

# 围隔体内赤潮对扰动的反应\*

唐森铭 林 昱 陈孝麟 庄栋法

(国家海洋局第三海洋研究所, 厦门 361005)

**提要** 于 1992 年 9—12 月, 使用中尺度围隔装置 (1.7m<sup>3</sup>) 研究扰动的水体对赤潮浮游植物种类演替的影响。实验结果表明, 对富营养化的围隔水体进行扰动可以改变水体中赤潮生物的演替次序, 即甲藻和鞭毛藻往往出现在硅藻赤潮之后。本文从另一方面证明, 富营养下的相对稳定水体有助于鞭毛藻类赤潮的形成。

**关键词** 富营养 扰动 赤潮 围隔实验

水体富营养化是特定水域赤潮现象的先决条件。张水浸等(1988)曾报道厦门港水域的活性磷与赤潮关系密切, 而水体的相对稳定伴随着赤潮的发生。林昱等(1992a, b)研究指出, 赤潮过程表现为有序的种类演替, 即鞭毛藻多出现在硅藻赤潮之后 Legendre 等(1983)计算说明, 水体中浮游植物增殖的速度必须大于种群被水流稀释的速度, 种群才能得以存在和发展。本文报道在没有水流稀释作用下, 水团自身的扰动对赤潮过程和种类演替产生的影响。

## 1 研究方法

**1.1 实验** 实验在厦门的国家海洋局第三海洋研究所的陆基水池中进行。该水池长 20m, 宽 10m, 实验期间水深 1.8m。围隔装置系高 2m、开口直径 1.2m、容积约 1.7m<sup>3</sup> 的玻璃钢桶组成。实验用两个玻璃钢桶, 相距约 2m, 桶周围的光照条件一致。

实验自 1992 年 9 月 19 日开始, 实验用水在桶外贮水池中澄清 24h, 次日用泵同步抽入桶中, 注水后, 设不扰动桶为对照桶 (C); 扰动桶为实验桶 (D)。D 桶在桶口距桶沿 0.3m 处对称装置两台小型提水泵, 以 20L/min 速率将桶内 1.5m 深处水体抽向表层, 再参与循环。水泵工作时间 4h, 间歇 2h, 周而复始到实验结束。为了使桶中水体保持富营养状态, 根据营养盐消耗情况, 不定期向桶内补充无机氮、磷和硅, 维持桶中无机氮在 30  $\mu\text{mol/L}$  以上, 磷酸盐不低于 0.5  $\mu\text{mol/L}$ , 硅酸盐高于 20  $\mu\text{mol/L}$ 。桶内水温用玻璃水银温度计测量, 活性硅和活性磷按《海洋监测规范》(国家海洋局, 1991) 的方法测定, 硝酸盐采用铜镉还原-对硝基偶氮法测定。铵氮由溴酚蓝测定。浮游植物水样取垂直柱样, 水样用 Lugol's 溶液固定, 经圆形沉降室沉降后在倒置微显微镜下鉴定种类并计数。本实验的鞭毛藻指 2—20 $\mu\text{m}$  的鞭毛藻个体, 直径小于 2 $\mu\text{m}$  的藻体划归为微型藻。藻类密度以

\* 国家自然科学基金重大项目, 9389008 号。唐森铭, 男, 出生于 1949 年 7 月, 副研究员。  
收稿日期: 1993 年 5 月 11 日, 接受日期: 1994 年 2 月 29 日。

每立方厘米 ( $\text{cm}^3$ ) 含细胞个数计量。计算日增长率 ( $\mu$ )。为避免较大误差, 实验中仅比较增殖峰值密度达 100 个细胞以上的种类, 计算数据取生长上升期一段。 $\mu$  的计算公式如下:

$$\mu = \ln(C_t/C_0)/\Delta t \ln 2$$

其中,  $C_t$  和  $C_0$  分别为  $t$  时间和 0 时间的细胞密度;  $\Delta t$  为间隔时间。

**1.2 围隔水体的环境** 实验期间最高水温  $30.0^\circ\text{C}$  (10 月 4 日), 最低水温  $16.7^\circ\text{C}$  (11 月

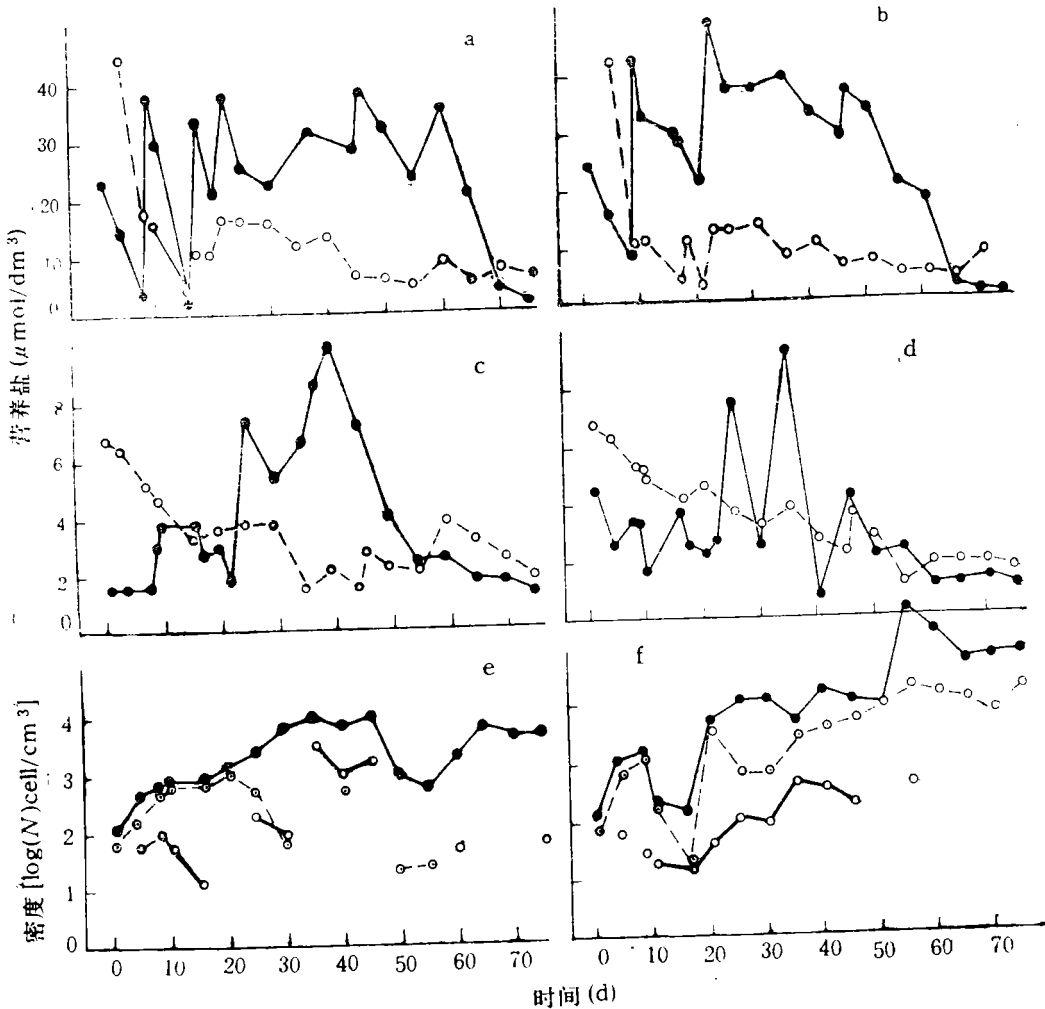


图 1 硝酸盐 (a,b:●)、硅酸盐 (a,b:○)、铵 (c,d:●) 和磷酸盐 (c,d:○) 浓度及浮游植物总密度 (e,f:●), 硅藻 (e,f:○)、甲藻 (e,f:○) 密度随时间的变化 (a, c 和 e 表示对照桶的变化, 其他表示扰动桶的变化)

Fig. 1 The changes in concentrations of nitrate (a,b:●), silicate (a,b:○), ammonium (c,d:●) and phosphate (c,d:○) and total algal density (e, f:●), diatom (e, f:○) and dinoflagellate (e,f:○) density with time (a, c and e for the control and others for the stirred)

21 日), 平均水温  $22.7 \pm 3.96^{\circ}\text{C}$  ( $m \pm \text{SD}$ ,  $n = 67$ )。实验过程水温呈下降趋势。各主要营养盐变化见图 1。其中, 铵氮含量波动较大, 其它盐类含量变化较小, 营养盐的补充与消耗处于动态平衡。

## 2 结果

实验用陈化一天的近岸水, 已难找到大型浮游藻类如圆筛藻、根管藻等。据统计, 前期浮游植物种类或类别计 25 种, 比较优势的种类有 *Skeletonema costatum*, *Nitzschia closterium*, *Cheatocecos lorenzana*, *Cheatocecos* sp., *Thalassionema nitzschioides*, *Leptocylindrus danicus*, *Gymnodinium* spp., Cryptophyta 及微型鞭毛藻等, 至实验后期(11 月以后), 两桶中藻类组成趋于单纯, 细胞个体小型化。

受扰动处理的 D 桶中(图 1f), 浮游植物总量在实验期间呈上升趋势, 从开始的 1200 个细胞上升到实验结束时的 70 000 个。其间, 第 16 天(10 月 6 日)密度骤然减少, 出现低谷, 密度从 1 000 跌到 133。硅藻种类从 18 种减少为 6 种, 优势种转为 *N. closterium* 和 *Amphiprora alata*。在此前 20d 中, 硅藻类群经历了一个由盛到衰的周期, 这一情形在污染效应的围隔实验中常见(Wong et al., 1992)。第 20 天后, 硅藻类组成单纯化, 个体趋小型, 数量增加。至第 50 天(11 月 9 日), *N. closterium* 成为优势种, 最高密度 20 500 个。与此同时, 甲藻类的数量也发生了相应变化, 密度从 20d 前的 50 以下(主要为裸甲藻 *Gymnodinium*) 发展到 100—200 之间。*P. micans* 此时也陆续出现, 密度最高达 181 个。甲藻的出现维持了 55d, 第 55 天以后消失。其他鞭毛藻出现期雷同于甲藻, 不过延续期较长, 在实验后期仍大量出现。最高密度达 220 000 个。同时个体小于  $2\mu\text{m}$  的微型藻也大量出现, 达 338 000 个, 是同期硅藻数量的 17 倍。到第 75 天实验終了, 微型藻类数量降到 45 000, 为同期硅藻的 2.4 倍。微型藻类在数量上虽占优势, 但 *N. closterium* 细胞长达  $100\mu\text{m}$ , 如以重量或体积比较, 占优势的还是后者。

对照桶(C)中的浮游植物总量在实验期间也呈上升趋势(图 1e), 开始 120 个, 末期达 4 700 个, 其间发生一个 12 500 的高峰。硅藻大量发生于第 20 天前, 种类数同 D 桶。第 20 天以后, 硅藻仅在少数样品中出现, 未形成稳定的种群。甲藻和鞭毛藻在第 20 天后出现, 峰值分别为 3 300(第 35 天)和 9 400(第 45 天)。此后鞭毛藻尤其是微型鞭毛藻( $2\text{--}10\mu\text{m}$ ) 成为优势种。实验后期桶中也出现蓝藻(*Nostoc* sp.) 密度在 100 个以下。D 桶桶壁在实验第 10 天附着浒苔, 到实验后期长成 10—20cm 的藻丝体。浒苔参与营养盐的争夺, 可能是 C 桶内无机氮盐浓度变化较大的原因。

## 3 讨论

在天然水体中, 由于季节变化, 浮游植物群落中种类进行着周期性的演替。春季赤潮, 硅藻很容易成为优势种, 赤潮之后, 甲藻和其他鞭毛藻类取而代之(Darlay, 1982)。显然, 这种演替以光照、温度和营养盐的变化为背景, 其演替方式也在围隔的水体中重现(林昱等, 1992a, b)。围隔的水体排除了水团间交流混合的效应, 水体逐渐变为稳定, 硅藻沉降, 为具有运动能力的鞭毛藻类提供了竞争机会, 客观上模拟了自然界中鞭毛藻类发生的条件。与此同时, 围隔实验也存在着非自然化的倾向, 即逐渐背离变化着的海洋环境。为弥补不足, 就有了在实验中增加扰动加强水流混的做法以研究生物学过程。如 Eppley(1978)往水体中鼓入气泡, 使得围隔水体中的种类组成和细胞大小在较长时间内得以平

衡。这里应该指出,水体扰动本身并不对浮游植物细胞发生直接影响,而是通过光照和营养盐发生间接作用,因为扰动改变了光照条件和营养盐的供给状态。Demers (1986) 报道,间断地向水体添加限制性营养盐元素,可影响浮游植物细胞的特征。高频率地添加营养盐,水体中植物细胞将向小型化发展。相反,添加频率降低,细胞向大型发展,营养盐供给变化还改变群落的丰度和多样性。他进而指出,水体不稳定还决定限制性营养盐的类型,同时选择特定生长速率的细胞,从而对演替施加影响。水体不稳定度高,分裂速度快的小细胞得到选择。相反,分裂速度慢的大型硅藻将会出现。从实验中观察到, *N. closterium* 在富营养的环境中总是生长很好 (Okamoto et al., 1989)。D桶无疑满足了 *N. closterium* 大量增殖的条件。

表 1 C 和 D 桶中藻体增殖密度峰值达 100 以上的种类和日增长率

Tab. 1 Diel growth rate ( $\mu$ ) for the species with peak value over 100 cells/cm<sup>3</sup> growing in enclosures C and D

种类或类群	C 桶	D 桶
<i>Skeletonema costatum</i>	1.39 1.96 (1.68) <sup>1)</sup>	
<i>Nitzschia closterium</i>	0.35 0.48 (0.42)	1.08 0.85 (0.97)
<i>N. seriata</i>	1.04	—
<i>Amphiprora alata</i>	—	0.40 0.36 (0.38)
<i>Prorocentrum micans</i>	1.49	0.08 1.50 (0.97)
<i>Gymnodinium</i> spp.	1.10 0.62 (0.86)	1.50
Cryptophyta	1.42 1.07 0.52 (1.00)	1.40 0.31 0.23 (0.64)

1) 括号内为平均值。

对主要种类的  $\mu$  值进行比较(表 1)。C 桶中硅藻一般有较高的日增长率,但最终都没能发展为密度高的、持续期长的赤潮,主要原因是大部分硅藻不能适应稳定的水环境,因沉降而消失,据 CEE 实验测定,围隔水体中硅藻的沉降速率随时间增大,数天中损失可达 76% (Beienfang, 1982)。在 D 桶中,生长速率大的有 *S. costatum*, *N. closterium* 和 *Gymnodinium* spp., *P. micans*, 说明短期内这些藻类都曾有相当的增殖能力。但鞭毛藻类未能取得优势,部分可归于太低的光合能力/呼吸比,与硅藻比较因耗能高而被淘汰。值得注意的是, C 桶中 *P. micans* 和 D 桶中 *S. costatum*  $\mu$  值较高但没能形成优势,很可能是各自处理条件下的一个随机过程,这将另文分析。不过, *N. closterium* 底栖生活为主,在桶壁上大量附着生长,是进入浮游生活的优势条件(林昱等, 1992a)。由于影响植物演替的原因可以来自外部,因此有可能对演替进行调节控制。Harrison (1982) 将调制因子划为三部分,其中粗调和微调因子分别控制类群间和类群内的选择。从实验知道,水体扰动是综合的粗调因子,对选择硅藻类群有效,从而印证了 Margalef 的提法 (Balch, 1986)。如果认为硅藻的上端食物链较短,有较高的生态转换效率 (Parsons et al., 1977), 那么扰动效应就可以用来指导渔业生产,减少鞭毛藻类的低值效应。

从另一方面来说,有害赤潮多为鞭毛藻引起,而水体相对稳定又是触发因子。目前近岸海区开发迅速,建港、围垦和养殖已影响局部海区水流通畅,加上海区富营养化,这为有害赤潮频发创造了有利的条件。管理部门应引以为注意。

#### 4 结语

富营养状态下的水体扰动改变了围隔水体中浮游植物通常的演替次序, 甲藻和其他鞭毛藻类不再以优势种出现在硅藻赤潮之后。水体扰动通过改善光照条件, 营养盐供给状态和减少藻类沉降速率而促进硅藻大量增殖, 并保持较长时间。从鞭毛藻赤潮发生条件看, 注意和改善近海区水流条件, 可控制有害赤潮发生, 也有利于水产经济发展。

#### 参 考 文 献

- 张水浸、许昆如、陈其焕等, 1988, 厦门西港区一次赤潮的观测, *海洋学报*, **10**(5): 602—608。
- 林昱、陈孝麟、庄栋法等, 1992a, 海洋围隔生态系中赤潮发生前后浮游植物群落结构的初步分析, *生态学报*, **12**(3): 213—218。
- 林昱、陈孝麟、庄栋法等, 1992b, 围隔生态系内富营养引起赤潮的初步研究, *海洋与湖沼*, **3**: 312—317。
- 国家海洋局, 1991, 海洋监测规范, 海洋出版社(北京), 1—766。
- Balch, W. M., 1986, Are red tides correlated to spring-neap tidal mixing? use of a historical record to test mechanisms responsible for dinoflagellat bloom, *In: Tidal Mixing and Plankton Dynamics*, ed. by Bowaman, M. J. et al. Springer-Verlag (New York), pp. 193—222.
- Beienfang, P. K., 1982, Phytoplankton sinking rate dynamics in enclosed experimental ecosystems, *In: Marine Mesocosms*, ed. by Grice, G. D. and Reeve, M. R., Springer-verlag (New York), pp. 261—274.
- Darlay, W. M., 1982, *Algal biology: a physiological Approach*, Blackwell Scientific Publication (Oxford London), 168pp.
- Demers, S., Legendre, L. and Therriault, J. -C., 1986, Phytoplankton response to vertical tidal mixing, *In: Tidal mixing and Plankton Dynamic*, ed. by Bowaman, M. J. et al. Springer-Verlag (New York), pp. 1—40.
- Eppley, R. W., Koeller, P. and Wallace, Jr, G. T., 1978, Stirring influences of the phytoplankton species composition within enclosed columns of coastal sea water, *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **32**:219—239.
- Harrison, P. J. and Turpin, D. H., 1982, The manipulaiton of physical, chemical, and biological factors to select species from natural phytoplankton communities, *In Marine Mesocosms*, Springer-Verlag (New York), pp. 275—289.
- Legendre, L. and Legendre, P., 1983, *Numerical Ecology, Developments in Environmental Modelling*, Elsevier Scientific Publishing Company (Amsterdam), 419pp.
- Okamoto, K., and Hirana, R., 1989, Growth responses of natural population of red tide organisms to nutrient enrichment, *In Red Tide: Biology, Environmental Science and Toxicity*, Elsevier (New York), pp. 233—236.
- Parsons, T. R., Takahashi, M. and Hargreaves, B., 1977, *Biological Oceanographic Processes*, Pergamon Press (Oxford), 330 pp.
- Wong, C. S. and Harrison, P. J., 1992, Marine Ecosystem Enclosed Experiments, *Proceedings of a Symposium Held in Beijing, PR China*, 9—14, IDRC, Ottawa, CA, 439 pp.

## RESPONSE OF RED TIDE TO WATER STIRRING IN MARINE ENCLOSURE

Tang Senming, Lin Yu, Chen Xiaolin, Zhuang Dongfa  
(Third Institute of Oceanography, SOA, Xiamen 361005)

### ABSTRACT

This experiment was conducted in two 1.7m<sup>3</sup> enclosures in the land-based tanks in the 3rd Institute of Oceanography, SOA, in Xiamen in September—December of 1992. The response of succession of phytoplanktonic bloom was studied with and without disturbance in the water columns, kept eutrophic by moderate enrichments of nitrite, nitrate, phosphate and silicate above the level of these nutrients in Xiamen waters. The results showed that in the unstirred water column algal succession was dominated by diatoms, dinoflagellates and microflagellates in order while the stirred water column underwent a diatom (*Nitzschia closterium*) bloom (highest peak of  $2 \times 10^4$  cells/cm<sup>3</sup>) till the end of the experiment. The experiment demonstrate again that, with a stable and eutrophicated water column, flagellate bloom or red tide may easily occur.

**Key words** Nutrient-enrichment Stirring Red tide Enclosed ecosystem