

胶州湾中肋骨条藻赤潮与环境因子的关系*

霍文毅 俞志明 邹景忠 宋秀贤 郝建华

(中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

提要 1998 年 7 月 3—8 日胶州湾女姑山增殖海域发生一次中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*) 赤潮, 对该次赤潮生消全过程环境因子变化的监测分析表明: 该养殖海域表层水体溶解态无机氮、无机磷、可溶性铁和锰含量高, 为赤潮的发生提供了必需的营养基础; 6 月 30 日—7 月 1 日较强的降雨过程使水体在以后两天中形成了高温、低盐、富营养的环境, 有利于中肋骨条藻的快速增殖并直接导致了赤潮的爆发; 7 月 3—8 日天气持续的高温和静风使赤潮得以维持, 随后磷、硅的耗尽使赤潮逐步走向消亡。应用相关分析和主成分分析, 研究了赤潮与环境因子的关系。结果表明, 影响本次赤潮的重要环境因子有: 盐度、水温、硅酸盐、磷酸盐。

关键词 胶州湾, 中肋骨条藻, 环境因子, 统计分析

中图分类号 P949.24

中肋骨条藻是中国东部沿海一种数量众多且最常见的硅藻, 在黄、东、南海均有该种赤潮纪录(黄奕华等, 1997; 洪君超等, 1994; 齐雨藻等, 1989; 李铁等, 1999, 2000a, b; 黄长江等, 2000a, b, 2001)。在胶州湾已记录的 40 余种赤潮生物中, 中肋骨条藻是主要优势种之一(郭玉洁等, 1992)。本文通过对 1998 年 7 月在胶州湾女姑山增殖海域发生的一次中肋骨条藻赤潮生消动态过程的跟踪监测, 分析了中肋骨条藻赤潮发生过程中环境因子的变化规律, 研究了赤潮藻生物量变化与环境因子的消长关系。

1 样品采集及分析

在胶州湾典型增殖区女姑山海域共布设了 5 个定点测站(图 1)。调查时间为 1998 年 5—9 月, 采样频率为每周一次, 赤潮发生期间, 每天采样一次。由于水深小于 4m, 水样只取表层。

叶绿素 *a* 的分析和测定按联合国教科文组织推荐方法, 采用 751 型分光光度计进行 (SCOR- UNESCO, 1966), 并根据 Jeffrey 等(1975)提出的公式计算其含量(单位为 mg/m^3)。监测的环境参数包括: T、S、pH、DO、COD、BOD、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 、 $\text{SiO}_2^{3-} - \text{Si}$ 、 Fe^{3+} 、 Mn^{2+} , 测定方法按《海洋监测规范》(国家海洋局, 1991)进行。

2 研究结果

7月3日上午11时45分, 在胶州湾女姑山海域近岸($36^\circ 14' \text{N}$, $120^\circ 19' \text{E}$), 发现水色

* 国家自然科学基金九五重大项目, 39790110 号; 国家自然科学基金资助项目, 49976029 号。霍文毅, 男, 出生于 1969 年 12 月, 副研究员, E-mail: whuo@mail.com

收稿日期: 2000-01-28; 收修改稿日期: 2000-10-29

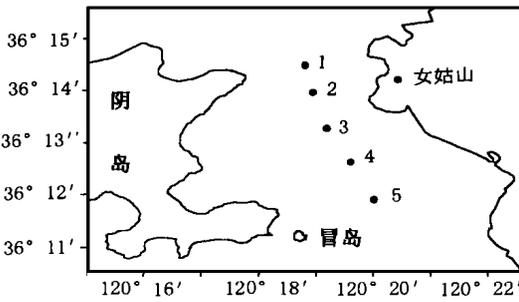


图 1 采样站位示意图

Fig. 1 Sampling sites in Jiaozhou Bay

呈浅褐色,与正常近岸水色存在明显的差异,经取样镜检,表层水体中肋骨条藻数量达 4.5×10^6 个/L,约占浮游植物总量的95%,参照安达六郎(1972)赤潮生物数量的判断标准($> 10^6$ 个/L),并结合水体 pH > 8.4 ,认定为中肋骨条藻赤潮。7月4日,调用中国科学院海洋研究所的“科交2号”在整个胶州湾进行了大范围的跟踪监测,发现在胶州湾东北部 $36^\circ 10' N$ 以北、 $120^\circ 18' E$ 以东海域水色呈浅褐色,并呈明显的条带状或斑块状分布,较7月3日已

有所发展,赤潮区总面积约为 10km^2 。从7月4-5日为赤潮的维持期,且近岸水色较深,5日下午开始,赤潮逐渐进入消亡期,至7月8日各站水色已恢复到浅绿色,叶绿素 *a* 浓度也已恢复到赤潮发生前的正常水平,表明该次赤潮结束。

2.1 赤潮发生前各环境要素浓度范围

赤潮发生前该海区叶绿素 *a* 的含量为 $3.46\text{mg}/\text{m}^3$ ($1.84-5.44\text{mg}/\text{m}^3$),与中国沿海及世界其它一些海域相比,尚属正常范围(邹景忠等,1985)。平均水温为 22.7°C ($21.8-23.4^\circ\text{C}$),盐度为 31.24(31.20-31.26),pH 值为 7.85(7.83-7.89)。

赤潮发生前该海区总无机氮含量(表1)显著高于夏季胶州湾全湾无机氮的平均含量,且主要以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 存在,而胶州湾全湾则主要表现为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 是无机氮的主要存在形态,说明增养殖海域的营养盐结构与自然海区存在较大差别。该区磷酸盐、硅酸盐的含量略高于全湾的平均水平,但相对于无机氮含量则表现为相对较低。

表 1 赤潮发生前胶州湾女姑山海域营养盐含量($\mu\text{mol}/\text{L}$)

Tab. 1 Concentration ($\mu\text{mol}/\text{L}$) of nutrients before occurrence of red tide in N gushan of Jiaozhou Bay

海 区	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	$\text{NO}_2^- - \text{N}$	TIN	$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$	$\text{SiO}_3^{2-} - \text{Si}$	$\Sigma\text{N} - \text{N}/\text{P}$	$\text{Si}/\Sigma\text{N} - \text{N}$
女姑山	10.42	12.16	2.74	25.32	0.51	5.64	49.6	0.22
胶州湾 ¹⁾	7.5	1.3	0.69	9.49	0.36	3.90	26.4	0.41

1) 胶州湾夏季营养盐的平均含量,引自沈志良(1997)

1) Average concentration of nutrients in summer in Jiaozhou Bay (from Shen Z L, 1997)

已有研究表明(丁文兰,1986;吴永成等,1992),该区潮流流速较小,水体混合较弱,且海水自净能力已达到极限,因此,由生活污水和养殖废水携入的大量营养物质可在这一水域停留较长时间,对藻类的生长繁殖十分有利。

2.2 赤潮发生过程中各环境要素的变化

图2为赤潮前后及发生全过程中各环境要素的变化。

2.2.1 营养盐含量的变化 赤潮发生前,各站表层水体无机氮含量明显增高,可能与6月30日和7月1日的降雨将大量的陆源污染物带入近海有关,这为中肋骨条藻的快速增殖提供了必须的营养基础;随着赤潮的发生与发展,表层水体 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含

量呈下降趋势,在中肋骨条藻种群数量达到最大时, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度分别由赤潮发生初期的 $11.51\mu\text{mol/L}$ 和 $15.54\mu\text{mol/L}$ 降为 $10.39\mu\text{mol/L}$ 和 $7.06\mu\text{mol/L}$,但降幅较小;在赤潮进入消亡期后,各种形态无机氮浓度逐步回升,并超过赤潮发生前的水平,可能与赤潮后期中肋骨条藻大量死亡导致对陆源迅速补充的无机氮盐利用能力降低和死亡藻体内营养盐的再释放有关。在整个赤潮发生和发展过程中,表层水体 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 和 $\text{SiO}_3^{2-} - \text{Si}$ 都呈下降趋势,其平均浓度分别由赤潮发生前的 $0.51\mu\text{mol/L}$ 和 $5.64\mu\text{mol/L}$ 降至 $0.06\mu\text{mol/L}$ 和 $0.72\mu\text{mol/L}$;在赤潮发育盛期, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 和 $\text{SiO}_3^{2-} - \text{Si}$ 几乎消耗殆尽(5 个站点中有 3 个站点降至检出限以下);赤潮进入消亡期后, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度略有回升,但一直保持较低水平,而 $\text{SiO}_3^{2-} - \text{Si}$ 则恢复较快,至 7 月 6 日已恢复到赤潮发生前的水平,并一直保持较高浓度($> 10\mu\text{mol/L}$)。

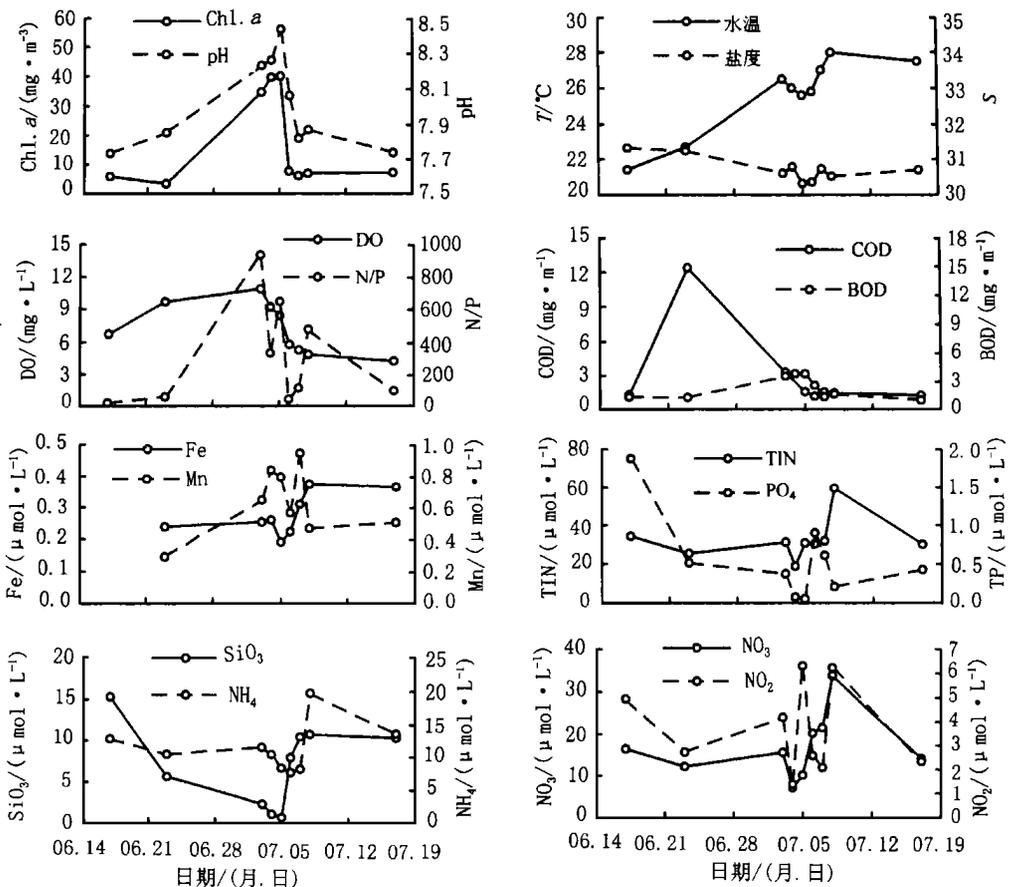


图 2 赤潮发生期间各环境要素的变化

Fig. 2 Variation of environmental factors during the red tides

2.2.2 $\Sigma\text{N} - \text{N/P}$ 的变化 本次研究得出该海域在未发生赤潮期间 $\Sigma\text{N} - \text{N/P}$ 约为 25 (22—32), 该数值与胶州湾生态实验站 1991 年 5 月—1993 年 2 月共 12 个航次的研究结果相近($\Sigma\text{N} - \text{N/P} = 29$) (张均顺等, 1997), 但比大洋海水和浮游生物体的 Redfield 比值

($\Sigma N - N/P = 16$)高。在该次赤潮发生初期,表层水体的N/P迅速上升,由平均的25上升至56.7,在赤潮发展至维持阶段,N/P的平均值上升至938,最大值达3639,直至 $PO_4^{3-} - P$ 被消耗殆尽;在赤潮消亡阶段,N/P重新恢复到赤潮发生前的水平。赤潮生物对无机氮、磷的吸收基本上按Redfield比量进行,赤潮发生过程中N/P的升高主要由 $PO_4^{3-} - P$ 浓度的降低所致。

2.2.3 微量元素(Fe, Mn)的变化 赤潮发生时,水溶性铁(Fe^{3+})的平均含量从赤潮发生前的 $0.24\mu\text{mol/L}$ 降至 $0.19\mu\text{mol/L}$,低于赤潮发生前各航次的平均值,表明中肋骨条藻生长过程需要从水中吸收可溶性铁,至7月6日赤潮进入消亡期后,铁的含量迅速恢复,可能与藻类死亡分解导致铁的重新释放有关。在赤潮发展至形成的整个过程中锰的含量波动较大,看不出明显的规律性。

2.2.4 其它环境要素的变化 赤潮发生前6月30日至7月1日持续的降雨过程使表层水体盐度由降雨前的31.24降至30.59,水温则由赤潮发生前的 22.7°C 上升至 26.5°C ,升高约 4°C 。在整个赤潮发生过程中,盐度和水温分别一直在30.31—30.78和 $25.6 - 28.0^\circ\text{C}$ 间波动。DO和pH值的变化同生物量的变化呈较好的线性关系,这同赤潮生物消长有关,当藻类快速增殖时,大量吸收 CO_2 并放出 O_2 ,致使海水DO和pH值同时增高;当藻类开始死亡时,藻体被细菌等微生物分解,大量消耗水体DO并放出 CO_2 ,使水体DO和pH同时降低。

2.3 赤潮发生过程的统计分析

2.3.1 相关分析 相关分析结果(表2)表明,与叶绿素a呈显著正相关的环境因子有pH、DO,呈显著负相关的环境因子有盐度、 PO_4^{3-} 、 SiO_3^{2-} ;叶绿素a与T、COD、BOD、 Fe^{3+} 、 NH_4^+ 、 NO_2^- 的相关性不显著,但与 Mn^{2+} 有一定程度正相关,与 NO_3^- 有一定程度的负相关。

表2 叶绿素a与环境因子的Spearman秩相关系数($n = 47$)

Tab. 2 Spearman rank coefficient ($n = 47$) of chlorophyll a and environmental factors

Chl. a	pH ¹⁾	T	S ¹⁾	DO ²⁾	COD	BOD	PO_4^{3-} ¹⁾	SiO_3^{2-} ²⁾	Fe^{3+}	Mn^{2+}	NH_4^+	NO_3^-	NO_2^-
R	0.52	0.20	-0.49	0.29	0.19	0.18	-0.42	-0.32	0.00	0.22	0.06	-0.21	0.07
t_s	4.07	1.34	-3.81	2.02	1.31	1.23	-2.92	-2.15	-0.02	1.52	0.39	-1.47	0.44
α	< 0.01	0.19	< 0.01	< 0.05	0.20	> 0.20	< 0.01	< 0.05	> 0.20	0.13	> 0.20	0.15	> 0.20

1) 0.01 显著性水平下相关($t_{0.01,45} = 2.58$); 2) 0.05 显著性水平下相关($t_{0.05,45} = 1.96$)

1) Significance correlation for the 0.01 confidence level ($t_{0.01,45} = 2.58$); 2) Significance correlation for the 0.05 confidence level ($t_{0.05,45} = 1.96$)

R 为 Spearman 秩相关系数; t_s 为 t - 检验统计量; α 为显著性水平

R is the Spearman rank correlation; t_s is the t - test critical value; and α is the significant level

2.3.2 主成分分析 使用1998年6月17日—7月17日赤潮发生前后及赤潮发生全过程共47个表层样本,对环境因子进行主成分分析,为充分提取各环境因子的信息,计算中使用了全部监测的环境因子,结果(表3)共提取出4个主成分(反映了全部信息量的79.5%);对第一主成分贡献较大的主要是Chl. a、pH、DO、 PO_4^{3-} 、 SiO_3^{2-} ;对第二主成分贡献较大的主要是水温和盐度;对第三主成分贡献较大的主要是氮盐;对第四主成分贡献较

表 3 各主成分因子载荷

Tab. 3 Factors loading of each principal components

	Chl. <i>a</i>	pH	DO	PO ₄ ³⁻	Si	S	T	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	Fe ³⁺	Mn ²⁺	CR ¹⁾ (%)
Z1	-0.71	-0.88	-0.73	0.68	0.92	0.23	0.30	0.08	-0.03	0.20	-0.12	31.47
Z2	0.42	0.35	-0.44	0.13	0.04	-0.90	0.72	0.12	0.15	-0.04	0.24	53.76
Z3	-0.11	0.04	0.03	0.44	-0.12	0.08	-0.40	-0.90	-0.85	0.15	0.20	70.70
Z4	0.09	0.04	0.15	0.28	-0.04	0.01	-0.26	0.22	0.15	-0.88	-0.81	79.49

1) CR 为主成分累计贡献率

1) CR is the cumulative proportion of principal component

大的主要是微量营养元素铁和锰。结合相关分析的结果对各主成分进行分析, 第一主成分中的 Chl. *a* 主要反映了海水的生物量状况, pH、DO 则是与赤潮生物量(叶绿素 *a*) 密切相关的化学因子, 尽管 pH、DO 均与 Chl. *a* 呈显著正相关, 但 pH、DO 的变化主要受赤潮生物迅速增殖的影响, 而非赤潮发生的诱因, 但 PO₄³⁻、SiO₃²⁻ 也出现在第一主成分, 结合相关分析, PO₄³⁻、SiO₃²⁻ 与叶绿素 *a* 呈显著负相关, 说明二者共同构成了本次赤潮发生的营养盐限制因子, 因此, 第一主成分较多反映了海水的生物量状况和藻类增殖的营养限制因子; 第二主成分中的水温和盐度主要表示海水的物理水文状况, 由相关分析可知, Chl. *a* 和盐度呈显著负相关, 因此, 第二主成分主要反映赤潮发生前的持续降雨过程对赤潮形成的影响; 第三主成分和第四主成分则较多反映了海水的营养状况。

3 讨论

3.1 赤潮与温度、盐度的关系

中肋骨条藻是一种广温、广盐的近岸性硅藻, 在水温为 0—37 °C、盐度为 13—36 范围内均可生长, 但其最适增殖温、盐范围则为 24—28 °C 和 20—30。胶州湾北部每年 6 至 7 月份出现以中肋骨条藻为优势种的浮游植物数量高峰, 这期间温度和盐度一般在 23.0—28.0 °C 和 31.5—32.3 之间波动(郭玉洁等, 1992); 对 1990 年 6 月 9—25 日东海赤潮多发区连续 5 次的中肋骨条藻赤潮监测表明, 在赤潮发生期间, 水温和盐度范围分别为 21.8—25.1 °C 和 18.7—23.9(王桂兰等, 1993); 而在 1991 年 8 月长江口东北部嵎山附近海域中肋骨条藻赤潮发生期间, 水温范围是 24.0—26.4 °C, 盐度范围为 21.5—28.0(洪君超等, 1993)。本次赤潮发生时, 水温平均为 26.5 °C, 为中肋骨条藻增殖的最适温度, 赤潮发生前的降雨过程则使盐度由此前 31.24 降至 30.59。Yamamoto 等(1995) 对中肋骨条藻的培养实验表明: 在硅限制条件下, 中肋骨条藻对硅的吸收率随盐度的降低而迅速升高, 说明盐度降低对中肋骨条藻的生长有显著促进作用。结合本研究说明: 6 月 30 日和 7 月 1 日降雨过程使水温升高, 盐度降低, 为中肋骨条藻的快速增殖提供了良好的物理环境并直接导致了 7 月 3 日赤潮的暴发。

3.2 赤潮与营养盐的关系

一般认为海域水体富营养化是赤潮发生的基础。对该海域水化学因子的监测分析表明, 该海域无机氮、磷和硅的平均含量分别为 25.32 μmol/L、0.51 μmol/L 和 5.64 μmol/L, 明显高于胶州湾全湾夏季表层海水无机氮、磷和硅的平均含量(分别为 9.49 μmol/L、0.36 μmol/L 和 3.90 μmol/L); 从营养盐比例看, 同全湾相比, 该海域无机氮含量较高, 而

无机磷和硅相对于无机氮则显得较低。在本次赤潮发育盛期, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 和 $\text{SiO}_3^{2-} - \text{Si}$ 迅速被消耗殆尽并使赤潮逐步走向消亡。关于磷是胶州湾浮游植物生长的限制因子早有文献报道(沈志良, 1994), 但近期张均顺等(1997)对胶州湾营养盐结构变化的研究表明, 胶州湾表层海水溶解无机氮作为浮游植物生长限制因子的出现率极小或接近零, 而溶解无机硅的出现率在迅速增长, 这与硅也成为本次赤潮中肋骨条藻增殖限制因子的结果相一致。

从赤潮发生过程中各种形态无机氮含量变化看, 尽管各种形态无机氮呈高一低一高的波动趋势, 但总体上并不表现出与叶绿素 a 含量的负相关, 只有 NO_3^- 同叶绿素 a 存在一定程度的负相关, 与 1991 年 8 月长江口嵎山海域中肋骨条藻赤潮发生时的现象(洪君超等, 1993) 相似。

3.3 赤潮与 Fe 和 Mn 的关系

研究表明: Fe 为多种酶系的辅助因子, 对于细胞色素、铁氧化还原蛋白和铁硫基蛋白, 铁是不可缺乏的元素, 藻类光合作用依赖于铁; 同时, 铁是硝酸盐、亚硝酸盐还原酶系的重要组分, 对增强藻类对硝酸盐、亚硝酸盐的还原效率、转移速率作用十分显著(陈慈美等, 1996)。胶州湾海域水体中铁、锰含量较高(表 4), 变化较大, 为骨条藻赤潮的生长、繁殖提供了有利条件。尽管统计分析看不出赤潮生物量变化同水体中铁、锰含量变化的规律性, 但该次赤潮发生过程中铁浓度的变化表明, 铁元素也应是该赤潮发生的重要环境条件之一。

表 4 赤潮发生前胶州湾女姑山海域 Fe、Mn 含量($\mu\text{mol/L}$)

Tab. 4 Concentrations ($\mu\text{mol/L}$) of dissolved Fe, Mn before occurrence of red tide near N gushan, Jiaozhou Bay

日期(月·日)	05. 18	05. 24	06. 08	06. 17	06. 23
Fe	0. 36	0. 57	0. 82	0. 31	0. 24
Mn	0. 87	0. 44	0. 75	1. 05	0. 29

4 结论

4.1 该海域表层水体中无机氮、磷和硅含量较胶州湾全湾高, 丰富的营养盐构成了本次赤潮发生的营养基础。

4.2 赤潮发生前的降雨过程使水温升高, 盐度降低, 有利于中肋骨条藻的快速增殖并直接导致了赤潮的暴发, 降雨过后持续近 1 周左右的高温、静风天气使赤潮得以维持。

4.3 从营养盐结构看, 该海域无机氮含量较高, 无机磷和硅则显得相对匮乏。在赤潮形成至发展过程中, 各种营养盐含量均有降低, 但无机氮降低较小, 而无机磷和硅则降低明显, 在赤潮发育盛期磷酸盐和硅酸盐的迅速耗尽使得本次赤潮逐步走向消亡, 表明磷酸盐和硅酸盐共同构成了本次赤潮营养盐主要限制因子。

4.4 据赤潮消亡过程中各营养盐含量变化, 赤潮过后无机氮和硅恢复较快, 而磷酸盐则一直保持较低水平。

4.5 表层水体可溶性铁、锰含量较高, 且在赤潮发生过程中表层水体中铁含量略有降低, 说明铁对本次赤潮形成有一定促进作用。

4.6 统计分析结果证实了影响本次赤潮的重要环境因子有盐度、水温、 $\text{SiO}_3^{2-} - \text{Si}$ 和

$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 。其中水温、盐度的变化直接说明了 6 月 30 日—7 月 1 日的强降雨过程是本次赤潮形成的主要诱因。

致谢 李全生、任广法、马 丽、孙晓霞、张 诚、张永山、张建华等同志参与了本次野外采样和室内样品分析工作, 谨致谢忱。

参 考 文 献

- 丁文兰, 1986. 胶州湾的潮汐与潮流. 海洋科学集刊, 26: 1—25
- 王桂兰, 黄秀清, 蒋晓山等, 1993. 长江口中肋骨条藻赤潮的分布特点. 海洋科学, 3: 51—54
- 齐雨藻, 张家平, 吴坤东等, 1989. 中国沿海的赤潮——深圳湾富营养化与赤潮的研究. 暨南大学学报(赤潮研究专刊), 10—21
- 安达六郎, 1972. 三重县水产学报纪要. 9(1): 1—149
- 李 铁, 史致丽, 仇赤斌等, 1999. 中肋骨条藻和新月菱形藻对营养盐的吸收速率及环境因素影响的研究. 海洋与湖沼, 30(6): 640—645
- 李 铁, 胡立阁, 史致丽, 2000a. 营养盐对中肋骨条藻和新月菱形藻生长及氮磷组成的影响. 海洋与湖沼, 31(1): 46—52
- 李 铁, 史致丽, 李 俊等, 2000b. 营养盐对中肋骨条藻和新月菱形藻生长及氮磷组成的影响. 海洋与湖沼, 31(3): 239—245
- 陈慈美, 周慈由, 郑爱榕等, 1996. 中肋骨条藻增殖的环境制约作用—— $\text{Fe}(\text{III})$ 与 N、Mn、光、温交互作用对藻生化组成的效应. 海洋通报, 15(2): 37—42
- 沈志良, 1994. 胶州湾水域的营养盐. 海洋科学集刊, 35: 115—129
- 吴永成, 王从敏, 张以恩等, 1992. 海水交换和潮合扩散. 见: 刘瑞玉主编. 胶州湾生态学和生物资源. 北京: 科学出版社, 57—72
- 张均顺, 沈志良, 1997. 胶州湾营养盐结构变化的研究. 海洋与湖沼, 28(5): 529—535
- 邹景忠, 董丽萍, 秦保平等, 1985. 渤海湾遥感试验区海水叶绿素含量的分布及其影响因素. 见: 中国科学院环境科学委员会和天津市环保局编. 天津—渤海地区环境遥感论文集. 北京: 科学出版社, 173—179
- 国家海洋局, 1991. 海洋监测规范(HY003·4—91). 北京: 海洋出版社, 178—282
- 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—170
- 洪君超, 黄秀清, 蒋晓山等, 1993. 崂山水域中肋骨条藻赤潮发生过程主导因子分析. 海洋学报, 15(6): 135—141
- 洪君超, 黄秀清, 蒋晓山等, 1994. 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. 海洋与湖沼, 25(2): 179—184
- 黄奕华, 楚建华, 齐雨藻等, 1997. 南海大鹏湾盐田海域骨条藻数量多元分析. 海洋与湖沼, 28(2): 121—127
- 黄长江, 董巧香, 2000a. 1998 年春季珠江口海域大规模赤潮原因生物的形态分类和生物特征 I. 海洋与湖沼, 31(2): 197—204
- 黄长江, 董巧香, 2000b. 1998 年春季珠江口海域大规模赤潮原因生物的形态分类和生物特征 II. 海洋与湖沼, 31(3): 233—238
- 黄长江, 董巧香, 2001. 1998 年春季珠江口海域大规模赤潮原因生物的形态分类和生物学特征 III. 海洋与湖沼, 32(1): 1—6
- Jeffrey S W, Humphrey G F, 1975. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton. Biochimie and Physiologia der Pflanzen, 167: 191—194
- SCOR—UNESCO, 1966. Determination of photosynthetic pigments in seawater. Monographs on Oceanography Methodology (I), Paris: UNESCO, 69
- Yamamoto T, Tsuchiya H, 1995. Physiological responses of Si—limited *Skeletonema costatum* to silicate supply with salinity decrease. Bulletin of Plankton Society, 42(1): 1—17

OUTBREAK OF *SKELETONEMA COSTATUM* RED TIDE AND ITS RELATIONS TO ENVIRONMENTAL FACTORS IN JIAOZHOU BAY

HUO Wei-Yi, YU Zhi-Ming, ZOU Jing-Zhong, SONG Xi-Xian, HAO Jian-Hua

(*Institute of Oceanology, The Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071*)

Abstract A *Skeletonema costatum* red tide occurred on July 3—8, 1998 in Jiaozhou Bay. Variations of ecological factors and their influence upon red tide organisms were determined. Relatively high contents of nutrients, iron and manganese were responsible for the growth of *Skeletonema costatum*. The outbreak of the *Skeletonema costatum* red tide has a close relationship with the strong rain on June 30 and July 1, 1998. After the rain, warm, low-salinity and eutrophic water resulted in the rapid proliferation of *Skeletonema costatum*. In terms of the nutrients structure, compared with TIN (total inorganic nitrogen), the concentration of silicate and phosphate were relatively deficient. At the developing stage, the concentration of various nutrients and iron in surface water as well as TIN were declining due to the declination of nitrate. Among the three forms of TIN, it is possible that *Skeletonema costatum* preferred to absorb nitrate. At the blooming stage, the exhaustion of phosphate and silicate led to the death of *Skeletonema costatum* and disappearance of red tide. After the bloom disappeared, the contents of TIN and silicate returned rapidly to normal, but the concentration of phosphate still remained low-level and renormalized after a considerable time. Two statistical methods (correlation analysis and principal component analysis) were used to determine the mechanism of red tide. Combined results show that temperature, salinity, silicate and phosphate were the critical ecological factors affecting the occurrence of the *Skeletonema costatum* red tide.

Key words Jiaozhou Bay, *Skeletonema costatum*, Environmental factors, Statistics analysis