

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3142.2014.02.015

何斌源, 赖廷和, 潘良浩, 等. 盐沼草—白骨壤混种减轻污损动物危害的生物防治效果研究[J]. 广西植物, 2014, 34(2):203—211

He BY, Lai TH, Pan LH, *et al.* Effect study on a biological prevention method applying mix-culturing of saltmarsh and *Avicennia marina* mangrove trees to reduce marine fouling fauna damage[J]. *Guihaia*, 2014, 34(2):203—211

盐沼草—白骨壤混种减轻污损动物危害的生物防治效果研究

何斌源^{1,2*}, 赖廷和^{1,2}, 潘良浩^{1,2}, 王欣^{1,2}, 范航清^{1,2}

(1. 广西科学院 广西红树林研究中心, 广西 北海 536000; 2. 广西红树林保护与利用重点实验室, 广西 北海 536000)

摘要: 广西北仑河口区新造高程约 220 cm 的潮间带裸滩, 移植白骨壤与荳蔻、沟叶结缕草、芦苇和南水葱四种盐沼草进行混种, 研究盐沼草-红树混种减轻污损动物对人工红树林危害的生物防治效果。结果表明: 沟叶结缕草和荳蔻可快速生长和扩展, 缓流、促淤能力高于长势较差的南水葱和芦苇。在盐沼和白骨壤上发现 19 种污损动物, 其中潮间藤壶、白条地藤壶、黑口滨螺和粗糙滨螺为优势种。荳蔻和沟叶结缕草受污损程度较南水葱和芦苇轻。四种盐沼草受污损程度均低于白骨壤。白骨壤+荳蔻、白骨壤+沟叶结缕草混种均可有效减轻污损动物对白骨壤苗木危害, 这两类树一草混种处理区苗木的高度、叶数、枝数、枝下高和存活率等指标均较其他处理区好。初步判断“盐沼草-红树林协同生态修复体系”对于营造人工红树林有较高应用价值。

关键词: 盐沼草; 白骨壤; 污损动物; 盐沼草-红树协同生态修复; 生物防治

中图分类号: Q145 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2014)00-0203-09

Effect study on a biological prevention method applying mix-culturing of saltmarsh and *Avicennia marina* mangrove trees to reduce marine fouling fauna damage

HE Bin-Yuan^{1,2*}, LAI Ting-He^{1,2}, PAN Liang-Hao^{1,2},
WANG Xin^{1,2}, FAN Hang-Qing^{1,2}(1. *Guangxi Mangrove Research Center, Guangxi Academy of Sciences*, Beihai 536000, China;2. *Key Lab of Guangxi Mangrove Conservation and Utilization*, Beihai 536000, China)

Abstract: In Beilun estuarine area of Guangxi, China, the intertidal flat were filled to an elevation of about 220 cm Yellow Sea Datum to mix-culture *Avicennia marina* (AM) seedlings with four species of saltmarsh, aimed at studying the effect of biological prevention method for reducing the fouling damage on mangrove trees. The results showed that *Cyperus malaccensis* (CM) and *Zoysia matrella* (ZM) were able to grow and spread faster, and more efficient to slow down water velocity and accelerate sedimentation than *Scirpus validus* var. *laeviglumis* (SV) and *Phragmites australis* (PA). 19 species of fouling fauna were found on saltmarsh and mangroves, among which *Balanus littoralis*, *Euraphia withersi*, *Littorina melanostoma* and *L. scabra* were major dominant species. Among four saltmarsh species, the fouled degrees on CM and ZM were significantly less than those on other two species. And the

收稿日期: 2013-08-26 修回日期: 2013-09-24

基金项目: 广西自然科学基金(桂科自 0991070); 北部湾重大基础专项(2010GXNSFE013004, 2011GXNSFE018005); 广西科学院基本科研业务费专项(10YJ25HS03)。

作者简介: 何斌源(1969-), 男(壮族), 广西东兴市人, 博士, 研究员, 主要从事海洋生态学研究, (E-mail) hebinyuan2008@126.com。

* 通讯作者

fouled degrees on four saltmarsh species were all significantly less than that on *A. marina* tree. The mix-culturing of saltmarsh CM or ZM with mangrove tree AM could efficiently reduce the fouling damage, resulting in better tree growth indexes i. e. tree height, leaf number, branch number, branch conservation and survival rate than those in mono-species treatment areas. In general, a saltmarsh-mangrove cooperating ecological conservation system could be a practical model for mangrove afforestation.

Key words: saltmarsh; *Avicennia marina*; fouling fauna; saltmarsh-mangrove cooperating ecological conservation; biological prevention method

红树林污损动物防治技术是目前我国红树林营林最急需的关键技术, 目前我国主要采取化学法防污(李云等, 1998; 何斌源等, 2008), 但化学法使用农药带来抚育期长、生物损伤、污染物富集以致影响食物安全等诸多问题(何斌源等, 2008), 这有违当今的环境友好理念, 必须综合运用各种物理、化学和生物技术方法防治病虫害。开发无公害生物活性防污涂料是当前污损生物防除的研究热点和重点之一(史航等, 2003; 严涛等, 2008)。Singh *et al.* (1996) 从桉树(*Eucalyptus*); 冯丹青(2007) 从生姜(*Zingiber officinale*); 林秀雁等(2008) 从红花夹竹桃(*Nerium indicum*)、黄花夹竹桃(*Thevetia peruviana*)、洋葱(*Allium cepa*)、大蒜(*A. sativum*)、苦楝(*Melia azedarach*)、印楝(*Azadirachta indica*); 曹文浩等(2012) 从美丽海绵(*Callyspongia*) 等提取了多种广谱、高效防污的生物活性物质。厦门大学申请获得了从海漆(*Excoecaria agallocha*)、杨梅(*Myrica rubra*)、连翘(*Forsythia*) 等植物中提取的生物活性物质制备海洋防污涂料的专利。这些研究和发明无疑对海上设施防污意义重大, 但对于不断生长的红树活体, 在辅助填料、施用方式和药效持久性等方面存在着技术障碍, 限制了其在红树林防污上应用。生物防治作为病虫害防治最重要的环境友好型技术之一, 常见于陆地农业人工生态系统中对害虫的控制, 但目前有关红树林污损动物的生物防治研究未见报道。

广西北仑河是中越界河, 近三十年来红树林及其生境遭到严重破坏, 导致北仑河口的主航道向我方一侧偏移 2.2 km, 造成我国固有领土 8.7 km² 发生了权属争端。国家发改委启动北仑河口生态修复工程, 遏制我方水土流失趋势, 扭转生态退化趋势, 保障我国领土安全和海洋权益。由于长期的人为扰动和自然侵蚀, 这一带滩涂的沉积物粗糙、土层薄且低洼, 必须采取工程填海才能满足红树适生高程和沉积物要求, 这属于特种造林范畴, 需要解决诸多技术难题, 严重的污损动物危害就是其中关键问题之一。在我国, 白骨壤(*Avicennia marina*) 分布面积

最大, 是我国红树林的先锋树种, 其耐受潮汐浸淹能力最强(He *et al.*, 2007); 但在我国以往红树造林中应用很少, 与其生长较慢、成林不易有关; 同时, 该种受污损危害严重(庆宁等, 2004)。白骨壤是北仑河口红树林的最大优势种, 自然表明它是当地红树林生态修复的宜林树种。

本文采取盐沼草与红树植物白骨壤混种, 发挥盐沼草-红树联合阻流缓速的生态功能, 减轻污损动物对造林目标种白骨壤的危害, 目的是提高造林成功率, 缩短抚育时间, 尽快成林, 保障北仑河口我方一侧湿地生态系统的良性修复, 维护边境国土安全, 同时为完善我国红树林营林技术体系做出贡献。

1 材料与方法

1.1 实验基地概况

实验基地位于广西东兴市竹山村五一堤岸段滩涂(21°32'44" N, 108°02'39" E), 属中越界河——北仑河入海的河口区。北仑河背靠十万大山, 南濒北部湾, 西北面以低山丘陵为主。河口口门宽约 6 km, 纵长约 11 km。滩涂土壤沙质、沙泥质、淤泥质和风化岩石滩夹杂并存。北仑河口一带年均气温 22.5 °C, 年均降雨量 2 220.5 mm, 年均蒸发量 1 005 mm, 年均相对湿度 82%, 是广西沿海降雨量和相对湿度较高的区域。北仑河口海区潮汐属全日潮型, 最大潮差 4.64 m, 平均潮差 2.04 m。在北仑河河口区, 位于我国境内的红树林面积 127.9 hm², 大部分为白骨壤群落和桐花树(*Aegiceras corniculatum*) 群落, 常见种有卤蕨(*Acrostichum aureum*)、秋茄(*Kandelia obovata*)、红海榄(*Rhizophora stylosa*)、老鼠簕(*Acanthus ilicifolius*) 和海漆等。

1.2 处理区设置

本文于 2011 年 5—7 月在中越界河北仑河的河口区竹山段海堤外, 采用船运海沙填海的方式, 形成面积 4 hm²、平均高程约为 220 cm 的滩涂(当地潮高基准面在平均海面下 230 cm), 8 月开展利用盐沼草

促进红树成林的生态修复工程。局部区域用于探索利用盐沼草减轻污损危害的生物防治途径试验,三类共 10 个处理区设置见图 1,向海前缘区为白骨壤和四种盐沼草单种的处理区,中间为树草混种处理区,向陆后缘区为白骨壤单种的处理区,处理区长约 250 m,宽 30 m,总面积约 7 500 m²。树、草的种植密度均为 1 m×1 m,混种处理区为树草隔行配置。白骨壤苗木有 2 种规格:9~12 cm 和 70~80 cm(以下分别称为小苗和大苗);盐沼草使用荳荳(*Cyperus malaccensis*)、沟叶结缕草(*Zoysia matrella*)、南水葱(*Scirpus validus* var. *laeviglumis*)和芦苇(*Phragmites australis*)等 4 种,均为本地土生种,采用 20 cm×20 cm 的草块移植。其中,荳荳草块采自偶然受到特大潮影响的人工田畦,芦苇草块采自静水咸水塘,沟叶结缕草和南水葱草块采自附近高潮带滩涂。

1.3 生境和生物监测方法

1.3.1 生境监测方法 本文对各处理区的生境因子进行监测,指标包括潮水流速、海水盐度、海水温度、气温、沉积速率和沉积物有机质含量。其中,温度的记录使用 UA-002-64 HOBO 温度/光数据采集器(美国产),每 1 h 自动记录 1 次。盐度监测采用盐度计法,每月间隔 5 d 测定 1 次高潮时海水盐度。

潮水流速测定使用 2 个 starflow 6526 水流监测系统(澳大利亚产)。设向海前缘区外 1 m 处(滩涂高程同各处理区)为对照区,在处理区涨潮水深达 1 m 前后,同时测定处理区与对照区滩面以上 30 cm 处的流速,各处理区的流速降低量与对照区的比值作为植被缓流能力对比。

沉积速率测定使用自制的湿地沉积速率测定装置(专利号:201120420638.2)。试验前、后取各处理区 0~10 cm 层的沉积物带回实验室,自然风干后,按照《海洋监测规范》GB17378.5-2007 测定有机质含量。实验期间竹山实验基地的实测水温、气温和盐度年均值分别为 24.0、25.2 和 15.7 ℃,月度变化见图 2。

1.3.2 生物调查方法 在植株稳定 2 个月后的 2011 年 10 月,从各处理区所种植的黑骨壤苗木中,每种规格苗木标记 50 株生长正常的植株用于固定观测,共计 1 500 株苗木。用于本文实验的苗木,是有目的地选择从种源地的群落内部间苗移植而来,污损动物很少附着,而且这时再次人工彻底去除其上的污损动物,作为无附着的起始点。同时标记固定的盐沼草观测样线,记录其萌发和生长情况。固定观测的树或草均位于各处理区的中间。

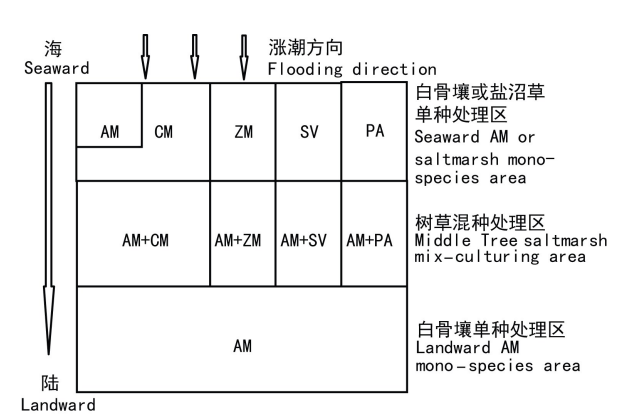


图 1 四种盐沼草与白骨壤处理区的位置示意图 AM=白骨壤,CM=荳荳,ZM=沟叶结缕草,SV=南水葱,PA=芦苇。下同。

Fig. 1 Treatment location for testing the biological prevention effect of *Avicennia marina* trees with four salt-marsh species on the fouling fauna by mix-culturing AM= *Avicennia marina*, CM= *Cyperus malaccensis*, ZM= *Zoysia matrella*, SV= *Scirpus validus* var. *laeviglumis* and PA= *Phragmites australis*. The same below.

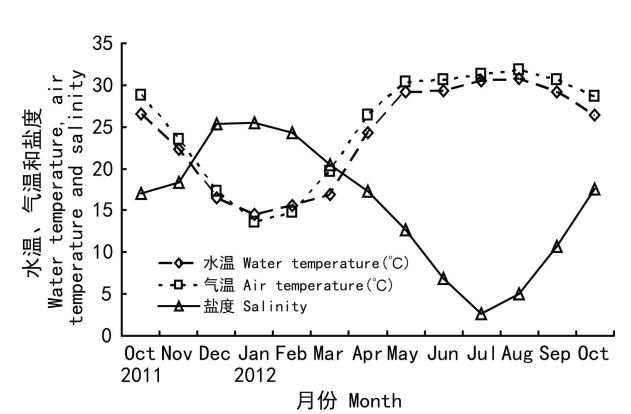


图 2 2011 年 10 月至 2012 年 10 月竹山实验基地的水温、气温和盐度月均变化

Fig. 2 Monthly average of air temperature, water temperature and seawater salinity in Zhushan field basis from Oct. 2011 to Oct. 2012

每季度一次开展人工种植盐沼草和白骨壤苗木的外部形态调查。盐沼草生长状况调查采用样带法,以初植草块位置为中心,连续做 20 个 1 m×1 m 的样方,调查盐沼草的密度和高度。白骨壤苗木观测指标包括存活率、株高、叶数、枝数和枝下高。

2012 年 10 月调查盐沼草和白骨壤上污损动物群落,包括附着高度、种类、密度和生物量。对植株的茎分层取样,20 cm 为一层,按种计数和称重。

1.4 数据处理

各污损动物种群的相对重要值 $V(\%)$ 计算公式为 $V(\%) = 100 \times n_i \times w_i \div \sum(n_i \times w_i)$

式中, n_i 为第 i 种密度, w_i 为第 i 种生物量。 $V(\%) \geq 1\%$ 的种为潮间带底栖动物优势种群。

不同处理组数据的差异均用 SPSS 软件计算和分析。数据经开平方根转换,采用单因素方差分析进行显著性检验;先进行方差齐性检测,根据检测结果再选择不同方法进行差异显著性检验, $P < 0.05$ 认为存在显著性差异, $P < 0.01$ 认为存在极显著差异。采用“标记字母法”显示显著性检验结果。数据组间相关性分析计算 Pearson 积矩法的相关系数 r 。

2 结果与分析

2.1 四种盐沼草的密度和高度变化

2011 年 10 月和 2012 年 10 月的两次观测结果见表 1,四种盐沼草的密度和高度均发生较大变化。从表 1 看出,沟叶结缕草移植草块萌发很快,移植 2 个月后向海前缘区和混种区的草块密度分别达 14.8 和 15.2 ind $\cdot$ m⁻²,1 a 后达 59.3 和 69.6 ind $\cdot$ m⁻²,密度为四种移植盐沼草中最高。沟叶结缕草的匍匐茎

的长度平均达 93.8 cm,最长达 251.0 cm,但从节上分蘖的直立茎高度约为 30 cm,草丛低矮且浓密。

荳荳移植草块的初期萌发速度稍低于沟叶结缕草,但向海前缘区和混种区草丛后期的密度分别增长 6.41 倍和 7.03 倍,是四种盐沼草中最高的;三棱形地上茎每面宽为 1.0~1.5 cm,形成较大的表面积,机械支撑力较强,移植 1 a 后的荳荳草丛茂密挺拔。

芦苇和南水葱的初期萌发速度慢,后期扩展有限,密度很低且地上部分纤细柔弱,与其在种源地的植株长势相差甚远。显然这两个种很不适应这种潮汐生境,可能与滩涂高程较低、潮汐浸淹较长有关。

2.2 不同处理区生境因子变化差异

从表 2 可以看出,各处理区的沉积速率差异较大。南水葱和芦苇不能制止新填林地沉积物的流失,其沉积速率均为负值。向海前缘区的白骨壤区的沉积速率也为负值,但位于层层处理区后的向陆后缘区有少量淤积。沟叶结缕草和荳荳均能有效促淤,前者稍强于后者,最大沉积速率分别为 2.5 和 2.3mm $\cdot$ a⁻¹。

表 1 不同处理区四种盐沼草的密度和高度(均值±SD)试验前后变化
Table 1 Densities and heights(mean±SD)of four saltmarsh species on Oct. 2011 and Oct. 2012

盐沼种类 Saltmarsh	处理区 Treatment area	Oct. 2011		Oct. 2012		密度增长 倍数	高度增长 倍数
		密度 Density (ind $\cdot$ m ⁻²)	高度 Height (cm)	密度 Density (ind $\cdot$ m ⁻²)	高度 Height (cm)	Density growth (times)	Height growth (times)
荳荳 CM	向海前缘区 Seaward	6.1±0.4 a	35.0±4.1 a	51.3±6.3 a	91.4±8.2 a	7.41	1.61
	混种区 Mix-culture	6.4±0.5 a	33.4±3.5 a	57.8±5.8 b	98.1±8.5 b	8.03	1.94
沟叶结缕草 ZM	向海前缘区 Seaward	14.8±1.0 a	17.1±2.0 a	59.3±6.1 a	91.4±8.8 a	3.01	4.35
	混种区 Mix-culture	15.2±1.2 a	16.9±1.8 a	67.6±6.2 b	96.2±9.1 b	3.45	4.69
芦苇 PA	向海前缘区 Seaward	4.2±0.2 a	8.9±0.5 a	7.5±0.6 a	103.9±9.4 a	0.79	10.67
	混种区 Mix-culture	3.7±0.2 b	9.8±0.7 b	8.4±0.8 b	106.4±9.4 a	1.27	9.86
南水葱 SV	向海前缘区 Seaward	3.8±0.2 a	41.6±3.1 a	12.3±1.0 a	85.3±7.2 a	2.24	1.05
	混种区 Mix-culture	4.1±0.2 a	47.3±3.6 b	14.7±1.2 b	81.6±7.8 a	2.59	0.73

注:同一盐沼草的不同处理区数据标记相同字母表示差异不显著($P>0.05$),反之差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: For the same species in two treatment areas, the data marked with the same letters have not significant difference($P>0.05$), otherwise have($P<0.05$). The same below.

沟叶结缕草的阻流效果最显著,在向海前缘区和混种区分别降低了 58.8% 和 51.0%(表 1);荳荳次之,分别降低了 54.9% 和 45.1%。白骨壤单种区及其与南水葱、芦苇的混种区均阻流能力很低。

向海前缘区,白骨壤、南水葱和芦苇的有机质增长率均为负值,荳荳和沟叶结缕草则显著促进沉积物中有机物质积累;这一现象同样出现在混种区。向陆后缘区白骨壤林地的有机质增量很微小。沉积速率、流速降低率和有机质增长率之间关系密切,相关系数 r 分别为沉积速率与流速降低率,0.991;沉积速率与有机质增长率,0.956;流速降低率与有机

质增长率,0.924。均达到极显著水平($P<0.001$)。

2.3 四种盐沼草受污损程度比较

从表 3 看出,混种区污损动物的种类丰度高于前缘区,优势种较多,相对较分散。以生物量比较,在两个处理区四种盐沼草受污损程度均为荳荳<沟叶结缕草<南水葱<芦苇,以密度比较则不然。荳荳上污损动物群落结构与其他 3 种盐沼差异较大,荳荳以白条地藤壶为主要优势种。该种个体远小于其他优势种,密度优势度很高,但生物量优势度很低。

混种区荳荳上的污损密度和生物量分别仅有向

表 2 各处理区沉积速率、有机质和流速比较

Table 2 Deposition rate,increment of organic material in sediment and tidewater velocity decrement in different treatment areas

处理区 Treatment area		沉积速率 Deposition rate (mm · a ⁻¹)	流速降低率 Tidewater velocity decrement (%)	有机质增长率 Increment of organic material (%)
向海前缘区 Seaward	白骨壤 AM	-0.5	2.0	-37.3
	荳苳 CM	2.3	54.9	31.1
	南水葱 SV	-0.4	2.0	-22.9
	芦苇 PA	-0.3	0.0	-21.2
	沟叶结缕草 ZM	2.5	58.8	38.2
混种区 Mix-culture	白骨壤+荳苳 AM+CM	2.1	45.1	27.8
	白骨壤+南水葱 AM+SV	-0.2	2.0	-4.5
	白骨壤+芦苇 AM+PA	-0.3	2.0	-0.1
	白骨壤+沟叶结缕草 AM+ZM	2.4	51.0	32.8
向陆后缘区 Landward	白骨壤 AM	0.1	2.0	0.2

表 3 各处理区不同盐沼草受污损程度比较

Table 3 Numerical characteristics of fouling fauna on the fouled saltmarsh

处理区 Treatment area	污损对象 Fouled saltmarsh species	污损动物 Fouling fauna			
		种数 Species No.	密度 Density (ind · m ⁻²)	生物量 Biomass (g · m ⁻²)	优势种及其相对重要值 Dominant species and their relative importance values (%)
向海前缘区 Seaward	荳苳 CM	3	20 759	156.71	白条地藤壶 EW 99.2
	沟叶结缕草 ZM	3	11 745	198.53	潮间藤壶 BL 99.9
	芦苇 PA	3	13 495	356.51	潮间藤壶 BL 96.07;团聚牡蛎 3.43
	南水葱 SV	3	15 255	235.36	潮间藤壶 BL 99.9
混种区 Mix-culture	荳苳 CM	5	786	36.06	白条地藤壶 EW54.45;黑口滨螺 LM 39.19;粗糙滨螺 1.14
	沟叶结缕草 ZM	5	3 097	80.89	潮间藤壶 BL 94.3;红树拟蟹守螺 3.79;黑口滨螺 LM 1.89
	芦苇 PA	4	14 458	347.50	潮间藤壶 BL 96.11;团聚牡蛎 OG 2.85;白条地藤壶 EW 1.05
	南水葱 SV	3	14 307	245.27	潮间藤壶 BL99.9

注：在优势种栏中,BL=潮间藤壶,CR=红树拟蟹守螺,EW=白条地藤壶,LM=黑口滨螺,LS=粗糙滨螺,OG=团聚牡蛎。下同。
Note: In the column of dominant species,BL=*Balanus littoralis*,CR=*Cerithidea rhizophorarum*,EW=*Euraphia withersi*,LM=*Littorina melanostoma*,LS=*L. scabra*,OG=*Ostrea glomerata*. The same below.

海前缘区的 3.8%和 23.0%，表明郁闭起来的荳苳种群可显著降低污损程度；沟叶结缕草受污损程度稍高于荳苳，其混种区的污损密度和生物量仅是向海前缘的 26.4%和 40.7%，降污效果同样也很明显。两类处理区中的芦苇和南水葱的受污损程度差异不显著($P>0.05$)，这与两区的草丛密度均较低有关。

2.4 各处理区白骨壤受污损程度比较

不同处理区白骨壤植株受污损状况差异较大(表 4)。向海前缘区的白骨壤大、小苗的受污损程度均高于所有处理区同规格的苗木，密度分别为 15 128和 14 310 ind · m⁻²，生物量为 2 046.79 和 1 726.84 g · m⁻²。白骨壤+芦苇混种区，密度分别为 13 764 和 12 313 ind · m⁻²，生物量为1 714.84和 1 244.96 g · m⁻²。与向海前缘区苗木相比，白骨壤+荳苳混种区大、小苗的污损动物密度分别为向海前缘区的 6.9%和 6.1%，生物量为其的 7.4%和 6.4%；白骨壤+沟叶结缕草混种区大、小苗的污损

动物密度分别为 47.2%和 8.6%，生物量为其的 37.7%和 7.4%。白骨壤+荳苳混种对两种规格苗木均有效防污，白骨壤+沟叶结缕草混种对小苗效果更好。

总体上白骨壤大苗受污损密度显著高于小苗，大苗往往具有更坚固的附着基质，在空间创造更多的垂直方向位置，细化了生态位类型，种类丰度上升，多占据上层空间的白条地藤壶较有一定的优势度。郁闭起来的荳苳区在群落结构不同于其他处理区，以黑口滨螺和粗糙滨螺这些能垂直移动的腹足类成为优势种，藤壶类不显优势。

2.5 各处理区移植白骨壤苗木的生长变化

2011 年 10 月和 2012 年 10 月的两次观测结果见表 5。由于经人为选择，处理区间的苗木高度在实验开始时差异不显著或差异有限，1 a 后各处理区两种苗木的高度均有显著增加，小苗高度增长幅度大，在 217.0%~305.9%之间，白骨壤+荳苳混种区

表 4 不同处理区的白骨壤苗木受污损程度比较

Table 4 Numerical characteristics of the fouling fauna community on the fouled *A. marina* seedlings

处理区 Treatment area	苗木 Seedling	污损动物 Fouling fauna			
		种数 Species No.	密度 Density (ind · m ⁻²)	生物量 Biomass (g · m ⁻²)	优势种及其相对重要值 Dominant species and their relative importance values (%)
向海前缘区 Seaward	大苗 High	5	15 128	2 046.79	潮间藤壶 BL 98.86
	小苗 Low	5	14 310	1 726.84	潮间藤壶 BL 99.23
混种区 AM+CM	大苗 High	8	1 041	151.86	黑口滨螺 LM 79.16;粗糙滨螺 LS 13.33;白条地藤壶 EW 4.6
	小苗 Low	6	869	111.31	黑口滨螺 LM 81.65;粗糙滨螺 LS 11.64;白条地藤壶 EW 4.3
混种区 AM+ZM	大苗 High	7	7 135	771.66	潮间藤壶 BL 82.55;白条地藤壶 EW 10.14;黑口滨螺 LM 2.10
	小苗 Low	6	1 232	127.62	潮间藤壶 BL 98.6
混种区 AM+SV	大苗 High	4	11 549	1 403.57	潮间藤壶 BL 91.31;白条地藤壶 EW 6.43
	小苗 Low	4	10 342	1 077.17	潮间藤壶 BL 98.84
混种区 AM+PA	大苗 High	5	13 764	1 714.84	潮间藤壶 BL 85.92;白条地藤壶 EW 7.36;团聚牡蛎 OG 6.25
	小苗 Low	5	12 313	1 244.96	潮间藤壶 BL 97.92
向陆后缘区 Landward	大苗 High	5	9 612	1 492.69	潮间藤壶 BL 84.36;白条地藤壶 EW 8.67
	小苗 Low	4	8 497	1 073.45	潮间藤壶 BL 98.95

表 5 各处理区白骨壤苗木生长变化

Table 5 Growth indexes of *A. marina* seedlings in different treatment areas

生长指标 Growth index	处理区 Treatment area	A Oct 2011		B Oct 2012		变化率 Change rate (B/A-1)(%)	
		小苗 Low	大苗 High	小苗 Low	大苗 High	小苗 Low	大苗 High
高度 Height (cm)	向海前缘区 Seaward	10.6 a	67.6 a	33.6 c	77.8 b	217.0	15.1
	混种区 AM+CM	10.2 b	68.9 a	41.4 a	87.5 a	305.9	27.0
	混种区 AM+ZM	10.8 a	66.8 a	40.6 a	83.7 a	275.9	25.3
	混种区 AM+SV	10.4 ab	67.5 a	35.3 b	76.2 bc	239.4	12.9
	混种区 AM+PA	10.1 b	66.4 a	36.1 b	75.8 bc	257.4	14.2
叶数 Leaf (ind)	向陆后缘区 Landward	10.6 a	68.2 a	35.8 b	79.5 ab	237.7	16.6
	向海前缘区 Seaward	2.0 a	23.2 bc	6.4 d	8.7 ^e	220.0	-62.5
	混种区 AM+CM	2.0 a	25.0 a	12.3 a	36.2 a	515.0	44.8
	混种区 AM+ZM	2.0 a	24.6 a	10.7 b	31.2 b	435.0	26.8
	混种区 AM+SV	2.2 a	21.7 d	6.8 c	12.3 d	209.1	-43.3
枝下高 Branch Height (cm)	混种区 AM+PA	2.0 a	24.2 ab	7.2 c	13.6 c	260.0	-43.8
	向陆后缘区 Landward	2.0 a	23.5 b	7.2 c	12.9 cd	260.0	-45.1
	向海前缘区 Seaward	—	43.4 a	—	65.5 a	—	50.9%
	混种区 AM+CM	—	45.5 a	—	46.7 b	—	2.6%
	混种区 AM+ZM	—	42.2 ab	—	43.8 b	—	3.8%
枝数 Branch (ind)	混种区 AM+SV	—	39.6 b	—	67.3 a	—	69.9%
	混种区 AM+PA	—	40.7 b	—	66.1 a	—	62.4%
	向陆后缘区 Landward	—	41.3 b	—	69.2 a	—	67.6%
	向海前缘区 Seaward	—	4.2 ab	—	1.8 d	—	-57.1
	混种区 AM+CM	—	4.2 ab	1.3 a	7.1 a	—	69.0
	混种区 AM+ZM	—	3.8 c	1.2 a	6.4 a	—	68.4
	混种区 AM+SV	—	4.5 a	0.3 c	2.3 c	—	-48.9
	混种区 AM+PA	—	4.1 b	0.3 c	2.2 c	—	-46.3
	向陆后缘区 Landward	—	4.5 a	0.4 b	2.6 b	—	-42.2

小苗增长最大,向海前缘区的最少。大苗的高度增长相对较少,增幅 12.9%~27.0%,白骨壤+荳苳混种区大苗增长最大,白骨壤+南水葱混种区增长最少。白骨壤+沟叶结缕草混种区的两种苗木高度增长仅次于白骨壤+荳苳混种区。

不同处理区间苗木的叶数差异最大,1 a 后各处

理区的小苗叶数均有增长,但白骨壤+荳苳、白骨壤+沟叶结缕草混种区小苗叶显著高于其他处理区。

除白骨壤+荳苳、白骨壤+沟叶结缕草混种区外,其余处理区大苗的叶均大幅度减少。枝数和枝下高的变化相反,枝数减少导致枝下高增大,除白骨壤+荳苳、白骨壤+沟叶结缕草混种区外,其余处理

区大苗的枝数均锐减、枝下高显著增大。

2.6 各处理区移植白骨壤苗木的存活状况比较

由图 3 看出, 荳荳混种区的 2 种规格白骨壤苗木的存活率均高于其他处理区, 小苗和大苗分别为 88% 和 92%; 沟叶结缕草混种区次之; 向海前缘区的最低, 仅 18%。芦苇混种区、南水葱混种区和向陆后缘区的存活率较接近, 为 20%~24%。经过 1 a 生长的荳荳群落茂密, 高草遮阴和枯草缠绕导致少部分苗木死亡, 尤其是对低矮的小苗影响较大。沟叶结缕草生长茂密, 且主茎匍匐延伸, 对小苗的影响较大, 但毕竟大幅度减少了污损动物附着, 存活率也显著高于其他混种区。

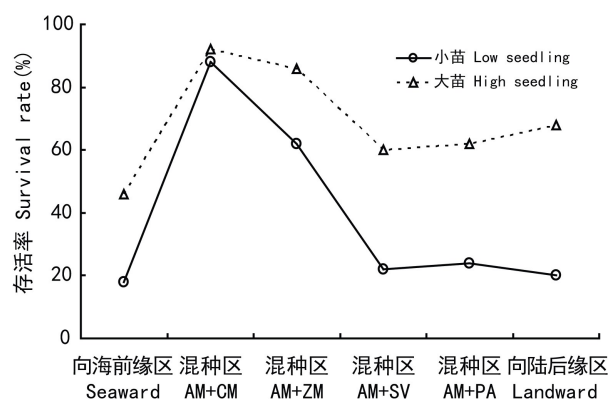


图 3 各处理区白骨壤苗木存活率

Fig. 3 Survival rates of *A. marina* trees in different treatment areas

3 结论与讨论

3.1 红树林与污损动物的生态特点及其对防污的启示

污损动物趋于选择水流通畅、浸淹时间长的生境(周时强等, 1993)。对广西大冠沙白骨壤林污损动物研究表明, 污损危害程度由海向陆递减, 原因是红树林机械阻水逐次降低了潮水流速, 同时由海向陆滩涂抬高。何斌源等(1995)认为结合滩涂高程和滩涂位置分析, 能阐明内低外高的广西新村滩涂上人工幼林污损程度的差异。广西防城港东湾的红树林污损动物附着高度与树高的比值($h:H$), 主干、枝条和叶片上附着的污损动物总量, 均随林带离岸距离增大而增(庆宁等, 2004)。厦门海沧滩涂人工秋茄林上的藤壶附着数量、覆盖度与滩涂高程呈负相关性(林秀雁等, 2006)。在九龙江口红树林区, 当林分郁闭度达 0.5 时就基本没有藤壶附着(向平等,

2006), 茂密林分发挥了机械阻水作用。李云等(1998)认为在广东红树林幼林的密度与藤壶附着无相关性。

本文在盐沼和红树采集到 19 种污损动物, 包括腔肠动物门的纵条肌海葵(*Haliplanella luciae*), 软体动物门双壳纲的黑莽麦蛤(*Xenostrobus atratus*)、难解不等蛤(*Enigmonia aenigmatica*)、团聚牡蛎(*Ostrea glomerata*)和纹斑梭蛤(*Trapezium Liratum*), 软体动物门腹足纲的紫游螺(*Nerita violacea*)、奥莱彩螺(*Clithon oualaniensis*)、黑口滨螺(*Littorina melanostoma*)、粗糙滨螺(*L. scabra*)、斑肋滨螺(*L. ardouiniana*)、纵带滩栖螺(*Batillaria zonalis*)、珠带拟蟹守螺(*Cerithidea cingulata*)、彩拟蟹守螺(*C. ornata*)、红树拟蟹守螺(*C. rhizophorarum*)、尖锥拟蟹守螺(*C. largillierti*)和石磺(*Onchidium verruculatus*), 节肢动物门的潮间藤壶(*Balanus littoralis*)、白条地藤壶(*Euraphia withersi*)、双齿相手蟹(*Sesarma bidens*)和褶痕相手蟹(*S. plicata*)。盐沼受污损程度远远低于红树, 这可能与盐沼草柔弱且易受风或浪影响摆动过甚, 不利于污损动物附着。群落稀疏和位于靠海前缘的盐沼或红树上都以潮间藤壶占绝对优势, 但荳荳群落郁闭后不仅污损动物群落的优势种群向小型化转变, 而且附着数量下降; 同时带动与其混种的白骨壤上污损动物的种类组成和数量结构变化, 从而影响苗木生长和存活状况。植物密度因素导致污损动物群落的种类组成和数量变化, 与庆宁等(2004)等的研究结果一致。

与污损动物正相反, 红树林要求较高的滩涂高程和较低的潮水流速。隐蔽的海岸线(如静浪的河口、海湾)是 Walsh(1974)归纳的红树林生长的合适条件之一。林鹏(1997)指出红树林一般分布于隐蔽的海岸, 经常出现在弧形曲折的港湾、台地溺谷、沙堤泻湖和河口三角洲平原等多样的海岸地貌类型。张乔民等(2001)认为红树林只能占据平均海平面(或稍上)与同归潮平均高高潮位之间, 大致为潮汐浸淹频率 47.5% 和 2.9%; 海岸波浪能量(潮水流速)控制红树林由港湾向开阔海岸的沿岸分布, 波能指数 $W < 7.0 \times 10^3$ 为适宜红树林生长的低波能海岸。

增加滩涂高程和降低潮水流速, 均可减轻人工红树幼林的污损危害程度, 两者折中也许可以获取效益最大化, 这是生物防治的启动引擎。以往选择红树宜林地的基本原则是趋利避害, 以最小的成本

代价换取最大的造林面积;但目前生态修复工程对于区域目标定向极强,造林地唯一性突出,强调高成本将造林条件由不宜改造为适宜,短时间达到修复目的。但即使在造林经费较为充裕的情况下,仍然要考虑到成本因素,要将适度的工程垫高滩涂高程与其他措施有机地结合起来。

3.2 红树林与盐沼草的协同消浪和防污基础

盐沼草与红树所处的生态位重叠或相近,是应用两者协同防污的物质基础。许多盐沼草与红树混杂或相邻生长,除本文使用的四种外,广西常见伴生红树林的盐沼草还有短叶荳蔻(*Cyperus malaccensis* var. *brevifolius*)、香附子(*C. rotundus*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)、盐地鼠尾黍(*Sporobolus virginicus*)、双穗雀稗(*Paspalum distichum*)、硬骨草(*Holosteum umbellatum*)、灯芯草(*Juncus effusus*)、互花米草(*Spartina alterniflora*)、伪针茅(*Pseudoraphis brunoniana*)、鬣刺(*Spinifex littoreu*)、低矮藁草(*Carex humilis*)、结状飘拂草(*Fimbristylis rigidula*)、两歧飘拂草(*F. dichoroma*)、海滨莎(*Kernirea maritima*)、葡萄苦荚菜(*Ixeris repen*)、南方碱蓬(*Suaeda australis*)、灰绿碱蓬(*S. glauca*)、葡茎滨藜(*Atriplex repens*)、露兜勒(*Pandanus tectorius*)、厚藤(*Ipomoea pes-capra*)等。互花米草是外来入侵种,已形成与红树林争夺潮间带滩涂之势。其他种类均为我国南方沿海的原生盐沼草,适应当地滨海环境,同时受到各种生境条件的有效制约而不至于泛滥。

盐沼草与红树都能有效消浪,是应用两者协同防污的功能基础。对比植物群落与裸滩的消波、降能作用可看出两者的显著差异。Quartel *et al.* (2007)的研究表明,红树林对波高的消减率是泥滩的5~7.5倍。陈玉军等(2011)发现波浪在经过裸滩50 m后平均波高仅减低5.8%,同样宽度的红树林则能使平均波高降低28.8%~46.1%。盐沼草虽比红树柔软,但其茂密草丛也能显著消波。Möller *et al.* (1999)研究表明波浪经过197 m的砂质光滩,有效波高仅减少15.29%;但波浪经过180 m、高度20~30 cm的盐沼,有效波高降低61.0%。史本伟等(2010)发现盐沼导致单位距离波高的损失率比光滩的高14~29倍,使单位距离波能密度的损失率比光滩的高40~55倍。

盐沼草与红树均能促淤,抬高滩涂又有助于降速,显著地捕沙促淤,但这个自然过程稍显缓慢。

Wang *et al.* (1993)发现盐沼内的潮流不足以使已沉积的泥沙再次悬浮。张乔民等(1996)研究表明红海榄密林区沉积速率0.5~12.5 mm·a⁻¹,平均4.1 mm·a⁻¹,邻近的疏林和裸滩却被侵蚀;在广东廉江市高桥镇凤地村岸段采取²¹⁰Pb定年表明红树林平均沉积速率为6.2 mm。广西红树林研究中心采用固定标杆定位法,观测到广西丹兜湾的红树林—互花米草群落的沉积速率为2.3 mm·a⁻¹(范航清等, 2005)。广西茅尾海的多年荳蔻草丛的密度每1 m²为212~307株,沉积速率为1.81 cm·a⁻¹(潘良浩等, 2011)。本文在广西北仑河口人工种植14个月,沟叶结缕草和荳蔻的密度每1 m²分别为67.6和57.8株,最大沉积速率分别为2.5和2.3 cm·a⁻¹。

综上可看出,无论是生态位、消浪、促淤功能,盐沼与红树植物存在协同的基础,在人工主导的生态修复中更可二者协调发展。红树植物在较贴近滩面的低层空间以茎为主,相对而言阻水面积有限,这时低矮的盐沼草缓流能力更强;而在较高空间,红树植物的枝叶发挥较大作用。

3.3 盐沼草-红树林协同生态修复体系的架构探讨

由于我国红树林后缘海堤化程度在80%以上(广西为85%),海平面上升将使红树林无路可退(范航清等, 1997)。红树林和盐沼等滨海湿地生态系统的修复,关系到华南海岸带的生态质量和生态安全,必须创新发展适应性的生态修复方法和技术。

红树林与盐沼草具有相似的生态功能,尤其是缓流促淤、保护堤岸方面。我国南方沿海的原生盐沼草资源丰富,草种选择空间广阔。有目的地选育原生盐沼草,探索盐沼草与红树混种技术,形成兼具消浪降能和减轻污损功能的“盐沼草-红树协同生态修复体系”,经过短期抚育(2~3 a)就能体系自维持,无疑具有较高的实用价值。

这一协同修复体系应包括工程形成红树林宜林地技术、潮汐环境下盐沼草种植技术和天然红树植物大苗移植造林技术,目前广西红树林研究中心已申请相关专利。其中,滩涂高程形成红树林宜林地技术(专利申请号:201210098946.7)重点是确定目标高程、围堰建设、填土和平整、人工潮沟建造、临时固化措施等关键步骤;潮汐环境下盐沼草种植技术(专利申请号:201210098716.0)关键环节包括种植滩涂选择、种植季节和时间、种苗和种源、带土草块规格、生长素使用、基肥和追肥及管护措施等;天然红树植物大苗移植造林技术(专利申请号:201210098942.9)侧重于天

然苗木标准、苗木土球规格、运输处理措施、移植造林季节和时间、促根生长素使用、挖穴定植和管护措施等技术要点。

致谢 感谢钟云旭、曹显彬、唐伟宝等帮助试验场地维护和野外采样工作。

参考文献:

- Cao WH(曹文浩), Yan T(严涛), Liu YH(刘永宏), *et al.* 2012. The antifouling activities of Callyspongia sponge extracts(美丽海绵提取物防污损作用)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), **32**(13):4 285—4 290
- Chen YJ(陈玉军), Liao BW(廖宝文), Huang B(黄勃), *et al.* 2011. Progresses in the study of wave attenuation effect of mangroves(红树林消波效应研究进展)[J]. *J Trop Org*(热带生物学报), **2**(4):378—382
- Fan HQ(范航清), Li GZ(黎广钊). 1997. Effect of sea dike on the quantity, community characteristics and restoration of mangrove forest along Guangxi coast(海堤对广西沿海红树林的数量、群落特征和恢复的影响)[J]. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **8**(3):240—244
- Fan HQ(范航清), Chen GH(陈光华), He BY(何斌源), *et al.* 2005. Shankou Mangrove Wetland and Management(山口红树林滨海湿地与管理)[M]. Beijing(北京): China Ocean Press(海洋出版社)
- He BY(何斌源), Mo ZC(莫竹承). 1995. Study on the growth and damage factors during the afforestation with artificial seedlings of *Rhizophora stylosa* in a bare tidal flat in Guangxi(红海榄人工苗光滩造林的生长及胁迫因子研究)[J]. *J Guangxi Acad Sci*(广西科学院学报), **11**(3/4):37—42
- He BY, Lai TH, Fan HQ, *et al.* 2007. Comparison of flooding-tolerance in four mangrove species in a diurnal tidal zone in the Beibu Gulf[J]. *Estuar Coast Shelf Sci*, **74**:254—262
- He BY(何斌源), Lai TH(赖廷和), Wang M(王瑁), *et al.* 2008. Prevention of barnacles on planted *Rhizophora stylosa* Griff seedlings with pesticide malathion and related eco-physiological effects(农药对红海榄幼苗上藤壶的防治及其生理生态效应)[J]. *J Ecol*(生态学杂志), **27**(8):1 351—1 356
- Li Y(李云), Zheng DZ(郑德璋), Zheng SF(郑松发), *et al.* 1998. Barnacle harm to artificial mangroves and their chemical control(人工红树林藤壶为害及其防治的研究)[J]. *For Res*(林业科学研究), **11**(4):370—376
- Lin P(林鹏). 1997. Chinese Mangrove Ecosystem(中国红树林生态系)[M]. Beijing(北京): Science Press(科学出版社)
- Lin XY(林秀雁), Lu CY(卢昌义). 2006. Preliminary study on the influence of elevation on attachment of barnacles to the planted *Kandelia candel* seedlings(滩涂高程对藤壶附着秋茄幼林影响的初步研究)[J]. *J Xiamen Univ:Nat Sci Edit*(厦门大学学报·自然科学版), **45**(4):575—579
- Lin XY(林秀雁), Lu CY(卢昌义). 2008. Toxicity comparison of extracts from six terrestrial plants to larvae of *Balanus albicostatus*(6种陆生植物提取物对白脊藤壶无节幼体的毒杀活性比较)[J]. *J Plant Res Environ*(植物资源与环境学报), **17**(2):22—27
- Möller I, Spencer T, French JR, *et al.* 1999. Wave transformation over salt marshes: a field and numerical modeling study from North Norfolk, England[J]. *Estuar Coast Shelf Sci*, **49**:411—426
- Pan LH(潘良浩). 2011. Study on biomass of *Cyperus malaccensis* Lam. at Maowehai in Guangxi(广西茅尾海荳荳生物量研究)[J]. *J Anhui Agric Sci*(安徽农业科学), **39**(22):13 481—13 483
- Qin N(庆宁), Lin YG(林岳光). 2004. Characteristics of quantitative distribution and species composition of fouling fauna in Dongwan mangrove stands of Fangchenggang, Guangxi(广西防城港东湾红树林污损动物的种类组成与数量分布特征)[J]. *J Trop Oceanog*(热带海洋学报), **23**(1):64—68
- Quartel S, Kroom A, Austinus PGEF, *et al.* 2007. Wave attenuation in coastal mangroves in the Red River Delta, Vietnam[J]. *J Asian Earth Sci*, **29**(4):576—584
- Shi H(史航), Wang LM(王鲁民). 2003. Research progress of marine nonpollution antifouling technology(无公害海洋防污技术的研究进展)[J]. *Mar Fish*(海洋渔业), (3):116—119
- Shi WB(史本伟), Yang SL(杨世伦), Luo XX(罗向欣), *et al.* 2010. A wave attenuation over the transitional zone of mudflat and salt marsh: a case study in the eastern Chongming on the Changjiang Delta(淤泥质光滩-盐沼过渡带波浪衰减的观测研究——以长江口崇明东滩为例)[J]. *Acta Oceanol Sin*(海洋学报), **32**(2):174—178
- Singh IP, Takahashi K, Etoh H. 1996. Potent attachment-inhibiting and-promoting substances for the blue mussel, *Mytilus edulis galloprovincialis*, from two species of *Eucalyptus*[J]. *Biosci Biotechnol Biochem*, **60**:1 522—1 523
- Walsh GE. 1974. Mangrove: A Review, Ecology of Halophytes [M]. New York and London: Academic Press
- Wang FC, Lu TS, Sikors WB. 1993. Intertidal marsh suspended sediment transport processes, Terrebonne Bay, Louisiana, U S A [J]. *J Coast Res*, **9**(1):209—220
- Wang WQ(王文卿), Wang M(王瑁). 2007. China Mangrove(中国红树林)[M]. Beijing(北京): Science Press(科学出版社)
- Yan T(严涛), Liu SS(刘姗姗), Cao WH(曹文浩). 2008. Marine biofouling on aquaculture facilities in the coastal waters of China and prevention methods(中国沿海水产设施污损生物特点及防除途径)[J]. *Mar Sci Bull*(海洋通报), **27**(1):102—110
- Zhang QM(张乔民), Wen SX(温孝胜), Song CJ(宋朝景), *et al.* 1996. The measurement and study on sedimentation rates in mangrove tidal flats(红树林潮滩沉积速率测量与研究)[J]. *Trop Oceanol*(热带海洋), **15**(4):57—62
- Zhang QM(张乔民), Su SZ(隋淑珍), Zhang YC(张叶春), *et al.* 2001. Marine environmental indexes related to mangrove growth(红树林宜林海洋环境指标研究)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), **21**(9):1 427—1 437
- Zhou SQ(周时强), Li FX(李复雪), Hong RF(洪荣发). 1993. Ecological studies on mangrove fouling animals in Jiulong river estuary, Fujian(九龙江口红树林上附着动物的生态)[J]. *J Oceanog Taiwan Strait*(台湾海峡), **12**(4):335—341