

区域农业水资源可持续利用模糊综合评价

黄初龙, 邓伟, 卢晓宁³ (1. 泉州师范学院资源与环境科学学院, 福建泉州362000; 2. 中国科学院水利部山地灾害与环境研究所, 四川成都610041; 3. 成都信息工程学院, 四川成都610225)

摘要 以东北区为例, 为客观评价区域农业水资源可持续利用(SUAWR)水平, 确定了新的模糊综合评价模式: 构建综合评价指标体系, 应用层次分析法确定指标综合权值, 构造标准化特征函数对各指标实际值进行标准化处理, 改进相对隶属度函数, 以等级中值的相对隶属度为参照标准, 采用加权幂平均原则, 进行SUAWR水平模糊综合评价。评价表明, 海明距离法和欧式距离法、按标准化值直接加权合成法的SUAWR排序结果拟合良好, 综合排序结果符合实际状况。SUAWR水平较差的评价单元分布在水资源贫乏的西部及辽河中下游区, 或社会经济需水量大而水资源相对紧张的中部平原区。相关分析表明, 制约SUAWR区域差异的主要指标有公顷均水资源量、蒸发量与降水量差值、干旱指数、水田比例、单方灌溉水水稻产量、农田供需水平衡率、农业人均农业用水量。

关键词 农业水资源可持续利用; 模糊综合评价; 隶属度函数

中图分类号 F323.213 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2009)05-02174-04

Fuzzy Comprehensive Evaluation on the Sustainable Utilization of Regional Agricultural Water Resources

HUANG Chu-long et al (School of Resources and Environmental Sciences, Quanzhou Normal University, Quanzhou, Fujian 362000)

Abstract Taking Northeast China as an example, a new fuzzy comprehensive evaluation model was confirmed in order to evaluate the sustainable utilization of agricultural water resources (SUAWR) objectively. The comprehensive evaluation index system was constructed. The analytic hierarchy method was used to confirm the integrated weight of indices. The standardized characteristic function was constructed to make the standardization treatments on the actual value of each index. And the relative membership degree function was improved. With the relative membership degree of grade median as reference standards, the fuzzy comprehensive evaluation was made on SUAWR level by using the average principles of weighted power. The evaluation results showed that SUAWR sorting results by using Hamming distance method, Euclidean distance method and weighting synthesis method based on standardized value were fit well. And the integrated sorting results were accordant with the actual situations. The evaluation units with worse SUAWR level were located in the western and middle and lower reaches of Liao River with poor water resources or middle plain area with greater water demand for the social and economic development and short water resources. The correlation analysis showed that the main restricting indices of SUAWR regional difference included water resources quantity per hectare, the difference value between evaporation amount and precipitation amount, drought index, paddy field proportion, rice yield per cubic meter irrigation water, water supply-demand balance ratio of farmland and per capita agricultural water consumption.

Key words Sustainable utilization of agricultural water resources; Fuzzy comprehensive evaluation; Membership degree function

东北地区是我国重要商品粮基地, 但东北三省有效灌溉面积占耕地面积比例仍低于全国平均水平, 是该区作物产量波动的重要原因^[1]。但该区水资源较为紧张, 且水土资源配置不协调。根据水资源公报和统计资料, 2001年东北三省的人均水资源量平均为1 098 m³/人, 接近脆弱区与紧缺区分界值1 000 m³/人; 东北三省水资源开发利用率为45%, 接近紧缺区和贫水区的分界值^[2]。据2001年松辽流域水资源公报, 松辽流域1994~2001年平均用水量中农业用水占70.3%。农业水资源可持续利用(Sustainable Utilization of Agricultural Water Resources, SUAWR)关系到该区水安全和我国粮食安全。以东北三省各地级行政区为评价单元(农垦系统单列), 客观评价各评价单元SUAWR水平, 并进行水平排序, 有利于明确该区水资源利用中存在的主要问题, 为制定合理的水资源规划方案提供依据。

基于指标体系的模糊综合评价法(Fuzzy Comprehensive Evaluation, FCE)是复合系统综合评价的一种重要方法, 也适用于水资源综合评价, 其评价结果的可信与否取决于指标体系的科学性、指标权重分配合理性、评价模型的适用性等多个方面^[3]。目前, 我国关于指标标准化处理特征函数确定、隶属度函数改进等模糊综合评价的关键环节方面的研究很少。笔者从农业水资源复合系统的可持续发展角度出发, 基于指标体系, 应用FCE法, 确定符合评价要求的改进的标准化特

征函数、隶属度函数, 以评价SUAWR水平, 进而分析评价结果与评价指标的相关性, 选出主导指标, 这既有利于分析制约评价区SUAWR水平的主要原因, 也有助于SUAWR水平的预测评价指标的选取, 还可为其他区域水资源可持续利用评价提供借鉴。

1 基于指标体系的模糊综合评价法

1.1 指标体系及其权重 评价事物N的优劣时, 以权系数来衡量各评价指标重要程度, 表示为 $W_i = (w_1, w_2, \dots, w_i)$ 。由于SUAWR水平的影响因素复杂多样, 具有模糊性和不确定性, 宜用AHP^[4]使其复杂的影响因素及其相互关系系统层次化, 使之由不确定变为确定, 由此得到关于目标层的运行层各指标群间、框架层各指标小组间、指标层各评价指标间的相对重要性次序。

1.2 指标实际值标准化处理方法 指标实际值具有不同质特性, 为了使不同指标具有可比性及消除其量纲影响, 增强评价等级间的区分度, 弱化同级别内部各评价单元间的区分度, 避免模糊合成值完全根据指标实际值隶属情况“分等级”合成, 而不能把不同评语等级之间的FCE值拉开距离, 必须先进行各指标实际值的分级标准化处理。标准化处理可采用特征函数法, 即用解析形式描述元素属于集合的程度。

模糊排序评价是为了了解该区内部各评价单元间SUAWR水平的差异, 故以各指标实际值中的最优值作为全区最优值, 其标准化值为1, 而最劣值的标准化值则为0。其他实际值以其反映目标层SUAWR的程度, 在0~1之间取标准化值, 按0.2跨度均分为5级。标准化值越大, 说明越接近可持续程度。标准化处理前, 必须先确定指标类型。根据虚拟水资源国际贸易观点^[5], 从国家水资源战略储备考虑, 以

基金项目 福建省青年科技人才创新基金(2006F3115); 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW19-1-02)。

作者简介 黄初龙(1971-), 男, 福建大田人, 博士, 副教授, 从事水资源与环境生态研究。

收稿日期 2008-11-24

农业可持续发展为出发点,可把所有指标分为两种类型:用水量类指标和不利农业发展类指标,这两类指标为越小越优型指标^[6]。

1.3 可持续评语等级划分 评语等级越多,单项指标区分能力就越高。但等级过多,容易使模糊隶属度分散于各评语等级,影响评价结果的解释。该研究采用对称5级制,即等级集合 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$, 每一个等级对应一个模糊子集,从 v_1 到 v_5 ,可持续水平由强到弱。该评价不采用最大隶属度原则,所以评语等级不一定等距划分。值得注意的是,根据模糊集合定义^[7],可持续是个模糊概念,农业水资源利用的绝对不可持续或绝对可持续是不存在的,完全隶属于及完全不隶属于可持续的隶属度1、0是不适用的,隶属度取值区间应缩小为(0,1),但就比较各评价单元间的“SUAWR 相对度”而言,隶属度取值区间可以是[0,1]。

1.4 确定相对隶属度函数 模糊综合评价的关键在于隶属度函数模型的确定。相对隶属度提出后,在我国各类模糊评价中应用广泛。文献[8]确定了相对隶属度的计算公式。但该公式把最优级别和最差级别内部所有元素的隶属度统一为1和0,不能区别指标值不同的元素对评价目标(如该研究的SUAWR度)的隶属度的差别,从而遗漏了评价信息,并拉大次优级别与次差级别间的指标值隶属度差距,易使评价失真。为解决这一问题,评价者一般从隶属函数入手,如徐良芳构造了10个相对隶属函数,避免了各等级间指标数值相差不大而评价等级相差一级的跳跃现象,实现了各等级之间隶属函数值的平滑过渡,但其计算方法繁琐^[9]。为了兼顾二者优缺点,又不使最优、最差等级指标实际值的隶属度溢出其取值区间[0,1],笔者根据对称5级制的可持续评语等级划分,确定如下改进的相对隶属度函数公式:

$$r_{ij} = \begin{cases} \frac{[x_{ij} - \min(x_{ij})] \times 0.2}{y_{ib} - \min(x_{ij})} & x_{ij} > y_{ib} \\ 0.2 + \frac{(x_{ij} - y_{ib}) \times 0.6}{y_{ia} - y_{ib}} & y_{ia} > x_{ij} > y_{ib} \\ 0.8 + \frac{(x_{ij} - y_{ia}) \times 0.2}{\max(x_{ij}) - y_{ia}} & x_{ij} < y_{ia} \end{cases} \quad (1)$$

式中, y_{ia} 、 y_{ib} 为 x_{ij} 可持续评语等级 v_1 与 v_2 级、 v_4 与 v_5 级间的界限值, $\max(x_{ij})$ 、 $\min(x_{ij})$ 分别为 x_{ij} 系列中最大值和最小值, r_{ij} 为评价单元 j 指标 i 的标准化值 x_{ij} 对模糊概念“SUAWR 相对度”的相对隶属度。

1.5 构造模糊综合评判矩阵 参照文献方法[8],各评语等级的模糊相对隶属度计算公式可修改为:

$$\mu_j = \frac{d_{vj}^{-1}}{\sum_{k=1}^v d_{kj}^{-1}} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i |r_{ij} - s_{iv}|^p}{\sum_{i=1}^n W_i |r_{ij} - s_{iv}|^p} \quad (2)$$

式中, W_i 为指标 I_i 的权重; r_{ij} 见式(1); $s_{iv} = (s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{i5})$ 为广义距离参照标准,即指标标准化值可持续评语等级中值的相对隶属度; d_{vj} 为评价单元 U_j 与级别 v 之间的广义权距离; p 为距离参数, $p=1$ 为海明距离, $p=2$ 为欧式距离; μ_j 表示评价单元 j 对模糊概念“SUAWR 相对度”的某级别 v 的相对隶属度。根据相对隶属度理论,当 $d_{vj} = 0$ 时, $\mu_j = 1$, 评价单元 j 完全属于 v 级。

根据式(2),可得出评价单元集模糊综合评判矩阵

$$U = \begin{pmatrix} U|u_1 & \mu_{11} & \mu_{12} & \dots & \mu_{1v} \\ U|u_2 & \mu_{21} & \mu_{22} & \dots & \mu_{2v} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ U|u_j & \mu_{j1} & \mu_{j2} & \dots & \mu_{jv} \end{pmatrix}_{j \times v} \quad (3)$$

矩阵计算结果必须符合式(4)的约束条件。

$$\sum_{v=1}^v \mu_j = 1 \quad (4)$$

$$\mu_j = 0, \text{ 当 } v < \min(v) \text{ 或 } v > \max(v)$$

1.6 SUAWR 水平分级排序 加权平均算法已被应用在许多方面,如决策、专家系统、神经网络、模糊系统控制和交互神经网络等。采用加权平均原则不仅可避免“取大取小算子”合成值不随单项评价值或权值的变化而变化,及其计算结果的物理含义混乱等缺点,而且有助于各指标反映对所有评语等级的隶属度,不会忽略非“众数组”指标对综合评价的作用,从而符合现状评价的整体性原则。加权平均原则是以模糊合成值的 K 次幂(b_j^k)为权数对评语等级量化值计算数值(μ_j)平均的一种模糊识别原则,根据该平均值与其相邻评语等级之间的距离(Y)判断其所属评语等级^[10]。即:

$$Y = b_j^k \mu_j^2 \quad (5)$$

式中, μ_j 为各评语等级的模糊相对隶属度; b_j^k 为各评价单元的模糊合成权数, $k=2$, b_j 可按式(6)计算

$$B = (b_1, b_2, \dots, b_j) = WOX = \begin{pmatrix} W_1 & W_2 & \dots & W_j \\ r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1j} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{i1} & r_{i2} & \dots & r_{ij} \end{pmatrix}_{i \times j} \quad (6)$$

式中, r_{ij} 见式(1)。

按式(5),以海明距离法、欧式距离法分别计算各评价单元的模糊加权幂平均合成值 Y_h 、 Y_o ,并按 Y_h 、 Y_o 值排序。然后,按式(6),把式中的 r_{ij} 替换为标准化值 x_{ij} ,直接加权合成为 B ,按 B 值排序。最后,验证按 Y_h 、 Y_o 值排序的合理性与可信度。

2 结果与分析

2.1 SUAWR 相对隶属度计算 基于评价区水资源利用概况分析与SUAWR内涵界定构建的指标体系^[6],采用AHP法^[4]分配指标体系各层次权重,并以3个层次的权重乘积作为评价指标的合成权值,指标 $I_1 \sim I_{23}$ 合成权值 W_i ,即 w_1, w_2, \dots, w_{23} 分别为 0.06、0.06、0.04、0.04、0.05、0.02、0.03、0.02、0.02、0.06、0.048、0.012、0.024、0.036、0.032、0.032、0.016、0.096、0.064、0.096、0.048、0.024、0.072。

数据来源、各指标实际值、指标实际值的标准化方法、各指标标准化值(表1)见文献[6]。为了增加指标可比性,所有指标均为相对比率指标。兼顾各指标数据系列特点、界限值对称性、省级平均值、各指标极值特点,确定各指标实际值界限值,使每一级评价单元数大致相同(表2)。

SUAWR 影响因素复杂,不同评价区的农业发展水平不同,其SUAWR目标值也不尽相同,因此,确定统一的SUAWR指标标准值十分困难,而且评价标准不统一,各评价单元评价结果就没有可比性。但是,如果仅评价处于同一水文地理区各评价单元的可持续相对度,对其进行可持续相对度的优

劣排序,采用同一方法,制定统一评价标准是可行的。为保证等级划分的科学性、可比性、可调节性,对有直接参照标准的指标或变量的评价区,考虑到今后节水意识增强和节水投入增加,节水水平和用水效率将提高,本着就高不就低的原则,可采纳相应标准;对未能找到参照标准指标的评价区,可按其实际值可持续贡献度排序,取前、后各2N 5 个实际值(N 为评价单元总数)的平均值,及2 个平均值差的绝对值的1/3 与较小平均值的和、与较大平均值的差的绝对值作为5 个等级间的界限值(表3)。

各指标各评语等级的最大界限值和最小界限值,即各指标标准化值的最大值与最小值,分别为1、0。各等级之间的

界限值可根据指标标准化公式^[6],把表3 中的实际值界限值转化为标准化值(表4)。根据式(1),计算各评价单元 x_{ij} 的相对隶属度 $r_{ij} = (r_{1j}, r_{2j}, \dots, r_{5j})^T$,确定各评语等级中值的相对隶属度(表5),并以其作为广义距离参照标准 $s_{iv} = (s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{i5})$ 。

把 r_{ij} 与 s_{iv} 代入式(2),分别按海明距离和欧式距离计算各评价单元 $U_j(j = 1, 2, \dots, 37)$ 对模糊概念“SUAWR 相对度”的某级别 $V_v(v = 1, 2, \dots, 5)$ 的相对隶属度 μ_j 。进而,检验评价单元集模糊综合评判矩阵U 是否满足式(4)的约束条件。经检验,每一个评价单元对不同评语等级的隶属度之和均为1,说明海明距离和欧式距离算法均符合模糊隶属度的概念。

表1 评价指标标准化值

Table 1 The standardized value of evaluation indices

评价单元 Evaluation units		I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅	I ₆	I ₇	I ₈	I ₉	I ₁₀	I ₁₁	I ₁₂	I ₁₃	I ₁₄	I ₁₅	I ₁₆	I ₁₇	I ₁₈	I ₁₉	I ₂₀	I ₂₁	I ₂₂	I ₂₃
沈阳 Shenyang	U ₁	0.75	0.60	0.89	0.38	0.13	0.59	0.18	0.43	0.08	0.64	0.41	0.33	0.20	0.76	0.11	0.94	0.66	0.42	0.71	0.30	0.33	0.39	0.41
大连 Dalian	U ₂	0.37	0.21	0.25	0.65	0.31	0.50	0.68	0.74	0.74	0.41	0.02	0.09	0.67	0.54	0.47	1.00	0.26	0.68	0.14	0.21	0.13	0.91	0.26

注:因篇幅所限,此处仅给出2 个评价单元的各指标标准化值。

Nte: Only the standardized value of each index in 2 evaluation units were given because of the paper's limits.

表2 评价指标实际值标准化分级界限值及其对应的标准化值

Table 2 The threshold value of the standardization grading of the actual value of evaluation indices and the standardized values

S	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅	I ₆	I ₇	I ₈	I ₉	I ₁₀	I ₁₁	I ₁₂	I ₁₃	I ₁₄	I ₁₅	I ₁₆	I ₁₇	I ₁₈	I ₁₉	I ₂₀	I ₂₁	I ₂₂	I ₂₃
1.0	7 398	9 300	1.8	397	86.84	1.34	0.631	562.11	3.24	80.35	100.00	20 792	96.04	86.40	13.60	37.1	10.31	31.09	1.43	531.5	76.2	100.00	7.11
0.8	5 500	3 300	10.0	800	63.00	2.10	0.400	130.00	1.05	35.00	100.00	700	87.00	25.00	24.00	100.0	15.00	16.00	0.57	140.0	400.0	95.00	1.50
0.6	4 050	2 200	21.0	1 000	43.00	2.40	0.300	58.00	0.65	25.00	96.00	550	81.00	15.00	32.00	200.0	25.00	13.00	0.49	120.0	1 000.0	90.00	0.48
0.4	3 350	1 500	29.0	1 200	36.00	2.70	0.200	28.00	0.45	15.00	76.00	400	79.00	10.00	40.00	400.0	30.00	11.00	0.31	100.0	1 500.0	81.00	0.24
0.2	2 900	1 100	36.0	1 400	23.00	3.10	0.090	5.00	0.25	5.00	66.00	300	75.00	5.00	48.00	800.0	40.00	9.00	0.23	80.0	4 500.0	58.00	0
0	1 001	29.7	72.3	2 117	1.57	4.80	0.004	0.00	0.00	0.06	43.85	157	69.53	0.00	81.30	8 483.9	68.48	5.26	0.00	4.3	23 142.9	22.41	- 6.67

表3 指标实际值可持续评语等级划分标准

Table 3 The division criteria of actual value sustainable remark grade of indices

等级 Grade	I ₁	I ₂ ¹	I ₃	I ₄	I ₅	I ₆	I ₇	I ₈	I ₉	I ₁₀	I ₁₁	I ₁₂	I ₁₃	I ₁₄	I ₁₅ ²	I ₁₆	I ₁₇	I ₁₈	I ₁₉ ²	I ₂₀	I ₂₁	I ₂₂	I ₂₃
v ₁ - v ₂	5 356	8 500	11.3	731	80	1.97	0.385	171	1.45	41.80	99	2 141	87.9	30.6	23	115	16.5	18.3	0.58	211.4	468	95	2.47
v ₂ - v ₃	4 492	4 500	20.4	990	60	2.44	0.281	116	1.05	29.80	88	1 522	83.9	22.2	32	609	26.8	15.1	0.52	164.4	2 238	83	1.65
v ₃ - v ₄	3 629	1 700	29.6	1 248	40	2.92	0.176	62	0.65	17.90	77	903	79.9	13.8	41	1 104	37.1	11.9	0.46	117.4	4 008	70	0.82
v ₄ - v ₅	2 765	500	38.7	1 507	20	3.40	0.072	7	0.24	5.87	65	284	75.9	5.4	50	1 598	47.5	8.7	0.32	70.3	5 778	58	0

注:¹ 参照文献[3];² 参照文献[11];v₁ ~ v₅ 指可持续评语等级,分别为:最强(v₁)、较强(v₂)、一般(v₃)、较弱(v₄)、最弱(v₅)。

Nte: The data with superscript ¹ referred to reference [3]; The data with superscript ² referred to reference [11]. v₁ - v₅ stand for sustainable remark grades, being strongest (v₁), stronger (v₂), common (v₃), weaker (v₄) and weakest (v₅).

表4 可持续评语等级界限值的标准化值

Table 4 The standardized value of the sustainable remark grade threshold value

	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅	I ₆	I ₇	I ₈	I ₉	I ₁₀	I ₁₁	I ₁₂	I ₁₃	I ₁₄	I ₁₅	I ₁₆	I ₁₇	I ₁₈	I ₁₉	I ₂₀	I ₂₁	I ₂₂	I ₂₃
v ₁ - v ₂	0.78	0.97	0.78	0.83	0.94	0.83	0.77	0.82	0.84	0.83	0.75	0.814	0.82	0.82	0.82	0.77	0.77	0.83	0.80	0.84	0.78	0.80	0.83
v ₂ - v ₃	0.66	0.84	0.61	0.61	0.77	0.57	0.56	0.76	0.80	0.70	0.52	0.808	0.70	0.74	0.60	0.30	0.53	0.74	0.68	0.81	0.35	0.44	0.81
v ₃ - v ₄	0.48	0.46	0.38	0.35	0.51	0.29	0.36	0.61	0.60	0.46	0.41	0.802	0.49	0.55	0.38	0.19	0.26	0.49	0.57	0.57	0.23	0.30	0.67
v ₄ - v ₅	0.19	0.09	0.19	0.17	0.17	0.17	0.15	0.22	0.19	0.22	0.19	0.180	0.24	0.22	0.19	0.18	0.15	0.18	0.41	0.17	0.19	0.20	0.20

注:指标I₂₃指最差一级标准值对应0 的指标实际值。

Nte: I₂₃ stands for the actual value of the worst level standardized value 0.

2 SUAWR 水平排序与分级 先按加权2 次幂平均原则,分别求得欧式距离法与海明距离法的模糊加权幂平均合成值 Y_h 、 Y_o ,再采用模糊合成算法求得标准化值的直接加权合成值B,然后,分别按 Y_h 、 Y_o 、B 排序,结果3 种排序曲线拟合良好。因此,为增强SUAWR 水平分级的客观性,采用3 种排序评价评分值的平均值进行SUAWR 水平分级,共分为5 级(图1)。

评价区SUAWR 水平的主要制约因子

采用Microsoft Excel 计算各指标标准化值与3 种排序评

价评分值的平均值的Pearson 相关系数(表6)。

根据 $v = n - 2$ 查相关系数r 显著性界值表。该研究 $v = 35$,查表得知 $r_{0.01(35)}$ 值为0.418, $r_{0.05(35)}$ 值为0.325,则该研究 $r > r_{0.01(35)}$ 的指标有I₂、I₄、I₆、I₁₄、I₁₉、I₂₀、I₂₁,其 $P < 0.01$; $r > r_{0.05(35)}$ 的指标有I₁、I₂、I₄、I₆、I₁₄、I₁₉、I₂₀、I₂₁,其 $P < 0.05$ (表6)。这些指标与SUAWR 水平排序有显著相关关系,是关于各评价单元的SUAWR 水平差异的主导指标,系该评价区SUAWR 水平的主要制约因子。

表5 可持续评语等级中值的标准化值的相对隶属度

Table 5 The relative membership degree of the standardized value of sustainable remark grades median

	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅	I ₆	I ₇	I ₈	I ₉	I ₁₀	I ₁₁	I ₁₂	I ₁₃	I ₁₄	I ₁₅	I ₁₆	I ₁₇	I ₁₈	I ₁₉	I ₂₀	I ₂₁	I ₂₂	I ₂₃
S ₁₁	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900
S ₁₂	0.739	0.756	0.714	0.700	0.734	0.682	0.698	0.770	0.782	0.736	0.677	0.797	0.738	0.760	0.695	0.561	0.684	0.758	0.708	0.787	0.581	0.620	0.790
S ₁₃	0.586	0.582	0.510	0.482	0.566	0.436	0.500	0.665	0.671	0.554	0.495	0.791	0.567	0.625	0.486	0.266	0.437	0.602	0.531	0.666	0.302	0.370	0.714
S ₁₄	0.347	0.326	0.297	0.282	0.332	0.255	0.302	0.395	0.389	0.318	0.318	0.494	0.329	0.365	0.290	0.205	0.253	0.343	0.323	0.379	0.220	0.250	0.424
S ₁₅	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100

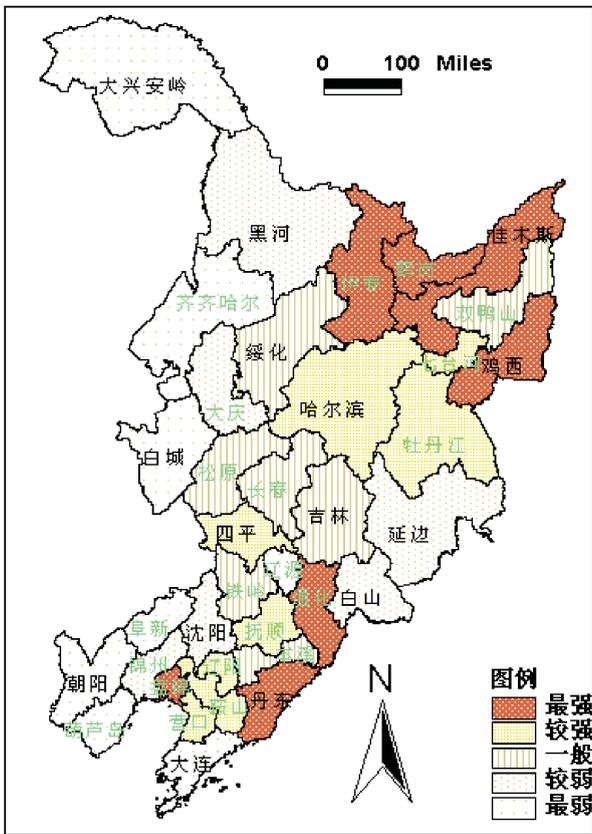
注: S₁₁、S₁₂、S₁₃、S₁₄、S₁₅ 分别指各等级中值的相对隶属度。

Nte: S₁₁, S₁₂, S₁₃, S₁₄ and S₁₅ stand for the relative membership degree of each grade median.

4 结论

指标实际值的分级标准化处理较好地消除了量纲影响,避免了实际值标准化后的标准化值差距弱化。同时,标准化值的直接加权合成值排序也便于验证相对隶属度的模糊合成值排序的可信度。相对隶属度的加权幂平均合成值 Y_h 和 Y_o 的排序曲线高度拟合,与标准化值的加权合成值排序也拟合良好,说明各种算法的评价模型可相互印证,具有较好的可操作性、通用性,也说明改进的相对隶属函数是合理可信的。

(1) SUAWR 水平分类表明(图1),SUAWR 水平较差的地区分布在经济落后、水资源贫乏的东北三省西部区和人口密度大、社会经济发达、需水量大而水资源量供给紧张的地区;社会经济需水量大而水资源紧张的中部平原区SUAWR 水平一般;水资源丰富、生态环境较好、人口压力较小的地区SUAWR 水平较强。从松辽流域2个二级区看,松花江流域与辽河流域的SUAWR 水平均表现从东北向西南减弱的趋势。



注:该图采用 ArcView8.3 绘制。农垦系统的农场分散于其他评价单元,未能在图中显示。

Nte: The map was drawn by using ArcView8.3. The farms of land reclamation system dispersed in other evaluation units were not indicated in the map.

图1 东北区各评价单元SUAWR 水平等级

Fig.1 SUAWR level grade of each evaluation unit in Northeast China

(2) 虽然制约各评价单元SUAWR 水平的影响因素复杂,但指标标准值与排序结果的相关分析表明,SUAWR 水平的主要制约因子为 I₂、I₄、I₆、I₁₄、I₁₉、I₂₀、I₂₁。该区SUAWR 主要取决于水资源丰富度,水资源利用效率、经济发展水平、水资源

表6 指标标准化值与3种评价评分值的平均值间的相关系数

Table 6 The correlation coefficients among the standardization value of indices and the mean of 3 evaluation scoring value

指标Index	r	指标Index	r	指标Index	r
I ₁	0.339	I ₉	0.097	I ₁₇	0.315
I ₂	0.773	I ₁₀	0.071	I ₁₈	0.158
I ₃	0.192	I ₁₁	0.273	I ₁₉	0.487
I ₄	0.495	I ₁₂	0.240	I ₂₀	0.650
I ₅	0.117	I ₁₃	0.201	I ₂₁	0.527
I ₆	0.519	I ₁₄	0.755	I ₂₂	0.004
I ₇	0.321	I ₁₅	0.079	I ₂₃	0.242
I ₈	0.109	I ₁₆	0.168		

供需状况也起重要作用。丹东、盘锦、通化、伊春市等水资源丰富、人口密度较小的边境地区SUAWR 水平最强,大连、阜新、朝阳、葫芦岛、辽源、白城市等水资源贫乏地区SUAWR 水平相对较弱。沈阳市、大庆市、锦州市、吉林省等工农业用水量、人口密度较大而水资源相对缺少的地区SUAWR 水平一般。可见,各评价单元的SUAWR 水平与其各自的水资源、社会、经济状况一致,评价结果较理想。今后,应着重依据SUAWR 水平主要制约因子进行预测评价,制定水资源配置方案和相关政策,以提高SUAWR 水平。

(3) 从指标体系各指标合成权重看,在权重值 W 0.048 的10个指标中, r > r_{0.01(35)} 的指标有 I₂、I₁₉、I₂₀、I₂₁; r > r_{0.05(35)} 的指标有 I₁、I₂、I₁₉、I₂₀、I₂₁。这说明权重与指标内涵对排序结果均有影响,未出现权重决定排序结果的现象,这再次说明该研究赋权合理,评价结果可信。研究中未出现 r = 0 的不相关指标,说明指标体系合理。

总之,评价结果较为理想,说明指标体系设计和指标标准化特征函数确定较合理,改进的相对隶属度函数可行,整个评价模式可操作性强,可为其他区域农业水资源评价提供一定借鉴。

参考文献

- [1] 刘兴土,邓伟,何岩,等.东北区域农业综合发展研究[M].北京:科学出版社,2002.
- [2] STEVENT H.Effect of pice struture on residential water demand[J].Water Resources Bulletin,1992,28(4):681-685.
- [3] 沈珍瑶,杨志峰.黄河流域水资源可再生性评价指标体系与评价方法[J].自然资源学报,2002,17(2):188-197.
- [4] SAATY T L, VARGAS L G. Estimating technological coefficients by the analytic hierarchy process[J].Socio Economic Planning Sciences,1979,13(6):333-336.
- [5] HOEKSTRA A Y, HUNG P Q. Globalisation of water resources: international virtual water flows in relation to crop trade[J].Gobal Environmental Change Pat A,2005,15(1):45-56.
- [6] 黄初龙,邓伟.农业水资源可持续利用评价指标体系构建与应用[M].北京:化学工业出版社,2008.
- [7] 高新波.模糊聚类分析及其应用[M].西安:西安电子科技大学出版社,2004.

表9 灌溉用水污染指数及分级结果

Table 9 The pollution index and classification results of irrigation water

采样地点 Sampling sites	P _{pH}	P _汞	P _镉	P _铅	P _砷	P _铬	P _内	分级 Grade
田丰 Tiarfeng	0.25	0.54	0.70	0.027	0.07	0.03	0.53	尚清洁
程家庄 Chengjiazhuang	0.67	0.63	0.01	0.060	0.08	0.05	0.51	尚清洁
武家堡 Wujiabao	0.46	0.14	0.72	0.080	0.26	0.03	0.55	尚清洁
南汪 Nanwang	0.42	0.25	0.04	0.003	0.10	0.02	0.31	清洁
北汪 Beiwang	0.44	0.25	0.04	0.003	0.10	0.02	0.33	清洁

表10 土壤中各项污染物的浓度限值

Table 10 The concentration limit of each pollutant in soil ng/kg

评价参数 Evaluation parameters	汞 Hg	镉 Cd	铅 Pb	砷 As	铬 Cr
pH值 < 6.5 pH value < 6.5	0.25	0.30	50	25	120
pH值 6.5 ~ 7.5 pH value of 6.5 - 7.5	0.30	0.30	50	20	120
pH值 > 7.5 pH value > 7.5	0.35	0.40	50	20	120

表11 土壤中各项污染物的分级标准

Table 11 The classification criteria of each pollutant in soil

等级 Grade	P _内 ng/kg	污染等级 Pollution grade	污染水平 Pollution level
1	0.7	安全	清洁
2	0.7 ~ 1.0	警戒级	尚清洁
3	1.0 ~ 2.0	轻污染	基质、作物开始受污染
4	2.0 ~ 3.0	中污染	基质、作物受到中度污染
5	> 3.0	重污染	基质、作物受污染已相当严重

表12 土壤污染指数及分级结果

Table 12 The soil pollution index and classification results

采样地点 Sampling sites	P _汞	P _镉	P _铅	P _砷	P _铬	P _内	分级 Grade
田丰 Tiarfeng	0.06	0.34	0.67	0.14	0.64	0.54	安全
桃园堡 Taoyuanbao	0.05	0.11	1.02	0.13	0.75	0.81	警戒级
新村 Xincun	0.06	0.22	0.70	0.16	0.93	0.72	警戒级
里修 Lixiu	0.07	0.49	0.73	0.14	0.69	0.60	安全
程家庄 Chengjiazhuang	0.34	0.22	0.49	0.21	0.42	0.42	安全
武家堡 Wjiiazhuang	0.11	0.08	0.72	0.49	0.81	0.65	安全
南六门 Naliunen	0.05	0.24	0.60	0.24	0.89	0.69	安全
西咸阳 Xixiayang	0.32	0.25	0.76	0.71	0.88	0.75	警戒级
南张 Nanzhang	0.31	0.19	0.74	0.53	0.71	0.63	安全
吴家庄 Wjiiazhuang	0.25	0.14	0.46	0.72	0.86	0.69	安全
南汪 Nanwang	0.33	0.20	0.49	0.77	0.69	0.65	安全
北汪 Beiwang	0.37	0.16	0.60	0.50	0.62	0.54	安全
均值 Mean	0.19	0.22	0.67	0.40	0.74	0.61	安全

(上接第2177页)

- [8] 陈守煜, 于雪峰. 相对隶属度理论及其在地下水水质评价中应用[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2003, 22(5): 691 - 694.
- [9] 徐良芳. 区域水资源可持续利用评价指标体系及其评价方法研究——

视; 其他各采样点的综合污染指数均小于0.70, 为安全级, 太谷县各采样点土壤重金属的综合污染指数顺序为: 桃园堡 > 西咸阳 > 新村 > 南六门、吴家庄 > 武家堡、南汪 > 南张、里修 > 田丰、北汪 > 程家庄。

3.4 产地环境综合评价 太谷县蔬菜生产基地大气的各项监测指标均未超过评价标准, 综合污染指数属尚清洁, 符合A级绿色食品产地的大气要求; 产地的灌溉用水各项监测指标均未超过评价标准, 综合污染指数均在清洁与尚清洁级, 符合A级绿色食品产地的水质要求; 产地土壤的各点监测指标中, 除桃园堡土壤中铅超标外, 其他各地的重金属元素的单项污染指数均小于1.00, 未超标。从综合污染指数来看, 桃园堡、新村、西咸阳各点的综合污染指数大于0.70, 污染等级为警戒级, 污染水平为尚清洁, 值得引起重视; 其他各采样点的综合污染指数均小于0.70, 为安全级, 故符合A级绿色食品产地的土壤要求。因此, 太谷县蔬菜产地的大气、灌溉水、土壤所监测的各项指标均符合中华人民共和国农业行业标准《绿色食品产地环境技术条件》(NY/T391-2000)中确定的各项污染物浓度限值。太谷县蔬菜产地自然环境良好, 符合A级绿色食品对基地环境质量的要求, 具备开发绿色蔬菜的优越条件。

4 综合防治对策与建议

生产过程中如果严格按照绿色食品的操作规程进行, 可以发展A级绿色食品。

(1) 牢固树立环保意识, 科学规划、合理布局工农业发展, 严格控制污染企业和其他污染源, 珍惜和保护现有无公害产地环境。严格控制工业“三废”的排放, 禁止工业废水的农用。

(2) 大力推广无公害蔬菜生长技术, 逐步实现标准化无公害生产, 农家肥应做到无害化处理后使用, 尽量减少病菌污染土壤和农产品, 科学施肥, 综合防治病虫害, 提高农产品质量, 同时控制投入品对农业环境的污染。严禁使用剧毒、高毒、高残留或具有“三致”毒性效应的农药。减少化学肥料施用量, 多施农家有机肥, 实施平衡施肥, 提高土壤肥力, 走可持续发展的生态农业道路。

(3) 充分利用区位、技术和基础优势, 科学布局, 推行规模化生产, 加快推进产业化经营, 带动区域共同发展。

参考文献

- [1] 欧阳喜辉. 绿色食品生产基地环境质量监测与评价探讨[J]. 农业环境保护, 1999, 18(6): 281 - 282, 286.
- [2] 中国绿色食品发展中心. 绿色食品产地环境质量现状评价技术导则[Z]. 2001.
- 以陕西关中地区为例[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2002.
- [10] 苏为华. 模糊分类综合评价中的识别原则问题研究[J]. 商业经济与管理, 2001(7): 39 - 42.
- [11] 陈莹, 赵勇, 刘昌明. 节水型社会评价研究[J]. 资源科学, 2004, 26(6): 83 - 88.