

文章编号: 1000-0615(2001)03-0222-05

胶州湾浮动弯角藻赤潮生消动态过程及其成因分析

霍文毅, 俞志明, 邹景忠, 韩笑天

(中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071)

摘要: 分析了1999年6月8日-15日胶州湾东北养殖水域浮动弯角藻赤潮生消动态过程中各环境因子的变化及赤潮成因。结果表明, 该海域无机营养盐含量较高, 为赤潮的发生提供了必需的营养物质; 赤潮发生前天气闷热无雨, 有利于浮动弯角藻的快速生长繁殖; 赤潮形成至发展期该海域盛行南风, 浮动弯角藻的物理性聚集对赤潮迅速形成有重要影响; 赤潮维持阶段天气稳定, 赤潮持续时间较长; 最终无机磷、活性硅酸盐的耗尽使赤潮逐步走向消亡。

关键词: 浮动弯角藻; 生消动态过程; 赤潮; 胶州湾

中图分类号: Q178.1⁺1; S913 **文献标识码:** A

Analysis of dynamic process and the causes of *Eucampia zoodiacus* red tide in Jiaozhou Bay

HUO Wen-yi, YU Zhi-ming, ZOU Jing-zhong, HAN Xiao-tian

(Institute of Oceanology, CAS, Qingdao 266071, China)

Abstract: A red tide caused by *Eucampia zoodiacus*, a kind of coastal eurythermal diatom, occurred from June 8 to June 15, 1999, in mariculture area of Jiaozhou Bay. Variations of abiotic factors were evaluated and the reasons for this red tide were analyzed. Results from in-situ monitoring indicated that the inorganic nutrients average concentration of nitrogen, phosphate and silicate were much higher than that in whole Jiaozhou Bay. The heavier eutrophic water provided macro-nutrients basis that was essential for algal growth and proliferation. The hot and muggy weather before red tide occurrence resulted in high water temperature that created favorable conditions for phytoplankton growth. The southern wind prevailing during blooming had great effects on physical conglomeration of algal cells. The stable synoptic condition made this red tide last for a relatively long time. After June 15, the red tide disappeared gradually due to the depletion of phosphate and silicate.

Key Words: *Eucampia zoodiacus*; bloom/decay dynamic process; red tide; Jiaozhou Bay

获得赤潮生消全过程的监测数据资料, 是分析赤潮发生诱因、提示其发生机制、建立赤潮生态数值模型及开展赤潮预测和防治研究的基础。近三十年, 尽管国内外在这方面作了大量工作^[1-4], 但由于赤潮具有突发性, 难以观测到赤潮发生的全过程, 致使许多问题难以解决。本文报道了国家自然科学基金“中国沿海典型增养殖区有害赤潮发生机制及防治对策研究”重大项目组对1999年6月发生在胶州湾

收稿日期: 2000-11-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(39790110); 中国科学院知识创新工程项目(KZCXZ-206)

第一作者: 霍文毅(1969-), 男, 山西河曲人, 博士, 副研究员, 主要从事海洋环境科学研究, 现在中国科学院南海海洋研究所工作。

E-mail: whuo@scsio.ac.cn

养殖水域的一次浮动弯角藻(*Eucampia zoodiacus*)赤潮生消全过程进行监测的结果,分析了该次赤潮生消过程中各环境因子的变化,结合往年监测资料,进一步探讨了该次赤潮的成因。

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)。调查工作从1997年开始,于每年的6月-9月(北方赤潮多发季节)进行监测,采样频率为每周一次,赤潮发生期间,每天采样一次。在该次赤潮发生高峰期的6月13日至6月15日,进行了连续24h的跟踪监测,每隔2h采样一次,由于该区水深小于4m,在低潮和平潮时水样只采表层。

叶绿素a的分析按联合国教科文组织推荐方法,采用751型分光光度计进行^[5],并根据Jeffrey和Hamphrey^[6]提出的公式计算其含量。

监测的环境参数包括:水温(T)、盐度(S)、pH、溶解氧(DO)、化学需氧量(COD)、生化需氧量(BOD)、硝酸盐(NO₃-N)、亚硝酸盐(NO₂-N)、氨(NH₄-N)、无机磷(PO₄-P)、活性硅酸盐(SiO₃-Si)、铁(Fe³⁺)、锰(Mn²⁺),测定方法按文献^[7]的规定进行。

2 结果

2.1 赤潮的形成、发展和消亡过程

浮动弯角藻系沿岸性广温种,分布广泛,其细胞平均体长为60μm×25μm,据安达六郎^[8]的赤潮判断标准,当每升海水中该种细胞数达3×10⁵个,则达到赤潮密度。1999年6月8日,本项目组对胶州湾东北养殖水域进行第三年度的例行监测,发现S3、S4、S5站溶解氧偏高,经对网采浮游植物进行镜检计数,浮动弯角藻(*E. zoodiacus*)的数量为22.5×10³ cell·L⁻¹,存在发生赤潮的可能性,于6月10日继续进行跟踪监测,发现水色已呈黄褐色,与正常海水水色存在较明显差异,浮动弯角藻的数量已达184×10³ cell·L⁻¹,到6月11日,该藻种群密度迅速增至1 028×10³ cell·L⁻¹,按饭塚昭二^[9]提供的公式计算,从6月8日至6月11日,浮动弯角藻的群生长速度为1.82,即浮动弯角藻每天分裂1.82次,对于自然海域,该生长速度是相当快的,因它实际上已扣除了因藻类被捕食、死亡、沉降等因素影响而减少的数量;6月13日,该种数量达到本次赤潮的最高峰1 324×10³ cell·L⁻¹;随后该种数量急剧下降,至6月15日,水色已逐步恢复正常,6月18日,赤潮完全从该水域消失。

2.2 赤潮生消过程中浮游植物种类组成的变化

对网采浮游植物的种类鉴定结果表明,该水域浮游植物包括浮动弯角藻、掌状冠盖藻(*Staphanophyx palmeriana*)、聚生角刺藻(*Chaetoceros socialis*)、旋链角刺藻(*Chaetoceros curvisetus*)、拟旋链角刺藻(*Chaetoceros psedocurvisetus*)、扭鞘藻(*Streptotheca thamesis*)等,优势种主要有*E. zoodiacus*、*C. socialis*和*C. psedocurvisetus*。在赤潮发展初期的6月8日,*E. zoodiacus*为主要优势种,*C. socialis*则较少见到;至6月10日,*E. zoodiacus*、*C. socialis*和*C. psedocurvisetus*的数量迅速增加,其种群密度分别为184×10³ cell·L⁻¹、314×10³ cell·L⁻¹和53×10³ cell·L⁻¹;6月11日,*E. zoodiacus*的种群密度和*C. socialis*大致相当,分别为1 029×10³ cell·L⁻¹和1 004×10³ cell·L⁻¹(*C. socialis*个体较小,尚未达到赤潮密度),*C. psedocurvisetus*的数量相对较少,为264×10³ cell·L⁻¹;在随后的几天里,*C. socialis*和*C. psedocurvisetus*的数量迅速下降,而*E. zoodiacus*仍保持在10⁵~10⁶ cell·L⁻¹;到6月18日,*E. zoodiacus*在该海区已很少见到。

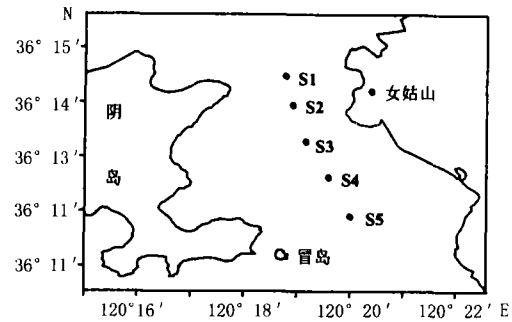


图1 采样站位示意图
Fig. 1 Sampling location in Jiaozhou Bay

2.3 赤潮生消过程中其它环境要素的变化

2.3.1 温度、盐度、pH、DO 和 COD 的变化

本次赤潮发生期间的水温在 20.4~24.8℃ 变动,平均为 23.0℃,盐度变化范围为 29.4~32.9,平均为 31.0。在本次赤潮发生过程中,pH、DO、BOD 和 COD 均出现异常增高现象,在赤潮高峰期,其最高值分别达 8.51、15.7mg·L⁻¹、10.30mg·L⁻¹和 11.0mg·L⁻¹,其变化规律基本上与赤潮生物量的变化呈正相关关系(pH、DO、BOD、COD 和 Chl-a 的相关系数分别为 0.80、0.94、0.88 和 0.92, n=33, α=0.01)。其中,pH 和 DO 的变化同赤潮藻增殖过程中大量吸收水中 CO₂、放出 O₂ 密切相关,而 BOD 则反映水体中可降解有机物的含量水平,赤潮藻从广义上说也是一种可降解有机物,因此,BOD 的高低在一定程度上亦可反映水体中赤潮藻的数量。

2.3.2 营养盐含量的变化

赤潮发生过程中营养盐含量变化见图 2。赤潮发生前,表层水体营养盐含量均较高,无机氮、磷、硅分别为 163.13μmol·L⁻¹、1.47μmol·L⁻¹和 13.22μmol·L⁻¹;随着赤潮的发生与发展,各种营养盐都有不同程度的下降,其中 PO₄ 和 SiO₃ 的降幅十分明显,最低浓度分别降至 0.08μmol·L⁻¹和 0.68 μmol·L⁻¹,同赤潮发生初期相比,最大降幅达 18 和 19 倍;至 6 月 18 日赤潮消失后,PO₄ 和 SiO₃ 又分别恢复到 1.44μmol·L⁻¹和 8.27μmol·L⁻¹,略低于赤潮发生前的水平。从赤潮发生全过程中看,尽管无机氮含量总体上呈下降趋势,但各种形态氮盐的变化不尽相同,NH₄ 的变化与总无机氮(TIN)的变化趋势相似,NO₂ 和 NO₃ 在整个赤潮发生过程中看不出明显的规律性变化,表明浮动弯角藻增殖过程中氮营养代谢主要以吸收 NH₄ 为主。

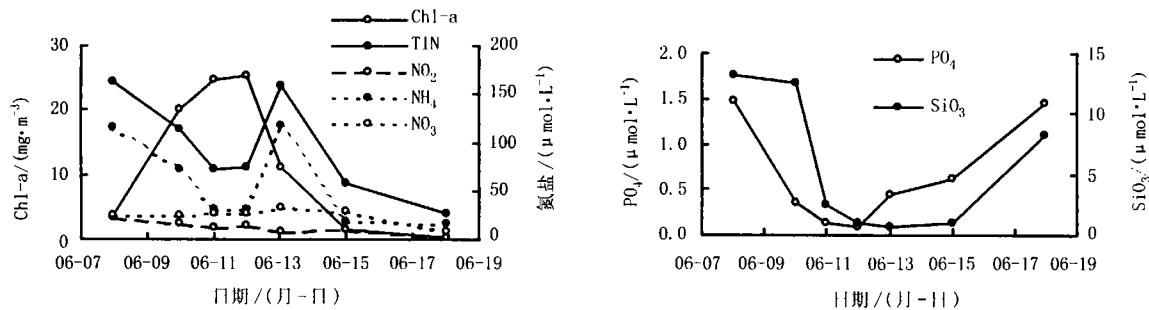


图 2 赤潮发生过程中营养盐含量的变化

Fig.2 Variation of nutrients concentration during red tide

3 讨论

3.1 赤潮生物种间竞争与赤潮发生的关系

综观整个赤潮过程中浮游植物种群组成的变化可以看出,浮动弯角藻是在同聚生角刺藻和拟旋链角刺藻的种群竞争中逐步发展起来的,尤其是浮动弯角藻和聚生角刺藻种群的增殖竞争贯穿于赤潮生消过程的自始至终。在赤潮发展初期的 6 月 10 日至 11 日,聚生角刺藻的数量曾一度超过浮动弯角藻,但随着浮动弯角藻的快速增殖,聚生角刺藻被逐渐排斥、抑制,数量逐渐下降,但直至赤潮高峰,浮动弯角藻也未成为绝对优势种,仅占到浮游植物总量的约 70%,而拟旋链角刺藻则是本次赤潮发生过程中的一种伴随种,其种群数量占浮游植物总量的百分比一直在 3.4%~15.5% 波动。对浮动弯角藻与聚生角刺藻之间的种间竞争机制,目前尚未有研究报导,但本次赤潮调查结果至少表明,浮动弯角藻的快速增殖对聚生角刺藻的生长繁殖有一定的抑制效应。

3.2 气象条件与赤潮发生的关系

在赤潮发展期的6月8日-11日,浮动弯角藻的群生长速度达1.82,而1987年5月在厦门港发生的浮动弯角藻赤潮,其群生长速度仅为0.4^[4],前者远高于后者,在自然海域,要达到如此高的群生长速度,一方面与赤潮藻本身的快速增殖有关,另一方面与赤潮藻的物理性聚集有关。据青岛市气象部门提供的资料,6月1日-15日,胶州湾主导风向为南风,风力3~5级,而本次赤潮发生区位于胶州湾东北部的养殖水域,由南风引起赤潮藻的物理聚集对赤潮的形成有重要作用。

温度控制着藻细胞生长、繁殖等生理活动,不同藻类均有其最适温度范围。浮动弯角藻属广温种类,是胶州湾秋季浮游植物数量高峰的优势种。但本次赤潮发生在夏季的6月,赤潮发生期间的温度变化范围为20.4~24.8℃,且其高密度种群(以Chl-a代替)主要出现在22~25℃(图3a)。

根据1997、1998年同期对该海域的调查结果,每年的5月底、6月初该海区的水温总存在一个大约4~5℃的急升期,一般来说,这种温度急升有利于浮游植物的快速生长。由于在1999年5月26日胶州湾出现了一次强降雨过程,日降雨量达69.0mm,此后天气一直保持稳定,导致6月初该海域的水温比1998年同期高出约3℃,这种温度条件亦为赤潮生物的快速生长、繁殖创造了有利环境。

3.3 盐度与赤潮发生的关系

调查水域本次赤潮期间的盐度范围在29.4~32.9,其高密度种群主要出现在31~32(图3b),盐度变化与浮动弯角藻赤潮的形成缺乏明显的相关性。该区无河流入海,海水盐度主要受降雨的影响,赤潮发生期间盐度变化很小,也从另一侧面反映出该段时间天气稳定,利于浮游植物的生长。在1987年5月厦门港浮动弯角藻赤潮发生期间,其盐度变化范围为23~28,张水浸^[4]认为浮动弯角藻的最适盐度为26~28。对照本次赤潮期间海水的盐度变化,浮动弯角藻在较高盐度(30~32)的海水中仍能快速增殖,因而浮动弯角藻的最适盐度范围可能更宽。

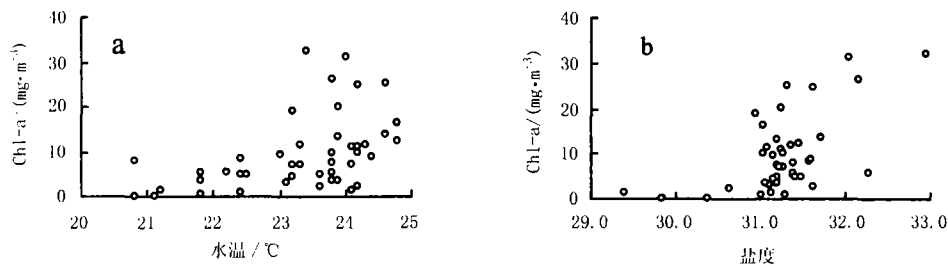


图3 叶绿素a与水温、盐度的相关散布图

Fig.3 Relationship between chlorophyll a and water temperature and salinity

3.4 营养盐与赤潮发生的关系

水域富营养化是赤潮发生的基础。但在不同海区、由不同种类形成的赤潮,各种营养盐所处的地位和所起的作用是不同的。据本项目组对该海域的调查结果(表1),其营养盐结构主要有以下特点:(1)氮、磷、硅三种营养盐的含量都很高,远高于胶州湾全湾的平均含量;(2)各种营养盐含量年际变化大,无机氮的最大变幅达3倍以上,活性磷酸盐和硅酸盐含量的变幅也在2倍左右;(3)各种形态无机氮中,亚硝态氮只占到无机氮的约10%,铵态氮

表1 胶州湾赤潮多发区营养盐的平均含量

Tab.1 Average concentration of nutrients in high-occurrence area for red tide in Jiaozhou Bay ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)

海区	时间	NH ₄	NO ₃	NO ₂	TIN	PO ₄	SiO ₃	N:P	Si:N
女姑山	1997	86.59	8.17	11.84	106.60	1.27	7.33	83.9	0.07
	1998	12.55	17.09	3.44	33.08	0.74	17.48	44.7	0.53
	1999	36.03	18.32	8.43	62.78	0.89	7.90	70.5	0.13
胶州湾		7.50	1.30	0.69	9.49	0.36	3.90	26.4	0.41

和硝态氮是其主要存在形态,但不同年份中硝态氮和铵态氮在总无机氮中所占的比例不同,在1997年-1999年,铵态氮占无机氮的比例分别为81.2%、37.9%、57.4%,硝态氮占总无机氮的比例分别为7.7%、51.7%、29.2%;(4)从氮磷比和硅氮比可以看出,该海域氮比较充足,而磷和硅则显得相对匮乏,在未发生赤潮的情况下,磷和硅均能满足浮游植物的生长需要,但若发生硅藻赤潮,则磷、硅往往构成赤潮生物的营养限制因子,如在该海域1998年7月的中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)赤潮和这次浮动弯角藻赤潮发生过程中,均出现了磷、硅被消耗殆尽的情况。沈志良^[10]曾报导了磷是胶州湾浮游植物生长的限制因子,近期张均顺和沈志良^[11]的研究亦表明,胶州湾表层海水中溶解无机硅作为浮游植物生长限制因子的出现率在迅速增长,与本文的结果相一致。

4 结语

(1)本次赤潮原因种——浮动弯角藻是在同聚生角刺藻和拟旋链角刺藻的增殖竞争中发展起来的,据现场资料计算得到的浮动弯角藻群生长速度达1.82,赤潮发展至形成期较短,6月11日赤潮正式形成,13日出现浮动弯角藻的数量高峰,15日以后赤潮走向消亡。

(2)赤潮发生期间,水温、盐度变化较小,分别在20.4~24.8℃和29.4~32.9变动,但浮动弯角藻的最适温度为22~25℃,最适盐度为31~32;pH和DO在赤潮发展和维持期均出现异常增高现象,是植物性赤潮快速增殖,大量消耗水中CO₂和放出O₂的结果。

(3)从营养盐结构看,该海域无机氮含量很高,无机磷和硅则显得相对匮乏。在赤潮发展至形成阶段,无机磷和硅降低明显,在赤潮发育盛期,磷和硅几乎消耗殆尽,赤潮消失后又迅速恢复;铵氮在赤潮发生过程中亦有明显降低,而后期恢复较慢,亚硝态氮和硝态氮含量在赤潮生消全过程中看不出明显的规律性变化,表明浮动弯角藻增殖过程中氮营养代谢以吸收铵态氮为主。

(4)在本次赤潮发生前的5月26日有一次强降雨过程,通过径流输入的大量营养盐为赤潮的发生提供了丰富的营养物质,雨后天气闷热无雨,水温较1998年同期高出近3℃,为赤潮生物的快速生长繁殖创造了有利条件;赤潮发展至形成期胶州湾盛行南风,有利于浮动弯角藻微小群体的物理性聚集,使赤潮得以迅速形成并维持较长时间,只是由于后期磷、硅的耗尽才使赤潮走向消亡。

张波、任广法、马丽、宋秀贤、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:

- [1] 齐雨藻, 张家平, 吴坤东, 等. 中国沿海的赤潮—深圳湾富营养化与赤潮的研究[J]. 暨南大学学报, 1989, (赤潮研究专刊): 10-21.
- [2] 洪君超, 黄秀清, 蒋晓山, 等. 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[J]. 海洋与湖沼, 1994, 25(2): 179-184.
- [3] 吕颂辉. 赤潮多发区主要赤潮发生过程的分析研究[A]. 大鹏湾环境与赤潮的研究[C]. 北京: 海洋出版社, 1996. 30-39.
- [4] 张水浸. 厦门港 *Eucampia zoodiacus* 赤潮的形成过程及其成因分析[A]. 厦门港赤潮调查研究论文集[C]. 北京: 海洋出版社, 1993. 19-28.
- [5] SCOR-UNESCO. Determination of photosynthetic pigments in seawater[A] Monographs on Oceanography Methodology [M]. Paris: UNESCO, 1966. 15-17.
- [6] Jeffrey S W, Humphrey G F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c₁ and c₂ in higher plants, algae and natural phytoplankton[J]. Biochemie and Physiologia der Pflanzen, 1975, 167:191-194.
- [7] 国家海洋局. 海洋监测规范[M]. 北京: 海洋出版社, 1991. 69-281.
- [8] 安达六郎. 三重县水产学报纪要[J]. 1972, 9(1): 1-149.
- [9] 饭塚昭二. 赤潮の生态学的诸问题[A]. 冈市友利: 赤潮の科学[M]. 东京: 恒星社厚生阁, 1987. 91-123.
- [10] 沈志良. 胶州湾水域的营养盐[J]. 海洋科学集刊, 1994, 35: 115-129.
- [11] 张均顺, 沈志良. 胶州湾营养盐结构变化的研究[J]. 海洋与湖沼, 1997, 28(5): 529-535.