

DOI: 10.12264/JFSC2023-0232

## 江苏启东潮间带滩涂底栖贝类生物多样性及分布格局

李楠楠<sup>1</sup>, 范瑞良<sup>1</sup>, 陈渊戈<sup>1</sup>, 欧阳珑玲<sup>1</sup>, 姜伟行<sup>1,2</sup>, 全为民<sup>1</sup>

1. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 渔业生态环境研究室, 上海 200090;

2. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306

**摘要:** 为掌握启东潮间带滩涂底栖贝类的生物多样性和资源现状, 于2019年春季和秋季在启东沿海滩涂开展底栖贝类调查, 分析了启东潮间带滩涂底栖贝类的种类组成、多样性、栖息密度、优势种及其分布格局, 可为贝类种质资源保护与栖息地修复提供基础数据和科学依据。研究结果表明, 春、秋两季调查共记录到30种底栖贝类, 其中腹足纲14种、双壳纲16种。沿潮间带高程梯度, 底栖贝类平均栖息密度空间格局呈现为: 高潮区>中潮区>低潮区的分布规律。潮间带滩涂底栖贝类的优势物种为四角蛤蜊(*Mactra veneriformis*)、薄片镜蛤(*Dosinia laminata*)、文蛤(*Meretrix meretrix*)、彩虹明樱蛤(*Moerella iridescens*)和泥螺(*Bullacta exarata*)。非参数多维标度排序(nMDS)结果显示启东潮间带滩涂底栖贝类可分为3个类群: Q1(吕四港)断面3个潮区为第一组群, 特征性物种为彩虹明樱蛤和菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*); Q8(启兴沙)断面3个潮区及个别中部断面的中、低潮区为第二组群, 特征性物种为薄片镜蛤和泥螺; 其余中部断面为第三组群, 特征性物种为文蛤和四角蛤蜊。典范相关分析法(CCA)显示: 四角蛤蜊和文蛤的栖息密度均与砂质含量和D50(中值粒径)呈正相关关系, 与黏土的含量呈负相关; 彩虹明樱蛤的密度分布与黏土含量呈正相关, 与砂含量呈负相关性; 薄片镜蛤的分布与TOC呈负相关关系。

**关键词:** 潮间带; 底栖贝类; 生物多样性; 分布格局; 启东

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2023)11-1327-10

贝类通常是滩涂生物群落组成的优势类群, 是海洋生态系统的重要组成部分, 为人类社会提供了大量海洋生物资源。同时, 贝类摄食悬浮物和浮游植物, 净化了内湾及近海水体, 发挥着调控赤潮的功能<sup>[1]</sup>, 并可能通过生物固碳作用降低了大气中二氧化碳的浓度, 进一步发展为“蓝碳”的一个重要环节<sup>[2-3]</sup>。

启东市拥有203 km的江海岸线和440 km<sup>2</sup>的江海滩涂, 是重要的藻类养殖基地和理想的底栖贝类增、养殖场, 其中底栖贝类是启东重要的区域特色资源, 在海洋渔业资源中占有重要地位。2009年以来, 启东吕四港区域连片围填海工程实际围填面积达41.14 km<sup>2</sup><sup>[4]</sup>, 大量沿海开发、滩涂

围垦、海岸带建设等人为活动导致了贝类适宜栖息生境日益减小, 区域生态要素随之发生变化。另一方面, 近年来也开展了大规模、多批次的贝类增殖放流活动, 这些因素对潮间带底栖贝类资源量、生物多样性以及海洋生态系统的平衡也带来一定的影响。

季晓等<sup>[5]</sup>运用 AMBI 指数和 ABC 曲线法研究发现启东近岸人为活动变化对底栖动物群落结构干扰程度较为强烈; 张虎等<sup>[6]</sup>调查了2013年江苏中南部潮间带大型底栖动物时空分布状况, 结果显示其群落结构稳定性较高; 袁健美等<sup>[7]</sup>分析了启东长江围填海工程环境因子的变化对底栖动物分布的影响, 发现了围填海活动改变了海域的盐

收稿日期: 2023-09-27; 修订日期: 2023-11-21.

基金项目: 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”重点专项(2020YFD0900800).

作者简介: 李楠楠(1983-), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向为贝类生态修复. E-mail: happysdq@126.com

通信作者: 全为民, 研究员, 研究方向为贝类生境的识别、保护与修复. E-mail: quanweim@163.com

度、水深、沉积物等生境条件,导致大型底栖动物群落结构和多样性指数均发生变动。底栖贝类作为底栖生物的一种,是启东有特色的海洋资源之一。在启东规模较大的滩涂围垦和多批次的贝类增殖放流状况下,对其贝类资源分布及群落结构的现状尚未有系统、整体性研究。本研究基于 2019 年春、秋两季启东市潮间带滩涂底栖贝类资源的调查结果,分析了启东潮间带底栖贝类的种类组成、生物多样性、栖息密度、优势种及其分布格局,为江苏沿海滩涂贝类种质资源保护与管理、栖息地修复与建设提供基础数据和科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 站 位 设 置 及 样 品 采 集

于 2019 年 5 月(春季)和 2019 年 11 月(秋季)各开展 1 次调查,在启东市沿海潮间带设置 8 个调查断面(图 1),分别为吕四港断面(Q1)、横沙断面(Q2)、蒿枝港南侧 2 个断面(Q3、Q4)、协兴港南侧 2 个断面(Q5、Q6)、连兴港断面(Q7)和启兴沙断面(Q8)。在每个断面的高潮区、中潮区以及低潮区分别设置 4 个调查站位,每个调查站位采集 1 个 0.25 m×0.25 m 样方,每一断面沿高程梯度共计设置 12 个调查样方。在每个调查样方内挖取表层 0.3 m 的泥样用 0.5 mm 网孔套筛冲洗,挑拣其中的生物样品,用 75%乙醇溶液现场固定,保存在聚乙烯样品瓶,带回实验室进行称重及鉴定分析。

贝类取样及分析,总有机碳(TOC)、硫化物、盐度的测定参照《海洋监测规范》GB17378.7-1998。沉积物粒度测定采用激光粒度分析法,根据谢帕德沉积物分类方法<sup>[8]</sup>进行底质分类。

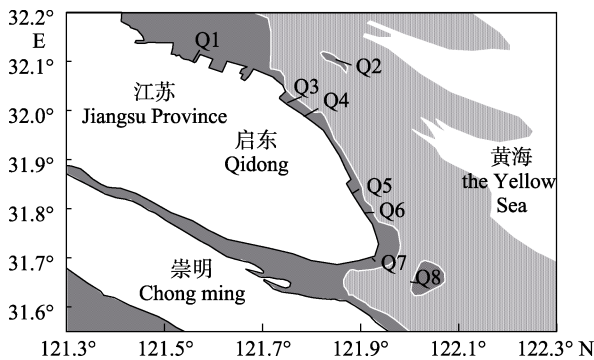


图 1 启东沿海潮间带采样断面

Fig. 1 Sampling transects in Qidong intertidal mudflats

### 1.2 数据 分 析 与 处 理

采用三因素方差分析(three-way ANOVA)比较贝类栖息密度在季节、潮区和地点间的差异性。运用相对重要性指数(IRI)来确定贝类的优势度,  $IRI=(N\%+W\%) \times F\%$ , 式中  $N\%$  为某一物种的丰度百分比;  $W\%$  为该物种的生物量百分比;  $F\%$  为该物种的出现频率,取  $IRI \geq 500$  的物种为优势种<sup>[9]</sup>。

采用非参数多维度标度排序(NMDS)对贝类群落分组,排序分析之前将贝类栖息密度经过二次方根转化,除去频率小于 5%的物种,减少稀有种效应,构建 Bray-Curtis 相似矩阵。采用双因素相似性分析(two-way ANOSIM)检验地点(断面)和高程(潮区)对底栖贝类群落结构的影响显著性。运用相似性百分比(SIMPER)衡量同一贝类结构群落的平均相似性,并分析其主要贡献种。贝类优势种的栖息密度经  $\log(X+1)$  转化后,采用 CANOCO 软件中的典范相关分析法(canonical correspondence analysis, CCA)进行栖息密度与环境因子的相关分析和排序图的绘制。

利用 SPSS 19.0 软件分析完成三因素方差分析。采用 PRIMER6.0 软件完成非参数多维度标度排序、Bray-Curtis 相似矩阵分析及双因素相似性。

## 2 结果与分析

### 2.1 环境理化因子

Q1 和 Q8 断面沉积物类型分别为粉砂和砂质粉砂。其他 6 个断面砂质含量均较高,以砂质为主(表 1)。各断面间沉积物有机碳的平均含量无显著性差异( $P>0.05$ ), Q1 断面沉积物硫化物的含量显著高于其他 7 个断面( $P<0.05$ )。

### 2.2 种类组成

春秋两季调查共记录到底栖贝类 20 科 30 种,其中腹足纲 11 科 14 种,双壳纲 9 科 16 种。春、秋季分别记录到底栖贝类 25 种和 15 种。春季  $N\%>5\%$  的种类有薄片镜蛤(*Dosinia laminata*)、彩虹明樱蛤(*Moerella iridescens*)、泥螺(*Bullacta exarata*)、菲律宾蛤仔等,秋季  $N\%>5\%$  的种类有文蛤(*Meretrix meretrix*)、四角蛤蜊(*Macra veneriformis*)、托氏昌螺(*Umbonium thomasi*)、彩虹明樱蛤等(表 2)。Q1、Q3、Q4 断面贝类种类数最多,皆为 13 种;Q8 断面种类数最少,为 3 种(图 2)。

表 1 启东沿海潮间带采样断面环境理化因子

Tab. 1 Physical and chemical factors of sediment at sampling transects in Qidong intertidal mudflats

断面 section	砂含量/% sand content	粉砂含量/% silt content	黏土含量/% clay content	有机碳/% TOC	硫化物/(mg/kg) AVS	附近海水盐度/% salinity
Q1	14.85±1.24	74.52±0.75	10.63±0.56	0.62±0.01	94±6	26.9
Q2	68.02±1.45	27.53±1.15	4.45±0.30	0.45±0.00	52±7	25.7
Q3	62.47±9.65	34.7±9.09	2.83±0.65	0.67±0.01	67±9	26.2
Q4	80.24±3.49	17.74±3.06	2.02±0.47	0.45±0.02	42±2	26.2
Q5	91.16±1.26	8.07±1.09	0.77±0.18	0.51±0.01	42±7	20.0
Q6	80.76±5.51	17.26±4.94	1.98±0.58	0.32±0.01	33±7	20.0
Q7	74.02±7.34	23.22±6.64	2.76±0.83	0.47±0.02	32±6	14.1
Q8	29.83±3.93	61.97±3.15	8.2±0.83	0.68±0.02	53±7	21.2

表 2 启东沿海潮间带滩涂底栖贝类的种类、相对丰度(N%)和出现频率(F%)

Tab. 2 The number of shellfish species, relative abundance (N%) and frequency of occurrence (F%) of Shellfish in Qidong intertidal mudflats

物种名 species	春季 spring			秋季 autumn		
	数量 number	N%	F%	数量 number	N%	F%
小刀蛭 <i>Cultellus attenuatus</i>	1	0.19	4.17	—	—	—
毛蚶 <i>Anadara kagoshimensis</i>	2	0.38	8.33	—	—	—
凸壳肌蛤 <i>Arcuatula senhousia</i>	4	0.76	12.5	—	—	—
褐蚶 <i>Didimacar tenebrica</i>	3	0.57	4.17	—	—	—
光滑河蓝蛤 <i>Potamocorbula laevis</i>	1	0.19	4.17	—	—	—
薄片镜蛤 <i>Dosinia laminata</i>	109	20.6	70.83	14	6.03	25
菲律宾蛤仔 <i>Ruditapes philippinarum</i>	59	11.15	12.5	—	—	—
文蛤 <i>Meretrix meretrix</i>	36	6.81	45.83	51	21.98	37.5
青蛤 <i>Cyclina sinensis</i>	—	—	—	2	0.86	8.33
日本镜蛤 <i>Dosinia japonica</i>	—	—	—	1	0.43	4.17
凸镜蛤 <i>Dosinia derupta</i>	—	—	—	1	0.43	4.17
等边浅蛤 <i>Macridiscus aequilatera</i>	10	1.89	20.83	—	—	—
四角蛤蜊 <i>Mactra quadrangularis</i>	40	7.56	41.67	49	21.12	25
彩虹明樱蛤 <i>Iridona iridescens</i>	104	19.66	66.67	33	14.22	50
樱蛤科一种 <i>Tellinidae sp.1</i>	—	—	—	2	0.86	4.17
大竹蛭 <i>Solen grandis</i>	1	0.19	4.17	1	0.43	4.17
泥螺 <i>Bullacta exarata</i>	72	13.61	66.67	—	—	—
伶鼬榧螺 <i>Oliva mustelina</i>	1	0.19	4.17	—	—	—
脉红螺 <i>Rapana venosa</i>	1	0.19	4.17	—	—	—
丽核螺 <i>Tritonoharpaleali harasewych</i>	1	0.19	4.17	5	2.16	12.5
两栖螺科一种 <i>Amphibolidae sp.1</i>	1	0.19	4.17	—	—	—
托氏瑁螺 <i>Umbonium thomasi</i>	5	0.95	12.5	45	19.4	12.5
婆罗囊螺 <i>Semiretusa borneensis</i>	55	10.4	8.33	—	—	—
塔螺属一种 <i>Turritella sp.1</i>	1	0.19	4.17	—	—	—
扁玉螺 <i>Neverita didyma</i>	4	0.76	12.5	2	0.86	12.5
半褶织纹螺 <i>Nassarius sinarum</i>	11	2.08	4.17	—	—	—
秀丽织纹螺 <i>Reticunassa festiva</i>	5	0.95	16.67	14	6.03	25
纵肋织纹螺 <i>Nassarius variciferus</i>	1	0.19	4.17	1	0.43	4.17
红带织纹螺 <i>Nassarius succinctus</i>	1	0.19	4.17	—	—	—
笋螺科一种 <i>Terebra sp.1</i>	—	—	—	11	4.74	25

注: —表示此物种未出现.

Note: — indicated the specie has not appeared.

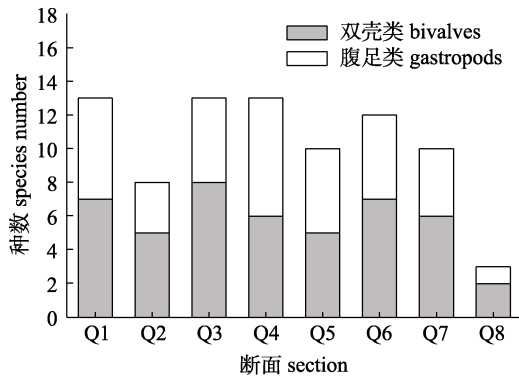


图 2 启东沿海潮间带各断面贝类种数

Fig. 2 The number of shellfish species in each section in Qidong intertidal mudflats

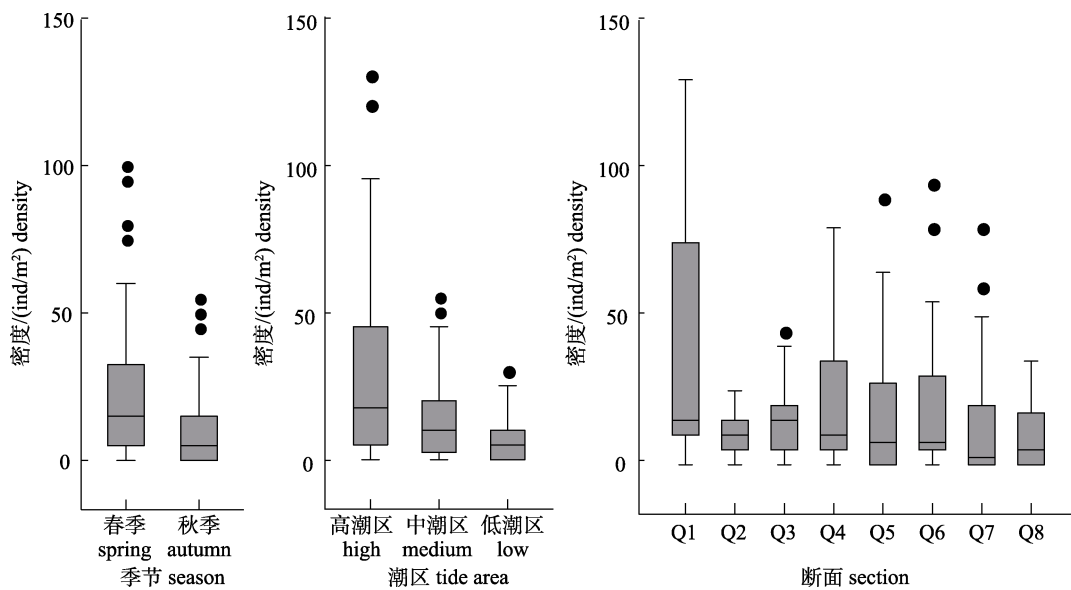


图 3 启东潮间带贝类总密度空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of shellfish in Qidong intertidal mudflats

## 2.4 优势种及其时空分布

按 IRI 由高至低, 春季 5 个优势种为四角蛤蜊、薄片镜蛤、文蛤、彩虹明樱蛤、泥螺; 秋季依次为文蛤、四角蛤蜊和彩虹明樱蛤。四角蛤蜊主要栖息于高、中潮区(表 3); 在 Q5、Q6 断面丰度最高, 平均丰度可达  $7.50 \text{ ind/m}^2$ 。其中在 Q5 的丰度均显著高于其他断面( $P < 0.05$ )(图 4a)。文蛤主要栖息于高潮区(表 3), 春季在 Q2、Q3 和 Q6 的文蛤丰度显著高于其他断面( $P < 0.05$ ), 秋季在 Q3、Q4 都显著高于其他断面( $P < 0.05$ )(图 4b)。彩虹明樱蛤在高、中、低 3 个潮区间丰度无显著性差异( $P > 0.05$ )(表 3), 在 Q1 断面的丰度显著高于

## 2.3 贝类总栖息密度及时空分布

贝类总栖息密度在不同的季节( $P < 0.05$ )、潮区( $P < 0.05$ )、断面间( $P < 0.05$ )均有显著性差异。在季节上的差异性表现为: 各潮区春季贝类栖息密度显著高于秋季。在潮区间的差异性表现为整体上随高程降低, 由陆向海方向, 贝类密度降低, 高潮区( $24.38 \text{ ind/m}^2$ ) > 中潮区( $7.34 \text{ ind/m}^2$ ) > 低潮区( $5.00 \text{ ind/m}^2$ )。LSD 多重比较分析结果为高潮区显著高于中潮区和低潮区( $P < 0.05$ )。在断面间的差异性表现为: Q1 栖息密度显著高于其他断面, Q6 显著高于 Q8 ( $P < 0.05$ ), 其他地点间差异不显著(图 3)。

其他断面( $P < 0.05$ )(图 4c), 采集个体数约占个体总数的 61.56%。薄片镜蛤和泥螺是春季独占的优势种(表 3)。薄片镜蛤在 Q6、Q7 的丰度显著高于其他断面( $P < 0.05$ )(图 4e)。泥螺为在中潮区丰度占比约为 50% (表 3), 各断面间丰度无显著性差异( $F = 1.258, P > 0.05$ )(图 4d)。

## 2.5 贝类群落结构组成

非参数多维标度排序结果表明, 在 40% 的相似性水平上, 启东沿海潮间带滩涂底栖贝类群落可以划分为 3 组, 第一组彩虹明樱蛤和菲律宾蛤仔的分布密度极高, SIMPER 分析表明两者的贡献率累积为 91.99%; 构成第二组贝类主要物种为

表 3 启东潮间带贝类优势种相对重要性指数及各潮区密度占比  
Tab. 3 IRI of shellfish in intertidal mudflats and proportion of density in each tidal area

物种名 species	IRI		春季相对丰度/% relative abundance in spring			秋季相对丰度/% relative abundance in autumn		
	春 spring	秋 autumn	高潮区 high tide area	中潮区 mid-tide area	低潮区 low-tide area	高潮区 high tide area	中潮区 mid-tide area	低潮区 low-tide area
	彩虹明樱蛤 <i>Moerella iridescens</i>	1361.57	721.22	62.5	17.3	20.2	27.3	42.4
泥螺 <i>Bullacta exarata</i>	1114.63	-	26.4	50.0	23.6	-	-	-
薄片镜蛤 <i>Dosinia laminata</i>	1795.08	-	67.0	29.4	3.7	-	-	-
文蛤 <i>Meretrix meretrix</i>	1334.70	2458.22	50.0	33.0	16.7	60.8	27.5	11.8
四角蛤蜊 <i>Macra veneriformis</i>	2095.68	1765.59	35.0	57.5	7.5	89.8	10.2	0.0

注: -表示此物种未出现。

Note: - indicated the specie has not appeared.

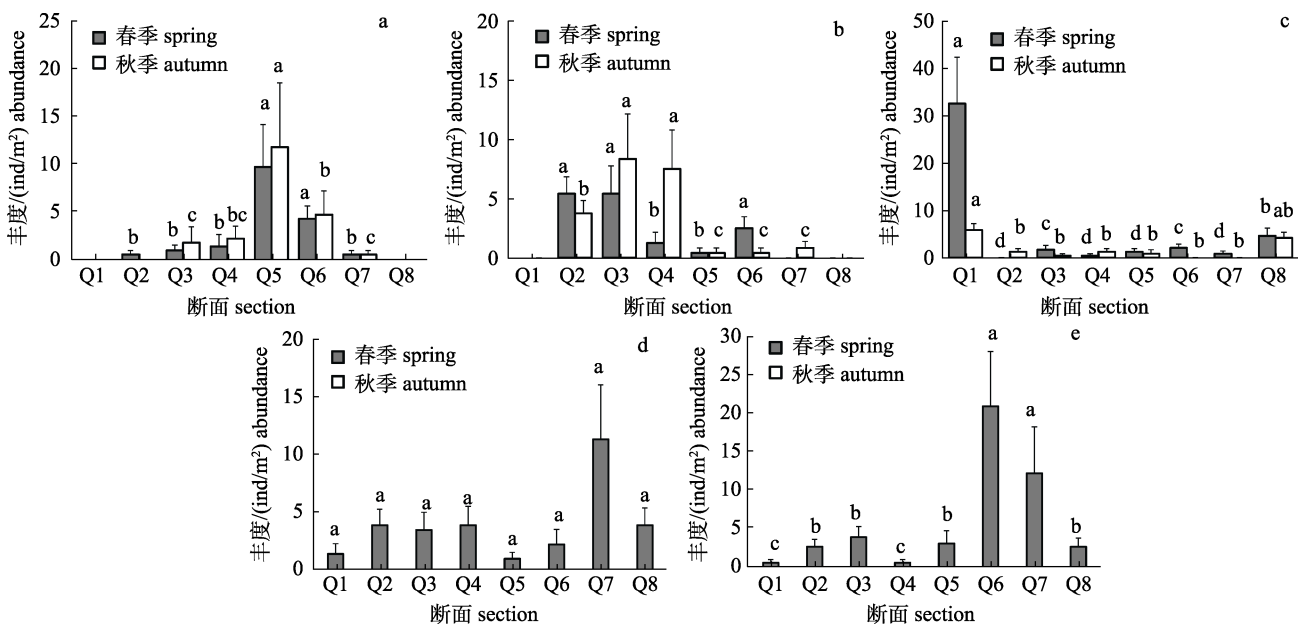


图 4 潮间带贝类优势种密度的空间分布

a. 四角蛤蜊; b. 文蛤; c. 彩虹明樱蛤; d. 泥螺; e. 薄片镜蛤. 柱形图上字母不同表示差异显著( $P < 0.05$ ).

Fig. 4 Spatial distribution of dominant species of shellfish at each survey section

a. *Macra veneriformis*; b. *Meretrix meretrix*; c. *Moerella iridescens*; d. *Bullacta exarata*; e. *Dosinia laminata*.

Different letters above the column indicate significant differences ( $P < 0.05$ ).

泥螺及薄片镜蛤, 两者的贡献率累积为 88.41%; 第三组的特征性贝类为四角蛤蜊和文蛤, 两者的相似性贡献率均值为 34.56% (图 5)。双因素相似性分析的结果表明在潮区间的贝类群落结构组成差异性不显著( $Rho = -0.143, P > 0.05$ ), 但在断面间的差异性显著( $Rho = 0.329, P < 0.05$ )。Q1 断面的贝类群落组成与其他断面均有显著性差异( $P < 0.05$ ), Q8 断面分别与 Q2 和 Q6 断面差异性显著( $P < 0.05$ )。

## 2.6 贝类与环境因子的相关性

将春、秋贝类栖息密度分别与环境因子进行典范相关或对应分析, 贝类物种和环境因子两排序轴的相关系数分别为 0.88 和 0.68, 前两轴环境因子对贝类分布的解释量为 87.68%, 因此可以反映贝类分布与环境因子的关系。检验结果显示砂 ( $F = 19.1, P < 0.05$ )、盐度 ( $F = 8.8, P < 0.05$ )、D50 ( $F = 4.5, P < 0.05$ )与以上优势种的密度分布有显著相关性。

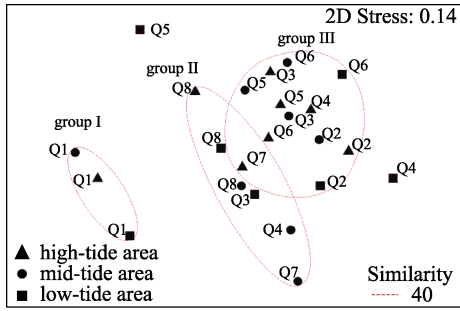


图 5 启东潮间带底栖贝类群落非参数多维标度排序图  
Fig. 5 NMDS plots of shellfish community in Qidong intertidal mudflats

CCA 分析得到四角蛤蜊和文蛤的栖息密度均与砂质含量和 D50 呈正相关关系, 与黏土的含量呈负相关; 彩虹明樱蛤的分布与黏土含量和硫化物成正相关, 而与砂含量和 D50 呈负相关关系, 表明彩虹明樱蛤更加适应沉积物粒径更小的栖息环境; 泥螺的分布密度与砂含量 D50 呈正相关关系; 薄片镜蛤与 TOC 呈负相关关系(图 6)。

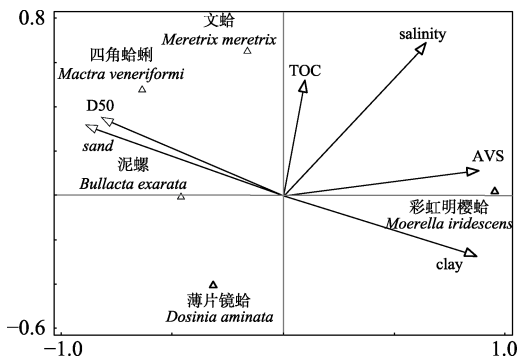


图 6 启东潮间带底栖贝类优势种与环境因子典范对应分析排序图

Fig. 6 CCA biplot of dominant shellfish species and environmental variables in Qidong intertidal mudflats

### 3 讨论

#### 3.1 贝类种类多样性

本研究对启东沿海潮间带滩涂进行了底栖贝类资源调查, 共记录到潮间带底栖贝类 30 种, 高于 2013 年江苏中南部潮间带(22 种贝类)<sup>[6]</sup>和 2015 年江苏南部潮间带的调查(20 种贝类)<sup>[10]</sup>, 与以往调查结果相比, 本次调查启东沿海潮间带滩涂采集到的种类数有明显增加, 婆罗囊螺、半褶织纹螺、等边浅蛤、凸壳肌蛤和褐蚶等在以往调查未

出现, 表明启东沿海滩涂贝类物种相对丰富, 具有重要的保护与开发利用价值。

启东沿海潮间带具有低盐种和半咸种共存的特点, 在贝类物种组成上, 双壳类与腹足类种类数所占比例相当。而在盐城潮间带螺类种数占比为 72.7%, 主要的原因可能是盐城潮间带主要为大面积的滨海湿地, 以粉砂及淤泥质为主的底质上附着藻类较丰富, 所以刮食者的种类数相对较多<sup>[11]</sup>。这些差异也表明贝类的分布与盐度和底质类型紧密相关。

#### 3.2 贝类群落结构分布

本研究发现, 在启东沿海滩涂具有较高经济价值的贝类物种数较高, 体型较小的贝类(如彩虹明樱蛤、菲律宾蛤仔)优势种在丰度上占据较大的比例, 传统的经济贝类优势种(文蛤、四角蛤蜊)的丰度占比略小于小型贝类。贝类物种组成上出现明显的分化, Q1 断面贝类物种丰富(12 种), 群聚类型以对环境适应性较高的、栖息于高潮区的小型贝类为主; Q4、Q5、Q6 断面贝类物种数为 17 种, 中、高潮区的大型双壳类所占比例较大。因此在今后的启东贝类资源的恢复中, 可将启东潮间带北部滩涂作为小型贝类资源恢复和保护区域, 而中部沿海滩涂适宜作为大型双壳类贝类种质资源的重点保护区域。此外, 沙洲滩涂断面(Q2 与 Q8)贝类种类数量和丰度均不及其他沿岸滩涂断面。沙洲虽人为因素影响较小, 饵料资源丰富, 但也容易受水道摆动、强潮、台风和风暴潮诸多因素的影响, 导致滩面不稳定<sup>[12-13]</sup>, 因此在考察发展沙洲贝类资源的增殖之前, 需要对自然环境和附近海域的人为因素进行综合评估。

文蛤是江苏潮间带最重要的经济贝类, 资源量曾居全国首位。在 21 世纪初, 由于集约化养殖、环境质量下降、种质资源退化等原因导致文蛤抵抗力低下, 病毒入侵, 发生大面积死亡现象, 资源量锐减<sup>[14]</sup>。然而, 依靠自然资源进行苗种补给的四角蛤蜊的覆盖范围和资源量逐渐增加, 至 2010 年, 江苏省产量约  $10 \times 10^4$  t<sup>[15]</sup>。2005 年起, 江苏省针对文蛤、大竹蛏、西施舌等经济贝类持续性地开展增殖放流活动, 文蛤资源量逐渐恢复。在 2019 年启东市吕四港海域潮间带调查中文蛤

的密度(36.17 ind/m<sup>2</sup>)远小于四角蛤蜊的密度(95.90 ind/m<sup>2</sup>)<sup>[16]</sup>, 但此结果仅说明了在吕四港海域潮间带两种贝类的分布状况。就本调查的研究范围——启东沿海潮间带滩涂整体而言, 文蛤与四角蛤蜊的资源量相当, 表明文蛤在此海域的自繁苗汛及资源量均得到一定的恢复。至 2022 年文蛤已从黄海增殖放流分水域适宜性评价名录中去除, 无需对文蛤开展资源增殖放流活动。

### 3.3 优势种的分布与环境因子的关系

彩虹明樱蛤主要栖息于启东北部滩涂断面(Q1)。在黏土质环境中有极强的钻潜能力, 以滤食黏土质细粒吸附的大量有机物和微生物为食<sup>[17]</sup>, 适宜栖息的盐度范围是 6.49‰~26.2‰<sup>[18]</sup>。因此彩虹明樱蛤常见于潮流较弱、水动力条件良好的软泥质潮间带和浅海<sup>[19]</sup>。这与本研究中所得到的彩虹明樱蛤栖息密度与黏土的含量、盐度呈显著正相关的结果是相符的。

四角蛤蜊与文蛤栖息地分布呈现明显的生态位重叠现象<sup>[20]</sup>, 集中分布在中潮区砂质滩涂。在砂质底质比泥质和粉砂质更适合四角蛤蜊和文蛤的其摄食、生长、潜砂等行为活动<sup>[21-23]</sup>。文蛤对温盐的变化较为敏感, 淡水冲击比较明显的海域不适合其生长繁殖, 适宜的盐度范围是 18.30‰~31.43‰, 高盐胁迫会对四角蛤蜊摄食与生长产生不利的影响(盐度>24)<sup>[23-24]</sup>。这也与本研究所得到的在启东潮间带四角蛤蜊和文蛤在中等盐度下栖息分布, 且丰度与砂质含量呈正相关的结果一致。

泥螺倾向于栖息在粉砂质底质环境中<sup>[25-26]</sup>。泥螺表现出广盐性的特点, 在不同地域对盐度的适应能力也有所差异: 在黄河口对高盐度环境(盐度范围为 3.87‰~3.50‰)表现出较强的适应性, 但在长江口、慈溪等地更适应于低盐度的环境条件(盐度变化范围 0.17‰~11.73‰)<sup>[27-28]</sup>。本研究结果表明泥螺在靠近长江口区域(Q7、Q8 断面)具有高栖息密度的原因可能是其更适应于启东长江口附近较低盐度、粉砂质环境及稳定广阔的滩面。

潮间带底栖贝类的群落组成由多个理化因子(沉积物粒径、盐度、有机质含量、高程、地形、水动力特征等)影响<sup>[29-31]</sup>。启东潮间带理化环境因子存在着较为明显的梯度变化, 其空间异质性形

成了启东潮间带具有代表性和差异性的 3 组贝类群落。启东潮间带潮区(高程)因素不是影响启东贝类群落组成和分布的最主要因子, 最能解释启东潮间带贝类群落组成分布的特征性环境因子是底质类型和盐度。Q1 断面形成了适合生存于中、高盐度, 对底质有机碳和硫化物有一定耐受力, 且善于在黏土质底质中钻潜的小型贝类为主的群落结构(如菲律宾蛤仔)<sup>[32-33]</sup>; 以中盐度、高砂质含量为主要特征的 Q2~Q6 断面形成了以体型较大的双壳贝类为主的栖息环境; 以低盐度、粉砂为主, 水流冲击较频繁, 有机碎屑等饵料供应丰富为特征的 Q7 与 Q8 河口断面逐渐形成了以低盐度需求, 滤食性或舔食性贝类为主的栖息地。

### 参考文献:

- [1] Wang Y, Yu Z M. Biological strategies in controlling or mitigating marine harmful algal blooms (HABS)[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2005, 29(4): 665-671. [王悠, 俞志明. 海洋有害赤潮的生物防治对策[J]. 植物生态学报, 2005, 29(4): 665-671].
- [2] Zhang J H, Liu J H, Zhang Y Y, et al. Strategic approach for mariculture to practice "ocean negative carbon emission"[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(3): 252-258. [张继红, 刘纪化, 张永雨, 等. 海水养殖践行“海洋负排放”的途径[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(3): 252-258.]
- [3] Jiao N Z, Wang H, Xu G H, et al. Blue carbon on the rise: Challenges and opportunities[J]. National Science Review, 2018, 5(4): 464-468.
- [4] Nanjing Normal University. The embankment engineering sea area demonstration report in Nantong port Lvsi operation area[R]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2021. [南京师范大学. 南通港吕四作业区西港池西侧北围堤工程海域论证报告[R]. 南京: 南京师范大学, 2021.]
- [5] Ji X, Xu R, Liu C C, et al. Assessment of macrobenthic community health in the coastal waters of Qidong[J]. Marine Fisheries, 2016, 38(4): 348-363. [季晓, 徐韧, 刘材材, 等. 江苏启东近岸海域大型底栖动物群落健康评价[J]. 海洋渔业, 2016, 38(4): 348-363.]
- [6] Zhang H, Tang X H, Guo Z R, et al. Temporal and spatial distribution of benthic macrofauna in intertidal mudflat of central and southern Jiangsu coast[J]. Marine Fisheries, 2014, 36(3): 208-215. [张虎, 汤晓鸿, 郭仲仁, 等. 江苏中南部潮间带大型底栖动物时空分布特征[J]. 海洋渔业, 2014, 36(3): 208-215.]

- [7] Yuan J M, Zhang H, Xiao Y Y, et al. Impact of coastal reclamation project on macrobenthos in Qidong Yangtze River Estuary[J]. *Guangxi Sciences*, 2021, 28(5): 529-536. [袁健美, 张虎, 肖悦悦, 等. 启东长江口围填海工程对大型底栖动物的影响[J]. *广西科学*, 2021, 28(5): 529-536.]
- [8] Shepard F P. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1954, 24(3): 151-158.
- [9] Xu K D, Lu K, Lu Z H, et al. Ecological niche analysis of dominant shrimp species in the Jiushan Islands Marine Nature Reserve[J]. *Biodiversity Science*, 2018, 26(6): 601-610.
- [10] Yuan J M, Zhang H, Tang X H, et al. Macrozoobenthic functional groups in intertidal zone of southern Jiangsu Province[J]. *Marine Fisheries*, 2019, 41(1): 43-52. [袁健美, 张虎, 汤晓鸿, 等. 江苏南部潮间带大型底栖动物功能群研究[J]. *海洋渔业*, 2019, 41(1): 43-52.]
- [11] Ouyang X Y, Ni T Z, Wu X H, et al. Distribution characteristics of Macrozoobenthos community in intertidal zone in Yancheng[J]. *Wetland Science*, 2022, 20(3): 427-434. [欧阳夏语, 倪天泽, 吴晓涵, 等. 盐城潮间带大型底栖动物群落分布特征[J]. *湿地科学*, 2022, 20(3): 427-434.]
- [12] Lu L Y, Zhang R S, Chen J. The developing and utilizing foreground of Jiangsu coastal radiate sandbands[J]. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition)*, 2002, 25(3): 18-24. [陆丽云, 张忍顺, 陈君. 江苏沿海辐射沙洲开发利用的前景[J]. *南京师大学报(自然科学版)*, 2002, 25(3): 18-24.]
- [13] Dong J B, Cheng J X, Chen D, et al. Assessment of restocking effect for *Solen grandis* in the Jiangjia and Zhugen shoals of Jiangsu Province[J]. *Fishery Information & Strategy*. 2016, 31(1): 59-64. [董建波, 程建新, 陈栋, 等. 江苏“两沙”海域大竹蛭(*Solen grandis*)增殖效果评估[J]. *渔业信息与战略*, 2016, 31(1): 59-64.]
- [14] Fan K Z, Sun G M, Chen A H, et al. A preliminary study on the relationship between the sulphuret and the COD in the substratum of the HARD clam (*Meretrix meretrix*) in the maritime reproductive—Cultural area of southern Jiangsu Province[J]. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition)*, 2005, 28(4): 90-94. [范可章, 孙国铭, 陈爱华, 等. 江苏南部海域文蛤增殖区底质中硫化物及其与 COD 的关系[J]. *南京师大学报(自然科学版)*, 2005, 28(4): 90-94.]
- [15] Chen S Y, Wang L C, Liu R, et al. Study on the technology of calcium citrate prepared with the shell of *Macraa veneriformis* Reeve[J]. *Chinese Journal of Marine Drugs*, 2011, 30(6): 18-22. [陈士勇, 王令充, 刘睿, 等. 四角蛤蜊贝壳制备柠檬酸钙的工艺研究[J]. *中国海洋药物*, 2011, 30(6): 18-22.]
- [16] Ren S C, Peng H B, Jia Y F, et al. Distribution of mollusks and brachiopods in intertidal zone, Qidong city and their influence factors[J]. *Wetland Science*, 2021, 19(3): 366-374. [任思成, 彭鹤博, 贾亦飞, 等. 启东市潮间带软体动物和腕足动物分布及其影响因素分析[J]. *湿地科学*, 2021, 19(3): 366-374.]
- [17] You Z J, Wang Y N, Zhu L B. A preliminary observation on the ecology of *Moerella iridescens* (benson)[J]. *Journal of Zhejiang College of Fisheries*, 1990, 9(2): 113-120, 4. [尤仲杰, 王一农, 朱龙斌. 彩虹明樱蛤生态的初步观察[J]. *浙江水产学院学报*, 1990, 9(2): 113-120, 4.]
- [18] Hu A K, Xue X H. The breeding technology of *Moerella Iridescens* in the intertidal zone[J]. *Agriculture and Technology*, 2013, 33(2): 326-326. [胡安宽, 薛兴华. 潮间带彩虹明樱蛤的养殖技术[J]. *农业与技术*, 2013, 33(2): 235-236.]
- [19] Xu Z D, Shi H H, Li N C, et al. Macrozoobenthic community structure and its relationship with environmental factors in the southern waters of the Miaodao archipelago[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(5): 704-712. [徐兆东, 石洪华, 李乃成, 等. 庙岛群岛南部海域大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(5): 704-712.]
- [20] Zhang A G, Yuan X T, Yang X L, et al. Temporal and spatial distributions of intertidal macrobenthos in the sand flats of the Shuangtaizi Estuary, Bohai Sea in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(3): 172-179.
- [21] Nakamura Y, Hashizume K, Koyama K, et al. Effects of salinity on sand burrowing activity, feeding and growth of the clams *Macraa veneriformis*, *Ruditapes philippinarum* and *Meretrix lusoria*[J]. *Journal of Shellfish Research*, 2005, 24(4): 1053-1059.
- [22] Zhang A G, Yuan X T, Yang F Y, et al. Effects of temperature, salinity and sediment on the burrowing behavior of clam *Meretrix meretrix*[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(6): 1595-1601. [张安国, 袁秀堂, 杨凤影, 等. 温度、盐度及底质对文蛤潜砂行为的影响[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(6): 1595-1601.]
- [23] Tang B J, Liu B Z, Yang H S, et al. Oxygen consumption and ammonia-N excretion of *Meretrix meretrix* in different temperature and salinity[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2005, 23(4): 469-474.
- [24] Sun X M, Chen B J, Gao P, et al. Effect of high salinity stress on ingestion and growth of *Macraa veneriformis* in Yellow River estuary[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2012, 33(5): 85-90. [孙雪梅, 陈碧鹃, 高萍, 等. 高盐胁迫对黄河河口四角蛤蜊摄食与生长的影响[J]. *渔业科学进展*, 2012, 33(5): 85-90.]
- [25] Wu W G, Leng Y, Zhang J H, 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. [吴文广, 冷宇, 张继红, 等. 黄河口泥螺种群夏季分布特性及其与底质环境的关系[J]. 渔业科学进展, 2013, 34(3): 38-45.]
- [26] Li B Q, Bouma T J, Wang Q C, et al. Effects of key species mud snail *Bullacta exarata* (Gastropoda) on oxygen and nutrient fluxes at the sediment-water interface in the Huanghe River Delta, China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2019, 38(8): 48-55.
- [27] Wang J Y, Zhang A G, Li X D, et al. Spatial distribution of buried molluscs and their relationship with sediment factors in Geligang[J]. Marine Sciences, 2016, 40(4): 32-39. [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.]
- [28] Ye S F, Lu J J. Analysis on the spatial distribution of *Bullacta exarata* (Mollusca: Gastropoda: Atyidae) Population in Yangtze River Estuary, China[J]. Zoological Research, 2001, 22(2): 131-136. [叶属峰, 陆健健. 长江口泥螺种群夏季的空间格局分析[J]. 动物学研究, 2001, 22(2): 131-136]
- [29] Wang Y N, You Z J, Yu H, et al. Study on ecological habit of mud slug, *Bullacta exarata*[J]. Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition), 2003, 16(3): 240-244. [王一农, 尤仲杰, 於宏, 等. 养殖泥螺生态习性研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2003, 16(3): 240-244.]
- [30] Zeon S R, Koo J H, Park J W, et al. Estimation of potential habitats for three species of bivalves using the habitat variables in Gomso Bay tidal flat, Korea[J]. Ocean Science Journal, 2022, 57(4): 607-617.
- [31] Zhang C S, Xue S Y, Li J Q, et al. Influences of substrate grain size on the burrowing behavior of *Juvenile Meretrix meretrix*[J]. Animals, 2022, 12(16): 2094.
- [32] Choi M, Lee I S, Kim C S, et al. Distributions of organic matter and trace metals in surface sediments around a Manila clam *Ruditapes philippinarum* farming area in Gomso Bay, Korea[J]. Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2015, 48(4): 555-563.
- [33] Liu Y, Wang X M, Du Y Q, et al. Defense system of the manila clam *Ruditapes philippinarum* under high-temperature and hydrogen sulfide conditions[J]. Biology, 2023, 12(2): 278.

## Biodiversity and distribution of benthic shellfish in Qidong intertidal mudflats, Jiangsu Province

LI Nannan<sup>1</sup>, FAN Ruiliang<sup>1</sup>, CHEN Yuange<sup>1</sup>, OUYANG Longling<sup>1</sup>, JIANG Weixing<sup>1,2</sup>, QUAN Weimin<sup>1</sup>

1. East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China;  
2. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

**Abstract:** In Qidong, Jiangsu Province, there used to be 440 km<sup>2</sup> of mudflats, which is a crucial habitat for benthic shellfish—a significant and unique marine resource. However, human activities such as mudflat reclamation and coastal construction have reduced the suitable habitat for shellfish and altered the local ecological factors. Conversely, shellfish proliferation and release activities have also been performed frequently, which have impacted the resources, biodiversity, and overall equilibrium of benthic shellfish ecosystems. Presently, the lack of understanding regarding the distribution and community structure of shellfish resources has hindered the effective management of shellfish and the protection of germplasm resources. Conversely, there have been frequent shellfish proliferation and release initiatives. Here, we aimed to systematically understand the biodiversity and resource status of benthic shellfish, explore the main environmental factors affecting the community structure, and provide basic data for the shellfish resources protection and habitat restoration. For this, we surveyed 8 sections of Qidong intertidal mudflats in the spring and autumn of 2019 and analyzed the species composition, diversity, density, dominant species, and distribution of shellfish. A total of 30 species of benthic shellfish were recorded during the spring and autumn surveys, including 14 species of gastropods and 16 species of bivalves. Across the elevation gradient of the intertidal zone, the average density of benthic shellfish exhibited the following trend: high tide zone>medium tide zone>low tide zone. The dominant species of benthic shellfish in intertidal mudflats were *Macra veneriformis*, *Dosinia laminata*, *Meretrix meretrix*, *Moerella iridescens*, and *Bullacta exarata*. The results of non-metric multidimensional scaling showed that the benthic shellfish could be divided into three groups. The first group comprised three tidal zones of the Q1 section (Lvsi harbour) housing *M. iridescens* and *R. philippinarum*; the second group included the three tidal zones of Q8 section (Qixingsha) and several middle and low tidal zones of central sections, with *D. laminata* and *B. exarata* being the predominant species. The remaining central sections formed the third group, with *M. meretrix* and *M. veneriformis* as the characteristic species. Canonical correlation analysis showed that the densities of both *M. meretrix* and *M. veneriformis* were positively correlated with sand content and D<sub>50</sub>, while being negatively correlated with clay content. The density of *M. iridescens* was positively correlated with clay content, while being negatively correlated with sand content. *D. laminata* was negatively correlated with total organic carbon. A clear differentiation was observed in shellfish composition in Qidong intertidal mudflats, owing to the significant differences in salinity and bottom plasmid diameter. Our results suggest that the northern mudflats must be developed into protection areas for small shellfish resources (such as *M. iridescens* and *R. philippinarum*). In contrast, the central coastal mudflat is suitable for large bivalve shellfish (such as *M. veneriformis* and *M. meretrix*). Sandbars are not conducive to the development of shellfish since they are susceptible to various factors such as channel fluctuations, strong tides, typhoons, and storm surges.

**Key words:** intertidal zone; benthic shellfish; biodiversity; distribution; Qidong City

**Corresponding author:** QUAN Weimin. E-mail: quanweim@163.com