

干旱区流域水文生态系统质量综合评价研究 ——以新疆自治区玛纳斯河流域为例

乔长录^{1,2}, 刘昭¹

(1. 长安大学 水与发展研究院, 陕西 西安 710054; 2. 华北水利水电学院 水利学院, 河南 郑州 450011)

摘要: 根据玛纳斯河流域水文生态现状和存在的主要问题, 构建了由 3 层 19 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, 并以玛纳斯河流域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对玛纳斯河流域水文生态系统质量影响较大, 两者对很差级别的隶属度分别高达 38.4% 和 47.0%, 而社会经济要素相对较好, 对良级别的隶属度高达 59.2%。总体来说该流域水文生态系统质量较差。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干旱区流域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; 干旱区; 玛纳斯河流域; 综合评价

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)02-0215-07

中图分类号: X171.1, TV213.9

Comprehensive Evaluation on Quality of Hydro-ecosystems in Arid River Basins — A Case Study of Manas River Basin in Xinjiang Autonomous Region

QIAO Chang-lu^{1,2}, LIU Zhao¹

(1. Research Institute for Water & Development, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, He'nan 450011, China)

Abstract: Considered the current hydro-ecological conditions on Manas River basin and relevant existing problems, an evaluation index system consisting of three hierarchies and 19 individual evaluation indexes was established. The weight for each evaluation index was allotted based on the analytic hierarchy process (AHP), and then the evaluation criteria and two-level comprehensive fuzzy evaluation method were developed. The quality of the hydro-ecosystem in Manas River basin was evaluated as an example. The evaluation results show that the factors of hydrologic meteorology and eco-environment dominated the hydro-ecosystem quality in the basin; the memberships of the two categories to the class of very poor were 38.4% and 47.0%, respectively. At the same time, social-economic factor was relatively better, as its membership to the class of good was as high as 59.2%. Overall, the hydro-ecosystems quality of Manas River basin was evaluated as low, which matched well with the fact. This suggests that the evaluation method developed in this study could have extensive application value in the similar areas.

Keywords: hydro-ecosystems; arid region; Manas River basin; comprehensive evaluation

中国干旱区包括新疆维吾尔自治区全境、甘肃省河西走廊、青海省柴达木盆地及内蒙古自治区贺兰山以西地区^[1-2]。由于深居欧亚大陆腹地, 平原区降水量在 160 mm 以下, 基本上不产生地表径流, 气候干旱, 风大沙多, 土地贫瘠, 是我国生态环境最为严酷和脆弱的地区。所幸的是干旱区内普遍分布着高大的山系, 因而能截留大气中的水资源成为旱区“湿岛”和山地“水塔”, 由此发育了众多的内陆河, 使得我国深居内

陆腹地的干旱区形成了许多人类赖以生存的绿洲^[2-3]。干旱区流域多为内陆河流域, 河流出山口以前汇流面积沿程不断扩大, 水量不断增多, 但河流出山口以后几乎没有地表径流汇入, 出山径流量基本代表每条河流或每一流域的总水资源量, 水量沿程因强烈蒸发、渗漏耗散不断减少, 最终流入尾间湖泊或消失于戈壁、沙漠、绿洲之中^[2,4]。干旱区内绿洲兴衰、植被演替皆取决于水资源状况^[2]。

中国干旱区特殊的地理气候环境, 使水资源成为

收稿日期: 2011-12-31

修回日期: 2012-01-20

资助项目: 国家外国专家局、教育部高等学校学科创新引智计划项目“干旱半干旱地区水文生态与水安全研究”(B08039); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目“关中地区水文干旱特征及其预警研究”(2010JM5013)

作者简介: 乔长录(1976—), 男(汉族), 青海省乐都县人, 博士研究生, 工程师, 从事水文及水资源、水利信息化方面的研究。Email: QiaoChangLu@126.com。

维系生态安全、粮食安全以及社会经济健康可持续发展的决定性因素。然而,近半个世纪以来,随着科学技术的迅速发展和人口的急剧增长,人类对水循环系统的改造强度更是史无前例,导致水资源在人类与自然之间的分配严重失衡^[2],致使湖泊萎缩干涸,植被退化,生物多样性减少,土地沙漠化,灾害程度加剧等众多的生态环境问题^[3],这不仅严重制约着干旱区社会经济的可持续发展和人居环境的持续改善,而且对水资源安全、粮食安全和生态安全构成了严重的威胁。

面对由于水资源短缺和人类不合理地开发利用以及气候变化而造成的中国干旱区生态环境日益恶化的严峻现实,科学界正在寻求新的解决办法。然而,单学科的研究很难摆脱其本身的局限性^[5],因而,局限于单纯地研究干旱区的水资源或生态退化问题,都无法满足干旱区水安全与生态安全整体调控的实际需求。

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及思想。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],因此解决干旱区流域水资源短缺与生态退化这对孪生问题,只有以李佩成提出的水文生态系统观及思想,以水文循环所涉及的完整地理空间——流域为单元,依据生态安全、可持续发展观与系统科学理论,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],从整体上识别干旱区流域水文生态耦合作用机制及演变规律,从而依据流域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流域水资源开发利用模式,实现水资源的可持续利用,促进流域社会经济的持续发展。

本研究在借鉴前人研究成果的基础上,就干旱区流域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问题,以新疆自治区玛纳斯河流域为例,从流域实际情况与存在的生态环境问题出发,以缓解流域水资源供需矛盾,保护和改善流域生态环境,实现流域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,结合流域水文、生态数据,并参考流域内各地自然、经济、社会统计资料,对流域2010年的水文生态系统质量进行综合评价,以期对玛纳斯河流域的水资源开发利用、生态修复和环境保护提供决策依据。

1 研究区概况

玛纳斯河流域位于新疆自治区天山北麓中段,准噶尔盆地南缘,南起依连哈比尔尕山,北接古尔班通古特沙漠,东起塔西河,西至巴音沟河,地理坐标 $85^{\circ}01'—86^{\circ}32' E$, $43^{\circ}27'—45^{\circ}21' N$,东西最长198.7 km,南北最宽260.8 km,总体由东南向西北倾斜,海拔最高5242.5 m,最低256 m,由南向北依次分为南部山地丘陵区、中部绿洲平原区和北部沙漠区3大地貌类型区,流域总面积 $2.67 \times 10^4 \text{ km}^2$,占新疆自治区国土面积的1.53%。主河玛纳斯河径流量约 $1.32 \times 10^9 \text{ m}^3$,河流总长约400 km。流域远离海洋,属于典型的大陆性干旱气候,年平均气温在 $6.0 \sim 6.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,夏季极端最高气温可达 $43.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$,冬季极端最低气温可达 $-42.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。年降水量110~200 mm,年蒸发量1500~2000 mm,具有气候干燥,光照充足,热量丰富,雨量稀少,蒸发量大,气温日较差大等大陆性气候特点^[10-13]。

该流域土地资源丰富,开发潜力巨大,农业经济在新疆占有举足轻重的地位。然而,近50 a来,特别是改革开放以来,几十年大规模地兴修水利,引水灌溉,地下水集中开采,水资源供给越来越受到上游污染,工农业和城市用水量日益增大等一系列不利因素的影响,使水资源供需矛盾日益突出,造成了水资源污染,下游玛纳斯湖干涸,地下水位持续下降并出现了降落漏斗等威胁人类生存的生态环境问题^[13-14]。

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

干旱区流域水文生态系统质量综合评价指标体系是干旱区流域水文生态系统质量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。干旱区流域水文生态系统质量综合评价,着眼于干旱区流域水资源短缺及水资源的无序不合理开发而引起的生态环境问题,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数据,坚持主导性、科学性与区域性、先进性、易获性、稳定性和协调性等原则,构建全面反映干旱区流域水文生态系统历史、现状和发展变化趋势的指标体系^[15]。

综合评价指标体系的构建采用AHP法。在对干旱区流域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,首先将干旱区流域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,以水文

生态系统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^[16]。

总体上将干旱区流域水文生态系统质量综合评价指标体系归纳为 3 个层次结构(表 1)^[15,17-18]。(1) 目标层 Z。以干旱区流域水文生态系统质量综合指数作为综合评价的总目标,来综合表征流域水文生态系统质量状况。(2) 准则层。组成干旱区流域水文生态系统的各要素作为准则层,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的判断依据。用 B 表示准则层,用 B₁ 表示水文气象要素, B₂ 表示生态环境要素, B₃ 表示社会经济要素。(3) 指标层。指标层是由可直接度量的指标构成,如单位面积地表水资源量、植被覆盖率、山区冬季冰雪覆盖率、万元工业产值耗水量等是流域水文生态系统质量综合评价指标体系最基本的层面,依据准则层各要素的特征和含义,干旱区流域水文生态系统质量综合指数就是由各指标参数的实际值通过一定的模型运算而得到的结果。用 C 表示目标层,同时用 C₁, C₂, … 表示各具体指标。

2.2 综合评语等级

一般综合评价的评语等级数目取 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,因为这样可以有一个中间等级,便于判断被评判事物的等级归属。根据干旱区流域水文生态系统质量综合评价的目的与要求,确定其综合评价的评语等级分为优、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(GB3838—2002),地下水质量标准(GB/T 14848—93)等。

(2) 背景和本底标准。以玛纳斯河流域水文生态系统的背景值和本底值作为评价标准,如区域植被覆盖率、沙漠面积比率、流域水土流失本底值等。

(3) 类比标准。以未受人类经济活动严重扰动的相似流域的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;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的植被覆盖率、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的相关科学研究已界定的保障水文生态质量的森林覆盖率要求、草地覆盖率要求、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。

按照综合评语等级要求,建立了玛纳斯河流域水文生态系统质量评价标准,详见表 1。

表 1 干旱区流域水文生态系统结构及质量综合评价标准

目标层	准则层	指标层	评价标准				
			优	良	中	差	很差
Z 干旱区 流域 水文 生态 系统 质量 综合 指数	B ₁ 素水 质文 量气 指象 数要	C ₁ 年降水量 ^[19] /mm	>1 600	800~1 600	500~800	250~500	<250
		C ₂ 干旱指数 ^[20]	<1.0	1.0~1.6	1.6~3.5	3.5~16.0	>16.0
		C ₃ 山区冬季冰雪覆盖率/%	>75	75~50	50~25	25~10	<10
		C ₄ 单位面积地表水资源量/(10 ⁴ m ³ ·km ⁻² ·a ⁻¹)	>80	80~45	45~17	17~5	<5
		C ₅ 单位面积地下水资源量/(10 ⁴ m ³ ·km ⁻² ·a ⁻¹)	>20	20~13	13~8	8~4	<4
		C ₆ 玛纳斯河水质	I	II	III	IV	V
		C ₇ 地下水埋深/m	2~3	1~2	3~7	7~10	>10, <1
		C ₈ 地下水矿化度/(g·L ⁻¹)	<1	1~3	3~7	7~10	>10
	B ₂ 素生 质态 量环 指境 数要	C ₉ 植被覆盖率/%	>80	60~80	40~60	20~40	<20
		C ₁₀ 垦区土壤盐渍化率/%	<5	5~10	10~15	15~20	>20
		C ₁₁ 沙漠化面积比率/%	<0	0~5	5~10	10~15	>15
		C ₁₂ 水土流失强度/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	<1 000	1 000~2 500	2 500~5 000	5 000~8 000	>8 000
		C ₁₃ 生态用水比率/%	>35	35~25	25~15	15~5	<5
	B ₃ 素社 质会 量经 指济 数要	C ₁₄ 人口密度/(人·km ⁻²)	<30	30~120	120~200	200~250	>250
		C ₁₅ 人均水资源量(m ³ /人)	>3 000	3 000~2 000	2 000~1 000	1 000~500	<500
		C ₁₆ 农业用水综合定额/(m ³ ·hm ⁻²)	<4 500	4 500~7 500	7 500~10 500	10 500~13 500	>13 500
		C ₁₇ 万元工业产值耗水量(m ³ /万元)	<200	200~400	400~600	600~1 000	>1 000
		C ₁₈ 污水处理率/%	>85	60~80	40~60	40~20	<20
		C ₁₉ 水资源供需比	>1.2	1.2~1.0	1.0~0.8	0.8~0.6	<0.6

3 流域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^[21] 于 20 世纪 70 年代中期提出的一种定性与定量相结合的多层次权重分析决策方法,目前广泛应用于社会经济系统的决策分析中。

(1) 判断矩阵的构造和层次单排序。经对玛纳斯河流域水文生态系统及影响其质量诸因素的综合分析,认为水文气象要素是影响该流域的主要因素,水文气象要素基本上决定着整个流域的水文生态状况;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流域的水文生态状况;该流域人口相对稀少,工业相对落后,农业较发达,因此社会经济要素对整个流域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。即计算指 C 对于 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。在对所筛选指标及其评价标准的特点进行了深入分析的基础上,对指标 $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_8, C_9, C_{10}, C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{14}, C_{15}, C_{16}, C_{17}, C_{18}$ 和 C_{19} 共 17 项评价指标,采用三角形模糊分布法,定义了其隶属度函数,对于评价标准较特殊的指标 C_6 和指标 C_7 分别进行了特殊的定义。

3.2.1 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, V 分别表示优、良、中、差、很差这 5 个评语等级,用 k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 分别表示三角形模糊分布法定义隶属度函数的评语等级界定值,用 $u_1(x), u_2(x), u_3(x), u_4(x), u_5(x)$ 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 17 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。

表 2 综合评价权重运算结果

目标层	准则层	权重 $A_B \rightarrow Z$	指标层	权重 $A_C \rightarrow B$	权重 $A_C \rightarrow Z$
Z 干旱区流域水文生态系统质量综合指数	B ₁ 水文气象要素	0.637 0	C ₁ 年降水量	0.297 7	0.189 6
			C ₂ 干旱指数	0.028 8	0.018 3
			C ₃ 山区冬季冰雪覆盖率	0.297 7	0.189 6
			C ₄ 单位面积地表水资源量	0.142 0	0.090 5
			C ₅ 单位面积地下水资源量	0.091 0	0.058 0
			C ₆ 玛纳斯河水质	0.056 8	0.036 2
			C ₇ 地下水埋深	0.048 1	0.030 6
			C ₈ 地下水矿化度	0.037 8	0.024 1
	B ₂ 生态环境要素	0.258 3	C ₉ 植被覆盖率	0.424 8	0.109 7
			C ₁₀ 垦区土壤盐渍化率	0.258 0	0.066 6
			C ₁₁ 沙漠化面积比率	0.138 2	0.035 7
			C ₁₂ 水土流失强度	0.105 0	0.027 1
			C ₁₃ 生态用水比率	0.074 1	0.019 1
	B ₃ 社会质量经济要素	0.104 7	C ₁₄ 人口密度	0.130 9	0.013 7
			C ₁₅ 人均水资源量	0.089 9	0.009 4
			C ₁₆ 农业用水综合定额	0.227 0	0.023 8
			C ₁₇ 万元工业产值耗水量	0.063 0	0.006 6
			C ₁₈ 污水处理率	0.038 7	0.004 1
			C ₁₉ 水资源供需比	0.450 4	0.047 2

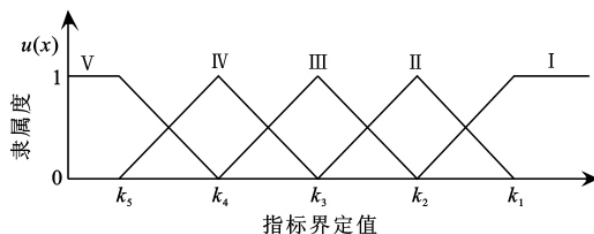


图 1 三角形模糊分布法定义效益型指标隶属度函数过程图

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

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

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

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

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

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

根据评价标准所确定的上述 17 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 详见表 3。

表 3 三角形模糊分布法定义隶属度函数的等级界定值

指标 C	三角形模糊分布法等级界定值				
	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
C_1/mm	1 500	1 250	750	300	100
C_2	1.0	1.4	2.5	10.5	16.0
$C_3/\%$	75.0	62.5	37.5	17.5	10.0
$C_4/(10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$	80.0	62.5	31.0	11.0	5.0
$C_5/(10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$	20.0	16.5	105.0	6.0	4.0
$C_8/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	1.0	2.0	5.0	8.5	10.0
$C_9/\%$	80	70	50	30	20
$C_{10}/\%$	5.0	7.5	12.5	17.5	20
$C_{11}/\%$	0	2.5	7.5	12.5	15
$C_{12}/(\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$	1 000	1 750	3 750	6 500	8 000
$C_{13}/\%$	35	30	20	10	5
$C_{14}/(\text{人} \cdot \text{km}^{-2})$	30	75	160	225	250
$C_{15}/(\text{m}^3/\text{人})$	3 000	2 500	1 500	750	500
$C_{16}/(\text{m}^3/\text{hm}^{-2})$	4 500	6 000	9 000	12 000	13 500
$C_{17}/(\text{m}^3/\text{万元})$	200	300	500	800	1000
$C_{18}/\%$	85	70	50	30	20
C_{19}	1.2	1.1	0.9	0.7	0.6

3.2.2 指标 C_6 的隶属度函数定义 对于评价标准较特殊的指标 C_6 ,本研究定义的隶属度函数可用公式 (6) — (10) 来描述。

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

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

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

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

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

3.2.3 指标 C_7 的隶属度函数定义 对于评价标准较特殊的指标 C_7 ,本研究经过对三角形模糊分布法适当改造,建立了定义指标 C_7 的隶属度函数的方法,并给出了定义,具体定义过程及定义可用图 2 及公式 (11) — (15) 来描述。

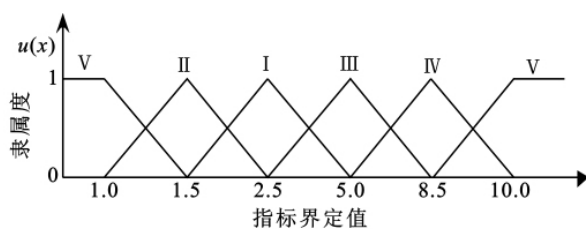


图 2 改进的三角形模糊分布法定义指标 C_7 隶属度函数过程图

$$u_1(x) = \begin{cases} 0 & (x \leq 1.5) \\ \frac{x - 1.5}{2.5 - 1.5} & (1.5 < x \leq 2.5) \\ \frac{5 - x}{5 - 2.5} & (2.5 < x < 5) \\ 0 & (x \geq 5) \end{cases} \quad (11)$$

$$u_2(x) = \begin{cases} 0 & (x \leq 1) \\ \frac{x - 1}{1.5 - 1} & (1 < x \leq 1.5) \\ \frac{2.5 - x}{2.5 - 1.5} & (1.5 < x < 2.5) \\ 0 & (x \geq 2.5) \end{cases} \quad (12)$$

$$u_3(x) = \begin{cases} 0 & (x \leq 2.5) \\ \frac{x - 2.5}{5 - 2.5} & (2.5 < x \leq 5) \\ \frac{8.5 - x}{8.5 - 5} & (5 < x < 8.5) \\ 0 & (x \geq 8.5) \end{cases} \quad (13)$$

$$u_4(x) = \begin{cases} 0 & (x \leq 5) \\ \frac{x-5}{8.5-5} & (5 < x \leq 8.5) \\ \frac{10-x}{10-8.5} & (8.5 < x < 10) \\ 0 & (x \geq 10) \end{cases} \quad (14)$$

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

3.3 综合评判运算

在确定了各评价指标的权重,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 2010 年为例,对玛纳斯河流域的水文生态系统质量进行了综合评判运算与分析。2010 年玛纳斯河流域水文生态系统质量综合评价各指标值详见表 4。

表 4 玛纳斯河流域 2010 年综合评价指标值

目标层	准则层	指标层	2010 年指标值
Z 干旱区 流域 水文 生态 系统 质量 综合 指数	B ₁ 素水 质文 量气 指象 数要	C ₁ 年降水量/mm	196.63
		C ₂ 干旱指数	9.1
		C ₃ 山区冬季冰雪覆盖率/%	62.24
		C ₄ 单位面积地表水资源量/(10 ⁴ m ³ · km ⁻² · a ⁻¹)	9.19
		C ₅ 单位面积地下水水资源量/(10 ⁴ m ³ · km ⁻² · a ⁻¹)	6.12
		C ₆ 玛纳斯河水质	4
		C ₇ 地下水埋深/m	3.52
		C ₈ 地下水矿化度/(g · L ⁻¹)	14.11
	B ₂ 素生 质态 量环 指境 数要	C ₉ 植被覆盖率/%	30.54
		C ₁₀ 垦区土壤盐渍化率/%	41.23
		C ₁₁ 沙漠化面积比率/%	22.79
		C ₁₂ 水土流失强度/(t · km ⁻² · a ⁻¹)	750
		C ₁₃ 生态用水比率/%	0.9
	B ₃ 素社 质会 量经 指济 数要	C ₁₄ 人口密度/(人 · km ⁻²)	82
		C ₁₅ 人均水资源量(m ³ /人)	2 499
		C ₁₆ 农业用水综合定额/(m ³ · hm ⁻²)	6 750
		C ₁₇ 万元工业产值耗水量(m ³ /万元)	31.2
		C ₁₈ 污水处理率/%	72.56
		C ₁₉ 水资源供需比	0.98

由表 2 可知,由于 C 层指标数量多达 19 项,各指标的组合权重都很小,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:

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

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

3.3.1 一级模糊综合评判 根据所构建的指标体系,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 个水文生态要素的质量状况,评判结果详见表 5。

表 5 一级模糊综合评判结果

评判要素	优 I	良 II	中 III	差 IV	很差 V
水文气象	0.028 5	0.314 2	0.037 7	0.235 5	0.384 0
生态环境	0.105 0	0.000 0	0.011 5	0.413 3	0.470 3
社会经济	0.069 6	0.592 4	0.337 9	0.000 0	0.000 0

3.3.2 二级模糊综合评判 根据所构建的指标体系,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	优 I	良 II	中 III	差 IV	很差 V
综合评判结果	0.052 6	0.262 2	0.062 4	0.256 8	0.366 1

由表 5 可以看出,在水文生态系统 3 个要素中,社会经济要素相对较好,对良级别的隶属度高达 59.2%,而水文气象要素和生态环境要素的质量较差,两者对很差级别的隶属度分别高达 38.4% 和 47.0%。导致玛纳斯河流域 2010 年水文生态系统质量较差,隶属于差和很差级别的隶属度分别高达 25.7% 和 36.6%。总体上来说研究区水文生态系统质量较差,这主要是由于该区植被覆盖率低,年降雨量少,垦区土壤盐渍化率高以及沙漠化面积比率高且权重较大而造成,因此必须禁止在沙漠边缘打井放牧,保护沙漠植被,搞好植树造林,力求在绿洲与沙漠边缘过渡带形成一道绿色生态屏障,以增强抗风沙灾害的能力。同时采取适当的措施改良土壤,降低垦区土壤盐渍化造成的危害;3 个要素中社会经济要素质量最好,对良级别的隶属度高达 59.2%,处于良好水

平,说明近年来该流域社会经济发展状况良好可为流域水文生态质量提供良好的经济技术保障。

4 结论

干旱区流域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以及确定其权重。在对干旱区流域水文生态系统的结构、功能、特点以及存在的主要问题等多方面进行了深入分析的基础上,根据流域的实际情况构建了由3层19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。

玛纳斯河流域水文生态系统质量综合评价结果表明,水文气象要素和生态环境要素对玛纳斯河流域水文生态系统质量影响较大,而社会经济要素对其影响小。同时说明,水资源是该流域水文生态系统质量的关键,因为降雨量少、干旱、水资源短缺等地域特征不仅其本身影响水文生态系统的质量,而且供需失调和不合理的开发利用等还会导致一系列的生态环境负面效应,进而影响水文生态系统的质量。因此,在干旱区流域,更应该加强水资源的合理利用。

[参 考 文 献]

- [1] 程国栋,张志强,李锐. 西部地区生态环境建设的若干问题与政策建议[J]. 地理科学,2000,20(6):503-510.
- [2] 程国栋,赵传燕. 干旱区内陆河流域生态水文综合集成研究[J]. 地球科学进展,2008,23(10):1005-1012.
- [3] 王根绪,程国栋,徐中民. 中国西北干旱区水资源利用及其生态环境问题[J]. 自然资源学报,1999,14(2):109-116.
- [4] 胡安彦. 干旱地区内陆河的水文生态特征及其水资源的合理开发利用研究:以塔里木河为例[D]. 陕西西安:长安大学,2003.
- [5] 严登华,何岩,邓伟,等. 生态水文学研究进展[J]. 地理科学,2001,21(5):467-473.
- [6] 李佩成. 论水文生态学的建立及其历史使命[R]. 陕西西安:长安大学水与发展研究院,2011.
- [7] 李佩成. 咸海萎缩原因、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:高等教育出版社,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]. 陕西西安:西北农业大学,1998.
- [10] 玲封. 玛纳斯河流域农业开发与生态环境变迁研究[D]. 江苏南京:南京农业大学,2005.
- [11] 赵宝峰. 干旱区水资源特征及其合理开发模式研究:以玛纳斯河流域为例[D]. 陕西西安:长安大学,2010.
- [12] 凌红波,徐海量,乔木,等. 1958—2006年玛纳斯河流域水系结构时空演变及驱动机制分析[J]. 地理科学进展,2010,29(9):1129-1136.
- [13] 禹朴家,张青青,樊自立,等. 玛纳斯河流域生态补偿机制探析[J]. 水土保持通报,2010,30(5):191-195.
- [14] 张军民. 新疆玛纳斯河流域水资源及水文循环二元分化研究[J]. 自然资源学报,2005,20(6):858-863.
- [15] 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.
- [16] 苏为华. 多指标综合评价理论与方法问题研究[D]. 福建厦门:厦门大学,2000.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 张建国,赵惠君. 关于“山西是干旱地区”提法科学性的探讨:兼谈干旱定义与干湿地区划分[J]. 山西水利科技,1994,24(3):38-44.
- [20] 中国科学院中国自然地理编辑委员会. 中国自然地理气候[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [21] Saaty T L. The Analytical Hierarchy Process: Planning, Priority Setting and Resource Allocation[M]. New York: McGraw-Hill,1980.