

# 三峡库区流域藻类生长与营养盐吸收关系

刘信安, 湛敏, 马艳娥

(重庆大学化学化工学院, 重庆 400044)

摘要: 根据三峡库区流域的实测数据和描述富营养污染流域中水华暴发强非线性耦合动力学模型中的控制函数, 研究了缓流态水体环境中藻类生长的内在机制, 并以长江三峡流域优势藻类, 即绿藻的生长为例, 较为系统地研究了藻类生长对 N、P 的吸收与水体中 N、P 浓度之间存在的强相互作用; 藻类对营养物的吸收率  $\omega_i$  与水体中营养物浓度  $c_x$  的比值 ( $\omega_i/c_x$ ) 不仅反映出三峡水域中藻类浓度对藻类吸收营养物程度的影响, 而且在藻类生长与吸收各种营养成分之间还存在明显的关联性。

关键词: 藻类生长; 营养物吸收; 流域环境; 富营养化; 三峡流域

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2005)04-0095-05

## Relationship Between Algal Growth and Nutritious Materials Absorbability in the Three Gorges Valley

LIU Xin-an, ZHAN Min, MA Yan-e

(College of Chemical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** According to measuring data of various relative pollution materials such as various nitrides, phosphides and chlorophyll along the Three Gorges valley, and with introducing a special controlling function of new strong nonlinear coupling dynamics model, in which could used to describe complex behavior and process of green algal bloom to exist in slow flow, we studied algal growth mechanism and found some strong interactions and inherence rules when N and P concentration absorbed by algae body varied with the different N and P concentration in the valley. The ratio factor ( $\omega_i/c_x$ ) of the nutritious absorption coefficient of algae  $\omega_i$  to nutritious material concentration  $c_x$  not only reveals the influence relation about nutrition content absorbed by the algae at different algal concentrations, but also characterizes the some correlations between algal growth and various effects of different nutritious materials absorbed by the algae.

**Key words:** algal growth; nutritious compound absorption; valley environment; eutrophication; Three Gorges Valley

在湖泊、水库和缓流态水域中, 藻类是主要的初级生产者<sup>[1]</sup>. 氮、磷等营养物在水体中过量累积且外部条件适宜时, 容易导致藻类大面积疯长, 即所谓的水华暴发<sup>[2]</sup>. 这种水体富营养化污染已经成为湖泊、水库, 尤其是象三峡库区这种超大规模流域体系中水环境安全的重要隐患. 例如, 三峡库区乌江流域自 1994 年以来几乎每年发生水华污染, 尤其是 1996 年和 2001 年春季暴发水华持续一个多月, 对重庆市的彭水县、武隆县和涪陵区的饮用水源造成严重污染<sup>[3,4]</sup>. 因而对藻类, 特别是对适应缓流态水体的藻类生长机理, 以及藻类吸收营养物影响因素等的定量研究至关重要. 藻类生长必需的营养元素主要有氮、磷等<sup>[5]</sup>. 研究水华爆发机制, 就必须考虑藻类、氮和磷等营养盐之间的相互关系.

### 1 藻类营养盐模型

张永泽、夏军等人提出: 在湖泊富营养化研究中应当重点考虑藻类生长模型和水体环境状态, 并给出了浮游植物生长率的动力学模型<sup>[6,7]</sup>:

$$\begin{aligned} \text{CDR} = & \mu_{\max} F(T) \left| 1 - \frac{c_{C_{\min}}}{c_C} \right| \\ & \times \left| 1 - \frac{c_{N_{\min}}}{c_N} \right| \left| 1 - \frac{c_{P_{\min}}}{c_P} \right| \end{aligned} \quad (1)$$

式中, CDR: 浮游植物的生长率;  $\mu_{\max}$ : 浮游植物最大生长率;  $F(T)$ : 温度限制因子;  $c_C$ 、 $c_N$  和  $c_P$  分别为藻类细胞中碳、氮和磷的浓度, 下标 min 表示相应组分的最小浓度, 分别为 150.0 S、15.0 S 和 1.0 S, S 为浮游藻类浓度, 单位为  $\mu\text{g/L}$ .

美国环保局推荐的 QUAL- II E 水质模型中叶绿素 a 浓度与浮游藻类的生物量成正比:

$$c_a = \varepsilon_0 c_A \quad (2)$$

式中,  $c_a$  是叶绿素 a 的浓度,  $c_A$  是藻类生物量的浓度,  $\varepsilon_0$  是转换系数<sup>[8,9]</sup>.

(1) 式可能没有反映出藻类对营养物质吸收的

收稿日期: 2004-07-19; 修订日期: 2004-10-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (20377054)

作者简介: 刘信安 (1954-), 男, 教授, 主要研究方向为理论环境化学与复杂性科学, E-mail: xaliu@cqu.edu.cn

关联性,使计算与实测数据之间存在较大偏差.因此,王洪礼等在研究赤潮藻类营养盐非线性动力学行为时,提出了藻类生长中 N、P 吸收比率的概念<sup>[10]</sup>.本文在此基础上,将  $\mu_{\max} F(T)$  合并成  $\mu_{\max}(T)$ ,结合(2)式中叶绿素 a 浓度与浮游藻类的生物量关系,并视碳水化合物的影响为常数以简化(1)式,重新构建了描述藻类吸收营养盐的动力学模型:

$$\begin{aligned} \text{CDR} &= \frac{dc_A}{dt} = \frac{dc_a}{\varepsilon_0 dt} \\ &= \mu_{\max}(t) \left| 1 - \frac{\omega_1}{c_N} c_{N_{\min}} \right| \left| 1 - \frac{\omega_2}{c_P} c_{P_{\min}} \right| \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $\omega_1$ :藻类生长对 N 的吸收比率;  $\omega_2$ :藻类生长对 P 的吸收比率;  $\mu_{\max}(t)$ :随温度变化的浮游植物最大生长率函数.又根据 QUAL- II E 水质模型中的关系式<sup>[8]</sup>:

$$\mu_{\max} = \mu_{\max}(20) \theta^{t-20} \quad (4)$$

式中,  $\theta$  为 1.02 ~ 1.06.本文选择温度  $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,模型简化为:

$$\frac{dc_a}{dt} = \varepsilon_0 \mu_{\max} \left| 1 - \frac{\omega_1}{c_N} c_{N_{\min}} \right| \left| 1 - \frac{\omega_2}{c_P} c_{P_{\min}} \right| \quad (5)$$

通过吸收比率使水体中营养物浓度与藻体中的营养物浓度关联起来,可以更为合理地描述藻类生长状态.而本文提出的  $(\omega_i/c_x)$  因子不仅反映了水体

中藻类浓度变化对藻类吸收营养盐的影响,还揭示出藻类对各种营养成分的吸收相关性,下标  $x:N$  或  $P$  营养盐.

为了方便计算,对(3)式又进行了如下所示的近似处理:

$$\begin{aligned} \text{CDR} &= \frac{dc_A}{dt} = \frac{dc_a}{\varepsilon_0 dt} \approx \frac{\Delta c_a}{\varepsilon_0 \Delta t} \\ &= \mu_{\max} \left| 1 - \frac{\omega_1}{c_N} c_{N_{\min}} \right| \left| 1 - \frac{\omega_2}{c_P} c_{P_{\min}} \right| \end{aligned} \quad (6)$$

在实际流域中,尤其是诸如湖泊、水库等缓流或静态水体中,营养物浓度随时间的变化率近似为 0,即可以考虑将(6)式右边项近似为某一时刻水体中叶绿素 a 的浓度,这样得到:

$$c_a \approx \varepsilon_0 \mu_{\max} \left| 1 - \frac{\omega_1}{c_N} c_{N_{\min}} \right| \left| 1 - \frac{\omega_2}{c_P} c_{P_{\min}} \right| \quad (7)$$

## 2 藻类吸收营养盐的影响因素

本文利用三峡流域 2001 年 ~ 2003 年的实测数据<sup>[11,12]</sup>如表 1 所示,将总氮(TN)、总磷(TP)作为藻类生长的重要指标带入(7)式,得到一系列重要的基本参数如  $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $c_{N_{\min}}$  和  $c_{P_{\min}}$  等,用于研究绿藻吸收不同营养物质的影响和相互关系,并以乌江流域为例进行了实际计算.

表 1 三峡库区流域 2001 年 ~ 2003 年枯水期 TP、TN 和叶绿素 a 的平均浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

Table 1 TP, TN and  $c_{\text{chl}a}$  measuring values along Three- Gorges valley between 2001 and 2003/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

| 地点    | 万洲    | 涪陵    | 丰都    | 武隆    | 忠县    | 开县    | 云阳    | 奉节    | 巫山    | 巫溪    |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| TP    | 0.276 | 0.181 | 0.120 | 0.178 | 0.108 | 0.108 | 0.071 | 0.018 | 0.013 | 0.012 |
| TN    | 2.25  | 2.38  | 0.77  | 2.32  | 1.63  | 0.81  | 1.93  | 0.96  | 0.68  | 0.42  |
| $c_a$ | 2.96  | 2.20  | 6.06  | 2.00  | 2.86  | 2.96  | 2.53  | 3.19  | 0.75  | 0.57  |

三峡库区乌江流域磷矿开采普遍,生产过程又存在较严重的排污行为<sup>[13]</sup>,库区流域 TP 污染负荷增大,同时两岸氨氮污染加剧导致江段 TN 浓度上升,使氮磷化合物在形态、分布和趋势上保持大致相同<sup>[11]</sup>.干流段断面平均 TP 浓度高达 0.15 ~ 0.25  $\text{mg/L}$ ,TN 浓度在 1.5 ~ 2.8  $\text{mg/L}$  之间<sup>[14]</sup>.本文首先固定 TP 浓度,取  $c_P = 0.20\text{ mg/L}$ ,通过改变藻类浓度  $S$  分析水体中藻类存在量对藻类吸收 N 的影响如图 1 所示,并得到拟合函数如下:

$$\omega_1/c_N = 67.1 \times S^{-1.010}, R^2 = 0.99983 \quad (8)$$

再根据现场监测资料<sup>[7]</sup>,取  $c_N = 2.32\text{ mg/L}$ ,通过改变  $S$  值,分析水体中藻类存在量对藻类吸收 P 的影响如图 2 所示,得到拟合函数式如下:

$$\omega_2/c_P = 1014 \times S^{-1.013}, R^2 = 0.99941 \quad (9)$$

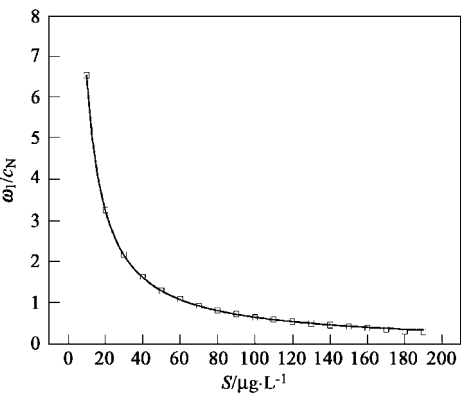


图 1  $c_P = 0.20\text{ mg/L}$  时  $S$  对藻类吸收 N 的影响

Fig.1 Influence of algal concentration varying on N absorption by the algae at  $c_P = 0.20\text{ mg/L}$

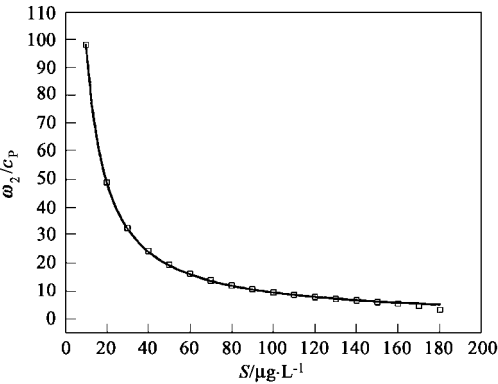


图 2  $c_N = 2.32 \text{ mg/L}$  时  $S$  对藻类吸收 P 的影响  
Fig. 2 Influence of algal concentration varying on P absorption by the algae at  $c_N = 2.32 \text{ mg/L}$

研究藻类吸收营养物相关性时取  $S$  分别为 120、90 和  $60 \mu\text{g/L}$ , 计算表明: 水体中氮浓度改变对藻类吸收磷的影响如图 3 所示. 取图 3 中拐点右侧曲线稳定以后的数据来研究藻类吸收磷的规律, 得到图 4. 关联比率因子  $\omega_i$  与  $c_x$  的函数为:  $(\omega_2/c_P) = U(c_N - V)^W$ , 计算后得到拟合方程的参数如表 2 所示.

同样, 在  $S = 120$ 、90 和  $60 \mu\text{g/L}$  时研究水体中磷浓度改变对藻类吸收氮的规律如图 5 所示, 其关联函数形式为  $(\omega_1/c_N) = U(c_P - V)^W$ , 拟合方程的参数如表 3 所示.

在此基础上本文引入了水华暴发强非线性耦合动力学模型中的控制函数如式(10).

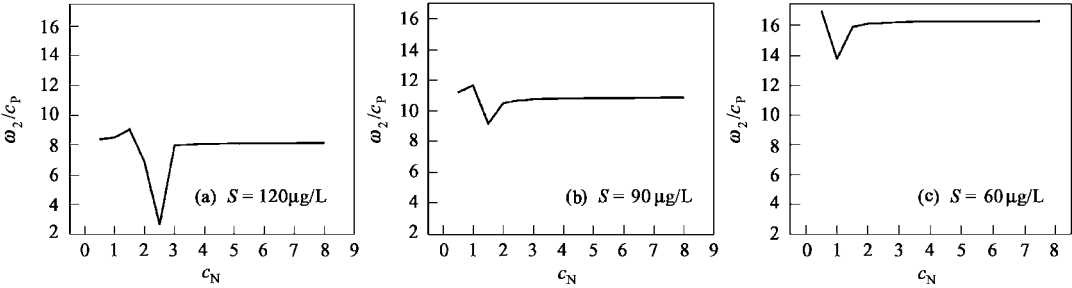


图 3 不同  $S$  值时水体中氮浓度改变对藻类吸收磷的影响  
Fig. 3 Influence of  $c_N$  varying on P absorption by the algae under different  $S$  in the valley

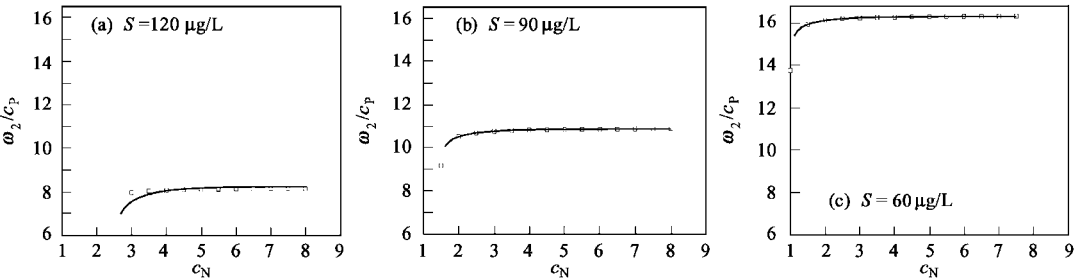


图 4 不同  $S$  值时水体中氮浓度改变对藻类吸收磷的变化规律  
Fig. 4 Evolution trend of  $c_N$  varying to P absorption by the algae under different  $S$  in the valley

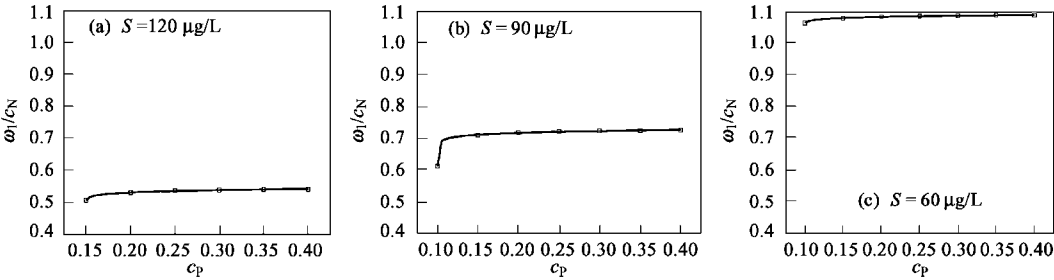


图 5 不同  $S$  浓度时水体中磷浓度改变对藻类吸收氮的影响  
Fig. 5 Influence of  $c_P$  varying on N absorption by the algae under different  $S$  in the valley

表 2 水体中 N 浓度变化对藻类吸收 P 的方程  
Table 2 Equation of P absorbtion by algae with  
 $c_N$  changing in the water environment

| $S$ | $U$   | $V$  | $W$    | $R^2$   |
|-----|-------|------|--------|---------|
| 120 | 7.87  | 2.50 | 0.03   | 0.99386 |
| 90  | 10.67 | 2.50 | 0.03   | 0.99553 |
| 60  | 16.12 | 1.00 | 0.0085 | 0.99985 |

表 3 水体中 P 浓度变化对藻类吸收 N 的方程  
Table 3 Equation of N absorbtion by algae with  
 $c_P$  changing in the water environment

| $S$ | $U$   | $V$   | $W$     | $R^2$   |
|-----|-------|-------|---------|---------|
| 120 | 0.552 | 0.149 | 0.012   | 0.99386 |
| 90  | 0.736 | 0.100 | 0.012   | 0.99553 |
| 60  | 1.095 | 0.098 | 0.00497 | 0.99985 |

$$\varphi(S) = \beta(1 + e^{\sin(S)})^{-1} \tag{10}$$

式中,  $\beta$  (绿藻疯长的临界参数域) 在 0.77 ~ 1.27 之间时正好表征出三峡库区乌江流域的水华暴发行 为<sup>[15]</sup>,  $S$ : 藻类密度. 将藻类吸收营养物模型带入水 华动力学模型控制函数(10)式中得到:

$$\mu_{\max}(t) \left| 1 - \frac{\alpha_1}{c_N} c_{N, \text{algae}} \right| \left| 1 - \frac{\alpha_2}{c_P} c_{P, \text{algae}} \right| = \beta(1 + e^{\sin(S)})^{-1} \tag{11}$$

式中,  $c_{N, \text{algae}}$  和  $c_{P, \text{algae}}$  分别为水华暴发时藻体内 N

和 P 的浓度 .  
水华暴发时水体中藻类大面积疯长, 此时藻细 胞中的营养物含量不再是最小值, 而是随水体中藻 类浓度变化的变量. 根据  $c_{N\min} = 15.0 S$  和  $c_{P\min} = 1.0 S$ , 藻细胞中的营养物质含量变化满足下列关系 式:

$$c_{N, \text{algae}} = \alpha_1 S$$
$$c_{P, \text{algae}} = \alpha_2 S \tag{12}$$

式中,  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  分别是营养盐 N、P 在藻细胞中的百 分含量, 反映了水华暴发时藻体吸收营养盐的规律. 改变  $S$  值, 利用函数关系(11) 计算  $\beta$  在 0.77 ~ 1.27 之间水体中藻类浓度发生变化时藻细胞内营养物的 变化. 研究表明: 固定水体中藻类浓度, 当  $\beta$  在 0.77 ~ 1.27 之间变化时, 藻细胞内营养物的百分含量  $\alpha$  为一定值(如  $S = 10 \mu\text{g/L}$  时,  $\alpha_1 = 150$ ,  $\alpha_2 = 10$ ), 即 水华暴发时,  $\alpha$  的变化与  $\beta$  无关, 而与  $S$  变化呈良好 的线性关系如图 6 所示. 其中图 6(a) 图反映了  $S$  与  $\alpha_1$  的关系, 图 6(b) 反映了  $S$  与  $\alpha_2$  的关系. 拟合函数 如下:

$$\alpha_1 = -46.5795 + 16.0118 S$$
$$R^2 = 0.99842 \tag{13}$$

$$\alpha_2 = -2.13829 + 1.06303 S$$
$$R^2 = 0.99852 \tag{14}$$

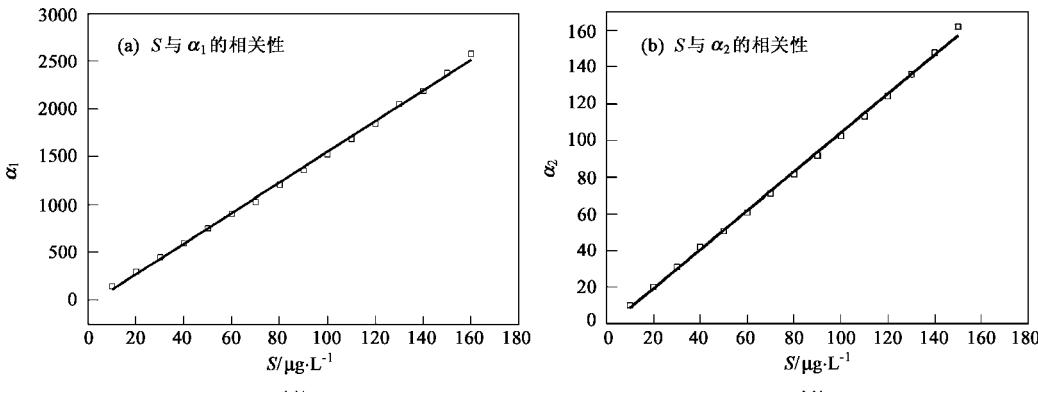


图 6 水华暴发时  $S$  值与藻细胞体内营养物含量  $\alpha$  之间的相关性  
Fig. 6 Correlation between  $S$  and nutritious concentration  $\alpha$  in the algae cell when algae blooms

3 结果与讨论

研究中发现水体中藻类浓度在 10 ~ 170  $\mu\text{g/L}$  时, 藻类浓度对藻类吸收营养物影响均呈现较好的 规律, 而且藻类吸收营养物之间的相关性比较强.  
函数(8)和(9)式体现了水体中藻类浓度对藻类 吸收营养物的影响, 对比两式可以发现:  
(1) 藻类对磷的吸收率远远超过对氮的吸收

率, 表现为关联函数的指数在几乎完全相等的情况 下, (9) 式的斜率远远大于(8) 式的斜率(约 15 倍), 这一点与三峡库区等流域中磷是富营养化主要限制 性因子的结论是一致的<sup>[5, 16 ~ 18]</sup>; 与李铁等在研究中 肋骨条藻和新月菱形藻细胞对磷酸盐的吸收速率远 大于对硝酸盐的吸收速率的结论也是一致的<sup>[19]</sup>.  
(2) 藻类中营养物的吸收比率一定时, 水体中 营养物浓度与水体中藻类浓度成正比, 这符合常识.

因为水体中营养物浓度越高,越有利于藻类大量生长,因而藻类的浓度也越高。

在图 3 中都出现了一个极小值,这说明藻类对磷的吸收在氮浓度从低到高的变化过程中首先会出现吸收量增长,然后急剧下降的现象。藻类对磷的吸收在  $c_N$  为  $1.0 \sim 2.5 \text{ mg/L}$  范围内出现一个极小值,这可能是由于水体中营养物浓度的改变造成藻类对其它营养物吸收方式的改变。随着  $N$  浓度进一步的增大,藻类对磷的吸收将逐渐稳定在一个固定范围。

图 4 和图 5 表明:

(1) 藻类浓度对藻类吸收氮、磷有影响,藻类浓度越高,对氮、磷的稳定吸收值越低;

(2) 藻类对氮、磷营养盐的吸收之间存在关联性,随着氮、磷浓度增加,藻类对磷、氮的吸收逐步增加,最终将会到达一个稳定吸收度。这与张青田等对金藻的实验结论相符<sup>[20]</sup>:当氮、磷浓度较低时,它们的浓度变化对藻类生长的影响较大,即氮、磷浓度的增大会明显提高藻类生长速率;但氮浓度或磷浓度到达一定值时,浓度对藻类生长的影响趋于稳定。

表 2 和表 3 讨论了藻类对氮和磷吸收的规律:

(1) 一种营养物对藻类吸收另一种营养物的影响是:氮对藻类吸收磷的影响远远大于磷对藻类吸收氮的影响,这从它们的关联函数得出的斜率  $U$  值与指数  $W$  值的对比可以发现;

(2) 比较各自相关系数的变化可以发现,藻类吸收营养物之间的关系受到水体中现存藻类浓度的限制,即水体中现存藻类浓度较高时,藻类吸收营养物之间的相关性较小,水体中现存藻类浓度较低时,藻类吸收营养物之间的相关性较大,比较它们的相关系数变化情况可以看出。

水华暴发时,氮、磷营养物分别占藻细胞体的百分含量  $a_1$ 、 $a_2$  与水体中藻类含量呈线性关系良好的正比关系,也就是水体中藻类浓度越高,藻细胞中的营养物含量越高。可能是在适合水华暴发的条件下,藻细胞吸收营养物的方式发生变化,使其能够迅速将水体中的营养物摄取到藻细胞中,促使藻类快速生长,导致水华暴发。但藻类浓度超过  $170 \mu\text{g/L}$  时,这种线性关系不再存在。

最后,水华暴发时流域中氮、磷化合物的形态和比值已有初步讨论<sup>[15]</sup>,而关于氮磷化合物化学键结构与藻类生化反应常数等微观层次上的描述将在后

续研究中作更深入地介绍。

参考文献:

- [1] 章宗涉. 水生高等植物-浮游植物关系和湖泊营养状态[J]. 湖泊科学, 1998, 10(4): 83.
- [2] 于虹漫, 冷云. 浅谈蓝藻水华的危害与防治[J]. 内陆水产, 2003, 12: 26.
- [3] 李崇明. 三峡“黑潮”现象原因及影响分析[A]. 见:第五届中国环境水力学会论文集[C]. 北京:中国水利水电出版社, 2002.
- [4] 张晟, 赵黎明, 李崇明. 乌江水污染调查[J]. 中国环境监测, 2003, 19(1): 23~26.
- [5] 叶闯, 洪一平. 三峡水库水体富营养化的潜势分析[A]. 见:第五届中国环境水力学会论文集[C]. 北京:中国水利水电出版社, 2002.
- [6] 张永泽, 刘玉生, 郑丙辉. Exergy 在湖泊生态系统建模中的应用[J]. 湖泊科学, 1997, 9(3): 75~81.
- [7] 夏军, 龚明, 张华. 汉江富营养化动态模型研究[J]. 重庆环境科学, 2001, 23(1): 20~23.
- [8] Linfield C Brown, Thomas O, Bamwell Jr. The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAD [M]. Washington: Documentation and User Manual, 1985. 62~85.
- [9] 韩非, 陈永灿, 刘昭伟. 湖泊及水库富营养化模型研究综述[J]. 水科学进展, 2003, 14(6): 785~791.
- [10] 王洪礼, 李超, 冯剑丰. 赤潮藻类营养盐限制方程的非线性动力学研究[J]. 海洋技术, 2003, 1(3): 41~45.
- [11] 李崇明. 三峡库区次级河流富营养化防治研究[R]. 重庆:重庆市环境科学研究院, 2003.
- [12] 吕平毓. 武隆监测数据. 长江上游水环境监测中心, 2002~2003.
- [13] 匡国明. 贵州省磷酸盐工业可持续发展战略的研讨[A]. 见:中国化工学会无机盐学术年会论文集[C]. 2003.
- [14] 李锦秀, 廖文根. 三峡库区富营养化主要诱发因子分析[J]. 科技导报, 2003, 9: 50.
- [15] 刘信安, 梁剑锋. 用胞映射方法研究三峡流域水华暴发的演变行为[J]. 自然科学进展, 2004, 14(2): 59~64.
- [16] 姚英姿. 岳阳南湖水体环境参数相关性及其富营养化特征分析[J]. 岳阳师范学院学报(自然科学版), 2003, 16(1): 91~94.
- [17] 孙沛雯. 埃米莉·罗马格纳沿岸富营养化水体的营养限制评价[J]. 环境科学技术, 1989, 2(3): 38~48.
- [18] 刘春广, 乔光建. 朱庄水库水体富营养化机理分析及治理对策[J]. 南水北调与水利科技, 2003, 1(5): 44~48.
- [19] 李铁, 史致丽, 仇赤斌. 中肋骨条藻和新月菱行藻对营养盐的吸收速率及环境因素影响研究[J]. 海洋与湖泊, 1999, 30(6): 643.
- [20] 张青田, 张兆琪, 董双林. 氮、磷对金藻的增殖效应[J]. 海洋湖沼通报, 2002, (2): 45~51.