

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2019.25.S1.027

# 证据权法在新疆卡拉麦里金矿带断层与 金矿化空间定量评价中的应用

曹小红<sup>1</sup>, 弓小平<sup>2</sup>, 韩琼<sup>3</sup>, 孟和<sup>1</sup>

(1. 新疆工程学院矿业工程与地质学院, 新疆 乌鲁木齐 830000;

2. 新疆大学地质与矿业工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830011;

3. 新疆地质调查院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

**摘要:** 新疆东准噶尔卡拉麦里金矿带是新疆重要的金成矿带之一, 相关学者开展了大量的生产和科研工作, 取得了丰硕的找矿成果, 积累了大量的研究。近年来, 随着向深部探测工作的兴起和成矿预测方法的不断成熟, 由定性研究向定量研究成为一种必然选择。研究在以往科研成果综合研究的基础上, 建立基于 ArcGis 平台的数据库, 应用证据权法开展卡拉麦里金矿带断层与金矿化空间定量评价研究, 研究表明断层距离和断层密度为重要的证据权因子, 断层距离在 0~1500 m 范围内, 成矿作用最强, 随着距离的增大, 成矿作用变弱。断层密度在 0.26~0.66 为中高有利成矿区域。该研究成果对卡拉麦里金矿带深部及外围的找矿工作具有重要意义。

**关键词:** 证据权法; 断层; 金矿化; 空间定量评价

**中图分类号:** P618.51

**文献标识码:** A

## APPLICATION OF EVIDENCE WEIGHT METHOD IN QUANTITATIVE EVALUATION OF FAULTS AND GOLD MINERALIZATION IN KALAMAILI GOLD BELT, XINJIANG

CAO Xiaohong<sup>1</sup>, GONG Xiaoping<sup>2</sup>, HAN Qiong<sup>3</sup>, MENG He<sup>1</sup>

(1. College of Mining Engineering and Geology, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830000, Xinjiang, China;

2. College of Geology and Mining Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830011, Xinjiang, China;

3. Geological Survey Institute of Xinjiang, Urumqi 830000, Xinjiang, China)

**Abstract:** The Kalamaili gold belt in East Junggar is one of the important gold metallogenic belts in Xinjiang. Relevant scholars have carried out a large number of production and scientific research work, and achieved fruitful results in ore-finding, and accumulated a lot of research. In recent years, with the rise of deep exploration and the maturity of mineralization prediction methods, qualitative research has become an inevitable choice. Based on the previous comprehensive research, this research establishes a database platform based on ArcGis platform, and uses the evidence weight method to carry out

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (41462004); 新疆维吾尔自治区教育厅高校科研项目 (XJEDU2016S088); 新疆维吾尔自治区“十三五”地质工程重点专业 (20161812)

**作者简介:** 曹小红 (1985-), 女, 硕士, 实验师, 从事地质教学工作。E-mail: 512197696@qq.com

**引用格式:** 曹小红, 弓小平, 韩琼, 等. 证据权法在新疆卡拉麦里金矿带断层与金矿化空间定量评价中的应用 [J]. 地质力学学报, 2019, 25 (S1): 157-162 DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2019.25.S1.027

CAO Xiaohong, GONG Xiaoping, HAN Qiong, et al. Application of evidence weight method in quantitative evaluation of faults and gold mineralization in Kalamaili gold belt, Xinjiang [J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25 (S1): 157-162 DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2019.25.S1.027

quantitative evaluation of fault and gold mineralization space. The results show that the fault distance and density are important evidence weight factors. When the fault distance is in the range of 0 ~ 1500 m, the mineralization is the strongest. As the distance increases, the mineralization becomes weaker; when the fault density is between 0.26 and 0.66, it is a medium-high favorable ore-forming area. The research results are of great significance for the prospecting work in the deep and peripheral areas of the Kalamaili gold belt.

**Key words:** evidence weight method; fault; gold mineralization; spatial quantitative evaluation

当代矿产资源评价是复杂高维非线性系统的建模与评价过程,建立能够描述综合信息间复杂关系的多元非线性统计模型并预测矿产靶区,对矿产勘查具有重要的指导意义<sup>[1]</sup>。证据权法是一种离散多元统计方法,由加拿大地质学家 Agerberg 和 Bonham-Carter 在 20 世纪 80 年代末引入到地质学中,建立的基于地学统计方法和 GIS 技术的矿产资源评价方法<sup>[2-4]</sup>。该方法以贝叶斯条件概率为基础,将与矿产形成的不同地学信息视为不同的证据因子,通过多元统计数学方法,计算出不同证据因子对成矿贡献的权重大小,在分析和总结找矿模型的基础上,对地学信息进行叠加复合分析,开展矿产靶区的预测<sup>[5-7]</sup>。证据权法是数理统计、图像分析和人工智能的有机综合,为基于 GIS 软件平台进行成矿预测提供了有效的方法,目前在矿产资源评价方面应用十分广泛<sup>[8-10]</sup>。新疆东准噶尔卡拉麦里金矿带一直是地质学家关注的焦点,已经开展过大量的基础地质调查工作,获得大量的区域地质成果报告和图件、物化探报告和图件<sup>[11-12]</sup>。在以往的研究中,大多为定性评价研究,在定量研究方面相对较弱。基于此,研究在充分收集相关资料的基础上,借助于 GIS 平台的数据集成功能,运用现在较为流行的证据权法 (Wofe) 开展新疆卡拉麦里金矿带断层与金矿床 (点) 之间的空间定量评价。

## 1 地质背景

研究区系准噶尔盆地以东、额尔齐斯—玛因鄂博断裂带以南、卡拉麦里山南麓北北西走向逆冲断裂以北的地区<sup>[7]</sup>,位于哈萨克斯坦—准噶尔板块与西伯利亚板块缝合带南侧,准噶尔东北缘古生代陆缘活动带,夹持在阿尔泰山脉和天山山脉之间,是横贯亚洲大陆的中亚古生代造山带的一部分<sup>[10]</sup>。在地理位置上,包括北塔山、卡拉麦

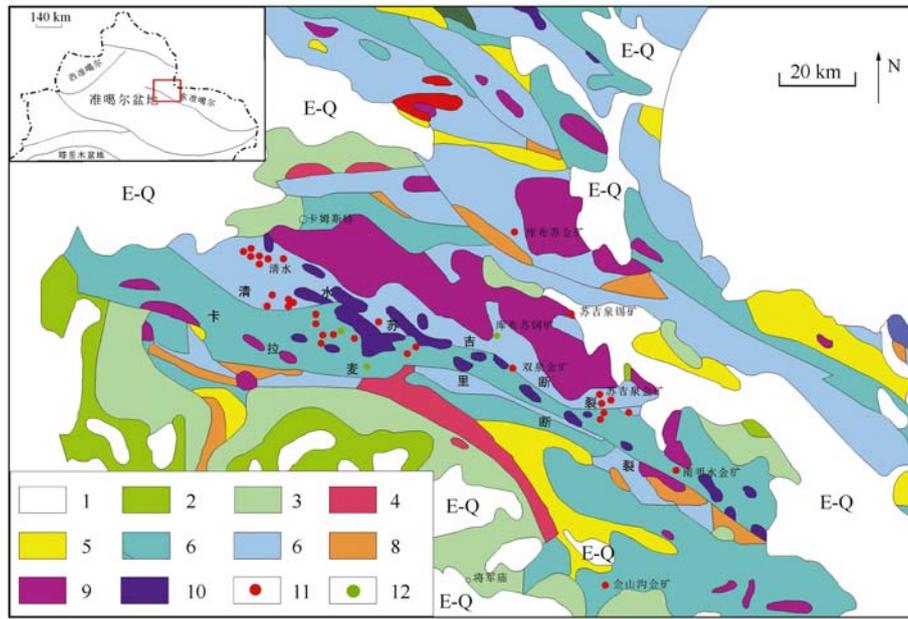
里及将军戈壁北部地区。区内构造活动频繁,断裂构造极为发育,卡拉麦里深大断裂横贯全区,清水—苏吉泉大断裂与卡拉麦里断裂平行产出,该断裂为重要的控矿容矿构造。沿深大断裂已发现多个金矿床 (点),并呈密集带状展布。地层横跨北塔山、卡拉麦里、博格达三个地层小区。出露最老的地层为奥陶系,除下志留纪未出露外,从中志留纪到第四系均有分布 (图 1),其中晚古生界地层最为发育。与金成矿有关的地层主要为晚古生代泥盆系和石炭系,均为该区含金背景值较高的地层,从已有的金矿 (床) 点特征分析,该区金成矿地质条件优越具有很好的找矿的潜力。

## 2 证据图层的确定

在矿产资源潜力评价工作中,断层密度作为主要单要素对在断层对矿床的影响程度进行分析<sup>[3]</sup>。而基于 Arcgis 平台的数据库集成了矿点及断层的地质空间属性,利用其自带的密度分析模块进行密度分析,生成矿点密度图和断层密度图,作为 Arcgis 分析的简单域,该简单域作为断层与金矿化的基本的证据权因子。在构造影响方面,利用已有线性构造分类及空间分布,进行密度分析 (density analysis)、距离分区 (distance analysis) 和坡向分析 (aspect analysis),获得评价模型的栅格数据,为证据权 (Wofe) 分析提供可靠数据。

## 3 证据权 (Wofe) 分析

文章研究数据像元大小为 250 m,采用分析单元面积为 1 km<sup>2</sup>。研究区总面积为 27057.9 km<sup>2</sup>,单元面积为 1 km<sup>2</sup>,金矿床 (矿化点) 共 61 个,金矿 (矿化点) 前概率为 0.00225;根据确定的证据权因子,从断层密度、断层距离、断层方向 3 个方面开展断层与金矿床之间的定量评价<sup>[9]</sup>。



1—新生界; 2—白垩纪; 3—侏罗纪; 4—三叠纪; 5—二叠纪; 6—石炭纪; 7—泥盆纪; 8—志留纪; 9—石炭纪花岗岩; 10—石炭纪超镁铁质岩; 11—金矿; 12—铜矿

图 1 新疆卡拉麦里金矿带地质矿产简图

Fig. 1 A brief map of geological minerals in the Kalamaili gold belt of Xinjiang

### 3.1 断层密度与金矿床 (点) 空间关系定量评价

断层密度分析 (density analysis) 反映断层的汇聚程度, 是确定断层汇聚程度和已知矿点间的空间关系。断层密度的计算方法有多种形式<sup>[11-13]</sup>, 文章研究对卡拉麦里金矿带进行网格划分并统计网格内断层作为断层密度值, 并且网格越小, 断

层密度数据越多, 初步分析发现断层密度在空间上的分布具有较好的连续性, 对断层密度进行分类分级, 共分为 10 级 (见表 1)。采用证据权模型中正权值 (W+)、负权值 (W-)、反差 (C 值) 及学生化开展断层密度与金矿化空间关系定量评价<sup>[9]</sup>, 计算结果见表 1。

表 1 卡拉麦里金矿与断层密度空间关系定量评价表

Table 1 Quantitative evaluation table for spatial relationship between the Kalamaili gold deposit and fault density

级别	面积/km <sup>2</sup>	单元数	矿床数	W+ 正权值	W- 负权值	反差	学生化反差	综合权重
0 ~ 0.13	22868	22868	4	-0.0002	6.3694	-6.3695	-0.4504	-2.281600
0.13 ~ 0.26	3228	3228	11	1.0536	-2.2816	3.3352	6.4347	1.053600
0.26 ~ 0.40	2490	2490	8	1.1721	-1.0915	2.2636	7.5416	1.053600
0.40 ~ 0.53	2010	2010	10	1.3509	-0.7550	2.1059	7.8334	1.053600
0.53 ~ 0.66	1238	1238	14	1.4893	-0.4617	1.9510	7.3406	1.053600
0.66 ~ 0.80	961	961	4	1.1336	-0.1473	1.2809	3.8156	1.053600
0.80 ~ 0.93	607	607	3	1.3034	-0.0953	1.3987	3.4602	1.053600
0.93 ~ 1.06	330	330	2	1.5291	-0.0564	1.5855	3.0484	1.053600
1.06 ~ 1.20	145	145	1	1.8800	-0.0298	1.9098	2.6396	1.053600
1.20 ~ 1.33	35	35	1	2.8448	-0.0164	2.8612	2.7962	1.053600

断层密度对金矿控制作用, 主要表现在 0.26 ~ 0.40、0.40 ~ 0.53、0.53 ~ 0.66 这 3 个分级内, 在这三个级别内的矿床 (矿化点) 有 32 个, 占金矿床 (矿化点) 总数的 52.4%, 综合权值达为

1.0536, 反映断层密度对金的影响较大, 作为卡拉麦里金矿带成矿断层与金矿化定量评价中的重要证据权因子, 其中断层密度在 0.26 ~ 0.66 为中高有利成矿区域 (见图 2)。

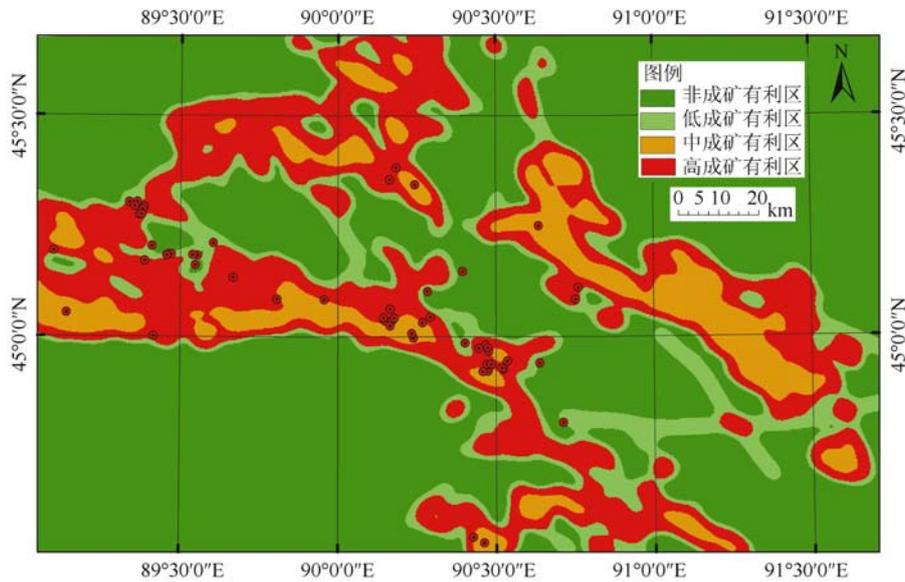


图2 断层密度与金矿成矿有利度分析结果图

Fig.2 Analysis of fault density and gold mineralization favorability

3.2 断层距离与金矿床（点）空间关系定量评价

断层距离分析（distance analysis）是确定断层与矿点的空间远近关系，反映断层对成矿（矿化）的影响范围，1:5万、1:20万区域地质资料和遥感影像特征表明<sup>[14-15]</sup>，断层距离分析

最大距离设定在8 km，对断层密度分析处理获得连续型栅格数据，对栅格数据进行重分类，得到可以应用于证据权模型中的整型栅格数据，开展断层与金矿化之间的空间定量评价，计算结果见表2。

表2 卡拉麦里金矿与断层距离空间关系定量评价表

Table 2 Quantitative evaluation table of spatial relationship between the Kalamaili gold deposit and fault distance

级别/单位	面积/km <sup>2</sup>	单元数	矿床数	W+ 正值	W- 负值	反差	学生化反差
0 ~ 500	5162	5162	28	-0.0002	5.5629	-5.5631	-0.3934
500 ~ 1000	2618	2618	11	-0.2442	0.3514	-0.5956	-2.2619
1000 ~ 1500	2016	2016	10	-0.3982	0.2722	-0.6704	-2.3920
1500 ~ 2000	1435	1435	3	-0.8278	0.2700	-1.0978	-3.0238
2000 ~ 2500	1286	1286	4	-0.9228	0.1923	-1.1151	-2.5840
2500 ~ 3000	925	925	2	-1.6271	0.1579	-1.7850	-2.4794
3000 ~ 3500	956	956	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3500 ~ 4000	774	774	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

在断层距离为0 ~ 500 m、500 ~ 1000 m 和1000 ~ 1500 m 三个级别内的矿床（矿化点）数共49个，占研究区内金矿床或矿化点数的80.3%，其反差为-5.5631，反映出断层距离对金矿床（矿化点）的影响较大，断层密度在0 ~ 1500 m 范围内金矿的成矿作用最强，随着断层距离的增大，成矿作用变弱。在进行成矿有利度和矿产资源潜力评价时，应作为重要的证据权因子。

3.3 断层方向与金矿床（点）空间关系定量评价

断层方向反映断层的空间展布特征，其成因上与区域构造关系密切，对矿床（矿化点）的空间的展布情况具有控制作用，在以往的定性评价工作中，认为新疆东准噶尔卡拉麦里金矿带，北西—北西西向的断裂为该成矿带内极为有利的控矿构造，其控制了成矿带的展布，与其共生的次级断裂和派生断裂为容矿构造，控制着矿床（点）

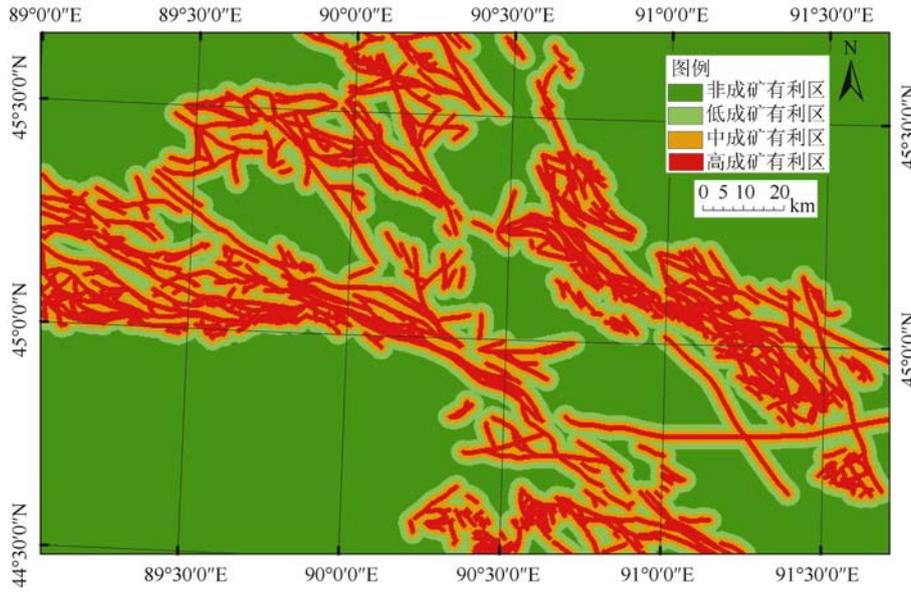


图 3 断层距离与金矿成矿有利度分析结果图

Fig. 3 Analysis of fault distance and gold mineralization favorability

的位置<sup>[15]</sup>。北东—北东东和北东向的断裂对金矿的控矿作用不明显。在定量分析中, 直接对断层线要素进行方向分析, 得到断层方向连续型栅格数据, 重分类后, 获得用于评价模型的整型栅格数据。卡拉麦里断层方向与金矿床(包括矿(化)

点)的空间关系计算结果见表 3。在表中断层方向与矿床或矿(化)点之间的综合权值均为 0 值, 反映出断层方向对成矿作用的影响不大。因此, 在断层与金矿化定量评价中断层方向为非影响因素之一处理, 其仅控制了矿点的空间展布。

表 3 卡拉麦里金矿与断层方向空间关系定量评价表

Table 3 Quantitative evaluation table for spatial relationship between the Kalamaili gold deposit and fault direction

级别	面积/km <sup>2</sup>	单元数	矿床数	W + 正权值	W - 负权值	反差	学生化反差
北 (0 - 22.5)	2182	2182	12	-0.0002	5.5629	-5.5631	-0.3934
北东	2403	2403	10	-0.0768	0.3655	-0.4424	-1.3613
东	1077	1077	1	-0.1176	0.2284	-0.3460	-1.2757
南东	700	700	2	-0.0382	0.0610	-0.0992	-0.3687
南	2091	2091	11	-0.0204	0.0276	-0.0481	-0.1809
南西	2465	2465	8	-0.1555	0.1085	-0.2640	-0.9737
西	1313	1313	4	-0.1505	0.0530	-0.2035	-0.6621
北西	765	765	2	-0.1177	0.0264	-0.1440	-0.4136
北 (337.5 - 360)	2176	2176	8	-0.0391	0.0064	-0.0455	-0.1192

## 4 结论

(1) 断层距离和断层密度为卡拉麦里金矿带金矿床资源潜力评价的重要证据权因子。

(2) 断层距离在 0 ~ 1500 m 范围内, 成矿作用最强, 随着距离的增大, 成矿作用变弱。断层密度在 0.26 ~ 0.66 为中高有利成矿区域。

## 参考文献/References

[ 1 ] 林楠, 陈永良, 路来君, 等. 基于证据加权模型的青海拉陵灶火地区矿产靶区预测及效果评价研究 [J]. 地球学报, 2016, 37 (6): 756 - 762.  
LIN Nan, CHEN Yongliang, LU Laijun, et al. Mineral target prediction and effect evaluation based on weighted evidence model of Lalingzaohuo Area in Qinghai Province [J]. Acta

- Geoscientica Sinica, 2016, 37 (6): 756 – 762. (in Chinese with English abstract)
- [ 2 ] 胡庆武, 林春峰, 余飞, 等. 多维 GIS 矿产评价数据管理系统设计和实现 [J]. 地球科学进展, 2010, 25 (9): 990 – 996.
- HU Qingwu, LIN Chunfeng, YU Fei, et al. Design and implementation of multi – dimensional GIS-based mineral resource evaluation data management system [J]. Advances in Earth Science, 2010, 25 (9): 990 – 996. (in Chinese with English abstract)
- [ 3 ] 袁峰, 周涛发, 岳书仓. GIS 矿产资源预测中的证据权重法 [J]. 黄金地质, 2003, 9 (3): 75 – 77.
- YUAN Feng, ZHOU Taofa, YUE Shucang. Metallogenetic prognosis based on GIS using weights of evidence model [J]. Gold Geology, 2003, 9 (3): 75 – 77. (in Chinese with English abstract)
- [ 4 ] 袁峰, 周涛发, 李湘凌, 等. 基于 GIS 的矿产资源预测现状及关键问题 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2004, 27 (5): 486 – 489.
- YUAN Feng, ZHOU Taofa, LI Xiangling, et al. Present situation of metallogenetic prognosis based on GIS and pivotal problems [J]. Journal of Heifei University of Technology, 2004, 27 (5): 486 – 489. (in Chinese with English abstract)
- [ 5 ] AGTERBERG F P. Combining indicator patterns in weights of evidence modeling for resource evaluation [J]. Nonrenewable Resources, 1992, 1 (1): 39 – 50.
- [ 6 ] AGTERBERG F P, CHENG Q M. Conditional independence test for weights-of-evidence modeling [J]. Natural Resources Research, 2002, 11 (4): 249 – 255.
- [ 7 ] 李荣, 董国臣, 王硕, 等. 基于 GIS 的证据权重法对三江地区的铜矿成矿预测 [J]. 沉积与特提斯地质, 2011, 31 (3): 100 – 106.
- LI Rong, DONG Guochen, WANG Shuo, et al. An application of GIS-based evidence weight method to the metallogenetic prognosis of the copper deposits in the Jinshajiang-Lancangjiang-Nuijiang area, western China [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2011, 31 (3): 100 – 106. (in Chinese with English abstract)
- [ 8 ] 杨茂森, 黎清华, 杨海巍. GIS 支持下的证据权重法在胶东金矿集中区预测中的应用 [J]. 地球学报, 2005, 26 (5): 487 – 491.
- YANG Maosen, LI Qinghua, YANG Haiwei. Application of the evidence wright method to the prognosis of mineral resources in Jiaodong gold ore concentration area [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2005, 26 (5): 487 – 491. (in Chinese with English abstract)
- [ 9 ] 马伟, 徐素宁, 王润生, 等. 基于证据权法的赣南稀土矿山地质环境评价 [J]. 地球学报, 2015, 36 (1): 103 – 110.
- MA Wei, XU Suning, WANG Runsheng, et al. Geo-environmental quality assessment of rare-earth mines in southern Jiangxi province using weights-of-evidence modeling [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2015, 36 (1): 103 – 110. (in Chinese with English abstract)
- [ 10 ] 聂晓勇, 宋谢炎, 薄科武, 等. 卡拉麦里金矿带典型矿床——双泉金矿的地质地球化学特征及成因 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2009, 28 (2): 169 – 176.
- NIE Xiaoyong, SONG Xieyan, BAO Kewu, et al. The geological – geochemical characteristics and genesis of Shuangquan Typical gold deposit in Kalameily belt, East Junggar, Xinjiang [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2009, 28 (2): 169 – 176. (in Chinese with English abstract)
- [ 11 ] 陈昌彦, 王思敬. 工程岩体断裂构造发育程度的定量评价研究 [J]. 工程地质学报, 2000, 9 (2): 145 – 151.
- CHEN Changyan, WANG Sijing. Research on quantitative estimation of development degree of fault structures in engineering rock mass [J]. Journal of Engineering Geology, 2000, 9 (2): 145 – 151. (in Chinese with English abstract)
- [ 12 ] 范留明, 黄润秋, 丁秀美. 一种基于结构面密度的岩体结构均质区划分方法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (7): 1132 – 1136.
- FAN Liuming, HUANG Runqiu, DING Xiumei. Analysis on structural homogeneity of rock mass based on discontinuity density [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (7): 1132 – 1136. (in Chinese with English abstract)
- [ 13 ] 金曲生, 范建军, 王思敬. 结构面密度算法及其应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17 (3): 273 – 278.
- JIN Qusheng, FAN Jianjun, WANG Sijing. A new method to calculate density of discontinuity and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17 (3): 273 – 278. (in Chinese with English abstract)
- [ 14 ] 谢磊. 东准噶尔卡拉麦里成矿带金矿多源信息成矿预测 [D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2015.
- XIE Lei. Prediction using multi – source information of gold mine at Kalamaili mineralization belt in East Junggar [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [ 15 ] 弓小平, 凤骏, 宋相龙, 等. 新疆东准噶尔卡拉麦里成矿带成矿预测与高精度遥感信息提取研究 [M]. 北京: 地质出版社, 2015.
- GONG Xiaoping, FENG Jun, SONG Xianglong, et al. Study on metallogenetic prediction and high precision remote sensing information extraction in Karamairi ore-forming belt of Eastern Junggar, Xinjiang [M]. Beijing: Geological Press, 2015. (in Chinese)