

北方潟湖大叶藻植株枚订移植法的效果评估与适宜性分析

刘燕山¹ 郭 栋² 张沛东^{1*} 张秀梅¹ 曾 星¹ 张 莹³

¹中国海洋大学水产学院, 青岛 266003; ²辽宁省海洋水产科学研究院, 大连 116023; ³山东省海洋生物资源与环境研究院, 烟台 264006

摘 要 2009年利用植株枚订移植法在我国北方典型潟湖——山东荣成天鹅湖逐月进行大叶藻(*Zostera marina*)植株移植, 并于当年逐月对移植植株的存活率、定居时间和生长进行监测, 分析该方法在我国北方潟湖的有效性和适宜性。结果显示: (1) 4–6月移植植株的存活率为76.5%–90.4%, 其中4月移植植株的存活率最低, 7–9月移植植株的存活率达到100%; (2) 6–9月移植植株的定居时间均为1个月, 5月移植植株的定居时间为2个月, 而4月移植植株的定居时间长达4个月; (3)除个别监测月份外, 移植植株的叶长和叶鞘长均显著小于天然植株, 而茎节直径和根长均与天然植株无明显差异; (4)我国北方潟湖较适宜大叶藻植株移植的区域为海水透明度高、水深不超过1 m的潮下带, 且底质为泥含量较高的泥砂底质海区, 9月份是适宜的移植时间。

关键词 大叶藻, 枚订法, 存活率, 定居时间, 生长, 海草

引用格式: 刘燕山, 郭栋, 张沛东, 张秀梅, 曾星, 张莹 (2015). 北方潟湖大叶藻植株枚订移植法的效果评估与适宜性分析. 植物生态学报, 39, 176–183. doi: 10.17521/cjpe.2015.0017

Assessing establishment success and suitability analysis of *Zostera marina* transplants using staple method in northern lagoons

LIU Yan-Shan¹, GUO Dong², ZHANG Pei-Dong^{1*}, ZHANG Xiu-Mei¹, ZENG Xing¹, and ZHANG Ying³

¹College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao, 266003, China; ²Liaoning Ocean and Fisheries Science Research Institute, Dalian 116023, China; and ³Shandong Marine Resource and Environment Research Institute, Yantai 264006, China

Abstract

Aims *Zostera marina* populations in northern China are rapidly declining due to both natural and anthropogenic disturbances. Efforts to prevent further losses and restore disturbed *Z. marina* habitats through transplanting are desirable. In this study, a transplanting experiment was conducted using the staple method in Swan Lake, which is a typical lagoon in the Rongcheng region of Shandong Peninsula, China. The objectives of this research are to: 1) investigate the plant response in terms of survivorship, morphology, and growth; 2) assess the establishment success of transplants; and 3) analyze the suitability of applying staple method in northern China.

Methods Ninety planting units (PUs, 3 shoots/PU) with 4–6 leaves and about 10 cm rhizome on each shoot were monthly transplanted using the staple method in the subtidal zone of Swan Lake (water depth 0.5 m) from April to September 2009. Ten replicated plots of 50 cm × 50 cm were set up and nine PUs were randomly planted in each plot. Survival rate was calculated as the percentage of PUs that survived. Shoot morphology and individual shoot biomass of transplants and reference plants in the donor bed were monthly monitored from May to December 2009.

Important findings Survival rate of transplants planted during spring (April, May, and June) ranged from 76.5% to 90.4% with the minimum value in April; whereas the survival rate of transplants planted during summer (July, August, and September) was 100%. The time required for the establishment of transplants was on average 1.0 month when planted from June to September, 2.0 months when planted in May, and 4.0 months when planted in April. With exception of some monitoring months, the leaf length and sheath length of transplants were significantly lower than those of reference plants; whereas no significant differences were found in rhizome diameter and root length between transplants and reference plants. Habitat suitability analysis showed that transplanting site should be chosen in shallow subtidal zone (water depth <1 m) with high transparency and high-silted sandy mud

sediment. September was suggested as the most effective transplanting season off the coast of northern lagoons in China.

Key words *Zostera marina*, staple method, survival rate, time required for the establishment, growth, seagrass

Citation: Liu YS, Guo D, Zhang PD, Zhang XM, Zeng X, Zhang Y (2015). Assessing establishment success and suitability analysis of *Zostera marina* transplants using staple method in northern lagoons. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39, 176–183. doi: 10.17521/cjpe.2015.0017

海草是一类生长在热带至温带海域浅水中的单子叶高等植物, 作为近岸浅海最重要的初级生产者之一, 其构筑的海草床是滨海三大典型生态系统之一, 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(Bos *et al.*, 2007; 李文涛和张秀梅, 2009; García-Marín *et al.*, 2013)。然而自20世纪以来, 受自然环境变迁和人类活动的影响, 海草床在世界范围内呈现严重衰退趋势, 有些地区海草床甚至已完全退化(Park & Lee, 2007)。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)。我国的海草床也已严重衰退, 人为干扰是导致其退化的主要原因(王道儒等, 2012; 郑凤英等, 2013)。

植株移植法是迄今为止最成熟的退化海草床修复方法, 即从生长茂盛的自然海草床采集植株, 利用某种方法或装置将其移栽于待修复海域的一种方法(Thorhaug, 1985)。根状茎植株移植法的移植单元不包含底质, 由单株或多株只包含2个茎节以上根状茎的植株构成, 显著降低植株使用量, 是植株移植法中最普遍的一个类别(李森等, 2010)。根据移植单元固定方法的不同, 根状茎植株移植法又可分为直插法、沉子法、枚订法、框架法及夹系法等, 其中枚订法的应用最为广泛(张沛东等, 2013)。枚订法是参照订书针的原理, 使用U型、V型或I型金属或木制、竹制枚订将移植单元的水平根状茎固定于深度2 cm左右底质中的一种植株移植方法, 具有移植单元固定效果好、移植植株成活率高及操作简单等优点(Davis & Short, 1997; Park & Lee, 2007)。

然而针对不同移植海域和不同移植种类, 各种方法的移植效果存在很大差异。如Park和Lee (2007)研究发现, 在韩国Kosung湾和Jindong湾使用牡蛎壳法(沉子法的一种)移植大叶藻(*Zostera marina*)植株效果良好, 其存活率分别达到81.3%和76.5%, 而在Koje湾移植效果差, 植株存活率仅为5.0%。Orth等(1999)在美国Chesapeake湾使用直插法移植大叶藻植株取得成功, 移植20个月后植株盖度高达

24.2%–38.9%, 而Bastyan和Cambridge (2008)在澳大利亚Oyster Harbour海域使用直插法移植聚伞藻(*Posidonia australis*)时植株全部丢失, 使用枚订法时植株存活率达到96%–98%。Phillips (1976)发现, 在美国Texas海域使用枚订法移植泰来海龟草(*Thalassia testudinum*)与二药藻(*Halodule wrightii*)时效果较差, 植株存活率均低于30%。尽管我国海草床已严重衰退, 有关海草床退化生境修复技术的研究还十分薄弱, 一些成熟的修复方法尚未在我国海域开展有效性验证和适宜性分析。

本研究以我国北方海域优势海草种类——大叶藻为对象, 于2009年4至9月在山东省荣成市典型潟湖——天鹅湖, 利用枚订法逐月移植大叶藻植株, 并于2009年5至12月逐月监测移植植株的存活与生长情况, 查明移植植株的定居时间, 评估枚订法在我国北方潟湖的有效性和适宜性, 探讨其适宜移植季节, 以期为建立我国的海草床退化生境恢复技术提供参考。

1 材料和方法

1.1 实验地点

实验在山东省荣成市天鹅湖海域(图1)进行。天鹅湖位于山东半岛东端(37.34°–37.36° N, 122.56°–122.58° E), 是一个典型的潟湖, 面积4.94 km², 湖东侧由一条长2.5 km的沙坝将其与外海隔开, 南侧有一个宽132 m的流口与外海相连。湖内大部分区域水深小于1.5 m, 大潮潮差1.15 m, 小潮潮差0.64 m, 40%湖区底质以粉砂质砂为主, 间有泥和沙泥底质, 其余湖区则为泥含量20%–50%的泥沙底质(魏合龙和庄振业, 1997; Jia *et al.*, 2003)。

20世纪70年代前, 天鹅湖分布有大面积的海草床。1979年, 为追求刺参(*Apostichopus japonicus*)养殖高产, 在湖区南侧流口处人为修建了堤坝, 导致湖区水体交换严重减弱, 湖内沉积物快速积累, 致使湖区海草床几乎完全消失(Gao *et al.*, 1998)。1986年堤坝上半部分被人工拆除, 2012年水下部分被移

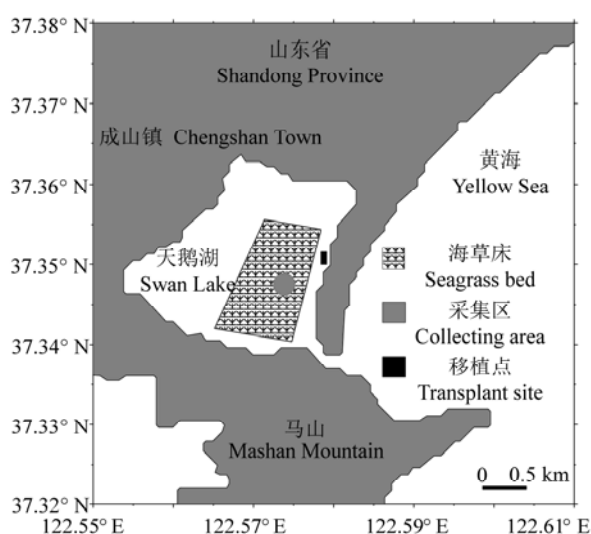


图1 天鹅湖大叶藻植株移植点和采集区。

Fig. 1 Transplant site and collecting area of *Zostera marina* shoots in Swan Lake.

除, 湖区生态环境得以逐渐恢复, 海草床亦随之重建, 目前分布有大叶藻和日本大叶藻(*Zostera japonica*) 2种海草, 其中大叶藻为优势种, 海草床面积约为2.0 km², 如图1所示。

1.2 实验设计

1.2.1 植株采集区与移植区选取

在天鹅湖南侧海草床采集大叶藻植株。参照Short等(2002)大叶藻移植区甄选模式, 选择天鹅湖东侧无海草分布的潮下带区域作为移植区, 如图1所示。植株采集区小潮时平均水深0.8 m, 底质以泥沙底质为主, 移植区小潮时平均水深0.5 m, 底质类型与植株采集区类似。移植区距离采集区约200 m, 距离海草床边界约10 m。

1.2.2 植株移植

植株的采集和移植设定在2009年4至9月的中上旬逐月进行。每月移植10组(重复), 每组在PVC管制成的50 cm × 50 cm移植框内均匀地移植9个移植单元, 共90个移植单元, 270株植株。各组间隔1 m, 平行海岸线排列成一字型。

采用枚订法进行植株移植, 以U型铁丝为枚订材料。移植过程主要包括植株采集、移植单元制作和种植3个过程。植株采集时, 只采集营养株, 并选取长势良好、叶片表面附生生物少的植株, 确保植株地下组织完整, 最大采集量控制在100株·m⁻², 植株经海水充分浸洗, 去除底质和叶片附生生物; 移

植单元制作时, 选取地下茎10 cm左右, 叶片数4–6个的植株, 每3株用棉绳在植株分生组织以下部位绑扎成一束, 即为一个移植单元, 并在2 h内种植; 种植时, 将U型铁制枚订穿过移植单元的棉绳, 固定于底泥中, 确保根状茎保持水平, 并对地下组织覆盖厚度为2 cm左右的底泥。

1.2.3 实验区水温和水下光照的监测

实验期间, 实验区水温和水下光照使用Onset公司的HOBO光照和温度数据采集器以30 min间隔进行连续监测。水温以每日平均水温表示。在实验区使用LI-COR公司的LI-250数据采集器和LI-193SA球形光量子传感器同步测定水下光照, 拟合光照强度(Ix)和光合光子通量密度(photosynthetic photon flux density, PFD, μmol·m⁻²·s⁻¹)之间的关系, 将光照强度转换为PFD, 并计算出日PFD (mol·m⁻²·d⁻¹)。

1.3 样品的收集和测定

2009年5至12月中上旬, 逐月监测移植植株的存活和生长状况。监测时, 观察全部样框移植植株的存活和侧枝发生情况, 计算存活率。在植株采集区随机采集自然植株30株, 并分别在各月移植样框中随机采集移植单元10个(每个样框随机选取1个)。采集时确保植株完整, 经海水充分浸洗, 去除底质和碎屑, 放入封口袋, 置于装有冰袋的泡沫箱中运回实验室, 保存于4 °C冰箱待测。

植株形态学指标和植株质量的测定过程参照Li等(2010)所述方法进行。分别选取天然植株和移植植株的30个主枝用于各指标测定, 各主枝所有叶片的叶长和叶鞘长均被测定。茎节直径测定第1个至第6个茎节, 6个茎节的须根根长则全部被测定。测量完成后, 将植株放入去离子水清洗, 置于60 °C烘干箱48 h至恒重, 取出后称量。

1.4 数据处理与分析

成活率的统计以移植单元植株枯萎或消失计为移植植株死亡。根据监测的植株侧枝发生情况和存活率计算植株定居时间, 即从植株移植到其存活率保持稳定并有新侧枝出现的月数(Park & Lee, 2007)。实验结果采用季节间与月间比较两种分析方法, 其中季节间比较是将4、5、6月和7、8、9月移植数据分别归类为春季移植组和夏季移植组, 并以天然大叶藻植株为对照组, 月间比较则分别对春季、夏季各月移植组间进行比较。数据以平均值±标准误差(SE)表示, 利用Excel 2007、SPSS 19.0及

ORIGIN 8.5软件对数据进行统计分析并绘图。2组数据之间的比较分析采用独立样本 t 检验, 3组以上数据之间的比较分析采用单因素方差分析, 若差异显著再做Duncan's多重比较以检验组间差异。存活率除以100, 然后经平方根和反正弦转换后用于方差分析。以 $p < 0.05$ 作为差异显著水平, $p < 0.01$ 作为差异极显著水平。

2 结果

2.1 实验区水温和PFD的变化

实验期间实验区水温和PFD的变化如图2所示。水温呈现典型的月季间变化, 先逐渐升高并于8月份达到最大值(26.8 °C), 随后逐渐下降, 并于12月份达到最小值(-0.5 °C)。PFD也表现出明显的月季间变化, 春、夏季PFD显著高于秋季($p < 0.05$), 在6月份达到最高值, 平均为 $9.6 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

2.2 存活率和定居时间

存活率的变化如图3所示。夏季移植植株全部存活, 春季移植植株的平均存活率在76.5%–90.4%之间。单因素方差分析显示, 春季或夏季移植植株的

存活率随着移植后时间的增加均无显著差异($p > 0.05$), 而 t 检验表明, 相同移植后时间的夏季移植植株存活率均显著高于春季($p < 0.05$)。春季各移植月中, 4月移植组植株的存活率随移植后月数增加而逐渐降低, 至移植4个月后稳定在57.8%, 显著低于移植后1–2个月($p < 0.05$), 而5月和6月移植组植株存活率均较高, 且各移植后月数间均无显著差异($p > 0.05$), 其中5月移植组的存活率于移植2个月后稳定在88.9%, 6月移植组则于移植后1个月稳定在91.1%。相同移植后月数时, 移植后3个月内, 各组存活率间均无明显不同($p > 0.05$), 但移植4个月后, 5月和6月移植组的存活率显著高于4月移植组, 分别是其1.5倍和1.6倍($p < 0.05$)。

对移植植株新侧枝发生的观察发现: 新侧枝的

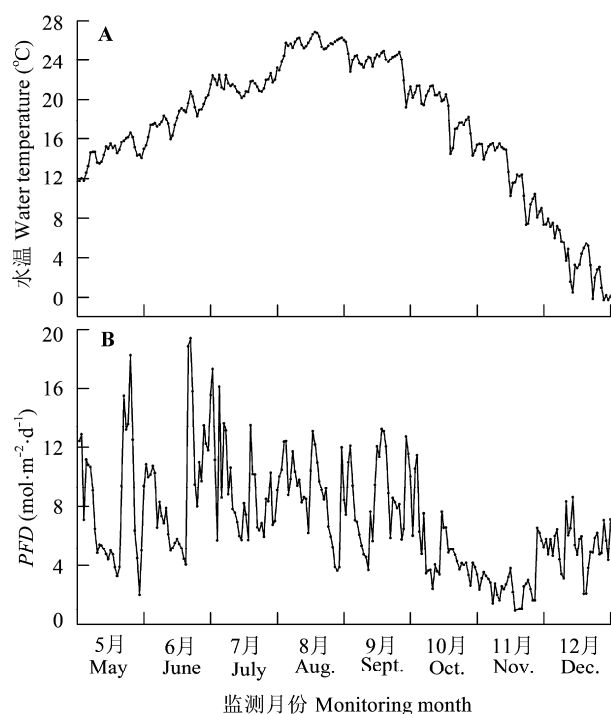


图2 2009年5–12月实验期间水温(A)和光合光子通量密度(PFD)(B)的变化。

Fig. 2 Changes in water temperature (A) and photosynthetic photon flux density (PFD) (B) during the experimental period from May to December 2009.

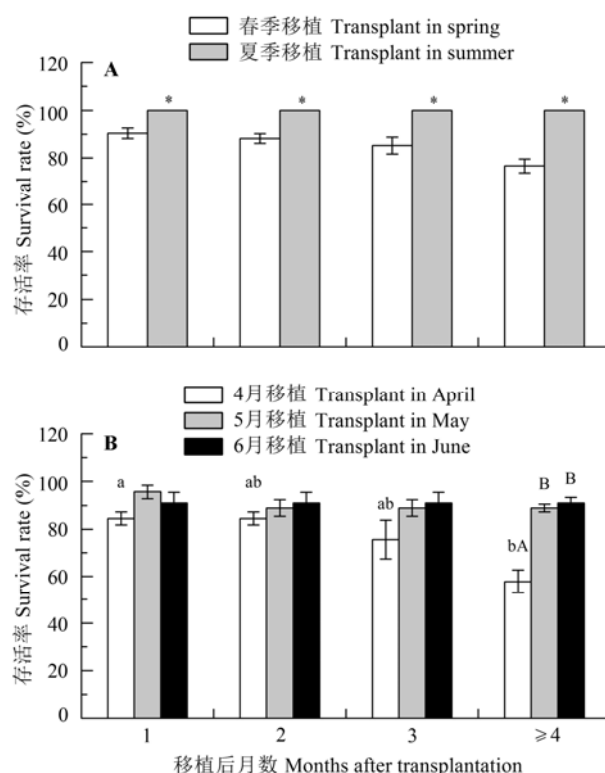


图3 移植植株存活率在不同移植季节(A)及春季不同移植月(B)间的变化。误差线上的不同小写字母表示同列之间存在显著差异, 而*和不同大写字母表示同簇间存在显著差异($p < 0.05$)。

Fig. 3 Changes in survival rate of transplants between different transplant seasons (A) and transplanting months in spring (B). Different lowercase letters above bars indicate significant differences for the comparison of the same transplant time, and * and different uppercase letters indicate significant differences for the comparison between transplanting seasons or among transplanting months for a given time following transplanting ($p < 0.05$).

出现时间与移植存活率保持稳定的时间一致。因此根据各移植组存活率变化的数据可知, 6月移植植株和夏季移植植株的定居时间最短, 均为1个月, 5月移植植株定居时间为2个月, 而4月移植植株定居时间长达4个月。

2.3 形态学指标和植株质量

监测期间, 天然植株和移植植株的形态学指标及植株质量均表现出显著的月季间变化, 如表1所示。天然植株和春季移植植株的各指标显示出先上升后下降的变化规律, 并在7月达到最大值, 而夏季移植植株的各指标呈现持续下降趋势。

5月至7月, *t*检验表明, 除6月的根长和植株质量外, 春季移植植株的叶长、叶鞘长、根长和植株质量均显著低于天然植株($p < 0.05$), 而移植植株的茎节直径表现出相反的变化趋势, 显著高于天然植株($p < 0.05$), 是天然植株的1.1倍。

8月至12月, 单因素方差分析显示, 除12月外, 春季和夏季移植植株的叶长、叶鞘长和植株质量均显著低于天然植株($p < 0.05$), 而移植植株的地下组

织除个别监测月无明显差异外, 其根长和茎节直径均显著高于天然植株($p < 0.05$)。春季和夏季移植组不同移植月份之间的显著性分析显示, 除个别监测月外, 各移植月份植株的形态学指标和植株质量均无显著性差异($p > 0.05$)。

3 讨论

3.1 大叶藻植株枚订移植法的有效性分析

一些学者在美国、韩国和澳大利亚等国家的沿岸海域进行了大叶藻植株枚订移植法的研究, 监测发现移植植株的成活率达到60%–100% (Davis & Short, 1997; van Katwijk & Hermus, 2000; Fishman *et al.*, 2004; Park & Lee, 2007)。本研究也发现, 在山东荣成天鹅湖海域利用枚订法移植大叶藻, 春季移植植株的平均成活率为76.5%–90.4%, 夏季移植植株平均成活率达100%, 说明在天鹅湖海域, 植株枚订移植法是恢复海草植被的有效方法。

定居时间反映移植植株的环境适应能力, 时间越短适应能力越强, 是判断移植方法适合性的重要

表1 天然植株和移植植株形态学指标及植株质量的变化
Table 1 Changes in morphological traits and shoot mass in reference plants and transplants

指标 Index	植株 Plant	监测月份 Monitoring month									
		5月 May	6月 June	7月 Jul.	8月 Aug.	9月 Sept.	10月 Oct.	11月 Nov.	12月 Dec.		
叶长 Leaf length (cm)	天然植株 Reference plants	20.1 ± 0.5	28.7 ± 1.2	39.8 ± 1.7	29.4 ± 1.5 ^a	34.0 ± 1.3 ^a	25.0 ± 1.0 ^a	16.1 ± 0.7 ^a	8.6 ± 0.3 ^a		
	春季移植植株 Transplants planted in spring	13.4 ± 0.9 ^{**}	22.2 ± 1.6 ^{**}	25.3 ± 1.0 ^{**}	16.5 ± 0.8 ^b	15.2 ± 0.7 ^b	12.7 ± 0.6 ^b	8.1 ± 0.5 ^b	6.8 ± 0.4 ^b		
	夏季移植植株 Transplants planted in summer	—	—	—	19.0 ± 1.5 ^b	17.6 ± 1.2 ^b	14.6 ± 0.8 ^b	9.5 ± 0.5 ^b	8.5 ± 0.6 ^a		
	天然植株 Reference plants	9.7 ± 0.4	12.3 ± 0.6	13.9 ± 0.3	9.3 ± 0.3 ^a	10.2 ± 0.3 ^a	7.5 ± 0.2 ^a	3.7 ± 0.1 ^a	2.7 ± 0.1 ^a		
叶鞘长 Sheath length (cm)	春季移植植株 Transplants planted in spring	6.7 ± 0.1 ^{**}	9.1 ± 0.5 ^{**}	10.1 ± 0.3 ^{**}	6.5 ± 0.2 ^b	5.8 ± 0.1 ^b	4.9 ± 0.1 ^b	3.0 ± 0.1 ^b	2.8 ± 0.1 ^a		
	夏季移植植株 Transplants planted in summer	—	—	—	6.8 ± 0.3 ^b	7.0 ± 0.2 ^c	6.0 ± 0.1 ^c	3.8 ± 0.1 ^a	3.3 ± 0.1 ^b		
	天然植株 Reference plants	0.25 ± 0.01	0.28 ± 0.00	0.38 ± 0.01	0.30 ± 0.00 ^a	0.30 ± 0.00 ^a	0.27 ± 0.00 ^a	0.25 ± 0.00 ^a	0.23 ± 0.01		
	春季移植植株 Transplants planted in spring	0.27 ± 0.02 [*]	0.30 ± 0.01 [*]	0.41 ± 0.01 ^{**}	0.36 ± 0.01 ^b	0.33 ± 0.01 ^b	0.29 ± 0.01 ^b	0.25 ± 0.00 ^a	0.22 ± 0.01		
茎节直径 Internode diameter (cm)	夏季移植植株 Transplants planted in summer	—	—	—	0.38 ± 0.01 ^c	0.33 ± 0.01 ^b	0.33 ± 0.01 ^c	0.27 ± 0.01 ^b	0.24 ± 0.01		
	天然植株 Reference plants	3.9 ± 0.1	4.9 ± 0.1	5.4 ± 0.2	4.2 ± 0.1 ^a	4.0 ± 0.1	3.7 ± 0.1 ^a	4.6 ± 0.1 ^a	3.5 ± 0.1 ^a		
	春季移植植株 Transplants planted in spring	2.3 ± 0.2 ^{**}	4.6 ± 0.2	4.1 ± 0.2 ^{**}	4.1 ± 0.2 ^a	3.5 ± 0.2	4.4 ± 0.2 ^b	5.1 ± 0.2 ^b	3.8 ± 0.2 ^{ab}		
	夏季移植植株 Transplants planted in summer	—	—	—	6.0 ± 0.4 ^b	4.1 ± 0.3	4.2 ± 0.2 ^b	5.1 ± 0.2 ^b	4.2 ± 0.2 ^b		
根长 Root length (cm)	天然植株 Reference plants	0.47 ± 0.07	0.61 ± 0.08	2.36 ± 0.20	0.76 ± 0.05 ^a	1.40 ± 0.13 ^a	0.76 ± 0.07 ^a	0.27 ± 0.03 ^a	0.19 ± 0.02		
	春季移植植株 Transplants planted in spring	0.30 ± 0.02 [*]	0.71 ± 0.08	1.08 ± 0.10 ^{**}	0.43 ± 0.03 ^b	0.36 ± 0.02 ^b	0.29 ± 0.01 ^b	0.20 ± 0.01 ^b	0.17 ± 0.00		
	夏季移植植株 Transplants planted in summer	—	—	—	0.52 ± 0.06 ^b	0.54 ± 0.07 ^b	0.37 ± 0.03 ^b	0.22 ± 0.01 ^b	0.21 ± 0.01		
	天然植株 Reference plants	0.47 ± 0.07	0.61 ± 0.08	2.36 ± 0.20	0.76 ± 0.05 ^a	1.40 ± 0.13 ^a	0.76 ± 0.07 ^a	0.27 ± 0.03 ^a	0.19 ± 0.02		
植株质量 Shoot mass (g DW·shoot ⁻¹)	春季移植植株 Transplants planted in spring	0.30 ± 0.02 [*]	0.71 ± 0.08	1.08 ± 0.10 ^{**}	0.43 ± 0.03 ^b	0.36 ± 0.02 ^b	0.29 ± 0.01 ^b	0.20 ± 0.01 ^b	0.17 ± 0.00		
	夏季移植植株 Transplants planted in summer	—	—	—	0.52 ± 0.06 ^b	0.54 ± 0.07 ^b	0.37 ± 0.03 ^b	0.22 ± 0.01 ^b	0.21 ± 0.01		
	天然植株 Reference plants	0.47 ± 0.07	0.61 ± 0.08	2.36 ± 0.20	0.76 ± 0.05 ^a	1.40 ± 0.13 ^a	0.76 ± 0.07 ^a	0.27 ± 0.03 ^a	0.19 ± 0.02		
	春季移植植株 Transplants planted in spring	0.30 ± 0.02 [*]	0.71 ± 0.08	1.08 ± 0.10 ^{**}	0.43 ± 0.03 ^b	0.36 ± 0.02 ^b	0.29 ± 0.01 ^b	0.20 ± 0.01 ^b	0.17 ± 0.00		

上标的不同字母和*表示同一监测月份天然植株和移植植株间存在显著差异 ($p < 0.05$); **, $p < 0.01$ 。
The different superscript letters and * indicate significant differences between reference plants and transplants in the same monitoring month ($p < 0.05$); **, $p < 0.01$.

依据。Park和Lee (2007)在韩国Koje湾、Kosung湾和Jindong湾沿岸海域利用枚订法、框架法(将移植单元绑缚在金属框架上,然后置于海底的一种移植方法)和牡蛎壳法(将移植单元绑缚在牡蛎壳上,然后置于海底的一种移植方法)开展了大叶藻植株移植实验,发现移植植株的定居时间分别为1.0–2.3个月、2.2–2.6个月和3.2–3.7个月。本研究发现,6–9月移植植株的定居时间均为1个月,5月移植植株的定居时间为2个月,而4月移植植株的定居时间长达4个月。研究结果与Park和Lee (2007)的报道相似,说明适宜的移植时间和固着力大的移植单元固定方式可增强移植植株对环境的适应能力。

3.2 移植操作胁迫对植株的影响

在植株移植过程中,植株采集、移植单元制作及种植等人为操作胁迫将不可避免地损伤海草组织,从而影响移植植株的定居和生长(Fonseca *et al.*, 1998)。一些研究发现,大叶藻植株在应对移植操作胁迫时,能通过补偿生长来减少或消除胁迫产生的不良影响,主要包括形态补偿过程和生理生化补偿过程等(Zimmerman *et al.*, 1995; Lee & Park, 2008; 李文涛和张秀梅, 2010; Li *et al.*, 2010)。如Li等(2010)研究发现,移植后3个月内大叶藻移植植株的株高、茎节直径和叶宽均显著低于天然植株,随后这3个指标与天然植株无明显不同,甚至高于天然植株。Lee和Park (2008)也研究发现,移植后4个月,大叶藻移植植株的根长和叶宽均显著低于天然植株,但移植后7个月时,这2个指标均显著高于天然植株。

本研究中,植株采集区和移植区的主要生态因子没有明显差异,因此产生胁迫的原因并不是环境条件,而可能是移植操作过程本身。对植株形态学指标的监测发现,除个别监测月份外,移植植株的地上组织(叶和叶鞘)均显著小于天然植株,表明移植操作对植株地上组织产生了严重的胁迫作用,且胁迫时间长,这可能是由于植株移植后,能量更多地分配到植株的地下组织,供地下组织快速生长,从而有利于植株的扎根和固着,这在移植后植株地下组织的生长变化上也得到了验证。除春季移植组的根长在5月、7月和9月监测时显著低于天然植株外,移植植株的茎节直径和根长均与天然植株无明显差异,甚至超过天然植株,表现出明显的形态补偿生长现象,说明移植植株的地下组织在经过移植

操作的短期胁迫后,能够通过自身的形态补偿生长来响应移植胁迫,从而有利于移植植株的扎根和固着。

3.3 大叶藻植株枚订移植法的适宜性分析

3.3.1 移植区域的选取

海草植株移植效果主要受水深、光照和底质类型的影响。研究发现,水深较浅的潮下带适宜大叶藻植株的移植,而潮间带移植效果较差。如Davis和Short (1997)在美国大湾河口水深小于1 m的潮下带和潮间带利用枚订法移植大叶藻植株,结果发现潮间带移植植株的存活率仅为0–15%,而潮下带移植植株的存活率达到75%–99%。Zimmerman等(1995)也发现,在水深小于1 m的潮下带移植大叶藻植株,其存活率约为60%,而当水深超过1.5 m时移植植株的存活率仅为10%。本研究中,大叶藻植株移植区位于水深为0.5 m的潮下带海区,移植植株的存活率达到76%以上,取得了良好的移植效果。

光照是控制海草存活和生长的关键因子。研究发现,大叶藻植株存活和生长的最低光照条件要求超过11%水面有效辐射强度(Ochieng *et al.*, 2010)。本研究实验期间,移植海区的光照条件均超过这一最低要求,因此光照条件不是阻碍大叶藻移植植株生长的限制因子。不同海草种类生长在不同的底质类型上,因此底质类型,特别是底质粒径,是影响海草植株移植成功的重要因素。大叶藻主要生长于泥砂底质或细沙底质(Martin *et al.*, 2010)。柳杰(2011)在天鹅湖开展了不同泥砂质量比的底质类型对大叶藻移植植株生长和存活影响的实验研究,结果发现泥砂质量比为3:1的底质类型最利于大叶藻移植植株的生长和存活。从这些研究结果可知,大叶藻植株移植海区的选取应综合考虑水深、光照和底质类型等因素,较适宜的区域为海水透明度高、水深不超过1 m的潮下带,且底质为泥含量较高的泥砂底质。

3.3.2 移植时间的选取

海草生长呈现明显的季节性变化(Orth & Moore, 1986),因此移植时间亦是影响海草植株移植成功的关键因素。受夏季高温影响,美国Chesapeake海湾和韩国沿海移植大叶藻的最佳季节均为秋季(Orth *et al.*, 1999; Park & Lee, 2007),葡萄牙西海岸诺氏大叶藻(*Zostera noltii*)的最佳移植季节是秋季和冬季(Martins *et al.*, 2005)。本研究中,4

月移植的大叶藻植株存活率在移植4个月后降至57.8%，表明水温较低的早春季节不适宜进行大叶藻植株移植。这可能是因为水温是确定天鹅湖大叶藻生长季节性变化的最关键因子，其生长适宜的水温范围是15–25℃，即仲春至早夏之间(Zhang *et al.*, 2014)，而天鹅湖4月份平均水温低于9℃，从而限制了大叶藻植株移植后的快速生长，导致存活率大幅下降。5月至9月移植植株的存活和生长效果较好，然而5–8月是我国北方海域大叶藻种子成熟和脱落季节，期间植株采集将影响大叶藻的有性生殖，且7–8月水温较高，大型漂浮藻类迅速繁殖与生长，显著降低移植植株对光的获得，从而导致植株的生长受到抑制(Hasegawa *et al.*, 2007)，因此我国北方潟湖适宜的大叶藻植株移植时间为9月。

4 结论

本研究在我国北方典型潟湖——山东荣成天鹅湖开展了大叶藻植株枚订移植法的有效性验证与适宜性分析，结果表明春季移植植株的存活率超过76%，夏季移植植株的存活率达100%，6–9月移植植株的定居时间均为1个月，因此植株枚订移植法在天鹅湖及类似潟湖具有良好的有效性；植株生长结果显示，移植操作将对植株地上组织产生严重的胁迫作用，但植株地下组织表现出明显的形态补偿生长现象，从而利于移植植株的扎根和固着；适宜性分析表明，我国北方潟湖较适宜的大叶藻植株移植区域为海水透明度高、水深不超过1 m的潮下带，且底质为泥含量较高的泥砂底质海区，9月是适宜的移植时间。

基金项目 国家自然科学基金(30400615)、海洋公益性行业科研专项经费项目(201405010-2)和山东省海洋生态修复重点实验室开放基金课题(201205)。

致谢 马山集团有限公司为本研究的开展提供了大量帮助，中国海洋大学的柳杰和牛淑娜同学对本研究的野外采样工作付出了辛勤劳动，在此一并致谢。

参考文献

- Bastyan GR, Cambridge ML (2008). Transplantation as a method for restoring the seagrass *Posidonia australis*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 79, 289–299.
- Bos AR, Bouma TJ, de Kort GLJ, van Katwijk MM (2007). Ecosystem engineering by annual intertidal seagrass beds: Sediment accretion and modification. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 74, 344–348.
- Davis RC, Short FT (1997). Restoring eelgrass (*Zostera marina* L.) habitat using a new transplanting technique: The horizontal rhizome method. *Aquatic Botany*, 59, 1–15.
- Fishman JR, Orth RJ, Marion S, Bieri J (2004). A comparative test of mechanized and manual transplanting of eelgrass *Zostera marina*, in Chesapeake Bay. *Restoration Ecology*, 12, 214–219.
- Fonseca MS, Kenworthy WJ, Thayer GW (1998). *Guidelines for the Conservation and Restoration of Seagrasses in the United States and Adjacent Waters*. US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Silver Spring.
- García-Marín P, Cabaço S, Hernández I, Vergara JJ, Silva J, Santos R (2013). Multi-metric index based on the seagrass *Zostera noltii* (ZoNI) for ecological quality assessment of coastal and estuarine systems in SW Iberian Peninsula. *Marine Pollution Bulletin*, 68, 46–54.
- Gao S, Zhuang ZY, Wei HL, Sun YL, Chen SJ (1998). Physical processes affecting the health of coastal embayments: An example from the Yuehu inlet, Shandong Peninsula, China. In: Hong GH, Zhang J, Park BK eds. *Health of the Yellow Sea*. The Earth Love Publication Association, Seoul. 314–329.
- Hasegawa N, Hori M, Mukai H (2007). Seasonal shifts in seagrass bed primary producers in a cold-temperate estuary: Dynamics of eelgrass *Zostera marina* and associated epiphytic algae. *Aquatic Botany*, 86, 337–345.
- Jia JJ, Gao S, Xue YC (2003). Sediment dynamic processes of the Yuehu inlet system, Shandong Peninsula, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57, 783–801.
- Lee KS, Park JI (2008). An effective transplanting technique using shells for restoration of *Zostera marina* habitats. *Marine Pollution Bulletin*, 56, 1015–1021.
- Li S, Fan HQ, Qiu GL, Shi YJ (2010). Review on research of seagrass beds restoration. *Acta Ecologica Sinica*, 30, 2443–2453. (in Chinese with English abstract) [李森, 范航清, 邱广龙, 石雅君 (2010). 海草床恢复研究进展. *生态学报*, 30, 2443–2453.]
- Li WT, Kim JH, Park JI, Lee KS (2010). Assessing establishment success of *Zostera marina* transplants through measurements of shoot morphology and growth. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 88, 377–384.
- Li WT, Zhang XM (2009). The ecological functions of seagrass meadows. *Periodical of Ocean University of China*, 39, 933–939. (in Chinese with English abstract) [李文涛, 张秀梅 (2009). 海草场的生态功能. *中国海洋大学学报*, 39, 933–939.]
- Li WT, Zhang XM (2010). Seasonal variations in morphology, growth and reproductivity of eelgrass, *Zostera marina*. *Journal of Fishery Sciences of China*, 17, 977–986. (in Chinese with English abstract) [李文涛, 张秀梅 (2010). 移植大叶藻的形态、生长和繁殖的季节性变化. *中国水*

产科学, 17, 977–986.]

- Liu J (2011). *Effects of Different Environmental Conditions on the Growth and Photosynthetic Pigment Contents of Zostera marina L. in Swan Lake*. Master degree dissertation, College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao. 38–51. (in Chinese with English abstract) [柳杰 (2011). 不同环境条件对天鹅湖大叶藻生长及光合色素含量的影响. 硕士学位论文, 中国海洋大学, 青岛. 38–51.]
- Martins I, Neto JM, Fontes MG, Marques JC, Pardal MA (2005). Seasonal variation in short-term survival of *Zostera noltii* transplants in a declining meadow in Portugal. *Aquatic Botany*, 82, 132–142.
- Martin P, Sébastien D, Gilles T, Isabelle A, de Montaudouin X, Emery E, Claire N, Christophe V (2010). Long-term evolution (1988–2008) of *Zostera* spp. meadows in Arcachon Bay (Bay of Biscay). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 87, 357–366.
- Ochieng CA, Short FT, Walker DI (2010). Photosynthetic and morphological responses of eelgrass (*Zostera marina* L.) to a gradient of light conditions. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 382, 117–124.
- Orth RJ, Moore KA (1986). Seasonal and year-to-year variations in the growth of *Zostera marina* L. (eelgrass) in the lower Chesapeake Bay. *Aquatic Botany*, 24, 335–341.
- Orth RJ, Harwell MC, Fishman JR (1999). A rapid and simple method for transplanting eelgrass using single, unanchored shoots. *Aquatic Botany*, 64, 77–85.
- Park JJ, 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.
- Phillips RC (1976). Preliminary observations on transplanting and a phenological index of seagrasses. *Aquatic Botany*, 2, 93–101.
- Short FT, Davis RC, Kopp BS, Short CA, Burdick DM (2002). Site-selection model for optimal transplantation of eelgrass *Zostera marina* in the northeastern US. *Marine Ecology Progress Series*, 227, 253–267.
- Thorhaug A (1985). Large-scale seagrass restoration in a damaged estuary. *Marine Pollution Bulletin*, 16, 55–62.
- van Katwijk MM, Hermus DCR (2000). Effects of water dynamics on *Zostera marina*: Transplantation experiments in the intertidal Dutch Wadden Sea. *Marine Ecology Progress Series*, 208, 107–118.
- Wang DR, Wu ZJ, Chen CH, Lan JX, Wu R, Chen XH, Zhang GX, Li YC (2012). Distribution of sea-grass resources and existing threat in Hainan Island. *Marine Environmental Science*, 31, 34–38. (in Chinese with English abstract) [王道儒, 吴钟解, 陈春华, 兰建新, 吴瑞, 陈晓慧, 张光星, 李元超 (2012). 海南岛海草资源分布现状及存在威胁. 海洋环境科学, 31, 34–38.]
- Waycott M, Duarte CM, Carruthers TJB, Orth RJ, Dennison WC, Olyarnik S, Calladine A, Fourqurean JW, Heck KL, Hughes AR, Kendrick GA, Kenworthy WJ, Short FT, Williams SL (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.
- Wei HL, Zhuang ZY (1997). Study on the evolution of Yuehu lake-tidal inlet system, Rongcheng Bay, Shandong Province. *Journal of Lake Sciences*, 9, 135–140. (in Chinese with English abstract) [魏合龙, 庄振业 (1997). 山东荣成湾月湖地区的潟湖-潮汐汊道体系. 湖泊科学, 9, 135–140.]
- Zhang PD, Zeng X, Sun Y, Zhang XM (2013). Research progress in seagrass shoot transplanting method. *Marine Sciences*, 37(5), 100–107. (in Chinese with English abstract). [张沛东, 曾星, 孙燕, 张秀梅 (2013). 海草植株移植方法的研究进展. 海洋科学, 37(5), 100–107.]
- Zhang PD, Liu YS, Guo D, Li WT, Zhang Q (2014). Seasonal variation in growth, morphology and reproduction of Eelgrass *Zostera marina* on the Eastern Coast of the Shandong Peninsula, China. *Journal of Coastal Research*, doi: 10.2112/JCOASTRES-D-14-00117.1.
- Zheng FY, Qiu GL, Fan HQ, Zhang W (2013). Diversity, distribution and conservation of Chinese seagrass species. *Biodiversity Science*, 21, 517–526. (in Chinese with English abstract) [郑凤英, 邱广龙, 范航清, 张伟 (2013). 中国海草的多样性、分布及保护. 生物多样性, 21, 517–526.]
- Zimmerman RC, Reguzzoni JL, Alberte RS (1995). Eelgrass (*Zostera marina* L.) transplants in San Francisco Bay: Role of light availability on metabolism, growth and survival. *Aquatic Botany*, 51, 67–86.

责任编辑: 曾 波 责任编辑: 王 薇