

三峡水域氮磷污染对水华暴发/消涨行为的协同影响

刘信安^{1,2}, 湛敏¹, 罗彦凤³, 郭圣文¹

(1. 重庆大学化学化工学院, 重庆 400044; 2. 重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400044; 3. 重庆大学生物工程学院, 重庆 400044)

摘要:藻类生长/消退与藻类对氮、磷的吸收比率 ω_1 和 ω_2 相关, ω_1 正/负增长分别对应藻类生长时从水体中吸收氮磷的加速阶段和藻类分解时向水体释放氮磷的消退阶段, 在特定磷氮比(P/N)范围出现 ω_1 和 ω_2 同时突变有可能从理论上解释水华的暴发/消退. 根据三峡流域实测数据和藻类吸收氮磷的关联函数, 在三维空间表征了随氮磷浓度协同作用导致的 ω_1 和 ω_2 在特定 P/N 区域同时突变所揭示出的水华暴发/消退现象, 从而直观、合理地解释了: ①适当的 P/N 范围才可能暴发水华; ②如果 P/N 区间同时满足 ω_1 和 ω_2 正向急剧增长的要求, 藻类疯长, 而 ω_1 和 ω_2 同时朝负值方向急剧降低, 水华消退; ③水华暴发/消退的速率为同一数量级, 且水华暴发/消退在氮、磷浓度达到某一敏感范围时将表现出明显的周期性振荡. 这些性状可能更真实地反映出水华暴发/消退时藻类对营养盐的吸收/释放机理.

关键词: 水华暴发/消退; 吸收比率; 磷氮比; 协同作用

中图分类号: X508 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)08-1554-06

Synergistic Effects by P and N Pollution to Fluctuation Behavior/ Bloom of Algae along the Three Gorges Valley

LIU Xin-an^{1,2}, ZHAN Min¹, LUO Yan-feng³, GUO Sheng-wen¹

(1. Chemical Engineering College, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. Bioengineering College, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Absorption rate coefficient of algae ω_1 to nutrients such as N and P could be used for describing algal increases/ decreases velocity in water areas in theory. ω_1 raise might correspond to algal quickly growth and to accelerate absorption of N and P while ω_1 decrease might correspond to algal decompose and release of N and P. According to locale measuring data along the Three Gorges valley and algal dynamics model of nutritious absorption we have obtained some interest 3-dimension figures in which ω_1 will varies up and down obviously with N and P concentration in special bound to show a synergistic effects of N and P that might reveal an inner behavior of algal bloom/ decompose. The research results explain in reason: ①algal blooms do will happen in one special P/N range in a certain water system; ②when ω_1 and ω_2 ascend rapidly and simultaneously in positive direction at same time algae would bloom, and when ω_1 and ω_2 descend sharply and simultaneously in negative direction at same time algae would decompose; ③The velocity of algal bloom is not only same approximately as one of algal decompose, but also its variety has evidently periodic fluctuation. All of these could reveal effectively mechanism of nutritious absorption/ release as algal bloom/ decompose.

Key words: bloom/ fluctuation of algal; nutritious absorption rate coefficient; ratio of P to N; synergistic effects

三峡水库形成过程中, 许多重要支流如大宁河、乌江和嘉陵江等已开始发生富营养化污染^[1~5]. 水体从不同营养状态演化到水华暴发是一个持续不断的复杂生物化学动力学过程. 从理论上讲, 水域中营养物聚集到一定程度都有可能形成藻类, 加上 P/N 比、水文条件、光照和温度等条件适宜, 则有可能导致藻类疯长, 即水华暴发. 由于藻类生长与它们对水体中营养物的吸收速率, 尤其是 P/N 比值等密切相关. 因此, 这种研究对于控制水华暴发具有一定的理论指导意义.

1 藻类吸收营养盐的动力学模型

笔者研究三峡流域中藻类生长与营养盐吸收的

动力学模型时, 构建了适应缓流态和湖泊等水域环境中浮游藻类浓度 S (也可用叶绿素浓度 c_a 表征) 与营养物吸收率之间的关联函数^[6]:

$$c_a \approx \varepsilon_0 \mu_{\max}(T) \left[1 - \frac{\omega_1}{c_N} c_{N\min} \right] \left[1 - \frac{\omega_2}{c_P} c_{P\min} \right] \quad (1)$$

式中, c_a 是水体中叶绿素 a 的浓度; $\mu_{\max}(T)$ 为受温度限制的浮游植物最大生长率; c_N 和 c_P 分别为水体中氮、磷浓度; $c_{N\min}$ 和 $c_{P\min}$ 表示藻类细胞中氮和

收稿日期: 2005-06-24; 修订日期: 2005-08-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(20377054); 重庆大学研究创新实验项目(编号: 19)

作者简介: 刘信安(1954~), 男, 教授, 主要研究方向为水资源保护、湖库富营养化, E-mail: xaliu@cqu.edu.cn

磷的最小浓度, 分别为 15.0S 和 1.0S, 单位为 $\mu\text{g/L}$; ϵ_0 是转换系数^[7,8]; ω_1 和 ω_2 分别为作者定义的藻类生长时对 N、P 的吸收比率(无量纲相对值)^[6], 这 2 个参数实际反映了藻类的生长/消退速率, 即藻体对水体中氮磷的吸收比率越高, 藻类生长越快, 水华暴发即藻类疯长阶段这种吸收率达到最高; 反之, 水华消退时大量氮、磷从藻体中迅速分解而重新进入水体, 此时藻体对水体中氮磷的吸收比率表现为负增长。

本文采用三峡流域实测数据(如表 1)作为构建模型的基础^[9,10], 结合(1)式从理论上研究了三峡水域在不同藻类浓度下, 氮磷同时变化时藻类对氮、磷吸收比率 ω_1 所产生的协同作用。图 1 主要考察氮浓度变化时藻类对磷吸收比率 ω_2 的协同效应; 图 2 主要考察磷浓度变化时藻类对氮吸收速率 ω_1 的协同效应, 并通过分析在何种 P/N 范围内(条件下) ω_1 和 ω_2 才有可能同时发生突变, 从而导致水华暴发。

简单变换(1)式可得到表征 c_P 与 $(\omega_1/c_N) \cdot c_N$

表 1 三峡库区流域 2001~ 2003 年枯水期总磷、总氮和叶绿素的平均浓度¹⁾/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

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

项目	重庆主城区	万洲	涪陵	丰都	武隆	忠县	开县	云阳	奉节	巫山	巫溪
TP	0.105	0.276	0.181	0.120	0.178	0.108	0.108	0.071	0.018	0.013	0.012
TN	0.812	2.25	2.38	0.77	2.32	1.63	0.81	1.93	0.96	0.68	0.42
$c_{\text{chl}a}$	3.70	2.96	2.20	6.06	2.00	2.86	2.96	2.53	3.19	0.75	0.57

1) 采用分光光度法按(GB3838-2002)标准测试的平均值

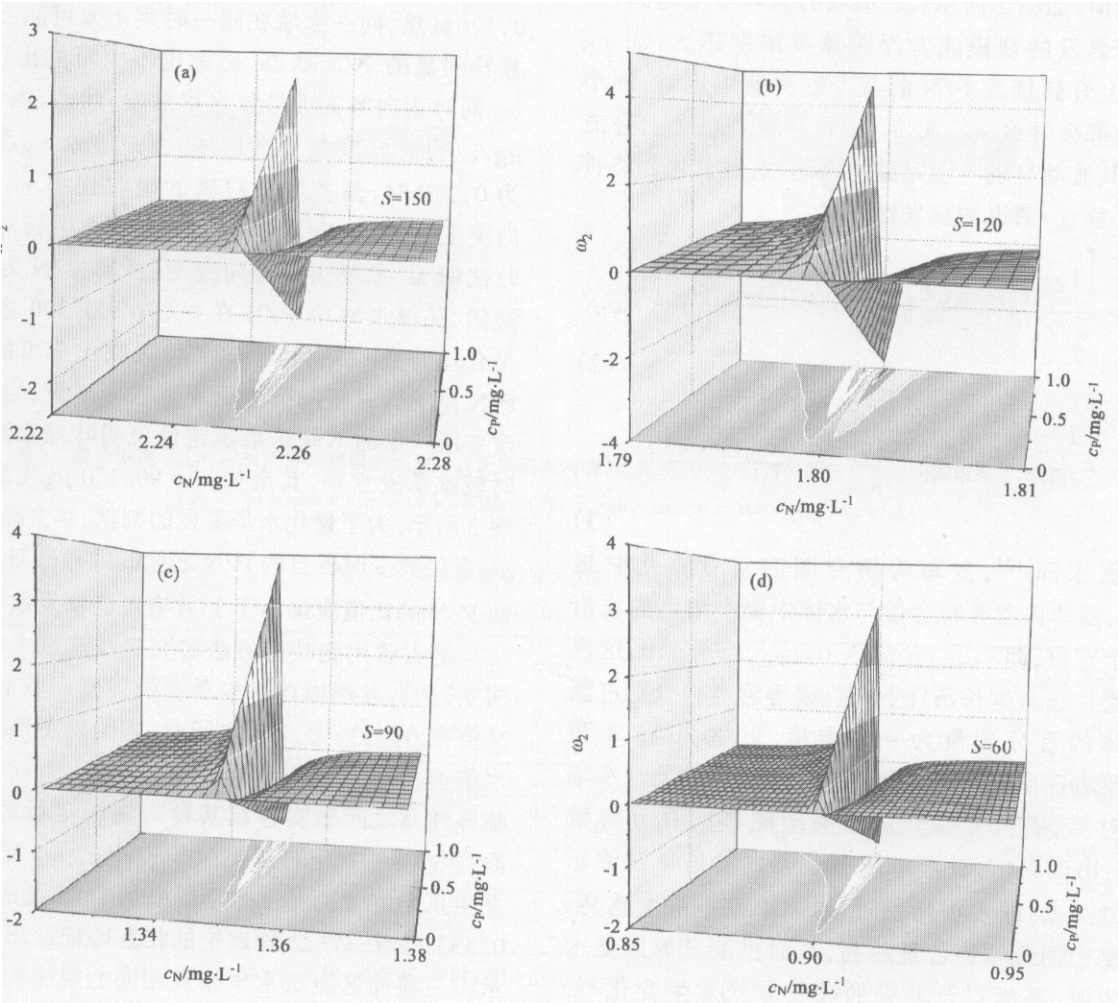


图 1 氮磷浓度 c_N 、 c_P 同时改变对磷吸收比率 ω_2 (无量纲相对值)的影响(朝正负方向上的突变反映水华暴发/消退)

Fig. 1 Synergistic effects under different N, P concentration to absorption rate of ω_2

与 (ω_2/c_P) 之间的双曲线函数形式,它们能在二维空间上直接反映 c_N 、 c_P 单独改变时分别对藻类生长(即 ω_1/c_N 、 ω_2/c_P)的影响.但为更准确地反映氮磷浓度同时改变对藻类生长所形成的协同效应,适当变换(1)式亦可得到(2)式和(3)式,则能够在三维空间中通过同时改变 c_N 和 c_P 来考察对 ω_1 或 ω_2 (表征水域中藻类的生长/消亡速率、水华是否暴发和暴发程度等)所产生协同作用.在不同 S 、 TN 和 TP 浓度条件下,用表1的实测数据代入双变量(即 c_N 和 c_P)函数(2)式和(3)式,在不同条件下进行计算发现:①磷浓度在 $0\sim 1.0\text{ mg/kg}$ 范围内,选取 $S=150, 120, 90$ 和 $60\text{ }\mu\text{g/L}$, c_N 分别从高到低在 $2.25, 1.80, 1.35$ 和 0.90 mg/L 时出现藻类对磷吸收率 ω_2 的极大值,如图1所示,同样,氮浓度在 $0\sim 1.0\text{ mg/L}$ 范围内,当 c_P 从高到低分别在 $0.15, 0.12, 0.09$ 和 0.06 mg/L 时会出现藻类对氮吸收率 ω_1 的极大值,如图2所示;②水域的氮磷浓度越高,导致水华暴发的规模或者浮游藻类浓度越大,③ c_N 或 c_P 上升到接近 P/N 的某个临界值附近时,细小的增量都会导致 ω_1 或 ω_2 突发性地大幅度上升或下降,其波动呈现一个完整的周期,这种变化趋势符合藻类疯长/消退的突发性规律.

$$\omega_1 = \frac{1 - \frac{c_a}{\varepsilon_0 \mu_{\max}(T)(1 - \omega_2 \cdot c_{P\min}/c_P)}}{c_{N\min}} \cdot c_N \quad (2)$$

$$\omega_2 = \frac{1 - \frac{c_a}{\varepsilon_0 \mu_{\max}(T)(1 - \omega_1 \cdot c_{N\min}/c_N)}}{c_{P\min}} \cdot c_P \quad (3)$$

张永泽^[13],夏军等研究湖泊富营养化时提出^[14],藻体内营养物含量与水体中藻类浓度的比值是一个定值,即 $c_{N\min}/S=15.0$, $c_{P\min}/S=1.0$,这说明藻类在正常生长条件下,氮、磷等营养物分别占藻细胞体的百分含量为一个定值,分别为 15.0 和 1.0 .笔者在研究藻类对营养盐吸收关系中发现水华暴发时氮、磷营养物分别占藻细胞体的百分含量 α_1 、 α_2 出现变化,且与水体中藻类含量呈良好的正比线性关系,即水华暴发时,水体中藻类浓度越高,藻细胞中的营养物含量越高,从而推测其原因是水华暴发时,藻类对营养物的吸收方式发生变化^[6].本文中认为 ω_1 与 ω_2 必须同时突变才能暴发水华的结论,使这种推测从理论上得到支持.同时,本文关于 S 值越高越容易导致水华暴发的结论也有了

充分的证明.

2 分析与验证

在构建表征藻类生长快慢的吸收比率 ω_1 与 c_N 、 c_P 关系的函数(2)式和(3)式中,使用的是三峡水域 TP 、 TN 和叶绿素浓度的现场监测数据(如表1).但实际上,藻类对水域中营养物如氮的吸收,主要是总氮中凯氏氮这一部分的有效氮(包括蛋白质、氨基酸、肽、核酸和尿素等).而且,由于同一水系中凯氏氮占总氮的比例基本相似.因此,本文采用凯氏氮(简称为 N)代替总氮来验证模型的合理性.

如前所述, ω_1 和 ω_2 要同时正向急剧升高才会导致水华暴发.这样对表2有如下说明:当 $S=60\text{ }\mu\text{g/L}$ (对应叶绿素 a 浓度为 $4.5\sim 6.0\text{ mg/L}$), P/N 为 0.667 时,藻类生长对磷的吸收比率 ω_2 出现正向突变,而在此叶绿素 a 浓度下,藻类生长对氮的吸收比率 ω_1 假如也要出现正向突变,需要的 P/N 为 0.12 ,显然,同一水域在同一时刻不太可能出现如此差异明显的 P/N 状态,因此也不太可能出现 ω_1 和 ω_2 同时正向突变而导致水华暴发;然而,当 $S=150\text{ }\mu\text{g/L}$ (对应叶绿素 a 浓度 $11.3\sim 15.0\text{ mg/L}$), P/N 为 0.270 时,藻类生长对磷的吸收比率 ω_2 出现正向突变,而在此叶绿素 a 浓度下藻类生长对氮的吸收比率 ω_1 如要出现正向突变,所需 P/N 为 0.300 ,显然,局部水域中 P/N 在 $0.270\sim 0.300$ 之间波动是合理的,即 ω_1 和 ω_2 这2种吸收比率可能在这种 P/N 范围同时正向突变而导致水华暴发.当然, S 值改变所产生的不同结果也定量说明叶绿素浓度较低时较难暴发水华.其余如 $S=90, 120\text{ }\mu\text{g/L}$ 的情况如表2所示.为了量化水华暴发的判据,本文提出 ω_2 和 ω_1 发生突变时各自的 P/N 之差的绝对值与其中最小的 P/N 的比值应远小于 1 ,才有可能暴发水华.

笔者曾用胞映射方法研究乌江流域水华暴发的演变行为,发现描述水华暴发的控制函数对应的 P/N 值在 $0.223\sim 0.336$ 之间时,胞映射图形出现表征水华突然暴发的极限环^[15].说明 P/N 与水华暴发临界性质之间确实存在某种内在的定量对应关系,而且与本文中反映藻类生长速率的 ω_1 和 ω_2 同时发生正向突变而导致水华暴发的 P/N 范围 $0.240\sim 0.333$ 相当一致,2种理论的相互印证从不同侧面揭示出三峡库区流域水华暴发相同的规律和机制.

乌江是三峡库区最大且水华暴发最频繁的次级河流之一.2001-03乌江发生大规模“黑潮”,持续一个多月,对三峡库区的彭水县、武隆县和涪陵地区造

成了严重的富营养化污染^[16]. 2001-03 乌江“黑潮”发生期间沿江而下各个河流段现场监测数据如表 3 所示, 与图 1, 图 2 进行了对照分析.

表 3 中的水质监测数据显示, 暴发水华时乌江

各水域段的 P/N 范围在 0.270~ 0.335 之间. 而根据图 1 和图 2, P/N 在 0.240~ 0.333 范围时, ω_1 和 ω_2 同时突变; 根据表 2, 在这种情况下暴发水华, 此时藻类浓度正好在 120~ 150 $\mu\text{g/L}$ 之间.

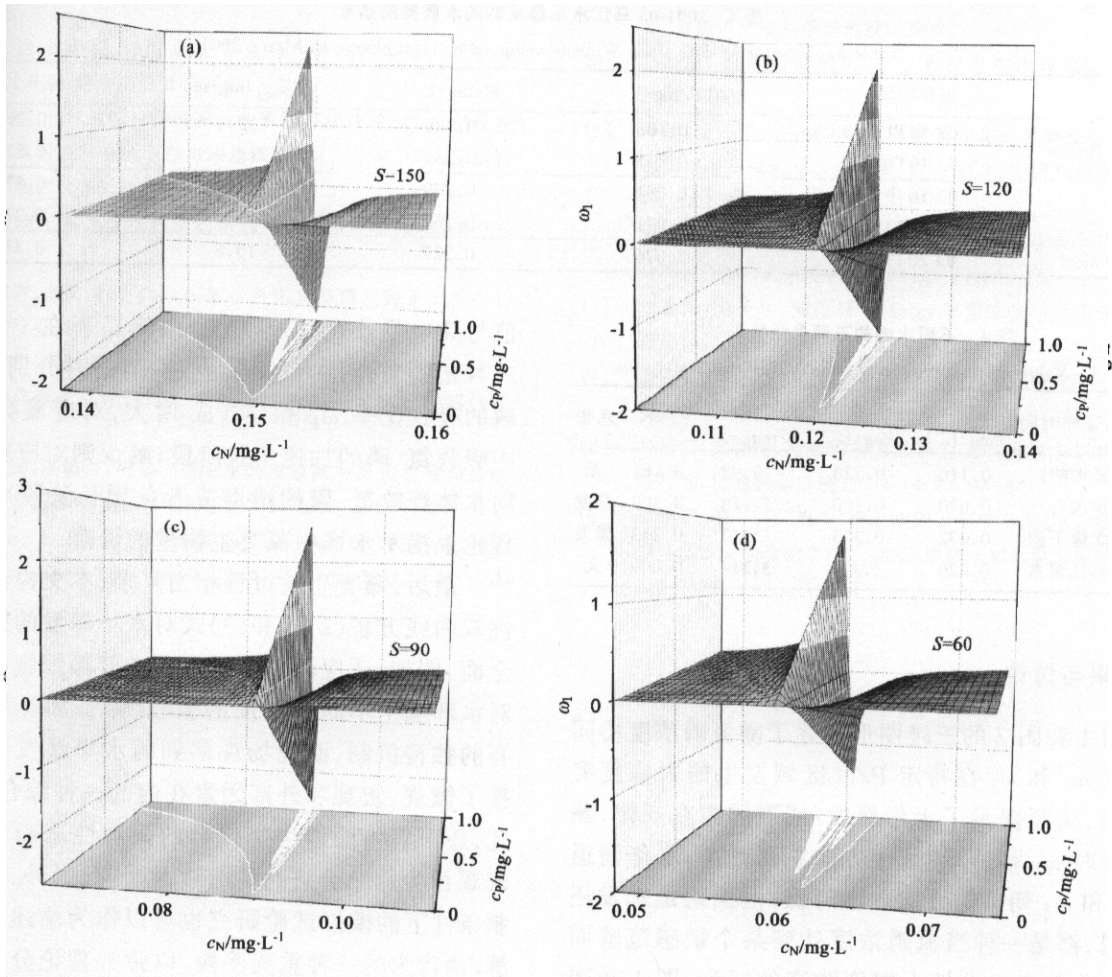


图 2 氮磷浓度 c_N 、 c_P 同时改变对氮吸收比率 ω_1 (无量纲相对值) 的影响(朝正/负方向的突变反映出水华暴发/消退)

Fig. 2 Synergistic effects under different N, P concentration to absorption rate of ω_1

表 2 不同 S 值时 ω_1 发生突变所对应的磷氮比

Table 2 ω_1 varieties with different P/N under different S

S 值 / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	ω_1 变化	TP / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{N}^{1)}$ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	c_{chla} / $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	P/N ³⁾	$ \Delta(\text{P/N}) ^{4)}$	$\frac{ \Delta(\text{P/N}) }{(\text{P/N})_{\min}}$	最终结论
150	仅 ω_1 突变	0.15	0.50 ²⁾	11.3~ 15.0	0.300	0.030	0.11(显然< 1)	ω_1 和 ω_2 能同时突变而水华暴发
	仅 ω_2 突变	0.60 ²⁾	2.25		0.270			
120	仅 ω_1 突变	0.12	0.50 ²⁾	9.0~ 12.0	0.240	0.089	0.37(显然< 1)	ω_1 和 ω_2 能同时突变而水华暴发
	仅 ω_2 突变	0.60 ²⁾	1.80		0.333			
90	仅 ω_1 突变	0.09	0.50 ²⁾	6.8~ 9.0	0.180	0.264	1.44(显然> 1)	ω_1 和 ω_2 不能同时突变而无水华暴发
	仅 ω_2 突变	0.60 ²⁾	1.35		0.444			
60	仅 ω_1 突变	0.06	0.50 ²⁾	4.5~ 6.0	0.120	0.547	4.58(显然> 1)	ω_1 和 ω_2 不能同时突变而无水华暴发
	仅 ω_2 突变	0.60 ²⁾	0.90		0.667			

1) 凯氏氮, 下同; 2) 图 1 和图 2 的估计值; 3) 总磷/凯氏氮, 下同; 4) $|\Delta(\text{P/N})|$ 为 ω_2 、 ω_1 突变时 P/N 之差的绝对值

为了进一步验证水体中 P/N 在 0.240~ 0.333 的范围内, ω_1 和 ω_2 会同时急剧增加, 从而证明水华

暴发结论的正确性, 本文还选取了蓄水前后的大宁河^[5,9]、2001-03 的武隆下游和 2002-03 乌江尾

水^[9,16]等水域进行了验证如表 4 所示. 大宁河蓄水前后的磷氮比发生变化, 根据图 1 和图 2, 在水体中叶绿素浓度适宜的范围内 ω_1 和 ω_2 发生突变. 2001-03 武隆下游和 2002-09 乌江尾水的磷氮比情况反

差较大: 武隆下游水体中, 在当时的叶绿素浓度所对应的图中, ω_1 和 ω_2 同时发生突变而发生水华; 而在乌江尾水水域中叶绿素浓度所对应的图中, ω_1 和 ω_2 都处于稳定吸收阶段, 故无水华暴发.

表 3 2001-03 乌江水华暴发时的水质监测结果

Table 3 Monitoring data along Wujiang valley when algal blooms in March 2001

采样点	采样时间	TP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	N/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$c_{\text{chl}a}/\text{mg}\cdot\text{m}^3$	P/N
贵州沿河县码头	03-16T17:15	0.108	0.349	12.4	0.294
	03-19T08:30	0.115	0.349	12.9	0.330
武隆囤船	03-16 中午	0.084	0.279	12.2	0.279
	03-19T19:15	0.071	0.263	11.1	0.270
武隆下游 4km	03-20T10:00	0.076	0.227	15.8	0.335

表 4 不同水域的不同参数值

Table 4 Values of different parameters in different water areas

采样点及采样时间	TP	N	$c_{\text{chl}a}$	P/N	水华
	/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	/ $\text{mg}\cdot\text{m}^3$		
大宁河(蓄水前)	0.116	0.720	0.92	0.161	无
大宁河(蓄水后)	0.030	0.100	27.10	0.300	暴发
2001-03 武隆下游	0.082	0.375	15.12	0.243	暴发
2002-09 乌江尾水	0.020	2.320	3.314	0.009	无

3 结果与讨论

图 1 和图 2 的三维图形描述了随氮磷浓度协同变化时 ω_1 和 ω_2 在特定 P/N 区域发生的大幅度突变行为, 从而揭示了水华暴发/消退的内在规律. 藻类疯长时 ω_1 和 ω_2 朝正值方向急剧升高; 水华消退时 ω_1 和 ω_2 朝负值方向急剧降低. 但无论是暴发还是消退, 都是一种当氮磷浓度达到某个敏感范围而导致吸收比率突发性大幅度改变的行为, 图 1 和图 2 表现出接近 ω_1 和 ω_2 的突变临界范围时, 无论是向上还是向下突变, 氮、磷浓度只需再有一个极小增量就将导致明显的突变. 另外, ω_1 和 ω_2 这种急剧向上或向下突变在数量级上表现为水华暴发/消退的速率基本一致, 即水华暴发/消退在时间尺度上大体相同, 这也符合现场观测到的现象^[9].

从图 1 和图 2 还可看出, ω_1 和 ω_2 的突变随着磷氮浓度变化均呈现某种周期性振荡行为, 这种性态符合实际流域中水华暴发/消退过程所表现出的周期性涨消行为; 水体中藻类浓度 S 的大小不仅影响藻类稳定吸收营养物水平, 而且对水华暴发的氮磷营养盐之间的协同作用产生影响. 综合这些因素, 有可能更为全面、合理地揭示出水华暴发/消退时藻类对营养盐的吸收/释放机理. 但水华暴发的关键判据是 ω_1 和 ω_2 的同时正向突变, 而能否实现同时正向突变又取决于 ω_1 和 ω_2 各自的 P/N 之差的绝对

值与其中最小的 P/N 值的比值是否在 1 以内. 在 P/N 的适宜范围内, 藻类生长/消退时分别对应氮、磷的吸收比率 ω_1 和 ω_2 (ω_1 增大, 对应藻类从水体中吸收氮、磷的加速生长阶段; 减少则对应藻类分解向水体释放氮、磷的消退或者负增长阶段), 可以从理论上揭示水域中藻类生物量的涨落.

最后, 藻类生长过程相当复杂, 本文构建的非线性双曲线方程 (2) 式和 (3) 式对水华暴发的描述并不全面. 例如, 还应该从微观上考虑蓝藻细胞内聚磷体对水环境中不同磷浓度的吸收、储备和释放时所具有的独特机制, 而现场观察到的水华暴发通常是包括了微观、宏观和外部因素在内的一种综合效应. 因此, 还可以将藻体生物化学的微观性态和水华暴发宏观行为相结合进行更有效的研究. 另外, 实验室控制条件下的模拟试验研究也可以作为描述水华污染涨/消行为的一种重要手段, 以弥补理论分析和现场监测的不足. 综上所述, 本研究尚未涉及微观层次研究和室内模拟实验, 存在一定局限性. 而结合藻类生物化学的微观性态、实验室模拟试验和现场监测将有利于更全面和量化地构建水华暴发的完整机制.

4 结论

- (1) 氮磷浓度累积到某个临界范围以后, 水体中的氮、磷浓度只需再有一个极小的增量就会使藻类对氮、磷的吸收比率出现突发性 and 大规模的剧变.
- (2) 当水体中的 P/N 范围在 0.240~0.333 时, 反映藻类生长速率的 ω_1 和 ω_2 会同时发生正向突变而导致水华暴发, 说明在此 P/N 范围内, 容易暴发水华, 因而可以考虑作为实际调控水华污染的一个重要参数.
- (3) ω_1 和 ω_2 这种急剧向上或向下突变在数量级上的一致性表现为水华暴发/消退的速率基本一

致,即水华暴发/消退在时间尺度和规模尺度上大体相同.而且,只有当 ω_1 和 ω_2 这 2 个重要参数同时发生正向/反向的急剧突变时才会导致水华的暴发或者消退。

参考文献:

- [1] 黄时达,徐小清,鲁生业.三峡工程与环境污染及人群健康[M].北京:科学出版社,1994.1~28.
- [2] 傅伯杰.长江流域可持续发展的资源环境评价.21世纪长江大型水利工程中的生态与环境保护[M].北京:中国环境科学出版社,1998.32~40.
- [3] 钱易.论三峡水库水污染的防治[J].资源环境,2004,3:3~6.
- [4] 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,2003,9:50~51.
- [5] 钟成华,幸治国,赵文谦,等.三峡水库蓄水后大宁河水体富营养化调查及评价[J].灌溉排水学报,2004,23(3):19~23.
- [6] 刘信安,湛敏,马艳娥.三峡库区流域藻类生长与营养盐吸收关系的研究[J].环境科学,2005,26(4):101~105.
- [7] Linfield C Brown, Thomas O, Bamwell Jr. The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAD [M]. Washington, US: Documentation and User Manual, 1985. 62~85.
- [8] 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.
- [9] 李崇明.三峡库区次级河流富营养化防治研究[R].重庆市:重庆市环境科学研究院,2003.
- [10] 吕平毓.武隆监测数据[R].长江上游水环境监测中心,2002~2003.
- [11] 叶阔,洪一平.三峡水库水体富营养化的潜势分析[A].第五届中国环境水力学学会论文[C].北京:中国水利水电出版社,2002.297~302.
- [12] 李金,董巧香,杜虹,等.柘林湾表层沉积物中氮和磷的时空分布[J].热带海洋学报,2004,23(4):63~71.
- [13] 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.
- [14] 夏军,窦明,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.
- [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.自然科学进展,2004,14(2):59~64.
- [16] 李崇明,等.乌江“黑潮”现象原因及影响分析[A].第五届中国环境水力学学会论文[C].北京:中国水利水电出版社,2002.322~327.