



渤海近海典型海草床育幼功能评估体系构建及其空间差异分析

赵家悦, 杨薇, 白军红

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

Zhao Jiayue, Yang Wei, Bai Junhong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12284/hyxb2025064>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

荣成马山里海域海草床分布现状及其生态特征

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

海洋学报. 2022, 44(8): 97–109 <https://doi.org/10.12284/hyxb2022160>

海草床微生物研究进展

The research progress of microorganisms in seagrass meadows

海洋学报. 2021, 43(4): 1–13 <https://doi.org/10.12284/hyxb2021032>

20182019年舟山近海浮游动物群落结构春季年际变化及其与水团的关系

Spring interannual changes of zooplankton community structure and the influencing factors of water masses in the Zhoushan nearshore waters during 20182019

海洋学报. 2020, 42(6): 90–100 <https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-4193.2020.06.011>

基于放射性核素的沉积物源识别技术探索与优化

Exploring and optimizing characterization of radionuclide fingerprint for tracking sediment source: Comparison of mangrove, seagrass, and coral reef ecosystems

海洋学报. 2023, 45(12): 58–66 <https://doi.org/10.12284/hyxb2023175>

福建沿海全新世相对海平面变化: 地质记录与“冰川水均衡调整”模拟对比

Holocene relative sea-level change of Fujian coast, southeastern China: Geological records and comparison with glacio-hydro isostatic adjustment modelling

海洋学报. 2022, 44(9): 109–123 <https://doi.org/10.12284/hyxb2022065>

渤海3个河口区底栖硅藻群落的时空变化特征

Temporal and spatial variations of benthic diatom communities at three estuaries in the Bohai Sea

海洋学报. 2020, 42(8): 101–114 <https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-4193.2020.08.009>

关注微信公众号, 获得更多资讯信息

赵家悦, 杨薇, 白军红. 渤海近海典型海草床育幼功能评估体系构建及其空间差异分析[J]. 海洋学报, 2025, 47(5): 64–77, doi:10.12284/hyxb2025064

Zhao Jiayue, Yang Wei, Bai Junhong. Evaluation system establishment of nursery function for three seagrass beds and their spatial differences in the nearshore Bohai Sea[J]. Haiyang Xuebao, 2025, 47(5): 64–77, doi:10.12284/hyxb2025064

渤海近海典型海草床育幼功能评估体系构建 及其空间差异分析

赵家悦, 杨薇*, 白军红

(北京师范大学 环境学院, 湿地环境保护与生态修复全国重点实验室, 北京 100875)

摘要: 以渤海区域曹妃甸、黄河口、觉华岛等 3 个典型海草床为案例区, 通过实地调研、物种鉴定及数据收集, 获取了海草生长状况、水体和沉积物环境质量及浮游生物、底栖生物、幼鱼种类和生物量等多项第一手资料, 从水环境、沉积环境、生物环境等生境角度构建了近海海草床育幼功能综合评估指标体系, 并对渤海近海各典型海草床进行了系统评估。结果显示曹妃甸与觉华岛海草生物量分别为 371.22 g/m^2 和 340.05 g/m^2 , 均显著高于黄河口海草生物量 (161.24 g/m^2 , $p < 0.05$); 各海草床的浮游植物丰度和生物量平均值均为黄河口 > 曹妃甸 > 觉华岛, 且空间差异显著 ($p < 0.05$); 而各海草床幼鱼和稚鱼密度则是觉华岛最高, 黄河口次之, 曹妃甸最低, 具有显著空间差异 ($p < 0.05$)。对海草床育幼功能综合评估的结果中, 觉华岛海草床为良好, 略优于曹妃甸海草床 (良好状态), 优于黄河口海草床 (一般状态)。进一步分析典型海草床育幼功能现状的主要驱动因素, 结果表明不同海草床中贡献较大的环境与生物指标呈现出空间差异。觉华岛海草床环境和生物状态良好, 水体透明度高、溶解氧丰富、无机氮质量浓度适中, 且幼鱼群落的各指标均表现较好, 在育幼功能方面贡献显著。相比之下, 黄河口海草床的水环境和生物状态相对较差, 该区域水体透明度低、pH 值和无机氮浓度过高, 同时生物指标中浮游植物多样性特征表现差、幼鱼占比偏低, 这些因素成为其育幼功能评估结果仅为一般的主要消极因素。曹妃甸海草床的环境状态良好, 温度、无机氮和无机磷质量浓度等因素贡献较大。然而, 其生物状态一般, 浮游动物和幼鱼数量较低是该区域育幼功能评估的主要消极因素。本研究有助于深刻理解和认识渤海区域典型海草床的育幼功能时空差异和驱动因素, 为促进我国海草床生态系统保护与海洋渔业资源可持续发展提供有效的科学依据和数据支撑。

关键词: 海草床; 育幼功能; 评估指标体系; 空间差异; 渤海近海水域

中图分类号: Q178.531

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2025)05-0064-14

1 引言

海草是广泛分布在海水界面以下的海洋被子植物, 通常生长在浅海和河口水域, 大面积的连片海草被称为海草床。作为浅海的众多鱼类和无脊椎动物

重要的产卵和育幼场所, 海草床可以为生物幼体提供优质、适宜的食物, 促进生物幼体的发育和提高生长率, 还能作为遮蔽场所帮助生物幼体躲避天敌的追杀^[1-2]。近年来, 受自然环境变迁和人类活动的影响, 我国海草床呈现出明显的萎缩趋势, 海草的物种多样

收稿日期: 2024-10-29; 修订日期: 2025-02-28。

基金项目: 国家自然科学基金委联合基金重点项目(U2344229)。

作者简介: 赵家悦(2001—), 女, 河北省廊坊市人, 主要从事海洋生态环境科学研究。E-mail: 202221180102@mail.bnu.edu.cn

* 通信作者: 杨薇, 教授, 博士生导师, 主要从事湿地环境生态学。E-mail: yangwei@bnu.edu.cn

性明显下降^[3]。海草床面积减小和海草物种多样性降低会在不同层次影响其育幼功能的正常发挥,例如适宜生境被破坏导致幼体存活率降低,食物来源减少。因此,科学评估环境影响下的海草床育幼功能水平,对于加强对海草床育幼功能的理解,保护近海渔业资源具有重要意义。

近年对于海草床生态系统功能的研究主要集中在生态系统服务功能评估^[4-5]和碳储量评估^[6],对育幼功能的评估相对较少。刘松林等^[1]从食源和捕食压力两个方面探讨海草床育幼功能机理,认为可以从生物幼体的密度、生长率、存活率等不同方面来进行分析。关于海草床育幼功能现状评估,则大多从生物幼体的密度或丰度开展评估^[7],对海草床的环境状态、其他生物群落的影响及其综合效应等方面的考虑较少。海草作为生态系统中的初级生产者,可通过自下而上的作用对食物网结构产生影响,而各个营养级与生态系统的功能发挥存在复杂的互馈机制^[8],因此海草床育幼功能的发挥往往同时受到生物和非生物作用影响^[9-10],其中牧食压力、生境复杂度不可忽视。本文综合考虑生境复杂度、食物来源、生物幼体生长特征以及被捕食压力多方面特征,探究多重因素影响下渤海海域主要海草床育幼功能现状及空间

差异。

本文以渤海区域曹妃甸、黄河口、觉华岛这3个典型海草床为案例区,探究水域环境、沉积环境、浮游生物、底栖生物等食物来源、生物幼体特征以及成鱼捕食压力对海草床育幼功能的影响程度。针对这一科学假设,本文采用实地调研、物种鉴定及数据收集等,筛选出渤海典型海草床的育幼功能指标,构建海草床育幼功能评估指标体系,揭示了渤海典型海草床育幼功能季节变化与空间差异,探究导致育幼功能空间差异的驱动因素,并提出海草床育幼功能提升策略,以期有利于完善与发展国内对海草床育幼功能的研究,为海草床的保护与修复提供科学依据。

2 方法与材料

2.1 研究区概况

本研究选择3个面积较大、保存较为完整的渤海典型海草栖息地作为研究区(图1),分别是河北唐山市曹妃甸海草床(39°00'~39°05'N, 118°41'~118°44'E)面积为90.26 km²,是中国现存面积最大的海草床;山东东营市黄河口海草床(37°50'~37°51'N, 119°06'~119°07'E)面积为18.35 km²;辽宁兴城市觉华岛海草床(40°30'~40°32'N, 120°45'~120°46'E)面积为7.92 km²,

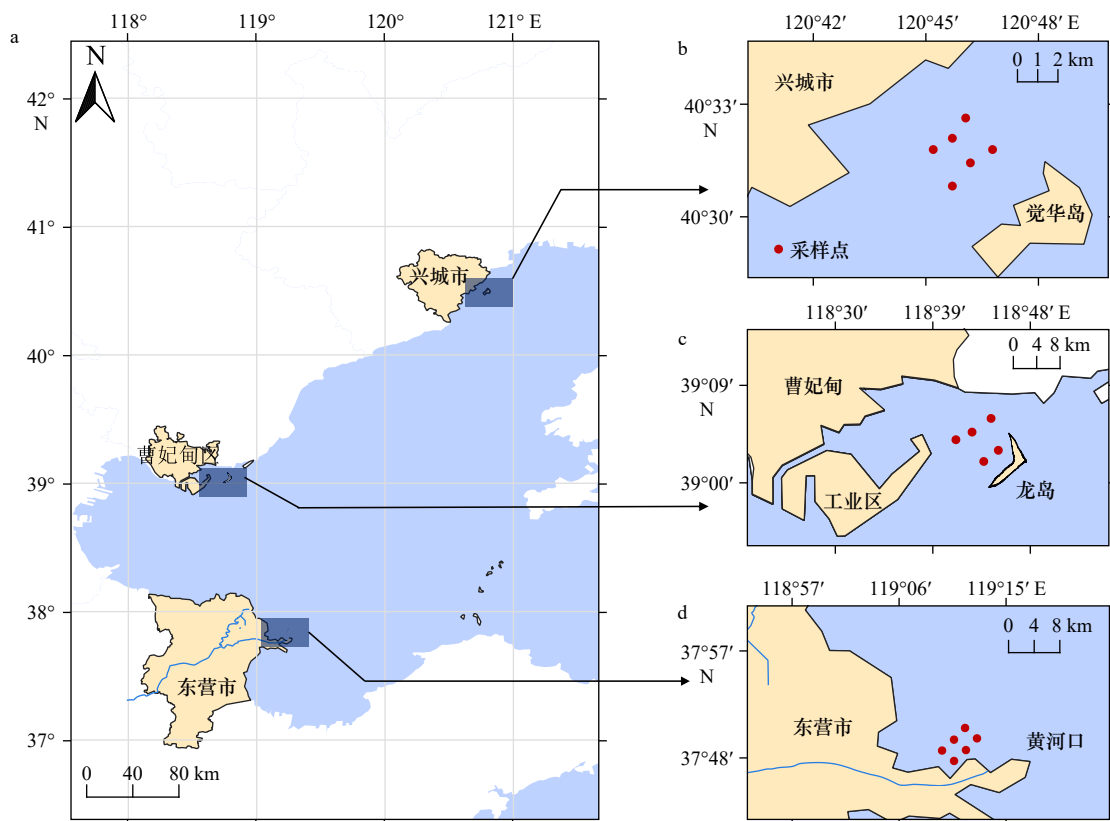


图1 渤海各典型海草床及采样点位置

Fig. 1 Locations of typical seagrass beds and sampling sites in the Bohai Sea

3 个研究区海草床面积约占整个渤海海草床总面积 (138.29 km²) 的 84.26%, 基本能够反映渤海区域海草床的功能状态。

2.2 育幼功能综合评估指标组成

综合考虑海草床非生物和生物因素, 从水体质量、沉积物状态和主要生物等不同方面, 筛选确定了

水与沉积环境、生物类群 2 类, 共 31 个指标, 构建了海草床育幼功能评估指标体系。其中, 水与沉积环境指标反映了海草床的水文、水质、沉积环境状态; 生物指标则通过关键生物类群的生物量、密度和多样性等来体现海草床为幼鱼提供庇护场所和食物来源的能力, 详细指标如图 2 所示。

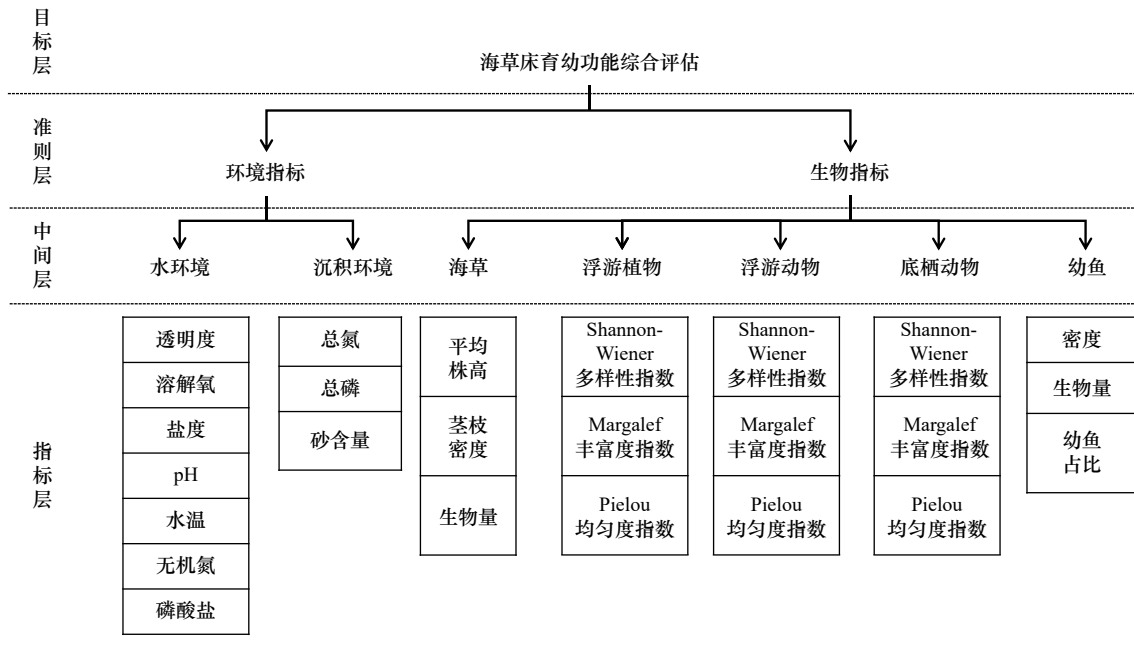


图 2 海草床育幼功能综合指标体系

Fig. 2 Comprehensive indicator system for evaluating the nursery function of seagrass beds

2.2.1 水环境与沉积环境指标

海草床水环境指标包括反映水体理化性质的透明度、盐度、水温、pH、溶解氧及表征水体中营养物质质量浓度的无机氮和磷酸盐; 沉积环境指标则包括沉积物中的总氮、总磷质量分数和砂含量。

水体理化性质指标中, 透明度会通过改变光合作用强度来影响海草生长, 进而影响海草床育幼功能^[11]。溶解氧含量则直接影响海草床内幼鱼以及其他生物的生存和生长^[12]。盐度、pH 和水温由于季节及空间差异, 变化幅度较大, 生物对这些指标的适应程度也较广, 但如果其变化超过生物的最适温度范围, 就会对海草的生理生化过程以及幼鱼的生长产生消极影响。

水体营养物质指标中, 氮、磷作为主要营养限制因子会影响初级生产者海草和浮游植物的生长, 当含量适中时, 海草可通过吸收无机氮和磷酸盐维持自身的新陈代谢^[13]。但较高无机氮质量浓度会对海草产生毒性, 引起海草床的衰退。而磷酸盐质量浓度过高则会导致藻类爆发性增长, 降低水中溶解氧质量浓度和透明度, 影响海草生长及其他海洋生物生存。

沉积物指标中, 沉积物中总氮和总磷是海草生长

的主要营养来源, 而营养盐质量浓度过高时, 底质对海草的生长会产生胁迫和抑制作用^[14]。砂含量反映出沉积物中平均粒径大小, 一般来说, 底质越细腻, 海草(如鳗草)越能够通过其在底质中延伸的地下茎迅速拓展生长范围, 成为海草床优势物种^[15]。

2.2.2 生物指标

生物指标方面则选择了 5 个能够影响和反映生物幼体食物来源、被捕食风险、数量特征的主要生物群落及其指标来评估海草床的育幼功能, 包括海草的生物量、茎枝密度和平均株高, 浮游植物和浮游动物的生物量、丰度和多样性特征 (Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数), 底栖动物的生物量、密度、多样性特征, 幼鱼的生物量、密度以及幼鱼数量占比。

海草床作为近海生态系统中重要的育幼场所, 相比于其他生境, 海草床内普遍拥有较高的幼鱼密度和生物量。这一特性也意味着, 在海草床中, 幼鱼的数量往往占据鱼类总个体数的较大比例。当幼鱼的数量相对较高时, 其主要捕食者——肉食性成鱼的比例相对较低, 幼鱼面临的捕食压力会降低。这种低捕食

风险环境直接提高了幼鱼存活率,促进了它们的生长。海草作为海草床生态系统的主要初级生产者,不仅能够通过光合作用为其他海洋生物提供食物和溶解氧,还通过枝、茎、叶营造的复杂的生境结构为幼鱼提供庇护所来躲避天敌的威胁,提高幼鱼存活率。浮游植物作为海草床另一大初级生产者,对育幼功能的影响不仅体现在直接作为许多幼鱼的食物,还通过作为幼鱼主要摄食对象的无脊椎生物的食物,间接为幼鱼提供食物来源。然而,浮游植物多少也能反映水体富营养化程度,浮游植物丰度和生物量过高、多样性过低都会造成水体透明度下降以及溶解氧含量降低,直接影响幼鱼以及其他生物的生存和生长。浮游动物和底栖动物作为大部分幼鱼的主要开口饵料,其丰度和生物量越高,幼鱼的食物越充足,生长率越高。不仅如此,丰富的浮游动物和底栖动物种类不仅能够反映出幼鱼食物的丰富,还能在一定程度上反映出海草床整体的生产力和稳定性^[16]。本文采用 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数 3 个指标来全面反映浮游动物和底栖动物群落多样性特征,从而更加全面地评估海草床的育幼功能现状。

2.2.3 海草床育幼功能综合指数计算

海草床育幼功能评估指标体系包含一个目标层、两个准则层和多个中间层(图 2)。利用综合指数法进行海草床育幼功能综合评估^[17],各指标层指数由 IC_{ij} 表示,计算公式如下:

$$IC_{ij} = \sum_{i=1}^n w_{ij} \times I_{ij}, \quad (1)$$

式中: n 为各中间层指标个数; IC_{ij} 为第 j 中间层第 i 个指标的评分; I_{ij} 为第 j 中间层第 i 个指标的归一化值; w_{ij} 为第 j 中间层第 i 个指标的权重。

各中间层指标评分由 IC_j 表示, s 为中间层数量,计算公式如下:

$$IC_j = \sum_{i=1}^s IC_{ij}. \quad (2)$$

准则层环境与生物综合评估结果由 IC_E 和 IC_B 来表示,综合指数由 NFI 表示,计算公式如下:

$$IC_E = \sum_{i=1}^2 w_j \times IC_j, \quad (3)$$

$$IC_B = \sum_{j=1}^5 w_j \times IC_j, \quad (4)$$

$$NFI = w_E \times IC_E + w_B \times IC_B, \quad (5)$$

式中: w_j 为第 j 个中间层指标权重,计算 IC_E 时 $j = 1$,

2, 分别对应水环境和沉积环境指数;计算 IC_B 时, j 取 1~5, 分别对应海草、浮游植物、浮游动物、底栖动物、幼鱼指数。 w_E 和 w_B 分别为环境和生物准则层指标权重。上述指数 IC_{ij} 、 IC_j 、 IC_E 、 IC_B 和 NFI 介于 [0, 1] 之间, 分别为优 [0.8, 1.0]、良好 [0.6, 0.8]、一般 [0.4, 0.6]、差 [0.2, 0.4] 和极差 [0, 0.2]。

2.3 育幼功能综合评估权重与评估方法

2.3.1 评级指标归一化处理

由于各项评估指标类型复杂,指标之间量纲不一致,缺乏直接可比性。为了便于比较和计算,参考最新的国家标准和其他研究成果^[13-15, 18],按照指标的实际数值,将各指标分为 5 级,标准化后的分值设定为 0~1 之间,每项指标评估标准见表 1。

2.3.2 评估指标权重确定

采用重要性赋权的方法分析海草床育幼功能评估体系中的不同准则层、中间层下的评估指标对海草床育幼功能的影响。本文采用层次分析法构建各层指标的相对重要性判断矩阵。具体操作为:邀请海草床生态系统领域拥有丰富学术背景的专家,根据 1~9 级标度法,对两两指标的相对重要性进行评判;进而利用 YAAHP 10.3 软件进行了指标权重的构建与计算;判断矩阵(CR)的一致性被用于评估方法的可靠性。本文所有判断矩阵 CR 均小于 0.1,具有一致性,最终确定了各个层次指标的权重(表 2)。

2.3.3 评估指数等级划分

最终得到的研究区海草床育幼功能评估体系的 IC_E 、 IC_B 和 NFI,按照标准化的处理方式将这 3 个指数划分为 5 级,分别为优 [0.8, 1.0]、良好 [0.6, 0.8]、一般 [0.4, 0.6]、差 [0.2, 0.4]、极差 [0, 0.2]。

2.4 数据收集与处理

本研究分别在 2019 年 6~9 月在黄河口,2020 年 10 月、2021 年 5 月和 8 月在觉华岛,2023 年 10 月和 2024 年 3 月在曹妃甸按相关采样规范(GB 17378—2007、HJ 442—2008 和 HY/T 083—2005)以及海草床分布情况分别均匀随机布设 6、6、5 个调查站位,如图 1 所示。并且在采样点进行水质监测,水样、沉积物、生物样品采集以及地笼网布设,采集水环境、沉积环境样品以及海草、浮游植物、浮游动物、底栖动物、鱼类样品,每个站位采集 3 组平行样品。

水体和沉积物环境调查:在采样现场使用测深仪、塞式盘、便携式水质仪(YSI Professional Pro, 美国)对水体透明度、盐度、水温、pH、溶解氧进行测定,并且采集表层海水水样,带回实验室进行无机氮和磷酸盐指标的测定。无机氮、磷酸盐质量浓度和砂含量测量参照最新国家标准(GB 17378.4—2007 和 GB/T

表 1 指标评分标准
Table 1 Scoring criteria for evaluation indicators

类型	指标	单位	指标水平(标准化范围)				
			优[0.8, 1.0]	良好[0.6, 0.8)	一般[0.4, 0.6)	差[0.2, 0.4)	极差[0, 0.2)
水环境	透明度	cm	≥150	100~150	50~100	25~50	<25
	溶解氧	mg/L	≥10	9~10	8~9	7~8	<7
	盐度	PSU	≤30	>30			
	pH	无量纲	7.8~8.5	6.8~7.8	<6.8		
	水温	℃	20~25	15~20	<15	>25	
	无机氮	mg/L	≤0.2	0.2~0.4	0.4~0.8	0.8~1	>1
	磷酸盐	μg/L	≤15	15~30	30~45	45~60	>60
沉积环境	总氮	mg/g	≤0.3	0.3~0.4	0.4~0.5	0.5~0.6	>0.6
	总磷	mg/g	≤0.2	0.2~0.4	0.4~0.5	0.5~0.6	>0.6
	砂含量	%	≤75	75~80	80~85	85~90	>90
海草	茎枝密度	ind./m ²	≥300	200~300	100~200	50~100	<50
	生物量	shoots/m ²	≥500	300~500	200~300	100~200	<100
	平均株高	cm	≥40	30~40	20~30	10~20	<10
浮游植物	Shannon-Wiener多样性指数	无量纲	≥2	1.5~2	1~1.5	0.5~1	<0.5
	Margalef 丰富度指数	无量纲	≥2	1~2	0.5~1	0.1~0.5	<0.1
	Pielou 均匀度指数	无量纲	≥0.9	0.8~0.9	0.6~0.8	0.5~0.6	<0.5
	丰度	10 ³ cells/L	≤3 000	3 000~10 000	10 000~30 000	30 000~60 000	>60 000
	生物量	mg/L	≤0.5	0.5~1	1~3	3~5	>5
浮游动物	Shannon-Wiener多样性指数	无量纲	≥1.5	1~1.5	0.5~1	0.1~0.5	<0.1
	Margalef 丰富度指数	无量纲	≥2	1~2	0.5~1	0.1~0.5	<0.1
	Pielou 均匀度指数	无量纲	≥0.8	0.7~0.8	0.6~0.7	0.5~0.6	<0.5
	丰度	ind./L	≥80	40~80	20~40	10~20	<10
	生物量	mg/L	≥1.5	1~1.5	0.5~1	0.25~0.5	<0.25
底栖动物	Shannon-Wiener多样性指数	无量纲	≥1.5	1~1.5	0.5~1	0.1~0.5	<0.1
	Margalef 丰富度指数	无量纲	≥2	1~2	0.5~1	0.1~0.5	<0.1
	Pielou 均匀度指数	无量纲	≥0.8	0.7~0.8	0.6~0.7	0.5~0.6	<0.5
	密度	ind./m ²	≥400	300~400	200~300	100~200	<100
	生物量	g/m ²	≥40	25~40	10~25	5~10	<5
幼鱼	密度	kg/km ²	≥4 000	1 500~4 000	500~1 500	250~500	<250
	生物量	ind./km ²	≥20	15~20	10~15	5~10	<5
	幼鱼数量占比	%	≥0.4	0.3~0.4	0.2~0.3	0.1~0.2	<0.1

12763.8—2007)。

生物群落调查:海草、浮游生物、底栖动物样品按照相关采样规范(HY/T 083—2005)采集,渔业生物采用地笼网进行采样。地笼网规格为总网长 8 m;网框

尺寸为(网宽×网高)30 cm×25 cm;网目长度为 10 mm。每个样点设置 3 个地笼网,从第一日 8 点放置到第三日 8 点,共放置 48 h 后将所有渔业生物带回实验室,记录物种种类、个数、体重、体长等,并计算生物量和密度。

表2 各层指标权重和类型
Table 2 Weights and types of hierarchical indicators in the comprehensive evaluation system

准则层	权重	中间层	权重	指标层	权重		
环境指标	0.370 0	水环境	0.800 0	透明度	0.203 9		
				溶解氧	0.166 8		
				盐度	0.070 1		
				pH	0.048 7		
				水温	0.168 2		
				无机碳	0.172 7		
				磷酸盐	0.172 7		
				沉积环境	0.200 0	总氮	0.333 3
				总磷	0.333 3		
				砂含量	0.333 3		
		生物指标	0.630 0	海草	0.166 7	茎枝密度	0.333 3
						生物量	0.333 3
						平均株高	0.333 3
				浮游植物	0.166 7	Shannon-Wiener多样性指数	0.142 9
Margalef丰富度指数	0.142 9						
Pielou均匀度指数	0.142 9						
丰度	0.285 7						
生物量	0.285 7						
浮游动物	0.166 7			Shannon-Wiener多样性指数	0.142 9		
				Margalef丰富度指数	0.142 9		
				Pielou均匀度指数	0.142 9		
				丰度	0.285 7		
				生物量	0.285 7		
底栖动物	0.166 7			Shannon-Wiener多样性指数	0.142 9		
				Margalef丰富度指数	0.142 9		
				Pielou均匀度指数	0.142 9		
				密度	0.285 7		
				生物量	0.285 7		
幼鱼	0.333 3	密度	0.333 3				
		生物量	0.333 3				
		幼鱼数量占比	0.333 3				

本研究根据现场采集与文献调研得到的渤海各典型海草床的鱼类优势种以及各鱼类丰度、密度数据, 选定鰕虎鱼科的矛尾刺鰕虎鱼 (*Acanthogobius hasti*) 和矛尾复鰕虎鱼 (*Synechogobius hasta*) 的幼鱼为

海草床鱼类幼体的代表生物, 根据 FishBase 统计的最小性成熟体长区分幼鱼和成鱼, 确定矛尾刺鰕虎鱼体长小于 7 cm、矛尾复鰕虎鱼体长小于 14 cm 为幼鱼, 其余为成鱼。

地笼网中鱼类生物量的计算公式为

$$B = \frac{C \times d}{v \times t \times a \times q}, \quad (6)$$

地笼网中鱼类密度的计算公式为

$$D = \frac{S \times d}{v \times t \times a \times q}, \quad (7)$$

式中: B 为渔业生物生物量 (g/m^2); D 为渔业生物密度 ($\text{个}/\text{m}^2$); S 为某种渔业生物总个数 (个); v 为海流平均流速 (m/h); d 为平均水深 (m); t 为地笼网放置时间 (h); a 为网具进口面积 (m^2); q 为捕捞效率, 取值范围为 $0.3 \sim 0.7$ [19]。

多样性指标计算: 选用 Shannon-Wiener 多样性指数 H' [20]、Margalef 丰富度指数 D [21] 和 Pielou 均匀度指数 J [22] 评估渤海海域典型海草床不同生物群落多样性、种类丰富程度和个体分配均匀性。

$$H' = - \sum_{i=1}^s P_i \times \ln P_i, \quad (8)$$

$$D = \frac{S-1}{\ln N}, \quad (9)$$

$$J = \frac{H'}{\ln S}, \quad (10)$$

式中: P_i 为某典型生物群落中第 i 种生物占总生物个体数比例; S 为典型生物群落物种数; N 为典型生物群落个体数之和。

开展数据分析时, 首先使用 Shapiro-Wilk 检验 (S-W 检验) 来判断环境和生物数据是否符合正态分布 ($p > 0.05$)。若数据符合正态分布, 采用单因素方差分析 (One way ANOVA) 来评估各组数据是否存在显著差异 ($p < 0.05$), 并利用 LSD 法 (方差齐性时) 或 Tamhane T2 法 (方差不齐性时) 进行事后多重检验, 判定各组数据间的差异显著性。若数据符合不正态分布, 使用 Kruskal-Wallis H 检验来评估各组数据是否存在显著差异 ($p < 0.05$)。最终通过字母标记法进行差异标记。上述分析均在 SPSS 27.0 版本上进行。

3 结果

3.1 海草床水环境及沉积环境的空间差异

渤海近海觉华岛、黄河口、曹妃甸海草床的水环境与沉积环境见表 3。通过单因素方差分析发现大部分环境因子在 3 个区域间呈现显著的空间差异。其中, 黄河口海草床透明度平均为 32.95 cm, 显著低于觉华岛 (131.00 cm) 和曹妃甸 (104.25 cm, $p < 0.05$)。

各区域水体 pH 整体偏碱性, 曹妃甸海草床中最高, 为 8.54, 其次为黄河口海草床(8.04)和觉华岛海草床(7.39, $p < 0.05$)。3 个区域溶解氧质量浓度均较高, 其中黄河口为 9.14 mg/L, 觉华岛海草床为 9.01 mg/L, 曹妃甸海草床为 8.74 mg/L。从水环境中的营养盐指标上看, 黄河口的无机氮质量浓度最高(1.12 mg/L), 远超

过 IV 类水质标准(0.5 mg/L), 其次为曹妃甸(0.13 mg/L)和觉华岛(0.08 mg/L); 3 个海草床间无机氮质量浓度差异较为显著($p < 0.05$)。而水环境中磷酸盐质量浓度则呈现出相反的趋势, 即黄河口海草床水中磷酸盐质量浓度最低为 4.60 $\mu\text{g/L}$, 曹妃甸海草床为 12.13 $\mu\text{g/L}$, 觉华岛海草床为 23.74 $\mu\text{g/L}$ ($p < 0.05$)。

表 3 海草床环境因子空间差异

Table 3 Spatial differences in environmental factors among seagrass beds

类别	指标名称	单位	觉华岛	黄河口	曹妃甸
水环境	透明度	cm	131.00 \pm 10.55 ^a	32.95 \pm 0.35 ^b	104.25 \pm 14.27 ^a
	溶解氧	mg/L	9.01 \pm 0.35 ^b	9.14 \pm 0.10 ^a	8.74 \pm 0.30 ^b
	盐度	PSU	30.82 \pm 0.46 ^a	33.10 \pm 0.63 ^a	32.93 \pm 0.59 ^a
	pH	无量纲	7.39 \pm 0.08 ^c	8.04 \pm 0.05 ^b	8.54 \pm 0.04 ^a
	水温	°C	18.07 \pm 1.44 ^b	22.71 \pm 0.16 ^a	17.89 \pm 1.03 ^b
	无机氮	mg/L	0.08 \pm 0.01 ^c	1.12 \pm 0.02 ^a	0.13 \pm 0.00 ^b
	磷酸盐	$\mu\text{g/L}$	23.74 \pm 2.03 ^a	4.60 \pm 0.00 ^c	12.13 \pm 1.60 ^b
	沉积环境	总氮	mg/g	0.38 \pm 0.01 ^b	0.40 \pm 0.00 ^b
总磷		mg/g	0.14 \pm 0.00 ^b	0.10 \pm 0.00 ^c	0.49 \pm 0.00 ^a
砂含量		%	87.19 \pm 1.08 ^a	86.60 \pm 0.17 ^b	81.88 \pm 2.92 ^b

注: 表中数据为平均值 \pm 标准误; 上角不同字母(a, b, c)表示差异显著($p < 0.05$)。

在海草床的沉积环境指标中, 曹妃甸海草床的总氮质量浓度(0.68 mg/L)要显著高于黄河口海草床(0.40 mg/L)和觉华岛海草床(0.38 mg/L, $p < 0.05$)。类似地, 曹妃甸海草床沉积物中总磷质量浓度最高, 为 0.49 mg/L, 显著高于其他两个区域($p < 0.05$)。觉华岛海草床的平均含砂量最高, 为 87.19%, 显著高于其他两个区域($p < 0.05$)。

3.2 海草床典型生物群落空间差异

3.2.1 海草种类与生物学特征

根据调查结果, 觉华岛海草种类为鳗草和日本鳗草, 以鳗草为优势种, 日本鳗草数量较少; 黄河口仅调

查到日本鳗草; 曹妃甸仅调查到的海草种类为鳗草。各海草床海草的生物学特征如图 3。海草的生物量在 78.60~686.44 g/m^2 之间, 其中, 觉华岛和曹妃甸海草生物量相近, 分别为 340.05 g/m^2 和 371.22 g/m^2 , 无显著的空间差异性($p > 0.05$); 而黄河口海草生物量平均为 161.24 g/m^2 , 显著低于其他两个区域($p < 0.05$)。海草茎枝密度在 83.28~349.43 shoot/ m^2 之间, 其中觉华岛、黄河口和曹妃甸海草茎枝密度平均值分别为 209.07 shoot/ m^2 、169.62 shoot/ m^2 和 182.45 shoot/ m^2 。海草平均株高在 21.00~54.20 cm 之间, 觉华岛、黄河口、曹妃甸海草株高依次为 32.34 cm、28.24 cm 和

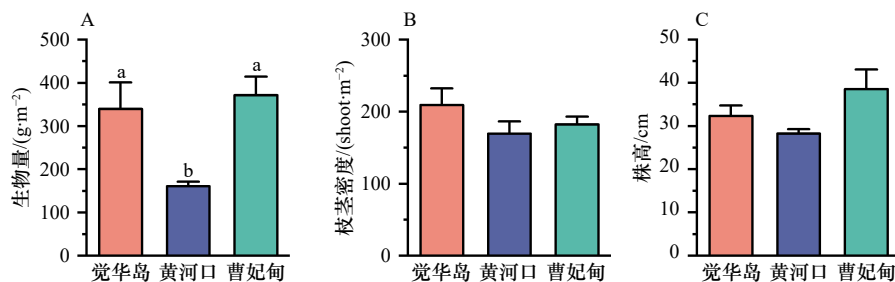


图 3 3 个区域海草床海草生物学特征空间差异

Fig. 3 Spatial differences in biological characteristics of *Zostera marina* among seagrass beds

误差线上的不同小写字母表示海草生物学特征在不同海草床之间存在显著差异($p < 0.05$)

Different lowercase letters above error bars indicate significant differences in biological characteristics of *Zostera marina* among seagrass beds ($p < 0.05$)

38.54 cm。各区域海草的茎枝密度和株高之间并未呈现出显著的空间差异性($p > 0.05$)。

3.2.2 其他典型生物群落丰度与生物量

进一步对其他生物群落指标的丰度(或密度)及生物量进行了计算,并分析了各区域海草床中生物群落的空间差异性特征,结果如图4和图5所示。浮游植物丰度平均值由高到低分别是黄河口(82.49×10^3 cells/L)、曹妃甸(59.97×10^3 cells/L)、觉华岛($11.70 \times$

10^3 cells/L)。浮游植物生物量也呈现相似的趋势,各区域生物量平均值依次为黄河口(2.09 mg/L)、曹妃甸(0.95 mg/L),觉华岛(0.09 mg/L),且3个区域间浮游植物的丰度和生物量均具有显著性差异($p < 0.05$)。浮游动物丰度平均值由高到低分别为觉华岛(62.58 ind./L)、黄河口(29.48 ind./L)和曹妃甸(9.61 ind./L)。生物量与丰度趋势有差异,分别为觉华岛(1.35 mg/L),黄河口(0.44 mg/L)和曹妃甸(0.61 mg/L)。3个海草床的

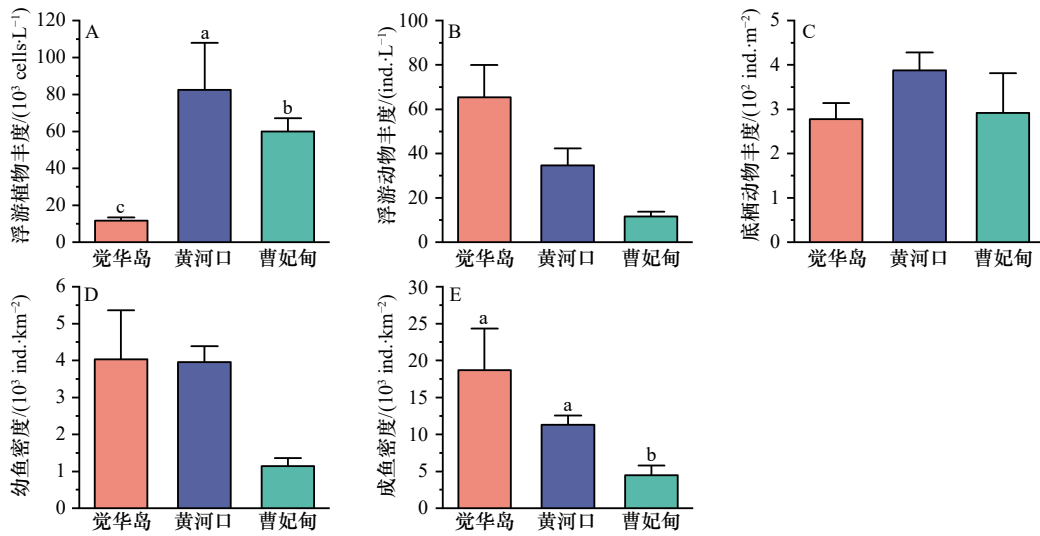


图4 各海草床典型生物群落丰度/密度的空间差异

Fig. 4 Spatial differences in abundance/density of typical biological communities among seagrass beds

误差线上的不同小写字母表示典型生物群落丰度/密度在不同海草床之间存在显著差异($p < 0.05$)

Different lowercase letters above error bars indicate significant differences in abundance/density of typical biological communities among seagrass beds ($p < 0.05$)

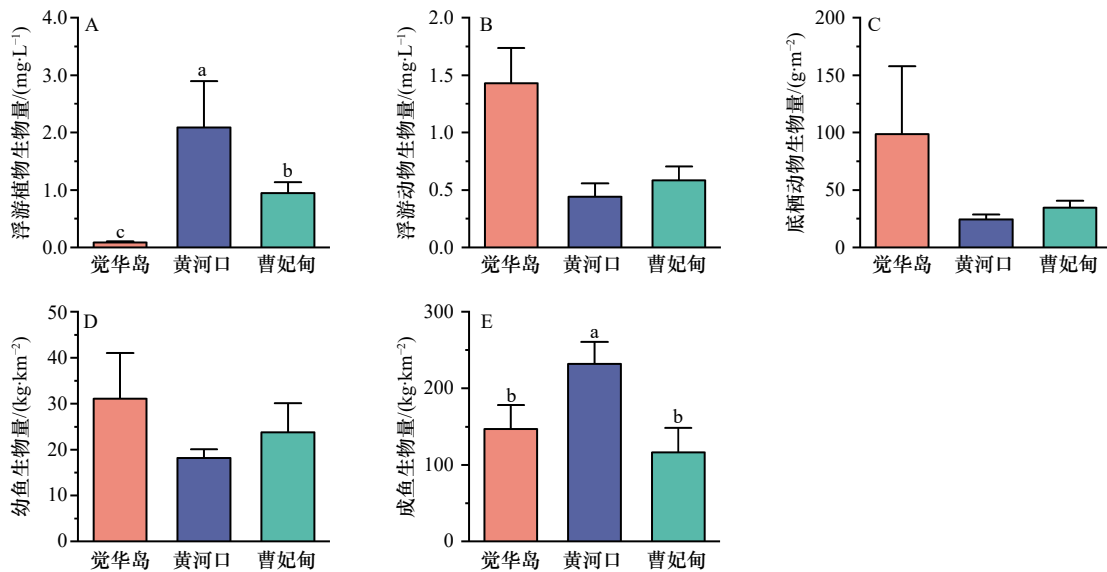


图5 各海草床典型生物群落生物量的空间差异

Fig. 5 Spatial differences in biomass of typical biological communities among seagrass beds

误差线上的不同小写字母表示典型生物群落生物量在不同海草床之间存在显著差异($p < 0.05$)

Different lowercase letters above error bars indicate significant differences in biomass of typical

biological communities among seagrass beds ($p < 0.05$)

浮游动物丰度和生物量并没有呈现出显著的统计学差异($p > 0.05$)。

黄河口底栖动物密度最高(387.56 ind./m^2), 曹妃甸的底栖动物密度(291.40 ind./m^2)次之, 觉华岛的底栖动物密度最低(277.45 ind./m^2)。底栖动物生物量则是觉华岛最高(98.60 g/m^2), 曹妃甸次之(34.61 g/m^2), 黄河口的底栖动物生物量(24.39 g/m^2)最低, 3个区域间没有显著性差异($p > 0.05$)。

觉华岛幼/稚鱼密度最高($4.03 \times 10^3 \text{ ind./m}^2$), 黄河口次之($3.96 \times 10^3 \text{ ind./m}^2$), 曹妃甸幼/稚鱼密度最低($1.14 \times 10^3 \text{ ind./m}^2$)。对于幼/稚鱼生物量, 表现为觉华岛幼/稚鱼生物量最高(31.10 kg/km^2), 黄河口(16.02 kg/km^2)和曹妃甸(18.16 kg/km^2)次之。觉华岛的成鱼

密度最高为($18.67 \times 10^3 \text{ ind./m}^2$), 黄河口次之($11.30 \times 10^3 \text{ ind./m}^2$), 曹妃甸的成鱼密度($4.50 \times 10^3 \text{ ind./m}^2$), 显著低于其他两个区域($p < 0.05$)。黄河口成鱼生物量(231.88 kg/km^2)最高, 显著高于其他两个区域($p < 0.05$), 觉华岛次之(146.80 kg/km^2), 曹妃甸最低(116.55 kg/km^2)最低。

3.2.3 典型生物群落生物多样性特征

浮游植物的 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数和 Pielou 均匀度指数分别在 0.13~2.43、0.10~3.05、0.23~1.00 之间(如图 6 所示)。曹妃甸海草床 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数均显著高于其他两个区域($p < 0.05$), Pielou 均匀度指数与其他两个区域相似。

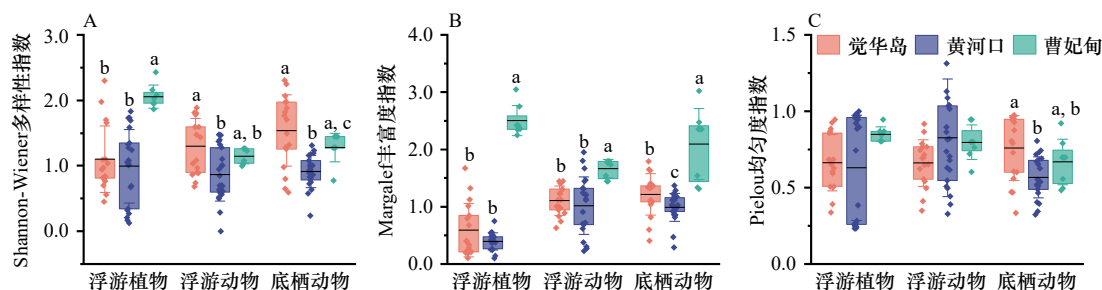


图 6 各海草床典型生物群落多样性特征的空间差异

Fig. 6 Spatial differences in biodiversity of typical biological communities among seagrass beds

误差线上的不同小写字母表示典型生物群落多样性特征在不同海草床之间存在显著差异($p < 0.05$)

Different lowercase letters above error bars indicate significant differences in biodiversity of typical biological communities among seagrass beds ($p < 0.05$)

浮游动物 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数和 Pielou 均匀度指数分别在 0.00~1.89、0.23~1.95、0.33~2.08 范围之间。其中, 黄河口海草床的浮游动物多样性指数均在所有区域处于较低水平, 且 Shannon-Wiener 多样性指数显著低于觉华岛区域($p < 0.05$), Margalef 丰富度指数显著低于曹妃甸海草床($p < 0.05$)。曹妃甸 Margalef 丰富度指数要显著高于其它两个区域($p < 0.05$)。

底栖动物 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数和 Pielou 均匀度指数范围分别为 0.24~2.31、0.29~3.02、0.32~0.98, 3个指标均表现出了显著性空间差异($p < 0.05$)。其中黄河口海草床底栖动物多样性指数整体较低。觉华岛底栖动物 Shannon-Wiener 多样性指数与 Pielou 均匀度指数均略高于曹妃甸; 而 Margalef 丰富度指数要显著低于曹妃甸区域($p < 0.05$)。

3.3 海草床育幼功能评估结果

3.3.1 影响育幼功能的环境指标评估

对 3 个海草床的水环境和沉积环境进行综合评估, 获得了综合环境指标评估结果, 如图 7 所示。可

以看出曹妃甸(良好)~觉华岛(良好)>黄河口(一般)。从水环境指标上看, 与综合环境指标具有趋势上的一致性, 即黄河口水环境状态最差(一般), 显著低于觉华岛(良好)和曹妃甸(良好)水平。从沉积环境状态来看, 觉华岛(良好)>黄河口(良好)>曹妃甸(一般), 且曹妃甸平均沉积环境指标远低于其他两个区域。

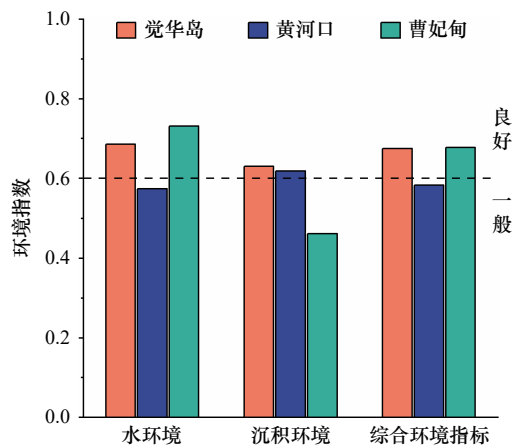


图 7 海草床环境指标评估

Fig. 7 Assessment results of environmental indicators among seagrass beds

3.3.2 影响育幼功能的生物指标评估

对3个海草床的生物指标综合评估可得:觉华岛(良好)>曹妃甸(一般)>黄河口(一般),如图8所示。其中,黄河口海草床除底栖动物外,其余生物群落指数均低于0.6,评估结果为“一般”。觉华岛的海草、浮游植物、浮游动物、底栖动物的指数均大于0.6,评估结果为“良好”。曹妃甸各生物指标均较差,浮游动物指数范围为0.33~0.61(均值0.46);幼鱼指数范围为0.27~0.71(均值0.51),使得曹妃甸海草床的生物指标处于略低于0.6的一般水平。

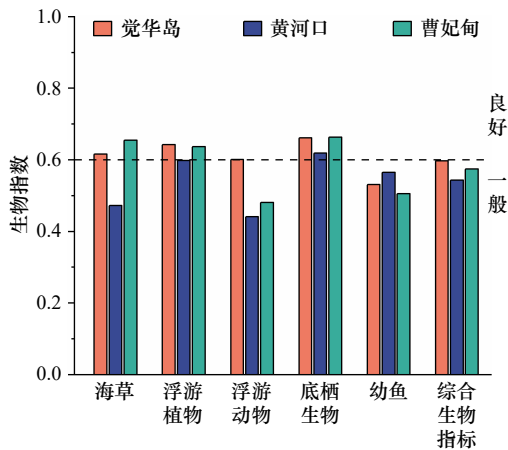


图8 海草床生物指标评估

Fig. 8 Evaluation of biological indicators among seagrass beds

3.3.3 育幼功能综合评估

对3个海草床的育幼功能(NFI)进行了综合评估,发现育幼功能存在一定的空间差异(图9),具体为:觉华岛(良好)>曹妃甸(良好)>黄河口(一般),经差异性检验发现,黄河口海草床NFI显著低于曹妃甸

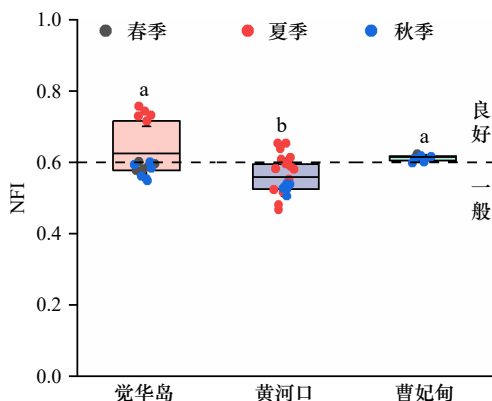


图9 海草床育幼功能综合指数时空差异

Fig. 9 Spatiotemporal differences in comprehensive nursery function index (NFI) among seagrass beds

误差线上的不同小写字母表示NFI在不同海草床之间存在显著差异($p < 0.05$)

Different lowercase letters above error bars indicate significant differences in NFI (Nursery Function Index) among seagrass beds ($p < 0.05$)

和觉华岛的水平($p < 0.05$)。同时,各海草床的育幼功能在不同季节也呈现出差异性。对于觉华岛海草床,夏季(0.72~0.76)>春季(0.57~0.60)>秋季(0.55~0.60);黄河口海草床的趋势则是:夏季(0.47~0.65)>秋季(0.50~0.54);而曹妃甸海草床为:春季(0.61~0.62)≈秋季(0.60~0.62)。从渤海海草床的整体来看,春季的NFI范围为0.53~0.63(均值0.59);夏季为0.46~0.76(均值0.61);秋季范围为0.5~0.6(均值0.57)。具体排序为:夏季>春季>秋季。

4 讨论

4.1 海草床育幼功能空间变化驱动因素分析

根据评估结果,各区域育幼功能状态排序为:觉华岛>曹妃甸>黄河口。从环境指数的空间差异进行分析,觉华岛和曹妃甸的水环境质量良好,其水环境综合指数都大于0.6。觉华岛水体透明度较高,溶解氧与无机氮质量浓度适宜,贡献显著。曹妃甸在温度、无机氮和无机磷质量浓度等方面表现较好,指数较高。而黄河口的水环境状态较差,水环境综合指数低于0.6,水体透明度较低,盐度、pH均超出适宜范围,且无机氮质量浓度高于IV类水质标准,这些都不利于海草床生态系统健康以及育幼功能的发挥。此结果与张翔和李慷^[23]的研究结果相一致,黄河口受流域农耕施肥影响,且氮肥使用率高于磷肥,多余的营养盐随农灌退水汇入黄河口,造成水体氮质量浓度超标而磷质量浓度偏低。

从生物指数的空间差异来看,各区域的生物指数排序同样为:觉华岛>曹妃甸>黄河口。觉华岛和曹妃甸的海草有较高的生物量和茎枝密度,为幼鱼提供了良好的捕食和栖息场所,而曹妃甸海草床受水体透明度较低的影响,海草的生物量、密度和株高都相对较低;觉华岛海草床的浮游植物的丰度(1.17×10^4 cells/L)显著高于以往辽东湾浮游植物调查^[24]。曹妃甸浮游植物多样性特征表现较好,相比渤海近年平均值来说相对较高^[25],评估结果均为良好。黄河口区域的浮游植物因水体中无机氮质量浓度过高,导致一些对于氮浓度敏感的硅藻爆发性增长^[26]。在本研究调查期间,硅藻丰度最高达到 3.91×10^5 cells/L,远高于渤海浮游植物平均丰度 3.40×10^4 cells/L,一定程度上增加了浮游植物的评估贡献。觉华岛海草床的浮游动物和底栖生物的平均密度高于以往辽东湾浮游动物调查结果^[27-28],这可能是由于充足的浮游植物提供了良好的摄食环境,使浮游动物和底栖动物数量随之增加^[25]。曹妃甸海草床的浮游动物和底栖动物的丰度和生物量略低

于觉华岛,但其多样性特征表现较好,整体指数较高^[29]。黄河口地区的浮游动物和底栖动物的数量会在一定程度上受当地浮游植物爆发性增长的促进,但从评估结果来看,单一类型的浮游植物的暴发也会导致部分浮游动物、底栖动物的食物短缺,多样性降低;曹妃甸海草床幼鱼的食物充足,多样性表现良好,但是幼鱼指数最低,生物量和密度较少,这可能是收到当地渔民频繁的捕捞活动影响,幼鱼被大量捕捞,或是受惊扰逃离,这都可能导致了海草床育幼功能状态相对其他两个区域较差。觉华岛幼鱼指数状态中等,当地充足的浮游动物和底栖生物通过营养级联效应,将营养传递给幼鱼,保证了幼鱼的食源供应,幼鱼数量占比也较高,但觉华岛海草床幼鱼指数偏低,这可能是受到了季节因素的影响。黄河口幼鱼指数最高,整体的渔业资源较为充足,幼鱼和成鱼的生物量和密度都很高,这可能是因为受陆源营养物质输入的影响,营养充足,食物充足。但黄河口区域幼鱼的数量占比较低,幼鱼具有较大的被捕食压力,这影响了海草床的育幼功能状态。尽管本研究对数据进行了标准化处理,但跨时间尺度的生态调查仍可能受到天气、环境条件变化波动等诸多因素的影响,对研究结果的全面性和准确性带来干扰。未来研究可进一步延续采样调查和数据收集,扩大样本量和采样周期,以期更完整、准确地反映不同海草育幼功能的变化情况。

4.2 海草床育幼功能提升策略

觉华岛海草床的育幼功能评估结果呈现出良好态势,该区域海草床的环境状态总体较优良好。然而,经检测发现,觉华岛海草床水体中的pH值、磷酸盐质量浓度以及沉积物中的总氮质量分数处于较高水平。与此同时,该区域的底栖动物丰度相对偏低。为切实有效地提升觉华岛海草床的育幼功能,可从以下几个方面进行着手。其一,针对水体和沉积物中特定物质含量过高的问题,应加强对水质和底质的监测力度,并实施科学合理的治理措施,以降低pH值、磷酸盐质量浓度及总氮质量分数。其二,运用生态修复手段,增加底栖动物的适宜生存环境,提高其生物量,从而为幼鱼提供更为丰富的食物来源。其三,可以考虑采取人工辅助措施,例如投放适宜的底栖生物物种,以促进生态系统的平衡发展。

黄河口海草床的育幼功能状态处于一般水平。黄河口作为黄河的水沙承泄区,近年来,在调水调沙工程实施的影响下,巨大的输沙量以及泥沙所携带的营养物质输入黄河口,导致此地区环境条件发生了显著改变^[22]。在本次评估中,水体透明度低以及无机氮

质量浓度过高成为影响海草床育幼功能状态的主要负面因素。在这种环境影响之下,海草床的海草茎枝密度和生物量均处于偏低水平,幼鱼由于缺乏海草的遮蔽保护,再加上捕食者数量较多,使得育幼功能状态受到严重影响。因此,黄河口海草床育幼功能提升策略首先应着重加强对陆源污染的控制,严格执行污水排放标准,强化废水回收再利用,并控制农业施肥以减少陆源营养盐的排放。其次,积极采取海草床修复措施,通过人工移植海草幼苗等方法提高海草存活率,从而为生物幼体营造安全的栖息地。此外,开展生态监测与评估工作,实时掌握海草床生态系统的变化动态,以便及时调整修复策略。同时,加强对周边环境综合整治,减少对海草床的潜在威胁因素。

曹妃甸海草床总体育幼功能状态良好。然而,曹妃甸附近建有两个油田人工岛以及一个人工大堤,石油开采以及工人的生活废水产生的石油烃和过量的营养物质沉积到底质中,致使沉积物中的总磷、总氮质量分数偏高。且从生物指数的表现来看,曹妃甸海草床的幼鱼指数偏低,这可能是由于其附近的捕捞活动强度较高。因此,尽管曹妃甸海草床环境状态良好,但高强度的捕捞与开采活动依然对海草床造成了直接和间接的负面影响。在曹妃甸海草床提升策略方面,首先要强化石油开采的废水废渣处理,切实防止污染物外泄。其次,可以通过设立禁渔区或实施季节性禁捕措施,为幼鱼提供良好的栖息环境。此外,应加强对石油开采和捕捞活动的监管力度,确保各项环保措施得到有效落实。同时,开展生态修复工程,逐步改善底质环境,降低总磷和总氮质量分数,促进海草床生态系统的健康稳定发展。

5 结论

以渤海区域曹妃甸、黄河口、觉华岛等3个典型海草床为研究区,调研了海草生长状况、水体和沉积物环境质量、浮游生物、底栖生物、幼鱼种类和生物量等多项环境生态数据,构建了耦合水环境、沉积环境、生物环境的近海海草床育幼功能综合评估指标体系,并对渤海近海各典型海草床进行了系统评估,得到以下结论:

(1)渤海区域典型海草床的环境和生物指标呈现明显的空间差异。从水环境和沉积环境的角度,曹妃甸(良好)>觉华岛(良好)>黄河口(一般);生物环境状况为:觉华岛(良好)>曹妃甸(一般)>黄河口(一般);综合上述两项,育幼功能综合评估结果为:觉华岛(良好)>曹妃甸(良好)>黄河口(一般)。

(2)分析海草床育幼功能进行综合评估结果,识别了各海草床育幼功能现状的主要驱动因素。觉华岛的育幼功能状态良好,这主要得益于较高的水体透明度、适宜质量浓度的无机氮以及较大占比的幼鱼数量和较高的幼鱼生物量;黄河口海草床育幼功能状态相对较差,其主要原因在于较低的水体透明度、过量的无机氮以及浮游植物多样性指数较差;曹妃甸海

草床育幼功能状态处于中等水平,一方面,适量的无机氮和磷酸盐质量浓度为海草生长提供了必要的营养物质,较高的海草生物量和株高也为海洋生物提供了一定的栖息空间和庇护场所,但较低的幼鱼生物量和密度成为制约其育幼功能进一步提升的因素,分析其原因,可能与频繁的捕捞活动、环境扰动等多种因素相关。

参考文献:

- [1] 刘松林,江志坚,吴云超,等.海草床育幼功能及其机理[J].生态学报,2015,35(24):7931-7940.
Liu Songlin, Jiang Zhijian, Wu Yunchao, et al. Nursery function of seagrass beds and its mechanisms[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(24): 7931-7940.
- [2] 王喜涛,张沛东,郭栋.海草床的产卵场功能及其形成机理研究进展[J].水产科学,2018,37(4):571-576.
Wang Xitao, Zhang Peidong, Guo Dong. A review: research progress on spawning ground function and formation mechanisms of a seagrass bed[J]. Fisheries Science, 2018, 37(4): 571-576.
- [3] 周毅,江志坚,邱广龙,等.中国海草资源分布现状、退化原因与保护对策[J].海洋与湖沼,2023,54(5):1248-1257.
Zhou Yi, Jiang Zhijian, Qiu Guanglong, et al. Distribution status, degradation reasons and protection countermeasures of seagrass resources in China[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2023, 54(5): 1248-1257.
- [4] Kaewsrikhaw R, Upanoi T, Prathep A. Ecosystem services and vulnerability assessments of seagrass ecosystems: basic tools for prioritizing conservation management actions using an example from Thailand[J]. Water, 2022, 14(22): 3650.
- [5] Mchenry J, Rassweiler A, Lester S E. Seagrass ecosystem services show complex spatial patterns and associations[J]. Ecosystem Services, 2023, 63: 101543.
- [6] Shayka B F, Hesselbarth M H K, Schill S R, et al. The natural capital of seagrass beds in the Caribbean: evaluating their ecosystem services and blue carbon trade potential[J]. Biology Letters, 2023, 19(6): 20230075.
- [7] Bertelli C M, Unsworth R K F. Protecting the hand that feeds us: seagrass (*Zostera marina*) serves as commercial juvenile fish habitat[J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, 83(2): 425-429.
- [8] James W R, Furman B T, Rodemann J R, et al. Widespread habitat loss leads to ecosystem-scale decrease in trophic function[J]. Global Change Biology, 2024, 30(4): e17263.
- [9] Gullström M, Berkström C, Öhman M C, et al. Scale-dependent patterns of variability of a grazing parrotfish (*Leptoscarus vaigiensis*) in a tropical seagrass-dominated seascape[J]. Marine Biology, 2011, 158(7): 1483-1495.
- [10] Olson A M, Hessing-Lewis M, Haggarty D, et al. Nearshore seascape connectivity enhances seagrass meadow nursery function[J]. Ecological Applications, 2019, 29(5): e01897.
- [11] Moussa R M, Bertucci F, Jorissen H, et al. Importance of intertidal seagrass beds as nursery area for coral reef fish juveniles (Mayotte, Indian Ocean)[J]. Regional Studies in Marine Science, 2020, 33: 100965.
- [12] Shoji J, Tomiyama T. Influence of vegetation coverage on dissolved oxygen concentration in seagrass bed in the Seto Inland Sea: possible effects on fish nursery function[J]. Estuaries and Coasts, 2023, 46(4): 1098-1109.
- [13] 刘伟妍,韩秋影,唐玉琴,等.营养盐富集和全球温度升高对海草的影响[J].生态学杂志,2017,36(4):1087-1096.
Liu Weiyan, Han Qiuying, Tang Yuqin, et al. Review of nutrient enrichment and global warming effects on seagrasses[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(4): 1087-1096.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Ismail J, Kamal A H M, Idris M H, et al. Zooplankton species composition and diversity in the seagrass habitat of Lawas, Sarawak, Malaysia[J]. Biodiversity Data Journal, 2021, 9: e67449.
- [17] 赖敏,欧阳玉蓉,吴耀建,等.面向区域层面的海洋生态修复综合效益评估指标体系[J].生态学报,2024,44(16):6965-6975.
Lai Min, Ouyang Yurong, Wu Yaojian, et al. Indicator system for assessing the comprehensive benefits of marine ecological restoration at the regional level[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(16): 6965-6975.
- [18] 李建军,杨笑波,魏社林,等.裸项栉鰕虎鱼的全人工繁殖及其胚胎发育[J].中国实验动物学报,2008,16(2):111-116.
Li Jianjun, Yang Xiaobo, Wei Shelin, et al. Complete artificial propagation and embryonic development of bareneck goby[J]. Acta Laboratorium Animalis Scientia Sinica, 2008, 16(2): 111-116.

- [19] Li Xiaoxiao, Yang Wei, Li Shanze, et al. Asymmetric responses of spatial variation of different communities to a salinity gradient in coastal wetlands[J]. *Marine Environmental Research*, 2020, 158: 105008.
- [20] Shannon C E, Weaver W. The Mathematical Theory of Communication[M]. Urbana: University of Illinois Press, 1949.
- [21] Margalef R. Perspectives in Ecological Theory[M]. Chicago: University of Chicago Press, 1968.
- [22] Pielou E. C. Ecological Diversity[M]. New York: Wiley, 1975.
- [23] 张翔, 李慷. 2015–2020 年黄河口近岸海域生态环境监测与分析[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(3): 139–147.
Zhang Xiang, Li Su. Monitoring and analysis on ecological environment in near-shore waters of Yellow River Estuary during 2015–2020[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(3): 139–147.
- [24] 李亚倩, 张倩, 杨世民. 2021 年渤海浮游植物群落结构及其季节性变化[J]. *海洋科学进展*, 2024, 42(2): 337–348.
Li Yaqian, Zhang Qian, Yang Shimin. Phytoplankton community structure and its seasonal variation in the Bohai Sea in 2021[J]. *Advances in Marine Science*, 2024, 42(2): 337–348.
- [25] 栾青杉, 康元德, 王俊. 渤海浮游植物群落的长期变化 (1959–2015)[J]. *渔业科学进展*, 2018, 39(4): 9–18.
Luan Qingshan, Kang Yuande, Wang Jun. Long-term changes in the phytoplankton community in the Bohai Sea (1959–2015)[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2018, 39(4): 9–18.
- [26] Liu Songlin, Jiang Zhijian, Zhang Jingping, et al. Effect of nutrient enrichment on the source and composition of sediment organic carbon in tropical seagrass beds in the South China Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 110(1): 274–280.
- [27] 王彬, 董婧, 刘春洋, 等. 夏初辽东湾海蜇放流区大型水母和主要浮游动物[J]. *渔业科学进展*, 2010, 31(5): 83–90.
Wang Bin, Dong Jing, Liu Chunyang, et al. Distribution of giant jellyfish and major zooplankton in jellyfish release area of Liaodong Bay, Bohai Sea in early summer[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2010, 31(5): 83–90.
- [28] 李轶平, 刘修泽, 王彬, 等. 辽东湾海域大型底栖动物群落特征[J]. *海洋渔业*, 2017, 39(3): 267–276.
Li Yiping, Liu Xiuzhe, Wang Bin, et al. Research on the community characteristics of macrobenthos in the Liaodong Bay[J]. *Marine Fisheries*, 2017, 39(3): 267–276.
- [29] 张兆衡, 杨薇, 张子玥, 等. 渤海兴城-觉华岛海域海草床典型生物群落特征及其关键环境因子识别[J]. *北京师范大学学报 (自然科学版)*, 2022, 58(1): 90–98.
Zhang Zhaoheng, Yang Wei, Zhang Ziyue, et al. Characteristics of typical biological communities and identification of key environmental factors in the seagrass bed of Xingcheng-Juehua Island, Bohai Sea[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2022, 58(1): 90–98.

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

Zhao Jiayue, Yang Wei, Bai Junhong

(State Key Laboratory of Wetland Conservation and Restoration, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: In this study, we conducted comprehensive field surveys in the Bohai Sea's seagrass beds at Caofeidian, Huanghe River mouth, and Juehua Island, gathering data on seagrass growth, water and sediment quality, plankton, benthic life, and juvenile fish. An integrated assessment index system for the nursery function of nearshore seagrass beds was constructed. The seagrass biomass at Caofeidian and Juehua Island was measured at 371.22 g/m² and 340.05 g/m², respectively, both of which were significantly higher than that recorded at the Huanghe River mouth (161.24 g/m², $p < 0.05$). The average abundance and biomass of phytoplankton in each seagrass bed followed the order: Huanghe River mouth > Caofeidian > Juehua Island, exhibiting significant spatial differences ($p < 0.05$). Regarding juvenile fish density, Juehua Island exhibited the highest density, followed by the Huanghe River mouth, with Caofeidian showing the lowest density, also demonstrating significant spatial differences ($p < 0.05$). The nursery function of seagrass beds was best in Juehua Island seagrass bed, followed by Caofeidian seagrass bed and Huanghe River mouth seagrass bed. Environmental and biological indicators with significant contributions varied spatially. The seagrass bed in Juehua Island has a good environmental and biological status, with high water transparency, abundant dissolved oxygen, and moderate inorganic nitrogen mass concentration, and the juvenile fish

community indicators all performed well, contributing significantly to the nursery function. The seagrass bed in Huanghe River Delta has relatively poor water environment and biological status, with low water transparency, high pH value, and excessive inorganic nitrogen. The biological indicators showed poor plankton diversity characteristics and low proportion of juvenile fish, which became the main negative factors for its nursery function assessment result of only average. The environmental status in Caofeidian seagrass bed is good, with factors such as temperature, inorganic nitrogen, and inorganic phosphorus mass concentration contributing significantly. However, its biological status is average, and the low number of planktonic animals and juvenile fish is the main negative factor in the nursery function assessment of this area. This study helps to deeply understand and recognize the spatial and temporal differences and driving factors of the nursery function of typical seagrass beds in the Bohai Sea area, and provides effective scientific basis and data support for the protection of seagrass bed ecosystems and the sustainable development of marine fishery resources in China.

Key words: seagrass beds; nursery function; evaluation system; spatial differences; nearshore Bohai Sea