

水华爆发的突变模型

——以巢湖为例

陈云峰¹, 殷福才², 陆根法^{1*}

(1. 南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210093;

2. 安徽省环境保护科学研究所, 合肥 230061)

摘要: 面对湖泊水库富营养化的严峻形势, 水华防治是当务之急, 而根据富营养化现状对水华进行准确的判定和预报更是重中之重。从水生生态系统的角度出发, 综合考虑 *TP*、*T*、*Chla* 和 *DO* 等 4 个对巢湖富营养化乃至水华影响最为突出的因子, 构建了巢湖水华突变的尖点模型, 通过模型来模拟巢湖富营养化引发水华的情势。在对巢湖 2000~2003 年时间序列的监测数据进行数据拟合的基础上, 发现南淝河入湖区断面处逐月 *TP*、*T*、*Chla* 和 *DO* 数据的演变规律符合突变理论的尖点模型特征。经检验, 模型的相对误差控制在 10% 左右, 具有较好的拟合精度。根据模型的突变判别, 巢湖的水生生态系统 2003 年 7 月在南淝河入湖区断面处发生了突变, 这一模拟结论与该断面 2003 年 8 月爆发水华的实际情况相一致。研究表明, 水华突变模型的建立, 准确地反映了巢湖富营养化引发水华的实际情况, 系统地勾勒出富营养化状态下水生生态系统各要素间的动态响应模式, 揭示了水华爆发的突变机理。通过水华突变模型的构建, 不仅能够对巢湖水华的发生进行判断和预报, 还可以对各项防治措施的实施效果进行预测和模拟, 进而为综合整治方案的优化和统筹提供科学依据。水华的爆发是多诱因的综合作用结果, 是营养物质长期累积、由量变到质变的演化过程, 作为目前唯一的一种研究由渐变引起突变的系统理论, 突变理论满足水华研究的数理要求, 为水华现象的数值模拟提供了可行的解决方案。

关键词: 水华; 突变理论; 尖点模型; 富营养化

文章编号: 1000-0933(2006)03-0878-06 中图分类号: X192 文献标识码: A

The catastrophic model of water bloom: a case study on Lake Chaohu

CHEN Yun-Feng¹, YIN Fu-Cai², LU Gen-Fa^{1*} (1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. Anhui Academy for Environment Science Research, Hefei 230061, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3): 878-883.

Abstract: Along with its rapid economy expanding, China is also facing the increasingly serious problem of cultural eutrophication, especially in aquatic ecosystems of lakes and reservoirs. Water bloom is the worst result of lake or reservoir eutrophication and sometimes leads them to death. To assess and forecast water bloom by studying the extent of eutrophication is crucial to the assurance of people's drinking water and thus it is of great importance. With a case study of Lake Chaohu, the fifth largest lake in China, as viewed from the whole aquatic ecosystem, this paper synthetically considered *TP*, *T*, *Chla* and *DO* as a whole, which were the outstanding factors in eutrophication and water bloom of Lake Chaohu, to construct a water bloom cusp model. Using this model, the process that eutrophication brought on water bloom in the lake was simulated. According to the result of data fitting, monthly data of the above four water quality parameters, obtained from a certain sampling site from 2000 to 2003, fitted characteristics of cusp model. The model was tested to be accurate for its relative error was around 10%. What is more

基金项目: 国家科技部国际科技合作重点资助项目(2005DFA90390)

收稿日期: 2005-06-11; 修订日期: 2005-12-10

作者简介: 陈云峰(1969-), 男, 安徽合肥人, 博士生, 从事环境数值仿真研究. E-mail: tea69@sohu.com

* 通信作者 Author for correspondence. E-mail: lugf@nju.edu.cn

Foundation Item: The project was supported by International S&T Cooperation Project from National Ministry of Science and Technology (No. 2005DFA90390)

Received date: 2005-06-11; Accepted date: 2005-12-10

Biography: CHEN Yun-Feng, Ph. D. candidate, mainly engaged in environmental numerical simulation. E-mail: tea69@sohu.com

convincible, according to the catastrophe discriminant of the cusp model, it could be judged that a discontinuous jump of the aquatic ecosystem had occurred in July, 2003 in Lake Chaohu, the conclusion was consistent with the fact that water bloom have arisen in August, 2003 in the lake. The case study of Lake Chaohu, on the base of data fitting, deduced that some water quality parameters fitted characteristics of cusp model in the process that eutrophication brought on water bloom. The research indicates that water bloom cusp model could reflect the actual state of water bloom caused by eutrophication, describing the dynamic response mode between different factors in the aquatic ecosystem and further revealing the outbreak mechanism of water bloom in the lake. This paper suggests that using catastrophe models to fit water quality data of a time serial would be a constructive approach to forecast and judge the outbreak of water bloom in lakes and reservoirs. In addition, by constructing and studying such catastrophe models, lake or reservoir managers would be able to simulate the effects of different protecting and curing projects and further supply the scientific warrant for the optimization of these projects as well. The outbreak of water bloom is the results of mutual exchange reactions of many inducements and long-term accumulative action of nourishments. As the only system theory studying how gradual change causes catastrophe, catastrophe theory satisfied the mathematical logic of the water bloom and provided us with a feasible solution for the numerical simulation of water bloom. This paper put forward a new idea for the study of the water bloom, which has never reported neither at home nor abroad so far.

Key words: water bloom; cusp model; catastrophe theory; eutrophication

富营养化是我国湖泊水库面临的普遍性问题,而近年来水华的频发更是令人担忧,滇池、巢湖、太湖等水体的水华现象为世界所罕见,甚至在汉江等河流也开始出现^[1],区域用水安全受到严重威胁。即便富营养化并非是短期即能治愈的顽症,但防治水华已是当务之急,而根据富营养化现状对水华进行准确的预测预报更是当前工作的重中之重。

一般认为水华的发生首先是水体中 N、P 等营养物质的过度增加,致使水体达到富营养化状态,这是水华发生的最重要的物质基础。但是富营养化水体并不一定发生水华,水华的发生是水生态系统中营养因子和环境因子综合作用的产物,它不仅要求有 N、P 及一定的氮磷比等营养盐条件,还涉及到温度、pH、光照情况、水的流动性、微量元素等诸多因素的共同影响,只有在众多系统要素满足一定耦合关系的情况下,水华才会发生。虽然针对水华情况下水生态系统各因子的研究已有不少的成果^[2,3],但只有系统地把握各影响因子与水华之间的动态响应模式,才能准确地判定富营养化现状是否会发生水华,进而科学合理地采取对应措施,有效地防范富营养化向水华的演变。但鉴于水华的发生机理非常复杂,目前还缺乏这方面成熟的研究结论^[4]。

笔者在对巢湖富营养化的研究工作中,发现了水华的发生机理符合突变理论的一般特征。通过构建水体水华的突变模型进行数值模拟,可以实现对是否发生水华的判定,为水华的预警以及防治提供科学依据。

1 巢湖富营养化现状

巢湖流域位于安徽省中部,介于东经 116°24'30" ~ 118°00'00"、北纬 30°58'40" ~ 32°06'00"之间,位于江淮分水岭南侧,属长江水系,是我国第五大淡水湖泊。多年平均水位 8.4m,平均深度 3m,多年平均水温 17.3℃,正常水位下的湖泊面积 760km²,多年平均入湖水量 $48 \times 10^8 \text{ m}^3$,出湖水量 $34 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

20 世纪 90 年代以来,由于流域经济的快速发展,氮磷等营养物质含量持续增高。长期的外源负荷造成污染物在底泥中的大量积累,又引发了日益严重的内源污染。在内外源污染的长期双重作用下,湖区水体的富营养化水平持续走高,当前巢湖几乎是全湖富营养化,被国家列为重点污染防治的“三湖”流域之一。表 1 列出了巢湖南淝河入湖区断面 2003 年 1~12 月的 TP、T、Chla 和 DO 等 4 项监测数据。量变引起质变,巢湖近年来水华频发,每当春末夏初温湿条件适宜的情况下,水华时有发生,给区域的饮用水源安全造成严重威胁。

2 突变理论与尖点突变模型

作为系统新三论之一,突变理论(Catastrophe Theory)是由法国数学家勒内·托姆(Rene Thom)于 1972 年创立的,是目前唯一的一门研究由渐变引起突变的系统理论^[5]。

3 巢湖水华突变模型

由于南淝河入湖区断面的水流较缓,加之所获得的水文数据并非和水质数据同步监测而来,因此在模型的构建过程中暂不考虑水文的影响。从数据积累的实际情况出发,本次研究重点选取 TP 、 T 、 $Chla$ 和 DO 等 4 个对巢湖富营养化乃至水华影响最为突出的因子构建模型。

3.1 模型结构

突变模型是由势函数、状态因子和控制因子构成。根据突变理论,在满足突变条件下控制变量的连续变化将引起状态变量的突跳,而由前可知,总磷(TP)指标在考察时间段内发生了突变,故采用它作为系统的状态变量 x ,表征水生态系统的富营养化状态;总结以前对巢湖的研究成果,选取对巢湖富营养化影响最为突出的氮磷比(T)和溶氧(DO)作为系统的控制变量 u 和 v ;采用叶绿素指标($Chla$)作为系统的势函数 V ,来表征水体藻类的生长状态和爆发水华的趋势。如此,由 2 个控制变量和 1 个状态变量,可以构建形如 $V(x) = x^4 + ux^2 + vx$ 的尖点突变模型对表 1 的数据进行拟合:

$$Chla = (TP)^4 + (T) \cdot (TP)^2 + (DO) \cdot (TP)$$

3.2 数据的预处理

为了解决模型等式两边的量纲统一问题,需要对各参变量做无量纲化处理。

(1) TP

根据常年的监测数据,取 $TP = 0.30$ 作为巢湖的总磷参照值,按公式:

$$TP_* = \frac{TP}{0.30},$$

计算水华的营养驱动力,作为状态变量 TP_* 。

(2) T 。从巢湖的生物群落数量来看,蓝藻门种类在时间和空间上占有绝对优势,其中铜绿微囊藻和水华微囊藻为优势种群,微囊藻生长的温度范围在 $10 \sim 40^\circ\text{C}$,最适温度为 $28.8 \sim 30.5^\circ\text{C}$ 。取 15°C 为巢湖的温度参照值,按公式:

$$TP_* = \frac{15 - T}{15},$$

计算水华的温度驱动力,作为控制变量 T_* 。

(3) DO 。参考 II 类湖泊水质标准中的溶氧取值,按公式

$$DO_* = \frac{DO}{6},$$

计算溶氧的不饱和度,作为另一个控制变量 DO_* 。

(4) $Chla_*$

通过转换系数 K ,按公式 $Chla_* = K \cdot Chla$,去除叶绿素的量纲,作为势函数 $Chla_*$ 。

经过数据的预处理,巢湖水华的突变模型即可表示为:

$$Chla_* = TP_*^4 + T_* \cdot TP_*^2 + DO_* \cdot TP_*$$

3.3 数据拟合

对南淝河入湖区断面 TP 、 T 、 $Chla$ 和 DO 等指标在 2000~2003 年的逐月监测结果进行数据拟合,利用最小二乘法进行拟合,求得叶绿素的转换系数 $K = 6.3$,带回模型中进行逐年的模拟计算后,与各年的实际值进行比较,并根据分叉集判别式对各年是否发生水华突变进行计算和判别。表 3 列出了各参变

表 3 数据拟合与突变判别结果

Table 3 Result of data fitting and catastrophe identification						
月份 Month	DO	T	TP	$Chla$	相对误差(%) Error	突变判别 Identification
1	9.56	3.2	0.391	30.0	1.5	72.4
2	13.5	5.5	0.436	23.0	1.9	138.7
3	7.91	8.6	0.328	20.7	-5.9	47.5
4	8.21	17.0	1.130	23.1	3.5	50.5
5	4.99	21.4	0.711	6.8	-1.9	18.1
6	4.99	25.5	0.218	46.1	11.1	15.9
7	1.41	27.0	0.456	36.7	-0.8	-2.6
8	7.52	30.1	0.755	2040.0	-95.5	34.3
9	7.71	21.0	1.010	51.7	364.2	44.1
10	6.80	22.5	0.296	10.6	-4.9	33.7
11	7.05	19.2	0.251	25.3	-3.9	37.1
12	10.72	11.0	0.859	15.5	3.6	86.3

量 2003 年的计算数值、模型的拟合误差和突变判别式的计算结果。

由表 3 可知,在 2003 年的 7 月之前,模型的拟合精度是令人满意的,相对误差控制在 10% 左右。而根据突变判别,在 7 月份,系统发生了突变。考虑到系统的整体突变滞后于单指标突变,这一判别结论与该断面当年 8 月份爆发水华的实际情况相符;8 月份以后,水华的发生严重损坏了巢湖水生态系统的功能,于是表 3 中各项指标数据不再与尖点模型相吻合;但随着各项环境保护和生态重建项目的实施,崩溃了的水生态系统开始得以逐步恢复,模型的拟合精度也趋于提高(12 月达到 3.6%)。

3.4 模型应用

综上,本文通过构建水华突变模型比较准确地反映了巢湖富营养化引发水华的实际情况,勾勒出富营养化状态下水生态系统各要素间的动态响应模式,揭示了水华爆发的突变机理。突变模型不仅可以用来对巢湖在各种富营养化状态下是否发生水华进行判定和预报,还可以对各项防治措施的实施效果进行模拟预测,进而为综合整治方案的优化和统筹提供科学依据。

(1)水华的预测预报 根据尖点模型的突变判别,当控制变量满足判别式 $\Delta = 8u^3 + 27v^2 < 0$ 时,将引起状态变量的突跳,系统即会发生突变。根据本文所建立的巢湖水华突变模型: $Chla_s = TP_s^4 + T_s \cdot TP_s^2 + DO_s \cdot TP_s$,如果掌握了解了模型控制因子 T 和 DO 的变化情势,利用突变判定条件: $\Delta = 8u^3 + 27v^2 = 8T_s^3 + 27DO_s^2 < 0$ (注意:该模型的各项参变量均为无量纲化处理后的数值),即可实现对该巢湖在各种富营养化情势下是否发生水华进行预测预报。

(2)对策措施的预测、优化和统筹

巢湖水华是多诱因的综合结果,因此水华的防治也必须采用系统的方法,多方案协同、多管齐下,方可见效,这不仅要求关注各单项措施的实施效果,更牵涉到多种措施的优化组合问题。

如前所述,为防止突变的发生,就必须对控制变量进行调控,保证 $\Delta = 8u^3 + 27v^2 > 0$ 。具体到巢湖,各项对策措施的实施效果可以通过对实施前后的 Δ 值的计算和预测后进行对比,分析其对水华防治的贡献;同时,也根据判别式 $\Delta > 0$ 的要求,对不同的组合方案进行优化和统筹,以期以最经济的手段获取最佳的整治效果,即在 $\Delta > 0$ 的约束条件前提下,满足成本最小化的函数目标。

$$\begin{aligned} \min Z &= \text{Cost}(T_s) + \text{Cost}(DO_s) \\ \text{s.t.}; \Delta &= 8u^3 + 27v^2 = 8T_s^3 + 27DO_s^2 > 0 \end{aligned}$$

本文中水华突变模型的构建方法在运用到其他湖泊水库时,需要考虑在地理、气候、水文等方面的差异性,在标准和参数的选取以及对水质数据的处理方法等方面做适当的调整和修正,甚至在模型的形式上采用更多维的控制变量和状态变量,但这都不会影响到建模的出发点,即水华的突变机理,也不会改变模型的拓扑结构。

4 讨论

对水华机理的研究就是对水生态系统的研究,水生态系统是集无机环境、微生物群落、水生植物群落、水生动物群落等从无机到有机、从低级生物到高级生物的复杂大系统。伴随着系统中的各种物理、化学和生物过程,各种无机物质和有机物质之间相互作用并互为因果,表现出高阶的和非线性的数学特征。因此,这就要求在对水华的研究中采用系统的理论和方法,将叶绿素、藻类的生物量、氮、磷、温度、光照、pH、溶氧等相关因素作为一个系统来统筹考虑。对各指标孤立地进行单独研究,或简单地寻求各指标与水华之间的对应关系都是片面的,不能反映系统的全貌^[7]。

其次,水华是水生态系统中营养物质长期累积的结果,是系统经富营养化长期演化后的极端状态,是一个由量变到质变、由渐变到突变的状态阶跃过程。这也要求采用的数学模型能够体现这种非连续的、阶跃式的数理特征^[5,8]。

而纵观系统建模方法,就其建模思想而言,从本质上而言大多都是基于经典的微分数学基础,即将系统看作是平稳渐变的,事实上类次于水华这种由连续的量变引发的不连续、突发性的质变现象,无论是自然界还是

人类社会都大量存在着,而对于这些突变现象,微分数学模型就显得无能为力^[5,9~11]。突变理论则正是这样一门以突变为研究对象的数学理论,也是目前唯一的一门研究系统运动由渐变引起突变的系统理论。突变理论曾被称为比微分数学更有价值的理论,因为后者只考虑了光滑、连续的过程,而突变理论却提供了一个研究所有跳跃的变迁、不连续性以及突发的质变的一般方法^[5]。突变理论为水华现象提供了一条新的研究思路,而本文的研究结论也证明了该理论方法在巢湖水华研究中的适用性。

本文是创新水华研究方法的一次初步尝试,类似的研究目前在国内外尚未见报道。文中的结论尚有待于得到在其他湖泊进行对比研究的进一步验证。此外由于数据收集等方面的条件所限,本文所建立的水华突变模型也仅考虑了 *Chla*、*TP*、*T* 和 *DO* 等几个对巢湖富营养化影响作用较为突出的几个因子,而光照、pH、水文等参量尚未考虑其中,还有待于进一步丰富和完善。

References:

- [1] Dou M, Xie P, Xia J, *et al.* Study on algal bloom in Hanjiang River. *Advances in Water Science*, 2002, 13(5):558 ~ 561.
- [2] Han F, Chen Y C, Liu Z W. Advance in the eutrophication models for lakes and reservoirs. *Advances in Water Science*, 2003, 14(6):785 ~ 791.
- [3] Du G S, Wang J T, Zhang W H, *et al.* On the nutrient status of Guanting reservoir. *Journal of Lake Science*, 2004, 16(3):278 ~ 281.
- [4] Quan W M, Yan L J, Yu Z M, *et al.* Advance in study of lake eutrophication models. *Biodiversity Science*, 2001, 9(2):168 ~ 175.
- [5] Collie J S, Richardson K, Steele J H. Regime shifts: can ecological theory illuminate the mechanisms? *Progress in Oceanography*, 2004, 60(2~4):281 ~ 302.
- [6] Thom R. *Structural stability and morphogenesis*. Benjamin-Addison Wesley, NY, USA, 1975.
- [7] Pechar L, Long-term changes in fish pond management as an unplanned ecosystem experiment: importance of zooplankton structure, nutrients and light for species composition of cyanobacterial blooms. *Water Science and Technology*, 1995, 32(4):187 ~ 196.
- [8] Scheffer M, Carpenter S R. Regime shifts in ecosystems: Models and evidence. *Trends in Ecology and Evolution*, 2003, 18:648 ~ 656.
- [9] Carpenter S R, Ludwig D, Brock W A. Management of eutrophication for lakes subject to potentially irreversible change. *Ecological Applications*, 1999, 9:751 ~ 771.
- [10] Cury P M, Shannon L J. Regime shifts in upwelling ecosystems: observed changes and possible mechanisms in the northern and southern Benguela. *Progress in Oceanography*, 2004, 60(2~4):223 ~ 243.
- [11] Ferriere R, Cazelles B. Universal power laws governing intermittent rarity in communities of interacting species. *Ecology*, 1999, 80:1505 ~ 1521.

参考文献:

- [1] 窦明, 谢平, 夏军, 等. 汉江水华问题研究. *水科学进展*, 2002, 13(5):558 ~ 561.
- [2] 韩菲, 陈永灿, 刘昭伟. 湖泊及水库富营养化模型研究综述. *水科学进展*, 2003, 14(6):785 ~ 791.
- [3] 杜桂森, 王建厅, 张为华, 等. 官厅水库水体营养状况分析. *湖泊科学*, 2004, 16(3):278 ~ 281.
- [4] 全为民, 严力蛟, 虞左明, 等. 湖泊富营养化模型研究进展. *生物多样性*, 2001, 9(2):168 ~ 175.