

基于广义对比加权的水安全综合指数评价

李祚泳^{1,2},汪嘉杨^{1,2},王文圣²,乌 敏¹

(1. 成都信息工程学院资源环境学院,四川 成都 610041; 2. 四川大学水利水电学院,四川 成都 610065)

摘要 为了构建水安全综合评价模型,在分别提出‘正向’和‘逆向’指标安全指数公式基础上,采用广义模糊对比加权法对水安全评价体系的各个子系统进行赋权,得到水安全综合评价指数公式。应用该方法对山东省区域水资源进行安全评价,并与应用属性识别理论法和贝叶斯法对该例的评价结果相比较,结果一致,表明了该方法应用于区域水安全评价的可行性和实用性。

关键词 水安全;评价指数;广义对比加权;山东省

中图分类号 X824 **文献标识码** A **文章编号** 1004-6933(2009)04-0005-03

Comprehensive index assessment method of water safety based on weighted method with generalized contrast

Li Zuo-yong^{1,2}, WANG Jia-yang^{1,2}, WANG Wen-sheng², WU Min¹

(1. College of Resource and Environment, Chengdu University of Information and Technology, Chengdu 610041, China; 2. School of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract : In order to construct a comprehensive assessment model of water safety, an index formula for comprehensive assessment of water safety was proposed to give weight to each subsystem of the water safety system using a weighted method with generalized fuzzy contrast, based on the designed ‘positive index’ and ‘converse index’ safety formulas. The method was applied to the practical water safety assessment of Shandong Province, and the results were in good agreement with the results obtained with the attribute recognition theory method and the Bayes method. This proves the feasibility and practicability of the method in regional water safety assessment.

Key words : water safety; assessment index; weighting with generalized contrast; Shandong province

水安全问题是一个涉及生态、经济、社会等多方面的问题,它直接关系到一个国家或地区的稳定和安全,因而已愈来愈受到各国的关注。我国人均水资源占有量低,水体污染严重,水安全问题不容忽视,东部某些经济较发达地区水安全问题尤为突出。水安全评价是水环境管理决策的基础,其目的是综合评价一个国家或地区的水安全状况,并根据水安全真实状态的评价结果,制订出相应的措施,以保障该国或该区域社会、经济及生态环境的可持续发展。因此,有必要对水安全进行客观、合理的评价。

近年来,国内外学者已建立了若干水安全评价的模型和方法,主要的有水贫困指数法^[1-2]、主分量分析评价法^[3]、模糊评价法^[4]、物元评价法^[5]、集对

分析评价法^[6]、层次分析评价法^[7]、属性识别理论评价法^[8]等以及若干方法的相互耦合^[9]。这些方法各有其特点,主分量分析评价法虽然能在原始数据信息丢失较少的情况下,对高维变量进行降维处理,以少数的综合变量取代原有的多维变量,作出综合评价,但计算过程较复杂。模糊评价法、灰色评价法、物元评价法和集对分析评价法等均需要设计诸多的各类评价函数,当指标数据较多时,工作量大,且这些函数的设计无规律可循,主观性较大。层次分析评价法是一种定性与定量相结合的决策评价法,充分体现了评价决策思维的分解、判断和综合的特征,但有时构造的判断矩阵并不具有一致性,而且评价结果亦过多地依赖于决策者的偏好和主观判断。因而上

述方法在实际应用中均受到一定限制。

本文在对水安全评价指标体系归类和建立分级标准的基础上,提出了用于水安全评价的单项指标的安全指数公式,并应用广义模糊对比加权法对水安全评价体系的各子系统加权,得到水安全综合评价指数公式,将该公式应用于山东省水安全评价的实例分析,进行效果检验。

1 水安全评价指标体系的建立及分级标准

水安全涉及范围涵盖了生命、生态环境、经济、社会和管理等多方面的内容。其评价指标既包含静态指标,又包含动态指标;既有定量指标,又有定性指标。其指标选取和分级标准还因所考察区域不同或所处的社会、经济发展阶段而异。例如文献[8]中,山东省水资源安全评价选取了如表 1 所示的 23 个评价指标及其 5 级分级标准。这些指标分别属于生命安全、经济安全、生态环境安全、社会安全和管理安全等 5 个水安全子系统。

2 水安全评价指数公式

2.1 单指标指数计算公式

水安全评价的指标体系中,有的指标值愈大愈

安全,此类指标称为‘正向’指标,有的指标值则是愈小愈安全,此类指标称为‘逆向’指标。为此,对‘正向’指标,安全指数设计为

I_i = \begin{cases} 0 & x_i < x_{im} \\ \frac{x_i - x_{im}}{x_{iM} - x_{im}} & x_{im} \leq x_i \leq x_{iM} \\ 1 & x_i > x_{iM} \end{cases} \quad (1)

对‘逆向’指标,安全指数设计为

I_i = \begin{cases} 1 & x_i < x_{im} \\ 1 - \frac{x_i - x_{im}}{x_{iM} - x_{im}} & x_{im} \leq x_i \leq x_{iM} \\ 0 & x_i > x_{iM} \end{cases} \quad (2)

式中: x_i 为指标 i 的实际值; x_{im} 和 x_{iM} 分别为指标 i 设置的极小值和极大值,如表 1 所示。

2.2 水安全综合评价指数公式

求得单指标安全指数后,将各子系统所包含的所有单指标安全指数求平均,得到子系统 j 的平均安全指数 \bar{I}_j, 简称为水安全均值指数。区域总的水安全综合指数计算公式为

I = \sum_{j=1}^m W_j \bar{I}_j \quad (3)

式中: \bar{I}_j 为子系统 j 的水安全均值指数; W_j 为相应于

表 1 山东省水安全评价指标分级标准及可行方案

水安全分级、 方案与极值	生命安全指标				经济安全指标					生态安全指标			
	x_1/m^3	x_2/L	x_3/%	x_4/元	x_5/m^3	x_6/%	x_7/kg	x_8/hm^2	x_9/%	x_{10}/%	x_{11}/%	x_{12}/%	x_{13}/%
I (非常安全)	1 100	220	99.5	15 000	5.0	90	530.0	0.073	98.0	98.0	95.0	1.00	0.5
II (安全)	875	180	97.5	13 458	16.5	80	466.5	0.061	82.5	92.5	82.5	4.35	2.5
III (基本安全)	625	140	94.5	10 670	30.0	70	399.5	0.050	67.5	87.5	67.5	6.60	5.5
IV (不安全)	375	100	91.5	7 882	43.5	60	333.0	0.037	52.5	82.5	52.5	8.85	8.5
V (极不安全)	225	60	88.5	5 000	55.0	50	280.0	0.030	38.0	75.0	38.0	12.25	13.0
方案 1	350	80	95.0	11 700	16.0	70	400.0	0.055	80.0	100.0	100.0	0.44	1.0
方案 2	347	75	93.0	11 660	15.0	68	390.0	0.054	75.0	90.0	96.0	0.30	0.6
方案 3	344	71	90.0	11 618	15.0	65	377.0	0.053	70.0	70.0	95.0	0.10	0.5
极大值	1 200	300	100.0	20 000	80.0	100	800.0	0.100	100.0	100.0	100.0	15.00	15.0
极小值	200	60	80.0	3 000	3.0	30	250.0	0.020	30.0	60.0	20.0	0.50	0.3

水安全分级、 方案与极值	社会安全指标					管理安全指标				
	x_{14}/%	x_{15}/%	x_{16}/%	x_{17}/%	x_{18}/%	x_{19}/%	x_{20}/%	x_{21}	x_{22}/%	x_{23}
I (非常安全)	3.00	1.000	0.50	97.0	97.0	1.500	97.00	0.950	6.00	0.95
II (安全)	9.15	3.335	1.65	91.0	91.0	0.870	93.35	0.835	4.75	0.85
III (基本安全)	17.45	5.505	2.80	83.0	83.0	0.605	90.05	0.705	3.25	0.75
IV (不安全)	25.80	8.170	4.30	74.5	74.5	0.335	86.70	0.570	1.75	0.65
V (极不安全)	34.00	13.000	5.50	65.0	65.0	0.150	81.00	0.450	0.50	0.55
方案 1	49.00	0.053	2.48	40.0	70.0	0.250	85.00	0.600	2.00	0.80
方案 2	36.00	0.040	2.15	30.0	60.0	0.230	82.00	0.580	1.50	0.70
方案 3	20.00	0.020	1.80	20.0	50.0	0.220	80.00	0.550	1.00	0.60
极大值	60.00	15.000	10.00	100.0	100.0	2.000	100.00	1.000	6.00	1.00
极小值	2.00	1.000	0.40	20.0	50.0	0.100	75.00	0.400	0.40	0.40

注: x_1 为人均水资源量; x_2 为人均生活用水量; x_3 为饮用水水质达标率; x_4 为人均 GDP; x_5 为工业万元产值取水量; x_6 为工业用水重复利用率; x_7 为人均粮食; x_8 为人均有效灌溉面积; x_9 为地表水水质(地表水中Ⅳ类水及优于Ⅳ类水水量占地表总水量的百分比); x_{10} 为地下水水质(地下水中Ⅲ类水及优于Ⅲ类水水量占地下水总量的百分比); x_{11} 为客水水质(客水中Ⅲ类水水量占客水总量的百分比); x_{12} 为污径比; x_{13} 为土壤盐渍化率; x_{14} 为干旱受灾面积率; x_{15} 为洪涝受灾面积率; x_{16} 为水灾害损失占 GDP 的比例; x_{17} 为河道防洪达标率; x_{18} 为城市防洪达标率; x_{19} 为水利投资占 GDP 的比例; x_{20} 为城市管网供水利用率; x_{21} 为灌溉水利用系数; x_{22} 为水利现代化投资比例; x_{23} 为管理人员学历结构系数。

子系统 j 对水安全综合评价的归一化权值; m 为子系统数目。

2.3 广义模糊对比加权公式

对于每个子系统而言,当其水安全均值指数很小时,其对水体综合安全的影响程度增长比较缓慢;而当子系统的水安全均值指数很大而趋于饱和时,其对水体安全的影响程度的增长亦趋于平缓。因此,各子系统对水安全综合评价的贡献大小不应是简单的线性关系,而应是‘具有较小水安全均值指数的子系统的权值变化应比线性变化有所增强’而具有较大水安全均值指数的子系统的权值变化应比线性变化有所减弱’而具有中等程度大小的水安全均值指数的子系统的权值的增强和减弱不应明显。即应适当增大较小安全均值指数的子系统在综合评价中的重要性,而适当抑制较大安全均值指数的子系统在综合评价中的重要性。满足上述要求的子系统的权值计算式可采用如式(4)所示的广义模糊对比加权公式^[10]：

$$W''_j = \begin{cases} \bar{I}_j^{1/2} & 0 \leq \bar{I}_j \leq 0.5 \\ 1 - \left(\frac{1 - \bar{I}_j}{2}\right)^{1/2} & 0.5 \leq \bar{I}_j \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\bar{I}_j$ 为计算得到的子系统 j 的单指标水安全均值指数。 W''_j 还应归一化为如式(5)所示的归一化权值 W_j 。

$$W_j = W''_j / \sum_{j=1}^m W''_j \quad (5)$$

3 实例分析

3.1 广义对比加权的山东省水安全综合指数评价结果

以文献[8]中的山东省水安全评价的 5 个子系统共 23 个评价指标的分级标准和可供选择的 3 个方案为范例,用本文提出的方法进行水资源安全评价。

23 个指标中除 x_5 、 $x_{12} \sim x_{16}$ 等 6 个指标属于‘逆向’指标外,其余 17 个指标皆属‘正向’指标。由公式(1)或(2)计算得到表 1 中 5 个分级标准和 3 个方

表 3 各子系统分级标准和可行方案的水安全均值指数及相应权值

水安全分级 及方案	子系统安全指数均值					各子系统归一化权值					综合安全 指数 I	评价 级别
	$\bar{I}_1$	$\bar{I}_2$	$\bar{I}_3$	$\bar{I}_4$	$\bar{I}_5$	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5		
I	0.8472	0.7426	0.9622	0.9353	0.9283	0.1876	0.1662	0.2235	0.2126	0.2101	0.8913	
II	0.6833	0.6121	0.7857	0.7821	0.7464	0.1912	0.1777	0.2137	0.2128	0.2045	0.7265	
III	0.4944	0.4629	0.6085	0.6459	0.5506	0.1883	0.1822	0.2111	0.2193	0.1992	0.5572	
IV	0.3056	0.3148	0.4313	0.4944	0.3523	0.1802	0.1829	0.2141	0.2292	0.1935	0.3865	
V	0.1500	0.1815	0.2080	0.3248	0.1478	0.1742	0.1916	0.2051	0.2563	0.1729	0.2123	
方案 1	0.3278	0.5241	0.9333	0.4503	0.4214	0.1517	0.192	0.3064	0.1779	0.1721	0.5889	III
方案 2	0.2865	0.5152	0.8645	0.4375	0.3191	0.1518	0.2036	0.2967	0.1876	0.1602	0.5381	IV
方案 3	0.2299	0.4981	0.7491	0.4345	0.2226	0.1485	0.2185	0.2828	0.2041	0.1461	0.4760	IV

案的各个指标的水安全指数 I_i 如表 2 所示。各个子系统的水安全均值指数 $\bar{I}_j$ ($j = 1 \sim 5$) 见表 3。由广义模糊对比加权公式(4)和(5)计算得到 5 级标准和 3 个方案的各个子系统的归一化权值 W_j (表 3),再由公式(3)计算得到 5 级标准和 3 个方案的水资源系统的水安全综合评价指数 I (表 3)。根据水安全综合指数的分级标准,方案 1 应属于基本安全(Ⅲ级),方案 2 和方案 3 皆属于不安全(Ⅳ级)。

表 2 评价指标的分级标准和可行方案的安全指数值

子 评价 系统 指标		安全指数 I_i							
		I	II	III	IV	V	方案 1	方案 2	方案 3
生命 安全	x_1	0.9000	0.6750	0.4250	0.1750	0.0250	0.1500	0.1470	0.1440
	x_2	0.6667	0.5000	0.3333	0.1667	0.0000	0.0833	0.0625	0.0458
	x_3	0.9750	0.8750	0.7250	0.5750	0.4250	0.7500	0.6500	0.5000
经济 安全	x_4	0.7059	0.6152	0.4512	0.2872	0.1176	0.5118	0.5094	0.5069
	x_5	0.9740	0.8247	0.6494	0.4740	0.3247	0.8312	0.8442	0.8442
	x_6	0.8571	0.7143	0.5714	0.4286	0.2857	0.5714	0.5429	0.5000
	x_7	0.5091	0.3936	0.2718	0.1509	0.0545	0.2727	0.2545	0.2309
	x_8	0.6667	0.5125	0.3708	0.2333	0.1250	0.4333	0.4250	0.4083
	x_9	0.9714	0.7500	0.5357	0.3214	0.1143	0.7143	0.6429	0.5714
生态 安全	x_{10}	0.9500	0.8125	0.6875	0.5625	0.3750	1.0000	0.7500	0.2500
	x_{11}	0.9375	0.7813	0.5938	0.4063	0.2250	1.0000	0.9500	0.9375
	x_{12}	0.9655	0.7345	0.5793	0.4241	0.1897	1.0000	1.0000	1.0000
	x_{13}	0.9864	0.8503	0.6463	0.4422	0.1361	0.9524	0.9796	0.9864
社会 安全	x_{14}	0.9828	0.8767	0.7336	0.5897	0.4483	0.1897	0.4138	0.6897
	x_{15}	1.0000	0.8332	0.6782	0.4879	0.1429	1.0000	1.0000	1.0000
	x_{16}	0.9896	0.8698	0.7500	0.5938	0.4688	0.7833	0.8177	0.8542
	x_{17}	0.9625	0.8875	0.7875	0.6813	0.5625	0.2500	0.1250	0.0000
	x_{18}	0.9400	0.8200	0.6600	0.4900	0.3000	0.4000	0.2000	0.0000
	x_{19}	0.7368	0.4053	0.2658	0.1237	0.0263	0.0789	0.0684	0.0632
管理 安全	x_{20}	0.8800	0.7340	0.6020	0.4680	0.2400	0.4000	0.2800	0.2000
	x_{21}	0.9167	0.7250	0.5083	0.2833	0.0833	0.3333	0.3000	0.2500
	x_{22}	1.0000	0.7768	0.5089	0.2411	0.0179	0.2857	0.1964	0.1071
	x_{23}	0.9167	0.7500	0.5833	0.4167	0.2500	0.6667	0.5000	0.3333

3.2 几种方法评价结果的比较

文献[8]采用属性识别理论法对山东省水安全的 3 个方案进行了评价,其评价结果如表 4 所示。

此外,笔者还采用贝叶斯法对本实例的水安全进行评价,贝叶斯法原理和实现步骤详见文献[11]。3 个方案属于各个等级的综合水安全评价概率值 P_i

参考文献：

[1] 杨东方,高振会,孙培艳,等.浮游植物增殖能力的研究探讨[J].科学视野,2003,27(5) :19-21.

[2] REYNOLDS C S, REYNOLDS S N, MUNAWARL F, et al. The regulation of phytoplankton population dynamics in the world's largest lakes [J]. Aquatic Ecosystem Health Management, 2000,7(3) :1-21.

[3] 孔繁翔.太湖水华与中国的水危机[J].文明,2007(10) :10-11.

[4] 李锦秀,廖文根.富营养化综合防治调控指标探讨[J].水资源保护,2002,18(2) :4-6.

[5] 尹真真.国内外水体富营养化机理研究历史与进展[J].微量元素与健康研究,2006,23(3) :46-47.

[6] 高忠信.水库水环境数值模拟[M].北京:地震出版社,2005 :94-105.

[7] 卢大远,刘倍刚,范天俞,等.汉江下游突发‘水华’的调查研究[J].环境科学研究,2000,13(2) :28-31.

[8] 李福生.引滦枢纽工程运行 20 年的效益与前景[J].海河水利,2003(6) :47-49.

[9] 李小平.美国湖泊富营养化的研究和治理[J].自然杂志,2002,24(2) :63-68.

[10] JOSEPH D, CHAO Lin, YANG Luo, et al. Eutrophication study at the Panjiakou-Daheiting Reservoir system: Chlorophyll-a modeland sources of phosphorus and nitrogen [J]. Agricultural Water Management, 2007,94 :43-53.

[11] 饶群,芮孝芳.富营养化机理及数学模拟研究进展[J].水文,2001,21(2) :16-20.

[12] 韩菲,陈永灿,刘昭伟.湖泊及水库富营养化模型研究综述[J].水科学进展,2003,14(6) :785-791.

[13] 梁婕,曾光明,郭生练,等.湖泊富营养化模型的研究进展[J].环境污染治理技术与设备,2006,7(6) :24-29.

[14] 濮培民,李正魁,王国祥.提高水体净化能力控制湖泊富营养化[J].生态学报,2002,25(10) :58-63.

[15] 郑建军,钟成华,邓春光.试论水华的定义[J].水资源保护,2006,22(5) :45-47.

(收稿日期 :2008-03-21 编辑 :熊水斌)

(上接第 7 页)如表 4 所示。从表 4 可以看出,采用贝叶斯法的评价结果亦和本文的评价结果相同。多种评价方案的评价结果也是一致的。可见,只有实施方案 1,山东省水资源安全状况才会有明显改善,若实施方案 2 和方案 3,则水安全状况改善较小。

表 4 几种方法的评价结果

方案	P_i					评价等级		
	I	II	III	IV	V	贝叶斯法	综合指数法	属性识别法
方案 1	0.1950	0.1971	0.2671	0.2116	0.1292	3	III	3
方案 2	0.1942	0.1658	0.2158	0.2420	0.1821	4	IV	4
方案 3	0.2001	0.1565	0.1991	0.2253	0.2191	4	IV	4

4 结 语

水安全评价指标体系的选取及各指标的评价分级标准的制订是否适当是水安全评价结果是否符合客观实况的关键所在。指标体系的选取需要在满足科学性、完备性、实用性和可比性等指标选取原则下,通过相关分析、频度统计分析等方法从众多指标中进行筛选,而分级标准制订则要根据所考察区域的经济、社会、生态环境和规划管理具体情况,并参考国内外不同类型地区的标准予以确定。

用本文提出的单指标水安全指数公式和对各子系统用广义模糊对比加权法进行水安全综合指数计算,物理意义明确,计算方法简便、实用。

参考文献：

[1] SULLIVAN C. Calculating a water poverty index [J]. World

Development,2002,30(7) :1195-1210.

[2] 郭梅,许振成,彭晓春.水资源安全问题研究综述[J].水资源保护,2007,23(3) :40-43,51.

[3] 施春红,胡波.城市供水安全综合评价探讨[J].资源科学,2007,29(3) :80-85.

[4] 王远坤,夏自强,曹升东.水安全综合评价方法研究[J].河海大学学报 :自然科学版,2007,35(6) :618-621.

[5] 张龙云,曹升东.农村水安全综合评价[J].水电能源科学,2007,25(4) :12-14.

[6] 卢敏,张展羽,石月珍.集对分析法在水安全评价中的应用研究[J].河海大学学报 :自然科学版,2006,34(5) :505-508.

[7] 樊彦芳,刘凌,陈星,等.层次分析法在水安全综合评价中的应用[J].河海大学学报 :自然科学版,2004,32(5) :512-514.

[8] 张龙云,曹升东,杨尚阳.属性识别理论在水安全评价中的应用研究[J].山东大学学报 :工学版,2006,36(5) :70-72.

[9] 黄乾,彭世彰,田守岗,等.模糊物元模型在区域水安全评价中的应用[J].河海大学学报 :自然科学版,2007,35(4) :379-383.

[10] 李祚泳,刘国东,丁晶.适用于多指标的水质指数公式[J].环境工程,2001,19(3) :53-55.

[11] 廖杰,王文圣,丁晶.贝叶斯公式在河流水质综合评价中的应用[J].四川师范大学学报 :自然科学版,2007,30(4) :519-522.

(收稿日期 :2008-07-14 编辑 :熊水斌)