

引用格式: 吕志成, 陈辉, 宓奎峰, 等, 2022. 勘查区找矿预测理论与方法及其应用案例 [J]. 地质力学学报, 28 (5): 842–865. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222816

Citation: LYU Z C, CHEN H, MI K F, et al., 2022. The theory and method of ore prospecting prediction for exploration area: Case studies of the Lala copper deposit in Sichuan, Muhu–Maerkantu manganese ore deposit in Xinjiang and Aonaodaba tin-polymetallic deposit in Inner Mongolia [J]. Journal of Geomechanics, 28 (5): 842–865. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222816

勘查区找矿预测理论与方法及其应用案例

吕志成^{1,2}, 陈辉^{1,2}, 宓奎峰^{1,2}, 张帮禄^{1,2}, 谢月桥³, 庞振山^{1,2}, 程志中^{1,2},
薛建玲^{1,2}, 公凡影^{1,2}, 段彬³, 吕鑫^{1,2}
LYU Zhicheng^{1,2}, CHEN hui^{1,2}, MI Kuifeng^{1,2}, ZHANG Banglu^{1,2}, XIE Yueqiao³, PANG Zhenshan^{1,2},
CHENG Zhizhong^{1,2}, XUE Jianling^{1,2}, GONG Fanying^{1,2}, DUAN Bin³, LYU Xin^{1,2}

1. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037;
 2. 自然资源部矿产勘查技术指导中心, 北京 100037;
 3. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第二地质大队, 新疆喀什 844000
1. *Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China;*
 2. *Mineral Exploration Technical Guidance Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100037, China;*
 3. *No.2 Geological Team of the Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources and Development, Kashi 844000, Xinjiang, China*

The theory and method of ore prospecting prediction for exploration area: Case studies of the Lala copper deposit in Sichuan, Muhu–Maerkantu manganese ore deposit in Xinjiang and Aonaodaba tin-polymetallic deposit in Inner Mongolia

Abstract: Reducing exploration risks and realizing scientific prospecting always have been frontier fields and research hotspots in the world of mineral exploration, the theory and method of ore prospecting prediction for exploration area is the valid channel to deal with this problem. Using this method, a geological model of ore prospecting can be established by combining the internal (geochemical behavior of elements) and external (types of geological processes) control factors for mineralization. The main components of the prospecting prediction model include geological bodies related to mineralization, metallogenetic structure planes and mineralization characteristics. Together with the results of special geological mapping, geophysical and geochemical exploration on large scale, orebodies have been located by synthetic information and explored by drilling. Case studies of the Lala copper deposit in Sichuan, Muhu–Maerkantu manganese ore deposit in Xinjiang and Aonaodaba tin-polymetallic deposit in Inner Mongolia, illustrate the effective application of this method in ore prospecting prediction.

Keywords: theory and method of ore prospecting prediction for exploration area; geological body related to mineralization; metallogenetic structure planes; mineralization characteristics; Lala copper ore deposit; Muhu–Maerkantu manganese ore deposit; Aonaodaba tin-polymetallic ore deposit

摘要: 降低勘查风险、实现科学找矿一直是国内外矿产勘查界不断探索的前缘领域和研究热点, 而勘查区找矿预测理论与方法是解决这一难题的有效途径。该方法将成矿作用内因(元素的地球化学特征)和外因(地质作用类型)相结合, 构建以成矿地质体、成矿构造与成矿结构面和成矿作用特征标志为主要内容的找矿预测地质模型, 通过大比例尺构造蚀变填图、物化探测量和专题研究等综合方法, 预测推

基金项目: 中国地质调查局矿产地质调查项目 (DD20220166, DD20190166)

This research is financially supported by the Geological Project of the China Geological Survey (Grants DD20220166, DD20190166)

第一作者简介: 吕志成 (1966—), 男, 博士, 研究员, 主要从事矿产资源调查评价及矿床学等方面的研究。E-mail: zhichenglv@163.com

收稿日期: 2022-08-09; 修回日期: 2022-09-14; 责任编辑: 王婧

断矿体赋存位置,最后通过工程施工,发现并查明工业矿体(矿床)。依据勘查区找矿预测理论与方法,在四川拉拉铜矿、新疆玛尔坎苏锰矿带穆呼-玛尔坎土锰矿及内蒙古大兴安岭南段敖脑达坝地区锡多金属矿开展找矿预测,取得了较好效果。

关键词: 勘查区找矿预测理论与方法; 成矿地质体; 成矿结构面; 成矿作用特征标志; 拉拉铜矿; 穆呼-玛尔坎土锰矿; 敖脑达坝锡多金属矿

中图分类号: P624 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2022) 05-0842-24

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222816

0 引言

矿产资源是人类经济社会发展的物质基础,也是工业、农业、国防和其他社会行业的“粮食”和主要动力来源(翟明国和胡波,2021)。矿产勘查是发现和查明矿产资源并服务于经济社会发展的重要的先行性和基础性工作,是国民经济的重要基础产业,其发现和探明的矿产资源满足了人类社会对矿物原料日益增长的需要。然而,矿产勘查位于人类利用矿产资源产业链的源头和上游,具有科学性、探索性、实践性强及风险大等特点。降低勘查风险、实现科学找矿和找矿效益最大化一直是国内外矿产勘查界不断探索的前缘领域和研究热点。开展大比例尺矿产(成矿)预测是解决这一难题的有效途径,为此国内外学者经过几十年的探索和研究,形成了大比例尺矿产(成矿)预测的理论和学科体系。国际上,苏联学者基于建造和构造分析基础上,提出了著名的预测普查组合理论(胡惠民等,1995)。西方学者基于矿床成因、描述、统计等模型基础上,提出了矿床模型预测理论(White and Hedenquist, 1995)。中国开展大比例尺找矿预测的工作始于20世纪50年代,经过几十年的发展,在大比例尺成矿预测理论和方法方面等取得了突出成果,形成了完整的理论和技术方法体系(朱裕生等,1997; 范永香和阳正熙,2003),包括地质异常矿体定位预测与统计预测(赵鹏大等,1983, 1992, 1994, 1995, 1996; 赵鹏大和池顺都,1991; 赵鹏大和孟宪国,1993; 赵鹏大和陈永清,1998; 赵鹏大,2007)、成矿系列(陈裕琪等,1983; 陈毓川等,2006)、大比例尺GIS三维立体预测(肖克炎等,2000a, 2000b, 2012; 陈建平等,2007)、成矿系统(翟裕生,2000, 2003a, 2003b; 翟裕生等,2010)、三联式成矿预测(赵鹏大,2000, 2002; 赵鹏大等,2001, 2003)、构造成矿动力学(韩润生,2003)、矿田(床)构造地球化学(韩

润生,2005)、“三部曲”矿产资源评价方法(肖克炎等,2006; Singer and Menzie, 2010)、综合信息预测(王世称,2010)、构造岩相学与地球化学岩相学(方维萱,2012)、矿床模型预测理论(毛景文等,2012)、固体矿产矿床模型综合地质信息预测技术(叶天竺,2013)、基于大数据的矿产资源智能预测(陈建平等,2015; 肖克炎等,2015; 于萍萍等,2015; 赵鹏大,2015; 周永章等,2018; 王功文等,2021; 张士红和林子瑜,2021; 赵鹏大和陈永清,2021)等。特别是21世纪初实施的国家专项“全国危机矿山接替资源勘查(2004—2010年)”“老矿山深部和外围找矿(2011—2013年)地质调查计划”及整装勘查区及矿集区地质调查项目,大比例尺矿产预测工作在矿山深部、外围和整装勘查区找矿工作中得到广泛应用,并取得显著成效(于晓飞等,2020)。

勘查区找矿预测属于预测矿体级别的大比例尺矿产预测工作,目的是预测、发现和探明未知矿体,指导探矿工程部署,属矿体定位预测。其特点是预测范围较小,一般是几到几十平方千米,深度在1500~2000 m以浅。预测对象与已知矿床(化)可比性强或联系密切,故已知矿床(化)的成矿规律和找矿标志可以作为预测的重要基础。开展大比例尺找矿预测是实现科学找矿的重要途径,也是寻找隐伏矿、深部矿的有效方法之一。在地质工作程度较高,且以寻找隐伏矿、深部矿为主要任务的地区,更需进行大比例尺找矿预测,以提高地质找矿效果实现科学找矿。文章以服务于矿产勘查和实现找矿突破为目标,阐述勘查区找矿预测理论与方法,分析讨论其在三类不同类型矿床找矿中的应用案例,以此推动大比例尺矿体定位预测工作,从而提高预测的准确度,进一步推进实现科学找矿。

1 勘查区找矿预测理论与方法的建立

勘查区找矿预测以现代构造地质学、岩石学、

矿物学、地球化学和矿床学等基础理论为指导,以1:10000和1:5000大比例尺地质构造和矿化蚀变等地质填图为基础,通过成矿地质体、成矿结构面和成矿作用特征标志研究,构建找矿预测地质模型。结合应用物探和化探方法,预测推断矿体赋存位置。通过工程施工,发现并查明工业矿体(矿床)。勘查区找矿预测是大比例尺矿产预测的重要组成部分,也是矿产勘查的主要内容,贯穿于矿产勘查(普查、详查和勘探)各个阶段,与矿产勘查工作同步进行。

1.1 勘查区找矿预测理论

基于对矿床成矿理论的研究和认识,结合矿产勘查的实际情况,在总结全国矿山深部和外围找矿预测工作成果的基础上,提出了勘查区大比例尺找矿预测的体系框架。

(1)基于找矿预测及矿产勘查的认识规律、方法论及成岩成矿关系,提出了与成矿有关的目标地质体(以下简称成矿地质体)概念,明确勘查区找矿方向。成矿地质体是指与矿床形成在时间、空间和成因上有密切联系的地质体(提供成矿物质和/或成矿的能量)。矿床的形成与成矿地质体同时或相近,或矿床空间分布与成矿地质体相依,或矿床形成与成矿地质体具有成因联系。成矿地质体包括地质建造及形成地质建造的环境,亦为自然岩石组

合体 and 不同尺度地质体间的结构构造。通过对勘查区成矿地质条件的分析研究,确定成矿地质体(表1),明确找矿方向,回答了在一个具体勘查区(或工作区)如何开展找矿预测和矿产勘查的核心问题。

(2)基于构造对矿(床)体成矿、控矿的普遍性规律,提出了成矿结构面的概念。通过对成矿结构面的研究,预测矿体空间位置,实现对矿体定位预测。矿床学的研究表明,无论是内生还是外生矿床,构成矿床的矿体都无一例外地受构造控制,并赋存于构造中。成矿结构面是指赋存矿体的岩石物理化学性质不连续面,可划分为原生成矿结构面、次生成矿结构面和物理化学条件转换结构面。原生成矿结构面包括沉积成岩作用原生构造、火山成岩作用原生构造和岩浆侵入成岩作用原生构造面,如火山、岩浆侵入作用形成的热液水压裂隙构造和隐爆角砾岩构造都是典型的原生成矿结构面。次生成矿结构面包括地质体形成后受构造应力场控制形成的构造界面,如区域应力作用下形成的褶皱、断裂构造中的成矿结构面,褶皱轴面及由褶皱作用形成的次生断裂、裂隙构造、层间破碎带、转折端、虚脱带等构造界面。断裂构造包括各种级别、序次的断裂、裂隙和节理等。物理化学条件转换结构面是分划性结构面,在成矿作用过程

表1 主要类型矿床的成矿地质体 (叶天竺等, 2014)

Table 1 Geological bodies related to the mineralization of the main types of mineral deposits (Ye et al., 2014)

成矿地质作用	矿床类型及主要矿种	成矿地质体
沉积地质作用	沉积型(铁、锰、铜、铀矿)	原型沉积盆地、隐蔽及同生断裂、含矿建造
	碎屑岩喷流沉积型(铅锌、铜、铁、锰矿)	含矿层位(以碎屑岩类为主)及成岩同生断裂
	砂岩型(铜、铀矿)(这里专指与后生地下水或者其他流体有关,富含在砂岩中的铜、铀矿)	砂岩型铜矿成矿地质体主要为盆地含矿层位及边缘同生断裂;砂岩型铀矿成矿地质体主要为氧化-还原过渡带砂体
	碳酸盐岩容矿的非岩浆后生热液型(铅锌矿)(MVT型)	含矿岩层及(深源)断裂构造,或以盆地边缘和后生断裂构造为主
火山地质作用	海相火山喷流沉积型(铜、铅锌矿)(VMS-SEDEX型)	次-火山岩体(深部岩浆来源)、同生-横向断裂(控制喷流口的产出)、含矿建造(海相火山-沉积地层)
	陆相次火山岩型(铁矿)	火山机构和次火山岩体
	陆相次火山热液型(金、银、铅锌、铜、铀矿)	火山机构中次火山岩体顶部突出小岩株(晚期次火山岩体)等
侵入岩浆地质作用	正岩浆型及伟晶岩型矿床	岩浆房顶部的突出小岩体等
	接触交代型(铁、铜、金、铅锌、钨、锡矿)	侵入深度较大的侵入体
	高(中)温热液型(钨、锡、稀有、稀土矿)	高F、B的酸性岩浆形成的中深成侵入体(或酸性碱长花岗岩)
	斑岩型(铜、钼、金、钨、锡矿)	浅成、超浅成侵入体,少量为次火山岩体
	中低温热液型(金、银、铅锌、钨矿)	中浅成岩浆侵入体
	远成低温热液型(金、铋、汞、钨矿)	浅成侵入体(浅成脉岩)
区域变质地质作用	受变质型(铁、磷、硼矿)	变质变形构造与含矿地层
大型变形地质作用	韧性剪切带型(金矿)	韧性剪切带中的脆性部位变质建造

中, 矿质沉淀于成矿物理化学条件(如温度、压力、酸碱度、氧化还原电位、密度、孔隙度等)转换界面处, 如砂岩型铜矿矿体赋存于古氧化还原转换部位; 后生水成砂岩型铀矿赋存于层间氧化带前锋带, 即氧化还原界面附近等。通过研究成矿构造与区域构造、成岩原生构造、控岩构造的关系, 确定成矿构造和成矿结构面(表 2), 通过勘查技术手段对成矿结构面进一步厘定和评价, 进而达到预测矿体的目标。

(3) 基于充分发挥各类矿床成矿理论对找矿预测的直接指导作用, 提出成矿作用特征标志的概念。矿床是成矿作用的产物, 不同矿床类型具有不同的特征标志, 主要表现为矿体宏观特征、矿物特征、成矿元素特征等方面, 如矿化、蚀变特征、矿化组合、成矿流体、成矿元素迁移沉淀机制等矿床学、矿物学、地球化学方面的特征标志。系统总结主要类型矿床的成矿作用特征标志, 并作为找矿预测的依据, 不但为勘查区找矿预测提供了理论基础, 也为找矿预测提供了科学依据, 进而实现矿床

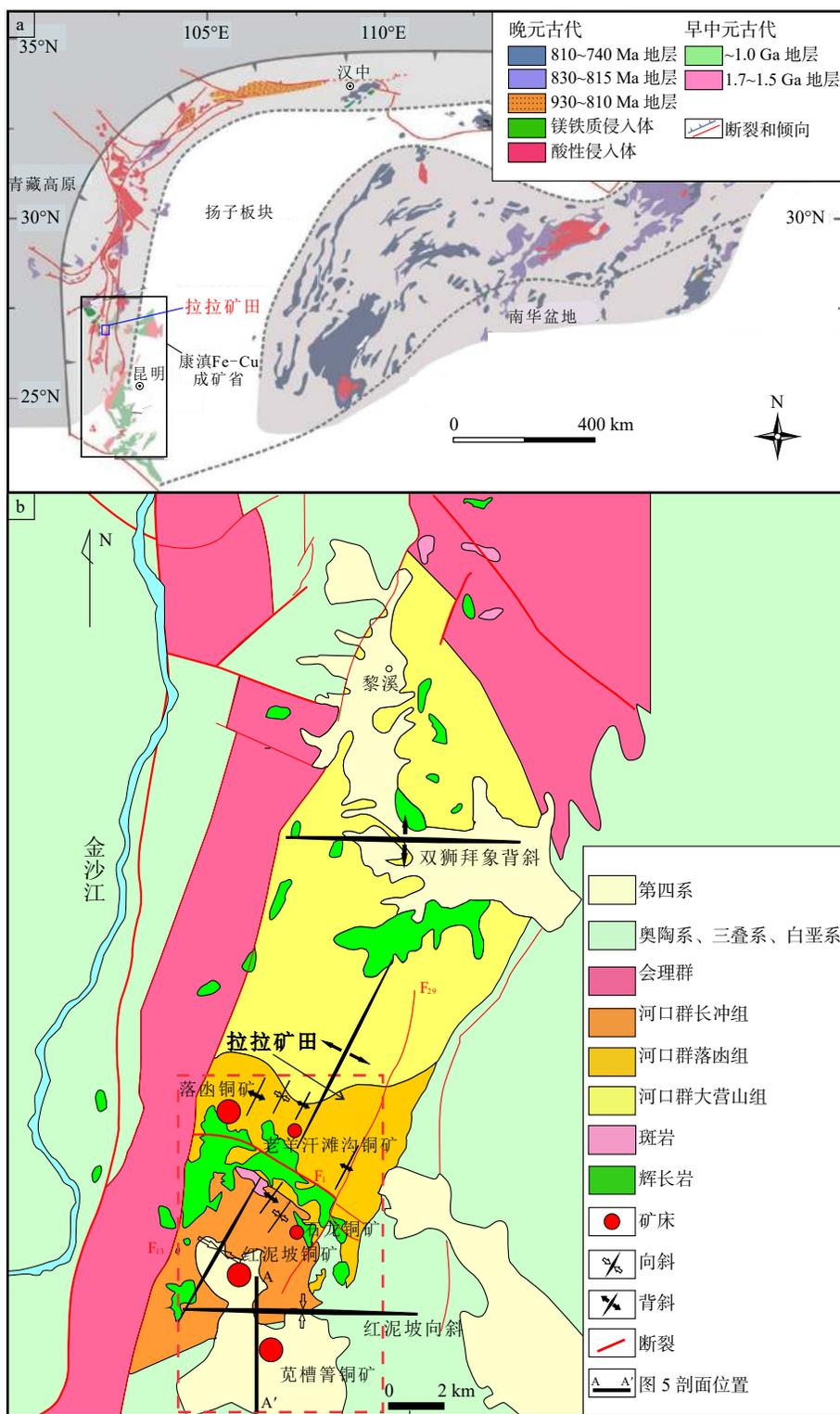
学、矿床地球化学理论研究与找矿预测与矿产勘查实践的紧密结合。找矿预测的目的是预测未揭露矿体(隐伏)的空间位置, 找矿预测的过程是通过研究成矿作用特征标志及已经揭露部分的矿体特征, 推断未揭露矿体的空间位置。

(4) 勘查区“三位一体”找矿预测地质模型的概念及构建方法。“三位一体”找矿预测地质模型是以突出表达成矿地质体、成矿构造和成矿结构面、成矿作用特征标志为基础的三维矿床实体模型, 如斑岩铜矿找矿预测地质模型(图 1)。“三位一体”找矿预测地质模型中的成矿地质体表达其与矿床形成的时空、物质来源及能量关系。“三位一体”找矿预测地质模型空间结构表达矿化样式在三维空间的变化规律, 实现成矿地质体、成矿构造和成矿结构面、成矿作用特征标志“三位一体”深度融合, 以及矿化样式(深浅、上下、左右、内外等矿化样式)在三维空间中的变化规律及三维空间结构的精细刻画。按照勘查区找矿预测理论与方法体系的学术思想, 系统构建了中国砂岩型铀矿床、海相

表 2 主要成矿构造系统的成矿结构面类型组合及空间格架 (叶天竺等, 2014)

Table 2 Types and composites of the metallogenetic structural planes in the main metallogenetic systems (Ye et al., 2014)

构造系统	分类	成矿结构面	矿床类型	结构面空间格架
沉积构造系统	陆相	①盆缘同生断裂面; ②岩相界面; ③特殊岩性层; ④氧化还原界面/转换带; ⑤酸碱转换界面; ⑥古风化面	风化型	①+⑥上下结构
			砂岩铜、铀矿	①+②+③+④+⑤上下、左右结构
	海相	①盆缘盆内同生断裂面和横张断裂面; ②次级隆拗变换带; ③沉降中心部位; ④特殊岩性层; ⑤岩相带界面; ⑥潟湖沙坝; ⑦古水温、古水流、古生物变化带; ⑧物理化学变换带/面; ⑨后生深源断裂; ⑩不整合面; ⑪古风化面	化学沉积型	②+③+④+⑤+⑥+⑦+⑧+⑩+⑪+⑨上下、左右结构
			同生热水沉积型 后生热液沉积型	①+④左右结构 ①+④+⑨左右结构
火山构造系统	陆相	①火山通道; ②火山岩性岩相界面; ③次火山原生裂隙; ④次火山喷发间断面; ⑤次火山岩体顶部裂隙带; ⑥爆破角砾岩体; ⑦叠加区域断裂	次火山热液型	⑦+③+①+②+⑥+④+⑤上下、左右结构
			海相	①次火山岩体顶部网脉状裂隙带; ②火山岩和沉积岩界面; ③喷流管道; ④叠加区域断裂
岩浆侵入构造系统	侵入体	①岩体底部/侧伏端; ②岩体同生边界断裂; ③构造岩片; ④岩性岩相带	基性、超基性岩浆型	②+①+④上下结构
			地幔岩铬铁矿	①+③+④上下结构
	侵入体接触带	①叠加区域同生断裂; ②岩体接触面; ③捕虏体; ④岩体顶部网脉状裂隙; ⑤岩体外接触带褶曲/“硅钙面”	斑岩型	①+②+④上下结构
			接触交代型 中高温热液型 中低温热液型	①+③+①+⑤左右结构 ①+②+④上下结构 ①+②上下结构
褶皱构造系统	褶曲、同生断裂	①向形构造轴部; ②背斜转折端/轴部	沉积变质型	①
		①褶皱同生断裂; ②背斜褶曲层间破碎带	接触交代型、中低温热液型	①+②左右、上下结构
断裂构造系统	剪切带	①韧性剪切带脆性叠加部位	韧性剪切带型	①上下结构
		①脆性断裂侧伏; ②叠加于一切成岩原生构造	中低温热液型	①+②上下结构
	断裂系统	①层间破碎带; ②沉积不整合界面	卡林型金矿	①+②上下结构



a—大地构造位置(据 Zhou et al., 2014 修改); b—矿田地质简图(据陈辉等, 2021 修改)

图 2 拉拉地区大地构造位置及矿田地质简图

Fig. 2 Geotectonic position and ore field geological sketch map of the Lala area

(a) Geotectonic position (modified from Zhou et al., 2014); (b) Ore field geological sketch map (modified from Chen et al., 2021)

大量研究, 积累了较为丰富的资料(陈根文等, 1992; 申屠保涌, 1997; 金明霞和沈苏, 1998; 陈根文

和夏斌, 2001; 黄崇轲等, 2001; 李泽琴等, 2003; Greentree and Li, 2008; 周家云等, 2008; Zhao et al.,

2010, 2012, 2013; Zhao and Zhou, 2011; Chen and Zhou, 2012; Zhu and Sun, 2013; 方维萱, 2014; Chen et al., 2019; Zhu et al., 2018; 孙君一等, 2019; 陈辉等, 2021)。该矿床研究早期, 多数学者根据其赋存于河口群落组海相火山岩中, 矿体呈层状、似层状产出, 矿石主要为块状、条带状构造的特征, 结合部分硫铅同位素数据显示成矿物质来自于河口群地层, 认为拉拉铜矿属 VMS(火山块状硫化物型矿床成矿)成因(陈根文等, 1991, 1992; 陈根文和夏斌, 2001; 黄崇轲等, 2001)。在此基础上, 可能存在元古宙末发生的晋宁运动和辉绿岩的侵位, 促使成矿元素再次活化富集(周家云等, 2008, 2009)。2000 年以来, 随着铁氧化物铜金(铀、稀土)型(IOCG)矿床成因研究的兴起, 一些学者通过拉拉铜矿发育很强的钠长石化, 出现大量的贫 Ti 磁铁矿, 并富集 Co、Au、P、F、REE 等证据提出拉拉矿床属于 IOCG 矿床, 此后, 拉拉铜矿床可能的 IOCG 属性陆续得到关注。据此, 提出拉拉铜矿具有典型 IOCG 矿床特征(Chen and Zhou, 2012), 成矿地质背景为板内裂谷拉张环境(Chen and Zhou, 2012), C-H-O-S 同位素数据显示其成矿流体为岩浆热液来源, 部分成矿物质来自地层(Zhao and Zhou, 2011), 发育有大面积的钠、钠-钙及钾化蚀变特征(朱志敏等, 2009)。成矿时代为多期多阶段, 主要集中在新元古代(李泽琴等, 2003; Greentree, 2007; Chen and Zhou, 2012; Zhu and Sun, 2013; Zhu et al., 2018; Chen et al., 2019; 陈伟等, 2019)。

基于详细的野外地质观察及成岩成矿年龄等分析测试结果, 认为矿床形成经历了三期地质事件, VMS 成矿事件(1.67~1.6 Ga)、变形事件(1.1~0.9 Ga)、热液叠加成矿事件(0.84~0.8 Ga), 矿床成因为火山喷流沉积-热液叠加型铜矿床(陈辉等, 2021)。自 1.85 Ga 开始, 伴随着哥伦比亚超大陆(Columbia)的裂解, 扬子地台产生最初拉伸(耿元生等, 2019)。古元古代末(~1.75 Ga), 扬子地台西南缘岩石圈拉张减薄, 形成地堑式断裂, 最终形成板内裂谷盆地, 并被海水充填, 随后至~1.6 Ga(Zhu et al., 2018), 发生了三次大规模的玄武-安山质火山喷溢, 分别形成河口群大营山组、落函组和长冲组的火山-沉积旋回, 并在火山喷发间歇期, 发育泥质、粉砂质等陆源碎屑沉积及碳酸盐沉积。大规模火山的喷溢, 从幔源带来大量的金属成矿物质, 由火山岩浆提供的热使海水在火山岩中产生对流循环,

并萃取其中成矿物质, 形成含矿热液。在~1.67 Ga 至~1.6 Ga 时, 富含金属的热液, 沿喷溢口喷出海底, 与海水或陆缘碎屑沉积物相互作用而沉淀成矿。1.1~0.9 Ga, 扬子板块与华夏板块间发生四堡造山运动, 致使河口群发生了区域变质作用, 河口群矿源岩以及早期形成的 VMS 型矿体发生同步褶曲, 并于转折端处产生破碎, 为热液叠加期成矿创造容矿空间。但根据野外观察, 脉状矿体均切穿片理化方向, 这种现象表明区域变质作用仅发生变形, 而并未产生叠加富集, 所以脉状矿体成矿应发生于变质变形期后。0.84~0.8 Ga, 伴随着罗迪尼亚超大陆(Rodinia)的裂解, 地幔柱上涌, 幔源流体(岩浆水)萃取河口群中成矿物质或者活化早期矿体中硫化物, 形成含矿热液, 在变形期形成的有利部位再度富集, 形成脉状矿体。

2.2 找矿预测地质模型构建

此次工作以勘查区找矿预测理论与方法体系为指导, 厘定了拉拉铜矿的成矿地质体、成矿构造和成矿结构面, 总结了成矿作用特征标志, 并建立了找矿预测地质模型(图 3)。

VMS 成矿事件的成矿地质体为古元古代海底火山喷发(溢)的基性-中性火山岩, 其提供了成矿物质和海水对流的热能。年代学研究显示落函组赋矿火山岩的形成年龄为~1.68 Ga, 而块状矿体形成年龄为~1.67 Ga, 成矿稍晚于成岩。在空间上, 经原岩恢复发现, 矿体常与火山岩相伴, 或赋存于火山岩中, 或赋存于火山岩与沉积岩接触带附近的沉积岩中。而脉状矿体形成时间为 841.1 Ma(辉钼矿 Re-Os)和 794.8 Ma(黄铜矿 Re-Os), 伴随罗迪尼亚超大陆(Rodinia)在 850~700 Ma 的裂解, 该区所在康滇地区处于大陆裂谷环境, 位于裂谷下方的超级地幔柱上涌, 在康滇地区形成了大量 842~795 Ma 超基性、基性到酸性的岩体。因此, 推测拉拉地区深部可能存在该期的隐伏岩体, 其可能是热液叠加期的成矿地质体, 为矿化进一步加富提供流体和热能。

从成矿构造和成矿结构面上看, VMS 期最主要的为一套原生成矿结构面, 矿体均产于基(中)性火山岩(已变质为钠长岩类)与沉积岩(已变质为各类片岩)的界面处, 而这套火山岩为裂谷环境下的裂隙式喷发的产物, 喷发产状受控于南北向的拉张环境。此外, 在落函铜矿床野外考察时, 见火山通道相产物, 火山角砾岩和坍塌角砾岩, 指示其可能是

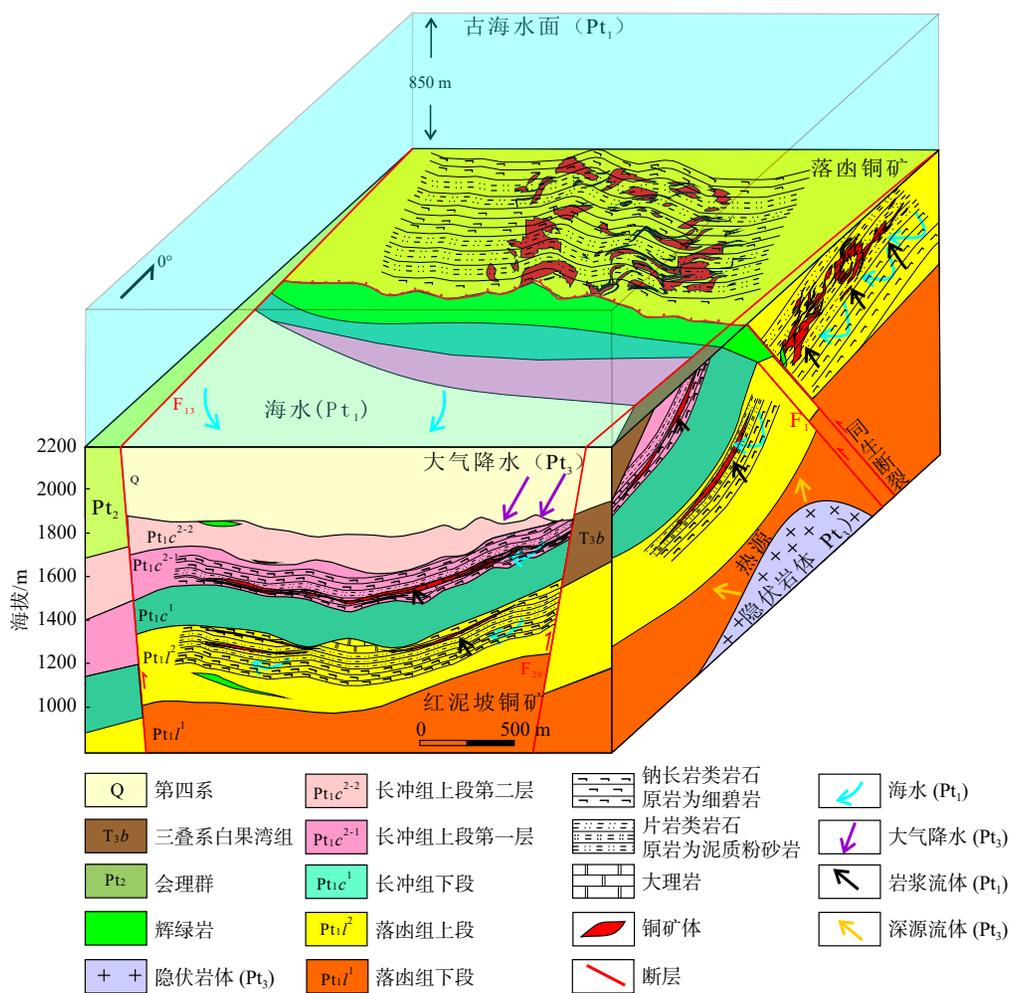


图 3 拉拉铜矿找矿预测地质模型

Fig. 3 Prospecting prediction model of the Lala copper deposit

喷溢口，也是一种原生成矿结构面。东西向 F_1 断裂作为宝台厂-九龙深大断裂的西延部分，控制同期含矿岩体的分布和矿体的延展与富集，并且是辉长岩侵位的通道，表明其为同生断裂。热液叠加期主要为次生成矿结构面，主要为褶皱、断裂和裂隙，区内构造主要有两期，近东西向和近南北向。东西向构造受早中元古代造山运动(会理运动)影响，主压应力方向为南北向，形成了轴向近东西的河口背斜和红泥坡向斜，其控制了基底地层和矿体的整体展布方向；南北向构造受到新元古代扬子板块和华夏板块拼贴作用的影响，东西向为主压应力，形成了一系列近南北向褶皱构造叠加于早期东西向褶皱构造之上，明显控制了矿体的富集改造，因此，叠加期主要的成矿结构面为复合褶皱的核部。

成矿作用特征标志研究显示，矿体主要呈层状、似层状和透镜状，产状与地层层理一致，显示典型的层控特征；容矿岩石为石英钠长岩、黑云石英

片岩、白云石英片岩及大理岩等；矿石类型有纹层状、块状、角砾状和脉状矿石；矿石矿物主要为黄铜矿、黄铁矿和磁铁矿，次为辉钼矿和赤铁矿等，偶见自然金、少量闪锌矿、磁黄铁矿和斑铜矿；脉石矿物主要为石英、方解石、黑云母、白云母和绿泥石等；矿石结构主要为自形一半自形粒状结构、他形粒状结构、交代结构、包含结构和压碎结构，偶见固溶体分离结构和筛状结构；矿石构造主要为纹层状构造、块状构造、角砾状构造和脉状构造。电子探针 Co、Ni 数据显示，无论 VMS 期还是热液叠加期形成的黄铁矿，Co 含量都较高，显示富 Co 特征，同时 Ni 含量也较高。VMS 期形成的黄铁矿 Co/Ni 比值为 0.20~994，均值为 119.13，具海底火山喷流-沉积型黄铁矿特征；热液叠加期黄铁矿中 Ni 含量也较高，Co/Ni 比平均值为 2.03，具热液成因黄铁矿特征。VMS 期形成的纹层状和块状矿体蚀变较弱，以硅化、绿泥石化和碳酸盐化为主；热液叠

加期主要发育碳酸盐化、硅化、钠长石化、黑云母化、萤石化和电气石化等。氢氧同位素显示, VMS期成矿流体为岩浆水和海水, 热液叠加期成矿流体主要为岩浆水, 后期有大气降水混入; 硫同位素显示, VMS期硫来自于海水淋滤火山岩和海水硫酸盐热化学还原, 热液叠加期硫来自于地幔和地层硫; Pb同位素表明成矿物质来自于富U、Th的河口群; 黄铁矿 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值表明VMS期成矿物质来源于河口群火山岩; 黄铜矿 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值表明: 热液叠加期成矿物质来源于河口群地层。

2.3 找矿预测研究、靶区圈定及验证

经过几十年的勘查, 拉拉铜矿田的露头矿基本已评价完毕, 广泛出露的新生代地层覆盖区以深部成为找矿重点和难点, 其是否有矿、规模如何是亟待解决的关键问题。根据找矿预测模型研究成果, 认为拉拉铜矿主矿体主要分布于河口群落组上段和长冲组上段层位中, 具典型的层控特征, 变质火山岩和变质沉积岩界面是重要的赋矿界面, 因此, 区域河口群地层及其中基性火山岩的识别对于拉拉铜矿深部找矿及明确该区的找矿方向意义重大。

(1) 成矿地质体预测及圈定。通过对该区布格重力异常研究, 推断河口群在红泥坡以南至黎洪一带连续分布。邱林等(2016)通过对各出露地层岩石的磁性测量, 发现河口群基性火山岩具高磁特征。1:50000航磁资料显示该区南部仍有大面积高磁异常, 推测河口群基性火山岩在南部覆盖区下有稳定延伸(图4)。部署的近南北向的AMT剖面测量发现的中高低阻梯度带表明基性—中性火山岩与沉积岩界面有较为连续的延伸。结合地质填图在南部黎洪—姜驿一带已发现河口群火山沉积岩露头, 进一步显示河口群火山沉积岩具有稳定向南延伸的趋势。

(2) 成矿结构面的探测。AMT探测剖面显示分布于红泥坡向斜核部位于拉拉—黎洪一带, 以往勘查工程大都分布于其北翼, 如已发现红泥坡大型铜矿床, 而其南翼覆盖层之下同样具有广阔的找矿前景, 在南部部署了两条近东西向AMT剖面AMT-16-08和AMT-19-1较好地反映了成矿结构面的形态与深度(陈辉等, 2021), 为钻探工程部署提供了依据。

(3) 钻探验证。在上述成果基础上, 相继部署了ZK-1801、ZK-1401、ZK3三个验证钻孔, 在深部成功发现厚大矿体即菟槽管铜矿, 随后实施的ZK4对

远景进一步控制。经资源量估算, 新增潜在资源铜金属量达 5.6×10^5 t, 平均品位0.7%, 实现了找矿重要突破, 预示区域覆盖层之下巨大的找矿空间(图5)。

3 玛尔坎苏富锰矿带找矿预测研究

3.1 矿床(田)地质特征

新疆西昆仑玛尔坎苏地区探明的大型优质富碳酸锰矿带是中国近年锰矿勘查的重大突破。玛尔坎苏富锰矿带处于西昆仑造山带与塔里木陆块的结合部位(图6a), 东西延伸近60 km, 赋矿层位稳定, 矿石品位富($\text{Mn} > 35\%$)、质量优(低Fe、低P), 主要包括西段的奥尔托喀纳什锰矿、东段的穆呼—玛尔坎土锰矿(张帮禄等, 2018; 董志国等, 2020b)及若干锰矿化点(图6b), 已探明300 m以浅的碳酸锰矿石储量超过 5×10^7 t, 远景资源量可达亿吨级, 有望成为中国新的锰矿资源基地(高永宝等, 2016, 2018)。

在奥尔托喀纳什锰矿区, 石炭系一二叠系地层序列展示发育完好的东西走向背斜构造(图7; A-A'剖面)。一条近东西走向的断裂(F_1)纵贯矿区, 为区域玛尔坎苏断裂的西延部分。受该断裂影响, 矿体形态及产状发生变化, 呈微弧形弯曲, 局部地段浅部矿体产状发生倒转。上石炭统喀拉阿特河组(C_2k)是主要含锰岩系, 其自下而上可划分为三个岩性段: 第一岩性段(C_2k^1)为含火山角砾灰岩夹薄层微晶灰岩, 厚度200~500 m; 第二岩性段(C_2k^2)为砂屑灰岩夹薄层细砂岩, 厚度30~60 m; 第三岩性段(C_2k^3)为含碳泥灰岩夹薄层炭质泥岩, 厚度30~150 m, 一般发育1~2层菱锰矿。锰矿层严格受含锰岩系第三岩性段高有机质含量的泥灰岩层位控制, 为层状碳酸锰矿体, 产状与地层基本一致, 总体近东西走向($90^\circ \sim 100^\circ$), 倾向 $350^\circ \sim 12^\circ$, 倾角较陡($65^\circ \sim 80^\circ$)。

奥尔托喀纳什锰矿区共发育两层矿(I号矿体和II号矿体), 均位于背斜北翼, 两条矿体间距20~40 m不等。其中, I号矿体为矿区主矿体, 总长度达5200 m, 向东延出矿区, 最大延深442 m, 平均延深280 m。矿体厚度变化较大, 地表出露最大厚度约6 m, 单工程控制矿体真厚度介于0.36~22.32 m, 平均为4.14 m。锰矿体单工程矿体品位为10.1%~50.2%, 平均品位37.8%。矿体两侧围岩发育明显滑脱碎裂泥, 且沿滑脱裂隙面发育方解石—蔷薇辉石脉, 脉宽10~50 cm; 蔷薇辉石呈鲜粉红色,

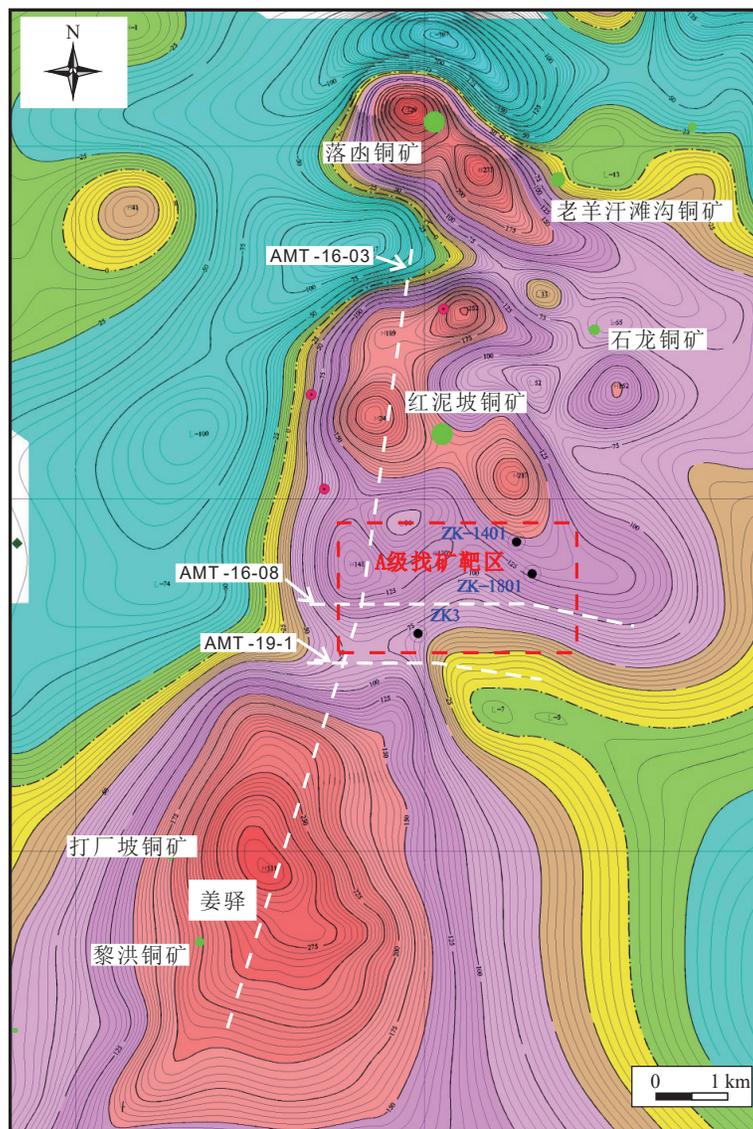


图 4 拉拉地区局部航磁 ΔT 平面图 (据陈辉等, 2021)

Fig. 4 Local aeromagnetic ΔT plan map of the Lala area (Chen et al., 2021)

为后期热液交代充填的产物。

在成矿带东部的穆呼-玛尔坎土锰矿区, 含锰岩系与奥尔托喀纳什锰矿区一致。矿区共发育 4 层矿体, 以 I 号和 II 号矿体为主(图 8)。矿层整体产状与围岩一致, 形态比较复杂, 呈似层状、透镜状、团块状、鸡窝状, 厚度不稳定, 存在尖灭一再和局部膨大、窄小等现象。与奥尔托喀纳什略有不同, 该矿区矿体内方解石脉和石英脉较发育, 呈透镜状、团块状、细脉条带状和不规则网脉状, 厚度从几厘米到几十厘米不等, 但近矿围岩顶底板中无方解石和石英脉发育。I 号矿体断续出露长约 2166 m, 厚 1.34~14.34 m, Mn 平均品位 29.64%。II 号矿体断续出露, 长度约 1290 m, 厚 1.11~9.12 m, Mn 平均品位 24.20%。

3.2 找矿预测地质模型构建

以勘查区找矿预测理论与方法体系为指导, 厘定了玛尔坎苏地区锰矿成矿地质体、成矿构造和成矿结构面, 总结了成矿作用特征标志, 最终建立了找矿预测地质模型(图 9)。

(1) 成矿地质体。按照成矿地质体的定义, 上石炭统喀拉阿特河组(C_2k)第二、三岩性段炭泥质灰岩为锰矿床的赋矿地层, 与锰矿体(床)空间上密切相依, 并与菱锰矿的形成密切相关, 是该区锰矿的成矿地质体, 也是勘查区找矿的目标地质体。勘查区锰矿找矿需要解决的首要问题是通过专项地质填图、岩相古地理研究及其他物化探等方法, 查明上石炭统喀拉阿特河组(C_2k)第二、三岩性段的空间展布。

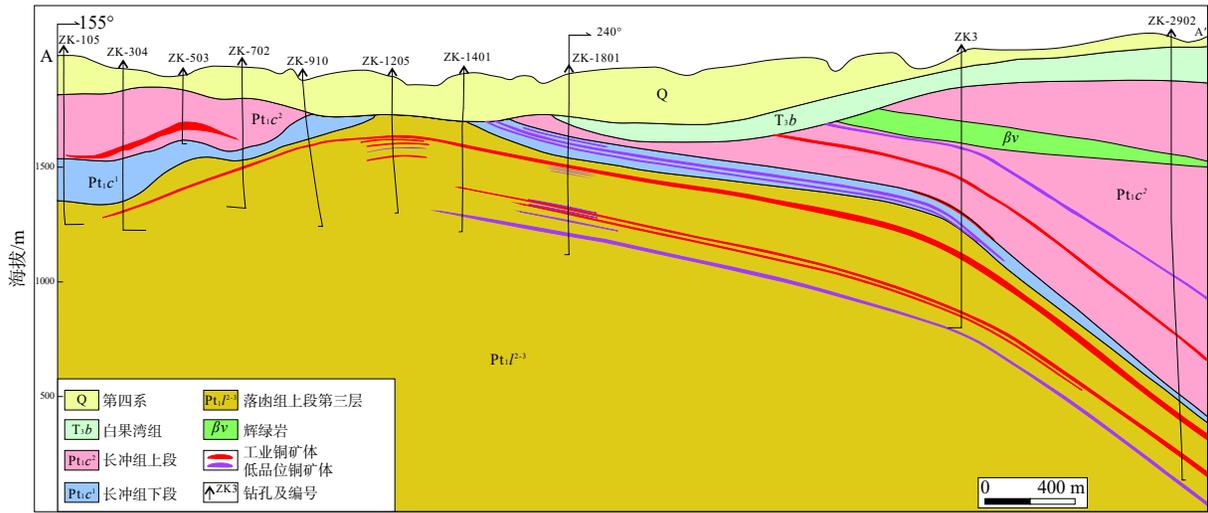
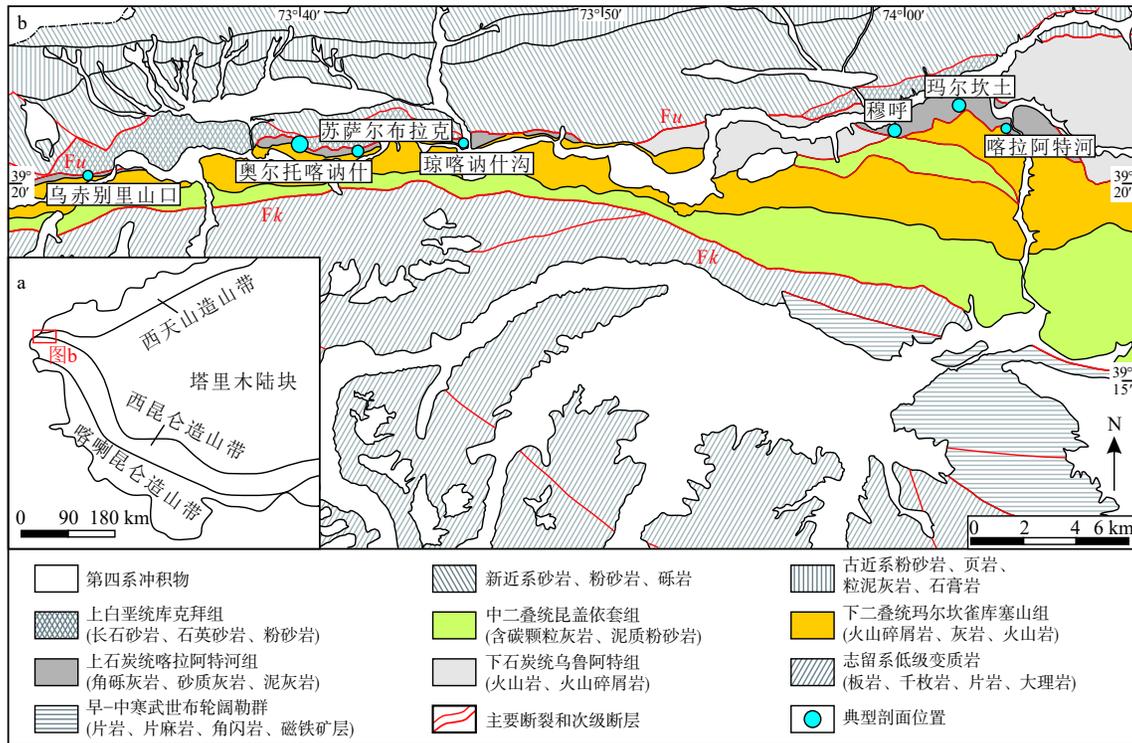


图5 红泥坡南部外围铜矿纵剖面图
 Fig. 5 Longitudinal profile of the southern Hongnipo copper deposit



a—西昆仑玛尔坎苏锰矿带大地构造简图(据覃英等, 2014 修改); b—玛尔坎苏大型碳酸锰矿带地质图(据 Zhang et al., 2020 修改)

图6 西昆仑玛尔坎苏大型碳酸锰矿带大地构造简图和地质图
 Fig. 6 Tectonic sketch and geological map of the giant Malkansu manganese carbonate zone, northwestern portion of the West Kunlun Orogenic Belt (a modified from Qin et al., 2014; b modified from Zhang et al., 2020)
 (a)Tectonic sketch; (b) Geological map

(2)成矿结构面。玛尔坎苏锰矿带形成于晚石炭世—中二叠世拉张活动形成的玛尔坎苏沉积盆地, 锰矿体主要受控于断陷盆地内陆棚相、盆地边缘相碳酸盐岩沉积建造。锰矿成矿结构面主要为含碳泥质灰岩原生岩相带界面, 该界面同时是控制

锰富集的氧化还原界面。同时, 由于成矿带位于塔里木陆块与西昆仑弧盆系结合部位, 后期构造活动强烈, 矿带遭受挤压整体发生推覆, 形成一系列逆冲推覆构造, 含锰地层局部出露地表, 矿体与顶、底板含炭灰岩接触带多发生滑脱、碎裂, 形成形态复

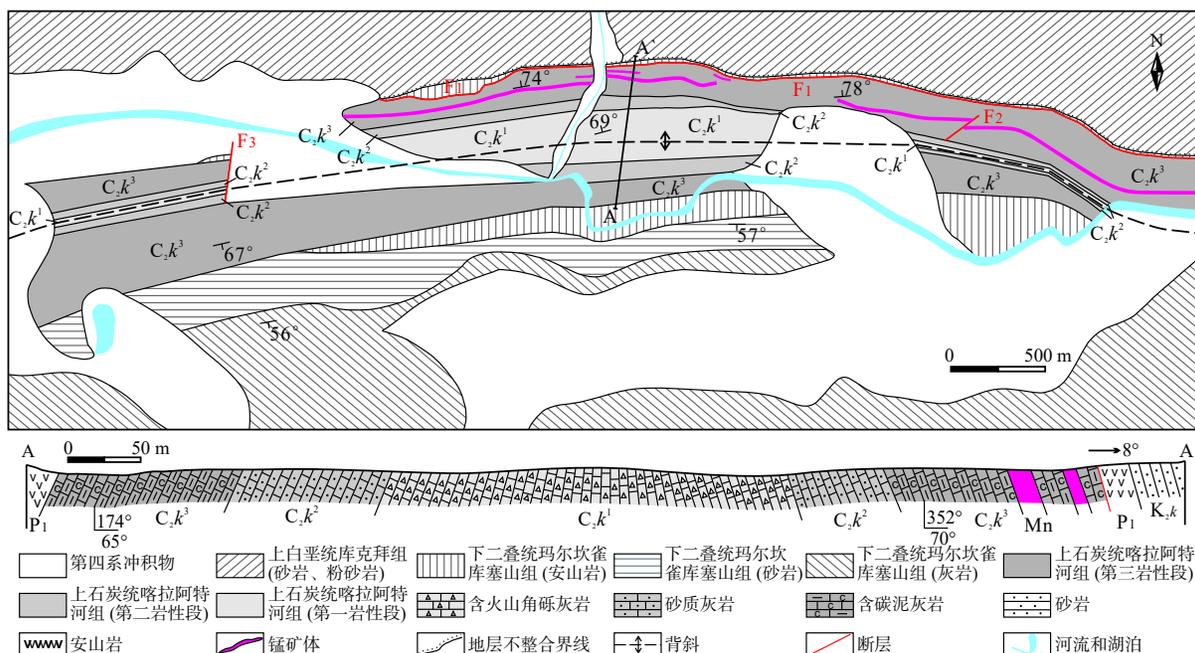


图 7 奥尔托喀纳什锰矿床地质图 (A-A' 剖面显示矿区背斜构造) (据张帮禄等, 2018 修改)

Fig. 7 Geological map of the Ortokarnash manganese carbonate ore deposit, and the profile A-A' shows the anticline of the mining area (modified from Zhang et al., 2018)

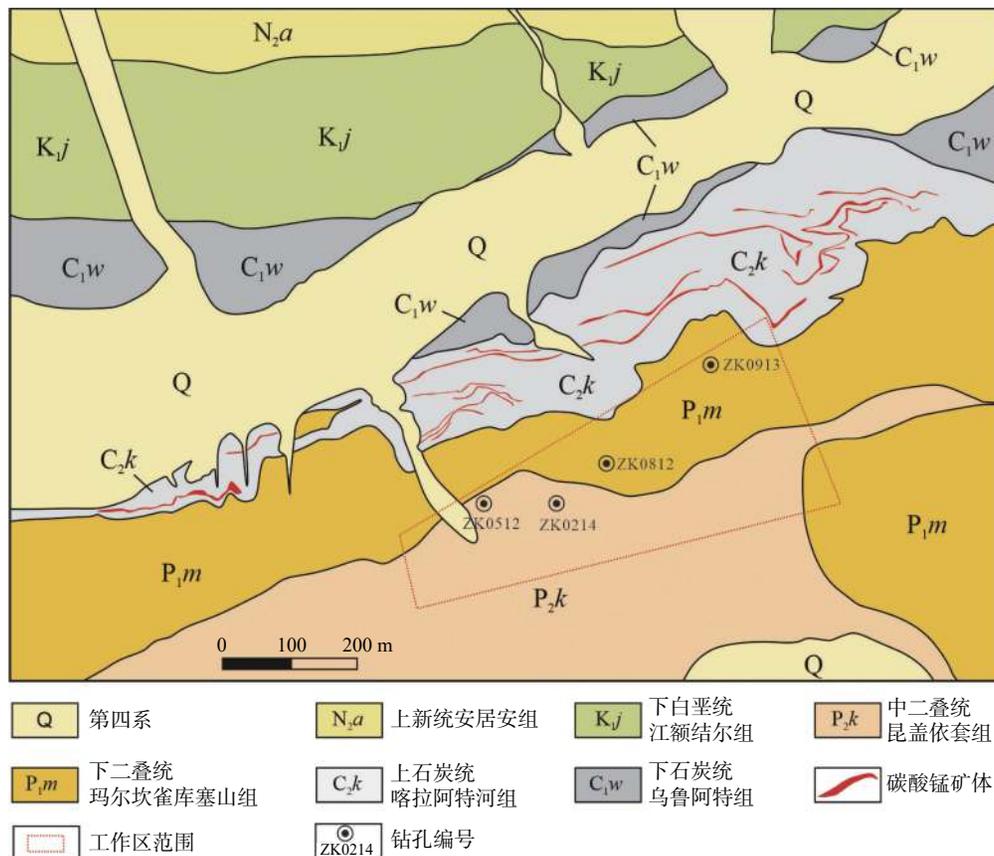


图 8 穆呼-玛尔坎土锰矿床地质图 (据董志国等, 2020a 修改)

Fig. 8 Geological map of the Muhu-Maerkantu manganese carbonate ore deposit (modified from Dong et al., 2020a)

杂的拖曳褶皱,走向上存在增厚、减薄、尖灭等变化特征。成矿期后构造破坏使对成矿结构面的厘定变得更加复杂。特别是穆呼-玛尔坎土矿区后期构造极其发育,主要表现为复杂的褶皱和断层,尤其在上石炭统含矿地层中,晚石炭世含锰岩系不同岩性段的地层重复出现,由两层碳酸锰矿层组成的玛尔坎苏含锰岩系,在穆呼矿区表现为四层碳酸锰矿层。

(3)成矿作用特征标志。玛尔坎苏锰矿带锰矿石类型比较单一,95%以上为菱锰矿矿石,局部地段偶见石英-菱锰矿、方解石-菱锰矿、褐锰矿-菱锰矿和硫锰矿-菱锰矿等矿石类型。脉石矿物组成单一,多为细脉状石英、方解石和黏土矿物。锰矿可划分为三个成矿期次,即(热水)沉积-成岩期、热液期和表生氧化期。其中,热液改造作用表现在矿体与围岩接触部位由于层间滑脱而发育的方解石-蔷薇辉石脉,矿物学上表现为近脉矿石发育的少量褐锰矿及脉体中发育的锰方解石,说明矿体受到后期热液活动的影响。同样,表生氧化作用也仅表现在锰碳酸盐矿物裂隙发育的少量纤维状软锰矿及水锰矿,并未见到大规模的氧化带,矿床整体保存原生沉积-成岩-成矿的状态。矿石结构主要为粒状结构、泥晶-微晶结构,偶见有球粒(鲕粒)结构,整体以微晶结构为主。矿石构造主要为致密块状构造、块状构造、细网脉状构造、团块状构造、土状构造和碎裂状构造。大部分矿石由于受构造作用影响,矿石中裂隙密集分布并充填了方解石,致使岩石发生分割并碎裂岩化。

玛尔坎苏锰矿带碳酸锰矿床形成于晚石炭世(320 Ma左右; Li et al., 2022)。在玛尔坎苏地区,早石炭世(350~326 Ma)弧后盆地发育初期,在伸展作用背景下形成早石炭世乌鲁阿特组(C_{1w})厚层基性火山岩(图9)。该套火山岩地层发育大量VMS型Cu(Au)矿床,如阿克塔什Cu-Au矿和萨洛依Cu矿(张晗, 2009; 慕生禄, 2016)。海底火山(热液)活动在带来Fe、Cu、Ni等金属元素的同时,还可能携带大量金属Mn元素。但跟Fe、Cu等金属元素具有的亲硫属性不同,Mn元素难以沉淀形成硫化物相(Van Cappellen and Wang, 1996; Maynard, 2010)。这样就会导致火山(热液)体系中Mn与其他亲硫元素,如Fe、Cu、Ni等发生分离(Maynard, 2010),故而被释放到海水中的热液应该具有亏损Fe、Cu、Ni等亲硫元素而富集Mn金属的组分特征(图9)。这与美国加利福尼亚地区晚侏罗世-早白垩世地层中发育的富Mn硅质岩的形成过程较为类似(Crerar et al., 1982),即大洋中脊或弧后盆地发育的热液系统可将Fe、Cu等亲硫元素优先富集在海底火山岩中,从而形成独富Mn氧化物的沉积物。玛尔坎苏晚古生代弧后盆地(次级裂陷盆地)可能为氧化-还原分层的水体,故而溶解 Mn^{2+} 可在盆地底部还原水体中大量积累。在晚石炭世早期,大规模火山活动趋于沉寂,玛尔坎苏盆地亦进入稳定沉寂阶段。由构造作用或环境气候变化而引起的区域海侵过程,将盆地底部还原水体中储藏的溶解 Mn^{2+} 带至浅层氧化水体,并在 Mn^{2+} - MnO_2 化变线与海底接触的部位以锰氧化物的形式发生沉淀,从而形成原始富Mn氧

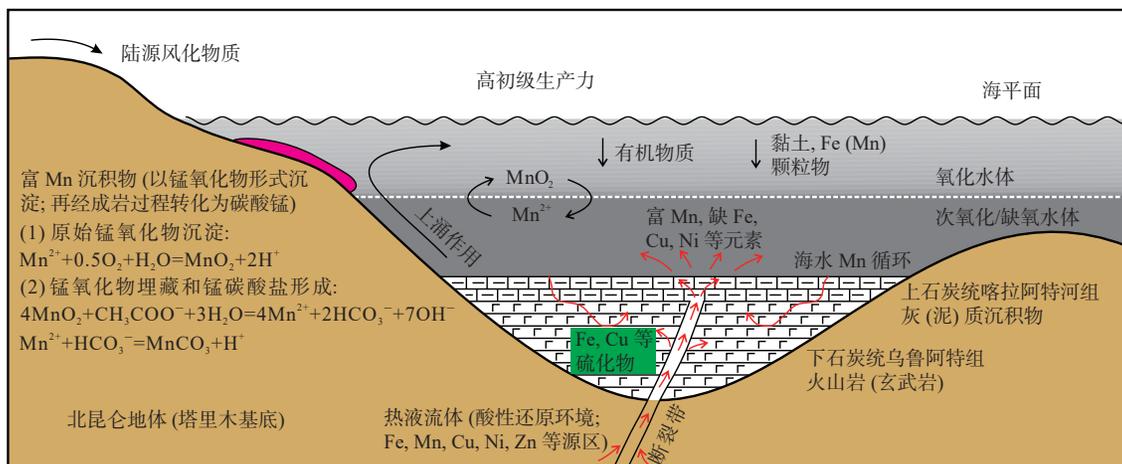


图9 海底热液过程与玛尔坎苏地区锰矿沉积模型(据 Zhang et al., 2020 修改)

Fig. 9 Qualitative model of submarine hydrothermal processes and deposition of the manganese ore deposit in the Malkansu district (modified from Zhang et al., 2020)

化物的沉积物(图 9)。这些富 Mn 沉积物随后在成岩过程中,在微生物媒介作用下,与一同埋藏的有机物质发生反应,并最终形成碳酸锰矿床而得以保存(Zhang et al., 2020)。地球化学研究表明含锰岩系富集 Cu、Pb、Zn、Ni、Co、Mo、As、Sr、Ba、Zr、Ga、Ag 等具有热水沉积特征的元素,稀土元素表现为明显的 Ce 正异常(陈登辉等, 2019)。菱锰矿 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 为 $-16.60\text{‰} \sim -1.95\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 为 $-11.51\text{‰} \sim -4.48\text{‰}$, 菱锰矿 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值介于 $0.70764 \sim 0.70790$, 平均值为 0.70781 (陈登辉等, 2022)。此外,含锰岩系的另一个显著特征是炭质含量明显偏高。在上述研究成果基础上,建立了玛尔坎苏地区锰矿成矿与找矿预测地质模型(图 9)。

3.3 找矿预测研究、靶区圈定及验证

(1)成矿地质体岩相古地理环境。鉴于上石炭统喀拉阿特河组(C_2k)炭泥质灰岩为锰矿床的成矿地质体,成矿地质体岩相古地理环境研究对指导找矿意义重大。已有的研究表明,玛尔坎苏地区石炭系至二叠系火山岩-碳酸盐岩-碎屑岩地层代表晚古生代与古特提斯洋北向俯冲作用有关的弧后盆地沉积序列(高永宝等, 2016; 张帮禄等, 2018; 张连昌等, 2020; Zhang et al., 2020)。该弧后盆地发育近东西向展布的碳酸盐台地;同时沿着台地边缘发育一些小型沉降盆地(图 10)。碳酸锰成矿作用主要发生在这些小型沉降盆地中心(高永宝等, 2016; 张

帮禄等, 2018)。成矿地质体炭泥灰岩在区域上出现两个明显的沉积中心,即奥尔托喀纳什和穆呼-玛尔坎土。对含锰岩系的沉积环境和沉积相研究表明,含锰岩系为海水较浅的碎屑滨岸相和浅海陆棚相沉积,矿体顶底板处于海水相对较浅的氧化-弱还原环境,菱锰矿则形成于海水相对较深的浅海陆棚沉积洼地(陈登辉等, 2019, 2022)。沉积相具有台地相-斜坡相-台盆相-局限台地泻湖亚相变化的特征(金川等, 2021)。根据上石炭统喀拉阿特河组(C_2k)地层剖面厚度而编绘的地层等值线图(图 11)显示,整体上该时期地层厚度具有中间厚、东西两端薄的特征。玛尔坎苏锰矿带中部琼喀纳什沟和博托彦一带,岩性以大厚层块状细晶灰岩、粉晶灰岩为主,属典型浅海碳酸盐台地沉积。而向东至穆呼-玛尔坎土矿区(地层厚 442 m),向西至奥尔托喀纳什矿区(地层厚 463 m),地层厚度相对变薄;且岩性也以薄层泥灰岩、含碳泥灰岩为主,反映深水台盆相沉积环境。

(2)综合找矿模型及靶区验证。2017—2020 年,在玛尔坎苏整装勘查区部署开展了综合研究、锰矿重点找矿区 1:50000 矿产地质专项填图、找矿预测和矿产综合检查(主要工作手段为大比例尺地质、物探、化探测量及工程验证)。在锰矿调查评价及沉积相研究基础上,2019 年和 2020 年优选穆呼-玛尔坎土已有矿业权外围的矿业权空白区作为重

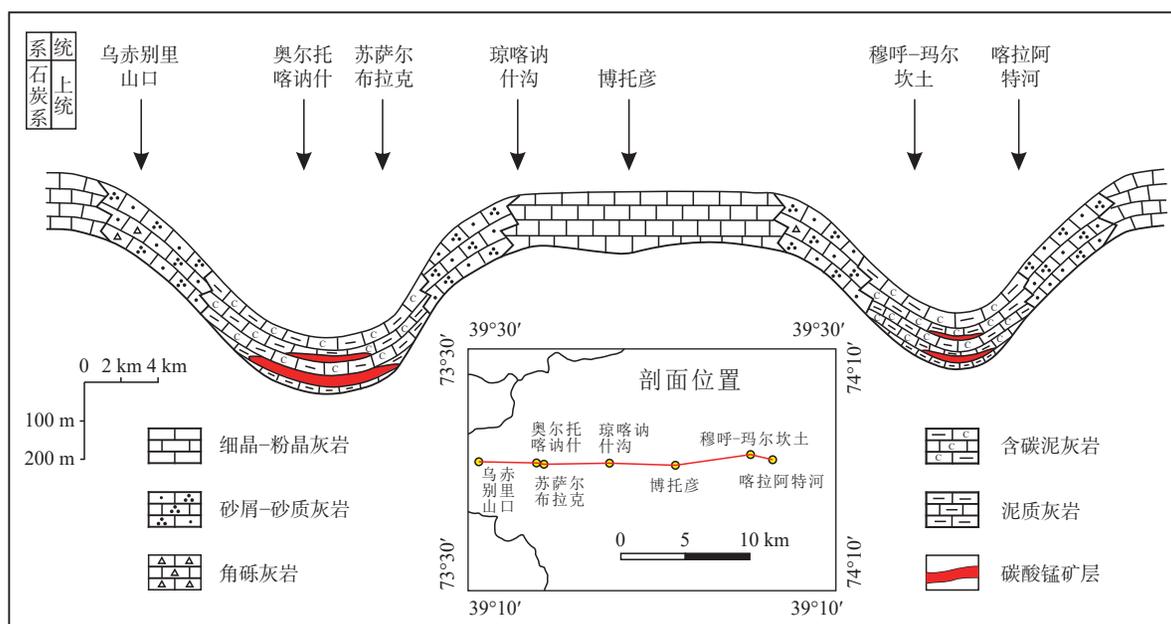


图 10 玛尔坎苏锰矿带晚石炭世地层沉积相恢复剖面图 (Zhang et al., 2020)

Fig. 10 Recovered profile of the late Carboniferous sedimentary facies in the Malkansu manganese zone (Zhang et al., 2020)

点勘查区,通过总结矿集区成矿规律和控矿条件及构建找矿预测地质模型,采用大比例尺地、物、化等手段开展矿产检查及找矿预测,在二叠系覆盖区的深部优选找矿靶位开展钻探验证,初步查明矿体的形态、规模、产状、厚度和品位等特征,提交锰矿石推断资源量及潜在矿产资源。

玛尔坎苏地区 80 余件各类岩石、矿石的物性测定表明,锰矿石极化率为 3.87%~12.96%,明显高于其他岩石的 0.36%~3.69%。锰矿石密度为 2.76~3.56 g/cm³,多大于 3 g/cm³,明显高于其他岩石的 2.51~2.70 g/cm³。因此,重力及激电异常可为深部矿体定位的有效技术方法。通过 1:10000 大比例尺专项地质填图和重力、磁法及激电剖面测量,结合找矿预测地质模型,建立了勘查区找矿预测综合模型(图 12),并对优选的靶位开展钻探验证。

2019 年度在穆呼南部地区(矿业权空白区)实施 ZK0208,见六层锰矿(化)体,单孔累计见矿厚度达 8.68 m,其中,在 764.9~770.33 m 见 I₁ 号矿体,视厚度 5.43 m,控制斜深 740 m,平均品位 29.31%,最高达 36.77%。2020 年度实施 ZK0512,在孔深 935.18~936.44 m 见真厚度 1.02 m I₁ 号锰矿体,锰品位 18.09%~19.13%,平均品位 18.72%,证明矿体向深部稳定延伸,达到深部验证目的。在 2019 年成果基础上,2020 年新疆维吾尔自治区地勘基金跟

进,采用稀疏钻孔进行控制,初步查明各锰矿体为穆呼锰矿及玛尔坎土锰矿向南部的延伸,主矿体呈层状、似层状产出,总体倾向南东,倾角 43°~49°,区内控制主矿体沿走向长度>1500 m,倾向上最大控制斜深 1085 m,埋深 494~1164 m,控矿标高在 2790~3420 m,矿体视厚度 1.20~5.97 m,平均 2.94 m,真厚度 0.85~5.15 m,锰品位 11.60%~39.93%。对 I₁ 号主矿体进行了资源量估算,共探获锰矿石推断资源量 5.56×10⁶ t,达到中型矿床规模。

4 内蒙古维拉斯托矿床找矿预测研究

4.1 矿床地质特征

大兴安岭南段地处内蒙古东南部(图 13),是古亚洲洋构造矿域、蒙古-鄂霍茨克洋构造矿域和古太平洋构造矿域的叠加区域,这种特殊的构造位置使该成矿带发生大规模的成矿作用,富含丰富的有色金属矿产资源(Ouyang et al., 2015; 江思宏等, 2018)。近年来,在大兴安岭南段,先后发现了维拉斯托 Sn-Li-Rb-Pb-Zn 矿床,以及白音查干 Sn-Pb-Zn-Ag 多金属矿,此外在白音诺尔 Pb-Zn 矿外围、浩布高 Sn-Fe 矿床外围等先后发现了新的找矿线索。大兴安岭南段地区的锡矿化可分为热液脉型、斑岩型、云英岩型或矽卡岩型。不同类型的成

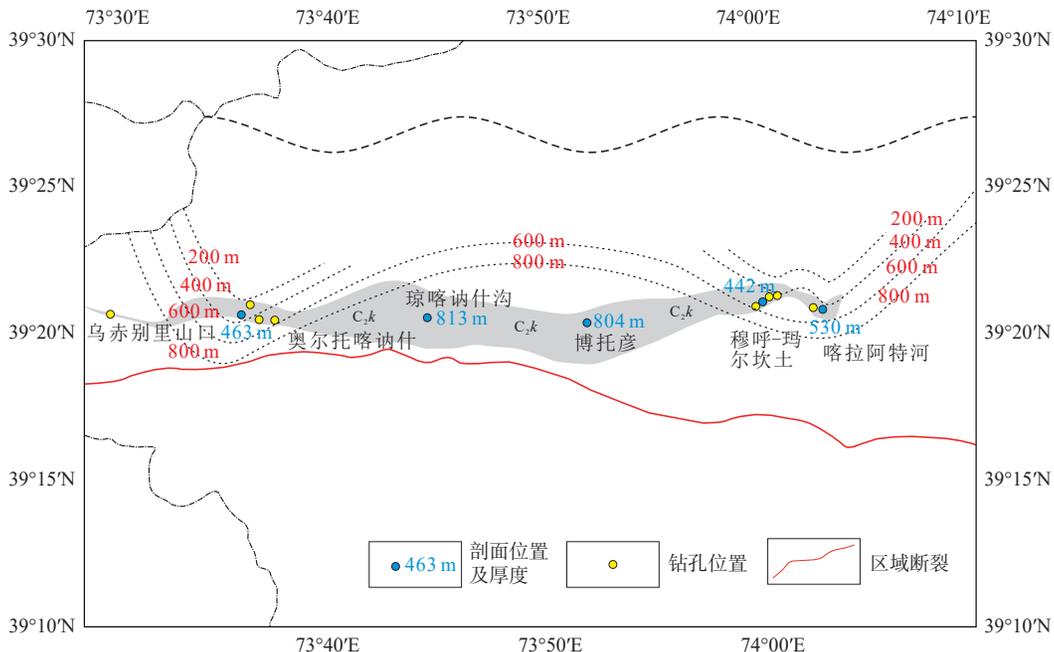


图 11 玛尔坎苏锰矿带上石炭统喀拉阿特河组(C_{2k})地层剖面分布及地层厚度等值线图

Fig. 11 Distribution map for the sections of the upper Carboniferous Kalaatehe Formation, also showing the isolines for the thickness of the strata

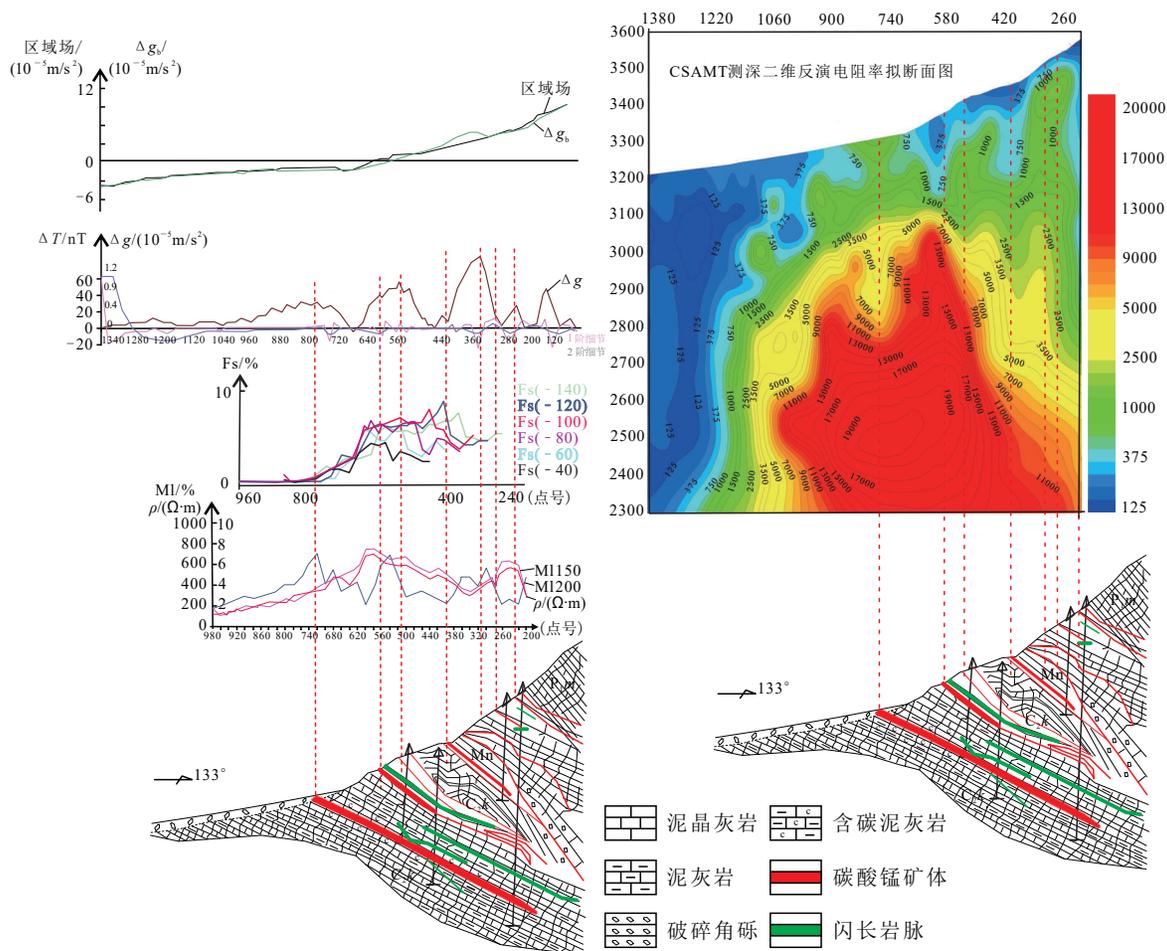


图 12 穆呼-玛尔坎土一带锰矿床找矿预测模型

Fig. 12 Prospecting prediction model of the manganese deposits in the Muhu-Maerkantu area

矿作用取决于花岗岩岩浆的演化、侵位深度、围岩、熔体和流体所流经通道的构造控制以及晚期岩浆活动中流体和围岩的相互作用等 (Romer and Kroner, 2016)。

维拉斯托锡多金属矿床是一个以锡为主, 共伴生锌、钨、铜、钼、铷、铯、铍和锂的大型矿床 (刘瑞麟等, 2018)。该矿床的矿化空间上发育明显的垂向分带 (“上脉下体”) 和水平分带 (以花岗岩体为中心的高温 W-Sn-Mo 矿化、中温 Cu-Zn 矿化、外围低温 Pb-Zn-Ag 矿化) (周振华等, 2019)。矿床中存在三种矿化类型: ①深部蚀变花岗岩型矿体, 以锡为主, 伴生锌-铷-铯; ②中部隐爆角砾岩型矿体, 以锂、锡为主, 含铜、锌; ③浅部石英脉型锡-钨-铋-铜-钼矿体, 是矿床内最具经济价值的矿体 (刘瑞麟等, 2018)。

关于维拉斯托矿床的成岩成矿时代, 已做了较多分析测试, 主要介于 138~126 Ma, 与成矿相关的石英斑岩侵位年龄介于 142~136 Ma, 成矿年龄稍

晚于成岩年龄 (Liu et al., 2016; Wang et al., 2017; 刘瑞麟等, 2018; Gao et al., 2019; 周振华等, 2019)。由此认为, Sn 多金属矿化与早白垩世中细粒石英斑岩的侵入密切相关。

流体包裹体研究表明, 维拉斯托矿床主要发育气液两相、富 CH₄ 以及含 CH₄-CO₂ 的包裹体, 成矿流体具有中温、低盐度和低密度的特点; 包裹体气相成分主要为 CO₂、CH₄ 和 H₂O (权鸿雁等, 2017; Zhu et al., 2021)。氢氧同位素分析结果表明成矿流体具有岩浆水和大气降水混合的特征 (权鸿雁等, 2017)。硫同位素具有深源特征, 表明硫主要来自岩浆 (Ouyang et al., 2014; 董锡泽等, 2019)。铅同位素值表明铅可能来自围岩地层及深源岩浆 (Ouyang et al., 2014)。地球化学资料及 Sr-Nd-Hf 同位素研究表明, 成矿石英斑岩的岩浆源区来自于伸展背景下新生下地壳的部分熔融, 石英斑岩的高分异结晶和岩浆-热液相互作用促成了维拉斯托 Sn 多金属矿床的形成 (Wang et al., 2017)。成矿机制主要为降温

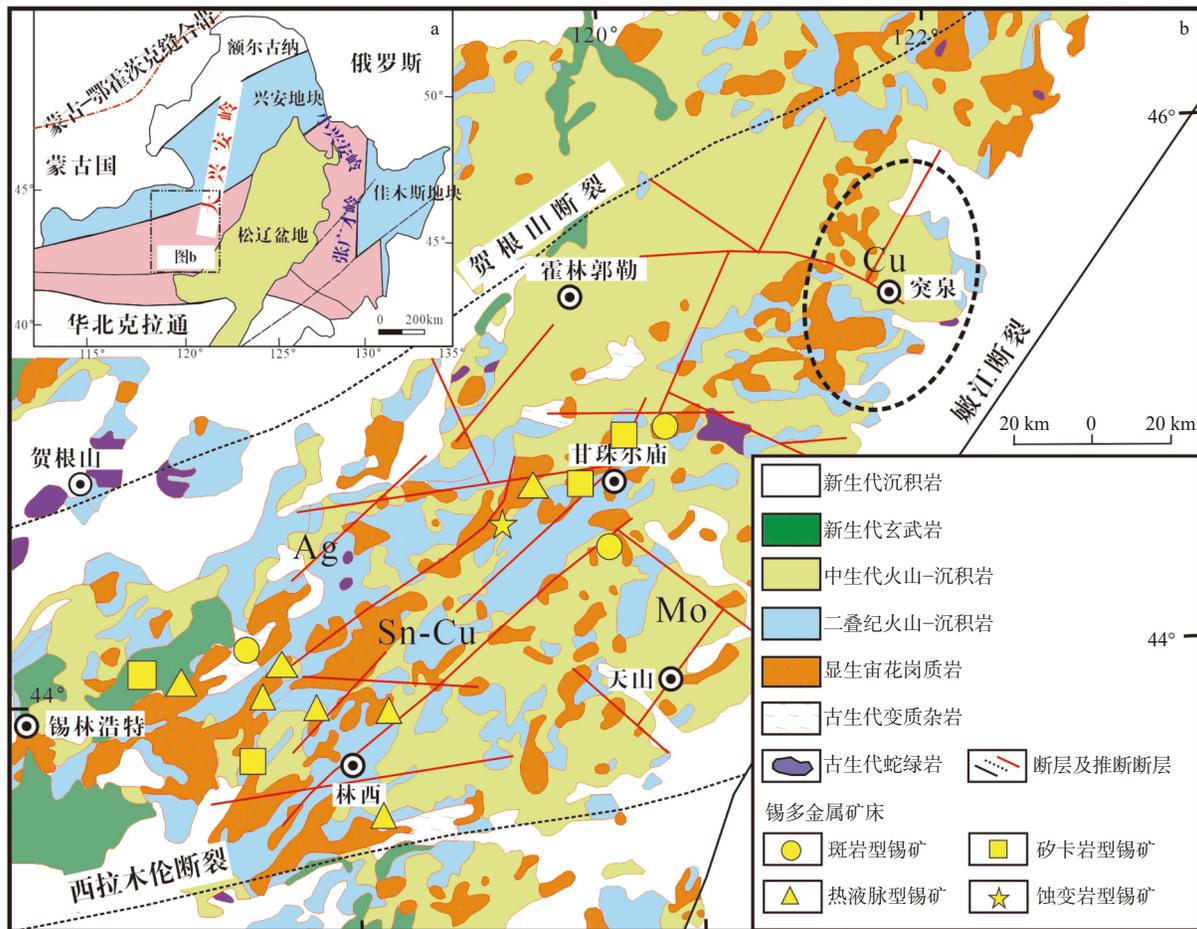


图 13 内蒙古黄岗梁-甘珠尔庙成矿带锡矿分布图 (据 Mi et al., 2020 修改)

Fig. 13 Locations of the tin polymetallic deposits in the Huanggangliang-Ganzhuermiao metallogenic belt (modified from Mi et al., 2020)

和成矿流体不混溶(梅微等, 2015)。

4.2 找矿预测地质模型构建

此次工作以勘查区找矿预测理论与方法为指导,厘定了维拉斯托锡矿床的成矿地质体、成矿构造和成矿结构面,总结了成矿作用特征标志,最终建立了找矿预测地质模型(图 14)。

成矿地质体:结合盍甲山岩体研究,认为维拉斯托成矿地质体为二长花岗岩(唐雷等, 2017)逐渐演化形成的碱长花岗岩,富 Si、高 Na,富含 Rb、F 等挥发分,为还原型高演化花岗岩。

成矿构造与成矿结构面:矿区主要发育北西向(助力可河断裂)及北北东向的两组断裂。其中,北北东向断裂是控矿构造,北西向断裂为主要导矿构造。其成矿结构面分为原生成矿结构面和次生成矿结构面。原生成矿结构面为隐爆角砾岩筒和侵入岩顶部网脉状裂隙,隐爆角砾岩发育于岩体顶部外接触带,呈陡倾筒状,与岩体过渡。

维拉斯托锡多金属矿成矿作用特征标志主要有:矿区发育五类锡铅矿体,分别为:①花岗岩

型锡矿;②矿化长英质脉;③石英脉型锡矿体;④脉状铜锌矿;⑤脉状铅锌矿。

围岩蚀变方面,靠近矿体的部位为钠长石化、硅化、天河石化、云英岩化、黄铁矿化、绢英岩化、绢云母化发育,远离矿体的部位可见高岭土化、碳酸盐化、伊利石化等。其中钠长石化、天河石化、硅化与锡矿化有关。

成矿阶段可分为四个阶段:云英岩阶段、石英+锡石+闪锌矿阶段、石英+闪锌矿+黄铜矿+方铅矿等硫化物阶段、萤石+碳酸盐阶段。

在化探异常上呈现以成矿岩体为中心向外构成 $\text{Sn}(\text{Li}, \text{Rb})+\text{Zn}(\text{W}+\text{Mo})\rightarrow\text{Cu}-\text{Zn}\rightarrow\text{Pb}+\text{Zn}+\text{Ag}\rightarrow\text{Pb}+\text{Ag}\rightarrow\text{F}$ 的分带特征(图 14;邹滔等, 2022)。

4.3 靶区圈定及验证

在勘查区找矿预测理论的指导下,内蒙古浩布高-榆树林-黄土梁锡多金属矿集区矿产地质调查项目在敖脑达坝区域内,以锡为主攻矿种,兼顾铜、铅、锌、银等,在已有工作程度和找矿预测需求

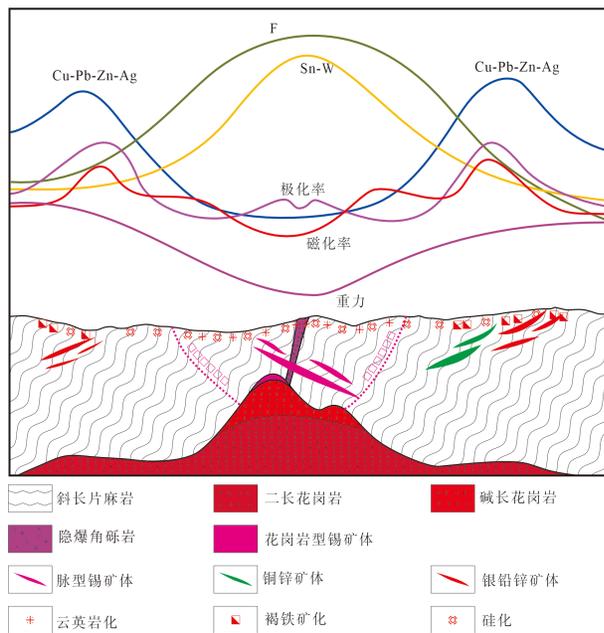


图 14 维拉斯托锡多金属床综合勘查模型 (邹滔等, 2022)

Fig. 14 Prospecting prediction model of the Weilasituo tin polymetallic deposit (Zou et al., 2022)

的基础上,以“补平填齐”的原则,开展地质、物探、化探等工作,发现在敖脑达坝向斜核部,高侵位酸性小侵入体富含挥发组分和成矿元素,多期次构造活动和含矿气液的活动为矿床的形成提供了物质来源和沉积空间。同时二叠系中统哲斯组地层构成良好的屏蔽作用,具有成矿的有利地质环境。经钻探验证,发现矿体,控制长 200 m,控制斜深 120 m,赋矿标高为 910~893 m,埋深 0~118 m,矿体总体走向 170°,倾向 260°,倾角 80°~88°。矿体厚度变化范围为 1.30~1.50 m,平均厚度 1.45 m,厚度变化系数 16.06%。矿体 Sn 品位 0.250%~0.705%,平均品位 0.412%。估算新增推断资源量及潜在矿产资源 Sn 矿石量 5.333×10^6 t,金属量 21792 t; Zn 矿石量 4.52×10^5 t,金属量 16474 t; Ag 矿石量 2.08×10^5 t,金属量 201 t; Cu 矿石量 1.94×10^5 t,金属量 4108 t。

5 结论

(1) 勘查区找矿预测以 1:10000 和 1:5000 大比例尺地质构造和矿化蚀变等地质填图为基础,通过成矿地质体、成矿结构面、成矿作用特征标志研究,构建找矿预测地质模型。结合物探和化探综合方法应用,预测推断矿体赋存位置。通过工程施工,发现并查明工业矿体(矿床)。勘查区找矿预测

是大比例尺矿产预测的重要组成部分,也是矿产勘查的主要工作,贯穿于矿产勘查(普查、详查和勘探)各个阶段。

(2) 按照勘查区找矿预测理论与方法体系,在四川拉拉铜矿、玛尔坎苏锰矿带穆呼-玛尔坎土外围及大兴安岭南段敖脑达坝地区开展找矿预测,取得了较好的效果。

致谢:衷心感谢邢树文研究员、胡健民研究员的盛情邀稿。此文是集体工作成果,参加研究工作的单位包括中国地质科学院地质力学研究所、北京矿产地质研究院、中国地质大学(北京)、中国科学院地质与地球物理研究所、吉林大学、昆明理工大学、中国地质大学(武汉)、南京大学、相关地勘单位等,在此一并致谢。感谢审稿专家提出的建设性、指导性意见。

References

- CHEN D H, SUI Q L, ZHAO X J, et al., 2019. Geology, geochemical characteristics, and sedimentary environment of Mn-bearing carbonate from the Late Carboniferous Muhu manganese deposit in West Kunlun[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 37(3): 477-490. (in Chinese with English abstract)
- CHEN D H, SUI Q L, GUO Z P, et al., 2022. Sedimentary environment of Mn-bearing carbonate from the Muhu manganese deposit in Malkansu, West Kunlun: Evidences from Fusulinids and C-O-Sr isotopes[J]. *Northwestern Geology*, 55(2): 1-13. (in Chinese with English abstract)
- CHEN G W, 1991. The characteristic and paragneiss of the spilite-keratophyre formation from Hekou group in Huili, Sichuan Province[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 11(4): 255-261. (in Chinese)
- CHEN G W, CHENG D R, YU X W, 1992. The typomorphic feature of pyrite in the copper deposit of LARLAR, Sichuan Province[J]. *Mineralogy and Petrology*, 12(3): 85-91. (in Chinese with English abstract)
- CHEN G W, XIA B, 2001. Study on the genesis of Lala copper deposit, Sichuan Province[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 20(1): 42-44. (in Chinese with English abstract)
- CHEN H, LIN L J, PANG Z S, et al., 2021. Construction and demonstration of an ore prospecting model for the Lala copper deposit in Huili, Sichuan[J]. *Earth Science Frontiers*, 28(3): 309-327. (in Chinese with English abstract)
- CHEN J P, LÜ P, WU W, et al., 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 J P, LI J, CUI N, et al., 2015. The construction and application of geological cloud under the big data background[J]. *Geological Bulletin of China*, 34(7): 1260-1265. (in Chinese with English abstract)
- CHEN W, ZHAO X F, LI X C, et al., 2019. An overview on the characterist-

- ics and origin of iron-oxide copper gold (IOCG) deposits in China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(1): 99-118. (in Chinese with English abstract)
- CHEN W T, ZHOU M F, 2012. Paragenesis, stable isotopes, and molybdenite Re-Os isotope age of the Lala iron-copper deposit, Southwest China[J]. *Economic Geology*, 107(3): 459-480.
- CHEN W T, ZHOU M F, ZHAO X F, 2013. Late Paleoproterozoic sedimentary and mafic rocks in the Hekou area, SW China: implication for the reconstruction of the Yangtze Block in Columbia[J]. *Precambrian Research*, 231: 61-77.
- CHEN W T, ZHOU M F, LI X C, et al., 2019. In situ Pb-Pb isotopic dating of sulfides from hydrothermal deposits: a case study of the Lala Fe-Cu deposit, SW China[J]. *Mineralium Deposita*, 54(5): 671-682.
- CHEN Y C, PEI R F, WANG D H, 2006. On Minerogenetic (Metallogenetic) series: Third discussion[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(10): 1501-1508. (in Chinese with English abstract)
- CHEN Y Q, CHEN Y C, ZHAO Y M, et al., 1983. Further discussion on the problems of minerogenetic series of mineral deposits[J]. *Bulletin Chinese Acad. Geol. Sci*(6): 1-64. (in Chinese with English abstract)
- CRERAR D A, NAMSON J, CHYI M S, et al., 1982. Manganiferous cherts of the Franciscan assemblage: I. General geology, ancient and modern analogues, and implications for hydrothermal convection at oceanic spreading centers[J]. *Economic Geology*, 77(3): 519-540.
- DONG X Z, YANG H, FAN J H, et al., 2019. Research on sulfur isotopes and metallogenic physicochemical conditions of Weilasituo Zn-Cu-Ag deposit, Inner Mongolia[J]. *Global Geology*, 38(4): 953-961. (in Chinese with English abstract)
- DONG Z G, ZHANG L C, DONG F Y, et al., 2020a. Geological characteristics, ore-controlling factors and metallogenic model of Muhu manganese deposit in West Kunlun, China[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 50(5): 1358-1372. (in Chinese with English abstract)
- DONG Z G, ZHANG L C, WANG C L, et al., 2020b. Progress and problems in understanding sedimentary manganese carbonate metallogenesis[J]. *Mineral Deposits*, 39(2): 237-255. (in Chinese with English abstract)
- FAN Y X, YANG Z X, 2003. Metallogenetic regularities and prediction[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press. (in Chinese)
- FANG W X, 2012. Types of geochemical lithofacies and their applications in basin[J]. *Geoscience*, 26(5): 996-1007. (in Chinese with English abstract)
- FANG W X, 2014. Geotectonic evolution and the Proterozoic iron oxide copper-gold deposits on the western margin of the Yangtze massif[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 38(4): 733-757. (in Chinese with English abstract)
- GAO X, ZHOU Z H, BREITER K, et al., 2019. Ore-formation mechanism of the Weilasituo tin-polymetallic deposit, NE China: Constraints from bulk-rock and mica chemistry, He-Ar isotopes, and Re-Os dating[J]. *Ore Geology Reviews*, 109: 163-183.
- GAO Y B, TENG J X, CHEN D H, et al., 2016. Geology, geochemistry and genesis of the Orto Karnash manganese ore deposit[J]. *Mineral Deposits*, 35(S1): 5-6. (in Chinese)
- GAO Y B, TENG J X, LI W Y, et al., 2018. Geology, geochemistry and ore genesis of the Aoertuokanashi manganese deposit, western Kunlun, Xinjiang, Northwest China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(8): 2341-2358. (in Chinese with English abstract)
- GENG Y S, KUANG H W, DU L L, et al., 2019. On the Paleo-Mesoproterozoic boundary from the breakup event of the Columbia supercontinent[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(8): 2299-2324. (in Chinese with English abstract)
- GREENTREE M R, 2007. Tectonostratigraphic analysis of the Proterozoic Kangdian Iron Oxide-Copper province, South-west China[D]. Perth: The University of Western Australia.
- GREENTREE M R, LI Z X, 2008. The oldest known rocks in south-western China: SHRIMP U-Pb magmatic crystallisation age and detrital provenance analysis of the Paleoproterozoic Dahongshan Group[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 33(5-6): 289-302.
- HAN R S, 2003. Preliminary discussion on research contents and methods of tectono-metallogenic dynamics and concealed ore orientation prognosis[J]. *Geology and Prospecting*, 39(1): 5-9. (in Chinese with English abstract)
- HAN R S, 2005. Orefield/deposit tectono-geochemical method for the localization and prognosis of concealed orebodies[J]. *Geological Bulletin of China*, 24(10-11): 978-984. (in Chinese with English abstract)
- HU H M, ZHAO P D, LI Z J, 1995. Large scale mineral prediction method[M]. Beijing: Geological Press. (in Chinese)
- HUANG C K, BAI Y, ZHU Y S, et al., 2001. The copper deposits in China[M]. Beijing: Geological Press. (in Chinese)
- JIANG S H, ZHNG L L, LIU Y F, et al., 2018. Metallogeny of Xing-Meng Orogenic Belt and some related problems[J]. *Mineral Deposits*, 37(4): 671-711. (in Chinese with English abstract)
- JIN C, XIE Y Q, LI Y F, et al., 2021. Palaeogeographic reconstruction for the Mn-bearing Formation in the Malkansu manganese deposit belt[J]. *Xinjiang Nonferrous Metal*, 44(1): 26-27. (in Chinese)
- JIN M X, SHEN S, 1998. Fluid features and metallogenic conditions in LALA copper deposit, Huili, Sichuan, China[J]. *Geological Science and Technology Information*, 17(S1): 45-48. (in Chinese with English abstract)
- LI W J, PENG Z D, DONG Z G, et al., 2022. Direct Re-Os dating of manganese carbonate ores and implications for the formation of the Ortokarnash manganese deposit, Northwest China[J]. *Economic Geology*, 117(1): 237-252.
- LI Z Q, WANG J Z, LIU J J, et al., 2003. Re-Os dating of molybdenite from LALA Fe-Oxide-Cu-Au-Mo-REE deposit, southwest China: Implications for ore genesis[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 18(1): 39-42. (in Chinese with English abstract)
- LIU R L, WU G, LI T G, et al., 2018. LA-ICP-MS cassiterite and zircon U-Pb ages of the Weilasituo tin-polymetallic deposit in the southern Great Xing'an Range and their geological significance[J]. *Earth Science Frontiers*, 25(5): 183-201. (in Chinese with English abstract)
- LIU Y F, JIANG S H, BAGAS L, 2016. The genesis of metal zonation in the Weilasituo and Bairendaba Ag-Zn-Pb-Cu-(Sn-W) deposits in the shallow part of a porphyry Sn-W-Rb system, Inner Mongolia, China[J]. *Ore Geo-*

- logy Reviews, 75: 150-173.
- MAO J W, ZHANG Z H, PEI R F, 2012. An introduction of mineral deposits models in China[M]. Beijing: Geological Press. (in Chinese)
- MAYNARD J B, 2010. The chemistry of manganese ores through time: a signal of increasing diversity of earth-surface environments[J]. *Economic Geology*, 105(3): 535-552.
- MEI W, LÜ X B, TANG R K, et al., 2015. Ore-forming fluid and its evolution of Bairendaba-Weilasituo deposits in west slope of southern Great Xing'an Range[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 40(1): 145-162. (in Chinese with English abstract)
- MI K F, LÜ Z C, YAN T J, et al., 2020. Zircon geochronological and geochemical study of the Baogaigou Tin deposits, southern Great Xing'an Range, Northeast China: Implications for the timing of mineralization and ore genesis[J]. *Geological Journal*, 55(7): 5062-5081.
- MU S L, 2016. Volcanic rocks tectonic environments and metallogenesis of typical mineral deposits in Kungai Mountains, West Kunlun[D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 1-186. (in Chinese with English abstract)
- OUYANG H G, MAO J W, SANTOSH M, et al., 2014. The Early Cretaceous Weilasituo Zn-Cu-Ag vein deposit in the southern Great Xing'an Range, northeast China: Fluid inclusions, H, O, S, Pb isotope geochemistry and genetic implications[J]. *Ore Geology Reviews*, 56: 503-515.
- OUYANG H G, MAO J W, ZHOU Z H, et al., 2015. Late Mesozoic metallogeny and intracontinental magmatism, southern Great Xing'an Range, northeastern China[J]. *Gondwana Research*, 27(3): 1153-1172.
- QIN Y, WEN G G, LI D P, 2014. Geological and geochemical characteristics of high-grade manganese ore deposit in Aketao County, west Kunlun, Xinjiang Province, and its prospecting significance[J]. *Western Prospecting Project*, 26(8): 112-115. (in Chinese)
- QIU L, ZHOU J, LIU X W, et al., 2016. Application of integrated geophysical methods to M163-1 aeromagnetic anomaly inspection of Lala, Huili, Sichuan province[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 38(5): 603-609. (in Chinese with English abstract)
- QUAN H Y, CAI W Y, ZHANG X B, et al., 2017. Characteristics of fluid inclusions and genesis of Weilasituo Pb-Zn deposit, Inner Mongolia[J]. *Global Geology*, 36(1): 105-117. (in Chinese with English abstract)
- ROMER R L, KRONER U, 2016. Phanerozoic tin and tungsten mineralization: Tectonic controls on the distribution of enriched protoliths and heat sources for crustal melting[J]. *Gondwana Research*, 31: 60-95.
- SHENTU B Y, 1997. Geological and geochemical characteristics and metallogenic model for the Lalachang copper deposit in Huili, Sichuan[J]. *Tethyan Geology*(21): 112-126. (in Chinese with English abstract)
- SINGER D A, MENZIE W D, 2010. Quantitative mineral resource assessments: An integrated approach[M]. Oxford: Oxford University Press.
- SUN J Y, YU W J, TANG Z X, et al., 2019. Discovery of the ore-bearing mafic layered sill in the Lala Fe-Cu ore district, western Sichuan province, China and its implications for petrogenesis and metallogenesis[J]. *Earth Science Frontiers*, 26(1): 313-325. (in Chinese with English abstract)
- TANG L, LIU J J, ZHU X Y, et al., 2017. Geochemical characteristics and geological implication of Kuijiashan granite pluton, Inner Mongolia[J]. *Mineral Exploration*, 8(6): 1031-1043. (in Chinese with English abstract)
- VAN CAPPELLEN P, WANG Y F, 1996. Cycling of iron and manganese in surface sediments: a general theory for the coupled transport and reaction of carbon, oxygen, nitrogen, sulfur, iron, and manganese[J]. *American Journal of Science*, 296(3): 197-243.
- WANG F X, BAGAS L, JIANG S H, et al., 2017. Geological, geochemical, and geochronological characteristics of Weilasituo Sn-polymetal deposit, Inner Mongolia, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 80: 1206-1229.
- WANG G W, ZHANG Z Q, LI R X, et al., 2021. Resource prediction and assessment based on 3D/4D big data modeling and deep integration in key ore districts of North China[J]. *Science China Earth Sciences*, 64(9): 1590-1606.
- WANG S C, 2010. The new development of theory and method of synthetic information mineral resources prognosis[J]. *Geological Bulletin of China*, 29(10): 1399-1403. (in Chinese with English abstract)
- WHITE N C, HEDENQUIST J W, 1995. Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration[J]. *SEG Newsletter*(23): 1-9.
- XIAO K Y, ZHANG X H, WANG S L, et al., 2000a. GIS assessment system of mineral resources[M]. Beijing: Geological Press. (in Chinese)
- XIAO K Y, ZHU Y S, SONG G Y, 2000b. GIS quantitative assessment and prospecting of mineral resources[J]. *Geology in China*(7): 29-32. (in Chinese)
- XIAO K Y, DING J H, LIU R, 2006. The discussion of three-part form of non-fuel mineral resource assessment[J]. *Geological Review*, 52(6): 793-798. (in Chinese with English abstract)
- XIAO K Y, LI N, SUN L, et al., 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 K Y, SUN L, LI N, et al., 2015. Mineral resources assessment under the thought of big data[J]. *Geological Bulletin of China*, 34(7): 1266-1272. (in Chinese with English abstract)
- YE T Z, 2013. Theoretical framework of methodology of deposit modeling and integrated geological information for mineral resource potential assessment[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 43(4): 1053-1072. (in Chinese with English abstract)
- YE T Z, LÜ Z C, PANG Z S, et al., 2014. Introduction of Prospecting prediction theory and method in exploration area[M]. Beijing: Geological Press. (in Chinese)
- YE T Z, WEI C S, WANG Y W, et al., 2017. Inclusion of Prospecting prediction theory and method in exploration area[M]. Beijing: Geological Press. (in Chinese)
- YU P P, CHEN J P, CHAI F S, et al., 2015. Research on model-driven quantitative prediction and evaluation of mineral resources based on geological big data concept[J]. *Geological Bulletin of China*, 34(7): 1333-1343. (in Chinese with English abstract)
- YU X F, LÜ Z C, SUN H R, et al., 2020. Metallogenic system of integrated exploration area and new exploration progress[J]. *Journal of Jilin Uni-*

- versity (Earth Science Edition), 50(5): 1261-1288. (in Chinese with English abstract)
- ZHAI M G, HU B, 2021. Thinking to state security, international competition and national strategy of mineral resources[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 43(1): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- ZHAI Y S, 2000. Metallogenic system and its evolution: From preliminary practice to theoretical consideration[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 25(4): 333-339. (in Chinese with English abstract)
- ZHAI Y S, 2003a. Research on metallogenic system[J]. *Geological Survey and Research*, 26(2): 65-71. (in Chinese with English abstract)
- ZHAI Y S, 2003b. Research on metallogenic system[J]. *Geological Survey and Research*, 26(3): 129-135. (in Chinese with English abstract)
- ZHAI Y S, DENG J, PENG R M, et al., 2010. Metallogenic system[M]. Beijing: Geological Press. (in Chinese)
- ZHANG B L, ZHANG L C, FENG J, et al., 2018. Genesis of the large-scale Orto Karnash manganese carbonate deposit in the Malkansu District, western Kunlun: Evidence from geological features[J]. *Geological Review*, 64(2): 361-377. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG B L, WANG C L, ROBBINS L J, et al., 2020. Petrography and geochemistry of the Carboniferous Ortokarnash manganese deposit in the western Kunlun mountains, Xinjiang Province, China: Implications for the depositional environment and the origin of mineralization[J]. *Economic Geology*, 115(7): 1559-1588.
- ZHANG H, 2009. Study on geological features and ore genesis of Aktash and Saluyi VMS deposits, West Kunlun[D]. Jilin: Jilin University, 1-74. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG L C, ZHANG B L, DONG Z G, et al., 2020. Tectonic setting and metallogenetic conditions of Carboniferous Malkansu giant manganese belt in west Kunlun orogen[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 50(5): 1340-1357. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG S H, LIN Z Y, 2021. Technological and methodological changes of (uranium) mineral resources prediction in big data era[J]. *Uranium Geology*, 37(5): 913-919. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO P D, HU W L, LI Z J, 1983. The theory and practices of statistical prediction for mineral deposits[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 8(4): 107-121. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO P D, CHI S D, 1991. A preliminary view on geological anomaly[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 16(3): 241-248. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO P D, LI Z J, HU G D, 1992. Statistical prediction of three-dimensional deposits in key metallogenic areas: a case study in the Yueshan district[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press. (in Chinese)
- ZHAO P D, MENG X G, 1993. Geological anomaly and mineral prediction[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 18(1): 39-47. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO P D, HU W L, LI Z J, 1994. Statistical prediction of mineral deposits[M]. 2nd ed. Beijing: Geological Press. (in Chinese)
- ZHAO P D, WANG J G, RAO M H, et al., 1995. Geologic anomaly of China[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 20(2): 117-127. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO P D, CHI S D, CHEN Y Q, 1996. A thorough investigation of geo-anomaly: A basis of metallogenic prognosis[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2(4): 361-373. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO P D, CHEN Y Q, 1998. The main way of geo-anomaly location of ore body[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 23(2): 111-114. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO P D, 2000. "Three Components" quantitative mineral prediction[M]. Beijing: China University of Geosciences Press. (in Chinese)
- ZHAO P D, CHEN J P, CHEN J G, 2001. On diversity of mineralization and the spectrum of ore deposits[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 26(2): 111-117. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO P D, 2002. "Three-Component" quantitative resource prediction and assessments: theory and practice of digital mineral prospecting[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 27(5): 482-489. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO P D, CHEN J P, ZHANG S T, 2003. The new development of "Three Components" quantitative mineral prediction[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(2): 455-463. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO P D, 2007. Quantitative mineral prediction and deep mineral exploration[J]. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 1-10. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO P D, 2015. Digital mineral exploration and quantitative evaluation in the big data age[J]. *Geological Bulletin of China*, 34(7): 1255-1259. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO P D, CHEN Y Q, 2021. Digital geology and quantitative mineral exploration[J]. *Earth Science Frontiers*, 28(3): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO X F, ZHOU M F, LI J W, et al., 2010. Late Paleoproterozoic to early Mesoproterozoic Dongchuan Group in Yunnan, SW China: implications for tectonic evolution of the Yangtze Block[J]. *Precambrian Research*, 182(1-2): 57-69.
- ZHAO X F, ZHOU M F, 2011. Fe-Cu deposits in the Kangdian region, SW China: a Proterozoic IOCG (iron-oxide-copper-gold) metallogenic province[J]. *Mineralium Deposita*, 46(7): 731-747.
- ZHAO X F, ZHOU M F, HITZMAN M W, et al., 2012. Late Paleoproterozoic to early Mesoproterozoic Tangdan sedimentary rock-hosted stratabound copper deposit, Yunnan Province, Southwest China[J]. *Economic Geology*, 107(2): 357-375.
- ZHAO X F, ZHOU M F, LI J W, et al., 2013. Sulfide Re-Os and Rb-Sr isotope dating of the Kangdian IOCG metallogenic province, southwest China: implications for regional metallogenesis[J]. *Economic Geology*, 108(6): 1489-1498.
- ZHOU J Y, ZHENG R C, ZHU Z M, et al., 2008. Geochemical characteristics of trace elements of pyrite and its implications to the metallogenesis in the LALA copper deposit[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 28(3): 64-71. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU J Y, MAO J W, ZHU Z M, et al., 2009. The fluid process of Lala iron

- oxide gold-copper deposit: constrain from trace elements of pyrite from different mineral stage[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 29(S1): 272-273. (in Chinese)
- ZHOU M F, ZHAO X F, CHEN W T, et al., 2014. Proterozoic Fe-Cu metallogeny and supercontinental cycles of the southwestern Yangtze Block, southern China and northern Vietnam[J]. *Earth-Science Reviews*, 139: 59-82.
- ZHOU Y Z, CHEN S, ZHANG Q, et al., 2018. Advances and prospects of big data and mathematical geoscience[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(2): 255-263. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU Z H, GAO X, OUYANG H G, et al., 2019. Formation mechanism and intrinsic genetic relationship between tin-tungsten-lithium mineralization and peripheral lead-zinc-silver-copper mineralization: exemplified by Weilasituo tin-tungsten-lithium polymetallic deposit, Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, 38(5): 1004-1022. (in Chinese with English abstract)
- ZHU K Y, JIANG S Y, SU H M, et al., 2021. In situ geochemical analysis of multiple generations of sphalerite from the Weilasituo Sn-Li-Rb-Cu-Zn ore field (Inner Mongolia, northeastern China): Implication for critical metal enrichment and ore-forming process[J]. *Ore Geology Reviews*, 139: 104473.
- ZHU Y S, XIAO K Y, DING P F, et al., 1997. *Methods of mineral resources prediction*[M]. Beijing: Geological Press. (in Chinese)
- ZHU Z M, ZENG L X, ZHOU J Y, et al., 2009. Lala iron oxide-copper-gold deposit in Sichuan province: evidences from mineralography[J]. *Geological Journal of China Universities*, 15(4): 485-495. (in Chinese with English abstract)
- ZHU Z M, SUN Y L, 2013. Direct Re-Os dating of chalcopyrite from the Lala IOCG deposit in the Kangdian Copper Belt, China[J]. *Economic Geology*, 108(4): 871-882.
- ZHU Z M, TAN H Q, LIU Y D, et al., 2018. Multiple episodes of mineralization revealed by Re-Os molybdenite geochronology in the Lala Fe-Cu deposit, SW China[J]. *Mineralium Deposita*, 53(3): 311-322.
- ZOU T, ZHU X Y, YANG S S, et al., 2022. A comprehensive model of tin polymetallic ore prospecting and exploration in the southern Great Xing' an Range: a case study of the ore-forming system of Weilasituo polymetallic ore[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(2): 673-690. (in Chinese with English abstract)
- ### 附中文参考文献
- 陈登辉, 隋清霖, 赵晓健, 等, 2019. 西昆仑穆呼锰矿晚石炭世含锰碳酸盐岩地质地球化学特征及其沉积环境[J]. *沉积学报*, 37(3): 477-490.
- 陈登辉, 隋清霖, 郭周平, 等, 2022. 西昆仑玛尔坎苏地区穆呼锰矿含锰岩系沉积环境: 来自琥珀类化石及碳酸盐岩碳、氧、锶同位素证据[J]. *西北地质*, 55(2): 1-13.
- 陈根文, 1991. 会理地区河口群细碧-角斑岩系特征及成因探讨[J]. *四川地质学报*, 11(4): 255-261.
- 陈根文, 程德荣, 余孝伟, 1992. 四川拉拉铜矿黄铁矿标型特征研究[J]. *矿物岩石*, 12(3): 85-91.
- 陈根文, 夏斌, 2001. 四川拉拉铜矿床成因研究[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 20(1): 42-44.
- 陈辉, 林鲁军, 庞振山, 等, 2021. 四川会理拉拉铜矿找矿预测模型构建与找矿示范[J]. *地学前缘*, 28(3): 309-327.
- 陈建平, 吕鹏, 吴文, 等, 2007. 基于三维可视化技术的隐伏矿床预测[J]. *地学前缘*, 14(5): 54-62.
- 陈建平, 李婧, 崔宁, 等, 2015. 大数据背景下地质云的构建与应用[J]. *中国地质通报*, 34(7): 1260-1265.
- 陈伟, 赵新福, 李晓春, 等, 2019. 中国铁氧化物-铜-金 (IOCG) 矿床的基本特征及研究进展[J]. *岩石学报*, 35(1): 99-118.
- 陈毓川, 裴家富, 王登红, 2006. 三论矿床的成矿系列问题[J]. *地质学报*, 80(10): 1501-1508.
- 陈裕琪, 陈毓川, 赵一鸣, 等, 1983. 再论矿床的成矿系列问题[J]. *中国地质科学院院报* (6): 1-64.
- 董锡泽, 贺颖, 樊金虎, 等, 2019. 内蒙古维拉斯托 Zn-Cu-Ag 矿床硫同位素及成矿物理化学条件研究[J]. *世界地质*, 38(4): 953-961.
- 董志国, 张连昌, 董飞羽, 等, 2020a. 西昆仑穆呼锰矿床地质特征、控矿因素及成矿模式[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 50(5): 1358-1372.
- 董志国, 张连昌, 王长乐, 等, 2020b. 沉积碳酸锰矿床研究进展及有待深入探讨的若干问题[J]. *矿床地质*, 39(2): 237-255.
- 范永香, 阳正熙, 2003. *成矿规律与成矿预测*[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社.
- 方维莹, 2012. 地球化学岩相学类型及其在沉积盆地分析中应用[J]. *现代地质*, 26(5): 996-1007.
- 方维莹, 2014. 论扬子地块西缘元古宙铁氧化物铜金型矿床与大地构造演化[J]. *大地构造与成矿学*, 38(4): 733-757.
- 高永宝, 滕家欣, 陈登辉, 等, 2016. 西昆仑奥尔托喀纳什锰矿地质、地球化学及成因[J]. *矿床地质*, 35(S1): 5-6.
- 高永宝, 滕家欣, 李文渊, 等, 2018. 新疆西昆仑奥尔托喀纳什锰矿地质、地球化学及成因[J]. *岩石学报*, 34(8): 2341-2358.
- 耿元生, 旷红伟, 杜利林, 等, 2019. 从哥伦比亚超大陆裂解事件论古/中元古代的界限[J]. *岩石学报*, 35(8): 2299-2324.
- 韩润生, 2003. 初论构造动力学及其隐伏矿定位预测研究内容和方法[J]. *地质与勘探*, 39(1): 5-9.
- 韩润生, 2005. 隐伏矿定位预测的矿田(床)构造地球化学方法[J]. *地质通报*, 24(10-11): 978-984.
- 胡惠民, 赵鹏大, 李紫金, 1995. *大比例尺成矿预测方法*[M]. 北京: 地质出版社.
- 黄崇珂, 白治, 朱裕生, 等, 2001. *中国铜矿床*[M]. 北京: 地质出版社.
- 江思宏, 张莉莉, 刘翼飞, 等, 2018. 兴蒙造山带成矿规律及若干科学问题[J]. *矿床地质*, 37(4): 671-711.
- 金川, 谢月桥, 李玉飞, 等, 2021. 西昆仑玛尔坎苏锰矿带含锰岩系沉积相分布特征[J]. *新疆有色金属*, 44(1): 26-27.
- 金明霞, 沈苏, 1998. 四川会理拉拉铜矿床流体特征及成矿条件研究[J]. *地质科技情报*, 17(S1): 45-48.
- 李泽琴, 王奖臻, 刘家军, 等, 2003. 拉拉铁氧化物-铜-金-钼-稀土矿床 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. *地质找矿论丛*, 18(1): 39-42.
- 刘瑞麟, 武广, 李铁刚, 等, 2018. 大兴安岭南段维拉斯托锡多金属矿床 LA-ICP-MS 锡石和锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *地学前缘*

- 缘, 25(5): 183-201.
- 毛景文, 张作衡, 裴荣富, 2012. 中国矿床模型概论[M]. 北京: 地质出版社.
- 梅微, 吕新彪, 唐然坤, 等, 2015. 大兴安岭南段西坡拜仁达坝-维拉斯托矿床成矿流体特征及其演化[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 40(1): 145-162.
- 慕生禄, 2016. 西昆仑仑盖山火山岩构造环境与典型矿床研究[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 1-186.
- 覃英, 温官国, 李代平, 2014. 新疆西昆仑阿克陶地区优质富锰矿的发现及意义[J]. 西部探矿工程, 26(8): 112-115.
- 邱林, 周军, 刘晓葳, 等, 2016. 综合物探在四川会理拉拉 M163-1 航磁异常查证中的应用[J]. 物探化探计算技术, 38(5): 603-609.
- 权鸿雁, 蔡文艳, 张雪冰, 等, 2017. 内蒙古维拉斯托铅锌矿床流体包裹体特征及矿床成因研究[J]. 世界地质, 36(1): 105-117.
- 申屠保涌, 1997. 四川会理拉拉厂铜矿床地质地球化学特征及成矿模式[J]. 特提斯地质(21): 112-126.
- 孙君一, 于文佳, 唐泽勋, 等, 2019. 川西拉拉 Fe-Cu 矿区含矿镁铁质层状岩席的首次发现及其成岩成矿意义[J]. 地学前缘, 26(1): 313-325.
- 唐雷, 刘家军, 祝新友, 等, 2017. 内蒙古盩甲山岩体岩石地球化学特征及地质意义[J]. 矿产勘查, 8(6): 1031-1043.
- 王功文, 张智强, 李瑞喜, 等, 2021. 华北重点矿集区大数据三维/四维建模与深层次集成的资源预测评价[J]. 中国科学: 地球科学, 51(9): 1594-1610.
- 王世称, 2010. 综合信息矿产预测理论与方法体系新进展[J]. 地质通报, 29(10): 1399-1403.
- 肖克炎, 张晓华, 王四龙, 等, 2000a. 矿产资源 GIS 评价系统[M]. 北京: 地质出版社.
- 肖克炎, 朱裕生, 宋国耀, 2000b. 矿产资源 GIS 定量评价[J]. 中国地质(7): 29-32.
- 肖克炎, 丁建华, 刘锐, 2006. 美国“三步式”固体矿产资源潜力评价方法评述[J]. 地质论评, 52(6): 793-798.
- 肖克炎, 李楠, 孙莉, 等, 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]. 地质学报, 36(3): 229-236.
- 肖克炎, 孙莉, 李楠, 等, 2015. 大数据思维下的矿产资源评价[J]. 中国地质通报, 34(7): 1266-1272.
- 叶天竺, 2013. 矿床模型综合地质信息预测技术方法理论框架[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 43(4): 1053-1072.
- 叶天竺, 吕志成, 庞振山, 等, 2014. 勘查区找矿预测理论与方法(总论)[M]. 北京: 地质出版社.
- 叶天竺, 韦昌山, 王玉往, 等, 2017. 勘查区找矿预测理论与方法(各论)[M]. 北京: 地质出版社.
- 于萍萍, 陈建平, 柴福山, 等, 2015. 基于地质大数据理念的模型驱动矿产资源定量预测[J]. 地质通报, 34(7): 1333-1343.
- 于晓飞, 吕志成, 孙海瑞, 等, 2020. 全国整装勘查区成矿系统研究与矿产勘查新进展[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 50(5): 1261-1288.
- 翟明国, 胡波, 2021. 矿产资源国家安全、国际争夺与国家战略之思考[J]. 地球科学与环境学报, 43(1): 1-11.
- 翟裕生, 2000. 成矿系统及其演化: 初步实践到理论思考[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 25(4): 333-339.
- 翟裕生, 2003a. 成矿系统研究与找矿[J]. 地质调查与研究, 26(2): 65-71.
- 翟裕生, 2003b. 成矿系统研究与找矿[J]. 地质调查与研究, 26(3): 129-135.
- 翟裕生, 邓军, 彭润民, 等, 2010. 成矿系统论[M]. 北京: 地质出版社.
- 张帮禄, 张连昌, 冯京, 等, 2018. 西昆仑玛尔坎苏地区奥尔托喀纳什大型碳酸锰矿床地质特征及成因探讨[J]. 地质论评, 64(2): 361-377.
- 张晗, 2009. 西昆仑阿克塔什、萨落依 VMS 矿床地质特征及成因[D]. 吉林: 吉林大学, 1-74.
- 张连昌, 张帮禄, 董志国, 等, 2020. 西昆仑玛尔坎苏石炭纪大型锰矿带构造背景与成矿条件[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 50(5): 1340-1357.
- 张士红, 林子瑜, 2021. 大数据时代(铀)成矿预测技术方法变革[J]. 铀矿地质, 37(5): 913-919.
- 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, 8(4): 107-121.
- 赵鹏大, 池顺都, 1991. 初论地质异常[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 16(3): 241-248.
- 赵鹏大, 李紫金, 胡光道, 1992. 重点成矿区三维立体矿床统计预测: 以安徽月山地区为例[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 赵鹏大, 孟宪国, 1993. 地质异常与矿产预测[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 18(1): 39-47.
- 赵鹏大, 胡旺亮, 李紫金, 1994. 矿床统计预测[M]. 2版. 北京: 地质出版社.
- 赵鹏大, 王京贵, 饶明辉, 等, 1995. 中国地质异常[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 20(2): 117-127.
- 赵鹏大, 池顺都, 陈永清, 1996. 查明地质异常: 成矿预测的基础[J]. 高校地质学报, 2(4): 361-373.
- 赵鹏大, 陈永清, 1998. 地质异常矿体定位的基本途径[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 23(2): 111-114.
- 赵鹏大, 2000. “三联式”定量成矿预测[M]. 北京: 中国地质大学出版社.
- 赵鹏大, 陈建平, 陈建国, 2001. 成矿多样性与矿床谱系[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 26(2): 111-117.
- 赵鹏大, 2002. “三联式”资源定量预测与评价: 数字找矿理论与实践探讨[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 27(5): 482-489.
- 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, 2007. 成矿定量预测与深部找矿[J]. 地学前缘, 14(5): 1-10.
- 赵鹏大, 2015. 大数据时代数字找矿与定量评价[J]. 地质通报, 34(7): 1255-1259.
- 赵鹏大, 陈永清, 2021. 数字地质与数字矿产勘查[J]. 地学前缘, 28(3): 1-5.
- 周家云, 郑荣才, 朱志敏, 等, 2008. 拉拉铜矿黄铁矿微量元素地球化学特征及其成因意义[J]. 矿物岩石, 28(3): 64-71.
- 周家云, 毛景文, 朱志敏, 等, 2009. 拉拉铁氧化物-铜-金矿床(IOCG)的流体过程—不同矿化阶段黄铁矿微量元素约束[J]. 矿物学报, 29(S1): 272-273.

周永章,陈烁,张旗,等,2018.大数据与数学地球科学研究进展:大数据与数学地球科学专题代序[J].岩石学报,34(2):255-263.

周振华,高旭,欧阳荷根,等,2019.锡钨锂矿化与外围脉状铅锌银铜矿化的内在成因关系和形成机制:以内蒙古维拉斯托锡钨锂多金属矿床为例[J].矿床地质,38(5):1004-1022.

朱裕生,肖克炎,丁鹏飞,等,1997.成矿预测方法[M].北京:地质出版社.

朱志敏,曾令熙,周家云,等,2009.四川拉拉铁氧化物铜金矿床(IOCG)形成的矿相学证据[J].高校地质学报,15(4):485-495.

邹滔,祝新友,杨尚松,等,2022.大兴安岭南段锡多金属矿找矿勘查综合模型:以维拉斯托锡多金属矿成矿系统为例[J].地质学报,96(2):673-690.

获奖者简历:

吕志成,中国地质调查发展研究中心二级研究员。2021年获得第17次李四光地质科学奖科研奖。现任中国地质调查局发展研究中心(自然资源部矿产勘查技术指导中心)副总工程师。长期从事科研工作,作为学术带头人之一,创建了以成矿地质体、成矿构造和成矿结构面、成矿作用特征标志为核心的勘查区找矿预测理论,构建了我国砂岩型铀矿等25种矿床类型的找矿预测模型。作为主要负责人,创建勘查区找矿预测技术方法体系,包括矿山尺度资源潜力评价与评估技术、区域尺度矿产地质调查技术标准、复杂矿区关键找矿技术体系等。创建的理论和技术方法体系在老矿山深部和外围找矿、新区找矿等方面取得突破,取得显著经济和社会效益。出版专著7部,发表学术论文94篇,其中SCI、EI收录20余篇。获国家科技进步二等奖1项,省部级一等奖5项、二等奖7项。2011年获原国土资源部全国危机矿山找矿先进个人、2012年获原国土资源部青藏高原理论创新与找矿突破先进个人、2019年入选自然资源部高层次创新人才梯队。

