

胶州湾网采浮游植物群落结构的长期变化*

孙晓霞¹ 孙松^{1,2} 吴玉霖² 张永山² 郑珊^{1,3}

(1. 山东胶州湾海洋生态系统国家野外科学观测研究站 青岛 266071; 2. 中国科学院海洋研究所海洋生态与环境科学重点实验室 青岛 266071; 3. 中国科学院研究生院 北京 100049)

提要 依据 20 世纪 80 年代以来胶州湾浮游植物的调查资料, 系统分析网采浮游植物群落的长期变化特征。结果表明, 自 1981 年以来, 胶州湾浮游植物总量呈现增加的趋势, 但空间分布格局没有发生明显改变。胶州湾的浮游植物优势种组成发生改变, 洛氏角毛藻、密联角毛藻、波状石鼓藻、叉角藻与梭角藻等成为近 5 年来新的优势种。胶州湾浮游植物优势类群数量的长期变化趋势表明, 中肋骨条藻、角毛藻等小型链状硅藻数量呈现增加趋势, 波状石鼓藻等暖水性种类的数量持续升高, 甲藻类浮游植物数量升高、分布范围扩大, 表明胶州湾浮游植物群落对气候变化和人类活动的综合影响已经做出响应。

关键词 胶州湾, 浮游植物, 群落结构, 优势种, 长期变化

中图分类号 Q958.1

浮游植物是海洋生态系统中最主要的初级生产者, 在生态系统的物质循环与能量流动中起着十分重要的作用(吴玉霖等, 2004; 张才学等, 2009; 王林等, 2009)。大量研究发现, 近几十年来全球许多近海区域浮游植物群落结构与组成发生了很大变化, 如硅藻所占比例下降, 甲藻种类与数量增加等(Smayda, 1990; Zhou *et al.*, 2008)。浮游植物种类与数量的变化通过食物链会导致整个海洋生态系统结构与功能的改变。因此, 了解浮游植物的长期变化规律是研究近海生态系统结构与功能变化以及变动趋势的基础。

海湾通常被认为是近海生态系统的缩影。胶州湾位于黄海西岸, 周围被青岛市及其辖区的胶州和胶南两市所包围, 沿岸工农业生产发达, 受城市化影响强烈。胶州湾生态系统既受东亚季风和黄海水团系统等自然变化的影响, 同时也受到陆源物质排放、养殖活动等人类活动的影响, 是一个受自然变化和人类活动双重影响的典型半封闭海湾(孙松等, 2005)。胶州湾海洋调查资料的长期变化研究表明, 在过去几十年间, 胶州湾海水中营养盐的浓度和结构都发生

了巨大的变化, 并由此引起浮游植物群落结构的改变(吴玉霖等, 2005)。

关于胶州湾浮游植物的研究, 最早开始于李冠国、黄世玫在 1953—1956 年对青岛近海浮游硅藻季节变化的研究(李冠国等, 1956)。随后, 钱树本等(1983)、郭玉洁等(1992)分别针对不同时期胶州湾浮游植物种类组成与数量变动进行过周年调查。进入 20 世纪 90 年代, 胶州湾海洋生态系统研究站开始进行每年四个季度月的长期调查, 相关研究如吴玉霖等(1995, 2005)、孙松等(2002)。近年来, 胶州湾浮游植物群落的结构与组成呈现若干新的变化特征。本文系统分析了自 20 世纪 80 年代以来胶州湾网采浮游植物群落的长期变化特征, 为揭示全球变化影响下近海生态系统的演变规律提供科学依据。

1 材料与方法

本研究所用数据资料主要包括: (1) 1981 年 2—11 月对胶州湾浮游植物的调查(郭玉洁等, 1992), 湾内共设调查站位 11 个, 湾外 3 个, 每季度(2、5、8、

* 中国科学院知识创新工程重要方向项目群项目, KZCX2-YW-Q07-01 号; 国家重点基础研究发展计划(973)项目, 2011CB403603 号; 国家自然科学基金项目, 40876083 号; 中国科学院战略性先导科技专项, XDA05030401 号。孙晓霞, 博士, 研究员, E-mail: xsun@qdio.ac.cn

收稿日期: 2011-01-21, 收修改稿日期: 2011-06-26

11月)采样1次,以浅水III型网从海底至表垂直拖取。(2)胶州湾海洋生态系统研究站自1991年5月—1995年11月、1997年2月—2008年11月对胶州湾浮游植物进行的连续调查,在湾内设调查站位9个,湾外1个。采样时间、间隔、网具及方法与1981年相同。样品采集后,立即用5%的福尔马林溶液固定,带回实验室利用显微镜进行浮游植物种类的鉴定与计数。不同时期调查站位如图1所示。

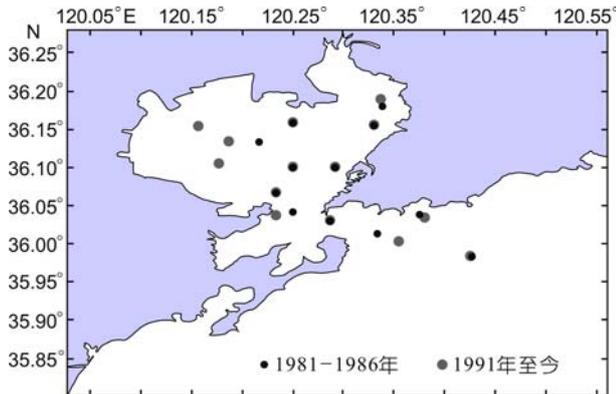


图1 胶州湾浮游植物调查站位图

Fig.1 Sampling stations in the Jiaozhou Bay

2 结果与讨论

2.1 胶州湾浮游植物数量时空格局的长期变化

2.1.1 总量的长期变化 近30年来胶州湾浮游植物季度月平均数量的长期变化规律如图2A所示。不同时期胶州湾浮游植物数量差别显著。1981年浮游植物数量季度月平均值为 785×10^4 个/ m^3 ,至20世纪90年代数量显著下降,1992—2000年间浮游植物数量的平均值仅为 397×10^4 个/ m^3 ,进入2000年以后,浮游植物数量呈现明显的上升趋势,2001—2008年间浮游植物数量的年平均值高达 2900×10^4 个/ m^3 ,为20世纪90年代的浮游植物平均数量的7倍以上。统计分析表明,两个时期浮游植物数量差异显著(ANOVA, $P < 0.01$)。与胶州湾浮游植物生态学已有研究结果相比较,王修林等(2006)认为自20世纪60年代至21世纪初,胶州湾网采浮游植物的数量基本呈现逐渐降低的趋势。而吴玉霖等(2005)发现近50年来胶州湾浮游植物的数量总体呈现升高的现象。根据本文的结果,从1981年以来,胶州湾的浮游植物呈现先下降后升高的规律。近30年网采浮游植物数量的升高主要出现在20世纪90年代末之后。与此相对应的是,从20世纪90年代中后期开始,胶州湾总溶解

无机氮、磷酸盐、硅酸盐浓度均呈现显著升高趋势。特别是硅酸盐浓度的增加,使得20世纪90年代胶州湾硅限制的状况得到缓解,为浮游植物的增长奠定了丰富的物质基础。

2.1.2 季节变化 进一步分析不同时期胶州湾浮游植物数量的季节变化(图2B),结果表明,除浮游植物总量发生改变外,不同时期浮游植物数量的季节变化亦呈现差异。其中,1981年浮游植物数量的峰值主要出现在2月和11月,5月和8月份数量很低。自20世纪90年代之后,浮游植物数量的峰值转变为2月和8月,8月份数量最高。2001年之后,2月份浮游植物数量最高。综观近30年胶州湾浮游植物数量的季节变化规律,一个最明显的特征是冬季浮游植物数量的升高极为显著。2001—2008年2月浮游植物数量的平均值可达到20世纪90年代的20倍,为20世纪80年代的6.3倍。关于胶州湾网采浮游植物数量一年呈现冬、夏季双峰的现象,在前面的研究中亦有报道(吴玉霖等,2004;孙松等,2002)。这种现象是营养盐以及摄食压力等因素综合控制的结果。另外,胶州湾冬季水温的升高也有利于浮游植物的生长。

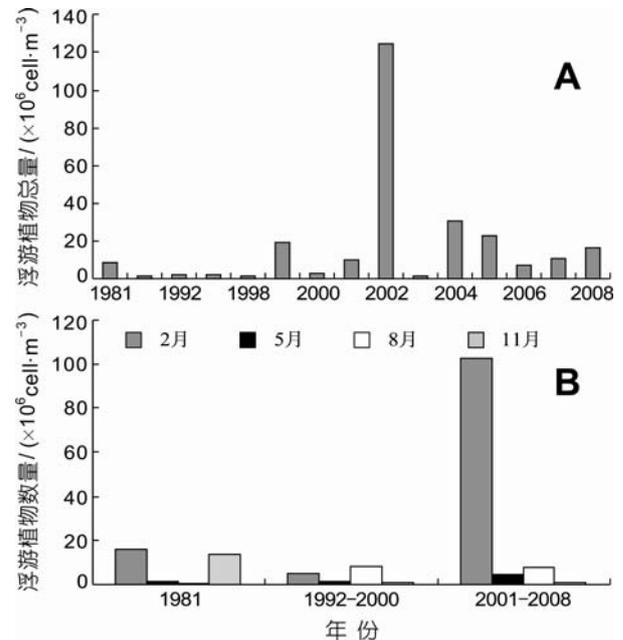


图2 胶州湾浮游植物总量的长期变化(A)以及浮游植物数量的季节变化(B)

Fig.2 Long-term changes (A) and seasonal changes (B) of phytoplankton density in the Jiaozhou Bay

2.1.3 空间分布格局变化 20世纪90年代以及2001—2008年间胶州湾不同时期浮游植物空间分布格局的变化情况如图3所示。比较图3(a、b、c、d)

和图 3(e、f、g、h)的分布规律, 尽管存在数量上的显著差异, 不同时期 2 月、5 月和 8 月浮游植物数量的分布格局基本相似, 呈现由湾北部和东北部向湾中和湾外降低的趋势, 但 11 月份的分布格局有所不同, 90 年代的高值区出现在湾口西侧近岸水域, 而 2001 年之后的高值区出现在湾中间区域。1977—1978 年胶州湾浮游植物总量的平面分布趋势为湾边缘海区高于湾中央, 湾北部海区高于湾南部, 湾口区最低(钱树本等, 1983)。1981—1982 年湾内浮游植物平面分布格局一般是密集区常出现在湾北部、东北部和西部, 稀疏区自湾口靠近湾的东南岸向湾中分布(郭玉洁等, 1992)。比较不同时期胶州湾的空间分布, 发现近 30 年来胶州湾浮游植物的空间分布格局基本保持一致, 没有发生明显变化。

2.2 胶州湾浮游植物主要组成类群的变化

与许多近海区域相似, 近几十年来胶州湾的生态环境发生了很大变化, 包括水温的升高、盐度的下降以及营养盐浓度与结构的改变。胶州湾的浮游植物群落结构如何对这些变化做出响应, 是普遍关注的问题。自 1981 年以来胶州湾硅藻数量的长期变化规律如图 4A 所示, 这一规律与胶州湾浮游植物总量的变化是一致的, 表明硅藻在胶州湾浮游植物类群组成中一直占绝对优势。在硅藻的组成中, 主要以链状和营群体生活的硅藻为主, 但营单独生活的硅藻自 2000 年后数量也呈现增加的规律。

根据图 4B、图 4C 所示, 胶州湾甲藻的数量所占比例尽管较低, 但近年来表现为明显的上升趋势, 2008 年季度月平均密度达到 $50000 \text{ 个}/\text{m}^3$, 2001—2008 年甲藻的平均密度为 1991—2000 年的 3.3 倍。与此相对应, 甲藻与硅藻的比例也有所升高, 分别由 1981 年的 0.21% 升高至 1991—2000 年 0.27% 和 2001—

2008 年的 0.33%。自 2003 年之后, 甲藻经常成为胶州湾夏季一些站位的优势种类, 如 2008 年 8 月份 2 号站甲藻数量高达 $1050 \times 10^3 \text{ 个}/\text{m}^3$, 2009 年 7 月份 10 号站甲藻数量达到 $1031 \times 10^3 \text{ 个}/\text{m}^3$ 。从空间分布格局上, 甲藻分布的高值区呈现从湾外向湾内蔓延的规律。以上结果表明, 胶州湾甲藻的数量和分布范围都在扩大。

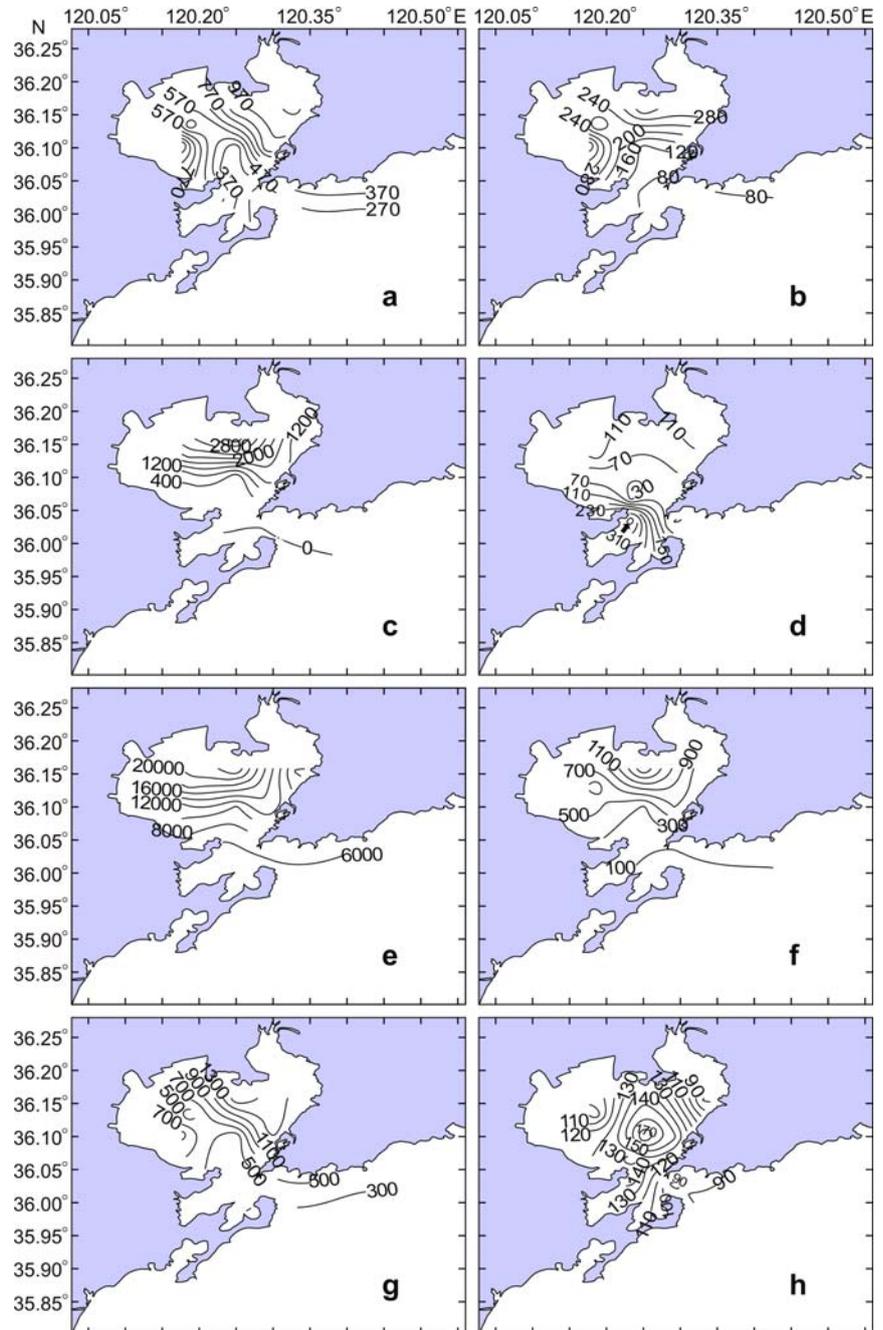


图 3 不同时期胶州湾浮游植物的空间分布格局

Fig.3 Spatial distribution of phytoplankton in the Jiaozhou Bay in different periods a—d: 1992—2000 年平均, a: 2 月, b: 5 月, c: 8 月, d: 11 月。e—h: 2001—2008 年平均, e: 2 月, f: 5 月, g: 8 月, h: 11 月

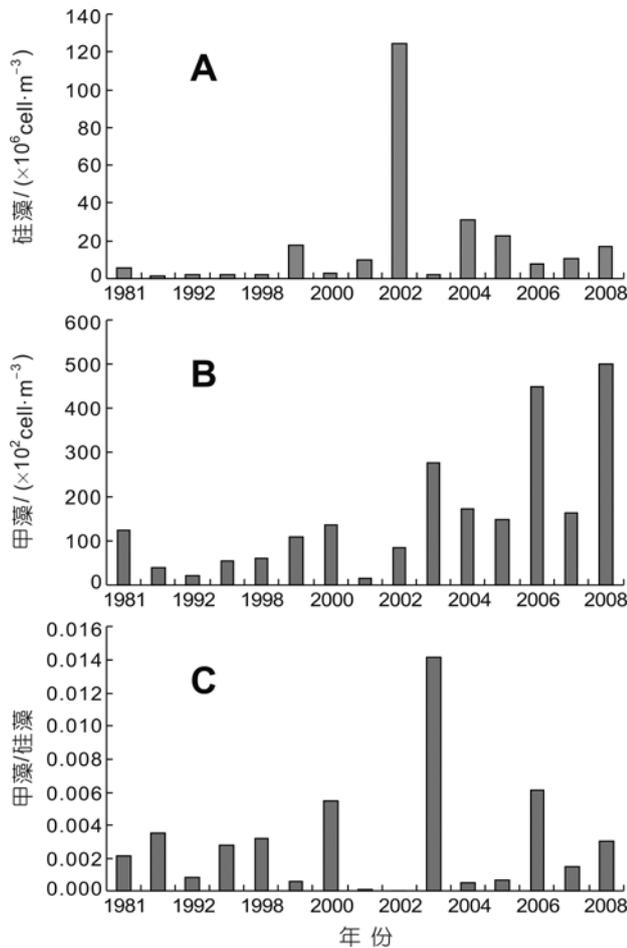


图4 胶州湾硅藻数量(A)、甲藻数量(B)、甲藻/硅藻比(C)的长期变化

Fig.4 Long-term changes of diatom (A), dinoflagellate (B) density and dinoflagellate/diatom ratio in the Jiaozhou Bay

大量研究表明,随着气候变化和人类活动影响的加剧,全球许多近海区域浮游植物群落发生了显著的变化,其中一个值得关注的趋势是甲藻类浮游植物数量以及所占比例的升高,这种现象在渤海(于志刚等,2000;郑炳辉等,2007)、黄海(Lin *et al.*, 2005)和东海(Zhou *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2009; 李云等, 2007)均有报道。根据 Zhou 等(2008)对长江口的研究,长江口硅藻所占的比例从1984年的85%降低到2000年的60%,且自20世纪90年代后期开始,长江口的赤潮开始由硅藻赤潮向甲藻赤潮转变。在黄海,硅藻所占的比例由1986年的88.9%降低到1998年的69.5%,与此相对应的是甲藻的数量由11.1%上升到30.5% (Lin *et al.*, 2005)。长期氮磷比失衡被认为是导致甲藻类在浮游植物群落中所占比例大幅攀升的重要原因(Zhou

et al., 2008; 李云等, 2007)。

Smayda 等(2003)按甲藻的生存策略将甲藻分为三大基本类群: 集群种类—通常在受化学扰动的生境中占优势(如由人类活动引起的富营养化)、耐受营养盐胁迫的类群和耐受物理扰动的类群。胶州湾甲藻的优势类群主要包括角藻属的一些种类,如纺锤角藻、叉角藻、弯顶角藻、柔软角藻、短角角藻等。角藻类的生态习性介于这三大类群之间,这一点与胶州湾的理化环境特征是相吻合的。根据胶州湾的潮流和水动力特征,胶州湾存在较大的物理扰动,湾内外海水交换情况良好,基本是湍流交换,半交换周期为5天(吴永成等, 1992)。与此同时,随着因人类活动引起的营养盐含量的增加及营养盐比例的失衡,胶州湾同时具有上述的三类生境特征,是角藻类甲藻在胶州湾数量增加的主要原因。

2.3 胶州湾浮游植物优势种的变化

2.3.1 优势种种类组成的变化 表1为2004—2008年间胶州湾2月、5月、8月和11月出现的优势种情况。其中中肋骨条藻、角毛藻等全年都居优势地位。季节性的优势种类如冬季的环纹劳德藻、奇异菱形藻、尖刺拟菱形藻、加拉星杆藻,春季的丹麦细柱藻、短角弯角藻、夜光藻等,夏季的短角弯角藻、波状石鼓藻、梭角藻等,秋季的星脐圆筛藻、伏氏海毛藻等。与历史上不同时期(李冠国, 1956; 钱树本等, 1983; 郭玉洁等, 1992; 孙松等, 2002; 刘东艳, 2004¹⁾; 吴玉霖等, 2005)胶州湾浮游植物的优势种相比较,近年来胶州湾浮游植物优势种组成发生了变化,在20世纪90年代之前占据优势地位的斯氏几内亚藻、印度翼根管藻、中华半管藻等种类在2000年之后不再占优势,除了一直居优势地位的中肋骨条藻、旋链角毛藻、星脐圆筛藻、柔弱角毛藻、尖刺拟菱形藻、浮动弯角藻等之外,洛氏角毛藻、密联角毛藻、波状石鼓藻、叉角藻与梭角藻等也成为近5年来新的优势种。

2.3.2 优势类群数量变动 图5分别列出了自1981年以来胶州湾优势类群的长期变化情况。其中中肋骨条藻、角毛藻、菱形藻等优势类群发生的频率和峰值在2000年之后都明显高于20世纪90年代和80年代,以角毛藻的增加最为显著。另外,角藻和波状石鼓藻的变化亦非常明显,均表现为增加的趋势。因此,近30年胶州湾浮游植物优势种的长期变化主要体现在三个方面: 即链状嗜氮性硅藻数量增加、以

1) 刘东艳, 2004. 胶州湾浮游植物和沉积物中硅藻群落结构演替的研究. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文, 1—127

表 1 2004—2008 年间胶州湾浮游植物优势种
Tab.1 Dominant phytoplankton species in the Jiaozhou Bay during 2004—2008

中文名称	拉丁名	2 月	5 月	8 月	11 月
中肋骨条藻	<i>Skeletonema costatum</i> (Grev.) Cleve	*		*	*
柔弱根管藻	<i>Rhizosolenia delicatula</i> Cleve	*		*	
斯氏根管藻	<i>R. stolterforthii</i> Peragallo		*		
刚毛根管藻	<i>R. setigera</i> Brightwell		*		
扁面角毛藻	<i>Chaetoceros compressus</i> Lauder		*		
洛氏角毛藻	<i>C. lorenzianus</i> Grunow		*	*	*
旋链角毛藻	<i>C. curvisetus</i> Cleve	*	*	*	*
拟旋链角毛藻	<i>C. pseudocurvisetus</i> Mangin			*	
垂缘角毛藻	<i>C. lacinosus</i> Schuet		*		
柔弱角毛藻	<i>C. debilis</i> Cleve	*	*	*	*
聚生角毛藻	<i>C. socialis</i> Lauder	*			
卡氏角毛藻	<i>C. castracanei</i> Karsten				*
密联角毛藻	<i>C. densus</i> Cleve	*	*		*
窄隙角毛藻	<i>C. affinis</i> Lauder		*		
丹麦细柱藻	<i>Leptocylindrus danicus</i> Cleve		*	*	
星脐圆筛藻	<i>Coscinodiscus asteromphalus</i> Ehrenberg			*	*
琼氏圆筛藻	<i>C. jonesianus</i> (Grev.) Ostenfeld				*
格氏圆筛藻	<i>C. granii</i> Grough				*
奇异菱形藻	<i>Nitzschia paradoxa</i> Gmelin	*	*		*
尖刺拟菱形藻	<i>Pseudonitzschia pungens</i> (Grunow ex Cleve) Hasle	*	*		
新月菱形藻	<i>N. closterium</i> W. Smith		*		
诺登海链藻	<i>T. nordenskioldii</i> Cleve	*			
太平洋海链藻	<i>T. pacifica</i> Granet Angest			*	
短角弯角藻	<i>Eucampia zoodiacus</i> Ehrenberg		*	*	
扭鞘藻	<i>Streptothece thamesis</i> Shrubsole			*	
环纹劳德藻	<i>Lauderia annulata</i> Cleve	*	*		
布氏双尾藻	<i>Ditylum brightwelli</i> (West) Grunow	*			*
伏氏海毛藻	<i>Thalassiothrix frauenfeldii</i> (Grun.) Grunow				*
加拉星杆藻	<i>A. kariana</i> Grunow	*	*		
波状石鼓藻	<i>Lithodesmium undulatus</i> Ehrenberg			*	
柏氏角管藻	<i>Ceratalina bergonii</i> Peragallo			*	
高盒形藻	<i>Biddulphia regia</i> (Schultze) Ostenfeld			*	
柔软角藻	<i>C. molle</i> Kofoid			*	
梭角藻	<i>Ceratium fusus</i> (Ehr.) Dujardin			*	
短角角藻	<i>C. breve</i> (Ost. Et Schmidt) Schroder			*	
夜光藻	<i>Noctiluca scintillans</i> (Macartney) Kofoid et Swezy		*		

注: *表示相应月份的优势种

角藻为主的甲藻数量增加、暖水性浮游植物数量增加。角毛藻、中肋骨条藻等均属于链状硅藻。与单独生活的硅藻相比,成链状或营群体生活的硅藻能够增加对营养盐的吸收(Logan *et al.*, 1989)。中肋骨条

藻、尖刺拟菱形藻、旋链角毛藻等被认为是嗜氮性硅藻(刘东艳, 2004)¹⁾,胶州湾无机氮浓度的不断增加为这类硅藻数量的增长提供了良好的物质基础。

角藻是胶州湾甲藻的主要优势类群,也是夏季

1) 刘东艳, 2004. 胶州湾浮游植物和沉积物中硅藻群落结构演替的研究. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文, 1—127

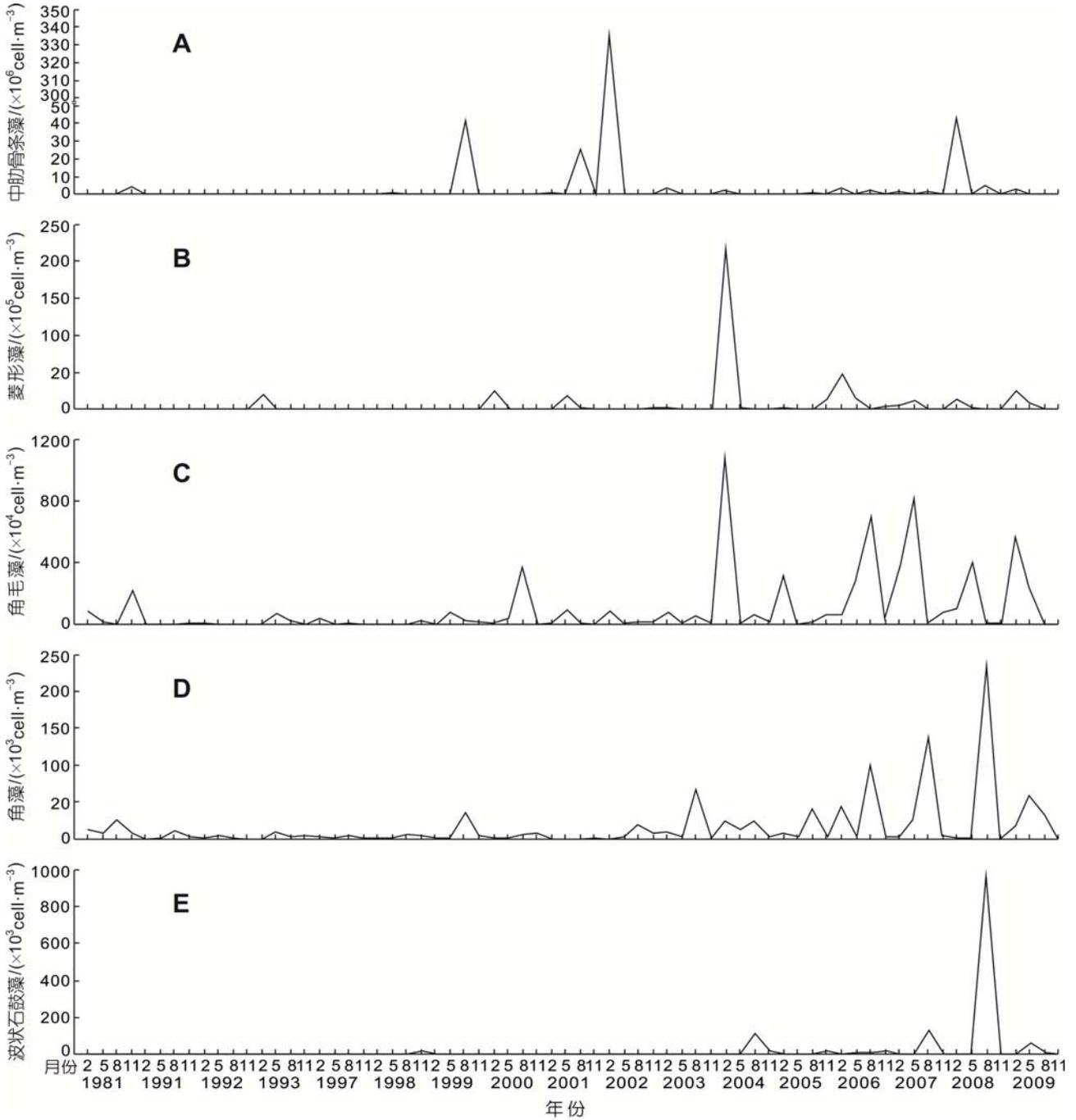


图5 胶州湾浮游植物优势种长期变化

Fig.5 Long-term changes of the density of the dominant phytoplankton species in the Jiaozhou Bay

胶州湾的主要优势种，以叉角藻和梭角藻为主。这两种藻类也是日本的温带海湾相模湾(Sagami 湾)的主要优势种类。根据 Baek 等(2008)对 2000—2005 年间相模湾角藻的研究结果，认为这两种甲藻成为浮游植物的优势种主要有两方面的原因：一是这两种藻类具有较低的营养盐吸收半饱和常数(K_s)以及特殊的营养盐吸收特征，如“奢侈消费”，使得这两种藻

类相对于其他种类具有一定的竞争优势。更为重要的是，这两种藻的细胞密度都随硝酸盐浓度的增加而增加，即使是在磷的浓度保持稳定时也是如此。特别是叉角藻的生长直接受硝酸盐、氨氮、尿素等各种氮源支持，并且发现其在富含硝酸盐的培养液中生长速率最高。这两种藻的生长速率受氮磷比变化的影响，在磷受限制的环境中具有较强的竞争优势。根据胶州

湾营养盐的长期变化特征, 自 20 世纪 90 年代以来, 总无机氮的含量显著升高, 相对于磷酸盐和硅酸盐而言, 近年来硝酸盐浓度的增加更为显著, 这种环境有利于角藻的发展并逐渐成为夏季的优势种。

根据图 5(E)可以看出, 自 2004 年之后, 胶州湾的波状石鼓藻(*Lithodesmium undulatum*)平均数量显著升高, 成为春末至夏季的主要优势种类之一。2008 年夏季个别站位波状石鼓藻的密度高达 44000×10^3 个/ m^3 。波状石鼓藻属于热带近岸性种类(吴玉霖等, 2005)。根据郭玉洁等(1992)的研究, 胶州湾的波状石鼓藻是 1978 年随外轮带来的暖水种, 近年来逐渐成为胶州湾的优势种, 通常在 6 月开始大面积出现, 至 9 月逐渐消退。1981 年胶州湾波状石鼓藻的最高数量为 15×10^3 个/ m^3 , 2003 年 6 月平均数量达到 298×10^3 个/ m^3 , 而到 2008 年 6 月, 全湾平均密度高达 5620×10^3 个/ m^3 , 为 2003 年的 19 倍。根据胶州湾气象水文要素的长期变化研究, 胶州湾表层水温 1962—2008 年的年平均变率为 0.023°C , 冬季年变率为 0.065°C 。自 1981 年以来, 冬、春季水温的上升幅度约为 2°C 。波状石鼓藻数量不断增加是胶州湾浮游植物群落对水温变暖的一种响应。

3 小结

近 30 年来胶州湾的浮游植物群落的长期变化特征主要表现在:

浮游植物总量呈现增加的趋势, 2000 年以后浮游植物数量增加尤为明显。在季节变化上, 主要体现在冬季浮游植物数量增加显著, 但各个季节浮游植物数量的空间分布格局没有发生明显改变。

浮游植物优势种组成发生变化, 在 20 世纪 90 年代之前占据优势地位的斯氏几内亚藻、印度翼根管藻、中华半管藻等种类在 2000 年之后不再占优势, 除了一直居优势地位的中肋骨条藻、旋链角毛藻、星脐圆筛藻、柔弱角毛藻、尖刺拟菱形藻、浮动弯角藻等之外, 洛氏角毛藻、密联角毛藻、波状石鼓藻、叉角藻与梭角藻等成为近 5 年来新的优势种。

胶州湾浮游植物优势类群数量的长期变化趋势表明, 中肋骨条藻、角毛藻等小型链状硅藻数量呈现增加趋势, 波状石鼓藻等暖水性种类的数量持续升高, 甲藻类浮游植物数量升高、分布范围扩大, 表明胶州湾浮游植物群落对气候变化和人类活动的综合影响已经做出响应。

致谢 本研究中的海上调查和样品采集工作得到了中国科学院海洋所胶州湾海洋生态系统研究站和浮游动物研究组各位老师、同学以及“科交二号”和“创新号”考察船全体工作人员的支持, 谨致谢忱。

参 考 文 献

- 于志刚, 米铁柱, 谢保东等, 2000. 二十年来渤海生态环境参数的演化与相互关系. 海洋环境科学, 19(1): 15—19
- 王 林, 赵冬至, 邢小昱等, 2009. 脱镁叶绿素对浮游植物吸收特性的影响. 海洋与湖沼, 40(5): 596—602
- 王修林, 李国强, 2006. 胶州湾浮游植物生物量及群落结构分析. 见: 王修林, 李国强, 石晓勇主编. 胶州湾主要化学污染物海洋环境容量. 北京: 科学出版社, 48—62
- 孙 松, 刘桂梅, 张永山等, 2002. 90 年代胶州湾浮游植物种类组成和数量分布特征. 海洋与湖沼, 33(浮游动物研究专辑): 37—45
- 孙 松, 张永山, 吴玉霖等, 2005. 胶州湾初级生产力周年变化. 海洋与湖沼, 36(6): 481—486
- 李 云, 李道季, 唐静亮等, 2007. 长江口及毗邻海域浮游植物的分布与变化. 环境科学, 28(4): 719—729
- 李冠国, 黄世玫, 1956. 青岛近海浮游硅藻季节变化研究的初步报告. 山东大学学报, 2(4): 119—143
- 吴永成, 王丛敏, 张以恩等, 1992. 海水交换和混合扩散. 见: 刘瑞玉主编. 胶州湾的生态学和生物资源. 北京: 科学出版社, 57—72
- 吴玉霖, 孙 松, 张永山, 2005. 环境长期变化对胶州湾浮游植物群落的影响. 海洋与湖沼, 35(6): 487—498
- 吴玉霖, 孙 松, 张永山等, 2004. 胶州湾浮游植物数量长期动态变化的研究. 海洋与湖沼, 36(6): 518—523
- 吴玉霖, 张永山, 1995. 胶州湾叶绿素 *a* 和初级生产力的分布特征. 见: 董金海, 焦念志主编. 胶州湾生态学研究. 北京: 科学出版社, 137—150
- 张才学, 孙省利, 谢伟良等, 2009. 徐闻珊瑚礁区浮游植物的季节变化. 海洋与湖沼, 40(2): 159—165
- 郑炳辉, 秦延文, 孟 伟等, 2007. 1985—2003 年渤海湾水质氮磷生源要素的历史演变趋势分析. 环境科学, 28(3): 494—499
- 钱树本, 王筱庆, 陈国蔚, 1983. 胶州湾的浮游藻类. 山东海洋学院学报, 13(1): 39—56
- 郭玉洁, 杨泽禹, 1992. 浮游生物. 见: 刘瑞玉主编. 胶州湾的生态学和生物资源. 北京: 科学出版社, 136—169
- Baek S H, Shimode S, Han M S *et al*, 2008. Growth of dinoflagellate, *Ceratium furca* and *Ceratium fusus* in Sagami Bay, Japan: The role of nutrients. Harmful Algae, 7: 729—739
- Li J, Glibert P M, Zhou M J *et al*, 2009. Relationship between nitrogen and phosphorus forms and ratios and the development of dinoflagellate blooms in the East China Sea. Marine Ecology Progress Series, 383: 11—26
- Lin C, Ning X R, Su J L *et al*, 2005. Environmental changes and the responses of the ecosystem of the Yellow Sea during 1976—2000. Journal of Marine Systems, 55: 223—234

- Logan B E, Alldredge A L, 1989. Potential for increased nutrient uptake by flocculating diatoms. *Marine Biology*, 101: 443—450
- Smayda T J, 1990. Noval and nuisance phytoplankton blooms in the sea: evidence for a global epidemic. In: Graneli E, Sundstrom B, Edler L *et al* ed. *Toxic Marine Phytoplankton*. Elsevier, New York, 29—40
- Smayda T J, Reynolds C S, 2003. Strategies of marine dinoflagellate survival and some rules of assembly. *Journal of Sea Research*, 49: 95—106
- Zhou M J, Shen Z L, Yu R C, 2008. Response of a coastal phytoplankton community to increased nutrient input from the Changjiang (Yangtze) River. *Continental Shelf Research*, 28: 1483—1489

LONG-TERM CHANGES OF PHYTOPLANKTON COMMUNITY STRUCTURE IN THE JIAOZHOU BAY

SUN Xiao-Xia¹, SUN Song^{1,2}, WU Yu-Lin², ZHANG Yong-Shan², ZHENG Shan^{1,3}

(1. *Jiaozhou Bay Marine Ecosystem Research Station, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071*;
2. *Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071*; 3. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049*)

Abstract Based on survey data collected using plankton net from the 1980's in the Jiaozhou bay, long-term changes of the phytoplankton community were analyzed in this study. The results indicated that total abundance of phytoplankton started increasing since 1981, and the increase was evident since 2000, especially in winter. However, there were no distinct changes in the spatial distribution patterns. The dominant phytoplankton species also changed in recent years. Some phytoplankton species, including *Guinardia striata*, *Rhizosolenia alata f. Indica*, and *Hemiaulus sinensis*, which were once dominant before the 1990's, lost their dominance after 2000. The new dominant species, including *Chaetoceros lorenzianus*, *Chaetoceros densus*, *Lithodesmium undulatus*, *Ceratium furca*, and *Ceratium fusus*, appeared in the past five years. The long-term changes of the dominant species revealed that the small chained diatoms such as *Skeletonema costatum* and *Chaetoceros* sp., the warm water species such as *Lithodesmium undulatus*, and the dinoflagellates such as *Ceratium furca* and *Ceratium fusus*, increased dramatically in the past 30 years, indicating that the phytoplankton community had changed in response to the impacts of climate change and human activities in the Jiaozhou Bay.

Key words Jiaozhou Bay, Phytoplankton, Community structure, Long-term changes