

环境长期变化对胶州湾 浮游植物群落结构的影响*

吴玉霖 孙松 张永山

(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)

提要 主要依据1991年5月—1995年11月和1997年2月—2004年11月连续多年每季度月(2、5、8、11月)采用“浅水III型”浮游生物网在胶州湾10个站位自海底至表垂直拖取的浮游植物样品,同时搜集自1954年以来约50年有关胶州湾环境因子及浮游植物的历史监测资料,分析研究胶州湾环境因子长期变化及其对浮游植物群落结构的影响。结果表明,近50年来由于大规模人类活动给胶州湾环境带来很大影响,大量工农业生产废水和生活污水源源不断进入湾内,造成水域营养盐含量迅速增加,近3年来 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 比1962年分别提高14.5倍和9.5倍,沿岸带的开发导致胶州湾水域面积不断缩小,纳潮量下降,水域环境容量和自净能力减弱,水域环境趋向退化。环境因子的变化对胶州湾浮游植物群落结构造成明显的影响,近50年来,浮游植物数量呈增加趋势;优势种更替明显,原先一些优势种不再居优势地位,而比较喜肥的种类如中肋骨条藻数量显著增加,成为最重要的优势种;浮游植物多样性指数有所下降,表明胶州湾浮游植物群落处于演化之中,同时由于营养盐含量迅速增加,为赤潮的形成与发展提供了丰富的物质基础,自1997年以来,赤潮几乎连年暴发,并有愈演愈烈的发展趋势,反映出胶州湾生态环境已呈现异常的征兆。

关键词 胶州湾, 环境变化, 浮游植物, 群落结构

中图分类号 P593

浮游植物个体微小,种类繁多,不同种类对环境的适应能力有一定差异,因而受环境因子变化的影响,浮游植物群落结构诸如种类组成、丰度等可能出现某些变化。作为海洋中最主要初级生产者的浮游植物在海洋生态系统中具有重要功能,因此开展环境长期变化对浮游植物群落结构的演变及演化方向的研究成为海洋科学研究的热点之一,国内外已有若干相关报道(沈志良, 2002; 吴玉霖等, 2004; 赵淑江等, 2001a; Zhao *et al.*, 2005; Copper *et al.*, 1993; Andren, 1999; Patsch *et al.*, 1997; Smayda, 1984)。本文中作者利用1953年以来约50年对胶州湾浮游植物调查结果,结合自然因素及人类活动引起的环境长期变化资料进行综合分析,探讨浮游植物对环境长期变化的响应。

1 调查材料与方法

1.1 浮游植物调查资料

1.1.1 1953年3月—1956年2月对青岛近海浮游砂藻的调查(李冠国等, 1956) 在栈桥设采样点,每星期用标准25号筛绢(网目为64 μm)制作的小网采样1次。

1.1.2 1981年2月—1981年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(图1),每季度(2、5、8、11月)采样1次,以浅水III型网从海底至表垂直拖取。

1.1.3 1991年5月—1995年11月、1997年2月—2004年11月对胶州湾浮游植物进行的连续调查(作者) 在湾内设调查站位9个,湾外1个(图2)。采样时间、间隔、网具及方法同1.1.2。

* 中国科学院知识创新项目, KZCX3-SW-214号。吴玉霖, 研究员, E-mail: YLWu@ms.qdio.ac.cn

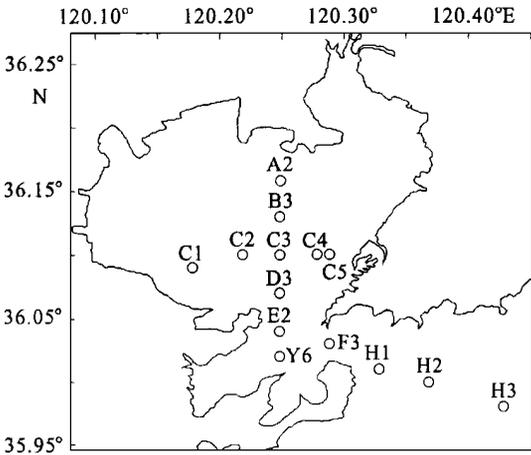


图 1 1981 年采样站点

Fig. 1 Location of sampling stations in 1981

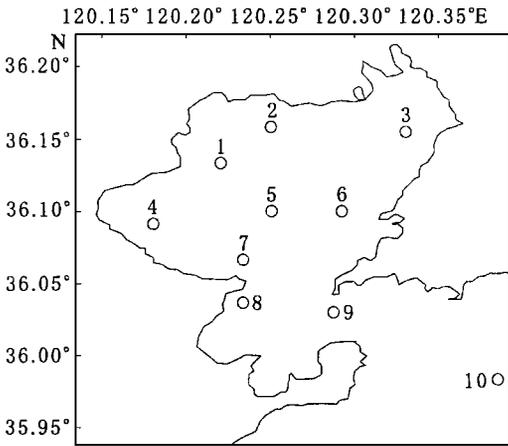


图 2 1992—2004 年采样站点

Fig. 2 Location of sampling stations(1992—2004)

对胶州湾浮游植物多样性采用 Shannon-Wiener 指数(H') 进行分析, 其公式为:

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i$$

其中: H' 为生物多样性指数, S 为样品中的种类总数, P_i 为第 i 种的个体数与总个体数的比值。

1.2 环境因子的历史资料

水文气象、海水化学资料来自中国生态系统研究网络(CERN)胶州湾生态系统研究站数据库, 部分营养盐资料由沈志良研究员提供。

海水养殖及其它人类活动的相关资料搜集自青岛市统计局所编的《统计数据》1949—2003 年年度资料。

2 结果和讨论

2.1 胶州湾浮游植物分布与种类组成的一般特征

自 1981 年以来历次现场调查资料分析表明, 胶州湾浮游植物数量平面分布具有明显的特征, 即高值区通常位于湾东北部和湾北部海域, 湾中部和南部数量相对较少, 而湾外又比湾南部的数量更少, 显示出自湾北向湾中、南部及湾外逐渐递降的数量分布格局(郭玉洁等, 1992; 孙松等, 2002)。图 3 表示 2003 年 5 月—2004 年 2 月各季度月胶州湾北部(1—3 号站)、南部(7—9 号站)和湾外(10 号站)浮游植物数量分布状况, 亦显示出上述浮游植物数量分布的基本特征。这一分布特征同胶州湾叶绿素 a 含量的分布状况相似(吴玉霖等, 2004)。

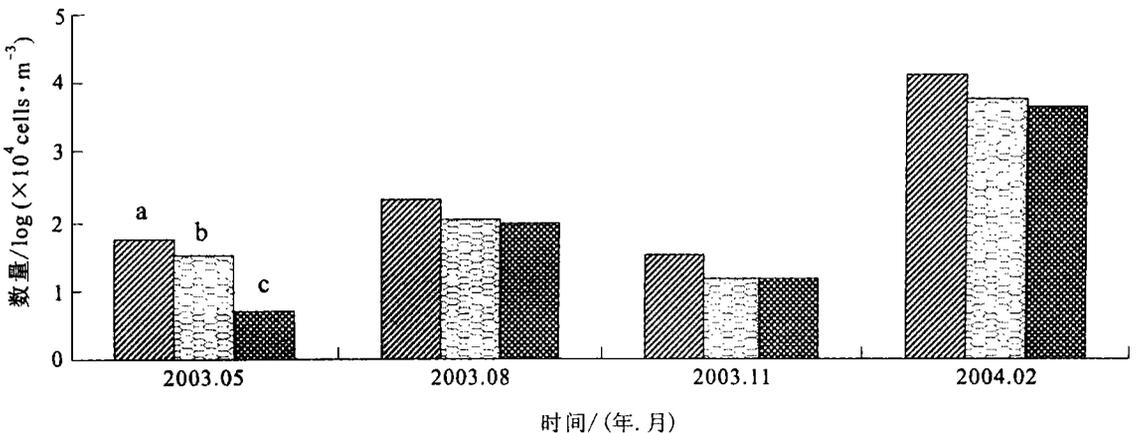


图 3 胶州湾不同区域浮游植物数量分布

Fig. 3 The distribution of phytoplankton abundance in different parts of Jiaozhou Bay
a. 湾北; b. 湾南; c. 湾外

胶州湾浮游植物这种分布格局同营养盐的分布状况基本一致。表层海水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度均是北部和东北部高,由北向南递减,湾外最低; $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 表、底层浓度均为东北部和东部高,自东北向西南降低,而湾外低于湾内(沈志良等,1994;沈志良,2002),表明氮、磷等营养盐对浮游植物数量分布具有相当重要的影响。另外,湾东北部水体稳定度相对较高亦有利于浮游植物聚集。

胶州湾地处暖温带,四季分明,湾内浮游植

物有着明显的季节数量动态变化特征,数量高峰通常出现在冬季,夏季常有一个次高峰(图4)。春、秋季数量较少,这符合温带海域一年有双峰的一般现象。如若把1954至今的13个年份调查加以平均,则冬季高达 $1119.01 \times 10^4 \text{ cells/m}^3$,夏季为 $690.08 \times 10^4 \text{ cells/m}^3$,春、秋季分别为 $160.47 \times 10^4 \text{ cells/m}^3$ 和 $203.77 \times 10^4 \text{ cells/m}^3$ 。浮游植物这种数量季节变化特征同胶州湾叶绿素a含量季节变化状况基本一致(吴玉霖等,2004)。

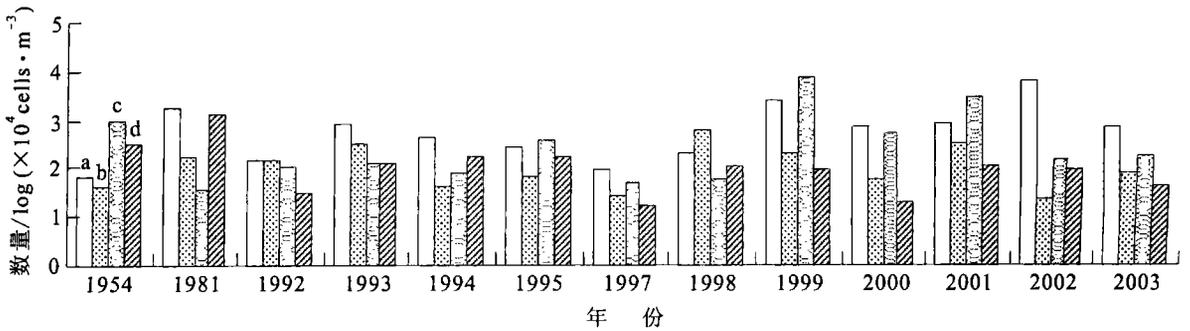


图4 不同季节浮游植物数量的年际变化

Fig. 4 The seasonal variation in phytoplankton abundance

a. 2月; b. 5月; c. 8月; d. 11月

关于胶州湾浮游植物种类组成,1981年调查共鉴定116种,其中硅藻100种,甲藻15种,金藻1种(郭玉洁等,1992);1999年调查共鉴定117种,其中属硅藻104种,甲藻12种及金藻1种(孙松等,2002);2003年调查共鉴定120种,其中属硅藻类的有95种,甲藻21种,绿藻2种,金藻和裸藻各1种。大部分浮游植物种类属于暖温带性和广布性种类,夏、秋季有若干热带近岸性种类出现,如波状石丝藻(*Lithodesmium undulatum*)等。此外近岸偶尔能采到半咸水性种。中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)为胶州湾最重要的优势种。其它较重要的种类还有加氏星杆藻(*Asterionella kariana*)、日本星杆藻(*A. japonica*)、旋链角毛藻(*Chaetoceros curvisetus*)、尖刺拟菱形藻(*Pseudonitzschia pungens*)、奇异菱形藻(*Nitzschia paradoxa*)、星脐圆筛藻(*Coscinodiscus asteromphalus*)及短角弯角藻(*Eucampia zodiacus*)等。

胶州湾浮游植物多样性指数 H' 平面分布状况与数量分布的格局明显不同,湾北部多样性指数通常较低。2003年1—3号站平均生物多样性指数为0.780,而湾南部(7—9号站)平均值为0.926,湾外(10号站)平均为0.936。湾南

部和湾外比较接近(图5)。这反映出三部分水域浮游植物植物群落结构有所差异。造成这种局面的主要原因是湾东北部和北部营养盐含量较高,水质肥沃,水体相对较为稳定,导致部分喜肥的种类如中肋骨条藻大量繁殖,往往成为浮游植物密集区。因生物多样性指数同群落中生物种类数及生物丰度关系密切,所以湾北部浮游植物多样性指数相对较低。湾南部及湾外处于湾内水同外海水的混合带,浮游植物种类相对多些,是造成这两部分水域多样性指数较高的主要原因。

2.2 胶州湾浮游植物的长期变化

2.2.1 浮游植物数量的长期变化

图4和图6表示1954年及其后若干年份各季度月与年平均浮游植物数量动态变化状况。总体上看,近50年来胶州湾浮游植物数量有呈增加的变化趋势,但年际间波动较大。进一步分析表明,可以划分两个不同的演变阶段,即1981—1997年浮游植物数量呈逐渐下降阶段和1998年至今为迅速增长时期。浮游植物数量这种年际变化趋势可能同胶州湾大规模滤食性贝类筏式养殖业发展状况有关。

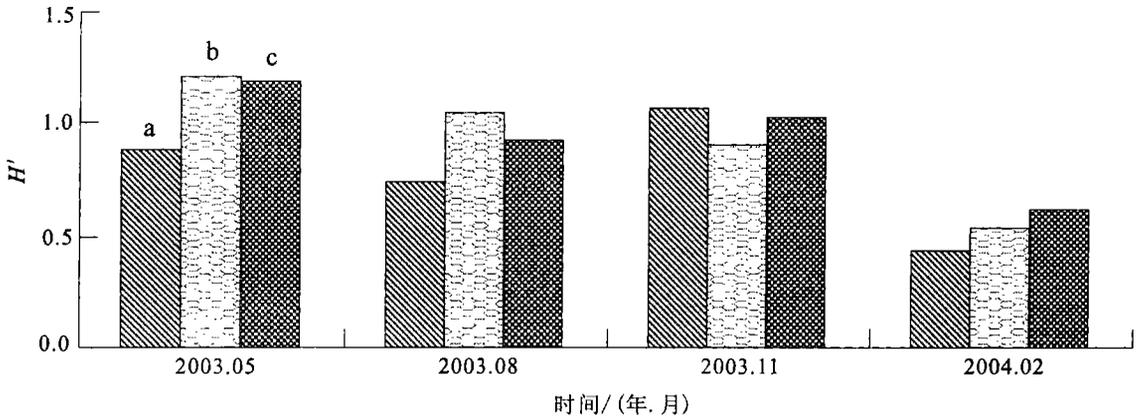


图 5 胶州湾浮游植物多样性指数分布

Fig. 5 The distribution of phytoplankton diversity index H' in Jiaozhou Bay

a. 湾北; b. 湾南; c. 湾外

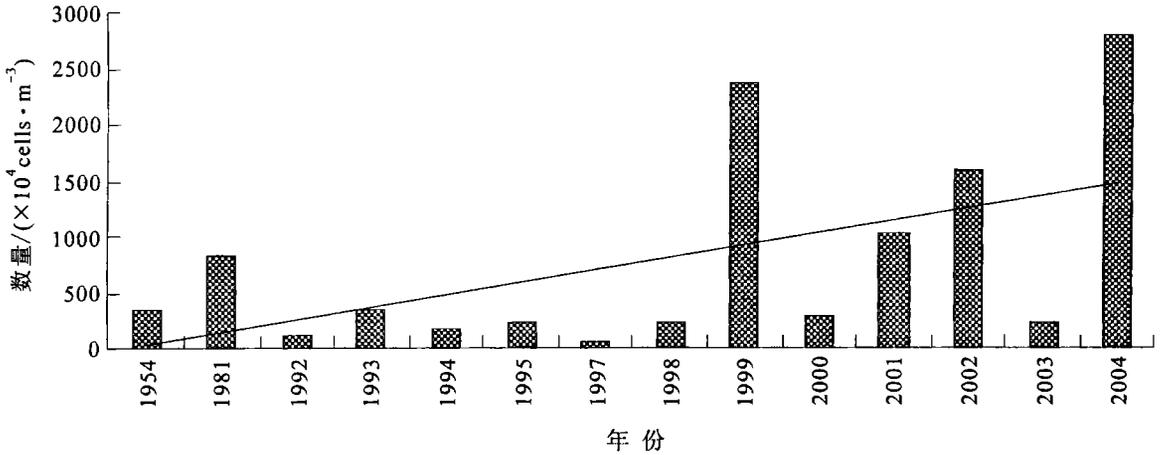


图 6 胶州湾浮游植物数量的长期变化

Fig. 6 Long-term changes of phytoplankton abundance in Jiaozhou Bay

胶州湾自 80 年代中期起迅速发展贝类筏式养殖, 至 90 年代中期达到高峰, 这期间浮游植物数量明显地呈现出逐年下降的变化趋势, 反映出滤食性贝类对浮游植物数量有很强的控制作用(详细分析见 3.3.2 节)。1997 年开始, 因病害等原因, 扇贝大规模灾难性死亡, 筏式养殖业出现大滑坡并迅速萎缩, 1998 年后胶州湾浮游植物数量得到恢复并呈迅速增加的态势。胶州湾浮游植物数量动态变化比较容易受人类活动如海水养殖及城市排污等影响的一个重要原因是因为该湾水域面积较小, 约为 374.4km², 平均水深仅 7m, 几乎为青岛市区所包围, 湾口狭小, 与湾外水交换不很顺畅; 营养盐含量持续增加, 导致某些浮游植物迅速繁殖且时而形成赤潮。1999 年浮游植物平均数量之

所以高达 2393.8×10^4 cells/m³, 就是因为该年夏季先后出现短角弯角藻和中肋骨条藻赤潮的缘故(详细分析见“2.3”节)。

2.2.2 浮游植物种类组成的变化 胶州湾各年四个季度月调查所获的浮游植物种类数见图 7, 可以看出, 年际间有一定的波动, 但没有明显的长期变化趋势。以 1997 年出现的种类最多, 各季度月均在 65 种以上。另外 2003 年四个季度平均种数亦达 70 种。应该说明的是, 季度月所采到的浮游植物种类数同调查站位的多少之间有一定关系, 调查站位多, 不同浮游植物种类被采到的几率就高, 反之则低。1954 年仅在栈桥设 1 个站, 该年各季度月调查所获种类数约为其它年份的一半。

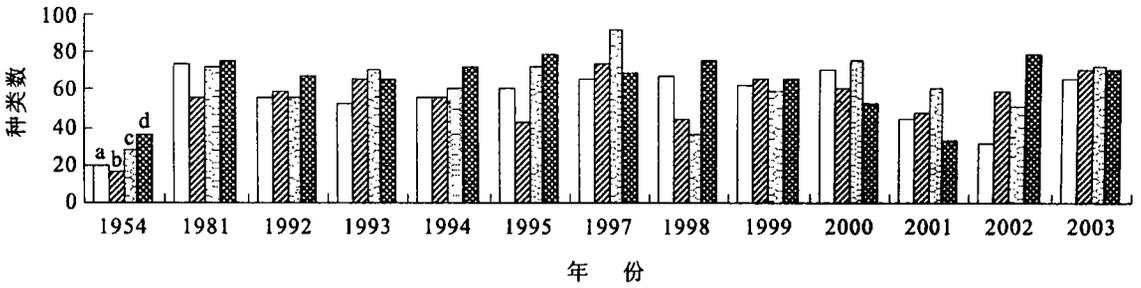


图7 四个季度月浮游植物种类数年际变化

Fig. 7 Annual variation in phytoplankton species number in different seasons
a. 2月; b. 5月; c. 8月; d. 11月

近50年来,胶州湾浮游植物优势种构成的变化是比较明显的(表1),中肋骨条藻是最常见的优势种,在上个世纪50年代和80年代的冬季或夏季常成为优势种群,而进入90年代至今,该藻数量有明显增加,且在一年中的大部分季节常居优势地位,2001年夏季,全湾该藻平均密度高达 $28059 \times 10^3 \text{ cells/m}^3$,优势度达到96.7%;90年代以来,加氏星杆藻和诺登海链藻 (*Thalassiosira nordenskioldii*) 常在冬季大量出现,成为重要优势种,如1999年2月,加氏星杆藻平均数量高达 $19714 \times 10^3 \text{ cells/m}^3$,优势度为97.6%,而诺登海链藻在2002年冬季全湾平均数量达到 $20243 \times 10^3 \text{ cells/m}^3$,优势度为32.6%;近几年来圆筛藻属

的星圆筛藻在夏季有较大量出现,成为优势种,2003年7月曾在胶州湾北部急速增殖而形成赤潮;进入90年代后,尖刺拟菱形藻和奇异菱形藻常在春、秋季较多量出现,由于春、秋两季胶州湾浮游植物数量相对较少,这两种硅藻成为重要的优势种。同上述那些90年代新出现的优势种呈鲜明对比的是,原先(1954年和1981年)胶州湾的若干浮游植物优势种,诸如窄隙角毛藻 (*Ch. affinis*)、菱形海线藻 (*Thalassionema nitzschioides*)、刚毛根管藻 (*Rhizosolenia setigera*) 和辐射圆筛藻 (*Cos. radiacus*) 等数量相对下降,已不再成为优势种群,显示出胶州湾浮游植物群落在种类构成上存在长期变化的重要现象。

表1 胶州湾浮游植物优势种长期变化

Tab. 1 Long-term changes of dominant phytoplankton species in Jiaozhou Bay

年份	冬季	春季	夏季	秋季
1954	<i>Coscinodiscus asteromphalus</i> (25.6%) <i>Thalassionema nitzschioides</i> (16.7%) <i>Asterionella japonica</i> (17.6%)	<i>Rhizosolenia stoltefothii</i> (33.3%) <i>Coscinodiscus radiatus</i> (12.5%)	<i>Skeletonema costatum</i> (79.3%)	<i>Coscinodiscus asteromphalus</i> (16%) <i>Chaetoceros affinis</i> (9.3%)
1981	<i>Chaetoceros affinis</i> (12.8%) <i>Chaetoceros ompressus</i> (11.9%)	<i>Chaetoceros densus</i> (40.3%) <i>Rhizosolenia setigera</i> (10.3%)	<i>Climacodium biconcavum</i> (9.6%)	<i>Skeletonema costatum</i> (25.4%) <i>Asterionella japonica</i> (11.9%) <i>Chaetoceros affinis</i> (10.7%)
1992	<i>Skeletonema costatum</i> (40.4%) <i>Rhizosolenia alata f. indica</i> (17.9%)	<i>Asterionella japonica</i> (36.8%)	<i>Coscinodiscus granii</i> (88.4%)	<i>Biddulphia aurita</i> (21.5%) <i>Chaetoceros debilis</i> (20.3%) <i>Pseudonitzschia pungens</i> (14.3%)

续表

年份	冬季	春季	夏季	秋季
1993	<i>Rhizosolenia delicatula</i> (70.1%) <i>Asterionella japonica</i> (8.9%)	<i>Pseudonitzschia pungens</i> (69.5%)	<i>Chaetoceros curvisetus</i> (62%)	<i>Rhizosolenia styliformis</i> (12.6%) <i>Chaetoceros compressus</i> (10.5%)
1994	<i>Rhizosolenia delicatula</i> (96.2%)	<i>Asterionella japonica</i> (36.6%)	<i>Pseudonitzschia pungens</i> (30.9%) <i>Skeletonema costatum</i> (22.3%) <i>Chaetoceros curvisetus</i> (15.9%)	<i>Skeletonema costatum</i> (32.1%) <i>Coscinodiscus asteromphalus</i> (18.4%) <i>Eucampia zoodiacus</i> (11%)
1995	<i>Skeletonema costatum</i> (46.3%) <i>Asterionella kariana</i> (22.5%)	<i>Ditylum brightwellii</i> (30.6%) <i>Coscinodiscus perforatus</i> (24%)	<i>Chaetoceros curvisetus</i> (71.9%) <i>Actinocyclus ehrenbergii</i> (12.7%)	<i>Rhizosolenia styliformis</i> (30.3%) <i>Asterionella japonica</i> (15.7%)
1997	<i>Chaetoceros compressus</i> (46.3%) <i>Chaetoceros densus</i> (14.5%)	<i>Pseudonitzschia pungens</i> (28.4%)	<i>Rhizosolenia fragilissima</i> (17.6%) <i>Skeletonema costatum</i> (17.2%)	<i>Skeletonema costatum</i> (73.5%)
1998	<i>Asterionella kariana</i> (57.8%) <i>Skeletonema costatum</i> (30.9%)	<i>Asterionella kariana</i> (74.4%) <i>Skeletonema costatum</i> (21.3%)	<i>Actinocyclus ehrenbergii</i> (75.7%) <i>Skeletonema costatum</i> (13.2%)	<i>Coscinodiscus perforatus</i> (39.7%) <i>Chaetoceros curvisetus</i> (10.8%)
1999	<i>Asterionella kariana</i> (97.6%)	<i>Chaetoceros curvisetus</i> (40%) <i>Actinocyclus ehrenbergii</i> (17.4%) <i>Eucampia zoodiacus</i> (16.7%)	<i>Skeletonema costatum</i> (91.8%) <i>Eucampia zoodiacus</i> (7%)	<i>Rhizosolenia styliformis</i> (19%) <i>Chaetoceros lorenzianus</i> (14.2%) <i>Skeletonema costatum</i> (13.3%)
2000	<i>Pseudonitzschia pungens</i> (45.3%) <i>Eucampia zoodiacus</i> (24.2%) <i>Asterionella japonica</i> (14%)	<i>Chaetoceros densus</i> (74.3%)	<i>Chaetoceros curvisetus</i> (81.3%) <i>Coscinodiscus walesii</i> (9.5%)	<i>Skeletonema costatum</i> (57.2%) <i>Nitzschia paradoxax</i> (16.6%)
2001	<i>Thalassiosira nordenskiöldii</i> (76.9%) <i>Skeletonema costatum</i> (18.1%)	<i>Pseudonitzschia pungens</i> (65.2%) <i>Chaetoceros eibeni</i> (24.8%)	<i>Skeletonema costatum</i> (96.7%)	<i>Skeletonema costatum</i> (55.1%) <i>Thalassiosira rotula</i> (30.1%)
2002	<i>Thalassiosira nordenskiöldii</i> (32.6%) <i>Skeletonema costatum</i> (56%)	<i>Skeletonema costatum</i> (15.5%) <i>Chaetoceros debilis</i> (13.5%) <i>Nitzschia paradoxax</i> (11.5%)	<i>Coscinodiscus asteromphalus</i> (79.4%) <i>Chaetoceros curvisetus</i> (11.3%)	<i>Rhizosolenia delicatula</i> (18.5%) <i>Pseudonitzschia pungens</i> (15.2%) <i>Nitzschia paradoxax</i> (14%) <i>Skeletonema costatum</i> (11.2%)

续表

年份	冬季	春季	夏季	秋季
2003	<i>Skeletonema costatum</i> (71.3%)	<i>Chaetoceros decipiens</i> (27.3%) <i>Asterionella japonica</i> (24.5%) <i>Skdetonema costatum</i> (14.5%)	<i>Chaetoceros curvisetus</i> (21.4%) <i>Coscinodiscus asteromphalus</i> (37.1%)	<i>Nitzschia paradoxo</i> (27.1%) <i>Skeletonema costatum</i> (11.8%) <i>Chaetoceros lorentzianus</i> (11.1%)

注:括号内数据为该藻数量占浮游植物总量的百分比

2.2.3 浮游植物多样性的长期变化 生物群落是一定生境里各生物种群相互依存和相互制约的组合结构单元,某些生存环境因子的变化可能影响这种组合结构特征的改变。为了解胶州湾浮游植物群落结构演化状况,应用 Shannon-Wiener 生物多样性指数对胶州湾浮游植物群落稳定度进行分析。该指数的主要依据是群落中物种丰度和生物种群丰度。从 1954 年以来历次浮游植物调查资料进行生物多样性指数统计结果(图 8)可以看出,几十年来,胶州湾浮游植物多样性指数有下

降趋势,1981 年平均多样性指数为 1.094,而 90 年代至今 3 个时间段(1991—1995、1997—2000、2001—2003)分别平均为 0.758、0.733 和 0.694。应该指出的是,1954 年因仅设置 1 个站位进行采样,代表性差些,如以 1981 年及 90 年代以来的 3 个时间段的浮游植物多样性指数变化状况进行比较,四个季度月的变化趋势基本一致,均有所下降,但以冬季最为明显。生物多样性指数呈下降趋势反映出胶州湾浮游植物群落结构受环境因子变化的影响已处于不断演化之中。

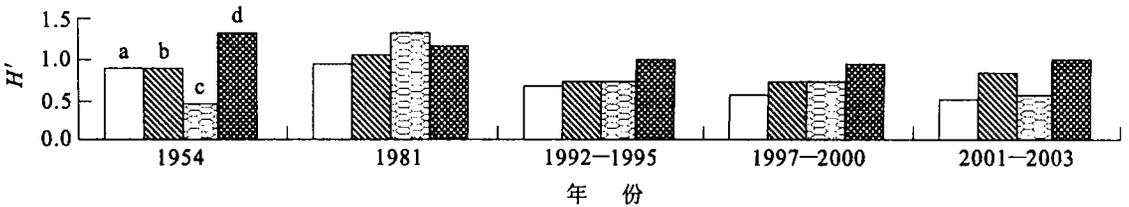


图 8 胶州湾浮游植物多样性指数 H' 长期变化

Fig. 8 Long-term changes of phytoplankton diversity index H' in different seasons

a. 2月; b. 5月; c. 8月; d. 11月

2.2.4 胶州湾的赤潮 赤潮是一大海洋灾害,是在异常的环境条件由某种或几种浮游植物(有时由原生动物或细菌)爆发性增殖或高度聚集引起水体变色的生态异常现象。自上世纪 70 年代起,在我国沿海发生的频率、规模和危害程度有愈演愈烈的发展趋势(吴玉霖等,2001),然而在 1990 年之前,胶州湾未见过发生赤潮的报道,1990 年 6 月首次发现由原生动物中缢虫 (*Mesodinium rubrum*)引起的面积约 8 万 m^2 的小范围赤潮。但是自 90 年代中期开始,胶州湾赤潮迅猛发展,几乎年年发生,甚至一年内发生多次,赤潮原因种由

早先的中缢虫增加了 6 种硅藻和 1 种甲藻,赤潮面积亦越来越大,2004 年 3 月赤潮面积达 70 km^2 (表 2)。在我国北方海域包括渤海和我国的边缘海——黄海,已记录到的赤潮均发生在夏季和秋季,而胶州湾 2004 年冬季就暴发赤潮实属异常。国内外对赤潮成因研究结果表明,水体中大量营养盐的存在为赤潮形成提供重要物质基础,适宜的水文气象因子是促成赤潮暴发的一个重要条件(周成旭等,2000)。由此说明,近 10 年来胶州湾水域赤潮频频发生是与水域生态环境的变化密切相关。

表 2 胶州湾赤潮发生状况

Tab. 2 Events of red tide in Jiaozhou Bay

时 间	海域和面积	原因种
1990年6月	22号锚地附近, 8万 m ²	红色中缢虫 (<i>Mesodinium rubrum</i>)
1997年8月	胶州湾中部	中肋骨条藻 (<i>Skeletonema costatum</i>)
1998年7月3—8日	姑山附近海域	中肋骨条藻和高贵盒形藻 (<i>Biddulphia regia</i>)
1999年6月中旬	胶州湾东北部	短角弯角藻 (<i>Eucampia zoodiacus</i>)
1999年7月	小港、团岛嘴、沧口水道, 26km ²	中肋骨条藻和短角弯角藻
2000年7月	胶州湾中部, 2km ²	夜光藻 (<i>Noctiluca scintillans</i>)
2001年7月8—12日	胶州湾口, 9.8km ²	红色中缢虫
2003年7月4—11日	团岛、大麦岛	红色中缢虫
2003年7月	胶州湾北部	星脐圆筛藻 (<i>Cos. asteromphalus</i>)
2004年2上旬	胶州湾东北部	柔弱根管藻 (<i>Rh. delicatula</i>)
2004年3月25日	胶州湾北部, 面积约70km ²	诺登海链藻 (<i>Th. nordenskiöldii</i>) 和中肋骨条藻

2.3 主要环境因子的长期变化及影响

近50年来, 青岛市工农业生产迅速发展, 市区人口不断增加, 进入90年代以来, 社会经济发展更是日新月异。2002年全市工农业总产值达到2848.29亿元, 是1965年的118.3倍, 市区人口亦由1965年的147万人增加到2002年的242万人。随着市区人口不断增加和大规模经济活动的开展, 大量生活污水和工农业生产产生的废水源源不断地进入胶州湾, 造成水域环境发生退化, 营养化水平不断增高, 导致浮游植物群落结构的演化。

2.3.1 营养盐 据收集到的调查资料显示, 自1962年来, 胶州湾营养盐含量发生了很大变化(图9)。90年代 NO₃-N 和 NH₄-N 含量分别是 60

年代的 7.26 倍和 5.1 倍, 同期 PO₄-P 的平均含量亦提高了 2.43 倍。近 3 年(2001—2003 年) NO₃-N 和 NH₄-N 含量又比上世纪 90 年代几乎翻了一番。2001—2003 年 SiO₃-Si 平均浓度为 5.79 μmol/L, 亦比 90 年代的平均值高约 1 倍。可以看出, 近 50 年来, 胶州湾氮、磷和硅等营养盐呈迅速增加的趋势。近 3 年全湾平均无机氮含量高达 22.40 μmol/L, PO₄-P 含量为 0.54 μmol/L 远高于 DIN = 1 μmol/L 和 PO₄-P = 0.1 μmol/L 的浮游植物生长阈值 (Justic *et al.*, 1995), 亦超过我国一类海水水质标准 (GB. 3097-97)。水域的富营养化为浮游植物大量繁殖提供重要的物质基础, 是造成浮游植物数量趋向增加的主要原因, 亦成为导致近 10 年来胶州湾赤潮的发生并呈愈演愈烈趋势的关键因素。

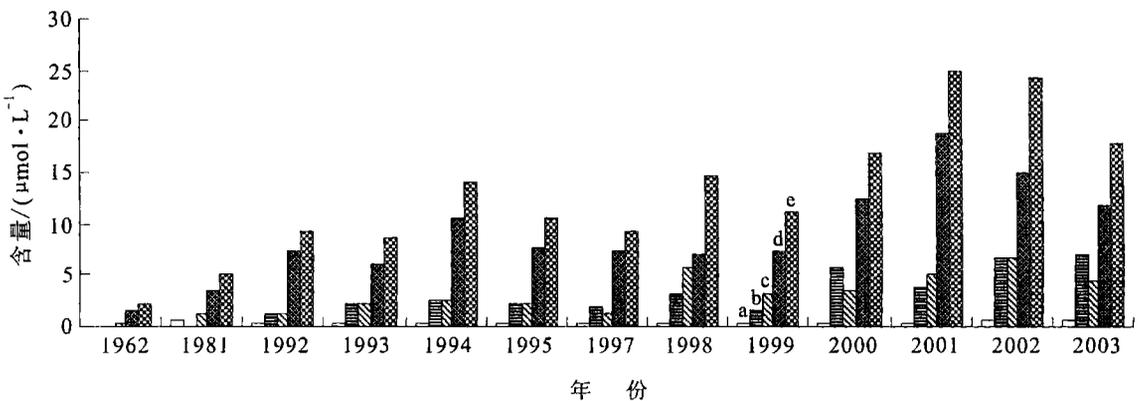


图 9 胶州湾营养盐含量的长期变化

Fig. 9 Long-term changes in PO₄-P, SiO₃-Si, NO₃-N, NH₄-N and DIN concentration in Jiaozhou Baya. PO₄-P; b. SiO₃-Si; c. NO₃-N; d. NH₄-N; e. DIN

依据青岛市统计局所编的《统计数据》1949—2003年年度资料,1997年青岛市废水排放总量为18545.2万t,到2002年就增加到23291.41万t,其中仅氨氮的排放量就达到7312.14t, COD为57495.5t,这是造成胶州湾营养盐增加的一个重要原因。胶州湾是几乎被青岛市区所包围的半封闭的小海湾,近几十年来,更由于包括人类活动(如围海造陆)在内的种种原因而造成水域面积逐渐变小,由1935年的559km²减少到1988年的374.4km²,缩小了近三分之一,纳潮量亦随之显著减小,由原先的12.667×10⁸m³缩小为9.48×10⁸m³

(赵淑江等,2001a),因而大大降低了胶州湾水域环境容量与自净能力,加速了水域富营养化进程。

2.3.2 海水养殖 胶州湾海水养殖业十分发达,海水养殖面积从1978年的1330ha发展至2001年的13737ha(依据城阳区和黄岛区海水养殖面积统计),增长了约10倍,近10年来发展尤为迅速(图10)。胶州湾海水养殖方式主要有四种:一是浅海筏式养殖,主要养殖栉孔扇贝和贻贝等;二是沿岸池塘养殖,主要养殖对虾;三是滩涂底播护滩养殖,主要养殖蛤仔等;四是网箱养鱼,主要养殖鲈鱼、牙鲆和黑等。

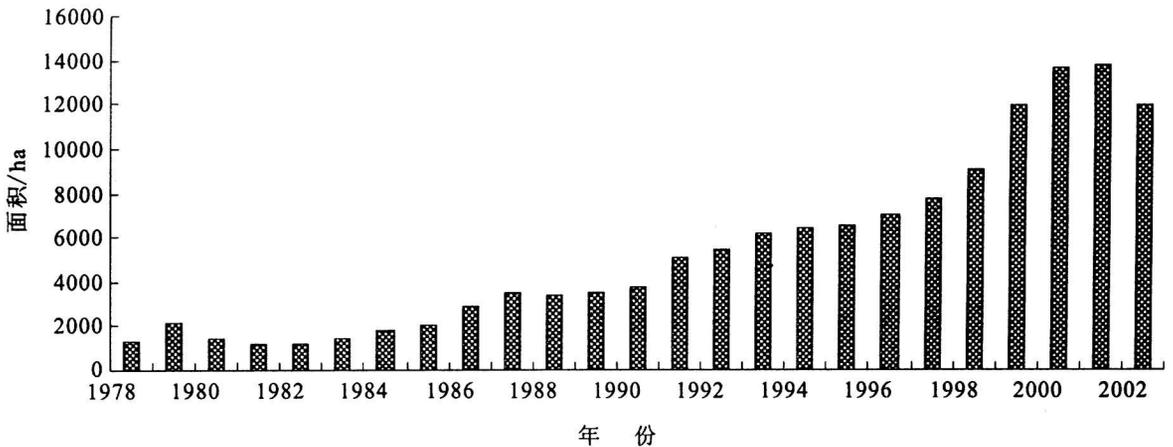


图10 胶州湾海水养殖面积长期变化

Fig. 10 Long-term changes of mariculture area in Jiaozhou Bay

海水养殖的自身污染问题相当突出,被养殖动物摄食而未消化的饵料作为粪便排出,而被消化和吸收的部分中有些则通过代谢作为氨和尿素排入水体。以筏式贝类养殖为例,据李元山等(1996)报道,栉孔扇贝每个体每天排粪量为179mg(干重),以通常每公顷养殖扇贝 1.5×10^6 个计算,则每公顷每年向水体排放的粪便量达到97.95t。胶州湾四万亩筏式贝类养殖每年向水域排入粪量高达2.6万t,如此巨量的生物性沉积为微生物包括某些病原生物大量孳生提供有利条件,给胶州湾生态环境带来不良影响。养殖生物排泄物经微生物代谢矿化后以营养盐形式进入水体,导致水域营养盐含量增加和富营养化。利用1981年及1992—2002年的调查资料进行数理统计得出,胶州湾DIN、NH₄-N和NO₃-N及SiO₅-Si同海水养殖面积变化间的相关系数分别为0.81、0.78、0.71和0.67,显示出海水养殖同水域营养

盐含量之间的重要关系。所以海水养殖是除上述城市排污外的又一个造成水域营养盐迅速增加的源泉,当然亦是导致浮游植物数量增加和赤潮频频发生的一个重要原因。实际上,近10多年来,我国北方沿海赤潮的发生多与海水养殖有关(吴玉霖等,2001)。

滤食性贝类具有另一个生态功能,即通过其强劲的滤食活动对浮游植物数量的控制作用,栉孔扇贝的滤水率可高达5.24L/(ind·h)(方建光等,1996)。80年代初庙岛海峡年平均浮游植物数量为 3.0×10^6 cells/m³,由于发展扇贝养殖,至80年代末,数量下降至 0.54×10^6 cells/m³,约为原先的六分之一(项福亭等,1996)。有大规模扇贝养殖的烟台四十里湾海域,在扇贝迅速生长的11月份,浮游植物密度仅为 5.23×10^4 cells/m³(吴玉霖等,2001),这是对在2.2.1节中揭示的1981—1997年伴随筏式贝类养殖业的迅速发展

展,胶州湾浮游植物数量呈下降趋势现象的又一个明证。随着 1997 年后因病害等原因扇贝大量死亡,出现养殖业大滑坡,仅黄岛区由原先 12000 亩养殖扇贝下降至 2000 年仅剩 8000 亩(刘元刚等, 2001)¹⁾。此后出现的现象是自 1998 年开始胶州湾浮游植物数量迅速增加,并常暴发赤潮,显示出滤食性贝类既有污染水环境,促进

水域富营养化的作用,同时又对浮游植物数量动态变化有强大的生态调控机能。

2.3.3 水温 自 1900 年至今 100 年来,胶州湾地区四季平均气温呈上升趋势,其中以冬季气温上升幅度较大,上世纪 90 年代冬季平均气温比 20 世纪初上升 2.64℃,秋季次之,相对说,夏季的升幅最小,为 0.56℃(表 3)。

表 3 胶州湾地区 20 世纪初和 20 世纪末四季平均气温(℃)及其变化¹⁾

Tab. 3 Average air temperatures(℃) and their changes in Jiaozhou Bay area in the early and late 20th century

季节	冬季	春季	夏季	秋季
20 世纪初	- 0.01	15.48	24.93	8.39
90 年代	2.63	16.49	24.49	9.81
上升幅度	2.64	1.01	0.56	1.42

1) 引自赵淑江等, 2001a

受气温变化的影响,胶州湾水温亦存在一定的变化。以 1981、1992—2000 年和 2001—2003 年 3 个时间段四个季节月平均水温进行比较(表 4),可以看出,冬、春季水温均有上升趋势,20 年来,上升幅度约 2℃,而夏、秋季变化小,无明显趋势。由于各种浮游植物对水温适应能力不同,所以水温的变化会引起浮游植物群落结构的改变,正如 3.2.2 节中所述的,胶州湾原先若干优势种如窄隙角毛藻、菱形海线藻、刚毛根管藻等至 90 年代数量明显下降,不再是优势种,而一些广温性种类如尖刺拟菱形藻、奇异菱形藻和中肋骨条藻近年来数量明显上升,特别是一些暖水性种类,如波状石丝藻,1981 年 6 月就开始出现在胶州湾南部和

中部; 9 月遍布全湾,以湾口数量最多,亦不过 $15 \times 10^3 \text{ cells/m}^3$; 10 月份数量急剧下降,仅为 9 月份的 1/3。但近年来,该藻自 5 月份起就在湾内出现,且数量明显增多,2003 年 6 月上旬,该藻已遍布全湾,平均数量高达 $298 \times 10^3 \text{ cells/m}^3$,比 1981 年的数量增加约 20 倍。洛氏角毛藻(*Ch. lorenzianus*)为热带和温带沿岸性种类,经常出现在暖海中,近些年来,该藻在胶州湾的数量有明显增加,如 2003 年 9 月全湾平均数量高达 $9046 \times 10^3 \text{ cells/m}^3$,占该月浮游植物总量的 42.9%,至 11 月仍为胶州湾主要优势种之一。由此可见,水温的变化对胶州湾浮游植物各种群数量及分布状况均有一定影响,并导致浮游植物群落结构的变化。

表 4 胶州湾水温(℃)的长期变化

Tab. 4 Long-term changes of the average water temperatures(℃) in Jiaozhou Bay

年份	冬季	春季	夏季	秋季
1981	2.61	13.56	25.78	12.50
1992—2000	3.99	15.94	26.18	14.16
2001—2003	4.40	16.27	25.65	12.71

1) 刘元刚, 谢佃臣, 2001. 黄岛区海珍品养殖现状及发展对策. 第三届全国海珍品养殖研讨会论文集, 137—141

3 小结

3.1 大规模的人类活动给胶州湾环境带来很大影响

由于越来越多的生活污水和工农业生产(包括海水养殖业)的废水源源不断进入湾内,造成近40年来水域营养盐含量迅速增加,近3年来 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N比1962年分别提高14.5倍和9.5倍,加上沿岸带开发,胶州湾水域面积不断缩小,纳潮量下降,水域环境容量和自净能力减弱,导致胶州湾环境正向富营养化方向蜕变。

3.2 胶州湾水环境的长期变化对浮游植物群落结构产生明显的影响

3.2.1 自1954年以来,浮游植物数量总体上看呈增加的趋势,特别是在1997年开始大规模滤食性贝类养殖业因病害等原因而出现大滑坡至今,浮游植物数量有明显增长的势头。

3.2.2 近50年来,胶州湾浮游植物优势种更替明显,一些原先优势种数量下降,不再居优势地位,而比较喜肥的种类如中肋骨条藻数量显著增加,成为最重要的优势种;一些暖水性种类如波状石鼓藻提前在湾内出现,且数量上有很大增加。

3.2.3 胶州湾浮游植物多样性指数近50年来有所下降,反映出种类数量与各物种种群丰度间的变化,表明胶州湾浮游植物群落结构处在演化之中。

3.2.4 由于营养盐含量迅速增加,为赤潮的形成与发展提供丰富的物质基础。自1997年以来赤潮几乎连年暴发,有愈演愈烈的发展趋势,反映出胶州湾生态环境已出现异常的征兆。

参 考 文 献

方建光,匡世煥,孙慧玲等,1996.桑沟湾栉孔扇贝养殖容量的研究.海洋水产研究,17(2):18—31[Fang J G, Kuang S H, Sun H L *et al.*, 1996. Study on the carrying capacity of Sanggou Bay for the culture of scallop *Chlamys farreri*. Marine Fisheries Research, 17(2):18—31]

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(浮游动物研究专辑),37—44[Sun S, Liu G M, Zhang Y S *et al.*, 2002. Community composition and distribution character of phytoplankton in the Jiaozhou Bay in the 1990s. Oceanologia et Limnologia Sinica (Special Issue for China GLOBEC Zooplankton Population Dynamics Research), 37—44]

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,35(6):518—523

[Wu Y L, Sun S, Zhang Y S *et al.*, 2004. Quantitative study on long-term variation of phytoplankton in Jiaozhou Bay. Oceanologia et Limnologia Sinica, 35(6):518—523]

吴玉霖,周成旭,张永山等,2001.烟台四十里湾海域红色裸甲藻赤潮发展过程及其成因.海洋与湖沼,32(2):159—167[Wu Y L, Zhou C X, Zhang Y S *et al.*, 2001. Evolution and causes of formation of *Gymnodinium sanguineum* bloom in Yantai Sishili Bay. Oceanologia et Limnologia Sinica, 32(2):159—167]

李元山,牟绍敦,冯月群等,1996.海珍品综合增养殖中的种间关系和生态容纳量研究.海洋湖沼通报,(1):24—29[Li Y S, Mu S D, Feng Y Q *et al.*, 1996. Study on the interspecific relationship and ecological capacity in rare marine animals culture. Transactions of Oceanology and Limnology, (1):24—29]

李冠国,黄世玫,1956.青岛近海浮游矽藻季节变化研究的初步报告.山东大学学报,2(4):119—143[Li G G, Huang S M, 1956. Seasonal variation of plankton diatoms at Tsingtao. Acta Scientiarum Naturalium, 2(4):119—143]

沈志良,2002.胶州湾营养盐结构的长期变化及其对生态环境的影响.海洋与湖沼,33(3):322—331[Shen Z L, 2002. Long-term changes in nutrient structure and its influences on ecology and environment in Jiaozhou Bay. Oceanologia et Limnologia Sinica, 33(3):322—331]

沈志良,陆家平,刘兴俊等,1994.胶州湾水域的营养盐.海洋科学集刊,35:115—129[Shen Z L, Lu J P, Liu X J *et al.*, 1994. Nutrients in Jiaozhou Bay Waters. Studia Marina Sinica, 35:115—129]

周成旭,吴玉霖,2000.赤潮发生机理.苏纪兰,秦蕴珊主编.当代海洋科学学科前沿.北京:学苑出版社,359—362

赵淑江,沈志良,张铭汉等,2001a.胶州湾理化因子的长期变化.焦念志,赵卫红,赵淑江等著.海湾生态过程与持续发展.北京:科学出版社,207—240

赵淑江,吴玉霖,王克等,2001b.胶州湾生物因子的长期变化.焦念志,赵卫红,赵淑江等著.海湾生态过程与持续发展.北京:科学出版社,241—256

项福亭,曲维功,张益额等,1996.庙岛海峡以东浅海养殖结构调整的研究.齐鲁渔业,13(2):1—4[Xiang F T, Qu W G, Zhang Y E *et al.*, 1996. On aquaculture structure adjustment in Shallow Sea East to Miaodao Strait. Shandong Fisheries, 13(2):1—4]

郭玉洁,杨则禹,1992.浮游植物.见:刘瑞玉主编.胶州湾生态学和生物资源.北京:科学出版社,136—169

Andren E, 1999. Changes in the composition of the diatom flora during the last century indicate increased eutrophication of the Oder Estuary, south-western Baltic Sea. Estuarine,

- Coastal and Shelf Science, 40: 339—351
- Copper S R, Bruch G S, 1993. A 2500-year history of anoxia and eutrophication Chesapeake Bay. *Estuaries*, 16: 617—626
- Justic D, Rabalais N N, Turner R E *et al.*, 1995. Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: stoichiometric nutrient balance and its consequences. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 40: 339—356
- Patsch J, Radach G, 1997. Long-term simulation of the eutrophication of the North Sea temporal development of nutrients, chlorophyll and primary production in comparison to observations. *Journal of Sea Research*, 38: 275—310
- Smayda T J, 1984. Variations and long-term changes in Narragansett Bay, a phytoplankton-based coastal marine ecosystem; relevance to field monitoring for pollution assessment. In: White H H ed. *Concepts in Marine Pollution Measurements*. Maryland Sea Grant College University of Maryland Press, 663—679
- Zhao S J, Jiao N Z, Shen Z L *et al.*, 2005. Causes and consequences of nutrient structure in the Jiaozhou Bay. *Journal of Integrative Plant Biology (Formerly Acta Bot Sin)*, 47(4): 396—410

LONG-TERM CHANGE OF ENVIRONMENT AND IT'S INFLUENCE ON PHYTOPLANKTON COMMUNITY STRUCTURE IN JIAOZHOU BAY

WU Yu-Lin, SUN Song, ZHANG Yong-Shan

(Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences,
Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071)

Abstract Long-term variation of environmental factors and their influences on phytoplankton were revealed by data obtained in 51 quarterly cruises (February, May, August and November) during 1991—2004 in Jiaozhou Bay combined with the historical data over the past 50 years. Phytoplankton were sampled with nets (37cm diameter, 140cm length, 77 μ m mesh) from bottom to surface for subsequent counting of cell number under microscope.

Jiaozhou Bay is a semi-enclosed bay situated in the western part of Shandong peninsula, China, which is surrounded by Qingdao City, with an area of about 390 km² and an average water depth of about 7m. The bay mouth is narrow, only about 2.5 km wide. The distribution of phytoplankton that characterized by dense area appeared mainly in northeastern and northwestern parts near-shore area, and in the middle and southern parts, the density was low. The phytoplankton abundance was higher inside the bay than outside the bay. Clear seasonal variation of phytoplankton was shown. The peak in phytoplankton abundance occurred frequently in winter and summer; and the trough value occurred mainly in autumn. Human activities have greatly impacted the environment of Jiaozhou Bay. Large amount of industrial and residential wastewater concentrated with N, P and organic matters discharged into the bay every day. Large-scale maricultures of filter-feeding bivalve, fish and so on have caused serious ecological problems in the bay. Nutrient concentrations had been continuously rising since 1960s. NO₃-N, NH₄-N and PO₄-P were doubled by 7.26, 5.10 and 2.43 times from 1960s to 1990s, respectively. The mean contents of these nutrients in 2001—2003 were obviously higher than that in 1990s. Significant long-term environmental changes have affected the succession of phytoplankton community constructure. The phytoplankton species composition, abundance and dominant species have also experienced obvious variation since 1954. Dominant species have considerably alternated. Some species such as *Chaetoceros affinis*, *Thalassionema nitzschioides*, *Rhizosolenia setigera*, *Coscinodiscus radiatus* have been replaced by *Asterionella kariana*, *Thalassiosira nordenskioldi*, *Nitzschia paradoxa* and so on. Some eutrophic species such as *Skeletonema costatum* and a warm water species *Lithodesmium undulatum* increased abundantly. The phytoplankton diversity index (Shannon's H') has slightly decreased during past 50 years. From 1977 to present, red tide events have been increasing in number, frequency and intensity in Jiaozhou Bay. Marine eutrophication is widely believed to be the major cause of red tide.

Key words Jiaozhou Bay, Environmental change, Phytoplankton, Community structure