



论文

中国知名大学及研究所专栏 中国科学院烟台海岸带研究所专辑

渤海南部海域大型底栖动物群落演变特征及原因探讨

陈琳琳^①, 王全超^{②③}, 李晓静^{①③}, 周政权^{①③}, 李宝泉^{①*}

中国科学院烟台海岸带研究所, 烟台 264003;

中国科学院海洋研究所, 青岛 266071;

中国科学院大学, 北京 100049

* 联系人, E-mail: bqli@yic.ac.cn

收稿日期: 2016-01-11; 接受日期: 2016-03-16; 网络版发表日期: 2016-08-26

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

摘要 根据 50 多年来渤海南部海域大型底栖动物群落的历史资料, 以及 2011~2013 年的现场调查数据, 从渤海南部包括黄河口邻近海域及莱州湾大型底栖动物群落结构变化特征出发, 分析了其长期演变的过程和规律, 旨在阐明底栖动物群落的演变趋势, 识别其重要的演变时段. 并结合 50 年来渤海南部海域相关底栖环境因子的变化特征, 探讨底栖动物群落的演变原因. 过去 50 余年来, 渤海南部海域大型底栖动物群落在物种数、生物量、丰度以及群落结构组成等方面都发生了较大的变动, 具体表现为寿命长、体积大、具有高竞争力的 *K* 对策种的优势地位正逐渐丧失, 而被寿命短、适应能力宽、具有高繁殖能力的 *R* 对策种所取代. 按照 50 余年来渤海南部海域大型底栖动物群落的变化特征, 大体可分为 3 个阶段: 第一阶段是 20 世纪 60 年代之前, 底栖动物群落物种数水平低, 生物量和丰度均维持在相对较高的水平, 经济型个体较大的软体动物和甲壳动物是群落中的主要贡献类群; 第二阶段发生在 20 世纪 80 年代至 2006 年, 物种数水平升高, 生物量水平降低, 小型的软体及棘皮动物成为优势类群; 第三阶段是 2006 年之后至今, 底栖动物群落有一定程度的恢复, 表现在生物量的上升与软体动物、甲壳动物优势地位的逐渐恢复. 通过对渤海南部各种环境因素的分析表明, 底栖动物群落的长周期变化是渤海南部海域多种环境因素、生物因素变化及人类活动综合作用的结果.

关键词 大型底栖动物, 群落演替, 黄河口, 莱州湾, 渤海

气候变化和人类活动引起的河口和海岸带生态系统的演变与退化在全球已成为非常普遍的现象. 大型底栖动物是海洋生态系统能量和物质循环的重

要组成部分, 且其群落结构的长周期变化能够客观地反映海洋环境的特点和环境质量状况, 是生态系统健康的重要指示生物, 其群落结构特征常被用于

引用格式: 陈琳琳, 王全超, 李晓静, 等. 渤海南部海域大型底栖动物群落演变特征及原因探讨. 中国科学: 生命科学, 2016, 46: 1121-1134
Chen L L, Wang Q C, Li X J, et al. Long-term trends of macrobenthos in Southern Bohai Sea, China, in relation to environmental changes. *Sci Sin Vitae*, 2016, 46: 1121-1134, doi: 10.1360/N052016-00063

监测人类活动或自然因素引起的长周期海洋生态系统变化^[1-4]。对底栖动物群落结构进行长周期变化和趋势的研究,已在不同海域开展了较多的工作,并取得了较好的成果^[5-10]。然而,由于这样的研究需要长期和大量的数据积累以及大量的人力和财力投入,也限制了其在各类海域的普遍展开。

渤海南部海域主要包括黄河口邻近海域和莱州湾,蓬莱近岸、莱州湾西部、东部以及东营近岸分布有重要产卵场(山东省海洋渔业厅,2009)。近年来,渤海南部受到污染日趋严重,导致渔场逐渐减少,已经不能形成渔汛。莱州湾为半封闭型海湾,是渤海渔业生物资源的重要产卵场和栖息地,水交换能力较差,沿岸有黄河、小清河、弥河、潍河、胶莱河等河流的注入,容易形成污染。近几十年来,黄河及沿岸几十条河流携带入海的大量泥沙、营养盐以及两岸城市群排放的有机污染物、重金属等涌入渤海,还有其他各种人类活动如围填海、大型水利工程建设、过度捕捞、海水养殖、石油和天然气的过度开发等已对渤海生态系统造成了严重的影响^[11,12]。研究表明,莱州湾渔业资源及底栖动物物种多样性和资源量严重衰退^[13,14]。近年来,随着东营、潍坊和烟台3市沿岸经济的迅速发展和海上人类活动的加剧以及黄河径流量的急剧减少所带来的水层和沉积环境的改变,包括莱州湾在内的渤海生态系统的结构和功能正经历着快速变化和退化的进程^[15]。

我国对渤海南部底栖动物的大规模调查可追溯到20世纪50年代末,在之后的几十年时间里,随着一系列研究项目的实施,有关渤海南部包括黄河口邻近海域及莱州湾底栖动物的种类组成、群落结构、功能组成、次级生产力以及生物多样性等科研成果不断涌现,人们对该海区底栖动物群落的认识也逐渐明确和深化^[16-21]。然而,以往的研究主要侧重在黄河口水下三角洲及其邻近海域、渤海中南部、渤海湾、莱州湾的大型底栖动物短周期的研究,鲜见针对渤海南部大型底栖动物群落的长周期分析。

本文主要采用2011~2013年渤海南部区域开展的现状调查数据以及50余年来相同海域已取得的研究成果和资料,从渤海南部包括黄河口邻近海域及莱州湾大型底栖动物群落结构变化特征出发,分析其长期演变的过程和规律,旨在阐明该群落的演变特征和趋势,识别其重要的演变时段,并结合50余年来渤海南部海域相关底栖环境因子的变化特征,

探讨导致底栖动物群落的演变的主要原因。

1 材料与方法

1.1 群落现状调查海域及取样方法

渤海南部海域大型底栖动物群落现状调查时间为2011年5、8月,2012年11月及2013年9、10月,调查区域包括黄河口邻近海域及莱州湾。其中,2011~2012年进行的3个航次调查中,共设置调查站位19个(图1,1~19站位),主要包括黄河口及邻近海域。由于天气情况等原因,各航次采样站数有所差别;其中2011年5月调查19个站位,8月调查18个站位,2012年11月调查10个站位。2013年秋季共调查13个站位(图1,L字母为首的站点),主要分布于莱州湾包括龙口人工岛附近海域。调查水域位于 $37^{\circ}28' \sim 37^{\circ}89'N$ 与 $119^{\circ}05' \sim 120^{\circ}28'E$ (图1)。

调查采用面积 0.1 m^2 的箱式采泥器取样,每站成功取样2次合并为一个样品处理。泥样用孔目为 0.5 mm 孔径网筛分选后用95%酒精现场固定,并带回实验室进行种类鉴定、个体计数及称重(湿重)等工作,样品的处理、保存、计数及称重均按照《海洋调查规范》(GB/T12763.6-2007)进行。

1.2 数据分析处理

群落优势种通过计算物种优势度指数(Y),当 $Y>0.02$ 时,即认为该物种为优势种,根据优势度理论,优势度相对不明显的底栖动物,其群落结构相对

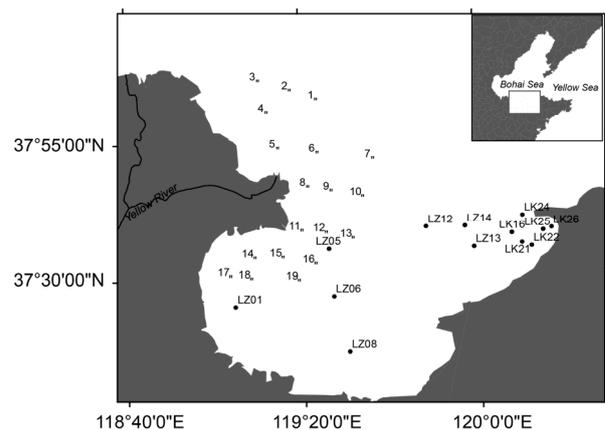


图1 渤海南部海域大型底栖动物调查站位图

站号1~19为黄河口及邻近海域采样站点;以L字母为首的为莱州湾包括龙口人工岛附近海域采样站点

稳定, 及优势度指数越小, 表明群落内物种数量分布越均匀, 优势种地位相对不突出^[22].

$$\text{优势度指数: } Y = (n_i / N) \times f_i, \quad (1)$$

式中 N 为所有站位采集的大型底栖动物总个体数目; 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.

对群落数据采用 PRIMER 6.0(plymouth marine laboratory)^[23]软件包中包含的一系列多元统计程序进行分析. 群落结构分析基于种丰度矩阵, 经双平方根转换, Bray-Curtis 相似性计算进行组平均连接的等级聚合聚类(cluster)和丰度量多维标度排序(MDS), 以此实现对群落的划分.

在进行底栖动物群落年际变化分析时, 为增加历史数据的可比性, 尽量选择和本调查相似的区域、相同的调查季节以及近似的采样方法所获得的有关物种数量、生物量和丰度等数据, 但由于以往调查者的目的和侧重点有所差异, 因此调查站位很难完全一致. 本文采取统计黄河口及莱州湾邻近水域而没有具体到采样站位的方式, 进行现状和历史资料的比较, 分析渤海南部水域大型底栖动物的长期变动情况.

2 结果与分析

2.1 渤海南部海域大型底栖动物群落特征及时空分布现状

(1) 物种组成及优势种. 2011~2012年, 黄河口及邻近海域3个航次调查共获大型底栖动物162种, 群落中优势类群依次为环节动物多毛类、软体动物、节肢动物甲壳类和棘皮动物, 其中环节动物多毛类55种, 软体动物和甲壳类物种数相同, 均为46种, 棘皮动物5种; 其他种类(包括底栖性鱼类、腔肠动物、纽虫、星虫等)10种(占6%). 2013年秋季, 莱州湾调查共采到大型底栖动物66种. 其中多毛类26种, 占总种数的39.4%; 软体动物18种, 占总种数的27.2%; 甲壳动物16种, 占总种数的24.2%; 棘皮动物3种, 占总种数的4.5%; 其他动物共3种, 占总种数的4.5%. 2011~2012年, 3个航次出现物种数量存在差异, 以春季87种最多; 夏季83种仅次之; 秋季73种最少. 春季群落的优势类群为甲壳动物, 而夏季及秋季均为多毛类. 2013年秋季, 莱州湾中部及东部区

域, 多毛类占优势地位.

群落中的优势种组成在不同航次间亦有差别(表1). 2011年春季调查海区内底栖动物优势度不明显, 优势度大于0.02的物种仅4种, 分别为多毛类寡节甘吻沙蚕(*Glycinde gurjanovae* Uschakov et Wu)、异足索沙蚕(*Lumbrineris heteropoda* (Marenzeller))、棘皮动物日本倍棘蛇尾(*Amphioplus japonicas* Lonnberg)以及甲壳类纤细长涟虫(*Iphinoe tenera* Lomakina); 夏季则以软体动物耳口露齿螺(*Ringicula* (*Ringiculina*) *doliaris* Gould)、紫色阿文蛤(*Alveolus sojanius* (Yokoyama))、小亮樱蛤(*Nitidotellina minuta* (Lischke))及彩虹明樱蛤(*Moerella iridescens* (Benson))等几种小型贝类以及多毛类寡节甘吻沙蚕(*G. gurjanovae* Uschakov et Wu)等占优势; 2012年秋季小型甲壳类介形类(*Ostracoda* sp.)、突头杯尾水虱(*Anthurus gracilis* (Montagu))等成为优势类群. 2013年秋季在莱州湾中部及东部海区, 甲壳类长尾虫(*Apseudes* sp.)及3种小型软体动物凸壳肌蛤(*Musculus senhousei* (Benson))豆形胡桃蛤(*Nucula faba* Xu)及小亮樱蛤(*N. minuta* (Lischke))占优势地位.

在调查海域, 由于渤海南部海区生态环境的复杂多变, 底栖动物的分布具有显著的空间异质性. 最为典型的有2011年春季出现的优势种纤细长涟虫, 仅出现在靠近河口的5, 8, 9, 12和15等5个站位, 各出现213, 420, 7, 7和47个个体; 2011年夏季出现的紫色阿文蛤, 分布于莱州湾西北部的10, 11, 12, 14及15等5个站位, 其中以10站位出现的个体最多(2553个). 2013年秋季调查海区出现的3种软体动物类优势种均只分布于5个站位, 其中凸壳肌蛤分布于LZ01, LZ05, LZ06, LZ13及LZ14等莱州湾中部的站位, LZ01站出现的个体最多(69个); 豆形胡桃蛤分布于莱州湾中东部的LZ06, LZ13, LK16, LK21及LK24等5个站点, 其中LZ06站出现的个体最多(42个); 小亮樱蛤则出现在LZ01, LZ05, LZ13, LZ14和LK26等5个站位, 以LZ05和LZ13站位个体数较多, 分别为13和8个. 总体而言, 优势种多集中分布在黄河入海口邻近区域及外侧海域, 且多为滤食性软体动物这可能与黄河入海携带大量泥沙有机质, 导致该区域初级生产力较高, 浮游植物丰度较大有关.

(2) 生物量和丰度. 黄河口邻近海域2011~2012年3个航次大型底栖动物平均生物量为

表 1 渤海南部海域 2011~2013 年 4 个航次大型底栖动物优势种

2011		2012		2013			
春季(5月)		夏季(8月)		秋季(11月)		秋季(9~10月)	
物种	优势度(Y)	物种	优势度(Y)	物种	优势度(Y)	物种	优势度(Y)
寡节甘吻沙蚕(<i>G. gurjanovae</i> Uschakov et Wu)	0.16	耳口露齿螺(<i>R. doliaris</i> Gould)	0.067	介形类(<i>Ostracoda</i> sp.)	0.22	长尾虫(<i>Apseudes</i> sp.)	0.070
日本倍棘蛇尾(<i>A. japonicas</i> Lonnberg)	0.045	紫色阿文蛤(<i>A. sojanus</i> (Yokoyama))	0.059	蛇尾(<i>Ophiuroidea</i> sp.)	0.065	凸壳肌蛤(<i>M. senhousei</i> (Benson))	0.059
纤细长涟虫(<i>I. tenera</i> Lomakina)	0.036	丝异蚓虫(<i>Heteromastus filiformis</i> (Claparède))	0.045	强鳞虫(<i>S. japonica</i> (McIntosh))	0.036	豆形胡桃蛤(<i>N. faba</i> Xu)	0.040
异足索沙蚕(<i>L. risheteropoda</i> (Marenzeller))	0.023	寡节甘吻沙蚕(<i>G. gurjanovae</i> Uschakov et Wu)	0.038	突头杯尾水虱(<i>A. gracilis</i> (Montagu))	0.030	小亮樱蛤(<i>N. minuta</i> (Lischke))	0.022
		强鳞虫(<i>Sthenolepis japonica</i> (McIntosh))	0.033	乳突半突虫(<i>Anaitides papillosa</i> (Uschakov et Wu))	0.026		
		西方似蛭虫(<i>Amaeana occidentalis</i> (Hartman))	0.032	索沙蚕(<i>Lumbrineridae</i> sp.)	0.020		
		介形类(<i>Ostracoda</i> sp.)	0.029				
		小亮樱蛤(<i>N. minuta</i> (Lischke))	0.025				
		刚鳃虫(<i>Chaetozone setosa</i> Malmgren)	0.023				
		彩虹明樱蛤(<i>M. iridescens</i> (Benson))	0.020				

13.26 g/m², 主要类群中以软体动物贡献最高, 达到 5.17 g/m²; 其次为棘皮动物 4.93 g/m²; 多毛类和甲壳动物贡献分别为 1.33 和 1.95 g/m². 总平均生物量季节间差异不明显(图 2), 表现为秋季(14.04 g/m²)略高, 春季(13.92 g/m²)和夏季(11.81 g/m²)略低. 同时, 各主要类群的平均生物量季节变化也不相同(图 2), 多毛类平均生物量大小顺序依次为夏季(1.38 g/m²)>秋季(1.31 g/m²)>春季(1.3 g/m²); 软体动物夏季(9.65 g/m²)最高, 秋季(1.6 g/m²)最低; 甲壳动物春季(1.95 g/m²)最高, 其次为秋季(1.6 g/m²), 夏季最低, 仅为 0.59 g/m²; 棘皮动物平均生物量大小顺序为秋季(9.39 g/m²)>春季(5.36 g/m²)>夏季(0.04 g/m²). 不同航次或者同一航次的平均生物量值在空间分布上也存在较大差异(图 2). 春季的生物量空间分布较为均匀, 且生物量总体数值较高, 仅在渤海中部及靠近河口的几个站位, 生物量偏低; 夏季和秋季生物量空间分布差异较大, 夏季生物量高值区集中在莱州湾中北部, 而秋季则明显向南迁移.

2013 年, 莱州湾中东部秋季航次大型底栖动物总平均生物量为 33.69 g/m², 明显高于黄河口邻近海域平均生物量值(图 2). 各主要类群对平均生物量的贡献大小顺序依次为棘皮动物(21.4 g/m²)>软体动物

(4.85 g/m²)>甲壳动物(1 g/m²)>多毛类动物(0.66 g/m²). 平均生物量值的空间分布站位间存在差异, 高生物量值集中在莱州湾中部的 LZ06, LZ12 和 LZ14 及龙口近海的 LK21 和 LK26 等站位.

黄河口邻近海域 2011~2012 年 3 个航次大型底栖动物平均丰度为 511.90 ind./m², 群落中各主要类群的平均丰度存在差异, 大小顺序依次为甲壳动物(159.95 ind./m²)>多毛类(157.36 ind./m²)>软体动物(149.59 ind./m²)>棘皮动物(32 ind./m²). 丰度值季节性变化明显(图 3), 依次为夏季(693.70 ind./m²)>秋季(575.67 ind./m²)>春季(266.32 ind./m²). 各主要类群丰度值的季节性差异也明显, 具体表现为: 多毛类, 夏季(211.11 ind./m²)>秋季(154.67 ind./m²)>春季(106.32 ind./m²); 软体动物, 夏季(347.04 ind./m²)>秋季(60.33 ind./m²)>春季(41.4 ind./m²); 甲壳动物, 秋季(304.33 ind./m²)>夏季(114.81 ind./m²)>春季(60.7 ind./m²); 棘皮动物, 秋季(49 ind./m²)>春季(40.7 ind./m²)>夏季(6.3 ind./m²). 不同航次间或者同一航次的平均丰度值在空间分布上也存在差异(图 3), 总体上夏秋季莱州湾中部海区平均丰度高于其他站位, 而春季各站位丰度分布较为平均.

2013 年, 莱州湾中东部秋季航次大型底栖动物

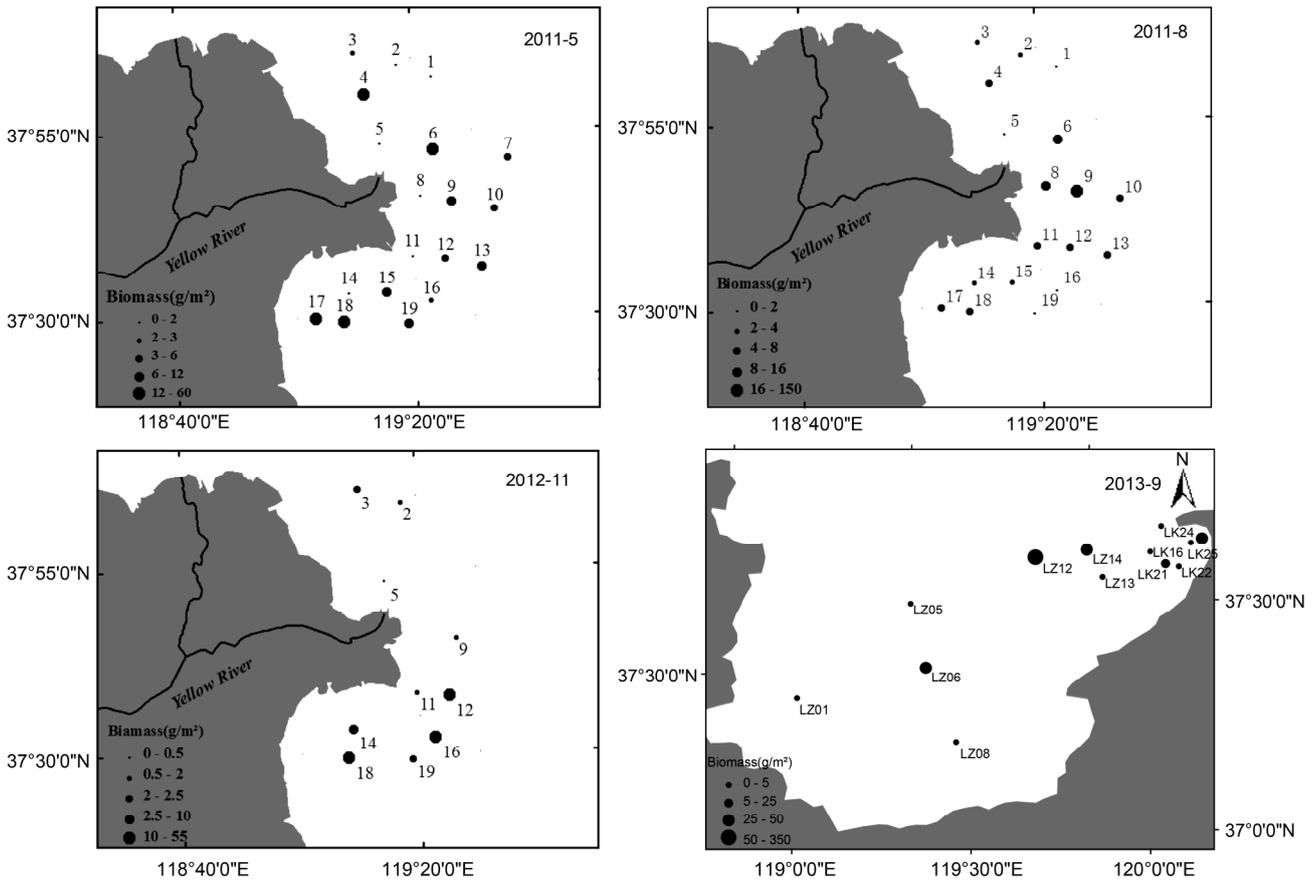


图2 渤海南部海域 2011~2013 年 4 个航次大型底栖动物生物量的空间分布

平均丰度为 320.26 ind./m², 低于黄河口邻近海域平均丰度值(图 3). 各主要类群平均丰度大小顺序依次为软体动物(132.31 ind./m²)>多毛类(85.13 ind./m²)>甲壳动物(84.87 ind./m²)>棘皮动物(13.33 ind./m²). 平均丰度值的空间分布存在差异, 平均丰度值较高的集中在莱州湾中部的 LZ01, LZ05, LZ06 及龙口近海的 LK21 和 LK24 等站位.

2.2 大型底栖动物群落的演变

(1) 物种组成. 自 20 世纪 50 年代末至 2013 年以来近 60 年内, 渤海南部海域大型底栖动物的物种数年际变化明显(表 2 和图 4). 按照底栖动物物种数目的年际变化特征, 大体可以分为 3 个阶段, 第一阶段即 20 世纪 50 年代, 物种数量较低(原因在于 1959 年全国海洋普查资料中仅列出主要种类, 而没有包括所有物种数, 造成统计种数低于实际当年物种数), 60~80 年代由于缺乏相应数据支持, 变动趋势不明.

第二阶段即 20 世纪 80 年代至 2006 年, 该阶段总物种数维持较高的水平, 约为 50~60 年代的 4 倍以上. 第三阶段即 2012~2013 年, 总种数明显下降. 群落中的优势类群在 60 年来也呈现明显的变动过程, 在第一阶段, 群落中优势类群为个体较大的经济型甲壳动物和软体动物, 多毛类物种数仅占极少量比例. 第二阶段前期, 群落中的优势类群为多毛类, 且在 1984 年占据绝对优势地位, 其次为软体动物和甲壳动物; 第二阶段后期, 群落中的多毛类、软体动物和甲壳类的物种数基本保持相同水平, 优势地位均不凸显. 第三阶段初期, 群落中的优势类群比例基本延续第二阶段的情况, 即群落仍以三大类群为主, 各类群优势地位均不明显, 至 2013 年多毛类数量相对增多.

(2) 生物资源优势种的变化. 优势种小型化趋势明显, 经济种优势度降低. 除了总物种数存在明显的年际间波动外, 渤海南部大型底栖动物群落中的

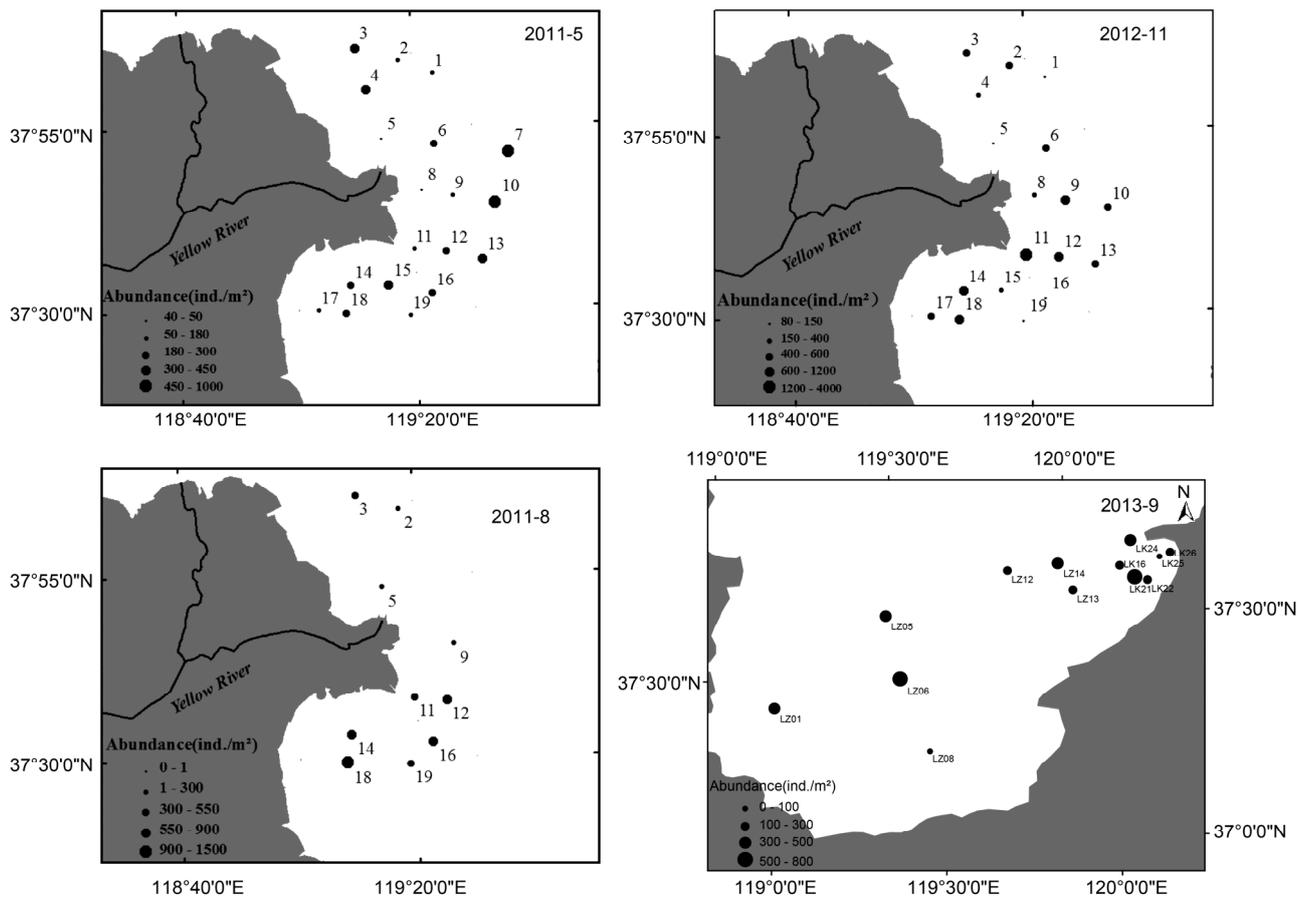


图3 渤海南部海域 2011~2013 年 4 个航次大型底栖动物丰度的空间分布

表 2 渤海南部大型底栖动物物种数的年际变动^{a)}

调查时间	站点数	总种数	多毛类	软体动物	甲壳动物	棘皮动物	其他	参考文献
1958 年 10 月	17	34	3	7	13	4	7	*
1959 年 10 月	17	30	1	10	11	5	3	
1984 年 5, 7, 8, 11 月	44	191	77	57	36	7	14	[24]
1998 年 9 月	20	253	81	71	76	10	15	[16]
2006 年 11 月	12	124	41	40	45	6	2	[21]
2012 年 11 月	10	73	25	24	19	3	2	本研究
2013 年 9~10 月	13	66	26	18	16	3	3	本研究

a) *: 全国海洋综合调查资料, 中华人民共和国科学技术委员会海洋综合调查办公室编

优势种也发生了明显变化(表 3). 总体表现为自 20 世纪 50 年代末迄今, 优势种的小型化趋势明显, 即小个体的多毛类、双壳类和甲壳类取代了大个体的甲壳类和软体动物经济类群. 1958~1959 年, 该海区的生物量很高, 群落内优势种多为大型的甲壳类如日本鼓虾、鹰爪虾、绒毛细足蟹等, 经济类群毛蚶、莱氏舌鳎等也占据优势地位; 到 20 世纪 80 年代, 穴居型

的双壳类和棘皮动物在数量和生物量上均占明显优势, 形成以凸壳肌蛤和心形海胆为优势种的群落. 到 90 年代, 该海区被较小的紫色阿文蛤和银白齿缘壳蛤代替. 而 20 世纪初期, 除了紫色阿文蛤继续占优势地位外, 更小型的种类如小亮樱蛤、江户明樱蛤、微型小海螂、耳口露齿螺等相继成为优势种. 2013 年, 该海区凸壳肌蛤的优势地位又有所回升, 这也反

表3 渤海南部底栖动物群落优势种的年际变动^{a)}

调查时间	优势种	优势度	文献出处
1958年10月	日本鼓虾(<i>Alpheus japonicus</i> Miers)	0.084	*
	中国毛虾(<i>Acetes chinensis</i> Hansen)	0.065	
	鹰爪虾(<i>Trachypenaeus curvirostris</i> (Stimpson))	0.056	
	钝尖鰕虎鱼(<i>Chaeturichthys hexanema</i> Bleeker)	0.043	
	莱氏舌鳎(<i>Cynoglossus lighti</i> Norman)	0.029	
1959年10月	莱氏舌鳎(<i>C. lighti</i> Norman)	0.068	*
	日本鼓虾(<i>A. japonicus</i> Miers)	0.068	
	鹰爪虾(<i>T. curvirostris</i> (Stimpson))	0.066	
	中国毛虾(<i>A. chinensis</i> Hansen)	0.045	
	毛蚶(<i>Arca subcrenata</i> Lischke)	0.039	
	绒毛细足蟹(<i>Raphidopus ciliatus</i> Stimpson)	0.026	
	虾蛄(<i>Squilla oratoria</i> de Haan)	0.020	
1982年7月	凸壳肌蛤(<i>M. senhousei</i> (Benson))	-	[18]
1984年5~11月	凸壳肌蛤(<i>M. senhousei</i> (Benson))	-	[24]
	光亮倍棘蛇尾(<i>Amphioplus lucidus</i> Koehler)	-	
1985年5~6月	心形海胆(<i>E. cordatum</i> (Pennant))	-	[20]
	凸壳肌蛤(<i>M. senhousei</i> (Benson))	-	
1998年9月	紫色阿文蛤(<i>A. ojanus</i> (Yokoyama))	-	[25]
	银白齿缘壳蛸螺(<i>Yokoyamaia argentata</i> (Gould))	-	
2006年11月	不倒翁虫(<i>Sternaspis scutata</i> Ranzani)	-	[21]
	小亮樱蛤(<i>N. minuta</i> (Lischke))	-	
	杯尾水虱(<i>Cythura</i> sp.)	-	
2009年6月	寡鳃齿吻沙蚕(<i>Nephtys oligobranchia</i> Southern)	-	[17]
	微型小海螂(<i>Leptomys minuta</i> Habe)	-	
	紫色阿文蛤(<i>A. ojanus</i> (Yokoyama))	-	
	江户明樱蛤(<i>Moerella jodoensis</i> (Lischke))	-	
	细长涟虫(<i>I. etenera</i> Lomakina)	-	
2011年5月	寡节甘吻沙蚕(<i>G. gurjanovae</i>)	0.16	本研究
	日本倍棘蛇尾(<i>A. japonicus</i>)	0.045	
	纤细长涟虫(<i>I. tenera</i> Lomakina)	0.036	
	异足索沙蚕(<i>L. risheteropoda</i> (Marenzeller))	0.023	
2011年8月	耳口露齿螺(<i>R. doliaris</i> Gould)	0.067	本研究
	紫色阿文蛤(<i>A. sojanus</i> (Yokoyama))	0.059	
	丝异蛸虫(<i>H. filiformis</i> (Claparède))	0.045	
	寡节甘吻沙蚕(<i>G. gurjanovae</i> Uschakov et Wu)	0.038	
	强鳞虫(<i>S. japonica</i> (McIntosh))	0.033	
	西方似蛸虫(<i>A. occidentalis</i> (Hartman))	0.032	
	介形类(<i>Ostracoda</i> sp.)	0.029	
	小亮樱蛤(<i>N. minuta</i> (Lischke))	0.025	
	刚鳃虫(<i>C. setosa</i> Malmgren)	0.023	
	彩虹明樱蛤(<i>M. iridescens</i> (Benson))	0.020	
	介形类(<i>Ostracoda</i> sp.)	0.22	
2012年11月	蛇尾幼体(<i>Ophiuroidea</i> sp.)	0.065	本研究
	强鳞虫(<i>S. japonica</i> (McIntosh))	0.036	
	突头杯尾水虱(<i>A. gracilis</i> (Montagu))	0.030	
	乳突半突虫(<i>A. spapillosa</i> (Uschakov et Wu))	0.026	
	索沙蚕(<i>Lumbrineridae</i> sp.)	0.020	
2013年9~10月	长尾虫(<i>Apseudes</i> sp.)	0.07	本研究
	凸壳肌蛤(<i>M. senhousei</i> (Benson))	0.059	
	豆形胡桃蛤(<i>N. faba</i> Xu)	0.04	
	小亮樱蛤(<i>N. minuta</i> (Lischke))	0.022	

a) *: 全国海洋综合调查资料, 中华人民共和国科学技术委员会海洋综合调查办公室编; -: 无调查数据

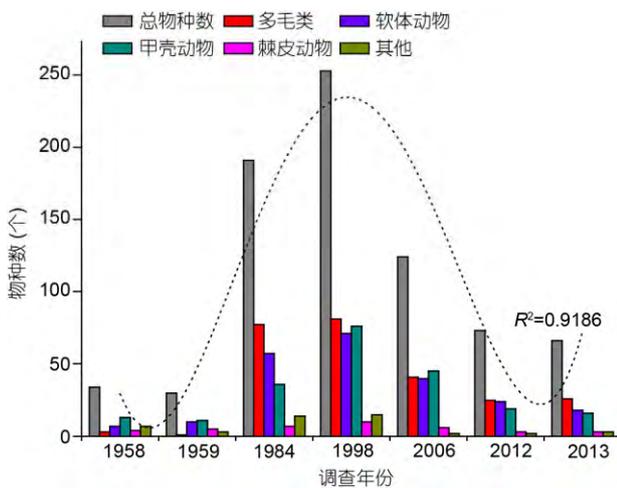


图4 渤海南部海域大型底栖动物物种总数及各主要类群物种数的年际变动
秋季数据, 黑线为总物种数趋势线

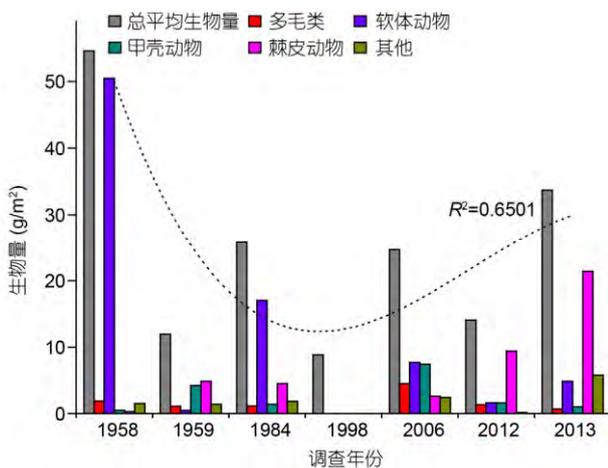


图5 渤海南部海域大型底栖动物物种生物量及各主要类群生物量的年际变动
秋季数据, 黑线为总平均生物量的趋势线

映了莱州湾渔业资源小型化和低值化的变化趋势。

(3) 生物量. 渤海南部海域近 60 年来生物量的年际变化因为个别年份的数值异常波动, 年际间变动趋势不如物种数量的年际变化明显, 但仍可以划分为相同的 3 个阶段(表 4 和图 5). 1959 年之前, 莱州湾底栖动物群落生物量数值较高, 结合同期的丰度数值情况, 可以推断该阶段的大型底栖动物群落以个体较大, 生活史较长的 K 优势种为主, 其中软体动物占据绝对优势. 第二阶段, 除 1998 年生物量出现较低值(可能与数据分析时仅选取 98 年资料中位于莱州湾的两个站点有关), 其余年份生物量均较 50 年代平均值低. 第三阶段, 生物量则持续下降, 直至 2013 年有上升的趋势. 与此相比, 群落中生物量占优势的类群则呈现更明显的阶段性变化, 第一阶段至第二阶段初期(1984 年), 群落中生物量占绝对优势地位的为软体动物. 第二阶段中期因缺少各主要类群的数据无法分析, 但在后期(2006 年), 各主要类群优势地位较为均衡. 值得注意的是, 第三阶段群落中的棘皮动物生物量呈现逐年上升的现象, 并在群落中占绝对优势.

该阶段生物量的年际变化, 与经济种类资源量的捕捞强度以及灾害种类的爆发可能存在明显的相关性, 软体动物中的某些种类如文蛤(*Meretrix meretrix*)、脉红螺(*Rapana venosa* (Valenciennes)、毛蚶(*Scapharca subcrenata*)和魁蚶(*Scapharca broughtonii*)等作为莱州湾的重要经济软体动物, 在 20 世纪 50~80 年代之前资源量均较高, 其生物量在群落中占较高的比例, 但随着捕捞强度的加大, 以及种群补充的不足, 其资源量逐渐减少. 近些年来, 多棘海盘车的爆发对底栖动物生物量年际变化的影响也较大, 由于多棘海盘车个体较大, 且加上其分布

表 4 渤海南部大型底栖动物平均生物量(g/m²)的年际变动^{a)}

调查时间	总生物量(g/m ²)	多毛类	软体动物	甲壳动物	棘皮动物	其他	参考文献
1958 年 10 月	54.6	1.88	50.46	0.47	0.27	1.51	*
1959 年 10 月	11.93	1.06	0.45	4.205	4.83	1.39	*
1984 年 11 月	25.83	1.1	17.01	1.39	4.48	1.85	[24]
1998 年 9 月	8.85	-	-	-	-	-	[25]
2006 年 11 月	24.7	4.5	7.7	7.4	2.6	2.4	[21]
2012 年 11 月	14.04	1.31	1.605	1.605	9.39	0.13	本研究
2013 年 9~10 月	33.69	0.66	4.85	0.10	21.40	5.79	本研究

a) *: 全国海洋综合调查资料, 中华人民共和国科学技术委员会海洋综合调查办公室编; -: 无调查数据

的聚集特性和采样的偶然性, 对生物量的贡献较大。

(4) 丰度. 渤海南部大型底栖动物丰度年际变化, 与物种数和生物量的变化趋势均不同, 年际间存在不明显的波动, 2012 和 2013 年的调查结果相对较低(表 5 和图 6). 虽然群落总丰度变动趋势不明显, 但群落中主要类群所占的比例发生了明显的变化: 20 世纪 50 年代群落中对丰度贡献较大的是经济型的甲壳类, 其次为软体动物, 棘皮动物和多毛类所占比例极低; 且软体动物所占比例呈明显上升趋势. 80 年代初期, 群落中的软体动物成为群落丰度的主要贡献类群. 之后群落中经济甲壳动物和软体动物占丰度的比例逐渐下降, 而多毛类则逐步上升. 2012 和 2013 年的调查发现, 群落中多毛类的丰度对群落总丰度的贡献依然占据较大比例, 甲壳动物和软体动物则存在年际间波动的现象。

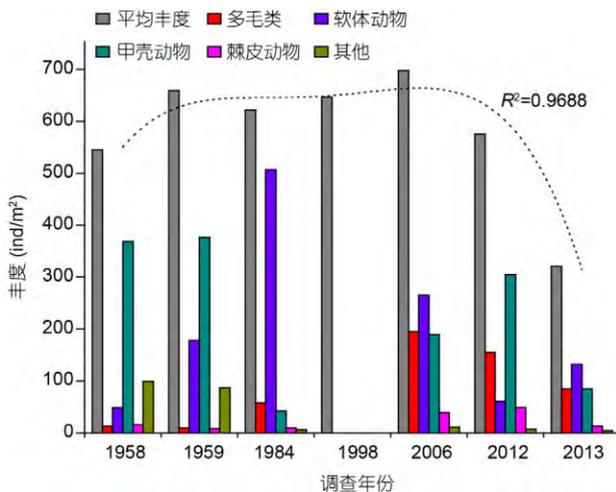


图 6 渤海南部海域大型底栖动物物种丰度及各主要类群丰度的年际变动
秋季数据, 黑线为总平均丰度的趋势线

表 5 渤海南部大型底栖动物丰度(ind./m²)的年际变动^{a)}

调查时间	丰度(ind./m²)	多毛类	软体动物	甲壳动物	棘皮动物	其他	参考文献
1958 年 10 月	545.3	13.3	48.7	368.7	16	98.7	*
1959 年 10 月	659.2	10	177.7	376.2	8.5	86.9	*
1984 年 11 月	621.9	57.8	506.5	41.7	9.7	6.2	[24]
1998 年 9 月	646.5	-	-	-	-	-	[25]
2006 年 11 月	698	195	265	189	39	11	[21]
2012 年 11 月	575.7	154.7	60.3	304.3	49	7.3	本研究
2013 年 9-10 月	320.3	85.1	132.3	84.9	13.3	4.6	

a): 全国海洋综合调查资料, 中华人民共和国科学技术委员会海洋综合调查办公室编; -: 无调查数据

2.3 渤海南部大型底栖动物群落年际间变化的 MDS 分析

对 50 余年来, 莱州湾区域大型底栖动物群落物种数量进行 MDS 分析表明, 不同年代的物种数依据 Bray Curtis 相似性被明显划分为 3 个组别, 与之前的分析结果密切吻合(图 7).

而对生物量的 MDS 分析(图 8)发现, 渤海南部 50 余年来不同年际间的波动没有明确的年代性分组, 这与个别年份的数值异常有关, 例如, 1958 年调查软体动物生物量异常高, 1959 年软体动物生物量急剧下降, 导致总生物量值异常偏低; 而 1998 年秋季调查所包含的莱州湾站位数量少, 可能是导致该年份生物量偏低的原因. 结合对群落中主要类群生物量的年际间变化, 基本吻合之前的 1958~2013 年间生物量先下降后缓慢回升的分析结论。

MDS 对不同年份底栖动物丰度的分析(图 9)表明, 除 2013 年明显偏低单独分离出来之外, 其余年份相似性较高. 仅从年度总平均丰度进行 MDS 分析的结果没有体现出群落中主要优势类群丰度的变动情况。

2.4 渤海南部底栖生态环境年际变化

过去几十年间, 渤海南部底栖环境因子发生了明显的变化(表 6). 底层温度在 1999 年前呈上升趋势, 年增长率为 0.013 /年, 2000 年后有所回落. 底层盐度从 1950, 1980 年代的 28.7 上升到 2000 年代的 30, 且 1999 年之前以 0.105 的年增长率增加. 底层溶解氧 1999 年以前以 $-1.60 \mu\text{mol L}^{-1} \text{年}^{-1}$ 的速率下降, 2000 年后回升. 生源要素变化各不相同, 99 年前底层磷(bottom P, BP)、底层硅(bottom Si, BSi)均呈显著下降趋势, 而底层溶解无机氮(bottom DIN, BDIN)则以

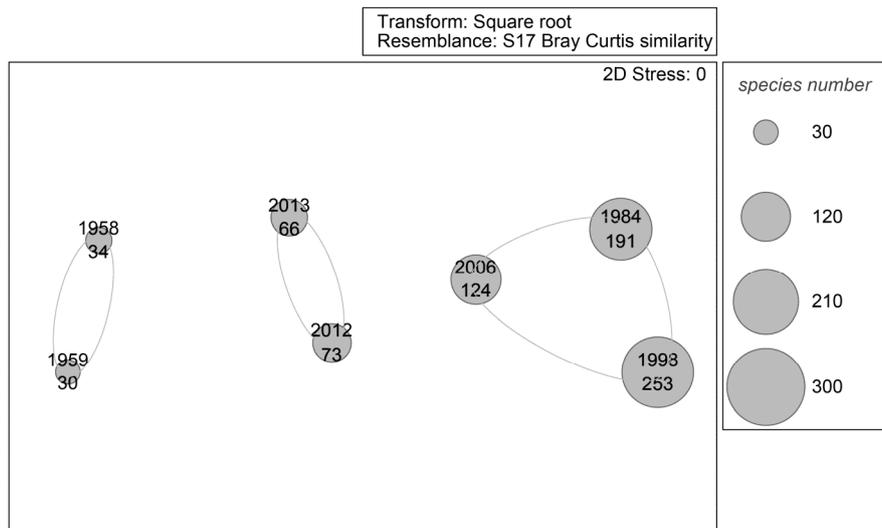


图7 物种年际变化的 MDS 分析
每个圆圈中上面的数字为年份, 下面的为物种数

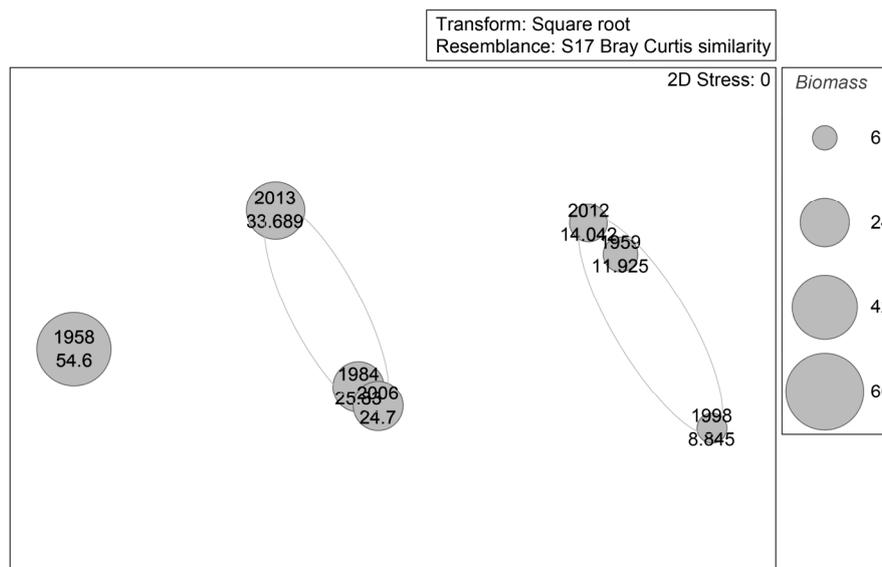


图8 生物量年际变化的 MDS 分析
每个圆圈中上面的数字为年份, 下面的为生物量

0.61 $\mu\text{mol L}^{-1} \text{年}^{-1}$ 的速率增加; N:P 呈现增加趋势, 而 Si:N 则显著降低; 小型动物丰度 1999 年后显著减少. 2000 年代沉积层叶绿素 a 和脱镁叶绿素 a 含量比 1980 年代下降了 6~7 倍. 1990 年代有机质含量升高了 3~4 倍, 但后 10 年又有大幅度下降. 渤海南部黏土含量下降, 沉积物粒径有变粗的趋势^[26,27].

3 讨论

近几十年来, 环渤海经济区成为中国北方发展最迅速的区域, 而由此引发的环境问题也日趋凸显. 许多研究显示渤海底栖生态系统衰退严重^[13~15]. 开展底栖动物长周期的调查和分析, 是定量研究环境

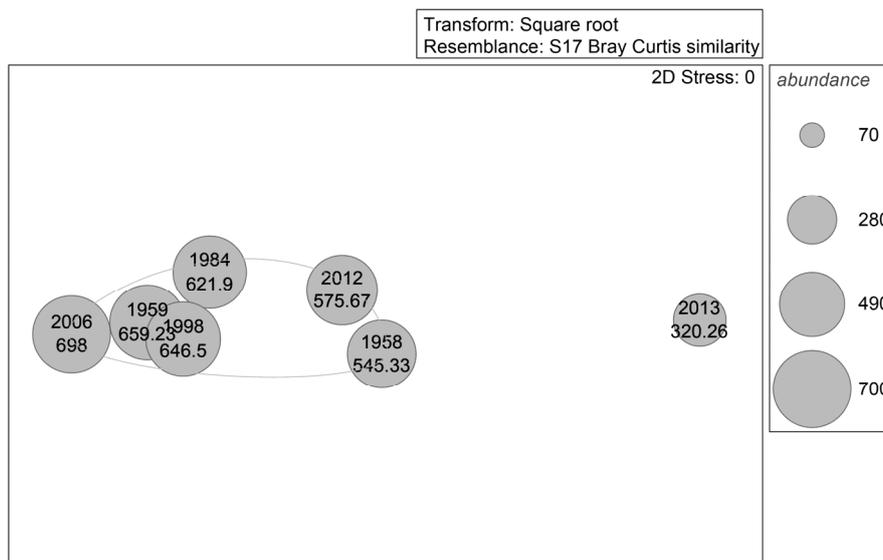


图9 丰度年际变化的 MDS 分析
每个圆圈中上面的数字为年份, 下面的为丰度

表6 渤海南部底栖环境因子的年际变动

底栖环境参数	20 世纪 50	20 世纪	20 世纪 90	21 世纪初 ^[26]	1959~1999 ^[27]		
	年代 [*] (n=17)	80 年代 ^[26] (n=24)	年代 ^[26] (n=5)	(n=25)	底栖环境参数	Annual rate	Amplitude
水深(depth)(m)	15~20	17	16	15	BS(psu/年)	0.105	3.79
底层温度(bottom temp., BT)()	17.79	19	-	17	BT(/年)	0.013	2.57
底层盐度(bottom salinity, BS)(‰)	28.7	28.7	-	30.0	底层溶氧 BDO ($\mu\text{mol L}^{-1} \text{年}^{-1}$)	-1.60	68
溶解氧 DO (mg/L)	5.68	-	-	8.53	底层磷含量 BP ($\mu\text{mol L}^{-1} \text{年}^{-1}$)	-0.011	0.54
叶绿素 a(Chl-a)(mg/kg)	-	6.12	2.92	0.85	底层硅含量 BSi ($\mu\text{mol L}^{-1} \text{年}^{-1}$)	-0.6	28.67
脱镁叶绿素 a(Pha-a)(mg/kg)	-	14.78	4.21	2.08	底层溶解无机氮 BDIN ($\mu\text{mol L}^{-1} \text{年}^{-1}$)	0.61	5.92
有机质含量(organic)%	-	0.76	1.79	0.59	N:P	1.4	32.7
粉砂-黏土含量(silt-clay)%	-	93	98	80	Si:N	-0.064	2.6
中值粒径 MD ϕ	-	3.19	6.86	5.13			
分选系数 QD ϕ	-	0.82	2.4	1.93			
小型动物(meiofaunal abundance)(ind./10cm ²)	-	1012	1056	842			

a) *: 全国海洋综合调查资料, 中华人民共和国科学技术委员会海洋综合调查办公室编; -: 无调查数据

条件长期变化引起的生物响应的较好方法。过去近 60 年来, 渤海南部海域大型底栖动物群落在物种数、生物量、丰度以及群落结构组成等方面都发生了较大的变动, 具体表现为寿命长、体积大、具有高竞争力的 K 对策种的优势地位正逐渐丧失, 而被寿命短、适应能力宽、具有高繁殖能力的 R 对策种所取

代, 这是种群繁殖策略上的一种改变, 以适应该海域越来越不稳定的自然环境。

研究表明, 近几十年来渤海生态系统正经历剧烈的变化^[27,28]。特别是渤海南部海域受到黄河及沿岸多条河流径流的影响, 同时该区域石油、天然气资源丰富, 海上运输及溢油的频发也给该海域造成了

巨大的生态压力。在全球变暖的大趋势下, 同时由于黄海黑潮暖流输入的影响, 且年际间黄海黑潮暖流输入量和影响范围均不相同, 导致渤海南部海域底层温度年际间也有波动^[29,30]。盐度的上升可能与淡水流量减少有关, 特别是黄河断流频率的增加, 如从1980年代的年平均18天增加到1990年代的94天。同时, 河流径流所携带的陆源污染和由于滩涂及浅海水产养殖的大面积发展造成的自身污染都显著增加^[11]。营养盐水平也发生了显著的变化, 特别是硅、磷含量下降但无机氮含量增加, 造成N:P显著增加^[27]。

研究表明, 底栖动物群落直接受到各种理化环境因素的影响, 包括温度、盐度、水动力状况、沉积物类型和粒径以及营养含量及比例等^[31]。对于大型底栖动物而言, 水层环境和沉积环境条件的变化都可能直接或潜在地影响到生物群落结构的空间和时间分布格局。有关渤海中南部大型底栖动物的研究中发现, 水深和底层水的硝酸盐浓度、悬浮物和盐度等水层环境因子对群落结构影响较大, 似乎超过沉积环境的影响^[21,32]。大型底栖动物可能对渤海水层环境的变化比较敏感, 如黄河径流量减少引起的盐度升高、与富营养化有关的水体营养盐浓度的增加。入海净流量的变化会引起区域盐度和营养盐输入的差异, 而盐度的变化引起群落中淡水种和咸水中种类组成的变化, 并导致两者在群落中处于不稳定状态。入海泥沙的改变, 直接引起河口三角洲及邻近海岸的冲淤演变, 对河口三角洲地区的工程、环境、湿地、生物多样性等都将产生严重的影响^[33,34]。过去几十年间, 研究资料表明黄河入海径流量下降趋势严重^[27]。温度影响生物的生长、发育和繁殖, 进而影响生物的种类数量、生物量和分布范围^[35]。溶解氧DO对底栖动物的存活、生长至关重要, 研究证实低氧对底栖动物及鱼类的生存都有负面作用, 引起其生存、竞争能力下降甚至死亡^[36,37]。三大生源要素N, P, Si的含量及比例也会影响底栖动物的群落结构, 底栖动物的各种特征参数都与有机质含量在时间和空间上存在明显关联^[38]。

除以上理化环境因子外, 浮游生物、小型底栖动

物等生物因素也会对大型底栖动物造成影响。虽然近几十年渤海南部叶绿素a呈下降趋势(表6), 但20世纪90年代至今, 渤海南部发生多次赤潮, 主要发生在夏秋季黄河口北部海域(2001年6月, 夜光藻)及莱州湾东部海域(1995年10月, 叉角藻; 1998年9月, 夜光藻)^[39]。这些赤潮藻可能会通过沉降和藻体分解消耗水体溶解氧或产生毒素, 对底栖动物产生间接或直接的影响, 但有关赤潮藻对底栖动物群落结构是否构成主要影响尚有待研究。已有研究表明, 浮游植物藻华主要通过两种途径影响底栖动物的补充、生长和存活: () 改变底栖动物幼虫、幼体和成体食物来源的质和量^[40,41]; () 藻华导致DO降低, 尤其是近沉积层处的极低DO值会对底栖动物群落产生更严重的影响^[37]。另一方面, 近年来, 渤海南部小型底栖动物丰度逐年下降, 小型饵料生物资源量的波动, 必然也会对大型底栖动物的群落分布造成影响。

此外, 由于目前缺乏针对某一海区长期连续的调查数据, 长周期分析往往取自不同来源的历史资料, 而调查过程中采用的调查方法(如采泥器种类和筛网孔径)^[42]、选取的调查站位及调查范围、调查时间等都会对分析结果产生极大的影响。本研究中所引用的历史资料已尽量选择相同的调查方法及调查季节, 使该种影响降到最低。

总之, 虽然研究表明, 50余年来, 渤海南部大型底栖动物群落演替阶段性特点明显, 且物种组成已发生明显的衰退, 但由于海洋生态环境复杂多变, 而影响底栖动物的环境因素众多, 影响程度也各不相同, 因此, 很难用一种或几种环境和生物因素的变化来解释底栖动物群落几十年来的变化, 而且本身这些环境因子的变化即是全球变化和人类活动综合作用的结果。环境及生物因子以及底栖动物群落本身, 在海洋生态系统这个大环境里, 也会相互作用和影响, 底栖动物群落本身也在慢慢适应这种影响并做出响应。今后对特定海区开展长周期调查, 并引入物种分布模型方法预测环境改变和人类活动对大型底栖动物的物种分布、群落演替或许有望得到更准确的答案。

参考文献

- 1 Wildsmith M D, Rose T H, Potter I C, et al. Benthic macroinvertebrates as indicators of environmental deterioration in a large microtidal estuary. *Mar Pollut Bull*, 2011, 62: 525-538

- 2 Thompson B, Lowe S. Assessment of macrobenthos response to sediment contamination in the San Francisco Estuary, California, USA. *Environ Toxicol Chem*, 2004, 23: 2178–2187
- 3 Li B Q, Wang Q C, Li B J. Assessing the benthic ecological status in the stressed coastal waters of Yantai, Yellow Sea, using AMBI and M-AMBI. *Mar Pollut Bull*, 2013, 75: 53–61
- 4 Leonard D R P, Clarke K R, Somerfield P J, et al. The application of an indicator based on taxonomic distinctness for UK marine biodiversity assessments. *J Environ Manage*, 2006, 78: 52–62
- 5 Dauer D M, Alden R W. Long-term trends in the macrobenthos and water quality of the lower Chesapeake Bay (1985–1991). *Mar Pollut Bull*, 1995, 30: 840–850
- 6 Dolbeth M, Cardoso P G, Grilo T F, et al. Long-term changes in the production by estuarine macrobenthos affected by multiple stressors. *Estuar Coast Shelf Sci*, 2011, 92: 10–18
- 7 Gremare A, Amouroux J M, Vétion G. Long-term comparison of macrobenthos within the soft bottoms of the Bay of Banyuls-sur-mer (northwestern Mediterranean Sea). *J Sea Res*, 1998, 40: 281–302
- 8 Labrune C, Gremare A, Guizien K, et al. Long-term comparison of soft bottom macrobenthos in the Bay of Banyuls-sur-Mer (north-western Mediterranean Sea): a reappraisal. *J Sea Res*, 2007, 58: 125–143
- 9 Service S K, Feller R J. Long-Term Trends of Subtidal Macrobenthos in North Inlet, South-Carolina. *Hydrobiologia*, 1992, 231: 13–40
- 10 Varfolomeeva M, Naumov A. Long-term temporal and spatial variation of macrobenthos in the intertidal soft-bottom flats of two small bights (Chupa Inlet, Kandalaksha Bay, White Sea). *Hydrobiologia*, 2013, 706: 175–189
- 11 Zhang Z H, Zhu M Y, Wang Z L, et al. Monitoring and managing pollution load in Bohai Sea, PR China. *Ocean Coast Manage*, 2006, 49: 706–716
- 12 金显仕, 唐启升. 渤海渔业资源结构、数量分布及其变化. *中国水产科学*, 1998, 5: 18–24
- 13 Jin X S. Long-term changes in fish community structure in the Bohai Sea, China. *Estuar Coast Shelf Sci*, 2004, 59: 163–171
- 14 Zhou H, Hua E, Zhang Z N. Taxonomic distinctness of macrofauna as an ecological indicator in Laizhou Bay and adjacent waters. *J Ocean Univ China* 2010, 9: 350–358
- 15 Zhou H, Zhang Z N, Liu X S, et al. Changes in the shelf macrobenthic community over large temporal and spatial scales in the Bohai Sea, China. *J Mar Syst* 2007, 67: 312–321
- 16 韩洁, 张志南, 于子山. 渤海中、南部大型底栖动物物种多样性研究. *生物多样性*, 2003, 11: 20–27
- 17 刘晓收, 赵瑞, 华尔, 等. 莱州湾夏季大型底栖动物群落结构特征及其与历史资料的比较. *海洋通报*, 2014, 33: 284–292
- 18 孙道元, 刘银城. 渤海底栖动物种类组成和数量分布. *黄渤海海洋*, 1991, 9: 42–50
- 19 吴斌, 宋金明, 李学刚. 黄河口大型底栖动物群落结构特征及其与环境因子的耦合分析. *海洋学报*, 2014, 36: 62–72
- 20 张志南, 图立红, 于子山. 黄河口及其邻近海域大型底栖动物的初步研究. *青岛海洋大学学报*, 1990, 20: 37–45
- 21 周红, 华尔, 张志南. 秋季莱州湾及邻近海域大型底栖动物群落结构的研究. *中国海洋大学学报*, 2010, 40: 80–87
- 22 陈亚瞿, 胡方西. 长江口河口锋区浮游动物生态研究. 生物量及优势种的平面分布. *中国水产科学*, 1995, 2: 49–58
- 23 Clarke K R, Warwick R M. *Change in Marine Communities: an Approach to Statistical Analysis and Interpretation*. Plymouth: Primer-E Ltd, 1994
- 24 孙道元, 唐质灿. 黄河口及其邻近水域底栖动物生态特点. *海洋科学集刊*, 1989, 30: 261–275
- 25 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. *青岛海洋大学学报*, 2001, 31: 889–896
- 26 Zhou H, Zhang Z N, Liu X S, et al. Decadal changes in sublittoral macrofaunal biodiversity in the Bohai Sea, China. *Mar Poll Bull*, 2012, 64: 2364–2373
- 27 Ning X R, Lin C L, Su J L, et al. Long-term environmental changes and the responses of the ecosystems in the Bohai Sea during 1960–1996. *Deep-Sea Research II*, 2010, 57: 1079–1091
- 28 Lin C L, Su J L, Xu B R, et al. Long-term variations of temperature and salinity of the Bohai Sea and their influence on its ecosystem. *Prog Oceanogr*, 2001, 49: 7–19
- 29 Lu H J, Lee H L. Changes in the fish species composition in the coastal zones of the Kuroshio Current and China Coastal Current during periods of climate change: observations from the set-net fishery (1993–2011). *Fish Res*, 2014, 155: 103–113
- 30 Zhai F G, Wang Q Y, Wang F J, et al. Variation of the North Equatorial Current, Mindanao Current, and Kuroshio Current in a high-resolution data assimilation during 2008–2012. *Adv Atmos Sci*, 2014, 31: 1445–1459
- 31 Currie D R, Small K J. Macrobenthic community responses to long-term environmental change in an east Australian sub-tropical estuary. *Estuar Coast Shelf Sci*, 2005, 63: 315–331
- 32 韩洁, 张志南, 于子山. 渤海中南部大型底栖动物的群落结构. *生态学报*, 2004, 24: 531–537

- 33 刘元进, 吕振波, 李凡, 等. 2011 年黄河调水调沙期间黄河口海域大型底栖动物群落多样性. 海洋渔业, 2012, 34: 316–322
- 34 彭俊, 陈沈良. 近 60 年黄河水沙变化过程及其对三角洲的影响. 地理学报, 2009, 64: 1353–1362
- 35 李新正, 刘录三, 李宝泉, 等. 中国海洋大型底栖生物: 研究与实践. 北京: 海洋出版社, 2010. 1–378
- 36 Diaz R J, Neubauer R J, Schaffner L C, et al. Continuous monitoring of dissolved-oxygen in an estuary experiencing periodic hypoxia and the effect of hypoxia on macrobenthos and fish. *Sci Total Environ*, 1992, Supplement 1992: 1055–1068
- 37 Sturdivant S K, Brush M J, Diaz R J. Modeling the effect of hypoxia on macrobenthos production in the lower Rappahannock River, Chesapeake Bay, USA. *PLoS One*, 2013, 8: e84140
- 38 Pearson T H, Rosenberg R. Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment. *Oceanogr Mar Biol Annu Rev*, 1978, 16: 229–311
- 39 张洪亮, 张爱君, 窦月明, 等. 渤海海区赤潮发生特点的研究. 见: 中国环境保护优秀论文集(2005) (上册). 北京: 中国环境科学出版社, 2015
- 40 Beukema J J. Changes in composition of bottom fauna of a tidal-flat area during a period of eutrophication. *Mar Biol*, 1991, 111: 293–301
- 41 Marsh A G, Tenore K R. The role of nutrition in regulating the population-dynamics of opportunistic, surface deposit feeders in a mesohaline community. *Limnol Oceanogr*, 1990, 35: 710–724
- 42 李新正, 王洪发, 王金宝, 等. 不同孔径底层筛对胶州湾大型底栖动物取样结果的影响. 海洋科学, 2005, 29: 68–74

Long-Term Trends of Macrobenthos in Southern Bohai Sea, China, in Relation to Environmental Changes

CHEN LinLin¹, WANG QuanChao^{2,3}, LI XiaoJing^{1,3}, ZHOU ZhengQuan^{1,3} & LI BaoQuan¹

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

2 Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

The succession of macrobenthic fauna of Southern Bohai Sea over the past 50 years was analyzed based on its recent status in 2011 and 2013, and the historical data obtained essentially from the same sampling area. In the past 50 years, the macrobenthic assemblages of Southern Bohai Sea have undergone some succession, including changes in species composition, key species, biomass, and abundance, as well as the temporal and spatial changes in distribution pattern. The average total species number showed an obvious yearly fluctuation over past 50 years, which can be broadly divided into three periods: First period (before 1960s), the characteristics of macrobenthic fauna during this period were represented by relatively low total species number, high value of biomass and abundance, and commercial mollusks and crustacean as the two dominant groups; Second period (from 1980s to 2006), the macrobenthic fauna was represented by increasing species number, decreasing biomass values, and small body-sized mollusks and echinoderms emerging as the dominant groups; Third period (since 2006), the increased value of biomass and dominated groups of mollusks and crustacean in macrobenthic community reflected a certain degree of recovery. The integrated effects from both, the changes in climate, and the anthropogenic disturbances that happened in Southern Bohai Sea over the past 50 years (such as aquaculture, coastal land reclamation and sewage discharge), were suggested to be the trigger factors for these long-term community successions.

macrobenthic community structure, succession, Huanghe River estuarine, Laizhou Bay, Bohai Sea

doi: 10.1360/N052016-00063