

蔡文倩, 孟伟, 刘录三, 等. 2013. 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, 33(8): 2332-2340

Cai W Q, Meng W, Liu L S, et al. 2013. Long-term trends of the dominant macrozoobenthos in Bohai Bay[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 33(8): 2332-2340

渤海湾大型底栖动物群落优势种长期变化研究

蔡文倩^{1,2}, 孟伟^{1,*}, 刘录三¹, 朱延忠¹, 周娟¹

1. 中国环境科学研究院 国家环境保护河口与海岸带环境重点实验室, 北京 100012

2. 北京师范大学 水科学研究院, 北京 100875

收稿日期: 2012-11-08 修回日期: 2013-01-15 录用日期: 2013-02-18

摘要:以 2008 年 4 月, 2009 年 5 月、8 月, 2011 年 5 月、9 月以及 2012 年 9 月采集的大型底栖动物资料为基础, 结合历史数据, 描述渤海湾底栖动物群落优势种的变化规律, 探讨变化原因。结果表明, 近 60 年来, 渤海湾底栖动物群落优势种多为营埋栖生活的小型双壳类和蟹类, 而近几年则以小型双壳类为绝对优势种。其中, 干扰耐受种凸壳肌蛤 (*Musculus senhousi*) 在渤海湾迅速增值并成为绝对优势种, 影响了底栖动物群落结构的稳定性。胶州湾、莱州湾、辽东湾及渤海湾的主要优势种较为相似, 变化规律皆为个体较大、生命周期较长的双壳类、虾蟹类逐步被个体更小、生命周期更短的干扰耐受种代替, 说明 4 个海湾的底栖生态环境皆受到了一定程度的干扰。渤海湾优势种的变化可能与海湾本身的底质状况、人为干扰(如围海造陆工程的实施)、过量的陆源排污以及食物链的变化有关。

关键词:大型底栖动物; 优势种; 底质状况; 人为干扰; 食物链; 渤海湾

文章编号: 0253-2468(2013)08-2332-09 中图分类号: X171.5, X835 文献标识码: A

Long-term trends of the dominant macrozoobenthos in Bohai Bay

CAI Wenqian^{1,2}, MENG Wei^{1,*}, LIU Lusan¹, ZHU Yanzhong¹, ZHOU Juan¹

1. State Environmental Protection Key Laboratory of Estuary and Coastal Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012

2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875

Received 8 November 2012; received in revised form 15 January 2013; accepted 18 February 2013

Abstract: Based on the macrozoobenthos samples collected from Bohai Bay on April 2008, May and August 2009, May and September 2011, September 2012 and the historical data, long-term trends of the dominant macrozoobenthos in Bohai Bay were described, and reasons for the changing trends were also discussed. Results showed that the dominant macrozoobenthos in Bohai Bay were mainly composed of small bivalves and crabs with the life style of burrow dwelling. However, smaller bivalves had been the absolute predominant species in recent couples of years in Bohai Bay. In particular, *Musculus senhousi* (Benson, 1842), a disturbance tolerant species, spreaded very fast and had been the predominant species in the recent two years, which affected the stability of macrozoobenthos community. Moreover, Bohai Bay shared the similar dominant species and the similar changing patterns with Jiaozhou, Laizhou and Liaodong Bays. It was verified that shrimps and crabs with larger size and longer life span were substituted by those being tolerant to environment changes with smaller size and shorter life span, such as some smaller bivalves. It could be concluded that all the benthic habitats of the four bays was disturbed to som degree. The long-term trends of dominant macrozoobenthos in Bohai Bay may be related to the sediment conditions, anthropogenic disturbances such as land reclamations projects, excess input of pollutants and changes of food chains.

Keywords: macrozoobenthos; dominant species; sediment condition; anthropogenic disturbances; food chains; Bohai Bay

1 引言 (Introduction)

渤海湾位于渤海北部, 平均深度 10 m, 为半封闭的缓坡淤泥底质海湾(秦蕴珊等, 1985), 自净能

力较差(Zheng *et al.*, 2011)。受黄河及其它入海河流冲淡水的影响, 底质较为单一, 底栖动物种类较少, 多以广温、低盐、近岸、暖水性物种为主(孙道元等, 1991), 并以虾、蟹和几种双壳类软体动物为主

基金项目: 中国环境科学研究院院所基金(No. gyk5091201)

Supported by the Special Foundation of Chinese Research Academy of Sciences(No. gyk5091201)

作者简介: 蔡文倩(1986—), 女, 博士生, E-mail: cwqpop0308@163.com; * 通讯作者(责任作者), E-mail: mengwei@craes.org.cn

Biography: CAI Wenqian (1986—), female, Ph. D. candidate, E-mail: cwqpop0308@163.com; * Corresponding author, E-mail: mengwei@craes.org.cn

要优势种(胡颖琰等,2000).近年来,渤海湾沿岸经济发展迅速,使得污染物入海量激增,加重了海域的营养盐负荷(Liu *et al.*, 2011).同时,填海造陆、海堤防护、港口建设等海岸工程的实施,破坏了滨海湿地的生态功能,改变了近岸局部流场,进一步减弱了渤海湾近岸海域的自净能力(王悦等,2006;聂红涛等,2008),水体污染日益严重(Qin *et al.*, 2011; Gao *et al.*, 2012),扰乱了渤海湾的底栖动物栖息环境(Ning *et al.*, 2010),从而导致大型底栖动物群落结构发生明显的变化(Zhou *et al.*, 2007).

优势种是指那些常通过数目、大小或活动性来控制群落特性的少数种或种群(沈国英等,2002).优势种具有高度的生态适应性,对于群落结构变化的研究至关重要.渤海湾大型底栖动物群落生态学研究始于20世纪50年代的全国海洋普查时期,至20世纪70、80年代初成系统(崔玉珩等,1983).经过近30年的不断发展,该海域的大型底栖动物群落结构特征及演变状况已基本摸清(张志南等,1990a;1990b;孙道元等,1991;韩洁等,2001;张培玉,2005;Li *et al.*, 2010;王瑜等,2010;冯剑丰等,2011;蔡文倩等,2012),但专门针对优势种多年来的变化状况,一直缺乏较为细致的研究.

故此,为丰富渤海湾大型底栖动物群落结构特

征演变的研究,本文在现有数据的基础上,查阅渤海湾以往研究资料,首次从优势种演变的角度来剖析渤海湾大型底栖动物群落的演变特征,并探讨影响其变化的环境因素.

2 材料与方法(Materials and methods)

2.1 调查海域及取样方法

于2008年4月(21个站位),2009年5月、8月(22个站位),2011年5月、9月(43个站位)以及2012年9月(34个站位)在渤海湾近岸海域进行了大型底栖动物调查(图1).其中,2008年4月采用采样面积为 0.1 m^2 的静力式箱式采泥器,2009年5月和8月航次为 0.05 m^2 的抓斗式采泥器,2011—2012年3个航次采用 0.05 m^2 的箱式采泥器.2008—2011年4个航次均是每次成功取样2次合为1个样品,除2011年5月每站有3个重复样外,其它3个航次均无;2011和2012年9月航次皆是每次成功取样1次为1个样品,每站采集3个重复样.除2008年4月航次采用 1 mm 孔径的网筛外,其它5个航次均使用 0.5 mm 孔径的网筛分选底栖动物样品,所得样品用75%酒精现场固定(GB/T 12763.6—2007).

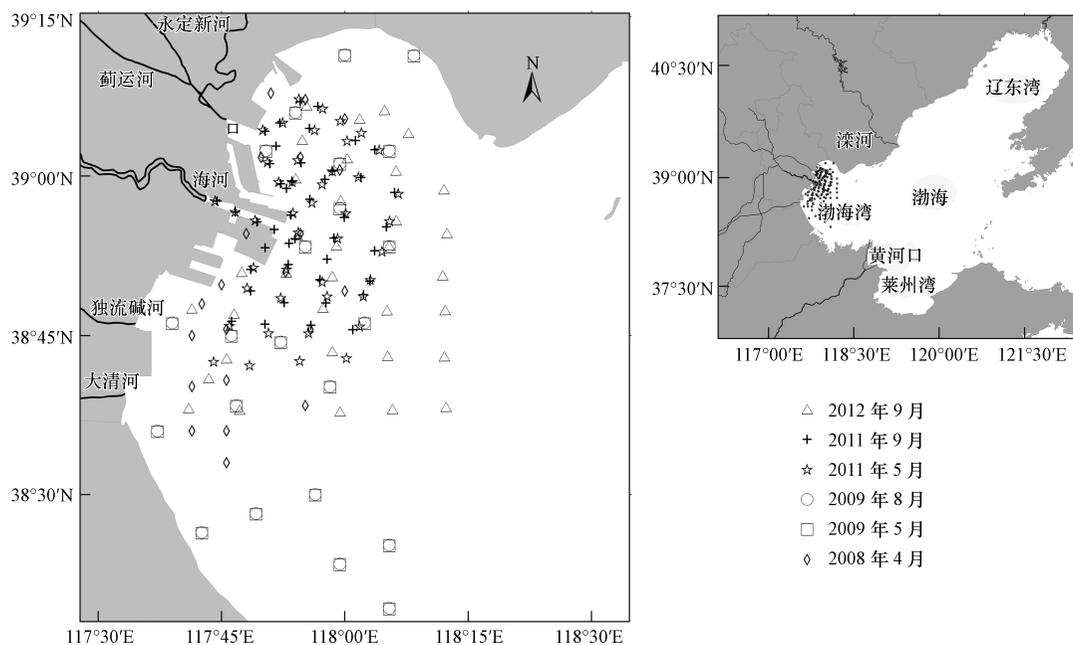


图1 渤海湾2008—2012年采样站位示意图

Fig. 1 Sampling stations in Bohai Bay from 2008 to 2012

2.2 数据处理和分析

大型底栖动物样品在实验室中进行分选、计数

及称重(湿重)等工作.根据优势度指数判定历次调查的优势种,其计算公式如下(李宝泉等,2006):

$$Y = (n/N) \times f_i \quad (1)$$

式中, Y 为大型底栖动物优势度指数; n 为第 i 种的总个体数(inds); N 为在所有站位采集的大型底栖动物总个体数(inds); f_i 为该种在各调查站位中的出现频率. 一般来说, 优势度指数越大, 表明群落中优势种的地位越突出, 物种的数量分布越不均匀. 当物种的 Y 值大于 0.02 时, 即判定其为优势种(李宝泉等, 2006).

为更全面地反映环境质量变化, 本文引入生态组(Ecological Group, EG)概念(Borja *et al.*, 2000). 环境敏感度(environmental sensitivity)可定义为生态系统对环境的一种同理性感受, 亦即环境的不良变化(污染、灾害或人为开发)对生态栖息环境的安全、生物存活及繁衍造成严重冲击之下的响应程度(陈宜清等, 2007). 根据各种底栖动物环境敏感度的不同, 即由最敏感种到最机会主义种, 分为 5 个不同的生态组(Borja *et al.*, 2000), 即 EGI(干扰敏感种)、EGII(干扰不敏感种)、EGIII(干扰耐受种)、EGIV(二阶机会种)、EGV(一阶机会种).

3 结果(Results)

3.1 优势种时间变化

2008 年 4 月航次, 调查区内优势度指数大于 0.02 的只有 4 种(表 1), 其中优势度指数最高的为豆形胡桃蛤(*Nucula faba*), 最小的为黄海埃刺梳鳞虫(*Ehersleanira incise hwanghaiensis*) (表 2). 而 2009 年 5 月航次光滑河篮蛤(*Potamocorbula laevis*) 为唯一的绝对优势种, 其单种栖息密度高达 11400 inds·m⁻², 占总栖息密度的 91.2%. 与 2009 年 5 月航次相比, 2009 年 8 月航次的优势种则为棘刺锚参(*Protankyra bidentata*) 和绒毛细足蟹(*Raphidopus ciliatus*), 而光滑河篮蛤的优势度值急剧下降(表 2). 至 2011 年 5 月航次, 凸壳肌蛤成为绝对优势种. 与 5 月份相比, 2011 年和 2012 年 9 月航次皆仅有 1 个绝对优势种即凸壳肌蛤, 其优势度指数是其它底栖动物的 100 倍以上, 但是两者的不同之处在于 2012 年 9 月份的长偏顶蛤(*Modiolus elongatus*) 优势度值比 2011 年的有所回升(表 2).

表 1 渤海湾 2008—2012 年大型底栖动物群落优势种

Table 1 The dominant macrozoobenthos in Bohai Bay during 2008 to 2012

航次	物种名称(生态组)
2008 年 4 月	黄海埃刺梳鳞虫(EGIII)、深钩毛虫(<i>Sigmbra bassi</i> , EGII)、绒毛细足蟹(EGI)、豆形胡桃蛤(EGI)
2009 年 5 月	光滑河篮蛤(EGV)
2009 年 8 月	棘刺锚参(EGII)、绒毛细足蟹(EGI)
2011 年 5 月	凸壳肌蛤(EGIII)、长偏顶蛤(EGI)
2011 年 9 月	凸壳肌蛤(EGIII)
2012 年 9 月	凸壳肌蛤(EGIII)

表 2 渤海湾 2008—2012 年大型底栖动物群落优势种的优势度指数变化情况

Table 2 Changes on the dominant index of the macrozoobenthos community in Bohai Bay during 2008 to 2012

优势种	优势度指数					
	2008 年 4 月	2009 年 5 月	2009 年 8 月	2011 年 5 月	2011 年 9 月	2012 年 9 月
凸壳肌蛤	0.0000	0.0000	0.0000	0.1279	0.1810	0.1290
长偏顶蛤	0.0000	0.0000	0.0000	0.0211	0.0017	0.0154
黄海埃刺梳鳞虫	0.0256	0.0002	0.0000	0.0003	0.0006	0.0001
深钩毛虫	0.0372	0.0000	0.0018	0.0000	0.0003	0.0000
豆形胡桃蛤	0.1230	0.0000	0.0096	0.0002	0.0000	0.0015
光滑河篮蛤	0.0051	0.1658	0.0039	0.0000	0.0000	0.0001
绒毛细足蟹	0.0377	0.0013	0.0274	0.0000	0.0005	0.0003
棘刺锚参	0.0058	0.0043	0.0216	0.0044	0.0003	0.0000

由表 2 可知, 所有优势种中, 黄海埃刺梳鳞虫的优势度逐年降低, 而光滑河篮蛤除在 2009 年 5 月航次占据绝对优势外, 其它年份的优势度较低. 凸壳肌蛤和长偏顶蛤则出现于 2011 年以后的调查中, 其

中凸壳肌蛤一直占绝对优势地位. 除 2009 年 8 月航次外, 绝对优势种皆为营埋栖生活的小型双壳类, 近两年尤为明显. 从优势种的主导地位来看, 2008 年 4 月航次优势种数目最多, 除豆形胡桃蛤外, 各优

势种的主导地位并不明显;2009 年 5 月航次优势种数目下降至 1 种、主导地位升高;2009 年 8 月航次优势种数目较少、主导地位不明显;2011—2012 年优势种占据绝对的优势地位。从优势种生态组别的变化来看(www. azti. es),干扰耐受种(EGIII)的比例逐年增大(表 1)。从季节变化来看,相比 2009 年 5 月航次,2011 年航次的优势种主导地位及干扰耐受种比例皆有所下降;而同是 9 月份的 2011、2012 航次的优势种主导地位及干扰耐受种比例基本保持不变。

3.2 优势种空间分布状况

由图 2a 可知,豆形胡桃蛤分布范围较广,遍布 2008 航次的 16 个站位,以海河口径流延伸线周围的栖息密度最低。2009 年 5 月航次的绝对优势种光滑河篮蛤仅分布在 4 个站,最高值位于黄骅港附近海域,达 $6970 \text{ inds} \cdot \text{m}^{-2}$,约占底栖动物群落总栖息

密度的 56% (本航次调查大型底栖动物总栖息密度为 $12500 \text{ inds} \cdot \text{m}^{-2}$) (图 2b)。与 2009 年 5 月相比,8 月绒毛细足蟹的分布站位也较少,高值区集中在渤海湾南部海域,最高值也同样位于黄骅港附近海域(图 2c)。及至 2011 年 5 月航次,绝对优势种凸壳肌蛤分布于 20 个站位,高值区集中在渤海湾北部海域,而低值区则主要聚集在海河口以南海域,且两者均呈聚集分布(图 2d)。与 5 月份相比,凸壳肌蛤在 9 月份的分布范围略小,同样地,其栖息密度呈现北高南低的分布格局(图 2e),类似的情况也出现在 2012 年 9 月航次(图 2f)。总体来说,2008—2009 年优势种高值区集中在海河口以南海域,优势种分布范围逐渐缩小,而 2011—2012 年优势种高值区则积聚在北部海域,分布范围也逐渐缩小。此外,同是 2011 年,5 月份优势种的分布范围比 9 月份的略广,可能与凸壳肌蛤在 4—5 月份的大量繁殖有关。

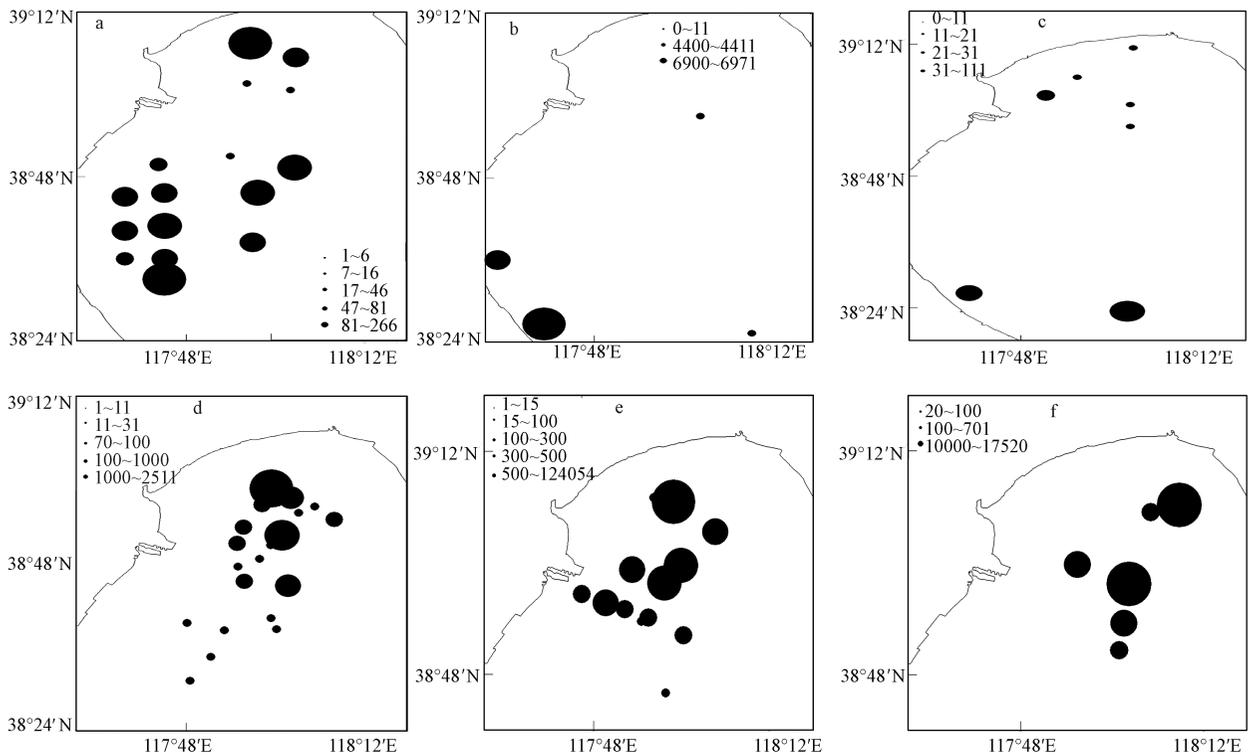


图 2 渤海湾 2008—2012 大型底栖动物主要优势种空间分布(a. 2008 年 4 月航次:豆形胡桃蛤;b、c. 2009 年 5 月、8 月:光滑河篮蛤;d-f. 2011 年 5 月、9 月及 2012 年 9 月:凸壳肌蛤)

Fig. 2 Spatial distributions of the dominant macrozoobenthos in Bohai Bay during 2008 to 2012

4 讨论 (Discussion)

4.1 与历史资料的比较

由表 3 可知,渤海湾大型底栖动物群落优势种变化明显,从 1958 年的经济动物毛蚶,至 20 世纪

80 年代的饵料生物小型甲壳类、双壳类及多毛类(短命机会种),说明 20 世纪 80 年代的渤海湾底栖生境已受到了一定程度的干扰(孙道元等,1991);20 世纪 90 年代优势种基本不变(韩洁等,2001),多为干扰敏感种(EG I)或不敏感种(EG II);2003—

表3 渤海湾、胶州湾、辽东湾、莱州湾大型底栖群落历年优势种

Table 3 The dominant species of macrobenthos community in Bohai, Jiaozhou, Liaodong and Laizhou Bays

海湾	年份	软体动物优势种	环节动物优势种	甲壳动物优势种	棘皮动物优势种	其它类动物	采泥器	网筛孔径/mm	参考文献
渤海湾	1958	毛蚶					—	—	全国海洋普查资料
	1978.9—1980.8	体型较小的单壳类和双壳类软体动物如金星蝶铰蛤					0.05或0.1m ² HNM型采泥器	1.0	崔玉珩等,1983
	1982.6;1983.11			绒毛细足蟹、葛氏长臂虾			0.1m ² HNM型采泥器	1.0	孙道元等,1991
	1985.5—1985.6	彩虹明樱蛤、内肋蛤	短命多毛类如索沙蚕、背蚓虫、梳鳃虫				0.1m ² HNM型或Smith-McIntyre型采泥器	0.5	张志南等,1990a;1990b
	1997—1998	毛蚶、扁玉螺、红带织纹螺		口虾蛄、葛氏长臂虾、隆线强蟹	棘刺锚参		0.1m ² 箱式采泥器	0.5	胡颖琰等,2000
	2003.7	竹蛭、脆壳理蛤	异蚓虫、不倒翁虫、			短吻铲荚蛭	0.05m ² 箱式采泥器	0.5	张培玉,2005
	2004.8	脆壳理蛤		日本鼓虾			0.05m ² 箱式采泥器	0.5	冯剑丰等,2011
2005.5,2005.8	无明显的优势种					0.05m ² 采泥器	0.5	房恩军等,2006	
2007.8	脆壳理蛤、小胡桃蛤	涡虫		绒毛细足蟹			0.05m ² 箱式采泥器	0.5	冯剑丰等,2011
胶州湾	1980.12—1981.11	菲律宾蛤仔、金星蝶铰蛤	不倒翁虫、寡鳃齿吻沙蚕、拟特须虫	豆形短眼蟹、异足倒颚蟹、仿盲蟹sp.、绒毛细足蟹等	棘刺锚参、日本倍棘蛇尾		0.1m ² 表层采泥器	—	孙道元等,1996
	1991.5—1994.2	软体与1980—1981类似	多毛类与1980—1981相同	甲壳也是蟹类	细雕刻肋海胆				孙道元等,1996
	1998.2—2004.11	滑理蛤、豆形胡桃蛤					0.1m ² 抓斗式采泥器	0.5	李宝泉等,2006
	2009.2	菲律宾蛤仔、缢蛭、凸壳肌蛤、光滑河篮蛤	丝异蚓虫	日本大眼蟹			0.1m ² 箱式采泥器	1.0	张崇良等,2010
莱州湾	1982—1983	凸壳肌蛤、江户明樱蛤	不倒翁虫、长吻沙蚕、寡节甘吻沙蚕、乳突叶须虫	绒毛细足蟹、日本鼓虾、纤细长涟虫	日本倍棘蛇尾、金氏蛇尾、棘刺锚参、心形海胆		0.1m ² HNM型采泥器	1.0	孙道元等,1991
	1985.5—6	穴居型的双壳类软体动物和棘皮动物	多毛类				0.1m ² HNM型或Smith-McIntyre型采泥器	0.5	张志南等,1990b
	1997.6—1998.7			颗粒拟关公蟹、涟虫、脊尾白虾、中国毛虾、绒毛细足蟹			0.1m ² 箱式采泥器	0.5	胡颖琰等,2000
	2006.11	小亮樱蛤	不倒翁虫	杯尾水虱、中华螺赢蜚			0.1m ² 箱式采泥器	0.5	周红等,2010
	2010.5;2010.9	紫壳阿文蛤	小头虫、奇异稚齿虫	伍氏螯蛄虾			—	—	张莹等,2012
2010.10	耳口露齿螺	小头虫				—	—	张莹等,2012	
辽东湾	1982—1983	油胡桃蛤、灰双齿蛤、光滴形蛤、长偏顶蛤、秀丽波纹蛤	强鳞虫、细蛇潜虫、寡鳃齿吻沙蚕、不倒翁虫、索沙蚕、拟特须虫、长吻沙蚕、似蛭虫、乳突叶须虫、持真节虫、梳鳃虫	细长涟虫、三叶针尾涟虫、长尾虫、日本鼓虾、细螯虾、日本浪漂水虱	光亮倍棘蛇尾、日本倍棘蛇尾		0.1m ² HNM型采泥器	1.0	孙道元等,1991
	2007.7	扁玉螺、西格织纹螺、津知圆蛤、光滑河篮蛤	不倒翁虫、拟节虫、扁蛭虫、强磷虫	日本浪漂水虱、仿盲蟹、细螯虾	日本倍棘蛇尾、棘刺锚参、中华倍棘蛇尾		0.1m ² 的静力式采泥器	1.0	刘录三等,2009

2007 年优势种变化较大,以生命周期短、生长快的二阶机会种(EGIV)为主,说明 21 世纪初期的渤海湾底栖生境受干扰的程度强于上世纪 80、90 年代;2008 年底栖生境的干扰程度有所降低,而至 2009 年干扰强度则增大,表现为优势种物种数目下降,优势主导地位上升,由单一的二阶机会种占据绝对优势;2011 年后,凸壳肌蛤迅速占据主导地位.但相比 2011 年,2012 年其分布范围和优势地位有所回落,可能与近几年多种高营养级物种的人工增殖放流成功,在一定程度上改善了底栖动物群落结构,底栖生境部分恢复有关.鉴于渤海湾严重的污染现状,生态恢复还需要一个漫长的过程,因此短期内干扰耐受种的绝对优势地位不会发生明显的变化.值得注意的是,2009 年 5 月航次的绝对优势种仅在 4 个站出现,尤其是在南部河口区的 2 个站位栖息密度极高,这可能是由于河口区营养盐丰富,有利于生物生长繁殖.此外,春季是光滑河篮蛤的增殖期,此时的光滑河篮蛤栖息密度较大,但由于 5 月份并不是光滑河篮蛤最肥满期(9 月为其最肥满期),因此个体较小(蔡文倩等,2013),生物量并不大($154.44 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,占总栖息密度的 17.29%).

4.2 与胶州湾、莱州湾以及辽东湾的优势种演变状况比较

由表 3 可知,胶州湾的优势种首推菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*),但个体小、生命周期短、季节变化较为明显的饵料生物也占一定的优势(刘瑞玉等,1992;李宝泉等,2006).20 世纪 90 年代后期菲律宾蛤仔人工养殖种群和自然种群混淆,其优势地位有待商榷.尽管整体上该海湾的主要优势种基本不变,但是个别优势种,尤其是光滑河篮蛤、凸壳肌蛤等的优势地位有所上升,说明胶州湾底栖动物群落结构也发生了一些变化(李宝泉等,2006;张崇良等,2010).20 世纪 80 年代初期,凸壳肌蛤为莱州湾的绝对优势种,在小清河口外海栖息密度达 $8283 \text{ inds}\cdot\text{m}^{-2}$ (孙道元等,1991),说明底栖群落结构物种均匀性及稳定性较差;20 世纪 80 年代中期至 2006 年,除多毛类外,穴居型的双壳类软体动物、小型蟹类和棘皮动物占据明显的优势,底栖物理环境相对稳定(张志南等,1990b;胡颢琰等,2000;周红等,2010);而到了 2010 年,莱州湾的主要优势种为指示严重污染的小头虫,底栖生境受到了较强的干扰(张莹等,2012).辽东湾则因为数据较少,无法得知 20 世纪 90 年代辽东湾优势种变化情况,但根

据现有数据可知辽东湾常见优势种类数减少,小型机会种双壳类,如光滑河篮蛤成为绝对的优势种,说明辽东湾的底栖生境也发生了较大变化(刘录三等,2009).

将上述 4 个海域进行比较,同处渤海海域的渤海湾、辽东湾、莱州湾底栖动物群落优势种均以营埋栖生活的小型双壳类和甲壳类为主,变化规律也均是个体较小、生长周期较短的物种代替个体较大、生长周期较长的物种.值得注意的是,莱州湾 20 世纪 80 年代的绝对优势种凸壳肌蛤,20 世纪 90 年代以后优势地位渐失,反而在胶州湾及渤海湾迅速增值成为绝对优势种,如在渤海湾北塘口排污区附近海域,栖息密度高达 $124050 \text{ inds}\cdot\text{m}^{-2}$.研究证实,凸壳肌蛤一旦成功扩散,便以绝对优势在区域生态系统中占据重要地位(中国海湾志,1994),对当地的大型底栖动物群落结构的稳定性产生不良的影响(薛俊增等,2011;杜永芬等,2012).凸壳肌蛤的严重危害发生在 4—5 月份的繁殖期,表现为与贝类争夺饵料,分泌的足丝连成一片,使其它双壳类难以与地表相通,影响养殖贝类摄食、呼吸和运动,甚至把蛤仔闷死(杨德渐等,1996;张仪浩,2009).本研究中,渤海湾凸壳肌蛤丰度较高的站位,物种丰富度仅为 1~3 种,个体数也较少,说明凸壳肌蛤已影响了渤海湾底栖动物群落结构的稳定性.此外,凸壳肌蛤在胶州湾和渤海湾的迅速增值,在莱州湾的减少,也说明了这 3 个海湾底栖生境发生了一定程度的改变,导致前两者生境更适合于该种生存,而后者对该种的适合度下降.

4.3 渤海湾大型底栖动物群落优势种时空变化原因

4.3.1 渤海湾本身底质状况及水动力条件的影响

底质特征是控制大型底栖动物分布的重要环境因子(Sanders, 1956;李新正等,2006).底质不同,底栖动物的栖息种类、丰富度、密度和生物量会有较大差异(李宝泉等,2005).一般来说,底质特征与沉积物的来源和环流扩散密切相关.渤海湾沿岸河流输入的大量细颗粒泥沙为营埋栖生活的小型双壳类、甲壳类、浅穴居、小型多毛类以及棘刺锚参等提供了良好的栖息环境,因此该研究区域一直以来均以上述底栖动物为优势种.20 世纪 50 年代至 80 年代,黄河、滦河和海河每年都携带大量富含营养物质的泥沙入海(秦蕴珊等,1985),使得渤海湾物种丰富,食物链稳定有序,大型经济物种较多,饵料生

物如小型双壳类虽然常见,但并不占据主导地位. 21世纪以后,主要入海河流,如黄河、滦河的季节性断流(枯水期)导致冲淡水量和入海泥沙量降低,加之海湾周围大量围海造陆工程的实施,减缓了近岸余流速度(Zheng *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2007),泥沙的输运能力减弱,从而改变了渤海湾近岸海域的沉积物组分. 2007年临港工业区围海造陆一期主体工程完成,工程对水体泥沙、悬浮物的影响减小,附近海域特别是远岸的海域生态环境恢复到之前的状态,底栖动物在丰富度上明显增加,使得2007、2008年的底栖动物优势种群的主导地位有所降低,群落内物种分布趋向均匀(冯剑丰等,2011;王瑜等,2010). 然而,2009年滨海新区围海造陆工程的重新启动,底栖生境的干扰加重,导致优势种主导地位骤升,物种数目降低. 此外,近年来天津港航道疏浚工程也对该地区的沉积环境影响较大(冯剑丰等,2011),甚至导致大型底栖动物灭绝(Li *et al.*, 2010). 本研究中,沉积环境的改变应是凸壳肌蛤在渤海湾成功拓殖的重要因素之一. 已有研究证实,相对均一的粘土质粉砂更适合于贝类生长(王爱军等,2006),滩面粘土含量的减少,为凸壳肌蛤成功拓殖提供最直接的驱动力(杜永芬等,2012),而2011年9月调查区的沉积物组分以粘土质粉砂为主,这也可能为凸壳肌蛤在渤海湾的大量增殖提供了合适的沉积环境.

渤海湾优势种空间分布的变化也可能与沉积物组分的改变有关. 如上所述,沿岸河流输入的细颗粒泥沙,在双环环流结构的影响下,渤海湾南北沉积物组分差异较大(秦蕴珊等,1985;赵保仁等,1995;韩宗珠等,2011). 同时,围海造陆工程导致天津港南部至黄骅港北部间的逆时针沿岸余流有所减小,减弱了黄河口泥沙的搬运速度,加上海河、滦河的季节性断流及天津港北部逆时针环流的消失导致渤海湾北部海域入海泥沙量减少(秦延文等,2012),从而形成了泥沙堆积南高北低的格局,本研究中优势种南高北低的空间分布格局验证了沉积物组分差异对底栖动物群落结构的影响. 此外,凸壳肌蛤在北部海域的大量聚集可能是因为该部分海域的底栖生境扰动程度较高,使得对环境变化敏感的小型双壳类栖息密度下降,从而为适应能力更强的凸壳肌蛤腾出更多的生态位,导致其迅速扩张.

4.3.2 陆源排污的影响 入海河流携带大量的营养盐和污染物进入渤海湾,加重了该海域的营养盐

负荷,加之沿岸水动力条件的变化,导致营养盐从近岸向外海的输移速率降低,使得渤海湾富营养化状况不断恶化,赤潮频发(Liu *et al.*, 2011; Zheng *et al.*, 2011). 而底泥中的重金属在总氮和总磷含量较高的情况下,通过水体的交换作用,也会对水体富营养化产生影响(刘成等,2003). 研究证实,自2003年以来,北塘和大沽排污口一直是渤海湾氮、磷污染严重区域,而水动力条件的变化导致营养盐向渤海湾北部海域转移输运,营养盐高值区从河口地区移向渤海湾东北部(曹妃甸)近岸海域(秦延文等,2012). 正因如此,近2年凸壳肌蛤在渤海湾北部海域迅速扩张,取代豆形胡桃蛤等干扰敏感种而占据绝对优势地位. 此外,光滑河篮蛤在2009年5月航次占据绝对优势,而在8月份则被棘刺锚参和绒毛细足蟹代替,可能与南部海域丰水期污染程度稍高有关(Tao *et al.*, 2008).

4.3.3 食物链变化的影响 大型底栖动物群落是海洋生态系统食物链中的重要一环,受到许多复杂的生物间的相互作用(Holland *et al.*, 1980; Holland, 1985),可为底层鱼类、海鸟提供食物,相互之间的捕食关系也较为密切,从而形成复杂的食物网. 日益剧烈的人类活动干扰,如过度捕捞、陆源排污等,使得近60年来渤海湾食物链发生了较大的变化(许思思,2011),底栖动物群落优势种更迭明显. 其中,高强度的渔业捕捞是渤海湾食物链改变的重要影响因素(金显仕,2001),如1962—1988年大规模的捕虾活动(韩洁等,2001),导致了20世纪70年代末期虾类的饵料生物如金星蝶较蛤的优势地位迅速上升(崔玉珩等,1983). 而20世纪50年代的特征种毛蚶,在20世纪70年代产量可达20多万吨,但由于长期的过度捕捞及环境污染等因素,导致毛蚶资源日益匮乏,优势地位逐年下降(孙道元等,1991).

硅藻在海洋生态系统的牧食食物链中占据重要的位置(沈国英等,2002). 尽管硅藻门生物仍是渤海湾浮游生物群落的主要优势种(陈建华等,2006;刘素娟,2007),但是人类排污和养殖业的污染诱发的富营养化导致硅浓度降低而氮磷比升高,一定程度上使得渤海湾生态系统的硅藻食物链被削弱. 通过食物链的传递作用,影响了该海域主要渔业资源结构的变化(许思思,2011),总体变化趋势为个体较大、营养层级较高的种类逐渐被个体较小、营养层级较低的种类代替,肉食性鱼类逐渐减

少. 捕食天敌的减少,使得作为饵料生物的双壳类,如光滑河篮蛤、凸壳肌蛤迅速繁殖(张仪浩,2009),占据渤海湾底栖动物的绝对优势地位.

4.3.4 其它原因 一般来说,在进行优势种纵向比较时,各个航次的调查范围、采泥器种类及网筛孔径的不同会造成底栖动物样品的统计结果差异. 首先,调查范围的不同会导致底栖动物物种数目、栖息密度、生物量和多样性的差异. 其次是采泥器种类的不同. 一般情况下,抓斗式采泥器密闭性差,一些小个体种类尤其是多毛类很容易随水流掉,客观上降低了底栖动物群落结构参数值,而箱式采泥器密闭性好,能将沉积物及上覆水完好地采上来,获得较为完整的底栖动物群落(刘录三等,2012). 再次,网筛孔径不同也会带来差异. 研究证实,0.5 mm 孔径的网筛所获得的底栖动物样品在种类和数量组成上皆优于1 mm 的网筛,样品的群落结构更加完整,代表性更高. 尤其是在底栖动物的繁殖季节,采用0.5 mm 孔径的网筛获得的样品代表性明显较高(张培玉,2005). 本研究中所涉及各个航次的调查方式,大多使用0.1 m²箱式采泥器或大洋-50型采泥器,网筛也多采用0.5 mm 孔径,因此对研究结果的影响不大(表3).

5 结论(Conclusions)

1) 近些年,渤海湾的优势种多为营埋栖生活的小型双壳类和蟹类. 与历史资料相比,渤海湾大型底栖动物群落的优势种变化较大,变化规律基本为个体较小、生命周期较短、对环境耐受更强的物种取代个体较大、生命周期较长、对环境敏感性更强的物种. 优势种群的变化规律与渤海湾底栖生境的变化较为吻合. 特别地,污损种凸壳肌蛤已成为近2年的绝对优势种,主要聚集在渤海湾北部海域,已对该海域底栖动物群落结构的稳定性带来了不良的影响.

2) 渤海湾优势种与胶州湾、莱州湾和辽东湾的同质性较高,变化规律也较为相似. 而凸壳肌蛤在胶州湾和渤海湾的迅速增值,在莱州湾的减少,说明这3个海湾的底栖生境变化明显,前2个海湾更适于该种生长繁殖. 值得注意的是,凸壳肌蛤的环境适应能力强,能够迅速侵占滩涂养殖贝类的生活空间,并分泌足丝连成一片,使其它双壳类难以与地表相通,影响养殖贝类摄食、呼吸和运动,甚至把蛤仔闷死,对水产养殖业以及其它贝类的生长繁殖

产生极大的危害. 在以后的研究中,应适当加强该种的生物学研究,以减轻其对底栖动物群落结构的危害程度.

3) 近60年来,渤海湾大型底栖动物群落的优势种变化与渤海湾本身的底质状况及水动力条件变化、陆源排污、食物网变化有较大关系. 由于海洋生态系统的复杂性,影响底栖生物的因素众多,影响程度也各不相同,很难用一种或几种环境因素的变化解释优势种的长期演变规律,更多是许多环境和生物因子相互作用的结果.

责任作者简介:孟伟(1956—),男,理学博士、中国工程院院士,博士生导师,全国人大代表,享受国务院有突出贡献专家和政府特殊津贴. 主要从事近岸海域环境保护科学研究、流域与河口海岸带水环境与生态保护科学研究以及废弃物安全填埋处置选址与环境影响评价研究. 近年来,主持承担完成国家“863”计划课题“渤海典型海岸带生境修复技术研究”等各类科研项目20余项. 现已发表论文30余篇,出版专著7部,获省部级科技进步奖10余项.

参考文献(References):

- Borja A, Franco J, Pérez V. 2000. A marine biotic index to establish the ecological quality of soft-bottom benthos within European estuarine and coastal environments[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 40(12): 1100-1114
- 蔡文倩,刘录三,乔飞,等. 2012. 渤海湾大型底栖生物群落结构变化及原因探讨[J]. *环境科学*, 33(9): 3104-3109
- 蔡文倩,孟伟,刘录三,等. 2013. 春季渤海湾大型底栖动物群落结构特征研究[J]. *环境科学学报*, 33(5): 1458-1466
- 陈建华,阎斌伦,高焕. 2006. 毛蚶生物学特性及其研究进展[J]. *河北渔业*, 9: 24-49
- 陈宜清,林建任. 2007. 探讨以生态指标应用于海岸油污染之环境敏感度的设定[A]. 第29届海洋工程研讨会论文集[C]. 国立成功大学,台湾,469-474
- 崔玉珩,孙道元. 1983. 渤海湾排污区底栖动物调查初步报告[J]. *海洋科学*, 3: 29-35
- 杜永芬,高抒,于子山,等. 2012. 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*, 23(7): 1904-1912
- 房恩军,李军,马维林,等. 2006. 渤海湾近岸海域大型底栖动物(Macrofauna)初步研究[J]. *现代渔业信息*, 21(10): 11-15
- 冯剑丰,王秀明,孟伟庆,等. 2011. 天津近岸海域夏季大型底栖生物群落结构变化特征[J]. *生态学报*, 31(20): 5875-5885
- Gao X, Chen C T A. 2012. Heavy metal pollution status in surface sediments of the coastal Bohai Bay[J]. *Water Research*, 46(6): 1901-1911
- 韩洁,张志南,于子山. 2001. 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*, 31(6): 889-896
- 韩宗珠,张军强,邹昊,等. 2011. 渤海湾北部底质沉积物中黏土矿物组成与物源研究[J]. *中国海洋大学学报*, 41(11): 95-102
- Holland A F, Mountford N K, Hiegel M H, et al. 1980. Influence of

- predation on infaunal abundance in Upper Chesapeake Bay, USA [J]. *Marine Biology*, 57(3): 221-235
- Holland A F. 1985. Long-term variation of macrobenthos in a mesohaline Region of Chesapeake Bay[J]. *Estuaries*, 8(2A): 93-113
- 胡颖琰, 黄备, 唐静亮, 等. 2000. 渤、黄海近岸海域底栖生物生态研究[J]. *东海海洋*, 18(4): 39-46
- 金显仕. 2001. 渤海主要渔业生物资源变动的研究[J]. *中国水产科学*, 7(4): 22-26
- 李宝泉, 李新正, 于海燕, 等. 2005. 胶州湾大型底栖软体动物与环境因子的关系[J]. *海洋与湖沼*, 36: 193-198
- 李宝泉, 李新正, 王洪法, 等. 2006. 胶州湾大型底栖软体动物物种多样性研究[J]. *生物多样性*, 14(2): 136-144
- Li K Y, Liu X B, Zhao X G, *et al.* 2010. Effects of reclamation projects on marine ecological environment in Tianjin Harbor Industrial Zone [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2: 792-799
- 李新正, 李宝泉, 王洪法, 等. 2006. 胶州湾潮间带大型底栖动物的群落生态[J]. *动物学报*, 52(3): 612-618
- 刘成, 王兆印, 何耘, 等. 2003. 环渤海诸河口底质现状的调查研究[J]. *环境科学学报*, 23(1): 58-63
- 刘录三, 孟伟, 李子成, 等. 2009. 辽东湾北部海域大型底栖动物研究 II. 生物多样性与群落结构[J]. *环境科学研究*, 22(2): 155-161
- 刘录三, 郑丙辉, 李宝泉, 等. 2012. 长江口大型底栖动物群落的演变过程及原因探讨[J]. *海洋学报*, 34(3): 134-145
- Liu S, Lou S, Kuang C, *et al.* 2011. Water quality assessment by pollution-index method in the coastal waters of Hebei Province in western Bohai Sea, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 62(10): 2220-2229
- 刘瑞玉, 徐凤山, 崔玉珩. 1992. 大型底栖动物生态学// 刘瑞玉. 胶州湾生态学和生物资源[M]. 北京: 科学出版社. 220-229
- 刘素娟. 2007. 渤海湾浮游植物的生态研究[D]. 天津: 天津大学, 64
- 聂红涛, 陶建华. 2008. 渤海湾海岸带开发对近海水环境影响分析[J]. *海洋工程*, 26(3): 44-50
- Ning X, Lin C, Su J, *et al.* 2010. Long-term environmental changes and the responses of the ecosystems in the Bohai Sea during 1960-1996 [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 57(11/12): 1079-1091
- 秦蕴珊, 赵一阳, 赵松龄, 等. 1985. 渤海地质[M]. 北京: 科学出版社. 232
- Qin Y W, Zheng B H, Lei K, *et al.* 2011. Distribution and mass inventory of polycyclic aromatic hydrocarbons in the sediments of the south Bohai Sea, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 62(2): 371-376
- 秦延文, 张雷, 郑丙辉, 等. 2012. 渤海湾岸线变化(2003—2011年)对近岸海域水质的影响[J]. *环境科学学报*, 32(9): 2149-2159
- Sanders H L. 1956. Oceanography of long island sound, 1952-4, X. The biology of marine bottom communities[J]. *Bulletin of Bingham Oceanography Collection*, 15: 345-414
- 沈国英, 施并章. 2002. 海洋生态学[M]. 北京: 科学出版社. 156
- 孙道元, 刘银城. 1991. 渤海底栖动物种类组成和数量分布[J]. *黄渤海海洋*, 9(1): 42-50
- 孙道元, 张宝琳, 吴耀泉. 1996. 胶州湾底栖生物动态的研究[J]. *海洋科学集刊*, 37: 103-114
- Tao J, Mu D. 2008. Numerical simulation of aquatic Eco-environment of Bohai bay[A]. *Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress*[C]. Honolulu, USA. 34-42
- 王爱军, 高抒, 贾建军. 2006. 互花米草对江苏潮滩沉积和地貌演化的影响[J]. *海洋学报*, 28(1): 92-99
- Wang C Y, Wang X L. 2007. Spatial distribution of dissolved Pb, Hg, Cd, Cu and As in the Bohai Sea [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 19(9): 1061-1066
- 王悦, 林霄沛. 2006. 地形变化下渤海湾 M2 分潮致余流的相应变化及其对污染物运输的影响[J]. *中国海洋大学学报*, 36(1): 1-6
- 王瑜, 刘录三, 刘存歧, 等. 2010. 渤海湾近岸海域春季大型底栖生物群落特征[J]. *环境科学研究*, 23(4): 430-436
- 许思思. 2011. 人为影响下渤海湾渔业资源的衰退机制[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所. 132
- 薛俊增, 王宝强, 庄骅, 等. 2011. 洋山港码头污损生物的群落结构和多样性研究[J]. *科技导报*. 29(3): 66-70
- 杨德渐, 王永良. 1996. 中国北部海洋无脊椎动物[M]. 北京: 高等教育出版社. 243
- 张崇良, 任一平, 薛莹, 等. 2010. 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*, 17(3): 551-560
- 张培玉. 2005. 渤海湾近岸海域底栖生物生态学与环境质量评价研究[D]. 青岛: 中国海洋大学. 184
- 张仪浩. 2009. 浙江沿海贻贝种类形态比较研究[J]. *渔业经济研究*, 2: 14-20
- 张莹, 刘元进, 张英, 等. 2012. 莱州湾多毛类底栖动物生态特征及其对环境变化的响应[J]. *生态学杂志*, 31(4): 888-895
- 张志南, 图立红, 于子山. 1990a. 黄河口及其邻近海域大型底栖动物的初步研究(一)生物量[J]. *青岛海洋大学学报*, 20(1): 37-45
- 张志南, 图立红, 于子山. 1990b. 黄河口及其邻近海域大型底栖动物的初步研究[J]. *青岛海洋大学学报*, 20(2): 45-52
- 赵保仁, 庄国文, 曹德明, 等. 1995. 渤海的环流、潮余流及其对沉积物分布的影响[J]. *海洋与湖沼*, 26(5): 466-473
- Zheng B H, Zhao X R, Liu L S, *et al.* 2011. Effects of hydrodynamics on the distribution of trace persistent organic pollutants and macrobenthic communities in Bohai Bay[J]. *Chemosphere*, 84(3): 336-341
- 中国海湾志编纂委员会. 1994. 中国海湾志第七卷. 福建北部海湾[M]. 北京: 科学出版社. 293
- 周红, 华尔, 张志南. 2010. 秋季莱州湾及邻近海域大型底栖动物群落结构的研究[J]. *中国海洋大学学报*, 40(8): 80-87
- Zhou H, Zhang Z N, Liu X S, *et al.* 2007. Changes in the shelf macrobenthic community over large temporal and spatial scales in the Bohai Sea, China [J]. *Journal of Marine Systems*, 67(3/4): 312-321