

文章编号:1672-3031(2019)03-0226-07

改进的模糊综合评价法在洱海水质评价中的应用

张倩, 李国强, 诸葛亦斯, 余晓, 谭红武, 杜强

(中国水利水电科学研究院 水环境所, 北京 海淀 100038)

摘要: 针对单因子评价法评价结果未能较好地反映近年来洱海水环境治理效果这一问题, 本文系统收集了洱海1992—2015年的水质监测数据, 采用层次分析和熵权法组合赋权的模糊综合评价法, 选用多个水质指标, 从水质和湖泊富营养化两个方面出发, 对洱海水环境变化趋势进行评价, 并与单因子评价结果进行对比。结果表明: 从年际变化来看, 1992—2003年期间洱海水水质逐渐变差, 2003年之后逐渐好转, 并趋于稳定; 从年内变化来看, 洱海水水质非汛期好于汛期(6—10月), 湖中心区水质好于南部和北部。整体而言, 洱海富营养化水平由贫营养逐渐向中营养转变。与单因子评价结果相比, 采用改进的模糊综合评价法能更好地反映洱海近20年水质的动态变化特征。

关键词: 水质评价; 改进的模糊综合评价法; 单因子评价法; 洱海

中图分类号: X824

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2019.03.009

1 研究背景

洱海是我国为数不多水质良好的高原内陆湖泊, 既是大理州主要的饮用水源地, 又是苍山洱海风景名胜区和国家级自然保护区的核心区^[1], 其水质状况深受大理市、云南省乃至国家的高度关注, 洱海水质的好坏对区域经济社会发展和人民群众的生产生活安全具有重要影响。同时洱海的富营养化问题一直是洱海最为突出的水环境问题之一, 也是洱海水环境治理的关键。

国内外常用的水质评价方法有很多种, 如: 单因子评价法^[2]、物元分析法^[3]、灰色系统评价法^[4]、人工神经网络模型^[5]、传统模糊综合评价^[6]等。单因子评价法虽计算简单, 但其评价结果过于保守, 不能反映综合水质类别; 物元分析法与灰色系统评价法虽理论可行, 但不能直观地反映不同评价对象综合水质的污染程度; 人工神经网络模型的自适应能力较强, 可用于非线性的大型复杂系统, 但模型参数主观性强且计算的工作量大; 传统模糊综合评价法的评价结果较符合实际, 但在隶属度矩阵、权重选用方面存在不足。

目前, 洱海水质评价结果显示近20年来洱海水水质基本未发生变化。实际上, 自1990年代初期洱海水水质逐年变差, 为了恢复洱海水水质, 大理市政府相继采取了污染源治理、加强水资源调控、提高洱海自净能力等一系列举措。但单因子评价法选取最差指标进行评价, 评价结果未能反映出洱海采取的一系列污染控制和治理措施的效果, 很大程度上影响了人们对各项工程和非工程措施效果的判别, 不利于洱海水环境的保护与治理。同时, 近年来对洱海富营养现状及趋势变化的定量分析较少, 因此, 有必要选取更为全面、准确、方便的评价方法, 以提高湖泊水质评价的精度。改进的模糊综合评价法对隶属度矩阵和权重进行了优化, 提出以水质标准上下限的中间值作为隶属函数的界限值, 以及针对不同权重的特点, 对权重赋值方式进行有效结合, 形成优势互补的组合赋权。

基于以上认识, 结合洱海长序列水质监测数据, 采用组合赋权的模糊综合评价法对洱海水水质和富营养化进行评价。

收稿日期: 2018-11-08

基金项目: 中国水科院基本科研业务费项目(WE0145C162018)

作者简介: 张倩(1993-), 硕士生, 主要从事水环境研究。E-mail: 495545527@qq.com

2 评价区域和评价指标

2.1 流域概况 洱海流域位于金沙江、澜沧江和元江三大水系分水岭地带,属澜沧江-湄公河水系,流域面积 2565 km²^[7],年均降水量 961 mm,年蒸发量为 1246 mm,年平均气温 15.7℃。洱海水位 1966 m 时(85 高程),南北长 42.0 km,东西宽最大 8.8 km,最小 3.05 km,最大水深 21.3 m,平均水深 10.8 m^[8],湖面面积 252.9 km²,湖岸线长 129.14 km,蓄水量 27.94 亿 m³。洱海是一个较为典型的内陆断陷盆地^[9],湖心深,南北浅。洱海湖水主要来源于地表径流和降水,多年平均入湖径流量为 7.39 亿 m³,主要的入湖河流有 23 条,其中北有弥苴河、永安江、罗时江,西含苍山十八溪,南纳波罗江,以及东侧的风尾箐^[10]。西洱河是洱海唯一的天然出湖河流,最终汇入澜沧江。流域水系详见图 1。

2.2 评价指标及标准 本文系统的收集了洱海 5 个监测点 1992 年—2015 年逐年水质数据^[11-13]以及大理州环境监测站 2016 年内汛期(6—10 月)和非汛期的水质数据,选取在水环境污染中起主要作用的指标作为评价因子,主要包括透明度、高锰酸盐指数、总氮、总磷、叶绿素 a 等,地表水水质评价标准选用《地表水环境质量标准》(GB3838-2002),水体富营养化评价标准参考国内部分湖泊的评价标准和以往学者的研究结果^[14],见表 1。本文选取洱海桃源、塔村、小关邑、龙龕、湖心 5 个监测站点,各监测点的分布位置见图 1。

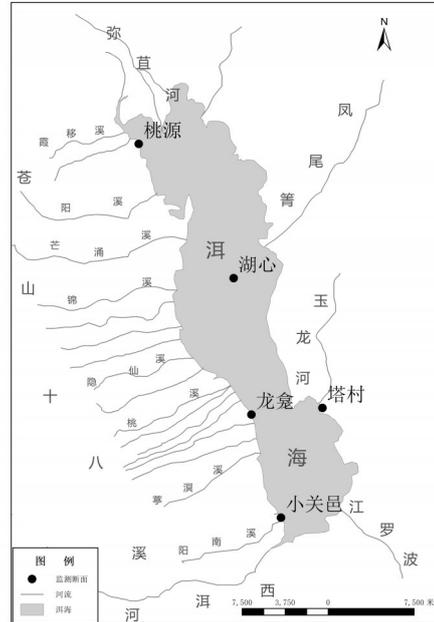


图 1 洱海水系及监测点位图

表 1 水体富营养化评价指标和评价标准

评价因子	贫营养(I)	中营养(II)	轻度富营养化(III)	中度富营养化(IV)	重度富营养化(V)
透明度/m	37	12	2.4	0.55	0.17
高锰酸盐指数/(mg/L)	1.4	2.96	6.29	13.33	28.25
总氮质量浓度/(mg/L)	0.02	0.06	0.31	1.2	4.6
总磷质量浓度/(mg/L)	0.001	0.004	0.023	0.11	0.66
叶绿素 a 浓度/(mg/L)	1	2	4	10	65

3 评价方法简介

3.1 组合赋权的模糊综合评价法 传统的模糊综合评判是基于水环境中存在复杂和不确定的模糊关系,应用模糊数学理论进行水质评价的方法^[15-16]。首先建立隶属度矩阵,根据各单项污染因子对水质的影响程度给出不同的权重,再进行复合运算,最后形成综合评价集合。该方法的缺点在于权重的差异会直接影响综合评价的计算结果。权重确定的方法通常有层次分析法、熵权法等。层次分析法仅仅是两个指标之间对比评价,不能反映出各指标之间的关系,通常会造成最大污染指标过高^[17];而熵权法削弱最大指标,使其权重分配变小。因此,仅使用其中一种方法均不够全面,致使评价结果缺少客观性^[18]。本文采用组合赋权的模糊综合评价法,利用熵权法的均衡性修正层次分析法使权重分配更加合理。

3.1.1 隶属度函数的计算 由于常规水质指标以数值小者为优,水质等级越高,其标准值越低,且水质的隶属度呈线性分布,故用降半梯形分布函数^[19]表示,公式如下:

第1级(首级)环境质量,当 $j=1$ 时,

$$r_{ij} = \begin{cases} 1 & (x_i < s_{i,j+1} > s_{ij}) \\ \frac{s_{i,j+1} - x_i}{s_{i,j+1} - s_{ij}} & (s_{ij} \leq x_i \leq s_{i,j+1}) \\ 0 & (x_i > s_{i,j+1}) \end{cases} \quad (1)$$

第 $n-1$ 级环境质量,当 $j=2, 3, \dots, (n-1)$ 时,

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

第 n 级(中间级)环境质量,当 $j=n$ 时

$$r_{ij} = \begin{cases} 0 & (x_i < s_{i,j-1}) \\ \frac{x_i - s_{i,j-1}}{s_{ij} - s_{i,j-1}} & (s_{i,j-1} \leq x_i \leq s_{ij}) \\ 1 & (x_i > s_{ij}) \end{cases} \quad (3)$$

其中: x_i 表示评价指标 i 的实际检测浓度值; $s_{i,j-1}$, s_{ij} , $s_{i,j+1}$ 分别表示第 i 项指标对应的第 $j-1$ 、 j 、 $j+1$ 级水质类别标准值。

3.1.2 权重的计算

(1)层次分析法。层次分析法是对评价指标之间进行两两比较,根据不同准则层的相对重要度构建判断矩阵,最终得出权重。该方法适用于定性与定量指标间存在层次阶梯结构的评判问题。具体步骤如下:

①根据环境背景和区域水质特征,确定评价指标 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_n\}$;

②构造判断矩阵 $C = (c_{ij})_{n \times n}$,以单项污染指数作为评价标度,建立不同准则层相对重要度的两两比较的判断矩阵;

③求出最大特征值,并对判断矩阵 C 进行一致性检验,确定权重。

(2)熵权法。“熵”是体系混乱程度的度量,可以用来度量数据中的有效信息的数量和重要,从而直观地描述指标信息熵的有效价值,并反映指标之间的相互作用。具体步骤如下:

①设 m 个评价样本, n 个评价指标,得到原始矩阵 $R = (r_{ij})_{n \times n}$, $i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$;

②将矩阵 R 归一化,得到矩阵 $C = (c_{ij})_{n \times n}$,其中 c_{ij} 表示在第 i 个评价对象下指标值 r_{ij} 的权重,

$$c_{ij} = r_{ij} / \sum_{i=1}^m r_{ij} \quad (4)$$

③计算某个指标的熵值:

$$E_j = - \left(\sum_{i=1}^m r_{ij} f_{ij} \ln c_{ij} \right) / \ln m \quad (5)$$

④计算权重:

$$A_{2j} = (1 - E_j) / \left(n - \sum_{i=1}^m E_{ij} \right) \quad (6)$$

得出熵权向量:

$$A_2 = (A_1, A_2, \dots, A_n) \quad (7)$$

(3)组合赋权法。由于层次分析法是对评价因子进行两两对比,会使权重值最大的因子对水质评价结果影响过大,熵权法对各评价因子之间的联系进行综合考虑,但会使最大污染因子权重赋值变小。因此,结合熵权法对各指标的作用具有均衡考虑的特性,同时层次分析法和熵权法具有很好的无偏性,所以将层次分析法和熵权法计算的权重作算术平均,使权重赋值更加合理。公式为:

$$A = (A_1 + A_2) / 2 \quad (8)$$

3.1.3 综合评判指数的计算 本文采用加权平均的综合评价法,充分保留水质原始数据和过程数据,避免有效信息丢失,并将水质等级量化,使评价结果更为直观。加权平均的计算公式如下:

$$B_i = \left(\sum_{j=1}^m B_j^\beta \right) / \sum_{j=1}^m b_j^\beta \quad (9)$$

式中, b_j 表示评价对象对第 j 级水质标准的隶属度; β 为加权系数, $\beta=1$ 或 $\beta=2$ 。本研究 $\beta=2$, 目的是控制较大的 b_j 所起的作用。

3.2 单因子评价法 采用单因子评价法对水体水质进行评价,首先要确定该水体的评价标准,然后比较各指标实测浓度与标准浓度值,选择最差水质指标对应的水质类别作为水质评价结果。《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)规定:“地表水环境质量评价应根据实现的水域功能类别,选取相应类别标准,进行单因子评价,评价结果应说明水质达标情况,超标的应说明超标项目和超标倍数。”

4 结果分析

4.1 洱海年际水质评价结果 首先根据评价指标对应的水质等级标准,确定隶属函数,进而建立 46 个模糊矩阵 R 。其次将 1992—2015 年监测数据带入公式中得出权重系数;最后将计算出的权重与模糊矩阵 R 相乘,得到评价指标 B , 计算出地表水水质等级 B_i 和富营养化评价等级 B_v , 见表 2。水质变化过程如图 2 所示。

由表 2 可以看出,采用单因子评价法,评价结果显示 1992—2003 年期间洱海水质为 II 类, 2003—2015 年水质为 III 类,仅反映出水质类别,无法判断随时间的变化趋势。由图 2 可见,采用组合赋权的模糊综合评价法,通过定量计算洱海 1992—2015 年水质等级 B_i 和富营养化等级 B_v , 其结果表明在 1992—2003 年期间, B_i 数值基本上呈现递增趋势,由 1.5817 增长至 2.4207, 涨幅为 54.5%, 水质由 II 类下降为 III 类, B_v 也随时间呈现波动递增的趋势,由 0.7781 增至 1.5975, 涨幅为 105.3%, 富营养水平由贫营养转化为中营养。在 2003—2015 年期间,洱海的水质等级逐渐降低, B_i 由 2.4207 降低至 2.0389, 降幅达到 18.6%, 富营养化等级 B_v 呈现缓慢降低的趋势,由 1.5975 降低至 1.5254, 降幅为 4.7%, 波动较小,基本保持稳定在中营养化水平,表明此段时间内洱海水质逐渐改善并趋于稳定。以上评价结果表明 1992—2003 年期间洱海水质开始变差,其中 2003 年水质最差,导致最终爆发全湖性的“蓝藻”危机。2003—2015 年期间洱海的水质逐渐变好,并趋于稳定。这主要是由于 1992 年—2003 年 10 年间为洱海流域社会经济快速增长时期,粗放型的发展模式使得大量的氮磷等随着农田地表径流和河流汇入湖中,而 2003 年后,洱海水质变好是各级政府部门采取流域“两违”整治、村镇“两污”整治、面源污染减量、节水治水生态修复、截污治污工程等措施,投入大量人力物力财力取得的成果,说明洱海保护治理工作初见成效。

4.2 洱海年内水质评价结果 与年际间水质综合评价过程类似,2016 年汛期(6—10 月)和非汛期洱海水质评价结果见表 3 和图 3。

由表 3 和图 3 可以看出,当采用单因子评价法时,2016 年洱海 5 个监测点水质评价结果主要为 III 类,个别监测点在枯水期为 II 类水,水质结果相对较差,在空间上也无明显差异。而组合赋权的模

表2 年际洱海水质综合评价结果

年份	单因子评价结果	B_i	水质评价结果	B_i	富营养评价结果
1992	II	1.5817	I 偏向 II 类	0.7781	贫营养
1993	II	1.7853	I 偏向 II 类	0.6366	贫营养
1994	II	1.8002	I 偏向 II 类	0.7623	贫营养
1995	II	1.8979	I 偏向 II 类	0.7783	贫营养
1996	II	1.8002	I 偏向 II 类	0.8616	贫营养
1997	II	1.4497	I 偏向 II 类	0.8633	贫营养
1998	II	1.8012	I 偏向 II 类	0.9437	贫营养
1999	II	1.7364	I 偏向 II 类	1.0342	贫营养偏中营养
2000	II	1.8591	I 偏向 II 类	0.9066	贫营养
2001	II	1.9492	I 偏向 II 类	1.4237	贫营养偏中营养
2002	II	1.9481	I 偏向 II 类	1.5601	贫营养偏中营养
2003	III	2.4207	II 偏向 III 类	1.5975	贫营养偏中营养
2004	III	2.2402	II 偏向 III 类	1.5753	贫营养偏中营养
2005	III	2.2162	II 偏向 III 类	1.5456	贫营养偏中营养
2006	III	2.1729	II 偏向 III 类	1.5415	贫营养偏中营养
2007	III	2.0443	II 偏向 III 类	1.4514	贫营养偏中营养
2008	III	2.0051	II 偏向 III 类	1.4318	贫营养偏中营养
2009	III	2.0537	II 偏向 III 类	1.5335	贫营养偏中营养
2010	III	2.0406	II 偏向 III 类	1.5263	贫营养偏中营养
2011	III	2.0172	II 偏向 III 类	1.4356	贫营养偏中营养
2012	III	2.0323	II 偏向 III 类	1.5485	贫营养偏中营养
2013	III	2.0695	II 偏向 III 类	1.5415	贫营养偏中营养
2014	III	2.0136	II 偏向 III 类	1.5327	贫营养偏中营养
2015	III	2.0389	II 偏向 III 类	1.5254	贫营养偏中营养

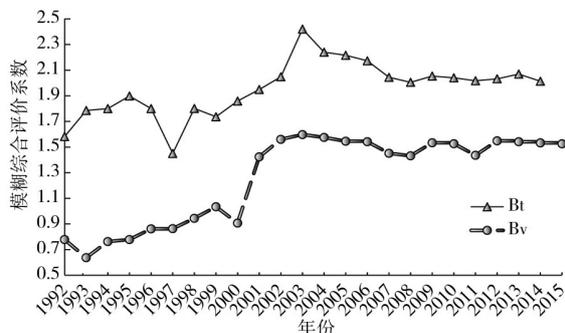


图2 年际洱海水质综合评价结果

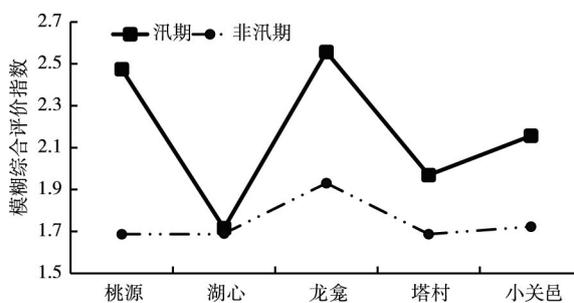


图3 湖区监测点的综合评价结果

糊综合评价结果表明,洱海的水质特征在时间以及空间上呈现明显的差异性。从时间上看,2016年汛期洱海水质等级 B_i 维持在1.71578~2.55624之间,除个别监测点外水质基本属于II类偏向III类,非汛期洱海水质等级 B_i 维持在1.68672~1.93052之间,均属于I类偏向II类,非汛期 B_i 的值整体小于汛期,表明非汛期水质好于汛期。这主要是由于洱海污染源为面源,雨季大量旱季滞留的营养物质随雨水进入洱海,入湖河流污染物浓度较高,致使汛期水质变差;而非汛期入湖水量大幅减少,入湖污染物也大幅减少;从空间上看,洱海湖心水质好于南部和北部,水质等级 B_i 由小到大依次为:湖心、塔村、小关邑、龙龕、桃源。造成此现象的原因是北部弥苴河、罗时江、永安江携带大量的污染物进入湖区,且南部的波罗江位于大理市区,导致北部和南部水体污染物浓度较高,水质较差。

表3 年内洱海水质综合评价结果

监测点	水期	单因子评价	B_i	水质评价结果
桃源	汛期	Ⅲ	2.47419	Ⅱ 偏向Ⅲ类
	非汛期	Ⅱ	1.68672	Ⅰ 偏向Ⅱ类
湖心	汛期	Ⅲ	1.71578	Ⅰ 偏向Ⅱ类
	非汛期	Ⅲ	1.68998	Ⅰ 偏向Ⅱ类
龙龕	汛期	Ⅲ	2.55624	Ⅱ 偏向Ⅲ类
	非汛期	Ⅲ	1.93052	Ⅰ 偏向Ⅱ类
塔村	汛期	Ⅲ	1.96893	Ⅰ 偏向Ⅱ类
	非汛期	Ⅲ	1.68708	Ⅰ 偏向Ⅱ类
关邑	汛期	Ⅲ	2.15653	Ⅱ 偏向Ⅲ类
	非汛期	Ⅱ	1.72298	Ⅰ 偏向Ⅱ类

5 结论

(1)从评价结果来看,在1992—2003年期间, B_i 数值基本上呈现递增趋势,由1.5817增长至2.4207,涨幅为54.5%,水质由Ⅱ类下降为Ⅲ类, B_p 也随时间呈现波动递增的趋势,由0.7781增至1.5975,涨幅为105.3%,富营养水平由贫营养转化为中营养。水质整体变差的主要原因是1992—2003年间为洱海流域社会经济快速增长时期,粗放型的发展模式使得大量的氮磷等随着农田地表径流和河流汇入湖中。

(2)在2003—2015年期间,洱海的水质等级 B_i 逐渐降低,降幅达到18.7%,而富营养化水平 B_p 基本保持稳定在中营养化,波动较小,表明此段时间内洱海水质逐渐改善并趋于稳定。水质变好的原因是大理市各级政府部门采取流域“两违”整治、村镇“两污”整治、面源污染减量、节水治水生态修复、截污治污工程等措施,并投入大量人力物力财力保护治理洱海。

(3)2016年汛期洱海水质等级 B_i 维持在1.71578~2.55624之间,除个别监测点外水质基本属于Ⅱ类偏向Ⅲ类,非汛期洱海水质等级 B_i 维持在1.68672~1.93052之间,均属于Ⅰ类偏向Ⅱ类,非汛期 B_i 的值整体小于汛期,呈现出洱海非汛期水质好于汛期的时间特征;湖区内水质等级 B_i 由小到大依次为:湖心、塔村、小关邑、龙龕、桃源,呈现出洱海湖心水质好于南部和北部的空间特征。

(4)从评价方法来看,单因子评价结果以最差的水质类别作为水质评价的结果,不能全面反映水质的整体状况;而改进的模糊综合评价法克服了单因子评价法的片面性,是一种合理、可靠且更全面的水质评价方法,能更好地反映洱海水质的动态变化特征,适用于洱海水质评价。

参 考 文 献:

- [1] 梁攀,冯健,彭文启,等.分担率法在洱海水环境容量计算中的应用[J].人民黄河,2012,34(6):92-94.
- [2] 徐祖信.我国河流单因子水质标识指数评价方法研究[J].同济大学学报,2005,33(3):321-325.
- [3] 樊引琴,李娅,刘婷婷,等.物元分析法在水质监测断面优化中的应用[J].人民黄河,2012,34(11):81-84.
- [4] 陈玲,张晟,夏世斌,等.灰色关联度分析方法在水质评价中的应用——以常州市北市河为例[J].环境科学与管理,2012,37(2):162-166.
- [5] 莫明浩,杨洁,宋月君,等.神经网络在湖北洪湖水水质综合评价中的应用[J].安徽农业科学,2010,38(25):13931-13933.
- [6] 杨大杰,谢建枝.模糊综合评价法在地表水源地水质评价中的作用——以北京市官厅水库水质评价为例[J].人民长江,2014,45(2):81-83.

- [7] 李芸, 李宝芬, 张坤, 等. 云南高原湖泊洱海流域年降水量时空分布特征研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2017, 15(3): 234-240.
- [8] 文红星, 马根连. 2008-2010年洱海水质及藻类初步分析[J]. 环境科学与管理, 2011, 36(11): 44-48.
- [9] 陈无歧, 李小平, 陈小华, 等. 基于 Aquatox 模型的洱海营养物投入响应关系模拟[J]. 湖泊科学, 2012, 24(3): 362-370.
- [10] 栾玉泉, 谢宝川. 洱海流域环境保护和综合管理[J]. 大理学院学报, 2007, 6(12): 38-40.
- [11] 孙怀英. 2008~2012年洱海总磷、总氮变化分析[J]. 环境科学导刊, 2013, 32(4): 56-58.
- [12] 张态. 洱海氮磷时空分布特征及其外源负荷研究[D]. 大理: 大理学院, 2008.
- [13] 王永美. 洱海化学需氧量变化趋势及影响因素分析[J]. 环境科学导刊, 2016, 35(1): 5-7.
- [14] 金相灿. 洱中国湖泊富营养化[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [15] 陶涛, 孙世群, 姜栋栋, 等. 模糊综合评价在巢湖水质评价中的应用[J]. 环境科学与管理, 2010, 35(12): 177-180.
- [16] 朱引弟, 陈星, 孟祥永. 基于改进模糊综合评价法的太湖水质评价[J]. 水电能源科学, 2013, 31(9): 42-44.
- [17] 宋洁, 张艺伟, 张炜. 基于组合赋权的地表水水质模糊综合评价[J]. 甘肃水利水电技术, 2017, 53(10): 4-8.
- [18] 赵迪. 茅洲河水质评价与水体污染防治综合措施研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2017.
- [19] 杨静. 改进的模糊综合评价法在水质评价中的应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.

Application of improved fuzzy comprehensive method to water quality assessment in Erhai

ZHANG Qian, LI Guoqiang, ZHUGE Yisi, YU Xiao, TAN Hongwu, DU Qiang

(*Institute of Water Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower, Beijing 100038, China*)

Abstract: The results of water quality assessment in Erhai using single factor evaluation, do not well reflect the effect of water environment management in recent years. This paper collects the monitoring data of water quality of Erhai systematically in 1992-2016. Based on the improved fuzzy comprehensive evaluation method and several water quality indexes, the trend of water environmental change in Erhai was evaluated from the aspects of surface water quality standard and lake eutrophication, and the results were compared with those obtained by the single factor evaluation method. The results show that the surface water quality in Erhai gradually deteriorated between 1992 and 2003, since 2003, and the water quality of Erhai has been improved year by year and tends to be stable. The quality of Erhai in non-flood season is better than that in flood season (during June to October) during the year, and the water quality in the center of the lake is better than in the south and north. Overall, the eutrophication level of Erhai has gradually changed from oligotrophic to medium nutrition. Compared with the single factor evaluation method, the improved fuzzy comprehensive evaluation method can better reflect the dynamic change characteristics of water quality in Erhai in recent 20 years.

Keywords: water quality evaluation; eutrophication; improved fuzzy comprehensive evaluation method; single factor evaluation method; Erhai

(责任编辑: 杨 虹)