

# 水安全综合评价方法研究

王远坤<sup>1,2</sup>, 夏自强<sup>1,2</sup>, 曹升乐<sup>3</sup>

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;  
2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 3. 山东大学土建与水利学院, 山东 济南 250062)

**摘要:** 从水安全的内涵出发, 在目前研究的基础上, 遵循科学、实用及简明的评价原则, 构建了单一目标层、5 个准则层和 19 个具体指标的水安全评价体系, 制定了各指标的评价分级标准, 提出了基于模糊数学的水安全综合评价方法. 以济南市为例进行水安全综合评价, 对评价的标准和评价方法进行了验证. 评价结果与当地水资源实际状态相吻合, 表明此方法在区域水安全的应用上是可行的.

**关键词:** 水安全; 评价体系; 评价标准; 评价方法; 济南市

中图分类号: TV213.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-198X(2007)06-0618-04

近年来, 水安全问题成为学术界及社会各界关注的焦点, 并已经成为 21 世纪社会经济发展的严重制约因素. 各个国家和地区都投入了大量的人力、物力去研究水安全问题. 2000 年的世界部长级会议和世界水讨论会把“21 世纪水安全”作为主题, 在海牙提出: 为实现 21 世纪水安全, 我们面临着“满足基本需要; 保证食物供应; 保护生态系统; 共享水资源; 控制灾害; 赋予水价值; 合理管理水资源”等一系列的挑战<sup>[1]</sup>. 目前, 水安全的研究已取得一定的成果, 如韩宇平等提出的多目标多层次评价模型<sup>[2]</sup>, 卢敏等提出的集对分析法<sup>[3]</sup>, 但这些方法得到的是区域间的对比值, 并不能反映某地区的真实水安全水平, 有必要进一步研究. 本文在前人研究的基础上建立了具有层次结构的水安全评价体系, 体系中选取了影响水安全的 5 大类 19 个影响指标, 提出了区域水安全综合评价方法.

## 1 水安全评价体系及标准

水安全的内涵<sup>[4-5]</sup>: 人类社会生存环境和经济发展过程中发生的水的危害问题, 不仅是一个生态环境问题, 也是一个经济问题、社会问题和政治问题, 直接关系到国家的安全. 水的存在方式(量与质、物理与化学特性等)及水事活动(政府行政管理、卫生、供水、减灾、环境保护等)对人类社会的稳定与发展是无威胁的, 或者说存在某种程度的威胁, 但是可以将其后果控制在人们可以承受的范围之内. 水安全可概括为实际可以利用的水资源能够保障该国(区域)经济当前需要和可持续发展需要, 涵盖生命安全、经济安全、生态环境安全、社会安全和管理安全.

水安全评价体系构建的原则如下: (a)科学性原则. 按照科学理论, 特别是可持续发展理论定义指标的概念和计算方法. (b)完备性原则. 水安全指标体系既要有反映社会、经济、人口的指标, 又要有反映生态环境、资源等系统的发展指标, 还要有反映上述各系统相互协调程度的指标. (c)实用性原则. 在充分考虑所有影响因素下根据区域特性提出实用的指标体系. (d)定性与定量相结合的原则. 指标体系应尽量选择可量化指标, 难以量化的重要指标可以采取定性描述指标. (e)可比性原则. 指标尽可能地采用标准的名称、概念、计算方法, 具有与其他地区指标的可比性. (f)可操作性原则. 指标体系要充分考虑资料的来源, 做到每一指标都由准确的数据支持.

水安全涉及范围较广, 涵盖内容较多, 既有动态性指标又有静态性指标, 既有定性指标又有定量指标等. 结合水安全的概念与内涵, 参照与水问题有关的研究成果, 并征求专家意见, 综合考虑上述原则, 将水安全评价体系分为目标层、准则层和指标层. 其构成见表 1.

目标层为单一目标,即总目标,表达的是水安全的综合安全度,水安全评价的目的在于综合评价某区域的水安全水平,根据评价出的水安全真实状态采取相应的措施,以推进人水和谐共同发展。

准则层是目标层的有机组成部分,分为 5 个方面:生命安全、经济安全、生态环境安全、社会安全、管理安全。(a)生命安全,对于人生活所需要的水,不致因水量的减少或水质问题而影响身体健康,危及生命。(b)经济安全,保障经济稳定增长,提高用水、节水效率,保证粮食能够满足不断增长的人口需求,不能因水的问题而影响经济的可持续发展。(c)生态环境安全,维持水生态系统健康,保护水环境不受污染。(d)社会安全,保证使涉水灾害对社会造成的损失降低到最低程度,保障社会稳定。(e)管理安全,提高管理效率和管理质量,不能因管理问题影响水务的良性运行。

指标层为反映准则层的影响因素,评价体系中选取了 19 个指标来描述水安全状态,见表 1。

水安全程度按照 5 个级别划分:(a)非常安全,水资源、水环境系统与社会、经济健康协调高效发展,满意程度很高。(b)安全,水资源、水环境系统与社会、经济健康协调发展,满意程度较高。(c)基本安全,水资源、水环境系统与社会、经济能协调发展,满意程度一般。(d)不安全,水资源、水环境系统不能与社会、经济协调发展,已威胁到社会、经济的可持续发展。(e)极不安全,水资源、水环境系统全面恶化,已严重阻碍了社会、经济可持续发展。本文中的水安全指标评价标准是将各指标量化分级,参照国内外的研究成果,考虑到目前的社会经济发展水平,确定各因素隶属不同等级的范围,见表 2。表 2 中  $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5$  分别对应于评价级别“非常安全”、“安全”、“基本安全”、“不安全”、“极不安全”。

表 1 水安全评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of water security

目标层	准则层	指标层
水安全	生命安全 ( $A_1$ )	人均水资源量 ( $A_{11}$ )
		人均日生活用水量 ( $A_{12}$ )
		饮用水水质达标率 ( $A_{13}$ )
	经济安全 ( $A_2$ )	人均 GDP ( $A_{21}$ )
		工业万元产值取水量 ( $A_{22}$ )
		工业用水重复利用率 ( $A_{23}$ )
		人均粮食 ( $A_{24}$ )
	生态环境安全 ( $A_3$ )	工业废水排放达标率 ( $A_{31}$ )
		中水回用率 ( $A_{32}$ )
		城市污水处理率 ( $A_{33}$ )
		污径比 ( $A_{34}$ )
		人均绿地面积 ( $A_{35}$ )
	社会安全 ( $A_4$ )	水灾害损失占 GDP 的比例 ( $A_{41}$ )
		防洪达标率 ( $A_{42}$ )
		水利投资占 GDP 的比例 ( $A_{43}$ )
	管理安全 ( $A_5$ )	城市管网供水利用率 ( $A_{51}$ )
		水资源费征收率 ( $A_{52}$ )
		灌溉水利用系数 ( $A_{53}$ )
		管理人员学历结构系数 ( $A_{54}$ )

表 2 水安全评价指标安全级别划分

Table 2 Degree classification of water security evaluation indexes

安全级别	$A_{11}/m^3$	$A_{12}/L$	$A_{13}/%$	$A_{21}/$ 万元	$A_{22}/m^3$	$A_{23}/%$	$A_{24}/kg$	$A_{31}/%$	$A_{32}/%$	$A_{33}/%$	$A_{34}/%$	$A_{35}/m^2$	$A_{41}/%$	$A_{42}/%$	$A_{43}/%$	$A_{51}/%$	$A_{52}/%$	$A_{53}$	$A_{54}$
$X_1$	$\geq 1000$	$\geq 200$	$\geq 99$	$\geq 2.48$	$< 10$	$\geq 85$	$\geq 500$	$\geq 90$	$\geq 60$	$\geq 80$	$\leq 1$	$\geq 18$	$\leq 1$	$\geq 95$	$\geq 1.0$	$\geq 95$	$\geq 90$	$\geq 0.9$	$\geq 0.9$
$X_2$	1000 ~ 750	200 ~ 160	99 ~ 96	1.87 ~ 2.48	10 ~ 23	85 ~ 75	500 ~ 433	70 ~ 90	50 ~ 60	69 ~ 80	1 ~ 4	14 ~ 18	1 ~ 2.3	90 ~ 95	1.0 ~ 0.74	95 ~ 91.7	80 ~ 90	0.9 ~ 0.77	0.9 ~ 0.8
$X_3$	750 ~ 500	160 ~ 120	96 ~ 93	1.26 ~ 1.87	23 ~ 37	75 ~ 65	433 ~ 366	50 ~ 70	40 ~ 50	57 ~ 69	4 ~ 7	10 ~ 14	2.3 ~ 3.6	80 ~ 90	0.74 ~ 0.47	91.7 ~ 88.4	70 ~ 80	0.77 ~ 0.64	0.8 ~ 0.7
$X_4$	500 ~ 250	120 ~ 80	93 ~ 90	0.65 ~ 1.26	37 ~ 50	65 ~ 55	366 ~ 300	30 ~ 50	30 ~ 40	45 ~ 57	7 ~ 10	6 ~ 10	3.6 ~ 5	70 ~ 80	0.47 ~ 0.2	88.4 ~ 85	60 ~ 70	0.64 ~ 0.5	0.7 ~ 0.6
$X_5$	$< 250$	$< 80$	$< 90$	$< 0.65$	$> 50$	$< 55$	$< 300$	$< 30$	$< 30$	$< 45$	$> 10$	$< 6$	$> 5$	$< 70$	$< 0.2$	$< 85$	$< 60$	$< 0.5$	$< 0.6$

实际上,标准的制定需要进行敏感性分析,以国际标准、国家标准和发展规划值为依据,通过专家咨询,研究具体指标的临界点来确定指标评价标准。

## 2 水安全综合评价方法

水安全系统内部因素间层次关系因为众多因素之间复杂的因果关系而难以确定,用常规的经典数学方法对这类系统进行描述不易取得好的效果,而模糊数学方法却能弥补这一缺陷,故采用模糊综合评价方法。采用模糊综合评价方法进行水安全综合评价的步骤如下:

a. 建立评价因素(指标)集  $I = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ ,为生命安全、经济安全、生态环境安全、社会安全和管理安全各评价指标的集合, $n$  代表各指标的数目。

b. 建立评语集  $H = \begin{bmatrix} h_{11} & \dots & h_{15} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{n1} & \dots & h_{n5} \end{bmatrix}$ , 即安全级别矩阵,  $h_{ij}$  为第  $i$  个指标第  $j$  个安全级别 ( $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, 3, 4, 5$ ) 其中  $j = 1, 2, 3, 4, 5$  分别代表“非常安全”、“安全”、“基本安全”、“不安全”、“极不安全”。

c. 确定指标权重. 用层次分析法<sup>[6]</sup>确定各要素及类别权重, 以及各具体指标的权重集  $W = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ 。

d. 建立指标单因素评判矩阵  $R$ . 根据各指标特征, 拟定各具体指标的隶属度函数, 此处采用三角形隶属度函数来确定各级别的隶属度, 由隶属度函数计算出各评价要素的评判矩阵  $R$ 。

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{15} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & \dots & r_{n5} \end{bmatrix} \quad (1)$$

e. 进行模糊层次综合评价. 采用模糊合成加权线性变换完成模糊合成  $B = WR = (B_1, B_2, B_3, B_4, B_5)$ , 可得到准则层中各项的安全级别隶属度矩阵, 对结果进行归一化处理<sup>[7]</sup>。

f. 根据 e 的计算结果再将准则层中各项看作元素对待, 重复上述步骤, 则可得到二级综合评价, 即水安全综合评价结果  $C = WR$ 。

### 3 应用实例

济南不仅是山东的政治、文化、经济中心, 而且是驰名中外的“泉城”, 与此不相协调的是其水资源条件比较差, 人均水资源量仅  $290 \text{ m}^3$ . 地表水开采用率已超过天然径流量的 40%, 地下水的开采量已占多年平均地下水量的 91%; 工业废水虽然达标率很高, 但未达标排放绝对量仍高达 428 万 t, 生活污水处理率极低, 仅为 35%, 水环境质量恶化, 水管理体制不顺, 使有限的水资源不能充分有效地利用和保护, 供水价格和污水处理费偏低, 不利于水资源的节约、保护和优化配置。

这一系列水安全问题已成为制约济南市经济和社会进一步可持续发展的主要因素之一。

以济南市 2003 年的基本资料为基础, 确定水安全评价的指标现状值, 对其水安全的状态进行评价。

通过层次分析法确定各层权重, 结果见表 3. 各指标的现状值及根据相应的隶属度计算公式求得的隶属度值见表 4, 此评价为二级模糊综合评价。

表 3 指标权重计算结果

Table 3 Calculated results of weights of indexes

指标	归一化后的向量
$(A_1, A_2, A_3, A_4, A_5)$	$(0.4185, 0.1599, 0.0973, 0.2625, 0.0618)$
$(A_{11}, A_{12}, A_{13})$	$(0.5584, 0.1220, 0.3196)$
$(A_{21}, A_{22}, A_{23}, A_{24})$	$(0.4673, 0.1601, 0.0954, 0.0227)$
$(A_{31}, A_{32}, A_{33}, A_{34}, A_{35})$	$(0.2625, 0.0973, 0.0618, 0.4185, 0.1599)$
$(A_{41}, A_{42}, A_{43})$	$(0.5396, 0.2970, 0.1634)$
$(A_{51}, A_{52}, A_{43}, A_{54})$	$(0.2843, 0.1699, 0.4729, 0.0729)$

表 4 各指标的隶属度向量值

Table 4 Vector value of membership of each index

指标	现状值	隶属度向量	指标	现状值	隶属度向量
$A_{11}$	$279 \text{ m}^3$	$(0.00, 0.00, 0.00, 0.62, 0.38)$	$A_{34}$	7.8%	$(0.00, 0.00, 0.50, 0.50, 0.00)$
$A_{12}$	160 L	$(0.00, 0.50, 0.50, 0.00, 0.00)$	$A_{35}$	$6.12 \text{ m}^2$	$(0.00, 0.00, 0.00, 0.03, 0.97)$
$A_{13}$	98.4%	$(0.37, 0.63, 0.00, 0.00, 0.00)$	$A_{41}$	2.48%	$(0.00, 0.00, 0.40, 0.60, 0.00)$
$A_{21}$	2.09 万元	$(0.00, 0.95, 0.05, 0.00, 0.00)$	$A_{42}$	30%	$(0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 1.00)$
$A_{22}$	$27 \text{ m}^3$	$(0.00, 0.00, 0.81, 0.19, 0.00)$	$A_{43}$	0.23%	$(0.00, 0.00, 0.00, 0.60, 0.40)$
$A_{23}$	81%	$(0.10, 0.90, 0.00, 0.00, 0.00)$	$A_{51}$	87%	$(0.00, 0.00, 0.09, 0.91, 0.00)$
$A_{24}$	330 kg	$(0.00, 0.00, 0.00, 0.95, 0.05)$	$A_{52}$	65%	$(0.00, 0.00, 0.00, 0.50, 0.50)$
$A_{31}$	93.5%	$(0.68, 0.32, 0.00, 0.00, 0.00)$	$A_{53}$	0.55	$(0.00, 0.00, 0.00, 0.85, 0.15)$
$A_{32}$	11%	$(0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 1.00)$	$A_{54}$	0.6	$(0.00, 0.00, 0.00, 0.50, 0.50)$
$A_{33}$	30%	$(0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 1.00)$			

以生命安全评价为例, 由表 4 可得生命安全评价的模糊评判矩阵为

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.62 & 0.38 \\ 0.00 & 0.50 & 0.50 & 0.00 & 0.00 \\ 0.37 & 0.63 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$$

由表3知其相应的权重  $W_1 = (0.5584, 0.1220, 0.3196)$ , 因此有  $C_1 = W_1 R_1$ , 将结果归一化可得  $C_1 = (0.1183, 0.2623, 0.0610, 0.3462, 0.2122)$ .

同理可求得其他评价指标归一化后的向量, 由此可得到济南市水安全评价的模糊评价矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} 0.1183 & 0.2623 & 0.0610 & 0.3462 & 0.2122 \\ 0.0095 & 0.5297 & 0.1530 & 0.2329 & 0.0139 \\ 0.1875 & 0.0841 & 0.2092 & 0.1040 & 0.3142 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.2176 & 0.4210 & 0.3614 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0740 & 0.7077 & 0.2183 \end{bmatrix}$$

由表3知  $W = (0.4185, 0.1599, 0.0973, 0.2625, 0.0618)$ , 再由  $C = WR$  求得济南市水安全计算结果, 将其归一化可得  $C = (0.0684, 0.2027, 0.1316, 0.3672, 0.2302)$ .

应用相对级别特征值<sup>[8]</sup>进行判断, 级别取5级, 即  $h = (1, 2, 3, 4, 5)$ , 则级别特征值为

$$H(u) = hC = 3.4886$$

由此可得, 济南市水安全隶属于“基本安全”状态, 但已处于“基本安全”与“不安全”的临界状态。

## 4 结 论

a. 水安全越来越成为制约经济和社会可持续发展的主要因素之一, 正确评价水安全状态, 合理配置水资源对区域的全面和谐发展具有重要意义, 因此对水安全的研究十分必要。

b. 对水安全评价采用的模糊综合评价方法具有一定的可行性和实用性, 由于在计算中采用层次分析法确定权重和具有层次结构的评价指标体系, 使得对水安全的评价逐层计算, 信息利用更加全面, 便于对水安全状况进行全面了解。

c. 由于评价指标分级标准是首次提出, 在应用中还需进一步检验与完善。

### 参考文献:

- [1] 吴季松. 海牙国际水资源会议与国际水资源政策动向[J]. 世界环境, 2000(3): 37-38.
- [2] 韩宇平, 阮本清, 解建仓. 多层次多目标模糊优选模型在水安全评价中的应用[J]. 资源科学, 2003, 25(4): 37-42.
- [3] 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.
- [4] 张翔, 夏军, 贾绍凤. 水安全定义及其评价指数的应用[J]. 资源科学, 2005, 27(3): 145-149.
- [5] 王小民. 二十一世纪的水安全[J]. 社会科学, 2001(2): 25-39.
- [6] 赵焕臣, 许树柏, 和金生. 层次分析法[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [7] 吴万铎. 模糊数学与计算机应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 1988.
- [8] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.

## Comprehensive evaluation method for water security

WANG Yuan-kun<sup>1, 2</sup>, XIA Zi-qiang<sup>1, 2</sup>, CAO Sheng-le<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. College of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250062, China)

**Abstract:** Following the scientific, practical, and concise assessment principle, a water security evaluation system with single goal layer, 5 rule layers, and 19 defined indexes was developed based on the connotation of water security and the results of present research. The evaluation and grading criteria for different indexes were presented, and the comprehensive evaluation method for water security based on fuzzy mathematics was proposed. The rationality of the evaluation criterion and method was verified by their application to water security comprehensive evaluation for Jinan City. The evaluated result agrees well with the reality of water resources of this area; therefore, the present method is feasible for comprehensive evaluation of water resources.

**Key words:** water security; evaluation system; evaluation criterion; evaluation method; Jinan City