

网络优先数字出版时间: 2016-06-17

网络优先数字出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/45.1075.N.20160617.0930.002.html>

蓬莱 19-3 平台溢油事故对渤海大型底栖生物群落结构的长期影响*

Long-term Effects of Penglai 19-3 Oil Spill Event on the Macrobenthic Community Structure in Bohai Sea

周政权^{1,2}, 李晓静^{1,2}, 陈琳琳¹, 刘欣¹, 李宝泉^{1* *}

ZHOU Zhengquan^{1,2}, LI Xiaojing^{1,2}, CHEN Linlin¹, LIU Xin¹, LI Baoquan¹

(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)

(1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai, Shandong, 264003, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China)

摘要:【目的】研究渤海海域底栖生物群落状况, 探明 2011 年发生的蓬莱 19-3 平台溢油事故对该海域底栖生物群落结构的长期影响。【方法】根据 2014 年夏季对渤海海域 32 个站位底栖生物的采样调查资料, 并与历史数据进行比较, 分析渤海海域底栖生物的群落结构、物种组成和底质状况。【结果】渤海海域 32 个站位共鉴定出大型底栖生物 191 种, 其中多毛类环节动物 83 种, 甲壳动物 40 种, 软体动物 42 种, 棘皮动物 15 种, 其它类群动物 11 种。优势种为凸壳肌蛤 (*Musculus senhousi*)。调查海域大型底栖生物平均丰度为 676.88 ind/m², 变化范围为 15~11 555 ind/m², 低于溢油前水平; 平均生物量为 30.77 g/m², 变化范围为 0.09~141.55 g/m², 高于溢油前水平。生物量的主要贡献者为棘皮动物, 丰度的主要贡献者为软体动物, 底栖生物群落结构的小型化有减缓趋势。Shannon-Wiener 物种多样性指数、Margalef 物种丰富度指数和 Pielou 物种均匀度指数平均值分别为 3.11±1.20, 2.89±1.40 和 0.82±0.22。ABC 曲线显示渤海海域正处于中度扰动状态, 溢油区各站位 ABC 曲线均显示底质状况较好, 但个别站位生物量起点较低且曲线整体偏左, 说明有向中度干扰发展的趋势。【结论】溢油事故 3 年后, 受溢油影响的底栖生物群落已得到不同程度的恢复。

关键词: 蓬莱 19-3 平台溢油 大型底栖生物 生物多样性 物种组成 群落结构 ABC 曲线

中图分类号: P714+.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-7378(2016)02-0092-09

Abstract:【Objective】In order to understand the long term impact of Penglai 19-3 oil spill event on benthic ecosystem since 2011, this research was arranged to study the present quality of benthic ecosystem in Bohai Sea.【Methods】The macrobenthic community was quantitatively researched based on data carried out at 32 sampling stations from August to September in 2014, Bohai Sea.【Results】191 macrobenthic species in total were obtained in 32 sites in Bohai Sea, most of the them belong to Polychaeta(83), Crustacea(40), Mollusca(42), and Echino-

dermata (15). The dominated species is molluscan *Musculus senhousi* (Benson, 1842), as a disturbance tolerant species which could affect the stability of macrofauna community. The total mean abundance is 676.88 ind/m², varies from 15 ind/m² to 11 555 ind/m², which is lower than the value of surveys result before the oil spill happened. The total mean biomass of this area

收稿日期: 2016-02-27

作者简介: 周政权(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事底栖动物生态学方面研究。

* 中国科学院 135 计划项目(Y455011031), 中国科学院院重点部署项目(KZZD-EW-14)和中国科学院海洋专项(XDA11020403, XDA11020702)资助。

** 通讯作者: 李宝泉(1972-), 男, 副研究员, 主要从事海洋生物多样性以及生态健康评价方面研究, E-mail: bqli@yic.ac.cn。

reached 30.77 g/m^2 , varies from 0.09 g/m^2 to 141.55 g/m^2 , which is higher than the previous level before the oil spill happened. The main contributor of biomass value is from echinodermata, while mollusca contributes the most to abundance value. Comparing to previous studys, the trend of macrobenthic miniaturization in body size seems to slow down. The mean value of Shannon-Wiener diversity index, richness index and evenness index was 3.11 ± 1.20 , 2.89 ± 1.40 and 0.82 ± 0.22 , respectively. Abundance Biomass Curves indicated that the macrofauna communities in the research region had been in moderate disturbance. **【Conclusion】** It showed that macrofauna communities in oil spill areas had recovered to different degree in the past three year of oil spill events.

Key words: Penglai 19-3 oil spill, macrozoobenthos, biodiversity, species composition, community structure, abundance biomass curves

0 引言

【研究意义】渤海是我国唯一的内海^[1],它不仅受到黄河、海河、滦河三大地表径流的输入,还面临着环渤海经济带人类活动的巨大干扰。渤海是我国最早实施油气开发的海域,其石油平台和海底管线在数量和密度上均为中国近海 4 个海区中最高^[2]。近年来,随着人类活动对渤海环境影响的日益加深,其生态状况受到越来越多的学者的持续关注^[3]。2011 年 6 月 11 日,位于渤海中部的蓬莱 19-3 油气田发生溢油事故。7 月 5 日,国家海洋局初步调查结果确定,溢油造成劣四类海水面积 840 km^2 , 单日溢油最大分布面积 158 km^2 , 事故附近海域海水石油烃平均浓度高出历史背景值 40.5 倍,最高浓度是历史背景值的 86.4 倍^[4]。此外,在海底油污清理过程中,清理区域内底栖生物栖息环境被严重破坏。污染海域浮游生物种类和多样性亦明显降低,群落结构受到影响。据调查显示,至 2011 年 7 月,溢油事故污染海域浮游幼虫幼体数量较历史背景值下降 69%, 鱼卵平均密度较历史背景值下降 45%, 仔稚鱼平均密度较历史背景值下降 90%, 底栖生物平均密度较历史背景值下降 30% (文献[5])。国外科研人员在类似事故发生后会事发相关海域底栖生物群落结构与海水理化因子等各项指标进行长期跟踪观测,如 Joydas 等^[6]在波斯湾溢油事故发生 14 年后综合调查和历史资料对相关海域底栖生物群落结构和生物多样性进行研究,发现该海域底栖动物群落状况良好,多毛动物在不同的深度和泥沙分布水平上分成 3 个类群,且部分生物类群,如端足目甲壳类得以恢复;Dauvin^[7]在 1987 年卡迪兹号溢油事件 (Amoco Cadiz Oil Spill) 发生后 20 年对西英吉利海峡莫尔莱克斯湾 (Bay of Morlaix) 海域底栖生物群

落状况进行研究,得出至少需要进行 10 年以上的长期调查才能评估溢油事故对底栖生物群落的影响。因此,研究蓬莱 19-3 平台溢油事故对渤海海域底栖生物群落结构的长期影响具有重要的生态学意义。**【前人研究进展】**蓬莱 19-3 平台溢油事故发生后,国内多方迅速开展相关调查研究,如过杰等^[8]利用 ENVISAT ASAR 图像数据分析等方式研究渤海溢油的特点及其对生态系统的影响,发现溢油事故对溢油区邻近海域生态系统造成严重损害;李京梅等^[5]基于资源等价分析法对蓬莱溢油事故造成的生物资源损害进行评估,得出底栖生物受损程度为 30%, 受损面积为 1600 km^2 , 非底栖生物的受损程度为 71.4%, 受损面积为 6400 km^2 ;李怀明等^[9]利用 FVCOM (Finite-volume coastal ocean numerical model) 数值模型和 MM5 风场预报模式,建立海洋溢油油膜漂移轨迹和扩散的数值预测模型,可对蓬莱溢油事故的油膜漂移轨迹和扩散进行快速预报,为事故的应急响应提供科学依据。**【本研究切入点】**在溢油事故海域底栖生物群落结构的长期调查和评估方面,国内尚少有研究和报道。因此,在渤海溢油事故发生 3 年后,本研究于 2014 年 8 月至 9 月在蓬莱 19-3 平台溢油事故附近海域及渤海各海区进行底栖生物采样,通过物种鉴定并分析其种类组成、群落结构等方面的状况对渤海底栖环境状况进行评估。**【拟解决的关键问题】**在已有研究基础上,掌握渤海溢油事故及其临近海域大型底栖动物群落结构状况,以底栖生物作为指示种对该海域的底栖环境状况进行系统性分析,评估蓬莱 19-3 平台溢油事故影响海域的恢复情况,同时进一步了解人类活动对渤海海洋资源的影响范围和程度,为渤海及其近岸海区生物多样性保护和渔业资源的可持续利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 站位及采样

蓬莱 19-3 油气平台位于渤海海域中南部、渤南凸起带中段东北端的郯庐断裂带,东经 $120^{\circ}01' \sim 120^{\circ}08'$,北纬 $38^{\circ}17' \sim 38^{\circ}27'$,油田范围内平均水深为 27~33 m。2014 年 8 月至 9 月,在渤海中南部海域及其近岸海区进行大型底栖动物取样。根据环境特点及溢油事故影响程度,在渤海湾(Bohai Bay, BHB)、辽东湾(Liaodong Bay, LDB)、渤海海峡(Bohai Strait, BS)、莱州湾(Laizhou Bay, LZB)和蓬莱溢油区(Penglai oil spill area, PLB)设置 32 个站位(图 1)。每站用取样面积 0.1 m^2 的抓斗式采泥器重复成功取样 2 次,每个泥样均用底层筛为 0.5 mm 网目的套筛冲洗。所获得样品用 95% 酒精固定,并带回实验室后进行种类鉴定、个体计数及称重。样品的处理、保存、计数、称重均按照《海洋调查规范》(GB/T12763.6-2007)进行。



图 1 2014 年夏季渤海各站位分布

Fig. 1 Sampling sites of macrobenthos in Bohai Sea, 2014 summer

1.2 群落多样性分析

利用 PRIMER6.0 软件分析群落多样性,用以反应调查海域群落多样性和物种分布状况,具体如下:优势度指数^[10] $Y = (n_i/N) \times f_i$; Shannon-Wiener 物种多样性指数^[11] $H' = -\sum P_i \log_2 P_i$; Margalef 物种丰富度指数^[12] $D = (S - 1)/\log_2 N$; Pielou 物种均匀度指数^[13] $J' = H'/\log_2 S$ 。上述各式中, 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。

1.3 丰度/生物量比较曲线(ABC 曲线)

采用 ABC 曲线分析大型底栖动物群落受污染及扰动状况。当生物量曲线明显高于丰度曲线时,表明生物生存环境很少或未受扰动;当生物量曲线与丰度曲线相对位置接近时,表明环境受到轻微扰动;当生物量曲线与丰度曲线出现交叉或者接近重合时,表明环境受到中度扰动;当生物量曲线明显低于丰度曲线时,表明环境受到强烈扰动^[14]。

2 结果与分析

2.1 物种组成及优势种

本次调查共采集到 4 332 个标本,经鉴定共有 191 种动物,其中多毛类环节动物 83 种,占总数的 43.46%;软体动物 42 种,占总数的 21.99%;甲壳动物 40 种,占总数的 20.94%;棘皮动物 15 种,占总数的 7.85%;其它类群动物 11 种,占总数的 5.76%(图 2),与溢油事件前同期调查的动物种类组成有所区别^[15]。5 个海域总物种数分布存在差异:渤海海峡(175 种) > 渤海湾(139 种) > 莱州湾(83 种) > 辽东湾(78 种) > 蓬莱溢油区(72 种)(图 3)。各主要类群在 5 个区域中的种数也不同,多毛类环节动物种数为渤海海峡 > 渤海湾 > 辽东湾 > 蓬莱溢油区 > 莱州湾;软体动物种数为渤海湾 > 莱州湾 > 渤海海峡 > 辽东湾 > 蓬莱溢油区;甲壳动物种数为渤海海峡 > 莱州湾 > 渤海湾 > 蓬莱溢油区 > 辽东湾。

如表 1 所示,经过各站位物种优势度计算得出 1 种优势种,为凸壳肌蛤 *Musculus senhousi*,其 Y 值达 0.120。另有 3 种 Y 值接近 0.01,分别为中蛔虫 *Mediomastus californiensis*,长须沙蚕 *Nereis longier*,日本倍棘蛇尾 *Amphiplus japonicus*。

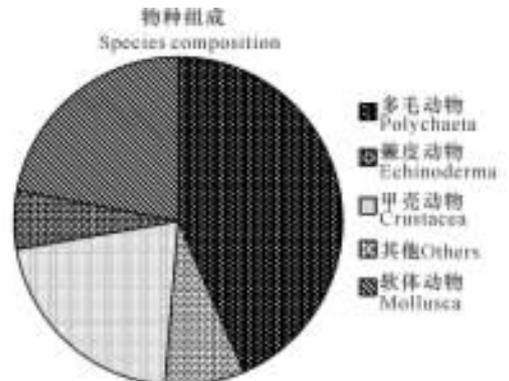


图 2 2014 年夏季渤海大型底栖生物物种组成

Fig. 2 Species composition of macrobenthos in Bohai Sea, 2014 summer

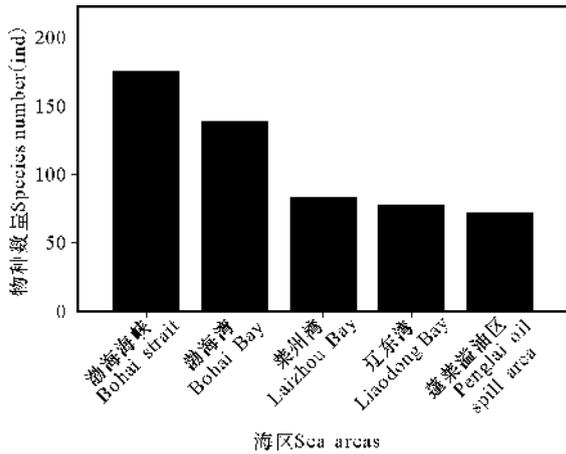


图3 2014年夏季渤海调查航次各海区物种数量

m^2) > 渤海海峡 (267.27 ind/m^2) > 蓬莱溢油区 (201.25 ind/m^2) (图5)。

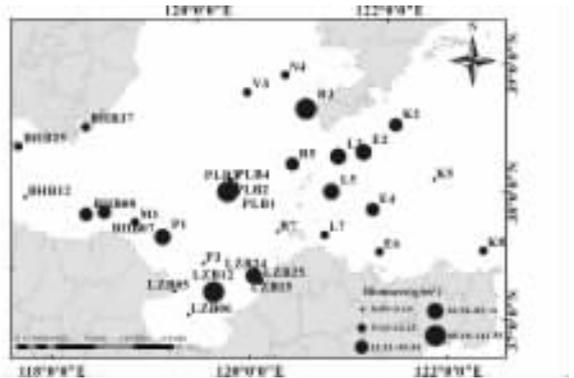


图4 2014年夏季渤海各站位生物量分布情况

Fig. 3 Total species number of each sea area in Bohai Sea, 2014 summer

Fig. 4 Spatial distribution of macrobenthos biomass in Bohai Sea, 2014 summer

表1 2014年夏季渤海优势种

Table 1 Dominant macrobenthic species in Bohai Sea, 2014 summer

种名 Species name	优势度 Y 值 Species dominance
凸壳肌蛤 <i>Musculus senhousiei</i>	0.120
中蚓虫 <i>Mediomastus californiensis</i>	0.010
长须沙蚕 <i>Nereis longier</i>	0.008
日本倍棘蛇尾 <i>Amphipolus japonicus</i>	0.007

2.2 生物量和丰度

调查海域总生物量为 984.63 g/m^2 , 平均生物量为 30.77 g/m^2 , 各站位生物量为 0.09 g/m^2 (PLB3 站) ~ 141.55 g/m^2 (LZB06 站)。棘皮动物对生物量贡献最高 (10.38 g/m^2), 甲壳动物贡献最小 (3.23 g/m^2), 软体动物和多毛动物分别为 6.60 g/m^2 和 4.19 g/m^2 。从区域划分来看, 平均生物量最高的为辽东湾 (44.52 g/m^2), 最低的为渤海湾 (25.55 g/m^2); 蓬莱溢油区、渤海海峡、莱州湾分别为 41.39 g/m^2 , 30.13 g/m^2 , 29.04 g/m^2 (图4)。

调查海域总丰度为 21660 ind/m^2 , 总丰度最高的站位为 LZB12 站, 达 11555 ind/m^2 , 其中凸壳肌蛤 *Musculus senhousiei* 丰度为 11440 ind/m^2 , 占该站位总丰度的 99.00%; BHB37 站最低, 为 15 ind/m^2 。所调查各站位丰度的平均水平因 LZB12 站的最高值而升高, 平均丰度为 676.88 ind/m^2 。各主要类群的平均丰度中, 软体动物贡献最高 (474.06 ind/m^2), 棘皮动物贡献最小 (29.53 ind/m^2); 多毛类环节动物和甲壳动物平均丰度分别为 129.69 ind/m^2 和 38.91 ind/m^2 。在 5 个采样区域中, 平均丰度由高到低依次是莱州湾海域 (2060.71 ind/m^2) > 辽东湾 (451.67 ind/m^2) > 渤海湾 (305 ind/

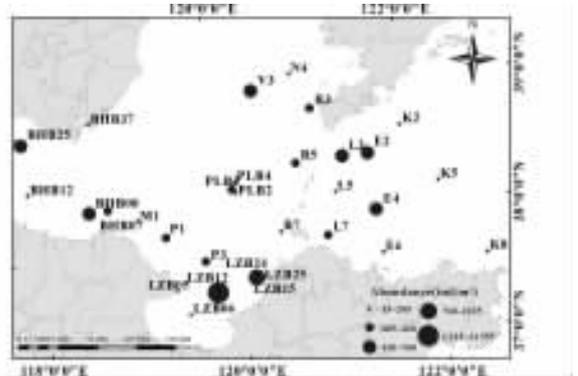


图5 2014年夏季渤海各站位丰度分布情况

Fig. 5 Spatial distribution of macrobenthos abundance in Bohai Sea, 2014 summer

2.3 生物多样性

如图6所示, 各站位 Shannon-Wiener 物种多样性指数 (H') 与物种丰富度指数 (D) 变化幅度较大。调查海域 32 个站位的 Shannon-Wiener 物种多样性指数 (H') 平均值为 3.11 ± 1.20 , 渤海湾南岸 BHB08 站物种多样性指数最高 (4.53), 黄河口附近 LZB12 站的物种多样性指数最低 (0.11)。物种丰富度指数 (D) 平均值为 2.89 ± 1.40 , 极值出现在 BHB08 站和渤海湾内部 BHB12 站, 分别为 5.77 和 0.37 , 其站位间变化趋势与 Shannon-Wiener 物种多样性指数 (H') 基本吻合。各站位物种均匀度指数 (J') 平均值为 0.82 ± 0.22 , 变化范围 0.03 (LZB12) ~ 1.00 (LZB25、BHB37), 除 LZB12、LZB24 站位因出现大量凸壳肌蛤 *Musculus senhousiei* 而偏低外, 其他各站位均维持在较高水平 ($0.58 \sim 1.00$)。

2.4 ABC 曲线

对调查海域各站位生物量和丰度数据做 ABC

曲线并得到 W 值(图 7), 仅有 LZB12(-0.036) 和 LZB24(-0.41) 两个站位的 W 值小于 0, 其中 LZB24 站点 W 值最小且丰度曲线(图 8)远在生物量曲线之上, 表明该站点底质环境受到剧烈扰动, 底质状况在 32 个站点中最差。

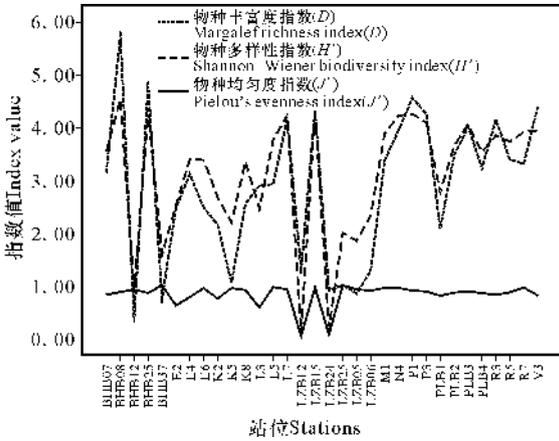


图 6 2014 年夏季渤海 32 站点多样性指数趋势线
Fig. 6 Diverse index trend lines of 32 stations in Bohai Sea, 2014 summer

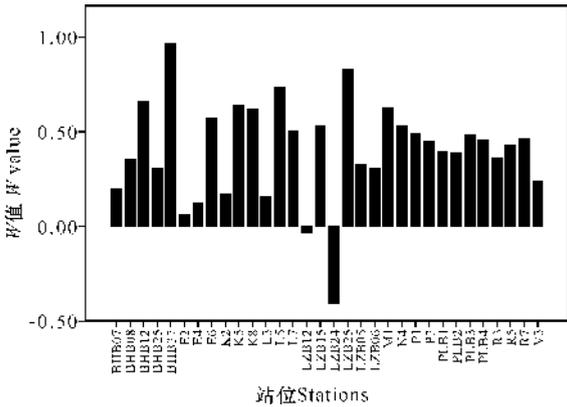


图 7 2014 年夏季渤海海域各站点 W 值
Fig. 7 W value of each station in Bohai Sea, 2014 summer

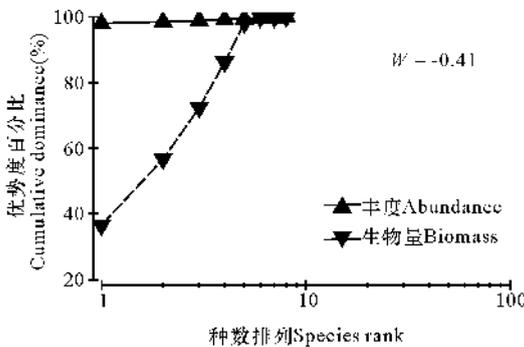


图 8 LZB24 站 ABC 曲线

Fig. 8 ABC plot on macrobenthos of LZB24

另外, E2、E4、L3 和 K2 站点 W 值明显小于其他各站, 生物量曲线的起点较低且与丰度曲线接近, 说明底质状况受到轻微扰动并有向中度扰动发展的趋势(图 9)。

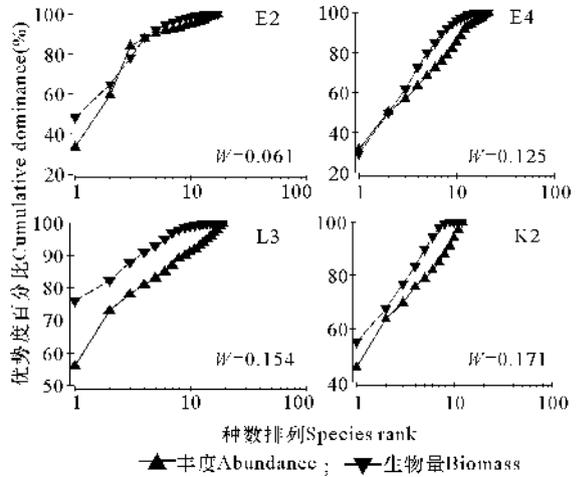


图 9 E2、E4、L3 和 K2 各站点 ABC 曲线

Fig. 9 ABC plot of E2, E4, L3 and K2

溢油区各站点除 PLB2 站生物量曲线、丰度曲线较接近外(图 10), 其余 3 个站点 ABC 曲线均显示底质状况较好。另外, PLB1 站和 PLB2 站点生物量起点较低且曲线整体较偏左, 说明有向中度干扰发展的趋势。

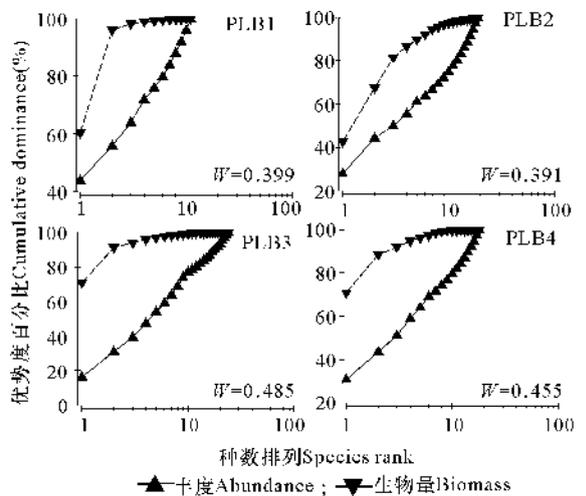


图 10 蓬莱溢油区各站点大型底栖生物群落 ABC 曲线

Fig. 10 ABC plot on macrobenthos of each station in Penglai oil spill areas, Bohai Sea

汇总 32 个站点生物量和丰度数据可得调查海域的丰度/生物量曲线(图 11), 丰度曲线在生物量曲线之上且有交叉, 说明调查海域受到中度干扰。另外, 由图 12 可见, 5 个海区中, 除莱州湾 LZB

($W = -0.024$) 的 ABC 曲线显示其受到中度扰动外(丰度曲线较生物量曲线占优势), 其余 4 个海区底质状态均良好。其中, 溢油区 PLB ($W = 0.356$) 丰度曲线和生物量曲线差距最大, 表明该区域在 5 个海区中环境状况及群落稳定性表现最佳; 渤海海峡 BS ($W = 0.168$) 和渤海湾 BHB ($W = 0.280$) 的生物量和丰度曲线较为接近, 表示该海域底质状况受到轻微扰动。此外, 辽东湾 LDB ($W = 0.320$)、渤海海峡 BS 和渤海湾 BHB 的生物量曲线起点均较低, 且生物量曲线和丰度曲线均较接近, 表明底栖环境有受到中度扰动的趋势。

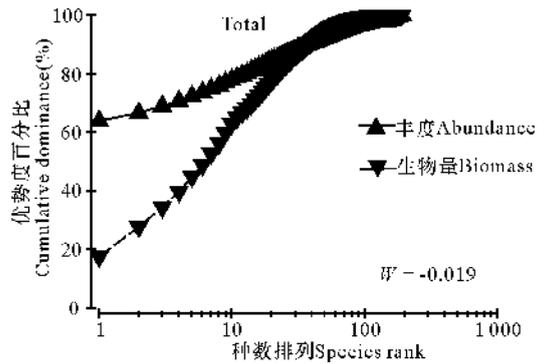


图 11 渤海海域大型底栖生物群落 ABC 曲线
Fig. 11 ABC plot on macrobenthos in Bohai Sea

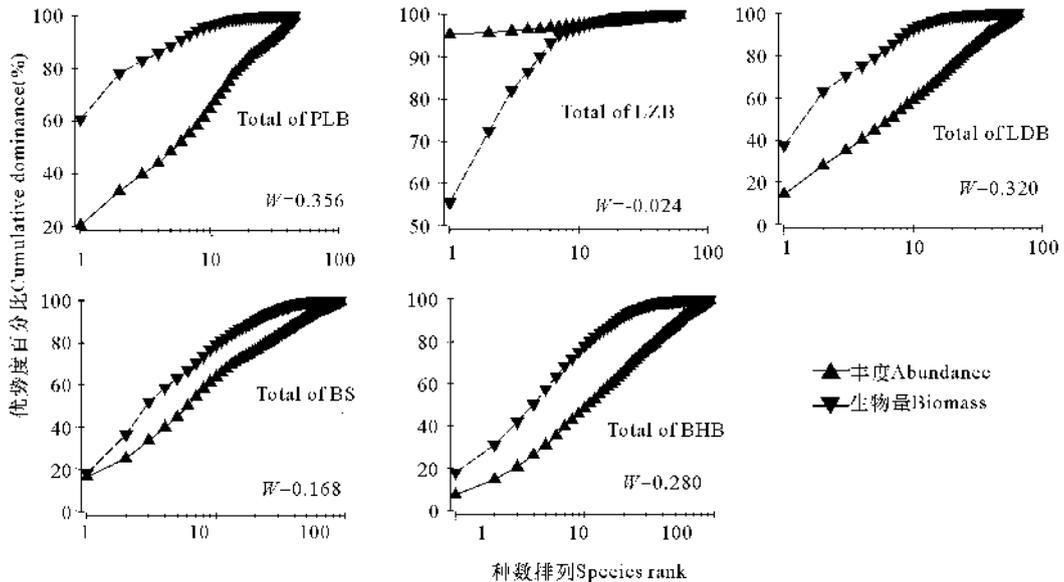


图 12 渤海各海区大型底栖生物群落 ABC 曲线

Fig. 12 ABC plot on macrobenthos of each sea domains in Bohai Sea

3 讨论

渤海海域历史上曾经历多次溢油事故^[16], 发生于 2011 年 6 月的蓬莱 19-3 平台“井涌”事故, 对渤海海域的渔业资源和生态环境影响之大, 为历次之最^[17]。溢油进入海洋后会发生复杂的物理、化学及生物过程。首先, 石油中大量轻质烃会直接挥发; 其次, 约有 5% 的石油组分溶解在海水中; 随后, 风浪加剧石油的乳化、吸附及沉降过程, 使得油膜破碎; 最后, 石油烃组分被光和生物作用降解, 转换成羧酸、酮和二氧化碳等物质, 进入生态系统的物质循环中^[18]。溢油对海洋生态环境的影响极为深远, 被污染海域的生物群落状况需要经历 10 年或更久才会恢复到原来的水平^[7]。历史数据表明, 2008 至 2010 年, 由于养殖方式和渔业人员技术水平的提高, 莱州湾海域水产养殖产量逐年提升。受渤海溢油事故影

响, 2011 年莱州湾海洋渔业总产量迅速下滑, 2012—2013 年略有回升^[19]。

3.1 丰度/生物量曲线(ABC 曲线)

环境的改变会引起物种间相互作用和种群数量关系的扰动, 从而对该区域群落稳定性产生影响^[20]。因此, 对比丰度和生物量的 K-优势度曲线可反映调查区域的群落稳定性, 进而对该区域的环境状况进行评估^[21]。从 ABC 曲线对底质的评价可以看出, 溢油区所在海域底质状况经过事故发生后的清理和后续三年的沉积演变, 已经恢复到利于底栖生物生长的程度, 这也与刘明等^[2]于蓬莱 19-3 平台溢油事故发生 1 年后对渤海中部油气开采区底质沉积物中的石油烃含量显著减少的报道, 以及吴福顺等^[22]在蓬莱 19-3 平台溢油区发现具高效石油降解能力的 γ -变形菌纲的菌株为该区域的石油降解优势种群从而加速该海域石油烃分解的调查结果相

一致。

需要指出的是,溢油区的 PLB1 站和 PLB2 站仍然有受到中度干扰的倾向,且 PLB1 站物种多样性指数 ($H' = 2.77$) 低于各站位平均水平 (3.11 ± 1.20)。渤海湾物种多样性指数 (H') 低于历史平均水平^[23],ABC 曲线也显示渤海海域底栖生物群落状况和底质状况受到中度干扰,如不进一步加强对环渤海区域污染的防治与治理,情况将更加严峻。

3.2 物种组成

本次调查 32 个站位共发现大型底栖生物 191 种,相比于 2011 年史书杰^[23]报道(调查所用采泥器规格和网筛孔径与本次一致)的 521 种大幅度减少,约 63.34% 的物种消失或迁移。其中,多毛类环节动物由 220 种下降至 83 种,依然是渤海海域底栖生物的主要贡献者;软体动物由 152 种下降至 42 种,甲壳动物由 110 种下降至 40 种,棘皮动物物种数则基本维持在相同水平,其贡献率由 2011 年的 2.51% 升高至 7.58%。造成物种数下降的原因,除 2011 年蓬莱溢油事故之外,还有环渤海地区人类活动污染排放以及地表径流带冲击的影响^[24],其主导因素是否为溢油事故还有待进一步探究。

3.3 生物量和丰度

各站位平均生物量由 2011 年^[23]的 19.18 g/m^2 上升至 30.77 g/m^2 ,主要贡献者由多毛类环节动物转变为棘皮动物;丰度由 2011 年的 $2\,668.13 \text{ ind/m}^2$ 下降至 676.88 ind/m^2 ,甚至低于 2008 年每站位 $1\,094.7 \text{ ind/m}^2$ 的平均水平^[25],其主要贡献者由多毛类环节动物转变为软体动物,棘皮动物在此次调查中对丰度的贡献最小。孙道元等^[26]于 1982 年报道的渤海海域丰度贡献量由大到小依次是甲壳动物、多毛类环节动物、棘皮动物、软体动物;韩洁等^[27]于 1999 年报道的顺序由大到小是软体动物、多毛类环节动物、甲壳动物、棘皮动物;史书杰^[23]于 2011 年报道的顺序由大到小依次是多毛类环节动物、甲壳动物、软体动物、棘皮动物。近 30 年的历史数据表明,渤海海域底栖生物丰度的主要贡献者经历由甲壳动物到软体动物再到多毛类环节动物的小型化转变。综合 2014 年渤海海域丰度和生物量的表现,棘皮动物数量虽然最少但对生物量贡献最大,软体动物对丰度方面贡献量也恢复到首位,说明渤海海域底栖生物整体小型化的趋势已较历史数据有所衰减。

从空间分布上来看,生物量较高的海域为辽东湾东南部,最低值出现在渤海湾,趋势与 2011 年同

期资料^[23]基本一致。此外,渤海中部溢油区生物量在总生物量中所占比重有所提升,仅次于辽东湾,其生物量的主要贡献者为较大型的蠕虫动物 (60.64%) 和软体动物 (18.63%),并非较小型的多毛类。丰度最高值出现在莱州湾东北部,与 2011 年 6 月历史数据相比较趋势基本一致;最低值出现在渤海湾曹妃甸海域 BHB37 站,该站仅发现 2 种多毛动物(中华内卷齿蚕 *Aglaophamus sinensis*、短叶索沙蚕 *Lumbrineris latreilli*) 和 1 种软体动物(共生蛤属一种 *Pseudopythina* sp.),表明此区域底栖生物群落受环境胁迫较大,物种多样性较低 ($H' = 1.58$);与 2011 年史书杰^[23]报道的有所不同,渤海海峡的丰度分布由北向南逐渐减少,且整体水平有所下降,具体原因还需要进一步数据支持。

3.4 优势种

对比蔡文倩等^[28]总结的历史数据发现,污损生物凸壳肌蛤 *Musculus senhousi* 已经成为渤海海域的绝对优势种 ($Y = 0.120$)。凸壳肌蛤在 20 世纪 80 年代为莱州湾优势种^[26],90 年代在渤海湾大量出现^[28],其存在对大型底栖动物群落结构产生不良影响^[29],也在一定程度上反映底质环境的恶化。此外,蛤与养殖贝类争夺饵料,其足丝交连成片使其他贝类无法到达地表之上,从而影响养殖贝类的产量。此次调查位于莱州湾的 LZB12 和 LZB24 两站位出现大量凸壳肌蛤,与 2013 年蔡文倩等^[28]的发现有所不同,说明除渤海湾和胶州湾外,莱州湾部分地区再次成为凸壳肌蛤生殖繁衍的适宜场所。凸壳肌蛤会对所在海域的群落结构和物种多样性造成剧烈冲击,其出现站位所在的海域物种多样性指数和物种均匀度指数为各站位中最低。莱州湾受黄河泥沙输入的影响,底质状况为粉砂^[30],该种底质有利于凸壳肌蛤的传播和生长^[25,31]。同时,凸壳肌蛤作为污染指示种的出现也说明 LZB12 站和 LZB24 站所在的黄河口和蓬莱养殖区海域底质状况极为严峻。

4 结论

(1)2011 年夏季渤海海域共发现大型底栖生物 191 种,优势种为凸壳肌蛤 *Musculus senhousi*。平均丰度为 676.88 ind/m^2 ,低于溢油前水平,为 $15 \text{ ind/m}^2 \sim 11\,555 \text{ ind/m}^2$;平均生物量为 30.77 g/m^2 ,高于溢油前水平,为 $0.09 \text{ g/m}^2 \sim 141.55 \text{ g/m}^2$ 。其中,平均丰度最高的区域为莱州湾海域 ($2\,060.71 \text{ ind/m}^2$),最低的为蓬莱溢油区 (201.25 ind/m^2);平均生物量最高的区域为辽东湾 (44.52

g/m^2),最低的为渤海湾($25.55 \text{ g}/\text{m}^2$)。生物量的主要贡献者为棘皮动物,丰度的主要贡献者为软体动物,底栖生物群落结构的小型化有减缓趋势。

(2)ABC 曲线显示渤海海域正处于中度扰动的状态,各海区中溢油区的底质状况最好,渤海湾的底质状况最差。溢油区各站位 ABC 曲线均显示底质状况较好,但 PLB1 站和 PLB2 站生物量起点较低且曲线整体较偏左,说明有向中度干扰发展的趋势。Shannon-Wiener 物种多样性指数、Margalef 物种丰富度指数和 Pielou 物种均匀度指数平均值分别为 3.11 ± 1.20 , 2.89 ± 1.40 和 0.82 ± 0.22 。

(3)溢油事故 3 年后,受溢油影响的底栖生物群落已得到不同程度地恢复,溢油平台邻近站位的底栖生物群落与周边对照点在物种组成、优势种、生物量、丰度和物种多样性方面没有显著性差异。

参考文献:

- [1] 乔淑卿,石学法,王国庆,等.渤海底质沉积物粒度特征及输运趋势探讨[J].海洋学报,2010,32(4):139-147.
QIAO S Q,SHI X F,WANG G Q,et al. Discussion on grain-size characteristics of seafloor sediment and transport pattern in the Bohai Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica,2010,32(4):139-147.
- [2] 刘明,张爱滨,廖永杰,等.渤海中部油气开采区沉积物中石油烃环境质量[J].海洋环境科学,2015,34(1):12-16.
LIU M,ZHANG A B,LIAO Y J,et al. Environmental quality of petroleum hydrocarbons in the surface sediment of the oil and gas exploration zone in the central of Bohai Sea[J]. Marine Environmental Science,2015,34(1):12-16.
- [3] 赵章元,孔令辉.渤海海域环境现状及保护对策[J].环境科学研究,2000,13(2):23-27.
ZHAO Z Y,KONG L H. Environmental status quo and protection countermeasures in Bohai marine areas [J]. Research of Environmental Sciences,2000,13(2):23-27.
- [4] 楚道文.浅论海洋生态损害的法律问题——以蓬莱 19-3 油田溢油事故为分析案例[J].政法论丛,2012(5):109-116.
CHU D W. Discussion on the legal issues of marine ecological damage:To Penglai 19-3 Oil Spill Accident as the case analysis [J]. Zheng Fa Lun Cong,2012(5):109-116.
- [5] 李京梅,侯怀洲,姚海燕,等.基于资源等价分析法的海洋溢油生物资源损害评估[J].生态学报,2014,34(13):3762-3770.
LI J M,HOU H Z,YAO H Y,et al. Marine biological damage assessment of oil spill based on resources e-

quivalency analysis[J]. Acta Ecologica Sinica,2014,34(13):3762-3770.

- [6] JOYDAS T V,QURBAN M A,AL-SUWAILEM A,et al. Macrobenthic community structure in the northern Saudi waters of the Gulf,14 years after the 1991 Oil Spill [J]. Marine Pollution Bulletin,2012,64(2):325-335.
- [7] DAUVIN J C. The muddy fine sand *abra alba - melin-napalmata* community of the bay of Morlaix twenty years after the Amoco Cadiz Oil Spill[J]. Marine Pollution Bulletin,2000,40(6):528-536.
- [8] 过杰,刘欣,谢强.渤海溢油特点及对其生态系统影响——蓬莱 19-3 石油平台溢油[R].青岛:中国海洋湖沼学会第十次全国会员代表大会暨学术研讨会,2012.
GUO J,LIU X,XIE Q. Characteristics of Oil Spill in Bohai Sea and Its Effect on Ecosystem:To Penglai 19-3 Oil Spill Accident [R]. Qingdao:10th National Congress of Chinese Society for Oceanology and Limnology,2012.
- [9] 李怀明,娄安刚,王璟,等.蓬莱 19-3 油田事故溢油数值模拟[J].海洋科学,2014(6):70-77.
LI H M,LOU A G,WANG J,et al. A numerical simulation of the oil spill accident at Penglai 19-3 oil field [J]. Marine Sciences,2014(6):70-77.
- [10] 陈亚瞿,徐兆礼,王云龙,等.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[J].中国水产科学,1995,2(1):49-58.
CHEN Y Q,XU Z L,WANG Y L,et al. An ecological study on zooplankton in plume front zone of Changjiang (Yangtze) River estuarine area biomass distribution of dominant species[J]. Journal of Fisheries Sciences of China,1995,2(1):49-58.
- [11] SHANNON C E,WEAVER W. The Mathematical Theory of Communication[M]. Urbana: University of Illinois Press,1949.
- [12] MARGALEF R. Perspectives in Ecological Theory [M]. Chicago:University of Chicago Press,1968.
- [13] PIELOU E C. Ecological Diversity[M]. New York: Wiley,1975.
- [14] 田胜艳,于子山,刘晓收,等.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[J].海洋通报,2006,25(1):92-96.
TIAN S Y,YU Z S,LIU X S,et al. Abundance/Biomass Curves for detecting pollution effects on marine macrobenthic communities[J]. Marine Science Bulletin,2006,25(1):92-96.
- [15] 刘晓收,史书杰,周红,等.渤海大型底栖动物多样性及其与环境因子的关系[J].广西科学,2015,22(5):540-548.
LIU X S,SHI S J,ZHOU H,et al. Macrofaunal diversity and its relationship with environmental factors in

- the Bohai Sea[J]. *Guangxi Sciences*, 2015, 22(5): 540-548.
- [16] 沈光玉. 渤海及邻近海域船舶溢油事故风险评价及规避研究[D]. 大连:大连海事大学, 2012.
SHEN G Y. The Research on Risk Assessment and Avoidance of Bohai Sea Ship Oil Spill Accident[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2012.
- [17] 宋朋远. 渤海油田溢油扩散与漂移的数值模拟研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2013.
SONG P Y. Numerical Simulation Research on Oil Spill Diffusion and Drift Process of the Bohai Sea Oil Field[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [18] 郑秀瑾. 石油烃在海水/沉积物中的物理生物过程[D]. 青岛:中国海洋大学, 2014.
ZHENG X J. The Physical-biological Processes of Petroleum Hydrocarbons in Seawater/Sediments[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [19] PAN G C, QIU S Y, LIU X, et al. Estimating the economic damages from the Penglai 19-3 oil spill to the Yantai fisheries in the Bohai Sea of northeast China [J]. *Marine Policy*, 2015, 62: 18-24.
- [20] ROSENBERG R, BLOMQUIST M, NILSSON H C, et al. Marine quality assessment by use of benthic species-abundance distributions: A proposed new protocol within the European Union Water Framework Directive[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, 49(9/10): 728-739.
- [21] WARWICK R M. A new method for detecting pollution effects on marine macrobenthic communities[J]. *Marine Biology*, 1986, 92(4): 557-562.
- [22] 吴福顺. 渤海溢油区石油降解菌的筛选鉴定及功能基因研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2013.
WU F S. Screening and Identification of Oil-degrading Marine Bacteria from Spilled Oil in the Bohai Sea and Analysis of Functional Genes[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [23] 史书杰. 渤海大型底栖动物生态学研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2014.
SHI S J. The Ecological Study of Macrobenthos in the Bohai Sea, China [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [24] 许思思. 人为影响下渤海渔业资源的衰退机制[D]. 青岛:中国科学院研究生院(海洋研究所), 2011.
XU S S. Decline Mechanisms of Fishery Resources in the Bohai Sea under Anthropogenic Activities[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [25] 刘晓收, 范颖, 史书杰, 等. 渤海大型底栖动物种类组成与群落结构研究[J]. *海洋学报*, 2014, 36(12): 53-66.
- LIU X S, FAN Y, SHI S J, et al. Studies on the species composition and community structure of macrofauna in the Bohai Sea, China [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 36(12): 53-66.
- [26] 孙道元, 刘银城. 渤海底栖动物种类组成和数量分布[J]. *黄渤海海洋*, 1991, 9(1): 42-50.
SUN D Y, LIU Y C. Species composition and quantitative distributions of biomass and density of the macrobenthic infauna in the Bohai Sea[J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 1991, 9(1): 42-50.
- [27] 韩洁, 张志南, 于子山. 渤海大型底栖动物丰度和生物量的研究[J]. *青岛海洋大学学报*, 2001, 31(6): 889-896.
HAN J, ZHANG Z N, YU Z S. Study on the macrobenthic abundance and biomass in Bohai Sea[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2001, 31(6): 889-896.
- [28] 蔡文倩, 孟伟, 刘录三, 等. 渤海湾大型底栖动物群落优势种长期变化研究[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(8): 2332-2340.
CAI W Q, MENG W, LIU L S, et al. Long-term trends of the dominant macrozoobenthos in Bohai Bay [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(8): 2332-2340.
- [29] 张崇良, 任一平, 薛莹, 等. 胶州湾西北部潮间带冬季大型底栖动物丰度和生物量[J]. *中国水产科学*, 2010, 17(3): 551-560.
ZHANG C L, REN Y P, XUE Y, et al. Abundance and biomass of macrobenthos in the intertidal zone of northwestern Jiaozhou Bay in Winter [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2010, 17(3): 551-560.
- [30] 廖永杰. 渤海中南部沉积地球化学特征和黄河改道事件[D]. 青岛:中国海洋大学, 2014.
LIAO Y J. Geochemical Characteristics of Sediments in Bohai Sea and Relocation of Huanghe River [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [31] 杜永芬, 高抒, 于子山, 等. 福建罗源湾潮间带大型底栖动物的次级生产力[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(7): 1904-1912.
DU Y F, GAO S, YU Z S, et al. Secondary productivity of macrobenthos in intertidal flat of Luoyuan Bay, Fujian Province of East China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(7): 1904-1912.

(责任编辑:米慧芝)