维普资讯 http://www.cqvip.com

213—218

8275(4)

第12卷 第3期 生 态 学 报 Vol.12,No.3
1992年9月 ACTA ECOLOGICA SINICA Sep.,1992

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*

林 昱 陈孝麟 庄栋法 吴省三
蔡子平 唐森铭 林荣澄
(国家海洋局第三海洋研究所海洋实验生态研究中心，厦门，361005)

Q948.885.3

摘 要

1990年5至7月，在国家海洋局第三海洋研究所陆基水池中进行了了围隔生态系内富营养化引起的生态效应实验。实验表明，富营养的围隔袋中，浮游植物群落结构逐渐发生了变化，组成和数量都有很大的变动，形成水华和赤潮。并发生了种群的演替。水华以硅藻开始，形成高潮之后便衰退。随后微型毛藻和甲藻开始较大量繁殖。金藻和甲藻在实验中形成赤潮，最高值达到6.7×10^{10}cells/m^3。甲藻和硅藻的生长似乎互相抑制。实验初期，在硅藻繁盛时，甲藻的种、属和数量都很少。而在演替的后期，硅藻衰落时，甲藻占优势。数量最高达2.6×10^8cells/m^3。实验演示了发生在硅藻水华之后的甲藻赤潮发展过程，与1986年厦门西海域发生的裸甲藻赤潮的发展过程相似。实验结果为进一步研究甲藻赤潮的形成规律及其预测预报积累了资料和经验。

关键词：围隔实验，赤潮，演替，海洋生态系，浮游植物。

生物总是与其生存的环境相统一的。因此，各个海域的生物群落也都有着自己的生态分布特性。但如果有外来因素的干扰，可能使群落中原有的种间关系受到破坏，引起群落结构及数量的变化，进而改变了群落的组成，严重的甚至导致生态系不可逆转的破坏[1,2]。比如海洋富营养化引起的赤潮[3]，结果导致了浮游植物的多样性指数降低，某些浮游动物的死亡，造成海洋灾害，等等。所以研究了解各种环境因子的变化对整个浮游植物群落变动的影响，在海洋生态学的研究和环境保护上，都具有重要意义。

1990年5月至7月，首次应用围隔实验技术进行富营养引起的赤潮的模拟实验（代号R_1）。本文就实验中发生的赤潮兴衰过程及浮游植物群落结构和数量变动，作初步分析。

一、方 法

R_1实验在厦门国家海洋局三所陆基水池中进行。池长20m，宽10m，深5m。池距海岸约8m。实验时每天用泵抽取堤外海水进入池内，保持池内水深5m。实验用的围隔袋固定在陆基水池的浮筏上(图1)。围隔袋用聚丙烯编织布制成，袋表面涂抹一层聚乙烯以增强其防渗能力。每袋约围隔7.5m 水体。袋灌满海水后静置1d，抽去沉积物，再按实验设计要求添加营养盐。并开始观测浮游植物群落结构和数量变化。

本文仅就富营养盐的围隔袋（H袋)的观测结果作分析讨论。H袋在实验开始就添加营养

* 获国家自然科学基金重大项目9389003的资助
本文于1991年3月12日收到，修改稿于1992年10月28日收到。

维普资讯 http://www.cqvip.com

盐，硝酸盐、磷酸盐和硅酸盐的浓度分别为30， 3 和 20μmol/L。以后仍根据每次对水样的跟踪测定值往袋内添补营养盐，以保持袋内水体营养盐浓度维持在原来的水平上。直至实验的第62天，才停止添加营养盐。

现场光照用 LX101 型袖珍照度计测量。水温用玻璃水银温度计测量。盐度用 HD-2型电导盐度计测量。活性硅和活性磷按《海洋调查规范》的方法测定。硝酸盐采用铜镉还原-对硝基偶氮法测定。铵氮用溴酚蓝法测定。叶绿素a是先用丙酮萃取后在唐纳萤光计上测定的。浮游植物水样经 Lugol's溶液固定后用倒置显微镜鉴定并计数。

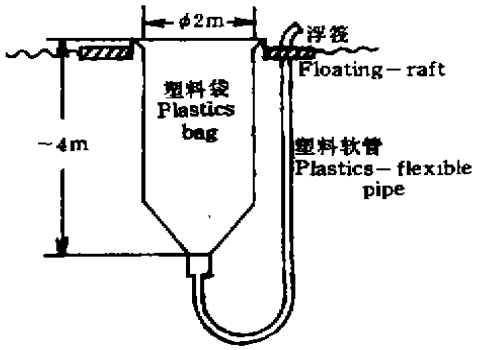

图 1 围隔实验装置示意图

Fig.1 The design of enclosure experiment

二、结 果

该围隔袋在实验期间叶绿素 a含量随时间变化的情况见图 2。从图中看出，在实验的第4天，有一个小小的峰值。随后，从第 9 至第27天，叶绿素a含量出现一个较大的峰。第18—21天处于峰值。在第27天到第41天之间叶绿素a含量处于低谷。第45天开始叶绿素a含量再次升高，在第55天处于峰巅。随后，虽有些波动起伏，但直到实验结束前 1 周，基本上都处于较高含量。

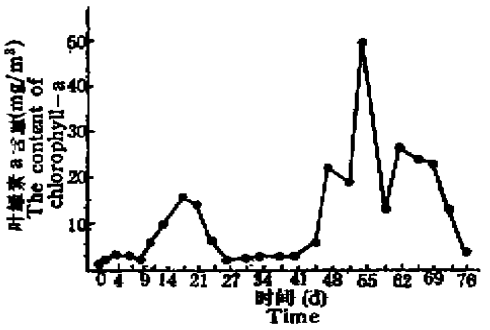

图 2 叶绿素a含量随时间的变化

Fig.2 The chlorophyll-a in the enclosure bag during experiment

实验期间浮游植物细胞密度的变动和叶绿素a 含量变动的趋势基本一致。而整个浮游植物群落的结构和数量都有很大的变化。第 1 个小高峰（第 4 天）是浮游植物在原来的群落结构基础上大量繁殖引起的。仅仅是数量有所增加而已，为实验初始时的 6 倍。第 9 天后叶绿素a含量开始升高，在高峰时(第21天)，浮游植物数量达 3.1×10^9cells/m³，形成水华。这时，浮游植物群落结构已有所变化。中心硅藻已基本消失（表 1），而微鞭毛藻开始大量生长，1 种金藻（种名待定）开始出现。处于高峰时的叶绿素 a含量主要是由羽纹硅藻作出的贡献，其数量约增加了 1 — 2 个数量级。羽纹硅藻的种、属仍基本保留原有的多样性，主要是舟形藻和菱形藻(表 1)。与以往围隔实验不同，R_1 实验在这段时间里，底栖硅藻也大量繁殖。从袋壁和袋内挂板采样发现，水线至水线以下 2.3m 处均有底栖硅藻附着在袋壁上。在第17天和第20天采样计数，平均数量分别为8.3×10^4cells/cm²和 1.9×10^5cells/cm²。主要是底栖的舟形藻(*Navicula*)和菱形藻 (*Nitzschia*)。这次高峰在第21天到达峰顶后开始回落。羽纹硅藻的数量从 8.3×10^8cells/m³跌落到第24天的 4 ×10cells/m³(图 3)。种属从10种减少到 1 种。微鞭毛藻的数量也同时回落。而甲藻却开始较大量地生长，在第21天达到了4.7×10^8cells/m³，裸甲藻(*Gymnodinium*)和海洋原甲藻 (*Prorocentrum micans*)居多。在

维普资讯 http://www.cqvip.com

叶绿素a含量处于低谷的第27天至第47天，甲藻的数量较第21天减少约1个数量级，并在这个数量级上下徘徊，直到第66天。羽纹硅藻的数量基本保持在每毫升几个至几十个水平上。微鞭毛藻和金藻的数量也明显减少。但金藻从第41天起就开始大量生长，且在第45天后成为优势种。在第48天和第55天分别占当天浮游植物总数量 6.74×10^{10}cells/m³和 7.77×10^{10} cells/m³的98%和64%。这段时间，海洋原甲藻数量也有较大幅度的增长，最多达2.6×10^{8} cells/m³。从第48至第58天，硅藻已基本镜检不出。在叶绿素 a 出现最高值的第55天，除金藻和甲藻占优势外，还有相当部分是微型藻类（<2μm）。其数量多达 2.5×10^{10}cells/m³，并持续到第59天(1.0×10^{10}cells/m³)，此后便消失了。而硅藻（主要是*Nitzschia*)又开始出现。并且数量逐日增多，直到实验结束。同时，甲藻（主要还是裸甲藻和海洋原甲藻）还维持在10^{8}cells/m³的水平上。和硅藻增多相反，从第69天以后，基本镜检不出了。

浮游藻类的各个种属在实验期间出现的时间(表1)表明，中心硅藻在实验头 10d存在着许多种属。羽纹硅藻在前47d都存在，随后消失过，在实验末期又出现。以11—23d出现的种属较多。与硅藻相比，在实验中期，甲藻出现的种属较多。图3和描绘了硅藻、甲藻和微鞭毛藻（1—20μm）的密度指数随时间的变化。从图中看到，甲藻与硅藻的数量有着近似的倒映关系。第11至第18天，甲藻几乎镜检不出时，硅藻恰有较高数量。第18天后，硅藻数量下跌，甲藻数量就开始增多。第45天以后，硅藻再次回落到几乎镜检不出时，甲藻具有较高数量。55d以后，硅藻再次逐步回升，甲藻却在第69天起几乎镜检不出。

表 1　浮游植物各种、属出现的时间

Table 1　The appearance time of the species and genus of phytoplakton during the experiment

出现时间 Appearance time (d)		1—10	11—20	21—23	24—47	48—58	59—68	69—76
骨条藻	*Skeletonema costatum*	+						
细弱海链藻	*Thalassiosira subtilis*	+						
角毛藻	*Chaetoceros*	+						
根管藻	*Rhizosolenia* sp.	+						
中肋月形藻	*Amphora costata*	+	+	+	+			+
舟形藻	*Navicula*	+	+	+	+			+
菱形藻	*Nitzschia*	+	+	+	+		+	+
曲舟藻	*Pleurosigma*	+	+					
牡蛎月形藻	*Amphora ostrearica*		+	+				
蜂腰双壁藻	*Diploneis bombus*		+	+				
脆杆藻	*Fragilaria*		+	+				
角藻	*Ceratium*				+			
裸甲藻	*Gymnodinium*	+		+	+	+	+	
多甲藻	*Peridinium*				+		+	
卵甲藻	*Exuviaella*			+			+	
海洋原甲藻	*Prorocentrum micans*				+	+	+	
金藻	*Chrysophyta*	+	+	+	+	+	+	+
微鞭毛藻	*Microflagellates*(1—20μm)	+	+		+	+	+	+

R_1实验结果表明，围隔体内加入营养盐可使浮游植物发生水华和赤潮[4]，从而导致浮游植物群落结构和数量发生变化。并出现演替现象。初期基本以水体中原有的群落结构为基

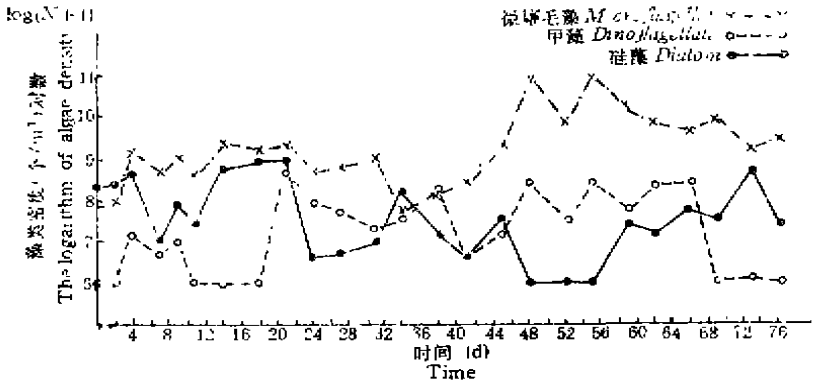

图 3 实验期间硅藻、甲藻和微鞭毛藻密度随时间变化

Fig. 3 The temporal distribution of diatom, dinoflagellate and microflagellate during the experiment

础，产生以硅藻为优势的繁盛高峰。待中心硅藻先行消失后，羽纹硅藻仍维持大量繁殖一段时间，随后也逐渐衰退。这时，甲藻和微鞭毛藻开始大量繁殖。甲藻是在演替的后期在种类和数量上占优势。总之，硅藻水华时，甲藻处于劣势。而硅藻衰退时，甲藻便开始兴旺。

三、讨 论

Magarlef(1962)[5] 根据西班牙、地中海和加勒比海浮游植物的季节演替现象总结性地提出：演替初期，营养盐充足，大型硅藻占优势。后期营养盐供给不足，能活动的大型甲藻占优势。这个对演替过程的归纳得到了许多海洋生物学家的赞同，并从各自的海洋调查结果获得佐证。如Revelente从 Northern Adriatic 断面的周年调查结果中归纳认为，该海域的浮游植物季节演替是从冬季硅藻占优势开始，到夏季甲藻占优势结束。郑重等[6]也提到，在温带海洋，甲藻大量出现在春季硅藻高峰之后的夏季，那时海水中营养盐非常贫乏。

这个观点也曾得到围隔实验的验证。1980年 Grice 设计的海洋食物网实验，围隔了1335m³的海水，实验进行了 111d。通过实验观测，围隔体内初期发生的是硅藻水华，随后鞭毛藻兴起。最后发生了梭角藻(*Ceratium fusus*)的赤潮。因此，Davis认为[7]，Magarlef提出的演替规律是正确的。但由于这种实验规模大，时间长，受制约的条件多，因此，这次实验成为围隔生态系中对浮游植物的演替过程观测最为详细的一次。

R_1 实验是专为赤潮研究而设计的。相比之下，规模小得多。一些实验条件也有很大的差别。从硅藻的数量看，实验初期发生了水华，密度高达 8.3×10^5cells/m³。但在这期间，微鞭毛藻的数量也大量增多。这和我们以前的围隔实验相比，硅藻增长的规模相对显得小了。图 4 是1985年在同一陆基水池中进行围隔实验的一个参照袋（围隔水体中仅添加营养盐）中各种藻类数量在水华前后所占总量的百分比图。它明确地显示出一段时间里硅藻数量占有优势。这个图代表了同类实验现象的趋势。多年来，在同一个陆基水池里先后进行过多次污染生态效应实验。有 7 个围隔体发生水华或赤潮，优势种都是硅藻，发展趋势如同图 4 。所以，可以认为，浮游植物水华总是先以硅藻开始。R_1 实验时这个现象不很明显，这

维普资讯 http://www.cqvip.com

可能和当时围隔的水系中生物群落结构和光照有关。R_1实验用水体是离岸不到 2m的海水。以往实验用水体是抽取离岸 150m 的海水。可能因此带入较大量的底栖藻类。实验初期又恰逢阴雨天气，光照不足，导致底栖硅藻的大量繁殖。如果按第17天和第20天采样计数结果折算，这些底栖硅藻分散在水体中可以使浮游藻类的数量分别增多 1.6×10^9cells/m³和 3.7×10^7cells/m³。数量相当可观。

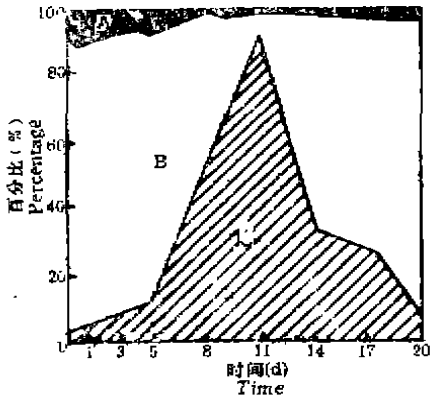

图 4　MEEE-85实验期间，硅藻C、甲藻A和微鞭毛藻B占浮游植物总量的百分比

Fig. 4　The percentage of diatom C, microflagellate A and dinoflagellat B in total phytoplakton in MEEE-85 experiment

与硅藻和甲藻相比，微鞭毛藻的数量变动相对是稳定的。只是在第 48至第55 天形成高峰。这可能和 R_1 的实验条件有关。围隔水体相对稳定，这是围隔实验条件和海区自然条件的主要不同之一。也可能是 R_1 实验过程中微鞭毛藻久盛不衰的原因。赤潮高峰时，围隔水体表层飘浮一层黄色泡沫。如果在天然海区，受到潮汐、湍流和波浪等的作用，就不可能存在。金藻的数量也就不可能在发生赤潮时占优势而掩盖了甲藻的数量优势。尽管这样，实验结果仍似乎可以说明微鞭毛藻和金藻的大量繁殖并不影响甲藻赤潮的形成。

从R_1实验观测到的演替过程，基本上与 Magarlef 所描述的过程相似。实际上，抽取实验用水体的厦门西海域，浮游植物的季节演替并不明显存在如同 Magarlef 描述的过程和顺序。这可能与厦门地处亚热带有关。杨清良[8]总结了厦门港浮游植物调查的结果，指出硅藻无论在种类组成或细胞密度上，四季都占绝对优势。林金美[9]指出厦门附近海域甲藻在 6 月出现高峰。这似乎说明甲藻出现的高峰正是在春季浮游植物水华（3月、4月）之后。意味着甲藻在整个浮游植物群落中占据的比例有所增大。这个海域的浮游植物群落结构及其季节演替，无疑是这个海域的浮游植物群落长期适应该地域环境条件的结果。但是，若受到外界条件的干扰，必引起整个浮游植物群落结构的变动。R_1实验结果就说明这一点。1986年厦门西海域发生的赤潮也是一个典型的事例。令人感兴趣的是，这次赤潮发展过程与 R_1 实验所观测到的赤潮发展过程几乎相同。杜琦[10]这样描述：第一次赤潮发生在 5 月17日，由地中海指管藻 (*Dactyliosolen mediterraneus*) 异常增殖引起。5 月25日赤潮消失，6 月初至 6 月底又出现了裸甲藻的赤潮。所以，无论从R_1和 Grice的实验结果看，还是从实际海区赤潮发展过程看，甲藻赤潮总是演替的最后一环，总是在硅藻水华之后[7]。

总之，R_1实验揭示了厦门西海域水体富营养化引起赤潮前后浮游植物种群演替的过程。至少是一种类型的赤潮发展过程的显示。其实际意义在于：为甲藻赤潮的预报提供实验根据。厦门西海域春季水华或硅藻赤潮之后，应警惕甲藻赤潮灾害的发生。

维普资讯 http://www.cqvip.com

参 考 文 献

〔1〕沈国英、施并章，《海洋生态学》，厦门大学出版社，1990，119—255。
〔2〕Valiela.I.,*Marine ecological processes*.Springer-Verlag,1984,364—440.
〔3〕IOC, IOC workshop on international cooperation in the study of red tides and ocean blooms. *workshop report*. 1987,No.57. 1—10.
〔4〕林 昱、陈孝麟、庄栋法等，围隔生态系内富营养引起赤潮的初步研究，海洋与湖沼，1992，23(2)：213—216。
〔5〕Magarlef,R.,Succession in marine population.*Adv.Front.Pl.Sci.*(*New Delhi*) 1983,2,137—188.
〔6〕郑 重、李少菁、许振祖，《海洋浮游生物学》，海洋出版社，1984，70—97。
〔7〕Davis, C.O., The importance of understanding phytoplankton life strategies in the design of enclosure experiments,*Marine Mesocosms*,Springer-Verlag.1982, 323—332.
〔8〕林清良，海洋生物，台湾海峡，1988，7(1)：1—10。
〔9〕林金美，厦门附近海域浮游甲藻类的分布，生态学报，1990，10(2)：139—144。
〔10〕杜 琦，厦门西海域赤潮的研究，暨南大学学报，赤潮研究专刊，1989，57—67。

PRELIMINARY ANALYSIS FOR THE STRUCTURES OF PHYTOPLANKTON COMMUNITY IN A MARINE ENCLOSED ECOSYSTEM BEFORE AND AFTER A RED TIDE PROCESS

Lin Yu Chen Xiao-Lin Zhuang Dong-Fa Wu Sheng-San
Cai Zi-Ping Tang Sen-Ming Lin Rong-Chen
(Third Institute of Oceanography, SOA, Xiamen, 361005)

A reseach experiment on ecological effects causeed by eutrophication in an enclosure ecosystem was set up in a land-based tank at the Third Insitute of Oceanography, SOA, from May to July in 1990. The results show,In the eutrophic enclosure bag, the phytoplankton community structure gradually changed in its composition and numbers of species, resulting in phytoplankton bloom and population succession.Bloom started with diatom.Microflagellate and Dinoflagellates began to grow in great quantity at the end of diatom bloom. Chrysophyta and dinoflagellate dominated in the bloom during the experiment with a maximum of 6.7×10^{10}cells/m^3. It was probably that the growth of diatom and dinoflagellate were restrained from each other. In the beginning of experiment,dinoflagellate species and numbers were depressed during diatom bloom. After diatom declined, dinoflagellate dominated in the last stage of the succession,with a maximum of 2.6×10^{8}cells/m^3. The experiment showed a case of Red Tide development which dinoflagellate Red Tide followed diatom bloom. The process was similar to Gymnodinium Red Tide occuring in Xiamen Bay in 1986. The results of experiment may be taken as the references in Red Tide forecast and research.

Key words: enclosure experiment, red tide, succession.