

DOI: 10.12264/JFSC2024-0149

黄河三角洲潮间带贝类群落结构季节性变化

马培振^{1,2}, 李翔伦^{1,2,3}, 刘志鸿^{1,2}, 牛明香^{1,2}, 孙秀俊^{1,2}, 李转转^{1,2}, 周丽青^{1,2}, 吴彪^{1,2}

1. 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 海水养殖生物育种与可持续产出全国重点实验室, 山东 青岛 266071;
2. 青岛海洋科技中心海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室, 山东 青岛 266237;
3. 上海海洋大学水产科学国家级实验教学示范中心, 上海 201306

摘要: 为查明黄河三角洲潮间带贝类多样性和群落结构季节性变化特征, 分别于 2022 年 8 月(夏季)、2022 年 10 月(秋季)、2023 年 2 月(冬季)及 2023 年 5 月(春季)大潮汛期间, 对黄河三角洲 8 条固定断面的潮间带底栖贝类资源进行了系统调查。共鉴定出潮间带贝类 22 种, 物种数量、密度、优势种及优势度在不同季节间均存在较大差异。夏季贝类物种数量最多(16 种), 栖息密度最高(1203.96 ind/m²), 优势种有托氏蛤螺(*Umbonium thomasi*)、光滑河篮蛤(*Potamocorbula laevis*)、彩虹明樱蛤(*Moerella iridescens*)、四角蛤蜊(*Mactra quadrangularis*)等, 其中光滑河篮蛤在不同季节均为优势种; 春季 Shannon-Wiener 多样性、Margalef 丰富度指数和 Pielou 均匀度指数均高于其他季节; 各季节维持断面间非相似性贡献率最高的 4 种均为光滑河篮蛤、托氏蛤螺、四角蛤蜊和短文蛤(*Meretrix petechialis*)。研究表明, 黄河三角洲潮间带底栖贝类资源量在夏季最大, 但群落多样性水平在春季最高。该研究结果可为黄河三角洲野生贝类资源的保护和开发利用提供基础资料和理论依据。

关键词: 黄河三角洲; 潮间带; 贝类; 生物多样性

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2024)09-1054-15

黄河三角洲是全球新生河口湿地的典型代表, 也是渤海和黄河流域重要的生态功能区^[1-2]。黄河的输运作用为河口水域提供了丰富的营养物质, 孕育了黄河三角洲较高的生物多样性和水域生产力水平^[3-4]。然而, 在黄河来水来沙减少、岸线侵蚀加剧、人为活动干扰和气候变化等影响下, 黄河三角洲生态环境和生物多样性面临着十分严峻的威胁^[5-8]。作为黄河三角洲潮间带大型底栖生物的重要组成部分, 贝类既是优势生物类群, 又可作为环境变化的指示生物^[9-11]。因此, 研究黄河三角洲潮间带贝类的群落结构对于评估黄河口海洋生态现状具有指导意义。

黄河三角洲因其特殊性、敏感性和重要性, 其生态环境一直受到广泛重视, 国内学者从不同角度对黄河三角洲潮间带贝类资源开展了比较研究并积累了多样的数据资源, 包括不同季节(含枯水期和丰水期^[12-14])、不同断面、不同潮区(含浅海^[15])的生物量、栖息密度、生物群落多样性指数和均匀度指数等^[16-19]。潮间带贝类组成和群落结构在季节间存在较大差异^[16], 但是, 黄河三角洲潮间带底栖贝类季节连续性数据相对匮乏, 尤其缺少冬季调查结果, 无法为阐明黄河三角洲贝类资源季节变化特征提供基础数据。本研究在黄河三角洲潮间带设置 8 条断面,

收稿日期: 2024-05-28; 修订日期: 2024-07-02.

基金项目: 农业农村部“黄河资源与环境调查”财政专项; 崂山实验室科技创新项目(2021QNLM050103); 国家海洋水产种质资源库项目。

作者简介: 马培振(1989-), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向为贝类种质资源与高效繁育. E-mail: mapz@ysfri.ac.cn

通信作者: 吴彪, 博士, 研究员, 研究方向为贝类遗传育种. E-mail: wubiao@ysfri.ac.cn

查明了春、夏、秋、冬4个季节潮间带贝类的种类组成和群落结构特征, 以期为黄河三角洲地区贝类资源的开发、利用和种质资源保护提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 调查时间与地点

分别于2022年8月(夏季)、2022年10月(秋季)、2023年2月(冬季)和2023年5月(春季)对黄

河三角洲8条断面进行潮间带贝类样品采集(1#~8#, 图1)。其中, 断面1#~4#处于黄河入海口南侧, 分别位于广利河河口、溢洪河河口、小岛河入海口和黄河口保护区南侧; 断面5#~8#处于黄河入海口北侧, 分别位于东营港保留小片贝类生产区域、飞雁滩黄河故道附近以及一千二管理站西部2条断面。每条断面按高、中、低潮区设置3个站位, 每个站位设置3个样方。调查均于大潮汛期枯潮期间进行。

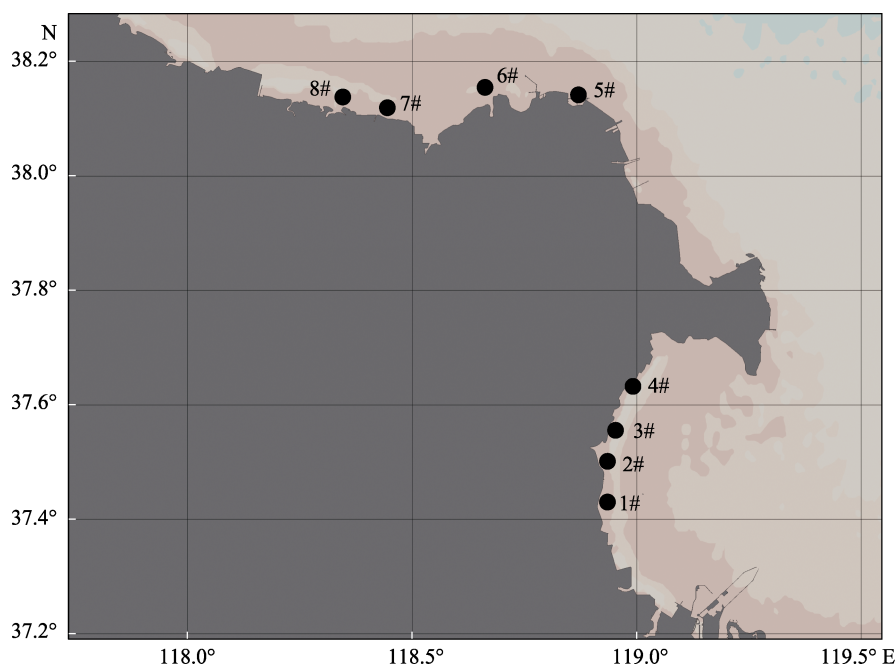


图1 黄河三角洲潮间带贝类资源调查断面布设示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the sampling sections in the shellfish resources investigations in the intertidal area of the Yellow River Delta

1.2 调查方法

调查中样方大小为50 cm×50 cm, 采样深度为30 cm。用40目的网筛筛选出所有贝类样本, 用海水冲洗干净后, 以75%乙醇固定, 记录采样时间和地点。参照《黄渤海软体动物图志》^[20]和《中国近海软体动物图志》^[21]对样品进行分类、鉴定和计数, 物种分类地位参照 World Register of Marine Species 数据库。在调查过程中, 使用多参数水质分析仪(Aqua Troll 400, In-Situ Inc, 柯林斯堡, 美国)测定各站位海水的温度和盐度, 以示各站位水质特征。使用 Microsoft Excel2016 进行季节间水质差异分析, 差异显著性水平为0.05。

1.3 数据统计分析

1.3.1 群落多样性指数 按公式(1)计算各调查断面获取的贝类物种的优势度(McNaughton 优势度指数, Y_i)^[22]:

$$Y_i = n_i / N \times f_i \quad (1)$$

式中, n_i 为第 i 种贝类的个体数, N 为贝类样品总个体数, f_i 为第 i 种贝类在该断面出现的频率即该种贝类出现的样方数与断面总样方数比值。当第 i 种贝类优势度 $Y_i > 0.02$ 时, 则该种贝类为优势种^[23-24]。

分别采用 Shannon-Wiener 多样性指数 (Shannon-Wiener diversity index, H')^[25]、Margalef

丰富度指数 (Margalef richness index, D)^[26] 和 Pielou 均匀度指数 (Pielou evenness index, J')^[27] 计算各调查断面贝类的群落多样性、丰富度和均匀度。计算公式如下:

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \tag{2}$$

$$D = (S - 1) / \ln N \tag{3}$$

$$J' = H' / \ln S \tag{4}$$

式(2)~(4)中, S 为贝类总物种数, N 为贝类总个体数, P_i 为第 i 种贝类的个体数与贝类总个体数 N 的比值。

1.3.2 群落结构聚类 采用 Microsoft Excel 2016 软件分别计算各贝类物种在所有调查站位的整体相对丰度(即所有调查站位中该物种个体数与总贝类个体数比值)和各物种在各站位的相对丰度(即各站位中该物种个体数与总贝类个体数比值)。去除在所有调查站位整体相对丰度小于 1% 的物种, 保留在任何一个站位相对丰度大于 3% 的物种, 以减少稀有种对群落划分的干扰; 去除稀有种干扰后保留的物种确定为常规物种, 用来进行群落结构聚类。计算各站位贝类物种绝对丰度(各站位中该贝类物种的单位面积个体数)后, 以站位为行、物种绝对丰度为列构建物种-站位丰度矩阵。对物种丰度数据进行 4 次方根转换, 并利用 PAST4.14 软件中的 Bray-Curtis 相似性系数

聚类功能和非度量多维排序(non-metric multi-dimensional scaling, nMDS)功能进行群落聚类分析。利用 nMDS 分析方法计算应力值(Stress), 以示样品在降维后形成的空间的距离与其在原始多维空间的距离的差值。该差值越小, 表明结果真实度越高^[28]。采用 PAST4.14 软件中的相似性百分比(SIMPER)分析造成每个群落聚类差异的物种及其差异贡献率(超过 3%的种为特征种)。

2 结果与分析

2.1 黄河三角洲潮间带海水温度和盐度

本研究中, 黄河三角洲潮间带 8 个调查断面均为淤泥质海岸, 夏季平均海水温度最高, 各断面达到(28.96±4.65) °C; 冬季平均海水温度最低, 仅为(9.57±5.29) °C; 季节间水温差异均显著($P<0.05$)。各断面春季海水平均盐度最高, 达到 30.43±3.36; 秋季海水平均盐度最低, 仅为 21.52±3.83; 春季与其他季节间、秋冬两季间盐度差异显著($P<0.05$), 其他季节间差异均不显著。春季盐度最高的断面为断面 7#, 达到 32.35, 而夏、秋、冬 3 季盐度最高的断面均为断面 6#, 分别为 30.36、26.52 和 26.42; 春季和秋季平均盐度最低的断面均为断面 2#, 分别为 27.30 和 18.50; 夏季平均盐度最低的断面为断面 3#, 冬季为断面 8#, 分别为 18.33 和 18.34 (表 1)。

表 1 黄河三角洲调查断面的海水温度和盐度
Tab. 1 Seawater temperature and salinity of sampling sections in the Yellow River Delta

调查断面 sampling section	潮区 tidal area	春季 spring		夏季 summer		秋季 autumn		冬季 winter	
		温度/°C temperature	盐度 salinity	温度/°C temperature	盐度 salinity	温度/°C temperature	盐度 salinity	温度/°C temperature	盐度 salinity
1#	高潮区 high-tidal area	22.60	36.89	34.70	34.30	16.47	24.62	4.01	20.05
	中潮区 middle-tidal area	21.03	30.18	35.50	31.00	16.17	20.35	2.37	19.54
	低潮区 low-tidal area	19.97	26.01	37.70	22.70	14.03	12.59	3.30	25.86
2#	高潮区 high-tidal area	17.79	25.78	33.50	21.00	19.06	14.42	5.07	27.05
	中潮区 middle-tidal area	17.59	24.84	34.50	20.30	20.72	19.15	2.04	26.89
	低潮区 low-tidal area	18.02	31.27	34.50	20.00	21.58	21.94	0.80	25.20
3#	高潮区 high-tidal area	23.28	35.59	30.00	17.70	19.50	21.14	7.23	23.15
	中潮区 middle-tidal area	21.17	27.72	32.50	17.00	15.35	18.76	6.14	29.63
	低潮区 low-tidal area	19.10	30.03	28.70	20.30	16.25	23.30	4.38	25.00
4#	高潮区 high-tidal area	21.19	36.20	30.00	19.00	16.31	24.47	4.81	16.10
	中潮区 middle-tidal area	20.99	31.17	30.10	17.70	16.97	24.57	6.77	27.32
	低潮区 low-tidal area	20.72	27.86	31.00	19.30	17.71	18.98	6.57	26.70

(待续 to be continued)

(续表 1 Tab. 1 continued)

调查断面 sampling section	潮区 tidal area	春季 spring		夏季 summer		秋季 autumn		冬季 winter	
		温度/℃ temperature	盐度 salinity	温度/℃ temperature	盐度 salinity	温度/℃ temperature	盐度 salinity	温度/℃ temperature	盐度 salinity
5#	高潮区 high-tidal area	18.42	27.76	24.12	23.54	12.45	23.33	12.91	25.76
	中潮区 middle-tidal area	18.42	26.39	24.20	25.00	12.11	24.77	12.11	24.77
	低潮区 low-tidal area	18.33	28.79	24.10	32.00	13.93	23.45	13.93	23.45
6#	高潮区 high-tidal area	24.35	31.31	23.65	29.08	17.35	25.00	16.57	26.17
	中潮区 middle-tidal area	24.34	32.52	24.60	32.00	17.77	27.86	16.87	26.86
	低潮区 low-tidal area	25.78	31.00	26.50	30.00	17.18	26.70	16.61	26.24
7#	高潮区 high-tidal area	78.45	31.33	29.65	26.54	13.56	20.25	13.52	21.33
	中潮区 middle-tidal area	21.49	31.69	31.00	27.70	13.66	20.53	13.66	20.53
	低潮区 low-tidal area	26.75	34.03	29.00	26.30	14.32	22.61	14.32	22.61
8#	高潮区 high-tidal area	77.36	32.25	18.59	23.54	12.71	23.58	13.65	17.18
	中潮区 middle-tidal area	27.74	33.03	27.90	25.00	13.37	14.43	13.37	17.43
	低潮区 low-tidal area	26.93	26.74	24.70	27.00	13.20	20.41	13.20	20.41
平均值 average		26.49 ^a	30.43 ^A	28.96 ^b	24.50 ^B	15.88 ^c	21.52 ^{BC}	9.57 ^d	23.55 ^{BD}
标准差 standard deviation		16.52	3.36	4.65	5.13	2.71	3.83	5.29	3.69

注: 不同小写字母代表季节间水温差异显著($P<0.05$); 不同大写字母代表季节间盐度差异显著($P<0.05$).
Note: Different lowercase letters represent significant differences in water temperature between seasons ($P<0.05$); different capital letters represent significant differences in salinity between seasons ($P<0.05$).

2.2 贝类种类与密度

本研究中黄河三角洲潮间带共采集到贝类 22 种, 隶属于 2 纲 10 目 17 科 21 属(表 2)。其中, 夏季采集贝类种类最多, 为 16 种; 春秋季节次之, 均为 15 种; 冬季采集种类最少, 仅为 14 种。春季, 断面 1#、2#、6#采集物种最多, 均为 10 种; 夏季, 断面 7#采集物种最多, 为 15 种; 秋季, 断面 2#和 7#采集物种数量最多, 均为 10 种; 冬季, 断面 5#、6#、7#采集物种数量最多, 均为 9 种。断面 4#采集的物种在各季节均最少, 春夏秋冬分别为 5 种、7 种、4 种和 4 种(图 2)。

黄河三角洲贝类栖息密度随季节、断面的不同而差异较大(表 3)。季节间密度为夏季>秋季>冬季>春季, 其中, 夏季贝类栖息密度最高, 平均

表 2 黄河三角洲潮间带调查贝类名录
Tab. 2 List of shellfish investigated in the tidal area of the Yellow River Delta

纲 class	目 order	科 family	物种名 species	春季 spring	夏季 summer	秋季 autumn	冬季 winter
双壳纲 Bivalvia	贫齿蛤目 Adapedonta	竹蛏科 Solenidae	长竹蛏 <i>Solen strictus</i>		△	△	△
		灯塔蛤科 Pharidae	缢蛏 <i>Sinonovacula constricta</i>			△	
	帘蛤目 Venerida	帘蛤科 Veneridae	青蛤 <i>Cyclina sinensis</i>	△	△	△	△
			菲律宾蛤仔 <i>Ruditapes philippinarum</i>	△		△	
			日本镜蛤 <i>Dosinia japonica</i>	△		△	△
			短文蛤 <i>Meretrix petechialis</i>	△	△	△	△
			四角蛤蜊 <i>Mactra quadrangularis</i>	△	△	△	△
		蛤蜊科 Mactridae	彩虹明樱蛤 <i>Moerella iridescens</i>	△	△	△	△
		樱蛤科 Tellinidae	光滑河篮蛤 <i>Potamocorbula laevis</i>	△	△	△	△
	海螂目 Myida	篮蛤科 Corbulidae	魁蚶 <i>Anadara broughtonii</i>				△
	蚶目 Arcida	蚶科 Arcidae	毛蚶 <i>Anadara kagoshimensis</i>				
	笋螂目 Pholadomyida	鸭嘴蛤科 Laternulidae	渤海鸭嘴蛤 <i>Laternula gracilis</i>		△		

(待续 to be continued)

(续表 2 Tab. 2 continued)

纲 class	目 order	科 family	物种名 species	春季 spring	夏季 summer	秋季 autumn	冬季 winter
腹足纲 Gastropoda	新腹足目 Neogastropoda	骨螺科 Muricidae	脉红螺 <i>Rapana venosa</i>	△	△		
		织纹螺科 Nassariidae	秀丽织纹螺 <i>Nassarius festivus</i>		△	△	
	头楯目 Cephalaspidea	长葡萄螺科 Haminoeidae	泥螺 <i>Bullacta caurina</i>		△	△	
	中腹足目 Mesogastropoda	滩栖螺科 Batillariidae	古氏滩栖螺 <i>Batillaria cumingii</i>	△	△	△	△
		玉螺科 Naticidae	扁玉螺 <i>Neverita didyma</i>	△	△	△	△
			微黄镰玉螺 <i>Euspira gilva</i>	△	△	△	△
		蟹守螺科 Cymbiidae	中华蟹守螺 <i>Rhinoclavis sinensis</i>		△	△	
		锥螺科 Turritellidae	棒锥螺 <i>Turritella terebra bacillum</i>	△	△	△	△
	原始腹足目 Archaeogastropoda	马蹄螺科 Trochidae	托氏蛸螺 <i>Umbonium thomasi</i>	△	△	△	△
	异腹足目 Heterogastropoda	梯螺科 Scaliariidae	尖高阿玛螺 <i>Amaea acuminata</i>		△	△	△

注: △表示该季节采集到此物种。
Note: △ means the species was collected in this season.

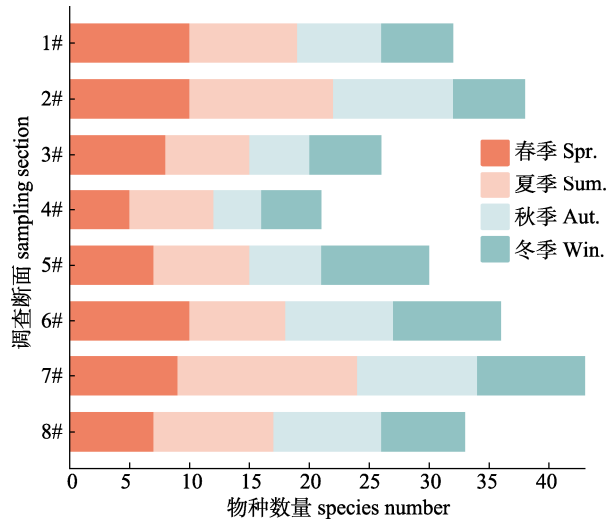


图 2 黄河三角洲各调查断面贝类种类数的季节性变化
Fig. 2 Seasonal variation of the number of shellfish species in each survey section of the Yellow River Delta

为 1203.96 ind/m²; 秋季其次, 为 507.71 ind/m²; 春季最低, 仅为 250.98 ind/m²。尽管冬季黄河三角洲水温最低、贝类物种数最少, 但贝类栖息密度稍高于春季, 尤其断面 1#和 6#的优势较大。在各断面中, 2#、5#、7#和 8#的贝类栖息密度较高, 各季节均超过 100 ind/m²。春季、夏季和秋季贝类栖息密度最大的断面均为断面 8#, 而冬季则为断面 5#, 其中夏季断面 8#的贝类栖息密度最大, 达到 7298.67 ind/m²。断面 4#的贝类栖息密度在各季节均为最低, 平均仅为 15.89 ind/m²。

表 3 黄河三角洲各断面不同季节贝类栖息密度
Tab. 3 Habitat density of shellfish in different seasons in each section of the Yellow River Delta

断面 sampling section	春季 spring	夏季 summer	秋季 autumn	冬季 winter	ind/m ²
					季节 平均 average
1#	84.44	345.78	136.00	196.00	190.56
2#	217.33	231.56	279.11	337.78	266.45
3#	57.33	68.00	67.56	59.11	63.00
4#	5.77	33.33	12.00	12.44	15.89
5#	594.00	1163.00	1456.00	590.00	950.75
6#	59.00	96.00	83.00	208.00	111.50
7#	228.00	395.33	443.33	431.33	374.50
8#	762.00	7298.67	1584.67	398.00	2510.84
断面平均 average among sampling sections	250.98	1203.96	507.71	279.08	560.43

2.3 贝类优势种及优势度

黄河三角洲各调查断面的优势种组成存在季节间差异性, 但托氏蛸螺(*Umbonium thomasi*)、光滑河篮蛤(*Potamocorbula laevis*)、彩虹明樱蛤(*Moerella iridescens*)等在各季节均优势度较高(表 4)。春季, 托氏蛸螺在断面 1#、6#, 光滑河篮蛤在断面 4#、5#、7#和 8#, 彩虹明樱蛤在断面 3#的优势度均超过 50%; 夏季, 托氏蛸螺在断面 1#、光滑河篮蛤在断面 5#和 8#, 彩虹明樱蛤在断面 6#的优势度均超过 50%; 秋季, 光滑河篮蛤在

断面 5#和 8#, 彩虹明樱蛤在断面 6#和 7#的优势度均超过 50%; 冬季, 四角蛤蜊 (*Mactra quadrangularis*)在断面 2#和 3#, 光滑河篮蛤在断面 5#和 8#的优势度均超过 50%。各季节, 优势度最高的物种均为光滑河篮蛤, 其中春季、夏季和秋季均出现在断面 8#, 分别达到 84.59%、97.63%、92.30%, 而冬季出现在断面 5#, 为 96.13%。

同一断面贝类优势种的种类和优势度随季节

的变化而发生改变。以断面 1#为例, 托氏蜆螺在夏季的优势度达到 78.66%, 为各季节间最高, 而彩虹明樱蛤、古氏滩栖螺(*Batillaria cumingii*)、四角蛤蜊的优势度则在夏季为各季节间最低; 泥螺 (*Bullacta exarata*)仅在夏季、青蛤(*Cyclina sinensis*)和光滑河篮蛤仅在秋冬两季的优势度超过 2%。在断面 6#中, 春季的最主要优势种为托氏蜆螺, 优势度为 74.04%, 而在夏秋季节则为彩虹明樱蛤, 优势度分别达到 68.67%和 63.54%。

表 4 黄河三角洲潮间带贝类优势种及优势度(仅显示大于 2%的数据)
Tab. 4 Dominant species and their dominance levels (with only data exceeding 2% shown) of shellfish in the intertidal area of the Yellow River Delta

						%
断面 sampling section	优势种 dominant species	春季 spring	夏季 summer	秋季 autumn	冬季 winter	
1#	彩虹明樱蛤 <i>Moerella iridescens</i>	8.39	4.63	8.17	27.37	
	泥螺 <i>Bullacta exarata</i>		2.06			
	托氏蜆螺 <i>Umbonium thomasi</i>	51.25	78.66	45.10	30.53	
	古氏滩栖螺 <i>Batillaria cumingii</i>	23.13	2.57	10.13	10.53	
	四角蛤蜊 <i>Mactra quadrangularis</i>	14.29	9.51	30.72	15.79	
	青蛤 <i>Cyclina sinensis</i>	2.72			4.21	
	光滑河篮蛤 <i>Potamocorbula laevis</i>			3.59	7.37	
2#	彩虹明樱蛤 <i>Moerella iridescens</i>	27.63	7.87	24.04	27.81	
	托氏蜆螺 <i>Umbonium thomasi</i>	42.63	25.14	18.15	7.57	
	古氏滩栖螺 <i>Batillaria cumingii</i>	9.08	9.40	12.90	9.00	
	四角蛤蜊 <i>Mactra quadrangularis</i>	18.95	26.30	42.04	51.94	
	青蛤 <i>Cyclina sinensis</i>		4.22			
3#	光滑河篮蛤 <i>Potamocorbula laevis</i>		23.80			
	四角蛤蜊 <i>Mactra quadrangularis</i>	14.29	7.19	5.92	61.24	
	青蛤 <i>Cyclina sinensis</i>	12.03	3.27	13.16	4.65	
	光滑河篮蛤 <i>Potamocorbula laevis</i>		28.76	36.84		
	古氏滩栖螺 <i>Batillaria cumingii</i>	4.51	28.76	19.74	3.87	
	彩虹明樱蛤 <i>Moerella iridescens</i>	50.38	13.73	24.34	23.26	
	泥螺 <i>Bullacta exarata</i>		17.65			
4#	托氏蜆螺 <i>Umbonium thomasi</i>	17.29				
	扁玉螺 <i>Neverita didyma</i>				3.87	
	泥螺 <i>Bullacta exarata</i>		32.00	40.74		
	古氏滩栖螺 <i>Batillaria cumingii</i>	3.57	10.67	18.52	23.08	
	四角蛤蜊 <i>Mactra quadrangularis</i>	10.71	25.33	18.52	15.38	
	青蛤 <i>Cyclina sinensis</i>	3.57	16.00	22.22	15.38	
	彩虹明樱蛤 <i>Moerella iridescens</i>	28.57			23.08	
5#	光滑河篮蛤 <i>Potamocorbula laevis</i>	53.57	13.33		23.08	
	光滑河篮蛤 <i>Potamocorbula laevis</i>	77.97	96.04	98.56	96.13	
	托氏蜆螺 <i>Umbonium thomasi</i>	18.14				

(待续 to be continued)

(续表 4 Tab. 4 continued)

断面 sampling section	优势种 dominant species	春季 spring	夏季 summer	秋季 autumn	冬季 winter
6#	彩虹明樱蛤 <i>Moerella iridescens</i>	12.98	63.54	68.67	13.56
	泥螺 <i>Bullacta exarata</i>		2.08		
	光滑河篮蛤 <i>Potamocorbula laevis</i>				13.56
	古氏滩栖螺 <i>Batillaria cumingii</i>		14.58	4.82	6.78
	四角蛤蜊 <i>Macra quadrangularis</i>		3.13	3.61	11.86
	短文蛤 <i>Meretrix petechialis</i>		12.50	12.05	22.03
	尖高阿玛螺 <i>Amaea acuminata</i>	2.88	2.08		5.08
	托氏蜆螺 <i>Umbonium thomasi</i>	74.04			20.34
	扁玉螺 <i>Neverita didyma</i>	3.36		4.82	3.39
	日本镜蛤 <i>Dosinia japonica</i>	2.40		2.41	
7#	彩虹明樱蛤 <i>Moerella iridescens</i>	16.07	17.88	55.49	36.84
	古氏滩栖螺 <i>Batillaria cumingii</i>	4.79	15.85	4.81	7.02
	四角蛤蜊 <i>Macra quadrangularis</i>	7.11	15.18	4.96	17.54
	短文蛤 <i>Meretrix petechialis</i>	4.17	18.55	13.98	6.14
	光滑河篮蛤 <i>Potamocorbula laevis</i>	53.32	26.81	18.20	29.24
	托氏蜆螺 <i>Umbonium thomasi</i>	13.45			
8#	光滑河篮蛤 <i>Potamocorbula laevis</i>	84.59	97.63	92.30	89.33
	彩虹明樱蛤 <i>Moerella iridescens</i>	3.85		4.92	5.69
	古氏滩栖螺 <i>Batillaria cumingii</i>	5.53			
	短文蛤 <i>Meretrix petechialis</i>	4.19			

2.4 贝类群落结构特征

2.4.1 群落多样性指数 黄河三角洲潮间带不同季节贝类群落 Shannon-Wiener 多样性(H')、Margalef 丰富度指数(D)和 Pielou 均匀度指数(J')结果如图 3 所示。春季、夏季、秋季、冬季的 Shannon-Wiener 多样性的范围分别为 0.23~2.04、0.14~1.83、0.10~1.47、0.65~1.42, 平均为 1.26、

1.16、1.07 和 1.11, 季节间差异不显著($P>0.05$)。各断面间, 6#在春季、7#在夏季和冬季、3#在秋季的 Shannon-Wiener 多样性指数最高, 而断面 5#在春季和秋季、8#在夏季和冬季的 Shannon-Wiener 多样性指数最低。各断面 Margalef 丰富度指数在春季平均值最高, 为 1.44, 在冬季最低, 仅为 1.11。其中, 断面 6#在春季的丰富度指数最高, 达

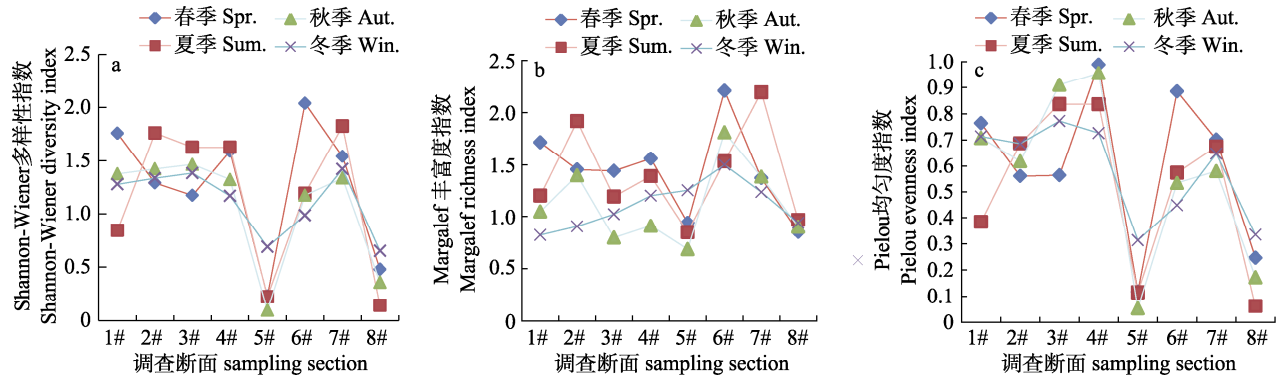


图 3 黄河三角洲潮间带贝类各断面 Shannon-Wiener 多样性指数(a)、Margalef 丰富度指数(b)和 Pielou 均匀度指数(c)

Fig. 3 Shannon-Wiener diversity index (a), Margalef richness index (b), and Pielou evenness index (c) of intertidal shellfish in different sections in the Yellow River Delta

到 2.21; 断面 5# 在秋季的丰富度指数最低, 仅为 0.69。Pielou 均匀度指数平均值在各季节间差异不大, 春季、夏季、秋季和冬季平均值分别为 0.60、0.52、0.57 和 0.58。断面 4# 在春季的均匀度最高, 达到 0.99; 断面 5# 在秋季的均匀度最低, 仅为 0.05。

2.4.2 聚类分析 去除在所有调查站位整体相对丰度小于 1% 的物种、但保留在任何一个站位相对丰度大于 3% 的物种后, 常规物种相对丰度在各站位春秋季分布如图 4 所示。群落结构分析的主要作用物种有四角蛤蜊、古氏滩栖螺、托氏蛎螺、短文蛤(*Meretrix petechialis*)、青蛤、泥螺、彩虹明樱蛤、光滑河篮蛤、长竹蛏(*Solen strictus*)、扁玉螺(*Neverita didyma*)、棒锥螺(*Turritella terebra bacillum*)。部分物种四季丰度变化较小, 如短文蛤、青蛤、长竹蛏、扁玉螺和棒锥螺; 部分物种相对丰度随季节变化较大, 如四角蛤蜊春夏季节的相对丰度高于秋冬季节, 而彩虹明樱蛤的相对丰度集中在夏秋季节, 光滑河篮蛤的相对丰度全

年都属于较高水平, 但是冬季则略有降低。

春季、夏季、秋季和冬季的非度量多维排序尺度(nMDS)分析中 Stress 值分别为 0.1268、0.2243、0.1394 和 0.1779。聚类结果显示, 黄河三角洲春季潮间带贝类 Bray-Curtis 相似性在 -0.4~0.4 水平, 可划分为 3 个类群, 其中, 断面 5# 和 8# 为一类, 断面 3# 和 4# 为一类, 断面 1#、2#、6#、7# 为一类; 夏季贝类 Bray-Curtis 相似性在 -0.3~0.4 水平, 可划分为 4 个类群, 其中, 断面 6# 单独为一类, 断面 5# 和 8# 为一类, 断面 3# 和 4# 为一类, 断面 1#、2#、7# 为一类; 秋季贝类 Bray-Curtis 相似性在 -0.3~0.4 水平, 可划分为 4 个类群, 其中, 断面 4# 单独为一类, 断面 5# 和 8# 为一类, 断面 6# 和 7# 为一类, 断面 1#、2#、3# 为一类; 冬季贝类 Bray-Curtis 相似性在 -0.3~0.5 水平, 可划分为 4 个类群, 其中, 断面 4# 和 6# 单独为一类, 断面 5#、7#、8# 为一类, 断面 1#、2#、3# 为一类(图 5)。

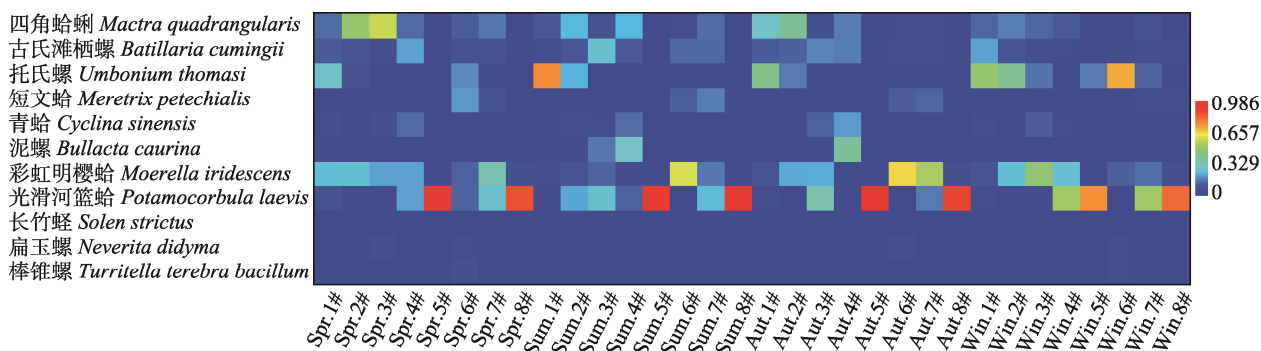


图 4 黄河三角洲潮间带贝类常规物种相对丰度分布图

Fig. 4 Map of relative abundances of regular shellfish species in the Yellow River Delta

维持断面间非相似性的主要特征种中, 各季节平均非相似性最高和贡献率最高的 4 种均为光滑河篮蛤、托氏蛎螺、四角蛤蜊和短文蛤。春季, 4 种贝类平均非相似性分别为 8.81、5.36、4.75、4.53, 贡献率分别为 21.42%、13.04%、11.56%、11.03%, 累计贡献率达到 57.05%; 夏季, 平均非相似性分别为 12.27、6.411、5.009、4.142, 贡献率分别为 29.42%、15.37%、12.01%、9.932%, 累计贡献率达到 66.73%; 秋季, 平均非相似性分别为 11.06、6.175、5.724、5.21, 贡献率分别为

23.11%、12.9%、11.96%、10.89%, 累计贡献率达到 58.86%; 冬季, 平均非相似性分别为 11.45、7.596、4.333、4.137, 贡献率分别为 26.19%、17.37%、9.908%、9.46%, 累计贡献率达到 62.928% (表 5)。

3 讨论

3.1 贝类种类和优势度特征

本研究中 8 个调查断面均为淤泥底质, 同质化程度高, 因此采集到的贝类种类数较李玄等^[17]、

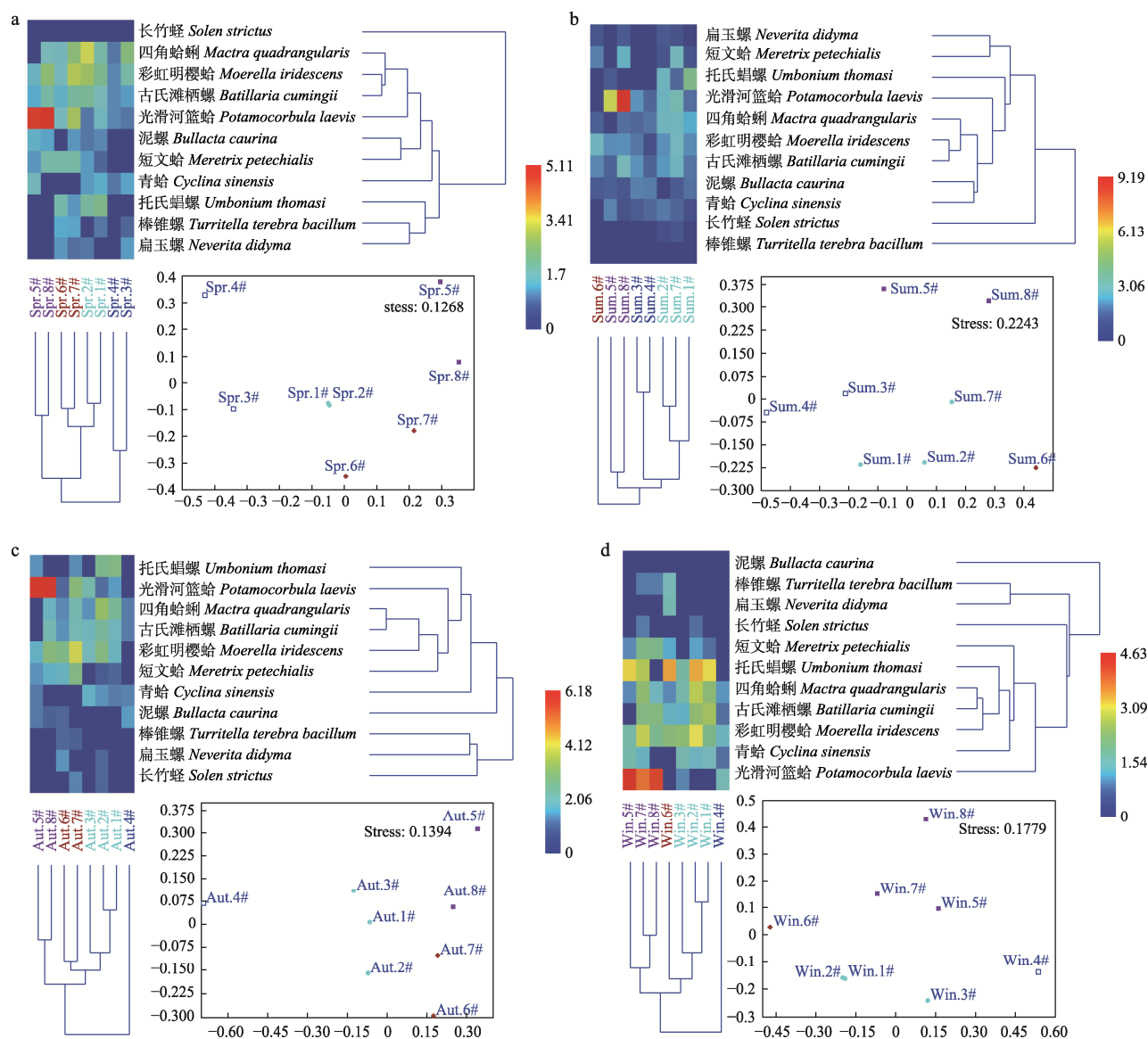


图 5 不同季节黄河三角洲潮间带各站位贝类聚类(Bray-Curtis)与非度量多维尺度(nMDS)

a. 春季; b. 夏季; c. 秋季; d. 冬季.

Fig. 5 Shellfish clustering (Bray-Curtis) (a) and non-metric multidimensional scaling (nMDS)

(b) at all stations in the intertidal zone of the Yellow River Delta in different seasons

a. Spr.; b. Sum.; c. Aut.; d. Win.

史会剑等^[18]结果偏低。夏季调查到的贝类种类最多、平均密度最高,这可能与潮间带贝类对高温耐受能力较强有关^[29],而埋栖型贝类的潜沙作用同样助其抵御夏季高温的威胁^[30]。尽管黄河三角洲潮间带冬季水温最低,但贝类栖息密度稍高于春季,这同严润玄等^[9]的研究结果存在差异。本研究中的 8 条调查断面分别位于黄河口南北两侧,距离较远而沉积物类型差异较大^[31]。而严润玄等^[9]的调查区域仅位于黄河三角洲黄河口生态旅游区

海滩,同本研究中的断面相距甚远,因此结果差异明显。此外,春季贝类栖息密度最低,也可能与春季较高的盐度有关。黄河三角洲受入海径流和外海高盐水的影响,夏季海水盐度降低,而冬春季盐度偏高^[32],造成泥螺等河口区嗜低盐贝类资源量降低^[33]。在夏秋季节,泥螺作为优势种出现在断面 1#、3#、4#、6#和 7#,且在北部断面的种群密度低于南部断面,这与吴文广等^[34]的研究结果相符,主要由于黄河口以南滩涂表层有机质

表 5 维持类群间非相似性的主要特征种及其贡献率

Tab. 5 Key indicator species and their contribution rate in upholding inter-community dissimilarity

物种名 species	季节 season	平均非相似性 average dissimilarity	贡献率/% contribution rate	累计贡献率/% cumulative contribution rate
光滑河篮蛤 <i>Potamocorbula laevis</i>	春季 spring	8.81	21.42	21.42
	夏季 summer	12.27	29.42	29.42
	秋季 autumn	11.06	23.11	23.11
	冬季 winter	11.45	26.19	26.19
托氏蜆螺 <i>Umbonium thomasi</i>	春季 spring	5.36	13.04	34.46
	夏季 summer	6.41	15.37	44.79
	秋季 autumn	6.18	12.90	36.01
	冬季 winter	7.60	17.37	43.56
四角蛤蜊 <i>Mactra quadrangularis</i>	春季 spring	4.75	11.56	46.02
	夏季 summer	5.01	12.01	56.80
	秋季 autumn	5.72	11.96	47.98
	冬季 winter	4.33	9.91	53.47
短文蛤 <i>Meretrix petechialis</i>	春季 spring	4.53	11.03	57.05
	夏季 summer	5.14	9.93	66.73
	秋季 autumn	5.21	10.89	58.86
	冬季 winter	4.14	9.46	62.93
青蛤 <i>Cyclina sinensis</i>	春季 spring	3.39	8.23	65.29
	夏季 summer	2.89	6.94	73.67
	秋季 autumn	4.71	9.85	68.71
	冬季 winter	3.57	8.15	71.09
彩虹明樱蛤 <i>Moerella iridescens</i>	春季 spring	3.35	8.16	73.44
	夏季 summer	2.80	6.72	80.39
	秋季 autumn	3.48	7.27	75.98
	冬季 winter	3.47	7.93	79.01
泥螺 <i>Bullacta caurina</i>	春季 spring	3.32	8.09	81.53
	夏季 summer	2.31	5.53	85.92
	秋季 autumn	3.28	6.86	82.85
	冬季 winter	3.02	6.90	85.91
棒锥螺 <i>Turritella terebra bacillum</i>	春季 spring	2.92	7.10	88.63
	夏季 summer	2.29	5.49	91.41
	秋季 autumn	3.00	6.26	89.11
	冬季 winter	2.89	6.610	92.52
扁玉螺 <i>Neverita didyma</i>	春季 spring	2.66	6.48	95.11
	夏季 summer	2.28	5.46	96.87
	秋季 autumn	1.96	4.09	93.20
	冬季 winter	2.12	4.84	97.36
古氏滩栖螺 <i>Batillaria cumingii</i>	春季 spring	2.01	4.89	100.00
	夏季 summer	1.31	3.13	100.00
	秋季 autumn	1.64	3.42	96.62
	冬季 winter	1.15	2.64	100.00
长竹蛏 <i>Solen strictus</i>	春季 spring	0.00	0.00	100.00
	夏季 summer	0.00	0.00	100.00
	秋季 autumn	1.62	3.39	100.00
	冬季 winter	0.00	0.00	100.00

含量和底质叶绿素 a 含量总体高于北岸,同时,泥螺为南方引进种,偏好高温^[35],因此在夏秋季资源量高而秋冬季难以采集到。

本研究发现,托氏蜆螺、光滑河篮蛤、彩虹明樱蛤、四角蛤蜊在各季节均有较高的优势度,也是黄河三角洲现有调查研究中出现频率较高的物种^[36]。作为各季节优势度均最高的物种,光滑河篮蛤具有群居习性,且对温度变化的耐受性较强,冰点水温仍不足以致死^[37],因此其在冬季仍具有极高的优势度。与前 3 种相比,四角蛤蜊经济价值更高,个体更大,其在黄河三角洲的冬季优势度相对较高。刘强等^[38]发现黄河三角洲潮间带四角蛤蜊生物量在冬季最大,而栖息密度在冬季也较高,因此其在本研究中冬季优势度较高。

3.2 群落多样性特征

潮间带底栖动物群落结构受季节变化、环境变化以及人为干扰等诸多因素的影响^[39-41]。本研究发现黄河三角洲潮间带贝类群落多样性指数在季节间差异不大,但以春季稍高,同葛广玉等^[42]于长山列岛潮间带贝类群落结构调查结果相似。冬季黄河三角洲贝类 Margalef 丰富度指数最低,但断面平均 Shannon-Wiener 多样性和 Pielou 均匀度指数均高于秋季(Pielou 均匀度指数甚至高于夏季),可能是由于低温耐受性差的物种如泥螺、脉红螺(*Rapana venosa*)、秀丽织纹螺(*Nassarius festivus*)等移动至深水区,这与冬季采集的贝类种类最少的调查结果相吻合。尽管本次调查中春季贝类平均栖息密度最小,但采集到的贝类种类数达到 15 种,仅略低于夏季的 16 种,因此根据 Shannon-Wiener 指数等计算方法得到的春季多样性指数较高。但是,以上方法忽视了种群大小在维持生物多样性中的贡献,如断面 5#贝类栖息密度较高,平均达到 950.75 ind/m²,但群居性光滑河篮蛤资源量极大,其春季优势种有光滑河篮蛤和托氏蜆螺两种,而其他季节优势种仅有光滑河篮蛤,影响了不同季节群落多样性的评估。王寿兵^[43]提出物种多样性评估时应充分考虑群落中各种群在个体数量上的绝对差异,王晶等^[44]则提出使用基于区域混合样数据评估 Shannon-Wiener

多样性指数而非基于样方数据,更能准确地反映海域群落生物多样性状况。此外,物种功能性状也被用于评估群落多样性^[45-46]。因此,未来黄河三角洲底栖生物群落需多手段综合评估方式以准确体现多样性状况。

本研究中,黄河三角洲不同调查季节底栖贝类多样性最高的断面存在差异。底质环境的差异被认为是影响潮间带贝类分布的主要原因^[47]。尽管本研究中 8 个调查断面均为淤泥质海岸,但沉积物类型和人为开发利用状况存在差异,滩涂贝类栖息地变化特征明显不同^[31,48]。与黄河入海口南侧开放断面 1#~4#不同,黄河入海口北侧的断面 5#~8#位于黄河国家级自然保护区周边,人为干扰相对较少^[17-18],因此,人类活动是影响黄河三角洲潮间带贝类物种多样性的一个重要因素^[14]。

3.3 贝类群落聚类

黄河三角洲底栖贝类群落春夏秋冬四季的非度量多维排序尺度(nMDS)分析中应力值分别为 0.1268、0.2243、0.1394 和 0.1779。刘颖等^[49]和赵梓屹等^[50]认为应力值小于 0.2 即可判断分析结果可信,而黄冰等^[28]认为应力值小于 0.3 即结果可信。因此,本研究中各季节中非度量多维排序尺度分析结果可信度高。尽管夏季应力值稍大于 0.2,聚类分析(Bray-Curtis)与非度量多维排序尺度分析图相互校正,所以夏季群落分析结果同样具有一定可信度,结果具有解释意义。本研究发现,托氏蜆螺、光滑河篮蛤、彩虹明樱蛤、四角蛤蜊 4 种在各季节优势度始终均较高的物种也是维持断面间非相似性贡献较高的物种,因此本研究认为可将其作为黄河三角洲泥质滩涂特征种。其中,托氏蜆螺、光滑河篮蛤和四角蛤蜊也是盐城滨海湿地的主要优势贝类^[51]。黄河三角洲和盐城市滨海湿地均位于东亚-澳大利西亚鸟类迁徙路线上^[52],以上 4 种泥质滩涂优势贝类对于保障候鸟越冬栖息和国际中转过程的食物需求具有实际意义。光滑河篮蛤是河口区主要底栖生物之一,广泛分布于我国南北沿海滩涂^[53]。在群落聚类结果中,断面 5#和 8#在不同季节始终聚为一类,可能为两个断面中光滑河篮蛤占绝对优势所致。而

其他断面在不同季节的聚类则受日本镜蛤(*Dosinia japonica*)、泥螺等物种的优势度影响。杨洁等^[54]发现光滑河篮蛤在厦门港海域为优势种,且春季密度最高,同本研究结果相似。尽管光滑河篮蛤的生理特征受盐度影响,但本研究中发现黄河三角洲潮间带盐度约21~30,符合光滑河篮蛤适应盐度范围^[55]。光滑河篮蛤作为重要的饵料生物^[55-56],其较大的资源量对于维持黄河三角洲潮间带生态系统稳定具有重要意义。综上所述,黄河三角洲潮间带不同断面的贝类群落中绝对优势种相似性较高,聚类结果受日本镜蛤等非绝对优势种的影响较大。

参考文献:

- [1] Li S Z, Xie T, Bai J H, et al. Degradation and ecological restoration of estuarine wetlands in China[J]. *Wetlands*, 2022, 42(7): 90.
- [2] Wei Z Y, Jian Z, Sun Y J, et al. Ecological sustainability and high-quality development of the Yellow River Delta in China based on the improved ecological footprint model[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13: 3821.
- [3] Zhang H, Chen X B, Luo Y M, et al. An overview of ecohydrology of the Yellow River Delta wetland[J]. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2016, 16(1): 39-44.
- [4] Zhang X L, Li P, Liu L J, et al. Biodiversity and its protection in the Yellow River Delta wetland[J]. *Coastal Engineering*, 2009, 28(3): 33-39. [张晓龙, 李萍, 刘乐军, 等. 黄河三角洲湿地生物多样性及其保护[J]. *海岸工程*, 2009, 28(3): 33-39.]
- [5] Wang S, Fu B J, Piao S L, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9: 38-41.
- [6] Yu S L, Cui B S, Xie C J, et al. A quantitative approach for offsetting the coastal reclamation impacts on multiple ecosystem services in the Yellow River Delta[J]. *Ecosystem Services*, 2021, 52: 101382.
- [7] Passalacqua P, Moodie A J. Delta-scale solutions for human-scale needs[J]. *Science*, 2022, 376(6596): 916-917.
- [8] Leuven J R F W, Pierik H J, van der Vegt M, et al. Sea-level-rise-induced threats depend on the size of tide-influenced estuaries worldwide[J]. *Nature Climate Change*, 2019, 9(12): 986-992.
- [9] Yan R X, Zhu F, Han Q G, et al. Research on intertidal macrobenthic community in the Yellow River Estuary[J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2019, 54(6): 835-844. [严润玄, 朱峰, 韩庆功, 等. 黄河口潮间带大型底栖动物群落特征[J]. *动物学杂志*, 2019, 54(6): 835-844.]
- [10] Blasc J, Drake P, Solé M. An integrative approach using benthos to evaluate environmental quality of the Sancti-Petri saltmarsh area (SW. Iberian Peninsula)[J]. *Marine Environmental Research*, 2008, 66(1): 200-205.
- [11] Du J, Yu M X, Song G J, et al. Research advances on monitoring and toxicology of microplastic pollution in marine as indicated by bivalves[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(7): 2205-2212. [杜静, 于明曦, 宋广军, 等. 基于双壳贝类指示的海洋微塑料污染监测与毒理学研究进展[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(7): 2205-2212.]
- [12] Xia J B, Li C R, Xu J W, et al. Quantitative characteristics of macrobenthos in the Yellow River Delta Estuary[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(4): 1368-1373. [夏江宝, 李传荣, 许景伟, 等. 黄河三角洲滩涂区大型底栖动物群落数量特征[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(4): 1368-1373.]
- [13] Wang Z Z, Zhang J L, Chen S J, et al. Community characteristics and secondary production of macrozoobenthos in intertidal zone of the Yellow River Estuary[J]. *Marine Environmental Science*, 2012, 31(5): 657-661. [王志忠, 张金路, 陈述江, 等. 黄河入海口潮间带大型底栖动物群落组成及次级生产力[J]. *海洋环境科学*, 2012, 31(5): 657-661.]
- [14] Leng Y, Liu Y T, Liu S, et al. Community structure and diversity of macrobenthos in southern intertidal zone of Yellow River Delta, China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(11): 3054-3062. [冷宇, 刘一霆, 刘霜, 等. 黄河三角洲南部潮间带大型底栖动物群落结构及多样性[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(11): 3054-3062.]
- [15] Ji D W. Study on the Yellow River estuary environment status and its influencing factors[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2006. [纪大伟. 黄河口及邻近海域生态环境状况与影响因素研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.]
- [16] Yan R X, Zhu F, Han Q G, et al. Research on intertidal macrobenthic community in the Yellow River Estuary[J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2019, 54(6): 835-844. [严润玄, 朱峰, 韩庆功, 等. 黄河口潮间带大型底栖动物群落特征[J]. *动物学杂志*, 2019, 54(6): 835-844.]
- [17] Li X, Shi H J, Wang H Y, et al. Diversity and distribution of intertidal molluscs in the Yellow River Delta, China[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(8): 1055-1063. [李玄, 史会剑, 王海艳, 等. 黄河三角洲潮间带软体动物多样性与分布格局[J]. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(8): 1055-1063.]

- [18] Shi H J, Li X, Wang H Y, et al. Community characteristics and spatial distribution of invertebrate macrobenthos in intertidal zone of the Yellow River Delta[J]. Marine Sciences, 2021, 45(2): 11-21. [史会剑, 李玄, 王海艳, 等. 黄河三角洲潮间带大型底栖无脊椎动物群落结构与分布特征[J]. 海洋科学, 2021, 45(2): 11-21.]
- [19] Li J R. Macrobenthic ecology of the intertidal zones of Yellow River delta[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011. [李佳芮. 黄河三角洲潮间带大型底栖生物生态学研究生[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.]
- [20] Zhang S P, Zhang J L, Chen Z Y, et al. Mollusks of the Yellow Sea and Bohai Sea[M]. Beijing: Science Press, 2016. [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.]
- [21] Li Q, Kong L F, Zheng X D. Atlas of Mollusks in Coastal China[M]. Beijing: Science Press, 2019. [李琪, 孔令锋, 郑小东. 中国近海软体动物图志[M]. 北京: 科学出版社, 2019.]
- [22] McNaughton S J. Relationships among functional properties of Californian grassland[J]. Nature, 1967, 216: 168-169.
- [23] Lin Y, Ding X Y, Lyu H, et al. Ecological niche and interspecific association of phytoplankton during the Ice-on period of Ulansuhai lake[J]. Journal of Hydroecology, 2023, 44(3): 102-109. [林岩, 丁晓宇, 吕航, 等. 冰封期乌梁素海浮游植物生态位和种间联结性研究[J]. 水生态学杂志, 2023, 44(3): 102-109.]
- [24] Deng W B, Feng K, Lin G, et al. Spatial-temporal patterns of fish taxonomical and functional diversity in Xiliang Lake and their relationship with water environmental factors after fishing ban[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2023, 47(10): 1681-1695. [邓文博, 冯凯, 林刚, 等. 禁渔后西凉湖鱼类物种和功能多样性时空格局及其与水环境因子的关系[J]. 水生生物学报, 2023, 47(10): 1681-1695.]
- [25] Strong W L. Biased richness and evenness relationships within Shannon-Wiener index values[J]. Ecological Indicators, 2016, 67: 703-713.
- [26] Margalef R. Perspectives in ecological theory[M]. Chicago: University of Chicago Press, 1968.
- [27] Ricotta C, Avena G. On the relationship between Pielou's evenness and landscape dominance within the context of Hill's diversity profiles[J]. Ecological Indicators, 2003, 2(4): 361-365.
- [28] Huang B, Harper D A T, Hammer Ø. Introduction to PASTA comprehensive statistics software package for paleontological data analysis[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 2013, 52(2): 161-181. [黄冰, David A T Harper, Øyvind Hammer. 定量古生物学软件 PAST 及其常用功能[J]. 古生物学报, 2013, 52(2): 161-181.]
- [29] Dong Y W, Liao M L, Han G D, et al. An integrated, multi-level analysis of thermal effects on intertidal molluscs for understanding species distribution patterns[J]. Biological Reviews, 2022, 97(2): 554-581.
- [30] Yang F, Zeng C, Wang H, et al. Effects of environmental factors and clam size on the burrowing behavior of Manila clam *Ruditapes philippinarum*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(3): 795-802. [杨凤, 曾超, 王华, 等. 环境因子及规格对菲律宾蛤仔幼贝潜沙行为的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(3): 795-802.]
- [31] Xu W K, Chen S L, Li P, et al. Distribution characteristics of sedimentation and suspended load and their indications for erosion-siltation in the littoral of Yellow River Delta[J]. Journal of Sediment Research, 2016(3): 24-30. [胥维坤, 陈沈良, 李平, 等. 黄河三角洲近岸沉积物和悬沙的分布特征及其冲淤指示[J]. 泥沙研究, 2016(3): 24-30.]
- [32] Fang C F, Xiu Y R, Zhang X H, et al. The main characteristics of ocean temperature and salinity in the northeast Asian Sea[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2019, 39(6): 73-78. [方长芳, 修义瑞, 张学宏, 等. 东北亚海温度盐度主要特征研究[J]. 海洋测绘, 2019, 39(6): 73-78.]
- [33] Yang L, Shi J Y, Pan R, et al. Distribution of mudsnail *Bullacta caurina* along smooth cordgrass *Spartina alterniflora* invasion stages on a coast of the Yellow Sea, China[J]. Marine Environmental Research, 2023, 192: 106248.
- [34] 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.]
- [35] Zhao W X, Song J J, Yu C Y, et al. Research progress on invasion and dispersion of *Bullacta exarata* in the Yellow River Delta[J]. Ocean Development and Management, 2017, 34(S2): 142-147. [赵文溪, 宋静静, 于超勇, 等. 黄河三角洲区域泥螺入侵与扩散研究进展[J]. 海洋开发与管理, 2017, 34(S2): 142-147.]
- [36] Liu Y F, Zuo M, Wang X X, 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. [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.]

- [37] Li R L, Ding J, Shen Y, et al. Analysis and fitted of the experimental data about the enzyme activity response of the clam *Potamocorbula laevis* to water temperature change above freezing[J]. Marine Environmental Science, 2015, 34(5): 706-712. [李润玲, 丁君, 沈妍, 等. 光滑河蓝蛤酶活性对结冰前水温变化响应试验数据的分析与拟合[J]. 海洋环境科学, 2015, 34(5): 706-712.]
- [38] Liu Q, Zhang S H, Liu Y F, et al. Survey and analysis of *Macraa veneriformis* resources in intertidal zone of the Yellow River Delta[J]. Marine Fisheries, 2018, 40(2): 163-170. [刘强, 张士华, 刘艳芬, 等. 黄河三角洲潮间带四角蛤蜊资源调查分析[J]. 海洋渔业, 2018, 40(2): 163-170.]
- [39] Wang J B, Li X Z, Wang H F, et al. Macrobenthic ecology in the intertidal zones of Changdao Islands in Shandong Province[J]. Marine Sciences, 2018, 42(10): 41-52. [王金宝, 李新正, 王洪法, 等. 山东长岛潮间带大型底栖动物生态特征研究[J]. 海洋科学, 2018, 42(10): 41-52.]
- [40] Tu L L, Liu W X, Sui J X, et al. The community structure of macrobenthos in the southern coastal waters nearby the Shandong Peninsula in summer[J]. Progress in Fishery Sciences, 2018, 39(1): 27-36. [涂梁莉, 刘卫霞, 隋吉星, 等. 山东南部沿海夏季大型底栖动物群落结构特征[J]. 渔业科学进展, 2018, 39(1): 27-36.]
- [41] Liu S L, Qin X D, Wang G J, et al. Structure and diversity of macrozoobenthic communities in intertidal zone with mangrove forest in Fengjiajiang Estuary, Beihai City in summer in 2017[J]. Wetland Science, 2019, 17(3): 352-358. [刘士龙, 秦旭东, 王广军, 等. 2017年夏季北海市冯家江入海口红树林潮间带大型底栖动物群落结构及多样性[J]. 湿地科学, 2019, 17(3): 352-358.]
- [42] Ge G Y, Zhou L Q, Jing H, et al. Annual variation of shellfish community structure in intertidal zone of Changshan Islands[J]. Progress in Fishery Sciences, 2024, 45(2): 199-209. [葛广玉, 周丽青, 井浩, 等. 长山列岛潮间带贝类群落结构季节变化[J]. 渔业科学进展, 2024, 45(2): 199-209.]
- [43] Wang S B. A question on the traditional biodiversity index[J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2003, 42(6): 867-868, 874. [王寿兵. 对传统生物多样性指数的质疑[J]. 复旦学报(自然科学版), 2003, 42(6): 867-868, 874.]
- [44] Wang J, Jiao Y, Ren Y P, et al. Comparative study on two computing methods for estimating Shannon-Wiener diversity index[J]. Journal of Fisheries of China, 2015, 39(8): 1257-1263. [王晶, 焦燕, 任一平, 等. Shannon-Wiener 多样性指数两种计算方法的比较研究[J]. 水产学报, 2015, 39(8): 1257-1263.]
- [45] He Q, Liu S D, Tang Y L, et al. Species and functional diversity of fish communities in an artificial reef area of the Pipa Island Sea, Shandong[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2023, 30(12): 1479-1495. [何倩, 刘淑德, 唐衍力, 等. 山东琵琶岛海域人工鱼礁区鱼类群落物种及功能多样性[J]. 中国水产科学, 2023, 30(12): 1479-1495.]
- [46] Mason N W H, Mouillot D, Lee W G, et al. Functional richness, functional evenness and functional divergence: The primary components of functional diversity[J]. Oikos, 2005, 111(1): 112-118.
- [47] Shu F Y. Mollusca resources in the intertidal zone along Qingdao coast[J]. Territory & Natural Resources Study, 2005(3): 84. [舒凤月. 青岛沿海潮间带的贝类资源[J]. 国土与自然资源研究, 2005(3): 84.]
- [48] Niu M X, Wang J, Wang A D, et al. Remote sensing monitoring of the spatio-temporal dynamics of mudflat shellfish habitat in the Yellow River Delta[J]. Progress in Fishery Sciences, 2022, 43(1): 77-85. [牛明香, 王俊, 王安东, 等. 黄河三角洲滩涂贝类栖息地的时空动态遥感监测[J]. 渔业科学进展, 2022, 43(1): 77-85.]
- [49] Liu Y, Li J J, Chen C, et al. Characteristics of the intertidal microbenthic community structure from nine islands in Xiangshan Bay, Zhejiang province, in Spring and Summer[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2021, 52(3): 685-696. [刘颖, 李进京, 陈晨, 等. 浙江象山港岛屿春、夏季潮间带大型底栖生物的群落结构特征[J]. 海洋与湖沼, 2021, 52(3): 685-696.]
- [50] Zhao Z Y, Liu L, Liu R Y, et al. Characteristics of phytoplankton community structure and its relationship with environmental factors in Jiangsu section of the Yangtze River based on NMDS[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(22): 9711-9718. [赵梓屹, 刘凌, 刘瑞艳, 等. 基于 NMDS 的长江江苏段浮游植物群落结构特征及其环境因子关系[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(22): 9711-9718.]
- [51] 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.]
- [52] Chen K L, Yang X Z, Lyu Y. Vital stopover of shorebirds migration on the East Asian-Australasian flyway: Wetlands of Yellow Sea and Bohai Sea[J]. Wetland Science, 2015, 13(1): 1-6. [陈克林, 杨秀芝, 吕咏. 鸕鹚类鸟东亚-澳大利西亚迁飞路线上的重要驿站: 黄渤海湿地[J]. 湿地科学, 2015, 13(1): 1-6.]
- [53] Chen W Q. Understanding the effects of water chemistry on the toxicity of copper in an estuarine clam *Potamocorbula*

- laevis using the toxicokinetic-toxicodynamic model[D]. Xiamen: Xiamen University, 2017. [陈雯倩. 运用毒代动力学-毒效动力学模型预测河口水化学对光滑河蓝蛤铜毒性的影响[D]. 厦门: 厦门大学, 2017.]
- [54] Yang J, Cai L Z, Liang J Y, et al. Quantitative analysis of two new dominant species of macrozoobenthos in Xiamen Harbour, China[J]. Marine Sciences, 2007, 31(9): 44-49. [杨洁, 蔡立哲, 梁俊彦, 等. 厦门海域大型底栖动物两个优势种的发现及其数量分析[J]. 海洋科学, 2007, 31(9): 44-49.]
- [55] Teng W M, Gao S L, Liu X, et al. Effects of salinity on filtration and ingestion rates of surf clam *Macraa veneriformis* and clam *Potamocorbula laevis* in Liaodong Bay[J]. Fisheries Science, 2018, 37(5): 622-627. [滕炜鸣, 高士林, 刘谓, 等. 盐度对辽东湾四角蛤蜊和光滑河蓝蛤摄食率和滤水率的影响[J]. 水产科学, 2018, 37(5): 622-627.]
- [56] Lyu H Z, Liu J, Chen J H, et al. Effects of salinity on filtration, ingestion, and assimilation rates of three filter-feeding bivalves in the Yangtze River estuary[J]. Marine Sciences, 2016, 40(8): 10-17. [吕昊泽, 刘健, 陈锦辉, 等. 盐度对长江口 3 种滤食性贝类滤水率、摄食率同化率的影响[J]. 海洋科学, 2016, 40(8): 10-17.]

Seasonal variation in the shellfish community structure characteristics in the intertidal area of the Yellow River Delta

MA Peizhen^{1,2}, LI Xianglun^{1,2,3}, LIU Zhihong^{1,2}, NIU Mingxiang^{1,2}, SUN Xiujun^{1,2}, LI Zhuanzhuan^{1,2}, ZHOU Liqing^{1,2}, WU Biao^{1,2}

1. State Key Laboratory of Mariculture Biobreeding and Sustainable Goods; Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fisheries Sciences, Qingdao 266071, China;
2. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, China;
3. National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: The Yellow River Delta is a typical representative of a newborn estuarine wetland, and is also an important ecological function area in both the Bohai Sea and the Yellow River Basin. Studying the shellfish community structure in the intertidal zone of the Yellow River Delta is of guiding significance for assessing the ecological status of the Yellow River Delta. In this study, the benthic shellfish resources of eight sampling sections in the intertidal area of the Yellow River Delta were systematically investigated to identify the seasonal variation in shellfish diversity and community structure characteristics in the Yellow River Delta. The investigations were conducted during astronomical tide in four seasons, namely, summer in August 2022, autumn in October 2022, winter in February 2023, and spring in May 2023. Twenty-two shellfish species were identified and the species quantities and densities, the dominant species, and the dominant degree varied greatly among both seasons and sampling sections. Most species (16) and the highest density of 1203.96 ind/m² were observed in summer. The dominant species were *Umbonium thomasi*, *Potamocorbula laevis*, *Moevella iridescens*, and *Macraa quadrangularis*, with *P. laevis* being dominant in all seasons. The Shannon-Wiener diversity, Margalef richness index, and Pielou evenness index values were highest in spring. *U. thomasi*, *P. laevis*, *Macraa quadrangularis*, and *Meretrix petechialis* were the four species with the largest contributions to inter-community dissimilarity among sampling sections in all four seasons. The results show that the benthic shellfish resource in the intertidal area of the Yellow River Delta was largest in summer, but the community diversity was highest in spring. Our results provide basic data and a theoretical foundation for the protection, development, and utilization of wild shellfish resources in the Yellow River Delta.

Key words: Yellow River Delta; intertidal area; mollusk; biodiversity

Corresponding author: WU Biao. E-mail: wubiao@ysfri.ac.cn