

红树植物白骨壤小苗对模拟潮汐淹浸时间的生长适应性

廖宝文¹, 邱凤英², 张留恩¹, 韩静^{1,3}, 管伟¹

(1. 中国林业科学研究院热带林业研究所, 广州 510520; 2. 广西壮族自治区林业科学研究院, 南宁 530001; 3. 中南林业科技大学, 长沙 410004)

摘要:室内模拟 12 个潮汐淹浸时间处理(2、4、6、8、10、12、14、16、18、20、22、24 h · d⁻¹)对红树植物白骨壤 *Avicennia marina* 小苗生长的影响,测定不同淹水时间处理下白骨壤小苗的叶绿素含量、根活力、生长量、生物量及净光合速率等 10 项生长信息指标。210 d 的试验结果表明,叶绿素含量、根活力、生物量及生长量均随淹水时间的延长先升后降,并在 16 h · d⁻¹ 处出现骤变分界点,淹水时间超过 16 h · d⁻¹ 后,白骨壤小苗的生物量、生长量均显著低于淹水时间 < 16 h · d⁻¹ 的处理;月均地茎增量、月均叶片增量、单株茎干重、单株根干重及总生物量均在淹水 10 h · d⁻¹ 处理下最大。结合主成分分析得出结论,白骨壤小苗在淹水时间 < 16 h · d⁻¹ 的处理下均能正常生长,最适淹水时间为 8 ~ 12 h · d⁻¹,临界淹水时间为 16 h · d⁻¹。

关键词:红树植物; 白骨壤; 潮汐淹浸时间; 生物量; 主成分分析

中图分类号:X17 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2010)05-1345-07

Adaptability of Mangrove *Avicennia marina* Seedlings to Simulated Tide-Inundated Times

LIAO Bao-wen¹, QIU Feng-ying², ZHANG Liu-en¹, HAN Jing^{1,3}, GUAN Wei¹

(1. The Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China; 2. Guangxi Forestry Research Institute, Nanning 530001, China; 3. Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: A laboratory test on the effects of different simulated tide-inundated times with 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24 h · d⁻¹ on the growth of *Avicennia marina* seedlings was conducted. The ten growth information indices including chlorophyll, root vigor, growth, biomass and photosynthetic rate were mensurated. The principal components analysis was made combining the ten growth information indices. The 210d experimental results showed that the chlorophyll, root vigor, growth and biomass would rise first and then fall as the extension of the inundate time; and they changed suddenly at the threshold inundate time 16 h · d⁻¹. The growth and biomass of *Avicennia marina* seedlings with more than 16 hours tide-inundated time per day were less than them with no more than 16 hours tide-inundated time per day. The maximum value of stem increment each month, leaf blade increment each month, dry weight of stem, dry weight of root and total biomass were under the 10 hours tide-inundated time per day. It concluded that *Avicennia marina* seedlings would grow adaptively with less than 16 hours tide-inundated time per day, 8-12 hours of tide-inundated time per day is the most suitable for the growth of *Avicennia marina* seedlings, while 16 h · d⁻¹ is a critical tide-inundated time when the plant responded to be obviously inadapttable.

Key words: mangrove; *Avicennia marina*; tide-inundated times; biomass; principal components analysis

红树林(mangroves)在净化水体,改善近海岸生态环境,包括促进悬浮物沉降、促进有机污染物降解、吸收重金属和营养盐等方面起着重要的作用,因此红树林保护对维护湿地生态系统的生态环境安全有着特殊的意义^[1~6]。近年来,沿海地区的开发已造成对红树林的严重破坏,恢复红树林的工作受到国内外广泛的重视,然而天然红树林远远不能满足生态恢复的需求,红树林造林势在必行。近年来,我国学者在红树林造林与经营技术上进行了一些研究^[7~10]。造林实践表明,浸淹时间是影响红树林造林的重要的限制因子^[11,12],红树林宜林临界线的确定是红树林造林成败的关键^[12,13]。

白骨壤(*Avicennia marina*)为马鞭草科植物,属广布性红树植物^[14],是我国红树植物中分布较广、抗性较强的造林先锋树种之一^[15],具有很强的耐盐和耐淹水能力^[16],在我国分布于广东、广西、海南、福建和台湾 5 个省(自治区)的海岸河口区。近年来,国内外研究学者在盐度对白骨壤的生长和生理

收稿日期:2009-07-09;修订日期:2009-09-18

基金项目:“十一五”国家林业科技支撑计划专题项目(2006BAD03A1402,2009BADB2B04);国家自然科学基金项目(40876062);中国林业科学研究院重点基金项目(2004-2007);海南东寨港红树林生态站项目

作者简介:廖宝文(1963~),男,研究员,主要研究方向为红树林湿地恢复, E-mail: mangro@pub. guangzhou. gd. cn

生态特性的影响及其耐盐机理、白骨壤潮滩生长、人工污水及重金属对其幼苗生长及生理生态特性的影响等方面做了大量研究^[17-29],但对白骨壤的潮水淹没适应能力、尤其淹没的临界阈值研究很少.本研究通过对白骨壤小苗在不同潮汐淹没时间下的生长及生理生态等 10 项生长信息指标的综合分析来了解其耐淹水能力及对淹水逆境的适应情况,以期为今后红树林造林实践中白骨壤宜林地的科学划分以及成功造林关键技术参数的获得提供科学依据.

1 材料与方 法

1.1 试验材料

于 2008 年 6 月 9 日从湛江调回无病虫害健壮的一年生裸根实生白骨壤小苗(苗高 14.99 cm ± 3.51 cm,地茎 0.50 cm ± 0.07 cm,叶片 6 片 ± 2 片),2008 年 6 月 10 日移入装混泥土(黄泥、沙和火烧土按 3:1:1)的塑料瓶(用 1.25 L 的可乐瓶制作,半径 5 cm,高 10 cm,底部带 4 个小孔)中,并放入玻璃温室潮汐模拟槽(长 × 宽 × 高 = 1.2 m × 0.7 m × 0.4 m)内进行培养.

1.2 试验方法

1.2.1 试验地概况

整个模拟试验在广州市人工玻璃温室内进行.试验时间为 2008 年 6 月 ~ 2009 年 1 月,历经夏秋冬三季,光热资源丰富、空气湿润,试验期间温室内最高气温达 39℃,最低气温约 10℃,平均气温约 21℃.

1.2.2 试验设置

试验采用自动潮汐模拟槽装置,设计了 12 对模拟槽,分上槽和下槽,上槽为培养槽,下槽为储水槽,用功率 15 W 的水泵连接上下水槽,以定时器控制涨退潮时间,槽内水为人工配置海水,由于多数红树林植物生长盐度在 20 之内较适生长,取其中间值,盐度调节为 10,根据苗期苗木高度和模拟槽现状,每天加入少量新鲜水,保持槽内人工海水深度为 0.38 m;每个半日潮苗木完全被淹没的时间分别为 1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、11、12 h(即模拟半日潮),共 12 个处理,每 12 h 循环水淹一个半日潮,各处理每天淹没两个半日潮;每一处理均为 18 株,即每重复 6 株,3 次重复.

1.2.3 植物生长调查分析

从 2008 年 6 月 10 日起每隔 15 d 对白骨壤小苗的苗高、地茎(胚轴以上苗木基部)及叶片数进行调查.于 2009 年 1 月用叶面积仪(Li-3000)对每株苗木叶片面积进行测定,然后进行生物量收获测定,即

将全部试验苗木装入信封(1 只信封装 1 株苗木)放入恒温烘箱中,先在 110℃ 下杀青 20min,再在 80℃ 下烘干至恒重,烘干取出后用电子天平分别称量每株苗木的根、茎、叶干重.

1.2.4 植物生理指标测定

在结束模拟潮汐淹水试验前 15 d,取白骨壤中上部无损伤成熟叶片进行各项生理指标的测定,每处理每项生理指标做 3 次重复.

(1) 叶绿素总量采用分光光度法,并根据 Lambert-Beer 定律计算.

(2) 根活力采用 TTC 法,以单位时间每 g 鲜重根所引起的氯化三苯基四氮唑(TTC)还原量来表示,单位为 $\mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$.

1.2.5 植物光合速率测定

于 2008 年 11 月 11 ~ 13 日 10:30 ~ 11:30,采用 Licor-6400 光合仪对不同水淹处理的白骨壤小苗叶片的净光合速率进行测定.测定时设置光强为 $1\ 000\ \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$,采用开放气路,每处理取 3 株,每株选中上部健康叶一片,每片叶连续重复测 5 次,接连测定 3 d,每处理测得 45 个值,取其平均值为该处理净光合速率.

1.2.6 主成分分析方法

主成分分析是将多指标问题转化为较少的综合指标的一种综合分析方法,这些综合指标是原来多个指标的线性组合,它们之间互不相关,但能反应原来多指标的信息.这种方法可避免多指标整体信息发生的重叠,并可得出简明的规律^[30].主成分分析的基本步骤:① 将样本数据标准化后用 SPSS 分析处理得出主成分贡献率、累积贡献率、相关系数矩阵的特征值(r)、因子负荷矩阵(A);② 根据性状累积贡献率达到 85% 以上,确定主成分个数;③ 根据特征值和因子负载矩阵计算特征向量矩阵 U ($U = A/r^{0.5}$);④ 用标准化样本数据计算主成分得分.

1.3 数据处理

所有数据在 Excel、SPSS 15.0 软件中进行分析,其中方差分析采用单因素方差分析法(One-Way ANOVA),多重比较采用最小显著差异法(LSD).

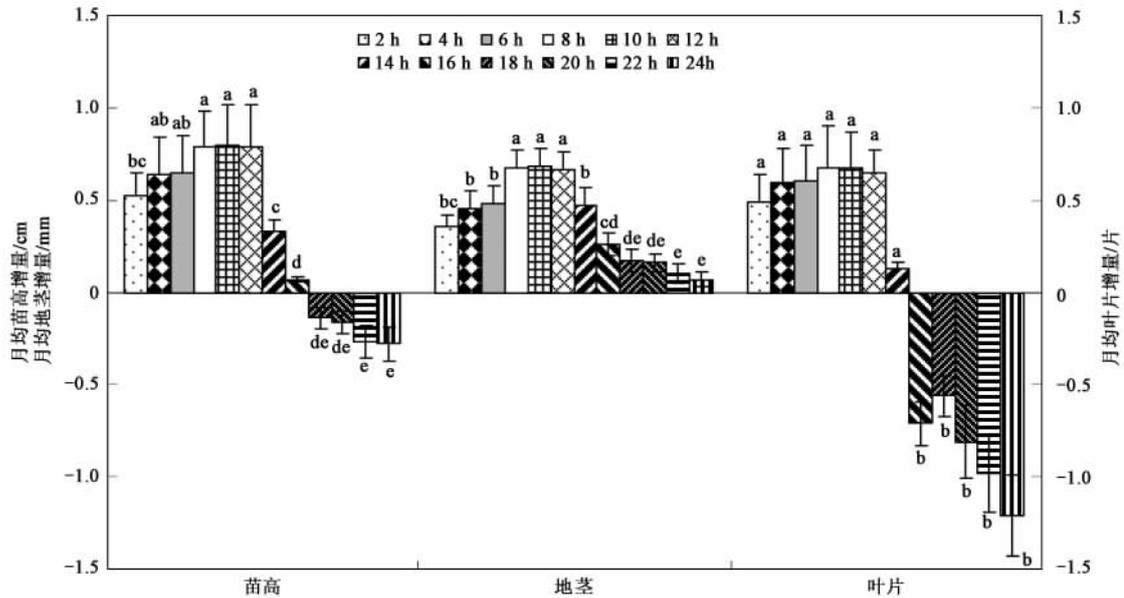
2 结果与分析

2.1 不同淹水时间对小苗生长量累积的影响

受淹水逆境的影响,不同淹水时间处理下白骨壤小苗的月均苗高增量、地茎增量及叶片增量均有差异.从图 1 可知,月均苗高增量在淹水 $< 16\ \text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ 的处理下显著高于淹水 $\geq 16\ \text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ 的处理

($p < 0.05$), 最大值($10\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ 处理下)是淹水 $16\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ 处理的 11.4 倍. 随着淹水时间的继续增大, 白骨壤小苗的月均苗高增量继续下降, 当淹水时间 $\geq 18\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$, 月均苗高增量呈负值, 白骨壤小苗出现顶芽或顶枝死亡现象. 白骨壤小苗的月均地茎增量随淹水时间的延长呈先增后减的趋势, 淹水 $8 \sim 12\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ 处理下的月均地茎增量均保持较高值, 显

著高于其他处理($p < 0.05$), 最大值($10\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ 处理下)是最小值($24\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ 处理下)的 9.7 倍. 白骨壤小苗的月均叶片增量随淹水时间的延长也呈先增后减的趋势, 淹水 $2 \sim 14\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ 处理下的叶片增量保持较高值, 当淹水时间 $\geq 16\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ 后, 叶片呈负增长, 出现脱叶现象. 从生长量指标来看, 白骨壤在淹水时间 $\geq 16\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ 后, 呈不适应生长.



图中标注的不同字母表明数据间差异显著($p = 0.05$), 下同

图 1 白骨壤不同浸水时间下的月均苗高增量、地茎增量及叶片数增量

Fig. 1 Seedling high increment, stem increment and leaf blade increment each month of *Avicennia marina* under different inundate disposes

2.2 不同淹水时间对小苗生物量累积的影响

如图 2 所示, 白骨壤小苗的单株茎干重、单株根干重及总生物量随淹水时间的延长均呈先增后减的趋势, 并均在 $10\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ 淹水处理下值最大, 表明淹水 $10\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ 利于白骨壤的生长. 叶干重、茎干重、根干重及总生物量在淹水 $2 \sim 14\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ 处理下的值均显著高于淹水 $\geq 16\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ 的值($p < 0.05$). 淹水 $16\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ 处理下的白骨壤小苗的单株叶干重、单株茎干重、单株根干重及总生物量分别仅为最大值的 4%、34%、44%、33%. 从总生物量指标看, 淹水 $16\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ 是白骨壤小苗适应性生长的一个分界点.

2.3 不同淹水时间对小苗净光合速率的影响

图 3 为 2008 年 11 月中旬晴天 11:00 白骨壤小苗不同淹水处理下的净光合速率. 可以看出, 白骨壤小苗的净光合速率随淹水时间的延长先增后降, 最大值出现在淹水 $10\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ 的处理, 与淹水 $8\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $12\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ 处理无显著差异($p > 0.05$), 显著高于其他

处理($p < 0.05$). 当淹水时间超过 $12\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ 后, 白骨壤小苗净光合速率不断下降, 最小值(淹水 $24\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ 处理下)仅为最大值(淹水 $10\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ 处理下)的 17%. 表明白骨壤小苗在 $8 \sim 12\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ 处理下的光合作用明显强于其他处理.

2.4 不同淹水时间处理下白骨壤小苗 10 项生长信息指标主成分分析

2.4.1 不同淹水时间处理下白骨壤小苗的 10 项生长信息指标

表 1 为不同淹水时间处理下白骨壤小苗的 10 项生长信息指标. 如表所示, 淹水时间 $\geq 16\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ 后, 白骨壤小苗的单株叶面积显著低于淹水时间 $< 16\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ 的处理($p < 0.05$), 表明淹水时间过长对苗木叶片生长影响很大. 白骨壤小苗的叶绿素总量和根活力也出现了在淹水时间超过 $16\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ 后骤降的趋势, 表明淹水 $16\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ 是白骨壤小苗耐水淹的一个临界点.

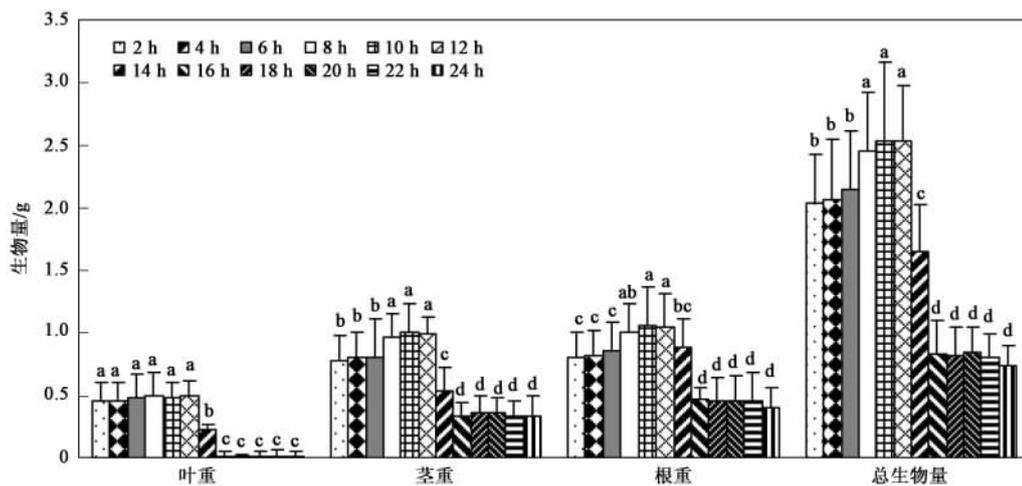


图 2 白骨壤不同浸水时间下叶、茎、根干重及生物量

Fig.2 Dry weight of leaves, caudex, root and total biomass of *Avicennia marina* with different inundate disposes

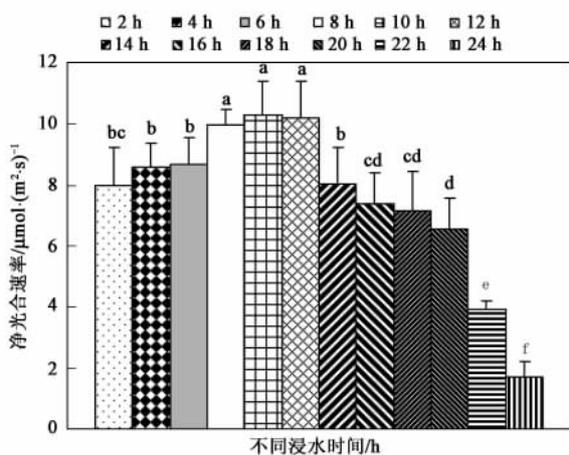


图 3 11 月份 11:00 白骨壤不同浸水时间下的净光合速率

Fig.3 Photosynthetic rates at 11:00 on Nov. of *Avicennia marina* with different inundata disposes

2.4.2 不同淹水时间处理下白骨壤小苗的 10 项生长信息指标的主成分分析

植物的耐水淹能力是受生长情况、生理生化等多因素综合作用影响的结果,单个因素无法准确地表现植物的耐水淹能力,为了准确评价白骨壤小苗的耐水淹能力强弱,本研究选用白骨壤小苗不同淹水时间处理下的 10 项生长信息指标进行主成分分析(见表 2~5)。由表 2 可知,白骨壤的第一主成分(F_1)的方差和累积贡献率分别为 94.40%、>85%,所以第一主成分能反映不同淹水时间处理下白骨壤小苗各生长指标之间的关系,用这个主成分对白骨壤耐水淹能力评价是可行的、合理的。

表 3 为因子载荷阵和第一主成分 F_1 对白骨壤小苗 10 项生长信息指标的方差承载。如表 2、表 3 所示, F_1 不仅能反映白骨壤 10 项生长信息指标变

表 1 白骨壤不同浸水时间下的 10 项生长信息指标

Table 1 Ten growth information indices of *Avicennia marina* with different inundate disposes

浸水时间 /h · d ⁻¹	单株叶干 重/g	单株茎干 重/g	单株根干 重/g	总生物 量/g	月均苗高 增量/cm	月均地径 增量/cm	单株叶面 积/cm ²	净光合速率 /μmol · (m ² · s) ⁻¹	叶绿素总量 /mg · g ⁻¹	根活力 /μg · (g · h) ⁻¹
2	0.45a	0.78b	0.81c	2.04b	0.52bc	0.36bc	35.38b	8.00bc	1.01ab	2241.69b
4	0.45a	0.80b	0.82c	2.07b	0.64ab	0.45b	32.84bc	8.59b	1.02ab	2155.00b
6	0.48a	0.81b	0.86c	2.15b	0.65ab	0.48b	33.62b	8.70b	1.03ab	2489.81b
8	0.49a	0.96a	1.00ab	2.45a	0.79a	0.67a	40.37ab	9.98a	1.11a	3861.23a
10	0.48a	1.00a	1.06a	2.54a	0.80a	0.68a	44.53a	10.30a	1.10a	3847.14a
12	0.49a	0.99a	1.05a	2.53a	0.79a	0.66a	36.08ab	10.21a	1.09a	3797.60a
14	0.23b	0.54c	0.88bc	1.65c	0.33c	0.47b	24.38c	8.04bc	0.95b	2690.30b
16	0.02c	0.34d	0.47d	0.83d	0.07d	0.26cd	3.02d	7.39cd	0.82c	1104.83c
18	0.01c	0.36d	0.45d	0.82d	-0.14fde	0.17de	2.00d	7.17cd	0.81c	1131.52c
20	0.02c	0.36d	0.46d	0.84d	-0.16fde	0.16de	1.98d	6.57d	0.80c	810.39c
22	0.02c	0.34d	0.45d	0.81d	-0.27e	0.10e	1.82d	3.92e	0.74c	869.81c
24	0.01c	0.33d	0.40d	0.74d	-0.28e	0.07e	1.46d	1.71f	0.70c	566.74c

1) 同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($p = 0.05$)

表 2 白骨壤小苗的生长信息主成分分析

Table 2 Principal components analysis of the growth information indices of *Avicennia marina*

项目	第一主成分 F_1
特征根	9.440
方差贡献率/%	94.40
累积贡献率/%	94.40

表 3 白骨壤小苗的因子载荷阵 A 及第一主成分 F_1 对各生长指标的承载Table 3 Factor load matrix and load bearing for growth indices of *Avicennia marina*

生长指标	因子载荷阵	F_1 对各指标的载荷/%
单株叶干重	0.965	93.12
单株茎干重	0.980	96.04
单株根干重	0.985	97.02
总生物量	0.992	98.41
月均苗高增量	0.990	98.01
月均地茎增量	0.976	95.26
叶面积	0.981	96.24
净光合速率	0.881	77.62
叶绿素总量	0.995	99.00
根活力	0.966	93.32

异信息的 94.40%, 而且各指标的方差在 F_1 上的载荷除净光合速率外均很高, 所以用 F_1 来简化原观察系统是可行的, 完全可反映白骨壤在不同淹水时间处理下的生长情况。

如表 4 所示, 白骨壤的第一主成分主要综合了单株根干重、总生物量、月均苗高增量、叶绿素总量等生长指标的信息, 它们的权重系数分别为 0.3206、0.3229、0.3222、0.3238。

由表 4 可得白骨壤第一主成分表达式:

$$F_1 = 0.3141X_1 + 0.3190X_2 + 0.3206X_3 + 0.3229X_4 + 0.3222X_5 + 0.3177X_6 + 0.3193X_7 + 0.2867X_8 + 0.3238X_9 + 0.3144X_{10}$$

由表 5 可知, 白骨壤主成分得分从高到低相对应的淹水时间依次为 10、12、8、6、4、2、14、16、18、20、22、24 $\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$, 在淹水 8~12 $\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ 处理下的主成分得分很高, 在淹水 2、4、6、14 $\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ 处理下的主成分得分值较高, 淹水 $\geq 16 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ 处理下的主成分得分值较低。主成分分析结果表明白骨壤在

表 4 白骨壤不同淹水时间处理下的生长特征向量分析¹⁾Table 4 Analysis of growth features vectors with different inundate time disposal of *Avicennia marina*

项目	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
白骨壤第一主成分	0.3141	0.3190	0.3206	0.3229	0.3222	0.3177	0.3193	0.2867	0.3238	0.3144

1) $X_1 \sim X_{10}$ 分别代表单株叶干重、单株茎干重、单株根干重、总生物量、月均苗高增量、月均地茎增量、叶面积、净光合速率、叶绿素总量和根活力, 下同

表 5 不同淹水处理下白骨壤的主成分值

Table 5 Values of the principal components with different inundate time disposal of *Avicennia marina*

每天淹水时间/h	主成分得分	每天淹水时间/h	主成分得分
2	1.3370	14	0.4885
4	1.6199	16	-2.5087
6	1.9383	18	-2.8673
8	3.5786	20	-3.0320
10	3.8293	22	-3.6605
12	3.5833	24	-4.2447

水淹 $< 16 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ 处理下均能正常生长, 在淹水 8~12 $\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ 处理下最适生长, 当淹水时间超过 16 $\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ 后, 呈不适生长, 即临界淹水时间为 16 $\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

3 讨论

自然状态下, 不同的红树植物种类在滩涂上呈带状分布, 本质上由其自身生理能力所决定, 红树植

物能耐受适度的潮水浸淹, 淹水胁迫程度变化会使之在生长状况、营养发育、生物量分配等方面的生理生态性质表现出梯度性反应^[31-33]。白骨壤小苗的苗高、地茎及叶片增量均随淹水时间的延长呈先增后降的趋势, 表明适当的淹水时间能够促进白骨壤小苗的生长。一般而言, 红树植物受潮汐周期性浸淹, 以加快茎的生长来降低叶片被潮水淹没的时间, 茎叶将氧气输送到根部, 可缓解根系缺氧的危害, 这与高海燕^[24]对不同高程下秋茄和白骨壤小苗的生长情况的研究结果相同。胡倩芳等^[23]对不同滩面高程和光照条件下白骨壤小苗的早期生长差异的研究结果也与本研究吻合。目前研究发现: 红树植物叶片对淹水胁迫的反应十分敏感, 淹水可使叶片生长受到显著抑制, 总叶面积减少^[34]。本试验中, 淹水时间超过 16 $\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ 后白骨壤的月均叶片数增量和叶面积均显著下降, 表明淹水时间过长严重限制了叶片的生长, 叶片开始脱落。

叶绿素是植物进行光合作用的主要色素, 其含

量的高低可反映植物光合作用水平的强弱,影响其合成的主要环境因子有光照、温度、营养元素、氧气等.在本试验中,每天淹水时间超过 $16 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ 后,叶绿素含量明显下降,将会影响到白骨壤的光合速率,不利于白骨壤的生长.就叶绿素含量而言,淹浸 $16 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ 是白骨壤小苗耐淹浸的一个分界点,其主要原因可能是淹水时间超过 $16 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ 后,氧气供应不足促使呼吸作用减弱,导致能量供应不足而影响叶绿素的形成,限制白骨壤光合作用,进而影响到白骨壤的生物量. TTC 还原能力测定的是与呼吸有关的琥珀酸脱氢酶,是反映根系活力的一个非常重要的指标^[35].如表 1 所示,在淹水 $8 \sim 12 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ 时白骨壤的根活力较强,当淹水超过 $16 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ 后,白骨壤小苗根活力骤降,根系生长受到明显的限制,表现出不适应性生长,这可能是由于水淹时间过长,根部氧气供应不足,影响根部呼吸作用,从而影响根的生长.

白骨壤小苗的总生物量在淹水 $2 \sim 14 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ 处理下均保持较高值,显著高于淹水时间超过 $16 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ 的处理,这是淹水逆境对白骨壤根、茎、叶及其内部生理机制综合影响的结果,表明淹水 $16 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ 是白骨壤淹水适应生长的临界淹水时间.

主成分分析是将多指标问题转化为较少的综合指标的一种综合分析方法,用其对白骨壤小苗的耐水淹能力的分析综合了生长量、生物量、生理指标及光合指标等多项指标,比单独采用少量指标进行的分析更加科学、合理、可靠.主成分分析结果表明淹水时间 $< 16 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ 的处理下,白骨壤均能正常生长,白骨壤的最适淹水时间为 $8 \sim 12 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$,临界淹水时间为 $16 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$.

在本试验完成之前本研究已经对适生于内缘高潮线附近的红树植物尖瓣海莲 (*Bruguiera sexangula* var. *rhynchopetala*)^[36] 和适生于中潮带的红树植物秋茄 (*Kandelia candel*)^[37] 的最适淹水时间及临界淹水时间进行了研究.结果表明,尖瓣海莲的最适淹水时间是 $6 \sim 8 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$,临界淹水时间是 $12 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$;秋茄的最适淹水时间是 $8 \sim 12 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$,临界淹水时间为 $16 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$.可见白骨壤较尖瓣海莲耐水淹,其耐水淹能力与红树植物秋茄相类似.本研究为人工模拟条件下的试验结果,在野外实际环境下,除潮汐淹浸外,小苗还受到滩涂底质、海水盐度、波浪冲击、螃蟹咬食、藤壶附着、人为破坏等多种因子的影响,可能与本试验结果有一些差异,仍需进行更多的野外科研试验.

4 结论

(1) 白骨壤小苗的月均苗高、地茎及叶片数增量随淹水时间的延长均有先增后减的趋势,均在 $8 \sim 12 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ 的淹水处理下保持较高值,淹水时间 $\geq 16 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ 后,生长变差.

(2) 白骨壤小苗的生物量随淹水时间的延长先增后减,在 $10 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ 的淹水处理下值最大,当淹水时间 $\geq 16 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ 后,生物量显著下降.

(3) 通过对不同时间淹水处理下白骨壤小苗的单株叶干重、单株茎干重、单株根干重、总生物量、月均苗高增量、月均地茎增量、叶面积、净光合速率、叶绿素总量和根活力等十项生长信息指标的主成分分析,可知白骨壤在水淹 $< 16 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ 处理下均能正常生长,在淹水 $8 \sim 12 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ 处理下最适生长,当淹水时间超过 $16 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ 后,呈不适生长,即临界淹水时间为 $16 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$.

参考文献:

- [1] 朱颖,吴纯德.红树林对水体进化作用研究进展[J].生态科学,2008,27(1):55-60.
- [2] 丁振华,刘金铃,李柳强,等.中国主要红树林湿地沉积物中汞的分布特征[J].环境科学,2009,30(8):2210-2215.
- [3] 陈小勇,曾宝强,陈利华.香港汀角红树植物、沉积物及双壳类动物重金属含量[J].中国环境科学,2003,23(5):480-484.
- [4] 陈海鹰.中国南部沿海湿地现状及其保护和利用研究[J].资源环境与发展,2006,3:15-19.
- [5] 程皓,陈桂珠,叶志鸿.红树林重金属污染生态学研究进展[J].生态学报,2009,29(7):3893-3900.
- [6] 李玫,章金鸿,陈桂珠.化工废水对红树林湿地的影响[J].重庆环境科学,2003,25(6):21-25.
- [7] 廖宝文,郑德璋,郑松发,等.白骨壤物候变化规律及育苗造林技术的研究[J].防护林科技,1999,(增刊):1-5.
- [8] 廖宝文,郑德璋,郑松发,等.海桑育苗技术及其幼苗生长规律的研究[J].林业科学研究,1997,10(3):296-302.
- [9] 廖宝文,郑德璋,郑松发,等.中国红树林湿地造林现状及其展望[M].北京:中国林业出版社,1995.77-80.
- [10] 张乔民,于红兵,陈欣树.红树林生长带与潮汐水位的研究[J].生态学报,1997,17(3):258-265.
- [11] Kitaya Y, Jintana V, Piriya Y. Early growth of seven mangrove species planted at different elevations in a Thai estuary [J]. Trees,2002,16:150-154.
- [12] 陈玉军,陈文沛,郑松发,等.广东番禺红树林造林研究[J].生态科学,2001,20(1,2):25-31.
- [13] 范航清,黎广钊.海堤对广西沿海红树林的数量、群落特征和恢复的影响[J].应用生态学报,1997,8(3):240-244.
- [14] 林鹏.中国东南部海岸红树林的类群及其分布[J].生态学报,1981,1(3):283-290.

- [15] 林鹏. 红树林研究论文集[M]. 厦门:厦门大学出版社,1990. 98.
- [16] Lin G, Sternberg L, Da S L. Differences in morphology, carbon isotope ratios, and photosynthesis between scrub and fringe mangroves in Florida, USA [J]. Aquatic Botany, 1992, **42**: 303-313.
- [17] Yasseen B T, Abu-Al-Basal M A. Ecophysiology of *Limonium axillare* and *Avicennia marina* from the coastline of Arabian Gulf-Qatar[J]. Journal of Coastal Conservation, 2008, **12**(1):35-42.
- [18] Jayatissa L P, Wickramasinghe W, Dahdouh-Guebas F, et al. Interspecific variations in responses of mangrove seedlings to two contrasting salinities [J]. International Review of Hydrobiology, 2008, **93**(6):700-710.
- [19] Lopez-Hoffman L, Anten N P R, Martinez-Ramos M, et al. Salinity and light interactively affect neotropical mangrove seedlings at the leaf and whole plant levels [J]. Oecologia, 2007, **150**(4):545-556.
- [20] Fukushima Y, Baba S, Ashihara H, et al. The effect of salt stress on the catabolism of sugars in leaves and boots of a mangrove plant *Avicennia marina* [J]. Journal of Biosciences, 1997, **52**(3-4):187-192.
- [21] 张宜辉,王文卿,林鹏. 红树植物的盐分平衡机理[J]. 海洋科学, 2007, **31**(1):86-90.
- [22] 何斌源,赖廷和,陈剑锋,等. 两种红树植物白骨壤和桐花树的耐盐性[J]. 生态学报, 2007, **27**(3):1131-1139.
- [23] 胡倩芳,叶勇. 不同滩面高程和光照条件下白骨壤幼苗的早期生长差异[J]. 福建林业科技, 2008, **36**(1):106-110.
- [24] 高海燕. 不同高程下秋茄和白骨壤幼苗生长的动态研究[J]. 科技信息, 2007, **33**:21-31.
- [25] 陈桂葵,陈桂珠,黄玉山,等. 人工污水对白骨壤幼苗生理生态特性的影响[J]. 应用生态学报, 1999, **10**(1):95-98.
- [26] 陈桂葵,陈桂珠,黄玉山,等. 人工污水对白骨壤生长的影响[J]. 海洋环境科学, 2003, **22**(3):39-43.
- [27] 陈桂葵,陈桂珠. 模拟分析白骨壤湿地系统中 Ni 的分配循环及其净化效果[J]. 海洋环境科学, 2005, **24**(4):16-19.
- [28] 王雪峰,陈桂珠,许夏玲. 白骨壤对石油污染的生理生态响应[J]. 生态学报, 2005, **25**(5):1095-1100.
- [29] 方煜,郑文教,万永吉,等. 重金属铬(III)对红树植物白骨壤幼苗生长的影响[J]. 生态学杂志, 2008, **27**(3):429-433.
- [30] 袁志发,周静芋. 多元统计分析[M]. 北京:科学出版社, 2002. 188-189.
- [31] 叶勇,卢昌义,谭凤仪. 木榄和秋茄对水渍的生长与生理反应的比较研究[J]. 生态学报, 2001, **21**(10):1654-1661.
- [32] 叶勇,卢昌义,郑逢中,等. 模拟海平面上升对红树植物秋茄的影响[J]. 生态学报, 2004, **24**(10):2238-2244.
- [33] 陈鹭真,王文卿,林鹏. 潮汐淹水时间对秋茄幼苗生长的影响[J]. 海洋学报, 2005, **27**(2):141-147.
- [34] Pezeshki S R, Delaune R D, Patrick W H. Differential response of selected mangroves to soil flooding and salinity: Gas exchanges and biomass partitioning [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1989, **20**:869-874.
- [35] 刘海龙,郑桂珍,关军锋,等. 干旱胁迫下玉米根系活力和膜透性的变化[J]. 华北农学报, 2002, **17**(2):20-22.
- [36] 廖宝文,邱凤英,管伟,等. 尖瓣海莲幼苗对模拟潮汐淹没时间的适应性研究[J]. 林业科学研究, 2009, **22**(1):42-47.
- [37] 廖宝文,邱凤英,曾雯璐,等. 红树植物秋茄幼苗对模拟潮汐淹没时间的适应性研究[J]. 华南农业大学学报, 2009, **30**(3):49-54.