

半干旱地区大型灌区水文生态系统质量综合评价

——以陕西省泾惠渠灌区为例

乔长录^{1,2}

(1.石河子大学 水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832003;
2.长安大学 水与发展研究院, 陕西 西安 710054)

摘要: 根据泾惠渠灌区水文生态现状和存在的主要问题,构建了由 3 层 16 项指标组成的综合评价指标体系;基于层次分析法进行了指标权重分配,确定了评价标准和两级模糊综合评判法,并以泾惠渠灌区 2000 年的具体指标值为例,进行了实例验证。结果表明,水文气象要素和生态环境要素的质量都为中等水平,两者对中等级别的隶属度分别为 36.7% 和 42.3%;而社会经济要素的质量相对较差,对很差级别的隶属度高达 61.1%。总体来说该灌区 2000 年的水文生态系统质量处于中等水平。评价结果与实际情况基本相符,说明层次分析法和两级模糊综合评判法在半干旱地区大型灌区水文生态系统质量综合评价中具有一定的应用价值。

关键词: 水文生态系统;半干旱地区;泾惠渠灌区;综合评价
中图分类号: X171.1;TV213.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)01-0196-07

Comprehensive evaluation on quality of hydrological ecosystems in large-scale irrigation district in semi-arid region

——A case study of Jinghuiqu Irrigation District, Shaanxi Province

QIAO Chang-lu^{1,2}

(1. College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China;
2. Research Institute for Water & Development, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: According to the current hydrological ecological conditions and existing major problems in Jinghuiqu Irrigation District, a comprehensive evaluation index system consisted of three hierarchies and 16 individual indexes was established. The weights for each evaluation index were allotted based on the analytic hierarchy process (AHP) and confirmed the evaluation criteria and two-level fuzzy comprehensive evaluation method. Taking the specific indexes of Jinghuiqu Irrigation District in 2000, was carried out the real example for validation. The evaluation results showed that the quality of hydrological meteorological elements and eco-environment elements was the medium level; the memberships of medium level for both were 36.7% and 42.3%, respectively. At the same time, the social-economic element was relatively very poor and its membership to the very poor level was high as 61.1%. Overall, the quality of hydrological ecosystems of Jinghuiqu Irrigation District in 2000 was a medium level. This evaluation result was matched well with the real situation. It was explained that the analytic hierarchy process and two-level fuzzy comprehensive evaluation method had a certain application value for the comprehensive evaluation of quality of hydrological ecosystem in large-scale irrigation district in semi-arid region.

Keywords: hydrological ecosystem; semi-arid region; Jinghuiqu Irrigation District; comprehensive evaluation

灌区是人类水事活动相对较为密集的区域,特别是渠井并举的半干旱地区大型灌区,地表水和地下水的循环与转化深受人类水事活动的影响^[1],加之人类其他经济活动的影响,大型灌区近年来出现了一系列的水文生态问题^[2]。如泾惠渠灌区,在 20 世纪 80 年代初期及以前,灌区地表、地下水资源都

收稿日期:2013-04-26
基金项目:国家外国专家局、教育部高等学校学科创新引智计划(‘111’)项目“干旱半干旱地区水文生态与水安全研究”(B08039);国家自然科学基金项目(51009008)
作者简介:乔长录(1976—),男,青海海东人,博士,讲师,主要从事水文水资源和遥感水文等方面的教学和科研工作。E-mail: QiaoChangLu@126.com。

较为丰富,工农业污染很轻,1980年引泾灌溉水量达 $4 \times 10^8 \text{ m}^3$,地下水开采量不到 $2 \times 10^8 \text{ m}^3$,而年补给量达 $3.346 \times 10^8 \text{ m}^3$,排泄量为 $3.311 \times 10^8 \text{ m}^3$,水位平均埋深为4.1 m,且水质较好,水文生态处于良好状态^[1]。自20世纪90年代以来,随着灌区社会经济的迅速发展、人口的增长、工农业生产和居民生活用水量的急剧增加,加之区域降水量减少(据研究^[1,3],灌区平均降水量由80年代的 $555.67 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 降为90年代的 $443.08 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$)、地表水资源泾河水量锐减(泾河多年平均径流量由20世纪40年代的 $22 \times 10^8 \text{ m}^3$ 降低到了80年代的 $18.73 \times 10^8 \text{ m}^3$,到了90年代锐减至 $11.42 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[1])以及灌区水价制度和管理体制的不尽完善,灌区机井数量盲目扩张,大量开采地下水,致使地下水严重超采,地下水位大幅度下降,降落漏斗面积不断扩大。分析灌区1985—1997年间的地下水动态观测资料表明^[4-5]:灌区地下水位年下降幅度大于50 cm的面积超过410 km²,下降区内形成了2个地下水降落大漏斗,一个是三原县鲁桥镇降落大漏斗,1997年降落漏斗面积达7.98 km²,降落漏斗中心地下水位埋深累计下降了26.48 m;另一个是西安市高陵县东南的张卜降落大漏斗,降落漏斗面积达8 km²,漏斗中心地下水位埋深累计下降了11.08 m。

这一系列的水文生态问题,不仅严重制约着半干旱地区大型灌区社会经济的可持续发展,而且对水资源安全、粮食安全和生态安全构成了严重威胁。

李佩成^[6]在经过多年广泛深入地考察、研究之后,提出了水文生态系统观。他认为水文与生态是密切相关的,水文系统的各种变化会诱发生态系统的变化,而生态系统的变化也会引起水文系统的变化^[7]。因此解决半干旱地区大型灌区日益严重的水文生态问题,以李佩成院士提出并大力倡导的水文生态系统观为理论基础,依据生态安全、可持续发展和系统科学的观点与理论,以及水文系统和生态系统的基本特征及其相互关系,把水文系统和生态系统(包括自然生态系统和人文生态系统)作为一个有机整体——水文生态系统来加以研究^[8-9],从整体上识别半干旱地区大型灌区水文生态耦合作用机制及演变规律,从而依据水文生态耦合作用规律,研究有利于生态环境保护和人与自然和谐的水资源开发利用模式,实现水资源的可持续利用,促进大型灌区社会经济的持续发展,方可能是合理的解决途径。

本研究在借鉴前人研究成果的基础上,就半干旱地区大型灌区水文生态系统研究所关注但鲜有报道的水文生态系统质量综合评价,以泾惠渠灌区为

例,从灌区实际情况与存在的生态环境问题出发,以缓解灌区水资源供需矛盾、保护和改善灌区生态环境、实现灌区水资源可持续利用为目标,基于层次分析法和两级模糊综合评判法,结合灌区水文、生态数据,并参考灌区内各地自然、经济、社会统计资料,对灌区2010年的水文生态系统质量进行综合评价,以期为泾惠渠灌区的水资源开发利用和生态环境保护提供决策依据。

1 研究区概况

泾惠渠灌区位于陕西省关中平原中部,北依黄土台塬和嵯峨山,泾河、渭河和石川河三面环绕,内有清峪河横贯;灌区辖陕西咸阳、西安、渭南三市的泾阳、三原、高陵和富平四县以及临潼和阎良两区,东西长约70 km,南北最宽约20 km,总面积约 $1.18 \times 10^3 \text{ km}^2$;设计灌溉面积 $9.7 \times 10^2 \text{ km}^2$,有效灌溉面积 $9 \times 10^2 \text{ km}^2$;灌区有干渠5条,支渠20条,斗渠527条,蓄水水库两座,配套机井 1.4×10^4 眼,抽水站22座,装机容量1 824 kW;灌区渠系成网、机井众多,是一个引蓄提相结合、地表水与地下水综合利用的大(Ⅱ)型灌区;灌区土地肥沃,交通便利,是陕西重要的粮、油、肉、蛋等农产品基地^[10-11]。

然而,多年来由于泾河上游水源区不合理的人类活动,以及全球气候变化的影响,近年来泾河径流量锐减,而且季节性分布极为不均,使得灌区引水量远远满足不了农业灌溉的需要,同时随着社会经济的不断发展和人口的增长,加之灌区水价制度和管理体制等诸多原因,致使灌区地下水开采量逐年增大,尤其是新世纪以来,地下水采补失衡愈演愈烈,地下水位大幅度持续下降,降落漏斗面积日益扩大,由此诱发了地面沉降、地裂缝、水质恶化、粮食减产、土壤污染、土壤肥力减退等一系列水文生态问题,这不仅严重制约着灌区社会经济的可持续发展,而且对灌区水资源安全、粮食安全和生态安全已造成了一定的威胁。

2 水文生态系统质量综合评价指标体系

2.1 指标体系构建

综合评价指标体系是综合评价的理论依据,是评价结果科学性、真实性、客观性与评价过程可行性的基础。半干旱地区大型灌区水文生态系统质量综合评价,着眼于半干旱地区大型灌区水资源短缺和水资源的无序不合理开发而诱发的生态环境问题,以“自然—经济—社会”复合水文生态系统为框架基础,应用水文、生态监测数据和社会经济统计资料,

坚持主导性、科学性、先进性、易获性和协调性等原则,构建全面反映半干旱地区大型灌区水文生态系统历史、现状和发展趋势的指标体系^[12]。

综合评价指标体系的构建采用 AHP 法。在对半干旱地区大型灌区水文生态系统质量的内涵与外延作了详细地分析后,依据 AHP 法的要求和步骤,首先将半干旱地区大型灌区水文生态系统质量综合指数作为综合评价的总目标,然后依据水文生态系统的结构和特征,以其各组成要素为子目标,用具体的指标来描述和表征各子目标^[13]。

总体上将综合评价指标体系归纳为 3 层结构(表 1)^[12,14-15]。(1) 目标层。以半干旱地区大型灌区水文生态系统质量综合指数作为综合评价的总目

标,来综合表征其质量状况。用 Z 表示目标层。(2) 准则层。组成半干旱地区大型灌区水文生态系统的诸要素作为准则层,即以水文气象要素、生态环境要素和社会经济要素作为准则层。用 B 表示准则层,用 B_1 表示水文气象要素, B_2 表示生态环境要素, B_3 表示社会经济要素。(3) 指标层。指标层由可直接度量的指标构成,如单位面积地表水资源量、植被(作物)覆盖率等,是综合评价指标体系最基本的层面。用 C 表示指标层,用 C_1 、 C_2 、 $\cdots$ 表示各指标。

依据准则层各要素的特征和含义,半干旱地区大型灌区水文生态系统质量综合指数就是由各指标实际值,通过一定模型运算的结果。

表 1 半干旱地区大型灌区水文生态系统质量综合评价指标体系

目标层 Target tier	准则层 Criterion tier	指标层 Index tier
Z 半干旱地区大型灌区水文 生态系统质量综合指数 Z Quality comprehensive index of hydro-ecosystems in large-scale irrigation district in semi-arid region	B ₁ 水文气象要素质量指数 B ₁ Quality index of hydro-meteorological elements	C ₁ 年降水量/mm C ₁ Annual precipitation
		C ₂ 干旱指数 C ₂ Drought index
		C ₃ 单位面积地表水资源量/(10 ⁴ m ³ ·km ⁻² ·a ⁻¹) C ₃ Surface water quantity per unit area
		C ₄ 单位面积地下水资源量/(10 ⁴ m ³ ·km ⁻² ·a ⁻¹) C ₄ Groundwater quantity per unit area
		C ₅ 泾河水质 C ₅ Water quality of Jing River
		C ₆ 地下水埋深/m C ₆ Groundwater table
		C ₇ 地下水矿化度/(g·L ⁻¹) C ₇ Degree of mineralization of groundwater
		C ₈ 地下水下降速率/(m·a ⁻¹) C ₈ Rate of groundwater level decline
	B ₂ 生态环境要素质量指数 B ₂ Quality index of eco-environment elements	C ₉ 植被(作物)覆盖率/% C ₉ Vegetation (crops) coverage
		C ₁₀ 土壤盐渍化率/% C ₁₀ Soil salinization rate
		C ₁₁ 降落漏斗面积比率/% C ₁₁ Area rate of groundwater depression funnel
	B ₃ 社会经济要素质量指数 B ₃ Quality index of social-economic elements	C ₁₂ 人口密度/(人·km ⁻²) C ₁₂ Population density
		C ₁₃ 人均水资源量(m ³ ·人 ⁻¹) C ₁₃ Water resources per capita
		C ₁₄ 农业用水综合定额/(m ³ ·hm ⁻²) C ₁₄ Agricultural water consumption norm
		C ₁₅ 万元工业产值耗水量/(m ³ ·10 ⁴ 元 ⁻¹) C ₁₅ Industrial water consumption per output of ten thousand yuan
		C ₁₆ 实引占可引泾水量比率/% C ₁₆ The ratio of actually diverted water volume to available from Jing River

2.2 综合评语等级

一般综合评语等级数目取 3~7 的整数为宜,若太多,则语言难以描述且不易判断因素的等级归属;若太少,又不符合综合评判的质量要求。取奇数更

合理一些,因为这样有一中间等级,便于判断事物的等级归属。根据半干旱地区大型灌区水文生态系统质量综合评价的目的与要求,确定其综合评语等级分为优、良、中、差、很差 5 个等级。

2.3 评价标准确定

- (1) 国家、地方和行业规定的规范和标准。如地表水环境质量标准、地下水质量标准等。
- (2) 背景和本底标准。以泾惠渠灌区水文生态系统的背景值和本底值作为评价标准,如地下水位埋深、泾河水质、地下水矿化度本底值等。
- (3) 类比标准。以未受人类经济活动严重扰动的相似区域水文生态系统或以相似的原生自然水文生态系统作为类比标准,或以类似的水文生态因子

和功能作为类比标准,如类似水文生态系统植被覆盖率、单位面积地表水资源量等。

(4) 相关科学研究已界定的水文生态效应标准。通过当地或相似条件下相关科学研究已界定的保障水文生态质量的植被覆盖率要求、地下水埋深要求、污水排放率要求、生态需水量要求等,均可作为评价标准或参考标准。

本文建立的评价标准详见表 2(以泾惠渠灌区为例)。

表 2 综合评价标准及权重运算结果
Table 2 Comprehensive evaluation criterion and weights calculation results

目标层 Target tier	准则层 Criterion tier	权重 ($A_{B \rightarrow Z}$) Weight($A_{B \rightarrow Z}$)	指标层 Index tier	评价标准 Evaluation criterion					权重($A_{C \rightarrow B}$) Weight($A_{C \rightarrow B}$)	权重($A_{C \rightarrow Z}$) Weight($A_{C \rightarrow Z}$)
				优 Excellent	良 Good	中 Moderate	差 Bad	很差 Very Bad		
Z	B ₁	0.6370	C ₁	> 1600	800 ~ 1600	500 ~ 800	250 ~ 500	< 250	0.3387	0.2158
			C ₂	< 1.0	1.0 ~ 1.6	1.6 ~ 3.5	3.5 ~ 16.0	> 16.0	0.0291	0.0185
			C ₃	> 80	80 ~ 45	45 ~ 17	17 ~ 5	< 5	0.1751	0.1115
			C ₄	> 20	20 ~ 13	13 ~ 8	8 ~ 4	< 4	0.1751	0.1115
			C ₅	I	II	III	IV	V	0.0565	0.0360
			C ₆	2 ~ 3	1 ~ 2	3 ~ 7	7 ~ 10	> 10, < 1	0.0946	0.0603
			C ₇	< 1	1 ~ 3	3 ~ 7	7 ~ 10	> 10	0.0565	0.0360
			C ₈	< 0.1	0.1 ~ 0.25	0.25 ~ 0.4	0.4 ~ 0.6	> 0.6	0.0745	0.0475
	B ₂	0.2583	C ₉	> 80	60 ~ 80	40 ~ 60	20 ~ 40	< 20	0.5936	0.1533
			C ₁₀	< 5	5 ~ 10	10 ~ 15	15 ~ 20	> 20	0.1571	0.0406
			C ₁₁	< 0	0 ~ 2	2 ~ 5	5 ~ 10	> 10	0.2493	0.0644
	B ₃	0.1047	C ₁₂	< 30	30 ~ 120	120 ~ 200	200 ~ 250	> 250	0.0412	0.0043
			C ₁₃	> 3000	3000 ~ 2000	2000 ~ 1000	1000 ~ 500	< 500	0.0871	0.0091
			C ₁₄	< 4500	4500 ~ 7500	7500 ~ 10500	10500 ~ 13500	> 13 500	0.2424	0.0254
			C ₁₅	< 200	200 ~ 400	400 ~ 600	600 ~ 1000	> 1000	0.1320	0.0138
			C ₁₆	> 90	80 ~ 90	60 ~ 80	40 ~ 60	< 40	0.4973	0.0521

3 水文生态系统质量综合评价

3.1 指标权重确定

权重是表示某一评价因子对评价对象相对重要性所赋予的一个数值,它反映了评价因子在综合评价过程中所起作用的大小,将直接影响评价结果合理与否。因此在综合评价过程中权重分配是非常关键的环节,只有运用加权调整后的指标体系进行综合评价,才能使评价结果较接近或符合实际情况。

本研究权重分配采用 AHP 法。AHP 法是美国著名运筹学家 Saaty^[16]于 20 世纪 70 年代中期提出的一种定性定量相结合的多层次权重分配决策方法,目前广泛应用于社会经济系统的决策分析中。

(1) 经对泾惠渠灌区水文生态系统状况以及影响其质量诸因素的综合分析,本文认为水文气象要素是影响其质量的主要因素,水文气象要素基本上

决定着整个灌区的水文生态状况;其次是生态环境要素,生态环境是水文生态系统的载体,在一定的水文气象以及自然地理背景下,也影响和决定着整个灌区的水文生态状况;该灌区内工业相对落后,农业较发达,因此社会经济要素对整个灌区的水文生态状况的影响相对最小。据此,按照 AHP 法,评价因子间进行两两比较,构造 B 对 A, C 对 B 共 4 个判断矩阵,并对其进行一致性检验,然后计算各层次评价元素所对应的权重值。

(2) 层次总排序。即计算 C 对 A 相对重要性排序,实际上是层次单排序的加权组合。权重运算结果详见表 2。

3.2 隶属度函数定义

利用模糊综合评判法进行综合评价,需要定义隶属度函数。隶属度函数的定义有多种方法,在模糊评价中恰当地定义隶属度函数是评价成功与否的

关键。在对所筛选的指标及其评价标准的特点进行了深入分析的基础上,本研究对指标 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_7 、 C_8 、 C_9 、 C_{10} 、 C_{11} 、 C_{12} 、 C_{13} 、 C_{14} 、 C_{15} 和 C_{16} 采用三角形模糊分布法定义了其隶属度函数,对评价标准较特殊的指标 C_5 和 C_6 分别进行了特殊的定义。

(1) 三角形模糊分布法定义指标隶属度函数。

为了问题描述的方便,用Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ分别表示优、良、中、差和很差这 5 个评语等级,用 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 和 k_5 表示评语等级界定值,用 $u_1(x)$ 、 $u_2(x)$ 、 $u_3(x)$ 、 $u_4(x)$ 和 $u_5(x)$ 分别表示指标值隶属于评语等级Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ的隶属度函数,这样,上述 14 项评价指标中效益型指标的隶属度函数的定义过程及定义可用图 1 及公式(1)~(5)来描述。

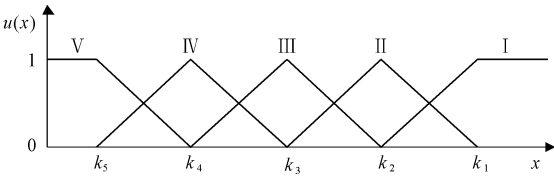


图 1 三角形模糊分布法定义效益型指标隶属度函数的过程

Fig. 1 Definition process for membership function of benefit index

$$u_1(x) = \begin{cases} 1 & (x \geqslant k_1) \\ \frac{x - k_2}{k_1 - k_2} & (k_2 < x < k_1) \\ 0 & (x \leqslant k_2) \end{cases} \quad (1)$$

$$u_2(x) = \begin{cases} 0 & (x \geqslant k_1) \\ \frac{k_1 - x}{k_1 - k_2} & (k_2 \leqslant x < k_1) \\ \frac{x - k_3}{k_2 - k_3} & (k_3 < x < k_2) \\ 0 & (x \leqslant k_3) \end{cases} \quad (2)$$

$$u_3(x) = \begin{cases} 0 & (x \geqslant k_2) \\ \frac{k_2 - x}{k_2 - k_3} & (k_3 \leqslant x < k_2) \\ \frac{x - k_4}{k_3 - k_4} & (k_4 < x < k_3) \\ 0 & (x \leqslant k_4) \end{cases} \quad (3)$$

$$u_4(x) = \begin{cases} 0 & (x \geqslant k_3) \\ \frac{k_3 - x}{k_3 - k_4} & (k_4 \leqslant x < k_3) \\ \frac{x - k_5}{k_4 - k_5} & (k_5 < x < k_4) \\ 0 & (x \leqslant k_5) \end{cases} \quad (4)$$

$$u_5(x) = \begin{cases} 0 & (x \geqslant k_4) \\ \frac{k_4 - x}{k_4 - k_5} & (k_5 < x < k_4) \\ 1 & (x \leqslant k_5) \end{cases} \quad (5)$$

对于成本型指标而言,只需将上述公式中等级界定取值条件中的“>”与“<”,“≤”与“≥”互换即可。

根据评价标准所确定的上述 14 项评价指标对应于评语等级Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ的等级界定值 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 、 k_5 见表 3。

表 3 三角形模糊分布法定义隶属度函数的等级界定值
Table 3 Level value for defining membership function

指标 C Index C	等级界定值 Level value				
	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
C_1	1600	1200	650	375	250
C_2	1.0	1.3	2.55	9.75	16
C_3	80	62.5	31	11	5
C_4	20	16.5	10.5	6	4
C_7	1	2	5	8.5	10
C_8	0.1	0.175	0.325	0.5	0.6
C_9	80	70	50	30	20
C_{10}	5	7.5	12.5	17.5	20
C_{11}	0	1	3.5	7.5	10
C_{12}	30	75	160	225	250
C_{13}	3000	2500	1500	750	500
C_{14}	4500	6000	9000	12000	13500
C_{15}	200	300	500	800	1000
C_{16}	90	80	70	50	40

(2) 指标 C_5 的隶属度函数定义。

对评价标准较特殊的指标 C_5 ,本研究定义的隶属度函数用公式(6)~(10)来描述^[17]。

$$u_1(x) = \begin{cases} 0.8 & (x = \text{Ⅰ}) \\ 0.2 & (x = \text{Ⅱ}) \\ 0 & (x = \text{Ⅲ}) \\ 0 & (x = \text{Ⅳ}) \\ 0 & (x = \text{Ⅴ}) \end{cases} \quad (6)$$

$$u_2(x) = \begin{cases} 0.1 & (x = \text{Ⅰ}) \\ 0.8 & (x = \text{Ⅱ}) \\ 0.1 & (x = \text{Ⅲ}) \\ 0 & (x = \text{Ⅳ}) \\ 0 & (x = \text{Ⅴ}) \end{cases} \quad (7)$$

$$u_3(x) = \begin{cases} 0 & (x = \text{Ⅰ}) \\ 0.1 & (x = \text{Ⅱ}) \\ 0.8 & (x = \text{Ⅲ}) \\ 0.1 & (x = \text{Ⅳ}) \\ 0 & (x = \text{Ⅴ}) \end{cases} \quad (8)$$

$$u_4(x) = \begin{cases} 0 & (x = \text{I}) \\ 0 & (x = \text{II}) \\ 0.1 & (x = \text{III}) \\ 0.8 & (x = \text{IV}) \\ 0.1 & (x = \text{V}) \end{cases} \quad (9)$$
$$u_5(x) = \begin{cases} 0 & (x = \text{I}) \\ 0 & (x = \text{II}) \\ 0 & (x = \text{III}) \\ 0.2 & (x = \text{IV}) \\ 0.8 & (x = \text{V}) \end{cases} \quad (10)$$

(3) 指标 C_6 的隶属度函数定义。

对评价标准较特殊的指标 C_6 ,本研究经对三角形模糊分布法的适当改造,建立了定义方法,具体定义过程及定义用图 2 及公式(11)~(15)来描述^[17]。

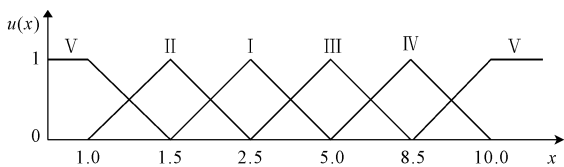


图 2 改进的三角形模糊分布法定义指标 C_6 隶属度函数的过程

Fig.2 Definition process for membership function of index C_6

$$u_1(x) = \begin{cases} 0 & (x \leq 1.5) \\ \frac{x - 1.5}{2.5 - 1.5} & (1.5 < x \leq 2.5) \\ \frac{5 - x}{5 - 2.5} & (2.5 < x < 5) \\ 0 & (x \geq 5) \end{cases} \quad (11)$$
$$u_2(x) = \begin{cases} 0 & (x \leq 1) \\ \frac{x - 1}{1.5 - 1} & (1 < x \leq 1.5) \\ \frac{2.5 - x}{2.5 - 1.5} & (1.5 < x < 2.5) \\ 0 & (x \geq 2.5) \end{cases} \quad (12)$$
$$u_3(x) = \begin{cases} 0 & (x \leq 2.5) \\ \frac{x - 2.5}{5 - 2.5} & (2.5 < x \leq 5) \\ \frac{8.5 - x}{8.5 - 5} & (5 < x < 8.5) \\ 0 & (x \geq 8.5) \end{cases} \quad (13)$$
$$u_4(x) = \begin{cases} 0 & (x \leq 5) \\ \frac{x - 5}{8.5 - 5} & (5 < x \leq 8.5) \\ \frac{10 - x}{10 - 8.5} & (8.5 < x < 10) \\ 0 & (x \geq 10) \end{cases} \quad (14)$$

$$u_5(x) = \begin{cases} 1 & (x \leq 1) \\ \frac{1.5 - x}{1.5 - 1} & (1 < x < 1.5) \\ 0 & (1.5 \leq x \leq 8.5) \\ \frac{x - 8.5}{10 - 8.5} & (8.5 < x < 10) \\ 1 & (x \geq 10) \end{cases} \quad (15)$$

3.3 综合评判运算

在确定了权重,定义了隶属度函数后,就可以用模糊综合评判法进行综合评判运算。本研究以泾惠渠灌区 2000 年的具体指标值为例(表 4),对其水文生态系统质量进行了综合评判运算与分析。

表 4 泾惠渠灌区 2000 年综合评价指标值

Table 4 Comprehensive evaluation indexes value in 2000

目标层 Target tier	准则层 Criterion tier	指标层 Index tier	2000 年指标值 Indexes value in 2000
Z	B_1	C_1	525.90
		C_2	2.42
		C_3	12.50
		C_4	10.64
		C_5	2.00
		C_6	11.70
		C_7	1.20
		C_8	0.50
	B_2	C_9	59.27
		C_{10}	1.80
		C_{11}	2.05
	B_3	C_{12}	998.00
		C_{13}	154.00
		C_{14}	300.00
		C_{15}	120.00
		C_{16}	38.45

由表 2 可知,由于 C 层指标数量多达 16 项,各指标的组合权重又都很小,如果直接利用 C 层指标,采用组合权重来进行综合评判,评判结果可能会失真。因此,根据评价指标体系递阶层次结构,将综合评判过程分为两级来进行,首先利用与 B 层各元素有联系的 C 层的指标,来评判 B 层各元素的质量状况,将其称为一级评判,然后以一级评判结果再做最终评判,将其称为二级评判。

本研究采用的综合模糊评判模型为:

$$B = W \circ R$$
$$= (w_1, w_2, \dots, w_m) \circ \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \vdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \vdots & r_{2n} \\ \cdots & \cdots & \vdots & \cdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \vdots & r_{mn} \end{bmatrix}$$
$$= (b_1, b_2, \dots, b_n) \quad (16)$$

式中, $W = (w_1, w_2, \cdots, w_m)$ 为评价因子的权重向量; $B = (b_1, b_2, \cdots, b_n)$ 为综合评判结果向量; R 为模糊评判向量, 由指标值的隶属度组成; $\circ$ 为模糊合成算子, 本研究采用 $M(\cdot, \oplus)$ 算子。

(1) 一级模糊综合评判。根据所建指标体系, 一级模糊综合评判就是利用指标层的指标来分别评判准则层 3 个要素的质量状况, 评判结果详见表 5。

表 5 一级模糊综合评判结果

评判要素 Evaluation elements	I	II	III	IV	V
水文气象要素 Hydro-meteorological elements	0.0465	0.0581	0.3670	0.3556	0.1728
生态环境要素 Eco-environment elements	0.1571	0.4197	0.4232	0.0000	0.0000
社会经济要素 Social-economic elements	0.0507	0.1072	0.1491	0.0812	0.6118

(2) 二级模糊综合评判。根据所建指标体系, 二级模糊综合评判就是利用一级评判结果, 来进行最终评判, 综合评判结果详见表 6。

表 6 二级模糊综合评判结果

综合评语等级 Comprehensive evaluation level	I	II	III	IV	V
综合评判结果 Comprehensive evaluation results	0.0943	0.1415	0.3431	0.2265	0.1907

由表 5 可以看出, 在水文生态系统 3 个要素中, 水文气象要素和生态环境要素的质量都为中等水平, 两者对中级别的隶属度分别为 36.7% 和 42.3%; 而社会经济要素相对较差, 对很差级别的隶属度高达 61.1%。从综合评判结果表 6 可知, 总体来说, 泾惠渠灌区 2000 年水文生态系统质量总体状况处于中等水平, 隶属于中级别的隶属度为 34.3%, 但其隶属于差和很差级别的隶属度也较高, 这主要是由于目前农业用水综合定额较高、万元工业产值耗水量较大以及引泾水量较少等因素造成的。

4 结 论

半干旱地区大型灌区水文生态系统质量综合评价是由水文气象要素、生态环境要素和社会经济要素等众多要素组成的具有层次结构的复杂系统, 评价的难点是如何合理地选取能反映实际情况的指标及其权重的分配。在对半干旱地区大型灌区水文生

态系统的结构、功能、特点以及存在的主要问题等诸多方面进行深入分析的基础上, 根据泾惠渠灌区的实际情况构建了由 3 层 16 项指标组成的综合评价指标体系, 并研究确定了相应的评价标准, 基于 AHP 法进行了指标权重的分配, 最后, 应用两级模糊综合评判法进行了综合评判分析, 结果与实际情况符合, 说明该方法具有一定的应用价值。

泾惠渠灌区水文生态系统质量综合评价结果表明, 社会经济要素是目前影响其水文生态系统质量的主要因素, 所以泾惠渠灌区应加大引泾水量, 通过农业节水改造降低农业综合用水定额以及通过中水利用工艺改造等降低万元工业产值耗水量等措施来改善灌区水文生态系统质量。

参 考 文 献:

[1] 刘 燕, 朱红艳. 泾惠渠灌区水环境劣变特征及地下水调蓄能力分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 19-24.

[2] 陕西省灌区协会. 关中灌区的地位作用与当前亟待解决的几个突出问题[R]. 西安: 陕西省灌区协会, 2007.

[3] 徐建国, 卫政润, 张 涛, 等. 环渤海山东地区地下水库建设条件分析[J]. 地质调查与研究, 2004, 27(3): 197-202.

[4] 泾惠渠管理局. 1978—2001 年泾惠渠灌区地下水动态观测[R]. 三原: 陕西省泾惠渠管理局, 2002.

[5] 贺 屹. 渠井双灌区地下水超采情况下的动态分析及人工补给研究——以泾惠渠灌区为例[D]. 西安: 长安大学, 2011.

[6] 李佩成. 论水文生态学的建立及其历史使命[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(1): 1-4.

[7] 李佩成. 威海萎缩原因、后果、对策及启示[J]. 国土开发与整治, 1993, 3(4): 53-59.

[8] 冯国璋. 水事活动对区域水文生态系统的影响[M]. 北京: 高等教育出版, 2002.

[9] 冯国璋. 水事活动对区域水文生态系统的影响及其对策研究[D]. 杨凌: 西北农业大学, 1998.

[10] 乔长录, 刘 招, 茯 苓. 基于 COMGIS 和 Matlab 的泾惠渠灌区灌溉决策支持系统[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(3): 31-36.

[11] 叶遇春. 泾惠渠志[M]. 西安: 三秦出版社, 1991.

[12] 刘 涛, 张洪江, 吴敬东, 等. 层次分析法在泥石流危险度评价中的应用——以北京市密云县为例[J]. 水土保持通报, 2008, 28(5): 6-10.

[13] 苏为华. 多指标综合评价理论与方法问题研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2000.

[14] 孙栋元, 赵成义, 李菊燕, 等. 基于层次分析法的干旱内陆河流域生态环境需水评价——以新疆台兰河流域为例[J]. 水土保持通报, 2011, 31(5): 108-114.

[15] 张 晓, 高海清, 郭东敏, 等. 层次分析法在陕北退耕还林可持续发展影响因子评价中的应用[J]. 水土保持通报, 2010, 30(5): 147-151.

[16] Saaty T L. The Analytical Hierarchy Process: Planning, Priority Setting and Resource Allocation[M]. New York: McGraw - Hill, 1980.

[17] 乔长录. 半干旱地区大型灌区水文生态系统动态监测与综合评价研究——以陕西省泾惠渠灌区为例[D]. 西安: 长安大学, 2012.