

邓筱凡, 张宏瑜, 吴忠迅, 等. 荣成马山里海域海草床分布现状及其生态特征[J]. 海洋学报, 2022, 44(8): 97–109, doi:10.12284/hyxb2022160
Deng Xiaofan, Zhang Hongyu, Wu Zhongxun, et al. Distribution and ecological characteristics of seagrass bed of Mashanli sea area in Rongcheng[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(8): 97–109, doi:10.12284/hyxb2022160

荣成马山里海域海草床分布现状及其生态特征

邓筱凡¹, 张宏瑜¹, 吴忠迅², 李文涛¹, 张沛东^{1*}

(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. 长岛国家海洋公园管理中心, 山东 烟台 265800)

摘要: 海草床是滨海三大典型生态系统之一, 具有极其重要的环境改善、资源养护和减灾防灾等生态功能, 亦是全球重要的碳库。2016年8月, 通过对荣成马山里海域的现场调查, 发现了面积为 58.26 hm² 的海草床, 其海草的种类为红纤维虾形草 (*Phyllospadix iwatensis*) 和丛生鳗草 (*Zostera caespitosa*)。红纤维虾形草分布面积为 54.50 hm², 占该海域海草床总面积的 93.5%, 分为北部和南部 2 个带状区域, 平均茎枝密度为 (368.0±18.2) shoots/m², 平均生物量 (干重, 下同) 为 (297.0±41.5) g/m²。丛生鳗草分布面积为 3.76 hm², 占海草床总面积的 6.5%, 呈现斑块状分布, 与红纤维虾形草交错而生, 平均茎枝密度为 (691.2±17.1) shoots/m², 平均生物量为 (534.0±70.7) g/m²。马山里海域海草床主要分布在平均水深为 (2.8±0.3) m 的以岩礁为主的底质上。海草的生长状况存在显著的空间差异, 与水温呈现显著的正相关, 与水深和陆源污染物存在显著的负相关。结合历史资料, 发现该海域海草床退化现象较严重, 其主要威胁因素是人为干扰, 主要包括渔业生产、养殖活动和陆源污染输入。建议合理规划周边海域的养殖规模和密度, 加强陆源污染物管控和开展海草床生态修复工程, 以期为温带海草床的有效保护和科学管理提供参考。

关键词: 海草床; 海草种类; 分布面积; 生态特征; 马山里海域

中图分类号: Q948.8

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2022)08-0097-13

1 引言

海草是一类可完全生活在海水中的被子植物, 是浅海水域重要的初级生产者, 年净生产力(干重, 下同)达 1 012 g/m², 由其构筑的海草床是地球最有效的碳封存系统之一, 碳储量可达海洋碳储量的 10% 以上, 还具有净化水质、防风固堤、稳定底质等重要的生态功能^[1-3]。然而, 近几十年来受自然环境变化和人类活动的影响, 全球海草床面积急剧衰退, 超过 1/3 的海草床已完全消失, 海草床的有效保护与高效修复亟待开展^[4-5]。

中国近海有海草 22 种, 约占全球海草种数的 30%^[6]。我国海草床的退化状况非常严峻。例如, 胶州湾芙蓉岛海域海草床由 20 世纪 80 年代的 1 334 hm²

退化至目前仅有零星分布^[7]; 1990 年前威海沿岸广布鳗草 (*Zostera marina*) 平均生物量 (干重, 下同) 达 1 500 g/m², 但 2016 年调查显示, 其平均生物量降至约 504 g/m², 仅为 1990 年平均生物量的 1/3 左右^[8-11]; 2017 年广东省流沙湾海域海草床的分布面积和平均生物量分别仅为 26.90 hm² 和 3.74 g/m², 均不足 2002 年的 1/10^[12]; 2015–2019 年, 海南岛海草床的海草盖度由 25.9% 下降到 16.7%, 平均茎枝密度由 1 035 shoots/m² 降至 579 shoots/m², 平均生物量下降 36.1%^[13]。

明确海草床的海草种类和面积等生态分布状况, 是海草床保护与恢复的基础。近年来, 我国学者对温带海域山东省的威海沿海^[10, 12-13]、莱州湾^[14]、黄河口^[15]、河北省的曹妃甸^[16-17]、辽宁省的獐子岛^[18]、长山岛^[19]、兴城-觉华岛^[20] 等海区以及亚热带和热带海域广西壮

收稿日期: 2021-12-02; 修订日期: 2022-04-27。

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFD0901302); 国家自然科学基金(42076100)。

作者简介: 邓筱凡(1997—), 女, 山东省威海市人, 主要从事海草床修复与保护研究。E-mail: 17806265822@163.com

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

自治区的竹山^[21]、合浦^[12]、北部湾^[22], 广东省的柘林湾^[23]、流沙湾^[24], 海南省的黎安港^[25]、东寨港^[26]、高隆湾^[27], 台湾省沿海^[28], 香港特别行政区的下白泥、荔枝窝^[6]等海区的海草床分布进行了调查, 逐步探明我国海草资源现状。然而, 仍有部分海域的海草床分布状况至今缺少基础数据, 严重影响了对海草资源的评估与保护工作。

荣成马山里海域 (37.30°~37.34°N, 122.56°~122.64°E) 位于山东半岛东端, 介于天鹅湖和养鱼池湾之间, 其沿岸村落大量存在的海草房证明该海域曾广布海草床。为查明马山里海域海草床的分布现状及其生态特征, 于 2015 年 10 月对马山里海域的海草碎屑开展调查, 发现岸边堆积大量海草干叶, 结合渔民走访, 初步判定马山里海域分布有较大面积的海草床。随后, 于 2016 年 8 月对马山里海域的海草床开展系统调查, 并通过分析荣成马山里海域海草床可能

面临的主要威胁因素, 提出相应的保护和修复建议, 以期为我国海草分布状况和海草生态学研究提供基础资料, 也为我国温带海草床的科学管理提供参考。

2 调查方法

2.1 海草种类和分布调查

对马山里 6 m 以浅的海域进行大面调查, 设置 21 条断面, 间隔 30 m, 调查总面积为 1 092 hm², 如图 1 所示。现场调查选择大潮低潮时段, 由潜水员携带象拔潜水观察, 发现有海草分布后沿草床边界间隔释放象拔, 并使用水下相机拍摄记录, 以海草覆盖度不小于 5% 为草床边界划分标准^[11]。调查船上人员发现象拔后, 用 GPS 记录边界拐点坐标, 在记录本绘制海草分布示意图, 标注近岸标志性建筑位置。返回实验室后, 对拍摄录像进行判读分析, 结合定点坐标和实时卫星测距, 估算海草床分布面积。

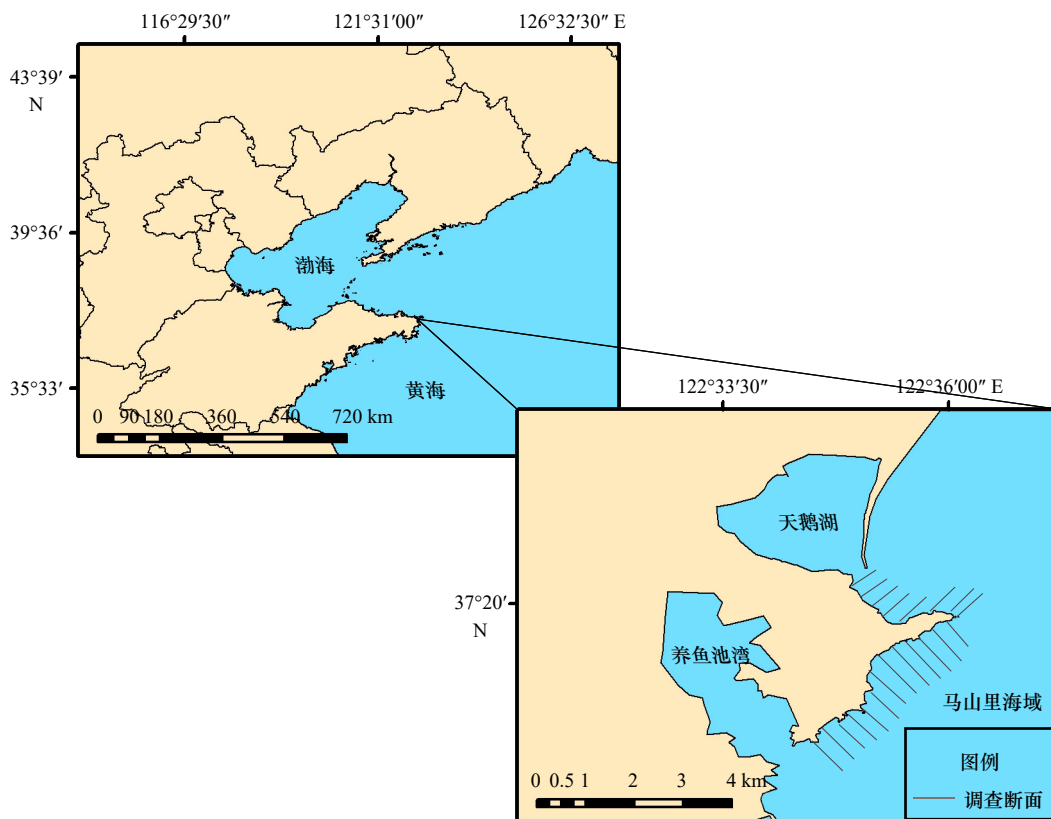


图 1 马山里海域海草床调查区域

Fig. 1 Investigation area of seagrass beds in the Mashanli sea area

2.2 海草生物学特征调查

在海草床分布区设置 10 个采样站位, 使用 25 cm×25 cm 样方框采样, 每站位设置 3 组重复。将样方内所有海草植株完整取出, 冲洗干净, 置入样品袋, 低温保存, 带回实验室进行测定与分析。

首先通过外部形态和组织切片等方式鉴定海草

种类; 随后统计各样方植株数量, 计算茎枝密度; 然后在每个站位随机选取 15 株完整植株, 将其表面附着物与根部泥沙冲洗干净, 进行形态学测量, 包括株高、叶鞘长、叶鞘宽、叶宽和最大根长, 其中株高、叶鞘长和最大根长使用直尺测量, 叶鞘宽和叶宽使用游标卡尺测量; 最后, 将样方内的全部海草植株分为地

上组织和地下组织,于60℃恒温烘干至恒重,测定生物量。测量标准和计算方法如下:(1)株高(cm):自分生组织至最长叶片顶端的高度;(2)叶鞘长(cm):包围着茎的叶基部的长度;(3)叶鞘宽(cm):叶鞘中间位置的宽度;(4)叶宽(cm):最长叶片中间位置的宽度;(5)最大根长(cm):单株最长根的长度;(6)单株地上生物量(g/shoot):单株地上组织干重;(7)单株地下生物量(g/shoot):单株地下组织干重。

2.3 海草床关键环境因子调查

在各站位,使用YSI 650(美国YSI公司)现场测定水温、盐度、pH和溶解氧含量;使用SM-5A测深仪(美国Speedtech公司)测量水深;使用SD20海水透明度盘(北京普力特仪器有限公司)测量透明度。沉积物理化性质主要监测的是沉积物的粒度和有机质含量,样品采集方法按照《海洋调查规范第8部分:海洋地质地球物理调查》(GB/T 12763.8-2007)规定执行,粒度分析采用筛析法,有机质含量的测定采用烧失量法^[29-31]。

2.4 海草床主要威胁的调查与分析

对马山里海域及天鹅湖、养鱼池湾周边的沿岸环境进行调研。通过现场调查,对空地、耕地、居民区、工厂以及养殖场等不同环境类型的位置和规模

进行统计;通过对相关公司和渔民的走访,了解马山里海域海水养殖种类规模、捕捞渔网具规格、码头建设位置、航道路线及其变迁等具体信息。

2.5 数据处理与分析

运用ArcGIS 10.2进行海草分布状况的绘图和海草分布面积的估算。运用SPSS 25.0进行描述性统计分析、独立样本 t 检验、聚类分析(CA)和典型相关分析(CCA),绘制系谱图。利用R语言的Corrplot软件包中进行Spearman相关性分析,确定海草形态学特征指标和海区环境因子之间的潜在相关性。利用ArcGIS 10.2克里金插值法评估海草生长状况和周边环境类型,分析海草床潜在威胁来源。实验数据用平均值±标准误表示,显著性水平为 $p<0.05$ 。

3 结果与分析

3.1 海草种类、分布范围与面积

通过植株形态学观察和组织切片分析,发现荣成马山里海域共分布2种海草,隶属于1科2属,分别是鳗草科虾形草属的红纤维虾形草(*Phyllospadix iwatensis*)(图2)和鳗草属的丛生鳗草(*Zostera caespitosa*)(图3)。马山里海域海草床总面积为58.26 hm²,其中红纤维虾形草分布面积为54.50 hm²,占该海域海草床

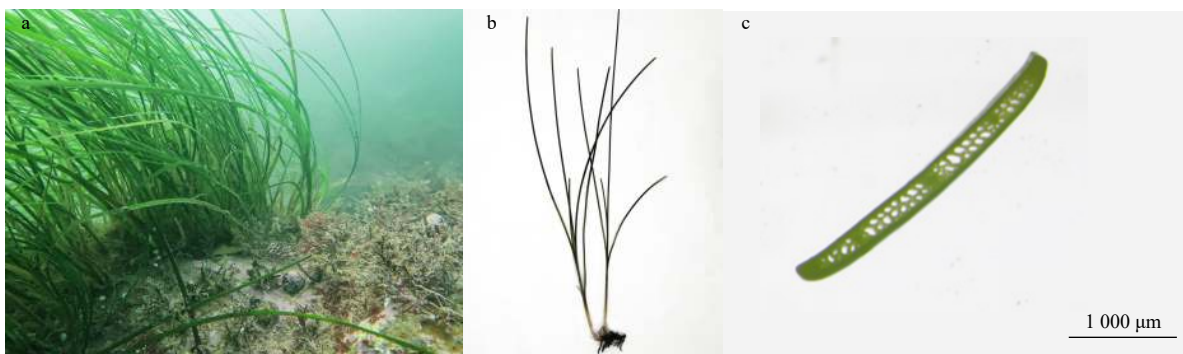


图2 红纤维虾形草水下状态(a)、外部形态特征(b)及其叶片组织切片(c)

Fig. 2 Underwater state (a), external morphological characteristics (b) and leaf transection (c) of *Phyllospadix iwatensis*



图3 丛生鳗草水下状态(a)、外部形态特征(b)及其叶片组织切片(c)

Fig. 3 Underwater state (a), external morphological characteristics (b) and leaf transection (c) of *Zostera caespitosa*

总面积的 93.5%, 丛生鳗草分布面积为 3.76 hm², 占海草床总面积的 6.5%。

红纤维虾形草海草床分为北部和南部两个带状区域, 北部分布区宽约 85 m, 自西向东延伸约 855 m, 分布面积约为 6.55 hm²; 南部分布区面积较大, 宽约 173 m, 自东北向西南方向延伸约 3 500 m, 至养鱼池湾湾口码头处消失, 分布面积约为 47.95 hm²。丛生鳗草呈现斑块状分布, 与红纤维虾形草交错而生, 如图 4 所示。由此可见, 马山里海域海草床以红纤维虾形草为主。

3.2 海草的茎枝密度、生物量与形态学特征

调查显示, 马山里红纤维虾形草平均茎枝密度为 (368.0±18.2) shoots/m², 平均生物量为 (297.0±41.5) g/m², 平均株高为 (89.2±4.2) cm; 丛生鳗草平均茎枝密度为 (691.2±17.1) shoots/m², 平均生物量为 (534.0±70.7) g/m², 平均株高为 (78.4±8.3) cm。形态学特征如表 1 所示。

3.3 环境因子

监测结果发现, 海草床分布水体平均水深为 (2.8±0.3) m, 透明度为 (1.7±0.2) m, 盐度为 (31.7±0.2), 底质以岩礁底质为主, 间有少量黏土质砂, 沉积物平均有机质含量为 (1.12±0.05)%, 如表 2 所示。海草生境地形复杂多样, 有大量的海底凸起和凹陷。

3.4 海草生长状况分析

对马山里海域 2 种海草的主要形态学特征指标进行独立样本 *t* 检验, 发现 2 种海草的株高、叶鞘长、

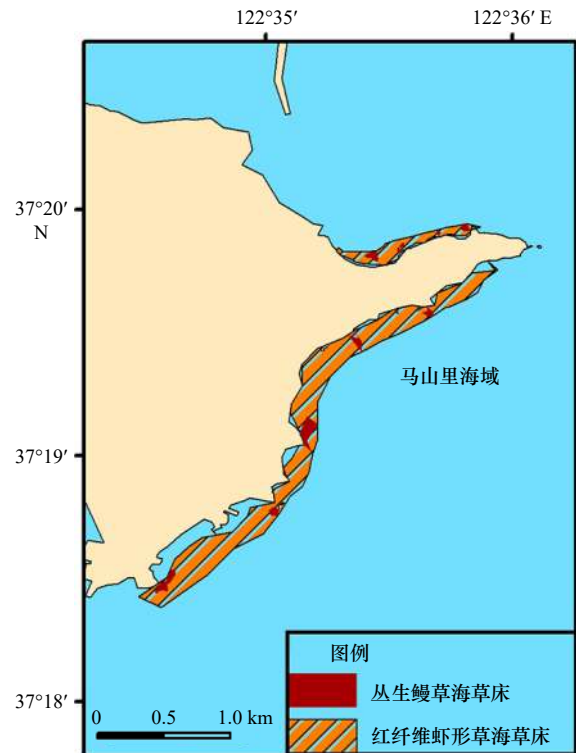


图 4 马山里海域海草分布

Fig. 4 Distribution of seagrasses in the Mashanli sea area

单株地上生物量和单株地下生物量等差异不显著 ($p>0.05$), 故选择这 4 个指标对马山里海域 10 个站点的海草形态学特征指标进行均值聚类分析, 如图 5 所示。马山里海域海草可按生长状况分为两个聚类中心, 第一类为生长较好, 包括 PW2、ZC3、ZC4、PW3、

表 1 马山里海域海草形态学指标统计

Table 1 Statistics of morphological indexes of seagrasses in the Mashanli sea area

海草种类	站位	株高/cm	叶鞘长/cm	叶鞘宽/cm	叶宽/cm	最大根长/cm
红纤维虾形草	PW1	81.8±3.2	7.5±1.5	0.29±0.02	0.23±0.01	0.36±0.06
	PW2	90.0±4.1	14.7±2.3	0.31±0.03	0.27±0.02	1.08±0.09
	PW3	90.8±2.3	16.0±2.5	0.30±0.02	0.28±0.02	1.75±0.06
	PW4	96.0±3.3	13.3±1.9	0.23±0.04	0.23±0.01	0.98±0.05
	PW5	87.6±3.8	12.5±1.8	0.29±0.03	0.25±0.02	1.13±0.07
	平均值		89.2±4.2	12.8±2.7	0.28±0.03	0.25±0.02
丛生鳗草	ZC1	68.3±4.5	13.3±0.56	0.37±0.03	0.33±0.02	6.10±0.62
	ZC2	80.8±5.2	15.2±0.33	0.45±0.02	0.39±0.03	7.74±0.58
	ZC3	87.1±7.2	16.1±0.84	0.44±0.02	0.41±0.03	8.10±0.71
	ZC4	88.7±6.4	16.1±0.75	0.44±0.03	0.39±0.02	8.60±0.67
	ZC5	67.3±7.3	14.7±0.64	0.43±0.01	0.38±0.03	6.15±0.84
	平均值		78.4±8.3	15.1±0.94	0.42±0.02	0.38±0.03

注: 站位位置见图 6。

表 2 马山里海域海草床主要环境因子

Table 2 The main environmental factors of the seagrass beds in the Mashanli sea area

海草种类	站位	水深/m	水温/°C	盐度	溶解氧含量/(mg·L ⁻¹)	pH	透明度/m	底质类型	沉积物有机质含量/%
红纤维虾形草	PW1	2.9	23.5	31.6	8.5	7.3	1.6	礁石	1.13
	PW2	2.5	23.5	31.3	8.7	7.5	1.6	礁石	1.19
	PW3	2.9	23.4	31.5	8.5	7.7	1.8	礁石	1.17
	PW4	2.3	23.5	31.3	8.4	7.3	1.9	礁石	1.11
	PW5	2.5	23.6	31.6	8.7	7.5	1.4	礁石	1.18
	平均值	2.6±0.2	23.5±0.1	31.5±0.1	8.6±0.1	7.5±0.1	1.6±0.2	礁石	1.16±0.03
丛生鳗草	ZC1	2.9	23.3	31.9	10.3	7.3	1.9	cS	1.09
	ZC2	3.0	22.9	31.9	10.7	7.4	1.7	cS	1.05
	ZC3	2.9	23.0	31.9	10.0	7.4	1.8	cS	1.06
	ZC4	3.2	23.0	31.9	11.2	7.2	1.6	cS	1.15
	ZC5	3.1	23.1	31.9	10.7	7.3	1.6	cS	1.11
	平均值	3.0±0.1	23.1±0.1	31.9±0	10.6±0.4	7.3±0.1	1.7±0.2	cS	1.09±0.04

注: cS为黏土质砂; 站位位置见图6。

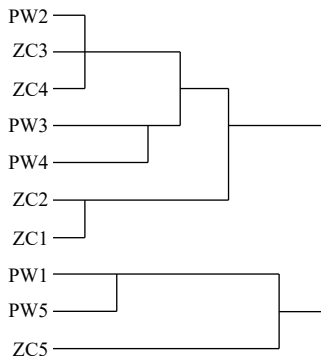


图 5 海草形态学特征指标谱系

Fig. 5 Morphologic indexes intergroup pedigree of seagrasses

PW1-PW5 为红纤维虾形草站位; ZC1-ZC5 为丛生鳗草站位
 PW1-PW5 indicate the stations of *Phyllospadix iwatensis*; ZC1-ZC5 indicate the stations of *Zostera caespitosa*

PW4、ZC2、ZC1 共 7 个站位, 第二类为生长较差, 包括 PW1、PW5 和 ZC5 共 3 个站位, 两者最终聚类中心的距离为 20.086。第一类的 4 个形态学特征指标的平均值均高于第二类, 是第二类的 1.1~1.4 倍。根据海草形态学特征指标谱系绘制马山里海域海草生长状况评估图(图 6), 可以看出, 马山里海域中部海草长势优于南北两侧。

3.5 海草生长影响因子分析

3.5.1 Spearman 相关性分析

对马山里海域海草形态学特征和环境因子进行 Spearman 相关分析, 结果表明, 海草形态学指标间具

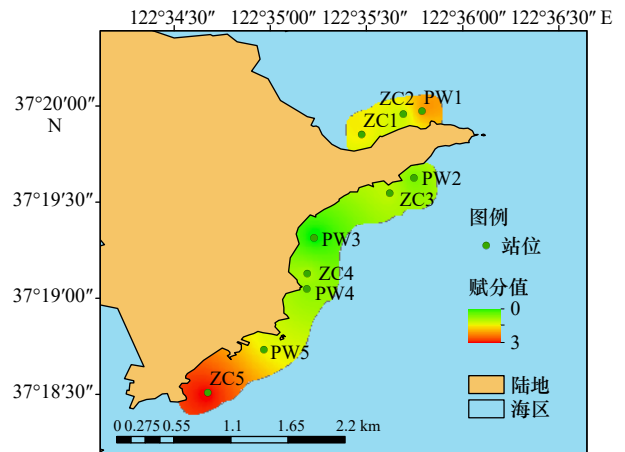


图 6 马山里海域海草调查站位及生长状况评估结果

Fig. 6 Seagrass survey stations and evaluation results of growth status in the Mashanli sea area

PW1-PW5 为红纤维虾形草站位; ZC1-ZC5 为丛生鳗草站位
 PW1-PW5 indicate the stations of *Phyllospadix iwatensis*; ZC1-ZC5 indicate the stations of *Zostera caespitosa*

有很强的相关性(图 7A), 如单株地上生物量(AB)与株高(SH), 单株地上生物量(AB)、单株地下生物量(UB)与叶鞘长(LSL)均为显著正相关($p < 0.05$); 同时环境因子之间也有很强的相关性(图 7B), 如水温(WT)、溶解氧含量(DO)、透明度(SWT)、沉积物有机质含量(OM)之间均有很强的相关性。然而, Spearman 相关分析发现, 海草形态学特征指标与环境因子指标之间无显著相关性(图 7C), 这可能是由于分析

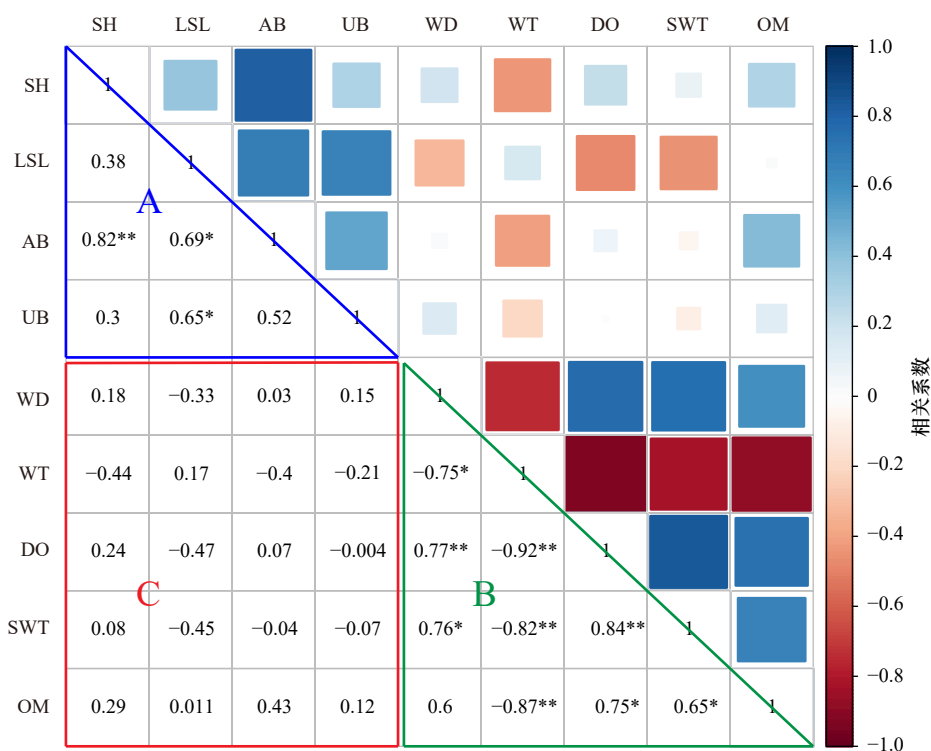


图 7 海草形态学指标与环境因子间的相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis among morphological indexes of seagrass and environmental factors

SH. 株高; LSL. 叶鞘长; AB. 单株地上生物量; UB. 单株地下生物量; WD. 水深; WT. 水温; DO. 溶解氧含量; SWT. 透明度; OM. 有机质含量; A. 海草形态学指标之间的相关性; B. 环境因子指标之间的相关性; C. 海草形态学指标与环境因子指标之间的相关性; *代表 $p < 0.05$, **代表 $p < 0.01$

SH. Shoot height; LSL. leaf sheath length; AB. aboveground bio mass per plant; UB. underground bio mass per plant; WD. water depth; WT. water temperature; DO. dissolved oxygen content; SWT. transparency; OM. organic matter content; the data on the left and right sides are the normalized canonical correlation coefficient of the variables; A. correlation between morphological indexes of seagrasses; B. correlation between environmental factors; C. correlation between morphological indexes of seagrasses and environmental factors; * indicates $p < 0.05$, ** indicates $p < 0.01$

方法不适用。因此,进一步采用典型相关分析探究海草形态学特征指标和环境因子指标之间的相关性。

3.5.2 典型相关分析

对海草的全部生态学特征指标与环境因子指标进行典型相关分析,结果发现,典型变量的相关性系数较低,无法以典型变量之间的关系表示两类指标之间的关系。然后进行了海草的不同生态学特征指标与不同环境因子指标的多种组合,并分别开展典型相关分析,发现株高、叶鞘长、茎枝密度和单株生物量等海草生态学特征指标和水深、水温、透明度和沉积物有机质含量等环境因子指标的组合,第一典型变量相关性系数较高,可以通过第一典型变量之间的关系表示两类指标之间的关系,而且这 8 个海草的生态学特征指标与环境因子指标亦能够较好反映海草的生长分布和环境状况(图 8)。

典型相关分析共得到 4 对典型变量($\rho_1(U_1, V_1)$ 、 $\rho_2(U_2, V_2)$ 、 $\rho_3(U_3, V_3)$ 和 $\rho_4(U_4, V_4)$),其相关系数分别为 0.962、0.556、0.451 和 0.126。第一典型变量间的相

关系数为 0.962($p < 0.05$),因此海草形态学指标与海区环境因子之间相关性分析可简化为只研究第一对典型变量 $\rho_1(U_1, V_1)$ 之间的关系。其中, U_1 为海草生态学的综合指标, V_1 为海区环境因子的综合指标。 U_1 、 V_1 标准化典型结构如图 8 所示。

$$\begin{cases} U_1 = 0.22X_1 - 0.036X_2 + 0.007X_3 - 0.233X_4 \\ V_1 = -1.45Y_1 + 2.819Y_2 + 1.128Y_3 + 1.827Y_4 \end{cases} \quad (1)$$

式中, U_1 为生态学指标第一典型变量; V_1 为海区环境指标第一典型变量; X_1 为株高; X_2 为叶鞘长; X_3 为茎枝密度; X_4 为单株干重; Y_1 为水深; Y_2 为水温; Y_3 为透明度; Y_4 为沉积物有机质含量。

典型载荷分析表明,在海草生态学指标中,茎枝密度典型负载系数高,达 0.984,为 U_1 主要影响因子,故茎枝密度为生态学指标的主要影响因素;在环境指标中,水温和水深典型载荷系数均较高,分别为 0.957 和 -0.873,为 V_1 主要影响因子,即水温和水深为环境指标的主要影响因素(图 9a)。

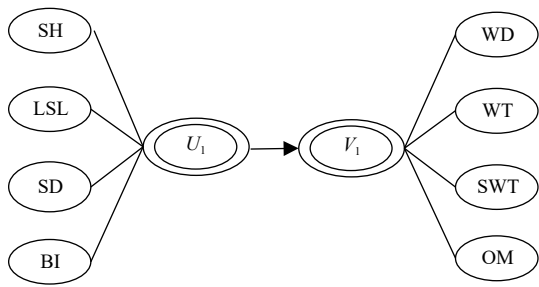


图8 U_1 、 V_1 典型结构示意图

Fig. 8 Canonical correlation structure diagram of U_1 and V_1

U_1 : 生态学指标第一典型变量; V_1 : 海区环境指标第一典型变量;
SH. 株高; LSL. 叶鞘长; SD. 茎枝密度; BI. 单株干重; WD. 水深;
WT. 水温; SWT. 透明度; OM. 有机质含量

U_1 : The first canonical variable of morphological indexes; V_1 : the first canonical variable of marine environmental factors; SH. shoot height; LSL. leaf sheath length; SD. shoot density; BI. dry weight per plant; WD. water depth; WT. water temperature; SWT. transparency; OM. organic matter content

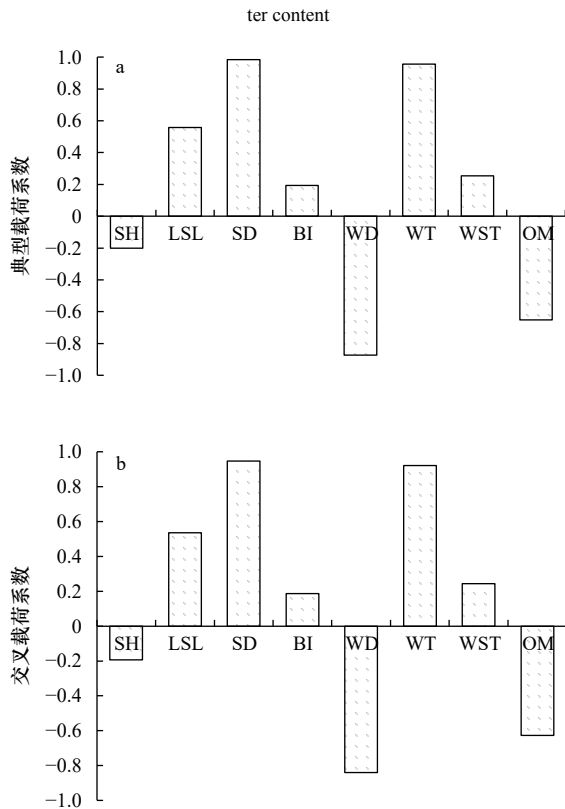


图9 变量典型载荷分析(a)和变量交叉载荷分析(b)

Fig. 9 Variable typical load analysis (a) and variable cross load analysis (b)

SH. 株高; LSL. 叶鞘长; SD. 茎枝密度; BI. 单株干重; WD. 水深;
WT. 水温; SWT. 透明度; OM. 有机质含量

SH. Shoot height; LSL. leaf sheath length; SD. shoot density; BI. dry weight per plant; WD. water depth; WT. water temperature; SWT. transparency; OM. organic matter content

交叉载荷分析表明, U_1 对 V_1 的影响中, 茎枝密度交叉载荷系数较高, 为 0.947, V_1 受其影响较大, 且为

正相关; V_1 对 U_1 的影响中, 水温和水深的交叉载荷系数较高, 分别为 0.921 和 -0.840, U_1 受这两个环境指标的影响较大, 且 U_1 与水温为正相关, 与水深为负相关 (图 9b)。

综上, 夏季马山里海域, 温度较高以及水深较浅的区域海草生长状况较好, 海草茎枝密度较高。

典型冗余分析组内解释度表明, 第一典型变量 U_1 可解释 4 个海草生态学指标 33.9% 的组内变异, 第一典型变量 V_1 可解释 4 个海洋环境指标 54.2% 的组内变异, 如图 10 所示。

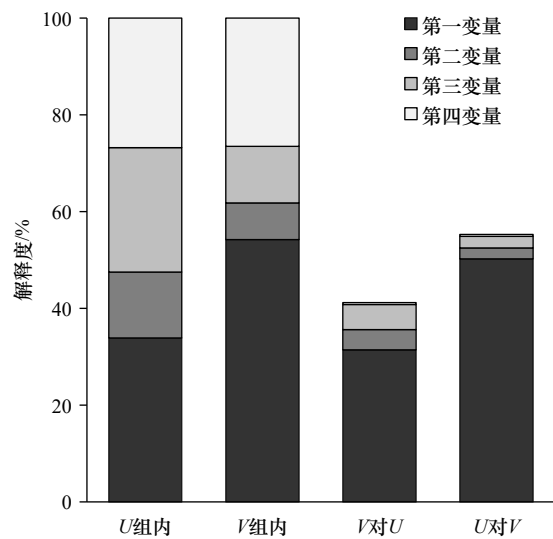


图 10 典型冗余分析组内、组间解释度

Fig. 10 Interpretation of typical redundancy analysis within and between groups

典型冗余分析组间解释度表明, 环境第一典型变量 V_1 对海草形态学特征的解释度为 31.4%, 4 个环境典型变量 (V_1 - V_4) 对海草形态特征的解释度共计 41.2%, 说明马山里海域还存在其他因素影响海草生长及分布状况; 生态指标第一典型变量 U_1 对海区环境因子的解释度为 50.2%, 4 个生态典型变量 (U_1 - U_4) 对海区环境因子的解释度共计 55.3%, 表明海草床对海区环境具有一定的影响作用, 但影响程度一般 (图 10)。

综上, 马山里海域海草床分布区中, 水温和水深是影响海草床茎枝密度等生态学指标的关键因子, 海草的生长状况与水温呈正相关, 与水深呈负相关。同时, 尚存在其他因素能影响海草生长与分布状况。

3.5.3 陆源影响分析

为进一步查明马山里海域海草生长状况差异的原因, 对马山里海域周边环境进行分析。马山里海域通过涨潮、退潮与天鹅湖和养鱼池湾两处海域进行频繁水体交换。因此, 同时对马山里海域、天鹅湖和

养鱼池湾周边陆地环境进行调查,将自然保护区、耕地、居民区和工厂(养殖场)按污染强弱分别赋分,赋分标准见表3。

表3 环境类型及赋分标准
Table 3 Environment type and assignment standard

类型	自然保护区	耕地	居民区	工厂(养殖场)
赋分	0	1	2	3

对赋分结果采用克里金插值法分析,如图11所示。结果发现,马山里海域周边以自然保护区为主,赋分最小,即受到的陆源污染最少;其次天鹅湖周边以自然保护区和居民区为主,赋分居中,受到的陆源污染居中;养鱼池湾周边工厂(养殖场)数量众多,赋分最高,受到的陆源污染最多。赋分结果与马山里海域海草生长状况评估结果(图6)相一致,故马山里海域海草生长状况的差异可能与陆源污染程度有关,南北两端来自于天鹅湖、养鱼池湾的陆源污染物较多,海草生长状况较差,马山里中部海域陆源污染较少,海草生长状况较好。

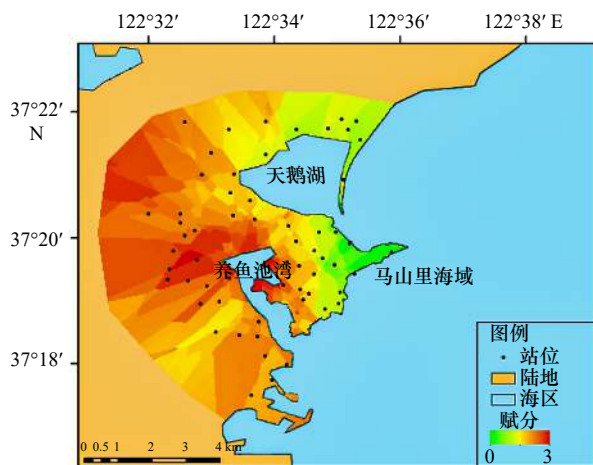


图11 环境类型赋分结果示意图
Fig. 11 Schematic diagram of environment type assignment results

4 讨论与建议

4.1 海草床的分布及资源量现状

马山里海域有红纤维虾形草和丛生鳗草两种海草,种类的分布与底质类型有直接关系。红纤维虾形草附着生长在岩石或礁石上,受底质条件限制,大多呈现带状分布^[32-33],而从生鳗草偏好细沙或黏土含量较高的沉积环境,如黏土质砂等^[34-35]。类似地,马山里海域红纤维虾形草受海区礁石分布影响从而呈现南北两个狭长的带状分布区域;马山里海域由于黏土

质砂底质的不连续分布,丛生鳗草难以形成连续草床,从而呈现零星斑块状分布。

在2011年世界自然保护联盟(IUCN)濒危物种红色名单灭绝风险的分类与评估标准中,红纤维虾形草和丛生鳗草均被列为易危种^[5]。马山里海域属外海海域,自然条件恶劣,加之近年来人为活动的干扰日渐加剧,海草面临一定程度的退化风险。由于缺乏马山里海域海草床的历史调查数据,无法对其进行历史对比。但据同期调查资料显示,马山里海域红纤维虾形草的平均茎枝密度和生物量均低于周边镓镓岛、桑沟湾和双岛湾海域,其现存植株平均数量(分布面积与平均茎枝密度的乘积)仅为镓镓岛的7%,桑沟湾的18%,如表4所示。Yabe等^[36]调查显示,夏季(7月)日本千叶县沿海红纤维虾形草的平均茎枝密度和生物量高达1809 shoots/m²和2226 g/m²,分别是相同季节(8月)马山里海域红纤维虾形草的4.9倍和6倍。这些对比结果表明,马山里海域红纤维虾形草的资源量较低,海草床生态系统处于脆弱状态,存在相当程度的退化风险。

表4 荣成近岸红纤维虾形草资源量
Table 4 Resources of *Phyllospadix iwataensis* in the Rongcheng coastal

地点	分布面积/hm ²	平均茎枝密度/(shoots·m ⁻²)	生物量/(g·m ⁻²)	参考文献
马山里	54.5	368.0±18.2	297.0±41.5	本文
镓镓岛	95.6	3087.0±35.4	2320.0±26.6	文献[8]
桑沟湾	37.3	2649.0±29.8	2381.3±27.3	文献[11]
双岛湾	7.73	889.1±17.1	605.9±18.1	文献[10]

马山里海域丛生鳗草海草床平均茎枝密度((691.2±17.1) shoots/m²)和生物量((534.0±70.7) g/m²)略大于桑沟湾的丛生鳗草海草床((513.0±17.9) shoots/m²、(479.1±17.9) g/m²)^[11],但马山里海域丛生鳗草零星分布,总面积为3.76 hm²,仅为后者的一半。因此,马山里海域丛生鳗草面临的主要风险是生境破碎化,这些海草斑块不仅会对海草床的生物多样性^[37-38]、生态系统功能^[39]产生负面影响,而且抵御环境变化和人为扰动的能力较差,极易因受到自然环境和人类活动的影响而消失,急需加强生境保护与修复^[6,40-41]。

4.2 关键环境因子对海草床分布与生长的影响

海草对环境变化敏感,其生长发育受多种环境因子影响。典型相关分析表明,马山里海域海草生态学

指标整体变化由水温和水深等环境因子所主导, 与水温呈正相关, 与水深呈负相关。

红纤维虾形草和丛生鳗草均属于温带海草, 最优生长温度为 11.5~20℃^[42], 典型相关分析结果显示, 海草生态学指标与水温呈正相关, 因此水温较高区域, 海草生长状况较好, 茎枝密度和单株生物量均较高。Yabe 等^[36]在日本铫子市对海岸海草生长状况跟踪调查显示, 水温升高能够提高红纤维虾形草的生产力, 与本文调查结果类似。

水深主要通过影响到达海草冠层的光照强度控制海草的分布与生长。太阳光进入海水后因吸收和散射而快速衰减, 而光照强度则会影响海草叶片的叶绿素 *a*、叶绿素 *b*、类胡萝卜素、可溶性蛋白、非结构性碳水化合物等含量, 是海草光合作用的决定性因素^[43-44]。水深越浅, 底层光照越充足, 越有利于海草光合作用, 因而能够支持更高的茎枝密度和生物量^[43]。马山里海域红纤维虾形草海草床分布水域平均水深为 2.6 m, 丛生鳗草海草床分布水域平均水深为 3.0 m, 数值均为低潮时测得, 当地潮差约为 1.5 m, 符合海草的适宜生长水深(6 m 以浅)^[44], 而两者分布水深的差异可能是由于两者对光照的适宜生长条件不同导致。

4.3 人类活动对海草床分布与生长的影响

结合走访调查与环境赋分分析的结果发现, 人为因素是导致马山里海域海草床退化的主要原因, 主要包括渔业生产、养殖活动和陆源污染的排放。

渔业生产方面, 马山里海域曾有相当面积的填海工程, 且建有码头。填海工程会直接掩埋海草, 侵占其生长海域; 码头建设施工过程中会造成水体悬浮物增加, 引起光照衰减, 影响海草的光合速率^[28]; 船舶航行对海草床进行反复切割^[45-46], 会导致海草床的斑块化和生境破碎化; 拖网、吸贝等生产方式则在短时间内造成海草的大面积死亡^[28]。海南岛南部铁炉港海域, 由于破坏性的挖贝方式, 2008-2014 年间, 海菖蒲(*Enhalus acoroides*)海草床面积由 1.18 hm² 降至 0.04 hm², 且呈现零星分布, 几近消失^[27]。

养殖活动方面, 马山里海域养殖场数量众多, 主要包括贝类养殖、海珍品养殖和海带浮筏养殖。养殖活动主要从两方面影响海草的生存生长: 一方面, 开掘池塘、围海养殖等挤占海草生存空间; 另一方

面, 养殖活动对水体干扰较大, 使海草失去适宜的生存环境。20 世纪 90 年代初, 在广东省流沙湾海域海草床中开挖虾池, 目前该范围内海草床已完全退化^[24]; 曾在广西合浦海域海草床大规模吊养贝类, 截至目前已有 100 hm² 海草床消失^[12]。

陆源污染方面, 马山里海域直接输入的陆源污染物较少, 但受到来自养鱼池湾陆源污染的间接影响, 同样存在污染压力。随着污染的加重, 海水出现富营养化状态, 直接抑制海草叶片叶绿体的磷酸化过程, 对海草产生毒性作用, 进而影响海草的茎枝密度和形态学特征^[47-49], 且植株铵态氮的过量富集会引起植株中毒, 导致生长受损^[50]。此外, 海水富营养化会促使大型藻类、叶片附生藻类和浮游植物大量暴发, 遮挡阳光, 抑制海草光合作用, 影响其生长^[51-52]。另外, 陆源污染中的除草剂、重金属等有毒物质进入海域, 会对海草产生长期毒害作用^[53-54]。

4.4 保护建议

马山里海域海草资源量较少, 加之底质坚硬、风浪较大, 海草种子定栖和植株扎根的难度大, 一旦海草床遭到严重破坏, 自然恢复的可能性较低。因此, 急需开展海草床的保护与修复工作。针对马山里海域海草床所受威胁的类型和强度, 提出以下建议:

(1) 加强马山里海域海草床的保护。特别是合理规划海带养殖规模, 降低养殖密度; 严控周边海域陆源污染物的排放; 提高政府重视程度, 科学规划海岸建设等活动, 减少对海草床的破坏。

(2) 开展马山里海域海草床生态修复工程。海草床自然恢复周期漫长, 应当辅以必要的人工恢复措施。近年来, 海草的修复研究已取得一定成果^[55-56], 但主要适合生长在泥沙底质的鳗草等种类, 对于红纤维虾形草和丛生鳗草并不适用。截至目前, 仅程冉等^[57]利用构件开展了红纤维虾形草植株的移植, 但过程复杂, 劳动量和成本较高, 无法推广应用, 而丛生鳗草的修复技术更为鲜见。因此, 应当进一步加强红纤维虾形草和丛生鳗草修复技术的研发, 科学有效开展海草床的修复工作。

(3) 加强红纤维虾形草和丛生鳗草的基础研究。尤其是两者的生活史、生长发育以及对环境胁迫的响应机制研究, 从而为两种海草的保护和修复提供数据基础和理论基础。

参考文献:

- [1] McKenzie L J, Yoshida R L, Aini J W, et al. Seagrass ecosystem contributions to people's quality of life in the Pacific Island countries and territories[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 167: 112307.

- [2] 庄武艺, J-谢佩尔. 海草对潮滩沉积作用的影响[J]. 海洋学报, 1991, 13(2): 230–239.
Zhuang Wuyi, Champey J. Effects of seagrass on tidal flat sedimentation[J]. Haiyang Xuebao, 1991, 13(2): 230–239.
- [3] 邱广龙, 林幸助, 李宗善, 等. 海草生态系统的固碳机理及贡献[J]. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1825–1832.
Qiu Guanglong, Lin Xingzhu, Li Zongshan, et al. Seagrass ecosystems: contributions to and mechanisms of carbon sequestration[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(6): 1825–1832.
- [4] Waycott M, Duarte C M, Carruthers T J B, et al. Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(30): 12377–12381.
- [5] Short F T, Polidoro B, Livingstone S R, et al. Extinction risk assessment of the world's seagrass species[J]. *Biological Conservation*, 2011, 144(7): 1961–1971.
- [6] 郑凤英, 邱广龙, 范航清, 等. 中国海草的多样性、分布及保护[J]. 生物多样性, 2013, 21(5): 517–526.
Zheng Fengying, Qiu Guanglong, Fan Hangqing, et al. Diversity, distribution and conservation of Chinese seagrass species[J]. Biodiversity Science, 2013, 21(5): 517–526.
- [7] 叶春江, 赵可夫. 高等植物大叶藻研究进展及其对海洋沉水生活的适应[J]. 植物学通报, 2002, 19(2): 184–193.
Ye Chunjiang, Zhao Kefu. Advances in the study on the marine higher plant eelgrass (*Zostera marina* L.) and its adaptation to submerged life in seawater[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2002, 19(2): 184–193.
- [8] 李洪辰, 张沛东, 李文涛, 等. 黄海镍岛海域海草床数量分布及其生态特征[J]. 海洋科学, 2019, 43(4): 46–51.
Li Hongchen, Zhang Peidong, Li Wentao, et al. Quantitative distribution and ecological characteristics of seagrass beds in the coastal area of Moye Island, Yellow Sea[J]. *Marine Sciences*, 2019, 43(4): 46–51.
- [9] 郭栋, 张沛东, 张秀梅, 等. 山东近岸海域海草种类的初步调查研究[J]. 海洋湖沼通报, 2010(2): 17–21.
Guo Dong, Zhang Peidong, Zhang Xiumei, et al. Preliminary investigation and study on seagrass species of inshore areas in Shandong Province[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2010(2): 17–21.
- [10] 李政, 李文涛, 杨晓龙, 等. 威海双岛湾海域海草分布及其生态特征[J]. 渔业科学进展, 2021, 42(2): 176–183.
Li Zheng, Li Wentao, Yang Xiaolong, et al. Distribution and ecological characteristics of seagrass in Shuangdao Bay, Weihai[J]. Progress in Fishery Sciences, 2021, 42(2): 176–183.
- [11] 李政, 李文涛, 杨晓龙, 等. 威海荣成桑沟湾海域海草床分布现状及其生态特征[J]. 海洋科学, 2020, 44(10): 52–59.
Li Zheng, Li Wentao, Yang Xiaolong, et al. Distribution and ecological characteristics of seagrass beds in Rongcheng Sanggou Bay, Weihai[J]. *Marine Sciences*, 2020, 44(10): 52–59.
- [12] 吴沅珈, 张宏科. 广西合浦海草床变化情况及其保护对策[J]. 中国科技信息, 2018(22): 68–69.
Wu Yuanjia, Zhang Hongke. Changes of seagrass beds and conservation strategies in Hepu, Guangxi Province[J]. *China Science and Technology Information*, 2018(22): 68–69.
- [13] 吴钟解, 陈石泉, 蔡泽富, 等. 海南岛海草床分布变化及恢复建议[J]. 海洋环境科学, 2021, 40(4): 542–549.
Wu Zhongjie, Chen Shiquan, Cai Zefu, et al. Analysis of distribution change and restoration suggestion of the seagrass beds in Hainan Island[J]. *Marine Environmental Science*, 2021, 40(4): 542–549.
- [14] 岳世栋, 徐少春, 张玉, 等. 中国温带海域新发现较大面积(大于50 ha)海草床: IV烟台沿海海草分布现状及生态特征[J]. 海洋科学, 2021, 45(10): 61–70.
Yue Shidong, Xu Shaochun, Zhang Yu, et al. New discovery of larger seagrass beds with area >50 ha in the temperate waters of China: IV distribution status and ecological characteristics of seagrass in the coastal waters of Yantai[J]. *Marine Sciences*, 2021, 45(10): 61–70.
- [15] 周毅, 张晓梅, 徐少春, 等. 中国温带海域新发现较大面积(大于50 ha)的海草床: I 黄河河口区罕见大面积日本鳗草海草床[J]. 海洋科学, 2016, 40(9): 95–97.
Zhou Yi, Zhang Xiaomei, Xu Shaochun, et al. New discovery of larger seagrass beds with areas >50 ha in temperate waters of China: an unusual large seagrass (*Zostera japonica*) bed in the Yellow River Estuary[J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(9): 95–97.
- [16] 周毅, 许帅, 徐少春, 等. 中国温带海域新发现较大面积(大于0.5 km²)海草床: II 声呐探测技术在渤海唐山沿海海域发现中国面积最大的鳗草海草床[J]. 海洋科学, 2019, 43(8): 50–55.
Zhou Yi, Xu Shuai, Xu Shaochun, et al. New discovery of larger seagrass beds with areas >0.50 km² in temperate waters of China: II the largest *Zostera marina* bed in China discovered in the coastal waters of Tangshan in the Bohai Sea by sonar detection technology[J]. *Marine Sciences*, 2019, 43(8): 50–55.
- [17] 刘慧, 黄小平, 王元磊, 等. 渤海曹妃甸新发现的海草床及其生态特征[J]. 生态学杂志, 2016, 35(7): 1677–1683.
Liu Hui, Huang Xiaoping, Wang Yuanlei, et al. Newly discovered seagrass bed and its ecological characteristics in the coastal area of Caoifeidian, Bohai Sea[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(7): 1677–1683.
- [18] 杨贵福. 獐子岛近海海草的群落特征和大叶藻营养动态分析[D]. 大连: 大连海洋大学, 2014.
Yang Guifu. Community ecological characteristics of seagrass and trophical dynamical analysis of *Zostera marina* L. in littoral of Zhangzi Island[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2014.
- [19] Xu Shaochun, Qiao Yongliang, Xu Shuai, et al. Diversity, distribution and conservation of seagrass in coastal waters of the Liaodong Peninsula, North Yellow Sea, northern China: implications for seagrass conservation[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 167: 112261.
- [20] 周毅, 徐少春, 许帅, 等. 中国温带海域新发现较大面积(大于50 ha)海草床: III渤海兴城-觉华岛海域大面积海草床鳗草种群动力学

- 及补充机制[J]. *海洋与湖沼*, 2020, 51(4): 943–951.
- Zhou Yi, Xu Shaochun, Xu Shuai, et al. New discovery of larger seagrass beds with areas >50 ha in temperate waters of China: III population dynamics and recruitment mechanism of *Zostera marina* in the Xingcheng-Juehuadao coastal waters of Bohai Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2020, 51(4): 943–951.
- [21] 宁秋云, 何斌源, 赖廷和. 广西竹山海草生态修复工程效果评估[J]. *化学工程与装备*, 2020(12): 304–306.
- Ning Qiuyun, He Binyuan, Lai Tinghe. Effect evaluation of ecological restoration of seagrass in Zhushan, Guangxi Province[J]. *Chemical Engineering & Equipment*, 2020(12): 304–306.
- [22] 范航清, 彭胜, 石雅君, 等. 广西北部湾沿海海草资源与研究状况[J]. *广西科学*, 2007, 14(3): 289–295.
- Fan Hangqing, Peng Sheng, Shi Yajun, et al. The situations of seagrass resources and researches along Guangxi coasts of Beibu Gulf[J]. *Guangxi Sciences*, 2007, 14(3): 289–295.
- [23] 黄小平, 江志坚, 张景平, 等. 广东沿海新发现的海草床[J]. *热带海洋学报*, 2010, 29(1): 132–135.
- Huang Xiaoping, Jiang Zhijian, Zhang Jingping, et al. Newly discovered seagrass beds in the coastal seas of Guangdong Province[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2010, 29(1): 132–135.
- [24] 钟超, 孙凯峰, 廖岩, 等. 广东流沙湾海草分布现状及其与不同养殖生境的关系[J]. *海洋环境科学*, 2019, 38(4): 521–527.
- Zhong Chao, Sun Kaifeng, Liao Yan, et al. Distribution status of seagrass and its relationship with different habitat types in Liusha Bay of Guangdong Province[J]. *Marine Environmental Science*, 2019, 38(4): 521–527.
- [25] 陈石泉, 庞巧珠, 蔡泽富, 等. 海南黎安港海草床分布特征、健康状况及影响因素分析[J]. *海洋科学*, 2020, 44(11): 57–64.
- Chen Shiquan, Pang Qiaozhu, Cai Zefu, et al. Analysis of distribution characteristics, health status, and influencing factors of seagrass bed in Li'an Lagoon, Hainan Island[J]. *Marine Sciences*, 2020, 44(11): 57–64.
- [26] 陈石泉, 林国尧, 蔡泽富, 等. 海南东寨港海草资源分布特征及影响因素[J]. *湿地科学与管理*, 2019, 15(4): 53–56.
- Chen Shiquan, Lin Guoyao, Cai Zefu, et al. Patterns and impacting factors of the distribution of the seagrass resources in Dongzhai Harbour of Hainan[J]. *Wetland Science & Management*, 2019, 15(4): 53–56.
- [27] 陈石泉, 吴钟解, 陈晓慧, 等. 海南岛南部海草资源分布现状调查分析[J]. *海洋学报*, 2015, 37(6): 106–113.
- Chen Shiquan, Wu Zhongjie, Chen Xiaohui, et al. Investigation and analysis of the distribution status of seagrass resources in the southern part of Hainan Island[J]. *Haiyang Xuebao*, 2015, 37(6): 106–113.
- [28] 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[J]. *科学通报*, 2006, 51(S2): 136–142.
- Huang Xiaoping, Huang Liangmin, Li Yinghong, et al. Main seagrass beds and threats to their habitats in the coastal sea of South China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(S2): 136–142.
- [29] 赵东波. 常用沉积物粒度分类命名方法探讨[J]. *海洋地质动态*, 2009, 25(8): 41–44, 46.
- Zhao Dongbo. Discussion on general methods of the grain-size classification and nomenclature of sediments[J]. *Marine Geology Letters*, 2009, 25(8): 41–44, 46.
- [30] 程鹏, 高抒, 李徐生. 激光粒度仪测试结果及其与沉降法、筛析法的比较[J]. *沉积学报*, 2001, 19(3): 449–455.
- Cheng Peng, Gao Shu, Li Xusheng. Evaluation of a wide range laser particle size analyses and comparison with pipette and sieving methods[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19(3): 449–455.
- [31] 钱宝, 刘凌, 肖潇. 土壤有机质测定方法对比分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(1): 34–38.
- Qian Bao, Liu Ling, Xiao Xiao. Comparative tests on different methods for content of soil organic matter[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2011, 39(1): 34–38.
- [32] Turner T. Complexity of early and middle successional stages in a rocky intertidal surfgrass community[J]. *Oecologia*, 1983, 60(1): 56–65.
- [33] Larkum A W D, Orth R J, Duarte C M. *Seagrasses: Biology, Ecology and Conservation*[M]. Dordrecht: Springer, 2006.
- [34] Lee S Y, Choi C I, Suh Y, et al. Seasonal variation in morphology, growth and reproduction of *Zostera caespitosa* on the southern coast of Korea[J]. *Aquatic Botany*, 2005, 83(4): 250–262.
- [35] 江鑫, 潘金华, 韩厚伟, 等. 底质与水深对大叶藻和丛生大叶藻分布的影响[J]. *大连海洋大学学报*, 2012, 27(2): 101–104.
- Jiang Xin, Pan Jinhua, Han Houwei, et al. Effects of substrate and water depth on distribution of sea weeds *Zostera marina* and *Z. caespitosa*[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2012, 27(2): 101–104.
- [36] Yabe T, Ikusima I, Tsuchiya T. Production and population ecology of *Phyllospadix iwatensis* Makino. I. leaf growth and biomass in an intertidal zone[J]. *Ecological Research*, 1995, 10(3): 291–299.
- [37] 杨芳, 贺达汉. 生境破碎化对生物多样性的影响[J]. *生态科学*, 2006, 25(6): 564–567.
- Yang Fang, He Dahan. Effects of habitat fragmentation on biodiversity[J]. *Ecologic Science*, 2006, 25(6): 564–567.
- [38] 武晶, 刘志民. 生境破碎化对生物多样性的影响研究综述[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(7): 1946–1952.
- Wu Jing, Liu Zhimin. Effect of habitat fragmentation on biodiversity: a review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(7): 1946–1952.
- [39] Sweatman J L, Layman C A, Fourqurean J W. Habitat fragmentation has some impacts on aspects of ecosystem functioning in a sub-tropical seagrass bed[J]. *Marine Environmental Research*, 2017, 126: 95–108.
- [40] Jaeger J A G. Landscape division, splitting index, and effective mesh size: new measures of landscape fragmentation[J]. *Landscape Ecology*, 2000, 15(2): 115–130.

- [41] Forman R T T. Some general principles of landscape and regional ecology[J]. *Landscape Ecology*, 1995, 10(3): 133–142.
- [42] Lee K S, Park S R, Kim Y K. Effects of irradiance, temperature, and nutrients on growth dynamics of seagrasses: a review[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2007, 350(1/2): 144–175.
- [43] Ralph P J, Durako M J, Enriquez S, et al. Impact of light limitation on seagrasses[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2007, 350(1/2): 176–193.
- [44] 柳杰, 张沛东, 郭栋, 等. 环境因子对海草生长及光合生理影响的研究进展[J]. *水产科学*, 2012, 31(2): 119–124.
Liu Jie, Zhang Peidong, Guo Dong, et al. Research advancement in effects of environmental factors on growth and photosynthetic physiology of sea weed[J]. *Fisheries Science*, 2012, 31(2): 119–124.
- [45] Dawes C J, Andorfer J, Rose C, et al. Regrowth of the seagrass *Thalassia testudinum* into propeller scars[J]. *Aquatic Botany*, 1997, 59(1/2): 139–155.
- [46] Frank J S, Timothy J L, David W C, et al. Scarring of Florida's seagrasses: assessment and management options[R]. Florida: Florida Department of Environmental Protection, 1995.
- [47] 李诗奇, 张彦浩, 李政, 等. 大叶藻对氮磷营养盐的吸收动力学特征[J]. *植物生态学报*, 2020, 44(7): 772–781.
Li Shiqi, Zhang Yanhao, Li Zheng, et al. Uptake kinetics of nitrogen and phosphorus by *Zostera marina*[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2020, 44(7): 772–781.
- [48] 陈玉, 韩秋影, 郑凤英, 等. 东楮岛海草组织碳氮含量特征及环境影响因素[J]. *中国海洋大学学报(自然科学学报)*, 2016, 46(5): 56–64.
Chen Yu, Han Qiuying, Zheng Fengying, et al. Carbon and nitrogen content characteristics in seagrass tissues and environmental effects in Dongchu Island[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2016, 46(5): 56–64.
- [49] 李诗奇, 李政, 王仙宇, 等. 植物对氮磷元素吸收利用的生理生态学过程研究进展[J]. *山东农业科学*, 2019, 51(3): 151–157.
Li Shiqi, Li Zheng, Wang Xianning, et al. Advances in research of physiological and ecological process of nitrogen and phosphorus absorption and utilization in plant[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2019, 51(3): 151–157.
- [50] 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)[J]. *Aquatic Botany*, 2002, 74(2): 121–131.
- [51] 柳杰. 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[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
Liu Jie. Effects of different environmental conditions on the growth and photosynthetic pigment contents of *Zostera marina* L. in Swan Lake[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.
- [52] 黄驰, 张景平, 江志坚, 等. 海草对营养盐的吸收过程及其与附生藻类的竞争机制[J]. *渔业研究*, 2017, 39(3): 222–228.
Huang Chi, Zhang Jingping, Jiang Zhijian, et al. Nutrients uptake processes of seagrass and its competition with epiphytic algae[J]. *Journal of Fisheries Research*, 2017, 39(3): 222–228.
- [53] 高亚平, 蒋增杰, 杜美荣, 等. 除草剂扑草净和阿特拉津对海草与大型藻类的毒性比较[J]. *水生生物学报*, 2017, 41(4): 930–934.
Gao Yaping, Jiang Zengjie, Du Meirong, et al. Comparison of the herbicide atrazine and prometryn's toxicity on seagrass and seaweed[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2017, 41(4): 930–934.
- [54] 李磊, 黄小平. 重金属在海草中累积及其对海草生长的影响[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(9): 1897–1904.
Li Lei, Huang Xiaoping. Research advances in heavy metals accumulation in seagrass and its effects on seagrass growth[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(9): 1897–1904.
- [55] 刘燕山, 郭栋, 张沛东, 等. 北方潟湖大叶藻植株枚订植法的效果评估与适宜性分析[J]. *植物生态学报*, 2015, 39(2): 176–183.
Liu Yanshan, Guo Dong, Zhang Peidong, et al. Assessing establishment success and suitability analysis of *Zostera marina* transplants using staple method in northern lagoons[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(2): 176–183.
- [56] 张倩, 柳杰, 张沛东, 等. 不同水流流速对大叶藻移植植株存活、生长及光合色素含量的影响[J]. *海洋环境科学*, 2015, 34(6): 806–812.
Zhang Qian, Liu Jie, Zhang Peidong, et al. Effects of different current velocities on survival, growth and photosynthetic pigment contents of *Zostera marina* transplants[J]. *Marine Environmental Science*, 2015, 34(6): 806–812.
- [57] 程冉, 侯鑫, 王欢, 等. 红纤维虾形草移植植株存活、生长和生理对不同水动力条件的响应[J]. *渔业科学进展*, 2022, 43(2): 21–31.
Cheng Ran, Hou Xin, Wang Huan, et al. Survival, growth, and physiological responses of surfgrass transplants to different hydrodynamic regimes[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2022, 43(2): 21–31.

Distribution and ecological characteristics of seagrass bed of Mashanli sea area in Rongcheng

Deng Xiaofan¹, Zhang Hongyu¹, Wu Zhongxun², Li Wentao¹, Zhang Peidong¹

(1. Key Laboratory of Mariculture, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266003, China; 2. The Marine Ecological Civilization Comprehensive Experimental Area of Changdao, Yantai 265800, China)

Abstract: Seagrass bed is one of the three typical coastal ecosystems, which plays an important role in environmental improvement, resource conservation, and mitigation of environment degradation caused by natural disasters. It is also important as a global carbon stock. In August 2016, a field survey was conducted in the sea area of Mashanli of Rongcheng. A seagrass bed with an area of 58.26 hm² was found, consisting of *Phyllospadix iwatensis* and *Zostera caespitosa* meadows. The *P. iwatensis* meadow was composed of two belt regions south and north of the bed, occupying an area of 54.50 hm² and accounting for 93.5% of the seagrass bed. The *P. iwatensis* shoot density was (368.0±18.2) shoots/m² and the biomass was (297.0±41.5) g/m². While the *Z. caespitosa* generally formed dense patches within the *P. iwatensis* meadows, and occupied an area of 3.76 hm², accounting for 6.5% of the seagrass bed. The shoot density of *Z. caespitosa* was (691.2±17.1) shoots/m², and the biomass was (534.0±70.7) g/m². The water depth in the seagrass bed was (2.8±0.3) m, and the seabed was mainly rocky, with some sediments covering on the rocky beds. The growth of the seagrasses showed significant spatial variation, which was positively correlated with the water temperature, and negatively correlated with water depth and terrestrial pollutants. By comparing with historical data, it was found that the degradation of seagrass beds in Mashanli sea area was severe. Anthropogenic activities are the main causes of seagrass degradation, including fishing and aquaculture activities, as well as the pollution of land-based sources. Therefore, it is suggested that rationally planning the scale and density of aquaculture in surrounding area, strengthening the control of terrestrial pollutants, and carrying out ecological restoration projects of seagrass beds will promote the effective protection and scientific management of seagrass beds in temperate zone.

Key words: seagrass bed; seagrass species; distribution area; ecological characteristics; Mashanli sea area