

# 厦门港小型浮游生物对可溶性活性磷的吸收和再生通量

朱小明 沈国英

(厦门大学亚热带海洋研究所、海洋系, 厦门, 361005)

**摘 要** 应用 $^{32}\text{PO}_4^{3-}$ 同位素稀释技术比较研究了厦门港 3 个站位 4 个季节表层(0.5m)浮游生物( $<200\mu\text{m}$ )对可溶性活性磷(SRP)吸收和再生通量。结果表明, SRP 吸收和再生通量夏季(7 月)最大, 冬季(1 月)最小; 近河口的 II 站 SRP 通量最大且季节波动性大, 位于港口外缘的 I 站 SRP 通量最小且季节波动小; 各站 SRP 通量变化的差异与其不同的理化环境有关。文中还研究探讨了浮游生物在不同季节、不同站位对 SRP 吸收和再生通量的变化特性及生态适应机制。

**关键词** 小型浮游生物 可溶性活性磷 吸收和再生通量 时空分布  
**中国图书分类号** Q178.53

研究海洋浮游生物营养盐循环的动力学过程, 对于阐明浮游生物群落结构变化的营养受控机理和营养盐对海洋初级生产力的调控具有重要的价值<sup>[1~8]</sup>。该项研究作为了解海洋对大气二氧化碳吸收、进而影响全球气候而纳入 JGOFS(全球海洋通量联合会研究)等重大国际计划, 并在全球范围内展开研究(SCOR)。国内该方面的工作已逐步开展<sup>[1~5, 9]</sup>。

磷是水域生态系中重要的营养盐, 浮游生物磷循环动力学过程具有快速周转的特征<sup>[2, 10]</sup>, 无载体放射性核素 $^{32}\text{PO}_4^{3-}$ 同位素稀释技术的应用为浮游生物磷循环动力学的研究开辟了新天地<sup>[2~6]</sup>。与其他一些河口港湾相比, 厦门港具有低磷高生产力特征<sup>[9]</sup>, 也有人推测磷与该海区时而发生的赤潮有重要的关系<sup>[11]</sup>。本文是在对同位素稀释法再作修正的基础上<sup>[2~5]</sup>, 研究“厦门港小型浮游生物对 SRP 吸收和再生”的又一内容。重点探讨不同季节, 不同站位 SRP 吸收和再生通量变化与浮游生物的关系。为进一步研究厦门港生物与环境的相互作用提供参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 站位设置与取样

本研究在厦门港港口内外设置三个站位(图 1)。I 站位位于港口外缘, 水深 19m 左右; II 站临近九龙江出口处; III 站位位于港口内缘。于 1989 年 10 月, 1990 年 1、5、7 月(分别基本代表秋、冬、春、夏 4 个季节)在三站采表层(0.5m)水样, 水样采集时间为大潮平潮前后 1h 左右, 并立即用  $200\mu\text{m}$  筛绢过滤(滤去大型浮游动物), 盛入洁净的塑料桶内, 马上运回实验室开始实验。

• 国家海洋局第三海洋研究所陈其焕研究员, 厦门大学生物系王候聪教授为本研究提供了极大方便, 并提出宝贵建议, 谨此特表衷心感谢。朱小明, 男, 1966 年 2 月出生, 讲师, 在职博士研究生。

本文于 1997 年 1 月 27 日收到。

### 1.2 SRP 吸收和再生速率的测定

$^{32}\text{PO}_4^{3-}$  同位素稀释实验和样品具体处理的方法按照朱小明等(1997)<sup>[4]</sup>的方法,并同步测定 SRP、溶解态有机磷(DOP)、颗粒磷(PP)( $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ),Chla( $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ )和初级生产力[PR, $\mu\text{g}/(\text{dm}^3 \cdot \text{h})$ ]<sup>[2~4]</sup>。

根据同位素稀释原理<sup>[6,12]</sup>,并对同位素稀释效应进行修正计算 SRP 的吸收和再生速率:

$$R = [\ln(\text{SR}^{32}\text{P}_0/\text{SR}^{32}\text{P}_t) + \ln(c_t/c_0)](c_0 - c_t) / \{[\ln(c_0/c_t)] \cdot t\}$$

当  $|c_0 - c_t| \ll c_0$  或  $\text{SR}^{32}\text{P}/c$  随时间变化很小 Fig. 1 Sampling stations in Xiamen Harbour 时,  $R$  按下式计算:

$$R = [\ln(\text{SR}^{32}\text{P}_0/\text{SR}^{32}\text{P}_t) + \ln(c_t/c_0)] \cdot c_0 / t$$

$$u = (P^{32}\text{P}_t - P^{32}\text{P}_0)[R - (c_t - c_0)/t] / (\text{SR}^{32}\text{P}_0 - \text{SR}^{32}\text{P}_t)$$

式中  $u$  是 SRP 的吸收速率,  $\times 10^{-3} \mu\text{mol}/(\text{dm}^3 \cdot \text{h})$ ;  $R$  是 SRP 的再生速率,  $\times 10^{-3} \mu\text{mol}/(\text{dm}^3 \cdot \text{h})$ ;  $P^{32}\text{P}_0, P^{32}\text{P}_t$  分别是 0 时刻与  $t$  时刻滤膜上 PP 的放射性强度(Bq);  $\text{SR}^{32}\text{P}_0, \text{SR}^{32}\text{P}_t$  和  $c_0, c_t$  分别是 0 时刻和  $t$  时刻 SRP 的放射性强度(Bq)和浓度;  $t$  是培养时间(h)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 Chl-a、PR 和各种形态磷的季节变化及站位变化比较

厦门港 3 个站表层 Chl-a 和 PP 的季节变化趋势基本一致,都是 7 月最大,10 月最小;Chl-a 与 PP 成较好的正相关,  $\text{Chl-a} = 13.82\text{PP} + 0.256$  ( $r = 0.771, n = 12$ ),但 I、II 站 1 月的 PP 大于 5 月的;SRP 的季节变化趋势与 Chl-a、PP 的相反,7 月最小,10 月最大,且三站变化非常一致;DOP 基本上是 10 月、5 月较大,而 1 月较小,结果见表 1。这种季节变化趋势在三个站的平均值上明显得到体现(表 2),Chl-a、PP、SRP 和 DOP 的季节变化具有协变性<sup>[4]</sup>;初级生产力亦是 7 月最大,1 月次之,1、7 月比 5、10 月大,与 DOP 的季节变化相反。I、II 站 1 月较高的

表 1 厦门港 3 个站表层 Chl-a 和各种形态磷的季节变化

Tab. 1 Seasonal variations of Chl-a and phosphorus in stations surface seawater(0.5m) at three sampling

项目	站位	10月	1月	5月	7月	平均
Chl-a ( $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ )	I	2.21	2.16	4.95	7.61	4.23
	II	1.99	4.02	4.58	7.63	4.56
	III	2.38	3.82	5.47	11.75	5.86
PP ( $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ )	I	0.115	0.336	0.378	0.436	0.310
	II	0.152	0.286	0.233	0.588	0.315
	III	0.133	0.398	0.324	0.484	0.355
SRP ( $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ )	I	0.655	0.474	0.217	0.087	0.358
	II	0.713	0.486	0.172	0.182	0.388
	III	0.651	0.451	0.362	0.118	0.396
DOP ( $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ )	I	0.276	0.031	0.129	0.101	0.134
	II	0.256	0.190	0.309	0.043	0.200
	III	0.290	0.137	0.125	0.067	0.155

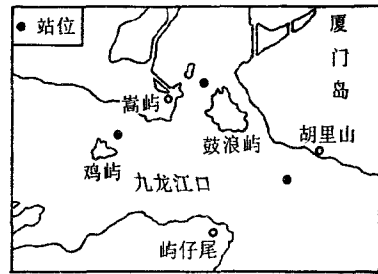


图 1 采样站位

PP 与较高的初级生产力有关<sup>[4]</sup>;5 月最低的初级生产力与采样前降雨有关(大雨转晴后第四天采样),也可能与 picoplankton 含量相对较高有关,与自然浮游生物群落结构特征有关<sup>[5]①</sup>。

3 个站各参数的年平均值(表 1)表明,Chl-a、PP、SRP 都是 III > I > II,且初级生产力亦是 III (11.58) > I (10.35) > II (10.17),而 DOP 和总磷(TP)却是 I > III > II。3 个站 PP、DOP 的季节变化不大一致,特别是 II 站;7、10 月 I 站 PP 最大,而 DOP 最小,1、5 月 II 站 PP 最小,而 DOP 最大。综观各站各参数的变化情况,II 站的波动性最大,而 I、III 站相对稳定。3 个站这些参数变化的差异反映了各站理化特点,II 站 7、10 月 PP、DOP 等与 1、5 月的明显差异反映了河口环境雨季前后的明显差别,并且这种差异必定会反映到浮游生物的群落组成上<sup>[5]①</sup>。

### 2.2 SRP 通量的季节变化

厦门港 3 个站表层 SRP 吸收和再生通量的季节变化总的看来比较一致,7 月 > 10 月 > 5 月 > 1 月;SRP 吸收和再生周转速率( $u/PP$  和  $R/PP, h^{-1}$ )的季节变化趋势与 SRP 通量的变化一致,而 SRP 的周转时间( $SRP/u, h$ )的变化与 SRP 通量变化相反,7 月 < 5 月 < 10 月 < 1 月,7 月 SRP 周转时间最短,3 个站平均仅为 3.86h;结果列于表 2、3。厦门港 3 个站表层 SRP 通量 4 个季度月的变化与厦门港 SRP 通量的季节变化类型基本一致<sup>[4]</sup>,这种季节变化类型在温带、亚热带沿岸水域(河口、海湾)是比较典型的<sup>[1,4~7]</sup>。5 月相对较低的 SRP 吸收和再生通量可能与阴雨天气较低的光合作用速率有关,亦可能与浮游生物群落结构有关,因为 5 月厦门小型浮游生物对 SRP 吸收的半饱和速率常数( $K_s, 1.732$ )为全年最高<sup>[5]</sup>。

表 2 厦门港 3 个站表层 Chl-a、PR、磷和 SRP 通量的平均值

Tab. 2 Mean value of three sampling stations for Chl-a, RP, phosphorus and SRP fluxes in surface seawater (0.5m) in Xiamen Harbour

项 目	10 月	1 月	5 月	7 月
Chl-a	2.19	3.33	5.00	9.00
PR	6.00	8.13	3.75	25.09
PP	0.133	0.340	0.312	0.503
SRP	0.673	0.470	0.250	0.129
DOP	0.274	0.119	0.188	0.070
TP	1.08	0.929	0.750	0.702
$u$	9.18	1.56	8.43	33.90
$R$	3.34	1.63	1.18	21.38
$R/u$	0.329	0.904	0.116	0.597
$SRP/u$	78.83	384.3	31.84	3.86
$u/PP$	6890	4.52	29.27	65.68
$R/PP$	24.60	1.75	3.64	40.71

### 2.3 SRP 通量变化的站位比较

从各站的年平均值看(表 3),SRP 吸收和再生通量大小顺序是 II > III > I;SRP 吸收和再生周转速率的站位变化与 SRP 通量的基本一致,周转时间亦是 II 站最长,而最短的是 III 站;再

① 高亚辉·厦门港微型浮游生物研究·理学博士学位论文,1990.

生与吸收比( $R/u$ )是Ⅲ>Ⅱ>Ⅰ站。比较各站 SRP 通量的季节变化,Ⅱ站相对于Ⅰ、Ⅲ站的季节波动性大,这是因为河口站受来自河流的淡水影响很大,并且雨季前后的差别也较大。Ⅱ站最大的 SRP 吸收和再生通量是与可利用的营养盐丰富及浮游生物中 20~200 $\mu\text{m}$  的小型浮游生物(其中部分可能来自淡水)含量相对较高有关<sup>[6]①</sup>,Ⅱ站 SRP 的周转时间最长,这是与 DOP 含量最高和磷的可利用性高有关,并非磷代谢不强的表现,这种磷代谢活跃的特征在 7 月最明显<sup>[3~5]</sup>,Ⅱ站最小的 C/P 吸收原子比(49.8),进一步证实了上述推论。Ⅲ站 SRP 周转时间最短可能与外来可利用磷的供应相对较差有关(港内站位,水位最深)。

表 3 厦门港 3 个站位表层 SRP 通量的季节变化

Tab. 3 Seasonal variations of SRP fluxes in surface seawater(0.5m) at three sampling stations

项 目	站 位	10 月	1 月	5 月	7 月	平 均
$u$	Ⅰ	5.84	1.45	5.11	21.27	8.67
	Ⅱ	2.04	1.10	10.01	49.12	17.32
	Ⅲ	11.67	2.14	10.16	31.32	13.82
$R$	Ⅰ	0.93	0	0	9.33	2.57
	Ⅱ	2.89	0.98	0	34.31	9.55
	Ⅲ	6.21	3.90	3.54	20.51	8.54
$R/u$	Ⅰ	0.136	0	0	0.439	0.144
	Ⅱ	0.320	0.891	0	0.698	0.477
	Ⅲ	0.532	1.822	0.348	0.655	0.839
SRP/ $u$	Ⅰ	95.80	326.90	42.50	4.10	117.30
	Ⅱ	78.90	441.80	17.32	3.71	135.40
	Ⅲ	55.80	210.70	35.60	3.77	76.46

#### 2.4 SRP 通量的变化与浮游生物及环境的关系

厦门港 3 个站位 4 个季度月的 SRP 吸收和再生通量与 Chl-a、PP 成正比相关,回归方程分别为:

$$u = 3.53\text{Chl-a} - 3.97 (r = 0.773, n = 12); R = 2.47\text{Chl-a} - 5.18 (r = 0.692, n = 12)$$

$$u = 63.52\text{PP} - 7.18 (r = 0.672, n = 12); R = 50.6\text{PP} - 9.38 (r = 0.762, n = 12)$$

SRP 吸收速率与 Chl-a 相关性比与 PP 的好,这是因为厦门港 SRP 的吸收主要有浮游植物完成的<sup>[4,5,9]</sup>;SRP 再生速率与 Chl-a 的相关性比与 PP 的差,SRP 的再生与浮游生物的磷含量有关,SRP 的再生更可能与细菌、原生动物的有关<sup>[6,10]</sup>,所以 SRP 的再生在一定程度上反映了浮游生物群落结构的相对组成<sup>[1,4,5,8,10]</sup>。SRP 吸收速率与 SRP 成较好的负相关,而再生速率与 DOP 成较好的负相关。浮游植物主要吸收 SRP,如果海水 SRP 低,只有以较高的吸收速率和 SRP 周转速率才能维持浮游植物的生长,这是浮游生物对营养利用的一般特征<sup>[1~8]</sup>,由于 SRP 的再生主要与细菌等异养生物有关,而一般认为细菌能利用有机磷并起到矿化作用<sup>[4~7]</sup>。

3 个站 SRP 通量变化的差异是与 3 个站不同的理化环境有关的。Ⅲ站位于港内,相对稳定,尽管一定程度上受到生活排污的影响;Ⅱ站位于受九龙江冲淡水影响较大的河口交汇处,而且雨季对该站的影响特别大,因此Ⅱ站 SRP 通量的季节波动性较为剧烈;Ⅰ站相对受外海水影响较大,SRP 通量的季节变化也相对稳定。3 个站 SRP 通量季节变化的差异同样是浮

① 高亚辉. 厦门港微型浮游生物研究. 理学博士学位论文,1990.

游生物群落生态特征的反映,Ⅱ与Ⅰ、Ⅲ站比较,其 $>20\mu\text{m}$ 、 $<3\mu\text{m}$ 的浮游生物含量相对较高<sup>①</sup>,因此其SRP通量最高,并且具有最小的C/P吸收原子比(49.8)。Ⅲ站最高的再生与吸收比和最短的周转时间是与Ⅲ站有较高的光合作用速率和磷代谢相关的,这种关系在冬季特别明显,并且Ⅲ站的单位Chl-a的PP含量最低,Ⅰ站相对于Ⅲ站其 $>20\mu\text{m}$ 的浮游生物含量较低,而 $<3\mu\text{m}$ 的浮游生物含量较高,因此Ⅰ站具有最高的C/P同化原子比(97.32),而且单位Chl-a的PP含量也最高,SRP通量最小。Ⅰ站SRP通量的浮游生物生态适应机制在厦门港冬季(1月)得到表征,1月具有最低的SRP通量,最高的C/P同化原子比(434.3),和4个季度月中最高单位Chl-a的PP含量,浮游植物可能利用细胞内贮磷进行光合作用<sup>[4]</sup>;冬季与秋季相比,综合3个站浮游生物粒级组成的结果表明,冬季 $<3\mu\text{m}$ 的浮游生物含量相对较高。尽管厦门 $<3\mu\text{m}$ 的浮游生物生物量小,对初级生产和SRP吸收贡献最小<sup>[5,9]</sup>,但其在真光层内生物磷循环中的作用是极其重要的<sup>[4,6]</sup>,有待于进一步研究。

### 3 结论

综观SRP通量的时空变化,从实验结果和讨论可以得到几点推论:

(1)厦门港表层SRP通量具有明显的季节变化,夏季最大,冬季最小,受大陆径流影响的河口区SRP通量大且变化的波动性大;SRP通量的变化与生源要素的变化呈协变化。

(2)厦门港SRP通量的变化与浮游生物及环境营养盐状况有关,SRP通量的时空变化是浮游生物群落生态特征的反映。

(3)厦门港表观SRP相对较低,但磷的可利用性高,浮游生物对磷有较高的同化或代谢速率。

环境变化对自然浮游生物群落组成的影响会反映到浮游生物营养盐循环动力学过程中,研究浮游生物营养盐动力学可阐明浮游生物群落的受控机理,解释浮游生物与海洋环境的相互作用,从而为海洋环境的预测和管理服务。

### 参考文献

- 1 焦念志. 海洋浮游生物氮吸收动力学及其粒级特征. 海洋与湖沼, 1995, 26(2): 191~198
- 2 朱小明, 沈国英. 中华盒形藻对可溶性活性磷吸收动力学的研究. 厦门大学学报(自然科学版), 1993, 32(2): 231~235
- 3 朱小明, 沈国英. 几种浮游单细胞藻类磷代谢的初步研究. 厦门大学学报(自然科学版), 1996, 35(4): 619~624
- 4 朱小明, 沈国英. 厦门港小型浮游生物对可溶性活性磷(SRP)吸收和再生通量的季节变化. 厦门大学学报(自然科学版), 1997, 36(1): 145~152
- 5 朱小明, 沈国英. 厦门港浮游生物对可溶性活性磷(SRP)吸收动力学的研究. 厦门大学学报(自然科学版), 1997, 37(1): 125~131
- 6 Harrison W G. Uptake and recycling of soluble reactive phosphorus by marine microplankton. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 1983, 10: 127~135
- 7 Dodds W K, Prisco J C, Ellis B K. Seasonal uptake and regeneration of inorganic nitrogen and phosphorus in a large oligotrophic lake: Size-fractionation and antibiotic treatment. *J. Plankt. Res.*, 1991, 13(6): 1339~1358
- 8 Corre P L, Wafar M, Helguen S L et al. Ammonium assimilation and regeneration by size-fractionated

- plankton in permanently well-mixed temperate waters. *J. Plankt. Res.*, 1996, **18**(3):355~370
- 9 洪华生,戴民汉,黄邦钦等. 厦门海域浮游植物对磷酸盐吸收速率的研究. *海洋与湖沼*, 1994, **25**(1):54~59
- 10 Lemasson L and Pages J. Excretion of dissolved organic phosphorus in tropical brackish waters. *Estua. Coast. Mar. Sci.*, 1981, **12**:511~524
- 11 张水浸,许昆灿,陈其焕等. 厦门西港区的一次赤潮观测. *海洋学报*, 1988, **10**(5):602~608
- 12 Laws E, Pages J. Isotope dilution models and the mystery of the vanishing  $^{15}\text{N}$ . *Limnol. Oceanogr.*, 1984, **29**:379~386

## Comparative Studies on Soluble Reactive Phosphorus (SRP) uptake and regeneration fluxes by microplankton in Xiamen Harbour

Zhu Xiaoming and Sheng Guoying

(Department of Oceanography/ Institute of Subtropical Oceanography, Xiamen University, Xiamen, 361005)

### Abstract

Uptake and regeneration fluxes of SRP by microplankton ( $<200\mu\text{m}$ ) were studied comparatively by using  $^{32}\text{PO}_4^{3-}$  isotope dilution techniques in Xiamen Harbour surface seawater (0.5m) of the three sampling stations from Oct. 1989 to July 1990. Obvious seasonal variations of SRP fluxes were characterised by the highest uptake and regeneration rates during summer (July) and the lowest during winter (January). Seasonal fluctuations of SRP fluxes were higher and much more violent at Station II located nearby the estuary than those of Station I near the outside edge of the Harbor. Differences of SRP fluxes variations at each station were correlated with each physical and chemical environments. Relations among SRP fluxes, microplankton and seawater environments were inquired into in the paper. Characters of SRP fluxes and ecological adaptive mechanism of natural microplankton assemblages in different seasons, different stations were interpreted preliminarily.

**KEYWORDS** Microplankton, SRP, uptake and regeneration fluxes, time-spatial distribution