

围隔生态系内富营养引起赤潮的初步研究*

林 昱 陈孝麟 庄栋法 唐森铭 林荣澄

(国家海洋局第三海洋研究所, 厦门 361005)

提要 1990 年 5 月 12 日—7 月底, 在厦门国家海洋局第三海洋研究所的陆基水池中, 进行了一次对厦门西海域水体富营养而引发赤潮的围隔实验。实验结果表明, 在厦门西海域已经处于中营养水平的水质条件下, 只要光照充足, 水体相对稳定, 如果再连续不断地供给充足的营养盐, 就可能引起浮游植物的水华或赤潮; 可溶性活性磷的含量不仅仅影响厦门西海域正常年份的浮游植物春季水华, 对赤潮的兴衰也起控制作用。

关键词 富营养 水华 赤潮 围隔生态系

本文根据 1990 年赤潮围隔实验研究的结果, 并结合 1985 年和 1986 年的二次实验, 对厦门西海域水体中富营养后的生物效应进行讨论。以期探明赤潮形成的机制, 为赤潮的预测预报和防治提供科学依据^[1]。

一、方 法

实验在国家海洋局第三海洋研究所的陆基水池中进行。池距海岸约 8 m。池长 20 m 宽 10 m, 深 5 m。围隔袋用聚丙烯编织布缝制成, 并在表面涂抹一层聚乙烯, 以增强其防渗能力。围隔袋固定在浮筏上(图 1)。实验期间, 用泵抽取堤外海水进入池内, 保持池内海水具有一定水位, 并且水温同海区相近。

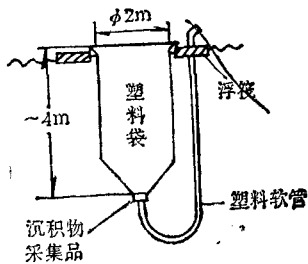


图 1 R₁ 围隔实验装置
Fig.1 Install of R₁ enclosure experiment

实验开始时, 用隔膜泵抽取实验海区海水, 同步注入各围隔袋并静置, 抽去沉积物, 按照实验设计要求添加营养盐。第一周, 每天或隔天采样一次, 以后每周二次。用蠕动泵从 3 m 以表水层采取水样, 混匀后分样分别测试各项目。测试方法参见 M₂ 实验研究报告^[4,8]。

赤潮研究的实验(代号 R₁) 在 1990 年 5 月 12 日—7 月底进行。在三个围隔袋中分别充满堤外海水约 7.5 m³。池内水深 5 m。实验分三个阶段。第一阶段(0—22 天), 观测比较富、寡营养盐条件下, 围隔体内浮游植物数量的变动情况。以 C 袋作对照, 定期

* 国家自然科学基金重大项目, 9389008 号。参加本实验工作的还有吴省三、蔡子平等同志。
接受日期: 1991 年 9 月 16 日。

测定袋内和堤外营养盐浓度,根据差值及时往袋内添补营养盐,以保持袋内的营养盐浓度和堤外的相近。H袋,实验开始时就加入富足的营养盐,并根据每次测定值及时添加,使袋内营养盐浓度始终维持在:硝酸盐 $30\mu\text{mol/L}$ 、硅酸盐 $20\mu\text{mol/L}$ 、磷酸盐 $3\mu\text{mol/L}$ 的水平上。L袋,维持一个低磷的水体,其浓度与厦门西海域春季水华后的浓度相仿。硝酸盐、磷酸盐的浓度分别在 $15, 0.2\mu\text{mol/L}$ 的水平上。第二阶段(23—62天),观测连续富营养和从寡营养转为富营养的浮游植物数量变动情况。提高 C,L 袋的营养盐浓度到与H袋相同的浓度水平上。第三阶段(63—76天),各袋停止外加营养盐,靠沉积物释放的营养盐供浮游植物生长用。

本文还参考以下两次实验中对照袋的数据。

其一,1985年4月,在上述同一陆基水池中进行的重金属污染动力学及其生物效应的围隔实验(M_2 实验),历时21天。围隔水体约 10M^3 。袋内加进营养盐后初始浓度,硝酸盐、硅酸盐和磷酸盐分别为 $25, 55$ 和 $1\mu\text{mol/L}$ 。

其二,1986年5月,在厦门东港海域,进行了石油污染动力学及其生物效应的围隔实验(M_3 实验)。历时14天。围隔水体约 14m^3 。袋内加进营养盐后的初始浓度为,硝酸盐、硅酸盐和磷酸盐浓度分别为: $25, 15$ 和 $0.5\mu\text{mol/L}^{[5]}$ 。

二、结 果

1. 浮游植物的含量

R_1 实验结果,浮游植物生物量以水体中的叶绿素- a 含量表示(图2)。

(1) 第一阶段 各袋营养盐浓度有差别的第一阶段,第9天以前各袋中叶绿素- a

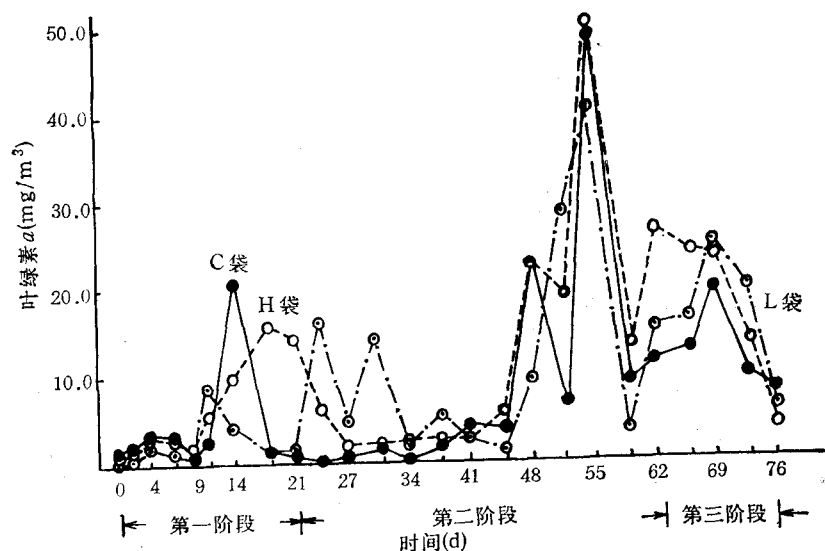


图2 R_1 实验时叶绿素- a 的时间变化

Fig. 2 Changes in chlorophylla- a concentration during R_1 experiment

含量变化情况相似。C袋在14天出现一个 $20.9\text{mg}/\text{m}^3$ 的峰值。H袋在第9—27天之间出现第一个高峰,峰值出现在第18天。与C,H袋相比,L袋在21天前未检测到较高的叶绿素含量。

(2) 第二阶段 C袋水体富营养后,分别在第48天和第55天出现了该袋在整个实验期间的叶绿素值的次高峰和最高峰,最高达 $48.7\text{mg}/\text{m}^3$ 。H袋的叶绿素-a含量从第45天开始再次升高,在第55天出现第二个高峰,峰值为 $49.8\text{mg}/\text{m}^3$ 。L袋,水体富营养后开始起伏出现峰值,至第55天叶绿素含量达到最大, $40.1\text{mg}/\text{m}^3$ 。第55天后,各袋的叶绿素含量都有一个较大的、但是短暂的回落。

(3) 第三阶段 各袋的叶绿素含量都处于较高含量的水平上。

2. 浮游植物数量的变动

变动情况和叶绿素-a的变动情况相似。

C袋的第一个峰值主要是微鞭毛藻($< 20\mu\text{m}$)和硅藻(*Diatom*)的水华引起的。其数量是第零天的10倍;第45天以后的叶绿素含量的持续高峰,是由一种金藻(*Chryso-phyta*)引起的赤潮,其数量在第48天和第55天,分别为 $2.68 \times 10^{10}\text{Cell}/\text{m}^3$ 和 $3.31 \times 10^{10}\text{Cell}/\text{m}^3$,分别占浮游植物总量的99.6%和99.4%。赤潮发生时,水色呈黄绿色,水面上漂浮有一层黄绿色泡沫。

H袋从第9天开始,浮游植物在原有群落基础上开始大量繁殖,形成水华;数量最多达 $2.94 \times 10^9\text{Cell}/\text{m}^3$;第45天以后,形成赤潮,优势种为金藻。同时,开始出现较大数量的海洋原甲藻(*Prorocentrum micans*)和隐藻(*Cryptophyta*)。在第48天和第55天,浮游植物总量达 $6.74 \times 10^{10}\text{Cell}/\text{m}^3$ 和 $7.77 \times 10^{10}\text{Cell}/\text{m}^3$,金藻分别占98%和64%。

L袋在第二阶段磷不受限制以后,在第24—31天之间发生了硅藻的水华;第48天以后,也发生了以金藻为优势种的赤潮;在第55天数量最大,为 $2.49 \times 10^{10}\text{Cell}/\text{m}^3$,其中金藻占91%;从第52天开始,观察到甲藻数量开始增多(主要是*Gymnodinium*),到第55天高达 $1.8 \times 10^9\text{Cell}/\text{m}^3$ 。

实验结果清楚表明,富营养的H袋在第一阶段发生了水华;缺磷的L袋中的浮游植物的生长情况基本没有什么变化,但加进富足的营养盐后也发生了水华;三个袋在第45天以后,均发生了以金藻和甲藻为优势种的赤潮。

3. M_2 和 M_3 实验的结果

M_2 实验的对照袋,在一次性加入营养盐后,于第8天出现水华,叶绿素-a的含量在第11天达到高峰。形成的是以中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)和角刺藻(*Chaetoceros* spp.)为主的硅藻赤潮。这时浮游植物总数达到 $2.05 \times 10^{10}\text{Cell}/\text{m}^3$,其中硅藻有 $1.64 \times 10^{10}\text{Cell}/\text{m}^3$ 。中肋骨条藻和角刺藻分别占硅藻总量的82%和10%。 M_3 实验时,在加入营养盐后的第4天,浮游植物就开始大量繁殖,在第10天形成赤潮。优势种为柔弱根管藻(*Rhizosolenia delicatula*);浮游植物总数达 $1.39 \times 10^9\text{Cell}/\text{m}^3$,其中根管藻占75%。

三、讨论与结语

1. 温度

本文提及的三次实验,均在厦门海域浮游植物春季水华季节进行。 R_1 实验期间,水温在 21—27℃ 之间,H袋先后发生了水华和赤潮,可见实验期间的水温是适宜浮游植物生长的。实验期间的水温是逐步升高的,并没有出现突然升高或降低的情况,说明实验期间的水华或赤潮的发生,并不是因水温突变而引发的。

2. 光照强度

M_2 实验结果表明,如果进入水体的光照度减弱,会引起浮游植物、叶绿素和初级生产力的减少或减弱^[5]。 M_2 和 R_1 实验都在同一陆基水池中进行,水池顶棚用玻璃钢瓦覆盖。从 M_2 到 R_1 实验,时隔 5 年,玻璃钢瓦老化,透光率仅为 M_2 实验时的 1/5 左右; R_1 实验的前 10 天又逢阴雨天气,光照不足,造成围隔生态系内海洋浮游植物的数量和群落结构上的差别,富营养的 H 袋没有发生象 M_2 实验时的浮游硅藻赤潮,而仅在第 14 天有一次水华,其细胞密度比 M_2 少一个数量级。与此同时,适宜低光照的底栖硅藻大量在袋壁上附着。H 袋在第 17 天从袋壁采样测得底栖硅藻密度为 $8.3 \times 10^4 \text{Cell/cm}^2$ 。为增加光照度,实验的第 18 天拆去了部分顶棚。实验 30 天以后,天气转晴,阳光充沛,后来在 48 天后各袋发生了赤潮。可见,实验只有在光照充足的条件下才能重现 M_2 实验的结果,产生赤潮。

3. 水体稳定性

同堤外海水比较,围隔袋内所捕捉的水体是相对稳定的,基本不受扰动。厦门西海域赤潮多发区是在宝珠屿以内的内湾,那里风浪较小,水体交换差,相对比较平静,同围隔实验有相似之处。水体相对稳定,可能是赤潮发生的另一个重要因素。

4. 营养盐浓度与赤潮发生的关系

三个实验结果表明,在具备上述物理因素条件下,往实验所捕捉的水体中加入营养盐,使之富营养,最终结果都可以观察到水华或赤潮。 R_1 实验的第一阶段,L袋中磷酸盐浓度在 $0.2 \mu\text{mol/L}$ 的水平上;C袋的营养盐浓度与实验时海区的浓度相似,均未发生水华或赤潮。正说明营养盐浓度,尤其是活性磷与赤潮有着密切的关系。叶绿素-a 含量随水体中活性磷耗尽而衰退,而这时水体中无机氮含量都还在 $5 \mu\text{mol/L}$ 以上,这也进一步说明这一点。

厦门西海域的调查表明,目前厦门西海域的水质已达到中营养的水平^{[2],1)}。这可能是我们几次围隔实验时加入营养盐后就发生水华或赤潮的原始物质基础。

厦门西海域营养盐富氮少磷^{[6],2)}。一般情况下,海区每年 3,4 月份营养盐处于周年的峰值,随着春季水华的消耗,磷酸盐降低到几乎检测不出的水平,而硝酸盐大多还在 $5 \mu\text{mol/L}$ 以上。这说明在正常年份,春季水华没有进而发展成赤潮,其中一个主要原因

1) 陈其焕等,1990,1987 年厦门西海域赤潮调查报告。

2) 国家海洋局厦门管区,1990,厦门西海域环境质量报告书。

是营养盐的不足,尤其是活性磷的不足, R_1 实验结果也揭示了这一点。但如果在赤潮多发季节,有足够的营养盐供给,就可能出现 R_1 实验中L袋的第二阶段的结果,发生赤潮。海区的情况也提供了很好的例证。在1986年6月和1987年5月,厦门西海域发生赤潮前,水体异常地出现富氮富磷现象^[1,3]。1986年发生裸甲藻赤潮时,发现活性磷小于 $0.2 \mu\text{mol/L}$ 时没有赤潮发生,而浓度增大到 $0.9 \mu\text{mol/L}$ 时,才形成赤潮^[3]。

R_1 实验的第三阶段,停止往各袋内添加营养盐,但各袋营养盐浓度仍维持在:硝酸盐为 $21-39 \mu\text{mol/L}$,活性磷为 $1.5-2.4 \mu\text{mol/L}$ 之间,持续了二周之久。同时浮游植物的生物量也在较高的水平上,叶绿素-*a* 含量在 $10-30 \text{mg/m}^3$ 。这说明,沉积物矿化再生能提供较富足的营养盐供浮游植物大量生长繁殖需要。这一结果揭示了海区赤潮发生前异常富营养的一个主要来源。

综上所述, R_1 围隔实验是对赤潮发生机制所作的首次初步的探索,实验结果得到自然海区赤潮发生过程的佐证。结果表明,在厦门西海域已经处于中营养水平的水质条件下,只要光照充足、水体相对稳定,如再持续不断地供给足够的营养盐,就可能引起浮游植物的水华或赤潮。可溶性活性磷的含量不仅影响厦门西海域的春季水华,对赤潮的兴衰也起控制作用。沉积物再矿化产生的营养盐可能是赤潮发生前富营养盐的主要来源之一。实验结果可能对赤潮的预测预报和防治有所帮助。

参 考 文 献

- [1] 杜琦, 1989, 厦门西海域赤潮的研究, 暨南大学学报, (赤潮研究专刊): 57—67。
- [2] 陈于望, 1987, 厦门港海域营养状况的分析, 海洋环境科学, 6(3): 15—19。
- [3] 张水浸、许昆灿等, 1988, 厦门西港区一次赤潮的观测, 海洋学报, 10(5): 602—608。
- [4] 海洋生态系围隔实验组, 1989, 工业区排污口沉积物对海洋浮游生物生态系的影响, 海洋学报, 11(1): 79—84。
- [5] 傅天宝、吴晋平等, 1988, 厦门海洋围隔生态系实验及其在海洋环境保护研究中的应用, 中国环境科学, 8(1): 63—67。
- [6] 蔡清海, 1988, 厦门港西海域的磷、氮含量, 海洋环境科学, 7(4): 43—47。
- [7] IOC, 1987, IOC workshop on international cooperation in the study of red tides and ocean blooms, Workshop report 57, pp. 1—10.
- [8] Parsons, T. R., Yoshiaki, M. et al, 1984, A manual of chemical and biological methods for seawater analysis, Pergamon Press, pp. 3—9.

PRELIMINARY STUDY ON RED TIDE CAUSED BY NUTRIENT ENRICHMENT IN MARINE ENCLOSED ECOSYSTEM

Lin Yu, Chen Xiaolin, Zhuang Dongfa,
Tang Senming and Lin Rongcheng

(Third Institute of Oceanography, SOA, Xiamen 361005)

ABSTRACT

Experiment was conducted to study the biological effects of nutrient enrichment, the factors about red tide occurrence and its development processes in marine ecosystem enclosure, from May 12 to the end of July, 1990.

The experiment was built up in a large land-based tank nearby seashore at the Third Institute of Oceanography, SOA, in Xiamen, China. Around 7.5 m³ seawater from Xiamen Xigan Harbour was pumped in bags. Experiment was divided into three stages. For the first stage (0—22d), the concentrations of nutrients in the controlled bag C were followed as closely as that of the seawater outside the seashore. In bag H, enough nutrient was added continually to keep the concentrations of nitrate, phosphate and silicate at the levels of 30, 3 and 20 μ mol/L, respectively. Bag L was kept in a lower nitrate and phosphate concentrations of 10 and 0.2 μ mol/L respectively. For the second stage (23—62d) increased nutrient concentrations in all bags. Nutrient addition to each bag was stopped in the third stage (63—76d).

The results of experiment showed that (1) under condition of mesotrophic water in Xiamen Xigan Harbour, the algal bloom or red tide was formed if there were plenty of light in relatively stabilized water column and continual supplement of enough nutrient; (2) the concentrations of dissolved phosphate controlled not only the spring bloom in common years but also the occurrence and decline of red tide; (3) the nutrients from sediment by regeneration could be one of main sources of enriched nutrients before red tide occurrence.

Key words Nutrient-enrichment, Bloom, Red tide, Enclosed ecosystem.