

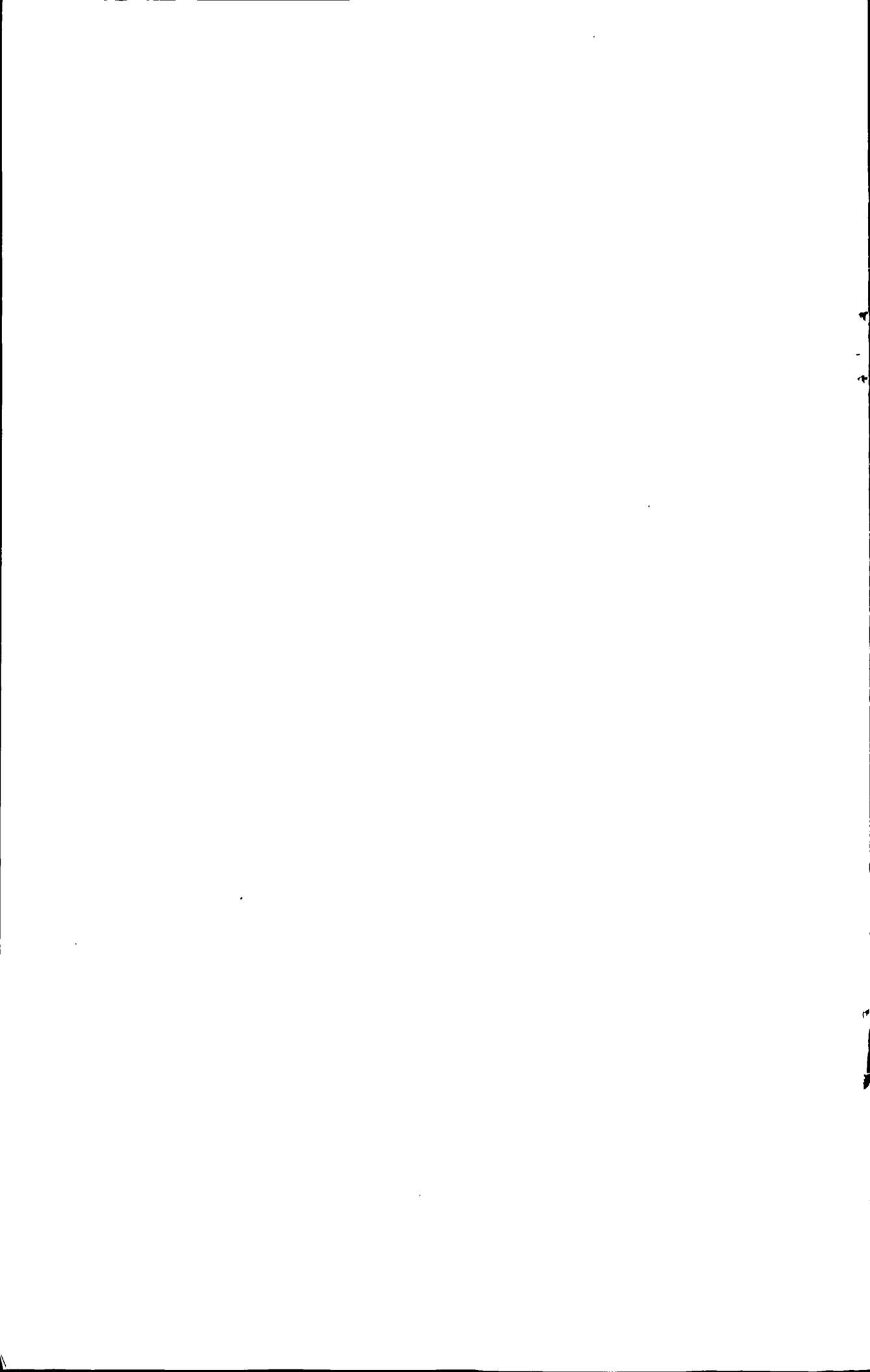


## 东华大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：吴雪峰

日期：2010年1月20日



## 东华大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权东华大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ，在 \_\_\_\_ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 。

学位论文作者签名：

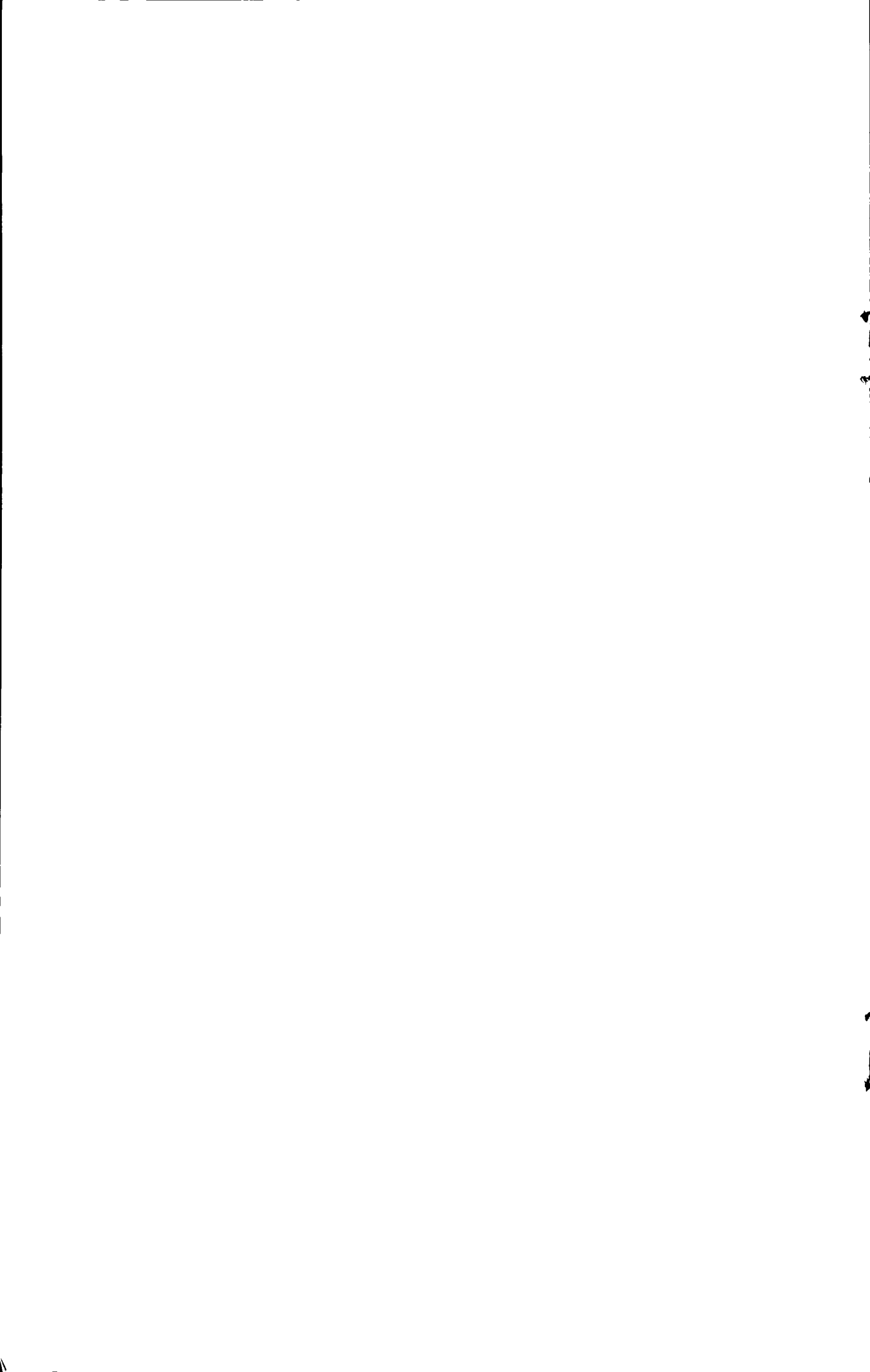
吴雪峰

日期：2010年1月20日

指导教师签名：

李军

日期：10年2月



## 淀山湖浮游植物增长营养物限制初步研究

### 摘要

湖泊富营养化及随之暴发的藻类水华成为中国以及世界许多国家面临的重大环境问题，尤其是作为城市饮用水水源的湖泊富营养化问题更是对城市供水的安全构成严重威胁。本文以上海市淀山湖为研究对象，以保障上海市安全供水为目标，在分析了淀山湖历史(1986-2007年)营养物水平和当前水质现状(2008-2009年)的基础上，系统的研究了淀山湖浮游植物增长营养物限制情况及其与营养盐之间的关系。

(1) 通过分析淀山湖22年(1986-2007)间水质监测数据表明淀山湖生态系统发生了重大变化，湖泊富营养化水平也从贫营养化转变成重度富营养化状态。TN、TP和COD等指标含量持续增加，直接导致溶解氧下降、透明度降低和湖泊富营养化；淀山湖浮游植物优势种类由中营养型藻类逐步向富营养型藻类转变，硅藻在浮游植物中比例逐年减少，而绿藻和蓝藻优势种的比例逐年增加，造成浮游植物种类数呈下降趋势，生物多样性锐减；

(2) 通过实验室藻类增长的生物学评价(Nutrient Enrichment Bioassay)试验研究淀山湖浮游植物增长营养物限制表明10-12月份添加 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 能提高相对比较系数，增加浮游植物的现存量和增长率，而添加 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 对相对比较系数、浮游植物的现存量和增长率影响不

大, 添加磷+硝氮能够显著增加生物量, 但从主效应分析看磷与硝氮之间不存在交互作用, 仅是磷促进浮游植物生长, 10-12月磷是限制浮游植物生长的限制性因子; 在2-3月间由于淀山湖水体中有充足的氮磷(总磷0.3mg/L, 总氮7mg/L), 湖体能提供足够的营养盐供浮游植物生长, 再增加营养盐对浮游植物的生长影响不大, 在这期间营养物不是限制浮游植物生长主要因素。

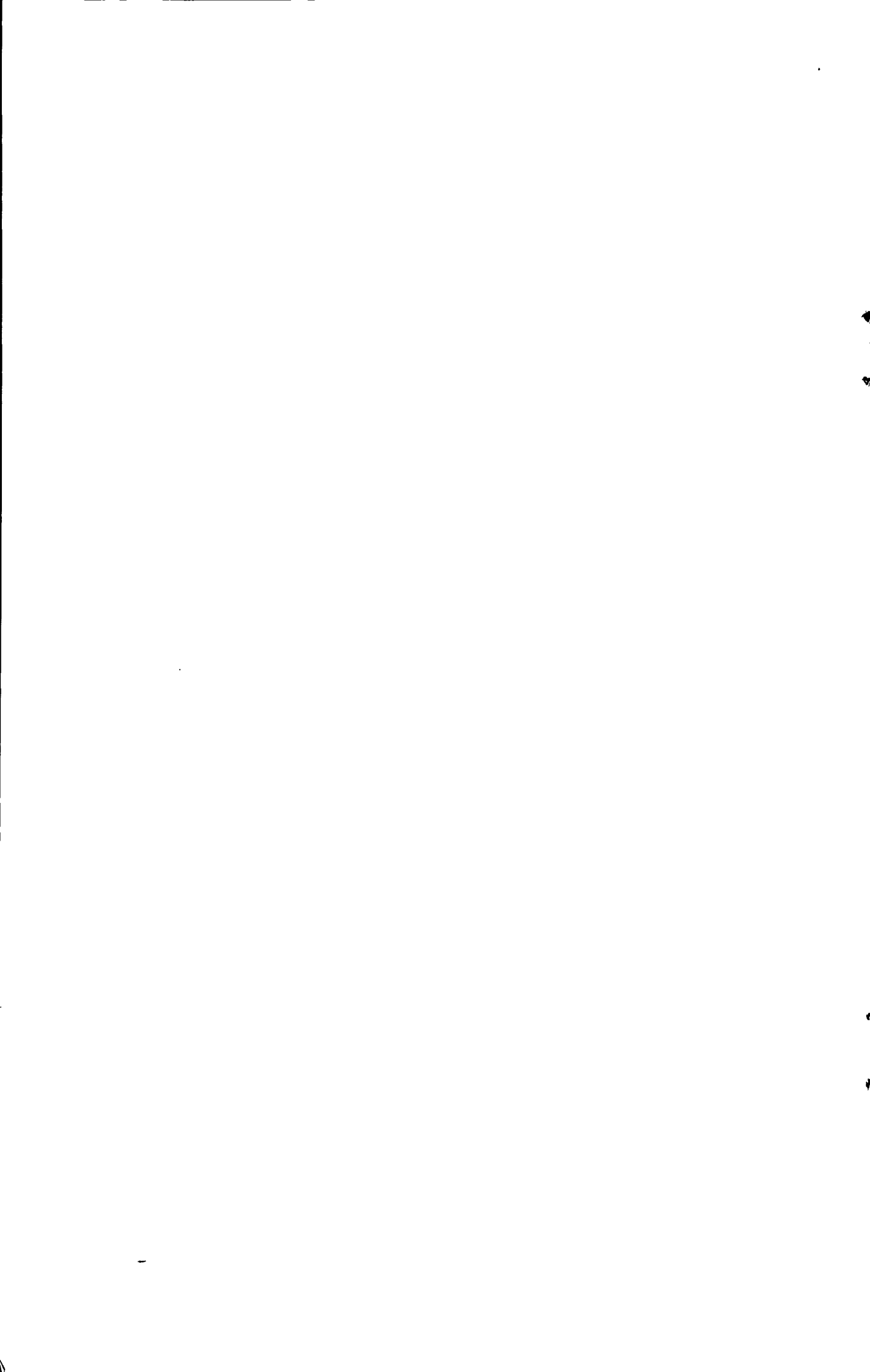
(3) 现场藻类增长的生物学评价试验表明在4-6月份添加 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 能提高相对比较系数, 增加浮游植物的现存量和增长率, 而添加 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 对相对比较系数、浮游植物的现存量和增长率影响不大, 说明在4-6月份磷对浮游植物生长有明显促进作用, 磷是限制浮游植物生长的限制性因子; 在7-9月份添加磷对浮游植物的生长影响不大, 而添加氮(氨氮和硝氮)能提高相对比较系数和增加浮游植物的现存量, 淀山湖浮游植物生长的限制性因子已经由4-6月份的磷限制转变成7-9月份氮( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ )限制。因此, 淀山湖浮游植物增长营养物限制全年经历了磷限制(10月-12月)到不受营养物限制(2月-3月)再到磷限制(4月-6月)最后转为氮限制(7月-9月)这么一过程。

(4) 分析2008-2009年水质监测数据和生态数据得出: TP出现两个峰值分别为10-3月份和5-7月份, TN出现两个峰值分别为1-3月份和6-7月份, 而叶绿素-*a*的两个峰值在3-5月和6-7月, 营养盐与叶绿素-*a*呈错开分布, 且可被浮游植物直接利用的氨氮+硝氮在总营养盐中的比例变化非常大, 相比之下采用氨氮+硝氮/磷酸盐比TN/TP更好的判断浮游植物增长营养物限制, 当(氨氮+硝氮)/磷酸盐 $\leq 57$ 时, 淀山湖浮游

植物增长属于氮限制；当 $57 > (\text{氨氮} + \text{硝氮}) / \text{磷酸盐} < 71$ 时，氮磷对浮游植物增长都不具有显著性；当 $(\text{氨氮} + \text{硝氮}) / \text{磷酸盐} \geq 71$ 时，淀山湖浮游植物增长属于磷限制。

关键字:湖泊富营养化 藻类增长的生物学评价 营养物质限制 浮游植物





# STUDY ON NUTRIENT LIMITATION OF PHYTOPLANKTON IN DIANSHAN LAKE

## ABSTRACT

Lake eutrophication and the outbreak of algal bloom subsequently become major environmental issues facing in China and over the world. In particular, as the urban drinking water resource, the lake eutrophication exerts a serious threat on the security of the water supply. This paper, in order to protect the safety of water supply in Shanghai, taking the Dianshan Lake as the research object, carry out the study about the nutrient limiting factors of the phytoplankton growth and its relationship with the nutrients, based on the nutrient levels over the history (year 1986-2007) and the current status of water quality (2008-2009).

(1) By analyzing the water quality data during the past 22 years (1986-2002), the ecosystem of Lianshan Lake have undertaken great changes, with the water eutrophication level from poor to severe. The water parameters such as TN, TP and COD experience continuous increase, with DO and transparency decrease as a result. The dominant species of phytoplankton transform gradually to nutrient-rich, the proportion of diatom gradually decrease while the green and blue algal increase which leads the species of phytoplankton and the diversity decrease sharply.

(2) The Nutrient Enrichment Bioassay in Laboratory is conducted to study the nutrients restriction of phytoplankton growth. The result shows that the enrichment of  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  during Oct-Dec can increase the relatively coefficient, phytoplankton biomass and growth rates, while the enrichment of  $\text{NO}_3\text{-N}$  and  $\text{NH}_3\text{-N}$  have little impact. But the addition of P and  $\text{NO}_3\text{-N}$  can increase the biomass significantly. However, the main effect analysis shows that there is no interaction between P and  $\text{NO}_3\text{-N}$ , with the P promote the growth of phytoplankton only, P is the limiting factor during Oct-Dec. In Feb-Mar, for the sufficient N and P content in the lake which has no significant effect on the growth of phytoplankton, nutrient is not a major factor during this period.

(3) Nutrient Enrichment Bioassay on site is conducted to show that the enrichment of  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  during April-June can increase the relatively coefficient, phytoplankton biomass and growth rates, while the enrichment of  $\text{NO}_3\text{-N}$  and  $\text{NH}_3\text{-N}$  have little impact. It indicates that P promote the

growth of phytoplankton during April-June which is the limited factor for the growth of phytoplankton; However, during July-Sep, the addition of P has little impact on the growth of phytoplankton, while the addition of  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  and  $\text{NH}_3 - \text{N}$  can increase the relatively coefficient and phytoplankton biomass that is the limited factor for the growth of phytoplankton this period. The limiting factor of phytoplankton growth experiences a changing all over the year, from P-limitation (Oct-Dec) to no limitation (Feb-March) then N-limitation (July-Sep).

(4) The analysis of the water quality data and ecological data during 2008-2009 is conducted to show that: TP has two peaks in Oct-March and May-July, respectively; while the peaks of TN in Jan-March and June-July, respectively and the Chlorophyll-a have two peaks in March-May and June-July, respectively. The distribution of nutrients and chlorophyll-a is staggered, and the proportion of dissolved nutrients in the total nutrients change greatly, so the  $(\text{NH}_3 - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N}) / \text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  can be a better parameter used to judge the nutrients limited status compared to TN/TP. When  $(\text{NH}_3 - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N}) / \text{PO}_4^{3-} - \text{P} \leq 57$ , the growth of phytoplankton can be limited by N; while the  $57 \geq (\text{NH}_3 - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N}) / \text{PO}_4^{3-} - \text{P} \leq 71$ , the growth of phytoplankton is not limited by either N or P; while  $(\text{NH}_3 - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N}) / \text{PO}_4^{3-} - \text{P} \leq 71$ , the growth of phytoplankton can be limited by P.

Wu Xuefeng (Environment Engineering)

Supervised by Professor Li Xiaoping

**KEY WORDS:** Eutrophication; Nutrient Enrichment Bioassay; Nutrient Limitation; Phytoplankton; Dianshan Lake

## 目 录

摘要.....	I
ABSTRACT.....	V
第一章 绪论.....	1
1.1 湖泊富营养化.....	1
1.2 国内外藻类增长营养物质限制研究动态.....	3
1.3 湖泊藻类增长营养物质限制研究方法.....	5
1.4 本课题研究的内容与意义.....	7
第二章 淀山湖营养物质水平调查.....	9
2.1 前言.....	9
2.2 淀山湖的概况.....	9
2.3 淀山湖历年各营养指标和藻类水华的分析（1986年-2007年）.....	11
2.4 本章小结.....	17
第三章 实验室藻类增长生物学评价试验.....	19
3.1 试验目的.....	19
3.2 研究方法.....	19
3.3 结果与讨论.....	22
3.4 本章小结.....	34
第四章 现场藻类增长生物学评价试验.....	36
4.1 研究方法.....	36
4.2 实验步骤.....	37
4.3 注意事项.....	38
4.4 结果与讨论.....	38
4.5 本章小结.....	55
第五章 营养盐和浮游植物营养物质限制的关系.....	57
5.1 实验目的.....	57
5.2 材料与方法.....	57
5.3 淀山湖各营养指标的分析（2008-2009年）.....	57
5.4 营养物质限制与 TN/TP 的关系.....	60

5.5 营养物限制与（氨氮+硝氮）/磷酸盐的关系 .....	60
5.6 本章小结 .....	61
第六章 结论与展望 .....	63
6.1 结论 .....	63
6.2 展望 .....	64
参考文献 .....	65
硕士期间发表论文及专利情况 .....	70
致 谢 .....	71

# 第一章 绪论

## 1.1 湖泊富营养化

湖泊富营养化是指湖泊等水体接纳过量的氮、磷等营养物质，使藻类以及其它水生生物异常繁殖，水体的透明度和溶解氧变化，造成水质恶化，加速湖泊老化，从而使湖泊生态系统和水功能受到阻碍和破坏<sup>[1]</sup>。湖泊的富营养化程度与水中氮、磷等营养物质密切相关<sup>[2]</sup>，按照湖泊中的营养标准可以划分湖泊类型如表 1.1 所示。

表1.1 不同划分湖泊营养水平的标准(mg/L)

Table 1.1 Different standards for the classification of trophic status in lakes

	指标	极贫营养	中营养	富营养	超富营养
OECD(1982)	Chl-a	<0.002	0.0025-0.0008	>0.0008	
	TP	<0.001	0.01-0.035	0.035-0.1	>0.1
	Max	<2	2-5	5-20	>20
Reynolds(1980)	PB	<0.006	0.006-0.025	>0.025-0.007	>0.07
	TP				
Wetzel(1983)	PB	<1	1-5	5-10	>10
	TP	<0.005	0.005-0.003	>0.003	

在自然条件下，湖泊从天然环境中接纳氮、磷等物质，由贫营养化向富营养化过渡，进而演变为沼泽或陆地，但这一过程极为缓慢，需几千年甚至上万年时间。近年来，人为排放含营养物质的生活污水和工业废水加速水体富营养化进程，使得湖泊在短期内即可变为富营养化状态，造成湖泊生态系统的恶性循环，制约湖泊资源的可利用性，还影响到人类健康与社会经济的持续发展。湖泊富营养化的危害主要有：

(1) 影响供水水质，增加制水成本。处于富营养化的水体作为供水水源时，会给净水厂的正常运行带来一系列问题，如增加水处理费用，降低处理效果和产水率等。另外，遭受富营养化污染的水体在一定条件下由于厌氧作用而产生硫化氢、甲烷和氨气等有毒有害气体，在给水处理过程中会增加相当的技术难度；

(2) 影响湖泊水体的生态环境。处于富营养化污染的水体，正常的生态平衡被破坏，导致水生生物的稳定性和多样性降低。大型水生植物群落会随着富营养程度的加剧逐渐灭绝。同时，异常增殖的藻类所分泌的毒素，以及缺氧条件下硝酸盐类物质被还原为亚硝酸盐类物质，成为致癌物，不仅威胁水生生物的生存，而

且会直接或间接影响人类健康,造成可利用水资源进一步减少;

(3) 影响水体的感官性状。处于富营养化的水体中,蓝绿藻大量增殖,水体色度增加,透明度下降,并散发出腥臭味,污染居住环境,丧失水体美学价值;

(4) 影响渔业等生物资源利用,水体经济价值降低。虽然一定程度的富营养化可能导致鱼产量增加,但严重富营养化的水体会由于藻类释放的毒素和溶解氧的稀缺,减少鱼类种类和数量,并直接影响鱼类质量,从而导致经济效益大大降低。

水体富营养化主要原因是湖泊等水体接纳了过量的氮、磷等营养物质,氮、磷等营养物质的主要来源有以下几种方式:

(1) 农田化肥。为促进植物生长,提高农产品的产量,人们常施用较多的氮肥和磷肥,它们极易在降雨或灌溉时发生流失。近年来的研究表明,磷能以溶解或吸附于土壤上的颗粒态形式通过土壤微孔结构运动下渗至亚表面流中,然后进入江、河、湖泊或海湾,而氮的渗透能力较强,能够下渗到地下水中污染地下水<sup>[3]</sup>。氮和磷在被土壤吸附与解吸过程中,其中一部分溶解于水中,另一部分则继续保持吸附态,在运动中甚至会随土壤颗粒沉积下来,成为湖、河或海底沉积物的一部分。沉淀在底泥中的污染物在流量、水温及微生物结构发生变化的情况下,可以通过再悬浮、溶解的方式返回水中,构成水源的二次污染。据调查,太湖底泥每年释放的总氮和总磷约占总负荷的 25%-35%<sup>[4]</sup>;

(2) 牲畜粪便。圈养家禽、家畜产生大量富含营养物和细菌的排泄物,极易随地表径流、亚表面流流入江河、湖泊而污染水体。草原过度放牧,产生大量牲畜粪便滞留于草原上,造成营养物过剩,并破坏草原的植被覆盖;

(3) 污水灌溉。污水作为一种可靠的水源和廉价的肥料被用于灌溉农田,是污水农业利用的一种提倡方式,但由于污水含有营养物质较高或技术原因,容易造成土壤和地表水的污染;

(4) 城镇地表径流。城镇路面大部分是不透水地面,氮磷营养物主要随地表径流进入地表水中。城镇中的氮磷营养物主要来自人类的生活垃圾、生活污水以及某些工商业废水。美国环保局把城市地表径流列为导致全美河流和湖泊污染的第三大污染源<sup>[5]</sup>;

(5) 矿区地表径流。在磷矿区,由于人类活动,破坏了原来的土壤结构和植被面貌,使得土壤表层裸露,在降雨条件下,散落在矿区的矿渣、泥沙、磷酸盐等污染物将随地表径流进入湖泊、水库、江河、海湾而污染水体;

(6) 沉降。大气沉降不仅是悬浮颗粒物、有害气体的来源之一,也是氮的来源之一。燃料燃烧时,氮元素以氮氧化物的形式进入空气,随雨雪降落在土壤或水体表面,污染地表水源;

(7) 水体人工养殖。许多水体既是水源地,又是人工养殖的场所。随着养殖

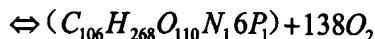
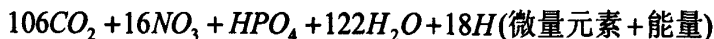
业的发展,人工投放的饵料以及鱼类的排泄物给水体带来了大量的氮磷。目前,国内湖库区人工养殖的饵料系数达 3.0-4.0,成为水体富营养化的又一重要来源。

## 1.2 国内外藻类增长营养物限制研究动态

一般认为影响藻类生长的因素主要有以下三方面因素:(1)氮、磷等营养物质;(2)水文因子,一般有流速、交换周期、停留时间、水温、浊度、透明度等;(3)气象因子;主要包括光照、气温、风向、风速、降雨、蒸发、降尘等;其中流速、光照、水温、气温、水量、水深、浊度、透明度等藻类生长有直接关系的因素,而降雨、风、蒸发、降尘、水量等与藻类生长有间接关系。本文主要讨论的是氮、磷等营养物质对藻类增长营养物限制。国内外常用于判断藻类增长营养限制的方法主要有 Sakamoto<sup>[6]</sup>提出氮磷比假说、Redfield 等提出的藻类细胞的 N:P 比值(7:1)用作评判标准以及藻类培养试验。

Sakamoto 提出氮磷比假说是通过分析氮磷与藻类叶绿素-*a* 的回归关系和散点分布。他认为在 TN/TP 大于 15-17 时磷是限制因子, TN/TP 小于 9-10 时氮是限制性因子。他依据是在 lgTN-lgChla 散点图中有 3 个数据点在回归直线下方远离,在分析 lgTP-lgChla 关系时,有两个 2 个点也在回归线方向偏离。

Redfield 等提出的 N:P 比值(7:1)评判标准是根据藻类细胞氮磷元素含量比确定的。藻类同其他所有的生物一样,需要 C、N、P、K、Ca、Mg、S 等多种营养元素,以及 Fe、B、Mn、Zn、Co、Cu、Mo、Si 等系列微量元素才能维持正常的生长,进行光合作用,为其它水生生物提供足够的氧气,达到能量代谢和物质循环的目的。也就是湖泊中藻类等利用太阳能和化学能,把简单的无机物合成复杂的有机物过程,一般可用下式表示:



根据这个典型藻类的分子可以说,临界的氮磷比按元素计应为 16:1,按重量计应为 7.2:1。从理论上讲,如果氮磷比小于该比值,氮将限制藻类的增长;如果氮磷比大于该比值,则可认为磷是藻类增长的限制因素。

但这两种判断方法都存在严重不足。Sakamoto 提出氮磷比假说是依据少数异常点的推论是不太科学的,这种方法缺乏严格的统计检验,不能证明氮磷比不同时藻类对氮和磷的依赖程度存在显著差异,他的结论只是对散点规律以偏概全的归纳<sup>[7]</sup>; Redfield 等提出的 N:P 比值(7:1)作评判标准依据藻类氮磷含量的比值确定,而实际上,这个比值只是多个藻类物种氮磷比的平均值,并不是通用藻类生长需求最适比。而且不同物种的最适比很不一致,淡水种的变异范围为



4.1-133.3<sup>[8-9]</sup>。而且在实际应用中,藻类生长所需的氮磷均为可溶性的氮磷,按照典型藻类分子式计算出来的比值并不实际。同时,许多藻类具有从大气中同化氮气的能力,这使得这些藻类在缺氮的条件下比其他藻类增长得更快;而还有些藻类能适应缺磷的环境,能在富磷时吸收和储存足够使用天数的磷。显然,不可能用特定的阈值来判别多物种群落的营养限制类型。

由于通过野外调查分析水质指标无法准确判断藻类增长营养无限制,因此现在在很多专家通过分析藻类在对氮、磷的吸收来判断。自然界中含磷化合物的溶解性和移动性比氮差,因此,磷对水体初级生产力的限制作用往往比氮更强。高学庆等在铜绿微囊藻营养动力学研究中也表明微囊藻的增长率和生物量在实验所设的磷浓度范围内随着磷浓度的升高而增加<sup>[10]</sup>;张红雨等在实验室模拟了藻对总氮和总磷在“水华”期间的吸收的实验,测定结果表明投加相同量的总氮和总磷,在相同的时间里,93%的总氮和1.5%总磷被藻吸收,而藻类数量分别增加34%和75%,这表明磷是藻类增殖的主要因素<sup>[11]</sup>;刘玉生等研究营养盐对滇池微囊藻生长的影响研究中指出,氮磷比值为5-10时,比生长速率变化较大,当氮磷比值为14.5时,比生长速率达到最大值,根据实验结果与限制因子的定义,总体上讲,滇池中磷是藻类生长的主要限制因子<sup>[12]</sup>;徐敏等在对衣藻“水华”的研究中,表明水体中的氮、磷含量是影响“水华”发生的主要因素,其中有效氮磷比为17时,就有可能导致“水华”中优势藻为衣藻的决定因素<sup>[13]</sup>;某些研究认为,可溶性氮和可溶性磷的重量比值29:1,可视为蓝藻主导藻类群落的临界值,低于此值时,蓝藻可能迅速增长<sup>[14]</sup>。

还有学者通过营养盐添加试验判断藻类增长营养物限制,这种方法在国内外很早就开始了,研究的对象主要的湖泊、水库、江河、河口及污水处理厂出水等,通过水体的藻类增长潜力的研究为水体污染防治和治理措施提供科学依据。主要采用的是采用的方法有黑白瓶法、藻类增长潜力测试(AGP test)和营养加富实验等。这些藻类增长营养物限制的研究表明国内大部分湖泊、水库、江河、河口等水体的藻类生长都是磷限制<sup>[15-24]</sup>,例如王霞、吕宪国、张学林等在松花湖富营养化现状及其影响因素分析中采用AGP test试验方法评价松花湖,结果表明松花湖处在中营养和轻度富营养状态,总磷是限制水体富营养化的主要因子之一;仅有少部分水体属于氮限制;有部分水体藻类增长营养物限制变化随着季节和丰枯水的变化而变化,例如安徽太平湖水库在枯水期,磷是藻类种群和密度的第一限制性营养元素,在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<sup>[16]</sup>;另一些水体藻类增长营养物限制变化随着的理位置的变化而变化,例如长江口近河口光限制区、过渡带光和磷酸盐限制区、远河口氮盐限制区<sup>[21]</sup>。此外,还有不是受营养物限制而是受藻类所需要的微量元素和温度所限制的水体<sup>[25-28]</sup>。

### 1.3 湖泊藻类增长营养物限制研究方法

#### 1.3.1 黑白瓶法

黑白瓶的基本原理是测定水中含氧量确定氧的净生产量,然后再利用光合作用方程计算出总初级生产量。实验步骤一般先从水体的一定深度采取含有自养生物的水样,然后将水样分装在容积为125~300ml的成对的培养瓶中。在每对培养瓶中包括一个透光可进行光合作用白瓶和一个不透光不能进行光合作用但有呼吸活动的黑瓶。黑瓶和白瓶同时被悬浮在水体中水样所在的深度,放置一定时间后取出水体,采用标准的化学滴定法或电子检测器测定黑瓶和白瓶中的含氧量。根据黑白瓶中含氧量的变化可以确定正常的呼吸耗氧量和净光合作用量及净光合作用率。同时利用黑瓶和白瓶的测氧资料就可以计算出总初级生产量。其基本假设条件是:植物呼吸作用在黑瓶中和白瓶中是一样的,这是对某些植物在短时间内是成立的,但是也有些植物在光照和黑暗条件下表现出不同的呼吸率。此外,此法在取样中异养生物的数量变化也会使呼吸消耗偏离正常值,而且取样中的水是静止的,但在实际情况下水是不断流动的,使运动中的各种营养物质不断到达和离开光合作用发生地点,而且,黑白瓶法不包括底栖生物群落的代谢,所以还不能全面估计整个水域生态系统的代谢过程<sup>[29-30]</sup>。

#### 1.3.2 藻类增长潜力测试 (AGP test)

AGP test 是 Algal Growth Potential test 简称,又称藻类增长潜力测试 (Algal Assay Procedure, 简称 AAP),是一种通过进行藻类生产潜力试验或藻类培养试验来考察富营养化问题的有效方法<sup>[31-35]</sup>。试验也是利用藻类的生物检验,在中国使用该方法研究湖泊富营养化时间较短。AGP test 实验可根据不同实验目的对测试水样进行不同的处理,也可以根据具体的需要采用不同的培养方式,试验不仅是以掌握富营养化的现状,而且也是预测未来的水质、控制水质为目的的一种调查方法。

为了解湖泊、水库、河流等水体的营养状态,找出浮游植物生长的限制因子,或预测当某种污水流入水体后对藻类生长可能产生的影响和当采取某种治理措施时可能会产生的效果,AGP 就是重要的一个指标,具有其独特的意义。

其原理是根据李比西“最低因子”定律,植物的生长与他所需要的、而存在量最低物质所限制<sup>[36-37]</sup>。这时这种物质就成为植物生长限制因子。同样,当这种物质含量增加会促进植物的生长或生长潜力时,则该种物质又成为生长的刺激因子或生长刺激物。在水体中藻类的生长服从于“最低因子律”。他的生长也经常受到各种物质的限制。一般认为,在限制藻类生长的营养元素中,主要是氮和磷两种元素。因此,当水体中的氮、磷营养物质输入突然大量增加时,他们就成为生

长刺激物, 促进藻类过量的增长, 这就是水体富营养化的主要机理。

AGP test 试验也是根据李比西“最低因子”定律设计的。试验前要把需要试验的水样经过处理, 稀释或添加不同量的氮磷营养物质, 再接种某种藻类, 在实验室控制条件下进行培养, 然后比较对照组以及各个不同实验组中藻类生长情况, 通过计算分析, 最后确定限制或刺激藻类生长营养物质, 在实验中主要考虑的是实验藻类生长参数的选择和测定, 测定结果的表示和统计处理, 以及测定结果的解释。

### 1.3.3 实验室藻类增长生物学评价

NEB 是 Nutrient Enrichment Bioassay, 又称藻类增长的生物学评价是一种有效检测浮游植物营养物质限制的主要研究方法<sup>[38-39]</sup>, 能找出水体中藻类增长限制性营养元素, 其结果为制定湖泊富营养化治理措施提供有效科学依据。它与 AGP test 有相似之处, 都是根据李比西“最低因子”定律设计的, 但是它与自然条件下藻类生长更加类似。与藻类增长潜力 (Algal Growth Potential) 测试的区别是不需对培养水样进行灭菌、过滤和添加藻种等处理, 而是直接利用水体中原始的生态群落进行培养。因此, 藻类增长的生物学评价比藻类增长潜力测试更切实际的反映含不同时期生物群落的水体在加富营养盐后对藻类增长的影响。

藻类同其他所有的生物一样, 需要 C、N、P、K、Ca、Mg、S 等多种营养元素, 以及其它微量元素才能维持正常的生长, 进行光合作用, 为其它水生生物提供足够的氧气, 达到能量代谢和物质循环的目的。所有营养元素中, 氮、磷是非常重要的, 如果氮、磷不足, 藻类的生长繁殖受到限制; 如果氮、磷过于丰富, 又会引起藻类非正常过量繁殖, 出现水体“富营养化”现象 (Eutrophication), 发生藻类水华 (Algal bloom), 导致水质下降, 污染加重, 水生态平衡失调。因此, 在评价湖泊水质和营养状况时, 水体中的营养成份除靠化学方法予以测定外, 还可通过藻类生长潜力的测试来甄别, 以便有效、准确地获知水体中哪些营养元素含量不足, 限制了藻类的生长; 哪些营养元素过剩, 导致藻类疯长, 引发富营养化。一般情况下藻类增长生物学评价实验设置有以下设置方案, 如表 1.2 所示。

表 1.2 藻类增长生物学评价试验设置

Tab.1.2 Test setting of NEB

序号	试验设置	甄别目的
1	原水, 不添加任何营养	在原水综合营养状况下藻类的最大生长值
2	原水, 煮沸, 不添加任何营养	原水中活性物质对藻类生长的影响
3	原水+N	N 元素对藻类生长的影响
4	原水+P	P 元素对藻类生长的影响
5	原水+N+P	N 和 P 对藻类生长的协同效应

藻类增长生物学评价的实验设置种类繁多,可根据不同的需要设置实验方案。对表 1.2 试验设置可能出现的结果依其甄别目的分析如下:

- 1) 处理 No.2 与 No.1 相比,藻类的最大生长值有可能小于 No.1 或等于 No.1,分别表明活性物质的破坏对藻类的生长有或没有影响;如果出现大于 No. 1 的现象,则说明杀死其它活性物质对藻类的生长有利;
- 2) 处理 No.3 与 No.1 相比,确定藻类生长限制性营养元素是否 N;
- 3) 处理 No.4 和 No.1 相比,确定藻类生长限制性营养元素是否 P;
- 4) 处理 No.5 与 No.1 相比,确定藻类生长限制性营养元素是否是 N 和 P。

### 1.3.4 现场藻类增长生物学评价试验

现场藻类增长生物学评价试验是采用 20L 可透光性 PE 软塑折叠箱在添加不同种类和不同浓度营养盐的条件下,悬浮在水面上进行培养。其原理和实验目的与实验室藻类增长生物学评价一样,但此法与藻类生长的现实条件更加相似,能更切实际的反应藻类生长营养物限制性营养元素。

## 1.4 本课题研究的内容与意义

### 1.4.1 本课题研究的内容

本文在对淀山湖现场考察的基础上确定采样点和藻类增长生物学评价试验点,是在分析了淀山湖历史(1986-2007 年)营养物水平的基础上系统的研究了淀山湖浮游植物增长营养物限制情况,并分析了浮游植物增长限制与营养盐(2008-2009 年)之间的关系。这将为制定湖泊污染防治和管理措施提供可靠而有效的科学依据。本课题研究的内容主要包括以下四部分:

(1) 调查淀山湖历史(1986 年-2008 年)营养水平变化状态,分析了 22 年间淀山湖总氮、氨氮、总磷、硝氮、化学需氧量、高锰酸盐指数、溶解氧和透明度等指标变化趋势和速度;

(2) 在 2008 年 10 月至 2009 年 4 月期间逐月进行人工气候室藻类增长生物学评价(NEB)试验,通过添加不同种类和不同浓度的营养盐确定淀山湖浮游植物增长限制性营养元素;

(3) 在 2009 年 4 月至 2009 年 9 月期间进行现场藻类增长生物学评价试验进一步判定淀山湖藻类增长限制性营养元素,以及通过两种藻类培养法的比较判断其可行性;

(4) 研究浮游植物增长限制性营养元素和营养盐氮磷比之间的关系,通过调查和分析淀山湖营叶绿素-a、总氮、氨氮、硝氮、总磷、磷酸盐等指标(2008 年 8 月-2009 年 7 月)确定各营养物和叶绿素-a 全年变化情况以及浮游植物增长限制

性营养元素和营养盐氮磷比之间的关系。

#### 1.4.2 本课题研究的意义

从地理位置上看,上海市内和周边地区都不缺水,但缺水和缺水资源是两个概念,现在上海缺乏的正是可供利用的水资源。上海的水资源绝大部分来自黄浦江的进潮水和太湖流域的过境水,是一个典型的水质型缺水城市。上海的人均淡水资源拥有量现在仅为 145 立方米,大大低于全国人均 2350 立方米(世界人均 8840 立方米)的水平,全国排名也是在 20 位以下。所以保障安全供水是上海市经济快速发展、人民生活安居乐业和社会稳定的基础。

湖泊富营养化是当今世界水体污染的难题,随着经济和社会的发展,人类活动的影响大大加快了我国湖泊的富营养化进程,由于过量营养物等污染物质的输入,湖泊水体水质恶化,藻类等浮游生物过度繁殖,严重威胁着湖泊生态系统健康和水体的使用功能。太湖饮用水源地的蓝藻水华为我们敲响了警钟。淀山湖是黄浦江上游水源保护区的重要组成部分,对上海市国民经济的发展和市民的饮用水安全发挥者举足轻重的作用。目前淀山湖水体的富营养化状况日益恶化,必须采取有效的监测手段和控制措施。水体中过高的营养物水平是导致淀山湖浮游植物增长和藻类水华的的直接原因,因此确定淀山湖水体营养物与藻类增长之间的关系,是控制淀山湖富营养化的关键之一。

## 第二章 淀山湖营养物水平调查

### 2.1 前言

掌握湖泊营养物水平和各营养物指标的历史变化规律对研究浮游植物增长营养物限制是很有必要的。本章以四号航标和网箱养鱼为站点分析淀山湖历史营养物水平(1986年-2007年),历史营养物水平调查数据来源于1986年-2007年的上海环境质量报告书,分析的指标包括总氮、氨氮、总磷、硝氮、化学需氧量、高锰酸盐指数、溶解氧和透明度等。

### 2.2 淀山湖的概况

淀山湖又名薛淀湖,属太湖流域,是上海最大的淡水湖泊,位江苏、浙江和上海两省一市交界处,31°04'~31°12'N,120°54'~121°01'E,其地理位置图和采样点设置如图2.1所示。淀山湖属于受潮汐影响的吞吐性浅水湖泊,水位和水量不仅受上游来水影响,而且与黄浦江潮位的变化有关,不同水位时淀山湖的水域面积和库容如表2.1所示。湖泊面积为62km<sup>2</sup>,南北长18km,东西宽9km,平均水深2.1m,最大水深3.6m,淀湖水流动缓慢,流速仅为0.03m/s,换水周期仅29d左右,占黄浦江水量的17%左右。湖泊水体收支基本平衡,进水量16.4亿立方米,出水量16亿立方米,急水港和大朱厓是淀山湖的主要进水口,分别占总进水量的35%和33%,拦路港是淀山湖的主要出水口,占总出水量的71%<sup>[40-42]</sup>。水体更新较快,这对防止水体污染是有利的。然而,由于湖泊水深浅,底泥薄,湖底水生生物生长不良,生态系统极其脆弱,调节能力较差。只要某一条件变动过大过速,如水流受阻(潮汐顶托、关闸蓄水等),有机污染物激增,水草、底栖动物(如蚬、螺、蚌等)的过量捕捞以及繁殖生境的破坏等,都可能导致生态环境的恶化。淀山湖还具有航运、养殖、灌溉、旅游、调蓄洪涝等多种功能。

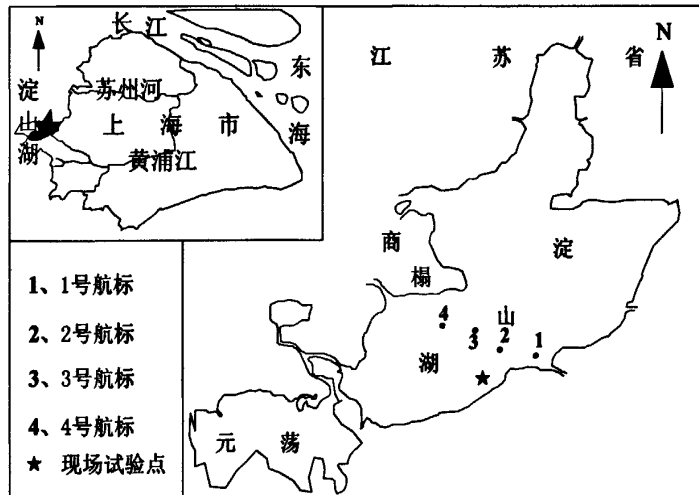


图 2.1 淀山湖地理区位图

Fig.2.1 Situation of Lake Dianshan

淀山湖流域属亚热带季风气候，四季分明，日光充足，年日照时数2071.1h；雨量充沛，年均降水量1037.7mm，全年无霜期达235d；气候温和，年均气温15.5℃，最热月（7月）平均气温27.9℃，最冷月（1月）平均气温2.9℃。气象条件对藻类生长有利。

表2.1 不同水位时淀山湖的水域面积和库容

Tab.2.1 Water height, surface and reservoir capacity of Lake Dianshan

水深(m)	0.12	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
湖面面积 (m <sup>2</sup> )	0	25	56	61.6	63.8	63.8	63.8	63.8	63.8
湖体体积 (×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	0	0.04	0.4	0.52	0.84	1.15	1.48	1.79	2.11

湖泊富营养化会造成藻类和其他水生生物大量繁殖，水体透明度和溶解氧降低，水体水质恶化，最终导致水体的生态系统和水体功能都到损害。这些营养物质主要来源于工业废水和生活生活污水的排入和养殖业投放的过量饵料等自身污染。淀山湖水域也同样存在富营养化的问题，为了保护淀山湖水域，上海市政府在1986年制定的《上海市黄浦江上游水源保护条例》中规定“禁止在网箱养鱼区内使用人粪、牛粪等污染水体的肥料”，并“禁止在淀山湖、元荡湖内新建水产养殖场”。在2002年初提出的第二轮三年环保行动计划中，环保部门也明确提出2005年之内要取消淀山湖内的所有网箱养殖。

目前，对淀山湖富营养化控制开展的相关研究包括：富营养化状况和水环境质量评价<sup>[43-44]</sup>，其研究表明在淀山湖人工栽植水草进行脱氮除磷、放养滤食性鱼类抑制藻类大量繁殖是改善淀山湖水质的有效途径；湖泊富营养化演变趋势以及水环境管理对策<sup>[45-48]</sup>；光谱遥感水质监测与反演（溶解氧、透明度和叶绿素-a）

[49-50]; 藻毒素的分布状况及其影响因素(定性)[51-55], 其研究表明整个淀山湖类毒素-A的平均含量为0.0071g/L, 而微囊藻毒素-LR的平均含量为0.0901g/L, 是类毒素-A的13倍, 淀山湖存在较严重的微囊藻毒素-LR污染和轻度的类毒素-A污染; 淀湖水生态系统群落结构和物质循环[56-60], 其研究发现沉水植物上着生藻类群落由37属39种藻类组成, 5种沉水植物上着生藻类群落密度和生物量, 均以黑藻最高, 金鱼藻次之, 菹草居第三, 人工基质介于金鱼藻和菹草之间, 并于冬季达全年最高峰, 夏季为全年最低。着生藻类生长与沉水植物生长间呈负相关, 并限制了沉水植物的分布。这些研究虽然涉及了富营养化相关指标, 但都没有研究营养物的输入和生态系统的响应关系, 更没有涉及浮游植物增长营养物限制方面的研究。

淀湖水的水质不仅与周边环境有关, 而且与太湖来水水质密切相关, 太湖流域及周边地区乡镇企业的迅猛发展和旅游业的兴起, 导致大量的生活污水和工业废水排入湖中, 当大量生活污水或含氮工业废水排入水体时, 可使水中有机氮和各种无机氮化合物含量增加, 从而影响了淀山湖上游来水的水质情况。目前淀湖水体的富营养化状况不容乐观。近20多年以来, N、P等营养物质在淀山湖湖体内大量聚积, 水体中叶绿素-a含量上升, 透明度大幅下降。淀湖水水质严重恶化。就营养物指标而言, 急水港、湖心北区、湖心南区、四号航标、网箱渔场、赵田湖中心和淀峰等主要点位的TN和TP长期以来劣于地表水III类水质标准, 达不到水源保护地的水质要求[61]。近10年来, 淀山湖湖体内的藻类群落迅速向以绿藻-蓝藻为主的群落结构演替, 优势种的比例逐年增加, 种类数却呈下降趋势, 生物多样性减少[62]。赵爱萍等人的上海淀山湖的浮游植物[63]发现浮游植物8门68属160种(包括变种)。其中绿藻门最多, 有36属99种, 占全部种类的61.88%; 其次为硅藻门, 有18属31种; 裸藻门有3属15种, 蓝藻门有4属7种; 隐藻门有2属3种; 甲藻门有2属2种; 金藻门有2属2种; 黄藻门有2属1种。1985年9月, 淀山湖首次暴发大面积“水华”, 历时达15天之久, 上海境内湖区面积(约47.5 km<sup>2</sup>)90%水面出现绿色被膜[64], 以后每年均有不同程度的“水华”现象出现[65]。多年的遥感影像数据表明, 藻类水华的频率在1999年以后大幅增加[66]。程曦等在淀山湖氮磷营养物20年变化及其藻类增长响应[61]研究表明淀山湖已经处于重度富营养化状态, 具备了暴发大规模、大面积蓝藻水华的条件。

## 2.3 淀山湖历年各营养指标和藻类水华的分析(1986年-2007年)

### 2.3.1 淀山湖各水质指标时空变化

美国国家营养物评估会议(U.S.EPA,1996)认为, 在众多反映水体富营养化



状态的参数中,总氮(TN)、总磷(TP)、叶绿素-*a*、透明度和溶解氧(DO)是最能体现湖泊水体营养水平的指示参数,并且具有早期预警作用。本章的分析重点也集中在总氮(TN)、总磷(TP)、叶绿素-*a*、透明度和溶解氧(DO)这五项指标,生物学数据还包括浮游植物的生物优势种比例。本节主要研究站点是淀山湖网箱养鱼和四号航标<sup>[67-78]</sup>,其中四号航标为上海管辖范围湖区的中心位置。主要分析22年间(1986-2007年)淀山湖富营养化指标总氮(TN)、总磷(TP)、叶绿素-*a*、化学需氧量(COD)、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、透明度和溶解氧(DO)随时间的变化情况。TN、TP、COD、COD<sub>Mn</sub>、透明度、溶解氧随年份变化情况分别如图2.2-2.5所示,及各指标在1986-1999年和1999-2007年间变化速率和均值如表2.2所示。

从图中可以看出淀山湖TN、TP、COD、COD<sub>Mn</sub>等指标的含量在这1986-2007年间都呈上升趋势,淀山湖全湖的营养物质在1999年都发生了显著的变化,TP的含量从1990年的0.1mg/L上升到的2007年的0.2mg/L,已经增加了一倍,且1999-2007年的增长速度为1986-1999年间的3倍多;TN的含量从2mg/L上升到5mg/L,这22年间TN含量增加了2.5倍,1999-2007年的增长速率为1986-1999年的2倍。直接导致的淀山湖水体的透明度值和溶解氧含量迅速下降,透明度在1999-2002年有60cm迅速降为40cm,1999-2007年降低速度为1986-1999年5倍。因此,从1990年到2007年22年间营养物质在湖体内大量聚积,水体中各项水质指标含量急剧上升,透明度大幅下降。经过22年淀山湖水质从I类水降至劣V类水,已经远远达不到水源保护地的水质要求。

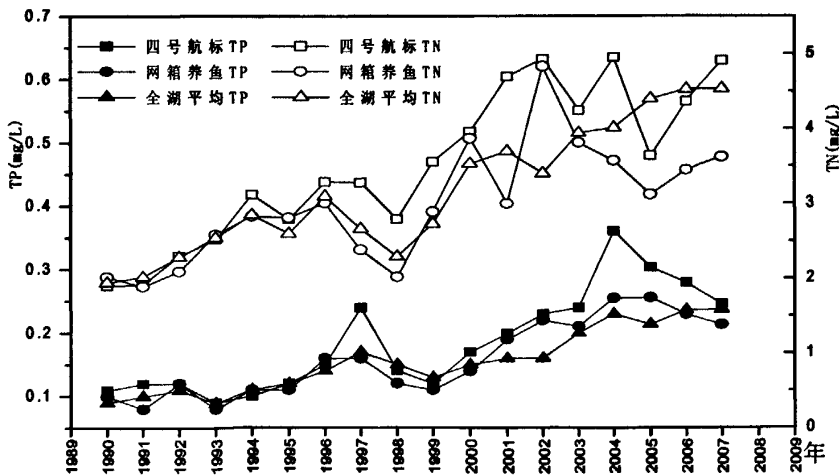


图 2.2 淀山湖总氮和总磷时间序列分析

Fig.2.2 Time series analysis of TN and TP of Lake Dianshan

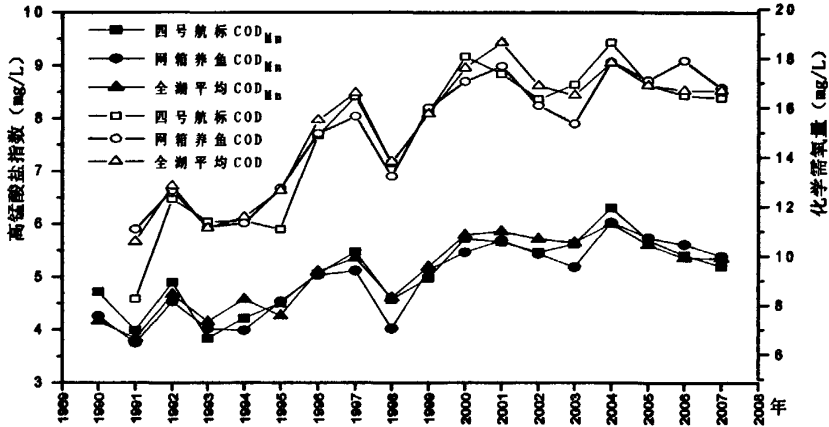


图 2.3 淀山湖化学需氧量和高锰酸盐指数时间序列分析

Fig.2.3 Time series analysis of COD and COD<sub>Ma</sub> of Lake Dianshan

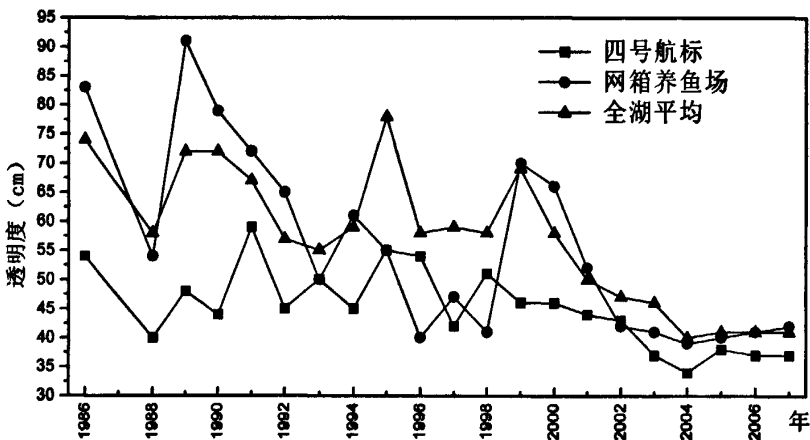


图 2.4 淀山湖透明度时间序列分析

Fig.2.4 Time series analysis of transparency of Lake Dianshan

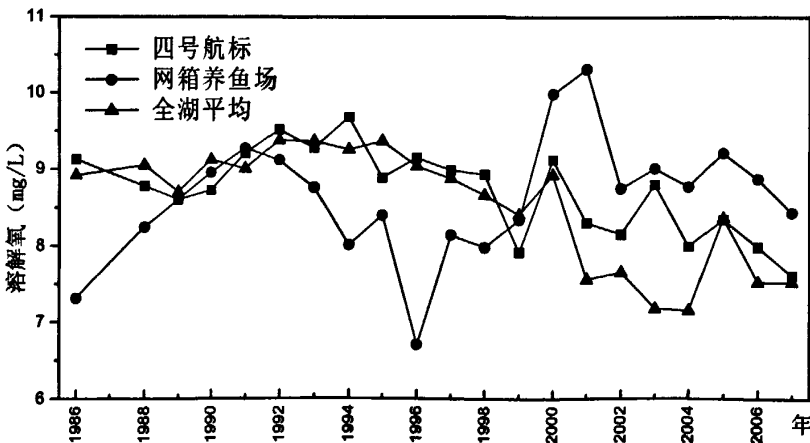


图 2.5 淀山湖溶解氧时间序列分析

Fig.2.5 Time series analysis of DO of Lake Dianshan

表 2.2 不同阶段淀山湖营养状态指标变化速率和均值比较\*

Tab.2.2 Comparison of parameter changing rates and averages of Lake Dianshan between different trophic states

指标 变量	变化速率 (斜率)				均值			
	1986-2007	1986-1999	1999-2007	比值	1986-2007	1986-1999	1999-2007	均差
TP	0.0072	0.0045	0.0145	3.2222	0.1491	0.1188	0.1909	0.0721
TN	0.155	0.1225	0.2035	1.6612	2.9338	2.2746	3.8633	1.5887
透明度	-1.5221	-0.5714	-3.1333	5.4835	57	64.2308	48.1111	-16.1197
DO	-0.0996	-0.0215	-0.1115	5.1860	8.5252	9.0123	7.8089	-1.2034
COD*	0.4158	0.6413	-0.0218	逆转	15.1741	17.0444	13.3644	-3.68

\*COD 为 1991-2007 年, 为 1991-1999 年

### 2.3.2 淀山湖藻类生长与群落变化

藻类作为生物学监测指标在水环境评价中得到了广泛的应用<sup>[79]</sup>, 国外对藻类在水质监测中的应用较早, 早在 1909 年, 德国学者 Kolkwitz 和 Marsson<sup>[80]</sup>就提出了利用藻类评价污染水质的方法, 并针对水体污染程度的不同进行了分类。藻类存在于自然界的各种水体之中, 是江河湖海中最基本的初级生产者, 由于个体小、生活周期短、繁殖速度快, 易受环境中因素的影响而在短时间内发生变化。在水环境中, 藻类和所处环境相统一, 因此藻类的种类组成、种群动态、生理生化等都可反映出所处环境的改变<sup>[81]</sup>, 而对理化条件而言, 藻类现存量、种类组成和多样性能更好地反映出水体的营养水平。利用藻类监测水质的主要方法有现存量法、指示生物法、生物指数法、多样性指数法。

淀山湖从 1959 年就开始对浮游植物进行调查, 在 1959-1992 年期间, 淀山湖曾有过 4 次浮游植物调查。1991-1992 年的调查表明, 淀山湖的浮游植物种类丰富, 共鉴定 8 门, 63 属, 98 种, 以绿藻和硅藻为主, 但绿藻的比例有随藻类的种类数下降而上升的趋势<sup>[82]</sup>。1994 年以后淀山湖对浮游植物调查有的连续记录, 在 1994 年浮游植物调查中共鉴定 6 门, 32 属, 87 种, 主要是以硅藻和隐藻为主。图 2.6 给出了 1994-2007 年 13 年间淀山湖浮游植物种类数的变化。自 1994 年以来, 绿藻门和蓝藻门的种类数比例大幅增加, 绿藻门增加的尤为明显, 从 1994 年的 2.34%增加到 2004 年的 40.9%, 再到 2007 年的 43%; 而硅藻门的比例持续降低, 从 1994 年的 68.6%下降到 2004 年的 30.3%, 再到 2007 年的 17%。2000 年左右绿藻门和蓝藻门首次突破了 50%, 并在随后的几年中仍呈上升趋势。1991-2007 年的十多年间, 淀山湖浮游植物优势种类由中营养型藻类逐步向富营养型藻类过渡; 绿藻和蓝藻优势种的比例逐年增加, 浮游植物种类数却呈下降趋势, 生物多样性锐减。

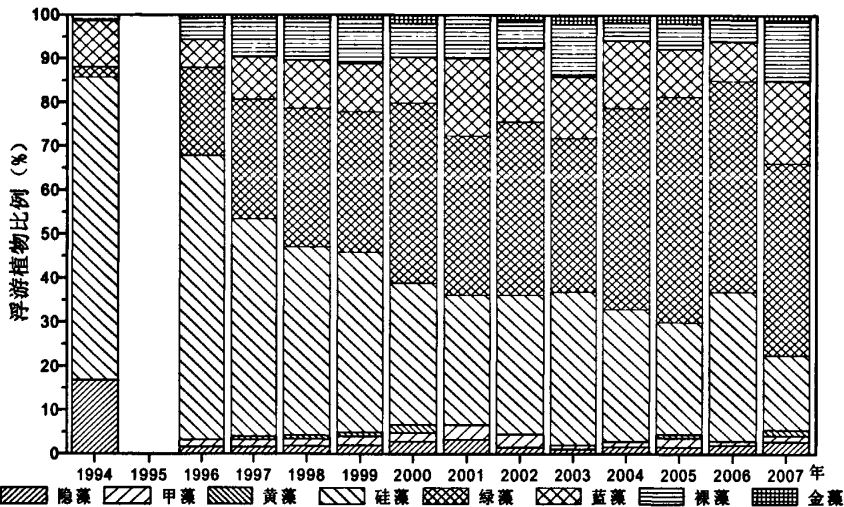


图 2.6 淀山湖浮游植物种类比例的变化(1994-2007 年)

Fig.2.6 Ratio change of phytoplankton species in Lake Diashan(1994-2007)

### 2.3.3 淀山湖藻类水华

一般认为水华的发生首先是水体中的营养物质(如氮、磷)等过量增加,致使水体达到富营养化状态,这是发生水华现象的最重要的物质基础<sup>[83-84]</sup>。不同的国家和不同的学者对于水体中的营养物质达到富营养化水平的量也提出了不同的标准<sup>[85-88]</sup>。湖泊中的水体富营养化造成的藻类水华暴发可以带来三类问题:1)水质恶化,水体表面的藻类难以清除,水体发出恶臭味;2)削弱水体的使用功能,不能用于娱乐和运动,同时大量的藻类堆积可以造成水体缺氧以致水体中的鱼类大量死亡;3)毒素-蓝藻产生的毒素对人类的生产和生活都有巨大的影响。

1985年9月,淀山湖首次暴发大面积“水华”,历时达15天之久,上海境内湖区面积(约47.5km<sup>2</sup>)90%水面出现绿色被膜<sup>[89]</sup>。以后每年均有不同程度的“水华”现象出现。笔者2008年8月27日和2009年9月9日赴淀山湖采样拍摄的藻类“水华”照片如图2.9和2.10所示。谢欢<sup>[90]</sup>等人在基于遥感的水质监测与时空分析中得反射水体各组分的散射、吸收特征,702nm与675nm波段反射率比值是估测叶绿素含量的较佳波段,根据其论文中1986-2005年的遥感影像分析藻类水华月份分布如图2.7所示。因此,淀山湖藻类水华在10-1月份的秋冬季发生水华较频繁;6-9月份次之;3-5月份很少或几乎不发生水华。1991-2008年藻类水华平率分析如图2.8所示,分析表明,淀山湖水体的营养化程度从2000-2003年急剧增大,发生藻类水华的频率为1999年前的2-3倍,2004年有所好转,且发生藻类水华的次數与淀山湖叶绿素-a的增长趋势一致。

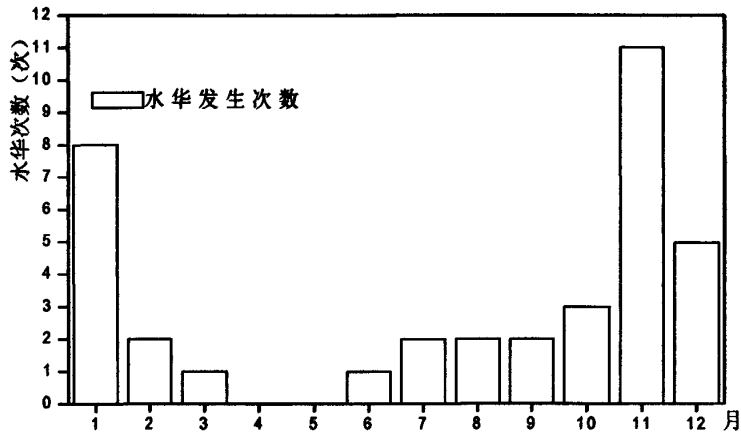


图 2.7 藻类水华月变化图

Fig.2.7 Monthly changes in algal bloom

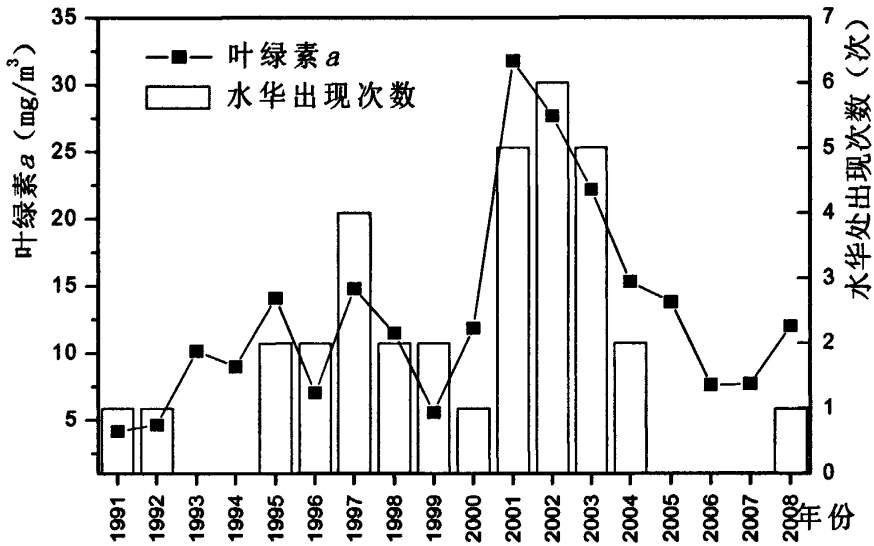


图 2.8 淀山湖水体水华出现频率分析(1991-2008 年)

Fig.2.8 Frequency of spectral character of algae in Lake Dianshan

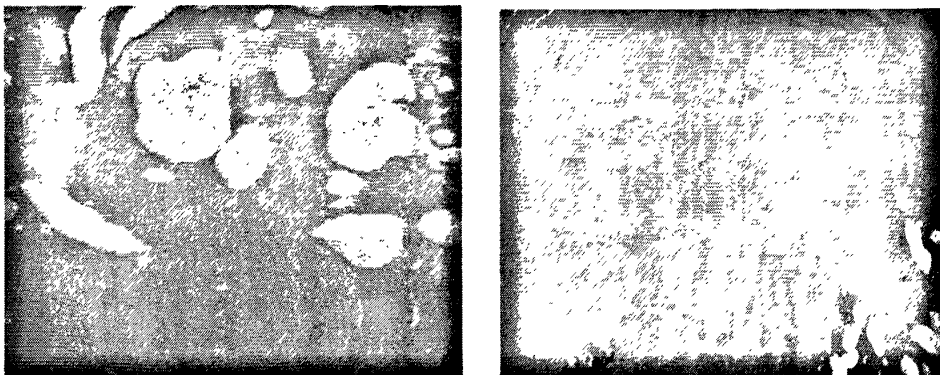


图 2.9 淀山湖藻类“水华”(2009 年 9 月 9 日)

Fig.2.9 Dianshan lake aglal blooms

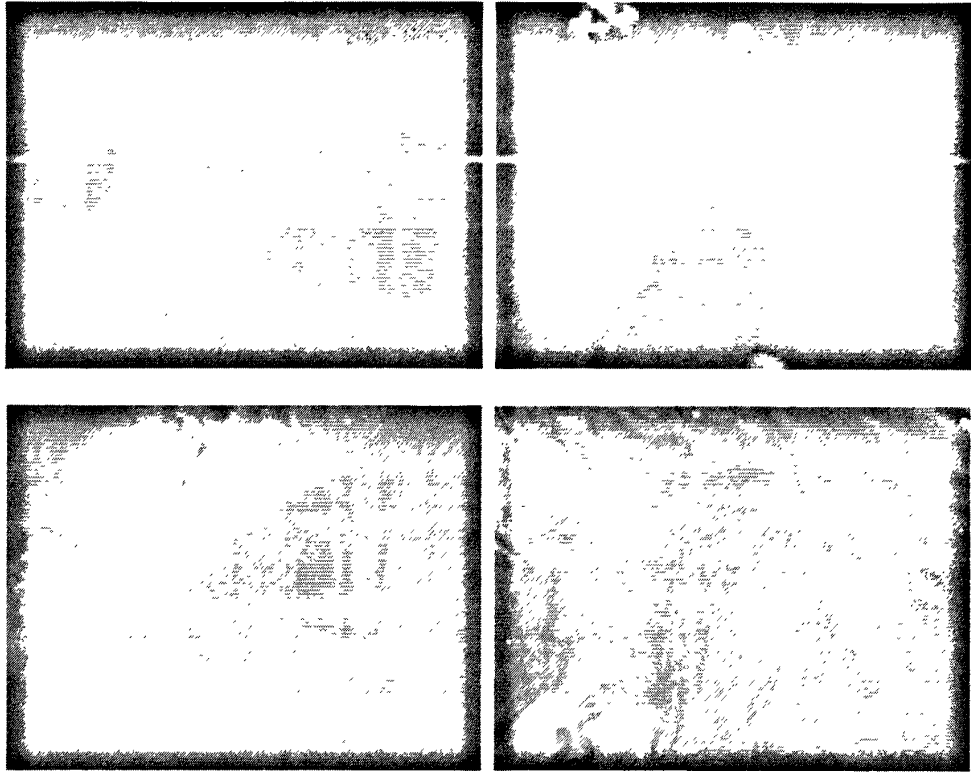


图 2.10 淀山湖藻类“水华”（2008年8月27日）

Fig.2.10 Dianshan lake aglal blooms

## 2.4 本章小结

湖泊富营养化是水体在一个相当长时间内过量积累过量营养物质而形成的，对湖泊的湖泊学数据进行长期的观测、积累和分析，是研究湖泊富营养化过程的重要方法，也是湖泊生态恢复、修复及湖泊管理的主要依据，本章主要是分析淀山湖历史营养物变化规律及其富营养化现状，为后文研究浮游植物增长营养物限制情况做准备。

通过对淀山湖1986-2007年22年间的生态、水质和水文数据分析表明，淀山湖生态系统同发生了重大变化，富营养化水平也从贫营养化转变成重度富营养化状态。1986-2007年22年间淀山湖中TN、TP的含量持续增加，且1999-2007年的增长速度远大于1986-1999年间；COD和COD<sub>Mn</sub>的值也迅速增大；直接导致的溶解氧下降和透明度降低。淀山湖浮游植物优势种类由中营养型藻类逐步向富营养型藻类转变，硅藻在浮游植物中比例逐年减少，而绿藻和蓝藻优势种的比例逐年增加，造成浮游植物种类数呈下降趋势，生物多样性锐减。

淀山湖藻类水华在10-1月份的秋冬季发生水华较频繁，6-9月份次之；从年份上看2000-2003年生藻类水华的频率，2004年以来又有所好转，且发生藻类水华的

次数与淀山湖叶绿素-*a*的增长趋势一致。

因此，淀山湖已处于高营养物水平，低浮游植物种群和藻类水华频繁富营养化状态。

### 第三章 实验室藻类增长生物学评价试验

#### 3.1 试验目的

在光照、温度、湿度等外界条件相同的情况下，改变营养盐的种类和浓度，进行室内浮游植物培养实验，在实验室条件下探讨浮游植物在不同种类营养盐及不同浓度营养盐作用下对浮游植物生长、繁殖的变化的规律，通过对试验数据的整理和分析，研究营养盐对浮游植物生长的影响，找出浮游植物生长的限制性营养元素。

#### 3.2 研究方法

##### 3.2.1 采样点设置

在2008年10月到2009年3月期间在淀山湖四号航标（淀山湖上海管辖湖区的湖心位置）处逐月进行NEB试验共5次，试验流程如图3.1所示。

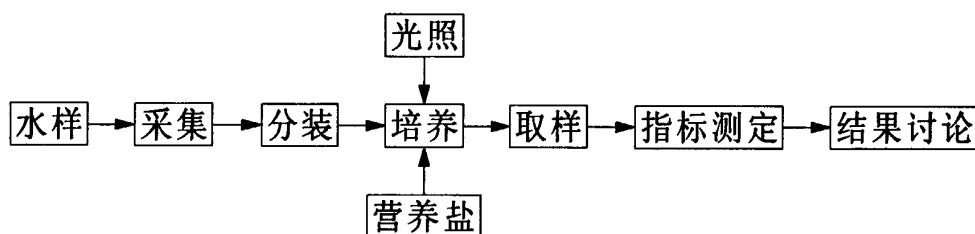


图 3.1 试验流程图

Fig3.1 The test flowchat

##### 3.2.2 培养条件和营养盐添加方案

试验条件：日光灯光源，光照强度 4000 LX；光暗时间比 14：10；温度 25℃；供试样品在人工气候室中培养一个生长周期。

营养盐添加方案：每次试验前测定水样的总氮(TN)和总磷 (TP)，作为水样的营养物水平，以营养物水平的 0.5、1.0、1.5 和 2.0 倍作为添加营养盐方案，添加方式为分六次添加，每个营养盐水平做三个平行样。所有实验组以不添加任何营养盐的空白 (Control) 为对照，进行培养、观察、测量、记录及统计分析。试验选用磷酸二氢钾 ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ )、硝酸钾 ( $\text{KNO}_3$ ) 和氯化铵 ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) 作为添加营养盐。每次试验营养盐的添加方式如表 3.1 所示。



表 3.1 NEB 试验营养盐添加方案\*

Tab.3.1 The nutrient adding method of NEB test

试验 时间	营养物 (mg/L)		PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	NH <sub>3</sub> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P+ NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N
	TN	TP				
2008-10	3.0	0.1	1.0 2.0 4.0	1.0 2.0 4.0	1.0 2.0 4.0	1.0 2.0 4.0
2008-11	3.0	0.15	0.5、1.0、1.5、2.0	0.5、1.0、1.5、2.0	0.5、1.0、1.5、2.0 2.0	0.5、1.0、1.5、2.0
2008-12	3.0	0.15	0.5、1.0、1.5、2.0	0.5、1.0、1.5、2.0	—	—
2009-02	5.5	0.25	0.5、1.0、1.5、2.0	0.5、1.0、1.5、2.0	0.5、1.0、1.5、2.0 2.0	0.5、1.0、1.5、2.0
2009-03	5.5	0.25	0.5、1.0、1.5、2.0	0.5、1.0、1.5、2.0	0.5、1.0、1.5、2.0 2.0	0.5、1.0、1.5、2.0
2009-04	4.5	0.18	0.5、1.0、1.5、2.0	0.5、1.0、1.5、2.0	0.5、1.0、1.5、2.0 2.0	0.5、1.0、1.5、2.0

\* 表中的数字为营养物水平的倍数。

### 3.2.3 试验仪器和试剂

人工气候室一间、1L 锥形瓶若干，实验室多功能荧光仪一台、离心机一台、抽滤装置一套、实验室冰箱一台；

90%丙酮：900mL 丙酮中加入 100mL 蒸馏水；

0.1mol/L HCl；

营养盐：硝酸钾 (KNO<sub>3</sub>)、氯化铵 (NH<sub>4</sub>Cl)、磷酸二氢钾 (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)。

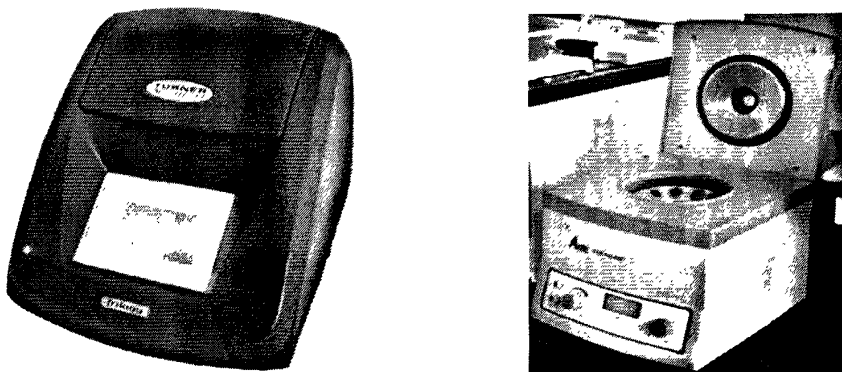


图 3.2 实验室多功能荧光仪和离心机

Fig.3.2 Trilogy Laboratory Fluorometer and Centrifuge

### 3.2.4 样品的采集和测量方法

每次试验前从淀山湖四号航标处采集水样 80L，为保存水样中原始的生态群落，水样不经任何处理直接分装到 1L 锥形瓶中在实验条件下培养，不添加藻种，每个营养水平平行三个样；每个锥形瓶口用铝箔包好，避免之间相互干扰；每天摇匀水样一次以防止藻类生长附着在容器壁和底部而无法取样从而影响实验结果。取样前摇匀，从第二天开始每天取 100mL 水样并在小于 5kp 压力下用玻璃纤

维滤膜过滤浓缩水样，在暗处 4℃ 下用 90% 的丙酮萃取 24h，萃取过程中每隔 8 小时摇一次，以利于叶绿素-a 的萃取；离心前萃取液从冰箱中提前取出在黑暗处回升到室温并充分摇匀，然后在 4000r/min 下离心 10mins 用实验室多功能荧光仪测量叶绿素-a、脱镁叶绿素及其对应的荧光值<sup>[91]</sup>。



图 3.3 室内 NEB 试验图片

Fig.3.3 Pictures of indoor NEB test

### 3.2.5 数据处理和分析方法

数据处理中为了能够消除不同时期原湖水带来的差异，采用相对比较系数法来表达添加营养物对藻类增长的影响<sup>[92-93]</sup>，即：

$$\text{比较系数}_{\text{某营养条件}} = \left( \frac{\text{叶绿素 a}_{\text{某营养条件}}}{\text{叶绿素 a}_{\text{control}}} - 1 \right) \times 100\%$$

进一步应用多因素多水平方差分析法及 Dunnett's test 事后两两比较法<sup>[94-95]</sup>分析 NEB 试验的叶绿素-a (置信水平  $p < 0.05$ )，得出营养盐添加效果及交互作用的显著性和营养添加组与空白组之间的显著性。

藻类比生长速率的计算方法公式见(3-1)：

$$\bar{\mu} = \frac{\ln(x_2 / x_1)}{t_2 - t_1} \quad (3-1)$$

式中： $\mu$ —比增长速率 ( $d^{-1}$ )； $x_1$ ：时间  $t_1$  时刻叶绿素-a 含量；  
 $t_2 - t_1$ ：时间间隔的天数； $x_2$ ：时间  $t_2$  时刻叶绿素-a 含量。

以试验组藻类生长周期叶绿素-a 最大量作为该组藻类的最大现存量， $t_2 - t_1 = 1$  天，求出各营养水平平均最大增长速率 ( $\bar{\mu}_{max}$ ) 和平均最大现存量 ( $\bar{x}_{max}$ )。

### 3.3 结果与讨论

#### 3.3.1 实验室 NEB 试验相对机比较系数分析

2008年10月份试验不同营养条件与原湖水(Control)条件下叶绿素-a 的比较结果如图3.4所示, 其中原湖水(Control)的试验结果均表达为0%。各试验通过三因素析因设计方差分析和各营养盐添加水平与Control进行Dunnetts's test事后两两比较结果如表3.2和表3.3所示。

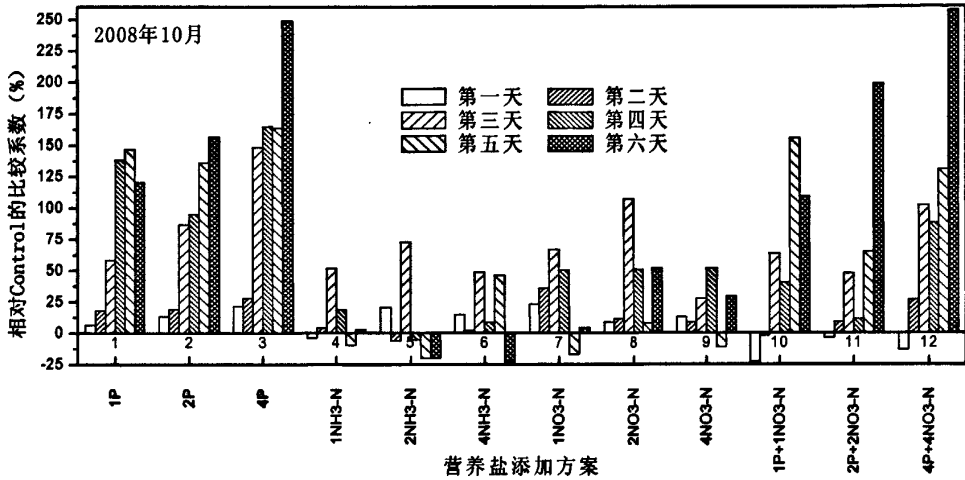


图3.4 NEB实验分析 (10月)

Fig.3.4 Analysis of NEB test (October)

从图3.4中可以看出添加 $PO_4^{3-}$ -P后相对比较系数大部分在100%到175%之间, 最大相对比较系数达250%, 说明添加 $PO_4^{3-}$ -P后浮游植物生物量远大于Control, 表3.2表明添加 $PO_4^{3-}$ -P对浮游植物生长的主效应显著 (Sig.值分别为0.000), 表4进一步用每个 $PO_4^{3-}$ -P添加水平与Control进行Dunnetts's test事后两两比较分析得出大部分添加 $PO_4^{3-}$ -P水平与Control之间在0.05的水平上差异显著, 说明在10月份磷对浮游植物的生长有促进作用; 添加 $NH_3$ -N后生物量相对比较系数介于-25%到75%之间, 表3.2表明 $NH_3$ -N对浮游植物生长的主效应不显著 (Sig.值分别为0.118), 事后两两比较分析结果也显示添加 $NH_3$ -N与Control之间在0.05的水平上没有显著性差异, 说明对浮游植物的生长影响不大, 有时还出现抑制作用; 添加 $NO_3^-$ -N后相对比较系数大部分在50%以下, 且添加 $NO_3^-$ -N对浮游植物生长的主效应不显著 (Sig.值分别为0.469), 两两比较在0.05的水平上没有显著性差异, 说明添加 $NO_3^-$ -N对浮游植物的生长影响不大; 添加 $O_4^{3-}$ -P+ $NO_3^-$ -N后相对比较系数与单独添加 $PO_4^{3-}$ -P相当, 表3.2显示不存在交互作用, 对浮游植物的生长可能仅是 $PO_4^{3-}$ -P的作用。

表 3.2 NEB 试验结果方差分析 (10 月)

Tab.3.2 Analysis of Variance for the NEB Test (October)

分析项目	方差 SS	自由度 df	均方 MS	统计量 F	P 值 Sig
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	2274.377	3	758.126	27.889	0.000
NH <sub>3</sub> -N	175.423	3	58.474	2.151	0.118
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	71.004	3	23.668	0.871	0.469
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P*NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	76.224	3	25.408	0.935	0.438
Error	706.766	26	27.183	/	/
Total	46069.405	39	/	/	/
Corrected Total	3946.849	38	/	/	/

表 3.3 NEB 试验结果 Dunnetts' s test 分析 (10 月) \*

Tab.3.3 Analysis of Dunnetts' s test for the NEB Test (October)

分析项目	平均差	Sig.
1 PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	15.732	0.016
2 PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	15.227	0.021
4 PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	25.369	0.000
4PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P+4NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	17.704	0.006

\* 表中仅列出试验中与control有显著差别的项目

2008年11月份试验不同营养条件与原湖水(Control)条件下叶绿素-a的比较结果如图3.5所示。各试验通过三因素析因设计方差分析和各营养盐添加水平与Control进行Dunnetts's test事后两两比较结果如表3.4和表3.5所示。

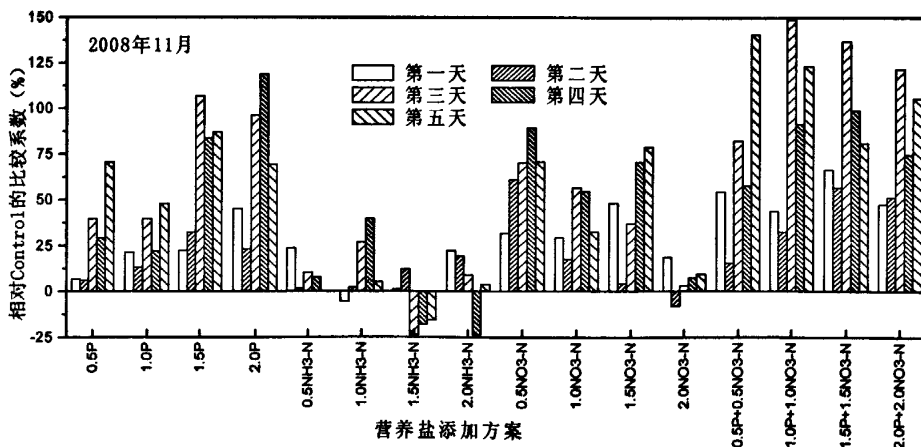


图3.5 NEB实验分析 (11月)

Fig.3.5 Analysis of NEB test (November)

通过分析得出在 11 月份磷依然对浮游植物增长有极大的促进作用,相对比较系数随磷浓度增加而增大的趋势,表 3.4 也表明添加  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  对浮游植物生长的主效应显著 (Sig.值分别为 0.000),表 3.5 进一步用每个  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  添加水平与 Control 进行 Dunnett's test 事后两两比较分析得出大部分添加  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  水平与 Control 之间在 0.05 的水平上差异显著,说明在 11 月份磷对浮游植物的生长有促进作用;11 月份添加  $\text{NH}_3\text{-N}$  和 10 月份一样对浮游植物的增长影响不大;添加  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  后相对比较系数大部分在 50%左右,且添加  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  对浮游植物生长的主效应不显著 (Sig.值分别为 0.141),但与 Control 两两比较在 0.05 的水平上有显著性差异,说明添加  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  对浮游植物的生长有一定的促进作用,但不具有主效应;添加  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}+\text{NO}_3^-\text{-N}$  后相对比较系数最大,这是磷和硝氮共同作用的结果,但是在 0.05 的水平上不具有显著性。

表 3.4 NEB 试验结果方差分析 (11 月)

Tab.3.4 Analysis of Variance for the NEB Test (November)

分析项目	方差 SS	自由度 df	均方 MS	统计量 F	P 值 Sig
$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	4313.596	4	1078.399	25.043	0.000
$\text{NH}_3\text{-N}$	3232.200	4	808.050	3.8765	0.123
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	319.724	4	79.931	1.856	0.141
$\text{PO}_4^{3-}\text{-P} * \text{NO}_3^-\text{-N}$	289.265	4	72.316	1.679	0.177
Error	1464.101	34	43.062	/	/
Total	179388.276	51	/	/	/
Corrected Total	12718.505	50	/	/	/

表 3.5 NEB 试验结果 Dunnett's test 分析 (11 月) \*

Tab.3.5 Analysis of Dunnett's test for the NEB Test (November)

分析项目	平均差	Sig.
$1.5\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	30.368	0.00
$2.0\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	31.836	0.00
$0.5\text{NO}_3^-\text{-N}$	29.227	0.00
$1.0\text{NO}_3^-\text{-N}$	16.813	0.045
$1.5\text{NO}_3^-\text{-N}$	20.664	0.008
$0.5\text{PO}_4^{3-}\text{-P}+0.5\text{NO}_3^-\text{-N}$	36.233	0.000
$1.0\text{PO}_4^{3-}\text{-P}+1.0\text{NO}_3^-\text{-N}$	37.553	0.000
$1.5\text{PO}_4^{3-}\text{-P}+1.5\text{NO}_3^-\text{-N}$	37.849	0.000
$2.0\text{PO}_4^{3-}\text{-P}+2.0\text{NO}_3^-\text{-N}$	32.990	0.000

\* 表中仅列出试验中与control有显著差别的项目

2008年12月份试验不同营养条件与原湖水(Control)条件下叶绿素-a 的比较结果如图3.6所示。各试验通过三因素析因设计方差分析和各营养盐添加水平与Control进行Dunnetts's test事后两两比较结果如表3.6和表3.7所示。

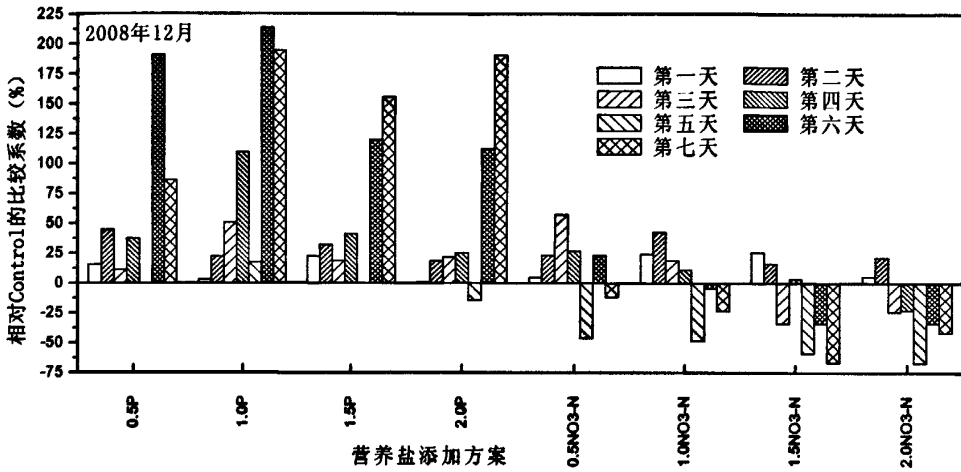


图3.6 NEB实验分析 (12月)

Fig.3.6 Analysis of NEB test (December)

在 2008 年 12 月中试验项目中仅包括磷和硝氮，从图 3.5 中可以看出添加磷后相对比较系数最大达到 200%多，表 3.6 表明添加磷对浮游植物生长的主效应具有显著性 (Sig.值分别为 0.000)，说明磷对浮游植物增长具有促进作用；而添加硝氮相对比较系数介于正负 50%之间，其主效应不具有显著性，与 Control 两两比较在 0.05 的水平上也没有有显著性差异，说明硝氮对浮游植物的生长影响不大。

表 3.6 NEB 试验结果方差分析 (12 月)

Tab.3.6 Analysis of Variance for the NEB Test (December)

分析项目	方差 SS	自由度 df	均方 MS	统计量 F	P 值 Sig
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	1515.947	4	378.987	4.618	0.010
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	428.303	4	107.076	1.305	0.306
Error	1477.286	18	82.071	/	/
Total	56280.887	27	/	/	/
Corrected Total	5930.169	26	/	/	/

表 3.7 NEB 试验结果 Dunnetts' s test 分析 (12 月) \*

Tab.3.7 Analysis of Dunnetts' s test for the NEB Test (December)

分析项目	平均差	Sig.
1.0PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	31.435	0.003

\* 表中仅列出试验中与control有显著差别的项目

2009年2月份试验不同营养条件与原湖水(Control)条件下叶绿素-a的比较结果

如图3.7所示。各试验通过三因素析因设计方差分析结果如表3.8所示。

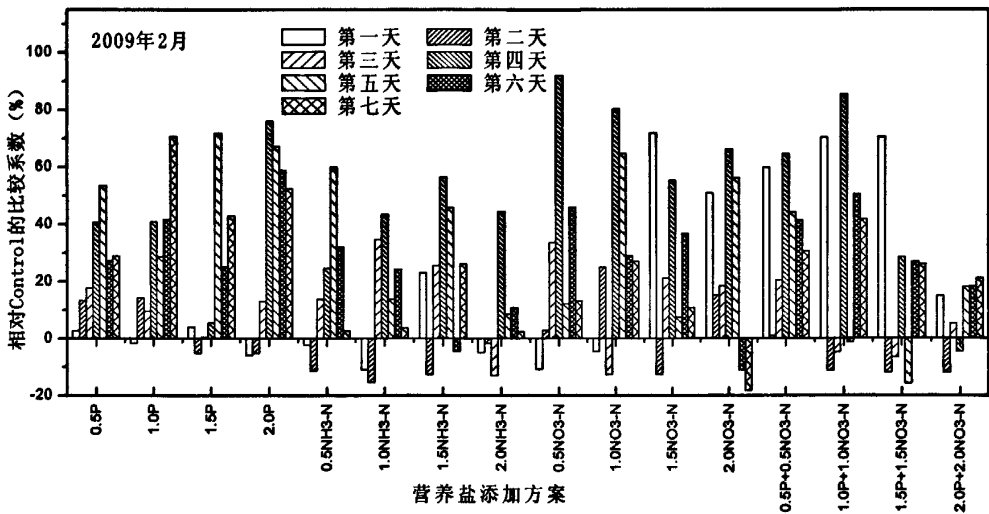


图3.7 NEB实验分析 (2月)

Fig.3.7 Analysis of NEB test (February)

从图中可以看出添加营养的实验组中相对比较系数都不是很大，最大的仅84%，而且还有部分为负值，从表3.4的析因方差分析看出添加NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的实验组表现出显著性 (sig 值为 0.006)，但是磷与硝氮之间的交互作用表现出显著性 (sig 值为 0.008)，因此这时候的主效应意义就不大了，需要进一步进行考察因素的简单效应，然而对所有试验组进行 Dunnett's test 事后两两比较分析得知，在 0.05 水平上没有任何试验组具有显著性。说明在 2 月份添加营养对浮游植物的生长没有任何作用，浮游植物的增长已经不再受营养物的限制。

表3.8 2009年2月NEB试验结果方差分析

Tab.3.8 Analysis of variance for the NEB

分析项目	方差SS	自由度df	均方MS	统计量F	P值Sig
P	590.278	4	147.570	2.349	0.074
NH <sub>3</sub> -N	351.308	4	87.827	1.398	0.255
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	1200.272	4	300.068	4.777	0.006
P* NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	1028.572	4	257.143	4.094	0.008
Error	2135.528	34	62.810	/	/
Total	249294.101	51	/	/	/
Corrected Total	5486.706	50	/	/	/

2009年3月份试验不同营养条件与原湖水(Control)条件下叶绿素-a 的比较结果如图 3.8 所示。各试验通过三因素析因设计方差分析结果如表 3.9 所示。

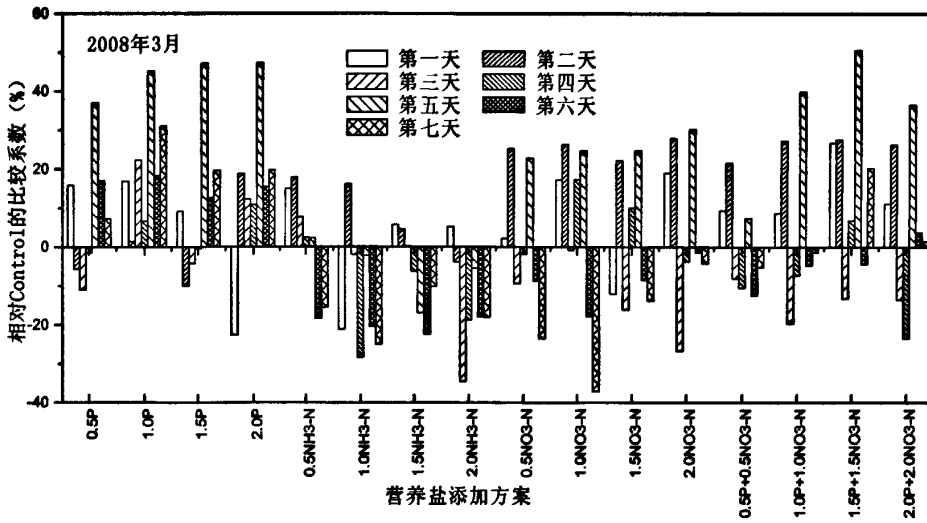


图3.8 NEB实验分析 (3月)

Fig.3.8 Analysis of NEB test (March)

从图 3.8 中可以看出多有添加营养的实验组中相对比较系数都不是很大，最大的才 50%，特别是添加 NH<sub>3</sub>-N 的试验组大部分为负值。从表 3.4 的析因方差分析看出虽然添加 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>3</sub>-N 的试验组都表现出显著性 (sig 值分别为 0.000、0.004 和 0.001)，但是磷与硝氮之间的交互作用表现出显著性 (sig 值为 0.004)，因此这时候的主效应意义就不大了，需要进一步进行考察因素的简单效应，然而对所有试验组进行 Dunnett's test 事后两两比较分析得知，在 0.05 水平上没有任何试验组具有显著性。说明在 3 月份添加营养对浮游植物的生长没有任何作用，浮游植物的增长已经不再受营养物的限制。

表3.9 2009年3月NEB试验结果方差分析

Tab.3.9 Analysis of variance for the NEB

分析项目	方差SS	自由度df	均方MS	统计量F	P值Sig
P	420.571	4	105.143	6.717	0.000
NH <sub>3</sub> -N	293.320	4	73.330	4.685	0.004
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	407.012	4	101.753	6.501	0.001
P* NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	296.768	4	74.192	4.740	0.004
Error	532.200	34	15.653	/	/
Total	307335.817	51	/	/	/
Corrected Total	3866.176	50	/	/	/

因此通过分析 10-12 月和 2-3 月份试验数据得出：在 10-12 月份添加 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 能提高浮游植物相对比较系数；添加 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>3</sub>-N 对浮游植物的生长影响不大，有时 NH<sub>3</sub>-N 还表现出抑制作用。在 2-3 月份添加营养对浮游植物相对比较系



数没有任何作用，浮游植物的增长已经不再受营养物的限制。

3.3.2 实验室 NEB 试验平均最大现存量和平均最大特定增长率

2008 年 10、11 月份添加不同种类和不同水平营养盐试验组叶绿素-a 平均最大现存量和平均最大特定增长率如表 3.10 所示。从表中可以看出添加  $PO_4^{3-}$ -P+ $NO_3^-$ -N 和单独添加  $PO_4^{3-}$ -P 的平均最大现存量远大于添加其他营养盐组和 Control， $4.0NO_3^-$ -N 的平均最大现存量最大为  $146.87\mu\text{g/L}$ ；单独添加  $NO_3^-$ -N 组平均最大现存量稍大于 Control；单独添加  $NH_3$ -N 的平均最大现存量大部分都要小于 Control，仅个别大于大于 Control。因此， $PO_4^{3-}$ -P 能显著的提高浮游植物的现存量， $NO_3^-$ -N 也存在一定的作用， $NH_3$ -N 对浮游植物生长有抑制作用。

添加  $PO_4^{3-}$ -P+ $NO_3^-$ -N 和  $PO_4^{3-}$ -P 的平均最大特定增长速率都远大于 Control，添加  $NO_3^-$ -N 和  $NH_3$ -N 的平均特定最大增长率都稍大于 Control。因此，添加  $PO_4^{3-}$ -P、 $NO_3^-$ -N 和  $NH_3$ -N 对浮游植物的生长速度都有促进作用，但  $PO_4^{3-}$ -P 的作用要远大于  $NO_3^-$ -N 和  $NH_3$ -N，成为浮游植物生长速度主要限制因子。

表 3.10 试验平均最大现存量和平均最大特定增长率（10 月）

Tab.3.10 Average maximum standing crop and specific growth rate of NEB test (October)

单位:  $\bar{u}_{max}$  (mg/L)     $\bar{x}_{max}$  (d)

试验	营养盐	$\bar{x}_{max}$	$\bar{u}_{max}$	营养盐	$\bar{x}_{max}$	$\bar{u}_{max}$
	Control	41.91	0.73	/	/	/
十 月	1 $PO_4^{3-}$ -P	72.39	1.46	1 $NO_3^-$ -N	45.31	0.83
	2 $PO_4^{3-}$ -P	79.54	0.85	2 $NO_3^-$ -N	51.22	0.94
	4 $PO_4^{3-}$ -P	99.25	1.01	4 $NO_3^-$ -N	46.47	0.87
	1 $NH_3$ -N	37.99	0.82	1 $PO_4^{3-}$ -P+1 $NO_3^-$ -N	72.72	1.03
十 一 月 份	2 $NH_3$ -N	39.91	0.86	2 $PO_4^{3-}$ -P+2 $NO_3^-$ -N	54.43	0.89
	4 $NH_3$ -N	59.25	0.78	4 $PO_4^{3-}$ -P+4 $NO_3^-$ -N	65.71	1.11
	Control	75.67	0.78	/	/	/
	0.5 $PO_4^{3-}$ -P	108.79	0.88	0.5 $NO_3^-$ -N	115.49	0.90
	1.0 $PO_4^{3-}$ -P	93.24	0.87	1.0 $NO_3^-$ -N	94.38	0.88
	1.5 $PO_4^{3-}$ -P	120.57	0.93	1.5 $NO_3^-$ -N	111.37	0.82
	2.0 $PO_4^{3-}$ -P	133.43	1.19	2.0 $NO_3^-$ -N	72.94	0.71
	0.5 $NH_3$ -N	68.45	0.56	0.5 $PO_4^{3-}$ -P+0.5 $NO_3^-$ -N	146.87	1.09
1.0 $NH_3$ -N	85.30	0.81	1.0 $PO_4^{3-}$ -P+1.0 $NO_3^-$ -N	136.17	0.94	
1.5 $NH_3$ -N	51.80	0.80	1.5 $PO_4^{3-}$ -P+1.5 $NO_3^-$ -N	125.74	0.99	
2.0 $NH_3$ -N	63.31	0.68	2.0 $PO_4^{3-}$ -P+2.0 $NO_3^-$ -N	139.64	0.91	

2008 年 12 月份添加不同种类和不同水平营养盐试验组叶绿素-*a* 平均最大现存量 and 平均最大特定增长率如表 3.11 所示。从表中可以看出添加  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  平均最大现存量现存量和平均最大特定增长率远大于添加  $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$  大于 Control；因此， $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  能显著的提高浮游植物的现存量和增长速率，对浮游植物增长有促进作用，成为浮游植物生长速度主要限制因子。

表 3.11 试验平均最大现存量和平均最大特定增长率（12 月）

Tab.3.11 Average maximum standing crop and specific growth rate of NEB test (December)

单位:  $\bar{x}_{max}$  (mg/L)     $\bar{u}_{max}$  (d<sup>-1</sup>)

营养盐	$\bar{x}_{max}$	$\bar{u}_{max}$	营养盐	$\bar{x}_{max}$	$\bar{u}_{max}$
Control	47.62	0.54	/	/	/
0.5P	85.43	1.02	0.5 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$	71.83	0.95
1.0P	115.75	1.00	1.0 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$	56.46	0.92
1.5P	76.72	0.88	1.5 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$	46.64	0.73
2.0P	81.52	0.96	2.0 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$	42.77	0.97

2009 年 2、3 月份添加不同种类和不同水平营养盐试验组叶绿素-*a* 平均最大现存量和平均最大特定增长率如表 3.12 所示。从表中可以看出添加  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$  和  $\text{NH}_3\text{-N}$  后浮游植物的平均最大现存量和平均最大特定增长率与 Control 的区别不大，说明在 2-3 月份添加营养对浮游植物的生长影响不大。

表 3.12 试验平均最大现存量和平均最大特定增长率（2、3 月）

Tab.3.12 Average maximum standing crop and specific growth rate of NEB test (February and March)

单位:  $\bar{x}_{max}$  (mg/L)     $\bar{u}_{max}$  (d<sup>-1</sup>)

试验	营养盐	$\bar{x}_{max}$	$\bar{u}_{max}$	营养盐	$\bar{x}_{max}$	$\bar{u}_{max}$
	Control	123.72	1.65	/	/	/
	0.5 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	159.81	1.75	0.5 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$	165.07	1.79
	1.0 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	202.23	1.79	1.0 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$	166.17	1.92
二	1.5 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	173.36	1.57	1.5 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$	154.54	1.47
月	2.0 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	193.14	1.66	2.0 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$	129.98	1.11
份	0.5 $\text{NH}_3\text{-N}$	156.87	1.47	0.5 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ +0.5 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$	164.49	1.26
	1.0 $\text{NH}_3\text{-N}$	145.44	1.50	1.0 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ +1.0 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$	172.30	1.15
	1.5 $\text{NH}_3\text{-N}$	151.75	1.65	1.5 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ +1.5 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$	149.75	1.14
	2.0 $\text{NH}_3\text{-N}$	130.55	1.68	2.0 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ +2.0 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$	149.11	0.83
三	Control	130.16	0.76	/	/	/
月	0.5 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	149.98	0.64	0.5 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$	114.94	0.74
份	1.0 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	163.18	0.57	1.0 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$	110.52	0.73

1.5PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	150.93	0.60	1.5NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	118.66	0.98
2.0PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	153.63	1.01	2.0NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	123.89	0.91
0.5NH <sub>3</sub> -N	113.64	0.74	0.5PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P+0.5NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	122.58	0.62
1.0NH <sub>3</sub> -N	108.22	0.96	1.0PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P+1.0NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	133.81	0.79
1.5NH <sub>3</sub> -N	114.88	0.64	1.5PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P+1.5NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	148.35	0.73
2.0NH <sub>3</sub> -N	107.02	0.78	2.0PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P+2.0NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	130.40	0.70

通过分析实验平均最大现存量和平均最大特定增长率得出：在 10-12 份添加 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 对浮游植物的生长速度都有促进作用，成为浮游植物生长速度主要限制因子；添加 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>3</sub>-N 对浮游植物生长影响不大，NH<sub>3</sub>-N 有时候还表现出抑制作用；在 2-3 月份添加营养盐与不添加营养盐的 Control 的区别不大，说明在 2-3 月份营养盐对浮游植物的生长影响不大，可能营养盐不是限制浮游植物生长的主要因素。

### 3.3.3 实验室 NEB 试验浮游植物增长曲线分析

2008 年 10 月营养盐对浮游植物生长周期的影响情况如图 3.9 所示，从图中可以看出在整个生长周期中添加 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 的生物量都要大于不添加任何营养盐的 Control 生物量，在培养前两天，浮游植物的生长曲线与 Control 相差不大，从第三天开始添加 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 迅速生长，叶绿素-*a* 的含量最大达 80μg/L，从第五天开始生长进入衰退期，叶绿素-*a* 的含量迅速下降，但始终比不添加营养盐的 Control 大；添加 NH<sub>3</sub>-N 的前三天浮游植物生长曲线与 Control 趋势一致，第三天达到最大值为 43 μg/L，第三天开始叶绿素-*a* 的含量迅速降低，并一直低于不添加营养盐的 Control；添加 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 后浮游植物的增长曲线一直与不添加营养盐的 Control 保持一致；添加 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P+NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 后与单独添加 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 的生长曲线相似，可能仅是 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 的作用。因此，添加 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 对浮游植物增长有促进作用，而添加 NH<sub>3</sub>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 对浮游植物的生长影响不大，NH<sub>3</sub>-N 在实验末期还出现抑制作用。

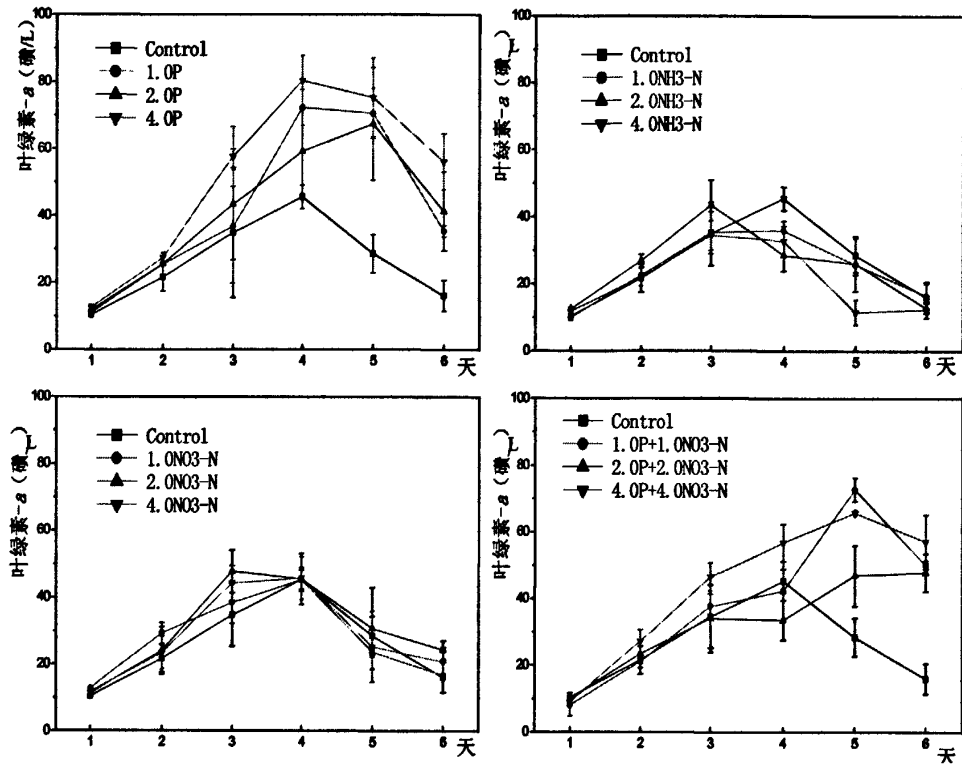


图 3.9 NEB 试验浮游植物增长曲线 (2008 年 10 月)

Fig.3.9 Phytoplankton growth curves of the NEB test

2008 年 11 月营养盐对浮游植物生长周期的影响情况如图 3.10 所示, 从图中可以看出添加  $PO_4^{3-}$ -P 前两天浮游植物的生长曲线与 Control 相差不大, 从第二天开始迅速增长, 到第四天达到最大值  $140\mu\text{g/L}$ , 并远远超过 Control; 添加  $NH_3$ -N 浮游植物的生长曲线与不添加营养盐 Control 保持一致; 添加  $NO_3^-$ -N 与添加  $PO_4^{3-}$ -P 的趋势一致, 但生长周期中叶绿素-a 的最大值小于添加  $PO_4^{3-}$ -P 叶绿素-a 仅  $100\mu\text{g/L}$ 。添加  $PO_4^{3-}$ -P+ $NO_3^-$ -N 后浮游植物迅速增长并维持较长时间。

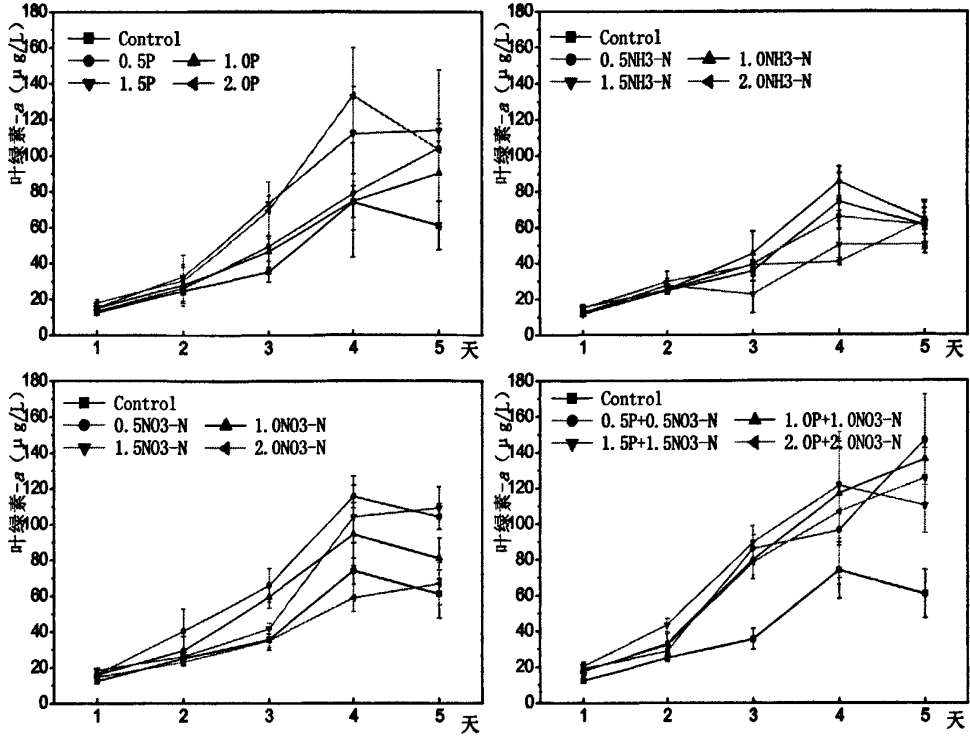


图 3.10 NEB 试验浮游植物增长曲线 (2008 年 11 月)

Fig.3.10 Phytoplankton growth curves of the NEB test

2008 年 12 月营养盐对浮游植物生长周期的影响情况如图 3.11 所示, 十二月份仅试验添加  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  组, 从图中可以看出添加  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  后, 浮游植物生长迅速进入对数增长期, 很快达到生长周期中最大值  $90\mu\text{g/L}$ , 从第四天开始进入稳定期并一直维持到实验结束, 而不添加营养盐的 Control 从第五天开始已经进入衰退期, 说明磷能促进浮游植物的生长, 叶绿素-*a* 的含量在较高水平维持较长时间; 而添加  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  前三天浮游植物迅速增长, 到第三天达到最大值, 之后进入衰亡期, 在试验末期叶绿素-*a* 的含量小于 Control。

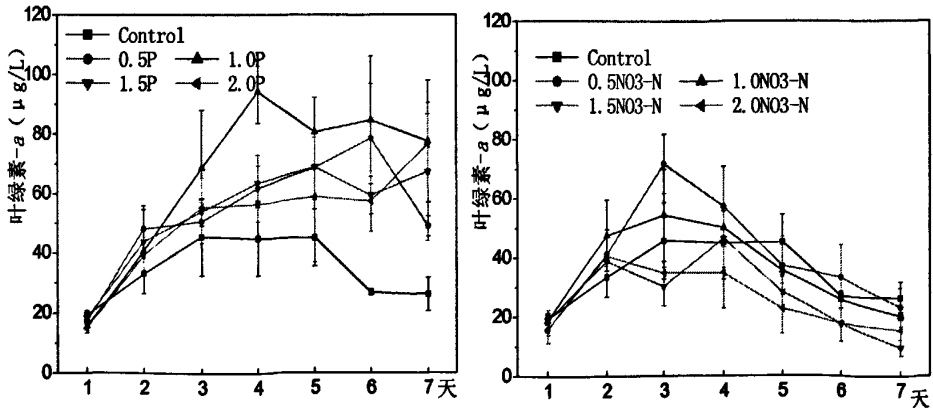


图 3.11 NEB 试验浮游植物增长曲线 (2008 年 12 月)

Fig.3.11 Phytoplankton growth curves of the NEB test

2009年2月营养盐对浮游植物生长周期的影响情况如图3.12所示,从图中可以看出所有添加营养盐的浮游植物生长曲线都有同样的趋势,在试验的前三天属于适应期浮游植物增长缓慢,从第三天进入对数增长期浮游植物迅速增长,并一直持续到第六天,并且添加营养盐的试验组与不添加营养盐的Control生长曲线保持一致,叶绿素-a的含量也相差不大,说明在2月份浮游植物的生长与营养盐的关系不大。

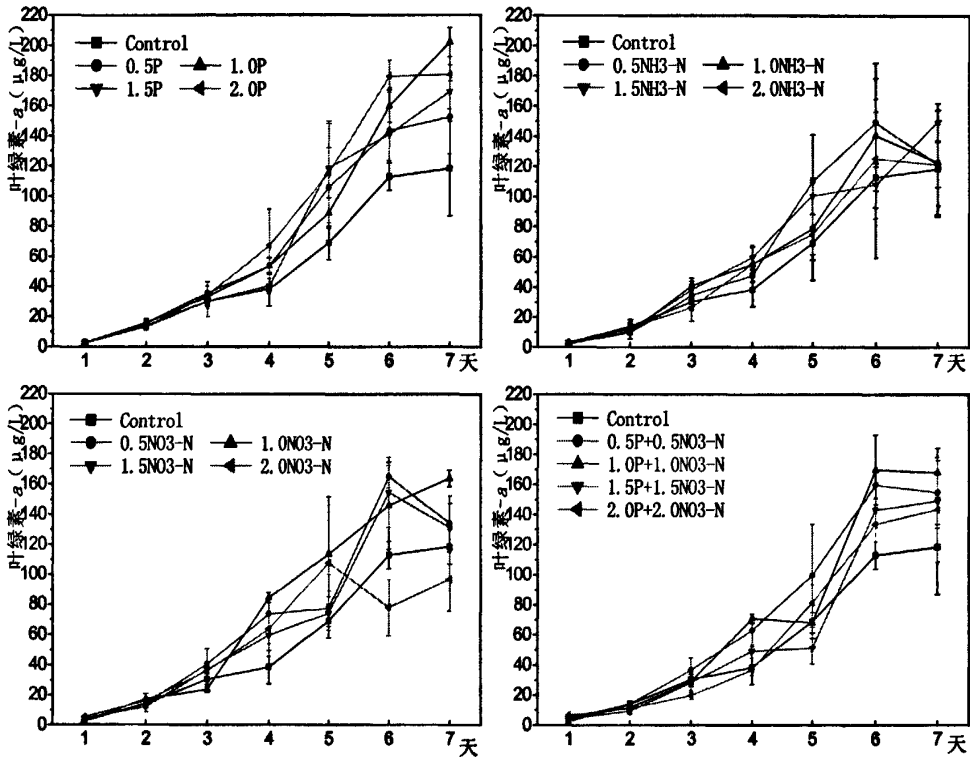


图 3.12 NEB 试验浮游植物增长曲线 (2009 年 2 月)

Fig.3.12 Phytoplankton growth curves of the NEB test

2009年3月营养盐对浮游植物生长周期的影响情况如图3.13所示,从图中分析三月份浮游植物生长曲线与二月份相似,添加营养盐的实验与不添加营养盐的Control保持一致。说明三月份浮游植物的生长同样不受营养物限制。

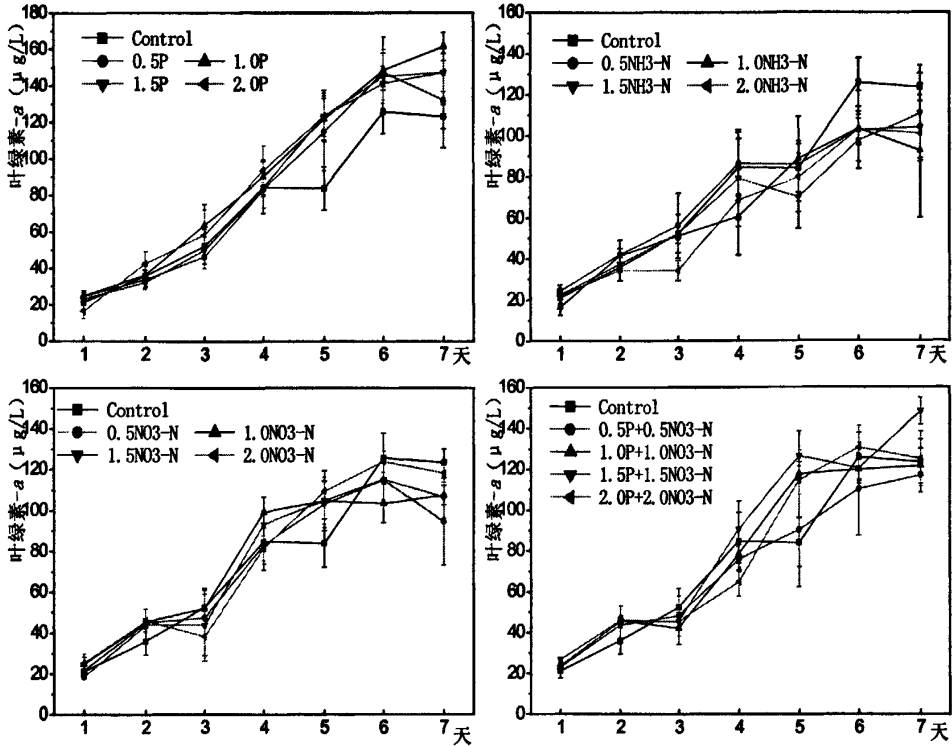


图 3.13 NEB 试验浮游植物增长曲线 (2009 年 3 月)

Fig.3.13 Phytoplankton growth curves of the NEB test

通过分析 10 月-3 月之间浮游植物增长曲线可以得出：在 10-12 月份添加  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  和  $\text{NH}_3 \text{-N}$  对浮游植物生长影响不大， $\text{NH}_3 \text{-N}$  有时候还表现出抑制作用；添加  $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$  对浮游植物的生长有促进作用；在 2-3 月份添加任何营养盐生长曲线都与不添加营养盐的 Control 一致。说明在 10-12 月份磷是限制浮游植物生长因子，在 2-3 月份添加营养盐对浮游植物生长影响不大。

### 3.4 本章小结

本章主要通过相对比较系数法、平均最大现存量和平均最大特定增长率以及浮游植物增长曲线分析淀山湖 10-12 月和 2-3 月份浮游植物增长营养物限制情况，为进一步说明试验结论对各试验相对比较系数平均 (如图 3.14 和如 3.15 所示)，通过分析得出在 10-12 和 2-3 月期间浮游植物增长营养物限制情况分为两个完全不同的情况：

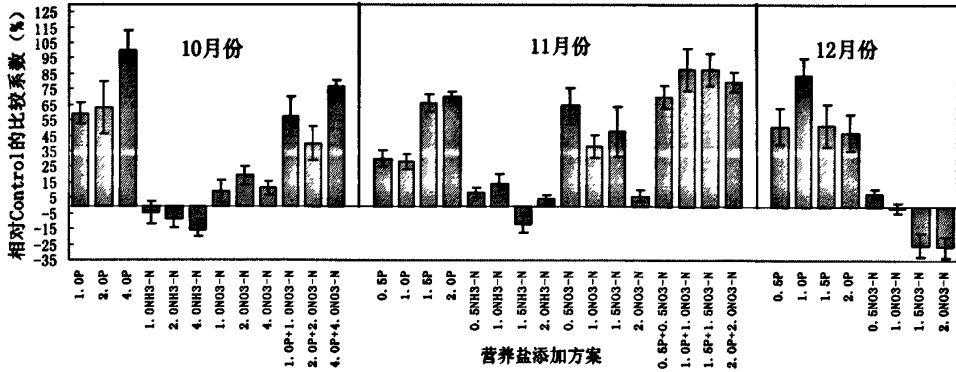


图 3.14 NEB 试验分析(平均值)

Fig.3.14 Analysis of NEB test (average)

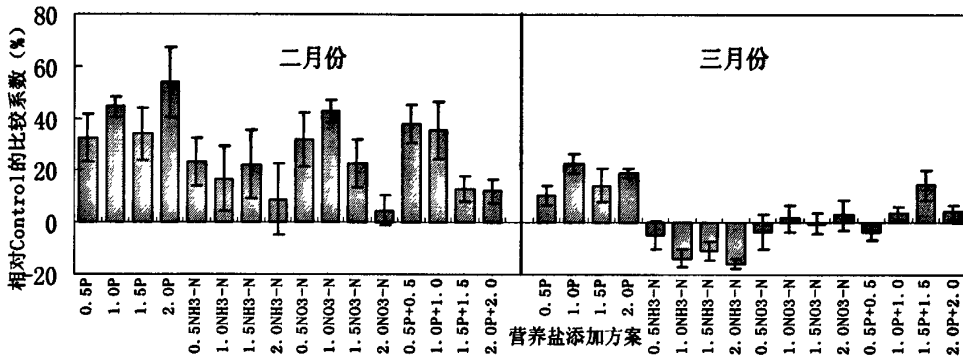


图 3.15 NEB 试验分析(平均值)

Fig.3.15 Analysis of NEB test (average)

(1) 在 10-12 月份添加  $PO_4^{3-}$ -P 能提高相对比较系数, 增加浮游植物的现存量和增长率; 而添加  $NO_3^-$ -N 和  $NH_3$ -N 对相对比较系数、浮游植物的现存量和增长率影响不大, 添加磷+硝氮能够显著增加生物量, 但从主效应分析看磷与硝氮之间不存在交互作用, 仅是磷促进浮游植物生长, 说明在 10-12 月份磷对浮游植物生长有明显促进作用, 磷是限制浮游植物增长的限制性因子;

(2) 在 2-3 月份由于淀山湖水体中有充足的氮和磷(总磷 0.3mg/L, 总氮 7mg/L), 湖体能提供足够的营养盐供浮游植物生长。再增加营养盐对浮游植物的生长影响不大, 说明在 2-3 月份浮游植物的增长已经不再受营养物的限制。



## 第四章 现场藻类增长生物学评价试验

### 4.1 研究方法

#### 4.1.1 培养点的选择

淀山湖地理区位和现场试验点位示意图如图 4.1 所示。

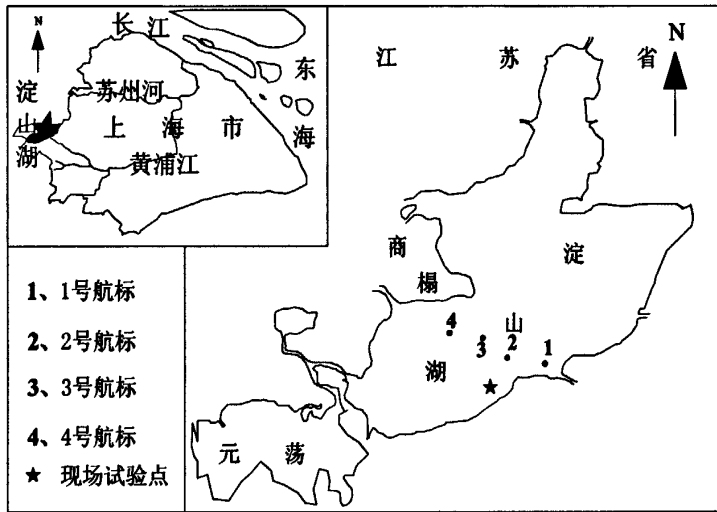


图 4.1 淀山湖地理区位和现场试验点位示意图

Fig. 4.1 Situation and sites distribution of Lake Dianshan

#### 4.1.2 营养盐的添加方案和测量方法

本章主要通过现场藻类增长生物学评价试验研究营养元素氮、磷对淀山湖浮游植物增长潜力的影响，添加方案和测量方法与第三章实验室 NEB 试验相同。测量时叶绿素-*a* 受温度和光照的影响比较大。因此，从添加营养盐的第二天起用棕色瓶采集 200mL 水样，并立即保存在冰箱中带回实验室抽滤后立即测量叶绿素-*a* 或装黑色塑料袋冷冻保存。

#### 4.1.3 试验仪器和试剂

溶氧仪、塞氏盘、水平采样器一个、车载两用冰箱、铝箔或锡纸、20L 透明塑料培养容器三十五个、培养容器固定支架三个、扎带若干、水平采样器、水泵一台、真空泵一台、离心机一台、抽滤装置一套、玻璃纤维滤膜若干、镊子、车载两用冰箱一台、实验室冰箱一台、实验室多功能荧光仪一台。

90%丙酮：900mL 丙酮中加入 100mL 蒸馏水；

0.1mol/LHCl；

营养盐：硝酸钾 ( $\text{KNO}_3$ )、氯化铵 ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ )、磷酸二氢钾 ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ )。

#### 4.1.4 数据处理和分析方法

试验数据处理方法与第三章实验室 NEB 试验相同。

#### 4.2 实验步骤

每次试验采集试验点表层水样，添加不同浓度水平的氨氮、硝氮、磷及氨氮+磷，并以不添加任何营养盐的空白 (Control) 为对照，进行培养、观察、测量、记录及统计分析，具体步骤如下所述：

1) 试验前选择试验点，并在试验点设三个固定装置，用于固定培养容器固定支架；

2) 试验前购买三个有一定浮力的培养容器固定支架 (如图 4.2 所示，尺寸约为  $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$ ) 及若干 ( $\geq 35$  个) 容量为 20L 的透明培养容器；

3) 测定原湖水的营养物水平 (TN、TP) 及叶绿素-*a* 含量；

4) 根据原湖水的营养盐水平 (以 TN 和 TP 为基准) 配置  $\text{NH}_4\text{Cl}$ 、 $\text{KNO}_3$ 、 $\text{KH}_2\text{PO}_4$  的营养盐添加液；

5) 灌水。用水泵或者大漏斗+水桶灌满 35 个培养容器；

6) 加药。按试验方案分六次添加营养盐；

7) 取样。从试验的第二天起从每个培养容器区样 200mL 水样测定叶绿素-*a*，一般实验持续 9-10 天 (可根据实际情况而定)；

8) 测定。在小于 5Kpa 压力下用玻璃纤维滤膜过滤浓缩水样，用 90% 的丙酮萃取叶绿素-*a* (不超过 24 小时)，萃取液在 4000r/min 下离心 10mins 后用实验室多功能荧光仪测量叶绿素-*a* 和脱镁叶绿素。

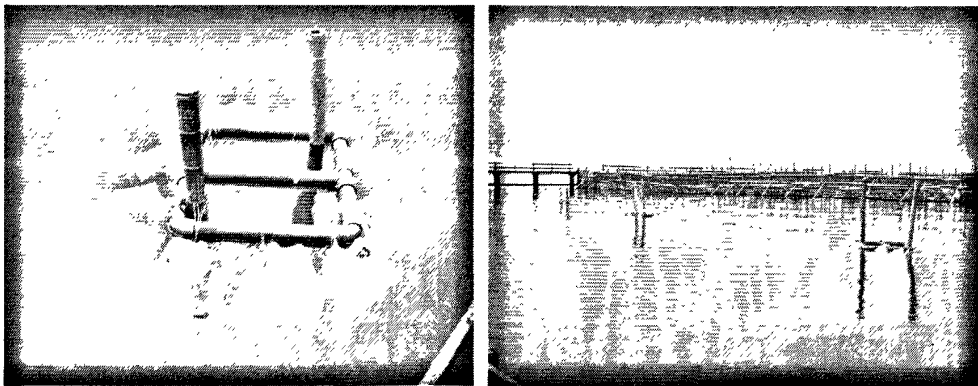


图 4.2 NEB 试验现场照片

Fig. 4.2 pictures of NEB test spot

### 4.3 注意事项

- (1) 整个叶绿素-*a* 测量过程应尽量在暗室中操作;
- (2) 水样抽虑时压力应小于 5kp;
- (3) 离心前应充分摇匀叶绿素-*a* 萃取液, 直到萃取液上下均匀为止;
- (4) 如果叶绿素-*a* 当天没有时间测量, 应用锡纸或铝箔包好置于冰箱中冷冻保存, 但时间最好不要超过 10 天。

### 4.4 结果与讨论

#### 4.4.1 试验现场条件

表 4.1 试验点基本情况

Tab4.1 The basic situation of test points

月份	日期	采样时间	天气	风向	风速	水温	溶解氧	透明度
四 月 份	2009年4月08日	12:00:00 PM	晴	西南	1-3	16.80	/	/
	2009年4月09日	12:00:00 PM	晴	/	1-3	17.50	/	/
	2009年4月10日	11:00:00 AM	晴	/	1-3	17.97	11.18	60
	2009年4月11日	10:00:00 AM	晴	/	1-3	17.83	9.24	62
	2009年4月12日	9:00:00 AM	晴	/	1-3	18.54	8.43	65
	2009年4月15日	11:00:00 AM	晴	/	1-3	19.39	8.08	70
五 月 份	2009年5月05日	1:30:00 PM	晴	西南	1-3	21.6	8.90	50
	2009年5月06日	9:30:00 AM	晴	西南	1-3	21.00	8.60	/
	2009年5月07日	9:10:00 AM	晴	西南	1-3	22.80	8.610	91
	2009年5月08日	9:20:00 AM	晴	西南	1-3	21.20	8.10	75
	2009年5月09日	8:10:00 AM	晴	西南	4-5	20.40	8.98	/
	2009年5月10日	8:45:00 AM	晴	南	4-5	21.40	8.24	75
六 月 份	2009年5月11日	8:50:00 AM	晴	西南	4-5	22.60	8.28	76
	2009年5月12日	9:23:00 AM	阴	北	5-6	23.80	8.31	84
	2009年5月13日	2:40:00 AM	阴转晴	东南	3-4	23.00	9.49	47
	2009年6月08日	12:20:00 PM	晴	东南	4-5	25.20	6.62	60
	2009年6月10日	9:11:00 AM	雨转阴	西北	4-5	24.40	7.76	56
	2009年6月11日	8:10:00 AM	阴转晴	西北	1-2	24.50	5.27	55
	2009年6月12日	8:23:00 AM	阴	西南	3-4	25.00	4.35	56
	2009年6月13日	8:20:00 AM	阴	西北	1-2	24.60	3.90	57
	2009年6月14日	8:00:00 AM	晴	东南	1-3	25.50	3.87	62

	2009年6月15日	8:10:00 AM	阴	东南	3-4	25.00	3.53	56
	2009年6月16日	7:54:00 AM	晴	东南	3-4	25.10	3.67	50
	2009年6月17日	8:05:00 AM	晴	东南	4-5	26.30	3.95	60
	2009年6月18日	9:10:00 AM	晴	东南	3-4	27.60	4.45	45
	2009年7月08日	11:20:00 AM	晴	/	/	29	5.67	73
	2009年7月09日	7:42:00 AM	晴	/	/	28.6	5.16	60
	2009年7月10日	7:00:00 AM	晴	/	/	29.2	5.63	65
七	2009年7月11日	6:58:00 AM	晴	/	/	29.9	8.56	57
月	2009年7月12日	7:20:00 AM	晴转阴	/	/	30.1	7.06	56
份	2009年7月13日	7:13:00 AM	晴	/	/	30.2	6.2	65
	2009年7月14日	7:00:00 AM	晴	/	/	30	5.08	57.5
	2009年7月15日	6:50:00 AM	晴	/	/	29.8	5.46	53
	2009年7月16日	/	晴	/	/	30.6	5.72	/
	2009年8月13日	8:35:00 AM	多云	东南	2-3级	28.1	6.58	45
	2009年8月14日	8:05:00 AM	多云	东南	2-3级	27.6	6.37	47
	2009年8月15日	8:15:00 AM	阴	东南	2-3级	27.3	/	57
八	2009年8月16日	8:10:00 AM	晴转阴	东南	2-3级	27.6	5.65	60
月	2009年8月17日	8:10:00 AM	晴	东南	2-3级	28.1	7.07	55
份	2009年8月18日	8:00:00 AM	晴	西南	1-2级	28.6	7.17	55
	2009年8月19日	8:05:00 AM	晴	东南	1-2级	28.6	5.21	54
	2009年8月20日	8:10:00 AM	多云	东南	3-4级	29	4.26	82
	2009年8月21日	8:10:00 AM	晴	东南	1-3级	31.1	6.03	83
	2009年8月22日	8:00:00 AM	多云	东南	1-2级	30.4	4.52	93
	2009年9月09日	9:00:00 AM	多云	东南	1-2级	27.2	7.5	70
	2009年9月10日	8:45:00 AM	晴	东南	2-3级	26	66.91	42
	2009年9月11日	8:35:00 AM	晴	东南	3-4级	25.9	6.15	37
九	2009年9月13日	8:10:00 AM	晴	北风	1-2级	25.4	5.79	48
月	2009年9月14日	8:00:00 AM	阴转晴	东南	3-4级	25.8	6.87	43
份	2009年9月15日	8:10:00 AM	晴	北风	5-6及	25.6	6.71	67
	2009年9月16日	8:39:00 AM	阴	东南	3-4级	25.1	6.35	33
	2009年9月17日	8:45:00 AM	阴转雨	东南	3-5级	24.6	6.62	41

#### 4.4.2 淀山湖现场 NEB 试验相对比较系数分析

从2009年4月现场藻类增长生物学评价试验不同营养条件与原湖水(Control)条

件下叶绿素-a的比较结果如图4.3所示，其中原湖水(Control)的试验结果均表达为0%。各试验通过三因素析因设计方差分析和各营养盐添加水平与Control进行Dunnett's test事后两两比较结果如4.2和4.3所示。

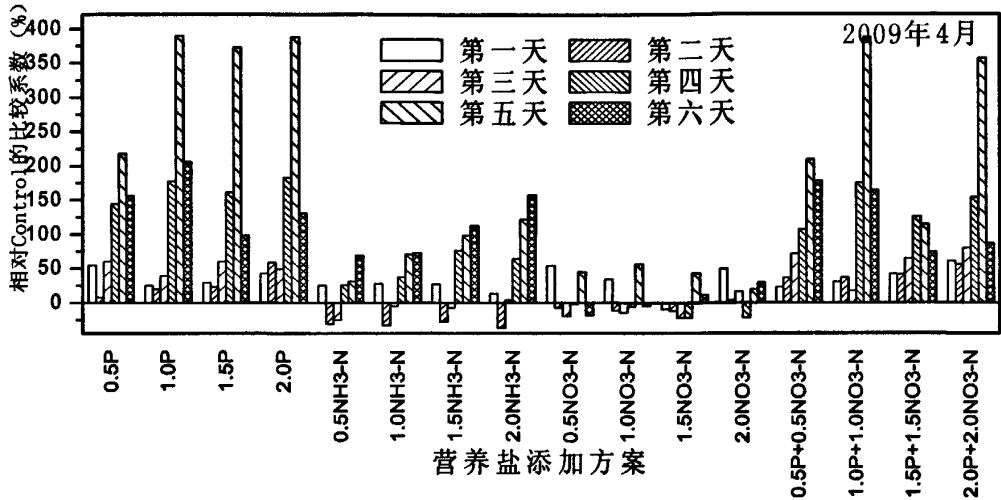


图4.3 NEB实验分析 (4月)

Fig.4.3 Analysis of NEB test (April)

从图4.3中可以看出添加 $PO_4^{3-}$ -P后相对比较系数在培养的第4-5天最大，达到400%，说明添加 $PO_4^{3-}$ -P后浮游植物生物量远大于Control，表4.2表明添加 $PO_4^{3-}$ -P对浮游植物生长的主效应显著 (Sig.值分别为0.000)，表4.3进一步用每个 $PO_4^{3-}$ -P添加水平与Control进行Dunnett's test事后两两比较分析得出所有添加 $PO_4^{3-}$ -P水平与Control之间在0.05的水平上差异显著，说明在4月份磷对浮游植物的生长有促进作用；添加 $NH_3$ -N后生物量相对比较系数介于-25%到150%之间，表4.2表明 $NH_3$ -N对浮游植物生长的主效应显著 (Sig.值分别为0.000)，但是事后两两比较分析结果显示添加 $NH_3$ -N与Control之间在0.05的水平上没有显著性差异，说明对浮游植物的生长影响不具有显著性；添加 $NO_3$ -N后相对比较系数介于-25%到50%之间，且添加 $NO_3$ -N对浮游植物生长的主效应不显著 (Sig.值分别为0.455)，与Control两两比较在0.05的水平上没有显著性差异，说明添加 $NO_3$ -N对浮游植物的生长影响不大；添加 $PO_4^{3-}$ -P+ $NO_3$ -N后相对比较系数与单独添加 $PO_4^{3-}$ -P相当，表3.2显示不存在交互作用，对浮游植物的生长可能仅是 $PO_4^{3-}$ -P的作用。

表4.2 2009年4月NEB试验结果方差分析(4月)

Tab.4.2 Analysis of variance for the NEB (April)

分析项目	方差SS	自由度df	均方MS	统计量F	P值Sig
P	3854.027	4	963.507	247.675	0.000
NH <sub>3</sub> -N	191.061	4	47.765	12.278	0.000
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	14.868	4	3.717	0.955	0.455
P*NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	22.684	4	5.671	1.458	0.256
Error	70.024	18	3.890	/	/
Total	49980.010	35	/	/	/
Corrected Total	4947.186	34	/	/	/

表 4.3 2009 年 4 月 NEB 试验结果 Dunnetts' s test 分析 (4 月) \*

Tab.4.3 Analysis of Dunnetts' s test for the NEB Test (April)

分析项目	平均差	Sig.	分析项目	平均差	Sig.
0.5PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	22.1177(*)	0.016	0.5NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N+0.5PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	21.9752(*)	0.004
1.0PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	29.3235(*)	0.001	0.5NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N+0.5PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	27.6952(*)	0.000
1.5PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	25.3960(*)	0.004	0.5NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N+0.5PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	23.1210(*)	0.002
2.0PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	25.8685(*)	0.004	0.5NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N+0.5PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	27.4044(*)	0.000

\* 表中仅列出试验中与control有显著差别的项目

从2009年5月现场藻类增长生物学评价试验不同营养条件与原湖水(Control)条件下叶绿素-a 的比较结果如图4.4所示。各试验通过三因素析因设计方差分析和各营养盐添加水平与Control进行Dunnetts's test事后两两比较结果如4.4和4.5所示。

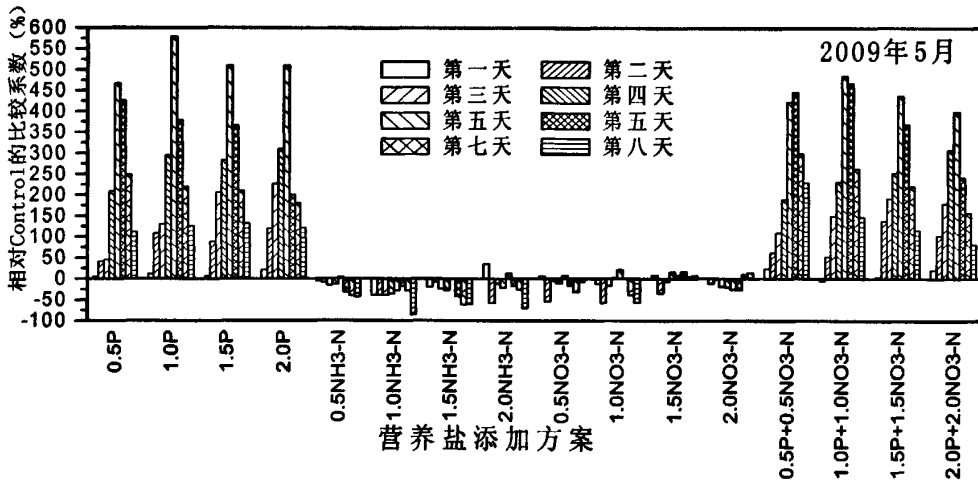


图 4.4 NEB 实验分析 (5 月)

Fig.4.4 Analysis of NEB test (May)

从图4.4中可以看出添加PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P后相对比较系数从第一天开始逐渐增大, 到第

五天最大将近600%，之后相对比较系数逐渐减小，说明添加 $PO_4^{3-}$ -P后浮游植物生物量远大于Control，表4.4表明添加 $PO_4^{3-}$ -P对浮游植物生长的主效应显著（Sig.值分别为0.000），表4.5进一步用每个 $PO_4^{3-}$ -P添加水平与Control进行Dunnetts's test事后两两比较分析得出所有添加 $PO_4^{3-}$ -P水平与Control之间在0.05的水平上差异显著，说明在4月份磷对浮游植物的生长有促进作用；添加 $NH_3$ -N和 $NO_3^-$ -N后生物量相对比较系数大部分为负值，表4.4也表明添加 $NH_3$ -N和 $NO_3^-$ -N对浮游植物生长的主效应不显著（Sig.值分别为0.218和0.665），与Control的事后两两比较分析也没有显著性差异；添加 $P O_4^{3-}$ -P+ $NO_3^-$ -N后相对比较系数与单独添加 $PO_4^{3-}$ -P相当，表4.4显示不存在交互作用，对浮游植物的生长可能仅是 $PO_4^{3-}$ -P的作用。

表4.4 2009年5月NEB试验结果方差分析（5月）

Tab.4.4 Analysis of variance for the NEB (May)

分析项目	方差SS	自由度df	均方MS	统计量F	P值Sig
P	9853.011	4	2463.253	158.568	0.000
$NH_3$ -N	99.198	4	24.799	1.596	0.218
$NO_3^-$ -N	37.546	4	9.387	0.604	0.665
P* $NO_3^-$ -N	94.884	4	23.721	1.527	0.237
Error	279.618	18	15.534	/	/
Total	62965.642	35	/	/	/
Corrected Total	15816.982	34	/	/	/

表 4.5 2009 年 6 月 NEB 试验结果 Dunnetts' s test 分析（5 月）\*

Tab.4.5 Analysis of Dunnetts' s test for the NEB Test (May)

分析项目	平均差	Sig.	分析项目	平均差	Sig.
0.5 $PO_4^{3-}$ -P	34.0154(*)	0.000	0.5 $NO_3^-$ -N+0.5 $PO_4^{3-}$ -P	42.2785(*)	0.000
1.0 $PO_4^{3-}$ -P	40.1284(*)	0.000	0.5 $NO_3^-$ -N+0.5 $PO_4^{3-}$ -P	40.1610(*)	0.000
1.5 $PO_4^{3-}$ -P	39.5891(*)	0.000	0.5 $NO_3^-$ -N+0.5 $PO_4^{3-}$ -P	39.2167(*)	0.000
2.0 $PO_4^{3-}$ -P	37.8051(*)	0.000	0.5 $NO_3^-$ -N+0.5 $PO_4^{3-}$ -P	33.6979(*)	0.000

\* 表中仅列出试验中与control有显著差别的项目

从2009年6月现场藻类增长生物学评价试验不同营养条件与原湖水(Control)条件下叶绿素-a 的比较结果如图4.5所示。各试验通过三因素析因设计方差分析和各营养盐添加水平与Control进行Dunnetts's test事后两两比较结果如4.7和4.8所示。

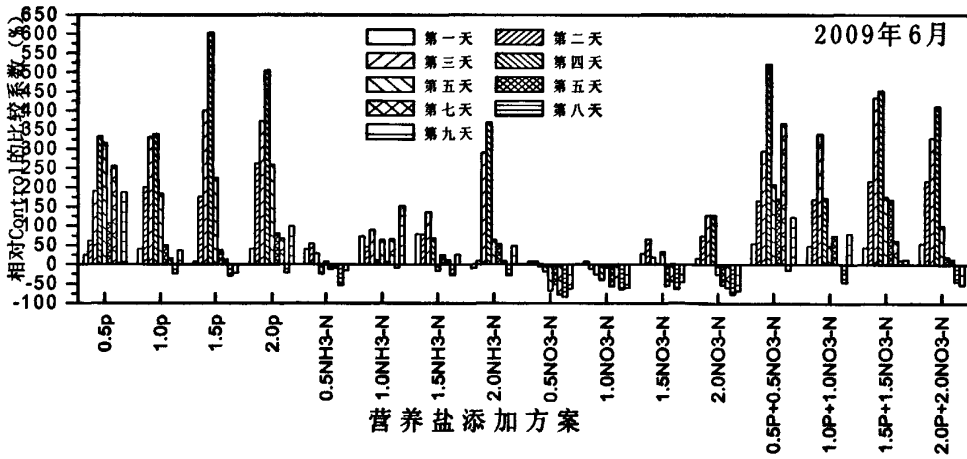


图 4.5 NEB 实验分析 (6 月)

Fig.4.5 Analysis of NEB test (June)

用同样的方法分析 2009 年 6 月份试验数据,得出六月份的试验结果与五月结果一样,唯一不同的是在六月份添加 NH<sub>3</sub>-N 的实验组相对比较系数比五月份的要大,最大的是添加 2.0 NH<sub>3</sub>-N 达到 300%,而且 Dunnetts's test 事后两两比较得出 2.0 NH<sub>3</sub>-N 表现出显著性,说明在六月份 NH<sub>3</sub>-N 对浮游植物生长有一定的促进作用,但是主效应不具有显著性。

表 4.6 2009 年 6 月 NEB 试验结果方差分析 (6 月)

Tab.4.6 Analysis of variance for the NEB (June)

分析项目	方差SS	自由度df	均方MS	统计量F	P值Sig
P	877.476	4	219.369	8.857	0.000
NH <sub>3</sub> -N	59.101	4	14.775	0.597	0.670
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	23.903	4	5.976	0.241	0.911
P* NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	55.855	4	13.964	0.564	0.692
Error	445.843	18	24.769	/	/
Total	10781.929	35	/	/	/
Corrected Total	1524.858	34	/	/	/

表 4.7 2009 年 6 月 NEB 试验结果 Dunnetts' s test 分析 (6 月) \*

Tab.4.7 Analysis of Dunnetts' s test for the NEB Test (June)

分析项目	平均差	Sig.	分析项目	平均差	Sig.
0.5PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	11.2680(*)	0.018	0.5NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N+0.5PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	14.9163(*)	0.002
2.0PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	12.2491(*)	0.009	1.5NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N+1.5PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	11.8841(*)	0.020
2.0NH <sub>3</sub> -N	12.2491(*)	0.009	/	/	/

\* 表中仅列出试验中与control有显著差别的项目



从2009年7月现场藻类增长生物学评价试验不同营养条件与原湖水(Control)条件下叶绿素-a的比较结果分别如图4.6所示。各试验通过三因素析因设计方差分析结果如4.10所示。

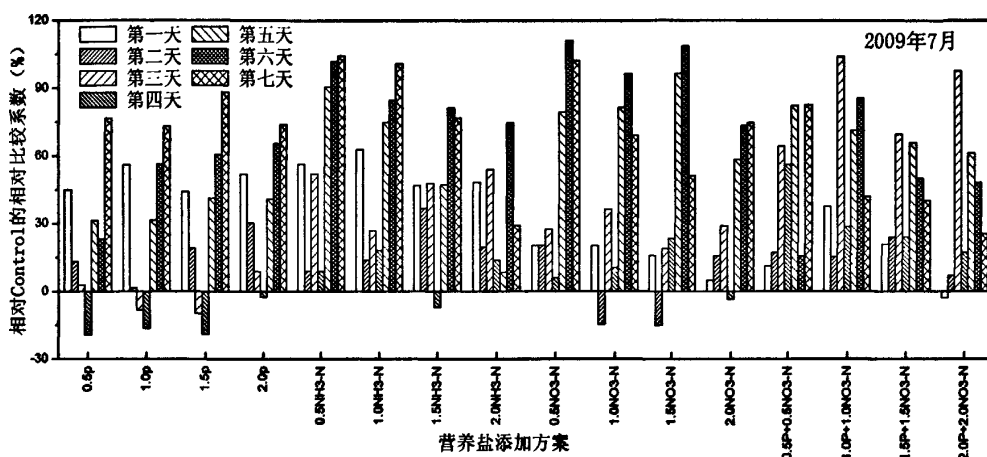


图 4.6 NEB 实验分析 (7 月)

Fig.4.6 Analysis of NEB test (July)

从图 4.6 中可以看出添加营养盐各试验组相对比较系数图与 4-6 月份相对比较系数图发生了根本性的变化，添加  $PO_4^{3-}-P$  和添加  $PO_4^{3-}-P+NO_3^{-}-N$  后的相对比较系数降低，添加  $NO_3^{-}-N$  和  $NH_3-N$  的比较系数升高，说明浮游植物增长营养物限制有所转变。而且从表 4.10 也可以看出，添加  $PO_4^{3-}-P$  的实验组经吸析因方差分析不具有显著性 (sig 值为 0.637)，而添加  $NH_3-N$  的试验组表现出显著性 (sig 值为 0.006)，说明在 7 月份添加  $NH_3-N$  对浮游植物的生长有促进作用，浮游植物的生长受  $NH_3-N$  限制。

表4.8 2009年7月NEB试验结果方差分析 (7月)

Tab.4.8 Analysis of variance for the NEB (July)

分析项目	方差SS	自由度df	均方MS	统计量F	P值Sig
P	9.023	4	2.256	.645	0.637
$NH_3-N$	73.116	4	18.279	5.228	0.006
$NO_3^{-}-N$	5.573	4	1.393	.399	0.807
$P*NO_3^{-}-N$	14.551	4	3.638	1.040	0.414
Error	62.932	18	3.496	/	/
Total	4325.136	35	/	/	/
Corrected Total	158.280	34	/	/	/

从2009年8月现场藻类增长生物学评价试验不同营养条件与原湖水(Control)条件下叶绿素-a 的比较结果分别如图4.7所示。各试验通过三因素析因设计方差分析

结果和各营养盐添加水平与Control进行Dunnetts's test事后两两比较结果如4.11和4.12所示。

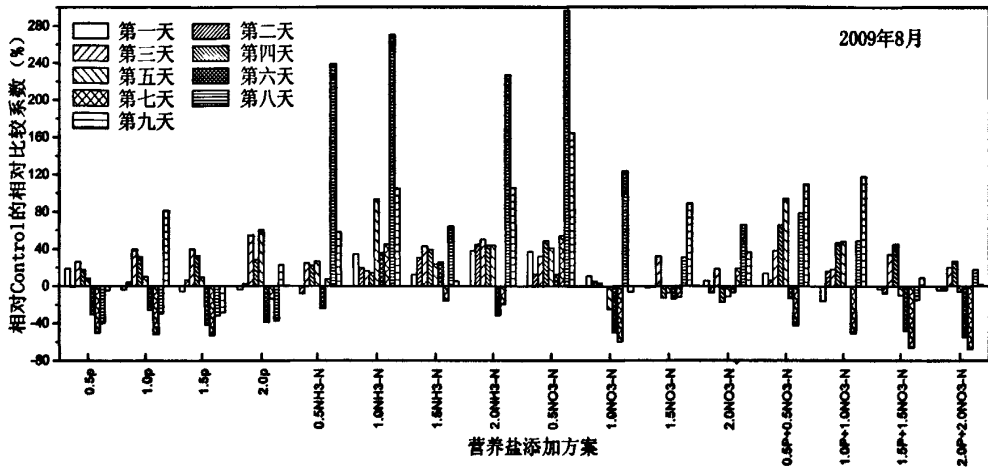


图 4.7 NEB 实验分析 (8月)

Fig.4.7 Analysis of NEB test (August)

用同样的方法分析 2009 年 8 月份试验数据, 添加 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 后相对比较系数在 -50%~60%之间, 通过析因方差分析表明添加 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 主效应不具有显著性 (sig 值为 0.811); 而添加 NH<sub>3</sub>-N 后相对比较系数最大值为 160%, 析因方差分析分析也表明主效应具有限制性 (sig 值为 0.021), 而且在 Dunnetts's test 事后两两比较中 1.0NH<sub>3</sub>-N 表现出显著性; 添加 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的主效应不具有显著性, 但在 Dunnetts's test 事后两两比较中 0.5NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 表现出显著性; 添加 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P+NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 后试验结果与单独添加 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 相似。因此, 在六月份 NH<sub>3</sub>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 对浮游植物生长有一定的促进作用, 是限制浮游植物增长的主要因子。

表4.9 2009年8月NEB试验结果方差分析 (8月)

Tab.4.9 Analysis of variance for the NEB (August)

分析项目	方差SS	自由度df	均方MS	统计量F	P值Sig
P	37.227	4	9.307	.393	0.811
NH <sub>3</sub> -N	360.903	4	90.226	3.808	0.021
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	247.155	4	61.789	2.608	0.070
P*NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	14.551	4	8.570	.362	0.833
Error	426.526	18	23.696	/	/
Total	30869.054	35	/	/	/
Corrected Total	1263.675	34	/	/	/

表4.10 2009年7-9月NEB试验结果Dunnetts' s test分析(8月)\*

Tab.4.10 Analysis of Dunnetts' s test for the NEB Test (August)

分析项目	平均差	Sig.
1.0 NH <sub>3</sub> -N	13.0587(*)	0.016
0.5NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	14.0276(*)	0.002

\* 表中仅列出试验中与control有显著差别的项目

从2009年9月现场藻类增长生物学评价试验不同营养条件与原湖水(Control)条件下叶绿素-a 的比较结果如图4.8所示。各试验通过三因素析因设计方差分析结果和各营养盐添加水平与Control进行Dunnetts' s test事后两两比较结果如4.13和4.14所示。

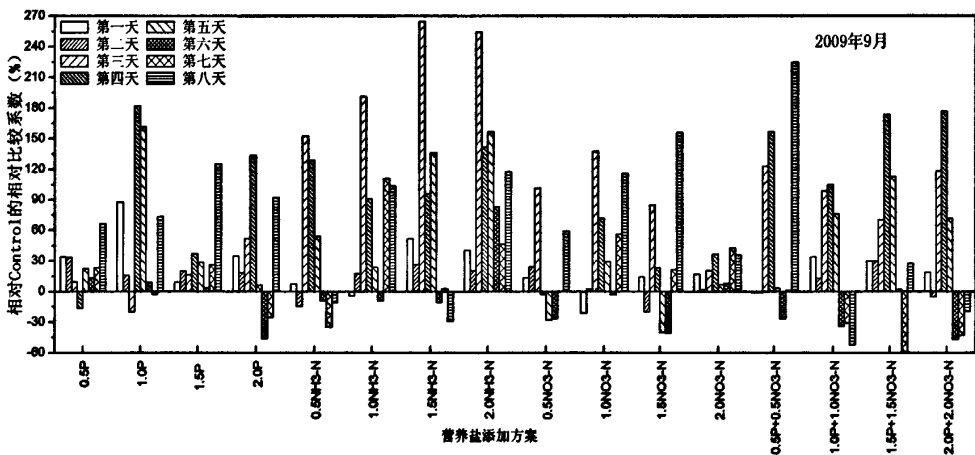


图 4.8 NEB 实验分析(9月)

Fig.4.8 Analysis of NEB test (September)

用同样方法分析九月份数据可以得出：在九月份试验结果和八月份相似，NH<sub>3</sub>-N和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N对浮游植物生长有一定的促进作用，而添加PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P对浮游植物的生长影响不大，说明NH<sub>3</sub>-N和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N是限制浮游植物增长的主要因子。

表4.11 2009年9月NEB试验结果方差分析(9月)

Tab.4.11 Analysis of variance for the NEB (September)

分析项目	方差SS	自由度df	均方MS	统计量F	P值Sig
P	39.941	4	9.985	2.220	0.108
NH <sub>3</sub> -N	141.664	4	35.416	7.875	0.001
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	121.645	4	30.411	6.762	0.002
P* NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	22.325	4	5.581	1.241	0.329
Error	80.947	18	4.497	/	/
Total	22692.494	35	/	/	/
Corrected Total	296.776	34	/	/	/

表4.12 2009年7-9月NEB试验结果Dunnetts' s test分析(9月)\*

Tab.4.12 Analysis of Dunnetts' s test for the NEB Test (September)

分析项目	平均差	Sig.
0.5 NH <sub>3</sub> -N	8.7931(*)	0.037
0.5NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	7.7524(*)	0.033

因此,通过分析4-9月份试验数据得出:在4-6月份添加PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P能显著提高浮游植物的相对比较系数;添加NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N和NH<sub>3</sub>-N对浮游植物的生长影响不大;在7-9月份转变为添加NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N和NH<sub>3</sub>-N能显著提高浮游植物相对比较系数,而添加PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P对浮游植物生长作用不明显。

4.4.3 现场 NEB 试验最大增长速度和现存量分析

2009年4月份添加不同种类和不同水平营养盐试验组叶绿素-a平均最大现存量和平均最大特定增长率如表4.13所示。从表中可以看出添加PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P+NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N和单独添加PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P的平均最大现存量和平均最大特定增长率远大于添加其他营养盐组和Control;单独添加NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N组平均最大现存量和平均最大特定增长率稍大于Control;因此,PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P能显著的提高浮游植物的现存量和增长速率,最大达到三倍多,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N和NH<sub>3</sub>-N也存在一定的作用。

表 4.13 试验平均最大现存量和平均最大特定增长率(4月)

Tab.4.13 Average maximum standing crop and specific growth rate of NEB test (April)

单位: $\bar{u}_{max}$ (mg/L) $\bar{x}_{max}$ (d <sup>-1</sup> )					
营养盐	$\bar{x}_{max}$	$\bar{u}_{max}$	营养盐	$\bar{x}_{max}$	$\bar{u}_{max}$
Control	28.00	0.36	/	/	/
0.5PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	59.64	0.39	0.5NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	30.98	0.33
1.0PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	91.79	0.61	1.0NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	29.42	0.61
1.5PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	88.54	0.49	1.5NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	26.86	0.43
2.0PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	91.45	0.57	2.0NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	35.27	0.27
0.5NH <sub>3</sub> -N	36.52	0.53	0.5PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P+0.5NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	60.08	0.59
1.0NH <sub>3</sub> -N	37.33	0.40	1.0PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P+1.0NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	91.29	0.80
1.5NH <sub>3</sub> -N	45.99	0.57	1.5PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P+1.5NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	80.10	0.63
2.0NH <sub>3</sub> -N	55.80	0.48	2.0PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P+2.0NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	85.62	0.41

2009年5月份添加不同种类和不同水平营养盐试验组叶绿素-a平均最大现存量和平均最大特定增长率如表4.14所示。从表中可以看出添加PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P+NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N和单独添加PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P的平均最大现存量远大于添加其他营养盐组和Control;单独添加

NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>3</sub>-N 组平均最大现存量都小于 Control; 所有添加营养盐的平均最大特定增长率与 Control 的区别不大。说明在 5 月只有添加 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 能提高浮游植物的显存量, 磷成为限制浮游植物增长的唯一因子。

表 4.14 试验平均最大现存量和平均最大特定增长率 (5 月)

Tab.4.14 Average maximum standing crop and specific growth rate of NEB test (May)

单位:  $\bar{u}_{max}$  (mg/L)     $\bar{x}_{max}$  (d<sup>-1</sup>)

营养盐	$\bar{x}_{max}$	$\bar{u}_{max}$	营养盐	$\bar{x}_{max}$	$\bar{u}_{max}$
Control	34.59	0.59	0.5NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	29.53	0.62
0.5PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	84.06	0.68	1.0NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	24.92	0.68
1.0PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	82.46	0.47	1.5NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	33.62	0.46
1.5PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	76.83	0.48	2.0NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	36.27	0.88
2.0PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	77.81	0.55	0.5PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P+0.5NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	103.9	0.32
0.5NH <sub>3</sub> -N	25.60	0.50	1.0PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P+1.0NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	85.67	0.48
1.0NH <sub>3</sub> -N	16.96	0.65	1.5PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P+1.5NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	75.05	0.61
1.5NH <sub>3</sub> -N	21.28	0.29	2.0PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P+2.0NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	77.25	0.48
2.0NH <sub>3</sub> -N	35.39	0.78	/	/	/

2009 年 6 月份添加不同种类和不同水平营养盐试验组叶绿素-a 平均最大现存量和平均最大特定增长率如表 4.15 所示。从表中可以看出添加 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P+NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和单独添加 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 的平均最大现存量都大于添加其他营养盐组和 Control, 但平均最大特定增长率比 Ccontrol 要小; 添加 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的平均最大现存量和平均最大特定增长率与 Control 的区别不大, 而添加 NH<sub>3</sub>-N 能提高浮游植物的平均最大现存量和平均最大特定增长率。说明浮游植物增长营养物限制可能要从磷限制转化成 NH<sub>3</sub>-N 限制。

表 4.15 试验平均最大现存量和平均最大特定增长率 (6 月)

Tab.4.15 Average maximum standing crop and specific growth rate of NEB test (June)

单位:  $\bar{u}_{max}$  (mg/L)     $\bar{x}_{max}$  (d<sup>-1</sup>)

营养盐	$\bar{x}_{max}$	$\bar{u}_{max}$	营养盐	$\bar{x}_{max}$	$\bar{u}_{max}$
Control	29.35	1.08	/	/	/
0.5PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	47.59	1.05	0.5NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	31.44	0.92
1.0PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	45.59	0.96	1.0NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	31.45	1.17
1.5PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	41.00	0.54	1.5NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	37.84	1.54
2.0PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	48.44	0.40	2.0NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	33.80	0.57
0.5NH <sub>3</sub> -N	40.83	1.18	0.5PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P+0.5NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	60.78	0.58
1.0NH <sub>3</sub> -N	50.80	1.36	1.0PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P+1.0NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	46.74	0.57
1.5NH <sub>3</sub> -N	52.36	0.83	1.5PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P+1.5NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	43.27	0.88
2.0NH <sub>3</sub> -N	35.32	0.90	2.0PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P+2.0NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	50.20	0.36

2009 年 7、8、9 月份添加不同种类和不同水平营养盐试验组叶绿素-a 平均最大现存量和平均最大特定增长率如表 4.16 所示。所有添加营养盐组的平均最大现存量都稍大于 Control；但添加营养盐对平均最大特定增长率影响不大。因此，在 7、8、9 月份添加营养盐在某种程度上都能提高浮游植物的现存量，具体受那种营养盐限制要通过主效应方差分析来判断。

表 4.16 试验平均最大现存量和平均最大特定增长率 (7 月)

Tab.4.16 Average maximum standing crop and specific growth rate of NEB test (July)

单位:  $\bar{u}_{max}$  (mg/L)     $\bar{x}_{max}$  (d<sup>-1</sup>)

月份	营养盐	$\bar{x}_{max}$	$\bar{u}_{max}$	营养盐	$\bar{x}_{max}$	$\bar{u}_{max}$
	Control	27.66	2.38	/	/	/
	0.5PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	36.97	2.38	0.5NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	34.26	2.46
	1.0PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	32.13	1.96	1.0NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	28.32	2.64
七	1.5PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	33.19	2.50	1.5NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	25.01	1.65
月	2.0PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	32.72	2.25	2.0NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	28.11	2.25
份	0.5NH <sub>3</sub> -N	24.16	2.12	0.5PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P+0.5NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	27.38	2.38
	1.0NH <sub>3</sub> -N	32.59	2.65	1.0PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P+1.0NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	31.20	2.21
	1.5NH <sub>3</sub> -N	34.99	2.20	1.5PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P+1.5NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	35.85	2.40
	2.0NH <sub>3</sub> -N	33.28	2.22	2.0PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P+2.0NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	26.23	2.15
八	Control	42.42	1.12	/	/	/
月	0.5PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	47.93	1.27	0.5NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	63.44	1.04

	1.0PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	53.18	1.18	1.0NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	40.57	1.07
	1.5PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	54.16	1.22	1.5NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	54.77	2.03
	2.0PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	58.92	1.51	2.0NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	45.09	0.98
	0.5NH <sub>3</sub> -N	49.59	1.19	0.5PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P+0.5NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	51.06	1.15
	1.0NH <sub>3</sub> -N	69.83	1.01	1.0PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P+1.0NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	51.75	1.54
	1.5NH <sub>3</sub> -N	54.30	1.25	1.5PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P+1.5NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	50.95	1.16
	2.0NH <sub>3</sub> -N	57.42	1.14	2.0PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P+2.0NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	45.72	1.10
	Control	39.24	0.93	/	/	/
	0.5PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	44.41	0.67	0.5NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	47.35	0.92
	1.0PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	39.89	0.48	1.0NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	34.93	0.57
九	1.5PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	46.74	0.73	1.5NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	33.43	0.61
月	2.0PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	51.10	0.79	2.0NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	45.45	1.02
份	0.5NH <sub>3</sub> -N	42.82	0.56	0.5PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P+0.5NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	46.00	0.97
	1.0NH <sub>3</sub> -N	44.67	0.56	1.0PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P+1.0NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	45.24	0.74
	1.5NH <sub>3</sub> -N	53.65	0.84	1.5PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P+1.5NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	48.73	0.96
	2.0NH <sub>3</sub> -N	47.00	0.70	2.0PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P+2.0NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	42.00	1.00

通过平均最大现存量和平均最大特定增长率分析得出：在 4-6 月份添加 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 能显著提高浮游植物的现存量和增长率，PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 对浮游植物的生长速度都有促进作用，成为浮游植物生长速度主要限制因子；添加 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>3</sub>-N 对浮游植物生长影响不大，NH<sub>3</sub>-N 有时候还表现出抑制作用；在 7-9 月份添加营养盐在某种程度上都能提高浮游植物的现存量，但没有显著差别，具体受那种营养盐限制要通过主效应方差分析来判断。

#### 4.4.4 现场 NEB 试验浮游植物增长曲线分析

2009 年 4 月营养盐对浮游植物生长周期的影响情况如图 4.9 所示，添加 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 后前三天浮游植物生长迟缓，到第四天迅速生长进入对数生长期，第五天达到最大值，最大值为 90μg/L 左右，接着迅速进入衰亡期，叶绿素-a 含量迅速下降；添加 NH<sub>3</sub>-N 后前两天出现倒退现象，在第二天叶绿素-a 的含量甚至比 Control 还要低，但从第三天浮游植物开始缓慢生长；添加 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 后浮游植物生长始终没有任何反应，与不添加营养物的 Control 区别不大；添加 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P+NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 都浮游植物的生长于单独添加 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 的趋势完全一样，应该仅是 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 作用。

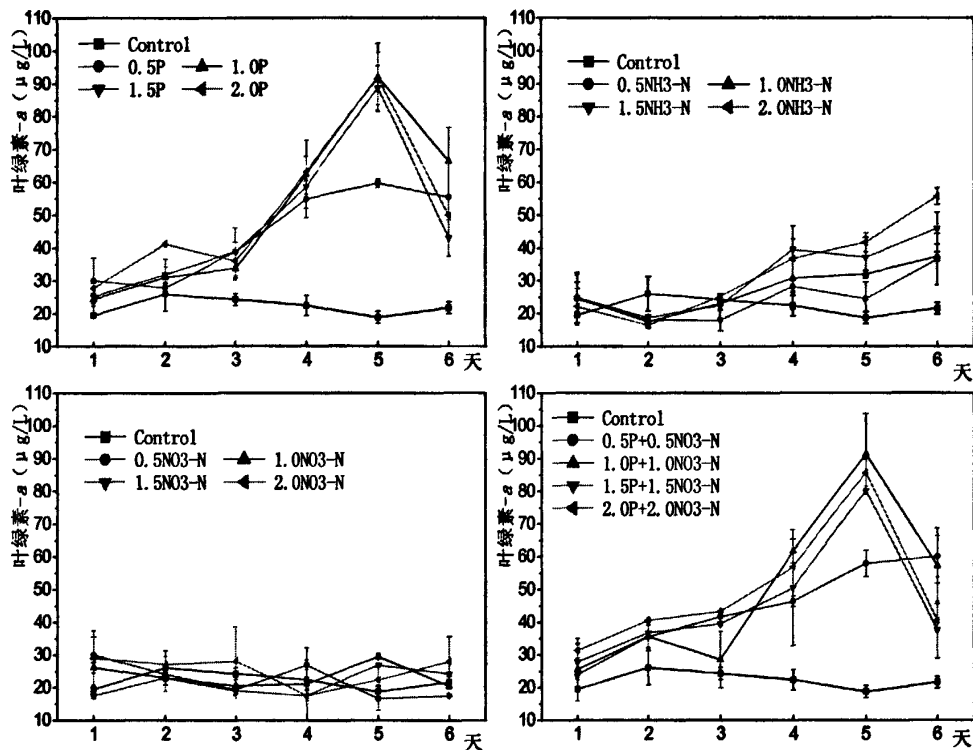


图 4.9 NEB 试验浮游植物增长曲线 (2009 年 4 月)

Fig.4.9 Phytoplankton growth curves of the NEB test

2009 年 5 月营养盐对浮游植物生长周期的影响情况如图 4.10 所示, 添加  $PO_4^{3-}-P$  和添加  $PO_4^{3-}-P+NO_3^{-}-N$  后浮游植物迅速生长直接进入对数期, 到第四天达到最大现存量, 之后进入稳定期, 并一直持续到实验结束; 添加  $NH_3-N$  和  $NO_3^{-}-N$  后浮游植物始终与不添加营养盐的 Control 生长趋势一致; 添加  $PO_4^{3-}-P+NO_3^{-}-N$  都浮游植物的生长于单独添加  $PO_4^{3-}-P$  的趋势一致, 应该仅是  $PO_4^{3-}-P$  作用。



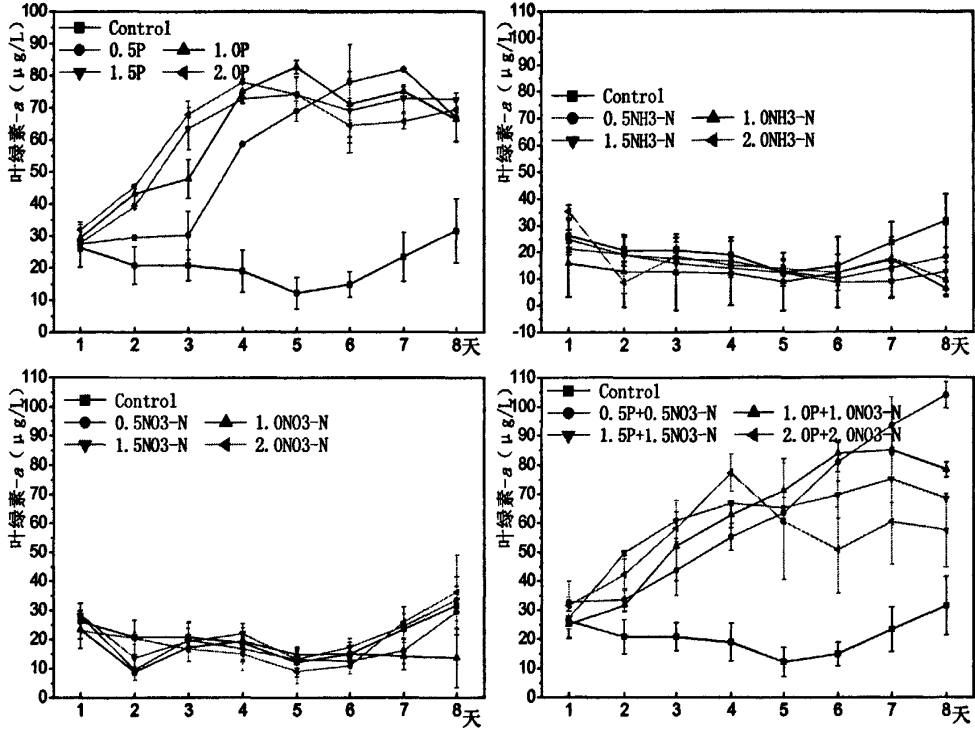


图 4.10 NEB 试验浮游植物增长曲线 (2009 年 5 月)

Fig.4.10 Phytoplankton growth curves of the NEB test

2009 年 6 月营养盐对浮游植物生长周期的影响情况如图 4.11 所示, 添加营养盐后浮游植物的生长减缓, 这可能与实验期间天气状况有关, 在实验的前六天都是阴天, 没有充足的阳光, 实验现场天气状况见 4.4.1 节, 但仔细分析四种添加方案还是有本质区别, 添加  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  和添加  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}+\text{NO}_3^-\text{-N}$  的组叶绿素-a 的含量始终比不添加营养盐 Control 大; 而添加  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  和  $\text{NH}_3\text{-N}$  一直与 Control 保持一致, 甚至有时还小于 Control。

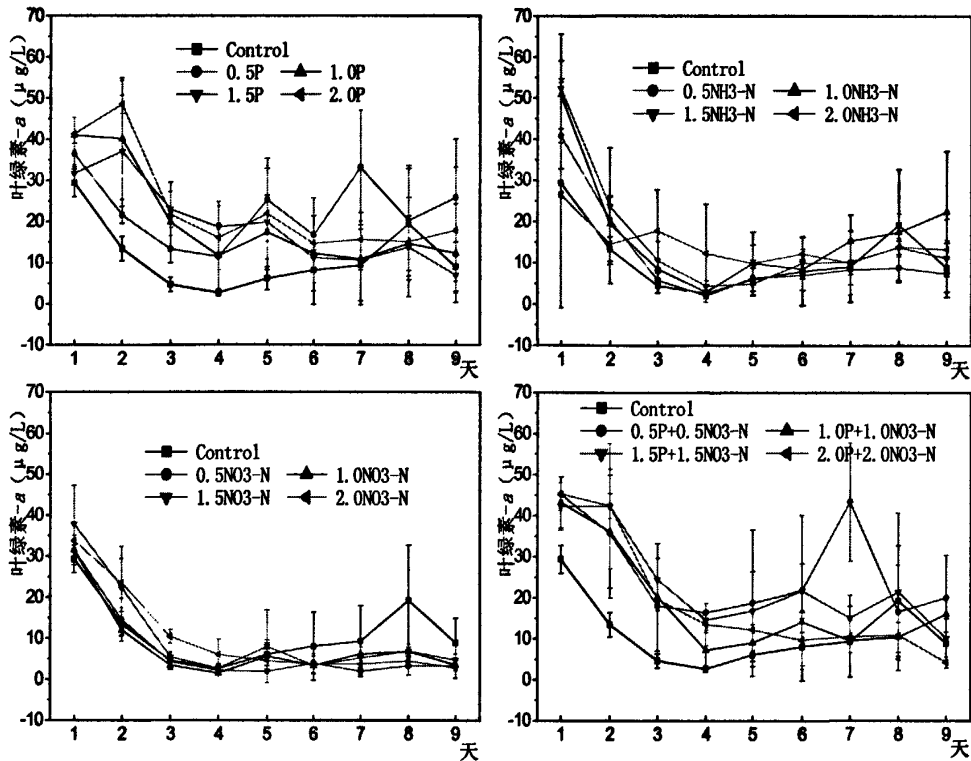


图 4.11 NEB 试验浮游植物增长曲线 (2009 年 6 月)

Fig.11 Phytoplankton growth curves of the NEB test

2009 年 7 月营养盐对浮游植物生长周期的影响情况如图 4.12 所示,七月份浮游植物生长于前面几个月出现了本质区别,添加  $PO_4^{3-}$ -P 后浮游植物的生长始终与不添加营养盐的 Control 保持一致,即在前两天浮游植物迅速生长,第二天达到最大值  $35\mu\text{g/L}$  左右,之后迅速降低,第五天最低,之后叶绿素-a 保持在一个相对较低的水平  $8\mu\text{g/L}$  左右。添加  $NO_3^-$ -N 和  $NH_3$ -N 后浮游植物的生长趋势与 Control 相似,但是整个生长周期中叶绿素-a 的含量都稍大于 Control,说明  $NO_3^-$ -N 和  $NH_3$ -N 对浮游植物的生长有一定的促进作用。

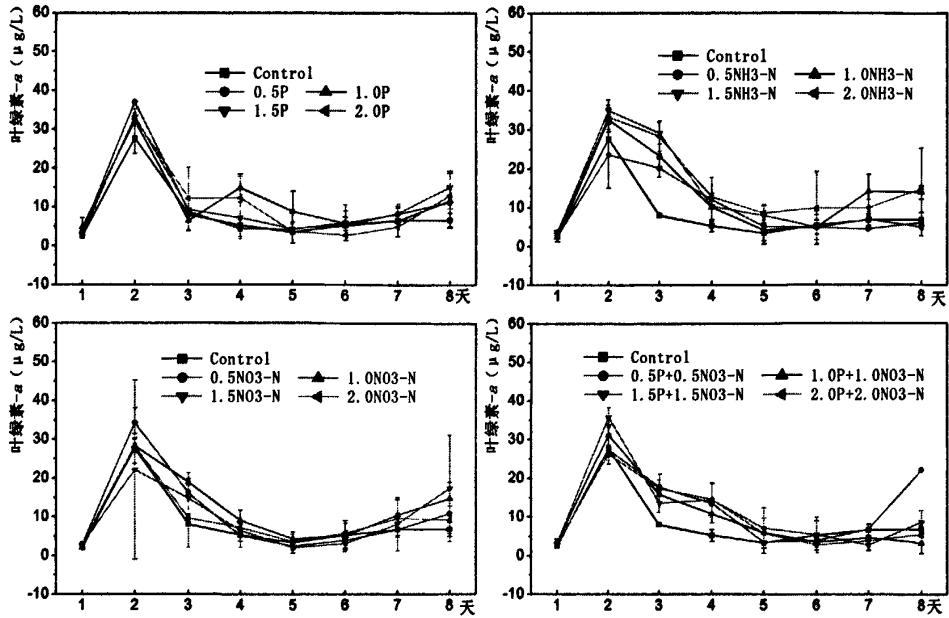


图 4.12 NEB 试验浮游植物增长曲线 (2009 年 7 月)

Fig.4.12 Phytoplankton growth curves of the NEB test

2009 年 8 月营养盐对浮游植物生长周期的影响情况如图 4.13 所示,八月份浮游植物的生长曲线和七月份相似,但与七月份不同的是叶绿素-a 的含量在第三天达到最大值大约在 50-60μg/L 之间,而且到实验末期添加 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>3</sub>-N 的试验组叶绿素-a 含量远大于 Control。

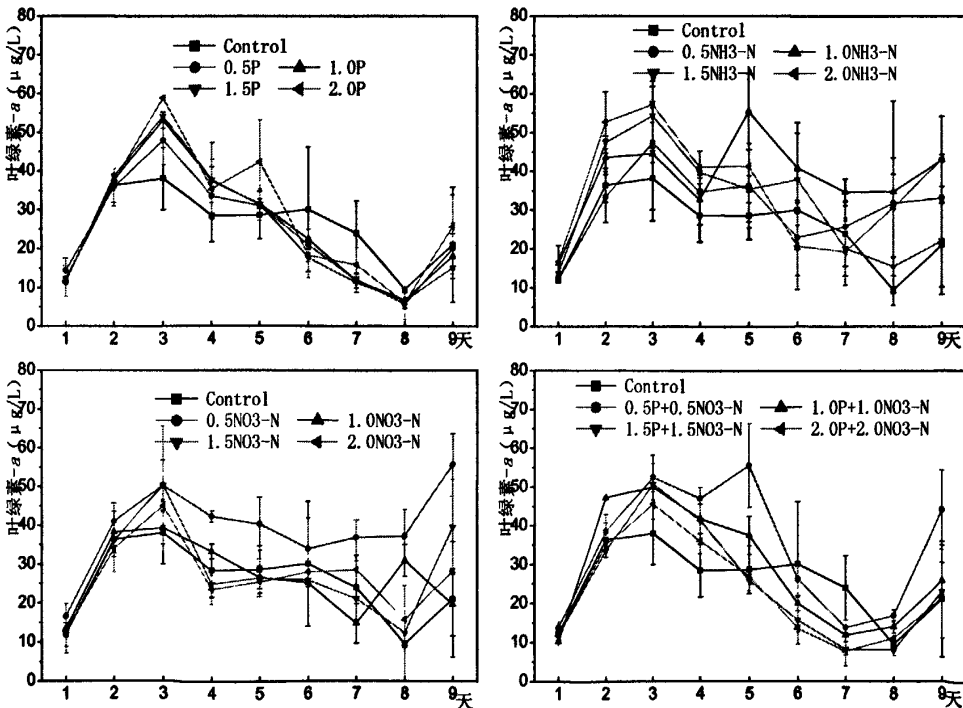


图 4.13 NEB 试验浮游植物增长曲线 (2009 年 8 月)

Fig.4.13 Phytoplankton growth curves of the NEB test

2009年9月营养盐对浮游植物生长周期的影响情况如图4.14所示,浮游植物的增长曲线与6-7月相似,添加 $PO_4^{3-}$ -P对浮游植物生长无影响,添加 $NO_3^-$ -N和 $NH_3$ -N对浮游植物有一定促进作用。

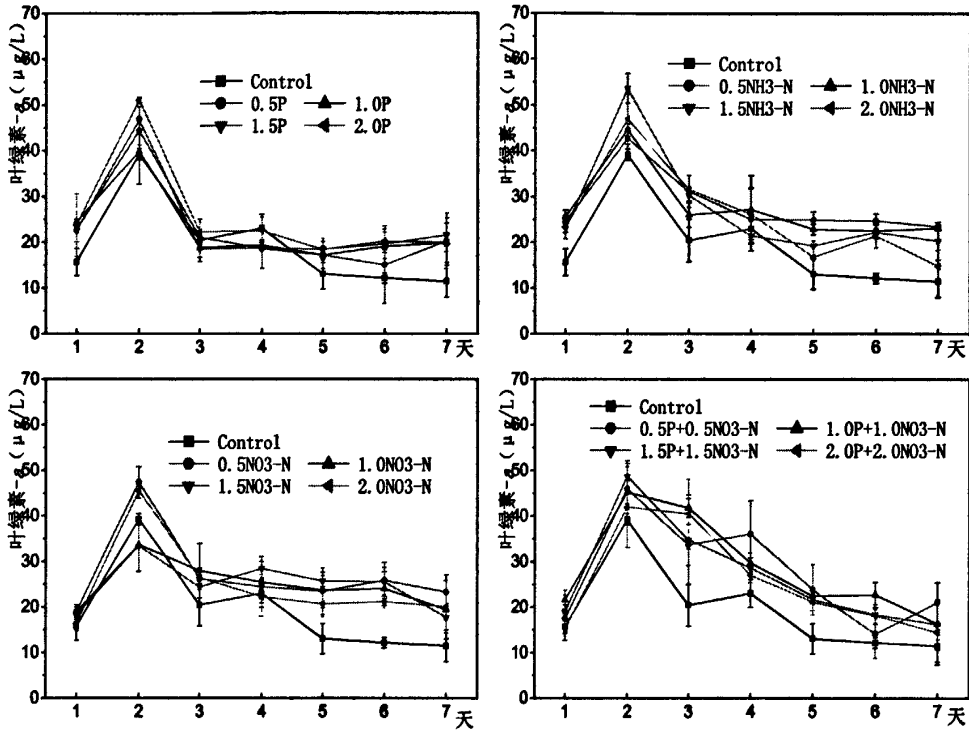


图 4.14 NEB 试验浮游植物增长曲线 (2009 年 9 月)

Fig.4.14 Phytoplankton growth curves of the NEB test

从现场 NEB 试验浮游植物增长曲线分析上看明显出现两个阶段:一个是4-6月份,添加 $PO_4^{3-}$ -P和添加 $PO_4^{3-}$ -P+ $NO_3^-$ -N后浮游植物能迅速增长,叶绿素-a的含量远大于不添加营养盐的Control,而添加 $NH_3$ -N和 $NO_3^-$ -N后浮游植物始终与不添加营养盐的Control生长趋势一致,说明添加 $PO_4^{3-}$ -P能促进浮游植物的生长;另一个阶段是7-9月份,添加 $PO_4^{3-}$ -P对浮游植物的生长都与不添加营养盐的Control一致,添加 $NO_3^-$ -N和 $NH_3$ -N对浮游植物有一定促进作用,说明在这段时间内 $NO_3^-$ -N和 $NH_3$ -N限制浮游植物的生长。

### 4.5 本章小结

本章主要通过相对比较系数法、平均最大现存量和平均最大特定增长率以及浮游植物增长曲线分析淀山湖4-9月份浮游植物增长营养物限制情况,为进一步说明试验结论对各试验相对比较系数平均(如图4.15和如4.16所示),通过分析得出在10-3月期间浮游植物增长营养物限制情况分为两个完全不同的情况:

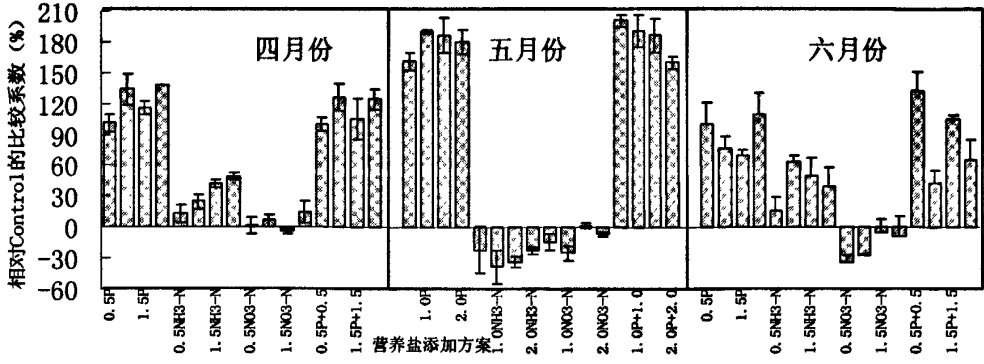


图 4.15 NEB 试验分析(平均值)

Fig.4.15 Analysis of NEB test (average)

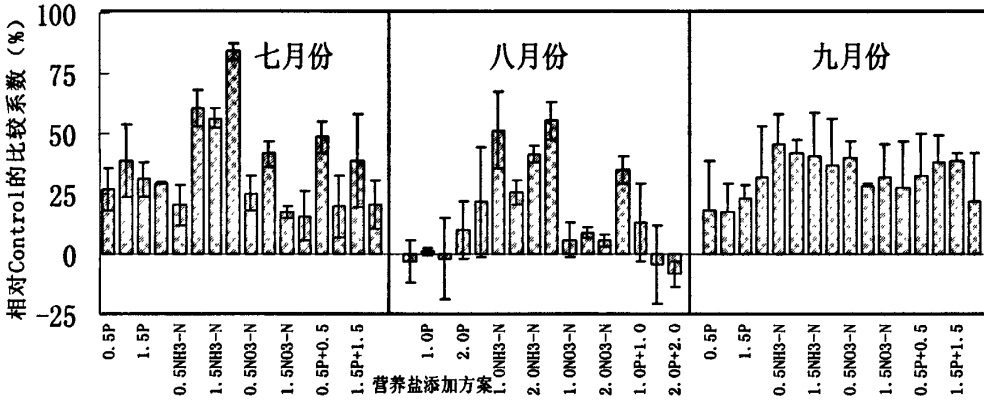


图 4.16 NEB 试验分析(平均值)

Fig.4.16 Analysis of NEB test (average)

(1) 在 4-6 月份添加  $PO_4^{3-}$ -P 能提高相对比较系数，增加浮游植物的现存量和增长率；而添加  $NO_3^-$ -N 和  $NH_3$ -N 对相对比较系数、浮游植物的现存量和增长率影响不大，在五月份添加  $NH_3$ -N 还表现出抑制作用，说明在 10-12 月份磷对浮游植物生长有明显促进作用，磷是限制浮游植物增长的限制性因子；

(2) 在 7-9 月份添加磷对浮游植物的生长影响不大，而添加氮（氨氮和硝氮）能提高相对比较系数和增加浮游植物的现存量，淀山湖浮游植物生长的限制性因子已经由 4-6 月份的磷限制转变成 7-9 月份氮限制。

## 第五章 营养盐和浮游植物营养物限制的关系

### 5.1 实验目的

通过监测淀山湖 2008-2009 年间总氮、氨氮、硝氮、总磷、磷酸盐和叶绿素-a 等指标含量,分析各指标和氮磷比全年变化规律,并结合第三章和第四章,找出浮游植物增长营养物限制与营养盐之间的关系。

### 5.2 材料与方法

#### 5.2.1 采样点设置

在 2008 年 8 月至 2009 年 7 月期间对淀山湖现场调查,监测频率为每月两次,共 24 次,监测采样点为四号航标附近非航道水域,采样点设置如图 2.1 所示。

#### 5.2.2 主要仪器和测量方法

岛津 1700 分光光度计、水平采样器和抽滤装置。

主要分析指标有叶绿素-a<sup>[95]</sup>、总氮 TN(GB/T 11894-89)、氨氮(GB/T 7479-87)、硝氮(HJ/T 346-2007)、总磷 TP(GB/T 11893-89)、磷酸盐(GB/T 11893-89)。

### 5.3 淀山湖各营养指标的分析(2008-2009 年)

#### 5.3.1 氮

2008-2009 年淀山湖总氮和氨氮+硝氮季节性变化如图 5.2 所示,氨氮+硝氮占 TN 百分比季节性变化如图 5.3 所示。淀山湖 TN 含量在 2.66-8.58mg/L 范围波动。全年范围出现两个峰值分别为 1-3 月份和 6-7 月份,在 1-3 月份 TN 含量相对较高,在 5.0mg/L 以上,最大值达到 8.58mg/L。在 6-7 月份 TN 含量在 4.0-6.0mg/L 范围,其余月份在 2.5-4.0mg/L 范围。根据 GB3838-2002《地表水环境质量标准》中的湖、库标准进行了类别评价,都劣于 V 类,大大超过了作为水源地的 II 类水质要求。但是 TN 含量高并不代表可被浮游植物直接利用的氨氮+硝氮含量高,在 2-3 月和 6-7 月份 TN 含量很高,但是氨氮+硝氮占 TN 的比例却相对较低在 65%以下,在 6-7 月份仅 45%。而在其他月份 TN 相对较低,但是氨氮+硝氮占总氮的比例却很高,都在 85%以上,有部分月份甚至达到 96%。

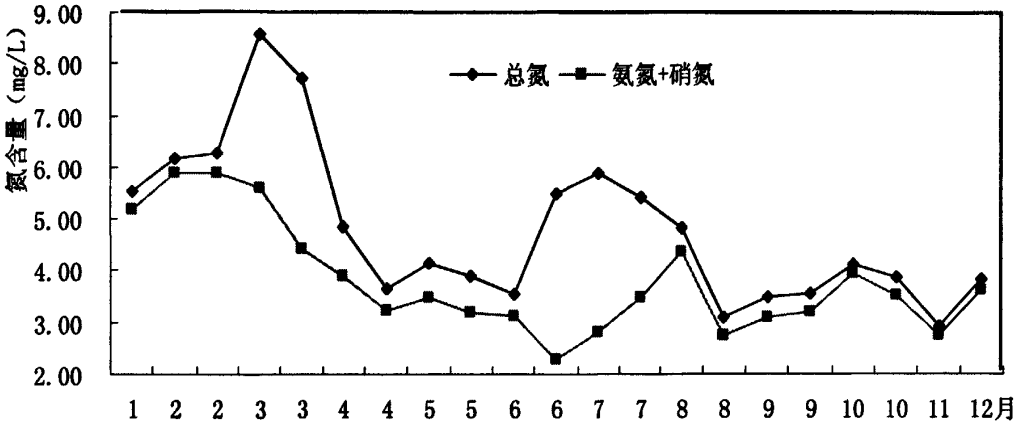


图 5.2 淀山湖 TN 和氨氮+硝氮季节性分布 (2008-2009 年)

Fig.5.2 The seasonal distribution of TN and DN in Dianshan Lake

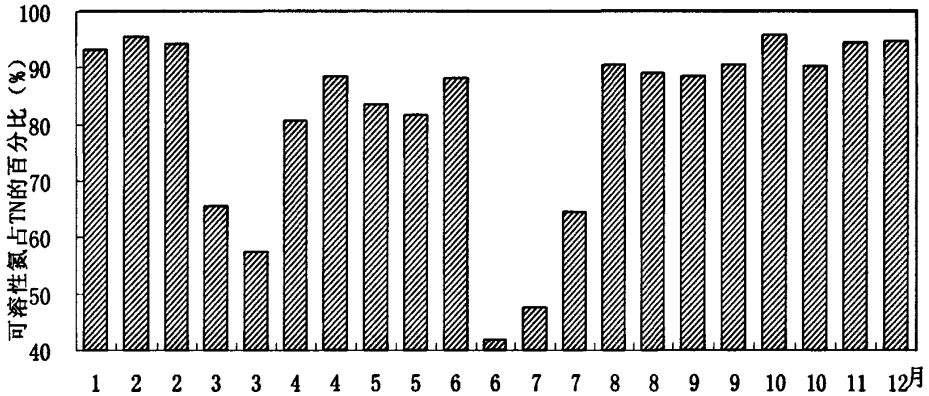


图 5.3 氨氮+硝氮占 TN 的百分比

Fig.5.3 The percentage of TN accounts for DN

### 5.3.2 磷

2008-2009 年淀山湖总磷和磷酸盐季节性变如图 5.4 所示, 磷酸盐占 TP 百分比如图 5.5 所示。淀山湖 TP 含量在 0.1-0.33mg/L 范围波动。全年范围出现两个峰值分别为 10-3 月份和 5-7 月份, 在 10-3 月份 TP 含量很高, 均在 0.24mg/L 以上, 最大值达到 0.33mg/L。在 5-7 月份 TP 比 10-3 月份相对较低在 0.20-0.28mg/L 范围, 在 8-10 月份 TP 含量最低在 0.094-0.20mg/L 之间。同样大大超过了作为水源地的 II 类水质要求。而磷酸盐全年在 0.02-0.10mg/L 之间波动, 磷酸盐在 1-3 月和 6-9 月份较高, 分别为 0.05-0.1mg/L 和 0.072-0.088 之间, 其余时间处于一个较低水平约 0.025mg/L。磷酸盐占 TP 百分比全年变化非常大, 在 8-9 月最大占 94.04%, 最小在 11-12 月仅占 10.45%和 10.46%, 其余月份 20%-40%之间。在 1-3 月份总磷含量非常高, 但是可被浮游植物直接利用的磷酸盐仅占 20%-35%之间, 而在 8-9 月份 TP 含量非常低进 0.10 mg/L, 但是其磷酸盐比例非常高在 80%以上。

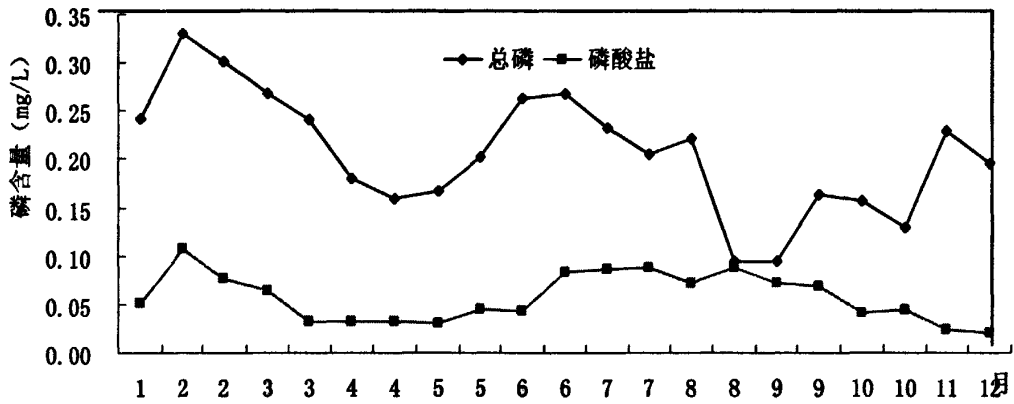


图 5.4 淀山湖 TP 和磷酸盐季节性分布 (2008-2009 年)

Fig.5.4 The seasonal distribution of TP and in PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P Dianshan Lake

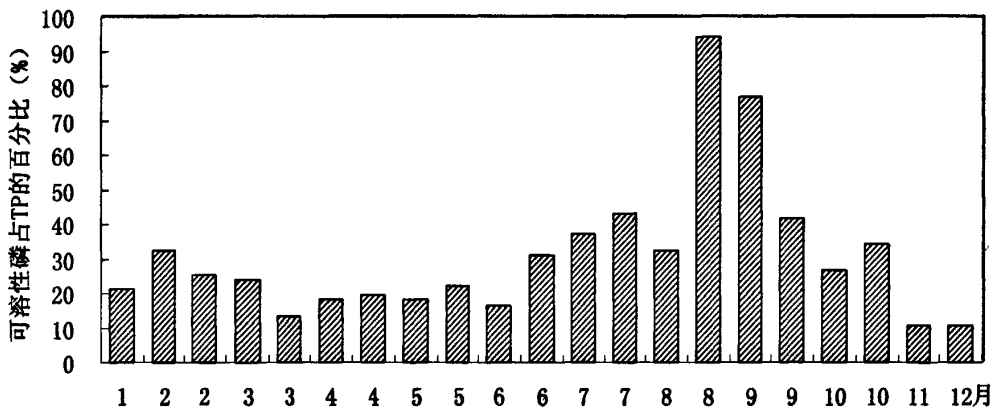


图 5.5 磷酸盐占总磷的百分比

Fig.5.5 The percentage of TP accounts for PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P

### 5.3.3 叶绿素-a

叶绿素-a 作为湖泊生物量含量的重要指标，对湖泊富营养化程度具有重要指示作用，2008 年-2009 年淀山湖四号航标的叶绿素-a 逐月变化如图 5.6 所示，同样叶绿素-a 在全年范围有两个峰值，分别为 3-5 月份和 6-7 月份，在 3-5 月份叶绿素-a 的含量最大，最大值为 55.85μg/L，在 6-7 月份叶绿素-a 的含量在 20.00-30.00μg/L 之间。营养盐 TP 和 TN 的含量分布与藻类生物量叶绿素-a 的值呈现错开的关系，冬季水体中的总磷营养盐浓度偏高，为春季的藻类爆发积蓄了足够的营养物质。春季的藻类增殖，大量消耗了水中的磷，使得春季营养物质下降。之后，藻类大量死亡，又可能引起水体中总磷浓度上升。淀山湖营养盐全年呈交替变化与浮游植物生物量全年呈氮磷交替限制相对应。



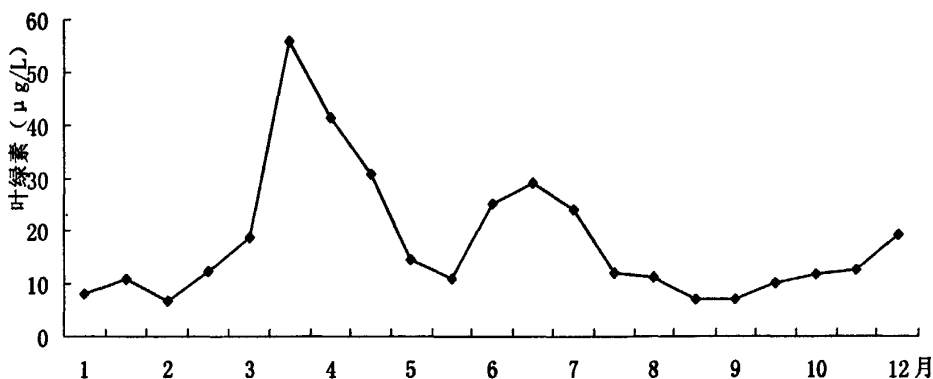


图 5.6 淀山湖叶绿素-a 季节性分布 (2008-2009 年)

Fig.5.6 The seasonal distribution of Chl-a in Dianshan Lake

#### 5.4 营养物限制与 TN/TP 的关系

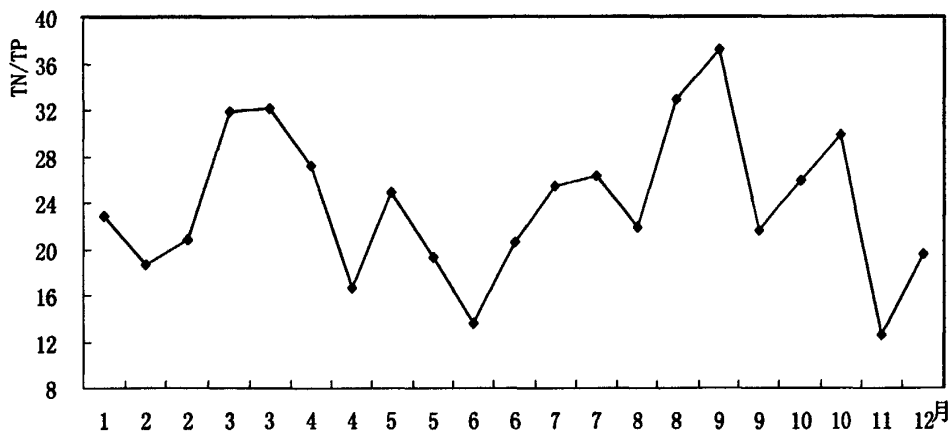


图 5.7 淀山湖 TN/TP 的季节性变化 (2008-2009 年)

Fig.5.7 The seasonal distribution of TN/TP in Dianshan Lake

2008-2009 年试验点 TN/TP 的季节性变化如图 5.7 所示, 从图中可以看出淀山湖 TN/TP 全年在 13-37 之间变化, 在 3 月和河 9 月 TN/TP 较高, 都在 32 以上, 其余月份相对较低。在 2-3 月份 TN/TP 在 18-32 之间, 而从论文的第三章和第四章得出结论是浮游植物增长不受营养无限制; 在 4-6 月份 TN/TP 在 18-32 之间, 浮游植物增长属于磷限制; 在 7-9 月份 TN/TP 在 13-20 之间, 浮游植物增长属于氮限制; 在 10-12 月份 TN/TP 在 23-27 之间, 浮游植物增长属于磷限制。通过分析可知, TN/TP 和浮游植物增长营养物限制没有必然的联系。因此, 在淀山湖采用 TN/TP 判断营养物限制意义不大。

#### 5.5 营养物限制与 (氨氮+硝氮)/磷酸盐的关系

2008-2009 年试验点 (氨氮+硝氮)/磷酸盐的值如图 5.8 所示, 从图中可以看

出(氨氮+硝氮)/磷酸盐全年在 27-134 之间大范围波动,在 3-4 月份和 10-1 月份(氨氮+硝氮)/磷酸盐比较大。结合第三章和第四张分析可知,2-3 月份(氨氮+硝氮)/磷酸盐为 54-87,浮游植物增长不受营养物限制;4-6 月份(氨氮+硝氮)/磷酸盐为 71-120,浮游植物增长属于磷限制;7-9 月份(氨氮+硝氮)/磷酸盐为 30-57,浮游植物增长属于氮限制;10-12 月份(氨氮+硝氮)/磷酸盐为 78-142,浮游植物增长属于磷限制。因此,(氨氮+硝氮)/磷酸盐与浮游植物增长营养物限制有必然的联系,当(氨氮+硝氮)/磷酸盐 $\leq 57$ 时,淀山湖浮游植物增长属于氮限制;当 $57 \geq$ (氨氮+硝氮)/磷酸盐 $\leq 71$ 时,氮磷对浮游植物增长都不具有显著性;当(氨氮+硝氮)/磷酸盐 $\leq 71$ 时,淀山湖浮游植物增长属于磷限制。

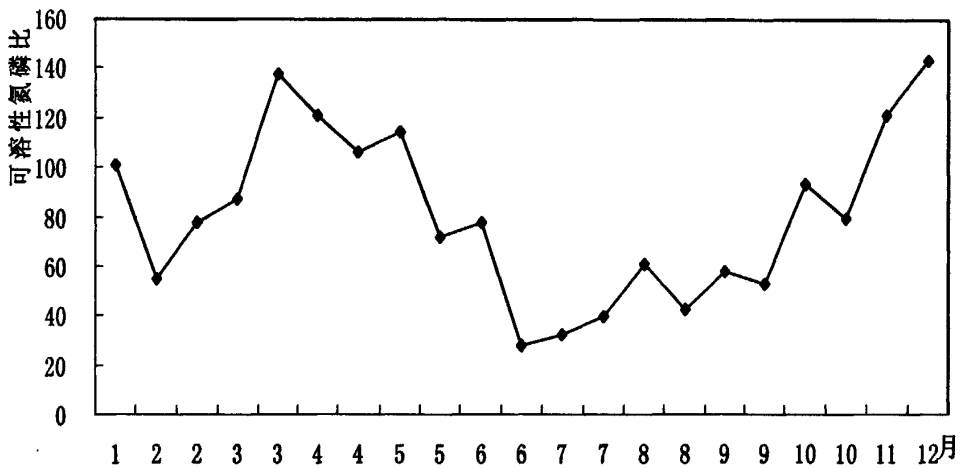


图 5.8 淀山湖(氨氮+硝氮)/磷酸盐的季节性变化(2008-2009 年)

Fig.5.8 The seasonal distribution of  $(\text{NH}_3\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N})/\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  in Dian Shan Lake

## 5.6 本章小结

本章主要通过分析总氮、氨氮、硝氮、总磷、磷酸盐和叶绿素-a 等指标含量得出各指标及氮磷比全年变化规律,以及找出浮游植物增长营养物限制与营养盐之间的关系。

通过分析 2008 年 8 月至 2009 年 7 月全年营养盐和浮游植物的生物量得出:在 2008-2009 年间,TP 出现两个峰值分别为 10-3 月份和 5-7 月份, TN 出现两个峰值分别为 1-3 月份和 6-7 月份,而藻类的生物量叶绿素-a 在为 3-5 月份和 6-7 月份两个峰值。营养盐的分布与浮游植物生物量叶绿素-a 的值呈现错开的关系;可被浮游植物直接利用的可溶性营养盐在总营养盐中的比例变化非常大,且 TN/TP 和浮游植物增长营养物限制没有必然的联系,相比之下,采用(氨氮+硝氮)/磷酸盐能很好的判断浮游植物增长营养物限制,当(氨氮+硝氮)/磷酸盐 $\leq 57$ 时,淀山湖浮游植物增长属于氮限制;当 $57 \geq$ (氨氮+硝氮)/磷酸盐 $\leq 71$ 时,氮磷对浮游植物增长都不具有显

著性；当（氨氮+硝氮）/磷酸盐 $\leq 71$ 时，淀山湖浮游植物增长属于磷限制。

## 第六章 结论与展望

### 6.1 结论

淀山湖是上海最大的湖泊，也是上海主要供水水源地之一，为保障城市供水安全，就必须解决水体富营养化问题。湖泊富营养化是水体在一个相当长时间内过量积累过量营养物质而形成的，这就要求我们从营养物着手探索影响浮游植物增长因素，同时对湖泊的湖泊学数据进行长期的观测、积累和分析。本课题主要是以保护上海市水源地供水安全为目的，在对淀山湖的水质现状进行了调查研究、收集资料和大量实验的基础上，分析淀山湖富营养化主要指标的长期变化趋势，研究淀山湖浮游植物增长限制性营养物元素，为湖泊管理和制定藻类水华治理措施提供一定的科学依据。笔者有针对性地进行了深入研究，主要结论如下：

通过对淀山湖1986-2007年22年间的生态、水质和水文数据分析表明淀山湖生态系统发生了重大变化，富营养化水平也从贫营养化转变成重度富营养化状态。淀山湖中氮、磷等营养物质含量持续增加，且近年来的增长速度远大于过去，这直接导致的溶解氧下降和透明度降低；淀山湖自1985年第一次藻类水华以来，以后每年都有程度的水华出现，从月份每年10-1月份的秋冬季发生水华较频繁，6-9月份次之；从年份上看2000-2003年生藻类水华的频率，2004年以来又有所好转，且发生藻类水华的次数与淀山湖叶绿素-*a*的增长趋势一致；淀山湖浮游植物优势种类由中营养型藻类逐步向富营养型藻类转变，硅藻在浮游植物中比例逐年减少，而绿藻和蓝藻优势种的比例逐年增加，造成浮游植物种类数呈下降趋势，生物多样性锐减。

通过实验室NEB试验研究淀山湖浮游植物生长营养物限制表明10-12月份添加 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 能提高相对比较系数，增加浮游植物的现存量和增长率，而添加 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 对相对比较系数、浮游植物的现存量和增长率影响不大，添加磷+硝氮能够显著增加生物量，但从主效应分析看磷与硝氮之间不存在交互作用，仅是磷促进浮游植物生长；10-12月磷是限制浮游植物增长的限制性因子；在2-3月间由于淀山湖水体中有充足的氮磷（总磷0.3mg/L，总氮7mg/L），湖体能提供足够的营养盐供浮游植物生长，增加营养盐对浮游植物的生长影响不大，在这期间营养物不是限制浮游植物生长主要因素。

现场藻类增长生物学评价试验研究表明在4-6月份添加 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 能提高相对比较系数，增加浮游植物的现存量和增长率；而添加 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 对相对比较系数、浮游植物的现存量和增长率影响不大，说明在4-6月份磷对浮游植物生长有明显促进作用，磷是限制浮游植物增长的限制性因子；在7-9月份添加磷对浮游植物的生

长影响不大,而添加氮(氨氮和硝氮)能提高相对比较系数和增加浮游植物的现存量,淀山湖浮游植物生长的限制性因子已经由4-6月份的磷限制转变成7-9月份氮限制。因此,淀山湖浮游植物增长营养物限制全年经历了磷限制(10月-12月)到不受营养物限制(2月-3月)再到磷限制(4月-6月)最后转为氮限制(7月-9月)这么一过程。

通过分析2008年8月-2009年7月全年营养盐和藻类的生物量得出:在2008-2009年间,TP出现两个峰值分别为10-3月份和5-7月份,TN出现两个峰值分别为1-3月份和6-7月份,而藻类的生物量叶绿素-*a*在3-5月份和6-7月份两个峰值。营养盐的分布与藻类生物量叶绿素-*a*的值呈现错开的关系;可被浮游植物直接利用的可溶性营养盐在总营养盐中的比例变化非常大,相比之下采用(氨氮+硝氮)/磷酸盐比TN/TP更好的判断浮游植物增长营养物限制,当(氨氮+硝氮)/磷酸盐 $\leq 57$ 时,淀山湖浮游植物增长属于氮限制;当 $57 \geq$  (氨氮+硝氮)/磷酸盐 $\leq 71$ 时,氮磷对浮游植物增长都不具有显著性;当(氨氮+硝氮)/磷酸盐 $\leq 71$ 时,淀山湖浮游植物增长属于磷限制。

## 6.2 展望

本文通过分析淀山湖2008-2009年营养盐、浮游植物生物量和历史营养盐水平状况,以及实验室和现场藻类培养NEB试验找出淀山湖浮游植物增长限制性营养元素。虽然取得了一些进展,但还有一些方面有待深入的研究和探讨。

(1) 由于NEB试验是采用封闭式培养容器,未考虑藻类的固氮作用,同时也很难模拟生态系统复杂的真实情况,这可能影响实验的结论。因此,该试验方法有待进一步改进。

(2) 不同种类藻类对氮磷等营养物的需求不一样,在实验过程中没有分析藻类种群的变化,而仅集中浮游植物生物总量上。因此,培养过程中藻类种群的变化有待进一步分析和研究。

## 参考文献

- [1] 金相灿.中国湖泊环境(第1册)[M].北京:海洋出版社,1995.
- [2] 张锡辉.水环境修复工程学原理与应用[M].北京:化学工业出版社,2002
- [3] Shirmohammadi A, Ulen B, Bergstrom, et al. Simulation of nitrogen and Phosphorus leaching in a structured soil using gleams and a new submodel, PARTLE[J]. Transactions of the ASAE, 1998, 41: 353-360
- [4] 朱颜明,黎劲松,杨爱玲等.城市饮用水地表水源非点源污染研究[J].城市环境与城市生态, 2000, 13(4): 1-4.
- [5] 贺缠生,傅伯杰.非点源污染的管理与控制[J].环境科学,1998,19(5):87-91.
- [6] Sakamoto M. Primary production by phytoplankton community in some Japanese lakes and its dependence on lake depth. Arch Hydrobiol, 1966, 62, 1-28
- [7] 王海军,王洪铸.富营养化治理应放宽控氮、集中控磷[J].自然科学进展. 2009,19(6),599-605
- [8] Smith VH. The nitrogen and phosphorus dependence of algal biomass in lakes: an empirical and theoretical analysis. Limnol Oceanogr, 1982, 27: 1101-1112
- [9] Klausmeyer CA, Litchman E, Daufresne T, et al. Optimal nitrogen to phosphorus stoichiometry of phytoplankton. Nature, 2004, 429: 171-174
- [10] 高学庆,任久长.铜绿微囊藻营养动力学研究[J].北京大学学报:自然科学版,1994, 30(4):461-469.
- [11] 张红雨,胡鸿雁,吴立群,等.汉江武汉段“水华”的形成分析及其防治建议.[2004].水利工程网.
- [12] 刘玉生,韩梅,梁占彬.光照、温度和营养盐对滇池微囊藻生长的影响[J].环境科学研究,1995,8(6):7-8.
- [13] 徐敏,程凯.环境因子对衣藻水华消长影响的初步研究[J].华中师范大学学报:自然科学版,2001,35(3):322-325.
- [14] 鲁敏,曾庆福.七种植物的人工湿地处理生活污水的研究[J].武汉科技学院学报,2004,17(2):32-35.
- [15] 赵彬.外源添加营养对安徽太平湖水藻类增殖影响[J].湖泊科学.1996,6
- [16] 王霞,吕宪国,张学林等.松花湖富营养化现状及其影响因素分析[J].湿地科学.2004,12
- [17] 吴洁,钱天鸣等.西湖叶绿素-a 周年动态变化及藻类增长潜力试验[J].湖泊科学, 2001, 13(2): 143-148.
- [18] 李凤彬,杜迎新等.洋河水库藻类增长实验分析[J].河北水利水电技术, 2001, (5): 26.
- [19] 蒲新明,吴玉霖,张永山等.长江口区浮游植物营养限制因子的研究[J].海洋学报,2000,(22):60-66

- [20] 郭蔚华,罗荣祥,张智等.长江和嘉陵江交汇段营养限制因子的试验[J].重庆大学学报(自然科学版),2006.01:98-101
- [21] 韦桂秋,李兰生,欧强等.AGP 试验在珠江口监测中的应用[J].海洋通报,2004.8(23):55-59
- [22] 高桥幸彦,杜茂安,王云波等.处理水 AGP 值对受纳河流水质的影响[J].中国给水排水 2005.1(21):98-100
- [23] 尹大强,吴重华,王晓蓉等.太湖湖水及沉积物磷释放对藻类生长潜力研究[J].南京大学学报,1996.4(32):253-260
- [24] 孙喆,杜茂安,高桥幸彦等.胜利油田耿井水库浮游植物增长潜力限制性营养研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2006.09:804-808
- [25] 王海明,王宁,王晓蓉等.不同浓度  $Mn^{2+}$ 对铜绿微囊藻的生长及其生物可利用性的影响[J].环境污染与防治.2008,1
- [26] 王海明,王宁,袁信芳等.不同形态  $Fe^{2+}$ 对铜绿微囊藻生长及其生物可利用性的影响[J].农业环境科学学报.2007
- [27] 张铁明,杜桂森,杨忠山等.锌对 2 种淡水浮游藻类增殖的影响[J].西北植物学报.2006
- [28] 刘静玲,盛连喜,候瑞珍等.不同温度下铜绿微囊藻生长特性的初步研究[J].1982
- [29] 张运林,秦伯强,陈伟民等太湖梅梁湾春季浮游植物初级生产力带[J].湖泊科学,2005,17(1):81-86
- [30] 阎希柱.初级生产力的不同测定方法[J].水产学杂志,2005,5(13):81-86
- [31] Maestrini S Y, Breret M, Berland B R et al. Nutrients limiting the algal growth potential (AGP) in the Po River Plume and an adjacent area, Northwest Adriatic Sea: Enrichment bioassays with the test algae *Nitzschia closterium* and *Thalassiosira pseudonana* [J]. Estuaries, 1997, 20(2): 416-429.
- [32] G. A. O. Moser. T. C. S. Sigaud-Kutner et al. Algal growth potential as an indicator of eutrophication degree in coastal areas under sewage disposal influence. Aquatic Ecosystem Health and Management 7 (2004):115-126
- [33] 赵彬.外源添加营养对安徽太平湖水藻类增殖影响[J].湖泊科学.1996,6
- [34] 王霞,吕宪国,张学林等.松花湖富营养化现状及其影响因素分析[J].湿地科学.2004,12
- [35] 吴洁,钱天鸣等. 西湖叶绿素-a 周年动态变化及藻类增长潜力试验[J]. 湖泊科学, 2001, 13(2): 143-148.
- [36] Dodds, W.K.; Johnson K.R.; Prisco J.C. Simultaneous nitrogen and phosphorus deficiency in natural phytoplankton assemblages: theory, empirical evidence, and implications for lake management. Lake and Reserv. Manage. 1989, 5, 21 - 26.
- [37] 金相灿.湖泊富营养化调查规范[M].北京:中国环境科学出版社,1990,275~285
- [38] Goldman, C.R., Jassby, A.D.; Hackley, S.H. Decadal, interannual, and seasonal variability in enrichment bioassay at Lake Tahoe, California - Nevada, USA.Can. J. Fish. Aquat. Sci. 1993,

- 50, 1489-1496.
- [39] 2. Jones, J.R.; Laperriere, J.D.; Perkins, B.D. Limnology of Walker Lake and comparisons with other lakes in the Brooks Range, Alaska (USA). Verh. Internat. Verein. Limnol. 1990, 24, 302 - 308.
- [40] 宋永昌.淀山湖富营养化及其防止研究[J].上海:华东师范大学出版社,1992:5-30.
- [41] 阮仁良,屠鹤鸣,王云.淀湖水水质监测及富营养化对策研究[J].上海水利, 1997,48(3):35-38.
- [42] 由文辉.淀湖水生态系统的物质循环[J].中国环境科学,1997,17(4):293-296.
- [43] 王旭晨,王丽卿,彭自然.灰色聚类法评价淀湖水水质状况[J].上海水产大学学报.2006,4.
- [44] 郑晓红.影响淀湖水水质变化的因素分析[J].干旱环境监测.1999,4.
- [45] 张鼎国,杨再福.淀山湖生态环境的演变与对策[J].水利渔业.2006,1.
- [46] 张运林,秦伯强,黄群芳.东部平原地区湖泊富营养化的演变及区域分析[J].上海环境科学,2002,9.
- [47] 赵宏林,陈东辉.淀湖水环境管理新模式探讨[J].上海环境科学,2002,8.
- [48] 胡玲珍,陈振楼,刘杰.长江三角洲湖泊富营养化演变趋势及其调控对策[J].重庆环境科学.2003,3.
- [49] 宋玲玲,仇雁翎,张洪恩等.淀山湖叶绿素- $a$  的高光谱遥感监测研究[J].长江流域资源与环境.2007,1.
- [50] 童小华,谢欢,仇雁翎等.黄浦江上游水域的多光谱遥感水质监测与反演模型[J].武汉大学学报(信息科学版).2006,10.
- [51] 刘成,高乃云,严敏等.黄浦江源水中藻类和微囊藻毒素状况调查[J].中国给水排水.2006,15.
- [52] 施玮,吴和岩,赵耐青等.淀湖水水质富营养化和微囊藻毒素污染水平[J].环境科学.2005,5.
- [53] 张志红,赵金明,蒋颂辉等.淀山湖夏秋季微囊藻毒素-LR 和类毒素-A 分布状况及其影响因素[J].卫生研究.2003,4.
- [54] 张志红,郑力行,屈卫东等.淀山湖微囊藻毒素-LR 和类毒素-A 的分布状况中国环境科学[J].2003,4.
- [55] 连民,陈传炜,俞顺章等.淀山湖夏季微囊藻毒素分布状况及其影响因素[J].中国环境科学.2000,4.
- [56] 赵爱萍,刘福影,吴波等.上海淀山湖的浮游植物[J].上海师范大学学报(自然科学版).2005,4.
- [57] 由文辉.淀山湖着生藻类群落结构与数量特征[J].环境科学.1999,5.
- [58] 由文辉.淀山湖周丛动物群落的初步研究[J].水生生物学报.1997,2.
- [59] 由文辉.淀湖水生态系统的物质循环[J].中国环境科学.1997,4.
- [60] 由文辉.淀山湖的浮游植物及其能量生产[J].海洋湖沼通报.1995,1.
- [61] 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):409-419



- [62] 上海市环境质量报告书(1991-2004). 上海:上海市环境保护局.
- [63] 赵爱萍,刘福影,吴波等.上海淀山湖的浮游植物[J].上海师范大学学报(自然科学版) 2005,12
- [64] 阮仁良,屠鹤鸣,王云.淀湖水水质监测及富营养化对策研究[J].上海水利,1997,48(3):35~38.
- [65] 阮仁良,王云.淀湖水环境质量评价及污染防治研究[J].湖泊科学,1993,5(6):153~158.
- [66] 谢欢.基于遥感的水质监测与时空分析[学位论文].上海:同济大学.2006.
- [67] 上海市环境质量报告书(1991~1995)[R]. 上海:上海市环境保护局. 1996.
- [68] 上海市环境质量报告书(1993)[R]. 上海:上海市环境保护局. 1994.
- [69] 上海市环境质量报告书(1994)[R]. 上海:上海市环境保护局. 1995.
- [70] 上海市环境质量报告书(1998)[R]. 上海:上海市环境保护局. 1999.
- [71] 上海市环境质量报告书(1999)[R]. 上海:上海市环境保护局. 2000.
- [72] 上海市环境质量报告书(2001)[R]. 上海:上海市环境保护局. 2002.
- [73] 上海市环境质量报告书(2002)[R]. 上海:上海市环境保护局. 2003.
- [74] 上海市环境质量报告书(2003)[R]. 上海:上海市环境保护局. 2004.
- [75] 上海市环境质量报告书(2004)[R]. 上海:上海市环境保护局. 2005.
- [76] 上海市环境质量报告书(2000~2005)[R]. 上海:上海市环境保护局. 2005.
- [77] 上海市环境质量报告书(2006)[R]. 上海:上海市环境保护局. 2007.
- [78] 上海市环境质量报告书(2007)[R]. 上海:上海市环境保护局. 2008
- [79] Kamenir Y Z, Dubinsky T Z. Phytoplankton size structure stability in mesoeutrophic subtropical lake[J].Hydrobiologia, 2004, 520: 89~104.
- [80] KolkwitzR, MarssonM. Okologie dertierischen sapro-bien [J].Hydrobiologia, 1909, 2: 145~152
- [81] 赵怡冰,许武德,郭宇欣.生物的指示作用与水环境[J].水资源保护, 2002, (2): 11~16.
- [82] 由文辉.淀山湖的浮游植物及其能量生产[J].海洋湖沼通报,1995,1:47-53
- [83] 金相灿等.中国湖泊环境(第1册) [M].北京:海洋出版社,1995.
- [84] 金相灿等.湖泊富营养化调查规范(第2版) [M].北京:中国环境科学出版社,1990.
- [85] 裘明,谢平等.汉江水华问题研究[J].水科学进展,2002,13(5):557~560.
- [86] 卢大远,刘培刚等.汉江下游突发“水华”的调查研究[J]. 环境科学研究,2000,13(2):28~31.
- [87] 董云仙.洱海蓝藻水华研究[J].云南环境科学,1999,18(4):28~31.
- [88] 况琪军,谭渝云等.汉江中下游江段藻类现状调查及“水华”成因分析[J].长江流域资源与环境,2000,9(1):63~70.
- [89] 曾正荣,袁永坤,孙建国.淀山湖生物资源调查研究[J].见:上海湿地利用和保护研讨会论文集.上海:上海市水利学会,2002

- [90] 谢欢.基于遥感化水质监测与时空分析(学位论文).同济大学,2006
- [91] Elizabeth J. Arar and Gary B. Collins. 1997. In Vitro Determination of Chlorophyll a and Pheophytin a in Marine and Freshwater Algae by Fluorescence (Method 445.0). National Exposure Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency.
- [92] Goldman CR, Wetzel RG. A study of the primary productivity of Clear Lake, Lake County, California. *Ecology*, 1963, 44(2): 283-294.
- [93] Horne AJ, Goldman CR. Nitrogen fixation in Clear Lake, California. 1. Seasonal variation and the role of the heterocysts. *Limnol Oceanogr*, 1972, 17(5): 678-692.
- [94] 丁国盛,李涛.SPSS 统计教程.从研究设计到数据分析[M].北京:机械工业出版社,2007:197-233
- [95] 宇传华.SPSS 与统计分析[M].北京:电子工业出版社,2007:515-525
- [96] 国家环境保护总局,水和废水监测分析.方法委员会水和废水检测方法(第四版).北京;中国环境科学出版社.2002

## 硕士期间发表论文及专利情况

环境科学与工程学院； 姓名吴雪峰； 学号 2070584； 导师（签名）



表一：发表于核心刊物的论文

序号	论文名称	发表刊物	发表日期	排序	获奖情况
1	淀山湖藻类增长营养无限制的研究	长江流域资源与环境		第一作者	
2	城市污泥处理处置管理体系探讨	环境科学与技术		第一作者	

表二：在学术年会、学术报告会及专业会议上宣读或发表的论文

序号	报告（论文）名称	会议名称	会议日期	排序	获奖情况
1	应用 NEB 对淀山湖浮游植物增值影响的研究	2009 中国环境科学学会学术年会暨武汉国际环境科学与技术会议		第一作者	优秀论文

表三：其他

获专利及编译著作等情况：

1、固相萃取-高效液相色谱法检测生活污水中土霉素的方法，第七申请人，申请号：

200910051852.2；

2、利用光催化氧化降解水体中微囊藻毒素-LR 的方法，第五申请人，申请号：200910052438.3。

## 致 谢

值此论文搁笔之时，心绪难平，回想两年半充实的研究生生活，有收获喜悦，亦有失败痛苦。

首先要感谢恩师李小平教授，感谢您对我学业上的悉心指导和生活上无微不至的关怀，李老师渊博的学识、儒雅的谈吐、豁达的胸襟、求实的作风，令学生终身难忘，衷心祝愿您在今后取得更多科研成果，桃李满天下。在此谨向李老师表示我最诚挚的敬意和感谢！

感谢程曦工程师、陈漫漫高级工程师、陈小华工程师和康丽娟博士在藻类增长潜力实验室和现场实验中的帮助和提出宝贵的意见，在论文撰写过程中慷慨的指导和无私的帮助，以及你们在生活上的支持和帮助，你们渊博的知识和深邃的思想使我受益匪浅；

感谢水所孙从军所长、李丹工程师、杨青工程师、高阳俊工程师、曹勇博士、赵振工程师和固土所罗启仕所长、李青青工程师、耿春女高工、杨洁工程师、李忠元助理工程师和张长波助理工程师在实验和生活上给予的帮助与支持；

感谢孙远军师姐、张大玲师兄、卢嘉师弟、还有朱文超同事在淀山湖现场实验和指标分析实验中的支持和生活上无私帮助；

感谢王旌、高洁在学习、生活和试验中给予的帮助和支持；

感谢翟毅杰和王振旗室友在学习和生活上的帮助，是你们使我度过了愉快而轻松的宿舍生活，感受到一份家的温馨。

感谢始终给予我无私关爱、支持、鼓励我的父母、亲人和朋友，你们在学习、生活上给予的巨大支持，使我顺利毕业，在以后的学习、工作上更加努力，争取更大的进步。

