

# 长江口中肋骨条藻赤潮发生过程 环境要素分析——营养盐状况\*

洪君超 黄秀清 蒋晓山 王桂兰

(国家海洋局东海监测中心, 上海 200137)

**提要** 从长江口 1990 年 6 月的一次中肋骨条藻赤潮发生过程中营养盐含量变化可见, 由于潮汐的作用, 观测水域各营养盐要素都在不同程度上存在周日波动特征, 其中  $\text{NO}_3\text{-N}$  在一个潮周期内变化幅度可达 1 倍以上。赤潮发生时表层水体  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$  和  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  值都呈下降趋势, 降幅最大的  $\text{PO}_4\text{-P}$  达 3 倍以上;  $\text{N/P}$  值则急剧上升, 峰值为 450。随着赤潮消亡,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$  和  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  浓度很快恢复正常,  $\text{NH}_4\text{-N}$  浓度在赤潮发生时略有升高, 但在赤潮末期明显下降, 而且恢复过程相对较长。

**关键词** 长江口 中肋骨条藻 赤潮 营养盐

赤潮生物对不同化学形态营养盐的利用情况存在一定差异(徐恒振, 1988)。水体中营养盐的含量是影响浮游植物生长繁殖的重要因子, 同时浮游植物的生长状况又是影响各种营养盐数量变动的条件, 两者之间表现为互相矛盾而又互相依存的关系。本文通过 1990 年 6 月在长江口赤潮多发区观测到的一次中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*) 赤潮发生过程不同形态营养盐变化情况的综合分析, 对浮游植物赤潮的发生与营养盐消长的关系作初步分析。

## 1 内容与方法

调查时间 1990 年 6 月 9 日—15 日, 船舶为 800 吨级“中国海监 47”, 定点连续测站设在长江口赤潮多发区(洪君超等, 1989) 东南部的  $C_{13}$  ( $31^\circ 00' \text{N}$ ,  $122^\circ 41' \text{E}$ , 图 1)。营养盐测定项目有  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$  和  $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 。取样频率, 赤潮发生前每天 1 次(其中 6 月 11 日 14 时—12 日 14 时取样间隔为 4h); 赤潮发生期间(6 月 14 日 12 时—15 日 12 时) 每 2h 1 次。取样层次为表层, 4m 和底层(测站水深 20m)。分析方法按《海洋调查规范》进行。赤潮生物个数用 0.1 mm 计数板现场统

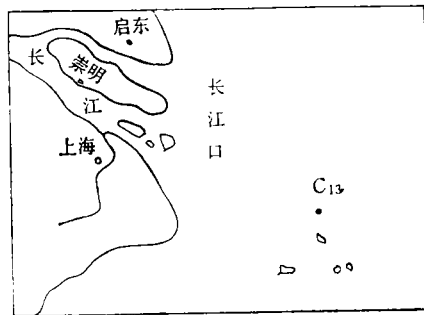


图 1 长江口赤潮观测站位  
( $31^\circ 00' \text{N}$ ,  $122^\circ 41' \text{E}$ )

Fig. 1 Location of red tide observing station in Changjiang River estuary

\* 国家自然科学基金资助重大项目, 9389008 号。

收稿日期: 1991 年 10 月 10 日, 接受日期: 1993 年 4 月 10 日。

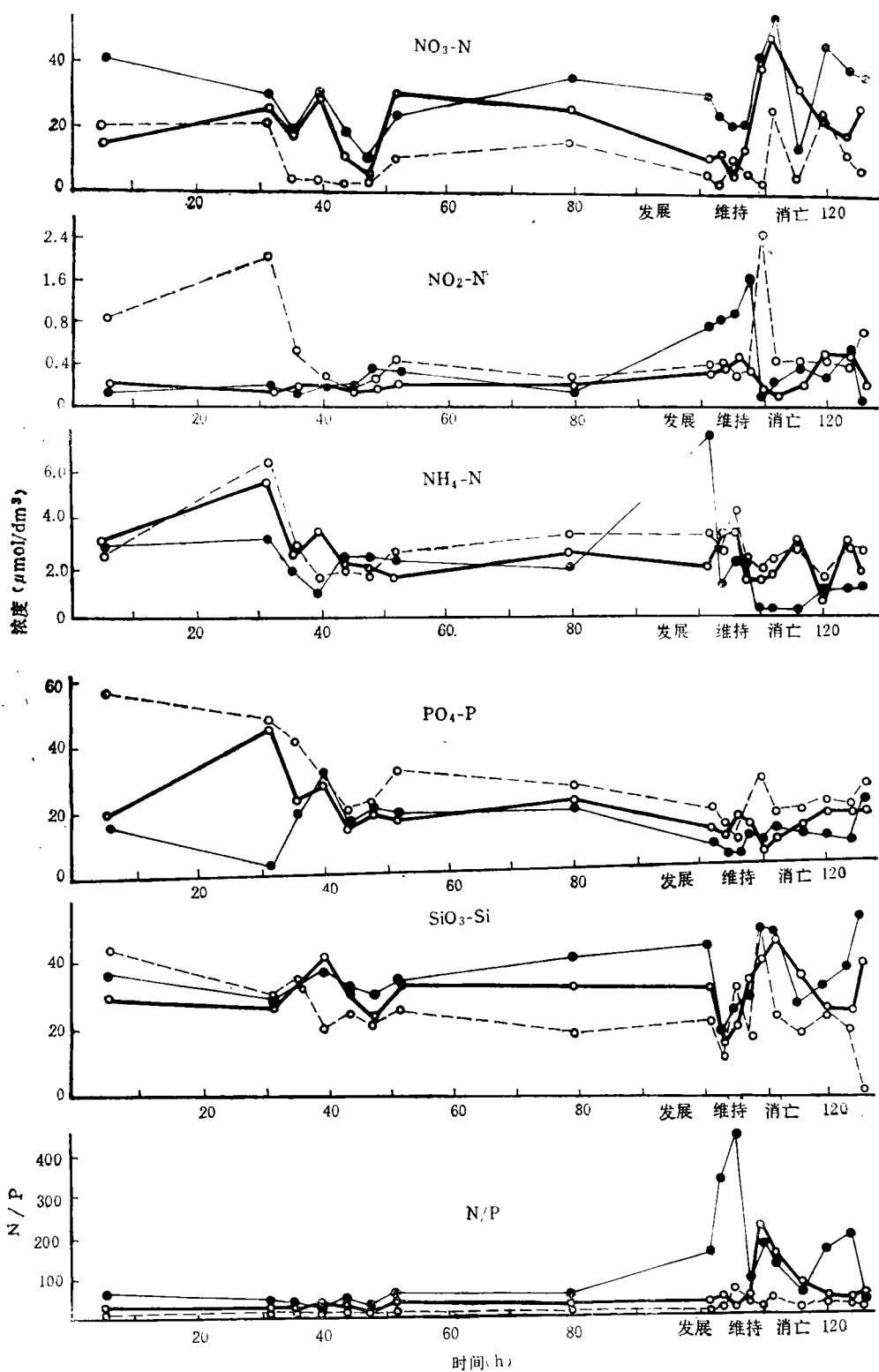


图2 赤潮发生过程营养盐变化(1990.6.10—1990.6.15)

Fig. 2 Variation of nutrients during red tide occurring process

—●— 表层; - - -○- - 4m; ····○···· 底层。

计。

## 2 结果与分析

本次赤潮从 6 月 14 日 10 时起发生。当时观测水域的海水水色开始由蓝变黄, 表层水体中肋骨条藻大量聚集并成为唯一的优势种, 密度为  $1.5 \times 10^{10}$  cell/m<sup>3</sup>; 下午水色继续发暗, 傍晚时海水已呈暗褐色, 并伴有腥臭味, 表层海水赤潮生物密度达  $2.6 \times 10^{10}$  cell/m<sup>3</sup>。晚上由于该海域突降暴雨, 而且风浪增大, 于次日凌晨继续观察时, 水体又恢复正常。

**2.1 赤潮发生前营养盐分布特征** 图 2 为赤潮发生前及发育过程(含发展、维持和消亡等阶段)各水层营养盐要素的变化。

图 2 中 0—100h 区间为赤潮发生前营养盐变化曲线, 其中 30—55h 区间为营养盐要素周日波动观测结果。很显然, 赤潮发生前营养盐垂直分布  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  自表层至底层大体呈下降趋势, 表层与底层的平均差值分别为  $16.1 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$  和  $7.4 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ; 而  $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$  浓度底层比表层高, 其中  $\text{PO}_4\text{-P}$  底层浓度平均较表层高 1 倍。这种营养盐分布的垂直差异与水体中各营养盐要素的生物、化学、物理循环过程的不同有关(徐恒振, 1988)。

营养盐周日变化以  $\text{NO}_3\text{-N}$  的表层水体波动较明显, 其最大值与最小值之差在 1 倍以上,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$  和  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  表层水体含量也出现 24 h 不规则变化特征, 只有  $\text{NO}_2\text{-N}$  变化不明显。底层水体各项营养盐除  $\text{PO}_4\text{-P}$  外大多不表现显著的周日波动。

多发区海域盐度与潮汐大体呈正相关<sup>[9]</sup>, 盐度与营养盐的关系可以在某种程度上说明潮汐对营养盐时间分布的影响。通过相关分析, 与盐度呈负相关的营养盐要素有  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$  和  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  (相关系数  $r$  分别为  $-0.513$ ,  $-0.765$  和  $-0.881$ ), 落潮时由于营养较丰富的沿岸冲淡水影响, 观测区海水的盐度值降低, 此时上述营养盐要素的浓度值较高, 可以认为该区域表层水体的  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$  和  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  主要由陆源来补充。 $\text{NH}_4\text{-N}$  与盐度正相关程度较明显( $r = 0.872$ ), 也就是说外海高盐水含有较高浓度的  $\text{NH}_4\text{-N}$ , 其中暗示着本水域  $\text{NH}_4\text{-N}$  的补充以自身的生物、物理和化学循环为主(Cochlan, 1986)。只有  $\text{NO}_2\text{-N}$  与盐度基本上没有相关性( $r = 0.006$ ), 潮汐对观测水域  $\text{NO}_2\text{-N}$  影响不明显。王正方(1983)、黄尚高(1986)曾用类似方法对长江口水域的盐度与营养盐进行相关分析, 本研究所得的结论与之基本一致。

**2.2 赤潮发生过程营养盐的变化** 从图 2 可以看出, 临近赤潮发生时, 表层水体营养盐浓度除  $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$  外都明显增高; 随着赤潮的发生及发展,  $\text{PO}_4\text{-P}$  和  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  的浓度有不同程度下降, 其中  $\text{PO}_4\text{-P}$  在赤潮发育盛期几乎消耗殆尽;  $\text{NH}_4\text{-N}$  虽然在赤潮维持阶段无明显变化, 但在消亡期浓度急剧下降, 表层水体平均测值从发生前的  $2.43 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$  降至  $0.74 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ , 最低 14 日 20 时的数值仅  $0.25 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ , 而且恢复速度也比较慢, 在赤潮消失后 16h, 表层水体的  $\text{NH}_4\text{-N}$  值只有赤潮发生前一半左右。 $\text{NO}_2\text{-N}$  在赤潮发生时平均值上升近 1 倍, 赤潮消失后又回落到发生前的水平。 $\text{NO}_3\text{-N}$  在整个赤潮发生过程无明显变化。

纵观整个过程的营养盐变化, 赤潮发生时  $\text{PO}_4\text{-P}$  和  $\text{NH}_4\text{-N}$  浓度下降最明显。浮

1) 长江口中肋骨条藻赤潮发生过程环境要素分析 II. 水温、盐度、DO 及 pH 与赤潮消长的关系。(待发表)

游植物对海水中  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$  及  $\text{NO}_2\text{-N}$  的摄取,主要倾向于利用  $\text{NH}_4\text{-N}$ , 当海域中高浓度的硝酸盐和铵盐共同存在时,浮游植物对硝酸盐的摄取受铵盐含量的控制,它们把铵盐和尿素作为氮源进行选择性地摄取,只有在铵盐和尿素不能满足其生长所必需的氮量情况下才能摄取硝酸盐 (Carpenter, 1985)。 $\text{NO}_2\text{-N}$  在赤潮发生时浓度反而升高则可能与中肋骨条藻存在  $\text{NO}_2\text{-N}$  释放机制有关(朱明远等,1991)。

**2.3 氮磷比 (N/P) 与赤潮的关系** 海洋浮游生物体和大洋海水的 N/P (原子比)值一般接近于 16/1,即 Redfield 比值。当海域营养盐体系发生某种变动时,这种比值也会因此而改变。从赤潮多发区的定点调查结果上看,本水域表层海水 N/P 较高,3 个水层的平均 N/P 值及其周日波动范围分别为 44.6, 32.7, 15.6 和 21.6—52.8, 19.4—36.2, 8.8—17.4。越接近底层,水体的 N/P 越接近于正常大洋海水比值,这说明多发区水域表层水体受大陆径流影响较显著,而底层尚保留外海水的性质;各水层 N/P 值周日变化幅度都比较大,最大值与最小值之差在 1 倍左右,这种变化显然与潮汐的作用有关。

赤潮发生时,表层水体的 N/P 值急剧上升,平均值从发生前的 44.6 升至 258.2, 最大值达 450.0, 4m 和底层水体的 N/P 值也有一定的上升。赤潮生物对溶解态无机氮、磷的吸收基本上按 Redfield 比量进行,可以认为本次赤潮的  $\text{PO}_4\text{-P}$  为营养盐的主要限制因子。赤潮消失后, N/P 值又趋回落,由于占无机氮总量绝大部分的  $\text{NO}_3\text{-N}$  在整个过程变化不大,赤潮发生时 N/P 升高主要靠  $\text{PO}_4\text{-P}$  降低所引起,而且浮游植物对各形态无机氮的吸收以  $\text{NH}_4\text{-N}$  为主,考察  $(\text{NH}_4\text{-N}):(\text{PO}_4\text{-P})$  值波动则更能直接反映营养盐与浮游植物活动的关系。

**2.4 赤潮发生过程营养盐的消耗与再生** 海水透光带的营养盐含量与浮游植物生物量有密切关系 (Eppley, 1979)。由图 3 可见,赤潮生物量 ( $\ln N$ ) 与  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$  和  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  值呈负相关,与  $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$  和 N/P 值呈正相关。当中肋骨条藻暴发繁殖时,水体中  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$  和  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  含量被大量消耗而明显降低, $\text{NO}_3\text{-N}$  和  $\text{NO}_2\text{-N}$  被利用程度不大。赤潮进入消亡期,浮游植物个体开始分解,水体中  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  和  $\text{NO}_3\text{-N}$  很快恢复到发生前水平;被浮游植物利用较显著的  $\text{NH}_4\text{-N}$  再生主要靠自身矿化过程来获得,夏季高温条件下  $\text{NH}_4\text{-N}$  再循环周期一般在 4.3—6.8h (Carpenter, 1985);此外,由于多发区水域盐度与  $\text{PO}_4\text{-P}$  呈显著负相关,大陆径流的补充似乎是  $\text{PO}_4\text{-P}$  再生的主要方式。

### 3 结语

**3.1** 观测海域营养盐浓度普遍较高,表层水体的  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$  和  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  平均值分别为: 36.6, 0.64, 2.43, 0.83, 34.7( $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ )。  $\text{NO}_3\text{-N}$  和  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  浓度自表层至底层大体呈下降趋势,  $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$  和  $\text{PO}_4\text{-P}$  则相反。

**3.2** 表层水体各营养盐要素均在不同程度上存在周日波动特征,其中  $\text{NO}_3\text{-N}$  的极值相差在 1 倍以上。相关分析表明,盐度与  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$  和  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  呈负相关,与  $\text{NH}_4\text{-N}$  呈正相关,而与  $\text{NO}_2\text{-N}$  相关性不明显。

**3.3** 赤潮发生时,中肋骨条藻对  $\text{PO}_4\text{-P}$ ,  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  和  $\text{NH}_4\text{-N}$  都有一定吸收,其中  $\text{PO}_4\text{-P}$  在赤潮发育盛期几乎消耗殆尽。 $\text{NO}_2\text{-N}$  平均值在赤潮发生时反而上升近 1 倍,只有  $\text{NO}_3\text{-N}$  在整个过程变化不大。N/P 值在赤潮发生时急剧上升,峰值达 450.0。所以,  $\text{PO}_4\text{-P}$  为本

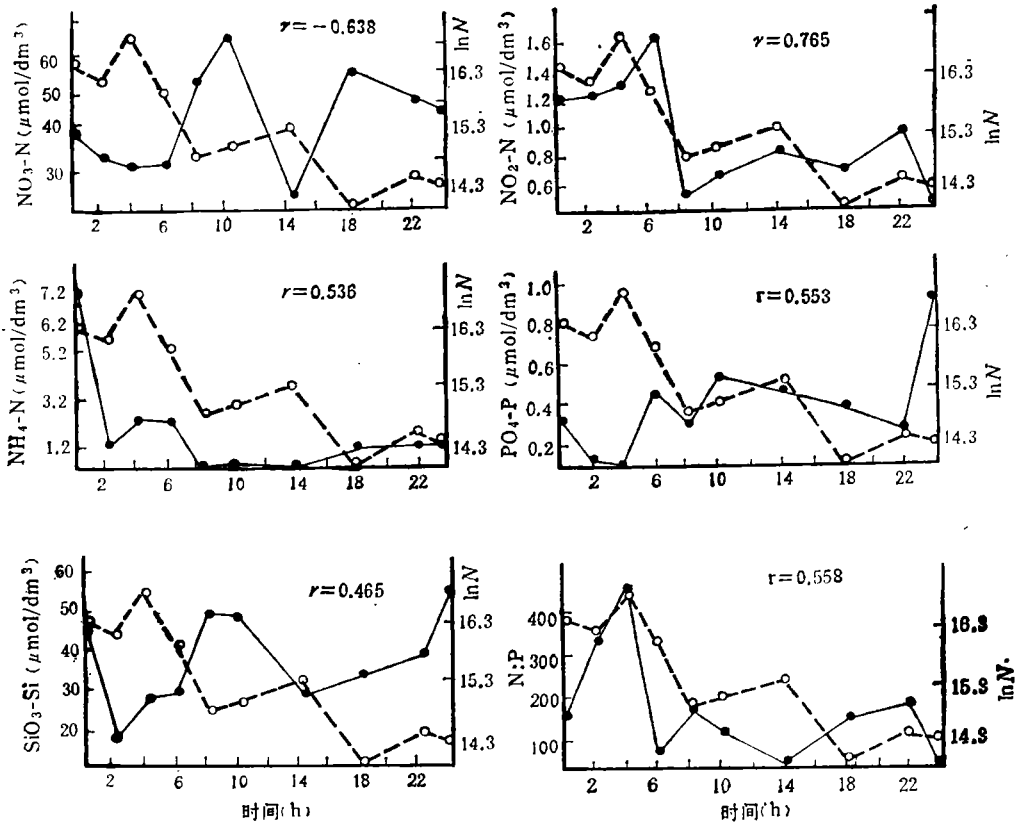


图3 赤潮消亡过程表层水体营养盐与生物量关系

Fig. 3 Relationship of nutrients in surface water and cell numbers (lnN) during red tide disappearance

时间区段: 6月14日12时—15日12时。—●—营养盐, ---○---生物量。

次赤潮营养盐的主要限制因子。

3.4 不同形态营养盐在赤潮消亡后再生方式不尽相同, 其中 NH<sub>4</sub>-N 靠自身矿化过程来获得, PO<sub>4</sub>-P 和 SiO<sub>3</sub>-Si 则以大陆径流的补充为主。

### 参 考 文 献

王正方等, 1983, 长江口营养盐 (N, P, Si) 分布与变化特征, 海洋与湖沼, 14(4): 324—332.  
 朱明远等, 1991, 三角褐指藻的亚硝酸盐释放及其生态意义, 青岛海洋大学学报, 21(2): 83—89.  
 洪君超等, 1989, 长江口外及邻近海区赤潮多发区的分析与探讨, 暨南大学学报, 赤潮研究专刊: 40—51.  
 徐恒振, 1988, 沿岸海域氮的动态, 海洋环境科学, 7(1): 40—45.  
 黄尚高, 1986, 长江口水体活性硅、氮、磷含量的时空变化及相互关系, 台湾海峡, 5(2): 114—123.  
 Carpenter, E. J., 1985, Nitrogenous nutrient uptake, primary production, and species composition of phytoplankton in Carmans River estuary, Long Island, Limnol. Oceanogr., 30(3):513—526.  
 Cochlan, W. P., 1986, Seasonal study of uptake and regeneration of nitrogen on the Scotian shelf, Contin. Shelf Res., 5(5): 555—557.  
 Eppley, R.W., 1979, Nitrate and phytoplankton production in southern California coastal waters, Contri., 49: 483—494.

ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL FACTORS DURING  
OCCURRENCE OF *SKELETONEMA COSTAUM* RED  
TIDE IN CHANGJIANG RIVER ESTUARY  
—THE NUTRIENT STATE

Hong Junchao, Huang Xiuqing, Jiang Xiaoshan, Wang Guilan  
(East China Sea Monitoring Center, SOA, Shanghai 200137)

ABSTRACT

Eutrophication of seawater is the main cause of red tide. The nutrient concentrations of surface water were relatively higher in the red tide frequent area of the Changjiang River estuary (by *Skeletonema costatum*). Before red tide occurs, the values of  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$ ,  $\text{SiO}_3\text{-Si}$ , N/P averaged 36.6, 0.64, 2.43, 0.83, 34.7 ( $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ) and 44.6 respectively and fluctuated daily. The value of  $\text{NO}_3\text{-N}$  could vary by more than 100% during 24h. Analysing of the relationship of nutrients and salinity showed that on the surveyed area the replenishment of  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$  and  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  was mainly from coastal freshwater, and that the concentration of  $\text{NH}_4\text{-N}$  was kept normal by its bio-chemical recycling. At the blooming stage, the concentrations of  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$  and  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  in the surface water reduced to some extent.  $\text{PO}_4\text{-P}$  concentration was reduced to 1/3 that of the original concentration. The concentration of  $\text{NO}_3\text{-N}$  tended to increase during the peak of red tide when the value of N/P also increased rapidly to a maximum of 450.0. During the bloom, the relationships between biomass and  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$  and  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  showed negative correlations, but that between  $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$  and N/P showed positive correlations. After red tide disappeared, the values of  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$  and  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  returned rapidly to normal. The concentration of  $\text{NH}_4\text{-N}$  was slightly higher during the peak of bloom but decreased obviously during the decline phase but renormalized after some time.

**Key words** Changjiang River estuary *Skeletonema costatum* Red tide  
Nutrient