

# 湖泊富营养化组合评价的方差大小加权法

谢平<sup>①②\*</sup>, 陈海健<sup>①②</sup>, 李彬彬<sup>①②</sup>, 雷旭<sup>①②</sup>, 张波<sup>①②</sup>

① 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072;

② 水资源安全保障湖北省协同创新中心, 武汉 430072

\* E-mail: pxie@whu.edu.cn

收稿日期: 2014-12-29; 接受日期: 2015-07-10; 网络出版日期: 2015-11-24

国家自然科学基金(批准号: 51179131, 51190094, 51579181)、广东省水利科技创新项目(编号: 2011-01)和湖北省水利专项科研课题(编号: HBSLKJZX201301)资助项目

**摘要** 针对湖泊水体富营养化评价方法具有的不确定性问题, 提出了湖泊富营养化组合评价的方差大小加权法. 该法的建立步骤为: 首先根据富营养化评价标准, 随机生成 1000 组富营养化水质指标样本, 分别用灰色关联法、打分统计法、经验频率法、贝叶斯方法、模糊评价法、向量评价法、综合营养指数法 7 种单项方法进行富营养化评价; 然后统计 1000 组样本中各单项方法的评价值与真值的误差平方和, 据此计算各单项评价方法在组合评价方法中所占的权重; 最后利用权重值对 7 种单项评价值进行加权平均组合, 从而得到方差大小加权法的组合评价结果. 经全国 30 个湖泊水体实测水质资料验证, 方差大小加权法能有效降低单项评价方法的不确定性.

**关键词**湖泊富营养化  
不确定性  
组合评价  
方差大小加权法

## 1 引言

湖泊富营养化是指湖泊水体在自然因素和(或)人类活动的影响下, 大量营养盐输入湖泊水体, 使湖泊逐步由生产力水平较低的贫营养状态向生产力水平较高的富营养状态变化的一种现象<sup>[1]</sup>. 为了准确评价湖泊水体所处的营养状态, 一些研究者先后提出了灰色关联法<sup>[2]</sup>、打分统计法<sup>[3]</sup>、经验频率法<sup>[4]</sup>、贝叶斯方法<sup>[5]</sup>、模糊评价法<sup>[6]</sup>、向量评价法<sup>[7]</sup>、综合营养状态指数法(TLI)<sup>[1]</sup>等多种富营养化评价方法, 它们在湖泊富营养化评价的应用中均取得了较好的效果. 上述富营养化评价方法虽然反映了湖泊富营养化状态的一些客观实际, 但是各个方法依据的原理不同, 精度不一, 且具有各自的适用条件和某些局限,

因此迄今为止, 还没有形成一种统一的湖泊富营养化评价方法.

由于影响湖泊富营养化的环境因子众多, 难以根据全部环境因子的监测数据建立确定性的富营养化评价模型, 而且湖泊富营养化状态是众多环境因子的综合体现, 其相邻两个营养状态之间的界限是渐变的, 但上述富营养化评价方法在相邻两个状态评价等级之间的标准是突变的, 特别是评价因子在综合评价中应占多大权重是通过统计相关确定的, 导致上述富营养化评价方法具有很大的不确定性<sup>[7]</sup>. 为了降低湖泊富营养化评价的不确定性, 本文提出基于 7 种湖泊富营养化评价方法(灰色关联法、打分统计法、经验频率法、贝叶斯方法、模糊评价法、向量评价法、综合营养状态指数法)的方差大小加权组

**引用格式:** 谢平, 陈海健, 李彬彬, 等. 湖泊富营养化组合评价的方差大小加权法. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 1321-1328  
Xie P, Chen H J, Li B B, et al. Combination assessment method for lake-water eutrophication base on the magnitude of the variance (in Chinese). Sci Sin Tech, 2015, 45: 1321-1328, doi: 10.1360/N092014-00439

合评价方法(简称方差大小加权法), 使评价结果更加接近湖泊水体真实的营养状态, 为湖泊富营养化防治提供科学依据。

## 2 方差大小加权法

组合方法在水文洪水预报方面已经有广泛的应用<sup>[8-10]</sup>, 但将其应用于富营养化评价方面的研究甚少, 本文尝试将组合方法引入到湖泊水体富营养化评价中. 借鉴洪水组合预报方法的思路, 湖泊富营养化组合评价方法的计算公式可写为

$$zh(j) = \sum_{i=1}^m \beta_i x_{ij} \quad (1)$$

其中,  $zh(j)$  为第  $j$  个样本的组合评价价值;  $m$  为评价方法数;  $\beta_i$  为第  $i$  种评价方法在组合评价方法中所占的权重;  $x_{ij}$  为第  $j$  个样本、第  $i$  种单项评价方法评价结果对应的等级数。

在洪水组合预报方法中, 各单项预报方法的权重系数是根据各自的预报误差大小来调整分配的<sup>[8]</sup>, 误差越大, 权重越小, 其误差由实测值作为真值与预报值计算得出. 组合预报的目的就是要使组合预报值比单项预报值的误差更小, 其结果更接近于真值. 但在湖泊富营养化组合评价中, 由于富营养化评价价值是多项水质指标的综合表现, 本身无法实测, 因此其评价价值的真值是未知的, 这样洪水组合预报的权重确定方法就不能直接套用在富营养化组合评价中. 为了避免由于某个单项富营养化评价方法的不确定性太大, 导致其评价价值与真值相差太远, 可以通过富营养化组合评价方法的权重确定使组合评价价值比单项评价价值更接近于真值, 鉴于此本文假设组合评价价值即为真值的近似值, 这个假设是否合理的关键就

在于能否找到合适的权重, 使得组合评价价值能够代表大多数单项评价价值的结果. 为此, 本文将通过统计试验比较单项评价方法与组合评价方法之间的差异, 并统计单项评价结果与组合评价真值的误差平方和的平均数(即方差), 方差越大, 权重越小, 据此确定单项评价方法在组合评价方法中的权重, 故称此组合方法为方差大小加权法。

### 2.1 统计实验

本文采用 2 种方法生成随机样本进行对比。

(1) 无条件抽样: 将富营养化评价指标值的分布视作具有有限范围的均匀分布, 采用线性同余法随机生成 1000 组富营养化水质指标样本. 具体方法是根据地表水富营养化控制标准<sup>[3,11]</sup>(表 1)中 5 个指标的取值限制范围, 采用线性同余法将 [0, 1] 区间上均匀分布的随机数乘以各个指标取值上下限的差值绝对值, 即可得到各个评价指标取值在限制范围内均匀分布的随机数序列。

(2) 有条件抽样: 考虑到实测的湖泊富营养化指标间存在较强的相关关系<sup>[12]</sup>, 为使随机样本更符合实际情况, 进行有条件抽样. 首先根据评价标准的 5 个等级, 利用 Chl- $\alpha$  指标的等级取值的上下限数值, 把样本分成相对应的 5 个级别; 然后利用各级别 Chl- $\alpha$  指标的上下限值分别随机抽出 200 份 Chl- $\alpha$  样本, 与各级别 Chl- $\alpha$  样本相对应的其他 4 个指标的上下限取值根据 Chl- $\alpha$  指标级别确定, 两者相差不超过一个等级. 例如, 假设 Chl- $\alpha$  指标取值落在贫营养级别范围内(0~1.0 mg/m<sup>3</sup>), 则其他 4 个指标的取值范围均落在贫营养与中营养级别内, 如 TP 的取值范围限制为 0~0.50 mg/L, 以此类推. 5 个级别的随机样本组

表 1 地表水富营养化控制标准

营养状态级别	营养状态分值	Chl- $\alpha$ (mg/m <sup>3</sup> )	TP (mg/L)	TN (mg/L)	COD(Mn) (mg/L)	SD (m)
贫营养	0	0	0	0	0	37.00
	10	0.5	0.001	0.02	0.15	10.00
	20	1.0	0.004	0.05	0.40	5.00
中营养	30	2.0	0.010	0.10	1.00	3.00
	40	4.0	0.025	0.30	2.00	1.50
	50	10.0	0.050	0.50	4.00	1.00
轻富营养	60	26.0	0.100	1.00	8.00	0.50
中富营养	70	64.0	0.200	2.00	10.00	0.40
重富营养	80	160.0	0.600	6.00	25.00	0.30
	90	400.0	0.900	9.00	40.00	0.20
	100	1000.0	1.300	16.00	60.00	0.12

成 1000 组样本.

## 2.2 权重计算

湖泊富营养化组合评价方法的计算公式如(1)式所示, 其中权重  $\beta_i$  通过单项评价方法评价结果的方差大小确定. 其原理是: 取 7 种方法的评价结果的算术平均值作为真值的第一次近似值; 统计各个方法的评价结果与“真值的第一次近似值”之间的方差, 方差越大, 说明评价方法的精度越低, 在组合评价中的加权系数就越小; 反之, 对方差较小的单项评价方法在组合中应赋予较大的加权系数. 即令

$$\beta_i = (ES - E_i) / (ES(m-1)), \quad (2)$$

其中,  $m$  为单项评价方法总数,  $E_i$  为第  $i$  种单项评价方法的方差, 其计算公式为

$$E_i = \sum_{j=1}^N (x_{ij} - y_j)^2 / N, \quad (3)$$

其中,  $x_{ij}$  为  $i$  方法的  $j$  样本富营养化评价结果对应的等级数;  $y_j$  为第  $j$  个样本组合评价真值,  $N$  为样本总数.  $ES$  为各个单项评价方法方差  $E_i$  的总和, 即:

$$ES = \sum_{i=1}^m E_i. \quad (4)$$

根据随机生成的 1000 组富营养化水质指标样本, 采用方差大小加权法通过迭代循环来确定  $\beta_i$ , 具体步骤如下:

(1) 采用线性同余法随机生成 1000 组富营养化水质指标样本;

(2) 分别用灰色关联法、打分统计法、经验频率法、贝叶斯方法、模糊评价法、向量评价法、综合营养状态指数法 7 种方法进行评价, 各种方法得到一组评价结果;

(3) 取 7 种方法的评价结果的算术平均值作为组合评价结果的初始值, 即以权重  $\beta_{i1} = 1/7, i=1,2,\dots,7$  计算组合评价结果  $y_{j1} = \sum_{i=1}^7 \beta_{i1} x_{ij}$ , 其中  $i$  为方法数,  $j$  为样本数;  $y_{j1}$  为第  $j$  个样本组合评价结果的初始值;  $x_{ij}$  为  $i$  方法的  $j$  样本富营养化评价结果对应的等级数;

(4) 统计计算第  $k$  次循环各单项评价方法的评价结果与组合评价值的误差平方和  $E_{ik}$  及 7 种评价方法方差的总和  $ES_k$ , 计算公式如下:

$$E_{ik} = \sum_{j=1}^{1000} (x_{ij} - y_{jk})^2 / 1000, \quad i=1,2,\dots,7, \quad (5)$$

其中,  $k$  为循环次数;  $x_{ij}$  为  $i$  方法的  $j$  样本富营养化评价结果对应的等级数;  $y_{jk}$  为  $j$  样本第  $k$  次循环得到的

组合评价结果;

$$ES_k = \sum_{i=1}^7 E_{ik}; \quad (6)$$

(5) 计算第  $k+1$  次循环各单项评价方法的权重:

$$\beta_{i(k+1)} = (ES_k - E_{ik}) / (6ES_k) \quad i=1,2,\dots,7; \quad (7)$$

(6) 计算第  $k+1$  次循环组合评价结果  $y_{j(k+1)} =$

$\sum_{i=1}^7 \beta_{i(k+1)} x_{ij}$ , 并进行四舍五入得到组合评价等级;

(7) 计算第  $k+1$  次循环各单项评价方法方差及其总和:

$$E_{i(k+1)} = \sum_{j=1}^{1000} (x_{ij} - y_{jk})^2 / 1000 \quad i=1,2,\dots,7; \quad (8)$$

$$ES_{k+1} = \sum_{i=1}^7 E_{i(k+1)};$$

(8) 如果  $|ES_{k+1} - ES_k| < 0.0001$ , 则停止计算, 否则转至步骤(5).

经计算, 初步得到灰色关联法、打分统计法、经验频率法、贝叶斯方法、模糊评价法、向量评价法、综合营养状态指数法各自对应的权重值如表 2 所示. 由于抽样方式的不同, 计算得到 2 组不同的权重, 本文称由无条件抽样方式计算得到的权重为无条件权重, 由有条件抽样方式计算得到的权重为有条件权重.

由表 2 中可以看出, 在无条件抽样情况下, 灰色关联法方法较其他 6 种单项评价方法的方差要大. 分析随机样本评价结果, 对于一些极端样本(例如其中一到两个指标相对于其他指标取得极大值或者极小值的样本)的评价结果, 灰色关联法与其他单项方法的评价结果相差较大. 究其原因是灰色关联方法受两级最小绝对差和两级最大绝对差的影响较大. 一旦某个评价指标出现某个极大值或极小值, 那么其他各点的关联系数都将受到影响, 从而关联度的值也会受到影响<sup>[13]</sup>. 因此, 在无条件抽样情况下, 为提高组合评价准确性, 本文弃用灰色关联法进行组合, 只采用其他 6 项单项方法进行组合, 重新进行权重计算, 其结果如表 3 所示.

为定量评价各单项评价方法的不确定性, 本文参考洪水预报中的确定性系数计算方法<sup>[14]</sup>, 引入不确定度  $ND$  来评价各个单项富营养化评价方法与组合评价方法的吻合程度, 其计算公式为

$$ND_i = E_i / \sigma^2, \quad i=1,2,\dots,m, \quad (9)$$

其中,  $E_i$  为各单项评价方法的方差, 计算公式如(3)式所示;  $\sigma^2$  为组合评价值的方差, 计算公式为

表 2 各方法初次计算对应权重

方法	方差		权重	
	无条件	有条件	无条件	有条件
灰色关联法	0.63	0.145	0.095	0.138
打分统计法	0.132	0.143	0.151	0.139
经验频率法	0.129	0.023	0.152	0.162
贝叶斯方法	0.130	0.030	0.152	0.161
模糊评价法	0.160	0.090	0.148	0.149
向量评价法	0.077	0.291	0.158	0.110
综合营养状态指数法	0.199	0.128	0.144	0.141
$\Sigma$	1.457	0.850	1.000	1.000

表 3 各方法最终计算对应权重

方法	方差		不确定度		权重	
	无条件	有条件	无条件	有条件	无条件	有条件
灰色关联法	-	0.145	-	0.072	-	0.138
打分统计法	0.137	0.143	0.933	0.071	0.165	0.139
经验频率法	0.095	0.023	0.647	0.012	0.176	0.162
贝叶斯方法	0.098	0.030	0.665	0.015	0.175	0.161
模糊评价法	0.192	0.090	1.304	0.044	0.152	0.149
向量评价法	0.066	0.291	0.446	0.143	0.183	0.110
综合营养状态指数法	0.203	0.128	1.381	0.063	0.149	0.141
$\Sigma$	0.791	0.850	5.375	0.420	1.000	1.000

$$\sigma^2 = \sum_{j=1}^N (y_j - \bar{y})^2 / N, \quad (10)$$

其中,  $N$  为样本总数,  $y_j$  为第  $j$  个样本组合评价结果;  $\bar{y}$  为  $N$  组样本组合评价值的平均值. 不确定度计算结果见表 3.

平均而言, 富营养化评价方法的不确定度越大, 用其进行评价失误的风险越大. 从表 3 可以看出, 采用无条件抽样时综合营养状态指数法的不确定度最大为 1.381, 向量评价法的不确定度最小为 0.446, 6 种方法的平均不确定度为  $5.375/6=0.896$ . 采用有条件抽样时向量评价法的不确定度最大为 0.143, 经验频率法的不确定度最小为 0.012, 7 种方法的平均不确定度为  $0.420/7=0.060$ . 如果仅仅以某个单项方法进行富营养化评价, 将会带来很大的不确定性, 因此需要进行组合评价以降低单项评价方法失误的风险; 方差越小的方法在组合方法中所占的权重越大, 所以方差大小加权平均的组合评价方法能代表大部分权重较大的单项评价方法的结果, 且其不确定性要小于权重较小的单项评价方法. 此外, 方差大小加权评价方法的组合权重是利用统计实验来确定的, 随机生成的样本考虑了湖泊水质可能出现的各种情况, 因此计算出来的权重更具有一般性, 且不确定度越

小的方法在组合评价方法中所占的权重越大, 这对于降低单项评价方法的不确定性来说是有效的. 两种不同的抽样方法计算所得的权重差异主要集中在打分统计法、向量评价法两种单项评价方法上. 在实际评价中, 可以根据湖泊的实测数据进行选用, 实测数据符合有条件抽样情况的采用有条件权重进行组合, 否则采用无条件权重进行组合.

### 3 方法验证

采用国内 30 个湖泊水体的实测水质资料, 按照 5 级评价标准, 分别采用 2 种抽样方式计算所得的权重进行组合评价, 并将组合评价方法与 7 种单项评价方法进行对比分析, 其评价结果见表 4. 对评价等级的计算值的小数部分(表 4 中括号内的数值)进行四舍五入, 对照表 1 得到其相应的营养状态等级.

#### 3.1 方法对比

单项评价结果与组合评价结果对比分析如下:

(1) 无条件权重和有条件权重计算得到的评价数值计算结果差别不大, 其评价等级基本一致. 本文根据湖泊实测数据采用相应的组合评价结果, 如表 4

表4 湖泊富营养化评价结果<sup>a)</sup>

序号	湖泊名称	贝叶斯评价	灰色关联	经验频率	模糊评价	向量相似度	打分统计	综合营养	无条件权重组合	有条件权重组合	是否适用有条件抽样	采用结果	是否一致
1	洱海	中营养级 (1.77)	贫营养级 (1.00)	中营养级 (1.75)	中营养级 (2.28)	中营养级 (2.00)	中营养级 (2.00)	中营养级 (2.00)	中营养级 (1.70)	中营养级 (1.82)	是	中营养级 (1.82)	x
2	洱海	贫营养级 (1.38)	中营养级 (2.00)	贫营养级 (1.50)	中营养级 (1.78)	中营养级 (2.24)	中营养级 (2.00)	中营养级 (2.00)	中营养级 (1.57)	中营养级 (1.83)	是	中营养级 (1.83)	xx
3	博斯腾湖	中营养级 (1.96)	中营养级 (2.00)	中营养级 (2.09)	中营养级 (2.18)	轻富营养 (2.74)	轻富营养 (3.00)	中营养级 (2.00)	中营养级 (2.01)	中营养级 (2.26)	是	中营养级 (2.26)	xx
4	于桥水库	中营养级 (2.00)	中营养级 (2.00)	中营养级 (2.23)	中营养级 (2.22)	轻富营养 (2.78)	轻富营养 (3.00)	中营养级 (2.00)	中营养级 (2.04)	中营养级 (2.30)	是	中营养级 (2.30)	xx
5	磁湖	轻富营养 (2.77)	轻富营养 (3.00)	轻富营养 (2.67)	轻富营养 (2.85)	轻富营养 (2.92)	轻富营养 (3.00)	轻富营养 (3.00)	中营养级 (2.47)	轻富营养 (2.88)	是	轻富营养 (2.88)	√
6	巢湖	轻富营养 (3.15)	轻富营养 (3.00)	轻富营养 (3.32)	轻富营养 (3.31)	轻富营养 (3.03)	中富营养 (4.00)	轻富营养 (3.00)	轻富营养 (2.83)	轻富营养 (3.26)	否	轻富营养 (2.83)	x
7	甘棠湖	中富营养 (3.61)	中富营养 (4.00)	中富营养 (3.75)	中富营养 (3.78)	轻富营养 (3.25)	中富营养 (4.00)	中富营养 (4.00)	轻富营养 (3.20)	中富营养 (3.79)	是	中富营养 (3.79)	x
8	蘑菇湖	中富营养 (3.81)	中富营养 (4.00)	中富营养 (4.03)	中富营养 (3.90)	中富营养 (3.54)	重富营养 (5.00)	重富营养 (5.00)	中富营养 (3.62)	中富营养 (4.20)	是	中富营养 (4.20)	xx
9	杭州西湖	中富营养 (3.81)	中富营养 (4.00)	中富营养 (4.02)	中富营养 (3.89)	轻富营养 (3.36)	重富营养 (5.00)	中富营养 (4.00)	轻富营养 (3.44)	中富营养 (4.03)	是	中富营养 (4.03)	xx
10	南京玄武湖	重富营养 (4.62)	重富营养 (5.00)	重富营养 (4.68)	重富营养 (4.80)	中富营养 (4.06)	重富营养 (5.00)	重富营养 (5.00)	中富营养 (4.02)	重富营养 (4.76)	是	重富营养 (4.76)	x
11	武汉墨水湖	重富营养 (4.81)	重富营养 (5.00)	重富营养 (4.81)	重富营养 (4.89)	中富营养 (4.05)	重富营养 (5.00)	重富营养 (5.00)	中富营养 (4.08)	重富营养 (4.82)	是	重富营养 (4.82)	x
12	广州东山湖	重富营养 (4.81)	重富营养 (5.00)	重富营养 (4.87)	重富营养 (4.93)	中富营养 (4.11)	重富营养 (5.00)	重富营养 (5.00)	中富营养 (4.10)	重富营养 (4.84)	是	重富营养 (4.84)	x
13	青海湖	贫营养级 (1.23)	贫营养级 (1.00)	中营养级 (1.51)	贫营养级 (1.08)	贫营养级 (1.00)	中营养级 (2.00)	中营养级 (2.00)	贫营养级 (1.26)	贫营养级 (1.42)	否	贫营养级 (1.26)	xxx
14	太湖	轻富营养 (2.65)	轻富营养 (3.00)	轻富营养 (2.70)	中富营养 (3.59)	轻富营养 (3.13)	轻富营养 (3.00)	轻富营养 (3.00)	轻富营养 (2.60)	轻富营养 (3.00)	否	轻富营养 (2.60)	x
15	呼伦湖	中营养级 (2.39)	轻富营养 (3.00)	中营养级 (2.40)	轻富营养 (3.01)	轻富营养 (2.92)	轻富营养 (3.00)	中营养级 (2.00)	中营养级 (2.26)	轻富营养 (2.66)	是	轻富营养 (2.66)	xxx

续表 4

序号	湖泊名称	贝叶斯评价	灰色关联	经验频率	模糊评价	向量相似度	打分统计	综合营养	无条件权重组合	有条件权重组合	是否适用有条件抽样	采用结果	是否一致
16	洪泽湖	轻富营养 (2.77)	中富营养 (2.00)	轻富营养 (2.85)	轻富营养 (3.01)	轻富营养 (2.92)	轻富营养 (3.00)	轻富营养 (3.00)	轻富营养 (2.51)	轻富营养 (2.78)	否	轻富营养 (2.51)	√
17	巢湖	轻富营养 (3.38)	轻富营养 (3.00)	轻富营养 (3.14)	轻富营养 (3.10)	轻富营养 (2.99)	中富营养 (4.00)	轻富营养 (3.00)	轻富营养 (2.81)	轻富营养 (3.23)	否	轻富营养 (2.81)	×
18	滇池	轻富营养 (2.89)	轻富营养 (3.00)	轻富营养 (3.03)	中富营养 (4.06)	轻富营养 (3.46)	轻富营养 (3.00)	轻富营养 (3.00)	轻富营养 (2.78)	轻富营养 (3.19)	否	轻富营养 (2.78)	×
19	抚仙湖	贫营养级 (1.46)	贫营养级 (1.00)	中富营养 (1.56)	中富营养 (1.82)	贫营养级 (1.00)	中富营养 (2.00)	中富营养 (2.00)	中富营养 (1.41)	中富营养 (1.56)	是	中富营养 (1.56)	××
20	武汉东湖	中富营养 (4.04)	中富营养 (4.00)	中富营养 (4.06)	中富营养 (4.22)	中富营养 (3.57)	重富营养 (5.00)	重富营养 (5.00)	中富营养 (3.71)	中富营养 (4.29)	是	中富营养 (4.29)	××
21	杭州西湖(1)	中富营养 (4.23)	中富营养 (4.00)	中富营养 (4.23)	中富营养 (4.23)	中富营养 (3.62)	重富营养 (5.00)	重富营养 (5.00)	中富营养 (3.77)	中富营养 (4.35)	是	中富营养 (4.35)	××
22	草湖	中富营养 (4.42)	中富营养 (4.00)	中富营养 (4.40)	重富营养 (4.52)	中富营养 (3.85)	重富营养 (5.00)	重富营养 (5.00)	中富营养 (3.89)	中富营养 (4.47)	是	中富营养 (4.47)	×××
23	外海北	轻富营养 (2.88)	中富营养 (2.00)	轻富营养 (2.94)	中富营养 (3.85)	轻富营养 (3.41)	中富营养 (4.00)	中富营养 (4.00)	轻富营养 (3.04)	轻富营养 (3.28)	否	轻富营养 (3.04)	×××
24	外海中	轻富营养 (2.88)	中富营养 (2.00)	轻富营养 (2.80)	中富营养 (3.90)	轻富营养 (3.39)	中富营养 (4.00)	轻富营养 (3.00)	轻富营养 (2.88)	轻富营养 (3.11)	否	轻富营养 (2.88)	××
25	外海南	轻富营养 (2.88)	中富营养 (2.00)	轻富营养 (2.86)	中富营养 (3.88)	轻富营养 (3.40)	中富营养 (4.00)	中富营养 (4.00)	中富营养 (3.04)	轻富营养 (3.27)	否	轻富营养 (3.04)	×××
26	洱海(1)	轻富营养 (2.62)	中富营养 (2.00)	轻富营养 (2.58)	轻富营养 (3.00)	轻富营养 (2.89)	轻富营养 (3.00)	中富营养 (2.00)	中富营养 (2.30)	轻富营养 (2.56)	是	轻富营养 (2.56)	××
27	藏碧湖	中富营养 (1.81)	中富营养 (2.00)	中富营养 (1.85)	中富营养 (2.16)	轻富营养 (2.67)	中富营养 (2.00)	中富营养 (2.00)	中富营养 (1.79)	中富营养 (2.05)	是	中富营养 (2.05)	×
28	西湖(2)	中富营养 (2.00)	中富营养 (2.00)	中富营养 (1.83)	中富营养 (2.18)	轻富营养 (2.66)	中富营养 (2.00)	中富营养 (2.00)	中富营养 (1.82)	中富营养 (2.07)	是	中富营养 (2.07)	×
29	海西海	中富营养 (1.62)	贫营养级 (1.00)	中富营养 (1.57)	贫营养级 (1.27)	贫营养级 (1.00)	中富营养 (2.00)	中富营养 (2.00)	贫营养级 (1.35)	中富营养 (1.51)	是	中富营养 (1.51)	×××
30	云南天池	中富营养 (2.27)	中富营养 (2.00)	中富营养 (2.31)	轻富营养 (2.83)	轻富营养 (2.85)	轻富营养 (3.00)	中富营养 (2.00)	中富营养 (2.19)	中富营养 (2.44)	否	中富营养 (2.19)	×××

a) 湖泊后面带数字表示同一湖泊不同时期的监测值; 括号内为评价等级的计算值, √表示评价结果一致, ×表示评价结果与组合结果有差异, ××表示有与组合方法评价结果与组合结果有差异, ×××有与组合方法评价结果与组合结果有差异, 表中序号 1~12 号资料来源于文献[15], 13~30 号资料来源于文献[2]

中第13列所示. 在30个湖泊中有28个湖泊的评价结果有差异, 说明各单项评价方法的评价结果均具有一定的不确定性. 需要说明的是当湖泊富营养化评价的计算结果处于2个标准评价级别之间时, 其结果可能取上限值, 也可能取下限值. 如评价级别为2.4, 2.5, 2.6的湖泊, 其水质差别很小, 而评价结果却相差1个级别. 从这个意义上说, 30个湖泊的评价结果差异均小于或等于1个级别, 说明各单项评价方法的评价结果在总体上差异并不大. 因此, 可利用方差大小加权法, 通过组合各单项评价方法的评价结果来降低单项评价方法的不确定性, 以降低单项评价方法失误的风险.

(2) 进一步统计30个湖泊中, 存在3项或以下单项评价结果与组合评价结果有差异的湖泊占28个, 其比例为93%, 说明组合评价方法能代表多数单项评价方法的评价结果, 并能有效降低少数有差异的单项评价方法的不确定性.

(3) 分析单项评价方法与组合评价方法的评价结果差异, 如综合营养状态指数方法评价结果与组合评价结果有差异的湖泊有9个. 其中在蘑菇湖的评价中, 综合营养状态指数方法评价结果为重富营养, 组合评价结果为中富营养, 而其他6种方法有5种方法的评价结果均为中富营养, 与组合评价结果相同, 因此, 本文更倾向于取组合评价方法的结果作为蘑菇湖的富营养化评价结果. 从这个意义上说, 组合评价方法与单项评价方法相比提高了评价精度.

(4) 分析单项评价方法与组合评价方法评价结果存在差异的湖泊. 灰色关联法、贝叶斯方法、经验频率法与组合方法评价结果存在差异的主要集中在富营养程度较低的湖泊, 而且3种评价方法的结果较组合结果均偏小. 推荐将此3种单项评价方法应用于评价富营养程度较高的湖泊. 打分统计法、模糊评价法、综合营养状态指数法与组合方法评价结果存在差异的主要集中在富营养化程度较高的湖泊, 而且3种评价方法的结果较组合结果均偏大. 推荐将此3种单项评价方法应用于评价富营养程度较低的湖泊. 向量评价法与组合方法评价结果存在差异的主要集中在较高、较低营养水平的湖泊. 推荐将此单项评价方法应用于评价富营养程度处于中等水平的湖泊.

方差大小加权法通过权重组合各单项评价方法的评价值, 使组合评价结果能够代表大多数单项评价结果, 而不是直接对水质指标进行操作, 因此

其适用范围受单项评价方法的制约, 适用于浮游植物型湖泊的水体富营养化评价.

### 3.2 原因分析

分析组合评价方法与7种单项评价方法的评价结果存在差异的原因, 发现产生差异的湖泊主要是富营养化程度较低或较高的湖泊. 富营养化状态是水体多个水质指标的综合体现, 由于各种单项评价方法的侧重点和评价指标权重的计算方法不同, 所以各种单项评价方法可能着重考虑了湖泊某一方面的特性, 导致评价结果受到个别指标极大或极小的影响较大, 出现了较为极端的评价结果. 而组合评价方法综合了各单项评价方法的评价结果, 间接上综合考虑了各个指标的作用与湖泊多个方面的特性, 因此降低了单项评价方法的极端情况, 更能反应湖泊水体的综合状况, 并能更加准确地评价湖泊所处的营养状态. 另外, 在实际湖泊的评价中, 可以根据湖泊的实测数据选用不同的权重, 实测数据符合有条件抽样情况的建议采用有条件权重进行组合评价, 不符合有条件抽样情况的建议采用无条件权重进行组合评价.

## 4 结论

(1) 湖泊富营养化评价的水质指标个数和种类的选择具有不确定性, 湖泊富营养化的评价级别和各级别对应的水质指标标准选择也具有不确定性. 因此, 湖泊富营养化评价方法具有一定的不确定性, 采用组合评价方法综合多种评价方法的评价结果可以降低单项评价方法的不确定性.

(2) 基于7种单项湖泊富营养化评价方法(灰色关联法、打分统计法、经验频率法、贝叶斯方法、模糊评价法、向量评价法、综合营养指数法), 通过统计实验构建了湖泊富营养化组合评价的方差大小加权法.

(3) 经全国30个湖泊水体实测水质资料的验证, 并与7种单项评价方法的结果进行比较, 发现方差大小加权组合评价方法能代表多数单项评价方法的评价结果, 并提高了湖泊富营养化评价的精度, 能更好地反映湖泊水质的营养状况. 采用方差大小加权组合评价方法能有效降低单项评价方法的不确定性, 建议根据湖泊实测数据采用相应的权重进行组合评价.

(4) 湖泊富营养化组合评价的方差大小加权法综合考虑了各单项评价方法的评价结果, 间接上综合考虑了各个指标的作用, 降低了单项评价方法失误的风险, 可为湖泊富营养化防治提供科学依据。

## 参考文献

- 1 王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准. 中国环境监测, 2002, 5: 47-49
- 2 冯玉国. 湖泊富营养化灰色评价模型及其应用. 系统工程理论与实践, 1996, 8: 44-48, 54
- 3 水利部水利水电规划设计总院. 全国水资源综合规划技术细则. 2002, <http://ghjh.mwr.gov.cn/upload/>
- 4 谢平, 黎红秋, 叶爱中. 基于经验频率曲线的湖泊富营养化随机评价方法及其验证. 湖泊科学, 2004, 4: 371-376
- 5 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. 长江流域资源与环境, 2005, 2: 224-228
- 6 赵泽斌. 模糊数学在湖泊水质富营养化评价中的应用. 黑龙江水专学报, 2007, 2: 115-117
- 7 谢平, 肖婵, 雷红富, 等. 基于向量相似度原理的湖泊富营养化评价方法及其验证. 安全与环境学报, 2008, 4: 93-96
- 8 闫悦新, 包为民. 组合预报方法在洪水预报模型中的应用. 水电能源科学, 2013, 10: 47-50.
- 9 刘冀. 径流分类组合预报方法及其应用研究. 博士学位论文. 大连理工大学, 2008
- 10 李克飞, 纪昌明, 张验科, 等. 水库径流预报的递阶结构组合模型研究与应用. 人民长江, 2012, 21: 16-20
- 11 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. 环境科学学报, 2006, 26: 1386-1392
- 12 金相灿. 中国湖泊环境. 北京: 海洋出版社, 1995
- 13 梅振国. 灰色绝对关联度及其计算方法. 系统工程, 1992, 5: 43-44, 72
- 14 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 水文情报预报规范(GB/T 22482-2008). 2008
- 15 陈守煜. 湖库水体富营养化评价级别特征值与识别模型. 黑龙江水专学报, 1999, 26: 1-8

## Combination assessment method for lake-water eutrophication base on the magnitude of the variance

XIE Ping<sup>1,2</sup>, CHEN HaiJian<sup>1,2</sup>, LI BinBin<sup>1,2</sup>, LEI Xu<sup>1,2</sup> & ZHANG Bo<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

<sup>2</sup> Hubei Collaborative Innovation Center for Water Resource Security, Wuhan 430072, China

In this study, a variance magnitude weighted method for combination evaluation is proposed to deal with uncertainties in lake eutrophication evaluation. There are three steps for the combination evaluation. Firstly, 1000 groups of eutrophication water quality index samples are randomly chosen based on the eutrophication assessment criteria; then, seven individual methods (including grey correlative method, scoring statistics method, experience frequency method, Bayesian method, fuzzy evaluation method, and vector evaluation method, TLI method) are used for evaluating eutrophication levels of the samples, respectively. Secondly, the variance that the evaluation value of each individual method deviate from the truth value is figured out; the weight of each individual method in the combination method can then be calculated. Thirdly, weighted averages of the seven individual evaluation values are combined to obtain the final results of combination evaluation of lake eutrophication. The developed combination method is applied to evaluating eutrophication levels of thirty lakes in China. Results indicate that it can effectively handle uncertainties in individual evaluation of lake eutrophication.

**lake eutrophication, uncertainties, combination assessment method, variance magnitude weighted method**

doi: 10.1360/N092014-00439