

初析赤潮成因研究的围隔实验结果 ——几个理化因子与硅藻 赤潮的关系*

林 昱 庄栋法 陈孝麟 唐森铭

(国家海洋局第三海洋研究所, 厦门 361005)

提要 从 1990 年以来,在国家海洋局第三海洋研究所的临海陆基水池中,应用围隔生态系统实验技术对赤潮成因作了几次探索性的研究。针对 4 次人为引发赤潮的中尺度围隔实验的部分结果,结合已报道的厦门西海域赤潮过程,分析几个主要理化因子(水体稳定性、无机氮、无机磷、可溶性锰、可溶性铁和维生素 B₁₂)与硅藻赤潮发生及其规模的关系。

关键词 赤潮 围隔生态系统 厦门西海域 可溶性铁 活性磷

海洋生态系中各种环境因子的相互作用,使得我们难以分析评估调查资料中各个环境因子在赤潮成因中的作用,而一些实验室内生态学研究的结果,由于受到海洋中多元因子的扰动,而无法延伸应用到自然海区去。我们从 1990 年春季以来,开始应用围隔实验技术研究几个主要理化因子的变动而引起的生态效应,以期探讨它们与赤潮发生和规模的关系。本文就其中的 4 次中尺度围隔实验(代号分别为 R1, R2, R4 和 R5)的部分结果,结合厦门西海域赤潮过程的有关资料作些评述。

1 方法

1.1 围隔体 有围隔袋和围隔桶两种。R1 实验时使用围隔袋(林昱等, 1992)其他实验均用围隔桶,以玻璃钢制成,容量 1.5m³。使用时,内衬一层聚乙烯薄膜袋。

1.2 装置和水体围隔 实验在国家海洋局第三海洋研究所内临海的陆基水池(20m × 10m × 5m)中进行(陈孝麟等, 1993;林昱等, 1992;1993)。围隔袋固定在浮筏上,且漂浮于池中央;围隔桶站立在池中(图 1)。实验时,用泵抽取近岸海水同步注入各围隔袋(桶),袋(桶)外池内灌入海水,以后根据每天流失量添加海水至一定的水深,使水温和临近海区相近。

1.3 实验内容和方法 表 1 列出了文中提及的 4 次实验的时间、内容和实验中各桶的安排。

1.4 采样和检测方法 采柱状水样多个混合后,分测各项目。测试项目和方法请参考陈孝麟等(1993)、林昱等(1992,1993)论文。

* 国家自然科学基金重大项目资助, 9389008 号。

收稿日期: 1993 年 7 月 26 日,接受日期: 1993 年 11 月 30 日。

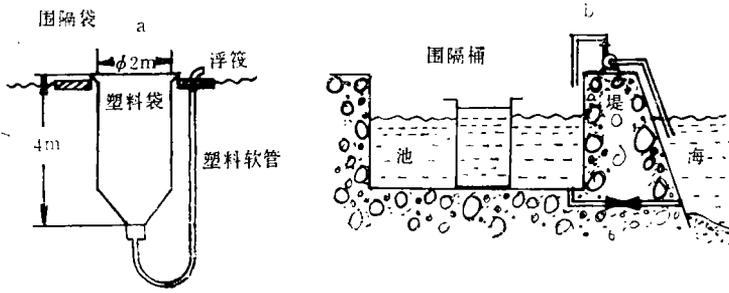


图 1 围隔实验装置示意图

Fig. 1 The design of the enclosed experiment

表 1 围隔实验的时间和内容

Tab. 1 The experimental time and content of enclosed experiments

实验代号	时 间 (年·月·日)	实验目的	围隔体积 (m ³)	各实验桶的实验条件
R1	1990.5.12—1990.8.1	了解富营养与赤潮的关系	7.6	C1: 对照,前期营养盐浓度与海区相仿。 L1: 前期维持低磷水体。 H1: 连续富营养盐。
R2	1991.5.3—1991.5.23	可溶性锰增多对浮游植物群落的影响	1.5	C2: 对照,不添加可溶性锰。 L2: 添加可溶性锰 25μg/L。 LB2: 添加可溶性锰 25μg/L, B ₁₂ 1μg/L。 M2: 添加可溶性锰 50μg/L。 H2: 添加可溶性锰 100μg/L。 各桶中 NO ₃ ⁻ ~50μmol/L, PO ₄ ³⁻ ~3μmol/L。
R4	1992.5.20—1992.6.9	可溶性铁与赤潮成因的关系	1.5	C4: 对照。 L4: 添加可溶性铁 10μg/L。 H4: 添加可溶性铁 50μg/L。 各桶中 NO ₃ ⁻ ~50μmol/L, PO ₄ ³⁻ ~3μmol/L。
R5	1992.9.19—1992.12.4	了解扰动对赤潮形成的干扰	1.5	C5: 对照。 D: 与 C5 同等程度富营养,扰动。 N: 富磷,间歇性供给无机氮。

2 结果和讨论

所有实验都是在自然光照和海区相仿的水温条件下进行的。这样可以在不同的可控条件下对比实验桶(袋)与对照桶中浮游植物动态上的差异。除 R1 实验中的对照袋 C1 在实验初期仅发生浮游植物的水华外,其他各桶的对照桶由于添加富足的营养盐,在实验开始后的一段时间里都发生不同程度的赤潮或水华。

2.1 水体稳定性对赤潮形成的影响 为了探明水体扰动对硅藻赤潮形成的影响, R5 实验时,在 D 桶中安装了微型泵,以 20L/min 的速度从 1.5m 深处抽水到表层,抽 4h,停 2h,周而复始。与对照桶 C5 一样,在实验的初期发生了赤潮,以新月菱形藻 (*Nitzschia closterium*) 为优势种,分别占 D 桶、C5 桶浮游植物总量的 98.7% 和 89.1%。图 2 显示,在实验后期 D 桶中硅藻仍占优势;而 C5 桶则出现了海洋原甲藻 (*Prorocentrum micans*) 的赤

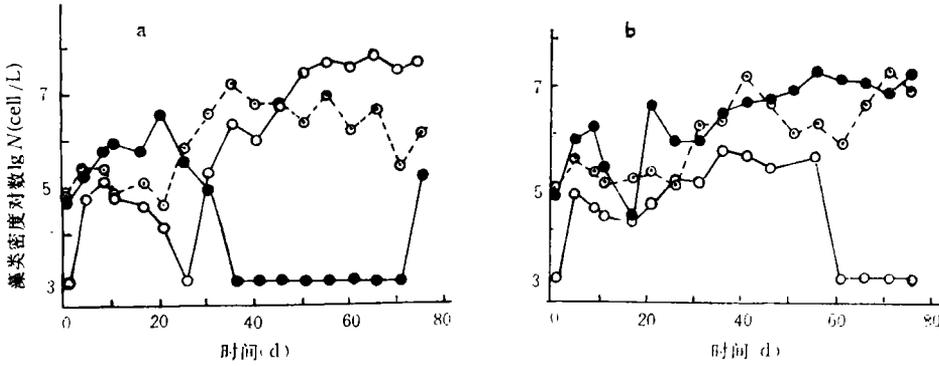


图 2 R5 实验时, C5 桶(a)和 D 桶(b)中硅藻(●—●)、甲藻(○—○)和微鞭毛藻(○---○)的密度变化

Fig. 2 The temporal distribution of diatom (●—●), dinoflagellates (○—○) and microflagellates (○---○) in barrel C5(a) and D(b) of R5 experiment

潮。这说明扰动对富营养的水体中硅藻赤潮的发生及其规模没有影响,相反,会干扰甲藻赤潮的生成。这可能是因为水体受扰动减缓了硅藻的沉降,又改善了营养盐供给状况,从而有利于硅藻的生长。1986 年厦门西海域甲藻赤潮始发区是在宝珠屿以内的海湾,那里风浪小,水体交换差,这与围隔实验有相似之处。水体相对稳定可能是甲藻赤潮发生的一个重要因素。

2.2 无机氮的供给对浮游植物群落变化的影响 据 1987 年厦门西海域调查资料,其无机氮年均值为 $14.5\mu\text{mol/L}$,最低值出现在 2 月份,为 $3.68\mu\text{mol/L}$ 。当年 3 月和 5 月发生的聚生角刺藻 (*Chaetoceros socialis*) 赤潮和浮动弯角藻 (*Eucampia zoodiacus*) 赤潮消亡后,无机氮含量分别降到 $8.81\mu\text{mol/L}$ 和 $11.10\mu\text{mol/L}$ (庄万金等,1991)。

R5 实验中,与连续富营养的 C5 对比的 N 实验桶,保持较为丰富的无机磷 ($>0.5\mu\text{mol/L}$),而无机氮的供给是间歇性的,当无机氮耗尽后过一段时间,再添加无机氮。桶内的浮游植物的群落变化的基本情况见图 3。由于无机氮供给不足,实验初期在原来群落基础上发生的硅藻水华没有持续发展的后劲。在第 9 天达到水华顶峰后就衰退了。水华也没有形成明显的优势种。这个实验说明厦门西海域若在富磷少氮的情况下,氮是可以抑制硅藻水华进一步发展成为赤潮。图 3 显示 N 桶与 C5 桶(图 2a)在实验后期的差异,表明无机氮供给速率对交替的干扰,这将在另文详细讨论。

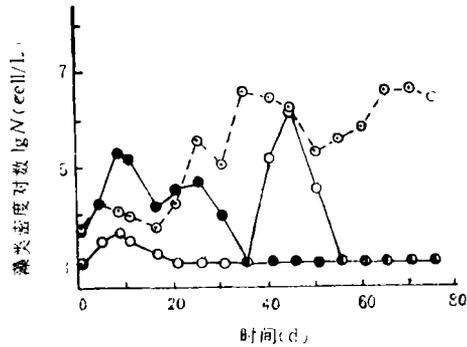


图 3 R5 实验时, N 桶中硅藻(●—●)、甲藻(○—○)和微鞭毛藻(○---○)的密度变化

Fig. 3 The temporal distribution of diatom (●—●), dinoflagellates (○—○) and microflagellates (○---○) in barrel N of R5 experiment

2.3 活性磷与浮游植物的水华或赤潮的关系 图 4 显示了 R1 实验前期 C1, L1 和 H1 袋中的可溶性磷在不同供给条件下叶绿素含量变化。L1 袋在寡磷时 (0—22d) 没发生

水华,在补足丰富的营养盐后(22d后),就发生了水华。蔡子平(1991)将实验数据进行相关分析,认为无机氮与叶绿素相关不明显,而无机磷则明显相关。其他3次实验的对照桶(C2,C4和C5)添足营养盐后发生了不同程度的水华或赤潮。这个实验结果可说明厦门西海域水体中的营养盐浓度,尤其是活性磷的浓度与赤潮的发生和发展有着密切的关系。

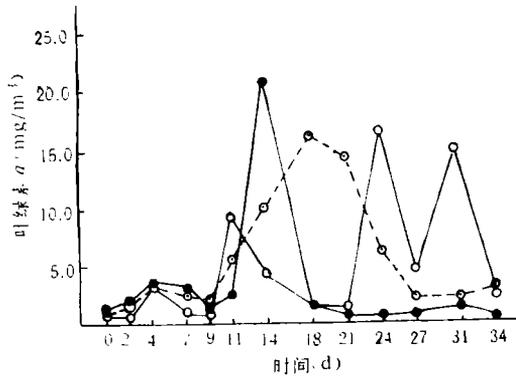


图4 R1实验时,C1(●—●),L1(○—○)和H1(○---○)袋中叶绿素a的时间变化

Fig. 4 Changes of chlorophyll a concentration of C1 (●—●), L1 (○—○), H1 (○---○) during R1 experiment

水体曾出现富氮富磷异常现象。尤其富磷现象,每次赤潮几乎都出现在磷酸盐含量高峰值之后(杜琦,1989;庄万金,1991;张水浸等,1988)。因此,无论是R1的实验结果,海区的春季水华,还是观测到赤潮时的营养盐状况,都说明水体中的活性磷浓度是厦门西海域水华或赤潮的一个诱发或控制因子。

2.4 可溶性锰与赤潮的关系 C2桶的可溶性锰含量为3—4 $\mu\text{g/L}$ 的水平时,也就是厦门西海域海水中可溶性锰的现存量。已足够藻类形成赤潮的增殖需求。过量的可溶性锰并不影响浮游植物的数量和群落结构(林昱等,1993)。

2.5 可溶性铁对硅藻赤潮生物增殖的影响 R4实验开始时实测C4,L4和H4的可溶性铁浓度分别为36,42和130 $\mu\text{g/L}$ 。

2.5.1 浮游植物群落的变化 实验期间,C4发生硅藻水华,硅藻的优势种是中肋骨条藻。L4和H4发生的也是中肋骨条藻的赤潮。它们在水华或赤潮高峰时的几个参数列于表2。

表2 R4实验时各桶水华(或赤潮)高峰的时间和生物量对比

Tab. 2 The parameters of red tide peaks during R4 experiment

围隔桶	开始出现赤潮的实验天数	出现最高值的实验天数	最高值时的细胞密度($\times 10^7\text{cell/L}$)	硅藻占浮游植物的百分比(%)	叶绿素a的最高值(mg/m^3)
C4	5	5	0.09	54.4	4.55
L4	5	7	2.1	89.4	23.64
H4	5	8	7.0	77.6	30.49

从表2可以看到,C4最早出现浮游植物细胞密度峰值,H4最晚。最高细胞密度是H4 > L4 > C4。这表明:添加可溶性铁增大了硅藻的水华规模并形成赤潮;可溶性铁的

浓度越大,赤潮的规模也越大,赤潮持续的时间也越长。

2.5.2 藻类增殖期可溶性铁浓度与生物量的相关性 将 L4 和对照桶合并成一组,用它们在藻类增殖到达峰值前的可溶性铁浓度与其相应的叶绿素含量回归分析, H4 的数据也作同样处理(见图 5)。回归分析结果表明,可溶性铁浓度与叶绿素的含量呈指数相关;其关系式为: $C = Ae^{Bx}$, 其中, C 为叶绿素含量; x 为可溶性铁浓度。

从图 5 可知,在高浓度可溶性铁的海水中,其 A 值较大,叶绿素含量递增速率明显快于低浓度。可见海水中可溶性铁对硅藻的增殖有明显的促进作用。

2.5.3 浮游植物增殖期的细胞净增长速率 细胞净增长速率 μ (已扣除沉降和被摄食部分)为: $\mu = \tau^{-1} \cdot \ln(C_t/C_0)$, 式中, C_0 为浮游植物初始细胞密度; C_t 为浮游植物水华或赤潮时细胞密度; τ 为从 C_0 到 C_t 的时间间隔 (d)。表 3 列出计算结果。 μ 值大小顺序为: H4 > L4 > C4。说明海水中可溶性铁可能参与了藻类生殖的生理过程。同一桶中硅藻的 μ 值均比浮游植物的大。这表明可溶性铁对中肋骨条藻增殖的促进作用强于其他藻类。

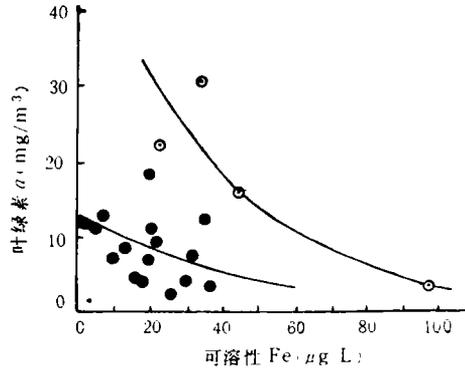


图 5 R4 实验藻类增殖期内可溶性铁与叶绿素 a 的关系曲线

Fig. 5 The relationship curves of chlorophyll a and dissolved Fe during the algal proliferation period of R4 experiment

● 低浓度铁; ○ 高浓度铁。

表 3 R4 实验时藻类增殖期桶中硅藻和浮游植物的细胞净增长速率(d⁻¹)

Tab. 3 The growth rates of diatom and phytoplankton during the proliferation period of R4 experiment (d⁻¹)

围隔桶	C4	L4	H4
浮游植物	0.139	0.744	0.855
硅藻	0.201	0.883	0.893

实验结果说明,可溶性铁对某些藻类的增殖有着明显的促进作用。在厦门西海域的海水中添加一定量的可溶性铁会促进这些藻类增殖而引发赤潮或增大赤潮的规模。1987 年厦门西海域发生的浮动弯角藻赤潮时,也同样发现可溶性铁含量异常增大的现象。陈于望(1987)、陈慈美(1990)的室内藻类培养实验也证明添加可溶性铁对藻类增殖起促进作用。因此,可以认为厦门西海域海水中可溶性铁的异常增加是诱发硅藻赤潮的因子之一。

2.6 维生素 B₁₂ 对浮游植物增殖的影响 对比实验是和 R2 实验同时进行的。向 LB2 添加和 L2 同样量的二氯化锰,另增添维生素 B₁₂ 浓度约为 1µg/L。结果如同上述, C2 和 L2 在第 4 天就已达到中肋骨条藻赤潮的峰顶。同一天的 LB2 为 6.6 × 10⁷ cell/L (还不是赤潮峰顶),是 C2 或 L2 的一倍多。

比较这4d的中肋骨条藻的细胞净增长速率 μ 值, C2, L2 和 LB2 分别为 1.20, 1.14 和 1.38d⁻¹。可见, 由于添加 B₁₂, 加速了中肋骨条藻的分裂速度。使数量增多。这可能是 B₁₂ 单独对中肋骨条藻增殖起促进作用, 或是与可溶性锰交互作用的结果。说明, 在富营养的围隔生态系中, B₁₂ 异常增多, 会加快原有浮游植物群落中需要 B₁₂ 的藻类(如中肋骨条藻)细胞分裂的速度, 增加其数量, 进而诱发赤潮或增大赤潮的规模(见另文)。

3 结语

4 次中尺度围隔实验的部分结果验证, 水体扰动对硅藻赤潮没有明显的影响。营养盐含量与厦门西海域赤潮形成密切相关, 活性磷含量是该海域硅藻赤潮的一个诱发或控制因子。厦门西海域海水中的可溶性锰现存量 3—4 μ g/L 的含量水平时, 已足够供海区浮游植物增殖的需求。而海区中可溶性铁的异常增多, 可能会引发硅藻赤潮。维生素 B₁₂ 加速需要该维生素的硅藻的分裂, 而诱发或增大赤潮规模。

参 考 文 献

- 庄万金, 1991, 厦门西海域表观耗氧量的分布特征及同赤潮关系的初步探讨, 海洋通报, 10(4): 25—32。
庄万金等, 1991, 厦门西海域营养盐的地球化学 I. 无机氮, 海洋通报, 10(5): 14—20。
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。
张水浸等, 1988, 厦门西港区一次赤潮的观测, 海洋学报, 10(5): 602—608。
陈于望等, 1987, 营养物质和环境因子对三种微藻生长的综合效应, 海洋环境科学, 6(4): 20—26。
陈孝麟等, 1993, 可溶性铁对中尺度海洋围隔生态系中浮游生物群落数量变动的影响, 台湾海峡, 12(2): 160—163。
陈慈美等, 1990, 纳污海域营养物质形态、含量与浮游植物增殖竞争关系, 海洋环境科学, 9(2): 1—7。
林昱等, 1992, 围隔生态系内富营养引起赤潮的初步分析, 海洋与湖沼, 23(3): 312—317。
林昱等, 1993, 围隔生态系中可溶性锰对两种形成赤潮藻类增殖的影响, 海洋学报, 15(4): 91—97。
蔡子平等, 1991, 海洋围隔生态系中叶绿素 a 的变化及其影响因素, 台湾海峡, 10(3): 229—234。
蔡清海, 1988, 厦门西海域氮、磷含量, 海洋环境科学, 7(4): 43—47。

**PRELIMINARY STUDY ON RED TIDE FORMATION BASED
ON RESULTS FROM ENCLOSED
EXPERIMENTAL ECOSYSTEMS
—THE RELATIONSHIP BETWEEN DIATOM RED TIDE
WITH SOME PHYSICAL AND CHE-
MICAL FACTORS**

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

ABSTRACT

This paper reports the results from a series of Marine Enclosed Ecosystem. Experiments on the mechanism of red tide occurrence have conducted in the land-based tank at the Third Institute of Oceanography, SOA, since 1990.

Some results of artificially induced red tide in 4 mesocosm experiments, reported natural red tide processes in Western Xiamen Harbour, the relationship between the occurrence and distribution scale of diatom red tide, and relevant physical and chemical factors, are analysed and discussed in this paper. Present some results are summarized below.

There was little influences on diatom red tide occurrence by stirring the water column. Close relationship existed between nutrient concentrations and red tide formation in especially the concentration of active phosphates, which might be a inducing and controlling factor for diatom bloom in Western Xiamen Harbour. The (3—4) $\mu\text{g/L}$ dissolved Mn, in the water was enough to support the phytoplanktonic proliferation. The unusual increase of dissolved Fe concentration in this region might stimulate the occurrence of diatom red tide. Vitamin B₁₂ can promote the division rate of some diatom, and so induce red tide occurrence or enlarging the distribution scale.

Key words Red tide Enclosed ecosystem Western Xiamen Harbour
Dissolved Fe Active phosphate