

面向对象多属性差异的矩阵型灰色聚类方法及其应用

刘红旗^{a,b,c}, 方志耕^{a,b}, 李维东^{a,b}, 陶良彦^{a,b}

(南京航空航天大学 a. 经济与管理学院, b. 科学发展研究中心, c. 纪委办公室, 南京 210016)

摘要: 针对传统灰聚类法对聚类对象间的关系信息和属性间的差异信息利用不充分、灰类划分宽泛、聚类结果约束相对严格、完备性不足等问题, 提出一种面向对象多属性差异的矩阵型灰色聚类方法. 该方法充分利用对象已有的多属性信息, 可以在不同的属性类别组合上获得多元、客观的聚类结果, 使对象的分类更贴近于实际. 通过对安徽省国家级贫困县进行聚类分析, 展示了矩阵型灰色聚类方法的应用, 表明了矩阵型灰色聚类方法的实用性和有效性.

关键词: 多属性; 差异; 矩阵型; 灰色聚类; 贫困县类型

中图分类号: C934

文献标志码: A

Object-oriented multi-attribute differences matrix grey clustering method and its application

LIU Hong-qi^{a,b,c}, FANG Zhi-geng^{a,b}, LI Wei-dong^{a,b}, TAO Liang-yan^{a,b}

(a. College of Economics and Management, b. Scientific Development Research Center, c. Commission for Discipline Inspection Office, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China. Correspondent: LIU Hong-qi, E-mail: liuhongqi@nuaa.edu.cn)

Abstract: An object-oriented multi-attribute differences matrix grey clustering method is proposed considering that the traditional grey clustering methods cannot make full use of the information relationships between the clustering objects and differences information of object's multi-attributes. Grey class division is more general and the results of clustering have relatively strict constraints, lack of completeness. This method makes full use of existing multi-attribute information of the object, and can receive various, objective clustering results on different attribute category combination, making the classification of objects more realistic. Through the clustering analysis of state-level poverty-stricken counties in Anhui province, the results show the matrix grey clustering method's application and indicates practicality and effectiveness of the matrix grey clustering method.

Keywords: multi-attribute; difference; matrix; grey clustering; classification of poverty-stricken counties

0 引言

聚类是基于数据对象的描述属性, 将对象划分为若干组(class)或类(cluster)的过程, 并使得同一个组内的数据对象具有较高的相似度, 而不同组中的数据对象则是不相似的^[1]. 灰色聚类是根据灰色关联矩阵或灰数的白化权函数, 将观测对象聚集成若干个可定义类别或将其划分为一定类别的方法, 一个聚类可以看作是属于同一类的观测对象的集合^[2]. 自1982年灰色系统理论创立以来, 灰色聚类分析^[3]一直是灰色系统理论研究的重要领域之一. 由于它在处理“小样本、

贫信息”聚类问题上具有独特的优势, 灰色聚类已成为众多学者深入讨论并在社会与经济管理实践中得到广泛应用的灰技术之一.

目前, 灰色聚类的方法较多, 主要有灰色关联聚类^[4]、灰色定权聚类^[5]、灰色变权聚类^[6]、灰色最优聚类^[7]、灰色趋势关联聚类^[8]、灰色熵权聚类^[9-10]、杂合灰色聚类^[11]、基于属性识别的灰色聚类方法^[12]、以及灰色聚类评估模型的优化^[13-14]、延拓^[15-16]和应用^[17-19]等研究, 这些方法主要是根据对象的全部属性信息, 通过综合权重集成对象全部属性的指标数据,

收稿日期: 2013-11-10; 修回日期: 2014-02-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(70971064, 71173106, 71171113); 国家社科基金重大项目(10zd&014); 国家社科基金重点项目(12AZD102); 教育部人文社科青年基金项目(12YJC630115, 12YJC630276); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(NJ20140032, NN2012038, XNA12094, NJ20130020, NJ20120014).

作者简介: 刘红旗(1981—), 男, 副研究员, 博士生, 从事灰色系统理论、科技创新与管理的研究; 方志耕(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事灰色系统、评价理论与方法等研究.

实现对象在整体意义上的综合分类. 然而, 在现实的社会经济生活中, 决策者在进行政策设计或方案选择时, 往往希望能够从多层次、多角度对研究对象进行深入细致的分类, 进而更好地把握对象在不同属性上的相互差异与个性特征, 以提高政策瞄准的针对性或方案选择的实效性.

传统的灰色聚类方法虽然能够寻找和利用对象全局上的属性信息, 但在对聚类对象间的关系信息和对象诸多属性间的差异信息及其利用方面考虑不够充分; 在灰类构造上未能充分挖掘和利用聚类对象多属性差异, 导致类别的划分比较笼统和宽泛, 对聚类的结果有着相对严格的约束, 完备性不足, 这些都需要引起重视. 因此, 遵循灰色系统差异信息和最少信息的基本原理, 利用灰色关联度, 本文提出一种面向对象多属性差异的矩阵型灰色聚类方法. 该方法充分利用了对象已有多属性信息, 克服了传统灰色聚类方法在聚类过程中没有考虑聚类对象多属性差异性和聚类指标间排他性的局限, 聚类分析指标抽取更加严谨、全面, 分析流程更加科学, 类别划分更加多元、自由, 可以在不同的属性矩阵上获得客观、具体的多维聚类结果, 使得分类更加贴近实际.

1 矩阵型灰色聚类方法的基本概念与原理

设有 n 个聚类对象, 记对象集 $O = \{o_1, o_2, \dots, o_n\}$; 每个对象均有 p 个属性, 记属性集 $A = (a_1, a_2, \dots, a_p)$; 任一属性 $a_l (l = (1, 2, \dots, p))$ 下有 m_{a_l} 个属性指标. 设第 i 个对象在第 l 个属性 a_l 下的第 j 个属性指标为 $x_{ia_l}^j (j = (1, 2, \dots, m_{a_l}))$.

定义 1 称 $x_i = (x_{ia_1}, x_{ia_2}, \dots, x_{ia_p})$ 为第 i 个对象 o_i 的属性指标序列. 其中: $x_{ia_k} = (x_{ia_k}^1, x_{ia_k}^2, \dots, x_{ia_k}^{m_{a_k}})$; $k = 1, 2, \dots, m_{a_l}$.

定义 2 设 $V_{ia_l} = \eta_l \sum_{j=1}^{m_{a_l}} w_j r_{ia_l}^j$ 为第 i 个对象在第 l 个属性 a_l 下的综合评估值. 其中: η_l 为属性 a_l 的权重, η_l 的大小反映了决策者对不同属性的重视程度; w_j 为第 l 个属性 a_l 下第 j 个指标的权重, w_j 的大小体现了不同指标的重要程度; $r_{ia_l}^j$ 为消除量纲后的属性指标标准值. 则称 $V_i = (V_{ia_1}, V_{ia_2}, \dots, V_{ia_p})$ 为第 i 个对象 o_i 的属性综合评估值序列.

为使属性指标保持同一极性, 可依据指标属性值的类型合理选择比较的标准值处理方法. 效益型指标、成本型指标、适中型指标的原始数据值可分别按照下述方法进行处理:

效益型指标

$$r_{ia_l}^j = \frac{x_{ia_k}^j - \min_j \{x_{ia_k}^j\}}{\max_j \{x_{ia_k}^j\} - \min_j \{x_{ia_k}^j\}}; \quad (1)$$

成本型指标

$$r_{ia_l}^j = \frac{\max_j \{x_{ia_k}^j\} - x_{ia_k}^j}{\max_j \{x_{ia_k}^j\} - \min_j \{x_{ia_k}^j\}}; \quad (2)$$

适中型指标

$$r_{ia_l}^j = 1 - \frac{|x_{ia_k}^j - x_{ia_k}^j|}{\max_j |x_{ia_k}^j - x_{ia_k}^j|}, \quad (3)$$

其中 $x_{ia_k}^j$ 为适中型指标 $x_{ia_k}^j$ 的最优取值.

定义 3 设在任一属性 $a_l (l = (1, 2, \dots, p))$ 上均有 $s (s = (1, 2, \dots, n))$ 个灰类, 记第 l 个属性 a_l 上的第 k 个灰类为 $s_{a_l}^k (k = (1, 2, \dots, s))$, 则称 $s_{a_l} = (s_{a_l}^1, s_{a_l}^2, \dots, s_{a_l}^s)$ 为属性 a_l 下的灰类向量, $S = (s_{a_1}, s_{a_2}, \dots, s_{a_p})$ 为灰类集.

定义 4 设属性集 $A = (a_1, a_2, \dots, a_p)$, 灰类集 $S = (s_{a_1}^k, s_{a_2}^k, \dots, s_{a_p}^k)$, 则称 (A, S) 为矩阵灰类属性坐标空间.

每一个对象的所属类别可以视为矩阵灰类属性坐标空间上的一个点, 该点可以用对象的属性综合评估向量值表示; p 个属性上的 s 个灰类将矩阵灰类属性坐标空间划分成 s^p 个矩阵灰类子空间. 矩阵型灰色聚类法即是判断对象处于矩阵灰类属性坐标空间上哪一个矩阵灰类子空间, 每个对象所属的灰类不再是单一属性或整体属性上的综合分类的结果, 而是由不同属性类别组合的结果, 呈现矩阵形式.

2 矩阵型灰色聚类方法的实现

2.1 灰类子空间特征点的提取

命题 1 设在每一个灰类子空间上, 均存在一个能够显著体现该属性空间上灰类特征的特征点, 命名为特征点, 该点可以作为其所在灰类子空间的代表, 用 V_{fp} 表示. 每个灰类子空间都是由该特征点所表示的对象和与该点最接近的对象组成, 每个对象在属性灰类坐标空间的位置可以用不同属性下的综合评估值来确定.

灰类子空间的特征点可以依据下述思想和步骤提取.

Step 1: 在属性指标保持同一极性条件下, 构建属性灰类坐标空间, 寻找并定位极值点. 在属性灰类坐标空间中, 极值点为所有评估对象在不同属性维度下综合评估值同时取最小或最大的值, 即

$$V_{fp}^{\min} = (\min V_{ia_1}, \min V_{ia_2}, \dots, \min V_{ia_p}),$$

$$V_{fp}^{\max} = (\max V_{ia_1}, \max V_{ia_2}, \dots, \max V_{ia_p}). \quad (4)$$

Step 2: 以极值点 V_{fp}^{\min} 为中心, 以极值差的等分均值 $\{(V_{fp}^{\max} - V_{fp}^{\min}) / (s - 1)\} (s \geq 3)$ 为提取距离, 沿各属性维度上分别搜索并提取对应的特征值和位置, 直到搜索到包含各属性维度下的最大值为止 (以极值

点 V_{jp}^{\max} 为中心的情况与之类似).

Step 3: 先以 $V_{fp}^{\min} + \{(V_{fp}^{\max} - V_{fp}^{\min})/(s - 1)\}$ 为中心, 再逐步以属性坐标空间中的各均值等分点为中心, 以极值差的等分均值

$$V_{fp}^{\min} + \{(V_{fp}^{\max} - V_{fp}^{\min})/(s - 1)\}, s \geq 3$$

为提取距离, 沿各属性维度上分别搜索并提取对应的特征值和位置, 其对应特征值可以用下式表示:

$$V_{fp}^{\min} + k\{(V_{fp}^{\max} - V_{fp}^{\min})/(s - 1)\},$$

$$k = 1, 2, \dots, s - 1.$$

以此递推, 直至完全搜索到 V_{fp}^{\max} 时提取过程结束.

定义 5 设第 q ($q = 1, 2, \dots, s^p$) 个灰类子空间特征点为 V_{fp}^q , 则称 $V_{fp}^q = (V_{fpa_1}^q, V_{fpa_2}^q, \dots, V_{fpa_p}^q)$ 为第 q ($q = 1, 2, \dots, s^p$) 个灰类子空间特征点序列.

2.2 矩阵型灰色聚类结果的确定

设 $V_i = (V_{ia_1}, V_{ia_2}, \dots, V_{ia_p})$ 为系统特征序列, $V_{fp}^q = (V_{fpa_1}^q, V_{fpa_2}^q, \dots, V_{fpa_p}^q)$ 为比较序列. 依据灰色关联度的一般求解思路, 对每一个对象计算出其属性综合评估序列与各个矩阵灰类子空间特征点序列的灰色关联度 γ_{iq} ; 由 $\max_{1 \leq i \leq s^p} \{\gamma_{iq}\} = \gamma_{iq^*}$ 可以判定对象 o_i 属于第 q^* 个矩阵灰类. γ_{ii} 越大, 表明对象 o_i 越隶属于第 q^* 个矩阵灰类; 当有多个对象同属于第 q^* 个矩阵灰类时, 还可进一步根据灰色关联度的大小确定同属于第 q^* 个矩阵灰类上的各个对象的优劣或位次.

2.3 矩阵型灰色聚类的一般步骤

矩阵型灰色聚类方法的一般步骤归纳如下.

Step 1: 分别给出对象 o_i 在已知多个属性下指标数值, 并依据指标权重和属性权重计算得出对象 o_i 的属性综合评估序列 V_i .

Step 2: 依据 p 个属性上的 s 个灰类, 构成各个矩阵灰类属性坐标空间上的矩阵灰类; 并依据特征点的提取规则, 得出各矩阵灰类子空间的特征点序列.

Step 3: 依据灰色关联度的一般求解思路, 对每一个对象计算其属性综合评估序列与各个灰类子空间特征点序列的灰色关联度 γ_{iq} .

Step 4: 若 $\max_{1 \leq i \leq s^p} \{\gamma_{iq}\} = \gamma_{iq^*}$, 则可以判定对象 o_i 属于第 q^* 矩阵灰类.

3 案例研究

贫困县重点开发是我国经济社会发展的一项重要战略举措. 要彻底解决贫困县的贫困问题, 科学的决策和扶贫开发战略的制定是必不可少的, 而其首要的前提是不仅要判别出贫困县贫困问题的表现和程度, 而且更要弄清贫困县减贫的基础和条件. 从贫困县的经济现状来看, 贫困的发生是自然、社会、经济等多种因素共同作用的结果; 在贫困问题上,

各个贫困县既具有共性特征, 又有着相互差异的个性特点. 把握贫困县贫困的共性特征, 可以更好地从整体上认清贫困的本质和致贫的规律; 把握贫困县贫困的个性特点, 可以更好地针对不同县域特定的贫困尽快找到突破口, 科学设计和制定符合贫困县域实际的减贫政策. 因此, 科学合理地划分贫困县的类型, 是我国设计和制定扶贫开发战略必须要正视的问题.

本文着眼于如何大幅提升我国贫困县扶贫开发战略和政策的效果与针对性, 更好地把握贫困县的共性特征和个性特点, 以我国南部低山丘陵片区之一的安徽省 17 个贫困县为研究对象, 通过从贫困的表现(经济属性)和减贫的条件(资源属性)两个方面, 筛选具有代表性的指标体系(见表 1).

设在贫困的表现(经济属性)上有特别贫困、中等贫困和一般贫困 3 个预设灰类, 在减贫的条件(资源属性)上有资源富集、资源中等和资源匮乏 3 个预设灰类, 两个不同属性下的灰类共构成 9 个矩阵灰类子空间. 为便于计算, 假设在贫困的表现(经济属性)与减贫的条件(资源属性)的权重相等, 各属性下特征指标权重相等.

Step 1: 按照表 1 中列出的属性指标数值对其进行规范化处理, 并依据指标权重和属性权重计算出对象 o_i 的属性综合评估序列 V_i . 各县在贫困的表现(经济属性)和减贫的条件(资源属性)下的综合评估值如表 2 所示. 可得到最大评估序列和最小评估序列为

$$V_{\max} = (1.54, 1.68), V_{\min} = (0.52, 0.08).$$

Step 2: 依据两个属性下的预设灰类, 可以构造出矩阵灰类集, 并求出各矩阵灰类的特征点. 二维属性矩阵灰类集如下式所示:

$$\begin{bmatrix} \text{特别贫困-} & \text{特别贫困-} & \text{特别贫困-} \\ \text{资源匮乏} & \text{资源中等} & \text{资源富集} \\ \text{贫困-} & \text{贫困-} & \text{贫困-} \\ \text{资源匮乏} & \text{资源中等} & \text{资源富集} \\ \text{一般贫困-} & \text{一般贫困-} & \text{一般贫困-} \\ \text{资源匮乏} & \text{资源中等} & \text{资源富集} \end{bmatrix}; \quad (5)$$

各灰类子空间对应的特征点矩阵为

$$\begin{bmatrix} (0.52, 0.08) & (0.52, 0.88) & (0.52, 1.68) \\ (1.03, 0.08) & (1.03, 0.88) & (1.03, 1.68) \\ (1.54, 0.08) & (1.54, 0.88) & (1.54, 1.68) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Step 3: 针对每一个对象计算其属性综合评估序列与各个灰类子空间特征点序列的灰色关联度 γ_{iq} . 以临泉县为例, 如下所示:

$$\gamma_{\text{临泉县}} = \begin{bmatrix} 0.70 & 0.85 & 0.72 \\ 0.44 & 0.75 & 0.45 \\ 0.40 & 0.67 & 0.43 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

表1 2012年安徽省国家级贫困县贫困表现与减贫的条件统计表

贫困县	贫困的表现					减贫的条件					
	贫困发生率/%	人均财政收入/元	人均GDP/元	财政收支比	人均现金收支比	人均耕地面积/亩	企业单位数量/个	招商引资额/万元	公路里程/km	移动电话用户量/万	普高职业数量/个
临泉县	3.42	637.8	4603	1.11	0.8	0.82	59	17421	2117.25	69.83	13
阜南县	4.27	601.56	5887	0.94	0.72	0.95	97	39748	2059.02	52.59	15
颍上县	2.37	2119.18	8532	3.05	0.81	1.02	66	37520	2165	53.83	11
利辛县	3.25	1059.74	7413	1.59	0.69	1.24	85	9502	2480.92	51.12	13
太湖县	7.83	1419.75	12360	1.33	1.18	0.76	86	34540	1972.44	23.68	21
宿松县	4.15	1491.3	13378	1.84	1.09	0.99	119	15858	2324.98	34.85	16
岳西县	11.31	1589.73	13939	1.28	0.78	0.67	75	25630	2328.86	16.82	10
潜山县	5.89	2508.22	16634	2.08	0.82	0.65	127	43211	1637.39	24.45	14
寿县	4.98	843.43	7378	1.17	0.66	1.52	54	28863	2694.14	47.73	20
霍邱县	1.81	1673.43	10676	2.7	1.22	1.17	157	56930	3151.59	62.89	18
舒城县	2.37	1685.54	11401	2.22	0.88	0.39	120	42761	1894.74	34.71	24
金寨县	3.9	1796.28	10822	1.71	0.95	0.59	55	33072	3459.26	23.15	14
石台县	17.17	3294.1	14017	1.74	1.2	0.54	19	13973	1158.09	5.93	2
砀山县	1.39	1203.32	9982	1.7	0.9	0.65	184	20899	1537.36	38.17	30
萧县	1.48	1296.74	10074	1.76	0.74	1.07	143	40251	2411.06	54.98	21
灵璧县	1.81	1001.66	8958	1.26	0.79	1.58	114	20434	2646.88	47.58	19
泗县	2.56	1485.25	11532	1.85	0.79	1.55	142	23650	2302.81	9.68	22

注: 数据来源于2012年安徽省统计年鉴.

表2 2012年安徽省国家级贫困县经济属性与资源属性综合评估值

贫困县	贫困的经济属性	贫困的资源属性
临泉县	0.52	0.87
阜南县	0.55	1.1
颍上县	1.49	1.02
利辛县	0.9	0.95
太湖县	0.72	0.89
宿松县	1.01	0.92
岳西县	0.98	0.65
潜山县	1.54	0.88
寿县	0.74	1.22
霍邱县	1.14	1.68
舒城县	1.24	0.99
金寨县	1.04	0.9
石台县	1.13	0.08
砀山县	0.95	1.05
萧县	1.09	1.37
灵璧县	0.82	1.27
泗县	1.15	1.13

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{霍邱县}} &= S_{23} = 0.94, \gamma_{\text{舒城县}} = S_{22} = 0.93, \\ \gamma_{\text{金寨县}} &= S_{22} = 0.99, \gamma_{\text{石台县}} = S_{21} = 0.95, \\ \gamma_{\text{砀山县}} &= S_{22} = 0.93, \gamma_{\text{萧县}} = S_{23} = 0.86, \\ \gamma_{\text{灵璧县}} &= S_{22} = 0.91, \gamma_{\text{泗县}} = S_{22} = 0.92. \end{aligned} \quad (9)$$

依据式(9)计算结果, 可以得出如下聚类结论: 临泉县、阜南县、太湖县、寿县归属于资源中等型特困县; 颍上县、潜山县归属于资源中等型一般贫困县; 利辛县、宿松县、岳西县、舒城县、金寨县、砀山县、灵璧县、泗县归属于资源中等型贫困县; 霍邱县、萧县归属于资源富集性贫困县; 石台县归属于资源匮乏型贫困县.

4 结 论

立足于政策设计或方案选择的精准性, 通过充分挖掘和利用对象多属性信息差异, 以发现对象在多属性差异下的共性特征和类型分布, 实现对象类型划分的多元化和细致性, 本文提出了面向对象多属性差异的矩阵型灰色聚类方法. 矩阵型灰色聚类思想和方法充分体现了灰色系统理论中的差异信息原理和最少信息原理, 在深度挖掘对象在某些属性类别集合下的共性具有其独特的优势, 可以实现对象在多属性维度的同时进行聚类, 多维度属性组合的类别划分可以提高政策的瞄准性和针对性提供客观判据, 是一种更贴近现实经济生活的聚类评价方法.

参考文献(References)

[1] 游芳, 姜建国, 张坤. 基于二维属性的高维数据聚类算法研究[J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(5): 111-113.
(You F, Jiang J G, Zhang K. Cluster-algorithm studies

Step 4: 若 $\max_{1 \leq l \leq s^p} \{\gamma_{iq}\} = \gamma_{iq^*}$, 则可以判定对象 o_i 属于第 q^* 矩阵灰类. 从上例中可知

$$\max_{1 \leq l \leq 9} \{\gamma_{\text{临泉县}}\} = S_{12} = 0.85, \quad (8)$$

对应二维属性矩阵灰类集, 可以判断临泉县属于资源中等型特别贫困县.

按照上述方法, 依次可以算出其他县与各灰类子空间特征点的最大灰色关联度为

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{阜南县}} &= S_{12} = 0.87, \gamma_{\text{颍上县}} = S_{32} = 0.93, \\ \gamma_{\text{利辛县}} &= S_{22} = 0.94, \gamma_{\text{宿松县}} = S_{22} = 0.98, \\ \gamma_{\text{潜山县}} &= S_{32} = 0.99, \gamma_{\text{太湖县}} = S_{12} = 0.84, \\ \gamma_{\text{岳西县}} &= S_{22} = 0.88, \gamma_{\text{寿县}} = S_{12} = 0.93, \end{aligned}$$

- based on two-dimensional attribute higher-dimension data[J]. *Computer Technology and Development*, 2009, 19(5): 111-113.)
- [2] 刘思峰, 党耀国, 方志耕, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 105.
(Liu S F, Dang Y G, Fang Z G, et al. *The grey system theory and application*[M]. Beijing: Sciences Press, 2004: 105.)
- [3] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002: 484-496.
(Deng J L. *The foundation of grey theory*[M]. Wuhan: Press of Huazhong University of Science & Technology, 2002: 484-496.)
- [4] 罗党, 刘思峰. 灰色关联决策方法研究[J]. *中国管理科学*, 2005, 13(1): 101-106.
(Luo D, Liu S F. Study on the method for grey incidence decision-making[J]. *Chinese J of Management Science*, 2005, 13(1): 101-106.)
- [5] 党耀国, 刘思峰, 翟振杰, 等. 灰色综合聚类评估模型的研究[J]. *统计与决策*, 2004, 178(10): 4-5.
(Dang Y G, Liu S F, Zhai Z J, et al. Study on grey comprehensive evaluation model of clustering[J]. *Statistics and Decision*, 2004, 178(10): 4-5.)
- [6] 王正新, 党耀国, 刘思峰. 基于白化权函数分类区分度的变权灰色聚类[J]. *统计与信息论坛*, 2011, 26(6): 23-27.
(Wang Z X, Dang Y G, Liu S F. Grey clusters with variable weights based on the classification degree of the whitening weight functions[J]. *Statistics & Information Forum*, 2011, 26(6): 23-27.)
- [7] 肖新平, 肖伟. 灰色最优聚类理论模型及其应用[J]. *运筹与管理*, 1997, 6(1): 21-26.
(Xiao X P, Xiao W. Grey optimal theory model of classification and its application[J]. *Operations Research and Management Science*, 1997, 6(1): 21-26.)
- [8] 陈德军, 熊和金, 陈绵云. 灰色趋势关联聚类及其在数据挖掘中的应用[J]. *系统工程与电子技术*, 2004, 26(5): 599-601.
(Chen D J, Xiong H J, Chen M Y. Grey trend relational clustering and its application in data mining[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2004, 26(5): 599-601.)
- [9] 米传民, 刘思峰, 党耀国, 等. 灰色熵权聚类决策方法研究[J]. *系统工程与电子技术*, 2006, 28(12): 1823-1825.
(Mi C M, Liu S F, Dang Y G, et al. Study on grey entropy weight clustering decision-making[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2006, 28(12): 1823-1825.)
- [10] Manman S, Lin Z, Yan S. Application of grey entropy clustering decision method to engineering bidding decision-making[C]. 2011 IEEE Int Conf on Grey Systems and Intelligent Services(GSIS). Nanjing: IEEE, 2011: 609-612.
- [11] 刘勇, 菅利荣, 刘思峰. 杂合灰色聚类与变精度粗糙模糊集的概率决策方法[J]. *系统工程*, 2012, 27(5): 89-95.
(Liu Y, Jian L R, Liu S F. Probabilistic decision method and application based on the hybrid model of grey clustering and variable precision rough set[J]. *Systems Engineering*, 2012, 27(5): 89-95.)
- [12] 罗党, 秦玉慧. 基于属性识别的灰色聚类方法[J]. *华北水利水电学院学报*, 2007, 28(5): 90-92.
(Luo D, Qin Y H. Grey clustering method based on attribute recognition[J]. *J of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power*, 2007, 28(5): 90-92.)
- [13] 裴玲玲, 陈万明, 沈春光. 灰色聚类评估模型的优化研究[J]. *内蒙古师范大学学报: 自然科学汉文版*, 2012, 41(5): 462-466.
(Pei L L, Chen W M, Shen C G. Study on the optimization of grey cluster evaluation model[J]. *J of Inner Mongolia Normal University: Natural Science Edition*, 2012, 41(5): 462-466.)
- [14] Li Liu, Jian-zhong Zhou, Xue-li An, et al. Improvement of the grey clustering method and its application in water quality assessment[C]. ICWAPR'07 Int Conf on Wavelet Analysis and Pattern Recognition. Beijing, 2007, 2: 907-911.
- [15] 张荣, 刘思峰, 刘斌, 等. 灰色聚类评价方法的延拓研究[J]. *统计与决策*, 2007, 258(18): 24-26.
(Zhang R, Liu S F, Liu B, et al. Extended study on grey cluster appraising method[J]. *Statistics and Decision*, 2007, 258(18): 24-26.)
- [16] Wei M, Sifeng L, Bo Z, et al. Standard triangular whitenization weight function and its application in grey clustering evaluation[J]. *J of Grey System*, 2012, 24(1): 39-48.
- [17] Liu Y C, Xu J X. Risk evaluation of ccit model in ant colony housing supply based on ahp-grey clustering method[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 380-384(2013): 1210-1215.
- [18] Xie N, Xin J, Liu S. China's regional meteorological disaster loss analysis and evaluation based on grey cluster model[J]. *Natural Hazards*, 2013, 71(2): 1-23.
- [19] Hongqi Liu, Zhigeng Fang, Naiming Xie, et al. Matrix grey clustering model based on object dimension incompatibility attributes constraint and its application in poverty student financial assistance policy design[J]. *J of Grey System*, 2013, 25(1): 76-85.

(责任编辑: 李君玲)