

# 厦门西港引发有害硅藻水华 磷的阈值研究\*

林昱 林荣澄

(国家海洋局第三海洋研究所 厦门 361005)

**提要** 1995年10月,在厦门市国家海洋局第三海洋研究所的陆基水池中,应用海洋围隔生态系统实验技术,研究了在无海流、盐度等因子干扰的情况下,磷的形态、分布及其与浮游植物生物量的相关性。结果表明,海水中的可溶性无机磷(DIP)随时间呈指数函数减少。浮游植物生物量主要与可溶性无机磷密切相关:  $[Chl-a] = A \times e^{-B[DIP]}$ , 这种相关的浮游植物生物量表现2d左右的滞后现象。还探讨了限制浮游植物增殖的DIP的最低浓度为0.3—0.4 $\mu\text{mol/L}$ , 从DIP表观浓度估算浮游植物可能达到的最大生物量为  $[Chl-a] = 10\text{mg/m}^3$ , 并由此估算出引发中肋骨条藻赤潮的DIP的阈值为1.2 $\mu\text{mol/L}$ , 作为赤潮预测预报的参考。

**关键词** 厦门西港 可溶性无机磷 赤潮 有害水华预测预报

**学科分类号** X171

磷是海洋浮游植物生长的重要营养元素之一。近年来,海洋和港湾的富营养化问题日益突出。磷的通量,尤其磷对环境的长期生态效应问题是国际海洋界共同关注的研究课题之一(Harrison, 1983; Smith *et al.*, 1985)。厦门西海域海水已处于轻度富营养水平,多次发生过赤潮,该海域的氮磷比值常年较高。多数学者(陈其焕等, 1993; 陈淑美等, 1992; 陈水土等, 1993, 1994; 洪华生等, 1989; 陈慈美等, 1993)认为磷与赤潮发生有密切关系,暨卫东等(1990)认为浮游植物生物量与海区活性磷存在的相关性受季节和海流的影响。本文探讨磷的不同形态与浮游植物生物量之间的关系,以期得出引发硅藻赤潮的磷的阈值,为赤潮的预测预报和海域资源的合理开发利用提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 围隔实验装置

1995年10月在厦门市国家海洋局第三海洋研究所内临海陆基水池中放置3个聚乙烯桶作为围隔桶(桶容量为60L),池内海水深2m,并根据流失情况及时添加,以保持池水深度并使池内水循环,使水温与邻近海域的相近。

### 1.2 实验用水

实验当日,用泵抽取正处于高平潮的海水,同步分流到3个围隔桶中,以保证各桶的浮游生物群落基本相同。抽水点距实验池约为10m。

\* 国家自然科学基金资助项目,39570145号;福建省自然科学基金资助项目,D94010号。林昱,男,出生于1944年7月,副研究员, Fax:0086-0592-2086646

收稿日期:1997-04-22, 收修改稿日期:1998-09-20

### 1.3 实验方法

3个围隔桶充满海水后,向其中两个桶(M桶和N桶)添加营养盐,使之 $\text{NO}_3^-$ 和 $\text{PO}_4^{3-}$ 浓度分别为 $50\mu\text{mol/L}$ 和 $1.8\mu\text{mol/L}$ ,以保证桶内浮游植物群落能发生水华。另一个桶(O桶)中不添加营养盐,保留原有的营养盐含量, $\text{NO}_3^-$ 和 $\text{PO}_4^{3-}$ 浓度分别为 $17.9\mu\text{mol/L}$ 和 $0.89\mu\text{mol/L}$ 。每天8:20和18:00将桶内海水各搅动一次。

### 1.4 采样和检测方法

每天8:00采集水样。积分采样。部分水样分别进行浮游植物的计数和种类鉴定、叶绿素 $a$ 含量和营养盐三氮的测定,分析方法按《海洋监测规范》(国家海洋局,1992)。

磷的形态测定:将海水样经GF/C玻璃纤维滤膜过滤,部分滤液按《海洋监测规范》测定可溶性无机磷(DIP);未滤水样按同法测定无机磷(IP)含量。另一部分滤液和未滤水样,在 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 存在条件下,经过硫酸钾湿法高温氧化后,再按DIP测定法测定,分别测得可溶性磷(DP)和总磷(TP)含量。其它形态磷含量由计算可得:可溶性有机磷(DOP) = DP - DIP; 颗粒磷(PP) = TP - DP; 颗粒无机磷(PIP) = IP - DIP; 颗粒有机磷(POP) = PP - PIP。

## 2 结果与讨论

### 2.1 浮游植物群落随时间的变动

M桶和N桶内的富有植物群落都发生了硅藻的水华。由表1可知,桶中叶绿素 $a$ 含量的变化趋势是一致的,但叶绿素 $a$ 达到峰值的时间差约为1d。M桶和N桶在叶绿素 $a$ 达到峰值时,藻类细胞密度分别为 $9.1 \times 10^6 \text{ cells/L}$ 和 $4.6 \times 10^6 \text{ cells/L}$ ,两桶中的中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)所占的比例分别为78.8%和62.5%。这可能是因为在实验围隔体捕捉的水体中,浮游植物群落存在着结构差异,在第3天,M桶中生长速度较快的中肋骨条藻的数量就比N桶多。O桶由于实验时没有添加营养盐,未发生藻类的水华,3天后即镜检不出硅藻,其群落以甲藻和其它微型鞭毛藻为主;叶绿素 $a$ 的含量前3天为 $1.7\text{--}1.9\text{mg/m}^3$ ,而后迅速降至 $1\text{mg/m}^3$ 以下(表1)。

表1 M桶、N桶和O桶中叶绿素 $a$ 含量( $\text{mg/m}^3$ ) 随时间的变化

Tab.1 Temporal changes in Chl- $a$  contents ( $\text{mg/m}^3$ ) in the barrels M, N, and O

时间(d)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
M桶	1.9	1.9	2.3	3.0	3.3	6.1	8.7	11.0	16.4	19.3	12.5	10.0	3.4	1.9	1.1
N桶	1.9	1.6	2.2	3.1	2.1	5.6	8.0	9.1	9.9	10.1	18.0	12.7	4.7	3.6	2.1
O桶	1.9	1.9	1.7	1.7	1.0	1.1	1.0	0.9	0.4	—	—	—	—	—	—

### 2.2 磷的形态

表2列出了M桶中不同形态的磷随时间的变化。DOP、PIP和POP含量变化不大,尤其POP含量并没有因为浮游植物水华生物量增加而明显地增加。DIP和TP含量随时间减少,两者之间表现很好的相关性,这与海区调查结果(陈水土等,1993)一致。DIP含量减少的主要原因是由于藻类增殖消耗。其它形态的磷没有表现出明显的和有规律的变化,可能是因为各形态的磷已处于稳态平衡。TP含量的减少主要有两个原因,一是因藻类和碎屑的沉降而从水体中移出;二是因藻类和碎屑被摄食而在食物网中传递移出,导致了TP

的减少。关于磷的形态的转移和再生问题, 将另文讨论。

N 桶的情况与 M 桶相似。两桶的 DIP 含量随时间的变化关系见表 3, 其关系式为:

$$[\text{DIP}] = 2.77e^{-0.300t} \quad (r = 0.951, n = 26)$$

式中, [DIP] 为可溶性无机磷的浓度 ( $\mu\text{mol/L}$ ),  $t$  为时间 (d)。

O 桶中 DIP 含量下降 3d 后基本不再变化。DOP 和 POP 含量随时间有些波动, 但幅度不大。

表2 M桶中不同形态磷含量( $\mu\text{mol/L}$ )的时间分布

Tab.2 The temporal distribution of contents of different phosphorus forms ( $\mu\text{mol/L}$ ) in barrel M

时间(d)	1	2	3	4	5	7	8	9	10	11	12
DIP	1.72	1.58	1.29	1.14	0.71	0.14	0.11	0.08	0.13	0.10	0.08
DOP	0.14	0.15	0.20	0.23	0.32	0.32	0.24	0.21	0.20	0.19	0.22
POP	0.24	0.22	0.07	0.14	0.28	0.28	0.30	0.29	0.18	—	0.12
PP	0.39	0.22	0.15	0.16	0.32	0.38	0.37	0.33	0.22	0.37	0.13
TP	2.25	1.96	1.63	1.53	1.34	0.83	0.72	0.62	0.55	0.66	0.43

表3 各桶中DIP含量( $\mu\text{mol/L}$ )的时间分布

Tab.3 The temporal distribution of DIP contents ( $\mu\text{mol/L}$ ) in barrels

时间(d)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
M桶	0.89	1.72	1.58	1.29	1.14	0.71	0.34	0.14	0.11	0.08	0.12	0.10	0.08	0.05
N桶	0.89	1.67	1.54	1.26	1.14	0.67	0.53	0.57	0.41	0.25	0.15	0.16	0.10	0.06
O桶	0.89	0.69	0.62	0.48	0.49	0.41	0.43	0.46	—	—	—	—	—	—

### 2.3 浮游植物增殖期其生物量与主要形态磷的关系

将平行的 M 桶和 N 桶在增殖期 (M 桶: 1—9d; N 桶: 1—10d) 每个采样日当天的 DIP 含量与叶绿素  $a$  含量作线性和非线性回归, 分别得函数 1 和函数 2; 将当天的 DIP 含量与 2 天后的叶绿素  $a$  含量作线性回归, 得函数 3 (表 4)。三个函数都表现出相关关系, 其中函数 2 的相关性最好, 也最符合浮游植物生长规律; 函数 1 的相关性最差。因此本文对浮游植物生物量与 DIP 的关系进行分析讨论时, 采用了函数 2, 摒弃了研究报道中常见的表面上也存在有很好的相关性的线性回归方程。如果将函数 1 和函数 3 再次对比, 就不难发现, 浮游植物的叶绿素  $a$  含量与相关的 DIP 值存在着约 2 天左右的时间滞后现象。用这期间 M 桶和 N 桶各自的 DOP 值与叶绿素  $a$  含量作线性回归,  $r$  值分别为 0.33 ( $n = 8$ ) 和 0.43 ( $n = 9$ ), 表现不相关。

O 桶当日的 DIP 值与叶绿素  $a$  含量作线性回归也表现相关 ( $r = 0.773, n = 8$ ); 而 DOP

表4 M桶和N桶在增殖期中DIP含量与叶绿素a含量关系函数及其参数

Tab.4 The function and parameter between contents of DIP and Chl- $a$  in barrel M and N during growth period

函数	回归方程	$n$	$r$
1	$[\text{Chl-}a] = -8.59[\text{DIP}] + 14.36$	19	0.889
2	$[\text{Chl-}a] = 16.62e^{-1.37[\text{DIP}]}$	19	0.971
3	$[\text{Chl-}a] = -9.69[\text{DIP}] + 18.39$	19	0.934

与叶绿素  $a$  含量则不相关 ( $r = 0.158, n = 7$ )。

实验结果表明, DIP 对浮游植物增殖所作的贡献最为明显。

#### 2.4 硅藻生长的 DIP 最低限值

第 3 天以后, O 桶中的 DIP 含量就已经降至  $0.5\mu\text{mol/L}$  以下, 其浮游植物群落也从以硅藻为主变成以甲藻为主。根据实验中得到的叶绿素  $a$  含量变化函数和 DIP 衰减函数计算可得, M 桶和 N 桶的 DIP 最低限值(即藻类开始衰败的 DIP 浓度)分别为  $0.17\mu\text{mol/L}$  和  $0.20\mu\text{mol/L}$ 。这表明当实验海水中 DIP 浓度降到  $0.20\mu\text{mol/L}$  时, 以硅藻为主的浮游植物群落停止增殖。这与作者在 1990 年围隔实验的结果(林昱等, 1992, 1994a)相一致。如果考虑到函数 3 所体现的浮游植物生长滞后约 1—2d, 这个 DIP 最低限值应为  $0.30\text{—}0.40\mu\text{mol/L}$ 。但是, 因为无法知道滞后的确切天数, 也就无法知道确切的最低限值。因此,  $0.20\mu\text{mol/L}$  也只能被称为硅藻生长的 DIP 最低限表观值。邹景忠等(1983)提到  $0.50\mu\text{mol/L}$  以上的无机磷含量是浮游植物生长所必须的起码浓度, 所存在的差别应归因于地区和实验水体中浮游植物群落结构上的差异, 如本实验的 M 桶和 N 桶就存在差别。

#### 2.5 引发硅藻赤潮的 DIP 的阈值

由于甲藻的营养方式与硅藻有所不同, 并不完全依赖水体中的营养盐(Taylor, 1987; 林昱等, 1994b)。因此本文仅讨论有害硅藻水华(赤潮), 并以实验中水华的优势种——中肋骨条藻为例。

据作者多年的实验资料, 中肋骨条藻单位细胞叶绿素  $a$  含量为  $3.4 \times 10^{-7}\text{—}10.0 \times 10^{-7}\mu\text{g/cell}$ , 以上限计算, 当中肋骨条藻密度大于  $1.0 \times 10^{-7}\text{cells/L}$  时, 可引发赤潮, 这时叶绿素  $a$  含量应大于  $10\text{mg/m}^3$ 。实验中测定的 DIP 值是表观浓度, 已不考虑磷的各形态之间的转化、转移等过程。如果按实验中表观上每耗去  $1\mu\text{mol}$  的 DIP, 叶绿素  $a$  增加  $10.6\mu\text{g}$  计算, 中肋骨条藻要增殖达到引发赤潮的数量, DIP 在增殖前后应表现有  $0.94\mu\text{mol/L}$  的减少。如果把硅藻增殖停止的浓度定为  $0.20\mu\text{mol/L}$ , 那么可能引发中肋骨条藻赤潮的 DIP 值应大于  $1.2\mu\text{mol/L}$ 。

实际上, 藻类增殖所需的磷含量还由浮游植物群落的结构和生态环境的条件所决定。本文仅将现有的常规检测手段能得到的数据进行分析处理, 以求得引发赤潮的临界值。该方法比较适用于封闭或半封闭的港湾和水产养殖区, 这些区域的水动力条件与本实验条件比较接近。参数经过修正后可供硅藻赤潮的预测预报参考。而由本文得出的临界值也可知, 厦门西海域 DIP 年均值在  $0.5\text{—}0.7\mu\text{mol/L}$  水平上, 并没有达到允许的最大初级生产量, 因此应该可以进一步开发, 以利于该海域的水产养殖业的发展。

### 3 结语

本实验研究结果表明, 海水中的 DIP 含量随时间呈指数函数减少。浮游植物生物量主要与 DIP 含量密切相关; 关系式为:  $[\text{Chl-}a] = A \times e^{-B[\text{PO}_4]}$ 。这种相关的浮游植物生物量表现了两天左右的滞后现象。本文还探讨了限制浮游植物增殖的 DIP 的最低浓度为  $0.3\text{—}0.4\mu\text{mol/L}$ ; 并根据 DIP 表观浓度估算出浮游植物可能达到的最大生物量(叶绿素  $a$  含量)应为  $10\text{mg/m}^3$ , 由此推算出引发中肋骨条藻赤潮的 DIP 的阈值为  $1.2\mu\text{mol/L}$ , 作为赤潮预测预报的参考。

## 参 考 文 献

- 邹景忠,董丽萍,秦保平,1983. 渤海湾富营养化和赤潮问题的初步探讨. 海洋环境科学,2(2):41—55
- 陈水土,阮五崎,郑瑞芝,1993. 九龙江、厦门西海域磷的生物地球化学研究 I. 水体中溶解态磷和颗粒态磷的含量、分布与转化. 海洋学报,15(1):63—70
- 陈水土,阮五崎,1994. 九龙江、厦门西海域磷的生物地球化学研究 III. 生物活动参与下的磷形态转化及磷循环估算. 海洋学报,16(2):63—71
- 陈其焕,曾昭文,张水浸等,1993. 厦门港 1987 年赤潮调查报告. 见:厦门港赤潮调查研究论文集. 北京:海洋出版社,1—18
- 陈淑美,林建云,傅天保,1992. 厦门西港水体中的各形态磷. 海洋学报,14(1):47—55
- 陈慈美,林月玲,陈于望等,1993. 厦门西海域磷的生物地球化学行为和环境容量. 海洋学报,15(3):43—48
- 林 昱,陈效麟,庄栋法等,1992. 围隔生态系内富营养引起赤潮的初步研究. 海洋与湖沼,23(3):312—317
- 林 昱,陈效麟,庄栋法等,1994a. 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. 海洋与湖沼,25(2):139—145
- 林 昱,陈效麟,庄栋法等,1994b. 初析赤潮成因研究的围隔实验结果 II. 浮游植物群落演替与甲藻赤潮. 应用生态学报,5(3):314—318
- 国家海洋局,1992. 海洋监测规范. 北京:海洋出版社,169—300
- 洪华生,戴民汉,陈水土,1989. 春季厦门港、九龙江口各种形态磷的分布与转化. 海洋环境科学,8(2):1—8
- 暨卫东,黄尚高,1990. 台湾海峡西部营养盐变化特征. 海洋学报,12(4):447—454
- Harrison W G, 1983. Uptake and recycling of soluble reactive phosphorus by marine microplankton. Mar Ecol Prog Ser, 10:127—135
- Smith R E H, Harrison W G, Harris L, 1985. Phosphorus exchange in marine microplankton communities near Hawaii. Mar Biol, 86:75—84
- Taylor F J, 1987 The biology of dinoflagellates. Bot Monogr, 17:462—481

## STUDY ON THE PHOSPHORUS EXTREME VALUE WITH A HARMFUL DIATOM BLOOM OCCURRENCE IN WESTERN XIAMEN HARBOUR

LIN Yu, LIN Rong-cheng

(Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen, 361005)

**Abstract** An experimental enclosed marine ecosystem in a land-based tank on the shore of western Xiamen harbor was used to study the states and distribution of phosphorus and their relation with phytoplankton biomass under normal conditions of salinity and tidal current in Oct., 1995. The result shows that dissolved inorganic phosphorus (DIP) in seawater decreased exponentially with time and is closely related to phytoplanktonic biomass. A relationship:  $[\text{Chl-}a] = A \times e^{-B[\text{PO}_4]}$  ( $A = 16.6$ ;  $B = 1.37$ ), was derived in this experiment. The phytoplanktonic biomass logged DIP content by about 2 days. The lowest DIP concentration limiting phytoplanktonic multiplication was  $0.3\text{--}0.4\mu\text{mol / L}$ ; the estimated maximum phytoplanktonic biomass ( $[\text{Chl-}a] = 10\text{mg / m}^3$ ) could be produced from the external DIP concentration supplied, and the minimum DIP external concentration for occurrence of *Skeletonema costatum* harmful bloom is  $1.2\mu\text{mol / L}$ , a value which can serve as criterium for forecasting the harmful bloom of diatoms.

**Key words** Western Xiamen harbour    Dissolved inorganic phosphorus    Red tide    Harmful bloom forecast

**Subject classification number** X171