

# 微型生态系统中正磷酸盐的周转 时间的估算\*

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, 以水柱正磷酸盐( $\text{PO}_4-\text{P}$ )完全被浮游植物摄取所需要的时间为指标, 估算了系统中  $\text{PO}_4-\text{P}$  的周转时间, 其中浮游植物的  $\text{PO}_4-\text{P}$  摄取率是采用挂瓶法来测定和估算的。结果表明, 两组实验中大多数有鱼系统的浮游植物  $\text{PO}_4-\text{P}$  摄取率都显著地比无鱼系统高, 而  $\text{PO}_4-\text{P}$  周转时间的估算值均显著地小于无鱼系统。经相关分析测定, 两组实验中浮游植物的  $\text{PO}_4-\text{P}$  摄取率皆显著地正相关于浮游植物密度和初级生产力, 同水柱  $\text{PO}_4-\text{P}$  浓度之间的负相关关系则不显著。根据估算结果看来, 罗非鱼对系统中磷循环速率的影响比鲢、鳙大得多, 而鳙的影响又明显地大于鲢。这些鱼类使微型生态系统中  $\text{PO}_4-\text{P}$  的周转时间缩短, 可能主要是它们加速了系统中  $\text{PO}_4-\text{P}$  再生的结果。

**关键词** 微型生态系统,  $\text{PO}_4-\text{P}$  周转时间, 浮游植物  $\text{PO}_4-\text{P}$  摄取率

放养罗非鱼 [*Oreochromis niloticus* (Linnaeus)] 或 鲢 [*Hypophthalmichthys molitrix* (Cuvier et Valenciennes)]、鳙 [*Aristichthys nobilis* (Richardson)] 鱼种, 使微型生态系统的群落结构、代谢和营养物水平发生了明显的变化, 以致后来这些系统呈现出不同程度的富营养状态<sup>[1,2]</sup>。实验中观测到, 有鱼系统的初级生产力显著地比无鱼系统高, 水柱正磷酸盐( $\text{PO}_4-\text{P}$ )浓度却显著地低于无鱼系统。在鱼类的影响下, 微型生态系统的水柱  $\text{PO}_4-\text{P}$  浓度较低而初级生产力较高, 看来是系统中磷处于高速循环的反映<sup>[3,4]</sup>。考虑到这一情况, 实验后期对微型生态系统中  $\text{PO}_4-\text{P}$  的周转时间进行了估算, 以期评定上述鱼类对系统中磷循环速率的影响。

## 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

\* 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。

1997-06-13 收到, 1998-11-10 修回。

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/m<sup>3</sup>。鲢、鳙的放养密度各组相同, 平均放养量为 15.0g/m<sup>3</sup>, 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, 其平均磷负荷分别为 0.0105 和 0.0061gP/m<sup>3</sup>/d。有关微型生态系统实验的细节见前报道<sup>[1, 2, 5, 6]</sup>。

## 1.2 PO<sub>4</sub>-P 周转时间的估算

淡水生态系统的水柱 PO<sub>4</sub>-P 浓度, 除了受营养物输入与输出的影响之外, 主要决定于系统中 PO<sub>4</sub>-P 的再生和自养生物对 PO<sub>4</sub>-P 的摄取。因此, 淡水生态系统中 PO<sub>4</sub>-P 的周转时间, 大体上可以其水柱 PO<sub>4</sub>-P 完全被浮游植物摄取所需要的时间为指标, 按下列公式来估算<sup>[7, 8]</sup>:

$$T = Cp/Upp$$

式中, T = PO<sub>4</sub>-P 的周转时间,

Cp = 水柱 PO<sub>4</sub>-P 浓度,

Upp = 浮游植物 PO<sub>4</sub>-P 摄取率。

微型生态系统的水柱 PO<sub>4</sub>-P 浓度和浮游植物 PO<sub>4</sub>-P 摄取率, 是以同一实验中各组系统的同一重复为单元来测定和估算的, 每个单元的试验重复进行 3 次, 此间各系统无营养物的输入与输出。具体做法是: 每次试验于同一时间(上午 9 时)开始, 逐个地从各水族箱采样测定其 PO<sub>4</sub>-P 浓度(Cp), 同时取 3 个 125mL 的透明试剂瓶, 经用少量水样涮洗两次后灌满水样(不含浮游动物), 盖紧瓶塞并象测定浮游植物初级生产力一样悬挂于水族箱中央 1/2 水深处, 接着分别在 1、2 和 3h 后各取出 1 瓶水样测定其 PO<sub>4</sub>-P 浓度。最后, 根据各试剂瓶中 PO<sub>4</sub>-P 浓度的下降值估算浮游植物的 PO<sub>4</sub>-P 摄取率(Upp), 其容器中可能存在的 PO<sub>4</sub>-P 再生未予以考虑。某一系统的浮游植物 PO<sub>4</sub>-P 摄取率, 系以各次试验的 3 个时间区间的观测平均值表示。PO<sub>4</sub>-P 的测定采用钼蓝比色法<sup>[9]</sup>, 其水样预先经过孔径为 0.45μm 的滤膜过滤。

## 2 结果与讨论

根据微型生态系统实验后期的测定(表 1), 放养罗非鱼的 II—IV 组和放养鲢、鳙的 II、IV 组之水柱 PO<sub>4</sub>-P 浓度都显著地低于对照组( $P < 0.10$ —0.01), 而放养罗非鱼的 II、IV 组和放养鲢、鳙的 II—IV 组之浮游植物 PO<sub>4</sub>-P 摄取率皆显著地高于对照组( $P < 0.10$ —0.01), 并且鲢、鳙实验中 II、III 组与 IV 组的水柱 PO<sub>4</sub>-P 浓度亦存在显著差异( $P < 0.10$  或 0.02)<sup>[10]</sup>。就浮游植物 PO<sub>4</sub>-P 摄取率来看, 罗非鱼实验中系以鱼的生物量最大的 III 组为最高, 鲢、鳙实验中的最大值出现于鳙单养系统(IV 组), 并且前一实验中各有鱼系统的观测平均值明显地比后一实验的有鱼系统大。据 Peters 报道<sup>[8]</sup>, 应用<sup>32</sup>P 标记法测得 Memphremagog 湖 6 个站的浮游植物 PO<sub>4</sub>-P 摄取率, 夏季平均为 3.38(1.56—6.36) μg P/L/h, 冬季平均为 1.68(0.07—4.74) μgP/L/h。按照有鱼系统的观测值计算, 罗非鱼实验和鲢、鳙实验中的浮游植物 PO<sub>4</sub>-P 摄取率依次平均为 4.74 和 2.18 μgP/L/h, 分别高于 Memphremagog 湖夏季和

冬季的观测平均值。同天然湖泊比较,微型生态系统的营养物供应更为充足,而且光照及温度条件稳定,其浮游植物  $\text{PO}_4-\text{P}$  摄取率较高是完全可以预见的,这同微型生态系统代谢水平的观测结果相一致。

表 1 实验后期微型生态系统的水柱  $\text{PO}_4-\text{P}$  浓度和浮游植物  $\text{PO}_4-\text{P}$  摄取率(均值  $\pm$  标准差)\*

Tab. 1  $\text{PO}_4-\text{P}$  concentrations in water column and  $\text{PO}_4-\text{P}$  uptake rates of phytoplankton in the microcosms in the later period of the experiments. mean  $\pm$  SD

项目 Item	Exp. (I)				Exp. (II)			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
$C_p$ (mg P/L)	0.387 $\pm 0.240$	0.113 $\pm 0.159$	0.125 $\pm 0.128$	0.042 $\pm 0.047$	0.377 $\pm 0.276$	0.190 $\pm 0.144$	0.265 $\pm 0.196$	0.106 $\pm 0.018$
Upp ( $\mu\text{g P/L/h}$ )	1.19 $\pm 0.71$	3.74 $\pm 2.09$	6.26 $\pm 4.16$	4.22 $\pm 2.07$	1.49 $\pm 0.44$	2.17 $\pm 0.40$	1.99 $\pm 0.48$	2.39 $\pm 0.70$

\*  $C_p$  = 水柱  $\text{PO}_4-\text{P}$  浓度  $\text{PO}_4-\text{P}$  concentration in water column, Upp = 浮游植物  $\text{PO}_4-\text{P}$  摄取率  $\text{PO}_4-\text{P}$  uptake rate of phytoplankton. Exp. (I) 和 (II) 分别表示罗非鱼实验和鲢、鳙实验,下同。Exp(I) and (II) represent the experiment for *Oreochromis niloticus* and the experiment for *Hypophthalmichthys molitrix* and *Aristichthys nobilis*, respectively. The same applies to the following tables.

浮游植物  $\text{PO}_4-\text{P}$  摄取率的测定和估算,原先是准备采用 $^{32}\text{P}$ 标记法来进行的,后来考虑到 $^{32}\text{P}$ 的室内用量太大不安全而改用挂瓶法。测定时,在给试剂瓶灌满水样之前,先用少量水样将其涮洗两次,是为了避免或者尽可能减少容器的吸附对测定结果的影响。但是,观测时间内试剂瓶中可能存在的  $\text{PO}_4-\text{P}$  再生,即其死亡有机物质的自溶及细菌分解过程的  $\text{PO}_4-\text{P}$  释放,因无法测定而予以忽略。在此情况下,根据一定时间内试剂瓶中  $\text{PO}_4-\text{P}$  浓度的下降值所估算的浮游植物  $\text{PO}_4-\text{P}$  摄取率显然偏低,并且试剂瓶中的浮游物浓度愈高,其偏差也就愈大。然而,由于两组实验中各有鱼系统的浮游物浓度都大于无鱼系统,其估算结果所指出的实验组与对照组浮游植物  $\text{PO}_4-\text{P}$  摄取率之间的差异亦偏小。这就是说,浮游植物  $\text{PO}_4-\text{P}$  摄取率的估算结果,虽然未能反映微型生态系统的实际水平,但它显示出的放养鱼类对系统所产生的影响却是完全可信的。同时,这里顺便指出,浮游植物的  $\text{PO}_4-\text{P}$  摄取率,除了应用 $^{32}\text{P}$ 标记法来测定之外,也有人将已知量的  $\text{PO}_4-\text{P}$  注入到含有某一浓度的藻类的容器中,然后根据一定时间内容器中  $\text{PO}_4-\text{P}$  含量的下降值来估算<sup>[11]</sup>。鉴于短期内测定容器中死亡有机物质的  $\text{PO}_4-\text{P}$  释放量很小,这一测定方法亦未考虑容器中的  $\text{PO}_4-\text{P}$  再生。

采用挂瓶法测定和估算浮游植物的  $\text{PO}_4-\text{P}$  摄取率,选定多长的观测时间是一个很重要的问题。从理论上讲,浮游植物的  $\text{PO}_4-\text{P}$  摄取率,同系统的水柱  $\text{PO}_4-\text{P}$  浓度、浮游植物密度(或生物量)、光合作用强度等都有一定的关系。由于同一实验中不同系统的这些变量存在很大的差异,浮游植物  $\text{PO}_4-\text{P}$  摄取率的测定和估算可能不宜采用同一大小的时间区间,因此对各系统均按照 3 个时间区间进行了测定和估算。从估算结果来看,各系统 3 个时间区间观测值的时间分布缺乏规律性,并且任何一个时间区间的观测值对于某些系统似乎都给出了过高或过低的估计。这可能部分归因于实验误差和测定容器中的  $\text{PO}_4-\text{P}$  再生的影响,同时在某种程度上反映了不同系统中浮游植物的  $\text{PO}_4-\text{P}$  摄取率与有关变量之间关系的复杂性。在此情况下,采用 3 个时间区间的观测平均值来表示浮游植物的  $\text{PO}_4-\text{P}$

摄取率,看来比采用任何一个时间区间的观测值更为合适。

综合同一实验中各系统的观测数据进行的相关分析<sup>[10]</sup>,大体上揭示了浮游植物的PO<sub>4</sub>-P摄取率与有关变量之间的关系(表2)。在罗非鱼和鲢、鳙实验中,浮游植物的PO<sub>4</sub>-P摄取率都显著地正相关于浮游植物密度和浮游植物初级生产力( $P < 0.10$ — $0.001$ ),不过前一实验中所述相关关系的显著性明显地高于后一实验。但是,无论在哪一组实验中,浮游植物的PO<sub>4</sub>-P摄取率同水柱PO<sub>4</sub>-P浓度之间的负相关关系均不显著。这种情况可能同着生藻类与浮游植物之间的营养物竞争有关。着生藻类是微型生态系统中的一类重要的初级生产者,尤其是在无鱼或放养鲢、鳙的系统中,其生物量估计要比天然生态系统大得多。在放养罗非鱼的系统中,着生藻类虽然因鱼的摄食而显著减少,但据浮游植物初级生产力与总初级生产力的比值(0.35—0.62,平均为0.48)判断,系统中着生藻类的营养物需求量依然很大。着生藻类所摄取的营养物,一部分可能来自它们所附着的基质,另一部分则来自于水柱。由于同一实验中各系统的着生藻类分布不均衡,其水柱PO<sub>4</sub>-P浓度因着生藻类的摄取所发生的变化必然也有差别,看来这就是浮游植物PO<sub>4</sub>-P摄取率与水柱PO<sub>4</sub>-P浓度之间的负相关关系不显著的原因所在。

表2 实验后期微型生态系统中浮游植物PO<sub>4</sub>-P摄取率与有关变量之间的相关系数(r)\*

Tab.2 The correlation coefficients ( $r$ ) between the rates of PO<sub>4</sub>-P uptake by phytoplankton and the relative variables in the microcosms in the later period of the experiments.

变 量 Variables	r	
	Exp.(I)	Exp.(II)
Upp-Cp	-0.177( $n=12$ , $P>0.50$ )	-0.087( $n=12$ , $P>0.70$ )
Upp-AD	0.677( $n=12$ , $P<0.02$ )	0.531( $n=12$ , $P<0.10$ )
Upp-P <sub>G</sub> (phyt)	0.823( $n=12$ , $P<0.001$ )	0.544( $n=12$ , $P<0.10$ )

\* AD=浮游植物密度 Algal density, P<sub>G</sub>(phyt)=浮游植物初级生产力 Phytoplankton primary production, 其余的见表1 Others as shown in Table 1.

微型生态系统中PO<sub>4</sub>-P周转时间的估算结果(表3)表明,两组实验中各有鱼系统的估算平均值都比无鱼系统小得多,其中放养罗非鱼的各系统(II—IV组)和鳙单养系统(IV组)与无鱼系统之间存在显著差异( $P < 0.001$ 或 $0.10$ )。鲢、鳙实验中的II、III组与对照组,以及两组实验中不少实验组的估算平均值相差甚大,但因某些组的平行估算值过于离散,所存在的组间差异均不显著。就两组实验进行比较,罗非鱼实验中各有鱼系统的估算平均值皆明显地小于鲢、鳙实验中的有鱼系统,这显然是其水柱PO<sub>4</sub>-P浓度较低而浮游植物

表3 实验后期微型生态系统中PO<sub>4</sub>-P的周转时间(T)(均值±标准差)

Tab.3 PO<sub>4</sub>-P turnover time (T) in the microcosms in the later period of the experiments. mean ± SD

实验 Experiments	T(hrs)			
	I	II	III	IV
Exp.(I)	322.2	24.4	21.9	10.5
	±34.7	±24.6	±28.0	±8.4
Exp.(II)	248.5	82.0	123.2	47.5
	±134.0	±46.6	±62.0	±17.1

$\text{PO}_4^-$ -P摄取率较高的缘故。

前面已指出，微型生态系统的水柱  $\text{PO}_4^-$ -P 既被浮游植物摄取，也为着生藻类所部分利用。因此，依据于浮游植物  $\text{PO}_4^-$ -P 摄取率所估算的  $\text{PO}_4^-$ -P 周转时间，无疑要比系统中实际的  $\text{PO}_4^-$ -P 周转时间长。这项适用于湖泊磷动态研究的指标，虽然不能给微型生态系统中  $\text{PO}_4^-$ -P 的周转时间以完全的度量，但其估算结果同样指出了放养鱼类对系统中磷循环速率的影响。鉴于两组实验中各有鱼系统的总初级生产力都显著地高于无鱼系统，可以断定有鱼系统与无鱼系统的实际  $\text{PO}_4^-$ -P 周转时间的差异，同这项指标的估算结果所显示的差异趋于一致。同时，从这项指标的估算结果可以看出，罗非鱼所产生的影响比鲢、鳙大得多，而鳙的影响又明显地大于鲢，这同微型生态系统群落结构与代谢的观测结果相吻合。在给定的实验条件下，罗非鱼或鲢、鳙的放养不同程度地缩短了微型生态系统中  $\text{PO}_4^-$ -P 的周转时间，或者说加快了系统中磷循环的速率，可能主要是这些鱼类促进了系统中  $\text{PO}_4^-$ -P 再生的结果<sup>[12]</sup>。至于这些鱼类是怎样促进了系统中  $\text{PO}_4^-$ -P 再生的，以后将结合实验鱼和浮游动物  $\text{PO}_4^-$ -P 排泄率的估算结果予以论述。

### 参 考 文 献

- [1] 阮景荣 刘衡霞 王少梅 等. 罗非鱼对微型生态系统浮游生物群落和初级生产力的影响. 应用生态学报, 1993, 4(1): 65—73
- [2] 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-1. 浮游生物群落和初级生产力. 湖泊科学, 1995, 7(3): 226—234
- [3] Lynch M, Shapiro J. Predation, enrichment, and phytoplankton community structure. *Limnol. Oceanogr.*, 1981, 26: 86—102
- [4] Tatrai I, Istvanovics V. The role of fish in the regulation of nutrient cycling in Lake Balaton, Hungary. *Freshwat. Biol.*, 1986, 16: 417—424
- [5] 阮景荣 刘衡霞 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
- [6] 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
- [7] Peters R H. Concentrations and kinetics of phosphorus fractions in water from streams entering Lake Memphremagog. *J. Fish. Res. Board Can.*, 1978, 35: 315—328
- [8] Peters R H. Concentrations and kinetics of phosphorus fractions along the trophic gradient of Lake Memphremagog. *J. Fish. Res. Board Can.*, 1979, 36: 970—979
- [9] 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
- [10] 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
- [11] Reinertsen H, Jensen A, Langeland A, et al. Algal competition for phosphorus: the influence of zooplankton and fish. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 1986, 43: 1135—1141
- [12] Northcote T G. Fish in the structure and function of freshwater ecosystems: a 'Top-down' view. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 1988, 45: 361—379

## ESTIMATION OF THE TURNOVER TIME OF ORTHOPHOSPHATE IN FRESHWATER MICROCOSMS

Ruan Jingrong

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

**Abstract** Experiments have been conducted to investigate the effects of *Oreochromis niloticus* or *Hypophthalmichthys molitrix* and *Aristichthys nobilis* on the community structure, metabolism and nutrient levels of freshwater microcosms. Results demonstrated that in the microcosms stocked with fish, orthophosphate ( $\text{PO}_4-\text{P}$ ) concentrations were lower but primary productivity was higher than those in the fish-free microcosms, probably indicating an intense cycling of phosphorus in the experimental microcosms. In the later period of the experiments, the turnover time of  $\text{PO}_4-\text{P}$  in the microcosms was estimated through the index of the time required for uptake of the total amount of  $\text{PO}_4-\text{P}$  in the water column by phytoplankton, in which the  $\text{PO}_4-\text{P}$  uptake rate of phytoplankton was estimated by the decrease of  $\text{PO}_4-\text{P}$  concentrations in the sample bottles suspended in the microcosms in the given time intervals. The results from both experiments showed that the rates of  $\text{PO}_4-\text{P}$  uptake by phytoplankton were significantly higher while the indices for  $\text{PO}_4-\text{P}$  turnover time were markedly lower in most microcosms with fish than those in the fish-free microcosms. In each experiment, the rates of  $\text{PO}_4-\text{P}$  uptake by phytoplankton were showed to be in significantly positive correlation with the density and primary production of phytoplankton but in insignificantly negative correlation with  $\text{PO}_4-\text{P}$  concentrations in the water column. It appears that *Oreochromis niloticus* had much greater influence as compared with *Hypophthalmichthys molitrix* and *Aristichthys nobilis* on phosphorus cycling in the microcosms, whereas the effect of *Aristichthys nobilis* was obviously greater than that of *Hypophthalmichthys molitrix*. The reduction of  $\text{PO}_4-\text{P}$  turnover time in the microcosms containing fish was attributed mainly to the acceleration of  $\text{PO}_4-\text{P}$  regeneration by fish.

**Key words** Microcosm,  $\text{PO}_4-\text{P}$  turnover time, Rate of  $\text{PO}_4-\text{P}$  uptake by phytoplankton