不同处理对大叶藻种子萌发和幼苗建成的影响*

田 璐 张沛东** 牛淑娜 张秀梅 张凌宇

(中国海洋大学水产学院, 山东青岛 266003)

摘 要 实验室条件下,研究了针刺种皮、酸蚀、药物、激素、低盐、变温和低温层积等不同处理对大叶藻种子萌发和幼苗建成的影响。结果表明:经 30 d 萌发实验,低盐处理对大叶藻种子萌发产生了显著影响($P<0.05$),其中盐度 25 处理组的种子萌发率和发芽指数分别为对照组(0.67%和0.07)的36.3倍和58.9倍,平均萌发历期降至9.3 d,且随着处理盐度的降低,种子萌发率与发芽指数逐渐增高,平均萌发历期则逐渐缩短;针刺种皮也显著促进大叶藻种子萌发,其种子萌发率和发芽指数分别为对照组的26.9倍和42.7倍,平均萌发历期降至12.6 d;而酸蚀、药物、激素、变温与低温层积等处理并未明显促进大叶藻种子的萌发。对萌发幼苗的培养显示,经30 d实验,低盐处理组幼苗建成率显著高于对照组($P<0.05$),其中低盐 10~25 处理组较高,但生长状况与对照组差异不大,而针刺种皮处理组无幼苗存活。综合分析可知,低盐处理可显著促进大叶藻种子的快速萌发,适宜盐度为 10~25。

关键词 海草; 大叶藻; 种子; 萌发; 幼苗建成

中图分类号 S917.3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2014)9-2408-06

Effects of different treatments on seed germination and seedling establishment of eelgrass *Zostera marina* L. TIAN Lu, ZHANG Pei-dong**, NIU Shu-na, ZHANG Xiu-mei, ZHANG Ling-yu (*College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao* 266003, *Shandong, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(9): 2408-2413.

Abstract: Seed germination and seedling establishment of eelgrass *Zostera marina* L. exposed to acupuncture, acid, drug, hormone, low salinity, fluctuating temperature, and low temperature stratification were studied under controlled laboratory conditions. Results showed that, after 30 d of seed germination, low salinity had a significant effect on the seed germination of *Z. marina* ($P<0.05$). The germination rate and germination index (GI) of seeds under the salinity of 25 were 36.3 times and 58.9 times as high as those of seeds from the control group (0.67% and 0.07), while the mean time-to-germinate (MTG) was lowered down to 9.3 d. Seed germination rate and GI gradually increased as salinity decreased, whereas an opposite trend was observed in MTG. In addition, acupuncture significantly promoted seed germination, as the germination rate and GI of the seeds in this treatment were 26.9 and 42.7 times as high as those of the seeds in the control group, whereas MTG was lowered down to 12.6 d. However, seed germination was not significantly affected by acid, hormone, drug, fluctuating temperature, and low-temperature stratification. By contrast, the establishment rate of seed-generated seedlings was significantly higher in the low-salinity treatments (with salinity of 10-25) than in the control treatment. However, no obvious difference in morphology was found between these treatments. The seed-generated seedlings in the acupuncture treatment all died at the end of the experiment (30 d). The results indicated that low salinity could promote *Z. marina* seed germination, and the optimum salinity range for rapid seed germination is from 10 to 25.

Key words: seagrass; *Zostera marina*; seed; germination; seedling establishment.

* 国家自然科学基金项目(30400615)、山东省优秀中青年科学家奖励基金项目(BS2011HZ017)和海洋公益性行业科研专项经费项目(201405010)资助。

** 通讯作者 E-mail: zhangpdsg@ouc.edu.cn

收稿日期: 2014-01-16 接受日期: 2014-04-03

海草是一类生长在热带至温带海域浅水中的单子叶植物,具有发达的根系和地下茎,一般分布于低潮带和潮下带 6 m 以上(少数可深达 30 m)砂泥或砂质与泥质混合的浅水生境(林鹏,2006)。作为浅海海域中重要的初级生产者,海草在适宜条件下可以形成大面积的海草床(Short *et al.*,2011)。海草床具有高生物量和生产力,是三大典型滨海生态系统之一,也是地球生物圈最高产的生态系统之一,具有极其重要的生态功能(García-Marín *et al.*,2013)。然而,海草床的消失速度已从 75 年前每年的 0.9% 上升到最近几十年的每年 7%,是热带森林消失速度的 2 ~ 15 倍(Nellemann *et al.*,2009)。最近一项评估显示,全球约 1/3 的海草床已消失,且消失速度还在加快(Waycott *et al.*,2009)。

近几十年来,人们逐渐认识到海草床极其重要的生态功能和急剧衰退的危机,开展了一些海草床修复和保护的研究与尝试(Balestri *et al.*,1998; Kirkman,1998; Martins *et al.*,2005; Park & Lee,2007)。海草种子数量多、体积小,运输方便,对种子供给海草床干扰小,还可以保持遗传多样性,且对斑块海草床的发展起决定作用(Orth *et al.*,2009),因此利用种子恢复受损海草床成为目前研究的热点。近些年,美国和澳大利亚的一些学者开展了海草种子自然海域播种的尝试,并研发了海上播种机(Traber *et al.*,2003; Orth *et al.*,2009)。但海草种子在自然海域的萌发率非常低,仅有 5% ~15%,幼苗建成率(种子萌发后成功定植的幼苗数占种子总数的百分比)也低于 10%(Orth *et al.*,2009),严重制约了海草种子在受损海草床规模化修复中的应用。海草种子在人为控制环境中的萌发率和幼苗建成率显著提高(Harwell & Orth,1999),因此目前另外一个尝试就是在人工控制条件下,对海草种子进行快速萌发和幼苗培育,待幼苗长至适宜规格后将其移植于修复海域。然而,有关海草有性繁殖、休眠与萌发、幼苗生长及其影响因素等的研究还相当匮乏。且海草种子的解剖学特征及萌发策略差异很大,特别是对于同一种类不同种群海草种子的萌发条件也可能存在显著差异(Orth *et al.*,2000),因此查明中国海草种类的种子萌发策略,是开展受损海草床修复的关键。

本研究以中国北方海域优势海草种类——大叶藻(*Zostera marina*)为研究对象,在实验室条件下,研究了针刺种皮、酸蚀、药物、激素、低盐、变温和低温层积等 9 种共 21 个处理对其种子萌发的影响,并探讨了人为促进种子萌发对后期幼苗存活和生长的影响,全面评价了各处理的促萌发效果,以期为研发大叶藻种子快速萌发技术及建立海草幼体人工培育理论提供参考。

1　材料与方法

1.1　种子收集

实验用大叶藻种子于 2010 年 7 月采自山东省荣成市天鹅湖海域。采集时,将带有尚未脱落成熟种子的佛焰苞装入 33 cm × 33 cm(长 × 宽)、网目大小为 1.1 mm 的网袋中,网袋扎紧兜口后将其悬于自然海域,至袋中种子自然脱落后进行收集。收集后的成熟种子置于广口瓶中带回实验室,室温条件下置于盐度 30 海水保存。保存期间每天换水一次,并充氧。

1.2　种子萌发

种子萌发实验共设置 21 个处理(表 1)。开始实验时,挑选成熟饱满的大叶藻种子,先用 75% 乙醇浸泡 30 s,无菌海水冲洗 3 次,再用 0.1% 氯化汞溶液浸泡 15 min,无菌海水冲洗 3 次。每个处理 3 个重复,每个重复随机挑选 100 粒消毒后种子,放入

表 1　大叶藻种子萌发的实验设计

Table 1　Experimental design on seed germination of *Zostera marina*

处理	前期处理	萌发条件
对照(C)	无	黑暗,15℃,盐度 30
针刺种皮(ZC)	用针将背对种阜一面的种皮刺破	黑暗,15℃,盐度 30
硫酸浸泡(H_2SO_4)	5% H_2SO_4浸泡 24 h	黑暗,15℃,盐度 30
硫脲浸泡(LN)	20 mg · L^{-1}硫脲浸泡 24 h	黑暗,15℃,盐度 30
KNO_3浸泡(KNO_3-10)	10 mg · L^{-1} KNO_3浸泡 24 h	黑暗,15℃,盐度 30
KNO_3浸泡(KNO_3-20)	20 mg · L^{-1} KNO_3浸泡 24 h	黑暗,15℃,盐度 30
KNO_3浸泡(KNO_3-40)	40 mg · L^{-1} KNO_3浸泡 24 h	黑暗,15℃,盐度 30
赤霉素浸泡(GA-10)	10 mg · L^{-1}GA 浸泡 24 h	黑暗,15℃,盐度 30
赤霉素浸泡(GA-20)	20 mg · L^{-1}GA 浸泡 24 h	黑暗,15℃,盐度 30
赤霉素浸泡(GA-30)	30 mg · L^{-1}GA 浸泡 24 h	黑暗,15℃,盐度 30
赤霉素浸泡(GA-60)	60 mg · L^{-1}GA 浸泡 24 h	黑暗,15℃,盐度 30
赤霉素浸泡(GA-100)	100 mg · L^{-1}GA 浸泡 24 h	黑暗,15℃,盐度 30
赤霉素浸泡(GA-300)	300 mg · L^{-1}GA 浸泡 24 h	黑暗,15℃,盐度 30
低盐萌发(LS-0)	无	黑暗,15℃,盐度 0
低盐萌发(LS-5)	无	黑暗,15℃,盐度 5
低盐萌发(LS-10)	无	黑暗,15℃,盐度 10
低盐萌发(LS-15)	无	黑暗,15℃,盐度 15
低盐萌发(LS-20)	无	黑暗,15℃,盐度 20
低盐萌发(LS-25)	无	黑暗,15℃,盐度 25
变温(T)	无	黑暗,25℃/15℃(12 h/12 h),盐度 30
低温层积(S)	无	黑暗,4℃,盐度 30

100 mL烧杯,烧杯中加入80 mL等量海水,置于光照培养箱(GXZ-0288,宁波江南仪器厂)中进行萌发实验。低盐处理组使用不同盐度海水萌发,其余处理均使用盐度30的海水萌发。萌发过程中无光照,温度15℃(变温处理组为12 h 15 ℃、12 h 25 ℃)。实验期间,每天观察种子萌发情况,统计萌发粒数并将已萌发种子挑出进行下一步幼苗培育,每2 d换水一次,实验共进行30 d。

1.3 幼苗培养

将萌发所得幼苗,每20株一组移植于底部铺有5 cm细沙的100 mL烧杯中,置于40 cm ×40 cm×20 cm(长×宽×高)的玻璃水槽中,添加海水至水深达到15 cm后,放入光照培养箱(GXZ-0288,宁波江南仪器厂)中培养,共30 d。培养条件:水温17℃、光量子密度45 μmol · m^{-2} · s^{-1}、光照周期12L∶12D、pH 8.3±0.2、DO>6.0 mg · L^{-1}、盐度30。低盐处理组所得幼苗,培养前以每天5的速率对其进行盐度驯化,至盐度达到30时正式开展幼苗培养实验。培养期间,每天观察幼苗的存活和生长情况,采用虹吸法每2 d换水1次。培养结束后,计算幼苗存活率,并测量幼苗的生长指标,包括叶长、叶宽、叶鞘长、茎节长及根长等(mm)。

1.4 数据处理

通过统计每日种子萌发数量与监测幼苗存活情况,计算种子萌发率、平均萌发历期(MTG)、发芽指数(GI)及幼苗存活率和幼苗建成率,计算公式如下:

(1)萌发率(%)= 萌发种子数/ 种子总数×100

(2) $MTG(d)=\sum(n_i \times d)/N$

式中,n_i为第i天萌发的种子数,d代表萌发统计的第i天,N为萌发种子的总数。

(3) $GI=\sum(G_t/D_t)$

式中,D_t为发芽日数,G_t为与D_t对应天数的萌发粒数。

(4)幼苗存活率(%)= 存活的幼苗数/ 初始幼苗数×100

(5)幼苗建成率(%)= 存活的幼苗数/ 初始种子数×100

采用SPSS 13.0与Excel 2007对数据进行统计分析及绘图,利用SPSS 13.0对数据进行ANOVA分析与多重比较,以$P<0.05$作为差异显著水平。

2 结果与分析

2.1 不同处理对大叶藻种子萌发的影响

经30 d萌发(表2),对照组(C)种子萌发率仅为0.7%,发芽指数(GI)为0.07,平均萌发历期(MTG)>30 d。6个低盐处理组均对大叶藻种子的萌发产生明显促进作用($P<0.05$),其中盐度25处理组(LS-25)种子萌发率和GI分别为对照组的36.3倍和58.9倍,MTG降至9.3 d,且随着处理盐度降低,种子萌发率与GI逐渐增高、MTG逐渐缩短。同时针刺种皮(ZC)也显著促进大叶藻种子萌发,至实验结束,ZC组种子萌发率和发芽指数分别为对照组的26.9倍和42.7倍,平均萌发历期降至12.6 d。而其余处理组大叶藻种子的萌发率、MTG和GI与对照组无显著差异($P>0.05$)。

表2 不同处理对大叶藻种子萌发的影响

Table 2 Effects of different treatments on seed germination of *Zostera marina*

处理	萌发率(%)	*MTG* (d)	*GI*
C	0.7±0.7 a	>30	0.07±0.01 a
ZC	18.0±6.2 b	12.6±1.1	2.99±0.13 b
H_2SO_4	0.7±0.3 a	>30	0.04±0.11 a
LN	2.3±0.3 a	>30	0.14±0.01 a
KNO_3-10	1.3±0.3 a	>30	0.21±0.02 a
KNO_3-20	2.3±0.9 a	>30	0.19±0.03 a
KNO_3-40	3.3±0.9 a	>30	0.39±0.02 a
GA-10	0.7±0.3 a	>30	0.04±0.01 a
GA-20	0.7±0.7 a	>30	0.03±0.01 a
GA-30	2.0±0.0 a	>30	0.39±0.01 a
GA-60	1.0±1.0 a	>30	0.06±0.01 a
GA-100	2.0±0.6 a	>30	0.09±0.01 a
GA-300	2.7±0.9 a	>30	0.60±0.02 a
LS-0	86.8±1.5 c	5.1±1.2	55.79±1.22 e
LS-5	56.0±2.9 d	5.1±0.9	36.21±1.10 d
LS-10	48.9±0.7 d	5.3±1.3	18.25±1.03 c
LS-15	35.0±1.7 d	7.1±2.1	14.74±0.33 c
LS-20	30.0±2 bd	6.9±1.8	10.01±0.99 c
LS-25	24.3±0.3 b	9.3±2.1	4.12±0.45 b
T	2.3±0.7 a	>30	0.27±0.06 a
S	1.7±0.3 a	>30	0.10±0.01 a

数据为平均值±标准偏差。同一列中不同字母代表差异显著,$P<0.05$,下同。

2.2 大叶藻幼苗的存活与生长

因H_2SO_4、LN、KNO_3、GA、T和S处理未能显著提高种子萌发率,ZC处理组萌发后幼苗培养1周后陆续死亡,因此未进一步对这些处理组的幼苗进行培养。

对照组及低盐处理条件下得到的大叶藻幼苗,其存活和生长情况如表3。培养30 d后,对照组幼苗存活率最高,达到75.1±5.0%,然而因种子萌发率极低,故幼苗建成率仅为0.5%。低盐处理条件下,幼苗存活率随处理盐度增高而增高,其中LS-0与LS-5处理组幼苗存活率较低,显著低于对照组和

表 3　不同处理大叶藻幼苗的存活率和生长状况
Table 3　Survival rate and growth of *Zostera marina* seedlings under different treatments

处理	幼苗存活率（%）	幼苗建成率（%）	叶长（mm）	叶宽（mm）	叶鞘长（mm）	茎节长（mm）	根长（mm）
C	75.1±5.0 d	0.5±0.2 d	17.2±1.1 b	1.03±0.02 a	8.2±0.27 a	2.6±0.11 a	6.4±0.6 a
LS-0	10.8±2.1 a	9.3±1.2 a	15.6±1.1 ab	0.99±0.03 a	7.1±0.22 a	2.6±0.30 a	8.1±1.04 a
LS-5	23.5±5.1 a	13.2±2.1 ab	12.2±0.8 c	1.00±0.03 a	7.2±0.29 a	2.6±0.23 a	3.4±0.6 b
LS-10	35.8±5. 4 bc	17.5±2.2 c	13.1±0.9 ac	0.96±0.04 a	6.9±0.32 a	2.5±0.16 a	4.6±0.7 ab
LS-15	41.4±4.1 bc	14.5±1.6 bc	17.2±1.0 b	0.93±0.02 a	7.4±0.40 a	2.8±0.18 a	5.2±0.9 ab
LS-20	52.9±10.9 bcd	15.8±2.3 ab	15.5±1.2 ab	0.94±0.03 a	7.8±0.31 a	2.3±0.13 a	6.6±0.7 a
LS-25	67.8±7.7 cd	16.5±2.4 ab	16.5±1.1 b	1.00±0.03 a	7.8±0.28 a	2.5±0.20 a	6.8±0.8 a

其他低盐处理组($P<0.05$),而 LS-20 与 LS-25 低盐处理组的幼苗存活率与对照组无显著性差异($P>0.05$)。方差分析显示,各处理组之间的幼苗建成率存在显著差异($P<0.05$),各低盐处理组的幼苗建成率均显著高于对照组,其中 LS-10 组的幼苗建成率最高,是对照组的 35 倍。

由萌发幼苗形态学指标来看,对照组幼苗生长较好。方差分析显示,低盐处理组幼苗的叶宽、叶鞘长和茎节长等 3 个指标与对照组无明显不同($P>0.05$)。LS-5 及 LS-10 处理组幼苗的叶长较短,显著低于对照组,其余各低盐处理组幼苗叶长和对照组无显著性差异。LS-5 处理组幼苗的根长最小,平均为 3.4±0.6 mm,显著低于对照组,其余各低盐处理组幼苗根长和对照组无明显不同($P>0.05$)。

3　讨　论

种子萌发需满足两个条件:有活力的种子和适宜的外界条件。不同环境因子对海草种子萌发的影响存在种间特异性,同一环境因子对不同种类海草种子萌发的影响可能存在显著的差异,各环境因子之间也常存在交互作用,所以提出精确的海草种子萌发机制非常困难(张沛东等,2011)。

海草种子属于顽拗性种子,种皮通常较硬,会对种子萌发造成较大的机械阻力。研究表明,酸蚀、摩擦、刺破等方式破除种皮可促进某些采用物理方法休眠的海草种子萌发(Loques *et al.*,1990; Harrison & Durance,1992; Conacher *et al.*,1994)。本研究发现,酸蚀种皮并未明显促进大叶藻种子萌发,这可能是因为酸蚀浓度不够,从而对种皮破除有限。刺破种皮可显著提高大叶藻种子的萌发率与发芽指数,缩短萌发历期,从而实现大叶藻种子的快速萌发,但未能形成幼苗,这可能是因为种群差异的原因,也可能是实验操作中刺破种皮时破坏了胚的结构,导致萌发的种子不能形成幼苗。海草种子个体较小,长径一般在 2～5 mm(Orth *et al.*,2000),刺破种皮作为机械破除种皮的一种,难操作且耗时,种子易受损伤,因此在规模化种子萌发中应选用高效、对种子破坏小的机械破除方法。

根据 Hilhorst & Toorop(1997)的研究结果,赤霉素(GA)对陆生植物种子具有抑制休眠和促进萌发的双重效果。然而,本研究发现,大叶藻种子经浓度 10 和 20 mg · L^{-1}的 GA 处理 24 h 后,其萌发率并未提高,浓度 30～300 mg · L^{-1}的 GA 处理 24 h 后虽然种子萌发率有所增加,但并不明显。Loques 等(1990)研究也发现,1 mg · L^{-1}的赤霉素对诺氏大叶藻(*Z. noltii*)种子的萌发没有影响,而 Conacher 等(1994)则发现,50 mg · L^{-1}的赤霉素可促进摩羯大叶藻(*Z. capricorni*)种子的萌发。这些结果表明,GA 对海草种子萌发的促进作用不如对陆生植物种子明显,且 GA 的浓度和处理时间可能会影响海草种子萌发的效果。这可能是因为部分海草种子具有坚硬且难以渗透的种皮,外源激素等刺激物无法作用于种皮内所包裹的胚,从而不能改变种子内部酶活水平及物质代谢水平,所以不能发挥促进种子萌发的作用(Kuo & Kirkman,1996)。除 GA 外,硫脲和 KNO_3也是已知能够破除种子休眠的萌发刺激物中较普遍、有效的化学物质(陈开宁等,2005)。Conacher 等(1994)研究发现,50 mg · L^{-1}的硫脲能够促进摩羯大叶藻种子的萌发,而陈开宁等(2005)则发现,20 mg · L^{-1}硫脲和 7 mg · L^{-1} KNO_3处理对沉水植物蓖齿眼子菜(*Potamogeton pectinatus*)种子的萌发没有影响。本研究也发现,20 mg · L^{-1}硫脲和 10、20、40 mg · L^{-1} KNO_3处理均对大叶藻种子的萌发没有明显促进作用,说明硫脲和 KNO_3处理可能对不同种类的沉水植物作用不同。

盐度是影响海草种子萌发最重要的环境因子

(Orth *et al.*,2000)。一般来说,降低盐度可以有效促进海草种子萌发。如 Caye 和 Meinesz(1986)发现,在高温低盐条件下 *Cymodocea nodosa* 种子 10 d 内的萌发率能够超过 90%;Hootsmans 等(1987)在温度 10~30 ℃和盐度 1~40 条件下对诺氏大叶藻种子进行了萌发实验,结果发现,温度 30 ℃和盐度 10 时萌发率最高,且随着温度的升高和盐度的降低而升高;24 ℃条件下,Kahn & Durako(2005)研究了盐度 0~70 对川蔓藻(*Ruppia maritima*)种子萌发的影响,结果发现,只有盐度 0~20 时种子萌发,且盐度 0 处理组萌发率最高,达到 40%。然而,已知的研究均未评价人为促进种子萌发对萌发幼苗存活和生长的影响。本研究不仅检验了低盐处理对大叶藻种子萌发的促进作用,还探讨了人为促进种子萌发后幼苗的存活与生长。结果表明,低盐处理能够显著促进大叶藻种子的快速萌发,种子萌发率是对照组的 36 倍以上,平均萌发历期则缩短至 10 d 以下。低盐促进种子快速萌发的内在机制可能主要为渗透压作用与离子效应,通过促进种子快速吸水膨胀,进而调节种子内部物质代谢,实现种子的快速、大量萌发(Orth *et al.*,2000)。但从萌发幼苗的幼苗建成率和生长状况来看,过低的盐度处理(LS-0 和 LS-5 处理组)虽然能显著提高种子的萌发率,同时也会对幼苗的存活产生不利影响,从而明显降低幼苗建成率,且 LS-5 低盐处理组幼苗的叶长和根长也显著低于对照组。综合分析种子萌发率、平均萌发历期、幼苗存活率、幼苗建成率及生长指标可知,人工控制条件下大叶藻种子快速萌发的适宜盐度范围为 10~25。在这个盐度范围内开展大叶藻种子萌发,既可以显著提高种子的萌发率,实现快速萌发,还不会对萌发后幼苗的存活和生长造成不良影响。

另外,变温处理对一些沉水植物的种子萌发具有促进作用,如,陈开宁等(2005)发现,30 ℃恒定高温不能提高篦齿眼子菜种子的发芽率,但 30 ℃(14 h)+18 ℃(10 h)的变温则可以显著促进篦齿眼子菜的发芽。而本研究则发现,变温对大叶藻种子萌发没有明显促进作用,表明变温对沉水植物种子萌发的促进作用具有明显种间差异。Clevering(1995)对藨草属(*Scirpus*)湿地植物的研究也显示,变温仅对 *S. lacustris* 和 *S. maritimus* 的种子萌发起作用,而 *S. lacustris* 种子则在恒定的高温条件下发芽率较高。一些研究发现,低温层积能够促进某些海草种子的萌发,如摩羯大叶藻在 6 ℃低温条件下储存 5 个月的种子要比在 26 ℃条件下储存 24 d 的种子萌发提前(Brenchley & Probert,1998);经过 7 ℃低温层积处理的日本大叶藻(*Z. japonica*)种子在不同底质条件下的萌发率和萌发速度均显著高于未经低温处理的种子(Morita *et al.*,2011),本研究发现,低温层积 1 个月并未明显提高大叶藻种子的萌发率,这可能跟低温层积的时间长短有关。

综上,人工控制条件下,低盐处理是促进大叶藻种子快速萌发的最有效方式。大叶藻种子快速萌发的适宜盐度范围为 10~25。过低的盐度处理虽然能显著提高种子的萌发率,但会对幼苗的存活产生不利影响,从而明显降低幼苗建成率。研究结果为研发大叶藻种子快速萌发技术提供了理论依据。

参考文献

陈开宁, 李文朝, 潘继征. 2005. 不同处理对蓖齿眼子菜(*Potamogeton pectinatus* L.)种子萌发率的影响. 湖泊科学, **17**(3): 237-242.

林　鹏. 2006. 海洋高等植物生态学. 北京: 科学出版社.

张沛东, 孙　燕, 牛淑娜, 等. 2011. 海草种子休眠、萌发、幼苗生长及其影响因素的研究进展. 应用生态学报, **22**(11): 3060-3066.

Balestri E, Piazzi L, Cinelli F. 1998. Survival and growth of transplanted and natural seedlings of *Posidonia oceanica* (L.) Delile in a damaged coastal area. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, **228**: 209-225.

Brenchley JL, Probert RJ. 1998. Seed germination response to some environmental factors in the seagrass *Zostera capricorni* from eastern Australia. *Aquatic Botany*, **62**: 177-188.

Caye G, Meinesz A. 1986. Experimental study of seed germination in the seagrass *Cymodocea nodosa*. *Aquatic Botany*, **26**: 79-87.

Clevering OA. 1995. Germination and seedling emergence of *Scirpus lacustris* L. and *Scirpus maritimus* L. with special reference to the restoration of wetlands. *Aquatic Botany*, **50**: 63-78.

Conacher CA, Poiner IR, Butler J, *et al*. 1994. Germination, storage and viability testing of seeds of *Zostera capricorni* Aschers. from a tropical bay in Australia. *Aquatic Botany*, **49**: 47-58.

García-Marín P, Cabaço S, Hernández I, *et al*. 2013. Multi-metric index based on the seagrass *Zostera noltii* (ZoNI) for ecological quality assessment of coastal and estuarine. *Marine Pollution Bulletin*, **68**: 46-54.

Harrison PG, Durance C. 1992. Variation in clonal structure in an eelgrass (*Zostera marina*) meadow on the Pacific coast of Canada. *Canadian Journal of Botany*, **70**: 653-657.

Harwell MC, Orth RJ. 1999. Eelgrass (*Zostera marina* L.) seed protection for field experiments and implications for large-scale restoration. *Aquatic Botany*, **64**: 51-61.

Hilhorst HW, Toorop PE. 1997. Review on dormancy, germinability, and germination in crop and weed seeds. *Advances in Agronomy*, **61**: 111-165.

Hootsmans MJM, Vermaat JE, Van Vierseen W. 1987. Seedbank development, germination and early seedling survival of two seagrass species from The Netherlands: *Zostera marina* L. and *Zostera noltii* hornem. *Aquatic Botany*, **28**: 275-285.

Kahn AE, Durako MJ. 2005. The effect of salinity and ammonium on seed germination in *Ruppia maritime* from Florida Bay. *Bulletin of Marine Science*, **77**: 453-458.

Kirkman H. 1998. Pilot experiments on planting seedlings and small seagrass propagules in Western Australia. *Marine Pollution Bulletin*, **37**: 460-467.

Kuo J, Kirkman H. 1996. Seedling development of selected *Posidonia* species from southwest Australia// Kuo J, Phillips R, Walker DI, *et al*., eds. Seagrass Biology: Proceedings of an international workshop. Perth: University of Western Australia Press: 57-64.

Loques F, Caye G, Meinesz A. 1990. Germination in the marine phanerogam *Zostera noltii* Hornemann at Golfe Juan, French Mediterranean. *Aquatic Botany*, **38**: 249-260.

Martins I, Neto JM, Fontes MG, *et al*. 2005. Seasonal variation in short-term survival of *Zostera noltii* transplants in a declining meadow in Portugal. *Aquatic Botany*, **82**: 132-142.

Morita T, Miyamatsu A, Fujii M, *et al*. 2011. Germination in *Zostera japonica* is determined by cold stratification, tidal elevation and sediment type. *Aquatic Botany*, **95**: 234-241.

Nellemann C, Corcoran E, Duarte CM, *et al*. 2009. Blue Carbon. A rapid response assessment [EB/OL]. [2013-12-12]. http://www.grida.no.

Orth RJ, Harwell MC, Bailey EM, *et al*. 2000. A review of issues in seagrass seed dormancy and germination: Implications for conservation and restoration. *Marine Ecology Progress Series*, **200**: 277-288.

Orth RJ, Marion SR, Granger S, *et al*. 2009. Evaluation of a mechanical seed planter for transplanting *Zostera marina* (eelgrass) seeds. *Aquatic Botany*, **90**: 204-208.

Park JI, Lee KS. 2007. Site-specific success of three transplanting methods and the effect of planting time on the establishment of *Zostera marina* transplants. *Marine Pollution Bulletin*, **54**: 1238-1248.

Short FT, Polidoro B, Livingstone SR, *et al*. 2011. Extinction risk assessment of the world's seagrass species. *Biological Conservation*, **144**: 1961-1971.

Traber MS, Granger S, Nixon SW. 2003. Mechanical seeder provides alternative method for restoring eelgrass habitat (Rhode Island). *Ecological Restoration*, **21**: 213-214.

Waycott M, Duarte CM, Carruthers TJB, *et al*. 2009. Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **106**: 12377-12381.

作者简介 田 璐,女,1988 年生,硕士研究生,主要从事海草资源增殖生态学研究。E-mail: tianluouc@163.com
责任编辑 李凤芹