

关中地区水土资源承载力复合指标体系及综合评价

南彩艳¹, 栗晓玲¹, 佟玲², 李楷¹, 史银军¹, 徐万林¹, 杨雪菲¹

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国农业大学农业水问题研究中心, 北京 100083)

摘 要: 针对现有一些承载力研究仅考虑水资源或土地资源的片面性和单一性问题, 对指标体系进行完善, 构建包括水资源、土地资源、科技功效、社会、经济及生态环境 6 个子系统共 20 个评价指标的水土资源复合承载系统的评价指标体系, 采用改进模糊综合评价模型对关中地区水土资源承载力进行评价。在权重确定中, 用基于模糊集决策理论的主观权重对熵权进行修正, 提高了权重的可靠性。在改进模糊综合评价模型中, 引入有效度指标, 判断传统模糊综合评价结果的有效性, 并对失效样本用基于贴近度的择近原则重新评价, 提高了评价结果的可信度。评价结果表明: 关中水土资源承载水平除咸阳为Ⅱ级, 处于临近超载状态外, 其他地市均在Ⅲ级左右, 处于基本平衡状态。水土资源承载状态从优到劣依次为宝鸡、西安、铜川、渭南、咸阳。未来宝鸡、咸阳、渭南的水土资源承载力会有所提高, 铜川则刚好相反, 西安水土资源承载状态在 2015 年有所改善, 但在 2025 年略微下降。

关键词: 水土资源承载力; 指标体系; 改进模糊综合评价; 关中地区

中图分类号: F301.24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2011)06-0164-09

关中地区介于东经 106°18′~110°37′和北纬 33°35′~35°50′之间, 位于陕西中部, 总面积约 5.55 万 km², 占全省总面积 20.58 万 km² 的 27%, 行政区划上包括西安、咸阳、铜川、宝鸡、渭南五个地(市), 是我国重要的粮棉产区和国家建设的重点地区, 素有“八百里秦川”之称^[1]。该区农业生产历史悠久, 土地资源丰富, 但由于地处半干旱区, 降水量少且蒸发强烈, 水资源成为制约土地资源利用的限制因子, 而且该区水土资源空间组合的“错位”现象严重约束社会经济的发展^[2]。近年来, 随着人口的增长和对水土资源的加速开发利用, 引发一系列的环境问题, 如水土资源供需矛盾突出、水土环境污染严重、地下水过度超采等, 所以研究该地区的水土资源承载力十分必要, 可为水土资源的优化配置、社会经济的发展 and 生态环境保护提供科学依据。

目前关于水土资源承载力的研究方法很多^[3,4], 在实际应用中取得了一定成果, 但也存在一些不足。由于水土资源承载力受诸多不确定因素的影响, 具有动态性、相对极限性和模糊性, 因而有必要对现有方法进行改进以提高评价结果的可靠性。本文在综合考虑水土资源承载力多元影响因素来构建水土资源承载力评价指标体系的基础上, 应用改进模糊综合评价模型对关中地区现状及规划水平年的水土资源承载力进行分析, 确定水土资源可持续

利用的承载等级及状态。

1 水土资源承载力评价指标体系及分级标准

1.1 水土资源承载力影响因素

水土资源承载系统是一个社会、经济、生态耦合作用的复杂多层次系统, 水土资源承载力主要受以下因素的影响:

(1) 承载主体: 水资源和土地资源是水土资源承载能力的主体, 承载能力大小首先取决于现有技术条件下资源供给系统所能提供的水资源和土地资源的数量和质量。只有达到一定数量和一定质量标准的水土资源才能满足人类居住和社会建设基本的物质与环境需求, 也才能支撑经济社会的可持续发展。

(2) 承载客体: 社会经济和生态环境系统是水土资源承载能力的客体, 人类及其赖以生存的环境和必需的社会活动都会对水土资源承载力产生影响。在社会经济系统中, 区域经济发展战略、管理体制和法制在很大程度上都影响水土资源承载能力的大小^[5]。

(3) 科技功效水平: 科技功效水平是生产效率的度量, 是现有生产力水平高低的体现, 有限的水土资源在不同的科技功效水平下会获得不同的收益。

收稿日期: 2011-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(50879071); 国家科技支撑计划(2006BAD29B02); 西北农林科技大学青年学术骨干支持计划资助项目

作者简介: 南彩艳(1985—), 女, 陕西延安人, 硕士研究生, 研究方向为水资源利用与管理。E-mail: nancaiyan@163.com。

* 通讯作者: 栗晓玲(1968—), 女, 四川开江人, 教授, 博士, 主要从事生态系统水资源配置方面的研究。E-mail: suxiaoling17@126.com。

先进高端的科技水平可以使承载主体的生产潜力得到很大程度的发挥,从而影响水土资源承载力的评价结果。

1.2 水土资源承载力评价指标体系

建立评价指标体系是水土资源承载力研究的基础,所以如何着眼于承载力影响因素,遵循所选指标需具有可操作性、独立性、可比性的原则,构建水土

资源承载力评价指标体系成为水土资源承载力研究的关键。根据关中地区水土资源现状及开发利用特点,充分考虑水土资源承载力影响因素,在参考前人研究成果^[6~8]的基础上,按照指标体系的选取原则,建立由 1 个目标层,6 个准则层(准则层Ⅱ),20 个评价指标组成的评价指标体系(图 1),各指标的计算表达式及意义见表 1。

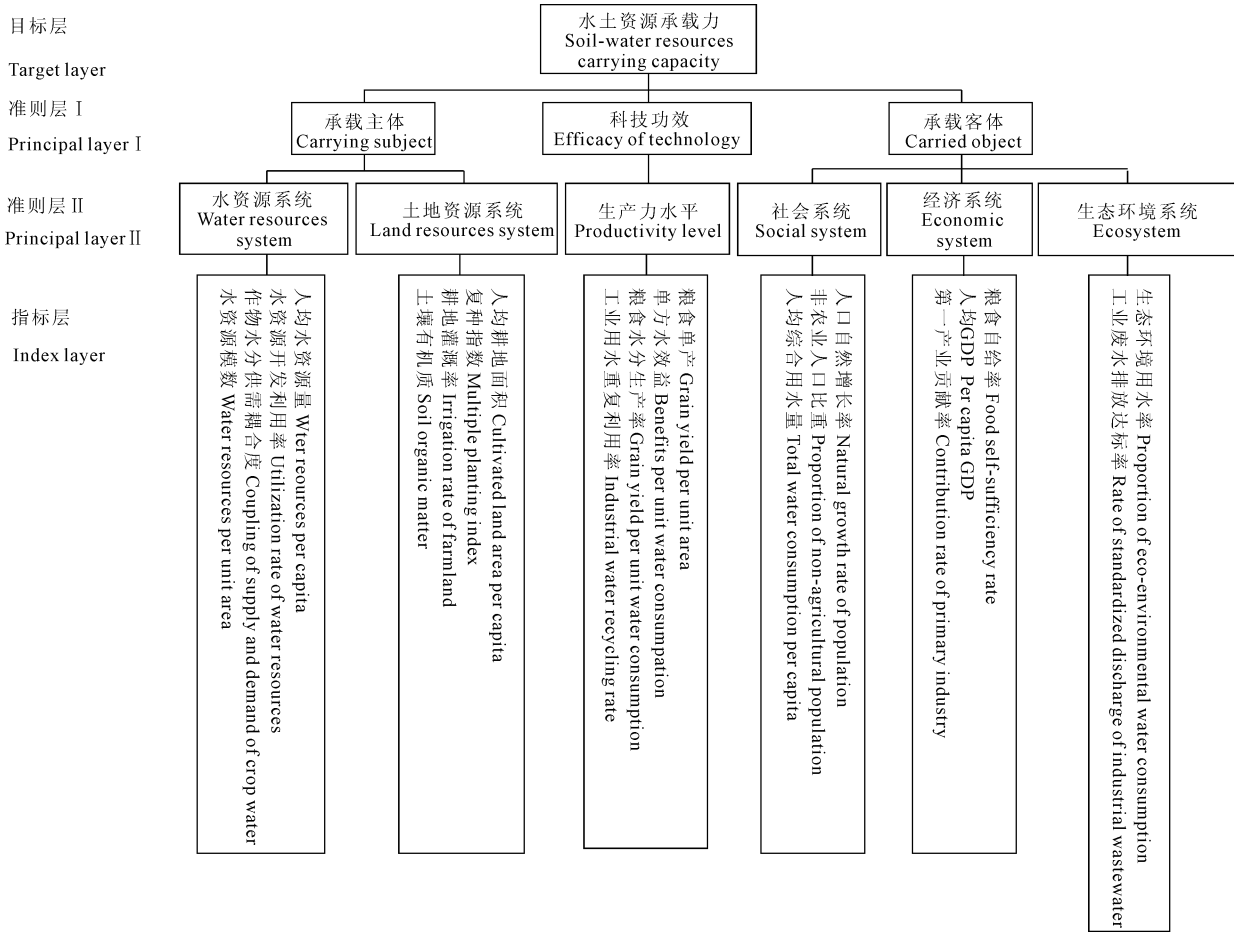


图 1 水土资源承载力评价指标体系

Fig.1 Soil-water resources carrying capacity indexes system

1.3 水土资源承载力指标分级标准

水土资源承载力指标分级标准是否合理客观将直接影响评价结果的可靠性,分级标准的确定应面向可持续发展,有利于水土资源的开发利用和保护。本文大多数指标的分级标准是在参考已有研究成果^[9~11]或国家规定标准的基础上确定的;对国家在宏观角度上有明确发展规划的指标,根据相关规划数据确定等级的上下限,如根据《国家粮食安全中长期规划纲要》确定粮食单产,土壤有机质的取值范围

由《陕西土壤》确定;对于没有明确标准或缺乏可靠参考依据的指标,如第一产业贡献率,通过分析指标在国内外不同地区的数值差异,确定等级的上下限取值;另外,通过调查访问相关专业的专家或工作人员,获得某些指标的取值范围或对通过上述方法确定的指标取值范围进行修正。正向型指标即为越大越优型指标,逆向型指标即为越小越优型指标,将水土资源承载等级分为 5 个级别,各指标在不同级别下的取值范围及各等级表征的承载状态如表 2。

表 1 水土资源承载力评价指标表达式及意义

评价指标 Evaluation index	指标计算公式 Evaluation indexes expression	指标作用 The significance of evaluation indexes
人均水资源量(m ³ /人) Per capita water resources	水资源总量/总人口 Total water resources/ total population	反映水资源的丰缺状况 Reflect the status of water resources
水资源开发利用率(%) Utilization rate of water resources	水资源的开发利用量/水资源量 Available water resources/total water resources	反映水资源的开发利用程度 Reflect the utilization of water resources
作物水分供需耦合度 Crop water supply and demand coupling	生长期的参考作物蒸发蒸腾量 ET_0 /同期降水量 Reference crop evaporationcapacity in growing period/ rainfall in growing period	反映天然降雨与作物生长期需水的匹配程度 Reflect the matching degree of natural rainfall and crop water
水资源模数(万 m ³ /km ²) Water resources per unit area	水资源总量/土地面积 Total water resources/land area	反映水土资源的匹配程度 Reflect the matching degree of water and land re- sources
人均耕地面积(hm ² /人) Per capita famland	耕地总面积/总人口 Total cultivated area/total population	反映耕地资源的数量 Reflect the quantity of cultivated land
复种指数 Multiple planting index	全年播种(移栽)作物的总面积/耕地总面积 Total area of annual seeding (transplant) crops/ total cul- tivated area	反映耕地的利用程度 Reflect the utilization of cultivated land
耕地灌溉率(%) Irrigation rate of famland	有效灌溉面积/耕地面积 Effective irrigation area/cultivated area	反映耕地的抗旱能力 Reflect the drought resistance of cultivated land
土壤有机质(%) Soil organic matter	土壤有机质是指土壤中含碳的有机化合物 Soil organic matter is the organic compounds that contain carbon	反映土壤肥力的大小 Reflect the soil fertility
粮食单产(kg/hm ²) Grain yield per unit planting area	粮食总产量/粮食作物播种面积 Total grain output/grain sowing area	反映耕地粮食生产水平的高低 Reflect the level of grain production
单方水效益(元/m ³) Benefits per unit water consumption	GDP/(总用水－生态用水) GDP/(total water consumption－ecological water con- sumption)	反映支持经济生产的科技水平的高低 Reflect the level of technology that support economic production
粮食水分生产率(kg/m ³) Grain yield per unit water consumption	粮食总产量/粮食生产耗水 Total grain output/ water consumption of grain production	反映粮食作物灌溉用水的产出效益 Reflect the benefit per unit grain irrigation water con- sumption
工业用水重复利用率(%) Industrial water reuse rate	工业回收利用水量/(工业回收用水量＋补充利用 水量) Industrial recycled water/(industrial recycled water＋ supplementary water)	反映工业节水水平的高低 Reflect the level of industrial water
人口自然增长率(‰) Natural population growth rate	(本年出生人数－本年死亡人数)/年平均人数 (Annual births－annual deaths)/ Average annual num- ber of population	反映人口数量的动态变化 Reflect the dynamic change of population
非农业人口比重(%) Proportion of non-agricultural popula- tion	非农业人口/总人口 Number of urban population/ total population	反映城市化程度 Reflect the urbanization degree
人均综合用水量(m ³ /人) Per capita total water consumption	总用水量/总人口 Total water consumption/total population	反映居民用水水平的高低 Reflect the level of water consumption
粮食自给率(%) Food self-sufficiency rate	人均自产粮食/人均粮食需求量(按 400kg/人计算) Per capita productive grain/per capita grain demand	反应区域粮食供求形势和供给潜力 Reflect the supply potential and situation of grain sup- ply and demand
人均 GDP(元/人) Per capita GDP	GDP 总量/总人口 Total GDP/total population	反映区域整体经济状况 Reflect the regional overall economic condition
第一产业贡献率(%) Contribution rate of primary industry	第一产业总产值/GDP The primary industry output /GDP	反映一产占总产值的比例 Reflect the primary industry proportion
生态环境用水率(%) Proportion of eco-environmental water consumption	生态环境用水量/总用水量 Eco-environmental water consumption /total water con- sumption	反映区域生态绿化水平的高低 Reflect the ecological greening level
工业废水排放达标率(%) Percentage of standardized discharge of industrial wastewater	工业废水达标排放量/总排放量 The discharge quantity of standard industrial wastewater/ total discharge quantity	反映废水处理水平的高低 Reflect the treatment level of wastewater

表 2 水土资源承载力评价指标体系及承载等级划分标准

Table 2 Soil-water resources carrying capacity indexes system and classification standard for different carrying degrees

子系统 Subsystem	评价指标 Evaluation index	类型 Type	分级标准及承载状态 Classification standard and carrying state				
			I	II	III	IV	V
			超载 Overload	临近超载 Near overload	承载基本平衡 Load balance	安全承载 Safe load	可盈余承载 Lack of load
水资源系统 B ₁ Water resources system	人均水资源量 C ₁₁ (m ³ /人)	正 Positive	<500	500~1000	1000~2500	2500~4800	>4800
	水资源开发利用率 C ₁₂ (%)	逆 Inverse	>50	30~50	20~30	10~20	<10
	作物水分供需耦合度 C ₁₃	逆 Inverse	>4	2~4	1.2~2	1~1.2	<1
	水资源模数 C ₁₄ (万 m ³ /km ²)	正 Positive	<5	5~15	15~25	25~40	>40
土地资源系统 B ₂ Land resources system	人均耕地面积 C ₂₁ (hm ² /人)	正 Positive	<0.04	0.04~0.07	0.07~0.10	0.10~0.17	>0.17
	复种指数 C ₂₂	逆 Inverse	>2.0	1.5~2.0	1.2~1.5	1.1~1.2	<1.1
	耕地灌溉率 C ₂₃ (%)	正 Positive	<20	20~40	40~70	70~80	>80
	土壤有机质 C ₂₄ (%)	正 Positive	<0.8	0.8~1.2	1.2~2	2~4	>4
科技功效系统 B ₃ Technological efficacy system	粮食单产 C ₃₁ (kg/hm ²)	正 Positive	<3450	3450~4950	4950~7500	7500~15000	>15000
	单方水效益 C ₃₂ (元/m ³)	正 Positive	<20	20~50	50~100	100~150	>150
	粮食水分生产率 C ₃₃ (kg/m ³)	正 Positive	<1.2	1.2~2.0	2.0~3.0	3.0~5.0	>5.0
	工业用水重复利用率 C ₃₄ (%)	正 Positive	<30	30~40	40~60	60~90	>90
社会系统 B ₄ Social system	人口自然增长率 C ₄₁ (%)	逆 Inverse	>10	7~10	4~7	0~4	0
	非农业人口比重 C ₄₂ (%)	正 Positive	<20	20~40	40~60	60~75	>75
	人均综合用水量 C ₄₃ (m ³ /人)	逆 Inverse	>400	300~400	200~300	100~200	<100
经济系统 B ₅ Economic system	粮食自给率 C ₅₁ (kg/m ³)	正 Positive	<70	70~90	90~100	100~120	>120
	人均 GDP C ₅₂ (元/人)	正 Positive	<7000	7000~15000	15000~25000	25000~55000	>55000
	一产贡献率 C ₅₃ (%)	逆 Inverse	>20	15~20	10~15	5~10	<5
生态环境系统 B ₆ Ecosystem	生态环境用水率 C ₆₁ (%)	正 Positive	<1	1~3	3~5	5~10	>10
	工业废水排放达标理率 C ₆₂ (%)	正 Positive	<40	40~50	50~80	80~95	>95

2 基于熵权和模糊集决策理论的改进模糊综合评价模型

2.1 确定评价指标权重

2.1.1 熵权法确定客观权重 熵权法确定权重的本质就是根据各指标在竞争意义上的激烈程度即指标值在待评样本之间的差异性来确定指标权重。熵权法可以去同存异,对数值有差异性的指标进行弱化和强化,从而使统计数据的效用值得到全面反映,使权重分配具有一定理论依据^[12],对样本做出客观评价。计算步骤如下:

(1) 设有 n 个评价样本,用 m 个指标描述样本属性, x_{ij} 为样本 i 的第 j 项指标。对原始数据进行无量纲化处理得到规范化矩阵 X' 。
 $X' = (x'_{ij})_{n \times m}, (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m);$
 $x'_{ij} = (x_{ij} - x_{jmin}) / (x_{jmax} - x_{jmin})$ (1)
式中, x_{jmax} 和 x_{jmin} 分别为同一指标在不同样本中的最优值和最劣值。

(2) 根据熵的定义,确定样本第 j 个评价指标的

熵值为:

$$E_j = -l \cdot \sum_{i=1}^n (p_{ij} \cdot \ln p_{ij})$$
 (2)

其中: $l = 1/\ln n$, $p_{ij} = x'_{ij} / \sum_{i=1}^n x'_{ij}$ 。但当 $p_{ij} = 0$ 时, $\ln p_{ij}$ 无意义,故对 p_{ij} 加以修正,定义:

$$p_{ij} = (1 + x'_{ij}) / \sum_{i=1}^n (1 + x'_{ij})$$
 (3)

(3) 根据第 j 指标的熵值计算其熵权:

$$\omega_j^{(e)} = (1 - E_j) / (m - \sum_{j=1}^m E_j)$$
 (4)

且满足 $\omega_j^{(e)} \in [0, 1], \sum_{j=1}^m \omega_j^{(e)} = 1$

2.1.2 基于模糊集决策理论的主观权重 充分考虑人的经验知识对指标权重的影响,采用陈守煜等^[13]创建的以二元比较判断互补性思维模式为基础的指标权重定量计算,计算公式见式(5)。

$$\omega_j^{(s)} = (\omega_1^{(s)}, \omega_2^{(s)}, \dots, \omega_m^{(s)}) = \left[\frac{1 - g_{11}}{g_{11}} / \sum_{j=1}^m \frac{1 - g_{1j}}{g_{1j}}, \right]$$

$$\frac{1-g_{12}}{g_{12}}/\sum_{j=1}^m \frac{1-g_{1j}}{g_{1j}}, \dots, \frac{1-g_{1m}}{g_{1m}}/\sum_{j=1}^m \frac{1-g_{1j}}{g_{1j}} \Bigg\} \quad (5)$$

式中, $\omega_j^{(s)}$ 为第 j 个指标的主观权重, $\omega_j^{(s)} = \frac{1-g_{1j}}{g_{1j}}/\sum_{j=1}^m \frac{1-g_{1j}}{g_{1j}} (j=1, 2, \dots, m), 0.5 \leq g_{1j} \leq 1$, g_{1j} 为第一重要指标对第 j 重要指标作重要性二元比较时的定量标度, 由表 3 确定。

表 3 语气算子与定量标度关系表^[13]

Table 3 Relationship between mood operator and quantitative scale

语气算子 Mood operator	同样 Similarly	稍微 Slightly	略微 A little	较微 More	明显 Clearly	显著 Significantly	十分 Completely	非常 Very	及其 Extremely	极端 Extreme	无可比拟 Unmatched
定量标度 Quantitative scale	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95	1

2.2 改进模糊综合评价模型

根据分级标准, 将水土资源承载等级分为 c 个级别, 选择模糊算子对模糊关系矩阵 R 和指标熵权向量 $W^{(e)}$ 进行复合运算, 得到综合评价矩阵 B 。

$$B = (b_{ik})_{n \times c} = W^{(e)} \times R = \min \left[1, \sum_{j=1}^m \omega_j^{(e)} r_{jk} \right] \quad (7)$$

式中, b_{ik} 表示样本 i 对于等级 k 的隶属向量; r_{jk} 为指标 j 对应等级 k 的隶属函数, $k = 1, 2, \dots, c$ 。用最大隶属原则判定样本水土资源承载等级。

最大隶属原则是一种在决策和评价方面广泛应用的分析方法, 但存在丢失信息的缺陷, 为了判定传统模糊综合评价中最大隶属原则的有效性, 引入有效度指标 $\alpha_i^{[14]}$ 。

$$\alpha_i = \frac{\beta'_i}{\gamma'_i} = \frac{\left(c \cdot \max_{1 \leq k \leq c} b_{ik} / \sum_{k=1}^c b_{ik} - 1 \right) \sum_{k=1}^c b_{ik}}{2(c-1) \sec_{1 \leq k \leq c} b_{ik}}$$

其中:
$$\begin{cases} \beta'_i = (c \cdot \beta_i - 1) / (c - 1) \\ \gamma'_i = 2 \sec_{1 \leq k \leq c} b_{ik} / \sum_{k=1}^c b_{ik} \end{cases} \quad (8)$$

式中, $\max_{1 \leq k \leq c} b_{ik}$ 为样本 i 水土资源承载力综合评价结果中 c 个等级隶属值中的最大值, $\sec_{1 \leq k \leq c} b_{ik}$ 为第二大值, $\beta_i = \max_{1 \leq k \leq c} b_{ik} / \sum_{k=1}^c b_{ik}$ 。分析有效度 α_i 的意义, 可得如下结论: $\alpha_i = +\infty$ 时认为最大隶属原则完全有效; $1 \leq \alpha_i < +\infty$ 认为最大隶属原则非常有效; $0.5 \leq \alpha_i < 1$ 认为最大隶属原则比较有效; $0 < \alpha_i < 0.5$ 认为最大隶属原则最低效; $\alpha_i = 0$ 认为最大隶属原则完全无效。

非对称贴近度原则能有效解决最大隶属原则失效问题^[15], 因此对于最大隶属原则失效样本采用文献^[16]中的非对称贴近度公式进行等级评价, 样本

2.1.3 主客观组合权重 熵权并不能代表指标的实际权重, 只表征各指标提供给决策者信息量的多少, 用基于模糊集单元系统决策理论的主观权重对熵权进行修正, 按式(6) 确定主客观组合权重, 比现有熵权或主观权重更符合实际。

$$\omega_j = \omega_j^{(e)} \omega_j^{(s)} / \sum_{j=1}^m \omega_j^{(e)} \omega_j^{(s)} \quad (6)$$

i 对于等级 k 的贴近度 N_{ik} 按下式计算:

$$N_{ik} = 1 - \frac{1}{m(m+1)} \sum_{j=1}^m \left(D_{jk}(x'_{ij}) \cdot \omega_j \right) \quad (9)$$

根据物元可拓理论知识, 构造经典域 $V_{jk} = \langle v_{jk}^{low}, v_{jk}^{high} \rangle$ 和节域 $v_{j \cdot all} = \langle v_{j \cdot all}^{low}, v_{j \cdot all}^{high} \rangle$, 其中 v_{jk}^{low} 和 v_{jk}^{high} 为等级 k 对指标 j 规定的量值区间的边界值; $v_{j \cdot all}^{low}$ 和 $v_{j \cdot all}^{high}$ 为所有评价等级对指标 j 所规定的量值范围。对待测物元进行归一化处理, 即 $x'_{ij} = x_{ij} / v_{j \cdot all}^{high}$, 对经典域矩阵进行归一化处理即 $v'_{jk} = v_{jk} / v_{j \cdot all}^{high}$, 所以 $v_{jk}^{low'} = v_{jk}^{low} / v_{j \cdot all}^{high}$, $v_{jk}^{high'} = v_{jk}^{high} / v_{j \cdot all}^{high}$ 。令距离公式:

$$D_{jk}(x'_{ij}) = \rho \left(x'_{ij}, v'_{jk} \right) = \left| x'_{ij} - \frac{1}{2} \left(v_{jk}^{low'} + v_{jk}^{high'} \right) \right| - \frac{1}{2} \left(v_{jk}^{high'} - v_{jk}^{low'} \right) \quad (10)$$

贴近度公式(9) 就转化为

$$N_{ik} = 1 - \frac{1}{m(m+1)} \sum_{j=1}^m \left\{ \left| \frac{x'_{ij}}{v_{j \cdot all}^{high}} - \frac{1}{2} \left(\frac{v_{jk}^{low}}{v_{j \cdot all}^{high}} + \frac{v_{jk}^{high}}{v_{j \cdot all}^{high}} \right) \right| - \frac{1}{2} \left(\frac{v_{jk}^{high}}{v_{j \cdot all}^{high}} - \frac{v_{jk}^{low}}{v_{j \cdot all}^{high}} \right) \right\} \cdot \omega_j \quad (11)$$

最后求解式:

$$\begin{cases} \overline{N}_{ik} = \left(N_{ik} - \min_{1 \leq k \leq c} N_{ik} \right) / \left(\max_{1 \leq k \leq c} N_{ik} - \min_{1 \leq k \leq c} N_{ik} \right) \\ B_i^* = \sum_{k=1}^c (k \cdot \overline{N}_{ik}) / \sum_{k=1}^c \overline{N}_{ik} \end{cases} \quad (12)$$

所得 B_i^* 即为样本 i 的等级变量特征值, 据此得出样本的水土资源承载等级。

3 模型应用

以《陕西统计年鉴》(2000—2009)、《陕西省水资源公报 2008》、《陕西省水利统计年鉴 2008》、《2008

年陕西省国民经济和社会发展统计公报》等为基本资料,根据《陕西省水资源开发利用规划》、《陕西省国民经济和社会发展第十一个五年规划》、《宝鸡市水资源规划》、《咸阳市水资源规划》、《铜川市水资源

规划》等各地市社会经济发展的总体要求和奋斗目标,对 2015 和 2025 年的指标数据进行预测,关中地区现状 2008 年评价指标值及 2015 年、2025 年评价指标预测值见表 4。

表 4 关中地区现状及规划水平年水土资源承载力评价指标值
Table 4 Soil-water resources carrying capacity evaluation indexes value
of Guanzhong areas in 2008, 2015 and 2025

评价指标 Evaluation index	2008					2015					2025				
	西安 Xi'an	铜川 Tongchuan	宝鸡 Baoji	咸阳 Xianyang	渭南 Weinan	西安 Xi'an	铜川 Tongchuan	宝鸡 Baoji	咸阳 Xianyang	渭南 Weinan	西安 Xi'an	铜川 Tongchuan	宝鸡 Baoji	咸阳 Xianyang	渭南 Weinan
C ₁₁	316.37	241.94	918.65	112.43	236.96	306.56	235.10	893.33	109.33	230.10	293.33	226.69	861.37	105.42	221.83
C ₁₂	69.81	38.92	18.72	199.76	111.05	81.95	62.47	33.34	289.10	140.12	93.30	69.56	40.78	295.18	146.41
C ₁₃	1.15	1.67	1.13	1.79	1.97	1.15	1.67	1.13	1.79	1.97	1.15	1.67	1.13	1.79	1.97
C ₁₄	24.47	5.30	19.11	5.62	9.96	24.47	5.30	19.11	5.62	9.96	24.47	5.30	19.11	5.62	9.96
C ₂₁	0.03	0.07	0.08	0.07	0.09	0.03	0.06	0.07	0.06	0.09	0.03	0.05	0.07	0.05	0.08
C ₂₂	1.93	1.25	1.42	1.52	1.36	2.09	1.23	1.42	1.61	1.42	2.29	1.20	1.42	1.74	1.48
C ₂₃	70.24	15.39	53.45	56.17	66.61	69.80	15.31	53.15	57.00	68.35	69.17	15.21	52.73	58.21	70.93
C ₂₄	1.24	1.14	1.15	0.99	1.01	1.24	1.14	1.15	0.99	1.01	1.24	1.14	1.15	0.99	1.01
C ₃₁	5102	3903	4502	4811	4290	5978	4899	5739	5821	5170	6945	5816	6914	6533	5801
C ₃₂	132.17	164.94	110.71	67.30	35.68	182.96	168.02	113.22	81.24	45.84	265.98	227.92	177.15	126.49	67.76
C ₃₃	3.75	13.86	4.78	3.54	2.71	3.87	15.97	5.06	3.57	2.84	4.50	19.93	7.36	3.74	3.26
C ₃₄	70.94	93.99	81.75	91.13	93.20	71.81	95.15	82.76	92.25	94.35	72.21	95.67	83.21	92.76	94.86
C ₄₁	4.58	4.42	4.22	4.50	4.48	4.51	4.10	4.00	4.00	4.20	4.42	3.65	3.65	3.65	3.67
C ₄₂	47.11	47.33	25.20	21.67	29.47	51.82	50.07	27.36	23.86	36.08	58.69	52.75	30.21	26.74	45.40
C ₄₃	220.87	94.15	172.02	224.59	263.15	251.21	146.88	297.80	316.08	322.41	273.69	157.69	351.24	311.18	324.78
C ₅₁	69.40	67.57	106.45	100.37	103.54	71.37	71.89	128.57	107.15	124.09	73.80	76.31	147.63	114.36	133.19
C ₅₂	28357	15124	18893	14978	9374	40348	21973	27775	20663	13359	60376	33770	42337	31088	20051
C ₅₃	4.72	7.52	10.97	19.48	18.61	4.06	6.85	9.61	17.35	17.04	3.65	6.45	8.42	16.00	16.33
C ₆₁	2.87	2.50	0.77	1.05	0.28	4.58	2.92	2.43	1.68	0.41	5.33	3.13	4.04	2.27	0.50
C ₆₂	97.58	99.65	99.32	99.64	94.07	100	100	100	100	97.45	100	100	100	100	100

注:表中土壤有机质数据来源于《陕西土壤》,取各地市土壤有机质含量的算术平均值。作物水分供需耦合度取 1962~2001 年的多年平均值;计算作物水分供需耦合度所需的 ET_0 和降雨量直接引用各地市代表站的数据,西安、铜川、宝鸡、咸阳、渭南分别以蓝田站、耀县站,宝鸡县站,咸阳站,蒲城站为代表站;生态环境用水量来源于《陕西省水资源开发利用规划》。

Note: The data of soil organic matter are the mean values of different areas, which come from Soil in Shaanxi. The coupling rate of crop water supply and demand is the average of many years in 1962~2001, and the data of ET_0 and precipitation are quoted from the typical observatory stations in various regions of the province. The data of eco-environmental water consumption are from Planning of Water Resources Utilization in Shaanxi Province.

计算关中地区水土资源承载力评价指标的熵权、主观权重及主客观组合权重,结果见表 5。水土资源承载力综合评价结果见表 6。

从表 6 可知:按最大隶属度原则的传统模糊综合评级结果的有效度均小于 0.5,所以该方法不适用,改进模糊综合评价的结果更为合理可靠一些。

3.1 时间尺度分析

西安不同水平年水土资源承载等级均为Ⅲ级,处于承载平衡状态。2008 年承载等级变量为 2.8056,2015 年上升至 2.9962,与现状年相比区域承载状态有所改善,水土资源基本能够承载预测规模

下的人口和经济。随着《大西安国家化大都市城市发展战略规划》通过,要求在 10 a 内实现国际化大都市,2020 年城市人口将达到 800 万人以上,人均 GDP 目标为 10 000 美元。要实现规划目标未来必然会加速人口和经济增长,致使水土资源承载负荷剧增,承载状态降低,评价结果显示 2025 年水土资源承载状态与 2015 年相比略微下降,等级变量为 2.9925,所以评价结果符合客观实际。铜川不同水平年水土资源承载等级均为Ⅲ级,等级变量呈下降趋势。宝鸡始终为Ⅲ级承载基本平衡状态,但等级变量随年份不断提高。咸阳为Ⅱ级临近超载状态,

咸阳水土资源贫乏,但有诸多灌区向该区引水,如羊毛湾灌区、泾惠渠、宝鸡峡灌区等,所以在供水设施完善的基础上承载状态有所改善,等级变量由 2008 年的 2.4363 上升至 2025 年的 2.4824,但承载等级为

Ⅱ级,为临界超载状态。渭南的承载等级由 2008 年的Ⅱ级上升至 2015 年的Ⅲ级,并在 2025 年维持不变,等级变量呈上升趋势。

表 5 关中地区水土资源承载力评价指标权重计算表
Table 5 Soil-water resources carrying capacity evaluation indexes' weight calculation in Guanzhong areas

目标层 Target layer	准则层 Principal layer	指标层 Index layer	主观权重 Subjective factor weight			熵权 Entropy weight						主客观组合权重 Combination of subjective and objective factor weight					
			准则层 Principal layer	指标层 Index layer	综合权重 Integrated weight	2008		2015		2025		2008		2015		2025	
						准则层 Principal layer	指标层 Index layer	准则层 Principal layer	指标层 Index layer	准则层 Principal layer	指标层 Index layer	准则层 Principal layer	指标层 Index layer	准则层 Principal layer	指标层 Index layer	准则层 Principal layer	指标层 Index layer
A 水土 资源 承载 力 Soil-water resources carrying capacity	B ₁	C ₁₁		0.2238	0.0569		0.0522		0.0519		0.0543		0.0608		0.0609		0.0641
		C ₁₂	0.2545	0.3729	0.0949	0.2143	0.0419	0.2144	0.0410	0.2141	0.0426	0.3006	0.0815	0.3007	0.0800	0.3005	0.0839
		C ₁₃		0.1796	0.0457		0.0572		0.0569		0.0594		0.0535		0.0535		0.0563
		C ₁₄		0.2238	0.0569		0.0622		0.0618		0.0646		0.0725		0.0725		0.0763
	B ₂	C ₂₁		0.3077	0.0783		0.0388		0.0385		0.0405		0.0622		0.0620		0.0657
		C ₂₂	0.2545	0.1923	0.0489	0.2157	0.0396	0.2157	0.0392	0.2154	0.0416	0.3025	0.0397	0.3025	0.0395	0.3023	0.0423
		C ₂₃		0.3077	0.0783		0.0409		0.0415		0.0434		0.0656		0.0670		0.0705
		C ₂₄		0.1923	0.0489		0.0512		0.0509		0.0532		0.0513		0.0513		0.0540
	B ₃	C ₃₁		0.2348	0.0322		0.0431		0.0494		0.0702		0.0284		0.0327		0.0469
		C ₃₂	0.1370	0.2870	0.0393	0.2149	0.0456	0.2146	0.0491	0.2139	0.0467	0.1623	0.0367	0.1621	0.0397	0.1616	0.0381
		C ₃₃		0.2870	0.0393		0.0595		0.0610		0.0638		0.0479		0.0494		0.0521
		C ₃₄		0.1913	0.0262		0.0460		0.0457		0.0477		0.0247		0.0247		0.0260
	B ₄	C ₄₁		0.2698	0.0331		0.0452		0.0431		0.0471		0.0306		0.0293		0.0323
		C ₄₂	0.1225	0.3651	0.0447	0.1425	0.0637	0.1423	0.0584	0.1425	0.0566	0.0962	0.0583	0.0961	0.0538	0.0963	0.0526
		C ₄₃		0.3651	0.0447		0.0465		0.0574		0.0521		0.0426		0.0529		0.0484
	B ₅	C ₅₁		0.2593	0.0318		0.0659		0.0654		0.0617		0.0429		0.0428		0.0407
		C ₅₂	0.1225	0.4815	0.0590	0.1421	0.0428	0.1420	0.0431	0.1421	0.0447	0.0960	0.0518	0.0959	0.0524	0.0960	0.0547
		C ₅₃		0.2593	0.0318		0.0578		0.0596		0.0620		0.0376		0.0389		0.0409
	B ₆	C ₆₁	0.1091	0.5000	0.0545	0.0705	0.0551	0.710	0.0408	0.0722	0.0427	0.0424	0.0616	0.0427	0.0459	0.0434	0.0483
		C ₆₂		0.5000	0.0545		0.0446		0.0454		0.0052		0.0499		0.0510		0.0058

3.2 空间尺度分析

关中五地市水土资源承载水平除咸阳为Ⅱ级,处于临近超载状态外,其他地市均在Ⅲ级左右,处于基本平衡承载状态。以同一水平年作为分析基准,不同水平年水土资源承载状态从优到劣均依次为宝鸡、西安、铜川、渭南、咸阳。

3.3 应对措施

陕西关中地区属半湿润偏旱区,该区土地资源相对比较丰富,但降水量少且蒸发强烈,除西安和宝鸡外其他地市的水资源均比较贫乏,严重影响水土资源的承载能力。在分析水土资源承载力评价指标值(表 4)和综合评价结果(表 6)的基础上,提出提高

水土资源承载力的相应措施。

由表 4 中水土资源承载力评价指标值可知,该区单方水效益和工业用水重复利用率已接近极限水平无法再进一步提高,但耕地灌溉率和生态环境用水率较低,所以在陕西关中地区可考虑从外区引水、加强供水工程的调蓄能力,同时改善土壤肥力,提高耕地灌溉率;加强生态用水,注重保护生态环境,全面提高水土资源承载能力。由表 6 可知,咸阳水土资源承载力等级与其他地市相比较低为Ⅱ级,铜川现状及规划水平年水土资源承载等级保持不变,但等级变量特征值呈下降趋势,所以要尤其注意这两个地市水土资源承载力的提高。

表 6 关中地区水土资源承载力综合评价结果

Table 6 Soil-water resources carrying capacity comprehensive evaluation results in Guanzhong areas

地市 Cities	年份 Years	最大隶属原则 The maximum membership principle		有效度 α_i Validity	贴近度择近原则 Selection nearness principle based on closeness degree		判定等级 k^* Judge degree
		等级最大隶属度 $\max(B_k)$	等级 k		等级变量特征值 B^*	等级 k	
		The degree maximum membership	Degree		Degree characteristic value	Degree	
西安 Xi'an	2008	0.3007	Ⅳ	0.2302	2.8056	Ⅲ	Ⅲ
	2015	0.3134	Ⅳ	0.2321	2.9962	Ⅲ	Ⅲ
	2025	0.3095	Ⅳ	0.2499	2.9925	Ⅲ	Ⅲ
铜川 Tongchuan	2008	0.3079	Ⅱ	0.2887	2.7046	Ⅲ	Ⅲ
	2015	0.2529	Ⅲ	0.1443	2.6797	Ⅲ	Ⅲ
	2025	0.2485	Ⅲ	0.1289	2.6040	Ⅲ	Ⅲ
宝鸡 Baoji	2008	0.3517	Ⅲ	0.2888	2.9846	Ⅲ	Ⅲ
	2015	0.3589	Ⅲ	0.3888	2.9978	Ⅲ	Ⅲ
	2025	0.3095	Ⅲ	0.2473	3.0665	Ⅲ	Ⅲ
咸阳 Xianyang	2008	0.3015	Ⅱ	0.2153	2.4363	Ⅱ	Ⅱ
	2015	0.3378	Ⅱ	0.2771	2.4691	Ⅱ	Ⅱ
	2025	0.3465	Ⅱ	0.3618	2.4824	Ⅱ	Ⅱ
渭南 Weinan	2008	0.3927	Ⅱ	0.4318	2.4546	Ⅱ	Ⅱ
	2015	0.3910	Ⅱ	0.4184	2.5027	Ⅲ	Ⅲ
	2025	0.3832	Ⅲ	0.3814	2.5291	Ⅲ	Ⅲ

4 结论与讨论

1) 关中地区咸阳水土资源承载水平为Ⅱ级,即处于临近超载状态,西安、铜川、宝鸡、渭南均处于基本平衡状态,承载水平在Ⅲ级左右。水土资源承载状态从优到劣依次为宝鸡、西安、铜川、渭南、咸阳。规划年份 2015 年和 2025 年宝鸡、咸阳、渭南的水土资源承载状态有所改善;铜川则刚好相反;西安水土资源承载水平在 2015 年有所提高,但在 2025 年又略微下降。

2) 水土资源承载力研究结果表明:应用构建的指标体系进行水土资源承载力综合评价,评价结果合理客观,能真实反应研究区域的承载状况。基于模糊集决策理论的主观权重在熵权使统计数据本身的效用值得到全面反映的基础上考虑了专家主观经验在综合评价中的作用,使指标权重分配更为合理。有效度指标判断最大隶属原则的有效性,应用改进模糊综合评价模型进行水土资源承载力研究使传统模糊综合评价结果得到改善,评价结果合理可靠,符合客观实际。

参 考 文 献:

[1] 栗晓玲,陈新明,蔡明科,等:关中地区水资源开发利用及解决

[14] 陈耀辉,孙春燕:模糊综合评判方法中的最大隶属原则有效度

缺水对策[J]. 西北水资源与水工程,1997,8(2):1—7.

[2] 耿艳辉,闵庆文:西北地区水土资源优化配置问题探讨[J]. 水土保持研究,2004,11(3):100—102.

[3] 陈兴鹏,戴 芹:系统动力学在甘肃省河西地区水土资源承载力研究中的应用[J]. 干旱区研究,2002,25(4):377—382.

[4] 拓学森,陈兴鹏,薛 冰:民勤县水土资源承载力系统动力学仿真模型研究[J]. 干旱区资源与环境,2006,20(6):78—83.

[5] 景林艳:区域水资源承载能力的量化计算和综合评价研究[D]. 安徽:合肥工业大学,2007.

[6] 王友贞,施国庆,王德胜:区域水资源承载力评价指标体系研究[J]. 自然资源学报,2005,20(4):597—604.

[7] Walmsley J. Indicators of sustainable development for catchments management in South Africa Review of indicators from around the world [J]. Water S A, 2001,27(4):539—550.

[8] 惠泱河,蒋晓辉,黄 强,等:水资源承载力评价指标体系研究[J]. 水土保持通报,2000,21(1):30—34.

[9] 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.

[10] 闵庆东,余卫东,张建新:区域水资源承载力的模糊综合评价方法及应用[J]. 水土保持研究,2004,11(3):14—17.

[11] 宋松柏,蔡焕杰:区域水资源可持续利用指标体系及评价方法研究[M]. 杨凌:西北农林科技大学出版社,2005.

[12] 孟宪萌,胡和平:基于熵权的集对分析模型在水质综合评价中的应用[J]. 水利学报,2009,40(3):257—262.

[13] 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的引用[J]. 大连理工大学学报,2006,46(1):98—102.

- [J]. 重庆师范学院学报(自然科学版), 2001, 18(1): 45—47.
- [15] 张晓平. 基于贴近度的模糊综合评判结果的集化[J]. 山东大学学报(理学版), 2004, 39(2): 25—29.
- [16] 孙廷容, 黄 强, 张洪波, 等. 基于粗集权重的改进可拓评价方法在灌区干旱评价中的应用[J]. 农业工程学报, 2006, 22(4): 70—74.

Soil-water resources carrying capacity index system and comprehensive evaluation in Guanzhong area

NAN Cai-yan¹, SU Xiao-ling^{1*}, TONG Ling², LI Lin-kai¹,
SHI Yin-jun¹, XU Wan-lin¹, YANG Xue-fei¹

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;
2. Center for Agricultural Water Research in China, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Most of current researches of soil-water resources carrying capacity (SWRCC) focus on single factor of either water resources or land resources and have been limited by their one-sidedness and singleness. This paper establishes a composite SWRCC index system which is composed of six sub-systems of water resources, land resources, technological efficacy, social, economic and ecological environment that contain 20 evaluation factors. The improved fuzzy comprehensive evaluation model is used for the evaluation of SWRCC in the study area. The subjective factor weights based on fuzzy set decision theory are given to modify the entropy weights of evaluation factors in the model to allocate the weights more reliably. The validity indexes are introduced to judge the effectiveness of assessment results obtained from original fuzzy comprehensive evaluation and failed samples are reevaluated using the selection nearness principle based on closeness degree to improve the credibility of comprehensive evaluation results. The results of research demonstrate that Xianyang has a SWRCC level of II close to being overload and other cities of Guanzhong area have the SWRCC level of III indicating a basic balance. The SWRCC in the cities of Guanzhong area ranking from excellent to poor are Baoji, followed by Xi'an, Tongchuan, Weinan, Xianyang. The SWRCC of Baoji, Xianyang, Weinan will be improved in the coming years while Tongchuan has the opposite result. Meanwhile, SWRCC of Xi'an will increase in 2015, but has a slight decrease in 2025. The SWRCC indexes system in this study is feasible and reasonable, and the improved comprehensive evaluation results could truly reflect the situation of regional SWRCC in the study area.

Keywords: water-land resources carrying capacity; index system; improved fuzzy comprehensive evaluation; Guanzhong area