

巢湖水体藻类生长潜力研究

李坤阳^{1,2}, 储昭升², 金相灿², 唐欣昀¹, 郭伟峰², 陈磊²

(1.安徽农业大学生命科学学院, 安徽 合肥 230036; 2.中国环境科学研究院湖泊环境创新基地/国家环境保护湖泊污染控制重点实验室, 北京 100012)

摘要:通过采样分析方法,调查了巢湖秋季全湖营养特征,并采用藻类生长潜力实验(AGP实验),研究了秋季巢湖微囊藻的生长潜力。结果表明,巢湖西半湖的富营养化程度高于东半湖。分析并研究富营养化程度不同的西半湖和东半湖的微囊藻的生长潜力测定表明,利用西半湖湖水培养的微囊藻群体生长状态优于东半湖。AGP实验表明,巢湖湖水在添加充足磷的情况下,藻类的最大现存量 and 平均最大特定增长率为 $7.93 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 和 $0.25 \cdot \text{d}^{-1}$;而在添加充足氮的情况下,藻类的最大现存量 and 平均最大特定增长率为 $2.54 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 和 $0.38 \cdot \text{d}^{-1}$ 。微囊藻的最大现存量及最大特定增长率与氮的相关性明显高于磷,说明与磷相比,在秋季水体中氮的增加可能会显著提高秋季蓝藻水华的暴发程度。

关键词:巢湖; 藻类生长潜力; 微囊藻; 氮; 磷

中图分类号: X524 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2009)10-2124-08

The Algal Growth Potential of Research in Chaohu Lake Water

LI Kun-yang^{1,2}, CHU Zhao-sheng², JIN Xiang-can², TANG Xin-yun¹, GUO Wei-feng², CHEN Lei²

(1.College of Life Science, Anhui Agriculture University, Hefei 230036, China; 2.State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, Research Center of Lake Eco-environments, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: The nutritional characteristics of Lake Chaohu in the autumn was investigated, and the potential test of algal growth (AGP experimental) was used to study the growth potential of *Microcystis* in autumn in Chaohu. The results showed that the eutrophication in West half of Chaohu Lake was higher than that of the eastern half lake. The microcyst algae's growth potential in samples from west half lake and east half lake were analyzed, and the results indicated that, microcyst algae in the west half lake water samples grew faster than algae in the water samples from east half lake. The AGP experiment indicated that the algae's biggest stock and the maximum specific rate of *Microcyst* were $7.93 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ and $0.25 \cdot \text{d}^{-1}$ respectively when sufficient phosphorus was added into the water samples; but algae's biggest stock and the maximum specific rate were $2.54 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ and $0.38 \cdot \text{d}^{-1}$ respectively when sufficient nitrogen was added. The relativities between nitrogen and *Microcyst* algae's biggest stock and the maximum specific rate were obviously higher than those between phosphorus and *Microcyst* algae's biggest stock and the maximum specific rate. These data indicated that compared with the phosphorus, the increase of nitrogen level in water body of Chaohu in the autumn could obviously enhance blue-green algae concentration to form water bloom.

Keywords: Chaohu; the potential of algal growth; *Microcyst* algae; nitrogen; phosphorus

20 世纪 80 年代以来,我国湖泊入湖污染负荷不断增加,湖泊中氮、磷水平不断提高,富营养化日趋严重。氮、磷是形成水体富营养化的限制性元素,通过对部分湖泊、水库多年监测结果分析,形成富营养化

的主要污染源为氮源污染,有机物和磷污染次之。80%以上的湖泊中富营养化水体氮源污染大于磷源污染^[1]。中国大多数湖泊中,氮磷比都处于较高的比例,诸如太湖、巢湖、滇池等湖泊的氮磷比都相当高,氮磷比一般在 10~20 之间。而水仙湖水体在 2001—2005 年表层水体氮磷比平均值达到 33.06^[2]。

由于温带众多湖泊水体中氮磷比都处于较高水平,不少研究也表明湖泊中叶绿素与湖泊总磷也有较好的相关性。巢湖作为我国的五大淡水湖之一,是我

收稿日期:2009-03-24

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412301)

作者简介:李坤阳(1982—),男,硕士研究生,主要研究方向为微生物生态学。E-mail:lkysy2005@163.com

通讯联系人:储昭升 E-mail:chuza@craes.org.cn; tangxinyun@21cn.com

国水污染防治的重点流域,夏秋季节,巢湖、太湖等湖泊蓝藻呈绝对性优势,以微囊藻为主的蓝藻水华频繁暴发,近年来,水华往往持续到深秋甚至冬季。目前很多学者都把磷作为湖泊藻类生长的限制因子,然而从太湖、巢湖等水体氮磷发展趋势看,磷并未增加,甚至有下降的趋势,而氮呈持续增加的趋势,关于氮对蓝藻水华暴发的影响没有得到足够的重视。氮和磷对湖泊蓝藻水华暴发的相对贡献,仍不清楚。本文采用 AGP 实验,比较秋季氮和磷对巢湖藻类生长的影响,以期在水华的暴发机理提供理论依据。

1 材料方法

1.1 采样点设置

巢湖水样采集于 2008 年 9 月,共布点 13 个,AGP 实验共选取其中 10 个采样点,采样点主要分布于入湖河口区、湖心区、出湖口等(如图 1)。

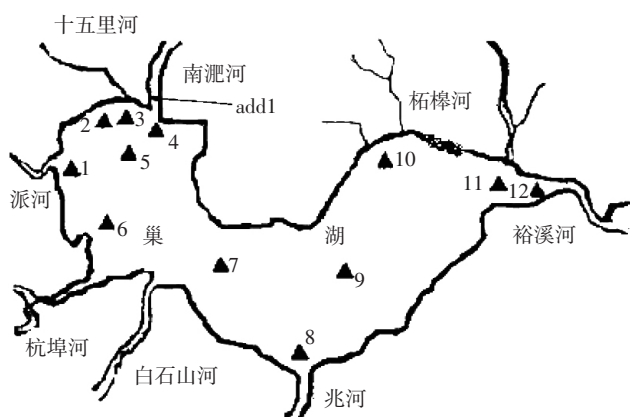


图 1 巢湖水样采样点位图

Figure 1 The map of sampling points in Chaohu

1.2 研究方法

水样采集后,冷冻保存,在测定藻类生长潜力前解冻。湖水不经过滤,直接进行 AGP 实验。以微囊藻进行 AGP 实验,藻种从巢湖分离,呈小群体状态。AGP 实验参照藻类生长潜力实验的标准方法^[6]进行。

1.3 分析测试方法

由于巢湖氮、磷浓度相对较高,故稍改变氮、磷营养盐添加浓度,其添加浓度如表 1 所示。

藻种接种浓度为 5.0×10^4 个 $\cdot \text{mL}^{-1}$ 。实验温度 28 $^{\circ}\text{C}$,光照强度为 2 000 lx,光暗比为 12 h:12 h。从第 2 d 开始每隔 1 d 测定光密度(650 nm),并且在第 2、6 d 和最大光密度时测定藻类细胞数。实验组 M11 为完全培养基组,藻密度用光密度仪测定,本文采用 Excel

表 1 AGP 测试液中 N、P 添加浓度

Table 1 The adding of N, P concentrations into the AGP testing solution

指标	低 N/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	高 N/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	低 P/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	高 P/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	低 NP/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	高 NP/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	湖水
浓度	0.6	1.5	0.04	0.1	0.6+0.04	1.5+0.1	—

注:—表示湖水中未添加 N、P 营养盐组。

软件进行相关分析数据整理。

2 结果和分析

2.1 巢湖不同区域水体营养特征

对巢湖的 10 个采样点的水中氮、磷含量进行测定发现,西半湖的位点的氮磷浓度都高于东半湖的位点。已知Ⅲ类水质标准值:总氮 $\geq 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \leq$ 总磷 $\leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。可知所选取的位点的氮、磷浓度(如表 2)均超过Ⅲ类水质标准值。

表 2 巢湖 10 个采样点氮、磷浓度

Table 2 The nitrogen and phosphorus concentrations of the ten sampling points in Chaohu

位点	TN/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	TP/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	TN/TP
1	1.99	0.27	7
2	1.28	0.20	6
3	1.61	0.15	11
4	3.10	0.17	19
5	1.63	0.15	11
add1	7.79	0.56	14
7	1.28	0.14	9
8	0.73	0.11	7
9	1.25	0.11	11
11	0.58	0.08	7

南淝河口的 add1 号样点的氮、磷浓度最高,10 个位点都有各自的相应特征。10 个位点中:add1 号位点的氮、磷浓度最高,属于劣 V 类水质,其总氮、总磷浓度分别为 V 类水质标准值的 3.9 和 2.8 倍;4 号位点氮严重污染,仅次于 add1 号位点,总氮浓度为 V 类水质标准值的 1.5 倍。add1 号位点在南淝河口区,污染来源于合肥市生活用水,因此水质污染较为严重,4 号位点在南淝河口区附近,水质污染仍较为严重。1、3 和 5 号位点的总氮浓度都超过Ⅳ类水质标准值,属于劣Ⅳ类水质,这 3 个位点相对远离南淝河口区,污染程度低于 4 号位点。3、4、5、7、8 和 9 号位点,总磷超过Ⅳ类水质标准值,属于劣Ⅳ类水质;2、7 和 9 号位点总氮浓度超过Ⅲ类水质标准值,属

于劣Ⅲ类水质;11号位点属于劣Ⅲ类水质,总磷为Ⅲ类水质标准值的1.6倍。巢湖水体总体污染程度,自西半湖南淝河口区向外延伸到湖心区,最终到东半湖的11号位点,氮、磷浓度是依次递减的,这是因为远离污染源的位点,湖水的污染逐渐被稀释,因此,巢湖湖水的污染程度自西半湖向东半湖之间逐渐减小。

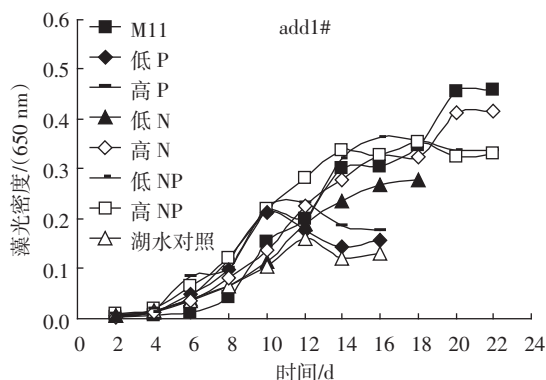
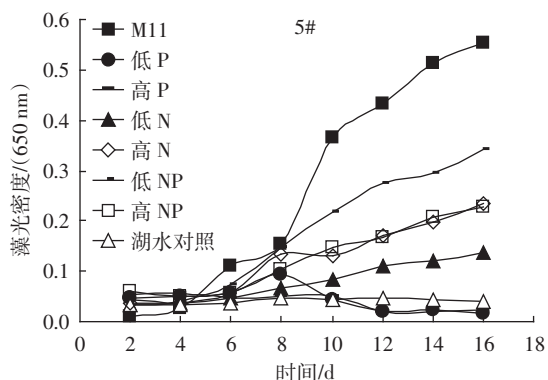
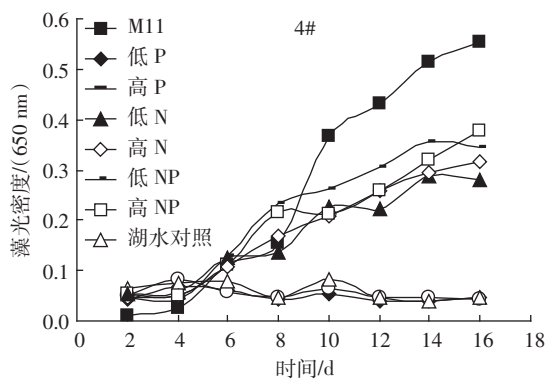
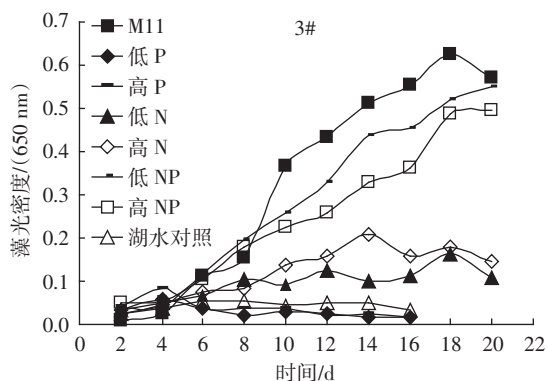
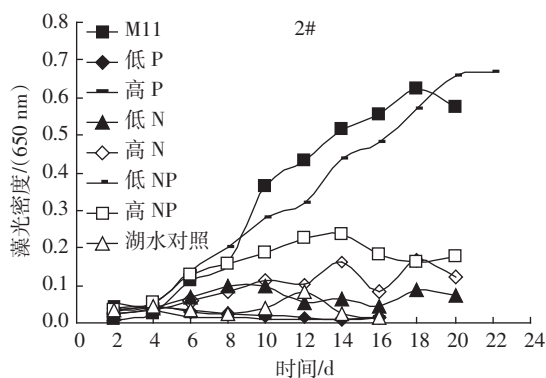
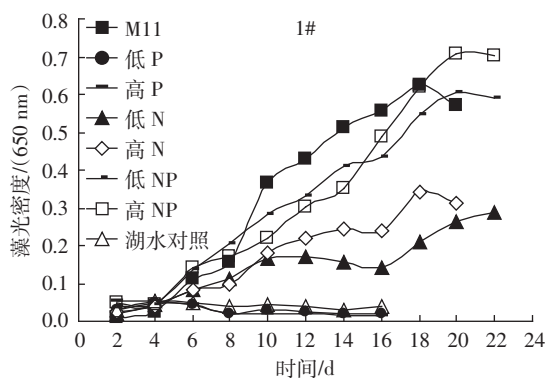
2.2 在光密度仪测定下的微囊藻藻密度曲线

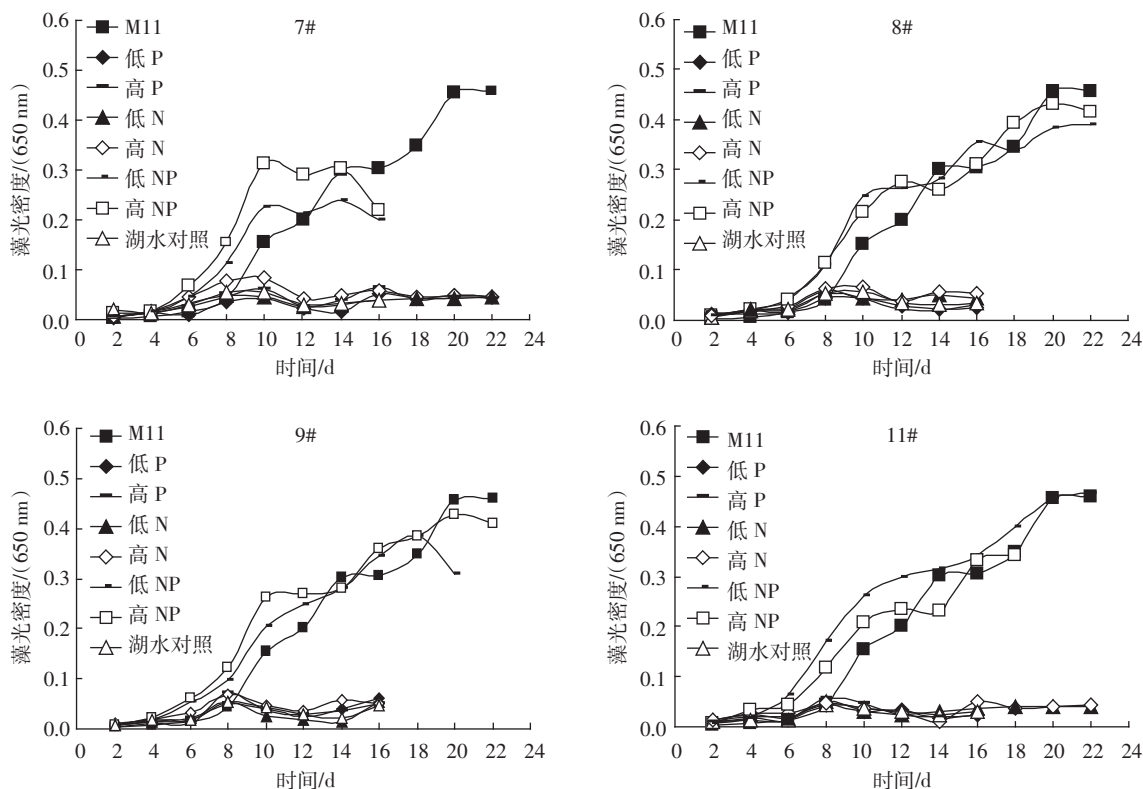
对10个位点的水样进行AGP测试,利用三角瓶培养的微囊藻群体,均在同一个人工控制培养室里进行培养。培养至第2d时,开始测定藻光密度,早上取样测定时把三角瓶轻轻摇动,稍微静置即进行测定。晚上对每组三角瓶分别进行轻轻摇动,使微囊藻群体相对分散均匀,以便微囊藻群体进行较好的生长

繁殖。微囊藻在光密度仪测定下的藻密度曲线如图2所示。

不同点位水体AGP实验藻类藻密度生长曲线如图2所示。10个位点中添加氮磷混合营养组的微囊藻生长较好,最大光密度值一般都超过0.3。add1位点添加氮营养组和磷营养组生长曲线均包括明显的对数期,因为add1号位点的氮、磷浓度最高,能满足微囊藻的生长所需的营养。其余湖水对照组(湖水),单独添加磷营养组的生长曲线均未出现明显的对数生长期。

培养至第6d时,10个位点的光密度值均较大;至第10d时,氮磷混合营养组的培养液呈现绿色,微囊藻生长状态最好;氮营养组的培养液呈现浅绿色,微囊藻生长状态低于氮磷营养组,三角瓶内微囊藻聚





1# 巢湖上派河附近, 2# 巢湖义城附近, 3# 十五里河附近, 4# 南淝河河口外围, 5# 巢湖西半湖核心区, add1# 巢湖南淝河口, 7# 白石山河附近, 8# 兆河附近, 9# 巢湖东半湖核心区, 11# 柘皋河附近

图2 AGP实验微囊藻生长曲线

Figure 2 The growth curve of AGP algae experiment

集成群且多漂浮在培养液表面;而磷营养组的培养液呈现浅黄色,微囊藻生长状态低于氮营养组,三角瓶内微囊藻聚集成群且多沉淀在瓶底。而且,添加氮的营养组比添加磷的营养组及湖水对照组(湖水)的生长周期持续时间长,说明巢湖秋季水体氮的增加比磷对微囊藻的生长有更大的促进作用。

2.3 特定生长率和最大现存量

2.3.1 微囊藻群体的特定生长率

培养至第2 d,采样测定藻光密度时,同时进行微囊藻藻细胞计数,作为藻细胞浓度的基数,培养至第6 d,即在对数增殖期时,再次对微囊藻藻细胞进行计数。由此,计算得到10个位点的特定增长率如图3所示。

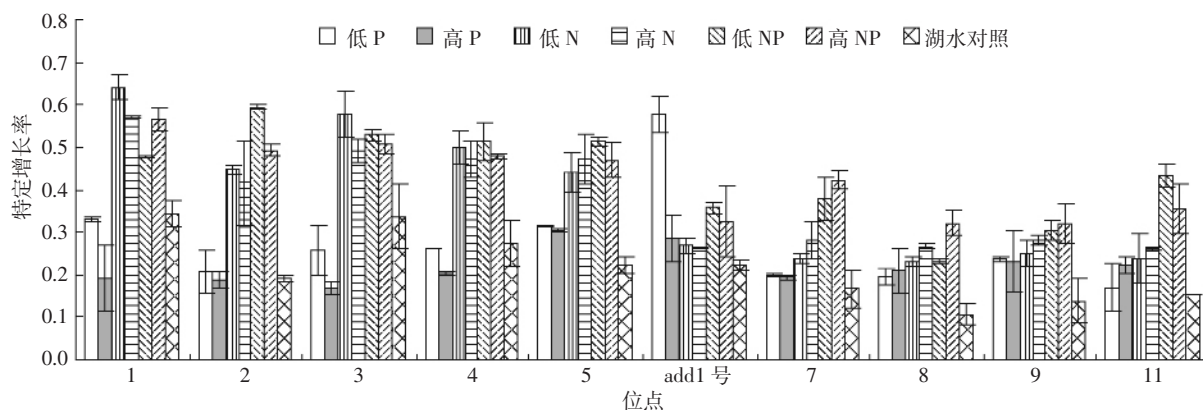


图3 巢湖10个不同区域的藻的特定增长率

Figure 3 The specific growth rate of algae in ten regions in Chaohu

图 3 为微囊藻在对数生长期的特定生长速率,氮营养组平均最大增长率为 $0.38 \cdot d^{-1}$, 磷营养组平均最大增长率为 $0.25 \cdot d^{-1}$, 氮磷混合营养组为 $0.43 \cdot d^{-1}$, 湖水对照组为 $0.22 \cdot d^{-1}$ 。添加氮营养组及氮磷混合组都有较大的特定增长率,湖水对照组和单独添加磷营养组(add1 位点除外)的特定增长率较小。由此可见,在 10 个位点中单独添加磷营养组,各自的特定增长率相对较低,磷的加入没有带来明显的生物量的增加,说明秋季巢湖对藻类生长起着限制作用的因子可能是氮。

由以上数据分析可知,在秋季巢湖对藻类生长起着限制作用的因子可能是氮。进一步对 10 个位点的最大增长率进行相关分析如表 3 所示。

查表知: $n=5$ 时, $R_1=0.875$; $R_2=0.754$ 。

表 3 巢湖 10 个位点最大增长率的相关分析

Table 3 The largest growth rate of ten points of correlation analysis in Chaohu

序号	相关性	
	N	P
add1#	$R=-0.163\sim$	$R=0.202\sim$
1#	$R=0.741\sim$	$R=-0.384\sim$
2#	$R=0.772^*$	$R=-0.033\sim$
3#	$R=0.724\sim$	$R=-0.376\sim$
4#	$R=0.772^*$	$R=-0.247\sim$
5#	$R=0.756^*$	$R=0.032\sim$
7#	$R=0.895^{**}$	$R=0.362\sim$
8#	$R=0.845^*$	$R=0.437\sim$
9#	$R=0.765^*$	$R=0.393\sim$
11#	$R=0.696\sim$	$R=0.313\sim$

注:** 显著性水平 $\alpha=0.01$, * 显著性水平 $\alpha=0.05$; ~表示不显著。

当 $R>R_1=0.875$ 时, 极显著; 当 $0.875>R>0.754$ 时, 显著; 当 $R<0.754$ 时, 不显著。

由表 3 知, 添加的氮对 7 号位点水样中藻的最大增长率的影响极显著; 氮对于 2、4、5、8 和 9 号位点水样的藻最大增长率的影响水平显著; 氮对于 add1、1、3 和 11 号位点水样中藻的最大增长率的影响不显著; 而磷对最大增长率的影响不显著。

add1 号位点位于南淝河河口, 氮、磷浓度最高, 加入的氮、磷营养盐对藻最大增长率的影响不明显; 3 号位点位于十五里河入口处, 且离 add1 号位点比较近, 3 号位点与 1 号位点的氮、磷浓度均较高, 但这两个位点靠近湖边, 采样时两位点湖水湖面上悬浮物较多, 湖水的流动性小, 相关分析得到氮对微囊藻生长最大增长率的影响水平不明显; 11 号位点是一个出湖口区, 湖水的流动性稀释了该位点的氮、磷浓度, 该位点氮、磷对最大增长率的影响不明显; 位于西半湖的 2、4 和 5 号位点和位于东半湖的 7、8 和 9 号位点, 氮对最大增长率的影响明显。因此, 氮对巢湖湖区藻类最大增长率的影响显著, 氮可能是秋季巢湖藻类生长繁殖的限制因子。

2.3.2 微囊藻群体的最大现存量

对 10 个位点微囊藻群体进行三角瓶培养, 在微囊藻到达对数增殖期以后, 每隔 1 d, 对每组的光密度进行测定, 测定发现光密度不再继续增大时, 此时的微囊藻藻细胞浓度一般为该组的微囊藻群体的最大现存量, 但最大现存量以连续记录两个连续时段, 藻细胞浓度没有显著增加时的藻细胞浓度为准。10 个位点的最大现存量如图 4 所示。

图 4 为 10 个位点微囊藻生长的最大现存量, 氮

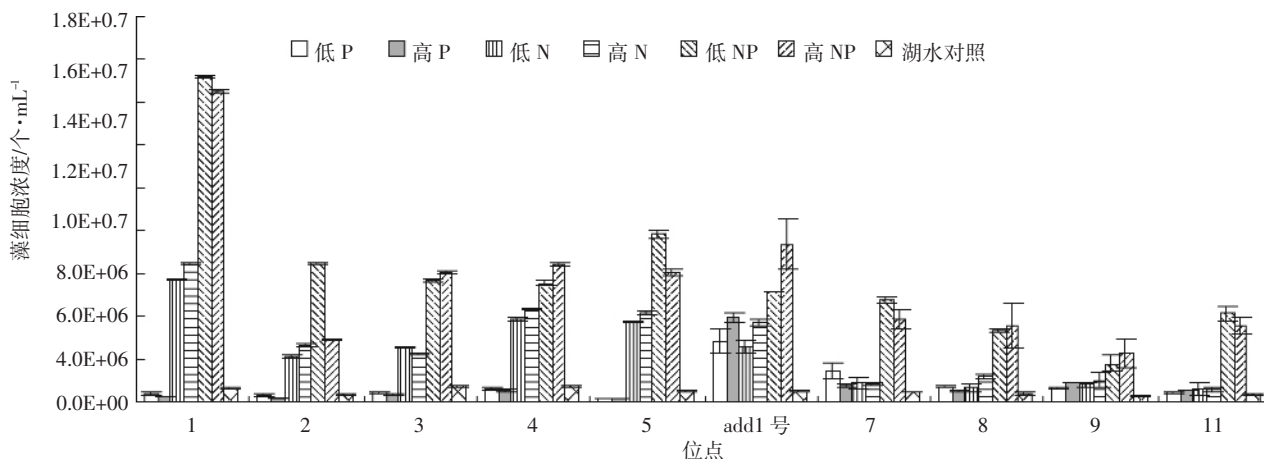


图 4 巢湖 10 个不同区域微囊藻群体的最大现存量

Figure 4 Ten different regions of the largest existing volume in Chaohu

营养组平均最大现存量为 2.54×10^6 cells·mL⁻¹, 磷营养组平均最大现存量为 7.93×10^5 cells·mL⁻¹, 氮磷营养组平均最大现存量为 5.82×10^6 cells·mL⁻¹, 湖水对照组平均最大现存量为 4.90×10^5 cells·mL⁻¹。最大添加氮营养组和氮磷混合营养组都有较大的现存量, 而湖水对照组和单独添加磷营养组的现存量不高。原水样 add1 号位点和 4 号位点的总氮含量最高, 1 号位点的总磷含量较高仅次于 add1 号位点, 但单独添加的磷营养组最终没有较高的现存量, 添加氮、磷营养组都有较大的现存量。add1 号位点的总磷含量最高, 但单独添加的磷营养组除 add1 号位点, 其余 9 个位点单独添加磷营养组的最大现存量都低于单独添加氮的营养组, 并且最终没有较高的现存量。说明磷的加入没有明显促进微囊藻的繁殖增长, 而在原湖水中所添加的氮营养组, 最终都有较大的现存量。因此, 与磷相比, 氮的加入明显促进了微囊藻繁殖增长。

由以上数据分析可知, 在秋季, 与磷相比, 氮的加入明显促进了微囊藻繁殖增长。进一步对 10 个位点的最大现存量进行相关分析如表 4 所示。

表 4 巢湖 10 个位点最大现存量的相关分析

Table 4 The largest existing volume of ten points of correlation analysis in Chaohu

序号	相关性	
	N	P
add1#	$R=0.799^*$	$R=0.703\sim$
1#	$R=0.839^*$	$R=0.206\sim$
2#	$R=0.554$	$R=-0.032\sim$
3#	$R=0.876^{**}$	$R=0.248\sim$
4#	$R=0.919^{**}$	$R=0.090\sim$
5#	$R=0.785^*$	$R=0.043\sim$
7#	$R=0.635$	$R=0.411\sim$
8#	$R=0.798^*$	$R=0.417\sim$
9#	$R=0.871^*$	$R=0.585\sim$
11#	$R=0.689$	$R=0.406\sim$

注:** 显著性水平 $\alpha=0.01$, * 显著性水平 $\alpha=0.05$; ~表示不显著。

查表知: $n=5$ 时, $R_1=0.875$; $R_2=0.754$ 。

当 $R>R_1=0.875$ 时, 极显著; 当 $0.875>R>0.754$ 时, 显著; 当 $R<0.754$ 时, 不显著。

从表 4 知, 添加的氮对 3 和 4 号位点藻最大现存量的影响极显著, 说明氮对西半湖藻类生长的影响水平显著, 氮对于 add1、1、5、8 和 9 号位点藻最大现存量的影响显著, 氮对于 2、7 和 11 号位点氮对最大现存量的影响不显著。而磷对最大现存量的影响

均不显著。

2 号位点位于义城附近, 远离南淝河河口区, 冲淡了该点的污染源, 所以, 氮对最大现存量的影响不明显; 7 号位点位于白石山河, 靠近湖心区, 湖水较深, 湖水处于相对流动的状态, 氮、磷浓度不高, 氮对最大现存量的影响也不明显; 11 号位点位于柘皋河出湖口区, 湖水处于流动的一种交换状态, 该位点的氮、磷浓度较低, 是 10 个位点之中最小的一个, 氮对该位点的最大现存量的影响不明显; add1、1、3、4 和 5 号位点在重污染的西半湖以及在东半湖的 8 和 9 号位点的氮、磷浓度较高, 氮对最大现存量的影响明显。因此, 氮对巢湖湖区藻类最大现存量的影响显著, 氮可能是秋季巢湖藻类生长繁殖的限制因子。

3 讨论

氮的加入比磷的加入更显著促进了微囊藻群体的生长, 采用西半湖的湖水与东半湖的湖水进行 AGP 测定相比表明, 西半湖的湖水培养微囊藻的生长状态较好些。1、2、7、8 和 11 号位点的氮磷比在 7:1 左右, 而 3、4、5、9 和 add1 号位点的氮磷比在 15:1 左右。通过相关分析得知, 加入氮的营养组与磷相比大都具有着较高的最大现存量和最大增长率, 氮磷比一般在低于 7:1 时, 氮的加入对最大现存量和最大增长率的影响比较显著。

所选取位点中, 氮与磷相比氮含量较高的位点对最大现存量的影响较大。水体中氮主要以硝酸盐氮和氨氮形态存在, 两者均为溶解态, 而磷主要以颗粒态存在, 溶解态的总磷含量较低, 天然湖水中溶解态总磷一般低于 $5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ [11-12]。而在 AGP 测试实验中, 天然湖水中磷对藻类生长起到重要作用, 说明秋季巢湖水体中颗粒态磷是藻类生长的最为重要的利用形态。水体中氮磷比较高, 但沉积物磷的含量较高, 氮磷比较低, 风浪作用可以使沉积物中氮磷悬浮, 藻类可以加以利用。众多研究表明, 在外源逐步得到控制的情况下, 沉积物作为内源对上覆水体释放氮和磷的作用会渐显重要。成为维持上覆水营养状态的重要来源。而水体中可利用的磷形态主要以颗粒态存在。在自然水体中溶解状态的正磷酸盐是藻类直接吸收的主要形式 [15-16]。因此, 微囊藻的繁殖生长在外源得到控制的情况下, 依靠沉积物释放的氮磷来维持生长, 而且优先利用释放出来的氨氮、硝氮, 而作为微囊藻直接吸收利用的正磷酸盐常常是其他的磷形态经过进一步转化才被利用, 外源性氮和内源性氮的输入更大地促

进了湖泊水华发生的程度。因此,氮和磷对藻类生长的贡献,不但与水体中氮和磷的比例关系相关,而且沉积物中氮和磷的比例关系对藻类的繁殖生长也起了很大作用。

氮和磷对微囊藻浮力的影响显著不同^[7,13],但是氮对微囊藻浮力的影响大于磷,氮的限制容易导致浮力的下降,因此氮比磷可能对秋季微囊藻水华有更大的影响。已有研究客观评价巢湖的氮、磷污染水平,正确反映该湖的富营养化程度,结论是巢湖的氮、磷污染均已经达到较高程度,氮污染问题尤其突出^[16]。实验表明,湖水中过量的氮、磷是巢湖富营养化的重要标志,AGP实验说明藻类的生长与湖水中氮源的进一步输入有关,氮营养盐的输入,使微囊藻群体快速生长繁殖并漂浮在培养液的表面,因此,湖水中如果一旦出现大量氮营养源的输入,就会导致微囊藻的大量繁殖,而且微囊藻群体漂浮在湖水的表面,更容易形成水华。在秋季,巢湖氮是影响藻类生长繁殖的重要因子,但水华的发生是一个相当复杂的过程,涉及的因子很多,各个因子之间又相互影响和制约,不同水体的具体情况也各不相同,需要多学科间进行综合研究与探讨,不仅要研究单个因子的作用,更要研究包括氮、磷在内的化学、生物、物理、水文和气象等多个因子及其相互间的影响,以便进一步揭示水华的暴发机理。

4 结论

在秋季巢湖不同点位的湖水氮磷含量有显著差别,巢湖西半湖湖水中的氮、磷含量高于东半湖湖水,AGP实验表明巢湖西半湖湖水培养的微囊藻的生长状态要好于东半湖湖水。磷营养组的最大现存量在 $(7.88\sim 7.97)\times 10^5$ cells·mL⁻¹之间,氮营养组的最大现存量在 $(2.35\sim 2.72)\times 10^6$ cells·mL⁻¹之间,氮磷混合营养组的最大现存量在 $(5.66\sim 5.99)\times 10^6$ cells·mL⁻¹之间;氮营养组平均最大增长率为 $0.38\cdot d^{-1}$,磷营养组平均最大增长率为 $0.25\cdot d^{-1}$,氮磷混合营养组为 $0.43\cdot d^{-1}$ 。因此,湖水添加氮的营养组与添加磷的营养组相比有着较高的最大现存量,且通过相关分析可知,最大现存量和最大特定生长速率与添加氮浓度有较高的相关性,说明在秋季氮比磷对微囊藻水华发生和持续有更大的影响。

参考文献:

[1] 金相灿, 庞 燕, 王圣瑞, 等. 长江中下游浅水湖沉积物磷形态及其

分布特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(1): 279-285.

JIN Xiang-can, PANG Yan, WANG Sheng-rui, et al. Phosphorus forms and its distribution character in sediment of shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(1): 279-285.

[2] 夏天翔, 潘继征, 刘雪华, 等. 抚仙湖水体 N P 变化及其非点源污染特征[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1340-1345.

XIA Tian-xiang, PAN Ji-zheng, LIU Xue-hua, et al. Non-point source pollution characteristics in Fuxianhu Lake watershed and variation law of N and P in lake water[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4): 1340-1345.

[3] 袁旭音, 许乃政, 陶于祥, 等. 太湖底泥的空间分布和富营养化特征[J]. 资源调查与环境, 2003, 24(1): 20-28.

YUAN Xu-yin, XU Nai-zheng, TAO Yu-xiang, et al. Taihu Lake sediments and the spatial distribution of eutrophication[J]. *Resources Survey and Environment*, 2003, 24(1): 20-28.

[4] 陈永川, 汤 利, 张德刚, 等. 滇池叶绿素 a 的时空变化及水体磷对藻类生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1555-1560.

CHEN Yong-chuan, TANG Li, ZHANG De-gang, et al. The spatial and temporal dynamics of chlorophyll a concentrations and its relationship with phosphorus in Lake Dianchi [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4): 1555-1560.

[5] 吴晓东, 孔繁翔. 水华期间太湖梅梁湾微囊藻原位生长速率的测定[J]. 中国环境科学, 2008, 24(6): 552-555.

WU Xiao-dong, KONG Fan-xiang. The determination of in situ growth rates of the bloomed Microcystis in Meiliang bay of Lake Taihu[J]. *China Environmental Science*, 2008, 27(4): 1555-1560.

[6] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 275-283.

JIN Xiang-can, TU Qing-ying. Regulate the investigation of lake eutrophication[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990: 275-283.

[7] 储昭升, 金相灿, 庞 燕. 铜绿微囊藻和孟氏颤藻在富营养化湖泊中生长特征的模拟研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(11): 1815-1820.

CHU Zhao-sheng, JIN Xiang-can, PANG Yan. Growth characteristics of *Microcystis aeruginosa* and *Oscillatoria mougeotii* in eutrophic lakes simulation experiments[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(11): 1815-1820.

[8] Dokulil M T and Teubner K. Cyanobacterial dominance in lakes[J]. *Hydrobiologia*, 2000, 438: 1-12.

[9] 胡章喜, 徐 宁, 李爱芬, 等. 氮磷比率对 3 种典型赤潮藻的影响[J]. 水生生物学报, 2008, 32(4): 482-487.

HU Zhang-xi, XU Ning, LI Ai-fen, et al. Effects of different N:P ratios on the growth of pseudo-nitzschia pungens[J]. *Aquatic Biology*, 2008, 32(4): 482-487.

[10] 吴晓东, 孔繁翔, 张晓峰, 等. 太湖和巢湖水华蓝藻越冬和春季复苏的比较研究[J]. 环境科学, 2008, 29(5): 1313-1318.

WU Xiao-dong, KONG Fan-xiang, ZHANG Xiao-feng, et al. Comparison of overwintering and recruitment of cyanobacteria in Taihu Lake and Chaohu Lake[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(5): 1313-1318.

[11] XIE Li-qiang, XIE Ping, LI Si-xin, et al. The low TN:TP ratio, a cause

- or a result of *Microcystis* blooms[J]. *Water Research*, 2003, 37: 2073–2080.
- [12] Xie L Q, Xie P, Tang H J. Enhancement of dissolved phosphorus release from sediment to lake water by *Microcystis* blooms—an enclosure experiment in a hyper-eutrophic, subtropical Chinese lake[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 122: 391–399.
- [13] Chu Z S, Jin X C, Yang B, et al. Buoyancy regulation of *Microcystis flos-aquae* during phosphorus-limited and nitrogen-limited growth[J]. *Journal of Plankton Research*, 2007, (11): 1–7.
- [14] 黄清辉, 王子健, 王东红, 等. 太湖表层沉积物磷的吸附容量及其释放风险评估[J]. 湖泊科学, 2004, 16(2): 97–104.
HUANG Qing-hui, WANG Zi-jian, WANG Dong-hong, et al. Taihu Lake phosphorus in surface sediments of the adsorption capacity and the release of risk assessment[J]. *Lakes Science*, 2004, 16(2): 97–104.
- [15] 陈 琼. 氮、磷对水华发生的影响[J]. 生物学通报, 2006, 41(5): 12–14.
CHEN Qiong. Nitrogen and phosphorus on the impact of algal bloom occurred[J]. *Biological Bulletin*, 2006, 41(5): 12–14.
- [16] 徐 微, 吕锡武, 余亚琴. 巢湖水体富营养化主要驱动因子的模糊数学评价[J]. 自然科学报, 2007, 23(4): 651–654.
XU Wei, LV Xi-wu, YU Ya-qin. Fuzzy evaluation of main driving factors of water eutrophication in the Chaohu Lake[J]. *Natural Sciences Report*, 2007, 23(4): 651–654.
- [17] 杨东方, 张 经, 陈 豫, 等. 营养盐限制的唯一因子研究[J]. 海洋科学, 2001, 25(12): 49–51.
YANG Dong-fang, ZHANG Jing, CHEN Yu, et al. The study about only nutrient limitation factor[J]. *Marine Science*, 2001, 25(12): 49–51.