

# 长武县水资源承载力的模糊评价

张青峰<sup>1</sup>, 王 力<sup>1,2</sup>, 李燐楷<sup>1,2</sup>, 张宽平<sup>3</sup>

(1 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

3 陕西省长武县水利局, 陕西 长武 713600)

**【摘要】** **【目的】**评价长武县的水资源承载能力(WRCC),为县域 WRCC 的评价提供依据。**【方法】**选取人均水资源可利用量、人均水资源占有量、单位 GDP 用水量、水资源开发利用率、单位耕地水资源量、单位面积水资源量、灌溉率等 7 项评价指标,采用模糊综合评价模型,计算得到 WRCC 的相对隶属度和影响因子贡献率;在考虑主观权重条件下,基于互补理论的二元对比方法确定主观权重,通过级别特征值计算得到长武县北塬区、河川区、南塬区 3 个区域的 WRCC 级别。**【结果】**长武县南塬区的 WRCC 级别从高水平向低水平过渡,社会经济发展与水资源利用情况协调较好;北塬区和河川区的 WRCC 均处于低水平,水资源利用已达到其最大承载能力,需要采取相应的措施,以确保社会经济的可持续发展。**【结论】**基于模糊识别理论的 WRCC 模糊评价方法,能较好地反映长武县 WRCC 的状况,也可用于其他县域 WRCC 的评价。

**【关键词】** 模糊识别模型;隶属函数;水资源承载力;模糊评价;长武县

**【中图分类号】** TV213.4

**【文献标识码】** A

**【文章编号】** 1671-9387(2010)05-0161-06

## Fuzzy assessment of water resources carrying capacity of Changwu County

ZHANG Qing-feng<sup>1</sup>, WANG Li<sup>1,2</sup>, LI Lin-kai<sup>1,2</sup>, ZHANG Kuan-ping<sup>3</sup>

(1 College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3 Water Conservancy Bureau of Changwu County, Changwu, Shaanxi 713600, China)

**Abstract:** **【Objective】** The aim of this article is trying to provide a methodology for the evaluation of county's water resources carrying capacity (WRCC) based on the WRCC evaluation of Changwu County. **【Method】** In this paper, 7 elevation indexes including per-capita availability quantity of the water resources, water resources ownership per capita, water consumption per unit GDP, utilization rate of water resources, water resources quantity per capita arable land, water resources quantity per unit area, irrigation rate are selected. The theory of fuzzy comprehensive assessment model is adopted for analyzing and calculating regional WRCC contribution ration and impact factor of relative membership. Subsequently, based on the theory of complementary binary comparison method, the subjective weights are obtained. Whilst, the WRCC characteristic value level is deducted. **【Result】** The result shows that, the WRCC of the region of southern tableland is transmitting from a higher level to a lower level, and its WRCC is relatively strong and the water resources have more potential development. On the contrary, the WRCC of the river region and the northern tableland region has reached their maximum bearing capacity respectively and the water resource are seriously short-supplied. **【Conclusion】** WRCC fuzzy assessment method based on the fuzzy

\* [收稿日期] 2009-10-13

[基金项目] 中国科学院知识创新工程重大项目(KSCX-YW-09-07); 国家“973”计划专题(2007CB407201); 西北农林科技大学科研业务费(QN2009040)

[作者简介] 张青峰(1974—), 男, 山西孝义人, 副教授, 博士, 主要从事土地资源与空间信息技术研究。

E-mail: zhqf@nwsuaf.edu.cn

recognition theory reflects the water resources conditions of Changwu County. The result provides not only the decision-making basis for the rational utilization of water resources for Changwu County, but also the reference methodology for the further evaluation of county's WRCC.

**Key words:** fuzzy recognition model; membership function; water resources carrying capacity (WRCC); fuzzy assessment; Changwu County

水资源承载力 (Water resources carrying capacity, WRCC) 是县域可持续发展过程中各种自然资源承载力的重要组成部分<sup>[1]</sup>。对于黄土高原干旱、半干旱地区的县域 WRCC 进行分析和评价, 已成为该区域寻求区域可持续发展道路的重要依据<sup>[2]</sup>。目前, 国内外对 WRCC 的评价主要采用主成分分析法<sup>[3]</sup>、系统动力学方法<sup>[4]</sup>和模糊综合评价法<sup>[5]</sup>, 其中模糊综合评价法是应用较多的一种方法, 它是在对影响水资源承载能力的各个因素进行单因素评价的基础上, 通过综合评判矩阵对其承载能力进行多因素综合评价, 从而可以较全面地分析干旱区 WRCC 的状况。在进行 WRCC 的综合评价时, 主要有 4 个步骤: (1) 确定评价指标体系; (2) 确定评价指标的分级; (3) 确定各评价指标分级后各级的隶属函数; (4) 确定各评价指标的权重系数。目前, 该方法在应用过程中, 大多根据指标因子进行模糊识别, 通过相对隶属度和影响因子的贡献率来确定评价区 WRCC 级别, 但对评价因子主观权重的影响缺乏进一步的分析<sup>[6]</sup>, 而且将该方法应用于西北干旱区, 特别是县域 WRCC 的研究鲜有报道。此外, 建立 WRCC 评价指标体系, 是进行 WRCC 研究的基础工作。在实践中, 诸多学者从不同角度提出了各自的 WRCC 评价指标体系<sup>[7-9]</sup>, 这些评价指标体系大多用于地区和小区 WRCC 研究与评价, 而应用于县域 WRCC 评价的研究相对较少。如何以县域水资源可持续发展为目标, 建立起一套科学适用、具有可操作性、开放动态的指标体系, 也是众多学者探讨的热点问题。为此, 本研究应用模糊综合评价模型, 选择国家耕地保育与持续高效现代农业试点县——陕西省长武县, 对其 WRCC 进行模糊评价, 以期为进一步推进县域 WRCC 评价研究, 探索 WRCC 对

农业生产可持续发展的影响, 以及为长武县水资源开发、保护和高效利用, 建立可持续的集约农业提供科学依据。

1 研究区概况

长武县位于陕西省黄土高原丘陵沟壑区, 东经 107°38′49″~107°58′02″, 北纬 34°59′09″~35°18′37″, 总面积 567.1 km<sup>2</sup>, 海拔 847~1 274 m, 境内有泾河、黑河、南河 3 条河流和 883 条干支毛沟, 将全县切割成北塬区、河川区、南塬区 3 个区, 形成了塬高、沟深、坡陡的地貌特征, 是黄土高原水土流失重点治理区。长武县属西北暖温带半湿润大陆性季风气候, 年均降水量 573 mm, 是地表水和地下水的主要补给来源。降水年内分配不均, 年际变化较大, 空间上分布趋势是塬区多于河川区。年平均气温 9.1 ℃, 年积温 2 994 ℃, 无霜期 171 d, 春季少雨, 夏季多伏旱、冰雹、风灾等自然灾害, 对农业生产危害较大。总人口 17.72 万人, 人口密度 312 人/km<sup>2</sup>; 主要作物有小麦、油菜、大麻、烤烟及果树。

2 水资源模糊评价模型

设有  $n$  个待识别区域, 每个区域用  $m$  项因子进行描述, 则样本集为:

$$\mathbf{X} = (x_{ij})_{m \times n} \quad (1)$$

式中:  $x_{ij}$  为样本  $j$  的第  $i$  项因子,  $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ 。根据标准, 按照  $c$  个级别进行识别, 则标准识别矩阵可表示为:

$$\mathbf{Y} = (y_{ih})_{m \times n} \quad (2)$$

式中:  $h = 1, 2, \dots, c$ 。采用式(3)计算样本集中的指标相对隶属度<sup>[10]</sup>:

$$r_{ij} = \begin{cases} 1, & x_{ij} \geq y_{i1} \text{ 或 } x_{ij} \leq y_{i1}; \\ (x_{ij} - y_{ic}) / (y_{i1} - y_{ic}), & y_{ic} < x_{ij} < y_{i1} \text{ 或 } y_{i1} < x_{ij} < y_{ic}; \\ 0, & x_{ij} \leq y_{ic} \text{ 或 } x_{ij} \geq y_{i1}. \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $r_{ij}$  为样本  $j$  中因子  $i$  的相对隶属度;  $y_{i1}$ 、 $y_{ic}$  分别为标准指标的最优值和最劣值, 对应的级别分别为 1 级和  $c$  级。

对于模糊概念“承载力”, 将  $n$  个样本的承载力

按照高低分为  $c$  个级别, 将其中级别为“高”所对应的相对隶属度定义为 1, 级别为“极低”所对应的相对隶属度定义为 0, 从级别 1 到级别  $c$  所对应的相对隶属度从 1 过渡到 0, 则  $c$  个级别的相对隶属度的标

准值  $S_{jh}$  可表示为:

$$S_{jh} = \begin{cases} 1, & y_{jh} = y_{j1}; \\ (y_{jh} - y_{jc}) / (y_{j1} - y_{jc}), y_{j1} > y_{jh} > y_{jc}; \\ 0, & y_{jh} = y_{jc}. \end{cases} \quad (4)$$

则样本集对于  $c$  个级别的隶属度矩阵  $U$  可以表示为:

$$U = (u_{hj})_{c \times n}, \text{ 满足约束 } \sum_{h=1}^c u_{hj} - 1 = 0, \forall_j \text{ 和 } \sum_{j=1}^n u_{hj} > 0, \forall_h. \quad (5)$$

式中:  $u_{hj}$  为样本  $j$  对类别  $h$  的相对隶属度。则样本  $j$  与级别  $h$  的加权广义距离  $D_{hj}$  可以定义为:

$$D_{hj} = u_{hj} \{ \sum_{i=1}^m [\alpha_i (r_{ij} - S_{jh})]^2 \}^{0.5}. \quad (6)$$

式中:  $\alpha_i$  为第  $i$  项因子对 WRCC 的贡献率,且满足约束:  $\sum_{i=1}^m \alpha_i - 1 = 0$ 。

求解目标函数:

$$\min \{ F(u_{hj}) = \sum_{h=1}^c D_{hj}^2 \}. \quad (7)$$

引入 Lagrange 函数  $L(u_{hj}, \alpha_i, \lambda_j, \lambda_a)$ ,解得模糊识别循环迭代模型<sup>[11]</sup>:

$$u_{hj} = \begin{cases} 0, & D_{kj} = 0, k \neq h; \\ \left\{ \sum_{k=1}^c \frac{\sum_{i=1}^m [\alpha_i (r_{ij} - S_{jh})]^2}{\sum_{i=1}^m [\alpha_i (r_{ij} - S_{jk})]^2} \right\}^{-1}, & D_{hj} \neq 0; \\ 1, & D_{hj} = 0. \end{cases} \quad (8)$$

$$\alpha = \left\{ \sum_{k=1}^m \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{h=1}^c [u_{hj} (r_{ij} - S_{jh})]^2}{\sum_{j=1}^n \sum_{h=1}^c [u_{hj} (r_{kj} - S_{kh})]^2} \right\}^{-1}. \quad (9)$$

求解相对隶属度  $u_{hj}$  和贡献率  $\alpha_i$  的步骤如下:

- ① 给定迭代计算精度  $\epsilon_1, \epsilon_2$ ;
- ② 设初始隶属度矩阵  $u_{hj}^l$ , 初始因子影响贡献率为  $\alpha_i^l, l=0$ ;
- ③ 采用式(8)和式(9)迭代模型计算  $u_{hj}^{l+1}, \alpha_i^{l+1}$ ;
- ④ 若满足条件:  $\max |u_{hj}^{l+1} - u_{hj}^l| \leq \epsilon_1$  且  $\max |\alpha_i^{l+1} - \alpha_i^l| \leq \epsilon_2$ , 则迭代结束,  $\alpha_i^{l+1}$  即为影响因子的贡献率,  $u_{hj}^{l+1}$  为样本对各个级别的相对隶属度; 否则, 令  $l=l+1$ , 转步骤③继续进行迭代计算。

表 1 长武县 WRCC 评价指标的标准

Table 1 Evaluation index for WRCC of Changwu County

| 影响因子<br>Impact factor                                                                                              | I      | II    | III   | IV  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------|-------|-----|
| 人均水资源可利用量( $x_1$ )/( $\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1}$ )<br>Per-capita availability quantity of the water resources | 200    | 100   | 50    | 10  |
| 人均水资源占有量( $x_2$ )/( $\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1}$ )<br>Water resources ownership per capita                     | 400    | 300   | 200   | 90  |
| 单位 GDP 用水量( $x_3$ )/( $\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1}$ )<br>Water consumption per unit GDP                        | 50     | 100   | 150   | 200 |
| 水资源开发利用率( $x_4$ )/%<br>Utilization rate of water resources                                                         | 12     | 25    | 50    | 75  |
| 单位耕地水资源量( $x_5$ )/( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ )<br>Water resources quantity per capita arable land         | 10 000 | 4 000 | 2 000 | 800 |
| 单位面积水资源量( $x_6$ )/( $\text{万 m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$ )<br>Water resources quantity per unit area                | 7      | 5     | 3     | 1   |
| 灌溉率( $x_7$ )/%<br>Irrigation rate                                                                                  | 60     | 45    | 35    | 15  |

根据模糊概念在分级条件下最大隶属度原则不适用性<sup>[12]</sup>,用级别特征值方法<sup>[10]</sup>对类别进行确定:

$$\tilde{H}(1, 2, \dots, c) \cdot U_{c \times n} = (H_1, H_2, \dots, H_n). \quad (10)$$

式中:  $\tilde{H}$  为级别特征值向量。

根据  $\tilde{H}$  对样本  $j$  进行综合评价,按照以下规则对各样本的承载力级别进行归类:若  $H_j \in [c-0.5, c]$ ,将样本  $j$  归于  $c$  级;若  $H_j \in [1, 1.5]$ ,将样本  $j$  归于 1 级;若  $H_j \in [h-0.5, h+0.5]$ ,将样本  $j$  归于  $h$  级,  $h=2, 3, \dots, c-1$ 。

3 结果与分析

3.1 长武县 WRCC 的模糊评价

根据长武县水资源现状及其利用特点,考虑人口、经济、生态环境对 WRCC 的影响,并参照全国水资源供需分析中的指标体系<sup>[13]</sup>,本研究选取了人均水资源可利用量  $x_1$  ( $\text{m}^3/\text{人}$ )、人均水资源占有量  $x_2$  ( $\text{m}^3/\text{人}$ )、单位 GDP 用水量  $x_3$  ( $\text{m}^3/\text{万元}$ )、水资源开发利用率  $x_4$  (%)、单位耕地水资源量  $x_5$  ( $\text{m}^3/\text{hm}^2$ )、单位面积水资源量  $x_6$  ( $\text{万 m}^3/\text{km}^2$ )、灌溉率  $x_7$  (%) 等 7 项评价指标。根据式(4),将各指标对 WRCC 的影响程度划分为高(I)、中(II)、低(III)、极低(IV)4 个等级,则 4 个级别相对隶属度的标准值矩阵可表示为:

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 0.474 & 0.211 & 0 \\ 1 & 0.677 & 0.355 & 0 \\ 1 & 0.813 & 0.250 & 0 \\ 1 & 0.794 & 0.397 & 0 \\ 1 & 0.348 & 0.130 & 0 \\ 1 & 0.667 & 0.333 & 0 \\ 1 & 0.667 & 0.444 & 0 \end{bmatrix}.$$

根据 1978—2007 年长武县统计年鉴,确定各指标的标准值如表 1 所示。

根据长武县水资源评价及开发利用现状分析报告,该县 3 个区域水资源 7 项评价指标的统计值如

表 2 长武县 3 个区域水资源影响指标的统计值

Table 2 Statistical values of effect factor for evaluation of each area of Changwu County

| 水资源分区<br>District     | $x_1/$<br>( $\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1}$ ) | $x_2/$<br>( $\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1}$ ) | $x_3/$<br>( $\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1}$ ) | $x_4/\%$ | $x_5/$<br>( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ) | $x_6/$<br>( $\text{万 m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$ ) | $x_7/\%$ |
|-----------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------|
| 北塬区 Beiyuan district  | 53.9                                           | 178.2                                          | 170.2                                           | 30.2     | 1 555.7                                         | 6.6                                               | 17.3     |
| 河川区 Hechuang district | 81.8                                           | 249.5                                          | 496.3                                           | 32.7     | 2 632.6                                         | 16.5                                              | 29.5     |
| 南塬区 Nanyuan district  | 10.1                                           | 408.7                                          | 170.0                                           | 2.5      | 21 440.0                                        | 6.6                                               | 6.2      |

应用式(3),将表 2 中 7 项评价指标的统计值与表 1 中标准值数据格式化,转化为相对隶属度矩阵  $R_{7 \times 3}$ :

$$R = \begin{bmatrix} 0.23 & 0.38 & 0.01 \\ 0.28 & 0.51 & 1.00 \\ 0.22 & 0.00 & 0.25 \\ 0.68 & 0.67 & 1.00 \\ 0.08 & 0.20 & 1.00 \\ 0.94 & 1.00 & 0.93 \\ 0.05 & 0.31 & 0.00 \end{bmatrix}。$$

应用模糊识别循环迭代模型式(8)和式(9),求解长武县 3 个水资源分区 WRCC 的相对隶属度  $u_{hj}$

表 3 长武县 3 个区域水资源 7 项评价指标贡献率  $\alpha_i$  的迭代结果

Table 3 Iteration result of contribution ratio  $\alpha_i$  for 7 WRCC evaluation index of Changwu County

| 迭代次数<br>Iteration | 贡献率 $\alpha_i$<br>Target contribution rate |         |         |         |         |         |         |
|-------------------|--------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0                 | 0.142 9                                    | 0.142 9 | 0.142 9 | 0.142 9 | 0.142 9 | 0.142 9 | 0.142 9 |
| 1                 | 0.191 1                                    | 0.203 5 | 0.121 9 | 0.186 6 | 0.129 6 | 0.075 9 | 0.091 5 |
| 2                 | 0.182 6                                    | 0.235 0 | 0.116 3 | 0.189 5 | 0.131 3 | 0.063 4 | 0.081 8 |
| ⋮                 | ⋮                                          | ⋮       | ⋮       | ⋮       | ⋮       | ⋮       | ⋮       |
| 11                | 0.004 0                                    | 0.193 4 | 0.006 3 | 0.038 7 | 0.745 6 | 0.008 3 | 0.003 7 |
| 12                | 0.004 0                                    | 0.191 9 | 0.006 3 | 0.038 5 | 0.747 3 | 0.008 3 | 0.003 7 |

采用式(10),分别求长武县 3 个水资源分区 WRCC 识别的级别特征值:  $\tilde{H} = (1, 2, 3, 4) \times U_{4 \times 3} = (H_1, H_2, H_3)$ 。当  $1 < H_j \leq 1.5$  时,WRCC 级别为高(Ⅰ);当  $1.5 < H_j \leq 2.5$  时,WRCC 级别为中(Ⅱ);当  $2.5 < H_j \leq 3.5$  时,WRCC 级别为低(Ⅲ);当  $3.5 < H_j \leq 4$  时,WRCC 级别为极低(Ⅳ)。长武县 3 个区域 WRCC 模糊评价结果见表 4。

表 4 长武县 3 个区域 WRCC 模糊评价结果

Table 4 Fuzzy assessment result of 3 regions of Changwu County

| 水资源分区<br>District     | 级别特征值 $H_j$<br>Characteristic value | WRCC 级别<br>WRCC level |
|-----------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| 北塬区 Beiyuan district  | 3.154 0                             | 低(Ⅲ) Low              |
| 河川区 Hechuang district | 2.866 5                             | 低(Ⅲ) Low              |
| 南塬区 Nanyuan district  | 1.000 7                             | 高(Ⅰ) Higher           |

3.2 考虑主观权重  $\omega$  的长武县 WRCC 模糊评价

表 4 的评价结果仅考虑到评价因子对 WRCC 的贡献率,而未考虑人的主观意志对评价因子的影

响。为了进一步说明人的主观意志对 WRCC 的影响,必须给出各个影响因子的主观权重。本文采用陈守煜等<sup>[14]</sup>创建的基于互补理论的二元对比方法进行定量计算,计算公式见式(11)。

和 7 个因子的贡献率  $\alpha_i$ ; 给定迭代计算精度  $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0.001$ ,初始矩阵  $U_{4 \times 3}$  和贡献率向量  $\alpha$  取值分别为:

$$U = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix},$$

$$\alpha = (1/7, 1/7, 1/7, 1/7, 1/7, 1/7, 1/7)。$$

经过 12 次迭代循环计算,指标贡献率迭代结果见表 3,最终得到贡献率  $\alpha_i$  为:

$$\alpha_i = (0.004\ 0, 0.191\ 9, 0.006\ 3, 0.038\ 5, 0.747\ 3, 0.008\ 3, 0.003\ 7)。$$

响。为了进一步说明人的主观意志对 WRCC 的影响,必须给出各个影响因子的主观权重。本文采用陈守煜等<sup>[14]</sup>创建的基于互补理论的二元对比方法进行定量计算,计算公式见式(11)。

$$\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m) = \left[ \frac{1 - g_{l1}}{g_{l1}} / \sum_{i=1}^m \frac{1 - g_{li}}{g_{li}}, \frac{1 - g_{l2}}{g_{l2}} / \sum_{i=1}^m \frac{1 - g_{li}}{g_{li}}, \dots, \frac{1 - g_{lm}}{g_{lm}} / \sum_{i=1}^m \frac{1 - g_{li}}{g_{li}} \right],$$

满足  $\sum_{i=1}^m \omega_i = 1。$

式中:  $\omega_i = \frac{1 - g_{li}}{g_{li}} / \sum_{i=1}^m \frac{1 - g_{li}}{g_{li}}$ ;  $g_{li}$  为指标  $c'_1$  对  $c'_i$  作重要性二元比较时,指标  $c'_1$  对  $c'_i$  的重要性定量标度,  $0.5 \leq g_{li} \leq 1.0 (i = 1, 2, \dots, m)$ ,  $g_{li}$  由表 5 确定。

由此可以得到长武县水资源 7 项评价指标的主观权重:

$$\omega = (0.20, 0.10, 0.10, 0.05, 0.15, 0.08, 0.12)。$$

表 5 语气算子与定量标度相对隶属度的关系<sup>[10]</sup>

Table 5 Linear relation between mood operator and quantitative scale

| 语气算子<br>Mood operator | 定量标度<br>Quantitative scale |       | 相对隶属度<br>Relative membership degree |       |
|-----------------------|----------------------------|-------|-------------------------------------|-------|
| 同样 Similarly          | 0.50                       | 0.525 | 1.000                               | 0.905 |
| 稍稍 Slightly           | 0.55                       | 0.575 | 0.818                               | 0.739 |
| 略为 A little           | 0.60                       | 0.625 | 0.667                               | 0.600 |
| 较为 More               | 0.65                       | 0.675 | 0.538                               | 0.481 |
| 明显 Clear              | 0.70                       | 0.725 | 0.429                               | 0.379 |
| 显著 Significantly      | 0.75                       | 0.775 | 0.333                               | 0.290 |
| 十分 Completely         | 0.80                       | 0.825 | 0.250                               | 0.212 |
| 非常 Very               | 0.85                       | 0.875 | 0.176                               | 0.143 |
| 极其 Extremely          | 0.90                       | 0.925 | 0.111                               | 0.081 |
| 极端 Extreme            | 0.95                       | 0.975 | 0.053                               | 0.026 |
| 无可比拟 Unmatched        | 1.00                       |       | 0                                   |       |

则综合评价式(6)、式(8)可转换为:

$$D_{hj}=u_{hj}\{\sum_{i=1}^m[(\gamma\omega_i+(1-\gamma)\alpha_i)(r_{ij}-S_{jh})]^2\}^{0.5}。(12)$$
$$u_{hj}=\begin{cases} 0, & D_{kj}=0,k\neq h; \\ \left\{\sum_{k=1}^c\frac{\sum_{i=1}^m[(\gamma\omega_i+(1-\gamma)\alpha_i)(r_{ij}-S_{jh})]^2}{\sum_{i=1}^m[(\gamma\omega_i+(1-\gamma)\alpha_i)(r_{ij}-S_{jk})]^2}\right\}^{-1}, & D_{hj}\neq 0; \\ 1, & D_{hj}=0。 \end{cases}。(13)$$

式中: $\omega_i$  为第  $i$  项因子对 WRCC 的主观权重; $\gamma$  为均衡因子( $0\leq\gamma\leq 1$ ),用来平衡主观权重和客观权重,当  $\gamma=0$  时,仅考虑因子对 WRCC 的贡献率,当  $\gamma=1$  时,仅考虑因子的主观权重。

设定  $\gamma$  分别为 0,0.3,0.7,1 时进行分析,则考虑综合因子贡献率和主观权重后的长武县 3 个区域 WRCC 模糊评价结果见表 6。

表 6 考虑主观权重  $\omega$  的长武县 3 个区域 WRCC 模糊评价结果

Table 6 Fuzzy assessment result considering of combination of the  $\alpha$  and  $\omega$

| 水资源分区<br>District        | $\gamma=0$                    |             | $\gamma=0.3$                  |             | $\gamma=0.7$                  |             | $\gamma=1$                    |             |
|--------------------------|-------------------------------|-------------|-------------------------------|-------------|-------------------------------|-------------|-------------------------------|-------------|
|                          | 级别特征值<br>Characteristic value | 级别<br>Level | 级别特征值<br>Characteristic value | 级别<br>Level | 级别特征值<br>Characteristic value | 级别<br>Level | 级别特征值<br>Characteristic value | 级别<br>Level |
| 北塬区<br>Beiyuan district  | 3.154 0                       | Ⅲ           | 3.157 0                       | Ⅲ           | 3.093 9                       | Ⅲ           | 2.938 0                       | Ⅲ           |
| 河川区<br>Hechuang district | 2.866 5                       | Ⅲ           | 2.844 6                       | Ⅲ           | 2.761 7                       | Ⅲ           | 2.679 9                       | Ⅲ           |
| 南塬区<br>Nanyuan district  | 1.000 7                       | I           | 1.121 7                       | I           | 1.878 4                       | Ⅱ           | 2.636 0                       | Ⅲ           |

由表 6 可知,在  $\gamma$  取值较小时,南塬区 WRCC 处于高水平,这表明水资源的供给需求在一定程度上能满足其社会发展,并且具有一定开发潜力;随着  $\gamma$  值的增加,南塬区 WRCC 级别从高水平向低水平过渡,表明随着各个评价指标权重的改变,南塬区 WRCC 有下降的趋势,水资源供给关系逐渐向不能满足社会发展的方向发展。因此,有必要对该区现有水资源的分配和利用进行进一步的调整和优化,促进水资源的高效利用。

由表 6 还可知,随着  $\gamma$  的增加,北塬区和河川区的 WRCC 级别没有变化,均为低水平,表明这 2 个地区的水资源已达到其最大承载能力,因此有必要采取相应的措施,如:1)大力发展节水型工业,加强工业污水和生活废水的治理,提高工业用水重复利用率;2)大力维修农田水利配套设施,积极推进节水

灌溉技术,对单位产品、单位面积和人畜饮水实行定额管理;3)可以考虑跨流域调水,同时制定该区产业结构和布局调整方案,调整与水资源条件和水资源供应不相适应的经济结构,使国民经济各产业发展和产业布局与水资源配置相协调,逐步建立与该区 WRCC 相适应的经济结构体系,全面推行节水措施,建设节水型社会,确保水资源的可持续利用与社会经济的可持续发展。

4 结 论

本研究以陕西省长武县为例,采用模糊识别理论解决县域 WRCC 评价过程中存在的模糊性问题,通过交叉迭代计算区域承载能力的相对隶属度及影响因子的贡献率,在未考虑人的主观意志影响的前提下,初步得到了区域 WRCC 的识别结果;若考虑

到人的主观经验知识在评价过程中的作用,则采用基于互补理论的二元对比方法确定影响因子的主观权重,即利用均衡因子,综合考虑影响因子的贡献率以及主观权重,通过级别特征值计算得到研究区各分区的 WRCC 的级别。结果表明,本研究所采用的基于模糊识别理论的水资源模糊评价方法,能较好地解决模糊的、难以量化的问题,反映了长武县 WRCC 的状况,研究结果不仅为长武县水资源的合理利用提供决策依据,而且对县域 WRCC 的评价具有借鉴和参考作用。

[参考文献]

[1] Feng L H,Zhang X C,Luo G Y. Application of system dynamics in analyzing the carrying capacity of water resources in Yiwu City,China [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2008,79:269-278.

[2] 朱一中,夏 军,谈 戈. 西北地区水资源承载力分析预测与评价 [J]. 资源科学,2003,25(4):43-48.  
Zhu Y Z,Xia J,Tan G. Measurement and evaluation of water resources carrying capacity of Northwest China [J]. Resources Science,2003,25(4):43-48. (in Chinese)

[3] 袁 伟,楼章华,田 娟. 富阳市水资源承载能力综合评价 [J]. 水利学报,2008,39(1):103-108.  
Yuan W,Lou Z H,Tian J. Comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in Fuyang City [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2008,39(1):103-108. (in Chinese)

[4] 冯海燕,张 昕,李光永,等. 北京市水资源承载力系统动力学模拟 [J]. 中国农业大学学报,2006,11(6):106-110.  
Feng H Y,Zhang X,Li G Y,et al. A system dynamic model and simulation for water resources carrying capacity in Beijing [J]. Journal of China Agricultural University, 2006, 11 ( 6 ): 106-110. (in Chinese)

[5] 陈卫宾,董增川,王声锋,等. 基于模糊识别理论的江西省水资源承载力分析 [J]. 灌溉排水学报,2008,27(1):61-64.  
Chen W B,Dong Z C,Wang S F,et al. Comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in Jiangxi Province based on fuzzy recognition [J]. Journal of Irrigation and Drainage,2008,27(1):61-64. (in Chinese)

[6] 李亚伟,陈守煜,傅 铁. 基于模糊识别的水资源承载能力综合评价 [J]. 水科学进展,2005,16(5):726-729.  
Li Y W,Chen S Y,Fu T. Comprehensive evaluation of water resource carrying capacity based on fuzzy recognition [J]. Ad-

vances in Water Science,2005,16(5):726-729. (in Chinese)

[7] 李朝霞. 区域水资源可持续利用指标体系研究 [J]. 河海大学学报:自然科学版,2007,35(1):81-85.  
Li Z X. Index system for sustainable utilization of regional water resources [J]. Journal of Hohai University:Natural Science Edition,2007,35(1):81-85. (in Chinese)

[8] 唐 曲,姜文来,陶 陶. 民勤盆地水资源承载力指标体系及评估 [J]. 自然资源学报,2004,19(5):672-678.  
Tang Q,Jiang W L,Tao T. Index system and assessment of water resources carrying capacity in Minqin Basin [J]. Journal of Natural Resources,2004,19(5):672-678. (in Chinese)

[9] 袁子勇,梁 虹,罗书文. 基于指标权重的喀斯特地区水资源承载力评价 [J]. 水资源与水工程学报,2009,20(1):85-91.  
Yuan Z Y,Liang H,Luo S W. Assessment on water resources carrying capacity in Karst area based on index weight [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,2009,20(1):85-91. (in Chinese)

[10] 陈守煜. 复杂水资源系统优化模糊识别理论与应用 [M]. 长春:吉林大学出版社,2002.  
Chen S Y. Fuzzy recognition theory and application of complicated water resources system optimization [M]. Changchun: Publishing Company of Jilin University,2002. (in Chinese)

[11] 秦 伟,朱清科,吴宗凯,等. 吴起县 2015 年水资源承载力评价 [J]. 干旱区研究,2007,24(1):70-76.  
Qin W,Zhu Q K,Wu Z K,et al. Estimation on the carrying capacity of water resources in Wuqi County in 2015 [J]. Arid Zone Research,2007,24(1):70-76. (in Chinese)

[12] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用 [M]. 北京:国防工业出版社,1998.  
Chen S Y. Engineering fuzzy set theory and its application [M]. Beijing:Publishing Company of National Defense Industry,1998. (in Chinese)

[13] 黄永基,马滇珍. 区域水资源供需分析方法 [M]. 南京:河海大学出版社,1990.  
Huang Y J,Ma C Z. Regional water supply and demand analysis method [M]. Nanjing:Publishing Company of Hehai University,1990. (in Chinese)

[14] 陈守煜,韩晓军. 模糊集决策单元系统理论及其在黄河置换水量分配中应用 [J]. 大连理工大学学报,2006,46(1):98-102.  
Chen S Y,Han X J. Unit systematic theory of fuzzy sets decision-making and its application to reallocation of replaced water of the Yellow River [J]. Journal of Dalian University of Technology,2006,46(1):98-102. (in Chinese)

(上接第 160 页)

[13] Doelman P,Haanstra L. Short-and long-term effects of heavy metals on phosphatase activity in soils [J]. Biology and Fertility of Soils,1989,10:235-241.

[14] Moreno José L,Hernández Teresa,Pérez Aurelia,et al. Toxicity of cadmium to soil microbial activity: effect of sewage

sludge addition to soil on the ecological dose [J]. Applied Soil Ecology,2002,21(2):149-158.

[15] Speir T W,Kettle H A,Parshotan A,et al. Simple kinetic approach to eteomine the toxicity of As (V) to soil biological properties [J]. Soil Biol&Biochem,1999,31:705-713.