

基于韦伯-费希纳定律的营养状态普适韦伯指数公式*

李祚泳, 汪嘉杨, 邹长武

(成都信息工程学院, 成都 610041)

摘 要: 在适当设定各营养状态指标“参照值” C_{j0} 的基础上, 用相应于“参照值” C_{j0} 的指标“规范值” x_j 作为基于韦伯-费希纳定律的营养状态指数公式中的刺激量. 由于各项指标的同级营养状态标准的“规范值” $x_{j\beta}$ 差异不大, 从而可认为各指标的营养状态韦伯指数公式都具有一个共同适用的韦伯常数 α , 并采用智能解域搜索算法优化 α , 得出对所有 14 项营养指标皆适用的营养状态普适韦伯指数公式. 将营养状态韦伯指数公式应用于数十个湖泊的富营养化评价, 并与其它多种方法的评价结果进行比较, 结果表明该公式不但理论依据充分, 而且具有简单、适用的特点.

关键词: 水污染; 富营养化评价; 韦伯-费希纳定律; 韦伯指数; 智能解域搜索算法

A universal Weber exponential formula on eutrophic state based on Weber-Fischna law

LI Zuoyong, WANG Jiayang & ZOU Changwu

(Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610041, P. R. China)

Abstract: By setting up ‘benchmarks value’ C_{j0} of eutrophic state indexes, the ‘normalized value’ x_j of index value corresponding to ‘benchmarks value’ C_{j0} was taken as the contamination stimulus amounts in the eutrophic state exponential formula based on W-F law. The Weber exponential formula of each index was regarded as equivalence to a Weber exponential pollutant formula with common suited Weber’s constant α , because no differences of ‘normalized value’ $x_{j\beta}$ were found on the same class standard of eutrophic state for all indexes. Intellectual Solution Space Search Algorithm (ISSS) was used for optimizing Weber constant α in the formula. The optimized universal formula was suited to 14 items of eutrophic indexes. Compared with the results of other methods, it can be used for eutrophic evaluations of dozens of lakes. It showed that the universal Weber exponential formula on eutrophic state had not only solid theoretical basis, but also simple, practical characteristics.

Keywords: Water pollution; eutrophic evaluation; Weber-Fischna law; weber exponential; Intellectual Solution Space Search Algorithm

近 30 年来,随着我国经济的快速发展,大量未经处理的工业废水和生活污水排放到水体中导致我国江河湖库水体富营养化发展速度大大加快,已成为水环境保护中刻不容缓的问题. 为了给富营养化的防治、决策提供依据,准确判定湖泊水库所处的营养状态是十分必要的. 数十年来,国内外学者对湖泊营养状态的评价进行了大量研究,提出了多种评价模型和方法^[1-7]. 较常用的有指数评价法^[8-10]、模糊评价法^[11]、灰色评价法^[12]、物元评价法^[13]、集对分析评价法^[14-15]、神经网络评价法^[16]、支持向量机评价法^[17]及多种方法的耦合评价法等. 上述方法各有利弊,除指数评价法外,其它方法的一个共同点都是不具有简便性,详见文献[10]. 指数评价法因计算简便,结果直观而常在实践中使用. 不过通常的卡森指数公式或营养状态指数公式都只给出了少数几项指标的营养状态指数公式,不具有普适性. 从理论和实用角度出发,一个好的评价模型或方法应具有科学性、简洁性和普适性特点.

本文在适当设定各营养指标的“参照值” C_{j0} 基础上,用相应于 C_{j0} 的指标“规范值” x_j 替换基于韦伯-费希纳 (Weber-Fischna, W-F) 定律的湖泊营养状态指数公式中的指标值 C_j . 由于各指标的同级营养状态的规范值 $x_{j\beta}$ 差异不大,从而可认为各指标的 W-F 营养状态指数公式都具有一个共同适用的营养状态韦伯常数 α ,

* 国家自然科学基金项目 (50779042, 50739002) 和成都信息工程学院引进人才启动项目 (KYTZ200919) 联合资助.
2009-04-15 收稿; 2009-07-23 收修改稿. 李祚泳, 男, 1944 年生, 教授; E-mail: lizuoyong@cuit.edu.cn.

并采用智能解域搜索算法 (Intellectual Solution Space Search Algorithm, ISSS) 优化得到普适常数 α , 将优化得到的营养状态韦伯指数公式应用于多个实例分析计算.

1 基于 W-F 定律的湖泊营养状态普适指数公式

1.1 营养指标的选取及营养状态分级标准

描述富营养化的指标很多, 主要分营养指标、环境指标和生态指标三类. 前两类指标是湖泊富营养化发生发展的外在条件, 即外因; 而后一类指标是湖泊富营养化发生和发展的内在条件和因素, 即内因. 本文从各类指标中选取了有代表性的 14 项主要指标: 制约生物生长的营养指标 (TP、TN、TOC、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$); 生物生产必需的水环境物化指标 (DO 、 SD 、 COD_{Mn} 和 BOD_5); 表征生物生产量和优势种群生物量的生态指标 (Chl. a、BIO 和 ppro). 上述 14 项富营养化指标 (以下简称指标) 的各级标准浓度限值 (C_{jk}) 见表 1. 指标 Chl. a、TP、TN、 COD_{Mn} 、 SD 和 BOD_5 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、ppro 的各分级标准的选取参照了修正卡森指数 TSI_m 和适用于我国的营养状态指数 TSI_e 分级标准; 而其余指标的各分级标准的选取参照了国内部分湖泊、水库营养状态评价标准^[10-11, 17].

表 1 湖泊营养状态分级标准值 C_{jk} 及规范值 x_{jk}
Tab. 1 Classified standards values C_{jk} and corresponding normalized values x_{jk} on lake eutrophic states

营养指标	极贫		贫营养		中营养		富营养		重富营养		极富营养	
	C_{j0}	x_{j0}	C_{j1}	x_{j1}	C_{j2}	x_{j2}	C_{j3}	x_{j3}	C_{j4}	x_{j4}	C_{j5}	x_{j5}
Chl. a ($\mu\text{g/L}$)	0.4	1.0	1.60	4.0	10	25	64	160	160	400	1000	2500
TP ($\mu\text{g/L}$)	1.0	1.0	4.6	4.6	23.0	23.0	110	110	250	250	1250	1250
TN (mg/L)	0.02	1.0	0.08	4.0	0.31	15.5	1.20	60	2.30	115	9.10	455
COD_{Mn} (mg/L)	0.12	1.0	0.48	4.0	1.80	15.0	7.10	59.17	14.0	116.7	54.0	450
BOD_5 (mg/L)	0.1	1.0	1.2	12	2.8	28	6.6	66	12	120	30	300
$\text{NH}_3\text{-N}$ (mg/L)	0.01	1.0	0.055	5.5	0.20	20	0.65	65	1.50	150	5.0	500
BIO (10^4 个/L)	2.0	1.0	20	10	60	30	200	100	500	250	1000	500
SD (m)	40	1.0	8	5.0	2.40	16.68	0.73	54.8	0.40	100	0.10	400
DO (mg/L)	40	1.0	16.5	5.88	10.0	16.0	4.0	100	3.0	177.8	1.0	1600
ppro ($\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$)	0.7	1.0	1.18	4.79	2.0	23.32	3.25	100	4.20	216	7.0	1000
$\text{NO}_3\text{-N}$ (mg/L)	0.10	1.0	0.50	5.0	3.00	30	10.0	100	20.0	200	35.0	350
$\text{NO}_2\text{-N}$ (mg/L)	0.01	1.0	0.05	5.0	0.15	15.0	0.50	50	2.00	200	5.00	500
$\text{PO}_4\text{-P}$ (mg/L)	0.001	1.0	0.005	5.0	0.01	10.0	0.05	50	0.20	200	1.00	1000
TOC (mg/L)	0.02	1.0	0.10	5.0	0.50	25	1.50	75	7.0	350	30	1500
EI_{j0}	0		0.20		0.35		0.50		0.65		0.80	
EI'_{j0}	0		0.2032		0.3613		0.5249		0.6316		0.7923	
EI_l	0		(0, 20.32]		(20.32, 36.13]		(36.13, 52.49]		(52.49, 63.16]		(63.16, 100]	

1.2 基于 W-F 定律的湖泊营养状态普适韦伯指数公式

韦伯-费希纳通过心理物理实验表明: 对中等强度的外界刺激, 人体产生的反应量 K 和刺激量 C 之间满足式 (1) 所示的对数关系式:

$$K = \alpha \lg C \tag{1}$$

式中, C 为外界客观刺激量; α 为韦伯常数; K 为人体对刺激量 C 产生的反应量. 将 W-F 定律加以推广用于描述湖泊营养状态时的基本思路为: 由营养指标 j 的浓度 C_j 对水体产生的危害程度 EI 也满足类似式 (1) 所示的 W-F 定律^[18-19], 即可写为:

$$EI_j = \alpha_j \lg C_j \tag{2}$$

式中, C_j 为营养指标 j 的浓度值; α_j 为与指标 j 性质有关的营养状态韦伯常数; EI_j 为指标 j 的营养状态韦伯指数. 式 (2) 的物理意义为: 当指标浓度 C_j 呈等比变化时, 其对湖泊水体的营养状态产生的影响 (危害程度) 呈

等差变化.

不同指标的同级营养状态的标准值不仅单位和量纲不同,而且数值 C_{jl} ($j=1,2,\dots,14; l=1,2,\dots,6$) 差异很大,有的相差几个数量级(表1). 因此,不同指标的 W-F 定律公式(2)中的韦伯常数 α_j 各不相同. 若能对各项营养指标,分别设定一个适当的“参照值” C_{j0} ($j=1,2,\dots,14$) 和分别设计函数关系式,而 C_{j0} 的设定应能满足“规范条件”:即使各营养指标同级标准值 C_{jl} ,用相应于 C_{j0} 的函数关系式(3)和(3)'转换为“规范值” x_{jl} 后,应差异不大,彼此愈接近愈好. 用式(3)和(3)'计算得到14项营养指标的各级标准的“规范值”如表1所示.

对 DO 和 SD 两个逆向指标有规范化公式:

$$x_j = \begin{cases} C_{j0}/C_j & C_j \leq C_{j0} \text{ (对 SD)} \\ (C_{j0}/C_j)^2 & C_j \leq C_{j0} \text{ (对 DO)} \\ 1 & C_j > C_{j0} \text{ (对 SD 和 DO)} \end{cases} \quad (3)$$

对其余12个正向指标有规范化公式:

$$x_j = \begin{cases} (C_j/C_{j0})^3 & C_j \geq C_{j0} \text{ (对 ppro)} \\ C_j/C_{j0} & C_j \geq C_{j0} \text{ (对其余 11 个指标)} \\ 1 & C_j < C_{j0} \text{ (对所有 12 个指标)} \end{cases} \quad (3)'$$

由于“规范变换”后的各营养指标的同级标准的“规范值” x_{jl} 差异很小,因此,若将营养状态韦伯指数公式(2)中的各指标的同级标准值 C_{jl} 用其“规范值” x_{jl} 替换后,各不同营养指标的同级标准的对数值 $\lg x_{jl}$ 差异更小,故不同营养指标的韦伯公式中的韦伯常数 α_j 差异亦很小,从而可认为:对14项营养指标,皆可用同一个“等效”的营养状态指标的韦伯指数代替:

$$EI_j = \alpha \lg x_j \quad (4)$$

式中, x_j 为由式(3)或(3)'计算得到的营养指标 j 的“规范值”; α 为待优化确定的与指标 j 性质无关的营养状态普适韦伯常数; EI_j 为单项指标 j 的营养状态韦伯指数.

1.3 公式的优化

采用文献[20]中提出的智能解域新算法对式(4)中的 α 进行优化时,需要构造满足式(5)的优化目标函数:

$$\min Q(\alpha) = \frac{1}{5} \sum_{l=1}^5 \left(\left(\frac{1}{14} \sum_{j=1}^{14} EI_{jl} \right) - EI_{l0} \right)^2 \quad (5)$$

式中, EI_{jl} 为由式(4)计算得到的指标 j 的 l 级标准的营养状态韦伯指数值; EI_{l0} 为与指标 j 性质无关,而仅与 l 级标准有关的韦伯指数目标值. 5级营养状态标准的韦伯指数目标值可分别设定为 $EI_{10}=0.20$ 、 $EI_{20}=0.35$ 、 $EI_{30}=0.50$ 、 $EI_{40}=0.65$ 、 $EI_{50}=0.80$ (表1).

将14项指标的各级标准的“规范值” x_{jl} 代入式(4),并在满足优化目标函数式(5)条件下,用智能解域搜索算法(ISSS)对式中的 α 进行优化. 智能解域搜索算法的基本思想及其算法实现详见文献[20]. ISSS 算法的参数设置为 $\varepsilon=0.001$, α 的初始值取值范围为 $\alpha \in [0, 10]$, 当 $\min Q = 2.3 \times 10^{-4} < \varepsilon$ 时,得到优化值 $\alpha = 0.2779$. 为了使营养状态指数表示更直观,并与多数指数评价法比如 TSI_m 和 TSI_c 的取值范围(0~100)相一致,可将 α 扩大100倍,即为27.79. 从而得到优化后对14项营养指标皆适用的湖泊营养状态韦伯指数公式

$$EI_j = 27.79 \times \lg x_j \quad (6)$$

而 n 项营养指标的湖泊营养状态综合韦伯指数则应为:

$$EI = \sum_{j=1}^n W_j \cdot EI_j = 27.79 \sum_{j=1}^n W_j \cdot \lg x_j \quad (7)$$

式中, EI_j 为由式(6)计算得到的指标 j 的营养状态韦伯指数; n 为营养状态指标数目; W_j 为指标 j 的归一化权

值,满足:

$$\sum_{j=1}^n W_j = 1 \tag{8}$$

由于式(6)对各指标均适用,即各指标对营养状态的影响都“等效”于同一个指标对营养状态的影响.因而,用式(7)表示的 n 项指标对营养状态的综合影响可视为一个“等效”指标的 n 次不同测量值的平均影响.因此,绝大多数情况下,在计算综合指数时,可将各指标视作等权即可.在某些特殊情况下,也可采用式(9)表示的广义对比加权法计算权值^[7]:

$$W_j = \begin{cases} \sqrt{EI_j}/2 & \text{当 } 0 \leq EI_j \leq 0.5 \\ \sqrt{1 - [(1 - EI_j)/2]} & \text{当 } 0.5 < EI_j \leq 1 \end{cases} \tag{9}$$

将 14 项指标的各级标准“规范值” x_j 代入式(7),并视各项指标为等权情况下,计算得到营养状态的韦伯指数 EI_i 与各营养等级之间的对应关系如表 1 最后一行所示.

2 实例分析

北京市区 2006 年 21 个湖泊的 5 项富营养化指标监测值如表 2 所示.数据摘自文献[21].由 5 项指标的“参照值” C_0 (表 1),并根据式(3)、(3)'和式(6)、(7)计算得到各湖泊的营养状态综合韦伯指数值 EI (各指标视作等权)(表 2).根据表 1 中的营养状态韦伯指数值与各营养等级的分级标准的对应关系,得出各湖泊所处的营养等级(表 2).可见北京市区 21 个湖泊都已处于富营养以上状态水平.

表 2 北京市湖泊 2006 年水质数据及多种方法评定结果
Tab. 2 Eutrophic indexes values and evaluation results of eutrophication based on W-F Law and TSI of Beijing urban lakes in 2006

序号	湖泊名称	叶绿素 C_j	总磷 C_j	总氮 C_j	高锰酸盐指数 C_j	透明度 C_j (m)	W-F 公式		TSI_m 指数公式		TSI_c 指数公式		普适指数公式		文献 [21] 的评价等级*
		($\mu\text{g/L}$)	($\mu\text{g/L}$)	(mg/L)	(mg/L)		EI	评价等级	TSI_m	等级	TSI_c	等级	EI	等级	
1	团城湖	8.21	40	1.08	3.19	1.30	42.02	富	58.46	富	44.69	富	34.24	富	中
2	昆明湖	15.75	60	1.06	4.91	0.87	46.54	富	63.47	富	51.35	富	38.03	富	轻富
3	西海	67.78	110	1.56	6.40	0.52	54.34	重富	71.82	重富	61.50	富	45.79	富	中富
4	后海	51.63	80	1.35	6.31	0.51	52.58	重富	70.02	富	59.35	富	44.02	富	轻富
5	前海	56.76	90	1.38	6.09	0.61	52.63	重富	69.88	富	59.07	富	43.72	富	轻富
6	北海	51.36	90	1.19	6.19	0.50	52.55	重富	69.94	富	59.24	富	43.89	富	轻富
7	中海	46.55	70	1.12	7.22	0.57	51.61	富	68.94	富	58.25	富	42.89	富	轻富
8	南海	58.15	60	1.26	7.63	0.67	51.80	富	69.01	富	58.28	富	42.96	富	轻富
9	圆明园湖	19.86	70	0.92	8.49	0.84	48.54	富	65.68	富	54.89	富	40.08	富	轻富
10	玉渊潭湖	102.29	160	1.47	7.80	0.66	56.00	重富	73.27	重富	63.44	重富	47.31	重富	中富
11	八一湖	60.13	140	2.11	7.84	0.77	54.90	重富	72.34	重富	62.56	富	46.50	重富	中富
12	紫竹院湖	61.93	130	1.50	7.35	0.53	54.72	重富	72.27	重富	62.36	富	46.24	重富	中富
13	展览馆后湖	38.00	90	1.47	5.19	0.87	50.57	富	67.53	富	56.08	富	41.46	富	轻富
14	陶然亭湖	128.41	120	7.98	15.96	0.52	62.64	重富	80.95	重富	74.07	重富	59.03	极富	重富
15	龙潭湖	147.33	340	6.17	16.01	0.31	65.72	极富	84.84	极富	79.01	极富	62.96	极富	重富
16	青年湖	89.59	140	2.21	10.90	0.46	58.02	重富	76.05	重富	67.53	重富	50.61	重富	中富
17	红领巾湖	133.46	810	4.73	18.46	0.18	68.59	极富	88.26	极富	83.69	极富	68.58	极富	重富
18	柳荫公园湖	78.06	110	1.83	8.99	0.44	56.29	重富	74.16	重富	64.92	重富	48.46	重富	中富
19	筒子河	33.03	80	1.18	6.17	0.45	51.42	富	69.00	富	58.30	富	43.27	富	轻富
20	莲花池	111.39	120	2.58	12.80	0.26	60.31	重富	78.97	重富	71.35	重富	54.66	重富	重富
21	朝阳公园湖	103.98	320	3.32	16.02	0.19	64.42	极富	83.74	极富	77.84	极富	61.15	极富	重富

* 文献[21]中的评价等级划分与其它几种方法的等级划分关系为:轻富、中富相当于富,重富相当于重富、极富.

3 分析比较

(1) 为了比较,表 2 中还列出用卡森修正指数公式 TSI_m 、营养状态指数公式 TSI_e 、幂函数加和型普适指数公式给出的评价结果.文献[21]所依据的营养状态分级分别是贫营养、中营养、轻度富营养、中度富营养、重度富营养,分别对应 W-F 指数公式的贫营养、中营养、富营养、重度富营养、极富营养.用 W-F 公式计算出的后海、北海和前海的 EI 值 52.58、52.55 和 52.63 仅略高于“重富营养级”下限值 52.49,因而评定为“重富”和“富”营养级都是可以的.所以除团城湖外,对其余 20 个湖泊用 W-F 普适指数公式作出的评价结果与用其余几种评价方法作出的营养状态评价结果基本一致.

(2) 应用 ISSS 算法优化得出的 W-F 指数公式依据的富营养状态分级标准是国内外多数学者通常采用的分级标准.因此,该公式可广泛用于我国湖泊和水库水体的营养状态评价.

(3) 修正的卡森指数公式 TSI_m 仅分别给出了 Chl. a、TP、TN、SD、 COD_{Mn} 和 SS 6 项指标的 TSI_m 计算公式;适用于我国的营养状态指数公式 TSI_e 也仅分别给出了 Chl. a、TP、TN、SD、 COD_{Mn} 和 BOD_5 6 项指标的 TSI_e 计算公式.对表 1 中的其余 8 项指标, TSI_m 和 TSI_e 都未有计算公式,因而无法使用.而本文采用优化算法优化得出的 W-F 公式(6)则是一个对 14 项指标皆通用的营养状态指数公式,因而是一个简单而又普适的公式.

(4) 由于式(6)是一个对 14 项指标中的每一项都“等效”的指数公式,因此,当对 n 项指标作综合评价时,相当于对一项“等效”指标的 n 次不同测试结果求平均值.因而一般而言,在用式(7)求综合 W-F 指数时,只要将各指标视作等权即可.

(5) 应用式(6)和(7)进行富营养化评价时,不用设计评价函数,不用编程计算,就可以作出评价.因此,不但客观,而且计算简便、快速,使用方便.

(6) 除了将 W-F 普适公式(6)和(7)用于实例中的 21 个湖泊富营养化评价外,我们还用式(6)和(7)对和国内其余 65 个湖库进行了营养状态评价(表 3),并与用其他评价方法的评价结果进行了对比,效果均理想,且与实况相符合.

表 3 我国 65 个湖泊水质数据及多种方法评定结果
Tab.3 Eutrophic index values and evaluation results of eutrophication based on Weber-Fischna law and TSI of 65 lakes in China

湖泊	Chl. a ($\mu\text{g/L}$)	TP ($\mu\text{g/L}$)	TN (mg/L)	COD (mg/L)	SD (m)	W-F 法		评定等级		
						EI'_{10}	评定等级	普适指数 公式	TSI_m 公式	TSI_e 公式
1	32.80	168	2.9390	7.55	0.53	0.5549	重富	重富	重富	重富
2	24.08	150	2.4410	6.83	0.43	0.5429	重富	重富 ⁻	重富	富 ⁺
3	57.62	292	2.8270	7.29	0.51	0.5811	重富	重富	重富	重富
4	6.98	88	0.7530	5.52	1.13	0.4432	重富	富	富	富
5	77.02	230	3.5320	8.58	0.51	0.5916	重富	重富	重富	重富
6	72.05	290	3.5420	8.76	0.43	0.6002	重富	重富	重富	重富
7	17.45	172	2.6540	7.99	0.51	0.5401	重富	重富 ⁻	重富	富 ⁺
8	7.89	108	1.7710	5.12	0.58	0.4861	富	富	富	富
9	6.27	59	1.0510	5.95	1.06	0.4424	富	富	富	富
10	25.77	116	2.2750	6	0.54	0.5280	富-重富	富 ⁺	重富 ⁻	富
11	11.32	73	0.8850	3.79	1.38	0.4404	富	富	富	富
12	9.83	86	2.3390	5.45	0.84	0.4852	富	富	富	富
13	4.29	48	0.6170	4.12	2.75	0.3835	富	富	富	富
14	4.83	51	0.6110	3.83	1.56	0.3995	富	富	富	富
15	77.02	189.8	2.0973	8.155	0.44	0.5767	重富	重富	重富	重富
16	71.78	515.4	3.2364	9.6	0.42	0.6146	重富	重富	重富	重富
17	15.67	192.5	3.0350	5.6	0.36	0.5433	重富	重富 ⁻	重富	富 ⁺

续 表

湖泊	Chl. a ($\mu\text{g/L}$)	TP ($\mu\text{g/L}$)	TN (mg/L)	COD (mg/L)	SD (m)	W-F 法		评定等级		
						EF'_{10}	评定等级	普适指数 公式	TSI_m 公式	TSI_c 公式
18	10.40	71.1	1.0030	4.9	0.47	0.4729	富	富	富	富
19	13.81	93.5	0.6711	3.5	0.65	0.4608	富	富	富	富
20	7.15	65.1	0.5234	4.1	0.75	0.4305	富	富	富	富
21	4.37	47.5	0.4166	3.3	1.74	0.3799	中-富	富 ⁻	富	中 ⁺
22	2.26	49.3	0.7366	3.6	0.95	0.3954	富	富	富	富
23	4.05	56.3	0.7414	3.6	0.81	0.4167	富	富	富	富
24	3.45	66.8	0.5980	3.06	0.76	0.4093	富	富	富	富
25	7.52	36	0.3174	2.4	3.72	0.3537	中	中	中	中
26	3.71	51	0.7743	4.1	0.84	0.4155	富	富	富	富
27	2.65	47	0.6170	1.3	1.53	0.3577	中富	中 ⁺	富 ⁻	中
28	24.64	548.9	2.8649	5.6	0.36	0.5781	重富	重富	重富	重富
29	11.66	113.6	1.2096	3.6	0.53	0.4812	富	富	富	富
30	4.72	125.5	1.4293	4.6	0.37	0.4804	富	富	富	富
31	35.80	207.4	2.3598	8.3	0.41	0.5653	重富	重富	重富	重富
32	16.72	68	0.7640	3.7	0.63	0.4629	富	富	富	富
33	3.19	38	0.9970	3.2	0.94	0.4021	富	富	富	富
34	59.36	141	1.8720	4.3	0.49	0.5424	重富	富 ⁺	重富 ⁻	富
35	7.22	72	1.7050	2.7	0.59	0.4574	富	富	富	富
36	5.58	36	0.3480	2.2	1.54	0.3679	富	中 ⁺	富 ⁻	中
37	5.53	38	0.4910	2.4	1.36	0.3824	富	富 ⁻	富	中 ⁺
38	48.98	172	1.8650	5.1	0.86	0.5330	重富	富 ⁺	重富 ⁻	富
39	5.95	43	1.4520	2.2	0.88	0.4218	富	富	富	富
40	9.89	51	0.6000	2.3	0.82	0.4196	富	富	富	富
41	4.27	35	0.5320	2.7	0.97	0.3872	富	富	富	富
42	2.14	30	0.4390	1.7	1.53	0.3399	中	中	中	中
43	14.60	50	1.1390	4.5	0.69	0.4644	富	富	富	富
44	31.02	62	1.2950	4.6	1.19	0.4782	富	富	富	富
45	3.90	44	1.0870	2.1	0.53	0.4163	富	富	富	富
46	0.88	130	0.4100	1.43	2.98	0.3320	中	重富	重富	重富
47	4.33	21	0.1800	3.38	2.40	0.3326	中	重富 ⁻	重富	富 ⁺
48	4.91	50	0.9690	5.42	1.46	0.4206	富	重富	重富	重富
49	16.20	26	1.0200	5.16	1.16	0.4392	富	富	富	富
50	82.40	332	2.6600	14.60	0.49	0.6090	重富	重富	重富	重富
51	95.94	136	2.2300	10.18	0.37	0.5850	重富	重富	重富	重富
52	262.40	500	16.050	13.60	0.15	0.7171	极富	重富 ⁻	重富	富 ⁺
53	185.10	670	7.200	14.80	0.26	0.6852	极富	富	富	富
54	14.60	20	0.2200	1.40	4.50	0.3291	中	富	富	富
55	11.60	80	0.1300	8.29	0.50	0.4403	富	富 ⁺	重富 ⁻	富
56	11.50	100	0.4600	5.5	0.30	0.4784	富	富	富	富
57	189.30	20	0.2300	10.13	0.50	0.4929	富	富	富	富
58	19.00	20	0.2100	1.61	7.03	0.3269	中	富	富	富
59	7060	177	2.8600	51.00	0.41	0.7375	极富	富	富	富
60	945	56	1.0800	3.37	0.87	0.5539	重富	重富	重富	重富
61	916	40	0.8700	3.53	0.92	0.5396	重富	重富	重富	重富
62	1011	42	0.9600	3.68	0.90	0.5471	重富	重富 ⁻	重富	富 ⁺
63	8.90	49	0.5200	2.05	1.50	0.3953	富	富	富	富
64	7.32	45	0.3180	1.28	3.50	0.3448	中	富	富	富
65	51.63	23	0.6200	4.05	1.20	0.4455	富	富	富	富

2000年10月至2003年4月分季度对长江中下游地区65个主要湖泊的水质富营养化指标调查、检测的数据表明^[23-24],从各湖泊的W-F法指数 EI 和所处营养状态可以看出,长江中下游湖泊除少数几个湖泊处于“中”营养状态外,其余绝大多数湖泊已处于“富”或“重富”营养状态水平(表3)。

为了将本文所用方法的评价结果与其它方法的评价结果相比较,表中还同时列出了用修正卡森指数公式 TSI_m 和用适用于我国湖泊的富营养状态指数公式 TSI_c 计算得到的这65个湖泊的营养状态指数值及相应的分级标准的评价结果。

4 结论

(1) 基于W-F定律,并适当设定各项营养指标“参照值”和函数关系式,将指标测值代入函数关系式转换成“规范值”后,提出了适用于以“规范值”表示的14项指标的营养状态韦伯指数公式,该公式不仅是一个普适公式,而且理论基础依据充分。

(2) 采用智能解域搜索算法优化得到的营养状态韦伯指数公式应用于我国较多湖泊的营养状态分析评价,并与其它多种营养状态评价方法的评价结果比较基本一致,从而表明本文得出的营养状态韦伯指数公式是合理的和可行的。

(3) 营养状态韦伯指数公式形式简单,结果直观,计算简便、快速,使用方便,为我国湖泊的富营养化评价提供了一个简单、实用的新公式。

5 参考文献

- [1] Carlson RE. A trophic state index for lakes. *Limnol & Oceanogr*, 1977, **22**(2): 361-369.
- [2] Aizaki M, Otsuki A, Fukushima T *et al.* Application of modified Carlson's trophic state index to Japanese lakes and its relationship between the index and other parameters. *Verh Internat Verein Limnol*, 1981, **21**: 675-681.
- [3] Cai Qinghua, Liu Jiankang, Lorenz King. A comprehensive model for assessing lake eutrophication. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(12): 1674-1678.
- [4] 汪嘉杨,李祚泳,熊建秋等. 混合禁忌搜索算法在湖泊富营养化评价中的应用. *湖泊科学*, 2007, **19**(4): 445-450.
- [5] 蔡庆华. 湖泊富营养化综合评价方法. *湖泊科学*, 1997, **9**(1): 89-94.
- [6] 赵晓莉,李祚泳,闫 军. 人工鱼群算法在湖泊富营养化综合评价中的应用. *水资源保护*, 2008, **24**(1): 49-51.
- [7] 李祚泳,丁 晶,彭荔红. 环境质量评价原理与方法. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [8] 李祚泳,张辉军. 我国若干湖泊水库的营养状态指数 TSI_c 及其与各参数的关系. *环境科学学报*, 1993, **13**(4): 391-397.
- [9] 李祚泳,彭荔红,吕玉嫦. 基于遗传算法优化的普适卡森指数公式. *中国环境科学*, 2001, **21**(2): 148-151.
- [10] 李祚泳,汪嘉杨,赵晓莉等. 富营养化评价的幂函数加和型普适指数公式. *环境科学学报*, 2008, **28**(2): 392-400.
- [11] 聂相田,李亚伟. 基于模糊识别的水体富营养化综合评价. *人民黄河*, 2008, **30**(9): 38-39.
- [12] 胡丽慧,潘 安,李铁松等. 灰色聚类法在升钟水库水体富营养化评价中的应用. *农业环境科学学报*, 2008, **27**(6): 2407-2412.
- [13] 门宝辉,杨兴国,董笑梅. 物元模型在湖泊水体富营养化评价中的应用. *东北水利水电*, 2002, **20**(9): 42-44.
- [14] 陈丽燕,付 强,魏丽丽. 五元联系数在湖泊水质综合评价中的应用. *环境科学研究*, 2008, **21**(3): 82-86.
- [15] 郭 敏,李祚泳,刘智勇等. 一种改进的集对分析法在湖泊富营养化评价中的应用. *水资源保护*, 2009, **25**(2): 5-9.
- [16] 任 黎,董增川,李少华. 人工神经网络在太湖富营养化评价中的应用. *河海大学学报(自然科学版)*, 2004, **32**(2): 147-150.
- [17] 王洪礼,王长江,李胜朋. 基于支持向量机理论的海水水质富营养化评价研究. *海洋技术*, 2005, **24**(1): 48-51.
- [18] 薛文博,爱 华,张增强等. 基于韦伯-费希纳定律的一种新型环境质量评价法. *中国环境监测*, 2006, **22**(6): 57-59.
- [19] 李祚泳,彭荔红. 基于韦伯-费希纳推广定律的环境空气质量标准. *中国环境监测*, 2003, **19**(4): 17-19.
- [20] 邹长武. 智能算法及其在水科学模型参数优化中的应用[博士论文]. 成都: 四川大学, 2008.
- [21] 荆红卫,华 蕾,孙成华等. 北京城市湖泊富营养化评价与分析. *湖泊科学*, 2008, **20**(3): 357-363.
- [22] 江 涛,刘祖发,陈晓宏等. 广东省水库富营养化评价. *湖泊科学*, 2005, **17**(4): 378-382.
- [23] 董旭辉,羊向东,潘红玺. 长江中下游地区湖泊沉积硅藻分布基本特征. *湖泊科学*, 2004, **16**(4): 298-304.
- [24] 董旭辉,羊向东,王 荣等. 长江中下游地区湖泊硅藻-总磷转换函数. *湖泊科学*, 2006, **18**(1): 1-12.