



不同丸粒化基质与风干时间对鳗草种子特性、萌发和实生苗建成的影响

彭立业, 刘晋冀, 闫文杰, 张彦浩, 张桢, 张沛东

Effects of different pelleting matrices and drying durations on seed characteristics, germination, and seedling establishment in *Zostera marina*

Peng Liye, Liu Jinji, Yan Wenjie, Zhang Yanhao, Zhang Zhen, Zhang Peidong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12284/hyxb2026034>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同水流流速对鳗草移植植株存活、生长和生理的影响

Effects of different water velocities on survival, growth and physiology of the *Zostera marina* transplants

海洋学报. 2025, 47(3): 62–72 <https://doi.org/10.12284/hyxb2025038>

淹水时长与盐度对桐花树胚胎萌根与生长发育过程的影响研究

The impacts of submergence duration and salinity on the germination and growth process of *Aegiceras corniculatum* radicles

海洋学报. 2023, 45(11): 101–111 <https://doi.org/10.12284/hyxb2023150>

渤海近海典型海草床育幼功能评估体系构建及其空间差异分析

Evaluation system establishment of nursery function for three seagrass beds and their spatial differences in the nearshore Bohai Sea

海洋学报. 2025, 47(5): 64–77 <https://doi.org/10.12284/hyxb2025064>

海假交替单胞菌 (*Pseudoalteromonas marina*) 鞭毛蛋白对生物被膜形成及厚壳贻贝附着的影响

Effects of *Pseudoalteromonas marina* flagellin on biofilm formation and settlement of *Mytilus coruscus*

海洋学报. 2021, 43(4): 75–83 <https://doi.org/10.12284/hyxb2021028>

液态降水与地表气温对北极海冰开始融化时间的影响

Effect of liquid precipitation and surface air temperature on the early melt onset of Arctic sea ice

海洋学报. 2023, 45(9): 10–24 <https://doi.org/10.12284/hyxb2023119>

不同时间尺度下智利竹筴鱼资源量与环境要素的关系

The relationship between *Trachurus murphyi* and the environment at different time scales

海洋学报. 2025, 47(1): 84–90 <https://doi.org/10.12284/hyxb2025004>

关注微信公众号, 获得更多资讯信息

彭立业, 刘晋冀, 闫文杰, 等. 不同丸粒化基质与风干时间对鳗草种子特性、萌发和实生苗建成的影响[J]. 海洋学报, 2026, 48(3): 45–58, doi:10.12284/hyxb2026034

Peng Liye, Liu Jinji, Yan Wenjie, et al. Effects of different pelleting matrices and drying durations on seed characteristics, germination, and seedling establishment in *Zostera marina*[J]. Haiyang Xuebao, 2026, 48(3): 45–58, doi:10.12284/hyxb2026034

不同丸粒化基质与风干时间对鳗草种子特性、萌发和实生苗建成的影响

彭立业^{1,2}, 刘晋冀^{1,2}, 闫文杰^{1,2}, 张彦浩^{1,2}, 张桢², 张沛东^{1,2*}

(1. 中国海洋大学 海水养殖教育部重点实验室, 山东 青岛 266003; 2. 中国海洋大学-中国船舶集团环境发展有限公司海洋生态保护修复与可持续利用技术联合研究中心, 山东 青岛 266003)

摘要: 为解决海草种子播种过程中种子易随水流漂移、实生苗建成率低等瓶颈, 本研究以温带优势海草——鳗草 (*Zostera marina*) 为对象, 探究了不同丸粒化基质 (木质基质和矿质基质) 及不同风干时间 (0~12 min) 对鳗草种子物理、生理特性的影响, 并初步筛选具有萌发潜力的处理组, 进一步探究这些处理组对鳗草种子萌发和实生苗建成的影响。结果显示, 延长风干时间可显著提升鳗草种子的下沉加速度与抗压强度, 其中矿质基质组种子的下沉加速度最高可达裸种组的 3.2 倍, 抗压强度可达木质基质组种子的 3.1 倍; 鳗草种子活力随风干时间延长呈下降趋势, 裸种对照组与木质基质组的种子活力在风干时间 8 min 之后低于 80%, 而矿质基质组的种子活力则于风干时间 4 min 之后低于 80%; 木质基质有效缓解了风干对种子的生理胁迫, 在风干时间 0~12 min 时, 木质基质组种子的 α - β -淀粉酶活性与总蛋白含量始终保持与裸种组种子无显著性差异, 但均显著优于矿质基质组 ($p < 0.05$); 风干时间 0~4 min 时, 木质基质处理组的实生苗建成率达到 39.0%~43.0%, 与裸种对照组 (42.0%) 无显著差异, 但显著高于相同条件下矿质基质处理组 (8%~12.5%)。相关性分析表明, 实生苗建成率与种子生理指标 (酶活、蛋白) 呈现极显著正相关; 综合收益指数分析进一步证实, 木质基质处理组在风干时间 2~4 min 时实现了物理强度适宜性与生理活力维持的平衡。结果表明, 木质基质配合 2~4 min 的短时风干是适宜的鳗草种子丸粒化方法。

关键词: 鳗草; 丸粒化基质; 风干时间; 实生苗建成; 综合收益评价

中图分类号: Q948.8

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2026)03-0045-14

1 引言

海草是唯一一类能在海洋中完成整个生活史的种子植物^[1], 构筑的海草床具有养护渔业资源、净化水质、固碳增汇等重要的生态系统服务价值^[2], 其每年参与气候调节的间接经济价值高达 1.3×10^4 亿美

元^[3]。然而, 受人类活动与气候变化影响, 全球海草床正以 7.0%/a 的速率快速退化^[4]。我国至今已有超过 80% 的海草床完全消失, 严重威胁了近岸海洋生态系统的生态平衡^[5]。

种子播种法作为海草床生态修复的有效手段, 能够充分利用海草有性繁殖的基因重组特性^[6], 培育出

收稿日期: 2026-01-12; 修订日期: 2026-03-04。

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFD2401102); 中国海洋大学-中国船舶集团环境发展有限公司海洋生态保护修复与可持续利用技术联合研究中心项目(H20240008)。

作者简介: 彭立业(2000—), 男, 山东省潍坊市人, 主要从事海草床修复与保护研究。E-mail: 1216701119@qq.com

* 通信作者: 张沛东, 教授, 主要从事海草床修复与保护研究。E-mail: zhangpds@ouc.edu.cn

具有优良性状的后代,从而提高海草床的遗传多样性水平。但播种的海草种子易受水流影响,流失率较高(40%~50%)^[7],从而导致实生苗建成率通常不高于5%^[8],严重制约了海草床的修复效果。为提高海草种子播种后的留存率,目前多采用简易的物理包裹手段。如, Xu等^[9]研发了一种鳗草(*Zostera marina*)泥丸种子播种法,使用泥土包裹种子并制成丸状物,有效解决了种子易随水流漂移、难以稳定着床的问题,播种后实生苗建成率达47%,但泥丸入水后常因水体冲刷不均而迅速崩解,导致种子失去保护,且泥丸需人工搓制,制作效率较低。Zhang等^[10]利用圆柱形黏土块制作鳗草播种单元,通过增大体积提升了播种单元稳定性,实生苗建成率达30%,但播种单元仍易崩解,且制作过程仍以人为塑形、晾晒为主。

陆地植物种子丸粒化的成熟技术为海草种子播种提供了借鉴,其作为陆地种植业成熟的种子播种手段,通过在种子表面包裹粉剂与黏合剂,既能有效增大种子体积与重量,又能通过外壳调控水分吸收、优化种子萌发微环境^[11]。如,杨明欣等^[12]通过吸水树脂、花生壳粉等对高丹草(*Sorghum-sudangrass hybrid*)种子进行丸粒化,其萌发势(38.3%)和萌发指数(12.8)均达到裸种的1.5倍。杨丽芳等^[13]采用黏土、滑石粉等对柠条(*Caragana korshinskii*)种子进行丸粒化,种子萌发率和活力指数分别达89%和34.8,较裸种分别提高1.0%和6.7%。但丸粒化种子播种技术在海草床修复的应用尚未见相关报道。另外,播种前的适度风干是提升丸粒性能的关键工艺,该环节可固化丸粒结构、增强机械强度、避免种子粘连,既满足机械化播种的物理性能要求,又能提升种子萌发率^[14]。但与陆生植物种子相比,海草种子具有独特的生理生态特性,其保存与萌发全过程均需依赖水环境,细胞结构与代谢机制对干燥环境的耐受性远低于陆生种子^[15],这使得陆地丸粒化风干工艺的直接应用存在局限。当前海草种子丸粒化的专属工艺体系尚未完全建立,关于适配的丸化基质配方、成型技术参数等基础问题缺乏系统研究,尤其对风干时间等关键参数与海草种子活力、萌发率的量化关系研究不足,导致技术优化缺乏科学依据。

基于丸粒化基质与风干处理对种子物理特性与生理的双重影响,本研究提出如下假说:(1)适宜的丸粒化基质可显著提升海草种子的质量与抗压能力等物理特性,从而增强种子吸水率和下沉速度,实现海草种子的丸粒化播种;(2)海草种子的丸粒化过程需要适宜的风干时间,从而保证种子的丸粒化不影响种

子萌发和实生苗建成。因此,本研究以温带海域优势海草物种——鳗草(*Z. marina*)为对象,系统研究不同丸粒化基质(木质基质、矿质基质)与风干时间(0、2、4、6、8、10、12 min)对鳗草种子萌发和实生苗建成的影响,通过监测抗压强度、崩解时间等物理指标和种子活力、可溶性糖、 α -淀粉酶等生理指标以及种子萌发率、实生苗建成率等成苗指标,阐明丸粒化与风干处理对鳗草种子生理生态的影响,旨在建立高效的鳗草种子丸粒化技术体系,为提升海草种子种植法修复效率和效果提供科学依据与技术支撑。

2 材料和方法

2.1 种子采集与保存

实验用鳗草种子于2024年7月采集于山东省威海市天鹅湖海域(37.338 2°~37.358 8°N, 122.555 1°~122.579 3°E)。天鹅湖鳗草海草床的平均种子产量达(53 623 ± 19 628.11) seeds/m²^[16]。人工采集鳗草生殖枝带有成熟种子的佛焰苞,并放入尼龙网袋中(网目孔径为1.0 mm, 30 cm × 50 cm),将袋口封好后置于自然海域中后熟5周。种子后熟结束后,将网袋中的内容物移入水桶中,并采用海水比重法^[17]反复去除杂质,将最终筛取的鳗草种子收集至盛有自然海水的2.5 L塑料瓶中,带回实验室保存,保持水温4℃、盐度33^[18]。

2.2 实验设计

由于鳗草种子体积小、表面粗糙,选用重型丸粒化方式对鳗草种子进行处理。丸粒化基质选用木质基质(木质纤维粉:羧甲基纤维素钠=10:1)与矿质基质(膨润土:乙烯醇=10:1),使用量为种子重量的3倍以上^[19]。设置3种丸粒化处理方式,分别为裸种组(对照组,不作任何处理)、木质基质组(种子与木质基质质量比1:3)和矿质基质组(种子与矿质基质质量比1:3)。

种子丸粒化完成后在风干机中进行短时风干以促使种子表层固化、防粘连并稳定丸粒结构;风干时间需结合种子对失水敏感性进行控制。鉴于鳗草种子具有对脱水高度敏感的生理特性^[20],本研究设置7种风干时间处理,分别为0、2、4、6、8、10、12 min。

丸粒化处理与风干时间交互共21个处理(表1)。丸粒化与风干处理结束后,测定所有处理组种子的物理性质与生理特性,以种子活力为标准筛选适宜的处理组进行室内种子促萌与实生苗建成实验,最后综合实验结果与前期测定指标进行收益评价,得出适宜的丸粒化基质和风干时间,具体实验过程见图1。

表1 鳗草种子丸粒化处理方式
Table 1 Seed pelletization method for *Zostera marina*

处理组	木质基质	矿质基质	风干时间/min
1	LZ1	0	0
2	LZ2	0	2
3	LZ3	0	4
4	LZ4	0	6
5	LZ5	0	8
6	LZ6	0	10
7	LZ7	0	12
8	MZ1	1:3	0
9	MZ2	1:3	2
10	MZ3	1:3	4
11	MZ4	1:3	6
12	MZ5	1:3	8
13	MZ6	1:3	10
14	MZ7	1:3	12
15	KZ1	0	1:3
16	KZ2	0	1:3
17	KZ3	0	1:3
18	KZ4	0	1:3
19	KZ5	0	1:3
20	KZ6	0	1:3
21	KZ7	0	1:3

注: LZ表示裸种组(无丸粒化基质); MZ表示木质基质组; KZ表示矿质基质组。1:3表示种子与丸粒化基质的质量比。

2.3 实验过程

2.3.1 种子丸粒化处理

丸粒化前,随机选择100粒鳗草种子采用TTC染色法进行种子活力测定,结果显示种子活力超过80%,达到种子播种的活力标准^[20]。

随机挑选12600粒外观为墨绿色、形态饱满的成熟鳗草种子,平均分为3组。将各组种子分别装入盛有海水的500 mL聚乙烯瓶中并置于放有冰袋的泡沫箱中送至青岛爱丰源农业科技有限公司,使用旋转型丸化机(转速:500 r/min)分别进行丸粒化处理。机械运转过程中,通过投料器添加海水和木质基质或矿质基质,10 min后将丸粒化好的鳗草种子从出料口中倒至孔径为3 mm的网筛,去除丸粒化不完整的种子。

丸粒化结束后,将3组种子分别均分至7份,分别转移至风箱中按照设置的风干时间进行风干。风干过程中风速保持为0.5 m/s、温度25℃。风干结束后将所有处理组种子带回实验室,于每个处理组随机选择种子分别测定种子物理指标与生理指标,以种子活力 $\geq 80\%$ 作为标准^[21],仅将满足阈值的处理组进入后续促萌与建成验证实验。最终进入促萌试验的处理组为:木质基质风干时间0、2、4、6 min与矿质基质风干时间0、2 min,并设置裸种对照。

2.3.2 种子萌发实验

(1) 低盐促萌

实验开始前,随机挑选2800粒外观为墨绿色、形态饱满的成熟鳗草种子,平均分为7份,1份作为对照组,其余6份送至青岛爱丰源农业科技有限公司,基于初筛结果进行丸粒化与风干处理并筛除丸粒化不完整的种子。

促萌实验选择500 mL的烧杯作为萌发容器,每个烧杯放置100粒种子作为1个重复,每个处理组设置3个重复,为确保充足的水交换同时避免种子外溢,烧杯顶部覆盖医用纱布并使用橡皮筋固定,置于循环水系统中进行种子萌发(培育水箱规格:70 cm \times 60 cm \times 80 cm),温度控制为15℃,保持自然光照。

根据王合虎等^[22]的研究,加入淡水至60 cm促萌4 d,结束后将淡水全部排出后加入盐度为10的海水继续促萌8 d,共促萌12 d。实验过程中每两天更换一次培养用水,以保持水质稳定^[23]。在整个促萌阶段中,每日观察、记录各处理组的种子萌发情况,统计每日萌发数,萌发标准为子叶突破种皮并伸出不小于1 cm^[24]。

(2) 实生苗建成

促萌结束后,选取已萌发的种子,插植于装有天然泥土栽培基质(粒径范围:0.6~2.0 mm)的栽培容器(规格:28 cm \times 20 cm \times 13 cm)中,基质装填高度为10 cm,插植深度为2 cm。加入盐度20的过滤海水至水位60 cm,培育水体温度设置为20℃,自然光照,培育60 d。

2.4 样品采集与分析

2.4.1 种子丸化处理

(1) 种子质量

每组随机选取30粒完整种子,使用万分之一电子天平逐粒称量,测定种子单粒质量(SW, g)。

(2) 种子抗压强度

在木质基质组和矿质基质组的各处理组中分别随机选取30粒丸粒化种子,保证种子大小均匀且表面完整,无明显裂痕或破损。使用GWJ-2型数显谷

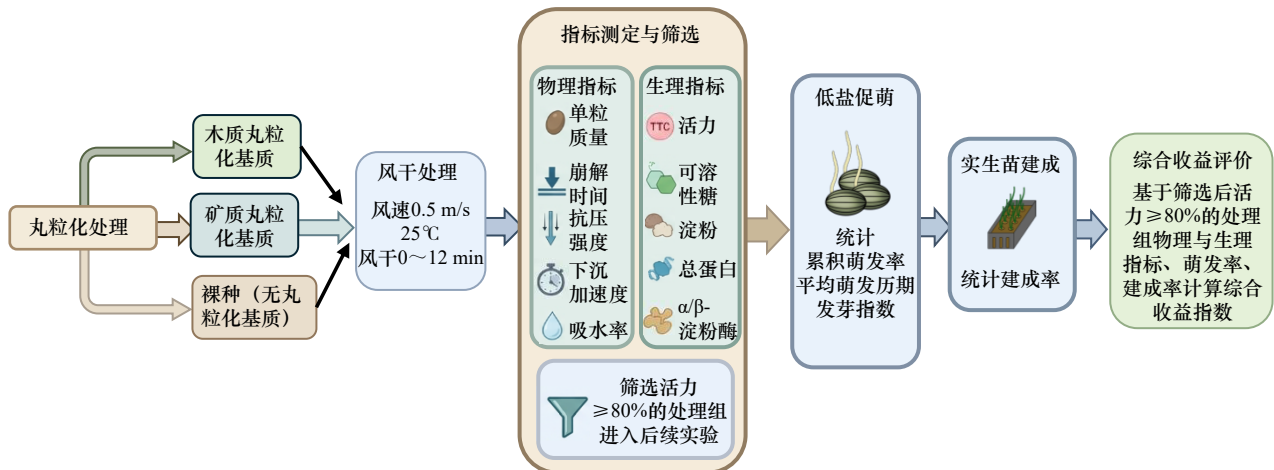


图1 实验流程

Fig. 1 Experimental flowchart

物硬度计(精度 0.01 N), 仪器在实验前进行零点校准, 对单粒丸粒化种子施加压力, 直至丸粒表层结构发生明显破裂或失稳, 记录此时压力表读数记为抗压强度(CS, N/seed)^[25]。

(3) 种子下沉加速度

在木质基质组和矿质基质组的各处理组中分别随机选取 30 粒丸粒化种子, 保证种子大小均匀、表面完整无裂纹。参考芦光新等^[26]的研究, 实验前将种子置于滤纸上自然风干, 避免因表面水膜影响下沉过程。采用透明有机玻璃柱(高度 50 cm, 直径 10 cm), 加入盐度 33 的海水, 并在实验前静置 12 h, 使水体温度与实验环境保持一致(20°C), 以避免水体扰动对下沉轨迹的干扰。实验时将种子轻轻置于水面中央, 确保初始位置接近静止。使用摄像设备(帧率 ≥120 fps, 精度 0.01 s)正对水柱侧壁记录下沉全过程。

实验过程中避免水体对流及外力干扰, 以保证下沉运动符合自由沉降条件。从视频中逐帧提取种子下沉的位移-时间数据, 采用二次曲线拟合位移随时间的变化关系, 根据公式:

$$SA = \frac{2X}{t^2}, \quad (1)$$

式中, X 为下沉位移(m), t 为时间(s), 通过曲线拟合获得种子的下沉加速度(SA, m/s^2)。

(4) 种子崩解时间

在木质基质组和矿质基质组的各处理组中分别随机选取 30 粒丸粒化种子, 保证种子外观完整、无裂纹或机械损伤。实验前将种子在室温(20°C)下平衡 24 h, 以保证样品含水状态一致。使用 250 mL 烧杯, 加入 200 mL 盐度 33 的海水, 水温控制在 20°C。在整个测定过程中保持静水环境, 避免外力扰动。将单粒种子轻轻投入水中, 立即开始计时。观察丸粒外壳在

水中逐渐吸水膨胀、出现裂纹并最终完全崩解的过程, 以丸粒外层结构全部破裂、种子完全裸露为判定标准。每粒种子单独计时, 精确至 0.1 s, 记录其崩解所需的时间作为崩解时间(DT, s)。

(5) 种子吸水率

从各处理组中分别随机选取 30 粒外观完整、无机械损伤的种子, 用滤纸轻轻吸去表面附着水分后立即称量初始质量(M_0)。随后将种子投入盐度 33 的海水中浸泡 20 s, 取出后用滤纸轻轻吸去表面附着水分, 迅速称量其湿重(M_t), 吸水率(WAR, %)按下式计算^[27]:

$$WAR = \frac{M_t - M_0}{M_0} \times 100\%, \quad (2)$$

式中, M_0 表示种子初始质量(g), M_t 表示浸泡 20 s 后种子湿重(g)。

(6) 种子生理指标

种子活力测定采用 TTC 染色法^[28], 每个处理组随机选择 90 粒种子, 均分为 3 份, 对所有种子剥除种皮, 浸入 0.5%TTC 溶液中, 于 25°C 避光条件下作用 24 h, 根据种子种胚的染色情况, 计算种子活力(SV, %)。

其他生理指标使用试剂盒进行测定, 每个处理组随机选取 90 粒种子, 均分为 3 份作为 3 个生物学重复。各重复样品经液氮研磨成粉, 按试剂盒说明书加入相应提取液充分匀浆, 4°C 条件下离心取上清或规定组分用于测定。植物可溶性糖含量采用可溶性糖试剂盒(蒽酮比色法)测定; 淀粉含量采用植物淀粉含量试剂盒(蒽酮比色法)测定; 总蛋白含量采用总蛋白试剂盒(考马斯亮蓝法)测定; α -淀粉酶活性与 β -淀粉酶活性均采用 β -淀粉酶试剂盒测定, 以上试剂盒均购自南京建成生物工程研究所。各指标在分光光度计

下读取吸光度并根据试剂盒配套公式计算,结果分别以可溶性糖(SS, %)、淀粉(S, %)、总蛋白(TP, mg/mL)、 α -淀粉酶活性(α -AMY, U/g)与 β -淀粉酶活性(β -AMY, U/g)表示。

2.4.2 种子萌发与实生苗建成

低盐促萌期间,每日统计种子的萌发数量,依据Wen等^[29]的方法计算各处理组的累计萌发率(CGR, %)、平均萌发历期(MGT, d)与发芽指数(GI)。实生苗培育结束后,统计已建成的实生苗数量计算各处理组实生苗建成率(SER, %)。

2.5 数据处理与指标界定

2.5.1 数据处理

分别采用SPSS 26.0和OriginLab 2021软件对数据进行统计分析并绘图,数据经正态分布与方差齐性检验符合要求后,进行如下差异显著性分析:(1)风干时间的影响:对于所有指标,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)结合Tukey HSD法,分析同一丸粒化基质不同风干时间对鳗草种子的影响;(2)丸粒化基质的影响:分析同一风干时间不同丸粒化基质的对鳗草种子影响时,抗压强度与崩解时间采用独立样本 t 检验(Independent Samples t-test);单粒质量及生理生化指标采用单因素方差分析结合Tukey HSD法。显著性水平设置为 $p < 0.05$ 。

对种子物理与生理指标分别进行主成分分析(PCA),揭示不同丸粒化基质的差异性;对种子物理指标、生理指标以及萌发率、建成率进行Pearson相关性分析,明确不同丸粒化基质与风干时间对鳗草种子物理指标、生理指标对幼苗建成的影响。

基于可供种子播种使用的种子活力标准($\geq 80\%$)^[21]初步筛选适宜的丸化方式和风干时间。对初筛后的结果,构建包含生理活力(physiological vigor, Pv)、物理适宜性(physical suitability, Ps)与萌发收益(germination income, Gi)的多维评价模型,采用模糊数学隶属函数法对各指标进行无量纲化处理^[30],计算综合收益指数(Comprehensive benefit index, D)(图1)^[31]。

2.5.2 指标属性界定

指标属性界定与基准值(Ref)设定如下:

(1)生理活力指数(PvI):较高的酶活性与营养物质保有量意味着更强的代谢潜能与抗逆能力。将 α -淀粉酶、 β -淀粉酶、可溶性糖、淀粉、总蛋白及种子活力定义为正向指标,以评价集合中的最大值为基准(Ref_{max})。

(2)萌发收益指数(GiI):萌发率、建成率、发芽指数直接反映修复成效,定义为正向指标,以最大值

为基准(Ref_{max});平均萌发历期为负向指标,以最小值为基准(Ref_{min})。

(3)物理适宜性指数(PsI):单粒质量、下沉加速度与吸水率可直接反映种子抗冲刷能力与水分渗透效率,以最大值为基准(Ref_{max})。机械防护平衡指标(中值型):含抗压强度与崩解时间。此类指标需在“物理防护”与“破壳阻力”间取得平衡,偏离适宜范围(过高或过低)均不利于定植^[32]。依据“以生物学效果验证物理性状”的原则^[33],选取在验证实验中幼苗建成率最高的处理组的实测值作为“理论最优阈值”(Ref_{opt})。

将各指标原始数据标准化为[0,1]区间的隶属函数值(U_{ij}), i 表示不同处理组, j 代表不同指标。

(1)正向指标:

$$U_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (3)$$

(2)负向指标:

$$U_{ij} = 1 - \frac{X_{ij} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (4)$$

(3)中值型指标:采用距离公式计算。越接近最优阈值(Ref_{opt}),得分越高。(注:裸种对照组LZ不具备丸化结构,其物理指标赋值为0参与计算)。

$$U_{ij} = 1 - \frac{|X_{ij} - \text{Ref}_{\text{opt}}|}{\max(|X_{\max} - \text{Ref}_{\text{opt}}|, |X_{\min} - \text{Ref}_{\text{opt}}|)} \quad (5)$$

物理、生理、萌发三个维度对海草床修复同等重要,采用等权法计算总指数:

$$D_i = \frac{\text{PvI}_i + \text{PsI}_i + \text{GiI}_i}{3} \quad (6)$$

利用二次多项式非线性回归模型对 D 值随风干时间的变化趋势进行拟合,依据拟合曲线峰值确定适宜丸粒化工艺的最佳风干时间窗口。

3 结果

3.1 种子物理性质

单因素方差分析显示,风干时间0~4 min时,矿质基质组的下沉加速度、崩解时间、抗压强度和单粒质量显著高于裸种组和木质基质组($p < 0.05$),其中下沉加速度分别是裸种组和木质基质组的3.2倍、1.8倍(图2a);风干时间4~8 min时矿质基质组崩解时间、抗压强度持续上升,分别达木质基质组的5.1倍和2.3倍($p < 0.05$;图2b和c);风干时间8~12 min时矿质基质组单粒质量显著高于木质基质组和裸种组($p < 0.05$,图2d),且其抗压强度达木质基质组的3.1倍;主成分分析结果显示,矿质基质组与木质基质组间存在显著差异($p < 0.05$;图2f)。

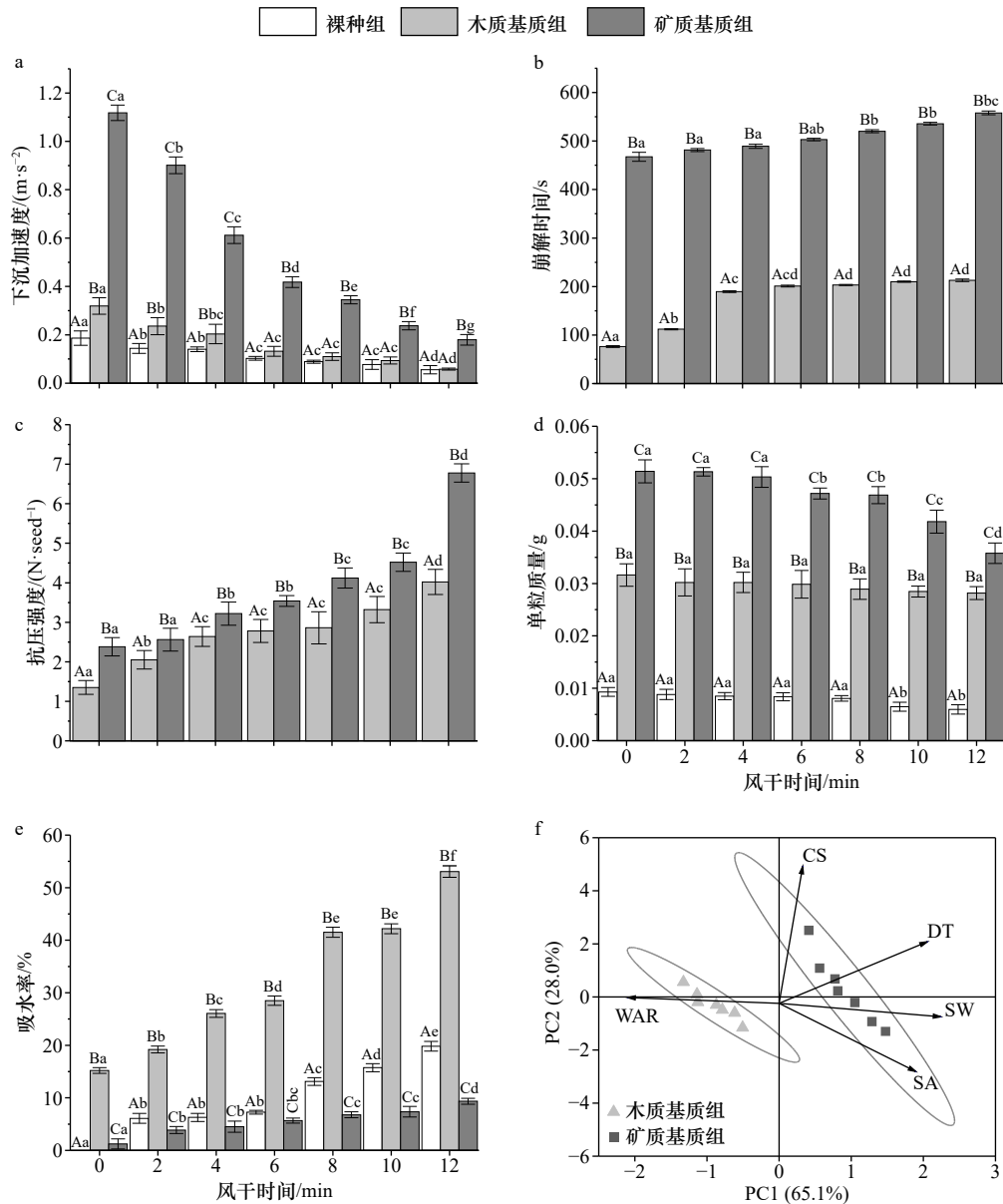


图2 不同丸粒化基质与风干时间对鳗草种子下沉加速度(a)、崩解时间(b)、抗压强度(c)、单粒质量(d)、吸水率(e)的影响以及物理指标主成分分析(f)

Fig. 2 Effects of different pelletizing matrices and drying durations on sinking acceleration (a), disintegration time (b), compressive strength (c), single seed weight (d), water absorption rate (e) of *Z. marina* seeds, and principal component analysis of physical indicators (f)

误差线上的不同小写字母表示相同丸粒化基质不同风干时间之间存在显著差异,然而不同大写字母表示相同风干时间不同丸粒化基质之间存在显著差异($p < 0.05$)。SW: 单粒质量; CS: 抗压强度; DT: 崩解时间; SA: 下沉加速度; WAR: 吸水率

Different lowercases letters on the error bars indicate significant differences among drying durations within the same pelletizing matrix, whereas different up-percases letters denote significant differences among pelletizing matrices under the same drying duration ($p < 0.05$). SW: single seed weight; CS: compressive strength; DT: disintegration time; SA: sinking acceleration; WAR: water absorption rate

3.2 种子生理特性

3.2.1 种子活力

鳗草种子活力随风干时间延长呈下降趋势,不同丸粒化基质处理间差异显著($p < 0.01$, 图3)。风干时间0~2 min, 3个处理组的种子活力均保持较高水平(>80%)。风干时间6 min时,裸种组与木质基质组的

种子活力仍维持在87.4%和84.6%,而矿质基质组种子活力相比裸种组降低了15.1%($p < 0.05$)。风干时间8~12 min, 3个处理组的种子活力均低于80%。

3.2.2 其他生理指标

随着风干时间延长,各处理组种子可溶性糖含量显著上升,淀粉含量则呈下降趋势(图4a和b)。其中,

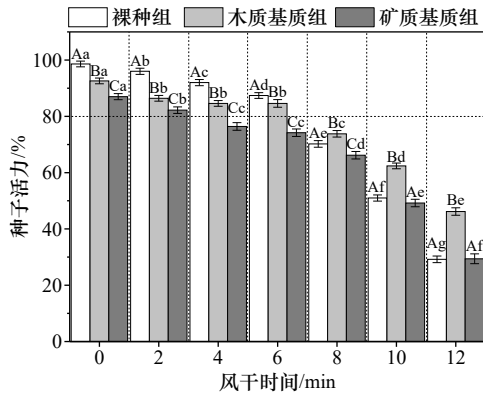


图3 不同丸粒化基质与风干时间对鳗草种子活力的影响

Fig. 3 Effects of different pelletizing matrices and drying durations on viability of *Z. marina* seeds

误差线上的不同小写字母表示相同丸粒化基质不同风干时间之间存在显著差异,然而不同大写字母表示相同风干时间不同丸粒化基质之间存在显著差异($p < 0.05$)

Different lowercases letters on the error bars indicate significant differences among drying durations within the same pelletizing matrix, whereas different uppercases letters denote significant differences among pelletizing matrices under the same drying duration ($p < 0.05$)

矿质基质组种子的可溶性糖含量在风干时间 12 min 时达到峰值,显著高于裸种组和木质基质组($p < 0.05$)。木质基质组种子的 α - β -淀粉酶活性平缓下降,矿质基质组种子的 β -淀粉酶活性则在风干时间 6 min 后急剧下降,较同期裸种组降低了 23.2%(图 4c 和 d)。同时,矿质基质组种子总蛋白含量在风干时间 6 min 后显著低于其他两个处理组($p < 0.05$,图 4e)。主成分分析显示,木质基质组与裸种组置信区间高度重叠,而矿质基质组沿 PC1 负轴及可溶性糖(SS)向量方向显著分离(图 4f)。

3.3 种子萌发与实生苗建成

单因素方差分析结果显示,不同丸粒化基质显著影响实生苗建成率(图 5, $p < 0.05$)。木质基质、风干时间 0 min 处理组种子的累积萌发率和发芽指数最高,分别是矿质基质、风干时间 0 min 处理组和矿质基质、风干时间 2 min 处理组的 1.3 倍和 1.7 倍以及 1.5 倍和 2.4 倍(表 2, $p < 0.05$)。实生苗建成率方面(图 5),对照组与木质基质、风干时间 0~4 min 处理组之间无统计学差异($p > 0.05$),均维持在较高水平,平均是木质基质、风干时间 6 min 处理组和矿质基质、风干时间 0~2 min 处理组的 2~5.3 倍($p < 0.05$)。

3.4 综合评价

堆积图显示,木质基质、风干时间 4 min 处理组的综合收益指数高于其他处理组,而木质基质、风干时

间 6 min 处理组则显著低于其他各组($p < 0.05$,图 6A)。曲线拟合结果显示,筛选后的木质基质组的综合收益指数随风干时间延长呈现显著的二次函数关系($p < 0.05$),在风干时间 0~2 min 呈上升态势,并在风干时间 2~4 min 达到峰值(约 0.66),理论最适风干时间为 3 min,表明综合收益指数在风干时间 2~4 min 时维持在最佳水平(图 6b)。

3.5 相关性分析

Pearson 相关性分析结果表明,抗压强度(CS)、崩解时间(DT)均显著影响种子总蛋白(TP)、种子活力(SV)、种子累积萌发率(CG)和幼苗建成率(SER)(图 7)。针对木质基质处理组,抗压强度与种子总蛋白含量呈显著负相关($r = -0.96, p < 0.01$),其相关系数高于矿质基质处理组对应指标间的关系。另外,种子吸水率(WAR)、抗压强度(CS)与种子可溶性糖含量(SS)呈显著正相关,与种子淀粉含量(S)呈显著负相关($p < 0.01$)。

4 讨论

4.1 不同丸粒化基质与风干时间对鳗草种子物理性质的影响

种子丸粒化作为人工调控种子物理性状的关键技术,其效果与丸粒化基质成分及风干程度密切相关。本研究中,两种丸粒化基质均显著提高了鳗草种子单粒质量与抗压强度,其核心机制在于丸粒化剂在种子表层形成致密保护膜,通过填充种子表面孔隙提升颗粒完整性^[34]。矿质基质组单粒质量较裸种提升 5 倍以上,抗压强度可达 2.38~6.78 N/seed,显著高于木质基质组,这可能与矿质材料更高的密度及黏结性有关^[35],较高的抗压强度可减少种子在长途运输过程中的碰撞破损,均匀的单粒质量则能提升播种时的均匀度,降低漏播、重播概率^[36]。类似结果在番茄(*Solanum lycopersicum*)种子丸粒化研究中也有报道,孙正等^[37]发现矿质丸粒化基质可使番茄种子抗压强度提升 40% 以上,既能有效抵御外界环境中的磨损,也能适应运输与播种环节的物理胁迫。

从海草床修复角度来看,“物理适宜性”的意义不仅在于种子运输,更体现在种子播种后能否实现快速着床并在适宜埋藏深度形成稳定种子库。研究显示,鳗草种子掩埋深度显著影响实生苗建成,最佳埋藏深度通常为 0~2 cm,过深掩埋则显著降低实生苗建成率^[38]。因此,本研究发现的丸粒化提升种子下沉能力、风干调控种子崩解时间与吸水过程等结论,是提升鳗草种子高效播种的有效途径。风干对丸粒化种子的物

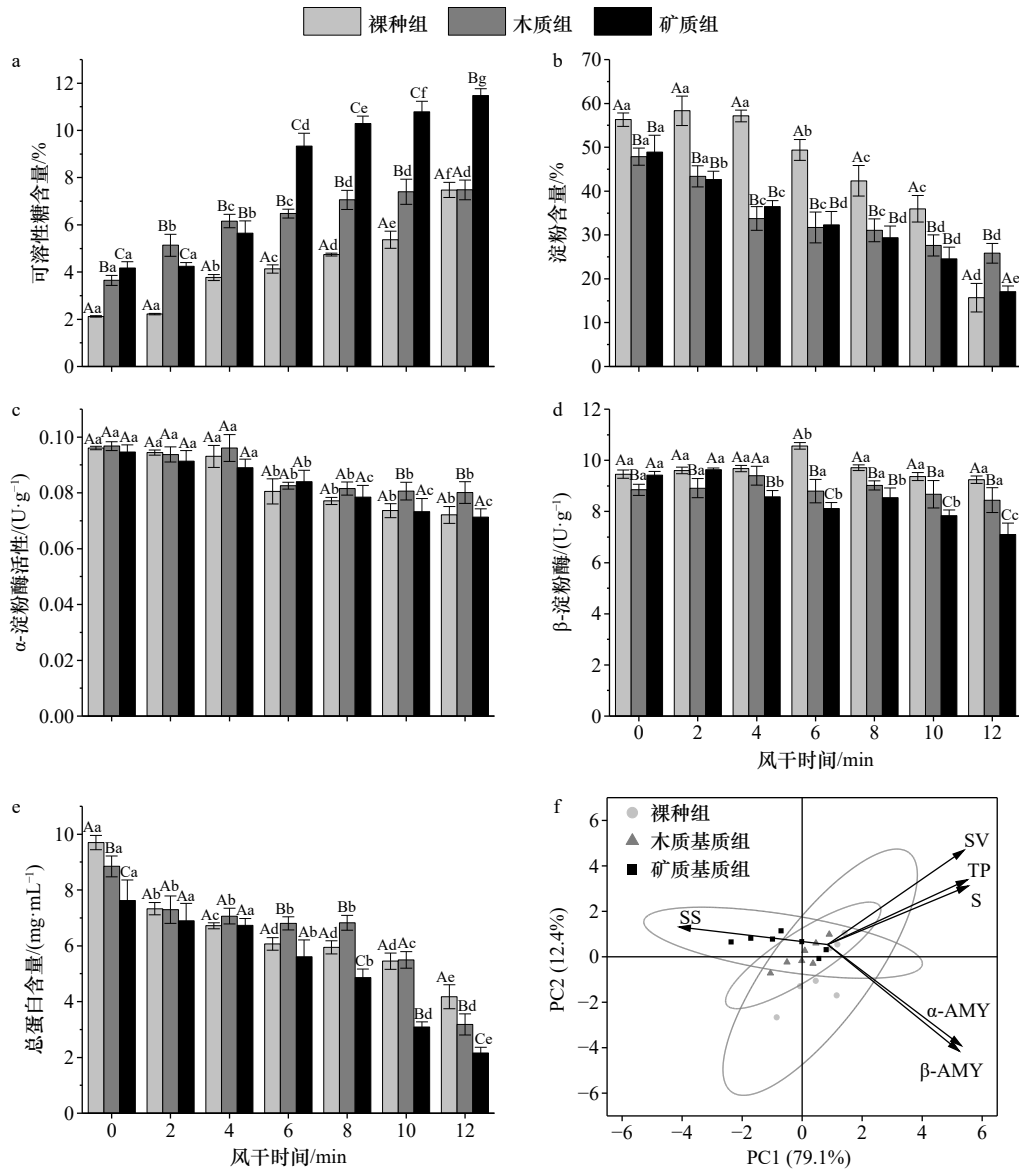


图 4 不同丸粒化基质与风干时间对鳗草种子可溶性糖含量(a)、淀粉含量(b)、 α -淀粉酶活性(c)、 β -淀粉酶活性(d)、总蛋白含量(e)的影响以及生理指标主成分分析(f)

Fig. 4 Effects of different pelletizing matrices and drying durations on soluble sugar content (a), starch content (b), α -amylase activity (c), β -amylase activity (d), total protein content (e) of *Z. marina* seeds, and principal component analysis of physiological indicators (f)

误差线上的不同小写字母表示相同丸粒化基质不同风干时间之间存在显著差异, 然而不同大写字母表示相同风干时间不同丸粒化基质之间存在显著差异 ($p < 0.05$). SS: 可溶性糖含量; S: 淀粉含量; SV: 种子活力; TP: 总蛋白含量; α -AMY: α -淀粉酶活性; β -AMY: β -淀粉酶活性

Different lowercases letters on the error bars indicate significant differences among drying durations within the same pelletizing matrix, whereas different up-percases letters denote significant differences among pelletizing matrices under the same drying duration ($p < 0.05$). SS: soluble sugar content; S: starch content; SV: seed viability; TP: total protein content; α -AMY: α -amylase activity; β -AMY: β -amylase activity

理特性的调控呈双重性, 2~4 min 适度风干可使丸粒化种子下沉加速度达到 0.2 m/s^2 以上, 风干时间 $\geq 8 \text{ min}$ 时矿质基质组崩解时间从 460~510 s 骤升至 520 s 以上。而木质基质组耐受性强, 风干时间至 12 min 时吸水率仍维持在 53.1%。矿质丸粒化基质虽能使种子抗压强度达 2.38~6.78 N/seed, 但吸水率却不到 10%, 这与李锦霞等^[39] 对小麦 (*Triticum aestivum*) 丸粒化基质的研究相似, 种子外部形成了致密的保护膜, 但同时也

影响到了水分渗透; 木质丸粒化基质的强耐受性或其主要成分为纤维素有关, Salmén 等^[40] 证实纤维素可调节水分渗透, 维持微环境稳定。Wu 等^[41] 对高粱 (*Sorghum bicolor*) 丸粒化的研究中, 矿质基质组丸粒抗压强度达 1.0 N/seed, 但因孔隙度低、水分渗透受阻, 幼苗生理活性受抑, 最终萌发率较植物纤维基填充剂组低 77% 以上。

综合来看, 矿质基质显著提高鳗草种子单粒质

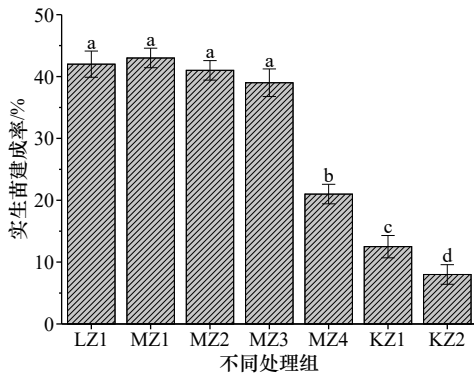


图5 不同处理组鳗草实生苗建成率比较

Fig. 5 Comparison of seedling establishment rates in *Z. marina* under different treatment conditions

误差线上的不同小写字母表示不同处理组之间存在显著差异 ($p < 0.05$)。LZ1: 裸种不风干(此处作为对照组); MZ1~MZ4: 木质基质风干时间0、2、4、6 min的处理组; KZ1~KZ2: 矿质基质风干时间0、2 min的处理组

Different lowercases letters on the error bars indicate significant differences among treatments ($p < 0.05$). LZ1 represents bare seeds with a drying duration of 0 min (control); MZ1~MZ4 represent wood-based matrix treatments with drying durations of 0, 2, 4, and 6 min; KZ1~KZ2 represent mineral-based matrix treatments with drying durations of 0 and 2 min

表2 不同处理组鳗草种子的累积萌发率、平均萌发历期与发芽指数(平均值±标准差)

Table 2 Cumulative germination rate, mean germination time, and germination index of *Z. marina* seeds under different treatments (mean ± SD)

处理组	累积萌发率/%	平均萌发历期/d	发芽指数
LZ1	52.0 ± 0.7 ^a	61.1 ± 0.5 ^a	14.3 ± 0.3 ^a
MZ1	52.8 ± 0.4 ^a	62.0 ± 1.0 ^a	14.8 ± 0.2 ^a
MZ2	52.0 ± 0.7 ^a	58.3 ± 1.9 ^b	13.9 ± 0.6 ^{ab}
MZ3	51.3 ± 1.3 ^a	57.3 ± 0.9 ^b	12.0 ± 0.3 ^b
MZ4	41.0 ± 0.6 ^b	59.5 ± 0.1 ^b	8.4 ± 0.2 ^c
KZ1	41.3 ± 0.8 ^b	58.5 ± 2.1 ^b	8.6 ± 0.6 ^c
KZ2	34.5 ± 0.7 ^c	59.2 ± 0.1 ^b	6.3 ± 0.6 ^c

注:不同小写字母表示同一指标在不同处理组间存在显著差异($p < 0.05$)。

量、抗压强度与下沉速度等物理特性,从而增强了鳗草种子的着床能力,但其吸水率偏低、崩解时间随风干延长显著增加,说明种子活力、萌发和实生苗建成可能受到负面影响。另外,种子长时间风干会导致种子活力丧失并出现脱水损伤,最终失去萌发能力^[42],这也强调了风干必须控制在短时适宜时间。

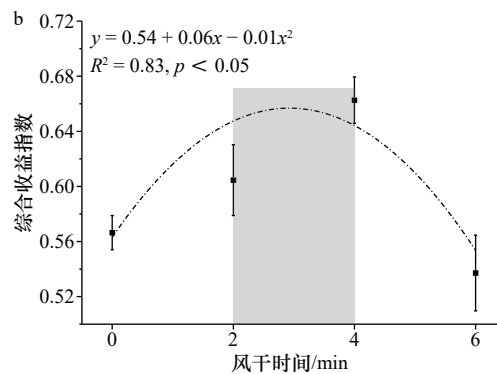
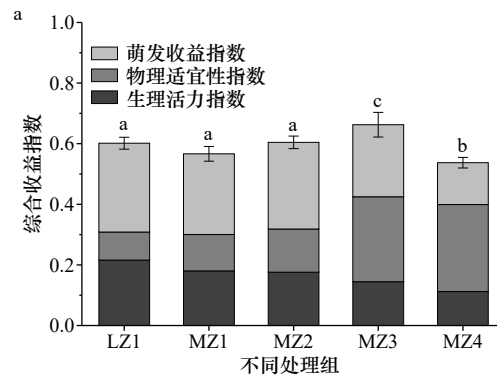


图6 不同处理组鳗草综合收益指数的比较(a)及其随风干时间变化的拟合曲线(b)

Fig. 6 Comparison of comprehensive benefit indices in *Z. marina* across different treatments (a) and the fitting relationship between comprehensive benefit indices and drying duration (b)

不同小写字母表示不同丸化处理组之间存在显著差异($p < 0.05$)。LZ1表示裸种不风干(此处作为对照组),MZ1~MZ4表示木质基质风干时间为0、2、4、6 min的处理组

Different lowercases letters on the error bars indicate significant differences among treatments ($p < 0.05$). LZ1 represents bare seeds with a drying duration of 0 min (control); MZ1~MZ4 represent wood-based matrix treatments with drying durations of 0, 2, 4, and 6 min

4.2 不同丸粒化基质与风干时间对鳗草生理指标的影响

丸粒化可显著提升种子生理活性,且木质丸粒化基质效果优于矿质丸粒化基质。木质基质组总蛋白含量为矿质基质组的1.2倍,淀粉酶活性较裸种显著提升。这一结果契合种子萌发生理机制,Shaik等^[43]指出淀粉酶活性直接影响种子萌发与幼苗建成;此外,木质丸粒化基质具有高吸水性,可改善种子周围的水分状况,Nie等^[44]发现,充足且稳定的水分供应是诱导赤霉素(GA)合成和激活淀粉酶基因表达的关键条件。退化海草床底质常伴随缺氧与硫化物积累等不利条件,硫化物胁迫被认为会抑制海草关键代谢与耐受途径并造成组织损伤,从而降低实生苗建成率^[45]。丸粒化材料通过调控局部含水与扩散条件,可

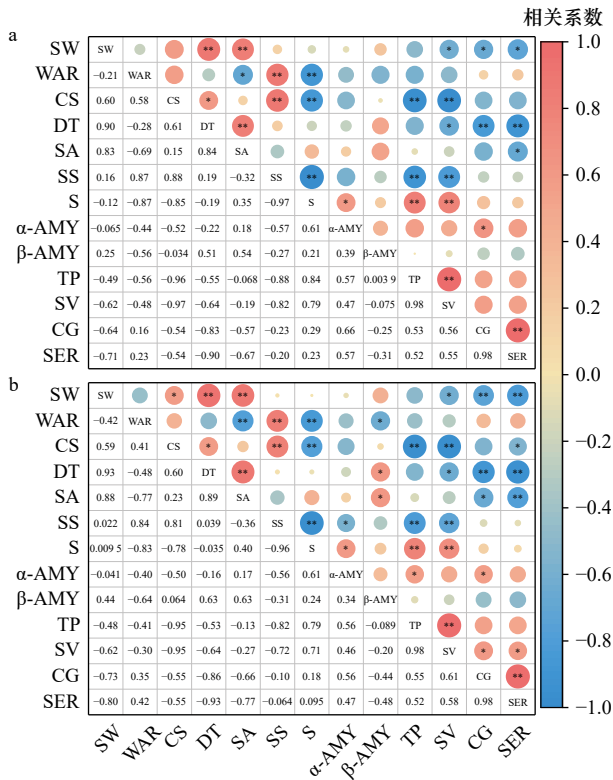


图7 木质基质处理组(a)与矿质基质处理组(b)鳗草种子物理指标与生物学指标间的相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis of physical, physiological, germination, and seedling establishment indicators in wood-based matrix treatments (a) and mineral-based matrix treatments (b)

*表示差异显著 ($p < 0.05$), **表示差异极显著 ($p < 0.01$); SW: 单粒质量; CS: 抗压强度; DT: 崩解时间; SA: 下沉加速度; WAR: 吸水率; SS: 可溶性糖含量; S: 淀粉含量; SV: 种子活力; TP: 总蛋白含量; α -AMY: α -淀粉酶活性; β -AMY: β -淀粉酶活性; CG: 累积萌发率; SER: 实生苗建成率

* indicates a significant difference ($p < 0.05$), and ** indicates a highly significant difference ($p < 0.01$). SW, CS, DT, SA, WAR, SS, S, SV, TP, α -AMY, and β -AMY represent single seed weight, compressive strength, disintegration time, sinking acceleration, water absorption rate, soluble sugar content, starch content, seed viability, total protein content, α -amylase activity, and β -amylase activity, cumulative germination rate and seedling establishment rates, respectively

能对种子代谢启动阶段的微环境起到一定的调控作用。

风干处理对鳗草种子生理活性的表现呈现出“适度风干激活、过度风干抑制”的特征,这一规律在植物研究中具有共性^[46]。适度脱水条件下,种子通过积累可溶性糖提升渗透调节能力,激活代谢酶活性,但过度风干的抑制效应同样得到广泛证实,柴亚倩等^[47]在对石榴(*Punica granatum*)的研究中发现,当脱水胁迫强度超过临界值时,细胞内的活性氧自由基(ROS)生成速率会急剧增加,而清除系统(如抗氧化酶和非酶抗氧化剂)的功能可能因脱水导致的结构破坏或功能障碍而受损,从而打破 ROS 的动态平衡,导致

ROS 大量积累,引发严重的氧化应激;张凤等^[48]在大豆(*Glycine max*)的研究中证实,细胞膜是维持细胞内外环境稳定的关键结构。在极端脱水条件下,细胞膜会失去原有的流动性和完整性,导致膜脂过氧化。丙二醛(MDA)是膜脂过氧化的终产物之一,其含量升高是细胞膜损伤的直接证据,膜透性增加,细胞内含物外渗,离子平衡紊乱,最终导致细胞死亡^[49]。

裸种组生理指标波动幅度显著大于丸粒化种子,核心原因在于缺乏丸化层的物理保护与营养供给。谢锦等^[50]指出种子丸粒化技术与生理保护之间存在协同效应,这种协同效应体现在多个层面,包括物理保护、生理活性调节、营养物质供给以及对幼苗生长的促进作用,这一理论在多种作物与水生植物中得到验证,陈德星等^[51]发现,油菜(*Brassica napus*)种子经过丸粒化处理后,能够提高其在干旱条件下的出苗率和幼苗成活率。张彦才等^[52]在棉花(*Gossypium hirsutum*)种子研究中也证实,丸粒化层不仅提供保护,还可以作为营养物质的载体,为和幼苗早期生长提供额外的支持。

本研究发现,在适宜风干时间条件下,木质基质在种子吸水率、总蛋白与淀粉酶活性等方面表现更有利,表现出木质基质缓解风干对种子活力与萌发的负效应,说明海草种子丸粒化工艺优化的关键不在于单纯追求更高强度或更快下沉,而应在适宜风干窗口内实现物理适宜性与生理指标稳定性耦合的最优化。

5 结论

本研究针对鳗草种子播种中种子易流失与实生苗建成率低的瓶颈,探究了丸化基质与风干时间对鳗草种子物理、生理、萌发特性及实生苗建成的影响。结果显示,木质丸粒化基质具有优良的亲水性,在风干 12 min 后吸水率仍达 53.1%,有效缓冲了干燥胁迫对种子生理代谢的损伤,维持了较高的种子活力与蛋白含量。综合收益指数结果表明,木质丸粒化基质配合 2~4 min 的风干时间为最优工艺窗口,综合收益指数为 0.54~0.66,实生苗建成率超过 35%,且与裸种无显著差异(图 8)。本研究证实了“木质丸粒化基质+短时风干”技术可有效平衡物理防护与生理活性的矛盾,为海草床规模化修复提供了科学依据与关键技术参数。

6 展望

未来可在室内筛选出的适宜基质类型与短时风干窗口基础上,结合自然海区的环境条件(水流、潮

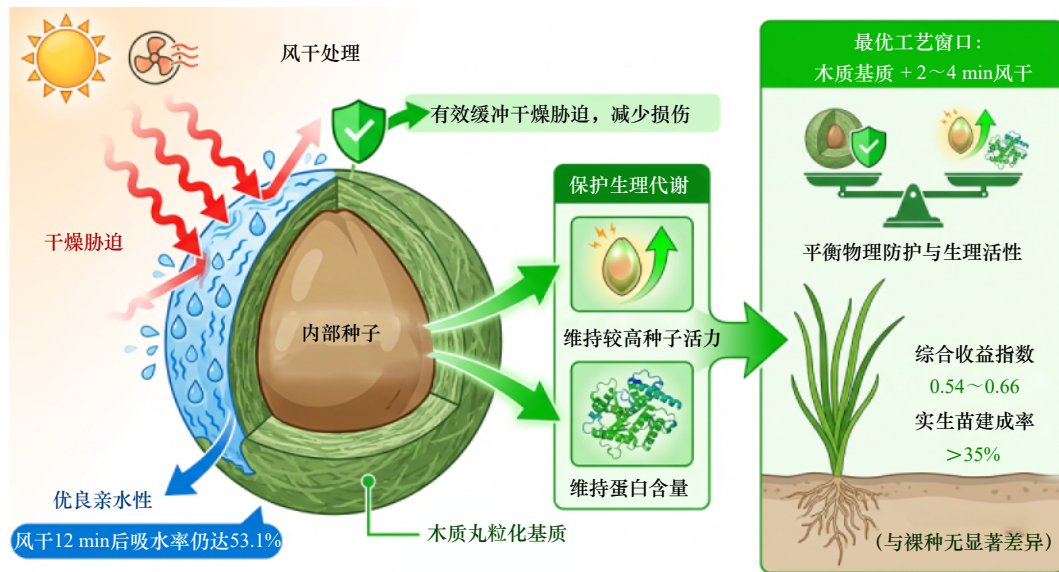


图8 木质基质与短时风干协同优化鳗草种子丸粒化并促进实生苗建成

Fig. 8 Synergistic optimization of the wood-based matrix and short-term drying duration for *Z. marina* seed pelletization and subsequent seedling establishment

汐与底质特征)开展小范围现场实验,验证种子丸粒化工艺参数(抗压强度、吸水率、崩解时间、风干时间等)与实际播种效果(种子留存率、萌发率、实生苗建成率等)的对应关系;在播种方式上,可将丸粒化种

子与种子带、种子绳等定点锚固布设技术相结合,用于环境稳定性较低或需要控制播种密度与空间布局的区域,也可与无人船撒播或无人机飞播等机械化手段结合,实现大尺度、密度可控的精准播种。

参考文献:

- [1] 黄小平,江志坚,范航清,等.中国海草的“藻”名更改[J].海洋与湖沼,2016,47(1):290-294.
Huang Xiaoping, Jiang Zhijian, Fan Hangqing, et al. The nomenclature of the “algae” name of seagrasses in China[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2016, 47(1): 290-294.
- [2] 黄小平,江志坚,张景平,等.全球海草的中文命名[J].海洋学报,2018,40(4):127-133.
Huang Xiaoping, Jiang Zhijian, Zhang Jingping, et al. The Chinese nomenclature of the global seagrasses[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(4): 127-133.
- [3] Darling J A, Martinson J, Gong Yunguo, et al. Ballast water exchange and invasion risk posed by intracoastal vessel traffic: an evaluation using high throughput sequencing[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(17): 9926-9936.
- [4] Dunic J C, Brown C J, Connolly R M, et al. Long-term declines and recovery of meadow area across the world’s seagrass bioregions[J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(17): 4096-4109.
- [5] Du Jianguo, Chen Bin, Nagelkerken I, et al. Protect seagrass meadows in China’s waters[J]. *Science*, 2023, 379(6631): 447.
- [6] 李森,范航清,邱广龙,等.海草床恢复研究进展[J].生态学报,2010,30(9):2443-2453.
Li Sen, Fan Hangqing, Qiu Guanglong, et al. Review on research of seagrass beds restoration[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(9): 2443-2453.
- [7] Hootsmans M J M, Vermaat J E, Van Vierssen W. Seed-bank development, germination and early seedling survival of two seagrass species from the Netherlands: *Zostera marina* L. and *Zostera noltii* hornem[J]. *Aquatic Botany*, 1987, 28(3/4): 275-285.
- [8] 刘雷.浅海海底植被修复播种机的设计与试验[D].泰安:山东农业大学,2013.
Liu Lei. Design and test of the shallow seabed vegetation restoration planter[D]. Tai’an: Shandong Agricultural University, 2013.
- [9] Xu Shaochun, Zhou Yi, Qiao Yongliang, et al. Seagrass restoration using seed ball burial in northern China[J]. *Restoration Ecology*, 2023, 31(1): e13691.
- [10] Zhang Yanhao, Liu Jinji, Xu Jieying, et al. Development of seed- and shoot-based restoration approaches for the eelgrass *Zostera marina*: the combined effect of sediment loosening and fertilization[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2025, 24(4): 1083-1098.
- [11] 邱广龙,权佳惠,苏治南,等.海草土壤种子库:特征、影响因素、研究方法及其在受损海草场恢复中的作用[J].应用海洋学学报,2022,41(2):193-200.
Qiu Guanglong, Quan Jiahui, Su Zhinan, et al. Characteristics, influence factors, research methods of seagrass seed bank and its significance in seagrass bed recovery[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2022, 41(2): 193-200.

- [12] 杨明欣, 张艺, 韩立朴. 高丹草种子丸粒化配方的筛选[J]. *河南农业科学*, 2020, 49(7): 58–67.
Yang Mingxin, Zhang Yi, Han Lipu. Selection of pelletization formulas of Sorghum-sudangrass hybrid seed[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2020, 49(7): 58–67.
- [13] 杨丽芳, 高捍东, 顾美影, 等. 柠条种子丸粒化配方的筛选[J]. *南京林业大学学报 (自然科学版)*, 2019, 43(5): 9–15.
Yang Lifang, Gao Handong, Gu Meiyong, et al. Screening of pellet formulas for *Caragana korshinskii* Kom. seeds[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2019, 43(5): 9–15.
- [14] Sharma P, Thakur A K, Nair S A. Seed pelleting: a technique of seed quality enhancement[J]. *Bhartiya Krishi Anusandhan Patrika*, 2019, 34(2): 142–144.
- [15] 范航清. 中国亚热带海草生理生态学研究[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
Fan Hangqing. Studies on Physiological Ecology of Seagrasses in Subtropical China[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [16] Xu Shaochun, Wang Pengmei, Zhou Yi, et al. New insights into different reproductive effort and sexual recruitment contribution between two geographic *Zostera marina* L. populations in temperate China[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 15.
- [17] 栾维迎. 海菖蒲对海洋酸化的响应及缓解海洋酸化的机制研究[D]. 青岛: 中国科学院大学 (中国科学院海洋研究所), 2023.
Luan Weiyong. Study on the response of *Enhalus acoroides* to ocean acidification (OA) and its mechanism to alleviate OA[D]. Qingdao: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences), 2023.
- [18] 田璐, 张沛东, 牛淑娜, 等. 不同处理对大叶藻种子萌发和幼苗建成的影响[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(9): 2408–2413.
Tian Lu, Zhang Peidong, Niu Shuna, et al. Effects of different treatments on seed germination and seedling establishment of eelgrass *Zostera marina* L.[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(9): 2408–2413.
- [19] 王玺茜, 皮娜娜, 翁群芳. 种子丸粒化及其研究进展[J]. *湖南农业科学*, 2024(3): 85–90.
Wang Xiqian, Pi Nana, Weng Qunfang. Research progress of seed pelleting[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2024(3): 85–90.
- [20] Xu Shaochun, Zhou Yi, Xu Shuai, et al. Seed selection and storage with nano-silver and copper as potential antibacterial agents for the seagrass *Zostera marina*: implications for habitat restoration[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 20249.
- [21] Fourqurean J W, Duarte C M, Kennedy H, et al. Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock[J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(7): 505–509.
- [22] 王合虎, 张彦浩, 李文涛, 等. 不同栽培方式对鳗草实生苗建成和生理的影响[J]. *渔业科学进展*, 2023, 44(6): 239–249.
Wang Hehu, Zhang Yanhao, Li Wentao, et al. Effects of different cultivation methods on seedling establishment and physiology of the eelgrass *Zostera marina*[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2023, 44(6): 239–249.
- [23] 于兵, 杨启文, 张彦浩, 等. 赤霉素和弱酸对鳗草种子萌发和生理特性的影响[J]. *渔业科学进展*, 2023, 44(4): 26–34.
Yu Bing, Yang Qiwen, Zhang Yanhao, et al. Effects of gibberellin and weak acid on seed germination and physiological characteristics of the eelgrass *Zostera marina*[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2023, 44(4): 26–34.
- [24] Brenchley J L, Probert R J. Seed germination responses to some environmental factors in the seagrass *Zostera capricorni* from eastern Australia[J]. *Aquatic Botany*, 1998, 62(3): 177–188.
- [25] 马英剑, 陈罗云, 臧吉强, 等. 大葱种子丸粒化及性能研究[J]. *农药学报*, 2022, 24(5): 1236–1247.
Ma Yingjian, Chen Luoyun, Zang Jiqiang, et al. Study on seed pelleting and performance of welsh onion (*Allium fistulosum* L.) [J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2022, 24(5): 1236–1247.
- [26] 芦光新, 李希来, 田丰, 等. 羊粪和粘土在牧草种子丸粒化中的应用研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(5): 55–58.
Lu Guangxin, Li Xilai, Tian Feng, et al. Different ratio of sheep manure and clay in pelleted-seed of forage[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(5): 55–58.
- [27] 张必周, 郑文哲, 张惠忠, 等. 甜菜丸粒化种子裂解及抗压特性的研究[J]. *中国糖料*, 2023, 45(3): 83–88.
Zhang Bizhou, Zheng Wenzhe, Zhang Huizhong, et al. Study on disintegration and compressive strength of pelleted sugar beet seeds[J]. *Sugar Crops of China*, 2023, 45(3): 83–88.
- [28] 张凌云. 三种因子对大叶藻种子休眠的影响及其作用机理初步研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
Zhang Lingyu. Effects of three factors on seed dormancy in eelgrass (*Zostera marina* L.) and their mechanisms[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [29] Wen Daxing, Xu Haicheng, Xie Liuyong, et al. Effects of nitrogen level during seed production on wheat seed vigor and seedling establishment at the transcriptome level[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2018, 19(11): 3417.
- [30] Liu Yaya, Zhu Lina, Rodríguez R M, et al. Personalized fuzzy semantic model of PHFLTS: application to linguistic group decision making[J]. *Information Fusion*, 2024, 103: 102118.
- [31] 吴奇, 周宇飞, 高悦, 等. 不同高粱品种萌发期抗旱性筛选与鉴定[J]. *作物学报*, 2016, 42(8): 1233–1246.
Wu Qi, Zhou Yufei, Gao Yue, et al. Screening and identification for drought resistance during germination in sorghum cultivars[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(8): 1233–1246.
- [32] Qiu Yi, Amirkhani M, Mayton H, et al. Biostimulant seed coating treatments to improve cover crop germination and seedling growth[J]. *Agronomy*, 2020, 10(2): 154.
- [33] Dzobo K, Khumalo N, Mora V Z, et al. Advances in silicone implants characterization: a comprehensive overview of chemical, physical and biological methods for biocompatibility assessment[J]. *Bioengineering*, 2025, 12(12): 1307.

- [34] 任海燕, 远远, 赵文多, 等. 抗逆增效草种包衣丸粒化技术在生态修复中的应用进展[J]. *应用生态学报*, 2025, 36(8): 2563–2570.
Ren Haiyan, Yuan Yuan, Zhao Wenduo, et al. Advances in the application of stress-resilient and growth-enhancing seed coating and pelleting technology for ecological restoration[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2025, 36(8): 2563–2570.
- [35] Hu Wentao, Qiu Qun, Wei Xinlei, et al. Promote alumina leaching through re-pelleting: effects of directional coating of calcite on silicate grains[J]. *Minerals*, 2018, 8(4): 129.
- [36] Afzal I, Javed T, Amirkhani M, et al. Modern seed technology: seed coating delivery systems for enhancing seed and crop performance[J]. *Agriculture*, 2020, 10(11): 526.
- [37] 孙正, 李树君, 苑严伟, 等. 番茄种子包衣丸粒化装置的设计与试验[J]. *农机化研究*, 2017, 39(6): 162–169.
Sun Zheng, Li Shujun, Yuan Yanwei, et al. Design and experiment on coating granulation equipment for tomato seeds[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2017, 39(6): 162–169.
- [38] Jørgensen M S, Labouriau R, Olesen B. Seed size and burial depth influence *Zostera marina* L. (eelgrass) seed survival, seedling emergence and initial seedling biomass development[J]. *PLoS One*, 2019, 14(4): e0215157.
- [39] 李锦霞, 许美刚, 缪建国, 等. 新型小麦种衣剂的优势及应用技术[J]. *现代农业科技*, 2014(19): 63–64.
Li Jinxia, Xu Meigang, Miao Jianguo, et al. Advantages and application technologies of new wheat seed coating agent[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2014(19): 63–64.
- [40] Salmén L, Stevanic J S, Holmqvist C, et al. Moisture induced straining of the cellulosic microfibril[J]. *Cellulose*, 2021, 28(6): 3347–3357.
- [41] Wu Yushi, Zhang Min, Bozdar B, et al. From filler to pelleted seed germination: a data-driven approach using multiple linear regression models for seed optimisation[J]. *Seed Science and Technology*, 2025, 53(3): 419–446.
- [42] Wen Zhaozhu, Lu Xuran, Wen Jiangqi, et al. Physical seed dormancy in legumes: molecular advances and perspectives[J]. *Plants*, 2024, 13(11): 1473.
- [43] Shaik S S, Carciofi M, Martens H J, et al. Starch bioengineering affects cereal grain germination and seedling establishment[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2014, 65(9): 2257–2270.
- [44] Nie Lixiao, Song Shaokun, Yin Qi, et al. Enhancement in seed priming-induced starch degradation of rice seed under chilling stress via GA-mediated α -amylase expression[J]. *Rice*, 2022, 15(1): 19.
- [45] Pedersen O, Binzer T, Borum J. Sulphide intrusion in eelgrass (*Zostera marina* L.)[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2004, 27(5): 595–602.
- [46] 洛桑旦巴, 索朗次仁. 植物对干旱胁迫的适应性研究进展[J]. *现代农业科技*, 2025(22): 72–76.
Luosang Danba, Suolang Ciren. Research progress on plant adaptation to drought stress[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2025(22): 72–76.
- [47] 柴亚倩, 关思慧, 崔洪鑫, 等. 水氮互作对石榴幼苗光合荧光及生理特性的影响[J]. *果树学报*, 2022, 39(12): 2352–2364.
Chai Yaqian, Guan Sihui, Cui Hongxin, et al. Effects of water and nitrogen interaction on photosynthetic fluorescence and physiological characteristics of pomegranate seedlings[J]. *Journal of Fruit Science*, 2022, 39(12): 2352–2364.
- [48] 张凤, 刘美, 杨翠翠, 等. 贮藏温度和种子含水量对大豆种子活力的影响[J]. *山东农业科学*, 2014, 46(8): 37–41.
Zhang Feng, Liu Mei, Yang Cuicui, et al. Effects of storage temperature and seed moisture content on soybean seed vigor[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2014, 46(8): 37–41.
- [49] 左卫能. SPP 引发对大豆种子吸胀损伤的防护作用[J]. *华北农学报*, 1988(1): 91–95.
Zuo Weineng. Prevention of imbibing damage of soybean with SPP priming[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 1988(1): 91–95.
- [50] 谢锦, 韩立朴. 我国种子丸粒化研究现状及展望[J]. *中国生态农业学报*, 2024, 32(4): 605–615.
Xie Jin, Han Lipu. Current status and prospects of seed pelleting research in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2024, 32(4): 605–615.
- [51] 陈德星, 周立友, 陈其军, 等. 油菜种子丸粒化包衣技术研究[J]. *种子*, 2004, 23(7): 85–86.
Chen Dexing, Zhou Liyou, Chen Qijun, et al. Study on rapeseed seed pelleting and coating technology[J]. *Seed*, 2004, 23(7): 85–86.
- [52] 张彦才, 李巧云, 刘全清, 等. 种子丸粒化对棉花生长发育的影响[J]. *河北农业科学*, 2003, 7(S1): 19–22.
Zhang Yancai, Li Qiaoyun, Liu Quanqing, et al. The effects of cottonseed pelletizing on cotton growth and development[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2003, 7(S1): 19–22.

Effects of different pelleting matrices and drying durations on seed characteristics, germination, and seedling establishment in *Zostera marina*

Peng Liye^{1,2}, Liu Jinji^{1,2}, Yan Wenjie^{1,2}, Zhang Yanhao^{1,2}, Zhang Zhen², Zhang Peidong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Mariculture, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266003, China; 2. Joint Research Center for Conservation, Restoration & Sustainable Utilization of Marine Ecology, Ocean University of China-China State Shipbuilding Corporation Environmental Development Company Limited, Qingdao 266003, China)

Abstract: To overcome key challenges such as the tendency of seeds to drift with water currents during sowing and low seedling establishment rates, this study focused on eelgrass (*Zostera marina*), a dominant temperate seagrass species. The effects of two types of pelleting matrices—wood-based and mineral-based—and varying drying durations (0–12 min) on the physical and physiological properties of eelgrass seeds were systematically investigated. Following a preliminary screening of groups exhibiting germination potential, the impacts of these treatments on seed germination and seedling establishment were further evaluated. Results demonstrated that prolonged drying significantly enhanced both sinking acceleration and compressive strength of granulated seeds. Notably, seeds coated with the mineral-based matrix exhibited the highest sinking acceleration, reaching 3.2 times that of uncoated seeds, and displayed 3.1 times greater compressive strength than those in the wood-based matrix group. However, seed viability decreased progressively with increasing drying time: the uncoated and wood-based matrix groups maintained viability above 80% up to 8 min of drying, whereas the mineral-based group fell below this threshold after only 4 min. The wood-based matrix played a protective role in alleviating physiological stress induced by drying. Throughout the 0–12 min drying period, α -/ β -amylase activities and total protein content in the wood-based matrix group remained comparable to those in the uncoated control group and were significantly higher than those in the mineral-based matrix group ($p < 0.05$). With respect to seedling establishment, the wood-based matrix treatment achieved rates of 39.0%–43.0% under drying durations of 0–4 min, which were statistically similar to the uncoated control (42.0%) and markedly higher than those observed in the mineral-based treatment (8%–12.5%). Correlation analysis revealed a highly significant positive association between seedling establishment rate and key physiological parameters, including enzyme activity and protein content. Furthermore, comprehensive benefit index analysis indicated that the wood-based matrix could achieve an optimal trade-off between physical suitability and physiological vitality when drying duration was restricted to 2–4 min. These findings suggest that using a wood-based pelleting matrix combined with a short drying duration (2–4 min) is a feasible and effective strategy for improving *Z. marina* seed handling and establishment in seagrass restoration practices.

Key words: *Zostera marina*; pelleting matrices; drying duration; seedling establishment; comprehensive benefit evaluation