

基于证据权-奇异性-灰色理论的山西五台地区 金矿成矿研究

范海明¹, 王翔^{2,3}, 茹湘兰²

FAN Haiming¹, WANG Xiang^{2,3}, RU Xianglan²

1. 山西省地质调查院, 山西太原 030001;

2. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037;

3. 中国地质大学(北京), 北京 100083

1. *Geological Survey of Shanxi Province, Taiyuan 030001, Shanxi, China;*

2. *Development Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China;*

3. *China University of Geoscience (Beijing), Beijing 100083, China*

摘要:山西五台地区位于华北陆台中部,是山西省内重要的金矿成矿区域,地质条件复杂,近年来找矿突破较小。在矿产预测中,可以结合证据权快速筛选地质变量,求取权重,计算地质奇异性指数,提取局部地质弱异常;利用灰色理论只需少量信息进行预测的特点,圈定找矿靶区,寻找突破。应用证据权-奇异性-灰色理论方法圈定了研究区预测靶区,靶区内通过已知矿床的验证,提取了4个一级靶区,1个二级靶区,确定了该区域金矿找矿突破口,明确了证据权-奇异性-灰色理论关联分析预测法在矿产预测评价中的重要应用价值和独特的应用效果。

关键词:五台;金矿;非线性;灰色理论;奇异性;成矿预测

中图分类号:P618.51;P628 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2017)08-1462-05

Fan H M, Wang X, Ru X L. A study of mineralization of Wutai gold deposits in Shanxi Province based on the weight of evidence-singularity-gray theory. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(8):1462-1466

Abstract: Located in the central part of North China Craton, Wutai area is an important area of gold mineralization in Shanxi Province; nevertheless, complex geological settings of this area lead to rare recent prospecting breakthroughs. In mineral prediction, the geological evidence weight approach can rapidly screen geological variables to calculate weights and anomaly index and extract local weak geological anomalies, whereas the gray theory approach can delineate prospecting targets by using only a small amount of information. These methods can be jointly utilized to look for a breakthrough. In delineating the prognostic target areas based on verified known deposits, four primary targets and a secondary target in Wutai area were delineated. This Weight - Anomaly - Gray Theory conjoint analysis is believed to be an important application in mineral prediction with unique application effect.

Key words: Wutai; gold deposit; nonlinear; gray theory; singularity; metallogenic prediction

“358”地质找矿行动是国土资源部继地质找矿改革发展大讨论后的又一重大战略部署。“整装勘查”是指在资源前景明朗的地区,打破传统的评价阶段划分模式,将物、化、电、磁、钻等多工种、多方法整合施工,进行成矿预测。成矿预测是在不确定

条件下制定最优决策的工作。由于矿床类型具有多样性、成因复杂性、控矿因素隐蔽性及找矿信息的多解性,探索成矿预测过程客观化、定量化和精确化一直是成矿预测学的前沿课题^[1]。1990年以来,赵鹏大等^[2]系统地提出了“综合地质异常致矿”

收稿日期:2016-10-13;修订日期:2017-03-11

资助项目:中国地质调查局项目《山西省矿产资源潜力调查》(编号:121201813004)

作者简介:范海明(1980-),男,硕士,工程师,从事地质矿产、地质遥感研究。E-mail:395827397@qq.com

理论和方法,认为:“矿床本身就是某种有用元素或矿物(或其组合)形成的、具有经济价值的地质异常”。A·Г·哈尔钦科夫(1987)^[2]指出,“除大量服从于一般规律的普通矿床外,任何地质演化过程中都可能出现异常成分或个体,其异常性原因有时不明,这就为预测带来困难,而它的形成与超常因素的作用相关,查明这些因素有时是困难的。因此,常规相似类比法预测这种矿床是不可能的”。成矿系统中各因素间的关联性、程度的多样性,以及常出现的自组织性、自相似性和奇异性,使非线性理论和方法^[3]在成矿规律研究和成矿预测中的应用近年取得很大的发展。

本文以山西五台地区金矿为例,展示致矿地质异常与矿体间的非线性关系,强调以“求异”准则为指导的成矿预测的重要性^[4]。在致矿异常提取和异常分形奇异性提取的基础上,以灰色理论为基础进行多元信息综合、集成,最终进行矿床预测的基本过程。

1 研究区地质概况

五台山地区位于山西省的北东部,地处华北平原与高原的交汇处,地理坐标为:东经112°38′~113°42′、北纬38°32′~39°12′。位于华北陆台中部,2条北东向韧性剪切带将研究区划分为3个构造分区,桑干河-恒山高级变质区(Ⅰ)、五台山中-低级变质片岩带绿泥岩带(Ⅱ)和阜平花岗-片麻岩穹窿(Ⅲ)。五台群中-下部的火山-硅铁建造和上部的中酸性火山沉积建造、滹沱群沉积变质砾岩建造及长城系高于庄组碳酸盐岩建造为本区的3个层控型金矿成矿层位。研究区自新太古代一元古代经历了3次区域性地壳运动,即涑水运动、五台运动和中条运动。五台群整体构造轮廓表现为60°~70°方向的褶皱构造带和脆韧性剪切带,体现了挤压运动机制。褶皱构造和区域性整合“断层”决定了(准)同生金矿化带北北东“单向”带状分布的展布特征。盖层构造层受燕山运动影响,主要为一系列北东向逆冲和北西向张性断层,伴随中酸性岩浆岩活动和火山陷落构造。五台群基本继承了前几期的构造轮廓,形成以北东向褶皱、韧性剪切带和北西向脆性断裂交切的菱形格子状构造格局,这种格局成为研究区内金(银)矿化带“双向”分布的主导因素。在格子状的交切部位,往往形成有远景的金银或多

金属矿田。中-酸性侵入岩与次火山岩在研究区分布较广。由英云闪长岩-奥长花岗岩等组成五台期花岗杂岩体,以早期富钠与晚期富钾为特征,规模较大,与五台群变质火山沉积岩系间常为韧性或脆韧剪切断裂接触,是剪切型金矿化的重要赋存部位。中条期花岗岩和(辉长)辉绿岩,岩性有似片麻状花岗岩、黑云母花岗岩、角闪石花岗岩、钠质花岗斑岩等,发育于五台山东部,北西向成群(带)平行排列,与唐河断裂的先期基底深断裂有关。少数岩体边部因燕山期断裂继承发展与岩浆热液沿其充填,有好的金矿形成。研究区受燕山期次火山岩浆热液影响,有较好的金矿化,以及银、锰等多金属矿化^[4]。

研究区金矿模式:①五台群火山沉积变形变质热液再造型金矿床,受多期褶皱、剪切变形变质作用控制,碳酸盐化镁铁质火山沉积硅铁建造及中基性-中酸性火山沉积建造为含矿层;②滹沱群沉积变质砾岩型金矿;③长城系渗滤热液型金银矿,矿质沿地层或构造裂隙沉淀;高于庄组碳酸盐岩及其中的断裂带为赋矿层和控矿构造;④燕山期的次火山岩浆热液型金多金属矿床分布于五台台隆,中酸性次火山杂岩体是成矿作用的主导因素,北西向主干断裂是区域性导矿与容矿构造。在构造岩的背景下,发育有硅化、钾化、碳酸盐化、黄铁矿化、绢云母化、高岭土化蚀变等,少见青盘岩化^[5]。

2 地质变量选取与奇异性计算

2.1 地质变量选取及权重计算

收集整理研究区内地质、化探数据,主要有1:20万Au、Ag、Cu、Pb、Zn、Mo元素地球化学异常图、侵入体分布图、含矿地层、断裂构造密度分布图。

证据权法是加拿大地质数学学家Agterberg提出的,将具有地质意义的地质因子划为一系列的多边形单元,计算每个因子的先验概率及权重^[6]。假设研究区被划分为 T 个等大小的网格单元,其中有 D 个网格单元含有已知矿点, D 为不含矿点网格单元数;将每个地质因子看作独立的证据因子,对任意一个证据因子,其成矿贡献的权重定义为^[7-9]:

$$W^+ = \ln \left\{ \frac{P(B/D)}{p(B/\bar{D})} \right\} \quad W^- = \ln \left\{ \frac{P(\bar{B}/D)}{p(\bar{B}/\bar{D})} \right\} \quad (1)$$

W^+ 、 W^- 分别为证据因子存在区、不存在区的权重,如原始数据缺失,权重值为0;其中 B 为该因子

存在的网格单元总数, B 为这种因子不存在的网格单元总数。

依据证据权评价法计算出先验概率, 参与本次计算的已知金矿点数为14个, 组织了9个地质变量图层。在进行评价计算时, 参照计算时的证据权值和变量独立性分析数据, 发现有部分变量存在不相关性和非独立性。凡不相关的变量予以舍弃; 非独立的变量, 根据地质成矿背景和成矿条件进行筛选, 最终选择含矿地层、控(容)矿侵入岩、断裂密度、化探Au元素异常、化探Ag元素异常、化探Pb元素异常为最后的6个地质变量计算因子(图1; 表1)。

2.2 奇异性计算

地质异常成矿预测理论强调了地质异常与矿床的形成及时空分布的内在联系^[1]。成矿作用受到地球内部非线性动力学机制的制约和地球内外环境的影响, 具有在较短时间或空间间隔内产生巨大能量释放或物质的超常富集、堆积的特点。这些能量释放和物质富集的异常性称之为奇异性^[10]。因此, 奇异性可能是异常地质事件的各种非线性地质过程的基本属性, 其产生的结果具有自组织性、自相似性、奇异性并可采用多重分形模型进行度量 and 研究^[11-12]。研究表明, 奇异性能有效地获取低缓、微弱、难识别异常信息, 并可以从背景中区分复杂的叠加异常^[13]。

与传统统计学或非奇异性数据不同, 奇异性从多重分形的角度描述了场的分布特征, 度量了异常

的局部标度性和奇异性^[14]。基于多重分形理论定义的奇异性指数 α ^[15] 可以度量异常的局部奇异性。奇异性指数 $\alpha \approx 2$ 时, 表明为未受到成矿或外源影响的地段; 奇异性指数 $\alpha < 2$ 时, 表明该地段由于成矿作用影响而造成元素富集, 元素密度随分布范围缩小而增大; 奇异性指数 $\alpha > 2$ 时, 表明该区域元素贫化, 元素密度随分布范围缩小而减小。奇异性分析得到的是有关场的多重分形维数的信息^[16]。

奇异性指数计算方法为: $\rho(\varepsilon) \propto \varepsilon^{\alpha-2}$, 其中 ε 为尺度范围, $\rho(\varepsilon)$ 为尺度范围内的平均密度, α 为奇异性指数。奇异性指数计算常采用基于窗口的方法。对于待计算的任一网格, 定义一系列以该网格为中心的不同尺度窗口 ($\varepsilon_{\min} = \varepsilon_1 < \varepsilon_2 < \dots < \varepsilon_n = \varepsilon_{\max}$), 通过计算每一个尺度窗口内地质变量因子含量的密度值, 同时与相应窗口尺度 (ε) 建立线性关系: $\log[\rho(\varepsilon)] = C + (\alpha - 2)\log(\varepsilon)$, 通过最小二乘法求得 $\alpha - 2$, 即为该线性关系的斜率, 求取奇异性指数 α ^[15-17]。通过上述方法对所选取的地质变量因子含矿地层、控(容)矿侵入岩、断裂构造密度、化探Au元素异常、化探Ag元素异常、化探Pb元素异常的奇异性指数提取。

3 灰色关联度过程

灰色系统理论是由著名学者邓聚龙首创的一种系统科学理论(Grey Theory), 其中的灰色关联分析是根据各因素变化的相似程度, 来判断因素之间的关联程度。灰色系统理论着重研究概率统计模糊数学难以解决的“小样本, 贫信息”的不确定性问题^[18]。显然地质异常找矿具有这一特征。矿床预测中控矿地质因素与矿床形成、分布密切相关; 在矿床的预测评价过程中, 可以用它们与已知矿床信息关联度的大小进行定量评价, 相关程度越高, 则成矿越有利^[19]。

(1) 将研究区进行单元划分, 本次通过分析将研究区单元格划分为若干个 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 栅格单元, 组成决策矩阵(比较数列)。通过前文分析, 建模参数(地质变量因子)为6个。

(2) 对数据进行无量纲化处理。由于地质异常计算的奇异指数的意义有所不同, 导致数据的量纲差异, 因此在进行

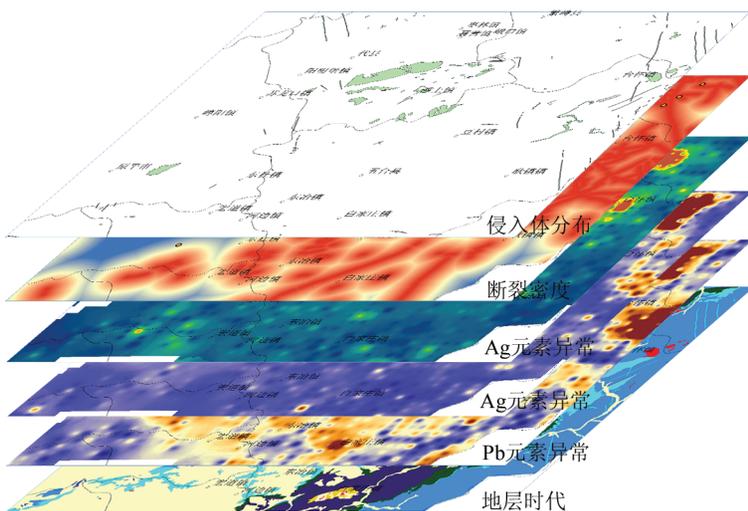


图1 研究区证据权评估后选取的地质变量
Fig. 1 Geological variables selected for the evaluation of evidence in the study area

表 1 五台地区证据因子权重

Table 1 Weight of evidence factor in Wutai area

变量名称	W ⁺	W ⁻
含矿地层面积百分比	2.357	-0.311
控(容)矿侵入岩缓冲区	2.613	-0.315
断裂构造密度	0.674	-0.481
化探Au元素异常	2.810	-0.369
化探Ag元素异常	0.190	-0.148
化探Pb元素异常	0.145	-0.142

灰色关联度分析时,一般都要进行无量纲化的数据处理。本文采用效益型指标^[19-20]进行无量纲化处理^[21-22]。

(3)建立参考序列(母序列),由研究区已知 14 个矿床(点)的地质变量组合而成,即求取它们的均值乘以权重后形成的最优序列指标 $G=(g_1, g_2, \dots, g_6)^T$,式中 $g_i(i=1, 2, \dots, 6)$ 为矿床(点)处前文所述 6 个地质变量因子的奇异指数无量纲化结果。

(4)求参考数列与比较数列的灰色关联系数 $\xi(X_i)$,实质上是曲线间几何形状的差别程度。根据灰色系统理论,设 $\{C^*\}=[C_1^*, C_2^*, \dots, C_n^*]$ 为参考数列, $\{C\}=[C_1, C_2, \dots, C_n]$ 为被比较数列,则用关联分析法分别求得第 i 个被评价对象的第 k 个指标与第 k 个最优指标的关联系数,即

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |C_k^* - C_k^i| + \rho \max_i \max_k |C_k^* - C_k^i|}{|C_k^* - C_k^i| + \rho \max_i \max_k |C_k^* - C_k^i|} \quad (1)$$

式中 $\rho \in (0, 1)$,一般取 $\rho = 0.5$ 。

(5)关联系数是比较数列与参考数列在各个时刻的关联程度值,所以它是一个数列;信息过于分散,不便进行整体比较。因此有必要将关联系数列集中为一个值,同时依据前文的地质变量权重,则第 i 个预测单元与参考序列的关联度 r_i 为:

$$r_i = \sum_{j=1}^m w_j \cdot \xi_{ij}, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

W_j 为各个地质变量权重。若关联度 r_i 最大,则 $\{C\}$ 与最优指标 $\{C^*\}$ 最接近,据此可以排出各被评价对象的优劣次序,判断预测单元的成矿有利度,最终确定成矿靶区^[23-25]。

4 预测评价及结论

本文通过证据权分析、奇异指数计算,以及灰色理论建立了研究区的比较数列矩阵,通过均值处理乘以权重,得到最终的比较数列(表 2)。通过表 2

可以发现,异常分布较均匀,各矿点间同类地质变量间差异较小,充分体现了奇异指数在成矿区域地质异常的一致性,这也使得地质异常成为成矿预测更准确的数据源,将地质异常数据更好的进行了整合,有利于形成找矿突破。

采用公式(1)和(2),结合表 2 权重值建立的比较数列,对无量纲化地质变量处理后的数据进行计算,求取关联度值,获得最终的预测图(图 2)。

根据关联度计算的等值线图(图 2),将研究区金矿进行了靶区分级,共 3 个层次。大于 6.5 为 I 级靶区,5.5~6.5 为 II 级靶区,4.5~5.5 为 III 级靶区。除去存在已知矿点的区域外,圈定了研究区 5 处靶区,其中①②③④为 I 级靶区,⑤为 II 级靶区。从靶区的分布看,主要集中在五台群火山沉积建造及滹沱群沉积变质砾岩中。因此,太古代五台群火山沉积建造、滹沱群沉积变质砾岩是重要的赋矿层位,靶区中心岩体发育,构造相对密集,这个与前文总结的研究区地质找矿标志吻合。所圈定的 5 个预测区均落在局部地质异常中,与奇异性指数计算结果一致,进一步印证了“地质异常理论”。通过证据权-奇异性-灰色理论计算得到的结果,在已知矿床(点)区域得到了很好的佐证,说明证据权-奇异性-灰色理论分析方法在找矿突破中可以发挥重要的作用。

通过结合证据权对证据因子的筛选及权重计

表 2 研究区已知矿点处的奇异指数无量纲化值比较数列矩阵

Table 2 The singular index study area deposits at the dimensionless value of comparative sequence matrix

矿点 序号	Ar 地层	侵入岩 缓冲区	断裂 密度	Au 化探异常	Ag 化探异常	Pb 化探异常
1	1.0000	0.9816	0.3632	0.0193	0.0762	0.3237
2	1.0000	0.9185	0.3734	0.0197	0.0785	0.2989
3	1.0000	0.9816	0.3813	0.0190	0.0942	0.3768
4	1.0000	0.9650	0.3135	0.0163	0.0832	0.3514
5	1.0000	0.8850	0.3615	0.0162	0.0781	0.3916
6	1.0000	0.8676	0.3108	0.0106	0.0719	0.3329
7	1.0000	0.9724	0.3470	0.0197	0.0374	0.3984
8	1.0000	0.9476	0.3462	0.0108	0.0714	0.3469
9	1.0000	0.9576	0.3068	0.0087	0.0760	0.3624
10	1.0000	0.9740	0.2998	0.0069	0.0744	0.3205
11	1.0000	0.9855	0.3249	0.0128	0.0660	0.3217
12	1.0000	0.9316	0.3517	0.0051	0.0771	0.3022
13	1.0000	0.9362	0.3224	0.0086	0.0771	0.3323
14	1.0000	0.9240	0.3415	0.0069	0.0819	0.3412
均值	1.0000	0.9449	0.3389	0.0129	0.0745	0.3429
权重	2.3570	2.6130	0.6740	2.8100	0.1900	0.1450
权重后值	2.3570	2.4689	0.2284	0.0363	0.0142	0.0497

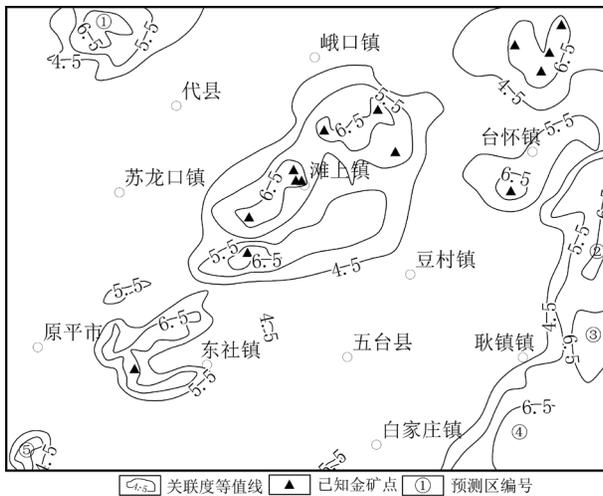


图2 研究区金矿关联度等值线分布图
Fig. 2 The distribution of the correlation degree of gold in the study area

算方面的优势,大量压缩了计算的复杂性,提取了最有利于进行成矿预测的地质变量因子。同时,对地质变量因子进行非线性多重分形奇异性指数计算,将成矿域内小范围有地质成矿异常、而大面积区域成矿地质异常弱,或没有显著变化的异常区域挖掘出来。灰色关联分析方法进行了综合因素的考虑,充分发挥其解决信息部分清楚、部分不清楚,并带有不确定性问题的作用,具有较强的抗干扰能力。以在已知金矿床(点)上建立的参考数列为灰色子波,对研究区的比较数列矩阵进行关联度计算,圈定关联度等值线,确定了金矿靶区。

参考文献

- [1]赵鹏大.成矿定量预测与深部找矿[J].地学前缘(中国地质大学(北京),北京大学),2006,14(5):1-9.
- [2]Zhao P D, Chen J P, Zhang S T, et al. Mineral deposits: geological anomalies with high economic value[C]//Cheng Q, Bonham-Carter G F. Proceedings of IAMG'05,2005:1022-1027.
- [3]詹姆斯·格莱克著,张淑誉译.混沌:开创新科学[M].上海:上海译文出版社,1990.
- [4]范海明.五台山—恒山地区金矿多源信息综合研究[D].中国地质大学(北京)硕士学位论文,2009(1):5-15.
- [5]范海明.基于适宜性模型的多元信息成矿预测研究——以五台山—恒山地区金矿为例[J].科技创新与生产力,2013,6:100-102.
- [6]Agterberg F P, Bonham-Carter G F, Weight D F. Statistical Pattern Integration for Mineral Exploration[C]//Gaal G, Merriam D F. Computer Applications for Mineral Exploration in Resource Exploration. Oxford:Pergamon Press,1990:1-21.
- [7]Chen J P, Wang G W, Hou C B. Quantitative Prediction and Evaluation of Mineral Resources Based on GIS: A Case Study in Sanjiang Region, Southwestern China[J]. Natural Resources Research, 2005, 24(1):15-24.
- [8]Cheng Q M. Application of Weights of Evidence Method for Assessment of Flowing Wells in the Greater Toronto Area, Canada[J]. Natural Resources Research, 2004,13(2):77-86.
- [9]Emmanuel J M. Carranza Martin Hale Geologically Constrained Probabilistic Mapping of Gold Potential, Baguio District, Philippines[J]. Natural Resources Research, 2000,9(3):237-253.
- [10]Cheng Q M. Singularity modeling of geo-anomalies and recognition of anomalies caused by buried sources[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2011,36(2): 307-316.
- [11]Cheng Q M, Agterberg F P, Bonham-Carter G F. A spatial analysis method for geochemical anomaly separation[J]. Journal of Geochemical Exploration,1996,56(3):183-195.
- [12]陈志军.多重分形局部奇异性分析方法及其在矿产资源信息提取中的应用[D].中国地质大学(北京)博士学位论文,2007,(1): 35-77.
- [13]成秋明.成矿过程奇异性与矿产预测量化的新理论与新方法[J].地学前缘,2007,14(5):42-53.
- [14]成秋明,赵鹏大,陈建国,等.奇异性理论在个旧锡铜矿产资源预测中的应用:成矿弱信息提取和复合信息分解[J].地球科学(中国地质大学学报),2009,34(2):232-242.
- [15]成秋明.非线性成矿预测理论:多重分形奇异性—广义自相似性—分形谱系模型与方法[J].地球科学(中国地质大学学报),2006,31(3):337-348.
- [16]张焱,周永章.奇异性理论在钦杭成矿带(南段)庞西垌银金矿产资源预测中的应用[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(9): 3558-3563.
- [17]李晓晖,袁峰,贾蔡,等.基于地统计学插值方法的局部奇异性指数计算比较研究[J].地理科学,2012,32(2):136-140.
- [18]邓聚龙.灰色系统基本方法[M].武汉:华中理工大学出版社,1992:24-29.
- [19]吕鹏,陈建平,蔡如华,等.基于灰色关联分析预测法的腾冲硅镁土矿床资源评价[J].地质找矿论丛,2007,22(1):56-61.
- [20]Kang J, Zou Z H. Time Prediction Model for Pipeline Leakage Based on Grey Relational Analysis[J]. Physics Procedia, 2012, 25: 2019-2014.
- [21]Song Q B, Shepperd Martin. Predicting software project effort: A grey relational analysis based method[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38:7302-7316.
- [22]Wang S, Zhang J L. Study on coal mines accidents based on the grey relational analysis[J]. Journal of Coal Science & Engineering (China),2008,1(14):81-84.
- [23]Ip W C, Hu B Q, Wong H,et al. Applications of grey relational method to river environment quality evaluation in China[J]. Journal of Hydrology, 2009,379:284-290.
- [24]麻志勇,成荣树.用灰色系统对赣西金矿床成矿地质异常进行评价和预测[J].有色金属矿产与勘查,1994,3(5):312-316.
- [25]纪瑛瑛,孙忠实.灰色系统理论在海沟金矿成矿预测中的应用[J].吉林地质,1999,18(4):38-42.