

富营养化水体中 N、P 浓度对浮游植物
生长繁殖速率和生物量的影响

李夜光, 李中奎, 耿亚红, 胡鸿钧, 殷春涛, 殴阳叶新, 桂建平

(中国科学院武汉植物园, 武汉 430074)

摘要:在浮游植物生长繁殖的高峰期(7~10月份)对3个富营养化水体的总氮、总磷和浮游植物生物量进行调查,统计分析了生物量与氮和磷浓度的关系。利用3种水样和梯度稀释的东湖水样培养玫瑰拟衣藻(*Chloromonas rosae*),研究了氮、磷浓度对生长繁殖速率的影响。结果表明磷是生长繁殖速率的限制因子,求出了生长繁殖速率与磷浓度的对数回归方程 $y = 0.0806 \ln x + 0.4658$,当磷浓度小于 0.05 mg/L 时,生长繁殖速率随着磷浓度的升高而直线上升,当磷浓度进一步升高,生长繁殖速率仍然随之增加,但增加的幅度越来越小,当磷浓度达到 0.2 mg/L 时,生长繁殖速率基本不再随着磷浓度的增加而升高。计算出生长速率为零时磷的浓度是 0.003 mg/L,接近贫营养化湖泊磷浓度的下限,计算结果与坂本的调查统计结果相吻合,说明回归方程具有代表性。在调查的3个富营养化水体中,浮游植物中的氮占全部氮元素的 53%,磷占全部磷元素的 85%,是氮、磷存在的主要形式,所以,评价水体的营养程度,必须同时考虑水中溶解的氮、磷和生物体内的氮、磷。统计分析表明,3个富营养化水体中浮游植物的生物量由氮(溶解氮+胞内氮)和磷(溶解磷+胞内磷)的浓度共同决定,生物量与氮浓度的直线回归方程 $y = 10.687x - 7.8304$,生物量与磷浓度的直线回归方程 $y = 122.11x - 12.069$ 。实验结果为根据氮、磷浓度以 Redfield 值判断浮游植物限制性营养元素的相对性和绝对性提供了例证。对3个富营养化水体的比较表明,防止水体富营养的唯一办法是维持水体氮、磷等主要营养元素收支平衡,治理富营养化的根本办法是从水体中移走过量的氮、磷等主要营养元素。

关键词:富营养化;浮游植物;生长速率;生物量

文章编号:1000-0933(2006)02-0317-09 中图分类号:Q143, Q178.1, Q179.1, Q948.8, X17 文献标识码:A

Effect of N, P concentration on growth rate and biomass of phytoplankton in eutrophic water

LI Ye-Guang, LI Zhong-Kui, GENG Ya-Hong, HU Hong-Jun, YIN Chun-Tao, OUYANG Ye-Xing, GUI Jian-Ping
(Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(2): 317 ~ 325.

Abstract: Total nitrogen, total phosphorus, biomass in three eutrophic waters were investigated in the rapid-growth season of phytoplankton (July ~ October). *Chloromonas rosae* was cultivated in water samples from three eutrophic waters and diluted water samples from Lake Donghu to determine the effect of N and P concentrations on growth rate. The relationship between biomass and N and P concentrations, analyzed by regression, showed that phosphorus was the limiting factor for algae growth in eutrophic water. The relationship between growth rate and P concentration can be described with the regression equation $y = 0.0806 \ln x + 0.4658$, ($R^2 = 0.889$). Growth rate increased linearly with the increase of P concentration when it was below 0.05 mg/L, Growth rate was less increased when the P concentration was above 0.05 mg/L, and was almost unaffected when the P concentration exceeded 0.2 mg/L. The P concentration corresponding to growth rate "0" (deduced from a regression equation) was 0.003 mg/L, close to the minimal P concentration of poor nutrient lakes. This indicated that the regression equation was representative. The

基金项目:湖北省重点科技攻关资助项目(2002AA306B03);中国科学院知识创新工程所长基金资助项目(04035116)**收稿日期:**2004-01-02; **修订日期:**2005-10-30**作者简介:**李夜光(1962~),男,山西人,研究员,主要从事微生物技术和生理生态学研究. E-mail: yeguanguang@rose.whiob.ac.cn**Foundation item:** The project was supported by Key project for tackling of S & T problem of Hubei Province (No. 2002AA306B03), and Foundation of innovation project of CAS (No. 04035116)**Received date:** 2004-01-02; **Accepted date:** 2005-10-30**Biography:** LI Ye-Guang, Professor, mainly engaged in micro algal biotechnology and physiological ecology. E-mail: yeguanguang@rose.whiob.ac.cn

average values for planktic cellular N and P in the three eutrophic waters were respectively 53% and 85%. To evaluate the levels of eutrophy, N and P both in the water and in the plants must be considered. The biomass of phytoplankton is controlled by concentrations of both dissolved and cellular N and P. The following linear regression equations describe the relationship between biomass and N: $y = 10.687x - 7.8304$, ($R^2 = 0.950$), biomass and P, $y = 122.11x - 12.069$, ($R^2 = 0.991$) They exemplify the absolute and relative aspects of growth-limiting factors with Redfield values. We conclude that the only way to prevent eutrophication is to maintain a balance between the input and output of nutrients and to remove excessive dissolved N and P in the water.

Key words: eutrophication; phytoplankton; growth rate; biomass

内陆湖泊水体富营养化引起藻类(大多数情况是蓝藻)的快速生长繁殖形成“水华”,已经造成灾害性后果,控制藻类的过度生长繁殖是水环境治理的重要内容。影响藻类生长繁殖的因素很多,诸如物理的,化学的,生物的等等。已经有实验证明,在影响藻类生长繁殖的因子中,磷是限制性因素之一^[1]。多年的调查研究表明,武汉东湖的氮、磷浓度持续上升,并对藻类的演替产生影响^[2,3]。在对太湖水体富营养化研究中得到的结论是光和磷是主要的限制性因素^[4];对太湖梅梁湾的研究得出的结论是水温 and 总磷为藻类总生物量的显著相关因子,水温,硝态氮和总氮为微囊藻生物量的显著相关因子^[5];还有研究表明,在湖泊的氮磷重量比(N/P)大于 7:1 时(氮磷原子数之比大于 16:1),磷是限制性营养元素,磷也影响微藻种类的交替^[6,7]。因此,研究氮和磷的变化对藻类生长繁殖的影响,对于研究治理湖泊富营养化水体中藻类的爆发性增长具有重要意义。上述结论的依据主要是湖泊生态调查的结果,即对大水体的理化、生物指标进行监测得到数据。通过对 3 个不同富营养化程度的水体进行跟踪调查,同时在实验室用 3 种水样原液及梯度稀释水样,制成培养基培养微藻,定量研究了氮、磷对藻类生长繁殖的影响。与已有的研究相比,本研究的特点是将生态调查与实验室内培养相结合,希望深入了解微藻生长繁殖速率和生物量与富营养化水体中氮磷浓度的关系,为探索控制藻类过度生长和净化水体的方法提供依据。

1 实验材料及方法

1.1 样品采集

样品分别采自 3 个不同富营养化程度的水体:武汉东湖(采样点:东湖与庙湖连通处);中国科学院武汉植物园水生植物栽培区(采样点为周边 4 点);东湖边的鱼塘(采样点为周边 4 点)。均从水表面下 20cm 处开始,向下每隔 30cm 采集一个水样。同一水体的各个水样等量混合,制成混合水样,待测。

1.2 pH 值用 pH-206 型 pH 计测定;溶氧采用 RSS5100 型便携式溶解氧测定仪测定。

1.3 水化学指标的测定

(1)总氮 碱性过硫酸钾消解分光光度法(GB11894-89)。

(2)总磷 钼酸铵分光光度法(GB11893-89)。

1.4 水体中叶绿素含量的测定

根据王建等人的方法^[8]。

1.5 水体中浮游植物生物量的测定

根据水体中叶绿素 a 含量计算浮游植物生物量(干重)^[7],计算公式:生物量 = 521Chla。

1.6 氮磷对微藻生长速率的影响

1.6.1 3 种不同水质培养基的配制 分别取 3 种水样原液,用 G5 细菌过滤器过滤,除去杂质、细菌和其它杂藻等,即成为具有不同氮磷浓度的 3 种培养基,用蒸馏水将东湖水样原液分别稀释到 1/12.5, 1/25, 1/50,成为另外 3 种具有不同氮磷浓度的培养基。

1.6.2 藻种及其前处理 玫瑰拟衣藻 *Chloromonas rosae* 由美国奥斯汀德克萨斯大学(UTEX)藻种保藏中心惠赠,该藻可以在极贫营养的培养基中生长繁殖。营养生长动力学实验前,藻种需经过 3~5d 氮、磷饥饿处理,消耗胞内积累的氮和磷。具体方法为:离心收集藻种,用蒸馏水洗涤 2 次,接入蒸馏水中培养,72h 后,细胞密

度不再增长,可以认为已经消耗掉了胞内积累的氮、磷^[9,10]。

1.6.3 培养条件 50ml 三角瓶装 20ml 培养基,每种处理设 2 个平行样,水平摇床摇动培养,转速为 80r/min,光照强度:100μmol·m⁻²·s⁻¹,温度(23±1)℃。

1.6.4 生长速率的测定和计算 生物量的增长用藻液吸光度(A₅₄₀)的增长表示,每 24h 测定 1 次藻液的吸光度。用下列公式计算生长速率:

$$\mu = \frac{\ln(A_{540})_2 - \ln(A_{540})_1}{T_2 - T_1}$$

式中,T₂ 和 T₁ 分别为培养结束和培养开始的时间,每次培养 3d。

玫瑰拟衣藻藻液吸光度与细胞密度的关系:A₅₄₀ = 0.1,细胞密度为 (22.97 ± 0.53) × 10⁴ cells/ml

1.7 浮游植物中氮磷含量的计算

采用经验值计算的方法。林婉莲报道,1982~1984 年对武汉东湖 12 个水华样品的分析结果表明,浮游植物氮含量变化范围 4.24%~11.26%,平均 7.98%,磷含量变化范围 0.56%~1.68%,平均 0.94%。考虑到东湖的优势种已经不是微囊藻,对于实验期间东湖浮游植物氮磷含量的经验值的统计,应该除去其中微囊藻占绝对优势的样品,这样,其它样品氮含量变化范围 4.24%~8.36%,平均 5.35%,磷含量变化范围 0.66%~1.12%,平均 0.783%^[11]。东湖浮游植物氮磷含量平均值的比值是 15.6,与 Rhee G Y 等报道的 7 种淡水微藻细胞的 N:P 平均值是 17 的结果相似^[12],与公认的 Redfield 值 16:1 非常接近,说明东湖浮游植物氮磷含量平均值具有较好的代表性,可以作为浮游植物氮磷含量的经验值:

氮含量的计算: N = 生物量 × 5.35%

磷含量的计算: P = 生物量 × 0.783%

2 结果和分析

2.1 水化学指标与生物量的变化

总氮、总磷、浮游植物生物量变化见图 1~图 3。

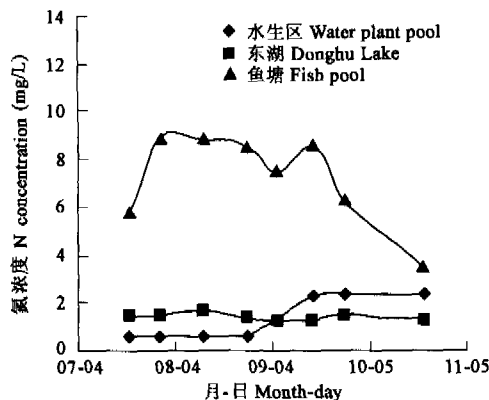


图 1 氮(N)浓度变化

Fig.1 Changes of TN concentration

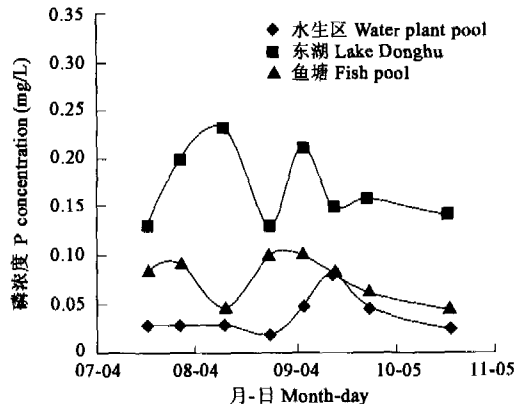


图 2 磷(P)浓度变化

Fig.2 Changes of DIP concentration

◆水生区 Water plant pool ■东湖 Lake Donghu ▲鱼塘 Fish pool ◆水生区 Water plant pool ■东湖 Lake Donghu ▲鱼塘 Fish pool

东湖的氮浓度波动不大,水生区的氮浓度在调查期间有一个突然的升高,然后又保持平稳,鱼塘的氮浓度比东湖和水生区高得多,在调查的后期开始大幅度地下降。

3 个水体的磷浓度都有所波动,东湖的磷浓度最高,其次是鱼塘,水生区的磷浓度一直保持最低的水平。

东湖和水生区的生物量比较接近,二者的变化都很平缓,鱼塘的生物量比东湖和水生区高得多,并且波动很大。

3 个水体的 pH 值有差异,按从高到低的顺序是东湖—水生区—鱼塘,同一水体的 pH 值在调查期间波动

不大。3 个水体的温度差异不明显,一般不超过 1℃,由于季节的变化,调查期间水温由 33℃ 逐步下降到 20℃。

3 个水体的溶解氧浓度波动较大,并且有差异,按从高到低的顺序是东湖—水生区—鱼塘。与 pH 值的变化规律相同。

根据多年的调查结果,7~10 月是当地(武汉)浮游植物生物量的高峰期^[7]。本次调查期间,东湖的浮游植物生物量也在往年的波动范围之内。东湖和 水生区的各项指标的变化都在正常范围之内。鱼塘的氮浓度远远超出了一般湖泊的范围。

2.2 3 个富营养化水体的水质

根据坂本的水质营养程度分类标准^[13],3 个水体的营养程度分别为:水生区,富营养;武汉东湖,超富营养;鱼塘,超富营养。

2.3 氮磷浓度对微藻生长繁殖速率的影响

从表 1 中的数据可以看出,鱼塘水的氮浓度比东湖水高得多,但培养玫瑰拟衣藻的生长速率却比东湖水低,表明在实验条件下氮浓度的变化对生长速率的影响不明显。

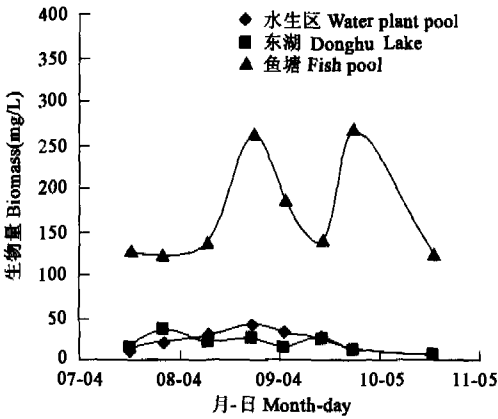


图 3 生物量变化
Fig.3 Changes of biomass
◆水生区 Water plant pool ■东湖 Lake Donghu ▲鱼塘 Fish pool

表 1 培养基氮磷浓度和玫瑰拟衣藻生长速率
Table 1 Concentration of N, P and the specific growth rate of *Chloromonas rosae*

培养基 Medium	N(mg/L)	P(mg/L)	生长速率 μ Specific growth rate
鱼塘水 Fish pool water	7.53	0.101	0.244
鱼塘水 Fish pool water	8.5	0.082	0.1989
鱼塘水 Fish pool water	6.3	0.061	0.2382
水生植物区水 Water plant pool water	0.61	0.028	0.246
水生植物区水 Water plant pool water	0.64	0.030	0.1716
水生植物区水 Water plant pool water	0.67	0.032	0.2163
东湖水 Lake Donghu water	1.32	0.21	0.4138
东湖水 Lake Donghu water	1.23	0.15	0.3328
东湖水 Lake Donghu water	1.48	0.16	0.2684
稀释东湖水 Diluted Lake Donghu water(1/12.5)	0.1056	0.0168	0.0948
稀释东湖水 Diluted Lake Donghu water(1/12.5)	0.0984	0.012	0.0993
稀释东湖水 Diluted Lake Donghu water(1/12.5)	0.1184	0.0128	0.1650
稀释东湖水 Diluted Lake Donghu water(1/25)	0.0528	0.0084	0.0915
稀释东湖水 Diluted Lake Donghu water(1/25)	0.0492	0.006	0.0067
稀释东湖水 Diluted Lake Donghu water(1/25)	0.0592	0.0064	0.0592
稀释东湖水 (1/50) Diluted Lake Donghu water(1/50)	0.0264	0.0042	0.0333
稀释东湖水 (1/50) Diluted Lake Donghu water(1/50)	0.0246	0.003	0.0198
稀释东湖水 (1/50) Diluted Lake Donghu water(1/50)	0.0296	0.0032	-0.0147

与氮浓度的情况不同,磷浓度按从高到低的顺序为东湖-鱼塘-水生区,在实验条件下,玫瑰拟衣藻的生长速率(μ)从高到低的顺序也是东湖-鱼塘-水生区,与磷浓度的顺序一致。回归分析表明,生长速率(μ)与磷浓度的关系曲线是对数曲线(图 4),回归方程为 $y = 0.0806\ln x + 0.4658$, $R^2 = 0.8889$ 。当磷浓度小于 0.05mg/L 时,生长繁殖速率随着磷浓度的升高而直线上升,当磷浓度进一步升高,生长繁殖速率仍然随之增加,但增加的幅度越来越小,当磷浓度达到 0.2mg/L 时,生长繁殖速率基本不再随着磷浓度的增加而升高。利用回归方

程外推,得出生长速率为零时的磷浓度是 0.003mg/L。

2.4 氮、磷浓度与浮游生物量的关系

为了深入分析富营养水体中氮浓度和磷浓度对浮游植物生物量影响,对存在于浮游植物中的氮和磷进行了计算,分别用溶解氮、溶解磷和溶解氮 + 胞内氮、溶解磷 + 胞内磷两种方法表示水体中氮和磷浓度,计算出两种氮磷比。结果见表 2。

溶解氮浓度与生物量的关系见图 5,溶解氮 + 胞内氮与生物量的关系见图 6。图 5 反映出生物量随着溶解氮浓度的增加呈线性上升,但实测数据与线性回归方程拟合程度不高($R^2 = 0.7179$)。图 6 表明,当同时考虑溶解的和生物体内的氮时,生物量随着氮浓度的增加呈线性上升,实测数据与线性回归方程拟合程度高($R^2 = 0.9508$)。

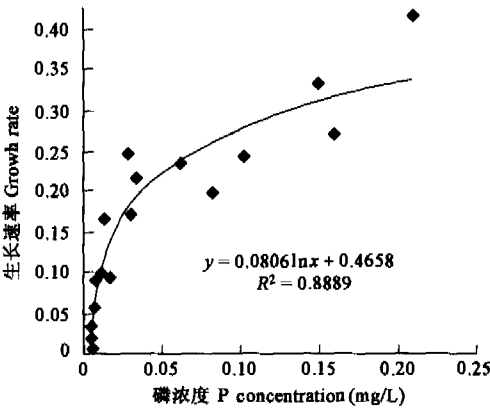


图 4 生长速率与磷浓度的关系

Fig.4 Relationship between growth rate and concentration of P

表 2 氮磷浓度及其原子比率

Table 2 Concentration of N, P and atomic N:P ratios

地点 Location	N(mg/L)	P(mg/L)	溶解氮 + 胞内氮 TDN + cellular N (mg/L)	溶解磷 + 胞内磷 DIP + cellular P(mg/L)	溶解氮/溶解磷 TDN/ DIP	(溶解氮 + 胞内氮)/ (溶解磷 + 胞内磷) (TDN + cellular N)/(DIP + cellular P)
1	1.47	0.13	2.223	0.240	26	21
2	1.53	0.20	3.436	0.479	17	16
3	1.69	0.23	2.880	0.404	17	16
4	1.41	0.13	2.709	0.320	25	19
5	1.32	0.21	2.193	0.338	14	15
6	1.23	0.15	2.676	0.362	19	17
7	1.48	0.16	2.219	0.268	21	19
8	1.23	0.14	1.493	0.178	20	19
9	0.61	0.028	1.315	0.131	50	23
10	0.64	0.030	1.792	0.199	49	21
11	0.67	0.032	2.271	0.264	51	20
12	0.67	0.018	2.845	0.336	85	19
13	1.38	0.048	3.093	0.299	66	24
14	2.30	0.083	3.597	0.273	63	30
15	2.29	0.046	2.916	0.138	114	48
16	2.32	0.024	2.569	0.060	220	97
17	5.74	0.085	12.459	1.068	154	27
18	8.85	0.093	15.350	1.044	218	34
19	8.76	0.046	16.113	1.122	435	33
20	8.60	0.100	22.499	2.134	197	24
21	7.53	0.101	17.498	1.560	170	26
22	8.50	0.082	15.942	1.171	237	31
23	6.30	0.061	20.599	2.154	236	22
24	3.50	0.045	9.920	0.985	178	23
平均 Average	3.33	0.095	7.109	0.647	112	27

* 1~8 东湖,9~16 水生植物区,17~24 鱼塘 1~8 Lake Donghu, 9~16 water plant pool, 17~24 fish pool

溶解磷浓度与生物量的关系见图 7,溶解磷 + 胞内磷与生物量的关系见图 8。从图 7 可以看出,生物量的变化与溶解磷浓度的变化没有明显关系。图 8 表明,当同时考虑溶解的和生物体内的磷时,生物量随着磷浓度的增加直线上升,实测数据与线性回归方程拟合程度非常高($R^2 = 0.9911$)。

4 讨论

4.1 浮游植物的生长限制性营养物质

浮游植物的生长限制性营养物质是氮元素还是磷元素,可以粗略地通过水体中的氮、磷比来判断。

Redfield 提出,满足海洋浮游植物对营养物质生理需求的碳、氮、磷原子比为 106:16:1^[14]。这一比值被称为 Redfield 值。尽管特定的物种对营养物质需求的最适比例在不同的生长时期有所不同,但是,Redfield 值代表了广大的物种对营养物质需求的最适比例的平均值,不仅在海洋浮游植物限制性营养物质的研究中应用,而且在淡水浮游植物限制性营养物质的研究中得到广泛的应用^[15]。在淡水浮游植物中,环境中的 N:P 比大于 20:1 时,被认为是磷限制性的,小于 10:1 时被认为是氮限制性的,该比率在 10:1~20:1 之间时,限制性因素就变得不确切了^[16]。

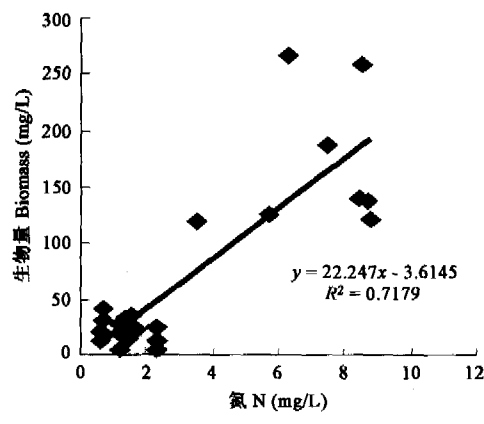


图 5 生物量与溶解氮的关系
Fig. 5 The relationship between biomass and TDN

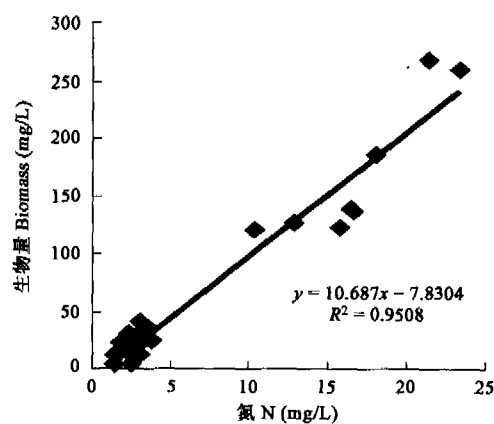


图 6 生物量与溶解氮 + 胞内氮的关系
Fig. 6 The relationship between biomass and TDN + cellular N

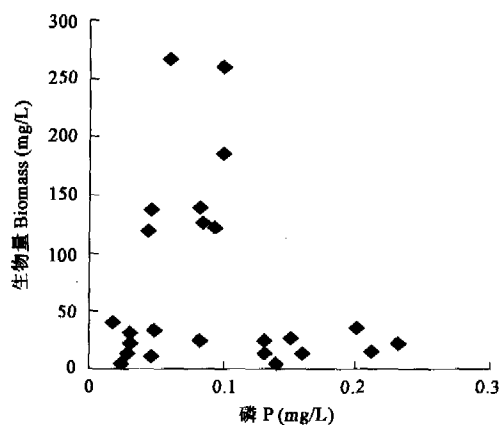


图 7 生物量与溶解磷的关系
Fig. 7 The relationship between biomass and DIP

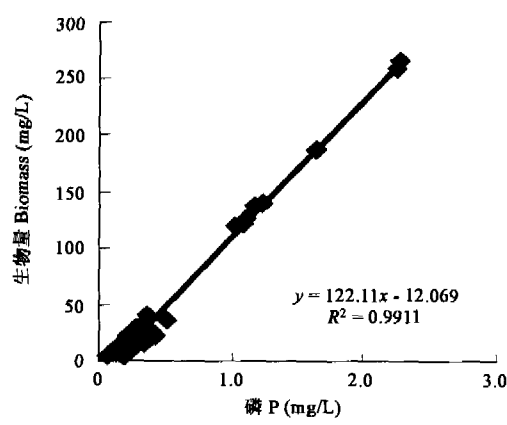


图 8 生物量与溶解磷 + 胞内磷的关系
Fig. 8 The relationship between biomass and DIP + cellular P

表 2 统计数据显示,3 个富营养化水体中,存在于水中的氮和磷原子之比的平均值分别是:东湖 20; 水生区 68(除去极端值 212); 鱼塘 199(除去极端值 422),平均值 112。根据 Redfield 值,磷成为浮游植物生长的限制因子。

室内培养实验的结果表明,决定玫瑰拟衣藻生长繁殖速率的因素是磷的浓度,而不是氮的浓度。实验结果支持利用 Redfield 值所做的判断。

利用 Redfield 值判断限制性营养物质的相对性已经被认识到。当营养水平接近限制水平时,Redfield 值是有效的;当营养过剩时,外界营养物质的比例已经与细胞内生理过程对营养物质需求的比例不相关,Redfield 值就不适用了^[16]。图 4 直观地说明了这种情况,磷在不同浓度范围内对生长繁殖速率影响的程度不同,随着磷浓度由不足变为过剩,对生长繁殖速率的限制作用越来越小。

利用 Redfield 值判断限制性营养物质也具有绝对性,关于这一点还没有被明确提出。如果环境中氮、磷原子比大于 16:1,一旦发生营养物质的限制作用,只能是磷元素限制;反之,只能是氮元素限制。因为在浮游植物对营养物质生理需求的氮、磷原子比为 16:1 的前提下,如果环境中氮、磷原子比大于 16:1,随着浮游植物生长繁殖对营养物质的消耗,氮、磷原子比会越来越大;如果环境中氮、磷原子比小于 16:1,随着浮游植物生长繁殖对营养物质的消耗,氮、磷原子比会越来越小。只有环境中氮、磷原子比正好是 16:1,随着浮游植物生长繁殖对营养物质的消耗,氮、磷原子比才会维持不变。氮磷比变化的数学模型清楚地表明这种数学关系:

$$\frac{N_2}{P_2} = \frac{(16P_1 + X) - 16Y}{P_1 - Y} = 16 + \frac{X}{P_1 - Y}$$

式中, P_1 表示磷的初始浓度,氮的初始浓度为 $16P_1 + X$, Y 表示浮游植物消耗的磷浓度, P_2 和 N_2 分别表示氮和磷的最终浓度。当 $X > 0$, N_2/P_2 不仅大于 16,而且会越来越大;当 $X < 0$, N_2/P_2 不仅小于 16,而且会越来越小。

表 2 的统计数据中,溶解氮 + 胞内氮与溶解磷 + 胞内磷的比值代表初始的氮磷比,平均值是 27,大于 16。溶解氮与溶解磷的比值代表最终的氮磷比,平均值是 112,是初始氮磷比的 4 倍多。李瑞香等进行的围隔生态系内浮游植物对富磷的响应的实验,开始时氮磷原子数比为 5.58,小于 16,当围隔中的中肋骨条藻细胞密度达到最大时,氮磷原子数比降为 2.75^[17]。

利用微藻生长繁殖速率与磷浓度回归方程计算出生长速率为零时对应的磷浓度本是 0.003mg/L。根据坂本的水质营养程度分类标准^[13],这一浓度为贫营养湖泊磷浓度的下限。计算结果与坂本的调查统计结果相吻合,说明回归方程具有代表性。对赤潮的研究表明,当水体中磷浓度低于 0.003mg/L 时,就可能限制藻类的生长,而水体的磷浓度为 0.018mg/L 时,就能刺激藻类的大量繁殖^[18]。

4.2 富营养化水体中氮磷浓度对浮游植物生物量的影响

图 5 ~ 图 8 反映出,如果只考虑水中溶解的氮磷浓度,浮游植物的生物量与氮的浓度虽然呈正相关,但线性关系不明显;与磷浓度的变化则没有关系。如果同时考虑水中溶解的和浮游植物体内的氮和磷,生物量不仅与氮的浓度呈明显的线性关系,而且与磷浓度也呈明显的线性关系,实验数据与线性回归方程的拟合程度都很高($R^2 = 0.9508$, $R^2 = 0.9911$)。所以,富营养化水体中浮游植物的生物量是由氮磷浓度共同控制的,只有氮、磷都供应充足时,生物量才可以持续增长。二者中有一个成为限制因子,生物量的增长必然减缓。

本次调查研究的 3 个富营养化水体的氮、磷浓度跨度大,根据实际测定的浓度和生物量得到的回归方程拟合程度高,有较好的代表性。如果这两个线性方程被证明适用于其它的富营养化水体,就可以广泛应用于定量描述富营养化水体中氮磷浓度对浮游植物生物量的影响,在理论研究和实际应用方面都很有意义。

4.3 关于浮游植物中的氮和磷

在调查的 3 个富营养水体中,被浮游植物吸收利用的氮占全部氮元素的 53%,磷占全部磷元素的 85%,是氮、磷存在的主要形式。所以,评价水体的营养程度,只考虑水中溶解的氮、磷是不全面的,必须同时考虑生物体内的氮、磷。生物体内的氮、磷和水中的氮、磷相互作用,不断交流,共同决定水体中氮、磷浓度和生物量的变化。根据对武汉东湖长年的监测,湖水中的氮、磷浓度有明显的季节变化规律,峰值出现在 4 月份,谷值出现在 7 ~ 10 月份,与浮游生物的数量变化呈负相关^[13]。以此类推,对于有水生高等植物的水体,需要考虑水生高等植物体内的氮、磷。准确的营养评价,需要以水中、浮游植物和水生高等植物中的氮、磷总量为基础,否则,不仅不能作出准确的评价,也不可能揭示营养物质与生物之间相互影响的规律。本项研究中氮磷浓度对浮游植物生物量影响的分析,提供了一个较好的例子。

4.4 关于富营养化水体的治理方法

武汉东湖是一个典型的浅水湖泊,周边地区人口密集,生活污水大量排入湖中,造成湖水富营养化,早期主要放养的对象是草鱼,水生植被被彻底破坏后至今没能恢复。位于中国科学院武汉植物园院内水生植物栽培观赏区与东湖后湖相连,但是,其生态环境与东湖差异极大,水质清洁,遍布沉水和浮水植物,主要有睡

莲, 芡, 眼子菜, 茭白等, 保持着良好的水生生态系统。靠近东湖的鱼塘因放养肉食性鱼类(非洲八角鲶鱼)而不断投放死鱼等物, 是一个极端污染的水体。

调查期间, 水生区浮游植物生物量保持较低水平, 主要是因为水中氮, 特别是磷浓度低, 限制了浮游植物的快速生长繁殖。氮、磷浓度低是由于水生高等植物的净化作用。东湖的氮、磷水平比水生区高, 浮游植物生物量却与水生区保持相近, 可能是因为湖中大量放养滤食性鱼类, 对浮游植物的总量起到了控制作用。刘建康、谢平等认为东湖自 1985 年起不再爆发蓝藻水华的主要原因是滤食性鱼类的滤食效果所致^[19]。所调查的鱼塘放养肉食性的非洲八角鲶鱼, 是一个极端的环境, 既没有水生高等植物的净化作用, 也没有滤食性鱼类的滤食效果, 浮游植物的生长繁殖和生物量的累积主要由水体中的氮、磷等营养元素的量控制, 只要氮磷源源不断地供应, 浮游植物的生物量就会持续增长。调查期间生物量(干重)平均 169.62mg/L, 最高 267.72 mg/L, 达到了微藻培养池中生物量的水平。

如果没有节制地向湖泊中排入富含氮磷的污水, 任何一个湖泊都会发展成与上述鱼塘一样的情况。防止水体富营养化的唯一办法是维持水体中氮、磷等主要营养元素收支平衡。治理富营养化的根本办法是从水体中移走过量的氮、磷等营养物质。水生区是利用水生植物净化水体的例子, 东湖是利用滤食性鱼类控制浮游植物生物量的例子, 都有效果, 但是这两种方法的局限性也显而易见: 不能有效地从水体中移走过量的氮、磷等主要营养元素。我国目前水环境问题的主要矛盾是富营养化, 只有能够大规模地从水体中去除氮、磷等主要营养物质的方法, 才能成为有效的水环境整治技术。

References:

- [1] Borcardt A. Nutrients. In: Stevenson, R., Bothwell, L. and Lowe, L. eds. *Algal Ecology-Freshwater Benthic Ecosystems*. London: Academic Press Inc., 1996. 184 ~ 227.
- [2] Lin W L, Wang J, Huang X F. Dynamics of sestonic particulate organic matter in Donghu lake, Wuhan in the recent decade (1983 ~ 1993). In: Liu J K, ed. *The study on ecology in Donghu Lake (II)*. Beijing: Science Press, 1995. 76 ~ 93.
- [3] Wang J, Lin W L. Studies on phosphorus status of the Donghu lake. In: Liu J K, ed. *The study on ecology in Donghu Lake (II)*. Beijing: Science Press, 1995. 76 ~ 93.
- [4] Dokulil M, Chen W, Cai Q. Anthropogenic impacts to large lakes in China: the Tai Hu example. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 2000, 3: 81 ~ 94.
- [5] Chen Y W, Qin B Q, Gao X Y. Prediction of blue-green algae bloom using stepwise multiple regression between algae & related environmental factors in Meiliang bay, lake Taihu. *Journal of Lake Sciences*, 2001, 13(1): 63 ~ 71.
- [6] Jin X C. *Eutrophication of lakes in China*. Beijing: Environmental Science Press of China, 1990.
- [7] Wang J. Phytoplankton. In: Liu J K, ed. *The study on ecology in Donghu Lake (I)*. Beijing: Science Press, 1990. 76 ~ 93.
- [8] Wang J, Wang J. The method for determination of chlorophyll and phaeopigments. *Wuhan Botanical Research*, 1984, 2(2): 321 ~ 328.
- [9] Deng G, Li Y G, Hu H J, et al. Effects of temperature light and pH on photosynthesis, and of Light-dark cycle on growth rate and biomass of *Scripsiella trochoidea* and *Alexandrium tamarense*. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2004, 22(2): 129 ~ 135.
- [10] Gao X Q, Ren J C, Zong Z X, et al. Studies on the Nutrient Energetics of *Microcystis aeruginosa*. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1994, 30(4): 461 ~ 470.
- [11] Lin W L. Organic detritus and it's functions in ecosystem of Lake Donghu. In: Liu J K, ed. *The study on ecology in Donghu Lake (I)*. Beijing: Science Press, 1990. 242 ~ 289.
- [12] Rhee G Y, Gothan I J. Optimum N:P ratios and coexistence of plankton algae. *J Phycol.* 1980. 6: 486 ~ 489.
- [13] Liu Q X, Zhang S Y. Studies on the physical and chemical character of the water in Donghu Lake. In: Liu J K, ed. *The study on ecology in Donghu Lake (I)*. Beijing: Science Press, 1990. 10 ~ 51.
- [14] Redfield A C. The biological control of chemical factors in the environment. *Am. Sci.*, 1958, 46: 205 ~ 222.
- [15] Sun J, Liu D Y, Chen Z T, et al. Growth of *Platymonas helgolandica* var. *tsingtaoensis*, *Cylindrotheca closterium* and *Karenia mikimotoi* and their survival strategies under different N/P ratios. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 5(11): 2122 ~ 2126.
- [16] Schanz F and Juon H. Two different methods of evaluating nutrient limitation of periphyton bioassays using water from the River Rhine and eight of its tributaries. *Hydrobiologia*, 1983, 102: 187 ~ 195.

- [17] Li R X, Zhu M Y, Chen S, *et al.* Responses of phytoplankton on phosphate enrichment in mesocosms. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(4):603 ~ 607.
- [18] Peng X H, Fang Y G. The exploration of the main reason of the rising tendency of phosphorus pollution near sea area and precaution. *Journal of Jinzhou Normal University (Natural Science Edition)*, 1997, (4):62 ~ 65.
- [19] Liu J K, Xie P. Unraveling the enigma of the disappearance of water bloom from the east lake(lake Donghu) of Wuhan. *Resource and Environment in the Yangtze Basin*, 1999, 8(3):312 ~ 319.

参考文献:

- [2] 林婉莲,王建,黄祥飞,等. 武汉东湖水柱浮游颗粒有机碳、氮、磷十年动态. 见:刘建康主编. 东湖生态学研究(二). 北京:科学出版社, 1995. 75 ~ 91.
- [3] 王建,林婉莲. 武汉东湖磷营养状况的研究. 见:刘建康主编. 东湖生态学研究(二). 北京:科学出版社, 1995. 108 ~ 128.
- [5] 陈宇炜,秦伯强,高锡云. 太湖梅梁湾藻类及相关环境因子逐步回归统计和蓝藻水华的初步预测. *湖泊科学*. 2001, 13(1):63 ~ 71.
- [6] 金相灿. 中国湖泊富营养化. 北京:中国环境科学出版社, 1990.
- [7] 王建. 浮游植物. 见:刘建康主编. 东湖生态学研究(一). 北京:科学出版社, 1990. 76 ~ 93.
- [8] 王建,王骥. 浮游植物叶绿素与脱镁叶绿素的测定方法. *武汉植物学研究*, 1984, 2(2), 321 ~ 328.
- [9] 邓光,李夜光,胡鸿钧,等. 温度、光照和 pH 值对锥状斯氏藻和塔玛亚历山大藻光合作用的影响及光暗周期对其生长速率和生物量的影响. *武汉植物学研究*, 2004, 22(2):129 ~ 135.
- [10] 高学庆,任久长,宗志祥,等. 铜绿微囊藻营养生长动力学研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 1994, 30(4):461 ~ 470.
- [11] 林婉莲. 有机碎屑及其在东湖生态系统中的作用. 见:刘建康主编. 东湖生态学研究(一). 北京:科学出版社, 1990. 242 ~ 289.
- [13] 刘衢霞,张水元. 湖水的理化性质. 见:刘建康主编. 东湖生态学研究(一). 北京:科学出版社, 1990. 10 ~ 51.
- [15] 孙军,刘东燕,陈宗涛,魏天迪. 不同氮磷比率对青岛大扁藻、新月柱壳藻、和米氏凯伦藻生长影响及其生存策略研究. *应用生态学报*, 2004, 15(11):2122 ~ 2126.
- [17] 李瑞香,朱明远,陈尚,等. 围隔生态系内浮游植物对富磷的响应. *生态学报*, 2001, 21(4):603 ~ 607.
- [18] 彭旭云,房云阁. 锦州近海海域磷污染主要原因及其对策. *锦州师范学院学报(自然科学版)*, 1997, (4):62 ~ 65.
- [19] 刘建康,谢平. 揭开东湖水华消失之谜. *长江流域资源与环境*, 1999, 8(3):312 ~ 319.