

研究论文

# 胶州湾大型底栖动物生态学初步研究

杨湘君<sup>1</sup>, 崔雯瑶<sup>1</sup>, 张蒙生<sup>2</sup>, 陈晨<sup>1</sup>, 于子山<sup>1\*</sup>

(1. 中国海洋大学 海洋生命学院, 山东 青岛 266003; 2. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200050)

**摘要:** 分别于 2018 年冬季(1 月)和夏季(9 月)对胶州湾进行了 2 个航次 20 个相同站位的大型底栖动物调查。共鉴定出大型底栖动物 287 种。大型底栖动物的总平均丰度和生物量分别为 2 026 个/m<sup>2</sup> 和 378.0 g/m<sup>2</sup>, 2 航次的丰度和生物量均呈现由胶州湾中部向南北两侧增大的趋势。调查水域优势种主要为多毛类, 但相对重要性指数( $I_{RI}$ )最高的物种为菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)。Shannon-Wiener 多样性指数结果表明, 胶州湾北部部分站位受到扰动( $H' < 2$ )。聚类分析表明在 35% 和 26% 的相似性水平上冬季和夏季航次的大型底栖动物分别划为 2 个和 3 个群落。Pearson 相关分析结果显示底温是影响胶州湾大型底栖动物丰度分布的主要因素。

**关键词:** 胶州湾; 大型底栖动物; 生物多样性; 群落组成

**中图分类号:** Q958

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1671-6647(2021)01-0089-13

**doi:** 10.3969/j.issn.1671-6647.2021.01.009

**引用格式:** YANG X J, CUI W Y, ZHANG M S, et al. Preliminary study on the ecology of macrobenthos in Jiaozhou Bay[J]. Advances in Marine Science, 2021, 39(1): 89-101. 杨湘君, 崔雯瑶, 张蒙生, 等. 胶州湾大型底栖动物生态学初步研究[J]. 海洋科学进展, 2021, 39(1): 89-101.

胶州湾位于山东半岛南部, 是一个典型的半封闭型海湾<sup>[1]</sup>, 环湾地带均属青岛市行政管辖。其水域环境条件及地理位置极适宜进行海湾生态学研究。由于该地区人类活动频繁, 2012 年胶州湾水域面积较 150 a 前减少了 40%, 胶州湾纳潮量减少, 自净能力减弱, 富营养化严重<sup>[1-2]</sup>。山东省青岛市政府自 2010 年大力促进“环湾保护, 拥湾发展”等一系列保护政策的实施<sup>[3]</sup>, 使胶州湾水域面积逐渐回升, 同时环境污染状况也有所减轻。

大型底栖动物因具有种类丰富、分布广泛及回避能力差等特点<sup>[4]</sup>, 可用于指示环境变化。对胶州湾大型底栖动物进行的研究, 不仅能揭示胶州湾污染现状及趋势, 还能为胶州湾环境监测及综合治理提供参考和依据。

20 世纪 90 年代以来, 众多研究人员对胶州湾大型底栖动物进行了研究<sup>[5-14]</sup>。这些研究大多设置站位较少, 且近些年的调查多侧重于湾内水产养殖区域底栖生态环境的变化。采样站位多集中于湾西部和北部, 水深较浅且底质类型单一, 不足以全面掌握整个胶州湾的大型底栖动物的生态学现状。我们于 2018 年在胶州湾均匀设置 20 个站位, 进行冬、夏 2 个航次的调查, 全面研究大型底栖动物的丰度、生物量、优势种、多样性和群落结构等特征, 结合环境因子进行分析后与相关历史研究进行对比, 以期为胶州湾水域大型底栖动物群落组成和演变的进一步研究提供参考, 为研究贝类养殖对胶州湾大型底栖生物群落及底栖环境的影响提供数据, 为近岸海湾研究提供资料积累。

**收稿日期:** 2019-10-10

**资助项目:** 国家自然科学基金项目——中国海砂质潮间带猛水蚤的多样性研究(41576153); 青岛市海洋与渔业局项目——胶州湾海洋生物多样性普查及信息库构建

**作者简介:** 杨湘君(1994—), 女, 硕士研究生, 主要从事底栖生物方面研究。E-mail: 1176098712@qq.com

\* **通信作者:** 于子山(1963—), 男, 副教授, 硕士, 主要从事底栖生物方面研究。E-mail: yu\_zishan@ouc.edu.cn

(高峻 编辑)

## 1 材料与方 法

### 1.1 样品的采集与检测

我们乘坐“天使一号”调查船分别于 2018 年 1 月和 2018 年 9 月对胶州湾进行了 2 个航次(简称冬季和夏季航次)的大型底栖动物采样,设置 20 个相同站位(图 1)。

使用 0.05 m<sup>2</sup>的 HNM 箱式采泥器(山东省科学院海洋仪器仪表研究所生产)进行沉积物样品的采集。每站采样 3 次,合为一个样品,现场分选大型底栖动物样品的网筛孔径为 0.5 mm,分选后留在筛子上的标本及残渣全部装瓶,并用体积分数为 10%的甲醛溶液固定,20 °C 常温保存<sup>[15]</sup>。每站另取表层沉积物样品约 50 g,−20 °C 冷冻保存,用于沉积物粒度、有机质和叶绿素的测定<sup>[16]</sup>。使用船载 Hydrocat 型 CTD 仪(美国 Sea-Bird Electronics Inc. 生产)现场测定各站位的水深、底温和底盐数据<sup>[17]</sup>。

野外采样工作结束后,立即于中国海洋大学底栖生物实验室开始大型底栖动物分析、鉴定、计数和称量工作,持续约 3 个月,各项工作均按照《海洋调查规范》的要求<sup>[15]</sup>进行。

在采样结束后 1 周内于中国海洋大学底栖生物实验室中完成表层沉积物环境因子的测定工作。其中,沉积物粒度使用 Cilas940L 型激光粒度仪(兴和仪器上海有限公司生产)测得(部分站位因底质颗粒较大采用筛析法<sup>[16]</sup>),有机质的测定参照《海洋监测规范》中的重铬酸钾-硫酸氧化法<sup>[16]</sup>,叶绿素的测定采用《海洋调查规范》中的荧光分光光度法<sup>[15]</sup>。

### 1.2 数据分析方法

#### 1.2.1 优势种的确定

使用相对重要性指数( $I_{RI}$ )<sup>[18]</sup>来确定优势种。其优势在于全面涵盖了大型底栖动物的生物量、丰度和分布情况,公式<sup>[18]</sup>如下

$$I_{RI} = (W + N) \times F, \quad (1)$$

式中  $W$  为物种生物量占总生物量的百分比, $N$  为物种丰度占总丰度的百分比, $F$  为物种在每个站位的出现频率。

#### 1.2.2 物种多样性

使用 Margalef 物种丰富度指数( $d$ )、Pielou's 物种均匀度指数( $J'$ )和 Shannon-Wiener 生物多样性指数( $H'$ ),对大型底栖动物的生物多样性进行评价。计算公式<sup>[19]</sup>分别为

$$d = (S - 1) / \log_2 N, \quad (2)$$

$$J' = H' / \log_2 S, \quad (3)$$

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i, \quad (4)$$

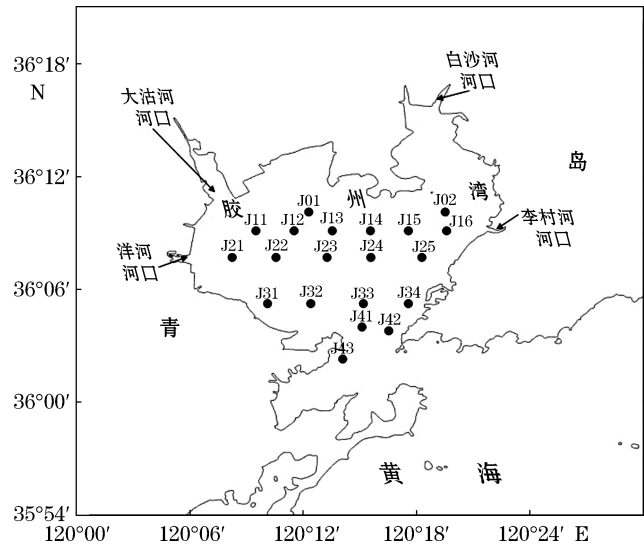


图 1 胶州湾调查站位(●)

Fig.1 Map of sampling stations (●) in Jiaozhou Bay

式中  $S$  是样品总物种数,  $N$  是样品总个体数,  $P_i$  是第  $i$  种的个体数与样品中的总个体数的比值。

### 1.2.3 群落分析

使用 PRIMER 6.0 软件包对大型底栖动物丰度数据进行 CLUSTER 分析(划分群落)、ANOSIM(群落组成显著性检验)以及 SIMPER 分析(群落组间相异性计算)<sup>[20]</sup>。使用 SPSS19.0 软件<sup>[19]</sup>进行 Pearson 相关分析(生物数据与环境因子的相关性)。

## 2 结 果

### 2.1 大型底栖动物种类组成及优势种

研究中共鉴定出大型底栖动物 287 种。其中多毛类 96 种,占总数的 33.45%;甲壳类 87 种,占总数的 30.31%;软体动物 74 种,占总数的 25.78%;棘皮动物 7 种,占总数的 2.44%;其他类群 23 种,占总数的 8.02%。

冬、夏航次分别鉴定出大型底栖动物 203 种和 189 种,物种数最多的类群均为多毛类,其次为甲壳类。胶州湾湾口及个别西北和东北部的站位物种数较多,中西部水域物种数相对较少(图 2)。

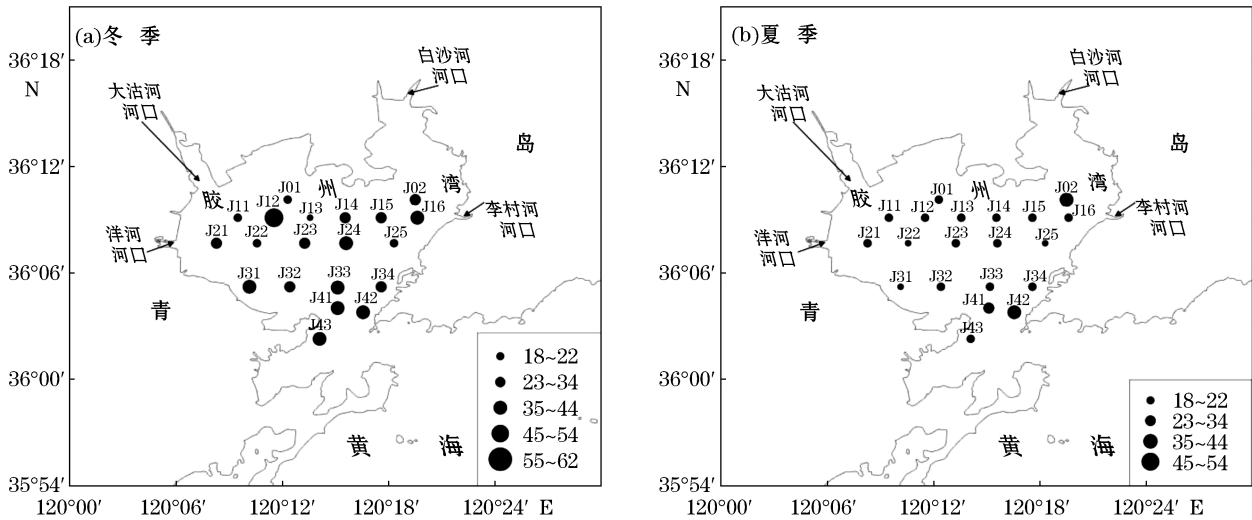


图 2 调查水域 2 航次大型底栖动物种数(种)分布图

Fig.2 The spatial distribution of macrobenthos species in 2 cruises survey area

2 个航次  $I_{RI}$  排名前 10 的物种见表 1,冬季和夏季航次的优势种组成差异不大,主要由多毛类组成。2 个航次  $I_{RI}$  最高的物种均为菲律宾蛤仔。

表 1 2 航次相对重要性指数排名前 10 的物种

Table 1 The top 10 species ranked by  $I_{RI}$  of two cruises

冬 季		夏 季	
物种名	$I_{RI}$	物种名	$I_{RI}$
菲律宾蛤仔 <i>Ruditapes philippinarum</i>	5 777	菲律宾蛤仔 <i>Ruditapes philippinarum</i>	1 594
马丁海稚虫 <i>Spio martinensis</i>	389	中蚓虫 <i>Mediomastus californiensis</i>	851
纽虫 <i>Nemertinea</i> spp.	340	不倒翁虫 <i>Sternaspis scutata</i>	475
中蚓虫 <i>Mediomastus californiensis</i>	289	巴氏钩毛虫 <i>Sigambra bassi</i>	419

续表

冬季		夏季	
物种名	$I_{RI}$	物种名	$I_{RI}$
寡鳃齿吻沙蚕 <i>Nephtys oligobranchia</i>	153	纽虫 <i>Nemertinea</i> spp.	336
短叶索沙蚕 <i>Lumbrinereis latreilli</i>	134	寡鳃齿吻沙蚕 <i>Nephtys oligobranchia</i>	313
红刺尖锥虫 <i>Scoloplos rubra</i>	120	多丝独毛虫 <i>Tharyx multifilis</i>	119
多丝独毛虫 <i>Tharyx multifilis</i>	114	短叶索沙蚕 <i>Lumbrinereis latreilli</i>	86
巴氏钩毛虫 <i>Sigambra bassi</i>	102	豆形短眼蟹 <i>Xenopthalmus pinnotheroides</i>	74
足刺拟单指虫 <i>Cossurella aciculata</i>	97	小胡桃蛤 <i>Nucula paulula</i>	61

## 2.2 大型底栖动物丰度与生物量

大型底栖动物的总平均丰度为 2 026 个/m<sup>2</sup>(表 2), 冬季航次(3 046 个/m<sup>2</sup>)总平均丰度大于夏季航次(1 006 个/m<sup>2</sup>), 且冬季航次的各类群丰度均大于夏季航次。大型底栖动物的总平均生物量为 378.0 g/m<sup>2</sup>, 夏季航次总平均生物量(363.5 g/m<sup>2</sup>)略高于冬季航次(401.2 g/m<sup>2</sup>)。

表 2 调查水域 2 航次大型底栖动物的丰度和生物量

Table 2 The abundance and biomass of macrobenthos of two cruises in survey area

站 位	丰度/(个·m <sup>-2</sup> )		生物量/(g·m <sup>-2</sup> )	
	冬季	夏季	冬季	夏季
J01	2 060	3 660	8.8	1 787.0
J02	1 980	2 213	101.1	3 089.9
J11	1 687	2 693	308.1	600.3
J12	2 727	900	1 202.8	245.7
J13	1 267	1 680	310.2	507.6
J14	2 600	707	482.5	44.5
J15	660	433	15.6	36.6
J16	1 947	720	1 369.0	1 443.5
J21	1 460	780	5.6	39.2
J22	827	287	4.2	14.9
J23	920	327	624.5	2.1
J24	1 660	507	53.5	12.6
J25	693	293	5.5	13.8
J31	7 147	227	2 703.0	28.9
J32	3 140	680	5.6	10.9
J33	2 673	633	13.5	5.5
J34	1 647	733	11.2	10.2
J41	5 733	1 430	16.5	29.3
J42	4 510	660	9.4	91.2
J43	15 580	547	18.8	10.1
平 均	3 046	1 006	363.5	401.2

2.2.1 大型底栖动物丰度组成及分布

大型底栖动物的丰度呈现出由胶州湾中部向南北两侧增大的趋势, 冬季航次丰度高值主要分布在胶州湾南部, 夏季航次丰度高值位于胶州湾西北部(图 3)。胶州湾多毛类与软体动物的丰度分别占总丰度的 36%和 39%, 不计菲律宾蛤仔的丰度, 调查水域多毛类所占比例上升至 64%, 软体动物占比下降为 12%。

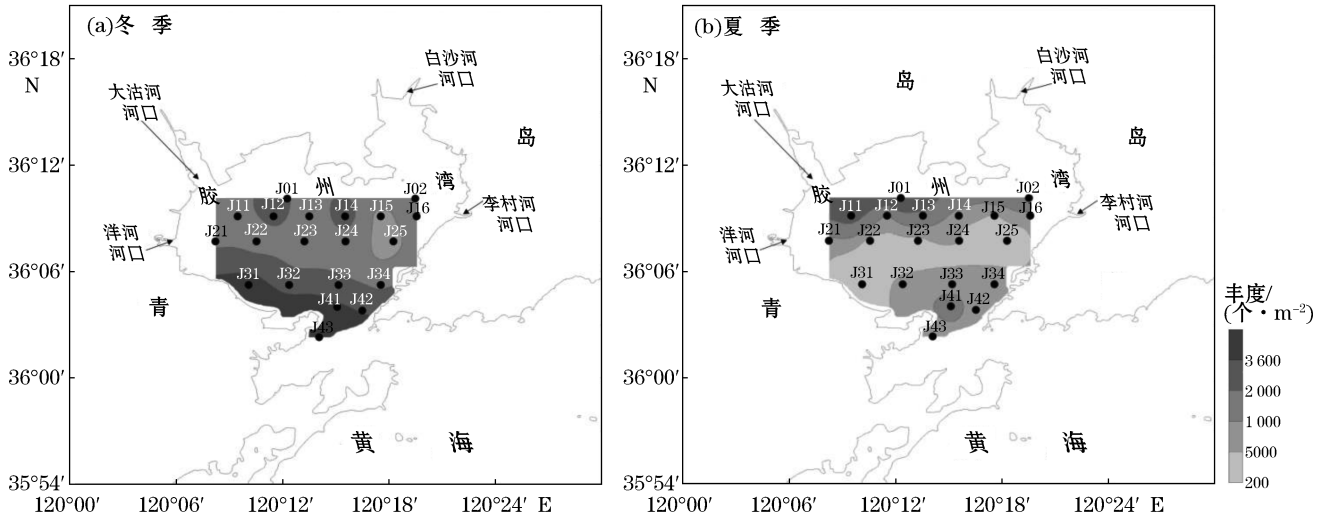


图 3 调查水域 2 航次大型底栖动物丰度平面分布

Fig.3 The horizontal distributions of macrobenthos abundance of two cruises in survey area

2.2.2 大型底栖动物生物量组成及分布

软体动物的生物量在总生物量中所占百分比高达 95%, 菲律宾蛤仔和牡蛎(长牡蛎 *Crassostrea gigas* 及猫爪牡蛎 *Crassostrea pestigris*) 的生物量则分别占软体动物生物量的 47%和 45%。冬季生物量低值区集中在胶州湾中部和南部水域, 而胶州湾中部站位在航次夏季生物量较低(图 4)。

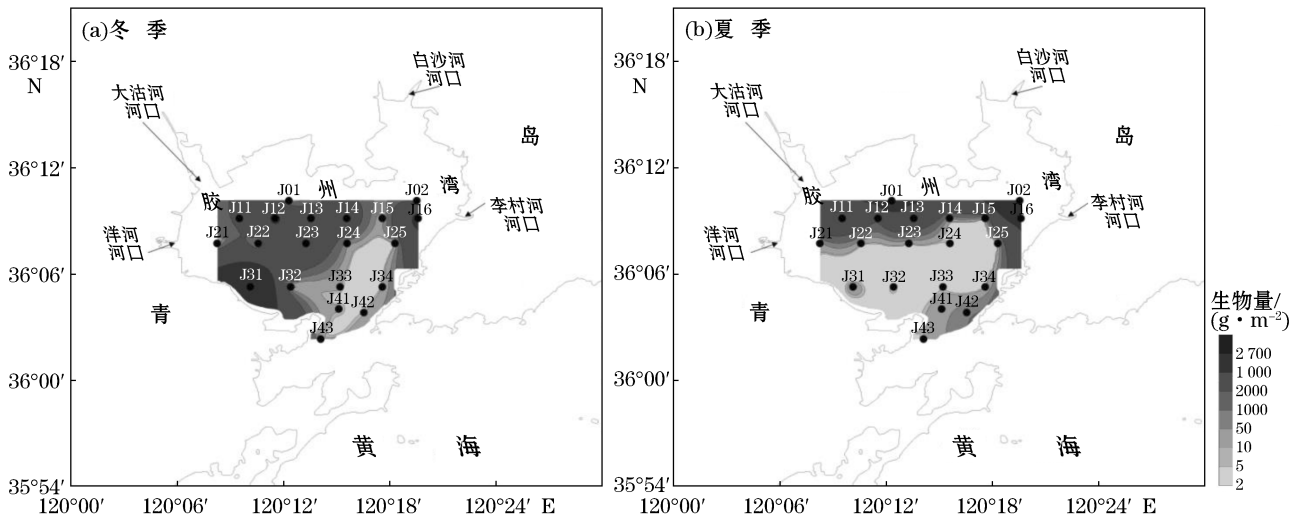


图 4 调查水域 2 航次大型底栖动物生物量平面分布

Fig.4 The horizontal distributions of macrobenthos biomass of two cruises in survey area

### 2.3 大型底栖动物生物多样性

冬季航次的  $H'$  平均值为 3.61(表 3)。胶州湾沿岸站位的  $H'$  较低,最低值为 1.69(J01 站);胶州湾中部的站位  $H'$  值较高,最高的站位是 J24(4.94)。夏季航次  $H'$  平均为 3.83。 $H'$  低值区位于胶州湾西北部水域,其中  $H'$  最小的站位是 J11(1.69), $H'$  次小的站位为 J01(1.78); $H'$  最高的站位 J42(5.28)位于胶州湾湾口, $H'$  值次高的站位是同样位于湾口的 J43(4.64)。

20 个站位的  $J'$  平均值在冬季航次为 0.68,夏季航次为 0.80,最高值出现在夏季航次的 J43 站位(0.94),冬、夏 2 个航次都在西北部水域出现低值。 $d$  平均值在冬季航次为 5.10,夏季航次为 4.26,最高值出现在夏季航次的 J42 站位(8.01)。

表 3 调查水域大型底栖动物  $H'$ ,  $J'$  和  $d$  值  
Table 3  $H'$ ,  $J'$  and  $d$  values of macrobenthos in survey area

站 位	冬 季			夏 季		
	$H'$	$J'$	$d$	$H'$	$J'$	$d$
J01	1.69	0.34	3.93	1.78	0.36	3.66
J02	4.29	0.80	5.27	4.58	0.81	6.49
J11	2.70	0.58	3.23	1.69	0.36	3.29
J12	4.49	0.76	7.59	3.78	0.80	3.82
J13	1.99	0.46	2.66	2.75	0.59	3.37
J14	3.45	0.66	4.71	4.12	0.84	4.42
J15	4.53	0.88	5.24	3.86	0.85	3.62
J16	4.53	0.82	6.07	4.51	0.91	4.56
J21	3.35	0.65	4.67	3.43	0.75	3.45
J22	4.34	0.86	4.76	3.56	0.85	3.00
J23	4.59	0.89	5.13	4.20	0.90	4.15
J24	4.94	0.87	6.61	4.29	0.89	4.34
J25	4.55	0.90	4.89	4.08	0.93	3.52
J31	2.02	0.36	5.41	3.82	0.92	3.14
J32	3.77	0.71	4.72	3.80	0.81	3.83
J33	3.89	0.70	5.70	4.48	0.89	4.96
J34	3.43	0.66	4.73	3.62	0.77	3.81
J41	3.40	0.61	5.32	4.38	0.83	5.09
J42	4.22	0.74	6.06	5.28	0.92	8.01
J43	2.04	0.36	5.28	4.64	0.94	4.76
平 均	3.61	0.68	5.10	3.83	0.80	4.26

### 2.4 大型底栖动物群落划分

根据大型底栖动物丰度值进行的聚类分析(Cluster)结果见图 5。可在 35% 的相似度水平上将冬季航次 20 个站位划分为群落 I (J01~J34, J43) 和群落 II (J41, J42), 经 SIMPER 分析, 2 群落间的相异性为 70%; 在 26% 的相似度水平上可将夏季航次的站位划分为群落 I (J01, J11~J15, J21~J34, J43)、群落 II (J41, J42) 和群落 III (J02, J16), 3 个群落间的相异性均大于 75%。经 ANOSIM 分析, 大型底栖动物各群落间均存



在极显著差异(冬季航次: $R=0.843, P<0.01$ ;夏季航次: $R=0.837, P<0.01$ )。

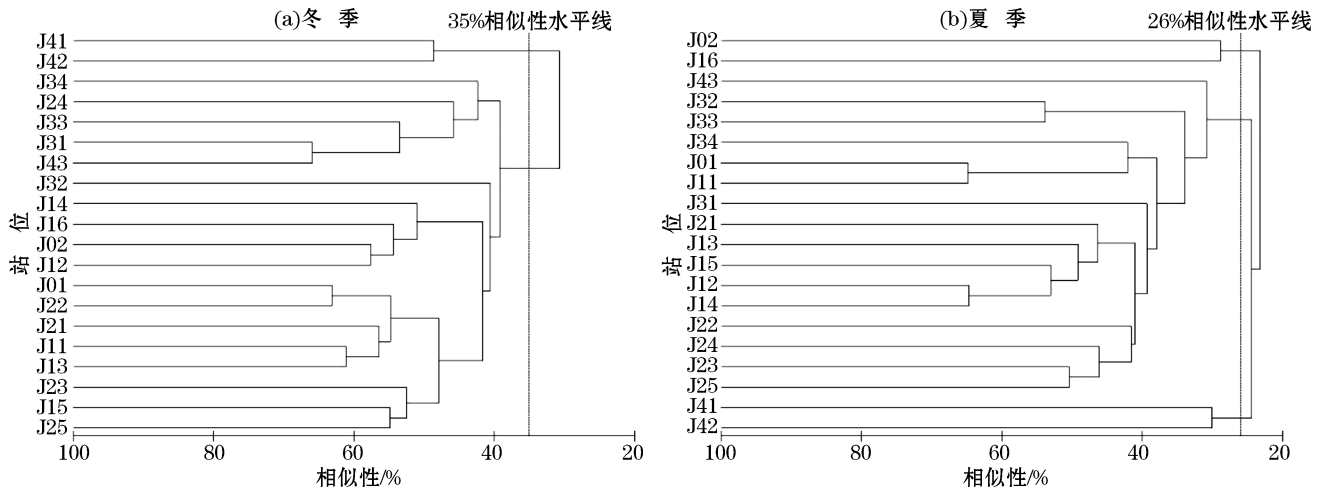


图5 调查水域2航次大型底栖动物聚类分析

Fig.5 Cluster analysis of macrobenthos of two cruises in survey area

### 3 讨论

#### 3.1 调查水域大型底栖动物丰度与环境因子的关系

大型底栖动物丰度分布与环境因子的变化存在相关性<sup>[21]</sup>,因此我们对调查水域大型底栖动物丰度与环境因子进行 Pearson 相关性分析(表4)。

研究结果表明冬季和夏季航次大型底栖动物的丰度与底温分别呈极显著和显著正相关关系,与其他环境因子均无显著相关关系,说明调查水域大型底栖动物的丰度分布主要受到底温变化的影响。陈晓娟对胶州湾大型底栖动物的研究<sup>[21]</sup>及李宝泉等对胶州湾大型底栖软体动物的研究<sup>[22]</sup>也得到相似结论。周红等在莱州湾的研究中也提出,大型底栖动物对底层水环境的温度变化较敏感<sup>[23]</sup>。

表4 调查水域大型底栖动物丰度与环境因子的 Pearson 相关性

Table 4 Pearson correlations between abundance of macrobenthos and environment factors in survey area

季节	Z/m	$t_{底}/^{\circ}\text{C}$	$S_{底}$	平均粒径/mm	中值粒径/mm	$w_{\text{Chl } a}/(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	$w_{\text{有机质}}/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$
冬季	0.155	0.601**	0.348	0.095	0.067	-0.143	-0.026
夏季	0.349	0.536*	0.389	0.319	0.336	-0.090	-0.324

注:“\*\*”表示在0.01水平(双侧)上显著相关,“\*”表示在0.05水平(双侧)上显著相关

#### 3.2 调查水域大型底栖动物两航次间的差异

冬季航次大型底栖动物物种数( $t=4.502, P<0.01$ )和丰度( $t=2.516, P<0.01$ )显著大于夏季航次,而生物量却与夏季航次的相差不显著( $t=-0.161, P>0.05$ ),这种现象与近10 a胶州湾调查的结果<sup>[4,11]</sup>相一致。冬季航次丰度显著大于夏季航次的原因是冬季航次鉴定出大量的菲律宾蛤仔幼体及小个体多毛类如马丁海稚虫、红刺尖锥虫和中蚓虫等。其中冬季航次J01, J02, J11, J12, J13, J14, J21, J31和J43站位出现的大量壳长2 mm左右的菲律宾蛤仔可能是2017年秋季繁生的幼蛤<sup>[5,24]</sup>。由于胶州湾部分多毛类在秋、冬季繁

殖<sup>[4-5]</sup>,我们、李新正等<sup>[8]</sup>、王金宝等<sup>[25]</sup>和隋吉星等<sup>[26]</sup>的研究结果都显示胶州湾多毛类的丰度在冬季出现最高值。

作为典型的暖温带沿岸内湾,胶州湾底栖动物群落存在稳定—消衰—恢复—稳定的季节性变化<sup>[5]</sup>。本研究 2 个航次的群落划分也存在一定差异(图 6),东北部的 J02 和 J16 站在夏季航次被单独划分为群落 III。经 SIMPER 分析,夏季航次对群落 I 和群落 III 之间的相异性贡献最高的物种为长牡蛎(5.9%),而 J02 和 J16 站位在夏季航次采到较多牡蛎,主要原因可能是这 2 个站位位于牡蛎养殖区<sup>[7]</sup>,受 5 月份的牡蛎苗底播<sup>[27]</sup>影响较大。

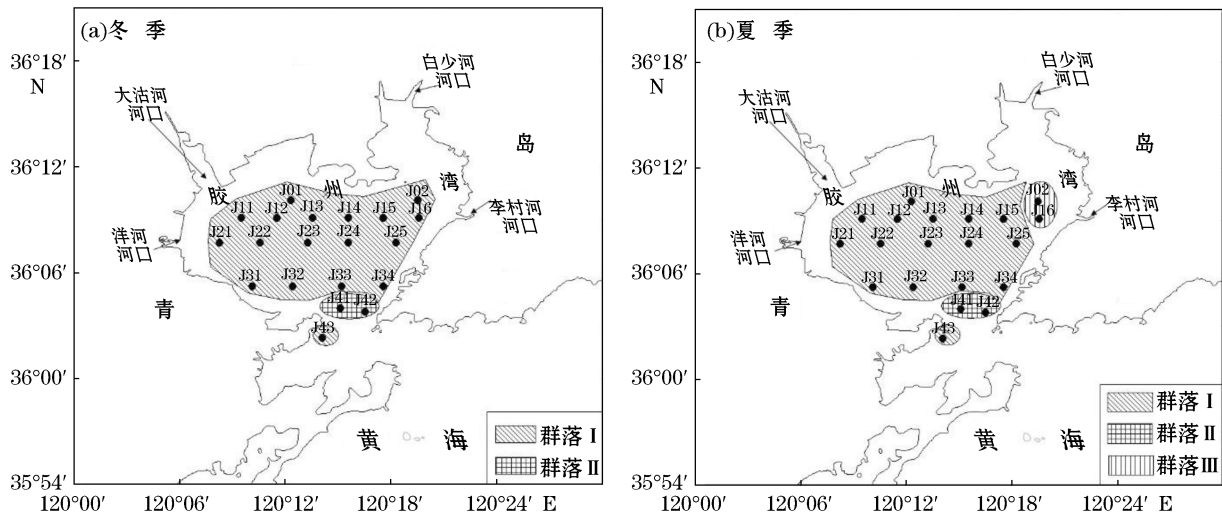


图 6 调查水域 2 航次大型底栖动物群落空间分布图

Fig.6 Spatial distributions of macrobenthic community of two cruises in survey area

### 3.3 利用 Shannon-Wiener 多样性指数评价调查水域底栖环境

泥沙等混合型沉积环境的生物多样性高于泥或砂等均质的沉积环境,且含有一定比例细颗粒的沉积环境多样性较高<sup>[28]</sup>。胶州湾的多样性分布存在相似的规律, $H'$ 与 $\varphi_{黏土}$ 呈极显著相关关系,和平均粒径、中值粒径以及 $\varphi_{砂}$ 之间都呈显著负相关(表 5)。胶州湾中部各站(如 J22, J23, J24 和 J25)多为粉砂黏土类型且水深较浅,离岸较远,水域环境较稳定,物种多样性较高;而湾口及河口站位(如 J11 和 J43)由粒径较大的砂砾组成,受人类活动影响较大,多样性较低。

研究中胶州湾沉积物的有机质质量分数在水域中部和南部较低,西北部和东北部相对较高(图 7),与袁伟<sup>[10]</sup>、刘瑞玉<sup>[5]</sup>和隋吉星等<sup>[26]</sup>的研究结果基本一致。胶州湾水域有机质与 Chl *a* 的分布有显著相关性,而与底质类型无显著相关关系(表 6)。推测北部的高有机质质量分数可能与北部海区的贝类底播和高营养盐含量有关。《青岛市海洋环境公报》显示 2017 年胶州湾的四类和劣四类水质主要分布在北部区域<sup>[29]</sup>;Yuan 等对胶州湾营养盐分布现状的研究也表明,胶州湾东北及西北部底层海水的各类营养盐含量均高于胶州湾其他区域<sup>[30]</sup>。研究中 $H'$ 与有机质质量分数呈显著负相关(表 5),说明有机质在一定程度上影响了胶州湾水域大型底栖动物群落的多样性。夏季航次胶州湾沉积物中有机质质量分数远远高于冬季航次(图 7),但根据表 3 的数据进行 *t* 检验,却发现 2 航次的 $H'$ 值之间并不存在显著差异( $t = -1.078, P > 0.05$ ),这说明 $H'$ 值不能准确反映有机质在时间层面的变化。王智在对青岛湾潮间带的研究中也发现,对不同采样时间的站位进行对比时, $H'$ 值不能准确反映沉积物中的有机质分布情况<sup>[31]</sup>。

除了环境因素,贝类养殖对胶州湾大型底栖动物的多样性指数的分布也有一定影响。胶州湾西北部和东北部水域的蛤仔及牡蛎养殖面积达 13 万公顷,其中 J01, J02, J11, J13 和 J21 站均位于贝类养殖区内<sup>[33]</sup>。



养殖区内的 2 个站位 J01 和 J13 的  $H'$  均小于 2, 均匀度和丰富度指数也相对较低; 而养殖区外站位 (如 J24 及 J25) 的  $H'$  均大于 3, 其他多样性指数也处于较高水平。这种养殖区内外的多样性差异与麻鹭等的研究结果<sup>[34]</sup> 基本一致。研究中邻近养殖区的 4 个站位 (J12, J23, J24 和 J25) 的  $H'$  和  $J'$  均在夏季较高, 冬季较低, 与毕洪生和冯卫<sup>[28]</sup>、于海燕等<sup>[24]</sup> 等对胶州湾多样性的研究结果相同, 这可能是由于胶州湾 4—5 月的菲律宾蛤仔捕捞作业使得其在湾内数量减少, 从而降低了其对其他大型底栖动物生长和分布的抑制<sup>[24]</sup>。

根据蔡立哲等提出的利用  $H'$  评价底栖环境污染情况的标准<sup>[35]</sup>, 并结合调查水域大型底栖动物  $H'$ ,  $J$  和  $d$  值 (表 3) 以及相关环境因子数据, 我们认为: 胶州湾北部的底栖环境受扰动相对严重。  $H'$  值仅能够在一定程度上反映底栖环境的受扰动情况。该方法的实际应用仍需完善。

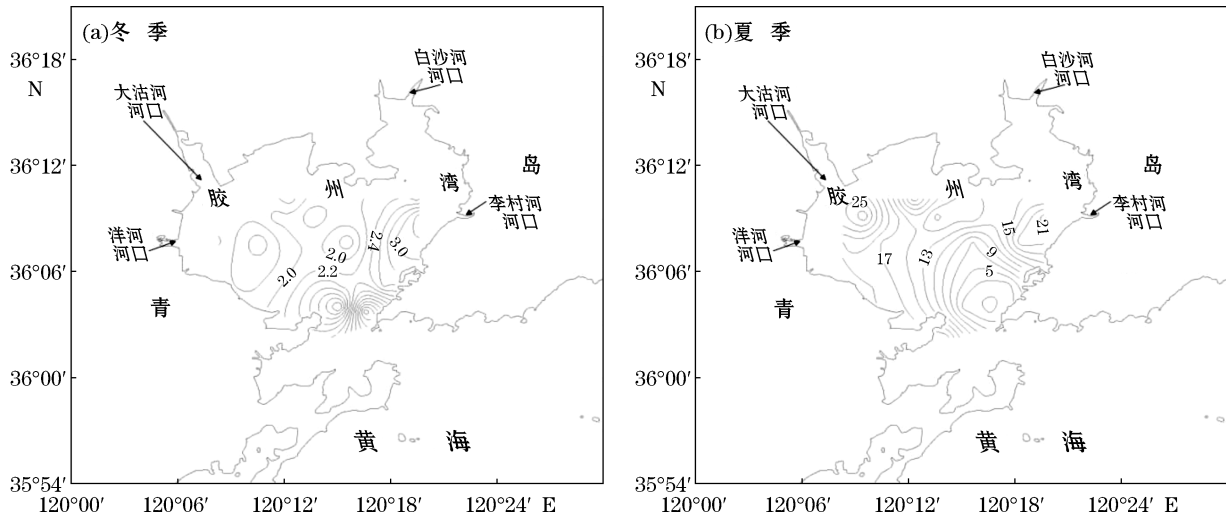


图 7 调查水域 2 航次有机质含量 ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) 平面分布

Fig.7 Horizontal distributions of organ carbon content ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) of two cruises in survey area

表 5 调查水域  $H'$  与环境因子的 Pearson 相关性

Table 5 Pearson correlations between  $H'$  and environment factors in survey area

季节	Z/m	$t_{\text{底}}/^{\circ}\text{C}$	$S_{\text{底}}$	平均粒径/mm	中值粒径/mm	$\varphi_{\text{砾}}/\%$	$\varphi_{\text{砂}}/\%$	$\varphi_{\text{粉砂}}/\%$	$\varphi_{\text{黏土}}/\%$	$\omega_{\text{Chl } a} / (\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	$\omega_{\text{有机质}} / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$
冬季	0.172	-0.002	0.340	-0.514*	-0.443*	-0.476*	-0.485*	0.469*	0.567**	-0.086	-0.468*
夏季	0.359	0.402	0.198	-0.477*	-0.451*	-0.403	-0.540*	0.519*	0.580**	0.003	-0.454*

注: “\*\*”表示在 0.01 水平 (双侧) 上显著相关, “\*”表示在 0.05 水平 (双侧) 上显著相关

表 6 调查水域有机质质量分数 ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) 与环境因子的 Pearson 相关性

Table 6 Pearson correlations between organic matter content ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) and other environment factors in survey area

季节	$\omega_{\text{Chl } a} / (\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	Z/m	平均粒径/mm	中值粒径/mm	$\varphi_{\text{砾}}/\%$	$\varphi_{\text{砂}}/\%$	$\varphi_{\text{粉砂}}/\%$	$\varphi_{\text{黏土}}/\%$
冬季	0.476*	-0.072	-0.315	-0.246	-0.046	-0.181	0.151	0.128
夏季	0.451*	-0.385	-0.443	-0.446	-0.394	-0.362	-0.279	0.401

注: “\*”表示在 0.05 水平 (双侧) 上显著相关

### 3.4 与其他大型底栖动物相关研究结果对比

通过与胶州湾大型底栖动物研究的历史资料对比 (表 7) 发现: 本次研究中胶州湾大型底栖动物的年平

均物种数较 1999 年和 2005—2009 年研究有所上升,与 1981 年结果相近;2014 年和本研究的大型底栖动物丰度明显高于 2010 年以前的;生物量较先前研究有所增加; $H'$  值高于 1981 年和 2005—2009 年研究,与 1999 和 2014 年结果相近;30 a 来胶州湾大型底栖动物的优势种未发生大的改变。胶州湾贝类养殖面积自 2010 年不断减少,至 2016 年共清理养殖筏架约 320 公顷<sup>[36]</sup>;相比 2005 年、2015 年和 2017 年胶州湾水体中溶解无机氮的体积分数分别下降了 40%<sup>[37]</sup>和 57%<sup>[29,38]</sup>;2017 年表层沉积物中的 Cd 和 Cu 等重金属质量分数分别由 2009 年的 0.55 mg/kg 和 36.23 mg/kg<sup>[39]</sup>降低至 2015 年的 0.30 mg/kg 和 27.31 mg/kg<sup>[40]</sup>。推测胶州湾贝类养殖面积缩减以及污染压力减轻可能是本研究各数值相对高于 2005—2009 年研究的主要原因;另一个原因可能是本次采样站位较历史研究多且覆盖了更多贝类养殖区域。

虽然本研究与所选取的历史资料在调查季节和覆盖范围上基本相同,但在采样站位的数目和分布及取样时间上仍存在一定差异,难以做到完全一致的比较,想要摸清胶州湾底栖环境的变化情况还需要进一步的现场调查和更多的比较研究。

表 7 本研究结果与历史资料对比

Table 7 Comparison between this study and the historical data in Jiaozhou Bay

采样时间	站位数/个	物种数/个	平均丰度/ (个·m <sup>-2</sup> )		平均生物量/ (g·m <sup>-2</sup> )		$H'$		主要优势种	来源
			冬季	夏季	冬季	夏季	冬季	夏季		
1981 年	10	330	179	158	43.7	129.5	2.70	2.69	不倒翁虫、寡鳃齿吻沙蚕、 菲律宾蛤仔	文献[5]
1999 年	10	195	487	271	218.5	82.9	3.47	3.53	寡鳃齿吻沙蚕、不倒翁虫、 拟特须虫、菲律宾蛤仔	文献[8]
2005 年	14	159	406	415	19.1	34.1				
2006 年	14	194	545	308	19.0	46.4				
2007 年	14	206	242	209	37.4	19.9	2.79	2.72	菲律宾蛤仔、不倒翁虫、 寡鳃齿吻沙蚕、中蚓虫等	文献[11]
2008 年	14	172	236	146	17.7	33.9				
2009 年	14	161	272	170	7.4	24.5				
2014 年	14	251	1210	3209	56.9	136.3	3.94	3.98	寡鳃齿吻沙蚕、不倒翁虫、 中蚓虫、巴氏钩毛虫、菲律宾蛤仔	文献[13]
2018 年	20	287	3 046	1 006	363.5	401.2	3.61	3.83	菲律宾蛤仔、中蚓虫、纽虫、 寡鳃齿吻沙蚕等	本研究

## 4 结 语

2018 年我们对胶州湾大型底栖动物群落进行了冬季和夏季共 2 个航次的研究,共鉴定出大型底栖动物 287 种,其总丰度为 2 026 个/m<sup>2</sup>,总生物量为 378.0 g/m<sup>2</sup>,优势种主要为多毛类。2018 年胶州湾大型底栖动物物种组成和群落划分在冬、夏航次的区别,主要由季节差异和贝类养殖活动导致。调查水域大型底栖动物的丰度分布主要受底温影响。

研究中 Shannon-Wiener 生物多样性指数( $H'$ )显示,胶州湾北部的底栖环境受扰动较为严重。对比历史资料,我们认为  $H'$  仅能够在一定程度上反映底栖环境的受扰动情况。该方法在近岸海湾底栖环境评价的应用需进一步完善。

研究中调查水域的物种数、平均丰度、平均生物量和  $H'$  均高于 2005—2009 年的调查与研究,我们认为

主要原因可能是调查水域贝类养殖面积的缩减和污染压力的减轻。但想要完全摸清胶州湾底栖环境的变化趋势仍需深入研究。

### 参考文献(References):

- [1] MA L J, YANG X G, QI Y L, et al. Oceanic area change and contributing factor of Jiaozhou Bay[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(3): 365-369. 马立杰, 杨曦光, 祁雅莉, 等. 胶州湾海域面积变化及原因探讨[J]. *地理科学*, 2014, 34(3): 365-369.
- [2] LEI N, HU X Y, ZHOU X H. Evolution process and ecological effect analysis of reclamation in Jiaozhou Bay[J]. *Marine Environmental Science*, 2013, 32(4): 506-509. 雷宁, 胡小颖, 周兴华. 胶州湾围填海的演进过程及其生态环境影响分析[J]. *海洋环境科学*, 2013, 32(4): 506-509.
- [3] YANG H, LI G Q, ZHOU Y, et al. Tidal zone dynamics in Jiaozhou Bay in recent 30 years[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2018, 37(2): 294-300. 杨慧, 李国庆, 周越, 等. 近 30 年来胶州湾潮间带动态变化分析[J]. *应用海洋学学报*, 2018, 37(2): 294-300.
- [4] YANG M, LI X Z, XU Y, et al. Seasonal variations in macrobenthic communities in the subtidal zones of Jiaozhou Bay[J]. *Biodiversity Science*, 2016, 24(7): 820-830. 杨梅, 李新正, 徐勇, 等. 胶州湾潮下带大型底栖动物群落的变化[J]. *生物多样性*, 2016, 24(7): 820-830.
- [5] LIU R Y. Ecology and living resources of Jiaozhou Bay[M]. Beijing: Science Press, 1992. 刘瑞玉. 胶州湾生态学和生物资源[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [6] SUN D Y, ZHANG B L, WU Y Q. A study on macrobenthic infauna in the Jiaozhou Bay[J]. *Studia Marina Sinica*, 1996, 37: 103-114. 孙道元, 张宝琳, 吴耀泉. 胶州湾底栖生物动态的研究[J]. *海洋科学集刊*, 1996, 37: 103-114.
- [7] BI H S, SUN S, SUN D Y. Changes of macrobenthic communities in Jiaozhou Bay[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2001, 32(2): 132-138. 毕洪生, 孙松, 孙道元. 胶州湾大型底栖生物群落的变化[J]. *海洋与湖沼*, 2001, 32(2): 132-138.
- [8] LI X Z, YU H Y, WANG Y Q, et al. Study on the quantitative dynamics of macrobenthos in Jiaozhou Bay[J]. *Studia Marina Sinica*, 2002, 44: 66-73. 李新正, 于海燕, 王永强, 等. 胶州湾大型底栖动物数量动态的研究[J]. *海洋科学集刊*, 2002, 44: 66-73.
- [9] TIAN S Y. Ecological study of macrobenthos in Jiaozhou Bay[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2003. 田胜艳. 胶州湾大型底栖动物的生态学研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2003.
- [10] YUAN W. Community structure and diversity of macrobenthos in western Jiaozhou Bay[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2006. 袁伟. 胶州湾西部海域大型底栖动物的群落结构和多样性[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.
- [11] WANG J B, LI X Z, WANG H F, et al. Ecological study on the macrobenthos in the Jiaozhou Bay in 2005—2009[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2011, 42(5): 728-737. 王金宝, 李新正, 王洪法, 等. 2005—2009 年胶州湾大型底栖动物生态学研究[J]. *海洋与湖沼*, 2011, 42(5): 728-737.
- [12] WANG Z Z. The ecological study on the macrobenthos in the northwest waters of Jiaozhou Bay[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012. 王振钟. 胶州湾西北部海域大型底栖动物生态学研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [13] XU Z D. Preliminary study of functional groups and ecological study of macrofauna in Jiaozhou Bay[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015. 徐兆东. 胶州湾大型底栖动物生态学研究及功能群初探[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [14] LIU X D, YU J Z, ZHANG X H, et al. The secondary production of macrozoobenthos in Jiaozhou Bay[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2018, 34(6): 47-61. 刘旭东, 于建钊, 张晓红, 等. 胶州湾大型底栖动物的次级生产力[J]. *中国环境监测*, 2018, 34(6): 47-61.
- [15] National Center of Ocean Standards and Metrology. Specifications for oceanographic survey: Part 6 Marine biological survey: GB/T 12763.6—2007[S]. Beijing: National Standards Press, 2007: 1-159. 国家海洋标准计量中心. 海洋调查规范: 第 6 部分 海洋生物调查: GB/T 12763.6—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [16] National Technical Committees of Ocean Standardization. The specification for marine monitoring: Part 5 Sediment analysis: GB/T 17378.5—2007[S]. Beijing: National Standards Press, 2007. 全国海洋标准化技术委员会. 海洋监测规范: 第 5 部分 沉积物分析: GB/T 17378.5—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [17] National Center of Ocean Standards and Metrology. Specifications for oceanographic survey: Part 2 Marine hydrographic observation: GB/T 12763.2—2007[S]. Beijing: National Standards Press, 2007. 国家海洋标准计量中心. 海洋调查规范: 第 2 部分 海洋水文观测: GB/T 12763.2—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [18] HAN J, ZHANG Z N, YU Z S. Macrobenthic community structure in the southern and central Bohai Sea, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(3): 531-537. 韩洁, 张志南, 于子山. 渤海中、南部大型底栖动物的群落结构[J]. *生态学报*, 2004, 24(3): 531-537.
- [19] LIU X S, SHI S J, ZHOU H, et al. Macrofaunal diversity and its relationship with environmental factors in the Bohai Sea[J]. *Guangxi Sciences*, 2015, 22(5): 540-548. 刘晓收, 史书杰, 周红, 等. 渤海大型底栖动物多样性及其与环境因子的关系[J]. *广西科学*, 2015,

- 22(5): 540-548.
- [20] ZHOU H, ZHANG Z N. Rationale of the multivariate statistical software PRIMER and its application in benthic community ecology[J]. Journal of Ocean University of Qingdao (Natural Science), 2003, 33(1): 58-64. 周红, 张志南. 大型多元统计软件 PRIMER 的方法原理及其在底栖群落生态学中的应用[J]. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 2003, 33(1): 58-64.
- [21] CHEN X J. Diversity and community structure of invertebrates in the central Jiaozhou Bay[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010. 陈晓娟. 胶州湾中部海域无脊椎动物群落结构及多样性变化研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- [22] LI B Q, LI X Z, YU H Y, et al. Macrobenthic mollusca fauna and its relations to environmental factors in Jiaozhou Bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2005, 36(3): 193-198. 李宝泉, 李新正, 于海燕, 等. 胶州湾底栖软体动物与环境因子的关系[J]. 海洋与湖沼, 2005, 36(3): 193-198.
- [23] ZHOU H, HUA E, ZHANG Z N. Community structure of macrobenthos in Laizhou Bay and adjacent waters[J]. Periodical of Ocean University of China (Natural Science), 2010, 40(8): 80-87. 周红, 华尔, 张志南. 秋季莱州湾及邻近海域大型底栖动物群落结构的研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2010, 40(8): 80-87.
- [24] YU H Y, LI X Z, LI B Q, et al. The species diversity of macrobenthic fauna in Jiaozhou Bay[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(2): 416-422. 于海燕, 李新正, 李宝泉, 等. 胶州湾大型底栖动物生物多样性现状[J]. 生态学报, 2006, 26(2): 416-422.
- [25] WANG J B, LI X Z, WANG H F. Ecological characteristics of dominant polychaete species from the Jiaozhou Bay[J]. Acta Zoologica Sinica, 2006, 52(1): 63-69. 王金宝, 李新正, 王洪法. 胶州湾多毛类环节动物优势种的生态特点[J]. 动物学报, 2006, 52(1): 63-69.
- [26] SUI J X, YU Z S, QU F Y, et al. Preliminary ecological study of the macrobenthos in the middle part of the Jiaozhou Bay[J]. Marine Sciences, 2010, 34(5): 1-6. 隋吉星, 于子山, 曲方圆, 等. 胶州湾中部海域大型底栖生物生态学初步研究[J]. 海洋科学, 2010, 34(5): 1-6.
- [27] LI S L, CHANG Y Q, SONG J, et al. Cultchless Oyster culture by step in north China sea[J]. Fisheries Science, 2013, 32(4): 201-204. 李石磊, 常亚青, 宋坚, 等. 北方海区单体牡蛎分段式养殖方法研究[J]. 水产科学, 2013, 32(4): 201-204.
- [28] BI H S, FENG W. The diversity of macrobenthos in Jiaozhou Bay[J]. Marine Sciences, 1996, 20(6): 58-62. 毕洪生, 冯卫. 胶州湾底栖生物多样性初探[J]. 海洋科学, 1996, 20(6): 58-62.
- [29] Qingdao Municipal Marine Development Bureau. Report on marine environmental quality of Qingdao, 2017[R/OL]. (2018-03-21) [2019-09-20]. <http://ocean.qingdao.gov.cn/n12479801/upload/180321100520491850/180525152418513804.pdf>. 青岛市海洋发展局. 2017年青岛市海洋环境公报[R/OL]. (2018-03-21) [2019-09-20]. <http://ocean.qingdao.gov.cn/n12479801/upload/180321100520491850/180525152418513804.pdf>.
- [30] YUAN H M, SONG J M, XING J W, et al. Spatial and seasonal variations, partitioning and fluxes of dissolved and particulate nutrients in Jiaozhou Bay[J]. Continental Shelf Research, 2018, 171: 140-149.
- [31] WANG Z. The ecological and morphological study of macrobenthos in the intertidal zone of Qingdao cove[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015. 王智. 青岛湾潮间带大型底栖动物生态学和形态学研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [32] ZHANG M L. The research of carrying capacity of shellfish in the Jiaozhou Bay[D]. Qingdao: The First Institute of Oceanography, SOA, 2008. 张明亮. 胶州湾贝类养殖容量研究与分析[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2008.
- [33] PANG L H, KONG F L, XI M, et al. Analysis on land use change in coastal zone of Jiaozhou Bay[J]. Wetland Science, 2017, 15(5): 680-688. 庞立华, 孔范龙, 郗敏, 等. 胶州湾海岸带土地利用变化分析[J]. 湿地科学, 2017, 15(5): 680-688.
- [34] MA A, LIU X S, LI L, et al. A comparative study on community characteristics of macrofauna inside and outside Manila clam culture waters, Jiaozhou Bay[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2014, 1: 122-128. 麻骛, 刘晓收, 李梁, 等. 胶州湾菲律宾蛤仔养殖水域内外大型底栖动物群落特征的比较研究[J]. 海洋湖沼通报, 2014, 1: 122-128.
- [35] CAI L Z, MA L, GAO Y, et al. Analysis on assessing criterion for polluted situation using species diversity index of marine macrofauna[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2002, 41(5): 641-646. 蔡立哲, 马丽, 高阳, 等. 海洋底栖动物多样性指数污染程度评价标准的分析[J]. 厦门大学学报(自然版), 2002, 41(5): 641-646.
- [36] Qingdao Municipal Marine Development Bureau. Report on marine environmental quality of Qingdao, 2016[R/OL]. (2017-04-18) [2019-09-20]. <http://ocean.qingdao.gov.cn/n12479801/upload/170418102939607318/170602153525050081.pdf>. 青岛市海洋发展局. 2016年青岛市海洋环境公报[R/OL]. (2017-04-18) [2019-09-20]. <http://ocean.qingdao.gov.cn/n12479801/upload/170418102939607318/170602153525050081.pdf>.
- [37] LI K Q, HE J, LI J L, et al. Linking water quality with the total pollutant load control management for nitrogen in Jiaozhou Bay, China[J]. Ecological Indicators, 2018, 85: 57-66.
- [38] DONG Z X. Jiaozhou Bay water environmental quality assessment and pollution control[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011. 董兆选. 胶州湾海水环境质量评价及污染防治研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [39] YIN X C, YANG Y L, YU J J, et al. Heavy metal distribution in surface sediments of Jiaozhou Bay[J]. Journal of Qingdao University

(Natural Science), 2001, 14(1): 76-80. 殷效彩, 杨永亮, 余季金, 等. 胶州湾表层沉积物重金属分布研究[J]. 青岛大学学报(自然科学版), 2001, 14(1): 76-80.

- [40] LIANG X M, SONG J M, DUAN L Q, et al. Source identification and risk assessment based on fractionation of heavy metals in surface sediments of Jiaozhou Bay, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, 128: 548-556.

## Preliminary Study on the Ecology of Macrobenthos in Jiaozhou Bay

YANG Xiang-jun<sup>1</sup>, CUI Wen-yao<sup>1</sup>, ZHANG Meng-sheng<sup>2</sup>, CHEN Chen<sup>1</sup>, YU Zi-shan<sup>1</sup>

(1. Ocean University of China, Qingdao 266003, China;

2. Shanghai Investigation Design & Research Institute Co. Ltd., Shanghai 20050, China)

**Abstract:** Based on the data collected in 20 stations of two survey cruises in winter (January) and summer (September) of 2018 in Jiaozhou Bay, a total of 287 macrobenthos species was identified. The average abundance and biomass of macrobenthos were 2 026 ind./m<sup>2</sup> and 378.0 g/m<sup>2</sup> respectively, both of them showed a trend of increasing from the middle to the northern and southern parts of Jiaozhou Bay. The composition of dominant species varied seasonally, the most dominant species was polychaetes, and *Ruditapes philippinarum* had a highest  $I_{RI}$  value. The Shannon-Wiener index ( $H'$ ) indicated that the environment of northern part of Jiaozhou Bay was disturbed ( $H' < 2$ ). The cluster analysis showed that the macrobenthos in the surveyed area were divided into 2 (winter) and 3 (summer) communities at the similarity level of 35% and 26% respectively. The result of Pearson analysis showed that the distribution of macrobenthos abundance had a significant correlation with the temperature of bottom water.

**Key words:** Jiaozhou Bay; macrobenthos; bio-diversity; community composition

**Received:** October 10, 2019