

## 微囊藻摄取东湖水磷形态研究

郑振华<sup>1</sup> 周培疆<sup>1,2</sup> 吴振斌<sup>2</sup>

1. 武汉大学, 武汉市

2. 中国科学院水生生物研究所, 武汉市

### 摘 要

将东湖水中的磷划分为总磷 (TP)、总溶解磷 (TSP)、总反应磷 (TRP) 和溶解反应磷 (SRP) 4 种磷形态, 研究微囊藻在天然湖水中生长及摄取各磷形态的动力学, 结果表明: 微囊藻的生长主要取决于胞内磷的浓度, 且微囊藻对各磷形态摄取过程中存在“奢侈性”积累现象, 在微囊藻促进作用下磷形态间存在协变性, 但这种作用影响很小。TSP 和 SRP 总是微囊藻细胞优先、快速摄取的磷形态, 只有在其进入大量增殖时, 才会逐步加速对其他磷形态的摄取。

关键词: 蓝藻水华, 微囊藻, 胞内磷, 奢侈性积累, 协变性, 摄取速率

### 壹、前 言

水华 (Water-bloom) 是一种较特殊的水生生物学现象。由于其巨大的危害作用而受到世人关注, 而微囊藻是形成水华的主要物种。适合的营养条件对微囊藻的生长极为重要, 其中磷的作用重大而直接<sup>[1]</sup>。将湖水中的磷划分为多种形态以研究微囊藻对各磷形态的摄取行为, 对研究微囊藻对营养物的需求及水华成因有重要意义。

### 贰、材料和方法

#### 一、磷形态的划分和测定

依据磷的钼蓝显色测定方法将湖水的磷形态划分为总磷 (TP)、总溶解反应磷 (TSP)、总反应磷 (TRP)、溶解性反应磷 (SRP) 4 种<sup>[2]</sup> (见图 1)。

#### 二、藻的培养

铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa* kütz) 取自中科院武汉水生所, 经 3~5 次纯化培养后, 于 5 000 r/min 离心 5 min, 去掉上清液, 用无菌二次水洗涤, 离心一次, 去上清液; 重复洗涤、离心, 去上清液, 以不含 P 营养的 HGZ 培养基 (即培养基中不

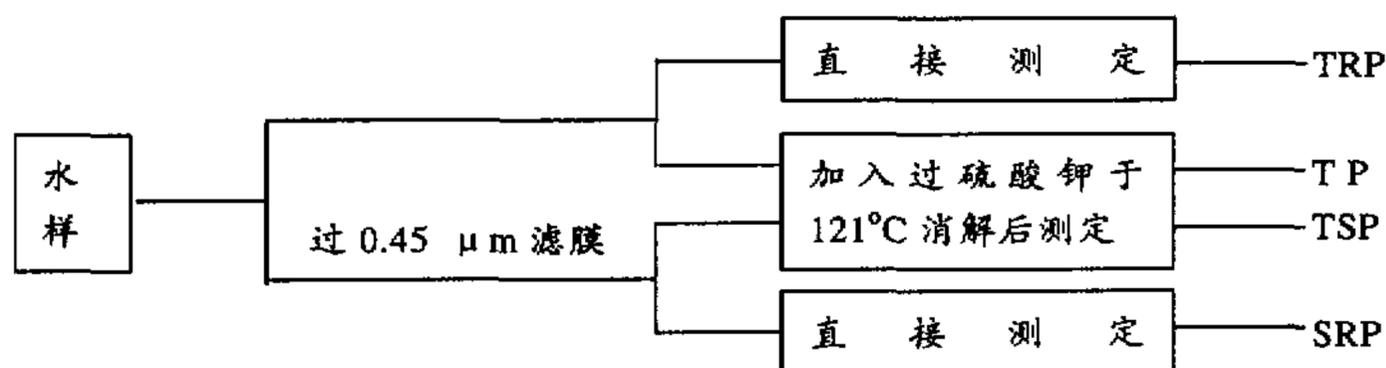


图 1 各磷形态测定程序

加入  $K_2HPO_4$ ) 稀释后, 饥饿培养 5 d 后备用。以上操作皆在无菌条件下进行。

### 三、天然水体中的培养

天然水体采自武大临波门外 0.5 m 水层, 混匀后以 145 mL/瓶的量分装于 500 mL 三角锥瓶中, 该水样于  $121^{\circ}\text{C}$  下高压灭菌 20 min 后冷却, 无菌条件下接入经饥饿培养的 5 ml 藻液, 混匀后于  $(25 \pm 1)^{\circ}\text{C}$  下培养, 光照强度为 3 500 lx, 光周期 12 L:12 D; 同时留有空白作为对照, 在培养过程中, 每隔数小时振摇锥瓶, 并调换其在培养箱中的位置。

### 四、藻生长量及水体中各磷形态的测定

按一定时间间隔, 定时取出藻液, 于显微镜下计数并计算藻生长量。离心后对水样中各磷形态用钼蓝比色法测定 TP(总磷)、TRP(总反应磷)、TSP(总溶解性磷)及 SRP(溶解性反应磷)。

## 叁、结果和讨论

### 一、东湖水中微囊藻的生长

通过用东湖水培养微囊藻来模拟其在天然环境中生长的动态过程, 结果见图 2。

在培养的初始阶段, 微囊藻生长较缓慢。经过饥饿培养的藻种进入天然水体后会加速积累各种营养。有研究认为<sup>[3]</sup>, 微囊藻的生长速度取决于细胞的胞内磷, 而不是胞外磷, 这一点从图 1 的延迟期得到证实。微囊藻从缺磷的培养基转入富营养化的东湖水体中, 尽管水体中 SRP(胞外磷)浓度很高, 但微囊藻并未很快进入对数生长期。这一阶段微囊藻正在快速摄入胞外磷以为其增殖作准备, 因而对数生长期发生在第 5 天。当微囊藻生长数量达到环境负荷时(因为锥瓶中水样体积一定), 其增殖速度减缓。

### 二、微囊藻对东湖水各磷形态的摄取

微囊藻在生长过程中会通过吸附和吸收等作用来利用环境中的磷营养, 从而引起

水体中各磷形态浓度变化, 因此水体中各磷形态的动态变化可以反映微囊藻对各磷形态的摄取规律, 结果见图 3。

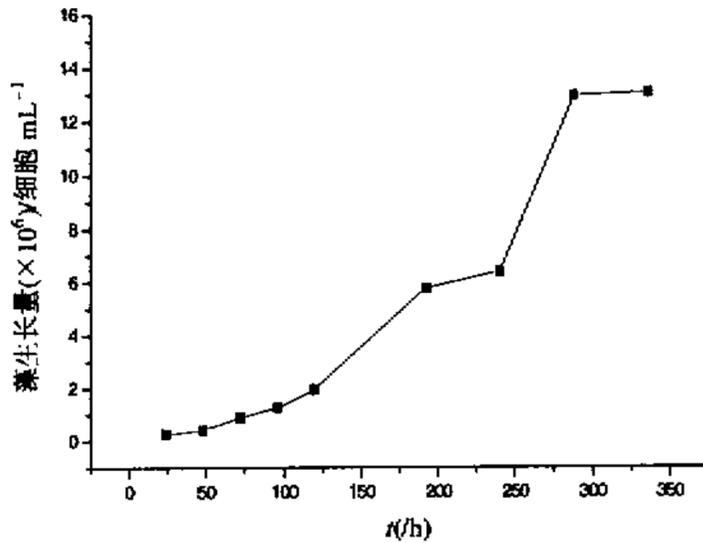


图 2 微囊藻的生长曲线

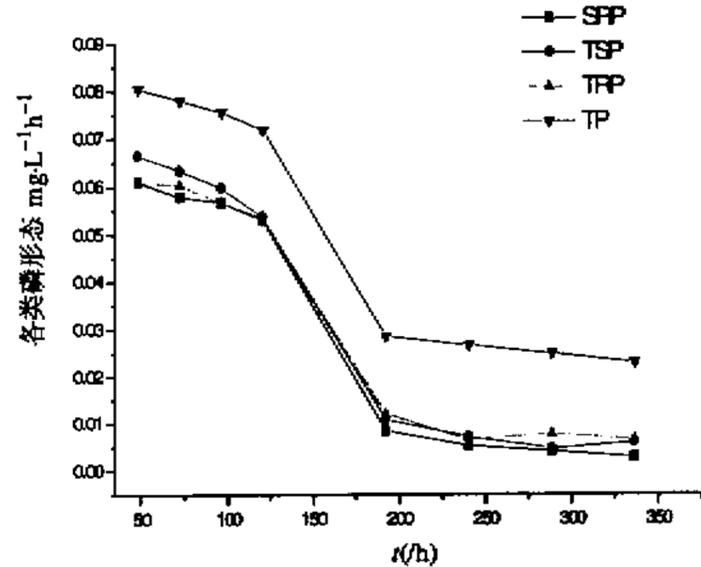


图 3 各磷形态的动态变化曲线

在 24~120 h 区间, 各磷形态的浓度下降虽然不大, 但考虑到这段时间内微囊藻浓度很低, 因而微囊藻摄入磷的相对量是非常高的。有研究表明, 微囊藻可以储存过多的磷即奢侈性消费 (Luxury consumption)<sup>[4]</sup>, 一方面是以备磷匮乏时之用, 一方面是为其对数生长期作准备。第二阶段, 120~192 h 区间, 培养水体中各磷形态的浓度下降达到最大, 而与图 2 对照可发现, 这时微囊藻的生长达到对数生长期。第三阶段, 各磷形态浓度的下降趋势减缓, 一方面是由于微囊藻的生长逐渐进入平缓期, 另一方面是由于前一阶段藻细胞内积累的磷可供其增殖之用。比较图 2 和图 3 可发现, 摄磷虽减缓, 但微囊藻的生长并未同步进入平缓期, 这表明微囊藻的生长主要取决于胞内磷, 而非取决于胞外磷的浓度。

值得注意的是, TRP 和 TSP 的浓度在第三阶段略有上升, 这可能是在达到饱和生长后死亡的藻细胞内磷的释放, 也有可能是非溶解性磷向可溶性磷的转化即磷形态间的协变性, 或者两种可能同时发生。有研究认为<sup>[5]</sup>, 藻类在环境中可直接利用磷的浓度较低时, 可诱促磷酸酶的活性上升及增加有机酸的分泌, 其作用在于促进水体中颗粒磷向溶解态磷的转化及有机磷的利用。一般情况下, 可溶性无机磷是藻类可利用的唯一磷形态, 但也有研究认为<sup>[6]</sup>, 藻类可少量利用水体中的有机磷。这种少量的利用可能是通过上述转化途径来实现的。由于酶的作用和有机酸的分泌有限, 因而这种转化作用不可能性是藻类摄磷的主要途径。

### 三、微囊藻对各磷形态的摄取速率

用表观速率 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) 和相对速率 ( $\text{mg} \cdot \text{细胞}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) 来标示微囊藻对各磷形态的摄取能力和摄取的顺序。表观速率只考虑磷形态的变化而未考虑藻细胞的浓度, 相对速率等于表观速率除以藻细胞浓度, 表示在某一时刻每个微囊藻细胞摄取该形态

磷的质量, 显然相对速率较表观速率更能准确反映藻细胞对该磷形态摄取能力的动态变化, 结果见表 1。微囊藻在其生长过程中对各磷形态的摄取能力并不恒定, 不同生长阶段, 表观速率和相对速率会发生变化, 其动力学见图 4 和图 5。

表 1 微囊藻摄取各磷形态的表观速率值和相对速率值

t/h	表观速率( $\times 10^{-5}$ )/mg $\cdot$ L $^{-1}$ $\cdot$ h $^{-1}$				相对速率( $\times 10^{-13}$ )/mg $\cdot$ cell $^{-1}$ $\cdot$ h $^{-1}$			
	SRP	TRP	TSP	TP	SRP	TRP	TSP	TP
72	1.271	0.254	1.275	1.021	3.282	0.656	3.292	2.636
96	0.513	1.529	1.529	1.017	0.575	1.717	1.717	1.142
120	1.529	1.271	2.546	1.529	1.223	1.017	2.037	1.223
192	6.199	5.775	5.946	6.029	3.187	2.969	3.057	3.100
240	0.638	1.148	0.765	0.383	0.110	0.199	0.132	0.066
288	0.254	-0.256	0.508	0.381	0.040	-0.040	0.079	0.060
336	0.256	0.256	-0.254	0.383	0.020	0.020	-0.020	0.030
均值 $\bar{V}$	1.523	1.425	1.759	1.535	1.205	0.934	1.471	1.180

从表观速率看, 微囊藻摄取各磷形态的最大速率发生在对数生长期 (192 h), 延迟期和平缓期的摄取速率皆很小。各磷形态表观速率的最大值按以下顺序排列: SRP>TP>TSP>TRP。表明 SRP 是微囊藻摄取最快的磷形态, 而 TRP 是摄取最慢的磷形态。因为在 TRP 中有一部分磷必须经过酸化、酶解才可游离出来, 而往往藻细胞不会在水环境中存在大量可直接利用性磷 (SRP) 的情况下促进磷酸酶等酶系的活性, 也不会大量分泌有机酸。各磷形态表观速率的平均值按以下顺序排列: TSP>TP>SRP>TRP。表明溶解态磷都能较快地为藻细胞所利用, 同时表明在酶和有机酸作用下非溶解态磷向 SRP 的转化在藻类摄磷过程中作用较小, 这一点从表 1 中 TSP>TRP 可看出。TP 的表观速率值较大, 可能是与溶解态磷在总磷中的比例较高有关。

相对速率可表示某时刻藻细胞对磷的摄取能力。图 5 中相对速率出现了 2 个高峰, 一个是延迟期, 另一个是对数生长期。其中 SRP 和 TSP 的最大相对速率值发生在延迟期 (72 h), 而 TRP 和 TP 的最大相对速率出现在对数生长期 (192 h)。这表明藻细胞刚进入天然水体时, 会以较大的速度摄取溶解态磷; 而在进入大量增殖时, 才会逐步加速对其他磷形态的摄取。2 个高峰表明, 微囊藻细胞对磷营养存在奢侈性积累。这一点也可从摄磷相对速率的变化和藻细胞生长的不同步性看出。摄磷相对速率在 240 h 时剧降并逐渐接近 0, 而藻细胞在 336 h 才进入生长平缓期。表 2 是几种磷形态的相对速率按不同标准进行的排序:

表 2 微囊藻摄取各磷形态相对速率值的排序

排序标准	排列顺序
SRP 和 TSP 的相对速率达到最大值时(72 h) 各磷形态相对速率	TSP>SRP>TP>TRP
TRP 和 TP 的相对速率达到最大值时(192 h) 各磷形态相对速率	TSP>TP >SRP >TRP
整个生长周期内各磷形态相对速率的最大值	TSP>SRP>TP>TRP
各磷形态相对速率的平均值	TSP>SRP>TP>TRP

从表 2 可明显看出, 藻细胞对溶解态磷的摄取速率总是较其他磷形态大, TSP 和 SRP 总是微囊藻细胞优先、快速摄取形态。

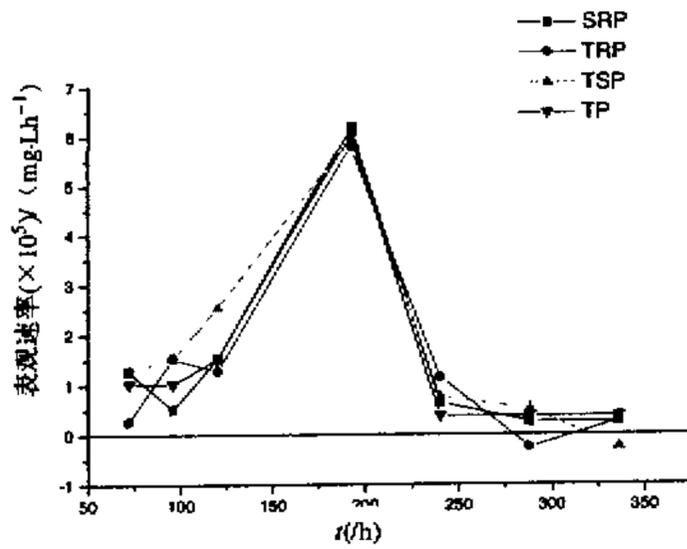


图 4 各磷形态表现速率动力学

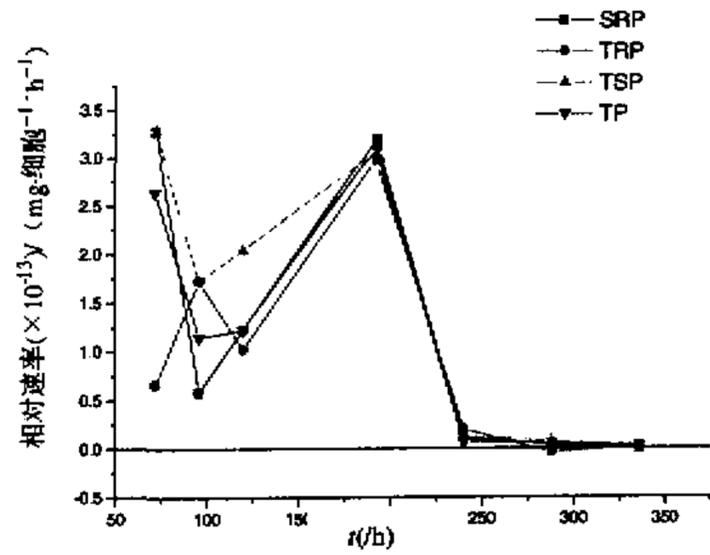


图 5 各磷形态相对速率动力学

## 肆、结 论

- 一、微囊藻生长并不取决于胞外磷的浓度, 而是取决于胞内磷的浓度。
- 二、微囊藻对磷营养的摄取存在奢侈性消费行为, 以应对环境中磷的缺乏及为爆发性增殖作准备。
- 三、各磷形态间存在着协变作用, 目的在于提高环境中磷的可利用性。
- 四、微囊藻细胞对溶解态磷的摄取速率大于其他磷形态。藻细胞刚进入天然水体时, 会以较大的速度摄取溶解态磷; 而在进入大量增殖时, 才会逐步加速对其他磷形

态的摄取。TSP 和 SRP 总是微囊藻细胞优先、快速摄取的形态。

### 参 考 文 献

- [1] 刘学君, 谢平, 等. 武汉东湖微囊藻水华形成及消失原因的探讨. 湖泊科学, 1994, 6(3): 245~256
- [2] 吴重华, 王晓蓉, 等. 羊角月牙藻摄取磷形态的动力学研究. 环境化学, 1998, 17(5): 417~421
- [3] Okado M, R Sudo. Nutrient absorption and growth characteristics of *Microcystis aeruginosa* Res Rep. from the National Inst for Enviro Studies, 1979, 6: 293~302
- [4] Reynolds C S, A E Walsby. Water-blooms. Biol Rev, 1975, 50: 437~481
- [5] 朱小明, 沈国英. 厦门港小型浮游生物对可溶性活性磷吸收和再生通量的季节变化. 厦门大学学报, 1997, 36(1): 145~152
- [6] 吴重华, 王晓蓉, 等. 几种物质磷形态的生物有效性模拟研究. 环境科学, 1998, 19(3): 58~61