

光照时间对外源性磷在模拟水生态系统中迁移的影响

史小丽¹, 王凤平², 蒋丽娟¹, 杨柳燕¹, 孔志明¹, 秦伯强³ (1. 南京大学环境学院污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210093; 2. 南京大学现代分析中心, 南京 210093; 3. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘要:采用同位素示踪法, 模拟研究不同光照时间对外源性无机磷酸盐在水体、铜绿微囊蓝细菌和底泥中迁移的影响。外源性磷在加入水体后先是一种物理化学的快速分配, 然后其在水体中的迁移主要受微囊蓝细菌的生长状况的影响。延长光照时间能加快微囊蓝细菌的生长速率和提高微囊蓝细菌的密度。水体中外源性磷的浓度随时间下降, 蓝细菌中外源性磷的最大浓度与光照时间无关, 只有蓝细菌中超积累了一定数量的外源性磷, 随后的对数生长就与细胞磷的含量无关。延长光照时间能增加微囊蓝细菌中总的外源性磷数量, 随着蓝细菌的衰亡, 外源性磷不断向底泥迁移, 最终绝大部分外源性磷都迁移到底泥中。

关键词:铜绿微囊蓝细菌; 磷; 水生态系统; 光照时间; 迁移; 同位素示踪

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2003)01-06-0040

Effect of Light Period Length on the Movement of Exogenous Phosphorus within Simulative Aqueous Eco-systems

Shi Xiaoli¹, Wang Fengping², Jiang Lijuan¹, Yang Liuyan¹, Kong Zhiming¹, Qin Boqiang³ (1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210093; 2. The Modern Analysis Center, Nanjing University, Nanjing 210093; 3. Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008)

Abstract: Effect of light period length on the movement of exogenous phosphorus within aqueous eco-systems composed with water, *Microcystis aeruginosa* and sediments was studied by the method of phosphorus isotope tracer. Exogenous phosphorus was initially distributed rapidly in the systems in a mode of physical chemistry and then its movement was significantly influenced by the growth of *M. aeruginosa*. With the increasing of the light period length, the growth rate and cell density rose gradually and exogenous phosphorus level declined rapidly in the water. The light period length had nothing to do with the maximum of endocellular phosphorus per mg *M. aeruginosa*. After certain amounts of exogenous phosphorus were accumulated in *M. aeruginosa*, its growth didn't affect the amounts of endocellular phosphorus. When the light period length was long, the total amounts of exogenous phosphorus was high in *M. aeruginosa*. The exogenous phosphorus moved from water and cyanobacteria to sediment continuously until most of exogenous phosphorus transferred into sediment through the decline of *M. aeruginosa*.

Key words: *Microcystis aeruginosa*; phosphorus; aqueous eco-system; light period length; movement; isotope tracer

太湖水体爆发水华时, 其优势生物是铜绿微囊蓝细菌(*Microcystis aeruginosa*), 它的大量繁殖不仅与营养盐浓度高有关, 而且与环境因子有关, 因此, 研究外源性磷在水体中迁移及其环境因子对迁移的影响对认识湖泊富营养化的发生、发展机理及对富营养化湖泊的防治有着重要的意义。用磷的放射性同位素示踪研究水生态系统中磷的迁移, 具有灵敏度高、速度快等

特点而被广泛采用^[1~6]。本试验采用同位素示踪法, 在实验室模拟研究不同光照时间对铜绿微囊蓝细菌生长及外源性磷酸盐在水生态系统中迁移的影响。

基金项目: 中国科学院知识创新项目(KZCX-403)

作者简介: 史小丽(1977~), 汉, 女, 博士生, 陕西宝鸡人, 主要从事环境微生物学方面的研究。

收稿日期: 2002-03-02; 修订日期: 2002-06-11

1 材料与方法

1.1 铜绿微囊蓝细菌(*M. aeruginosa*)

来自中国科学院武汉水生生物研究所,保存在 pH 值为 8.6 的 MA 培养基中^[7],培养条件为温度 25℃、光暗比 10:14、光强度 2200 lx。试验前期将处于对数生长期的微囊蓝细菌转移到无磷的 MA 培养基中培养 3 d,使藻细胞处于磷饥饿状态。

1.2 底泥

在 2001 年 9 月,用彼得森采泥器采集位于中国科学院太湖野外研究站附近湖区的表层沉积物,底泥样品在现场进行混合,且 4℃保存。

1.3 外源性磷

用含有³²P 同位素标记的 Na_2HPO_4 作为试验用外源性磷, $\text{Na}_2\text{H}^{32}\text{PO}_4$ 由中国原子能研究院同位素所提供,放射强度为 5 mCi。

1.4 仪器

采用 BECKMAN LS9800 液体闪烁计数器测定样品的放射性强度。

1.5 试验步骤

(1)模拟水生生态系统 模拟水生生态系统是由水、铜绿微囊蓝细菌和底泥组成的简单水生生态系统。取底泥 100 mL 约 178 g 置于 500 mL 的烧杯中,在低温(5℃)黑暗条件下静置 48 h,用虹吸管小心抽去上层水样,将预先备好的 300 mL 水样沿烧杯壁缓慢加入(不搅动沉积物表层),然后加入磷饥饿的铜绿微囊蓝细菌。水样用蒸馏水配置并采用 MA 培养基,但用放射性 $\text{Na}_2\text{H}^{32}\text{PO}_4$ 代替 β -甘油磷酸钠作为磷源, Na_2HPO_4 的浓度为 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,TP 为 $2.183\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,放射强度为 $109150\text{ DPM}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。蓝细菌的初始浓度在 $10^6\text{ cell}\cdot\text{mL}^{-1}$ 左右。模拟生态系统在不同光照时间下进行静止培养,光暗比分别为 8:16、12:12 和 16:8,光强度 2200 lx,温度为 25℃。每组设 3 个平行样。

(2)取样测定方法 用取样器移取 0.5 mL 含铜绿微囊藻水样,在 10000 r/min 的离心机中离心 15 min,上清液移入闪烁测量瓶中,沉降的微囊蓝细菌用无放射性的培养液反复冲洗,直

到冲洗液中的放射性强度达到背景值为止。冲洗过的蓝细菌用 0.2 mL 60% HClO_4 和 0.4 mL 30% H_2O_2 在 80℃消化 60 min,消化后的产物移入闪烁瓶中。在所有的样品中都加入 5 mL 的甲苯闪烁液,然后在液体闪烁器上测量。根据放射性同位素的强度来反映样品中外源性磷的浓度。采用显微镜计数法测定铜绿微囊蓝细菌的密度,根据质量守恒定律计算底泥中的外源性磷的数量。

2 结果和讨论

2.1 光照时间对铜绿微囊蓝细菌生长的影响

在不同光照时间下,铜绿微囊蓝细菌生长曲线都包括延迟期、对数期和衰亡期 3 个阶段而没有明显的稳定期(图 1)。延长光照时间能缩短微囊蓝细菌生长的延迟期和对数期,提高微囊蓝细菌在水体中的最大密度。在光照分别为 8 h、12 h 和 16 h 时,微囊蓝细菌密度分别在第 8 d、7 d 和 6 d 达到最大值,其最大值分别为 $5.9 \times 10^6\text{ cell}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、 $7.85 \times 10^6\text{ cell}\cdot\text{mL}^{-1}$ 和 $9.05 \times 10^6\text{ cell}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。试验结果表明光照时间的增长有利于铜绿微囊蓝细菌的生长并且缩短了藻的生长周期。

铜绿微囊蓝细菌过去称为铜绿微囊藻,属于蓝藻门,后来研究发现它的细胞结构同真细菌一样,属于原核生物,是蓝细菌(*Cyanobacteria*)中的一种,它具有光合作用能力,是一种放氧型的光合细菌。因此,光强度和光暗比对蓝细菌等光合生物的生长有很大的影响^[8]。光照时间长,微囊蓝细菌获得能量多,有利于其合成各种细胞组成成分,促进细胞繁殖。同时,相应的黑暗时间缩短,蓝细菌进行好氧或厌氧代谢所需的自身储存物质的消耗也少,因此,微囊蓝细菌的密度增加的快。比较不同光照时间铜绿蓝细菌生长的最大密度发现,其生长速率随着光照时间的增长而加大,当光照时间增长到一定程度后,生长速率加大的程度减小,此现象同受光照影响的颤蓝细菌的生长一致^[9]。

2.2 光照时间对水体中可溶性外源性磷变化的影响

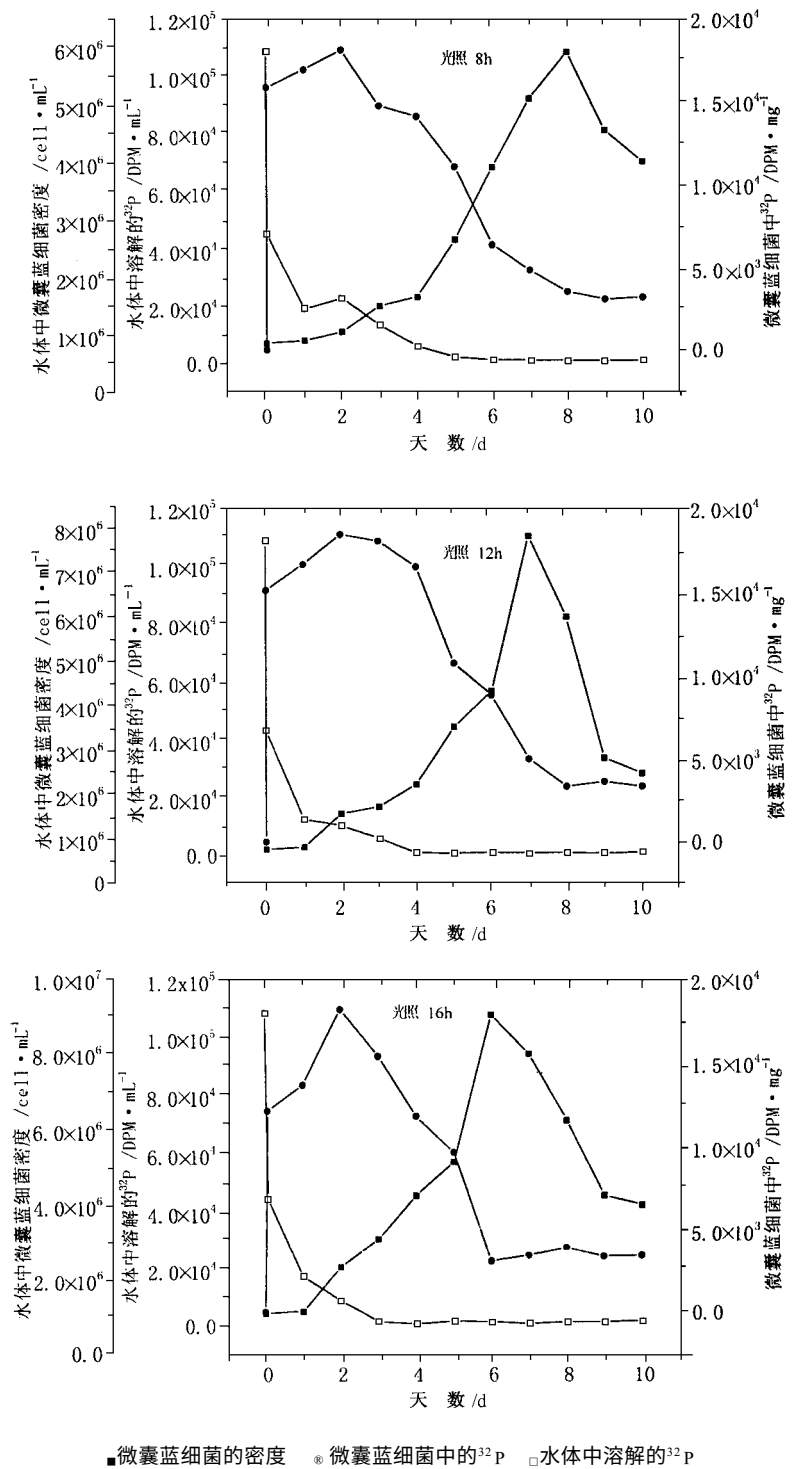


图 1 光照时间对铜绿微囊蓝细菌生长和外源性磷在系统中迁移的影响

Fig.1 Effect of light period length on growth of *M. Aeruginosa* and movement of exogenous phosphorus within eco-systems

在不同光照时间,水体中外源性磷浓度都 同.光照时间长,达到平衡的时间短.因此,光照 随时间不断下降减少,但是,达到平衡的时间不 时间对水中溶解外源性磷浓度的影响主要集中

体现到达平衡前的 5d 左右这个时间内.对这一时段内水中溶解³²P 的含量(Y) 作自然对数,得到与时间(t) 的直线关系 $\ln Y = a - bt$, b 值的大小能定量的说明光照时间对水中³²P 的影响(表 1). 因此,随着光照时间的增加,水中溶解³²P 含量下降速度加快.

表 1 水中溶解³²P 放射强度随时间变化的方程

Table 1 Equation of ³²P radioactivity in water with time

光照时间/h	线性方程	相关系数(r)
8	$\ln Y = 10.78 - 0.55 t$	- 0.95
12	$\ln Y = 10.63 - 0.82 t$	- 0.97
16	$\ln Y = 10.51 - 1.86 t$	- 0.93

水中可溶性外源性磷下降速率与微囊蓝细菌的生长有关,微囊蓝细菌生长繁殖迅速,需要的磷多,对外界吸收磷的能力强,水体中可溶性磷酸盐下降速率快.光照时间分别为 8h、12h 和 16h 时,水中可溶性外源性磷的平衡浓度分别为 0.0205 mg·L⁻¹、0.0173 mg·L⁻¹ 和 0.0225 mg·L⁻¹,其浓度同太湖溶解性磷酸盐的水平相似^[10].因此,微囊蓝细菌的生长对水中可溶性磷酸盐浓度影响很大.

2.3 光照时间对铜绿微囊蓝细菌中外源性磷含量的影响

不论光照时间的长短,铜绿微囊蓝细菌中外源性磷浓度在添加后的 10 min 内迅速增加,接着缓慢上升,2d 后达到最大值约 18000 DPM·mg⁻¹,然后逐渐下降并趋向平衡(图 1).但是,延长光照时间能缩短趋向平衡所需要的时间.当微囊蓝细菌处于衰亡初期时,其外源性磷浓度就开始趋向平衡.微囊蓝细菌中外源性磷的平衡浓度几乎不受光照时间的影响,都在 3000 DPM·mg⁻¹到 3500 DPM·mg⁻¹之间.铜绿微囊蓝细菌中外源性磷总量的变化受光照时间影响很大(图 2).延长光照时间能提高微囊蓝细菌中总的外源性磷含量,满足其生长的需求.

本试验中蓝细菌中外源性磷最大浓度都出现在对数生长初期,与不同光照时间没有明显的关系,这可能由于蓝细菌中磷浓度只与水体中磷的初始浓度有关^[4,11],而本试验磷的初始

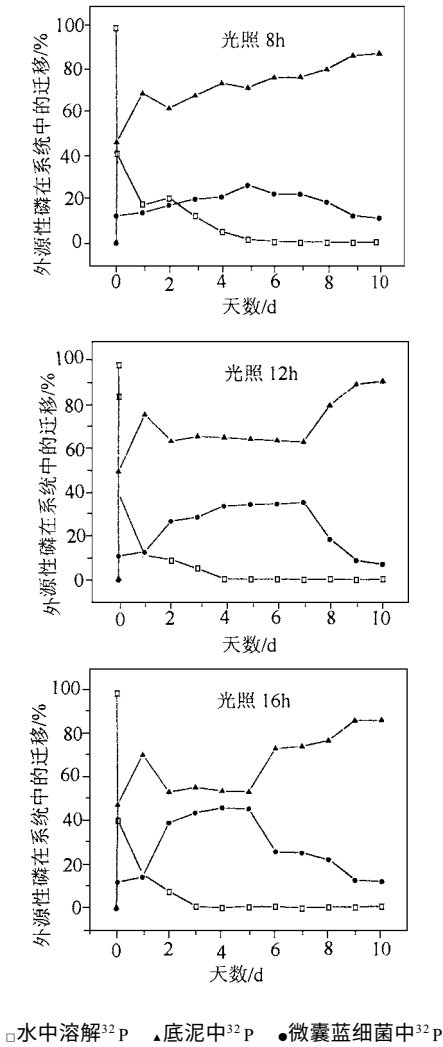


图 2 不同光照时间下外源性磷在模拟水生态系统中迁移过程

Fig.2 Movement of exogenous phosphorus within aqueous eco-systems under variable light period length

浓度均为 2.83 mg·mL⁻¹,因此,蓝细菌中外源性磷的浓度最大值也基本相同.铜绿微囊蓝细菌生长和对外界磷的吸收是不同步的,只有当其吸收了大量的磷以后,才能进入旺盛的对数生长期,因为微囊蓝细菌能合成聚合磷酸盐,对水体中的磷酸盐具有过量吸收的能力,因此,对数生长期的微囊蓝细菌同其细胞中磷的含量无关.从图 1 和图 2 可以发现,铜绿微囊蓝细菌对水中溶解性磷的吸收可分为 2 个阶段,一是快速物理吸收,二是慢速生物化学吸收.在外界溶解性磷酸盐浓度高的时候,采用扩散的这种物

理方式吸收磷.本试验所用的铜绿微囊蓝细菌是磷饥饿的,因此,在开始的 10 min 内有快速的吸收能力.在外界磷酸盐浓度低时,采用的是主动运输方式,需要生物化学反应的参与,因此,对磷酸盐的吸收速度比较慢^[4].但是,延长光照时间能提高蓝细菌主动吸收磷的速率和能力,使其积累更多的磷.因为光照时间长,微囊蓝细菌获得的光能多,并把光能转化为化学能储存在聚合磷酸盐中的高能磷酸键中.

微囊蓝细菌中外源性磷总量的下降与微囊蓝细菌的沉降有关,当微囊蓝细菌生长到一定程度后,细胞活动能量下降,从而发生沉降.蓝细菌中的磷就从水体中进入到底泥中.因此,水体中溶解性磷向底泥中迁移过程中微囊蓝细菌起到非常重要的作用.

2.4 光照时间对外源性磷在模拟水生态系统中迁移的影响

最初的 10 min 内,水中外源性磷浓度迅速下降,很快分配到微囊蓝细菌和底泥中,这种分配并不受外界条件的影响(图 2),在铜绿微囊蓝细菌中达到 12%,在底泥中达到 47%,在水中只有 41%.在 10 min 到 1 d 内,对于不同的光照时间,外源性磷在蓝细菌中的比例都略有增加,底泥中的比例都迅速上升,水体中可溶性磷酸盐迅速下降.1 d 以后,外源性磷的迁移明显受到光照时间的影响.当光照时间为 8 h 时,水体中的溶解性磷继续向微囊蓝细菌和底泥中迁移,蓝细菌中磷最大值达到 23%.到第 5 天后,蓝细菌中外源性磷含量降低并迁移到底泥中.当光照时间为 12 h 时,第 2 天微囊蓝细菌中外源性磷迅速上升,最大比值 35%,底泥中磷下降,直到第 7 天后,微囊蓝细菌中外源性磷下降,而底泥中上升.当光照时间为 16 h 时,底泥中的磷下降,蓝细菌中磷上升,其最大值达到 45%.第 5 d 后微囊蓝细菌中的磷迁移到底泥中.在蓝细菌对数生长初期,外源性磷在蓝细菌中的比值快速上升,底泥中的迅速下降,这是由于蓝细菌对磷的需求量迅速增加,水体中的磷已不能满足其生长的需要,微囊蓝细菌通过自身的酶或代谢产物使底泥放磷来满足其生长的

需要.试验结果表明,不同的光照时间通过影响微囊蓝细菌的生长而改变外源性磷在水体、微囊蓝细菌和底泥中的迁移.

蓝细菌和真细菌对外源性磷有很大的吸收能力^[2,3,12],因此,在最初 10 min,水中磷迅速迁移到底泥和蓝细菌中.微囊蓝细菌积累和储存大量的磷,使得蓝细菌在低营养盐浓度下生存和生长^[13].同时,正磷酸盐形式的磷源很容易进行一些化学反应,特别是与铁和锰进行反应而被底泥吸收. Ritchie 曾报道过 *Synechococcus* 在夜晚吸磷的速度很慢,而在光的激发下速度加快^[14].因此光照时间越长,³²P 迁移到蓝细菌中的数量就越多.本试验结果表明,光照时间对模拟水生态系统系统中磷迁移的影响是通过铜绿微囊蓝细菌而发生作用的,微囊蓝细菌是决定外源性磷在水体中分布的主要原因.因此,夏天光照时间长,微囊蓝细菌能积累更多的外源性磷,在其他环境因子适宜的时候就能产生水华.

3 结论

(1) 延长光照时间有利于微囊蓝细菌的生长,缩短到达最大密度的时间.

(2) 水中溶解性磷的浓度与铜绿微囊蓝细菌的生长有密切的关系,延长光照时间加快水体中可溶性外源性磷的下降速率.

(3) 铜绿微囊蓝细菌中外源性磷最高浓度与光照无关,而铜绿微囊蓝细菌中外源性磷总量与光照有关,延长光照时间,迁移到微囊蓝细菌中的外源性磷数量就增加.

(4) 外源性磷在模拟水生态系统中的迁移受光照时间的影响,这种影响是通过铜绿微囊蓝细菌的生长而发生作用的.

(5) 太湖水体发生水华是由铜绿微囊蓝细菌在适宜条件下大量繁殖的结果,光照时间是影响蓝细菌生长的一个重要方面.今后有必要在连续输入外源性磷时,研究光照等环境因子对蓝细菌生长的影响.

参考文献:

- 1 Rigler F H. A tracer study of the phosphorus cycles in lake water[J]. Ecology, 1956, 37: 550 ~ 562.

- 2 Levine S N, Stainton M P, Schindler D W. A radiotracer study of phosphorus cycling in a eutrophic Canadian shield lake, Lake 227, North western Ontario[J]. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 1986, **43**: 366 ~ 377.
- 3 Lean D R S, White E. Chemical and radiotracer measurements of phosphorus uptake by lake plankton[J]. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 1983, **40**: 147 ~ 155.
- 4 Halmann M, Stiller M. Turnover and uptake of dissolved phosphate in freshwater. A Study in Lake Kinneret[J]. Limnol. Oceanogr., 1974, **19**(5): 774 ~ 783.
- 5 王桂林, 韩梅, 王国仪. 滇池水中浮游生命有机体对磷酸盐的吸收速率[J]. 中国环境科学, 1991, **11**(2): 113 ~ 119.
- 6 王桂林, 韩梅, 唐忠武, 张新华. 磷在滇池水中的循环速度[J]. 环境化学, 1991, **10**(5): 28 ~ 34.
- 7 Oh H, Lee S J, Jang M, Yoon B. Microcystin production by *Microcystis aeruginosa* in a phosphorus-limited chemostat[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2000, Jan: 176 ~ 179.
- 8 Foy R H, Gibson C E. Photosynthetic characteristics of planktonic blue-green algae: the response to twenty strains grown under high and low light[J]. British Phycological Journal, 1982, **17**: 169 ~ 182.
- 9 Post A F, Loogman J G, Mur L R. Photosynthesis, carbon flows and growth of *Oscillatoria agardhii* gomont in environments with a periodic supply of light[J]. Journal of General Microbiology, 1986, **132**: 2129 ~ 2136.
- 10 陈宇炜, 高锡云, 陈伟民, 秦伯强. 太湖微囊藻的生长特征及其分离纯培养的初步研究[J]. 湖泊科学, 1999, **11**(4): 351 ~ 356.
- 11 Fujimoto N, Sudo R. Nutrient-limited growth of *Microcystis aeruginosa* and *Phormidium tenue* and competition under various N: P supply ratios and temperatures. Limnol. Oceanogr., 1997, **42**(2): 250 ~ 256.
- 12 Syers J K, Harris R F, Armstrong D E. Phosphate chemistry in lake sediments[J]. J. Environ. Qual., 1973, **2**: 1 ~ 14.
- 13 Kimura T, Watanabe M, Kohata K, Sudo R. Phosphate metabolism during diel vertical migration in the *Raphidophyceae* alga, *Chattenella antiqua*[J]. Journal of Applied Phycology, 1999, **11**: 301 ~ 311.
- 14 Ritchie R J, Trautman D A, Larkum A W D. Phosphate uptake in the cyanobacterium *Synechococcus* R-2 PCC7942[J]. Plant and Cell Physiology, 1997, **38**(11): 1232 ~ 1241.

最新信息

根据中国科技信息研究所信息分析中心 2002 年的《中国科技期刊引证报告》最新统计数据,《生态学报》2001 年影响因子 0.911,总被引频次为 1207 次,指标综合加权评分为 84.678 分,荣获“百种中国杰出学术期刊”称号。

《生态学报》2003 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的综合性学术刊物,创刊于是 1981 年,主要报道动物生态、植物生态、微生物生态、农业生态、森林生态、草地生态、土壤生态、海洋生态、淡水生态、景观生态、区域生态、化学生态、污染生态、经济生态、系统生态、城市生态、人类生态等生态学各领域的学术论文;特别欢迎能反映现代生态学发展方向的综述性文章;创造性研究报告和研究简报;生态学理论、新方法、新技术介绍、新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。为促进学术、科研信息的交流,欢迎踊跃投稿。

《生态学报》为月刊,2003 年每期 176 页,信息容量约 36 万字,每期定价 36.00 元,年定价值 432.00 元,全国各地邮局均可订阅,望广大读者互相转告,以便及时订阅。

《生态学报》编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号,邮政编码:100085,电话:(010) 62941099

E-mail: Shengtaixuebao@sina.com 或 Shengtaixuebao@mail.rcees.ac.cn

本刊国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670,标准刊号:ISSN 1000-0933/CN11-2031/Q

欢迎订阅! 欢迎投稿! 欢迎刊登广告!