

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.2013.04.014

区域人水和谐评价指标体系及评价模型

康艳¹, 蔡焕杰^{1,2}, 宋松柏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. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)



康艳

摘要: 为了评价区域人水和谐程度,在阐述人水和谐内涵的基础上,根据复杂系统及和谐论理论,构建了区域人水和谐评价指标体系。根据集对分析和可变模糊集理论,建立了集对分析可变模糊集模型,评价人水复合系统发展态势;以合作博弈理论为基本思想确定系统“理想发展状态”,结合距离协调度模型,建立了合作博弈距离协调度模型,评价人水复合系统协调度;以发展态势和协调度为基本依据,采用乘法合成模型综合评价区域人水复合系统和谐度。将上述模型应用于陕西省人水复合系统,评价2000—2009年人水系统和谐程度,评价结果显示陕西省人水系统和谐度呈现缓慢上升趋势,但均处于第I、II等级,属于不和谐或临界和谐状态。说明陕西省人水和谐程度仍处于较低水平,比较符合陕西省目前实际现状。将此模型与模糊综合评价模型的评价结果进行对比分析,评价结果基本一致,表明该模型有效可行,结果可靠。

关键词: 人水和谐评价;人水复合系统;发展态势;协调度;和谐度

中图分类号: S277.9; TV213 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2013)04-0345-07

Evaluation index system and evaluation models for regional human-water harmony

Kang Yan¹, Cai Huanjie^{1,2}, Song Songbai¹

(1. College of Water Resources and Architecture Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Key Lab of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to evaluate regional human-water harmony, the concept of human-water harmony was introduced and, based on complex system theory and harmony theory, a set of indicators to evaluate regional human-water harmony was established. With set pair analysis theory and variable fuzzy set theory, set pair analysis-variable fuzzy set model was set up to analyze the development trend of human-water system. An ideal development state of a system was determined in the spirit of cooperative game theory; a cooperative game distance coordination degree model was established to evaluate coordination degrees of human-water system. On the bases of development trend and coordination degree, a multiplicative synthesis model is used to evaluate regional human-water harmony degree. The above-mentioned models were applied to assess the human-water harmony degree of human-water system from the year 2000 to 2009 in Shaanxi province. The results show that the human-water harmony degrees were on a slow increasing trend, but still in grade I and II, disharmony and critical harmony. It indicated the level of human-water harmony in Shaanxi province was still rather low, which is in close accordance with the fact in Shaanxi province. Comparison with fuzzy comprehensive evaluation model

收稿日期: 2012-09-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51179160, 50879070); 西北农林科技大学创新团队支持计划项目

作者简介: 康艳(1977—),女,黑龙江汤原人,讲师,博士研究生(kangyan@nwsuaf.edu.cn),主要从事水文水资源研究。

蔡焕杰(1962—),男,河北藁城人,教授,博士生导师(通信作者,caihj@nwsuaf.edu.cn),主要从事节水灌溉理论研究。

showed similar results, which proves the feasibility of the models and reliability of results.

Key words: human-water harmony evaluation; human-water complex system; development trend; coordination degree; harmony degree

随着社会经济的快速发展,水多、水少、水脏和水浑等水问题已成为人类社会进一步发展的瓶颈^[1],人水关系面临着前所未有的挑战,寻求人水共同发展之路,实现人水和谐,已成为全球的焦点问题之一。人水和谐理念对区域水资源调控方略的制定实施具有现实的指导意义。人水和谐评价是对人水和谐理念的量化评估,是对人水复合系统在长期演化过程中的发展态势、协调度及和谐程度的定量分析,可为水资源管理决策提供科学的理论依据。

受自然和人为等因素影响,人水复合系统是一个典型的复杂系统,具有不确定性。传统的不确定性评价模型存在以下不足^[2]:①只表达事物间的宏观关系,不能反映微观结构;②只适用于单一类型的不确定性关系,不适用于多种类型耦合关系;③只分析静态特征,不关注动态特征。集对分析理论^[2-4]通过构建集对,并对其进行同一、差异和对立性分析,从整体和局部上动态地分析事物间的关系。可变模糊集理论^[5-7]用数学方法描述模糊事物间的相对性和动态可变性,从优劣2个方面评价事物间的接近程度。将2种理论有机结合,构建集对分析可变模糊集(set pair analysis-variable fuzzy set, SPA-VFS)模型将弥补传统评价模型的不足之处,从宏观和微观结构上动态可变地评价人水复合系统的发展态势。

人水复合系统发展应具有协调性。目前被广泛应用的协调度评价模型^[8]大多是通过度量系统实际发展状态与“理想发展状态”间的距离来判断2个系统间的协调程度。因此,“理想发展状态”的确定在协调评价中起着至关重要的作用,但目前还未形成统一的确定方法。人水复合系统在发展演化过程中,水系统与人类系统为寻求共同发展,相互协调、相互竞争、相互妥协,最终促使整个人水复合系统达到“理想发展状态”,水系统和人类系统可视为是合作博弈中既相互竞争又相互协调一致的2个局中人。因此,可采用合作博弈的基本思想寻找人水复合系统的“理想发展状态”,建立基于合作博弈的距离协调度(cooperation game distance coordination degree, CGDCD)模型,评价水系统与人类系统的协调度。

文中以陕西省人水复合系统为研究对象,建立

SPA-VFS模型评价人水复合系统的发展态势,建立CGDCD模型评价水系统与人类系统的协调度,并以发展态势和协调度为依据,综合评价陕西省2000—2009年人水复合系统的和谐程度。

1 区域人水和谐评价指标体系构建

1.1 人水和谐内涵

目前,人水和谐内涵尚未形成统一的定义。国内外学者对“人水和谐”进行了大量研究和探讨^[9-12]。蔡其华认为:“确立人水和谐的理念是时代赋予的重任,人水和谐是治水实践的更高境界。”左其亭等^[11-12]提出人水和谐是人文系统与水系统相互协调的良性循环状态。综合上述定义,文中认为人水和谐是指人水复合系统在长期发展演化过程中,水系统与人类系统及其子系统间彼此相互作用、相互影响、相互适应,达到配合得当、协调一致,共同推动人水复合系统整体协调发展的状态。人水和谐内涵包括2层含义:①人水复合系统的整体发展。发展是事物从小到大、从低级到高级、从无序到有序的运动演化过程^[13]。水系统的发展是指水系统本身得到不断改善,呈现出水资源高效利用、水灾害减少、水环境良好和水管理水平不断提高的健康发展状态。人类系统的发展是指社会有序、经济繁荣,科技发达。整体发展不仅要求水系统和人类系统的有序发展,还要求其内部子系统的同步发展。②水系统与人类系统的协调发展。协调是系统间配合得当、多元发展的良性关联。水系统和人类系统协调发展使人水复合系统达到一种整体、综合、平衡和内生发展的组合。

1.2 区域人水和谐评价指标体系

人水复合系统涉及自然和社会等众多因素,需要根据区域实际状况,科学合理地确定评价指标体系。根据陕西省水量少、水环境恶化以及社会经济发展滞后等特点,并结合人水和谐内涵,陕西省人水和谐评价指标体系由水系统和人类系统组成,其中水系统由水资源、水灾害、水环境和水管理4个子系统组成,涵盖了水作为自然资源的资源性、灾害性、环境效应以及水管理水平等4个方面内容;人类系统由社会、经济和科技3个子系统组成。以科学

性、代表性和可操作性为指标选取原则选取评价指标,建立区域人水和谐评价指标体系,如表1所示。

1.3 指标理想集

指标理想集是评价指标发展水平高低的尺度,

目前对指标理想集没有统一标准.依据陕西省实际情况,借鉴相关研究成果、国际评价标准,对比分析其他区域评价标准,将指标理想集分为I-V共5个等级,表示低、较低、中等、较高、高水平,见表1。

表1 区域人水和谐评价指标体系及指标理想集
Tab.1 Regional human-water harmony assessment index system and ideal set

系统	子系统	指标	I级	II级	III级	IV级	V级
水系统	水资源子系统	X_{11} 人均水资源占有量 $x_1/(m^3 \cdot 人^{-1})$	[0,500)	[500,1 000)	[1 000,1 700)	[1 700,10 000)	$\geq 10 000$
		X_{12} 年径流深 x_2/mm	[0,10)	[10,50)	[50,200)	[200,900)	≥ 900
		X_{13} 水资源开发利用效率 $x_3/\%$	≥ 50	[30,50)	[20,30)	[10,20)	[0,10)
		X_{14} 农业用水比例 $x_4/\%$	≥ 90	[73,90)	[55,73)	[40,55)	[0,40)
		X_{15} 工业用水比例 $x_5/\%$	[0,5)	[5,20)	[20,35)	[35,45)	≥ 45
	水环境子系统	X_{21} 绿地覆盖率 $x_6/\%$	[0,10)	[10,30)	[30,50)	[50,60)	≥ 60
		X_{22} 生态环境用水比例 $x_7/\%$	[0,1)	[1,2)	[2,3)	[3,5)	≥ 5
		X_{23} 工业废水排放达标率 $x_8/\%$	[0,40)	[40,50)	[50,80)	[80,95)	≥ 95
		X_{24} IV级以上水质占总河长比 $x_9/\%$	≥ 50	[30,50)	[10,30)	[5,10)	[0,5)
	水灾害子系统	X_{31} 洪水人口受灾率 $x_{10}/\%$	≥ 20	[10,20)	[5,10)	[2,5)	[0,2)
		X_{32} 干旱人口受灾率 $x_{11}/\%$	≥ 20	[10,20)	[5,10)	[2,5)	[0,2)
		X_{33} 水利工程保护耕地面积率 $x_{12}/\%$	[0,20)	[20,35)	[35,50)	[50,60)	≥ 60
	水管理子系统	X_{34} 水利工程完好率 $x_{13}/\%$	[0,60)	[60,75)	[75,90)	[90,98)	≥ 98
		X_{41} 水法律法规建设程度 x_{14} (定性)	[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	[80,100)
X_{42} 公众对河流保护自觉度 x_{15} (定性)		[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	[80,100)	
X_{43} 公众参与水管理程度 x_{16} (定性)		[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	[80,100)	
人类系统		社会子系统	X_{51} 人口密度 $x_{17}/(人 \cdot km^{-2})$	≥ 300	[100,300)	[50,100)	[20,50)
	X_{52} 人均耕地面积 $x_{18}/(ha \cdot 人^{-1})$		[0,0.05)	[0.05,0.08)	[0.08,0.80)	[0.80,1.00)	≥ 1.00
	X_{53} 人均综合用水量 $x_{19}/(m^3 \cdot 人^{-1})$		$\geq 1 100$	[1 000,1 100)	[800,1 000)	[510,800)	[0,510)
	X_{54} 城市化率 $x_{20}/\%$		[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	≥ 80
	X_{55} 基本社会保障覆盖率 $x_{21}/\%$		[0,50)	[50,65)	[65,80)	[80,90)	≥ 90
	经济子系统	X_{61} 人均GDP $x_{22}/(万元 \cdot 人^{-1})$	[0,0.30)	[0.30,0.66)	[0.66,2.50)	[2.50,7.74)	≥ 7.74
		X_{62} 第一产业产值占GDP比重 $x_{23}/\%$	≥ 30	[15,30)	[12,15)	[3,12)	[0,3)
		X_{63} 第三产业产值占GDP比重 $x_{24}/\%$	[0,20)	[20,40)	[40,50)	[50,60)	≥ 60
		X_{64} 居民基尼系数 x_{25}	≥ 0.5	[0.4,0.5)	[0.3,0.4)	[0.2,0.3)	[0,0.2)
		X_{65} 居民恩格尔系数 x_{26}	≥ 0.60	[0.55,0.60)	[0.40,0.55)	[0.30,0.40)	[0,0.30)
科技子系统	X_{71} 单位GDP用水量 $x_{27}/(m^3 \cdot 万元^{-1})$	$\geq 1 060$	[610,1 060)	[140,610)	[24,140)	[0,24)	
	X_{72} 农业灌溉水利用系数 $x_{28}/\%$	[0,0.3)	[0.3,0.4)	[0.4,0.5)	[0.5,0.6)	≥ 0.6	
	X_{73} 工业用水重复利用率 $x_{29}/\%$	[0,30)	[30,40)	[40,70)	[70,90)	≥ 90	

2 SPA-VFS模型评价系统发展态势

2.1 集对分析理论

集对分析的核心思想是将待评价样本 $A = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ (m 为指标数)和指标理想集的第 k 级等级标准 B_k ($k = 1, 2, \dots, K$) 看成一对集对 $H = (A, B_k)$,对集对中的各指标做同一性、差异性和对立性分析,用联系度描述集对的同、异、反关系^[2-5].集对的联系度可表示为

$$\mu_{A, B_k} = a + bI + cJ, \quad (1)$$

式中: μ_{A, B_k} 为联系度; a, b 和 c 分别表示同一度、差异度和对立度,均为非负值, $a + b + c = 1; I \in [-1, 1]$,为差异联系数; $J = -1$,为对立联系数。

2.2 可变模糊集评价理论

设论域 U 上的一个模糊概念(事物、现象) \tilde{A} ,对 U 中的任意元素 $u(u \in U)$,在相对隶属函数的连续统数轴任一点上, u 对表示吸引性质 \tilde{A} 的相对隶属度为 $v_{\tilde{A}}(u) \in [0, 1]$,对表示排斥性质 \tilde{A}_c 的相对隶属度为 $v_{\tilde{A}_c}(u) \in [0, 1]$,且 $v_{\tilde{A}}(u) + v_{\tilde{A}_c}(u) = 1$,则 u 对 \tilde{A} 的相对差异度 $D_{\tilde{A}}(u)$ ^[4-5,7]为

$$D_{\tilde{A}}(u) = v_{\tilde{A}}(u) - v_{\tilde{A}_c}(u). \quad (2)$$

式(2)也可表示为

$$v_{\tilde{A}}(u) = [1 + D_{\tilde{A}}(u)]/2. \quad (3)$$

模糊识别可变模型^[5,7]可表示为

$$v_k = 1 / \left[1 + \left(\frac{d_{gk}}{d_{bk}} \right)^\alpha \right], k = 1, 2, \dots, K, \quad (4)$$

其中,

$$d_{gk} = \left\{ \sum_{l=1}^m [w_l (1 - v_{\bar{\lambda}}(u)_l)]^p \right\}^{1/p},$$

$$d_{bk} = \left\{ \sum_{l=1}^m (w_l v_{\bar{\lambda}}(u)_l)^p \right\}^{1/p},$$

式中: v_k 为样本对等级 k 的综合相对隶属度; d_{gk}, d_{bk} 分别为在统数轴上, 指标与左右端点的广义距离; α 为优化参数, 常取 $\alpha=1$ 或 2 ; p 为距离参数, $p=1$, 为海明距离, $p=2$, 为欧式距离。

2.3 SPA-VFS 模型评价系统发展态势

发展态势是表征系统在一定时段内的综合发展水平或综合发展状态, 采用 SPA-VFS 模型评价人水复合系统发展态势的过程如下。

1) 建立人水和谐复合系统评价指标体系, 确定指标理想集。

2) 根据人水和谐评价指标体系结构, 以子系统为基本样本单元, 根据集对分析理论, 计算子系统中各指标 $x_l (l=1, 2, \dots, m)$ 与指标理想集 B_k 间的联系数 $\mu_{x_l \sim B_k}$ [2], 得

$$\mu_{x_l \sim B_k} = \begin{cases} 1 - \left| \frac{2(s_{k-1} - x)}{s_{k-1} - s_{k-2}} \right|, & x \text{ 落在区间 } k-1 \text{ 上,} \\ 1, & x \text{ 落在区间 } k \text{ 上,} \\ 1 - \left| \frac{2(x - s_k)}{s_{k+1} - s_k} \right|, & x \text{ 落在区间 } k+1 \text{ 上,} \\ -1, & x \text{ 落在其他区间上,} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\mu_{x_l \sim B_k} \in [-1, 1]$, 表示评价指标 x 与指标理想集 B_k 间的联系数; s_k 为 O 第 k 级标准值。

3) 计算指标对评价等级 k 的相对隶属度 $v_{x_l \sim B_k}$ 。联系数 $\mu_{x_l \sim B_k} \in [-1, 1]$, 可知 $\mu_{x_l \sim B_k}$ 越接近 1, 指标越倾向隶属于评价等级 k , 反之, 倾向不隶属于评价等级 k 。可见, 联系数 $\mu_{x_l \sim B_k}$ 就是模糊集“评价等级 k ”的一种相对差异度, 则根据式(3), 指标对评价等级 k 的相对隶属度 $v_{x_l \sim B_k}$ 可表示为

$$v_{x_l \sim B_k} = (1 + \mu_{x_l \sim B_k}) / 2. \quad (6)$$

4) 确定指标权重 w_l 。为避免单一赋权法的主观性和片面性, 文中采用信息熵赋权法和 AHP 赋权法相结合的综合赋权法。根据最小熵原理计算综合权重 [14] 为

$$w_l = \frac{[w_{e_l} \cdot w_{A_l}]^{0.5}}{\sum_{l=1}^m [[w_{e_l} \cdot w_{A_l}]^{0.5}]}, \quad l = 1, 2, \dots, m, \quad (7)$$

式中: w 为综合权重; w_e 为客观权重; w_A 为主观权重。

5) 采用式(4)计算子系统对评价等级 k 的综合

相对隶属度 v_k 。

6) 判断子系统的发展态势。可采用级别特征值公式 [2] 计算, 得

$$h = \sum_{k=1}^K k (v_k / \sum_{k=1}^K v_k) = \sum_{k=1}^K k v'_k, \quad (8)$$

式中: h 为子系统发展态势; v'_k 为归一化综合相对隶属度。

7) 评价系统的发展态势。采用式(7)对各子系统赋值, 计算水系统和人类系统的发展态势, 得

$$H = \sum_{j=1}^n w_j h_j, \quad (9)$$

式中: H 为水系统或人类系统的发展态势; w_j 为系统内部各子系统的权重; h_j 为系统内部各子系统的发展态势; n 为水系统或人类系统中的子系统的个数。

8) 人水和谐复合系统发展态势

$$\bar{H} = \sum_{i=1}^2 w_i H_i, \quad (10)$$

式中: w_i 为权重; H_i 为水系统或人类系统发展态势。

3 CGDCD 模型评价系统协调度

3.1 距离协调度模型

协调度表征系统间的协调程度。采用欧氏距离度量系统实际发展态势与理想发展状态的距离 d , 则

$$d(H_i, H^*) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (H_i - H^*)^2}. \quad (11)$$

欧氏距离 d 越大, 各子系统越偏离理想发展状态, 则系统间协调性越差, 构造距离协调度模型为

$$DCD = 1 - d. \quad (12)$$

3.2 系统“理想发展状态”

“系统理想发展状态”在距离协调度模型中起着至关重要的作用, 文中将采用合作博弈思想 [15] 确定“系统理想发展度”。人水复合系统在发展演化过程中, 为寻求共同发展, 相互协调、相互竞争、相互妥协, 最终促使整个人水复合系统达到“理想发展状态”, 因此, 水系统和人类系统可被视为合作博弈中既相互竞争又相互协调一致的 2 个局中人, 为寻求“共赢”通过合作博弈达到整体利益最大化, 即达到整个系统理想发展状态。

设 $r_i (i=1, 2)$ 为水系统或人类系统对人水复合系统理想发展状态的贡献率, 则理想发展状态为

$$H^* = \sum_{i=1}^2 r_i H_i, \quad (13)$$

式中: H_i 为水系统(或人类系统)的实际发展态势;
 $\sum_{i=1}^2 r_i = 1, 0 < r < 1, r$ 可被视为一种特殊权重。

式(13)的关键问题是如何确定贡献率。为了避免单一方法确定贡献率的片面性和主观性,可以采用多种方法赋值。但多种方法所得贡献率相互独立,可能在一定程度上存在冲突,则可采用多个贡献率向量的任意线性组合来表示可能贡献率向量。

构造贡献率集合 $r_p = \{r_{p1}, r_{p2}\}, p = 1, 2, \dots, L$, 将 L 个向量进行任意线性组合^[15], 可能贡献率向量为

$$r = \sum_{p=1}^L a_p \times r_p^T, a_p > 0. \quad (14)$$

基于合作博弈理论,在不同贡献率向量间寻找一致或妥协,即最小化各贡献率向量与可能贡献率向量的偏差。其实质是寻找式(14)最满意的贡献率向量,可转化为对组合系数 a_p 优化,优化目标是使 r 和每个 r_p 的离差最小,即 $\min \left\| \sum_{p=1}^L a_p \times r_p^T - r_p \right\|$ 。根据矩阵的微分性质,最优化的一阶导数条件为

$$\sum_{p=1}^L a_p \times r_q \times r_p^T = r_q \times r_q^T, q = 1, 2, \dots, L. \quad (15)$$

求解式(15),得优化解 a^* , 对其归一化后代入式(14),得最优化贡献率向量 r^* , 代入式(13)计算出理想发展状态 H^* 。

4 区域人水复合系统和谐度评价

根据人水和谐内涵,认为人水和谐程度评价应主要考虑系统的发展态势和系统间的协调程度,且两者同等重要,采用乘法合成模型计算和谐度。

$$HD(t) = [\bar{H}(t) \times DCD(t)]^{\frac{1}{2}}, t = 1, 2, \dots, T, \quad (16)$$

式中: $HD(t)$ 为人水复合系统在 t 时段的和谐度; $\bar{H}(t)$ 为水复合系统在 t 时段的发展态势。为了统一,将发展态势 \bar{H} 采用直线型法^[16]求得在区间 $[0, 1]$ 上的发展态势值。

表3 2009年陕西省水资源子系统各指标与各等级联系数及相对隶属度计算成果表

Tab.3 Relation coefficient and relative membership in water resources subsystem of Shaanxi province in 2009

指标	联系数					相对隶属度				
	I级	II级	III级	IV级	V级	I级	II级	III级	IV级	V级
X_1	-1.000	0.699	1.000	-0.699	-1.000	0.000	0.850	1.000	0.150	0
X_2	-1.000	-0.886	1.000	0.886	-1.000	0.000	0.057	1.000	0.943	0
X_3	-1.000	-0.954	1.000	0.954	-1.000	0.000	0.023	1.000	0.977	0
X_4	-1.000	0.667	1.000	-0.667	-1.000	0.000	0.833	1.000	0.167	0
X_5	-0.133	1.000	0.133	-1.000	-0.133	0.433	1.000	0.567	0	0.433

根据人们对和谐社会和水资源可持续利用评价的常用评价标准^[16],将和谐度划分为5个等级,见表2。

表2 人水复合系统和谐度等级划分标准表

Tab.2 Harmony degree grade standards in human-water complex system

等级	I级	II级	III级	IV级	V级
和谐度	[0,0.6)	[0.6,0.7)	[0.7,0.8)	[0.8,0.9)	[0.9,1.0]
和谐水平	不和谐	临界和谐	基本和谐	良好和谐	优质和谐

5 应用实例

以陕西省为例,以2000—2009年为研究时段,建立如表1的区域人水和谐评价指标体系,其中指标 x_{41}, x_{42}, x_{43} 为定性指标,采用专家咨询法在0~100打分进行量化,其余指标为定量指标,通过收集相关数据确定指标值。采用文中提出的模型评价陕西省人水和谐度。

5.1 人水复合系统发展态势评价

因SPA-VFS模型评价各子系统发展态势的过程相同,现以2009年陕西省水资源子系统为例说明SPA-VFS模型评价发展态势的过程。①收集2009年陕西省水资源子系统评价指标数据为 $x_{11} = 757.4, x_{12} = 138.6, x_{13} = 30.0, x_{14} = 69.6, x_{15} = 15.1$ 。②利用式(5)计算各指标与指标理想集各等级的联系数 $\mu_{x_i-B_k}$, 结果如表3所示。③利用式(6)计算指标隶属于评价等级 k 的相对隶属度 $v_{x_i-B_k}$, 结果如表3所示。④采用最小熵原理计算综合权重为(0.3833, 0.3046, 0.2234, 0.0114, 0.0774)。由此可见,人均水资源占有量在水资源子系统中权重最大,是水资源子系统发展态势评价的重要影响因素。⑤利用式(4)计算水资源子系统隶属于等级 k 的综合相对隶属度 v_k , 这里取模型优化参数 $\alpha = 2$ 计算 $v_k = (0.002, 0.408, 0.998, 0.592, 0)$ 。⑥利用级别特征值式(8)计算水资源子系统的发展态势为3.091(见表4),说明2009年水资源子系统的发展态势为III级。

同理,可计算2000—2009年各子系统的发展态势,结果见表4.由式(9),(10)计算水系统、人类系

统及人水复合系统的发展态势,具体变化趋势见图1.

表4 2000—2009年陕西省各子系统发展态势 SPA-VFS模型评价结果表
Tab.4 Development trend in human-water complex system of Shaanxi province in 2000—2009

系统	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年
水资源子系统	2.868	2.271	2.339	3.852	2.668	3.722	2.382	2.919	2.569	3.091
水环境子系统	2.126	2.185	2.185	2.159	2.104	2.153	2.185	2.138	2.155	2.389
水灾害子系统	2.476	2.582	3.472	2.972	2.767	3.487	3.493	3.013	3.098	3.484
水管理子系统	2.192	2.201	2.026	2.108	2.234	2.352	2.438	2.565	2.683	2.700
社会子系统	2.246	2.241	2.238	2.231	2.226	2.222	2.217	2.212	2.209	2.209
经济子系统	1.931	2.175	2.373	2.525	2.520	2.669	2.750	2.958	3.305	3.493
科技子系统	2.612	2.677	2.872	3.100	3.285	3.412	3.448	3.476	3.477	3.486

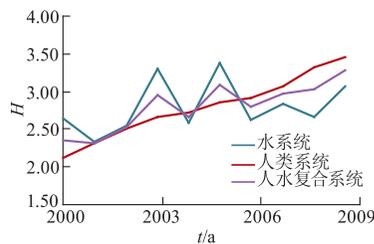


图1 2000—2009年陕西省水系统、人类系统及人水复合系统发展态势图

Fig.1 Development trend of water system, human system and human-water complex system in Shaanxi province in 2000—2009

由表4和图1可见,陕西省各系统的发展态势呈上升趋势.对水系统而言,水管理和水灾害子系统比水环境和水资源子系统的发展态势上升幅度大.由于人类保护水资源的意识有所加强,使得水管理水平的提高,并采取有效的措施减少水灾害;虽然在改善水环境方面也做了大量的工作,但由于社会经济的高速发展,对水环境的负面影响比较大,水环境体现的发展态势并没有显著变化.人类系统发展态势较水系统上升趋势速度快,尤其是经济发展态势从2000年的1.931上升至2009年的3.493,

科技发展态势由2.636发展到3.486,说明10年间人类系统得到了较大发展.但总体来说,陕西省人水复合系统的发展态势还处于较低水平,仍具有较大的发展潜力.

5.2 人水系统协调度评价

采用专家咨询法确定水系统和人类系统对人水复合系统理想发展状态的2种贡献率向量分别为(0.399,0.601)和(0.587,0.412),根据式(14)计算最优贡献率为(0.486,0.514),用CGDCD模型计算系统的协调度,结果见图2和表5.

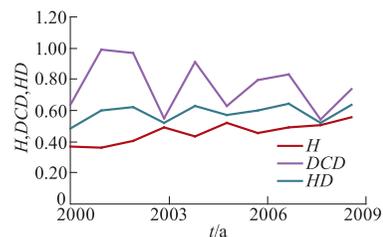


图2 2000—2009年陕西省人水复合系统发展态势、协调度及和谐度图

Fig.2 Development trend, coordination degree and harmony degree of human-water complex system in Shaanxi in 2000—2009

表5 2000—2009年陕西省人水和谐评价不同模型成果对比表

Tab.5 Assessment results of human-water harmony from different models in Shaanxi province in 2000—2009

模型	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年
文中模型										
发展态势	0.370	0.364	0.405	0.490	0.432	0.517	0.458	0.493	0.506	0.557
协调度	0.637	0.989	0.966	0.553	0.914	0.631	0.794	0.832	0.543	0.735
和谐度	0.486	0.600	0.625	0.520	0.628	0.571	0.603	0.640	0.524	0.640
和谐等级	I	II	II	I	II	I	II	II	I	II
模糊综合评价模型和谐等级	I	I	II	I	II	I	I	II	I	II

由图2可看出,人水复合系统的协调度有加大波动,且波动幅度有减小趋势,说明2000—2009年人水系统在受到外部因素和内部随机涨落的影响下,协调度趋于稳定.人水复合系统在演化过程中不断地合作、竞争、妥协,直到达成协调一致.其中,

2001年和2002年协调度较高,但这2年的发展态势较小,说明这2年是低发展水平的协调状态.

5.3 人水系统和谐度评价

由式(16)计算人水复合系统的和谐度,结果见图2和表5.

从图2和表5可看出,和谐度呈现缓慢上升趋势,但均处于第I,II等级,属于不和谐或临界和谐状态.说明陕西省人水和谐程度仍处于较低水平,比较符合陕西省目前实际现状.今后,应重视水资源合理开发利用、环境保护,加强水资源的管理,实现陕西省人水和谐的发展状态.

为证实文中评价模型评价结果的可靠性,将文中模型评价结果与模糊综合评价结果对比,见表5.

从对比结果可看出,两种评价结果基本一致,只有2001年和2006年有差别,从文中模型中和谐度数值看,虽然属于临界和谐,但是却位于不和谐的边界上,所以评价结果合理.由此可见,文中模型具有可行性,评价结果可靠.

6 结 论

1) 阐述人水和谐内涵,以复杂系统、和谐论理论为基础,构建了人水和谐评价指标体系,提高了人水和谐定量评价的可操作性.

2) 根据集对分析和可变模糊集理论,建立了SPA-VFS模型,对人水复合系统发展态势进行评价,模型从整体和局部结构上动态可变地评价了人水复合系统与指标理想集间的关系,评价方法概念清晰、原理简单、对系统间的信息描述得更全面、直观.

3) 以合作博弈理论为基本思想建立了CGDCD模型,评价人类系统与水系统的协调度.

4) 采用乘法合成模型评价陕西省人水复合系统和谐度,结果表明陕西省人水复合系统和谐度有缓慢提高趋势,但仍属于较低水平,处于不和谐或临界和谐水平,符合陕西省的实际情况.

参考文献 (References)

- [1] 夏军,翟金良,占车生. 我国水资源研究与发展的若干思考[J]. 地球科学进展, 2011, 26(9): 905-915.
Xia Jun, Zhai Jinliang, Zhan Chesheng. Some reflections on the research and development of water resources in China[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(9): 905-915. (in Chinese)
- [2] 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.
- [3] Su M R, Yang Z F, Chen B. Set pair analysis for urban ecosystem health assessment [J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2009, 14(4): 1773-1780.
- [4] Kang Yan, Cai Huanjie, Song Songbai. A coordinated development evaluation modeling in water-socioeconomy-environment system [J]. Advanced Materials Research, 2012, 524-527: 3313-3317.
- [5] 李文君,邱林,陈晓楠,等. 基于集对分析与可变模糊集的河流生态健康评价模型[J]. 水利学报, 2011, 42(7): 775-782.
Li Wenjun, Qiu Lin, Chen Xiaonan, et al. Assessment model for river ecology health based on set pair analysis and variable fuzzy [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(7): 775-782. (in Chinese)
- [6] 陈守煜. 可变集-可变模糊集的发展及其在水资源系统中的应用 [J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(1): 92-101.
Chen Shouyu. Variable sets-the development of variable fuzzy sets and the applications in assessment of water resource [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012, 42(1): 92-101. (in Chinese)
- [7] 陈守煜,王子茹. 基于对立统一与质量互变定理的水资源系统可变模糊评价新方法[J]. 水利学报, 2011, 42(3): 253-261, 270.
Chen Shouyu, Wang Ziru. Water resource systems' variable fuzzy sets evaluation new method based on the opposites unity and quantity-quality exchange theorem [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(3): 253-261, 270. (in Chinese)
- [8] 汤铃,李建平,余乐安,等. 基于距离协调度模型的系统协调发展定量评价方法 [J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(4): 594-602.
Tang Ling, Li Jianping, Yu Lean, et al. Quantitative evaluation methodology for system eoordination development based on distance coordination degree model [J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 2010, 30(4): 594-602. (in Chinese)
- [9] 李佩成. 论人水和谐 [J]. 中国水利, 2010(19): 62-64.
Li Peicheng. Human-water harmony [J]. China Water Resources, 2010(19): 62-64. (in Chinese)
- [10] Evan G R Davies, Slobodan P Simonovic. Global water resources modeling with an integrated model of the social-economic-environmental system [J]. Advances in Water Resources, 2011, 34: 684-700.
- [11] 左其亭,张云,林平. 人水和谐评价指标及量化方法研究 [J]. 水利学报, 2008, 39(4): 440-447.
Zuo Qiting, Zhang Yun, Lin Ping. Index system and quantification method for human-water harmony [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(4): 440-447. (in Chinese)

(下转第368页)