

# 滨海湿地盐沼植被修复中的种子产品制作过程及其有效性

隋皓辰<sup>1</sup>, 马旭<sup>1</sup>, 闫家国<sup>1</sup>, 张树岩<sup>2</sup>, 盖凌云<sup>2</sup>,  
刘泽正<sup>1</sup>, 邱冬冬<sup>1</sup>, 崔保山<sup>1</sup>

(1. 北京师范大学环境学院, 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875;

2. 山东黄河三角洲国家级自然保护区黄河口管理站, 东营 257500)

**摘要:** 针对当前滨海湿地种子流在潮汐过程中种子有效沉降降低、土壤种子库分布不均、定植效率低和栖息地裸斑现象等关键问题, 以黄河三角洲盐沼湿地的盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)为修复物种, 研发一种应用于滨海湿地盐沼植被修复的固态种子产品, 阐述固态种子产品的制作过程, 并开展三种不同保水材料为核心材料(聚丙烯酰胺PAM, 羟乙基纤维素HEC, 羟丙基甲基纤维素HPMC)的种子产品的有效性研究。研究结果表明: (1)包装制作后的盐地碱蓬种子的吸水倍率和保水持续时间显著高于普通天然种子, 表现出良好的吸水保水特性; (2)包装后的盐地碱蓬种子受盐度梯度变化的影响较小, 表现出良好的耐盐抗性; (3)包装后的盐地碱蓬种子具有更高的萌发潜力, 而不同保水材料的种子产品包装对盐地碱蓬种子萌发的促进作用表现为PAM>HPMC>HEC>天然种子; (4)包装后的盐地碱蓬种子具有更短的悬浮时间和较快的平均沉降速度, 表明了种子产品增强了盐地碱蓬种子抵抗水动力干扰的潜力, 其中以PAM为保水材料的种子产品可以直接、快速地沉降。本文首次将种子产品技术应用于滨海湿地盐沼植被修复中, 为种子产品技术在退化滨海湿地的植被修复领域的应用与实践提供了理论基础。

**关键词:** 盐沼湿地; 生态修复; 种子产品; 保水材料; 盐地碱蓬

滨海盐沼湿地是位于海洋与陆地的交错地带, 在保护生物多样性、维系海陆动态平衡、改善滨海水环境, 以及维持元素循环稳定等方面发挥着重要作用。然而, 在人类活动和气候变化的双重作用下, 滨海湿地生态系统的结构、功能和过程完整性受到严重破坏, 威胁区域生态系统安全和稳定。因此, 如何有效地保护和修复已受干扰、退化的滨海湿地生态系统, 迫切需要基于生态系统关键过程的修复机理研究<sup>[1-2]</sup>。

河口三角洲湿地作为滨海湿地中十分重要的一环, 水动力条件尤为复杂, 受到咸淡水交替变化的影响, 盐沼植物群落呈现明显的带状分布规律<sup>[3]</sup>, 生态环境变得更加脆弱。目前, 黄河口三角洲滨海盐沼受人类干扰和互花米草(*Spartina alterniflora* Loisel.)入侵的影响面临的退化问题非常严重, 许多区域的本地种盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)群落已消失殆尽<sup>[4]</sup>, 生态系统各组分结构失衡、比例失调, 植物群落难以保持其自我维持能力<sup>[5]</sup>。如何科学地修复退化的河口盐沼湿地已成为保障区域生态安全, 促进区域经济、生态协调发展的当务之急。

收稿日期: 2019-03-10; 修订日期: 2019-06-17

基金项目: 中国工程院咨询研究项目(2018-XZ-14); 国家自然科学基金项目(51639001, 51721093)

作者简介: 隋皓辰(1995-), 男, 山东烟台人, 硕士, 主要从事滨海湿地生态修复研究。

E-mail: 15650131626@163.com

通讯作者: 崔保山(1967-), 男, 河北涿源人, 博士, 教授, 主要从事湿地生态过程与环境响应研究。

E-mail: cuib@s@bnu.edu.cn

一直以来,国内外在滨海湿地修复问题上做出了不懈努力,荷兰<sup>[6]</sup>、英国<sup>[7]</sup>、丹麦<sup>[8]</sup>以及欧洲许多其他沿海国家都有大规模的海岸带恢复计划。所涉及的生态修复技术大体可分为三种类型,即基底修复技术、水质修复技术、植被修复技术。然而多数修复技术存在植被种子受水动力干扰大,无法快速地沉降、定植,导致种子库分布不均匀的问题。此外,最终定植的种子由于受到水、盐环境胁迫的作用,实际实施过程中育苗成功率往往 $<10\%$ <sup>[9-10]</sup>。因此迫切需要以种子为基础的恢复的新方法,种子产品技术可能是抵抗水动力干扰,缓解水盐胁迫,提高幼苗建立<sup>[11]</sup>,植物生长<sup>[12]</sup>以及天然种子恢复功效的关键,其中种子从野外收集,减少了有限资源的浪费<sup>[13]</sup>。近年来,通过增强植被种子<sup>[14]</sup>来进行退化土地生态修复的研究越来越多,然而相关技术多应用在受野火影响的地区<sup>[15-18]</sup>、半干旱干旱地区的退化牧场<sup>[19-22]</sup>以及采矿后退化土地<sup>[13]</sup>,在滨海湿地生态修复领域尚未有相关技术的研究和报道。

本文首次将种子产品技术引入滨海湿地修复领域。具体开展以下工作:以黄河三角洲盐沼湿地的盐地碱蓬为修复物种研发了一种固态种子产品,并对该产品的有效性进行了初步的试验研究。其作用原理如下:(1)通过吸、保水来缓解种子周围的水盐胁迫;(2)通过吸水、增重缩短种子的悬浮时间,加快种子的沉降、定植,从而增强种子抵挡滨海盐沼周期性水动力干扰的能力;(3)通过种子多粒团聚的促进作用和定植后缓释营养来促进种子的萌发和幼苗的成长。具体目标是:种子产品具有良好的抵抗水动力干扰的能力,能够有效地缓解种子定植微点位的水、盐胁迫,促进种子的萌发和幼苗的建立。本文将为黄河三角洲盐地碱蓬生态修复提供新的技术思路和相关理论依据。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 研究区概况

研究区域位于中国山东省东营市黄河入海口的黄河三角洲国家级自然保护区( $37^{\circ}40'\sim 38^{\circ}10'$ ,  $118^{\circ}41'\sim 119^{\circ}16'E$ )。近年来该区域存在盐地碱蓬面积萎缩,盐沼斑块破碎化趋势明显的问题。致使问题产生的关键驱动力是水文连通的阻断效应,部分区域的养殖塘、围堤、固岸等工程阻断了潮汐作用,使滨海植被的种子无法正常的扩散流动,分布存在不均匀性,导致植被定植斑块化,并逐步形成空斑区域(图1)。此外,滨海植被的种子大多小而轻,被潮汐作用裹挟的过程中遇到空斑区域无法有效地沉降,最终多聚集在有植被群落分布的区域,使得斑块化现象愈演愈烈。这种扩散模式下,成功的发

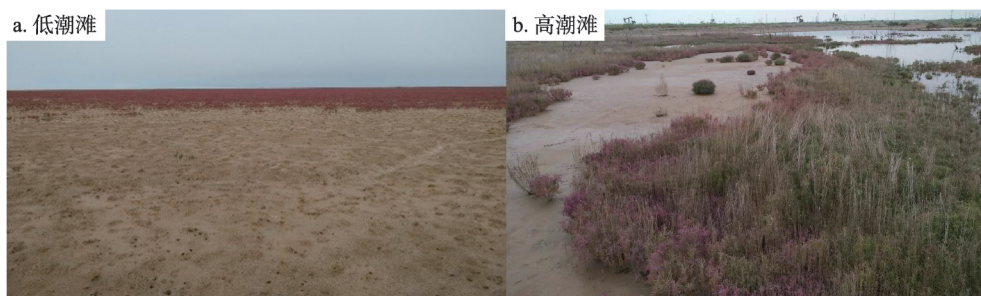


图1 低潮滩和高潮滩盐地碱蓬群落的空斑区域

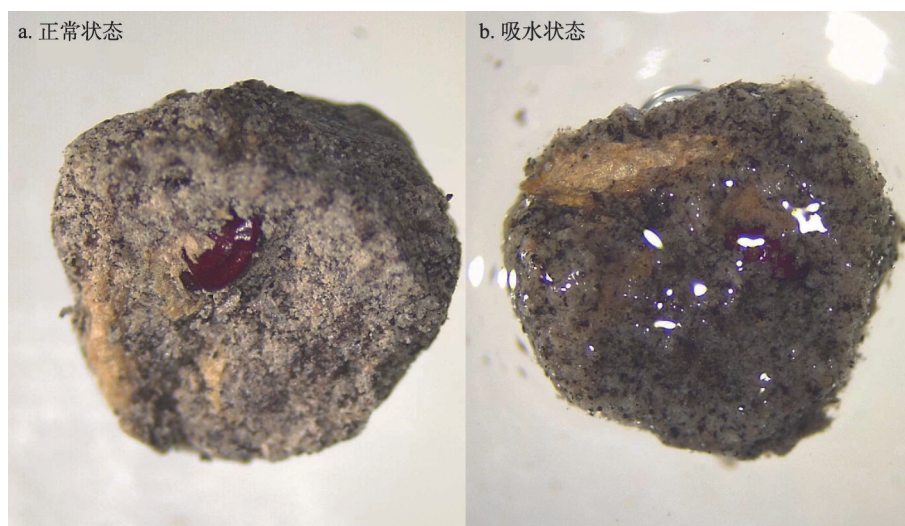
Fig. 1 The patches area of the *Suaeda salsa* community in the low tide beach and the high tide beach

芽和幼苗的建立高度依赖于种子截留区域是否有足够的营养、适宜的盐度和水分,并且不受捕食的影响。如何使种子合理的扩散,并有效的截留、萌发、定植是滨海盐沼湿地生态保护与修复实践工作的关键问题<sup>[23-25]</sup>。

## 1.2 种子产品

### 1.2.1 材料

种子产品于2018年4月在东营市生态修复实验站制作完成(图2),制作过程中使用的材料包括盐地碱蓬种子、保水材料、有机—无机复合材料以及成膜剂。其中,实验中使用的种子是2017年12月份从东营黄河三角洲国家级自然保护区低潮区采集,采回后于通风处放置,待完全干燥后过筛,去除尘土和枯枝;通过对几种常见保水材料的评价,择优选择了三种保水材料:羟乙基纤维素(万利达食化)、羟丙基甲基纤维素(青岛优索化学科技有限公司)、非离子聚丙烯酰胺(河南巩义市金辰水处理材料有限公司),保水材料可以通过自身的吸水、保水作用来加快沉降、定植,并在一定程度上缓解水文胁迫。实验所用的有机—无机复合材料的组成包括:凹凸棒石粘土(常州鼎邦矿产品科技有限公司)、滨海粘土(黄河三角洲国家级天然保护区)、茶皂素(青岛优索化学科技有限公司)、牡蛎壳粉(山东福田正大科技有限公司)、腐殖质(山东花扶疏园艺农资)等,有机—无机复合材料在保护种子,增重加速沉降的同时,会缓释营养改善定植点位的微环境条件。成膜剂使用的是聚乙烯醇(青岛优索化学科技有限公司),通过在种子表面形成固化膜增加了其耐水防浪的性能。



注: a中棕褐色为包裹的盐地碱蓬种子。

图2 固态种子产品截面图

Fig. 2 Cross-sectional view of solid seed product

### 1.2.2 种子产品的制作过程

#### (1) 内核包衣剂的制作

将2017年12月份从东营黄河三角洲国家级自然保护区采集的盐地碱蓬种子进行干燥和过筛,去除尘土和枯枝,对种子进行多层包衣的过程采用的是层级均匀添加辅助材料方法,将水雾喷至每粒种子表面微微润湿,并将预处理的种子与保水材料按照一定的质



量比混合,从而在每粒种子的表面上形成均匀的保水材料涂层。

### (2) 中层包衣剂的制作

种子形成内核包衣后,将滨海粘土、凹凸棒石粘土、羟乙基纤维素、生物质颗粒、茶皂素等其他有益添加剂按照一定的质量比混合制成有机-无机复合材料,将上述有机/无机复合材料与初步包衣后的种子按照一定的质量比混合造粒,每个中层包衣剂包裹的种子数量为5~7个。

### (3) 外壳包衣剂的制作

将包好中层包衣剂的种子产品外层喷洒一定浓度的成膜剂,至种子表面变得光滑圆润即可,然后将制好的包衣种子在器皿中摊开,晾干,制作原料和成品(图3)如下。

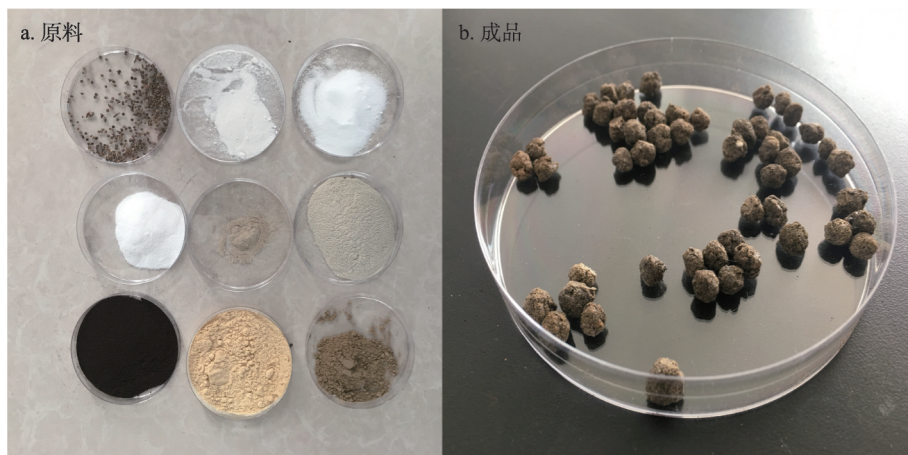


图3 种子产品制作原料和成品图

Fig. 3 Seed coating compositions and finished product

## 1.3 种子产品的形态观测与性能测试

### 1.3.1 形态观测

随机选取三种类型的固态种子产品各25粒,用实验室解剖显微镜(LEICA EZ4D)观察固态种子产品的外部形态,并测量其直径。种子的重量以10粒为1组,用电子天平(Sartorius BS210S,精确到0.0001 g)称重,并记录数据,5次重复,计算种子产品的10粒重。

### 1.3.2 保水材料吸水性能和保水时长的测试

称取三种类型的质量为0.5 g的保水材料于烧杯中,设置三组重复,加入足量25 ppt(模拟海水盐度)<sup>[26]</sup>的NaCl溶液,使其充分吸水至平衡,用500目滤网过滤30分钟至无水滴下落,然后将其放在培养皿等容器里称量,由公式计算吸液倍数。

$$Q = (W - W_0) / W_0 \quad (1)$$

式中:  $Q$ 表示吸水(液)倍率( $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ );  $W_0$ 表示干样品质量(g);  $W$ 表示吸水(液)过滤后产物总质量(g)。

将已达到饱和状态的三种保水材料放入烧杯中,然后置于25℃温度下的恒温干燥箱中。每隔1小时进行一次称重,直到3次称量的结果一致结束试验,记录所需的时间。

### 1.3.3 固态种子产品吸水性能和保水时长的测试

称取三种类型的固态种子产品以及天然种子各5粒于烧杯中,设置三组重复,加入

足量的 25 ppt NaCl 溶液,使其充分吸水至平衡,用 500 目滤网过滤 30 分钟至无水滴下落,然后将其放在培养皿等容器里称量,由式(1)计算吸液倍数。将吸水已经达到饱和状态的固态种子产品和天然种子置于烧杯中,然后将其放入恒温干燥烘箱里,在设定的 25 ℃下,每隔 1 小时进行一次称重,直到 3 次称量的结果一致结束试验,记录所需的时间。

## 1.4 室内模拟实验

### 1.4.1 萌发实验

将颗粒饱满的盐地碱蓬种子用 0.1% 的高锰酸钾溶液表面消毒 8 分钟,用去离子水冲洗 3 次,并在室温下浸泡 6 小时。实验设置四种处理,即:未经包衣的天然种子、吸水材料为聚丙烯酰胺的种子产品、吸水材料为羟乙基纤维素的种子产品、吸水材料为羟丙基甲基纤维素的种子产品,每处理均设 5 组重复。培养皿中放置两张剪好的滤纸,加入适量的盐水(分成 0 ppt、7 ppt、14 ppt、21 ppt、28 ppt、35 ppt 六个盐度梯度),深度以培养皿 45° 倾斜,以水溢不出来为宜,用以提供其萌发所必须的条件。每个培养皿放置 100 粒种子,进行 12 小时光照/12 小时黑暗交替培养,在培养期间覆盖培养皿的盖子以减少水分的损失。每天下午 6 点钟记录发芽的数量,以胚根出现 2 mm 左右视为萌发,连续培养 10 天直至连续 3 天未发现有种子萌发则结束实验。

### 1.4.2 漂浮—沉降实验

在漂浮实验中,取四个 0.5 L 锥形烧瓶,并向其中加入 450 ml 的去离子水和 11.25 g 氯化钠,用玻璃棒搅拌均匀配置典型的黄河口海水盐度(25 ppt)<sup>[26]</sup>。在每个锥形瓶中放置同一种处理的种子产品 30 粒,记录每粒种子产品开始下沉的时间,直至锥形瓶中的种子产品完全沉降。

沉降实验在 0.15 m 直径,1.5 m 高的垂直玻璃量筒中进行,量筒中注入盐度为 25 ppt 的 NaCl 溶液。量筒外壁附上坐标纸记录沉降距离,并采用高清摄像机记录沉降过程。每次实验时,将种子产品从水面下投放以去除表面张力的影响,测量种子产品开始下沉到完全沉降所需的时间,每种种子产品设 20 个重复,每测完一组种子产品重新置换量筒中的 NaCl 溶液以去除种子产品本身对溶液盐度的影响,由公式计算平均沉降速度。

$$V=H/t \quad (2)$$

式中:  $V$  表示平均沉降速度 ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $H$  表示沉降距离 (cm);  $t$  表示沉降时间 (s)。

## 1.5 数据分析

使用 IBM SPSS Statistics 22.0 软件对所有数据进行统计学分析,所有的实验数据均以平均值±标准误的形式表示。种子产品的部分特性,吸水、保水性能以及悬浮—沉降实验的相关数据采用单因素方差分析(one-way ANOVA),盐度胁迫下种子产品的萌发情况采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和多因素方差分析,事后多重比较均采用 LSD 比较法,在 0.05 水平上进行差异显著性检测,数据检验之前进行了数据的正态性检验,对于不符合正态分布的数据进行了 log 数据转换。

## 2 结果分析

### 2.1 种子产品的部分特性

根据所述的固态种子产品的包装过程,制得的种子产品形状为大小均一的丸粒状,种子产品的直径和 5 粒重如表 1 所述,种子产品的体积和重量与天然种子相比有较大差

异。其中，种子产品与天然种子的直径差异显著 ( $P<0.05$ )，种子产品的直径是天然种子的2~3倍，种子产品的5粒重显著大于天然种子 ( $P<0.05$ )，种子产品的五粒重相比于天然种子增加了400~500倍。

2.2 不同种子产品的吸、保水性能的比较

考虑到种子产品的耐盐性和环保性，择优选择的三种不同的保水材料，分别是：聚丙烯酰胺 (PAM)、羧甲基纤维素 (HEC)、羧丙基甲基纤维素 (HPMC)，表2比较了三种保水材料在25 ppt盐溶液中的吸水性和保水性。实验结果显示，HEC的吸水倍率为 $17.67\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ ，显著大于HPMC ( $P<0.05$ )，PAM的吸水倍率与HEC、HPMC均无显著差异 ( $P>0.05$ )。此外PAM与HEC在吸水达到饱和后在25℃下保水持续时间无显著差异 ( $P>0.05$ )，均可达22小时以上，且二者的保水持续时间显著大于HPMC ( $P<0.05$ )。

图4是25 ppt NaCl溶液（模拟海水盐度）中不同种子产品吸水倍率的比较，结果显示，在25 ppt NaCl溶液中种子产品的吸水倍率均在 $2\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ 以上，而天然种子在25 ppt NaCl溶液中的吸水倍率为 $0.127743\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ ，种子产品的吸水倍率显著高于天然种子 ( $P<0.05$ )。此外，不同保水材料的种子产品的吸水倍率存在显著差异 ( $P<0.05$ )，以PAM、HEC为保水材料的种子产品的吸水倍率显著高于以PHMC为保水材料的种子产品 ( $P<0.05$ )，而保水材料为PAM、HEC的种子产品的吸水倍率差异不显著 ( $P>0.05$ )。

图5是不同种子产品在室内25℃下保水持续时间的比较，从图中可以看出，种子产品的保水持续时间均在9小时以上，其中以HPMC为保水材料的种子产品的保水持续时

表1 种子产品的部分特性

Table 1 The characteristics of seed products

种子产品类型	产品直径/mm	5粒重/g
PAM的种子产品	$6.38\pm0.6512\text{ a}$	$0.8881\pm0.1559\text{ b}$
HEC的种子产品	$6.17\pm0.7025\text{ a}$	$0.8257\pm0.1098\text{ b}$
HPMC的种子产品	$6.28\pm0.5884\text{ a}$	$1.0989\pm0.0910\text{ a}$
天然种子	$2.68\pm0.2658\text{ b}$	$0.0020\pm0.0008\text{ c}$

表2 保水材料的吸水倍率、保水持续时间

Table 2 Water absorption ratio and water retention duration of water-retaining materials

保水材料类型	吸水 (25 ppt) 倍率/ ( $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )	保水持续时间/h
PAM	$15.2956\pm1.1742\text{ ab}$	$23\pm0.5864\text{ a}$
HEC	$17.6671\pm1.2237\text{ a}$	$22\pm1.5216\text{ a}$
HPMC	$13.7958\pm2.1925\text{ b}$	$19\pm0.7389\text{ b}$

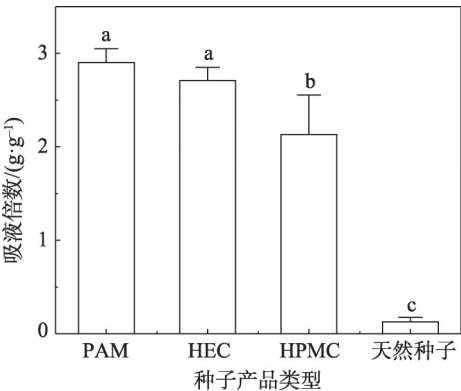


图4 不同种子产品吸水  
(25 ppt NaCl溶液) 倍率及对比

Fig. 4 Water absorption (25 ppt NaCl solution) magnification and comparison chart of different seed products

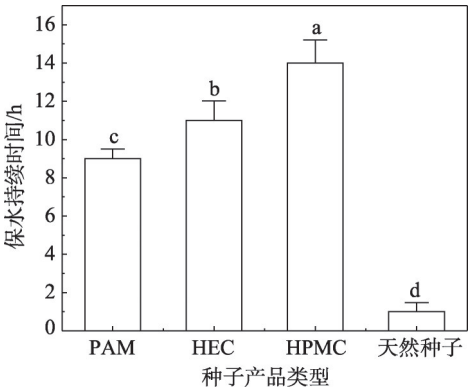


图5 不同种子产品保水持续  
时间及对比

Fig. 5 Water retention duration and comparison chart of different seed products

间为 14 小时,而天然盐地碱蓬种子的保水持续时间仅为 1 小时,种子产品的保水持续时间显著大于天然种子 ( $P<0.05$ ),此外,不同种子产品在室内 25 ℃ 下的保水持续时间差异显著 ( $P<0.05$ ),不同种子产品的保水持续时间表现为 HPMC 的种子产品 > HEC 的种子产品 > PAM 的种子产品。

### 2.3 盐度胁迫对不同种子产品萌发的影响

图 6 是不同种子产品在不同盐度胁迫下的日萌发情况,可以看出,天然盐地碱蓬种子随着盐度胁迫强度的增加,盐地碱蓬种子的最终萌发率先上升后下降,在盐度 14 ppt 时达到阈值,且各盐度胁迫 (0、7 ppt、14 ppt、21 ppt、28 ppt、35 ppt) 下盐地碱蓬种子的最终萌发率差异显著 ( $P<0.05$ ),据此推测过高和过低的盐度胁迫对盐地碱蓬种子的萌发均有明显的抑制作用。而在种子产品 PAM、HEC 和 HPMC 的实验组中,种子产品在各盐度胁迫 (0、7 ppt、14 ppt、21 ppt、28 ppt、35 ppt) 间的萌发率均无显著差异 ( $P>0.05$ )。试验结果表明,种子产品均受盐度变化的影响较小,对盐度胁迫表现出抗性较好。

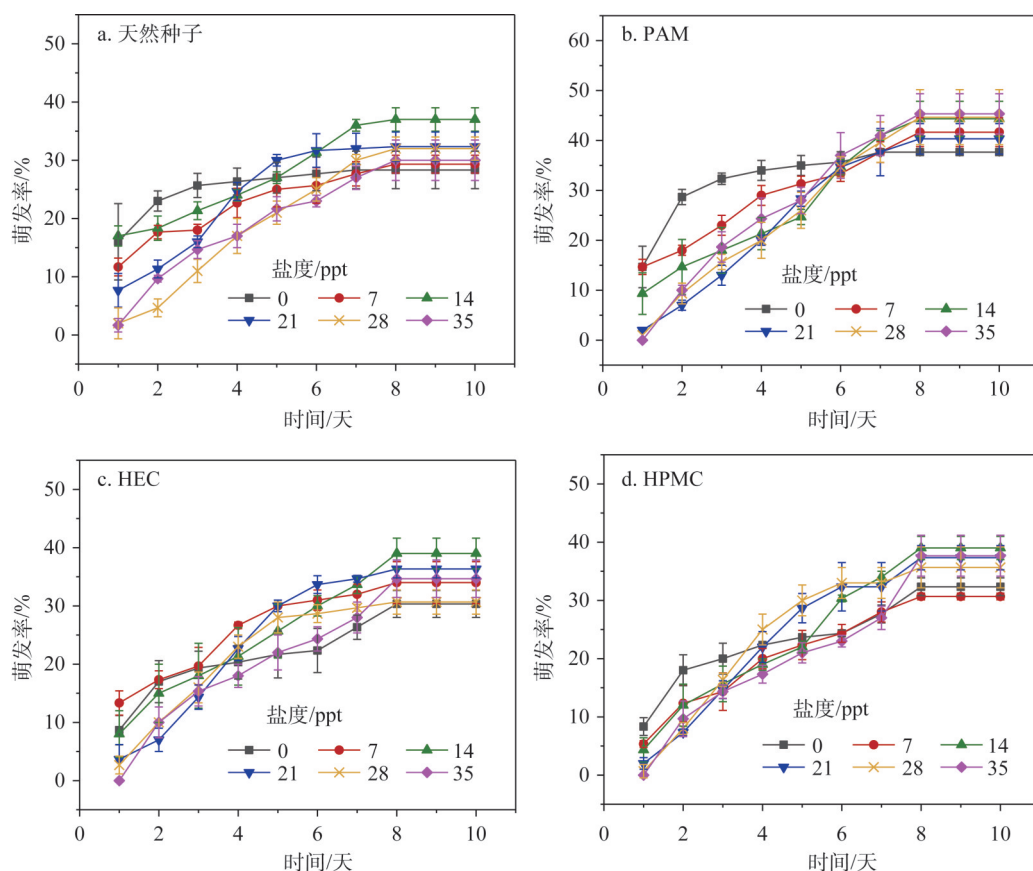


图 6 不同种子产品在各盐度胁迫下的日萌发情况及对比

Fig. 6 Daily germination and comparison of different seed products under various salinity stresses

### 2.4 不同种子产品包装对盐地碱蓬种子萌发的影响

在不同盐度胁迫下,四种包装处理的盐地碱蓬种子的累积萌发情况如图 7 所示,保水材料为 PAM 的种子产品的累积萌发率在各盐度胁迫 (0、7 ppt、14 ppt、21 ppt、28 ppt、



35 ppt) 下均高于天然的盐地碱蓬种子, 且其累积萌发率与天然的盐地碱蓬种子相比差异显著 ( $P<0.05$ ), 保水材料为 HEC 的种子产品的累积萌发率在 7 ppt 盐度下显著高于天然的盐地碱蓬种子 ( $P<0.05$ ), 在其他盐度胁迫 (0、14 ppt、21 ppt、28 ppt、35 ppt) 下与天然的盐地碱蓬种子累积萌发率无显著差异 ( $P>0.05$ )。而以 HPMC 为保水材料的种子产品的累积萌发率在 21 ppt、35 ppt 盐度下显著高于天然的盐地碱蓬种子 ( $P<0.05$ ), 在其他盐度胁迫 (0、7 ppt、14 ppt、28 ppt) 下与天然的盐地碱蓬种子累积萌发率无显著差异 ( $P>0.05$ ), 据此不同种子产品包装对盐地碱蓬种子萌发的促进作用表现为  $\text{PAM}>\text{HPMC}>\text{HEC}>\text{天然种子}$ 。实验结果表明, 种子产品包装对盐地碱蓬种子的萌发有显著促进作用 ( $P<0.05$ ), 且保水材料为 PAM 的种子产品效果最优。

2.5 种子产品包装对盐地碱蓬种子悬浮时间和平均沉降速率的影响

在许多盐沼湿地生态系统中, 种子的悬浮能力及沉降速度作为种子水媒传布的关键因素, 在确定种子扩散距离和最终到达定殖区域中也起着重要的作用<sup>[27-30]</sup>。表 3 显示了不同种子产品包装对盐地碱蓬种子悬浮时间的影响, 从表中可以看出, 不同种子产品的悬浮时间差异显著 ( $P<0.05$ ), 其中, 保水材料为 PAM、HEC、HPMC 的种子产品和天然种子的悬浮时间分别为 0 s、42 s、145 s、12 小时内未沉降, 在 25 ppt 盐水中的悬浮时间表现为  $\text{PAM}<\text{HEC}<\text{HPMC}<\text{天然种子}$ 。图 8 是不同种子产品包装对盐地碱蓬种子悬浮时间、平均沉降速率的影响。不同种子产品的平均沉降速度存在显著差异 ( $P<0.05$ ), 保水材料为 PAM、HEC、HPMC 的种子产品和天然种子的平均沉降速度分别为  $6.35\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $2.37\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $3.21\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $2.85\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ , 且以 PAM 为保水材料的种子产品的平均沉降速率显著大于以 HEC、HPMC 为保水材料的种子产品以及天然种子 ( $P<0.05$ ), 而以 HEC、HPMC 为保水材料的种子产品与天然种子的平均沉降速度均无显著差异 ( $P>0.05$ )。试验结果表明, 种子产品与天然种子相比具有悬浮时间短、沉降速度快的优点, 其中保水材料为 PAM 的种子产品效果最优, 可以直接、快速地沉降。

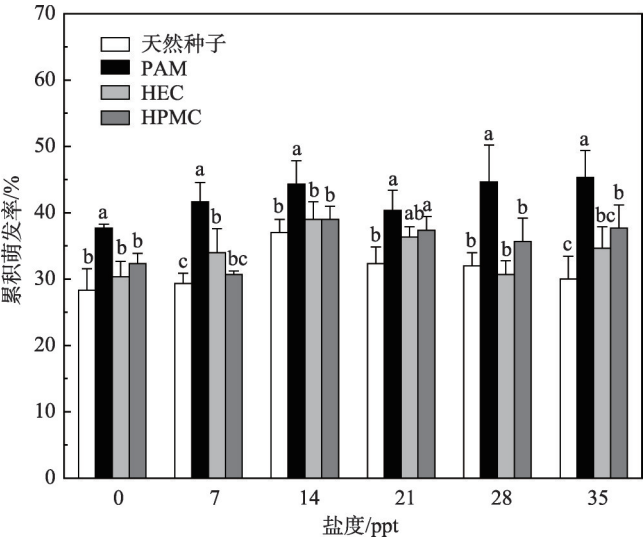


图7 不同种子产品在各盐度胁迫下的累积萌发率的对比  
Fig. 7 Comparison of cumulative germination rates of different seed products under various salinity stresses

表3 不同种子产品在 25 ppt NaCl 溶液中悬浮时间  
Table 3 The suspension time of different seed products in 25 ppt NaCl solution

种子产品类型	悬浮时间/s
PAM的种子产品	0 c
HEC的种子产品	42.00±12.0949 b
HPMC的种子产品	145.87±47.3465 a
天然种子	12小时内未沉降



### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

本研究以黄河三角洲盐沼湿地的盐地碱蓬为修复物种研发的固态种子产品,形状大小均匀,流动性强,可用于大规模机械化撒播。研究结果表明,种子产品具有良好的吸25 ppt NaCl溶液(模拟海水)的能力和优良的保水性能;种子产品在各盐度胁迫(0 ppt、7 ppt、14 ppt、21 ppt、28 ppt、35 ppt)间的萌发率均无显著差异,表现出良好的耐盐抗性;经种子产品包装的盐地碱蓬种子具有更高的萌发潜力,以保水材料为PAM的种子产品的效果最优;此外,种子产品缩短了25 ppt NaCl溶液(模拟海水)中的悬浮时间,加快了下沉平均速度,其中以PAM为保水材料的种子产品可以直接、快速地沉降,表明种子产品增强了抵抗水动力干扰的能力。综上,以PAM为保水材料的种子产品的整体效果最优,种子产品修复的区域建议选在盐度在0~35 ppt范围内的低潮滩的退化区。

本研究中研制的种子产品是将种子产品技术应用于滨海湿地盐沼植被修复的首次尝试,针对种子产品有效性开展的相关研究为可用于生态修复的盐沼植物物种及修复区域的选择提供参考。下一阶段将在预实验的基础上进一步开展包含更多情境的室内模拟实验和野外原位实验研究,并对现场监测结果进行对比分析,以进一步验证种子产品在滨海湿地盐沼植被修复中应用的有效性。

#### 3.2 讨论

##### 3.2.1 种子产品包装对盐地碱蓬种子吸、保水性能的影响

在中纬度滨海湿地的中潮带,由于高温导致水分蒸发量大,使得水胁迫通常是限制植物种子萌发的关键性因素<sup>[31]</sup>。高吸水性树脂(Super Absorbent Polymer, SAP)是一种功能性聚合物材料,能够吸收相当于自身质量数百倍甚至千倍的水,并具有很强保水性能。近年来,其一直作为缓解植物种子水胁迫的优良材料。郭焕等制备了一种淀粉接枝丙烯酸树脂聚合物,其最大吸水率可达 $587 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ ,其最大吸盐水(0.9% NaCl溶液)倍率为 $148 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ <sup>[32]</sup>。冯晓琦等<sup>[33]</sup>制备了一种分子筛改性羟甲基纤维素类高吸水性树脂,其最大吸水率可达 $675 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。黄慧珍等<sup>[34]</sup>以丙烯酸和海藻酸钠为原料采用了水溶液聚合法制得的树脂吸水倍率为 $830 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ ,吸盐水(0.9% NaCl溶液)倍率为 $81 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。本研究比较了三种不同保水材料的种子产品和天然种子在25 ppt NaCl溶液(模拟海水盐度)中的吸水倍率。研究结果表明种子产品在25 ppt NaCl溶液中的吸水倍率均在 $2 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 以上,显著高于天然种子( $P < 0.05$ ),这可能与种子产品组分自身的吸水性能有关。一方面由于种子产品内核保水材料的分子链上有大量的亲水基团(羧基、羧基离子或酰胺基等),通过水合作用导致网链内外的渗透压差增大,同时同性基团间的排斥作用更使网链扩张,促使水分子向树脂内部扩散,吸收大量的水分<sup>[35]</sup>;另一方面由于种子产品中层有机-无机复合材料自身会形成大小不一的孔径,通过物理毛细吸附作用,也会吸收部

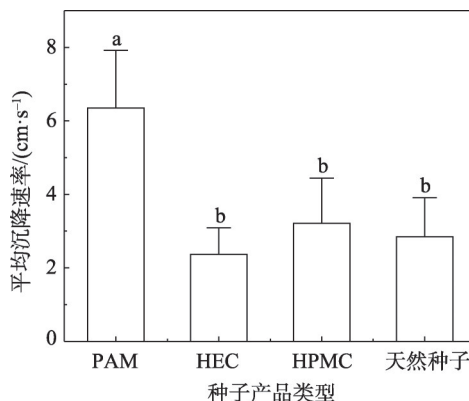


图8 不同种子产品在25 ppt NaCl溶液中沉降情况及对比

Fig. 8 Sedimentation of different seed products in 25 ppt NaCl solution and comparison chart

分水分。

本研究发现种子产品在室内 25 ℃下的保水持续时间显著大于裸种子 ( $P<0.05$ )，种子产品的保水持续时间是裸种子的 9~14 倍，有相关学者对高吸水性树脂改善土壤保水性进行了研究，也得到类似的结果<sup>[36-37]</sup>。这可能与种子产品内核保水材料的交联结构有关，保证了保水材料只能溶胀不能溶解，在赋予保水材料吸水、释水的可逆性的同时，保证了保水材料的稳定性（保水性）<sup>[38]</sup>。

### 3.2.2 盐度胁迫对不同种子产品萌发的影响

在生态系统中土壤作为植株生长的基础，其自身的结构、水分、pH、有机物、无机物、盐分等都影响着植株早期的建立，而在滨海盐沼生态系统中，盐分对植株早期建立最常见的影响是抑制种子萌发和幼苗生长<sup>[39]</sup>。李海燕等<sup>[40]</sup>研究发现高浓度的盐溶液对盐生禾草—羊草和野大麦种子的发芽率、发芽速度、胚根和胚芽的相对生长均存在明显的抑制作用。Uhvits 等<sup>[41-42]</sup>研究发现高盐度胁迫减缓了种子对水分的吸收，从而抑制了它们的萌发和根伸长。本研究的结果表明，天然的盐地碱蓬种子随着盐度胁迫强度的增加，盐地碱蓬种子的累积萌发数量呈现出先升高后降低的趋势并在中度盐度 14 ppt 时达到阈值，因此，推测过高和过低的盐度胁迫对盐地碱蓬种子的萌发具有明显的抑制作用 ( $P<0.05$ )，这类似于先前研究中盐度胁迫下盐生植物种子的萌发反应。

在种子产品 PAM、HEC 和 HPMC 的实验组中，种子产品在各盐度胁迫 (0 ppt、7 ppt、14 ppt、21 ppt、28 ppt、35 ppt) 间的萌发率均无显著差异 ( $P>0.05$ )。可见，种子产品均受盐度变化的影响较小，对盐度胁迫表现出抗性较好。这可能是由于种子产品内部的保水材料重复吸收、保留并释放大相对于自身重量的水<sup>[38]</sup>，降低了种子周围的盐度，缓解了盐度胁迫对盐地碱蓬种子的抑制作用。本研究表明，种子产品具有良好的耐盐性，可以有效的缓解周围的盐度胁迫。

### 3.2.3 种子产品包装对盐地碱蓬种子萌发率的影响

如之前研究所报道的，经种子产品包装后的种子通常具有更高的萌发潜力<sup>[12-19]</sup>。徐卯林等<sup>[43]</sup>将高吸水种衣剂应用在旱育水稻抛秧上，发现高吸水种衣剂包衣处理可以有效地促进种子发芽成苗，提高旱育秧出苗率和成秧率。姜绍通等<sup>[44]</sup>合成了一种甘薯淀粉接枝共聚高吸水树脂并将其对种子进行包衣处理，结果表明包衣种子的发芽率明显比未包衣种子地发芽率高 10% 以上。此外，高吸水性树脂包衣应用在玉米<sup>[45]</sup>、棉花<sup>[46]</sup>、大豆<sup>[47]</sup>等作物的研究发现高吸水性树脂包衣对种子萌发、幼苗建立具有促进作用。本研究结果表明种子产品包装对盐地碱蓬种子的萌发有显著促进作用 ( $P<0.05$ )，不同种子产品包装对盐地碱蓬种子萌发的促进作用表现为 PAM>HPMC>HEC>天然种子。一方面原因是每个种子产品团聚多粒种子，而已有的研究表明种子前期的促进作用大于后期的竞争作用，出苗的渗透力随着在相同位置的种子数量而增加<sup>[48]</sup>。另一方面可能是由于种子产品包衣在增加种子的可用水量的同时，提供萌发所需要的养分，促进了盐地碱蓬种子的萌发。

### 3.2.4 种子产品包装对盐地碱蓬种子悬浮—沉降性能的影响

一般而言，种子扩散主要经历两个阶段，即初次扩散阶段 (primary dispersal)，主要指成熟种子由于重力作用从母本植株掉落附近地面的过程；二次扩散阶段 (secondary dispersal)，主要包括种子掉落地面后的运动<sup>[29]</sup>。在许多盐沼湿地生态系统中，水媒传播是种子二次扩散的主要方式，而种子的漂浮能力是其水媒传播的关键因素<sup>[49]</sup>。其中，不

同植物种子的漂浮能力差异显著,持续漂浮时间从小时到年不等<sup>[50]</sup>。通常沉水种子在高流量情形下可以传播较远的距离<sup>[51]</sup>,而漂浮种子潜在扩散距离更远,尤其是在低流量或低流速的情形下<sup>[52-53]</sup>。McDonald<sup>[54]</sup>、Van 等<sup>[55]</sup>则发现种子在动水中漂浮时间较短而在静水中漂浮时间较长。因此,种子的漂浮能力及水力要素(流速、流向、紊动强度等)对确定种子传播距离及最终到达定殖区域具有关键作用<sup>[5]</sup>。本研究结果表明不同种子产品的悬浮时间差异显著( $P<0.05$ ),不同种子产品在 25 ppt 盐水中的悬浮时间表现为 PAM<HEC<HPMC。这可能与种子产品的内核保水材料吸水性有关,所选用的保水材料为轻度交联结构的高分子,其分子链上有很多亲水性基团,故能吸收自身重量十几倍的含盐水分从而实现沉降,并且吸盐速率越快,悬浮的时间越短<sup>[38]</sup>。

由于沉水种子亦可以随水流输运,因此种子在水中扩散过程同样重要<sup>[56]</sup>,而沉降速度作为此过程中的关键因素之一,在确定种子扩散距离和最终到达定殖区域中亦起着重要的作用<sup>[57]</sup>。本研究发现,不同种子产品的沉降平均速度存在显著差异( $P<0.05$ ),以 PAM 为保水材料的种子产品的沉降平均速度显著大于以 HEC、HPMC 为保水材料的种子产品以及天然种子( $P<0.05$ ),而以 HEC、HPMC 为保水材料的种子产品与天然种子的沉降平均速度均无显著差异( $P>0.05$ )。研究表明种子产品增强了盐地碱蓬种子抵抗水动力干扰的能力,具有悬浮时间短、沉降速度快的优点。

## 参考文献(References):

- [1] BERTNESS M D, CRAIN C, HOLDREDGE C, et al. Eutrophication and consumer control of New England salt marsh primary productivity. *Conservation Biology*, 2008, 22(1): 131-139.
- [2] BERTNESS M D, SILLIMAN B R. Consumer control of salt marshes driven by human disturbance. *Conservation Biology*, 2008, 22(3): 618-623.
- [3] 贺强, 安渊, 崔保山. 滨海盐沼及其植物群落的分布与多样性. *生态环境学报*, 2010, 19(3): 657-664. [HE Q, AN Y, CUI B S. Coastal salt marshes and distribution and diversity of salt marsh plant communities. *Ecology & Environmental Sciences*, 2010, 19(3): 657-664.]
- [4] 崔保山, 谢焱, 王青, 等. 大规模围填海对滨海湿地的影响与对策. *中国科学院院刊*, 2017, 32(4): 418-425. [CUI B S, XIE T, WANG Q, et al. Impact of large-scale reclamation on coastal wetlands and implications for ecological restoration, compensation, and sustainable exploitation framework. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2017, 32(4): 418-425.]
- [5] 曾玉红, 朱曦. 经水媒传布种子的漂浮及沉降特性研究进展. *人民长江*, 2017, 48(17): 20-24. [ZENG Y H, ZHU X. Review on seeds floating and settling kinetic characteristics dispersed by hydrochory. *Yangtze River*, 2017, 48(17): 20-24.]
- [6] DE JONGE V N, DE JONG D J. Ecological Restoration of Aquatic and Semi-aquatic Ecosystems in the Netherlands (NW Europe). Dordrecht: Springer, 2002: 7-28.
- [7] FOSTER N M, HUDSON M D, BRAY S, et al. Intertidal mudflat and saltmarsh conservation and sustainable use in the UK: A review. *Journal of Environmental Management*, 2013, 126: 96-104.
- [8] MORSING J, FRANSEN S I, VEJRE H, et al. Do the principles of ecological restoration cover EU LIFE nature co-funded projects in Denmark?. *Ecology and Society*, 2013, 18(4): 15.
- [9] MERRITT D J, DIXON K W. Restoration seed banks: A matter of scale. *Science*, 2011, 332(6028): 424-425.
- [10] JAMES J J, SVEJCAR T J, RINELLA M J. Demographic processes limiting seedling recruitment in arid grassland restoration. *Journal of Applied Ecology*, 2011, 48(4): 961-969.
- [11] LIU Y, HORISAWA S, MUKOHATA Y. Effect of seed coating on plant growth and soil conditions: A preliminary study for restoration of degraded rangeland in the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Grassland Science*, 2010, 56(3): 145-152.
- [12] MADSEN M D, DAVIES K W, WILLIAMS C J, et al. Agglomerating seeds to enhance native seedling emergence and growth. *Journal of Applied Ecology*, 2012, 49(2): 431-438.

- [13] TURNER S R, PEARCE B, ROKICH D P, et al. Influence of polymer seed coatings, soil raking, and time of sowing on seedling performance in post-mining restoration. *Restoration Ecology*, 2006, 14(2): 267-277.
- [14] PEDRINI S, MERRITT D J, STEVENS J, et al. Seed coating: Science or marketing spin?. *Trends in plant science*, 2017, 22(2): 106-116.
- [15] MACDONALD L H, LARSEN I J. *Fire Effects on Soils and Restoration Strategies*. Enfield: Science Publishers, 2009: 423-452.
- [16] MADSEN M D, KOSTKA S J, INOUE A L, et al. Postfire restoration of soil hydrology and wildland vegetation using surfactant seed coating technology. *Rangeland Ecology & Management*, 2012, 65(3): 253-259.
- [17] MADSEN M, ZVIRZDIN D, ROUNDY B, et al. Improving reseeding success after catastrophic wildfire with surfactant seed coating technology. *Pesticide Formulation and Delivery Systems: 33<sup>rd</sup> Volume, "Sustainability: Contributions from Formulation Technology"*. ASTM International, 2014.
- [18] HOSSEINI M, GONZALEZ-PELAYO O, VASQUES A, et al. The short-term effectiveness of surfactant seed coating and mulching treatment in reducing post-fire runoff and erosion. *Geoderma*, 2017, 307: 231-237.
- [19] RICHARDSON M D, HIGNIGHT K W. Seedling emergence of tall fescue and kentucky bluegrass, as affected by two seed coating techniques. *Hort Technology*, 2010, 20(2): 415-417.
- [20] MADSEN M D, DAVIES K W, MUMMEY D L, et al. Improving restoration of exotic annual grass-invaded rangelands through activated carbon seed enhancement technologies. *Rangeland Ecology & Management*, 2014, 67(1): 61-67.
- [21] MADSEN M D, DAVIES K W, BOYD C S, et al. Emerging seed enhancement technologies for overcoming barriers to restoration. *Restoration Ecology*, 2016, 24: S77-S84.
- [22] MADSEN M D, SVEJCAR A J. Seed pillow for overcoming the limiting factors controlling rangeland reseeding success: US, 9326451, 2016-05-03.
- [23] SILINSKI A, HEUNER M, SCHOELYNCK J, et al. Effects of wind waves versus ship waves on tidal marsh plants: A flume study on different life stages of *Scirpus maritimus*. *Plos One*, 2015, 10(3): e0118687.
- [24] BALKE T, HERMAN P M J, BOUMA T J. Critical transitions in disturbance-driven ecosystems: Identifying windows of opportunity for recovery. *Journal of Ecology*, 2014, 102(3): 700-708.
- [25] NICHOLS P G H, MALIK A I, STOCKDALE M, et al. Salt tolerance and avoidance mechanisms at germination of annual pasture legumes: Importance for adaptation to saline environments. *Plant & Soil*, 2009, 315(1/2): 241-255.
- [26] 王伟宏. 黄河口地区海水盐度场对泥沙固结过程影响研究. 青岛: 中国海洋大学, 2015. [WANG W H. Effect of the salinity field on the sediment consolidation process in the Yellow River Estuary. Qingdao: Ocean University of China, 2015.]
- [27] CHANG E R, VEENEKLAAS R M, BUITENWERF R, et al. To move or not to move: Determinants of seed retention in a tidal marsh. *Functional Ecology*, 2008, 22(4): 720-727.
- [28] VAN LEEUWEN C H A, SARNEEL J M, VAN PAASSEN J, et al. Hydrology, shore morphology and species traits affect seed dispersal, germination and community assembly in shoreline plant communities. *Journal of Ecology*, 2014, 102(4): 998-1007.
- [29] GRIFFITH A B F, I.N. Primary and secondary seed dispersal of a rare, tidal wetland annual, *aeschynomene virginica*. *Wetlands*, 2002, 22: 696-704.
- [30] HUISKES A H L, KOUTSTAAL B P, HERMAN P M J, et al. Seed dispersal of halophytes in Tidal Salt Marshes. *Journal of Ecology*, 1995, 83(4): 559.
- [31] WANG Q, WANG C H, HUANG S F, et al. Review on salt marsh plant communities: Distribution, succession and impact factors. *Ecology and Environment Sciences*, 2012, 21(2): 375-388.
- [32] 郭焕, 刘国军, 刘素花, 等. 淀粉接枝丙烯酸高吸水树脂的制备. 大连工业大学学报, 2013, 32(4): 293-296. [GUO H, LIU G J, LIU S H, et al. Preparation of super absorbent polymer by graft copolymerization of acrylic acid onto starch. *Journal of Dalian Polytechnic University*, 2013, 32(4): 293-296.]
- [33] 冯晓琦, 邓卫波, 申峻, 等. 分子筛改性羧甲基纤维素类高吸水性树脂研究. 化工新型材料, 2012, 40(10): 37-39. [FENG X Q, DENG W B, SHEN J, et al. Study on the carboxymethyl cellulose superabsorbent modified by molecular sieve. *New Chemical Materials*, 2012, 40(10): 37-39.]
- [34] 黄慧珍. 聚丙烯酸—海藻酸钠吸水树脂的制备及性能研究. 广州化工, 2012, 40(12): 96-97. [HUANG H Z. Study on



- preparation and properties of polyacrylic acid-sodium alginate absorbent resin. *Guangzhou Chemical Industry*, 2012, 40 (12): 96-97.]
- [35] FLORY P J. *Principles of Polymer Chemistry*. New York: Cornell University Press, 1953: 57-59.
- [36] 闫辉, 张丽华, 周秀苗, 等. 高吸水性树脂保水保肥性能研究. *化工科技*, 2001, 9(5): 4-7. [YAN H, ZHANG L H, ZHOU X M, et al. Study on water retention capacity and fertilizer retention capacity of super absorbent polymers. *Science and Technology in Chemical Industry*, 2001, 9(5): 4-7.]
- [37] 潘滋涵, 刘涛, 吴效楠, 等. 秸秆纤维素接枝 AA/AM 高吸水性树脂合成与性能研究. *塑料科技*, 2018, 46(1): 46-50. [PANG Z H, LIU T, WU X N, et al. Study on synthesis and properties of straw cellulose grafted with AA/AM high adsorbent resin. *Plastics Science and Technology*, 2018, 46(1): 46-50.]
- [38] ZOHURIAAN-MEHR M J, KABIRI K. Superabsorbent polymer materials: A review. *Iranian Polymer Journal*, 2008, 17 (6): 451.
- [39] SONG J, FAN H, ZHAO Y, et al. Effect of salinity on germination, seedling emergence, seedling growth and ion accumulation of a euhalophyte *Suaeda salsa* in an intertidal zone and on saline inland. *Aquatic Botany*, 2008, 88(4): 331-337.
- [40] 海燕, 丁雪梅, 周婵, 等. 盐胁迫对三种盐生禾草种子萌发及其胚生长的影响. *草地学报*, 2004, 12(1): 45-5. [HAI Y, DING X M, ZHOU C, et al. The effect of saline stress on the germination and embryo growth of three saline-grass seeds. *Acta Agrestia Sinica*, 2004, 12(1): 45-50.]
- [41] UHVITS R. Effect of osmotic pressure on water absorption and germination of alfalfa seeds. *American Journal of Botany*, 1946, 33(4): 278-285.
- [42] WERNER J E, FINKELSTEIN R R. Arabidopsis mutants with reduced response to NaCl and osmotic stress. *Physiologia Plantarum*, 1995, 93(4): 659-666.
- [43] 徐卯林, 张洪熙, 黄年生, 等. 高吸水种衣剂在水稻旱育抛秧上的应用. *中国水稻科学*, 1998, 12(2): 92-98. [XU M L, ZHANG H X, HUANG N S, et al. Application of high-hydroscopicity seed-coating material in dry-raised scattered-transplantation rice. *Chinese Journal of Rice Science*, 1998, 12(2): 92-98.]
- [44] 姜绍通, 周建芹, 赵妍嫣, 等. 甘薯淀粉接枝共聚高吸水树脂的合成及在种子包衣上的应用研究. *农业工程学报*, 2004, 20(1): 207-210. [JIANG S T, ZHOU J Q, ZHAO Y Y, et al. Synthesis of sweet potato starch grafted copolymer super absorbent resin and its application to seed-coating. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(1): 207-210.]
- [45] 陈恒伟, 姜绍通, 周建芹, 等. 高吸水树脂种衣剂对玉米种子生理特性的影响. *合肥工业大学学报: 自然科学版*, 2004, 27(3): 242-246. [CHEN H W, JIANG S T, ZHOU J Q, et al. Super absorbent polymer seed coating and its effect on physiological features of corn seed. *Journal of Hefei University of Technology*, 2004, 27(3): 242-246.]
- [46] 伍亚华, 石亚中. 甘薯淀粉基高吸水树脂棉花包衣剂研究. *应用化工*, 2009, 38(2): 182-184. [WU Y H, SHI Y Z. Study on cotton seed coating with sweet potato starch super absorbent polymer. *Applied Chemical Industry*, 2009, 38 (2): 182-184.]
- [47] 王志玉, 刘作新, 魏义长. 高吸水树脂包衣对大豆光合作用及水分利用效率的影响. *干旱地区农业研究*, 2004, 22 (3): 105-108. [WANG Z Y, LIU Z X, WEI Y C. Effects of super absorbent polymers coating on photosynthesis and water use efficiency of soybean. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2004, 22(3): 105-108.]
- [48] AWADHWAL N G. Soil crust and its impact on crop establishment: A review. *Soil and Tillage Research*, 1985, 5(3): 289-302.
- [49] CARTHEY A J R, FRYIRS K A, RALPH T J, et al. How seed traits predict floating times: A biophysical process model for hydrochorous seed transport behaviour in fluvial systems. *Freshwater Biology*, 2016, 61(1): 19-31.
- [50] HUISKES A H L, BLOM C W P M, ROZEMA J. *Vegetation between Land and Sea: Structure and Processes*. Dordrecht: Springer, 1987: 226-235.
- [51] GURNELL A, THOMPSON K, GOODSON J, et al. Propagule deposition along river margins: Linking hydrology and ecology. *Journal of Ecology*, 2008, 96(3): 553-565.
- [52] DANVIND M, NILSSON C. Seed floating ability and distribution of alpine plants along a Northern Swedish River. *Journal of Vegetation Science*, 1997, 8(2): 271-276.
- [53] BOEDELTE G, BAKKER J P, TEN B A, et al. Dispersal phenology of hydrochorous plants in relation to discharge, seed release time and buoyancy of seeds: The flood pulse concept supported. *Journal of Ecology*, 2004, 92(5): 786-796.
- [54] MCDONALD K. Tidal Seed Dispersal Potential of *Spartina Densiflora* in Humboldt Bay. California: Humboldt State University, 2014.
- [55] VAN D B T, VAN D R, BOBBINK R. Variation in seed buoyancy of species in wetland ecosystems with different flooding dynamics. *Journal of Vegetation Science*, 2005, 16(5): 579-586.

- [56] MARKWITH S H, LEIGH D S. Subaqueous hydrochory: Open-channel hydraulic modelling of non-buoyant seed movement. *Freshwater Biology*, 2008, 53(11): 2274-2286.
- [57] YOSHIKAWA M, HOSHINO Y, IWATA N. Role of seed settleability and settling velocity in water for plant colonization of river gravel bars. *Journal of Vegetation Science*, 2013, 24: 712-723.

## Seed coating methods and availability for applying in the restoration of salt marsh vegetation in coastal wetlands

SUI Hao-chen<sup>1</sup>, MA Xu<sup>1</sup>, YAN Jia-guo<sup>1</sup>, ZHANG Shu-yan<sup>2</sup>, GAI Ling-yun<sup>2</sup>,  
LIU Ze-zheng<sup>1</sup>, QIU Dong-dong<sup>1</sup>, CUI Bao-shan<sup>1</sup>

(1. School of Environment, State Key Laboratory of Water Environment Simulation, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Huanghekou Management Station, Shandong Yellow River Delta National Nature Reserve Administration, Dongying 257500, Shandong, China)

**Abstract:** A crucial question in restoration of coastal saltmarsh ecosystem is how to keep sustainable and evenly distributed seed banks, and approaches to enhance the seed settlement and germination. Thus, an urgent need is to develop a method by ameliorating the available conditions for seeds settlement and germination, thereby promoting the effectiveness of coastal vegetation restoration. Here, using an annual saltmarsh vegetation *Suaeda salsa* as a model species in the Yellow River Delta, we experimentally enveloped a thin layer outside each seed by three kinds of super absorbent materials, thereby testing their difference and providing an optimal selection for the restoration of *Suaeda salsa*. The materials we selected were polyacrylamide PAM, hydroxyethyl cellulose HEC, and hydroxypropyl methyl cellulose HPMC, which of each harbors the high ability in water absorption. Firstly, we coated the powder of each kind of absorbent material outside the seeds; secondly, we experimentally manipulated a gradient of water salinity to know the coated seed germination vary with the salinity; thirdly, we experimentally released 30 seeds for testing their mean suspension time and 20 seeds for the whole process of settlement; in the end, we investigated the seeds germination with different absorbent materials. Our results showed that, compared to the natural seeds dispersed to the bare ground, seeds that were enveloped by the water retaining materials (i.e. seed product) significantly harbored more water and maintained the water for a longer time. Our findings are that seed product coated by absorbent materials presented shorter suspension time and quick settlement within the sea water; the seed product significantly increased the germination rate and salt tolerance. In addition, we observed that PAM, HPMC and HEC differed significantly in making contribution to the seed suspension, settlement, and seed germination, showing that the seed product with PAM is higher than HPMC, HEC and natural seeds, successively. Our study provides an available approach for governing the persistence of the coastal seed banks, with important management implication to use artificial seed products in the restoration of degraded saltmarsh ecosystems.

**Keywords:** saltmarsh; ecological restoration; seed coating; superabsorbent material; *Suaeda salsa*