

# 贵州烂泥沟金矿三维定量预测

张权平, 陈建平\*, 陈雪薇, 李国超, 刘畅, 朱静

中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;  
北京市国土资源信息研究开发重点实验室, 北京 100083

**摘要:** 贵州烂泥沟金矿是中国黔桂滇“金三角”区内已知最大的卡林型金矿床, 资源储量大(大于 126.25 t), 达到超大型规模, 大地位置处在扬子准地台西南缘右江盆地北侧, 由赖子山背斜、板昌逆冲断层与册亨构造带所组成的三角形构造变形区的北部顶点。本次研究系统剖析烂泥沟金矿的成矿地质背景与成因类型, 建立找矿地质模型, 并依据资料基础建立三维地质模型, 进而在模型上开展成矿地质异常信息定量提取与三维空间重构, 建立找矿预测模型, 采用“立方体预测模型”方法, 通过三维证据权与找矿信息量相结合的综合圈定办法减少预测结果的不确定性, 共圈定找矿靶区 5 处, 其中 A 类靶区 2 处, B 类靶区 3 处, 为该区的进一步勘查提供了参考。

**关键词:** 三维地质建模; 立方体预测模型; 地质异常; 定量预测; 贵州烂泥沟金矿

中图分类号: P62 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2020.011901

## 3D Quantitative Prediction in the Lannigou Gold Deposit, Guizhou Province

ZHANG Quan-ping, CHEN Jian-ping\*, CHEN Xue-wei, LI Guo-chao, LIU Chang, ZHU Jing

*School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083;  
Beijing Key Laboratory of Land and Resources Information Research and Development, Beijing 100083*

**Abstract:** The Lannigou gold deposit in Guizhou Province is the largest Carlin-type gold deposit so far known in the ‘Golden Triangle Area’ of Guizhou, Guangxi and Yunnan, which has large mineral reserves (more than 126.25 t), reaching a superlarge scale. The deposit is located on the northern side of Youjiang Basin on the southwest margin of Yangtze paraplatform as well as at the northern apex of the triangle structural deformation area composed of Laizishan anticline, Banchang thrust fault and Danheng tectonic belt. The geological settings of mineralization and genetic type of the Lannigou gold deposit were systematically analyzed and then the prospecting model was summarized on such a basis. The 3D geological model was built based on the data foundation, and then the quantitative extraction and 3D spatial reconstruction of geological anomaly ore-controlling information were carried out under the guidance of the prospecting model. A prospecting prediction model was established, and the results were calculated through “cube prediction model”. In order to reduce the uncertainty of the prediction results, the authors combined the results of three-dimensional weight of evidence and the information contents. A total of 5 prospective targets were delineated, which included two Class A targets and three Class B targets. This research provides a reference for further exploration of the study area.

**Key words:** 3D geological modeling; cube prediction model; geological anomaly; quantitative prospecting; Lannigou gold deposit, Guizhou Province

贵州烂泥沟金矿地处黔、桂、滇三省接壤地点, 是中国著名的卡林型金矿“金三角”, 大地位置处

在扬子准地台西南缘, 右江盆地北侧, 由赖子山背斜、板昌逆冲断层与册亨构造带组成的三角形构造

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“深部成矿地质异常定量预测方法与模型”(编号: 2017YFC0601502)资助。  
收稿日期: 2019-11-25; 改回日期: 2019-12-31; 网络首发日期: 2020-01-21。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 张权平, 男, 1994 年生。博士研究生。地球探测与信息技术专业, 主要从事矿产资源定量预测研究。通讯地址: 100083, 北京市海淀区学院路 29 号。E-mail: zqp\_dream@163.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。

变形区北部顶点(图 1)(罗孝桓, 1993)。烂泥沟金矿资源储量大(>126.25 t)(毛铁等, 2014), 达到超大型规模(丛源等, 2016), 根据资源潜力评价显示, 区内金资源的查明程度仅为 34.16%, 金矿资源的找矿潜力巨大。陈懋弘等(2007)对烂泥沟金矿的矿床构造进行了详细解析并探讨其构造成矿特征, 为该区的深部找矿提供了重要的理论依据; 聂爱国(2007)系统研究了黔西南地区金矿的成矿机制并给出黔西南地区区域性的成矿预测远景区; 王旭阳等(2014)对矿床模型进行分析认为岩性强烈变形地段为有利成矿部位, 同时提出礦厂沟深部有着一定的找矿潜力; 张洪信等(2016)在以往研究基础上, 对赖子山背斜西南段的成矿条件与找矿潜力进行了初步分析, 并给出 5 处找矿靶区; 刁理品等(2017)综合研究了黔西南地区赖子山背斜西翼的成矿地质条件与物化探信息, 圈定了新的找矿靶区并给出下一步找矿工作的研究重点; 刘永良(2018)根据一定的物化探方法对烂泥沟金矿外围的成矿地质条件进行解析, 给出烂泥沟区域性的找矿方向。

已有研究都是给出区域性的找矿方向, 难以给出矿床深部的预测, 随着近些年三维地质建模技术的成熟, 矿产资源三维定量预测理论与方法正逐步走上舞台, 其揭露地质体三维空间结构特征、实现地质信息空间量化提取分析的能力正适用于矿产资源的深部成矿潜力预测。Caumon et al.(2006)利用 logistic 回归方法及证据权重法对加拿大 Duparquet

金矿区及 Joutel VMS 矿区进行了三维远景预测; 毛先成等(2010)提出了隐伏矿体立体定量预测工作流程, 并取得很好的应用效果(毛先成等, 2020; 陈进等, 2020); Joly et al.(2010)利用证据权重方法基于三维地质模型对 Tanami 造山带金成矿远景区进行了预测; 肖克炎等(2012)总结了三维成矿预测的工作流程, 突破了三维可视化以及三维信息综合定量预测等方面的关键技术问题; Payne et al.(2015)以 GOCAD 为平台, 综合各种地质资料信息建立了新西兰 Taupo 地区的三维地质模型并开展找矿潜力预测评价; 陈建平等(2007)提出了一套适用于隐伏矿体三维预测的“立方体预测模型”找矿方法, 综合多元找矿信息, 开展深部隐伏矿体的“定位-定量-定概率”预测评价。该方法将区域二维成矿预测方法与先进的三维地质建模相结合, 在多个研究区开展隐伏矿体三维定量预测, 取得了丰硕的找矿成果(陈建平等, 2008a, 2011, 2014a, b; 史蕊等, 2014; 李伟等, 2020)。

本次研究系统分析梳理烂泥沟金矿的成矿地质背景与成因类型, 基于地质异常理论建立找矿地质模型, 并在其指导下开展异常信息的三维空间重构, 以实现研究区的三维定量预测。

## 1 研究区地质背景

研究区在大地构造位置上位于羌塘—扬子—华南板块一级构造带, 二级扬子陆块西南缘, 三级江南造山带, 四级右江裂谷—前陆盆地区, 区域内

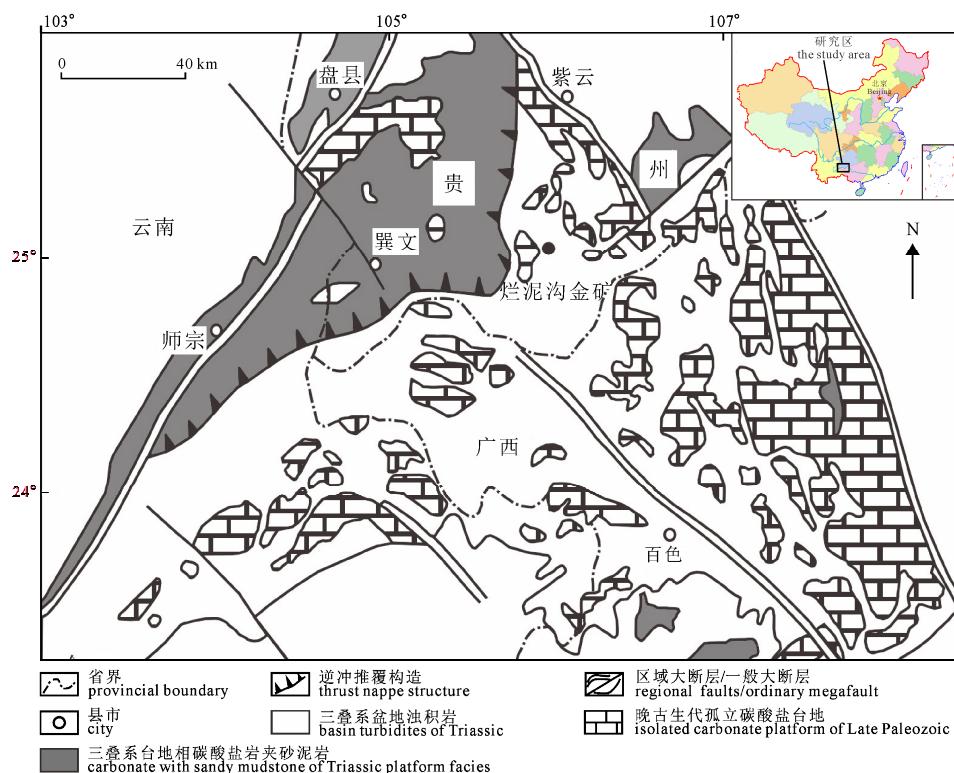


图 1 烂泥沟金矿区域构造简图(陈懋弘等, 2007)  
Fig. 1 Regional geological map of the Lannigou gold deposit (after CHEN et al., 2007)

主要有三套不同的地层序列: ①扬子被动大陆边缘浅水碳酸盐岩序列, 发育在黔西南被动大陆边缘的浅水碳酸盐岩沉积夹少量的火山岩和陆源碎屑沉积岩, 这套碳酸盐岩建造是烂泥沟地区金主要赋存的层序之一; ②右江盆地内分布渗水碳酸盐岩-陆源碎屑浊积岩盆地序列, 下部以深水碳酸盐岩为主, 包括泥岩、硅质岩和沉积凝灰岩, 上部以后期发育形成的陆源碎屑浊积岩系为主, 也是右江盆地内主要赋金层序之一; ③孤立碳酸盐岩台地序列, 在右江盆地内呈孤立台地产出, 而后被一层陆源碎屑浊积岩覆盖(陈懋弘等, 2007; 苏杭和王甘露, 2013)。

区域上经历了海西期、印支期和燕山期等多次构造运动, 这为研究区形成具有工业价值的卡林型金矿提供了活化和迁移的驱动力, 同时也提供了有利于矿体就位的成矿空间(褶皱、断裂等), 从而在有利构造部位富集成矿(苏杭和王甘露, 2013)。区内岩浆活动较弱, 岩浆岩出露面积较少, 仅在矿区北北东 27 km 远的贞丰县白层有燕山期偏碱性超基性岩小岩体出露, 主要为斑状橄榄辉岩、斑状辉橄榄岩。

研究区内主要出露地层有: 边阳组( $T_{2by}$ )是主要的赋矿地层之一, 具有典型的陆源碎屑岩特征, 主要以灰色薄至中厚层状、厚层状(少许块状)细砂岩、粉砂岩、杂砂岩为主, 夹灰色薄至中厚层状黏土岩, 或砂岩与黏土岩呈韵律性互层; 尼罗组( $T_{2nl}$ )主要以灰、深灰色薄层状钙质黏土岩为主, 夹薄层状泥质粉砂岩; 许满组( $T_{2xm}$ )是矿区内的主要赋矿地层之一, 主要岩性为中厚层状-块状砂岩夹薄层

黏土岩。吴家坪组仅在矿区北西角小面积出露, 岩性为浅灰色、灰色块状水螅海绵礁灰岩。其中主要赋矿地层为边阳组, 其次为许满组, 金矿主要产于边阳组的陆源碎屑岩中。

黔西南地区主要的区域深大构造走向为 NE 和 NW, 有部分构造走向为 NS 向和 WE 向(聂爱国, 2007)。研究区内构造线主要分为近 NS 向、NW 向和 NE 向 3 组, 其中造山期间形成的 NW 向褶皱和逆冲断层控制了研究区的整体构造格架(陈懋弘等, 2007), 3 组构造互相之间有限制也有错动(图 2), 在断裂交汇的部位常有富厚矿体产出(聂爱国, 2007)。近 NS 向断层规模大, 走向延伸稳定, 与 NW 向褶皱一起控制了研究区的总体构造格架, 总体表现为逆冲断层性质, 但许多证据表明逆冲过后有一次显著的右旋-正断运动, 主要有  $F_7$  断层; NS 向断层规模大, 走向延伸稳定, 与 NW 向褶皱一起控制了研究区总体构造格架, 由 W 往 E 主要有  $F_3(F_{3N})$ 、 $F_6$ 、 $F_5$  等, 其中  $F_3(F_{3N})$  断层构造经历复杂, 为主要的控矿断裂, 其内矿体储量占整个矿床储量的 80% 以上(罗孝桓, 1993); NE 向断层规模小, 走向延伸短, 断面陡立, 总体上以挤压和走滑性质为主, 出露有  $F_2$  断层。

## 2 找矿地质模型建立

根据研究区所处实际地质情况与矿床模型综合分析建立三维地质模型, 从成矿地质背景、成因类型入手建立找矿地质模型, 进而选取合适的数学地质变量来定量表征成矿信息, 并提取分析控矿要素(陈建平等, 2007, 2008a, 2011, 2014a; 史蕊等, 2014), 以实现地质异常的三维空间重构, 变量公式及数学算法此处不再赘述。

### 2.1 三维地质建模

三维地质模型是一个以地理坐标为依据的、数字化的三维显示的虚拟矿床, 其核心思想是用三维可视化平台整体解决与空间位置或属性相关的实际地质问题, 三维地质实体模型的建立是三维定位预测的研究基础(陈建平等, 2008a, 2011; 史蕊等, 2014)。

本次研究中, 收集到间距 100 m 的实测地质剖面 65 条, 平均深度 600 m, 钻孔 32 个, 平均深度 450 m, 经数据处理后, 形成研究区的三维地质模型, 平面面积为 1.5 km<sup>2</sup>, 深度 750 m, 建模细节与方法本次不再赘述(陈建平等, 2007, 2014a; 肖克炎等, 2012; 杨伟等, 2016; 张权平等, 2018; 胡桥等, 2018)。建立的地层信息、矿体信息以及构造信息模型如图 3 所示。

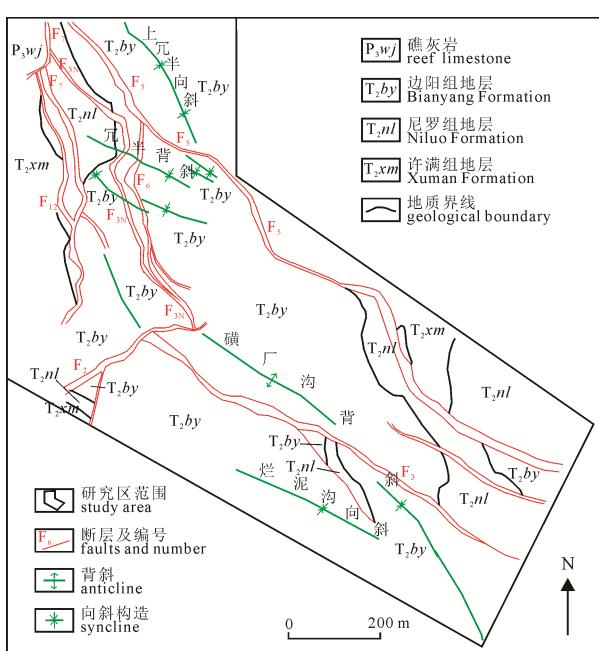


图 2 烂泥沟金矿研究区构造简图

Fig. 2 Structural map of the Lannigou gold deposit

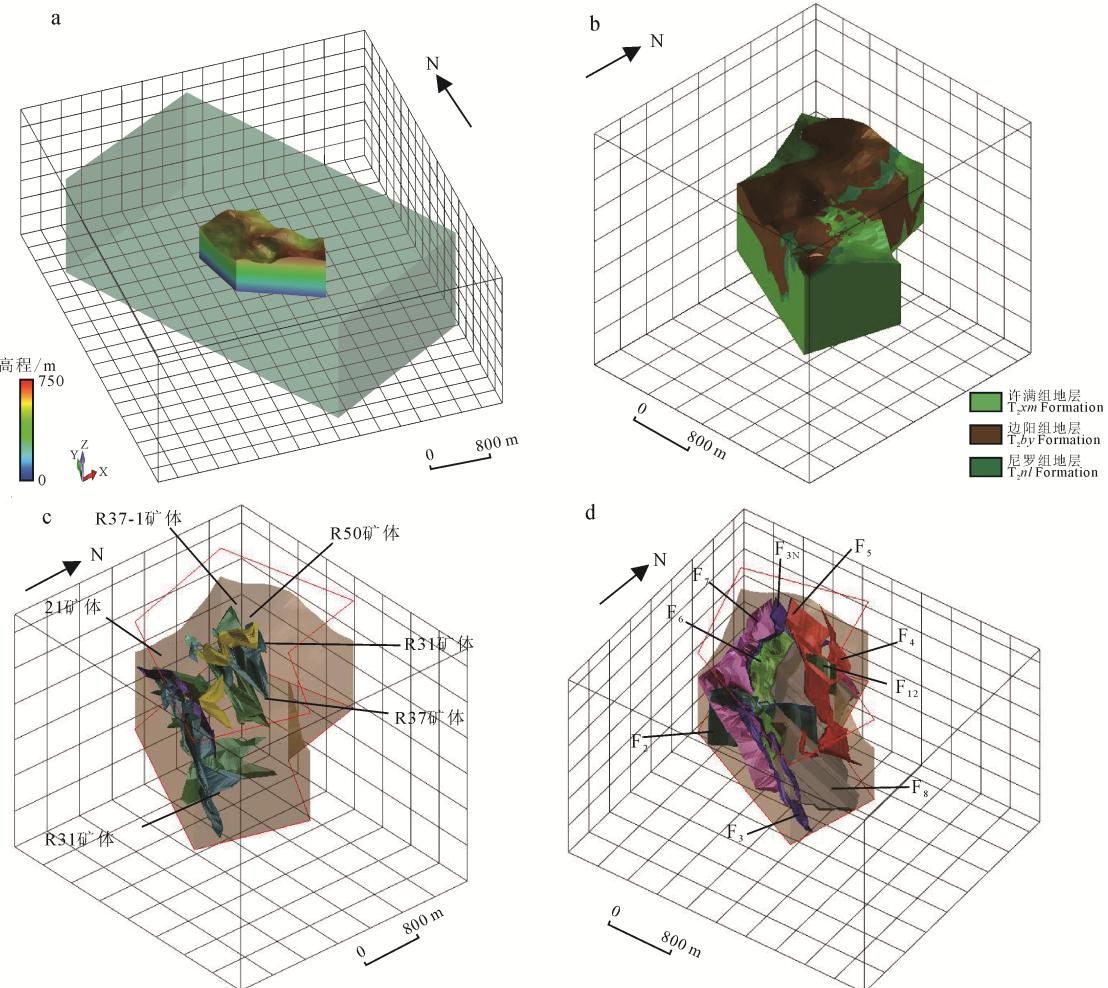
## 2.2 找矿地质模型构建

地质异常是在结构、构造或成因次序上与周围环境有着明显差异的地质体或地质体组合(赵鹏大和池顺都, 1991; 赵鹏大和孟宪国, 1993; 赵鹏大等, 2001)。本次研究从成矿地质背景与矿床成因类型入手, 提取地质异常信息, 构建研究区的找矿地质模型。

### (1) 成矿地质背景

#### (a) 地层信息

研究区内产出的矿体主要赋存在  $T_2by$  及  $T_2xm$  中, 其岩性组合以一套砂岩夹黏土岩或两者呈韵律性互层产出为特征, 环境属于深水盆地相陆源碎屑冲积岩(毛铁等, 2014); 主要容矿岩石为一套陆源碎屑岩(陈懋弘等, 2007; 韩雪, 2012; 苏杭和王甘露, 2013), 它为成矿流体的扩散与保存提供了一定的有利条件。虽然地层是黔西南地区金矿的主要控矿要素之一, 但在研究区内并不占主导地位(罗孝桓, 1993; 聂爱国, 2007; 陈懋弘, 2007; 吴松洋等, 2016)。



a—研究区三维空间范围; b—地层模型; c—矿体模型; d—断裂构造模型。  
a—3D space of the study area; b—stratigraphic model; c—orebody model; d—faults model.

图 3 烂泥沟金矿研究区三维地质模型  
Fig. 3 3D geological model of the Lannigou gold deposit

### (b) 构造活动能量强度

断裂的发育程度能够直接反应区内所发生的构造活动强度, 在很多金矿床中金元素异常在能量释放区处有明显的富集特征(郭红乐等, 2003; 马星华等, 2008; 刘家军等, 2010; 喻万强等, 2010), 但是过度剧烈的能量释放对矿体有破坏作用, 所以矿体一般存在于能量强度次高级区, 故此合理地确定构造活动能量的集中及释放部分对于金矿体的预测有着十分重要的作用。这里采用构造等密度算法来定量描述构造活动的强度。

### (c) 构造格架空间异常方位展布

在金矿的成矿模式中, 区域构造格架的空间展布对于矿体有着十分重要的控制作用, 在我国众多金矿中有着很明显的体现(姚仲友, 1994; 何伟民等, 2017), 并且在研究区中, NE 向构造控矿为主, NW 向构造控矿为辅的特征尤为明显, 故此重建出研究区构造格架的异常特征对于矿体的产出定位与规模推断同样有着十分重要的作用。这里采用异常方位算法来定量描述构造空间格架特征。

## (2)成因类型

烂泥沟矿床位于伴随大型逆冲-推覆断层构造形成的构造三角区内，同时含有挤压体制和伸展体制的断裂，且金矿床主要受逆冲断层控制，烂泥沟金矿的成矿模式如图4。

在大型逆冲-推覆构造作用过程中，成矿热液沿导矿网络体系运移，进入切穿盆地相陆源碎屑岩的北西向压扭性断裂及配套的走滑断层中，在成矿有利的岩性组合及封闭的低温还原空间富集成矿。可以看出矿源、导矿容矿空间等主要的成矿分析对于探索矿体的最终就位空间有着至关重要的作用。笔者主要从含矿热液运移、深大断裂通道、矿体赋存空间等导矿容矿特征入手，分析提取主要的控矿地质要素。

### (a)含矿热液上涌特征

在实际的地质情况中，地壳运动、基底岩浆底辟作用、热液上涌侵位等地质情况会造成地质构造或线性地质体的中心对称分布现象，因此定量分析断裂构造的中心对称发育特征能够推测在实际的地质活动中含矿热液沿断裂上涌而造成的对称环状或放射状裂隙特征。大部分的热液型矿床或与热液成因有关的矿床都有此特征(于森等, 2013; 陈建平等, 2014a, b)，同样对于相似的成矿地质背景条件下的桂西北高龙金矿(燕守勋和孟宪刚, 1996, 谢卓熙, 2000; 陈大经和谢世业, 2004)的矿床成因中，在岩浆上涌的应力作用下，小隆起区进一步上隆，并在

周边形成边缘断裂系统，为矿液运移提供通道。故此本次研究引入中心对称度算法来反演研究区含矿热液的上涌作用。

### (b)深大断裂通道

深大断裂为含矿热液的运移与矿体就位提供了通道，是很重要的导矿容矿空间。大部分热液成因或与热液活动成因有关的矿床受主干断裂的影响很大，在金矿的勘查研究中能够发现，深大断裂同样控制着矿体的赋存空间位置。深大断裂特征的异常特征定量提取，对于研究区的含矿热液运移和成矿空间估计有着至关重要的作用，采用主干断裂的算法来定量描述研究区的深大断裂特征。

### (c)深大断裂旁侧次级构造

次级断裂表现为深大断裂的旁侧断裂，通常相对于深大断裂来说，其旁侧的断裂空间容矿性更好，因为其相对稳定的物理化学条件更适合于含矿热液中矿质的沉淀与矿体的形成。这里采用局部断裂法定量描述深大断裂旁侧次级断裂空间特征，采用方位异常度算法来定量描述主控矿构造方向旁侧异常断裂控矿特征。

### (d)断裂容矿空间特征

断裂破碎带主要是由次级断裂、节理、劈理面等裂隙网络组成，断裂带内部结构及其构造空间是流体运移的主要通道，局部构造活动更是驱动和促进流体运移的主要动力之一(Caine et al., 1996; Cline and Hofstra, 2000; Kim et al., 2004; Deng and Wang,

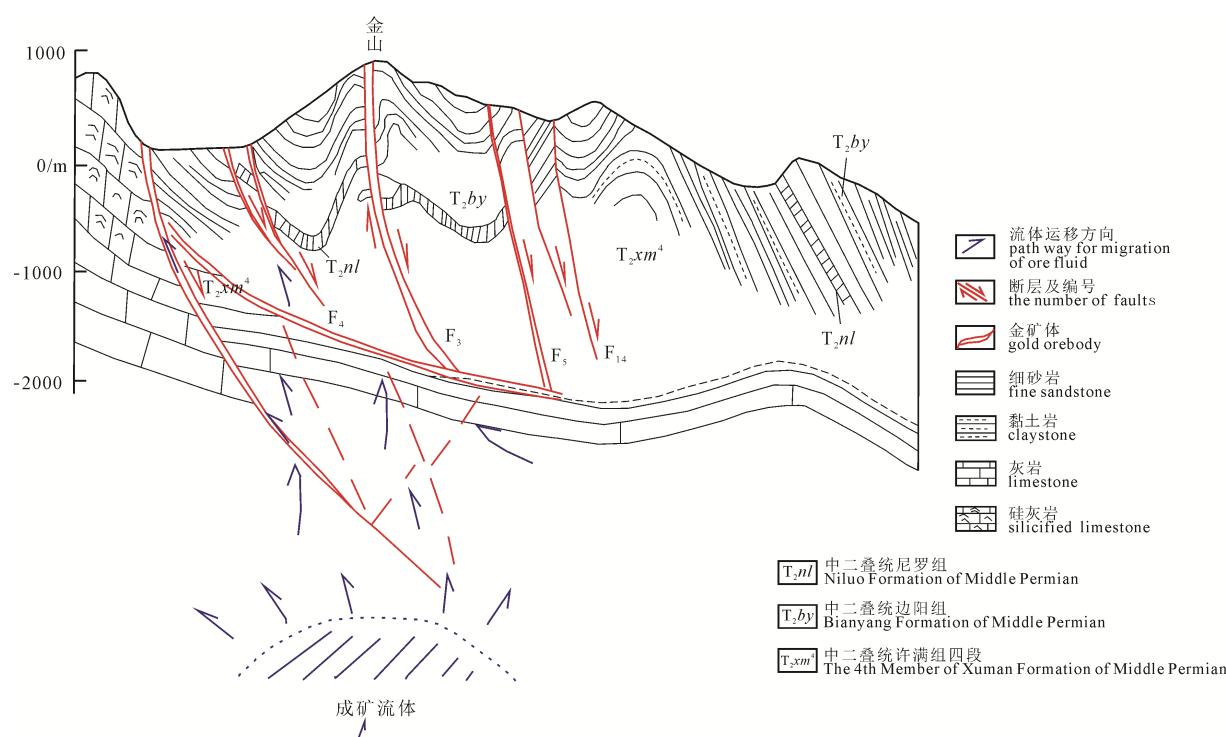


图4 烂泥沟金矿成矿模式图(丛源等, 2016)

Fig. 4 The model for the formation of the Lannigou gold deposit (after CONG et al., 2016)

2016; Deng et al., 2017)。在研究区中, 某些地段矿体会穿越破碎带边界, 在破碎带的围岩中成矿, 或者断层破碎带在活动过程中, 在构造动力的驱动下, 两盘围岩形成张性节理带或破劈理发育带, 产生减压空间, 有利于成矿流体的贯入, 也会形成矿体, 而且与断层破碎带中的矿体是连成一体的, 因此, 研究区矿体总体来看是受断层破碎带控制, 但矿体也会突破断层的边界进入断层两盘围岩, 且距离不会太远。其矿体形态明显的一个特征是, 两组不同方向的断裂交接部位矿体厚大, 品味富(陈懋弘等, 2007), 即不同方向的构造相汇部位是矿体的膨大部位, 构造变形强烈的地段, 断裂破碎带的宽度也大, 形成的矿体较厚、品味较高, 矿体基本产于控矿断裂以及控矿断裂旁侧的破碎带中(陈懋弘等, 2007; 韩雪, 2012), 同时断裂周边破碎带也为矿质的留存提供有利空间, 采用交点数算法来定量提取研究区内各组断裂的交汇部位, 建立断裂缓冲区来定量提取断裂构造的周边破碎带区域。

根据以上信息建立研究区的找矿模型如表 1。

表 1 烂泥沟金矿找矿地质模型  
Table 1 Geological prospecting model of the Lannigou gold deposit

异常类型	地质异常要素	控矿要素描述
成矿地质背景	大地构造位置	一级羌塘—扬子—华南板块一级构造带 二级扬子陆块西南缘 三级江南造山带 四级右江裂谷-前陆盆地区
	赋矿地层	T <sub>2by</sub> T <sub>2xm</sub>
	构造活动	整体 NW 向构造格架展布 多次构造活动
	断裂控矿	断裂及周边破碎带
	构造活动能量	多期活动提供能量源
	导矿容矿通道	深大断裂
成因类型	矿体就位空间	深大断裂旁次级构造 次级构造方位异常特征
	热液运移	含矿热液上涌运移
	致矿异常	构造交汇部位

表 2 烂泥沟研究区找矿预测模型  
Table 2 Geological prospecting prediction model of the study area

异常类型	地质异常要素	控矿要素描述	异常定量区间
成矿地质背景	控矿构造	断裂破碎带	断裂及周边 20 m 破碎带
	构造活动能量强度	构造等密度异常	(1.73, 3.73)
	控矿构造格架整体展布	异常方位	(0.6, 0.8) ∪ (0.8, 1)
成因类型	赋矿地层	主要含矿地层	T <sub>2by</sub> 、T <sub>2xm</sub>
	深大断裂通道	深大断裂控矿异常	(0.1, 0.5)
	断裂周边次级构造	断裂周边次级断裂	(2.750, 6.050)
	次级构造的方位异常	次级断裂方位异常度	(0.18, 0.41)
	含矿热液上涌特征	构造中心对称特征	(0.1, 0.5)
	多组构造的交汇空间	构造交汇处	交点数大于 0

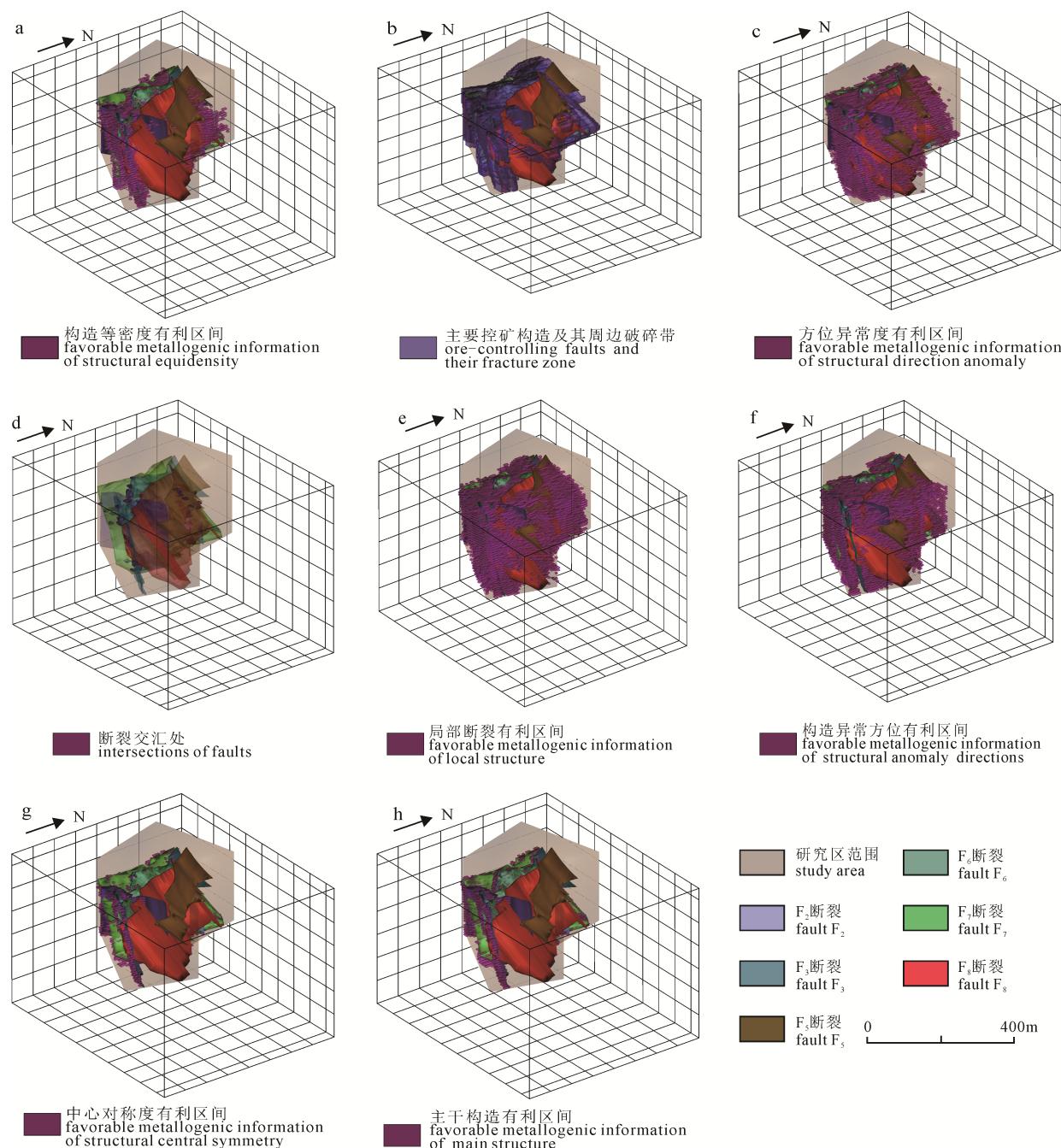


图 5 控矿要素三维空间重构

Fig. 5 3D spatial reconstructions of ore-controlling factors

各控矿要素的定量有利区间与主要控矿断裂构造的三维空间重构结果如图 5 所示。

能够看出各控矿要素的三维空间重构结果整体呈现 NW 向为主, NE 向为辅的特征, 这与已知矿体的空间展布(图 3c)特征具有很明显的一致性。反应研究区构造活动强度的等密度要素(图 5a)与研究区主干构造(图 5h)的结果能够综合证明 F<sub>7</sub>是研究区的重要控矿断裂并控制着研究区的整体构造格架, 同时中心对称度的计算结果(图 5g)也指明 F<sub>7</sub>可能为含矿热液上涌及就位保存提供通道及空间, 这也证明了 F<sub>7</sub>断裂是重要的导矿容矿构造。反应主干断裂旁侧容矿空间的局部断裂(图 5e)、断裂破碎带(图 5b)

以及方位异常度(图 5e)的控矿要素之间主体趋势一致, 说明断裂构造周边及相互直接切割所产生的破碎带空间对成矿十分有利, 这与研究区整体构造特征相呼应。

#### (2) 三维证据权法预测结果

作为矿产资源定量评价和成矿预测的最常用的模型之一, 证据权模型(WoFE)被国内外学者广泛应用于多源信息综合空间信息决策支持系统, 在我国同样也有着广泛的应用(陈建平等, 2008b; 张生元等, 2009; 李卫东等, 2009)。陈建平将二维证据权算法成功引入到三维矿产资源预测中, 并取得了很好的效果(吕鹏, 2007; 陈建平等, 2007,

2011)。

在已建立起的找矿预测模型中, 将定量控矿要素作为证据图层, 将已知矿体块作为训练样本, 计算各证据图层的先验概率及各证据图层的正负相关性与权重值见表 3。

从表 3 中可以看出, 综合权值最高的为断裂及周边破碎带, 其综合权重达到了 3.29, 说明烂泥沟研究区最主要的控矿要素还是断裂构造, 这与已有的研究结果相吻合(罗孝桓, 1993; 陈懋弘等, 2006, 2007; 陈懋弘, 2007; 聂爱国, 2007; 苏杭和王甘露, 2013; 陈江, 2017)。构造活动发育能量强度异常区间和描述主干断裂旁侧的次级断裂容矿空间的局部断裂和方位异常度特征的综合权值分别达到了 1.73、1.60 和 1.43, 说明研究区曾经历过剧烈的构造活动和多期次的构造叠加活动, 而主要的控矿断裂  $F_7$  和  $F_3$  也正是有这样多期次活动的特点, 与研究区已有的研究成果相吻合(罗孝桓, 1993; 陈懋弘等, 2007)。作为成矿热液运移通道的主干断裂异常特征和反映成矿热液上涌特征的构造中心对称特征的综合影响权值都分别达到了 1.51 和 1.52, 说明推测发生热液上涌过程的空间与深大断裂所提供的热液活动通道的异常特征在研究区同样占很大的影响。而描述整体构造格架空间方位展布特征的异常方位特征

权重相对之前的几个控矿要素相比略低, 推测因为区内矿体的主要展布方向顺构造展布同为 NW 向, 差异性不大, 故此其影响因子并不是很高。而地层信息中,  $T_{2by}$  和  $T_{2xm}$  的控矿作用不是很明显, 同样从已有的研究中能够得到相应的印证, 研究区的主要控矿因素为构造控矿。而构造交点数因为空间分布的局限性和仅有的矿体膨大特征导致训练样本过少, 故此权值得分较低, 但据已有的研究资料和相关文献认为, 构造交汇处仍然是很重要的成矿有利要素之一。

### (3) 找矿信息量法

信息量法是由 E.B. 维索科奥斯特罗夫斯卡娅、N.N. 恰金先后提出的, 该方法也是在区域矿产预测中经常使用到的一种单变量统计分析方法(赵鹏大等, 1983; 游远航等, 2006; 陈建平等, 2007; 胡桥等, 2018), 其主要通过研究分析各控矿要素在空间上与矿体之间的关系来确定各控矿要素的所含信息量, 进而反映研究区内各区块对成矿的贡献大小。在找矿预测模型指导下, 采用找矿信息量法(陈建平等, 2007; 史蕊等, 2014)进行成矿有利块体分级与靶区圈定。信息量值的计算结果如表 4。

对三维证据权法和找矿信息量法所得到的计算结果进行分级统计分析(图 6)。

表 3 各控矿要素证据权重值  
Table 3 Weight value of every ore-controlling factor

异常类型	地质异常要素	控矿要素描述	W+	W-	C
成矿地质背景	控矿构造	断裂破碎带	0.573 625	-2.724 730	3.298 355
		$T_{2xm}$	-0.830 490	0.438 218	-1.268 710
	赋矿地层	$T_{2by}$	0.492 132	-0.857 740	1.349 872
		构造发育能量强度	0.921 353	-0.810 360	1.731 713
	断裂特征	构造发育异常方位	0.829 381	-0.528 870	1.358 246
		主干断裂特征	0.836 490	-0.678 200	1.514 694
成因类型	次级构造特征	次级断裂发育	0.871 363	-0.730 810	1.602 174
		方位异常发育	1.326 638	-0.109 930	1.436 565
	热液上涌特征	中心对称构造特征	1.073 945	-0.447 790	1.521 735
致矿异常	矿体膨大	断裂交汇处	0.519 617	-0.032 830	0.552 442

表 4 各控矿要素信息量表  
Table 4 Information contents of ore control factors

异常类型	地质异常要素	控矿要素描述	信息量值
成矿地质背景	控矿构造	断裂破碎带	0.620 858 964
		$T_{2xm}$	-0.356 850 490
	赋矿地层	$T_{2by}$	0.209 328 480
		构造发育能量强度	0.389 720 480
	断裂特征	构造发育异常方位	0.351 268 650
		主干断裂特征	0.354 249 780
成因类型	次级构造特征	局部断裂发育	0.368 839 500
		方位异常发育	0.557 190 770
	热液上涌特征	中心对称构造特征	0.453 179 050
致矿异常	矿体膨大	断裂交汇处	0.220 664 120

可以发现,两种方法得到的计算结果具有一致性,随着提高控矿条件(升高后验概率或信息量值),满足要求的块体越来越少,但是含矿率却在不断升高,说明成矿条件有利的块体正在被我们逐渐搜索出来。根据实际情况,以后验概率0.98和0.994,信息量3.4和4.4为阈值,对两种结果分别划分两级有利块体,其三维空间展示如图7所示。

#### (4)综合预测结果

笔者采用两种计算结果相结合的方法进行综合地质异常定量圈定,其划分原则为:将两种预测方法的两级成矿有利结果进行叠加,划分四类成矿有利块体,即:一级成矿有利块体为两种预测方法的高值区;二级成矿有利块体为满足一种预测方法的高值区同时是另一种预测方法的有利区;三级成

矿有利块体为满足一种预测方法的高值区或同时满足两种预测方法的有利区;普通成矿有利块体为仅满足某一种方法的有利区,划分结果如表5,划分之后的计算结果如图8。

研究区主要为构造控矿,同时计算结果也相应显示成矿有利块体分布均沿断裂展布,但研究区内的构造十分发育,纵横交错,故此在三维空间显示中显得十分散乱,缺乏规律性。为展示清晰,同时有利于下一步的靶区圈定,以垂直整体构造格架(NE、NW)方式对研究区进行剖面切割,共在连续插值预测区切割5条剖面,结果如图9。

在图8中可以看出综合圈定的找矿预测区已包含了大部分矿体,说明本次连续插值预测结果的准确性,在综合预测结果剖面图9中,能够看出F<sub>2</sub>、

表5 基于双预测方法的有利区分级情况表

Table 5 Classification table of favorable area based on double prediction methods

成矿有利块体级别	单元块个数	说明
一级成矿有利块体	600	两种预测方法的一致最高值区, 成矿概率高
二级成矿有利块体	2336	一种预测方法的最高值区同时是另一种预测方法的有利区
三级成矿有利块体	2489	仅是一种方法的最高值区或两种预测方法一致的有利区
普通成矿有利块体	3667	满足一种预测方法的有利区

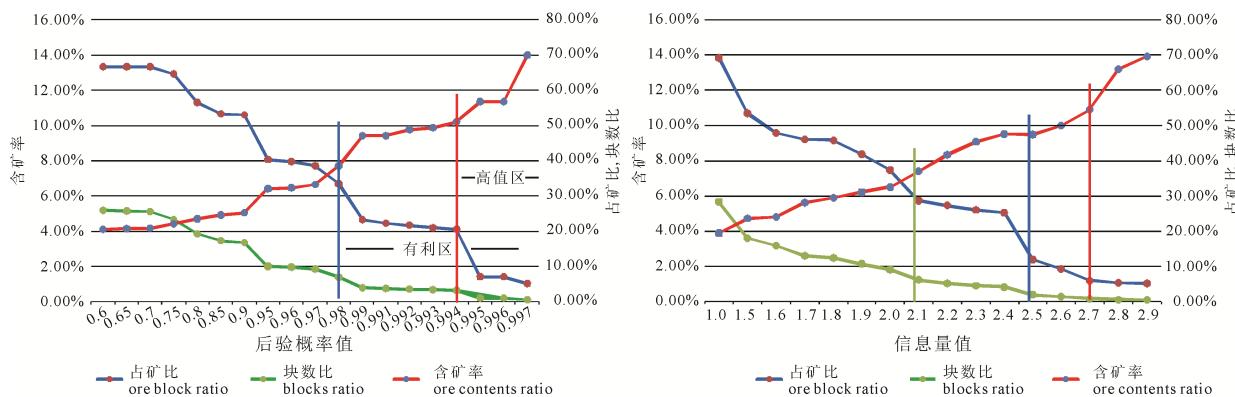


图6 计算结果统计图  
Fig. 6 Statistical graph of calculation results

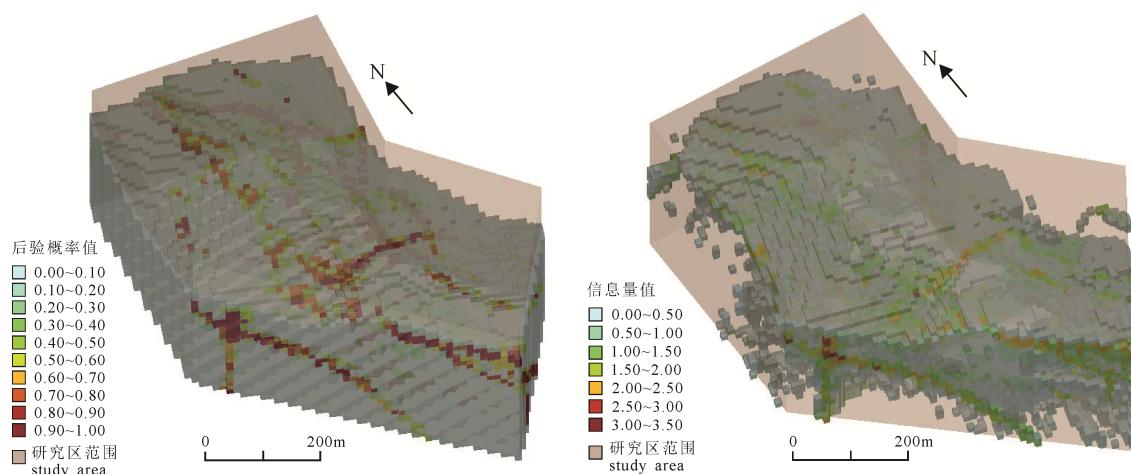


图7 三维证据权法计算结果(a)与找矿信息量法计算结果(b)  
Fig. 7 Calculation results of 3D WofE (a) and information contents (b)

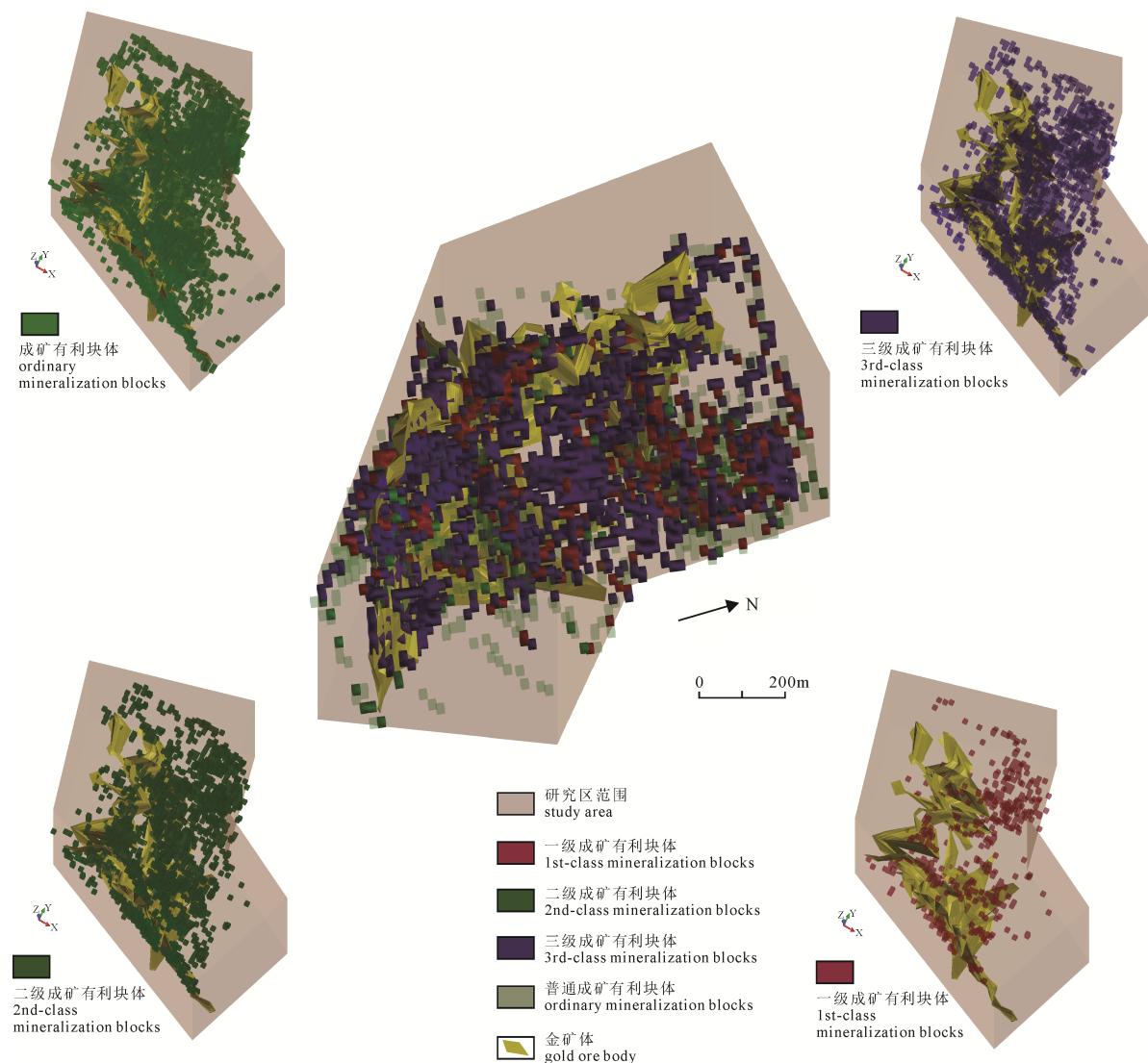


图 8 综合预测结果图  
Fig. 8 Comprehensive prediction results

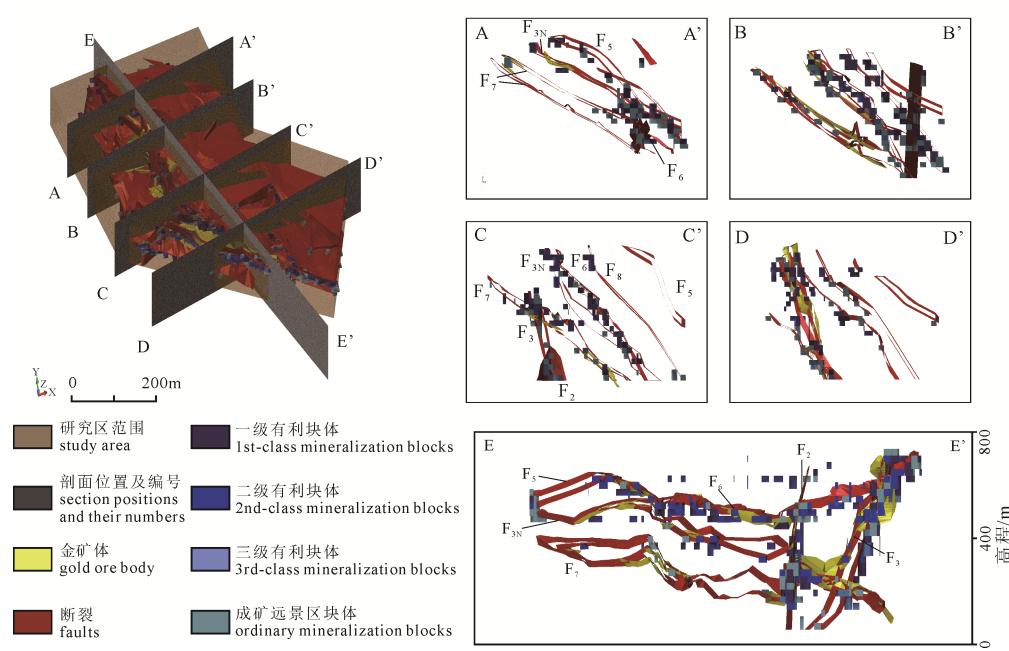


图 9 预测结果综合剖面图  
Fig. 9 Cross-sections of comprehensive prediction results

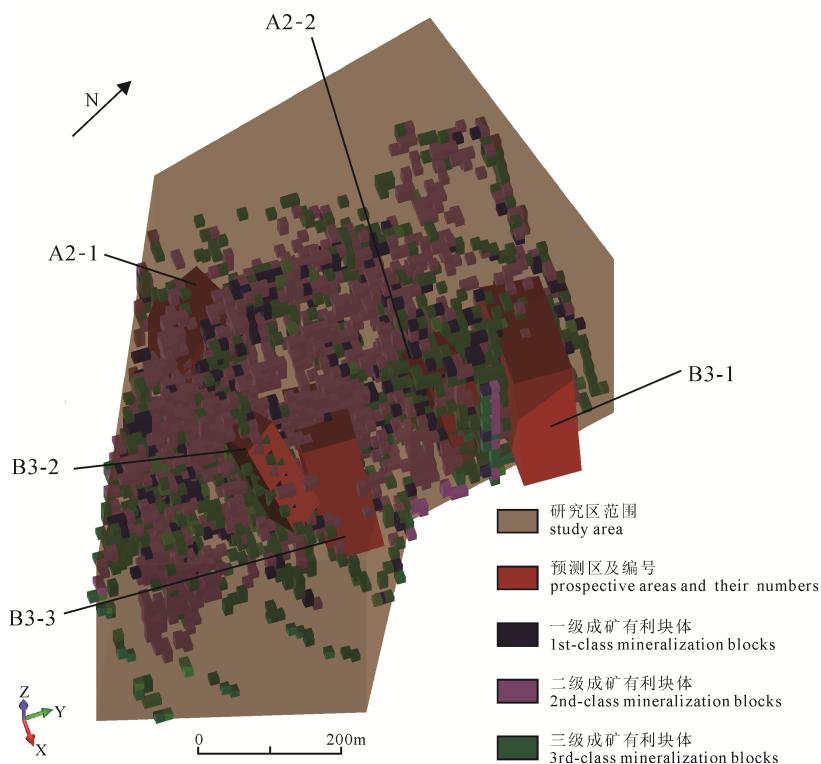


图 10 找矿预测靶区综合圈定图  
Fig. 10 Delineation of metallogenetic prospective areas in the study areas

$F_3$ 、 $F_6$ 、 $F_7$ 是主要的控矿构造，同时控矿断裂的部分深部延展部位、多组断裂交汇区域、以及深大断裂的周边破碎空间内的成矿有利块体明显增多。根据两种预测方法的同时指向位置、实际的地质构造特征以及已知矿体的空间展布方向，圈定找矿靶区如图 10。

根据实际地质产出情况与一级有利块体分布情况，划分 A 级靶区 2 处，B 级靶区 3 处(图 10)。靶区评述如下：A2-1 靶区位于研究区的西南部，20 号矿体的深部位置延展区，在主要控矿断裂  $F_2$  上，边阳组地层与许满组地层交汇处，推测在  $F_2$  与  $F_3$  断裂的交汇处有着十分可观的找矿前景；A2-2 靶区位于研究区的东北部，31 号矿体的深部位置延展区，在主要控矿断裂  $F_{3N}$  的深部区域，接近边阳组地层与许满组地层交汇处；B3-1 靶区位于研究区的东北部，矿体的深部位置延展区，推测在断裂  $F_8$  上，同样处在边阳组地层与许满组地层交汇处；B3-2 靶区：位于连续插值预测区的中南部，边阳组地层中，21 号矿体在主要控矿断裂  $F_2$  的东向延展区，推测产出位置为  $F_2$  与  $F_8$  的交汇处；B3-3 预测区：位于连续插值预测区的中南部，主要控矿断裂  $F_6$  上，推测该区域是 R37 矿体的深部延展部位。

## 4 结论

本次研究基于地质异常理论与实际资料基础，建立了烂泥沟研究区的找矿地质模型与三维地质模

型，应用“立方体预测模型”方法定量提取了控矿要素并实现异常信息的三维空间重构，进而在三维证据权法与找矿信息量法的双重约束下实现了找矿靶区圈定，取得主要成果如下：

(1) 在已有研究基础上，系统梳理了研究区的成矿地质背景与成因类型，依据地质异常理论分析提取了主要的控矿要素，建立了找矿地质模型；

(2) 应用数学地质算法对主要控矿要素特征进行定量提取并实现三维空间重构；

(3) 应用三维证据权法与找矿信息量法对研究区同时进行了成矿预测，并给出两种预测结果的综合分析原则，有效减少了预测结果的不确定性；

(4) 结合实际地质构造条件与矿体产出特征确立 5 处找矿靶区，给出了下一步工作的研究方向。

## Acknowledgements:

This study was supported by National Key Research & Development Program of China (No. 2017YFC0601502).

## 参考文献:

- 陈大经, 谢世业. 2004. 广西高龙金矿成矿地质特征及成矿模式[J]. 地质找矿论丛, 19(4): 228-232.
- 陈建平, 陈勇, 曾敏, 胡忠德, 赵洁, 胡青, 尚北川, 唐宇, 段毅君. 2008a. 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, 陈勇, 王全明. 2008b. 基于 GIS 的多元信息成矿预测研

- 究—以赤峰地区为例[J]. 地学前缘, 15(4): 18-26.
- 陈建平, 陈勇, 朱鹏飞, 王丽梅, 尚北川, 赵洁. 2011. 数字矿床模型及其应用——以新疆阿勒泰地区可可托海3号伟晶岩脉稀有金属隐伏矿预测为例[J]. 地质通报, 30(5): 630-641.
- 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(5): 56-64.
- 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, 于森, 于萍萍, 尚北川, 郑啸, 王丽梅. 2014a. 重点成矿带大中比例尺三维地质建模方法与实践[J]. 地质学报, 88(6): 1187-1195.
- 陈建平, 于萍萍, 史蕊, 于森, 张顺昌. 2014b. 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.
- 陈江. 2017. 贵州烂泥沟卡林型金矿床成矿流体研究[J]. 世界有色金属, (12): 167-168.
- 陈进, 毛先成, 邓浩. 2020. 大尹格庄金矿床深部三维定量成矿预测[J]. 地球学报, 41(2): 179-191.
- 陈懋弘, 毛景文, UTTLEY P J, NORMAN T, 吴六灵, 郑建民, 秦运忠. 2007. 贵州锦丰(烂泥沟)超大型金矿床构造解析及构造成矿作用[J]. 矿床地质, 26(4): 380-396.
- 陈懋弘, 毛景文, 吴六灵, UTTLEY P J, 郑建民, 秦运忠. 2006. 贵州锦丰(烂泥沟)金矿成矿年代学研究新进展—兼论滇黔桂“金三角”卡林型金矿成矿时代和动力学背景[J]. 矿床地质, 25(S1): 7-10.
- 从源, 肖克炎, 刘增铁, 董庆吉. 2016. 南盘江-右江Sn-Sb-Mn-Zn-Al-Au多金属成矿区主要地质特征及资源潜力[J]. 地质学报, 90(7): 1573-1588.
- 刁理品, 栗欢欢, 孙俊. 2017. 黔西南赖子山背斜西翼金矿综合信息找矿预测[J]. 金属矿山, (4): 96-104.
- 郭红乐, 陆志平, 刘爽, 张复新, 于嵒. 2003. 甘肃寨上卡林型金矿床地质特征与控矿因素[J]. 黄金地质, 9(3): 21-26.
- 韩雪. 2012. 贵州烂泥沟卡林型金矿床地质地球化学特征及成因探讨[D]. 成都: 成都理工大学.
- 何伟民, 李文军, 宁倩雯, 李大卓, 王弘凯. 2017. 甘肃碌曲县拉尔玛金矿床地质特征及控矿因素分析[J]. 矿产与地质, 31(1): 99-105.
- 胡桥, 陈建平, 田业. 2018. 三维成矿预测与预测评价——以东昆仑成矿带红旗沟—深水潭金矿为例[J]. 现代地质, 32(2): 335-343.
- 李宏伟. 2018. 西秦岭阳山金矿带控矿因素、找矿标志及深部成矿预测[J]. 矿床地质, 37(1): 67-80.
- 李伟, 陈建平, 贾玉乐, 周冠云, 毛先成, 肖克炎. 2020. 甘肃早子沟金矿三维建模与综合成矿预测[J]. 地球学报, 41(2): 144-156.
- 李卫东, 余志伟, 单新建, 段洪芳. 2009. 基于GIS和证据权模型的矿产勘探信息系统[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 28(3): 382-385.
- 刘家军, 毛光剑, 吴胜华, 王建平, 马星华, 李立兴, 刘光智, 廖延福, 郑卫军. 2010. 甘肃寨上金矿床成矿特征与形成机理[J]. 矿床地质, 29(1): 85-100.
- 刘永良. 2018. 贵州省烂泥沟金矿外围成矿远景浅析[J]. 企业技术开发, 37(10): 106-114.
- 罗孝桓. 1993. 烂泥沟金矿区F3控矿断裂特征及构造成矿作用机理探讨[J]. 贵州地质, (01): 26-34.
- 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).
- 马星华, 刘家军, 李立兴, 毛光剑, 郭玉乾. 2008. 甘肃寨上金矿床成矿流体性质与成矿作用探讨[J]. 岩石学报, 24(9): 2069-2078.
- 毛铁, 叶春, 杜定全. 2014. 贵州烂泥沟金矿控矿断层构造地球化学研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 33(1): 98-107.
- 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.
- 毛先成, 邹艳红, 陈进, 赖健清, 彭省临, 邵拥军. 2010. 危机矿山深部、边部隐伏矿体的三维可视化预测——以安徽铜陵凤凰山矿田为例[J]. 地质通报, 29(2): 401-413.
- 聂爱国. 2007. 黔西南卡林型金矿的成矿机制及成矿预测[D]. 昆明: 昆明理工大学.
- 史蕊, 陈建平, 刘汉栋, 王巧云. 2014. 山东焦家金成矿带三维预测模型及靶区优选[J]. 现代地质, (4): 743-750.
- 苏杭, 王甘露. 2013. 黔西南烂泥沟金矿构造控矿与成矿模拟实验[J]. 世界地质, 32(2): 403-411.
- 王旭阳, 王方里, 王宏阳. 2014. 锦丰(烂泥沟)金矿地质特征及找矿方向浅析[J]. 云南地质, 33(1): 130-132.
- 吴松洋, 侯林, 丁俊, 吴伟, 秦凯, 张锦让, 朱斯豹. 2016. 黔西南卡林型金矿矿田控矿构造类型及成矿流体特征[J]. 岩石学报, 32(8): 2407-2424.
- 肖克炎, 李楠, 孙莉, 邹伟, 李莹. 2012. 基于三维信息技术大比例尺三维立体矿产预测方法及途径[J]. 地质学刊, 36(3): 229-236.
- 谢卓熙. 2000. 广西田林高龙金矿地质特征及成因[J]. 黄金科学技术, 8(5): 28-36.
- 燕守勋, 孟宪刚. 1996. 桂西北高龙金矿床的控矿构造[J]. 地质力学学报, 2(4): 31-37.
- 杨伟, 陈建平, 顾雪祥, 向杰, 章永梅. 2016. 基于物探数据的内蒙古哈达门沟金矿三维地质体建模[J]. 地质学刊, 40(3): 501-506.
- 姚仲友. 1994. 甘肃碌曲拉尔玛金矿地质特征及成因研究[J]. 矿床地质, 13(1): 19-27.
- 游远航, 杨建中, 胡明, 杨斌. 2006. 找矿信息量法在成矿预测中的应用——以武当西缘铅锌铜矿预测为例[J]. 地质找矿论丛, (1): 58-62.
- 于森, 陈建平, 龚建华. 2013. 含矿热液运移过程的数值模拟研究——以个旧锡矿为例[C]//第十二届全国数学地质与地学信息学术研讨会: 189-198.
- 喻万强, 刘纲, 王晓军, 陈祥, 王治华. 2010. 甘肃寨上金矿床的控矿因素[J]. 黄金科学技术, 18(3): 46-50.
- 张洪信, 秦兴刚, 陈德荣, 罗建均, 吴鹏, 安泉, 陈学治. 2016. 贵州赖子山背斜南西段金矿找矿靶区的确定[J]. 西部探矿工程, 28(06): 82-86.
- 张权平, 陈建平, 胡彬, 朱月琴. 2018. 基于模糊证据权与信息量的隐伏矿体三维预测: 以山西罗框研究区为例[J]. 中国矿业, 27(7): 171-177.
- 张生元, 成秋明, 张素萍, 夏庆霖. 2009. 加权证据权模型和逐步证据权模型及其在个旧锡铜矿产资源预测中的应用[J]. 中国地质大学学报, 34(2): 281-286.
- 赵鹏大, 陈建平, 陈建国. 2001. 成矿多样性与矿床谱系[J]. 中国地质大学学报, 26(2): 111-117.
- 赵鹏大, 池顺都. 1991. 初论地质异常[J]. 地球科学, (3): 241-248.
- 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, (4): 107-121.
- 赵鹏大, 孟宪国. 1993. 地质异常与矿产预测[J]. 地球科学, (1): 39-47, 127.

## References:

- CAINE J S, EVANS J P., FORSTER C B. 1996. Fault zone architecture and permeability structure[J]. Geological Society of America, 24: 1025-1028.
- CAUMON G, ORTIZ J M, RABEAU O. 2006. A comparative study of three data-driven Mineral Potential Mapping techniques[C]//International Association for Mathematical Geology.
- CHEN Da-jing, XIE Shi-ye. 2004. Geological characteristics and ore forming model of GaoLong Au deposit, Guangxi[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 19(4): 228-232(in Chinese).

- CHEN Jiang. 2017. The research on the metallogenic fluid of the karlin gold deposit in guizhou is in the area of mud[J]. World Nonferrous Metals, (12): 167-168(in Chinese).
- CHEN Jian-ping YU Ping-ping, SHI Rui, YU Miao, ZHANG Shun-chang. 2014b. 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 Jian-ping, CHEN Yong, WANG Quan-ming. 2008b. Study on synthetic informational mineral resource prediction using GIS-A case study in Chifeng region, Inner Mongolia, China[J]. Earth Science Frontiers, 15(4): 552-559(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. 2008a. 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, CHEN Yong, ZHU Peng-fei, WANG Li-mei, SHANG Bei-chuan, ZHAO Jie. 2011. Digital ore deposit model and its application: A case study of the prognosis of the Koktokay No. 3 pegmatite dike concealed rare metal deposit in Altay area of Xinjiang[J]. Geological Bulletin of China, 30(5): 630-641(in Chinese with English abstract).
- CHEN Jian-ping, LU Peng, WU Wen, ZHAO Jie, HU Qing. 2007. A 3D method for predicting blind orebodies, based on a 3D visualization model and its application[J]. Earth Science Frontiers, 14(5): 56-64(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, YU Miao, YU Ping-ping, SHANG Bei-chuan, ZHENG Xiao, WANG Li-mei. 2014a. Method and practice of 3D geological modeling at key metallogenic belt with large and medium scale[J]. Acta Geologica Sinica, 88(6): 1187-1195(in Chinese with English abstract).
- CHEN Jin, MAO Xian-cheng, DENG Hao. 2020. 3D Quantitative Mineral prediction in Deep Dayingezhuang Gold Deposit[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(2): 179-191(in Chinese with English abstract).
- CHEN Mao-hong, MAO Jing-wen, UTTLEY P J, NORMAN T, WU Liu-ling, ZHENG Jian-min, QIN Yun-zhong. 2007. Structure analysis and structural metallogenesis of Jinfeng (Lannigou) gold deposit in Guizhou Province[J]. Mineral Deposits, 26(4): 380-396(in Chinese with English abstract).
- CHEN Mao-hong, MAO Jing-wen, WU Liu-ling, UTTLEY P J, ZHENG Jian-min, QIN Yun-zhong. 2006. New advance in chronological study of the Jinfeng (Lannigou) gold deposit in Guizhou Province, with special reference to the metallogenic epoch and dynamic background of the "Golden Triangle" Carlin-type gold deposits in Yunnan-Guizhou-Guangxi area[J]. Mineral Deposits, 25(S1): 7-10(in Chinese with English abstract).
- CLINE J S, HOFSTR A A. 2000. Ore-fluid evolution at the Getchell Carlin-type gold deposit, Nevada, USA (English Title: Ore-fluid evolution at the Getchell Carlin-type gold deposit, Nevada, USA)[J]. European Journal of Mineralogy, 12: 195-212.
- CONG Yuan, XIAO Ke-yan, LIU Zeng-tie, DONG Qing-ji. 2016. Geological Characteristics and Resource Potential Analysis of the Nanpaniang-Youjiang Sn-Sb-Mn-Zn-Al-Au Metallogenic Belt[J]. Acta Geologica Sinica, 90(7): 1573-1588(in Chinese with English abstract).
- DENG Jun, WANG Qing-fei, LI Gong-jian. 2017. Tectonic evolution, superimposed orogeny, and composite metallogenic system in China[J]. Gondwana Research, 50: 216-266.
- DENG Jun, WANG Qing-fei. 2016. Gold mineralization in China: Metallogenic provinces, deposit types and tectonic framework[J]. Gondwana Research, 36: 219-274.
- DAO Li-pin, LI Huan-huan, SUN Jun. 2017. Metallogenic Prognosis of Gold Deposit Based on Comprehensive Information in the West Margin of Laizishan Anticline in Southwest Guizhou Province[J]. Metal Mine, (4): 96-104(in Chinese with English abstract).
- GUO Hong-le, LU Zhi-ping, LIU Shuang, ZHANG Fu-xin, YU Lan. 2003. Geological characteristics of the Zhaishang Carlin type gold deposit and its ore control factors, Gansu[J]. Gold Geology, 9(3): 21-26(in Chinese with English abstract).
- HAN Xue. 2012. Geochemical characteristics and genesis of carlin type gold deposit in gemudou, guizhou province[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology(in Chinese with English abstract).
- HE Wei-min, LI Wen-jun, NING Qian-wen, LI Da-zhuo, WANG Hong-kai. 2017. The geological characteristics and ore-controlling factors of Laerma gold deposit in Luqu County, Gansu Province[J]. Mineral Resources and Geology, 31(1): 99-105(in Chinese with English abstract).
- HU Qiao, CHEN Jian-ping, TIAN Ye. 2018. 3D Metallogenic Prediction and Prediction Evaluation: A Case Study in Hongqigou-Shenshuitan Gold Deposit in the Eastern Kunlun Metallogenic Belt[J]. Geoscience, 32(2): 335-343(in Chinese with English abstract).
- JOLY A, PORWAL A, MC-CUAIG C. 2010. 3D geophysical and geological modeling for understanding the gold mineral systems in the Tanami Orogen, Western Australia[C]//EGU Vienna. EGU General Assembly Conference Abstracts.
- KIM Young-Seog, PEACOCK D C P, SANDERSON D J. 2004. Fault damage zones[J]. Journal of Structural Geology, 26(3): 503-517.
- LI Hong-wei. 2018. Ore-controlling factors, prospecting criteria and deep metallogenic prognosis in Yangshan gold ore belt, West Qinling Mountain[J]. Mineral Deposits, 37(1): 67-80(in Chinese with English abstract).
- LI Wei, CHEN Jian-ping, JIA Yu-le, ZHOU Guan-yun, MAO Xian-cheng, XIAO Ke-yan. 2020. Three-dimensional Modeling and Comprehensive Metallogenic Prediction of the Zaozigou Gold Deposit, Gansu Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(2): 144-156(in Chinese with English abstract).
- LI Wei-dong, YU Zhi-wei, SHAN Xin-jian, DUAN Hong-fang. 2009. Exploration information system of mineral resources based on GIS and evidence weight model[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 28(3): 382-385(in Chinese with English abstract).
- LIU Jia-jun, MAO Guang-jian, WU Sheng-hua, WANG Jian-ping, MA Xing-hua, LI Li-xing, LIU Guang-zhi, LIAO Yan-fu, ZHENG Wei-jun. 2010. Metallogenic characteristics and formation mechanism of Zhaishang gold deposit, southern Gansu Province[J]. Mineral Deposits, 29(1): 85-100(in Chinese with English abstract).
- LIU Yong-liang. 2018. Analysis on the Metallogenic Prospect of the Periphery of the LanniGou gold Mine in Guizhou[J]. Technological Development of Enterprise, 37(10): 106-114(in Chinese with English abstract).
- LU 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).
- LUO Xiao-huan. 1993. The features of F3 fault controlling gold deposit and the study of mechanism of tectonic mineralization in Lannigou gold orefield[J]. *Guizhou Geology*, (01): 26-34(in Chinese with English abstract).
- MA Xing-hua, LIU Jia-jun, LI Li-xing, MAO Guang-jian, GUO Yu-qian. 2008. Zhaishang gold deposit in Gansu Province: Characteristics, evolution of ore-forming fluids and their metallogenic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(9): 2069-2078(in Chinese with English abstract).
- MAO Tie, YE Chun, DU Ding-quan. 2014. Tectonogeochimistry Characteristics of the Gold Controlling Fault in the Lannigou Gold Deposit, Guizhou, China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 33(1): 98-107(in Chinese with English abstract).
- 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).
- MAO Xian-cheng, ZOU Yan-hong, CHEN Jin, LAI Jian-qing, PENG Sheng-lin, SHAO Yong-jun. 2010. Three-dimensional visual prediction of concealed ore bodies in the deep and marginal parts of crisis mines: a case study of the Fengnangshan ore field in Tongling, Anhui, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 29(2): 401-413(in Chinese with English abstract).
- NIE Ai-guo. 2007. A mineralization mechanism as well as mineralogenetic prospect of Carlin-type gold deposit in southwestern of Guizhou[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology(in Chinese with English abstract).
- PAYNE C E, CUNNINGHAM F, PETERS K J, NIELSEN S, PUCCIONI E, WILDMAN C, PARTINGTON G A. 2015. From 2D to 3D: Prospectivity modelling in the Taupo Volcanic Zone, New Zealand[J]. *Ore Geology Reviews*, 71: 558-577.
- SHI Rui, CHEN Jian-ping, LIU Han-dong, WANG Qiao-yun. 2014. The 3D Prediction Model and Division of Targets in Jiaojia Gold Ore Belt, Shandong Province[J]. *Geoscience*, (4): 743-750(in Chinese with English abstract).
- SU Hang, WANG Gan-lu. 2013. Tectonic ore-controlling and ore-forming research of Lannigou gold deposit in SW Guizhou: constraint from experiment simulations and scanning electron microscope[J]. *Global Geology*, 32(2): 403-411(in Chinese with English abstract).
- WANG Xu-yang, WANG Fang-li, WANG Hong-yang. 2014. A preliminary analysis of geological feature and prospection of Jinfeng(Lannigou) Au deposit[J]. *Yunnan Geology*, 33(1): 130-132(in Chinese with English abstract).
- WU Song-yang, HOU Lin, DING Jun, WU Wei, QIN Kai, ZHANG Jin-rang, ZHU Si-bao. 2016. Ore-controlling structure types and characteristics of ore-forming fluid of the Carlin-type gold orefield in southwestern Guizhou, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(8): 2407-2424(in Chinese with English abstract).
- XIAO Ke-yan, LI Nan, SUN Li, ZOU Wei, LI Ying. 2012. Large scale 3D mineral prediction methods and channels based on 3D information technology[J]. *Journal of Geology*, 36(3): 229-236(in Chinese with English abstract).
- XIE Zhuo-xi. 2000. Geological feature and metallogeny of the gaolong gold deposit in Tianlin Guangxi Province[J]. *Gold Science and Technology*, 8(5): 28-36(in Chinese with English abstract).
- YAN Shou-xun, MENG Xian-gang. 1996. Ore controlling structures in Gaolong gold ore deposit, north western Guangxi province[J]. *Journal of Geomechanics*, 2(4): 31-37(in Chinese with English abstract).
- YANG Wei, CHEN Jian-ping, GU Xue-xiang, XIANG Jie, ZHANG Yong-mei. 2016. Application of 3D geological modelling based on geophysical data in the Hadamengou gold deposit in Inner Mongolia[J]. *Journal of Geology*, 40(3): 501-506(in Chinese with English abstract).
- YAO Zhong-you. 1994. A Preliminary discussion on geological characteristics and genesis of the Laerma gold deposit in Luqu county, Gansu province[J]. *Mineral Deposits*, 13(1): 19-27(in Chinese with English abstract).
- YOU Yuan-hang, YANG Jian-zhong, HU Ming, YANG Bin. 2006. Application of prospecting-information contents method for mineralogenetic prediction: a case study on prediction of lead-zinc-copper deposit in western Wudang area[J]. *Contribution to Geology and Mineral Resources Research*, (01): 58-62(in Chinese with English abstract).
- YU Miao, CHEN Jian-ping, GONG Jian-hua. 2013. Research on numerical simulation of hydrothermal migration process-taking GaoSong ore field as an example[C]//The 12th National Symposium of Geomathematics and Geoscience Information: 189-198.
- YU Wan-qiang, LIU Gang, WANG Xiao-jun, CEHN Xiang, WANG Zhi-hua. 2010. Discussion on the Ore-controlling Factors of Zhaishang Gold Deposit in Gansu Province[J]. *Gold Science and Technology*, 18(3): 46-50(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Hong-xin, QIN Xing-gang, CHEN De-rong, LUO Jian-jun, WU peng, AN Quan, CHEN Xue-zhi. 2016. Determination of gold prospecting target area in the south and west section of laizishan anticline, guizhou province[J]. *West-China Exploration Engineering*, 28(06): 82-86(in Chinese).
- ZHANG Quan-ping, CHEN Jian-ping, HU Bin, ZHU Yue-qin. 2018. Three-dimensional prediction of concealed ore based on fuzzy weights of evidence and information contents: A case study in Luokuang area in shanxi province[J]. *China Mining Magazine*, 27(7): 171-177(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Sheng-yuan, CHENG Qiu-ming, ZHANG Su-ping, XIA Qing-lin. 2009. Weighted Weights of Evidence and Stepwise Weights of Evidence and Their Applications in Sn-Cu Mineral Potential Mapping in Gejiu, Yunnan Province, China[J]. *Journal of China University of Geosciences*, 34(2): 281-286(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Peng-da, CHEN Jian-ping, CHEN Jian-guo. 2001. On diversity of mineralization and the spectrum of ore deposits[J]. *Journal of China University of Geosciences*, 26(2): 111-117(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Peng-da, CHI Shun-du. 1991. A preliminary view on geological anomaly[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, (3): 241-248(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 China University of Geosciences*, (4): 107-121(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Peng-da, MENG Xian-guo. 1993. Geological anomaly and mineral prediction[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, (1): 39-47, 127(in Chinese with English abstract).