 d时,酸雨处理的LUE和CUE均大幅低于试验20 d水平,且随着酸雨酸度降低而呈现下降的趋势,说明此时三角枫叶片的光合作用能力已明显减弱,且处理液酸度越低光合作用越弱。此时三角枫叶片LUE在pH 4.0、3.0和2.0处理下均比对照显著降低,且以pH 2.0降幅最大;而同期叶片CUE在pH 4.0处理下与对照相差不大,但在pH 3.0和2.0处理下分别比对照显著降低了28.2%和46.0%。

### 3 讨论

叶绿素是植物的光能吸收色素。随着模拟酸雨酸度的增加,本试验中三角枫叶片叶绿素含量下降幅度逐步增大,但在pH为4.0和3.0时下降不显著,且在生长过程中具有一定程度的恢复能力,而在pH 2.0时,下降幅度达到了显著水平,且随着植株生长其可恢复性较差。由此可见,三角枫叶片叶绿素含量受重度酸雨胁迫的影响较大,而受轻度、中度酸雨胁迫的影响较轻。

植物叶片光合作用是其光合生理状态的直接表现形式,可以较为准确地反映植物对逆境的耐性。研究发现,酸雨条件下,植物光合器官会受到损伤,其光合功能下降<sup>[25-27]</sup>。本研究条件下,随着酸雨强度的增加,三角枫叶片净光合速率显著下降,且以pH 3.0和2.0处理表现最为显著,同时叶片表观光能利用效率(LUE)和表观CO<sub>2</sub>利用效率(CUE)的变化趋势与净光合速率变化趋势也基本一致,表明酸雨能显著影响三角枫的光合作用。

但本研究发现酸雨对三角枫叶片的蒸腾速率和水分利用效率的影响并不显著,且蒸腾速率在处理后直至20 d呈上升趋势,这又表明酸雨对三角枫光

合作用的影响主要是非气孔性限制因素。前人众多研究则表明,影响植物光合作用的非气孔性限制因素主要与叶绿素合成和内在光合系统效率有关<sup>[28-29]</sup>。本研究发现,随着模拟酸雨酸度的增加,叶片叶绿素含量下降趋势逐步增大,pH 2.0 的重度酸雨胁迫对三角枫叶片叶绿素影响最为显著,而轻度、中度胁迫下影响较轻,与光合作用下降趋势相吻合。由此可见,酸雨条件下三角枫叶绿素含量的下降是导致叶片光合作用下降的重要因素之一。

酸雨对植物的伤害机理表现为膜保护系统的受损,以及酶的活性和膜保护物质的含量的下降,使活性氧代谢失衡<sup>[30]</sup>。本研究结果表明,三角枫在酸雨胁迫下,随着处理时间的延长,叶片膜质过氧化产物MDA含量和质膜透性显著升高,尤其在pH 3.0 和2.0 酸雨处理下 MDA 含量升高达到显著水平。这说明强酸雨对三角枫叶片膜保护系统产生了较强的伤害,进而可能会影响叶片光合系统电子传递效率,

导致叶片光合作用下降,内在的机制尚需要今后更为深入的研究。

此外,植物叶片水分利用效率作为植物体生理活动过程中耗水和形成有机物质之间的基本效率,已经成为确定植物体生长发育所需要的的最佳水分供应的重要指标之一<sup>[31-32]</sup>。本研究则发现,三角枫叶片 WUE 在 pH 4.0 的弱酸下受到影响较小,而在 pH 3.0 和 2.0 的强酸雨胁迫下表现出显著下降,表明三角枫在强酸雨条件下内在生理活动受到了严重影响,且表现趋势与净光合速率表现一致,这可能与光合作用的下降也密切相关,需要在今后的研究中进一步探讨。

综上所述,三角枫生理状况在 pH 4.0 的酸雨胁迫下没有发生显著变化;在 pH≤3.0 的强酸环境条件下,三角枫叶片叶绿素含量下降、膜保护系统受损、光合作用效率下降,这些结果表明三角枫能适应弱酸雨环境,可作为酸雨地区的园林绿化树种。

## 参考文献:

- [1] 冯颖竹,陈惠阳,余土元,等.中国酸雨及其对农业生产影响的研究进展[J].中国农学通报,2012,28(11):306-311.
- FENG Y Z, CHEN H Y, YU T Y, et al. Research progress on acid deposition over China and effect of acid rain on agricultural production [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(11): 306-311.
- [2] LARSEN T, LYDERSEN E, TANG D, et al. Acid rain in China[J]. *Environmental Science and Technology*, 2006, 40(2): 418-425.
- [3] 刘 健.江苏城市酸雨问题与对策研究[J].城市研究,1998,(3):46-48.
- LIU J. The Problem and countermeasures of the acid rain in the cities of Jiangsu Province[J]. *Urban Research*, 1998,(3): 46-48.
- [4] 王伟丽,吴洪颜,贺金芳,等.基于信息扩散理论的江苏省酸雨风险评估[J].灾害学,2015,30(1):92-95.
- WANG W L, WU H Y, HE J F, et al. The disaster risk assessment of acid rain in Jiangsu Province based on information diffusion theory [J]. *Journal of Catastrophology*, 2015, 30(1):92-95.
- [5] 张新民,柴发合,王淑兰,等.中国酸雨研究现状[J].环境科学研究,2010,23(5):527-532.
- ZHANG X M, CHAI F H, WANG S L, et al. Research progress of acid precipitation in China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2010, 23(5):527-532.
- [6] 魏 霞,李守忠,郑怀舟,等.叶片气体交换和叶绿素荧光在植物逆境生理研究中的应用[J].福建师范大学学报(自然科学版),2007,23(4):124-128.
- WEI X, LI S Z, ZHENG H Z, et al. Application of leaf gas Exchange and chlorophyll fluorescence to plant stress physiology[J]. *Journal of Fujian Normal University(Natural Science Edition)*, 2007, 23(4):124-128.
- [7] BELLANI L M, RINALLO C, MUCCIFORA S. Effects of simulated acid rain on pollen physiology and ultrastructure in the apple[J]. *Environment Pollution*, 1997, 95(3):357-362.
- [8] 田大伦,黄智勇,付晓萍.模拟酸雨对盆栽樟树(*Cinnamomum camphora*)幼苗叶矿质元素含量的影响[J].生态学报,2007,27(3):1 099-1 105.
- TIAN D L, HUANG Z Y, FU X P. Effects of simulated acid rain on mineral elements content in leaves of *Cinnamomum camphora* seedling in artificial potted environment [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3):1 099-1 105.
- [9] SINGH A, AGRAWAL M. Acid rain and its ecological consequences[J]. *Journal of Environmental Biology*, 2008, 29(1): 15-24.
- [10] 蒋雪梅,戚文华,肖 娟,等.模拟酸雨对银杏雌雄幼苗生长及生理特性的影响[J].植物生理学报,2014,50 (7): 953-959.
- JIANG X M, QI W H, XIAO J, et al. Effects of simulated acid rain on the growth and physiological features of female and male *Ginkgo biloba* seedlings [J]. *Plant Physiology Journal*, 2014, 50(7): 953-959.
- [11] 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 Z M, ZHONG Z C. Effect of simulated acid rain on photosynthesis and growth of *Eucommia ulmoides* Oliv. [J]. *Journal of Southwest China Normal University(Natural Science Edition)*, 2006, 31(2): 151-156.

- [12] 李志国,姜卫兵,翁忙玲,姜武.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 Z G, JIANG W B, WENG M L, et al. Physiologic responses and sensitivity of six garden plants to simulated acid rain [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2011, 38(3): 512-518.
- [13] LEE W S, CHEVONE B I, SEILER J R. Growth and gas exchange of *loblolly pine* seedlings as influenced by drought and air pollutants [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1990, 51(1-2): 105-116.
- [14] 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):1 117-1 124.
- JIN Q, JIANG H, YU S Q, et al. Effects of acid rain stress on gas exchange and chlorophyll fluorescence of *Castanopsis sclerophylla* seedlings [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(9): 1 117-1 124.
- [15] 李文芳.三角枫与金沙槭远缘杂交技术初步研究[D].山东泰安:山东农业大学,2015.
- [16] 张毅,刘伟,李桂祥.世界各国的日本枫树垂枝型园艺品种资源[J].中国农学通报,2014,30(10):73-82.
- ZHANG Y, LIU W, LI G X. Garden variety resources of weeping type Japanese Maple in the world [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(10): 73-82.
- [17] KRAMER G F, NORMAN H A, KRIZEK D T, MIRECKI RM. Influence of UV-B radiation on polyamines, lipid peroxidation and membrane lipid in cucumber [J]. *Phytochemistry*, 1991, 30(7): 2 101-2 108.
- [18] BATES L S, WALDEREN R P, TEARE I D. Rapid determination of free proline for water-stress studies [J]. *Plant Soil*, 1973, 39: 205-207.
- [19] 熊庆娥.植物生理学实验教程[M].成都:四川成都科学出版社,2003;122-123.
- [20] LONG S P, BAKER N R, RAINS C A. Analyzing the responses of photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation to long-term elevation of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration [J]. *Vegetatio*, 1993, 104-105(1): 33-45.
- [21] 何维明,马风云.水分梯度对沙地柏幼苗荧光特征和气体交换的影响[J].植物生态学报,2000,24(5):630-634.
- HE W M, MA F Y. Effects of water gradient on fluorescence characteristics and gas exchange in *Sabina vulgaris* seedlings [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(5): 630-634.
- [22] 庄猛,姜卫兵,花国平,等.金边黄杨与大叶黄杨光合特性的比较[J].植物生理学通讯,2006,42(1):39-42.
- ZHUANG M, JIANG W B, HUA G P, et al. Comparison of the photosynthetic characteristics of *Euonymus japonicus* L. f. *aureo-marginatus* Rehd. and *Euonymus japonicus* L. [J] *Plant Physiology Communications*, 2006, 42(1): 39-42.
- [23] 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 Q, JIN Z X, PENG L Q. Effects of simulated acid rain on the ecophysiological characteristics of *Lindera aggregata* [J]. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 2013, 40(4): 447-455.
- [24] 朱虹,祖元刚,王文杰.逆境胁迫条件下脯氨酸对植物生长的影响[J].东北林业大学学报,2009,37(4):86-89.
- ZHU H, ZU Y G, WANG W J. Effect of proline on plant growth under different stress conditions [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2009, 37(4): 86-89.
- [25] 严重玲,洪业汤,王世杰,等.稀土元素对酸雨胁迫小麦活性氧清除系统响应的作用[J].作物学报,1999,25(4):504-507.
- YAN C L, HONG Y T, WANG S J, et al. Effect of earth elements on the response of the activated oxygen scavenging system in leaves of wheat active [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1999, 25(4): 504-507.
- [26] 郑启伟,王效科,冯兆忠,等.臭氧和模拟酸雨对冬小麦气体交换、生长和产量的复合影响[J].环境科学学报,2007,27(9):1 542-1 548.
- ZHENG Q W, WANG X K, FENG Z Z, et al. Combined impact of ozone and simulated acid rain on gas exchange, growth and yield of field-grown winter [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(9): 1 542-1 548.
- [27] 谢寅峰,杨万红,陆美容,等.模拟酸雨胁迫下硅对髯毛箬竹光合特性的影响[J].应用生态学报,2008,(6): 1 179-1 184.
- XIE Y F, YANG W H, LU M R, et al. Effects of silicon on photosynthetic characteristics of *Indocalamus barbatus* under simulated acid rain stress [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, (6): 1 179-1 184.
- [28] 柴胜丰,唐健民,王满莲,等.干旱胁迫对金花茶幼苗光合生理特性的影响[J].西北植物学报,2015,35(2):322-328.
- CHAI S F, TANG J M, WANG M L, et al. Photosynthetic and physiological characteristics of *Camellia petelotii* seedlings under drought stress [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalis Sinica*, 2015, 35(2): 322-328.
- [29] 赵则海.模拟酸雨对五爪金龙幼苗光合生理特性的影响[J].生态环境学报,2014, 23(9): 1 498-1 502.
- ZHAO Z H. Effects of simulated acid rain on photosynthetic physiology characteristics of *Ipomoea Cairica* seedling [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(9): 1 498-1 502.
- [30] 齐泽民,王玄德,宋光煜.酸雨对植物影响的研究进展[J].世界科技研究与发展,2004,26(2):26-41.
- QI Z M, WANG X D, SONG G Y. The research progress of the effect of acid rain on plant [J]. *World Science Technology Research and Development*, 2004, 26(2): 26-41.
- [31] 梁宗锁,康绍忠.植物水分利用率及其提高途径[J].西北植物学报,1996,16(6):79-84.
- LIANG Z S, KANG S Z. Water use efficiency and improvement way [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalis Sinica*, 1996, 16(6): 79-84.
- [32] 李国泰.8种园林树种光合作用特征与水分利用效率比较[J].林业科学研究,2002,15(3):291-296.
- LI G T. The photosynthesis and water use efficiency of eight garden tree species [J]. *Forest Research*, 2002, 15(3): 291-296.

(编辑:裴阿卫)