

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2013.05.012

基于集对分析和可变模糊集的区域抗旱能力评价模型

李瑞杰,李德竹,梅润雨,金海洋

(合肥工业大学土木与水利工程学院,安徽 合肥 230009)

摘要:建立区域抗旱能力评价指标体系和评价标准,用基于加速遗传算法的模糊层次分析法筛选指标、确定各指标和子系统的权重,将集对分析(SPA)与可变模糊集(VFS)的相对隶属度函数结合构建了基于集对分析-可变模糊集耦合评价法的区域抗旱能力评价(SPA-VFS)模型,并将 SPA-VFS 模型应用于合肥市抗旱能力评价。结果表明,合肥市抗旱能力的评价等级为 3 级,抗旱能力一般;SPA-VFS 与属性数学的置信度准则评判方法具有一致性和互补性,两者联合应用可保障评价结果的可靠性。指出应进一步提高合肥市的抗旱组织管理水平,推广节水技术,控制人口增长,增强市民抗旱意识,以进一步提高合肥市抗旱能力。

关键词:抗旱能力评价;评价指标体系;集对分析;联系数;可变模糊集

中图分类号:TV213.4 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2013)05-0059-06

Regional drought-resistant ability assessment model based on set pair analysis and variable fuzzy set

LI Ruijie, LI Dezhu, MEI Runyu, JIN Haiyang

(School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: An index system for assessing the regional drought-resistant ability was established. The accelerating genetic algorithm-based fuzzy analytic hierarchy process was used to select the index system and to determine the weights of both indices and sub-systems of the drought-resistant ability assessment system. Through combination of the set pair analysis (SPA) and the relative-membership function of the variable fuzzy set (VFS), the SPA-VFS model for regional drought-resistant ability assessment was established. This model was applied to assessment of the drought-resistant ability of Hefei City. The results show that the assessment levels can be classified as three levels, and the city's drought-resistant ability was at the middle level. The SPA-VFS model was consistent with the method of confidence criterion of attribute mathematics, and the two can complement each other; their combination can ensure the reliability of the assessment result. The drought-resistant ability of Hefei City should be improved in the following aspects: the drought-resistant arrangement level should be further heightened, the water-saving technology should be promoted, the population growth should be controlled, and public drought-resistant awareness should be raised.

Key words: drought-resistant ability assessment; assessment index system; set pair analysis; connection number; variable fuzzy set

干旱是指水分的收支或供求不平衡而造成的水分亏缺现象^[1],当干旱积聚到一定程度从而给人类的生产生活以及生态环境带来影响时则形成旱灾。干旱的发生频率高、分布广、面积大、持续时间长,往

往会给工农业生产带来巨大损失。抗旱能力是指在研究区域内防御、减轻、抵抗或承受干旱灾害风险的各种人类活动的 ability^[2]。抗旱能力评价就是在研究地区特定的自然、技术、经济社会发展条件下,根

据地区旱灾成因分析和脆弱性分析,建立相应的评价指标体系及其等级标准,采用区域不同时期评价指标样本值和评价模型,对各地区抗旱能力在总体上的差异性进行等级评定,可为区域旱灾风险管理、抗旱决策、抗旱应急方案制定等提供支撑和重要依据。目前,对抗旱能力的研究主要侧重于农业抗旱能力社会属性的定性评价研究,较少考虑其自然属性及其与社会属性的相互作用,同时缺乏抗旱能力的定量计算及城市抗旱能力、区域综合抗旱能力的定量研究。为此,笔者在理论分析、频度统计、专家咨询和调研基础上初步建立了区域抗旱能力评价指标体系,用基于加速遗传算法的模糊层次分析法 (accelerating genetic algorithm based fuzzy analytic hierarchy process, AGA-FAHP) [3] 筛选指标、确定区域抗旱能力评价系统中各指标、各子系统的权重,提出用集对分析 (set pair analysis, SPA) 方法 [4-6] 构造各评价样本与评价标准等级之间联系数 [4, 7-8] 分量的方法,进而计算出样本隶属于模糊集 [9] “评价标准等级”的相对隶属度,定量表达出区域抗旱能力的评价结果,建立基于集对分析-可变模糊集耦合评价法的区域抗旱能力评价 (set pair analysis based variable fuzzy set assessment, SPA-VFS) 模型,并在合肥市开展抗旱能力评价的实证研究。

1 SPA-VFS 模型的建立

建立 SPA-VFS 模型的过程包括如下 8 个步骤。

a. 采用系统性、导向性和实用性原则,将区域抗旱能力评价系统分为区域背景特征条件、水利工程条件、社会经济发展水平、科技生产水平和抗旱组织管理水平 5 个子系统。根据干旱的成因和抗旱能力影响因素的综合分析,将区域抗旱能力评价系统各子系统细分为若干评价指标,建立区域抗旱能力评价指标体系 $\{x_l \mid l=1, 2, \dots, m\}$ 。

b. 根据所建立的初步评价指标体系,邀请专家填写咨询表格中各要素 (子系统或指标) 的重要性排序值。“1”为同一表格中相对最重要的要素所对应的排序值,“2”为同一表格中相对第 2 重要的要素所对应的排序值,依此类推;同等重要的要素的排序值取其平均值,依此类推 [10]。

设 $Z_{j,k,i}$ 为专家 i 对子系统 j 指标 k 的重要性排序值, $i=1, 2, \dots, n_i$ 。其中 n_i 为专家的数目。则子系统 j 指标 k 的重要性排序值的均值和标准差分别为

$$\bar{Z}_{j,k} = \sum_{i=1}^{n_i} Z_{j,k,i} / n_i \quad (1)$$

$$S_{j,k} = \left[\sum_{i=1}^{n_i} (Z_{j,k,i} - \bar{Z}_{j,k})^2 / (n_i - 1) \right]^{0.5} \quad (2)$$

取重要性排序值的均值和标准差相对较小的指标,组成最终的抗旱能力综合评价指标体系。为了进一步量化各指标的相对重要性,下面应用基于加速遗传算法的模糊层次分析法 [11] 筛选评价指标体系。显然,重要性排序值越小则该指标的重要性越高,据此建立系统 j 的模糊互补判断矩阵为

$$P_j = (p_{j,k,l}) \quad (k, l = 1, 2, \dots, n_j) \quad (3)$$

其中

$$p_{j,k,l} = \bar{Z}_{j,l} / (\bar{Z}_{j,k} + \bar{Z}_{j,l})$$

式中: $p_{j,k,l}$ 为系统 j 中指标 k 优于指标 l 的程度; n_j 为系统 j 的指标数。具体规定为: $0 \leq p_{j,k,l} \leq 1$, $p_{j,k,l} + p_{j,l,k} = 1$; 当 $p_{j,k,l} > 0.5$ 时表示指标 k 比指标 l 重要,且 $p_{j,k,l}$ 越大表示指标 k 比指标 l 越重要;反之亦然。若 P_j 不具有满意的一致性,则需要修正。设 P_j 的修正判断矩阵为 $Q_j = (q_{j,k,l})$, Q_j 的各指标的权重记为 $\{w_{j,k} \mid j=1, 2, \dots, u; k=1, 2, \dots, n_j\}$, 则称使式 (4) 最小的 Q_j 为 P_j 的最优模糊一致性判断矩阵 [11]:

$$\begin{aligned} \min C_{IC}(n_j) = & \sum_{k=1}^{n_j} \sum_{l=1}^{n_j} |q_{j,k,l} - p_{j,k,l}| / n_j^2 + \\ & \sum_{k=1}^{n_j} \sum_{l=1}^{n_j} |0.5(n_j - 1)(w_{j,k} - w_{j,l}) + \\ & 0.5 - q_{j,k,l}| / n_j^2 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{s. t.} \quad 1 - q_{j,k,l} = q_{j,l,k} \in [p_{j,k,l} - d, p_{j,k,l} + d] \cap [0, 1] \\ (k = 1, 2, \dots, n_j - 1; l = k + 1, k + 2, \dots, n_j)$$

其中

$$q_{j,k,k} = 0.5 \quad (k = 1, 2, \dots, n_j)$$

$$w_{j,k} > 0 \quad (k = 1, 2, \dots, n_j)$$

$$\sum_{k=1}^{n_j} w_{j,k} = 1$$

式中: $C_{IC}(n_j)$ 称为一致性指标系数 (consistency index coefficient); d 为非负参数,根据笔者的经验可从 $[0, 0.5]$ 内选取;其余符号同前。

式 (4) 中权重 $w_{j,k}$ ($k=1, 2, \dots, n_j$) 和修正判断矩阵 $Q_j = (q_{j,k,l})$ 的上三角元素为优化变量,对子系统 j 的 n_j 阶模糊互补判断矩阵 P_j 共有 $n_j(n_j+1)/2$ 个独立的优化变量。模拟生物优胜劣汰规则与群体内部染色体信息交换机制的加速遗传算法是一种通用的全局优化方法,用它来求解式 (4) 所示的问题较为简便和有效。当 $C_{IC}(n_j)$ 小于某一临界值时,可认为 P_j 具有满意的一致性,据此计算的各要素的排序权重 $w_{j,k}$ 是可以接受的;否则就需要提高参数 d 或修改原判断矩阵 P_j ,直到具有满意的一致性为止。选取同一子系统中评价指标的权重相对较大的 N_j 个指标,重新进行排序,组成最终的抗旱能力评价指标体系 $\{x'_l \mid l=1, 2, \dots, M\}$ [12]。

c. 由筛选出的指标组成区域抗旱能力评价指

标体系,根据这些指标的物理含义及其对抗旱能力的影响和作用,建立抗旱能力评价等级标准 $\{s_g \mid g=1,2,\dots,G\}$ 。对于正向指标和负向指标的等级范围的界定应区分开来。正向指标值越大则抗旱能力越强;负向指标值越大则抗旱能力越弱。

d. 对于评价样本,计算其各评价指标 $x'_l (l=1,2,\dots,M)$ 与评价等级标准 s_g 间的联系数 $\mu'_{A_l \sim B_g}$ 。将样本抗旱能力指标 x'_l 看成一个集合 A_l ,把该指标的某评价等级 s_g 看成另一个集合 B_g ,则 A_l 与 B_g 可构成一个集对 $H(A_l, B_g)$,采用文献[12-13]的公式计算集对 $H(A_l, B_g)$ 的联系数 $\mu'_{A_l \sim B_g}$ 。

e. 对步骤(b)得到的专家咨询表进行算术平均值计算和归一化处理,记为 γ_k 。记 a_{kl} 为指标(或子系统) k 比指标 l (或子系统)的重要性排序值之比,由 $a_{kl}=\gamma_k/\gamma_l$ 建立每子系统内的指标之间及子系统之间的判断矩阵群;然后由式(5)计算各评价指标在其所处子系统内的权重以及各子系统在抗旱能力评价体系中的权重:

$$w_k = \sqrt{\prod_{l=1}^{N_j} a_{kl}} \quad (5)$$

式中: N_j 为子系统 j 中的评价因子数。

由式(6)进行权重归一化:

$$w'_k = \frac{w_k}{\sum w_k}; \quad (6)$$

记归一化的子系统权重和抗旱指标在子系统内的权重分别为 w_j 和 $w_{j,k}$,然后由式(7)可得单指标权重 w_l :

$$w_l = w_j w_{j,k} \quad (7)$$

f. 计算样本与评价标准等级 g 之间的综合联系数 $\bar{\mu}_g$:

$$\bar{\mu}_g = \sum_{l=1}^M w_l \mu'_{A_l \sim B_g} \quad (g=1,2,\dots,G) \quad (8)$$

g. 计算样本隶属于模糊集“评价等级 g ”的隶属度 v_g 。显然,若综合联系数 $\bar{\mu}_g$ 越接近于-1,样本越倾向于不隶属于该评价等级 g ;若样本与评价等级 g 间的同一性越大,则 $\bar{\mu}_g$ 越接近于1,样本越倾向于隶属于评价等级 g 。可见综合联系数就是模糊集“评价等级 g ”的一种相对差异度,样本隶属于模糊集“评价等级 g ”的隶属度可写为

$$v_g = 0.5 + 0.5\bar{\mu}_g \quad (g=1,2,\dots,G) \quad (9)$$

式(9)直接利用待评样本与评价等级 g 就它们的数值接近性这一属性作同、异、反的定量分析,从而构造出可变模糊集的相对隶属度函数。

h. 评判样本的抗旱能力等级 h 。为避免应用最大隶属度原则进行模糊模式识别可能造成的失真^[13],提高等级评判的精度,把级别特征值 h 作为评判样本的抗旱能力等级。

$$h = \sum_{g=1}^G h_g = \sum_{g=1}^G g v'_g \quad (10)$$

其中 $v'_g = v_g / \sum_{g=1}^G v_g \quad (g=1,2,\dots,G)$

式中: v'_g 为归一化相对隶属度; h_g 为各级别的特征值。

为进一步提高抗旱等级评价结果的可靠性,也可采用置信度准则^[14]评判样本的抗旱能力等级。

$$h = \min \left\{ g' \mid \sum_{g=1}^{g'} v'_g > \lambda, 1 \leq g' \leq G \right\} \quad (11)$$

式中: λ 为置信度,一般在 $[0.50, 0.70]$ 内取值, λ 越大则评价结果越趋向于保守、稳妥^[14]。

2 实例分析

以合肥市为例,根据指标选择的系统性、独立性、可比性、客观性和实用性原则,考虑到合肥市的具体情况和资料收集的可行性,在参考其他国内外有关抗旱能力评价指标体系案例的基础上,根据SPA-VFS模型建立步骤a,初步确立的合肥市抗旱能力评价指标体系(表1)。

对初步建立的抗旱能力评价的指标体系中的5个子系统及其指标集,进行专家咨询,建立模糊互补判断矩阵,得初步指标体系中各要素重要性排序均值 $\bar{Z}$ 、标准差 S 及各要素权重 w 。下面以“区域背景子系统”为例进行分析,结果见表2。

由表2可知:在区域背景子系统中, x_6 “植被覆盖率”、 x_7 “种植结构”和 x_8 “产业结构”3个指标权重较小,且重要性排序较靠后,说明这两个指标相对不重要,可以删除。 x_3 “耕地面积占区域面积比例”这一指标与抗旱能力直接相关性不大,也可筛去。 x_1 “降水”与 x_2 “相对湿润度指数”都是反映气象方面的指标,且 x_2 “相对湿润度指数”的计算中涉及 x_1 “降水”的信息,能更加客观真实地反应干旱的发生程度,故 x_1 “降水”这一指标有些赘余,可以删除。那么其余的4个指标组成区域背景子系统,其中 x_2 “相对湿润度指数”和 x_4 “水资源量”重要性排序靠前,权重较大,相对更为重要,说明抗旱能力的区域背景中“相对湿润度指数”和“水资源量”2个指标比较重要。这8个指标的重要性排序值的标准差相对较大,说明各专家在区域背景子系统各指标的重要性判定上意见相对分散,反映出区域背景对于抗旱能力影响的复杂性,更显出区域背景特征研究的重要性。

依次分析,最终可得合肥市抗旱能力评价指标体系,按筛选后的指标体系对指标序号重新编号,将查找到的相关数据汇总于表3。然后根据SPA-VFS

步骤 c,建立安徽省合肥市抗旱能力评价等级标准,结果见表 3。

表 1 合肥市抗旱能力评估的初步指标体系

区域抗旱能力评价指标体系	C ₁ 区域背景特征子系统	x_1 : 降水 (mm)
		x_2 : 相对湿度指数
		x_3 : 耕地面积占区域面积比例 (%)
		x_4 : 水资源量 (m ³ /人)
		x_5 : 耕地占有水资源量 (m ³ /km ²)
		x_6 : 植被覆盖率 (%)
		x_7 : “种植结构 (%)
		x_8 : 产业结构 (%)
	C ₂ 水利工程子系统	x_9 : 耕地灌溉率 (%)
		x_{10} : 水库调蓄率 (%)
		x_{11} : 旱涝保收率 (%)
		x_{12} : 居民供水量 (m ³ /(人·a))
		x_{13} : 引提调水量 (万 m ³ /km ²)
	C ₃ 经济社会发展水平子系统	x_{14} : 年实际供水量 (万 m ³ /km ²)
		x_{15} : 人均 GDP (万元)
		x_{16} : 水利工程投资 (万元/km ²)
		x_{17} : 城市化率 (%)
	C ₄ 科技生产水平子系统	x_{18} : 人均受教育的年数 (a)
x_{19} : 饮水安全普及率 (%)		
x_{20} : 工业 GDP 耗水量 (m ³ /万元)		
x_{21} : 粮食耗水量 (m ³ /kg)		
x_{22} : 灌溉水利用系数		
x_{23} : 节水灌溉率 (%)		
C ₅ 抗旱组织管理水平子系统	x_{24} : 抗旱工作制度 (包括抗旱预案) 规范程度	
	x_{25} : 旱情监测预警建设水平	
	x_{26} : 抗旱服务组织建设水平	
	x_{27} : 抗旱设备固定资产 (万元/km ²)	
	x_{28} : 抗旱应急备用水源供水能力 (万亩/d)	
	x_{29} : 抗旱服务组织的资金投入 (万元/km ²)	
	x_{30} : 抗旱浇地率 (%)	
	x_{31} : 农业应急浇水能力 (万 m ³ /km ²)	
	x_{32} : 饮用水应急送水能力 (万 m ³ /km ²)	
	x_{33} : 生态需水应急供水能力 (万 m ³ /km ²)	
	x_{34} : 抗旱服务组织人员数目 (人/km ²)	

表 2 区域背景子系统各指标的筛选计算值

区域背景子系统	重要性排序均值	重要性排序标准差	重要性排序离差系数	权重均值	权重标准差	权重离差系数
x_1	2.12	2.12	1.00	0.05	0.02	0.38
x_2	2.96	1.90	0.64	0.04	0.01	0.36
x_3	6.08	2.09	0.34	0.03	0.01	0.33
x_4	3.62	1.84	0.51	0.03	0.01	0.28
x_5	3.81	1.82	0.48	0.03	0.01	0.32
x_6	6.27	1.67	0.27	0.02	0.01	0.36
x_7	5.62	1.62	0.29	0.03	0.01	0.29
x_8	6.15	1.78	0.29	0.02	0.01	0.24

把表 3 数据代入文献[12-13]的公式,计算得各单指标与评价等级标准间的联系数;由步骤 f 可得

归一化后的各子系统在抗旱能力评价体系的权重、各评价指标在各自子系统内的权重以及各单指标权重;再根据式(8)和式(9)得合肥市整个区域和各子系统的综合联系数和相对隶属度;最后根据式(10)和式(11)(置信度取 0.5)评判各子系统和合肥市的抗旱能力等级,其计算结果见表 4 和表 5。

表 4、表 5 说明:①基于式(10)的均分原则方法与基于式(11)的属性数学的置信度准则方法的计算结果具有一致性和互补性,联合应用可提高评价结果的可靠性。②区域背景特征抗旱等级为 1 级(非常弱),应控制人口增长,加大节约用水宣传力度,推广农业节水技术,改善种植结构,从而提高区域背景特征抗旱等级。③水利工程抗旱等级为 4 级(较强),表明合肥市水利工程条件处于良好的状态。④经济社会发展水平抗旱等级为 4 级(较强),表明合肥市良好的经济发展水平为合肥市的抗旱工作提供了保障。⑤科技生产水平抗旱等级为 3 级(一般),应推广农业节水技术提高农业用水效率,逐步改造现有高耗水、低效益的工业项目和设备,提高工业用水的重复利用率,降低单位产品的耗水量。⑥抗旱组织管理水平抗旱等级为 1 级(非常弱),应加强旱情监测能力和应急抗旱能力的建设,做到旱前积极防御,旱中降低损失,旱后快速恢复;建立和完善水资源统一管理的管理体制,合理配置和优化调度水资源,使有限的水资源发挥最大的抗旱减灾效益。⑦合肥市总体抗旱能力等级为 3 级(一般),应进一步提高合肥市的抗旱组织管理水平,推广节水技术,控制人口增长,增强市民抗旱意识,最终提高合肥市抗旱能力。

3 结 论

a. 为定量刻画出区域的抗旱能力,进一步提高区域的抗旱能力水平,在理论分析、频度统计、专家咨询和调研基础上初步建立了区域抗旱能力评价指标体系,用基于加速遗传算法的模糊层次分析法筛选指标、确定区域抗旱能力评价系统中各指标、各子系统的权重,提出了用集对分析方法构造流域水资源安全评价样本符合评价等级标准的可变模糊集^[15]的相对隶属度的新方法,进而建立了基于集对分析-可变模糊集耦合评价法的区域抗旱能力评价(SPA-VFS)模型。

b. SPA-VFS 模型在合肥市的应用结果表明,基于集对分析-可变模糊集耦合评价法与属性数学的置信度准则评判方法具有一致性和互补性,联合应用可提高 SPA-VFS 评价结果的可靠性;合肥市抗旱能力等级处于一般状态,区域背景特征和抗旱组织

表 3 合肥市抗旱能力评价等级标准

等级	相对湿润 度指数	水资源量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1}$)	耕地占有 水资源量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)	种植 结构/%	耕地灌 溉率/%	水库调蓄 率/%	旱涝保收 率/%	人均 GDP/ 万元	水利工程 投资/ ($\text{万元} \cdot \text{km}^{-2}$)	城市化 率/%
1(非常弱)	~ -0.01	$0 \sim 1000$	$0 \sim 3.5$	$0 \sim 50$	$0 \sim 30$	$0 \sim 20$	$0 \sim 60$	$0 \sim 1.3$	$0 \sim 3$	$0 \sim 20$
2(较弱)	$-0.01 \sim 0.10$	$1000 \sim 2000$	$3.5 \sim 6.0$	$50 \sim 65$	$30 \sim 50$	$20 \sim 40$	$60 \sim 70$	$1.3 \sim 2.2$	$3 \sim 5$	$20 \sim 30$
3(一般)	$0.10 \sim 0.25$	$2000 \sim 3000$	$6.0 \sim 9.0$	$65 \sim 80$	$50 \sim 75$	$40 \sim 55$	$70 \sim 80$	$2.2 \sim 3.0$	$5 \sim 8$	$30 \sim 40$
4(较强)	$0.25 \sim 0.35$	$3000 \sim 4000$	$9.0 \sim 12.0$	$80 \sim 95$	$75 \sim 95$	$55 \sim 70$	$80 \sim 95$	$3.0 \sim 3.8$	$8 \sim 10$	$40 \sim 50$
5(非常强)	$0.35 \sim$	$4000 \sim$	$12.0 \sim$	$95 \sim$	$95 \sim$	$70 \sim$	$95 \sim$	$3.8 \sim$	$10 \sim$	$50 \sim$
合肥市	-0.135	423	0.92	59	113	60.68	80	2.76	11.8	43

等级	工业 GDP 耗水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1}$)	粮食 耗水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)	灌溉水 利用 系数	节水 灌溉率/%	地下水、 墒情、蒸发 站数目	抗旱设备 固定资产/ ($\text{万元} \cdot \text{km}^{-2}$)	抗旱应急 备用水源 供水能力/ ($\text{万亩} \cdot \text{d}^{-1}$)	抗旱浇 地率/%	农业应急 浇水能力/ ($\text{万 m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)	饮用水应急 送水能力/ ($\text{万 m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)
1(非常弱)	540 ~	1 ~	$0.0 \sim 0.35$	$0 \sim 20$	$0 \sim 15$	$0 \sim 0.8$	$0 \sim 0.6$	$0 \sim 7$	$0 \sim 3.6$	$0 \sim 0.7$
2(较弱)	400 ~ 540	$0.75 \sim 1$	$0.35 \sim 0.45$	$20 \sim 30$	$15 \sim 30$	$0.8 \sim 1.6$	$0.6 \sim 1.2$	$7 \sim 14$	$3.6 \sim 7.2$	$0.7 \sim 1.5$
3(一般)	270 ~ 400	$0.50 \sim 0.75$	$0.45 \sim 0.55$	$30 \sim 50$	$30 \sim 45$	$1.6 \sim 2.4$	$1.2 \sim 1.8$	$14 \sim 21$	$7.2 \sim 10.8$	$1.5 \sim 2.2$
4(较强)	140 ~ 270	$0.30 \sim 0.50$	$0.55 \sim 0.65$	$50 \sim 60$	$45 \sim 60$	$2.4 \sim 3.2$	$1.8 \sim 2.4$	$21 \sim 28$	$10.8 \sim 14.4$	$2.2 \sim 3.0$
5(非常强)	$0 \sim 140$	$0.0 \sim 0.30$	$0.65 \sim$	$60 \sim$	$60 \sim$	$3.2 \sim$	$2.4 \sim$	$28 \sim$	$14.4 \sim$	$3.0 \sim$
合肥市	121.45	0.55	0.468	21	11	0.08	0.2	0	0	0

注:表中“工业 GDP 耗水量”、“粮食耗水量”为负向指标。

表 4 合肥市各子系统抗旱能力的 SPA-VFS 评价结果

子 系 统	综合联系数					归一相对隶属度					抗旱等级	
	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级	式(10)	式(11)
C_1	0.777	-0.172	-0.777	-1.000	-1.000	0.628	0.293	0.079	0.000	0.000	1.451	1.0
C_2	-1.000	-1.000	0.044	1.000	-0.044	0.000	0.000	0.261	0.500	0.239	3.978	4.0
C_3	-1.000	-0.801	0.030	0.801	-0.030	0.000	0.050	0.258	0.450	0.242	3.886	4.0
C_4	-0.603	0.058	0.169	-0.115	-0.565	0.101	0.268	0.296	0.224	0.110	2.975	3.0
C_5	1.000	-0.646	-1.000	-1.000	-1.000	0.850	0.150	0.000	0.000	0.000	1.150	1.0

表 5 合肥市抗旱能力的 SPA-VFS 评价结果

分类	综合 联系数	相对 隶属度	归一相对 隶属度	各级别 特征值	抗旱等级	
					式(10)	式(11)
1 级	-0.106	0.447	0.264	0.264		
2 级	-0.545	0.227	0.134	0.268		
3 级	-0.355	0.322	0.190	0.571	2.887	3.0
4 级	-0.064	0.468	0.276	1.105		
5 级	-0.539	0.231	0.136	0.680		

管理水平等级处于非常弱的状态。进一步提高合肥市的抗旱组织管理水平,推广节水技术,控制人口增长,增强市民抗旱意识,是提高合肥市抗旱能力的重要措施。

c. SPA-VFS 模型综合利用了评价指标样本值与评价标准等级间各单指标联系度的评价信息,不仅可以对系统做整体性评价,而且对子系统,甚至单指标,进行单独评价与比较,评价结果合理,精度高,可以有针对性地对系统建设提出建议,方法直观简便,可用于已知等级评价标准的各种系统综合评价问题中。

参考文献:

[1] 杨小利,刘庚山,杨兴国,等. 甘肃黄土高原帕尔默旱度模式的修订[J]. 干旱气象,2005,23(2): 8-12. (YANG Xiaoli, LIU Gengshan, YANG Xingguo, et al. The

modification of palmer drought severity model for Gansu Loess Plateau[J]. Arid Meteorology, 2005,23(2): 8-12. (in Chinese))

[2] 王晓红,乔云峰,沈荣开,等. 灌区干旱风险评估模型研究[J]. 水科学进展,2004, 15(1): 77-81. (WANG Xiaohong, QIAO Yunfeng, SHEN Rongkai, et al. Drought risk assessment model for irrigation region[J]. Advances in Water Science, 2004, 15(1): 77-81. (in Chinese))

[3] 金菊良,洪天求,王文圣. 基于熵和 FAHP 的水资源可持续利用模糊综合评价模型[J]. 水力发电学报, 2007,26(4): 22-28. (JIN Juliang, HONG Tianqiu, WANG Wensheng. Entropy and FAHP based fuzzy comprehensive evaluation model of water resources sustaining utilization [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007,26(4): 22-28. (in Chinese))

[4] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州:浙江科技出版社,2000.

[5] 李凡修,辛焰,陈武. 集对分析用于湖泊富营养化评价研究[J]. 重庆环境科学,2000,22(6): 10-11, 16. (LI Fanxiu, XIN Yan, CHEN Wu. Set pair analysis method of water quality eutrophication assessment of lakes [J]. Chongqing Environmental Science, 2000,22(6): 10-11, 16. (in Chinese))

[6] 王文圣,李跃清,金菊良,等. 水文水资源集对分析 [M]. 北京: 科学出版社,2010.

[7] 汪新凡. 投资风险综合评价的联系数学模型[J]. 统计与决策,2006(10):19-20. (WANG Xinfan. Mathematical model of investment risk comprehensive evaluation of contact[J]. Statistics and Decision,2006,(10):19-20. (in Chinese))

[8] 汪新凡. 基于属性数学和联系数学的煤灰结渣特性综合评判模型及应用[J]. 锅炉技术,2006,37(6):47-50. (WANG Xinfan. Model for comprehensive judging characteristics of coal ash slagging based on attribute mathematics and connection mathematics and its application[J]. Boiler Technology, 2006,37(6):47-50. (in Chinese))

[9] 汪培庄. 模糊集合论及其应用[M]. 上海: 上海科学技术出版社,1983.

[10] 安徽省统计局. 安徽省统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2005-2008.

[11] 金菊良,魏一鸣,丁晶. 基于改进层次分析法的模糊综合评价模型[J]. 水利学报,2004(3):65-70. (JIN Juliang, WEI Yiming, DING Jing. Fuzzy comprehensive evaluation model based on improved analytic hierarchy process[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(3): 65-70. (in Chinese))

[12] 金菊良,吴开亚,魏一鸣. 基于联系数的流域水安全评价模型[J]. 水利学报,2008(4):401-409. (JIN Juliang, WU Kaiya, WEI Yiming. Connection number based assessment model for watershed water security[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008(4):401-409. (in Chinese))

[13] 李凡修,辛焰,陈武. 集对分析用于湖泊富营养化评价研究[J]. 重庆环境科学,2000,22(6):10-11 (LI Fanxiu,XIN Yan,CHEN Wu. Set pair analysis method of water quality eutrophication assessment of lakes [J]. Chongqing Environmental Science, 2000,22(6):10-11. (in Chinese))

[14] 程乾生. 属性识别理论模型及其应用[J]. 北京大学学报: 自然科学版,1997,33(1):12-20. (CHENG Qiansheng. Attribute recognition theoretical model with Application[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 1997,33(1):12-20. (in Chinese))

[15] 陈守煜. 水资源与防洪系统可变模糊集理论与方法 [M]. 大连: 大连理工大学出版社,2005.

(收稿日期:2013-03-07 编辑:徐 娟)

(上接第 54 页)

中评价结果是一致的,说明采用综合权重的灰色关联分析方法对河流水质进行评价是可行的。

4 结 论

将灰色理论与普通数学方法相结合,建立综合权重的灰色关联分析法,将其应用于河流水质评价。以濠阳河水质评价为例,结果表明,采用综合权重的灰色关联分析方法评价河流水质是可行的。将灰色理论与普通数学方法相结合,对灰色理论的进一步推广和发展具有重要的意义。

参考文献:

[1] 王正文. 邯郸市濠阳河综合治理初探[J]. 价值工程, 2011,30(19):317. (WANG Zhengwen. Exploration on comprehensive treatment of Fuyang River in Handan City [J]. Value Engineering, 2011, 30(19):317. (in Chinese))

[2] 文梅,鞠莲,易柏林,等. 双台子沉积环境质量综合评价[J]. 中国海洋大学学报,2011,41(增刊1):158-164. (WEN Mei, JU Lian, YI Bolin, et al. The comprehensive evaluations on the environmental quality in sediments in estuary of Shuangtaizi River [J]. Periodical of Ocean University of China, 2011, 41(S1):158-164. (in Chinese))

[3] 王菊英,马德毅,鲍永恩,等. 黄海和东海海域沉积物的

环境质量评价[J]. 海洋环境科学,2003,22(4):21-24. (WANG Juying, MA Deyi, BAO Yongen, et al. Evaluation on sediment quality in Yellow Sea and East China Sea[J]. Marine Environmental Science, 2003, 22(4):21-24. (in Chinese))

[4] 章新,贺石磊,张雍照,等. 水质评价的灰色关联分析方法研究[J]. 水资源与水工程学报,2010,21(5):119-121. (ZHANG Xin, HE Shilei, ZHANG Yongzhao, et al. Study on grey relational analysis method for water quality assessment [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,2010,21(5):119-121. (in Chinese))

[5] 徐明德,何娟. 沁河晋城段水质灰色关联分析[J]. 科技情报开发与经济,2008,18(30):140-142. (XU Mingde, HE Juan. Evaluation on the water quality of Qinhe River's Jincheng section with the gray relative analysis method[J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2008, 18(30):140-142. (in Chinese))

[6] 施萍. 利用灰色关联法评价苏州河水质状况[J]. 江苏环境科技,2008,21(增刊1):62-65. (SHI Ping. Application of grey correlation method in the evaluation of water quality of Suzhou River [J]. Jiangsu Environmental Science and Technology,2008,21(S1):62-65. (in Chinese))

[7] 刘思峰,党耀国,方志耕. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,2010.

[8] 王清印,刘开第. 灰色系统理论的数学方法及其应用 [M]. 成都:西南交通大学出版社,1990.

(收稿日期:2013-05-22 编辑:彭桃英)