

长江口外水域叶绿素 a 分布的基本特征

沈新强

(中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海 200090)

胡方西

(华东师范大学河口和海岸研究所, 上海 200062)

摘 要 本文根据1988年8月、12月、89年8月和1991年9月对长江口外附近水域($30^{\circ}30'—31^{\circ}50'N$ 、 $124^{\circ}30'E$ 以西)进行的多学科的综合调查结果,着重探讨长江河口羽状锋区附近叶绿素 a 含量的分布特征及其与海洋环境因子的关系。调查海区叶绿素 a 含量从长江口外向东构成低、高、最低分布趋势,夏季形成向东或东北扩展的、清晰可辨的叶绿素 a 的羽状锋。在锋区内叶绿素 a 的含量值高,最大值可达40 毫克/米³,该羽状锋的水平及垂向边界大致可以3.0毫克/米³等值线确定。在垂直分布上出现较强的叶绿素 a 跃层,最大梯度可达每米5 毫克/米³以上。冬季叶绿素 a 含量比夏季成倍地降低,锋区消失,垂直分布均匀,相对高值区比夏季明显地向河口内收缩。叶绿素 a 含量具有显著的周日变化、季节变化和年际变化。在影响叶绿素 a 分布与变化的众多因子中,与浮游植物细胞数量、种类、盐度、潮流、径流、营养盐、光照等关系密切。

关键词 长江口,羽状锋区,叶绿素 a,环境因子

前 言

长江是我国第一大河,河口区域丰水多沙,营养盐含量高,年总径流量达9240亿立方米,年输沙量为4.68亿吨。巨量的长江径流入海与海水发生混合,形成长江冲淡水。夏季,表层长江冲淡水向东北方向扩展,在河口外水域形成清晰可见的羽状锋。Bowman 等人在总结河口羽状锋的研究^[2]中指出:河口羽状锋对沿岸物理与生物过程的空间和时间影响取决于河流排水的多寡和水体的稳定性。冬季,由于长江径流聚减,长江冲淡水向东南方向延伸。

大量的研究表明,海水中叶绿素 a 含量不仅与浮游植物的数量、初级生产力和中心渔

• 收稿日期:1994年9月24日。

本文为国家自然科学基金重大项目《中国河口主要沉积动力过程研究及其应用》河口锋研究内容之一,项目编号:9487005

场的形成密切相关,而且其分布又显示与海洋环境相依存的关系。因此,近年来在对与海洋锋相关的生物学研究过程中,对锋区附近水域内叶绿素 a 分布的研究引起越来越多的重视^[1-3,5-6,8]。这些研究都揭示了锋区附近水域中叶绿素 a 含量的分布和变化与锋的变化紧密相关。

本文根据1988年8月、12月,1989年8月和1991年9月,在长江河口锋区附近进行的4个航次的多学科的综合调查结果,着重探讨长江河口锋区附近叶绿素 a 含量的分布变化特征及其与环境因子间的关系。

材料与方 法

调查海区位于 $30^{\circ}30' - 31^{\circ}50'N, 124^{\circ}30'E$ 以西的长江河口区。各次调查的测站位置如图1所示,在各测站上按0.5、10、15、25米及底层间隔用有机玻璃采水器取样。每层取0.5—1.0升水样,在船上用0.45微米孔径的混合纤维素酯微孔滤膜进行真空抽滤,截留有浮游植物的滤膜被低温、干燥贮存,带回实验室,按联合国教科文组织推荐的分光光度法^[7],在国产751分光光度计上测定,而后根据 Jeffercy—Humphrey^[4]的计算方程计算叶绿素 a 含量。

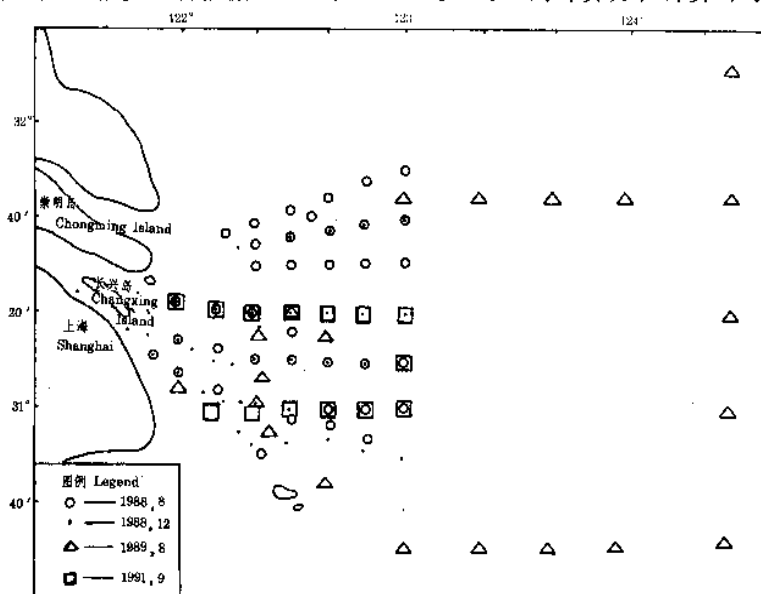


图1 叶绿素 a 取样站位分布

Fig. 1 The distribution of sampling stations of Chlorophyll a

结果与讨论

(一)叶绿素 a 空间分布

1. 平面分布

8月调查海区盛行偏南风,气温是全年最高月份,表面水温平均在 $26.0^{\circ}C$ 以上,长江径流正处于丰水期,巨量的淡水注入和扩散,不仅给海区的盐度分布带来巨大影响,而且也携带大量的泥沙和营养物质。

图2给出了1988年8月调查区表层叶绿素a含量的分布,其含量值变化于0.4—13.0毫克/米³之间,在长江口外成密集分布,形成一条最大梯度带。以3.0毫克/米³等值线为界,所围区域占据调查区的大部分水域,和15—30等盐线大体吻合,其东边界大致沿122°25'E呈由北向南走向,向东扩展成舌状分布。该舌状区内的叶绿素a含量为整个调查区之最,中心值高达13.0毫克/米³。舌状区两侧,含量值迅速降低,左侧即调查区的东北角含量最低(小于1.0毫克/米³),靠河口内侧的含量均在2.0毫克/米³以下。5米层的叶绿素a分布与表层大体相似,最大梯度带位置保持不变;在10米层,除个别测站还保持高值外,大部分测站含量值迅速降低,最大梯度带也消失。对照这些测站的水深可发现,含量值迅速降低的测站水深较浅,已近海底。整个底层叶绿素a含量相对上层均较低,分布也较均匀。

冬季调查海区盛行偏北风,气温急剧下降,表层水温最高也在15.0℃以下,此时长江径流处于枯水期,长江冲淡水势力较弱,叶绿素a含量明显降低。

图3给出了1988年12月表层叶绿素a的分布,其含量值变化范围在0.3—4.9毫克/米³之间。调查区没有出现夏季时的叶绿素a最大梯度带,仅出现2个舌状的范围较小的相对高值区(含量>2.0毫克/米³)。其一位于北港外即122°10'E、31°20'N附近,伸向东南;其二位于122°30'E、31°00'N附近,这表明此时长江冲淡水向南—东南运移。在河口内侧即121°40'E以西和河口外侧即122°30'E以东均为低值区,含量值均在1.0毫克/米³以下,由河口向东分布趋势依旧显示低、高、低的特征。表层的分布趋势基本一直保持到底层,显示出垂直分布均匀的特征。

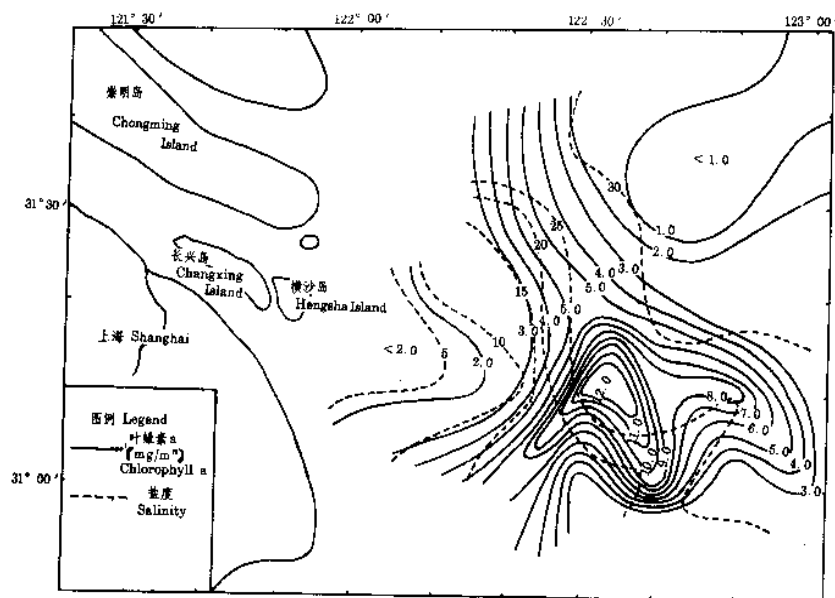


图2 长江口外表层叶绿素a含量(毫克/米³)平面分布图(1988年8月)

Fig. 2 The horizontal distribution of chlorophyll a concentration (mg/m³) at surface in the Changjiang estuary in Aug. of 1988

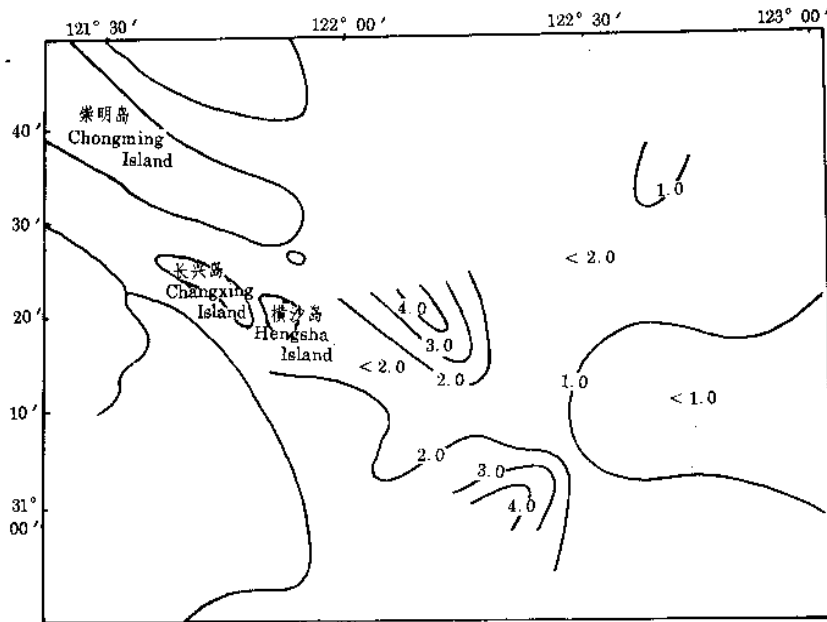


图3 长江口外表层叶绿素a含量(毫克/米³)平面分布图(1988年12月)

Fig. 3 the horizontal distribution of chlorophyll a concentration (mg/m³) at surface in the Changjiang estuary in Dec. of 1988

2. 垂直分布

海水中叶绿素a的垂直分布受光照影响,主要存在于真光层内,其含量随深度而变化,且又与海水的温度、盐度、营养盐、垂直稳定度、动物捕食等诸因素有关。

(1)夏季 调查海区由于受下泄径流的强烈影响,上层盐度很低,海水层化显著,盐跃层强盛。此时叶绿素a在垂直分布上显示出明显分层特点。图4是1988年8月叶绿素a的垂直分布。由图可以看出,不同水域叶绿素a的垂直分布有很大差别,在32站以西的河口口门附近水域,其含量较低(<3.0毫克/米³)。一般情况是表层较高,底层较低,但差别不大,相对呈均匀化分布。但该站以东含量明显增加且分层现象随之出现,随着离河口距离的增加,含量迅速升高,垂直梯度增大。在33站出现强烈的跃层,上界为5米水深,下界为10米水深处,其间叶绿素a垂直梯度每米可达1.6毫克/米³。再向东,跃层位置下降,厚度增加。至35站以后,叶绿素a含量又趋于减少;到36站即123°E附近,含量已很低了,相应垂直分层现象消失。上述情况表明,叶绿素a的高值区大体上和长江口羽状锋区吻合。正是海水的明显分层现象才导致叶绿素a的分层现象。图5给出了1989年8月长江口外122°40'E横断面叶绿素a的分布,此间正是长江冲淡水主轴通过的水域。在127站表、底层含量从40.0毫克/米³到1.0毫克/米³,且有强烈的分层现象,跃层的上边界几乎就在近表层,下界在7—8米水深处,最大垂直梯度可达每米5.0毫克/米³,跃层之下含量迅速降低。强烈的水体分层状态,增加了水体稳定度,从而增加细胞在强光下的暴露时间^[6],导致跃层之上出现高叶绿素a的含量。

图6是长江特大洪水年1991年9月1日在31°N纵向断面叶绿素a分布,可以看出其等值线呈水平状密集分布,形成强跃层,西部区域垂直梯度可达每米1.6毫克/米³,断面东部跃层位置下降至10米水深处,如果以跃层边界值3.0毫克/米³为准,可以推断其东边界已越出

本航次调查范围,即 123°E 之外。和1988年8月对比已明显东移,表明长江径流对叶绿素 a 的分布有重大影响。此外,从图中可看出在断面西部近底层处,叶绿素 a 含量明显增高。这种现象在1988年8月相同位置也观测到,它显然与生物碎屑在此处沉积有关^[5]。

(2)冬季 由于强烈的垂直对流作用,调查区内叶绿素 a 含量的垂直分布普遍显示相对均匀的特点(图4)。就整个调查区而言,北侧纬向断面的叶绿素 a 含量更低、更均匀,而南侧纬向断面的西部其含量值相对高一些。这种现象看来与冬季入海径流出口后向南流有关。

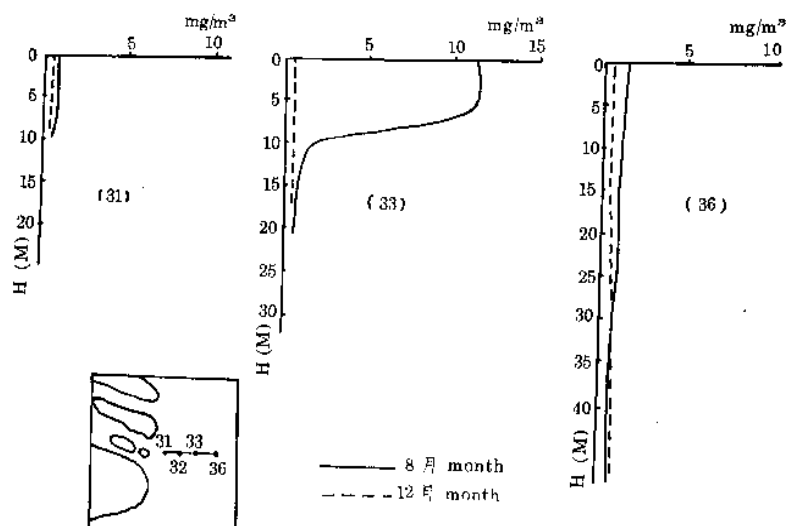


图4 长江口外叶绿素 a 含量(毫克/米³)垂直分布图(31°10'N 断面)(1988年8月和12月)

Fig. 4 The vertical distribution of chlorophyll a concentration (mg/m^3) in the section of $31^{\circ}10'\text{N}$ of the Changjiang estuary in Aug. and Dec. of 1988

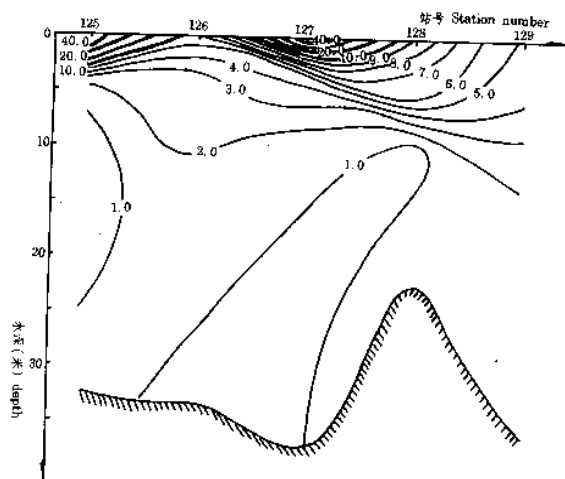


图5 长江口外叶绿素 a 含量(毫克/米³)垂直分布图(122°40'E 断面)(1988年8月)

Fig. 5 The vertical distribution of chlorophyll a concentration (mg/m^3) in the section of $122^{\circ}40'\text{E}$ of the Changjiang estuary in Aug. of 1988

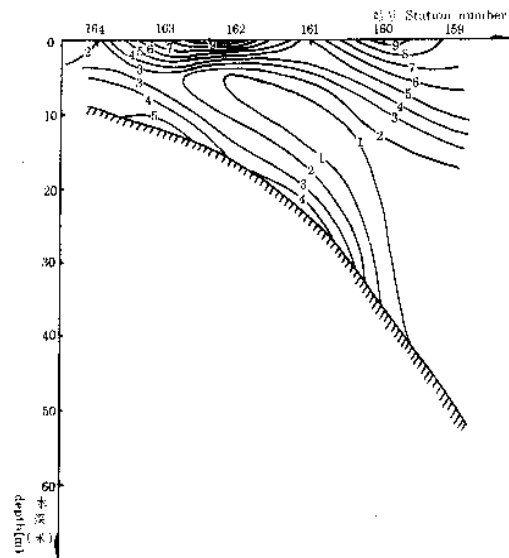


图6 长江口外叶绿素a含量(毫克/米³)垂直分布图(31°00'N断面)(1991年9月)

Fig. 6 The vertical distribution of chlorophyll a concentration (mg/m³) in the section of 31°00'N of the Changjiang estuary in Sept. of 1991

(二)叶绿素a含量变化与环境因子的关系

影响长江口外水域叶绿素a含量变化的环境因子是多种多样的,既有自然因素中的光照、营养盐等限制因子,又有径流、潮流、温度、盐度、悬浮体等控制因子。浮游植物更与叶绿素a有直接的依赖关系。

(1)浮游植物 调查区域网获浮游植物细胞总个数与叶绿素a含量之间基本呈正相关关系,即高叶绿素a含量对应高生物量。1988年8月水层垂直平均叶绿素a含量与细胞个数间的相关分析显示,相关关系可达0.62,统计学检验表明在 $\alpha=0.05$ 水平,关系显著。可以肯定,如果能考虑对叶绿素a产生较大贡献的小型细胞^[6],则相关程度必然会更高。把叶绿素a含量与浮游植物的种类对照分析可以看出,长江河口区的中肋骨条藻 *Skeletonema costatum* 对叶绿素a含量的贡献最为明显。如1988年8月在33测站,水柱平均叶绿素a含量为整个调查区之最(6.15毫克/米³),相对应该测站的中肋骨条藻占总数的80%以上,同时也为各测站之最。又如1989年8月在125和127测站出现的叶绿素a含量的极端高值(40.0毫克/米³)与这两个测站极端高的中肋骨条藻数量(分别为 10^9 和 10^8 量级)密切相关。其次,对叶绿素a含量有较大贡献的种类是窄隙角刺藻 *Chaetoceros affinis* 和远距角刺藻 *Ch. distans*,在叶绿素a含量较高的测站,这两个种类的数量一般均较高。

(2)盐度 在影响叶绿素a含量的众多因子中,与盐度的关系最为密切,从1988年表层盐度分布(图7)对比(图2),可以看出不同盐度对应不同的含量值。调查区表层叶绿素a含量和表层盐度的相关分析表明:在盐度低于25—27的水域,叶绿素a含量和盐度成正相关,即叶绿素a含量随盐度的增加而增加,相关系数可达0.91;而在盐度高于27的水域,它们之间则成负相关关系,叶绿素a含量随盐度增加而降低。Bowman等人的研究指出,盐度锋常常与叶绿素a锋相一致^[2]。我们在长江河口锋的调查中也证实了这一点。

(3)营养盐 长江径流向河口区输送大量的无机磷和无机氮,致使河口区的氮、磷含量特别高。调查区内叶绿素a含量与氮、磷含量的关系较为复杂,没有象盐度因子那么明显,这是因为促使浮游植物生长繁殖除营养盐因子外,还需具备其它适宜条件。而且浮游植物大量繁殖时,消耗大量的营养盐。在河口内侧,虽然氮、磷含量高不成为一个限制因子,但含沙量大、水体混浊、光合作用差、盐度偏低,不利于浮游植物的生长繁殖,相对应叶绿素a含量低。河口外侧即羽状锋区,该区域属下泄冲淡水 and 外海水的交界区,含沙量降低、盐度适中,同时具有浮游植物生长所需的营养盐类,所以该区域内叶绿素a含量迅速增加。值得注意的是,由于浮游植物的大量繁殖,无机氮和无机磷几乎被消耗殆尽。因此在叶绿素a含量高的测站,氮、磷含量极端的低。由图8可以明显地看出,与叶绿素a含量的高值相对应的是磷酸盐的痕量区。再进一步向外,临近外海,盐度较高,虽然含沙量降至最低,海水透明度大,光合作用强,但营养盐含量低,限制了浮游植物的生长,因此该区域内叶绿素a含量为整个调查区之最低。叶绿素a含量在河口锋附近水域显示出低、高、低这样一种水平梯度的分布,是众多环境因子综合影响的结果。

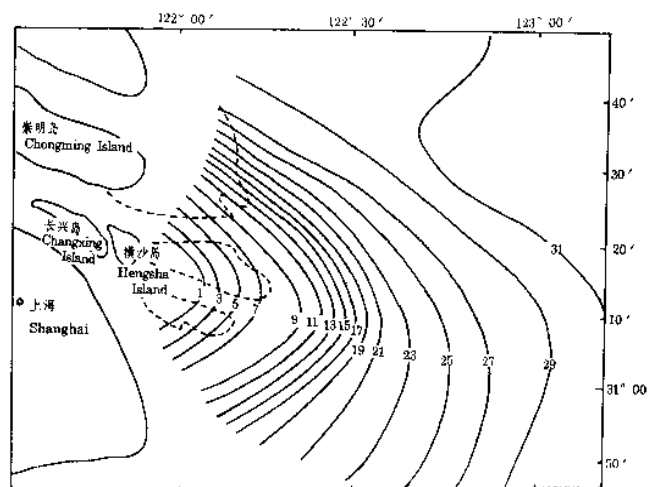


图7 长江口表层盐度分布图(1988年8月)

Fig. 7 The distribution of surface salinity in the Changjiang estuary in Aug. of 1988

(4)潮流 潮流作为长江口水动力的主要因子,对叶绿素a的空间分布及变化主要体现在潮周期内变化上。图9是1988年8月8802站叶绿素a的周日变化图,从中可以看出不同水深层次的变化是有差别的。5米层以下,特别是底层,具有明显半日周期的变化,其峰值在23日13:00时及24日01:00时,此时流向正值西北向,浮游植物正由东南水域的高值区随着海流进入测站附近,从而造成二个高峰时段。相反23日17:00时及24日05:00时流向为东南向,浮游植物随着水流从低值区进入测站水域,故产生二个低谷时段。对表层来说,第一个高峰是明显存在的,而第二个高峰却没有出现,造成这种现象主要是由于阳光作用的关系。第一个峰值正是中午,而第二个峰值却是晚上,由于此时阳光作用在表层,要大于叶绿素a空间分布状态,故峰期消失。类似这种状况在海区其它各站也时常产生。

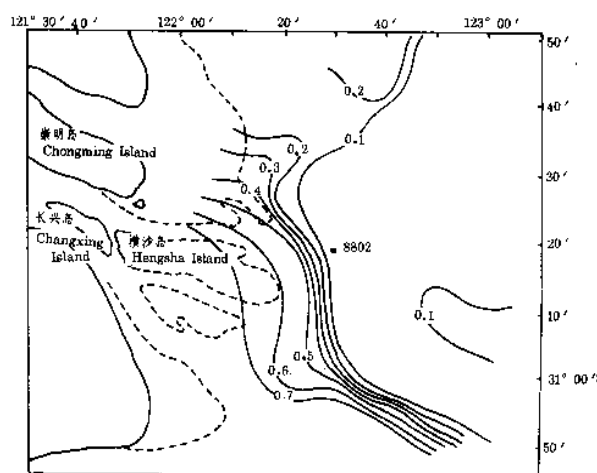


图8 长江口夏季表层磷酸盐(微克原子-P,L)分布图(1988年8月)

Fig. 8 The distribution of $\text{PO}_4\text{-P}$ (μM) at surface in the Changjiang estuary in Aug. of 1988

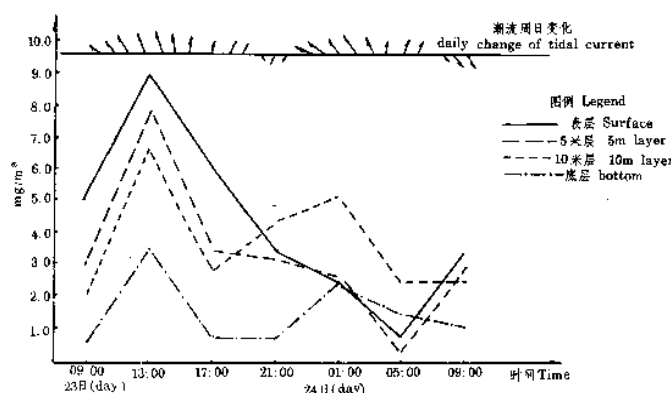


图9 8802测站表层叶绿素a含量(毫克/米³)周日变化图(1988年8月23—24日)

Fig. 9 the daily variation of surface chlorophyll a concentration (mg/m^3) at the station 8802 during Aug. 23—24 of 1988

(5) 径流 叶绿素a含量的分布与变化除与上述环境因子相关外,从羽状锋区内显示出的高叶绿素a含量来看,径流无疑是一个相当重要的因子。夏季,入海径流量大,携带的营养盐丰富,保证浮游植物大量繁殖生长的需求,导致叶绿素a含量迅猛增加,如1988年8月长江径流量467000 $\text{米}^3/\text{秒}$,叶绿素a锋东侧边界处于123°00'E附近。同年12月,径流量降至30000 $\text{米}^3/\text{秒}$,东边界向西收缩至122°30'E以西。正如前节所述,叶绿素a含量分布的年际差异与径流的变化相对应。1989年8月径流量比1988年8月多8000 $\text{米}^3/\text{秒}$,相对应叶绿素a锋东边界比1988年8月明显地向东北推移至123°30'E附近。1991年夏季遇到百年未遇的洪水,9月初的调查结果还显示出锋带强烈地向东北延伸,叶绿素a锋面扩展至123°30'E附近。

结 论

1. 长江河口区附近叶绿素a含量从长江口门向东成低、高、低的分布趋势。在长江口外

羽状流区域,夏季则形成清晰的叶绿素 a 锋区,该锋面向东或东北扩展,其边界大致可以 3.0 毫克/米³等值线确定,锋区内含量值迅猛增加;在锋区外含量又迅速降低,在垂直分布上出现较强的叶绿素 a 跃层。冬季,叶绿素 a 含量比夏季成倍地降低,锋面消失,垂直分布均匀,相对高值区比夏季明显地向河口内收缩。

2. 在影响叶绿素 a 分布与变化的众多环境因子中,它与浮游植物细胞数量和种类、盐度、潮流、径流、营养盐和光照的关系密切。随着这些因素的变化,它的空间分布有很大的差异,而且有显著的潮周期、季节及年际变化。

3. 长江河口区叶绿素 a 锋区和河口羽状锋相一致,不仅表明叶绿素 a 是判别河口锋的一项重要指标,而且羽状锋内高叶绿素 a 含量反映了那里的高生物量。因此,研究锋带的变动具有生物学的意义。

参 考 文 献

- [1] 宁修仁、刘子琳、胡钦贤,1985.浙江沿岸上升流区叶绿素 a 和初级生产力的分布特征.海洋学报,7(6):753—764.
- [2] Bowman, M. J. and Iverson, R. L., 1978, Oceanic fronts in coastal processes. Springer—Verlag, Berlin Heidelberg, New York, 87—104.
- [3] Fisher, T. R. *et al.*, 1988, Phytoplankton, nutrients and turbidity in the Chesapeake Delaware and Hudson estuaries. Estuarine Coastal and Shelf Science, 27:61—93.
- [4] Jeffrey, S. W. and Humphrey, G. F., 1975, New spectrophotometric equation for determining chlorophylls a, b, c and C2 in higher plants, algae and natural phytoplankton. Biochem. physiol. pflanz, 167: 191—194.
- [5] Malone, T. C *et al.*, 1983, mesoscale response of diatom population to a wind event in the plume of the Hudson river. Deep Sea Res, 30:149—179.
- [6] Ning Xiuren *et al.*, 1988, Standing stock and production of phytoplankton in the estuary of the Changjiang and the adjacent East China Sea. Marine Ecology — progress Series, 49(10): 141—150.
- [7] SCOR—Unesco Working Group 17, 1966, Monographs on Oceanographic methodology, 1—69.
- [8] Simpson, J. H. *et al.*, 1978, The Isloy front: physical structure and phytoplankton distribution. Estuarine Coastal Mar. Sci., 9: 713—726.

BASIC CHARACTERISTICS OF DISTRIBUTION OF CHLOROPHYLL A IN THE CHANGJIANG ESTUARY

Shen Xinqiang

(East China Sea Fishery Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090)

Hu Fangxi

(Coast—Estuary Institute, East China Normal University, Shanghai 200062)

ABSTRACT Based on the results of multidisciplinary investigations in the estuary of the Changjiang River (30°30'—31°50'N, west of 124°30' E) in August and December of 1988, August of 1989 and September of 1991, this paper emphasis on discussing the features of distribution of chlorophyll a in the plume frontal region located in the estuary of the Changjiang River and their relation with marine environmental factors. The results show a

tendency of the distribution of chlorophyll a from high to the lowest concentration from the mouth of the Changjiang River to the east. In summer, there is a clear plume front of chlorophyll a which expands to the east or the northeast. In the plume, the concentration rapidly increases and the maximum may reach 40 mg/m^3 . The horizontal and vertical borders of the plume may be roughly determined by an isoline of 3.0 mg/m^3 .

A strong stratification of chlorophyll a has been observed in the plume and maximal gradient may reach 5.0 mg/m^3 or more each meter. In winter, the concentration decreases many times. The plume disappears and the vertical distribution is homogeneous. The region with relative high concentration obviously draws back into the mouth. The chlorophyll a concentration has daily, seasonal and yearly variations in the studying area. The factors affecting the distribution and variation of chlorophyll a are closely related to cell number and species of phytoplankton, salinity, tidal current, runoff, nutrients and illumination.

KEYWORDS Changjiang estuary, Plume front region, Chlorophyll a, Environmental factors