

莱州湾多毛类底栖动物生态特征及其对环境变化的响应^{*}

张莹^{1,2,*} 刘元进³ 张英⁴ 徐炳庆¹ 吕振波^{1,2}

(¹山东省海洋水产研究所, 山东烟台 264006; ²山东省海洋生态修复重点实验室, 山东烟台 264006; ³上海海洋大学海洋科学学院, 上海 200000; ⁴山东省可持续发展研究中心, 山东师范大学, 济南 250014)

摘要 研究了2010年莱州湾15个站位的多毛类底栖动物群落生态特征及其对主要海水化学、沉积物环境变化的响应,并与1998年的相关研究进行了对比,以期对莱州湾生态质量现状进行健康评价。结果表明:与1998年相比,2010年底栖动物种类组成和生物多样性发生了较大的变化,底栖动物中绝对优势种为小头虫(*Capitella capitata*)。夏季,*H'*与硝酸盐、石油类、重金属铅、铜、锌、铬呈负相关,说明多毛类动物多样性随着富营养化程度的提高而相应降低,营养物质氮的大量输入,重金属的污染,对莱州湾多毛类动物群落产生了一定负面影响。ABC曲线和BOPA指数结果显示,底栖动物的丰度优势度曲线高于生物量曲线,表明莱州湾底栖动物群落处于重度扰动状态,并且以小头虫为主的多毛类动物显著增加预示了莱州湾已经受到了一定程度的污染。加强海水养殖管理,合理利用海洋生物资源,对底栖动物群落的稳定性和环境的可持续利用具有重要意义。

关键词 莱州湾; 小头虫; 多毛类动物群落; 生态质量

中图分类号 Q958.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2012)4-0888-08

Ecological characteristics of benthic polychaete community and its responses to environmental change in Laizhou Bay, Shandong Province of East China. ZHANG Ying^{1,2,*}, LIU Yuan-jin³, ZHANG Ying⁴, XU Bing-qing¹, LÜ Zhen-bo^{1,2} (¹Shandong Marine Fisheries Research Institute, Yantai 264006, Shandong, China; ²Shandong Key Laboratory of Marine Ecological Restoration, Yantai 264006, Shandong, China; ³College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 200000, China; ⁴Research Center for Sustainable Development of Shandong Province, Shandong Normal University, Ji'nan 250014, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31**(4): 888–895.

Abstract: This paper studied the ecological characteristics of benthic polychaete community and its responses to the sea water and sediment environmental variables at 15 sampling stations in Laizhou Bay in 2010, with the results obtained compared with those in 1998, aimed to give a health assessment on the present ecological quality status of the Bay. As compared with those in 1998, the polychaete species composition and biodiversity in 2010 had a greater change, and the dominant species was *Capitella capitata*. In summer, the Shannon index of the polychaete had significant negative correlations with the sea water and sediment nitrite, oil, Pb, Cu, Zn and Cr concentrations, suggesting that the diversity of polychaete community decreased with the increasing eutrophication in Laizhou Bay. The large input of nutrient nitrogen and the heavy metals pollution had definite negative effects on the polychaete community. The ABC curve and the BOPA index showed that the abundance curve was above the biomass curve, suggesting that the present macrobenthic community was heavily disturbed, while the significant increase of mainly *C. capitata* foreshowed the Bay having been polluted to some extent. To strengthen aquaculture management and to rationally use marine biological resources would have great significance for the stability of benthic fauna and the sustainable use of the sea environment.

Key words: Laizhou Bay; *Capitella capitata*; polychaete community; ecological quality.

* 国家海洋局公益性行业专项(20090519 和 2012418023) 和水生动物营养与饲料‘泰山学者’岗位经费资助。

* * 通讯作者 E-mail: zhangying99g99@yahoo.com.cn

收稿日期: 2011-10-10 接受日期: 2012-01-17

底栖动物是海洋环境中一个重要的生态类群,它在生态系统的物质循环和能量流动中占有十分重要的地位 (Moddley *et al.*, 1998)。底栖动物也是一类活动能力相对较弱的生物类群,直接受到周围环境变化的影响 (田胜艳等, 2009)。多毛类环节动物在大型底栖动物群落功能中发挥重要作用 (Hutchings, 1998), 不仅是因为它们在大型底栖动物群落中数量巨大, 而且也因为它们取食方式的多样性 (Giangrande *et al.*, 2005), 因此多毛类动物一直被认为是底栖动物物种丰富度和群落特征的最好指示生物 (Fresi *et al.*, 1983), 最近更有学者提出多毛类动物是海洋生物多样性的指示生物 (Olsgard *et al.*, 2003)。由于这类物种从原始栖息地到严重扰动环境的逐渐变化过程中, 既存在敏感物种又存在耐受物种 (Pocklington & Wells, 1992), 因此是环境扰动的最好指示生物之一。

莱州湾是渤海三大海湾之一, 西起黄河口, 东至龙口市砬姆岛, 沿岸有黄河、小清河等 10 余条河流入海, 是一个半封闭的海湾 (李广楼等, 2007)。莱州湾是黄、渤海多种经济鱼虾类的主要产卵场和索饵场, 在渔业经济中占有重要地位 (邓景耀和金显仕, 2000)。近些年来, 随着入海河流带入莱州湾的污染物不断增加, 莱州湾海水富营养化问题日趋严重, 给莱州湾的环境和生物群落造成严重的危害 (郝彦菊等, 2005)。因此, 适时掌握莱州湾的生态环境质量状况与变化, 对产业发展, 环境污染控制和海洋生态环境保护等具有重要意义。本文以 1998 年莱州湾底栖动物群落生态特征为对照, 与 2010 年各指标进行比较研究, 探讨莱州湾现阶段大型底栖动物群落生态特征现状, 并利用多毛类动物生态特征作为指示生物来探讨影响群落动态变化的关键环境因素, 评价和监测莱州湾环境质量, 评估生态系统健康状况, 为莱州湾生态系统修复提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究海域

2010 年 5、8 和 10 月, 在莱州湾内进行了调查, 调查范围为 119°05'E—120°00'E, 37°12'N—37°40'N, 采取均匀布位的原则, 共设置 15 个站位 (图 1)。“1998 年莱州湾大型底栖动物种类组成、生物量所占比例、Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数和 Shannon 多样性指数”数据均引自《黄渤海近岸水域生态环境与生物群落》(程济生等, 2004)。

1.2 采样方法

海水水质监测样品的采集贮存运输和预处理按《海洋调查规范》(GB/T 12763. 4—2007) 的有关规定执行。分选泥样样品的处理、保存、计算和称重均按《海洋调查规范》(GB/T 12763. 6—2007) 进行。

1.3 海水化学分析

pH 值、溶解氧、化学耗氧量、亚硝酸盐、硝酸盐、铵盐和活性硅酸盐分别采用 pH 计法、碘量滴定法、重铬酸钾法、重氮-偶氮法、次溴酸钠氧化法和抗坏血酸还原磷钼蓝法, 所有样品分析均按照《海洋调查规范》(GB/T 12763. 4—2007) 进行。

1.4 沉积物分析

石油类采用荧光分光光度法, 有机碳采用重铬酸钾氧化-还原容量法, 重金属铅、镉、铜、锌、铬采用原子吸收分光光度法, 砷和汞采用原子荧光法, 所有样品分析均按照《海洋监测规范》(GB 17378. 5—2007) 进行。

1.5 数据处理

1.5.1 Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数和 Shannon 多样性指数 采用 Margalef 丰富度指数 (D)、Pielou 均匀度指数 (J') 和 Shannon 多样性指数 (H') 来研究调查站位出现种类的多样性 (李冠国, 1981; 孙军和刘东艳, 2004)。

Margalef 种类丰富度指数: $D = (S - 1) / \ln N$

Pielou 均匀度指数: $J' = H' / \ln S$

Shannon 多样性指数: $H' = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$

式中, S 为种类数, N 为总尾数, P_i 为第 i 种底栖动物占总底栖动物重量的比例。采用 PRIMER 5. 2 软件进行上述指数计算。

1.5.2 生态优势度 利用 Pinkas 相对重要性指数 (index of relative importance, 简称 IRI) 确定种类在

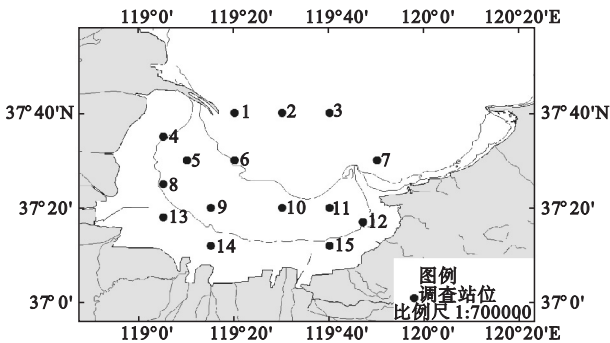


图 1 采样站点示意图
Fig. 1 Sampling stations

群落中的重要性(Pinkas *et al.* ,1971)。将 *IRI* 值大于 500 的种类定义为优势种。

1.5.3 群落结构 采用非参数多变量分析群落结构,数据分析时,按各季节多毛类总密度排序,构成了“站位×种类密度”矩阵。对各站位多毛类动物密度进行 4 次方根转换,然后采用等级聚类(未加权的组平均方法,即 UPGMA)的分类方法和非度量多维标度(non-metric multidimensional scaling,简称 NMDS)的排序方法分析调查站位的底栖动物结构特征(Field *et al.* ,1982;Clarke & Warwick,2001)。

1.5.4 群落生态特征与水环境相关性 用 SPSS 11.5 软件对底栖动物的 Margalef 丰富度指数(*D*)、Pielou 均匀度指数(*J'*)和 Shannon 多样性指数(*H'*)分别和春、夏、秋 3 个季节的主要海水化学和沉积物环境因素进行相关性分析,显著水平设置为 0.05。

1.5.5 ABC 曲线 丰度/生物量比较曲线(abundance biomass comparison curve,简称 ABC 曲线)方法是在同一坐标系中比较生物量优势度曲线和丰度优势度曲线,通过两条曲线的分布情况分析群落不同干扰状况,若生物量优势度曲线在丰度优势度曲线之上,表明群落处在未受干扰状态;两条曲线相交,表明群落处在中等干扰的状态;丰度优势度曲线在生物量曲线之上,表明群落处在严重干扰状态(Warwick,1986;Clarke & Warwick,2001;Yemane *et al.* ,2005;李圣法,2008)。用 *W* 统计量作为 ABC 曲线法的一个统计量,其公式为:

$$W = \sum_{i=1}^S \frac{(B_i - A_i)}{50(S - 1)}$$

式中,*B_i* 和 *A_i* 为 ABC 曲线中种类序号对应的生物

量和数量的累积百分比,*S* 为出现物种数。当生物量优势度曲线在数量优势度之上时,*W* 为正,反之,为负。ABC 曲线绘制和 *W* 统计的计算均使用 PRIMER 5.2 软件(Clarke & Warwick,2001)。

1.5.6 BOPA 指数 采用底栖生物多毛类机会种和端足目动物指数(benthic opportunistic polychaetes amphipods index,BOPA index)来研究调查站位的污染情况(Dauvin & Ruellet,2007;Joydas *et al.* ,2011,其公式为:

$$BOPA\ index = \log\left(\frac{fP}{fA+1}+1\right)$$

式中,*fP* 为多毛类机会种的个体总数与样本个体总数的比值,*fA* 为端足目动物的个体总数与样本个体总数的比值。低的 BOPA 指数表明环境良好,而随着指数值的增加表明环境逐渐退化。根据 BOPA 指数值的范围将生态质量状况分为 5 个等级,优良,无污染(0.0 ~ 0.05);良好,有轻度污染(0.05 ~ 0.14);一般,有中度污染(0.14 ~ 0.19);较差,有重度污染(0.19 ~ 0.27);恶劣,有较严重的污染或无生命位点(0.27 ~ 0.30)。

2 结果与分析

2.1 各海湾大型底栖动物种类组成

2010 年莱州湾大型底栖动物种类组成及生物量所占比例与 1998 年莱州湾调查数据有较大差别(表 1)。2010 年莱州湾大型底栖动物种类组成及生物量所占比例显示,春季,甲壳动物生物量最高,占总生物量的比例为 58.55%,其次为软体动物和多毛类,棘皮动物生物量最低,占总生物量的比例为

表 1 1998 年和 2010 年莱州湾大型底栖动物种类组成及生物量所占比例
Table 1 Species constitutions and the biomass proportion of benthos in Laizhou Bay in 1998 and 2010

| 年份 | 种类 | 春季 | | 夏季 | | 秋季 | |
|------|------|-----------------------------|-----------|-----------------------------|-----------|-----------------------------|-----------|
| | | 生物量 (g·m ⁻²) | 比例 (%) | 生物量 (g·m ⁻²) | 比例 (%) | 生物量 (g·m ⁻²) | 比例 (%) |
| 1998 | 软体动物 | 10 | 29.15 | 9 | 39.13 | 99 | 89.76 |
| | 多毛类 | 7 | 20.41 | 0.4 | 1.74 | 5 | 4.53 |
| | 甲壳动物 | 2 | 5.83 | 4 | 17.39 | 3 | 2.72 |
| | 棘皮动物 | 11 | 32.07 | 8 | 34.78 | 2 | 1.81 |
| | 其他 | 4.3 | 12.54 | 1.6 | 6.96 | 1.3 | 1.18 |
| | 总计 | 34.3 | 100 | 23.0 | 100 | 110.3 | 100 |
| 2010 | 软体动物 | 2.17 | 22.77 | 13.87 | 77.18 | 0.98 | 37.55 |
| | 多毛类 | 1.44 | 15.11 | 1.10 | 6.12 | 0.52 | 19.92 |
| | 甲壳动物 | 5.58 | 58.55 | 0.84 | 4.67 | 0.97 | 37.16 |
| | 棘皮动物 | 0.18 | 1.89 | 2.07 | 11.52 | 0.001 | 0.04 |
| | 其他 | 0.16 | 1.68 | 0.09 | 0.5 | 0.14 | 5.36 |
| | 总计 | 9.53 | 100 | 17.97 | 100 | 2.61 | 100 |

1.89%。夏季,软体动物生物量占有绝对优势,占总生物量的 77.18%。秋季,软体动物和甲壳动物生物量基本相当,分别占总生物量的 37.55% 和 37.16%,棘皮动物最少,仅占 0.04%。

2.2 底栖动物的 Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数和 Shannon 多样性指数

对 1998 年与 2010 年莱州湾春、夏、秋 3 个季节底栖动物的 Margalef 丰富度指数(D)、Pielou 均匀度指数(J')和 Shannon 多样性指数(H')进行比较分析(表 2)。从表 2 可以看出,2010 年莱州湾春、夏、秋季底栖动物的丰富度指数分别为 3.157、4.003、3.701,分别高于 1998 年底栖动物的丰富度指数。2010 年莱州湾底栖动物的均匀度指数平均值为 0.543,显著低于 1998 年莱州湾的均匀度指数 0.820($P<0.05$)。2010 年莱州湾春、夏、秋季底栖动物的多样性指数分别为 1.257、1.619、1.811,分别低于 1998 年春、夏、秋季底栖动物的多样性指数。

2.3 优势种

利用 Pinkas 相对重要性指数(IRI)确定种类在群落中的重要性,结果表明,莱州湾大型底栖动物种类组成中,春、夏 2 季的绝对优势种都为紫壳阿文蛤, IRI 值分别为 1317.34 和 4362.52,小头虫也为两季共有优势种,另外,春季优势种还有奇异稚齿虫和伍氏螯蛄虾。秋季优势种为小头虫和耳口露齿螺, IRI 值分别为 938.13 和 1402.01(表 3)。

利用优势度 IRI 确定莱州湾多毛类优势种的组成特征,结果见表 4。莱州湾春、夏、秋 3 季的绝对优势种都为小头虫, IRI 值分别为 2075.75、4740.50 和 3387.90。春季的优势种还有不倒翁虫,奇异稚齿虫和长吻沙蚕,夏季还有不倒翁虫,寡节甘吻沙蚕和乳突半突虫,秋季还有不倒翁虫,寡节甘吻沙蚕,长锥虫和加州齿吻沙蚕(表 4)。

表 2 1998 年和 2010 年莱州湾底栖生物的 Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数和 Shannon 多样性指数
Table 2 Margalef index, Pielou index and Shannon index of benthos in Laizhou Bay in 1998 and 2010

| 季节 | 年份 | 丰富度指数 (D) | 均匀度指数 (J') | 生物多样性 指数(H') |
|----|------|------------------|-------------------|---------------------|
| 春季 | 1998 | 2.277 | 0.754 | 1.349 |
| | 2010 | 3.157 | 0.467 | 1.257 |
| 夏季 | 1998 | 2.642 | 0.813 | 1.755 |
| | 2010 | 4.003 | 0.541 | 1.619 |
| 秋季 | 1998 | 3.125 | 0.894 | 1.986 |
| | 2010 | 3.701 | 0.621 | 1.811 |

表 3 2010 年莱州湾优势种组成特征
Table 3 Importance components of dominant species in Laizhou Bay in 2010

| 种类 | IRI | | |
|-------------------------------------|---------|---------|---------|
| | 春季 | 夏季 | 秋季 |
| 紫壳阿文蛤 <i>Alwenius ojanus</i> | 1317.34 | 4362.52 | |
| 小头虫 <i>Capitella capitata</i> | 794.99 | 678.56 | 938.13 |
| 奇异稚齿虫 <i>Paraprionospio pinnata</i> | 665.92 | | |
| 伍氏螯蛄虾 <i>Upogebia wuhsienweni</i> | 615.43 | | |
| 耳口露齿螺 <i>Ringicula doliaris</i> | | | 1402.01 |

表 4 2010 年莱州湾多毛类优势种组成特征
Table 4 Importance components of opportunistic polychaete species in Laizhou Bay in 2010

| 种类 | IRI | | |
|--------------------------------------|---------|---------|---------|
| | 春季 | 夏季 | 秋季 |
| 小头虫 <i>Capitella capitata</i> | 2075.75 | 4740.50 | 3387.90 |
| 不倒翁虫 <i>Sternaspis sculata</i> | 1781.52 | 1726.73 | 1721.45 |
| 奇异稚齿虫 <i>Paraprionospio pinnata</i> | 1613.50 | | |
| 长吻沙蚕 <i>Glycera chirori</i> | 532.98 | | |
| 寡节甘吻沙蚕 <i>Glycinde gurjanovae</i> | | 800.75 | 953.40 |
| 乳突半突虫 <i>Phyllodoce papillosa</i> | | 504.85 | |
| 长锥虫 <i>Haploscoloplos elongates</i> | | | 892.71 |
| 加州齿吻沙蚕 <i>Nephtys californiensis</i> | | | 808.49 |

2.4 群落划分及其空间分布

采用等级聚类(UPGMA)的分类方法对莱州湾大面 15 个站位进行多毛类群落结构分析,非度量多维标度(NMDS)的排序方法表明,春、夏和秋季胁强系数(Stress)均小于 0.20,可用二维点阵图表示(图 2)。由图 2 可知,春季 15 个站位群体样本可划分为 2 群,第一聚群包括站位 1~14,第二聚群仅包括站位 15。夏季可分为两个聚群,即 1~5、7~15 站位组成第一聚群,而 6 站位组成第二聚群。秋季群体大致可划分为 2 个聚群,由 3~5、7~15 站位组成第一聚群,而第二聚群由 1、2 和 6 站位共同构成。

2.5 环境因素与 Margalef 丰富度指数(D)、Pielou 均匀度指数(J')和 Shannon 多样性指数(H')的相关性

分别对 2010 年莱州湾春、夏、秋 3 个季节的环境因素与表征多毛类多样性的重要参数(D 、 J' 、 H')进行 Pearson 相关分析(表 5),结果表明,春季, H' 与所调查的 20 个环境因素无显著相关性, J' 与 pH 值和盐度呈显著正相关关系,与水温 and 亚硝酸盐呈显著负相关关系,而 D 与采样深度呈极显著正相关性($P<0.01$),与沉积物中的金属 Hg 呈显著负相关性($P<0.05$)。夏季, H' 与硝酸盐、石油类、沉积物中的

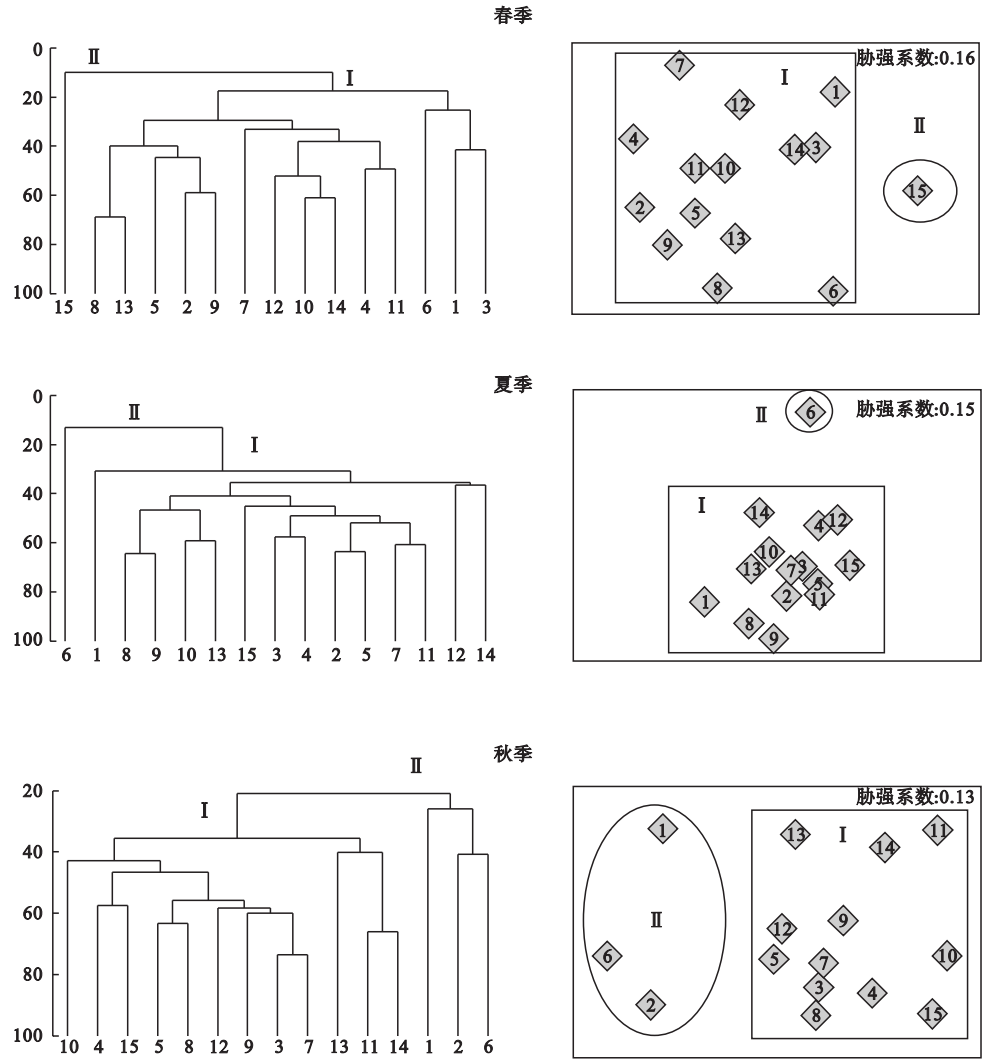


图 2 2010 年莱州湾多毛类调查站位的聚类分析图 (左) 和 NMDS 排序图 (右)
Fig. 2 Group average clustering (left) and NMDS ordination (right) of sampling stations in Laizhou Bay in 2010

重金属 Pb、Cu、Zn、Cr 呈显著的负相关关系, J' 仅与 pH 值呈正相关性 ($P < 0.05$), 相关系数为 0.533, D 与采样深度呈显著正相关性 ($P < 0.05$), 而与底层水温、化学耗氧量、亚硝酸盐、硝酸盐、铵盐和活性磷酸盐呈显著的负向相关关系 ($P < 0.05$)。秋季, H' 与化学耗氧量呈负相关性, 与硝酸盐呈正相关性, 相关系数分别为 -0.530 和 0.561, J' 与 pH 值, 沉积物中有机碳、Pb、Cu、Cr、As 和 Hg 呈显著的正相关性 ($P < 0.05$), D 与化学耗氧量呈极显著的负相关性 ($P < 0.01$), 相关系数为 -0.681。

2.6 ABC 曲线分析

海洋大型底栖动物生活相对稳定, 对海洋环境污染反应敏感, 具有污染效应指示性。Warwick (1986) 提出用丰度/生物量比较曲线 (ABC 曲线) 法来监测环境污染对大型底栖动物群落的扰动, 并对

不同海域、不同生境中的大型底栖动物群落进行了验证, 结果表明, 对于任何物理性、生物性以及污染扰动引起的大型底栖动物群落变化, ABC 曲线均能灵敏地做出反应。根据莱州湾 15 个站点 3 个季节的丰度和生物量数据做 ABC 曲线 (图 3)。由图 3 可知, 莱州湾底栖动物的 ABC 曲线中丰度优势度曲线在生物量曲线之上, 表明群落处在严重干扰状态, 大型底栖群落逐渐由一种或几种个体较小的种类占优势。

2.7 BOPA 指数

利用 BOPA 指数来研究莱州湾春、夏、秋 3 季各调查站位的污染情况, 结果见图 4。春季, 莱州湾调查站位中, 有 6 个站位环境优良, 无污染, 5 个站位环境良好, 有较轻度污染, 2 个站位环境一般 (站位 10 和 11), 有中度污染, 2 个站位环境较差 (站位 12

表 5 2010 年环境因素与表征多毛类多样性重要参数的 Pearson 相关性
Table 5 Pearson correlations of main environmental variables and parameters of polychaete community in 2010

| | 春季 | | | 夏季 | | | 秋季 | | |
|-------|----|-----------|----------|-----------|---------|-----------|----------|---------|-----------|
| | H' | J' | D | H' | J' | D | H' | J' | D |
| 采样深度 | + | + | 0.797 ** | + | + | 0.551 * | + | + | + |
| 水温 | - | -0.746 ** | - | - | - | -0.644 * | - | - | + |
| pH 值 | + | 0.531 * | + | + | 0.533 * | + | - | 0.519 * | - |
| 盐度 | + | 0.587 * | + | + | + | + | - | + | + |
| 溶解氧 | - | - | - | + | + | - | - | + | - |
| 化学耗氧量 | - | - | - | - | - | -0.695 ** | -0.530 * | - | -0.681 ** |
| 亚硝酸盐 | + | -0.526 * | - | - | - | -0.585 * | + | + | - |
| 硝酸盐 | + | + | + | -0.628 * | - | -0.561 * | 0.561 * | + | + |
| 铵盐 | - | - | - | - | - | -0.618 * | + | + | - |
| 活性磷酸盐 | - | - | - | - | - | -0.595 * | + | - | + |
| 活性硅酸盐 | - | - | - | + | - | + | - | - | - |
| 石油类 | + | - | + | -0.540 * | + | - | - | + | - |
| 有机碳 | + | - | + | - | + | - | - | 0.577 * | - |
| Pb | - | + | + | -0.651 * | - | - | - | 0.579 * | - |
| Cd | - | - | + | - | - | - | - | + | + |
| Cu | - | - | - | -0.653 ** | - | - | - | 0.588 * | - |
| Zn | - | + | - | -0.720 ** | - | - | - | + | - |
| Cr | - | - | - | -0.602 * | - | - | - | 0.565 * | - |
| As | - | + | - | - | + | - | - | 0.612 * | - |
| Hg | - | - | -0.530 * | - | - | + | + | 0.616 * | - |

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ 。

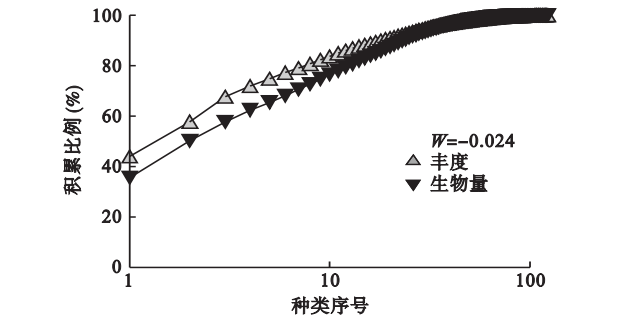


图 3 2010 年莱州湾底栖动物的 ABC 曲线以及 W 统计值
Fig.3 ABC curves and W value of macrobenthic communities in the Laizhou Bay

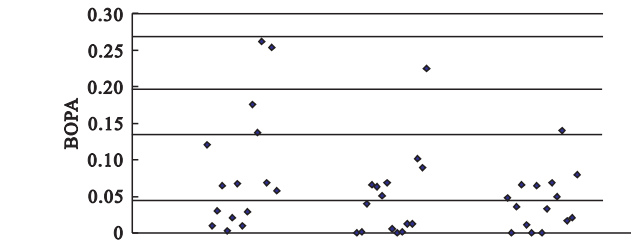


图 4 2010 年春、夏、秋 3 季莱州湾底栖动物各站位的 BOPA 指数
Fig.4 BOPA index calculated for the stations in the Laizhou Bay in 2010

和 14), 有重度污染。夏季, 莱州湾调查站位中, 有 8 个站位环境优良, 无污染, 6 个站位环境良好, 有较轻度污染, 1 个站位环境较差 (站位 15), 有重度污

染。秋季, 莱州湾调查站位中, 有 8 个站位环境优良, 无污染, 6 个站位环境良好, 有轻度污染, 1 个站位环境一般, 有中度污染 (站位 12)。

3 讨论

3.1 底栖动物种类组成的年间变化

2010 年莱州湾大型底栖动物种类组成及生物量所占比例与 1998 年莱州湾调查数据有较大差别 (表 1)。莱州湾大型底栖动物种类组成及生物量所占比例显示, 2010 年与 1998 年相比, 底栖动物种类组成发生了根本性的变化, 变化最为显著的是棘皮动物, 在 1998 年底栖动物种类组成中, 棘皮动物占总生物量的比例非常高, 而 2010 年, 棘皮动物生物量比例降为最低。据何明海等 (1988) 对厦门西港底栖生物生态调查报告显示, 在一定环境污染状况下, 随着污染程度的增加, 多毛类动物数量增加, 棘皮动物数量减少, 甚至绝迹, 是否由于环境污染造成 2010 年底栖动物调查中棘皮动物数量的减少还有待于进一步研究。

莱州湾底栖动物优势种种类年间差异较大, 在 2010 年莱州湾调查过程中, 优势种为紫壳阿文蛤、小头虫、奇异稚齿虫、伍氏骷髅虾和耳口露齿螺, 1998 年优势种为长吻沙蚕、寡鳃齿吻沙蚕、布氏蚶、

薄索足蛤、纹斑梭蛤和滩栖阳遂足等。对1998年和2010年莱州湾春、夏、秋3个季节底栖动物的丰富度指数(D)、均匀度指数(J')和多样性指数(H')进行比较分析,结果显示,2010年莱州湾底栖动物的 D 高于1998年春、夏、秋季底栖动物的 D ,而2010年莱州湾底栖动物的 J' 和 H' 分别低于1998年的调查数据。 H' 是用于表示多种生物所组成的混合生物群落的数量和种类之间关系的一种指数(戴奇等,2010),普遍被用来监测淡水、海水底栖动物群落结构的变化,是一个较好的评价工具(李永祺和丁美丽,1991)。莱州湾位于渤海南部,为半封闭性海湾,湾内水深较浅,水交换能力较差(李广楼等,2007)。近年来,随着莱州湾沿岸工、农业的发展和人口的增长,排海污染物迅速增加,特别是营养盐类和有机物的过量排放引起海水污染和水域富营养化,从而给莱州湾生态环境和生物群落造成严重的危害(郝彦菊等,2005),日益加重的富营养化程度必定引起破坏原有的生物多样性结构,造成生态系统各组分的变化(张敏等,2011),这可能是造成莱州湾底栖动物群落结构改变的原因之一。

3.2 2010年莱州湾多毛类动物群落的生态特征

多毛类环节动物在大型底栖动物群落功能中发挥重要作用(Hutchings, 1998),它们被认为是海洋生物多样性的指示生物(Olsgard *et al.*, 2003),亦被认为是环境扰动的最好指示生物(Pocklington & Wells, 1992)。其中,小头虫常年栖居于有淡水注入的黑色泥沙中,被作为海洋有机物污染区的指示种。小头虫世代更新快,周年能产生幼虫,既以浮游幼虫,又以底栖幼虫进行种群补充,能在短期内大量发展,在扰动的软相海洋沉积物底栖群落演替中起主要作用。利用优势度 IRI 确定莱州湾多毛类优势种的组成特征显示,2010年莱州湾春、夏、秋3季的绝对优势种都为小头虫,以小头虫为代表的多毛类数量占群落数量总数比例的升高是底栖动物群落在受到环境污染或者人为扰动下做出的一种反应,即机会种大量繁殖(张莹等,2012)。因此,小头虫作为优势种预示了莱州湾底栖动物群落受到了环境污染的影响。采用等级聚类(UPGMA)的分类方法对莱州湾15个站位进行多毛类群落结构分析,结果显示,春季15个站位群体样本可划分为2群,第一聚群包括站位1~14,第二聚群仅包括站位15;夏季可分为两个聚群,即1~5、7~15组成第一聚群,而6站位组成第二聚群;秋季群体大致可划分为2个聚

群,由3~5、7~15,而第二聚群由1、2、6站位共同构成。2010年莱州湾15个站位多毛类动物种类分析表明,春季,15站位的种类最少,仅调查发现加州齿吻沙蚕和奇异稚齿虫;夏季,6站位的种类最少,仅有小头虫和头吻沙蚕;秋季,1、2、6站位调查发现的多毛类环节动物种类数分别为4种、6种、3种,低于其它站位平均的9.7种。由此可见,2010年莱州湾15个站位多毛类群落结构与多毛类的种类数目密切相关。

大型底栖动物同时受到水环境和底质环境影响,它们决定了动物区系的组成和性质,使底栖动物的生物多样性呈现差异(刘瑞玉等,1986)。分别对2010年莱州湾春、夏、秋3个季节的环境因素与表征底栖动物多毛类多样性的重要参数进行Pearson相关分析,结果表明,夏季, H' 与硝酸盐、石油类、沉积物中的重金属铅、铜、锌、铬呈显著的负相关关系,多毛类动物多样性随着富营养化程度的提高而相应降低,营养物质氮的大量输入,重金属的污染,对莱州湾多毛类动物群落产生了一定负面影响。夏季是渤海一年中水温最高、降水量和入海径流量最大的季节,这个季节河流对于海湾生态环境及生物群落的影响也是最为明显的,工业废水和生活污水的大量排放造成了水体富营养化,可能对莱州湾多毛类动物群落产生了一定负面影响;有研究表明,重金属对底栖动物具有显著的毒性效应,不同浓度的重金属影响程度不同(杨丽等,2005),浓度较高的重金属含量可以导致水体生物多样性降低,生物群落单一,耐污种大量存活成为优势种(戴奇等,2010)。秋季, H' 与化学耗氧量呈负相关性,秋天因降雨量少,化学耗氧量为一年中最大,此时各排污口只要排污或排水,临近海域的化学耗氧量就会急剧升高,水体中有机污染较重时,多毛类多样性降低。

3.3 多毛类环节动物在环境监测中的应用

Warwick(1986)提出用丰度/生物量比较曲线(ABC曲线)法来监测人为扰动或环境污染对大型底栖动物群落的影响。ABC曲线是对整个底栖动物群落进行统计性分析,从生物量和丰度优势度的差别可以直观反应出群落组成中机会种与竞争型物种间比例是否均衡,2010年莱州湾大型底栖动物的ABC曲线中丰度的优势度积累曲线起点比较高,表明莱州湾内某些机会种的数量增加,预示了环境可能已经被严重污染,底栖群落逐渐由一种或几种个体较小的种类占优势,此时的丰度曲线位于生物量

曲线之上。利用优势度 *IRI* 确定莱州湾底栖动物群落优势种的组成特征时发现,莱州湾春、夏、秋 3 季的绝对优势种都为小头虫,小头虫由于其独特的栖息环境,被作为海洋有机物污染区的指示种。通常只有在污染情况下,特别是水体富营养化,某些种类会大量繁殖,数量迅速增长,指示种一旦大量出现,往往预示环境已经被严重污染。可见,莱州湾底栖动物群落受到了环境污染的影响。利用 BOPA 指数来研究莱州湾春、夏、秋 3 季各调查站位的污染情况,结果显示,春季,莱州湾调查站位中,2 个站位环境一般(站位 10 和 11),有中度污染,2 个站位环境较差(站位 12 和 14),有重度污染。2010 年莱州湾大规模调查发现,站位 10、11、12、14、15 站位附近有大规模的箱体养殖扇贝活动,阻碍了此区域水体交换能力,密集的养殖活动也给海洋生态系统带来了巨大影响。另外,在调查中还发现,夏季 15 站位附近拖网作业的渔船较多,可能对此区域的底质造成了一定的破坏,影响了此区域底栖动物群落结构。因此,加强海水养殖管理,强化生态健康养殖理念,合理利用海洋生物资源,适时掌握莱州湾的生态环境质量状况与变化,对底栖动物群落的稳定性和环境的可持续利用具有重要意义。

参考文献

程济生,邱盛尧,李培军,等. 2004. 黄渤海近岸水域生态环境与生物群落. 青岛:中国海洋大学出版社.

戴奇,李双,周忠良,等. 2010. 上海城区河道底栖动物群落特征与沉积物重金属潜在生态风险. 生态学杂志, **29**(10):1985–1992.

邓景耀,金显仕. 2000. 莱州湾及黄河口水域渔业生物多样性及其保护研究. 动物学研究, **21**(1):76–82.

郝彦菊,王宗灵,朱明远,等. 2005. 莱州湾营养盐与浮游植物多样性调查与评价研究. 海洋科学进展, **23**(2):197–204.

何明海,蔡尔西,吴启泉,等. 1988. 厦门西港底栖生物的生态. 台湾海峡, **7**(2):189–194.

李冠国. 1981. 多样性指数的应用. 海洋科学, (2):4–8.

李广楼,崔毅,陈碧鹃,等. 2007. 秋季莱州湾及附近水域营养现状与评价. 海洋环境科学, **26**(1):45–48.

李圣法. 2008. 以数量生物量比较曲线评价东海鱼类群落的状况. 中国水产科学, **15**(1):136–144.

李永祺,丁美丽. 1991. 海洋污染生物学. 北京:海洋出版社.

刘瑞玉,崔玉珩,徐凤山,等. 1986. 黄海、东海底栖生物的生态特点. 海洋科学集刊, **27**:153–173.

孙军,刘东艳. 2004. 多样性指数在海洋浮游植物研究中的应用. 海洋学报, **26**(1):62–75.

田胜艳,张文亮,张锐. 2009. 大型底栖动物在海洋生态

系统中的作用. 盐业与化工, **38**(2):50–54.

杨丽,蔡立哲,童玉贵,等. 2005. 深圳湾福田潮滩重金属含量及对大型底栖动物的影响. 台湾海峡, **24**(2):157–164.

张敏,蔡庆华,唐涛,等. 2011. 洱海流域湖泊大型底栖动物群落结构及空间分布. 生态学杂志, **30**(8):1696–1702.

张莹,吕振波,徐宗法,等. 2012. 环境污染对小清河口大型底栖动物多样性的影响. 生态学杂志, **31**(2):381–387.

Clarke KR, Warwick RM. 2001. Change in Marine Communities: An Approach to Statistical Analysis and Interpretation (2nd ed). Plymouth: PRIMER-E.

Dauvin JC, Ruellet T. 2007. Polychaete/amphipod ratio revisited. *Marine Pollution Bulletin*, **55**:215–224.

Field JG, Clarke KR, Warwick RM. 1982. A practical strategy for analysing multispecies distribution patterns. *Marine Ecology: Progress Series*, **8**:37–52.

Fresi E, Colognola R, Gambi MC, et al. 1983. Ricerche sui popolamenti bentonici di substrato duro del Porto di Ischia. *Infralitorale fotofilo: Policheti. Cahiers de Biologie Marine* **24**:1–19.

Giangrande A, Licciano M, Musco L. 2005. Polychaetes as environmental indicators revisited. *Marine Pollution Bulletin*, **50**:1153–1162.

Hutchings P. 1998. Biodiversity and functioning of polychaetes in benthic sediments. *Biodiversity and Conservation*, **7**:1133–1145.

Joydas TV, Krishnakumar PK, Qurban MA, et al. 2011. Status of macrobenthic community of Manifa–Tanajib Bay System of Saudi Arabia based on a once-off sampling event. *Marine Pollution Bulletin*, **62**:1249–1260.

Olsgard F, Brattegard T, Holthe T. 2003. Polychaetes as surrogates for marine biodiversity: Lower taxonomic resolution and indicator groups. *Biodiversity and Conservation*, **12**:1033–1049.

Pinkas L, Oliphant MS, Iverson ILK. 1971. Food habits of albacore, bluefin tuna, and bonito in California waters. *Fish Bulletin*, **152**:1–105.

Pocklington P, Wells PG. 1992. Polychaetes: Key taxa for marine environmental quality monitoring. *Marine Pollution Bulletin*, **24**:593–598.

Warwick RM. 1986. A new method for detecting pollution effects on marine macrobenthic communities. *Marine Biology*, **92**:557–562.

Yemane D, Field JG, Leslie RW. 2005. Exploring the effects of fishing on fish assemblages using Abundance Biomass Comparison (ABC) curves. *ICES Journal of Marine Science*, **62**:374–379.

作者简介 张莹,女,1983年12月生,博士,助理研究员,研究方向为海洋生态修复研究. E-mail: zhangying99g@yahoo.com.cn

责任编辑 李凤芹