

外源添加营养对安徽太平湖水库 藻类增殖影响的研究

赵 斌^{**}

(水利部 水库渔业研究所, 武汉 430073)
中国科学院

摘要 1992年11月~1993年10月,在安徽太平湖水库,同时用藻类生长潜力测试法(AGP试验)和外源添加营养的黑白瓶测定初级生产力法,对陵山站的水体分季度进行了分析测试。其结果表明,这两种方法对太平湖水库的营养评价均是行之有效的,而且二者的结果也能相互比较、相互验证;太平湖水库的不同季节,其主要营养限制性因子也各异。在枯水期,磷是藻类种群和密度的第一限制性营养元素;丰水期,由于各营养元素都相对缺乏,磷此时作为限制性因子的作用下降。因而认为,在进行象太平湖水库这样的大水域野外工作中,若能同时运用这两种方法进行检验和比较分析,就能克服二者各自的片面性,得出较为客观的结论。同时,本实验的结果对太平湖水库施肥养殖也有一定指导意义。

关键词 太平湖水库 藻类 限制性因子 AGP测试 黑白瓶试验

与地质变动时期形成的湖泊相比,水库是一种相对年轻的淡水生态系统,尚未进行广泛的湖泊学或生态学研究^[1]。过去很多关于水库湖泊学的研究方法同湖泊学的研究方法基本是一样的,甚至认为水库和湖泊本质是相同的,并将其划分成为第73类湖泊^[2]。但近年来的研究表明,人工建造的水库同天然湖泊并非必然相似的水体生态系统^[3~6]。它们的区别首先在于物理环境要素(包括水库的形态和水文学特性、区域性的地理因素以及流体力学因素)的不同;其次,在于生态系统内部营养结构、功能和动态上的差异,其中,浮游植物的营养结构,是反映生态系统营养结构的具体体现,这是因为在绝大多数大中型水库中浮游植物占初级生产力的主要优势。营养限制性因子是生态系统营养结构最重要的方面之一,是影响水生生态系统中浮游植物季节性增长的重要因素,同其它如捕食压力、光强或水体稳定性等因子相比,要显得更为重要^[7]。水库中的浮游植物生活的环境在物理、化学和生物方面均是呈动态变化的。虽然从年变化来看,水库中的浮游植物生产量的变化不如天然湖泊明显,但是如果缩短时间期限进行比较,水库中的变化可能要比天然湖泊大得多^[1]。本文试从太平湖水库中浮游植物的营养限制性因子入手,对外源添加氮、磷等营养物质进行动态研究,监测其对藻类增殖情况及水体初级生产力的影响,探讨浮游植物营养结构以及水库和湖泊生态系统的

* 中国科学院“八五”宏观生物学重点项目(KY85-112)资助。

** 现在工作单位:中国科学院水生生物研究所,邮政编码 430072。

来稿日期:1994-08-26;接受日期:1994-10-23。

作者简介:赵斌,男,1969年生,助理工程师。1992年南京大学环境科学系环境生物专业毕业。现主要从事淡水生态学研究。

区别,旨在为水库和天然湖泊的比较生态学研究提供第一手资料,同时也寻找一种研究水体营养状况的野外操作方便的方法。

1 材料和方法

1.1 试验水库概况

太平湖水库位于安徽省著名旅游胜地黄山和九华山之间,总库容 $24.75 \times 10^8 \text{m}^3$,流域面积 2800km^2 ,是一座峡谷型水库,库长约 80km ,可养殖水面约 6600hm^2 ,几乎占整个水面的 80% 。库区属亚热带的过渡地带,年平均气温约 16°C ,年太阳辐射能总量约为 $4.437 \times 10^3 \text{kJ}/\text{cm}^2$ 。水位高程 110m 时面积为 $13.2 \times 10^4 \text{hm}^2$,消落区 $3.3 \times 10^4 \text{hm}^2$,最大泄洪量为 $4670 \text{m}^3/\text{s}$,库水流经陈村大坝入青弋江后汇入长江。

1.2 采样点的设置和水样预处理

选择太平湖水库中游最具代表性的陵山站最开阔水面处采集水样。取 1.0m 、 2.0m 、 3.0m 、 4.0m 、 6.0m 深的分层水样进行混合,用 25^μ 生物网初过滤,再用 0.45μ 的微孔滤膜过滤,同时测定水样中氮、磷等元素的初始营养成份以及浮游藻类的种类、密度、生物量和叶绿素 a 等指标(表 1、2)。

表 1 太平湖水库氮、磷等主要营养元素的季节变化 单位:mg/L

Tab. 1 Seasonal variations of nitrogen and phosphorus etc. in Taipinghu Reservoir

营养元素	TN	TP	$\text{NO}_2^- - \text{N}$	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$	SiO_2
春季(4月)	0.521	0.006	0.004	0.381	0.032	<0.01	6.92
夏季(7~8月)	0.564	0.009	0.005	0.180	0.016	<0.01	5.88
秋季(10~11月)	1.65	0.184	0.006	0.287	0.046	<0.01	5.09
冬季(1月)	7.68	0.043	0.004	0.335	0.012	<0.01	4.45

表 2 太平湖水库浮游植物的季节变化

Tab. 2 Seasonal variations of properties of phytoplankton in Taipinghu Reservoir

季 节	种 类	密度(10^3 个/L)	生 物 量(mg/L)	叶绿素 a(mg/m ³)
春季(4月)	15	68.4	1.23	—
夏季(7~8月)	17	37.2	0.52	1.68
秋季(10~11月)	21	35.4	1.03	1.79
冬季(1月)	23	88.5	1.68	2.47

1.3 试验方法

为了使本研究结果同其他相关研究具可比性,同时又能代表太平湖水库的浮游植物的营养状况,试验选择了两种方法同步进行研究:(1)藻类生长潜力 AGP 测试法^[8]。试验藻种为由中国科学院水生生物研究所室内人工纯培养的斜生栅藻(*Scenedesmus obliquus*)。(2)外源添加营养的黑白瓶试验^[9]。

添加营养均为分析纯试剂。磷用磷酸二氢钠($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$),氮用硝酸钾(KNO_3)。使用前先用蒸馏水配制成浓度较高的母液,使用时再以培养用水稀释至所需浓度,单独或共同添加到培养用水中。

2 结果

2.1 AGP 试验

为了探讨水庫与湖泊不同的营养动态特性,试验特意安排在水庫水位及营养状况变动较大的时期(4~10月)进行。检测太平湖水庫浮游植物营养限制性因子的试验共进行5次:1993年4月(A₁)、1993年7月(A₂)、1993年8月(A₃)、1993年9~10月(A₄,A₅)。实验结束后,求出最大特定生长率(μ_{max})和最大现存量等参数。

2.1.1 枯水期,磷对藻类生长的限制性作用 太平湖水庫一般在夏汛前水位降到最低点,夏末秋初雨季后水位开始回升。1993年4月,是当年水位最低的时期,处于枯水期。其添加氮、磷营养后的生长动态见图1(A₁)。添加磷的培养液同对照组相比,有明显促进栅藻生长的作用,并且0.050mg P/L组>0.015mg P/L组。而同时氮的添加,不仅不能促进栅藻的生长,甚至在某种程度上对藻类的生长还起一定的阻碍作用。这种机理尚需进一步探讨。

2.1.2 藻类最适生长磷浓度的测定 此批试验,共设定4组磷浓度进行对比试验,浓度比为2,形成一等比梯度。从生长动态(图1(A₂))可见,0.20mg P/L是栅藻的最适生长浓度;而最高浓度组0.40mg P/L,起始5d与对照组无显著差别,5d以后,当其他浓度组处于下降趋势时,其生长呈加快的趋势,由此可见,藻类生长过程中,磷浓度的偏高或偏低均对生长有抑制作用。

2.1.3 丰水期,氮、磷的添加对藻类生长的影响 1993年8月,太平湖水庫处于高水位时期。此期间汇集了一年中丰富的降雨。该批试验中磷的浓度同上批试验浓度设置完全相同,但结果却有较大差异。生长动态(图1(A₃))表明:各组之间生长无显著差异,此时期氮、磷的添加不能显著地促进藻类增长。

为了进一步明确磷在丰水期的作用,于1993年9月至10月重复了上批试验(A₄,图1(A₄)),并在其它条件不变的情况下增加磷浓度重复此批试验(A₅,图1(A₅)),结果表明,A₄和A₅的结论是一致的。在高浓度组的情况下,随着磷浓度的增加,栅藻增长加快,即栅藻生长曲线呈现出“双峰型”。对此本文未作深入研究,有待今后详细探讨。

2.1.4 其它影响营养因子的因素 为了确定水庫中是否还存在着其它限制藻类生长的因子,利用两种藻类培养基HB₄和T₅作了下述几组试验:全库水、T₅培养基、库水+T₅培养基、HB₄培养基、库水+HB₄培养基。其生长动态见图1(A₆)。结果表明:库水+T₅培养基组生长状态最为良好,并且库水+T₅培养基组>T₅培养基组,而库水+HB₄组<T₅组,T₅组>HB₄组。可以看出,T₅培养基最适合于太平湖水庫藻类生长,可见太平湖水庫中除了磷是限制藻类生长的营养因素之外,还有很多复杂的营养关系。比较T₅培养基同HB₄培养基成份的差别发现,HB₄仅比T₅少NO₃-N,但生长状况的差异却如此之大(库水+T₅培养基组藻类最大现存量为 9.92×10^6 个/mL,而库水+HB₄组为 5.54×10^6 个/mL),因而NO₃-N对于太平湖水庫的藻类增殖起着举足轻重的作用。

2.2 黑白瓶试验

用于检测太平湖水庫外源添加氮、磷营养对浮游植物初级生长力影响的黑白瓶挂瓶试验共进行3次:1993年1月(B₁)、1993年4月(B₂)、1993年7月(B₃)。主要用于对AGP测试中部分结论的验证,实验与AGP测试同步进行,以保证研究的代表性。其各次试验的总初

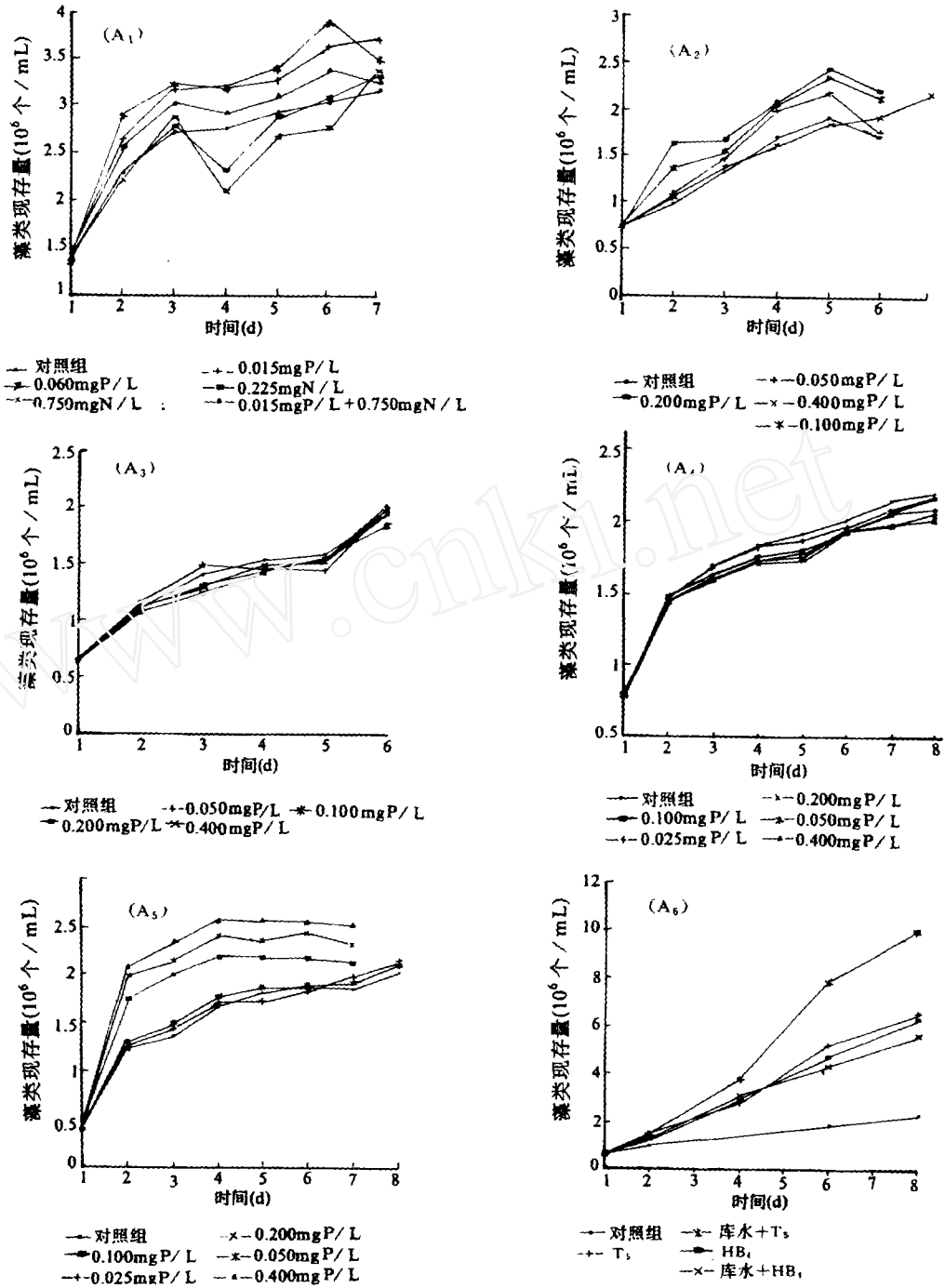


图 1 添加氮、磷等营养后藻类生长曲线

Fig. 1 Algal growth curves after adding N and P

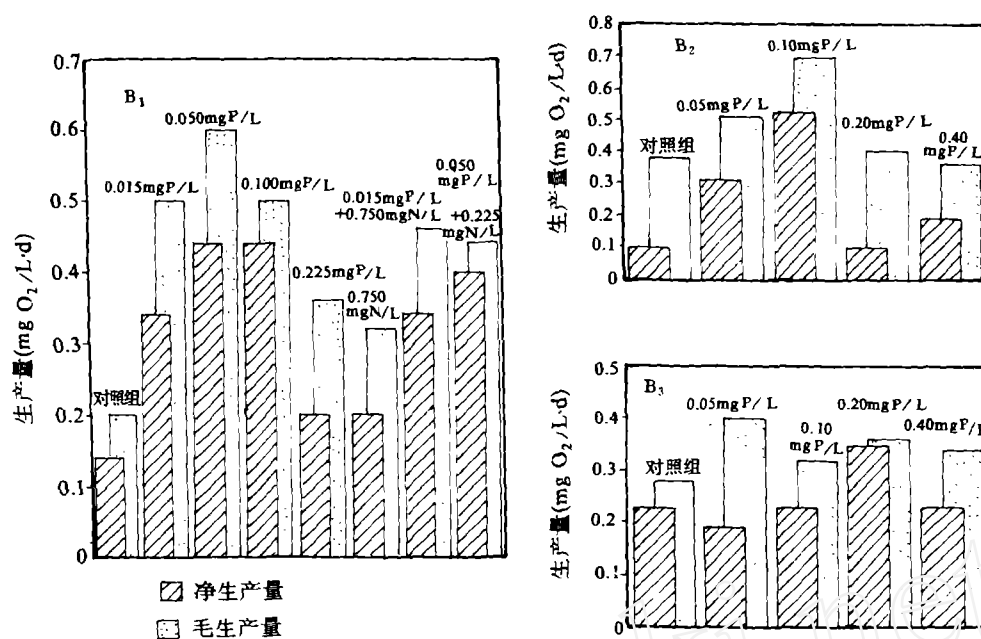


图2 总初级生产量和净初级生产量的比较

Fig. 2 The comparison of gross production and net production

级生产力和净初级生产力见图2。

2.2.1 氮、磷营养元素的添加对藻类初级生产力的影响 B₁ 试验共分8组进行,各组设定不同的氮、磷浓度或配比。其结果表明,磷在0~0.100mg/L 浓度范围内,净初级生产力随浓度升高而增大,毛生产力也基本呈现这一趋势;而加氮组藻类初级生产力却无明显随氮浓度升高而增加的现象,但同对照组相比,氮的添加对生长也有一定的促进作用。氮、磷混合组也基本是依赖磷浓度的升高而变化的。因而,在此时期,磷对藻类初级生产力相对于氮更重要,进一步证明磷是藻类生长的营养限制性因子。

2.2.2 促进藻类初级生产力的最适磷浓度 从B₂ 结果可以明显地看出藻类的初级生产力随磷浓度增大而增加的情况。0.10mgP/L 对此时期的太平湖来讲,是藻类最适生长浓度。

2.2.3 丰水期,磷的添加对藻类初级生产力影响不大 B₃ 试验各组同对照组相比,均在对照组附近波动,差异不显著,可见在丰水期磷的添加对藻类初级生产力的促进作用不明显。

3 讨论

3.1 对本试验中所应用的方法的比较评价

在此选用了两种广泛应用于湖沼学上的方法对太平湖水库营养限制性因子进行了探讨。这两种方法都是外加营养源生物测试法,试验周期短,它们是判定水体限制性营养元素和预测水体营养状况的通用方法,这些方法能直接查明水体中营养盐对浮游植物的供应情况,包括各种营养元素的相对丰度和限制性营养元素的种类等。以往的许多学者往往比较推崇长期测验法,而对短期试验则持保留态度^[10~12],但是,长期的生物测试法存在其固有的缺

名:(1) 这些方法一般需要一周至数周时间或更长时间,时间太长,培养液中的生物的组成会发生同研究水体许多完全不同的变化^[13,14];(2) 时间太长,培养液中营养状况会发生同研究水域不相同的变化(例如限制性营养因素的改变及营养物可利用性的改变)^[10,14];(3) 时间太长,其试验结果用来指导不断变化的水体的施肥实践将有较大出入。短期试验相对地克服了这些缺点,提高了它在生产实践中的应用价值。

比较分析所选用的两种方法,可以发现,不管从形式上还是所提供的结果,它们都是确切的、有意义的,且试验设备简单,试验过程容易控制,两种方法得到的结论也基本一致,这无疑使二者独立的结果能够相互借证,从两种不同形式的方法得出了同一结论,应当相信其结论的可靠性。而且,AGP 测试还是国内外进行生物刺激(藻类生产力)实验的标准方法,已有很多的相关研究,应用这种方法所得出的结果可便于进行参照和比较;本文中的外源添加营养的黑白瓶方法虽不是标准方法,但它却是参照标准方法进行的,同样能提供较为可靠的结论。因而作者认为,对于进行象太平湖水库这样的大水域野外研究工作,这两种方法是可取的。上述两种方法在对藻类生长最适磷浓度的测定上略有差异,这可能主要是因为二者在藻种及培养时间等的差异所造成。诚然,这两种方法各自也存在一定的缺陷:AGP 试验中所接种的斜生栅藻不能完全代表水库所有的浮游植物,因为不同种类的藻类对营养源的配比有不同的要求^[15],因而如果仅以此来评价水体的营养状况,显然存在较大出入。黑白瓶试验利用了水库中本身浮游植物群落进行测定,克服了上述弱点,对于反映了水库浮游植物的实际营养状况具有一定的代表性,但是黑白瓶试验对天气状况要求较高(阴天及雨天往往较难取得满意结果)。因而作者认为,在进行水域的营养状况评价时,应同步应用这两种方法,并对实验结果进行缜密的比较分析,寻找造成结果差异的原因,才能得出较为可靠的结论,正确地指导渔业生产实践。

3.2 水库磷、氮限制作用的变化在施肥养殖中的应用

水库一般具有多方面的功能。太平湖水库是一座集发电、灌溉、航运、养殖以及旅游等多功能水体。水库和天然湖泊在排水方式上是不同的,水位的日变化和季节性波动程度也明显不同,天然湖泊在表层排水,排水不可控制,但水位很少发生剧烈变化,而水库却因改变或控制河川流量的蓄水、灌溉过程引起的水位的急剧变化,同时水库还会因水力发电排放的不同水温的水所引起水温变化,这些将导致发生在水库和其他类型的水体中的营养状况及其相关的过程具有明显的不同。水库的水质和生产力在很大程度上受着输入的外源性营养物的质和量的控制,因而对水库营养状况的探讨应以动态研究为佳。本研究结果表明:太平湖水库在枯水期,磷对水体中初级生产力的限制作用比氮重要,磷在此时是藻类种群和密度的第一限制性营养元素。而且,此时的藻类最适生长的磷浓度为 0.10~0.20mg/L 之间,此结果对水库施肥养殖应有参考价值。结合表 1,夏、秋雨季的降水导致水库中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度降低,大量进水不仅起了稀释作用,而且水位升高后沉降作用增强^[16]。进水中的颗粒物对营养物质的吸附作用使得水库中的 TP、TN 浓度及其他一些营养物质的浓度均不同程度地降低,但氮元素浓度的降低并未达到限制浮游植物生长的程度,因而还不可能成为藻类生长的限制性因素。结合表 2 清晰可见,在夏、秋两季,无论是浮游植物的密度、生物量,还是叶绿素 a 的含量,均低于春、冬两季。夏、秋两季的 TP 浓度虽有增无减,但生物可直接利用的磷,例如 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度却并未增加,即使人为添加磷也并未促进藻类增长。这表明,磷在此时作为限制

性因子的作用下降,同时由于其它许多营养元素因雨水的稀释和吸附作用使浓度降低,也相对缺乏,因而磷、氮的添加在此时不能显著的促进藻类的增长及水体初级生产力的提高是容易理解的。这提示在水库增肥时应配和氮磷元素添加多种肥料。对照完全培养基的试验还说明,太平湖水库中除了氮、磷之外,其它一些营养元素的缺乏构成了抑制藻类存在或生长繁殖的综合因素。

显然,对太平湖水库的营养状况的评价,不能一概而论,也不能仅仅依靠一、两次营养评价实验下结论,而应当针对不同时期、不同水文环境进行评价,不同时期的施肥方案也相对有所改变。同天然湖泊相比,水库因受气象和水文学因素的变动影响而导致其生产力状况经常性的扰动,往往表现出更大的变化速率。但是由于水库水中停留时间较短和外来营养物的输入,而表现出其生态系统的动态稳定性和回复力,使其年观测数据表现出较大的重复性。因而对水库的营养状况评价应以一年为好,若能缩短时间间隔,将更为准确些。

致谢 本研究工作是在夏宜璋教授、况琪军工程师的指导下进行的,其中水化学数据由李植生提供,浮游植物数据由况琪军提供。参加野外采集和室内测定工作的还有吴志文。在论方撰定过程中又承夏宜璋教授、武汉大学生命科学学院陈家宽教授提出许多宝贵意见并审改全文,谨此衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 Kent W T. Perspectives on reservoir limnology. In: Kent W Thornton, *et al* eds. Reservoir limnology: ecological perspectives. New York: John Wiley & Sons Inc, 1990. 1~13
- 2 Hutchinson G E. A treatise on limnology, Vol 1: Geography, physics, and chemistry. New York: John Wiley & Sons Inc, 1957. 1015
- 3 Baxter R M. Environmental effects of reservoirs. In: D Gunnison, ed. Microbial processes in reservoirs. Boston: Dr W Junk Publishers, 1985. 1~26
- 4 Baxter R M. Environmental effects of dams and impoundments. *Ann Rev Ecol and Syst*, 1977, 8: 225~283
- 5 Kennedy R H, *et al*. Characterization of the reservoir ecosystem. In: Gunnison D, ed. Microbial processes in reservoirs. Boston: Dr W Junk Publishers, 1985. 27~38
- 6 Thornton K M, *et al*. Reservoir sedimentation and water quality—A heuristic model. In: Stefan H G, ed. Proceedings of the symposium on surface water impoundments. Amer Soc Civil Engr, New York, 1981. 654~661
- 7 Nedoma J. A seasonal study of phosphorus deficiency in a eutrophic reservoir. *Freshwater Biology*, 1993, 30(3): 369~376
- 8 USEPA. Algal assay procedure: bottle test. orvallis. Ore: USEPA, National Environ Res Center. 1971. 1~82
- 9 章宗涉等. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991. 349~352
- 10 Fitzgerald G P. Bioassay analysis of nutrient availability. In: Allen and Kramer, eds. Nutrient in natural waters. 1972. 147~170
- 11 Gerhart D Z, *et al*. Enrichment experiments for determining nutrient limitation: four methods compared. *Limnol Oceanogr*, 1975, 20: 640~653
- 12 Lean D R S, *et al*. Photosynthetic response of lake plankton to combined nitrogen enrichment. *J Phycol*, 1982, 18(4): 509~521
- 13 Kallf J. Nutrient limiting factors in an Arctic tundra pond. *Ecology*, 1971, 52: 655~659
- 14 O'Brain W J, *et al*. Response of three phytoplankton bioassay techniques in experimental ponds of known limiting nutri-

- ent. *Hydrobiol.*, 1976, 49(1):65~76
- 15 Smith V H. The nitrogen and phosphorous dependence of algal biomass in lakes; an empirical and theoretic analysis. *Limnol Oceanogr.*, 1982, 27(6):1101~1112
- 16 李德尚等. 浅水水库中磷的周年变动及其影响因素. 海洋与湖沼, 1991, 22(2):104~110

STUDIES ON INFLUENCE OF EXOGENOUS NUTRIENT ON ALGAL GROWTH IN TAIPINGHU RESERVOIR

Zhao Bin

(*Institute of Reservoir Fisheries, Ministry of Water Conservancy & Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430073*)

Abstract

The influence of exogenous nutrients on algal growth was studied in Lingshan Station of Taipinghu Reservoir, Anhui Province during the algal growth season of 1992~1993. Two short-term algal bioassays, i. e. , algal growth potential (AGP) test and black-light bottle test—the main experimental method of determining nutrient limitation for phytoplankton and green macroalgae—were performed integrately in various seasons in the site experiments. The main additive used included phosphorus (NaH_2PO_4) and nitrogen (KNO_3). The algae was *Scenedesmus obliquus*.

According to these experiments, the results show:

(1) The two methods were effective to reveal the trophic state of Taipinghu Reservoir and the results can be extended to large and medium reservoirs in the Changjiang River Basin. The respective one-side defect could be avoided and the two methods be used integrately.

(2) The nutrient limitation of algae varied widely during the study period. In early summer, only the addition of P evoked a clear increase in the growth of algae, revealing that P was the primary limiting nutrient of algal population, biomass and primary production. In late summer and autumn, neither the addition of P nor the addition of N stimulated algal growth as in early summer because of the relative deficiency of other nutrition by the dilution of rainwater in summer rainy season, and the limiting action of P was declining.

(3) The optimum P concentration for *S. obliquus* growth was 0.20mg/L.

The aforementioned analysis can be used for guiding technique of artificial fertilization in large water bodies. Many nutritions should be supplied when P and N are added in late summer and autumn in the Reservoir.

Key Words Taipinghu Reservoir, algae, nutrient limitation, algal growth potential test, black-light bottle test