

基于指标规范化的水安全评价组合极值公式

汪嘉杨,张碧,李祚泳,张雪乔

(成都信息工程学院,四川 成都 610041)

摘要:在选取各项指标参照值并设定相应规范变换式的基础上,将参数多元组合算子加以改进,提出适用于多区域、多项指标的、具有普适性的水安全评价组合极值公式,并采用粒子群算法优化公式中的参数。将优化好的具有普适性的组合极值公式应用于实例分析计算,评价结果与其他多种方法的评价结果一致,表明该公式的实用性和可行性。由于基于指标规范化的组合极值公式不受评价指标数目多少的限制,为水安全评价模型的普适化、简单化提供了一条途径。

关键词:规范化;组合极值公式;粒子群算法;水安全评价

中图分类号:P641.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0852(2013)03-0005-05

水资源是基础性的自然资源和战略性的经济资源,是一个国家和区域生存和发展的基本保障。随着我国社会、经济的快速发展,人口膨胀、城市化进程加快使得我国水资源问题面临严峻挑战,特别是水安全问题凸显,如水资源短缺、洪涝干旱、突发水环境污染事件等,已经成为所有自然资源可持续开发利用中最重要的一类问题。同时,我国水资源的人均占有量少,时空分布变异性大,与土地资源的匹配状况不理想,生态环境相对脆弱,城市化进程加快,水安全问题更为明显^[1-3]。因此,近年来水安全问题已成为研究热点,并引起社会的广泛关注。

在水安全研究中,水安全的范畴、水安全的度量、水安全评价和水安全保障体系的建设等都是其研究的主要内容。近年来国内外学者对水安全评价方法进行了有益的探讨,提出了模糊评判法、灰色评价法、集对分析法、投影寻踪评价法等多种评价法^[4-8]。但这些方法多数需要设计各评价指标对各级标准的隶属函数及各个影响因子的权重,而且这些函数或表达式无规范的设计形式,可以因人而异,因此主观性较大,难以反映综合水安全情况,限制了评价方法的通用性,也影响了结果的可靠性。指数评价法由于公式形式简单、直观、易于计算,结果又能以一个数值来表示而常被使

用。但是,由于各水安全评价指标的单位、量纲并不完全相同,致使不同指标的同级标准值差异很大,很难对于多标准进行统一处理,而且有的指标相邻两级分级标准值都是相同的,给评价公式的等级划分带来一定困难。由于水安全评价因子众多,且它们均与水安全级别之间存在非常复杂的非线性关系,故增加了对其准确评价的难度,故而至今还没有形成一种统一的方法。

李祚泳^[9]在著作中借鉴物理学中普遍存在的规范不变性(对称性)原理,提出了规范化思想。其实现方式:通过设定各指标适当的“参照值”和规范变换式,使不同指标的同级标准值经规范变换后的“标准规范值”彼此差异很小,从而认为用规范值或对数变换值表示的不同指标都与某个指标“等效”^[9]。文献[10]将规范化方法应用到地面水、地下水和湖泊富营养化评价中,提出地表水、地下水和富营养化共同适用的六种普适指数公式,并对公式的可靠性进行了理论分析并通过若干实例对公式的实用性进行了效果检验。文献[11-12]通过对评价指标体系进行规范化处理后,提出应用于地面水水质未确知测度模型、模糊综合评价模型、径向基函数神经网络模型。

因此,本文借鉴 Zimmerann 提出的处理模糊问题的参数多元组合算法的思想^[9],对参数多元组合算法

收稿日期:2012-04-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51209024);四川省科技厅项目(2013ZR0080);成都信息工程学院科研基金(J201214,KYTZ201303)

作者简介:汪嘉杨(1980-),女,四川泸州人,博士,讲师,主要研究方向为水文水资源与水环境。E-mail: wjj@cuit.edu.cn

加以改进,并在选取各项指标的参照值并设定相应的规范变换式基础上,提出适用于多项指标的、具有普适性的水安全评价的组合极值公式。该公式不受评价指标数目多少的限制,为评价模型的普适化、简单化提供了一条途径。通过应用于多个实例分析,并与其他方法的评价结果对比,表明了评价公式的正确性和实用性。

1 水安全评价指标体系及规范化

国内用于水安全评价的方法和模型已有多种,其中用于水安全评价的指标更是各不相同。根据对水安全评价指标体系构建原理的分析,采用文献[4]中水安全评价指标体系作为水安全评价建模依据,评价指标体系包含25个评价指标及其5级分级标准,如表1所示。

由表1可以看出,由于水安全各评价指标的单位、量纲并不完全相同,致使不同指标的同级标准值差异很大,有的相差几个数量级。通过对每个指标分别设定

一个“参考值” c_{i0} 和规范变换式,使得由各规范变换式计算得到的同一级标准的不同指标的“规范值” x'_{ij} (i 代表指标, j 代表级别)差异不大,至多不能超过一个数量级。其设定原则为^[9]:通过对各项指标各级标准值的观察、分析、比较和提炼,使不同指标的同级标准值经规范变换后的同级标准规范值 x'_{ik} 差异尽可能小,而不同标准之间的标准规范值差异尽可能大。这一过程需要对选择的 c_{i0} 和规范变换式反复设置、试算和调整,直到满意为止。水安全规范变换式如下。

$$x_i = \begin{cases} (c_{i0}/c_i)^{0.5} \cdots \cdots \text{对指标 } x_{13}, x_{14}, x_{17}, x_{21}, x_{22} \\ (c_{i0}/c_i) \cdots \cdots \text{对指标 } x_7, x_8, x_{11}, x_{12}, x_{15}, x_{16}, x_{19}, x_{23}, x_{25} \\ (c_{i0}/c_i)^2 \cdots \cdots \text{对指标 } x_1, x_2, x_6, x_{20} \\ (c_{i0}/c_i)^3 \cdots \cdots \text{对指标 } x_3 \\ (c_i/c_{i0})^{0.5} \cdots \cdots \text{对指标 } x_4, x_{18} \\ (c_i/c_{i0})^2 \cdots \cdots \text{对指标 } x_5, x_9 \\ (c_i/c_{i0})^3 \cdots \cdots \text{对指标 } x_{10} \end{cases} \quad (1)$$

表1 水安全评价指标分级标准
Table1 The index grading standard for water safety comprehensive assessment

子系统	评价指标	单位	良好	安全	临界	不安全	危险	c_{i0}
资源安全系统	人均水资源量	m ³ /人	>250	250~215	215~185	185~150	≤150	400
	亩均水资源量	m ³ /亩	≥290	290~260	260~210	210~170	≤170	470
	水源地水质达标率	%	≥90	90~80	80~75	75~70	≤70	130
	地表水开发利用率	%	≤10	10~20	20~40	40~60	≥60	1.5
	地下水开发利用率	%	≤10	10~20	20~40	40~60	≥60	1.5
	本地淡水资源供水量	10 ⁸ m ³	≥14	14~12	12~10.5	10.5~8.0	≤8.0	23
	非传统水资源供水量	10 ⁸ m ³	≥0.4	0.4~0.3	0.3~0.2	0.2~0.1	≤0.1	1.1
生命安全系统	人均粮食产量	kg/人	≥350	350~310	310~260	260~200	≤200	1200
	工业用水水平(万元产值用水量)	m ³ /万元	≤58	58~78	78~90	90~100	≥100	35
	农业用水水平(农田灌溉亩均用水量)	m ³ /亩	≤320	320~350	350~380	380~430	≥430	225
	城市生活用水水平	L/(人·日)	≥280	280~220	220~150	150~89	≤89	690
	农村生活用水水平	L/(人·日)	≥120	120~100	100~70	70~50	≤50	330
	人均GDP	万元/人	≥7.74	7.74~2.5	2.5~0.66	0.66~0.3	≤0.3	31
	GDP 年增长率	%	≥9	9~6	6~4	4~2	≤2	100
管理安全系统	工业水重复利用率	%	≥90	90~80	80~60	60~40	≤40	250
	污水处理率	%	≥90	90~70	70~50	50~30	≤30	190
	中水回收率	%	≥50	50~35	35~25	25~15	≤15	400
	海水入侵面积比例	%	≤1	1~2	2~5	5~10	≥10	0.15
	水土流失治理面积率	%	≥80	80~65	65~50	50~40	≤40	250
	城市绿化覆盖率	%	≥50	50~40	40~35	35~30	≤30	80
	环境保护投资指数	%	≥1.7	1.7~1.2	1.2~0.7	0.7~0.2	≤0.2	13
	水价	元/m ³	≥5.0	5.0~4.0	4.0~2.5	2.5~1.0	≤1.0	42
	城市防洪抗旱能力		≥0.85	0.85~0.7	0.7~0.6	0.6~0.5	≤0.5	2.5
	水市场化程度		≥0.85	0.85~0.7	0.7~0.6	0.6~0.5	≤0.5	2.5
	人民道德意识		≥0.85	0.85~0.7	0.7~0.6	0.6~0.5	≤0.5	2.5

$$x'_i = \frac{1}{5} \ln x_i \quad (2)$$

式中: c_{i0} 为各指标的参照值; x'_i 为各指标的规范变换值。

2 水安全评价的组合极值普适评价公式

2.1 基本原理

借鉴 Zimmerann 提出的处理模糊问题的参数多元组合算法的思想,对参数多元组合算法加以改进,提出用于区域水安全评价的组合极值公式。水安全评价是一个模糊性问题,将 Zimmerann 提出的处理模糊问题的参数多元组合算法用于水安全评价。设 A_i ($i=1, 2, \dots, N$) 为用隶属度表示的 N 个模糊集合,则由这 N 个模糊集合构成的多指标组合算子公式为:

$$C_\alpha(A_1, A_2, \dots, A_n) = \left(\bigcap_{i=1}^N A_i \right)^\alpha \left(\bigcup_{i=1}^N A_i \right)^{1-\alpha} \quad (3)$$

式中: $\bigcap_{i=1}^N A_i$ 表示取 N 个隶属度中的极小; $\bigcup_{i=1}^N A_i$ 表示取 N 个隶属度中的极大; α 为组合算子参数,需要优化确定。

把水安全的 j 个评价等级标准视作多指标组合算子公式的 y_j , 它为样本各指标规范化值 $\{x'_{ij}\} = (x'_{1j}, x'_{2j}, \dots, x'_{Nj})$, ($N=1, 2, \dots, 25$) 的函数,由式(4)多指标参数组合运算确定:

$$y_j = \left(\min_{1 \leq i \leq N} x'_{ij} \right)^\alpha \cdot \left(\max_{1 \leq i \leq N} x'_{ij} \right)^{1-\alpha} \quad (4)$$

式中:参数 α 需由 M 个建模样本优化确定。当参数 α 被优化确定后,就可以计算某个待评价样本所属评价等级。

多指标参数组合运算式(4)中需要计算求得同级各标准中的最大及最小,如果同级标准中最小为接近于0或等于0的极端情况,则多指标参数组合运算式(4)计算的评价结果就为0,使得评价结果不能很好地代表待评价样本的实际情况,不能正确地给出评价等级。因此,将参数组合化算子公式加以改进,提出用于水安全评价的组合极值公式。组合极值公式中,计算指标最大值和平均值作为评价因子,目的是为了突出最大值指标和指标整体对评价结果的影响,因为最大值指标代表该区域水安全的最极端情况,该指标往往

是对区域水安全评价影响最大的指标,而指标平均值代表了该区域水安全的综合情况。组合极值公式如式(5)所示。

$$PI = (\bar{x}')^\alpha \cdot \left(\max_{1 \leq i \leq N} x'_i \right)^{1-\alpha} \quad (5)$$

式中: \bar{x}' 为样本各指标规范化值的平均值。

2.2 参数的确定

组合极值公式(5)中参数 $\alpha \in [0, 10]$ 需要优化确定,采用粒子群算法^[13]优化时,需要构造满足式(6)的优化目标函数:

$$\min Q = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 (PI_j - PI_{j0})^2 \quad (6)$$

式中: PI_j 为由式(5)计算得到的第 j 等级的评价指数值; PI_0 为与指标性质无关,而仅与 j 级标准有关的指数目标值,可分别设定为 $PI_0=0.20, PI_0=0.25, PI_0=0.30, PI_0=0.40, PI_0=0.45$ 。在满足优化目标函数式(5)条件下,用粒子群算法对式中的 α 进行优化。当 $\min Q=0.00061$ 时,优化得到 $\alpha=0.5706$,从而得到优化好的具有普适性的水安全组合极值公式。

$$PI = (\bar{x}')^{0.5706} \cdot \left(\max_{1 \leq i \leq N} x'_i \right)^{0.4294} \quad (7)$$

将表1中25项指标的各级标准值采用式(1)和(2)计算得到“规范值”后代入式(7),得到水安全组合极值公式的分级标准: $PI_1=0.1968, PI_2=0.2429, PI_3=0.3091, PI_4=0.3787, PI_5=0.4530$ 。因此得到水安全评价准则为:一级: $PI \in [0, 0.1968]$, 二级: $PI \in (0.1968, 0.2429]$, 三级: $PI \in (0.2429, 0.3091]$, 四级: $PI \in (0.3091, 0.3787]$, 五级: $PI \in (0.3787, 0.4530]$ 。

3 实例分析

3.1 大连市水安全评价

将大连市2000~2007年7个水安全待评样本的各指标值经过规范化式(1)和式(2)处理后代入式(7),计算得到的各项指标的组合极值指数和相应的评价等级,如表2所示,表2还列出了采用模糊可变集合评价法、未确知测度模型、PNN模型等的评价结果^[4,8]。从表可以看出,多种评价方法得到的评价结果是基本一致

的,表明了组合极值公式的正确性。

表2 大连市水安全几种方法的评价结果
Table2 The results of several water safety evaluation methods for Dalian City

年份	组合极值公式		模糊可变 集合评价	未确知测 度模型	PNN 模型
	评价指数	评价等级			
2000	0.3724	4	4	4	4
2001	0.3778	4	4	4	4
2002	0.3816	5	5	4	4
2003	0.3685	4	4	4	4
2004	0.3093	3	3	3	3
2005	0.2986	3	3	3	3
2006	0.2951	3	3	3	3
2007	0.2982	3	2	3	3

3.2 湘江流域水安全评价

湘江流域水安全评价指标体系以及 2000 年、2010 年 2 个待评样本^[3]为评价实例,采用组合极值公式进行评价,如表 3 所示。

湘江流域水安全各评价指标的单位、量纲并不完全相同,不同指标的同级标准值差异较大,并且部分评价指标与表 1 中 25 项水安全指标及其分级标准并不一致。因此,为了使依据表 1 所列的水安全评价指标及其分级标准所建立的指数公式和评价模型适用于湘江流域水安全评价,适当设定湘江流域水安全各指标“参照值” c_{i0} (如表 3 所示)和规范变换式。

$$x_i = \begin{cases} (c_{i0}/c_i)^{0.5} \cdots \cdots \text{对指标 } x_1, x_2, x_5, x_7, x_{10} \\ (c_{i0}/c_i) \cdots \cdots \text{对指标 } x_3 \\ (c_{i0}/c_i)^2 \cdots \cdots \text{对指标 } x_6, x_8 \\ (c_i/c_{i0})^2 \cdots \cdots \text{对指标 } x_4, x_9 \\ (c_i/c_{i0})^3 \cdots \cdots \text{对指标 } x_{11} \end{cases} \quad (8)$$

表3 湘江流域水安全评价指标体系及待评方案

Table3 The index grading standard of the water safety assessment and the feasible scheme of the Xiangjiang River basin

指标	序号	2000年	2010年	c_{i0}
人均水资源占有量/(m^3 /人)	x_1	2400	2050	1700
水资源利用率/%	x_2	80	60	40
森林覆盖率/%	x_3	30.75	26.5	18
水土流失率/%	x_4	10	11.2	12.5
污水处理达标率/%	x_5	100	75	50
经济增长速度/%	x_6	15	12.5	9
水利投资增长率/%	x_7	10	7.5	5
工业固体废物综合利用率/%	x_8	95	80.5	66
人口增长率/%	x_9	7	9	10
青壮年完成中等教育人数比/%	x_{10}	19	15.5	13
恩格尔系数	x_{11}	0.4	0.44	0.48

$$x'_i = \frac{1}{5} \ln x_i \quad (9)$$

式中: c_{i0} 为各指标的参照值; x'_i 为各指标的规范变换值。

将表 3 所示湘江流域水安全评价指标分级标准按规范化式(8)和式(9)进行处理后,代入式(7)中计算得到组合极值公式评价分级标准: $PI = 0.1766, PI = 0.2201, PI = 0.2998, PI = 0.3647, PI = 0.4632$ 。同样,将湘江流域 2000 年和 2010 年的评价指标值规范化处理后代入公式(7),就可以直接得到 2000 年和 2010 年的水安全评价指数值为 0.2791 和 0.1780,相应的评价等级为: 等和 等。该评价结果和距离指数法及可变模糊集法^[3]的评价结果是完全一致的,表明了组合极值公式的正确性和实用性。

4 结论

(1)通过对参数多元组合算法的改进,提出用于区域水安全评价的组合极值公式。

(2)提出适用于多项指标的、具有普适性的水安全评价的组合极值公式。该公式不受评价指标数目多少的限制,优化后的组合极值公式(7)可直接用于任何区域的水安全评价,不受样本和指标个数的影响,使计算大为简化,为评价模型的普适化、简单化提供了一条途径。

(3)适用于多项指标的、具有普适性的水安全评价的组合极值公式被用于多个实例分析计算,并与其它多种评价方法的评价结果进行了比较,结果相一致,也与实况相符合,从而表明了该公式的合理性和实用性。

参考文献:

- [1] Beekman G B. Social change and water resource planning and development [J]. International journal of water resources development, 2002, 18 (1): 183-195.
- [2] Mark Rosegrant, Ruthmeized Dick. Water resource in the Asia pacific region[J]. Asian Pacific Economic Literature, 1996, (9): 25-28.
- [3] 陈绍金. 水安全系统评价、预警与调控研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.(CHEN Shaojin. Assessment, Early Warning and Regulation of Water Security System[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2006. (in Chinese))
- [4] 吴丽. 城市水资源系统中若干重要问题的研究[D]. 大连理工大学博士学位论文, 2009.(WU Li. The Study on Several Important Problems in Urban Water Resources System [D]. PhD dissertation of Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese))
- [5] 李祚泳, 张正健, 余春雪, 等. 水安全评价的参数化组合算子普适指数公式 [J]. 水文, 2012, 32 (1): 6-12.(LI Zuoyong, ZHANG Zhengjian, YU Chunxue, et al. Universal index formula of parameterized combination operator for water security evaluation[J]. Journal of China Hydrology, 2012, 32(1): 6-12.(in Chinese))
- [6] 金菊良, 吴开亚, 魏一鸣. 基于联系数的流域水安全评价模型[J]. 水利学报, 2008, 39 (4): 401-409.(JIN Juliang, WU Kaiya, WEI Yiming. Connection number based assessment model for watershed water security [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(4): 401-409. (in Chinese))
- [7] 丁恒康, 李祚泳, 汪嘉杨. 基于熵变加权法的水安全综合指数评价 [J]. 成都信息工程学院学报, 2010, 25 (3): 312-316.(DING Hengkang, LI Zuoyong, WANG Jiayang. Comprehensive index assessment of water safety based on entropy weight coefficient method [J]. Journal of Chengdu University of Information Technology, 2010, 25(3): 312-316. (in Chinese))
- [8] 汪嘉杨. 区域水安全综合评价方法研究 [D]. 四川大学博士学位论文, 2011.(WANG Jiayang. Studies on Comprehensive Evaluation Method of Regional Water Security[D]. PhD dissertation of Sichuan University, 2011. (in Chinese))
- [9] 李祚泳, 王文圣, 张正健, 等. 环境信息规范对称与普适性 [M]. 北京: 科学出版社, 2011. (LI Zuoyong, WANG Wensheng, ZHANG Zhengjian, et al. Normalization Symmetry and Unversality on Environment Information [M]. Beijing: Science Press, 2011: 35-36. (in Chinese))
- [10] 李祚泳, 张正健, 汪嘉杨, 等. 基于水环境信息规范变换的水质普适指数公式[J]. 环境科学学报, 2012, 32(3): 668-677. (LI Zuoyong, ZHANG Zhengjian, WANG Jiayang, et al. Universal index formulae of water quality based on normalized transformation of water environment information [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(3): 668-677. (in Chinese))
- [11] 余春雪, 李祚泳, 汪嘉杨. 指标规范值的未确知测度模型用于地表水水质评价 [J]. 水文, 2011, 31(3): 51-55.(YU Chunxue, LI Zuoyong, WANG Jiayang. Surface water quality evaluation using unascertained measure model based on normalized index values [J]. Journal of China Hydrology, 2011, 31 (3): 51-55.(in Chinese))
- [12] 李祚泳, 余春雪, 张正健. 基于指标规范值的环境质量突变模糊普适指数公式[J]. 环境工程, 2012,30(2): 93-97.(LI Zuoyong, YU Chunxue, ZHANG Zhengjian. Exponent formulae of environmental quality evaluation with normalized index values based on catastrophe[J]. Environmental Engineering, 2012,30(2): 93-97.(in Chinese))
- [13] Idel Montalvo, Joaquin Izquierdo, Rafael Perez, et al. Particle swarm optimization applied to the design of water supply systems [J]. Computers and Mathematics with Applications, 2008, 56: 769-776

A Combination Extreme Formula for Water Safety Evaluation Based on Standardized Indicators

WANG Jiayang, ZHANG Bi, LI Zuoyong, ZHANG Xueqiao

(Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610041, China)

Abstract: A parameter combination extreme formula for water safety assessment, which was universal and suited to a number of indicators and several regions, was proposed based on the reference value of all indicators and the appropriate standardization transformation formula. The particle swarm optimization was used in optimization of the parameters in the formula. The optimized combination extreme formula with universality was used in case study. The results show the practicality and feasibility of the formula. The combination extreme formula based on standardized indicators was not restricted by the numbers of the evaluation indexes, it provides a new approach to the water safety evaluation model to be universal and simplified.

Key words: standardization; parameters combination extreme formula; particle swarm optimization; water safety assessment