

基于模糊识别理论的陕西省典型 县域水资源承载力评价

张 曦¹, 王武卫², 齐养周³, 赵鹏霞³, 寇丽娟³

(1. 长江勘测规划设计研究院, 湖北 武汉 430010; 2. 陕西省渭南市东雷二期抽黄工程管理局, 陕西 渭南 714000;
3. 陕西省周至县水务局水土保持工作站, 陕西 周至 710400)

摘 要: 以陕西省不同地貌类型区分布的 9 个典型县域为研究对象, 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、水资源开发利用效率、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, 采用模糊识别理论模型, 计算得到水资源承载能力 (WRCC) 的相对隶属度和影响因子的贡献率; 在考虑主客观权重条件下, 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典型县域 WRCC 级别。结果表明, 陕南地区 4 个县的水资源充足, 其水资源与经济发展较为协调, 可开发潜力很大; 关中地区 3 个县水资源已严重超载, 需要采取措施进行人工干预; 陕北地区靖边和安塞县水资源不富足。

关键词: 水资源承载力; 模糊识别理论; 隶属函数; 县域; 陕西省

中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2013)06-0232-06

Assessment of water resources carrying capacity in typical counties of Shaanxi Province based on fuzzy recognition theory (FRT)

ZHANG Xi¹, WANG Wu-wei², QI Yang-zhou³, ZHAO Peng-xia³, KOU Li-juan³

(1. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China;

2. 2nd Donglei of Yellow River Diversion Project Bureau in Weinan, Weinan 714000, China;

3. Soil and Water Conservation Workstation in Water Authority of Zhouzhi county, Zhouzhi 710400, China)

Abstract: In this paper, 7 elevation indexes include 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 fuzzy recognition theory (FRT) model is adopted for calculating the contribution ration and relative membership of selected impact factors of regional water resources carrying capacity (WRCC). Subsequently, based on the complementary binary comparison method, the subjective weights are obtained. Whilst, the WRCC characteristic value level of sample counties in Shaanxi province are deducted. The result shows that: water resources in Southern Shaanxi such as Shiquan, Shangnan, Nanzheng and Zhenping county are adequate relatively, which means a more coordinated relationship between social economic development and WRCC; water resources in Guanzhong region such as Wugong, Jingyang and Qishan county have been severely overloaded, measures should be taken to carry out human intervention; and water resources in Northern Shaanxi such as Jingbian and Ansai county are still not rich. FRT - based WRCC fuzzy assessment method reflects the water resources conditions of sample counties of Shaanxi Province.

Keywords: water resources carrying capacity (WRCC); fuzzy recognition theory (FRT); membership function; County-level; Shaanxi Province

水资源承载力 (WRCC) 是指在区域社会、经济和环境可持续发展前提下, 根据一定的经济技术水

平和社会生产条件下, 水资源天然产出量的允许开发水量维持的人口、社会经济发展能力^[1-2]。目前

收稿日期: 2013-06-03

基金项目: 国家科技支撑计划 (2011BAD29B09 - 1 - 1C)

作者简介: 张 曦 (1972—), 男, 陕西府谷人, 高级工程师, 主要从事环境保护方面的规划、设计以及研究工作。E-mail: zhangxi@cjwsjy.com.cn。

WRCC的评价^[3-6]方法主要有PCA、SD方法、模糊综合评价法和熵模型。其中,模糊综合评价法通过确定评价指标体系、评价指标的分级及其隶属函数、评价指标的权重系数,在对影响WRCC的各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,可以较全面地分析WRCC的状况。该方法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研究区WRCC级别,但对评价因子主观权重的影响缺乏进一步的分析^[7]。虽然诸多学者从不同角度提出了各自的WRCC评价指标体系^[8-9],并用于地区和小区WRCC的研究与实践,但应用于县域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,本研究选择陕西省境内不同地貌类型区内散布的9个典型县域,对其WRCC进行模糊评价,以期建立一种适宜的县域WRCC评价方法和指标体系,为陕西省水资源开发、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

陕西省地处东经 $105^{\circ}29'$ ~ $111^{\circ}15'$,北纬 $31^{\circ}42'$ ~ $39^{\circ}35'$ 之间,总土地面积 20.58 万 km^2 ,常住人口为 3762 万人(2008年)。地势呈现南北高,中部低,且由西向东倾斜的特点。北山和秦岭把陕西分为三大自然区域:北部是陕北高原,中部是关中平原,南部是陕南秦巴山地。全省纵跨黄河、长江两大水系,多年平均降水量 676.4 mm,多年平均地表径流量 425.8 亿 m^3 ,水资源总量 445 亿 m^3 ,居全国各省(市、区)第19位。人均、单位面积水资源占有量分别只占全国平均水平的 54% 和 42% ,且水资源时空分布不均和难以蓄存利用的现实进一步减少了水资源的有效供给。此外,工程供水能力不足、应变能力差,供需矛盾突出;用水技术与设备落后,水的有效利用率较低,水资源浪费严重;水源污染、水资源功能下降、水环境恶化;科研投入有限,水资源基础研究薄弱等也是影响水资源利用的重要因素。目前陕西省工农业和城市缺水问题突出,随着人口增加、城市和

工业规模增大、农灌范围扩展,水资源不足的矛盾将越来越尖锐。缺水将成为陕西未来发展中最大限制因素之一。

靖边县和安塞县地处陕北高原,其中靖边县地处风沙区与黄土丘陵沟壑区的过渡地带,境内有红柳河、大理河、黑河、杏子河、芦河等8条大河流,水资源总量 1.23 亿 m^3 ,人口密度 77 人 $\cdot\text{km}^{-2}$;安塞县地处黄土高原丘陵沟壑区,境内有延河、大理河、清涧河3条水系,水资源总量 1.55 亿 m^3 ,人口密度 56 人 $\cdot\text{km}^{-2}$ 。

武功县、泾阳县和岐山县地处关中平原,其中武功县境内有3条河流,均属渭河水系,水资源总量 2.65 亿 m^3 ,人口密度 1034 人 $\cdot\text{km}^{-2}$;泾阳县位于泾河下游,境内有泾河、冶峪河、清峪河3条河流,水资源总量 19.23 亿 m^3 ,人口密度 625 人 $\cdot\text{km}^{-2}$;岐山县是全国粮棉大县、全国食品工业强县,陕西省粮油、辣椒、蔬菜、肉牛、奶畜生产基地,水资源总量 1.27 亿 m^3 ,人口密度 548 人 $\cdot\text{km}^{-2}$ 。

商南县、石泉县、南郑县、镇坪县地处陕南秦巴山地,其中商南县属汉江水系丹江中游地区,蕴藏有丰富的水力资源,水资源总量 7.66 亿 m^3 ,人口密度 100 人 $\cdot\text{km}^{-2}$;石泉县的生物、水力、矿产资源非常丰富,是陕西省蚕桑基地县,汉江自西向东穿境而过,水资源总量 13.25 亿 m^3 ,人口密度 119 人 $\cdot\text{km}^{-2}$;南郑县境内主要河流有9条,分属汉江和嘉陵江水系,水资源总量 24.4 亿 m^3 ,人口密度 200 人 $\cdot\text{km}^{-2}$;镇坪县是大宁河发源地之一,境内有赵河、沿陵河、潦河等大小河流13条,水资源总量 10.02 亿 m^3 ,人口密度 38 人 $\cdot\text{km}^{-2}$ 。

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: $X = (x_{ij})_{m \times n}$ 。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,将 n 个样本的承载力按照高低分为 c 个级别,则标准识别矩阵可表示为: $Y = (y_{ih})_{m \times n}$ 。式中, $h = 1, 2, \dots, c$ 。并采用式(1)计算样本集中的指标相对隶属度^[10]:

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

式中, r_{ij} 为样本 j 因子 i 的相对优属度; y_{i1} 、 y_{ic} 分别为标准指标值的最优和最劣值, 分别对应第 1 级和第 c 级。

对于模糊概念“承载力”, 将 c 个级别中“高”级别对应的相对隶属度定义为 1, “极低”级别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, 则相对隶属度的标准值 S_{ih} 可表示为:

$$S_{ih} = \begin{cases} 1, & y_{ih} = y_{i1} \\ (y_{ih} - y_{ic}) / (y_{i1} - y_{ic}) & y_{i1} > y_{ih} > y_{ic} \\ 0, & y_{ih} = y_{ic} \end{cases} \quad (2)$$

则样本集对于 c 个级别的隶属度矩阵 U 可表示为:

$$U = (u_{hj})_{c \times n} \text{ 满足约束: } \sum_{h=1}^c u_{hj} - 1 = 0, \forall j \text{ 和 } \sum_{j=1}^n u_{hj} > 0, \forall h \quad (3)$$

式中, u_{hj} 表示样本 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:

$$D_{hj} = u_{hj} \left\{ \sum_{i=1}^m [\alpha_i (r_{ij} - S_{ih})]^2 \right\}^{0.5} \quad (4)$$

式中, α_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:

$$\min \{ F(u_{hj}) = \sum_{h=1}^c D_{hj}^2 \} \quad (5)$$

引入 Lagrange 函数 $L(u_{hj}, \alpha_i, \lambda_j, \lambda_\alpha)$, 解得模糊识别循环迭代模型^[10]:

$$u_{hj} = \begin{cases} 0, & D_{kj} = 0, k \neq h; \\ \left\{ \frac{\sum_{k=1}^c \frac{\sum_{i=1}^m [\alpha_i (r_{ij} - s_{ih})]^2}{\sum_{i=1}^m [\alpha_i (r_{ij} - s_{ik})]^2} \right\}^{-1}, & D_{hj} \neq 0; \\ 1, & D_{hj} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

$$\alpha = \left\{ \frac{\sum_{k=1}^m \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{h=1}^c [u_{hj} (r_{ij} - s_{ih})]^2}{\sum_{j=1}^n \sum_{h=1}^c [u_{hj} (r_{kj} - s_{kh})]^2} \right\}^{-1} \quad (7)$$

求解相对隶属度 u_{hj} 和贡献率 α_i 的步骤: (1) 给定迭代计算精度 ϵ_1, ϵ_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)、式(9) 迭代模型进行计算 $u_{hj}^{l+1}, \alpha_i^{l+1}$; (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, α_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。

根据模糊概念在分级条件下最大隶属度原则不适用性^[11], 用级别特征值方法^[10] 对类别进行确定:

$$\tilde{H}(1, 2, \dots, c) \cdot U_{c \times n} = (H_1, H_2, \dots, H_n) \quad (8)$$

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 指标选取及数据源

根据陕西省境内 9 个典型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, 参照全国水资源供需分析中的指标体系^[12-13], 选取人均水资源可利用量 x_1 ($\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1}$)、人均水资源占有量 x_2 ($\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1}$)、单位 GDP 用水量 x_3 ($\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1}$)、水资源开发利用效率 x_4 (%)、单位耕地水资源量 x_5 ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)、单位面积水资源量 x_6 ($\text{万 m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)、灌溉率 x_7 (%) 等 7 项评价指标 (见表 1)。指标数据来源于陕西省和地市年鉴及 2007 年各县水资源公报。

3.2 WRCC 的模糊评价

根据式(2), 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, 则各级别相对隶属度的标准值矩阵可表为:

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

确定各指标的标准值如表 1 所示。

应用式(3), 将评价指标的统计值与标准值数据格式化, 转化为相对隶属度矩阵 $R_{7 \times 9}$:

$$R = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.05 & 0.01 & 0.36 & 0.77 & 0.66 & 0.09 & 0.08 & 0.04 \\ 0.01 & 0.03 & 0.01 & 0.18 & 0.74 & 0.34 & 0.07 & 0.06 & 0.02 \\ 0.99 & 0.95 & 0.99 & 0.42 & 0.00 & 0.09 & 0.92 & 0.91 & 0.03 \\ 0.71 & 0.76 & 0.73 & 0.84 & 0.81 & 0.64 & 0.94 & 0.78 & 0.75 \\ 0.01 & 0.06 & 0.01 & 0.54 & 0.11 & 0.90 & 0.01 & 0.01 & 0.56 \\ 0.13 & 0.28 & 0.08 & 0.18 & 0.99 & 0.62 & 0.01 & 0.00 & 0.18 \\ 1.00 & 0.00 & 1.00 & 0.14 & 0.52 & 0.50 & 0.11 & 0.44 & 0.00 \end{bmatrix}$$

表 1 陕西省县域 WRCC 评价指标的标准

Table 1 Evaluation index for WRCC of sample counties in Shaanxi Province

影响因子 Impact factor	I	II	III	IV
人均水资源可利用量(x_1)/($m^3 \cdot 人^{-1}$) Per-capita availability quantity of the water resources	7500	1500	300	60
人均水资源占有量(x_2)/($m^3 \cdot 人^{-1}$) Water resources ownership per capita	15000	3000	600	120
单位 GDP 用水量(x_3)/($m^3 \cdot 万元^{-1}$) Water consumption per unit GDP	500	1000	5000	20000
水资源开发利用率(x_4)/% Utilization rate of water resources	12	25	50	75
单位耕地水资源量(x_5)/($m^3 \cdot hm^{-2}$) Water resources quantity per capita arable land	90000	50000	10000	2000
单位面积水资源量(x_6)/($万 m^3 \cdot km^{-2}$) Water resources quantity per unit area	135	45	15	5
灌溉率(x_7) Irrigation rate/%	60	40	35	12

应用模糊识别循环迭代模型式(8)和式(9),求解各县水资源 WRCC 的相对隶属度 u_{hj} 和 7 个因子的贡献率 a_i ; 给定迭代计算精度 $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0.001$, 初始矩阵 $U_{4 \times 9}$ 和贡献率向量 α 取值分别为:

$$U = \begin{pmatrix} 0.5 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0.5 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \end{pmatrix}$$

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

经过 12 次迭代循环计算,指标贡献率迭代结果见表 2, 最终得到贡献率 a_i 为: $a_i = (0.1848, 0.3725, 0.0188, 0.0433, 0.0397, 0.3078, 0.0330)$ 。

采用式(8),分别求各县 WRCC 识别的级别特征值: $\tilde{H} = (1, 2, 3, 4) \times U_{4 \times 9} = (H_1, H_2, H_3)$ 。当 $1 < H_1 \leq 1.5$ 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)。WRCC 模糊评价结果见表 3。

表 2 典型县域评价指标贡献率 a_i 的迭代结果

Table 2 Iteration result of contribution ratio a_i for 7 WRCC evaluation index

迭代次数 Iteration	贡献率 a_i Target contribution rate						
0	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429
1	0.1502	0.1556	0.1107	0.1739	0.1434	0.1387	0.1274
2	0.2047	0.2767	0.0533	0.1160	0.0954	0.1791	0.0749
...
11	0.1847	0.3736	0.0188	0.0433	0.0398	0.3067	0.0331
12	0.1848	0.3725	0.0188	0.0433	0.0397	0.3078	0.0330

表 3 典型县 WRCC 模糊评价结果

Table 3 Fuzzy assessment result of sample counties

典型县 Sample counties	级别特征值 H_j Characteristic value	WRCC 级别 WRCC level
武功 Wugong	3.0934	低(III) Low
泾阳 Jingyang	2.8245	低(III) Low
岐山 Qishan	3.1125	低(III) Low
商南 Shangnan	2.4802	中(II) Middle
石泉 Shiquan	1.3895	高(I) Higher
南郑 Nanzheng	2.3596	中(II) Middle
镇坪 Zhenping	3.0691	低(III) Low
靖边 Jingbian	3.2188	低(III) Low
安塞 Ansai	3.2213	低(III) Low

3.3 考虑主观权重 ω 的 WRCC 模糊评价

表 3 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^[10]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)。

$$w = (w_1, w_2, \dots, w_m) = \left[\frac{1 - g_{l1}}{g_{l1}} / \sum_{i=1}^m \frac{1 - g_{li}}{g_{li}}, \frac{1 - g_{l2}}{g_{l2}} / \sum_{i=1}^m \frac{1 - g_{li}}{g_{li}}, \dots, \frac{1 - g_{lm}}{g_{lm}} / \sum_{i=1}^m \frac{1 - g_{li}}{g_{li}} \right]$$

满足 $\sum_{i=1}^m w_i = 1^\circ$ (9)

式中, $w_i = \frac{1 - g_{li}}{g_{li}} / \sum_{i=1}^m \frac{1 - g_{li}}{g_{li}}$; 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 4 确定。

表 4 语气算子与定量标度相对隶属度的关系^[10]

Table 4 Linear relation between mood operator and quantitative scale

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

表 5 考虑主观权重 ω 的各样本县 WRCC 模糊评价结果

Table 5 Fuzzy assessment result considering combination of ω & α

典型县 Sample counties	$\gamma = 0$		$\gamma = 0.3$		$\gamma = 0.7$		$\gamma = 1$	
	级别特征值 Characteristic value	级别 Level						
武功 Wugong	3.0934	Ⅲ	2.9840	Ⅲ	2.8431	Ⅲ	2.7755	Ⅲ
泾阳 Jingyang	2.8245	Ⅲ	2.9632	Ⅲ	2.9681	Ⅲ	2.9454	Ⅲ
岐山 Qishan	3.1125	Ⅲ	2.9996	Ⅲ	2.8450	Ⅲ	2.7736	Ⅲ
商南 Shangnan	2.4802	Ⅱ	2.5069	Ⅲ	2.5670	Ⅲ	2.5986	Ⅲ
石泉 Shiquan	1.3895	Ⅰ	1.6791	Ⅱ	2.2059	Ⅱ	2.4113	Ⅱ
南郑 Nanzheng	2.3596	Ⅱ	2.3687	Ⅱ	2.2322	Ⅱ	2.1865	Ⅱ
镇坪 Zhenping	3.0691	Ⅲ	3.1076	Ⅲ	3.0577	Ⅲ	3.0901	Ⅲ
靖边 Jingbian	3.2188	Ⅲ	3.0826	Ⅲ	2.9838	Ⅲ	2.9480	Ⅲ
安塞 Ansai	3.2213	Ⅲ	3.0443	Ⅲ	2.9660	Ⅲ	2.9464	Ⅲ

由表 5 可知, 无论 γ 取何值, 这 9 个县中, 石泉县和南郑县的 WRCC 都比其它县要高, 说明这两个县的水资源供给除了在一定的程度上能满足其社会发展需要外, 还具有一定的开发潜力, 可进一步对其进行开发利用。当 $\gamma = 0.3$ 时, 石泉县 WRCC 值变为中等级别, 说明水资源尚能满足社会发展需要, 但对其开发利用必须慎重; 南郑县 WRCC 值不随 γ 变化而改变, 水资源的供给需求一直处于中等水平。其它各县不论 γ 取何值, WRCC 值都处于较低水平 (Ⅲ级), 说明水资源供给关系不能满足社会发展的需求, 水资源的开发利用也达到其最大承载能力, 需要对这些地区进行水资源的合理规划和调整, 促进水资源的高效利用。另外, 比较 $\gamma = 0$ 和 $\gamma = 1$ 两种

由此可得到陕西省典型县域水资源 7 项评价指标的主观权重: $\omega = (0.20, 0.10, 0.10, 0.05, 0.15, 0.08, 0.12)$ 。则综合评价式(4)、式(6)可转换为:

$$D = w_{hj} \left\{ \sum_{i=1}^m [(\gamma\omega_i + (1 - \gamma)a_i)(r_{ij} - S_{ih})]^2 \right\}^{0.5} \quad (10)$$

$$u_{hj} = \begin{cases} 0, & D_{kj} = 0, k \neq h; \\ \left\{ \sum_{k=1}^c \frac{\sum_{i=1}^m [(\gamma\omega_i + (1 - \gamma)a_i)(r_{ij} - S_{ih})]^2}{\sum_{i=1}^m [(\gamma\omega_i + (1 - \gamma)a_i)(r_{ij} - S_{ik})]^2} \right\}^{-1}, & D_{kj} \neq 0; \\ 1, & D_{hj} = 0. \end{cases} \quad (11)$$

式中, ω_i 为第 i 项因子对 WRCC 的主观权重; γ 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 γ 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样本县 WRCC 模糊评价结果见表 5。

情况可发现, 在只受客观因素影响下, 石泉县和南郑县的 WRCC 值是最高的, 说明这两个地区水资源储备是丰富的; 在只受主观因素影响下, 石泉县的 WRCC 值有所降低, 说明人类已开始考虑利用该地区丰富的水资源。南郑县的 WRCC 值没有改变, 人类对其开发利用是有一定限度的。

4 结论与讨论

研究陕西省境内不同地貌类型区内散布县域的水资源承载力, 有助于了解其水资源禀赋与经济社会结构的适配程度及其空间分布特征, 推动区域水资源承载力研究的进一步发展。本文应用模糊识别理论判识了研究区 WRCC 的水平, 石泉县最高, 其

次为南郑县和商南县,其它6个县较低;若考虑人的主观经验知识在评价过程中的作用,则石泉县 WRCC 有所降低,其它县都没改变。综合上述研究可知,陕南地区的水资源充足,其水资源与经济发展较为协调,可开发潜力很大,未来应充分发挥其 WRCC 优势,加大水资源开发力度,促进该地区经济社会可持续发展;关中地区水资源已严重超载,需要相关部门采取措施进行人工干预,未来应逐步调整产业结构,加大节水工程建设力度,提高居民节水意识,使水资源的利用走上可持续发展的道路;陕北地区水资源严重短缺,也是生态脆弱区,应采取相关生态治理措施,避免该地区生态环境进一步恶化。

以陕西省典型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,通过交叉迭代计算得到区域的承载能力的相对隶属度和影响因子的贡献率,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贡献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各县 WRCC 的级别。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,较好地反映了陕西省典型县域 WRCC 的状况,研究结果可以为陕西省水资源的合理利用提供决策依据,而

且为县域 WRCC 的评价提供理论方法价值,具有重要的现实参考意义。

参考文献:

- [1] 刘佳骏,董锁成,李泽红.中国水资源承载力综合评价研究[J].自然资源学报,2011,(2):258-269.
- [2] 姜秋香,付强,王子龙.三江平原水资源承载力评价及区域差异[J].农业工程学报,2011,(9):184-190.
- [3] 肖迎迎,宋孝玉,张建龙.基于主成分分析的榆林市水资源承载力评价[J].干旱地区农业研究,2012,(4):218-223,235.
- [4] 黄蕊,刘俊民,李熡楷.基于系统动力学的咸阳市水资源承载力[J].排灌机械工程学报,2012,(1):57-63.
- [5] 张君,魏素洁,胡剑,等.基于模糊二级评判模型的水资源承载力分析[J].人民黄河,2012,(9):63-65.
- [6] 赵军凯,李九发,戴志军,等.基于熵模型的城市水资源承载力研究——以开封市为例[J].自然资源学报,2009,11:1944-1951.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [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.
- [11] 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.
- [12] 张会涓,陈然,赵言文.基于模糊物元模型的区域水环境承载力研究[J].水土保持通报,2012,(2):186-189.
- [13] 张青峰,王力,李熡楷,等.长武县水资源承载力的模糊评价[J].西北农林科技大学学报,2010,38(5):161-166.

(上接第 231 页)

- [4] 李同昇,杨卫丽.西安都市圈都市农业的发展及其空间格局研究[J].经济地理,2011,31(1):123-128.
- [5] Luc J A Mougeot. Urban agriculture: Concept and definition[J]. Urban Agriculture Magazine, 2000, 1:5-7.
- [6] Lynch K, Binns T, Olofin E. Urban agriculture under threat the land security question in Kano, Nigeria[J]. Cities, 2001,18(3):159-171.
- [7] 张文胜.日本都市农业的特征、功能及案例分析[J].农业经济,2009,(12):33-34.
- [8] 杨仪清.都市农业发展的模式及途径探析——以郑州市发展都市农业为例[J].改革与战略,2011,27(12):112-114.
- [9] 吉力力·阿不都外力,木巴热克·阿尤普.基于生态足迹的中亚区域生态安全评价[J].地理研究,2008,27(6):1308-1320.
- [10] 任志远,黄青,李晶.陕西省生态安全及空间差异定量分析[J].地理学报,2005,60(4):597-606.
- [11] 吴国庆.区域农业可持续发展的生态安全及其评价探析[J].生态经济,2001,(8):22-25.
- [12] 韩瑛,韩珺,陈忠祥.区域农业可持续发展的生态安全评价——以宁夏红寺堡移民区为例[J].山西师范大学报,2009,23(1):88-91.
- [13] 潘泽江,康小兰,刘滨.湘粤桂边贫困山区农业生态安全评价——以湖南双牌县为例[J].江西农业大学学报,2011,10(1):105-110.
- [14] 曹明兰,李亚东.基于能值分析的唐山市生态安全评价[J].应用生态学报,2009,20(9):2214-2218.
- [15] 马玉香,张云.乌鲁木齐城市生态安全评价研究[J].资源环境与发展,2009,(2):22-25.
- [16] 邓楚雄,谢炳庚,吴永兴,等.上海市都市农业生态安全定量综合评价[J].地理研究,2011,30(4):646-654.
- [17] 罗平.武汉市都市农业生态安全评价[J].中国科技论坛,2010,(4):126-141.
- [18] 王军,何玲,董谦,等.河北省农业生态安全障碍度评价与对策研究[J].农业现代化研究,2010,37(1):81-85.
- [19] 姚成胜,朱鹤健.区域农业可持续发展的生态安全评价——以福建省为例[J].自然资源学报,2007,22(3):380-388.
- [20] 郭亚军.综合评价理论、方法及应用[M].北京:科学出版社,2007:31-33.
- [21] 李元年.基于熵理论的指标体系区分度测算与权重设计[D].南京:南京航空航天大学,2008.