

黄海秋季大型底栖甲壳类多样性及群落结构的初步研究

祝琳¹, 李少月², 王智³, 张蒙生⁴, 陈晨¹, 滕安康¹, 邵聪聪¹, 于子山¹

(1. 中国海洋大学 海洋生命学院, 山东 青岛 266003; 2. 国家海洋局北海环境监测中心, 山东 青岛 266003; 3. 厦门大学 近海海洋环境科学国家重点实验室, 福建 厦门 361102; 4. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200050)

摘要: 基于 2014 年秋季(11 月)在黄海海域所获取的大型底栖动物及环境数据, 研究了黄海海域大型底栖甲壳类动物的种类组成、丰度、生物量、多样性以及群落结构特征等。调查海域共发现 71 种大型底栖甲壳类动物, 隶属于 32 科 42 属, 其平均丰度和生物量分别为 278 inds./m² 和 2.33 g/m²。相对重要性指数最高的物种为太平洋方甲涟虫 *Eudorella pacifica* (Hart, 1930)。在 23% 的相似度水平上, 可以将大型底栖甲壳类划分为 6 个群落。Pearson 相关性结果显示, 太平洋方甲涟虫丰度与水深呈极显著正相关, 与底层盐度呈显著正相关, 与底层温度呈显著负相关。大型底栖甲壳类动物的物种数占比在黄海大型底栖动物类群组成中变化不大, 都在 30% 左右。BOPA 指数表明, 调查海域底栖生态环境整体良好, 仅黄海中部和南部部分站位可能存在中度扰动; BOPA 指数能较好地评价研究海域的环境质量状况。

关键词: 黄海; 大型底栖甲壳类; 群落; BOPA 指数; 环境因子

中图分类号: Q958.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2022)09-0098-11

DOI: 10.11759/hyxx20220304001

大型底栖甲壳类(以下简称底栖甲壳类)在海洋生态系统的能量流动和物质循环中具有重要作用, 它们大多生活在有氧和有机质丰富的沉积物表层, 通过摄食、掘穴和建管等扰动活动, 直接或间接地影响其所在的生态系统^[1]。底栖甲壳类种类多, 数量大, 是优势类群, 在海洋底栖生物中占有重要的地位^[2]。例如生活于沉积物表层的端足类、等足类和涟虫类, 个体虽小, 但因为数量大, 构成大型无脊椎动物及鱼类幼体的重要饵料。底栖甲壳类生活习性相对稳定, 区域性强, 迁移能力弱^[3], 对环境污染等人类活动有着持久的综合的响应。因此, 底栖甲壳类可作为评价环境质量的指示生物。

从 20 世纪 90 年代始, 我国海洋甲壳动物的生态学研究陆续展开, 主要包括甲壳类动物资源的生物量评估、群落结构特征的分析、群落的划分、主要经济种的生物学特性和时空分布特征等。进入 21 世纪以来, 我国深入开发利用海洋资源, 海洋甲壳动物调查规模、频次、所涉海域明显增加, 这使得对虾蟹类生态学的研究更为深入^[4]。例如黄梓荣等^[5]对南海北部陆架区甲壳类动物资源密度分布与种类组成的研究; 卢占晖等^[6]对东海中部虾类季节群落的研究;

宋海棠^[7]、俞存根等^[8]、陈小庆等^[9]、李惠玉^[10]对东海区虾蟹类生态类群和区系特征划分研究等等。关于黄海的甲壳类, 于海燕等^[11]报道了胶州湾大型底栖甲壳动物数量的动态变化, 吴强等^[12-13]研究了黄渤海甲壳类动物群落结构。上述这些研究的对象都是来自底拖网的个体较大的经济甲壳类动物, 而对于采泥样品中的甲壳类动物的系统研究仍然很缺乏。本文根据 2014 年秋季黄海大型底栖动物的调查资料, 研究了该海域底栖甲壳类的种类组成、丰度、生物量、群落结构以及与环境因子的相关性等, 通过与历史资料的对比, 分析了底栖甲壳类物种类组成变化, 并首次利用 BOPA 指数(I_{BOPA})对黄海沉积环境质量状况进行了评价, 以期对黄海底栖甲壳类生态学的深入研究提供参考。

收稿日期: 2022-03-04; 修回日期: 2022-04-06

基金项目: 科技部项目(2012FY112200); 国家自然科学基金项目(41976100)

[Foundation: Ministry of Science and Technology Projects, No. 2012FY112200; National Natural Science Foundation of China, No. 41976100]

作者简介: 祝琳(1997—), 女, 山东青岛人, 硕士生, 研究方向为海洋底栖生物生态学, E-mail: 805531826@qq.com; 于子山(1963—), 通信作者, 男, 山东青岛人, 副教授, 研究方向为海洋底栖生物生态学, E-mail: yu_zishan@ouc.edu.cn

1 材料与方法

1.1 研究海域

于2014年秋季(11月)搭乘“东方红2号”海洋综合调查船,对黄海海域进行了大型底栖动物调查,共设置29个站位,站位见图1。

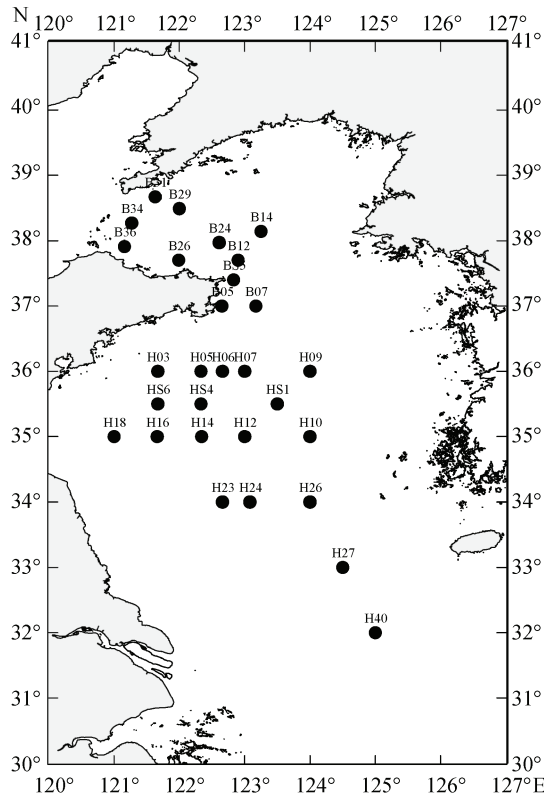


图1 2014年秋季黄海海域大型底栖动物取样站位

Fig. 1 Macrobenthos sampling stations in the Yellow Sea during autumn 2014

1.2 样品采集及处理

使用0.1 m²的箱式采泥器采样,每站成功采2次合为1个样品;现场利用涡旋器悬洗泥沙,经孔径为0.5 mm的网筛分选,分选后留在网筛上的样品残渣全部收集装瓶,并用等体积10%福尔马林溶液固定。每站取一定量的表层沉积物,-20℃冷冻保存,用于环境因子测定。野外及实验室内样品的采集和处理均按照《海洋调查规范:第6部分海洋生物调查》^[14]进行。

本研究所测环境因子包括水深、底层温度、底层盐度和沉积物粒度等,其中水深、底层温度、底层盐度是由CTD现场测定,粒度则使用Mastersizer3000型激光粒度仪进行测定。

1.3 数据处理分析

1.3.1 优势种

采用相对重要性指数(Index of Relative Importance, 简称 I_{RI})来确定优势种^[15],其计算公式如下:

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

式中, W 为每种生物量占总生物量的百分比, N 为每种丰度占总丰度的百分比, F 为该种出现的频率。

1.3.2 多样性指数

采用香农维纳多样性指数(Shannon-Wiener diversity index, H')、均匀度指数(Pielou's index, J')、丰富度指数(Margalef's index, d)进行多样性分析。计算公式如下:

$$H' = -\sum (n_i/N) \cdot \log_2(n_i/N), \quad (2)$$

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

$$d = (S-1) / \log_2 N, \quad (4)$$

式中 S 为样品的总种数, N 为样品的总个体数, n_i 为第 i 种的个体数。

1.3.3 BOPA 指数

BOPA 指数(benthic opportunistic polychaetes amphipods index, 简称 I_{BOPA})是指利用底栖多毛类机会种和端足类的比值来评价环境质量状况^[16]。计算公式:

$$I_{BOPA} = \lg \left(\frac{f_p}{f_a + 1} + 1 \right). \quad (5)$$

f_p 是多毛类机会种的个体总数与样本个体总数的比值, f_a 是端足类的个体总数与样本个体总数的比值。根据 I_{BOPA} 的范围,将环境生态质量状况分为5个等级:优(0.0~0.045 76),未受污染;良(0.045 76~0.139 66),轻度污染;中(0.139 66~0.193 82),中度污染;差(0.193 82~0.267 61),重度污染;劣(0.267 61~0.301 30),严重污染。

1.3.4 数据分析

使用PRIMER6.0软件,进行群落结构分析,对各站位的底栖甲壳类丰度进行平方根转化使之标准化,构建Bray-Curtis相似性矩阵进行聚类分析;利用SPSS22.0软件进行相关性等分析。

2 结果

2.1 沉积环境

本研究环境因子数据见表1。

由表1可以看出,本研究的平均水深为53.64 m,最深处高达82.2 m,在H10站位;最浅处是B26和B36站位,为22 m。平均底温12.77℃,温度范围在8.93~20.23℃,近岸的温度高于中央冷水团,近岸区

温度变化较大。平均底层盐度 31.82, 盐度最高的是 H26 站位, 为 33.165; 最低为 30.954, 在 H03 站位。

沉积物粒径呈现出黄海西部近岸比黄海中部沉积物粒径粗的特点。

表 1 本研究各站位环境因子数据

Tab. 1 Environmental parameters for each station in the surveyed area

站位	H03	H05	H06	H07	H09	HS1	HS4	HS6	H10	H12
水深/m	37.6	51.4	—	72	75.6	75.3	53	43.8	82.2	71.3
底层温度/℃	17.722	17.58	—	8.926	9.084	9.085	13.156	17.467	9.569	9.374
底层盐度	30.954	31.15	—	32.647	32.716	32.707	31.699	31.18	33.116	32.751
平均粒径/mm	0.029	0.006	—	0.005	0.007	0.006	0.006	—	0.018	0.007
中值粒径/mm	0.05	0.006	—	0.006	0.007	0.006	0.006	—	0.015	0.007
站位	H14	H16	H18	H23	H24	H26	H27	H40	B05	B07
水深/m	56	40	37	55	69	74	66.7	49	34	59
底层温度/℃	9.817	17.58	18.254	16.057	10.62	10.285	13.531	20.239	14.698	10.147
底层盐度	32.357	31.27	31.064	31.751	32.368	33.165	32.201	31.25	31.166	32.24
平均粒径/mm	0.007	0.048	—	0.025	0.011	0.011	0.024	0.065	0.022	0.016
中值粒径/mm	0.007	0.087	—	0.033	0.01	0.008	0.022	0.171	0.029	0.017
站位	BS5	B12	B14	B24	B26	B29	B31	B34	B36	平均值
水深/m	32	57	65	52	22	52	57	41	22	53.64
底层温度/℃	13.445	11.98	10.282	11.552	12.553	9.006 3	10.571	12.584	12.323	12.77
底层盐度	31.007	31.86	31.708	31.762	31.208	31.542	31.498	31.451	31.153	31.82
平均粒径/mm	0.019	0.023	0.049	0.015	0.024	0.028	0.027	0.055	0.029	0.022
中值粒径/mm	0.027	0.032	0.08	0.015	0.036	0.029	0.027	0.095	0.041	0.033

注: “—”表示未测得该数据

2.2 底栖甲壳类种类组成与优势种

本研究共采到底栖甲壳类 71 种, 隶属于 32 科 42 属。出现种数较多的科分别为螺赢蜚科 Corophiidae (9 种)、马耳他钩虾科 Melitidae (6 种)和双眼钩虾科 Ampeliscidae (6 种)。出现种数较多的属分别为拟钩虾属 *Gammaropsis* (5 种)、双眼钩虾属 *Ampelisca* (5 种)和马耳他钩虾属 *Melita* (4 种)。物种数较多的站位集中在山东半岛近岸附近, 黄海中部区域相对较少(图 2)。

表 2 列出了本研究中 I_{RI} 指数大小列前五位的种, 分别为太平洋方甲涟虫 *Eudorella pacifica* (Hart, 1930)、口虾蛄 *Oratosquilla oratoria* (De Haan, 1844)、滩拟猛钩虾 *Harpiniopsis vadiculus* (Hirayama, 1987)、日本沙钩虾 *Byblis japonicus* (Dahl, 1945)和美原双眼钩虾 *Ampelisca miharaensis* (Nagata, 1959)。其中, 太平洋方甲涟虫的 I_{RI} 值最高, 其分布于 23 个站位, 出现率(分布站位数/总站位数)为 79.31%; 集中分布在冷水团范围, 包括山东半岛的外围海域和南黄海中部(图 3), 其中, 在 B14 站位达到丰度的最高值 560 inds./m²。

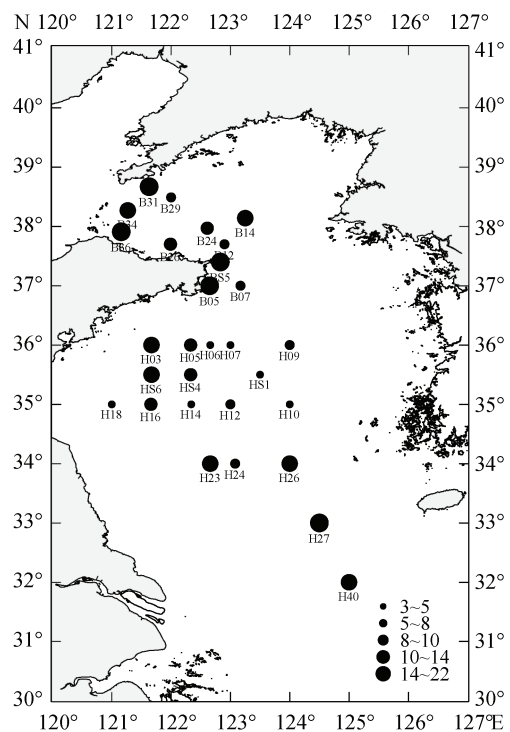


图 2 研究海域底栖甲壳类物种数分布

Fig. 2 Distribution of benthic crustaceans species in the surveyed area

表 2 相对重要性指数排名前 5 位的底栖甲壳类物种

Tab. 2 Top 5 I_{RI} benthic crustacean species

种名	拉丁名	I_{RI}
太平洋 方甲涟虫	<i>Eudorella pacifica</i> (Hart, 1930)	2 380
口虾蛄	<i>Oratosquilla oratoria</i> (De Haan, 1844)	445
滩拟猛钩虾	<i>Harpiniopsis vadiculus</i> (Hirayama, 1987)	443
日本沙钩虾	<i>Byblis japonicus</i> (Dahl, 1945)	270
美原双眼钩虾	<i>Ampelisca miharaensis</i> (Nagata, 1959)	233

2.3 底栖甲壳类的丰度和生物量

底栖甲壳类的平均丰度为 278 inds./m², 丰度最高的站位在 B14, 为 850 inds./m², 原因是该站位出现了大量的太平洋方甲涟虫, 其丰度占大型底栖动物总丰度的 65.88%; 丰度最低的站位在 B26, 为 60 inds./m²。本研究底栖甲壳类丰度高值区大体都位于北黄海远岸海域(图 4a)。

底栖甲壳类的平均生物量为 2.33 g/m², 生物量最高的站位在 H09, 为 22.98 g/m², 其次为 H40 站位, 原因是这两个站位采集到了口虾蛄; 生物量最低的站位在 H18, 为 0.014 g/m²。本研究底栖甲壳类生物量高值区大体都位于黄海中部(图 4b)。

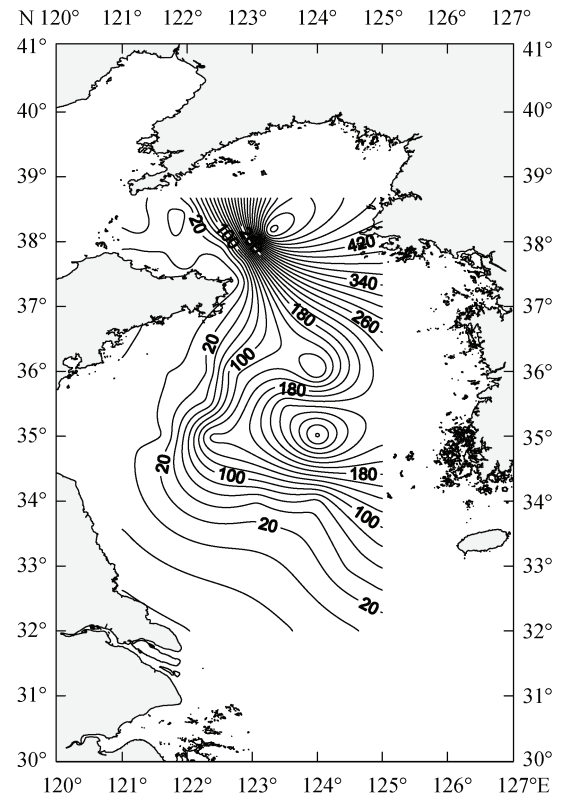


图 3 研究海域太平洋方甲涟虫丰度(inds./m²)平面分布
Fig. 3 Abundance (inds./m²) of *Eudorella pacifica* in the surveyed area

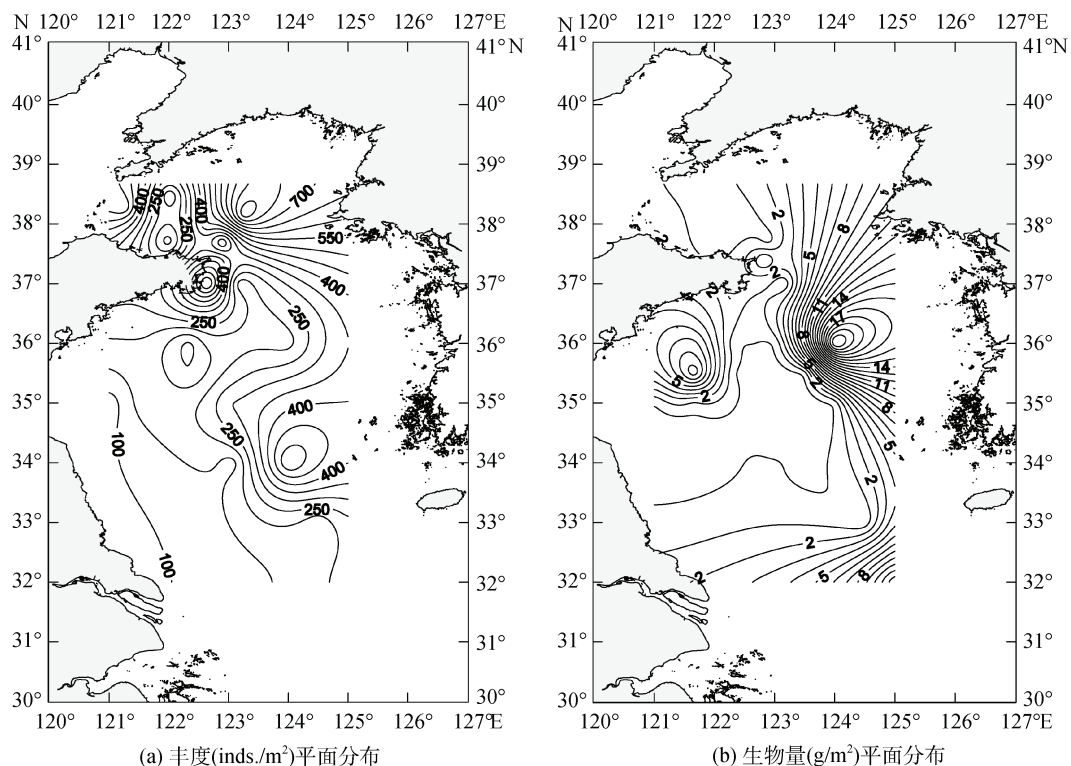


图 4 研究海域底栖甲壳丰度和生物量平面分布
Fig. 4 Abundance (a) and biomass (b) of benthic crustaceans in the surveyed area

2.4 底栖甲壳类多样性指数

由表 3 看出, 各个站位底栖甲壳类种数(S)平均值为 9.2, 种数最多的站位位于山东半岛近岸的 B05, 为 21 种, 最少的站位位于黄海中部的 H14, 为 3 种。香农维纳多样性指数(H')平均值为 2.22, 最高出现在山东半岛近岸的 B05 站位, 达 3.66, 最低出现在黄海中部的 H14 站位, 为 0.48。

表 3 研究海域底栖甲壳类多样性指数

Tab. 3 Diversity indices of the benthic crustaceans in the surveyed area

站位	S	N	H'	d	J'
H03	13	38	3.18	2.29	0.86
H05	8	16	2.53	1.75	0.84
H06	4	34	1.40	0.59	0.70
H07	4	36	1.17	0.58	0.59
H09	7	36	1.90	1.16	0.68
HS1	4	52	0.51	0.53	0.25
HS4	9	20	2.50	1.85	0.79
HS6	10	37	2.96	1.73	0.89
H10	4	77	0.75	0.48	0.38
H12	7	60	1.69	1.02	0.60
H14	3	37	0.48	0.38	0.30
H16	9	39	1.55	1.51	0.49
H18	4	14	1.69	0.79	0.84
H23	10	33	2.67	1.78	0.80
H24	6	25	2.08	1.08	0.81
H26	13	112	2.52	1.76	0.68
H27	14	32	3.29	2.60	0.86
H40	12	46	2.52	1.99	0.70
B05	21	137	3.66	2.82	0.83
B07	7	32	1.90	1.20	0.68
BS5	16	89	2.97	2.32	0.74
B12	5	34	1.58	0.79	0.68
B14	10	170	1.81	1.21	0.54
B24	9	90	2.57	1.23	0.81
B26	8	12	2.86	1.95	0.95
B29	7	18	2.52	1.44	0.90
B31	17	79	3.33	2.54	0.82
B34	12	120	2.80	1.59	0.78
B36	14	85	2.96	2.03	0.78
平均	9.2	55.5	2.22	1.48	0.71

2.5 底栖甲壳类群落

在 23% 的相似度水平上可以划分为 6 个群落(图 5)。群落 I 和 II 均由 1 个站位组成, 群落 I 仅包含黄海西南部的 H16 站位, 其中丰度较高的物种为日本沙钩虾, 为 145 inds./m²。群落 II 仅包含 H40 站位, 位于黄海南部, 其中丰度较高的物种为镰形叶钩虾 *Jassa falcata* (Montagu, 1808), 为 120 inds./m²。群落 III: 塞切尔泥钩虾 *Eriopisella sechellensis* (Chevreux, 1901)-美原双眼钩虾群落, 由南黄海西部的 H03 和 H18 组成, SIMPER 分析表明该群落的平均相似性为 38.46%, 其中塞切尔泥钩虾的贡献率达到了 70%。群落 IV: 太平洋方甲涟虫-滩拟猛钩虾-日本沙钩虾群落, 由 18 个站位组成, 这些站位与黄海冷水团范围相当, 群落的平均相似性为 30.78%, 其中太平洋方甲涟虫的贡献率达到了 81.10%。群落 V: 日本长尾虫 *Apseudes nipponicus* (Shiino, 1937)-日本大螯蜚 *Grandidierella japonica* (Stephensen, 1938)-内海拟钩虾 *Gammaropsis utinomii* (Nagata, 1961) 群落, 由北黄海西部的 B29、B31 和 B34 站位组成, 该群落的平均相似性为 16.62%。群落 VI: 滩拟猛钩虾-日本拟背尾水虱 *Paranthura japonica* (Richardson, 1909)-潮间海钩虾 *Pontogeneia littorea* (Ren, 1992) 群落, 由山东半岛近岸 4 个站位组成, 该群落的平均相似性为 15.63%。ANOSIM 分析表明各群落间物种组成差异显著(Global $R=0.789$, $P=0.001$)。

2.6 底栖甲壳类丰度与环境因子的关系

为探讨环境因子对底栖甲壳类丰度的影响, 本研究将底栖甲壳类总丰度和优势种太平洋方甲涟虫的丰度与水深、底温、底盐、平均粒径和中值粒径进行了 Pearson 相关性分析。结果(表 4)显示, 底栖甲壳类总丰度与各环境因子的相关性均不显著, 而太平洋方甲涟虫丰度与水深呈极显著正相关, 与底盐呈显著正相关, 与底温呈显著负相关。

2.7 BOPA 指数

图 6 为本研究各站位的 I_{BOPA} 。除个别站位外, 大部分站位的 I_{BOPA} 都为 0~0.13 966, 指示沉积环境状况优良。位于黄海南部的 H27 站位的 I_{BOPA} 为 0.139 66~0.193 82, 指示沉积环境受到中度扰动, 位于黄海冷水团中部的 H05、HS4、H14 站位的 I_{BOPA} 为 0.193 82~0.267 61, 指示沉积环境受到重度扰动。根据 I_{BOPA} , 除部分站位外, 黄海海域沉积环境整体良好。

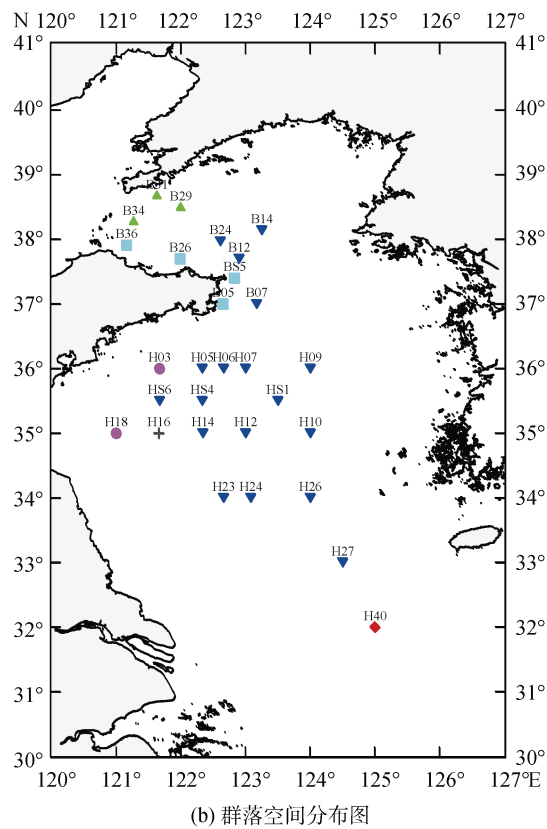
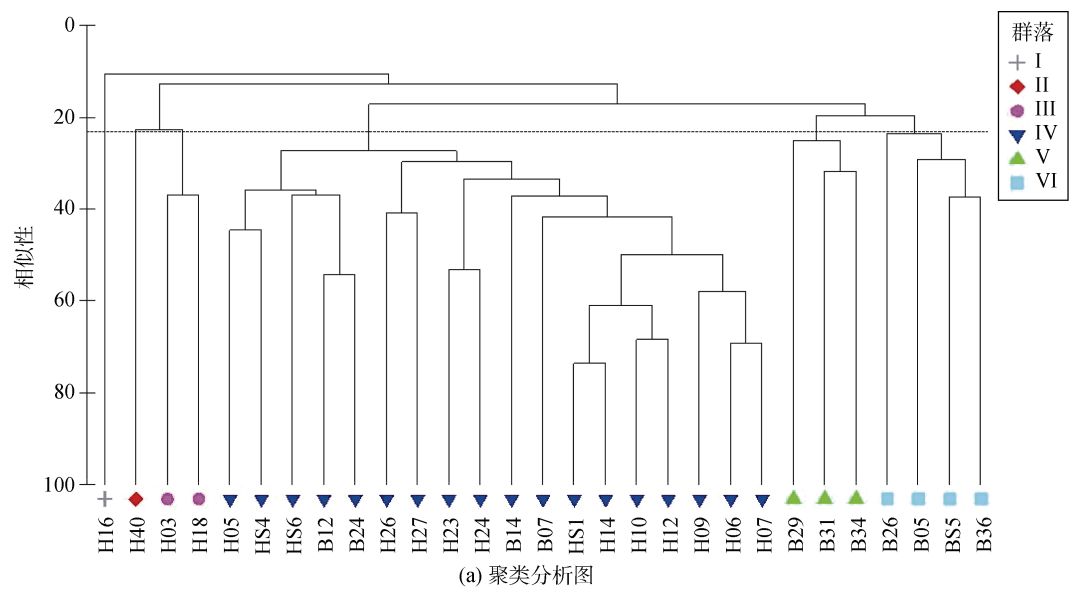


图 5 研究海域底栖甲壳类聚类分析图和群落空间分布图

Fig. 5 Cluster analysis (a) and spatial distribution (b) of the benthic crustacean community in the surveyed area

表 4 研究海域底栖甲壳类丰度与环境因子的相关性

Tab. 4 Correlation between the abundance of benthic crustaceans and the environmental factors in the surveyed area

	水深	底温	底盐	中值粒径	平均粒径
底栖甲壳类总丰度	-0.047	-0.134	-0.038	0.338	0.23
太平洋方甲涟虫丰度	0.541**	-0.453*	0.463*	-0.017	-0.050

注: *表示相关性显著, $P<0.05$ (双尾); **表示相关性极显著, $P<0.01$ (双尾)。

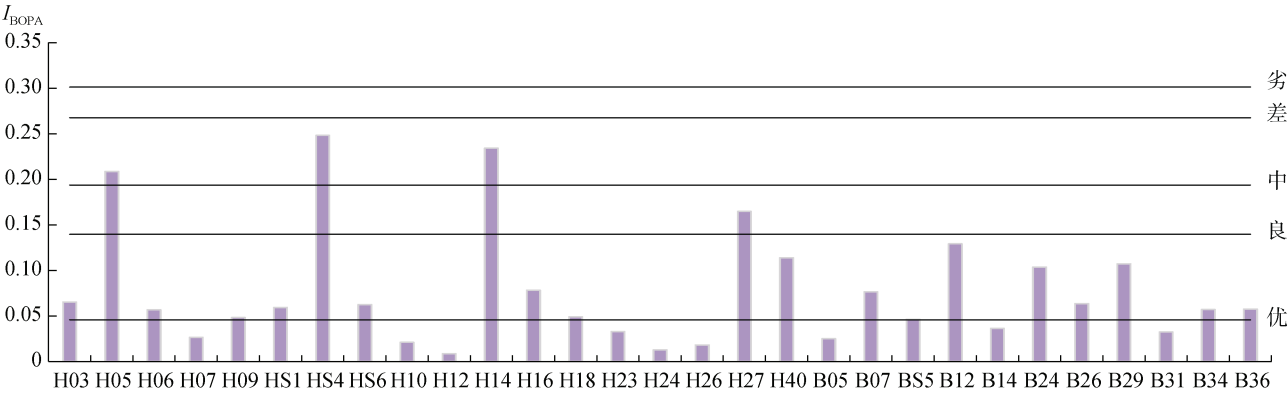


图 6 研究海域各站位 I_{BOPA}
Fig. 6 I_{BOPA} for each station in the surveyed area

3 讨论

3.1 本研究结果与历史资料的对比

本研究共采到底栖甲壳类 71 种, 物种数较多的站位分布在山东半岛近岸附近, 一方面可能由于近岸有机质含量较高, 吸引了更多的底栖甲壳类; 另一方面是由于秋季近岸水域温度比冬春季高, 可能导致较多的种类分布在近岸; 而黄海中部由于冷水团的存在, 限制了一些属暖温带和亚热带混合类型的底栖甲壳类的分布^[17], 导致了黄海中部底栖甲壳

类的物种数较低。

本研究结果与历史资料的对比见表 5。从表 5 可以看出, 本研究底栖甲壳类的种数和丰度, 比之前年份的研究资料都略高。彭松耀等^[18]报道过, 一些游泳性的底栖甲壳类会由于索饵和越冬导致其丰度出现季节变动, 在本文所列出的历史资料中(表 5), 采样季节并不相同, 可能导致了不同研究之间底栖甲壳类物种数的差异。设置的站位的多少与采样区域的不同等, 也会对底栖甲壳类的丰度和物种数产生影响^[19]。具体原因还有待进一步研究。

表 5 本研究结果与历史资料的对比
Tab. 5 Comparison of the results of this study with historical data

调查海域	调查时间	站位数	底栖甲壳物种数	底栖甲壳类占比/%	丰度/(inds.·m ⁻²)	分选网筛孔径/mm	参考文献
黄海	2014-11	29	71	31.70	277.59	0.5	本研究
南黄海	2012-05	26	55	26	138.02	0.5	[20]
南黄海	2012-11	23	47	25	127.60	0.5	[20]
南黄海	2011-06	17	44	27	277.90	0.5	[20]
南黄海	2011-11	16	37	25	90.30	0.5	[20]
南黄海	2008-09—2008-10	40	13	14	22.4	—	[21]
黄海	2007-06	58	59	22.1	—	0.5	[22]
南黄海	2006-07—2006-08	130	22	11	12	0.5	[17]
北黄海	2007-01	78	95	26.69	551	0.5	[23]
	2006-07—2006-08	74			502		
胶州湾	2000-02—2002-11	10	75	29.2	39	0.5	[11]

注: “—” 表示文献中未有该数据

此外,在历年的研究结果中,底栖甲壳类种数在大型底栖动物中的占比都在 30%左右,说明底栖甲壳类在黄海大型底栖动物类群组成中变化不大。

3.2 太平洋方甲涟虫的丰度与环境因子的关系探讨

太平洋方甲涟虫隶属于软甲纲 Malacostraca、涟虫目 Cumacea、尖额涟虫科 Leuconidae、方甲涟虫属 *Eudorella*,在渤海、黄海、日本沿海、鄂霍次克海、白令海和北美洲太平洋沿岸都有分布^[24]。张均龙^[22]和 ZHANG 等^[25]在 1992 年南黄海定量采泥中,首次报道小个体的太平洋方甲涟虫为南黄海冷水团的优势种之一,此后,刘卫霞等^[23]和杨传平^[20]也均报道过此现象。

太平洋方甲涟虫在本研究中具有极高的优势,在近 80%的站位样品中出现,集中分布在黄海冷水团范围。黄海冷水团在冬季时形成,经过春季的发展,至 7—8 月份达到鼎盛期。本研究取样时间处于冷水团逐渐消退阶段,太平洋方甲涟虫为冷水性种^[24],能够适应低温高盐环境,因此可以在此大量繁殖,形成较高的优势。

就像 20 世纪 60 年代出现的引人注意的鱼类资源小型化一样^[26],大型底栖动物也同样存在此现象。如徐勇报道了从 20 世纪 50 年代到 21 世纪,生命周期较短的小型多毛类动物,取代了生命周期较长的大型软体动物、棘皮动物和多毛类动物等,成为南黄海西部海域大型底栖动物的优势种^[27],并且提出群落变化可能会向离岸较远的南黄海东部区域扩展^[28]。早在 20 世纪中叶,刘瑞玉先生等报道的黄海冷水团优势种^[28]并不包括太平洋方甲涟虫,而现在该种却成为研究海域的最占优势的物种,这极有可能是底栖甲壳类动物应对环境变迁,出现的优势种更替现象。太平洋方甲涟虫个体很小,平均体长仅 4.38 mm^[24],这可能是黄海底栖甲壳类响应环境变化而小型化的一种表现,值得进一步深入研究。

3.3 利用 I_{BOPA} 来评价海域沉积环境质量状况

2000 年 Gómez-Gesteira 和 Dauvin 首次提出了利用多毛类机会种和端足类指数,来确定溢油对软底质底栖动物群落的影响。多毛类和端足类底栖生物是环境扰动的指示生物,当环境扰动增加时,生命周期短、成熟快、繁殖效率高的多毛类机会种占据优势地位,个体数量大量增加,是环境污染或人为

扰动后的先锋底栖生物^[29];而端足类动物在缺氧的沉积物中建管,促进海底的氧化过程和硝化过程,可作为环境修复的指示生物^[29-30]。因此,利用多毛类机会种和端足类的比值(I_{BOPA})来研究沉积环境的扰动状况具有一定的意义。目前,国内对于 I_{BOPA} 的研究较少,仅见张莹等^[29, 31-32]、任中华^[33]和李少文等^[34]利用 I_{BOPA} 对莱州湾和黄河口的环境质量状况进行的评价,余骥^[35]和刘志权^[36]利用 I_{BOPA} 对崇明东滩潮间带的研究, Xu 等^[37]利用 I_{BOPA} 对苏北浅滩生态状况进行评价。在这些研究中, I_{BOPA} 均能比较准确地评价研究区域的环境质量状况。

在本研究中,根据 I_{BOPA} ,除黄海中部和南部部分站位受到中度和重度扰动外,大部分站位处于优和良范围,即黄海沉积环境整体良好。李少月^[38]利用 ABC 曲线方法对黄海沉积物环境质量状况进行的评价,也显示黄海多数站位未受扰动,仅南黄海中部的部分站位受到扰动,与本研究结果基本一致。王教凯^[39]等在 2011 年对南黄海沉积物中有有机氯农药(OCPs)的研究发现, OCPs 浓度高值出现在南黄海中部泥质区,其范围与本文黄海中部相当。山东半岛附近海域是现代黄河泥沙的主要沉积区,沿岸流带来大量泥砂的同时,也携带了大量黄河流域的污染物进入南黄海,这可能是造成扰动的原因之一^[40]。

综上所述,本文初步认为调查海域沉积环境良好,仅黄海中部和南部部分站位受到了中度扰动, I_{BOPA} 能较好地评价研究区域的环境质量状况。

4 结论

- 1) 底栖甲壳类在历年的黄海大型底栖动物类群组成中变化不大,占比都在 30%左右。
- 2) 太平洋方甲涟虫具有极高的优势,底温、底盐和水深是影响其丰度的主要环境因子。
- 3) 研究海域沉积环境整体良好,仅黄海中部和南部部分站位受到了中度扰动。
- 4) I_{BOPA} 能较好地评价海域的沉积环境质量状况。

参考文献:

- [1] BOIX D, GASCÓN S, SALA J, et al. Patterns of composition and species richness of crustaceans and aquatic insects along environmental gradients in Mediterranean water bodies[J]. *Hydrobiologia*, 2008, 597(1): 53-69.
- [2] DANA J D. Conspectus of the Crustacea of the exploring expedition under Capt. Wilkes, U. S. N.[J]. *Pro-*

- ceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia, 1852, 6: 73-86.
- [3] 何明海. 利用底栖生物监测与评价海洋环境质量[J]. 海洋环境科学, 1989, 8(4): 49-54.
HE Minghai. Monitoring and evaluation of marine environmental quality by benthos[J]. Marine Environmental Science, 1989, 8(4): 49-54.
- [4] ABELLÓ P, VALLADARES F J, CASTELLÓN A. Analysis of the structure of decapod crustacean assemblages off the Catalan coast (North-West Mediterranean)[J]. Marine Biology, 1988, 98(1): 39-49.
- [5] 黄梓荣, 陈作志, 钟智辉, 等. 南海北部陆架区甲壳类的种类组成和资源密度分布[J]. 上海海洋大学学报, 2009, 18(1): 59-65.
HUANG Zirong, CHEN Zuozhi, ZHONG Zhihui, et al. Species composition and resource density of crustaceans in the continental shelf of northern South China Sea[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2009, 18(1): 59-65.
- [6] 卢占晖, 徐汉祥, 薛利建, 等. 东海中部虾类群落季节变化研究[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2015, 34(6): 497-504.
LU Zhanhui, XU Hanxiang, XUE Lijian, et al. A study on seasonal changes of the shrimp communities in the middle East China Sea[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2015, 34(6): 497-504.
- [7] 宋海棠. 东海虾类的生态群落与区系特征[J]. 海洋科学集刊, 2002, 44: 124-133.
SONG Haitang. The ecological colony and fauna characteristics of East China Sea shrimp[J]. Studia Marina Sinica, 2002, 44: 124-133.
- [8] 俞存根, 陈小庆, 宋海棠, 等. 春季东海海域虾类群落结构及其多样性[J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3593-3604.
YU Cungen, CHEN Xiaoqing, SONG Haitang, et al. Analysis on community structure and diversity of shrimps in the East China Sea in spring[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(7): 3593-3604.
- [9] 陈小庆, 俞存根, 虞聪达, 等. 东海中南部外海虾类群落结构特征分析[J]. 水生生物学报, 2009, 33(4): 664-673.
CHEN Xiaoqing, YU Cungen, YU Congda, et al. Community characteristics of shrimps in the offshore waters of the mid-southern East China Sea[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2009, 33(4): 664-673.
- [10] 李惠玉. 东海区甲壳动物群落结构的研究[C]//中国水产学会. 2007 年中国水产学会学术年会暨水产微生物生态调控技术论坛论文摘要汇编. 北京: 中国水产学会, 2007.
LI Huiyu. Study on crustacean community structure in East China Sea[C]// Chinese Fisheries Society. Abstract compilation of papers of the 2007 academic annual meeting of the Chinese Fisheries Society and the forum on aquatic microecological regulation technology. Beijing: Chinese Fisheries Society, 2007.
- [11] 于海燕, 李新正, 李宝泉, 等. 胶州湾大型底栖甲壳动物数量动态变化[J]. 海洋与湖沼, 2005, 36(4): 289-295.
YU Haiyan, LI Xinzheng, LI Baoquan, et al. Distribution of macrobenthic crustacean in Jiaozhou Bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2005, 36(4): 289-295.
- [12] 吴强, 王俊, 李忠义, 等. 黄渤海春季甲壳类群落结构的时空变化[J]. 水产学报, 2012, 36(11): 1685-1693.
WU Qiang, WANG Jun, LI Zhongyi, et al. Spatial variation of crustacean community structure in Yellow Sea and Bohai Sea in spring[J]. Journal of Fisheries of China, 2012, 36(11): 1685-1693.
- [13] 吴强, 李忠义, 戴芳群, 等. 黄渤海甲壳类的分类多样性[J]. 生物多样性, 2016, 24(11): 1306-1314.
WU Qiang, LI Zhongyi, DAI Fangqun, et al. Taxonomic diversity of crustaceans in the Yellow Sea and Bohai Sea[J]. Biodiversity Science, 2016, 24(11): 1306-1314.
- [14] 国家质量监督局和国家标准委员会. 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.
The State Bureau of Quality and Technical Supervision and Standardization Administration of the People's Republic of China. Specifications for oceanographic survey-part 6: marine biological survey[S]. Beijing: Standards Press of China Press, 2007.
- [15] PIANKA E R. Ecology of the Agamid Lizard *Amphibolurus isolepis* in Western Australia[J]. Copeia, 1971, 1971(3): 527-536.
- [16] DAUVIN J C, RUELLET T. Polychaete/amphipod ratio revisited[J]. Marine Pollution Bulletin, 2007, 55(1/6): 215-224.
- [17] 徐勤增, 李瑞香, 王宗灵, 等. 南黄海夏季大型底栖动物分布现状[J]. 海洋科学进展, 2009, 27(3): 393-399.
XU Qinzeng, LI Ruixiang, WANG Zongling, et al. Macrobenthos distribution of the South Yellow Sea in summer[J]. Advances in Marine Science, 2009, 27(3): 393-399.
- [18] 彭松耀, 李新正, 徐勇, 等. 黄海大型底栖动物功能摄食类群的空间格局[J]. 海洋与湖沼, 2020, 51(3): 456-466.
PENG Songyao, LI Xinzheng, XU Yong, et al. Spatial distribution pattern of macrobenthos feeding functional groups in the Yellow Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2020, 51(3): 456-466.
- [19] 彭松耀. 黄东海大型底栖动物群落结构特征[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(中国科学院海洋研究所), 2013.
PENG Songyao. Characteristics of microbenthic community structure in the Yellow Sea and East China Sea[D]. Qingdao: University of Chinese Academy of

- Sciences (Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences), 2013.
- [20] 杨传平. 南黄海大型底栖动物生态学研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
YANG Chuanping. The ecological study on Macrobenthos in the Southern Yellow Sea, China[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [21] 贾海波, 胡颢琰, 唐静亮, 等. 南黄海大型底栖生物生态调查与研究[J]. 海洋与湖沼, 2010, 41(6): 842-849.
JIA Haibo, HU Haoyan, TANG Jingliang, et al. The macrobenthos ecology of the Southern Yellow Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2010, 41(6): 842-849.
- [22] 张均龙. 黄海大型底栖生物多样性与群落结构的研究[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(中国科学院海洋研究所), 2012.
ZHANG Junlong. Biodiversity and community structure of macrobenthos in the Yellow Sea[D]. Qingdao: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences), 2012.
- [23] 刘卫霞, 于子山, 曲方圆, 等. 北黄海冬季大型底栖动物种类组成和数量分布[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2009, 39(S1): 115-119.
LIU Weixia, YU Zishan, QU Fangyuan, et al. Species composition and quantitative distribution of abundance and biomass of macrobenthos in the North Yellow Sea in winter[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2009, 39(S1): 115-119.
- [24] 沙忠利, 任先秋, 王永良. 胶州湾及青岛邻近海域底栖甲壳动物(上册)[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 280-282.
SHA Zhongli, REN Xianqiu, WANG Yongliang. Marine benthic Crustacea from Jiaozhou Bay and Qingdao adjacent waters(1)[M]. Beijing: Science Press, 2017: 280-282.
- [25] ZHANG J L, XU F S, LIU R Y. Community structure changes of macrobenthos in the South Yellow Sea[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2012, 30(2): 248-255.
- [26] 刘其根, 沈建忠, 陈马康, 等. 天然经济鱼类小型化问题的研究进展[J]. 上海水产大学学报, 2005, 14(1): 79-83.
LIU Qigen, SHEN Jianzhong, CHEN Makang, et al. Advances of the study on the miniaturization of natural economical fish resources[J]. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 2005, 14(1): 79-83.
- [27] 徐勇. 黄东海大型底栖动物多样性变化及黑潮的影响[D]. 青岛: 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所), 2017.
XU Yong. Variations of macrofaunal diversity in the Yellow Sea and East China Sea and the influence of Kuroshio Current[D]. Qingdao: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences), 2017.
- [28] 刘瑞玉, 崔玉珩, 徐凤山, 等. 黄海、东海底栖生物的生态特点[J]. 海洋科学集刊, 1986, 27: 154-173.
LIU Ruiyu, CUI Yuheng, XU Fengshan, et al. Ecological characteristics of macrobenthos of the Yellow Sea and the East China Sea[J]. *Studia Marina Sinica*, 1986, 27: 154-173.
- [29] 张莹, 李少文, 吕振波, 等. 多毛类底栖动物在莱州湾生态环境评价中的应用[J]. 生态学报, 2013, 33(8): 2522-2530.
ZHANG Ying, LI Shaowen, LV Zhenbo, et al. Application of polychaete in ecological environment evaluation of Laizhou Bay[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(8): 2522-2530.
- [30] GESTEIRA J L G, DAUVIN J C. Amphipods are good bioindicators of the impact of oil spills on soft-bottom macrobenthic communities[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2000, 40(11): 1017-1027.
- [31] 张莹, 刘元进, 张英, 等. 莱州湾多毛类底栖动物生态特征及其对环境变化的响应[J]. 生态学杂志, 2012, 31(4): 888-895.
ZHANG Ying, LIU Yuanjin, ZHANG Ying, et al. Ecological characteristics of hairy benthos and their response to environmental changes in Laizhou Bay[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(4): 888-895.
- [32] 张莹, 吕振波, 徐宗法, 等. 环境污染对小清河口大型底栖动物多样性的影响[J]. 生态学杂志, 2012, 31(2): 381-387.
ZHANG Ying, LV Zhenbo, XU Zongfa, et al. Effects of environmental pollution on the diversity of macrobenthos in Xiaoqing Estuary[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(2): 381-387.
- [33] 任中华. 莱州湾及黄河口海域大型底栖动物群落结构多样性及其生态学研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.
REN Zhonghua. The diversity of community and the ecology of macrobenthos in Laizhou Bay[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016.
- [34] 李少文, 张莹, 李凡, 等. 调水调沙对黄河口海域大型底栖动物群落的影响[J]. 环境科学研究, 2015, 28(2): 259-266.
LI Shaowen, ZHANG Ying, LI Fan, et al. Effects of water and sediment discharge regulation on macrobenthic community in the Yellow River Estuary[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(2): 259-266.
- [35] 余骥. 崇明东滩潮间带大型底栖动物群落的生态学研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2014.
YU Ji. The ecological study on macrozoobenthic communities in the intertidal zone of Chongming east shoal[D]. Shanghai: East China Normal University, 2014.
- [36] 刘志权. 崇明东滩大型底栖动物对人类活动的响应及生态修复研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.

- LIU Zhiquan. Response of macrobenthos on human activities and the ecological restoration in east shoal of Chongming island[D]. Shanghai: East China Normal University, 2017.
- [37] XU Y, LI X Z, WANG H F, et al. Status of macrobenthic diversity and distribution in Subei Shoal, China[J]. Aquatic Ecosystem Health & Management, 2016, 19(4): 411-419.
- [38] 李少月. 黄海春秋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, 2016.
- LI Shaoyue. Preliminary study on the ecology and functional groups of macrobenthos in the spring and autumn of the Yellow Sea[D]. Qingdao: Ocean university of China, 2016.
- [39] 王教凯. 生物标志物指示南黄海沉积物中有机氯农药的分布及来源的可行性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- WANG Jiaokai. Feasibility study on biomarkers indicating the distribution and source of organochlorine pesticides (OCPs) in sediment from Southern Yellow Sea (SYS)[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [40] 李孟芳, 张大海, 段晓勇, 等. 南黄海表层沉积物中邻苯二甲酸酯的分布特征[J]. 海洋环境科学, 2014, 33(5): 682-687.
- LI Mengfang, ZHANG Dahai, DUAN Xiaoyong, et al. Distribution of phthalic acid esters (PAEs) in surface sediments of the Southern Yellow Sea[J]. Marine Environmental Science, 2014, 33(5): 682-687.

Primary study on the diversity and community structure of macrobenthic crustaceans in the Yellow Sea during autumn

ZHU Lin¹, LI Shao-yue², WANG Zhi³, ZHANG Meng-sheng⁴, CHEN Chen¹, TENG An-kang¹, SHAO Cong-cong¹, YU Zi-shan¹

(1. College of Marine Life Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266003, China; 2. North Sea Environmental Monitoring Center, State Oceanic Administration, Qingdao 266003, China; 3. State Key Laboratory of Marine Environmental Science, College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361102, China; 4. Survey and Design Institute of Shanghai, Shanghai 200050, China)

Received: Mar. 4, 2022

Key words: Yellow Sea; macrobenthic crustaceans; community; BOPA index; environmental factors

Abstract: The species composition, abundance, biomass, diversity, and community structure of the macrobenthic crustaceans were studied based on Yellow Sea macrobenthos data from November 2014. A total of 71 species of macrobenthic crustaceans were identified from 32 families and 45 genera, with an average abundance of 278 inds./m² and biomass of 2.33 g/m². *Eudorella pacifica* Hart, 1930 had the highest Index of Relative Importance value. The cluster analysis showed that the macrobenthic crustaceans in the surveyed area were divided into six communities at a similarity level of 23%. The result of Pearson's correlation analysis showed that the abundance of *Eudorella pacifica* Hart, 1930 was strongly positively correlated with water depth and bottom salt and negatively correlated with bottom temperature. In previous studies, the proportion of macrobenthos among benthic crustacean species did not change much, accounting for about 30% of the total number of macrobenthic species. The benthic ecological environment in the surveyed area was undisturbed according to the benthic opportunistic Polychaeta Amphipoda (BOPA) index results, and only the central and southern parts of the Yellow Sea were moderately disturbed. The environmental quality of the surveyed area was well evaluated by the BOPA index.

(本文编辑: 赵卫红)