

甘肃早子沟金矿三维建模与综合成矿预测

李 伟^{1, 2)}, 陈建平^{1, 2)*}, 贾玉乐^{1, 2)}, 周冠云^{1, 2)}, 毛先成^{3, 4)}, 肖克炎⁵⁾

1) 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

2) 北京市国土资源信息研究开发重点实验室, 北京 100083;

3) 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083;

4) 中南大学有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 湖南长沙 410083;

5) 中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037

摘 要: 甘肃早子沟金矿是西秦岭成矿带上矿床规模较大, 研究程度较高的构造蚀变岩性金矿典型代表。针对早子沟金矿床深部找矿方向与成矿潜力, 本文采用三维地质建模手段, 成矿有利信息提取方法, 开展基于找矿地质模型的三维建模与综合成矿预测。研究结果表明: 甘肃早子沟金矿适用于控矿断裂+有利岩体+有利围岩蚀变+等间距控矿的综合地质找矿模型; 地质异常变量定量分析与提取结果在地质认识上均得到较好的印证, 综合成矿预测结果显示矿床明显受多期次构造控制矿化叠加富集, Au1、Au9、Au30、M16 等主矿体深部具有良好的找矿潜力。

关键词: 三维建模; 地质异常提取; 综合成矿预测; 早子沟金矿

中图分类号: P62 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2020.010801

Three-dimensional Modeling and Comprehensive Metallogenic Prediction of the Zaozigou Gold Deposit, Gansu Province

LI Wei^{1, 2)}, CHEN Jian-ping^{1, 2)*}, JIA Yu-le^{1, 2)}, ZHOU Guan-yun^{1, 2)},
MAO Xian-cheng^{3, 4)}, XIAO Ke-yan⁵⁾

1) School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083;

2) Beijing Key Laboratory of Land and Resources Information Research and Development, Beijing 100083;

3) School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha, Hunan 410083;

4) Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring (Ministry of Education), Central South University, Changsha, Hunan 410083;

5) MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037

Abstract: The Zaozigou gold deposit in the west Qinling metallogenic belt of Gansu Province is a typical representative of large-sized tectonic-altered lithologic gold deposit with high degree of studies. To investigate the prospecting direction and metallogenic potential in the depth of the Zaozigou gold deposit, the authors adopted the three-dimensional geological modeling method and the method of extracting favorable information for mineralization to carry out the three-dimensional modeling and comprehensive metallogenic prediction based on the ore-prospecting geological model. The results show that the Zaozigou gold deposit is suitable for the utilization of comprehensive geological prospecting model of ore-controlling fault + favorable rock mass + favorable wall rock alteration + equidistant ore-controlling. The results of quantitative analysis and extraction of geological anomaly variables are well confirmed in geological understanding. The comprehensive mineralization prediction results show that the enrichment of this deposit was obviously attributed to the superimposed mineralization controlled by multi-stage structure, and the main orebodies such as Au1, Au9, Au30 and M16 have good prospecting potential in the depth.

本文由国家重点研发计划“深地资源勘查开采”重点专项课题(编号: 2017YFC0601502)资助。

收稿日期: 2019-11-12; 改回日期: 2019-12-31; 网络首发日期: 2020-01-09。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 李伟, 男, 1993 年生。硕士研究生。矿产普查与勘探专业。通讯地址: 100083, 北京市海淀区学院路 29 号。E-mail: 846198794@qq.com。

*通讯作者: 陈建平, 男, 1959 年生。教授, 博士生导师。主要从事矿产资源定量预测评价和“3S”技术集成应用的教学与研究工作。

通讯地址: 100083, 北京市海淀区学院路 29 号。E-mail: 3s@cugb.edu.cn。

Key words: three-dimensional modeling; geological anomaly extraction; comprehensive metallogenic prediction; Zaozigou gold deposit

近年来,找矿工作的重点已逐渐由地表矿、浅部矿、易识别矿产向深部、难识别的隐伏矿转移,成矿规律的研究与成矿预测方法的创新在找矿勘查中发挥着越来越重要的作用(赵鹏大等, 2003; 于萍萍, 2015; 毛先成等, 2020)。矿产资源定量预测与评价是国内外数学地球科学研究的重大前沿课题,而深部三维成矿预测正是当前矿产资源定量预测与评价的趋势与前沿。

甘肃早子沟金矿床是近年来西秦岭金成矿带发现的大型金矿床,区域地质成矿条件较好,矿床地质勘探程度相对较高,基础地质研究主要集中于矿床地质特征及成因分析,并积累了大量的成果资料,但针对该矿床少有成矿综合研究,特别是三维成矿综合研究。三维建模技术是近些年来在地质领域研究的一项有效手段,它在地质要素可视化与地质资料综合利用解释方面有着独特的优势。笔者参与“深部成矿地质异常定量预测方法与模型”课题研究,以甘肃早子沟金矿为研究对象开展三维建模与综合成矿预测研究工作。通过总结、归纳区域成矿规律与矿床找矿标志从而建立找矿地质模型,建立矿床三维实体模型对找矿标志可视化表达,对成矿地质异常定量分析与提取,并开展基于证据权重法与信息量法相结合的综合成矿预测,为甘肃早子沟金矿深边部勘探与找矿方向提供建议与参考。

1 矿床地质

1.1 区域成矿规律

甘肃夏河—合作地区所处大地构造位置位于扬子板块、华北板块及松潘地块三者围限的西秦岭—松潘—甘孜构造东北缘。区域主体构造格架奠定于印支板块俯冲碰撞造山阶段,以及随后以伸展塌陷、剪切平移作用为主的板内造山阶段,其后又遭受中、新生代构造的强烈改造,最终形成现今的北西向构造格局(冯益民等, 2003; 张国伟等, 2004)。

夏河—合作地区以南为金、汞、银等中-低温成矿亚带(刘建宏等, 2006; 姚书振等, 2006)。赋矿岩层主要为中、下三叠统板岩、砂岩、灰岩、砾屑灰岩等等;岩浆岩体多为印支期小规模石英闪长岩、花岗闪长岩、花岗斑岩和花岗闪长岩脉、闪长玢岩脉等;北西西向区域构造构成金成矿系统,矿化主要受断裂带控制,多产于构造带内以及岩体或岩脉周围(吕新彪等, 2009; 姜琪和王荣超, 2010; 刘春先等, 2011; 刘晓林, 2011; 代文军和陈耀宇, 2012; 梁

志录等, 2012; 隋吉祥和李建威, 2013; 陈国忠等, 2012, 2013; 陈正乐等, 2015; 韦良喜, 2015; 韦良喜等, 2018)。矿床类型主要为中低温热液型和构造蚀变岩型,已知的金矿床主要有早子沟、桑曲、也赫杰、直合完干、早仁道、索拉贡玛、加甘滩等,该成矿亚带中的金、锑、汞矿化成矿条件类似,均产于中三叠统碎屑岩系中,主要受区域断裂构造控制,中酸性岩体影响。

1.2 矿床地质特征

甘肃早子沟金矿床是西秦岭金成矿富集带的典型代表,也是西秦岭夏河—合作地区中-低温热液(锑)金矿床的典型代表(姜琪和王荣超, 2010; 刘晓林, 2011),成矿序列归属于夏河—合作断裂带以南金、汞、银等多金属中-低温成矿亚带(陈毓川等, 1994; 张新虎等, 2005; 刘建宏等, 2006; 姚书振等, 2006)(图 1)。

甘肃早子沟金矿体严格受多期次断裂控制,呈现多期次矿化,等间距分布以及断裂控矿专属性等特征,同时矿体多发育于断裂破碎带中(吕新彪等, 2009; 姜琪和王荣超, 2010; 刘春先等, 2011; 刘晓林, 2011; 代文军和陈耀宇, 2012; 梁志录等, 2012, 2013; 隋吉祥和李建威, 2013; 陈国忠等, 2013; 韦良喜, 2015; 韦良喜等, 2018)。研究区大面积出露燕山期石英闪长玢岩脉,少部分斑岩脉,以条带状分布的岩脉集中产出,部分岩脉由地表向深部逐渐变大,在深部往往相互贯通。多位学者研究表明矿体与玢岩体密切相关,主要产于玢岩脉内部以及硅质板岩与玢岩脉接触部位(刘晓林, 2011; 刘勇等, 2012; 梁志录等, 2012, 2013; 陈国忠等, 2013; 韦良喜, 2015; 韦良喜等, 2018),同时金矿化强度与硅化、黄铁矿化、毒砂化、辉锑矿化等矿化蚀变类型的复杂性和强度呈正相关,往往硅化、褐铁矿化、黄铁矿化和毒砂化等最强烈地段,也是金矿化最富集部位(刘春先等, 2011; 代文军等, 2011; 代文军和陈耀宇, 2012)。

多数学者认为早子沟金矿床为燕山期多期次断裂活动与中酸性岩浆顺构造侵位发生多期次矿化叠加富集形成,矿床经历了两期次四阶段矿化过程,即热液期的黄铁矿-毒砂矿化阶段,锑-金矿化阶段,碳酸盐岩化阶段和表生期,多数学者普遍认为早子沟金矿为中-低温热液蚀变(锑)金矿床(吕新彪等, 2009; 刘春先等, 2011; 曹晓峰等, 2012; 刘勇等, 2012; 陈耀宇和代文军, 2012; 隋吉祥和李建威, 2013; 李康宁, 2014)。

1.3 多期次叠加成矿综合找矿模型

找矿模型的建立与完善是对研究区矿床的有利成矿因素进行分析,为了在成矿预测中尽可能地定位控矿变量的种类,提前剔除与成矿无关的要素,从而缩小最终成矿预测的结果,得到较小的勘查区(或找矿靶区)范围,保证隐伏矿体定位预测的准确性(朱裕生, 1993)。

针对早子沟金主要矿化期,总结归纳研究区找矿要素,并充分提取构造,岩体,成矿有利围岩蚀变和矿体展布形态等信息,构建早子沟金矿床三维找矿地质模型(表 1)。

2 三维建模

本次研究共收集了矿区勘探线剖面 38 条,中段剖面 20 余条,钻孔数据约 144 个,地质图若干,资料空间展布情况如图 2a 所示。针对研究区实际与

基础资料情况,建模范围综合参考资料平面分布、覆盖情况,确定为大致覆盖矿区范围约 1.6 km²;建模深度参考剖面与钻孔有效深度,确定绝对深度 1600~3500 m,相对深度 1800 m 的有效建模深度。

为直观了解各地质体在空间的展布形态,本次研究主要借助已有的勘探线剖面,辅助以中段平面图与钻孔数据。借助于 SURPAC 三维建模软件平台,采用线框建模方法将剖面上各地质体边界利用线框进行提取,并将相邻的线框进行连接,建立起研究区断裂三维模型、玢岩体三维模型、矿体三维模型等(图 2)。

3 地质异常提取与综合成矿预测

三维地质实体模型能够生动形象地反映各地质体的三维形态,以及各地质体与矿体的相互关系,但要定量分析矿体和相关地质体时则需要借助

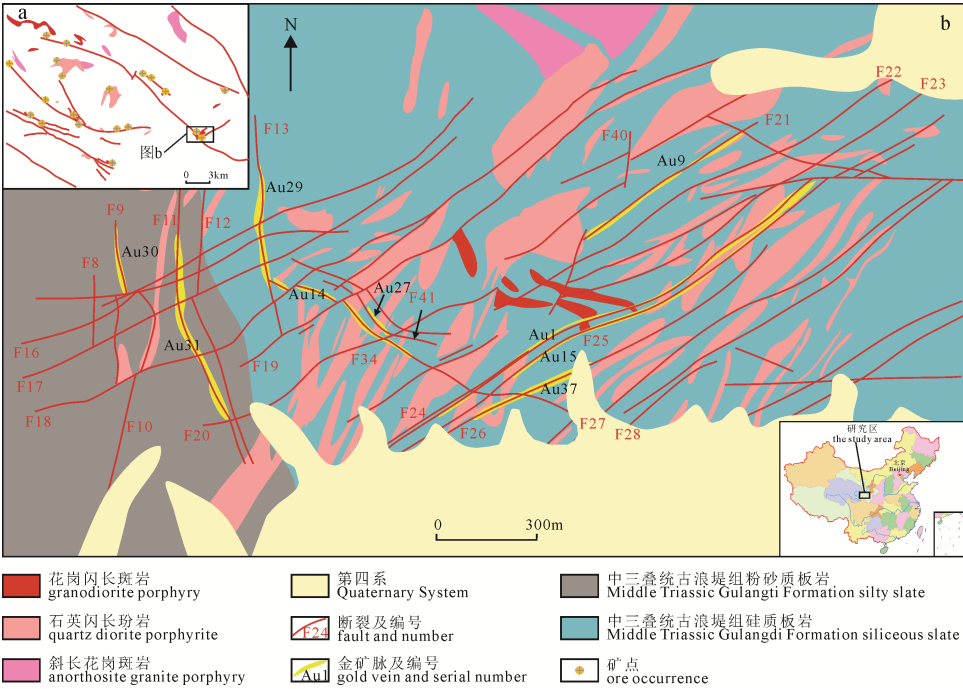


图 1 甘肃早子沟金矿床地质简图
Fig. 1 Geological sketch of Zaozigou gold deposit in Gansu Province

表 1 甘肃早子沟金矿床找矿地质模型
Table 1 Geological model for ore-prospecting of the Zaozigou gold deposit in Gansu Province

矿床类型	控矿要素	地质特征描述	变量类型	成矿地质异常表征
中、低温热液蚀变岩型(锑、金矿床)	构造	构造含矿特征	有利成矿构造	多期次控矿断裂
		构造带特征	断裂影响范围	断裂缓冲区
		构造发育及展布特征	局部构造	断裂频数/断裂等密度
			构造方向	控矿断裂方位
		构造导矿、容矿特征	构造交汇特征	构造交点缓冲区
			构造岩浆活动特征	中心对称度
	岩体	岩体含矿特征	成矿有利岩体	石英闪长玢岩
			有利赋矿部位	玢岩体与硅质板岩接触部位
	围岩蚀变	有利围岩蚀变	成矿有利蚀变	黄铁绢云岩化、辉锑矿化、毒砂化, 泥化等
	等间距控矿	等间距控矿	等间距赋矿	等间距赋矿

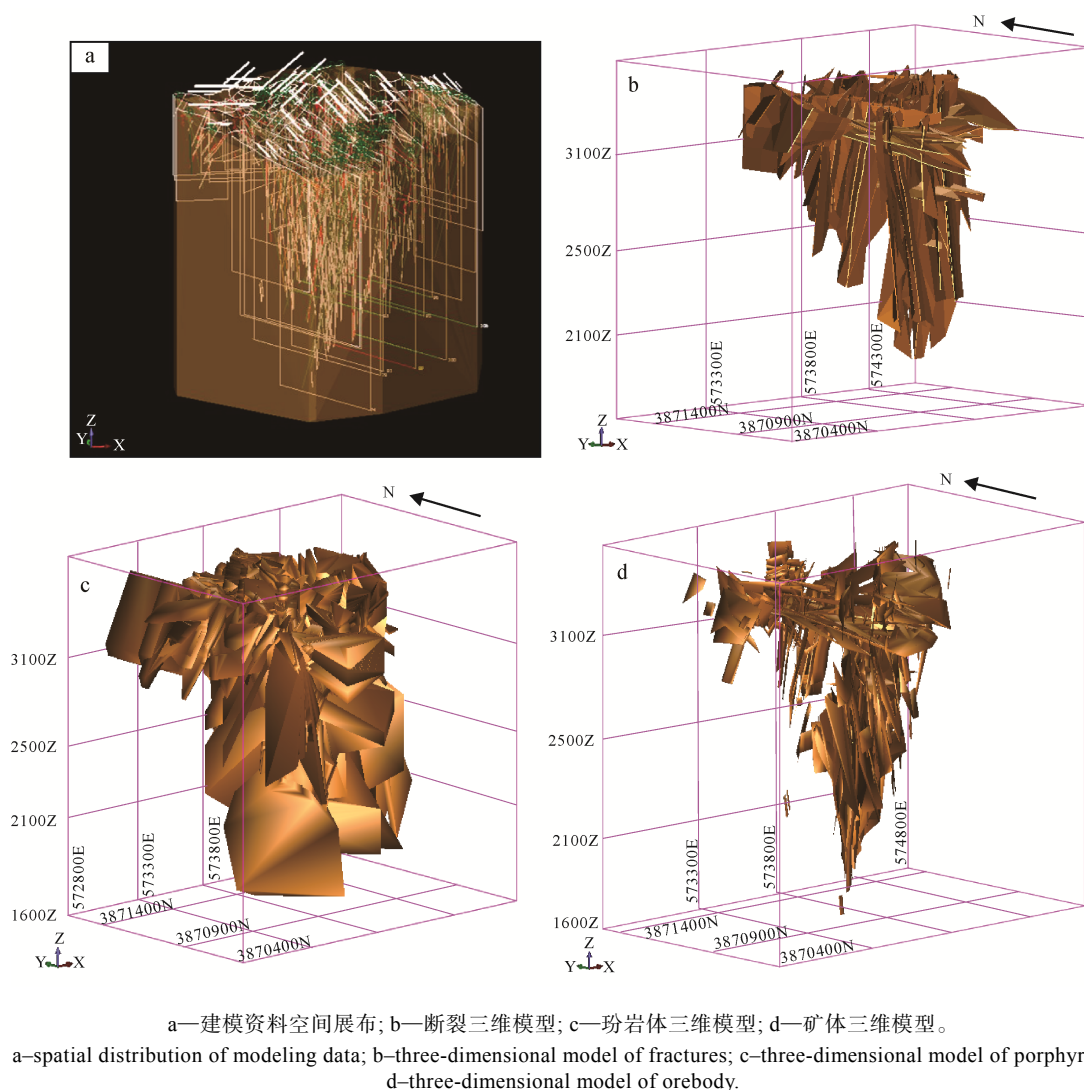


图 2 早子沟金矿建模资料空间展布与实体模型
Fig. 2 Spatial display and solid model of modeling data of the Zaozigou gold deposit

于块体模型(陈建平等, 2009)。块体建模是把要建模的空间分割成一定尺度的三维立体网格, 每个块体被视为均质同性体, 所有立方体网格的属性变化规律就近似地表达了地质体的内部变化规律。这样的最小立方体被称为“块段”或“块段单元”。每个块段单元在计算机中存储的地址与其在自然矿床中的位置相对应。本次研究综合考虑地质体实际空间展布特征, 与软件平台性能, 选定块体模型标准为行×列×层=10 m×10 m×10 m, 在约 1.6 km², 相对建模深度约 1800 m 的实体建模范围内共有块体 4 265 120 块。

3.1 地质异常分析与提取

有利地质体要素信息的定量提取主要通过统计分析地质体和已知矿体含量, 来说明某一地质体的成矿有利度。分别用地质体实体模型、已知矿体实体模型对立方体模型进行限定, 划分出各个要素、不同矿体所包含的块体单元, 作为矿床预测中的各找矿要素和先验条件(吕鹏, 2007; 陈建平等,

2007)。本文在已建立的找矿模型基础上, 将地质异常变量进行单元化处理, 对每个地质异常变量运用地质统计学法, 特征分析法等数学分析方法, 展开定量分析与定量提取。

3.1.1 多期次控矿断裂

早子沟金矿体严格受多期次断裂控制, 断裂多期次性导致矿化呈现多期次性特征。分析研究区主要断裂 29 条, 其中控矿断裂 23 条, 控制着研究区约 80%的矿块; 统计结果表明, 控矿断裂块体模型中共得到块体 256 036 块, 其中矿块数目为 66 579 块, 占总金矿块数 139 569 的 47.403%。故提取控矿断裂作为断裂地质异常要素。

3.1.2 断裂缓冲区

断裂对成矿过程主要起到导矿、容矿、破坏矿等作用, 早子沟金矿床中早期断裂主要起着导矿与容矿作用, 后期断裂起着破坏矿体作用(梁志录等, 2012, 2013; 陈国忠等, 2013)。故建立早期控矿断裂不同半径的断裂缓冲区, 以求得断裂对矿体的最佳

影响范围。统计结果(图 3)表明在断裂缓冲区半径为 30 m 时,此时含矿数目为 63 382 块,已知矿块占总金矿块体数 139 569 的 45.413%。故提取断裂 30 m 缓冲区作为断裂缓冲区地质异常要素。

3.1.3 局部断裂

强烈构造活动区域是含矿热液运移的通道,而含矿热液沉积需要一个相对平静的环境,因此构造活动相对弱一点部位是矿体的储积场所。局部断裂是相对于主干断裂而言构造强度较弱的断裂,

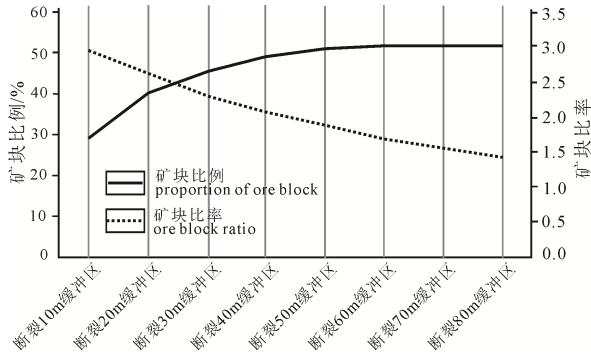


图 3 断裂缓冲区最佳半径统计
Fig. 3 Statistics of the optimal radius of the fractured buffer zone

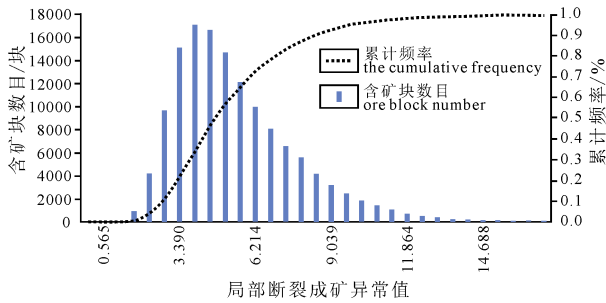


图 4 局部断裂成矿异常统计
Fig. 4 Metallogenic anomaly statistics of local faults

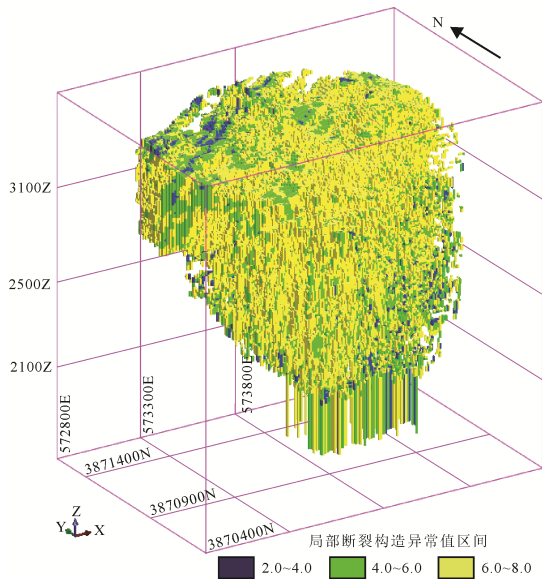


图 5 局部断裂成矿异常三维空间重构
Fig. 5 3D reconstruction of local fault ore-forming anomalies

是成矿的有利构造(陈建平等, 2005, 2008; 董庆吉, 2009; 董庆吉等, 2010; 尚北川等, 2013; 刘汉栋等, 2015)。早子沟金矿区断裂均属于夏河—合作断裂带上的次级断裂。本文采用断裂频数与断裂等密度之比来描述局部断裂,选取研究区控矿断裂,计算并统计局部断裂不同区间含矿块数目,累计频率(图 4),由图可知局部断裂含矿性呈现近正态分布特征,而累计频率曲线呈现快速到达峰值的特征。本文选取含矿块数目高于 6500 块的区间作为局部断裂成矿异常区间,即[2.825, 7.344],该区间共包含矿块数目 110 136 块,已知矿块占总金矿块体数 139 569 的 78.912%。提取局部断裂成矿有利区间[2.825, 7.344]作为找矿地质异常要素,构建局部断裂成矿异常三维空间(图 5)。

3.1.4 控矿断裂方位

线性构造方位分析的目的即是了解线性构造产出的优势方位、区域性线性构造的空间展布特征和区域性线性构造与次级线性构造的关系,它同样是描述局部断裂特征的变量(陈建平等, 2005, 2008; 董庆吉等, 2010; 尚百川等, 2013)。早子沟金矿体严格受多期次,等间距分布断裂控制,提取研究区控矿断裂主要方位(图 6, 图 7),由玫瑰花节理图可得研究区控矿断裂主要呈现 3 个方位: 0°, 58°, 315°。而最为主要控矿断裂方位为 58°±10°。

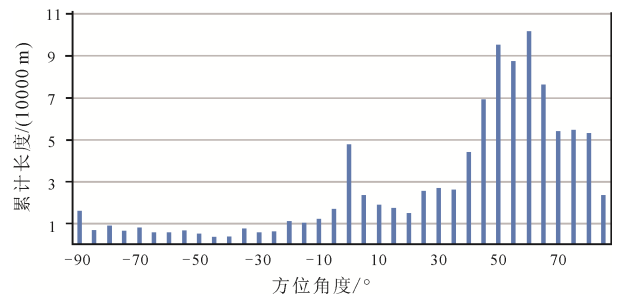


图 6 构造方位统计
Fig. 6 Structural azimuth statistics

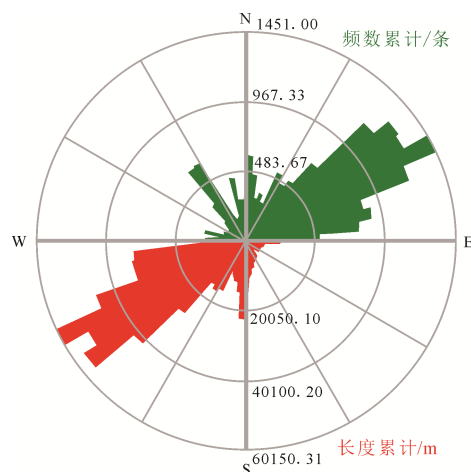


图 7 断裂玫瑰花节理图
Fig. 7 Rose joint diagram of fractures

将研究区控矿断裂进一步提取, 计算并统计控矿断裂方位含矿块数目, 累计频率(图 8), 由图可知控矿断裂方位含矿性呈现近正态分布特征, 而累计频率曲线呈现匀速增长到达峰值的特征。本文选取含矿数目高于 2300 块的区间作为控矿断裂方位成矿异常区间, 即[0.165, 0.496], 该区间共包含矿块数目 102 239 块, 已知矿体占总金矿块体数 139 569 的 73.253%。提取控矿断裂方位成矿有利区间[0.165, 0.496]作为找矿地质异常要素, 构建控矿断裂方位成矿异常三维空间(图 9)。

3.1.5 构造交点缓冲区

构造交点数是预测单元内出露断裂构造交点数的一个定量指标, 因此交点数的高值区即是多组断裂交汇的部位。一般地多组线性构造交汇部位往往是成矿最有利的部位, 沿多组线性构造交汇部位常常有岩体侵位、火山喷发以及岩浆期后热液或火山-次火山热液活动(陈建平等, 2005, 2008; 董庆吉等,

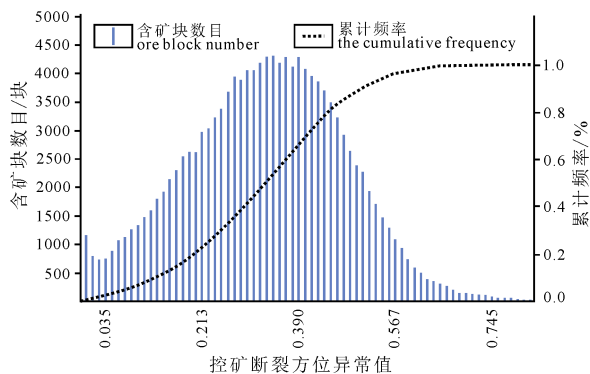


图 8 控矿断裂方位成矿异常统计

Fig. 8 Statistics of fault azimuth metallogenic anomalies

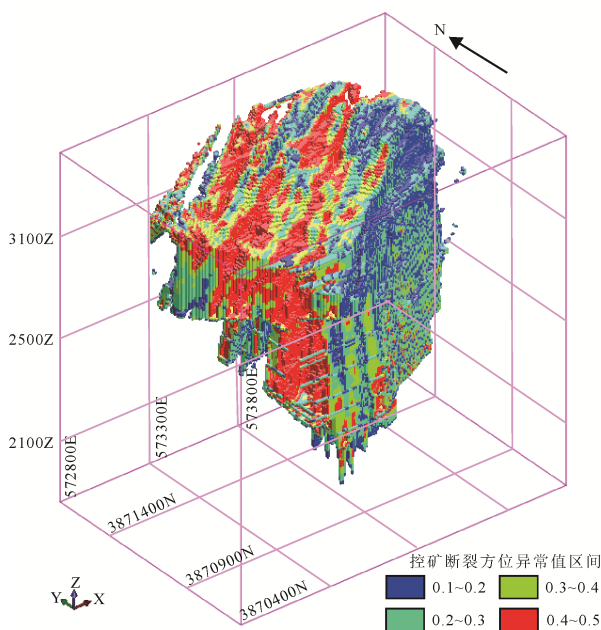


图 9 控矿断裂方位成矿异常三维空间重构

Fig. 9 3D spatial reconstruction of fault azimuth metallogenic anomalies

2010)。早子沟矿区断裂具有多期次叠加, 岩体多顺着断裂向上侵位, 矿体主要赋存于断裂破碎带, 玢岩体内部以及岩体与硅质板岩接触带部位等特点。提取研究区断裂交点, 在此基础上建立不同半径的断裂交点缓冲区作含矿性统计, 统计结果(图 10)表明在断裂交点缓冲区半径为 40 m 时, 含矿块数目为 96 253 块, 已知矿体占总金矿块体数 139 569 的 68.964%。提取断裂交点 40 m 缓冲区作为找矿地质异常要素, 构建断裂交点 40 m 缓冲区三维空间(图 11)。

3.1.6 断裂中心对称度

断裂中心对称度代表了构造对称的特征, 在实际地质情况中, 造成断裂构造呈对称性分布的地质现象主要有火山口、侵入岩体等(陈建平等, 2005, 2008; 董庆吉等, 2010; 史蕊等, 2011)。早子沟研究区普遍发育玢岩体与多期次断裂, 矿化与玢岩体,

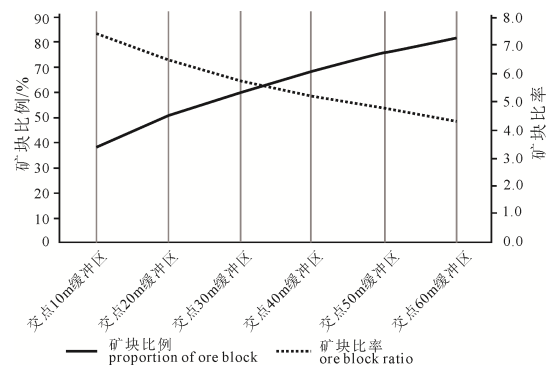


图 10 断裂交点最佳缓冲区统计

Fig. 10 Statistics of optimal buffer zone at fracture intersection

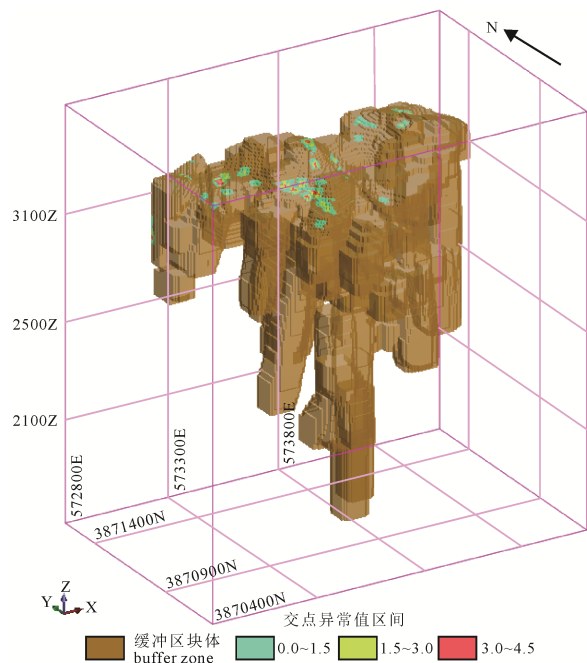


图 11 断裂交点 40 m 缓冲区三维空间重构

Fig. 11 3D structure of 40 m buffer zone at fracture intersection

断裂破碎带密切相关,矿体主要赋存于断裂破碎带,岩体内部及岩体与硅质板岩接触带。选取研究区断裂,提取断裂中心对称度并统计不同区间含矿块数目,累计频率(图 12),由图可知断裂中心对称度含矿性呈现双峰态分布特征,而累计频率曲线呈现匀速到达峰值的特征。本文选取含矿块数目高于 2500 块的区间作为断裂中心对称度成矿异常区间,即[0.532, 0.969],该区间共包含矿块数目 115 008 块,已知矿体占总金矿块数 139 569 的 82.406%。提取断裂中心对称度成矿异常区间[0.532, 0.969]作为找矿地质异常要素,构建断裂中心对称度成矿异常三维空间(图 13)。

3.1.7 成矿有利岩体

研究区玢岩体为矿化过程起到提供物源,热源,部分动力源作用,矿体与玢岩体密切相关,主要产于玢岩体内部以及硅质板岩与玢岩体接触部位。成矿有利玢岩块体模型中共得到块体 706 298 块,其中矿块数目 103 310 块,已知矿体占总金矿块数

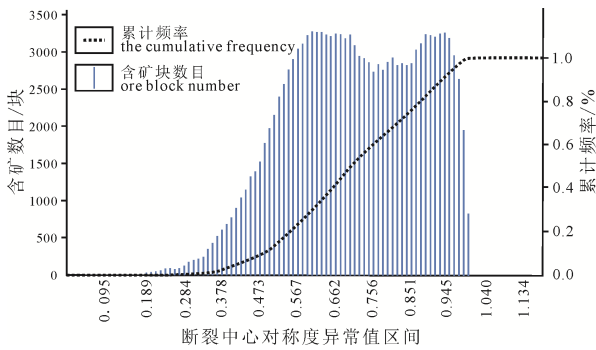


图 12 断裂中心对称度成矿异常统计
Fig. 12 Metallogenic anomaly statistics of central symmetry degree of fault

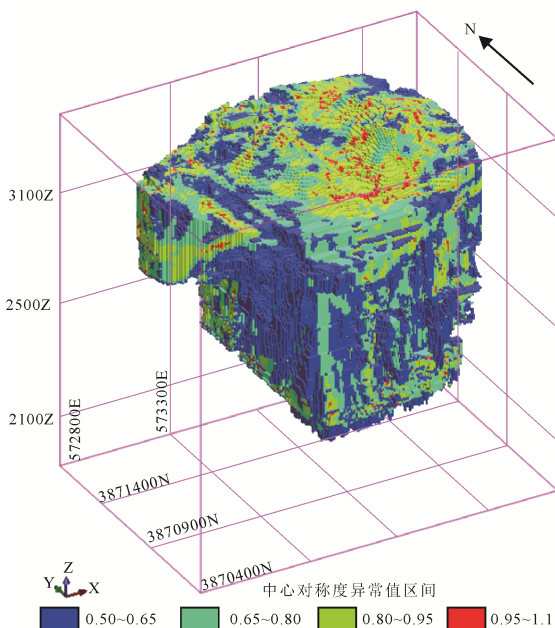


图 13 断裂中心对称度三维空间重构
Fig. 13 3D spatial structure of fracture center symmetry

139 569 的 74.021%。提取研究区成矿有利玢岩体作为找矿地质异常要素。

3.1.8 成矿有利部位

早子沟研究区普遍发育玢岩脉与多期次断裂,矿化与玢岩脉,断裂破碎带密切相关,矿体主要赋存于断裂破碎带,岩脉内部及岩脉与硅质板岩接触带。本文在玢岩脉模型基础上建立不同半径的玢岩脉缓冲区作含矿性统计,提取玢岩脉最佳缓冲区作为玢岩脉与硅质板岩接触带的成矿有利部位,统计结果表明(图 14)在玢岩脉缓冲区半径为 30 m 时,矿块数目为 30 924 块,已知矿块占总金矿块数 139 569 的 22.157%。提取玢岩脉 30 m 缓冲区作为成矿有利部位地质异常要素。

3.1.9 成矿有利围岩蚀变

甘肃早子沟金矿化强度与硅化、黄铁矿化、毒砂化、辉锑矿化等矿化蚀变类型的复杂性和强度呈正相关,往往硅化、褐铁矿化、黄铁矿化和毒砂化等最强烈地段,也是金矿化最富集部位。成矿有利围岩蚀变块体模型中共得到块体 543 016 块,其中矿块数目为 107 115 块,已知矿块占总金矿块数 139 569 的 76.747%。提取成矿有利围岩蚀变作为找矿地质异常要素。

3.1.10 等间距控矿

区域内控矿构造的等间距性和含矿热液流动方向及叠加程度导致了矿床呈等间距性展布,构造的等间距在不同方向上不同尺度上控制着矿床,矿体的分布也呈现等间距的特征,因此分析构造的等间距特征对指导盲区找矿具有指示性作用(石玉臣, 2005)。夏河—合作地区区域尺度上,金矿床受控于北西向推覆构造,断裂构造间距 3~4 km,同一断裂带上矿床呈 0.5~1 km 不等的点距分布(图 15a);矿田尺度上,同一期次矿脉呈 30~60 m 不等的等间距分布(图 15b)。

根据研究区与矿区断裂等间距控矿特征,以矿区已知断裂展布规律为事实,构建矿区等间距控矿

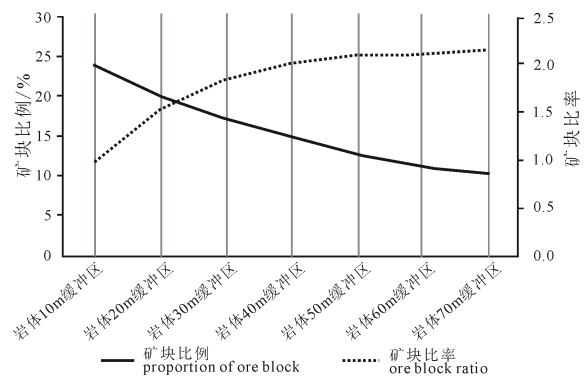


图 14 玢岩体最佳缓冲区半径统计
Fig. 14 Statistics of optimal buffer radius of porphyrite rock mass

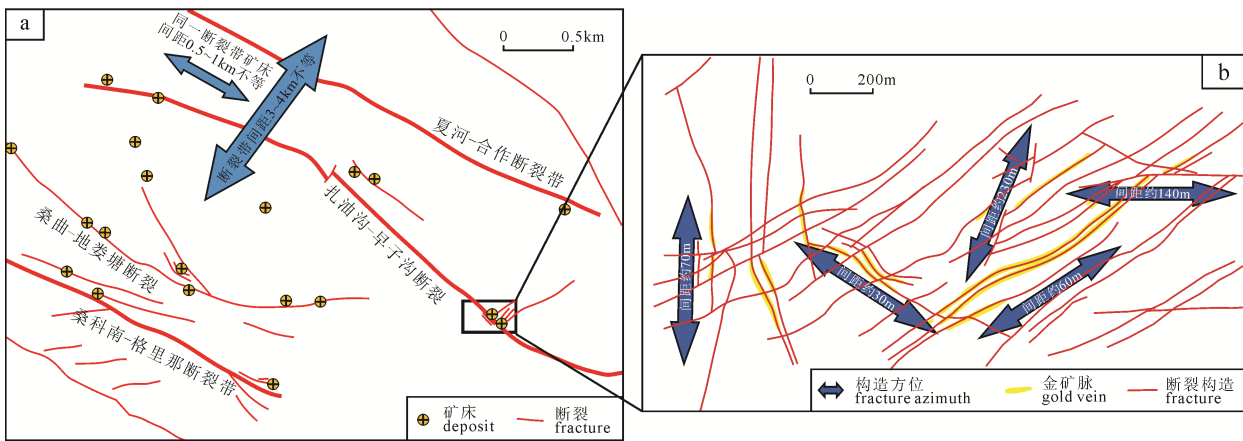


图 15 区域构造等间距控矿床(a)与矿区构造等间距控矿脉特征简图(b)
Fig. 15 Regional structural iso-spacing control of ore deposit (a) and structural iso-spacing control of ore vein (b)

表 2 甘肃早子沟金矿床找矿预测模型

Table 2 Ore-prospecting prediction model of the Zaozigou gold deposit in Gansu Province					
矿床类型	控矿要素	地质特征描述	成矿地质异常表征	地质异常三维空间重构	控矿指数/%
中、低温热液蚀变岩型(锑)金矿床	构造	构造含矿特征	多期次控矿断裂	多期次控矿断裂	47.703
		构造带特征	断裂缓冲区	控矿断裂 30 m 缓冲区	45.413
		构造发育及展布特征	断裂频数/断裂等密度	局部断裂成矿异常区间 [2.825, 7.344]	78.912
			控矿断裂方位	控矿断裂方位成矿异常区间 [0.165, 0.496]	73.253
		构造导矿、容矿特征	构造交点缓冲区	断裂交点数 40 m 缓冲区	68.964
			中心对称度	中心对称度成矿异常区间 [0.532, 0.969]	82.402
	岩体	岩体含矿特征	晚期中性岩脉-石英闪长玢岩 玢岩体与硅质板岩接触部位	成矿有利玢岩体 有利成矿部位	74.021 22.157
	围岩蚀变	有利围岩蚀变	黄铁绢云岩化、辉锑矿化、 毒砂化, 泥化等	有利围岩蚀变组合	76.747
	等间距控矿	等间距赋矿	等间距赋矿	等间距赋矿	59.411

三维实体模型, 分析研究区矿体等间距控矿特征, 在该块体模型中共有块体 801 709 块, 其中矿块数目为 82 919 块, 已知矿体占总金矿块数 139 569 的 59.411%。提取矿体等间距控矿空间作为成矿地质异常要素, 构建等间距控矿三维空间(图 16)。

本文对找矿模型设定的 10 个成矿地质异常变量逐个进行定量分析, 定量提取, 在此基础上构建基于找矿地质模型的找矿预测模型(表 2)。

3.2 综合成矿预测

三维成矿预测是在找矿模型指导下, 对有利的控矿因素(成矿条件)建立量化的指标, 结合实体模型和块体模型, 进行各成矿有利条件三维立方体提取; 采用地质统计学等预测理论方法实现深部矿体的三维成矿条件分析, 寻找成矿条件的有利组合, 以成矿条件有利组合部位的定量评价与筛选来圈定找矿有利靶区(陈建平等, 2008, 2012, 2014)。

3.2.1 证据权重法

证据权重法是一种贝叶斯方法, 由加拿大数学地质学家 Agterberg 最早提出, 被广泛用于矿产

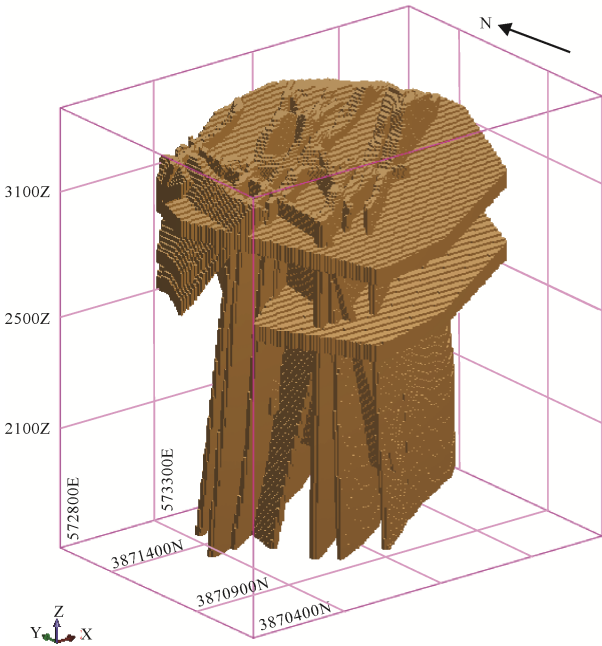


图 16 等间距控矿三维空间重构
Fig. 16 3D structure of vein controlled by equal spacing

资源预测评价。它通过对与成矿相关地质要素进行叠加综合统计,分析各要素对于成矿的贡献,提取有利因素的组合部位,从而寻求潜在的矿产预测有利远景区。选取后验概率值 ≥ 0.5315 作为证据权重法划分成矿有利区间的阈值,此时块体数目为245 256块,块体比例为5.75%,其中矿块数目为74 004块,矿块比例为53.02%,并构建证据权重法综合成矿有利三维空间(图17)。

3.2.2 信息量法

找矿信息量法属于统计分析方法,该方法广泛应用于区域矿产预测研究。由维索科奥斯特罗夫斯卡娅及恰金先后提出的,以地质异常理论为指导,

以地质、物探、化探、遥感、矿产分布等找矿信息为基础,通过统计途径计算各地质因素、找矿标志的找矿信息量,定量地评价控矿地质因素和找矿标志对指示找矿作用的大小,确定有利成矿部位(赵鹏大等,1983)。

选取信息量值 ≥ 4.0 作为信息量法划分成矿有利区间的阈值,此时块体数目为277 601块,块体比例为6.51%,其中矿块数目为77 517块,矿块比例为55.54%,并构建证据权重法综合成矿有利三维空间(图18)。

3.2.3 证据权重法与信息量法叠加分析

为了提高预测结果的准确程度,将三维证据权重和三维信息量的预测结果进行叠加分析,并根据矿产勘查学中靶区分类的原则即成矿地质条件有利

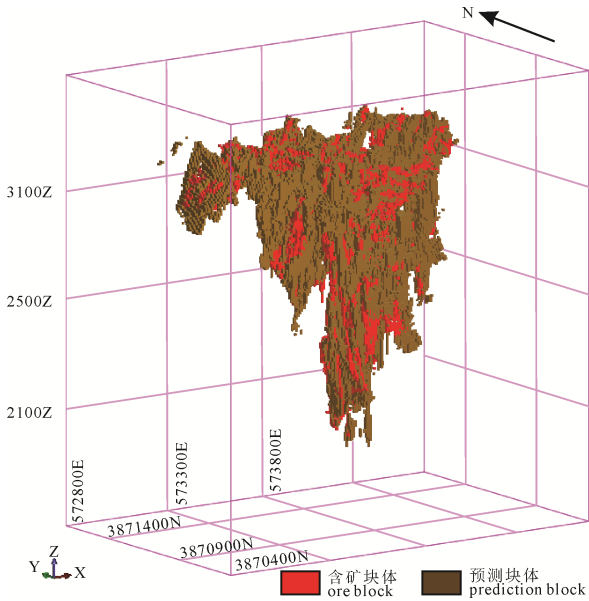


图 17 证据权重法综合成矿有利三维空间重构
Fig. 17 Evidence weight method synthesizing favorable 3D spatial structure of mineralization

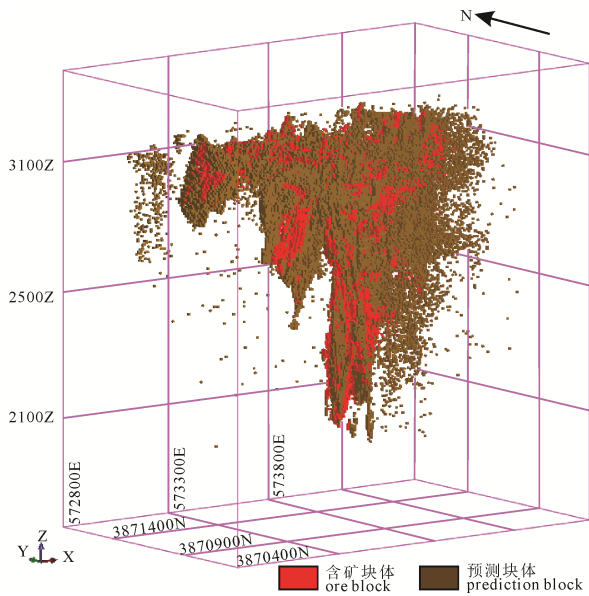


图 18 信息量法综合成矿有利三维空间重构
Fig. 18 Information content method synthesizing favorable 3D spatial structure of mineralization

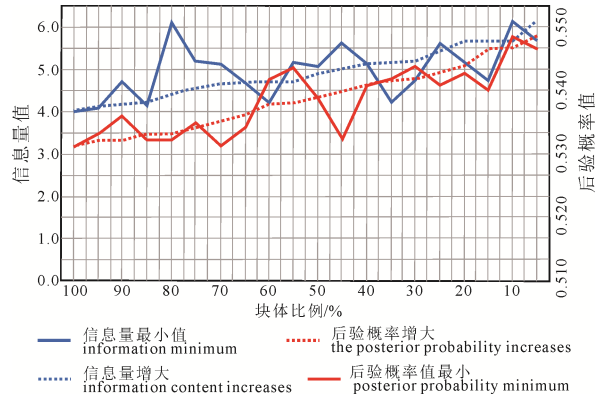


图 19 证据权重法与信息量法相互验证
Fig. 19 Mutual verification of evidence weight method and information amount method

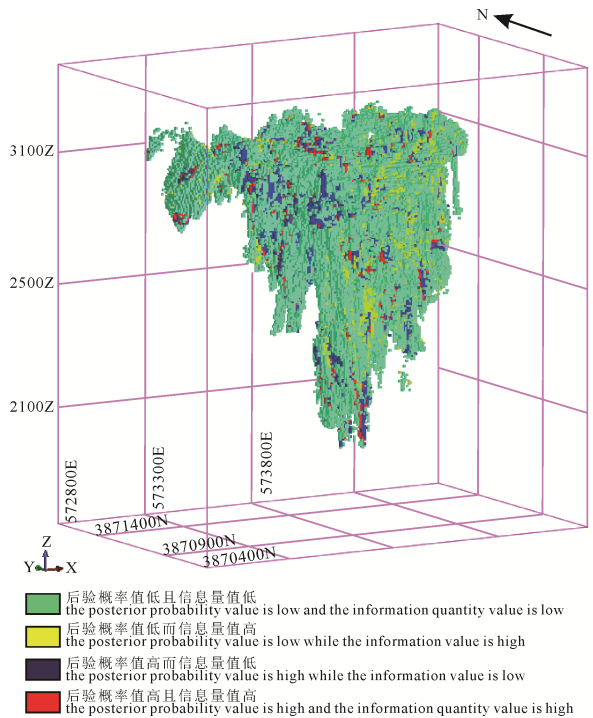


图 20 相互验证结果三维空间展布
Fig. 20 The results of mutual verification distributed in 3D space

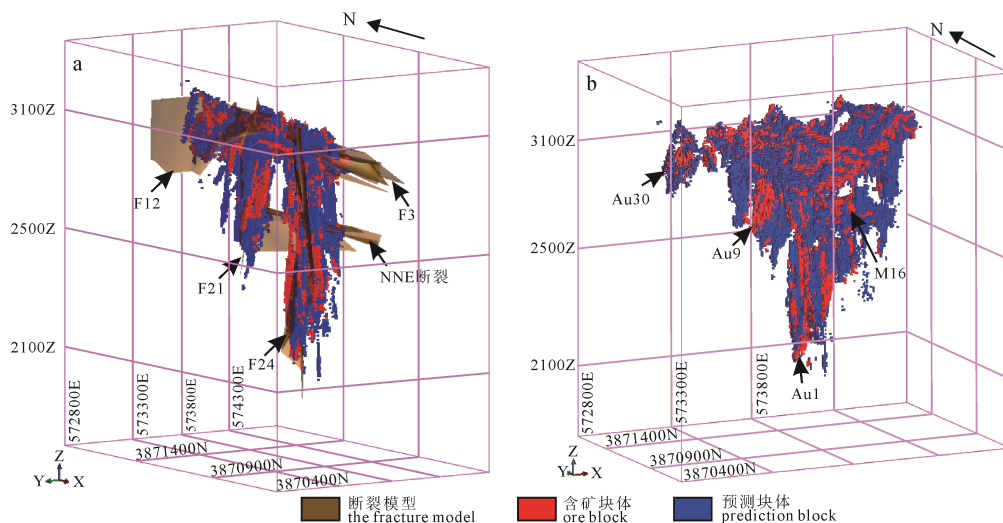


图 21 深部预测结果、断裂叠合(a)与深部成矿有利部位(b)

Fig. 21 Deep prediction results and fault superimposition (a) and deep ore-forming favorable position (b)

程度和已知矿化信息的有利程度,进行靶区圈定和优选(赵鹏大, 2006)。

本文采用证据权重法与信息量法两种预测方法进行叠加分析成矿预测,以求达到对研究区成矿预测真实有效。选取证据权重法综合成矿有利块体和信息量法综合成矿有利块体共同约束条件下的块体按数目 5%等比例减少,在约定某一种预测方法为主导的先决条件下,观察另一预测算法最小值变化趋势,观察证据权重法与信息量法相互验证的效果。此过程目的是剔除绝大部分背景块体,减少与成矿无关或关联较小的块体,缩小成矿有利块体范围。

由图 19 可以看出随着块体比例逐步减少,随着信息量值主导曲线(蓝色虚线)稳步上升,后验概率最小值曲线(红色实线)震荡上升,说明证据权重法的预测结果在信息量法预测结果中得到了很好的体现;同理可得,随着块体比例逐步减少,后验概率值主导曲线(红色虚线)稳步上升,信息量最小值曲线(蓝色实线)震荡上升,说明信息量法的预测结果在证据权重法预测结果中也得到了很好的体现。同时随着块体数目减少,两条震荡实线在各自的稳步上升虚线周围震荡上升,实线震荡幅度逐步减小,并有朝着各自虚线收敛的趋势。当块体数目比例 35%以后的区间震荡曲线震荡幅度整体较小,各自综合权值均较高,变化趋势一致,说明此区间内两种预测方法相互验证结果较好,所挑选出来的块体符合后验概率值高同时信息量值高的特征(图 20)。

4 结果与讨论

找矿模型构建与异常提取讨论:本研究充分总结、归纳区域成矿规律与矿床找矿标志,构建较为客观准确的找矿地质模型;并在此基础上运用合理

的数学统计学方法定量分析与提取地质异常变量,各地质异常在地质认识上均能得到较好的印证,而地质异常要素的控矿指数较为客观地反映了其在控矿作用的权重。

成矿预测结果分析:通过成矿异常定量分析与提取,运用证据权重法与信息量法相互验证挑选出成矿有利区块结果显示(图 20):矿脉顺构造就位成矿的特征明显(图 21a),是勘察与预测的重点;预测结果中高值块体高度囊括已知矿块,且在空间位置上两者较为贴合;预测矿块主要分布于已知矿块的周围及深部;通过比对已知矿块得出, Au1、Au9、Au30、M16 等深部具有良好的找矿潜力(图 21b)。

5 结论

(1)甘肃夏河—合作地区以南金、汞、银等中-低温成矿亚带金矿床均产于中三叠统碎屑岩系地层中,主要受区域构造控制,中酸性岩体影响,矿床呈等间距分布;早子沟金矿成矿规律特征明显,严格受多期次断裂控制,矿体呈现多期次矿化叠加富集的特征,针对主成矿期矿体构建控矿断裂+有利岩体+有利围岩蚀变+等间距控矿的综合地质找矿模型。

(2)每个地质异常变量定量分析与提取结果在地质认识上都有较好的印证。证据权重法与信息量法相互验证结果在成矿有利区块圈定方面都有较好的佐证。预测结果显示矿床明显受多期次构造控制矿化叠加富集, Au1、Au9、Au30 等主矿体深部具有良好的找矿潜力。

Acknowledgements:

This study was supported by National Key Re-

search & Development Program of China (No. 2017YFC0601502).

参考文献:

- 曹晓峰, MOHANED L S S, 吕新彪, 何谋春, 陈超, 朱江, 唐然坤, 刘智, 张彬. 2012. 甘肃枣子沟金矿床成矿过程分析——来自矿床地质特征、金的赋存状态及稳定同位素证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 42(4): 1039-1054.
- 陈国忠, 梁志录, 王建龙, 麻红顺. 2012. 早子沟金矿岩石地球化学特征及其地质意义[J]. 甘肃地质, 21(4): 23-31.
- 陈国忠, 王建龙, 梁志录, 李鹏兵, 麻红顺, 张愿宁. 2013. 甘南早子沟金矿构造特征分析[J]. 甘肃地质, 22(4): 50-57.
- 陈建平, 王功文, 侯昌波, 唐菊兴. 2005. 基于 GIS 技术的西南三江北段矿产资源定量预测与评价[J]. 矿床地质, 24(1): 15-24.
- 陈建平, 陈勇, 曾敏, 胡忠德, 赵洁, 胡青, 尚北川, 唐宇, 段毅君. 2008. 基于数字矿床模型的新疆可可托海 3 号脉三维定位定量研究[J]. 地质通报, 27(4): 552-559.
- 陈建平, 吕鹏, 吴文, 赵洁, 胡青. 2007. 基于三维可视化技术的隐伏矿体预测[J]. 地学前缘, 14(05): 54-62.
- 陈建平, 尚北川, 吕鹏, 赵洁, 胡青. 2009. 云南个旧矿区某隐伏矿床大比例尺三维预测[J]. 地质科学, 44(1): 324-337.
- 陈建平, 史蕊, 王丽梅, 陈珍平. 2012. 基于数字矿床模型的陕西潼关县 Q8 号金矿脉西段三维成矿预测[J]. 地质学报, 36(141): 237-242.
- 陈建平, 于萍萍, 史蕊, 于森, 张顺昌. 2014. 区域隐伏矿体三维定量预测评价方法研究[J]. 地学前缘, 21(5): 211-220.
- 陈耀宇, 代文军. 2012. 枣子沟金矿地质特征及成矿模式探讨[J]. 新疆地质, 30(1): 90-94.
- 陈毓川, 王平安, 秦克令, 赵东宏, 毛景文. 1994. 秦岭地区主要金属矿床成矿系列的划分及区域成矿规律探讨[J]. 矿床地质, 13(4): 289-298.
- 陈正乐, 韩凤彬, 王功文, 肖昌浩, 韦良喜, 伍俊杰. 2015. 甘肃省合作市早子沟金矿找矿预测研究专题-结题报告[R]. 北京: 中国地质科学院地质力学研究所.
- 代文军, 陈耀宇, 刘春先, 刘东晓, 马小云. 2011. 甘肃枣子沟金矿围岩蚀变特征及其与金矿化的关系[J]. 甘肃地质, 20(3): 31-36.
- 代文军, 陈耀宇. 2012. 甘肃枣子沟金矿区中性岩脉与成矿关系[J]. 黄金, 33(1): 19-24.
- 董庆吉, 肖克炎, 陈建平, 丛源. 2010. 西南“三江”成矿带北段区域成矿断裂信息定量化分析[J]. 地质通报, 29(10): 1479-1485.
- 董庆吉. 2009. 西南“三江”北段区域成矿定量预测与评价[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 冯益民, 曹宣铎, 张二朋, 胡云绪, 潘晓萍, 杨军录, 贾群子, 李文明. 2003. 西秦岭造山带的演化、构造格局和性质[J]. 西北地质, 36(01): 1-10.
- 姜琪, 王荣超. 2010. 甘肃枣子沟金矿床形成环境及矿床成因[J]. 黄金科学技术, 18(4): 37-40.
- 李康宁, 金鼎国, 蔡龙, 逯文辉, 马原, 吕菊蕊. 2014. 早子沟金矿黄铁矿标型特征及其地质意义[J]. 甘肃地质, 23(2): 33-40.
- 梁志录, 陈国忠, 王建龙, 李鹏兵, 张愿宁, 麻红顺. 2013. 早子沟金矿成矿过程中的元素迁移规律及金富集机制探讨[J]. 甘肃地质, 22(3): 35-40.
- 梁志录, 张愿宁, 王建龙, 汪宏涛. 2012. 甘肃省合作市早子沟金矿地质特征及其深部找矿前景分析[J]. 甘肃冶金, 34(6): 64-69.
- 刘春先, 李亮, 隋吉祥. 2011. 甘肃枣子沟金矿的矿化特征及矿床成因[J]. 地质科技情报, 30(6): 66-74.
- 刘汉栋, 王巧云, 李秀章, 陈建平, 祝培刚, 朱继托, 刘丽. 2015. 基于 GIS 证据权法的焦家金成矿带综合信息成矿预测[J]. 中国矿业, 24(S1): 251-257.
- 刘建宏, 张新虎, 赵彦庆, 任丰寿. 2006. 西秦岭成矿系列、成矿谱系研究及其找矿意义[J]. 矿床地质, 25(6): 727-734.
- 刘晓林. 2011. 甘肃枣子沟金矿床地质特征及成因分析[J]. 甘肃地质, 20(1): 52-56.
- 刘勇, 刘云华, 董福辰, 李宗会, 于建坤, 马晓平, 郑绪忠, 高熙贺. 2012. 甘肃枣子沟金矿床成矿时代精确测定及其地质意义[J]. 地质科学进展, 27(A1): 229-231.
- 吕鹏. 2007. 基于立方体预测模型的隐伏矿体三维预测和系统开发[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 吕新彪, 曹晓峰, MOHAMED L S, S SANOGO, 何谋春, 李亮, 张彬. 2009. 枣子沟金矿地质特征、控矿构造及物质来源探讨[J]. 矿物学报, 29(1): 447-448.
- 毛先成, 王琪, 陈进, 邓浩, 刘占坤, 王金利, 陈建平, 肖克炎. 2020. 胶西北金矿集区深部成矿构造三维建模与找矿意义[J]. 地球学报, 41(2): 166-178.
- 尚北川, 陈建平, 郑啸, 戎景会, 严琼, 武翌. 2013. 个旧高松矿田断裂构造三维信息定量特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 43(05): 1448-1456.
- 石玉臣. 2005. 山东省焦家成矿带深部金矿成矿预测研究及其应用[D]. 吉林: 吉林大学.
- 史蕊, 陈建平, 陈珍平, 王丽梅, 田毅, 王翔, 王春女, 严琼. 2011. 陕西小秦岭金矿带潼关段区域三维定量预测[J]. 地质通报, 30(05): 711-721.
- 隋吉祥, 李建威. 2013. 西秦岭夏河-合作地区枣子沟金矿床成矿时代与矿床成因[J]. 矿物学报, 33(S2): 346-347.
- 韦良喜, 陈正乐, 庞振山, 韩凤彬, 肖昌浩. 2018. 甘肃省合作市早子沟金矿床构造应力场分析[J]. 地球学报, 39(01): 79-93.
- 韦良喜. 2015. 甘肃省早子沟金矿床构造演化与成矿[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 姚书振, 周宗桂, 吕新彪, 陈守余, 丁振举, 王苹. 2006. 秦岭成矿带成矿特征和找矿方向[J]. 西北地质, 39(2): 156-178.
- 于萍萍. 2015. 基于知识驱动的矿产资源定量预测评价关键技术研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 张国伟, 郭安林, 姚安平. 2004. 中国大陆构造中的西秦岭—松潘大陆构造结[J]. 地学前缘, 11(03): 23-32.
- 张新虎, 刘建宏, 徐家乐, 牛洪斌, 赵延庆. 2005. 再论甘肃省的板块构造[J]. 甘肃地质学报, 14(02): 1-10.

- 赵鹏大, 陈建平, 张寿庭. 2003. “三联式”成矿预测新进展[J]. 地学前缘, 10(2): 455-463.
- 赵鹏大. 2006. 矿产勘查理论与方法[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 赵鹏大, 胡旺亮, 李紫金. 1983. 矿床统计预测的理论与实践[J]. 地球科学-中国地质大学学报, (4): 107-121.
- 朱裕生. 1993. 论矿床成矿模式[J]. 地质论评, 39(03): 216-222.

References:

- CAO Xiao-feng, MOHANED L S S, LÜ Xin-biao, HE Mou-chun, CHEN Chao, ZHU Jiang, TANG Ran-kun, LIU Zhi, ZHANG Bin. 2012. Ore-Forming Process of the Zaozigou Gold Deposit: Constraints from Geological Characteristics, Gold Occurrence and Stable Isotope Compositions[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 42(4): 1039-1054(in Chinese with English abstract).
- CHEN Guo-zhong, LIANG Zhi-lu, WANG Jian-long, MA Hong-shun. 2012. Geochemical Characteristics of Zaozigou Gold deposit And Its Significance[J]. Gansu Geology, 21(4): 23-31(in Chinese with English abstract).
- CHEN Guo-zhong, WANG Jian-long, LIANG Zhi-lu, LI Peng-bing, ZHANG Yuan-ning, MA Hong-shun. 2013. Geology and Mineral Exploration Team, Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration and Development[J]. Gansu Geology, 22(4): 50-57(in Chinese with English abstract).
- CHEN Jian-ping, WANG Gong-wen, HOU Chang-bo, TANG Ju-xing. 2005. Quantitative prediction and evaluation of mineral resources based on GIS in northern segment of Three River (Sanjiang) Region, Southwest China[J]. Mineral Deposits, 24(1): 15-24(in Chinese with English abstract).
- CHEN Jian-ping, LÜ Peng, WU Wen, ZHAO Jie, HU Qin. 2007. A 3D method for predicting blind orebodies, based on a 3D visualization model and its application[J]. Earth Science Frontiers, 14(5): 54-62(in Chinese with English abstract).
- CHEN Jian-Ping, CHEN Yong, ZENG Min, HU Zhong-De, ZHAO Jie, HU Qing, SHANG Bei-Chuan, TANG Yu, DUAN Yi-Jun. 2008. 3D positioning and quantitative prediction of the Koktokay No.3 pegmatite dike, Xinjiang, China, based on the digital mineral deposit model[J]. Geological Bulletin of China, 27(4): 552-559(in Chinese with English abstract).
- CHEN Jian-ping, SHANG Bei-chuan, LÜ Peng, ZHAO Jie, HU Qing. 2009. Large-Scale 3D Metallogenic Prediction of Concealed orebody in Gejiu, Yunnan Province[J]. Chinese Journal of Geology, 44(1): 324-337(in Chinese with English abstract).
- CHEN Jian-ping, SHI Rui, WANG Li-mei, CHEN Zhen-ping. 2012. 3D metallogenic prediction for western section of Q8 gold deposit in Tongguan County of Shaanxi based on digital mineral deposit model[J]. Journal of Geology, 36(141): 237-242(in Chinese with English abstract).
- CHEN Jian-ping, YU Ping-ping, SHI Rui, YU Miao, ZHANG Shun-chang. 2014. Research on three-dimensional quantitative prediction and evaluation methods of regional concealed ore bodies[J]. Earth Science Frontiers, 21(5): 211-220(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yao-yu, DAI Wen-jun. 2012. Geological Characteristics and Metallogenic Model of the Zaozigou Gold Mine[J]. Xinjiang Geology, 30(1): 90-94(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yu-chuan, WANG Ping-an, QIN Ke-ling, ZHAO Dong-hong, MAO Jing-wen. 1994. Met Allogenic Series of Main Ore Deposits and Regional Met Allogeny in the Qinling Area[J]. Mineral Deposits, 13(4): 289-298(in Chinese with English abstract).
- CHEN Zheng-le, HAN Feng-bin, WANG Gong-wen, XIAO Chang-hao, WEI Liang-xi, WU Jun-jie. 2015. Research topic of Zaozigou gold mine prospecting prediction in Hezuo city, Gansu province-concluding report[R]. Beijing: Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geosciences(in Chinese).
- DAI Wen-jun, CHEN Yao-yu, LIU Chun-xian, LIU Dong-xiao, MA Xiao-yun. 2012. Wallrock Alteration and Gold Mineralization in Zaozigou Gold Mine of Gansu Province[J]. Gansu Geology, 20(3): 31-36(in Chinese with English abstract).
- DAI Wen-jun, CHEN Yao-yu. 2012. Relationship between neutral rock vine and mineralization in Zaozigou gold deposit, Gansu[J]. Gold, 33(1): 19-24(in Chinese with English abstract).
- DONG Qing-ji. 2009. Quantitative Evaluation and Prediction of Regional Metallogeny in Northern Segment of Three River Region, Southwest China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing)(in Chinese with English abstract).
- DONG Qing-ji, XIAO Ke-yan, CHEN Jian-ping, CONG Yuan. 2010. The quantitative analysis of regional metallogenic fault in the northern segment of the Sanjiang metallogenic belt, southwestern China[J]. Geological Bulletin of China, 29(10): 1479-1485(in Chinese with English abstract).
- FENG Yi-min, CAO Xuan-duo, ZHANG Er-peng, HU Yun-xu, PAN Xiao-ping, YANG Jun-lu, JIA Qun-zi, LI Wen-ming. 2003. Ectonic Evolution Framework and Nature of the West Qinling Orogenic Belt[J]. Northwestern Geology, 36(01): 1-10(in Chinese with English abstract).
- JIANG Qi, WANG Rong-chao. 2010. Deposit Formation Environment and Genesis of Zaozigou Gold Deposit in Hezuo, Gansu Province[J]. Gold Science and Technology, 18(4): 37-40(in Chinese with English abstract).
- LI Kang-ning, JIN Ding-guo, CAI Long, LU Wen-hui, MA Yuan, LÜ Ju-rui. 2014. Typomorphism and its Geological Significance of Pyrite in Zaozigou Gold Deposit[J]. Gansu Geology, 23(2): 33-40(in Chinese with English abstract).
- LIANG Zhi-lu, ZHANG Yuan-ning, WANG Jian-Long, WANG Hong-tao. 2012. Geology Feature and Deep Prospection Analysis of Zaozigou Gold Deposit[J]. Gansu Metallurgy, 34(6): 64-69(in Chinese with English abstract).
- LIANG Zhi-lu, CHEN Guo-zhong, WANG Jian-long, LI Peng-bing,

- ZHANG Yuan-ning, MA Hong-shun. 2013. Element Migration and Gold Enrichment Mechanism of Mineralization in Zaozigou Gold Deposit[J]. *Gansu Geology*, 22(3): 35-40(in Chinese with English abstract).
- LIU Han-dong, WANG Qiao-yun, LI Xiu-zhang, CHEN Jian-ping, ZHU Pei-gang, ZHU Ji-tuo, LIU Li. 2015. Applying GIS weights of evidence method to the integrated information and metallogenic prediction of Jiaojia gold metallogenic belt, Shandong province[J]. *China Mining Magazine*, 24(S1): 251-257(in Chinese with English abstract).
- LIU Chun-xian, LI Liang, SUI Ji-xiang. 2011. Mineralization Characteristics and Ore Genesis of the Zaozigou Gold Deposit, Gansu Province[J]. *Geological Science and Technology Information*, 30(6): 66-74(in Chinese with English abstract).
- LIU Jian-hong, ZHANG Xin-hu, ZHAO Yan-qing, REN Feng-shou. 2006. A study of minerogenetic series of West Qinling region in Gansu Province and its ore prospecting significance[J]. *Mineral Deposits*, 25(6): 727-734(in Chinese with English abstract).
- LÜ Peng. 2007. Cube Predicting Model Based 3D Predicting Methods of Blind Orebody and Software Development[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- LÜ Xin-biao, CAO Xiao-feng, MOHAMED L S S, SANOGO, HE Mou-chun, LI Liang, ZHANG Bin. 2009. Geological characteristics, ore-controlling structures and material sources of Zaozigou gold deposit[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 29(1): 447-448(in Chinese).
- LIU Xiao-ling. 2011. Geology and Metallogenesis of Zaozigou Gold Deposit in Gansu[J]. *Gansu Geology*, 20(1): 52-56(in Chinese with English abstract).
- LIU Yong, LIU Yun-hua, DONG Fu-chen, LI Zong-hui, YU Jian-kun, MA Xiao-ping, ZHENG Xi-zhong, GAO Xi-he. 2012. Accurate determination of metallogenic age and geological significance of Zaozigou gold deposit in Gansu province[J]. *Advances in Earth Science*, 27(A1): 229-231(in Chinese).
- MAO Xian-cheng, WANG Qi, CHEN Jin, DENG Hao, LIU Zhan-kun, WANG Jin-li, CHEN Jian-ping, XIAO Ke-yan. 2020. Three-dimensional Modeling of Deep Metallogenic Structure in Northwestern Jiaodong Peninsula and Its Gold Prospecting Significance[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 41(2): 166-178(in Chinese with English abstract).
- SHANG Bei-chuan, CHEN Jian-ping, ZHENG Xiao, RONG Jing-hui, YAN Qiong, WU Zhao. 2013. Three Dimensional Quantitative Characteristics of Fault Structures in Gaosong Ore Field, Gejiu[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 43(05): 1448-1456(in Chinese with English abstract).
- SHI Rui, CHEN Jian-ping, CHEN Zhen-ping, WANG Li-mei, TIAN Yi, WANG Xiang, WANG Chun-nu, YAN Qiong. 2011. 3D positioning and quantitative prediction of the Xiaoqinling gold belt in Tongguan area, Shaanxi[J]. *Geological Bulletin of China*, 30(05): 711-721(in Chinese with English abstract).
- SHI Yu-chen. 2005. Deeo-Space Metallogenic Predication Study and its Application in Jiaojia Gold Belt of Shandong[D]. Jilin: Jilin University(in Chinese with English abstract).
- SUI Ji-xiang, LI Jian-wei. 2013. The metallogenic age and genesis of Zaozigou gold deposit in Xiahe-Hezuo area, west Qinling[J]. *Acta Mineralogy Sinica*, 33(S2): 346-347(in Chinese).
- WEI Liang-xi. 2015. Tectonic Evolution and Mineralization of the Zaozigou Gold Deposit, Gansu Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- WEI Liang-xi, CHEN Zheng-le, PANG Zhen-shan, HAN Feng-bin, XIAO Chang-hao. 2018. An Analysis of the Tectonic Stress Field in the Zaozigou Gold Deposit, Hezuo Area, Gansu Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 39(01): 79-93(in Chinese with English abstract).
- YAO Shu-zhen, ZHOU Zong-gui, LÜ Xin-biao, CHEN Shou-yu, DING Zhen-ju, WANG Ping. 2004. Mineralization Characteristics and Prospecting Potential in the Qinling Metallogenic Belt[J]. *Northwestern Geology*, 39(2): 156-178(in Chinese with English abstract).
- YU Ping-ping. 2015. Research on the Key Technologies of Knowledge-Driven Quantitative Prediction and Evaluation of Mineral Resources[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- ZHANG Guo-wei, GUO An-lin, YAO An-ping. 2004. Western Qinling-Songpan continental tectonic node in China's continental tectonics[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(03): 23-32(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Xin-hu, LIU Jian-hong, XU Jia-le, NIU Hong-bin, ZHAO Yan-qing. 2005. Second Study On Plate Tectonics In Gansu Province[J]. *Acta Geologica Gansu*, 14(02):1-10(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Peng-da, CHEN Jian-ping, ZHANG Shou-ting. 2003. The New Development of "Three Components" Quantitative Mineral Prediction[J]. *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing)*, 10(2): 455-463(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Peng-da, HU Wang-liang, LI Zi-jin. 1983. The Theory and Practices of Statistical Prediction for Mineral Deposits[J]. *Earth Science-Journal of Wuhan College of Geology*, (4): 107-121(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Peng-da. 2006. Theory and methods of mineral exploration[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press(in Chinese).
- ZHU Yu-sheng. 1993. On Mineral Deposit Modeling[J]. *Geological Review*, 39(03): 216-222(in Chinese with English abstract).