

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica



第34卷 第6期 Vol.34 No.6 2014

中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
科学出版社

主办  
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 34 卷 第 6 期      2014 年 3 月      (半月刊)

## 目 次

### 前沿理论与学科综述

- 全球气候变暖对凋落物分解的影响..... 宋 飘,张乃莉,马克平,等 (1327)
- 从系统到景观:区域物质流分析的景观取向 ..... 张晓刚,曾 辉 (1340)
- 论湿地生态系统服务的多维度价值评估方法..... 宋豫秦,张晓蕾 (1352)
- 保幼激素在昆虫中的分子作用机理..... 金敏娜,林欣大 (1361)
- 岩画和壁画类文物微生物病害研究进展..... 李 强,葛琴雅,潘晓轩,等 (1371)
- 基于 3S 技术的图们江流域湿地生态安全评价与预警研究 ..... 朱卫红,苗承玉,郑小军,等 (1379)
- 跨界保护区网络构建研究进展..... 王 伟,田 瑜,常 明,等 (1391)

### 个体与基础生态

- 速生树种尾巨桉和竹柳幼苗耗水特性和水分利用效率..... 邱 权,潘 昕,李吉跃,等 (1401)
- 三种增温情景对入侵植物空心莲子草形态可塑性的影响..... 褚延梅,杨 健,李景吉,等 (1411)
- 气象要素及土壤理化性质对不同土地利用方式下冬夏岩溶作用的影响 ..... 刘 文,张 强,贾亚男 (1418)
- 施用纳米碳对烤烟氮素吸收和利用的影响..... 梁太波,尹启生,张艳玲,等 (1429)
- 基于 Voronoi 图的林分空间模型及分布格局研究 ..... 刘 帅,吴舒辞,王 红,等 (1436)
- 近自然毛竹林空间结构动态变化..... 仇建习,汤孟平,沈利芬,等 (1444)
- 基于种实性状的无患子天然群体表型多样性研究..... 刁松锋,邵文豪,姜景民,等 (1451)
- 不同林分起源的相容性生物量模型构建..... 符利勇,雷渊才,孙 伟,等 (1461)

### 种群、群落和生态系统

- 毛竹材用林林下植被群落结构对多花黄精生长的影响..... 樊艳荣,陈双林,杨清平,等 (1471)
- 温度和 CO<sub>2</sub> 浓度升高下转 *Bt* 水稻种植对土壤活性碳氮和线虫群落的短期影响 .....  
..... 陈 婧,陈法军,刘满强,等 (1481)
- 中国东北地区近 50 年净生态系统生产力的时空动态 ..... 李 洁,张远东,顾峰雪,等 (1490)
- 遥感与 GIS 支持下的盘锦湿地水禽栖息地适宜性评价..... 董张玉,刘殿伟,王宗明,等 (1503)
- 秦岭火地塘林区土壤大孔隙分布特征及对导水性能的影响..... 陆 斌,张胜利,李 侃,等 (1512)
- 磷浓度对铜绿微囊藻、大型溞和金鱼藻三者相互作用的影响..... 马剑敏靳 萍,郭 萌,等 (1520)
- 普生轮藻浸提液对两种淡水藻类的化感抑制作用及其数学模型..... 何宗祥,刘 璐,李 诚,等 (1527)
- 北京永定河-海河干流河岸带植物的区系分析 ..... 修 晨,欧阳志云,郑 华 (1535)
- 基于河流生境调查的东河河流生境评价..... 王 强,袁兴中,刘 红,等 (1548)

## 景观、区域和全球生态

- 应用 SWAT 模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响 ..... 郭军庭, 张志强, 王盛萍, 等 (1559)
- 长白山不同海拔树木生长对气候变化的响应差异..... 陈 力, 尹云鹤, 赵东升, 等 (1568)
- 石家庄市空气花粉散布规律及与气候因子的关系..... 李 英, 李月丛, 吕素青, 等 (1575)
- 不同放牧梯度下呼伦贝尔草甸草原土壤碳氮变化及固碳效应..... 闫瑞瑞, 辛晓平, 王 旭, 等 (1587)
- 南四湖区农田土壤有机质和微量元素空间分布特征及影响因素..... 武 婕, 李玉环, 李增兵, 等 (1596)

## 资源与产业生态

- 跨国土地利用及其生态影响 ..... 陆小璇 (1606)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 288 \* zh \* P \* ¥ 90.00 \* 1510 \* 30 \* 2014-03



**封面图说:** 图们江河流中段——图们江位于吉林省东南边境, 发源于长白山东南部的石乙水, 河流的绝大部分是中国与朝鲜的界河, 下游很小一段为俄罗斯与朝鲜的界河, 并由这里流入日本海, 我国珲春距离日本海最近的地方仅有 15km。图们江是我国重要的国际性河流之一, 随着我国经济的迅速崛起, 图们江地区进入到多国合作联合开发阶段, 湿地生态系统处于中度预警状态, 并有向重度预警发展的趋势, 生态安全面临的威胁越来越严重。对该区域进行湿地生态安全评价与预警研究, 可为图们江流域生态环境的可持续发展提供依据。图中河道的远方为朝鲜、河道近方为中国。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201210271492

马剑敏, 靳萍, 郭萌, 代克岩, 徐婷婷, 杨程, 蔺庆伟. 磷浓度对铜绿微囊藻、大型溘和金鱼藻三者相互作用的影响. 生态学报, 2014, 34(6): 1520-1526.

Ma J M, Jin P, Guo M, Dai K Y, Xu T T, Yang C, Lin Q W. Influences of phosphorus concentration on interactions among *Microcystis aeruginosa*, *Daphnia magna* and *Ceratophyllum demersum*. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(6): 1520-1526.

## 磷浓度对铜绿微囊藻、大型溘和金鱼藻 三者相互作用的影响

马剑敏<sup>1,2,\*</sup>, 靳萍<sup>1</sup>, 郭萌<sup>1</sup>, 代克岩<sup>1</sup>, 徐婷婷<sup>1</sup>, 杨程<sup>1</sup>, 蔺庆伟<sup>1</sup>

(1. 河南师范大学生命科学学院, 新乡 453007;

2. 河南省环境污染控制重点实验室, 黄淮水环境与污染防治省部共建教育部重点实验室, 新乡 453007)

**摘要:** 为了解磷浓度对生物操纵和水生植被恢复效果的影响, 以铜绿微囊藻、大型溘和金鱼藻分别作为浮游植物、浮游动物和大型沉水植物的代表, 在 25°C、2000—3000lx 光强和 11mg/L 氮浓度条件下, 研究两者和三者共培养时 4 种磷浓度 (0.2、0.5、1.0、1.5 mg/L) 下各自的增长率和培养液中氮磷去除率的变化。结果表明: 两者共培养时, 磷浓度不大于 0.2mg/L 时, 有利于大型溘的繁殖和金鱼藻的生长; 磷浓度介于 0.5—1.5mg/L 时, 铜绿微囊藻呈正增长趋势, 而金鱼藻的生长则明显受抑制。三者共培养时, 所有磷浓度下的大型溘数量及金鱼藻生物量均不同程度的升高, 且铜绿微囊藻的生长得到了有效抑制, 以磷浓度为 0.2—0.5mg/L 时效果最佳; N/P 比值对藻、溘、草间的相互作用有重要影响, 在藻-溘系统中, 大型沉水植物的加入可以大大提高抑藻效果, 减小 N/P 比值波动带来的不利影响。磷浓度为 0.5mg/L 时的水体氮磷去除效果好于其他磷浓度梯度。

**关键词:** 铜绿微囊藻; 大型溘; 金鱼藻; 磷浓度; 生物操纵; 共培养

### Influences of phosphorus concentration on interactions among *Microcystis aeruginosa*, *Daphnia magna* and *Ceratophyllum demersum*

MA Jianmin<sup>1,2,\*</sup>, JIN Ping<sup>1</sup>, GUO Meng<sup>1</sup>, DAI Keyan<sup>1</sup>, XU Tingting<sup>1</sup>, YANG Cheng<sup>1</sup>, LIN Qingwei<sup>1</sup>

1 College of Life Sciences, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China

2 Henan Key Laboratory for Environmental Pollution Control; Key Laboratory for Yellow River and Huai River Water Environment and Pollution Control, Ministry of Education, Xinxiang 453007, China

**Abstract:** In this study, *Microcystis aeruginosa*, *Daphnia magna* and *Ceratophyllum demersum* were selected to be respectively as the representative of phytoplankton, zooplankton and submerged macrophyte to evaluate the influence of phosphorus concentration on biomanipulation and aquatic vegetation restoration. When two or three of them were cultured together, with 4 kinds of phosphorus concentration (0.2, 0.5, 1.0, 1.5 mg/L), 25°C, 2000—3000lx illumination and 11mg/L nitrogen concentration, the changes of growth rate and rate of removing nitrogen and phosphorus were studied. The results indicated that it was advantageous to *D. magna* multiplication and *C. demersum* growth when two of the three organisms were cultured together and the phosphorus concentration was no more than 0.2 mg/L in pairwise culture. *M. aeruginosa* was keeping multiplication fast, but *C. demersum* biomass decreased obviously when phosphorus concentration range was 0.5 to 1.5mg/L. When all organisms were cultured together, both *D. magna* density and *C. demersum* quantity increased, but *M. aeruginosa* density declined markedly, and the effect was best when phosphorus concentration range was 0.2 to 0.5mg/L.

**基金项目:** 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07101007-005); 河南省教育厅科学技术重点研究项目 (14B180009); 河南省创新型科技人才队伍建设工程

收稿日期: 2012-10-27; 修订日期: 2013-03-04

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mjm6495@sina.com

The ratio of N/P could obviously influence their interactions of *M. aeruginosa*, *D. magna* and *C. demersum*. In the co-culture system of *M. aeruginosa* and *D. magna*, addition of submerged macrophyte could enhance the effect of algal control, and lowered the negative effect that was triggered by the wave of N/P ratio. When phosphorus concentration was 0.5mg/L, there was better elimination effect on the nitrogen and phosphorus than other phosphorus concentration gradient.

**Key Words:** *Microcystis aeruginosa*; *Daphnia magna*; *Ceratophyllum demersum*; biomanipulation; phosphorus concentration; co-culture

富营养化已成为当今世界普遍面临的水环境问题,它会影响到水体中浮游植物和浮游动物种群的变化,从而改变生态系统的结构和功能<sup>[1-2]</sup>。蓝藻水华的频繁发生是富营养化淡水水体的一个主要表现,如何控制蓝藻水华则成为现今的水体生态环境研究热点<sup>[3]</sup>。经过多年理论研究和实践达成共识,生态修复是长期有效的控制水华的最佳方式。而生态修复中有两种重要而有效的措施:利用生物操纵<sup>[4]</sup>和大型水生植物来控制藻类<sup>[4-6]</sup>。

生物操纵是通过浮游动物的摄食(下行作用),达到直接控制浮游植物的目的。一些研究发现<sup>[7-8]</sup>,以水溞等大型透明溞动物占优势的湖泊中浮游植物生物量和生产力较低。而大型水生植物不仅能与浮游植物竞争营养、光照、空间等资源<sup>[9-10]</sup>,还能分泌化学物质抑制浮游植物的生长<sup>[11-12]</sup>。两者相辅相成,最终获得良好的抑藻效果。Benndorf 最早提出了生物操纵的磷负荷阈值问题<sup>[13]</sup>,但不同学者对磷负荷阈值范围的研究结果并不一致,有人认为该范围为 0.05—0.15 mg/L<sup>[14]</sup>,有人认为是 0.25mg/L<sup>[15]</sup>,因此适用于我国水体的磷浓度条件需要进一步研究。不仅如此,当水体中的磷浓度超过某一限度后,以大型沉水植物为主的清洁型草型稳态就会转化为以浮游植物为主的浑浊型藻型稳态的水生态系统<sup>[5]</sup>。且生物操纵能否有效和大型沉水植物能否恢复重建这两者之间是有关联的。所以磷浓度阈值是需要研究的关键。而之前我们也在这方面做了一些初步研究<sup>[16]</sup>,但研究尚不完善,有必要进一步研究在富营养化水体中实施生物操纵和恢复大型沉水植物所需的磷浓度。铜绿微囊藻是蓝藻水华中占主要优势的藻类,大型溞是牧食浮游植物的重要浮游动物,因此选择铜绿微囊藻、大型溞和金鱼藻为实验材料,研究不同的磷浓度对三者相互作用的影响,为治理水华和恢复健康水体环境提供更多的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*, FACHB573)购自中国科学院水生生物研究所,保存在 BG-11 培养基中,培养条件为温度 25℃,光暗比 14h:10h,光强 2000—3000lx。实验前将其在 BG-11 培养基中驯化 3 次后扩大培养。进入对数生长期后,便可作为实验接种藻种。

大型溞(*Daphnia magna*):实验室内进行纯化培养并进行实验前的驯化(温度 25℃,光强 2000—3000lx,光暗比 14h:10h),使用同一母体繁殖三代以上的出生 6—24h 的幼龄期大型溞作为实验对象。

金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*):采集于牧野湖,取回实验室后用自来水清洗干净,培养于 BG-11 培养基中,放在实验室靠窗的实验台上。实验时用蒸馏水清洗 3 遍,选取生长良好、长势一致的长 15cm 的顶枝做实验材料。

### 1.2 培养液的配制

以 BG-11 培养基<sup>[17]</sup>为基础,根据之前的预实验配制 11mg/L 氮浓度下磷浓度梯度为 0.2、0.5、1.0、1.5mg/L 的培养液,然后用 1mol/L NaOH 调节 pH 到 7.5;氮浓度的设置以重富营养化水质为参考,磷浓度则覆盖从中度到重度富营养化水质的范围。所有培养液及器皿均高压灭菌。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 接种方法

将经过扩大培养的铜绿微囊藻细胞接种于无氮无磷的 BG-11 培养液中饥饿培养 2d,以去除藻细胞中蓄积的氮、磷,之后倒取适量藻液,4000r/min 离心 15min,弃去上清液,再用无菌蒸馏水洗涤 2 次,弃去上清液,以去除吸附性营养,最后稀释成所需的藻细胞浓度。均为无菌操作。

### 1.3.2 铜绿微囊藻和大型溞共培养

在 250mL 的锥形瓶中加入 150mL BG-11 培养液及 5 个大型溞, 然后加入不同体积的铜绿微囊藻藻液, 每个铜绿微囊藻密度梯度设 3 个重复, 培养

10d, 观察大型溞的繁殖情况, 以确定最适宜大型溞繁殖的藻细胞密度(表 1)。经单因素方差分析, 各密度组之间的大型溞数目差异显著性( $P < 0.05$ ); 最适宜藻细胞密度为  $1.48 \times 10^5$  个/mL。

表 1 大型溞在不同密度的铜绿微囊藻中培养时的数量变化

Table 1 The quantitative change of *D. magna* cultured in different *M. aeruginosa* density

铜绿微囊藻密度(个/mL) Density of <i>M. aeruginosa</i>	0	$1.53 \times 10^4$	$1.48 \times 10^5$	$1.66 \times 10^6$	$1.03 \times 10^7$
初始大型溞数目/个 Initial number of <i>D. magna</i>	5	5	5	5	5
培养后大型溞数目/个 End number of <i>D. magna</i>	1	8	39	7	0

根据上述实验所确定的适宜的铜绿微囊藻密度, 在不同磷浓度梯度培养液的锥形瓶中, 加入等量的铜绿微囊藻藻液调节成  $1.5 \times 10^5$  个/mL 的藻密度, 放入 5 个形态相似的大型溞, 置于光照培养箱内 ( $25 \pm 1^\circ\text{C}$ , 14h:10h, 2000—3000lx) 培养 15d, 每个磷浓度 3 个重复, 每隔 3d 添加适量培养液。测定铜绿微囊藻密度和大型溞数目、以及各培养液中总氮和总磷的浓度, 计算各指标的变化率, 以确定不同磷浓度下各指标的变化趋势。

### 1.3.3 金鱼藻对铜绿微囊藻的化感作用

金鱼藻种植水对铜绿微囊藻的化感作用: 在不同磷浓度培养液的 1000mL 锥形瓶中, 加入相同质量的金鱼藻置于培养箱培养 15d 后, 取出金鱼藻, 补充与改良的 BG-11 培养液相同的氮、磷, 接种相同密度的铜绿微囊藻后再于培养箱中培养 15d ( $25 \pm 1^\circ\text{C}$ , 14h:10h, 2000—3000lx), 每个磷浓度设 3 个重复, 每隔 3d 添加适量培养液。以同样条件下单独培养的铜绿微囊藻为对照(3 个重复)。测定藻细胞密度、以及各培养液中总氮和总磷的浓度, 计算各指标的变化率。

金鱼藻与铜绿微囊藻共培养: 与上述化感实验条件相同, 让金鱼藻和铜绿微囊藻共培养, 此外, 再增加单独培养的金鱼藻作为对照(3 个重复)。测定铜绿微囊藻密度和金鱼藻生物量、以及各培养液中总氮和总磷的浓度, 计算各指标的变化率。

### 1.3.4 铜绿微囊藻、大型溞和金鱼藻三者共培养

在含不同磷浓度培养液的 1000mL 烧杯中, 加入等量的铜绿微囊藻藻液调节成相同的藻密度, 然后加入相同重量的金鱼藻和 5 个形态相似的大型溞, 置于培养箱内 ( $25 \pm 1^\circ\text{C}$ , 14h:10h, 2000—3000lx) 培

养 15d, 每个磷浓度设 3 个重复, 每隔 3d 添加适量培养液。测定铜绿微囊藻密度、大型溞数目和金鱼藻生物量、以及各培养液中总氮和总磷的浓度, 计算各指标的变化率。

### 1.4 测定指标

铜绿微囊藻细胞密度: 在分光光度计上扫描铜绿微囊藻的藻液在 400—800nm 的吸光值, 确定铜绿微囊藻最大吸收峰的波长为 680nm(图 1)。以相同初始条件接种 3 瓶铜绿微囊藻, 培养 14d, 每隔 2d 测定 1 次藻液的吸光值(OD), 并用血球计数板计数藻细胞, 建立藻细胞密度与吸光值 OD 间的回归方程:  $y = 119.597x - 2.107$ , 式中  $x$  为吸光值(OD),  $y$  为藻细胞密度( $\times 10^6$  个/mL), 回归系数  $R^2 = 0.993$ ,  $P < 0.05$ , 因此可以用 OD 值直接反应藻细胞密度。

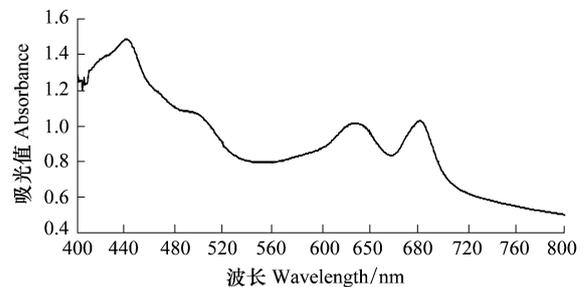


图 1 铜绿微囊藻培养液在波长 400—800nm 下的吸光值扫描图

Fig.1 Absorbance scan of *M. aeruginosa* culture solution on 400—800 nm wavelength

大型溞数目: 肉眼计数。

金鱼藻生物量: 用吸水纸吸取枝条上的多余水分后, 用电子天平称其鲜重。

总氮和总磷浓度: 将培养液以 4000r/min 离心

10min,取其上清液,按照标准方法测定<sup>[18]</sup>。

### 1.5 数据处理

用 spss19.0 进行作图及统计分析。

## 2 结果和分析

### 2.1 铜绿微囊藻和大型溞共培养

图 2 显示:磷浓度为 0.2mg/L 时,铜绿微囊藻密度增加幅度较小,大型溞的增长率大于铜绿微囊藻,培养液较清澈;磷浓度大于 0.2mg/L 时,铜绿微囊藻密度急剧增加,培养液变为蓝绿色。可见磷浓度为 0.2mg/L 时,大型溞对铜绿微囊藻具有显著抑制作用( $P<0.05$ );随着磷浓度增高,大型溞对铜绿微囊藻的抑制程度减弱( $P<0.05$ )。

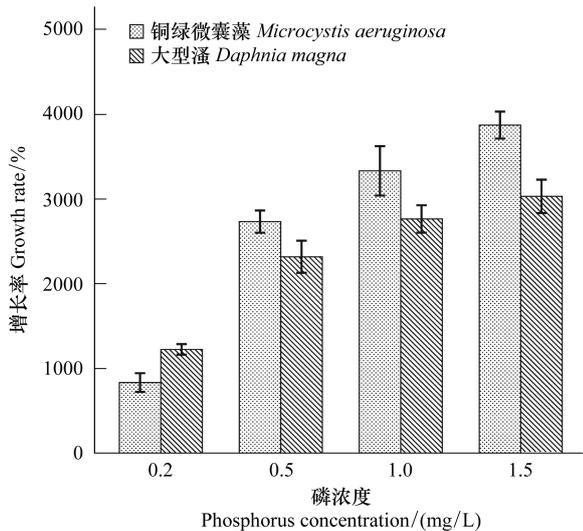


图 2 铜绿微囊藻和大型溞共培养时增长率变化情况

Fig.2 The change of growth rate of *M. aeruginosa* and *D. magna* when they cultured together

### 2.2 金鱼藻和铜绿微囊藻的相互作用

用金鱼藻种植水培养铜绿微囊藻时(图 3),随着磷浓度的升高,铜绿微囊藻的增长率升高,但实验组中铜绿微囊藻的增长率远低于对照组( $P<0.05$ )。磷浓度为 0.2mg/L 时,实验组的铜绿微囊藻的增长率很低,约为接种值的 40%,可见磷浓度越低时金鱼藻种植水对铜绿微囊藻的抑制效果越明显。

金鱼藻与铜绿微囊藻共培养时(图 3),随着磷浓度的增高,铜绿微囊藻的增长率逐渐增大,对照和实验组的金鱼藻增长率均逐渐减小,实验组的金鱼藻增长率显著低于对照组( $P<0.05$ ),原因是微囊藻与金鱼藻之间存在竞争,甚至存在化感作用。磷浓

度为 0.2mg/L 时,金鱼藻对铜绿微囊藻有较高的抑制作用,铜绿微囊藻的密度比起始降低了 20%;磷浓度介于 0.5—1.5mg/L 时,金鱼藻生物量明显下降,而铜绿微囊藻受到的抑制作用减弱,其密度呈现正增长。对比图 3 中微囊藻的增长率可以发现,金鱼藻种植水的抑藻效果明显小于两者共培养时的抑藻效果,原因是:后者除了有化感作用外,还有金鱼藻对铜绿微囊藻的竞争作用;此外,也可能是两种条件下金鱼藻分泌的抑藻物质的量有所不同,或抑藻物质进入水环境后随时间延长效力下降所致。

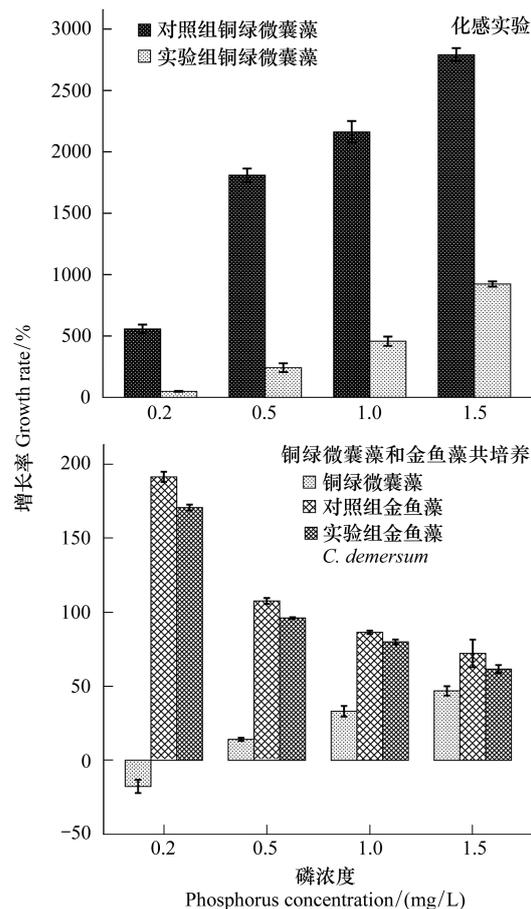


图 3 铜绿微囊藻和金鱼藻的增长率变化情况

Fig.3 The change of *M. aeruginosa* and *C. demersum* growth rate on experiment

### 2.3 藻-溞-草共培养

结果表明(图 4,图 5):高氮浓度下,铜绿微囊藻密度一直保持负增长,且随着磷浓度的增大,负增长趋势逐渐增大。说明铜绿微囊藻的种群数量得到了显著抑制( $P<0.05$ )。金鱼藻生物量随磷浓度的升高而减少,磷浓度为 0.2mg/L 时,其生物量增量显著高于其他 3 个磷处理组( $P<0.05$ )。大型溞数目随磷浓

度的升高而增加,各浓度组之间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。

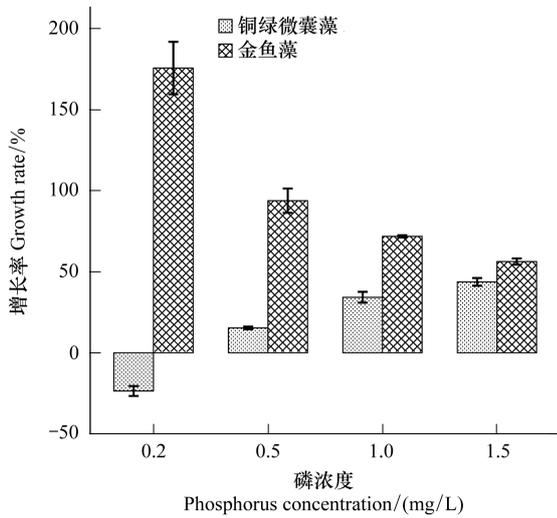


图 4 三者共培养时铜绿微囊藻和金鱼藻的增长率变化

Fig.4 The change of *M. aeruginosa* and *C. demersum* growth rate when *M. aeruginosa*, *D. magna* and *C. demersum* cultured together

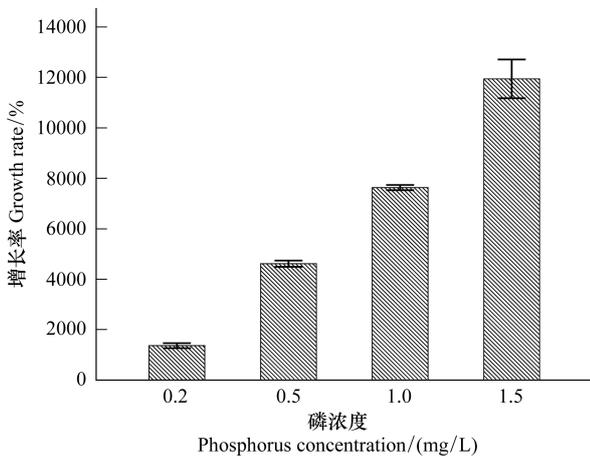


图 5 三者共培养时大型溞的增长率变化情况

Fig.5 The change of *D. magna* growth rate when *M. aeruginosa*, *D. magna* and *C. demersum* cultured together

### 2.5 不同组合下共培养对培养液中氮磷的去除效果

由图 6 可见:铜绿微囊藻和大型溞共培养时, 4 个磷浓度梯度间的除氮效果有显著差异 ( $P < 0.05$ ), 氮去除率最高为 45%;磷平均去除率在 50%以上,磷浓度为 0.2、0.5mg/L 时去除率(约 70%—80%)均高于其他两个浓度。化感实验时,磷浓度为 0.5mg/L 时的氮磷去除效果均高于其他 3 个浓度。铜绿微囊藻和金鱼藻共培养时,随着磷浓度的升高,磷去除率增大,最高可达到 95%; 4 个磷浓度梯度间的除氮效

果有显著差异,对氮的去除率,在 1.0mg/L 磷浓度下,氮平均去除率均显著高于其他磷浓度下的去除率 ( $P < 0.05$ )。可见,铜绿微囊藻和金鱼藻共存时的氮、磷去除效果和化感实验时的去除效果完全不同。在三者共培养时,磷浓度为 0.5mg/L 时,对磷的去除率均显著高于其他浓度 ( $P < 0.05$ );随着磷浓度升高,氮去除率增大,4 个组之间除氮效果差异显著 ( $P < 0.05$ )。

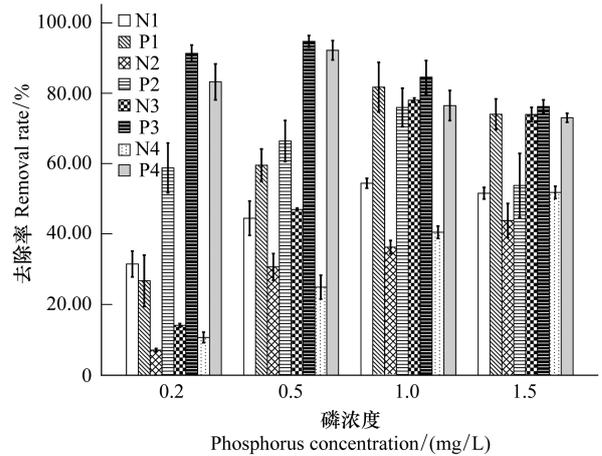


图 6 水中总氮和总磷去除率

Fig.6 The removal rate change of total nitrogen and total phosphorus

N1 与 P1:铜绿微囊藻与大型溞共培养;N2 与 P2:化感实验;N3 与 P3:铜绿微囊藻与金鱼藻共培养;N4 与 P4:三者共培养

N1 and P1 represent the removal rate of nitrogen and phosphorus respectively in which *M. aeruginosa* and *D. magna* cultured together; N2 and P2 represent represent the removal rate of nitrogen and phosphorus respectively in which allelopathical experiment; N3 and P3 represent the removal rate of nitrogen and phosphorus respectively in which of *M.aeruginosa* and *C. demersum* cultured together; N4 and P4 represent the removal rate of nitrogen and phosphorus respectively in which *M. aeruginosa*, *D. magna* and *C. demersum* cultured together

### 3 讨论

本实验清楚地表明了富营养化水体中生物操纵的效果会受到磷浓度以及 N/P 比的明显影响。磷与铜绿微囊藻的生长关系密切,且水体中的磷浓度易受到人为因素的影响。本研究中,对于 0.2、0.5、1.0 和 1.5mg/L 的磷浓度,N/P 比分别为 55/1、22/1、11/1、7.3/1。实验中,磷浓度升高时,铜绿微囊藻的增长率也随之增大。沈宏等<sup>[19]</sup>的研究表明,微囊藻对磷的摄取存在积累性,微囊藻的生长取决于藻细胞

内的磷浓度。因此随着培养液中磷的不断消耗,细胞内的磷含量增加,而低磷培养液首先出现磷限制,高磷培养液中的铜绿微囊藻密度逐渐超过低磷培养液,铜绿微囊藻的细胞增长率高于低磷培养液。陈国永等<sup>[20]</sup>也指出细胞内磷增加有利于铜绿微囊藻生长,藻体内的磷对细胞增殖有促进作用。

铜绿微囊藻和大型溞共培养时,两者的种群数量均随磷浓度的升高而增加。磷浓度为 0.2mg/L 时,铜绿微囊藻的增长相对于其它高磷浓度较为缓慢,且存在大型溞的摄食作用,藻的增长率更加减小,前者的增长率低于后者,因而大型溞在磷浓度为 0.2mg/L 时占优势。这一结果和有的学者提出的生物操纵在 0.05—0.15mg/L 的磷浓度时有较好的抑藻效果<sup>[14]</sup>的结论接近,但范围略大。表明生物操纵的效果的确与水体的磷负荷有密切关系。也直接反映许多学者的研究事实,大型浮游动物的摄食可短期内控制浮游植物生物量,却不能长期有效控制蓝藻水华的急速增加,不能维持生物操纵效果的稳定性和长期性。从氮磷比的角度看,磷的相对缺乏有利于大型溞控制藻。

铜绿微囊藻和金鱼藻共培养时,磷浓度为 0.2mg/L (N/P = 55/1) 时,金鱼藻在竞争中占优势,而铜绿微囊藻的生长受到抑制;当磷浓度大于 0.2mg/L (N/P 比为 22/1—7.3/1) 时,随着磷浓度升高,铜绿微囊藻的种群数量增大,而金鱼藻的增长率最低降到初始值的 60%。在磷浓度为 0.2mg/L 时,金鱼藻生长状况最好,表明高磷浓度不利于金鱼藻生长,与王珺等<sup>[21]</sup>的研究结果一致。原因是营养盐浓度超过金鱼藻抗逆能力时,严重影响金鱼藻的生理活动,对金鱼藻的生长产生胁迫现象,从而使它的抗逆性弱化。而随着磷浓度的升高,铜绿微囊藻增长率增大,是因为磷浓度的增加对藻细胞的生长有促进作用;从氮磷比的角度分析,浮游植物与大型沉水植物竞争时,较高的氮磷比对大型沉水植物有利。金鱼藻的生物量最大时,铜绿微囊藻的生长受到抑制,说明金鱼藻通过对重要生态因子(光、空间、营养等)的竞争、以及向水中释放化感物质<sup>[22]</sup>,从而抑制藻的生长。Scheffer 等认为<sup>[15]</sup>,0.25mg/L 以内的磷负荷下,浅水湖泊可以通过大型沉水植物固定营养物而维持清洁状态,高于此浓度,浮游植物将会占据优势。

三者共培养时,铜绿微囊藻和大型溞的增长率变化趋势相反。在所有的磷浓度下(N/P 比为 55/1—7.3/1),铜绿微囊藻均处于负增长状态,金鱼藻和大型溞处于正增长状态,尤其是大型溞的增幅更为明显。表明三者共培养时,铜绿微囊藻始终受到明显的抑制,而大型溞和金鱼藻则一直处于优势。说明在藻-溞系统中,大型沉水植物的加入,可以提高浮游动物枝角类对水华藻类的控制效果。因为大型水生植物为浮游动物提供了良好的栖息场所,水生植物的光合作用,增加水体溶氧量,为浮游动物的生长和繁殖提供足够的氧气;大型沉水植物不仅同浮游植物竞争光照和营养,还可能分泌化感物质,从而抑制浮游植物的生长和发展<sup>[22]</sup>,使水体透明度提高,水质得到改善。反映了生态系统的复杂性和生物多样性的提高,有利于增强大型沉水植物的竞争力和控制水华藻类的效果。生物操纵的开拓者 Shapiro 认为,生物操纵之后,必须恢复水生植被才能维持清水态湖泊生态系统<sup>[23]</sup>。许多研究也表明<sup>[24-25]</sup>,大型沉水植物可以有效地降低浅水湖泊中营养物质的含量,从而显著提高富营养水体的水质,对氮、磷污染有明显的净化作用,可维持水体长期稳定于清澈状态。实验中氮磷去除率的结果也证明了这点。

综上所述,生物操纵与水生植被重建同时进行是可以实现的。合理的生物操纵和重建大型水生植物相结合,可以有效的控制浮游植物的过量生长,净化水体。

鉴于上述结论只是在实验室内模拟自然水生态条件下研究的结果,与实际水体的复杂性还有很大的差距,其结论的实际应用效果还有待进一步的验证。

#### References:

- [1] Sanders J G, Cibik S J, Delia C F. Nutrient enrichment studies in a coastal plain estuary: changes in phytoplankton species composition. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 1987, 44: 83-90.
- [2] Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenko J, Melillo J M. Human domination of Earth's ecosystems. *Science*, 1997, 277:233-239.
- [3] Xie P. Sliver carp, blighead carp and alagl water-bloom control. Beijing: Science Press, 2003:103-129.
- [4] Liu J, Qin Y J, Qiu Y L Pan W B. Advances on bio-manipulation in control of eutrophic lakes. *Ecologic Science*, 2005, 24(2):188-192.

- [ 5 ] Qin B Q, Yang L Y, Chen F Z, Zhu G W, Zhang L, Chen Y Y. Mechanism and control technology and its application of Eutrophication happen in lake. Chinese Science Bulletin, 2006, (16):1857-1866.
- [ 6 ] Moss B. Engineering and biological approaches to the restoration from the eutrophication of shallow lakes which aquatic plant communities are important components. Hydrobiologia, 1991, 200/201:367-377.
- [ 7 ] Sarvala J, Helminen H, Vesa S, Salonen S, Vuorio K. Relations between planktivorous fish abundance zooplankton and phytoplankton in three lakes of differing productivity, Hydrobiologia, 1997/1998, 363:81-95.
- [ 8 ] Tonno I, Kunnap H, Noges T. The role of zooplankton grazing in the formation of clear water phase in a shallow charophyte-dominated lake. Hydrobiologia, 2003, 506(1/3):353-358.
- [ 9 ] Yang Q X. Studies on the interaction of submerged plant and phytoplankton in eutrophic waters. Journal of Lake Sciences, 1996, (8):17-23.
- [ 10 ] Zhang Z S. Macrophyte-phytoplankton relationship and lake trophic status. Journal of Lake Sciences, 1998, 10(4):83-86.
- [ 11 ] Scheffer M, Berg van den M, Breukelaar A, Breukers C, Coops H, Doef R, Meijer M L. Vegetated area with clear water in turbid shallow lakes. Aquatic Botany, 1991, 49:193-196.
- [ 12 ] Gross E M. Allelopathy of aquatic autotrophs. Critical Reviews in Plant Sciences, 2003, 22(3&4):313-339.
- [ 13 ] Benndorf J. Food web manipulation without nutrient control: A useful strategy in lake restoration. Aquatic Sciences, 1987, 49(2):237-248.
- [ 14 ] Jørgensen S E and R de Bernardi. The use of structural dynamic models to explain the success and failure of biomanipulation. Hydrobiologia, 1998, 379:147-158.
- [ 15 ] Scheffer M, Carpenter S, Foley J A, Folke C, Walker B. Catastrophic shifts in ecosystems. Nature, 2001, 413:591-596.
- [ 16 ] Ma S, Wang C L, Zhang Y J, Jiang X Y, Ren S X, Li X Y, Ma J M. Influences of nitrogen and phosphorus concentration on interactions among *Chlorella vulgaris*, *Daphnia magna* and *Ceratophyllum demersum*. Acta Hydrobiologica Sinica, 2012, 36(1):66-72.
- [ 17 ] Saito K, Hiroshi Ishii, Nishida F. Purification of microcystins by DEAE and C<sub>18</sub> cartridge chromatography. Toxicon, 2002, 40(1):97-101.
- [ 18 ] State environmental protection administration. Water and wastewater monitoring analysis method (The fourth edition). Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 243-257.
- [ 19 ] Shen H, Song L R, Zhou P J, Liu Y D. Kinetic studies on the effects of organophosphorus pesticides on the growth of *Microcystis aeruginosa* and the uptake of phosphorus forms by *Microcystis aeruginosa* in Dianchi Lake. Acta Hydrobiologica Sinica, 2007, 31(6):863-868.
- [ 20 ] Chen G Y, Yang Z B, Ma Y, Tao M X. Effects of nitrogen and phosphorus on growth of *Microcystis aeruginosa* strains. Journal of Environment and Health, 2007, 2(9):675-679.
- [ 21 ] Wang J, Gu Y F, Zu Z Y, Wu B, Yin D Q. Physiological responses of *Ceratophyllum demersum* under different nutritional conditions. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(2):337-340.
- [ 22 ] Sun Y Y, Xu S Z, Zang J, Wang C H. Growth inhibition of *Ceratophyllum demersum* on five species of water bloom microalgae. Environmental Science & Technology, 2012, 35(7):1-7.
- [ 23 ] Blindow I, Anderson G, Hargeby A. Long-term pattern of alternative stable states in two shallow eutrophic lakes. Freshwater Biology, 1993, 30:159-167.
- [ 24 ] Houser S H. Stable states, buffers and switches: an ecosystem approach to the restoration and management of shallow lakes in Netherlands. Wat Sci Tech, 1998, 37(3):151-164.
- [ 25 ] Ciurli A, Zuccarini P, Alpi A. Growth and nutrient absorption of two submerged aquatic macrophytes in mesocosms, for reinsertion in a eutrophicated shallow lake. Wetlands Ecology and Management, 2009, 17:107-115.

## 参考文献:

- [ 3 ] 谢平. 鲢、鳙与藻类水华控制. 北京: 科学出版社, 2003: 103-129.
- [ 4 ] 刘晶, 秦玉洁, 丘焱伦, 潘伟斌. 生物操纵理论与技术在富营养化湖泊治理中的应用. 生态科学, 2005, 24(2):188-192.
- [ 5 ] 秦伯强, 杨柳燕, 陈非洲, 朱广伟, 张路, 陈宜瑜. 湖泊富营养化发生机制与控制技术及其应用. 科学通报, 2006, 51(16):1857-1866.
- [ 9 ] 杨清心. 富营养化水体中沉水植物与浮游植物藻类相互竞争的研究. 湖泊科学, 1996, (8):17-23.
- [ 10 ] 章宗涉. 水生高等植物-浮游植物关系和湖泊营养状态. 湖泊科学, 1998, 10(4):83-86
- [ 16 ] 马帅, 王程丽, 张亚捷, 蒋昕斌, 任韶霞, 李效宇, 马剑敏. 氮磷浓度对藻-蚤-草间相互作用的影响. 水生生物学报, 2012, 36(1):66-71.
- [ 18 ] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 243-257.
- [ 19 ] 沈宏, 宋立荣, 周培疆, 刘永定. 有机磷农药对滇池微囊藻生长和摄磷效应的影响. 水生生物学报, 2007, 31(6):863-868.
- [ 20 ] 陈国永, 杨振波, 马昱, 陶茂莹. 氮和磷对铜绿微囊藻细胞生长的影响. 环境与健康杂志, 2007, 24(9):675-679.
- [ 21 ] 王珺, 顾宇飞, 朱增银, 武斌, 尹大强. 不同营养状态下金鱼藻的生理响应. 应用生态学报, 2005, 16(2):337-340.
- [ 22 ] 孙颖颖, 徐深圳, 张静, 王长海. 金鱼藻对5种水华微藻生长的抑制作用. 环境科学与技术, 2012, 35(7):1-7.

**ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.6 Mar., 2014 (Semimonthly)**  
**CONTENTS**

**Frontiers and Comprehensive Review**

- Impacts of global warming on litter decomposition ..... SONG Piao, ZHANG Naili, MA Keping, et al (1327)
- From system to landscape: the other orientation of regional material flow analysis ..... ZHANG Xiaogang, ZENG Hui (1340)
- A multi-dimensional approach for wetland ecosystem service valuation ..... SONG Yuqin, ZHANG Xiaolei (1352)
- Molecular mechanisms of the insect juvenile hormone ..... JIN Minna, LIN Xinda (1361)
- Microbial deterioration in ancient cave and wall paintings ..... LI Qiang, GE Qinya, PAN Xiaoxuan, et al (1371)
- Study on ecological safety evaluation and warning of wetlands in Tumen River watershed based on 3S technology .....  
..... ZHU Weihong, MIAO Chengyu, ZHENG Xiaojun, et al (1379)
- A review of transboundary protected areas network establishment ..... WANG Wei, TIAN Yu, CHANG Ming, et al (1391)

**Autecology & Fundamentals**

- Water consumption characteristics and water use efficiency of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* and bamboo-willow  
seedlings ..... QIU Quan, PAN Xin, LI Jiyue, et al (1401)
- Three warming scenarios differentially affect morphological plasticity of an invasive herb *Alternanthera philoxeroides* .....  
..... CHU Yanmei, YANG Jian, LI Jingji, et al (1411)
- The influence of meteorological factors and soil physicochemical properties on karst processes in six land-use patterns in summer  
and winter in a typical karst valley ..... LIU Wen, ZHANG Qiang, JIA Yanan (1418)
- Effects of nanocarbon application on nitrogen absorption and utilization of flue-cured tobacco .....  
..... LIANG Taibo, YIN Qisheng, ZHANG Yanling, et al (1429)
- The stand spatial model and pattern based on voronoi diagram ..... LIU Shuai, WU Shuci, WANG Hong, et al (1436)
- Dynamic analysis of spatial structure in a close-to-nature *Phyllostachys edulis* stands .....  
..... QIU Jianxi, TANG Mengping, SHEN Lifan, et al (1444)
- Phenotypic diversity in natural populations of *Sapindus mukorossi* based on fruit and seed traits .....  
..... DIAO Songfeng, SHAO Wenhao, JIANG Jingmin, et al (1451)
- Development of compatible biomass models for trees from different stand origin ... FU Liyong, LEI Yuancai, SUN Wei, et al (1461)

**Population, Community and Ecosystem**

- The impact of understory vegetation structure on growth of *Polygonatum cyrtoneura* in extensively managed *Phyllostachys edulis*  
plantation ..... FAN Yanrong, CHEN Shuanglin, YANG Qingping, et al (1471)
- Short-term effects of CO<sub>2</sub> concentration elevation, warming and transgenic *Bt* rice cropping on soil labile organic carbon and  
nitrogen, and nematode communities ..... CHEN Jing, CHEN Fajun, LIU Manqiang, et al (1481)
- Temporospatial variations in net ecosystem productivity in Northeast China since 1961 .....  
..... LI Jie, ZHANG Yuandong, GU Fengxue, et al (1490)
- Assessment of the habitat suitability for waterfowls in the Panjin, Liaoning with GIS and remote sensing .....  
..... DONG Zhangyu, LIU Dianwei, WANG Zongming, et al (1503)
- Distribution of soil macropores and their influence on saturated hydraulic conductivity in the Huoditang forest region of the  
Qinling Mountains ..... LU Bin, ZHANG Shengli, LI Kan, et al (1512)

- Influences of phosphorus concentration on interactions among *Microcystis aeruginosa*, *Daphnia magna* and *Ceratophyllum demersum* ...  
 ..... MA Jianmin, JIN Ping, GUO Meng, et al (1520)
- Allelopathic inhibition and mathematical models of *Chara vulgaris* extracts on two freshwater algae species .....  
 ..... HE Zongxiang, LIU Lu, LI Cheng, et al (1527)
- Flora analysis of riparian vegetation in Yongding-Haihe river system, China ..... XIU Chen, OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua (1535)
- Stream habitat assessment of Dong River, China, using *River Habitat Survey* method .....  
 ..... WANG Qiang, YUAN Xingzhong, LIU Hong, et al (1548)
- Landscape, Regional and Global Ecology**
- Applying SWAT model to explore the impact of changes in land use and climate on the streamflow in a Watershed of Northern  
 China ..... GUO Junting, ZHANG Zhiqiang, WANG Shengping, et al (1559)
- Climate response of tree growth along an altitudinal gradient in the Changbai Mountains, Northeast China .....  
 ..... CHEN Li, YIN Yunhe, ZHAO Dongsheng, et al (1568)
- The dispersion of airborne pollen and its relationship with major climatic parameters in Shijiazhuang .....  
 ..... LI Ying, LI Yuecong, LÜ Suqing, et al (1575)
- The change of soil carbon and nitrogen under different grazing gradients in Hulunber meadow steppe .....  
 ..... YAN Ruirui, XIN Xiaoping, WANG Xu, et al (1587)
- Spatial distribution and influencing factors of farmland soil organic matter and trace elements in the nansihu region .....  
 ..... WU Jie, LI Yuhuan, LI Zengbing, et al (1596)
- Resource and Industrial Ecology**
- Transnational land use and its potential environmental consequence ..... LU Xiaoxuan (1606)

# 《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 薛建辉 编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 34 卷 第 6 期 (2014 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 6 (March, 2014)

编 辑 《生态学报》编辑部  
地址:北京海淀区双清路 18 号  
邮政编码:100085  
电话:(010)62941099  
www.ecologica.cn  
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

主 编 王如松  
主 管 中国科学技术协会  
主 办 中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
地址:北京海淀区双清路 18 号  
邮政编码:100085

出 版 科 学 出 版 社  
地址:北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂  
发 行 科 学 出 版 社  
地址:东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717  
电话:(010)64034563  
E-mail: journal@cspg.net

订 购 全国各地邮局  
国外发行 中国国际图书贸易总公司  
地址:北京 399 信箱  
邮政编码:100044

广告经营 京海工商广字第 8013 号  
许 可 证

Edited by Editorial board of  
ACTA ECOLOGICA SINICA  
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China  
Tel: (010)62941099  
www.ecologica.cn  
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

Editor-in-chief WANG Rusong  
Supervised by China Association for Science and Technology  
Sponsored by Ecological Society of China  
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS  
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,  
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,  
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North  
Street, Beijing 100717, China  
Tel: (010)64034563  
E-mail: journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China  
Foreign China International Book Trading  
Corporation  
Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元