

• 研究报告 •

山东烟台大沽夹河河口及邻近海域大型底栖动物群落特征

李晓静^{1,2} 周政权^{1,2} 陈琳琳¹ 李宝泉^{1*}

1 (中国科学院烟台海岸带研究所, 山东烟台 264003)

2 (中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了解烟台大沽夹河河口及邻近海域大型底栖动物群落特征及受干扰情况, 于2012年9月在上述区域设置12个采样点进行大型底栖动物群落调查和分析。对采集的生物样品进行物种鉴定、计数和称重, 利用生物统计软件PRIMER计算优势度指数(Y)、Shannon-Wiener多样性指数(H')、Margalef丰富度指数(D)和Pielou均匀度指数(J), 并进行等级聚类(CLUSTER)、非度量多维标度排序(non-metric multi-dimensional scaling, MDS)及丰度/生物量曲线(abundance and biomass curves, ABC)分析。共采集和鉴定大型底栖动物89种, 优势类群为多毛类。总平均生物量为18.02 g/m², 软体动物贡献率最高; 总平均丰度为2,165 ind./m², 甲壳类贡献率最高。丰富度指数(D)、均匀度指数(J)和Shannon-Wiener多样性指数(H')分别为 2.620 ± 1.324 、 0.585 ± 0.294 和 2.398 ± 1.351 。CLUSTER聚类和MDS标序结果表明, 在30%的相似性水平, 不同站位可分为5组, 且不同组间差异显著。环境因子与群落分布特征相关性较大, 其中最能解释群落丰度和生物量空间分布特征的环境因子为水温、盐度和总磷含量。ABC曲线表明该区域超过80%的采样点其大型底栖动物已受到中等到严重程度的扰动。结合历史资料发现, 调查区域大型底栖动物群落物种呈小型化变动趋势, 尤其是大沽夹河入海口处, 物种组成单一, 小型甲壳类占绝对优势。

关键词: 大型底栖动物; 群落结构; 环境因子; 群落演替; 大沽夹河河口

Characteristics of macrobenthic communities in the estuary of Dagujia River and its adjacent water areas in Yantai, Shandong

Xiaojing Li^{1,2}, Zhengquan Zhou^{1,2}, Linlin Chen¹, Baoquan Li^{1*}

1 Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai, Shandong 264003

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract: A survey on macrobenthic assemblages was carried out in the estuary of Dagujia River and its adjacent waters in September 2012 (Yantai, China), to investigate the macrobenthic community and disturbance from anthropogenic activities. The software package PRIMER was used to calculate four biodiversity indices and carry out CLUSTER, non-metric multi-dimensional scaling (MDS) ordination analyses, abundance and biomass curves (ABC) to analyze the community structure. A total of 89 macrobenthic species were identified, of which the dominant group was polychaetes. The average biomass and abundance was 18.02 g/m² and 2,165 ind./m², respectively, of which Molluscan species contributed most to biomass and Crustacean species contributed most to abundance. Three biodiversity indices, Richness index, Evenness index and Shannon-Wiener index were 2.620 ± 1.324 , 0.585 ± 0.294 and 2.398 ± 1.351 , respectively. CLUSTER and MDS analysis showed that macrobenthic assemblages could be divided into five sub-groups based on Bray-Curtis similarity and significant difference was found within the sub-groups. The spatial distribution of abundance and biomass of the community was closely related to water temperature, salt and total phosphorus. ABC curves showed the macrobenthic assemblages suffered disturbance from moderate to severe extent due to an-

收稿日期: 2015-08-05; 接受日期: 2015-11-16

基金项目: 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-14)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA11020403 和 XDA11020702)及中国科学院科技服务网络计划(STS计划)(KFJ-EW-ST-127)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: bqli@yic.ac.cn

thropogenic activities. Further analysis shows community succession has occurred, seen through a miniaturization tendency of individual body size, and decreasing number of species in assemblages as well as the dominant group changing to Crustacea in the estuary of Dagujia River.

Key words: macrobenthos; community structure; environmental factors; community succession; estuary of Dagujia River and its adjacent water areas

河口区是河流与海洋的交汇地带, 人口密集、经济发达, 船舶运输、水产养殖和污染物排放等人类活动的干扰强烈, 栖息于此的生物易产生明显的时空变化, 增加了河口区生态系统的复杂性, 并导致较快的群落演替发生(陈吉余和陈沈良, 2007; 毛婕昕等, 2011)。

大沽夹河位于 $120^{\circ}44'28''$ – $121^{\circ}26'28''$ E, $37^{\circ}02'22''$ – $37^{\circ}36'12''$ N 之间, 流域面积 $2,282 \text{ km}^2$, 由内外夹河汇合而成, 最后汇入套子湾。作为烟台境内最大的入海河流和主要的水源地(郭献军, 2005), 大沽夹河对烟台经济发展和套子湾生态状况具有重要的影响。近半个世纪以来, 受沿岸水利工程建设和工农业活动等的影响, 流域生态环境呈严重退化趋势(罗新正等, 2008b)。套子湾位于山东半岛北部, 属开放型海湾, 平均水深 12 m , 曾是烟台威海地区重要的渔场。近年来, 由于烟台临港工业和旅游业的迅速发展, 海湾环境和生态状况受人类活动的影响较大(李睿倩和孟范平, 2012)。

大型底栖动物指能被 0.5 mm 网筛截留、生活在海洋沉积物中的底内或底上的生物, 主要包括环节动物多毛类、软体动物、节肢动物甲壳类和棘皮动物、腔肠动物5个类群。此外, 常见的还有纽虫、苔藓虫和底栖鱼类等。多数种类由于活动范围有限甚至营固着生活, 对逆境的逃避相对迟缓, 受环境影响深刻。因此, 大型底栖动物的种类组成、群落结构、次级生产力等群落特征对于环境健康状况有良好的指示作用(李新正, 2011)。

已有的研究表明, 大沽夹河流域的大型底栖动物物种组成主要以敏感和耐受性物种为主, 且生态健康状况不佳(罗新正等, 2008a, b), 但大沽夹河河口区和套子湾的大型底栖动物特征迄今未见报道。本文以现状调查数据结合历史资料, 明确分析了大沽夹河河口区大型底栖动物群落特征和时空变化, 结合环境数据, 探讨群落受扰动的程度, 以期为进一步开展烟台近海底栖生物群落长周期的演替特征分析及河口区生态环境的管理提供基础资料。

1 方法

1.1 站位布设和样品采集

2012年9月在大沽夹河河口和附近海域共布设12个采样站, 布设原则主要考虑河口区不同盐度梯度(图1)。使用 0.05 m^2 的抓斗式采泥器每站成功取样3次合并为1个样品, 使用 0.5 mm 孔径的网筛分选后用75%的酒精现场固定, 带回实验室进行种类鉴定、个体计数和称重。样品的处理、保存、称重均按照《海洋调查规范 第6部分: 海洋生物调查》(GB/T 12763.6-2007)进行。水深、水温、盐度、溶解氧(DO)和pH等环境因子利用YSI环境监测系统(600QS-M-O, 美国)现场同步测定。营养盐用Niskon采水器采集表层海水, 带回实验室利用营养盐自动流体分析仪(AutoAnalyzer 3, Bran Luebbe, Germany)测定, 测定方法按照《海洋监测规范 第4部分: 海水分析》(GB 17378.4-2007)进行。

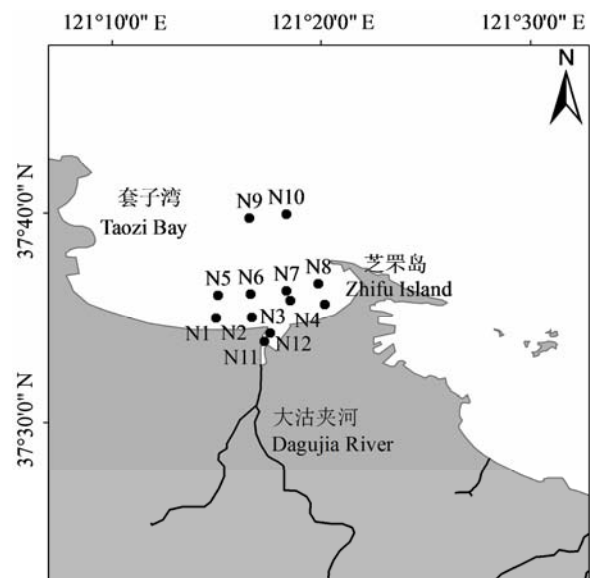


图1 大沽夹河河口及其邻近海域大型底栖动物的调查站位
Fig. 1 Sampling stations of macrobenthos in the estuary of Dagujia River and its adjacent water areas

1.2 群落多样性分析

采用以下公式计算群落优势度和多样性指数:

优势度指数(陈亚瞿等, 1995):

$$Y = (n_i / N) \times f_i \tag{1}$$

Shannon-Wiener 多样性指数 (Shannon & Weaver, 1949):

$$H' = - \sum_{i=1}^s P_i \log_2 P_i \tag{2}$$

Margalef 物种丰富度指数(Margalef, 1968):

$$D = (S - 1) / \log_2 N \tag{3}$$

Pielou 物种均匀度指数(Pielou, 1975):

$$J = H' / \log_2 S \tag{4}$$

式中, N 为所有站位采集的大型底栖动物总个体数; n_i 为第*i*种底栖动物的总个体数; f_i 为物种*i*在各站位出现的频率; S 为采泥样品中的种类总数; P_i 为第*i*种的个体数与样品中总个体数的比值(n_i/N)。当物种优势度 $Y > 0.02$ 时, 该种即为优势种(陈亚瞿等, 1995)。

1.3 群落结构分析

采用PRIMER 6.0进行多元统计分析: 首先对物种的丰度数据进行平方根转换以平衡优势种和稀有种在群落中的影响, 并计算站位间的Bray-Curtis相似性系数, 构建相似性矩阵, 然后采用CLUSTER 等级聚类方法和非度量多维标度(non-metric multi-dimensional scaling, MDS)排序方法分析大型底栖动物的群落分布格局。采用相似性分析ANOSIM (analysis of similarities)检验各聚类组间的差异显著性。通过SIMPER (similarity percentage program)分析不同物种对各群落组内相似性和组间差异性的平均贡献率(Clarke & Warwick, 1994; 周红和张志南, 2003)。

1.4 群落与环境因子相关性分析

对所有环境因子进行主成分(principal component analysis, PCA)分析, 所有站位的主成分分析结果构成1个图谱, 呈现的是各站位的环境相似性程度(Clarke & Green, 1988), 图谱中站位间的距离与站位的环境相异程度一致, 站位在图谱中的位置由主成分分析数据表示^①。利用PRIMER软件的RELATE分析丰度和生物量与环境因子的关系, BIOENV分析单一环境因子与底栖动物群落结构的

相关系数, 再通过BVSTEP分析并获取解释群落结构的最佳环境因子组合。使用SPSS16.0软件分析各生物多样性指数与环境因子的相关性。

1.5 丰度/生物量比较曲线(ABC曲线)

采用丰度/生物量比较曲线(abundance and biomass curves)分析大型底栖动物群落受干扰状况。未受扰动的群落, 生物量曲线始终位于丰度曲线之上; 受到中等程度扰动的群落, 丰度和生物量曲线接近重合, 或出现部分交叉; 受严重扰动的群落, 则生物量曲线始终位于丰度曲线之下(田胜艳等, 2006)。

2 结果

2.1 物种组成与优势种

该区域共发现和鉴定大型底栖动物89种, 其中多毛类最多, 为42种, 占总物种数的47.19%; 软体动物和甲壳类均为21种, 占23.60%; 棘皮动物3种, 占3.37%; 其他动物2种, 占2.25%。各站位平均物种数为19, 其中多毛类最多, 为10种, 所占比例达52.63% (附录1)。

群落优势种有4种, 分别为刚鳃虫(*Chaetozone setosa*)、日本大螯蜚(*Grandidierella japonica*)、丝异蚓虫(*Heteromastus filiformis*)和不倒翁虫(*Sternaspis sculata*), 优势度分别为0.11、0.09、0.07和0.02 (表1)。N2站无优势种分布。每种优势种出现的站位数均达到调查站位总数的一半及以上, 均呈集中分布

表1 群落优势种在各站位的分布(+表示分布在该站位)
Table 1 Spatial distribution of dominant species in the sampling stations (+ means the species were recorded in the station)

	刚鳃虫 <i>Chaetozone setosa</i>	日本大螯蜚 <i>Grandidierella japonica</i>	丝异蚓虫 <i>Heteromastus filiformis</i>	不倒翁虫 <i>Sternaspis sculata</i>
N1	+	+	+	+
N2				
N3	+		+	+
N4	+		+	
N5		+	+	+
N6	+	+	+	+
N7	+		+	+
N8	+		+	+
N9	+		+	+
N10	+	+	+	+
N11	+	+		
N12	+	+	+	

①王晓晨 (2009) 乳山湾及邻近海域大型底栖动物群落的生态学研究. 硕士学位论文, 中国海洋大学, 青岛.

特征,且优势度越高的优势种集中分布越明显,如刚鳃虫在N8站的丰度占该站位总丰度的比例达87.78%;日本大螯蜚在N11、N12站的丰度比例分别达29.58%和68.57%。丝异蚓虫主要分布在N3、N6、N7站,丰度所占比例分别为24.9%、42.27%和22.51%。不倒翁虫主要分布在N7、N8、N9站,丰度所占比例分别为35.34%、16.54%和25.56%。

2.2 生物量和丰度

底栖动物总平均生物量为18.02 g/m²,其中软体动物最高,为11.87 g/m²(占总平均生物量的65.90%);其后依次为多毛类(3.71 g/m²,占20.57%)、甲壳类(2.09 g/m²,占11.59%)、其他动物(0.18 g/m²,占0.99%)和棘皮动物(0.17 g/m²,占0.95%)。生物量在各采样点的空间分布不均,以入海河流延长线为界,东侧区域各采样点的生物量普遍高于西侧区域(图2)。

底栖动物总平均丰度为2,165 ind./m²,其中甲壳类最高,为1,130.56 ind./m²,占总平均丰度的52.22%;其后依次是多毛类(867.22 ind./m²,占40.06%)、软体动物(122.78 ind./m²,占5.67%)、棘皮动物(36.67 ind./m²,占1.69%)、其他动物(7.78 ind./m²,占0.36%)。丰度在各采样点的分布不均(图3),高值区位于大沽夹河河口处。

2.3 群落多样性

各站位的丰富度指数(D)平均为 2.620 ± 1.324 ,N9站最高(4.803),N11站最低(0.604);均匀度指数(J)平均为 0.585 ± 0.294 ,N1站最高(0.914),N12站最低(0.087);Shannon-Wiener多样性指数(H')平均为 2.398 ± 1.351 ,N10站最高(4.356),N12站最低(0.313)(表2)。

2.4 群落结构分析

在Bray-Curtis相似性系数基础上对调查区域的大型底栖动物群落进行聚类分析。结果发现,在30%的相似性时,该群落可被分为5组(图4),MDS分析结果与CLUSTER分析结果一致(附录2)。ANOSIM分析得出不同聚类组间存在显著差异($R = 0.91, P < 0.01$)。组内相似性以及主要贡献物种具体情况如下:

组I: N2站在相似性6.45%处与其他站位分离,由于只有1个站位,无法分析组内相似性和主要贡献种。该采样点位于大沽夹河河口附近。

组II: 由N11站和N12站组成,组内平均相似性

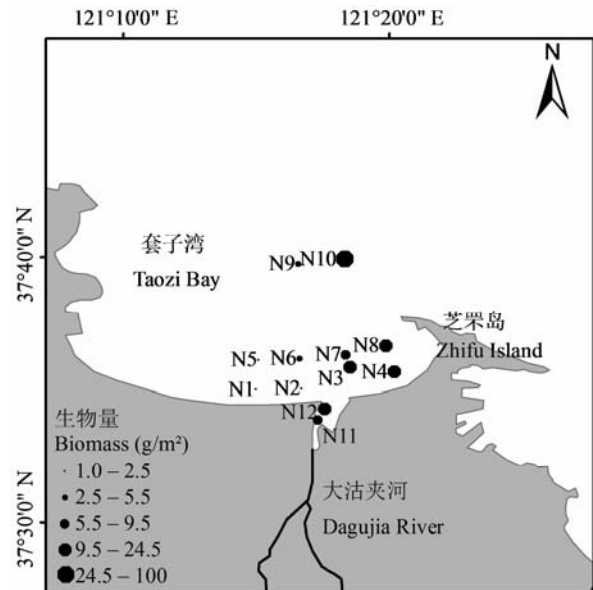


图2 大型底栖动物生物量在调查站位的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of macrobenthic biomass in the sampling stations

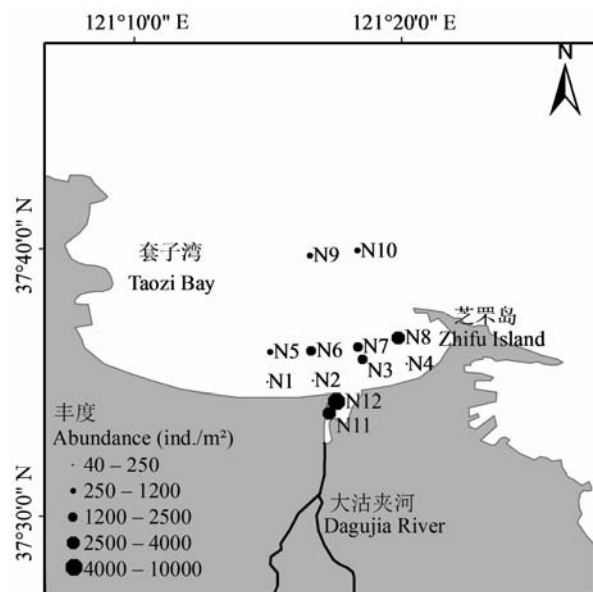


图3 大型底栖动物丰度在调查站位的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of macrobenthic abundance in the sampling stations

高达80.33%,主要贡献种为日本大螯蜚,贡献率为82.64%,其次为突头杯尾水虱(*Anthura gracilis*),贡献率为11.78%。这两个站位均位于大沽夹河入海河口内,底栖动物丰度远高于其他站位。

组III: 只包括N4采样点,无法分析组内相似性

表2 大沽夹河河口及邻近海域大型底栖动物群落的物种多样性指数

Table 2 Species biodiversity indices of macrobenthic communities in the estuary of Dagujia River and its adjacent water areas

站位 Station	丰富度指数 Species richness index (D)	均匀度指数 Evenness index (J')	Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener index (H')
N1	2.864	0.914	3.737
N2	0.813	0.896	1.792
N3	2.469	0.583	2.521
N4	1.798	0.602	2.084
N5	2.510	0.699	2.855
N6	3.365	0.412	1.960
N7	3.434	0.646	3.071
N8	3.275	0.290	1.395
N9	4.803	0.842	4.319
N10	4.291	0.906	4.356
N11	0.604	0.144	0.373
N12	1.209	0.087	0.313
平均值±标准差 Mean ± SD	2.620 ± 1.324	0.585 ± 0.294	2.398 ± 1.351

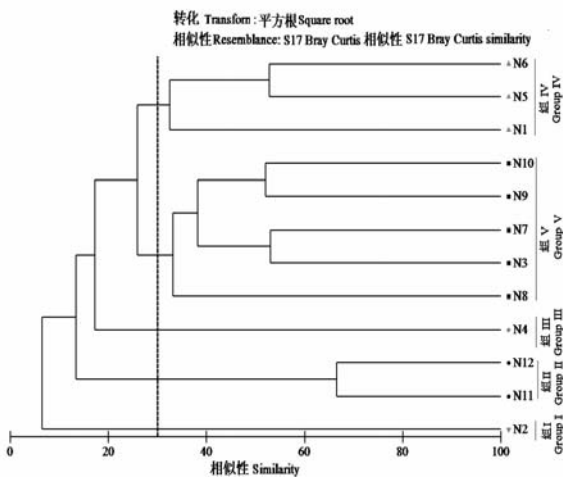


图4 大沽夹河河口及邻近海域大型底栖动物群落的 CLUSTER 聚类分析结果

Fig. 4 CLUSTER analysis of macrobenthos in the estuary of Dagujia River and its adjacent water areas

和主要贡献种。

组IV: 包括N1、N5、N6等3个采样点, 组内相似性为45.66%, 主要贡献物种有10种, 前三位依次为丝异蚓虫、日本大螯蜚和轮双眼钩虾(*Ampelisca cyclops*), 贡献率分别为30.76%、17.02%和12.21%。

组V: 由N3、N7、N8、N9、N10等5个采样站组成, 组内平均相似性为39.65%, 各物种贡献率相对一致, 20个物种的累计贡献率超过90%, 其中贡

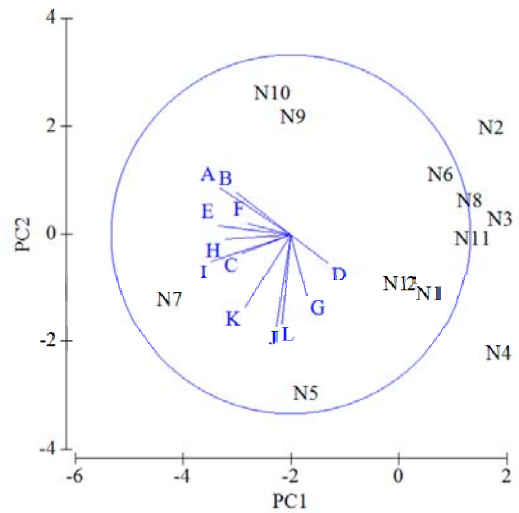


图5 调查站位环境因子主成分分析排序图。A: 水深; B: 水温; C: 盐度; D: 溶解氧; E: pH; F: 磷酸-磷; G: 总磷; H: 铵盐-氮; I: 亚硝酸-氮; J: 硝酸-氮; K: 总氮; L: 硅酸-硅。

Fig. 5 Ordination of sampling stations by Principal Component Analysis on environmental factors. A, Water depth; B, Water temperature; C, Salinity; D, Dissolved oxygen; E, pH; F, Phosphoric acid-phosphorus; G, Total phosphorus; H, Ammonium salt-nitrogen; I, Nitrous acid-nitrogen; J, Nitric acid-nitrogen; K, Total nitrogen; L, Silicic acid-silicon.

献率较高的几个物种分别是不倒翁虫、丝异蚓虫、双唇索沙蚕(*Lumbrineris cruzensis*)、刚鳃虫, 贡献率分别为12.85%、10.90%、9.09%和8.23%。

2.5 群落与环境因子的相关性

环境因子的PCA分析结果表明, 前两个主成分轴的信息量占总信息量的60.4% (图5)。依环境因子的相似性将调查站位大致分为4组, 其中N9、N10站相距较近聚为一组, N5、N7各单独聚为一组, 其他站位聚为一组。前3个主成分的累计贡献率为72.8%, 对总体有较好的解释。反映环境变量对各主成分贡献程度的负荷矩阵如附录3, 其中, 对第一主成分PC1贡献较大的环境因子有 NO_2^- -N、pH、水深、 NH_4^+ -N, 对第二主成分PC2贡献较大的环境因子有 NO_3^- -N、 SiO_3 -Si、TN、TP, 对第三主成分PC3贡献较大的环境因子有 PO_4^{3-} -P、 NH_4^+ -N、DO。

通过BIOENV分析环境因子与群落结构的关系, 发现在所有环境因子中, 水温、盐度和总磷含量3个环境因子的组合与丰度和生物量的相关系数最高, 最能解释群落丰度和生物量的空间分布特征, 其中与丰度的Spearman相关系数为0.290, 与生物量的Spearman相关系数为0.307。

各生物多样性指数与环境因子的Pearson相关性分析结果表明,丰富度指数(D)与水深相关性极显著,与水温相关性显著;Shannon-Wiener多样性指数(H')与水深相关性极显著,其他相关性均不显著(表3)。

2.6 ABC曲线

从ABC曲线中可以看出,该区域超过80%的采样点生物量和丰度曲线接近重合,或出现交叉,甚至生物量曲线始终位于丰度曲线之下,表明大型底栖动物群落已受到不同程度的扰动。N2和N10采样点生物量曲线始终位于丰度曲线之上,未受到扰动。N1、N3、N5、N6、N8、N9、N11、N12等8个采样点的 W 值均为负值,生物量曲线始终位于丰度曲线之下,这些采样点的大型底栖动物群落均已

表3 生物多样性指数与环境因子的Pearson相关分析
Table 3 Pearson correlation between environmental factors and species biodiversity indices

	丰富度指数 Species richness index (D)	均匀度指数 Evenness index (J)	Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener index (H')
水深 Water depth	0.747**	0.478	0.719**
水温 Water temperature	0.687*	0.038	0.404
盐度 Salinity	0.402	0.537	0.521
溶解氧 Dissolved oxygen (DO)	-0.201	-0.523	-0.399
pH	0.364	0.315	0.459
磷酸-磷 Phosphoric acid - phosphorus (PO_4^{3-} -P)	0.533	0.273	0.477
总磷 Total phosphorus (TP)	-0.108	-0.074	-0.002
铵盐-氮 Ammonium salt - nitrogen (NH_4^+ -N)	0.400	0.040	0.276
亚硝酸盐-氮 Nitrous acid - nitrogen (NO_2^- -N)	0.467	0.170	0.419
硝酸盐-氮 Nitric acid - nitrogen (NO_3^- -N)	-0.160	-0.063	-0.012
总氮 Total nitrogen (TN)	-0.039	-0.020	0.029
硅酸-硅 Silicic acid - silicon (SiO_3 -Si)	-0.350	-0.381	-0.315

* $P \leq 0.05$; ** $P \leq 0.01$

受到严重的扰动。N4和N7采样点 W 值为正值,但丰度曲线和生物量曲线均接近重合并出现交叉,说明这两个采样点均受到中等程度干扰(图6)。

3 讨论

3.1 群落结构特征

本次调查大型底栖动物组成以多毛类占绝对优势,其次是软体动物和甲壳类,棘皮动物和其他类群生物较少,与烟台近海历次调查结论类似^①(吴耀泉和张波, 1994; 王绪娥等, 1995; 王全超和李宝泉, 2013),说明近30年来烟台近海大型底栖动物群落物种组成变化不大。

大沽夹河入海河流延长线及芝罘岛附近的生物量显著高于其他区域,尤其在大沽夹河河口N11和N12站发现大量个体较小的日本大螯蜚,同时BIOENV分析结果说明水温、盐度和总磷含量3个环境因子的组合与丰度和生物量的相关系数最高,基于此可以推断大沽夹河淡水和营养盐的陆源输入对套子湾的底栖生物群落造成了一定影响。在主要类群中,丰度最高的为甲壳类,与大沽夹河河口N11和N12站出现大量的日本大螯蜚有关。生物量最高的为软体动物,与N10站采集到重量较大的贻贝(*Mytilus edulis*)有关。

生物多样性指数和ABC曲线表明,调查区域各站位的大型底栖动物受扰动程度不一,局部区域受污染扰动较大,特别是位于烟台金沙滩旅游区附近的N2站和大沽夹河河口的N11、N12站,物种组成单一,且个体小型化特征明显,说明受污染的环境给机会种或者是多毛类等小型耐污种提供了更大的生存机会。

3.2 与周边调查区域的比较

烟台近海大型底栖动物的历史数据积累较少,仅有的几次调查研究在采样区域和调查方法等方面也有所差异。已开展的调查包括1985年7月到1986年6月芝罘岛外海区域调查,使用0.1 m²采泥器,5 mm和1 mm孔径的套筛筛选(王绪娥等, 1995); 1993年8月芝罘湾海域调查,使用0.1 m² HNH型采泥器,0.5 mm和0.25 mm孔径的套筛筛选(吴耀泉和张波, 1994); 2009年5月和10月四十里湾调查,采用0.05 m²采泥器,0.5 mm和0.063 mm孔径网筛筛选^①。

① 汤宪春 (2011) 烟台四十里湾大型底栖动物生态功能研究. 硕士学位论文论文, 中国农业科学院, 北京.

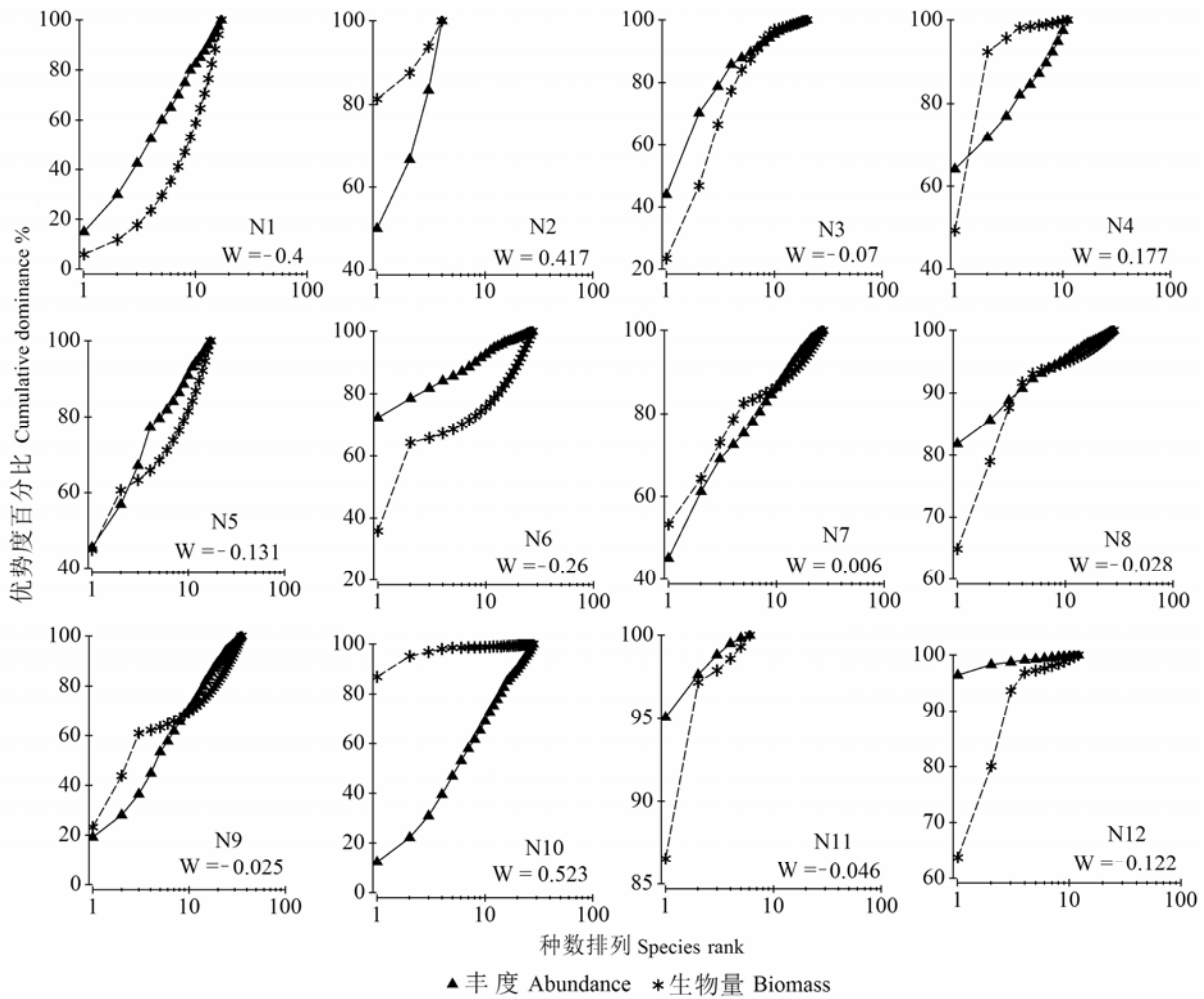


图6 大沽夹河河口及邻近海域所有站位的ABC曲线
 Fig. 6 ABC curves at all stations in the estuary of Dagujia River and its adjacent water areas

2010–2011年烟台近海的大型底栖生物调查, 在套子湾、四十里湾、芝罘湾以及芝罘岛外侧海域均有站点布设, 使用0.05 m²抓斗式采泥器, 0.5 mm的网筛进行筛选(王全超和李宝泉, 2013)。

考虑到之前的3次调查与本次调查区域的不同, 以及河口区营养盐和污染物输入造成的盐度梯度变化, 物种组成有其特殊性, 因此很难进行量化比较。而王全超和李宝泉(2013)对烟台近海的调查区域与本次调查区域有所重叠, 采样和筛选方法一致, 为减少误差, 选取与本次调查区域相同季节的数据进行比较, 探讨该区域的大型底栖动物群落的变动状况。通过比较发现, 该区域的物种数相比于烟台近海大范围的物种数没有明显的差异, 但在物种组成以及生物量和丰度上差异较大, 在大沽夹河入海口处的N11和N12站点发现大量的甲壳类日本

大螯蜚, 导致该区域的甲壳类丰度和生物量明显偏高, 而且聚类分析中, 位于河口的N11和N12两站也单独聚为一组, 与其他分类组的非相似性超过80%, 而组内相似性达80.33%, 由此可以看出大沽夹河入海口处大型底栖动物群落与近海区域存在较大差异。

本次调查区域的大型底栖动物的丰度远高于烟台近海的调查数据, 而生物量却低于烟台近海的调查数据, 说明个体较小的物种在群落中所占比例较大。2010年烟台近海的调查中优势种有4种, 全部是多毛类, 且优势种呈种类减少和小型化的趋势(王全超和李宝泉, 2013)。本次调查优势种有4种, 其中多毛类3种, 甲壳类1种, 多毛类刚鳃虫和不倒翁虫为两次调查的共有优势种, 这说明多毛类已成为烟台近海群落中的绝对优势类群。随着人类活动的

加剧和环境的复杂多变,其他海域的底栖生物群落也呈现组成结构简单化,物种小型化的趋势,例如,渤海海域(刘晓收等,2014)、南黄海和长江口及邻近海域(刘录三等,2012;彭松耀,2013)等,具体表现为寿命长、具有高竞争力的 k 对策种正在被寿命短、适应能力宽、具有高繁殖能力的 r 对策种所取代。

3.3 影响生物群落特征的因素

影响海洋生物多样性的因素多而复杂,从大范围的全球气候变化至区域性的人类活动,如沿海区域富营养化、物种入侵、渔业、底拖网等均会影响生物多样性(Smith et al, 2000)。本调查区域位于大沽夹河河口附近,沿岸工农业发达,大沽夹河为烟台最大的入海河流,9月份随着雨水的增多,携带大量的陆源污染物入海(刘风非,2008)。套子湾为半封闭性海湾,特别是近芝罘湾内海域,与外界水域交换较差,导致该区域的营养富集。本次调查的近芝罘湾内海域N3、N4、N7、N8采样点氮磷的含量高于其他采样点,且河流入海延长线和近芝罘湾内的采样点生物量明显高于其他站位,其具体的影响因素和量化分析还需进一步探讨。2010年烟台市政府逐步取消四十里湾沿岸的养殖筏架,但并未对套子湾区域采取此措施,致使套子湾的生态状况劣于四十里湾(Li et al, 2013),可以看出人类活动对生态环境的干扰较大。同时,ABC曲线分析也显示该区域生物群落已受到中等到严重程度的扰动。烟台近海物种小型化、 r 对策机会种的急剧增加也是对烟台近海不稳定环境的一种适应策略,因此该区域生态保护和环境防治亟待重视。开展长周期的调查和分析,是定量研究生物群落对环境条件长期变化响应的常用方法(Holland, 1985)。

参考文献

- Chen JY, Chen SL (2007) China estuarine research for 50 years: retrospect and prospective. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 38, 481–486. (in Chinese with English abstract) [陈吉余, 陈沈良 (2007) 中国河口研究五十年: 回顾与展望. *海洋与湖沼*, 38, 481–486.]
- Chen YQ, Xu ZL, Wang YL, Hu FX, Hu H, Gu GC (1995) An ecological study on zooplankton in plume front zone of Changjiang (Yangtze) River Estuarine Area. I. Biomass distribution of dominant species. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2, 49–58. (in Chinese with English abstract) [陈亚瞿, 徐兆礼, 王云龙, 胡方西, 胡辉, 谷国传 (1995) 长江口河口锋区浮游动物生态研究. I. 生物量及优势种的平面分布. *中国水产科学*, 2, 49–58.]
- Clarke K, Green R (1988) Statistical design and analysis for a biological effects study. *Marine Ecology Progress Series*, 46, 213–226.
- Clarke KR, Warwick RM (1994) Change in Marine Communities: An Approach to Statistical Analysis and Interpretation, 2nd edn. PRIMER-E Ltd., Plymouth.
- Guo XJ (2005) Water environment assessment and protection measures of Dagujia River valley. *Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition)*, 18, 308–312. (in Chinese with English abstract) [郭献军 (2005) 大沽夹河流域水环境评价及污染防治对策. *烟台大学学报(自然科学与工程版)*, 18, 308–312.]
- Holland AF (1985) Long-term variation of macrobenthos in a mesohaline region of Chesapeake Bay. *Estuaries*, 8, 93–113.
- Li BQ, Keesing JK, Liu DY, Han QX, Wang YJ, Dong ZJ, Chen Q (2013) Anthropogenic impacts on hyperbenthos in the coastal waters of Sishili Bay, Yellow Sea. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 31, 1257–1267.
- Li RQ, Meng FP (2012) Emergy appraisal on the loss of ecosystem service caused by marine reclamation: a case study in the Taozi Bay. *Acta Ecologica Sinica*, 32, 5825–5835. (in Chinese with English abstract) [李睿倩, 孟范平 (2012) 填海造地导致海湾生态系统服务损失的能值评估——以套子湾为例. *生态学报*, 32, 5825–5835.]
- Li XZ (2011) An overview of studies on marine macrobenthic biodiversity from Chinese waters: principally from the Yellow Sea. *Biodiversity Science*, 19, 676–684. (in Chinese with English abstract) [李新正 (2011) 我国海洋大型底栖生物多样性研究及展望: 以黄海为例. *生物多样性*, 19, 676–684.]
- Liu FF (2008) Current situation of ocean environment in Taozi Bay. *Ocean Development and Management*, 25(6), 96–98. (in Chinese) [刘风非 (2008) 套子湾海洋环境现状浅析. *海洋开发与管理*, 25(6), 96–98.]
- Liu LS, Zheng BH, Li BQ, Cai WQ, Han QX, Lin KX (2012) Long-term trends of macrobenthos in Changjiang Estuary, China in relation to environmental changes. *Acta Oceanologica Sinica (Chinese version)*, 34, 134–145. (in Chinese with English abstract) [刘录三, 郑丙辉, 李宝泉, 蔡文倩, 韩庆喜, 林岩璇 (2012) 长江口大型底栖动物群落的演变过程及原因探讨. *海洋学报(中文版)*, 34, 134–145.]
- Liu XS, Fan Y, Shi SJ, Hua E, Zhang ZN (2014) Studies on the species composition and community structure of macrofauna in the Bohai Sea, China. *Acta Oceanologica Sinica (Chinese version)*, 36, 53–66. (in Chinese with English abstract) [刘晓收, 范颖, 史书杰, 华尔, 张志南 (2014) 渤海大型底栖动物种类组成与群落结构研究. *海洋学报(中文版)*, 36, 53–66.]
- Luo XZ, Guo XJ, Zhang XL, Wu GF, Han YM, Li H (2008a) Estimation of tolerance values for benthic macroinvertebrates in Dagujia River. *Acta Ecologica Sinica*, 28, 5706–5713. (in Chinese with English abstract) [罗新正, 郭

- 献军, 张晓龙, 吴广芬, 韩玉梅, 李环 (2008a) 大沽夹河底栖大型无脊椎动物耐受值估算. 生态学报, 28, 5706–5713.]
- Luo XZ, Zhang XL, Guo XJ, Li H, Han YM, Wu GF (2008b) Ecological health bioassessment based on benthic macroinvertebrate in Dagujia River. *Research of Environmental Science*, 21, 88–93. (in Chinese with English abstract) [罗新正, 张晓龙, 郭献军, 李环, 韩玉梅, 吴广芬 (2008b) 大沽夹河生态健康的生物学评价. 环境科学研究, 21, 88–93.]
- Mao JX, Yan QL, Wang LJ (2011) Changes trend of species number, biomass and density of zoobenthos in typical estuaries of China. *Marine Environment Science*, 30, 37–40. (in Chinese with English abstract) [毛婕昕, 闫启仑, 王立俊 (2011) 典型河口底栖动物种类数、生物量及种群密度变化趋势的研究. 海洋环境科学, 30, 37–40.]
- Margalef R (1968) *Perspectives in Ecological Theory*. University of Chicago Press, Chicago.
- Peng SY (2013) Characteristics of Macrobenthic Community Structure in the Yellow Sea and East China Sea. PhD dissertation, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao. (in Chinese with English abstract) [彭松耀 (2013) 黄东海大型底栖动物群落结构特征. 博士学位论文, 中国科学院海洋研究所, 青岛.]
- Pielou EC (1975) *Ecology Diversity*. Wiley-Inters, New York.
- Shannon CE, Weaver W (1949) *The Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois Press, Urbana.
- Smith CR, Austen MC, Boucher G, Heip C, Hutchings PA, King GM, Koike I, Lambshead PJD, Snelgrove P (2000) Global change and biodiversity of marine sediments: impacts and linkages across the sediment–water interface. *BioScience*, 50, 1108–1120.
- Tian SY, Yu ZS, Liu XS, Zhang ZN, Lin KX, Liu TZ (2006) Abundance/biomass curves for detecting pollution effects on marine macrobenthic communities. *Marine Science Bulletin*, 25, 92–96. (in Chinese with English abstract) [田胜艳, 于子山, 刘晓收, 张志南, 林焜璇, 刘廷志 (2006) 丰度/生物量比较曲线法监测大型底栖动物群落受污染扰动的研究. 海洋通报, 25, 92–96.]
- Wang QC, Li BQ (2013) Community structure of macrobenthos in coastal water of Yantai, East China. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 44, 1667–1680. (in Chinese with English abstract) [王全超, 李宝泉 (2013) 烟台近海大型底栖动物群落特征. 海洋与湖沼, 44, 1667–1680.]
- Wang XE, Xu ZF, Zhou XJ (1995) Benthic animal survey in Yantai Inshore. *Chinese Journal of Ecology*, 14, 6–10. (in Chinese with English abstract) [王绪峨, 徐宗法, 周学家 (1995) 烟台近海底栖动物调查报告. 生态学杂志, 14, 6–10.]
- Wu YQ, Zhang B (1994) Ecological environment characteristics of macrobenthos in Yantai Zhifu Bay waters. *Marine Environmental Science*, 13, 1–6. (in Chinese with English abstract) [吴耀泉, 张波 (1994) 烟台芝罘湾水域底栖动物生态环境特征. 海洋环境科学, 13, 1–6.]
- Zhou H, Zhang ZN (2003) Rationale of the multivariate statistical software PRIMER and its application in benthic community ecology. *Journal of Ocean University of Qingdao (Natural Science)*, 33, 58–64. (in Chinese with English abstract) [周红, 张志南 (2003) 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), 33, 58–64.]

(责任编辑: 李新正 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 山东烟台大沽夹河河口及邻近海域大型底栖动物名录

Appendix 1 Species list of macrobenthos in the estuary of Dagujia River and its adjacent water areas in Yantai, Shandong
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2015217-1.pdf>

附录2 山东烟台大沽夹河河口及邻近海域大型底栖动物的MDS分析

Appendix 2 MDS analysis of macrobenthos in the estuary of Dagujia River and its adjacent water areas in Yantai, Shandong
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2015217-2.pdf>

附录3 调查站位环境因子负荷矩阵

Appendix 3 Principal component loading matrix of environmental factors in the sampling stations
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2015217-3.pdf>

李晓静, 周政权, 陈琳琳, 李宝泉. 山东烟台大沽夹河河口及邻近海域大型底栖动物群落特征. 生物多样性, 2016, **24** (2), 157-165.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2015217>

附录 1 山东烟台大沽夹河河口及邻近海域大型底栖动物名录

Appendix 1 Species list of macrobenthos in the estuary of Dagujia River and its adjacent water areas in Yantai, Shandong

物种 Species	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12
甲壳类 Crustacea												
塞切尔泥钩虾 <i>Eriopisella sechellensis</i> (Chevreux, 1901)							+		+	+		
日本游泳水虱 <i>Natatolana japonensis</i> (Richardson, 1904)								+				
长尾虫一种 <i>Aspeudes</i> sp.									+			
弯指铲钩虾 <i>Listriella curvidactyla</i> (Nagata, 1965)									+			
中华近方蟹 <i>Hemigrapsus sinensis</i> Rathbun, 1929												+
轮双眼钩虾 <i>Ampelisca cyclops</i> Walker, 1904	+				+	+	+	+				
日本大螯蜚 <i>Grandidierella japonica</i> Stephensen, 1938	+				+	+				+	+	+
麦秆虫属一种 <i>Caprella</i> sp.						+						+
长尾亮钩虾 <i>Photis longicaudata</i> (Bate et Westwood, 1862)					+	+						
日本拟钩虾 <i>Gammaropsis japonicus</i> (Nagata, 1961)					+	+						
中尖头钩虾属一 种 <i>Metaphoxus</i> sp.							+					
三叶针尾涟虫 <i>Diastylis tricineta</i> (Zimmer, 1903)	+						+	+	+			
滩拟猛钩虾 <i>Harpiniopsis vadicularis</i> Hirayama, 1987							+					
突头杯尾水虱 <i>Anthura gracilis</i> (Montagu, 1808)					+				+	+	+	+
眼仿尖头钩虾 <i>Paraphoxus oculatus</i> (Sars, 1879)	+											
极地蚤钩虾 <i>Pontocrates altamarinus</i> (Bata et Westwood, 1862)	+											
细长涟虫 <i>Iphinoe tenera</i> Lomakina, 1960										+		

李晓静, 周政权, 陈琳琳, 李宝泉. 山东烟台大沽夹河河口及邻近海域大型底栖动物群落特征. 生物多样性, 2016, 24 (2), 157-165.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2015217>

	物种 Species	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12
口虾蛄	<i>Oratosquilla oratoria</i> (de Haan, 1849)									+			
长指马尔他钩虾	<i>Melita longidactyla</i> Hirayama, 1987									+			
小头弹钩虾	<i>Orchomene breviceps</i> Hirayama, 1986										+		
棘皮动物													
Echinodermata													
小双鳞蛇尾	<i>Amphipholis squamata</i> (Delle Chiaje, 1828)		+	+		+	+	+	+	+	+		
金氏真蛇尾	<i>Ophiura kinbergi</i> (Ljungman, 1866)								+				
软体动物													
Mollusca													
壳蛞蝓一种	<i>Philine</i> sp.							+		+			
彩虹明樱蛤	<i>Moerella iridescens</i> (Benson, 1842)		+	+				+	+	+	+		+
豆形胡桃蛤	<i>Nucula (Leionucula) faba</i> Xu, 1999										+		
内肋蛤	<i>Endopleura lubrica</i> (Gould, 1861)			+			+	+	+	+	+		+
日本管角贝	<i>Siphonodentalium japonicum</i> Habe, 1960					+	+	+					
日本镜蛤	<i>Dosinia japonica</i> (Reeve, 1850)						+						
异白樱蛤	<i>Macoma incongrua</i> (Martens, 1865)					+							
小亮樱蛤	<i>Nitidotellina minuta</i> (Lischke, 1872)	+						+		+			
双纹须蚶	<i>Barbatia bistrigata</i> (Dunker, 1866)							+					
粗纹吻状蛤	<i>Nuculana yokoyamai</i> Kuroda, 1934												+
贻贝一种	<i>Mytilus</i> sp.			+	+						+		
扁玉螺	<i>Neverita didyma</i> (Roding, 1798)				+								
秀丽织纹螺	<i>Nassarius (Reticunassa) festivus</i> (Powys, 1835)			+				+	+				
腰带螺	<i>Cingulina cingulata</i> (Dunker, 1860)			+				+	+				

李晓静, 周政权, 陈琳琳, 李宝泉. 山东烟台大沽夹河河口及邻近海域大型底栖动物群落特征. 生物多样性, 2016, **24** (2), 157-165.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2015217>

	物种 Species	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12
圆筒原盒螺	<i>Eocylichna cylindrella</i> (A. Adams, 1862)		+										
东方缝栖蛤	<i>Hiatella orientalis</i> (Yokoyama, 1920)						+		+				
微小海螂	<i>Leptomya minuta</i> Habe, 1960								+				
薄荚蛭	<i>Siliqua pulchella</i> (Dunker, 1858)								+				
短竹蛭	<i>Solen dunkerianus</i> Clessin, 1888											+	
多毛类													
Polychaeta													
梳鳃虫	<i>Terebellides stroemii</i> Sars, 1835											+	
西方似蛭虫	<i>Amaeana occidentalis</i> (Hartman, 1944)			+							+		
双唇索沙蚕	<i>Lumbrineris cruzensis</i> Hartman, 1944			+		+	+	+	+	+	+	+	+
渤海格鳞虫	<i>Gattyana pohaiensis</i> Uschakov et Wu, 1959										+		
含糊拟刺虫	<i>Linopherus ambigua</i> (Monro, 1933)			+									
不倒翁虫	<i>Sternaspis sculata</i> (Renier, 1807)	+		+		+	+	+	+	+	+		
孟加拉海扇虫	<i>Pherusa cf. bengalensis</i> (Fauvel, 1932)										+	+	
中锐吻沙蚕	<i>Glycera rouxi</i> Audouin et Milne Edwards, 1833	+							+				
拟特须虫	<i>Paralacydonia paradoxa</i> Fauvel, 1913										+	+	
丝异蚓虫	<i>Heteromastus filiformis</i> (Claparède, 1864)	+		+	+	+	+	+	+	+	+		+
多腮齿吻沙蚕	<i>Nephtys polybranchia</i> Southern, 1921			+	+		+	+	+	+	+		+
寡节甘吻沙蚕	<i>Glycinde gurjanovae</i> Uschakov et Wu, 1962					+		+		+	+		

李晓静, 周政权, 陈琳琳, 李宝泉. 山东烟台大沽夹河河口及邻近海域大型底栖动物群落特征. 生物多样性, 2016, **24** (2), 157–165.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2015217>

	物种 Species	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12
副栉虫	<i>Paramphicteis angustifolia</i> (Grube, 1878)									+			
狭细蛇潜虫	<i>Ophiodromus angustifrons</i> (Grube, 1878)			+				+		+		+	
蛇杂毛虫	<i>Poecilochaetus serpens</i> Allen, 1904									+		+	
深沟毛虫	<i>Sigambra bassi</i> (Hartman, 1947)	+				+	+		+	+		+	
矮小稚齿虫	<i>Prionospio (Apoprionospio) pygmaea</i> (Hartman, 1961)					+							
刚鳃虫	<i>Chaetozone setosa</i> Malmgren, 1867	+		+	+		+	+	+	+	+	+	+
强鳞虫	<i>Sthenolepis japonica</i> (McIntosh, 1885)								+				
锥唇吻沙蚕	<i>Glycera onomichiensis</i> Izuka, 1912			+					+			+	
乳突半突虫	<i>Anaitides papillosa</i> Uschakov et Wu, 1959							+	+				
独指虫	<i>Aricidea fragilis</i> Webster, 1879	+				+	+	+	+	+			
尖叶长手沙蚕	<i>Magelona cincta</i> Ehlers, 1908			+						+		+	
昆士兰稚齿虫	<i>Prionospio (Prionospio) queenslandica</i> Blake et Kudenov, 1978	+			+		+	+					
角海蛹	<i>Ophelina acuminata</i> Örsted, 1843						+					+	
膜质伪才女虫	<i>Pseudopolydora kemp</i> (Southern, 1912)	+					+					+	
欧文虫	<i>Owenia fusiformis delle Chiaje</i> , 1844						+	+	+	+			
加州齿吻沙蚕	<i>Nephtys californiensis</i> Hartman, 1938						+						
仙居虫	<i>Naineris laevigata</i> (Grube, 1855)						+						

李晓静, 周政权, 陈琳琳, 李宝泉. 山东烟台大沽夹河河口及邻近海域大型底栖动物群落特征. 生物多样性, 2016, **24** (2), 157–165.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2015217>

	物种 Species	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12
囊叶齿吻沙蚕	<i>Nephtys caeca</i> (Fabricius, 1780)	+											
钩小蛇稚虫	<i>Boccardiella hamata</i> (Webster, 1879)	+											
埃刺梳鳞虫	<i>Ehlersileanira incisa</i> (Grube, 1877)							+		+	+		
扁鳃扇栉虫	<i>Amphicteis</i> <i>scophrobranchiata</i> Moore, 1906								+	+			
须鳃虫	<i>Cirriformia</i> <i>tentaculata</i> (Montagu, 1808)			+	+				+				
长锥虫	<i>Haploscoloplos</i> <i>elongatus</i> (Johnson, 1901)			+	+								
结节刺纓虫	<i>Potamilla torelli</i> Malmgren, 1866								+				
长鳃树蛭虫	<i>Pista brevibranchia</i> Caullery, 1915								+				
锥稚虫	<i>Aonides oxycephala</i> (Sars, 1862)					+							
叉毛锥头虫	<i>Orbinia dicrochaeta</i> Wu, 1962	+											
双叶巢沙蚕	<i>Diopatra bilobata</i> Imajima, 1967							+					
其他动物 Others													
海蜘蛛	Pantopoda						+						
纽虫	Nemertinea		+	+	+						+		+

“+”此物种分布于该站位 “+” The species were recorded in this station

李晓静, 周政权, 陈琳琳, 李宝泉. 山东烟台大沽夹河河口及邻近海域大型底栖动物群落特征. 生物多样性, 2016, 24 (2), 157-165.

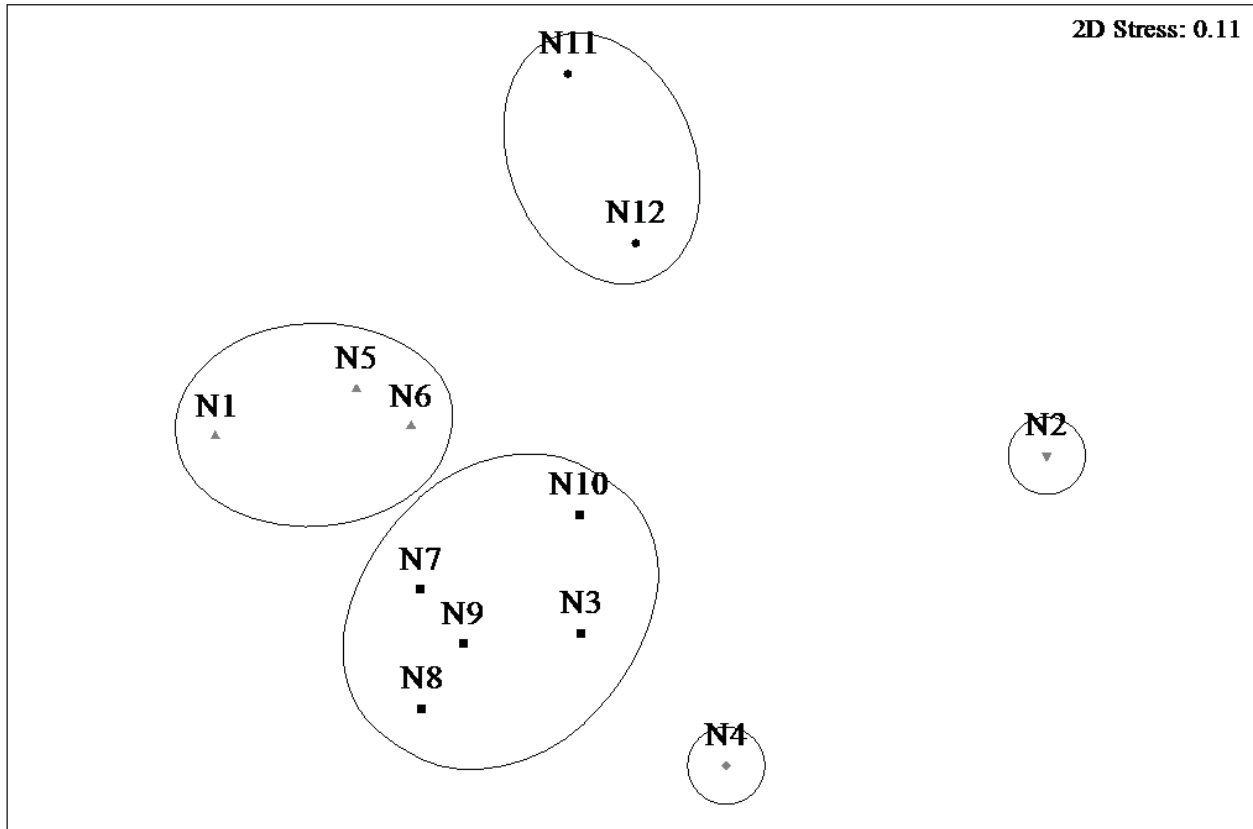
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2015217>

附录 2 山东烟台大沽夹河河口及邻近海域大型底栖动物的 MDS 分析

Appendix 2 MDS analysis of macrobenthos in the estuary of Dagujia River and its adjacent water areas in Yantai, Shandong

转化 Transform : 平方根 Square root

相似性 Resemblance: S17 Bray Curtis 相似性 S17 Bray Curtis similarity



李晓静, 周政权, 陈琳琳, 李宝泉. 山东烟台大沽夹河河口及邻近海域大型底栖动物群落特征. 生物多样性, 2016, 24 (2), 157-165.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2015217>

附录 3 调查站位环境因子负荷矩阵

Appendix 3 Principal component loading matrix of environmental factors in the sampling stations

	第一主成分 PC1	第二主成分 PC2	第三主成分 PC3
水深 Water depth	-0.395	0.262	-0.048
水温 Water temperature	-0.304	0.236	-0.264
盐度 Salinity	-0.273	-0.103	-0.272
溶解氧 Dissolved oxygen (DO)	0.209	-0.159	-0.362
pH	-0.404	0.051	-0.118
磷酸-磷 Phosphoric acid-phosphorus (PO_4^{3-} -P)	-0.237	0.062	-0.639
总磷 Total phosphorus (TP)	0.088	-0.348	-0.141
铵盐-氮 Ammonium salt -nitrogen (NH_4^+ -N)	-0.368	-0.024	0.428
亚硝酸-氮 Nitrous acid - nitrogen (NO_2^- -N)	-0.443	-0.149	0.231
硝酸-氮 Nitric acid - nitrogen (NO_3^- -N)	-0.082	-0.525	0.150
总氮 Total nitrogen (TN)	-0.254	-0.409	0.147
硅酸-硅 Silicic acid - silicon (SiO_3 -Si)	-0.049	-0.497	-0.025