

基于 NEB 试验的不同湖泊夏季营养物投入与藻类响应关系的比较： 以淀山湖、小兴凯湖和洱海为例*

王菲菲¹, 李小平^{1**}, 程曦², 吴雪峰³

(1: 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

(2: 上海市环境科学研究院, 上海 200233)

(3: 上海建科建设监理咨询有限公司, 上海 200032)

摘要: 淀山湖、小兴凯湖和洱海分别处在不同的营养阶段, 夏季都存在蓝藻水华现象, 有效控制蓝藻水华应控氮还是控磷一直存在争议. 本研究采用营养物加富生物测试的试验方法, 研究和比较三个湖泊限制性营养元素(N 和 P) 夏季对浮游藻类生长的刺激作用, 并采用多因素方差分析和两两比较方法(LSD) 检验试验结果的显著性. 结果表明: 淀山湖(TN/TP = 10 左右)、洱海(TN/TP = 29 左右)、小兴凯湖(TN/TP = 9 左右) 在夏季分别表现出显著的氮响应、氮磷双重响应、氮响应; 较低氮磷比的营养程度较高的湖泊(淀山湖和小兴凯湖) 夏季应控制氮含量, 若添加氮更容易引发蓝藻(微囊藻) 水华, 而高氮磷比的初期富营养化湖泊(洱海) 夏季应同时控制氮磷含量, 同时添加氮磷的交互作用容易引发蓝藻(微囊藻) 水华.

关键词: 蓝藻水华; NEB; 限制性营养元素; 氮磷比; 淀山湖; 洱海; 小兴凯湖

Nutrients enrichment and algal response based on *in situ* experiments of NEB in summer: a comparative study of Lakes Dianshan, Xiaoxingkai and Erhai

WANG Feifei¹, LI Xiaoping¹, CHENG Xi² & WU Xuefeng³

(1: State Key Laboratory and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, P. R. China)

(2: Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, P. R. China)

(3: Shanghai Jianke Project Management Co. Ltd., Shanghai 200032, P. R. China)

Abstract: Lakes Dianshan, Xiaoxingkai and Erhai represent different trophic status respectively, and each of them is suffering severe cyanobacteria blooms in summer. Nutrient enrichment bioassays were conducted in the fields to compare the effects of nutrients (N and P) on cyanobacteria growth in the three lakes in summer. Significant differences between/among the treatments of the experiments were tested by Univariate and LSD. The results showed that Lakes Dianshan, Erhai and Xiaoxingkai have significant responses to N, N and P, N in summer, and add N to the Lake Dianshan and Lake Xiaoxingkai with low N:P ratio which may cause cyanobacteria (*Microcystis*) blooms easily, while N and P interaction may induce cyanobacteria bloom in lake (Lake Erhai) with high N:P ratio.

Keywords: Cyanobacteria bloom; NEB; TN/TP ratio; Lake Dianshan; Lake Xiaoxingkai; Lake Erhai

近 20 年来, 我国湖泊富营养化日趋严重, 湖泊藻类水华现象频繁发生, 在各种水华中, 尤其以蓝藻水华发生范围最广、危害最大. 氮磷等营养物质的过量排放是促使蓝藻水华发生的直接原因之一. 国内外已大量开展有关湖泊藻类生长的营养物质基础方面的研究^[1-3]. 营养物加富生物测试 (Nutrient Enrichment Bioassay, 简称 NEB) 试验已成为欧美、韩国等国家评价实际藻类群落增长的限制性营养元素的重要方法^[4]. 例如, Kim

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2009ZX07106-001-006)资助. 2011-04-05 收稿; 2011-07-19 收修改稿. 王菲菲, 女, 1986 年生, 硕士研究生; E-mail: wff1986@163.com.

** 通信作者; E-mail: lixp_2008@hotmail.com.

等通过 NEB 试验发现重度富营养化湖泊中低氮磷比条件下更容易引发蓝藻水华^[5];美国目前正在推行的湖泊 TMDLs 也采用 NEB 方法来确定湖泊营养物限制的类型,为实际的营养物控制提供依据^[6].

我国已开展大量有关湖泊藻类生长的限制性营养元素方面的研究工作^[7-9],但不同营养程度湖泊的藻类水华比较研究却较为少见.位于东部平原湖区的淀山湖和云贵高原湖区的洱海是当地生活、工农业生产的重要水源保护区及水源供给地,位于东北湖区的小兴凯湖是黑龙江省最大的淡水湖,但是这些湖泊夏季都已出现不同程度的藻类(主要为微囊藻)水华现象,而且夏季是蓝藻水华的多发季节,因此本研究采用 NEB 试验方法对三个不同营养程度湖泊夏季藻类生长的限制性营养元素、其氮磷营养物投入与藻类增长响应关系的异同点进行比较研究,以期对不同营养程度湖泊的夏季蓝藻(主要为微囊藻)水华的有效控制提供借鉴.

1 研究区域

淀山湖(31°04' ~ 30°12'N, 120°54' ~ 121°01'E)、小兴凯湖(45°16' ~ 45°24'N, 132°20' ~ 132°47'E)、洱海(25°25' ~ 26°10'N, 99°32' ~ 100°27'E)分别位于中国的东部平原湖区、东北湖区、云贵高原湖区.其在气候特征、水文特点、水质状况等方面均有一定差异(表1):三湖泊处于不同的营养状态,夏季氮、磷、叶绿素 a 浓度差别较大,淀山湖的此三项指标浓度远高于小兴凯湖和洱海,但三湖泊夏季优势藻种均为微囊藻(*Microcystis*),且近年来均有夏季蓝藻水华的报道.

表 1 夏季淀山湖、小兴凯湖、洱海的理化和生物参数

Tab. 1 Physio-chemical and biological parameters of Lakes Dianshan, Xiaoxingkai and Erhai in Summer

湖泊	湖面面积 /km ²	湖体容积 /(×10 ⁸ m ³)	平均水深 /m	水温 /°C	TN/TP /(mg/L)	叶绿素 a /(μg/L)	优势藻	营养状态
淀山湖	62.0	0.84	2.63	24 ~ 29	2.428/0.250	35.058	微囊藻	重度富营养
小兴凯湖	145.5	3.3	1.8	22 ~ 24	0.610/0.068	22.033	微囊藻	中度富营养
洱海	249.3	28.8	10.60	23 ~ 24	0.537/0.021	10.142	微囊藻	初期富营养

2 研究方法

营养物加富生物测试(Nutrient Enrichment Bioassay, NEB)试验原理为利比希“最低因子”定律,即增加植物生长所需的、存在量最低的物质时会促进植物的生长或生长潜力,则该种物质为植物生长的刺激因子或生长刺激盐^[10-11].现场 NEB 试验不需对培养水样进行灭菌、过滤和添加藻种等处理,直接利用水体中原始生物群落进行现场培养,与植物生长的自然环境类似,能相对精确地反映含不同时期、不同种类生物群落的水体在添加营养物后对藻类生长的影响^[12-13].

2.1 试验设计

淀山湖于 2009 年夏季、小兴凯湖和洱海于 2010 年夏季均进行 2 ~ 3 次现场 NEB 试验,培养容器置于湖面近岸边处,每次试验连续培养 7 d.

淀山湖、小兴凯湖、洱海分别取表层水分装到若干个 20 L 的透明塑料培养容器中,不添加任何营养物的原湖水作为对照组,设 6 个平行样.考虑到淀山湖主要入湖河道急水港和大朱库的氮磷浓度最大不超过淀山湖的 2 倍,所以淀山湖以原湖水氮磷浓度(2.428、0.250 mg/L)的 0.5 倍、1.0 倍、1.5 倍、2.0 倍添加铵氮(NH₄⁺-N)、硝氮(NO₃⁻-N)、磷酸盐(PO₄³⁻-P)至装有原湖水的培养容器中;同样考虑到小兴凯湖、洱海主要入湖河道的氮磷浓度不高于湖水的 1 倍,所以小兴凯湖、洱海均以原湖水氮浓度(0.610、0.537 mg/L)、磷浓度(0.068、0.021 mg/L)的 0.25 倍、0.5 倍、1.0 倍添加铵氮、硝氮、磷酸盐至装有原湖水的培养容器中.添加营养物的氮源、磷源为氯化铵(NH₄Cl)和硝酸钾(KNO₃)、磷酸二氢钾(KH₂PO₄).

2.2 测定项目和方法

添加营养物后的第 1 d 起从每个培养容器中取 250 ml 水样于棕色瓶中,并立即带回实验室测定叶绿素 a 浓度,按《水和废水监测分析方法》(第 4 版)的标准方法进行测定,连续测定 7 d.

2.3 数据处理方法

NEB 试验数据分析选用 SPSS 13.0 软件,主要采用的统计分析方法为多因素方差分析(Multi-factor analysis of variance),数据处理中为消除不同时期原湖水(对照)中叶绿素浓度的差异,采用叶绿素相对比较系数方法来表达添加营养物对浮游藻类增长的影响^[13-15],即:比较系数 $_{某营养条件} = (\text{叶绿素}_{某营养条件} / \text{叶绿素}_{Control} - 1) \times 100\%$ 。

3 结果与分析

3.1 NEB 试验氮磷营养物作用的显著性分析

2009、2010 年夏季三个湖泊现场 NEB 试验培养期(7 d)中的最大叶绿素相对比较系数的三因素方差分析^[16]结果见表 2。

2009 年夏季(7、8 月)淀山湖 TN/TP 质量比为 8.83 ~ 9.90,向培养容器中添加氮磷等营养物,PO₄³⁻-P 对藻类生长的刺激作用不是特别显著,单独添加 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 对浮游藻类生长的刺激作用较显著,同时添加 PO₄³⁻-P 和 NO₃⁻-N 效果反而不显著;小兴凯湖在 2010 年夏季 TN/TP 质量比为 8.97,向培养容器中单独添加营养物 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 对浮游藻类初级生产力的刺激作用极显著,而添加 PO₄³⁻-P 及同时添加 PO₄³⁻-P + NH₄⁺-N 或 PO₄³⁻-P + NO₃⁻-N 均没有特别显著的效果;对于洱海,2010 年夏季 TN/TP 质量比为 25.57,向培养容器中单独添加 PO₄³⁻-P、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 对浮游藻类初级生产力的刺激作用非常显著,并且同时添加 PO₄³⁻-P + NH₄⁺-N 或 PO₄³⁻-P + NO₃⁻-N 的交互作用也对浮游藻类的生长有显著影响。

表 2 三湖泊夏季 NEB 试验方差分析(叶绿素相对比较系数)*

Tab. 2 Analysis of variance for the NEB test of three lakes

湖泊	添加 PO ₄ ³⁻ -P	添加 NH ₄ ⁺ -N	添加 NO ₃ ⁻ -N	添加 PO ₄ ³⁻ -P + NH ₄ ⁺ -N	添加 PO ₄ ³⁻ -P + NO ₃ ⁻ -N	TN/TP
淀山湖	+ / NS	+++ / +++	++ / ++	-	NS	8.83 ~ 9.90
小兴凯湖	NS	++	+++	NS	+	8.97
洱海	+++	+++	+++	++	++	25.57

* +++代表 P < 0.001; ++代表 P < 0.01; +代表 P < 0.05; NS 代表不显著, P > 0.05; -代表未做,下同。

3.2 NEB 试验中藻类增长响应结果

NEB 试验中各营养组培养期中最大叶绿素相对比较系数(代表藻类生物量相对原湖水的生长情况)的统计结果见图 1,其中原湖水的试验结果均表示为 0%。根据表 2 方差分析结果,对有显著差异营养组的各营养物添加水平与原湖水进行 LSD 两两比较分析。

3.2.1 淀山湖 往培养容器中添加 PO₄³⁻-P 对淀山湖浮游藻类生物量无显著影响(P > 0.5);添加 NH₄⁺-N 可显著促进浮游藻类的生长(P < 0.01),且添加 NH₄⁺-N 使得培养容器中 TN 浓度在 3.36 ~ 5.60 mg/L 之间时,随 NH₄⁺-N 浓度的增大促进作用增大;培养容器中添加低浓度的 NO₃⁻-N 也可显著促进浮游藻类的生长,添加高浓度 NO₃⁻-N 使 TN 浓度在 4.48 ~ 6.72 mg/L 时,随着 NO₃⁻-N 浓度的升高促进作用减小;添加不同浓度的 PO₄³⁻-P + NO₃⁻-N 可不同程度地促进浮游藻类的生长,但 PO₄³⁻-P 与 NO₃⁻-N 不存在相互促进的交互作用(图 1a)。

2009 年 6 月淀山湖 TN/TP 质量比大于 10,进入 7、8 月份 TN/TP 质量比降低到 10 以下,TP 的作用也随之变为不显著,但是 6—8 月 TN 始终对藻类生长有显著影响(表 3),因此,总体而言淀山湖夏季藻类生长的主要限制性营养元素是氮,氮与磷不存在相互促进的交互作用。

3.2.2 小兴凯湖 小兴凯湖夏季的 NEB 试验中,往试验容器中添加 PO₄³⁻-P,浮游藻类生物量无显著变化;添加高浓度的 NH₄⁺-N 或 NO₃⁻-N,即通过添加 NH₄⁺-N 或 NO₃⁻-N 分别使培养容器中的 TN > 0.76 mg/L 或 1.22 mg/L 时,对藻类生长有明显的促进作用,可显著增加生物量;向培养容器添加 NH₄⁺-N 使得 TN 浓度在 0.76 ~ 1.22 mg/L 时,随 NH₄⁺-N 添加量的增大对藻类生长的促进作用增大。添加 PO₄³⁻-P + NH₄⁺-N 或 PO₄³⁻-P + NO₃⁻-N 均可显著增加浮游藻类生物量,使得生物量分别高于原湖水的 39% ~ 85%、25% ~ 89%,显著促进浮游藻类的生长,但是 PO₄³⁻-P 与 NH₄⁺-N、PO₄³⁻-P 与 NO₃⁻-N 均不存在相互促进的交互作用(图 1b)。因此,磷的主效应不显著,高浓度的氮对小兴凯湖藻类生长有显著促进作用,因此氮为小兴凯湖夏季主要的限制性

营养元素,氮与磷也不存在相互促进的交互作用.

表3 淀山湖夏季 NEB 试验方差分析(叶绿素相对比较系数)

Tab. 3 Analysis of variance for the NEB test of Lake Dianshan

时间	添加 PO_4^{3-} -P	添加 NH_4^+ -N	添加 NO_3^- -N	添加 PO_4^{3-} -P + NO_3^- -N	TN/TP
6月	+++	++	++	NS	10.16
7月	+	+++	++	NS	8.83
8月	NS	++	+	NS	9.90

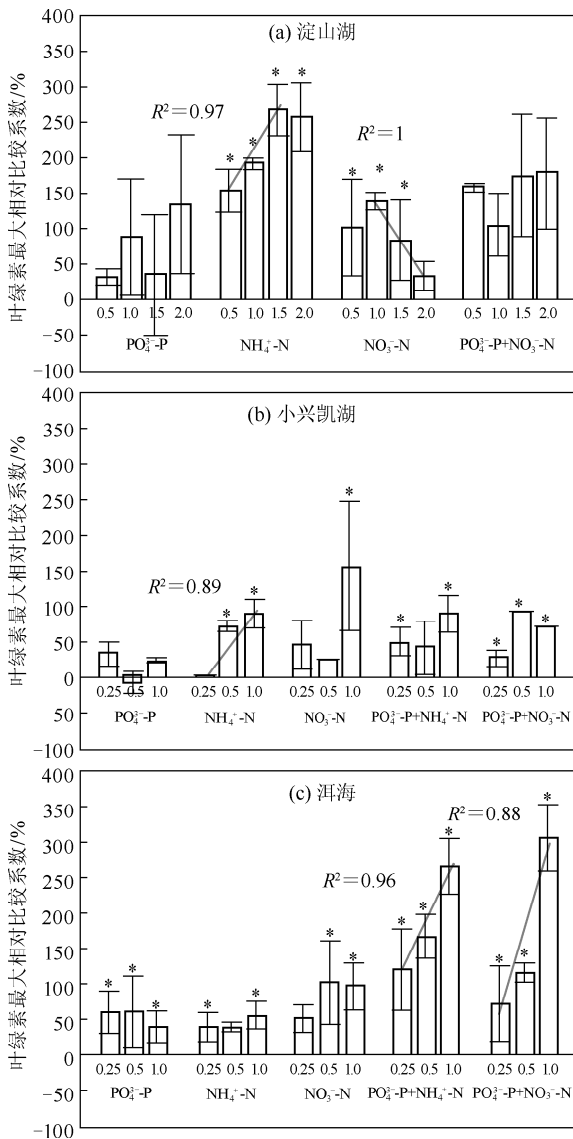


图1 三湖泊夏季 NEB 试验中藻类增长响应 (* 代表与原湖水有显著差异 $P < 0.05$); 横坐标为培养容器中营养盐添加方案, 其中数字为营养盐的添加倍数)

Fig. 1 Algae growth response of NEB in three lakes

3.2.3 洱海 洱海夏季的 NEB 试验中, 向培养容器中添加 PO_4^{3-} -P、 NH_4^+ -N、 PO_4^{3-} -P + NH_4^+ -N、 PO_4^{3-} -P + NO_3^- -N 均对藻类生长有显著的促进作用; 添加低浓度的 NO_3^- -N 对藻类生物量无显著影响, 添加 NO_3^- -N 使得 TN > 0.806 mg/L 时可显著促进浮游藻类的生长; 同时添加 PO_4^{3-} -P + NH_4^+ -N 或 PO_4^{3-} -P + NO_3^- -N 使得藻类生物量高于原湖水的 115% ~ 259% 或 68% ~ 297%, 远高于单独添加 PO_4^{3-} -P 与 NH_4^+ -N 或 PO_4^{3-} -P 与 NO_3^- -N 处理的藻类生物量之和, 因此 PO_4^{3-} -P 与 NH_4^+ -N、 PO_4^{3-} -P 与 NO_3^- -N 均存在极显著的相互促进的交互作用^[10], 且随着 PO_4^{3-} -P + NH_4^+ -N 或者 PO_4^{3-} -P + NO_3^- -N 浓度的升高, 对藻类生长的促进作用增大(图 1c). 通过以上分析可知洱海夏季水体中藻类群落的生长表现出氮、磷同时响应, 同时添加氮、磷的交互作用可极显著促进浮游藻类增长.

4 讨论

4.1 三湖泊夏季限制性营养元素的比较

某些营养物添加量与叶绿素相对比较系数(代表藻类生物量相对原湖水的生长情况)有很好的线性关系(图 1), 因此进一步计算其叶绿素相对原湖水的增长率(代表藻类生物量相对原湖水的生长情况). 向培养容器中添加 NH_4^+ -N 使淀山湖总氮浓度在 3.36 ~ 5.60 mg/L 之间、小兴凯湖总氮浓度在 0.76 ~ 1.22 mg/L 之间时, 藻类生物量都随 NH_4^+ -N 添加量的增加而增大, 淀山湖培养容器中 NH_4^+ -N 每增加 1 mg/L 叶绿素较原湖水增加 75.22%, 小兴凯湖培养容器中 NH_4^+ -N 每增加 1 mg/L 叶绿素较原湖水增加 183.70% (表 4). 向培养容器中添加 NO_3^- -N, 使重度富营养湖泊淀山湖 TN 浓度达到 4.48 ~ 6.72 mg/L 时, 随着 NO_3^- -N 添加量的增加对藻类生长的抑制作用增大, NO_3^- -N 每增

加 1 mg/L 叶绿素含量相对原湖水减少 67.44%,但是添加 NO_3^- -N 对中度富营养湖泊小兴凯湖作用不大,对初期富营养湖泊洱海有显著促进作用(图 1,表 3).因此通过本实验可以看出三湖泊夏季添加 NH_4^+ -N 促进藻类生长,而添加高浓度 NO_3^- -N 会抑制蓝藻的生长,这与吴雪峰等有关淀山湖的研究结果类似^[13],也与 Dokulil 等的微囊藻生长较 NO_3^- -N 更喜欢 NH_4^+ -N 的观点相符^[17].

当添加 PO_4^{3-} -P + NH_4^+ -N 使得 TN、TP 浓度在 0.67 ~ 1.07 mg/L、0.026 ~ 0.042 mg/L 时,TN 浓度每升高 1 mg/L,同时 TP 浓度升高 0.04 mg/L,则藻类生物量较原湖水增大 358.15%;当添加 PO_4^{3-} -P + NO_3^- -N 使得 TN、TP 浓度在 0.67 ~ 1.07 mg/L、0.026 ~ 0.042 mg/L 时,TN 浓度每升高 1 mg/L,同时 TP 浓度升高 0.04 mg/L,藻类生物量较原湖水增大 574.25% (表 4).洱海为初期富营养化湖泊,夏季水体中氮磷浓度远低于淀山湖等重度富营养化湖泊,添加氮、磷势必会引起藻类生物量的增加,同时添加氮磷的交互作用非常明显.

表 4 NEB 试验中营养组的藻类增长率
Tab. 4 Algae growth rates of nutrient-enriched teams in NEB

湖泊	添加营养物 (数字为营养盐添加倍数)	TN 或 TP 浓度/ (mg/L)	叶绿素相对比较 系数/%	叶绿素较原湖水的 增长率/%
淀山湖	0.50 NH_4^+ -N	TN 3.36	152.32	75.22
	1.00 NH_4^+ -N	TN 4.48	191.36	
	1.50 NH_4^+ -N	TN 5.60	264.64	
	1.00 NO_3^- -N	TN 4.48	137.23	
	1.50 NO_3^- -N	TN 5.60	84.61	
	2.00 NO_3^- -N	TN 6.72	36.52	
洱海	0.25 PO_4^{3-} -P + 0.25 NH_4^+ -N	TN 0.67/TP 0.026	115.41	358.15
	0.50 PO_4^{3-} -P + 0.50 NH_4^+ -N	TN 0.81/TP 0.032	160.82	
	1.00 PO_4^{3-} -P + 1.00 NH_4^+ -N	TN 1.07/TP 0.042	258.67	
	0.25 PO_4^{3-} -P + 0.25 NO_3^- -N	TN 0.67/TP 0.026	67.78	
	0.50 PO_4^{3-} -P + 0.50 NO_3^- -N	TN 0.81/TP 0.032	110.86	
	1.00 PO_4^{3-} -P + 1.00 NO_3^- -N	TN 1.07/TP 0.042	297.48	
小兴凯湖	0.25 NH_4^+ -N	TN 0.76	1.68	183.70
	0.50 NH_4^+ -N	TN 0.92	69.28	
	1.00 NH_4^+ -N	TN 1.22	85.78	

4.2 氮磷营养盐投入对不同营养程度湖泊夏季藻类生长的影响

淀山湖、小兴凯湖和洱海的 TN/TP 质量比年内变化特点是冬季较高,从春季开始逐渐降低,直到夏季 6 或 7 月到达最低点,随后又开始升高(图 2).除此之外,太湖等夏季以微囊藻为主的很多湖泊都存在这样的 TN/TP 质量比年内变化特点^[1].主要原因可能是夏季降雨量大,氮磷等营养物随入湖河道汇入湖体,此时温度、光照、营养盐都适宜藻类大量繁殖,藻类的生长又消耗大量的氮和相对较少的磷,因此夏季氮由于藻类生长的消耗导致氮含量达到全年最低,磷则因为外源输入和底泥释放大于藻类消耗导致夏季含量升高,所以 TN/TP 质量比会在夏季达到最低值.

淀山湖为重度富营养湖泊,几乎每年夏季都暴发大规模蓝藻水华^[14],淀山湖 6、7、8 月的 NEB 试验结果表明,夏季随着藻类的大量繁殖、氮含量逐渐降低,当 TN/TP 质量比降低到 10 以下时,氮成为藻类生长的主要限制性营养元素(表 3);小兴凯湖已处于中度富营养状态,局部地区已出现蓝藻水华现象^[18],其夏季 TN/TP 质量比也在 10 以下,夏季的限制性营养元素也为氮.因此夏季向较低氮磷比(TN/TP = 10 左右)的营养程度较高的湖泊(淀山湖和小兴凯湖)添加氮很容易引发蓝藻水华.

洱海夏季降雨量增加、大量氮磷营养物随入湖河道汇入湖泊,而氮磷浓度较低的初期富营养化湖泊夏

季不暴发大规模蓝藻水华,那么洱海氮磷浓度在夏季略微升高可能是纳入大于消耗所致,通过 NEB 试验可知洱海夏季水体中藻类群落的生长表现出氮、磷同时响应,而且同时添加氮磷的交互作用会极显著促进浮游藻类的生长,因此向高氮磷比(TN/TP = 29 左右)的初期富营养化湖泊(洱海)同时添加氮磷可能会引发蓝藻(微囊藻)水华.

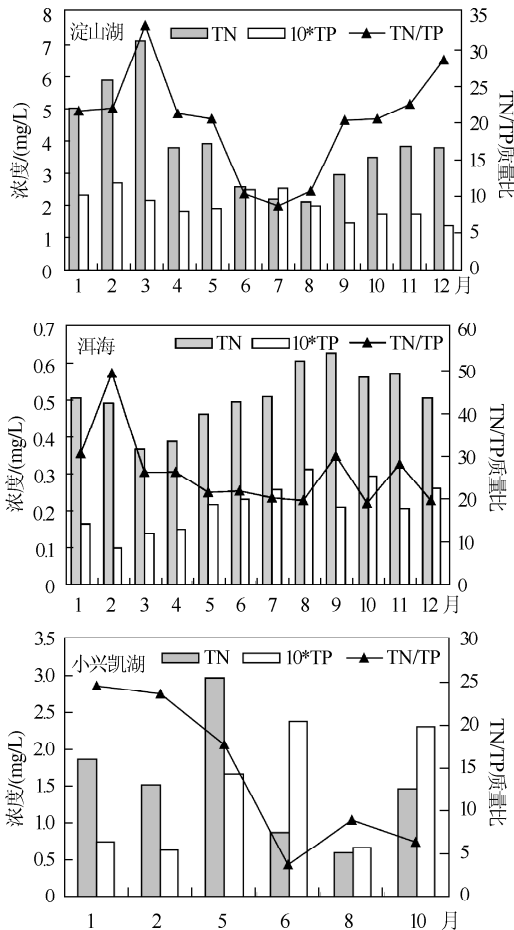


图2 淀山湖(2009年)、洱海(2008,2009年均值)、小兴凯湖(2010年)氮磷浓度(10*TP表示TP浓度的10倍)

Fig. 2 N and P concentrations of Lakes Dianshan, Erhai and Xiaoxingkai

夏季太湖的主要限制性营养元素由磷变为氮、太湖夏季的主要限制性营养元素为氮^[1].

目前,淀山湖在现有的氮磷水平、浮游藻类群落构成的基础上,TN/TP = 10 可能是夏季淀山湖氮限制的一个临界点,当夏季淀山湖氮磷质量比 < 10 时,限制性营养元素应该为氮.若此时增加水体中氮含量,则极有可能暴发大规模的蓝藻水华.所以,建议夏季淀山湖控制氮含量,保持氮磷质量比在 10 以下.小兴凯湖夏季表现出明显的氮响应,建议夏季通过控氮来预防蓝藻水华.对于洱海,夏季氮、磷投入与生物量增长表现出很好的响应关系,因此洱海夏季通过控氮或控磷来防止蓝藻水华发生都是很好的举措.

4.3 氮磷比与限制性营养元素的关系

造成湖泊富营养化的营养物质基础,一般认为是氮和磷^[19-20],二者是湖泊水体中藻类生长的重要限制因子^[21-22].藻类生长营养物的限制与水体中氮磷比有密切关系,为此很多研究者提出不同的氮磷比值作为判断限制因子的界限.如:Smith 认为TN/TP质量比 < 10 时为氮限制,TN/TP在 10 ~ 17 之间时为氮磷共同限制,当TN/TP > 17 时为磷限制^[23];Redfield 定律认为,如果TN/TP质量比 > 16,磷是浮游藻类生长的限制因子,反之限制因子为氮^[24];Wang 等认为,TN/TP > 30 才能确认为磷限制,TN/TP < 8 为氮限制,TN/TP在 9 ~ 20 之间则为氮磷共同限制^[6].

由上文分析可知:淀山湖进入 7、8 月份TN/TP质量比降低为 8.83、9.9,磷的作用消失、氮为主要的限制因素;小兴凯湖夏季TN/TP质量比为 8.97 时,表现为氮限制;洱海夏季TN/TP质量比为 25.57,表现为氮、磷同时响应.此三个湖泊的限制性营养元素并不完全符合前人提出的氮磷比界限值,可见仅凭借TN/TP质量比来确定湖泊的营养物限制类型不合理,这与郑翔方等的观点类似^[25].不同湖泊、同一湖泊不同时期的藻类构成均不一样,不同种类的浮游藻类生长所需的氮磷营养物比例也有很大差异,已知的淡水藻类对TN/TP需求的变异范围为 4.1 ~ 133.3^[26-27],所以每个湖泊营养物限制类型的研究要结合自身氮磷浓度、氮磷比、浮游藻类种类构成综合考察确定,不可一概而论.

4.4 三湖泊夏季氮磷营养物的控制措施

对于控制湖泊蓝藻水华应该控氮还是控磷,通常认为磷的作用大于氮^[4],从全年平均情况来看可能磷的作用较大,但是藻类生长的限制因子很可能随季节发生变化,三湖泊的试验结果表明随着夏季藻类的大量繁殖,氮含量降低,氮成为夏季限制藻类生长的营养元素,而且许海等在太湖的实验也证明从冬季到夏

5 结论

淀山湖夏季水体TN/TP质量比在10左右,主要的限制性营养元素为氮;添加 NH_4^+ -N使得培养容器中TN浓度在3.36~5.60 mg/L之间时,TN浓度每升高1 mg/L藻类生物量相对原湖水增长75.22%。洱海夏季水体TN/TP质量比为26左右,藻类生长表现为氮磷双重响应;当添加 PO_4^{3-} -P + NH_4^+ -N使得培养容器中TN、TP浓度在0.67~1.07、0.026~0.042 mg/L时,TN浓度每升高1 mg/L、同时TP浓度随之升高0.04 mg/L,则藻类生物量相对原湖水增长358%;当添加 PO_4^{3-} -P + NO_3^- -N使得培养容器中TN、TP浓度在0.67~1.07 mg/L、0.026~0.042 mg/L时,TN浓度每升高1 mg/L、同时TP浓度随之升高0.04 mg/L,藻类生物量相对原湖水增长574%。小兴凯湖夏季水体TN/TP质量比为9左右,限制性营养元素为氮;往培养容器添加 NH_4^+ -N使得TN浓度在0.76~1.22 mg/L时,TN浓度每升高1 mg/L叶绿素相对比较系数增大184%。

通过对淀山湖、洱海、小兴凯湖的夏季NEB试验结果以及氮磷数据的分析表明:夏季向较低氮磷质量比(TN/TP=10左右)的营养程度较高的湖泊(淀山湖和小兴凯湖)添加氮,更容易引发蓝藻(微囊藻)水华,而夏季向高氮磷比(TN/TP=29左右)的初期富营养化湖泊(洱海)同时添加氮磷的交互作用则容易引发蓝藻(微囊藻)水华。

此三个湖泊的限制因子并不完全符合前人提出的作为判断限制因子的TN/TP质量比为10、16等界限值,每个湖泊营养物限制类型的研究要结合自身氮磷浓度、氮磷比、浮游藻类种类构成综合考察确定,不可一概而论。

致谢:在此谨对陈小华、陈无岐、朱文超、陈炜等表示感谢。淀山湖、洱海、小兴凯湖的氮磷数据分别由上海市环境科学研究院、中国科学院水生生物研究所、东北农业大学提供,特此致谢。

6 参考文献

- [1] Xu H, Paerl HW, Qin BQ *et al.* Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**(1): 420-432.
- [2] Li X, Goldman CR, Richerson PJ. Nutrient bioassays in Clear Lake: Co-limitation of iron and nitrogen to phytoplankton growth. *Eos Transactions*, 1996, **76**(3): 6-10.
- [3] Imai A, Fukushima T, Matsushige K. Effects of iron limitation and aquatic humic substances on the growth of *Microcystis aeruginosa*. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1999, **56**: 1929-1937.
- [4] Elser JJ, Marzolf ER, Goldman CR. Phosphorus and nitrogen limitation of phytoplankton growth in the freshwaters of North America: A review and critique of experimental enrichments. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1990, **47**: 1468-1477.
- [5] Kim HS, Hwang SJ, Shin JK *et al.* An effects of limiting nutrients and N: P ratios on the phytoplankton growth in a shallow hypertrophic reservoir. *Hydrobiologia*, 2007, **581**: 255-267.
- [6] Wang S, Dzialowski AR, Spotts WW *et al.* Variability of nutrient limitation on phytoplankton growth in small and medium Kansas lakes. Kansas: University of Kansas Press, 2005.
- [7] Paerl HW, Xu H, McCarthy MJ *et al.* Controlling harmful cyanobacterial blooms in a hypereutrophic lake (Lake Taihu, China): The need for a dual nutrient (N and P) management strategy. *Water Research*, 2011, **45**: 1973-1983.
- [8] 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的研究. *南京大学学报*, 1996, **32**(2): 254-260.
- [9] 魏 徽, 郑朔方, 储昭升等. 应用藻类生长潜力试验的方法研究滇池藻类生长的控制因子. *环境科学学报*, 2010, **30**(7): 1472-1478.
- [10] Dodds WK, Johnson KR, Prisco JC. Simultaneous nitrogen and phosphorus deficiency in natural phytoplankton assemblages: theory, empirical evidence, and implications for lake management. *Lake Reservoir Manage*, 1989, **5**: 21-26.
- [11] 金相灿. 湖泊富营养化调查规范. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 275-285.
- [12] Maqsood SA. Determination of algae growth potential in natural environment [dissertation]. B. S. in English: Texas Tech University, 1974.
- [13] 吴雪峰, 程 曦, 李小平. 淀山湖浮游植物营养限制因子的研究. *长江流域资源与环境*, 2010, **19**(3): 292-298.

- [14] 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. 湖泊科学, 2008, 20(4): 409-419.
- [15] Horne AJ, Goldman CR. Nitrogen fixation in clear lake, California. 1. Seasonal variation and the role of the heterocysts. *Limnology and Oceanography*, 1972, 17(5): 678-692.
- [16] 卢纹岱, 朱一力, 沙 捷等. SPSS for Windows 统计分析. 北京: 电子工业出版社, 2002: 146-184.
- [17] Dokulil MT, Teubner K. Cyanobacterial dominance in lakes. *Hydrobiologia*, 2000, 438: 1-12.
- [18] 于洪贤, 李友华. 生物碳汇产业控制兴凯湖富营养化污染研究. 经济研究导刊, 2010, 2: 244-245.
- [19] Vollenweider R, Kerekes J. Eutrophication of waters, monitoring, assessment and control. Paris: OECD, 1982.
- [20] 高学庆, 任久长, 宗志祥等. 铜绿微囊藻营养动力学研究. 北京大学学报: 自然科学版, 1994, 30(4): 461-469.
- [21] Chu SP. The influence of the mineral composition of medium on the growth of planktonic algae, part I: methods and culture media. *Journal of Ecology*, 1942, 30: 284-340.
- [22] Barnes RSK, Mann KH. Fundamentals of aquatic ecology. London: Blackwell Scientific Publications, 1980: 208-212.
- [23] Smith VH. Cultural eutrophication of inland, estuarine, and coastal waters. In: Pace ML, Groffman PM eds. Limitation and frontiers in ecosystem science. New York: Springer-Verlag, 1998: 7-49.
- [24] Redfield AC. The biological control of chemical factors in the environment. *American Scientist*, 1958, 46: 205-222.
- [25] 郑朔方, 杨苏文, 金相灿. 铜绿微囊藻生长的营养动力学. 环境科学, 2005, 26(2): 152-156.
- [26] Smith VH. The nitrogen and phosphorus dependence of algal biomass in lakes: an empirical and theoretical analysis. *Limnology and Oceanography*, 1982, (27): 1001-1112.
- [27] Klausmeyer CA, Litchman E, Daufresne T *et al.* Optimal nitrogen-to-phosphorus stoichiometry of phytoplankton. *Nature*, 2004, (429): 171-174.