

太湖春季藻类生长的磷营养盐阈值研究

吴雅丽^{1,2}, 许海², 杨桂军^{1*}, 朱广伟², 秦伯强² (1.江南大学环境与土木工程学院, 江苏 无锡 214122; 2.中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 江苏 南京 210008)

摘要: 为了探讨太湖春季藻类生长的磷营养盐阈值, 采用原位营养盐富集生物模拟实验, 研究了太湖梅梁湾浮游植物对不同浓度无机磷($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)的生长响应。结果表明: 外源磷添加能显著的促进浮游植物生长, 但存在阈值。当磷浓度低于 0.02mg/L 时, 藻类生长速率和生物量是可控的, 当磷浓度高于 0.02mg/L 时, 生长速率和生物量没有变化, 因此春季藻类生长的无机磷阈值为 0.02mg/L, 相当于总磷阈值为 0.059mg/L。太湖目前只有部分湖区总磷年平均浓度处于总磷阈值以下, 控制流域的磷负荷, 降低太湖的浮游植物生物量将是一个长期过程。

关键词: 太湖; 磷; 阈值; 浮游植物

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2013)09-1622-08

Developing the critical phosphorus threshold for spring algal growth in Lake Taihu, China. WU Ya-li^{1,2}, XU Hai², YANG Gui-jun^{1*}, ZHU Guang-wei², QIN Bo-qiang² (1.School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2.State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China). *China Environmental Science*, 2013,33(9): 1622~1629

Abstract: In order to establish a phosphorus threshold for phytoplankton growth in Tai Lake (Taihu) in spring, a in situ nutrition enrichment experiment was conducted in highly eutrophic Meiliangbay to examine the growth response of phytoplankton to different concentration of inorganic phosphorus ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$). The results showed that exogenous phosphorus (P) enrichment could promote phytoplankton growth, and that it exhibited threshold characteristics. Phytoplankton growth rate and biomass would be controlled at P addition levels of less than 0.02mg/L. When the P concentration exceeded 0.02mg/L, the growth rate and biomass remained constant. Therefore, the inorganic P threshold value for algal growth is 0.02mg/L in spring, which equivalent to 0.059mg/L of the TP threshold value.

Key words: Lake Taihu; phosphorus; threshold; phytoplankton

水体富营养化是指在人类活动的影响下,生物所需的氮磷等营养物质大量进入湖泊、河口、海湾等缓流水体,引起藻类及其他浮游生物迅速繁殖,水体溶解氧量下降,水质恶化,鱼类及其他生物大量死亡的现象。这是我国湖泊所面临的最主要的生态环境问题之一,尤其是长江中下游地区的许多湖泊都暴发了严重的蓝藻水华^[1]。氮磷是藻类生长的主要物质基础^[2-3],它们与藻类生物量之间的关系一直是研究湖泊富营养化的重要内容之一^[4]。藻类生长通常存在营养盐的浓度阈值,低于该阈值,其生长受到营养盐的限制,生长速率随营养盐浓度的增加而增加,高于该阈值,该因素达到生态饱和,而其他因素成为新的限制因素。国际上一般认为湖水中总氮(TN)达到

0.2mg/L,总磷(TP)达到 0.02mg/L 是富营养化发生的浓度^[5]。我国的水体富营养化标准不能简单套用欧洲等国家的标准,所以研究湖泊富营养化发生的机理,明确外源氮磷营养盐输入与富营养化发生的响应关系,确定富营养化发生的氮磷阈值对氮磷削减程度和水体富营养化的控制具有重要意义。

富营养化阈值通常采用标准藻种和静态培养^[6],通过藻类生长潜力室内模拟实验获得,这

收稿日期: 2013-01-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41003043,41171368,41101053);江苏省自然科学基金(BK2012895);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07101-010)

* 责任作者, 副教授, yanggj1979@163.com

与实际水体富营养化过程差异较大.现场营养盐加富实验具有可操作性强和实验条件更接近自然状况的特点,是探讨浮游植物对营养盐增加反应的一个直接方法,因此被越来越多的学者采用^[7-8].

太湖位于长江中下游地区,是我国第三大淡水湖,具有供水、渔业、航运、防洪、娱乐等重要功能,对于该区社会稳定和经济发展具有重要作用.近年来,随着流域工农业迅速发展,受人为活动影响较大,水体富营养化日益严重,蓝藻水华发生频繁.太湖蓝藻水华的发生与氮磷营养盐浓度有密切关系^[9],氮和磷的输入在一定条件下都会促进浮游植物生长,且春季藻类的生长主要受到磷的限制^[10].关于阈值研究的报道很多^[6,11-12],关于太湖藻类生长的磷阈值研究鲜见报道.

本研究采用原位营养盐添加实验,采集原湖水直接添加不同浓度的磷,研究春季水华暴发前期太湖浮游植物生长对外源磷输入的响应,确定太湖浮游植物大量生长的磷营养盐阈值,以期为制定太湖水体富营养化控制的营养盐策略提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 实验设计

2012年5月在太湖湖泊生态系统研究站(简称太湖站)附近采集表层湖水,分装到100L白色塑料桶中,培养用水体积为60L,按计划添加磷营养盐进行原位培养.培养桶放入自制的可以漂浮的培养架上,漂浮于湖水中,桶上盖有透明的有机玻璃盖,使其保持自然水温、光照和扰动.

实验共设7个磷浓度:0,0.005,0.01,0.02,0.04,0.08,0.10mg/L.添加频率为每天一次,当出现磷的积累超过设定浓度时停止添加,直到浓度降低到低于设定浓度时再继续补充,使水体磷浓度尽量维持在设定浓度,模拟连续培养条件.为防止出现氮限制的情况,在实验初期各处理组补充1.5mg/L左右的氮.添加的氮为KNO₃,磷为K₂HPO₄·3H₂O,每个处理3个重复.

实验进行4d,每天早上8:00左右采样测定叶绿素含量和营养盐情况.实验开始与结束同步留

样用鲁戈试剂固定,用于浮游植物种群鉴定.

1.2 分析方法

1.2.1 氮磷营养盐测定 总氮(TN)及总可溶态氮(TDN)经WhatmanGF/F膜过滤后采用碱性过硫酸钾消解后用紫外分光光度法测定,总磷(TP)、总可溶态磷(TDP)及溶解性反应磷(PO₄³⁻-P)用钼锑抗比色法测定^[13],硝态氮(NO₃⁻-N)用紫外分光光度法测定.

1.2.2 叶绿素a的测定 样品经GF/F玻璃纤维滤膜过滤后,在-20℃下放置过夜,经热酒精提取,采用分光光度法测定^[14].

1.2.3 浮游植物种群的鉴定及生物量的计算 水样通过鲁戈试剂固定后浓缩到50mL,样品在显微镜10×40倍下观察.计数时摇匀待镜检水样,用移液枪准确吸取0.1mL,注入计数框内(20mm×20mm)中,盖上同等面积的盖玻片,在10×40倍高倍显微镜下鉴定和计数,每片观察50~100个视野,同时保证所观察的浮游植物总量不少于100个,种类的鉴定法参照《中国淡水藻类》^[15].同时在显微镜下随机选取每个种类的20个个体,测定线性参数,利用形态相似的几何体积公式计算每个种类的细胞体积,将细胞体积乘以藻细胞的比重(接近于1)后转化为鲜重(mg/L).

1.2.4 浮游植物比生长速率及生物量的计算 自实验开始,每天同一时间取水样过滤测定叶绿素a,代表浮游植物的现存量.比生长速率计算公式 $\mu = \ln(X_1 - X_2) / (T_2 - T_1)$,式中: X_2 为某一时间间隔终结时的藻类现存量; X_1 为某一时间间隔开始时的藻类现存量; $T_2 - T_1$ 为某一时间间隔.

1.3 藻类生长的磷阈值判定

根据磷(生物可利用磷浓度)与藻类生长的定量关系,建立其关系曲线,从以上曲线中找到拐点即为藻类生长的磷营养盐阈值.以实验期间监测的太湖水体中各种形态磷的特征为依据,再结合各种形态磷对藻类可利用性的分析,得出水体中生物可利用磷与总磷的定量关系,从而得出太湖春季藻类生长的总磷阈值.

1.4 数据处理

数据分析选用SPSS18.0软件,对照和处理间浮游植物Chl-a的比较采用单因素方差分析

(one-way ANOVA),处理是对结果产生影响的因素,差异显著性水平设为 $\alpha=0.05$,选用 LSD 法进行验后比较.

2 结果与分析

2.1 春季湖水的理化性质

太湖 5 月水体氮浓度较高,TN 浓度为 2.65mg/L,TDN 浓度为 2.35mg/L.而磷浓度很低,TP 浓度为 0.048mg/L,TDP 浓度为 0.021mg/L,SRP 的浓度为 0.0038mg/L,叶绿素 a 含量在 3.8 μ g/L 左右.浮游植物主要以隐藻和硅藻为优势种,其生物量分别为 1.15 和 0.78mg/L.

2.2 原位培养期间藻类对氮磷营养盐的利用情况

由图 1 可见,实验期间 0.005,0.01,0.02mg/L 的处理组经过 1d 的消耗后水体剩余的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度与对照组没有显著差异,说明藻类对每天加入的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 几乎消耗完毕,而处理组 0.04mg/L 的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度显著高于对照,处理组 0.08mg/L 和 0.10mg/L 的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度剩余更多,这些处理组的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 有一定程度的累积.

实验结束时水体可溶性总磷与 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的变化趋势相似,低浓度组与对照组相比没有显著差异,添加磷浓度高于 0.04mg/L 的处理显著高于对照.而不同处理总磷浓度均具有显著差异,且浓度与几次添加的磷浓度总和接近,表明磷的消耗主要转化为了颗粒态的磷.

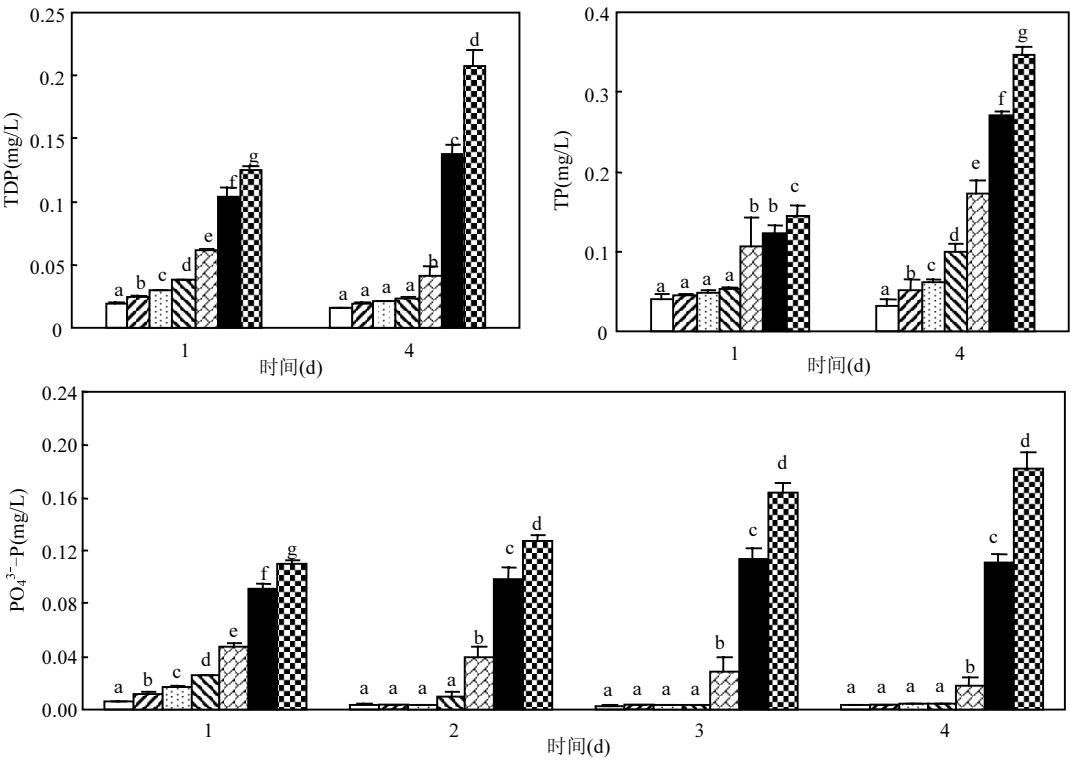


图 1 实验期间不同处理组磷营养盐的变化

Fig.1 Variation of the phosphorus concentrations during the experiment

□P-0.00mg/L ▨P-0.005mg/L ▤P-0.01mg/L ■P-0.02mg/L ▩P-0.04mg/L ■P-0.08mg/L ▨P-0.10mg/L

图 2 为实验期间氮浓度情况.磷浓度为 0.005~0.02mg/L 的处理组 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 浓度逐渐降低,存在显著性差异,磷浓度大于 0.04mg/L 时各处理组 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 含量没有显著性差异,说明磷浓度达到 0.02mg/L 时已经满足藻类生长的需求,磷浓度继续

升高藻类对 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 的吸收也不再增加.与 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 的利用相似, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度为 0.02~0.10mg/L 处理组间 TDN 的含量没有显著性差异,表明这些磷浓度已经达到藻类生长需求的饱和浓度,因此藻类在这些磷浓度下生长需要的氮浓度相似.

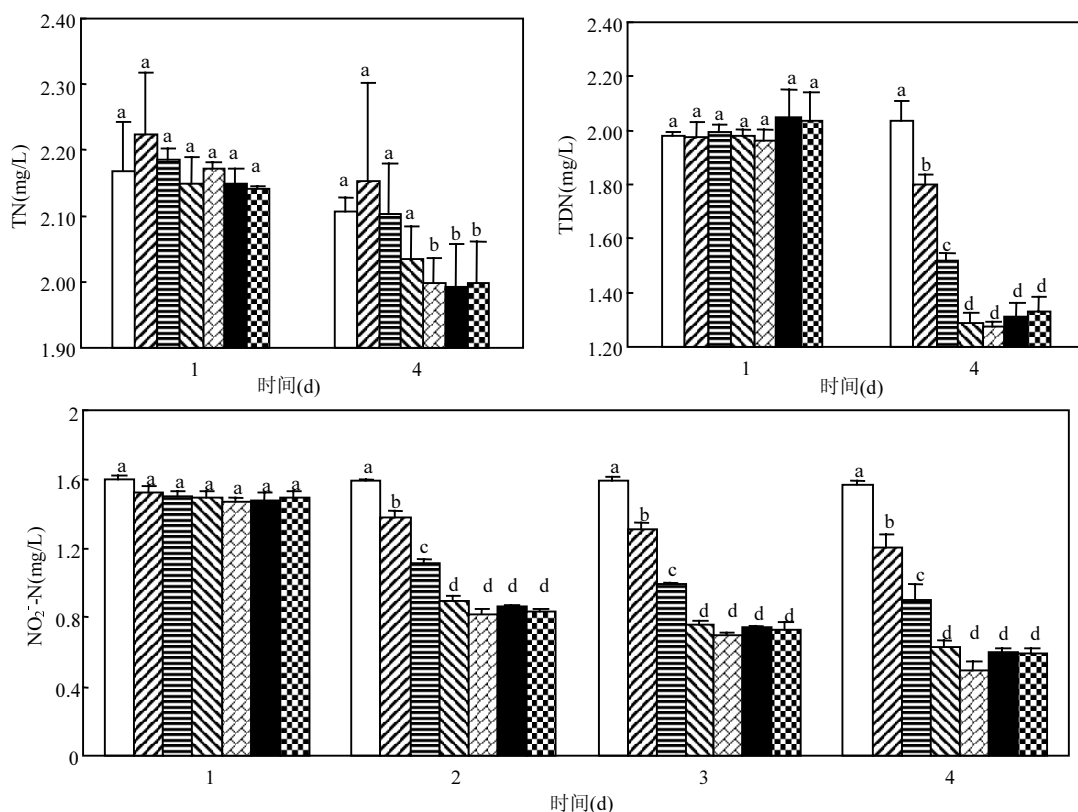


图2 实验期间不同处理组氮营养盐的变化

Fig.2 Variation of the nitrogen concentrations during the experiment

□ P-0.00mg/L ▨ P-0.005mg/L ▩ P-0.01mg/L ▪ P-0.02mg/L ▫ P-0.04mg/L ▬ P-0.08mg/L ▮ P-0.10mg/L

2.3 磷添加对浮游植物生长的影响

图3为实验期间各处理中浮游植物生物量(以chl-a表示)随时间的变化.第1d藻类的生物量很低,加磷1d后,各处理组生物量均增加,叶绿素a浓度显著高于对照,但加磷的处理组之间没有显著差异.2d以后,磷浓度高于0.02mg/L时,随着磷浓度继续升高,浮游植物生物量不再有响应.说明这一时期每天补充0.02mg/L的磷已能满足藻类生长的需求.

由图4可知,浮游植物的生长速率随着磷浓度的升高而提高,当磷浓度达到0.02mg/L时,生长速率达到最大值,此后生长速率不再随着磷浓度的升高而提高,随着磷浓度由不足变为过剩,磷浓度对生长繁殖速率的限制作用越来越小.生长量的变化趋势与比增长速率的变化趋势基本保持一致.

2.4 浮游植物种群对不同浓度磷添加的响应

由图5可知,在实验期间,实验点附近的湖水

中藻类以隐藻和硅藻为主,实验开始时隐藻的生物量为1.15mg/L,硅藻的生物量为0.78mg/L,分别占藻类总生物量的48%和33%,实验结束时湖水中的藻类仍以隐藻和硅藻为主.水体中浮游植物的季节性周期变化规律是相似的,一般,冬季,由于水温低、光强低,浮游植物的生产力很低,数量较少;春季,虽然水温仍然较低,但光照时间增长,会有大量硅藻出现^[16].太湖硅藻生物量与其他藻类的生长呈显著相关性,它与总浮游藻类、绿藻、隐藻及直链硅藻生物量均呈显著正相关,而与蓝藻生物量百分比呈显著负相关.长期观测结果(1996~2000年)也显示太湖冬春季,硅藻生物量百分比比较高,在30%~65%之间波动^[17].

图6为实验结束时不同处理组藻类组成比例,结果显示,各处理组的浮游植物以绿藻和硅藻为主,占据总生物量的70%以上.其中空白对照中绿藻门的生物量为0.71mg/L,占总生物量的

78%,以衣藻属占优势,其次为隐藻.添加磷营养盐以后浮游植物仍以绿藻门为主,生物量也都占据总生物量的 50%左右,以小球藻属为优势.但硅藻和隐藻的生物量均随磷浓度的升高而有不同程度的提高,硅藻在磷浓度达到 0.01mg/L 时生物量达到最大.

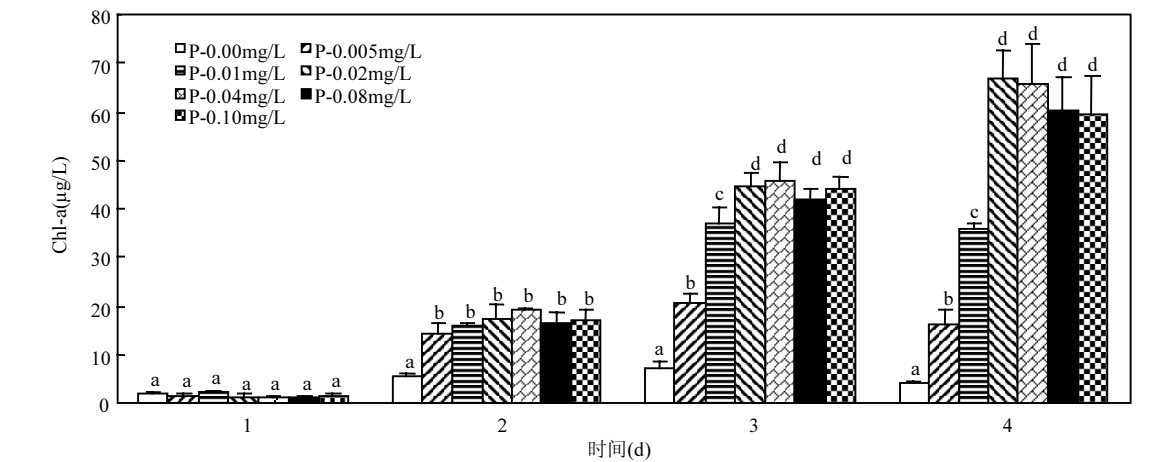


图3 实验期间不同处理 chl-a 的变化

Fig.3 Variations of chl-a concentrations in response to a range of P concentration during the experiment

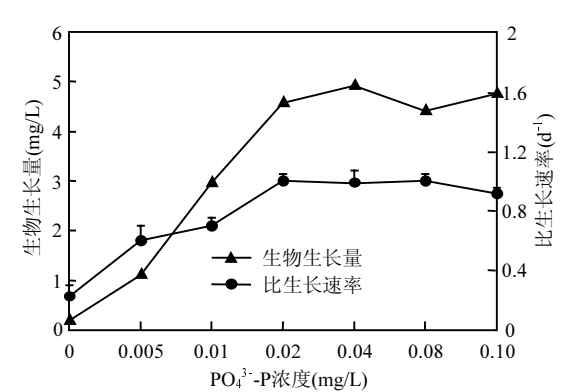


图4 磷对藻类生长量和比生长速率的影响

Fig.4 Effect of P concentrations on the specific growth rate and biomass of the alga

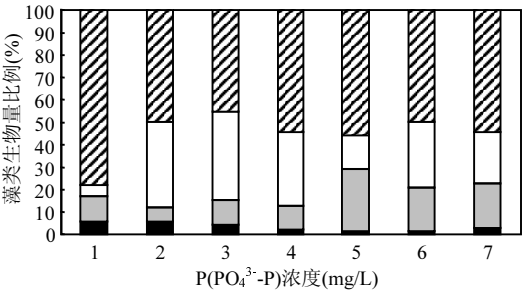


图6 实验结束时不同处理组下藻类组成比例

Fig.6 Variation of algae community in response to a range of P concentrations at the end of the experiment

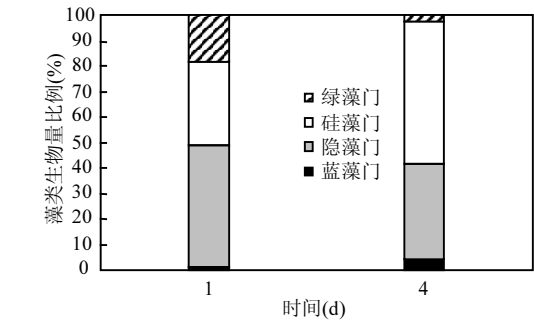


图5 实验期间湖水中藻类组成比例

Fig.5 Variation of algae community in lake during the experiment

3 讨论

3.1 太湖梅梁湾春季藻类生长的氮磷限制因子

大量研究表明,磷是淡水湖泊的主要限制因子^[18],而且控磷也被证明是一种有效的改善水质的措施.最近,加拿大和美国的科学家基于长期湖沼学研究提出了湖泊富营养化治理无需控氮只需控磷的观点^[19].根据太湖生态调查的结果,有研究认为光和磷是主要的限制性因素^[20].短期营养盐富集实验表明,在春季的太湖,氮是充分的,磷是水体初级生产力的主要限制因子^[21].在本实验中,对照组(加氮)的浮游植物生物量明显低于其他氮磷添

加处理组(加氮磷组),说明磷的添加更有利于浮游植物的生长,磷是春季太湖藻类生长的限制因子。

3.2 太湖春季藻类生长的磷阈值

研究表明,氮磷营养盐添加对太湖春季浮游植物生长的促进作用非常明显^[22]。本实验在低 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度(0~0.01mg/L)的处理下,浮游植物并没有出现持续生长,第4d生物量就出现下降趋势,说明这时磷浓度已经成为浮游植物生长的限制因子。在 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度为0.02~0.10mg/L的处理下,浮游植物出现持续性增长,但 Chl-a 间并无显著性差异,说明 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度达到0.02mg/L时已满足藻类生长的需求,浓度继续升高,生物量也不再继续增加。因此,浮游植物利用磷的能力有一定的阈值,并不是磷的浓度越高浮游植物的生物量越大,当磷浓度满足生长所需浓度时,浮游植物的生物量不再随着营养盐浓度升高而发生较大变化。由图4可知, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度在0~0.02mg/L时,藻类的生长速率随着浓度的升高而迅速增加,在0.02mg/L时,比生长速率达到最大值, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度0.02~0.10mg/L生长速率随着磷浓度的升高而减缓,即藻类的生长速率在 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度为0.02mg/L时出现了一个拐点,即太湖在 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度达到0.02mg/L时为春季藻类生长的饱和浓度。在 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 达到0.02mg/L以上后,藻的增长速率或生长量处于非响应阶段。因此,在本实验条件下,可确定水体藻类生长的无机磷营养盐阈值为0.02mg/L,即在春季的太湖, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度达到0.02mg/L已经能够满足浮游植物的正常生长。美国EPA建议正磷酸盐浓度0.025mg/L是湖泊或水库磷浓度的上限^[23],这与本实验的研究结果基本相符。

溶解态的无机磷被认为是藻类可直接利用的磷源,近年来的研究表明,藻类也可以利用溶解态的有机磷,特别是在磷限制的湖泊和某些海域,溶解态有机磷的生物可利用性更为重要,在对溶解态有机磷的利用中,碱性磷酸酶的活性都有所变化^[24-25]。在许多湖泊中,溶解性有机磷的浓度要比溶解性的反应磷高1倍以上,其中大约60%左右的溶解性有机磷可以被碱性磷酸酶水解后,用于藻类的生长^[26]。在太湖,水体中特异性碱性磷

酸酶活性(总碱性磷酸酶活性/Chl-a)与水体中的 PO_4^{3-} 存在着较好的负相关,尤其是在春季相关性更加显著^[27]。本实验在春季太湖的梅梁湾进行,且实验期间水体中的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 为0.006mg/L,低于太湖水体中碱性磷酸酶的作用阈值^[28],所以水体中的藻类和细菌体内的酶被诱导大量产生,水体中的有机磷化合物水解,释放出无机磷。根据实验期间测得太湖水体中各种形态磷的含量可知,总磷中的43.65%为可溶性磷,其中可溶性磷酸盐占19.14%,可溶性有机磷为24.51%。根据太湖水体中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和溶解性有机磷与总磷的比例可计算出春季太湖水体中总磷的33.85%为藻类可利用磷,结合上面结论得出太湖春季藻类生长的阈值为总磷含量0.059mg/L。

藻类的生长不仅和温度、光强、氮、磷、铁等各种营养物有关,还与湖水中的pH值,氧化还原电位,微量元素及风浪扰动等很多因素有关,尤其是太湖这样的浅水湖泊,风浪扰动的作用更不可忽视,因此在实验室内获取的藻类生长的营养盐阈值不一定适合太湖的实际情况。本实验选取经常性出现水华现象的太湖梅梁湾水域作为实验地,具有一定的代表性,而且在室外进行原位培养实验,尽量保持与太湖水体的自然环境特接近。但实验中未考虑由风浪引起的底泥释放,不过春季水温不高,底泥释放作用较弱,所获得的阈值具有实际应用价值。

在一些湖泊中外源性磷负荷的降低并不一定立即导致湖泊内生物量的降低和营养状态的改善,这主要有2个原因:底泥中磷的释放以及某些湖水水体中磷浓度超过了藻类生长的阈值。根据长期监测(2005~2007年)显示,太湖3个入湖河口区及竺山湾TP平均值为0.231mg/L,湖心区及西南湖区平均值0.109mg/L,东部湖区平均值0.054mg/L,大浦口和竺山湾相应的叶绿素含量较高,3年平均值为36.3 $\mu\text{g/L}$ 、31.3 $\mu\text{g/L}$,东部湖区平均值为6.4 $\mu\text{g/L}$ ^[9]。湖心区及西南湖区总磷浓度略高于实验所得总磷阈值,叶绿素含量也较低,如果较好控制总磷含量,对富营养化的现象的改善会有明显的效果。东部湖区的总磷含量及实验区域在实验期间水体总磷浓度为0.048mg/L,低于

实验所得水体发生富营养化的阈值,因此水体磷浓度尚处于磷浓度的响应区间,进行外源磷控制,对抑制浮游植物的生物量将具有重要作用.而入湖河口区的总磷浓度远远高于实验所得磷阈值,水体磷浓度已经处于非响应区间,浮游植物的生物量一直处于高含量状态.因此降低外源磷负荷,使之成为藻类生长的限制性因素是控制水体富营养化的途径之一.可以预测,太湖流域的磷负荷通过工程和其他措施逐步减少时,太湖的恢复将经历以下 3 个阶段: (1)外源性磷负荷减少后,底泥中磷又释放,湖水中磷浓度变化不大;(2)外源性磷负荷进一步减少,水中无机磷浓度从 0.02mg/L,但此阶段藻类的生物量下降不大;(3)外源性磷负荷再减少,水中无机磷浓度从 0.02mg/L 进一步降低,在此阶段,磷成为藻类生长的限制因素.藻类生物量随磷浓度的下降迅速降低,湖泊生态系统逐渐恢复到良性状态.

3.3 营养盐添加对浮游植物的影响

易文利等^[29]研究认为磷的质量浓度 0.445mg/L 为微囊藻最适生长质量浓度;浮游植物的种群结构演替受营养盐质量浓度和季节的共同影响,营养盐质量浓度偏高的水体绿藻易成为优势种,营养盐质量浓度偏低的水体蓝藻易成为优势种;中低温季节,绿藻易成为优势种,在高温季节蓝藻易成为优势种^[30].

根据 2003~2004 年数据研究表明,梅梁湾绿藻生物量年平均值占藻类生物量比重的 34.5%,其次是蓝藻占生物量比重的 28.08%、硅藻 21.22%、隐藻 14.87%^[31].本实验中添加氮营养盐以后浮游植物以绿藻为主,随着氮磷比的降低,绿藻的生物量在总生物量中的比例有所下降,但仍占总生物量的 50%以上.Xu 等^[32]也认为,在富营养化水体中,当氮磷比例较低时,会出现绿藻类的高峰.隐藻的生物量随着磷浓度的升高有所增加,从对照组的 0.1mg/L 上升到了磷浓度为 0.04mg/L 时的 1.63mg/L,磷浓度高于 0.04mg/L 其生物量虽有所下降,但都维持在 1mg/L 以上.随着磷浓度的升高,绿藻门中小球藻的生物量一直增加,从对照的 0.22mg/L 增加到 0.02mg/L 的 3.09mg/L,此后随磷度的增加生物量不再有明显

增加,可见磷营养盐的添加能促进小球藻的生长繁殖,但存在一定的阈值.浮游植物生物量的升高不仅与营养盐浓度有关,还与影响浮游植物生长的其他因素有关,如无机碳,硅,维生素和微量元素等^[33].磷浓度为 0.005 和 0.01mg/L 时,藻类生物量除绿藻以外,硅藻也占去了相当的比例,磷浓度有所升高时(>0.02mg/L),硅藻的生物量有所下降,硅酸盐是硅藻生长的必要元素,它的浓度大小直接影响硅藻的密度^[34],硅藻生物量的下降,可能是硅酸盐不足导致的结果.

添加营养盐以后,浮游植物的优势种发生了变化,但并不是以太湖常出现的蓝藻为优势种,而是以绿藻为优势种.冬春季节,蓝藻的生物量百分比非常低,1996~2000 年冬春季节,蓝藻生物量百分比接近于零,其他年份的百分比也明显低于 10%^[17].除营养盐外温度也是蓝藻大量增值的主要控制因素.Takamura 等^[30]研究了霞浦湖中微囊藻的最大光合作用效率,发现温度对微囊藻水华的发生影响很大.高温有利于微囊藻的生长繁殖,低温不利于微囊藻的生长繁殖^[35],低温对蓝藻光合作用及其细胞浮力的影响可能抑制蓝藻的生长^[36-37].本实验中,春季的湖水水温较低,可能是导致蓝藻未能占据优势种的主要原因.

4 结论

4.1 太湖春季藻类生长的磷阈值浓度为 0.02mg/LPO₄³⁻-P,相当于总磷阈值为 0.059mg/L.

4.2 太湖除东部湖区和梅梁湾地区总磷年平均浓度低于上述阈值外,大部分湖区总磷年平均浓度都超过了总磷阈值,因此磷目前不是太湖藻类生长的主要限制因子.

4.3 在治理太湖的过程中,要大力降低流域的磷负荷才能使太湖全湖达到磷限制的环境,因此太湖的治理不仅花费大而且是一个缓慢的过程.

参考文献:

- [1] 秦伯强.湖泊生态恢复的基本原理与实现 [J]. 生态学报, 2007,27(11):4848-4856.
- [2] Paerl H W. Nutrient and other environmental controls of harmful cyanobacterial blooms along the freshwater-marine continuum. *Advances in Experimental Biology*, 2008,

- 619:216-241.
- [3] 许海,秦伯强,朱广伟.太湖不同湖区夏季蓝藻生长的营养盐限制研究[J].中国环境科学,2012,32(12):2230-2236.
- [4] 秦伯强,胡维平,陈伟民.太湖水环境演化过程与机理[M].北京:科学出版社,2004.
- [5] 郑翔芳,杨苏文.藻类生长影响因素研究进展 湖泊有毒藻类控制与生态修复国际学术研讨会论文集[C].中国无锡:2003,1:397-401.
- [6] 王霞,吕宪国,闫伯茹,等.基于富营养化阈值的松花湖水环境容量分析[J].湖泊科学,2006,18(5):503-508.
- [7] Bernhard AE, Peele ER. Nitrogen limitation of phytoplankton in a shallow embayment in northern Puget Sound[J]. Estuaries, 1997, 20(4):759-769.
- [8] Hutchins D A, Bruland KW. Iron-limited diatom growth and Si:N uptake ratios in a coastal upwelling regime[J]. Nature, 1998, 393(6685):561-564.
- [9] 朱广伟.太湖水质的时空分异特征及其与水华的关系[J].长江流域资源与环境,2009,(5):439-455.
- [10] Xu H, Paerl W H, Qin B Q, et al. Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China[J]. Limnology and Oceanography, 2010,55:420-432.
- [11] 杨龙,王晓燕,王子健,等.基于磷阈值的富营养化风险评估体系[J].中国环境科学,2009,29(S1):20-34.
- [12] 张家瑞,曾勇,赵彦伟.白洋淀湿地水华暴发阈值分析[J].生态学杂志,2011,30(8):1744-1750.
- [13] Eston A D, Clesceri L S, Greenberg A E. Standard methods for the examination of water and wastewater[M]. 19th edition. Washington, 1995.
- [14] 陈宇炜,陈开宁,胡耀辉.浮游植物叶绿素a测定的“热乙醇法”及其测定误差的探讨[J].湖泊科学,2006,18:550-552.
- [15] 胡鸿钧,李尧英,魏印心,等.中国淡水藻类[M].上海:上海科学技术出版社,1979.
- [16] 李小平.美国湖泊富营养化的研究和治理[J].自然杂志,2002,24(2):63-68.
- [17] 刘霞,陆晓华,陈宇炜.太湖浮游硅藻时空烟花与环境因子的关系[J].环境科学学报,2012,32(4):821-827.
- [18] Schindler D W. Eutrophication and Recovery in Experimental Lakes: Implications for Lake Management[J]. Science, 1974,184:897-899.
- [19] Schindler D W, Hecky R E, Findly D L, et al. Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: Results of a 37-year whole-ecosystem experiment[J]. PNAS, 2008,105(32):11254-11258.
- [20] Dokulil M T, Teubner K. Cyanobacterial dominance in lakes[J]. Hydrobiologia, 2000,438:1-12.
- [21] Xu H, Paerl H W, Qin B, Zhu G, Gao G. Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China[J]. Limnol Oceanogr, 2010,55(1):420-432.
- [22] Wang X D, Qin B Q, Gao G, et al. Phytoplankton community from Lake Taihu, China, has dissimilar responses to onorganic and organic nutrients[J]. Journal of Environmental Science, 2010,22:1491-1499.
- [23] Li X P. Lake eutrophication research and control in USA[J]. Natural Journal, 2002,24(2):63-68.
- [24] 王海黎,洪华生.海洋环境中溶解有机磷的生物活性初探[J].厦门大学学报(自然科学版),1995,34(3):425-430.
- [25] 周易勇,付永清.水体磷酸酶来源、特性及其生态学意义[J].湖泊科学,1999,11(3):274-279.
- [26] Hantke B, Fleischer P, Domanyl, et al. P release from DOP by phosphatase activity in comparison to P excretion by zooplankton Studies in hardwater lakes of different trophic level[J]. Hydrobiologia, 1996,317:151-162.
- [27] 高光,秦伯强,朱广伟,等.太湖梅梁湾中碱性磷酸酶的活性及其与藻类生长的关系[J].湖泊科学,2004,16(3):245-251.
- [28] 高光,高锡芸,秦伯强,等.太湖水体中碱性磷酸酶的作用阈值[J].湖泊科学,2000,12(4):353-359.
- [29] 易文利,金相灿,储昭升,等.不同质量浓度的磷对铜绿微囊藻生长及细胞内磷的影响[J].环境科学研究,2004,17(Suppl.):58-61.
- [30] Takamura N, Iwakuma T, Yasuno M. Photosynthesis and primary production of Microcystis aeruginosa Kütz in Lake Kasumigaura[J]. Plankton Res,1985,7:303-312.
- [31] 宋晓兰,刘正文,潘宏凯,等.太湖梅梁湾与五里湖浮游植物群落的比较[J].湖泊科学,2007,19(6):643-651.
- [32] Xu Y J, Li D S, Wang W L, et al. Variations of the chemical factors in sea-water ponds before and after Prorocentrum micanswater-bloom[J]. Trans Oceanol Limnol, 2000(1):41-46.
- [33] 王小冬,秦伯强,高光,等.无机氮磷添加对太湖来源浮游植物和附着生物生物量的影响[J].生态学杂志,2011,3(10):2257-2261.
- [34] Hotzel G, Croome R. Population dynamics of Aulacoseira granulata (HER.) SIMONSON (Bacillariophyceae, Centrales), the dominant alga in the Murray River, Australia[J]. Archiv für Hydrobiologie, 1996,136(2):191-215.
- [35] 朱伟,万蕾,赵联芳.不同温度和营养盐质量浓度条件下藻类的种间竞争规律[J].生态环境,2008,17(1):6-11.
- [36] 张青田,王新华,林超,等.温度和光照对铜绿微囊藻生长的影响[J].天津科技大学学报,2011,26(2):24-27.
- [37] 金相灿,储昭升,杨波,等.温度对水华微囊藻及孟氏浮游蓝藻生长、光合作用及浮力变化的影响[J].环境科学学报,2008,28(1):50-55.

作者简介:吴雅丽(1987-),女,河北唐山人,硕士研究生,主要研究方向为藻类生态学。