

基于成矿系统的三维定量预测研究

——以四川拉拉铜矿为例

向 杰¹⁾, 肖克炎^{1)*}, 陈建平^{2, 3)}, 李 诗^{2, 3)}

1) 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;

2) 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

3) 北京市国土资源信息研究开发重点实验室, 北京 100083

摘 要: 随着矿产资源预测的发展, 三维矿产资源定量预测评价已经成为矿产勘查领域的热点。然而真正决定矿产预测及矿产勘查成败的核心在于: 如何构建恰当的预测变量来反映成矿作用过程。本文以四川拉拉铜矿为例, 通过成矿系统分析“源-运-储-保”四大要素总结了该区矿产预测的地质找矿要素。基于三维地质建模技术以及成矿信息定量提取技术, 构建了区域找矿要素三维地质信息。以找矿信息量为数学模型, 确定了拉拉铜矿成矿有利区划, 圈定了 4 个找矿靶区。本次研究将矿床成矿系统分析(知识驱动)与三维定量分析(数据驱动)相结合, 将成矿作用过程及关键因素(源、运、储、保等)转化为可预测的具体空间要素, 并使用三维可视化技术进行三维空间重构, 该方法为今后的三维定量预测工作提供了有利参考。

关键词: 定量预测; 成矿系统; 预测模型; 拉拉铜矿

中图分类号: P62 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2020.011301

3D Metallogenic Prediction Based on Metallogenic System Analysis: A Case Study in the Lala Copper Mine of Sichuan Province

XIANG Jie¹⁾, XIAO Ke-yan^{1)*}, CHEN Jian-ping^{2, 3)}, LI Shi^{2, 3)}

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

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

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

Abstract: With the development of mineral resources prediction, 3D quantitative prediction and evaluation of mineral resources has become a hot spot in the field of mineral exploration. However, the core for determining the success or failure of mineral prediction and exploration lies in how to construct appropriate prediction variables to reflect the mineralization process. Taking the Lala copper mine as an example, this paper summarizes the geological prospecting elements of mineral prediction in this area by analyzing the four elements of “source, transport, storage, protection” through the metallogenic system. Based on the 3D geological modeling technology and the quantitative extraction technology of metallogenic information, the 3D geological information of regional prospecting elements is constructed. Based on the information of prospecting information, the favorable zoning of the Lala copper deposit is determined and four prospecting target areas are delineated. This study combines metallogenic system analysis (knowledge-driven) with three-dimensional quantitative analysis (data-driven), converts the mineralization process and key factors (source, transport, storage, protection, etc.) into specific and predictable space elements, and the 3D visualization technology is used to reconstruct the 3D space. This method provides a good reference for the future 3D quantitative prediction.

Key words: quantitative prediction; metallogenic system; prediction model; Lala copper mine

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“深部矿产三维可视化预测评价软件系统研发”(编号: 2017YFC0601501)、“深部成矿地质异常定量预测方法与模型”(编号: 2017YFC0601502)和中国地质科学院矿产资源研究所核心业务(编号: DD20190193(N1914-03))联合资助。

收稿日期: 2019-11-20; 改回日期: 2019-12-23; 网络首发日期: 2020-01-14。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 向杰, 男, 1990 年生。博士后。主要从事矿产资源定量预测与评价。E-mail: xiangjie@cugb.edu.cn。

*通讯作者: 肖克炎, 男, 1963 年生。博士, 二级研究员。主要从事矿产资源定量预测与评价。E-mail: kyanxiao@sohu.com。

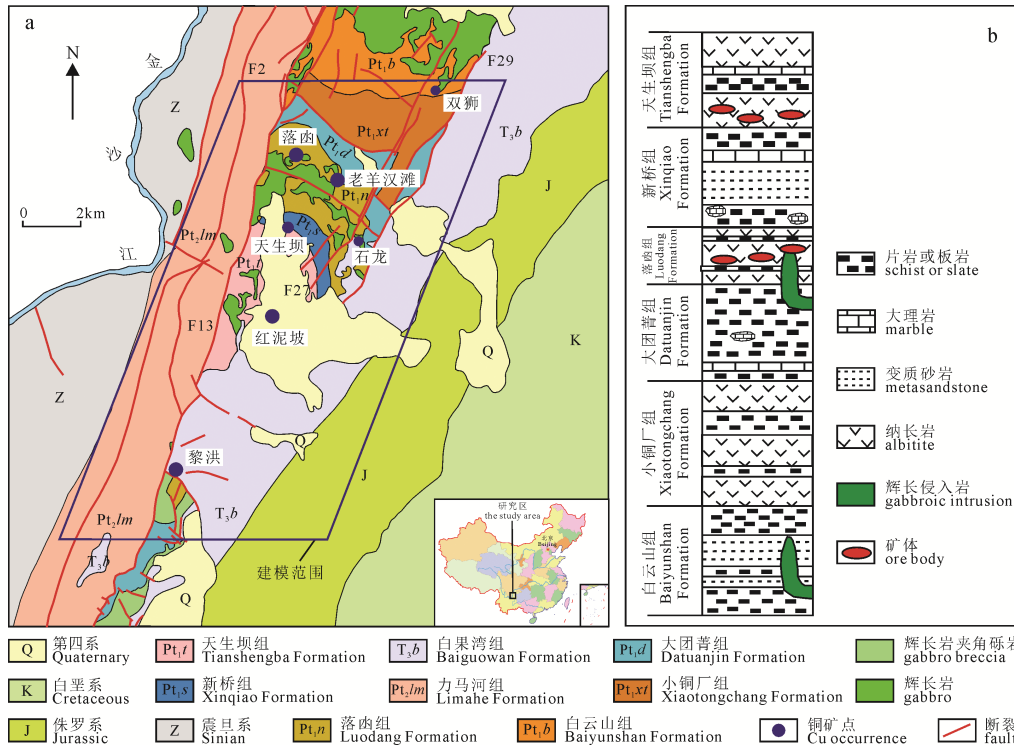
矿产资源预测评价是对一个国家、一个成矿区带或某个地区近地表和地下未发现矿产资源的矿种、类型、空间位置、数量和经济价值的估算与评价(肖克炎等, 2015)。矿产资源评价所涉及的三大基本步骤可以概况为: 确定预测矿产概念模型、分析提取预测变量图层、构建数学模型计算成矿概率。经过几十年的发展, 资源评价的数学模型大量地被提出, 如 20 世纪 90 年代, Agterberg(1989)提出的证据权模型及其后的各种改进证据权模型, 极大地促进了矿产资源定量评价发展。近年来, 机器学习与深度学习的相关数学模型也被引入资源评价领域, 使得矿产资源评价朝着智能化方向快速发展(Xiang et al., 2019)。传统的矿产资源定量预测是基于二维图层的叠加分析预测, 随着计算机图形学技术及三维空间数据处理研究不断深入发展, 采用三维立方体模型进行隐伏矿体(即第二找矿空间)的资源预测评价已经成为矿产勘查领域的热点(陈建平等, 2007, 2014; 肖克炎等, 2012; 毛先成等, 2009, 2020)。然而, 真正决定矿产预测及矿产勘查成败的核心在于: 如何构建恰当的预测变量来反映成矿作用过程(向杰等, 2016)。近年来西方国家对成矿系统的热衷研究, 一个基本出发点是认为矿床近限于地壳一个非常小的区域(通常 1~2 km), 这在区域地质填图与矿产预测很难直接发现。成矿系统从成矿物质来源、流体运移、成矿通道、矿床就位等全空间进行研究,

其范围可达上万平方千米, 成矿系统研究对奥林匹克坝金铜等隐伏矿床预测十分有效(Hagemann et al., 2016b)。这些工作重点有对成矿系统控制地质因素研究、成矿系统地质要素的预测转化模型及矿产定量预测方法模型等。

本次研究以四川拉拉铜矿为例, 通过成矿系统分析来确定矿产预测概念模型, 以三维地质建模与分析提取技术来构建预测变量三维图层, 采用找矿信息量算法来计算成矿概率, 进而圈定拉拉铜矿靶区, 该研究为将为隐伏矿三维定量预测提供新的借鉴。

1 地质矿产概况

研究区位于扬子准地台康滇地轴中段, 经历了漫长的地史演化: 早元古代为弧后盆地环境, 早中元古代为拗拉槽环境, 中元古代至晚元古代经历了由陆间裂谷至后造山裂谷, 古生代至中生代经历了块断升降、地裂运动、前陆盆地、山间断陷等。区域出露地层主要有前震旦系昆阳群、河口群以及三叠系, 第四系地层, 其中以下元古界河口群为主。研究区内岩浆活动非常强烈, 表现出的特点为多期次、多旋回。其中, 岩浆活动表现最为强烈的是河口早期和中期, 河口早期为强烈的火山喷发, 而河口中期则为基性岩侵入(孙燕和李承德, 1990)。虽有基性岩和酸性花岗岩的侵入, 但海西期和印支期岩浆活动强度及规模较小(图 1)。



a—矿田地质图; b—河口群地层柱状图。
a—geological map of the orefield; b—stratigraphy of the Hekou Group.

图 1 拉拉铜矿田地质矿产简图

Fig. 1 Simplified geological map of the Lala orefield

拉拉矿田地处著名的川滇有色金属成矿带北段,以“拉拉式”铜多金属矿产资源为主。拉拉铜矿田主要由 5 个矿区组成:落鹵铜矿区,老羊汉滩铜矿区,石龙铜矿区,双狮铜矿、红泥坡铜矿、天生坝铁矿区以及黎洪铁矿区,其中落鹵和红泥坡属于大型铜矿床。由于缺少年代学数据,加上康滇地区构造复杂,古一中元古代地层层序一直存在很大的争议,导致矿床成因仍然众说纷纭。本次深地项目组,确定了落鹵铜矿、红泥坡铜矿的矿床成因为 VMS 型铜矿,但存在两期矿化:第一期形成层状-似层状块状硫化物型矿体,第二期热液叠加形成脉状矿体,品位加富,但总体以第一期矿化为主。并不存在变质热液叠加改造事件,后期脉状矿体全部切穿片理,变质事件仅使矿石变形,叠加改造期的热液应为岩浆热液。

2 成矿系统分析

成矿系统是在系统科学的基础上衍生出来的概念(李人澍, 1996; 翟裕生, 1999)。成矿系统是地质系统过程的产物,是人们根据经济需求和生产技术水平划出的特定部分。对于运用成矿系统开展矿产预测是 Wyborn et al.(1994)提出成矿系统的初衷,

一方面他们重点研究 GIS 平台下的矿产预测专家系统;另一方面重点研究如何将成矿过程要素转化为可预测的要素(Wyborn, 1994; Porwal, 2015)。按照 Wyborn 对成矿系统的定义,成矿系统包括所有控制矿床生成及保存的要素及涉及矿床形成过程的源-运-储-保等过程成因。成矿系统是地质历史过程中的特殊事件,矿床是成矿系统最终产物和保存对象痕迹,如何将成矿作用过程及关键因素(源、运、储等)转化为可预测的具体空间要素是成矿预测和靶区圈定的关键(Hagemann et al., 2016a)。

如图 2 为四川拉拉铜矿成矿模式图,与国外的 VMS 型矿床相比(Antoni et al., 2017),其成矿作用相对复杂,成矿过程大致分为火山喷发沉积作用和热液叠加改造作用两个成矿阶段。在火山喷发沉积阶段,多次连续的火山喷发过程中,有用组分则伴随着熔岩流和火山碎屑直接喷溢到海底,主要分布在火山碎屑岩及其向沉积岩过渡的地段,经沉积成岩作用而形成含矿的火山沉积建造及其原始的矿化层。在热液叠加改造阶段,新元古代 Rodinia 超大陆的聚合导致区域普遍的变质,形成了绿片岩相至绿帘-角闪岩相的矿物组合,加上裂解事件导致地幔

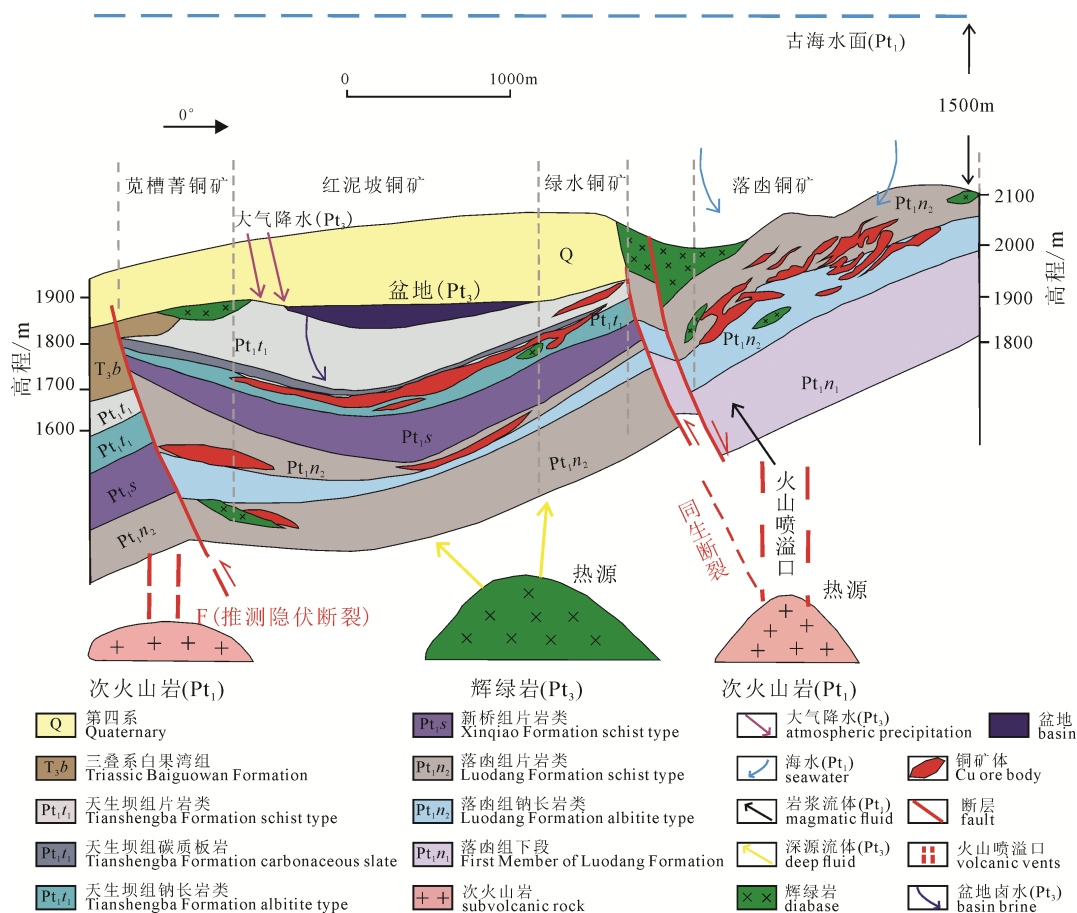


图 2 四川拉拉铜矿成矿模式(据中国地质调查局发展研究中心, 2019 修改)
Fig. 2 Metallogenic model of the Lala copper deposit in Sichuan
(modified after Development Research Center of China Geological Survey, 2019)

柱上涌,辉绿岩大量侵入,岩浆流体或地幔流体沿着断裂迁移,使成矿物质进一步富集,形成了红泥坡典型的脉状矿石。本次研究基于此成矿模式,开展成矿系统分析,进而确定研究区定量预测模型,为三维定量预测分析提供指导。

(1)源

拉拉铜矿绝大部分金属硫化物 S 同位素的组成特征与幔源硫类似,暗示了成矿流体中 S 主要来自于地幔。金属硫化物富集重硫的特征一般指示了硫最终来源于海水硫酸盐,并经历了热化学还原过程。拉拉矿床部分富集重硫样品的存在,则暗示了可能有少量的海水硫酸盐为成矿提供了硫源。拉拉铜矿金属硫化物 S 同位素特征显示成矿元素硫主要来自于幔源硫,成矿过程中可能有少量的海水硫酸盐的加入。大规模的中基性-中酸性火山喷发活动,表现为远源火山凝灰、碎屑与正常成分的砂泥质、炭质和钙质的混生沉积,为本区铜、铁矿床的形成提供了丰富的物质来源(周家云等, 2008)。因此,可以将区域内同期的基性岩和次火山岩作为重要的预测要素。此外,研究表明拉拉铜矿是在早期的火山喷发沉积阶段矿源层基础上,经过后期热液叠加改造而富集,赋矿地层是重要的成矿物质来源,对于成矿预测具有指示定位作用。

(2)运

新元古代 Rodinia 超大陆的聚合导致构造变形所产生的空间,为后期含矿热液叠加提供了通道和赋存场所。超大陆在聚合后发生裂解事件,地幔柱上涌,辉绿岩大量侵入,岩浆流体或地幔流体沿着断裂迁移,使成矿物质进一步富集。拉拉铜矿可能存在两期成矿事件,早期的成矿事件为 VMS 成因,矿体均产在基性火山岩与沉积岩的界面处。可通过对基性火山岩做缓冲区分析,确定最佳的缓冲距离,进而与沉积岩做相交分析来表达该成矿结构面。晚期成矿为叠加期,断裂构造是最重要的成矿物质运移的通道。如 F1,拉拉矿区 F1 断层是矿区内最为重要的东西向断层。它东西两端分别被 F27 断层和 F13 断层所切,并与宝台厂—九龙断裂相连,应是宝台厂—九龙断裂西延部分,它控制了含矿岩体的分布和矿体的延展与富集,拉拉所发现的矿床均分布在 F1 断裂两侧,且 F1 断裂带内是含矿的,且具有多期活动性质,现在显示的断层特征为向北倾的带平移性质的正断层,是成矿前构造或成矿期构造(张武鹏等, 2016)。通过对构造进行定量分析,可以较好地表征出成矿作用的运移特征。

(3)储

成矿物质的就位与圈闭对整个成矿作用至关重要。通过对拉拉成矿模式的分析,确定了褶皱构

造为有利的成矿空间。拉拉地区东西向构造受早元古代南北向裂谷作用影响,东西向为主张应力,南北向为主压应力,形成了一系列轴向东西向的褶皱,如河口背斜、红泥坡向斜等,其控制了基底地层和矿体的整体展布方向。南北向构造受到晚元古代扬子板块和华夏板块拼贴作用的影响,其南北向为主张应力,东西向为主压应力,形成了拉拉矿区南北向褶皱构造叠加于早期东西向褶皱构造之上,对矿体具有明显的富集改造作用。本次研究通过对褶皱进行形态分析,确定有利的成矿部位,进而定量表征出有利的圈闭部位。

(4)保

成矿系统是指在一定地质时空域中,控制矿床形成和保存的全部地质要素和成矿作用过程,以及形成的矿床和异常系列所构成的整体,是具有成矿功能的一个自然系统,包括成矿背景条件、成矿流体能量、成矿作用过程、成矿产物及保存等成矿要素(Wyborn et al., 1994; 翟裕生, 1999)。因此,保存条件对于基于成矿系统的矿产资源评价也不可获取,其分析主要体现在两个方面:上覆地层的保护作用 and 后期构造的破坏作用。在成矿预测当中,尤其是三维定量预测中,往往不考虑上覆地层的保护作用,而重点通过断裂构造定量分析来确定断裂对矿体的后期破坏作用,定量表征出断裂特定部位对成矿的不利因素。

3 三维地质建模

三维地质建模是当前地学领域的前沿课题,其以地质调查、勘探工程和地球物理等数据为基础,构建区域内地质单元(对象)的三维模型,直观地刻画出地质单元的空间展布以及地质单元之间的演化关系。通过三维可视化技术构建三维地质模型是三维定量预测的基础,其实质就是一个多元综合信息融合的过程。本次三维地质建模采用 GEMCOM 国际矿业软件公司三维建模软件 Surpac 6.3, 基于平面地质图、钻孔数据、勘探线剖面、地球物理综合解译图等开展三维建模工作(表 1)。采用剖面建模法,构建了研究区的地层、岩体、断裂、矿体三维实体模型(图 3)。

4 三维定量预测

在三维地质实体模型的基础上,采用“立方块模型”预测法将三维地质实体模型分割成大小相同三维立方块,将单元所属的类型或预测参数作为属性赋给每一个立方块实现多元信息的集成,通过立方体单元进行各种地学统计分析,从而实现三维成矿有利条件的提取和三维矿产定量预测

表 1 三维地质建模数据基础
Table 1 The database of the 3D Geological modelling

资料名称	比例尺	数量	探测深度/m
地形地质图	1:2000, 1:5000	3	地表
基岩地质图	1:5000	1	地表
矿层柱状对比图	1:5000	2	1000
钻孔柱状图	1:200	204	70~1030
地质勘探剖面	1:1000	36	300~500
地质勘探剖面	1:2000	21	1000~1200
CSAMT 综合解译剖面图	1:1 万	12	2000
CSAMT 综合解译中段图	1:1 万	3	500, 1000, 1500

评价(邓浩等, 2020; 陈进等, 2020)。本次研究建模坐标范围南北 2 891 616—2 908 616 m, 东西 787 618—802 718 m, 高程—1000~2500 m。基于钻孔间距, 勘探线间距, 剖分后数据量, 以及计算能力等多方面的考虑, 在保证块体单元的尺寸能够满足三维成矿预测计算精度的前提下尽可能的提高计算机的运行速度, 因此按照 50 m×50 m×50 m 的块体单元尺寸对整个实体模型区进行块体划分, 整个研究区共划分单元块体总数为 3 825 347 块, 其中已知矿体块数为 5638(图 4i)。

4.1 成矿有利信息提取

基于上文的成矿系统分析, 在三维立方块体模型基础上, 开展成矿有利信息提取, 基本思路为: 构建能够表征成矿作用过程及关键因素的 GIS 图层, 并通过与已知矿体进行叠合分析, 提取成矿有利信息。

(1)成矿有利“源”信息

拉拉铜矿属于 VMS 型铜矿, 且为“别子式”, 无论从成矿物质的来源还是从成矿能量的提供, 岩体都具有非常重要的作用。该区主要与成矿有关的岩体为辉绿岩, 可作为重要的预测要素(图 4a)。早期火山喷发沉积阶段形成的火山沉积建造或矿源层也是该地区找矿预测的重要标志, 统计分析可知 27.4%、56.5%的已知矿体分别赋存在天生坝组和落函组地层当中, 证实了该地区的赋矿地层为天生坝组和落函组, 其空间分布如图 4b、c 所示。

(2)成矿有利“运”信息

能够作为成矿物质运移通道的主要包括两个地质要素: 一方面基性岩与沉积岩的交界面, 通过“膨胀缓冲法”来快速构建不同距离的辉绿岩缓冲区, 基于含矿性分析来确定最佳的辉绿岩缓冲距离, 进而表征基性岩与沉积岩的交界面; 另一方面, 导矿构造为重要的物质运移通道, 其主要通过断裂及其最优断裂缓冲区来表征。如图 5 表示辉长岩和断裂不同距离的缓冲区含矿性, 我们可以清晰地看到辉绿岩最优缓冲区为 50 m, 断裂最优缓冲区为 100 m, 其空间分布如图 4d 所示。

(3)成矿有利“储”信息

褶皱构造及其产生的滑脱空间往往是成矿系统的重要圈闭空间。研究区发育有较多东西向褶皱构造, 矿体总体走向呈近东西向, 产状与围岩一致, 并且随围岩一起发生东西向褶皱(张武鹏等, 2016)。通过对地层进行三维形态分析, 发现区内围岩褶皱常发生弯曲或波状起伏, 其中褶皱面常作相似的弯曲, 致使褶皱的转折端产生膨大变厚的虚脱空间, 为矿化富集提供有利部位(如图 4e)。此外, 铜矿体多分布在细碧质或角斑质的火山碎屑岩中, 主要岩性为黑云母片岩型和石英钠长岩型, 往往赋矿地层越厚, 矿体一般也越厚大。三维定量分析证实, 赋矿地层厚度在大于 500 m 的部位成矿可能性较高, 可作为三维预测要素, 其空间分布如图 4f 所示。

(4)成矿有利“保”信息

成矿前和成矿期断裂构造与成矿作用关系密切, 往往是控岩、控矿的重要因素, 而成矿期后断裂活动常常是使先成矿体破坏错失, 并且由于断裂两盘的相对运动, 使矿体上升地表遭受剥蚀或深埋地下成为盲矿体。本次研究通过三维构造分析技术计算了断裂的等密度、频数、交点数、断裂优益度, 异常方位, 方位异常度等多个定量特征, 最终通过相关性分析确定采用等密度和频数来做为断裂对矿体保存的影响特征指标, 并确定了等密度(0.44, 0.76)、频数为(6.24, 9.51)定量特征值, 其空间分布如图 4g、h 所示。

4.2 定量预测模型建立

4.2.1 数学模型

三维矿产资源定量预测中常用的数学算法有: 条件概率法, 特征分析法, 因子分析法, 证据权法, 找矿信息量法等, 近年来还有还将一些机器学习算法引入(如随机森林算法), 最为常用的是证据权法和找矿信息量法(陈建平等, 2014)。证据权法要求证据图层具体条件独立, 常用于已知矿块比较多的研究区。因此, 本次研究采用找矿信息量法来计算各找矿标志的信息量, 最终通过每个块体的信息量来

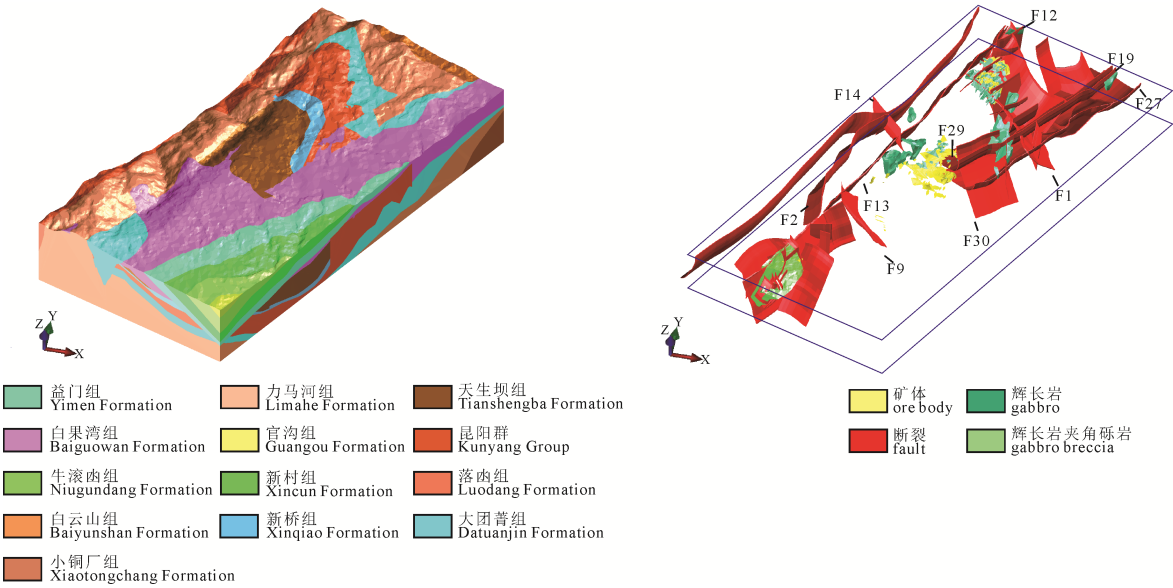
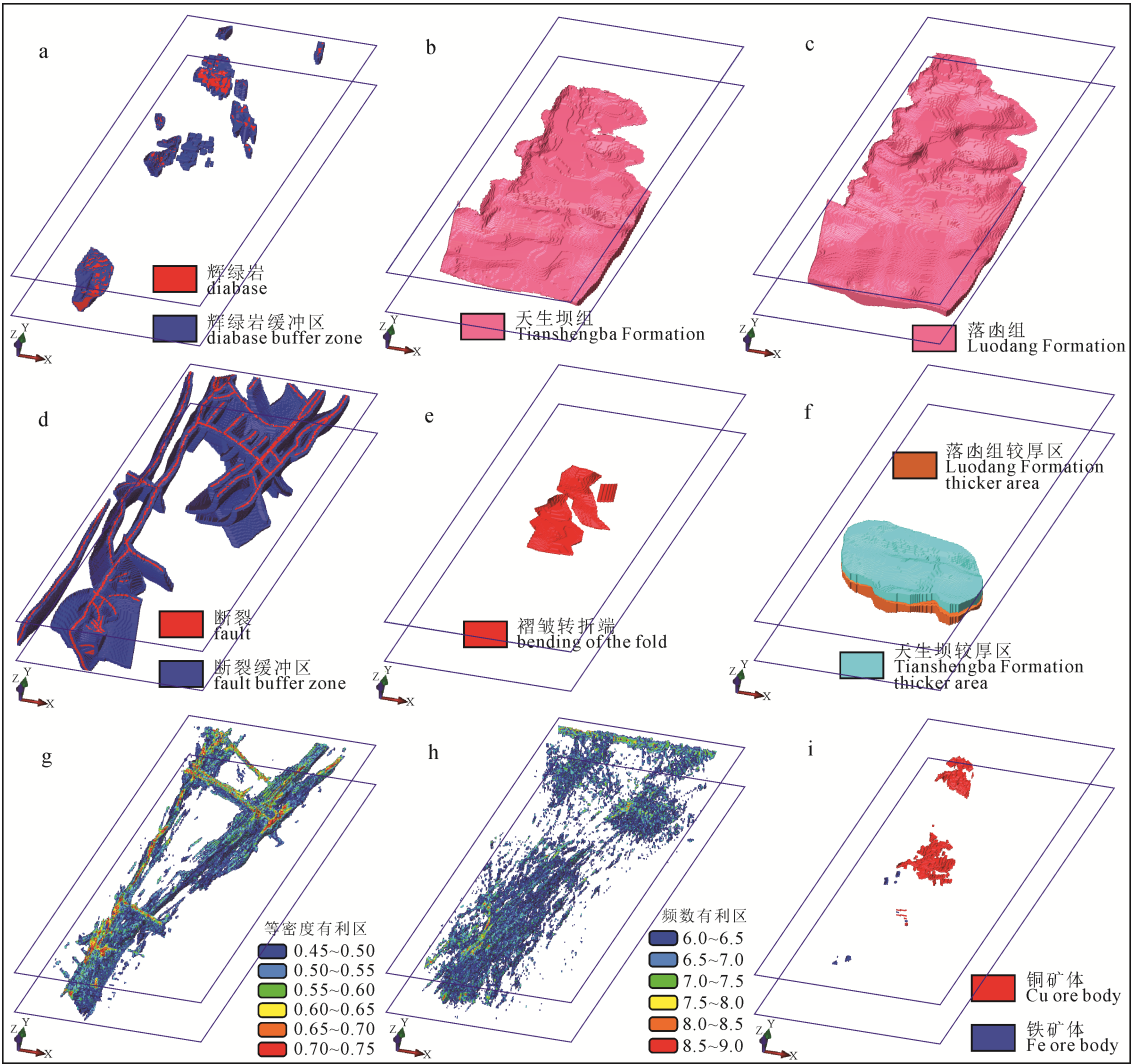


图 3 四川拉拉铜矿三维地质模型
Fig. 3 Three-dimensional geological model of the Lala copper deposit in Sichuan Province



a—辉绿岩及缓冲区; b—天生坝组; c—落凼组; d—断裂及其缓冲区; e—褶皱转折端;
f—赋矿地层大于 500 m; g—等密度; h—频数; i—矿体。
a—diabase; b—Tianshengba Formation; c—Luodang Formation; d—fault and buffer; e—hinge zone of fold;
f—thickness more than 500 m; g—equidensity; h—fracture frequency; i—orebody.

图 4 四川拉拉铜矿三维预测成矿有利信息

Fig. 4 3D favorable prediction information for mineralization of the Lala copper deposit in Sichuan Province

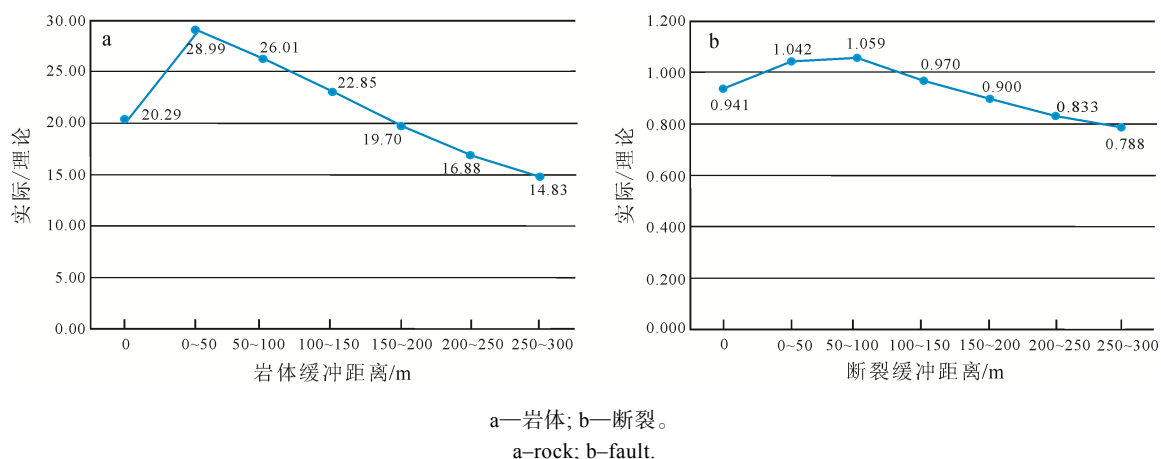


图 5 缓冲区成矿有利信息分析
Fig. 5 Analysis of favorable ore-forming information in buffer zone

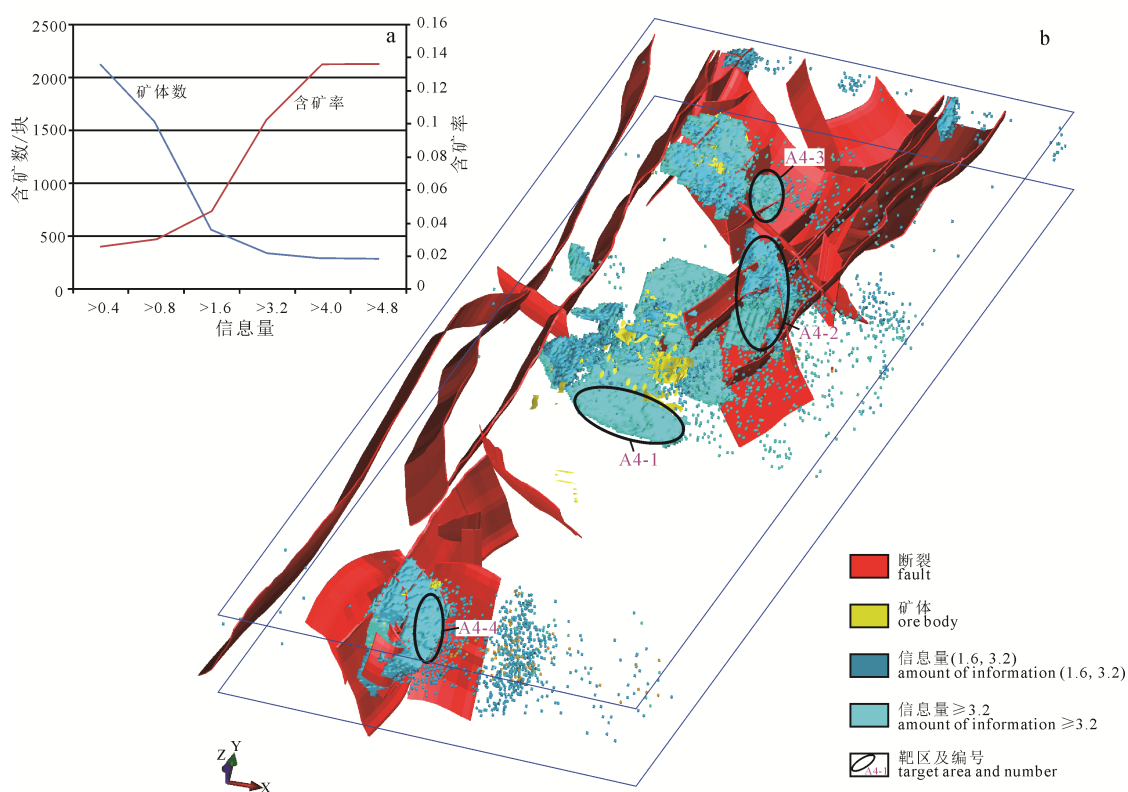


图 6 拉拉铜矿成矿有利区块与靶区划分
Fig. 6 Favorable area for mineralization and division of targets in the Lala mineral deposit

评估成矿有利区和圈定靶区。找矿信息量法为一种非参数性的单变量统计分析方法,其基本思想是通过研究各地质因素在研究区所有单元的分布情况,来查明各种地质要素对指导找矿作用的大小。

某立方块体中各要素信息量总和反映了该单元块的相对找矿概率。某个找矿标志的找矿信息量需要用条件概率计算,如下:

$$I_{A(B)} = \lg \frac{P(A/B)}{P(A)} \quad (1)$$

上式中, $I_{A(B)}$ 为 A 标志中含有 B 矿的信息量; $P(A/B)$ 为已知 B 矿存在的条件下出现 A 标志的概率; $P(A)$ 为在研究区内标志 A 出现的概率。由于概率估

计上的困难,就以频率值来估计概率值。那么:

$$I_{A(B)} = \lg \frac{\left(\frac{N_j}{N} \right)}{\left(\frac{S_j}{S} \right)} \quad (2)$$

式中, N_j 为研究区内含有标志 A 的含矿单元数; N 为研究区内的含矿单元总数; S_j 为研究区内具有标志 A 的单元数; S 为研究区的单元总数。

4.2.2 定量预测模型

本次研究基于成矿系统分析构建了四川拉拉铜矿预测的概念模型及相关的预测地质要素,通过成矿有利信息分析提取确定了 10 个预测变量及其

表 2 四川拉拉铜矿定量预测模型
Table 2 Quantitative prediction model of the Lala copper deposit in Sichuan Province

成矿系统要素	地质要素	预测要素	成矿有利信息	定量特征值	信息量
源	基性岩或次火山岩	辉绿岩	辉绿岩	辉绿岩	1.310 559 00
	矿源层	赋矿地层	天生坝组	天生坝组	0.478 572 75
			落鹵组	落鹵组	0.678 224 76
运	基性岩与沉积岩界面	辉绿岩缓冲区	辉绿岩 50 m 缓冲	辉绿岩 50 m 缓冲	1.462 643 72
	导矿构造	断裂	断裂	断裂	0.051 693 50
		破碎带	断裂 100 m 缓冲	断裂 100 m 缓冲	0.000 293 08
聚	褶皱控矿	褶皱特征	褶皱转折端	褶皱转折端	1.596 828 94
	地层控矿	地层特征	地层厚度	大于 500 m	0.000 794 99
保	断裂破坏	构造特征	等密度	(0.44, 0.76)	0.048 918 29
			频数	(6.24, 9.51)	0.327 008 47

定量特征值, 并通过找矿信息量法计算了控矿要素的信息量值(表 2)。控矿要素的信息量值为正值, 证明了该定量预测模型的有效性, 但控矿要素的找矿贡献各不相同。如表 2 所示, 褶皱转折端、辉绿岩 50 m 缓冲、辉绿岩为排名前三的必要控矿要素, 证明了该研究区褶皱与岩体控矿明显; 等密度、断裂、断裂缓冲区、地层厚度为排名最后四位的次要控矿要素, 表明该区断裂与地层厚度控矿不太明显; 而以天生坝组和落鹵组构成的赋矿地层, 以及频数表征的构造破坏作用在该研究区的找矿预测中为重要控矿要素。

5 预测结果

在立方块单元内所包含的成矿有利信息(控矿要素)的信息量加和, 即为该立方块的信息量。统计整个研究区块体信息量的含矿率: 随着信息量的增大, 大于阈值的块体数和矿体数都减少, 含矿率不断增加, 证明了信息量的控矿有效性。根据其统计规律, 选定信息量为 1.6 为成矿有利区的下限值, 信息量大于 3.2 为信息量高值区(图 6a)。信息量大于 1.6 的立方块即为拉拉铜矿成矿有利区块, 结合区域地质特征及已有找矿事实, 圈定了 4 个找矿靶区。靶区 A4-1 位于红泥坡大型铜矿矿区南部, 该区有辉长岩脉出露, 且深部隐伏天生坝组和落鹵组地层。该预测靶区位于航磁 ΔT 正负异常交界处零值线区域、强磁异常, 通过深部钻孔验证探获铜矿体, 具有较大资源潜力。靶区 A4-2 位于落鹵矿区东南部, 区内重要控矿断裂 F1 以北, 附近有辉长岩脉出露, 区域地球化学特征上处于平地幅综合异常区南部边缘, 暂时还未开展深部钻探工作, 具有良好的找矿前景。靶区 A4-3 位于落鹵矿区东北部, 区内多条断裂交汇提供成矿物质, 区域地球化学异常元素组合齐全, Cu 异常强度较高, 通过地表探槽揭露到铜矿体。靶区 A4-4 位于黎洪矿区东南部, 位于辉长岩及砾岩岩体边部, 暂时

还未在该靶区开展大比例尺找矿工作, 具有一定的成矿潜力(图 6b)。

6 结论

(1)本次研究分析了四川拉拉铜矿的成矿系统, 并根据“源-运-储-保”四大要素总结了该区矿产预测的地质找矿要素。采用三维地质建模技术构建了区域三维地质模型, 并在此基础上提取了区域找矿要素三维地质信息。

(2)以找矿信息量为数学模型, 计算了各控矿要素的信息量, 以及各立方块体信息量。通过含矿性统计分析确定了成矿有利信息阈值, 确定了拉拉铜矿成矿有利区划, 结合区域地质特征及已有找矿事实, 圈定了 4 个找矿靶区, 为下一步找矿研究工作提供参考。

(3)本次研究将矿床成矿系统分析(知识驱动)与三维定量分析(数据驱动)相结合, 将成矿作用过程及关键因素(源、运、储等)转化为可预测的具体空间要素, 并三维可视化技术进行空间重构, 为隐伏矿三维定量预测提供新的思路。

(4)成矿系统类型特征各不相同, 从区域构造应力、矿床物质来源、成矿流体产生、运移通道轨迹、矿床就位沉淀机制等方面, 研发出更多的定量预测指标和分析提取手段, 将为三维定量预测提供新的方向。

Acknowledgements:

This study was supported by National Key Research & Development Program of China (Nos. 2017YFC0601501 and 2017YFC0601502), and Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences (No. DD20190193(N1914-03)).

参考文献:

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): 54-62.
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.

- 陈进, 毛先成, 邓浩. 2020. 山东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.
- 邓浩, 郑扬, 陈进, 魏运凤, 毛先成. 2020. 基于深度学习的大尹格庄金矿床深部三维预测模型[J]. 地球学报, 41(2): 157-165.
- 李人澍. 1996. 成矿系统分析的理论与实践[M]. 北京: 地质出版社.
- 孙燕, 李承德. 1990. 四川拉拉铜矿床成矿机制研究[J]. 成都地质学院学报, 17(4): 1-9.
- 毛先成, 戴塔根, 吴湘滨, 邹艳红. 2009. 危机矿山深边部隐伏矿体立体定量预测研究——以广西大厂锡多金属矿床为例[J]. 中国地质, 36(2): 424-435.
- 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.
- 向杰, 陈建平, 胡桥, 安文通, 尹晓云. 2016. 基于矿床成矿系列的三维成矿预测——以安徽铜陵矿集区为例[J]. 现代地质, 30(1): 230-238.
- 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.
- 肖克炎, 王瑞江, 邢树文, 唐菊兴, 孙莉. 2015. 矿产资源区划常态化工作设想[J]. 地质学刊, 39(3): 347-351.
- 翟裕生. 1999. 论成矿系统[J]. 地学前缘, 6(1): 13-27.
- 张武鹏, 余臻, 李峰, 曾庆天, 张达兵, 张志发, 吕俊男. 2016. 四川会理红泥坡铜矿地质特征及找矿标志[J]. 有色金属工程, 6(2): 80-84.
- 中国地质调查局发展研究中心. 2019. 深部矿产资源三维找矿预测评价示范中期成果报告[R]. 北京: 中国地质调查局发展研究中心.
- 周家云, 陈家彪, 沈冰, 朱志敏, 刘飞燕, 罗丽萍, 李潇雨. 2008. 四川拉拉铜矿构造动力学机制[J]. 大地构造与成矿学, 32(1): 98-104.

References:

- AGTERBERG F P. 1989. Systematic approach to dealing with uncertainty of geoscience information in mineral exploration[C]//Proceedings of the 21st APCOM Symposium, Las Vegas, USA: 165-178(Chapter 18).
- ANTONI C, EDUARDO G P, LISARD T, PURA A, CARLES C, MIGUEL A M G, MICHELANGELO M, FRANCISCO G S. 2017. Mesozoic volcanogenic massive sulfide (VMS) deposits in Mexico[J]. Ore Geology Reviews, 81: 1066-1083.
- CHEN Jian-ping, LÜ 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): 54-62(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 Jin, MAO Xian-cheng, DENG Hao. 2020. 3D Quantitative Mineral Prediction in the Depth of the Dayingezhuang Gold Deposit, Shandong Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(2): 179-191(in Chinese with English abstract).
- DENG Hao, ZHENG Yang, CHEN Jin, WEI Yun-feng, MAO Xian-cheng. 2020. Deep Learning-based 3D Prediction Model for the Dayingezhuang Gold Deposit, Shandong Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(2): 157-165(in Chinese with English abstract).
- Development Research Center of China Geological Survey. 2019. Interim Results Report of Three-dimensional Prospecting Prediction and Evaluation Demonstration of Deep Mineral Resources[R]. Beijing: Development Research Center of China Geological Survey(in Chinese).
- HAGEMANN S G, ANGGERER T, DUURING P, ROSIERE C A, SILVA R C, LOBATO L, HENSLER A S, WALDE D H G. 2016b. BIF-hosted iron mineral system: A review[J]. Ore Geology Reviews 76:317-359.
- HAGEMANN S G, LISITSIN V A, HUSTON D L. 2016a. Mineral system analysis: Quo vadis[J]. Ore Geology Reviews, 76: 504-522.
- LI Ren-shu. 1996. Theory and practice of metallogenic system analysis[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- MAO Xian-cheng, DAI Ta-gen, WU Xiang-bin, ZOU Yan-hong. 2009. The stereoscopic quantitative prediction of concealed ore bodies in the deep and marginal parts of crisis mines: a case study of the Dachang tin polymetallic ore deposit in Guangxi[J]. Geology in China, 36(2): 424-435(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).
- PORWAL A, DAS R D, CHAUDHARY B, GONZALEZ A I, KREUZER O. 2015. Fuzzy inference systems for prospectivity modeling of mineral systems and a case-study for prospectivity mapping of surficial uranium in Yeelirrie area, Western Australia[J]. Ore Geology Reviews, 71: 839-852.
- SUN Yan, LI Cheng-de. 1990. Mineralization mechanism of Lala copper deposit in Sichuan province[J]. Journal of Chengdu College of Geology, 17(4): 1-9(in Chinese with English abstract).
- WYBORN L A I, HEINRICH C A, JAUQUES A L. 1994. Australian Proterozoic mineral systems: essential ingredients and mappable criteria[J]. Journal of the City Planning Institute of Japan, 5(94): 109-115.
- XIANG Jie, CHEN Jian-ping, HU Qiao, AN Wen-tong, YIN Xiao-yun. 2016. 3D metallogenic prediction based on mineralogical series: a case study in Tongling mineral district of Anhui[J]. Geoscience, 30(1): 230-238(in Chinese with English abstract).
- XIANG Jie, XIAO Ke-yan, CARRANZA E J M, CHEN Jian-ping, LI Shi. 2019. 3D Mineral Prospectivity Mapping with Random Forests: A Case Study of Tongling, Anhui, China[J]. Natural Resources Research, 1-20.
- 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).
- XIAO Ke-yan, WANG Rui-jiang, XING Shu-wen, TANG Ju-xing, SUN Li. 2015. A tentative idea of mineral resources regionalization[J]. Journal of Geology, 39(3): 347-351(in Chinese with English abstract).
- ZHAI Yu-sheng. 1999. On the metallogenic system[J]. Earth Science Frontiers, 6(1): 13-27(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Wu-peng, YU Can, LI Feng, ZENG Qing-tian, ZHANG Da-bing, ZHANG Zhi-fa, LU Jun-nan. 2016. Geological characteristics and ore-controlling factors of Hongnipo copper deposit in Huili of Sichuan[J]. Nonferrous Metals Engineering, 6(2): 80-84(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Jia-yun, CHEN Jia-biao, SHEN Bing, ZHU Zhi-min, LIU Fei-yan, LUO Li-ping, LI Xiao-yu. 2008. Tectono-metallogenic mechanism for the Lala copper deposit, Sichuan[J]. Geotectonica et Metallogenia, 32(1): 98-104(in Chinese with English abstract).