

改进的突变模型及其在水资源评价中的应用

郑德凤,臧正,王平富

(辽宁师范大学城市与环境学院,辽宁 大连 116029)

摘要:针对突变理论和传统突变模型对多目标、多准则复杂系统进行决策分析时,评价结果容易受到主观因素影响致使其准确性较低的问题,利用传统突变模型对辽宁省农业水资源可持续利用水平进行评价,比较不同方案得出的评价结果,分析传统突变模型的灵敏度;在此基础上,提出基于熵值法和熵权理论改进的突变模型,并进一步进行验证。结果表明,改进突变模型能有效避免人为主观因素的影响,评价方法科学合理,评价结果客观准确。

关键词:突变模型;熵权;灵敏度;水资源评价;辽宁省

中图分类号:TV213 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2014)04-0046-07

An improved catastrophe model and its application in water resources assessment//ZHENG Defeng,ZANG Zheng,WANG Pingfu (*School of Urban Planning and Environmental Science,Liaoning Normal University,Dalian 116029,China*)

Abstract: When the traditional catastrophe progression method are used to make a decision for a multi-object and multi-criterion complicated system, the assessment results are easily affected by subjective factors and its veracity are limited. In order to analyze the reliability of catastrophe progression method in practice, the sustainable utilization level of agricultural water resources in Liaoning Province are evaluated by using traditional catastrophe model. Furthermore, the sensitivity are analyzed by comparing the assessment results of different schemes. Based on the above-mentioned challenges, an improved catastrophe model, based on entropy method and entropy weight theory, are proposed. The results are evaluated by using an improved catastrophe model and the information of objective facts of the study area. The example application showed that the improved catastrophe model can effectively avoid factitious subjectivity and are more scientific and reasonable. Additionally, the results are more objective and accurate.

Key words: catastrophe model; entropy weight; sensitivity; water resources assessment; Liaoning Province

多目标、多准则复杂系统是高阶次、多回路、具有多重反馈特征的非线性系统,由于内部结构复杂,因此对其进行科学、准确的量化研究往往会遇到困难。随着现代科学向系统化方向的不断发展,模糊数学法、投影寻踪法、人工神经网络法、多目标决策的理想点法以及集对分析理论等传统理论和方法已成为对内部结构不明、相互联系及运动机理处于未知状态的复杂系统进行决策分析的重要工具,并在诸如水资源评价、优化决策等领域得到广泛应用^[1-5]。由于上述传统理论和方法在具体应用中通常假定条件比较多,人为地割裂了内部子系统间的联系,因而结果不可避免地存在一些不确定性。为了提高水资源评价工作的可靠性和实用性,近年来对基于传统理论和方法的多目标决策方法的改进研究不断开展,理想区间法、遗传投影寻踪法等

在水资源承载能力、可再生能力及河流健康评价中得到广泛应用并取得成果^[6-9]。

近年来,由法国数学家 Thom 基于奇点理论和稳定性理论提出的、研究不连续变化现象的突变理论被引入自然科学和社会科学领域。由于该方法只需考虑参评指标的相对重要性而无需计算具体指标权重,在一定程度上避免了评价过程中主观因素对评价结果的影响,因此成为对多目标、多准则复杂系统进行方案优选、综合分析的重要方法^[10]。姜璐等^[11]分析了常用突变模型的形式和特点,总结了突变理论在社会科学中的两种应用途径以及具体应用方法;施玉群等^[12-13]分别提出基于随机数与三角模糊数的改进突变模型,对多准则决策问题进行建模分析;李柏洲等^[14]应用结构方程,结合突变理论构建区域科技创新能力评价模型,对我国宏观经济政

策调控的有效性进行评价;涂圣文等^[15-16]针对突变模型评价结果分值偏高的缺点,通过分值变换法分别对公路过境方案和旱灾风险进行了分析与评价。

为进一步分析突变模型在实际应用中的可靠性,本文以辽宁省农业水资源可持续利用水平评价为例,应用突变理论和传统突变模型对其进行评价,比较不同方案得出的评价结果,对传统突变模型灵敏度进行验证,在此基础上提出基于熵值法和熵权理论改进的突变模型,通过与现有文献的对比,验证改进模型的准确性和适用性。

1 突变理论及传统突变模型

突变理论通过建立微分方程与函数之间联系的方法,对梯度系统奇点进行分类,能够描述系统状态的飞跃。该方法给出了系统处于稳定状态的参数区域,当参数缓慢变化时,系统的稳定状态是渐变、量变的;当参数通过某些特定位置时,系统状态则发生突变、质变^[17-18]。突变模型基于突变理论对评价目标进行多层次分解,通过归一化公式对底层(输入层)指标数据进行标准化处理,利用数学模型产生突变模糊隶属度函数,依次进行归一化运算,得出总隶属度函数,最后根据总隶属度函数进行分析与评价。

1.1 原始数据标准化

依据评价目的对评价总指标进行多层次分解,构建递阶层次结构的评价指标体系。将输入层原始数据无量纲化,为使负向指标与正向指标具有可比性,将原始指标值通过越小越优型(U)或越大越优型(U')隶属度函数进行标准化处理:

$$U=\begin{cases}1&0\leqslant x\leqslant a_1\\ \frac{a_2-x}{a_2-a_1}&a_1<x<a_2\\ 0&x\geqslant a_2\end{cases}\quad (1)$$

$$U'=\begin{cases}1&x\geqslant a_2\\ \frac{x-a_1}{a_2-a_1}&a_1<x<a_2\\ 0&0\leqslant x\leqslant a_1\end{cases}\quad (2)$$

式中: U 、 U' 为归一化指标值; x 为指标实测值; a_2 、 a_1 分别为各定量指标的上、下界,实际评价时可根据具体情况来确定,如在最大值、最小值的基础上增、减其本身的10%作为该指标的上、下界。

1.2 突变模型的选择

按照突变理论,系统受到干扰后从一种稳定组态跃变到另一种稳定组态的不连续过程,可以由某种特定形状的几何图形表示,不同类型系统对应于不同的势函数。评价过程中需根据势函数对系统临界点进行分类,按控制变量对状态变量控制作用的

大小确定其相对重要性,然后对分歧集进行归一化处理,最终得到指标的突变模糊隶属度函数,实现对临界点附近的非连续性变化特征进行分析和评价。常用的突变模型有折叠型、尖顶型、燕尾型和蝴蝶型(分别将评价指标分解为1~4个子指标),相关公式见表1。

表1 常用突变模型的相关公式

类型	势函数	分歧集方程	归一化公式
折叠型	$F(x)=x^3+ax$	$a=-6x^2$	$x_a=\sqrt{ a }$
尖顶型	$F(x)=x^4+ax^2+bx$	$a=-6x^2$ $b=8x^3$	$x_a=\sqrt{ a }$ $x_b=\sqrt[3]{ b }$
燕尾型	$F(x)=x^5+ax^3+bx^2+cx$	$a=-6x^2$ $b=8x^3$ $c=-3x^4$	$x_a=\sqrt{ a }$ $x_b=\sqrt[3]{ b }$ $x_c=\sqrt[4]{ c }$
蝴蝶型	$F(x)=x^6+ax^4+bx^3+cx^2+dx$	$a=-10x^2$ $b=20x^3$ $c=-15x^4$ $d=4x^5$	$x_a=\sqrt{ a }$ $x_b=\sqrt[3]{ b }$ $x_c=\sqrt[4]{ c }$ $x_d=\sqrt[5]{ d }$

注: $F(x)$ 为系统的势函数; a 、 b 、 c 、 d 为系统控制变量(相对重要性依次减弱); x_a 、 x_b 、 x_c 、 x_d 分别为归一化值。

1.3 评价原则

利用突变理论进行模糊决策时,需根据实际情况确定评价原则:如果各指标之间联系不明显或是相互独立的关系,则采用大中取小的非互补性原则;如果各指标间彼此存在联系、具有一定的相互促进或制约作用,则采用互补性原则(取平均值代替)。最后对评价总指标按由大到小的顺序进行排序、划分等级。

2 传统突变模型的灵敏度分析

与传统微积分理论相比,突变理论能够对非连续运动过程给予更合理的解释和预测,因而成为水资源和水环境领域定量研究与综合评价的一种常用理论工具^[19-20]。辽宁省是我国水资源比较匮乏的区域之一,水资源短缺日益成为制约该地区经济、社会发展以及改善生态环境的重要因素^[21-22]。农业一直是我国的用水大户,因此农业水资源的可持续开发与利用是区域水资源科学管理的关键。本文以辽宁省14个地级行政区(以下简称研究区)为例,利用传统突变模型对其农业水资源可持续利用水平进行评价。

2.1 研究区农业水资源可持续利用评价指标体系

参考石丽忠等^[21,23-24]构建的“辽宁省农业水资源可持续利用评价指标体系”,遵循全面性、差异性、独立性和动态性的原则,结合研究区自然环境条件、农村经济与社会发展状况,构建基于突变理论的研究区农业水资源可持续利用评价指标体系,如表2所示。

表 2 研究区农业水资源可持续利用评价指标体系

目标层 A	准则层 B	输入层 C
农业水资源 可持续利用 水平 A	资源子系统 B ₁	水资源利用率 C ₁
		水资源开发利用率 C ₂
		蓄水占地表供水比例 C ₃
		产水模数 C ₄
	社会子系统 B ₂	人均供水量 C ₅
		节水意识 C ₆
		农业人口比例 C ₇
		农业供水设施投入 C ₈
	经济子系统 B ₃	单方水 GDP 产出 C ₉
		污水回用率 C ₁₀
		农田综合灌水定额 C ₁₁
		农业供水单方产值 C ₁₂
	生态子系统 B ₄	人均农业用水量 C ₁₃
		污水处理能力 C ₁₄
		生态环境用水率 C ₁₅
		森林覆盖率 C ₁₆

2.2 评价指标重要性排序及评价原则

在应用突变理论时,各评价指标需按相对重要性进行排序(通过 Delphi 法等),然后分别采用不同的归一化公式计算其相应的突变值。为了验证评价指标重要性排序对评价结果的影响,分别考虑各行政分区局部经济利益和辽宁省全局利益,提出输入层和准则层指标重要性排序相反、评价原则相同的两种方案:方案 1 和方案 2;同时,为了验证不同评价原则对评价结果的影响,考虑各子系统输入层评价指标之间具有一定的关联性,提出输入层指标重要性排序分别与方案 1、方案 2 相同,评价原则不同

表 3 不同方案的指标重要性排序及评价原则

层 次	重要性排序				评价原则			
	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
输入层 C ₁ ~ C ₄	C ₁ >C ₂ >C ₃ >C ₄	C ₄ >C ₃ >C ₂ >C ₁	C ₁ >C ₂ >C ₃ >C ₄	C ₄ >C ₃ >C ₂ >C ₁	非互补性	非互补性	互补性	互补性
输入层 C ₅ ~ C ₈	C ₆ >C ₅ >C ₈ >C ₇	C ₇ >C ₈ >C ₅ >C ₆	C ₆ >C ₅ >C ₈ >C ₇	C ₇ >C ₈ >C ₅ >C ₆	非互补性	非互补性	互补性	互补性
输入层 C ₉ ~ C ₁₂	C ₁₀ >C ₁₂ >C ₉ >C ₁₁	C ₁₁ >C ₉ >C ₁₂ >C ₁₀	C ₁₀ >C ₁₂ >C ₉ >C ₁₁	C ₁₁ >C ₉ >C ₁₂ >C ₁₀	非互补性	非互补性	互补性	互补性
输入层 C ₁₃ ~ C ₁₆	C ₁₃ >C ₁₄ >C ₁₅ >C ₁₆	C ₁₆ >C ₁₅ >C ₁₄ >C ₁₃	C ₁₃ >C ₁₄ >C ₁₅ >C ₁₆	C ₁₆ >C ₁₅ >C ₁₄ >C ₁₃	非互补性	非互补性	互补性	互补性
准则层 B ₁ ~ B ₄	B ₁ >B ₄ >B ₂ >B ₃	B ₃ >B ₂ >B ₄ >B ₁	B ₁ >B ₄ >B ₂ >B ₃	B ₃ >B ₂ >B ₄ >B ₁	互补性	互补性	互补性	互补性

表 4 研究区农业水资源可持续利用评价指标转化值

行政区	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆
沈阳	0.19	0.84	0.79	0.27	0.69	0.89	0.91	0.03	0.29	0.91	0.79	0.14	0.80	0.89	0.40	0.33
大连	0.06	0.93	0.83	0.34	0.89	0.67	0.53	0.63	0.90	0.37	0.86	0.90	0.93	0.89	0.14	0.46
鞍山	0.07	0.90	0.07	0.40	0.77	0.24	0.07	0.43	0.38	0	0.74	0.15	0.85	0.67	0.19	0.56
抚顺	0.01	0.94	0.70	0.72	0.80	0.02	0.09	0.55	0.21	0	0.74	0.15	0.84	0.67	0.90	0.76
本溪	0.01	0.98	0.22	0.79	0.78	0.02	0.04	0.63	0.28	0	0.81	0.29	0.88	0.24	0.11	0.90
丹东	0.01	1.00	0.36	0.90	0.69	0.89	0.09	0.60	0.08	0.15	0.65	0.12	0.73	0.24	0.03	0.72
锦州	0.10	0.85	0	0.13	0.86	0.67	0.18	0.42	0.18	0.01	0.93	0.50	0.90	0.46	0.03	0.17
营口	0.13	0.80	0.14	0.21	0.79	0.67	0.03	0.71	0.19	0.01	0.55	0.14	0.82	0.24	0.16	0.51
阜新	0.08	0.94	0.60	0.05	0.87	0.46	0.09	0.4	0.08	0	0.96	0.27	0.88	0.67	0.03	0.32
辽阳	0.17	0.90	0.91	0.34	0.50	0.46	0.03	0.22	0.06	0.13	0.62	0.01	0.69	0.24	0.32	0.42
铁岭	0.07	0.92	0.82	0.31	0.68	0.89	0.01	0.89	0.01	0	0.80	0.12	0.77	0.67	0.01	0.34
朝阳	0.04	0.94	0.50	0.01	0.99	0.89	0.01	0.33	0.21	0.01	1.00	0.60	0.99	0.02	0.06	0.38
盘锦	0.91	0.09	0.11	0.05	0.10	0.46	0	0.47	0.09	0	0.09	0.04	0.10	0.02	0.06	0.01
葫芦岛	0.04	0.95	0.69	0.15	0.93	0.67	0.01	0.22	0.25	0.41	0.93	0.34	0.93	0.46	0.08	0.38

的两种方案:方案 3 和方案 4。即方案 1 和方案 2、方案 3 和方案 4 中输入层指标 C₁ ~ C₁₆ 评价原则相同、指标重要性排序相反;方案 1 与方案 3、方案 2 与方案 4 中各层指标重要性排序相同、输入层指标 C₁ ~ C₁₆ 的评价原则不同,见表 3。

2.3 构建等级划分标准

参考基于不同理论方法及不同地区水资源可持续利用评价研究所采用的等级划分标准^[25-26],对比研究区有关水资源评价指标统计值,按传统 5 阶段法确定本文研究的等级划分标准为:①可持续利用水平 L_s 很低,总指标隶属度 U_A ∈ (0, 0. 20];②L_s 较低,U_A ∈ (0. 20,0. 40];③L_s 一般,U_A ∈ (0. 40, 0. 60];④L_s 较高,U_A ∈ (0. 60,0. 80];⑤L_s 很高,U_A ∈ (0. 80,1.00)。

2.4 数据来源及评价结果

依据文献[21]计算研究区农业水资源可持续利用评价指标原始值,分别利用式(1)、(2)对其进行标准化处理,结果见表 4(其中 C₂、C₅、C₁₁、C₁₃ 为负向指标)。根据各层指标数选取相应突变模型,依据不同方案计算出研究区农业水资源的 L_s、U_A、R_D(排名)等评价结果,如表 5 所示。

结合表 3、表 5 可以看出:方案 1 和方案 2 之间、方案 3 和方案 4 之间,U_A、R_D 变化较大,说明人为确定指标重要性对评价结果产生了一定影响;方案 1 和方案 3 之间、方案 2 和方案 4 之间 U_A 和 R_D 变化

表 5 基于传统突变模型的研究区农业水资源可持续利用各方案评价结果

行政区	U_A				R_D				L_S			
	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
沈阳	0.816	0.800	0.933	0.927	1	2	2	2	很高	很高	很高	很高
大连	0.798	0.886	0.939	0.951	2	1	1	1	较高	很高	很高	很高
鞍山	0.553	0.589	0.889	0.878	7	7	7	6	一般	一般	很高	很高
抚顺	0.461	0.611	0.901	0.884	11	6	4	5	一般	较高	很高	很高
本溪	0.418	0.553	0.882	0.876	12	9	11	7	一般	一般	很高	很高
丹东	0.674	0.715	0.895	0.890	5	5	5	4	较高	较高	很高	很高
锦州	0.417	0.375	0.861	0.867	13	13	13	11	一般	较低	很高	很高
营口	0.574	0.568	0.886	0.866	6	8	10	12	一般	一般	很高	很高
阜新	0.542	0.540	0.888	0.871	8	10	8	8	一般	一般	很高	很高
辽阳	0.767	0.729	0.893	0.868	3	4	6	10	较高	较高	很高	很高
铁岭	0.490	0.507	0.887	0.859	9	11	9	13	一般	一般	很高	很高
朝阳	0.480	0.478	0.874	0.870	10	12	12	9	一般	一般	很高	很高
盘锦	0.332	0.327	0.794	0.768	14	14	14	14	较低	较低	较高	较高
葫芦岛	0.750	0.732	0.906	0.903	4	3	3	3	较高	较高	很高	很高

也很明显,说明应用不同评价原则进行决策对评价结果也产生较大影响。由此可见,应用传统突变模型、采用 Delphi 法等主观方法确定评价指标的重要性顺序以及决策原则,评价结果均具有比较明显的不确定性。

另外,从方案 3 和方案 4 得出的研究区农业水资源可持续利用水平可以看出,基于传统突变模型、采用互补性原则得出的 U_A 较方案 1 和方案 2 得出的结果整体上偏大,由于相互之间差距不明显,因此如果按照传统经验确定的等级划分标准进行等级评定,得出的研究区农业水资源可持续利用水平普遍很高,这与研究区的客观实际是不相符的^[21-22]。

3 基于熵权理论改进突变模型

为有效避免人为因素对评价结果的干扰,本文提出了应用熵值法确定评价指标相对重要性排序、基于熵权理论确定指标评价原则的改进突变模型(以下简称本文模型)。

3.1 熵值法

熵值法根据各指标的变异程度,利用信息熵计算各指标的权重,是比较客观的赋权方法,通常可与其他评价方法相结合,应用于各种复杂系统的分析与评价研究^[27-28]。

设有 n 个待评样本、 m 项评价指标构成的评价目标集,其指标特征值矩阵为 $\mathbf{X}=(x_{ij})_{m \times n}(i=1,2,\cdots,m,j=1,2,\cdots,n)$,首先利用式(3)对正向指标特征值、式(4)对负向指标特征值进行无量纲化和同趋势化处理,得标准化矩阵 $\mathbf{R}=(r_{ij})_{m \times n}$,然后计算第 j 个样本第 i 项评价指标的相对质量 p_{ij} 、第 i 项指标的信息熵 e_i 及权重 w_i :

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max_j x_{ij}} \tag{3}$$

$$r_{ij} = \frac{\min_j x_{ij}}{x_{ij}} \tag{4}$$

$$p_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^m r_{ij}} \tag{5}$$

$$e_i = -k \sum_{j=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \tag{6}$$

$$w_i = \frac{1 - e_i}{\sum_{i=1}^m (1 - e_i)} \tag{7}$$

其中

$$k = \frac{1}{\ln n}$$

式中: x_{ij} 为第 j 个样本第 i 项评价指标的特征值; r_{ij} 为 x_{ij} 经过同趋势化处理后的标准值。由式(7)可以看出,熵值越小其权重越大,即该指标在系统中的地位越高,按照信息熵理论,其提供给决策者的信息量也越多;如果各样本评价指标 i 的数值相同,那么此时 $e_i=1,w_i=0$,表明该指标不能向决策者提供有价值的信息,在所有样本中该指标对于决策者来说是处于同等地位的,可考虑去掉^[29]。

3.2 改进突变模型及其验证分析

利用式(3)(4)对表 4 中输入层指标 $C_1 \sim C_{16}$ 的 x_{ij} 进行同趋势化处理,得其相应的 r_{ij} ;利用式(5)计算输入层指标的 p_{ij} ,利用式(6)得出评价指标 $C_1 \sim C_{16}$ 的信息熵如下:

$$\begin{aligned} E_i = & (0.694, 0.981, 0.900, 0.872, \\ & 0.978, 0.930, 0.659, 0.951, 0.871, 0.522, \\ & 0.977, 0.867, 0.981, 0.912, 0.778, 0.944)^T \end{aligned}$$

以各子系统指标信息熵的均值计算准则层指标信息熵,得出 $B_1 \sim B_4$ 的信息熵值分别为 0.862、0.880、0.809 和 0.904。分析式(7),得出输入层各子系统指标权重由大到小的顺序分别为 $C_1 > C_4 > C_3 > C_2, C_7 >$

$C_6 > C_8 > C_5, C_{10} > C_{12} > C_9 > C_{11}, C_{15} > C_{14} > C_{16} > C_{13}$, 准则层指标权重由大到小的顺序为 $B_3 > B_1 > B_2 > B_4$ (由于只需确定指标的相对重要性,故无需计算具体权重值)。

根据式(7)可知:指标熵值越大,其重要性排序越靠后,所以应用突变模型归一化公式计算时,其开方次数越高,结果越趋近于1。如果按照大中取小的非互补性原则进行决策,则该指标不被考虑,因此不会对上层指标状态变量起到控制作用。据此,本文确定改进突变模型层间决策按非互补性原则进行。为了科学、准确地评价研究区农业水资源可持续利用水平,构建评价指标体系时应以区域自然条件和经济社会发展的实际情况为出发点,遵循全面性、差异性、独立性、动态性的原则选取输入层指标^[23-24]。

依据上述指标重要性排序及指标评价原则,应用表1蝴蝶模型对表4数据进行计算,得出基于改进突变模型的研究区农业水资源可持续利用评价结果。其参数如下:输入层 $C_1 \sim C_4$ 有 $x_{c1} = C_1^{1/2}, x_{c4} = C_4^{1/3}, x_{c3} = C_3^{1/4}, x_{c2} = C_2^{1/5}$; 输入层 $C_5 \sim C_8$ 有 $x_{c7} = C_7^{1/2}, x_{c6} = C_6^{1/3}, x_{c8} = C_8^{1/4}, x_{c5} = C_5^{1/5}$; 输入层 $C_9 \sim C_{12}$ 有 $x_{c10} = C_{10}^{1/2}, x_{c12} = C_{12}^{1/3}, x_{c9} = C_9^{1/4}, x_{c11} = C_{11}^{1/5}$; 输入层 $C_{13} \sim C_{16}$ 有 $x_{c15} = C_{15}^{1/2}, x_{c14} = C_{14}^{1/3}, x_{c16} = C_{16}^{1/4}, x_{c13} = C_{13}^{1/5}$; 准则层 $B_1 \sim B_4$ 有 $x_{B3} = B_3^{1/2}, x_{B1} = B_1^{1/3}, x_{B2} = B_2^{1/4}, x_{B4} = B_4^{1/5}$ 。为便于比较和分析,依据文献[21]的 U_A ,按本文提出的标准对其进行等级划分,结果对比如表6所示。

表6 本文模型与文献[21]的研究区农业水资源可持续利用评价结果对比

行政区	U_A		R_D		L_S	
	本文模型	文献[21]	本文模型	文献[21]	本文模型	文献[21]
沈阳	0.798	0.742	1	1	较高	较高
大连	0.786	0.563	2	4	较高	一般
鞍山	0.529	0.471	8	8	一般	一般
抚顺	0.378	0.443	12	10	较低	较低
本溪	0.461	0.339	11	13	一般	较低
丹东	0.307	0.335	14	14	较低	一般
锦州	0.551	0.534	6	6	一般	一般
营口	0.548	0.595	7	3	一般	一般
阜新	0.489	0.460	9	9	一般	一般
辽阳	0.673	0.537	4	5	较高	一般
铁岭	0.611	0.511	5	7	较高	一般
朝阳	0.484	0.425	10	11	一般	一般
盘锦	0.692	0.617	3	2	较高	较高
葫芦岛	0.367	0.400	13	12	较低	一般

从表6可以看出,本文模型得出的研究区农业水资源可持续利用水平评价结果,与文献[21]的评价结果比较接近,整体上符合辽宁省水资源的可持续利用现状水平。由于二者采用的评价指标体系、

研究方法等不完全相同,因此各行政分区的排名情况略有差异,但从表6可以看出二者得出的 U_A 的整体趋势基本一致,只在局部排名顺序上稍有区别。参考近年来辽宁省水利厅公布的2006年辽宁省水资源公报等文献可以看出,本文模型得出的评价结果与各行政分区农业水资源开发利用情况等客观实际总体上是吻合的^[21-22,30]。

4 讨论

尽管以往在应用传统突变模型进行多准则决策分析时无需给出评价指标的具体权重,但是由于仍需要根据每个控制变量在系统中的作用、地位差异,通过专家打分法、层次分析法等确定评价指标的相对重要性排序,因此评价过程中无法完全避免人为因素的干扰和影响;同时,当各控制变量的相对重要性相差较大且主要控制变量对方案优劣评价起主导作用时,按传统突变模型取得的上层状态变量值可能并非来自起主导作用的控制变量,因此对评价体系中各评价指标之间关联程度的不同判断,也可能对评价结果产生一定影响,从而不利于最终方案的优选^[13]。此外,由于传统突变模型在应用过程中需要对0~1之间取值的控制变量进行逐层归一化计算,导致计算结果整体趋近于1,虽然评价结果的绝对大小仍可以进行排序,但若据此进行等级划分评定,评价结果就会不够直观,缺乏一定的说服力^[15-16]。

本文引入熵值法,根据系统控制变量的熵值确定指标相对重要性排序,与文献[12-13]提出的分别基于随机数与三角模糊数改进底层评价指标评分值的方法比较,能更大限度地避免主观随意性和片面性对评价过程的影响,提高了评价结果的可靠性。另外,本文基于突变系统的开放性和随机性考虑,遵循差异化和动态化的原则,科学合理地选取评价指标,引入熵权理论确定以非互补性评价原则进行方案决策,舍弃了非主导地位的控制变量,避免了评价指标对上层状态变量的控制作用,且较之依据互补性原则得出的 U_A 更加分散,起到了与文献[15-16]通过分值变换对突变模型进行改进的效果,实例分析表明评价结果等级分明、与文献[21]得出的结果基本一致,具有一定说服力。

5 结论

- a. 基于传统突变模型得出的评价结果存在风险。
- b. 基于熵值法确定各参评指标相对重要性、基于熵权理论确定决策原则的改进突变模型,与以往

单纯通过专家打分法确定指标权重及决策原则的传统模型相比,能够客观、准确地确定评价指标的重要性排序和决策原则,有效地避免了主观赋权的随意性以及客观赋权受限于样本数据的有限性;确定评价指标相对重要性过程中无需计算各指标具体权重,因此改进突变模型简便易行;依据非互补性决策原则得出的目标层总评分之间分值变得分散,因而评价结果更加直观。

参考文献:

[1] 武荣,李援农. 基于层次分析法的水资源安全模糊综合评价模型及其应用[J]. 水资源与水工程学报,2013,24(4):139-144. (WU Rong, LI Yuannong. Application of fuzzy assessment model of water resources security based on AHP [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,2013,24(4):139-144. (in Chinese))

[2] 马峰,王千,蔺文静,等. 基于指标体系投影寻踪模型的水资源承载力评价-以石家庄为例[J]. 南水北调与水利科技,2012,10(3):62-66. (MA Feng, WANG Qian, LIN Wenjing, et al. Evaluation of water resources carrying capacity based on index system with parameter projection pursuit mode [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10 (3) : 62-66. (in Chinese))

[3] 姜师,王慧敏,牛文娟,等. 基于免疫遗传算法水资源配置多阶段群决策优化模型研究[J]. 资源科学,2013,35(3):569-577. (LOU Shuai, WANG Huimin, NIU Wenjuan, et al. Optimization of multi-stage group decision making for water resource allocation [J]. Resources Science,2013,35(3):569-577. (in Chinese))

[4] 林忠兵,胡铁松,尹正杰. 基于模糊理想点法的多区域多目标水利工程建设排序[J]. 中国农村水利水电,2007(4):73-75. (LIN Zhongbing, HU Tiesong, YIN Zhengjie. Multi-region and multi-objective hydraulic project construction sorting based on fuzzy ideal point method [J]. China Rural Water and Hydropower, 2007 (4) : 73-75. (in Chinese))

[5] 尹志杰,管玉卉,胡晓雪. 区域水资源可持续利用系统评价的集对分析模型[J]. 水资源保护,2010,26(6):28-31. (YIN Zhijie, GUAN Yuhui, HU Xiaoxue. Set pair analysis model for assessment of regional water resources sustainable utilization system [J]. Water Resources Protection,2010,26(6):28-31. (in Chinese))

[6] 酆建强,陆桂华,杨晓华,等. 流域水资源承载能力综合评价的多目标决策:理想区间模型[J]. 水文,2004,24(4):1-4. (LI Jiangqiang, LU Guihua, YANG Xiaohua, et al. A multi-objective decision-making ideal interval model for assessment of water resources carrying capacity in river basins [J]. Hydrology, 2004, 24 (4) : 1-4. (in Chinese))

[7] 杨晓华,杨志峰,沈珍瑶,等. 水资源可再生能力综合评价的多目标决策理想区间法[J]. 中国科学: E 辑, 2004, 34 (增刊 1) : 34-41. (YANG Xiaohua, YANG Zhifeng, SHEN Zhenyao, et al. Renewable water resources capacity comprehensive evaluation weighted ideal interval multi-objective decision-making method [J]. Science in China; Ser E, 2004, 34 (Sup1) : 34-41. (in Chinese))

[8] 胡晓雪,杨晓华,酆建强,等. 河流健康系统评价的集对分析模型[J]. 系统工程理论与实践,2008(5):164-170. (HU Xiaoxue, YANG Xiaohua, LI Jiangqiang, et al. Set pair analysis model for river health system assessment [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2008 (5) : 164-170. (in Chinese))

[9] 杨晓华,杨志峰,酆建强. 区域水资源潜力综合评价的遗传投影寻踪方法[J]. 自然科学进展,2003,13(5):554-557. (YANG Xiaohua, YANG Zhifeng, LI Jiangqiang. Comprehensive evaluation of regional water resources potential genetic projection pursuit method [J]. Progress in Natural Science, 2003, 13 (5) : 554-557. (in Chinese))

[10] ARNOLD V I. Catastrophe theory [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1984.

[11] 姜璐,于连宇. 初等突变理论在社会科学中的应用[J]. 系统工程理论与实践,2002,22(10):113-117. (JIANG Lu, YU Lianyu. The application of primary catastrophe theory to social science [J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2002, 22 (10) : 113-117. (in Chinese))

[12] 施玉群,刘亚莲,何金平. 关于突变评价法几个问题的进一步研究[J]. 武汉大学学报:工学版,2003,36(4):132-136. (SHI Yuqun, LIU Yalian, HE Jinping. Further study on some questions of catastrophe evaluation method [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2003, 36 (4) : 132-136. (in Chinese))

[13] 史志富,张安,刘海燕,等. 基于突变理论与模糊集的复杂系统多准则决策[J]. 系统工程与电子技术,2006,28(7):1010-1013. (SHI Zhifu, ZHANG An, LIU Haiyan, et al. Multi-criteria decision making of complex system using catastrophe theory based on fuzzy set [J]. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28 (7) : 1010-1013. (in Chinese))

[14] 李柏洲,苏屹. 基于改进突变级数的区域科技创新能力评价研究[J]. 中国软科学,2012(6):90-101. (LI Baizhou, SU Yi. Study on the regional science and technology innovation capacity based on improved catastrophe progression method [J]. China Soft Science, 2012 (6) : 90-101. (in Chinese))

[15] 涂圣文,过秀成,孙志华,等. 改进的突变评价法在干线公路过境方案决策中的应用[J]. 交通与计算机,2008,26(3):65-68. (TU Shengwen, GUO Xiucheng, SUN Zhihua, et al. Application of improved catastrophe progression method to decision making of through traffic project for arterial highway [J]. Computer and

- Communications,2008,26(3):65-68. (in Chinese))
- [16] 唐明,邵东国,姚成林,等.改进的突变评价法在旱灾风险评价中的应用[J].水利学报,2009,40(7):858-862. (TANG Ming, SHAO Dongguo, YAO Chenglin, et al. Improved catastrophe theory based evaluation method and its application to drought disaster risk evaluation [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2009,40(7):858-862. (in Chinese))
- [17] 陈晓红,彭佳,吴小瑾.基于突变级数法的中小企业成长性评价模型研究[J].财经研究,2004,30(11):5-15. (CHEN Xiaohong, PENG Jia, WU Xiaojin. Appraisal model based on the sudden change progression for the growth of small and medium-sized enterprises[J]. Journal of Finance and Economics, 2004, 30 (11): 5-15. (in Chinese))
- [18] 郑德凤,臧正,苏琳.基于突变级数法的吉林省生态补偿标准核算[J].生态与农村环境学报,2013,29(4):537-540. (ZHENG Defeng, ZANG Zheng, SU Lin. Accounting of ecological compensation standards in Jilin Province using catastrophe progression method[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2013, 29 (4): 537-540. (in Chinese))
- [19] 李绍飞,孙书洪,王向余.突变理论在海河流域地下水环境风险评价中的应用[J].水利学报,2007,38(11):1312-1317. (LI Shaofei, SUN Shuhong, WANG Xiangyu. Application of catastrophe theory to risk assessment of groundwater environment for river basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38 (11): 1312-1317. (in Chinese))
- [20] 李祚泳,郭淳,汪嘉杨,等.突变模型势函数的一般表示式及用于富营养化评价[J].水科学进展,2010,21(1):101-106. (LI Zuoyong, GUO Chun, WANG Jiayang, et al. Generalized expression of potential function in catastrophe model and its application in eutrophication evaluation[J]. Advances Water Science, 2010, 21 (1): 101-106. (in Chinese))
- [21] 石丽忠,陈金良,马涛,等.辽宁省农业水资源可持续利用评价指标体系的应用研究[J].吉林农业大学学报,2008,30(3):334-339. (SHI Lizhong, CHEN Jinliang, MA Tao, et al. Application of assessment index system for sustainable utilization of agricultural water resources in Liaoning Province [J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2008, 30(3): 334-339. (in Chinese))
- [22] 张宝东,王殿武,李松.辽宁省水资源可持续利用存在的突出问题及对策[J].东北水利水电,2010,28(8):32-38. (ZHANG Baodong, WANG Dianwu, LI Song. Sustainable use of water resources in the outstanding problems and countermeasures in Liaoning Province[J]. Water Resources & Hydropower Northeast China, 2010, 28 (8): 32-38. (in Chinese))
- [23] 黄初龙.农业水资源可持续利用评价指标体系构建研究[J].泉州师范学院学报:自然科学,2006,24(6):66-71. (HUANG Chulong. Development of indicators system for sustainability assessment of agricultural water resources (AWR) use[J]. Journal of Quanzhou Normal University: Natural Science, 2006, 24(6): 66-71. (in Chinese))
- [24] 刘恒,耿雷华,陈晓燕.区域水资源可持续利用评价指标体系的建立[J].水科学进展,2003,14(3):265-270. (LIU Heng, GENG Leihua, CHEN Xiaoyan. Indicators for evaluating sustainable utilization of regional water resources[J]. Advances in Water Science, 2003, 14 (3): 265-270 (in Chinese))
- [25] 陈守煜.区域水资源可持续利用评价理论模型与方法[J].中国工程科学,2001,3(2):33-38. (CHEN Shouyu. Theory model and a method for qualitative assessment of sustainable development of regional water resources[J]. Engineering Science, 2001, 3 (2): 33-38. (in Chinese))
- [26] 王华.城市水资源可持续利用综合评价:以南京市为例[J].南京农业大学学报,2003,26(2):59-62. (WANG Hua. Method for assessment of sustainable utilization of urban water resources: taking Nanjing as a case study[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2003, 26(2): 59-62. (in Chinese))
- [27] 双文元,郝晋珉,黄晓英,等.基于信息熵和协整理论的新疆土地利用动态分析[J].中国农学通报,2011,27(6):249-255. (SHUANG Wenyuan, HAO Jinmin, HUANG Xiaoying, et al. Spatial temporal dynamic analysis of land use in Xinjiang based on information entropy and cointegration theory [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(6): 249-255. (in Chinese))
- [28] 谢霖铨,卢茜.基于信息熵理论的水利工程项目风险控制应用[J].价值工程,2012,2(2):58-62. (XIE Linquan, LU Xi. Study on application of information entropy in risk control of water project [J]. Value Engineering, 2012, 2(2): 58-62. (in Chinese))
- [29] 田硕.多目标决策下的公路建设项目优化排序研究[D].西安:长安大学,2007.
- [30] 辽宁省水利厅.2006年辽宁省水资源公报[N].辽宁日报,2007-03-22(A06).

(收稿日期:2013-05-12 编辑:胡新宇)

