

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20200108001

http://www.yykxjz.cn/

李政, 李文涛, 杨晓龙, 张彦浩, 张沛东. 威海双岛湾海域海草分布及其生态特征. 渔业科学进展, 2021, 42(2): 176–183
Li Z, Li WT, Yang XL, Zhang YH, Zhang PD. Distribution and ecological characteristics of seagrass in Shuangdao Bay, Weihai. Progress in Fishery Sciences, 2021, 42(2): 176–183

威海双岛湾海域海草分布及其生态特征*

李 政 李文涛 杨晓龙 张彦浩 张沛东^①

(中国海洋大学 海水养殖教育部重点实验室 青岛 266003)

摘要 2016 年 8 月, 现场调查并分析了山东省威海市双岛湾海域的海草资源及其生态特征, 发现分布面积为 442.19 hm² 的海草床, 种类为鳗草(*Zostera marina*)和红纤维虾形草(*Phyllospadix iwatensis*) 2 种。鳗草的分布面积约为 434.46 hm², 占总面积的 98.3%, 主要分布在双岛湾中部东侧及海参池, 其平均植株密度和生物量分别为(174.2±9.2) shoots/m²和(337.7±17.5) g DW/m²。红纤维虾形草的分布面积约为 7.73 hm², 占总面积的 1.7%, 主要分布在双岛湾湾口东侧及向东约 3 km 的近岸礁石浅水区, 呈明显的带状分布, 其平均植株密度和生物量分别为(889.1±17.1) shoots/m²和(605.9±18.1) g DW/m²。双岛湾海草床平均水深约为 1.6 m, 鳗草草床底质坚硬, 平均底质粒径约为(4.3±0.2) mm。本调查表明, 双岛湾海草床受到陆源污染物排放、围海养殖和捕捞作业等人类活动的严重威胁, 提出了保护双岛湾海草床的建议和对策, 为我国海草床现有资源提供数据补充。

关键词 海草床; 海草种类; 分布面积; 生态特征; 双岛湾

中图分类号 Q948.8 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2021)02-0176-08

海草是一类分布于极圈以外海洋或河口的高等水生植物(Duarte, 1991), 种类多样性较低, 目前, 全球范围内共发现 74 种(黄小平等, 2018), 由单种或多种海草构筑的海草床是地球生物圈最高产的生态系统之一(Duarte *et al.*, 1999), 也是多种水生动物重要的产卵场、育幼场和栖息地(Costanza *et al.*, 1997; Short *et al.*, 2011a)。然而, 在自然环境和人类活动的双重影响下, 世界范围内超过 1/3 的海草床已经消失(Waycott *et al.*, 2009; Short *et al.*, 2011b), 山东省威海海域完全退化或消失的海草床已超过 90% (郑凤英等, 2013)。随着海草床生态及经济价值不断被发掘, 各海洋强国相继实施了全球性或区域性海草研究计划, 海草床的保护和修复等相关研究正成为生态修复工作的热点(van Katwijk *et al.*, 2009、2016; Statton *et al.*, 2013)。而

与北美、澳大利亚和欧洲相比, 我国对海草床的研究仍有欠缺, 山东半岛部分海域的海草床分布及其生境状况缺少基础数据, 严重影响了对海草现有资源量的认识与保护工作的顺利开展。为此, 作者于 2016 年 8 月对山东省威海双岛湾进行海草资源及其环境特征的调查研究, 以期对海草床生态系统的修复和管理提供数据补充。

1 调查方法

1.1 断面布设与调查方法

双岛湾(37°27'N、121°58'E)位于山东半岛东北部, 濒临北黄海, 湾内开阔, 面积约为 18.70 km²。由于受到海水和河口的常年冲积, 双岛湾形成了独特

* 国家科技基础性工作专项(2015FY110600)、国家自然科学基金项目(41576112)和中央高校基本科研业务费专项(201861031; 201822021)共同资助 [This work was supported by National Science and Technology Basic Work Program (2015FY110600), National Natural Science Foundation of China (41576112), and Fundamental Research Funds for the Central Universities (201861031; 201822021)]. 李 政, E-mail: 13256952979@163.com

^① 通讯作者: 张沛东, 教授, E-mail: zhangpds@ouc.edu.cn

收稿日期: 2020-01-08, 收修改稿日期: 2020-02-13

的水下三角洲和大量滩涂地貌, 滩涂上布有大量养殖池塘, 湾中有菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)增殖区(王军等, 2012)。

2016 年 5 月, 通过现场观测和渔民走访, 确定双岛湾海域存在较大面积的海草床。同年 8 月, 通过调查断面布设, 结合双岛湾海域各岸段的地形和水文等具体环境特征及海草的生长习性, 对可能有海草床分布的岸段进行分段调查。总调查面积为 31.60 km², 共设置 32 个调查断面, 覆盖双岛湾全湾、湾口及湾

口东侧海域, 每个调查断面平行间距为 30 m (图 1)。在大潮低潮段时进行调查, 在确保安全的情况下由潜水员手持水下摄像机进行潜水拍照与录像, 以便更加准确地识别海草种类、分布状况及海草床附近的地貌特征。在海草覆盖度>5%的区域边界、拐点及中心位置设置多个 GPS 定位点, 用相机和记录本记录大致区域及标志性建筑位置。在实验室进一步对拍摄录像和记录本的记录内容进行分析整合, 对定点坐标进行图像空间计算, 明确海草种类, 估算海草床具体分布面积。

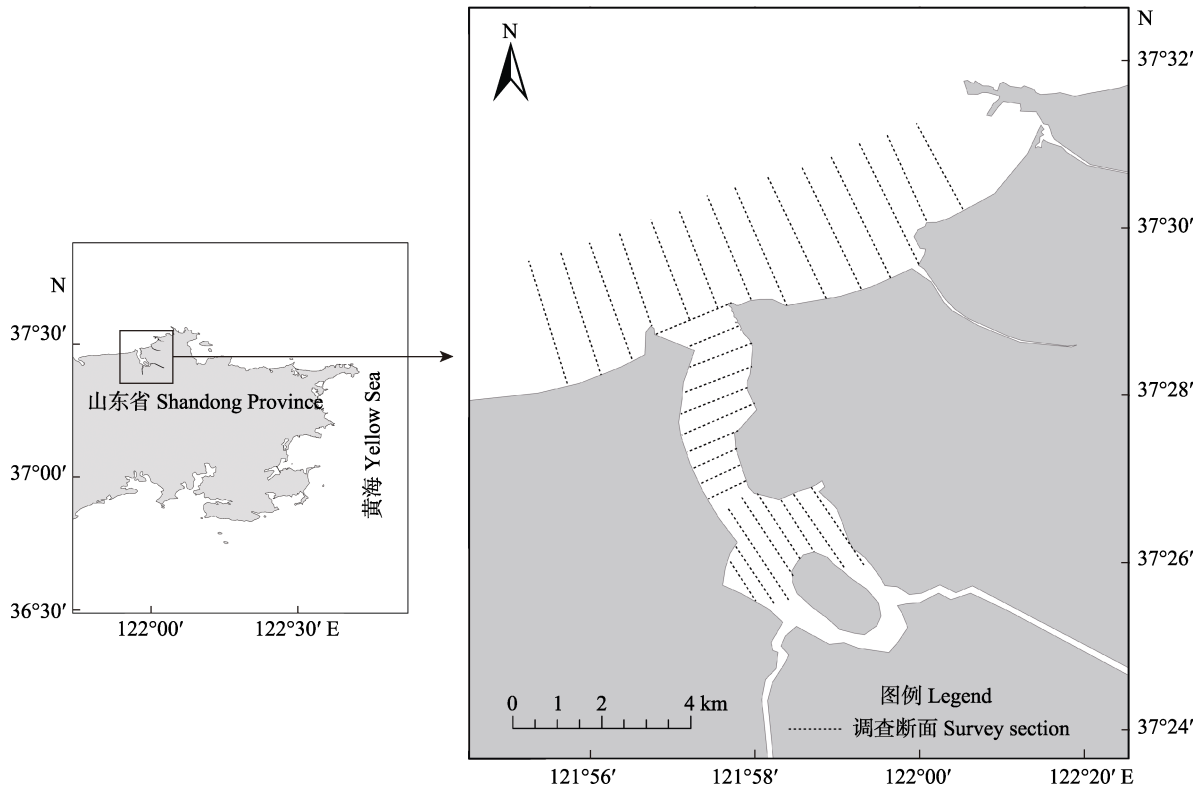


图 1 双岛湾调查区域断面布设位置

Fig.1 Section layout map of Shuangdao Bay survey area

1.2 海草植株密度、形态学特征与生物量调查

在发现的海草床内随机设置 3~5 个采样站位, 利用 25 cm × 25 cm 的取样框进行采样, 每个站位采集 3 个重复样方, 将取样框内所有海草地上和地下部分完整取出, 适当清洗后置于样品袋, 将样品袋封口、编号记录(包括日期、经纬度和种类等信息)后低温保存带回实验室。结合视频资料和实验样品, 于实验室进一步通过外部形态、叶脉数量和组织切片的方式分析海草种类。统计植株数量, 计算单位面积植株密度。在关键调查区域获得的样品中随机选取 30 株完整海草植株, 将其表面附着物与根部泥沙冲洗干净后进行形态学测量。将测量后的海草植株在 65℃ 恒温条件下烘干至恒重, 对单位面积海草的生物量进行计算。

1.3 海草床区域关键环境因子调查

在各采样站位, 运用 SM-5A 测深仪(Speedtech, 美国)测量水深, 参考当地当日潮汐表校正实际水深。使用 YSI 650 多参数水质监测仪(美国)监测调查海域的水温、溶解氧、盐度和酸碱度。使用 SD20 透明度塞氏盘(北京普力特仪器有限公司)测量水体透明度。采集沉积物, 采用实验室筛析法结合马尔文激光粒度仪(Malvern Instruments Ltd., 英国)法测定沉积物的平均粒径、砂含量、粉砂和粘土含量。

1.4 数据处理与分析

运用 ArcGIS10.2 软件估算双岛湾海域海草分布面积、绘制海草分布图。运用 SPSS18.0 软件对海草床关

键环境因子和海草形态学指标进行 T 检验、描述性统计和单因素方差分析(One-way ANOVA)。实验数据采用平均值 \pm 标准误差(Mean \pm SE)表示,显著性水平为 $P=0.05$ 。

2 结果

2.1 海草种类

本调查通过植株形态学观察和组织切片法对调查区域的海草进行种类鉴定。结果显示,双岛湾海域共分布有2种海草,分别为鳗草科(Zosteraceae)、鳗草属(*Zostera*)的鳗草(*Z. marina*)(图2)和鳗草科虾形草属(*Phyllospadix*)的红纤维虾形草(*P. iwatensis*)(图3)。

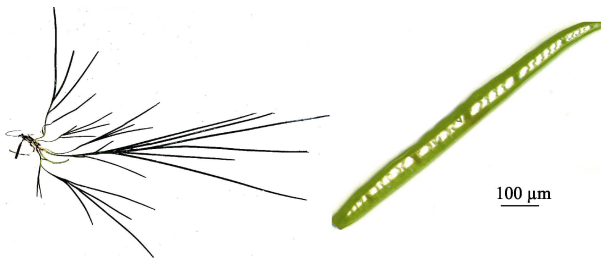


图2 鳗草外部形态特征及其叶片横断面
Fig.2 External morphological characters of *Z. marina* and its transection of leaf



图3 红纤维虾形草外部形态特征及其叶片横断面
Fig.3 External morphological characters of *P. iwatensis* and its transection of leaf

2.2 分布面积

海草床分布总面积为 442.19 hm^2 (图4)。鳗草是双岛湾的海草优势种,分布面积为 434.46 hm^2 , 占总面积的 98.3%, 主要分布于双岛湾中部东侧及海参池中。海参池中的鳗草分布面积为 34.26 hm^2 , 双岛湾中部东侧的鳗草分布面积为 400.20 hm^2 , 湾口 1~3 m 的浅水区成片连续分布, 内湾鳗草呈斑块状或零星分布, 双岛湾西侧因受水动力作用淤积大面积的浅滩, 未发现鳗草分布。红纤维虾形草主要分布于双岛湾湾口东侧及向东约 3 km 的近岸礁石浅水区, 分布面积仅为 7.73 hm^2 , 占总面积的 1.7%。其中, 湾口东侧红纤维虾形草的分布面积约为 3.65 hm^2 , 于礁石底质呈小斑块状分布; 而在近岸礁石浅水区的分布面积约为 4.08 hm^2 , 呈线性连续零星分布。

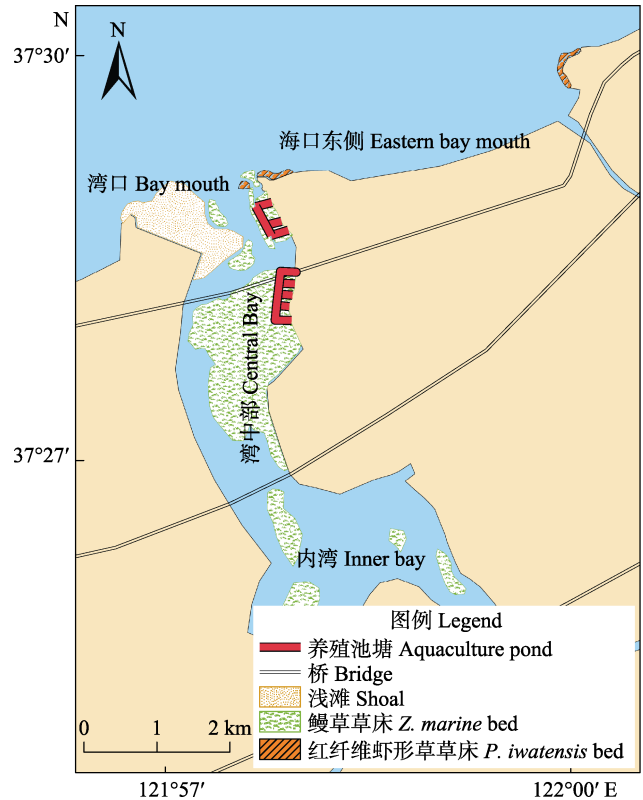


图4 双岛湾海草床的地理分布
Fig.4 Geographical distribution of seagrass beds in Shuangdao Bay

2.3 海草的密度、生物量与形态学特征

2.3.1 鳗草 双岛湾海域鳗草的平均植株密度为 (174.2 ± 9.2) shoots/ m^2 , 其中, 靠近湾口的鳗草密度最大(218.7 shoots/ m^2)、湾中部最小(138.7 shoots/ m^2)。鳗草的平均生物量为 (337.7 ± 17.5) g DW/ m^2 , 其中, 靠近湾口的平均生物量最大(472.4 g DW/ m^2)、内湾最低(132.2 g DW/ m^2)。

从双岛湾中部、湾口和内湾采集的样品中各随机抽取 30 株鳗草进行形态学统计分析。调查表明, 双岛湾中部鳗草地上形态学指标显著高于湾口和内湾 ($P<0.05$)。中部鳗草平均株高最高, 比湾口处鳗草高约 10 cm, 比湾内鳗草高约 20 cm, 平均单株叶片数、叶长和叶鞘长等指标均具有相似规律(表 1)。地下部分, 全湾鳗草平均节间长约为 1.7 cm, 平均节间直径约为 0.6 cm, 平均根长约为 16.7 cm。

2.3.2 红纤维虾形草 双岛湾海域靠近湾口的红纤维虾形草的植株密度(969.8 shoots/ m^2)大于湾口东侧(738.7 shoots/ m^2), 平均密度为 (889.1 ± 17.1) shoots/ m^2 。红纤维虾形草平均生物量为 (605.9 ± 18.1) g DW/ m^2 , 靠近湾口的平均生物量为 (727.7 ± 21.3) g DW/ m^2 , 显著大于湾口东侧 [(525.3 ± 15.8) g DW/ m^2] ($P<0.05$)。

从双岛湾湾口和内湾采集的红纤维虾形草样品

中各随机抽取 30 株进行形态学统计分析。从表 2 可知, 双岛湾湾口及其东侧的红纤维虾形草除株高、叶鞘长与根长有显著差异外($P<0.05$), 其他形态学指标

差异不显著($P>0.05$)。总体来看, 虾形草平均单株叶片数为 3.4 leaves/shoot, 平均株高为 71.2 cm, 平均叶宽为 0.2 cm, 平均节间直径为 0.4 cm, 根长为 1.0 cm。

表 1 双岛湾不同区域鳗草形态学指标
Tab.1 Morphological indices of *Z. marina* in different areas of Shuangdao Bay

形态学指标 Morphological index	湾口 Bay mouth	湾中部 Central bay	内湾 Inner bay	样本数 Number of samples
叶片数 Number of leaves (leaves/shoot)	6.0±0.3 ^a	6.7±0.3 ^b	5.8±0.3 ^c	30
株高 Shoot height (cm)	152.7±7.4 ^a	166.7±3.7 ^b	154.4±3.6 ^a	30
叶鞘长 Leaf sheath length(cm)	37.9±1.6 ^a	40.5±0.9 ^b	38.8±1.3 ^a	30
叶鞘宽 Leaf sheath width(cm)	1.1±0.0 ^a	1.2±0.1 ^a	1.1±0.0 ^a	30
最大叶长 Maximum leaf length(cm)	114.8±6.1 ^a	126.2±3.5 ^b	115.6±4.2 ^a	30
最大叶宽 Maximum leaf width(cm)	1.0±0.0 ^a	1.1±0.0 ^a	1.0±0.0 ^a	30
节间长 Internode length(cm)	2.1±0.1 ^a	1.7±0.1 ^b	1.2±0.1 ^c	30
节间直径 Internode diameter(cm)	0.6±0.0 ^a	0.7±0.0 ^b	0.6±0.0 ^a	30
最大根长 Maximum root length(cm)	17.1±0.4 ^a	17.1±0.9 ^a	15.7±0.5 ^b	30

注: 不同字母表示差异显著($P<0.05$)。下同

Note: Different letters indicated significant differences ($P<0.05$). The same as below

表 2 双岛湾不同区域红纤维虾形草植株形态学指标
Tab.2 Morphological indices of *P. iwatensis* in different areas of Shuangdao Bay

形态学指标 Morphological index	湾口 Bay mouth	湾口东侧 Eastern bay mouth	样本数 Number of samples
叶片数 Number of leaves (leaves/shoot)	3.4±0.3 ^a	3.3±0.3 ^a	30
株高 Shoot height (cm)	67.4±2.8 ^a	75.0±2.3 ^b	30
叶宽 Leaf width (cm)	0.2±0.0 ^a	0.2±0.0 ^a	30
叶鞘长 Leaf sheath length (cm)	10.3±0.5 ^a	9.8±0.4 ^b	30
叶鞘宽 Leaf sheath width (cm)	0.2±0.0 ^a	0.3±0.0 ^a	30
节间直径 Internode diameter (cm)	0.4±0.1 ^a	0.4±0.1 ^a	30
根长 Root length (cm)	0.9±0.0 ^a	1.1±0.0 ^b	30
根直径 Root diameter (cm)	0.1±0.0 ^a	0.1±0.0 ^a	30

2.4 双岛湾海草床区域关键环境因子

从双岛湾湾口、湾中部、内湾和湾口东侧调查数据中, 各随机抽取 15 组关键环境因子进行数据分析,

调查结果见表 3。从表 3 可以看出, 部分区域的水深、透明度和溶解氧含量存在显著差异($P<0.05$)。水温、盐度和 pH 差异不大, 平均值分别为 28.7℃、31.9 和 7.4。调查发现, 鳗草草床底质坚硬, 平均底质粒径

表 3 双岛湾海草床区域的关键环境因子
Tab.3 Key environmental factors in the seagrass bed area of Shuangdao Bay

环境因子 Environmental factors	湾口 Bay mouth	湾中部 Central bay	内湾 Inner bay	湾口东侧 Eastern bay mouth	样本数 Number of samples
水深 Water depth (m)	1.8±0.3 ^a	2.0±0.2 ^a	1.2±0.1 ^b	1.5±0.1 ^c	15
透明度 Transparency (m)	0.9±0.1 ^a	1.4±0.2 ^b	0.9±0.1 ^a	1.2±0.1 ^b	15
水温 Temperature (°C)	29.0±0.4 ^a	29.0±0.3 ^a	28.0±0.3 ^b	28.9±0.6 ^a	15
盐度 Salinity	31.6±0.2 ^a	32.1±0.1 ^a	32.1±0.1 ^a	31.9±0.1 ^a	15
溶解氧含量 Dissolved oxygen (mg/L)	7.9±0.0 ^a	7.7±0.0 ^a	7.5±0.0 ^b	7.4±0.0 ^b	15
酸碱度 pH	7.4±0.1 ^a	7.5±0.1 ^a	7.4±0.1 ^a	7.5±0.1 ^a	15
底质类型 Bottom sediment types	中细砂 Medium-fine sand	中细砂 Medium-fine sand	细中砂 Fine to medium sand	礁石 Reef	15

为 (4.3 ± 0.2) mm, 红纤维虾形草则附生于礁石上。

3 讨论

3.1 环境因子与海草分布、形态学特征的互作关系

基因和环境因子是导致物种差异性的主要原因, 同一物种在不同环境下也可能呈现出一定的表现差异(Palacio-López *et al.*, 2015)。本调查中, 双岛湾湾口、湾中部、内湾及湾口东侧的水深、透明度和底质粒径呈显著差异, 是影响双岛湾海草分布及形态学差异的重要环境变量。

水深和水质透明度通过影响光照进而影响海草的形态学特征(Karydis, 2009)。一般情况下, 同一水域中, 光照随水深增加而递减; 此外, 水质透明度越高, 海草的可利用光也会随之增加。本研究中, 双岛湾中部和湾口东侧的水深、透明度显著高于湾口和内湾, 可能是导致湾中部鳗草和红纤维虾形草地上形态学指标显著高于湾口和内湾($P<0.05$)的重要原因。

沉积物粒径是影响海草分布及生物学特征的又一重要因素(Schanz *et al.*, 2003)。一般情况下, 海底沉积物粒径和水流强度呈正相关关系, 沉积物颗粒直径越小, 表明该区域的水动力较小(Andral *et al.*, 1999)。海草能通过适应水动力不同的环境来减少种间或种内竞争, 提升自身生存能力和资源利用率(Schanz *et al.*, 2003), 进而影响形态学特征。本研究中, 双岛湾湾口和中部底质类型为中细砂, 内湾为细中砂, 湾口东侧为礁石底质, 导致了海草种类分布及形态学的差异。

3.2 双岛湾海草密度及生物量

双岛湾海域鳗草的平均植株密度为 174.2 shoots/m², 显著低于同季节镆镎岛(364.0 shoots/m²)(李洪辰等, 2019)、荣成俚岛湾海域(1209.0 shoots/m²)、荣成马山里海域(688.0 shoots/m²)和荣成天鹅湖(416.0 shoots/m²)(Zhang *et al.*, 2016)的鳗草床植株密度。据报道, 20世纪80年代以前, 山东省威海、青岛和烟台等沿海海域广泛分布鳗草, 威海海域鳗草床平均生物量达到 1500.0 g DW/m²(李恒等, 2006), 而本调查获得的双岛湾鳗草草床生物量仅为 337.7 g DW/m²。红纤维虾形草于2011年被列为易危种(Short *et al.*, 2011b), 对环境变化较敏感, 难以在恶劣的生态环境中生存(Shelton, 2010)。本调查中, 双岛湾红纤维虾形草仅零星分布于礁石上, 平均密度为 889.1 shoots/m², 显著低于同季节镆镎岛红纤维虾形草的平均植株密度(3087.0 shoots/m²)(李洪辰等, 2019), 应予以高度重视。

本研究表明, 双岛湾海域鳗草和红纤维虾形草的

植株密度和生物量均处于较低水平, 但由于缺乏双岛湾海域海草床的历史数据, 故无法对双岛湾海草床的衰退状况进行全面且准确的评价。通过对现场调查、群众走访, 初步认为双岛湾海草床处于较为严重的衰退状况。此外, 双岛湾底质坚硬, 海草种子定栖和植株扎根的难度极大, 一旦海草床被破坏, 通过自然或人工进行恢复将异常困难。

3.3 双岛湾海草床生境面临的威胁

根据本调查与渔民走访发现, 双岛湾海域海草床生境正受到围海养殖、捕捞和工业废水的严重威胁。

3.3.1 围海养殖、捕捞 双岛湾是威海著名的海参增养殖区(李乐乐, 2015), 潮间带大面积的海草床直接被改造成了养殖池塘, 导致这些海草床短时间内直接被毁灭; 养殖活动中, 践踏海草或刨挖贝类, 亦会对海草的生长与繁殖造成巨大威胁(黄小平等, 2006)。此外, 近岸渔业用船螺旋桨的机械运作(Sargent *et al.*, 1995; Dawes *et al.*, 1997)、渔业拖网和船锚(Burdick *et al.*, 1999; Neckles *et al.*, 2005)的大量使用会在短时间内严重切割连续海草床, 导致海草床的斑块化和生境破碎化。

3.3.2 工业废水的排放 据报道, 双岛湾沿岸有工厂数10家, 其中, 包括电镀厂、造纸厂、眼镜厂、电化铝厂等, 排出的工业废水经排污口流入初村河和羊亭河, 两河交汇后又流入双岛湾。对数个人海排污口的监测结果显示, 双岛湾海水处于富营养化水平。对有机污染进行评价, 结果显示, 双岛湾海域水体处于严重污染状态(周艳荣等, 2008)。长期的水污染导致海草一系列的退化问题。首先, 光照是决定海草生长发育的关键环境因子(Adams *et al.*, 2017), 水体长期富营养化和较高的悬浮物浓度会抑制叶绿体的磷酸化进程, 对海草或其他浮游植物产生直接毒性作用, 甚至直接导致其死亡(Touchette, 2000; 李凤雪等, 2020)。成熟植物对高浓度的无机氮营养盐耐受性较差, 如红纤维虾形草一般生活在中低水平营养盐环境中, 而在富营养化水体中, 特别是铵态氮的过量富集会直接引起红纤维虾形草中毒, 走向衰亡(Ramírez-García *et al.*, 2002)。其次, 水体富营养化会促进大型藻类的爆发性生长, 大量藻类的遮挡会进一步减少海草对光的吸收, 导致其死亡(Han *et al.*, 2016; Ruesink, 2016)。另外, 据报道双岛湾海水存在中高等级重金属生物毒性效应(张学超等, 2014), 高浓度的重金属会破坏海草叶片类囊体膜和叶绿体膜的超微结构, 降低海草的光合效率, 进而导致其退化(Ralph *et al.*, 1998)。

3.4 保护建议

针对双岛湾海草床所受威胁的类型和强度, 提出

以下建议, 以实现有效保护和科学管理:

(1) 严格控制双岛湾周边企业的污水排量, 同时严格监管排放污水的处理, 以改善水质。

(2) 对双岛湾海域划分不同功能区, 加强对功能区的管理。结合本调查结果和当地实际情况, 可将双岛湾划分出 3 个主要功能区(图 5): 增殖捕捞区、核心保护区和海水养殖区。其中, 增殖捕捞区主要用于贝类的增殖放流和采集, 该区域大部分水深较浅, 退潮后露出大片滩涂, 适于贝类生长和捕捞, 总面积为 117.32 hm²。核心保护区是海草床密集区, 总面积为 105.21 hm², 该区域海草连续分布, 水深较深且生物多样性较高, 但受人类活动影响较大, 保护不当会造成海草床衰退。因此, 该区域应严格限制渔业捕捞和开挖航道等行为。海水养殖区受陆源径流影响, 营养盐含量丰富, 初级生产力高, 适于海带、牡蛎等的养殖, 该功能区总面积约为 163.93 hm²。

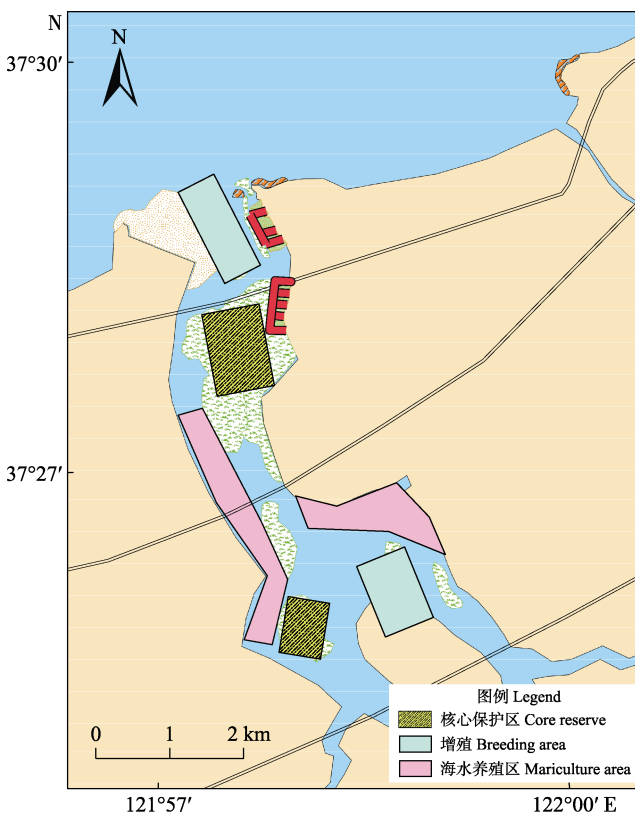


图 5 双岛湾海域不同功能区划分示意图

Fig.5 Schematic diagram of the distribution of different functional areas in Shuangdao Bay

(3) 考虑到双岛湾长远发展的持久利益, 同双岛湾当地的环保、渔业、水产等相关部门进行协商, 避免短期行为, 合理规划渔业捕捞、船舶运行及挖掘航道等行为, 尽量减少对海草床的破坏。

(4) 随着国内外学者对海草床的不断深入研究,

对海草床的管理、保护和修复也逐渐趋于正规化和科学化, 特别是近几年已在海草床修复方面取得重大突破(Verduin *et al.*, 2012; 郭栋等, 2012; 刘燕山等, 2015)。重视海草床的生境保护, 结合成熟有效的海草床修复方法, 如海草植株枚钉移植法(刘燕山等, 2015)和种子保护袋播种法(Zhao *et al.*, 2016)等, 应用海草植株的扩繁与定植理论(张沛东等, 2020), 结合双岛湾鳗草的生殖期及生殖策略确定适宜的海草床修复时间和修复地点(李乐乐等, 2015; 张飞, 2017), 进而加快双岛湾生态系统的恢复与重建。

综上所述, 本调查初步摸清了双岛湾海域海草的种类、分布面积、生物学特征及其生存环境特征, 分析了海草床退化的可能原因并提出了相应的建议 and 对策, 以期海草床资源及滨海生境修复提供参考。

参 考 文 献

- Adams MP, Collier CJ, Uthicke S, *et al.* Model fit versus biological relevance: Evaluating photosynthesis-temperature models for three tropical seagrass species. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 39930
- Andral MC, Roger S, Montréjaud-Vignoles M, *et al.* Particle size distribution and hydrodynamic characteristics of solid matter carried by runoff from motorways. *Water Environment Research*, 1999, 71(4): 398-407
- Burdick DM, Short FT. The effects of boat docks on eelgrass beds in coastal waters of Massachusetts. *Environmental Management*, 1999, 23(2): 231-240
- Costanza R, d'Arge R, de Groot R, *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260
- Dawes CJ, Andorfer J, Rose C, *et al.* Regrowth of the seagrass *Thalassia testudinum* into propeller scars. *Aquatic Botany*, 1997, 59(1-2): 139-155
- Duarte CM, Chiscano CL. Seagrass biomass and production: A reassessment. *Aquatic Botany*, 1999, 65(1-4): 159-174
- Duarte CM. Seagrass depth limits. *Aquatic Botany*, 1991, 40(4): 363-377
- Guo D, Zhang PD, Zhang XM, *et al.* Study on transplant methods of eelgrass (*Zostera marina*). *Marine Sciences*, 2012, 36(3): 42-48 [郭栋, 张沛东, 张秀梅, 等. 大叶藻移植方法的研究. *海洋科学*, 2012, 36(3): 42-48]
- Han QY, Soissons LM, Bouma TJ, *et al.* Combined nutrient and macroalgae loads lead to response in seagrass indicator properties. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 106(1-2): 174-182
- Huang XP, Huang LM, Li YH, *et al.* The major seagrass beds and its habitat threats along the coast of South China. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51: 114-119 [黄小平, 黄良民, 李颖虹, 等. 华南沿海主要海草床及其生境威胁.

- 科学通报, 2006, 51: 114–119]
- Huang XP, Jiang ZJ, Zhang JP, *et al.* The Chinese nomenclature of the global seagrasses. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(4): 127–133 [黄小平, 江志坚, 张景平, 等. 全球海草的中文命名. *海洋学报*, 2018, 40(4): 127–133]
- Karydis M. Eutrophication assessment of coastal waters based on indicators: A literature review. *Global NEST Journal*, 2009, 11(4): 373–390
- Li FX, Jiang ZJ, Gao YP, *et al.* Distribution of size-fractionated phytoplankton and its relationship with environmental variables in Sanggou Bay. *Progress in Fishery Sciences*, 2020, 41(1): 31–40 [李凤雪, 蒋增杰, 高亚平, 等. 桑沟湾浮游植物粒径结构及其与环境因子的关系. *渔业科学进展*, 2020, 41(1): 31–40]
- Li H, Li MZ. The ecological function of algal field and the present situation of artificial algal field construction. *China Fisheries*, 2006(11): 77–80 [李恒, 李美真. 藻场的生态作用及人工藻场建设的现状. *中国水产*, 2006(11): 77–80]
- Li HC, Zhang PD, Li WT, *et al.* Quantitative distribution and ecological characteristics of seagrass beds in the coastal area of Moye Island, Yellow Sea. *Marine Sciences*, 2019, 43(4): 46–51 [李洪辰, 张沛东, 李文涛, 等. 黄海镆镆岛海域海草床数量分布及其生态特征. *海洋科学*, 2019, 43(4): 46–51]
- Li LL, Zheng FY, Liu XQ, *et al.* Sexual reproductive characteristics of *Zostera marina* L. in Shuangdao Bay. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(10): 2866–2872 [李乐乐, 郑凤英, 刘雪芹, 等. 双岛湾大叶藻的有性生殖特征. *生态学杂志*, 2015, 34(10): 2866–2872]
- Li LL. Studies on population ecology of *Zostera marina* in Shuangdao Bay, China. Master's Thesis of Shandong University (Weihai), 2015 [李乐乐. 双岛湾大叶藻种群生态学的初步研究. 山东大学(威海)硕士研究生学位论文, 2015]
- Liu YS, Guo D, Zhang PD, *et al.* Assessing establishment success and suitability analysis of *Zostera marina* transplants using staple method in northern lagoons. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(2): 176–183 [刘燕山, 郭栋, 张沛东, 等. 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*, 2015, 39(2): 176–183]
- Neckles HA, Short FT, Barker S, *et al.* Disturbance of eelgrass *Zostera marina* by commercial mussel *Mytilus edulis* harvesting in marine: Dragging impacts and habitat recovery. *Marine Ecology Progress Series*, 2005, 285(1): 57–73
- Palacio-López K, Beckage B, Scheiner S, *et al.* The ubiquity of phenotypic plasticity in plants: A synthesis. *Ecology and Evolution*, 2015, 5(16): 3389–3400
- Ralph PJ, Burchett MD. Photosynthetic response of *Halophila ovalis* to heavy metal stress. *Environmental Pollution*, 1998, 103(1): 91–101
- Ramírez-García P, Terrados J, Ramos F, *et al.* Distribution and nutrient limitation of surfgrass, *Phyllospadix scouleri* and *Phyllospadix torreyi*, along the Pacific coast of Baja California (México). *Aquatic Botany*, 2002, 74(2): 121–131
- Ruesink JL. Epiphyte load and seagrass performance are decoupled in an estuary with low eutrophication risk. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2016, 481: 1–8
- Sargent FJ, Leary TJ, Crewz DW, *et al.* Scarring of Florida's seagrasses: Assessment and management options. Florida Department of Environmental Protection, 1995, 66
- Schanz A, Asmus H. Impact of hydrodynamics on development and morphology of intertidal seagrasses in the Wadden Sea. *Marine Ecology Progress Series*, 2003, 261: 123–134
- Shelton AO. Temperature and community consequences of the loss of foundation species: Surfgrass (*Phyllospadix* spp., Hooker) in tidepools. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2010, 391(1–2): 35–42
- Short FT, Jones GE, Burdick DM. Seagrass decline: Problems and solutions. *Coastal Wetlands*, 2011a: 439–453
- Short FT, Polidoro B, Livingstone SR, *et al.* Extinction risk assessment of the world's seagrass species. *Biological Conservation*, 2011b, 144(7): 1961–1971
- Statton J, Cambridge ML, Dixon KW, *et al.* Aquaculture of *Posidonia australis* seedlings for seagrass restoration programs: Effect of sediment type and organic enrichment on growth. *Restoration Ecology*, 2013, 21(2): 250–259
- Touchette BW. Physiological and developmental responses of eelgrass (*Zostera marina* L.) to increases in water-column nitrate and temperature. Doctoral Dissertation of North Carolina State University, 2000
- van Katwijk MM, Bos AR, de Jonge VN, *et al.* Guidelines for seagrass restoration: Importance of habitat selection and donor population, spreading of risks, and ecosystem engineering effects. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, 58(2): 179–188
- van Katwijk MM, Thorhaug A, Marbà N, *et al.* Global analysis of seagrass restoration: The importance of large-scale planting. *Journal of Applied Ecology*, 2016, 53(2): 567–578
- Verduin JJ, Paling EI, van Keulen M, *et al.* Recovery of donor meadows of *Posidonia sinuosa* and *Posidonia australis* contributes to sustainable seagrass transplantation. *International Journal of Ecology*, 2012, 837317
- Wang J, Zhang Y, Yuan XZ, *et al.* Water quality condition and its seasonal variation of the artificial reef waters in Shuangdao Bay. *Journal of Hydroecology*, 2012, 33(6): 90–95 [王军, 张艳, 苑旭洲, 等. 双岛湾海域人工鱼礁区水质状况及其季节变化特征. *水生态学杂志*, 2012, 33(6): 90–95]
- Waycott M, Duarte CM, Carruthers TJB, *et al.* Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(30): 12377–12381
- Zhang F. Reproductive strategy of *Zostera marina* population in Shuangdao Bay, China. Master's Thesis of Shandong University (Weihai), 2017 [张飞. 双岛湾鳗草种群生殖策略的研究. 山东大学(威海)硕士研究生学位论文, 2017]

- Zhang PD, Liu YS, Guo D, *et al.* Seasonal variation in growth, morphology, and reproduction of eelgrass *Zostera marina* on the eastern coast of the Shandong Peninsula, China. *Journal of Coastal Research*, 2016, 32(2): 315–322
- Zhang PD, Zhang YH, Zhang HY, *et al.* Research advances in shoot propagation theory and planting technique of seagrasses. *Progress in Fishery Sciences*, 2020, 41(4): 181–189 [张沛东, 张彦浩, 张宏瑜, 等. 海草植株扩繁理论及其定植效应的研究进展. *渔业科学进展*, 2020, 41(4): 181–189]
- Zhang XC, Liu Y, Song JD, *et al.* Distributions and ecological risk assessment of heavy metals in Shuangdao Bay of Weihai. *Journal of Marine Sciences*, 2014, 32(2): 85–90 [张学超, 刘莹, 宋吉德, 等. 威海双岛湾海域重金属的分布特征及生态风险评价. *海洋学研究*, 2014, 32(2): 85–90]
- Zhao JS, Liu YS, Zhang PD, *et al.* Assessment of the establishment success of eelgrass *Zostera marina* (Alismatales: Zosteraceae) from seeds in a cost-effective seed protection method: Implications for large-scale restoration. *Botanica Marina*, 2016, 59(4): 259–266
- Zheng FY, Qiu GL, Fan HQ, *et al.* Diversity, distribution and conservation of Chinese seagrass species. *Biodiversity Science*, 2013, 21(5): 517–526 [郑凤英, 邱广龙, 范航清, 等. 中国海草的多样性、分布及保护. *生物多样性*, 2013, 21(5): 517–526]
- Zhou YR, Tang W, Zhao B, *et al.* Analysis of nutrients and organic pollution in the Shuangdao Bay. *Marine Science Bulletin*, 2008, 27(3): 115–120 [周艳荣, 唐伟, 赵蓓, 等. 山东威海双岛湾海域营养状态及有机污染状况分析. *海洋通报*, 2008, 27(3): 115–120]

(编辑 马瑾艳)

Distribution and Ecological Characteristics of Seagrass in Shuangdao Bay, Weihai

LI Zheng, LI Wentao, YANG Xiaolong, ZHANG Yanhao, ZHANG Peidong^①

(Key Laboratory of Mariculture, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266003)

Abstract The seagrass bed ecosystem is one of the most productive ecosystems on earth with important ecological functions and ecological service values. In August 2016, the seagrass resources and ecological characteristics were investigated and analyzed in Shuangdao Bay sea area of Weihai city, Shandong Province. Seagrass beds of *Zostera marina* and *Phyllospadix iwatensis* covering approximately 442.19 hm² were discovered. *Z. marina* was distributed over 434.46 hm², which is approximately 98.3% of the total seagrass area. These *Z. marina* plants mostly grow in the eastern part of Shuangdao Bay and in the farming ponds of *Stichopus japonicus*. The average shoot density and biomass of *Z. marina* were (174.2±9.2) shoots/m² and (337.7±17.5) g DW/m², respectively. The distribution area of *P. iwatensis* was 7.73 hm² and was approximately equivalent to 1.7% of the total seagrass area. These *P. iwatensis* plants mostly grow on rocky coasts and displayed an obvious band-like distribution. The average shoot density and biomass of *P. iwatensis* were (889.1±17.1) shoots/m² and (605.9±18.1) g DW/m², respectively. The average water depth of seagrass beds was about 1.6 m and the farming ponds growing *Z. marina* had a hard substrate with an average particle size of (4.3±0.2) mm. The investigation showed that the seagrass habitats are being seriously threatened by human activities, such as pollution discharge from the land, culling, and fishing. Suggestions for the protection of the seagrass beds in Shuangdao Bay have been proposed to provide supplementary data on China's seagrass resources and their conservation.

Key words Seagrass bed; Seagrass species; Distribution area; Ecological characteristics; Shuangdao Bay

① Corresponding author: ZHANG Peidong, E-mail: zhangpds@ouc.edu.cn