

微型生态系统中浮游动物正磷酸盐 排泄率的估算^{*}

阮景荣

(中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072)

摘要 在考查罗非鱼或鲢、鳙下行影响的微型生态系统实验后期, 对其唯一的浮游动物——大型蚤的特定正磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$)排泄率按不同大小级别和培育时间进行了测定, 同时估算了该浮游动物种群的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 排泄率。结果表明, 大型蚤的特定 $\text{PO}_4\text{-P}$ 排泄率依其体重的增长呈指数式下降, 并且随着培育时间的增加而大大降低; 有鱼系统中大型蚤种群的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 排泄率及其与浮游植物 $\text{PO}_4\text{-P}$ 摄取率的比值都显著地小于无鱼系统, 而放养罗非鱼或鳙的系统之二项估算值又明显地比鲢单养系统低。看来, 大型蚤种群的磷排泄在鲢单养系统的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 再生中起有一定的作用, 而在放养罗非鱼或鳙的系统中所起的作用很小。

关键词 微型生态系统, 大型蚤, $\text{PO}_4\text{-P}$ 排泄率

浮游动物的排泄是水生态系统中营养物再生的主要途径^[1]。据报道, 不同水域中浮游动物释放的营养物可供浮游植物氮、磷日需要量的 3%—171%^[2~4]。就磷而言, 浮游动物所排泄的溶解磷几乎都呈正磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$)形式^[5], 或者说溶解活性磷(SRP)在其释放的磷中占有相当大的比重^[6]。因此, 浮游动物所排泄的营养物(尤其是磷)浓度, 通常被看作是限制水体初级生产力的关键因素^[7]。

在考查罗非鱼 [*Oreochromis niloticus* (Linnaeus)] 或鲢 [*Hypophthalmichthys molitrix* (Cuvier et Valenciennes)]、鳙 [*Aristichthys nobilis* (Richardson)] 下行影响的微型生态系统实验中, 观测到有鱼系统的水柱 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度显著地比无鱼系统低, 其初级生产力却显著地高于无鱼系统, 因此认为有鱼系统中的磷可能处于高速度的循环^[8, 9]。为评定放养鱼类对微型生态系统中磷循环速率的影响, 实验后期对系统中 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的周转时间进行了估算^[10]。与此同时, 考虑到浮游动物营养物排泄的重要性, 亦估算了系统中浮游动物的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 排泄率, 以揭示实验条件下浮游动物的磷排泄在系统的磷再循环中所起的作用。

1 材料与方法

1.1 微型生态系统实验

实验系在室内人工光照条件下进行。采用 12 个同一大小的水族箱建立微型生态系

^{*} 本研究受中国科学院“九五”重大项目与院特别支持项目“生态系统生产力形成机制与可持续性研究”(合同号 KZ95T-04)和国家自然科学基金(合同编号: 39430101)资助

1997-11-10收到, 1998-04-20修回

统,分为3个实验组(II—IV)和1个对照组(I),每一组设置3个重复。水族箱的使用容积为60L,经配制WC培养基后,相继引入数种藻类和1种浮游动物(大型溞 *Daphnia magna*)。当微型生态系统建成,并达到相对稳定的状态时,即给实验组放养罗非鱼或鲢、鳙鱼种。罗非鱼系按照不同密度放养,II—IV组的放养量分别为1.7、3.7和7.2g/m³。鲢、鳙的放养密度各组相同,平均放养量为15.0g/m³,其中III、IV组分别单养鲢、鳙,II组为鲢、鳙混养。罗非鱼和鲢、鳙实验的持续时间分别为31和27周,每周于采样后给各水族箱补充等量的营养物质,其平均磷负荷分别为0.0105和0.0061gP/m³/d。有关微型生态系统实验的细节见前报道^[8,9]。

1.2 大型溞特定 PO₄-P排泄率的测定

试验系按照大型溞的个体大小,将其分为大、中、小3个级别来进行,每个级别均设有3个重复。经解剖镜观测,3个级别的大型溞个体的体长分别为小于1.5、1.5—3.0mm和大于3.0mm。试验用的自来水,经活性炭过滤后存放24h,其水温为23—25℃。

试验的具体做法:用吸管从微型生态系统中取出一定数量的某一级别大型溞个体(大的取100多个,中等大小的近300个,小的约1000个),放到一个盛有自来水的玻璃缸中,然后用纱布网按大致三等分将其转移至3个各盛有400ml自来水的烧杯,当即及其后10、30和60min时,从每个烧杯依次各取出40ml水样,取样前用吸管在烧杯内轻轻吹动数次使其水层充分混合,最后对各烧杯中的大型溞进行活体计数,并测定水样的PO₄-P浓度。PO₄-P的测定采用钼蓝比色法^[11],其水样预先经过孔径为0.45μm的滤膜过滤。

根据不同培育时间烧杯中的水量和PO₄-P浓度的变动,以及某一级别大型溞个体的总重量(干重),计算该级别大型溞个体不同培育时间的特定PO₄-P排泄率。不同级别大型溞个体的平均体重(干重),系由其平均体长(从小到大分别取为0.80、2.25和3.50mm)和体长(L)—体重(W)关系式 $W = 6.5856L^{2.7472}$ 求得^[12]。

1.3 大型溞种群 PO₄-P排泄率的估算

微型生态系统中大型溞种群的PO₄-P排泄率按下列公式估算:

$$Epz = \sum_{i=1}^n Espi * Bi$$

式中, Epz = PO₄-P排泄率(μg P/L/h),

Esp = 特定PO₄-P排泄率(μg P/mg d.w./h),

B = 生物量(mg d.w./L),

n = 大型溞的个体大小级别。

微型生态系统实验后期,大型溞的密度是按照上述的3个级别来测定的,并以其周观测平均值表示这一期间的平均密度。某一级别大型溞个体的生物量,系按照其平均密度和平均体重(按上述方法取值)来计算。

2 结果与讨论

在水生态系统中,浮游动物营养物质再生的机制包括其摄食时所撕裂的食物碎片的营养物质释放、排粪和排泄,其中最重要的是其排泄物的营养物质释放^[13]。然而,由于试验操作上的困难,浮游动物排粪所释放的营养物,或多或少被作为排泄的营养物予以测定,以致

有的学者不使用“营养物排泄率”这一术语而使用“营养物再生率”^[13]。同时,在测定上更难以处置的是,浮游动物只有处于摄食状态才能有真实的排粪和排泄,而浮游植物存在又会立即摄取前者所释放的营养物^[14]。为了解决这些问题,某些学者进行过改进其测定方法的尝试,但至今还没有一种标准的或者是比较理想的方法为人们所接受^[13]。作者对大型溞磷排泄的测定,是参照该研究领域广泛采用的方法^[7,13,15],在微型生态系统所处的温度和光照条件下进行的,其试验方案考虑了大型溞的停食时间和排粪对测定结果的影响。

表 1 列出了大型溞各级别个体不同培育时间内的特定 $\text{PO}_4\text{-P}$ 排泄率的实测值,各培育时间的特定 $\text{PO}_4\text{-P}$ 排泄率与个体重的回归方程^[16],以及由各回归方程求得的相应培育时间内各级别个体特定 $\text{PO}_4\text{-P}$ 排泄率的估算值。大型溞各培育时间的特定 $\text{PO}_4\text{-P}$ 排泄率,皆依其体重的增长而呈指数式下降,这同许多学者关于不同浮游动物类群营养物排泄的观测结果趋于一致^[4,17,18]。同时,大型溞各级别个体的特定 $\text{PO}_4\text{-P}$ 排泄率,都随着培育时间的增加而大大降低,经测定二者间存在显著的负相关关系 ($r = -0.665, n = 27, p < 0.001$)^[16]。Korstad 在考查南休伦湖中浮游动物的 SRP 再生率与培育时间之间的关系时,亦取得了类似的结果^[13]。随着培育时间的延长,大型溞的特定 $\text{PO}_4\text{-P}$ 排泄率降低,无疑是其停食后的代谢水平因饥饿而下降的缘故,同时与其排粪量的减少也有一定的关系。试验中观测到,大型溞小级别个体的一个试验组在 30 和 60min 内的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 排泄量皆同前 10min 一致,而另一个试验组 60min 内的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 排泄量与前 30min 相同。这一结果表明,两组试验动物的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 排泄分别是在前 10min 和 30min 内完成的,其后则完全没有 $\text{PO}_4\text{-P}$ 排出。根据这两组试验结果看来,大型溞停食后的代谢水平与排粪量,都随着时间的推移而迅速下降,以致于不同培育时间内的特定 $\text{PO}_4\text{-P}$ 排泄率存在那么大的差异。同时应当指出,浮游动物的营养物排泄率及其与个体重之间的关系,因受许多因素的影响而有很大的变动^[7,17]。因此,即使是关于同一浮游动物类群的某种营养物排泄,不同学者所取得的观测结果(尤其是营养物排泄率)往往也存在明显的差别。

表 1 大型溞的特定 $\text{PO}_4\text{-P}$ 排泄率 (E_{sp}) 及其与个体重 (W) 之间的关系^{*}
Tab.1 The specific $\text{PO}_4\text{-P}$ excretion rate (E_{sp}) and its relationship with the individual weight (W) of *D. magna*.

培育时间	$E_{sp}(\mu\text{g P/mg d. w./h})$						$E_{sp}-W$ 回归方程
Incubation time (min)	实测值 Measured value			估算值			$E_{sp}-W$ regression equation
	(mean \pm SD)			Estimated value			
	L ₁	L ₂	L ₃	L ₁	L ₂	L ₃	
10	2.12	1.25	0.79	2.14	1.09	0.81	$E_{sp}=0.557W^{-0.239}$ (1)
	± 0.47	± 0.49	± 0.26				($r^2=0.70, n=9, p<0.01$)
30	1.20	0.68	0.41	1.14	0.58	0.44	$E_{sp}=0.302W^{-0.236}$ (2)
	± 0.54	± 0.21	± 0.13				($r^2=0.61, n=9, p<0.02$)
60	0.71	0.42	0.31	0.65	0.39	0.31	$E_{sp}=0.236W^{-0.180}$ (3)
	± 0.36	± 0.11	± 0.10				($r^2=0.43, n=9, p<0.10$)

^{*} L_1, L_2 和 L_3 分别表示大型溞体长小于 1.5、1.5—3.0 和大于 3.0mm 的个体。 L_1, L_2 and L_3 represent *D. magna* individuals of < 1.5, 1.5—3.0 and > 3.0mm in body length, respectively.

在表 1 所列的 3 个回归方程中,就其确定系数值和回归系数的显著性而言,分别根据培育时间 10 和 30min 的观测值所求得的回归方程 (1) 和 (2),明显地优于按培育时间 60min 的观测值所求得的回归方程 (3)。从各回归方程所依据的观测值来看,在培育时间前 10min 内,由于试验动物排粪量较大的影响,其特定 $\text{PO}_4\text{-P}$ 排泄率的观测值可能偏高,而在培育时间 60min 内,因试验动物的代谢水平大幅度下降,其特定 $\text{PO}_4\text{-P}$ 排泄率的观测值可能偏低,因此回归方程 (1) 和 (3) 可能对大型蚤正常摄食状态下的特定 $\text{PO}_4\text{-P}$ 排泄率分别给予了过高和过低的估计。与此相比较,在培育时间 30min 内,由于试验动物的停食时间和排粪的影响均可谓适中,大型蚤特定 $\text{PO}_4\text{-P}$ 排泄率的观测值和回归方程 (2) 所给出的估计值看来都较为合理。然而,按照 Peters 的估算浮游动物特定磷释放率的回归模型^[19] (已为不少学者所采用) 计算,大型蚤各级别个体在 25℃ 水温条件下的特定 $\text{PO}_4\text{-P}$ 排泄率,分别为 0.72—1.78 (L_1)、0.25—0.61 (L_2) 和 0.15—0.38 (L_3) $\mu\text{g P/mg d.w./h}$, 其中 L_1 的值介于回归方程 (1) 和 (3) 所给出的估计值之间, L_2 和 L_3 的值则同回归方程 (2) 和 (3) 所给出的估计值接近。根据所述种种情况考虑,在估算大型蚤种群的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 排泄率时,同时采用了回归方程 (1) — (3)。

实验后期微型生态系统中大型蚤种群的生物量及按照回归方程 (1) — (3) 和生物量估算的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 排泄率列于表 2。在放养罗非鱼的系统中,大型蚤种群的生物量和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 排泄率,依罗非鱼放养密度的增大而下降。在放养鲢、鳙的系统中,二项估算值系按照鲢单养、鲢和鳙混养、鳙单养的顺序逐渐减小。然而,无论是在哪一组实验中,各有鱼系统的二项估算值均显著地小于无鱼系统 ($P < 0.10\text{—}0.01$)^[16]。就同一组实验的有鱼系统比较,除了罗非鱼实验中 II 组与 III、IV 组的二项估算值存在显著差异 ($P < 0.10\text{—}0.02$) 之外,罗非鱼实验中 III、IV 组和鲢、鳙实验中各实验组之间的差异都不显著。

表 2 微型生态系统中大型蚤种群的生物量(B)和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 排泄率(Epz) (均值±标准差)

Tab.2 The biomass(B) and $\text{PO}_4\text{-P}$ excretion rate(Epz) of *D.magna* population in the microcosms. mean±SD

项目 Item	Exp. (I)				Exp. (II)			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
B	4.032	0.054	0.026	0.013	6.956	0.053	1.816	0.036
(mg d.w./L)	±0.962	±0.017	±0.015	±0.005	±2.474	±0.038	±1.703	±0.047
Epz(1)	3.68	0.12	0.06	0.03	6.05	0.06	1.61	0.04
($\mu\text{gP/L/h}$)	±0.75	±0.04	±0.03	±0.01	±2.33	±0.03	±1.51	±0.04
Epz(2)	1.98	0.06	0.03	0.01	3.26	0.03	0.87	0.02
($\mu\text{gP/L/h}$)	±0.40	±0.02	±0.02	±0.01	±1.25	±0.02	±0.81	±0.02
Epz(3)	1.37	0.04	0.02	0.01	2.29	0.02	0.61	0.01
($\mu\text{gP/L/h}$)	±0.29	±0.01	±0.01	±0.003	±0.86	±0.01	±0.57	±0.01

* Exp. (I) 和 (II) 分别表示罗非鱼实验和鲢、鳙实验, Epz(1)、(2) 和 (3) 分别为依据于回归方程 (1)、(2) 和 (3) 的估计量,下同。Exp. (I) and (II) represent the experiment for *Oreochromis niloticus* and the expcirmcnt for *Hypophthalmichthys molitrix* and *Aristichthys nobilis*, respectively. Epz(1)、(2) and (3) are the estimates on the basis of regression equations (1)、(2) and (3) in Table.1, respectively. The same applies to the following table.

微型生态系统中大型蚤种群的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 排泄率与浮游植物 $\text{PO}_4\text{-P}$ 摄取率^[10] 的比值 (表 3),大体上反映了大型蚤的磷排泄在系统的磷再循环中所起的作用。在罗非鱼实验和鲢、

表3 微型生态系统中大型溞种群的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 排泄率(Epz)与浮游植物 $\text{PO}_4\text{-P}$ 摄取率(Upp) 的比值(%，均值±标准差)
Tab.3 The ratio (%，mean±SD) of the $\text{PO}_4\text{-P}$ excretion rate (Epz) of *D.magna* population to the $\text{PO}_4\text{-P}$ uptake rate (Upp) of phytoplankton in the microcosms.

项目 Item	Exp. (I)				Exp. (II)			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
Epz(1)/Upp	407.4	3.8	1.2	0.7	472.8	3.1	88.9	1.8
	±251.0	±2.2	±0.8	±0.2	±347.9	±1.7	±98.2	±1.8
Epz(2)/Upp	219.6	2.0	0.6	0.4	255.0	1.7	47.9	1.0
	±135.4	±1.2	±0.4	±0.1	±187.4	±0.9	±53.0	±1.0
Epz(3)/Upp	152.4	1.1	0.4	0.2	178.8	1.1	33.4	0.7
	±94.8	±0.7	±0.3	±0.1	±130.2	±0.7	±36.9	±0.6

鳙实验的无鱼系统中,大型溞种群的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 排泄率(按最大估计值计算)比浮游植物 $\text{PO}_4\text{-P}$ 摄取率分别高 3.1 倍和 3.7 倍,而在有鱼系统中,二者的比值分别为 0.7%—3.8% 和 1.8%—88.9%,其中放养罗非鱼或鳙的系统明显地低于鲢单养系统。然而需要指出的是,微型生态系统中的主要初级生产者,除了浮游植物之外,还分布着大量的着生藻类,其生物量估计以无鱼系统为最大,其次是放养鲢、鳙的系统,而放养罗非鱼的系统最小。因此,各类系统中大型溞种群的磷排泄对浮游植物的实际 $\text{PO}_4\text{-P}$ 供给率,都会不同程度地低于表 3 所列出的比值。不过,两组实验在无鱼系统的这一比值都大大地超过了有鱼系统,其实际 $\text{PO}_4\text{-P}$ 供给率也必定比有鱼系统高得多。看来,在给定的实验条件下,大型溞种群的磷排泄是无鱼系统中 $\text{PO}_4\text{-P}$ 再生的主要途径,在鲢单养系统的磷再循环中起有一定的作用,而在放养罗非鱼或鳙的系统中所起的作用很小。至于这些系统中的磷再循环主要是通过哪一条途径实现的,以后将结合实验鱼 $\text{PO}_4\text{-P}$ 排泄率的估算结果予以论述。

参 考 文 献

[1] Johannes R E. Nutrient regeneration in lakes and oceans. *Adv. Microbiol. Sea*, 1968, 1:203—213
[2] Ganf G G. Blazka P. Oxygen uptake, ammonia and phosphate excretion by zooplankton of a shallow equatorial lake (Lake George, Uganda). *Limnol. Oceanogr.*, 1974, 19:313—325
[3] Hargrave B T. Green G H. Phosphorus excretion by zooplankton. *Limnol. Oceanogr.*, 1968, 13:332—342
[4] Peters R H. Rigler F H. Phosphorus release by *Daphnia*. *Limnol. Oceanogr.*, 1973, 18:821—839
[5] Peters R H. Lean D. The characterization of soluble phosphorus released by limnetic zooplankton. *Limnol. Oceanogr.*, 1973, 18:270—279
[6] Butler E I. Corner E D S. Marshall S M. On the nutrition and metabolism of zooplankton. VI. Feeding efficiency of *Calanus* in terms of nitrogen and phosphorus. *J. Mar. Biol. Assoc. U. K.*, 1969, 49:977—1003
[7] Andersen V. Phosphate excretion rate of *Salpa fusiformis* Cuvier (Tunicata: Thaliacea). *Hydrobiologia*, 1989, 171:91—97
[8] 阮景荣 刘衢霞 王少梅等. 罗非鱼对微型生态系统营养物水平的影响. 应用生态学报, 1993, 4(4):404—409
[9] 阮景荣 戎克文 王少梅. 微型生态系统中鲢、鳙下行影响的实验研究—2. 营养物水平. 湖泊科学, 1995, 7(4):334—340

-
- [10] 阮景荣. 微型生态系统中正磷酸盐的周转时间的估算. 水生生物学报, 1999, 23(1): 47—52
- [11] 中国医学科学院卫生研究所编. 水质分析法. 北京: 人民卫生出版社, 1974, 112—115
- [12] 黄祥飞 胡春英. 淡水常见枝角类体长—体重回归方程式. 见:《甲壳动物论文集》编委会编. 甲壳动物论文集(1). 北京: 科学出版社, 1986, 147—157
- [13] Korstad J. Nutrient regeneration by zooplankton in southern Lake Huron. *J. Great Lakes Res.*, 1983, 9: 374—388
- [14] Takahashi M. Ikeda T. Excretion of ammonia and inorganic phosphorus by *Euphausia pacifica* and *Melridia pacifica* at different concentrations of phytoplankton. *J. Fish. Res. Board Can.*, 1975, 32: 2189—2195
- [15] Bamstedt U. Seasonal excretion rates of macrozooplankton from the Swedish west coast. *Limnol. Oceanogr.*, 1985, 30: 607—617
- [16] 斯奈迪格 G W. 等著(杨纪珂 汪安琦译). 应用于农学和生物学实验的数理统计方法. 北京: 科学出版社, 1964, 95—112, 179—215, 505—532
- [17] Ikeda T. Mitchell A W. Oxygen uptake, ammonia excretion and phosphate excretion by krill and other Antarctic zooplankton in relation to their body size and chemical composition. *Mar. Biol.*, 1982, 71: 283—298
- [18] Ejsmont—Karabin J. Ammonia nitrogen and inorganic phosphorus excretion by the planktonic rotifers. *Hydrobiologia*, 1983, 104: 231—236
- [19] Peters R H. Phosphorus regeneration by natural populations of limnetic zooplankton, *Verh. Int. Ver. Limnol.*, 1975, 19: 273—279

ESTIMATION OF ORTHOPHOSPHATE EXCRETION RATE OF ZOOPLANKTON IN FRESHWATER MICROCOSMS

Ruan Jingrong

(Institute of Hydrobiology, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072)

Abstract In the later period of the experiments to investigate the top-down effects of *Oreochromis niloticus* or *Hypophthalmichthys molitrix* and *Aristichthys nobilis* in freshwater microcosms, the specific orthophosphate ($\text{PO}_4\text{-P}$) excretion rate of *Daphnia magna*, the sole species of zooplankton in the microcosms, was measured for the different size classes of the animal and in the different incubation time. Moreover, the rate of $\text{PO}_4\text{-P}$ excretion (Epz) by *D. magna* population in the microcosms was estimated with the equation $\text{Epz} = \sum_{i=1}^n \text{Esp}_i * \text{B}_i$, where Esp = the specific $\text{PO}_4\text{-P}$ excretion rate, B = biomass (dry weight), and n = size classes of the animal. The results indicated that the specific $\text{PO}_4\text{-P}$ excretion rate of *D. magna* decreased exponentially with the increase of individual weight and reduced markedly as incubation time increased. And the rate of $\text{PO}_4\text{-P}$ excretion by *D. magna* population and its ratio to the rate of $\text{PO}_4\text{-P}$ uptake by phytoplankton in the microcosms stocked with fish were significantly lower than those in the fish-free microcosms, whereas the estimated values of the above indices in the microcosms with *Oreochromis niloticus* or *Aristichthys nobilis* were obviously smaller than those in the microcosms containing *Hypophthalmichthys molitrix* alone. It appears that phosphorus excretion by *D. magna* population have made some contributions to $\text{PO}_4\text{-P}$ regeneration in the microcosms stocked with *Hypophthalmichthys molitrix* alone but contributed inconsiderably to the recycling of phosphorus in the microcosms with *Oreochromis niloticus* or *Aristichthys nobilis* under the given experimental conditions.

Key words Microcosm, *Daphnia magna*, $\text{PO}_4\text{-P}$ excretion rate.