

DOI: 10.20103/j.stxb.202312292871

蒋文贤, 张明伟, 刘晓收. 不同污染压力对青岛董家口邻近海域大型底栖动物群落的影响. 生态学报, 2024, 44(17): 7830-7843.

Jiang W X, Zhang M W, Liu X S. Effects of different pollution stresses on macrofaunal communities in the adjacent waters of Dongjiakou, Qingdao, China. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(17): 7830-7843.

不同污染压力对青岛董家口邻近海域大型底栖动物群落的影响

蒋文贤^{1,2}, 张明伟^{1,2}, 刘晓收^{1,2,*}

1 中国海洋大学海洋生命学院, 青岛 266003

2 中国海洋大学海洋生物多样性与进化教育部重点实验室, 青岛 266003

摘要: 研究利用 2021 年 11 月在青岛董家口邻近海域的 14 个站位采集的大型底栖动物数据, 分析了不同污染压力对大型底栖动物群落的影响。共鉴定出大型底栖动物 66 个分类单元, 主要类群为多毛类、节肢动物、环节动物、软体动物等。研究区域的平均丰度为 343.33 个/m², 平均湿重生物量为 8.26g/m²。研究区域的海域底质类型包括砂、粘土质粉砂、砂质粉砂、砂-粉砂-粘土四种类型。海域内的重金属污染较轻, 铬、锌、铅、砷、铜、镉处于清洁水平, 砷在部分站位存在轻度污染。通过 BIOENV 分析得出, 影响大型底栖动物群落的决定因素包括化学需氧量、沉积物叶绿素 a 含量、锌、铅、镉含量, 相关系数为 0.460。对大型底栖动物群落结构的主要压力来源于重金属。在港区继续长期使用后, 重金属的污染压力可能会增大。

关键词: 大型底栖动物; 群落结构; 环境因子; 污染压力; 重金属

Effects of different pollution stresses on macrofaunal communities in the adjacent waters of Dongjiakou, Qingdao, China

JIANG Wenxian^{1,2}, ZHANG Mingwei^{1,2}, LIU Xiaoshou^{1,2,*}

1 College of Marine Life Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266003, China

2 Institute of Evolution and Marine Biodiversity, Ocean University of China, Qingdao 266003, China

Abstract: This study revealed the impacts of different pollution pressures on the community structure of macrofauna based on samples collected from 14 stations in the adjacent waters of Dongjiakou Port, Qingdao in November 2021. A total of 66 taxonomic units of macrofauna were identified, including polychaetes, arthropods, annelids, and mollusks. The average abundance in the study area was 343.33 ind./m² with an average wet weight biomass of 8.26 g/m². The seabed sediment types in the study area included sand, clayey silt, sandy silt, and a combination of sand-silt-clay. The heavy metal pollution in the area was relatively light with chromium, zinc, lead, arsenic copper and cadmium being mostly clean except for mild contamination by arsenic at some stations. BIOENV analysis revealed that chemical oxygen demand (COD), sediment Chlorophyll a, zinc, lead and cadmium were important factors affecting the community structure of macrofauna with a correlation coefficient of 0.460. The main pressure on the community structure was heavy metals. It indicated that after long-term use of the port, heavy metal pollution pressure in this area may increase in the future.

Key Words: macrofauna; community structure; environmental factors; pollution stress; heavy metals

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41976131)

收稿日期: 2023-12-29; 网络出版日期: 2024-06-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuxs@ouc.edu.cn

随着经济日益发达,人类对环境的影响越发明显,人类活动如工业、城市发展、航运、捕捞、旅游等都会造成海洋环境的污染和破坏^[1-2]。中国的人口主要分布在沿海地区,约占全国人口的 44.52%^[3],因此在沿海地区人类活动更为频繁,对海洋环境的影响更加明显。港口作为沿海城市的一个重要的物质交换枢纽,是人类活动最为活跃的地区之一。已有研究表明,港口的建设会使临近生态环境发生明显改变,严重程度取决于港口的类型^[4],工业区域附近的海域与港口临近的海域,会出现某些重金属的富集^[5]。由于港口常位于海湾内,海水的交换受到限制^[6-7],环境的自我恢复速度会降低。

大型底栖动物是指生活在海底的可以被 5mm 筛网过滤出的生物^[8]。其物种数远远超过水层中的大型浮游动物、鱼类和海洋哺乳类的总和^[9]。大型底栖动物对环境的变化非常敏感,在海洋生态系统的能量流动和物质流动中也具有重要的地位,其中部分附着在海床上,作为沉积物-水界面上的主要物质交换者^[10],能够影响污染物的迁移转化,它们可以对自然和人为活动引起的水和沉积物的变化作出可预测的反应^[2,11]。大型底栖动物作为良好的环境指示生物^[9,12],沉积物中的有机物含量会显著的影响大型底栖动物的群落结构^[13]。基于大型底栖生物进行的环境评价方法也被广大学者所接受,在海洋环境监测和污染评价中,它们被广泛用作生态质量的指标。

董家口位于青岛市的南端,港区三面环海。董家口港区海岸线长度达 35.7km,总面积约为 70 平方公里,设计的吞吐能力达到每年 3.7 亿吨,并已建成两期的原油工程^[14-15]。中石化公司将董家口港区作为了其在山东省的第一个 LNG(液化天然气)码头,用于运输的液态天然气^[16]。先前对杭州湾工程的长期监测中证明,沿海工程的施工对邻近的海域生物影响十分显著^[17],董家口港区作为青岛市重要的物流港口之一,会对港区附近海域的海洋生态环境以及海洋生物等造成一定的负面影响;同时也有研究证明,工业港口对环境影响更加严重^[4],并且与港口短期内的活动明显相关^[18-19]。尽管港区对环境的影响较大,但世界范围内对港口临近的底栖生态的研究较少。

本文通过研究董家口港口临近海域大型底栖动物群落结构,探讨港口附近人类活动对生态环境的影响;基于沉积物环境因子对该港口的污染压力进行评估,并揭示驱动大型底栖动物群落结构的关键环境因子。本研究为董家口的生态环境质量状况提供了基础数据,帮助人们更好的了解董家口港口的出现对这片区域的影响。

1 材料与方法

1.1 调查区域与站位分布

在 2021 年 11 月对董家口港区进行了 14 个站位大型底栖动物以及环境因子的取样调查,调查站位位置见图 1。

1.2 样品的采集与处理

使用抓斗采泥器采集沉积物样品,每次采样面积为 0.025m²,每站采样四次,合并为一个样品。采集的沉积物现场使用 0.5mm 孔径的网筛分选过滤,使用大量海水冲洗抓取的沉积物样品,将冲洗后生物样品及其残渣加入 75% 的酒精固定。同时采集一定量表层(0—2cm)沉积物用于测定沉积物的粒度、有机质含量、叶绿素含量和重金属,其中用于测定叶绿素的沉积物样品使用锡箔纸包裹,避光保存。所有表层沉积物样品保存于 -20℃ 的低温冰柜中直到进行测定。大型底栖动物的鉴定尽量鉴定到种并计数,使用精度为 0.0001g 的电子天平对大型底栖动物的湿重进行称量,称重前使用滤纸将生物体表的水分吸干。样品的采集、分类、计数、称量等均按照《海洋调查规范》和《海洋底栖生物研究方法》进行。软体动物带壳称取质量。

1.3 环境因子的测定

现场使用 YSI 550A 型水质分析仪测量表层海水盐度、温度、含氧量等数据;使用船载 CTD 测量水深数据,每次读取三次数据,取均值记录。按照《海洋监测规范》的描述,使用重铬酸钾氧化法测量有机质。叶绿素测定按照《海洋调查规范》规定,使用荧光分光光度法测定叶绿素 a 与脱镁叶绿酸含量。沉积物粒度使用

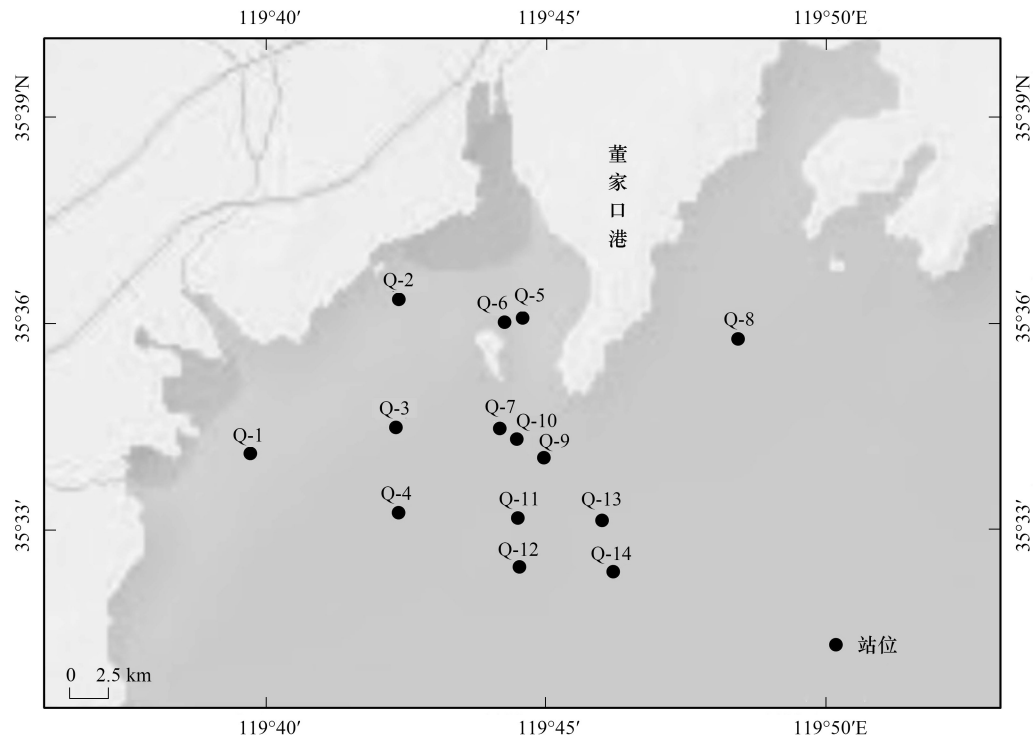


图 1 青岛董家口邻近海域大型底栖动物调查站位图
Fig.1 Sampling sites of macrofauna in the adjacent waters of Dongjiakou, Qingdao

Mastersizer 3000 型激光粒度仪测定,依据谢帕德分类对沉积物类型分类。
根据《海洋监测规范》,沉积物中各重金属与硫化物、油类的处理方式如下:铜、铅、镉、铬:无火焰原子吸收分光光度法;锌:火焰原子吸收分光光度法;砷、汞:原子荧光法;硫化物:亚甲基蓝分光光度法;油类:紫外分光光度法。

1.4 重金属污染评价

本次研究中重金属的污染评价采用地质累积指数法(I_{geo})、Hakanson 潜在生态风险指数法(RI)2 种方法。
地质累积指数法(I_{geo})的公式如下:

$$I_{geo} = \log_2 C_n / k B_n$$

式中, C_n 为沉积物中重金属 n 的测量浓度, B_n 为该重金属的地球化学背景值,因子 k 为岩石圈效应导致的背景矩阵修正因子,通常为 1.5。评价等级如表 1 所示:

表 1 地质累积指数(I_{geo})法评价等级
Table 1 Geological accumulation index (I_{geo}) method evaluation grade

	0 级 Level 0	1 级 Level 1	2 级 Level 2	3 级 Level 3	4 级 Level 4	5 级 Level 5	6 级 Level 6
I_{geo} 范围 I_{geo} Scope	≤ 0	0—1	1—2	2—3	3—4	4—5	>5
评价 Appraise	清洁	轻度污染	偏中度污染	中度污染	偏重污染	重度污染	严重污染

Hakanson 潜在生态风险指数法的公式如下:

$$E_r^i = T_r^i C_f^i$$
$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i C_f^i$$

式中, E_r^i 为污染物潜在生态风险指数; C_f^i 为重金属富集系数($C_f^i = C_s^i / C_n^i$), 即单因子污染指数, C_s^i 为重金属 i 的实测含量, C_n^i 为计算所需的参比值; T_r^i 为重金属毒性系数, $\text{Cu} = \text{Pb} = 5, \text{Zn} = 1, \text{Cd} = 30, \text{Cr} = 2, \text{As} = 10, \text{Hg} = 40$ ^[20]; RI 是沉积物中重金属所有危险因素的总和。评价指标与生态危害等级评价如表 2 所示:

表 2 Hakanson 潜在生态风险指数评价等级
Table 2 Hakanson potential ecological risk index evaluation level

	轻微 Slight	中等 Medium	强 Powerful	极强 Extremely strong
E_r^i 范围 E_r^i Scope	<40	40—80	80—320	>320
RI 范围 RI Scope	≤ 150	150—300	300—600	>600

E_r^i : 污染物潜在风险指数; RI : 沉积物中重金属危险因素总和

1.5 数据处理

1.5.1 优势种的确定

使用相对重要性指数 (IRI) 来确定优势种, 该指数兼顾了大型底栖动物丰度、生物量数据和各物种的分布情况, 因此可以较好的反应董家口大型底栖动物的地位与分布情况, 其计算公式如下:

$$\text{IRI} = (W + N) \times F$$

式中, W 为各物种生物量占总生物量的百分比; N 为各物种丰度占总丰度的百分比; F 为各物种出现的频率。

1.5.2 多样性指数的计算

使用 PRIMER 6.0 软件计算 Shannon-Wiener 多样性指数 (H')、Pielou 均匀度指数 (J') 和 Margalef 丰富度指数 (d)。计算公式如下:

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

$$H' = - \sum P_i \log_2 S$$

$$J' = H' / \log_2 S$$

式中, S 为样品的总种数; N 为样品的总个体数; P_i 为第 i 种的个体数与总个体数的比值。

1.5.3 AMBI 与 M-AMBI 的计算

通过使用 AMBI 5.0 软件, 计算该地区的 AMBI 值与 M-AMBI 值, 依据欧盟 2000 年发布的《The European Water Framework Directive》, 本研究将生态指标分为: 优、良、中、差、极差五个水平^[21]。

1.5.4 群落结构分析

采用 PRIMER6.0 进行群落结构分析, 使用等级聚类分析 CLUSTER 将样品逐级连接成组, 通过树枝图来表示群落结构^[22]。用 SIMPER 分析来计算不同物种对样本组内相似性和组间差异性的平均贡献率。群落结构与环境变量的关系采用 BIOENV 分析(采用 Weighted Spearman 相关系数), 找出与群落结构形成最佳匹配(最大相关)的环境变量组合。

2 结果与分析

2.1 水体环境因子

各站位的水体环境因子见表 3。14 个调查站位的水温范围为 13.1—14.6℃, 平均为 13.4℃, 各站位之间区别较小; pH 值在 8.15—8.25 间, 平均为 8.19; 盐度范围为 29.64—32.36, 平均为 31.44; 水深范围为 2.1—15.3 m, 平均为 12.17m。表层海水的叶绿素 a 范围在 0.14—3.84 $\mu\text{g/g}$ 间, 平均为 2.07 $\mu\text{g/g}$ 。

2.2 沉积物环境因子

14 个站位的沉积物环境因子数据见表 4。粒度结果表明, 各个站位的沉积物中值粒径差别较大, 范围为 10.29—488 μm , 平均为 120.39 μm ; 分选系数范围为 34.83—2177.24, 平均为 273.58。根据谢帕德分类, Q-1、Q-2、Q-13 与 Q-14 的沉积物类型为砂; Q-3 与 Q-11 为粘土质粉砂; Q-4、Q-5、Q-6、Q-7、Q-8、Q-10 和 Q-12 为砂

质粉砂;Q-9 站位为砂-粉砂-粘土。

表 3 2021 秋季董家口邻近海域水体环境因子

Table 3 Water environmental factors in the adjacent waters of Dongjiakou in autumn 2021

站位 Site	水温 Temperature/°C	pH	盐度 Salt/%	DO/ (mg/L)	COD/ (mg/L)	水深 Depth/m	叶绿素 a Chlorophyll a/(mg/m ³)
Q-1	13.3	8.16	29.64	9.66	1.09	2.1	1.30
Q-2	13.9	8.18	30.46	9.46	1.20	2.3	0.58
Q-3	14.6	8.16	30.87	9.25	1.30	8.0	0.70
Q-4	14.0	8.17	30.57	9.73	1.20	8.7	1.16
Q-5	13.1	8.15	30.38	9.73	1.13	3.1	0.14
Q-6	14.4	8.17	31.31	9.49	1.33	3.0	0.88
Q-7	14.3	8.15	31.44	9.25	1.10	11.5	0.35
Q-8	14.6	8.22	32.14	9.48	1.05	12.5	0.46
Q-9	13.4	8.21	32.27	8.26	1.21	9.7	3.77
Q-10	13.3	8.22	32.04	8.39	1.00	7.2	1.20
Q-11	13.6	8.22	32.36	8.04	1.29	12.3	9.66
Q-12	13.2	8.21	32.11	8.19	1.03	14.3	1.99
Q-13	13.4	8.22	32.29	8.42	1.03	15.3	2.89
Q-14	13.3	8.25	32.21	8.03	1.23	14.2	3.84

DO:溶解氧 Dissolved oxygen;COD:化学需氧量 Chemical oxygen demand

表 4 2021 秋季董家口邻近海域沉积物环境因子数据

Table 4 Sediment environmental factors in the adjacent waters of Dongjiakou in autumn 2021

站位 Site	中值粒径 Median particle size/μm	谢帕德分类名称 Shepard's classification	有机质/(g/kg) Organic matter	叶绿素 a/(μg/g) Chlorophyll a	油类/(μg/kg) Oils
Q-1	393.82	砂	0.013	0.02	10.06
Q-2	207.16	砂	0.931	0.08	9.69
Q-3	10.50	粘土质粉砂	2.016	0.32	23.96
Q-4	30.47	砂质粉砂	1.309	0.35	82.04
Q-5	31.66	砂质粉砂	1.296	0.41	56.06
Q-6	35.86	砂质粉砂	1.249	0.68	117.40
Q-7	32.83	砂质粉砂	1.727	0.66	13.75
Q-8	33.28	砂质粉砂	0.749	0.29	21.12
Q-9	10.29	砂-粉砂-粘土	0.927	0.06	19.96
Q-10	32.61	砂质粉砂	1.723	0.16	47.64
Q-11	16.50	粘土质粉砂	0.081	0.04	7.12
Q-12	158.02	粉砂质砂	0.625	0.32	48.78
Q-13	488.18	砂	0.442	0.15	28.57
Q-14	204.34	砂	1.111	0.04	36.41

本次调查有机质含量范围在 0.013—2.016g/kg 间,平均为 1.014g/kg。叶绿素范围为 0.02—0.68μg/g,平均为 0.26μg/g;油类的平均含量为 37.33μg/kg,依据《海洋沉积物质量 GB 18668—2002》标准,海洋一类沉积物中的油类标准为 500μg/kg,本次所检测出油类的含量低于该标准。

2.3 重金属污染评价

本次所采集的沉积物重金属详细数据见表 5。其中铬含量最高,平均为 29.21μg/kg,之后依次为锌、铅、砷、铜、镉、汞。在本次调查中,所有进行检测的重金属均未超出《海洋沉积物质量 GB 18668—2002》所规定的标准。

由于海洋沉积物均采自海洋,因此采用《海洋沉积物质量 GB18668—2002》中的一类标准作为本次背景值来判断该海域沉积物的重金属污染程度。综合来看,所有重金属的 I_{geo} 平均指数均低于 0,属于清洁范围,Q-10、Q-14 站位的砷处于轻度污染水平。本次各个站位的地质累积指数法评价及背景值见表 6。

表 5 2021 秋季董家口邻近海域沉积物重金属含量及 I_{geo} 指数、Hakanson 潜在生态风险评估

站 位	铜			锌/ ($\mu\text{g/kg}$)			铝			镉			汞			铬			砷			RI
	Copper/		含量 Content	Zinc/		含量 Content	Al		含量 Content	Cd		含量 Content	Hg		含量 Content	Cr		含量 Content	As		含量 Content	
	I_{geo}	E_r		I_{geo}	E_r		I_{geo}	E_r		I_{geo}	E_r		I_{geo}	E_r		I_{geo}	E_r		I_{geo}	E_r		
Q-1	4.21	-3.64	0.60	5.72	-5.30	0.04	9.64	-3.22	0.80	0.07	-3.42	0.28	0.15	-1.00	30.00	54.20	-1.15	20.33	3.88	-2.95	1.94	53.99
Q-2	0.98	-5.74	0.14	12.92	-4.12	0.09	10.17	-3.15	0.85	0.14	-2.42	0.56	0.13	-1.21	26.00	48.87	-1.30	18.33	3.75	-3.00	1.88	47.83
Q-3	13.42	-1.97	1.92	39.62	-2.51	0.26	13.86	-2.70	1.16	0.11	-2.77	0.44	0.15	-1.00	30.00	14.09	-3.09	5.28	6.87	-2.13	3.44	42.50
Q-4	21.86	-1.26	3.12	41.86	-2.43	0.28	12.10	-2.89	1.01	0.13	-2.53	0.52	0.13	-1.21	26.00	37.38	-1.68	14.02	5.87	-2.35	2.94	47.88
Q-5	20.92	-1.33	2.99	43.73	-2.36	0.29	14.02	-2.68	1.17	0.08	-3.23	0.32	0.14	-1.10	28.00	60.50	-0.99	22.69	5.70	-2.40	2.85	58.31
Q-6	19.10	-1.46	2.73	37.06	-2.60	0.25	12.27	-2.87	1.02	0.07	-3.42	0.28	0.11	-1.45	22.00	49.38	-1.28	18.52	5.34	-2.49	2.67	47.47
Q-7	20.63	-1.35	2.95	59.12	-1.93	0.39	15.96	-2.50	1.33	0.17	-2.14	0.68	0.13	-1.21	26.00	56.05	-1.10	21.02	6.93	-2.11	3.47	55.84
Q-8	21.55	-1.28	3.08	48.89	-2.20	0.33	20.53	-2.13	1.71	0.14	-2.42	0.56	0.14	-1.10	28.00	57.69	-1.06	21.63	4.03	-2.90	2.02	57.32
Q-9	17.78	-1.56	2.54	12.63	-4.15	0.08	70.23	-0.36	5.85	0.08	-3.23	0.32	0.10	-1.58	20.00	4.68	-4.68	1.76	17.43	-0.78	8.72	39.27
Q-10	6.53	-3.01	0.93	7.32	-4.94	0.05	11.44	-2.98	0.95	0.13	-2.53	0.52	0.12	-1.32	24.00	4.39	-4.77	1.65	78.54	1.39	39.27	67.37
Q-11	14.92	-1.82	2.13	12.21	-4.20	0.08	60.64	-0.57	5.05	0.05	-3.91	0.20	0.14	-1.10	28.00	2.14	-5.81	0.80	19.07	-0.65	9.54	45.80
Q-12	8.83	-2.57	1.26	10.39	-4.44	0.07	42.39	-1.09	3.53	0.12	-2.64	0.48	0.15	-1.00	30.00	2.46	-5.61	0.92	9.66	-1.63	4.83	41.10
Q-13	6.17	-3.09	0.88	14.26	-3.98	0.10	12.48	-2.85	1.04	0.47	-0.67	1.88	0.11	-1.45	22.00	13.49	-3.15	5.06	25.53	-0.23	12.77	43.72
Q-14	9.83	-2.42	1.40	9.35	-4.59	0.06	22.71	-1.99	1.89	0.24	-1.64	0.96	0.12	-1.32	24.00	3.64	-5.04	1.37	79.52	1.41	39.76	69.44
平均值 Average	13.34	-1.98	1.91	25.36	-3.15	0.17	23.46	-1.94	1.95	0.14	-2.42	0.57	0.13	-1.21	26.00	29.21	-2.04	10.96	19.44	-0.63	9.72	51.27
参考背景值																						
Reference background value	35			150			60		0.50	0.20			80		20							

表 6 2021 秋季董家口邻近海域大型底栖动物丰度与生物量

类群 Group	丰度 Abundance/(个/m ²)														生物量 Biomass/(g/m ²)										总计 Total	
	Q-1	Q-2	Q-3	Q-4	Q-5	Q-6	Q-8	Q-9	Q-11	Q-12	Q-13	Q-14	总计 Total	Q-1	Q-2	Q-3	Q-4	Q-5	Q-6	Q-8	Q-9	Q-11	Q-12	Q-13		Q-14
环节动物 Annelida	80	300	300	560	440	220	170	40	230	120	630	230	3340	0.05	0.83	0.23	1.35	0.27	0.17	0.08	0.17	1.22	0.39	61.06	0.79	66.63
棘皮动物 Echinodermata	10	20	0	40	0	0	10	0	0	0	20	10	110	0.32	1.59	0.00	2.59	0.00	0.00	1.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.70
节肢动物 Arthropoda	20	0	0	20	80	60	40	10	40	30	30	60	400	0.07	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	0.99	0.28	4.05	0.06	0.01	4.15	12.12
纽形动物 Nemertea	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16
软体动物 Granulifusus	0	40	0	0	20	40	10	20	50	30	0	20	230	0.00	0.39	0.00	0.00	0.35	7.76	0.00	5.01	0.41	0.58	0.00	0.03	14.52
总类群 Total	110	360	300	620	540	320	230	70	320	180	680	330	4120	0.44	2.81	0.23	3.94	0.65	7.95	2.27	5.46	5.67	1.03	61.08	4.97	99.13

Hakanson 潜在生态风险评价的重金属参考背景值依照《海洋沉积物质量 GB 18668—2002》中的一类标准作为参考。

依据 Hakanson 潜在生态风险评价指数,所有站点的重金属均处于轻微水平。详细指数见表 7。Hakanson 潜在生态风险评价指数的空间分布情况见图 2。

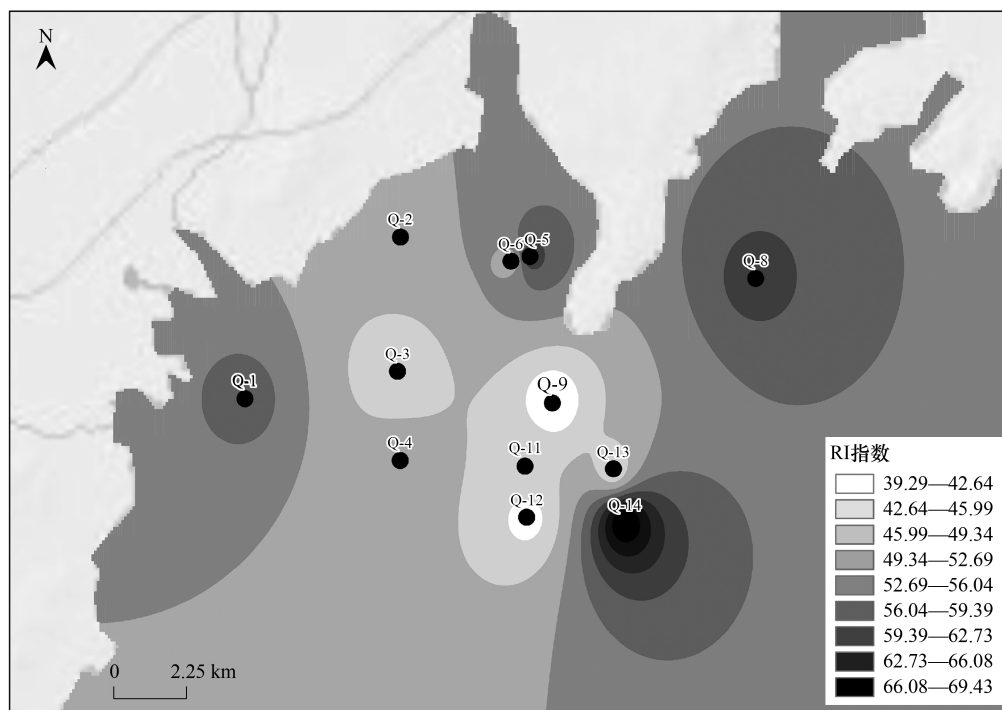


图 2 Hakanson 潜在生态风险评价指数空间分布情况

Fig.2 Spatial distribution of Hakanson potential ecological risk assessment index

RI: 沉积物中重金属所有危险因素的总和

2.4 大型底栖动物

本次调查中,共采集到各类大型底栖动物 66 种,包括环节动物、节肢动物、棘皮动物、软体动物和纽形动物。其中,Q-7、Q-10 站位采集样品较少,予以排除。

从丰度看,12 个站点的总丰度为 4120 个/ m^2 ,平均每个站点丰度为 343.33 个/ m^2 ;其中,环节动物占据了绝对优势,达到了 81.07%的比例,其次是节肢动物,达到了 9.71%的比例,软体动物占比 5.58%,棘皮动物与纽形动物占比分别为 2.67%与 0.97%,占比较低(图 3)。从生物量看,12 个站点平均生物量为 8.26g/ m^2 ;其中,环节动物达到了 67.22%的比例,其次是软体动物,达到了 14.65%的比例,节肢动物占比 12.23%,棘皮动物与纽形动物占比分别为 5.75%与 0.16%。在种类数目上,环节动物以 35 种占比 53.03%,其次为节肢动物 15 种占比 22.73%,软体动物 12 种占比 18.18%,棘皮动物 3 种占比 4.55%,纽形动物 1 种占比 1.52%。

2.4.1 丰度与生物量

本次调查的 12 个站点的类群丰度与生物量详细见表 6。从丰度看来,平均丰度为 343.33 个/ m^2 ,Q-13 站点的丰度最高,为 680 个/ m^2 ,Q-9 站点的丰度最低,仅为 70 个/ m^2 。从生物量看来,平均湿重生物量为 8.26g/ m^2 ,Q-13 站点的生物量最高,为 61.08g/ m^2 ,Q-3 的站点最低,为 0.23g/ m^2 。生物量、丰度分布情况见图 4。

2.4.2 优势种与种类组成

本次调查中共采集大型底栖动物 66 种,取 IRI 值>100 为优势种,则共有优势种 10 种,优势度较高的有昆士兰稚齿虫(*Prionospio queenslandica*)、丝异须虫(*Heteromastus filiformis*)、澳洲鳞沙蚕(*Aphrodita australis*)与花冈钩毛虫(*Sigambra hanaokai*)。详细优势种目录及优势度指数见表 7。

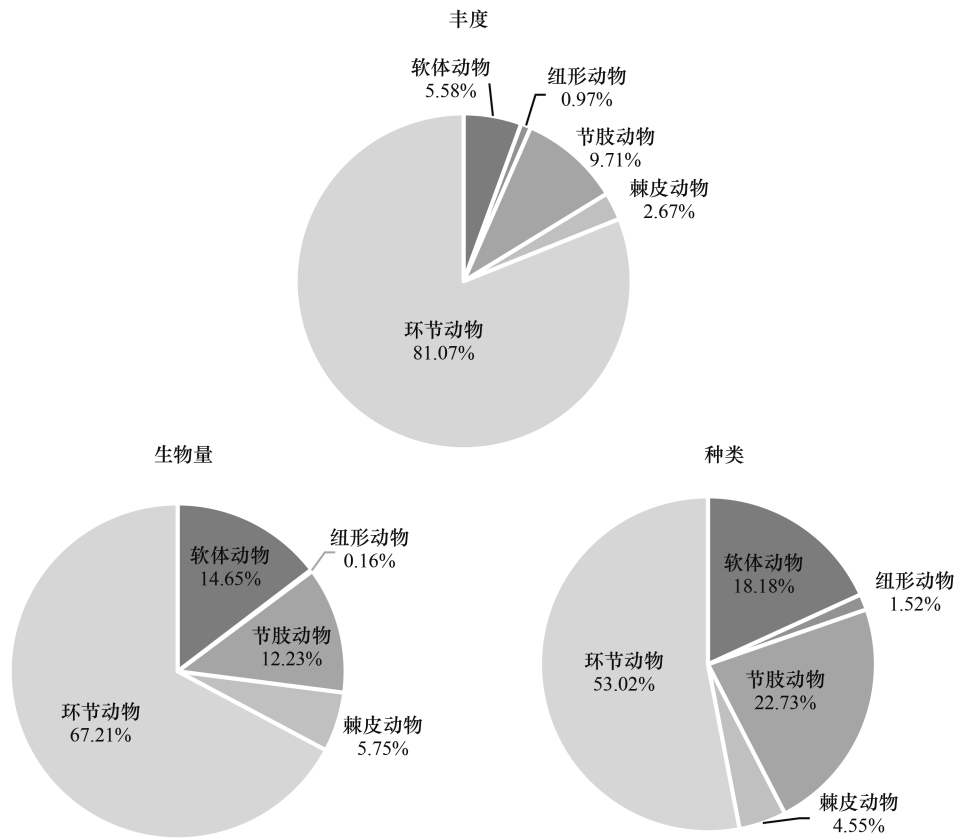


图 3 2021 秋季董家口邻近海域大型底栖动物丰度、生物量与种类比例

Fig.3 The abundance, biomass, and species ratio of large benthic animals in the vicinity of Dongjiakou in the autumn of 2021

表 7 2021 秋季董家口邻近海域大型底栖动物优势种及优势度

Table 7 Dominant species of macrofauna in the adjacent waters of Dongjiakou in autumn 2021

物种 Species	IRI	物种 Species	IRI
昆士兰稚齿虫 <i>Prionospio queenslandica</i>	1373.40	近辐蛇尾 <i>Ophiactis affinis</i>	219.56
丝异须虫 <i>Heteromastus filiformis</i>	582.68	毛须鳃虫 <i>Cirriformia filigera</i>	202.53
澳洲鳞沙蚕 <i>Aphrodita australis</i>	431.53	拟特须虫 <i>Paralacydonia paradoxa</i>	189.92
花冈钩毛虫 <i>Sigambra hanaokai</i>	310.27	副栉虫 <i>Paramphicteis angustifolia</i>	143.72
寡鳃齿吻沙蚕 <i>Nephtys oligobranchia</i>	262.17	独指虫 <i>Aricidea fragilis</i>	125.82

IRI: 相对重要性指数

2.4.3 物种多样性与群落结构

本次调查的各个站位的 Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Pielou 均匀度指数(J')和 Margalef 丰富度指数(d)见表 8。本次 Shannon-Wiener 多样性指数(H')的范围为 1.743—3.714,平均为 2.91。12 个站位中,仅有 6 个站位的 Shannon-Wiener 多样性指数的值大于 3,1 个站位的值低于 2。Pielou 均匀度指数(J')的范围为 0.6074—0.9713,平均为 0.8557。Margalef 丰富度指数(d)的范围为 0.9415—2.947,平均为 1.7804。

对调查站位进行 CLUSTER 聚类分析,结果见图 5。可将 12 个站位划分为 2 个群落,Q-1、Q-12、Q-2、Q-4、Q-6、Q-8、Q-3 和 Q-5 为一个群落,Q-9、Q-11、Q-13、Q-14 为一个群落。

2.4.4 AMBI 与 M-AMBI

通过 AMBI 5.0 软件进行计算,部分未能在 AMBI 种名录中的物种替换为相近的物种进行计算。结果见表 9。

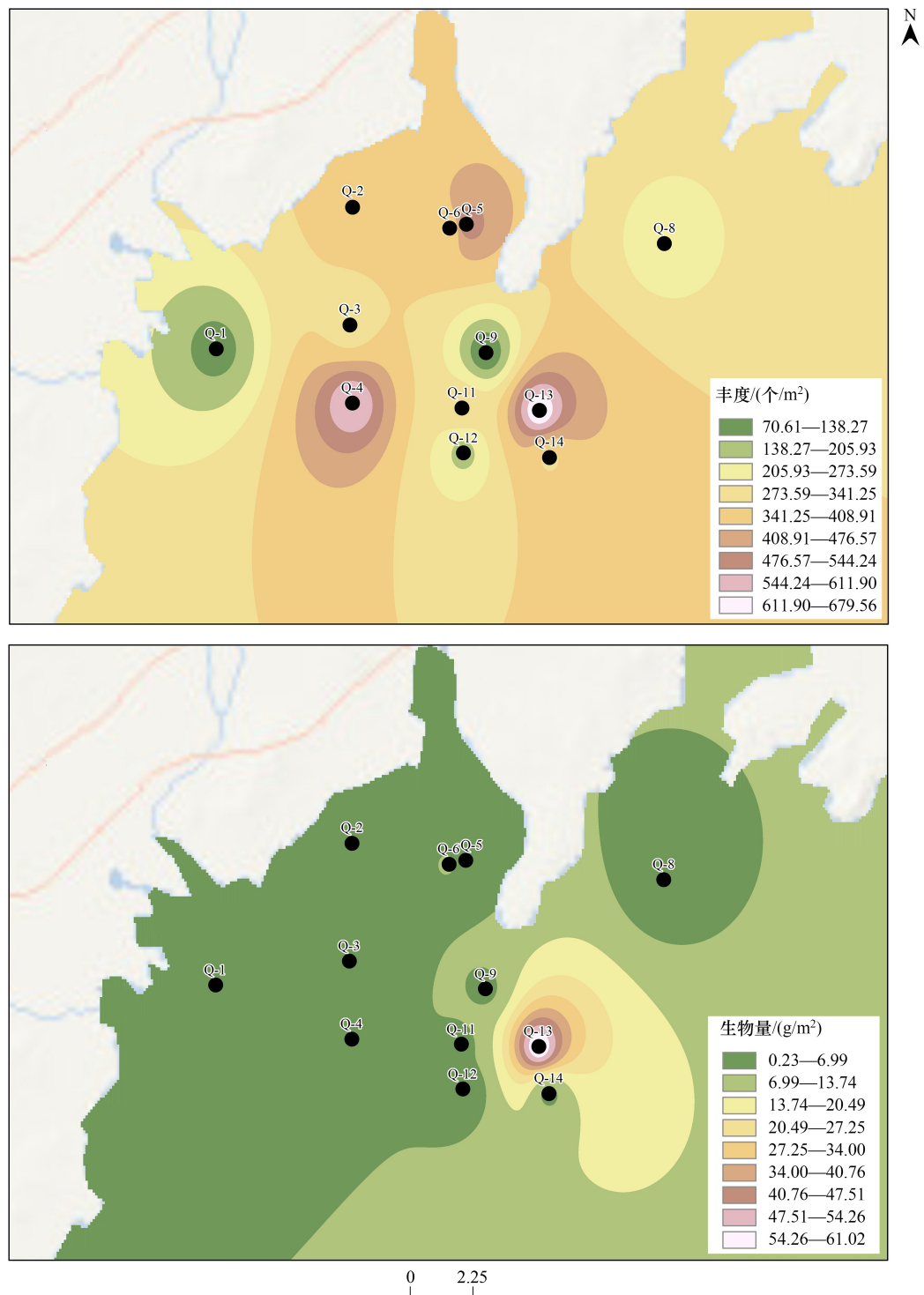


图4 2021 秋季董家口邻近海域大型底栖动物丰度与生物量分布情况

Fig.4 Abundance and biomass distribution of large benthic animals in the vicinity of Dongjiakou in the autumn of 2021

2.5 环境因子与群落结构相关性

对大型底栖动物群落与环境因子进行 BIOENV 分析,结果见表 10。参考在内的水体环境因子有:温度、盐度、pH、COD,沉积物环境因子有:有机质、沉积物中值粒径、叶绿素(沉积物)、有机碳、铜、锌、铅、镉、总汞、铬、砷、油类。结果表明,与董家口附近海域的大型底栖动物群落结构最匹配的环境因子是 COD、叶绿素 a(沉

积物)、锌、铅、镉,相关系数达到了 0.460。此外,大型底栖动物的群落结构也受到砷、总汞、有机质等环境因子的影响。

2.6 ABC 曲线

本次各个站位的丰度-生物量曲线见下图。除 Q-3 站位出现了两条曲线的交叉外,其余所有站位均表现为生物量曲线高于丰度曲线。

3 讨论

从地理位置看来,本次采样的范围环绕董家口港口,可以有效代表该港口附近海域。Mosbahi 等^[1]研究表明,沿海工业是海洋近海的扰动主要来源之一,Darbra 等^[23]也在研究中发现,港口地区的人为活动往往会导致一系列的环境问题,例如石油泄漏、码头建设、运输和疏浚等,因此近海的永久性人为改变,需要考虑到对临近环境的影响。

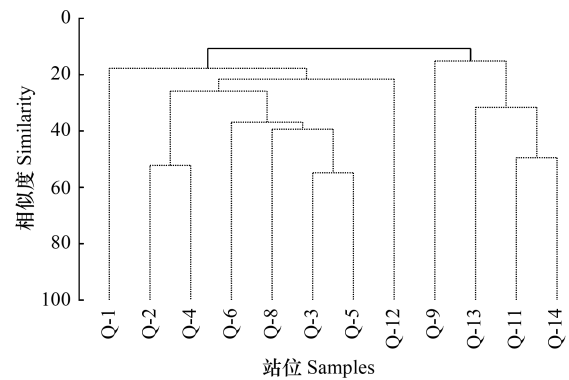


图 5 2021 秋季董家口邻近海域大型底栖动物聚类分析图

Fig.5 Cluster analysis of macrofauna in the adjacent waters of Dongjiakou in autumn 2021

表 8 2021 秋季董家口邻近海域大型底栖动物物种多样性指数

Table 8 Species diversity index of macrofauna in the adjacent waters of Dongjiakou in autumn 2021

站位 Site	H'	J'	d	站位 Site	H'	J'	d
Q-1	2.914	0.9713	1.489	Q-8	3.166	0.9152	1.839
Q-2	2.747	0.9157	1.189	Q-9	2.128	0.9165	0.9415
Q-3	3.253	0.8791	2.104	Q-11	1.743	0.6207	1.04
Q-4	3.119	0.87	1.711	Q-12	3.35	0.9684	1.926
Q-5	3.577	0.8944	2.384	Q-13	2.018	0.6074	1.38
Q-6	3.714	0.8906	2.947	Q-14	3.2	0.8191	2.414

H' :多样性指数; J' :均匀度指数; d :丰度度指数

表 9 2021 秋季董家口邻近海域大型底栖动物 AMBI 与 M-AMBI 评价

Table 9 Evaluation of AMBI and M-AMBI of macrofauna in the adjacent waters of Dongjiakou in autumn 2021

站位 Site	AMBI	M-AMBI	评价 Assess	站位 Site	AMBI	M-AMBI	评价 Assess
Q-1	2.25	0.65	优	Q-8	2.93	0.62	优
Q-2	2.5	0.59	优	Q-9	2.57	0.48	中
Q-3	2.75	0.70	优	Q-11	3.15	0.45	中
Q-4	2.81	0.67	优	Q-12	2.25	0.70	优
Q-5	2.11	0.82	良	Q-13	3.40	0.51	中
Q-6	2.02	0.87	良	Q-14	2.45	0.75	优

表 10 2021 秋季董家口邻近海域大型底栖动物群落结构与环境因子的相关分析结果

Table 10 Correlation analysis results of macrofauna community structure and environmental factors in the adjacent waters of Dongjiakou in autumn 2021

相关系数 Correlation coefficient	环境因子组合 Environmental factor combination	相关系数 Correlation coefficient	环境因子组合 Environmental factor combination
0.460	COD、叶绿素 a(沉积物)、锌、铅、镉	0.449	有机质、叶绿素 a(沉积物)、锌、铅、铬
0.451	有机质、叶绿素 a(沉积物)、锌、铅、砷	0.448	COD、叶绿素 a(沉积物)、锌、铅、铬
0.451	叶绿素 a(沉积物)、锌、铅、总汞、砷		

COD:化学需氧量

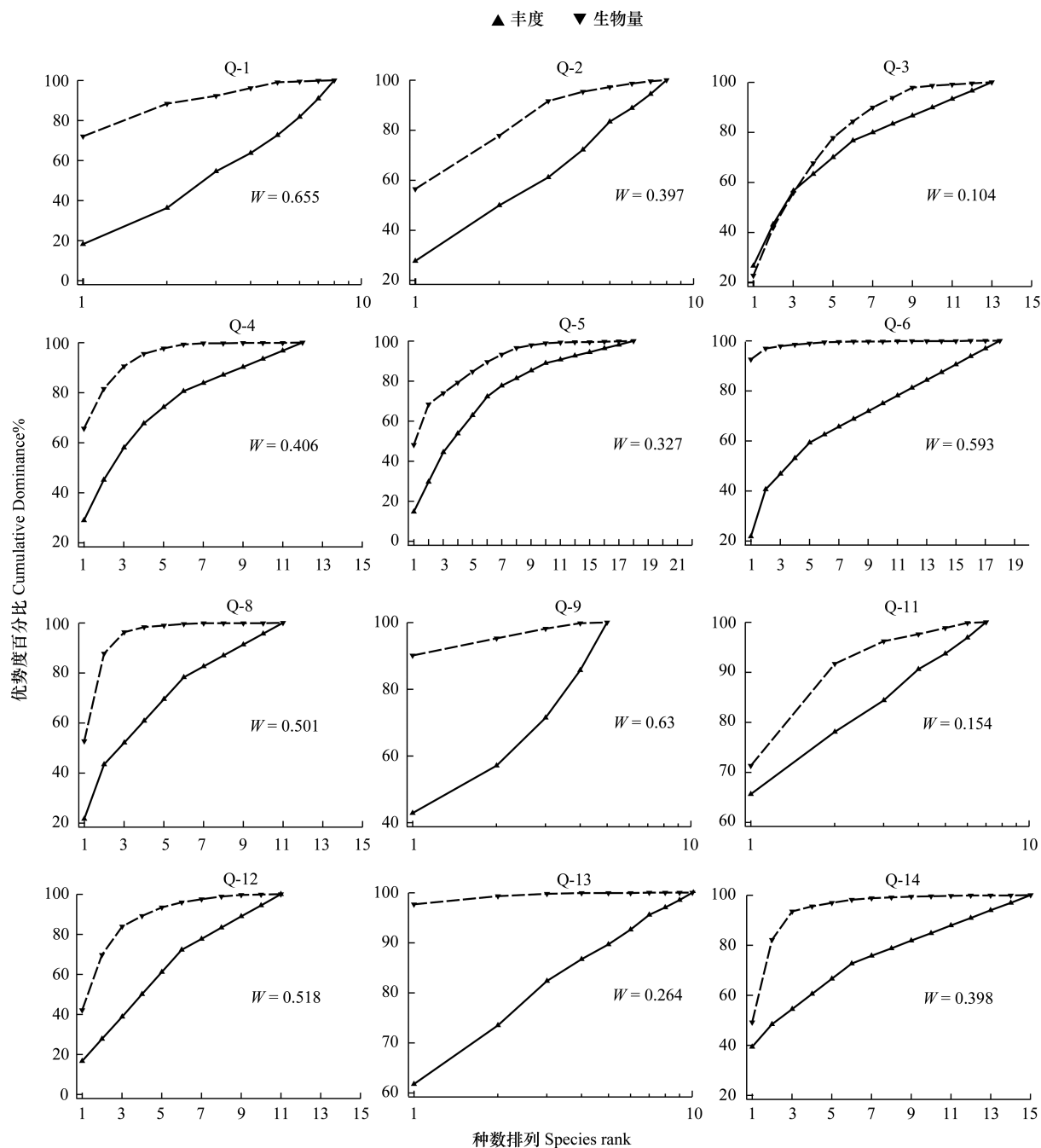


图 6 董家口邻近海域 2021 秋季大型底栖动物个站位 ABC 曲线

Fig.6 ABC curves of individual stations of macrofauna in the adjacent waters of Dongjiakou in autumn 2021

W : 接近 1 则表明群落未受扰动, 接近 0 则中度扰动, 接近 -1 则重度扰动

本次共检测到大型底栖动物 66 个分类单元, 环节动物、节肢动物占据较大比例, 相比于使用年限较长的龙口港、威海港, 董家口港附近海域的多毛类和软体类占比并不显著, 而且物种种类也相对较多, 对污染较为敏感的棘皮动物也有出现, 这说明该海域的环境状况相对较好^[4]。

Shannon-Wiener 多样性指数可以将污染评价范围分为 5 类, 即无底栖动物为严重污染; H' 值小于 1, 重污染; H' 值在 1—2 之间, 中等污染; H' 值在 2—3 之间, 轻度污染; H' 值大于 3, 清洁^[24]。总体来看, 本海域的海水生物多样性指数 H' 平均为 2.91, 依据以上分类, 董家口附近海域的环境属于轻度污染, 在 2016 年春季的调

查中, H' 平均为 3.99,对比出现了明显的下降^[25]。先前对长江口附近的研究表明,近海的干扰程度往往与到岸边的距离呈负相关^[26],而本次调查污染较重的站位邻近于入港口附近,受影响明显的站位多处于航道之上或临近航道,这表明航运可能是影响该地区环境质量的因素之一。

丰度/生物量曲线,即 ABC 曲线,是由 Warwick 在 1986 年提出的^[27],在环境稳定的区域中,生物量曲线会高于丰度曲线,在中度污染的区域,两者的曲线可能会出现交叉,在严重污染的区域,丰度曲线会位于生物量曲线之上。在董家口附近海域的 12 个站位 ABC 曲线中,除 Q-3 站位外均呈现生物量曲线高于丰度曲线。Q-3 站位的丰度生物量曲线出现了交叉,但该站位的 H' 值为 3.253, AMBI 与 M-AMBI 的评价为优。先前的研究发现,部分情况下污染加重可能会导致 H' 值提高^[28];也有研究发现群落的分类群或个体数过少时,会因数据量过低导致计算出现偏差^[29]。该站位中丝异须虫为主要物种,丝异须虫为耐污性较强的耐污种,对比其他站位,丝异须虫在本次调查中在更多出现在 Q-3 站位,这说明 Q-3 很可能出现了污染,导致耐污种占比提高。对港口而言,M-AMBI 的参考性高于 H' 值的参考性,其对生态变化更为敏感,之前的研究也认为当未分配物种较少时,M-AMBI 比 AMBI 和 H' 更有利于对底栖环境的准确评估^[30]。本次调查中优势度较高的物种有昆士兰稚齿虫、丝异须虫、澳洲鳞沙蚕与花冈钩毛虫,其耐污值分别为 4 级、4 级、1 级、3 级,除澳洲鳞沙蚕外均属于耐污值较高的物种,耐污种占据优势种往往代表着该海域生态环境质量的下降,昆士兰稚齿虫与丝异须虫在几乎在所有站位都有出现,这说明多数站位都受到了不同程度上的污染,而耐污值较低的棘皮动物、钩虾、纽虫等物种多出现在远离港口或港口背面的区域,这说明港口的正面与较近区域受到的污染更加严重。

综合两种重金属评估方法来看,只有砷存在部分污染;而在群落结构与环境因子的相关性分析中,相关系数最高的环境因子组合为 COD、叶绿素 a(沉积物)、锌、铅、镉,相关系数达到了 0.460。这说明该海域中,锌、铅与镉是影响较大的,砷虽然存在少数站位的轻微污染,但对群落结构影响并不明显。对董家口港评估中,两种方法都未能判断出对大型底栖动物影响较大的重金属种类,这说明港口的背景值选择与普通海域应有所差别^[30]。

BIOENV 分析的结果说明,COD、叶绿素 a(沉积物)与锌、铅、镉是限制大型底栖动物群落结构的主要因素。此外,河口附近会出现低氧现象,大量的陆源有机颗粒会随河流进入近海,且难以扩散,在涨潮、退潮的影响下,河口临近的有机物质在海水中消耗大量氧气,造成河口缺氧;董家口港邻近于白马河,其底层海水中可能存在“河口缺氧”的现象^[31]。沉积物中的重金属中,锌、铅、镉对大型底栖动物的影响最大。先前对中国南海航运附近海域的连续监测中,所检测的重金属中锌的含量会因为航运明显增加^[32];大气溶胶是海洋中铅与镉的主要来源^[33-34],过去二十年中,铅主要来源自化石燃料、工业活动、焚烧、化肥和污水等^[35],受污染的河流与港口的工业活动可能是铅的主要来源,镉更多的来自工业废水^[34]。在董家口港口更长时间的运营后,重金属的污染可能会进一步加重。此外,之前对重金属的研究发现,锌的含量与水深成负相关,而其他重金属含量与水深呈正相关,董家口港区域的平均水深低于 20m,因此对于锌的累计有明显的推动作用,锌可能会随航运的增多而迅速累积^[36]。

由于港口区域的限制,无法紧邻船舶停靠区采样,在地理位置上来看,Q-8、Q-9、Q-11、Q-13 站位环绕船舶停靠的区域,这四个站位的 M-AMBI 评价较低,其他站位相对于港口的停靠区较远,M-AMBI 的评价也相对较高。环境评价最佳的 Q-5、Q-6 站位,虽然距离港口最近,但港口该侧为道路,人为扰动较小,又紧邻沐管岛,船只无法到达,也距离河流相对较远,受到的影响较小,M-AMBI 的评价较高。综合看来,董家口港区大型底栖动物受到船只与河流的双重影响,人为影响较小且距离河流较远的 Q-5、Q-6 站位成为了本次调查中环境评价最佳的区域。CLUSTER 的群落结构分析也证明,靠近港口停靠区的 Q-9、Q-11、Q-13、Q-14 为一组,证明这四个站位的群落结构更加相似。

综合来看,董家口港区邻近海域的大型底栖动物群落结构主要受到低氧、重金属的胁迫。低氧推测来源于陆源河流的有机物质,海水中的氧气被消耗所造成的,而重金属的来源推测为航运过程中泄漏、化能燃料的燃烧、陆源河流输入所带来的。随着董家口港区的进一步开发利用,此类胁迫可能会逐步加重。

4 结论

(1) 本研究在 2021 年 11 月对董家口港口附近的调查共鉴定出大型底栖动物 66 种, 平均丰度为 343.33 个/ m^3 , 平均生物量为 $8.26\text{g}/\text{m}^2$ 。影响大型底栖动物群落的决定因素包括 COD、叶绿素 a (沉积物)、锌、铅、镉。

(2) 相比于 2016 年春季的调查, 董家口港口的附近海域的环境质量出现了下降, 平均 H' 从 2016 年春季的 3.99 降低到了 2021 年秋季的 2.91^[25]。

参考文献 (References):

- [1] Mosbahi N, Serbaji M M, Pezy J P, Neifar L, Dauvin J C. Response of benthic macrofauna to multiple anthropogenic pressures in the shallow coastal zone south of Sfax (Tunisia, central Mediterranean Sea). *Environmental Pollution*, 2019, 253: 474-487.
- [2] Ni D P, Zhang Z N, Liu X S. Benthic ecological quality assessment of the Bohai Sea, China using marine biotic indices. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 142: 457-464.
- [3] 卓莉, 陈晋, 史培军, 辜智慧, 范一大, 一之瀬俊明. 基于夜间灯光数据的中国人口密度模拟. *地理学报*, 2005, 60(2): 266-276.
- [4] Zhang M W, Liu C Y, Zhang C J, Zhu H Y, Wan J T, Liu X S. Response of macrofaunal assemblages to different pollution pressures of two types of ports. *Ecological Indicators*, 2023, 146: 109858.
- [5] Monaco D, Chianese E, Riccio A, Delgado-Sanchez A, Lacorte S. Spatial distribution of heavy hydrocarbons, PAHs and metals in polluted areas. The case of "Galicia", Spain. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 121(1/2): 230-237.
- [6] Grifoll M, Del Campo A, Espino M, Mader J, González M, Borja Á. Water renewal and risk assessment of water pollution in semi-enclosed domains: application to Bilbao Harbour (Bay of Biscay). *Journal of Marine Systems*, 2013, 109/110: S241-S251.
- [7] Harriague A C, Albertelli G, Misic C. Macro- and meiofaunal community features in the critical environmental system of a tourist harbour (Rapallo, Ligurian Sea, NW Mediterranean). *Marine Environmental Research*, 2012, 74: 64-72.
- [8] Stratmann T, van Oevelen D, Martínez Arbizu P, Wei C L, Liao J X, Cusson M, Scrosati R A, Archambault P, Snelgrove P V R, Ramey-Balci P A, Burd B J, Kenchington E, Gilkinson K, Belley R, Soetaert K. The BenBioDen database, a global database for meio-, macro- and megabenthic biomass and densities. *Scientific Data*, 2020, 7: 206.
- [9] 刘晓收, 范颖, 史书杰, 华尔, 张志南. 渤海大型底栖动物种类组成与群落结构研究. *海洋学报*, 2014, 36(12): 53-66.
- [10] Hawkins C P, Murphy M L, Anderson N H. Effects of canopy, substrate composition, and gradient on the structure of macroinvertebrate communities in cascade range streams of Oregon. *Ecology*, 1982, 63(6): 1840.
- [11] 渠晓东, 刘志刚, 张远. 标准化方法筛选参照点构建大型底栖动物生物完整性指数. *生态学报*, 2012, 32(15): 4661-4672.
- [12] Xu Y, Peng J F, Xu X Y, Wang Y J, Xue H T, Li Y, Yu H W, Cao X F, Cai Y P, Sun X, Qu J H. Survey-based approach to establish macrobenthic biological network in lakes. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 162: 105061.
- [13] Johansen P O, Isaksen T E, Bye-Ingebrigtsen E, Haave M, Dahlgren T G, Kvalø S E, Greenacre M, Durand D, Rapp H T. Temporal changes in benthic macrofauna on the west coast of Norway resulting from human activities. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 128: 483-495.
- [14] 只红茹, 于志安. 青岛港董家口港区原油码头水工结构特点与创新. *水运工程*, 2021(10): 155-160, 172.
- [15] 姚令燕. 董家口港区水动力环境数值模拟研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [16] 王存琪, 李志波. 浅析董家口港区 LNG 船舶靠泊引航操纵. *中国水运*, 2018(9): 64-65.
- [17] 陈华, 徐兆礼. 杭州湾洋山工程群对邻近水域浮游动物数量分布的影响. *中国水产科学*, 2010, 17(6): 1319-1326.
- [18] 刘颖, 李进京, 陈晨, 刘懂, 焦海峰, 韩庆喜, 王一农, 尤仲杰. 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. *海洋与湖沼*, 2021, 52(3): 685-696.
- [19] 纪莹璐, 王尽文, 张亮, 孙滨, 陶卉卉, 宿凯, 屈文. 日照岚山港邻近海域大型底栖动物群落结构及季节变化. *生态科学*, 2020, 39(5): 151-160.
- [20] Wang Z, Lin K X, Liu X S. Distribution and pollution risk assessment of heavy metals in the surface sediment of the intertidal zones of the Yellow River Estuary, China. *Marine Pollution Bulletin*, 2022, 174: 113286.
- [21] Xu J, Lu X, Liu X S. Patterns of species and functional diversity of macrofaunal assemblages and the bioassessment of benthic ecological quality status in the southern Yellow Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 171: 112784.
- [22] 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. *青岛海洋大学学报: 自然科学版*, 2003, 33(1): 58-64.

- [23] Darbra R M, Ronza A, Stojanovic T A, Wooldridge C, Casal J. A procedure for identifying significant environmental aspects in sea ports. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, 50(8): 866-874.
- [24] 蔡立哲, 马丽, 高阳, 郑天凌, 林鹏. 海洋底栖动物多样性指数污染程度评价标准的分析. *厦门大学学报: 自然科学版*, 2002, 41(5): 641-646.
- [25] 纪莹璐, 张亮, 宿凯, 陶卉卉, 张绍萍, 王尽文, 屈文. 青岛董家口春季大型底栖动物群落结构及其与环境因子关系. *海洋湖沼通报*, 2021, 43(5): 99-108.
- [26] Qiu B C, Zhong X, Liu X S. Assessment of the benthic ecological status in the adjacent waters of Yangtze River Estuary using marine biotic indices. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 137: 104-112.
- [27] Warwick R M. A new method for detecting pollution effects on marine macrobenthic communities. *Marine Biology*, 1986, 92(4): 557-562.
- [28] 李永祺, 丁美丽. *海洋污染生物学*. 北京: 海洋出版社, 1991: 445-449.
- [29] Borja A, Muxika I, Department of Oceanography and Marine Environment A Z T I. Guidelines for the use of AMBI (AZTI's Marine Biotic Index) in the assessment of the benthic ecological quality. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, 50(7): 787-789.
- [30] Lu X, Xu J, Xu Z D, Liu X S. Assessment of benthic ecological quality status using multi-biotic indices based on macrofaunal assemblages in a semi-enclosed bay. *Frontiers in Marine Science*, 2021, 8: 734710.
- [31] 杨艾琳, 杨芳, 李少斌, 余其彪, 陈能汪. 福建省流域-近海溶解氧时空格局与低氧调控机制. *环境科学*, 2022, 43(11): 4950-4960.
- [32] Xie S R, Jiang W, Sun Y N, Yu K F, Feng C M, Han Y S, Xiao Y W, Wei C S. Interannual variation and sources identification of heavy metals in seawater near shipping lanes: evidence from a coral record from the northern South China Sea. *The Science of the Total Environment*, 2023, 854: 158755.
- [33] Chen M L, Boyle E A, Lee J M, Nurhati I, Zurbrick C, Switzer A D, Carrasco G. Lead isotope exchange between dissolved and fluvial particulate matter: a laboratory study from the Johor River Estuary. *Philosophical Transactions Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 2016, 374(2081): 20160054.
- [34] Hutton M, Symon C. The quantities of cadmium, lead, mercury and arsenic entering the U.K. environment from human activities. *The Science of the Total Environment*, 1986, 57: 129-150.
- [35] Flegal A R, Gallon C, Ganguli P M, Conaway C H. All the lead in China. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2013, 43(17): 1869-1944.
- [36] Dong J Y, Zhao L L, Sun X, Hu C Y, Wang Y H, Li W T, Zhang P D, Zhang X M. Response of macrobenthic communities to heavy metal pollution in Laoshan Bay, China: a trait-based method. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 167: 112292.