

# 烟台四十里湾叶绿素 a 和初级生产力的分布特征

李 斌 谷伟丽 靳 洋 马元庆 白艳艳 孙 珊 王文杰 刘小静

(山东省海洋生态修复重点实验室 山东省海洋水产研究所, 烟台 264006)

**摘 要** 2006~2010 年 5、8、10 月, 分别对烟台四十里湾近岸水域进行了 30 航次的综合调查, 调查内容包括海水水质、浮游植物、叶绿素以及水文气象等要素。四十里湾近岸水域表层叶绿素 a 和初级生产力的季节与年际变化结果显示, 浮游植物数量、叶绿素 a 含量和初级生产力一般在 8 月出现高值; 仅 2008 年浮游植物数量最高值出现在 10 月, 2009 年叶绿素 a 含量和初级生产力最高值出现在 5 月。2008 年 10 月浮游植物数量平均值为所有航次中最高, 达到  $51.61 \times 10^4$  cells/L, 且各站位间差别显著 ( $P < 0.01$ ); 2007 年 10 月最低, 仅为  $0.02 \times 10^4$  cells/L。2006~2009 年, 表层叶绿素 a 含量和初级生产力均值呈逐年增加趋势, 2009 年分别达到  $8.72 \mu\text{g/L}$  和  $1481.42 \text{ mg/m}^3 \cdot \text{d}$ ; 2010 年(叶绿素 a:  $6.13 \mu\text{g/L}$ ; 初级生产力:  $733.91 \text{ mg/m}^3 \cdot \text{d}$ ) 又降至与 2008 年相当。近 5 年, 四十里湾浮游植物数量、叶绿素 a 含量和初级生产力均呈现湾东部高于西部的趋势, 初级生产力与表层叶绿素 a 含量呈强正相关关系 ( $R = 0.921, P < 0.01$ ), 并得出二者的回归方程式, 这为海洋初级生产力的估算与评价提供了一种更简便的方法。

**关键词** 四十里湾 浮游植物数量 叶绿素-a 初级生产力 相关性

**中图分类号** S931.2 **文献标识码** A **文章编号** 1000-7075(2012)02-0019-05

## Distribution of chlorophyll-a and primary productivity in Yantai Sishili Bay

LI Bin GU Wei-li JIN Yang MA Yuan-qing BAI Yan-yan  
SUN Shan WANG Wen-jie LIU Xiao-jing

(Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Ecological Restoration, Shandong Marine Fisheries Research Institute, Yantai 264006)

**ABSTRACT** In May, August and October 2006~2010, thirty integrated surveys of coastal water environment were carried out in Yantai Sishili Bay (YSB) twice per month. Monitored items included water quality, phytoplankton, surface chlorophyll-a and hydrometeorology. The spacial and temporal distribution of chlorophyll-a and primary productivity in YSB was studied. The results showed that phytoplankton density, chlorophyll-a concentration and primary productivity were generally higher in August; But in 2008, the maximum of phytoplankton density appeared in October, and in 2009 the maximums of both chlorophyll-a concentration and primary productivity appeared in May. In October 2008, the phytoplankton density, the highest during the survey period, reached  $51.61 \times 10^4$  cells/L, and significant differences were found among all six sampling sites ( $P < 0.01$ ); The lowest value ( $0.02 \times 10^4$  cells/L) appeared in Octo-

ber 2007. From 2006 to 2009 both chlorophyll-a concentration and primary productivity showed a growing trend, but in 2010 they decreased to a similar level as 2008. In the last five years, phytoplankton density, chlorophyll-a concentration and primary productivity were generally higher in east YSB than in the west. Furthermore, a significant positive correlation was found between primary productivity and chlorophyll-a concentration ( $R=0.921, P<0.01$ ), and a regression equation was developed. It will offer an option to estimate and assess the primary productivity of the coastal waters.

**KEY WORDS** Sishili Bay Phytoplankton density Chlorophyll a concentration  
Primary productivity Correlation

海洋浮游植物作为主要的初级生产者,在物质循环与能量转换过程中具有重要作用。叶绿素是浮游植物进行光合作用的主要色素,也是浮游植物现存量的一个关键指标(林丽贞等 2007),叶绿素时空变化的研究有助于了解海区初级生产力和生物资源状况。海洋初级生产力在全球碳循环中起着重要作用,在相当程度上控制着海-气界面二氧化碳的交换,是全球气候变化的重要影响因子(檀赛春等 2006)。初级生产力研究能为渔业资源开发、赤潮的监测预报、海洋环境质量评价与海洋生态系结构与功能分析等提供重要科学依据(宁修仁等 1995)。

夏季和冬季的海表温度与表层 Chl-a 浓度之间均呈负相关(高爽等 2009)。已报道的对北黄海的浮游植物、叶绿素和初级生产力的研究多为 2001 年以前完成的(王真良等 1989;朱明远等 1993;俞建奎等 1993;王勇等 1999;王俊 2001)。2003~2004 年,孙松等(2005)的研究结果表明,胶州湾初级生产力季节变化明显,夏季最高,冬季最低,并认为温度是影响胶州湾初级生产力季节变化的决定因子。对烟台四十里湾养殖区的研究还未见报道,叶绿素和初级生产力水平的分布规律、影响因素以及二者之间的相关性等问题还不清楚。本研究通过分析 2006~2010 年 5、8、10 月四十里湾叶绿素 a 与初级生产力的时空变化,发现了其分布规律,并弄清了二者间的相关关系,为利用叶绿素 a 估算近海初级生产力提供了一种可行的方法。

## 1 试验方法与数据分析

### 1.1 站位布设及样品采集

在四十里湾( $37^{\circ}29' \sim 37^{\circ}35' N, 121^{\circ}25' \sim 121^{\circ}35' E$ )共布设了 6 个定点测站 S1~S6(图 1),监测时间为每年 5、8、10 月上、下旬各 1 次。海水、叶绿素和浮游植物样品的采集、分析方法按《海洋调查规范》(GB12763-2001)和《海洋监测规范》(GB17378-2007)进行。透明度、温度、盐度和 COD 分别采用透明圆盘法、表层水温表法、盐度计法和碱性高锰酸钾法。

### 1.2 样品测定

浮游植物样品用 5% 的甲醛溶液固定、保存,带回实验室内用显微镜进行物种鉴定和细胞计数;叶绿素 a 采用分光光度法测量,使用孔径为  $0.45 \mu m$  的纤维素酯微孔滤膜现场过滤海水,滤膜于避光  $-20^{\circ}C$  冷冻保存。滤膜经 10 ml 90% 丙酮在低温避光条件下萃取 14~24 h, 3 000~4 000 r/min 离心 10 min,取上清液,使用日立 U-2900 型紫外可见分光光度计进行测定,分别在 664、647 和 630 nm 波长处测定吸光值。叶绿素 a 含量( $\mu g/L$ )的计算公式为: $\rho = (11.85E_{664} - 1.54E_{647} - 0.08E_{630})$

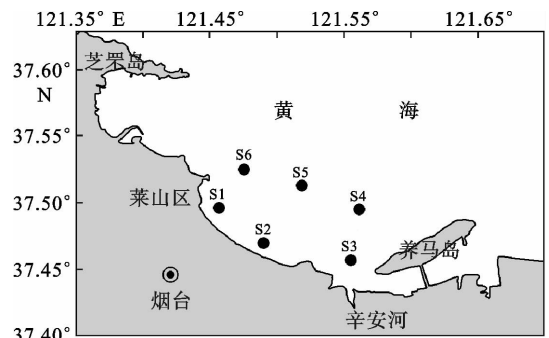


图 1 四十里湾调查站位

Fig. 1 Survey stations in the Sishili Bay

$\times 10/V$ , 式中  $E_{664}$ 、 $E_{647}$ 、 $E_{630}$  分别代表 664、647、630 nm 波长处的吸光值减去 750 nm 下的吸光值,  $V$  代表过滤海水样品的体积(L)。

### 1.3 初级生产力的估算

初级生产力采用叶绿素 a 法测定。

按照 Cadée(1975)提出的简化公式计算:  $C_{\text{Chl-a}} = P_s \cdot E \cdot D/2$ ,

式中,  $C_{\text{Chl-a}}$  为初级生产力, 以 C 计, 单位为  $\text{mg}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$ ,  $P_s$  为表层水中浮游植物的潜在生产力, 以 C 计, 单位为  $\text{mg}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$ ,  $E$  为真光层的深度(m),  $D$  为白昼时间的长短(h)。

其中, 表层水(1 m 以内)中浮游植物的潜在生产力( $P_s$ )根据表层水中叶绿素 a 的含量计算:  $P_s = C_a \cdot Q$ ,

式中,  $C_a$  为表层叶绿素 a 的含量( $\text{mg}/\text{m}^3$ ),  $Q$  为同化系数( $\text{mg}/\text{mg} \cdot \text{h}$ )。真光层( $E$ )的深度取透明度的 3 倍, 同化系数( $Q$ )采用 3.7(王 俊等 2002)。

### 1.4 数据分析

采用 SPSS 17.0 统计软件进行方差分析、相关分析和回归分析。

## 2 结果分析

### 2.1 海水环境质量概况

海水透明度变化范围为 1.7~5.4 m, 最高值出现在 5 月; 2006 和 2007 年均 10 月最低; 2008~2010 年均 8 月最低。水温月平均值 8~9 月最高, 5 月最低。2006 年 5 月(17.3 °C)、2007 年 8 月(27.1 °C)和 2008 年 10 月(19.6 °C)水温分别高于其他年份同期。盐度最高值出现在 5 月, 年际变化不大; 8 月出现低盐度, 且年际变化较大, 2007 年 8 月盐度平均值(26.9)为所有月份中最低。除 2006 年外, 其他年份化学需氧量值(COD)均为 8 月高于 10 月; 其中, 2009 年季节变化最明显, 8 月(2.25 mg/L)和 10 月(0.51 mg/L)分别为所有监测月份的最高值和最低值。

### 2.2 浮游植物数量分布特征

除 2008 年外, 其他年份的浮游植物月均数量均在 8 月最高(图 2)。2008 年最高值出现在 10 月, 并且为调查期间各月份最高值, 达到  $51.61 \times 10^4$  cells/L。其中, 下旬(平均值为  $1.01 \times 10^6$  cells/L)明显高于上午(平均值为  $1.95 \times 10^4$  cells/L), 且各站位间差别显著( $P < 0.01$ ): 10 月上旬的 6 号站最低, 为 487.2 cells/L, 最高的 4 号站高出约 140 倍; 2009 年 8 月, 浮游植物数量也高达  $38.61 \times 10^4$  cells/L。2007 年 10 月, 月均值最低, 为  $0.02 \times 10^4$  cells/L。浮游植物数量年均值变化特征与透明度相似, 2008 年最高, 2009 年次之, 2007 年最低; 基本呈现湾东部高于西部的趋势。

### 2.3 叶绿素 a 分布特征

2006~2009 年, 表层叶绿素 a 年均含量呈逐渐增加趋势(图 3), 2010 年( $6.13 \mu\text{g}/\text{L}$ )降至与 2008 年( $6.02 \mu\text{g}/\text{L}$ )相当的水平。除 2009 年外, 其他年份的叶绿素 a 月均含量均为 8 月最高; 2009 年, 最高值出现在 5 月( $15.82 \mu\text{g}/\text{L}$ ), 并且为 5 年中最高值; 2007 年 10 月, 叶绿素 a 含量在各年份中最低, 为  $0.59 \mu\text{g}/\text{L}$ ; 调查期间四十里湾叶绿素 a 的浓度

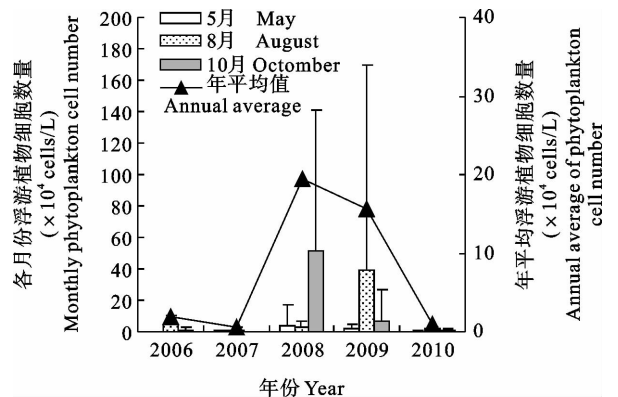


图 2 浮游植物细胞数量的季度及年际分布特征

Fig. 2 Seasonal and inter-annual variations of phytoplankton cell numbers

与浮游植物数量季节变化并不完全一致,但叶绿素 a 含量空间分布整体呈现湾东部高于西部的趋势。

## 2.4 初级生产力的分布特征

2006~2009年,初级生产力均值呈逐渐增加趋势(图4),2010年( $733.91 \text{ mg/m}^3 \cdot \text{d}$ )降至与2008年( $724.54 \text{ mg/m}^3 \cdot \text{d}$ )相当,这与叶绿素 a 的变化趋势一致。除2009年外,其他年份的初级生产力均在8月最高;2009年,最高值出现在5月,并且为5年中最高值,达到 $3307.23 \text{ mg/m}^3 \cdot \text{d}$ ;2007年10月最低,为 $45.06 \text{ mg/m}^3 \cdot \text{d}$ ;2006~2010年,四十里湾初级生产力整体呈现湾东部高于西部的趋势。

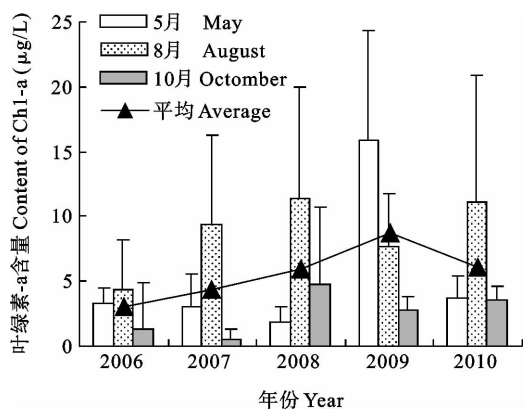


图3 叶绿素 a 的季度及年际分布特征

Fig. 3 Seasonal and inter-annual variations of Chl-a

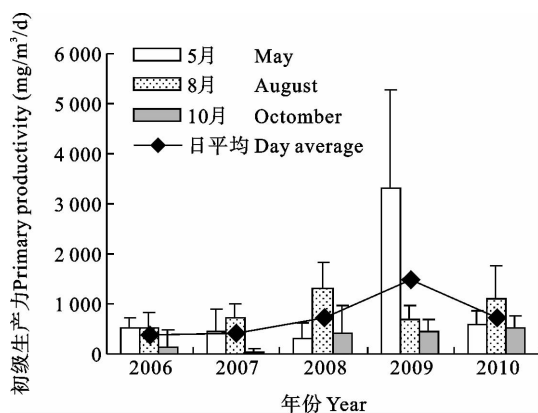


图4 初级生产力的季度及年际分布特征

Fig. 4 Seasonal and inter-annual variations of primary productivity

## 2.5 叶绿素 a 与初级生产力的相关性分析

通过对四十里湾监测数据进行 Pearson 相关性分析,表层叶绿素 a 含量( $x$ )与初级生产力( $y$ )呈强正相关关系(相关系数  $r=0.859$ ,  $P<0.01$ )(图5),回归分析的函数关系式为: $y=173.68x-123.6$  ( $R=0.921$ ,  $P<0.01$ ,  $n=126$ )。因此,单独利用叶绿素 a 含量估算的初级生产力与实测值相近,这为海洋初级生产力的估算与评价提供了一种更简便的方法。该方法在不同海域的适用性有待验证和完善。

## 3 讨论

海水中叶绿素 a 的分布和季节变化在一定程度上反映了水域环境因子对浮游植物生长的影响,也反映了海洋生态系统的发育状况。王俊等(2002)发现,渤海近岸水域表层叶绿素 a 的含量为  $0.54 \sim 16.78 \text{ mg/m}^3$ ,平均值为  $2.88 \text{ mg/m}^3$ ,5、8和10月叶绿素的含量依次降低。这与本研究结果有一定差异。本研究结果显示,2006~2010年,四十里湾表层叶绿素 a 的含量为  $0.3 \sim 37.0 \text{ mg/m}^3$ ,每年3个季节的平均值均高于  $2.88 \text{ mg/m}^3$ ,且有逐渐升高的趋势;并且,一般8月叶绿素的含量高于5和10月。原因可能是海水温度、透明度等环境条件及营养盐季节分布特征发生了变化,导致8月份更适于浮游植物繁殖所致。经 Pearson 相关性分析,初级生产力与海水透明度 ( $r=0.237$ ,  $P<0.01$ ) 呈显著正相关;而叶绿素 a 分别与 COD

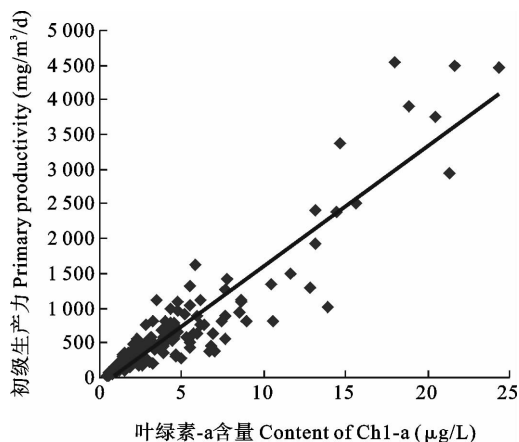


图5 叶绿素 a 含量与初级生产力的相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis of Chl-a concentration and primary productivity

( $r=0.371$ ,  $P<0.01$ )和海水温度( $r=0.190$ ,  $P<0.05$ )均呈显著正相关;另外,浮游植物细胞数量与 COD( $r=$

0.483,  $P < 0.01$ ) 也呈显著正相关。因此,海水透明度是影响四十里湾初级生产力的关键因子,而 COD 和海水温度是影响浮游植物生长及其叶绿素含量的首要因子。周伟华等(2004) 也发现,光是影响叶绿素 a 和初级生产力分布的主控因子。

最近十几年,中国海洋开发力度不断加大,同时海洋排污负荷也在不断增加,对中国近海环境有一定程度的影响。最新研究显示,北黄海夏季磷酸盐可能成为限制浮游植物生长的因素,而冬季无机氮和磷酸盐可能同时成为限制因子(高 爽等 2009)。2003~2008 年,四十里湾 Chl-a 含量呈上升趋势,并与 N、P 浓度呈显著的正相关(喻 龙等 2009)。但四十里湾浮游植物数量与 Chl-a 含量并不呈明显的相关关系(图 2、图 3),Chl-a 含量可能受水文状况、营养状态、浮游植物群落结构及养殖贝类选择性摄食等有关(张继红等 2008)。四十里湾监测指标的空间分布特点显示,该海域浮游生物与初级生产力可能受陆源排污、海流及贝类养殖布局影响。8、9 月份烟台进入雨季,充足的降水携带着大量的陆源污染物经辛安河流入四十里湾,改变了海水的营养状态,为赤潮发生提供了物质基础。

1998 年渤海近岸水域初级生产力平均值为  $327 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ (王 俊等 2002)。2003~2004 年,胶州湾初级生产力周年变化结果表明,夏季是一年中的高峰,平均为  $835.72 \text{ mgC/m}^2 \cdot \text{d}$ ,春、秋季次之,分别为  $286.00$ 、 $247.81 \text{ mgC/m}^2 \cdot \text{d}$ ,冬季最低,平均为  $102.27 \text{ mgC/m}^2 \cdot \text{d}$ (孙 松等 2005)。本研究发现,2006~2010 年四十里湾近岸初级生产力范围为  $383 \sim 1481 \text{ mg/m}^3 \cdot \text{d}$ ,明显高于渤海近岸 10 年前的初级生产力均值,并且,基本呈现逐年升高的趋势;除 2009 年外,初级生产力也基本呈夏季 > 春季 > 秋季。本研究在分析近 5 年四十里湾大量调查数据的基础上,得出了表层叶绿素 a 含量与初级生产力的一元回归方程,与 Cadée(1975)法相比,该关系式仅利用表层叶绿素 a 含量即可对初级生产力进行估算,减少了同化系数  $Q$ 、真光层的深度  $E$  和白昼时间  $D$  等参数的测定,为山东沿海及邻近海域初级生产力的估算提供了一种更简便的方法。周伟华等(2004)采用  $^{14}\text{C}$  法测定了长江口海域各季节的初级生产力,并作了其与表层叶绿素 a 的回归方程,认为在有足够的现场观测数据支持时,可以根据叶绿素 a 的浓度来估算初级生产力。本研究结果也表明,叶绿素 a 和初级生产力相关性明显,其结果对我国黄、渤海近海初级生产力估算具有一定借鉴作用。应用叶绿素 a 估算初级生产力是一种方便、可行的方法,但其适用性与准确性有待进一步验证,其中,同化系数( $Q$ )是一个重要参数。浮游植物的同化系数受诸多因素的影响,随时间和空间的变化而变化,通常冬季的同化系数较低(张继红等 2008)。因此,本研究中同化系数采用固定的数值会造成一定的估算误差。

## 参 考 文 献

- 王 俊. 2001. 黄海春季浮游植物的调查研究. 海洋水产研究, 22(1):56~61
- 王 俊, 李洪志. 2002. 渤海近岸叶绿素和初级生产力研究. 海洋水产研究, 23(1):23~28
- 王 勇, 焦念志. 1999. 北黄海浮游植物营养盐限制的初步研究. 海洋与湖沼, 30(5):512~518
- 王真良, 刘晓丹. 1989. 北黄海浮游动物昼夜垂直移动的初步研究. 黄渤海海洋, 7(4):50~54
- 宁修仁, 刘子琳, 史君贤. 1995. 渤、黄、东海初级生产力和潜在渔业生产量的评估. 海洋学报, 17(3):72~84
- 孙 松, 张永山, 吴玉霖, 张光涛, 张 芳, 蒲新明. 2005. 胶州湾初级生产力周年变化. 海洋与湖沼, 36(6):481~486
- 朱明远, 孙明华. 1993. 黄海水区的 Chl-a 和初级生产力. 黄渤海海洋, 11(3):38~51
- 张继红, 方建光, 蒋增杰, 王 巍, 王诗欢, 孙 松. 2008. 獐子岛养殖水域叶绿素含量时空分布特征及初级生产力季节变化. 海洋水产研究, 29(4):22~28
- 林丽贞, 陈纪新, 刘 媛, 曹振锐, 黄邦钦. 2007. 东、黄海典型海区分粒级浮游植物 Chl-a 的周日波动及影响因子. 台湾海峡, 26(3):342~350
- 周伟华, 袁翔城, 霍文毅, 殷克东. 2004. 长江口邻域叶绿素 a 和初级生产力的分布. 海洋学报, 26(3):143~150
- 俞建鑫, 李瑞香. 1993. 渤海, 黄海浮游植物生态的研究. 黄渤海海洋, 11(3):52~59
- 高 爽, 李正炎. 2009. 北黄海夏、冬季叶绿素和初级生产力的空间分布和季节变化特征. 中国海洋大学学报, 39(4):604~610
- 喻 龙, 郝艳菊, 蔡悦荫. 2009. 四十里湾赤潮高发期营养盐与叶绿素 a 的年际变化. 海洋环境科学, 28(5):558~561
- 檀赛春, 石广玉. 2006. 中国近海初级生产力的遥感研究及其时空演化. 地理学报, 61(11):1189~1200
- Cadée, G. C. 1975. Primary production off the Guyana coast. Netherlands Journal of Sea Research, 9(1):128~143