

# 互花米草在吹填筑挡工程上的试验与应用

曹大正<sup>1</sup>, 王银生<sup>1</sup>, 张冬然<sup>1</sup>, 顾立军<sup>1</sup>, 唐廷贵<sup>2</sup>

(1. 天津市水利科学研究所, 天津 300061; 2. 南开大学生命科学学院, 天津 300071)

**[摘要]** 研究了互花米草 (*Spartina alterniflora* Loisel) 促淤固土、缓流消浪的护坡功能, 确定了互花米草海挡护坡的最佳条件, 构建了大断面土堤型植物护坡吹填筑挡新模式, 改变了传统的护砌型式。可有效防止或减轻潮汐风浪对海挡迎水坡的淘刷和侵蚀, 保护海挡的安全, 工程效益、经济效益和生态效益显著。

**[关键词]** 互花米草; 海挡; 植物护坡; 缓流消浪; 促淤固土

**[中图分类号]** P753; Q948.8 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)07-0014-10

## 1 前言

天津沿海地区受渤海湾自然环境条件影响, 历史上曾多次遭受风暴、强潮的袭击, 因此构筑海挡(海堤), 即为了防御海潮而修建的主要防御性工程设施。海挡的结构多以土堤型为主, 迎潮坡多衬砌砖、石、混凝土等刚性材料作为护坡, 以防浪、固土、保护海挡安全。因该区地基软弱, 地面沉降严重, 原有海挡防浪能力弱。

笔者构建了一种新型海挡结构模式, 即大断面土堤型植物护坡吹填筑挡工程。筑挡土料不用传统陆运素土, 而利用“低位真空预压软土地基加固法”<sup>[1]</sup>, 将海湾泥(淤泥)疏干后, 分层碾压而成。海挡面层土体未施硬覆盖, 而是采用生物工程进行柔性防护。由于筑挡土料均取自海湾淤泥, 土体含盐量高、容重较大、肥力低、渗透性能差, 超过了一般植物的生存极限, 加之潮汐风浪及气象条件等诸多因素的影响, 植物护坡工程难度很大, 尤其是海挡迎水坡潮位波动部位, 没有适宜的植物品种可供选择。20世纪70年代, 仲崇信教授等从美国引入互花米草 (*Spartina alterniflora*), 在浙江、福建沿海种植成功, 种植面积逐年扩大<sup>[2]</sup>。

实践证明, 互花米草不但可以缓流消浪、促淤固土、保护海挡安全, 而且可以绿化海滨, 改善生态环境, 为大断面海挡植物护坡的建设, 提供了重要的植物原材料<sup>[3]</sup>。

## 2 自然环境条件<sup>[4]</sup>

天津海岸带位于渤海湾西海岸, 北纬 38°33′~40°14′, 东经 116°42′~118°03′。海岸线南起歧口, 向北经大港、塘沽、北塘、汉沽至涧河口, 全长 155.23 km, 滩涂面积 512.03 km<sup>2</sup>, 属于粉沙淤泥质海岸。滨带海拔标高约 2 m, 地势低平, 海水经常倒灌。该区属暖温带大陆性气候, 年平均气温 11.7℃。年降水量 588.2 mm, 年蒸发量 1 742.6 mm。受季风影响, 海陆风特征明显, 风向多南东南风。年平均风速 4.2 m/s, 极大风速为 48.7 m/s, 形成强破坏性天气。

海域潮汐为不规则半日潮, 每昼夜涨落潮各两次, 历年月最高潮位多出现在 8 月份, 平均值为 2.92 m; 最低潮位多出现在 4 月份, 年均值为 1.75 m。渤海湾海浪 90% 以上属于风浪型, 涌浪类型出现机会约为 1%, 且常与风浪混合出现, 大浪通常为偏东北方向, 但出现次数较少。沿岸多年

**[收稿日期]** 2005-02-29

**[基金项目]** 天津市委自然科学基金资助项目(993112611); 天津市水利局水利科学研究资助项目(津 20030199)

**[作者简介]** 曹大正(1945-), 男, 天津市人, 天津市水利科学研究所教授级高级工程师

平均波高为 0.4~0.6 m, 最大波高 3.1 m。一般年份 11 月下旬至 12 月初开始结冰, 3 月初海冰消失, 冰期 90~110 天。

海挡所在区段海岸为冲刷型, 冲刷带直抵堤岸, 滩涂高程 2.0 m (大沽), 滩面宽度 3~4 km, 坡降为 1.13‰~1.41‰。涨潮时, 整个滩涂被海水淹没, 退潮时泥滩裸露, 上覆粥状淤泥, 深度 20~40 cm。春秋季节滩面有冲刷淘蚀现象。海水矿化度月平均值为 21.0~37.7 g/L。受海潮影响, 海岸线内侧土壤为滨海盐土, 含盐量一般为 2%~3% (质量百分数, 下同), 最高可达 5%~6% 以上。盐分组成以氯化物为主, 氯离子占阴离子总量 80% 以上。地下水埋深约 1.0 m, 矿化度 25~30 g/L。海岸线周边分布众多的盐池和海水养殖场。滩涂闲置土地多为裸地, 无植被覆盖, 偶见盐地碱蓬 (*Suaeda salsa*)、灰绿碱蓬 (*Suaeda glauca*)、猪毛蒿 (*Artemisia scoparia*)、猪毛菜 (*Salsola collina*)、滨藜 (*Atriplex centralasiatica*)、白刺 (*Nitraria schoberi*) 等盐生植物零星分布。

### 3 天津互花米草工程概况

1997 年至 2000 年, 先后在滨海新区所辖的塘沽、汉沽、八一盐厂等临海一侧, 共修建了大断面互花米草护坡吹填筑挡工程 3.24 km, 工程规模分别为 620 m, 1 800 m, 820 m, 包括塘沽盐厂互花米草护坡组合吹填筑挡工程 (1999 年 12 月)、八一盐厂段互花米草护坡海挡吹填筑挡工程 (1999 年 9 月) 和汉沽盐厂互花米草护坡海挡吹填筑挡工程 (2000 年 10 月) 3 座大型海挡 (见图 1)。海挡坡面从迎水坡脚至堤顶分别种植了互花米草、怪柳 (*Tamarax chinensis*) 和其他草本植物, 海挡背水坡脚种有白蜡树 (*Fraxinus velutina*)、桑树 (*Morus alba*) 等乔木、灌木。为优化海挡设计方案, 深入研究互花米草护堤功能, 于 1998 年和 1999 年分别立项研究, 获天津市科委和天津市水利局科研项目资助, 着重对互花米草护堤功能进行专项试验研究。试验区设在八一盐厂段海挡上。

八一盐厂段互花米草护坡海挡主体工程堤坝体全长 820 m, 设计防潮标准为 50 年一遇 (潮位 4.69 m)。断面尺寸为: 底宽 93 m (高程 2.0 m), 顶宽 3.0 m (高程 7.5 m)。迎水坡根据海湾潮汐风浪特点和植物适应性的要求, 坡比自下而上逐渐变陡。坡脚至 3.5 m 高程处, 坡比为 1:25; 3.5~

6.0 m 高程处坡比 1:10; 6.0~7.5 m 高程处, 堤坝体两侧坡比 1:2.5。在背水坡面 6.0 m 高程处, 设 6.0 m 宽小路一条, 路肩至坡脚坡比为 1:3。迎水坡土壤剖面分析: 筑挡土料为粉质粘土, 粒径小于 0.05 mm 的粉粒和粘粒含量占总土重的 80% 以上。土壤理化性质: 容重 1.50~1.63 g/cm<sup>3</sup>、孔隙率 43.1%~45.3%、液限 34.5%、塑限 20.8%、渗透系数  $2.15 \times 10^{-7}$  cm/s、pH 值 7.82~8.19、含盐量 1.12%~1.19%、氯离子含量占阴离子总量的 78%~80%、有机质 0.88%~1.027%、水解氮 (N) 18.5~26.5 mg/kg、速效磷 (P) 24.1~30.7 mg/kg。

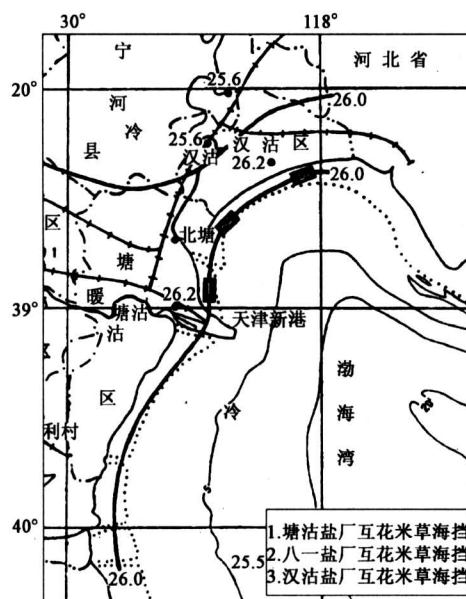


图 1 天津互花米草海挡地理位置图

Fig.1 Situation of Sea wall by *Spartina alterniflora*

互花米草护坡试验场地位于八一盐厂段护坡海挡中, 长 210 m, 面积 15 000 m<sup>2</sup>。分 3 个种植带, 从水到陆, 从低到高布设互花米草→灌木怪柳→草丛→桑树 (*Morus alba*)、白蜡树 (*Fraxinus velutina*) 等乔木树, 组成海挡防潮林带。

第一试验区。建在迎水坡 2.0~3.5 m 高程处, 坡比 1:25。互花米草形成快速向水域发展的先锋植物群落, 其功能目标设定为缓流消浪、固土促淤。

第二试验区。建在迎水坡 3.5~6.0 m 高程处, 坡比 1:10。实施草本、灌木相结合的滨带陆生灌、草植物群落, 即碱茅 (*Puccinellia* sp.)、狗

牙根 (*Cynodon sp.*) 和怪柳 (*Tamarax chinensis*) 混合种植群落, 尚有盐地碱蓬、灰绿碱蓬、猪毛蒿等植物自然生长。其功能目标设定为消浪固土、拦截径流、降低风速。

第三试验区。设在坝体两侧 6.0~7.5 m 高程处, 坡比 1:2.5。建立乔、灌、草三层结构群落, 地被层以草本植物为主, 怪柳、白刺为灌木层, 乔木层多配置白蜡、臭椿等抗盐乔木树种。其功能目标为防冲固土保护坡面土体, 免受风雨侵蚀。

#### 4 试验研究项目<sup>[5]</sup>

互花米草试验区选定在八一盐厂段护坡海挡(坡比 1:25)迎水坡上。宽度自坡脚往上 37.5m, 面积 7 875 m<sup>2</sup> (其中对比试验区 1 100 m<sup>2</sup>)。该部位正值潮间带, 即潮汐在高潮位时能够达到, 低潮位时能够退出的地带, 是海挡迎水坡面潮汐作用时间最长、最易遭受风浪淘刷侵蚀的地方。互花米草作为海挡护坡的植物材料尚无成功经验, 为此笔者对互花米草的种植措施、种植坡比、种植高程、促淤固土、缓流消浪以及抑制互花米草繁殖过快的方法进行了研究。

##### 4.1 互花米草种植措施及其存活率

本项试验的目的在于探索种植方法, 提高种植互花米草幼苗的存活率。采用塑膜和土工布作为防护措施覆被土表, 然后在其上开口挖坑植苗, 与直接栽插者作对照研究。

有防护措施种植法: 分为土工布 (200 g/m<sup>2</sup>) 和聚乙烯塑料薄膜 (厚 0.1 mm) 两个小区, 面积为 20 m×9 m, 株行距 50 cm×50 cm。分别覆被于土表, 在草苗栽插部位, 剪口 15 cm×15 cm, 并挖坑将草苗栽插其中。

无防护措施种植法: 以不同种植密度设 3 小区, 面积均为 30 m×10 m, 种植株行距分别为 40 cm×40 cm, 60 cm×60 cm, 80 cm×80 cm。坑穴大小设为 20 cm<sup>3</sup>, 每穴栽植一丛, 每丛草苗 8~10 株。每 15 d 左右观测一次, 记录存活丛数 (存活率)、死亡状况和原因与具防护者作比较。

观测结果表明, 两种种植法在初期存活率无明显差异。但有防护的存活率相对较高 (约 20%~30%)。随着风浪作用, 锚固钉脱落, 防护物错位或撕裂现象逐渐加重, 部分草苗被防护物覆盖, 抑制了草苗的正常生长, 防护物在风浪作用下频繁错动, 加速了草苗的死亡。无防护措施的死亡率虽前

期较高, 但随着生长期的增长, 根部逐渐出现萌芽现象, 存活率呈逐渐上升趋势。前期死亡率高的主要原因是由于干旱缺水或茎秆在风浪作用下折断所致, 但栽种高程越低, 存活率相对越高。草苗死亡的最高月份在 5 月中旬至 6 月中旬, 而后至 6 月下旬草苗死亡率明显降低。无防护措施不同种植密度显示, 虽然密度越大成活率越高, 但不便于施工, 如 40 cm×40 cm 密度方案, 挖穴时土方相互占压, 草苗用量大, 单位面积成本相对较高, 而 80 cm×80 cm 密度方案植被覆盖率相对较低, 坡面裸露面积较大, 易被冲蚀, 郁闭较慢。以上说明, 海挡实施互花米草护坡工程, 从种植成本、植物成活率、分蘖、郁闭速度等方面综合考虑, 采用无防护措施方案较好, 株行距 60 cm×60 cm 为宜。

##### 4.2 互花米草在不同坡比的存活率

互花米草在不同坡比条件下存活率的对比试验观测, 分为 3 个试验区:

I 试验区设在海挡坡比 1:10 迎水坡上 (高程 2.2~3.2 m), 面积 30 m×10 m, 株行距为 60 cm×60 cm。

II 试验区设在海挡坡比 1:25 迎水坡上 (高程 2.0~3.5 m), 面积 20 m×37.5 m, 株行距为 60 cm×60 cm。

III 试验区设在海挡坡比 1:45 迎水坡上 (高程 2.0~3.0 m), 面积 12 m×45 m, 株行距为 60 cm×60 cm。

观测点坡比是海挡迎水坡的实际坡比。互花米草在潮间带的存活率与迎水坡比具有一定的相关性, 在相同的种植高程条件下, 海挡迎水坡越陡则成活率越低, 坡比由缓至陡, 互花米草的存活率分别为 97%、61%、23% (表 1)。而草苗的死亡区主要在潮汐变动部位, 静水位以下及变动部位以上死亡率则较低。观测结果, 互花米草在 3.0 m 高程线以上, 因干旱缺水, 死亡率较高, 而造成 3.0 m 高程线以下互花米草死亡的主要原因是风浪作用所致。当涨潮时, 潮汐在风力的作用下, 形成海浪, 向海挡迎水面冲击时, 带动水体向堤面运动, 当水体到达堤面后与海挡迎水坡产生撞击的同时, 风浪会沿堤面爬升; 当风浪撞击堤面时会产生一定的浪压力, 波浪在爬升时也会对堤面产生一定的冲击力。可见海浪对迎水坡面层产生的浪压力与波高、波长、海挡前水深、波速、坡比等有关。试验测定证明, 海挡迎水坡越陡, 其面层承受的浪压力

越大，所以波浪沿坡面爬升时，对坡面造成的冲击力也大。当波浪爬升到一定位置回落时，其离堤的惯性力也大。所以海挡迎水坡越陡，风浪对波面和互花米草的损坏也会越加严重。因此迎水坡度越缓，互花米草成活率越高。根据种植实践得出：互花米草护坡设计坡度应缓于坡比1:25为宜。

表1 不同坡比互花米草存活率观测表

Table 1 Survive rate of *Spartina alterniflora* on different slope ratio

试验区	坡比	植丛/丛	面积/m <sup>2</sup>	高程/m	活率%
I	1:10	687	300	2.2~3.3	23
II	1:25	2 140	750	2.0~3.5	61
III	1:45	1 596	540	2.2~3.0	97

#### 4.3 互花米草种植高程与生存条件的关系

植物护坡的防护效果取决于植物的长势和存活率，因此应掌握互花米草生长所需要的基本条件。互花米草虽然适宜在滩涂潮间带生长，但海挡迎水坡较之滩涂坡度更陡，高差相对较大，迎水坡自下而上受海潮的影响程度也不同。因此，互花米草在迎水坡不同高程部位的分布与长势和存活率密切相关，必需了解互花米草在迎水坡的种植区间和上限高程界线。设以下3个试验区进行观测研究。

试验区A：地点设在八一盐厂海挡坡比1:25的迎水坡上（高程2.0~3.5 m），面积37.5 m×20 m。观测试验目的是通过对不同高程部位互花米草长势的观察，分析与表层土壤物理、化学性质的关系，找出互花米草在海挡迎水坡上的最适生境条件。试验分两个时段进行，首先定期观测定植后互花米草的长势和存活率，求得不同高程草苗生长情况的数据资料，并测出草苗存活的上限高程。然后将迎水坡生长区间划分为上、中、下三个阶区，分别进行表层土壤物理、化学性质分析，测出不同季节的土壤动态变化规律对互花米草的影响。

试验区B：设在海挡坡比1:25迎水坡上部（高程3.1~3.5 m）处，种植面积50 m×10 m。该区为互花米草苗死亡高发区，试验目的是探索互花米草的死亡原因和存活期限。草苗定植后，每天涨潮时浇透水一次直至苗存活为止，开始定期进行存活率观测，同时土壤取样分析，观测土壤动态变化对草苗存活率的影响。

试验区C：设在近岸滩涂上（高程2.0 m），面积20 m×20 m。滩面常具10~15 cm厚粥状淤泥。试验目的是观察互花米草在土壤水超饱和和状态

下的生长情况，以探索互花米草在低位滩涂上生长的可行性。

4.3.1 互花米草在海挡护坡上的长势和存活率观测 互花米草在海挡护坡上的长势和存活率的大小均与堤坝的高程密切相关（表2）。经观测，发现互花米草在海挡迎水坡面上的最适高程生境为2~3.0 m之间，高程越低处的植株长势越旺盛，生活力越强，存活率高达98%；超越高程3.0 m以上或低于2.0 m以下，则植株存活率较低，甚至不能生存。其长势和存活率与土壤物理、化学性能，表层土状态和潮汐海水在坡面上滞留时间有关。

表2 互花米草长势、成活率观测表

Table 2 Growth and survive rate of *S. alterniflora*

试验区	高程/m	植丛/丛	存活数/丛	存活率/%	生活力
A	2.0	2 140	2 097	98	强
A	2.8	2 140	1 965	92	强
B	3.4	1 321	0	0	死亡
C	2.0	1 122	976	87	中强
C	2.0	1 122	380	34	弱

4.3.2 土壤物理性质与互花米草的生长 试验观测证明：试验区A年平均含水量和液性指数随着高程的降低而增大，容重则减小（表3），说明植物护坡高程越低，土壤越细软。但一定高程区的坡面状态随着季节更替各有不同，例如3 m高程线以上坡面冬春土壤状态相对较软，夏秋较硬，有时可达到硬塑状态；每年夏季表层土体受气候和潮汐的影响，土壤状态变化呈周期性，时而可塑、时而硬塑，严重影响互花米草的正常生长。而在3 m高程线以下，土壤状态变化相反，护坡表层土体虽常年为可塑状态，但春冬季相对较硬，夏秋季较软，随着坡面高程的降低，土壤状态变化越不明显。在2.7 m高程线以下土壤常年处于软塑状态，有的部位土壤含水量达74%，干容重仅为0.96 g/cm<sup>3</sup>。

土壤的潮汐滞留时间与液性指数对互花米草的生存关系：从理论上讲，液性指数是判别土壤状态变化的指标，其数值的大小与土壤的类别和含水量有关。所以在相同的土壤条件下，土壤含水量是影响液性指数大小的主要因素，就海挡迎水坡而言，其表层土体的液性指数大小应与潮汐在坡面滞留时间的长短成正比。显示植物护坡的液性指数过程线，不但与潮汐滞留时间过程线平行，还与某个潮位出现次数有关。从互花米草存活带的上限高程看

出, 该部位每年度上潮次数可达 160 次以上, 相对应的液性指数值为 0.6。这说明, 每 2~3 d 潮水必须要在海挡坡面上滞留 3 h 以上时的土壤状态, 才能满足互花米草生长的水分要求。

表 3 表层土体物理性能测试表

Table 3 Physical characters of surface soil

试验区	高程 /m	湿容重 /g·cm <sup>-3</sup>	干容重 /g·cm <sup>-3</sup>	含水量 /%	液性指标 /Ip
A	3.0~3.5	1.96	1.55	26.2	0.39
A	2.5~3.0	1.88	1.51	29.4	0.63
A	2.0~2.5	1.81	1.35	34.0	0.96
B	3.1~3.5	1.99	1.54	25.5	0.34
C	2.0	1.48	0.73	102.5	5.96

从表 3 中试验区 B, C 看出: 互花米草的死亡原因是土壤的容重、含水量值均不在其适宜生存的范围所致。互花米草虽有一定的耐淹、耐旱性能, 但在初春种植时其生存极限值一般不超过 30 d。就滨海滩涂而言, 土壤含水量大、容重小, 且长期处于水分超饱和状态, 加之滩面淤泥较厚, 涨落潮时枝叶挂满泥浆, 堵塞了叶片的盐腺和气孔, 制约了草苗的呼吸和光合作用, 从而造成草苗快速腐烂死亡。而超过 3.0 m 高程以上草苗的死亡原因是由于土壤容重大, 含水量过低造成的。由于每年度潮位超过 3.0 m 的潮水次数较少, 且滞留时间较短, 土壤经常处于硬塑状态, 从而影响了互花米草根系的生长和草苗对水分的需求。

经以上种植实践看出: 潮水在海挡坡面上的滞留时间是制约草苗成活率和长势的主要因素。时间过长或过短都会对草苗的生长造成致命的危害。潮水滞留时间每 2~3 d 超过 3 h, 或每天少于 12 h (液性指数 0.6~1.0, 干容重 1.3~1.4 g/cm<sup>3</sup>, 含水量 30%~40%) 的土壤状态下, 生长最为适宜。从而得出: 互花米草在海挡迎水坡种植高程为 2.0~3.0 m, 但上限设计高程低于 2.9 m 为宜。

4.3.3 不同高程的土壤化学性质与互花米草的关系 海挡互花米草群落护坡上、中部的土壤肥力、养份含量基本相同, 例如全盐 (高程 2.9~2.4 m) 均为 1.19~1.69; pH 7.93~8.19; 但 N, P 含量中部大于上部, 有机质相反, 上部大于中部; Cl<sup>-</sup> 含量很高。随着生长年限的增加, 土壤各项指标都有增长趋势, 但仍属贫瘠土壤 (表 4)。不同高程的互花米草生长每年都不相同, 中部比上部生长旺盛, 高差达 15~30 cm 不等, 但是个别年份土壤的各项指标虽高于往年, 草高却相对较低。因此, 植

物护坡在设计时应考虑尽可能降低种植高程。

表 4 土壤化学成分与互花米草关系表

Table 4 Relationship between chemical components of the soil and growth of *S. alterniflora*

测点	海挡上部		海挡下部		
	2.9~3.1	2.9~3.1	2.4~2.6	2.4~2.6	2.4~2.6
高程/m	2.9~3.1	2.9~3.1	2.4~2.6	2.4~2.6	2.4~2.6
pH	7.93	7.72	8.19	7.55	8.1
全盐/%	1.19	1.42	1.10	1.69	1.578
有机质/%	0.88	0.85	0.752	1.717	0.847
Cl <sup>-</sup> /%	0.586	0.741	0.554	0.565	0.795
草高/cm	60	75	75	110	105
N/mg·kg <sup>-1</sup>	18.5	23.2	15.4	30.4	40.4
P/mg·kg <sup>-1</sup>	24.1	2.06	21.9	21.8	37.9

#### 4.4 互花米草促淤固土效果试验

植物护坡吹填筑挡工程土, 质地细软, 多粉粒粘性淤泥质土, 堤坝坡面迎水坡坡度陡, 易受风浪冲刷, 因此利用植物根系的网络作用防冲、固土、促淤、保挡是修建植物护坡的主要目的。为此, 进一步研究互花米草根系的抗冲性, 测定迎水坡表层土的抗蚀性和促淤、固土效果。

4.4.1 互花米草的根系调查 植物护坡固土效果与土壤中植物根系含量相关。采用抽样、水冲、烘干、称重法, 获得根系年净增长量 (干重)。连续 3 年在 2.6 m 高程线以下按 50 cm<sup>2</sup> 采样, 洗净烘干后分段称重, 计算地下部分不同深度根系年增长量, 干物质含量和年度增长量, 结果示于表 5。

表 5 互花米草根系质量表

Table 5 Weight of root system of *Spartina alterniflora*

	根干重/g		
	1999 年	2000 年	2001 年
根深 0~5 cm	112	120	134
5~10 cm	80	156.8	135.2
10~15 cm	24	66.4	156
15~20 cm	10	37.2	80
20~25 cm	—	18.8	36.8
25~30 cm	—	7.6	34
总重/g·m <sup>-2</sup>	226	406.8	576
年增率/%	—	80	41.6

注: 增长率均为本年度与上一年相比。

4.4.2 植物护坡表层土体抗蚀性观测 土壤的抗蚀性是指土壤结构在水体静止状态下, 抵抗其分散的能力。一般常用水稳性指数表示, 其数值的大小反映了土壤抗蚀性的强弱, 也可以证明植物护坡的防冲固土效果。有机质含量或根系含量是影响土壤水稳性数值的两个因素, 为此, 分别测定了水稳性

指数、根系含量、有机质含量，其中水稳性指数测定：先将土样风干后掰成颗粒状，再取直径0.5~0.7 cm的土粒50颗，均匀放在孔径5 mm的金属网上，然后置于静水中，以1 mm为间隔记录分散的粒数，时间为10 min，而后分别计算土壤的水稳性指数。试验结果见表6。

表6 土壤水稳性指数观测表

Table 6 Index of water stabilization of the soil

测点	土层 /cm	水稳性指数	根系含量 /%	有机质 /%
对比区	10	0.04	0	0.752
1年生草区	10	0.28	3.47	0.717
3年生草区	10	0.39	4.85	0.847

4.4.3 互花米草淤积强度观测 试验在有草区和无草区3.5 m高程以下，每间隔5 m设观测标桩，在20 cm和30 cm处划标志，30 cm标志处与坡面齐平，并用水准仪测出标桩顶高程，以其顶部作基数，观测坡面冲淤变化，测算淤积厚度。观测结果如表7所示。

4.4.4 互花米草促淤固土效率评估 互花米草促

淤固土性质在防浪、保堤中有独特功能；巨大的根系网络如织，拦截、固着松软泥沙，有效地阻挡风暴雨、风浪、潮汐的袭击。从表5可知：互花米草根系生长速度较快，仅1年时间从土壤20 cm深度扎伸到30 cm；生长3年的根系干重达576 g/m<sup>2</sup>，增长量达80%，土壤10 cm以下根系含量逐年增多、蔓延，护坡的防冲固土效果十分显著。

互花米草对表层土体的抗蚀性能强，随着根系增长，水稳性指数随之提高，但土壤有机质含量增长甚微，肥力低，属贫瘠土壤。由于土壤含盐量较高、互花米草种植时间较短、枯根落叶分解不良，故频繁的海浪冲击，对土壤的水稳性团粒的分散影响较大。而土壤有机物质含量，对提高土壤的抗蚀性作用不大。但互花米草根系的发育，网络作用逐渐形成，众多细小的须根、主根穿插在土体中，可有效地防止土体分散破碎。其根系含量与土体水稳性指数具有较好的相关性。回归直线方程式为：

$$\hat{Y} = 0.103 + 0.057X, n = 16, r = 0.849,$$

$$r_{14,0.01} = 0.623, r > r_{0.01}(\text{相关极显著}).$$

从而说明：互花米草的根系含量越多，土体的抗蚀性能越好，植物护坡的防冲固土效果越明显。

表7 观测区促淤效果观测表

Table 7 Silt deposited effect in the observation area

年份	1999.9		2000.10		2001.9		2002.8	
	有草区高程 /m	无草区高程 /m	有草区淤积 /cm	无草区淤积 /cm	有草区淤积 /cm	无草区淤积 /cm	有草区淤积 /cm	无草区淤积 /cm
对比高程 /m	3.54	3.51	-4	-13	-11	-16	-17	-24
3.3	3.35	3.32	-2	-21	-9	-36	-16	-50
3.1	3.12	3.10	2	-19	-2	-34	-4	-49
2.9	2.94	2.94	4	-16	4	-32	2	-47
2.7	2.76	2.71	7	-14	9	-23	7	-36
2.5	2.63	2.53	9	-8	17	-16	13	-25
2.3	2.51	2.47	14	-15	18	-20	16	-28
2.1	2.43	2.43	17	-22	14	-27	3	-33
2.0	2.35	2.41	22	-25	13	-33	4	-37

注：测点高程定于坡面自上至下每距5 m为一测点。

互花米草的促淤强度（表7）表明：生长第3年，有草区的淤积厚度最高值为16 cm，而无草区的土体损失深度最高值却达50 cm。在坡面相同高程处（高程2.9 m），有草区与无草区的坡面高度已相差49 cm。两个试验区的坡面变化都有一定的规律性：有草区的淤积厚度随着互花米草生长年限的增长，沿坡面自上而下逐年升高，也随着草区宽度的逐年缩短而减少；无草区上、下部，坡面土体损失现象逐年加重，在坡面3.3 m和2.1 m高程处，2002年与2000年相比，坡面淘刷深度已达14

cm。而在草区存活带上限2.9 m高程处，坡面高程变化很小，2002年度与1999年基本相同。

在对比试验区（无草区）坡面土体损失深度，以2.5 m高程线为界，随着高程的升高或降低，土体损失深度都在逐渐加大（2002年实测值）。从土体损失数量看，两者基本相同。但从发展的趋势看，两者有明显差别。2.5 m高程线以上，土体损失深度每年达14~15 cm以下，除2000年度土方损失量较大外，以后却逐年降低，约为8~9 cm，而且高程越低土方损失量越小。

经分析,草区的淤积原因是潮汐在涨潮时风浪携带着泥沙经过草区,减缓了流速。使较大颗粒首先在坡面下部沉落,而落潮时坡面高程越低,潮水滞留时间越长,泥沙沉落量越多,淤积量越大。海挡坡面土体损失的原因是草区上部(3.0~3.5 m)在高潮位时,坡面土体受海水浸泡而分散,经风浪冲击造成其移动、悬浮,当潮水回落时被带走所致。草区下部则是因为坡面高于滩涂,护坡前排草苗在风浪作用下出现跑苗和枝杆折断等死亡现象,造成坡面裸露所致,经观测每年草皮约蚀退1~2 m。对比区坡面土体每年度潮位高于2.5 m的潮水,发生次数较多,海浪的爬坡和回落是造成坡面土体损失的主要原因。

经对有草区与无草区淤积和冲刷情况的分析得出:互花米草具有较好的促淤固土效果,但是当草区宽度小于25 m时,不能完全消除海浪对坡面的上部的冲刷侵蚀,其固土促淤靠的是种群密度,单排单株草苗不能抵抗风浪的冲击,因此在条件允许的前提下,应尽量扩大护坡宽度,草区前部应采用工程措施进行防护,特别是在个别地段,高程2 m左右的前沿,迎风面正东南风向的大风浪作用下,互花米草群落仍有被冲刷的现象。为了避免冲刷,应在群落前沿筑桩墩,以缓流潮水袭击,保护互花米草群落的安全。

#### 4.5 互花米草缓流消浪功能

**4.5.1 互花米草的生长密度** 一般情况下互花米草的缓流消浪效果与其种群密度的大小有关。植物种群密度以单位面积株数来表达,其方法是采用随机取样记名计数统计法。本项实测案例:样地面积为 $4 \times (0.25 \text{ m}^2)$ ,整株取样(株高10 cm以上,不含小苗),连续3年计数(取样时间每年7~8月),按 $D(\text{密度}) = N(\text{株数}) / S(\text{面积})$ 计算,结果:1  $\text{m}^2$ 样地平均258株;当第3年互花米草群落郁闭时的密度为283株时,表示群落成熟期密度为缓流消浪功能最大值(表8)。此时测得互花米草平均单株行距为5.9 cm,生长株高达110~130 cm,秆径为0.5~0.7 cm。按照经验值估算,种植丛行距应以 $60 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$ 为宜;群落带宽度应在20 m以上。观测证明:浪高和流速是影响风浪对海挡迎水坡作用的主要因素,因此减少和抑制波浪高度和潮汐流速是保护坡面土体损失的较好方法。互花米草植株高大,茎杆粗壮,在海挡上生长快,繁殖能力强,种群密度高,密密丛丛的植株增

加了坡面糙率,降低了波浪高度和减缓波浪速度。显然密度越大,群落带越宽,消浪功能越显著。

表8 互花米草生长密度调查表

Table 8 Growth density of *Spartina alterniflora*

取样年份	1999	2000	2001
面积/ $\text{m}^2$	0.25	0.25	0.25
I号/株	62	64	71
II号/株	58	72	62
III号/株	47	68	80
IV号/株	51	69	70
合计/株	218	273	283
增长率/%	—	25.2	37
株行距/cm	6.8	6.1	5.9

**4.5.2 互花米草缓流消浪效果** 观测点布设:观测点设在海挡迎水坡面,草带宽度为20 m,高程2.54~3.05 m,对照点剪除草约15 m宽作为对比。在观测点前、中、后部分别安装观测仪器,以流1号、流2号、流3号、流4号和波1号、波2号、波3号、波4号表示(图2)。

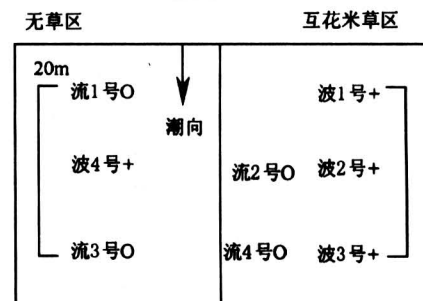


图2 观测仪器安置点示意图

Fig.2 Sketch map of the place where the observation instruments installed

**观测仪器:**波浪观测采用天津市海洋研究所研制的电传式声波测波仪;流速仪采用重庆水文仪器厂生产的旋杯流速仪和数字型记数器;风速观测采用天津市海洋仪器厂生产的轻便式手持风速仪;潮位变化采用水尺观测。

**观测结果:**互花米草的缓流效果从安装在海挡迎水坡下部的1号流速仪的观测结果见表9。涨潮时潮汐底层流速随着坡前水深的增长而提高。当潮位上升到3.0 m、坡面上水深达50 cm时,底层流速0.2 m/s;潮位上升到3.25 m、水深到70 cm时,流速0.328 m/s;潮位上升到3.35 m、坡面潮水深81 cm时,底层流速值最大为0.355 m/s。此间潮水层间流速变化不明显。而后随着潮位的升

高，流速呈逐渐变小的趋势。经对潮位观测资料的统计分析，天津沿海地区近年逐月最高潮位的平均值为 3.43 m。因此海挡迎水坡 2.5 m 高程线以上

部位的坡面土体，受潮汐风浪的影响最大，必须采取有效的防护措施，保护坡面土体的稳定性。

表 9 互花米草缓流效率测量表

Table 9 Current slowed effect by *Spartina alterniflora*

潮位/m	坡比/m	流 1 号 流速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	流 3 号 流速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	流 3 号与 1 号相比 流速衰减率/%	流 2 号 流速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
3.25	1:40	0.328	0.210	36.0	0.144
3.50	1:40	0.289	0.197	38.1	0.131
流 2 号与 1 号相比 流速衰减率/%	流 4 号 流速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	流 4 号与 1 号相比 流速衰减率/%	流 4 号与 2 号相比 流速衰减率/%	流 4 号与 3 号相比 流速衰减率/%	—
56.1	0.118	64.0	18.1	43.8	—
54.7	0.105	63.7	19.8	46.7	—

从互花米草的消浪对比观测结果看出，在不同的潮位条件下，互花米草对潮汐流速的衰减比率基本相同。当潮水经过 10 m 宽草带时流速平均衰减率为 55%，经过 20 m 宽草带时流速的衰减率为 64%，比相同宽度的无护面缓坡提高 27%，比 10 m 宽草带提高 19%，从而说明潮水底层的流速衰减率随着草带宽度的增加而提高，但其衰减幅度在相同的草带宽度下却逐渐减少。就互花米草的消浪效果而言，其作用更加明显。当潮位在 3.50 m 高程时，仅 10 m 宽的草带波高衰减率就达 48.5%，比无护面缓坡提高 45.1%，在草带宽度为 20 m 时，波高衰减率可达 66.7%，比 10 m 宽草带的波高衰减率提高 35.3%，比 10 m 宽无护面缓坡提高 64.5%，从而说明：互花米草护坡在减轻潮汐风浪对坡面土体的淘蚀和冲刷方面作用较大。按相同宽度，不同高程部位草带的波高和流速的衰减比率计算，在潮位 3.5 m，波高 50 cm 的条件下，互花米草的种植宽度应大于 50 m 为宜。

## 5 结论

### 5.1 互花米草具有促淤固土、缓流消浪的作用

互花米草的促淤固土作用，首先表现在根系非常发达，生长第 3 年，根系干重高达  $576 \text{ g}/\text{m}^2$ ；年增长率 80%，淤积厚度最高值 16 cm，而无草区的土体损失深度最高值却达 50 cm，有草区、无草区的坡面高度已相差 49 cm。有草区的淤积厚度随着互花米草生长年限的增长，沿坡面自上而下逐年升高，也随着草区宽度的逐年缩短而减少。而在无草区上下部，坡面土体损失却逐年加重，坡面淘刷深度已达 14 cm。当草区宽度小于 25 m 时，不能完全消除海浪对坡面的上部的冲刷侵蚀，其固土促淤

靠的是种群密度和根系增长，互花米草的根系含量越多，土体的抗蚀性能越好，植物护坡的防冲固土效果越明显，故应尽量扩大互花米草护坡宽度。

互花米草的最适生境应在海挡迎水坡 2.0~3.0 m 高程范围内，护坡设计坡比应  $\leq 1:50$ ，草带宽度应  $\geq 50 \text{ m}$  为宜，种植株行距最适为  $60 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$ ，在此区间种植存活率可达 95% 以上，3 年内即可建成密闭的互花米草护堤海挡工程。

互花米草的缓流作用非常明显。潮水经过 10 m 宽草带时流速平均衰减率为 55%，经过 20 m 宽草带时流速衰减率为 64%，比相同宽度的无护面缓坡提高 27%，比 10 m 宽草带提高 9%，说明潮水底层流速衰减率随着草带宽度的增加而提高。

互花米草的消浪作用更明显，当潮位在 3.50 m 高程时，仅 10 m 宽的草带波高衰减率就达 48.5%，比无护面缓坡提高了 45.1%；在草带宽度为 20 m 时，波高衰减率可达 66.7%，比 10 m 宽草带的波高衰减率提高了 35.3%，比 10 m 宽无护面缓坡提高了 64.5%。从而说明：互花米草护坡在减轻潮汐风浪对坡面土体的淘蚀和冲刷方面作用很大，按相同宽度，不同高程部位草带的波高和流速衰减比率计算，在潮位 3.5 m，波高 50 cm 的条件下，互花米草种植宽度应大于 50 m 为宜。

互花米草的生长密度与缓流消浪功能的大小密切相关。当第 3 年互花米草群落郁闭时的密度为 283 株时，表示群落成熟期密度为缓流消浪功能最大值。此时测得互花米草平均单株行距为 6.3 cm，生长株高可达 110~130 cm，秆径为 0.5~0.7 cm，群落带宽度应在 20m 以上。观测证明：浪高和流速是影响风浪对海挡迎水坡作用的主要因素，减少和抑制波浪高度和潮汐流速是保护坡面土体损失的



较好方法。互花米草植株高大, 茎秆粗壮, 在海挡上生长快, 繁殖能力强, 种群密度高, 密密丛丛的植株增加了坡面糙率, 减缓了波浪的高度和行进速度。显然密度越大, 群落带越宽, 其功能作用越显著。同时, 常用水稳性指数来表示土壤抗蚀性的强弱, 本项目测得水稳性指数逐年上升(0.04, 0.28, 0.39), 并与有机质含量、根系含量的逐年上升成正比, 证明植物护坡的防冲固土效果逐年增加。

总之, 互花米草不但耐淹、耐盐, 而且具有缓流消浪和固土促淤功能”为提高互花米草的种植存活率和防护效果, 建议互花米草护坡应种植在海挡迎水坡 2.0~3.0 m 高程线间, 设计宽度应大于 50 m, 坡比小于 1:50 为宜。但是在互花米草海挡的个别地段, 特别是在高程 2 m 左右的海挡前沿, 应在互花米草群落前沿筑桩埝, 缓流潮水袭击, 以防海挡被冲刷。

### 5.2 互花米草海挡工程的经营管理

互花米草自 20 世纪 70 年代引入我国后, 一直作为促淤造陆、固土护岸的先锋植物, 在我国沿海地区被大规模应用。但是由于部分地区对互花米草的生态习性缺乏了解, 没有科学的规划和管理, 以致逸为野生; 特别是在海岸河口地区富营养化污染和气候变化的影响下, 促使互花米草过速繁殖, 误认为是一种外来生物入侵种, 被列入防除之列<sup>[6]</sup>。

经多年的种植实践和观察, 互花米草在本区 2.0 m (大沽) 高程线以下滩涂, 不具备生存条件, 因此该草泛滥蔓延的可能性极微。但是, 为了防止互花米草在不应该生长的地方泛滥蔓延, 必须加强科学管理, 统筹规划, 适度开发<sup>[5]</sup>。为防治互花米草可能发生的野生化、杂草化现象, 特介绍“沼泽软地挖掘机”, 用机械翻耕法抑制互花米草过速繁殖。其方法简单、易行、高效, 即在坡比 1:10 的迎水坡上, 坡面高程 2.4~2.8 m, 操作面积 50 m<sup>2</sup>, 进行挖掘翻耕。首先人工割除地上部分, 再用沼泽软地挖掘机进行挖掘翻耕, 要求挖掘深度自地表往下不低于 60~70 cm, 机械下斗要平稳, 必须将起出的土壤面朝上, 然后依靠铲斗的翻转, 将表土倒置放在坑内。如此依次向前进行, 经核定效率为每小时可翻盖 40~50 m<sup>2</sup>。此法效果极佳, 第二年观察发现互花米草无一成活。经分析: 虽然互花米草的耐淹、耐盐性能较强、在海水矿化度大于 35%、温度低于 30℃、且每天淹泡时间多于 12 h 的超饱和土壤中存活期可达 60 天以上, 但

是互花米草抗掩埋的性能极差, 当泥土或海沙高于其根部 25~30 cm 时, 大部分植株受到抑制甚至死亡, 尤其是当其枝叶上挂满泥浆后, 死亡速率加快, 存活期一般不超过 30 天。原因是互花米草的气孔被泥沙、泥浆堵塞, 致使呼吸作用和光合作用停止, 根系腐烂而死亡。采用机械措施可有效地控制和防止互花米草的泛滥蔓延, 并可以保护环境免受二次污染。

### 5.3 经济、生态、社会综合效益显著

本区滨海地势平坦低洼, 潮汐作用频繁, 历史上多次遭受强风暴潮的袭击。为防潮减灾, 每年都要投入大量资金用于海挡工程建设和除险加固, 以确保海挡和人民生命财产的安全。互花米草在吹填筑挡工程上的试验与应用研究, 作为大断面海挡坡面土体防护措施的新创举, 改变了传统的工程措施护砌型式, 充分利用了互花米草的生物功能和柔性好、再生力强、易修补、适应变形等特点, 不但保护了坡面土体的稳定和坝体的安全, 也为今后大面积实施提供了经验。从观测资料中可知, 互花米草护坡与无护面土堤型海挡相比, 每公里可减少土体损失 5 000 m<sup>3</sup>, 节省维修费用约 30 万元。

采用互花米草作护坡的海挡, 集防潮、公路、景观为一体, 不但能缓流消浪、促淤固土, 而且可以绿化海滨, 改善生态环境, 保护生物多样性, 美化滨海地区, 具有显著的经济、生态和社会效益, 促使滨海地区的经济和环境可持续发展。

#### 参考文献

- [1] 曹大正. 低位真空预压软土地基加固法[P]. 专利号: ZL 1 00652.0, 国际专利主分类号: E02D 3/10 (1997.3)
- [2] 徐国万, 卓荣宗. 我国引种互花米草 (*Spartina alterniflora* Loisel) 的初步研究(I) [J]. 南京大学学报 1985 论文集, 212
- [3] 赵大昌, 等. 中国海岸带植被[M]. 北京: 海洋出版社, 1966. 214~221
- [4] 天津市海岸带和海涂资源综合调查组, 海岸带和海涂资源综合调查报告. 海洋出版社 1987. 1~105
- [5] 钦佩, 仲崇信. 米草的应用研究[M]. 北京: 海洋出版社, 1992
- [6] 李振宇, 解焱. 中国外来入侵种[M]. 北京: 中国林业出版社, 2002, 184

\* “沼泽软地挖掘机”(WY-40ZR型), 辽宁省抚顺市工业机械厂产品

## Application of *Spartina alterniflora* on Blow-fill-construct Sea Wall Engineering

Cao Dazheng<sup>1</sup>, Wang Yinsheng<sup>1</sup>, Zhang Dongran<sup>1</sup>, Gu Lijun<sup>1</sup>, Tang Tinggui<sup>2</sup>

(1. Tianjin Research Institute of Water Conservancy Science, Tianjin 300061, China; 2. College of Life Science, Nankai University, Tianjin 300071, China)

[Abstract] *Spartina alterniflora* Loisel was used to protect slopes in sea wall engineering, which replaced the traditional protection model of sea wall by large area of claybank. Because the stems can prevent sea wave and the root systems can strengthen the dyke, significant effects was got on slowing the current, eliminating the sea wave and immobilizing the soil. As an important component of blow - fill-construct sea wall engineering, erosion of tide and stormy waves on sea wall water-meeting slope was effectively prevented or alleviated and safety of sea wall was guaranteeed by using *Spartina alterniflora* to protect slopes. Significant engineering, economical and ecological benefits were obtained.

[Key words] *Spartina alterniflora* Loisel; sea wall; protecting slopes by plants; slowing the current and eliminating the wave; immobilizing the soil

## 《中国工程科学》2005 年第 7 卷第 8 期要目预告

- |                                  |      |                       |      |
|----------------------------------|------|-----------------------|------|
| 从复杂性看科学发展观 .....                 | 苗东升  | 带误差补偿的 GPC 对网络控制系统    |      |
| 钛在汽车工业中的应用及降低钛材成本                |      | 时延的解决 .....           | 王冬青  |
| 的工艺 .....                        | 杨遇春  | 基于经验模式分解的旋转机械振动       |      |
| 数字城市——一类开放的复杂巨系统 .....           | 戴汝为  | 信号降噪处理 .....          | 杨建文等 |
| 概念加固思想及工程应用 .....                | 段敬民等 | 基于 GIS 的混凝土坝施工可视化仿真   |      |
| 水稻 <i>eui</i> 种质的遗传评价和育种利用 ..... | 杨仁崔  | 技术及其应用 .....          | 李景茹等 |
| 基于区间数的多指标灰靶决策模型的                 |      | 锌液冷却管损坏机理的研究 .....    | 袁望姣等 |
| 研究 .....                         | 党耀国等 | 一种改进的新型桥式固态限流器的研究     |      |
| 考虑多孔电极内气液分布的数学模型 .....           |      | .....                 | 李洪凤等 |
| .....                            | 徐献芝等 | 地铁火灾中强制通风烟控系统作用的      |      |
| 系统的稳定性与不稳定性——搅动能守恒律              |      | 模拟 .....              | 蔡波等  |
| 意义和作用的引伸性讨论 .....                | 陈刚毅等 | 带冷却系统的 XK717 数控铣床主轴部件 |      |
| 火灾标准火烟雾颗粒测量及粒径尺度                 |      | 热特性分析 .....           | 王金生等 |
| 分布函数研究 .....                     | 疏学明等 | 基于频率响应函数的动力学模型修正      |      |
| 基于评价方法属性层次的组合评价研究                |      | 方法研究 .....            | 朱囡囡等 |
| .....                            | 陈衍泰等 |                       |      |