

胶州湾叶绿素 *a* 及初级生产力的长期变化*

孙晓霞¹ 孙松^{1,2} 张永山² 张芳²

(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)

摘要 采用野外观测与历史数据相结合的方法,系统分析了 1984—2008 年胶州湾叶绿素 *a* 及初级生产力分布格局、季节特征的变化以及长期变化规律。结果表明,近 20 年来胶州湾叶绿素 *a* 的空间分布格局没有发生大的变化,但季节规律发生了很大变化。冬季和夏季叶绿素 *a* 浓度升高,春季和秋季叶绿素 *a* 浓度下降,使得其双周期型的季节变化特点更为显著。胶州湾叶绿素 *a* 浓度的长期变化呈现波动状态,波动范围为 1—4.76mg/m³。2 月份和 8 月份叶绿素 *a* 的浓度呈现较弱的升高的趋势,而 5 月份和 11 月份则表现为下降的趋势。从空间格局上看,湾外区域叶绿素 *a* 浓度呈现显著下降的趋势。胶州湾的初级生产力存在一定的年际波动,1980's、1990's 和 2000's 三个时期的季度月平均初级生产力分别为 334.41、354.39、347.73mgC/(m²·d),并没有出现下降趋势。

关键词 胶州湾, 叶绿素 *a*, 初级生产力, 长期变化

中图分类号 Q948.885.3

海洋浮游植物及其初级生产过程是海洋生态系统中重要的驱动因子之一,其动态变化直接影响到生态系统的结构与功能(孙松等, 2005; 张才学等, 2009; 王林等, 2009)。由于浮游植物种类繁多,不同种类之间的个体差异较大,水体中叶绿素 *a* 的含量通常被作为研究浮游植物生物量和动态变化的主要指标(李超伦等, 2005)。关于近海河口海湾区域叶绿素与初级生产力的长期变化,国际上已开展了大量的研究,如 Harding 等(1997)对 1950—1994 年间切萨匹克湾叶绿素和初级生产力长期变化的研究; Lohrenz 等(1997)对墨西哥湾北部初级生产力升高与营养盐输入之间的关系的研究; Oviatt 等(2002)对 Narragansett 湾初级生产力变化的研究等。这些研究表明,很多近海区域的叶绿素含量和初级生产力水平与营养盐的输入密切相关,因人类活动增加而引起的近海营养盐水平的提高,导致这些区域叶绿素与初级生产力呈现升高的趋势。

随着全球变化影响的加剧,胶州湾的生态环境发生了巨大的变化,胶州湾叶绿素 *a* 及初级生产力的

长期变化规律及未来发展趋势是当前普遍关心的问题。本文系统分析了 1984—2008 年胶州湾叶绿素 *a* 及初级生产力分布格局的变化、季节特征的变化以及长期变化规律,探讨关键的驱动过程,为胶州湾生态系统的长期变化研究、生态系统健康评价以及基于生态系统的管理提供重要的依据。

1 材料与方法

1.1 历史数据

本研究所用数据资料包括 1984 年胶州湾生态学和生物资源调查(郭玉洁等, 1992)叶绿素及初级生产力数据资料、1991 年至 2008 年胶州湾海洋生态系统研究站长期观测数据资料。

1.2 叶绿素 *a* 调查采样及样品处理

胶州湾叶绿素 *a* 调查站位如图 1 所示。自 1991 年起于每年的季度月,即 2 月、5 月、8 月、11 月进行采样调查。使用有机玻璃采水器在表层和底层采集水样,取 500ml 水样以孔径为 0.45μm 醋酸纤维素滤膜减压抽滤。其中 1991—2002 年样品按照联合国教

* 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“973”项目, 2011CB403603 号; 国家自然科学基金项目, 40876083 号, 40631008 号; 国家“973”项目, 2006CB400606 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

科文组织(Unesco, 1966)推荐的分光光度法进行测定。应用 Jefery-Humphrey 等(1975)的计算公式计算叶绿素 *a* 的含量。2003—2008 年样品按海洋调查规范(GB12763.6-91)(国家技术监督局, 1991)规定的萃取荧光法, 用 Turner Design Model-10 荧光光度计进行测定, 计算叶绿素 *a* 含量。根据赵东至等(2007)对近岸海域叶绿素 *a* 测试方法的比较研究, 分光光度法与荧光法测定的结果基本相当。为保持调查站位的一致性, 叶绿素 *a* 长期变化数据资料均统计 1—10 号站。2008 年叶绿素 *a* 空间分布格局资料使用 1—14 号站数据资料。

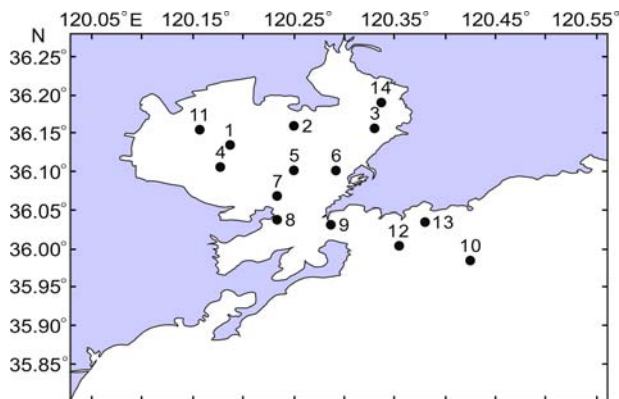


图 1 胶州湾调查站位图

Fig.1 Sampling stations in Jiaozhou Bay

1.3 初级生产力调查

每季度月在较有代表性的 3 号站、5 号站和 10 号站进行初级生产力的测定, 依据海洋调查规范(GB12763.6-91)(国家技术监督局, 1991)规定的 ^{14}C 示踪法, 按 100%、50%、10%、5%和 1%光衰减深度, 在靠近中午时分有效光照强度时, 现场挂瓶 3h, 将样品带回实验室用 Beckman LS-9800 计数器进行放射强度测定, 计算碳同化系数。根据同步调查测定叶绿素 *a* 含量、真光层厚度、昼长以及碳同化数, 采用 Cadee 等(1974)及 Jeffrey 等(1975)提出的公式估算各站的初级生产力。

2 结果与讨论

2.1 叶绿素 *a* 含量的长期变化

2.1.1 不同时期胶州湾叶绿素 *a* 含量水平分布格局的变化 胶州湾 2008 年表层叶绿素 *a* 含量的逐月水平分布格局如图 2 所示。1—3 月份叶绿素 *a* 水平总体较高, 高值区位于湾的东北部及北部, 向西南部及湾口和湾外区域逐渐递减。4 月份叶绿素 *a* 浓度下

降, 但仍然呈现湾东北部浓度高, 西南部、湾口及湾外低的分布格局。5 月份叶绿素浓度进一步降低, 同时高值中心向湾的西北部扩展。6 月份, 叶绿素浓度开始回升, 到 8 月份达到一年中的最高值, 分布格局与冬季相似。9 月份, 叶绿素 *a* 浓度再次下降, 总体呈现北部高于南部, 湾内高于湾外的分布格局。2008 年表层叶绿素 *a* 含量的平均水平为 $2.60\text{mg}/\text{m}^3$, 变化范围为 $0.06\text{—}19.84\text{mg}/\text{m}^3$ 。最高值出现在 8 月份的 3 号站, 最低值出现在 12 月份的 5 号站。

关于胶州湾叶绿素 *a* 含量的水平分布格局, 吴玉霖等(1995, 2004)分别对胶州湾 1991—2002 年季度月(2、5、8、11 月)叶绿素 *a* 含量的水平分布格局进行了研究, 发现尽管不同季度月叶绿素 *a* 含量有显著变化, 但在平面分布上明显特征是高值区位于胶州湾的西北部和东北部近岸水域, 湾中部和南部较低, 而且湾内高于湾口, 湾口高于湾外, 呈现出自湾内向湾外递降的分布趋势。胶州湾叶绿素 *a* 的水平分布格局与营养盐的水平分布基本一致。李超伦等(2005)对 2003—2004 年胶州湾周年逐月叶绿素 *a* 浓度的分布进行了研究, 分布格局与本研究基本是一致的。综合比较不同时期胶州湾叶绿素 *a* 含量的分布情况, 近 20 年来胶州湾叶绿素的水平分布格局没有发生大的变化, 基本上保持湾东北部和西北部较高, 逐渐向湾中部、南部、湾口及湾外递减的分布规律。

2.1.2 不同时期胶州湾叶绿素 *a* 含量的季节变化 胶州湾不同时期叶绿素 *a* 含量的季节变化规律如图 3 所示。通过比较 1984 年、1991—2002 年间以及 2004—2008 年间三个时期叶绿素 *a* 含量的周年/季节变化情况, 胶州湾不同时期叶绿素 *a* 的季节变化规律发生了显著改变。1984 年叶绿素 *a* 的周年变化主要表现为单峰型, 全年以 11 月份浓度最低, 为 $1.922\text{mg}/\text{m}^3$, 到冬、春季逐渐升高, 6 月份达到顶峰, 为 $8.471\text{mg}/\text{m}^3$, 随后又逐渐降低(郭玉洁等, 1992)。1991—2002 年间, 主要进行季度月调查, 叶绿素 *a* 浓度的变化与 1984 年明显不同, 呈现双峰型的结构, 以 2 月份和 8 月份居高, 多年平均值分别可达 4.72 和 $4.33\text{mg}/\text{m}^3$, 11 月份最低, 为 $1.95\text{mg}/\text{m}^3$ (吴玉霖等, 2004)。2004—2008 年叶绿素 *a* 浓度周年变化呈现双峰型的特点与 90 年代相似, 但季节变化更为显著, 2 月份和 8 月份叶绿素 *a* 的多年平均值分别为 5.01 和 $4.92\text{mg}/\text{m}^3$, 高于 80—90 年代的水平, 但 5 月和 11 月叶绿素 *a* 浓度的多年平均值仅为 1.44 和 $1.02\text{mg}/\text{m}^3$, 大大低于历史同期水平。以上结果表明, 近 25 年来, 胶州湾叶绿素 *a* 的季

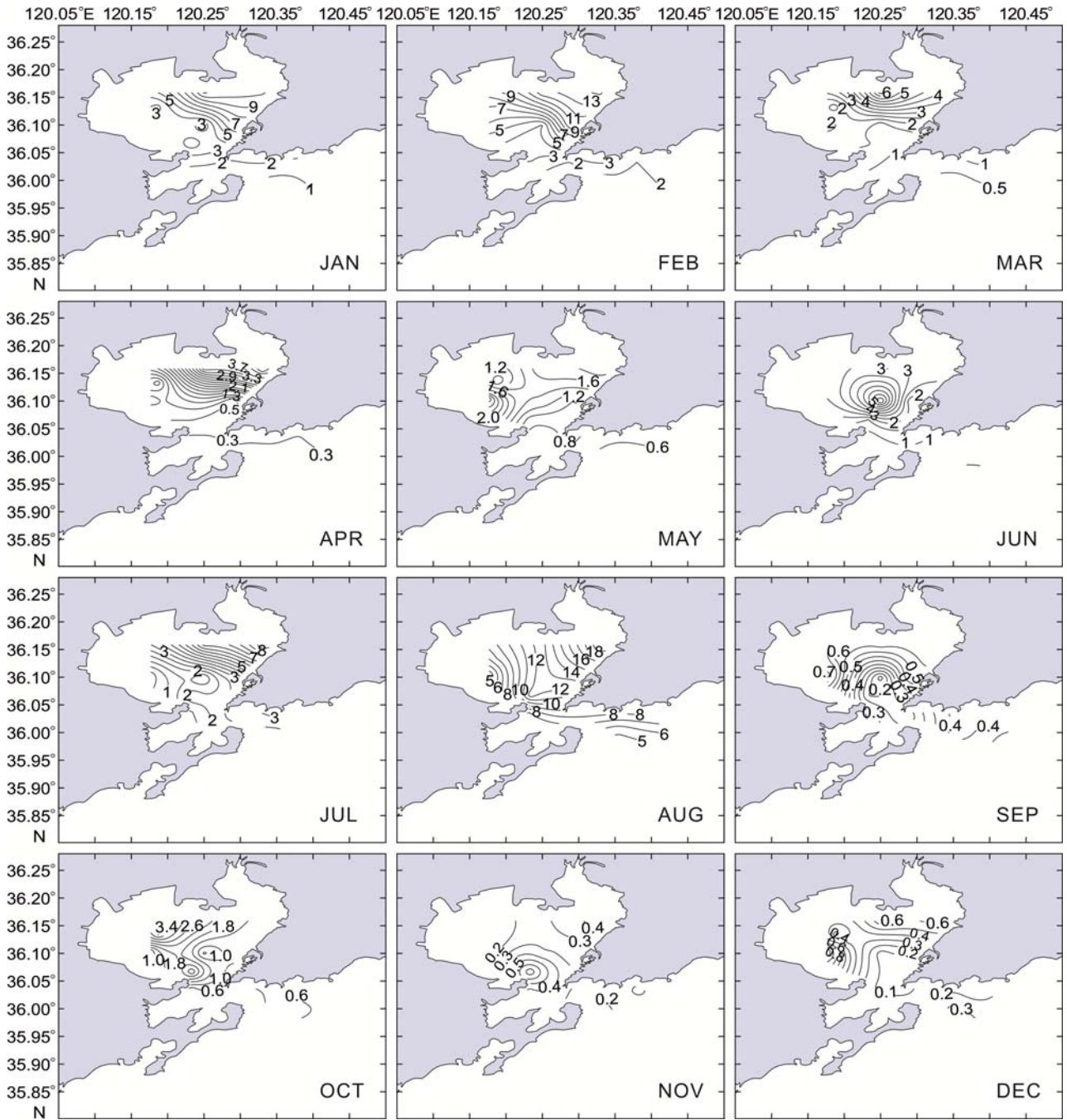


图2 2008年胶州湾表层叶绿素a含量的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of the concentration of Chl.a in the surface of Jiaozhou Bay in 2008

节变化规律发生了较大的改变。冬季和夏季叶绿素a浓度升高,春季和秋季叶绿素a浓度下降,使得其季节变化特点更为显著。这方面的变化与法国的布雷斯特新湾不同,该湾在1981—2000年间叶绿素a含量的季节性指数是降低的(Chauvaud *et al.*, 2000)。

根据胶州湾叶绿素a浓度的空间分布格局,不同区域间叶绿素a的浓度相差很大,为了解不同区域间叶绿素a含量的季节变化是否存在差异,选择了四个

代表性站位,分别代表湾北部、湾中、湾口和湾外,进一步研究了胶州湾不同区域叶绿素a含量的季节变化规律,结果如图4所示。尽管四个站位存在叶绿素a浓度上的差异,但变化规律是一致的,即冬季和夏季高,春季和秋季低。相比湾口(9号站)和湾外(10号站),湾北部的2号站和湾内的5号站叶绿素a浓度的季节差异更大,且与90年代相比,这种现象在2004—2008年更为明显。以2月份和5月份叶绿素a浓度

的比例为例, 2 号站在 1991—2002 年间和 2004—2008 年间的比例分别为 1.93 和 4.15, 而 10 号站则分别为 1.60 和 2.86, 一方面说明 2004 年之后胶州湾叶绿素 *a* 浓度的季节差异更为显著, 另一方面说明这一差异主要体现在湾北部和湾内等近岸站位。

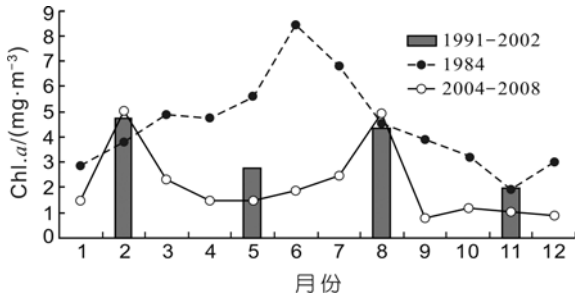


图 3 胶州湾不同时期平均叶绿素 *a* 含量的季节变化
Fig.3 Seasonal changes of the average concentration of Chl.*a* in different periods in Jiaozhou Bay

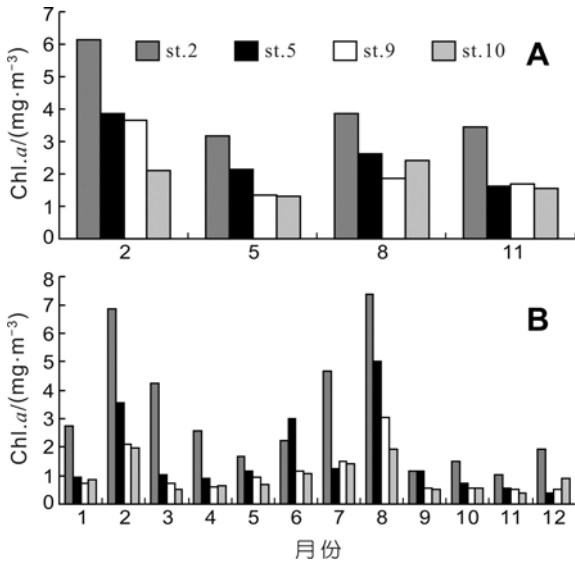


图 4 胶州湾不同区域平均叶绿素 *a* 含量的季节变化
Fig.4 Seasonal changes of the average concentration of Chl.*a* in different areas of Jiaozhou Bay
A. 1991—2002 年; B. 2004—2008 年

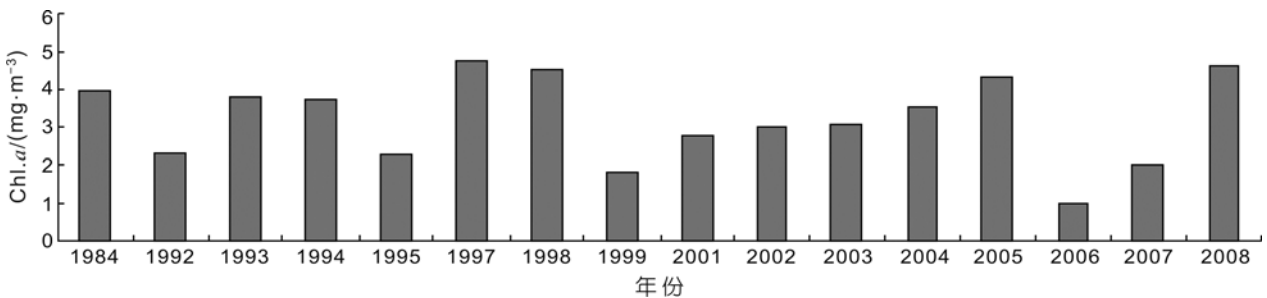


图 5 胶州湾平均叶绿素 *a* 含量的长期变化
Fig.5 Long term changes of the average concentration of Chl.*a* in Jiaozhou Bay

2.1.3 胶州湾叶绿素 *a* 含量的长期变化 胶州湾叶绿素 *a* 浓度的长期变化规律如图 5 和图 6 所示。图 5 表示从 1984—2008 年季度月平均值的变化情况, 总体呈现一种波动的变化规律, 波动范围为 1—4.76mg/m³, 最低值出现在 2006 年, 高值出现在 1997、1998、2008 年, 没有明显的升高或者降低的变化趋势。与大亚湾 1985—2004 年叶绿素 *a* 浓度的长期变化规律相比, 二者呈现相似的波动规律, 大亚湾叶绿素 *a* 浓度的波动范围为 1.83—3.78mg/m³ (Wang *et al*, 2008)。进一步分析四个季度月的长期变化趋势 (图 6), 可以发现 2 月份和 8 月份叶绿素 *a* 的浓度呈现较弱的升高的趋势, 而 5 月份和 11 月份则表现为下降的趋势。分别选取四个代表性站位进行不同区域叶绿素 *a* 浓度长期变化的分析, 结果如图 7 所示。结果表明不同区域间叶绿素 *a* 浓度的变化规律不尽相同, 自 1991 年以来, 湾北部和中间区域叶绿素 *a* 浓度基本保持波动状态, 但湾口和湾外区域叶绿素 *a* 呈现下降的趋势, 且湾外的 10 号站下降趋势是显著的 ($P < 0.05$, $R^2 = 0.4076$)。这一点与 Lin 等(2005)对于黄海的叶绿素 *a* 浓度和初级生产力长期变化研究结果是一致的。

2.2 胶州湾初级生产力的长期变化

2.2.1 不同时期的季节变化 孙松等(2005)对 2003—2004 胶州湾初级生产力周年变化研究表明, 胶州湾初级生产力的季节变化特点为: 夏季是一年中的高峰, 春、秋季次之, 冬季最低, 温度是影响胶州湾初级生产力季节变化的决定因子。本研究进一步比较了 1984 年(郭玉洁等, 1992)、1992—2000 年、2001—2008 年三个时期胶州湾初级生产力的季节变化特征, 其中 90 年代和 2000 年以后的结果均为多年平均值(图 8)。结果表明近 25 年来胶州湾的初级生产力的季节变化特征没有发生改变, 与孙松等(2005)的研究结果一致。三个时期的季度月平均初级生产力分别为

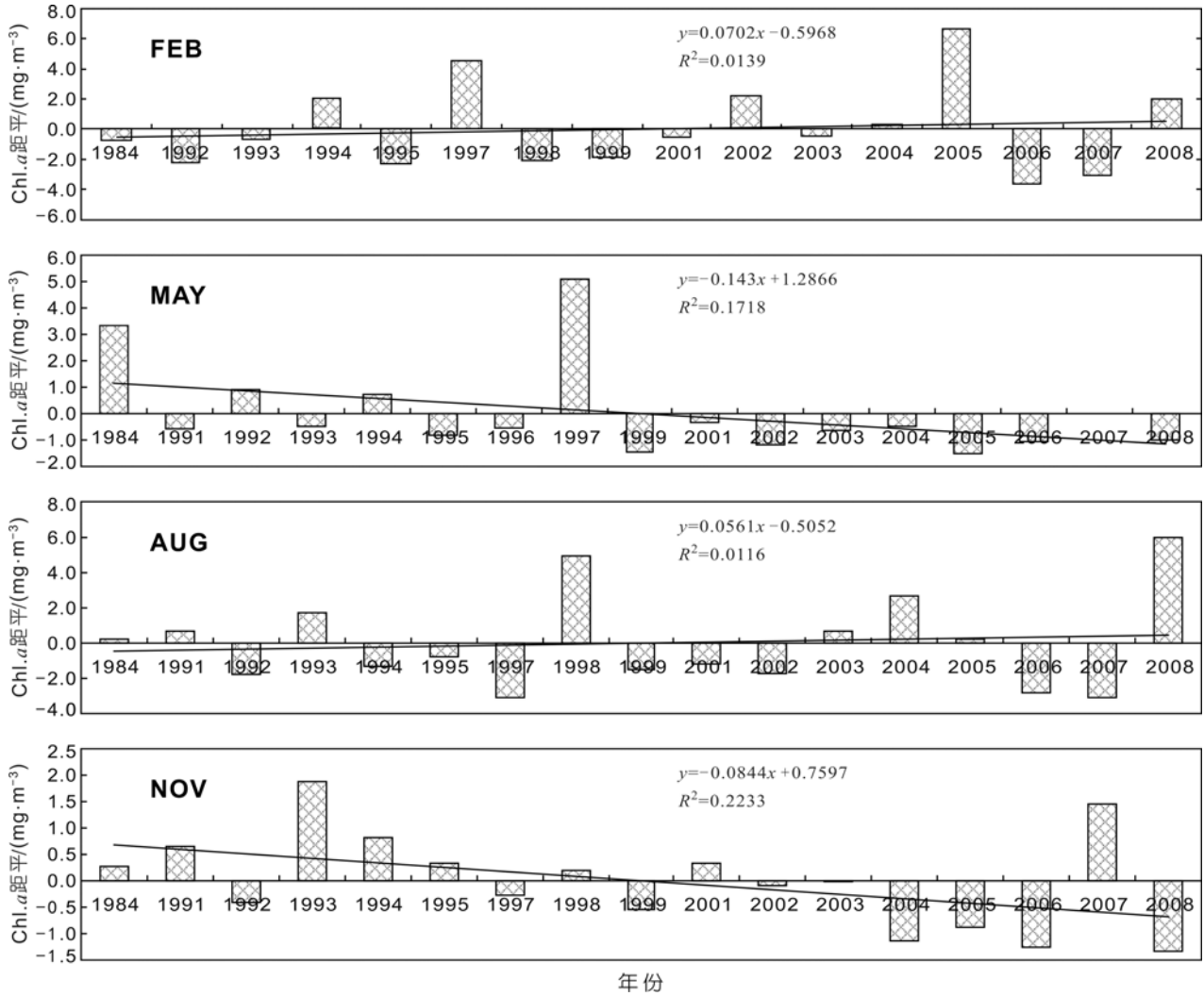


图6 不同季节平均叶绿素 a 含量的长期变化趋势

Fig.6 Long term changes of the average concentration of Chl.a in different seasons in Jiaozhou Bay

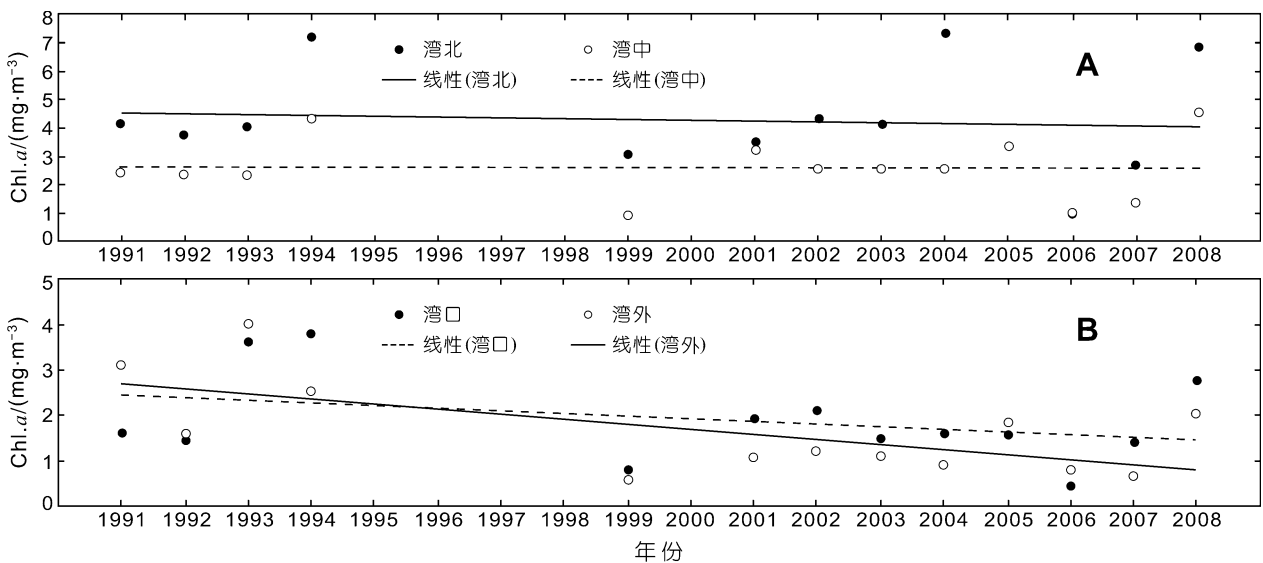


图7 不同区域平均叶绿素 a 含量的长期变化

Fig.7 Long term changes of the average concentration of Chl.a in different areas of Jiaozhou Bay

334.41、354.39、347.73mgC/(m²·d), 基本保持在相同的水平。从不同月份的情况看, 5 月份的初级生产力呈下降的趋势, 5 月份三个时期的平均初级生产力分别为 275.60、214.84、161.67mgC/(m²·d), 与 1984 年相比, 90 年代和 2001—2008 年初级生产力分别下降了 22% 和 41%。8 月份则呈现升高的趋势, 三个时期的初级生产力分别为 754、848.36、992.55mgC/(m²·d), 2001—2008 年初级生产力分别为前两个时期的 1.32 倍和 1.17 倍。

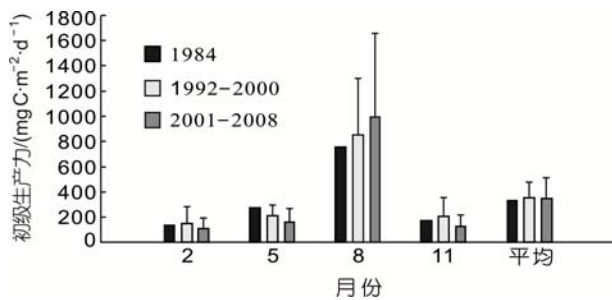


图 8 不同时期季度月平均初级生产力(Bar = S.D.)

Fig.8 Average seasonal primary productivity in Jiaozhou Bay in different seasons

2.2.2 初级生产力的长期变化 胶州湾初级生产力的长期变化规律如图 9 所示。可以看出自 80 年代以来初级生产力的变化呈现周期性波动的规律, 变化范围为 65.18—567.42mgC/(m²·d)。1993 年、2004 年和 2008 年为初级生产力的高值年, 分别可以达到 559.38、540.74、567.42mgC/(m²·d)。1998 年、2006 年则为初级生产力较低的年份, 仅为 65.18 和 132.68mgC/(m²·d)。初级生产力的总体水平没有显著的上升或者下降的趋势。

关于胶州湾初级生产力的研究较少, 相关的报道如郭玉洁等(1992)对胶州湾初级生产力的平面分布和周年变化的研究、潘友联等(1995)针对胶州湾口内的初级生产力的定点观测、吴玉霖等(1995)对 1991—

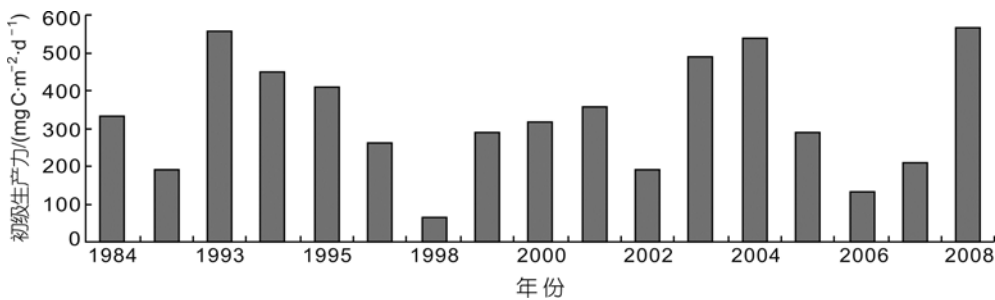


图 9 胶州湾平均初级生产力的长期变化

Fig.9 Long term changes of the average primary productivity in Jiaozhou Bay

1993 年胶州湾季度月初级生产力分布特征的研究、孙松等(2005)对 2003—2004 胶州湾初级生产力周年变化的研究、傅明珠等(2009)对胶州湾 2006—2007 年浮游植物初级生产力粒级结构及固碳能力的研究。以上研究主要针对较短时段进行, 缺乏对于胶州湾初级生产力长期变化的规律的探讨。赵淑江等(2001)分析 1991—1994 年的资料认为, 胶州湾的初级生产力自 90 年代以来有下降的趋势。本研究的结果表明, 胶州湾的初级生产力存在一定的年际波动, 但从较长的时间尺度分析, 并没有出现下降的趋势。

关于近海河口海湾区域叶绿素与初级生产力的长期变化, 国际上已开展了大量的研究。Harding 等(1997)研究了 1950—1994 年间切萨匹克湾浮游植物生物量的长期变化, 发现切萨匹克湾向海的河口区域叶绿素 *a* 浓度增加了 5—10 倍, 其它区域增加了 1.5—2 倍, 与二战以后氮、磷营养盐的增加一致。Ivona 等(2005)对爱琴海中部初级生产力的长期变化研究表明, 无论是近岸的 Kaštela 湾, 还是位于开放海域的站位, 初级生产力都在增加, 并认为这种增加不仅与人类活动增加引起的营养盐负荷的增加有关, 而且与全球变暖有关。Rydberg 等(2006)研究了波罗的海入口区域 50 年来初级生产力的长期变化, 结果表明, 与 50 年代和 60 年代相比, 初级生产力有一个明显的变化特征, 3—10 月的初级生产力由原来的相对平稳状态变为具有两个明显的峰值, 分别发生在春季和夏末。从 50 年代开始, 年平均初级生产力显著增加。到 80 年代后, 随着相应的环保措施的实施, 波罗的海营养盐含量下降, 初级生产力下降。Lohrenz 等(1997)研究了墨西哥湾北部初级生产力升高与营养盐输入之间的关系, 发现 1988—1994 年间初级生产力的变化与硝酸盐和亚硝酸盐浓度的变化显著相关。Oviatt 等(1999)对 Narragansett 湾年初级生产力的研究表明, Narragansett 湾 1997—1998 年初级生产力水平为 160—662gC/(m²·a), 年平均初级生产力为 323gC/(m²·a),

与 1973 年相比提高了 54gC/(m²·a)。以上研究表明, 很多近海区域的初级生产力水平与营养盐的输入密切相关, 因人类活动增加而引起的近海营养盐水平的提高, 导致这些区域初级生产力呈现升高的趋势。

与上述区域相比,

胶州湾初级生产力的变化规律不尽相同。从 20 世纪 80 年代至今, 胶州湾各项营养盐浓度都在显著增加 (Shen, 2001), 但叶绿素和初级生产力水平并没有明显的提高。作者认为, 胶州湾养殖贝类的滤食压力对控制胶州湾叶绿素及初级生产力的长期变化应起到重要作用。根据 Huang 等(2008)在 2000—2004 年间对 Tapong 湾的研究, 将湾内部的牡蛎养殖去除之后, 叶绿素和浮游植物最大生产率比对照区域升高了 4 倍, 证明贝类的滤食压力对叶绿素和初级生产力水平起到关键的控制作用。据张继红等(2005)的研究结果, 胶州湾菲律宾蛤仔对实验海区初级生产力和颗粒有机碳现存量的摄食压力分别为 560% 和 90%。养殖的蛤仔通过滤食已经能够影响甚至控制养殖区的浮游植物的生长或初级生产力, 甚至与整个胶州湾叶绿素 a 浓度的季节性变化趋势相吻合, 因为胶州湾叶绿素浓度冬、夏季高, 春、秋季节低, 而蛤仔的生长旺季刚好在春、秋两季。从不同季节胶州湾叶绿素与初级生产力的长期变化看, 5 月和 11 月胶州湾叶绿素含量下降, 2 月和 8 月叶绿素含量上升, 5 月份初级生产力水平下降, 8 月份初级生产力水平上升, 进一步说明菲律宾蛤仔对胶州湾叶绿素及初级生产力的季节变化和长期变化有重要影响。

3 小结

通过对胶州湾叶绿素 a 及初级生产力的长期变化研究发现, 近 20 年来胶州湾叶绿素 a 的水平分布格局没有发生大的变化, 基本上保持湾东北部和西北部较高, 逐渐向湾中部、南部、湾口及湾外递减的分布规律。叶绿素 a 的季节变化规律发生了较大的改变。冬季和春季叶绿素 a 浓度升高, 春季和秋季叶绿素 a 浓度下降, 使得其双周期型的季节变化特点更为显著, 这种变化在湾北部及东北部等近岸区域更为明显。

胶州湾叶绿素 a 浓度的长期变化呈现一种波动的变化规律, 波动范围为 $1\text{--}4.76\text{mg}/\text{m}^3$ 。2 月份和 8 月份叶绿素 a 的浓度呈现较弱的升高的趋势, 而 5 月份和 11 月份则表现为下降的趋势。从空间格局上看, 湾外区域叶绿素 a 浓度呈现显著下降的趋势。

胶州湾的初级生产力存在一定的年际波动, 但从较长的时间尺度分析, 并没有出现下降的趋势。1980s、1990s 和 2000s 三个时期的季度月平均初级生产力分别为 334.41 、 354.39 、 $347.73\text{mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。胶州湾叶绿素与初级生产力的长期变化规律主要受营

养盐浓度升高和养殖贝类滤食压力的综合控制。

致谢 本研究中海上调查和样品分析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

- 王 林, 赵冬至, 邢小罡等, 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
- 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
- 李超伦, 张 芳, 申 欣等, 2005. 胶州湾叶绿素的浓度、分布特征及其周年变化. 海洋与湖沼, 36(6): 499—506
- 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
- 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
- 张继红, 方建光, 孙 松等, 2005. 胶州湾养殖菲律宾蛤仔的清滤率、摄食率、吸收效率的研究. 海洋与湖沼, 36(6): 548—555
- 国家技术监督局, 1991. 海洋调查规范 海洋生物调查. 北京: 中国标准出版社, 4—10
- 赵冬至, 傅云娜, 赵 玲等, 2007. 近岸海域水色算法真实性检验的不同叶绿素 a 测试方法换算模型. 海洋环境科学, 26(2): 101—106
- 郭玉洁, 杨则禹, 1992. 初级生产力. 见: 刘瑞玉主编. 胶州湾生态学和生物资源. 北京: 科学出版社, 1—110
- 潘友联, 郭玉洁, 曾呈奎, 1995. 胶州湾口内初级生产力的周年定点观测. 海洋与湖沼, 26(3): 309—316
- Cadee G C, Hegeman J, 1974. Primary production of phytoplankton in the Dutch wadden sea. Netherlands. J Sea Res, 8(2): 240—259
- Harding Jr L W, Perry E S, 1997. Long-term increase of phytoplankton biomass in Chesapeake Bay, 1950—1994. Mar Ecol Prog Ser, 157: 39—52
- Huang C H, Lin H J, Huang T C *et al*, 2008. Responses of phytoplankton and periphyton to system-scale removal of oyster-culture racks from a eutrophic tropical lagoon. Mar Ecol Prog Ser, 358: 1—12
- Ivona M, Zivana N, Grozdan K, 2005. Long-term changes of basic biological and chemical parameters at two stations in the middle Adriatic. Journal of Sea Research, 54: 3—14
- Jeffrey S W, Humphrey G F, 1975. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a , b , $c1$ and $c2$ in high plants, algae and natural phytoplankton. Biochem Physiol Pflanzen, 167: 191—194
- Lin C L, Ning X R, Su J L *et al*, 2005. Environmental changes

- and the responses of the ecosystems of the Yellow Sea during 1976—2000. *Journal of Marine Systems*, 55: 223—234
- Lohrenz S E, Fahnenstiel G L, Redalje D G *et al*, 1997. Variations in primary production of northern Gulf of Mexico continental shelf waters linked to nutrient inputs from the Mississippi River. *Marine Ecology Progress Series*, 155: 45—54
- Oviatt C, Keller A, Reed L, 2002. Annual Primary Production in Narragansett Bay with no Bay-Wide Winter-Spring Phytoplankton Bloom. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 54: 1013—1026
- Rydberg L, Ærtebjerg G, Edler L, 2006. Fifty years of primary production measurements in the Baltic entrance region, trends and variability in relation to land-based input of nutrients. *Journal of Sea Research*, 56: 1—16
- Shen Z L, 2001. Historical changes in nutrient structure and its influences on phytoplankton composition in Jiaozhou Bay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 52: 211—224
- Wang Y S, Lou Z P, Sun C C *et al*, 2008. Ecological environment changes in Daya Bay, China, from 1982 to 2004. *Marine Pollution Bulletin*, 56: 1871—1879

LONG-TERM CHANGES OF CHLOROPHYLL-*a* CONCENTRATION AND PRIMARY PRODUCTIVITY IN THE JIAOZHOU BAY

SUN Xiao-Xia¹, SUN Song^{1,2}, ZHANG Yong-Shan², ZHANG Fang²

(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)

Abstract Long-term changes of chlorophyll *a* (Chl.*a*) concentration and primary productivity in Jiaozhou Bay during 1984—2008 were studied in this work. The results indicated that there was no significant change on the spatial distribution of Chl.*a* concentration in the last 20 years. Chl.*a* concentration showed a decreasing trend from the northeastern and northwestern parts of the Bay to the Bay mouth. Change in the seasonal characteristics of Chl.*a* concentration was evident, e.g., it increased in winter and summer, and decreased in spring and autumn, showing a dual-peak feature, especially in the coastal area of the north and the northeast regions of the Jiaozhou Bay. For the longer-term timeframe, Chl.*a* concentration fluctuated from 1 to 4.76mg/m³ and its concentration showed a weak increasing trend from February and August, and a decreasing trend in May and November. Similar to Chl.*a* concentration, primary productivity also fluctuated, although no decreasing trend was observed for the long term. Average seasonal primary productivities in the three periods of 1980's, 1990's, and 2000's were 334.41, 354.39, 347.73mgC/(m²·d), respectively. Long-term changes in Chl.*a* concentration and primary productivity were affected by both the increased nutrient concentrations and the feeding pressure of maricultured shellfish in the Jiaozhou Bay.

Key words Jiaozhou Bay, Chlorophyll *a*, Primary productivity, Long-term changes