

氮磷的不同供应比例和频度对藻类水华形成的影响

王小冬^{1,2,3}, 秦伯强^{3*}, 高 光³

(1. 农业部渔业装备与工程重点开放实验室, 上海 200092; 2. 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 上海 200092; 3. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

摘 要:为了探讨氮磷的不同供应比例和频度对藻类水华形成的影响,本研究设计了7种氮磷添加比例(质量比):只添加氮(以+N表示)、50:1、20:1、7:1、1:1、1:7和只添加磷(以+P表示);2种添加频度:频度较大的L系列(实验前期每日均进行添加),频度较小的S系列(只在实验过程中添加1次)。两种添加频度下,相同添加比例的处理的营养盐添加量相近。在处理+N、50:1、20:1、7:1和1:1中以N浓度为基准进行相应比例的P添加,在处理1:1、1:7和+P中以P浓度为基准进行相应比例的N添加。在1:1处理缸中N、P净增加均约为 $2.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。实验水体来自一个浮游植物丰富但没有微囊藻水华的天然富营养池塘。实验于2007年8月1日—8月13日在室外采用玻璃缸进行。结果表明,两种添加频度以及不同氮磷添加比例下,实验过程中出现的水华种类均为微囊藻(*Microcystis* spp.)水华,没有固氮藻类水华出现。在两种不同添加频度下,微囊藻水华在处理+N、50:1、20:1、7:1和1:1中明显形成,而处理+P和1:7中,微囊藻水华的出现会晚几天或者水华现象不明显,这表明本实验中单独添加氮比单独添加磷对微囊藻水华形成的促进作用要明显些。水体中微囊藻水华的出现与适宜的氮磷比例添加有关,氮磷添加比例适宜时,两种不同的添加频度下均可出现微囊藻水华,但氮磷营养盐的不同添加比例和频度均没有导致固氮藻类水华的出现。

关键词:营养盐;氮磷添加;藻类水华

中图分类号:X172 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)12-2533-09

Effect of Different Ratios and Frequencies of Nitrogen and Phosphorus Addition on Algal Bloom Formation

WANG Xiao-dong^{1,2,3}, QIN Bo-qiang^{3*}, GAO Guang³

(1. Key Laboratory of Fishery Equipment and Engineering, Ministry of Agriculture, Shanghai 200092, China; 2. Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fisheries Sciences, Shanghai 200092, China; 3. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: To determine the effects of different ratios and frequencies of nitrogen (N) and phosphorus (P) addition on algal bloom formation, an experiment was carried out with glass jars from 1 August 2007 to 13 August 2007 outdoors, which included 7 kinds of N to P ratios (mass ratio): N addition alone (+N), 50:1, 20:1, 7:1, 1:1, 1:7 and P addition alone (+P); and 2 kinds of frequencies: high frequency (L), addition was conducted every day in the first few days, and low frequency (S), addition was only once in the middle of the experiment. The addition amount for the treatments with the same ratio from the 2 kinds of frequencies was close to each other. In treatments +N, 50:1, 20:1, 7:1 and 1:1, P addition were based on N mass, and in treatments 1:1, 1:7 and +P, N addition were based on P mass. And in treatment 1:1, the net addition of N and P was about $2.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ each for both the 2 kinds of frequencies. The experimental water was from a natural eutrophic pond rich of phytoplankton but without *Microcystis* bloom. The results showed the algal blooms appeared in this experiment were all *Microcystis* blooms regardless of what addition ratios or frequencies, and no nitrogen-fixing algae bloom appeared. *Microcystis* blooms obviously formed in treatments +N, 50:1, 20:1, 7:1 and 1:1 in both the 2 kinds of addition frequencies, while in treatments 1:7 and +P of the 2 kinds of frequencies, *Microcystis* bloom formation would be a few days later or not obvious. It showed the N addition alone for promoting *Microcystis* bloom formation was relatively evident than that of P addition alone. Our experiment here showed that *Microcystis* bloom formation was related to nutrients

收稿日期:2011-04-25

基金项目:湖泊与环境国家重点实验室开放基金(2010SKL006);国家杰出青年科学基金(40825004);国家大宗淡水鱼类产业技术体系(nycytx-9-12)

作者简介:王小冬(1981—),女,湖南隆回人,博士,主要研究水体富营养化。E-mail: wangxd1201@163.com

* 通讯作者:秦伯强 E-mail: qinbq@niglas.ac.cn

addition of appropriate N:P ratios, and when the added N:P ratios were appropriate, *Microcystis* bloom appeared in both the 2 addition frequencies. However, the different addition ratios and frequencies here did not lead to nitrogen-fixing algae bloom formation.

Keywords: nutrients; N & P addition; algal bloom

天然淡水水体常见的藻类水华有多种,除了微囊藻水华,还有鱼腥藻水华、裸藻水华、硅藻水华等^[1-4]。藻类水华的发生通常与氮(N)、磷(P)的供给有关^[5-6]。有研究认为,影响固氮蓝藻或非固氮蓝藻占优势的最重要因素是氮、磷的相对可利用性^[7]。在氮磷摩尔比较低(一般 N:P <15)的水体中容易出现蓝藻水华^[8-9],相反,氮磷摩尔比值较高(一般 N:P >20)的水体中可能出现真核藻类为优势^[8]。在淡水环境中,过量的 P 负荷经常与富营养联系起来^[10-11]。磷驱动的富营养化现象可能成为固氮或者非固氮蓝藻占优势的一个前提。磷添加(例如,氮磷比降低)的情况下经常容易出现固氮种类为优势^[11],但 Paerl^[14]列举了一些相反的例子。

营养盐的供应频度也会影响浮游植物优势种类。Örnólfsson 等^[12]对 Galveston Bay 的研究表明,影响浮游植物群落结构的主要因素是河流输入中氮元素的脉冲式供给。Jensen et al^[13]通过调查丹麦 178 个浅水湖泊发现,具有异形胞的蓝藻在总磷 < 0.25 mg·L⁻¹ 时占优势,不含异形胞的蓝藻在总磷为 0.25~0.8 mg·L⁻¹ 时占优势,而绿藻在总磷 > 1 mg·L⁻¹ 时占优势,绿藻在超富营养水体中占据优势很有可能是由于底泥和外源营养盐提供了连续的营养盐和碳的输入。

为了探讨氮磷的供应比例和频度是否会影响同一水源中不同种类藻类水华的出现,我们设计了本实验进行探讨。

1 材料与方法

1.1 实验条件与设计

实验于 2007 年 8 月 1 日—8 月 13 日在室外进行。氮、磷的添加按添加频度分两种方式(添加频度较大的 L 系列和添加频度较小的 S 系列)。两种添加频度下的添加比例均分为 7 种,以氮磷的比例(N:P 质量比)划分:只添加氮(以+N 表示)、50:1、20:1、7:1、1:1、1:7,只添加磷(以+P 表示)。则 L 系列依次表示为 L(+N)、L(50:1)、L(20:1)、L(7:1)、L(1:1)、L(1:7)和 L(+P);S 系列依次表示为 S(+N)、S(50:1)、S(20:1)、S(7:1)、S(1:1)、S(1:7)和 S(+P)。在处理+N、50:1、20:1、7:1 和 1:1 中以 N 浓度为基准进行相应比例的 P 添加,在处理 1:1、1:7 和 +P 中以 P 浓度为基准进行相应比例的 N 添加。

实验用水来自中国科学院南京地理与湖泊研究所内一个富营养池塘,面积为 300 m²,该池塘浮游植物丰富但没有微囊藻水华。此池塘水体在此实验之后的营养盐添加实验中成功模拟了蓝藻水华的形成^[14]。每个处理均没有设置重复,共有 14 个玻璃缸。玻璃缸的规格(长×宽×高)为 30 cm×25 cm×40 cm。实验初始水体积为 24 L。

营养盐添加采用 KNO₃ 和 KH₂PO₄ 配置的母液,针对处理+N、50:1、20:1、7:1 和 1:1 的母液系列中 NO₃-N 浓度为 2400 mg·L⁻¹,PO₄-P 的浓度依次为 0、48、120、342.9 mg·L⁻¹ 和 2400 mg·L⁻¹;针对处理 1:7 和 +P 的母液系列中 PO₄-P 的浓度 2400 mg·L⁻¹,NO₃-N 的浓度依次为 342.9 mg·L⁻¹ 和 0 mg·L⁻¹。2007 年 8 月 2 日至 8 月 7 日对 L 系列处理缸中每日上午 08:00 左右和下午 17:30 左右各进行 1 次营养盐添加,每次添加 2 mL,共添加了 11 次(其中 8 月 2 日下午没有进行添加),合计 22 mL。对 L 系列添加的 1:1 处理缸中每次添加 2 mL 营养盐可以使体积为 24 L 的水体 N、P 均净增加 0.2 mg·L⁻¹。2007 年 8 月 7 日上午对 S 系列的各缸一次性添加 20 mL,从而可以使 1:1 处理缸中 N、P 净增加均约为 2.4 mg·L⁻¹。实验期间没有补充蒸发用水。下雨时遮盖各缸防雨。

1.2 指标分析及方法

记录天气和水温,测定水体叶绿素 a(Chl-a)、总氮(TN)、总磷(TP)、活性磷(SRP)、氨氮(NH₄-N)、硝态氮与亚硝态氮之和(NO_x-N),以及浮游植物的种群组成和优势种类,计算溶解性无机氮(DIN=NH₄-N+NO_x-N),以及氮磷比(TN:TP)。

采样时轻缓搅动水体,尽量使水体混合均匀且少泛起沉淀物。TN、TP 的测定日期为 8 月 1 日、8 月 4 日、8 月 6 日、8 月 7 日和 8 月 9 日,水样为上午 09:00 左右采集,如果当日对应的处理在上午 08:00 左右有营养盐添加,那么对应的是营养盐添加之后的水样。SRP 的测定日期为 8 月 1 日、8 月 3 日—8 月 5 日、8 月 7 日—8 月 10 日;NH₄-N 和 NO_x-N 的测定日期为 8 月 1 日、8 月 5 日—8 月 10 日。在 8 月 7 日上午 09:00 左右对添加频度较小的 S 系列添加了营养盐,在 S 系列此次添加营养盐之前和刚添加营养盐之后均采集了水样。对添加频度较小的 S 系列在添加营

养盐后的8月7日—8月9日每日进行3次采样以测定SRP、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_x\text{-N}$,采样的时间依次为09:00左右、14:00左右和19:00左右;8月10日测定了09:00左右和14:00左右的SRP、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_x\text{-N}$ 。Chl-a的测定日期为8月1日、8月5日、8月7日、8月9日和8月12日。浮游植物样品的采集日期为8月1日、8月7日和8月13日。作图时把实验开始时的8月1日作为第1d。

水温采用普通水银温度计测定,每日08:00左右和14:00左右测定。TN、TP的测定采用过硫酸钾联合消解法^[15], $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_x\text{-N}$ 采用Skalar流动分析仪测定,SRP的测定使用磷钼蓝比色法^[16],测定SRP、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_x\text{-N}$ 的水样经过GF/C玻璃纤维滤膜(1.2 μm)过滤。Chl-a测定采用乙醇提取法^[17],浮游植物的鉴别见文献^[18]。因SRP和DIN有时低于检测限,DIN/SRP比值就会偏向极大或极小,故没有列出DIN/SRP的变化。

1.3 数据分析

实验过程中分别对L系列和S系列的TN、TP、TN:TP、DIN、SRP和Chl-a进行均值比较,采用针对无重复的双因素方差分析(two-way ANOVA)(处理和采样时间是对结果产生影响的2个因素),方差分析时不考虑时间和处理的交互效应。差异显著性水平选择 $\alpha=0.05$ 。浮游植物总数及相应浮游植物比例的数据因采样次数较少而没有进行方差分析。方差分析采用软件OriginPro 8.0进行。

2 结果与分析

2.1 天气与水温

实验期间天气基本为晴好天气,所有玻璃缸上午和下午均没有出现温度分层。实验期间08:00的平均水温为29.2℃,14:00的平均水温为36.1℃。

2.2 营养盐

实验过程中氮磷营养盐(DIN、SRP、TP、TN、TN:TP)的变化依次见图1~图5,可见测定的氮磷含量的高低与添加量的大小有关,添加量越多测定的含量往往也越高;同时,测定的氮磷含量的高低也与添加的氮磷比例有关,添加的比例适中时,测定的氮磷含量往往低些。

图1中,2007年8月7日之前,S系列各处理缸中DIN含量与实验初始时接近,均很低。至2007年8月7日对S系列添加营养盐后,S(+N)、S(50:1)、S(20:1)、S(7:1)和S(1:1)中DIN含量均出现了升高。ANOVA

结果表明,S系列中,S(+N)、S(50:1)和S(20:1)的DIN含量没有显著差异($P>0.05$),且以S(+N)的DIN含量最高,其明显高于S(7:1)、S(1:1)、S(1:7)和S(+P)($P<0.05$);处理S(1:7)和S(+P)的DIN含量是各处理中最低的,二者之间没有显著差异($P>0.05$),且二者的DIN含量是明显低于处理S(+N)($P<0.05$)。

S系列中,处理S(+N)、S(50:1)、S(20:1)和S(7:1)的SRP含量没有显著差异($P>0.05$),且这4个处理的SRP含量明显低于其他3个处理($P<0.05$),处理S(1:1)和S(1:7)之间SRP含量没有显著差异($P>0.05$),处理S(1:7)和S(+P)之间SRP含量没有显著差异($P>0.05$),且S(+P)的SRP含量明显高于处理S(1:1)($P<0.05$)。ANOVA分析表明,S系列各处理间TN、TP和TN:TP均没有显著差异($P>0.05$)。

ANOVA分析表明,L系列中,处理L(+N)、L(50:1)、L(20:1)、L(7:1)和L(1:1)之间的TN、SRP含量均没有显著差异($P>0.05$),且这5个处理的TN、SRP含量均明显高于处理L(1:7)和L(+P)($P<0.05$),而处理L(1:7)和L(+P)的TN、SRP含量没有显著差异($P>0.05$)。处理L(+N)、L(50:1)、L(20:1)和L(7:1)之间的TP含量没有显著差异($P>0.05$),且这4个处理的TP含量均明显高于其他3个处理L(1:1)、L(1:7)和L(+P)($P<0.05$),而这3个处理间TP含量没有显著差异($P>0.05$)。

L系列中,处理L(+N)、L(50:1)和L(20:1)间的TN:TP没有显著差异($P>0.05$),且这3个处理的TN:TP均明显高于处理L(1:1)、L(1:7)和L(+P)($P<0.05$),处理L(+N)的TN:TP均明显高于处理L(7:1)、L(1:1)、L(1:7)和L(+P)($P<0.05$),而处理L(7:1)、L(1:1)、L(1:7)和L(+P)间TN:TP没有显著差异($P>0.05$)。处理L(+N)的DIN含量最高,其明显高于其他6个处理($P<0.05$),处理L(50:1)、L(20:1)和L(7:1)之间的DIN含量没有显著差异($P>0.05$),且处理L(50:1)的DIN含量明显高于处理L(1:1)和L(1:7)($P<0.05$),其他处理间DIN含量均没有显著差异($P>0.05$)。

2.3 浮游植物和叶绿素a

实验初始浮游植物的组成及细胞密度见表1,主要优势种为蓝藻门的微小隐球藻(*Aphanocapsa delicatissima*)。实验过程中浮游植物种类变化不大,主要变化为实验过程中出现了微囊藻(*Microcystis* spp.),且微小隐球藻的数量发生较大变化。

实验期间各处理Chl-a随时间的变化见图6。S

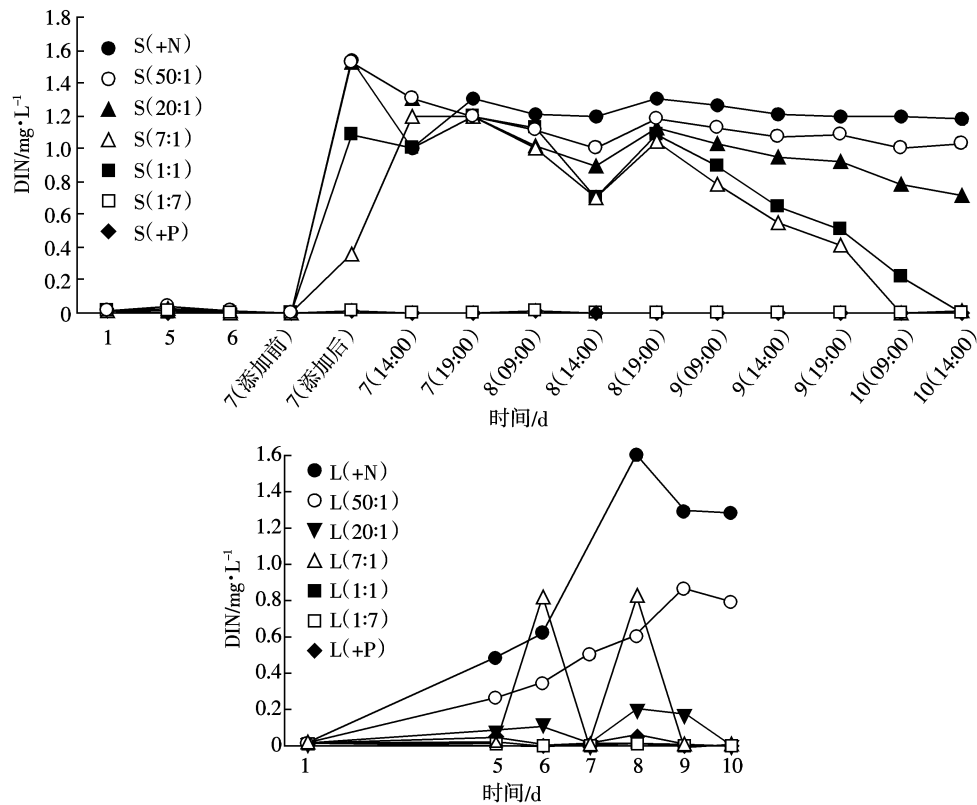


图1 实验期间 S 系列和 L 系列的 DIN 随时间的变化

Figure 1 Changes in DIN of series S and L during the experiment

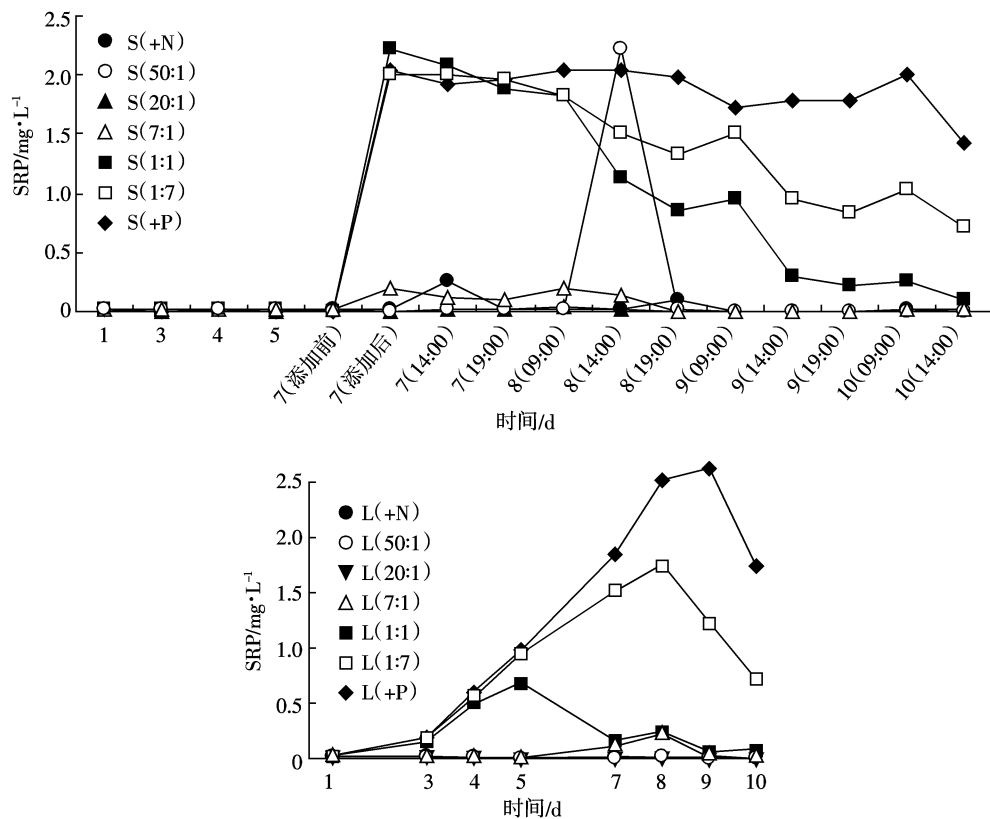


图2 实验期间 S 系列和 L 系列的 SRP 随时间的变化

Figure 2 Changes in SRP of series S and L during the experiment

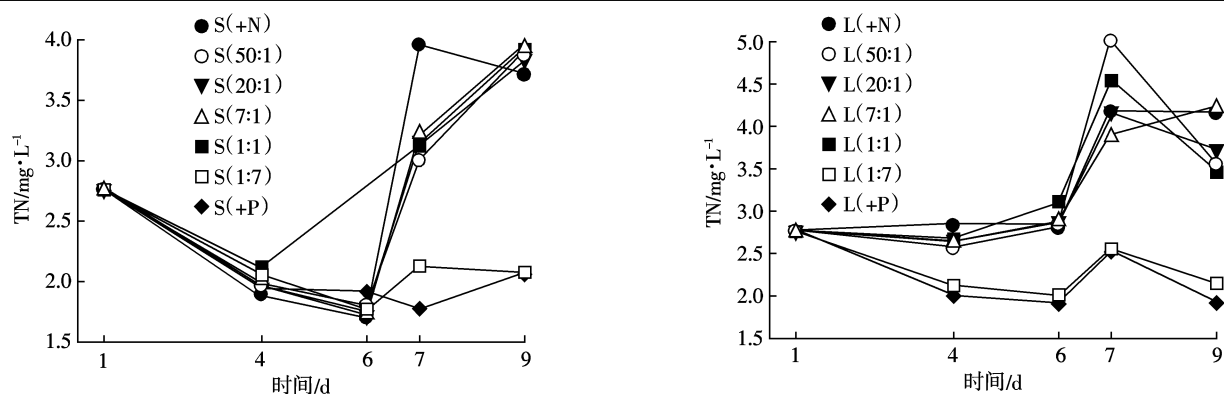


图3 实验期间 S 系列和 L 系列的 TN 随时间的变化

Figure 3 Changes in TN of series S and L during the experiment

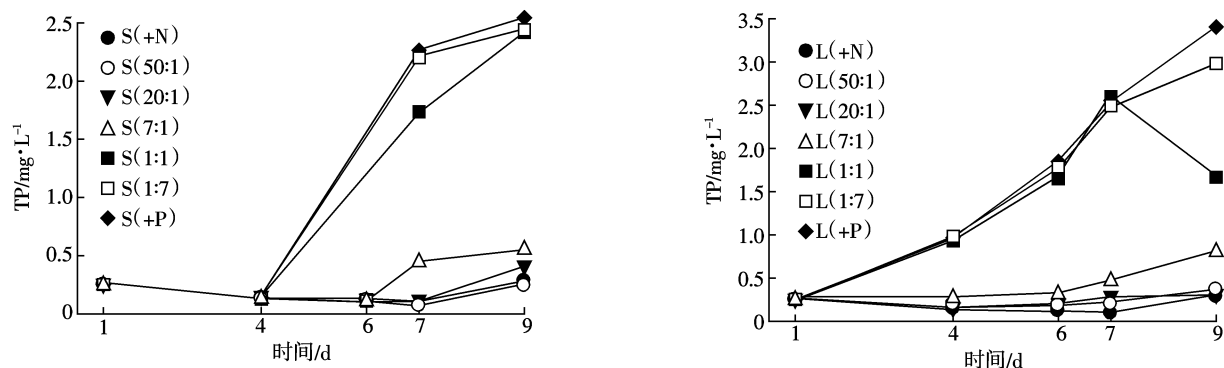


图4 实验期间 S 系列和 L 系列的 TP 随时间的变化

Figure 4 Changes in TP of series S and L during the experiment

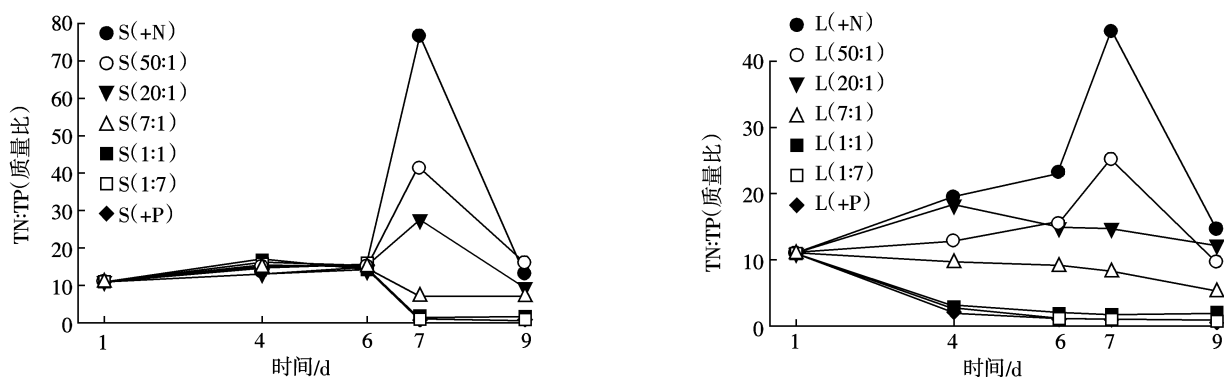


图5 实验期间 S 系列和 L 系列的 TN:TP 随时间的变化

Figure 5 Changes in TN:TP of series S and L during the experiment

系列中,各处理的 Chl-a 含量没有显著差异 ($P>0.05$)。L 系列中,处理 L(+N)、L(50:1)和 L(20:1)之间的 Chl-a 含量没有显著差异 ($P>0.05$),处理 L(7:1)和 L(1:1)的 Chl-a 含量均明显高于处理 L(+N)、L(1:7)和 L(+P) ($P<0.05$),其他处理间 Chl-a 含量没有显著差异 ($P>0.05$)。

实验期间各处理浮游植物总数量随时间的变化

见图 7。第 13 d 时各处理浮游植物总数量与第 12 d 时的 Chl-a 规律相近。

2.4 蓝藻门(*Cyanobacteria*)、微小隐球藻(*Aphanocapsa delicalissima*)和微囊藻(*Microcystis* spp.)数量占浮游植物总细胞数量的百分比

实验初始时,蓝藻门的微小隐球藻占绝对优势。实验过程中,蓝藻门占浮游植物总数的比例一直在

表 1 实验初始时浮游植物的组成及细胞密度
Table 1 The initial composition and density of the phytoplankton of the experiment

门类	种属	细胞密度/ cell·mL ⁻¹	门类	种属	细胞密度/ cell·mL ⁻¹
蓝藻门 <i>Cyanophyta</i>	微小隐球藻 <i>Aphanocapsa delicalissima</i> sp.	2 966 749	绿藻门 <i>Chlorophyta</i>	盘星藻属 <i>Pediastrum</i>	580
	平裂藻属 <i>Merismopedia</i>	35 005		纤维藻属 <i>Ankistrodesmus</i>	1 184
	鱼腥藻属 <i>Anabaena</i>	13 322		四角藻属 <i>Tetradron</i>	545
	浮游蓝丝藻属 <i>Planktothrix</i>	18 094		多芒藻属 <i>Golenkinia</i>	83
	色球藻属 <i>Chroococcus</i>	17 822		栅藻属 <i>Scenedesmus</i>	13 500
裸藻门 <i>Euglenophyta</i>	裸藻属 <i>Euglena</i>	308	黄藻门 <i>Xanthophyta</i>	弓形藻属 <i>Schroederia</i>	83
甲藻门 <i>Pyrrophyta</i>	裸甲藻属 <i>Gymnodinium</i>	367		卵囊藻属 <i>Oocystis</i>	71
硅藻门 <i>Bacillariophyta</i>	针杆藻属 <i>Synedra</i>	8 360		衣藻属 <i>Chlamydomonas</i>	71
	菱形藻属 <i>Nitzschia</i>	83		周泡藻属 <i>Vacuolaria</i>	71

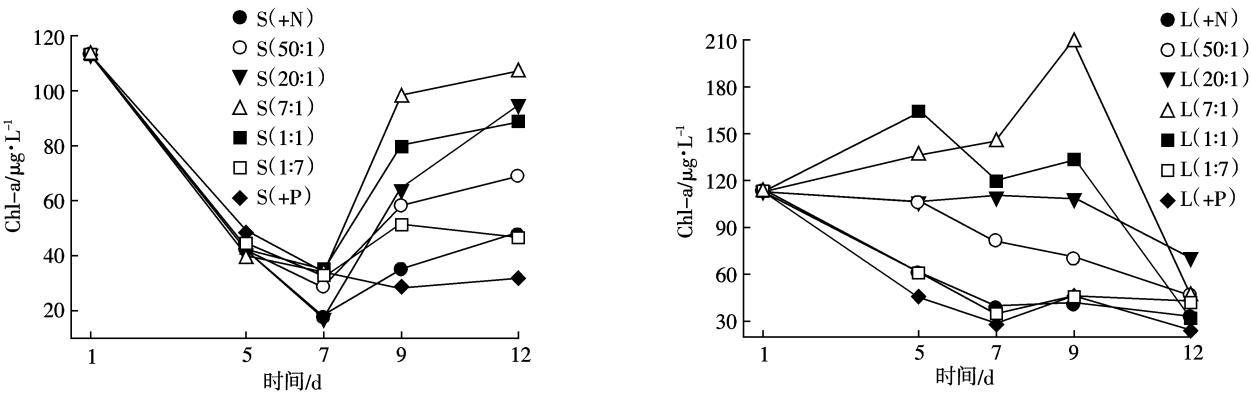
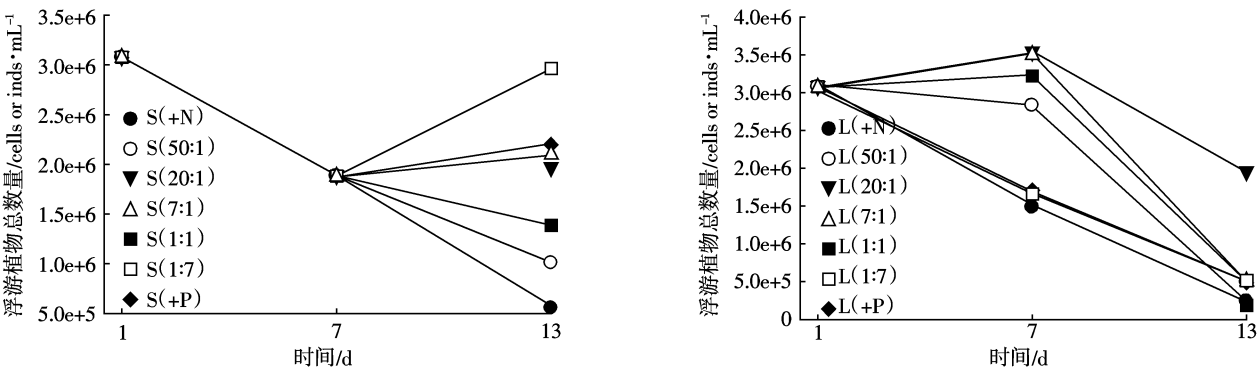


图 6 实验期间 S 系列和 L 系列的 Chl-a 随时间的变化
Figure 6 Changes in Chl-a of series S and L during the experiment



注:其中 2007 年 8 月 7 日 S 系列的浮游植物的数量为随机的 2 个缸计数的平均值
Notes:The algal amount in series S on 7 August 2007 was the mean of 2 random jars.

图 7 实验期间 S 系列和 L 系列的浮游植物总生物量随时间的变化
Figure 7 Changes in total algal amount of series S and L during the experiment

80%以上。在 S 系列中,8 月 7 日才添加营养盐,蓝藻门比例与初始时很接近。在第 13 d 时,不同处理中蓝藻门组成发生变化:S(20:1)和 S(7:1)的隐球藻比例下降最多,而 S(20:1)的微囊藻比例上升最大(图 8)。

在 L 系列中,8 月 7 日时各处理中蓝藻门比例,隐球藻比例和微囊藻的比例均比较接近,隐球藻比例均在 90%以上,微囊藻的比例均在 10%以下。在第 13 d 时,不同处理中蓝藻门组成发生变化:L(20:1)、L(7:1)和 L(1:1)的隐球藻比例均下降很快,而微囊藻比例在这 3 个处理中上升最快。

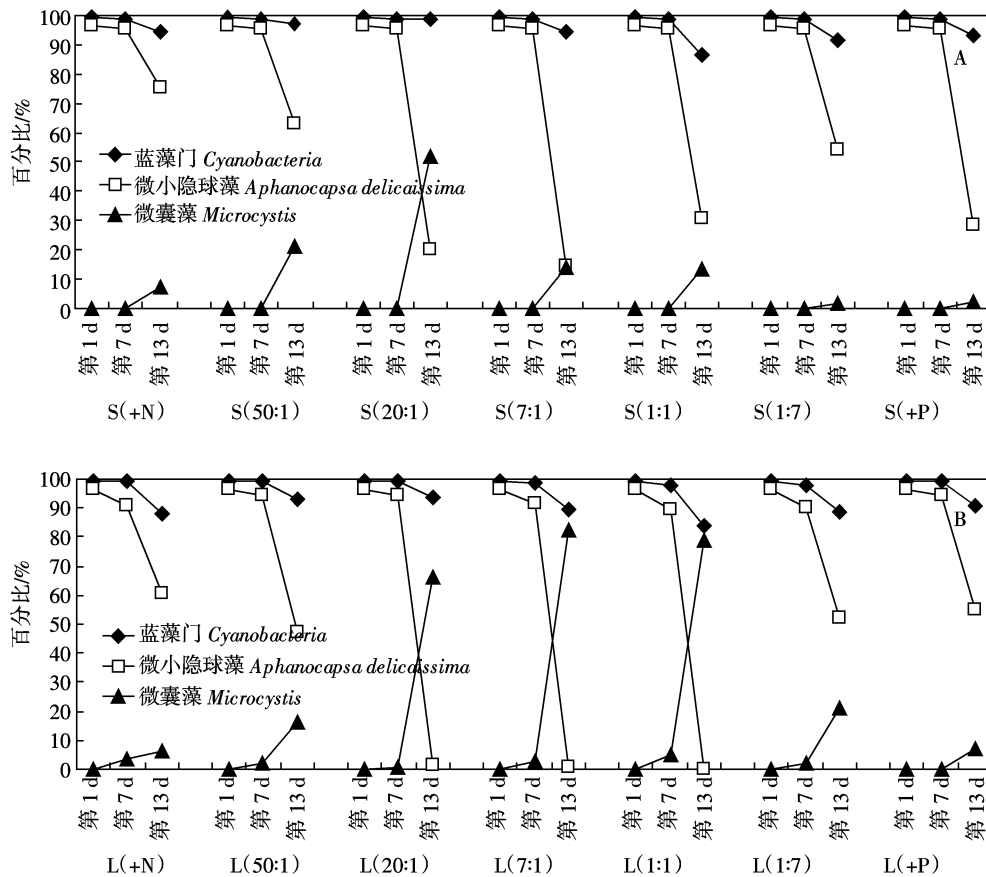


图 8 实验期间 S 系列(A)和 L 系列(B)的各处理中蓝藻(*Cyanobacteria*)、微小隐球藻(*Aphanocapsa delicatissima*)和微囊藻(*Microcystis* spp.)细胞数量占浮游植物总细胞数量的百分比的变化

Figure 8 Changes in percentage of *Cyanobacteria*, *Aphanocapsa delicatissima* and *Microcystis* spp. occupied in the total algal amount of each treatment of series S (A) and L (B) during the experiment

2.5 各玻璃缸水华出现的日期

各处理中出现明显微囊藻水华的日期见表 2。在 8 月 5 日上午的 L 系列中除了处理 L(+P)外均出现了明显的微囊藻水华,在 8 月 9 日上午的 S 系列中除处理 S(1:7)和 L(+P)外均出现了明显的微囊藻水华。

表 2 出现表现可见微囊藻水华的处理及其首次出现的日期

Table 2 The dates and treatments of first appearance with visible microcystis bloom			
处理	时间(年-月-日)	处理	时间(年-月-日)
L(+N)	2007-8-5	S(+N)	2007-8-9
L(50:1)	2007-8-5	S(50:1)	2007-8-9
L(20:1)	2007-8-5	S(20:1)	2007-8-9
L(7:1)	2007-8-5	S(7:1)	2007-8-9
L(1:1)	2007-8-5	S(1:1)	2007-8-9
L(1:7)	2007-8-9	S(1:7)	—
L(+P)	—	S(+P)	—

注:“—”表示微囊藻水华一直不明显。

实验期间,处理 L(+P),L(1:7) 和 S(+P)中均未出现明显的微囊藻水华。

3 讨论

Lagus et al^[19]报道浮游植物对营养盐添加和氮磷比的响应因种类而异。Liao^[20]的研究认为随着氮的添加,不具有固氮作用的种类会占优势,但是当没有外源氮(比如硝酸盐氮)输入时,具有固氮作用的种类会占优势。有文献^[21-22]表明,低的 N:P 比促使浮游植物优势种类朝固氮蓝藻方向转变,但是固氮藻类只在强光照条件下才出现优势,而非固氮蓝藻的密度与 N:P 比没有关系^[21]。本实验中无论氮、磷以哪种比例或者频度添加,实验水体均没有出现多种水华种类,出现的水华种类均为微囊藻水华(图 8 和表 2),没有固氮藻类水华的出现。类似地,Piehl et al^[23]的研究认为 DIN:DIP 比值降低不一定导致浮游植物群落结构和功能的变化。本实验中若只提供充足的氮或者磷,浮

游植物均不能很好生长繁殖(图 7,图 8),表明浮游植物的生长需要合适的氮磷比例,并且本实验中微囊藻水华的出现也需要添加比例适宜的氮磷营养盐。

许多研究已经探讨了氮磷比对浮游植物优势种类的影响。Nydic et al^[24]的研究认为浮游植物对 N 和 N+P 的添加有明显的响应,但是对 P 添加没有明显的响应,这些响应主要指藻类细胞密度、叶绿素 a 浓度、光合作用,以及由隐藻优势向蓝藻、绿藻和硅藻优势的转变。Kim et al^[25]报道蓝藻的生长是 P 添加的一个直接结果,这比 N 添加要明显,并且蓝藻水华在较低 N:P 的超富营养水库中容易出现。在新西兰 Okaro 湖进行的围隔实验(主要查看的是大量元素的供应比例对浮游植物种群组成的影响)发现:第 10 d 时,蓝藻生物量(主要是铜绿微囊藻)的比重在添加 N+P 的处理($59\%\pm 6\%$)中明显高些,只添加 N 的处理($23\%\pm 7\%$)与对照($33\%\pm 7\%$)很接近^[26]。Smith^[8]通过对分布于世界各地的 17 个湖泊中正值生长季节的藻类和营养盐的分析,认为水体中蓝藻的比例与水体中总氮总磷比例(TN:TP)有关,当 TN:TP(质量比)超过 29 时往往会出现蓝藻很少的情况。本实验中,联系氮磷的添加、微囊藻水华的出现和微囊藻在水体中的比例情况(图 8 和表 2)可知,水体明显出现微囊藻水华的氮磷添加比例在两种添加频度下的适宜范围大致在 20:1 至 1:1 之间,实验过程中明显出现微囊藻水华的水体 TN:TP 基本都维持在 29:1 以下。这表明本实验条件下微囊藻水华的出现与添加营养盐后水体 TN:TP 的关系不大。

2007 年 8 月 7 日在 S 系列中营养盐的添加量很大,8 月 9 日在氮磷比适宜的处理中出现了明显的水华现象,表明水华出现所需营养盐添加量应该有大致的阈值。在 L 系列中,水华在 8 月 5 日早晨能够明显观察到,至此各处理缸中添加的营养盐的总体积为 10 mL。那么在 S(1:1)中,若不考虑水体积的蒸发减少,添加的 N、P 浓度均为 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。这说明在本实验条件下,氮磷比适宜时, $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 氮的添加对水华形成已经比较充足。而形成水华的营养盐阈值应该还和其他环境条件有关,如水温 and 日光辐射。由两种系列中蓝藻比例变化可见,随着时间的延续,适宜氮磷比的添加有利于微囊藻在竞争中获得优势。

两种不同营养盐添加系列下蓝藻占总生物量的比例(图 8)的变化情况说明,具有合适的 N:P 比例的营养盐添加有利于微囊藻取得优势,合适的营养

盐添加是微囊藻水华形成的重要条件,并且本实验中形成水华的种类都是微囊藻。这就表明对于本实验的水体而言,不同的 N:P 添加比例以及添加频度都不是形成不同种类水华的关键因素,因而必然有其他因子在影响不同水华种类的出现,这需要进一步研究。

4 结论

利用天然富营养水体进行实验时,微囊藻水华的出现与氮磷营养盐的供应比例有关,与供应的频度关系不大,本实验中比较适宜的氮磷供应比例为+N、50:1、20:1、7:1 和 1:1。对本实验所选水体而言,实验过程中出现的蓝藻水华均为微囊藻水华,在不同供应比例和频度条件下均没有出现固氮类蓝藻水华。

参考文献:

- [1] 赵玉珩,杨红生,乔志刚,等. 鱼池中一种裸藻水华的研究[J]. 水生生物学报, 1994, 18: 186–188.
- [2] ZHAO Yu-hang, YANG Hong-sheng, QIAO Zhi-gang, et al. Studies on the “water bloom” of *Euglena* sp. in fish ponds[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1994, 18: 186–188.
- [3] Oliver R L, Ganf G G. Freshwater blooms[M]//The ecology of *Cyanobacteria* (Eds Whitton B A and Potts M), Dordrecht (The Netherlands): Kluwer Academic Publishers, 2000: 150–194.
- [4] 窦明,谢平,夏军,等. 汉江水华问题研究[J]. 水科学进展, 2002, 13(5): 557–561.
- [5] DOU Ming, XIE Ping, XIA Jun, et al. Study on algal bloom in Hanjiang river[J]. *Advances in Water Science*, 2002, 13(5): 557–561.
- [6] Paerl H W. Nutrient and other environmental controls of harmful cyanobacterial blooms along the freshwater marine continuum//Cyanobacterial harmful algal blooms: state of the science and research needs (Eds Hudnell H K)[M]. Springer, 2007: 217–238.
- [7] Fogg G E. The physiology of an algal nuisance [J]. *Proceedings of the Royal Society B*, 1969, 173: 175–189.
- [8] Reynolds C S, Walsby A E. Water blooms[J]. *Biological Reviews*, 1975, 50: 437–481.
- [9] Paerl H W. Physiological ecology and regulation of N_2 fixation in natural waters[J]. *Advances in Microbial Ecology*, 1990, 11: 305–344.
- [10] Smith V H. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton[J]. *Science*, 1983, 221: 669–671.
- [11] Smith V H. Nitrogen, phosphorus, and nitrogen fixation in lacustrine and estuarine ecosystems[J]. *Limnology and Oceanography*, 1990, 35: 1852–1859.
- [12] Likens G E. Nutrients and eutrophication [M]. American Society of Limnology and Oceanography (Special Symp 1), 1972.
- [13] Paerl H W. Nuisance phytoplankton blooms in coastal, estuarine, and inland waters[J]. *Limnology and Oceanography*, 1988, 33: 823–847.
- [14] Örnólfsson E B, Lumsden S E, Pinckney J L. Nutrient pulsing as a

- regulator of phytoplankton abundance and community composition in Galveston Bay, Texas[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2004, 303:197–220.
- [13] Jensen J P, Jeppesen E, Olrik K, et al. Impact of nutrients and physical factors on the shift from cyanobacterial to chlorophyte dominance in shallow Danish lakes[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1994, 51:1692–1699.
- [14] WANG Xiao-dong, QIN Bo-qiang, GAO Guang, et al. Nutrient enrichment and selective predation by zooplankton promote *Microcystis* (Cyanobacteria) bloom formation [J]. *Journal of Plankton Research*, 2010, 32(4):457–470.
- [15] Gross A, Boyd C E. A digestion procedure for the simultaneous determination of total nitrogen and total phosphorus in pond water[J]. *Journal of World Aquaculture Society*, 1998, 29:300–303.
- [16] Eaton A D, Clesceri L S, Greenburg A E. Standard methods for examination of water and wastewater, 19th edn [M]. American Public Health Association, Washington DC, USA, 1995.
- [17] 陈宇炜, 陈开宁, 胡耀辉. 浮游植物叶绿素 a 测定的“热乙醇法”及其测定误差的探讨[J]. 湖泊科学, 2006, 18(5):550–552.
CHEN Yu-wei, CHEN Kai-ning, HU Yao-hui. Discussion on possible error for phytoplankton chlorophyll -A concentration analysis using hot-ethanol extraction method[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2006, 18(5):550–552.
- [18] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类—系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
HU Hong-jun, WEI Yin-xin. The freshwater algae of China—systematics, taxonomy and ecology[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [19] Lagus A, Suomela J, Weithoff G, et al. Species-specific differences in phytoplankton responses to N and P enrichments and the N:P ratio in the Archipelago Sea, northern Baltic Sea[J]. *Journal of Plankton Research*, 2004, 26:779–798.
- [20] Liao A F H. The effect of nutrient enrichment on nitrogen fixation activity in the Bay of Quinte, Lake Ontario[J]. *Hydrobiologia*, 1977, 56:273–279.
- [21] De Tezanos Pinto P, Litchman E. Interactive effects of N:P ratios and light on nitrogen-fixer abundance[J]. *Oikos*, 2010, 119:567–575.
- [22] Vrede T, Ballantyne A, Mille-Lindblom C, et al. Effects of N:P loading ratios on phytoplankton community composition, primary production and N fixation in a eutrophic lake[J]. *Freshwater Biology*, 2009, 54:331–344.
- [23] Piehler M F, Dyble J, Moisander P H, et al. Effects of modified nutrient concentrations and ratios on the structure and function of the native phytoplankton community in the Neuse River Estuary, North Carolina, USA[J]. *Aquatic Ecology*, 2002, 36:371–385.
- [24] Nydick K R, Lafrancois B M, Baron J S, et al. Nitrogen regulation of algal biomass, productivity, and composition in shallow mountain lakes, Snowy Range, Wyoming, USA[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2004, 61:1256–1268.
- [25] Kim H S, Hwang S J, Shin J K, et al. Effects of limiting nutrients and N:P ratios on the phytoplankton growth in a shallow hypertrophic reservoir[J]. *Hydrobiologia*, 2007, 581:255–267.
- [26] Pick F R. Species-specific phytoplankton responses to nutrient enrichment in limnetic enclosures[J]. *Archiv Fuer Hydrobiologie Ergebnisse der Limnologie*, 1989, 32:177–187.