

## 基于突变理论的太湖蓝藻水华危险性分区评价\*

刘聚涛<sup>1,2</sup>, 高俊峰<sup>1\*\*</sup>, 姜加虎<sup>1</sup>, 许妍<sup>1,2</sup>, 赵家虎<sup>1,2</sup>

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

(2: 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 蓝藻水华暴发是湖泊生态系统中营养物质长期累积的结果, 是系统营养经长期演化后的极端状态. 突变理论评价方法无需确定指标权重, 减少了人为主观因素, 并且计算方便. 本文基于突变理论, 采取蓝藻水华暴发的表征因子(叶绿素浓度)和导致蓝藻水华暴发的环境因子(总氮和总磷)作为潜在危险性评价指标, 蓝藻水华的面积、范围以及暴发频次作为历史危险性评价指标建立多准则蓝藻水华暴发风险评价指标体系, 并结合太湖九个分区进行蓝藻水华暴发危险性分区及全湖评价. 研究表明: 竺山湖和西部沿岸为极重危险性湖区; 梅梁湾为重度危险性湖区; 南部沿岸、贡湖和大太湖为中度危险性湖区; 箭湖东茭咀、东太湖和胥湖蓝藻水华暴发危险性较小, 为轻微危险性湖区. 整体上看, 太湖蓝藻水华暴发危险性程度由轻到重基本上沿东南-西北方向变化, 与营养盐浓度由低到高分布趋势相一致. 根据评价结果, 可以明确太湖各区遭遇蓝藻水华暴发危险性的大小, 为蓝藻水华风险管理和应急处理提供科学依据.

**关键词:** 蓝藻水华; 风险评价; 太湖; 突变理论

## Catastrophe theory-based risk evaluation of blue-green algae bloom of different regions in Lake Taihu

LIU Jutao<sup>1,2</sup>, GAO Junfeng<sup>1</sup>, JIANG Jiahui<sup>1</sup>, XU Yan<sup>1,2</sup> & ZHAO Jiahui<sup>1,2</sup>

(1: *Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China*)

(2: *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China*)

**Abstract:** Water bloom is the results of long-term accumulation of nutrients in ecological system, and an extreme state as a result of eutrophication system after long-term evolution. The proposed method needn't define the weight of evaluation indices so that the influence of subjective factors on assessment can be minimized. Based on catastrophe theory, this paper takes water chlorophyll-a concentration as characterization factor of blue-green algae bloom outbreak degree, total phosphorus and total nitrogen concentration as the environmental factors of potential risk evaluation indexes, and blue-green algae bloom area, extent and frequency as the historical risk evaluation indexes. These parameters can be used to establish a multi-criteria risk evaluation index system for blue-green algae bloom outbreak. It carries out the risk evaluation combined with different regions in Lake Taihu. The results show that the risk in the western coast of Lake Zhushan, is the most serious, heavy in Meiliang Bay, moderate in southern coast of Gonghu and Large Taihu, and almost none serious in Lake Jianhu, East Lake Taihu and Lake Xuhu. In general, the degrees of blue-green algae bloom risk in Lake Taihu are from light to heavy changes from the southeast to the northwest, which is consistent with the nutrient concentration trend from low to high. The evaluation results define the possibility and the degree of the hazards of the risk of blue-green algae bloom outbreak in Lake Taihu, and provide scientific basis for the management and emergent treatment of blue-green algae bloom outbreak risk.

**Keywords:** Algae bloom; risk evaluation; Lake Taihu; catastrophe theory

\* 国家重点基础研究发展计划项目(2008CB418106)、中国科学院知识创新工程重大交叉项目(KZCX1-YW-14-6)和国家水污染治理专项项目(2008ZX07101-014)联合资助. 2009-10-26 收稿; 2010-01-22 收修改稿. 刘聚涛, 男, 1983年生, 博士研究生; E-mail: liujutao126@163.com.

\*\* 通讯作者; E-mail: gaojunf@niglas.ac.cn.

淡水湖泊富营养化造成水华频发,其中以夏季微囊藻(*Microcystis*)引起的蓝藻水华最为常见<sup>[1]</sup>.太湖是我国第三大淡水湖,20世纪60年代,太湖略呈贫营养状态,1981年时仍属于中营养湖泊<sup>[2-3]</sup>,但从20世纪80年代后期,太湖北部的梅梁湾开始频繁暴发蓝藻水华.近十年来,太湖水质下降,特别是富营养程度不断加重,蓝藻水华暴发的面积和频次逐渐增加.蓝藻水华暴发引起的影响也越来越大,1990年7月北部湖区藻类水华暴发,直接经济损失上亿元<sup>[4]</sup>.2007年梅梁湾蓝藻水华暴发,导致无锡市200多万居民饮水危机,造成了重大经济损失,引起社会的广泛关注.蓝藻水华发生后应急措施实施的迟缓一定程度上加重了蓝藻水华带来的影响.为了分清轻重缓急,有针对性的制定太湖蓝藻水华防灾预案,需研究太湖湖区内哪些湖区为易发生蓝藻水华灾害区域,针对蓝藻水华进行危险性评价,为太湖蓝藻水华风险管理提供理论依据.

蓝藻水华暴发是湖泊生态系统中营养物质长期累积的结果,是系统营养经长期演化后的极端状态,是水生态系统由量变到质变、由渐变到突变的状态阶段.其中,营养盐和水温是影响蓝藻生长的关键因子<sup>[5]</sup>,但是不仅要求有N、P等营养盐条件,还涉及到pH值、光照、水流、微量元素等诸多因素<sup>[6-9]</sup>,蓝藻水华的形成过程是由蓝藻本身的生理特点以及温度、光照、营养盐、其它生物等诸多环境因素共同作用的结果<sup>[10]</sup>,但目前蓝藻水华的发生机理仍然不清楚.突变理论是研究由渐变引起突变的系统理论<sup>[6-7,11-12]</sup>,特点是根据系统的势函数将临界点分类,研究各类临界点附近的不连续特征<sup>[13-14]</sup>.突变模型直接处理不连续性而不联系任何特殊的内在机制,这使它特别适用于对内部作用机理尚不明确系统的研究<sup>[15]</sup>.

与以往的评价方法相比,突变理论评价方法无需确定指标权重,减少了人为主观因素,并且计算方便<sup>[15]</sup>.目前基于突变理论的蓝藻水华研究相对较少,陈云峰等<sup>[7-8]</sup>采用突变理论,研究时间序列上水华暴发节点.本文基于突变理论评价方法,分别采取蓝藻水华暴发的表征因子Chl. a和导致蓝藻水华暴发的环境因子(TP和TN)作为潜在危险性评价指标,蓝藻水华的面积、范围以及暴发频次作为历史危险性评价指标建立蓝藻水华暴发危险性评价指标体系,对太湖蓝藻水华暴发危险性进行分区评价,明确太湖各区遭遇蓝藻水华暴发的危险性,为蓝藻水华暴发风险管理和应急处理提供科学依据.

## 1 突变理论综合评价方法

### 1.1 常用的突变理论基本模型

突变理论<sup>[13-14]</sup>的特点是根据系统的势函数将系统的临界点分类,研究分类临界点附近非连续变化状态的特征,从而归纳出若干个初等突变模型.进行综合评价时,常用的突变模型有尖点突变、燕尾突变和蝴蝶突变,见表1.其中, $f(X)$ 表示系统状态变量的势函数; $X$ 的系数 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 表示状态变量的控制变量.

表1 初等突变模型的势函数

Tab. 1 Potential function of common catastrophe model

类型	控制变量个数	势函数 $f(X)$	分歧方程
尖点突变	2	$1/4X^4 + 1/2aX^2 + b$	$a = -6X^2, b = 8X^3$
燕尾突变	3	$1/5X^5 + 1/3aX^3 + 1/2bX^2 + c$	$a = -6X^2, b = 8X^3, c = -3X^4$
蝴蝶突变	4	$1/6X^6 + 1/4aX^4 + 1/3bX^3 + 1/2cX^2 + dX$	$a = -10X^2, b = 20X^3, c = -15X^4, d = 4X^5$

突变模型中,势函数 $f(X)$ 的所有临界点集合成一平衡曲面 $M$ ,通过对 $f(X)$ 求一阶导数,并令 $f'(X) = 0$ ,即可得到该平衡曲面方程.平衡曲面的奇点集 $S$ ,可通过二阶导数 $f''(X) = 0$ 求得.令 $f'(X) = 0$ 和 $f''(X) = 0$ ,可得到反映状态变量与各控制变量间关系的分解形式的分歧方程(表1).通过分歧方程可导出归一化公式,运用归一化公式,可求出表征系统状态特征的系统总突变隶属函数值.常用的三种突变模型的归一化公式分别为:

$$\text{尖点突变归一化: } X_a = a^{1/2}, X_b = b^{1/3};$$

$$\text{燕尾突变归一化: } X_a = a^{1/2}, X_b = b^{1/3}, X_c = c^{1/4};$$

蝴蝶突变归一化:  $X_a = a^{1/2}$ ,  $X_b = b^{1/3}$ ,  $X_c = c^{1/4}$ ,  $X_d = d^{1/5}$ .

在归一化公式中, 状态变量及诸控制变量皆取 0-1 范围的数值. 突变级数法规定, 必须遵循“越大越好”原则的准则模型体系, 方可用归一化公式计算.

### 1.2 基于突变评理论的应用研究

突变理论是以奇点理论、稳定性理论等数学理论为基础的用于研究不连续变化现象的理论. 目前, 突变理论在各领域中得到广泛应用, 不仅仅局限于数学、力学和物理等自然科学领域中, 而且还推广到生物学和社会科学等领域中<sup>[16]</sup>. 陈云峰等<sup>[6-7]</sup>应用突变理论研究富营养化水体蓝藻水华暴发突变模型; 孙雪峰等<sup>[17]</sup>用突变理论的观点对水生生态系统进行分析, 以水质和水量为控制变量, 建立了水生生态系统突变的尖点突变模型.

突变理论不仅仅应用于复杂系统的机理性研究, 也广泛应用于环境及其风险的研究. 汤洁等<sup>[18]</sup>通过采用尖点突变模型来研究洪水引起环境突变中的作用. 李继清等<sup>[19]</sup>采用突变理论应用于长江流域洪灾综合风险社会评价中. 冯平等<sup>[14]</sup>基于突变理论的地下水环境风险评价模型, 对海河流域的典型区域地下水环境进行风险评价. 李绍飞等<sup>[15]</sup>基于突变理论对海河流域地下水水环境进行风险评价. 通过突变理论在环境及其风险评价的应用, 突变理论评价方法越来越成熟.

### 1.3 基于突变理论的蓝藻水华危险性评价方法

突变评价法是在突变理论的基础上发展起来的一种综合评价方法<sup>[13,15,20]</sup>, 基于蓝藻水华危险性评价的特点, 将突变理论评价方法分为以下几个步骤:

(1) 按系统的内在作用机理, 将其分解为由若干评价指标组成的多层子系统. 其中目标层为蓝藻水华暴发危险性综合评价, 准则层为水环境指标和蓝藻水华指标, 指标层为具体选取的评价指标; (2) 采用极差法进行数据标准化, 根据公式  $(X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$  产生  $[0, 1]$  之间取值越大越优型的数据表达方式, 其中  $X_i$  表示指标值,  $X_{\min}$  表示该指标的最小值,  $X_{\max}$  表示该指标的最大值; (3) 根据指标个数, 选取与控制变量相同的突变模型. 利用归一化公式进行综合量化递归运算, 求出评价系统的总突变隶属度值. 利用归一公式对同一系统各控制变量(指标)计算出的对应的值应采用“大中取小”原则, 但对存在“互补性”的指标, 通常用其平均数代替, 即考虑“互补”与“非互补”原则.

## 2 蓝藻水华危险性评价指标体系

蓝藻水华危险性主要是指蓝藻水华暴发可能性的大小程度, 主要包括潜在危险性和历史危险性评价.

潜在危险性主要是指在目前状态下, 对影响蓝藻水华暴发的各因子以及蓝藻水华暴发的表征因子所处状态的评价. 蓝藻水华的暴发是水生生态系统中营养因子和环境因子综合作用的产物, 是水体富营养化的一种表现形式. Jorgensen 指出浮游藻类的生长是富营养化的关键过程<sup>[21]</sup>, 着重研究氮、磷负荷与浮游藻类生产力的相互作用和关系, 是揭示湖泊富营养化形成机理的主要途径. 多年研究<sup>[22-23]</sup>表明: 蓝藻暴发除了与藻类大量繁殖及其持续的时段、气温变化、风力、风向密切相关外, 其最主要的原因是与水中的总磷、总氮等营养盐相对浓度有关. 水体富营养化通常用 TN、TP 和 Chl. a 浓度等环境因子来评价<sup>[24]</sup>, 并且蓝藻重度发生时水质特征主要以 TN、TP 和 Chl. a 浓度来表征<sup>[25]</sup>, 陈云峰等<sup>[6-7]</sup>采用 Chl. a 为系统势函数来表征水体藻类的生长状态和暴发水华的趋势. 由于对太湖蓝藻水华暴发风险评价时, 太湖各湖区中气温、风向和风力等自然条件大致相同, 而水生态环境指标差异很大, 因此本文采取 Chl. a 浓度为蓝藻水华暴发的表征因子, TP 和 TN 浓度为蓝藻水华暴发的影响因子作为蓝藻水华暴发的潜在危险性评价指标.

历史危险性主要对过去蓝藻水华暴发的面积、范围的大小和程度进行评价, 本文采取历史蓝藻水华暴发面积百分比和蓝藻水华暴发的频率作为历史灾害危险性评价指标, 历史蓝藻水华暴发的面积百分比为蓝藻水华暴发的范围, 频次为蓝藻水华暴发的概率. 潜在危险性指标与历史危险性指标相结合, 从而建立多准则蓝藻水华暴发风险评价指标体系(表 2).

表 2 蓝藻水华危险性评价指标体系  
Tab.2 Index system of blue-green gloom risk evaluation

目标层	准则层	指标层	指标含义
蓝藻水华 危险性 评价(C)	潜在危险性评价(A)	$Chl. a(A_1)$	叶绿素 a 浓度,单位为 $mg/m^3$
		$TP(A_2)$	水体中 TP 浓度,单位为 $mg/L$
		$TN(A_3)$	水体中 TN 浓度,单位为 $mg/L$
	历史危险性评价(B)	蓝藻水华暴发面积百分比( $B_1$ )	蓝藻水华面积占所在湖区百分比,无量纲
		发生蓝藻频率( $B_2$ )	每年该湖区蓝藻水华发生次数,单位为次/年

### 3 太湖蓝藻水华危险性分区评价

根据自然条件和水环境指标,把太湖分为梅梁湾、竺山湖、西部沿岸、大太湖、贡湖、南部沿岸、胥湖、箭湖东菱咀和东太湖九个湖区.通过频率为每天一次的分辨率为  $250m \times 250m$  的 MODIS 遥感影像,采用近红外波段  $Band2/Band4 > 1$  的方法<sup>[26]</sup>提取太湖蓝藻水华面积及其范围,可以看出太湖蓝藻水华暴发主要集中在 4-11 月份,对太湖 2004-2008 年 4-11 月份太湖及各湖区的蓝藻水华暴发次数、面积及其范围进行统计.为避免由于极短事件引起潜在危险性评价指标的差异,潜在危险性指标来源于 2004-2007 年 4-11 月份中国科学院太湖湖泊生态系统研究站对太湖的定点常规监测,取湖区内各监测点的平均值.

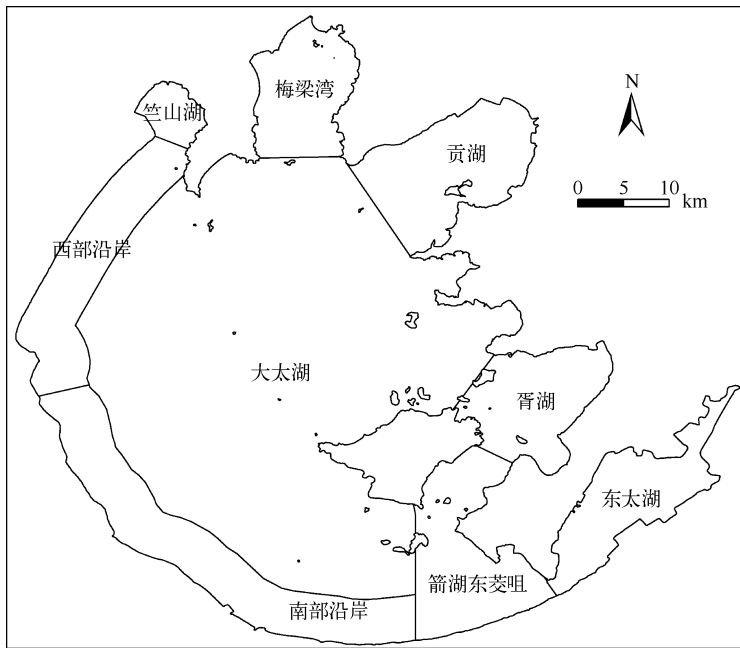


图 1 太湖九个分区监测点位置图  
Fig.1 Sketch of of nine regions in Lake Taihu

通过对太湖各湖区以全湖蓝藻水华暴发的潜在危险性和历史危险性指标的分析,根据蓝藻水华危险性评价方法,对各指标实测值进行标准化(表 3).根据突变理论的评价方法,首先将表 3 中各指标原始值转换成  $[0,1]$  范围内的突变模糊隶属度函数.然后采用突变系统的归一公式逐步向上综合计算,得出各个湖区的突变级数.以竺山湖为例,计算过程如下:

潜在危险性评价指标中  $Chl. a(A_1)$ 、 $TP(A_2)$  和  $TN(A_3)$  构成燕尾突变(表 2),采用燕尾突变归一公式得:

$$X_{A1} = (0.8768)^{1/2} = 0.9364, X_{A2} = (1)^{1/3} = 1, X_{A3} = (1)^{1/4} = 1$$

历史危险性评价指标发生蓝藻频率 ( $B_1$ ) 和蓝藻水华暴发面积百分比 ( $B_2$ ) 构成尖点突变, 采用尖点突变归一公式得:

$$X_{B1} = (1)^{1/2} = 1, X_{B2} = (0.5959)^{1/3} = 0.8415$$

由于各控制标量之间可以相互弥补不足, 综合起来, 共同对上一层评价指标产生作用, 因此按“互补”原则, 取平均值有:

$$A = (X_{A1} + X_{A2} + X_{A3})/3 = 0.9788; B = (X_{B1} + X_{B2})/2 = 0.9208$$

潜在危险性评价指标 ( $A$ ) 和历史危险性评价指标 ( $B$ ) 构成尖点突变, 按照互补原则可计算出竺山湖蓝藻水华暴发风险值为 0.9811. 同理, 可计算出梅梁湾、贡湖、南部沿岸、箭湖东茭咀、东太湖、胥湖、大太湖、西部沿岸和全湖的蓝藻水华危险性评价结果 (表 3).

表 3 太湖各湖区及全湖蓝藻水华危险性评价结果

Tab. 3 Results of the blue-green algae bloom risk evaluation index in the Lake Taihu

湖区	潜在危险性评价				历史危险性评价			综合评价结果 (C)	风险 排序
	标准化值			评价结果 (A)	标准化值		评价结果 (B)		
	Chl. a ( $A_1$ )	TP ( $A_2$ )	TN ( $A_3$ )		蓝藻水华面积 百分比 ( $B_1$ )	发生频率 ( $B_2$ , 次/年)			
竺山湖	0.8768	1.0000	1.0000	0.9788	1.0000	0.5959	0.9208	0.9811	1
西部沿岸	1.0000	0.6362	0.6176	0.8820	0.9067	1.0000	0.9761	0.9656	2
梅梁湾	0.4305	0.6864	0.6555	0.7826	0.8027	0.8219	0.9163	0.9280	3
南部沿岸	0.3134	0.2589	0.2146	0.5535	0.5680	0.6610	0.8124	0.8385	4
贡湖	0.2224	0.2629	0.2607	0.5409	0.4133	0.4418	0.7023	0.8122	5
大太湖	0.1956	0.2285	0.2268	0.5099	0.2213	0.9760	0.7312	0.8075	6
箭湖东茭咀	0.0000	0.0244	0.0173	0.1404	0.0587	0.0068	0.2161	0.4874	7
胥湖	0.0050	0.0374	0.0514	0.2106	0.0000	0.0000	0.0000	0.2295	8
东太湖	0.0094	0.0000	0.0000	0.0323	0.0000	0.0000	0.0000	0.0899	9

#### 4 结果分析

根据太湖九个湖区及全湖的蓝藻水华危险性评价结果, 参考国内外风险评价标准和太湖历史灾害危险性状况, 对太湖蓝藻水华危险性评价结果进行分级, < 0.5 为轻微风险, [0.5, 0.8) 为轻度风险, [0.8, 0.9) 为中度风险, [0.9, 0.95) 为重度风险,  $\geq 0.95$  为极重风险. 为了比较直观地反映各评价单元的风险程度, 以专题图形式反映太湖及各湖区蓝藻水华危险性程度分布 (图 2).

通过对梅梁湾、竺山湖、贡湖、大太湖、西部沿岸、南部沿岸、胥湖、箭湖东茭咀和东太湖九个湖区蓝藻水华暴发危险性评价结果进行对比分析 (表 3), 各湖区蓝藻水华暴发危险性由重到轻分别为竺山湖、西部沿岸、梅梁湾、南部沿岸、贡湖、大太湖、箭湖东茭咀、胥湖和东太湖. 其中, 竺山湖和西部沿岸危险性指数分别为 0.9811 和 0.9656, 属于极重危险性区域; 梅梁湾危险性指数为 0.9280, 为重度危险性区域; 南部沿岸、贡湖和大太湖蓝藻水华暴发危险性指数大于 0.8, 蓝藻水华暴发危险性较大, 属于中度危险性区域; 位于太湖东南部的箭湖东茭咀、胥湖和东太湖蓝藻水华暴发危险性评价结果较小, 分别为 0.4874、0.2295 和 0.0899, 基本上无蓝藻水华发生.

在竺山湖、西部沿岸和梅梁湾三个湖区中, Chl. a、TP 和 TN 浓度总体较高, 尤其竺山湖和西部沿岸, Chl. a 浓度大于  $100\text{mg}/\text{m}^3$ , 梅梁湾也大于  $50\text{mg}/\text{m}^3$ ; 三个湖区的 TP 浓度大于  $0.1\text{mg}/\text{L}$ , 接近于  $0.15\text{mg}/\text{L}$ ; TN 浓度大于  $4\text{mg}/\text{L}$ ; 而且蓝藻水华暴发面积占湖区的面积比例都大于 30%, 危险性最大; 贡湖、大太湖和南部沿岸 Chl. a 浓度大于  $30\text{mg}/\text{m}^3$ , TP 浓度大于  $0.5\text{mg}/\text{L}$ , TN 浓度大于  $2\text{mg}/\text{L}$ , 蓝藻水华暴发面积占湖区面积比例

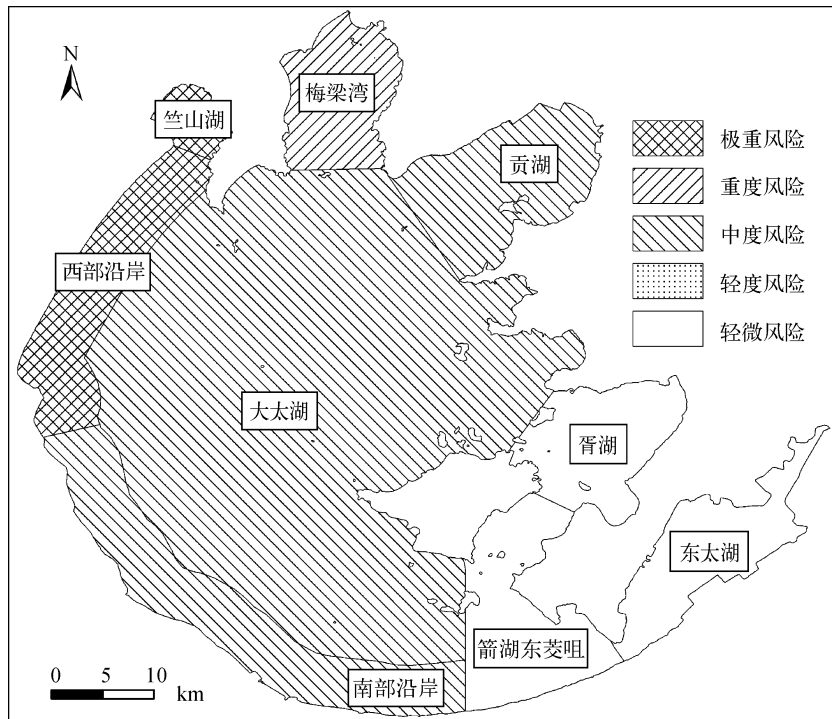


图2 太湖蓝藻水华危险性评价结果

Fig.2 Sketch of evaluation of blue-green algae bloom risk of Lake Taihu

大于5%，危险性相对也较大；位于太湖东南部的东太湖、胥湖和箭湖东茭咀三个湖区蓝藻水华暴发的风险最小，Chl. a 浓度略大于  $10\text{mg}/\text{m}^3$ ，TP 浓度小于  $0.1\text{mg}/\text{L}$ ，TN 浓度小于  $1.5\text{mg}/\text{L}$ ，并且东太湖和胥湖的蓝藻水华暴发频率和面积都为0，因此蓝藻水华暴发的危险性较小，基本上无蓝藻水华发生。各湖区蓝藻水华暴发危险性由轻到重基本沿东南-西北方向分布，其分布与营养盐浓度分布趋势基本相一致。

对于整个太湖来说，蓝藻水华暴发危险性较大的区域主要集中于竺山湖、西部沿岸、梅梁湾、南部沿岸、贡湖和大太湖六个湖区，湖区面积占太湖总面积的80%以上，表明太湖蓝藻水华暴发的危险性相对较大。

## 5 结论与讨论

(1) 本文分别采取蓝藻水华暴发的表征因子和导致蓝藻水华暴发的环境因子作为潜在危险性评价指标，蓝藻水华的面积、范围以及暴发频次作为历史危险性评价指标，初步建立蓝藻水华危险性评价指标体系。

(2) 基于突变理论建立蓝藻水华危险性评价方法。根据突变理论，准则层评价中，潜在危险性评价指标 Chl. a、TN 和 TP 复合燕尾突变模型，历史危险性指标蓝藻水华暴发面积占各湖区百分比和暴发频次复合尖点突变模型；目标层评价中，潜在危险性评价指标和历史危险性指标复合尖点突变模型，从而建立蓝藻水华危险性评价方法。

(3) 基于太湖九个分区，依据蓝藻水华危险性评价指标体系，采用蓝藻水华危险性评价方法，对太湖蓝藻水华危险性进行评价。根据评价结果可知，各湖区蓝藻水华暴发危险性从大到小分别为：竺山湖、南部沿岸、梅梁湾、西部沿岸、贡湖、大太湖、箭湖东茭咀、胥湖和东太湖。其中，竺山湖和南部沿岸为极重危险性湖区，梅梁湾为重度危险性湖区，南部沿岸、贡湖和大太湖为中度危险性湖区，箭湖东茭咀、胥湖和东太湖为轻微危险性湖区。

(4) 太湖蓝藻水华主要堆积在北部和西北部沿岸，位于太湖北部和西北部的湖区更容易发生蓝藻水华。根据各湖区 Chl. a、TP 和 TN 浓度分布趋势，浓度较高的区域分布在太湖西北部，浓度较低的区域分布在太湖东南部，营养盐浓度由东南区向西北区逐渐增加。而且，各湖区蓝藻水华暴发危险性由轻到重基本沿东

南-西北方向分布,其分布与营养盐浓度分布趋势基本相一致。

(5) 根据太湖九个湖区蓝藻水华危险性评价结果可知,太湖各湖区分别属于极重、重度、中度和轻微危险性区域,并无轻度危险性区域。九个湖区中,极重、重度和中度危险性湖区的 Chl. a、TP 和 TN 浓度最小值分别为  $31.73\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $0.08\text{mg}/\text{L}$  和  $2.31\text{mg}/\text{L}$ ,轻微危险性湖区的 Chl. a、TP 和 TN 浓度最大值为  $11.69\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $0.044\text{mg}/\text{L}$  和  $1.46\text{mg}/\text{L}$ ,两者之间有明显梯度,这可能是由于 Chl. a、TP 和 TN 浓度取各湖区内监测点的均值,一定程度上消除了湖区内的差异,但也增加了湖区间的差异,因此造成了危险性等级突变,突变区域为南部沿岸和大太湖与胥湖和箭湖东茭咀之间的湖区交界处。

(6) 本研究将突变理论应用于太湖蓝藻水华暴发危险性评价,评价结果与实际情况基本相吻合,在目前蓝藻水华发生机理尚不完全清楚的情况下,为太湖蓝藻水华危险性评价提供了新的研究方法。

致谢:本研究采用了太湖湖泊生态系统研究站水环境监测数据资料,在此深表谢意。同时,感谢审稿人给本论文提出的宝贵意见。

## 6 参考文献

- [ 1 ] 吴晓东,孔繁祥. 水华期间太湖梅梁湾微囊藻原位生长速率的测定. 中国环境科学,2008,28(6):552-555.
- [ 2 ] Chen Yuwei, Qin Boqiang, Teubener K *et al.* Long-term dynamics of phytoplankton assemblages; *Microcystis*-domination in Lake Taihu, a large shallow lake in China. *Journal of Plankton Research*, 2003, 25(1):445-453.
- [ 3 ] 朱广伟. 太湖富营养化现状及原因分析. 湖泊科学,2008,20(1):21-26.
- [ 4 ] 范成新,季江,陈荷生. 太湖富营养化现状、趋势及其综合整治对策. 上海环境科学,1997,16(8):4-7.
- [ 5 ] Chapman BR, Fery BW, Ford TW. Phytoplankton communities in water bodies at Dungeness, UK; Analysis of seasonal changes in response to environmental factors. *Hydrobiologia*, 1998, 362:161-170.
- [ 6 ] 陈云峰,殷福才,陆根法. 富营养化水体水华暴发的突变模型. 中国环境科学,2006,26(1):125-128.
- [ 7 ] 陈云峰,殷福才,陆根法. 水华爆发的突变模型——以巢湖为例. 生态学报,2006,26(3):878-883.
- [ 8 ] 周云龙,于明. 水华的发生、危害和防治. 生物学通报,2004,39(6):11-14.
- [ 9 ] 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.
- [ 10 ] Paerl HW, Fulton RS, Moisander PH *et al.* Harmful freshwater algal blooms, with an emphasis on cyanobacteria. *Scientific World Journal*, 2001, (1):76-113.
- [ 11 ] Scheffer M, Carpenter SR. Regime shifts in ecosystems models and evidence. *Trends in Ecology and Evolution*, 2003, 18:648-656.
- [ 12 ] Collie JS, Richardson K, Steele JH. Regime shifts; can ecological theory illuminate the mechanisms. *Progress in Oceanography*, 2004, 60(2-4):281-302.
- [ 13 ] 何金平,李珍照. 基于突变理论的大坝安全动态模糊综合分析与评判. 系统工程,1997,15(5):39-43.
- [ 14 ] 冯平,李绍飞,李建柱. 基于突变理论的地下水环境风险评价. 自然灾害学报,2008,17(2):13-18.
- [ 15 ] 李绍飞,孙书洪,王向余. 突变理论在海河流域地下水环境风险评价中的应用. 水利学报,2007,38(11):1312-1317.
- [ 16 ] 姜璐,于连宇. 初等突变理论在社会科学中的应用. 系统工程理论与实践,2002,22(10):113-117.
- [ 17 ] 孙雪峰,于莲. 水生态系统的突变模型. 水科学与工程学报,2007,(1):39-41.
- [ 18 ] 汤洁,林年丰,黄奕龙. 尖点突变模型在研究洪水引起环境突变中的应用. 环境科学学报,2002,22(4):443-447.
- [ 19 ] 李继清,张玉山,纪昌明等. 突变理论在长江流域洪灾综合风险社会评价中的应用. 武汉大学学报(工学版),2007,40(4):26-30.
- [ 20 ] 施玉群,吴益民. 基于突变评价理论的施工截流标准优选. 武汉水利电力大学学报,1997,30(6):45-47.
- [ 21 ] Jorgensen. Application of ecology in environmental management. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1983.
- [ 22 ] 任健,蒋名淑,商兆堂等. 太湖蓝藻暴发的气象条件研究. 气象科学,2008,28(2):221-226.
- [ 23 ] 中国科学院南京地理与湖泊研究所. 太湖梅梁湾 2007 年蓝藻水华形成及取水口污水团成因分析与应急措施建议. 湖泊科学,2007,19(4):357-358.
- [ 24 ] 余博识,吴忠兴,朱梦灵等. 水果湖湾蓝藻水华的行程及其对东湖影响的评价. 水生生物学报,2008,32(2):286-289.
- [ 25 ] 刘伟. 巢湖蓝藻重度发生时的水质特征分析. 中国环境监测,2007,23(4):101-102.
- [ 26 ] 段洪涛,张寿选,张渊智. 太湖蓝藻水华遥感监测方法. 湖泊科学,2008,20(2):145-152.