

基于模糊集对分析的最严格水安全综合评价

沈俊源, 吴凤平, 于倩雯
(河海大学 商学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 在最严格水资源管理制度的约束下, 遵循指标选取的合理性、科学性等原则, 建立“三条红线”为基准的水安全量化指标体系, 并提出基于信息熵的水安全模糊集对评价模型, 通过模糊联系度的计算和置信度准则确定水安全评价等级。最后, 结合青海省8个行政分区的水安全评价研究, 与灰色聚类、层次分析法的评价结果进行了对比。研究表明: 青海省整体水安全等级为Ⅳ级, 处于“较不安全”状态, 形势不容乐观, 模糊集对分析与其他评价方法的评价结果基本一致, 且该方法易于编程, 对水安全评价具有一定的应用价值。

关键词: 水安全; 信息熵; 模糊集对分析; 联系度

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)02-0092-06

Strictest comprehensive evaluation of water safety based on fuzzy set pair analysis

SHEN Junyuan, WU Fengping, YU Qianwen
(Business School, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: Under the constraint of the strictest water resources management system, the paper followed the principles of rationality, scientificity to establish “Three Red Lines” as a water safety indicator system, and proposed the fuzzy set pair evaluation model of water safety based on information entropy, and then determined the level of water safety assessment by calculating the fuzzy relation degree and the criterion of setting confidence. Finally, the paper combined an empirical study of water safety evaluation for 8 administrative regions of Qinghai Providence and compared the results with that of grey clustering and analytic hierarchy process. The research shows that the overall water safety level of Qinghai Province is grade IV, and is more relatively unsafe state. The situation is not optimistic. The results given by fuzzy set pair analysis are consistent with the results by the other two methods. The method is easy to be programmed and has certain application value for water safety assessment.

Key words: water safety; information entropy; fuzzy set pair analysis; contact degree

水是人类社会赖以生存的战略资源,也是社会经济可持续发展的基本条件。自20世纪末以来,由于人类对水资源的过度开发和全球气候环境的变化,水资源短缺、水环境恶化以及水土流失等问题在世界范围内频繁出现,导致有限的可利用水已无法满足人们日益增长的需水量^[1]。

面对日益突出的水资源问题,2011年《中共中央国务院关于加快水利改革的决定》和2012年国务院3号文件《关于实行最严格水资源管理制度的意见》中明确提出要实行最严格的水资源管理制度,

并确立三条红线即用水总量、用水效率、水功能区限制纳污的主要目标,充分体现了国家对于水安全问题的战略决策和制度安排^[2]。因此,进行最严格水资源管理制度约束下的水安全评价研究,对于我国水资源的合理调控与保护以及区域生态经济的健康发展具有重要的现实意义。

目前,集对分析法在水安全问题的研究中已经取得了一定的成果。贡力等^[3]从城市水安全的角度出发,将集对分析法应用到城市水安全评价中;潘争伟等^[4]利用三角模糊数确立差异度系数,建立了

收稿日期:2015-10-11; 修回日期:2015-11-10

基金项目:国家自然科学基金项目(41271537); 国家社会科学基金重大项目(12&ZD214)

作者简介:沈俊源(1991-),男,江苏苏州人,硕士研究生,主要研究方向为技术经济及管理。

巢湖流域水安全评价集对分析模型;尹志杰等^[5]通过集对分析和层次分析法相结合,以南京市为例进行了水安全评价;WANG Wensheng 等^[6]在水资源系统评估分析中,提出改进集对分析并建立模糊集对分析模型。虽然集对分析法在水安全评价中得到了较好的运用,但是仍然存在一些不足。如评价过程中指标权重的确定偏于主观,未曾考虑到等级标准边界的模糊性,最后计算出的评价结果也与实际存在一些偏差。

为此,本文在前人研究的基础上,结合最严格水资源管理制度的要求,建立“三条红线”为基础的水安全量化指标体系,根据“最严格水安全”的概念构建水安全模糊集对评价模型,并利用信息熵法对指标权重的确定方法进行改进,对区域水安全状况进行分级研究。

1 水安全评价指标体系的建立

1.1 最严格水安全概念及解析

最严格水资源管理制度是破解我国水问题的关键之法,也是当代治水理念的中心总结。2009年,国家两次召开水利工作会议,首次提出了“最严格水资源管理”这一概念。结合现有关于最严格水资源管理制度的概念解析^[7-10],笔者认为最严格水资源管理制度是以“三条红线”即水资源开发利用、用水效率和水质功能区限制纳污为核心,着重水资源配置规划和水资源保护的一项管理制度。

通过建立水资源开发利用红线,在考虑水资源承载能力和社会经济发展需要的基础上实现水量的严格控制;建立用水效率控制红线,在考虑节约用水的基础上提高水资源的重复利用率以减少污水排放,实现水资源利用效率的严格控制;建立水功能区限制纳污红线,充分考虑水环境承载能力,对江河湖泊的污水排放总量进行宏观控制和管理,实现水质的严格控制。同时,以开发、利用、保护和监管这四项制度为保障,全面推动水资源和社会经济的协调发展。

水安全作为一个复杂的综合系统,涉及多个领域,对于其定义也不尽相同。从供需平衡方面来看,水安全是既要满足人类对水资源的需求也要保障相应水资源及时、足量供给的均衡状态^[11-12];从可持续发展方面来看,水安全指一个国家的水资源总量能够达到既满足当代需求又满足长期可持续发展需要的要求^[13]。笔者结合最严格水资源管理制度的概念解析,在最严格水资源管理制度约束下,提出新

的概念“最严格水安全”,其内涵定义为以人水和谐为目标,水资源的量质条件必须处于一个同时满足“三条红线”控制标准的合理范畴,达到适量、高效、优质 3 者相结合的用水标准。

1.2 “三条红线”量化指标体系构建

在现有的水安全研究文献中,通常将水安全系统看成一个社会-经济-生态安全的复合系统来考虑。本文从最严格水安全的定义出发,根据相关文献的研究成果^[14-17],选取了最严格水资源管理制度约束下影响水安全的 3 个约束目标:水量约束、用水效率约束、水质约束。同时,考虑到数据的可得性及区域内不同地区的可比性,在 3 个约束目标下综合选取 12 个评价指标,建立了基于“三条红线”的水安全评价量化指标体系(如图 1)。

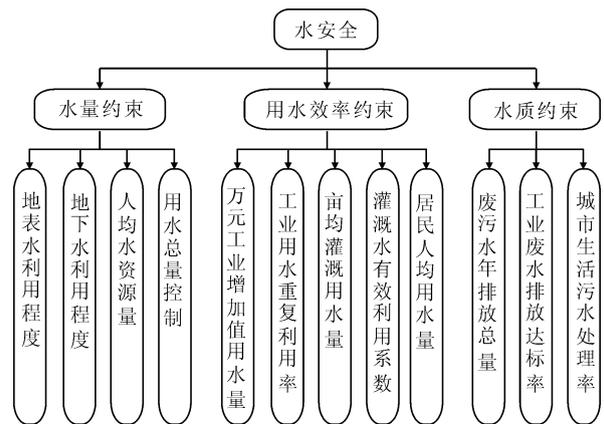


图 1 水安全“三条红线”量化指标体系

2 模糊集对分析理论

2.1 集对分析的基本概念

集对分析(set pair analysis, SPA)是我国学者赵克勤于 1989 年全国系统理论会议上提出的一种处理系统确定与不确定性问题的数学理论^[18]。它的基本概念是集对以及联系度,通过同、异、反 3 种思想来分析事物的相互联系,全面刻划事物间的对立与统一关系。集对是指两个具有一定联系的集合组成一个区间数对。假设集合 A 和集合 B 共同组成的集对表示为 $H = (A, B)$, 总共得到 N 个特征属性,其中 S 个特性是集合 A 、 B 所共有的; P 个特性上集合 A 、 B 相互对立;余下的 $F(F = N - S - P)$ 个特性上集合 A 、 B 既不对立也不共同具有,则称 S/N 为该集对在所研究问题下的同一度,简记为 a ; F/N 为该集对在所研究问题下的差异度,简记为 b ; P/N 为该集对在所研究问题下的对立度,简记为 c , a 、 b 、 c 满足归一化条件 $a + b + c = 1$ 。在特性权重未知的情况

下,集合 A 、 B 的联系度统一表示为:

$$\mu = \frac{S}{N} + \frac{F}{N}i + \frac{P}{N}j = a + bi + cj \quad (1)$$

式中: μ 为集合 A 、 B 的联系度; i 为差异度系数, $i \in [-1, 1]$; j 为对立度系数, 一般情况下固定取值 -1 。由定义可知, 当 $a = 1, b = c = 0$ 时, 联系度 $\mu = 1$, 表示两个集合完全同一; 当 $a = b = 0, c = 1$ 时, 联系度 $\mu = -1$, 表示两个集合完全对立。 μ 的取值范围随着 a, b, c 的变化在 $[-1, 1]$ 上运动, 反映了两个集合之间联系的强弱程度。

2.2 模糊集对分析的基本原理

模糊集对分析法是在集对分析的理论基础上, 引入模糊联系度的概念处理确定与不确定性问题的一种多目标决策方法。当集对分析中用于评价标准的集合无法精确时, 将评价指标的最优或最劣值作为标准, 并且通过计算评价要素与最优或最劣值的贴近度来判断评价要素的标准等级。假设评价对象组成集合 $D(x_1, x_2, \dots, x_t)$, 其指标表示为 $x_t, t = 1, 2, \dots, T, T$ 为评价指标的总个数。评价等级标准表示为 $S_k (k = 1, 2, \dots, K)$, K 为评价等级标准的总个数, 第 k 级标准表示为集合 B_k 。

若评价对象集合 D 与等级标准集合 B_k 可以构成一个集对 $H(D, B_k)$, 对于该集对进行符号的量化处理。将 k 级评价标准记为 $B_k = (k, k, \dots, k)$ 。将评价对象集合 D 中所有的评价指标值与对应指标的各等级标准值进行比较, 若指标值落入第 k 级, 则判断该指标属于 k 级标准, 符号量化为“ k ”, 以此类推进行逐个指标的比较。

设集合 D 和集合 B_k 对应的符号元素中, 统计符号相同的个数记为 S , 相差一个等级的记为 F_1 , 相差两个等级的记为 F_2 , 相差 $K - 2$ 级的记为 F_{K-2} , 相差 K 级的记为 P 。因此, 定义集对 $H(D, B_k)$ 的 K 元模糊联系度为^[19-20]:

$$\mu_{D-B_k} = a + b_1I_1 + b_2I_2 + \dots + b_{k-2}I_{k-2} + cJ \quad (2)$$

式中: S/T 表示集对 $H(D, B_k)$ 的同一度, 记为 a ; $f_1/T, F_2/T, \dots, F_{k-2}/T$ 为表示集对 $H(D, B_k)$ 的差异度分量, 分别记为 b_1, b_2, \dots, b_{k-2} , 反映差异度的不同级别或层次; P/T 表示集对 $H(D, B_k)$ 的对立度, 记为 c 。 $a, b_1, b_2, \dots, b_{k-2}, c$ 满足归一化条件 $a + b_1 + b_2 + \dots + b_{k-2} + c = 1$; I_1, I_2, \dots, I_{k-2} 表示差异度不确定分量的系数, 一般根据均匀取值法确定, 公式为 $I_k = 1 - 2k/(K - 1)$; $J = -1$, 记为对立系数。 K 元模糊联

系度的表达式与标准集对分析联系度表达式的区别在于, 前者给出了集对在某一特性上的同异反模糊刻画, 更为完整的描述了事物的模糊信息。

3 水安全模糊集对评价模型

3.1 信息熵确定指标权重

信息熵是由 Shannon 首次提出的, 在熵的基础上引入信息论思想的一个热力学概念^[21]。熵值不仅可以进行信息无序度和混乱度的描述, 而且可以用来衡量信息量的大小。当某个指标含有的信息量越大时, 该项指标对于决策的作用也随之增大, 而信息熵值越小, 则信息系统的无序化程度越小。因此可以用信息熵来度量评价指标的信息量, 进而确定各评价指标的权重。设共有 m 个对象 ($i = 1, 2, \dots, m$)、 n 个评价指标 ($j = 1, 2, \dots, n$), 构成一个判断矩阵 $(C_{ij})_{m \times n}$, 对其进行归一化处理得到矩阵 $(X_{ij})_{m \times n}$, 公式如下:

$$X_{ij} = (C_{ij} - \min X_j) / (\max X_j - \min X_j) \quad (3)$$

式中: $\max X_j$ 与 $\min X_j$ 分别为某一相同指标下不同对象中最优或最劣者 (越大越优或越小越优)。根据信息熵的定义, 由 m 个对象 n 个指标确定评价指标的熵值 e_j , 公式为:

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m (P_{ij} \ln P_{ij}) \quad (4)$$

其中:

$$P_{ij} = (1 + X_{ij}) / \sum_{i=1}^m (1 + X_{ij}) \quad (5)$$

最后, 确定第 j 个评价指标的熵权, 公式为:

$$w_j = (1 + e_j) / \sum_{j=1}^n (1 + e_j) \quad \left(\sum_{j=1}^n w_j = 1 \right) \quad (6)$$

3.2 评价指标联系度的计算

设水安全的评价指标体系中所有的指标值 $x_t (t = 1, 2, \dots, T)$ 构成一个集合 A_t , 某指标的第 k 级等级标准构成集合 $B_k (k = 1, 2, \dots, K)$, 将 A_t 与 B_k 组成一个集对, 定义为 $H(A_t, B_k)$ 。对于给定的 T 个评价指标和 K 个等级标准, 在计算集对 $H(A_t, B_k)$ 的联系度 $\mu_{A_t-B_k}$ 时, 存在评价结论分辨率不高、信息重叠等问题, 而 $\mu_{A_t-B_1}$ 包含的信息量最完整, 即将 B_k 视为指标的 1 级评价标准集合 B_1 。因此, 只需计算 $H(A_t, B_k)$ 的 K 元模糊联系度 $\mu_{A_t-B_1}$ 即可, 公式为^[22]:

(1) 成本型指标(越小越优)

$$\mu_{A_t \sim B_1} = \begin{cases} 1 + 0I_1 + 0I_2 + \dots + 0I_{k-2} + 0J, x_t \leq s_1 \\ \frac{s_1 + s_2 - 2x_t}{s_2 - s_1} + \frac{2x_t - 2s_1}{s_2 - s_1} I_1 + 0I_2 + \dots + 0I_{k-2} + 0J, s_1 < x_t \leq \frac{s_1 + s_2}{2}; \\ 0 + \frac{s_2 + s_3 - 2x_t}{s_3 - s_1} I_1 + \frac{2x_t - s_1 - 2s_2}{s_3 - s_1} I_2 + \dots + 0I_{k-2} + \dots + 0I_{k-2} + 0J, \frac{s_1 + s_2}{2} < x_t \leq \frac{s_2 + s_3}{2}; \\ \dots\dots \\ 0 + 0I_1 + \dots + \frac{2x_t - 2s_{k-1}}{s_{k-2} - s_{k-1}} I_{k-2} + \frac{s_{k-1} + s_{k-2} - 2x_t}{s_{k-2} - s_{k-1}} J, s_{k-1} \leq x_t < \frac{s_{k-2} - s_{k-1}}{2}; \\ 0 + 0I_1 + 0I_2 + \dots + 0I_{k-2} + 1J, x_t < s_{k-1} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $K > 2$ 且 $s_1 \leq s_2 \leq \dots \leq s_{k-1}$ 。

(2) 效益型指标(越大越优)

$$\mu_{A_t \sim B_1} = \begin{cases} 1 + 0I_1 + 0I_2 + \dots + 0I_{k-2} + 0J, X_t \geq s_1 \\ \frac{2x_t - s_1 - s_2}{s_1 - s_2} + \frac{2s_1 - 2x_t}{s_1 - s_2} I_1 + 0I_2 + \dots + 0I_{k-2} + 0J, \frac{s_1 + s_2}{2} \leq x_t < s_1; \\ 0 + \frac{2x_t - s_2 - s_3}{s_1 - s_3} I_1 + \frac{s_1 + s_2 - 2x_t}{s_1 - s_3} I_2 + \dots + 0I_{k-2} + 0J, \frac{s_2 + s_3}{2} \leq x_t < \frac{s_1 + s_2}{2}; \\ \dots\dots \\ 0 + 0I_1 + \dots + \frac{2x_t - 2s_{k-1}}{s_{k-2} - s_{k-1}} I_{k-2} + \frac{s_{k-1} + s_{k-2} - 2x_t}{s_{k-2} - s_{k-1}} J, s_{k-1} \leq x_t < \frac{s_{k-2} - s_{k-1}}{2}; \\ 0 + 0I_1 + 0I_2 + \dots + 0I_{k-2} + 1J, x_t < s_{k-1} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $K > 2$ 且 $s_1 \leq s_2 \leq \dots \leq s_{k-1}$ 。

3.3 综合模糊联系度的计算

设评价对象集合为 A , 所有指标的 1 级评价标准集合为 B , 则集对 $H(A, B)$ 的 K 元模糊联系度公式定义为:

$$\mu_{A \sim B} = \sum_{i=1}^T w_i \mu_{A_t \sim B_1} = \sum_{i=1}^T w_i a_i + \sum_{i=1}^l w_i b_{i,1} I_1 + \sum_{i=1}^T w_i b_{i,2} I_2 + \dots + \sum_{i=1}^T w_i b_{i,k-2} I_{k-2} + \sum_{i=1}^T w_i c_i J \quad (9)$$

式中: w_i 为指标 t 的权重, 令 $f_1 = \sum_{i=1}^T w_i a_i$, $f_2 =$

$\sum_{i=1}^T w_i b_{i,1}$, 以此类推, $f_{k-1} = \sum_{i=1}^T w_i b_{i,k-2}$, $f_k = \sum_{i=1}^T w_i c_i$,

公式(9)可以简写成如下形式:

$$\mu_{A \sim B} = f_1 + f_2 I_1 + f_3 I_3 + \dots + f_{k-1} I_{k-2} + f_k J \quad (10)$$

式中: f_1 为评价对象属于 1 级标准的可能度; f_2 为评价对象属于 2 级标准的可能度, 以此类推; f_k 为评价对象属于 k 级标准的可能度。

3.4 评价等级的确定

计算 K 元模糊联系度时, 由于其差异不确定分量系数难以确定, 分级过程中具有一定的主观性, 为了避免这种主观决策, 本文采用置信度准则进行判

断^[23], 公式为:

$$h_k = (f_1 + f_2 + \dots + f_k) > \lambda, k = 1, 2, \dots, K \quad (11)$$

式中: λ 为置信度; h_k 为评价指标的属性测度, 对应的等级标准为 k 。 λ 的取值应该控制在一个合理范围内, 不宜过大造成评价结果过于保守, 也不宜过小导致结果的可靠性变差。一般建议 λ 的取值在 $[0.5, 0.7]$ 范围内, 进而根据公式(11)判断评价对象的等级标准。

4 实证研究

青海省位于青藏高原东北部, 是我国西部重要省份之一。其境内水资源丰富, 涵盖了长江、黄河、澜沧江和黑河的源头, 是我国重要的水源地, 素有“中华水塔”之称。2012年, 青海省贯彻落实中央、省委水利工作会议精神, 省政府出台了《关于实行最严格水资源管理制度的意见》(简称《意见》)。《意见》中指出: 至 2015 年, 全省用水总量力争控制在 37.15 亿 m^3 以内; 万元工业产值用水量比 2010 年下降 25%, 灌溉水有效利用系数提高到 0.489; 区域内如青海湖等重要水功能区水质达标率达到

74%。本文在最严格水资源管理制度约束下选取地表水利用程度、城市生活污水处理率等12个指标,根据相应的数据,选择青海省8个行政分区:西宁市、海东市、海北州、海南州、黄南州、果洛州、玉树州、海西州作为模糊集对分析对象。

(1)评价标准及指标权重的确定。根据各指标

表1 青海省水安全评价指标权重及评价等级标准

评价指标	评价等级标准					指标权重
	安全	比较安全	临界安全	较不安全	不安全	
地表水利用程度/%	$(-\infty, 15]$	$(15, 30]$	$(30, 45]$	$(45, 60]$	$(60, +\infty)$	0.020
地下水利用程度/%	$(-\infty, 10]$	$(10, 20]$	$(20, 30]$	$(30, 50]$	$(50, +\infty)$	0.020
人均水资源量/ $10^4 m^3$	$[0.3, +\infty)$	$[0.17, 0.3)$	$[0.1, 0.17)$	$[0.05, 0.1)$	$[0, 0.05)$	0.113
用水总量控制/ $10^8 m^3$	$[1.5, 4.5)$	$[4.5, 7.5)$	$[7.5, 10.5)$	$[10.5, 13.5)$	$[13.5, 16.5)$	0.076
万元工业增加值用水量/ m^3	$[0, 10]$	$(10, 30]$	$(30, 90]$	$(90, 200]$	$(200, +\infty)$	0.047
工业用水重复利用率/%	$[90, +\infty)$	$[80, 90)$	$[70, 80)$	$[50, 70)$	$[0, 50)$	0.034
亩均灌溉用水量/ m^3	$[150, 250]$	$(250, 350]$	$(350, 450]$	$(450, 550]$	$(550, +\infty)$	0.051
灌溉水有效利用系数/%	$[0.5, +\infty)$	$[0.4, 0.5)$	$[0.25, 0.4)$	$[0.15, 0.25)$	$[0, 0.15)$	0.055
居民人均用水量/ m^3	$[0, 300)$	$(300, 500]$	$(500, 800]$	$(800, 1100]$	$(1100, +\infty)$	0.105
废污水年排放总量/万t	$[0, 1000)$	$[1000, 2000)$	$[2000, 3000)$	$[3000, 4000)$	$[4000, +\infty)$	0.039
工业废水排放达标率/%	$[100, 85)$	$[85, 70)$	$[70, 55)$	$[55, 40)$	$[40, 0)$	0.047
城市生活污水处理率/%	$[100, 85)$	$[85, 70)$	$[70, 55)$	$[55, 40)$	$[40, 0)$	0.033

(2)模糊联系度及水安全等级的确定。以《青海省统计年鉴》、《青海省水资源公报》以及各县市《水资源评价及优化配置》资料中2013年最新数据为例,运用 Matlab 软件进行评价过程的相关计算。根据式(7)和式(8),以及青海省8个行政分区的评价指标属性值和评价等级标准,计算得到各行政分区及全省的各集对 $H(A_i, B_1)$ 的模糊联系度。以此为基础,由表1中各指标值的权重,根据式(9)和式(10)计算得到综合模糊联系度值,计算结果见表2。取置信度 $\lambda = 0.5$,由式(11)求得青海省各行政分区的水安全评价等级,结果如表2所示。

表2 青海省及各行政分区的模糊联系度值及水安全等级

行政区划	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	λ	安全等级
西宁市	0.449	0.173	0.169	0.113	0.097	0.5	II
海东市	0.184	0.153	0.127	0.309	0.226	0.5	IV
海北州	0.161	0.140	0.159	0.360	0.181	0.5	IV
海南州	0.144	0.093	0.069	0.327	0.368	0.5	IV
黄南州	0.108	0.190	0.176	0.384	0.142	0.5	IV
果洛州	0.341	0.147	0.200	0.238	0.075	0.5	III
玉树州	0.218	0.163	0.306	0.176	0.138	0.5	III
海西州	0.279	0.201	0.152	0.118	0.251	0.5	III
青海省	0.135	0.097	0.230	0.397	0.140	0.5	IV

的含义及其对水资源承载力和水环境承载力健康发展的作用,结合国内外水安全指标的标准以及“三条红线”的控制要求,建立了青海省水安全评价5个等级(分别用I、II、III、IV、V表示),并由式(4)、(5)、(6)通过信息熵权法确定各评价指标的权重,均列于表1。

由表2结果可以看出,8个行政分区中西宁市处于“比较安全”等级,占12.5%;果洛州、玉树州、海西州3个地区的水资源评价结果处于临界安全级别,占37.5%;海东市、海北州、海南州、黄南州4个地区的水资源状况处于较不安全级别,占40%。就青海省整体而言,水安全等级为4级,属于“较不安全”状态,形势不容乐观。自2006年起,西宁市响应国家政策成为全国第2批节水型社会建设试点地区,将节水型社会建设与经济结构调整、生态修复、水环境改善有机结合,取得了显著的经济、社会和生态效益,模糊集对分析结果也表明节水型社会试点取得了良好的效果。其次,果洛、玉树、海西虽然处于临界安全级别,但是这3大地区的经济发展状况属于较落后阶段,在维持水资源安全的基础上需要进一步加强社会经济的快速发展,充分利用资源优势寻求水资源安全系统的效益最大化,而海东市、海北州、海南州、黄南州这4个较不安全地区急需采取相应的措施来解决水资源安全问题。

(3)不同方法下水安全评价结果比较。为了对评价结果进行合理性检验,本研究还运用灰色建模软件 GMS6.0 以及层次分析法软件 Yaahp V7.5,分别对最严格水资源管理制度下青海省水安全状况进行了灰色聚类和层次分析,评价结果比较见表3。

表3 基于不同方法的青海省水安全评价结果

行政区划	评价方法		
	模糊集对分析法	灰色聚类分析	层次分析法
西宁市	2	2	2
海东市	4	4	4
海北州	4	4	4
海南州	4	4	5
黄南州	4	3	4
果洛州	3	3	3
玉树州	3	3	3
海西州	3	3	4
青海省	4	4	4

根据表3可以看出,基于不同方法下模糊集对分析法与灰色聚类分析法的评价结果相比有7个相同(占87.5%),有1个相差一级(占12.5%);与层次分析法相比较,评价结果有6个相同(占75%),有两个相差一级(占25%)。模糊集对分析法的评价结果与这两种方法的评价结果基本一致,表明了该方法的合理性及可行性。

5 结论

(1)在解析最严格水资源管理制度的基础上提出了“最严格水安全”概念,建立基于“三条红线”的水安全量化指标体系,并运用模糊集对分析法构建水安全评价模型,客观性强,而且考虑了等级标准边界的模糊性,在同类评价中具有一定的可行性和实用性。

(2)将该评价模型应用到青海省水安全评价的实际研究中,根据模糊集对分析结果分析了青海省8个行政分区的水安全状况,将最严格水资源管理制度落实到实处,有很好的理论与实际应用价值。

参考文献:

- [1] Wang S, Huang G H. Interactive two-stage stochastic fuzzy programming for water resources management [J]. Journal of Environmental Management, 2011, 92(8): 1986-1995.
- [2] 王浩. 实行最严格的水资源管理制度关键技术支撑探析[J]. 中国水利, 2011(9): 28-32.
- [3] 贡力, 严松宏. 基于集对分析法的城市水安全评价[J]. 兰州交通大学学报, 2014, 33(1): 149-153.
- [4] 潘争伟, 金菊良, 吴开亚, 等. 巢湖流域水安全评价的集

- 对分析模型[J]. 水资源保护, 2012, 28(3): 9-15.
- [5] 尹志杰, 管玉卉. 南京市水资源安全综合评价方法研究[J]. 水电能源科学, 2010, 28(6): 16-18.
- [6] WANG Wensheng, JIN Juliang, DING Jing, et al. A new approach to water resources system assessment - set pair analysis method[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(10): 3017-3023.
- [7] 左其亭, 李可任. 最严格水资源管理制度理论体系探讨[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(1): 34-38+65.
- [8] 张志强, 左其亭, 马军霞. 最严格水资源管理制度的和谐论解读[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(6): 133-137.
- [9] 孙雪涛. 贯彻落实中央一号文件实行最严格水资源管理制度[J]. 中国水利, 2011(6): 33-34+52.
- [10] 解决中国水资源问题的重要举措——水利部副部长胡四一解读《国务院关于实行最严格水资源管理制度的意见》[J]. 中国水利, 2012, (7): 4-8.
- [11] 沈镭, 成升魁. 论国家资源安全及其保障战略[J]. 自然资源学报, 2002, 17(4): 393-400.
- [12] 谷树忠, 姚予龙, 沈镭, 等. 资源安全及其基本属性与研究框架[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 280-285.
- [13] 赵军凯, 赵秉栋, 冷传明. 中国水资源安全与可持续利用[J]. 南阳师范学院学报(自然科学版), 2004, 3(3): 67-70.
- [14] 刘渝, 张俊飏. 中国水资源生态安全与粮食安全状态评价[J]. 资源科学, 2012, 32(12): 2292-2297.
- [15] 冯耀龙, 崔彦朋, 田伊池. 基于模糊集理论的区域水安全评价及应用[J]. 中国农村水利水电, 2013(12): 5-8.
- [16] 申毅荣, 解建仓. 基于熵权和TOPSIS法的水安全模糊物元评价模型研究及其应用[J]. 系统工程, 2014, 32(7): 143-148.
- [17] 江红, 杨小柳. 基于熵权的亚太地区水安全评价[J]. 地理科学进展, 2015, 34(3): 373-380.
- [18] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2000: 1-3.
- [19] 杨海波, 贺添, 李建峰. 基于模糊集对分析的黄河三角洲景观评价研究[J]. 人民黄河, 2010, 32(5): 1-3+7.
- [20] 王文圣, 李跃清, 金菊良, 等. 水文水资源集对分析[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [21] 马黎华, 康绍忠, 粟晓玲. 西北干旱内陆区石羊河流域用水结构演变及其驱动力分析[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(1): 125-130.
- [22] 王宏伟, 张鑫, 邱俊楠. 模糊集对分析法在水资源安全评价中的应用[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(10): 209-214.
- [23] 程乾生. 属性识别理论模型及其应用[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 1997, 33(1): 12-20.