

莫愁湖富营养化限制性因素确定的 AGP 实验研究

顾进伟, 钱 谊, 黄 辉

(南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210023)

[摘要] 莫愁湖作为南京市一个重要的景观类湖泊, 近些年已经呈现较为严重的富营养化状态. 探求影响莫愁湖水质富营养化的限制因子, 对于防治莫愁湖水体富营养化, 维护莫愁湖水质特别重要. 本文通过莫愁湖藻类增长潜力试验研究, 设立试验对照组, 确定莫愁湖富营养化的主要限制因子为氮, 并为防治莫愁湖水体富营养化, 加强水质管理, 进行水体修复提供科学依据.

[关键词] 莫愁湖, 富营养化, 藻类增长潜力试验, 氮, 磷

[中图分类号] X524 [文献标志码] A [文章编号] 1001-4616(2014)03-0111-05

The AGP Test for Studying of Limiting Factors Resulting in Eutrophication of Mochou Lake

Gu Jinwei, Qian Yi, Huang Hui

(School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: As an important scenic lake, in recent years, Mochou Lake has represented a state of severe eutrophication. It is crucial to maintain the high quality of Mochou Lake by discovering the limiting factors leading to the eutrophication, which should be prevented. This paper investigated the algae growth by setting the AGP tests. Results showed that the main limiting factor of eutrophication was nitrogen. This study could provide scientific evidence of how to manage and restore the lake water quality.

Key words: Mochou Lake, eutrophication, AGP, nitrogen, phosphorus

莫愁湖位于南京城西南部, 地处莫愁湖公园内, 总面积 0.3 km^2 , 外形略呈三角形, 出水口位于湖泊东部, 通往秦淮河, 无入湖河渠, 有生活污水排入(图 1). 近年来, 随着人类社会的发展以及城市化进程的加快, 莫愁湖水体富营养化现象日益严重. 莫愁湖水体本身已经积蓄了较多的氮、磷营养盐, 并且污染源尚未得到控制, 外部的氮、磷等营养物依旧源源不断排入湖中, 加之莫愁湖底部的通道被阻塞, 水质在很大程度上受到危害. 作为南京市一处重要的水体景观, 莫愁湖除了供游人水上游乐之外, 湖内还放养了大量的鲢鱼、鳊鱼及少量的青鱼^[1]. 鉴于莫愁湖如此重要的生态及景观功能, 确定其水体富营养化限制因子, 防止水质进一步恶化显得十分必要和迫切. 此外, 客观而正确地评价莫愁湖水质现状, 可以为下一阶段生态修复工程的各项技术方案提供指导和依据, 达到逐渐使莫愁湖恢复到良好生态状况的终极目标.

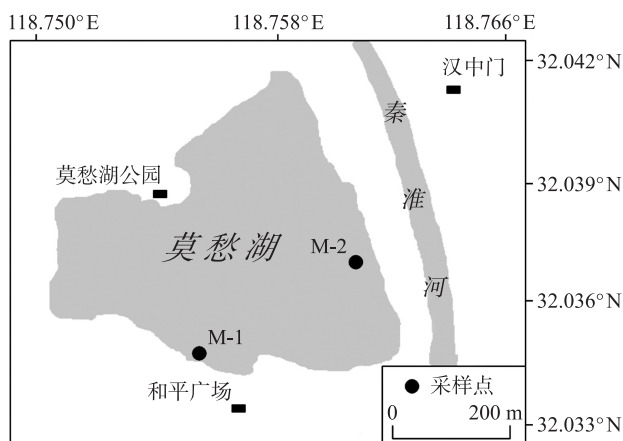


图 1 采样点位置图

Fig. 1 Location of sampling sites

收稿日期: 2013-12-06.

基金项目: 江苏高校优势学科建设工程资助项目.

通讯联系人: 钱 谊, 博士, 教授, 研究方向: 环境规划与管理、环境影响评价. E-mail: njqianyi@163.com

浮游生物作为水体生态系统中的优势种,是其他高等水生植物赖以生存的能量与物质基础,在食物链中起着非常重要的作用.创造适宜浮游生物定居的环境有利于恢复受污染河流的各营养级位生物的生存与繁殖^[2,3].浮游生物特有的生物属性,更加有利于得出可靠的试验结果.因此,本文选择敏感性较好,易于分离和培养的浮游生物为指示生物,针对莫愁湖开展藻类增长潜力试验,探寻莫愁湖水体富营养化主导限制因子.

AGP(Algal Growth Potential)试验,即藻类增长潜力试验,是根据李比西的“最低因子定律”设计的.在水体中,藻类生长状况也服从“最低因子定律”.为了解受污水体的营养状态,找出藻类生长的限制因子,预测研究水体营养状况的可能走势及采取某种治理措施可能达到的效果,就需要测定藻类增长的潜在能力,即进行 AGP 试验^[4].韦桂秋^[5]等人通过 AGP 试验,分析得出,珠江口的主要营养限制因素是磷,并且存在磷-氮双重限制机制;段秀举^[6]等人利用 AGP 试验,探讨重庆市双龙湖富营养化限制因子问题,并且通过藻类增长潜力试验分析得出,磷是双龙湖富营养化的限制因素,并就此提出控制双龙湖富营养化状况的有效措施及管理方案.本文力求通过观察斜生栅藻长势的 AGP 实验,定性与定量分析影响莫愁湖水体富营养化的主要限制因子.

1 材料与方法

1.1 藻种的选择和培养

试验常用的淡水藻种有羊角月牙藻(*Selenastrum capricornutum*)、铜绿微囊藻(*Microcysis aeruginosa*)、水华鱼腥藻(*Anabaena flaaquae*)和斜生栅藻(*Scenedesmus obliquus*)等.本试验采用形态特征较为分明的斜生栅藻为标准试验藻种.用于试验的藻种均购自中科院武汉水生生物所藻种库. AGP 试验的人工培养基配方见表 1.

1.2 水样的采集及保存

本试验水样采集于南京莫愁湖,采样地点如图 1 所示.在图示 M-1 和 M-2 处设立采样点,并且保证采样点之间存在一定的间隔.在采取水样时充分润洗采样容器,以保证采集的水质能充分反映莫愁湖本身的水质状况.为了保证水样的有效性和代表性,试验采集的水样应及时置于冰箱中存放,防止水质过期,影响测定结果的准确性.试验中所用到的玻璃器皿都要经过酸洗,再用去离子水冲洗,烘箱 60℃ 烘 3 h.

1.3 AGP 试验

1.3.1 接种用藻种的预培养

在无菌条件下,将藻种接种在表 1 所示的人工培养基上,进行预培养.培养温度(24±2)℃,光强 2 000 lux±10%,培养瓶每 2 h 摇一次,每隔 4 h 更换各个培养瓶的位置一次,然后用显微镜观察,若无杂草并且藻类的生长状况良好,就可以作为进行试验的藻种液^[7].

1.3.2 试验组的设计及藻类的接种

正磷酸盐和硝酸盐分别是藻类吸收磷和氮的主要方式,因此,本试验选用相应浓度的硝酸钾(KNO₃)和磷酸二氢钾(KH₂PO₄)营养盐溶液,作为氮和磷的营养源来设计试验组,具体方案如表 2 所示.为了保证试验结果的准确性,本次试验设立平行样.将稀释过的原藻液接种到试样瓶中,每个试样瓶注射 2 mL.接种完毕后,在温度(24±2)℃,光强 2 000 lux±10% 条件下培养,培养瓶每 2 h 摇一次,每隔 4 h 更换各个培养瓶的位置一次,然后在规定时间段的同一时刻取出一定量的试液,并在显微镜下读出准确的藻种数量,计算出藻密度并记录^[8].

表 1 AGP 试验人工培养基配方

Table 1 Artificial medium formula of AGP test

Component	Amount	Stock Solution
NaNO ₃	100 mL/L	15.0 g/L dH ₂ O
K ₂ HPO ₄	10 mL/L	2 g/500 mL dH ₂ O
MgSO ₄ ·7H ₂ O	10 mL/L	3.75 g/500 mL dH ₂ O
CaCl ₂ ·2H ₂ O	10 mL/L	1.8 g/500 mL dH ₂ O
Citric acid	10 mL/L	0.3 g/500 mL dH ₂ O
Ferric ammonium citrate	10 mL/L	0.3 g/500 mL dH ₂ O
EDTANa ₂	10 mL/L	0.05 g/500 mL dH ₂ O
NaCO ₃	10 mL/L	1.0 g/500 mL dH ₂ O
A5(Trace mental solution)	1 mL/L	
H ₃ BO ₃		2.86 g/L dH ₂ O
MnCl ₂ ·4H ₂ O		1.86 g/L dH ₂ O
ZnSO ₄ ·7H ₂ O		0.22 g/L dH ₂ O
NaMoO ₄ ·2H ₂ O		0.39 g/L dH ₂ O
CuSO ₄ ·5H ₂ O		0.08 g/L dH ₂ O
Co(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O		0.05 g/L dH ₂ O

表 2 AGP 试验

Table 2 AGP test

水样	名称	添加营养盐方案	试验瓶数
1	原水样	不添加任何营养盐(120 mL 原水+15 mL 蒸馏水)	3
2	添加 P 营养盐	水样(120 mL 原水)+0.015 mg(P)/L(15 mL)	3
3		水样(120 mL 原水)+0.050 mg(P)/L(15 mL)	3
4		水样(120 mL 原水)+0.225 mg(N)/L(15 mL)	3
5	添加 N 营养盐	水样(120 mL 原水)+0.750 mg(N)/L(15 mL)	3

1.3.3 藻类增长参数的测定

藻类增长参数是通过逐日测定藻类的现存量而得到的. 每天测定藻类的现存量,直到试验结束,测定的时间应基本相同,本试验选在中午进行测定. 本试验采取镜检计数的方法测定藻类现存量,即吸取 0.1 mL 样品于计数框中,用目镜视野法计数.

2 结果与讨论

2.1 营养盐添加对斜生栅藻增长潜能的影响

试验中所采集水样测得的总氮(TN)、总磷(TP)浓度值见表 3.

利用水样 1 和水样 2 测得的斜生栅藻的藻类生长状况曲线分别见图 2 和图 3. 根据图中曲线趋势可以明显发现,氮磷营养元素对藻类生长趋势有较大的刺激作用,并且高浓度的氮表现出更大的刺激作用.

表 3 总磷和总氮的分析结果

Table 3 Concentrations of TP and TN

采样点参数	水样 1	水样 2
TN/(mg/L)	0.516	0.530
TP/(mg/L)	0.176	0.172
N/P	3	3

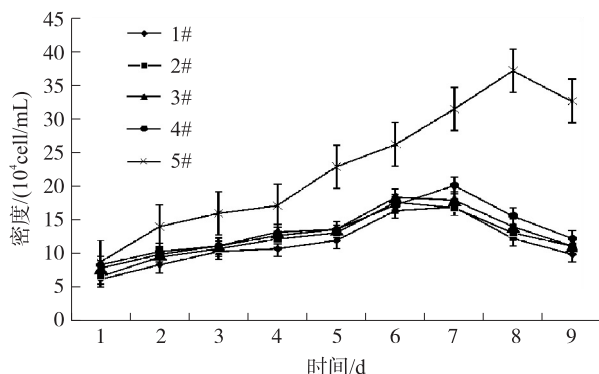


图 2 水样 1 对藻类增长状况的影响

Fig. 2 Effect of water sample(No. 1) on Algae growth status

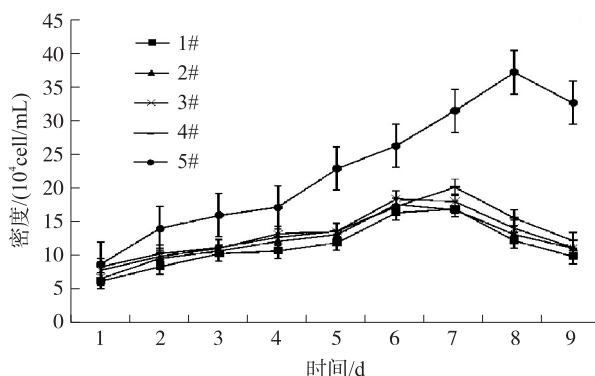


图 3 水样 2 对藻类增长状况的影响

Fig. 3 Effect of water sample(No. 2) on Algae growth status

2.2 斜生栅藻生长限制因子确立

氮和磷是天然水体富营养化的重要影响因素,是湖泊水体中藻类生长的重要限制因子. 不同的藻类对于营养盐的需求不同,因此,不同浓度的氮和磷的供应量会导致水体藻类生长状况的变化. 本研究通过长期观察与记录藻类生长数据,绘制斜生栅藻生长曲线状况图发现,同样的培养条件下,不同的营养盐对于藻类的增长速率影响不同:未添加任何营养盐的 1#曲线所对应的藻类最大现存量明显少于添加氮元素后藻类的最大现存量,并且随着添加的氮营养盐浓度的增加,刺激斜生栅藻增长作用增强,斜生栅藻繁殖速度加快,最大现存量较低浓度氮状态下的数量也越多;磷元素对于刺激斜生栅藻的生长也有一定的促进作用. 未添加任何营养盐的 1#曲线所对应的藻类最大现存量也少于添加磷元素后藻类的最大现存量,并且随着添加的磷营养盐浓度的增加,刺激斜生栅藻的增长作用有一定加强,斜生栅藻获取的营养越丰富,达到最大现存量的数量也较大;对比 2#、3#曲线与 4#、5#曲线发现,斜生栅藻对氮营养盐的反应较磷营养盐而言更为敏感. 添加氮的藻类最大现存量比添加磷的藻类最大现存量,并且斜生栅藻对于氮营养盐浓度变化反应比较敏感,而对高浓度磷与低浓度磷的生长反应变化不是很明显,增长速率也较为接近. 因此,就莫愁湖水体而言,影响斜生栅藻生长的主导限制因子是氮.

2.3 斜生栅藻生长动力学特性分析

一般认为,当水体中的营养物质过量增加时,达到富营养化状态就会发生水华.但是,并不是只有在富营养化的水体中才会发生水华,中营养化的状态下也会发生水华现象,例如千岛湖蓝藻事件^[9].因此,应该把握藻种的不同特性,分析其对营养盐的需求状况,即对藻种的动力学特性进行研究,才能有针对性地控制具体水域的水体富营养化现象.比增长率(U)和半饱和常数(K_s)是藻类在浮游植物群落中竞争力和演替情况的重要指标.最大生长速率(U_{\max})为当限制性底物浓度趋向无穷大时生物的生长速率;半饱和常数通常用来衡量生物物种对营养物质的亲和性, K_s 值小,表示亲和性好,只要很小的营养物质浓度就使种群增殖率达到最大生长率的一半^[10-12].

比增长率(U)指在某一时间间隔内藻类生长的速率,计算式:

$$U = \ln(X_2/X_1)/(t_2 - t_1)^{[12]}. \quad (1)$$

式中, X_2 为某一时间间隔终结时的藻类现存量; X_1 为某一时间间隔开始时的藻类现存量; $t_2 - t_1$ 为某一时间间隔.将 Monod 方程式 $U = U_{\max}c/(c + K_s)$ 变成以下形式: $c/U = K_s/U_{\max} + c/U_{\max}$.式中: U 为微生物的比增殖速度, U_{\max} 为在饱和质量浓度中微生物最大比增殖速度, c 为溶液中限制微生物增殖的底物质量浓度, K_s 为半饱和常数,其值为 $U = U_{\max}/2$ 时底物质量浓度.以统计学的最小二乘法的程序求出上述方程的斜率 $1/U_{\max}$ 和截距 K_s/U_{\max} ,斜率的倒数为 U_{\max} ,其与截距的乘积即为半饱和常数 K_s ^[12].

根据式(1)计算得出,在氮限制下斜生栅藻的最大比增长速率为 $0.47/d$,半饱和常数为 0.28 ;在磷限制作用下斜生栅藻的最大比生长速率为 $0.37/d$,半饱和常数为 0.029 .该试验所得到的数据与许海^[14]等的研究数据对比发现,斜生栅藻的最大增长率和半饱和常数都比铜绿微囊藻大.因此,在氮磷等营养元素丰富的情况下,斜生栅藻会形成优势,而当氮磷缺乏时,铜绿微囊藻就会形成优势.有学者^[14-16]在研究引起水华的不同藻类生态特征时发现,铜绿微囊藻更加适宜在中等偏低的营养水平下生长,同时指出,蓝藻水华是湖泊富营养化过程中的阶段性产物,当湖泊营养物质的水平超出一定的范围时,蓝藻就不再具有生长优势.因此,在研究湖泊富营养化问题的过程中,应该对水质营养现状充分了解,才能采取有效的防范措施.

3 结论

本文利用指示性较好的浮游植物——斜生栅藻作为试验藻种,通过设置试验对照组,对莫愁湖的水质进行了 AGP 试验.试验表明,就莫愁湖水体而言,斜生栅藻对氮元素浓度变化更为敏感,随着氮元素浓度的增加,藻类生长速率明显提高,高浓度氮条件下的藻类最大现存量达到 5 组试验数值中的最大值.因此判断氮是莫愁湖水体中斜生栅藻大量增殖的主导限制性因子.此外,磷作为水体富营养化的重要影响因素,同样对莫愁湖水体营养状况起到一定的限制作用.在对照试验中发现,添加磷营养盐的试样中的藻类最大增长量明显比未添加任何营养盐的试样的藻类最大增长量要大.因此,斜生栅藻的藻类增殖状况存在着氮-磷协同控制机制^[6].

从莫愁湖藻类增长潜力测试结果可知,不同的营养盐条件及不同浓度的同类营养盐对斜生栅藻生长的促进作用各不相同.斜生栅藻作为一种对营养盐依赖性较高的浮游植物,在其适应性较好的高营养盐浓度范围内会大量生长^[11,12].因此,为防止斜生栅藻大量生长,应该着重控制氮磷营养盐的流入,防止生成适宜斜生栅藻大量生长的外环境,避免莫愁湖水质进一步恶化.在研究水体富营养化问题的过程中,应该通过观察与分析,了解水体中浮游植物的优势种,有针对性地把握藻种的动态增长特性,了解优势藻大量增殖的营养盐范围,从而更好地提出控制水体富营养化的方案和措施.就莫愁湖而言,要控制斜生栅藻的增长,必须严格控制外源营养盐的流入,强化水质治理,防止水体富营养化的加剧^[17-20].

[参考文献]

- [1] 成小英,李世杰.城市富营养化湖泊生态恢复——南京莫愁湖物理生态工程试验[J].湖泊科学,2006,18(3):218-224.
- [2] 张玮玮,王家官.微量元素钴对脆杆藻和斜生栅藻增殖的影响[J].山西农业科学,2012,40(3):207-211.

- [3] 程曦,李小平. 淀山湖氮磷营养物 20 年变化及其藻类增长响应[J]. 湖泊科学,2008,20(4):408-419.
- [4] 王霞,于海燕. 藻类增长潜力试验及其在防止富营养化中的应用[C]//第六次全国环境监测学术交流会论文集. 成都:化学工业出版社,2001.
- [5] 韦桂秋. AGP 试验在珠江口检测中的应用[J]. 海洋通报,2004,23(4):55-59.
- [6] 段秀举,刘亚丽. 重庆双龙湖富营养化限制性因素确定试验研究[J]. 水资源与水工程学报,2006,17(2):14-17.
- [7] Niu S L, Wu M Y, Han Y, et al. Water-mediated responses of ecosystem carbon fluxes to climatic change in a temperate steppe[J]. New Phytologist, 2007, 177(1):209-219.
- [8] 杨东方,张经,陈豫,等. 营养盐限制的唯一性因子探究[J]. 海洋科学,2001,25(12):49-51.
- [9] 刘其根,陈立侨,陈勇. 千岛湖水华发生与主要环境因子的相关性分析[J]. 海洋湖沼通报,2007,1(1):117-124.
- [10] 许海,杨林章. 铜绿微囊藻斜生栅藻生长的氮营养动力学特征[J]. 环境科学研究,2008,21(1):69-73.
- [11] 许海,杨林章,茅华. 铜绿微囊藻斜生栅藻生长的磷营养动力学特征[J]. 生态环境,2006,15(5):921-924.
- [12] 张自杰,周帆. 活性污泥反应动力学[M]. 北京:中国环境科学出版社,1989.
- [13] Bucka H. Ecology of selected planktonic algal causing water blooms[J]. Acta Hydrobiologica, 1989, 31(4):207-258.
- [14] 万蕾,朱伟,赵联芳. 氮磷对微囊藻和栅藻生长及竞争的影响[J]. 环境科学,2007,28(6):1 231-1 235.
- [15] 秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探[J]. 湖泊科学,2002,14(3):193-202.
- [16] 秦伯强. 太湖水环境面临的主要问题:研究动态与初步进展[J]. 湖泊科学,1998,10(4):1-9.
- [17] 金相灿,胡小贞. “绿色流域建设”的湖泊富营养化防治思路及其在洱海的应用[J]. 环境科学研究,2011,24(11):1 203-1 208.
- [18] 王军霞,张亚娟. 生物链调控技术防治湖泊富营养化研究进展[J]. 湖北农业科学,2011,50(9):735-738.
- [19] Wauer G, Gonsiorczyk T, Kretschmer K et al. Sediment treatment with a nitrate—storing compound to reduce phosphorus-release[J]. Water Research, 2005, 39(2):494-500.
- [20] 赵永宏,邓祥征. 我国湖泊富营养化防治与控制策略研究进展[J]. 环境科学与技术,2010,33(3):92-99.

[责任编辑:黄 敏]