

# 一种 Gamma-云的富营养化评价方法及其应用

刘登峰<sup>1</sup>, 王 栋<sup>1</sup>, 丁 昊<sup>2</sup>, 张秣媛<sup>3</sup>

(1.表生地球化学教育部重点实验室, 南京大学地球科学与工程学院水科学系, 江苏 南京 210046;  
2.水利部太湖流域管理局, 上海 200434; 3. 江苏省水资源服务中心, 江苏 南京 210029)

**摘要:**基于富营养化评价中隶属分布的非对称性和“单侧受限”假设, 引入云模型理论提出了一种基于 Gamma-云模型的富营养化评价方法。由既定指标区间计算各等级的 Gamma-云模型参数, 通过云发生器生成各指标下相应于各等级的 Gamma-云模型; 由层次分析法确定指标权重。将实测水质数据代入 Gamma-云模型, 并通过指标权重计算得到水体对各富营养化等级的确定度, 由确定度最值对应的等级作为评价结果。以我国 12 个代表性湖库为例验证了 Gamma-云评价方法的适用性, 并将该方法与单一指标法, 模糊可变集法和正态云法进行对比。实例表明, 基于 Gamma-云模型的富营养化评价方法可行有效, 为水体富营养化评价工作提供了新思路。

**关键词:**云模型; Gamma 分布; 层次分析; 富营养化评价; 水环境

中图分类号: X824

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2014)05-0045-06

## 1 引言

水体富营养化问题不仅对生态环境构成威胁, 而且严重制约社会经济的可持续发展。建立适当的数学模型, 实现对富营养化程度的科学评价是防控水体富营养化的重要前提。

OECD 把富营养化定义为“水体营养盐增加引起的一系列征兆变化, 其中藻类和大型植物生产力的增加、水质恶化和其他征兆变化破坏了水的利用”<sup>[1]</sup>。传统的富营养化评价研究多从水质、水生生物以及底质三个方面来进行; 所采用的评价方法可归纳为参数法、生物指标评价法和营养状态指数法等<sup>[2]</sup>。近年来的研究工作多从评价模型的研建入手, 如引入突变模型势函数的富营养化评价模型、距离测度评价模型、对应分析及投影寻踪熵耦合方法<sup>[3-5]</sup>, 等等。

有学者认为在实际进行水体富营养化评价时需要解决以下 3 类问题: ①水体富营养化评价需兼顾多个评价因子的综合影响, 对于各指标处于不同营养化级

别的水体, 其营养化级别难以确定。②对于某一评价指标, 仅以其数值为阈值划分营养级别并不合理。③对于相同的数值, 不同的专家也可能认为它隶属于不同的营养化级别。并针对这些问题提出了基于正态云模型的富营养化评价方法, 在评价实例中取得了较好的结果<sup>[6]</sup>。然而, 在实际评价中仍然有以下 3 个细节需要考虑: ①对于某一概念, 在其定量区间内的隶属分布并非为正态对称分布。以总磷的“富营养”评价区间 (50, 200](mg/m<sup>3</sup>) 为例, 对于区间中值 125(mg/m<sup>3</sup>) 两侧的数值, 其相应于“富营养”概念的确定度不同: 如 190(mg/m<sup>3</sup>) 相应于“富营养”的确定度要大于 60(mg/m<sup>3</sup>)。此谓隶属分布的非对称性。②隶属分布应遵循“单侧受限”原则。即对于某一概念的隶属分布, 只在该概念对应的定量区间一侧具有定义。具体而言, “上升型”指标(富营养化等级与指标值呈正相关, 如总磷指标)对某一等级的隶属分布, 只在大于等于该等级的各区间具有定义, 即“下侧受限”; “下降型”指标(富营养化等级与指标值呈负相关, 如透明度)对某一等级的隶属分

收稿日期: 2014-02-26

基金项目: 国家自然科学基金(No. 41071018, 51190091); 国家重点基础研究发展计划(2013CB956503); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-12-0262); 教育部博士点基金(20120091110026); 江苏省教育厅青蓝工程; 南京大学青年骨干教师和优秀中青年学科带头人培养计划资助项目

作者简介: 刘登峰(1991-), 男, 江苏宿迁人, 研究生, 从事水资源不确定性分析与统计应用研究工作。E-mail: hydrol@163.com

通讯作者: 王栋(1972-), 男, 山东沂水人, 教授、博导, 主要从事水文学与水资源水环境模型、风险分析、系统优化、非线性和不确定性问题的研究。E-mail: wangdong@nju.edu.cn

布,只在小于等于该等级的各区间具有定义,即“上侧受限”。此谓“单侧受限”原则。③对于多变量综合决策的富营养化评价,不同的指标对于富营养化级别的贡献程度不同,如何科学地确定指标权重。

基于富营养化评价中隶属分布的非对称性和“单侧受限”假设,引入云模型理论,提出了一种基于Gamma-云模型的水体富营养化评价方法。其中Gamma分布刻画了对概念隶属分布的非对称性和单侧受限性假设,云模型构成定性、定量之间的映射。本文以我国12个代表性湖库为例,并参照单一指标法,模糊可变集法和正态云法的评价结果,以验证Gamma-云评价方法的适用性和有效性。

## 2 Gamma-云模型

云模型是李德毅提出的一种定性概念与其定量数值表示之间的不确定性转换模型,是对Mamdani-Zadeh范式模糊数学的扬弃<sup>[7]</sup>。云模型主要反映客观世界中事物或人类知识中概念的2种不确定性,即模糊性和随机性,并把二者完全集成在一起,构成定性和定量相互间的映射。云模型目前已应用于时间序列预测、风险分析等领域<sup>[8-9]</sup>。本文在云模型理论的基础上提出了Gamma-云模型。Gamma-云是对云模型论域分布和参数的改进,是云模型的衍生模型。

### 2.1 模型定义

设 $U$ 是一个用精确数值表示的论域, $U$ 上对应着定性概念 $A$ ,对于论域中的任意一个元素 $x$ ,都存在一个有稳定倾向的随机数 $y=u_A(x)$ ,叫做 $x$ 对概念 $A$ 的确定度, $x$ 在 $U$ 上的分布称为云模型,简称为云<sup>[10]</sup>。

文献<sup>[11]</sup>中列举了用于描述自然和社会科学中模糊概念的6类隶属函数,并论证了正态分布在应用上的普适性。然而对于水体富营养化评价问题,尤其针对概念隶属分布的非对称性和“单侧受限”假设,正态分布却无法予以准确描述。Gamma分布(式(1))作为一种双参数连续分布,具有偏态性、单侧性特征,且构造简单,能够准确刻画隶属分布的非对称性和“单侧受限”假设。

$$f(x) = \frac{x^{\alpha-1}e^{-x/\beta}}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} \quad (1)$$

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty t^{\alpha-1}e^{-t}dt \quad (2)$$

式中: $\alpha, \beta > 0$ ,  $\alpha$ 称为形状参数; $\beta$ 为尺度参数。

### 2.2 模型参数

正态云模型用期望 $E_x$ 、熵 $E_n$ 和超熵 $He$ 三个参

数来表征<sup>[10]</sup>。相应地, Gamma-云模型的参数由期望 $E_x$ 、熵 $E_n$ 和阈值 $T$ 表征。

期望 $E_x$ : 期望表示云滴在论域空间分布的期望,是概念在论域空间的中心值,是最能够代表定性概念的点。

熵 $E_n$ : 熵是定性概念不确定性的度量,由定性概念的随机性和模糊性共同决定。一方面熵是定性概念随机性的度量,反映了能代表这个定性概念的云滴的离散程度;同时又是定性概念亦此亦彼性的度量,是对定性概念模糊性的度量。

阈值 $T$ : 位置阈值是表征概念单侧限值的数字特征,同时也是关于分布的位置参数,反映了代表某一定性概念的最小(最大)接受值。

### 2.3 Gamma-云发生器

Gamma-云模型通过云发生器算法实现,其中又根据Gamma分布的单侧性分为正发生器和反发生器:

#### (1) 正 Gamma-云发生器:

①生成以 $E_x$ 为期望值、 $E_n$ 为标准差的一个Gamma随机数 $x'$ ;

②令 $x = x' + T$ ,称 $x$ 为论域中的一个Gamma-云滴;

③计算,令 $y = f(x - T)$ (式1)。称 $y$ 为 $x$ 属于某一概念 $A$ 的确定度;

④重复①-②,直到产生 $N$ 个Gamma-云滴为止。

#### (2) 反 Gamma-云发生器:

①生成以 $E_x$ 为期望值、 $E_n$ 为标准差的一个Gamma随机数 $x'$ 。

②令 $x = T - x'$ ,称 $x$ 为论域中的一个Gamma-云滴;

③计算,令 $y = f(T - x)$ (式1)。称 $y$ 为 $x$ 属于某一概念 $A$ 的确定度;

④重复①-②,直到产生 $N$ 个Gamma-云滴为止。

## 3 Gamma-云富营养化评价方法

### 3.1 基本思路

基于Gamma-云模型的富营养化评价方法可以概括如下:①模型参数确定;②指标权重确定;③综合Gamma-云模型建立与评价。评价方法流程如图1所示。

选用文献<sup>[12]</sup>采用的水体富营养评价标准,该标准以国外富营养化判定标准及我国富营养化国情为基础提出。选取评价指标为叶绿素a(Chl-a)、总氮(TN)、总磷(TP)和透明度(SD),每个指标下设6个富营养化等级并有定性概念和定量区间与之对应。具体指标及等级情况见表1。

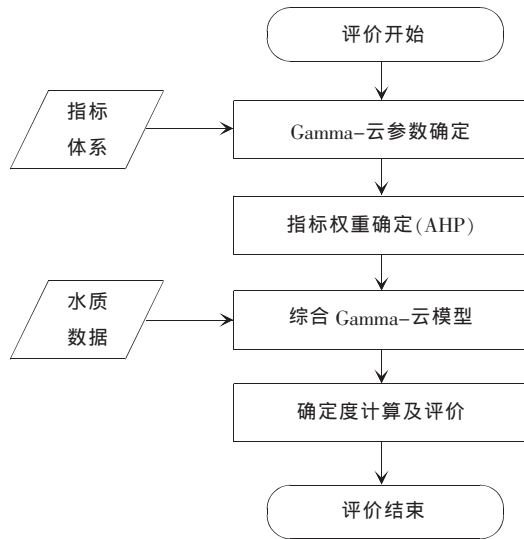


图1 基于 Gamma-云模型的富营养化评价方法流程图

Fig.1 The flow of the assessment method for eutrophication level based on Gamma-cloud

根据各定量区间确定相应于各等级的 Gamma-云参数,通过 Gamma-云发生器生成各指标等级下的 Gamma-云模型。采用层次分析法确定各评价指标的权重,将各指标的 Gamma-云通过权重计算得到指标体系下的综合 Gamma-云模型。代入实测数据即可得到该水体相应于各等级的确定度分布,最终实现水体

表1 湖库水体营养化分级指标表  
Table 1 The classification index of eutrophication

概念	等级	TP/mg·m <sup>-3</sup>	TN/mg·m <sup>-3</sup>	Chl-a/mg·m <sup>-3</sup>	SD/m
贫营养	I	≤2.5	≤30	≤1	≥10
贫中营养	II	≤5	≤50	≤2	≥5
中营养	III	≤25	≤300	≤4	≥1.5
中富营养	IV	≤50	≤500	≤10	≥1
富营养	V	≤200	≤2000	≤65	≥0.4
重富营养	VI	>200	>2000	>65	<0.4

富营养化评价。

### 3.2 参数确定

在既定的评价指标体系下(见表1),根据表2的参数计算准则确定 Gamma-云模型的参数( $E_x, E_n, T$ ) (见表3)。表中  $S_{i\min}$  为等级  $i$  所对应的评价区间下端值,  $S_{i\max}$  为等级  $i$  所对应的评价区间上端值。确定模型参数后,通过 Gamma-云发生器即可得到评价指标体系下相应于各等级的 Gamma-云模型。其中上升型指标 Chl-a、TP、TN 采用正 Gamma-云发生器,下降型指标 SD 采用反 Gamma-云发生器。

### 3.3 指标权重确定

层次分析法(AHP)作为一种定量与定性结合的分析方法<sup>[13]</sup>,适用于处理多目标、多层次和难于完全用定量方法来分析与决策的系统工程中的复杂问题。

表2 Gamma-云参数( $E_x, E_n, T$ )率定准则

Table 2 The criterion of the numerical characteristics of Gamma-cloud

等级	$E_x$		$E_n$		$T$	
	TP, TN, Chl-a	SD	TP, TN, Chl-a	SD	TP, TN, Chl-a	SD
	$(S_{1\min}+S_{1\max})/2$	$S_{1\min}+S_{2\min}$	$(S_{1\max}-S_{1\min})/3$	$2S_{2\min}/3$	$S_{1\max}$	$S_{1\min}$
	$(S_{2\min}+S_{2\max})/2$	$(S_{2\min}+S_{2\max})/2$	$(S_{2\max}-S_{2\min})/3$	$(S_{2\max}-S_{2\min})/3$	$S_{2\max}$	$S_{2\min}$
	$(S_{3\min}+S_{3\max})/2$	$(S_{3\min}+S_{3\max})/2$	$(S_{3\max}-S_{3\min})/3$	$(S_{3\max}-S_{3\min})/3$	$S_{3\max}$	$S_{3\min}$
	$(S_{4\min}+S_{4\max})/2$	$(S_{4\min}+S_{4\max})/2$	$(S_{4\max}-S_{4\min})/3$	$(S_{4\max}-S_{4\min})/3$	$S_{4\max}$	$S_{4\min}$
	$(S_{5\min}+S_{5\max})/2$	$(S_{5\min}+S_{5\max})/2$	$(S_{5\max}-S_{5\min})/3$	$(S_{5\max}-S_{5\min})/3$	$S_{5\max}$	$S_{5\min}$
	$S_{6\min}+S_{5\min}$	$(S_{6\min}+S_{6\max})/2$	$2S_{5\min}/3$	$(S_{6\max}-S_{6\min})/3$	$S_{6\min}+2S_{5\min}$	$S_{6\min}$

表3 Gamma-云参数( $E_x, E_n, T$ )取值表

Table 3 The values of the numerical characteristics of Gamma-cloud

等级	TP/mg·m <sup>-3</sup>			TN/mg·m <sup>-3</sup>			Chl-a/mg·m <sup>-3</sup>			SD/m		
	$E_x$	$E_n$	$T$	$E_x$	$E_n$	$T$	$E_x$	$E_n$	$T$	$E_x$	$E_n$	$T$
	1.25	0.83	2.5	15	10	30	0.5	0.33	1	15	3.33	10
	3.75	0.83	5	40	6.67	50	1.5	0.33	2	7.5	1.67	5
	15	6.67	25	175	83.33	300	3	0.67	4	3.25	1.17	1.5
	37.5	8.33	50	400	66.67	500	7	2	10	1.25	0.17	1
	125	50	200	1250	500	2000	37.5	18.33	65	0.7	0.2	0.4
	250	33.33	300	2500	333.33	3000	75	6.67	85	0.2	0.13	0

本文采用层次分析法确定指标权重。首先进行指标重要性排序;对富营养化的影响性质和重要性不同,将影响水体富营养化的四组指标划分为生物指标 Chl-a(主导)、营养盐指标 TP、TN、物理指标 SD 三类,其重要性程度依次为 Chl-a> TP≈TN>SD。相应判断矩阵为:

$$\begin{pmatrix} 1 & 3/2 & 3/2 & 2 \\ 2/3 & 1 & 1 & 3/2 \\ 2/3 & 1 & 1 & 3/2 \\ 1/2 & 3/2 & 3/2 & 1 \end{pmatrix}$$

对应权向量为  $W=(0.3516,0.2413,0.2413,0.1657)$ 。其中最大特征值  $\lambda_{\max}=4.0813, CI=0.0271, RI=0.9, CR=0.0301<0.1$  通过了一致性检验。检验结果表明该权重较好地反映了富营养化评价中各因子的相对重要性。

### 3.4 模型建立与评价

权重确定后,将各指标相应于各等级的 Gamma-云模型(图2)通过权重计算得到指标体系下的综合 Gamma-云模型。图中横坐标为各指标的取值,纵坐标为 Gamma-云模型下隶属于各等级的确定度。代入实测水质数据计算各指标相应于各等级的确定度,经过权重计算得到指标体系下隶属于各富营养化等级的确定度,最终实现水体富营养化评价。

## 4 实例应用

### 4.1 评价结果

为验证 Gamma-云富营养化评价方法的可行性和有效性,本文以文献[2]中 12 个湖库的富营养化调查资料为例,运用 Gamma-云方法进行了富营养化评价。各湖库隶属于各富营养化等级的确定度分布如图 3 所示,图中横坐标表示富营养化等级,纵坐标表示某湖库在各等级上的确定度。如左图中洱海在等级 3(中营养)下的确定度达到峰值,则洱海的富营养化评价等级为等级 3(中营养)。各湖库实测数据以及详细评价结果如表 4 所示。

### 4.2 参照方法

选取单一指标法,模糊可变集评价法<sup>[14]</sup>和基于概念正态分布假设的云模型方法<sup>[6]</sup>作为参照方法进行比较分析。各方法评价结果如表 5 所示。

### 4.3 结果分析

对 Gamma-云评价方法与参照方法的结果进行比较分析,结论如下:

(1)由图 3 的等级分布与表 4 的评价结果,把 12 个湖库按营养化程度由低到高分为 5 档;第一档:洱海(级);第二档:邛海(级)、博斯腾湖(级)、玉桥水

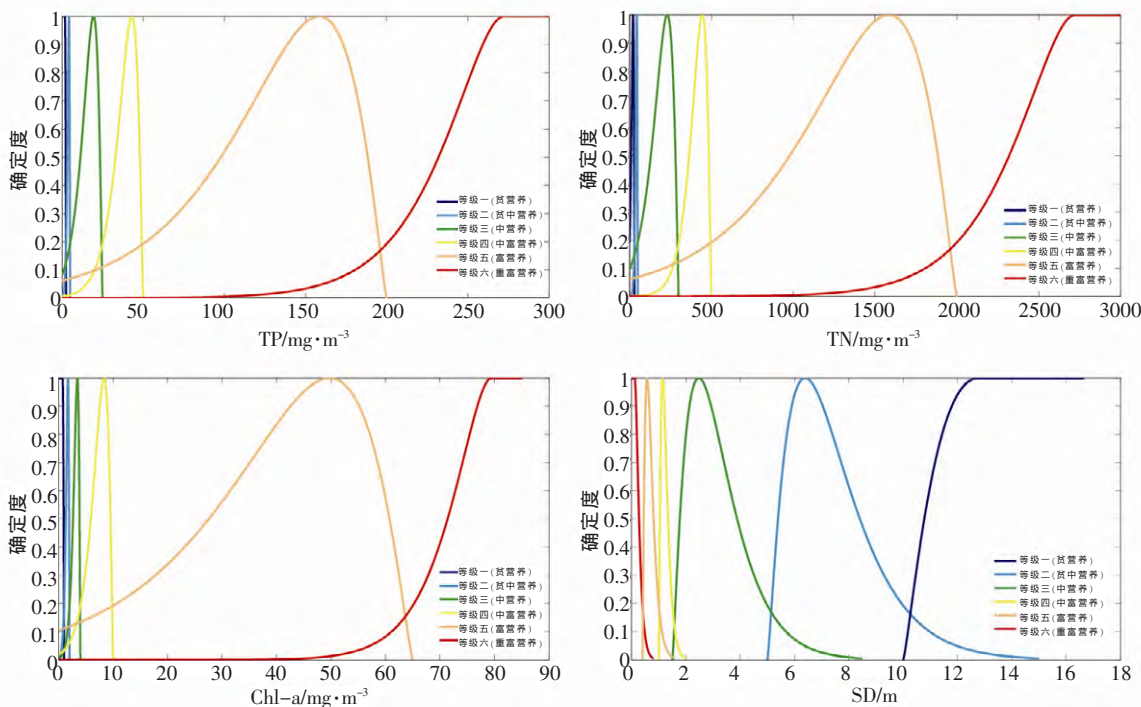


图 2 各指标相应于各营养化等级的 Gamma-云模型图

Fig.2 The Gamma-cloud under each eutrophication level for the assessment index



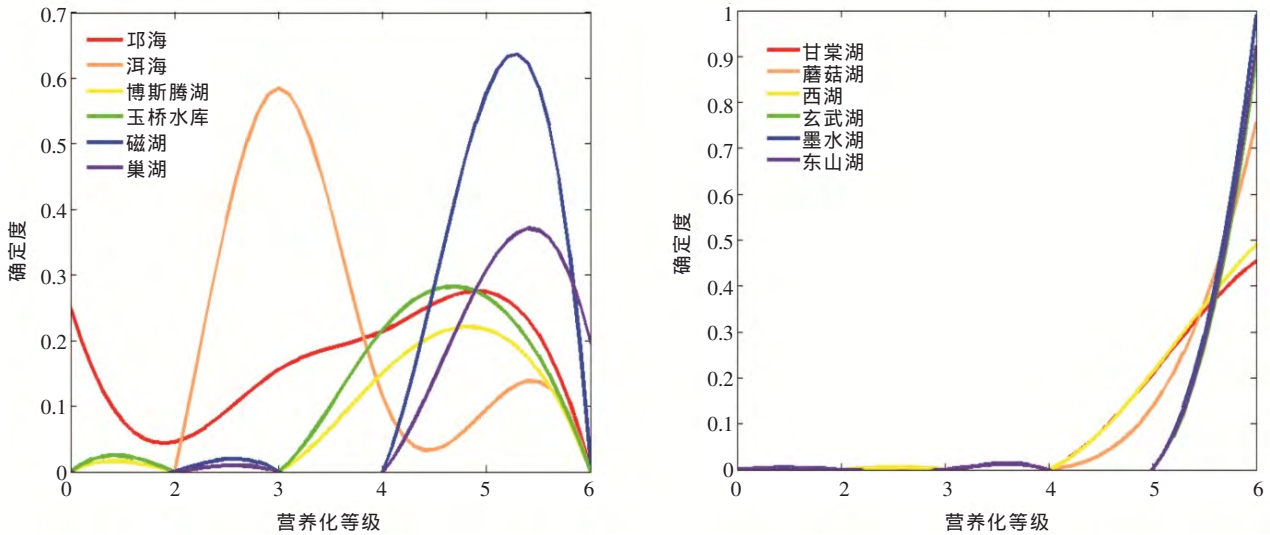


图3 湖库营养化等级分布图

Fig.3 The distribution of the water eutrophication level

表4 基于 Gamma-云的富营养化程度评价实例与结果

Table 4 The data and results of the assessment method for the water eutrophication level based Gamma-cloud

湖库	TP /mg·m <sup>-3</sup>	TN /mg·m <sup>-3</sup>	Chl-a /mg·m <sup>-3</sup>	SD /m	确定度					评价 结果
邛海	130	410	0.88	2.98	0.2505	0.0454	0.1554	0.2142	0.2742	0.0040
洱海	21	180	4.33	2.40	0.0000	0.0000	0.5847	0.1135	0.0949	0.0001
博斯腾湖	50	969	4.91	1.46	0.0000	0.0000	0.0000	0.1501	0.2169	0.0013
玉桥水库	26	1020	16.20	1.16	0.0000	0.0000	0.0000	0.2164	0.2665	0.0014
磁湖	87	1540	15.38	0.65	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.5782	0.0137
巢湖	140	2270	14.56	0.27	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.3078	0.1955
甘棠湖	135	2140	77.70	0.36	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2089	0.4548
蘑菇湖	332	2660	82.40	0.49	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1364	0.7558
西湖	136	2230	95.94	0.37	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2112	0.4913
玄武湖	708	6790	202.10	0.31	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.8981
墨水湖	500	16050	262.40	0.15	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9902
东山湖	670	7200	185.10	0.26	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9243

表5 水体富营养化程度分级结果比照

Table 5 The comparison of the assessment methods for water eutrophication level

湖库	单一指标法	模糊可变集法	正态云方法	Gamma-云法
邛海				
洱海				
博斯腾湖				
玉桥水库				
磁湖				
巢湖				
甘棠湖				
蘑菇湖				
西湖				
玄武湖				
墨水湖				
东山湖				

库(级);第三档:磁湖(级)、巢湖(级);第四档:甘棠湖(级)、西湖(级);第五档:蘑菇湖(级)、玄武湖(级)、墨水湖(级)、东山湖(级)。将评价结果与湖库实际水质景观相对照:洱海、邛海、博斯腾湖等在实际中都没有发现有用水障碍情况;磁湖、巢湖等部分出现水华,有碍观瞻;玄武湖、墨水湖和广州东山湖全湖出现水华,严重影响养殖观瞻。评价结果与事实相符,且等级分布图详细地刻画了各湖库富营养化程度,达到了比传统评价方法更细致的效果。

(2)由表5,同样的评价指标下,评价方法不同导致其最终结果有所差异,这种差异反映出不同方法的优劣特点。

①单一指标法以各指标的最大等级作为最终结

果,评价结果偏严格,有利于富营养化风险防范。但该方法以点带面,往往不能客观反映实际情况。如在洱海、巢湖实例中,单一指标法的评价等级明显高于其他三种方法,有失偏颇。

②Gamma-云模型评价结果介于单一评价法和模糊综合法、云模型方法之间。对于评价结果有出入的邛海、玉桥水库例,从各指标确定度的角度分析认为:邛海例中,Chl-a 指标下隶属于等级 Ⅱ 的确定度较高,而 Chl-a 作为富营养化的生物指标起主导作用,故 Gamma-云模型的最终评价结果为 Ⅱ 级。玉桥水库例中,虽然 SD 指标下隶属于 Ⅱ 级的确定度接近于 1,然而 SD 在 AHP 分析下是最次要指标(权重仅 0.1657);对于 Chl-a、TP、TN 指标,虽然隶属 Ⅱ 级的确定度小于 SD 下 Ⅱ 级的确定度,但由于指标权重重大,故最终评价结果为 Ⅱ 级。

(3)由图 3 所示的各湖库确定度分布图,对于相同的富营养化等级结果,能通过确定度分布峰值高低和坡度的陡缓对富营养化程度进行区分。例如对于甘棠湖、西湖、蘑菇湖和墨水湖例,虽然评价结果均为等级 Ⅱ,但由图 3 可得富营养化严重程度依次为甘棠湖<西湖<蘑菇湖<墨水湖。

## 5 结论

基于富营养化评价中概念分布的非对称性和“单侧受限”假设,提出了基于 Gamma-云模型的富营养化评价方法。实例分析表明,Gamma-云模型深入考虑评价细节,且方法简明有效,为湖库等水体富营养化评价工作提供了新的思路。该方法亦可应用于相关领域的评价工作。

Gamma-云模型参数的确定有一定主观性,尚未有较为完备的理论;此外权重的客观确定对评价结果的影响较大,需要进一步研究论证。

### 参考文献:

- [1] Organization for Economic Co-operation and Development. Eutrophication of waters: monitoring, assessment and control [R]. 1982.
- [2] 蔡庆华. 湖泊富营养化综合评价方法[J]. 湖泊科学, 1997,9(1):89-94. (CAI Qinghua. On the comprehensive evaluation method for lake eutrophication[J]. Journal of Lake Science, 1997,9(1):89-94. (in Chinese))
- [3] 李祚泳, 郭淳, 汪嘉杨, 等. 突变模型势函数的一般表示式及用于富营养化评价[J]. 水科学进展, 2010,21(1):101-106. (LI Zuoyong, GUO Chun, WANG Jiayang, et al. Generalized expression of potential function in catastrophe model and its application in eutrophication evaluation [J]. Advances in Water Science, 2010,21(1):101-106. (in Chinese))
- [4] 张亦飞. 湖泊富营养化综合评价的距离测度模型 [J]. 水利学报, 2008,38(4):472-475. (ZHANG Yifei. Relative distance measure model for eutrophication comprehensive evaluation of lake [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008,38(4):472-475. (in Chinese))
- [5] 金菊良, 吴开亚, 郗建强. 巢湖水质安全评价的对应分析和投影追踪熵耦合方法 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2007,6:7-13. (JIN Juliang, WU Kaiya, LI Jianqiang. Entropy coupling method of evaluating Chaohu Lake water quality security using correspondence factor analysis and projection pursuit[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2007,39(6):7-13. (in Chinese))
- [6] 丁昊, 王栋. 基于云模型的水体富营养化程度评价方法 [J]. 环境科学学报, 2013,33(1). (DING Hao, WANG Dong. The evaluation method of water eutrophication based on cloud model [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013,33(1). (in Chinese))
- [7] 李德毅, 孟海军. 隶属云和隶属云发生器 [J]. 计算机研究与发展, 1995,32(6):15-20. (LI Deyi, MENG Haijun. Membership clouds and membership cloud generators [J]. Journal of Computer Research and Development, 1995,32(6):15-20. (in Chinese))
- [8] Zhang J C, Hu G Y. Application of uncertainty reasoning based on cloud model in time series prediction[J]. Journal of Zhejiang University Science, 2003,4(5):578-583.
- [9] 刘登峰, 王栋, 丁昊, 等. 城市水灾害风险等级的 RBF-C 评估方法 [J]. 人民黄河, 2014,36(1):8-10. (LIU Dengfeng, WANG Dong, DING Hao, et al. A risk assessment method Based on RBF artificial neural network-cloud model for urban water disaster [J]. Yellow River, 2014,36(1):8-10. (in Chinese))
- [10] 刘常昱, 李德毅, 杜鹃, 等. 正态云模型的统计分析 [J]. 信息与控制, 2005,34(2):236-239. (LIU Changyu, LI Deyi, DU Yi, et al. Some statistical analysis of the normal cloud model [J]. Information and Control, 2005,34(2):236-239. (in Chinese))
- [11] 李德毅, 刘常昱. 论正态云模型的普适性 [J]. 中国工程科学, 2004,6(8):28-34. (LI Deyi, LIU Changyu. Study on the universality of the normal cloud model [J]. Engineering Science, 2004,6(8):28-34. (in Chinese))
- [12] 舒金华. 我国湖泊富营养化程度评价方法的探讨[J]. 环境污染与防治, 1990,12(5):2-7. (SHU Jinhua. The assessment methodology for eutrophication level of lakes in China[J]. Environmental Pollution & Control, 1990, 12(5):2-7. (in Chinese))
- [13] Saaty T L. The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resources allocation [J]. Mc Graw-Hill, 1980.
- [14] 陈守煜, 郭瑜. 水质综合评价的模糊可变集合方法 [J]. 水资源保护, 2005,21(6):19-22. (CHEN Shouyu, GUO Yu. Variable fuzzy sets and its application in comprehensive risk evaluation for flood-control engineering system [J]. Fuzzy Optimization and Decision Making, 2005,21(6):19-22. (in Chinese))

(下转第 60 页)

- a concentration in small reservoirs in south China[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2009,15(1):64-71. (in Chinese))
- [4] 陈宇炜,高锡云. 浮游植物叶绿素 a 含量测定方法的比较测定[J]. 湖泊科学, 2000,12(2): 185-188. (CHEN Yuwei, GAO Xiyun. Comparison of two methods for phytoplankton chlorophyll -a concentration measurement[J]. Journal of Lake Science, 2000,12(2):185-188. (in Chinese))
- [5] 国家环保总局,水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法(第四版)[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2002. (State Environmental Protection Administration of China, Editorial Board of Water and Wastewater Monitoring and Analyzing Method. Water and Wastewater Monitoring and Analyzing Method (the 4th edition) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. (in Chinese))
- [6] 田美影,王学东,马雪姣,等. 白洋淀气候变化及对生态系统的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2013,12(3):76-80. (TIAN Meiyong, WANG Xuedong, MA Xuejia, et al. Climate change in the Baiyang Lake and its impact on ecological system [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science&Technology, 2013,12(3):76-80. (in Chinese))

### Comparison of Different Methods for Phytoplankton Chlorophyll-a Concentration Measurement: A Study Case of Water in Baiyangdian Area

WANG Yufang<sup>1</sup>, YANG Shibin<sup>1</sup>, LIU Deyin<sup>1</sup>, ZHOU Xushen<sup>2</sup>

(1. Management Bureau of Haihe River Lower Reaches, HWCC, Tianjin 300061, China;

2. Haihe River Basin Water Environment Monitoring Center, Tianjin 300170, China)

**Abstract:** This study compared the 4 methods for phytoplankton chlorophyll-a concentration measurement, i.e. the hot ethanol extraction method, acetone extraction method, BBE fluoroprobe instrumental method and YSI 6600 instrumental method. The hot ethanol extraction method is used widely in the world now and the acetone extraction method is normally used in China. The study results show that there is a good comparability on measurement results between ethanol extraction method and the BBE fluoroprobe instrumental method. The concentration value level may be overestimated by the acetone extraction method. Some difference of results may be existed between the YSI 6600 instrumental method and hot ethanol extraction method. The results of BBE fluoroprobe instrumental method can be partially adopted. The results of YSI 6600 instrumental method can be used as a reference value of the experiment. The omission of centrifugation in the acetone extraction method caused some differences to the results.

**Key words:** Chlorophyll-a; hot ethanol extraction method; acetone extraction method

(上接第 50 页)

### Gamma-Cloud Model for Eutrophication Evaluation

LIU Dengfeng<sup>1</sup>, WANG Dong<sup>1</sup>, DING Hao<sup>2</sup>, ZHANG Liyuan<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Surficial Geochemistry, MOE, Department of Hydrosociences, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing 210046, China; 2. Taihu Basin Authority, Shanghai 200434, China; 3. Water Resources Service Center of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** An eutrophication evaluation method of Gamma-Cloud model was proposed based on the theory of cloud model, with the assumption of asymmetry and unilateral constraint in membership distribution. Numeric characteristics of Gamma-Cloud model belonging to each eutrophication level were determined according to the established indicators; and the weight was calculated by analytic hierarchy process to generate Gamma-Cloud models of all indicators. Distribution of the certainty degrees belong to each level were determined after weight calculation; and the eutrophication level corresponding to the maximum certainty degree is the final evaluation. 12 lakes and reservoirs were evaluated with this model. Comparative researches with the methods of single index, variable fuzzy sets and normal cloud model shows that Gamma-Cloud model is effective and provides a new way of eutrophication evaluation.

**Key words:** cloud model; Gamma distribution; AHP; eutrophication evaluation; water environment