

三峡库区小江流域水体富营养化的模糊评价

裴廷权¹, 王里奥¹, 韩 勇², 马培东¹, 王华梁¹, 董靖蒙¹

(1.重庆大学资源及环境科学学院, 重庆 400030; 2.重庆市环境保护局, 重庆 400015)

摘要:通过对三峡库区典型次级流域——小江流域水体实测,提出了三峡库区次级流域的评价体系及评价方法。考虑到富营养化评价标准和影响因子的不确定性,建立不同的评价指标所对应的隶属度函数,确定其权重系数和模糊综合指数。并结合库区消落带水体实际情况,选用叶绿素 a(Chla)、透明度(SD)、TP、TN 和 COD_{Mn} 为参数进行模糊综合评价。结果表明:SD、Chla、TP、TN 和 COD_{Mn} 含量差异很大,含量范围分别为:1.2~3.5 m、2.12~37.04 mg·m⁻³、0.026~0.103 mg·L⁻¹、0.681~1.643 mg·L⁻¹、1.15~3.05 mg·L⁻¹。COD_{Mn} 对水质富营养化的贡献率最小,Chla、SD、TP 和 TN 是水体中主要的污染因子。在春夏季,水域大多处于中度富营养化状态。与其他评价方法相比,该方法具有操作简单、评价客观等优点。

关键词:三峡库区;次级河流;富营养化;模糊评价;模型

中图分类号:X824 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)04-1427-05

Fuzzy Assessment of Water Utrrophication for Xiaojiang River Basin in Three Gorges Region

PEI Ting-quan¹, WANG Li-ao¹, HAN Yong², MA Pei-dong¹, WANG Hua-liang¹, DONG Jing-meng¹

(1.College of Resources and Environmental Science In Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2.Chongqing Environmental Protection Butreau, Chongqing 400015, China)

Abstract:Based on water quality investigation about typical tributary—Xiaojiang watershed of Three Gorges Region, an assessment system and evaluation method are proposed on zoning of typical tributary in Three Gorges Region. Accounting into the human-divided level indeterminacy of utrophication evaluation standard and influencing factors, establishing the corresponding membership functions of different valuation indices, ascertaining the value of weight and fuzzy comprehensive indexes. Combining the actual situation with water-level-fluctuating in reservoir area. Five valuation indexes including transparency(SD), chlorophyll-a(Chla), TP, TN, and COD_{Mn} are selected to evaluate the eutrophication by using comprehensive evaluation method. The results show that value of SD、Chla、TP、TN and COD_{Mn} are quite different, which are 1.2~3.5 m, 2.12~37.04 mg·m⁻³, 0.026~0.103 mg·L⁻¹, 0.681~1.643 mg·L⁻¹, 1.15~3.05 mg·L⁻¹ respectively. The contribution rate of COD_{Mn} for water eutrophication is the least, the major pollutant factors are Chla, SD, TP, and TN in water. Xiaojiang river water is in middle eutrophication state in spring or summery, the water quality of reservoirs has different eutrophication trend. Compared with other assessment methods, which have the advantages such as simple operation and objective evaluation. comprehensive evaluation method is reasonable and practicable, It also could reflect the variety of good or bad quality for the reservoir area. Further study must start urgently and new countermeasures could be found consequently. which provides reference for pollution control and comprehensive utilization in reservoir area.

Keywords:Three Gorges Region; tributary; eutrophication; fuzzy assessment; model

举世瞩目的三峡工程已经蓄水到 156 m 水位,蓄水后长江干流水质基本无变化,仍能保持Ⅱ~Ⅲ类水质,但次级河流由于长江的顶托作用出现了不同程度的水华现象。2008 年,三峡水库即将蓄水到 172 m 或 175 m,这将对三峡库区生态环境的结构和功能带来

深远影响。高水位形成后,上游水势将由原来的急流直下转为平缓流淌。由于调节径流改变了库区河流的水文水利条件,将形成高达 30 m 的消落区,对水质的改变又是一个重要影响因素。可能会加剧污染物在沿岸一定范围内的滞留时间,造成水体的恶化。由于水体自净能力下降,消落区富营养化相关物质(如 N、P)污染会进一步加剧,引起三峡库区局部水域出现富营养化,从而导致蓝绿藻水华暴发,严重威胁库区的水环境质量。

收稿日期:2008-02-26

基金项目:重庆市发展和改革委员会,重庆市科学技术委员会项目(03-26)

作者简介:裴廷权(1980—),男,博士研究生,主要研究方向为环境评价、固体废弃物污染控制及资源化。E-mail:ptqok666@163.com

目前,针对水质评价的方法很多,主要有神经网络评价、营养度指数法、属性识别理论方法^[1]、坡度加权评分法^[2]、多目标决策理想区间法^[3]等。这些评价方法在水体富营养化评价的应用中取得了良好的效果,但这些方法各有自身的适用条件和局限性,至今尚未形成标准的评价模式。而影响水体富营养化的环境因子很多,仅仅依据某一方面建立确定性的水体富营养化评价,评价的结果往往比较片面。并且评价因子在综合评价中应占多大权重也是不明确的,导致富营养化评价方法具有很强的不确定性^[4],且不同水质指标对水体污染贡献率不同,而且水体水质的影响因素很多,它们具有不精确、不确定和不完全性的特征^[5],这也无疑增加了水质评价的难度。模糊综合评价采用隶属函数描述水质污染分级界限,克服了以往单因子评价的缺点,充分考虑了各项指标在总体评价中贡献差异和评价等级过度的不确定性。可对多指标进行综合评价,更能全面客观地对水体富营养状态进行评价。

针对三峡库区消落区水环境问题较为突出的状况,利用模糊综合模型对库区典型次级河流——小江流域进行富营养化评价。分析当前库区水体富营养程度和消落区初步形成后局部流域将出现的水华现象,对保障成库后水环境质量、生态系统完整性都具有积极的意义,也为三峡库区水体污染的防治提供科学依据。

1 研究方法

三峡工程蓄水后,库区消落带初步形成,考虑到库区次级河流——小江水域消落带的水位变化最为明显。表现为小江流域受到长江干流水顶托后,水位上升淹没面积较大,流速明显变缓,极有可能发生富营养化。因此,断面采样点选择在小江流域消落带范围内。

1.1 监测断面的布设

小江流域是位于三峡库区腹心地带的长江一级支流,发源于重庆市开县白泉乡,经云阳县双江镇汇入长江,主河长约 182.4 km,流域消落带面积为 38.68 km²,占库区消落带总面积 13.2%,是三峡库区面积最大的消落带。从消落带内的云阳、开县境内布点采样,每 1 km 布置一个采样断面,共布设了 8 个断面,采样断面设置以及水样采取按照《地表水和污水监测技术规范》(HJ/T91—2002)要求进行。根据三峡二期蓄水后流域的观测,次级河流水华发生时间多在春夏季,夏季三峡水库为低水位运行,消落带为成陆时间。春

季,库区水位处于缓慢下降阶段,消落带大多处于淹没期,为使评价消落带水体的富营养化程度准确性更高,故采样时间选择在 2006 年春末夏初(5 月)。

1.2 分析方法

主要对表征水质项目中的叶绿素 a(Chla)、总磷(TP)、总氮(TN)、透明度(SD)、高锰酸钾指数(COD_{Mn})等指标项目进行了监测,所有项目均用采水器在水面下 0.5 m 处采样。分析方法见表 1,监测结果见表 2。

表 1 水质监测项目和分析方法

Table 1 The water quality measuring items and analysis methods

监测项目	分析方法	检出限	方法来源
Chla	分光光度计		(1)
TP	钼锑抗分光光度法	0.01~0.6 mg·L ⁻¹	(2)
TN	碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法	0.05~4.0 mg·L ⁻¹	GB11894—89
SD	铅字法		(2)
COD _{Mn}	酸性法	0.5~4.5 mg·L ⁻¹	GB11892—89

注:(1):《湖泊富营养化调查规范(第二版)》,(2):《水和废水监测分析方法(第四版)》

表 2 富营养化指标监测结果

Table 2 Measuring results of eutrophication indexes

断面序号	SD/m	Chla/mg·m ⁻³	TP/mg·L ⁻¹	TN/mg·L ⁻¹	COD _{Mn} /mg·L ⁻¹
1	3.5	2.12	0.026	0.681	1.64
2	1.8	22.89	0.088	1.177	1.96
3	1.4	4.13	0.064	0.820	1.15
4	2.2	4.95	0.055	0.710	1.29
5	1.3	19.88	0.069	1.643	2.70
6	1.2	37.04	0.074	1.445	3.05
7	2.2	15.40	0.098	1.495	2.21
8	2.3	11.27	0.103	1.415	2.14

由表 2 可知,各断面指标差异较大,尤其是 Chla 指标差异最大,范围在 2.12~37.04 mg·m⁻³。从断面位置上看,Chla、TP、TN 指标较高的断面主要发生在水流流速较缓的回水湾处。

2 水体富营养化模糊综合评价

2.1 模糊综合评价理论

模糊理论较之传统数学经典数学研究对象的确定性而言,更适合研究具有不确定的对象以及对象之间的模糊关系。模糊数学理论的内容包括:模糊聚类分析、模糊模型识别、模糊决策、模糊线性规划等方面,而模糊综合评价就是模糊决策中的一种具体方法。综合评价是指综合考虑受多种因素影响的事物或

系统时其进行总的评价,模糊综合评判就是指当评价对象具有模糊性时,采用模糊数学的理论和方法对受多个因素所影响的事件或现象作总的评价。

当影响决策评价的因素或指标有 n 项时可以构成一个因素集 U :

$$U=\{u_1,u_2,\cdots,u_n\}$$

而评判这些因素或指标的等级有 m 项时,构成评价集 V :

$$V=\{v_1,v_2,\cdots,v_m\}$$

$V_1, V_2, \dots, V_m$ 为与 U_i 相应的评价标准的子集,因为评价是模糊性的,为了便于计算,须对评价进行量化处理。常用的方法是对评价的各个等级实行记分制,可以采用“5 分制”或“百分制”,这可根据评价等级的多寡和评价要求而定。由于各个因素所处的地位、作用不同,其权重不相同,因而最终的评判也就不同。对 m 种评判不是采用绝对的肯定或否定,因此综合评价就是建立在 V_j 上的一个模糊子集 B 。

$$B=(b_1,b_2,\cdots,b_m)\in F(V)$$

根据模糊映射与模糊变换,可推导出模糊关系 R_j ,此模糊关系可用矩阵 R 表示, R 称为模糊关系矩阵或综合评判的变换矩阵。

$$R=(r_{ij})=\begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \dots \\ R_n \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} r_{11}\cdots r_{13}\cdots r_{1m} \\ r_{21}\cdots r_{23}\cdots r_{2m} \\ \dots \\ r_{n1}\cdots r_{n3}\cdots r_{nm} \end{bmatrix}$$

矩阵 R 就是从因子 U_i 出发进行评价的结果,但单因子模糊评价仅仅反映一个因子对评价对象的影响,而未反映所有因子的综合影响。进而需要进一步考虑其他因素的影响,进行多因子综合评价。

r_{ij} 表示第 i 种污染物的环境质量数值,可以被作为第 j 级环境质量的可能性,即 i 对 j 的隶属度。故模糊关系矩阵的第 i 行 $R_i=(r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}, \dots, r_{im})$, $i=1,2,3,\dots,m$,实际上代表了第 i 个因子对各级环境质量标准的隶属性。而模糊关系中的第 j 列, $R_j=(r_{1j}, r_{2j}, r_{3j}, \dots, r_{mj})$, $j=1,2,3,\dots,n$,则代表了各个污染因子对第 j 个因子对各级环境质量标准的隶属性。

评价因子集 U 的模糊子集^[6]: $A=(a_1, a_2, \dots, a_n)$,式中: a_i 表示单因素 U_i 在所有因素中所起作用的度量,可以看作第 i 种污染因子在环境质量众多因子中的权重系数。在模糊向量 A 和模糊关系矩阵 R 已知时,模糊综合评价模型可表达为:

$$B=A \cdot R \quad (1)$$

式子: $B=\{b_1, b_2, \dots, b_m\}$; $b_j=\sum_{i=1}^n a_i r_{ij}$, ($i=1,2,3, \dots, n$;

$j=1,2,3,\dots,m$),模糊综合指数 $b_0=\max\{b_j\}$; $j=1,2,3,\dots,m$ 。

其中: b_j 为 j 评价指标,它反映了第 j 种评判 V_j 在综合评价中所占的地位,即 V_j 对综合评定模糊子集中的隶属度,也就是第 j 级的环境质量标准对综合环境分级指数的隶属程度。

2.2 模糊综合评价模型的构建

2.2.1 评价因子的选取

由于影响水体富营养化的因素较多,评价因子的选取直接影响到综合评价的效果,考虑了库区水体富营养化的主要影响因素及富营养化时所反映出来的特征^[7]。并结合库区消落带水体实际情况,选择 Chla、TP、TN、SD、COD_{Mn} 作为模糊评价的评价因子。

2.2.2 确定分级评价标准

水体发生富营养化与水体中营养物质 TP、TN、Chla 等关系密切,参考国内对水库湖泊富营养化评价和研究^[7,8],并根据研究区实际情况,建立小江流域消落带水体的富营养化评价标准,见表 3。评价标准中将“清洁”与“污染”之间分界点的值定义为基点值。当水质标准分为五级时,可以将中间一级,即第 3 级的值定义为基点值^[9]。

表 3 水体富营养化评价标准
Table 3 Evaluated classes of water eutrophication

监测指标	贫营养 (I)	中营养 (II)	富营养 (III)	中富营养 (IV)	重富营养 (V)	C_{ij}
TP/mg·L ⁻¹	<0.005	0.025	0.05	0.11	>0.66	0.05
TN/mg·L ⁻¹	<0.007 9	0.31	0.65	1.2	>2.3	0.65
COD _{Mn} /mg·L ⁻¹	<0.48	1.8	3.6	7.1	>14	3.6
Chla/mg·m ⁻³	<0.1	3	10	20	>40	10
SD/m	>4.0	1.5	1.2	0.5	<0.12	1.2

注: C_{ij} 为评价参数 i 的第 j 级水质富营养化的分级基点值。

2.2.3 构造隶属度函数方程

隶属度系指某种事物所属某种标准值的程度,是模糊综合评价模型的重要模糊算子,只有通过建立隶属度函数方程式,才能进行模糊映射分析^[10]。

隶属函数的确定:模糊关系矩阵 R 代表了每一个污染因子对每一级环境质量标准的隶属程度,因此,可以把隶属度看成污染物的浓度和环境质量标准的函数,根据水质分级标准,通过取线形函数来确定各级水体的隶属函数。

假设某个污染因子的参数实测值为 x_i ,那么这个因子对各个环境质量级的隶属度如下表示:对于评价等级 I,构造隶属度方程为:

$$S_{ij}=r_{ij}=\begin{cases} 1 & x_i \leq c_{ij} \\ \frac{(x_i - c_{ij})}{(c_{i(j+1)} - c_{ij})} & c_{ij} < x_i < c_{i(j+1)} \\ 0 & x_i \geq c_{i(j+1)} \end{cases} \quad (2)$$

对于评价等级 II-IV,构造隶属度函数为:

$$S_{ij}=r_{ij}=\begin{cases} 1-s_{i(j-1)} & c_{i(j-1)} < x_i < c_{ij} \\ \frac{(c_{i(j+1)} - x_i)}{(c_{i(j+1)} - c_{ij})} & c_{ij} < x_i < c_{i(j+1)} \\ 0 & x_i \geq c_{i(j+1)} \text{ 或 } x_i \leq c_{i(j-1)} \end{cases} \quad (3)$$

对于评价等级 V,构造隶属度方程为:

$$S_{ij}=r_{ij}=\begin{cases} 0 & x_i \leq c_{i(j-1)} \\ \frac{(x_i - c_{i(j-1)})}{(c_{ij} - c_{i(j-1)})} & c_{i(j-1)} < x_i < c_{ij} \\ 1 & x_i \geq c_{ij} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $S_1(x_i), S_{11}(x_i), \dots, S_j(x_i)$ 分别为环境质量 x_i 对一级,二级, $\dots, j$ 级环境质量的隶属度,且假设隶属度为线性函数。

2.3 模糊综合评价指数的评价

2.3.1 权重系数的确定

污染因子的权重系数是衡量参加评价各污染因子对水体环境质量影响的大小,在模糊水质评价中,权重系数常用于描述其对水质污染的重要性,采取污染贡献率求污染因子权重系数。计算式为:

$$a_i = \frac{x_i / c_{ij}}{a_i^*} \quad (5)$$

其中: $a_i^* = \sum_{i=1}^n x_i / c_{ij}$; x_i 表示污染物的实测浓度; a_i 为第 i 种污染因子在环境质量评价众多因子中的权重系数。权重系数 a_i 的计算:将各个指标的实测浓度和基点值(表 2、表 3)代入公式(5)中,可计算各污染因子的权重系数,见表 4。

表 4 各污染因子的权重系数

Table 4 The item weights of different index

项目	SD	Chla	TP	TN	COD _{Mn}
1	0.566	0.041	0.101	0.203	0.089
2	0.190	0.290	0.223	0.229	0.068
3	0.263	0.093	0.288	0.284	0.072
4	0.376	0.101	0.226	0.224	0.076
5	0.140	0.257	0.179	0.327	0.097
6	0.090	0.399	0.181	0.239	0.091
7	0.222	0.187	0.238	0.279	0.074
8	0.243	0.143	0.262	0.276	0.076

从表 4 可以看出,污染因子在各断面的权重系数分布不均,COD_{Mn} 的权重系数相对较小,说明 COD_{Mn}

对库区的污染贡献最小。Chla、SD、TP、TN 的权重系数相差不大,是影响库区次级河流富营养的主要污染参数。

2.3.2 隶属函数矩阵形式的确定

将表 2 和表 3 中数据代入公式(2)、公式(3)、公式(4)中,可求得各监测指标隶属函数的矩阵形式为:

$$S^{(SD)} = \begin{bmatrix} 0.80 & 0.20 & 0 & 0 & 0 \\ 0.12 & 0.88 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.667 & 0.333 & 0 & 0 \\ 0.28 & 0.72 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.333 & 0.667 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.714 & 0.286 & 0 \\ 0.28 & 0.72 & 0 & 0 & 0 \\ 0.32 & 0.68 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$S^{(Chla)} = \begin{bmatrix} 0.697 & 0.303 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.856 & 0.145 \\ 0 & 0.839 & 0.161 & 0 & 0 \\ 0 & 0.721 & 0.279 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.012 & 0.988 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.148 & 0.852 \\ 0 & 0 & 0.46 & 0.54 & 0 \\ 0 & 0 & 0.873 & 0.127 & 0 \end{bmatrix}$$

$$S^{(TP)} = \begin{bmatrix} 0 & 0.96 & 0.04 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.367 & 0.633 & 0 \\ 0 & 0 & 0.767 & 0.233 & 0 \\ 0 & 0 & 0.917 & 0.083 & 0 \\ 0 & 0 & 0.683 & 0.317 & 0 \\ 0 & 0 & 0.433 & 0.567 & 0 \\ 0 & 0 & 0.20 & 0.80 & 0 \\ 0 & 0 & 0.117 & 0.883 & 0 \end{bmatrix}$$

$$S^{(TN)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.944 & 0.056 & 0 \\ 0 & 0 & 0.042 & 0.958 & 0 \\ 0 & 0 & 0.691 & 0.309 & 0 \\ 0 & 0 & 0.891 & 0.109 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.597 & 0.403 \\ 0 & 0 & 0 & 0.777 & 0.223 \\ 0 & 0 & 0 & 0.732 & 0.268 \\ 0 & 0 & 0 & 0.805 & 0.195 \end{bmatrix}$$

$$S^{(COD_{Mn})} = \begin{bmatrix} 0.879 & 0.121 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.911 & 0.089 & 0 & 0 \\ 0.508 & 0.492 & 0 & 0 & 0 \\ 0.614 & 0.386 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.50 & 0.50 & 0 & 0 \\ 0 & 0.306 & 0.694 & 0 & 0 \\ 0 & 0.772 & 0.228 & 0 & 0 \\ 0 & 0.811 & 0.189 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

2.3.3 模糊综合评价指数与评价结果

将隶属函数的矩阵 $S^{(SD)}$ 、矩阵 $S^{(Chla)}$ 、矩阵 $S^{(TP)}$ 、矩阵 $S^{(TN)}$ 、矩阵 $S^{(COD_{Mn})}$ 和表 4 中的数据代入公式(1): $B=A \cdot R$,可得消落带水体综合评价指数。在对消落带水体富营养化程度进行评价时,取叠加隶属度函

数最大等级为消落带水体对应的富营养化状态,评价结果见表 5。

表 5 消落带水域富营养化模糊综合指数

Table 5 Fuzzy assessment comprehensive indexes of water eutrophication in water-level-fluctuating-zone

断面	贫营养 (I)	中营养 (II)	富营养 (III)	中富营养 (IV)	重富营养 (V)	评价等级
1	1.745	1.329	1.895	0	0	III
2	0.880	1.031	0.510	1.724	0.855	IV
3	0.508	1.664	1.904	0.924	0	III
4	1.334	0.945	2.529	0.192	0	III
5	0	1.167	1.529	1.902	0.403	IV
6	0	0.306	1.480	2.122	1.093	IV
7	0.720	1.052	0.888	2.072	0.268	IV
8	1.491	0.509	0.990	1.815	0.195	IV

从表 5 可以看出,8 个断面中,5 个断面的富营养化程度为中度富营养,3 个断面为富营养。结果表明,三峡库区蓄水后次级流域——小江水域春夏季的富营养化程度较为严重,富营养化已成为三峡水库次级河流的主要环境问题之一。

3 结论

三峡水库蓄水后库区干流水质良好,但支流污染加重。对三峡库区典型次级河流——小江水域布点采样并进行富营养化模糊综合评价。结果表明,COD_{Mn}对库区的污染贡献最小,Chla、SD、TP、TN 是影响库区次级河流富营养的主要污染参数。春末夏初季节,在小江水域 8 个断面中,5 个断面的富营养化程度为中度富营养,其余 3 个断面为富营养。而在适合的条件下,就会导致不同程度“水华”现象发生。这表明,次级河流消落带的富营养化将严重威胁库区环境和水资源质量。

模糊综合评价方法考虑了一系列不同指标对水体水质的影响,能够比较客观地反映库区的水体富营养状态。可以弄清各个污染指标在总体评价中的权重和评价指标隶属度,并且能准确判断在决定水质级别方面的重要污染指标,为今后库区水质污染防治措施提供技术支持。

参考文献:

[1] 孔健健,张江山. 属性识别理论模型在湖泊水质富营养化评价中的应用[J]. 环境工程, 2004, 22(5): 66-69.

KONG Jian-jian, ZHANG Jiang-shan. Application of attribute recognition theoretical model to evaluation of lake eutrophication [J]. *Environmental Engineering*, 2004, 22(5): 66-69.

[2] 邓大鹏, 刘 刚, 李学德, 等. 湖泊富营养化综合评价的坡度加权评分法[J]. 环境科学学报, 2006, 26(8): 1386-1392.

DENG Da-peng, LIU Gang, LI Xue-de, et al. Slope weighted scoring method for eutrophication comprehensive evaluation of lake[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(8): 1386-1392.

[3] 杨晓华, 杨志峰, 郦建强, 等. 水环境质量综合评价的多目标决策-理想区间法[J]. 水科学进展, 2004, 15(2): 202-205.

YANG Xiao-hua, YANG Zhi-feng, LI Jian-qiang, et al. Multiple objective decision making-ideal interval method for comprehensive assessment of water environmental quality [J]. *Advances In Water Science*, 2004, 15(2): 202-205.

[4] 谢 平, 李 德, 陈广才, 等. 基于贝叶斯公式的湖泊富营养化随机评价方法及其验证[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(2): 224-227.

XIE Ping, LI De, CHEN Guang-cai, et al. A lake eutrophication stochastic assessment method by using bayesian formula and its verification[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, 14(2): 224-227.

[5] 吴义锋, 吕锡武, 何雪梅, 等. 不确定信息下的水体污染因子粗糙分析[J]. 系统工程理论与实践, 2006(4): 136-140.

WU Yi-feng, LU Xi-wu, HE Xue-mei, et al. Rough analysis on aquatic pollutant factors under uncertainty[J]. *Systems Engineering Theory & Practice*, 2006(4): 136-140.

[6] 朱 雷, 陈 威. 模糊综合指数法在水质评价中的应用[J]. 武汉理工大学学报, 2001, 23(8): 62-65.

ZHU Lei, CHEN Wei. Fuzzy complex index in water quality assessment of municipalities[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2001, 23(8): 62-65.

[7] 孔健健, 张江山. 福州第二水源山仔水库营养类型的判定及变化趋势分析[J]. 安全与环境工程, 2004, 11(3): 65-67.

KONG Jian-jian, ZHANG Jiang-shan. Decision and variation tendency of trophic type of Shanzi Reservoir, Fuzhou[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2004, 11(3): 65-67.

[8] 郑丙辉, 张 远, 富 国, 等. 三峡水库营养状态评价标准研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(6): 1022-1030.

ZHENG Bing-hui, ZHANG Yuan, FU Guo, et al. On the assessment standards for nutrition status in the Three Gorge Reservoir[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(6): 1022-1030.

[9] 刘培桐. 环境学概论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1995, 166-169.

LIU Pei-tong. *Environmental Science Conspectus*[M]. Beijing: Higher Education Press, 1995, 166-169.

[10] 庞清江, 李白英. 东平湖水体富营养化评价[J]. 水资源保护, 2003(5): 42-44.

PANG Qing-jiang, LI Bai-ying. Evaluation of water eutrophication of Dongping Lake[J]. *Water Resources Protection*, 2003(5): 42-44.