

淹水深度对互叶白千层幼苗气体交换、 叶绿素荧光和生长的影响

刘瑞仙¹,靖元孝^{1,*},肖林¹,李国梁¹,杨丹菁²,聂坤廷³

(1. 华南师范大学生命科学学院,广东省高等学校生态与环境科学重点实验室,广州 510631;

2. 广州市环境保护科学研究院,广州 510620; 3. 广州市金晖经济发展有限公司,广州 510620)

摘要:实验设置对照、浅淹(水位高出土壤表面 5cm)和深淹(水位高出土壤表面 20cm)3 种处理,研究了淹水深度对互叶白千层幼苗的气体交换、叶绿素荧光和生长状况的影响。研究结果表明,随着淹水深度的增加,互叶白千层受到的胁迫程度有所增强。经过 270d 的淹水处理,浅淹组和深淹组的株高和生物量有所下降,分别为对照的 90.86%、64.58% 和 74.52%、36.46%。浅淹组植株叶绿素含量、净光合速率、气孔传导率和蒸腾速率略有下降,分别为对照的 95.39%、94.26%、90.02% 和 88.94%。深淹组植株在淹水后 180d 内上述参数显著下降,分别为对照的 79.44%、73.54%、61.79% 和 71.46%,随后逐渐接近对照组。浅淹组 PS II 的最大光化学量子效率(F_v/F_m)比较稳定,与对照组基本相同。深淹组在淹水后 150d 内 F_v/F_m 稍有下降,随后恢复到对照水平。浅淹组植株光化学淬灭系数(qP)稍有下降,非光化学淬灭(NPQ)略有上升,分别为对照的 96.63% 和 105.66%。深淹组植株在淹水后 120d 内 qP 显著下降, NPQ 明显上升,分别为对照的 94.51% 和 126.66%,随后逐渐接近对照组。另外,淹水过程中,互叶白千层形成不定根和产生发达的通气组织,淹水植株的根孔隙度显著高于对照。

关键词:互叶白千层;淹水深度;气体交换;叶绿素荧光

Effects of flooding depth on gas exchange, chlorophyll fluorescence and growth of *Melaleuca alternifolia* seedlings

LIU Ruixian¹, JING Yuanxiao^{1,*}, XIAO Lin¹, LI Guoliang¹, YANG Danjing², NIE Kuntong³

1 Key Laboratory of Ecology and Environmental Science in Guangdong Higher Education, College of Life Science, South China Normal University, Guangzhou 510631, China

2 Guangzhou Research Academy of Environmental Protection, Guangzhou 510620, China

3 Guangzhou Jinhui Economy Development Corporation, Guangzhou 510620, China

Abstract: The effects of flooding depth on gas exchange, chlorophyll fluorescence and growth of *Melaleuca alternifolia* seedlings were studied. Seedlings were subjected to two hydrological treatments: shallow flooding and deep flooding with water level at 5cm and 20cm above the soil surface, respectively. Results indicated that the effect of flooding on *Melaleuca alternifolia* was elevated with the increase in the flooding depth. After 270 days of flooding, the height and biomass of the shallow-flooded and deep-flooded seedlings were significantly lower, accounting for 90.86%, 64.58% and 74.52%, 36.46% of the control, respectively. Chlorophyll content, net photosynthetic rate, stomatal conductance and transpiration rate of the shallow-flooded seedlings were all slightly lower, accounting for 95.39%, 94.26%, 90.02% and 88.94% of the control, respectively. However, these parameters in the deep-flooded seedlings were all significantly lower within 180 days of flooding, accounting for 79.44%, 73.54%, 61.79% and 71.46% of the control, respectively, and then approached gradually to those of the control. There were no differences in the maximum quantum efficiency of the photosystem II (F_v/F_m) between the shallow-flooded and control seedlings. F_v/F_m of the deep-flooded seedlings was

基金项目:广东省攻关项目(2005B33302014)

收稿日期:2009-09-16; 修订日期:2009-12-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jingyx@senu.edu.cn

slightly lower within 150 days of flooding, and then recovered to the levels of the control. A slight reduction of photochemical quenching coefficient (qP) and an increase of non-photochemical quenching (NPQ) in the shallow-flooded seedlings were observed, accounting for 96.63% and 105.66% of the control, respectively. However, a pronounced decrease of qP and an increase of NPQ in the deep-flooded seedlings were found within 120 days of flooding, accounting for 94.51% and 126.66% of the control, respectively, and then approached gradually to those of the control. Moreover, *M. alternifolia* developed aerenchyma and adventitious roots during inundation, with root porosity in the flooded seedlings much higher than that of the control.

Key Words: *Melaleuca alternifolia*; flooding depth; gas exchange; chlorophyll fluorescence

淹水改变了土壤的物理、化学和生物学特性,直接影响树木的生长环境,从而对植物的生长和生理生态过程造成影响^[1-3]。在淹水胁迫下,不耐淹树木的水分和营养吸收、气体交换和叶绿素荧光等生理功能都有大幅度的降低,而耐淹树种可通过形态、生理和代谢的调节来适应淹水环境^[4-7]。国外许多学者研究了树木对淹水的反应和适应、耐淹树种的选择、树木的耐淹机理等问题^[1-7],而国内学者对树木耐淹的研究报导较少^[8-10]。

互叶白千层(*Melaleuca alternifolia*)为桃金娘科白千层属的常绿灌木树种,原产于澳大利亚。互叶白千层枝叶提取的精油广泛应用于医药保健工业^[11-12]。我国20世纪90年代初引进互叶白千层,目前陆续在广东、福建、广西、重庆等地广为种植并进行产业开发^[13-14]。在澳大利亚,互叶白千层人工湿地污水处理系统对污染物有很强的净化能力^[15-17]。另外,据观察,互叶白千层在华南师范大学生物试验场的表面流人工湿地污水处理系统能维持正常的生长,但在不同水位的表面流人工湿地中植物生长状况存在较大差异。因此推测互叶白千层有较强的耐淹能力,而淹水深度对植物的生长和生理生态特性会产生不同的影响。本实验研究互叶白千层对不同淹水深度的反应和适应,一方面为木本植物适应淹水的机制提供更多的理论支持,另一方面为湿地植被恢复与重建提供更多的植物材料。

1 材料和方法

1.1 植物材料和实验设计

实验在广州华南师范大学生物试验场进行。广州属亚热带气候,年平均气温22℃,最冷月1月份和最热月7月份平均气温分别为13.3℃和28.4℃,年平均降雨量1694 mm。用塑料桶作为培养容器,塑料桶高50cm,直径42.5cm。桶内装有混合均匀的森林土,土壤深度约30 cm。2008年3月3日,从广州金晖经济发展有限公司育苗基地选取长势良好,大小均匀的互叶白千层实生苗(基茎约10mm,株高约42cm)移植到塑料桶内,每桶1株。100株植物随机排列于华南师范大学生物试验场的平坦空地上,经常浇水使土壤保持湿润状态。2008年4月3日,在互叶白千层适应生长约30d后,随机选取10株用于计算初始生物量,其余90株随机分成对照组、浅淹组和深淹组,每组30桶。对照组为常规生长组,经常浇水使土壤保持湿润状态,为了避免桶内积水,在距离桶底1cm的桶边打两个直径为1cm小孔;浅淹组水位高出土壤表面5cm,植株地上部分相对淹水深度约10%,为了防止降雨导致水位超过规定水平,在高出土壤表面5cm的桶壁处打一个直径为1cm的小孔;深淹组水位高出土壤表面20cm,植株地上部分相对淹水深度约50%。所有植株每隔15d用1/2的Hoagland溶液进行施肥。实验从2008年3月开始,至12月份结束,淹水时间共为270d。

1.2 测定指标和方法

1.2.1 植物生长和生物量

每30d随机抽取各组中10株测定株高。每90d随机抽取各组中5株进行收割,分成地下根、不定根、茎和叶等部分。将根冲洗干净后,按照Kludze^[18]等人的方法测定根孔隙度。然后用精度0.1g天平称取各器官新鲜材料100—500g左右,在80℃烘箱中烘干48h,用精度0.1mg电子天平称干重。根据含水量 W 计算植株各器官的干重。

1.2.2 植物生理指标

从实验处理之日算起,每30d对各项生理指标进行测定,每个处理每次测定5株植物。测定叶片为从顶部数第4—10片完全展开叶。用便携式光合系统(LICOR-6400, LI-COR Inc., USA)于9:00—11:30在2cm×3cm标准叶室中测定叶片净光合速率、气孔传导率和蒸腾速率等气体交换参数。在测定过程中,用LI-6400-02B红蓝光源提供 $800\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的光合有效辐射,用 CO_2 钢瓶将参比室的 CO_2 浓度稳定在 $370\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,叶室温度控制在大约 30°C ,叶片在叶室中至少适应5min直到气体交换参数变化稳定为止。用便携式叶绿素荧光仪(PAM-2100, Walz, Germany)测定叶绿素荧光参数。原初荧光(F_0)是用暗适应15min的叶片在弱调制测量光($0.05\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)诱导下产生的,最大荧光(F_m)则是在(F_0)之后用强饱和脉冲($5000\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)激发。当荧光从最大值降低到接近 F_0 水平时,用光强为 $200\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的光化光(Actinic light)诱导荧光动力学。根据Maxwell^[19]等的方法计算荧光参数 F_v/F_m (PS II的最大光化学量子效率)、 qP (光化学猝灭)和 NPQ (非光化学猝灭)。测定时间同植物叶片气体交换参数的测定同步。叶绿素含量按照Lichtenthaler^[20]等的方法测定。

1.3 数据处理

采用SPSS15.0 for Windows进行重复测定方差分析,并用LSD进行多重比较,检验每个测定指标在处理间的差异显著性。

2 结果和分析

2.1 淹水深度对互叶白千层生长的影响

淹水对互叶白千层地下根的生长发育产生了明显的影响。随着淹水时间的延长,地下根不断衰老死亡,导致淹水组地下根生物量显著低于对照组($P < 0.05$),其中深淹组尤为明显。实验结束时浅淹组和深淹组地下根生物量分别为对照的30.71%和18.59%(图1A)。同时,淹水诱导互叶白千层在淹水的茎部产生大量的不定根。浅淹组在淹水约30d少数植株开始产生不定根,而深淹组在淹水约50d少数植株产生不定根,淹水90d后所有植株都长有不定根。随着淹水时间的延长不定根逐渐增多,实验结束时浅淹组和深淹组不定根的生物量均超过了各自的地下根生物量,分别为地下根生物量的156.56%和132.89%($P < 0.05$)(图1A)。

淹水后互叶白千层形成发达的通气组织,可用孔隙度来间接评价通气组织发达程度。结果表明,对照组植株根的孔隙度在30%左右,浅淹组和深淹组地下根和不定根空隙度在40%—45%,均明显高于对照组($P < 0.05$)(图1B)。另外,根空隙度的变化在根的形态上也得到了体现,淹水处理后,不论是地下根还是不定根,根的直径均明显大于对照组。

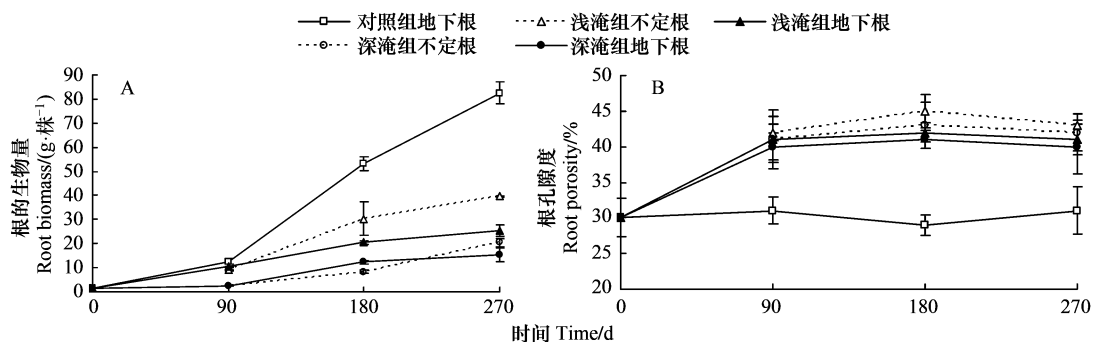


图1 淹水深度对互叶白千层根的生物量和孔隙度的影响(平均值±标准差)

Fig. 1 Effects of flooding depth on root biomass and root porosity in *M. alternifolia* seedlings (mean ± SD)

淹水对互叶白千层株高和生物量影响较大。浅淹组在淹水后90d内,株高和生物量受影响小,与对照相比没有差异($P > 0.05$)。随后株高和生物量明显低于对照组($P < 0.05$),实验结束时分别为对照的90.86%和64.58%。深淹组株高和生物量受到影响较大,整个实验期间一直显著低于对照组($P < 0.05$),实验结束时

分别为对照的 74.52% 和 36.46% (图 2A,B)。

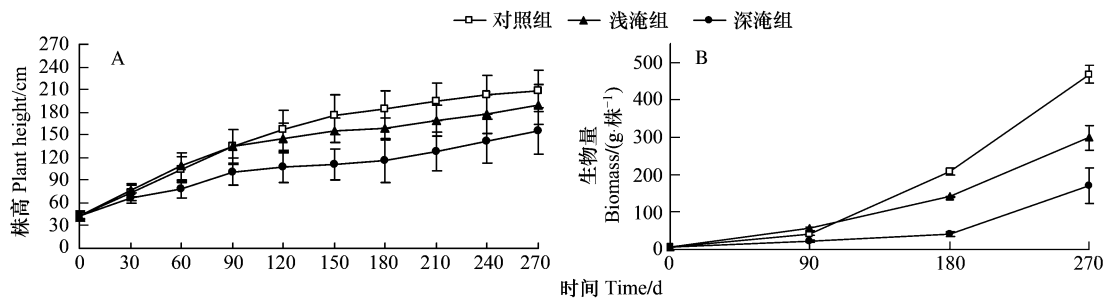


图2 淹水深度对互叶白千层株高和生物量的影响(平均值±标准差)
Fig.2 Effects of flooding depth on height and biomass in *M. alternifolia* seedlings (mean ± SD)

2.2 淹水深度对互叶白千层生理特性的影响

根据整个实验期间数据计算各个生理指标的平均值(表1),通过重复测量方差分析比较了对照组、浅淹组和深淹组差异的显著性。

表1 不同处理互叶白千层的光合作用和叶绿素荧光参数比较

Table 1 Comparison of photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of *Melaleuca alternifolia* among treatments

参数 Parameters	对照组 Control	浅淹组 Shallow flooding	深淹组 Deep flooding
Chl/(mg·g ⁻¹ 鲜重)	3.04 ± 0.27a	2.83 ± 0.22b	2.57 ± 0.18c
P _N /(μmolCO ₂ ·m ⁻² ·s ⁻¹)	8.71 ± 0.82a	8.21 ± 0.75b	7.52 ± 0.81c
g _s /(mmolH ₂ O·m ⁻² ·s ⁻¹)	174.22 ± 18.22a	156.84 ± 16.32b	130.52 ± 17.68c
E/(mmolH ₂ O·m ⁻² ·s ⁻¹)	4.25 ± 0.59a	3.78 ± 0.43b	3.41 ± 0.39c
F _v /F _m	0.835 ± 0.013a	0.832 ± 0.0092a	0.816 ± 0.0084b
qP	0.89 ± 0.075a	0.86 ± 0.068b	0.83 ± 0.092c
NPQ	0.53 ± 0.051a	0.56 ± 0.062b	0.60 ± 0.073c

总叶绿素含量(Chl)、净光合速率(P_N)、气孔传导率(g_s)、蒸腾速率(E)、PS II的最大光化学量子效率(F_v/F_m)、光化学淬灭(qP)和非光化学淬灭(NPQ);表中数据为平均值±标准差,同一行字母不同者表示差异显著(P<0.05)

2.2.1 淹水深度对叶绿素含量的影响

淹水处理降低了互叶白千层叶绿素含量,随着淹水深度的增加下降幅度有所提高。浅淹组总叶绿素含量稍有下降,为对照的 95.39%。深淹组在淹水后 180d 内总叶绿素含量显著下降,为对照的 79.44%,随后逐渐接近对照组(图 3C)。对照组、浅淹组和深淹组总叶绿素含量平均值分别为 3.04、2.83 和 2.57 mg·g⁻¹鲜重,不同处理间差异显著(P<0.05)(表1)。叶绿素 a 和叶绿素 b 含量变化规律与总叶绿素含量基本相同(图 3A, B)。

2.2.2 淹水深度对净光合速率、气孔传导率和蒸腾速率的影响

淹水处理降低了互叶白千层气体交换速率,随着淹水深度的增加下降幅度有所提高。浅淹组净光合速率、气孔传导率和蒸腾速率稍有下降,分别为对照的 94.26%、90.02% 和 88.94%。深淹组植株在淹水后 150d 内净光合速率、气孔传导率和蒸腾速率显著下降,分别为对照的 73.54%、61.79% 和 71.46%,随后逐渐接近对照组(图 4)。对照组、浅淹组和深淹组净光合速率、气孔传导率和蒸腾速率平均值分别为 8.71、8.21、7.52 μmolCO₂·m⁻²·s⁻¹, 174.22、156.84、130.52 mmolH₂O·m⁻²·s⁻¹ 和 4.25、3.78、3.41 mmolH₂O·m⁻²·s⁻¹, 各个指标不同处理间差异显著(P<0.05)(表1)。

2.2.3 淹水深度对荧光参数的影响

浅淹组 F_v/F_m 比较稳定,一直维持在 0.83 左右,与对照组基本相同,差异不显著(P>0.05)(图 5A,表 1)。深淹组在淹水后 150d 内 F_v/F_m 稍有下降,为对照的 96.38%,随后恢复到对照水平(图 5A)。在整个实

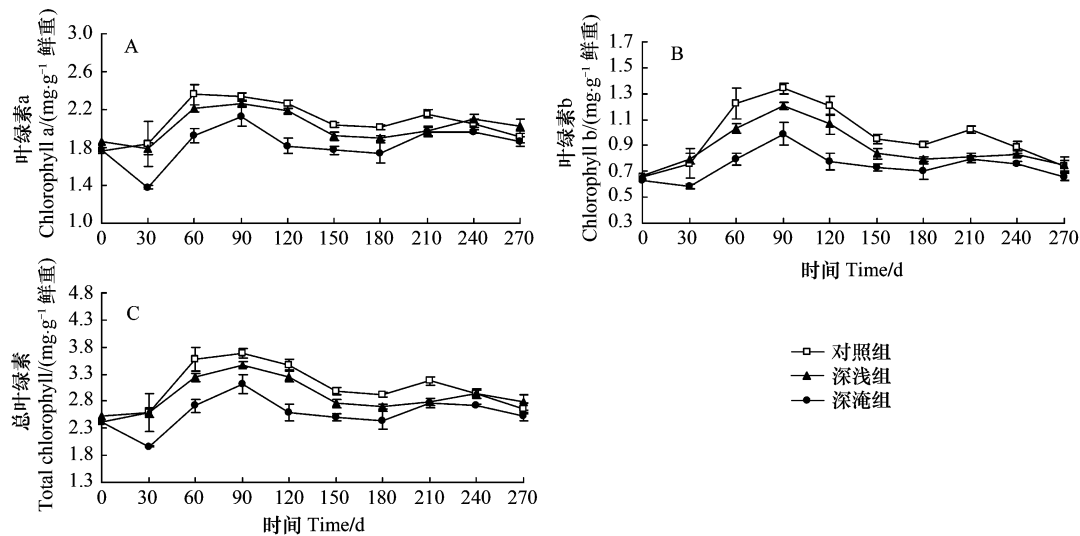


图3 淹水深度对互叶白千层叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量的影响(平均值 ± 标准差)

Fig.3 Effects of flooding depth on chlorophyll a, chlorophyll b and total chlorophyll content in *M. alternifolia* seedlings (mean ± SD)

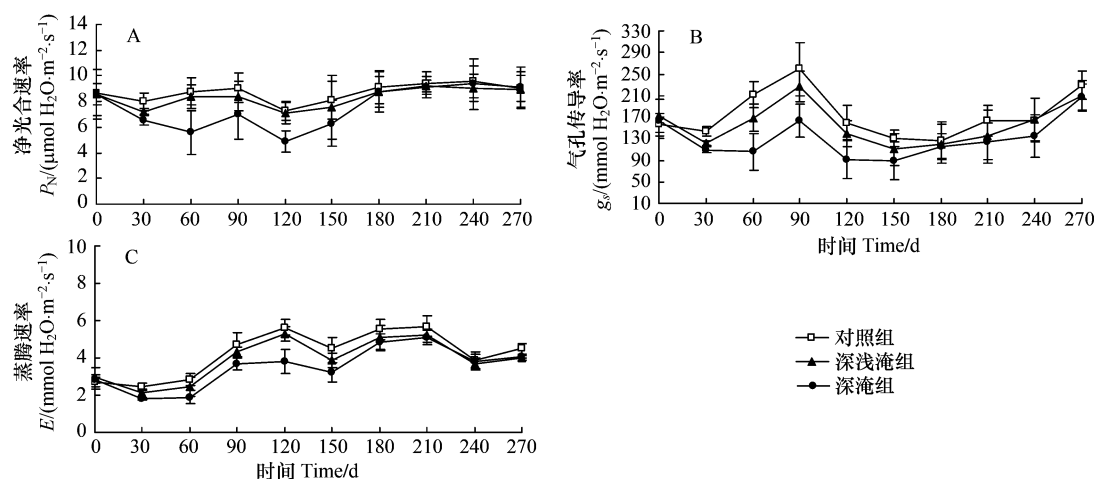


图4 淹水深度对互叶白千层净光合速率 (P_N)、气孔导率 (g_s) 和蒸腾速率 (E) 的影响(平均值 ± 标准差)

Fig.4 Effects of flooding depth on net photosynthetic rate (P_N), stomatal conductance (g_s) and transpiration rate (E) in *M. alternifolia* seedlings (mean ± SD)

验期间,深淹组 F_v/F_m 平均值为 0.816,与对照组和浅淹组差异显著($P < 0.05$) (表 1)。

淹水处理降低了互叶白千层的 qP ,增加了 NPQ ,随着淹水深度的增加变化幅度有所提高。浅淹组 qP 稍有下降,而 NPQ 稍有上升,分别为对照的 96.63% 和 105.66%。深淹组植株在淹水后 120d 内 qP 显著下降, NPQ 显著上升,分别为对照的 94.51% 和 126.66%,随后 qP 和 NPQ 逐渐接近对照组。对照组、浅淹组和深淹组 qP 和 NPQ 的平均值分别为 0.89、0.86、0.83 和 0.53、0.56、0.60,各个指标不同处理间差异显著($P < 0.05$) (表 1)。

3 讨论

土壤淹水缺氧环境下,根是植物体最先也是最直接受到胁迫的部分。在淹水条件下,根吸收水分能力大大降低,从而导致植物生理性缺水而使气孔关闭,影响二氧化碳的吸收与固定,光合产物大大减少。同时,淹水条件下根吸收矿质营养能力降低,从而影响物质的代谢^[4,6]。本实验中,互叶白千层地下根随着淹水时间的延长,出现了较大程度的退化,地下根生物量明显低于对照组,虽然不定根的形成可以部分代替地下根的功

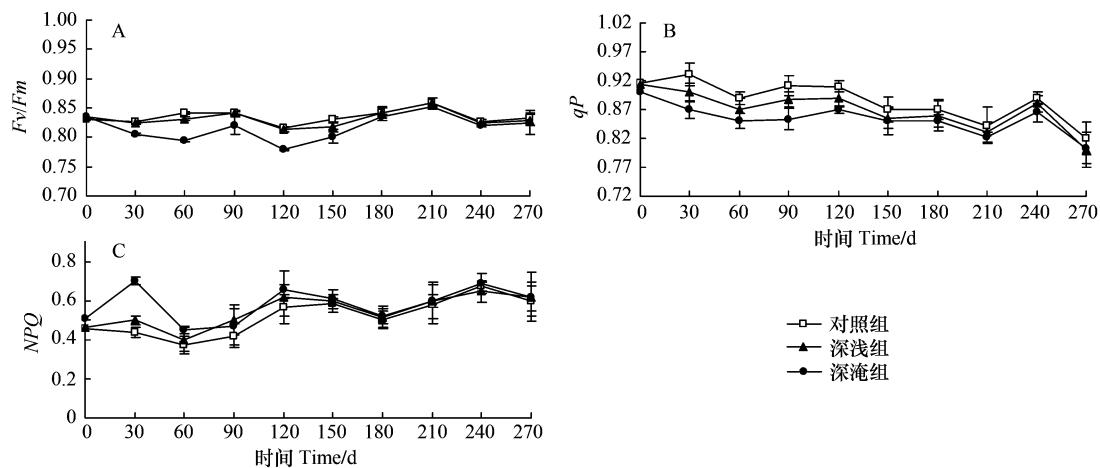


图5 淹水深度对互叶白千层 PS II 的最大光化学量子效率 (F_v/F_m)、光化学淬灭 (qP) 和非光化学淬灭 (NPQ) 的影响 (平均值 $\pm$ 标准差)

Fig.5 Effects of flooding depth on the maximum quantum efficiency of the photosystem II, F_v/F_m , photochemical quenching, qP and non-photochemical quenching, NPQ in *M. alternifolia* seedlings (mean $\pm$ SD)

能,但淹水对互叶白千层的气体交换和生长仍然产生了不利影响。淹水处理的互叶白千层的株高、生物量、叶绿素含量、净光合速率、气孔传导率和蒸腾速率较对照均有不同程度的降低。

大多数学者认为淹水深度能够影响植物受到的伤害程度,随着淹水深度的增加,植物受到的伤害逐渐增大^[21-23]。本研究,随着淹水深度的增加,互叶白千层受到的胁迫有所增强。浅淹条件下,互叶白千层受到的胁迫较小,生长状况和生理特性与对照相比差别不大。深淹条件下,互叶白千层在前期受到严重的胁迫,生长状况和生理特性相比对照组有较大差别。但是,到了实验后期,生长状况和生理指标有了明显的恢复,与对照相比差别不大。这可能主要是由于植株的不断长高,深淹组互叶白千层的相对淹水深度由实验开始的 46.55% 下降到实验后期的 12.90%,淹水胁迫逐渐减弱。另外,本研究结果表明在实验后期(180—270d)浅淹组和深淹组互叶白千层的生长状况、气体交换和叶绿素荧光参数差异不显著,这是否意味着在一定的绝对淹水深度和相对淹水深度范围内淹水对植物产生的影响并不会随着淹水深度的变化而变化?这一问题有待进一步研究。

叶绿素荧光作为鉴定植物抗逆性的理想指标和技术,对各种胁迫因子十分敏感,经常被用于评价光合机构的功能和环境胁迫对其的影响^[19,24]。荧光参数 F_v/F_m 是反映光系统 II 活性的可靠指标,在非逆境条件下多数植物的 F_v/F_m 在 0.832 ± 0.004 左右,但是在逆境或受损伤时这一值明显降低^[19,25-26]。一个稳定 F_v/F_m 的维持表示植物 PS II 光化学反应未受到破坏^[27]。本试验结果表明,在浅淹条件下, F_v/F_m 比较稳定,一直在 0.83 左右,与对照组差异不显著,表明 PS II 光化学反应未受到破坏。深淹组在淹水前 150d 内 F_v/F_m 与对照组相比稍有下降,随后恢复到对照水平,表明 PS II 光化学反应在前期受到轻度破坏,随后恢复正常。

通气组织的形成和不定根的产生是耐淹木本植物适应淹水环境的一个重要机制。通气组织的形成增加了地下部分氧气的供应,提高了植物对水分和矿质营养的吸收。通气组织形成后植物根的孔隙度明显增大,如淹水条件下落羽杉 (*Taxodium distichum*)、纳塔栎 (*Quercus nuttallii*)、沼泽栗子橡木 (*Quercus michauxii*) 等树种根的孔隙度与未淹水的对照相比都有所增大^[28]。不定根能够取代受淹水缺氧影响而导致根活力下降并逐渐死亡的地下根。在淹水缺氧的环境下,不定根更容易从环境中获得氧气,并通过通气组织向下传递,能够提高根对水分的吸收,能够向根的周围供氧,并将根周围的有毒性的还原性物质转化为无害的物质^[29-31]。许多植物在淹水后都能产生不定根,并且不定根产生后植株的生长、水分代谢和光合作用等都所有好转,如枫杨 (*Pterocarya stenoptera*)^[10]、*Alnus japonica*^[7]、水翁 (*Cleistocalyx operculatu*)^[8] 等。本研究中,淹水条件下互叶白千层产生大量的不定根和发达的通气组织,这可能是该植物适应淹水的一个重要机制。

一般来说,树木淹水持续时间越长,遭受的伤害越大。不耐淹树种在生长季节只能够忍受短暂的淹水,耐

淹树种一般也不超过树木生长季节的 40%—45%^[21]。本研究中,2008 年 4—12 月整个生长季节互叶白千层处在淹水状态下,仍能维持正常生长,是一种非常耐淹的木本植物。

总之,浅淹处理对互叶白千层的生长、气体交换和叶绿素荧光影响不大,而在深淹处理过程中,互叶白千层在前期受到较大影响,随后影响程度逐渐变小。互叶白千层通过产生不定根和形成发达的通气组织以适应淹水环境,是一种耐淹能力非常强的木本植物。在河岸和库岸等水位容易波动的地区进行植被恢复的实践过程中,根据互叶白千层的耐淹能力确定树木的种植高度和种植高程,尽量保证树木的相对淹水深度不要超过树木高度的 50%。

致谢:感谢古滨河博士对本文写作给予的帮助。

References:

- [1] Pezeshki S R, DeLaune R D. Responses of seedlings of selected woody species to soil oxidation-reduction conditions. *Environmental and Experimental Botany*, 1998, 40(2): 123-133.
- [2] Parolin P, Armbruster N, Junk W J. Two Amazonian floodplain trees react differently to periodical flooding. *Tropical Ecology*, 2006, 47(2): 243-250.
- [3] Kramer K, Vreugdenhil S J, van der Werf D C. Effects of flooding on the recruitment, damage and mortality of riparian tree species: A field and simulation study on the Rhine floodplain. *Wetlands Ecology and Management*, 2008, 255(11): 3893-3903.
- [4] Pezeshki S R, Pardue J H, DeLaune R D. Leaf gas exchange and growth of flood-tolerant and flood-sensitive tree species under low soil redox conditions. *Tree Physiology*, 1996, 16(4): 453-458.
- [5] Kozłowski T T, Pallardy S G. Acclimation and adaptive responses of woody plants to environmental stresses. *The Botanical Review*, 2002, 68(2): 270-334.
- [6] Stewart J R, Landes R D, Koeser A K, Pettay A L. Net photosynthesis and growth of three novel woody species under water stress: *Calycanthus occidentalis*, *Fraxinus anomala*, and *Pinckneya pubens*. *Hortscience*, 2007, 42(6): 1341-1345.
- [7] Iwanaga F, Yamamoto F. Effects of flooding depth on growth, morphology and photosynthesis in *Alnus japonica* species. *New Forests*, 2008, 35(1): 1-14.
- [8] Jing Y X, Cheng H Q, Peng J Z, Chen Z P, Mo X M, Zheng Z H, Xu D B. Preliminary studies on responses of the seedlings of *Cleistocalyx operculatus* to flooding. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(5): 810-813.
- [9] Li C X, Zhong Z C. Comparative studies on photosynthetic characteristics of *Taxodium distichum* and *Taxodium ascendens* seedlings under simulated soil water change in the hydro-fluctuation belt of Three Gorges Reservoir area. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(6): 28-34.
- [10] Yi Y H, Fan D Y, Xie Z Q, Chen F Q. Effects of waterlogging on the gas exchange, chlorophyll fluorescence and water potential of *Quercus variabilis* and *Pterocarya stenoptera*. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(6): 960-968.
- [11] Evandri M G, Battinelli L, Daniele C, Mastrangelo S, Bolle P, Mazzanti G. The antimutagenic activity of *Lavandula angustifolia* (lavender) essential oil in the bacterial reverse mutation assay. *Food and Chemical Toxicology*, 2005, 43(9): 1381-1387.
- [12] Carson C F, Smith D W, Lampacher G J, Riley T V. Use of deception to achieve double-blinding in a clinical trial of *Melaleuca alternifolia* (tea tree) oil for the treatment of recurrent herpes labialis. *Contemporary Clinical Trials*, 2008, 29(1): 9-12.
- [13] Zhou L H, Zhang H T, Gong Z, Zeng L, Zhou Z J, Tan B X. Propagation of *Melaleuca alternifolia* in industrial mode. *Guangdong Forestry Science and Technology*, 2001, 17(1): 16-19.
- [14] Li H S, Huang Y H. The cultivation techniques of *Melaleuca alternifolia*. *Guangxi Forestry Science*, 2007, 36(3): 156-157.
- [15] Bolton K G E, Greenway M. A feasibility study of *Melaleuca* trees for use in constructed wetlands in subtropical Australia. *Water Science and Technology*, 1997, 35(5): 247-254.
- [16] Bolton K G E, Greenway M. Pollutant removal capability of a constructed *Melaleuca* wetland receiving primary settled sewage. *Water Science and Technology*, 1999, 39(6): 199-206.
- [17] Bolton K G E, Greenway M. Nutrient sinks in a constructed *Melaleuca* wetland receiving secondary treated effluent. *Water Science and Technology*, 1999, 40(3): 341-347.
- [18] Kludze H K, DeLaune R D, Patrick W H Jr. Aerenchyma formation and methane and oxygen exchange in rice. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57(2): 386-391.
- [19] Maxwell K, Johnson G N. Chlorophyll fluorescence — a practical guide. *Journal of Experimental Botany*, 2000, 51(345): 659-668.
- [20] Lichtenthaler H K, Wellbum A R. Determinations of total carotenoids and chlorophyll a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochemical*

- Society Transactions, 1983, 11:591-592.
- [21] Hall T F, Smith G E. Effects of flooding on woody plants, West Sandy dewatering project, Kentucky reservoir. *Journal of Forestry*, 1955, 53:281-285.
- [22] Gill C J. The flooding tolerance of woody species — a review. *Forestry Abstracts*, 1970, 31 (4):671-688.
- [23] Siebel H N, Wijk M V, Blom C W P M. Can tree seedlings survive increased flood levels of rivers?. *Acta Botanica Neerlandica*, 1998, 47 (2):219-230.
- [24] Zhang S R. A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance. *Chinese Bulletin of Botany*, 1999, 16 (4):444-448.
- [25] Lavinsky A O, Sant'Ana C S, Mielke M S, Almeida A F D, Gomes F P, Franca S, Silva D D C. Effects of light availability and soil flooding on growth and photosynthetic characteristics of *Genipa Americana* L. seedlings. *New Forests*, 2007, 34(1):41-50.
- [26] Ball M C, Butterworth J A, Roden J S, Christian R, Egerton J J G, Wydrzynski T J, Chow W S, Badger M R. Applications of chlorophyll fluorescence to forest ecology. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1994, 22(2):311-319.
- [27] Mielke M S, Almeida A F, Gomes F P, Aguilar M A G, Mangabeira P A O. Leaf gas exchange, chlorophyll fluorescence and growth responses of *Genipa americana* seedlings to soil flooding. *Environmental and Experimental Botany*, 2003, 50(3):221-231.
- [28] Pezeshki S R, Anderson P H. Effects of flood pre-conditioning on responses of three bottomland tree species to soil waterlogging. *Plant Physiology*, 2001, 158(2):227-233.
- [29] Sena Gomes A R, Kozlowski T T. Responses of *Melaleuca quinquenervia* seedlings to flooding. *Physiologia Plantarum*, 1980, 49:373-377.
- [30] Tsukahara H, Kozlowski T T. Importance of adventitious roots to growth of flooded *Platanus occidentalis* seedlings. *Plant and Soil*, 1985, 88:123-132.
- [31] Islam M A, Macdonald S E. Ecophysiological adaptations of black spruce (*Picea mariana*) and tamarack (*Larix laricina*) seedlings to flooding. *Trees*, 2004, 18(1):35-42.

参考文献:

- [8] 靖元孝, 程惠青, 彭建宗, 陈兆平, 莫熙穆, 郑中华, 许大彬. 水翁幼苗对淹水的反应初报. *生态学报*, 2001, 21(5):810-813.
- [9] 李昌晓, 钟章成. 模拟三峡库区消落带土壤水分变化条件下落羽杉与池杉幼苗的光合特性比较. *林业科学*, 2005, 41(6):28-34.
- [10] 衣英华, 樊大勇, 谢宗强, 陈芳清. 模拟淹水对枫杨和栓皮栎气体交换、叶绿素荧光和水势的影响. *植物生态学报*, 2006, 30(6):960-968.
- [13] 周丽华, 张华通, 龚峥, 曾雷, 周志坚, 谭碧霞. 互叶白千层工厂化育苗技术. *广东林业科技*, 2001, 17(1):16-19.
- [14] 李恒树, 黄耀恒. 互叶白千层的栽培技术. *广西林业科学*, 2007, 36(3):156-157.
- [24] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论. *植物学通报*, 1999, 16 (4):444-448.