

文章编号: 1000-4734(2017)05-0528-08

大姚六苴砂岩型铜矿区构造岩矿物岩石学特征与地质意义

邹海俊^{1,2}, 韩润生^{2*}, 方维萱³, 胡瑞忠¹, 刘梦琼⁴

(1. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002; 2. 昆明理工大学 有色金属矿产地质调查中心 西南地质调查所, 云南 昆明 650093; 3. 有色金属矿产地质调查中心, 北京 100012; 4. 云南省建筑工程设计院, 云南 昆明 650021)

摘要: 大姚六苴铜矿区是楚雄盆地典型的砂岩型铜矿床聚集区, 矿床(体)在燕山期沉积成岩成矿作用的基础上, 受到喜山运动构造一成矿作用的改造, 构造控矿特征明显。基于矿床成矿地质特征与褶皱、断裂等构造变形分析, 着重采用构造岩显微构造特征和构造岩石英脉 ESR 测年方法, 研究了构造岩矿物岩石学特征及其地质意义, 讨论了扩展构造岩矿物岩石学研究的途径。通过构造岩显微组构研究认为, 显微构造存在 NE-SW 向、近 EW 向、NW-SE 向和近 SN 向主压应力; 含矿流体受构造动力的驱动, 在紫红色砂岩蚀变为浅色砂岩的过程中伴随着硅化和碳酸盐化发生沉淀成矿。构造岩 ESR 测年结果反映该区经历了喜山运动早期 ($46.8 \pm 4.5 \sim 56.0 \pm 5.6\text{Ma}$)、中期 ($32.4 \pm 3.0 \sim 42.3 \pm 4.1\text{Ma}$)、晚期 ($23.5 \pm 2.4 \sim 29.3 \pm 3.0\text{Ma}$) 三期构造变形改造作用和热液活动。

关键词: 构造岩; 矿物岩石学; 显微构造; ESR 测年; 大姚六苴铜矿区

中图分类号: P313; P583; P611

文献标识码: A

doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2017.05.002

作者简介: 邹海俊, 男, 1979 年生, 高级工程师, 博士, 主要从事构造与成矿、矿床地球化学方向研究. E-mail: zouhaijun@vip.gyig.ac.cn

Mineralogical-Petrological Characteristics of Tectonites from Dayao Liuju Copper Ore-District, Central Yunnan Province, China and Their Geological Significance

ZOU Hai-jun^{1,2}, HAN Run-sheng^{2*}, FANG Wei-xuan³, HU Rui-zhong¹, Liu Meng-qiong⁴

(1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guiyang 550002, China; 2. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 3. Geological Survey Center for Non-ferrous Mineral Resources, Beijing 100012, China; 4. Architecture & Engineering Design Institute of Yunnan Province, Kunming 650021, China)

Abstract: As a typical sandstone-type copper ore district in the Chuxiong Basin, Dayao Liuju copper ore-deposits and ore-bodies formed with tectonic-metallogenic mineralization during the Himalayan movement on the basis of sedimentation-diagenesis mineralizing at the Yanshan movement stage, which leads to show structure-controlling features. Based on the geological and ore-forming characteristics and structural deformation analysis results of macro-structures including folds and faults in Liuju copper ore-district, Dayao, it is emphasized to use ways by microstructures and ESR dating to reveal the mineralogical-petrological characteristics and geological significance of the tectonites. We also discussed how to expand the study on tectonite petrology in the future. Oriented tectonites' micro-structural marks indicate that there exist principal compressive stresses as the NE-SW, E-W, NW-SE and S-N trends; the ore bearing fluid should be driven under the tectonic stresses to deposit ores and form silicification and carbonation alteration when the purple sandstones were altered into light-colored. The tectonite ESR dating results reflect that the district was experienced

收稿日期: 2017-05-11

基金项目: 中国科学院地球化学研究所博士后研究经费 (编号: 1191030078); 国家危机矿山接替资源勘查项目 (编号: 20089943); 国家自然科学基金项目 (批准号: 41572060); 云南省矿产资源预测评价工程实验室项目; 云南省、校创新团队项目

*通讯作者, E-mail: 554670042@qq.com

3 stages of structural deformation and thermal-fluid activities respectively due to the early stage (46.8±4.5~56.0±5.6 Ma), medium stage (32.4±3.0~42.3±4.1 Ma) and late stage (23.5±2.4~29.3±3.0 Ma) of the Himalayan movement. The ESR dating could be an effective chronological method to study the regional structure evolution. And the mineralogy-petrology research should be complement and certification items for matching the study on macro-structure deformation.

Keywords: tectonite; mineralogy-petrology research; micro-structure; ESR dating; Dayao Liuju copper ore-district

楚雄盆地沉积—成岩成矿作用对形成砂岩型铜矿床扮演着重要角色^[1-6], 但中-新生代的构造运动对该类矿床的空间就位和改造富集作用也不容忽略^[7-11]。近年的研究, 越来越多证据指向成矿同期和后期的构造成矿作用^[12-17]。这在六苴铜矿床、郝家河铜矿床中表现的尤为明显^[14,18-19]。邹海俊^[12]、韩润生等^[14]从楚雄盆地构造变形演化的角度研究了改造成矿作用机理及构造-成矿流体耦合作用, 结果表明, 在构造-流体-成矿体系的动力学演化中, 该类矿床的形成经历了沉积-成岩成矿作用、改造成矿作用及后期断裂作用的演化过程, 矿床(体)既沿褶皱分布又沿含矿层定位及矿物、元素分带的主要原因是在区域构造运动背景下铜矿源、构造与流体三者耦合作用的结果。因此, 研究构造演化矿体定位与改造的关系, 在砂岩型铜矿床的成因研究中显得十分重要。

构造岩^[20]是原有岩石在应力作用下经受一定程度脆性变形或塑性变形, 发生破裂、滑移、重结晶等作用形成的岩石。构造岩内隐藏着反映构造活动的时间、变形机制与强度、物理化学条件(*t*、*p*、*Eh*、*pH*等)、流体运移及成岩成矿作用方式、构造演化等信息。构造岩的矿物岩石学特征研究是探讨构造演化的重要途径, 其中显微组构特征与年代学研究是分析构造作用的关键内容。因此, 定向构造岩显微组构、构造岩特征、矿物年代学研究是对宏观构造演化特征研究的有力补充和有效手段。

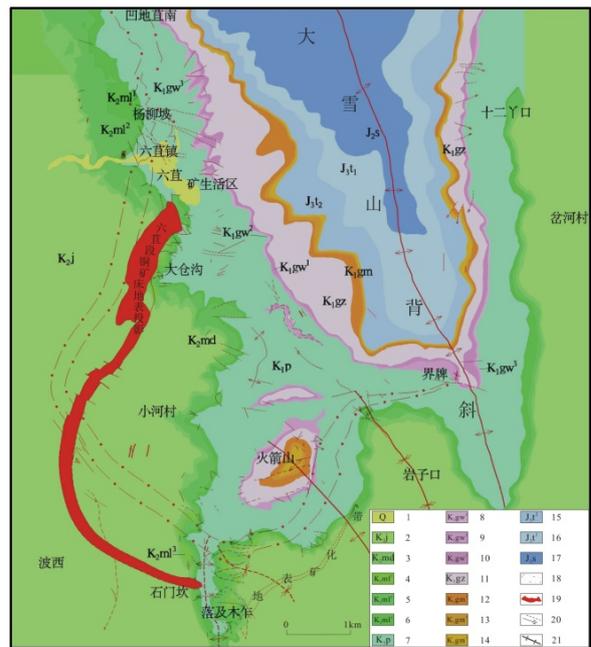
本文在简述大姚砂岩型铜矿区构造变形和控矿特征的基础上, 着重从断裂构造岩定向显微构造特征及石英 ESR 测年资料的综合分析, 从微观角度补充揭示了喜山期构造活动特征与成矿(矿床形成与定位)的关系及其发生时限, 完善本区构造-成矿演化的认识, 具有重要的地质意义。

1 大姚六苴铜矿区构造控矿特征

1.1 成矿地质特征

大姚六苴铜矿区位于楚雄盆地大雪山背斜南部西翼倾没端(图 1), 主要矿床(点)有: 六苴、小河—石门坎、凹地苴 3 个矿床和落及木乍、岩子口、

界牌—火箭山、岔河、十二丫口矿点等。其中六苴铜矿床是楚雄盆地内探明规模最大的大型砂岩型铜矿床^[1,3,21], 赋存于大雪山背斜西翼上白垩统马头山组六苴下亚段(K_1ml^1)和中亚段(K_1ml^2)的浅灰色中—粗粒长石石英砂岩层中(图 1)。主要金属矿物辉铜矿, 靠浅色砂岩有少量斑铜矿和黄铜矿及黄铁矿。次生氧化矿物主要为孔雀石和极少量的硅孔雀石、赤铜矿、铜蓝、黑铜矿等。主要脉石矿物是长石、石英、方解石, 少量石膏和白云石等。围岩蚀变主要为硅化、碳酸盐化。岩石由紫灰色到浅色的变化是一种褪色蚀变作用。



1.第四系沉积物; 2.上白垩统江底河组泥岩、粉砂岩; 3.上白垩统马头山组大村段泥岩、粉砂岩、砾岩; 4.上白垩统马头山组六苴上亚段泥岩; 5.上白垩统马头山组六苴中亚段泥岩/细砂岩; 6.上白垩统马头山组六苴下亚段长石石英砂岩; 7.下白垩统普昌河组泥岩、粉砂岩; 8.下白垩统高峰寺组凹地苴上亚段粉砂岩、泥岩; 9.下白垩统高峰寺组凹地苴中亚段砂质泥岩; 10.下白垩统高峰寺组凹地苴下亚段砂质泥岩、砂岩; 11.下白垩统高峰寺组者纳段泥岩; 12,13,14.下白垩统高峰寺组美宜坡上、中、下段含砾砂岩、砂质泥岩; 15.上侏罗统妥甸组杂色泥岩段; 16.上侏罗统妥甸组紫色泥岩段; 17.中侏罗统蛇甸组石英砂岩夹泥岩; 18.凹地苴段矿体地表投影; 19.六苴段矿体地表投影; 20.实测、推断断层; 21.背斜。

图 1 大姚六苴铜矿区地质简图
Fig. 1. Geological sketch map of Liuju copper ore-district, Dayao.

1.2 构造控矿特征

六直铜矿区矿床的形成是矿源层（含铜源区）、风化剥蚀-河流沉积、砂岩矿源-构造驱动、流体萃取-浅色层形成、沉淀成矿等一系列有利成矿条件耦合作用的结果^[12]。矿床（体）的形成、定位和改造均与大雪山复式背斜褶皱及其配套构造具有密切的时空和成因关系（图 2）。

六直铜矿区构造控矿特征表现在：褶皱构造控制似层状矿体，断裂、节理构造控制了脉状矿体（脉）^[14]；后期断裂作用常错断矿体。喜山运动早期，区域主压力为近 EW 向，使六直铜矿区内形成横亘南北的大雪山背斜，形成小规模近 SN 向的层间滑动断裂、NW 向左行扭性断裂、部分 EW 向张扭性断裂，构造动力驱动流体大规模的运移，并与所经岩石发生水岩相互作用，从而溶解和活化其中的 Cu 等矿质，形成成矿流体并在构造有利部位沉淀成矿，为六直铜矿床的第一次成矿期；喜山运动中期，区域主压应力方向为 NW-SE 向，大雪山背斜经历了左行扭性改造，形成南部“裙边”褶皱，在 NW 与近 EW 向的（压）扭性断裂带中常充填石英-方解石-含铜硫化物矿脉，为第二次成矿期；成矿期后构造主要为 NW 向及近 EW 向扭性断裂，常使铜矿化带或矿体平移。

1.3 褶皱和断裂构造变形特征

矿区构造活动是伴随着盆地构造演化而发生的。楚雄盆地在印支运动末期形成以来，由于印度板块向北俯冲，经历了燕山运动和喜山运动等多次区域构造运动，在六直铜矿区产生相应的褶皱、断裂、不整合面等构造形迹。

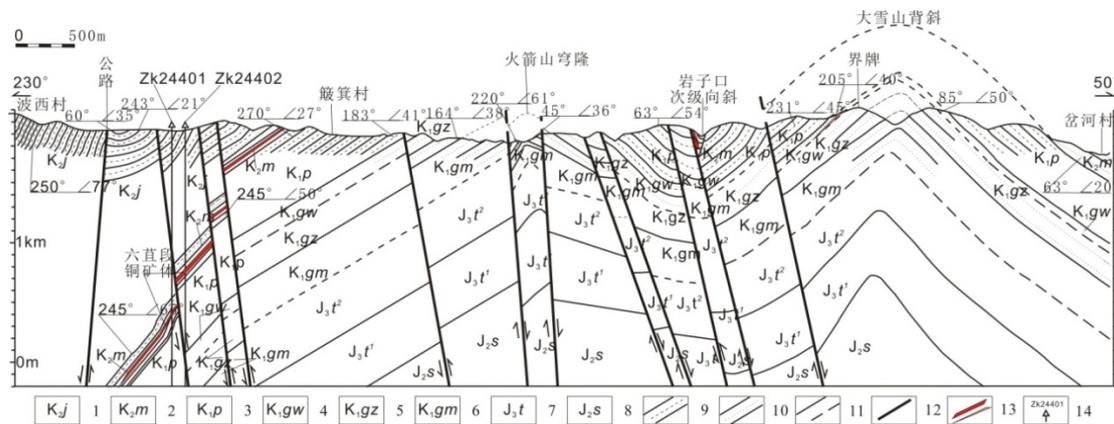
通过对大雪山复式褶皱和断裂构造演化研究认为，在燕山期沉积作用和同沉积构造作用（古构造或古隆起）的基础上，六直铜矿区在喜山期主要经历了近 EW 向应力→NW-SE 向应力→近 SN 向主压应力的作用和改造，形成以大雪山背斜为主要构造、上叠次级和更次级褶皱构造以及短轴状褶皱（穹隆）的复式褶皱构造样式，其同期及后期的演化过程配套产生了不同方向、多期次活动的断裂构造样式（图 2）。这与区域上楚雄盆地喜山期构造演化特征相吻合^[7,9-10,12,21-23]。

2 大姚六直铜矿区构造岩矿物岩石学特征与地质意义

2.1 构造岩定向标本显微构造特征及地质意义

在研究六直铜矿区褶皱和断裂构造的同时，采集主要代表性断裂构造带构造岩定向标本，并切割成定向薄片，进行显微构造岩矿物岩石学研究，总结构造岩的微观特征（表 1）。

综合分析认为，显微构造的主压应力方向变化，由构造岩定向反映到宏观尺度，可补充和验证宏观构造的力学分析结论。本区断裂构造岩显微构造的主压应力作用主要有 NE-SW 向、近 EW 向、NW-SE 向和近 SN 向主压应力，可与宏观构造变形分析相补充和印证（表 2）。至于显微构造形成期次，须与宏观构造期次相配套，才能得出合理的结论。因此，将显微构造主压应力结果匹配到宏观构造变形分析中，则可以印证宏观构造解析结果的可靠性^[12]。从而说明了其是对宏观构造变形研究的有效补充和佐证，具有明显的地质指示作用。



1.上白垩统江底河组泥岩; 2.上白垩统马头山组砂岩、泥岩; 3. 上白垩统普昌河组泥岩; 4.上白垩统高峰寺组凹地苜段砂岩; 5.上白垩统高峰寺组那么段砂岩; 6.上白垩统高峰寺组美宜坡段砂岩; 7.上侏罗统妥甸组泥岩; 8.中侏罗统蛇甸组泥岩; 9.泥岩; 10.砂岩; 11.地层界线及假整合界线; 12.断裂（层）; 13.矿体及矿化体; 14.钻孔及编号。

图 2 大姚六直铜矿区大雪山复式背斜波西—界牌—岔河实测地质剖面图

Fig. 2. Boxi-Jiepai-Chahasurveyed geological cross-section on Daxueshan anticline in Liuju copper ore-district, Dayao.

表 1 大姚六直铜矿区构造岩显微构造特征

Table 1. Micro-structural Characteristics of oriented tectonitesamples fromLiuju copper ore-district, Dayao

样品号	构造岩定名	微观特征
060DX-31	石英砂质碎裂岩	四条裂隙, 走向为 60°; 平直裂缝切断矿物, 为一扭性裂缝, 与四条裂隙夹角约为 30°~40°。
06D-32	长石石英砂质碎裂岩	石英-硫化物脉的裂缝走向方位角为 15°, 裂缝宽窄不规则, 石英晶形较好, 而金属矿物—石英具溶蚀, 反应边结构, 为应力扩容空间。
06DXE-37	石英碎裂岩	早期大颗粒椭圆状石英晶粒被后期石英脉穿插现象; 早期石英长轴方向为 162°, 后期有两组石英脉, 其中一组形态平直、平行于长轴方向分布, 另一组为不规则状、垂直于长轴方向分布。破碎带石英定向排列方向 203°。
06DXE37-1	强硅化构造蚀变岩	石英有两种: 早期石英晶粒较小, 为自形—半自形结构; 后期石英为均质体包围早期石英, 其中见金属矿物。
06DX-37-1	石英砂质碎裂岩	裂隙中石英颗粒定向排列, 裂缝方位角为 98°; 裂缝较宽, 其方向与其中石英长轴定向排列方向垂直。
06DX-37-2	硅化石英砂质碎裂岩	裂缝多发育, 可见到早期长石被后期石英脉裂缝破坏现象, 裂缝方位角为 322°, 为追踪张裂缝。石英流动构造与裂隙组成一个反“S”形流变带, 为一扭力矩作用的结果。
06DX-62	泥质粉砂质构造蚀变岩	蚀变带的走向: 从 16°~75°之间, 平均为 34°, 石英定向排列方向从 10°~17°, 平均为 13.5°。
074DBX-5	矿化石英砂质碎裂岩	143°~169°方向的张裂较发育, 其中及其周围破碎石英颗粒之间发育大量的金属矿物。
074DBD-20	粗砂质碎裂岩	金属矿物晶面长轴方向及脉走向及揉皱状石英以及石英定向排列方向平均为 9.7°, 为压性面方向。
074DBD-21	强硅化细砂质构造蚀变岩	裂缝总体方位为 49°, 总体较平直, 延伸性较强, 且以右行雁列排布, 具共轭现象, 为扭张性脉。
074DBD-27	强硅化石英砂质碎裂岩	早期石英定向排列方向 103°; 后期石英脉走向均 168.4°。
074DB0-28-2	矿化粗粒石英砂质碎裂岩	石英颗粒较粗, 具压碎结构; 石英颗粒之间见不透明金属矿物。
074DBR-37	强硅化含砾石英细砂质构造蚀变岩	见长石聚片双晶, 硅质胶结, 砂状结构。
074DBR-39	粉砂质泥质碎裂岩	泥质条带定向方位 108°; 石英定向排列, 方位为 81°, 具糜棱结构, 为压扭性应力。

注: 定向薄片切制单位: 云南省地矿局测试中心。

表 2 大姚六直铜矿区构造岩显微构造主压应力方向及宏观构造分析匹配

Table 2. Principal compressive stresses of tectonites withmacro-structural matching for Liuju copper ore-district, Dayao

样品号	主应力方向 σ_1	宏观对应性
060DX-31	30°~45°	与石门坎 I 号大坑 NNW 向断裂 σ_1 为 25°~35°一致
06D-32	15°	与第 1 期 NE 向右行扭性断裂 σ_1 为 0°~20°一致
06DXE-37	72°	与 NE 向断裂 (含矿石英脉) σ_1 为 60°~77°一致
6DXE37-1		浸染状矿石
06DX-37-1	80°~95°	近 EW 向 (NEE 向) 两期活动断裂 σ_1 为 80°~90°一致
06DX-37-2	120°	与 NW 向含矿层间断裂 σ_1 为 298°~313°一致
06DX-62	34°~55°	与 NW 向层间断裂 σ_1 为 22°~52°一致
074DBX-5	150°	与 NNW 向含矿层间断裂 σ_1 为 340°~355°一致
074DBD-20	99.7°	与 NW 向断裂 σ_1 为 285°~300°一致, 与矿化关系密切
074DBD-21	64°~79°	与 NNW 向左行扭压性断裂 σ_1 为 65°~80°一致
074DBD-27	168.4°	与 NWW 向切层断裂 σ_1 为 310°~325°一致
074DB0-28-2		砂岩的硅化蚀变对成矿有利
074DBR-37		后期蚀变改造强烈
074DBR-39	96°~101°	与近 EW 向后期压扭性断裂 σ_1 为 314°~329°一致

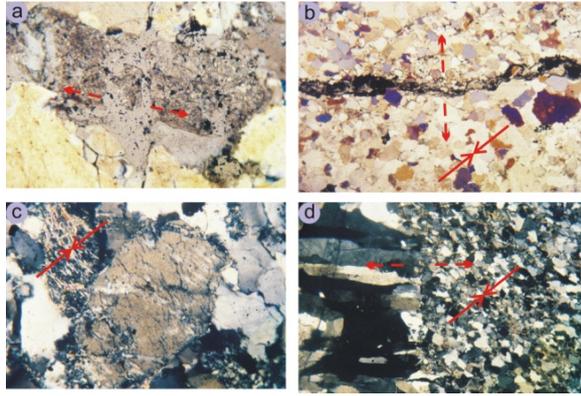
此外, 在与矿化关系密切的构造岩显微构造研究中发现, 金属矿物沿构造裂隙分布于硅化和碳酸盐化带和长石—石英接触缝隙中, 宏观特征表现为矿化多出现在受构造影响的蚀变砂岩中。硅化和碳酸盐化蚀变对成矿有利, 辉铜矿等金属矿物是在紫色砂岩蚀变为浅色砂岩的过程中形成的。在构造应力的驱动下, 后期热液 (流体) 改造作用是紫红色砂岩蚀变为浅色砂岩以及形成层状矿体和后期矿脉的关键。浅色含矿砂岩流体包裹体世代穿插关系及类型也可说明至少有两期与成矿有关的流体对砂岩

进行了改造^[12]。这进一步从微观角度反映了构造活动与矿化具有紧密的成因关系 (图 3)。

2.2 构造岩石英热活化电子自旋共振 (ESR) 测年及其地质意义

2.2.1 构造岩石英 ESR 测年的可行性

构造活动的精确定年一直是地学界的难题, 早期根据构造层的概念大致确定时限, 随着热释光测年技术和电子自旋共振测年技术的发展^[24-30], 电子



a. 砂岩中长石颗粒被压裂, 后期石英和金属矿物充填, 示后生成矿 (06DX-31 浅灰色长石石英砂岩, 单偏光 10×10 倍); b. 石英颗粒受挤压而定向排列; 后期经压裂发育裂缝, 充填金属矿物; 示多期应力作用和后生成矿 (06DX-31 浅灰色长石石英砂岩, 正交光 10×2.5 倍); c. 长石颗粒被压裂, 部分已糜棱岩化, 颗粒和裂隙定向排列, 走向一致; 后期石英充填裂缝或交代长石 (06DXE-37 浅色孔雀石化石英砂岩, 正交光 10×2.5 倍); d. 含矿砂岩中石英颗粒小, 受应力作用定向排列; 张扭性裂隙含矿石英脉中石英颗粒粗大, 共生金属矿物, 示多期应力作用和后生成矿 (06DXE-37 浅色孔雀石化石英砂岩, 正交光 10×2.5 倍)。

图 3 大姚六苴铜矿区构造岩显微组构

Fig. 3. Micro-texture and structure features of oriented tectonites from Liuju copper ore-district, Dayao.

自旋共振 ESR (Electron Spin Resonance), 亦称电子顺磁共振^[25], 为精确测定断裂构造活动的年限提供了可能。断层强烈活动时, 在断层带内能形成一些热退火石英颗粒和重结晶石英颗粒, 具有良好的测年零点, 有利于 ESR 测年^[24], 测年下限可以达到 2 亿年左右或更长的时间^[24-25]。可用于 ESR 测年的构造岩矿物有石英、方解石脉和石膏^[29-30]。

断裂构造岩 ESR 测年是可行的^[12]。压(扭)性断裂在活动过程中, 常在裂带中形成相对张性的空间。伴随两盘缓慢移动, 其中石英可以沿与运动方向大致成 45° 角或更小夹角的方向生长, 形态为长柱状、纤维状(图 4), 结晶完好。野外地质工作中, 常用此判定压扭性断裂两盘的相对运动方向及错距, 石英生长柱与相邻盘的锐角指示此盘的运动方

向(图 4)。多期活动断裂面上往往可以见到早期石英被挤压为薄膜状, 甚至重结晶, 则石英膜的 ESR 年龄可以认为是后期活动时间的上限。因此, 这对张性多期活动断裂同样适用。周文等^[31]在楚雄盆地使用 ESR 确定地层天然裂缝形成期次, 并与燕山期、喜马拉雅期构造运动进行了匹配对比就是一个典型的应用实例。

2.2.2 构造岩石英 ESR 测年

在六苴矿区典型断裂构造带中采取含有石英脉的构造岩样品共 8 件, 送往成都理工大学地科院经标准化加工、测试, 结果见表 3。

074DBD-21 样品测试结果是说明构造岩 ESR 测年反映宏观地质构造特征的例证。样品取自六苴铜矿区岩子口次级向斜核部马头山组六苴下亚段(K₂m¹)中的断裂带中。断裂带平直, 裂面上见大量石英应力薄膜。发育明显的两期擦痕: 早期为裂

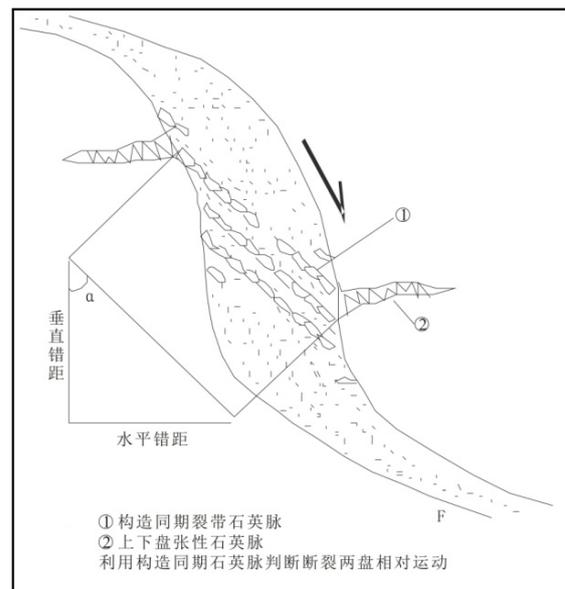


图 4 断裂构造同期石英脉 ESR 测年可行性示意图
Fig. 4. Feasibility of ESR dating for quartz vein formed homochronously with faults.

表 3 大姚六苴铜矿区断裂构造岩 ESR 测年结果

Table 3. ESR dating results for fault tectonites from Liuju copper ore-district, Dayao

样品编号	样品名称	顺磁中心浓度/(10 ¹⁵ Sp/g)	铀当量含量/(μg/g)	年龄/Ma
074DBQ-5	含氧化矿石英脉	0.196	1.21	32.4±3.0
074DBQ-16	石英脉(团块)	0.147	1.25	23.5±2.4
074DBQ-21	灰黄色细砂质碎裂岩	0.131	0.61	42.3±4.1
074DBQ-39	紫红色粉砂质泥质碎裂岩	0.131	0.46	56.0±5.6
074DBQ-41-1	紫红色砂质碎裂岩	0.608	2.60	46.8±4.5
074DBQ-41-2	紫红色细砂质碎裂岩	0.023	0.14	32.9±3.3
074DBR-48	紫红色泥质碎裂岩	0.235	1.00	47.0±4.8
074DBQ-53	浅灰黄色中粒长石石英砂质碎裂岩	0.063	0.43	29.3±3.0

测试单位: 成都理工大学地科院; 测试者: 梁兴中; 铀当量含量(μg/g)即测定的平衡铀摩尔浓度(值)(μg/g)。

面上的斜下擦痕, 后期为薄膜上的垂向擦痕, 指示断裂经历两期活动, 早期左行压扭性, 在相对张性环境中形成构造同期石英脉, 主压应力 σ_1 方向为: $270^\circ \sim 285^\circ$ (近 EW 向); 后期为压性, 上盘逆冲, 主压应力 σ_1 方向为: $60^\circ \sim 75^\circ$ 。上下盘围岩为紫红色砂岩 (图 5)。断裂带产状: $345^\circ \angle 80^\circ$ 。

样品为构造同期石英脉, 其年龄代表断裂形成年龄, 即早期活动 (近 EW 向 σ_1) 为 42.3 ± 4.1 Ma。在此之后经历了 NE-SW 方向的应力作用, 应为改造期局部应力, 对形成轴向 NW 的岩石口向斜有关。

2.2.3 构造岩石英 ESR 测年的地质意义

本次测试的 6 件样品直接取自断裂带 (破碎带) 中, 有两件样品取自岩石中的蚀变脉, 充填于岩石的裂隙中。这些样品所代表的地质意义成为指示构造-热液活动时限的关键 (表 4)。

测试结果分析和综合地质研究表明, 样品 ESR 年龄可分为 3 个区间: 1) $46.8 \pm 4.5 \sim 56.0 \pm 5.6$ Ma, 代表近 EW 向主压应力形成大雪山背斜形成期, 同时也是主成矿期, 与区域上喜山运动早期 (第 I 幕) 相当; 2) $32.4 \pm 3.0 \sim 42.3 \pm 4.1$ Ma, 代表 NW-SE 向主压应力的第一次改造期, 即南部裙边褶皱形成期, 与区域上喜山运动中期 (第 II 幕) 相当; 3) $23.5 \pm 2.4 \sim 29.3 \pm 3.0$ Ma, 代表近 SN 向主压应力的第二次改造破坏期及表生氧化期, 与区域上喜山运动晚期早阶段 (早第 III 幕) 相当。

区域上的年龄对比印证了以上研究成果。彭建堂等^[32]对位于楚雄盆地西部祥云马厂箐富碱侵入岩年龄研究表明, 最早岩浆活动始于 52 Ma, 中期为 42~47 Ma, 晚期岩浆活动最强烈, 时间为 33~37 Ma, 末期岩浆活动为 29~32 Ma, 并与其成矿作用关系密切。这代表了喜山运动时期楚雄盆地边界

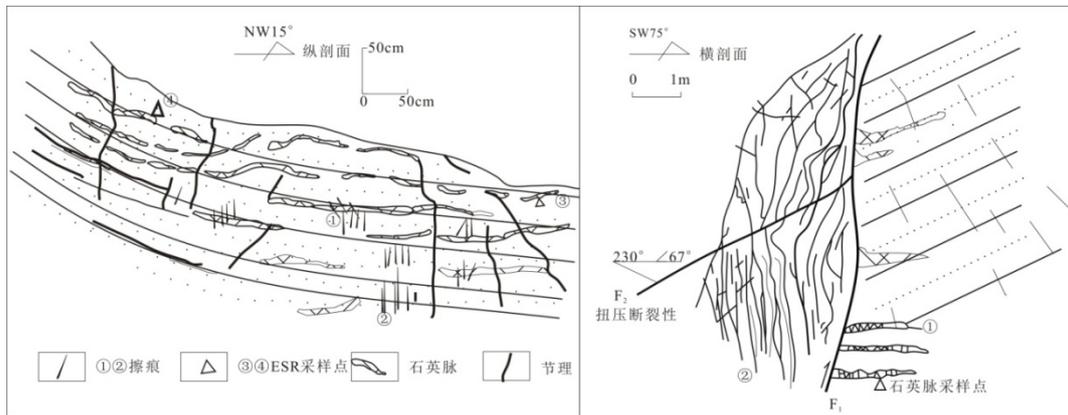


图 5 大姚六直铜矿区 ESR 测年样品 074DB-21 断裂构造素描图

Fig. 5. Fault structure sketch for ESR dating sample 074DB-21 from Liuju copper ore-district, Dayao.

表 4 大姚六直铜矿区构造岩 ESR 测年样品特征及地质意义

Table 4. Geological significance and characteristics of tectonites from Liuju copper ore-district, Dayao

样品号	测年岩 (矿) 石特征	赋存环境/产状	力学性质	层位/围岩/宏观特征	ESR 年龄地质意义
074DBQ-5	石英脉中石英颗粒较粗, 孔雀石化	含矿断裂带 $50^\circ \angle 35^\circ$	层间压扭性滑动 破碎带	落及木乍 K_2m_1 浅色砂岩中脉状矿体中石英脉 (改造期)	断裂 (矿体) 的改造活动时间 (σ_1 为 NW-SE 向)
074DBQ-16	石英颗粒粗大, 见空洞	破碎带 $145^\circ \angle 75^\circ$	张性破碎带	K_1p 紫红色砂岩中切层充填石英脉 (破坏期)	最晚期断裂破坏改造时限
074DBD-21	石英脉沿裂隙生长, 见梳状晶洞	断裂带 $165^\circ \angle 80^\circ$	早期左行扭压性、晚期压性	岩石口次级向斜 K_2m_1 紫红色砂岩中石英脉 (改造期)	第一次改造活动时限 (σ_1 近 EW 向)
074DBD-39	顺层带擦痕和阶步石英脉	断裂带 $95^\circ \angle 85^\circ$	早张性, 晚期左行压扭性;	K_1p 紫红色砂岩中第一期张性石英脉 (背斜形成期)	大雪山背斜形成期断裂及石英脉年龄 (σ_1 近 EW 向)
074DBQ-41-1	含砾 (长石), 多条顺层石英细脉	砂岩顺层裂隙 $132^\circ \angle 19^\circ$	早期张性顺层	杨柳坡 K_2m_1 紫红色砂岩 (背斜形成期)	大雪山背斜形成期年龄 (σ_1 近 EW 向)
074DBQ-41-2	不规则厚大切层石英脉	砂岩切层裂隙 $105^\circ \angle 67^\circ$	后期张性脉, 切错了早期石英脉	杨柳坡 K_2m_1 紫红色砂岩 (改造期)	大雪山背斜形成后的第一次改造期年龄
074DBR-48	发育厚 3~20mm 梳状石膏-方解石脉	泥岩裂隙 $85^\circ \angle 27^\circ$	张性蚀变产物	K_1p 紫红色泥岩夹灰绿色浅色蚀变团斑状泥岩	大雪山背斜形成期蚀变作用年龄及浅色层-紫色层交互出现现象形成年龄
074DBQ-53	两组厚大石英脉, 石英晶形完好	断裂带下盘 $3^\circ \angle 29^\circ$	早期右行扭性; 后期右行压扭性	K_2m_1 灰黄色含砾砂岩层中断裂带内充填石英脉 (破坏改造期)	南部“裙边”褶皱形成后的改造年龄

断裂构造—岩浆活动事件和时间,可以与本次研究成果对比。刘树根等^[33]对楚雄盆地构造时限研究成果表明,楚雄盆地经历了燕山期(120~130 Ma)、喜山早期(60 Ma左右)、喜山中期(30~40 Ma)、喜山晚期(20~25 Ma)、喜山末期(10 Ma)的构造演化过程。这项年龄数据与本次测试的年龄数据,经过构造筛分后的分段时限非常吻合和一致。张玉泉等^[34]对姚安富碱侵入岩体岩体的 K-Ar 定年结果显示该岩体的成岩时代为 36 Ma 左右,且与金成矿关系密切。说明了在喜山中期有强烈的构造—岩浆活动。王生伟、蒋小芳等^[35]测试出楚雄盆地直苴铜矿中、侵入下白垩统普昌河组和高丰寺组砂岩层的含矿花岗斑岩体锆石的 La-ICP-MS U-Pb 年龄为 31.28 ± 0.28 Ma,表明直苴铜多金属矿形成于喜马拉雅中期。同样证明了喜山期构造—岩浆活动对楚雄盆地内铜矿成矿作用的控制。这些数据佐证了本文年龄数据和分析结果的可靠性。

因此,通过对六苴铜矿区不同方向、多期次活动的构造中构造岩 ESR 测年、以及所采样品代表的构造变形特征的研究,并结合全区构造变形演化整体特征,可以认为,构造岩 ESR 测年工作及其结果不仅是可揭示构造本身变形特征,更是对全区乃至区域构造演化的有效补充,对研究楚雄盆地的形成和变形演化历史具有重要的作用。

3 讨论

构造岩矿物学特征研究,必须与宏观断裂、褶皱、节理(劈理)等构造变形研究、平衡剖面、构造层时限划定等的研究相结合,相互补充和验证方可得到对区域构造演化的全面的认识。例如,前期对楚雄盆地构造演化和六苴铜矿区宏观构造变形特征的研究表明^[12,14,20-22],楚雄盆地区域构造演化是由扬子地台西南缘受到印度板块与欧亚板块碰撞构造运动所形成的,六苴铜矿区存在除了现今构造应力之外的 5 组构造主压应力,演化顺序为^[12-14]: NNW-SSE(近 SN)向 $177^\circ \rightarrow$ SW-NE 向 $44^\circ \rightarrow$ 近 EW 向 $91^\circ \rightarrow$ NW-SE 向 $129^\circ \rightarrow$ 近 SN 向 5° , 实际主压应

力侧伏角依次为: 25.8° 、 35° 、 31.5° 、 25° 、 33.2° 。结合六苴铜矿区构造岩矿物岩石学研究成果,认为本区至少有 5 期构造活动^[1,7,10,20,36-40],分别为燕山中期(137 Ma)和燕山晚期(96~65 Ma)、喜山早期($46.8 \pm 4.5 \sim 56.0 \pm 5.6$ Ma)、喜山中期($32.4 \pm 3.0 \sim 42.3 \pm 4.1$ Ma)、喜山晚期($23.5 \pm 2.4 \sim 29.3 \pm 3.0$ Ma),形成现今构造格架。利用平衡剖面恢复六苴铜矿区构造变形史表明,大约 140 Ma 以来,六苴铜矿区表层地壳以挤压纵弯变形为主,表层地壳缩短了 20%以上^[12],缩短部分转化为隆起的褶皱高山,一部分遭受了风化剥蚀。大雪山背斜是在喜山运动早期(第 I 幕)形成,同时与本区的大规模成矿作用关系密切。

构造岩矿物学特征研究,不仅限于构造岩显微组构特征、变形特征、测年的研究,还应使用矿物岩石学和地球化学等其它地质学科领域的方法和手段,对构造岩常量和微量元素、稀土元素、流体包裹体、同位素及模拟实验等方面进行研究^[41],以揭示构造变形的演化规律,对反演川滇黔多金属成矿域的构造演化具有重要意义。

4 结论

(1)构造岩矿物岩石学研究可有效补充和印证宏观构造变形特征,具有明显的地质指示作用。大姚六苴铜矿区构造岩显微组构研究表明,显微构造主压应力有 NE-SW 向、近 EW 向、NW-SE 向和近 SN 向。含矿流体是在构造应力的驱动下,紫红色砂岩蚀变为浅色砂岩的过程中伴随着硅化和碳酸盐化沉淀成矿的。

(2)构造岩 ESR 测年可揭示构造变形的时限,是研究区域构造演化的有效年代学工具。大姚六苴铜矿区构造岩石 ESR 测年结果与区域上构造运动的年龄吻合,反映了其共同楚雄盆地共同经历了喜山运动早、中、晚期构造变形作用和热液活动。

致谢: 本文的野外工作得到了云铜集团楚雄矿冶公司的大力支持和配合,研究工作得到了昆明理工大学西南地质调查所各位老师的指导。在此一并表示感谢!

参考文献:

- [1] 云南冶金局地质勘探公司著. 砂岩铜矿地质: 滇中砂岩铜矿床的实践与认识[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1976: 1-294.
- [2] 成治. 我国某地区砂岩铜矿床的成因及控矿因素的初步探讨[J]. 地质学报 1975, 49(1): 28-44.
- [3] 冉崇英, 刘卫华. 康滇地轴铜矿床地球化学与矿床层楼结构机理[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 1-165.
- [4] 庄汉平, 冉崇英, 何明勤, 等. 楚雄盆地铜、盐、有机质相互作用与砂岩铜矿生成[J]. 地质学报, 1996, 70(2): 162-172.

- [5] Ran C Y, Liu W H, Zhang Z J, et al. Rifting cycle and storeyed texture of copper deposits and their geochemical evolution in Kangdian region[J]. *Science in China (Series B)*, 1995, 38(5): 606-612.
- [6] 陈根文, 夏斌, 吴延之, 等. 沉积岩对楚雄盆地砂岩铜矿成矿的控制[J]. *矿物岩石*, 2002, 22(3): 24-28.
- [7] 刘家铎, 张成江, 刘显凡, 等. 扬子地台西南缘成矿规律及找矿方向[M]. 北京: 地质出版社, 2004.
- [8] 陈根文, 夏斌, 王国强, 等. 楚雄盆地砂岩铜矿床构造控矿分析[J]. *大地构造与成矿学*, 2002, 26(2): 167-171.
- [9] 谭富文, 尹福光, 许效松, 等. 楚雄前陆盆地的构造特征与沉积演化[J]. *大地构造与成矿学*, 2004, 28(3): 345-352.
- [10] 曹德斌, 张志斌. 楚雄盆地中—新生代构造变形特征[J]. *云南地质*, 2001, 21(1): 50-59.
- [11] 涂光炽. 中国层控矿床地球化学(第三卷)[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [12] 邹海俊. 楚雄盆地构造变形及其成矿作用研究——以大姚六直铜矿区为例[D]. 昆明: 昆明理工大学(博士论文), 2008.
- [13] 韩润生, 邹海俊, 吴鹏, 等. 大姚六直砂岩型铜矿床构造演化时间序列及构造-流体耦合成矿模式[J]. *矿物学报*, 2009, 29(S1): 425-426.
- [14] 韩润生, 邹海俊, 吴鹏, 等. 楚雄盆地砂岩型铜矿床构造—流体耦合成矿模型[J]. *地质学报*, 2010, 84(10): 1438-1447.
- [15] 韩润生, 吴鹏, 胡煜昭, 等. 楚雄盆地砂岩型铜矿床岩性/岩相成矿结构面[J]. *地球科学进展*, 2012, 27(S1): 174-178.
- [16] 胡煜昭, 韩润生, 闵朝龙, 等. 楚雄盆地六直铜矿含矿岩系沉积演化、成矿时代及成矿深度分析[J]. *世界地质*, 2010, 29(2): 218-225.
- [17] 鲁文举, 王学文, 龙力辉. 云南楚雄盆地砂(页)岩型铜矿床成矿规律及成矿模式[J]. *矿物学报*, 2013, 33(4): 566-572.
- [18] 秦德先, 孟清, 杨明初. 牟定郝家河铜矿床的沉积—改造成因[J]. *矿床地质*, 1993, 12(2): 97-108.
- [19] 梁徐文, 韩润生, 吴海枝, 等. 云南楚雄盆地郝家河铜矿区断裂地质特征及其与成矿的关系[J]. *现代地质*, 2013, 27(6): 1297-1307.
- [20] 何永年, 林传勇, 史兰斌. 构造岩石学基础[M]. 地质出版社, 1988.
- [21] 刘肇昌, 李凡友, 钟康惠, 等. 扬子地台西缘构造演化与成矿[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1996: 1-251.
- [22] 杨庆道, 王伟峰, 吴思卫, 等. 楚雄盆地构造演化及其对油气聚集的控制[J]. *中国石油勘探*, 2011, 16(4): 28-36.
- [23] 丁道柱, 潘文蕾, 黄继文. 楚雄前陆盆地的改造变形[J]. *石油实验地质*, 2012, 34(4): 345-356.
- [24] 梁兴中, 高钧成. 断裂成矿年龄的 α 石英ESR研究[J]. *矿物岩石*, 1999, 19(2): 69-71.
- [25] 杨坤光, 梁兴中, 谢建磊, 等. ESR定年: 一种确定脆性断层活动年龄的方法原理与应用[J]. *地球科学进展*, 2006, 21(4): 430-435.
- [26] Yang K F, Yang K G, Ma C Q. Deformation characteristics and ESR dating of Anhua-Xupu fault belt in the Xuefeng mountains, Hunan[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2005, 28(3): 263-269.
- [27] 尹功明, 林敏. 沉积物电子自旋共振测年现状[J]. *核技术*, 2005, 28(5): 399-402.
- [28] 李立刚, 黄培华, 傅容珊, 等. 断层粘滑摩擦增温的理论分析及其对TL, ESR测龄的意义[J]. *地震地质*, 1999, 21(4): 387-396.
- [29] 贾丽, 鲍继飞, 尹功明, 等. 方解石脉ESR定年信号和测量条件的研究[J]. *地震地质*, 2006, 28(4): 668-674.
- [30] 业渝光, 刁少波, 高钧成. 干旱地区石膏ESR测年的初步研究[J]. *核技术*, 2003, 26(1): 66-67.
- [31] 周文, 张银德, 王洪辉, 等. 楚雄盆地北部T₃-J地层天然裂缝形成期次确定[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2008, 35(2): 121-126.
- [32] 彭建堂, 毕献武, 胡瑞忠, 等. 滇西马厂箐斑岩铜(铅)矿床成岩成矿时限的厘定[J]. *矿物学报*, 2005, 25(1): 69-74.
- [33] 刘树根, 赵锡奎, 罗志立, 等. 龙门山造山带—川西前陆盆地系统构造事件研究[J]. *成都理工学院学报*, 2001, 28(3): 221-230.
- [34] 毕献武, 胡瑞忠, Cornell D H. 富碱侵入岩与金成矿关系: 云南省姚安金矿床成矿流体形成演化的微量元素和同位素证据[J]. *地球化学*, 2001, 30(3): 264-272.
- [35] 蒋小芳, 王生伟, 孙晓明, 等. 云南永仁直直铜多金属矿床含矿斑岩体锆石U-Pb年龄[J]. *矿床地质*, 2014, 33(S1): 281-282.
- [36] 万玲, 郭随平, 刘德良. 滇中楚雄盆地构造演化与油气关系[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 1998, 34(3): 322-329.
- [37] 冉崇英, 张智筠, 庄汉平. 楚雄盆地铜、膏盐、有机矿床组合地球化学[J]. *成都理工学院学报*, 1998, 25(2): 241-245.
- [38] 催克信. 中国西南区域古地理及其演化图集[M]. 北京: 地震出版社, 2004.
- [39] 翟光明, 宋建国, 靳久强, 等. 板块构造演化与含油气盆地形成和评价[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.
- [40] 肖荣阁, 陈卉泉, 袁见齐. 云南中新生代地质与矿产[M]. 北京: 海洋出版社, 1993.
- [41] Zou H J, Han R S, Yao Z H, et al. Several methods and steps in tectono-geochemistry research[J]. *Geochimica et Cosmochimica acta*, 2010, 74(12): A370-A370.