

· 专题 7: 造山带成矿作用 ·

斑岩型钼矿：新类型及成矿控制因素

李诺

中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆矿产资源研究中心 新疆 乌鲁木齐 830011

目前已有的钼金属成矿理论主要基于北美科迪勒拉成矿带典型矿床研究而建立, 共识这一地区斑岩钼矿可分为两类: 一类为“弧后裂谷型”, 形成于大洋板块俯冲诱发的弧后拉张的初始阶段, 成矿岩体属高分异的流纹质-碱性岩浆, 成矿系统富 F, Mo 品位较高, 以美国的 Climax, Urad-Henderson 为代表。另一类为“陆缘弧型”, 形成于陆缘弧背景, 成矿岩体属分异程度较低的钙碱性岩浆, 成矿系统贫 F, Mo 品位较低, 代表了斑岩铜-钼-金系列的富钼端元, 以加拿大的 Endako 钼矿床为代表。基于秦岭-大别等地斑岩钼矿的系统解剖, 我国学者发现这些燕山期斑岩钼矿的成矿斑岩体主要源自中下地壳的部分熔融。成矿流体以富 CO₂ 为特征, 可出现独特的多子晶富 CO₂ 包裹体。系统的单个包裹体流体成分分析和高温高压模拟实验进一步证实, 富 CO₂ 包裹体具有较强的搬运钼金属的能力, 可作为斑岩钼成矿的有利载体。由这种流体诱发的围岩蚀变钾化、碳酸盐化、萤石化强

烈, 绢英岩化、青磐岩化相对较弱。上述特征普适于同碰撞-后碰撞环境形成的斑岩钼矿, 我国学者提出了碰撞型斑岩钼矿的新概念 (Li et al., 2012, 2013; Chen et al., 2017)。

基于对秦岭地区的系统研究, 提出秦岭具有富钼的物质背景, 长期、多次的钼金属预富集, 导致了秦岭燕山期爆发式成矿。汇总了三类斑岩型钼矿已有熔体包裹体数据, 发现无论矿床产出的构造背景或成矿岩体岩性 (石英闪长岩、花岗斑岩等) 如何, 成矿岩浆中钼含量并不高; 形成斑岩型钼矿需要高通量的熔体、大规模的岩浆房。高氧逸度条件有利于钼等成矿元素通过部分熔融等方式进入岩浆, 高氧逸度可抑制岩浆阶段硫化物的饱和; 并且, 在岩浆上升过程中, 高氧逸度的岩浆可以进一步同化萃取围岩中的亲铜元素, 因此斑岩型钼矿往往具有较高的氧逸度, 但氧逸度并不是决定斑岩钼成矿潜力的唯一因素。

· 专题 7: 造山带成矿作用 ·

碳质流体迁移沉淀与金矿化: 来自石墨的证据

李文博*, 张方华, 乔雪园

北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871

含碳物质是造山型金矿的重要组成部分, 包括造山型矿床中常见的富 CO_2 含 CH_4 变质流体、碳酸盐蚀变带、富碳沉积围岩等。不同碳质组分在成矿金属源区富集、流体迁移及富集成矿过程中扮演不同的角色, 影响了金及其络合物在不同成矿阶段的化学行为。近年来, 以中亚造山带、西非绿岩带及新西兰阿尔卑斯造山带为代表的地区发现了多个碳质地层容矿型造山型金矿, 它们普遍具有低品位、高吨位的特点, 贡献了超过 20 000 t 的金金属储量。以中亚造山带为例, 造山带及其邻近地区分布着诸如 Muruntau、Kumtor、Sukhoi Log、Olimpiada、萨瓦亚尔顿、朱拉达嘎及长山壕等大型金矿, 这些矿床通常产于元古代-古生代碳质地层中, 矿体展布与区域剪切变形密切相关, 伴随成矿区内通常发育岩浆岩活动。厘定金矿化与碳质组分的关系对进一步找矿有着积极意义。不同于成矿蚀变阶段广泛发育的碳酸盐矿物, 石墨在造山型金矿中的角色存在诸多可能: (1) 沉积成岩阶段通过还原作用导致金及硫化物在地层中的预富集; (3) 成矿阶段还原氧化性流体及金属络合物; (3) 富

碳围岩物理吸附含金流体; (4) 热液石墨与金发生共沉淀作用。

华北克拉通北缘长山壕金矿赋存于白云鄂博群比鲁特组碳质板岩及含碳二云母片岩中, 含金石英硫化物脉体及蚀变围岩中发育大量石墨, 是研究碳质组分的理想对象。详细的石墨形态学、拉曼光谱学研究表明该矿床发育五类热液石墨, 由脉体至蚀变围岩, 热液石墨记录了流体降温及含碳流体析出碳质组分的过程。热液矿物同位素分析结果表明 $\text{H}_2\text{O}-\text{N}_2-\text{CO}_2-\text{CH}_4$ 流体源于比鲁特组碳质火山沉积岩地层, 晚古生代岩浆活动对成矿流体无物质贡献。进一步的石墨流体平衡分析表明, 高温 ($>546^\circ\text{C}$) 条件下的强烈水岩反应有助于碳质组分以 CO_2 的形式大量析出, 中低温条件下的水岩反应仅能析出少量含 CH_4 流体。长山壕金矿床中的热液石墨是高温富 CO_2 流体逐步降温并与围岩发生氧化还原反应的产物。大量石墨的形成导致金属络合物失稳, 促进自然金及硫化物同石墨发生共沉淀现象。热液石墨是造山型金矿床重要的成矿媒介及标志性找矿矿物。

· 专题 7: 造山带成矿作用 ·

内蒙古甲生盘层状 Zn-Pb 同变质再活化及年代学研究

于畅¹, 钟日晨^{1*}, 谢玉玲¹, 李文博²

1. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083;

2. 北京大学 地球与空间科学学院 北京 100871

甲生盘为大型 Zn-Pb 硫化物矿床, 位于狼山-渣尔泰山多金属成矿带内。对于该矿床成因目前尚存争议: 部分学者根据矿床赋存于元古代裂谷沉积及矿石的沉积特征认为该矿床主要形成于元古代的喷流沉积, 为典型的 SEDEX 型矿床 (彭润民和翟裕生, 2004); 而一些学者通过对渣尔泰地区的剪切构造研究发现该区域内 Au、Zn、Pb 等成矿元素的富集受控于剪切构造 (牛树银, 1990)。本课题组前期对甲生盘矿床的岩矿相研究发现 Zn-Pb 明显存在后期热液改造特征且受控于后期的剪切带及变质作用。具有沉积特征的矿石中 Zn-Pb 矿物粒度很低且分布较分散, 沉积期为 Zn-Pb 预富集阶段; 高品位铅锌矿石中的 Zn-Pb 矿物均为热液方铅矿、闪锌矿, 且可见热液 Zn-Pb 硫化物交代早期沉积黄铁矿、磁黄铁矿 (钟日晨, 2014)。表明后期热液活动再活化沉积期预富集的 Zn-Pb 形成高品位矿石, 成矿时代应与后期的热液活动时代一致。但目前对 Zn-Pb 再活化的过程及时代尚不明确。

本研究主要对甲生盘 Zn-Pb 再活化过程及成矿年代展开研究。甲生盘 Zn-Pb 再活化期流体包裹体研

究揭示再活化流体为中温、低盐度富碳质流体, 特征与变质流体相似。再活化流体存在由含 CO₂ 氧化性流体向气相 CH₄ 与液相水不混溶的还原性流体演化的过程, 成矿深度约 4 km。热力学模拟结果表明当含 CO₂ 的再活化流体流经 Zn-Pb 预富集的围岩时可溶解其中的 Zn-Pb 形成含矿热液, 该热液继续向上流经富碳质地层时被还原生成 CH₄ 并形成两相不混溶流体, 该流体对 Zn-Pb 溶解能力急剧下降导致 Zn-Pb 硫化物沉淀, 形成高品位 Zn-Pb 矿石。此结果与岩矿相观察结果吻合。甲生盘成矿年代学研究选择与热液 Zn-Pb 矿物共生的白云母进行 ³⁹Ar-⁴⁰Ar 定年, 定年结果指示甲生盘矿床形成于泥盆纪 (~380 Ma)。结合徐备等人认为的古亚洲洋于泥盆纪闭合的观点 (徐备等, 2014), 甲生盘 Zn-Pb 再活化年代与区域造山作用同期, 为造山型贱金属矿床。

综合以上结果, 提出甲生盘矿床两期成矿模式: 元古代喷流沉积形成低品位 Zn-Pb 矿石, 为 Zn-Pb 预富集阶段; 泥盆纪古亚洲洋闭合引起区域内造山作用, 变质流体使 Zn-Pb 再活化形成高品位矿石, 最终成矿。

第一作者简介: 于畅 (1995-), 博士研究生, 研究方向: 矿床学. E-mail: yuchangustb@126.com.

*通信作者简介: 钟日晨 (1986-), 副教授, 研究方向: 矿床学. E-mail: zhongrichen@126.com.

· 专题 7: 造山带成矿作用 ·

物理力学模拟在矿床研究中的应用

张国政¹, 郑义^{1,2,3,4*}, 虞鹏鹏¹, 胡照斌¹, 吴宜翰¹

1. 中山大学地球科学与工程学院, 广州 510275;
2. 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广州 510275;
3. 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室, 广州 510275;
4. 南方海洋科学与工程广东省实验室, 广东 珠海 519000

物理力学模拟从 20 世纪 90 年代开始在地质领域广泛应用 (谢建华等, 2005)。物理力学模拟方法不受时间和空间的约束, 按照自然和客观规律, 可以有效结合地质、地球物理、地球化学等学科研究成果, 模拟结果具有可视化和科学性 (赵鹏飞等, 2017)。随着新一轮找矿勘查的开展, 寻找深部隐伏矿床是当前矿产资源勘查的热点问题, 已有的成矿理论在预测深部隐伏矿体方面难如人愿 (刘亮明等, 2008; 朱静等, 2019), 物理力学模拟方法则在成矿机制研究与成矿预测方面表现出较强的优越性。

矿床的形成是构造变形、孔隙流体流动、热量传递和化学反应 4 个过程耦合的结果 (Hobbs et al., 2000)。前人从不同的方面展开大量成矿过程的耦合研究, 例如成功将构造变形-流体流动耦合应用到热液流动和成矿系统中, 包括安徽白象山铁矿床 (贾蔡等, 2014) 和河南南泥湖钼矿 (赵鹏飞等, 2017) 等; 通过耦合构造变形-热量传递-流体流动研究接触带上扩容空间对矿体控制作用 (刘亮明等, 2008; 赵义来等, 2015), Hobbs 等 (2000) 将变形-流体流动-热量传递-化学反应四个过程耦合, 对构造控矿理论

进行探讨, 并成功应用于找矿地质勘探中。

现有成矿动力学模拟的软件较多, 如 FLAC3D、ANSYS、TOUGHREACT、3DMine, 根据研究的需要选择合适的模拟软件, 但是对于复杂地质模型, 单一的数值软件难以满足建模的要求, 可以通过将建模软件 (如 AutoCAD、GOACD、Rhino、Surpface、ArcGIS) 作为前处理与力学模拟软件耦合实现研究目的。赵义来等 (2011) 借助 C++ 编程实现 AutoCAD 和 GOCAD 的建模数据到 FLAC3D 模拟数据格式转换, 在 FLAC3D 中利用变形-热量-流体耦合模拟铜矿热液成矿过程; 陈庆发等 (2016) 在 3DMine 数字模型基础上, 提出了 3Dmine-FLAC3D 耦合建模和 3DMine-Surfer-Rhino-ANSYS-FLAC3D 多软件耦合建模方法。

通过对模拟软件进行编程以及算法优化, 可以更好的验证假想, 弥补物理力学实验的不足, 大大节约成本, 提高效率, 促进成矿机理研究, 为深部找矿提供理论依据。当前在成矿动力学模拟的研究仍然局限于定性分析, 要实现成矿过程中的构造变形、流体流动等方面定量分析需要继续深入研究。

第一作者简介: 张国政 (1995-), 博士研究生, 研究方向: 资源与环境. E-mail: zhanggzhe9@mail2.sysu.edu.cn.
通信作者简介: 郑义 (1984-), 博士, 教授, 研究方向: 成矿与资源勘查. E-mail: zhengy43@mail.sysu.edu.cn.

• 专题 7: 造山带成矿作用 •

凡口铅锌矿床矿物生长序列及分散元素富集规律研究

胡照斌¹, 郑义^{1,2,3*}, 虞鹏鹏^{1,3}, 王成明², 吴宜翰¹, 龙丽洁¹, 杜金泽¹

1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东 珠海 519000;

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519000;

3. 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室, 广州 510275

广东省凡口铅锌矿是我国著名的超大型铅锌矿床,其位于南岭金属成矿带中段,粤北曲仁盆地北缘,西向九峰-诸广山东构造岩浆岩带与北北东向北江构造带交接复合部位。

凡口铅锌矿在矿床成因认识上存在不足,矿物生成序列的厘定是恢复成矿历史和矿床成因的基础。凡口矿中的矿物穿插关系复杂,前人对矿区的矿物生长序列进行了不同类型的划分,如郑庆年(1996)的方案:1)沉积阶段——星点状黄铁矿;2)成岩阶段——一条纹条带状矿石,包括大部分的黄铁矿,少量闪锌矿和方铅矿;3)热液阶段——脉状硫化物。张术根(2001,2009)的划分方案为:1)沉积阶段——一条带状矿石,以黄铁矿为主;2)热液阶段——脉状矿石,以铅锌矿硫化物为主。本次工作在前人研究的基础上,基于岩相学观察,将凡口的矿物生长序列划分为如下几个期次和阶段:1)沉积期,灰岩、泥质灰岩等围岩形成,发育细粒浸染状黄铁矿化和草莓状黄铁矿。2)黄铁成矿期,发育大量的白云石-黄铁矿脉,

黄铁矿边缘有白云石的增生边。黄铁矿和白云石均为半自形-自形。3)黄铁铅锌成矿期,这一阶段的黄铁矿多与石英共生。闪锌矿多呈球状,与黄铁矿、方铅矿共生,是最主要的铅锌和硫铁成矿期次。这一成矿期次还可细分为石英-黄铁矿阶段、铅锌成矿早阶段和铅锌成矿晚阶段。4)热液成矿晚期,热液成矿晚期少量形成重晶石-方解石脉。

分散元素指的是地壳中丰度很低的元素(一般为 10^{-6} ~ 10^{-9} ,多为 10^{-9} 级),主要包括 Ga、Ge、Cd、In、Tl、Se、Te 和 Re 等(涂光炽,2003),其在自然界中少见独立矿物,多与铅锌矿共/伴生且分布极不均匀。对凡口铅锌矿的中闪锌矿分散元素的研究能揭示其富集规律和赋存状态,并为矿床成因类型的厘定提供依据。本次研究发现,凡口铅锌矿中的闪锌矿富集 Ga、Ge、Cd、Sb、Cu,贫 In,暗示其类似于 MVT 类型的成矿背景。另外闪锌矿的 Ga、Ge 的元素的富集呈现环带结构,推测与闪锌矿的缓慢生长过程中的元素替代机制有关。

基金项目:国家自然科学基金优秀青年基金(42022020);面上项目(41872193);广东省自然科学基金-杰出青年基金(2018B030306021)

第一作者简介:胡照斌(1995-),博士研究生,研究方向:矿床学研究.E-mail:huzhb5@mail2.sysu.edu.cn.

*通信作者简介:郑义(1984-),教授,研究方向:矿床成因与资源勘查研究.E-mail:zhengy43@mail.sysu.edu.cn.

• 专题 7: 造山带成矿作用 •

Trace elemental and sulfur-lead isotopic variations in metamorphosed volcanogenic massive sulfide (VMS) mineralization systems

YU Peng-peng^{1,2*}, ZHENG Yi^{1,2}

1. Guangdong Provincial Key Lab of Geological Process and Mineral Resources Survey, School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China

The effects of post-VMS (volcanogenic massive sulfide) deformation/metamorphism on sulfide trace element and sulfur-lead isotopic compositions remain unclear. The greenschist to lower amphibolite facies metamorphosed Keketale Pb-Zn deposit in the Devonian volcanic-sedimentary basin, the Chinese Altay, NW China, serves as excellent object to decode the issue. The deposit exhibits two mineralization stages, including (1) primary banded, massive and disseminated ores derived from sea-floor hydrothermal mineralization and (2) ore remobilization, as represented by intensively-deformed ores and quartz-polymetallic sulfide ore veins that crosscut the primary ores.

Sulfide trace elements data suggest that Stage 2 pyrite and pyrrhotite have higher contents of Cu, Zn, Ag, Sb and Pb, whereas contents of these elements are higher in Stage 1 sphalerite and galena than their Stage 2 counterparts. Such elemental remobilization was probably caused by the rapid intragrain diffusion and subsequent fluid-mediated liberation with trace elements re-precipitated as particles within the same grain and nearby minerals, respectively. Sulfide mineral pairs formed during primary VMS mineralization are

not in sulfur isotopic equilibrium, and only localized re-equilibration occurs during deformation and metamorphism. In addition, the lead isotopic values of galena from remobilized sulfide veins overlap with those of the Stage 1 galena and pyrite. These data indicate that regional deformation and metamorphism of the Keketale deposit can be approximated as a closed system in terms of sulfur-lead isotopes. Lead isotopes of the sulfides and mineralized meta-sedimentary-volcanic rocks display a linear distribution between the mantle and upper crust line in the $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram. The lead source may be derived from both felsic volcanic rocks and mafic igneous rocks (and/or magmatic volatiles), and the sulfur-lead isotopes may result from a shallow-level seawater circulating process. An additional group of lead isotopic compositions of the meta-volcanic rocks show elevated present-day $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ values, probably due to decay of Th and U carried by deeply-penetrative circulation (~13 km) of CO_2 -F-Cl-rich hydrothermal (metamorphic) fluids. Both syn-VMS shallow (seawater) and post-VMS deep (metamorphic fluids) circulation processes are critical for the metal concentration at Keketale.

· 专题 7: 造山带成矿作用 ·

新疆阿尔泰地区萨热阔布金矿与萨尔布拉克金矿的对比研究

吴宜翰¹, 郑义^{1,2,3,4*}, 虞鹏鹏¹, 胡照斌¹,

1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东 510275;
2. 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广东 510275;
3. 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室, 广东 510275;
4. 南方海洋科学与工程广东省实验室, 广东 珠海 519000

造山型金矿床指产于变质地体中,在时间和空间上与增生造山或碰撞造山密切相关,形成于汇聚板块边界上的受到韧—脆性断裂控制的系列金矿床 (Goldfarb et al., 1998)。阿尔泰造山带位于中亚增生型造山带的中部,在晚古生代经历了准噶尔洋向北的俯冲和增生造山作用 (chen et al., 2012), 形成了 NWW 向数十条断裂带,其中额尔齐斯断裂带两侧分布有多拉纳萨依、萨尔布拉克、赛都、科克萨依、萨热阔布等 10 余处矿床或矿化点,吸引了许多矿床学家的关注。目前,对于断裂带两侧金矿床的成矿物质来源是否一致、断裂两侧的抬升剥蚀速率是否相同等问题,缺乏系统和深入探究。

本研究拟选取位于额尔齐斯断裂北侧的萨热阔布金矿和南侧的萨尔布拉克金矿进行对比研究,试图回答以上问题。前人研究认为这两个矿床均属于造山型金矿,矿床成因与造山活动密切相关,均赋存变质火山建造地层中,并受到 NW 走向的断裂构造控制,且成矿流体均具有中低温,中低盐度,富 CO₂ 等特征。与此同时,两个矿床的地质特征存在一些

差异。1) 萨热阔布金矿的主要金属矿物为黄铁矿,雌黄铁矿和自然金,而萨尔布拉克金矿的主要金属矿物为黄铁矿、毒砂和自然金,前人研究认为黄铁矿、磁黄铁矿在变质火成岩中较为典型,而毒砂在变质的沉积岩中较为典型 (Goldfarb et al., 1998), 暗示两个矿床的成矿过程并不是一致的。2) 萨热阔布金矿发育有含子矿物的流体包裹体,而萨尔布拉克金矿却很难找到,说明前者的成矿流体在成岩成矿过程中处于饱和状态 (zhang et al., 2014)。再者 3) 萨热阔布晚期脉石矿物以石英作为主,萨尔布拉克金矿则以方解石为主,说明萨尔布拉克金矿晚期的成矿流体富 Ca。

以上地质特征显示两个矿床的成矿流体来源可能不同或者成矿过程可能不同,还需通过其他方法进行验证,断裂两侧的抬升剥蚀速率也需要详细的研究。本研究拟将通过宏观的野外观察与采样,岩矿鉴定, BSE-EDS 分析、划分矿物生成序列、 μ -XRF 扫描、磷灰石裂变径迹、流体包裹体显微测温以及原位硫同位素研究,逐步解决上述问题。

基金项目: 国家自然科学基金项目-优秀青年科学基金项目 (42022020); 国家自然科学基金项目 (U1803115); 广东省自然科学基金杰出青年基金项目 (2018B030306021)

第一作者简介: 吴宜翰 (1996-), 博士研究生, 研究方向: 矿床学研究. E-mail: wuyh68@mail2.sysu.edu.cn.

*通信作者简介: 郑义 (1984-), 博士, 教授, 研究方向: 成矿与资源勘查. E-mail: zhengy43@mail.sysu.edu.cn.

· 专题 7: 造山带成矿作用 ·

硅饱和体系硫酸盐溶解度定量研究及其在稀土成矿的应用

陈缓, 钟日晨*, 谢玉玲*, 崔浩, 凌一凡, 黎子萌, 于畅

北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083

传统观点认为硫酸盐在水溶液中具有逆溶解特性, 然而 Cui 等 (2020) 的定性研究结果表明在硅饱和体系中, 硫酸盐在高温下表现为正溶解度, 因此富硫酸盐水溶液可以在高温下稳定存在, 这与天然地质流体中观察到的现象一致。然而, 目前硅饱和体系中硫酸盐的溶解度尚缺乏定量研究, 而地壳流体通常是硅饱和的。因此, 需要开展定量实验以探究硅饱和体系中硫酸盐的溶解度。

由于硅饱和体系中硫酸盐具有特殊的相行为(如 Na_2SO_4 低温熔融), 因此传统的溶解度测量方法(如水热高压釜等)并不适用于本实验。熔融毛细石英管 (Fused Silica Capillary Capsule; FSCC) 可以构建硅饱和体系并满足原位观察要求, 且将 FSCC 与拉曼光谱仪联用, 可以对溶液中的硫酸盐含量进行定量测量。

在 $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 体系中, Na_2SO_4 的溶解度在 50~313 °C 内降低; 而温度高于 313 °C 时, Na_2SO_4 晶体开始熔化, 随着熔体的形成, Na_2SO_4 由逆溶解度转变为正溶解度。在 $\text{K}_2\text{SO}_4\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 体系中, K_2SO_4 的溶解度在 50~400 °C 内持续升高。硅饱和和体

系中 Na_2SO_4 及 K_2SO_4 的溶解度在整个实验温度范围内均高于其在不含硅条件下的溶解度。鉴于大多数地壳流体均为硅饱和的, 因此与不含硅的 $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 或 $\text{K}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 二元体系相比, 本研究获得的 Na_2SO_4 及 K_2SO_4 溶解度曲线可以更好地反映真实地质流体的特性。

与包裹体测盐度的原理类似, 我们将本文所获得的 Na_2SO_4 及 K_2SO_4 溶解度曲线与前人的包裹体显微测温结果相结合, 计算得出川西牦牛坪超大型稀土矿床成矿流体中的硫酸盐浓度为 2.41~4.81 m (mol/kg H_2O)。以上述硫酸盐浓度作为内标, 可以定量校正 Xie 等 (2015) 所报道的该矿床中单个流体包裹体微量元素 LA-ICP-MS 分析结果, 从而得到该成矿流体中稀土元素 Ce 的浓度为 0.30%~0.44% wt.。该结果表明, 富硫酸盐的流体具有较强的稀土搬运能力, 是稀土元素的理想成矿流体。此外, 根据成矿流体中稀土的浓度, 以及成矿碳酸岩岩浆的含水量, 可估算形成牦牛坪超大型稀土矿床所需的成矿碳酸岩体积的下限, 进而证明了 Xie 等 (2015) 小岩体可以成大矿的猜想。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41930427; 41472072; 41872078; 41502069)

第一作者简介: 陈缓 (1995-), 博士研究生, 研究方向: 实验地球化学及成岩成矿作用. E-mail: 2835074178@qq.com

*通信作者简介: 钟日晨 (1986-), 副教授, 研究方向: 热液成矿过程热力学模拟. E-mail: zhongrichen@126.com

谢玉玲 (1963-), 教授, 研究方向: 地质流体与成岩成矿作用. E-mail: yulingxie63@hotmail.com

• 专题 7: 造山带成矿作用 •

新疆西天山阿吾拉勒西段后碰撞铜矿床 多期叠加改造成矿作用研究

孙庆, 赵晓波*, 薛春纪

中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

阿吾拉勒成矿带位于新疆西天山造山带的核部, 其西段以发育众多中-小型的铜矿床为特征。空间上, 这些铜矿床均与形成于后碰撞背景下的二叠纪火山岩或侵入岩有紧密的空间关系, 多数矿床的主矿体产在岩体的内部, 少数产在火山岩岩性转换的界面。成矿物质来源方面, 金属矿物的硫和铅同位素具有与熔矿的火山岩或侵入岩相似的组成。因此, 多数研究将其类型归为斑岩型或陆相次火山岩型矿床(赵军等, 2012; 刘睿等, 2017)。然而, 随着勘探程度的不断加深, 在多数矿床中发现了多期叠加改造的现象。

本次研究选取群吉、群吉萨伊及努拉赛矿床为对象展开了详细的地表和钻孔编录工作, 发现这些矿床均经历了后期的叠加改造过程。例如群吉矿床, 早期的矿化以星点状的黄铁矿和黄铜矿为主, 钠长斑岩体全岩不同程度的经历了这次矿化事件。之后, 大量走向平行的石英脉切穿了早期的钠长斑岩体, 并且在石英脉两侧对称发育强烈的钾长石蚀变晕。这两期矿化作用形成的矿石均被后期的构造作用叠加, 形成了角

砾岩型的矿石。这一多期叠加成矿的现象也得到了黄铁矿-钼与蚀变钾长石 Ar-Ar 定年结果的支持, 测年的结果显示群吉矿床经历了明显的三期成矿事件, 第一期的成矿事件与钠长斑岩体的就位时间一致, 均为早二叠纪; 第二期和第三期分别形成于中三叠-早侏罗纪。值得注意的是, 主矿体均与后两期的叠加成矿作用有关, 说明早期的斑岩体矿化可能只提供了部分的金属, 主要的铜资源量形成于后两个叠加成矿期。结合区域地质构造背景, 早期的成矿事件与后碰撞的岩浆作用有关, 而后两期的叠加成矿作用很可能与区域大规模的陆内走滑活动有关(Wang et al., 2006), 这一时期的走滑活动提供了岩浆或非岩浆热液流动的运移通道和矿体的贮藏空间, 例如大量定向及平行发育的含矿石英脉。

相似的多期叠加成矿作用也在群吉萨伊、努拉赛矿床均有发现。多期叠加改造成矿作用的发现不仅对阿吾拉勒西段铜矿床的进一步工作提供可借鉴的方向, 而且对于整个新疆西天山后碰撞铜矿床的找矿勘查也会起到一定的启发作用。

基金项目: 国家深地资源勘查专项课题(2017YFC0601202)

第一作者简介: 孙庆(1987-), 博士研究生, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学. E-mail: sq4132113@163.com

*通信作者简介: 赵晓波(1988-), 博士生导师, 研究方向: 贵金属矿床学和天山区域成矿学. E-mail: xiaobozhao@cugb.edu.cn

· 专题 7: 造山带成矿作用 ·

内蒙古扎鲁特旗巴尔哲矿床岩浆-热液演化及其对铀钍成矿作用的启示

陈金勇^{1,2*}, 范洪海^{1,2}, 王生云^{1,2}, 朱泉龙^{1,2}

1. 核工业北京地质研究院, 北京 100029;
2. 中核铀资源勘查与评价技术重点实验室, 北京 100029

巴尔哲矿床又称“八〇一”矿床, 位于内蒙古哲里木盟扎鲁特旗境内, 矿体产于燕山期碱性花岗岩体中。该矿床作为超大型 Nb-REE-Zr-Be 矿床, 其铀钍资源也十分丰富, 达到大型矿床规模。矿床发现至今, 前人不仅对巴尔哲碱性花岗岩的地球化学特征及成因做了有益探讨, 而且对锆、铌、钽、铍及稀土元素的赋存状态进行了系统分析, 以及对矿床的成矿流体、成矿年龄和成矿机制进行了初步探讨。但是对铀钍的成矿作用却鲜有报道, 因此, 本文通过野外观察和岩矿鉴定, 结合前人的研究成果, 初步对该矿床的铀钍成矿作用进行探讨。

1 矿床地质特征

矿区内地层比较简单, 仅分布有白音高老组 and 梅勒图组两套地层, 岩浆岩较发育, 多成群成带出现, 但出露面积小, 呈小岩株及岩脉产出。主要为分布在背斜轴部的含矿钠长石化钠闪石花岗岩体及背斜两翼的岩脉, 呈北北东向展布, 个别呈北西向, 脉长 30~50 m, 宽 3~5 m 不等, 岩脉主要有花岗细晶岩脉、花岗斑岩脉、二长斑岩脉、石英斑岩脉、闪长玢岩脉及安山玢岩脉等。其分布明显受北北东向构造体系控制。主要赋矿岩体是碱性花岗岩体, 出露面积约为 0.35 km², 由东、西两个不连续的岩体组成, 但其深部连为一体。该岩体在矿区内呈小岩株状侵入于侏罗系形成的短轴背斜轴部。主要围岩为上侏罗纪白音高老组 (J_{3b}) 碱性流纹质晶屑岩屑凝灰岩和中酸性

火山碎屑岩。

2 岩浆-热液演化过程

根据前人对巴尔哲地区碱性花岗岩中的熔体和熔体-流体包裹体研究结果可知, 伟晶状花岗岩和石英斑晶中的熔体包裹体熔融温度在 750~1027℃之间 (平均为 916℃), 熔体-流体包裹体的均一温度在 475~650℃之间 (平均为 562℃)。同时, 熔体-流体包裹体中含有钛锆钍矿、硅钍矿等矿物, 而流体相则是以 H₂O 为主, 未发现 CO₂、CO 和 CH₄ 等气体。表明巴尔哲碱性花岗岩体的岩浆-热液演化对铀、钍矿化具有重要的制约作用。

3 铀钍成矿作用

由岩矿鉴定、电子探针分析结果及结合前人研究资料可知, 矿石中含有 40 多种矿物, 稀有稀土矿物 12 种, 其他金属矿物 17 种, 硅酸盐矿物 11 种; 其中以羟硅铍钼铈矿 (兴安石)、铌铁矿、锆石、铀日光榴石、烧绿石、独居石等为主要工业矿物。铀主要以类质同像赋存于锆石、独居石、铌铁矿、兴安石、烧绿石等副矿物中。钍以钍石、铁钍石、铀钍石等独立矿物产出, 部分钍也以类质同像赋存于锆石、独居石、烧绿石、易解石等副矿物中。

从铀钍赋存形式及碱性花岗岩中熔体-流体包裹体研究结果分析, 认为该矿床铀钍矿化形成于岩浆-热液过渡过程, 原始岩浆中富含挥发份, 有利于铀、钍等成矿元素的迁移和富集, 最终形成巴尔哲超大型多金属矿床。

基金项目: 国防预研项目 (3210408); 国家自然科学基金项目 (41602080)

第一作者及通信作者简介: 陈金勇 (1984-), 高级工程师, 博士, 研究方向铀矿地质研究. E-mail: jinyong20060309@163.com.

· 专题 7: 造山带成矿作用 ·

热液矿物示踪造山型金矿成矿时代及流体性质

张方华, 李文博*, 乔雪园, 付天尧

北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京, 100871

矿床热液系统的发育往往伴随强烈的水岩反应和元素交换。产于热液流体中的矿物, 如磷灰石、榍石、白钨矿、黑云母等, 记录了流体物理化学条件和水岩反应过程。详细的矿物结构观察及原位微区分析可以区分不同蚀变阶段的流体演化信息, 已经广泛应用于斑岩-矽卡岩热液系统成矿过程厘定及找矿研究, 在造山型矿床中也有广泛的应用前景。榍石是常见的含钛矿物, 稀土元素及高场强元素在不同类型榍石中成分差异较大, 较高的 U、Pb 含量使得榍石成为潜在的定年矿物, 特殊的矿物结构及钛铁矿-榍石-金红石反应条件使得榍石对成矿流体物理化学性质非常敏感 (Li et al. 2010; Kohn, 2017)。磷灰石是岩浆-热液矿床中常见的含磷矿物, 诸如 Na、Si、Mn、Sr、REE 等微量元素能以类质同象的形式进入磷灰石晶格, 使其具有不同的成分特征及阴极发光特点, 能够有效判别流体活动强度 (Bouzari et al., 2016; Mao et al. 2016)。

本研究以内蒙古浩尧尔忽洞金矿为例, 系统研

究了蚀变围岩及热液脉体中不同阶段的热液榍石及磷灰石特征。镜下观察表明榍石和磷灰石多为它形或半自形, 与热液黑云母、石墨、硫化物、白钨矿及自然金密切共生。产于蚀变围岩中的榍石多发育钛铁矿及硫化物包裹体, 产于脉体中的磷灰石则发育气液两相流体包裹体。对热液脉体中的榍石进行原位 U-Pb 定年分析, 其结果表明金矿化时代为 256 Ma, 略晚于区域内岩浆侵位活动 (269 Ma)。系统的原位微量元素分析则显示由蚀变围岩至热液脉体, 水岩比上升导致热液矿物逐渐亏损 Fe、Mn、As、Bi、REE 及高场强元素, 富集 Sr、V、Na、K、Ba。进一步的微量元素对比显示成矿流体为低盐度氧化性富 Sr 流体, 围岩强烈的水岩反应消耗了热液体系中的碳质组分, 使得流体呈现贫 CO₂ 特点。对比其他类型矿床, 浩尧尔忽洞金矿流体特征及磷灰石成分特点均指示其为造山型矿床, 榍石 V+Pb vs. Th/U、Mn/Pb vs. La/Yb 以及 Zr+Hf vs. Th/U 图解可以作为区分造山型金矿与其他类型矿床的有力工具。

基金项目: 国家自然科学基金 (42073037, 41672067); 科技部国家重点研发计划 (2017YFC0601302)

第一作者简介: 张方华 (1994-), 博士研究生, 研究方向: 矿床地球化学. E-mail: fhzhang@pku.edu.cn.

*通信作者简介: 李文博 (1976-), 博士生导师, 研究方向: 矿床地球化学. E-mail: liwenbo@pku.edu.cn.

· 专题 7: 造山带成矿作用 ·

新疆东准噶尔顿巴斯套金矿成矿作用研究进展

刘文祥¹, 邓小华², 吴艳爽³, 陈衍景^{1,3*}

1. 北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京, 100871;

2. 北京矿产地质研究院有限责任公司, 北京, 100012;

3. 中国科学院新疆生态与地理研究所新疆矿产资源研究中心, 乌鲁木齐, 830011

造山型金矿是最重要的金矿床类型之一, 为世界提供了约三分之一的黄金产量 (Frimmel, 2008)。我国自 2009 年以来, 一直是世界最大的黄金生产国, 其中约 65%~75% 的黄金产自于造山型金矿 (Goldfarb et al., 2019), 因此, 利用现有成矿模型, 识别新的造山型金矿, 对我国矿产勘查具有重要意义。东准噶尔地区位于阿尔泰山造山带南缘、准噶尔盆地东北缘, 是新疆北部重要的金铜多金属成矿带之一。区内南部卡拉麦里构造带和北部额尔齐斯构造带已发现多个金矿床, 且多被认为是造山型金矿, 表明东准噶尔是重要的造山型金矿集中区 (李欢 2018; 刘文祥等, 2021)。然而位于中部的阿尔曼太构造带仅发现有顿巴斯套一处金矿床。厘定其矿床成因, 探讨其成矿过程对该构造带的金矿找矿勘查的意义不言而喻。

本文对矿区主要地层、岩浆岩、矿体的岩相学, 及矿物标型、流体包裹体、同位素等研究表明: (1) 顿巴斯套金矿具有区域性断裂的次级断裂控矿、脆—韧性剪切带控矿、背斜核部控矿“三位一体”的控矿特征, 成矿过程同步于构造变形。成矿过程可划分为沉积成岩期和热液期。热液期可进一步划分石英—钾长石阶段 (早)、石英—铁白云石—多金属硫化物阶段 (中) 和方解石—石英阶段 (晚)。中阶段为主成矿阶段, 黄铁矿化、毒砂化、铁白云石化、绢云母化蚀

变是重要的找矿标志。(2) 矿区内赋矿围岩之一石英闪长玢岩锆石 U-Pb 谐和年龄为 $320.53 \pm 0.80 \text{Ma}$, 流纹斑岩、钾长花岗岩、二长花岗岩锆石 U-Pb 谐和年龄分别为 $(311.2 \pm 1.4) \text{Ma}$, $(321.20 \pm 0.64) \text{Ma}$, $(319.56 \pm 0.60) \text{Ma}$, 均是成矿前的产物。(3) 早阶段成矿流体为中高温、低盐度流体, 中阶段为中温、低盐度、富 CO_2 包裹体, 含有少量 CH_4 、 N_2 、 H_2S 等, 与典型的变质热液特征一致, 晚阶段为低温、低-高盐度流体。早阶段流体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 $8.5\% \sim 9.9\%$, $^{18}\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 $-108.6\% \sim -105.6\%$, 具有变质水特征, 晚阶段向大气降水线演化。

(4) 热液期黄铁矿中 As 与 Au 具正相关性, 而毒砂中 As 与 Au 具负相关性。贫 As 毒砂 (Apy-b) 与富 As 黄铁矿 (Py2-c) 在时间上耦合, As 在毒砂、黄铁矿中的选择性富集、亏损可能是金富集的重要原因。沉积成岩期黄铁矿中不可见金主要以纳米金存在, 热液期黄铁矿中则既有纳米金也有晶格金。(5) 中阶段流体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{fluid}}$ 为 $-4.8\% \sim -2.5\%$, 晚阶段 $\delta^{13}\text{C}_{\text{fluid}}$ 为 $-6.9\% \sim -3.8\%$, 碳最可能来自陆相碳酸盐。中阶段最早期热液黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 介于 $1.49 \sim 1.85\%$, 岩浆硫可能是最重要的硫源; 而中阶段中、晚期黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 介于 $1.25\% \sim 8.45\%$, 沉积硫化物应是最重要的硫源。(6) 顿巴斯套金矿为造山型金矿, 由中阶段 C 型流体包裹体估算的成矿深度约在 $10.4 \sim 5.2 \text{km}$, 深部具有找矿潜力。

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFC0601203); NSFC-新疆联合基金 (U1803242)

第一作者简介: 刘文祥 (1999-), 博士研究生, 研究方向: 矿床学. E-mail: 1801110590@pku.edu.cn.

*通信作者简介: 陈衍景 (1962-), 教授, 研究方向: 矿床学. E-mail: yjchen@pku.edu.cn.

• 专题 7: 造山带成矿作用 •

西准噶尔哈图金矿地质特征及成因研究

韩申¹, 丁嘉鑫², 陈衍景^{1,3*}

1. 北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871;

2. 上海交通大学转化医学研究院, 上海 200240;

3. 中国科学院新疆生态与地理研究所新疆矿产资源研究中心, 乌鲁木齐 830011

哈图金矿位于西准噶尔达拉布特大断裂北侧, 是该地区最大的金矿床, 储量可达 62 t, 平均品位为 4.99 g/t。其主要赋矿围岩为下石炭统太勒古拉组的玄武岩和凝灰岩, 矿区发育显著断裂构造, 安齐断裂是主干断裂构造, 其上盘所发育的次级断裂是矿区内的赋矿断裂, 呈 NEE-EW 向、NNE 向和 NS 向展布。

矿区地表和深部分布有百余条矿脉, 矿体形态为不规则状、脉状和长条状。矿石矿物为毒砂、黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、闪锌矿、黝铜矿、车轮矿、自然金等, 脉石矿物为石英、铁白云石、绢云母、钠长石、绿泥石、绿帘石、金红石、磷灰石、独居石等。

成矿阶段可划分为: 黄铁矿-钠长石-石英阶段(早)、多金属硫化物-绢云母-石英-铁白云石阶段(中)、石英-方解石阶段(晚)。矿床围岩蚀变分带清晰, 依据蚀变矿物组合和蚀变强度, 从脉体向外依次(矿化中心到边缘)可划分为: 浅黄褐色含金硫化物-铁白云石-绢云母-硅化带(I带); 黄褐-褐色弱绿泥石-绢云母-铁白云石带(II带); 黄绿色弱铁白云石-绿帘石-绿泥石化带(III带); 墨绿色未蚀变玄武岩(IV带)。

据包裹体冷热台研究, 成矿热液体系具有中低温、低盐度、含 CO₂ 的特征。早阶段包裹体均一温度为 298℃~360℃, 盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 5.2%~

8.1%; 中阶段均一温度为 220℃~268℃, 盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 3.7%~7.4%; 晚阶段均一温度为 121℃~208℃, 盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 1.1%~4.6%, 成矿过程压力逐渐降低, 成矿深度估算为 5.7~7.8 km。

哈图金矿矿石 $\delta^{34}\text{S}$ 值总体介于-0.8‰到 1.3‰, 平均值为 0.4‰, 极差为 2.1‰。整体上, 哈图金矿的成矿流体主要来源于俯冲过程中准噶尔地块中早石炭世的玄武岩等海相火山岩及其他岩石变质脱水形成的变质热液。

通过详尽的显微岩相学和扫描电镜的观察, 选取了主成矿阶段的毒砂进行了 Re-Os 同位素分析, 得到了 $(266.0 \pm 27.7) \text{ Ma}$ (MSWD=7.7, n=5) 的等时线年龄, 这与前人石英包裹体 Rb-Sr 法测得哈图金矿成矿年龄 $(290 \pm 5) \text{ Ma}$ 相近(李华芹等, 2000), 揭示了哈图金矿形成于二叠纪的后碰撞体制。

西准噶尔在晚石炭世陆陆碰撞达到高潮, 其 P-T-t 轨迹阐述为: (1) 早石炭世晚期开始发生地壳的挤压、增厚; (2) 晚石炭世至早二叠世演化为挤压向伸展转变环境; (3) 二叠纪进入伸展体制, 发生造山带垮塌。上述碰撞造山的轨迹演化与哈图金矿流体成矿过程均具有三阶段特征并可完全吻合, 且成矿时代与之相符, 因此哈图金矿是形成于陆陆碰撞造山作用中的造山型金矿床, 据成矿深度可知深部具有较大找矿潜力。

基金项目: 国家重点研发计划“深地资源勘查开采”重点专项(2017YFC0601203)

第一作者简介: 韩申(1996-), 博士研究生, 研究方向: 矿床学研究. E-mail: HanShen2016@163.com

*通信作者简介: 陈衍景(1962-), 教授, 研究方向矿床学. E-mail: yjchen@pku.edu.cn

· 专题 7: 造山带成矿作用 ·

崤山地区燕山期成矿作用及其找矿指示

黄柏诚¹, 于杰^{1*}, 齐楠¹, 许晨¹, 邱志伟¹, 陈衍景^{1,2*}

1. 北京大学造山带与地壳演化重点实验室, 北京 100871;
2. 中国科学院新疆矿产资源研究中心, 乌鲁木齐 83000

东秦岭造山带是中国重要的金属成矿带之一, 拥有金堆城、夜长坪、南泥湖、三道庄、上房沟、鱼库、雷门沟、鱼池岭、东沟等 9 个超大型钼矿床以及金、银、铅、锌、钨等多种资源伴生。崤山地区位于东秦岭造山带的中心位置, 拥有夜长坪超大型 Mo-W 矿床、老里湾及中河两个大型 Ag-Pb-Zn 矿床、以及数个中小型 Au(-Ag)矿床。然而, 这样的成矿规模, 尤其是金矿的成矿规模, 却远远不如周围小秦岭、熊耳山及外方山地区。因此, 我们通过大量搜集崤山地区矿床地质特征、流体包裹体研究以及成矿年龄来讨论崤山地区整体的成矿作用。

崤山地区矿床主要分为三类: (1) 造山型 Au(-Ag) 矿床, 主要出现在崤山北部太华超群变质核杂岩出露区; (2) 斑岩-矽卡岩多金属矿床, 主要赋存在崤山南部的官道口群白云岩层中; (3) 岩浆热液脉型 Ag-Pb-Zn 矿床, 主要出现在中酸性侵入岩周边的断

裂构造中。同位素年代学研究已经得到了造山型 Au(-Ag)矿年龄介于 130~156 Ma, 斑岩矽卡岩多金属矿床为 141~145 Ma。而岩浆热液脉型 Ag-Pb-Zn 矿床目前尚未有针对矿体进行的年代学研究, 只能藉由赋矿斑岩体的年龄将其年龄上限定为 129~130 Ma。这三类矿床的年龄都指示了崤山地区的矿床主要发育在燕山期, 且可能与华北-扬子板块在晚侏罗-早白垩世的后碰撞挤压-伸展转变期的大地构造体制有关。基于上述研究, 我们利用了 CMF 模型来解释崤山地区的成矿作用。我们认为崤山地区具有与东秦岭其他成矿区相似的结晶基底以及相同的构造演化背景, 理应具有同样的成矿条件。再者, 由于剥蚀程度较低, 崤山地区大部分的矿床可能尚未出露。因此, 我们认为崤山地区仍有极大的成矿潜力, 并且后续找矿工作需着重在隐伏矿床的探勘以及现有矿床的多金属矿种开发。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41630313, U1906207)

第一作者简介: 黄柏诚 (1996-), 博士研究生, 研究方向: 矿床学专业. E-mail: 2101110632@pku.edu.cn.

通信作者简介: 陈衍景 (1962-), 教授, 研究方向矿床学. E-mail: yjchen@pku.edu.cn; gigyjchen@126.com.

• 专题 7: 造山带成矿作用 •

内蒙古哈达庙-毕力赫斑岩金矿床低温热年代学研究

付天尧¹, 李文博^{1*}, 乔雪园¹

1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

低温热年代学对讨论矿床的埋藏、剥蚀等后成矿过程及成矿区域构造历史有重要意义。我们选取了兴蒙造山带中的两个相邻的典型的斑岩金矿床——哈达庙（中型）和毕力赫（大型）矿床，对其中与成矿相关的酸性侵入岩进行了锆石(U-Th)/He (ZHe) 和磷灰石裂变径迹 (AFT) 定年，并进行了反演模型计算以获得该区域的热历史。哈达庙矿区的样品得到了 237.4-207.9 Ma 的 ZHe 年龄和 214.1-204.7Ma 的 AFT 年龄；毕力赫矿区样品得到了 157.3-133.3 Ma 的 ZHe 年龄和 154.4-125.7 Ma 的 AFT 年龄。根据以上结果，我们通过反演模型计算获得了两个矿床的抬升历史曲线。结合前人测得

的两个矿床~270 Ma 的成矿年龄，可以得知哈达庙-毕力赫矿床自成矿到抬升至地表经历了三个主要的热历史阶段：1. ~270-240 Ma：两个矿床接受沉积而埋藏；2. ~240-200 Ma：哈达庙矿床受到抬升剥蚀，而毕力赫矿床未抬升至地表；3. ~160-120Ma：毕力赫矿床受到抬升剥蚀。哈达庙矿床的抬升剥蚀受古亚洲洋闭合后的陆陆碰撞控制；毕力赫矿床的抬升剥蚀受古太平洋板块的俯冲及板片回撤导致的地壳减薄控制。虽然两个矿床成矿时间和过程都相近，但不同的抬升剥蚀条件导致了它们成矿规模的区别。以上热年代学数据也揭示了哈达庙-毕力赫地区北部进一步深部找矿的潜力。

基金项目：国家自然科学基金 42073037

第一作者简介：付天尧（1999-），博士生，研究方向：矿床学. E-mail: tyfu@pku.edu.cn

*通信作者简介：李文博（1976-），研究员，研究方向：矿床学. E-mail: liwenbo@pku.edu.cn

· 专题 7: 造山带成矿作用 ·

库车前陆冲断带多尺度裂缝成因类型及储集意义

刘春¹

1. 中国石油杭州地质研究院

随着全球油气从浅层走向深层乃至超深层,前陆冲断带深层区再度受到各国油公司的普遍关注并不断取得突破,掀起了人们对前陆冲断带深层储层研究的再聚焦。但是由于前陆冲断带储层受到横向构造挤压与垂向埋藏压实的双重影响,储层基质物性总体已变得较为致密,使得在一定程度上致密储层中只有发育裂缝,才能成为油气运移的良好通道,改善储层渗滤性能,进而形成裂缝型或裂缝-孔隙型储层。因此,裂缝已成为特低孔特低渗深层储层高产及稳产的关键,裂缝研究也成为致密储层勘探开发不可或缺的关键研究内容之一。

近年来,国内外学者对致密低渗透砂岩储层天然裂缝开展了大量研究工作,特别在致密砂岩储层裂缝分类、表征参数选择、形成机理、发育主控因素、分布规律以及天然裂缝与应力间耦合关系等方面取得了系列进展。本文以库车前陆冲断带深层白垩系巴什基奇克组砂岩储层为例,利用地表露头、岩心、薄片和成像测井等资料,运用工业 CT、激光共聚焦、阴极发光、电子探针、扫描电镜等技术手段,基于裂缝开度大小对裂缝进行分级分类,系统

研究库车前陆冲断带砂岩储层天然裂缝类型、特征、成因、期次及形成序列等,并分析不同尺度天然裂缝的储层意义及裂缝网络的产能响应。结果表明:库车前陆冲断带深层致密砂岩储层天然裂缝可以分为四级:100 μm 级以上宏观构造裂缝(I级)切割单砂体,形成优势运移通道,提高渗透率;10~100 μm 级微细构造伴生缝(II级)切割基质颗粒,连通基质大孔隙,改善渗流性能;1~10 μm 级粒缘显微成岩缝(III级)连通中小孔隙,改善孔隙连通网络,提高天然气运移充注效率;1 μm 级以下基质裂隙(IV级)沟通粒内微孔隙,扩大储层储集空间,增加储量规模。I级与II级构造成因裂缝主要有3期,其中早期和中期裂缝主要为充填-半充填,是油气大规模充注前的上新世早期以前形成,晚期开启裂缝形成于上新世末期以来。裂缝网络对孔隙度贡献率较低,但在在平行裂缝走向的方向上,裂缝可以提高渗透率2~3个数量级。前陆冲断带致密砂岩气藏的高产稳产是储层多尺度裂缝系统(宏观、微细和显微裂缝与基质)与多尺度孔隙系统(大孔隙、中小孔隙、微孔隙)优势配置的结果。

· 专题 7: 造山带成矿作用 ·

雪峰隆起区西段污牙钨矿床成矿时代及其地质意义

祝亚男

贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025

华南是全球规模最大的钨成矿区, 钨矿床主要集中在产于南岭地区及江南古陆, 后者包括东段江南钨矿带和西南段雪峰隆起区。其中, 雪峰隆起区内主要分布与岩浆活动无关的层控石英脉型钨矿床, 其次为与花岗岩有关的矽卡岩型、斑岩型钨矿床, 且常伴有大量 Au、Sb 矿化。以往研究表明, 这些钨矿床除部分形成于印支期 (如大溶溪、渣滓溪、杏枫山) 以外, 其余矿床主要形成于加里东期 (如沃溪: 白钨矿 Sm-Nd 等时线法为~402Ma; 板溪: 石英 Ar-Ar 法为~397Ma 和~422Ma; 黄金洞: 石英流体包裹体 Rb-Sr 等时线法为~462Ma)。然而最近研究发现, 很多之前认为是加里东期的钨矿床其成矿年龄通过最新的测试方法 (如沃溪: 黑钨矿白钨矿及共生磷灰石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为~130-150Ma) 或通过直接对矿石矿物开展定年研究 (如板溪: 辉钨矿 Sm-Nd 等时线法~130Ma; 黄金洞: 白钨矿 Sm-Nd 等时线法~129Ma), 所获得的成矿时代却为燕山期。这些矛盾的成矿年龄制约了对雪峰隆起区钨矿床的成因认识, 也让人们对该区是否广泛存在加里东期钨成矿事件

产生质疑。

黔东南污牙钨矿床位于雪峰隆起区西段, 矿化主要分布在摩天岭花岗岩体的外接触带。矿区内断裂构造不发育, 仅有区域性大断层高武断层从矿区南东角通过。矿体赋存于四堡群鱼西组的层间破碎蚀变带内, 主要为蚀变岩型和石英脉型白钨矿矿体。围岩蚀变类型主要包括电气石化、黑云母化、硅化及方解石化等。其中, 钨矿化与电气石化、黑云母化密切相关。矿石矿物主要为白钨矿, 见少量黄铁矿、毒砂、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等金属矿物。非金属矿物以石英为主, 次为黑云母、电气石、斜长石、楣石等。其中, 楣石呈自形-它形粗-细粒, 与白钨矿共生, 是良好的定年对象。研究获得与白钨矿共生的楣石的 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为~424Ma, 表明污牙钨矿床形成于晚志留世。精确的矿物年代学证实了污牙钨矿床的成矿时代为加里东期, 结合雪峰隆起区内其他 Au、Sb、W 元素组合矿床的可靠成矿年龄, 进一步表明该区矿床具有多阶段成矿的特点, 且加里东期成矿在该区是具有普遍意义的。