

渤海湾南部滩涂贝类群落结构特征及其环境因子相关性研究

蒋文良¹, 陈胜林², 李永明², 张德普³, 刘 栋¹, 李 敏¹, 高梦娟¹, 吕振波¹, 任中华¹

(1. 鲁东大学 滨海生态高等研究院, 山东 烟台 264003; 2. 滨州市海洋发展研究院, 山东 滨州 256600; 3. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306)

摘要: 本研究以渤海湾南部(滨州)滩涂为研究区域, 设置 6 个断面共 36 个采样站位, 覆盖潮间带(高潮带-中潮带-低潮带)和潮下带, 研究该区域贝类资源群落结构特征及其环境因子相关性。结果表明: 整个调查区域常见贝类总共有 30 种。潮间带共有 23 种常见贝类, 优势种为光滑篮蛤(*Potamocorbula laevis* Hinds 1843)、四角蛤蜊(*Mactra quadrangularis* Reeve 1854)、短文蛤(*Meretrix petechialis* Lamarck 1799); 潮下带共有 26 种常见贝类, 优势种为中国蛤蜊(*Mactra chinensis* Philippi 1846)、等边浅蛤(*Gomphina aequilatera* Sowerby 1825)、朝鲜笋螺(*Terebra koreana* Yoo 1976)、红带织纹螺(*Nassarius succinctus* A. Adams 1852)、纵肋织纹螺(*Nassarius variciferus* A. Adams 1851); 潮间带贝类多样性指数(*H'*)和均匀度指数(*J'*)显著高于潮下带, 而丰富度指数(*D'*)则相反; 潮间带贝类生物量(710.16 g/m²)和栖息密度(4 523 个/m²)远高于潮下带(17.10 g/m², 35 个/m²)。群落结构多元统计分析将贝类按照站位划分为 5 个组群, 包括东侧潮下带、西侧潮下带、西侧潮间带、东侧潮间带以及 D4 站位。冗余分析(RDA)结果表明, 对潮间带贝类影响较大的环境因子主要为沉积物的粒径以及砂、粉砂含量, 而对潮下带贝类影响较大的主要为浮游植物密度、沉积物的粒径以及砂、粉砂和黏土含量。渤海湾南部(滨州)滩涂贝类资源较为丰富, 但应从不同滩涂区域生态特性的角度出发, 加强贝类的保护和资源修复, 本研究可为该区域贝类的资源养护和可持续利用提供数据基础。

关键词: 渤海湾南部; 滨州; 滩涂; 贝类; 群落结构; 环境因子相关性

中图分类号: S932.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2023)10-0052-13

DOI: 10.11759/hyxx20230315002

渤海湾南部近岸入海河流众多, 如黄河、大口河、套尔河等^[1], 河流携带大量泥沙在此处形成极大面积浅滩, 同时携带大量营养盐和有机质入海, 为近岸海域和河口生态系统补充了充足的营养元素, 促使初级生产力提高, 为滩涂贝类生物提供了充足饵料^[2]。因此, 自古以来此处就是优良贝类产地^[3], 为我国北方贝类产业的发展以及“渤海粮仓”建设助力良多。

贝类的代谢过程可实现对有机质和悬浮物的沉降, 对于改善海域富营养化效果显著; 同时, 贝类也能通过沉降作用使水中的颗粒物实现从水中向底层搬运的过程, 对维持底栖环境生态系统平衡起着十分重要的作用^[4-5]。渤海湾南部海域滩涂贝类资源丰富, 盛产短文蛤(*Meretrix petechialis* Lamarck 1799)、四角蛤蜊(*Mactra quadrangularis* Reeve 1854)和中国蛤蜊(*Mactra chinensis* Philippi 1846)等优质贝类海产品, 而贝类增殖活动不但能促进渔民增收, 也在维持海

洋生态系统平衡方面发挥着重要作用^[6]。然而近几十年来, 石油开采、港口工程建设、河道疏浚、工农业污染排放等人为活动极为频繁^[2], 严重破坏了贝类繁育栖息地, 迫使贝类资源持续衰退^[6], 从长远来看会造成本土贝类种质资源退化以及生物多样性丧失。

收稿日期: 2023-03-15; 修回日期: 2023-04-21

基金项目: 农业农村部“黄河三角洲近岸贝类资源修复关键技术探讨”(A060102-17220231); 滨州市海洋发展和渔业局“滨州市周边海域海水贝类资源调查与评价项目”HRGJBZ-2020-005)

[Foundation: Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China “Study on the key technologies of shellfish resource restoration in the coastal areas of the Yellow River Delta”, No. A060102-17220231; Binzhou Bureau of Marine Development and Fisheries “Investigation and evaluation of marine shellfish resources in the waters around Binzhou City”, No. HRGJBZ-2020-005]

作者简介: 蒋文良(1998—), 男, 山东烟台人, 硕士研究生, 研究方向: 渔业资源, E-mail: jwl1521154932@163.com; 任中华(1990—), 通信作者, 男, 山东潍坊人, 讲师, 研究方向: 海洋生态, E-mail: renzhonghua16@mails.uca.ac.cn

目前,已有学者针对我国近岸海域贝类资源群落结构变化及其影响因素开展了相关研究,例如,赵云龙等^[7]通过调查掌握了 2009—2010 年辽东湾高家滩的贝类群落组成及资源量现状;段秀娟等^[8]对比分析了 2008 年和 2013 年天津汉沽鲤鱼门区域潮间带经济贝类资源分布及群落结构特征差异;李永仁等^[9]探讨了 2012—2014 年引起天津潮间带贝类群落结构变动的主要影响因素,包括底质类型、含沙量、沙粒粒径等。然而,作为黄河三角洲生态系统的重要组成部分,渤海湾南部滩涂的贝类资源群落结构特征及其影响因素尚未有全面报道。滨州市(主要是无棣县和沾化区)滩涂作为黄河三角洲的重要组成部分,区域辽阔、生境优良^[10-11],系统研究该区域滩涂贝类的种类组成、资源分布及其环境因子相关性,对贝类多样性及其生境的保护具有极为重要的现实意义。

基于此,本文从贝类群落结构特征及其环境因子相关性的研究主线出发,分析渤海湾南部滩涂(潮

间带和潮下带)的贝类种类组成及优势种,研究贝类资源密度、生物多样性和群落结构聚类特征及其区域差异,分别探讨与潮间带或潮下带贝类群落结构变动相关的环境因子。本研究旨在通过调查研究,为贝类资源的合理利用、资源养护与修复和生物多样性保护提供数据基础。

1 材料与方法

1.1 站位设计

本文以渤海湾南部的滨州市(主要为无棣县和沾化区)滩涂为研究区域,包括潮间带(高潮带、中潮带和低潮带)和潮下带(水深<15 m)两个区域。按照均匀设站、重点加密的原则,在研究区域设计 8 个样品采集断面(A—H),在每个断面的低潮带、中潮带、高潮带各设 1 个贝类样品采集站位,在潮下带沿水深由浅至深设 2~3 个站位,因沾化区滩涂部分区域(以 E 和 F 开头站位)基本无潮间带,仅在潮下带设站位。如图 1 所示,本研究共设贝类样品采集站位 36 个。

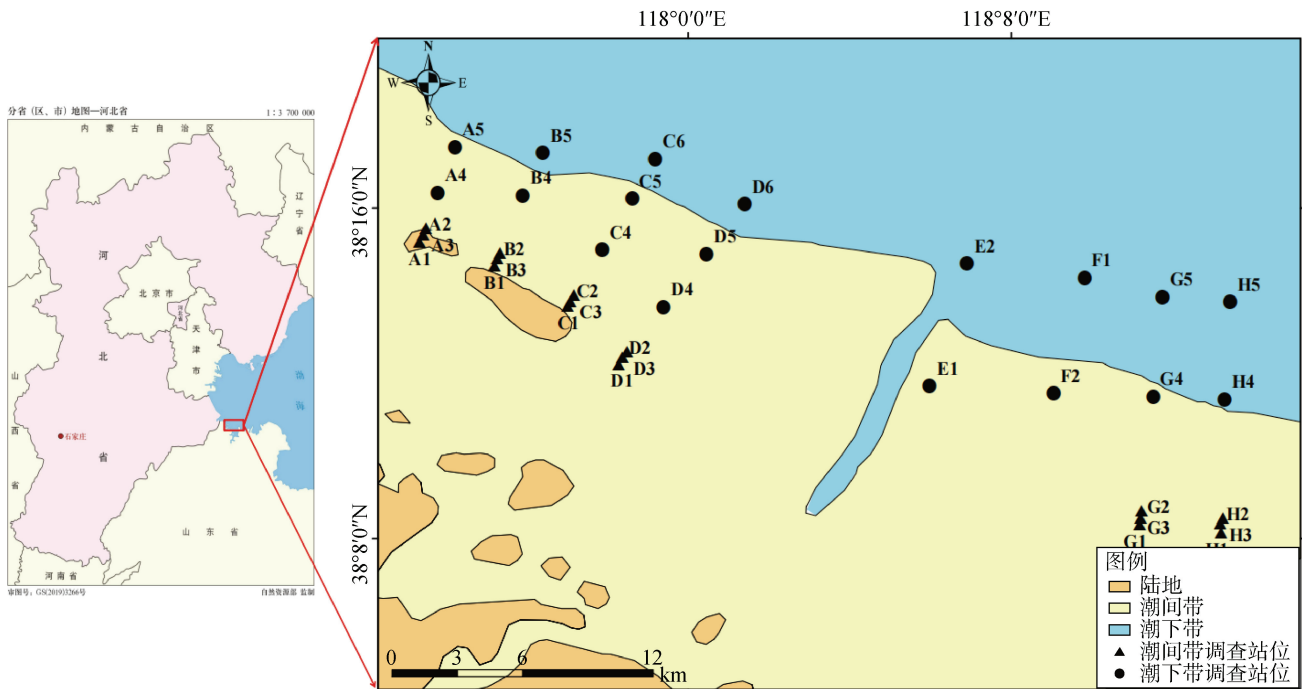


图 1 渤海湾南部滩涂贝类样品采集站位图

Fig. 1 Map showing the shellfish sampling stations in the southern tidal flats of Bohai Bay

1.2 样品采集与分析

贝类样品采集与分析按照 GB/T 12763.6—2007《海洋调查规范 第 6 部分:海洋生物调查》^[12]的有关要求进行。其中,潮间带贝类采集使用样方框法

(长度 50 cm×宽度 50 cm×深度 25 cm),在每个站位附近采集 3 次,并使用网筛(孔径 150 μm,直径 21 cm)对贝类进行冲洗、筛选,挑选出贝类样品置于密封袋,低温保存带回实验室进行鉴定及分析。潮下带贝类

采集使用拖曳式泵吸底表贝类专捕网具(无耙刺)进行,网具宽度 1.2 m,拖速 2 kn,每站位拖曳 10 min,采集后的贝类经冲洗、筛选后,置于密封袋,低温保存带回实验室鉴定及分析。实验室分析中,贝类物种鉴定以《黄渤海软体动物图志》^[13]为准;使用游标卡尺(精度 0.01 mm)测量贝类的壳长、壳宽和壳高,用电子天平(精度 0.01 g)测定贝类的湿重。最后将鉴定贝类物种的数量、重量统一标准化为密度(个/m²)、生物量(g/m²)。

贝类采集过程中同步进行环境样品采集或环境因子直接测定,潮间带采集沉积物样品用于测定沉积物类型和中值粒径,潮下带测定沉积物类型和中值粒径、海水盐度和 pH、叶绿素 *a*、浮游植物密度和浮游动物生物量。其中,沉积物样品的采集和分析按照 GB/T 12763.9—2007《海洋调查规范 第 9 部分:海洋生态调查指南》^[14]的要求进行,分别使用样方框(采样面积 0.25 m²)或抓斗式采泥器(采样面积 0.05 m²)采集潮间带或潮下带表层沉积物样品,使用激光粒度分析仪(Mastersizer2000, 马尔文,英国)测定沉积物粒度参数,计算中值粒径,并结合文献资料分析沉积物类型。海水盐度和 pH 使用多功能水质参数仪(YSI; ProDSS, 美国)进行现场测定;叶绿素 *a*(chl-*a*)样品采集及分析按照 GB/T 12763.6—2007《海洋调查规范 第 6 部分:海洋生物调查》^[12]的有关要求进行,使用叶绿素荧光仪(HM-SYZ, 恒美,中国)测定叶绿素 *a* 浓度;浮游植物(Phytoplankton)和浮游动物(Zooplankton)的采集按照 GB/T 12763.6—2007《海洋调查规范 第 6 部分:海洋生物调查》^[12]的有关要求进行,分别使用浅水 III、I 型网,自水底至表层垂直拖取,样品均用福尔马林溶液(5%)保存,在实验室内通过显微镜(OST-TX4R, 鸥斯特,中国)进行种类鉴定和计数。

1.3 数据处理与分析

1.3.1 群落结构特征指数

使用相对重要性指数指数分析研究区域贝类优势组成特征,公式如下:

$$IRI = (N+W) \times F;$$

其中,IRI 为相对重要性指数;*N* 为某个物种的个数占贝类总个数的百分比,*W* 为某个物种的生物量占贝类总生物量的百分比;*F* 为某个物种出现的站位数占总站位数的百分比。将 IRI>1 000 的定义为优势种,100<IRI<1 000 的物种定义为重要种^[15]。

采用 Shannon-Weaver 物种多样性指数(*H'*)、

Margalef 丰富度指数(*D*)和 Pielou 均匀度指数(*J'*)^[15]分析研究区域贝类生物多样性特征,公式如下:

Shannon-Weaver 多样性指数:

$$H' = -\sum P_i \ln P_i;$$

Margalef 丰富度指数:

$$D = (S-1)/\ln N;$$

Pielou 均匀度指数:

$$J' = H'/\ln S;$$

其中 *S* 为贝类总物种数, *N* 为贝类所有物种总个体数, *P_i* 为第 *i* 种的个体(*n_i*)占贝类所有物种总个体数(*N*)的比例。

1.3.2 群落结构多元统计分析

对渤海湾南部滩涂贝类密度(个/m²)数据进行四次方根转换,计算其 Bray-Curtis 相似性系数矩阵,使用等级聚类分析(Cluster)和非度量多维标度分析(nMDS)方法研究贝类群落在研究区域的不同分组特征^[15-16],并使用胁迫系数(Stress)来判断分组的有效性,其中,当 0.1<Stress<0.2 时,表示分组结果具有一定的解释意义;当 0.05<Stress<0.1 时,表示分组结果基本可信;当 Stress<0.05,表示分组结果具有很好的代表性。同时,使用单因子相似性分析(ANOSIM)研究不同分组贝类群落之间的差异显著性(以 *P*<0.05 表示差异显著),使用相似性百分比分析(SIMPRES)研究造成不同分组贝类群落结构相异的分歧种与造成群落结构相似的典型种。上述数据分析及图件绘制均通过 PRIMER 6 软件完成。

1.3.3 环境因子相关性分析

通过 CANOCO for Windows 软件对贝类和环境因子进行相关性分析和图件绘制,其中贝类数据采用的是重要种和优势种(IRI≥100)的密度(个/m²),环境因子数据采用的是环境因子实测值,因潮间带区域和潮下带区域分析的环境因子有所不同,故将潮间带和潮下带的贝类-环境因子相关性分开分析。首先将贝类密度进行 lg(*x*+1) 转化,而对环境因子进行标准化^[17],将处理后的数据进行去趋势对应分析(DCA),分析结果显示 4 个轴最大轴距均小于 3,故选用冗余分析(RDA)进行贝类-环境因子相关性。

1.3.4 统计学分析

本文中涉及特定区域的贝类生物多样性、生物量和密度数据统计结果均以该区域所有贝类相关数据的平均值表示,使用 SPSS 软件(IBM Statistics SPSS 22 for Windows, 美国)对数据进行 Kolmogorov-Smirnov 正态分布检验和 Levene 方差齐性检验,在满足两种检验的条件下进行单因素方差分析(one-way analysis of variance, one-way ANOVA),并使用 Tukey' test 进行事

后多重比较, 当 $P < 0.05$ 时表示两两差异显著。

2 结果

2.1 渤海湾南部滩涂贝类种类组成与分布

本研究共采集贝类 30 种, 其中潮间带贝类物种数 (23 种) 略低于潮下带 (26 种), 而帘蛤目在两个区域贝类群落中均占据优势地位 (表 1)。就潮间带而言, 中潮带出现

的物种数最高 (20 种), 低潮带 (17 种) 和高潮带 (15 种) 次之。潮间带优势种 (IRI > 1 000) 有光滑篮蛤 (*Potamocorbula laevis* Hinds 1843)、四角蛤蜊和短文蛤, 而潮下带则为中国蛤蜊、等边浅蛤 (*Gomphina aequilatera* Sowerby 1825)、朝鲜笋螺 (*Terebra koreana* Yoo 1976)、红带织纹螺 (*Nassarius succinctus* A. Adams 1852)、纵肋织纹螺 (*Nassarius variciferus* A. Adams 1851)。

表 1 渤海湾南部滩涂贝类种类组成与分布

Tab. 1 Composition and distribution of mollusks in the southern tidal flats of Bohai Bay

物种	所属目	高潮带	中潮带	低潮带	潮下带
微黄镰玉螺 <i>Euspira gilva</i> Philippi 1851	中腹足目	+	+		
广大扁玉螺 <i>Glossaulax reiniana</i> Dunker 1877	中腹足目				+
扁玉螺 <i>Glossaulax didyma</i> Röding 1798	中腹足目	+	+	+	+
异白樱蛤 <i>Macoma incongrua</i> Martens 1865	帘蛤目	+	+	+	+
彩虹明樱蛤 <i>Moerella iridescens</i> Benson 1842	帘蛤目	+	+	+	+
江户明樱蛤 <i>Moerella jodoensis</i> Lischke 1872	帘蛤目				+
等边浅蛤 <i>Gomphina aequilatera</i> Sowerby 1825	帘蛤目				+
凸壳肌蛤 <i>Arcuatula senhousia</i> Benson in Cantor 1842	贻贝目		+	+	+
黑纹斑捻螺 <i>Punctateon yamamurae</i> Habe 1976	头楯目			+	+
短文蛤 <i>Meretrix petechialis</i> Lamarck 1799	帘蛤目	+	+	+	+
日本镜蛤 <i>Dosinia japonica</i> Reeve 1850	帘蛤目	+	+	+	+
四角蛤蜊 <i>Maetra quadrangularis</i> Reeve 1854	帘蛤目	+	+	+	
中国蛤蜊 <i>Maetra chinensis</i> Philippi 1846	帘蛤目				+
螭蛸 <i>Sinonovacula lamarcki</i> Huber 2010	帘蛤目	+			
长竹蛸 <i>Solen strictus</i> Gould 1861	帘蛤目			+	+
朝鲜笋螺 <i>Terebra koreana</i> Yoo 1976	新腹足目	+	+	+	+
红带织纹螺 <i>Nassarius succinctus</i> A. Adams 1852	新腹足目		+	+	+
秀丽织纹螺 <i>Nassarius festivus</i> Powys 1835	新腹足目	+	+	+	+
纵肋织纹螺 <i>Nassarius variciferus</i> A. Adams 1851	新腹足目		+	+	+
脉红螺 <i>Papana venosa</i> Valenciennes 1846	新腹足目		+		+
光滑篮蛤 <i>Potamocorbula laevis</i> Hinds 1843	海螂目	+	+	+	+
托氏蝾螺 <i>Umbonium thomasi</i> Crosse 1863	原始腹足目	+	+		+
青蛤 <i>Cyclina sinensis</i> Gmelin 1791	帘蛤目	+	+	+	+
泥螺 <i>Bullacta exrata</i> Philippi 1848	头楯目	+	+	+	+
经氏壳蛞蝓 <i>Philine kinglipini</i> Tchang 1934	头楯目				+
魁蚶 <i>Scapharca broughtonii</i> Schrenck 1867	蚶目	+	+	+	+
毛蚶 <i>Anadara kagoshimensis</i> Tokunaga 1906	蚶目				+
马丽亚瓷光螺 <i>Eumila maria</i> A. Adams 1861	异腹足目		+		+
长牡蛎 <i>Crassostrea gigas</i> Thunberg 1793	牡蛎目		+		
白带三角螺 <i>Trigonostoma scalariformis</i> Lamarck 1822	新腹足目				+

2.2 渤海湾南部滩涂贝类生物多样性

如图 2 所示, 潮间带的高潮带、中潮带和低潮带的贝类物种多样性指数 (H') 和均匀度指数 (J') 均显著

低于潮下带 (one-way ANOVA, Tukey' test, $P < 0.05$), 但中潮带和低潮带的贝类丰富度指数 (D) 显著高于潮下带 (one-way ANOVA, Tukey' test, $P < 0.05$), 而高潮

带贝类丰富度指数与潮下带无显著差异(one-way ANOVA, Tukey' test, $P>0.05$)。就潮间带而言, 3 个指数均表现为中潮带(H' , 1.11; D , 1.61; J' , 0.46) $>$ 低潮带(H' , 0.96; D , 1.46; J' , 0.45) $>$ 高潮带(H' , 0.95; D , 0.43; J' , 1.06)的趋势, 且差异显著(one-way ANOVA, Tukey' test, $P<0.05$)。

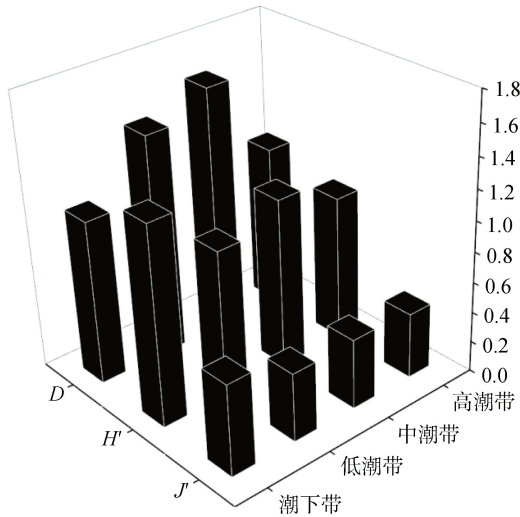


图 2 渤海湾南部滩涂贝类物种多样性指数、丰富度指数和均匀度指数

Fig. 2 Shannon-Weaver species diversity (H'), Margalef richness (D), and Pielou evenness (J') indices for the southern tidal flats of Bohai Bay

2.3 渤海湾南部滩涂贝类生物量和密度空间分布

如图 3、图 4 所示, 渤海湾南部滩涂贝类的生物量和密度存在显著的空间分布差异。具体而言, 潮间带贝类生物量(710.16 g/m^2)和密度($4\ 523 \text{ 个/m}^2$)均显著高于潮下带(17.10 g/m^2 ; 35 个/m^2)(one-way ANOVA, Tukey' test, $P<0.05$); 西侧潮间带贝类生物量和密度整体呈现高潮带(872.67 g/m^2 , $4\ 935 \text{ 个/m}^2$) $>$ 中潮带(601.17 g/m^2 , 736 个/m^2) $>$ 低潮带(99.36 g/m^2 , 469 个/m^2)的趋势(one-way ANOVA, Tukey' test, $P<0.05$), 而东侧潮间带贝类生物量则相反, 整体呈现低潮带($2\ 545.68 \text{ g/m}^2$) $>$ 中潮带(508.85 g/m^2) $>$ 高潮带(190.55 g/m^2)的趋势(one-way ANOVA, Tukey' test, $P<0.05$), 但东侧潮间带贝类密度无显著差异($2\ 039\sim 2\ 788 \text{ 个/m}^2$; one-way ANOVA, Tukey' test, $P>0.05$)。

潮间带中, 以 H3 站点的光滑篮蛤生物量($3\ 584.00 \text{ g/m}^2$)最高, 而以 H1 站位的短文蛤和 H2 站位的玛利亚瓷光螺(*Eumila maria* A. Adams 1861)生物量最低, 均为 0.01 g/m^2 ; 以 B1 站点的光滑篮蛤密度($12\ 117 \text{ 个/m}^2$)最高。在潮下带中, 以 F4 站位的中国蛤蜊生物量(52.77 g/m^2)最高, 而以 F6 站位的秀丽织纹螺生物量(0.001 g/m^2)最低; 以 B4 站位的朝鲜笋螺密度(110 个/m^2)最高。

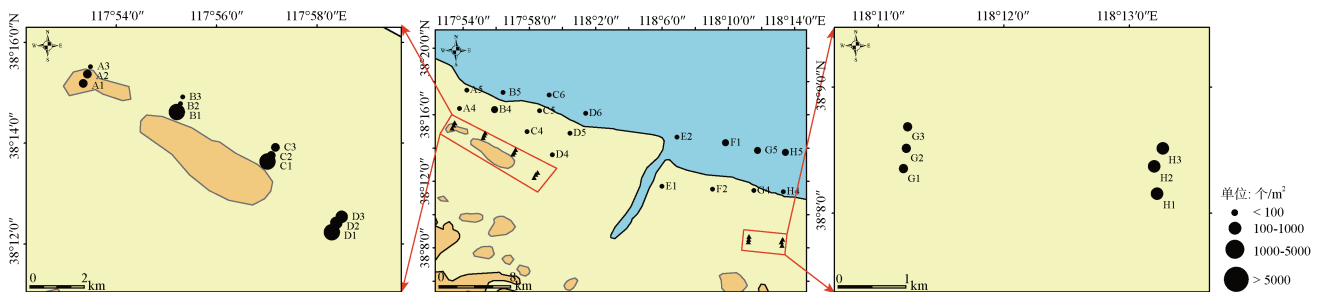


图 3 渤海湾南部滩涂贝类生物量空间分布

Fig. 3 Distribution of shellfish biomass in the southern tidal flats of Bohai Bay

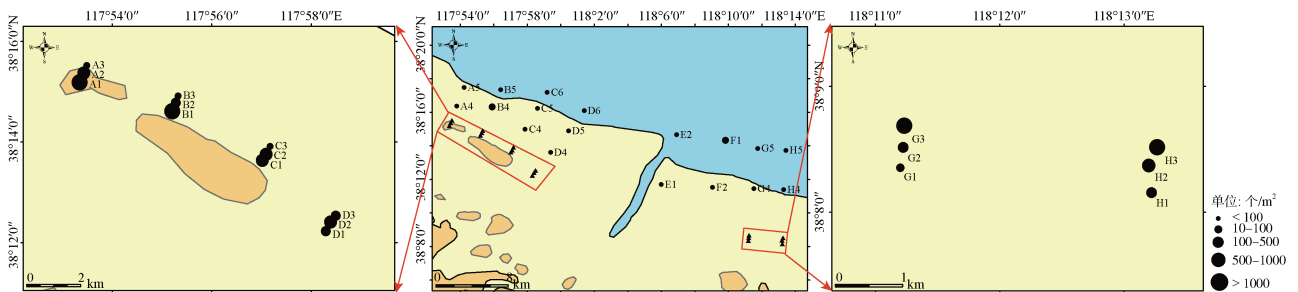


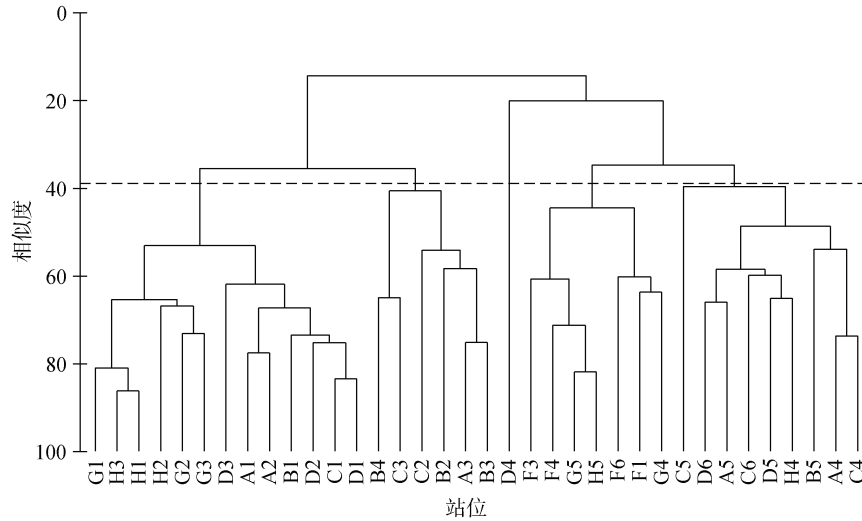
图 4 渤海湾南部滩涂贝类密度空间分布

Fig. 4 Distribution of shellfish density in the southern tidal flats of Bohai Bay

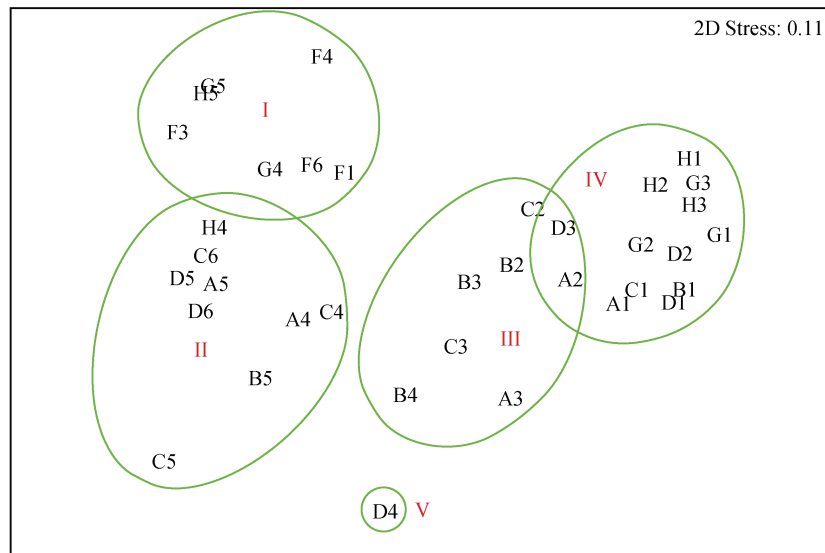
2.4 渤海湾南部滩涂贝类群落结构多元统计分析

根据群落结构多元统计分析, 渤海湾南部滩涂贝类群落聚类结果及空间分布效果明显(图 5), 可按照 39%的相似性将贝类群落空间分布划分为 5 组(I—V), 胁迫系数为 $Stress=0.11$, 说明分组具有一定的解释意

义。其中, 划分的 5 组分别对应 I: 东侧潮下带(F3、F4、F6、G4、G5、H5 站位), II: 西侧潮下带(A4、A5、B5、C4、C5、C6、D5、D6 站位), III: 西部潮间带(A2、A3、B2、B3、C2、C3 站位), IV: 东部潮间带(G1、G2、G3、H1、H2、H3 站位), V: 仅有 D4 站位。ANOSIM 分析表明, 5 个贝类群落分组之间差异显著($P<0.05$)。



(a) 等级聚类分析 (Cluster)



(b) 非度量多维标度分析 (nMDS)

图 5 渤海湾南部滩涂贝类群落结构多元统计分析结果

Fig. 5 Results of Cluster and nMDS analyses for the shellfish community in the southern tidal flats of Bohai Bay

SIMPER 分析表明: 对 I 组相似性贡献较大的有中国蛤蜊、朝鲜笋螺、扁玉螺(*Glossaulax didyma* Röding 1798)等 7 种(累计贡献率 90.58%), II 组有朝鲜笋螺、纵肋织纹螺、扁玉螺等 7 种(91.90%), III 组有泥螺(*Bullacta exrata* Philippi 1848)、朝鲜笋螺、彩虹明樱蛤

(*Moerella iridescens* Benson 1842)等 8 种(91.57%), IV 组有光滑篮蛤、彩虹明樱蛤、秀丽织纹螺等 7 种(91.59%), 而 V 组由于样本数量只有一组故不做讨论(表 2)。此外, 对贝类群落各两组之间相异性贡献率均较大的有短文蛤、朝鲜笋螺、秀丽织纹螺等(表 3)。

表 2 各组群典型种及其对组内相似性贡献百分比(%)
 Tab. 2 Typifying species and their percentage contribution to the within-group similarity in the shellfish community

物种	I	II	III	IV
光滑篮蛤	—	—	—	33.35
彩虹明樱蛤	—	—	13.32	20.59
秀丽织纹螺	—	—	—	11.33
四角蛤蜊	—	—	—	10.32
泥螺	—	—	23.92	—
朝鲜笋螺	14.60	36.67	17.35	—
扁玉螺	11.71	13.03	10.69	—
短文蛤	—	—	—	—
红带织纹螺	—	12.46	—	—
纵肋织纹螺	—	17.31	—	—
中国蛤蜊	37.55	—	—	—
等边浅蛤	—	—	—	—

2.5 渤海湾南部滩涂主要贝类密度与环境因子相关关系

潮间带区域第一轴(RDA1)和第二轴(RDA2)的特征值分别为 40.69%和 10.21%, RDA1 和 RDA2 共解释物种累计方差百分比的 63.94%和物种-环境累计方差总百分比的 99.14%。如图 6 所示, 排序轴 1 与沉积物粉砂含量(Silt)和黏土含量(Clay)呈正相关关系, 而与沉积物粒径(SS)和砂含量(Sand)呈负相关关系; 排序轴 2 主要与 Silt 呈正相关关系, 而与黏土含量(Clay)、沉积物粒径(SS)和砂含量(Sand)呈负相关关系。四角蛤蜊、彩虹明樱蛤、光滑篮蛤和异白樱蛤(*Macoma incongrua* Martens 1865)的分布密度与粉砂含量(Silt)呈正相关关系, 而与沉积物粒径(SS)和砂含量(Sand)呈负相关关系; 泥螺的分布密度与沉积物粒径(SS)和砂含量(Sand)呈正相关关系, 而与粉砂含量(Silt)和黏土含量(Clay)呈负相关关系; 短文蛤的分布密度与黏土含量(Clay)呈正相关关系。

表 3 各两组群分歧种及其对组间差异性贡献百分比(%)
 Tab. 3 Discriminating species and their percentage contribution to the two dissimilar groups of shellfish

种类	贝类组群									
	I - II	I - III	I - IV	I - V	II - III	II - IV	II - V	III - IV	III - V	IV - V
中国蛤蜊	21.95	10.90	7.18	18.70	2.97		4.11			
等边浅蛤	12.37	5.85	3.60	9.05			3.17			
异白樱蛤	8.13	3.71	6.52	5.99		5.77		6.47		6.20
短文蛤	8.01	5.56	3.79	6.53	7.54	4.52	3.50	4.22	7.99	5.27
红带织纹螺	6.37	5.22			5.39	1.97	7.93	3.91	6.56	
青蛤	5.51	4.15	3.93	4.09	5.20	4.22		5.16	5.12	4.50
广大扁玉螺	3.16			2.33						
朝鲜笋螺	3.16	5.60	2.70	3.48	5.94	3.04	3.44	5.11	4.53	3.33
纵肋织纹螺	3.13	3.78		5.05	4.81	1.96	7.75	2.83	4.48	
经氏壳蛞蝓	2.63									
秀丽织纹螺	3.15	5.99	7.17	7.52	7.59	7.94	12.86	5.89	5.30	5.79
扁玉螺	2.88	4.43	1.99	5.38	6.56	1.78	5.87	4.22	8.07	
日本镜蛤	3.16		3.46	2.28		3.89		4.18		4.20
魁蚶	2.90	1.66								
白带三角螺	2.50						3.14			
江户明樱蛤	2.67									
泥螺		11.28	5.71		14.26	6.15		2.65	14.36	6.77
彩虹明樱蛤		8.86	12.20		11.70	13.49		8.61	11.66	14.69
光滑篮蛤		5.04	22.82		6.01	25.41		24.40	5.91	27.29
凸壳肌蛤		2.75		6.44	3.59		9.94	2.11	4.42	
四角蛤蜊		2.68	7.19		3.35	7.90		7.52	3.30	8.49
黑纹斑捻螺		2.11			3.12		1.84			
托氏蝓螺		1.95	2.97	15.14	2.33	3.23	25.65	4.12	10.82	5.35
毛蚶							1.64			

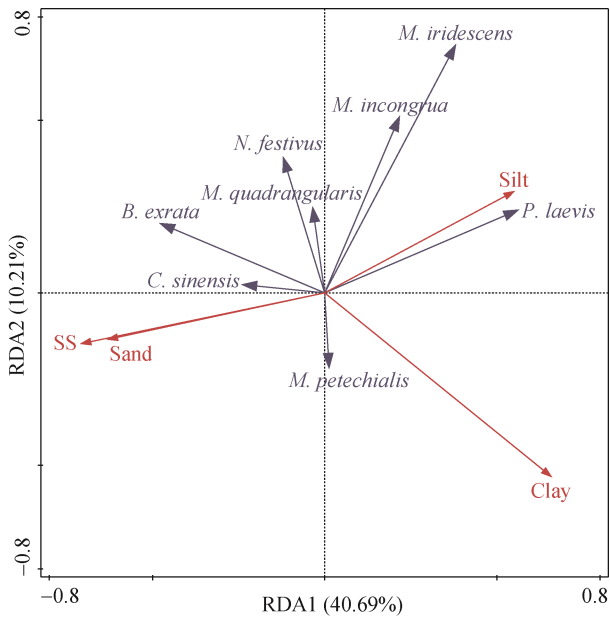


图 6 渤海南部潮间带主要贝类(IRI \geq 100)密度与沉积物因子相关性 RDA 分析

Fig. 6 Redundancy analysis (RDA) of the main shellfish density (IRI \geq 100) and sediment factors in the southern tidal zone of Bohai Bay

注: *C. sinensis*, 青蛤; *B. exrata*, 泥螺; *M. petechialis*, 短文蛤; *M. incongrua*, 异白樱蛤; *P. laevis*, 光滑篮蛤; *M. iridescens*, 彩虹明樱蛤; *M. quadrangularis*, 四角蛤蜊; *N. festivus*, 秀丽织纹螺; SS, 沉积物粒径; Sand, 砂含量; Silt, 粉砂含量; Clay, 黏土含量

潮下带区域第一轴(RDA1)和第二轴(RDA2)的特征值分别为 31.63%和 24.58%, RDA1 和 RDA2 共解释物种累计方差百分比的 91.04%和物种-环境累计方差总百分比的 71.00%。图 7 显示排序轴 1 与 PP(浮游植物丰度)、Chl-*a*、Clay(黏土含量)、Silt(粉砂含量)和 ZP(浮游动物丰度)呈正相关关系, 而与 SS(沉积物粒径)和 Sand(砂含量)呈负相关关系。排序轴 2 与 pH、Chl-*a* 和 PP(浮游植物丰度)呈正相关关系, 而与 Clay(黏土含量)和 ZP(浮游动物丰度)呈负相关关系。等边浅蛤、白带三角螺(*Trigonostoma scalariformis* Lamarck 1822)、朝鲜笋螺、纵肋织纹螺、扁玉螺、秀丽织纹螺和红带织纹螺的分布密度与 SS(沉积物粒径)和 Sand(砂含量)呈正相关性关系, 而与 Silt(粉砂含量)和 Clay(黏土含量)呈负相关关系。广大扁玉螺(*Glossaulax reiniana* Dunker 1877)和中国蛤蜊的分布密度与 pH、Chl-*a* 和 PP(浮游植物丰度)呈正相关关系, 与 Clay(黏土含量)呈负相关关系。托氏蛸螺(*Umbonium thomasi* Crosse 1863)的分布密度与 Clay(黏土含量)和 ZP(浮游动物丰度)呈正相关关系,

而与 pH、SS(沉积物粒径)和 Sand(砂含量)呈负相关关系。

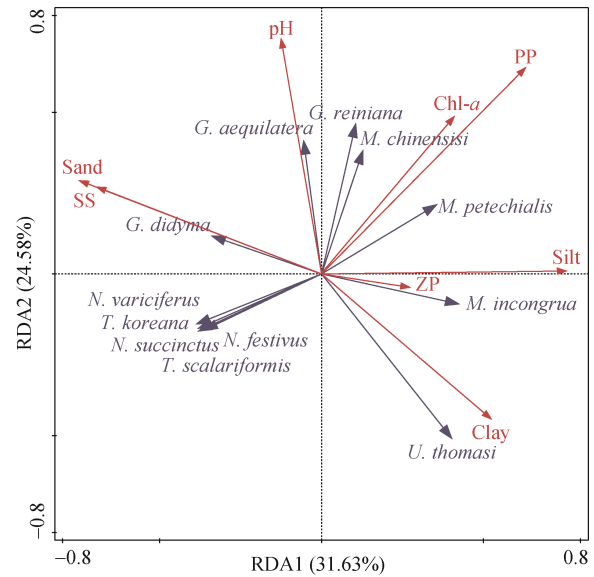


图 7 渤海南部潮下带主要贝类(IRI \geq 100)密度与环境因子相关性 RDA 分析

Fig. 7 Redundancy analysis (RDA) of the main shellfish density (IRI \geq 100) and sediment factors in the southern subtidal zone of Bohai Bay

注: *U. thomasi*, 托氏蛸螺; *M. petechialis*, 短文蛤; *M. incongrua*, 异白樱蛤; *M. chinensisi*, 中国蛤蜊; *G. reiniana*, 广大扁玉螺; *G. didyma*, 扁玉螺; *N. succinctus*, 红带织纹螺; *T. koreana*, 朝鲜笋螺; *T. scalariformis*, 白带三角螺; *N. variciferus*, 纵肋织纹螺; *N. festivus*, 秀丽织纹螺; *G. aequilatera*, 等边浅蛤; PP, 浮游植物丰度; Clay, 黏土含量; Silt, 粉砂含量; ZP, 浮游动物丰度; Chl-*a*, 叶绿素 *a*; SS, 沉积物粒径; Sand, 砂含量

3 讨论

3.1 渤海湾南部滩涂贝类资源组成及其群落结构特征

滩涂一般指包含潮上带、潮间带(高潮带、中潮带、低潮带)和潮下带(水深 $<$ 15 m)的区域, 而经济贝类集中分布于潮间带, 包括短文蛤、四角蛤蜊等^[18-19], 这与贝类生长发育等生命活动对栖息环境的要求有关, 因此国内许多学者将贝类群落结构的相关研究区域聚焦在潮间带区域^[10]。然而, 潮下带也是许多贝类的重要栖息地, 如朝鲜笋螺、广大扁玉螺、纵肋织纹螺等螺类以及中国蛤蜊、等边浅蛤等小型双壳贝类^[20]。本研究中, 潮下带出现的贝类种类数和物种多样性指数明显高于潮间带, 究其原因, 这可能是与潮下带的潮汐、波浪和海流等的作用给潮下带贝类

带来了丰富的饵料生物有关。此外,潮间带的中潮带出现的贝类种类数及其多样性指数显著高于高、低潮带,这也可能与潮流的影响有关,如高潮带海水淹没时间短,贝类生存环境较为恶劣,而低潮带淹没时间长,不适宜在表层栖息的贝类生存^[21],并且中潮带为泥沙混合型沉积环境,相较于低潮带软泥底质和高潮带泥砂质更适合多种贝类的生长^[7, 22]。此外,Shannon-Weaver多样性指数(H')也常被用来评价水环境受人为影响的程度^[23],据此推断,本研究中的中潮带和潮下带均受到人为中度影响,而底耙网等传统贝类捕捞方式、河口排污、滨州港池建设等是主要的人为影响因素^[24],对贝类的栖息环境和生长繁殖构成潜在威胁。

本研究中,光滑篮蛤、四角蛤蜊和短文蛤属于潮间带贝类的优势物种,这也与刘艳芬等^[10]的研究结果相一致。光滑篮蛤属于广温广盐性滩涂底栖贝类,广泛分布于我国南北沿海,也是黄河三角洲滩涂、辽东湾西海岸潮间带、闽江口潮间带等区域的贝类优势种^[24-26]。一方面,光滑篮蛤对水体有重要的净化作用^[27],另一方面,光滑篮蛤可作为虾蟹类养殖中的高营养成分饲料^[28],据此,滨州市依托底播型海洋牧场建设不断开展该物种的贝类增殖活动,使其资源量和栖息密度在贝类群落中占比较高。四角蛤蜊生物量和栖息密度在研究区域东侧尤为突出,东侧滩涂区域的无棣贝壳堤岛保护区,其适宜的栖息环境以及较少的人为活动都为四角蛤蜊生存繁殖奠定了良好基础。此外,四角蛤蜊极强的环境适应能力使其在分布面积、栖息密度和生物量等方面不断增加,受人为活动干扰较小^[29]。已有报道指出,短文蛤一直是我国沿海区域的重要经济贝类,资源量和产量居高不下^[29]。但伴随采捕强度过大、繁殖群体锐减、苗种补充不足、引进苗种滥用,以及快速工农业和港口工程发展造成的环境污染及栖息地破坏等问题的出现^[30],短文蛤资源开始严重衰竭。然而,短文蛤在本研究中依然作为渤海湾南部滩涂区域的优势种,这可能与该区域底播型海洋牧场进行的多批次短文蛤增殖放流有关。近年来,我国尤其是山东省进行的多物种增殖放流活动,对渔业资源养护修复和海洋生态环境改善均取得了极为显著的成效。相较于滩涂,本研究中潮下带的优势种多为经济价值较低的贝类,如等边浅蛤、朝鲜笋螺、红带织纹螺和纵肋织纹螺等,而在其他相关研究中也有诸多类似结论^[20, 31]。可以看出,经济贝类多分布在潮间带区域,

这与其环境适应性、生态习性等极为密切,但潮下带区域的贝类在维持水生生态系统结构稳定性、保障贝类生物多样性和改善水生环境等方面也发挥极为重要的作用^[32]。

本研究区域的中间位置为滨州港,其建设使用在一定程度上改变了水动力条件和水生生物栖息地^[24]。因此,本文将研究区域贝类分为5个组群,其中I-IV组群的重要分组依据就与滨州港的位置息息相关,而V组群仅包含D4站位,这可能与站位托氏蛴螺分布较多有关。

3.2 渤海湾南部滩涂贝类与环境因子相关性

渤海湾南部近岸入海径流较多,河口区域底栖生物的分布受到海水中有有机质、底质、水动力以及陆源污染物等的多重影响^[17, 29]。本研究中,贝类种类组成及其资源量分布特征也证实了渤海湾南部滩涂区域的环境变化较为复杂,而贝类群落分组差异也受到诸多环境因子的影响。

许多研究结果表明,沉积物类型是影响贝类分布的重要环境因子^[10],例如,王金叶等^[29]研究表明,泥螺主要分布在蛤喇岗滩涂的中潮带,其沉积物类型主要为粉砂,而四角蛤蜊和短文蛤主要分布在中潮带-低潮带区域,该区域沉积物含沙量较高。他们推测这可能与中潮带的砂质沉积物所含有有机质较为丰富,可以支持容纳更多的贝类生物量有关,而包括Macfarlane等^[33]、吴文广等^[19]和王金叶等^[29]等的研究也提出了类似观点。本研究中,与滩涂区域贝类栖息密度相关性较强的环境因子为沉积物粒径及沉积物类型,其中沉积物粉砂含量与四角蛤蜊呈正相关,沉积物黏土含量与短文蛤呈正相关。粉砂及黏土含量较高的底质类型空间异质化程度更高,可以为贝类的生长发育提供更多空间^[34],同时粉砂及黏土含量较高的底质类型沉积物粒径偏细,底质较为松软^[35],可以吸附更多有机质和微生物,营养物质含量更高,可以为贝类提供丰富的饵料^[36]。此外,叶绿素 a 和pH也是影响潮下带贝类分布的重要环境因子。一般而言,pH会对贝类体内钙离子(Ca^{2+})代谢产生影响,当pH小于7.0时,会导致 Ca^{2+} 大量丢失,进而对贝类正常生长发育产生影响,严重时可致死^[37]。叶绿素 a 和浮游植物存量主要表征海水初级生产力的高低,而这也一定程度上决定了贝类食物来源^[18],进而影响贝类的生长发育和生存繁殖等生命活动。此外,潮下带的沉积物因子和浮游动物对部分贝类

物种的分布也有显著影响,如沉积物的砂含量及沉积物粒径与等边浅蛤和纵肋织纹螺密度等呈正相关,而沉积物的粘土含量与托氏蛞蝓密度呈正相关,沉积物的砂含量及沉积物粒径与异白樱蛤和托氏蛞蝓等呈负相关等。浮游动物以海水中的有机碎屑和浮游植物为食,可以将营养物质输送到较低的营养级,也是贝类的饵料组成之一^[38],据此推断浮游动物主要是通过海洋生物间复杂的相互关系及海域内的食物网结构对贝类的分布产生影响^[39]。

参考文献:

- [1] 张立奎, 吴建政, 李巍然, 等. 渤海湾西部与南部海岸线和潮滩演变及其影响因素[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(1): 21-27.
ZHANG Likui, WU Jianzheng, LI Weiran, et al. Coast-line changes and tidal flat evolution in west and south parts of Bohai Bay and affecting factors[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2014, 34(1): 21-27.
- [2] 姜磊. 黄河三角洲近岸海域生态环境调查及变化趋势分析[D]. 济南: 济南大学, 2020.
JIANG Lei. Investigation on the ecological environment in the Coastal waters of the Yellow River Delta and analysis of its changing trend[D]. Jinan: Jinan University, 2020.
- [3] 李莉, 吴莹莹, 宋娴丽, 等. 浅析山东省滩涂贝类养殖现状与技术发展对策[J]. 水产养殖, 2020, 41(10): 78-80.
LI Li, WU Yingying, SONG Xianli, et al. Analyze on the present situation and technical development countermeasures of beach shellfish culture in Shandong Province[J]. Journal of Aquaculture, 2020, 41(10): 78-80.
- [4] 季如宝, 毛兴华, 朱明远. 贝类养殖对海湾生态系统的影响[J]. 黄渤海海洋, 1998, 16(1): 22-28.
JI Rubao, MAO Xinghua, ZHU Yuanming. Effects of shellfish culture on gulf ecosystem[J]. Journal of Oceanography of Huanghai and Bohai Seas, 1998, 16(1): 22-28.
- [5] 朱明明. 滤食性河蚌对浮游生物群落与水质的影响研究[D]. 广州: 暨南大学, 2020.
ZHU Mingming. Effects of filter-feeding bivalves on plankton community and water quality[D]. Guangzhou: Jinan University, 2020.
- [6] 王益鸣, 张凤英, 许贞平, 等. 椒江河口生态环境质量评价[J]. 浙江海洋学院学报·自然科学版, 2005, 24(3): 221-226.
WANG Yiming, ZHANG Fengying, XU Zhenping, et al. Assessment on the situation of ecological environment quality in Jiaojiang Estuary[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2005, 24(3): 221-226.
- [7] 赵云龙, 赵文, 闫喜武, 等. 渤海辽东湾高家滩沿海滩涂贝类资源调查[J]. 大连海洋大报, 2011, 26(5): 471-474.
ZHAO Yunlong, ZHAO Wen, YAN Xiwu, et al. Coastal shellfish resources survey of Gaojia Beach in Liaodong Bay, Bohai Sea[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2011, 26(5): 471-474.
- [8] 段秀娟, 李永仁, 任延军. 天津汉沽鲤鱼门潮间带的经济贝类资源[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2015, 35(4): 71-74.
DUAN Xiujuan, LI Yongren, REN Yanjun. Economic shellfish resources in the intertidal zone along Liyumen coast, Hangu of Tianjin[J]. Journal of Tianjin Normal University(Natural Science Edition), 2015, 35(4): 71-74.
- [9] 李永仁, 梁健, 郭永军, 等. 天津鲤鱼门滩涂经济贝类资源变化及原因探讨[J]. 海洋科学, 2015, 39(11): 68-73.
LI Yongren, LIANG Jian, GUO Yongjun, et al. Study on the changes of economic shellfish resources and their causes in the intertidal zone along Liyumen coast, Tianjin[J]. Marine Sciences, 2015, 39(11): 68-73.
- [10] 刘艳芬, 左明, 王晓璇, 等. 黄河三角洲潮间带底栖贝类群落结构与多样性研究[J]. 海洋湖沼通报, 2022, 44(6): 121-129.
LIU Yanfen, ZUO Ming, WANG Xiaoxuan, et al. Community structure and diversity of benthic shellfish in the intertidal zone of Yellow River Delta[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2022, 44(6): 121-129.
- [11] 董贵仓, 李秀启, 刘峰, 等. 黄河三角洲潮间带底栖动物群落结构分析及环境质量评价[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(3): 370-374.
DONG Guancang, LI Xiuqi, LIU Feng, et al. Community characteristics of macrozoobenthos and environmental quality assessment in intertidal zone of the Huanghe Delta[J]. Marine Environmental Science, 2012, 31(3): 370-374.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 12763.6—2007 海洋调查规范 第 6 部分: 海洋生物调查[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 12763.6—2007 Specifications for oceanographic survey-Part 6: Marine biological survey[S]. Beijing: China Standard Press, 2007.
- [13] 张素萍, 张均龙, 陈志云, 等. 黄渤海软体动物图志[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
ZHANG Suping, ZHANG Junlong, CHEN Zhiyun, et al. Mollusks of the Yellow Sea and Bohai Sea[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 12763.9—2007 海洋调查规范

- 范第9部分:海洋生态调查指南[S].北京:中国标准出版社,2007.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 12763.9—2007 Specifications for oceanographic survey-Part 9: Guidelines for marine ecological survey[S]. Beijing: China Standard Press, 2008.
- [15] 任中华,李凡,魏佳丽,等.渤海东部海域秋季底层游泳动物种类组成及群落多样性[J].生态学报,2016,36(17):5537-5547.
- RENG Zhonghua, LI Fan, WEI Jiali, et al. Autumnal species composition and community diversity of nekton in the eastern Bohai Sea[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(17): 5537-5547.
- [16] 任中华,郑亮,李凡,等.莱州湾海域虾类群落结构及其多样性[J].海洋渔业,2014,36(3):193-201.
- RENG Zhonghua, ZHENG Liang, LI Fan, et al. Community structure and diversity of shrimp in Laizhou Bay[J]. Marine Fisheries, 2014, 36(3): 193-201.
- [17] 赵永强,曾江宁,陈全震,等.椒江河口滩涂贝类时空分布与环境因子的关系[J].应用与环境生物学报,2009,15(6):808-813.
- ZHAO Yongqiang, ZENG Jiangning, CHEN Quanzhen, et al. Relationship of environmental factors with temporal and spatial distribution of macrobenthic mollusks at a tide flat of Jiaojiang River Estuary[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2009, 15(6): 808-813.
- [18] 刘子琳,宁修仁,蔡昱明.北部湾浮游植物粒径分级叶绿素 *a* 和初级生产力的分布特征[J].海洋学报(中文版),1998,20(1):50-57.
- LIU Zilin, NING Xiuren, CAI Yuming. Distribution characteristics of size-fractionated chlorophyll-*a* and productivity of phytoplankton in the Beibu Gulf[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1998, 20(1): 50-57.
- [19] 吴文广,冷宇,张继红,等.黄河口泥螺种群夏季分布特征及其与底质环境的关系[J].渔业科学进展,2013,34(3):38-45.
- WU Wenguang, LENG Yu, ZHANG Jihong, et al. Preliminary study on distribution characteristics and living environment of *Bullacta exarata* population in Yellow River Estuary, China[J]. Progress in Fishery Sciences, 2013, 34(3): 38-45.
- [20] 孟周,魏永杰,王晓波,等.浙江三门湾海域主要底上动物生态位及种间联结性[J].海洋与湖沼,2022,53(5):1269-1278.
- MENG Zhou, WEI Yongjie, WANG Xiaobo, et al. Niche and interspecies association of major epifauna in Sanmen Bay of Zhejiang Province, China[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2022, 53(5): 1269-1278.
- [21] SPRUZEN F L, RICHARDSON A M M, WOEHLER E J. Spatial variation of intertidal macroinvertebrates and environmental variables in Robbins Passage wetlands, NW Tasmania[J]. Hydrobiologia, 2008, 598(1): 325-342.
- [22] 王晓华,朱龙,罗世菊,等.山东蓬莱沿海岩相潮间带贝类的垂直分布[J].海洋湖沼通报,2003,14(4):79-83.
- WANG Xiaohua, ZHU Long, LUO Shiju, et al. On the vertical distribution of mollusca in the rocky intertidal zone in Penglai, Shandong Province[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2003, 14(4): 79-83.
- [23] 王尽文,纪莹璐,蔡帅,等.日照近岸海域春季鱼类群落结构[J].海洋湖沼通报,2022,44(4):115-122.
- WANG Jinwen, JI Yinglu, CAI Shuai, et al. Fish community structure in the coastal waters of Rizhao City in spring[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2022, 44(4): 115-122.
- [24] 黄六一,王羿宁,黄桂芳,等.海上风电场对鱼类福利的影响研究进展[J].水产学报,2022,46(11):2226-2240.
- HUANG Liuyi, WANG Yining, HUANG Guifang, et al. Advances in research on the effects of offshore wind farm on fish welfare[J]. Journal of Fisheries of China, 2022, 46(11): 2226-2240.
- [25] 李轶平,李玉龙,付杰,等.辽东湾西海岸潮间带大型底栖动物群落生态位特征[J].海洋科学,2019,43(3):32-39.
- LI Zhiping, LI Yulong, FU Jie, et al. Niche characteristics of macrobenthic community in the intertidal zone on west coast of Liaodong Bay[J]. Marine Sciences, 2019, 43(3): 32-39.
- [26] 林建杰.闽江口潮间带大型底栖动物群落基本特征分析[J].渔业研究,2022,44(1):33-43.
- LIN Jianjie. Analysis on basic characteristics of macrobenthos community in the intertidal zone of Min River estuary, Fujian Province[J]. Journal of Fisheries Research, 2022, 44(1): 33-43.
- [27] 周婷婷,郑荣泉,林志华,等.光滑篮蛤对净化养殖废水的净化效果[J].安徽农业科学,2017,45(32):57-60,64.
- ZHOU Tingting, ZHENG Rongquan, LIN Zhihua, et al. Purification effect of *Potamocorbula laevis* on aquaculture wastewater[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, 45(32): 57-60, 64.
- [28] 刘静龙.光滑篮蛤营养成分分析与评价[J].黑龙江水产,2022,41(1):6-11.
- LIU Jinglong. Analysis and evaluation of nutrient composition of *Potamocorbula laevis*[J]. Northern Chinese Fisheries, 2022, 41(1): 6-11.
- [29] 王金叶,张安国,李晓东,等.蛤蜊岗滩涂贝类分布及其与环境因子的关系[J].海洋科学,2016,40(4):32-39.

- WANG Jinye, ZHANG Anguo, LI Xiaodong, et al. Spatial distribution of buried molluscs and their relationship with sediment factors in Geligang[J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(4): 32-39.
- [30] 何好如. 渔业伦理视角下的现代渔业治理研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021.
- HE Yuru. Study on modern fisheries and aquaculture governance from the ethical perspective[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2021.
- [31] 余书生, 孙颢. 珠江口香港海域底拖网贝类资源研究[J]. *海洋科学*, 2017, 41(11): 119-124.
- SHE Shusheng, SUN Jie. Bottom trawl survey on molluscs resources of the Pearl River Estuary near Hong Kong waters[J]. *Marine Sciences*, 2017, 41(11): 119-124.
- [32] 吴中奎, 邱小常, 张修峰, 等. 富营养化浅水湖泊生态修复中背角无齿蚌对水质改善的影响[J]. *湖泊科学*, 2018, 30(6): 1610-1615.
- WU Zhongkui, QIU Xiaochang, ZHANG Xiufeng, et al. Effects of *Anodonta woodiana* on water quality improvement in restoration of eutrophic shallow lakes[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(6): 1610-1615.
- [33] MACFARLANE G R, BOOTH D J. Estuarine macrobenthic community structure in the Hawkesbury River, Australia: Relationships with sediment physicochemical and anthropogenic parameters[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2001, 72(1): 51-78.
- [34] 张晓举, 丁龙, 冯春晖. 辽东湾中部海域春季大型底栖生物的群落结构及影响因子[J]. *海洋科学*, 2016, 40(10): 43-48.
- ZHANG Xiaoju, DING Long, FENG Chunhui. Macrobenthos community and environmental factors in the middle waters of Liaodong Bay in spring[J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(10): 43-48.
- [35] 吴金浩, 宋广军, 韩家波, 等. 渤海老铁山海域沉积物粒度分布及其对大型底栖生物群落的影响[J]. *水产科学*, 2019, 38(5): 624-635.
- WU Jinhao, SONG Guangjun, HAN Jiabo, et al. Granularity distribution of sediments and effect on macrobenthos community in Laotie Mountain area of Bohai Sea[J]. *Fisheries Science*, 2019, 38(5): 624-635.
- [36] 江锦祥, 黄立强, 孟凡, 等. 东海大陆架及其邻近海区底栖生物种类组成和分布特点[J]. *台湾海峡*, 1985, 4(1): 89-98.
- JIANG Jinxiang, HUANG Liqiang, MENG Fan, et al. Species composition and distribution of benthic animals on the continental shelf of the east China Sea and its adjacent waters[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 1985, 4(1): 89-98.
- [37] 丁建华, 周立志, 邓道贵, 等. 淮河干流软体动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. *水生生物学报*, 2013, 37(2): 367-375.
- DING Jianhua, ZHOU Lizhi, DENG Daogui, et al. Community structure of benthic mollusca and its relationship with environmental factors in the mainstream of Huaihe River[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2013, 37(2): 367-375.
- [38] 张镇, 董建宇, 孙昕, 等. 莱州芙蓉岛人工鱼礁区大型底栖动物营养结构特征研究[J]. *水产学报*, 2023, [2023-09-14]. DOI: 10.11964/jfc.20210913067.
- ZHANG Zhen, DONG Jianyu, SUN Xi, et al. Trophic structure of macrobenthos in artificial reef area of Furong Island, Laizhou Bay[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2023, [2023-09-14]. DOI: 10.11964/jfc.20210913067.
- [39] 唐柳青, 迟雯丹, 吕芳, 等. 长岛海域海洋浮游生物和底栖生物的季节变化规律及相互关系[J/OL]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2022, [2022-08-22]. DOI: 10.16441/j.cnki.hdxh.20220235.
- TANG Liuqing, CHI Wendan, LV Fang, et al. Seasonal variation and interrelationship of marine plankton and benthos in Changdao Island sea[J/OL]. *Periodical of Ocean University of China*, 2022, [2022-08-22]. DOI: 10.16441/j.cnki.hdxh.20220235.

Characteristics of the shellfish community structure and its correlation with environmental factors in the southern tidal flats of Bohai Bay

JIANG Wen-liang¹, CHEN Sheng-lin², LI Yong-ming², ZHANG De-pu³, LIU Dong¹, LI Min¹, GAO Meng-juan¹, LV Zhen-bo¹, REN Zhong-hua¹

(1. Ludong University, Institute for Advanced Study of Coastal Ecology, Yantai 264025, China; 2. Binzhou Ocean Development Research Institute, Binzhou 256600, China; 3. Shanghai Ocean University, Institute of Marine Science, Shanghai 201306, China)

Received: Mar. 15, 2023

Key words: Southern Bohai Bay; Binzhou; tidal zone; shellfish; community structure; correlation with environmental factors

Abstract: This study aimed to investigate the community structure characteristics of shellfish and their correlation with the environmental factors in southern Bohai Bay (Binzhou) by setting up 36 sampling stations in six sections covering the tidal flats (high tidal flats, middle tidal flats, and low tidal flats) and the subtidal zone. The results showed that a total of 30 shellfish species were collected in the tidal flats and the subtidal zone. 23 species were observed in the tidal flats, with the dominant species of *Potamocorbula laevis* (Hinds 1843), *Macra quadrangularis* (Reeve 1854), and *Meretrix petechialis* (Lamarck 1799) and 26 species were observed in the subtidal zone with the dominant species of *Macra chinensis* (Philippi 1864), *Gomphina aequilatera*, *Terebra koreana* (Yoo 1976), *Nassarius succinctus* (A. Adams 1852), and *Nassarius variciferus* (A. Adams 1851). The diversity index (H') and evenness index (J') in the tidal flats were significantly higher than those in the subtidal zone, whereas the richness index (D') showed the opposite trend. The biomass (710.16 g/m^2) and density ($4523 /\text{m}^2$) of the shellfish in the tidal flats were significantly higher than those in the subtidal zone (17.10 g/m^2 ; $35 /\text{m}^2$). Additionally, multivariate analysis of the community structure revealed that shellfish were divided into five groups, including the eastern subtidal zone, the western subtidal zone, the western tidal flats, the eastern tidal flats, and the area including only the D4 station. Moreover, redundancy analysis was conducted to study the correlation between the dominant shellfish species and the environmental factors of the tidal flats and subtidal zones. The results showed that particle size and sand or silt content of the sediment were major factors affecting the shellfish distribution in the tidal flats, whereas phytoplankton density, particle size, and sand, silt, or clay content of the sediment were major factors affecting the shellfish distribution in the subtidal zone. Shellfish resources are abundant in southern Bohai Bay (Binzhou), but the protection or restoration of shellfish resources should be strengthened based on the ecological characteristics of the different tidal areas. This study provides a basis for the conservation and sustainable utilization of shellfish resources in the Bohai Bay region.

(本文编辑: 赵卫红)