

云南老君山片麻岩穹隆中含绿柱石石英脉的显微构造与流体特征及地质意义

李清松¹, 曹淑云¹, 李孝文¹, 田 韵¹, 刘 忠², 范建伟¹, 王淑婷¹

(1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;
2. 铜陵学院建筑工程学院, 安徽 铜陵 244061)

摘要: 绿柱石是重要的铍铝硅酸盐矿物, 具有极高的经济和工业价值。老君山片麻岩穹隆位于华南陆块与印支陆块的结合部位, 经历了多期构造-岩浆作用, 并发育有锡、铜、锌等多金属矿床与祖母绿矿床。本研究重点针对区域中出露的绿柱石及其共生石英脉开展了详细的宏观与微观构造特征分析, 并结合流体包裹体与石英 EBSD 组构开展了形成与变形温度环境限定。研究表明, 绿柱石与石英中都保存有丰富的流体包裹体, 其中绿柱石中存在低温-高盐度两相与高温-低盐度三相流体包裹体类型, 石英中存在低温-低盐度两相流体包裹体类型。绿柱石石英脉中的石英变形特征主要为发育底面 $\langle a \rangle$ 滑移系叠加次要的柱面 $\langle c \rangle$ 滑移系, 指示低温(约 350~400°C)为主的变形环境, 局部叠加相对高温变形。燕山中晚期的岩浆流体伴随片麻岩穹隆隆升/剥露, 带来了丰富的成矿元素, 其中包括绿柱石成矿所需的主要 Be 元素。区域片麻岩穹隆从深部至浅部的剥露过程为成矿作用提供了重要的构造容矿流体通道, 伴随流体不混溶现象的出现, 成矿流体 pH 值增高, 进而促进成矿元素赋存沉淀。

关键词: 绿柱石; 流体包裹体; 显微观测; 变形 EBSD 组构; 流体不混溶作用

中图分类号: P315.2⁺3; P578.953

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2025)02-0259-24

Microstructure and fluid characteristics of beryl-bearing quartz vein in the gneiss dome of Laojunshan, Yunnan, and their geological significance

LI Qing-song¹, CAO Shu-yun¹, LI Xiao-wen¹, TIAN Yun¹, LIU Zhong², FAN Jian-wei¹ and WANG Shu-ting¹

(1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. School of Architectural Engineering, Tongling College, Tongling 244061, China)

Abstract: Beryl is an important Be-Al silicate mineral with high economic and industrial value. Laojunshan gneiss dome is located in the joint of South China block and Indosinian block, which has experienced multi-stage tectonic-magmatic action and developed Sn, Cu, Zn and other polymetallic deposits and emerald deposits. This study focuses on the detailed analysis of macro- and micro-structural characteristics of beryl and its symbiotic quartz veins in the region, and limits the temperature environment of formation and deformation through fluid inclusions and quartz EBSD fabric. The results show that beryl and quartz are rich in fluid inclusions, in which beryl has low temperature-high salinity two-phase and high temperature-low salinity three-phase fluid inclusions, and quartz has low temperature-low salinity two-phase fluid inclusions. The deformation characteristics of the quartz associated with beryl mainly develop rhombal $\langle a \rangle$ superimposed by secondary prim $\langle c \rangle$, indicating low-temperature (350 ~ 400°C)

收稿日期: 2024-03-20; 接受日期: 2024-11-28; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家自然科学基金项目(42320104007, 41972220, 42302262, 42202229)

作者简介: 李清松(2000-), 男, 硕士研究生, 构造地质学专业, E-mail: 15731129422@163.com; 通讯作者: 曹淑云(1978-), 女, 教授, 博士生导师, 构造地质学专业, E-mail: shuyun.cao@cug.edu.cn.

deformation environment, superimposed by local high-temperature deformation. The magmatic fluid in the middle and late Yanshanian was accompanied by the uplift/exhumation of gneiss dome, which brought rich ore-forming elements, including the main Be elements of beryl mineralization. The exhumation process of regional gneiss dome from deep to shallow provides an important structural ore-bearing fluid channel for mineralization. With the occurrence of fluid immiscibility, the pH value of ore-forming fluid increases, thus promoting the occurrence and precipitation of ore-forming elements.

Key words: beryl; fluid inclusion; microscopic observation; deformation EBSD fabric; fluid immiscibility

Fund support: National Natural Science Foundation of China(42320104007, 41972220, 42302262, 42202229)

流体在岩石圈中分布广泛,是地质演化过程中不可或缺的介质或成分。流体作用可以导致或促进热传导、物质组分的迁移与交换、岩石和矿物变形、热液矿床形成等地质现象的发生(邓军等, 2000; 肖荣阁等, 2001, 2004; 沈照理等, 2002; 陈衍景等, 2004; 张铭杰等, 2004; Cao and Neubauer, 2016; Cheng *et al.*, 2018; 陈宇等, 2019; 张进江等, 2019),因而流体在地壳的形成、演化及地质过程中起到了极为重要的作用(Cao and Neubauer, 2016; Cheng *et al.*, 2018; 陈宇等, 2019; 张进江等, 2019)。流体包裹体保存了地质历史时期的古流体,一直都是地质流体研究领域的重点研究对象(卢焕章, 2004; 池国祥等, 2009)。通过对流体包裹体开展相关研究工作,可以获得地质古流体的流体来源、成分、物化条件等重要信息,初步反演地质古流体的形成环境与演化过程,还可以与岩相学、矿物变质变形等方面的研究结合,更为全面地反映区域的流体形成-演化过程,对区域成岩成矿过程与岩石变质变形行为有重要的指示意义(Cao and Neubauer, 2016; Tuba *et al.*, 2019; 郭伟等, 2020; Zou *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2023)。

绿柱石($\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$)是一种重要的铍铝硅酸盐矿物,不仅具有极高的宝石学研究意义与经济价值,还是最主要的含铍矿物之一,是电子与军事工业不可或缺的重要原材料。绿柱石主要产出在花岗伟晶岩或高度分异的花岗岩(Cerny *et al.*, 2003; Zhou *et al.*, 2015, 2018; Michallik *et al.*, 2017)以及石英脉中(冯明刚等, 2000; 胡荣荣, 2008)。绿柱石中常常保存相对丰富的流体包裹体(Thomas *et al.*, 2009; 林龙华等, 2012; 黄文清等, 2017; 姜雪等, 2019; 董京娉等, 2023),通过对绿柱石中流体包裹体的系统研究,可以为成矿流体演化和成矿机制探索提供有力证据(丁欣, 2016; Suo *et al.*, 2022; 熊

欣等, 2022)。

云南老君山片麻岩穹隆位于华南陆块与印支陆块的结合地带(马文璞, 1998; 钟大赉等, 1998; Zheng *et al.*, 2013)。老君山地区与越南境内 Song Chay(斋江)地区相邻,且具有一致的地质特征,因此统称为老君山-Song Chay 变质杂岩(李东旭等, 2000; 颜丹平等, 2005; Chen *et al.*, 2014; Zhou *et al.*, 2017; 刘忠等, 2022)。在前人的研究中,部分学者认为老君山地区具有典型的变质杂岩特征(张世涛等, 1998; 李东旭等, 2000; 刘玉平等, 2007),但也有学者采用片麻岩穹隆或变质穹隆体来描述该地区(颜丹平等, 2005; 王丹丹等, 2015),本文采用老君山片麻岩穹隆来描述研究区域。老君山片麻岩穹隆蕴藏有丰富的矿产资源,目前已发现超大型都龙锡锌多金属矿床、大型新寨钨锡与南秧田钨锡多金属矿床,并在大丫口发现了大型的祖母绿宝石矿床(张世涛等, 1998; 胡荣荣, 2008; 郭碧君, 2009; 黄文清等, 2017; 姜雪等, 2019)。值得注意的是,在老君山地区发育有不同含矿和变形程度的石英脉,是研究该区域构造与热液流体演化的重要对象,前人对此未做过多研究。本文在详细的野外地质观测基础上,利用光学显微镜、矿物阴极发光(CL)、流体包裹体冷热台、扫描电镜与电子背散射衍射(SEM-EBSD)技术手段,对含绿柱石石英脉进行了精细的矿物显微构造、EBSD 组构、流体特征与形成条件分析,以进一步阐释构造与流体-成矿三者之间的演化过程与成因联系。

1 区域地质背景

老君山(又称为老君山-麻栗坡)片麻岩穹隆位于我国云南省境内文山苗族壮族自治州麻栗坡县和马关县域范围内,南北与东西跨度均约 25 km

(图1)。区域整体受NW-SE向的断裂控制,主要包括位于东北部的文山-麻栗坡断裂与西南部的红河-哀牢山走滑断裂带(颜丹平等, 2005; Yan *et al.*, 2006; Xie and Wang, 2019; 刘忠等, 2022; 刘忠, 2023), 钨锡多金属成矿带主要分布在断裂之间。

老君山片麻岩穹隆内主要发育古元古代猛洞岩群、志留纪侵位的S型花岗岩(老城坡+团田片麻状花岗岩和南捞构造片麻岩)和晚燕山期侵位的S型花岗岩(老君山花岗岩)(张世涛等, 1998; 云南省地矿局, 1999; 郭利果, 2006; 黄孔文, 2013; 谭洪旗等, 2017)。中生代发育大规模低角度的逆冲推覆断层带, 导致区域南秧田岩组的二云母片岩、酒西岩组的变粒岩、团田与老城坡花岗片麻岩、南捞花岗片麻岩等变质岩及其岩性界面的形成。原始地层的

层理受到印支期及其后的变质变形作用改造, 导致其难以分辨与恢复。猛洞岩群由南秧田岩组与酒西岩组构成, 主要为变粒岩、云母片岩、片麻岩和角闪岩; 志留纪侵位的S型花岗岩受到区域性变质运动形成片麻状花岗岩, 在断层带附近形成构造片麻岩。该区域岩浆岩分布广泛, 以酸性岩浆岩为主(云南省地矿局, 1999; 郭利果, 2006; 黄孔文, 2013; 潘锦波等, 2015)。滇东南地区受到深部热流与地质构造双重作用, 因此区域广泛发生区域动力变质作用, 强度在低绿片岩相-角闪岩相, 形成一系列的NW向复式花岗岩体(个旧、老君山、薄竹山)(阙朝阳等, 2014), 其中岩体保存较好, 未遭受后期变质变形作用影响。

该地区存在古元古代的结晶基底, 在漫长的地

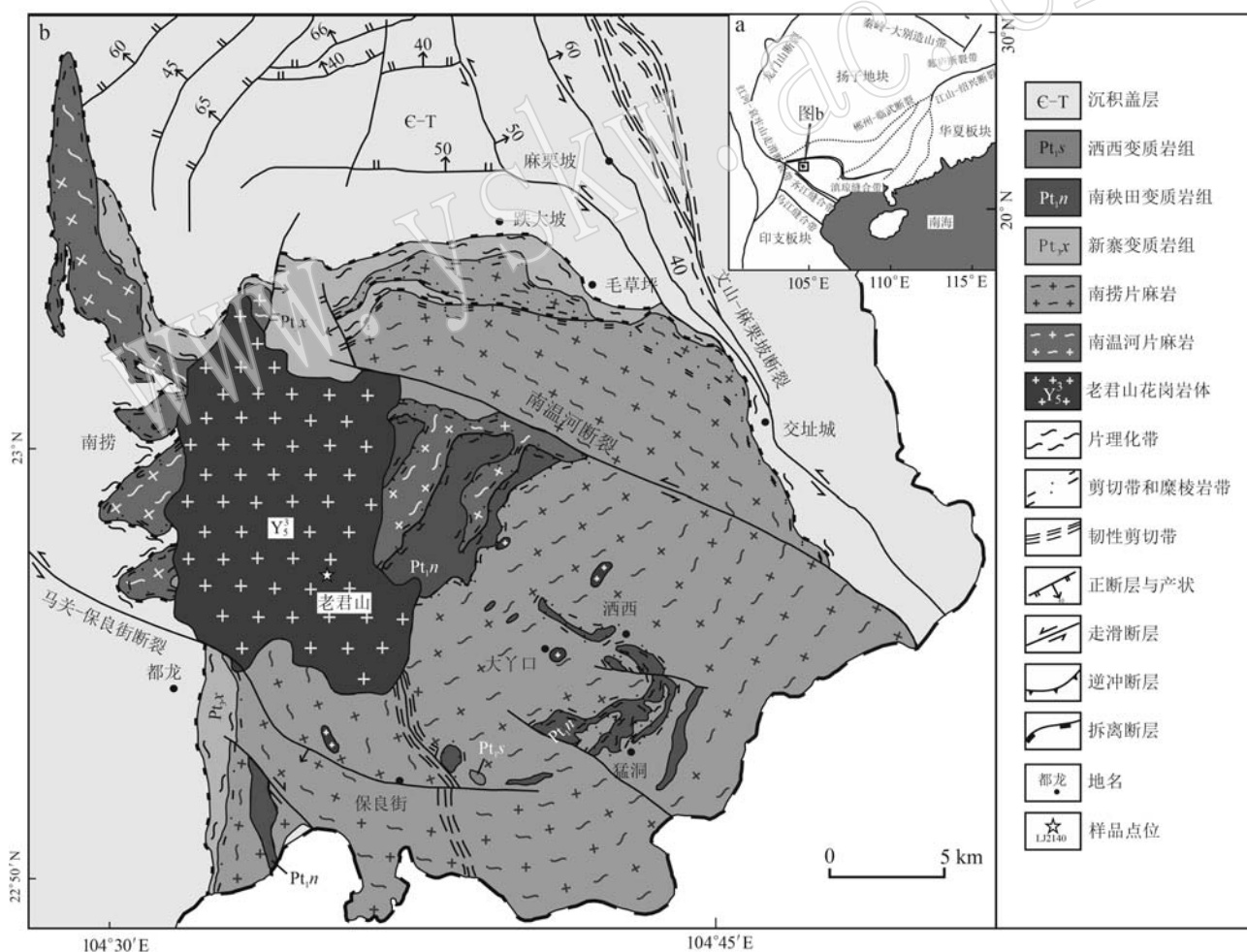


图1 华南陆块与印支陆块的大地构造简图[a, 据 Zhou 等(2017)、刘忠等(2022)改编]和老君山片麻岩穹隆构造示意图 [b, 据刘忠等(2022)改编]

Fig. 1 Geotectonic map of South China block and Indo-China block (a, adapted from Zhou *et al.*, 2017; Liu Zhong *et al.*, 2022) and schematic diagram of gneiss dome structure of Laojunshan (b, adapted from Liu Zhong *et al.*, 2022)

质时期之中受到扬子板块与华夏板块的俯冲碰撞、华南加里东褶皱隆升、印支期陆内造山以及多期次岩浆活动等影响,最终剥露至地表(Roger *et al.*, 2000; Maluski *et al.*, 2001; 刘玉平等, 2006, 2007; 冯佳睿等, 2010; 王小娟等, 2014; 阙朝阳, 2016; 刘忠等, 2022; 刘忠, 2023)。新元古代片麻岩中锆石核部 U-Pb 年龄指示了裂谷成因的岩浆侵入发生在 799 ± 10 Ma(Zheng *et al.*, 2013)。而加里东期的岩浆活动与侵位主要发生在 $436 \sim 402$ Ma(任纪舜, 1990; Roger *et al.*, 2000; Maluski *et al.*, 2001; Carter and Clift, 2007; 王丹丹等, 2015)。在印支期至燕山早期($237 \sim 144$ Ma), 区域 NE-SW 向挤压作用导致变质变形发育, 致使花岗质片麻岩形成(Yan *et al.*, 2006)。形成老君山片麻岩穹窿西北部花岗侵入岩体的岩浆活动约发生在 $95 \sim 80$ Ma, 其中岩浆富含多种成矿元素, 是区域稀有多金属矿物与绿柱石的主要形成时期(刘玉平等, 2007; 胡荣荣, 2008; 王小娟等, 2014; 黄文清等, 2017)。进入新生代, 受到欧亚板块与印度洋板块相互挤压碰撞作用的影响, 华南陆块发生了东南向的陆块逃逸(任纪舜, 1990; Roger *et al.*, 2000; Faure *et al.*, 2009; 舒良树, 2012; 张国伟等, 2013; Zheng *et al.*, 2013), 老君山地区发生左行近水平旋扭作用, 伴随穹窿的持续剥露, 直至约 21 Ma 左右, 穹窿剥露至地表(Maluski *et al.*, 2001; 刘忠等, 2022)。

2 研究手段与方法

2.1 显微阴极发光(CL)

显微阴极发光是进行岩石和矿物相分析非常有用的手段, 通过不同矿物的阴极荧光发光性能能够有效鉴别矿物相、矿物内杂质元素的分布, 并区分不同世代的产物和胶结次序等, 可进一步恢复岩石和矿物的结构和构造特征以及成因联系(徐慧芬等, 1987; 董彦龙等, 2019; Li *et al.*, 2023)。显微阴极发光成分分析使用中国地质大学(武汉)地学实验中心的 BEACON INNOVATION INTL 公司的新型阴极发光仪 CLF-1 进行, 仪器使用环境温度 $< 30^{\circ}\text{C}$, 湿度 $< 60\%$, 工作电压为 220 V, 观察窗工作距离为 15 mm, 真空度最高极限为 0.25 Pa, 电子枪电压达 30 kV, 通常在 $1 \sim 25$ kV 之间调节, 阴极电压 $0 \sim 30$ kV, 工作电流 1.2 mA, 连续可测, 最大束流到 2 mA。

2.2 冷热台流体包裹体分析

流体包裹体的显微测温工作能够获得宿主矿物中流体包裹体的捕获温度与盐度, 从而限制古流体的物化性质。进行测温前, 通过显微镜观测工作初步划分流体包裹体的形态分布、相态特征及生成序列。流体包裹体的显微测温工作使用的仪器为 Linkam THMS600 冷热台, 其观测温度范围为 $-196 \sim +600^{\circ}\text{C}$, 当温度低于 30°C 时误差为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$, 温度处于 $30 \sim 300^{\circ}\text{C}$ 时误差为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$, 温度高于 300°C 时误差为 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。冷热台主要通过加热丝与液氮对样品仓内流体包裹体进行加热与降温处理, 加热速度 $5 \sim 15^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 在接近均一温度时速度控制为 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$; 降温速度 $0.1 \sim 1^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 在接近冰点与初融点时控制速度为 $0.1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (陈宇等, 2019; 李孝文等, 2021)。实验在中国地质大学(武汉)地球科学学院实验中心完成。

2.3 EBSD 组构分析

矿物 EBSD 组构分析技术是利用高分辨扫描电子显微镜搭配电子背散射衍射来获取矿物晶体结构和矿物优选定向的有效手段(Prior *et al.*, 1999; 曹淑云, 2007; 刘俊来等, 2008)。在完成显微镜观测的基础上, 选取具有代表性的石英脉薄片, 经过抛光处理后进行 EBSD 组构分析研究。具体分析步骤包括: 获取背景—采集图像—选择数据库—设置基本参数—选点矫正—采集花样(主要为面扫)—图像处理与菊池花样识别—获得数据。获得的数据随后在 HKLChannel 5 软件上进行进一步处理, 最终获得极图、反极图、取向分布函数图、晶体尺寸分布图表等内容, 从而得出测定矿物的晶格优选方位(LPO)。实验在中国地质大学(武汉)地学实验中心完成, 仪器为 FEI Quanta 450 FEG-SEM 的场发射扫描电子显微镜及 EBSD 探头, 加速电压 20 kV, 工作距离范围在 $0 \sim 15$ mm 之间, 真空仓压力在 20 Pa 左右。

3 老君山片麻岩穹窿构造单元特征

老君山片麻岩穹窿可划分为 3 个基本构造单元, 分别为上盘(沉积盖层)、拆离断层系与下盘(核部), 不同构造单元的成岩成矿与变形-变质行为差异较大(图 1、图 2)。

老君山的下盘核部主要为花岗岩与深熔混合岩, 包括花岗片麻岩、石榴矽线片麻岩、斜长角闪岩、片岩、大理岩以及脉体(图 2a~2d)。元古宙的变质

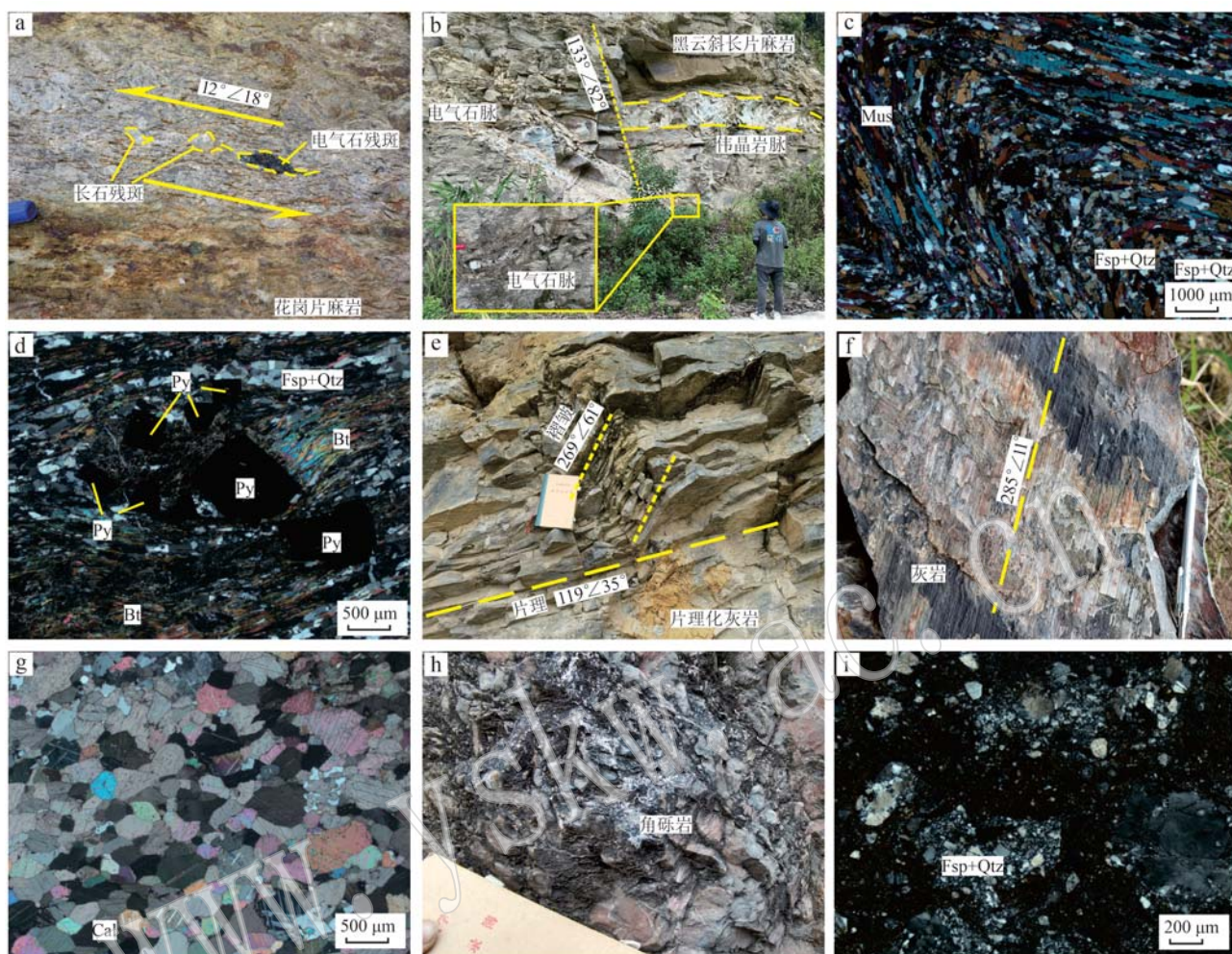


图2 老君山片麻岩穹隆主要岩性宏观与微观构造特征

Fig. 2 Macroscopic and microstructural characteristics of main lithology in Laojunshan gneiss dome

a—花岗片麻岩,其中可见电气石与长英质残斑,矿物拉伸线理基本平行;b—黑云斜长片麻岩岩体与大型伟晶岩脉,可见电气石脉斜切围岩;c—花岗岩中褶皱现象,岩体主要矿物为白云母(Mus)、长石(Fsp)与石英(Qtz);d—块状黄铁矿(Py)旋转残斑,分布在黑云母(Bt)、长石与石英基质中,残斑指示左行剪切运动方向;e—靠近拆离断层的片理化灰岩岩体,其中可见明显褶皱现象;f—存在明显擦痕的灰岩断层面;g—上盘未变形灰岩显微照片,可见粗颗粒方解石(Cal);h—发育在上下盘之间角砾岩;i—拆离断层角砾岩显微照片,主要成分为长石与石英

a—granite gneiss, containing tourmaline and feldspathic remnants, and mineral extension lineation is basically parallel; b—biotite plagioclase gneiss body and large pegmatite vein, where shows tourmaline veins obliquely cut the surrounding rock; c—folds in granite, the main minerals in granite are muscovite (Mus), feldspar (Fsp) and quartz (Qtz); d—massive pyrite (Py) rotational remnant, distributed in biotite (Bt), feldspar and quartz matrix, indicates the direction of left-lateral shear movement; e—schistose limestone body near the detachment fault, in which obvious folds can be seen; f—limestone fault plane with obvious scratches; g—micrograph of the undeformed limestone in upper plate shows coarse-grained calcite (Cal); h—breccia developed between the upper plate and lower plate; i—micrographs of detachment fault breccia, mainly composed of feldspar and quartz

岩逆冲在(南温河与南捞)花岗片麻岩之上,其中低角度逆断层发育。岩层中面理发育,其产状由核部向沉积盖层,呈现出放射状分布,倾角范围($8^{\circ} \sim 80^{\circ}$)变化较大(刘忠等, 2022)。岩石受高温剪切作用影响明显,整体上呈现出塑性流动构造特征。长英质脉、S-C 组构、不对称旋转残斑,如“ σ ”或“ δ ”型

的长石、石榴子石或角闪石等剪切运动学特征(图2d),指示上盘围绕下盘呈弧形状向东、北、西向的滑动剪切运动(刘忠等, 2022)。区域西北部出露花岗岩体,为燕山中晚期多期次岩浆侵入作用形成的复式岩体,以二云二长花岗岩为主,无明显塑性变形特征。

上盘以早古生代寒武系与奥陶系沉积岩为主,部分地区为中生代沉积地层(图1)。岩性主要为灰岩、泥灰岩、白云岩等,其中层理与节理发育明显。上盘靠近核部地区发育角砾岩与片理化灰岩(图2e~2g),可见明显断层现象,部分断面被方解石脉、石英脉充填。远离下盘区域在宏观上主要表现为弱变形或未变形,部分区域可见保存较好的鲕粒灰岩。在西部与北部均存在明显的层间滑脱褶皱构造。在上盘与下盘或拆离断层系交界处可见片理化灰岩。在西部靠近下盘处存在一系列的高角度正断层,倾向主要为NW、W、SW,断面擦痕线理发育(图2f),部分断面可见两期擦痕叠加的现象,其中低角度擦痕保存情况较好,为相对晚期擦痕,而早期的擦痕表现为高角度平行断面发育。

上下盘之间发育一系列低角度拆离断层,呈弧形状展布,断层构造指示片麻岩穹窿具有下盘指向上盘的运动学方向,岩性以花岗质糜棱岩、断层角砾岩、构造碎裂岩、断层泥的断层构造岩序列为主(图2h、2i)。断层面上可见明显的纤维矿物组成的热擦痕,指示明显的低温脆-韧性转换的变形作用。

4 含绿柱石石英脉的构造与岩石学特征

含绿柱石的石英脉出露在下盘的洒西西部附近,位于大丫口祖母绿矿场的西北3 km左右(图1)。石英脉产于石榴云母片岩之中,厚度约为50~80 cm,脉体产状为 $129^{\circ}\angle 67^{\circ}$ 。石英脉矿化现象明显,肉眼可见晶体较好的柱状绿柱石分布其中,同时可见伴生的金属矿物与呈现放射状或簇状黑色电气石(图3a)。石英脉的围岩为石榴云母片岩,变形程度高,手标本上呈现黑色,具有丝绸光泽,其中以长石、石英、黑云母、白云母为主要矿物(图3b)。围岩片理产状为 $124^{\circ}\angle 31^{\circ}$,被含矿石英脉斜切。在显微镜下可见具有明显定向的黑云母、白云母矿物,除此之外可见石英、长石,部分样品可见石榴子石、磷灰石/磁铁矿与毒砂等矿物(图3c~3i)。片状矿物周围的长英质成分粒度较小,边界平直。云母集合体强烈定向,与石英、长石等矿物构成岩石拉伸线理。

含绿柱石石英脉手标本可见明显石英颗粒,为粗颗粒弱变形石英,透明程度一般,主要为乳白色。通过显微镜观测,可以发现不同粒度的石英显微特征存在差异,粗颗粒(平均约600 μm)石英的大部分颗

粒边界相对较平直,颗粒内部呈现亚颗粒,不均匀消光为主,少数可见膨凸重结晶(图3d),而另一些石英呈现明显的细粒化现象,颗粒粒度大多 $<100\ \mu\text{m}$ (图3e)。采集样品中绿柱石分布在石英颗粒之间,粒度较大,约500~2 000 μm ,自形程度较好,呈现六方柱状,颗粒相对破碎,在显微阴极发光下呈现明显的亮红色荧光,且具有明显的环带特征(图3j、3l)。样品中电气石常与磁铁矿共生分布,电气石多呈现棕色,少数具有蓝色环带,为长柱状,可见典型的球面三角形截面。磁铁矿分布在电气石周围,少数穿插插入电气石裂隙之中,反射光下呈现浅黄色(图3g、3h)。除此之外,样品中副矿物丰富,可见围岩中石榴子石与磷灰石共生,脉体中可见毒砂、榍石、磷灰石等矿物(图3f、3l、3k、3l)。

5 含绿柱石石英脉中的流体包裹体特征

含绿柱石石英脉中保存有十分丰富的流体包裹体。本文重点针对石英和绿柱石中的原生或次生流体包裹体开展了详细的观测与分析,并依据流体包裹体的宿主矿物(石英和绿柱石)、岩相学与相态特征进行了分类描述分析和温压估算(表1)。

5.1 流体包裹体岩相学特征

在含绿柱石石英脉中可观测到石英和绿柱石中具有不同类型特征的流体包裹体:类型1为石英中气液两相型流体包裹体,类型2为绿柱石中气液两相型流体包裹体,类型3为绿柱石中三相含 CO_2 型包裹体。

石英中气液两相型流体包裹体(类型1)主要出现在粗颗粒石英的中心区域(图4a、4b),颗粒边部以线性穿晶的次生流体包裹体为主(图4c、4d)。对矿物内部的原生流体包裹体进行了显微观测,可见流体包裹体主要以气相($V_{\text{H}_2\text{O}}$)与液相($L_{\text{H}_2\text{O}}$)组合为主,表现为群生分布,呈现负晶型、椭圆形或少量的不规则形(图4a~4d)。该类型的原生流体包裹体相对较小,长度一般为3~6 μm ,气体充填度主要在15%~20%之间。

绿柱石中气液两相型流体包裹体(类型2)通常分布在绿柱石表面相对干净、基本无破裂的区域。大部分原生包裹体呈孤立分布,少部分为群生分布,形态上表现为负晶型与椭圆形,长轴长度集中在4~10 μm 之间,而少数包裹体长轴超过10 μm (图4f、4g)。该类型的流体包裹体同样表现为气相($V_{\text{H}_2\text{O}}$)

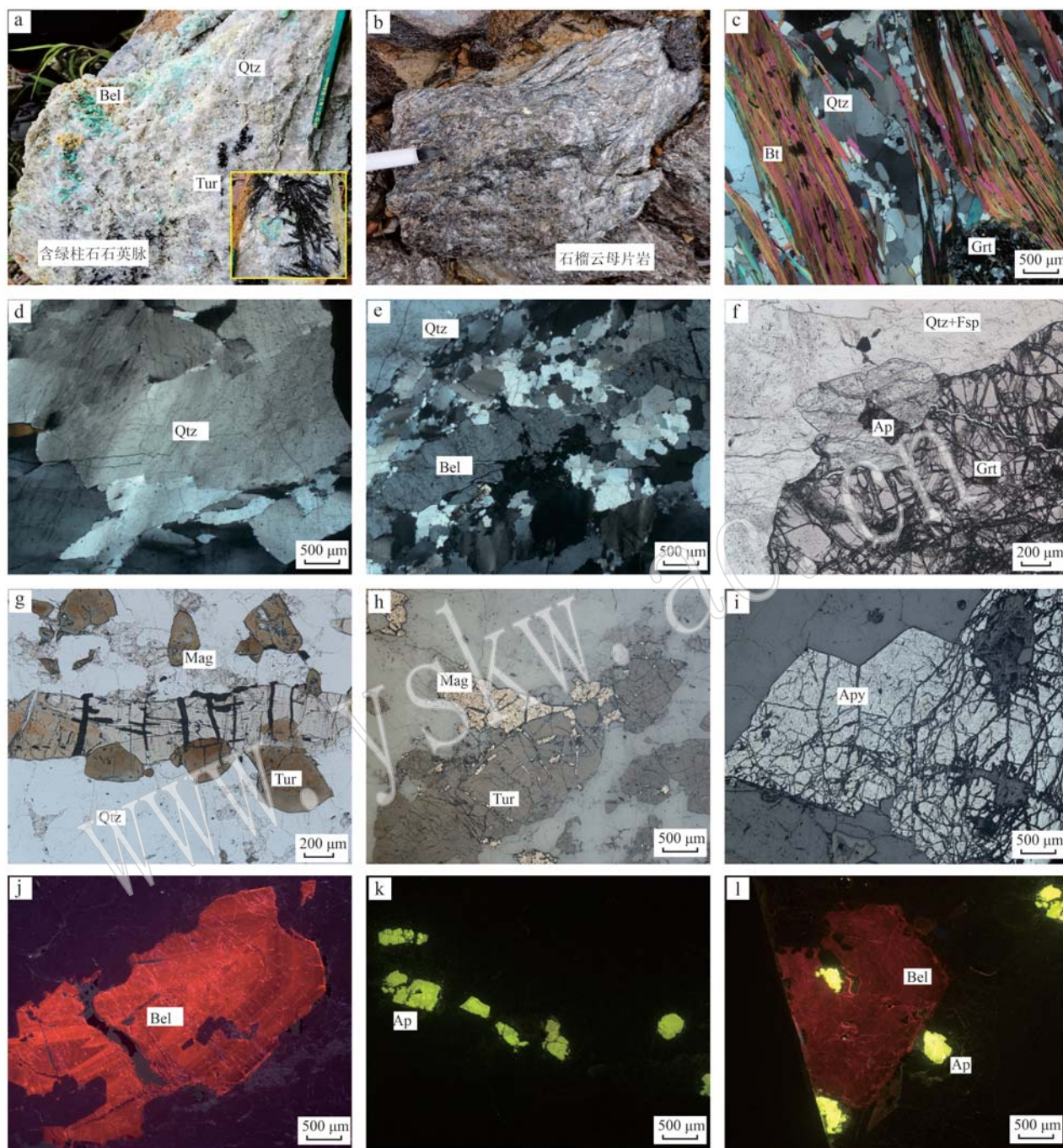


图3 含绿柱石矿化石英脉的宏观与微观构造和岩石学特征

Fig. 3 Macroscopic, microstructural and petrological characteristics of mineralized quartz veins containing beryl

a—矿化石英脉体手标本, 主要成分为石英 (Qtz)、绿柱石 (Bel) 与电气石 (Tur); b—石英脉围岩石榴云母片岩手标本; c—石榴云母片岩的显微镜下特征, 主要成分为黑云母 (Bt)、石英以及石榴子石 (Grt), 云母成集合体条带, 矿物定向良好; d—粗颗粒石英呈波状消光和亚颗粒显微构造特征; e—长柱状绿柱石与石英, 在绿柱石周围的石英粒度较小; f—围岩石榴云母片岩与长英质脉体 (Qtz+Fsp) 交界位置的磷灰石 (Ap) 与石榴子石; g—矿化石英脉中电气石、磁铁矿 (Mag) 出现在电气石边部或裂隙中; h—反射光下的磁铁矿与电气石; i—反射光下的毒砂 (Apy); j—阴极发光下橘红色的绿柱石具有环带特征; k—阴极发光下呈绿色的磷灰石; l—阴极发光下呈绿色的磷灰石与红色的绿柱石

a—mineral quartz vein specimen, mainly composed of quartz (Qtz), beryl (Bel) and tourmaline (Tur); b—quartz vein surrounding rock garnet mica schist specimen; c—the microscopic characteristics of garnet mica schist are mainly composed of biotite (Bt), quartz and garnet (Grt), the mica forms aggregate bands and the minerals are well oriented; d—coarse grained quartz is characterized by wavy extinction and subgranular microstructure; e—long columnar beryl and quartz, the grain size of quartz around beryl is smaller; f—apatite (Ap) and garnet at the junction of surrounding rock garnet mica schist and feldspathic vein (Qtz+Fsp); g—tourmaline and magnetite (Mag) occurs at the edge or cracks of the tourmaline; h—magnetite and tourmaline under reflected light; i—arsenopyrite (Apy) under reflected light; j—orange beryl has banding characteristics under cathodoluminescence; k—green apatite under cathodoluminescence; l—green apatite and orange beryl under cathodoluminescence

表 1 含绿柱石石英脉中流体包裹体特征及分析结果

Table 1 Characteristics and analysis results of fluid inclusions in beryl-bearing quartz veins

标本	序号	主矿物	成因	相态	气体充 填度/%	$t_m/$ ℃	t_{h,CO_2} /℃	$t_h/$ ℃	$w_{NaCl}/\%$	捕获温 度/℃	捕获压 力/MPa	pH	Eh
LJ2140-10	1	Bel	原生	L+V	10	-3.1		345	5.11	375	390.94	6.650	-0.227
LJ2140-10	2	Bel	次生	L+V	10	-0.91		265	1.58	295	413.67	5.894	0.020
LJ2140-10	3	Bel	原生	L+V	10	-0.86		273	1.50	303	405.69	5.920	-0.005
LJ2266-2	3	Bel	原生	L+V	20	-7.4		321	10.98	351	423.01	7.616	-0.358
LJ2266-2	4	Bel	次生	L+V	20	-3.1		260	5.11	290	425.82	6.249	-0.055
LJ2140-10	4	Bel	原生	L+V	10	-2.9		351	4.80	381	389.21	6.713	-0.242
LJ2140-10	5	Bel	原生	L+V	10	-2.9		321	4.80	351	389.76	6.369	-0.068
LJ2266-2	6	Bel	原生	L+V	25	-4.3		318	6.88	348	402.49	7.531	-0.123
LJ2140-10	6	Bel	原生	L+V	5	-3.6		357	5.86	387	400.75	6.803	-0.215
LJ2266-2	7	Bel	原生	L+V	20	-4.1		286	6.59	316	412.70	6.803	-0.099
LJ2140-10	7	Bel	原生	L+V	5	-0.56		368	0.98	398	335.42	6.754	-0.233
LJ2266-2	8	Bel	原生	L+V+L	20	-3.9		290	6.30	320	409.20	6.903	-0.121
LJ2266-1-1-1	8	Bel	原生	L+V	30	-6		291	9.21	321	422.20	6.895	-0.258
LJ2140-10	8	Bel	原生	L+V	10	-0.91		375	1.58	405	346.35	6.880	-0.244
LJ2266-1-1-1	9	Bel	次生	L+V	35	-5.8		232	8.95	262	471.60	6.071	-0.011
LJ2140-10	9	Bel	原生	L+V	10	-0.41		348	0.72	378	339.79	6.499	-0.166
LJ2266-1-1-1	10	Bel	原生	L+V	30	-4.6		298	7.31	328	410.11	6.953	-0.235
LJ2140-10	10	Bel	原生	L+V	10	-0.32		353	0.57	383	334.32	6.533	-0.166
LJ2266-1-1-1	11	Bel	原生	L+V	35	-5.2		296	8.14	326	414.87	6.941	-0.212
LJ2140-10	11	Bel	原生	L+V	10	-0.4		359	0.72	389	333.91	6.623	-0.218
LJ2140-10	12	Bel	次生	L+V	10	-1.2		171	2.07	196	429.18	5.795	0.196
LJ2266-1-1-1	12	Bel	原生	L+V	40	-4.2		306	6.74	336	404.39	7.155	-0.112
LJ2140-10	13	Bel	次生	L+V	10	-3.8		239	6.16	269	449.67	5.919	0.075
LJ2140-10	14	Bel	次生	L+V	10	-1.2		175	2.07	200	425.79	5.789	0.188
LJ2140-10	15	Bel	次生	L+V	20	-2		268	3.39	298	413.97	5.967	0.035
LJ2140-10	16	Bel	原生	L+V	10	-4.2		288	6.74	318	412.22	6.111	-0.143
LJ2140-10	17	Bel	原生	L+V	5	-4		296	6.45	326	406.92	6.140	-0.023
LJ2140-10	18	Bel	原生	L+V	10	-1.3		294	2.24	324	389.34	6.036	-0.024
LJ2140-10	19	Bel	原生	L+V	24	-1.8		310	3.06	340	383.10	6.201	-0.034
LJ2140-10	20	Bel	原生	L+V	35	-4.8		312	7.59	342	407.17	6.310	-0.039
LJ2140-10	21	Bel	原生	L+V	35	-5.2		315	8.14	345	409.49	6.351	-0.264
LJ2140-10	22	Bel	原生	L+V	35	-2.1		310	3.55	340	385.93	6.215	-0.024
LJ2140-10	23	Bel	原生	L+V	45	-1.3		299	2.24	329	385.57	6.056	-0.042
LJ2140-10	24	Bel	原生	L+V	35	-8.7		309	12.51	339	431.62	6.325	-0.250
LJ2140-10	25	Bel	原生	L+V	50	-1.8		282	3.06	312	401.58	6.015	-0.002
LJ2140-10	26	Bel	原生	L+V	45	-5.7		340	8.81	370	414.96	6.647	-0.187
LJ2140-10	27	Bel	次生	L+V	40	-5.2		265	8.14	295	434.20	6.033	0.027
LJ2140-10	28	Bel	次生	L+V	40	-4.8		254	7.59	284	441.21	5.981	0.037
LJ2140-10	29	Bel	原生	L+V	35	-6		284	9.21	314	425.95	6.124	-0.147
LJ2140-10	30	Bel	次生	L+V	35	-4.2		260	6.74	290	432.04	5.995	0.026
LJ2140-10	31	Bel	次生	L+V	30	-5.4		270	8.41	300	431.56	6.057	0.025
LJ2140-10	32	Bel	次生	L+V	25	-5		268	7.86	298	430.51	6.042	-0.017
LJ2140-10	1	Q	原生	L+V	5	-0.53		325	0.93	340	239.02	6.720	-0.219
LJ2140-10	2	Q	原生	L+V	5	-0.71		328	1.24	343	241.76	6.782	-0.226
LJ2140-10	3	Q	原生	L+V	5	-0.73		292	1.28	307	231.55	5.981	-0.040
LJ2140-10	4	Q	原生	L+V	5	-3.7		298	6.01	313	242.21	6.142	-0.041
LJ2140-10	5	Q	原生	L+V	50	-3.2		341	5.26	356	267.46	7.078	-0.259
LJ2140-10	6	Q	原生	L+V	35	-1.7		287	2.90	302	233.51	6.030	-0.046

续表 1
Continued Table 1

标本	序号	主矿物	成因	相态	气体充 填度/%	$t_m/$ ℃	t_{h,CO_2} /℃	$t_h/$ ℃	$w_{NaCl}/\%$	捕获温 度/℃	捕获压 力/MPa	pH	Eh
LJ2140-10	7	Q	次生	L+V	25	-0.73		167	1.28	177	176.99	6.107	0.169
LJ2140-10	8	Q	次生	L+V	20	-0.45		176	0.79	186	175.32	6.080	0.123
LJ2140-10	9	Q	原生	L+V	45	-3.15		339	5.19	354	265.37	7.053	-0.258
LJ2140-10	10	Q	原生	L+V	50	-3.6		293	5.86	308	240.29	6.119	-0.054
LJ2140-10	11	Q	次生	L+V	10	-0.8		278	1.40	293	231.08	5.934	-0.119
LJ2140-10	12	Q	原生	L+V	5	-3.6		303	5.86	318	243.72	6.649	-0.417
LJ2140-10	13	Q	原生	L+V	5	-3.7		310	6.01	325	247.29	6.732	-0.187
LJ2140-10	14	Q	原生	L+V	5	-1.6		281	2.74	296	232.62	6.001	-0.036
LJ2140-10	15	Q	次生	L+V	10	-1.6		231	2.74	246	238.41	5.851	0.059
LJ2140-10	16	Q	次生	L+V	15	-1.9		267	3.23	282	232.84	5.959	-0.004
LJ2140-10	17	Q	次生	L+V	10	-3.9		245	6.30	260	239.51	5.975	0.025
LJ2140-10	18	Q	次生	L+V	10	-1.4		129	2.41	139	187.72	6.038	0.160
LJ2140-10	19	Q	次生	L+V	10	-3.9		131	6.30	141	200.51	6.037	0.207
LJ2140-10	20	Q	原生	L+V	40	-1.7		294	2.90	309	234.74	6.059	-0.154
LJ2140-10	21	Q	次生	L+V	15	-0.81		270	1.41	285	231.41	5.904	-0.009
LJ2140-10	22	Q	次生	L+V	20	-0.81		274	1.41	289	231.19	5.920	-0.083
LJ2140-10	23	Q	次生	L+V	15	-0.75		268	1.31	283	231.53	5.891	-0.128
LJ2140-10	24	Q	原生	L+V	15	-3.6		281	5.86	296	237.64	6.069	-0.059
LJ2140-10	25	Q	次生	L+V	30	-2.6		267	4.34	282	234.16	5.985	-0.020
LJ2140-10	26	Q	原生	L+V	15	-2.8		285	4.65	300	236.11	6.064	-0.053
LJ2140-10	27	Q	次生	L+V	35	-1		265	1.74	280	231.93	5.901	-0.075
LJ2140-10	28	Q	次生	L+V	10	-0.9		156	1.57	166	179.49	6.136	0.167
LJ2140-10	29	Q	次生	L+V	10	-0.91		156	1.58	166	179.51	6.136	0.163
LJ2140-10	30	Q	次生	L+V	10	-0.95		167	1.65	177	177.11	6.111	0.035
LJ2140-10	31	Q	次生	L+V	5	-0.9		170	1.57	180	176.44	6.105	0.135
LJ2140-10	32	Q	次生	L+V	10	-0.89		165	1.55	175	177.50	6.115	0.032
LJ2140-10	33	Q	次生	L+V	15	-1.4		175	2.41	185	175.80	6.106	0.093
LJ2140-10	34	Q	次生	L+V	15	-1.3		190	2.24	200	172.64	6.092	0.060
LJ2140-10	35	Q	次生	L+V	10	-1.4		185	2.41	195	173.66	6.097	0.043
LJ2266-2	1	Bel	原生	L+V+L	60+25+15	-0.7	9.87	218	0.27				
LJ12140-1	4	Bel	原生	L+V+L	70+20+10	-2	9.85	265	0.31				
LJ2266-2	2	Bel	原生	L+V+L	70+20+10	-0.6	9.54	241	0.95				
LJ2266-1-1-1	2	Bel	原生	L+V+L	70+20+10	-0.65	9.12	239	1.79				
LJ2266-1-1-1	5	Bel	原生	L+V+L	70+20+10	-1.2	9.08	269	1.87				
LJ2266-1-1-1	3	Bel	原生	L+V+L	70+15+15	-0.6	8.95	330	2.13				
LJ12140-1	3	Bel	原生	L+V+L	70+20+10	-0.65	8.8	328	2.42				
LJ2266-2	10	Bel	原生	L+V+L	60+25+15	-0.64	8.76	295	2.50				
LJ2266-1-1-1	4	Bel	原生	L+V+L	60+25+15	-0.58	8.75	229	2.52				
LJ12140-1	1	Bel	原生	L+V+L	60+30+10	-1.56	8.75	294	2.52				
LJ2266-2	5	Bel	原生	L+V+L	65+20+15	-1.32	8.7	299	2.62				
LJ2266-1-2	1	Bel	原生	L+V+L	60+25+15	-0.75	8.76	238	2.50				
LJ2266-1-2	2	Bel	原生	L+V+L	55+25+20	-0.98	8.74	258	2.54				
LJ2266-2	9	Bel	原生	L+V+L	65+20+15	-0.55	8.72	282	2.58				
LJ2266-1-1-1	1	Bel	原生	L+V+L	70+20+10	-0.86	8.7	292	2.62				
LJ2266-1-1-1	7	Bel	原生	L+V+L	70+20+10	-1.04	8.67	325	2.67				
LJ2266-1-1-1	6	Bel	原生	L+V+L	60+25+15	-0.87	8.61	314	2.79				
LJ12140-1	2	Bel	原生	L+V+L	70+20+10	-1.05	8.55	319	2.91				

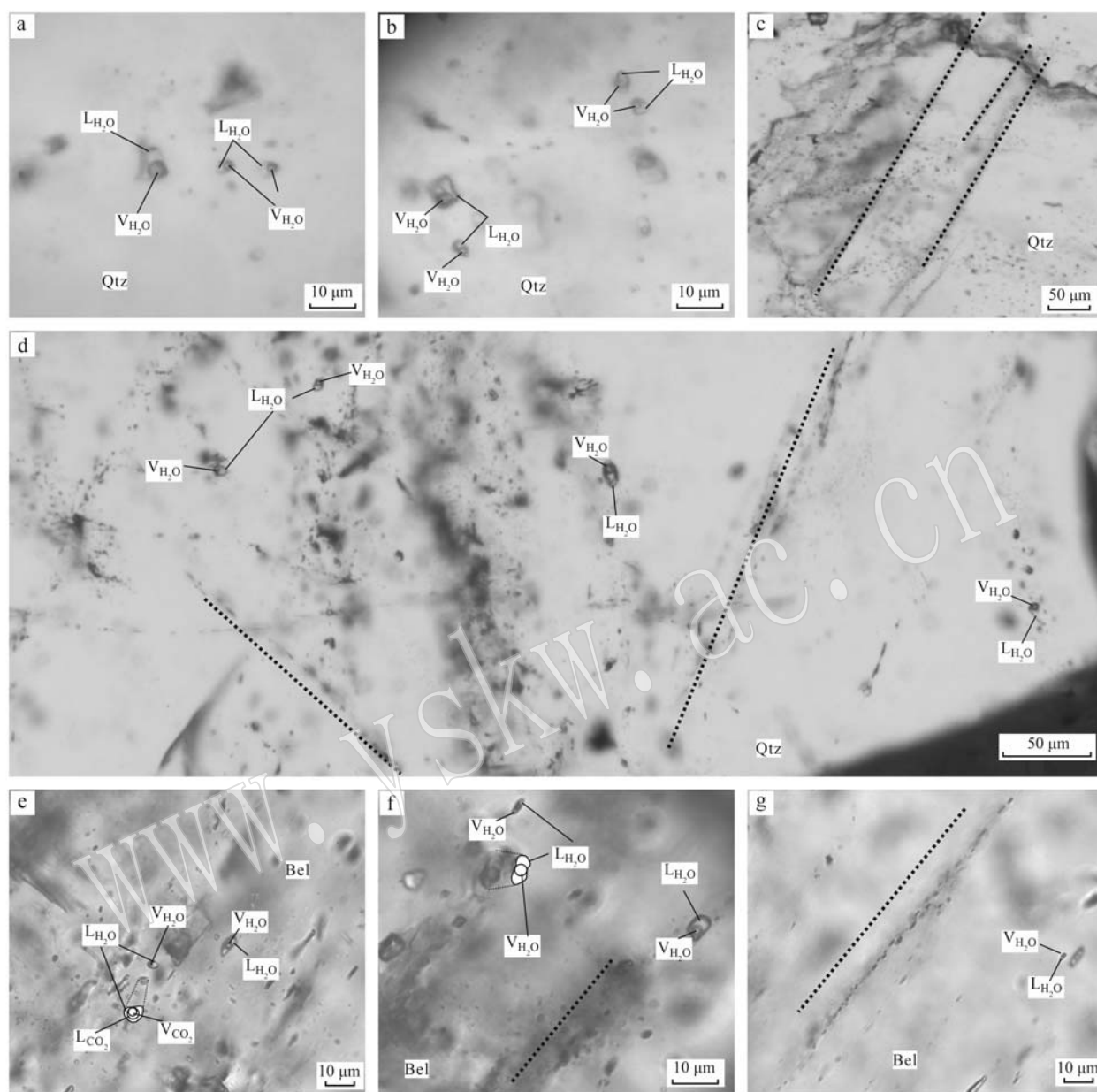


图4 含绿柱石石英脉流体包裹体分布特征

Fig. 4 Distribution characteristics of fluid inclusions in beryl-bearing quartz veins

a—石英 (Qtz) 中不规则原生流体包裹体; b—石英中原生流体包裹体; c—切穿多个晶体的线状次生流体包裹体; d—发育石英中孤立原生流体包裹体与线状次生流体包裹体; e—绿柱石 (Bel) 中含 CO_2 流体包裹体; f—绿柱石中盐水两相流体包裹体; g—绿柱石中线状的次生流体包裹体与孤立分布的椭球形原生流体包裹体; L_{CO_2} —液相 CO_2 ; V_{CO_2} —气相 CO_2 ; $\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}$ —液相水; $\text{V}_{\text{H}_2\text{O}}$ —气相水

a—irregular primary fluid inclusions in quartz (Qtz); b—primary fluid inclusions in quartz; c—linear secondary fluid inclusions cut through multiple crystals; d—isolated primary and linear secondary fluid inclusions in quartz; e— CO_2 fluid inclusions in beryl (Bel); f—brine two-phase fluid inclusions in beryl; g—linear secondary fluid inclusions and isolated ellipsoidal primary fluid inclusions in beryl; L_{CO_2} —liquid phase carbon dioxide;

V_{CO_2} —gas phase carbon dioxide; $\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}$ —liquid phase water; $\text{V}_{\text{H}_2\text{O}}$ —gas phase water

与液相 ($\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}$) 的组合形式, 气体充填度存在两个峰值, 分别在 12% 与 35% 左右。

绿柱石中三相含 CO_2 型包裹体 (类型 3) 数量较少, 主要孤立分布在绿柱石核心区域, 呈现负晶型或

不规则状, 长轴集中在 9~17 μm 之间。该类型的流体包裹体表现为气相 CO_2 (V_{CO_2})、液相 CO_2 (L_{CO_2}) 与液相水 ($\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}$) 组合的岩相学特征, 其中 CO_2 相的充填度在 30%~40% (图 4e)。

5.2 流体包裹体测温结果

在流体包裹体的岩相学观测分析基础上, 对体积较大、相态清晰、现象分明的流体包裹体开展了系统性的显微测温工作, 并依据测温结果开展热力学分析, 得到3类共计95组热力学数据(图5), 计算流体包裹体体系的物化条件, 以进一步确定还原成矿流体环境。

石英中气液两相型流体包裹体(类型1)的均一

方式表现为整体均一至液相($V_{H_2O} + L_{H_2O} \rightarrow L_{H_2O}$), 均一温度分布范围为130~340℃, 但是主要集中在220~250℃, 冰点温度范围为-3.9~-0.5℃。依据盐度-冰点关系图和体系盐度 p - T 相图(Bodnar, 1993), 计算获得该类型的流体包裹体盐度 [$w(\text{NaCl})/\%$] 峰值集中在0.6%~6.3%之间, 主要集中在1.2%~4.3%之间, 包裹体密度为0.69~0.95 g/cm^3 。

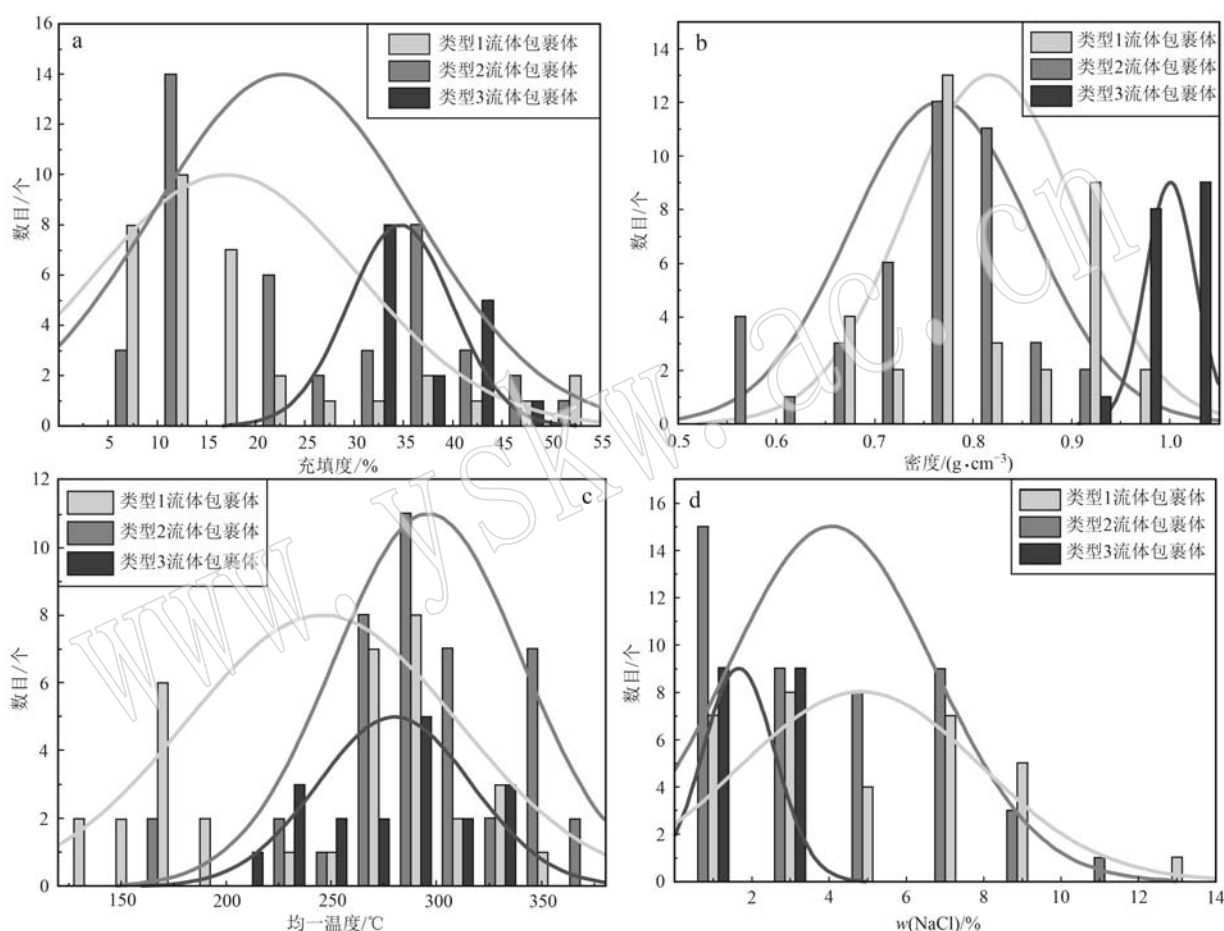


图5 含绿柱石石英脉流体包裹体气体充填度(a)、密度(b)、均一温度(c)与盐度(d)分布特征

Fig. 5 Distribution characteristics of gas filling degree (a), density (b), homogenization temperature (c) and salinity (d) of fluid inclusions in quartz veins containing beryl

绿柱石中气液两相型流体包裹体(类型2)通过升温, 包裹体内部达到均一状态, 大部分包裹体均一至液相($V_{H_2O} + L_{H_2O} \rightarrow L_{H_2O}$), 但是少部分包裹体随着升温, 气相逐渐增大直到内部完全均一至气相($V_{H_2O} + L_{H_2O} \rightarrow V_{H_2O}$)。均一温度范围在170~370℃, 峰值为230~320℃, 冰点范围在-8.7~-0.3℃, 其中存在两个明显的峰值: -6.0~-4.3℃与-4.0~-1.2℃。该类型的包裹体气体充填度存在两个差异峰值, 可以作

为该类型流体包裹体发生了流体不混溶现象的初步证据。依据不同体系盐度与冰点的关系图可以进一步计算出该类型流体包裹体的盐度, 整体处于0.5%~12.5%之间, 而峰值则为2.0%~6.3%与6.8%~9.2%两个区间。依据不同盐度的 p - T 相图图解, 可以求得该类型流体包裹体的均一压力为0.79~21.9 MPa, 密度为0.55~0.91 g/cm^3 。

绿柱石中三相含 CO_2 型包裹体(类型3)在降温

至 -90°C 之后才完全冻结。随着升温的进行,可以观测到 CO_2 笼形物在约 $-0.2\sim 4.2^{\circ}\text{C}$ 融化,融化温度峰值在 $1.8\sim 2.5^{\circ}\text{C}$,依据 Roedder (1984) 的公式,可计算出该类流体包裹体的盐度分布范围为 $0.26\%\sim 2.88\%$,峰值为 $2.1\%\sim 2.6\%$ 。继续升温,该类型流体包裹体 CO_2 相态的均一方式表现为气相均一至液相($\text{V}_{\text{H}_2\text{O}}+\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}\rightarrow\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}$),均一温度主要为 $13.0\sim 24.0^{\circ}\text{C}$,而包裹体整体的均一温度集中在 $230\sim 320^{\circ}\text{C}$ 。依据 Brown 和 Lamb (1989) 提出的不同 NaCl 浓度 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$ 体系的相图,可以计算流体包裹体其他物化性质,该类型流体包裹体的均一压力在 $223.5\sim 392.5\text{ MPa}$ 之间,密度为 $0.94\sim 1.03\text{ g/cm}^3$ 。

6 石英 EBSD 晶格优选定向特征

在显观测与阴极发光的分析基础上,我们选择了绿柱石矿物附近的石英、与绿柱石共生的石英进一步开展了 EBSD 组构分析,发现两类石英表现出明显的不同组构分布特征。其中与绿柱石共生的粗颗粒石英 EBSD 组构结果表现为在 Z_0 附近形成 $C-\langle 0001 \rangle$ 极密,以底面 $\langle a \rangle$ 滑移系为主,表现为相对低温的变形环境(图6);而分布在绿柱石附近的粗颗粒和细粒化石英 EBSD 组构图显示出其在 Z_0 轴与 X_0 轴附近同时存在 $C-\langle 0001 \rangle$ 极密,形成类似大

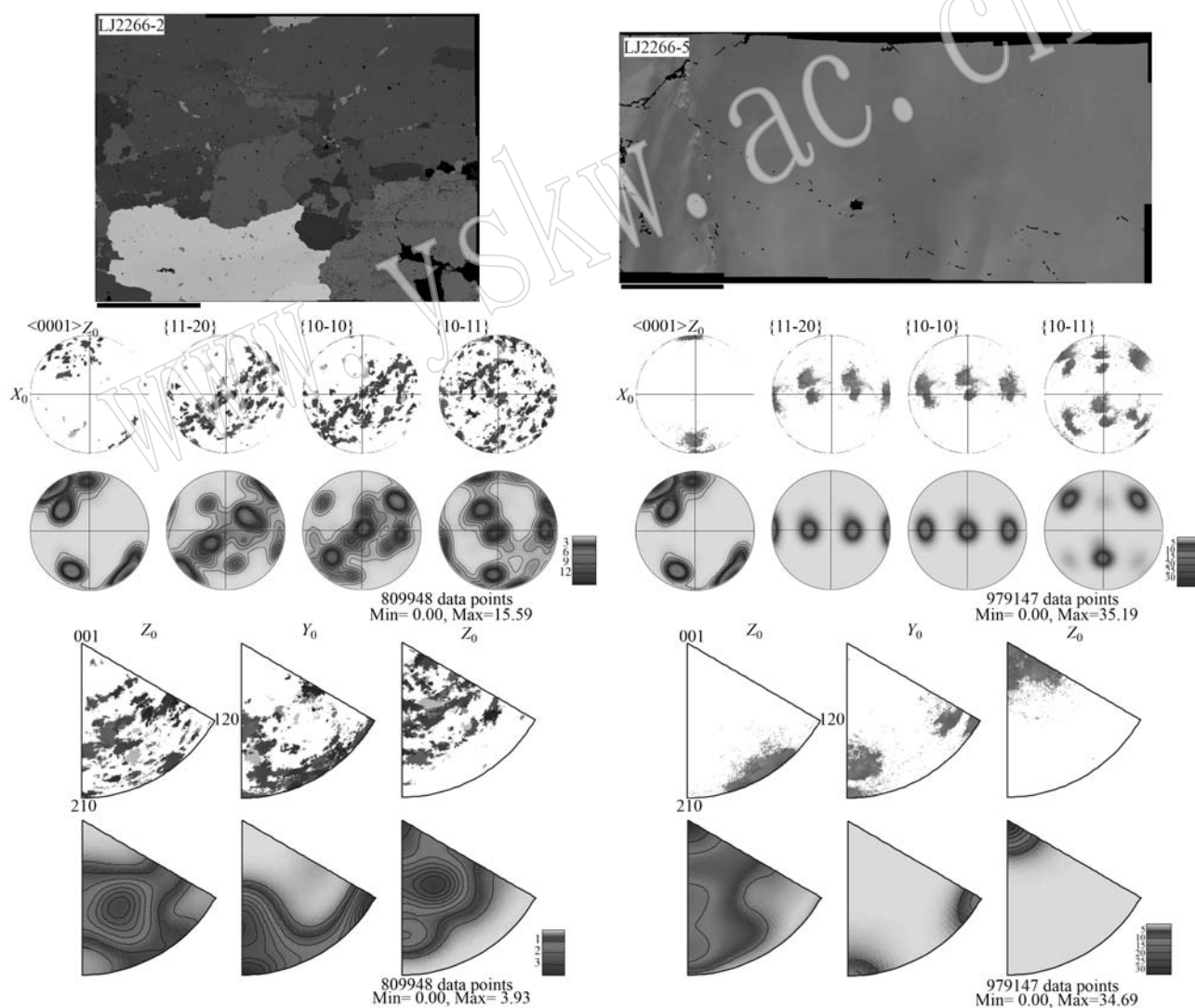


图6 与绿柱石共生的石英的 EBSD 极密图与反极密图

Fig. 6 EBSD pole diagram and inverse pole diagram of quartz associated with beryl

圆环带极密(图7)。

针对绿柱石附近的石英进行进一步筛选,将其EBSD组构数据进行分别投图,获得粒度400 μm 以上粗颗粒石英的EBSD组构,其呈现出 $C-\langle 0001 \rangle$ 在 Z_0 轴形成极密,与此相对的,粒度处于400 μm 以下

的石英主要在 X_0 轴形成 $C-\langle 0001 \rangle$ 极密(图8)。因此可以认为在含绿柱石石英脉中,石英主要呈现粗颗粒、弱变形的显微特征,以底面 $\langle a \rangle$ 为主要滑移系,少数石英分布在绿柱石周围,存在细粒化的现象,以柱面 $\langle c \rangle$ 为主要滑移系。

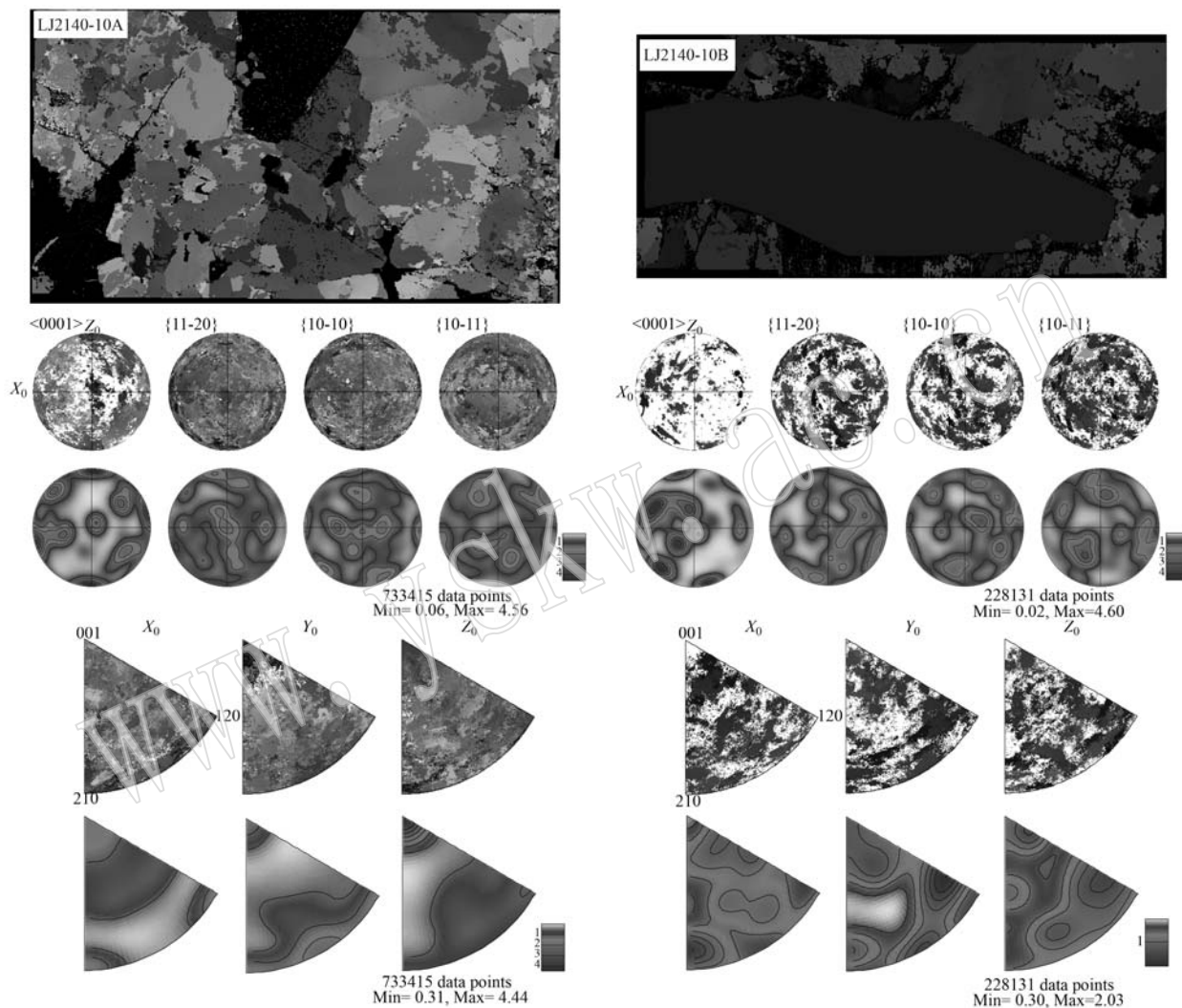


图7 绿柱石矿物附近的石英的EBSD极密图与反极密图

Fig. 7 EBSD pole diagram and inverse pole diagram of quartz near beryl minerals

7 讨论

7.1 构造变形和流体包裹体形成环境限定

组构(fabric/texture)或称晶格优选(lattice preferred orientation, LPO)为岩石中大量的矿物结晶方向的统计优选结果,主要与矿物的结晶过程及后期变形相关(Jessell, 1987; Law *et al.*, 1990; Heidelberg *et al.*, 2000; Law, 2014; Hunter *et al.*, 2019; 占乐凡

等, 2022; 王淑婷等, 2023)。石英是地壳主要造岩矿物之一,通过前人研究,石英的主要变形机制包括有低温脆性变形为主的破裂与微破裂作用,低温到高温的晶质塑性变形,其中包括膨凸重结晶、亚颗粒旋转及颗粒边界迁移重结晶(Stipp *et al.*, 2002; Stipp and Kunze, 2008)以及在特定温压环境下的道芬双晶现象(占乐凡等, 2022)。前人研究表明,变形石英滑移系发育受温度影响明显,从高温到低温依次出现的滑移系为柱面 $\langle c \rangle$ 、柱面 $\langle a \rangle$ 、底面 $\langle a \rangle$ 、菱面 $\langle a \rangle$ (图9),

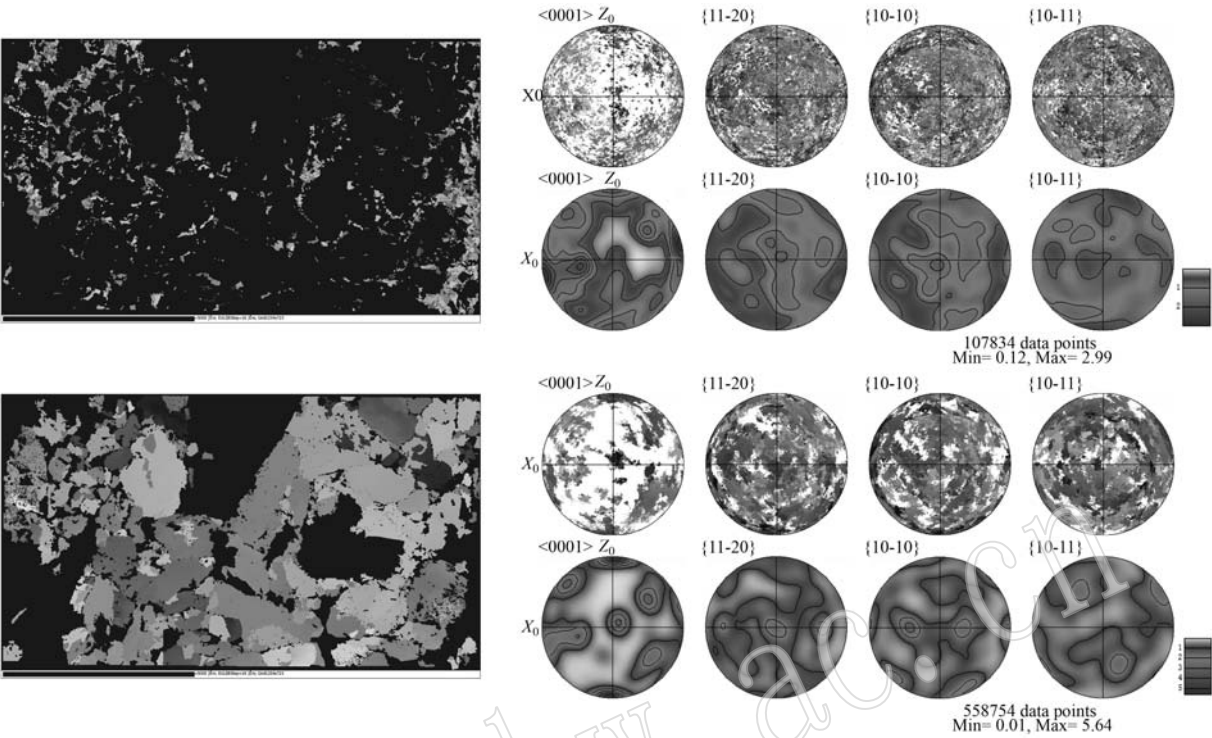


图 8 绿柱石矿物附近不同粒度石英的 EBSD 极密图与反极密图
Fig. 8 EBSD pole diagram and inverse pole diagram of quartz near beryl with different particle sizes

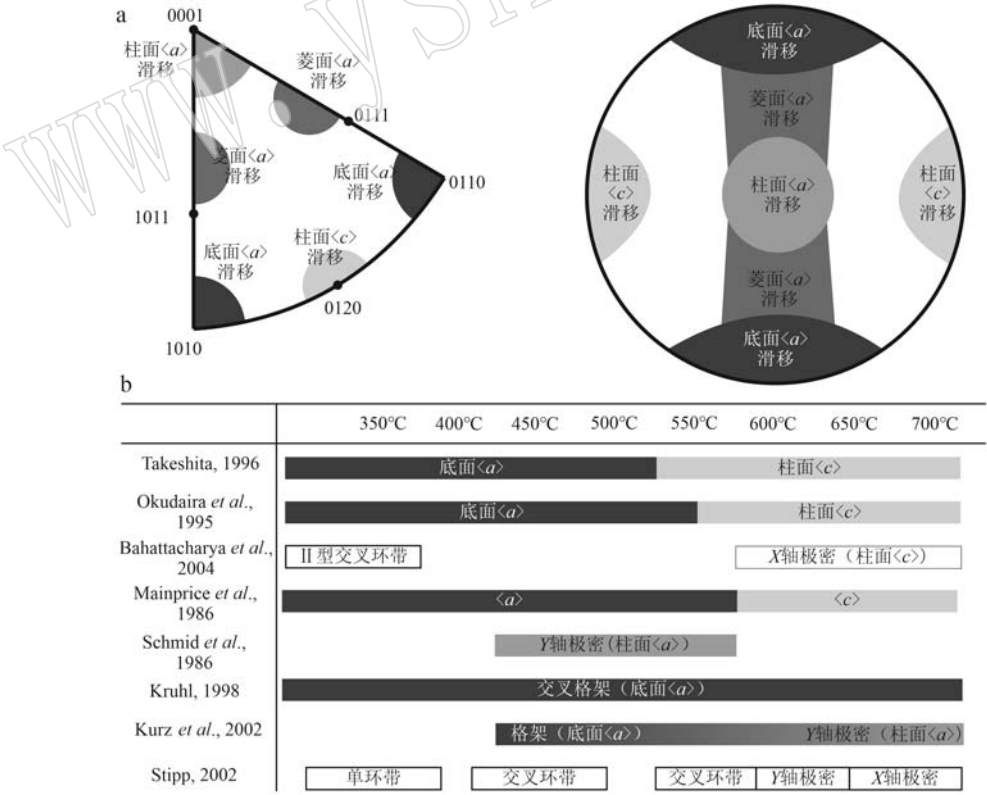


图 9 石英的不同滑移系在反极密图与极密图的分布特征(a)和石英主要滑移系的温度范围(b) [据 Toy 等(2008)、夏浩然等(2011)修改]

Fig. 9 The distribution characteristics of different slip systems of quartz on the pole and extreme pole diagrams(a) and the temperature range of the main slip systems of quartz(b) (modified after Toy *et al.*, 2008; Xia Haoran *et al.*, 2011)

然而近期研究表明石英滑移系同样受到流体的影响(陈宇等, 2019; 李孝文等, 2021; 王淑婷等, 2023)。本文样品的 EBSD 组构分析表明, 石英主要发育底面 $\langle a \rangle$ 滑移系, 表现为相对低温的变形环境。

绿柱石及石英内部流体包裹体的显微测温结果显示, 类型 1 流体包裹体在石英脉中分布广泛。类型 1 流体包裹体分布在以底面 $\langle a \rangle$ 滑移系为主的石英之中, 表现出低温低盐度的特点, 依据其流体性质估算其捕获温度集中在 350~400℃, 捕获压力在 220~260 MPa(图 10, 表 1)。该类型包裹体宿主石

英呈现出以膨凸重结晶为主的低温变形特征, 其 EBSD 组构以底面 $\langle a \rangle$ 滑移系为主, 对应变形组构温度与流体包裹体数据相吻合, 指示一种相对低温的捕获流体(图 11)。而类型 2 流体包裹体主要分布在绿柱石矿物中, 其盐度集中在 2.0%~6.3% 与 6.8%~9.2% 之间, 均一温度为 230~320℃, 并且还存在少量均一至气相的流体包裹体(表 1)。类型 3 流体包裹体为分布在绿柱石中的三相流体包裹体, 其均一温度相对较高, 为 230~320℃, 盐度为 2.1%~2.6%, 对应一种相对高温低盐度的流体(图 10, 表 1)。

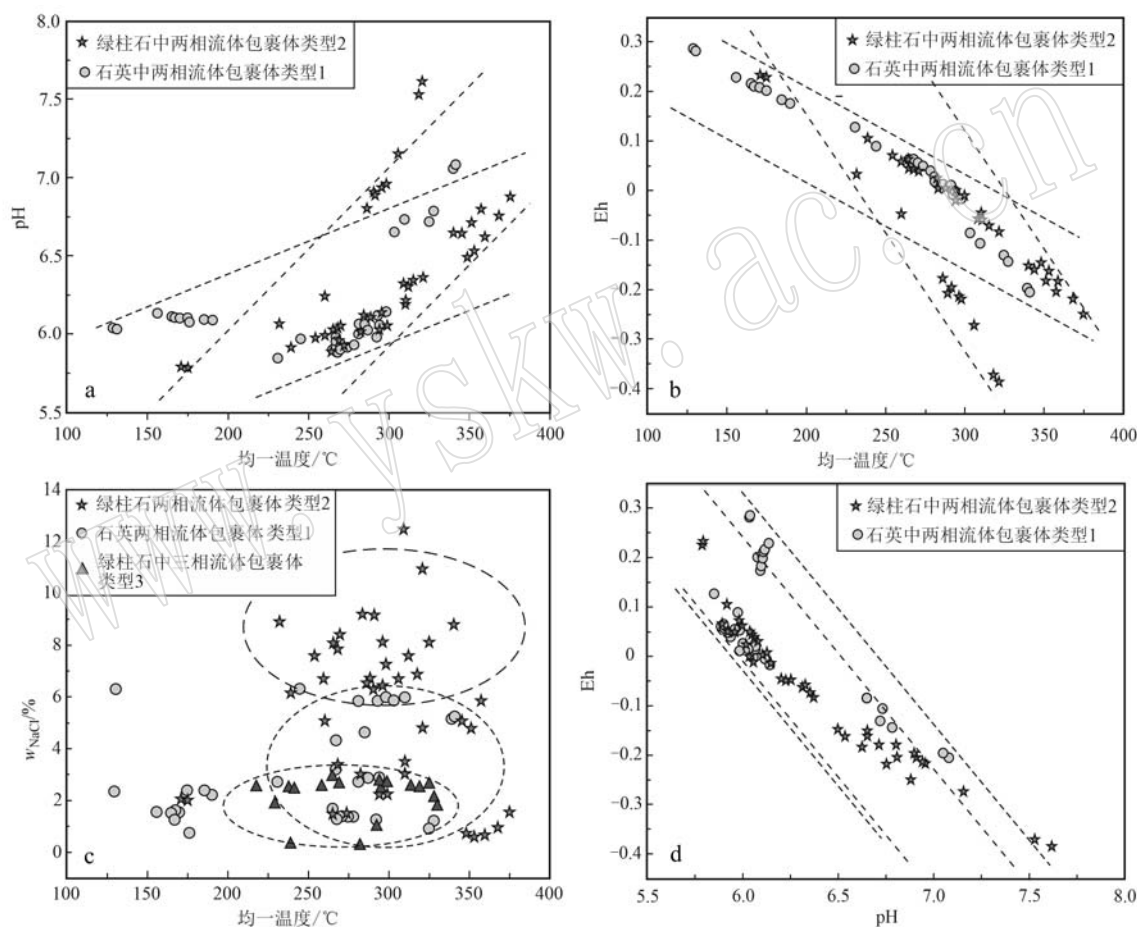


图 10 含绿柱石石英脉流体包裹体均一温度与 pH(a)、Eh(b)、盐度(c)关系图及 pH 与 Eh 关系图(d)

Fig. 10 Relationship diagrams between temperature and pH(a), Eh(b), salinity(c), and relationship diagram between pH and Eh(d) of fluid inclusions in quartz veins containing beryl

7.2 流体不混溶与成矿流体环境

流体不混溶作用在不同地质演化过程中均有体现, 深刻影响成矿流体的演化过程(卢焕章, 2011, 2019; 刘景波, 2019)。流体不混溶现象的成因较为多样, 不同学者针对不同体系的流体不混溶现象开展了研究(Zhang and Frantz, 1989; Frantz *et al.*,

1992; 丁俊英等, 2007; 卢焕章, 2011), 认为促使流体不混溶现象发生的主要前提包括有体系成分、温压的变化、盐分的加入等。在老君山地区绿柱石石英脉样品中, 同时发现类型 2(气液两相)与类型 3(三相)两组不同相态的流体包裹体, 这是成矿流体在被捕获时处于不混溶状态的证据之一(卢焕章,

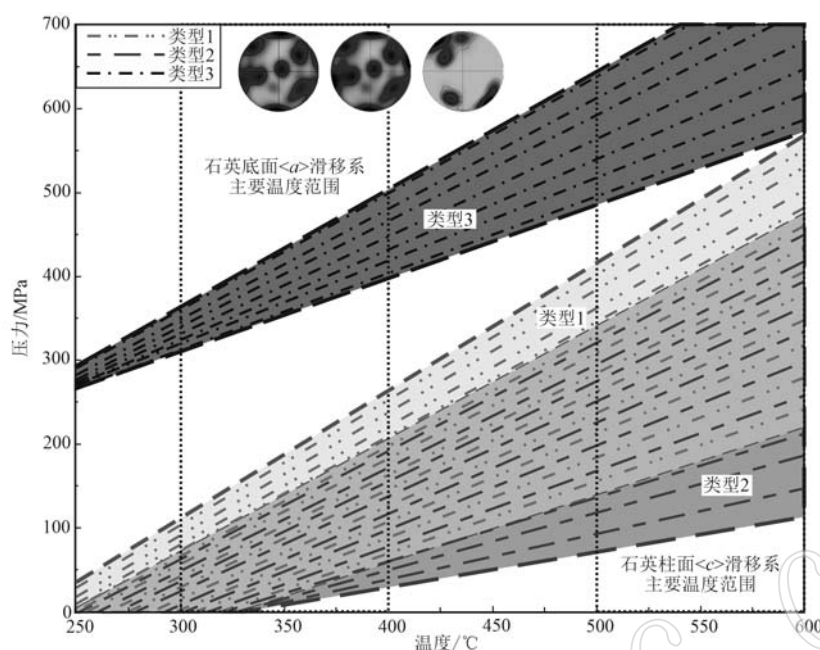


图 11 流体包裹体体系压力-温度投图

Fig. 11 Pressure-temperature diagram of fluid inclusion system

2004, 2011; 黄文清等, 2017; 李孝文等, 2021)。除此之外,通过分析流体包裹体的测温数据,还发现以下流体不混溶现象的直接证据:① 类型 2 流体包裹体存在少量均一至液相的流体包裹体,同时伴随着少量气体充填度较大的包裹体;② 对比盐度可知,类型 2 流体包裹体的盐度要远远大于类型 3 的流体包裹体盐度(图 10),这是因为在流体发生不混溶作用时,盐类更倾向于分馏至水相,因而会导致同一矿物中 H_2O - NaCl 流体包裹体的盐度相对更高(Coulibaly *et al.*, 2008; Lawrence *et al.*, 2013);③ 通过建立流体包裹体体系的温压投图(图 11),可以清楚地看到,共存于绿柱石中的类型 2 与类型 3 包裹体的温压投图具有类似的温压斜率,但是二者的范围存在分歧,成矿环境的压力波动通常是导致流体不混溶现象发生的前提。

成矿流体的氧化-还原环境条件和酸碱度在很大程度上影响了金属元素的迁移与沉淀,从而对区域的成岩成矿作用产生影响(高慧文等, 2010; 张荣伟等, 2017; 谢伟等, 2020)。Worley 和 Powell (1998)针对不同矿物组合建立了热力学相图,有效地限定了不同矿物组合的物理化学环境条件。Reed (2006)通过实验验证了酸碱度对硫化物的沉淀的重要意义,高慧文等(2010)提出以 Eh-pH 为变量的图解法可以用于研究水溶液中化学平衡条件和各种矿

物相之间的稳定与变化趋势。由上述列举研究可知,成矿热液流体的 pH 与 Eh 值是限制区域成矿物质迁移沉淀的重要热力学参数。而流体包裹体的热力学研究能够为我们提供古流体的 pH 与 Eh 值数据,能够量化成矿过程中的物化环境。成矿流体的 pH 与 Eh 值计算结果可以帮助我们了解成矿热液流体的热力学性质,进而了解在热液成矿过程中矿物的溶解和沉淀、热液蚀变、热液成矿等地球化学过程,对解释成矿过程与成矿机制有重要作用(韩吟文等, 2003)。结合老君山地区的成矿研究工作,依据刘斌(2011)的公式,计算了类型 1 与类型 2 流体包裹体的 pH 与 Eh 值数据,将其在谢伟等(2020)建立的 Fe-Pb-Zn 为主的 Eh-pH 相图上进行了投图,结果可见两种类型包裹体的 pH-Eh 数据相差较小, pH 值分布范围为 5.5~7.3,峰值范围为 5.7~6.8,而 Eh 范围为 -0.3~0.1,主要集中在 -0.05~0.05 之间(图 12)。另外在图 12 中可见其中 Fe 离子分布区域主要在 Fe^{2+} 与 Fe_2O_3 两相的交界区域,这与我们在显微镜下观测到的磁铁矿现象相一致(图 4g),佐证了我们在显微镜下观测到的磁铁矿、毒砂、电气石与绿柱石等矿物来自于同一期次成矿流体,整体可能源自于燕山期上涌的岩浆,这也与前人的研究成果一致(胡荣荣, 2008; 郭碧君, 2009; 黄文清等, 2017)。

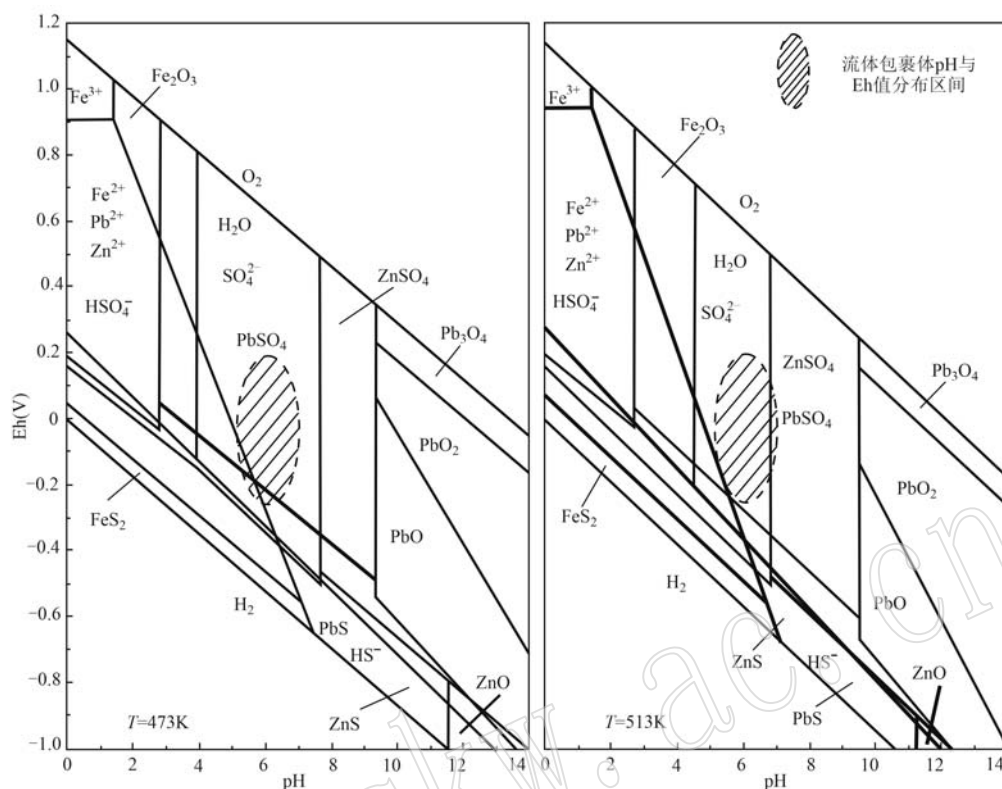


图 12 含绿柱石石英脉流体包裹体热力学数据投图(据谢伟等, 2020 修改)

Fig. 12 Thermodynamic data of fluid inclusions in beryl-bearing quartz veins (revised according to Xie Wei *et al.*, 2020)

由于在流体环境中,金属矿物主要以硫的络合物形式运移,这种络合物与流体的 pH 值关系紧密 (Hayashi and Ohmoto, 1991; Gammons *et al.*, 1994; Mikucki, 1998)。而流体的 CO_2 通常可以作为 pH 值的缓冲剂,从而扩大一部分金属矿物的溶解度,因此,当流体中 CO_2 因为不混溶溢出,同样会造成金属矿物溶解度降低,最终导致区域成矿作用的发生。通过对流体包裹体的 pH 值投图分析,可以看出不论是石英中还是绿柱石中的流体包裹体,均存在流体环境由弱酸性向中性甚至弱碱性转化的过程 (Qtz: 6.0→7.0; Bel: 6.0→7.3),因此可以进一步认为,流体不混溶是老君山地区绿柱石成矿的重要因素之一。

老君山地区自古元古代形成结晶基底以来,经历了多期次的构造演化过程,形成了丰富的构造现象与矿产资源。老君山主要花岗片麻岩原岩形成年限在 440 ~ 420 Ma (Roger *et al.*, 2000; Maluski *et al.*, 2001; 郭利果, 2006; 王丹丹等, 2015; 刘忠等, 2022),为加里东期花岗岩。Yan 等 (2006) 认为印支期至燕山早期是花岗片麻岩形成的主要时期。胡荣荣 (2008) 在大丫口祖母绿矿床采集的花岗斑岩

的 Ar-Ar 同位素年龄为 64 Ma,可能代表燕山末期岩浆侵入作用的最晚年龄。对比老君山地区不同岩石的微量元素含量,可见形成于白垩纪的花岗岩中 Be 元素 (含量为 33.8×10^{-6}) 要远高于志留纪南温河序列 (Be 含量为 4.9×10^{-6}) (张世涛等, 1998),这也侧面证明了绿柱石中 Be 元素主要来源于燕山期侵入岩浆。一般认为,燕山中晚期 (约 144 ~ 80 Ma) 太平洋板块与欧亚板块的相互作用导致了中下地壳的熔融,并在随后的岩浆上涌过程中形成燕山期的侵入岩体 (刘玉平等, 2007; 冯佳睿等, 2010; 刘忠等, 2022)。老君山燕山期岩浆时限在 95 ~ 80 Ma,岩浆作用导致了区域各类型矿床的形成,主要体现在两个方面: ① 燕山期岩浆上涌过程导致穹隆进一步的隆升,形成一系列断层与断裂构造现象,可以作为热液成矿作用的容矿构造场所; ② 岩浆及残余热液为区域提供了丰富的成矿物质。因此,绿柱石的形成与燕山期岩浆作用息息相关,成矿流体直接或间接来自于燕山期岩浆。综合流体包裹体数据,可知老君山区域的成矿流体以相对中高温、低盐度为特征,这与前人的研究成果相吻合 (胡荣荣, 2008; 黄文清等, 2017; 姜雪等, 2019)。形成绿柱石所需的 Be

元素作为一种轻金属元素,主要富集在地壳部分,因此老君山地区成矿的 Be 元素应来自于上涌的燕山期岩浆。燕山期岩浆源于太平洋板块与欧亚板块碰撞后的中下地壳熔融,沿穹窿隆升过程中形成的裂隙上涌,在流体不断自深部向浅层迁移过程中,热液中 CO_2 的逸出导致了流体不混溶现象,最终导致绿柱石沉淀成矿。部分成矿热液交代区域结晶基底中 Cr、V 元素,最终在不同构造层次的裂隙构造中沉淀,形成丰富的绿柱石矿物乃至祖母绿矿床。

8 结论

(1) 老君山地区石英与绿柱石中的流体包裹体十分发育,主要包括了类型 1(石英中 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 两相流体包裹体)、类型 2(绿柱石中 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 两相流体包裹体)、类型 3(绿柱石中 $\text{CO}_2\text{-NaCl-H}_2\text{O}$ 两相流体包裹体)。3 种流体包裹体分别对应了低温流体、低温高盐度流体与高温低盐度流体。

(2) 老君山地区含绿柱石石英脉产出云母片岩中,包含发生细粒化的细颗粒石英和发生膨凸重结晶的粗颗粒石英,指示区域存在多期次变形作用。石英的变形特征为以底面滑移系为主,叠加少量柱面<c>滑移系,指示石英脉低温为主的变形环境,局部存在高温变形,其与区域片麻岩穹窿经历的由深部向浅部逐渐剥露的过程一致。

(3) 老君山区域成矿流体主要来自于燕山中晚期岩浆,片麻岩穹窿在岩浆侵入过程中不断隆升,导致区域成矿流体的运移与聚集,同时为成矿过程提供了良好的导矿和容矿构造。

(4) 石英和绿柱石中的流体包裹体表明,成矿流体存在由弱酸性向中性甚至弱碱性转化的过程,pH 值的增大促进金属硫络合物的分解,有利于区域矿物沉淀。同时流体在沿构造裂隙上涌过程中发生流体不混溶现象,是区域绿柱石成矿的重要因素之一。

References

- Bodnar R J. 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of $\text{H}_2\text{O-NaCl}$ solutions[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(3): 683~684.
- Brown P E and Lamb W M. 1989. P-V-T properties of fluids in the system $\text{H}_2\text{O} \pm \text{CO}_2 \pm \text{NaCl}$: New graphical presentations and implications for fluid inclusion studies[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(6): 1 209~1 221.
- Cao Shuyun. 2007. Study on Microstructure and Flow Mechanism of High Temperature Mylonite in Diancang Mountain, Western Yunnan[D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Cao S Y and Neubauer F. 2016. Deep crustal expressions of exhumed strike-slip fault systems: Shear zone initiation on rheological boundaries[J]. *Earth-Science Reviews*, 162: 155~176.
- Carter A and Clift P D. 2007. Was the Indosinian orogeny a Triassic mountain building or a thermotectonic reactivation event? [J]. *Comptes Rendus Géoscience*, 340(2~3): 83~93.
- Cerny P, Anderson A J, Tomascak P B, *et al.* 2003. Geochemical and morphological features of beryl from the Bikita granitic pegmatite, Zimbabwe[J]. *The Canadian Mineralogist*, 41(4): 1 003~1 011.
- Chen Yanjing, Tang Guojun, Jno F P, *et al.* 2004. Hydrothermal metallogeny of the Shangong gold deposit, east Qinling: Radiogenic isotope geochemistry[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 24(3): 22~27(in Chinese with English abstract).
- Chen Yu, Cao Shuyun, Deng Youguo, *et al.* 2019. Fluid records within the Ailao Shan-Red River shear zone and their geological significance [J]. *Earth Science Frontiers*, 26(2): 42~57 (in Chinese).
- Chen Z C, Lin W, Faure M, *et al.* 2014. Geochronology and isotope analysis of the Late Paleozoic to Mesozoic granitoids from northeastern Vietnam and implications for the evolution of the South China block [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 86: 131~150.
- Cheng X M, Cao S Y, Li J Y, *et al.* 2018. Metamorphic, deformation, fluids and geological significance of low-temperature retrograde mylonites of Diancangshan metamorphic massif along Ailaoshan-Red River strike-slip fault zone, Yunnan, China[J]. *Science China Earth Sciences*, 61(8): 1 023~1 041.
- Chi Guoxiang and Lai Jianqing. 2009. Roles of fluid inclusions in study of mineral deposits[J]. *Mineral Deposits*, 28(6): 850~855 (in Chinese with English abstract).
- Coulibaly Y, Boiron M C, Cathelineau M, *et al.* 2008. Fluid immiscibility and gold deposition in the Birimian quartz veins of the Angovia deposit (Yaouré, Ivory Coast)[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 50(2~4): 234~254.
- Deng Jun, Sun Zhongshi, Yang Liqiang, *et al.* 2000. Discussion on gold origin and rich mechanism of ore-forming fluid movement[J]. *Geological Science and Technology Information*, 19(1): 41~45 (in

- Chinese with English abstract).
- Ding Junying and Ni Pei. 2007. Melting and dissolution behaviors of frozen synthetic fluid inclusion for the system $\text{NaCl-CaCl}_2\text{-H}_2\text{O}$ [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2 039~2 044 (in Chinese with English abstract).
- Ding Xin. 2016. Ore-forming Mechanism of the Asikaerte Granite Type Beryllium Deposit in Xinjiang, China[D]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- Dong Jingyu, Huang Fan and Wei Na. 2023. Characteristics of fluid inclusions in beryl from different beryllium deposits in China[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 44(4): 635~648 (in Chinese with English abstract).
- Dong Yanlong, Cao Shuyun, Cheng Xuemei, *et al.* 2019. Grain-size reduction of feldspar and flow of deformed granites within the Gaoligong shear zone, southwestern Yunnan, China[J]. *Science China Earth Sciences*, 49(9): 1 372~1 393 (in Chinese).
- Faure M, Shu L S, Wang B, *et al.* 2009. Intracontinental subduction: A possible mechanism for the Early Palaeozoic Orogen of SE China[J]. *Terra Nova*, 21(5): 360~368.
- Feng Jiarui, Mao Jingwen, Pei Rongfu, *et al.* 2010. SHRIMP zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of Laojunshan granite intrusion from the Wazha tungsten deposit, Yunnan Province and their implications for petrogenesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 845~857 (in Chinese with English abstract).
- Feng Minggang, Zhang Shitao and Lu Wei. 2000. The characteristics and prospecting direction of the emerald deposit in China[J]. *Yunnan Geology*, 19(1): 37~42 (in Chinese with English abstract).
- Frantz J D, Popp R K and Hoering T C. 1992. The compositional limits of fluid immiscibility in the system $\text{H}_2\text{O-NaCl-CO}_2$ as determined with the use of synthetic fluid inclusions in conjunction with mass spectrometry[J]. *Chemical Geology*, 98(3~4): 237~255.
- Gammons C H, Williams-Jones A E and Yu Y. 1994. New data on the stability of gold (I) chloride complexes at 300°C [J]. *Mineralogical Magazine*, 58(1) 159~193.
- Gao Huiwen and Liu Xing. 2010. Application of thermodynamics Eh-pH to the zoning model of Dayao copper deposit[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 30(2): 77~81 (in Chinese with English abstract).
- Guo Bijun. 2009. Study on Paragenetic Association of Minerals in Malipo Emerald Deposit from Yunnan Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Guo Ligu. 2006. Preliminary Study on Geochemistry and Chronology of Laojunshan Metamorphic Core Complex in Southeastern Yunnan [D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract).
- Guo Wei, Lin Xian and Hu Shenghong. 2020. Advances in LA-ICP-MS analysis for individual fluid inclusions and applications [J]. *Earth Science*, 45(4): 1 362~1 374 (in Chinese with English abstract).
- Han Yinwen and Ma Zhendong. 2003. *Geochemistry* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~370(in Chinese).
- Hayashi K I and Ohmoto H. 1991. Solubility of gold in NaCl - and H_2S -bearing aqueous solutions at 250~350°C [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(8): 2 111~2 126.
- Heidelbach F, Kunze K and Wenk H R. 2000. Texture analysis of a recrystallized quartzite using electron diffraction in the scanning electron microscope [J]. *Journal of Structural Geology*, 22(1): 91~104.
- Hu Rongrong. 2008. Study on Metallogenic Geological Background and Metallogenic Model of Malipo Emerald Deposit in Yunnan Province [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology (in Chinese with English abstract).
- Huang Kongwen. 2013. *Geochemistry and Geochronology of Nanlao Gneiss in Laojunshan Area, Southeastern Yunnan and Its Tectonic Significance* [D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Huang Wenqing, Shui Ting and Ni Pei. 2017. Study on fluid inclusions of emerald in Malipo, Yunnan [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 37(S1): 75~83 (in Chinese).
- Hunter N J R, Weinberg R F, Wilson C J L, *et al.* 2019. Quartz deformation across interlayered monomineralic and polymineralic rocks: A comparative analysis [J]. *Journal of Structural Geology*, 119: 118~134.
- Jessell M W. 1987. Grain-boundary migration microstructures in a naturally deformed quartzite [J]. *Journal of Structural Geology*, 9(8): 1 007~1 014.
- Jiang Xue, Yu Xiaoyan, Guo Bijun, *et al.* 2019. A study of mineral inclusions in emeralds from Malipo, Yunnan Province, China [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 38(2): 279~286 (in Chinese with English abstract).
- Kruhl J H. 1998. Reply: prism- and basal-plane parallel subgrain boundaries in quartz: A microstructural geothermobarometer [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 16: 142~146.
- Kurz W, Fritz H, Tenczer V, *et al.* 2002. Tectonometamorphic evolution of the Koralm Complex (Eastern Alps): Constraints from microstruc-

- tures and textures of the "Plattengneis" shear zone[J]. *Journal of Structural Geology*, 24: 1 957~1 970.
- Law R D. 2014. Deformation thermometry based on quartz *c*-axis fabrics and recrystallization microstructures: A review[J]. *Journal of Structural Geology*, 66: 129~161.
- Law R D, Schmid S M and Wheeler J. 1990. Simple shear deformation and quartz crystallographic fabrics: A possible natural example from the torridon area of NW Scotland[J]. *Journal of Structural Geology*, 12(1): 29~45.
- Lawrence D M, Treloar P J, Rankin A H, *et al.* 2013. A fluid inclusion and stable isotope study at the loulo mining district, Mali, West Africa: Implications for multifluid sources in the generation of orogenic gold deposits[J]. *Economic Geology*, 108(2): 229~257.
- Li Dongxu and Xu Shunshan. 2000. Rotation-shearing genesis of metamorphic core complex—Structural analysis of metamorphic core complex in Laojunshan, southeastern Yunnan Province[J]. *Geological Review*, 46(2): 113~119, 225 (in Chinese with English abstract).
- Li W Y, Cao S Y, Dong Y L, *et al.* 2023. Crustal anatexis and initiation of the continental-scale Chongshan strike-slip shear zone on the southeastern Tibetan Plateau[J]. *Tectonics*, 42(4): e2023TC007864.
- Li Xiaowen, Cao Shuyun, Liu Jianhua, *et al.* 2021. Geological structure characteristics and fluid activity of the gold-bearing quartz veins on the Yushishan area, North Altyn tagh[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 45(6): 1 061~1 093 (in Chinese with English abstract).
- Lin Longhua, Xu Jiuhua, Wei Hao, *et al.* 2012. SRXRF study of fluid inclusions in beryl from the Kektokay No. 3 pegmatite vein, Altay, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(4): 603~611 (in Chinese with English abstract).
- Liu Bin. 2011. Calculation of pH and Eh for aqueous inclusions as simple system[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(5): 1 533~1 542 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jingbo. 2019. Carbon-bearing fluids forming in the process of metamorphism of subduction zones[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(1): 89~98 (in Chinese with English abstract).
- Liu Junlai, Cao Shuyun, Zou Yunxin, *et al.* 2008. EBSD analysis of rock fabrics and its application[J]. *Geological Bulletin of China*, 27(10): 1 638~1 645 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yuping, Li Zhengxiang, Li Huimin, *et al.* 2007. U-Pb geochronology of cassiterite and zircon from the Dulong Sn-Zn deposit: Evidence for Cretaceous large-scale granitic magmatism and mineralization events in southeastern Yunnan Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 967~976 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yuping, Ye Lin, Li Chaoyang, *et al.* 2006. Discovery of the neoproterozoic magmatics in southeastern Yunnan: Evidence from SHRIMP zircon U-Pb dating lithogeochemistry[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 916~926 (in Chinese with English abstract).
- Liu Zhong. 2022. Tectono Thermal Evolution and Exhumation of the Laojunshan Gneiss Dome in the Southeast of Yunnan[D]. Wuhan: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- Liu Zhong, Cao Shuyun, Dong Yanlong, *et al.* 2022. Deformation structure and stripping process of gneiss dome in Laojunshan, southeastern Yunnan[J]. *Science China Earth Sciences*, 52(1): 53~87 (in Chinese).
- Lu Huanzhang. 2004. Fluid Inclusion[M]. Beijing: Science Press, 1~487(in Chinese).
- Lu Huanzhang. 2011. Fluids immiscibility and fluid inclusions[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(5): 1 253~1 261 (in Chinese with English abstract).
- Lu Huanzhang. 2019. Geofluids and across earth sphere structures[J]. *Journal of Geomechanics*, 25(6): 1 003~1 012 (in Chinese with English abstract).
- Ma Wenpu. 1998. Babu ophiolite Turkic orogenic belt[J]. *Chinese Science Bulletin*, 43(13): 1 363~1 365 (in Chinese).
- Mainprice D, Bouches J L and Blumenfeld P. 1986. Dominant *c* slip in naturally deformed quartz: Implications for dramatic plastic softening at high temperature[J]. *Geology*, 14: 819~822.
- Maluski H, Lepvrier C, Jolivet L, *et al.* 2001. Ar-Ar and fission-track ages in the song chay massif: Early Triassic and Cenozoic tectonics in northern Vietnam[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 19(1~2): 233~248.
- Michallik R M, Wagner T, Fusswinkel T, *et al.* 2017. Chemical evolution and origin of the luumäki gem beryl pegmatite: Constraints from mineral trace element chemistry and fractionation modeling[J]. *Lithos*, 274: 147~168.
- Mikucki E J. 1998. Hydrothermal transport and depositional processes in Archean lode-gold systems: A review[J]. *Ore Geology Reviews*, 13(1~5): 307~321.
- Okudaira T, Takeshita T, Hara I, *et al.* 1995. A new estimate of the conditions for transition from basal to prism<C> slip in naturally deformed quartz[J]. *Tectonophysics*, 250(1/3): 31~46.
- Pan Jinbo, Zhang Da, Que Chaoyang, *et al.* 2015. Geochemistry and zircon U-Pb chronology of the laochengpo gneissic granite in the southeast Yunnan area and their implications[J]. *Bulletin of Mineralogy*,

- Petrology and Geochemistry, 34(4): 795~803 (in Chinese with English abstract).
- Prior D J, Boyle A P, Brenker F, *et al.* 1999. The application of electron backscatter diffraction and orientation contrast imaging in the SEM to textural problems in rocks[J]. *American Mineralogist*, 84(11~12): 1741~1759.
- Que Chaoyang. 2016. Study on Tungsten Metallogenic System and Prospecting Direction in Nanwenhe-Saxi Area of Malipo, Yunnan Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Que Chaoyang, Zhang Da, Di Yongjun, *et al.* 2014. Ore-controlling characteristics of tungsten deposits in the Nanwenhe Saxi area and deep prospecting breakthrough[J]. *Earth Science Frontiers*, 21(2): 286~300 (in Chinese with English abstract).
- Reed M H. 2006. Sulfide mineral precipitation from hydrothermal fluids [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 61(1): 609~631.
- Ren Jishun. 1990. On the geotectonics of Southern China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 64(4): 275~288 (in Chinese with English abstract).
- Roedder E. 1984. Fluid inclusions: Reviews in Mineralogy Volume 12 [M]. Washington: Mineralogical Society of America, 1~644.
- Roger F, Leloup P H, Jolivet M, *et al.* 2000. Long and complex thermal history of the Song Chay metamorphic dome (Northern Vietnam) by multi-system geochronology [J]. *Tectonophysics*, 321(4): 449~466.
- Schmid S M and Casey M. 1986. Complete fabric analysis of some commonly observed quartz *c*-axis patterns[C]//Hobbs B E and Heard H C. *Mineral and Rock Deformation: Laboratory Studies—The Paterson Volume*, American Geophysical Union Monograph, 36. San Francisco: American Geophysical Union, 246~261.
- Shen Zhaoli and Wang Yanxin. 2002. Review and outlook of water-rock interaction studies[J]. *Earth Science*, 27(2): 127~133 (in Chinese with English abstract).
- Shu Liangshu. 2012. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block [J]. *Geological Bulletin of China*, 31(7): 1035~1053 (in Chinese with English abstract).
- Stipp M and Kunze K. 2008. Dynamic recrystallization near the brittle-plastic transition in naturally and experimentally deformed quartz aggregates[J]. *Tectonophysics*, 448(1~4): 77~97.
- Stipp M, Stünitz H, Heilbronner R, *et al.* 2002. The eastern tonale fault zone: A 'natural laboratory' for crystal plastic deformation of quartz over a temperature range from 250 to 700°C [J]. *Journal of Structural Geology*, 24(12): 1861~1884.
- Suo Q Y, Shen P, Luo Y Q, *et al.* 2022. Beryl mineralogy and fluid inclusion constraints on the Be enrichment in the dakalasu No. 1 pegmatite, Altai, NW China[J]. *Minerals*, 12(4): 450.
- Takeshita T. 1996. Estimate of physical conditions for deformation based on *c*-axis transitions in naturally deformed quartzite[J]. *Journal of the Geological Society of Japan*, 102(3): 211~222.
- Tan Hongqi and Liu Yuping. 2017. Genesis of amphibolite in Mengdong Group-complex in southeastern Yunnan and its tectonic significance [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 47(6): 1763~1783 (in Chinese with English abstract).
- Thomas R, Davidson P and Badanina E. 2009. A melt and fluid inclusion assemblage in beryl from pegmatite in the orlovka amazonite granite, east Transbaikalia, Russia: Implications for pegmatite-forming melt systems[J]. *Mineralogy and Petrology*, 96(3): 129~140.
- Toy V G, Prior D J and Norris R J. 2008. Quartz fabrics in the alpine fault mylonites: Influence of pre-existing preferred orientations on fabric development during progressive uplift[J]. *Journal of Structural Geology*, 30(5): 602~621.
- Tuba G, Kontak D J, Zajacz Z, *et al.* 2019. Bulk microanalysis of assemblages of small fluid inclusions by LA-ICP-MS: Methodology and application to orogenic gold systems[J]. *Chemical Geology*, 529: 119326.
- Wang Dandan, Li Baolong, Zhu Dequan, *et al.* 2015. Zircon U-Pb geochronology of metamorphic complex in the Laojunshan district, southeastern Yunnan Province and its tectonic implication[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(10): 1718~1734 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shuting, Cao Shuyun, Zhan Lefan, *et al.* 2023. Deformation behavior and fluid action of quartz veins in the Xuelongshan metamorphic complex, Western Yunnan[J]. *Science China Earth Sciences*, 53(9): 2035~2058 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaojuan, Liu Yuping, Miao Yingli, *et al.* 2014. In-situ LA-MC-ICP-MS cassiterite U-Pb dating of Dulong Sn-Zn polymetallic deposit and its significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(3): 867~876 (in Chinese with English abstract).
- Worley B and Powell R. 1998. Making movies: Phase diagrams changing in pressure, temperature, composition and time[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 138(1): 269~280.
- Xia Haoran and Liu Junlai. 2011. The crystallographic preferred orientation of quartz and its applications[J]. *Geological Bulletin of China*, 30(1): 58~70 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Rongge, Yuan Zhenlei, Liu Jingdang, *et al.* 2004. The formation

- and evolution of regional ore-forming fluid[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(2): 461~469 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Rongge, Zhang Zongheng, Chen Huiquan, *et al.* 2001. Types of geological fluids and ore-forming fluid[J]. *Earth Science Frontiers*, 8(4): 245~251 (in Chinese with English abstract).
- Xie Wei, Wen Shouqin, Tang Tiejiao, *et al.* 2020. The thermodynamic phase diagram and the ore-forming mechanism of the Dongjun Pb-Zn-Ag deposit[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(5): 1 482~1 504 (in Chinese with English abstract).
- Xie Y T and Wang Y. 2019. Structural doming tectonics; Intracontinental deformation of the SW margin of the Yangtze Block, China[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 108(5): 1 643~1 661.
- Xiong Xin, Ding Xin, Li Jiankang, *et al.* 2022. Metallogenic process of the Jiajika Li-Be deposit in West Sichuan: Constraints from fluid inclusions of No. 308 pegmatite[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(2): 323~340 (in Chinese with English abstract).
- Xu Huifen and Chen Tao. 1987. Application of cathodoluminescence to metamorphic and granitic rocks[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 6(3): 279~284, 286 (in Chinese with English abstract).
- Yan D P, Zhou M F, Wang C Y, *et al.* 2006. Structural and geochronological constraints on the tectonic evolution of the Dulong-Song Chay tectonic dome in Yunnan province, SW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 28(4~6): 332~353.
- Yan Danping, Zhou Meifu, Wang Yan, *et al.* 2005. Structural styles and chronological evidences from Dulong-song Chay Tectonic dome: Earlier spreading of South China Sea Basin due to Late Mesozoic to Early Cenozoic extension of South China Block[J]. *Earth Science*, 30(4): 402~412 (in Chinese with English abstract).
- Yunnan Bureau of Geology and Mineral Resources. 1999. Geological Maps and Geological Map Instructions of the 1:50 000 Dulong and Malipo Sheets of the People's Republic of China[R] (in Chinese).
- Zhan Lefan and Cao Shuyun. 2022. The effect of Dauphiné twinning on the crystallographic preferred orientation and deformation mechanism in quartz[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 41(6): 1 135~1 146 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Guo Anlin, Wang Yuejun, *et al.* 2013. Tectonics of South China continent and its implications[J]. *Science China Earth Sciences*, 43(10): 1 553~1 582 (in Chinese).
- Zhang Jinjiang, Shang Shan, Wei Chunjing, *et al.* 2019. Present status and development prospect of studies of rheology of continental lithosphere[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 40(1): 9~16 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Mingjie, Tang Junhong, Zhang Tongwei, *et al.* 2004. Applications of fluid inclusions to petroleum and natural gas geology and geochemistry[J]. *Geological Review*, 50(4): 397~406 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Rongwei, Peng Jiantang, Deng Qidong, *et al.* 2017. The Eh-pH thermodynamic phase diagram reflecting the intergrowth and differentiation of mineral groups in Maozu hydrothermal type deposits of northeastern Yunnan[J]. *Geological Review*, 63(5): 1 391~1 400 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shitao, Feng Minggang and Lü Wei. 1998. Analysis of Nanwenhe metamorphic core complex in southeastern Yunnan[J]. *Geological Bulletin of China*, 17(4): 390~397 (in Chinese).
- Zhang Y G and Frantz J D. 1989. Experimental determination of the compositional limits of immiscibility in the system $\text{CaCl}_2\text{-H}_2\text{O-CO}_2$ at high temperatures and pressures using synthetic fluid inclusions[J]. *Chemical Geology*, 74(3~4): 289~308.
- Zheng Y F, Xiao W J and Zhao G C. 2013. Introduction to tectonics of China[J]. *Gondwana Research*, 23(4): 1 189~1 206.
- Zhong Dalai, Wu Genyao, Ji Jianqing, *et al.* 1998. Ophiolite discovered in southeastern Yunnan[J]. *Chinese Science Bulletin*, 43(13): 1 365~1 370 (in Chinese).
- Zhou Q F, Qin K Z, Tang D M, *et al.* 2015. Mineralogy of the koktokay No. 3 pegmatite, Altai, NW China: Implications for evolution and melt-fluid processes of rare-metal pegmatites[J]. *European Journal of Mineralogy*, 27(3): 433~457.
- Zhou Q F, Qin K Z, Tang D M, *et al.* 2018. LA-ICP-MS U-Pb zircon, columbite-tantalite and 40 muscovite age constraints for the rare-element pegmatite dykes in the Altai orogenic belt, NW China[J]. *Geological Magazine*, 155(3): 707~728.
- Zhou X Y, Yu J H, O'Reilly S Y, *et al.* 2017. Sources of the Nanwenhe-Song Chay granitic complex (SW China-NW Vietnam) and its tectonic significance [J]. *Lithos*, 290~291: 76~93.
- Zou H, Min L A and Lbac D. 2020. Fluid composition and evolution of the Langxi Ba-F deposit, Yangtze Block, China: New insight from LA-ICP-MS study of individual fluid inclusion[J]. *Ore Geology Reviews*, 125: 103702.

附中文参考文献

- 曹淑云. 2007. 滇西点苍山高温糜棱岩显微构造和流动机制研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 陈衍景, 唐国军, Jno F P, 等. 2004. 东秦岭上宫金矿流体成矿作用:

- 放射成因同位素地球化学研究[J]. 矿物岩石, 24(3): 22~27.
- 陈宇, 曹淑云, 邓友国, 等. 2019. 哀牢山—红河剪切带中流体记录及地质意义[J]. 地学前缘, 26(2): 42~57.
- 池国祥, 赖健清. 2009. 流体包裹体在矿床研究中的作用[J]. 矿床地质, 28(6): 850~855.
- 邓军, 孙忠实, 杨立强, 等. 2000. 成矿流体运动系统与金质来源和富集机制讨论[J]. 地质科技情报, 19(1): 41~45.
- 丁俊英, 倪培. 2007. NaCl-CaCl₂-H₂O 体系人工合成流体包裹体及其冷冻后的熔融行为研究[J]. 岩石学报, 23(9): 2 039~2 044.
- 丁欣. 2016. 新疆阿斯卡尔特花岗岩型铍矿床成矿机制研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 董京娉, 黄凡, 魏娜. 2023. 中国不同类型铍矿床中绿柱石流体包裹体特征研究[J]. 地球学报, 44(4): 635~648.
- 董彦龙, 曹淑云, 程雪梅, 等. 2019. 高黎贡剪切带变形花岗岩中的长石细粒化和岩石流动特性[J]. 中国科学: 地球科学, 49(9): 1 372~1 393.
- 冯佳睿, 毛景文, 裴荣富, 等. 2010. 云南瓦渣钨矿区老君山花岗岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及成因探讨[J]. 岩石学报, 26(3): 845~857.
- 冯明刚, 张世涛, 吕伟. 2000. 中国祖母绿矿床特征及其找矿方向[J]. 云南地质, 19(1): 37~42.
- 高慧文, 刘星. 2010. 热力学 Eh-pH 相图在大姚铜矿分带模式研究中的应用[J]. 矿物岩石, 30(2): 77~81.
- 郭碧君. 2009. 云南麻栗坡祖母绿矿床矿物共生组合关系的研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 郭利果. 2006. 滇东南老君山变质核杂岩地球化学和年代学初步研究[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所.
- 郭伟, 林贤, 胡圣虹. 2020. 单个流体包裹体 LA-ICP-MS 分析及应用进展[J]. 地球科学, 45(4): 1 362~1 374.
- 韩吟文, 马振东. 2003. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1~370.
- 胡荣荣. 2008. 云南麻栗坡祖母绿矿床成矿地质背景及成矿模式研究[D]. 昆明: 昆明理工大学.
- 黄孔文. 2013. 滇东南老君山地区南捞片麻岩地球化学和年代学及其构造意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 黄文清, 水汀, 倪培. 2017. 云南麻栗坡祖母绿的流体包裹体研究[J]. 矿物学报, 37(S1): 75~83.
- 姜雪, 余晓艳, 郭碧君, 等. 2019. 云南麻栗坡祖母绿的矿物包裹体特征研究[J]. 岩石矿物学杂志, 38(2): 279~286.
- 李东旭, 许顺山. 2000. 变质核杂岩的旋扭成因——滇东南老君山变质核杂岩的构造解析[J]. 地质论评, 46(2): 113~119, 225.
- 李孝文, 曹淑云, 刘建华, 等. 2021. 北阿尔金余石山含金石英脉地质构造特征与流体作用[J]. 大地构造与成矿学, 45(6): 1 061~1 093.
- 林龙华, 徐九华, 魏浩, 等. 2012. 新疆阿尔泰可可托海 3 号伟晶岩脉绿柱石流体包裹体 SRXRF 研究[J]. 岩石矿物学杂志, 31(4): 603~611.
- 刘斌. 2011. 简单体系水溶液包裹体 pH 和 Eh 的计算[J]. 岩石学报, 27(5): 1 533~1 542.
- 刘景波. 2019. 俯冲带变质过程中的含碳流体[J]. 岩石学报, 35(1): 89~98.
- 刘俊来, 曹淑云, 邹运鑫, 等. 2008. 岩石电子背散射衍射 (EBSD) 组构分析及应用[J]. 地质通报, 27(10): 1 638~1 645.
- 刘玉平, 李正祥, 李惠民, 等. 2007. 都龙锡锌矿床锡石和锆石 U-Pb 年代学: 滇东南白垩纪大规模花岗岩成岩-成矿事件[J]. 岩石学报, 23(5): 967~976.
- 刘玉平, 叶霖, 李朝阳, 等. 2006. 滇东南发现新元古代岩浆岩: SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学证据[J]. 岩石学报, 22(4): 916~926.
- 刘忠. 2023. 滇东南老君山片麻岩穹隆的构造-热演化与剥露过程[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉).
- 刘忠, 曹淑云, 董彦龙, 等. 2022. 滇东南老君山片麻岩穹隆变形构造与剥露过程[J]. 中国科学: 地球科学, 52(1): 53~87.
- 卢焕章. 2004. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社, 1~487.
- 卢焕章. 2011. 流体不混溶性和流体包裹体[J]. 岩石学报, 27(5): 1 253~1 261.
- 卢焕章. 2019. 地球中的流体和穿越层圈构造[J]. 地质力学学报, 25(6): 1 003~1 012.
- 马文璞. 1998. 八布蛇绿岩突厥型造山带[J]. 科学通报, 43(13): 1 363~1 365.
- 潘锦波, 张达, 阙朝阳, 等. 2015. 滇东南老城坡片麻状花岗岩地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及其意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 34(4): 795~803.
- 阙朝阳. 2016. 云南麻栗坡南温河—洒西一带钨成矿系统及找矿方向研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 阙朝阳, 张达, 狄永军, 等. 2014. 滇东南麻栗坡南温河—洒西一带钨矿控矿要素及深部找矿突破[J]. 地学前缘, 21(2): 286~300.
- 任纪舜. 1990. 论中国南部的大地构造[J]. 地质学报, 64(4): 275~288.
- 沈照理, 王焰新. 2002. 水-岩相互作用研究的回顾与展望[J]. 地球科学, 27(2): 127~133.
- 舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报, 31(7): 1 035~1 053.
- 谭洪旗, 刘玉平. 2017. 滇东南猛洞岩群斜长角闪岩成因及其构造意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 47(6): 1 763~1 783.
- 王丹丹, 李宝龙, 朱德全, 等. 2015. 滇东南老君山地区变质岩锆石

- U-Pb 年代学及其构造意义[J]. 地质学报, 89(10): 1 718~1 734.
- 王淑婷, 曹淑云, 占乐凡, 等. 2023. 滇西雪龙山变质杂岩中石英脉的变形行为与流体作用[J]. 中国科学: 地球科学, 53(9): 2 035~2 058.
- 王小娟, 刘玉平, 缪应理, 等. 2014. 都龙锡锌多金属矿床 LA-MC-ICPMS 锡石 U-Pb 测年及其意义[J]. 岩石学报, 30(3): 867~876.
- 夏浩然, 刘俊来. 2011. 石英结晶学优选与应用[J]. 地质通报, 30(1): 58~70.
- 肖荣阁, 原振雷, 刘敬党, 等. 2004. 区域成矿流体的形成与演化[J]. 地学前缘, 11(2): 461~469.
- 肖荣阁, 张宗恒, 陈卉泉, 等. 2001. 地质流体自然类型与成矿流体类型[J]. 地学前缘, 8(4): 245~251.
- 谢伟, 温守钦, 唐铁乔, 等. 2020. 内蒙古东珙铅锌银矿床成矿机制的热力学相图研究[J]. 地质学报, 94(5): 1 482~1 504.
- 熊欣, 丁欣, 李建康, 等. 2022. 川西甲基卡花岗伟晶岩的锂铍成矿作用过程——来自 308 号脉流体包裹体的约束[J]. 岩石学报, 38(2): 323~340.
- 徐惠芬, 陈涛. 1987. 阴极发光仪在变质岩和花岗岩类岩石中的应用[J]. 岩石矿物学杂志, 6(3): 279~284, 286.
- 颜丹平, 周美夫, 王焰, 等. 2005. 都龙-Song Chay 变质穹隆体变形与构造年代——南海盆地北缘早期扩张作用始于华南地块张裂的证据[J]. 地球科学, 30(4): 402~412.
- 云南省地质矿产勘察开发局. 1999. 中华人民共和国 1:5 万都龙幅、麻栗坡幅地质图、地质图说明书[R].
- 占乐凡, 曹淑云. 2022. 石英道芬双晶对晶格优选取向及变形机制的贡献和意义[J]. 岩石矿物学杂志, 41(6): 1 135~1 146.
- 张国伟, 郭安林, 王岳军, 等. 2013. 中国华南大陆构造与问题[J]. 中国科学: 地球科学, 43(10): 1 553~1 582.
- 张进江, 商珊, 魏春景, 等. 2019. 大陆岩石圈流变学研究的发展现状与前景[J]. 地球学报, 40(1): 9~16.
- 张铭杰, 唐俊红, 张同伟, 等. 2004. 流体包裹体在油气地质地球化学中的应用[J]. 地质论评, 50(4): 397~406.
- 张荣伟, 彭建堂, 邓起东, 等. 2017. 滇东北茂租热液型铅锌矿床矿物组合共生分异的热力学 Eh-pH 相图[J]. 地质论评, 63(5): 1 391~1 400.
- 张世涛, 冯明刚, 吕伟. 1998. 滇东南南温河变质核杂岩解析[J]. 中国区域地质, 17(4): 390~397.
- 钟大赉, 吴根耀, 李建清, 等. 1998. 滇东南发现蛇绿岩[J]. 科学通报, 43(13): 1 365~1 370.