

粤西河台金矿田糜棱岩 XRD 特征 及其地质意义



Pre-pub. on line: www.geojournals.cn/georev

师爽¹⁾, 龚朝阳²⁾, 焦骞骞¹⁾, 许德如³⁾, 张胜印¹⁾, 常华诚¹⁾, 胡彬⁴⁾

1) 昆明理工大学, 国土资源工程学院, 昆明, 650093; 2) 广东河台金矿, 广东肇庆, 526600;

3) 东华理工大学, 核资源与环境国家重点实验室, 南昌, 330013;

4) 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 昆明, 650051

内容提要: 粤西河台金矿田位于钦州湾—杭州湾(钦—杭)结合带南段的云开地区, 是典型的受韧性剪切带控制的金矿。然而, 对于剪切带中有利于金成矿的地质环境及其成矿过程仍然存在争议。本文在对河台矿田高村矿床进行详细野外地质调查的基础上, 通过 X 射线衍射(XRD)对含金剪切带中各类糜棱岩系列岩石进行系统研究, 建立应力变化—成分变异的对比序列, 从而进一步揭示剪切变形与金矿化的关系。结果显示, 剪切带中白(绢)云母的含量在 9%~40%, 并且在初糜棱岩、无矿糜棱岩、含矿糜棱岩、无矿超糜棱岩、含矿超糜棱岩中呈现出逐渐递增的趋势。白(绢)云母主要为 2M1 型, b_0 值在 0.55505~0.99002 nm 之间, 初糜棱岩<无矿糜棱岩<无矿超糜棱岩, 分别指示低压、中压和高压环境。可见, 从初糜棱岩到超糜棱岩, 随着变形强度的增加, 热液活动也随之增强, 从而新生成了大量白(绢)云母。然而, 在含矿的糜棱岩和超糜棱岩中还存在一些低压白云母, 推测其可能是在后期脆性裂隙中由于流体活动所新形成的。因此, 成矿可能经历了两个阶段, 即早期的韧性剪切变形阶段导致金的初步富集, 后期叠加的脆性破裂阶段形成具有工业品位的矿体。另外, 无矿超糜棱岩的石英含量(29.8%)明显低于糜棱岩(44.2%), 推测在形成石英脉型矿体过程中, 部分热液可能来自于其围岩超糜棱岩。因此, 相对于初糜棱岩和糜棱岩, 超糜棱岩中更有利于金矿的形成。

关键词: 糜棱岩矿物含量; 白云母 b_0 值; 含金剪切带; 广东云开地区河台金矿田

与剪切带有关的金矿床是金矿家族中的重要类型, 国内外在剪切带中发现了大量大型、超大型金矿床。国外世界级的大金矿几乎都产在太古宙绿岩带的剪切带中, 例如, 加拿大 Abitibi 含金绿岩带(Boullier and Robert, 1992; Dubosq et al., 2018), 西澳大利亚伊尔冈地块 Boulder—Lefroy 含金剪切带(Weinberg, 2005), 巴西 Turmalina 金矿床(Fabricio-Silva et al., 2019)。国内发现的有广东河台(Jiao Qianqian et al., 2017a, b), 辽宁阜新排山楼(张旭东和亓歌, 2018), 云南哀牢山金矿(张燕和汤倩, 2011)等。韧性剪切带作为区域构造薄弱带, 不仅为成矿流体的迁移提供了通道, 还能驱使成矿物质活化迁移, 并在有利部位富集沉淀(陈柏林等, 1999; 杨晓勇, 2005; Zhu Yongfeng et al., 2007; Kassem et al., 2016; 程南南等, 2018)。因此, 含金

剪切带及其控矿机制一直是过去研究的前沿课题, 然而对于剪切带中有利于金成矿的环境及其成矿过程仍然不是十分清楚。

两广交界的云开地区是华南重要的金矿产区, 其中以河台金矿田的金储量规模最大, 累计提交金储量超过 50 t(Jiao Qianqian et al., 2017b)。广东河台金矿田中的矿床是典型的受剪切带控制的金矿, 矿田中发育若干条韧性剪切带, 金矿床都产于这些剪切带中。在这些含金剪切带中通常发育初糜棱岩—糜棱岩—超糜棱岩的变形序列岩石, 通过对比这些不同变形强度糜棱岩系列岩石的矿物组成及含量的变化规律, 能够建立一个很好的应力变化—成分变异的对比序列, 从而有助于含金剪切带中岩石变形与金矿化关系的研究(杨晓勇, 2005)。

X 射线衍射(XRD)矿物分析技术是一种常用

注: 本文为国家自然科学基金青年资助项目(编号:41902086)和国家自然科学基金项目重点资助项目(编号:41930428)的成果。

收稿日期:2021-04-11; 改回日期:2021-08-03; 网络首发:2021-09-20; 责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.09.016

作者简介: 师爽, 男, 1996 年生, 硕士研究生, 地质工程专业; Email: 373007131@qq.com。通讯作者: 焦骞骞, 男, 1986 年生, 博士, 讲师。主要从事地质构造与成矿作用的教学和研究; Email: 289284567@qq.com。

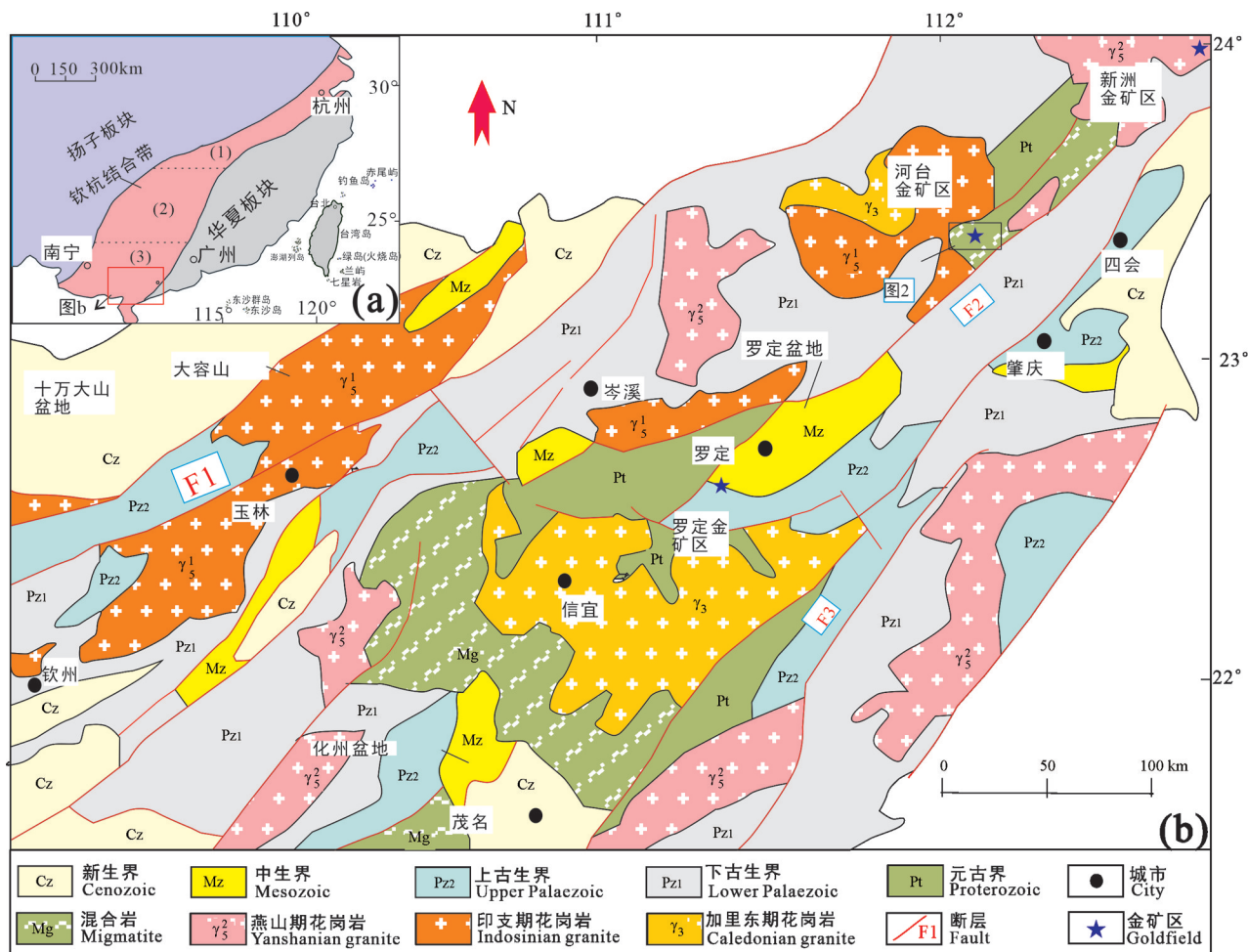


图1 华南地区大地构造示意图(a,据周永章等,2012)与钦杭结合带南段云开地区地质图(b,据丘元禧和梁新权,2006)

Fig. 1 Tectonic framework of South Chian Block (a, modified from Zhou Yongzhang et al., 2012&) and geological sketch map of Yunkai area in the southern segment of the Qinzhou Bay—Hangzhou Bay Junctionure Orogenic Belt (b, modified from Qiu Yuanxi and Liang Xinquan, 2006&)

的定量测定岩石中矿物含量的方法,在国内外地质研究中得到广泛应用(Pawloski, 1985;迟广成等, 2013)。因此,通过定量分析不同类型糜棱岩系列岩石的矿物含量,可以约束其在成岩过程中的成分变异。另外,利用XRD方法还可以定量测量各种矿物的晶胞参数,例如不同类型白云母的 b_0 值。前人研究表明,在压力变大的情况下,白云母中的绿鳞石含量会变多,Mg和 Fe^{2+} 等元素含量也会随之增加,导致云母 b_0 增大。因此,可以利用变质岩中白云母 b_0 值对变质带进行压力分带,并约束其变质环境和变质过程(Sassi, 1972)。因此,本文选择对河台金矿田高村金矿床进行详细调查,在野外查明金矿化特征及与各类糜棱岩的关系。在此基础上,利用XRD方法对各类糜棱岩系列岩石的矿物成分及含量、白云母的物相、晶胞参数进行系统测试,对比在

不同压力条件下形成的各类糜棱岩系列岩(矿)石的组成及矿物含量变化,建立糜棱岩系列岩(矿)石的应力变化—成分变异序列,进一步揭示金在剪切带中的矿化过程及有利的矿化条件。

1 河台金矿田地质特征

1.1 区域地质背景

广东河台金矿田位于钦州湾—杭州湾(钦—杭)结合带南段的云开地区(周永章等,2012;Zheng Yi et al., 2016)。钦—杭结合带也叫十—杭(十万大山—杭州湾)带,是位于扬子板块与华夏板块之间的巨型构造结合带(图1)。毛景文等(2011)认为该构造带是一条新元古代碰撞对接带,显生宙加里东期、印支期和燕山期又发生多期活化和强烈改造,在表壳显示出先挤压后伸展的环境。钦杭结合

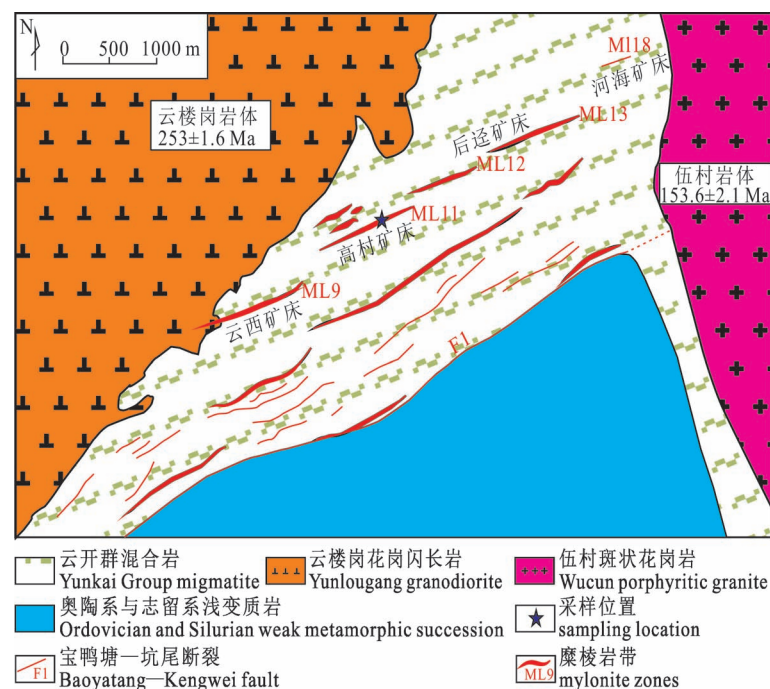


图 2 广东河台矿田地质图(据陈骏和王鹤年,1993 修改)

Fig. 2 Geological map of Hetai orefield, western Guangdong
(modified by Chen Jun and Wang Henian, 1993&)

带南段云开地区是我国最重要的金矿产地之一。该区域内地层出露较全,包括绿片岩相到角闪岩相的云开群、寒武系八村群及上覆的弱变质—未变质的奥陶纪到白垩纪的地层。过去通常被认为云开群为华夏地块的前寒武变质基底,然而最新研究表明,其形成时代为晚新元古代—早古生代,并非古元古代—早新元古代(Wan Yusheng et al., 2010; Chen Chenghong et al., 2012; 周雪瑶等, 2015; 焦骞骞等, 2017)。区域内岩浆岩发育,加里东期、印支期和燕山期岩体均有出露。位于中部的信宜花岗岩体形成于加里东期,锆石 U-Pb 年龄为 460~430 Ma(图 1; 彭松柏等, 2006; Wang Yuejun et al., 2007; Wan Yusheng et al., 2010)。印支期花岗岩岩体主要沿断裂分布,例如,在广宁—罗定动力变质带北段东云楼岗花岗闪长岩(焦骞骞等, 2020);在防城—灵山断裂带附近大容山—十万大山花岗岩(祁昌实等, 2007; Jiao Qianqian et al., 2017a)。燕山期形成大量 I 型花岗岩主要沿着云开地区西南边缘分布(Wang Yuejun et al., 2007; Lin Wei et al., 2009)。区域上构造线以 NE—NNE 方向为主,例如防城—灵山断裂(F1),罗定—广宁断裂(F2),吴川—四会断裂(F3)等(图 1)。这些区域性大断裂(韧性剪切

带)主要是在印支期形成,经历了约 248~220 Ma 和 220~200 Ma 两期构造活动(Wang Yuejun et al., 2007; 丁汝鑫等, 2015; Jiao Qianqian et al., 2017b),控制着区域内金矿的分布和产出。例如,沿着罗定—广宁断裂带分布着新洲金矿、河台金矿、罗定金矿等,其中河台金矿田是本文的主要研究对象。

1.2 矿田地质特征

河台矿田及外围出露的地层主要有云开群、奥陶系和志留系(图 2)。云开群出露于矿田中北部,为一套整体无序的变质岩,岩性以变粒岩、片麻岩、混合岩为主,局部遭受强烈韧性剪切而形成糜棱岩系列岩石,河台金矿田内矿床就产于这些糜棱岩带中,例如,河台金矿田内两个主要的金矿床云西矿床和高村矿床分别受 9 号(ML9)和 11 号(ML11)糜棱岩带控制。奥陶系与志留系分布在矿田中南部,以薄层浅变质砂岩、粉砂岩、及薄层板岩为主,通过 F1 宝鸭塘—坑尾断裂(区域上为罗定—广宁断裂)与云开群断层接触。矿田内还出露两个岩体,即位于西部的印支期云楼岗花岗闪长岩体, U-Pb 年龄为 253 Ma(焦骞骞等, 2020);以及矿田东北部的燕山期伍村巨斑状黑云母花岗岩体,单颗粒锆石 U-Pb 年龄 153.6±2.1 Ma(翟伟等, 2005)。

矿田中含矿剪切带呈狭长的条带状产于云开群及云楼岗岩体中,长 500~1000 m,宽十几厘米到几十米不等,走向 NE—NEE 向,倾向 NW,倾角 60°~85°。矿体严格受糜棱岩控制,产状与糜棱岩产状近于一致,总体形态是呈脉状、透镜状,一般 100 m 以上,厚度变化不大,通常在 2~4 m(图 3a, b)。另外,在矿体附近通常还可以见到一些晚期的花岗伟晶岩穿插进入糜棱岩中(图 3c)。

从剪切带的边缘到中心,通常可以见到从初糜棱岩,经糜棱岩到超糜棱岩的岩石分带(图 3a)。初糜棱岩由石英、长石、云母、绢云母等矿物组成,其中长石和石英碎斑>70%(图 4a, b)。糜棱岩由长石、石英、绢云母等矿物组成,以条带状石英,眼球状的长石斑晶和破碎的具有波状消光的石英为特征(图 4c, d),还可见到长石斑晶发育的 σ 旋斑(图 4e)和石英变形形成的 S—C 组构(图 4f)。定向排列的石英±长石±云母条带和亚颗粒化的石英±绢云母条带

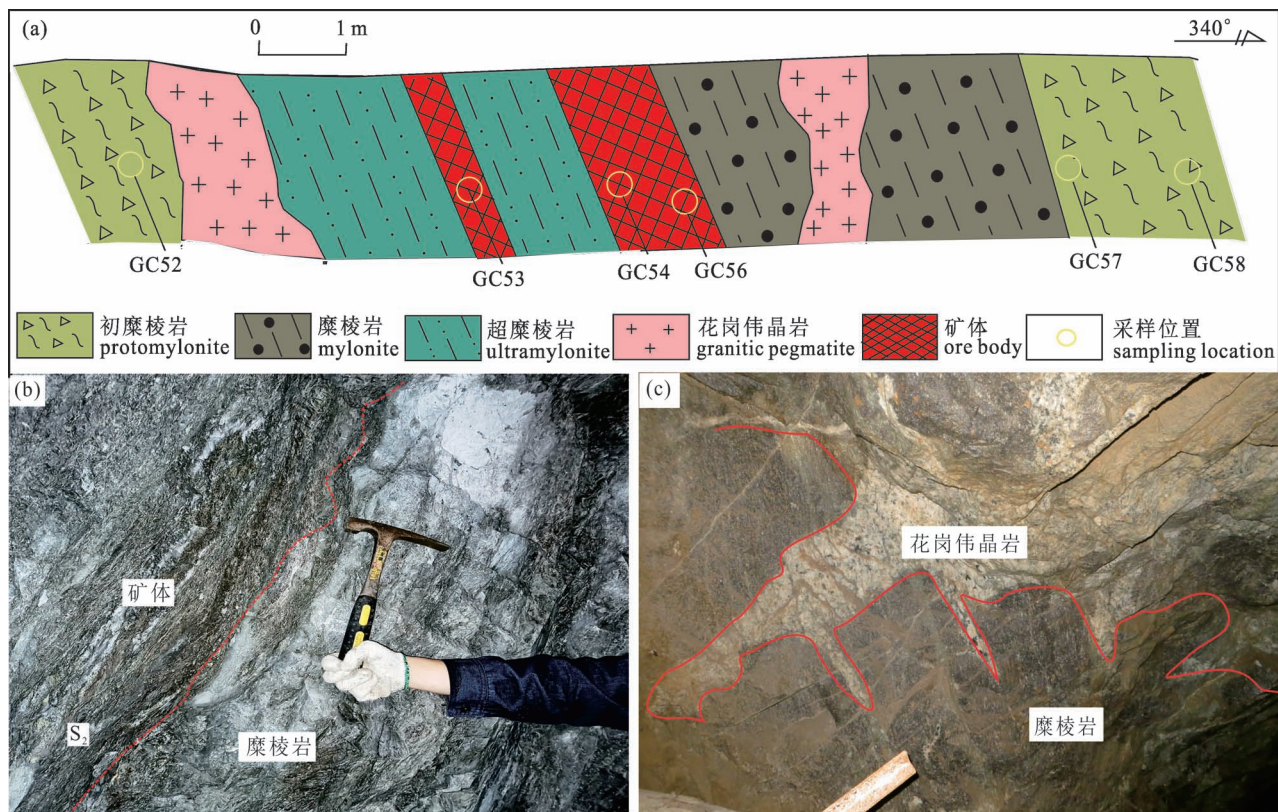


图3 广东河台矿田高村矿床-140 m 中段剖面图(a), 矿体与糜棱岩面理 S_2 产状近于平行(b) 以及花岗伟晶岩侵入糜棱岩(c), S_2 (S_c)代表剪切面理(C 面理)

Fig. 3 The profile of -140 m level in the Gaocun deposit of Hetai gold orefield (a), the orebody subparallel to the mylonite foliation S_2 (b) ; the granitic pegmatite intruded into the mylonite(c) . S_2 (S_c) represents shear foliation (C foliation)

交替出现构成剪切面理(C 面理)。超糜棱岩由>90%碎基和<10%长石石英碎斑组成, 矿物定向排列构成剪切面理(图 4g, h)。矿体则主要产在糜棱岩及超糜棱岩中, 产状与糜棱岩剪切面理的产状近于一致。

河台金矿田矿石包括含金石英脉型(图 4i)和蚀变(超)糜棱岩型(图 4j)两类。其中, 石英脉型矿石围岩主要为超糜棱岩, 而蚀变岩型矿石在糜棱岩和超糜棱岩中均有产出。矿石中主要的矿石矿物有自然金(图 4k, l)、黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿及少量毒砂、方铅矿、闪锌矿等, 脉石矿物主要为石英、绢云母及少量绿泥石、方解石。含金石英脉型矿石, 硫化物主要以脉状或者胶结物形式产出(图 4m, n), 而浸染状则较少; 而在蚀变糜棱岩矿石中, 浸染状和细脉状硫化物则同等发育(图 4o, p)。

根据矿石中矿物的交切关系, 并结合前人的研究, 将河台金矿田成矿期次划分为 3 期: 同构造动力变质期、热液期和表生期(图 5)。其中, 热液期又可

分为 3 个阶段: 石英—硫化物矿阶段、金—硫化物阶段、金—硫化物—碳酸盐阶段。动力变质期主要是形成糜棱岩, 并伴随有硫化物的产生。金成矿主要形成于热液期。而无论是动力变质期还是热液期都有大量的白(绢)云母的产生。

2 样品来源及实验分析

2.1 样品来源

本次研究共选取 26 件不同类型的糜棱岩系列岩石样品进行测试分析, 分别采自高村矿床-230 m 中段(样品 14GC02, 14GC03, 14GC04, 14GC10, 14GC12, 14GC13, 14GC25, 14GC27, 14GC28 和 14GC29), 高村-140 m 中段(样品 14GC52, 14GC53, 14GC54, 14GC56, 14GC57, 14GC58, 图 3)和高村-40 m 中段(样品 14GC72, 14GC74, 14GC84, 14GC85, 14GC86, 14GC87, 14GC101, 14GC103, 14GC104 和 14GC105)。通过野外地质调查、镜下光薄片鉴定以及对样品金含量的测试分析, 确定有初糜棱岩样品

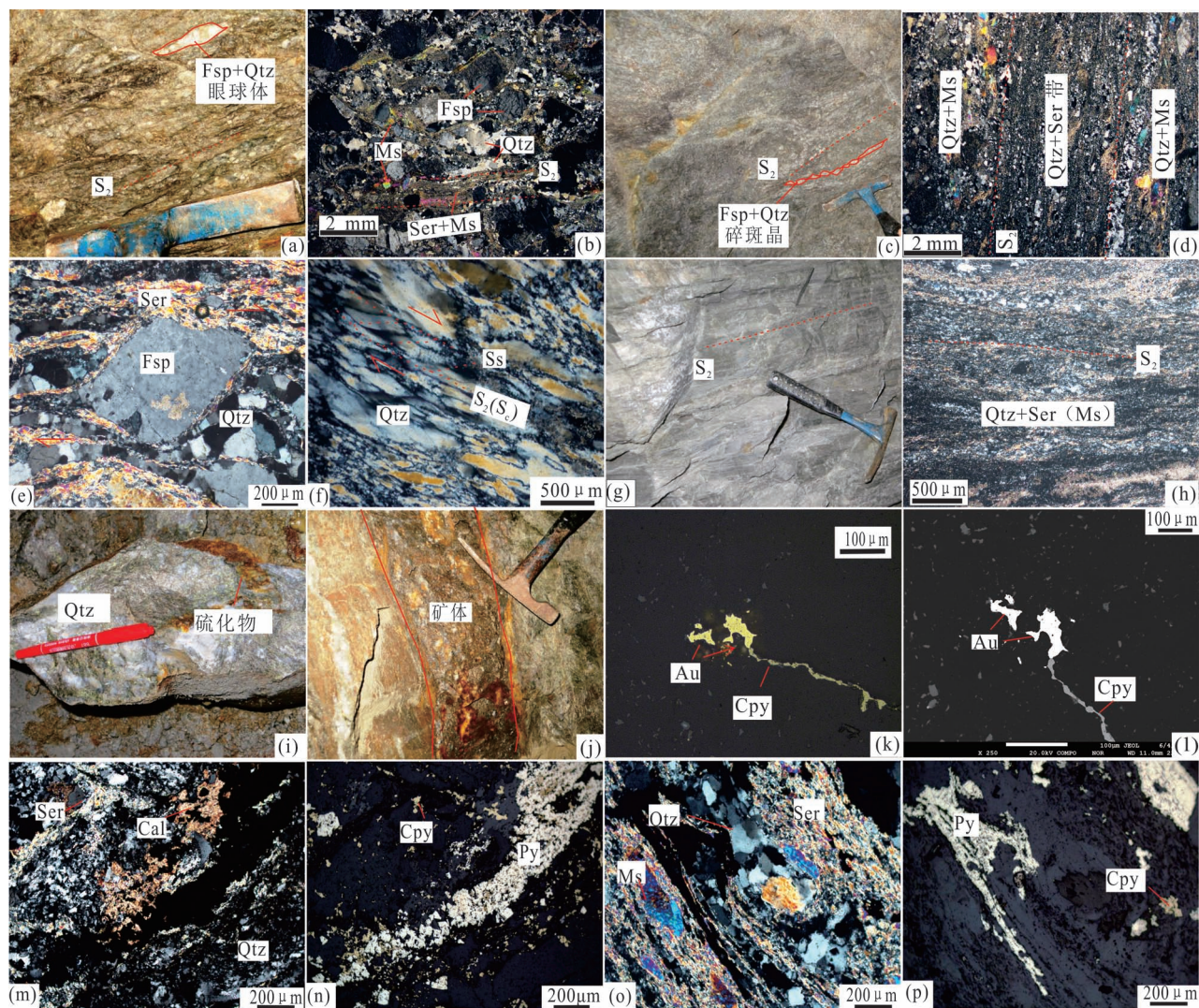


图 4 广东河台矿田岩(矿)石样品野外及镜下照片

Fig. 4 Field and microscopic photos of rock (ore) samples from Hetai orefield, western Guangdong

(a) 和 (b) 初糜棱岩(糜棱岩化混合岩)中白(绢)云母和石英碎基围绕长石碎斑;(c) 长石+石英斑晶定向排列构成糜棱岩面理 S_2 ; (d) 交替出现的较粗的石英和云母斑晶与动态重结晶的细小石英和绢云母构成糜棱岩面理 S_2 ; (e) 为糜棱岩 σ 旋斑;(f) 糜棱岩中发育的 S—C 组构;(g) 交替出现浅色体与暗色体条带构成的超糜棱岩面理 S_2 ; (h) 矿物定向形成超糜棱岩面理 S_2 ; (i) 含金石英脉型矿石手标本;(j) 蚀变糜棱岩型矿石野外露头;(k)、(l) 含金石英脉中的自然金;(m) 和 (n) 含金石英脉型矿石镜下照片;(o) 和 (p) 蚀变糜棱岩型矿石镜下照片。(b)、(d)、(h)、(m) 和 (o) 是正交偏光下照片;(k)、(n) 和 (p) 是反射光下照片;(l) 是背散射照片。 S_2 (Sc) 代表剪切面理(C 面理)。Au—自然金; Fsp—长石; Qtz—石英; Ms—白云母; Ser—绢云母; Cal—方解石; Cpy—黄铜矿; Py—黄铁矿

(a) and (b) Feldspar porphyroclast rounded by matrix of broken muscovite (or sericite) and quartz in the protomylonite (mylonitized migmatite); (c) mylonite foliation (S_2) defined by feldspar + quartz porphyroclast alignment; (d) mylonite foliation (S_2) defined by alternating bands of muscovite + quartz with quartz subgrains + sericite; (e) ultramylonite foliation (S_2) defined by alternating leucosome bands with melasome bands; (f) ultramylonite foliation (S_2) defined by mineral alignment; (g) hand specimen of auriferous quartz vein-type ore; (h) field outcrop of auriferous altered mylonite type ore; (i) and (j) microscopic photographs of auriferous quartz vein-type ore; (k) and (l) microscopic photographs of auriferous altered mylonite type ores. (b), (d), (f), (i) and (k) From crossed nicols; (j) and (l) From reflection light. S_2 (Sc) Represents shear foliation (C foliation). Fsp—feldspar, Qtz—quartz, Ms—muscovite, Ser—sericite, Cal—calcite, Cpy—chalcopyrite, Py—pyrite

6 件,均不含矿;糜棱岩样品 9 件,其中 5 件含矿,均为蚀变岩型矿石;超糜棱岩样品 11 件,其中 6 件含矿,包括 1 件蚀变岩型和 5 件石英脉型矿石(表 1)。

2.2 X 射线衍射实验

将实验所需的样品制备成 $<2\ \mu\text{m}$ 的粉末,具体的制备过程参照 Paudel 和 Arita(2000)。X 射线衍

矿物	同构造动力 变质成矿期	热液成矿期			表生期
		石英-硫化物 成矿阶段	金-硫化物 成矿阶段	金-硫化物 -碳酸盐成 矿阶段	
白(绢)云母	————	————	————	————	
石英	————	————	————	————	
黄铁矿	————	————	————	————	
自然金	— ■ — ■	——	————	————	
毒砂	————	————			
磁黄铁矿	————	————		————	
黄铜矿	————	————		————	
绿泥石			————		
方解石			————	—— ■	
闪锌矿				————	
方铅矿				————	
铜蓝					————
褐铁矿					————
硫磺					————

图 5 广东河台金矿田成矿期次

Fig. 5 Suggested mineralization stages for the Hetai gold orefield
in western Guangdong

射实验在中国科学院广州地球化学研究所矿物学与成矿学中科院重点实验室完成。将粉末装入铝制的样品槽中,以提高(060)相对于(331)的峰值,从而获得更精准的 b_0 值测试结果(Guidotti, 1984)。实验所用仪器为德国 BRUKER D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪 Cu(单色)。工作电压为 40 kV;工作电流 30 mA;扫描范围 $2\theta = 3^\circ \sim 85^\circ$;狭缝 1 mm;扫描速度:4/min。数据分析使用 jade6.0 软件。图片处理使用 CorelDRAW 和 Origin94 软件。

3 实验结果

3.1 矿物含量

通过 X 射线衍射分析进行物相鉴定,从而确定各类糜棱岩的主要矿物组成(表 1)。图 6 列出了本次实验的 26 件样品中 6 件具有代表性的糜棱岩类岩石 X 射线衍射图,分别为初糜棱岩(14GC52,图 6a)、无矿糜棱岩(14GC86,图 6b)、含矿糜棱岩(14GC54,图 6c)、无矿超糜棱岩(14GC25,图 6d)、含矿超糜棱岩(14GC101,图 6e),另外一件为同时含有 2M₁型和 3T 型白云母样品 14GC87 的 X 射线衍射图(图 6f)。初糜棱岩基本保留了原岩云开群混合岩的矿物成分,其中石英含量 19.9%~33.6%(平均为 26.1%),云母 9.0%~17.7%(平均为 12.375%),钾长石 0~33%(平均为 18.475%),斜长石 16.9%~39.7%(平均为 27.2%)。糜棱岩中

石英含量 24.5%~44.2%(平均为 39.67%),云母 13.0%~23.5%(平均为 17.6%),可见糜棱岩中石英和云母含量相对于初糜棱岩有所增加(图 7)。其中无矿糜棱岩和含矿糜棱岩的石英含量分别为 44.1%~44.2%(平均为 44.2%)和 24.5%~44.1%(平均为 36.1%),云母含量为 13.0%~19.2%(平均为 16.7%)和 14.5%~23.5%(平均 19.8%)。超糜棱岩中石英和云母含量相对于初糜棱岩显著增高,其中石英含量 27.9%~58.4%(平均为 41.85%),云母 17.0%~43.2%(平均为 31.45%)。无矿超糜棱岩和含矿超糜棱岩中石英含量分别为 27.9%~31.4%(平均为 29.8%)和 51.4%~58.4%(平均为 56.73%),云母含量为 17.0%~40.0%(平均为 26.8%)和 34.1%~43.2%(平均为 35.33%)(图 7)。然而,相对于无矿糜棱岩,无矿超糜棱岩的石英含量却显著减

少。

3.2 白云母 b_0 值及多型特征

用 jade 软件对 26 件样品 XRD 结果进行处理,从而准确的得到样品中白云母的 b_0 值。结果显示 26 件样品中白云母的 b_0 值分布在 0.55505~0.99002nm 之间,其频率分布直方图(图 8)所示。其中 6 件初糜棱岩中白云母值 b_0 为 0.55505~0.82376 nm(平均为 0.64514 nm)。9 件糜棱岩白云母 b_0 值为 0.75955~0.90253 nm(平均为 0.86141 nm),其中 4 件无矿糜棱岩中白云母 b_0 值为 0.90216~0.90253 nm(平均为 0.90235 nm),5 件含矿糜棱岩中白云母 b_0 值为 0.75955~0.90163 nm(平均为 0.82866 nm)。11 件超糜棱中,有一件含有两种类型的白云母, b_0 值分别为 0.8774 nm 和 0.30714 nm,去除 b_0 值为 0.30714 nm 的,其余为 0.85774~0.99002 nm(平均为 0.92448 nm),其中 3 件无矿超糜棱岩中白云母 b_0 值为 0.91318~0.99002 nm(平均为 0.94275 nm),4 件含矿超糜棱岩样品中 b_0 值为 0.30714~0.94367 nm(平均为 0.90926 nm)。Sassi 和 Scolai(1974)研究了白云母 b_0 值与变质岩石成岩压力对应关系,提出了以 b_0 值来划分变质作用低、中、高压类型: $b_0 \leq 0.9000$ nm 为低压环境、 $b_0 \geq 0.9040$ nm 为高压、介于两者之间为中压。因此,本次实验 26 个样品中,低压变质样品 11 件,平均值为 0.72457 nm,其标准方差为

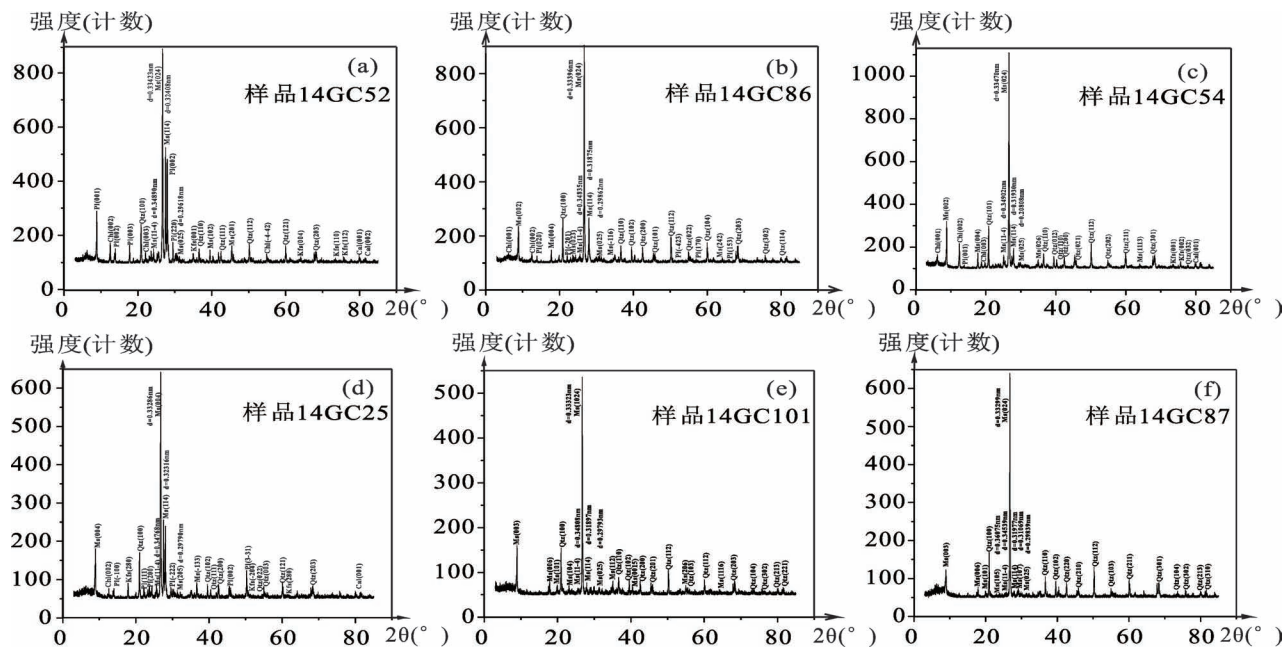


图 6 广东河台金矿田各类型糜棱岩样品 X 射线衍射图

Fig. 6 X-ray diffraction pattern of the sample from Hetai orefield

(a) 初糜棱岩 14GC52 的 XRD 图,含 $2M_1$ 型白云母 b_0 值为 0.62551 nm,代表低压;(b) 无矿糜棱岩 14GC86 的 XRD 图,含 $2M_1$ 型白云母 b_0 值为 0.90253 nm,代表中压;(c) 含矿糜棱岩 14GC54 的 XRD 图,含 $2M_1$ 型白云母 b_0 值为 0.75955 nm,代表低压;(d) 无矿超糜棱岩 14GC25 的 XRD 图,含 $2M_1$ 型白云母 b_0 值为 0.91318 nm,代表高压;(e) 含矿超糜棱岩 14GC101 的 XRD 图,含 $2M_1$ 型白云母 b_0 值为 0.94367 nm,代表高压;(f) 含矿超糜棱岩 14GC87 的 XRD 图,含 $2M_1$ 型和 3T 型白云母 b_0 值分别为 0.85774 nm、0.30714 nm,代表低压。图中 d 值为 $2M_1$ 型白云母特征峰

(a) XRD pattern of 14GC52 protomylonite, containing $2M_1$ -type muscovite b_0 value of 0.62551 nm, representing low pressure;(b) XRD image of 14GC86 barren mylonite, with a b_0 value of 0.90253 nm for $2M_1$ -type muscovite, representing medium pressure;(c) XRD image of auriferous mylonite 14GC54, with b_0 value of $2M_1$ -type muscovite 0.75955 nm, representing low pressure;(d) XRD image of 14GC25 barren ultramylonite, with a b_0 value of 0.91318Å for $2M_1$ -type muscovite, representing high pressure;(e) XRD image of auriferous ultramylonite 14GC101, with b_0 value of $2M_1$ -type muscovite 0.94367 nm, representing high pressure;(f) XRD image of ore auriferous ultramylonite 14GC87, the b_0 value of muscovite containing $2M_1$ and 3T type is 0.85774 nm and 0.30714 nm, representing low pressure. The bold d value is the characteristic peak of $2M_1$ type muscovite

0.11055 nm ;中压变质 5 件,平均值为 0.90221 nm ,其标准方差为 0.00031 nm ;高压变质样品 10 件,平均值为 0.93116 nm ,其标准方差为 0.02521 nm (图 8)。其中,6 件初糜棱岩样品中白云母都代表低压环境;9 件糜棱岩样品中,4 件含矿糜棱岩中白云母代表低压,5 件无矿代表中压;超糜棱岩样品中,10 件超糜棱岩中白云母代表高压,1 件含矿超糜棱岩中白云母代表低压。

白云母系层状结构,由于层与层的堆垛形式不同(层内结构不变)形成同质多象的现象,称其为“多型”,分为 $1M_1$ 、 $2M_1$ 、3T 型等,通过 X 射线衍射实验,根据特征峰来加以区分。白云母最常见的多型类型为 $1M_1$ 、 $2M_1$ 型,这两种类型的白云母所处的温压条件代表着白云母的平均温压条件(李海龙

等,2016)。本次实验 26 个样品的 X 射线衍射图中,在 $d(11-4)$ 附近的峰值为 0.34539 ~ 0.35310 nm, $d(024)$ 为 0.33264 ~ 0.33523 nm, $d(114)$ 为 0.31763 ~ 0.32537 nm, $d(025)$ 为 0.29618 ~ 0.29939 nm(表 1),符合 $2M_1$ 型白云母的特征峰: $d(11-4)$ = 0.34910 nm, $d(024)$ = 0.33171 nm, $d(114)$ = 0.32020 nm, $d(025)$ = 0.29860 nm。这 26 件样品都属于 $2M_1$ 型白云母。在样品 14GC87 中还存在 $d(105)$ = 0.36075 nm, $d(107)$ = 0.31069 nm 的特征峰,符合 3T 型白云母特征峰: $d(105)$ = 0.36042 nm, $d(107)$ = 0.31059 nm 因此样品 14GC87 中存在 3T 型白云母。

4 讨论

大型含金剪切带是复杂的变形变质地质体,具

有多期次、多层次的活动史,是多种地质作用过程耦合改造的复杂系统(邓军等,1998)。在韧性—脆性剪切作用的控制作用下,变形、变质、流体、岩浆与成矿等多种作用过程相互耦合,使得成矿物质和流体活化、运移和聚集,并最终富集成矿。在此过程中,流体作用非常普遍,水—岩反应十分广泛,不仅影响着岩石的变形机制,促进变形构造的发生和发展,同时还导致岩石的矿物组成及化学成分的变化(李晓峰和华仁民,2000)。

通过对河台金矿田含金剪切带中初糜棱岩—糜棱岩—超糜棱岩进行 XRD 研究,结果显示,从初糜棱岩到超糜棱岩,白云母的 b_0 值逐渐增高(图 7),表明从剪切带的边缘到中心所受应力在逐渐增大,从而导致矿物颗粒发生了明显的细化,即从初糜棱岩到超糜棱岩,岩石中碎基含量逐渐增多,碎斑含量

逐渐减少(图 4)。白(绢)云母含量在初糜棱岩、无矿糜棱岩、含矿糜棱岩、无矿超糜棱岩、含矿超糜棱岩中呈现出逐渐递增的特征,表明随着变形强度的增加,热液活动也随之增强,从而新生成了大量云母。可见,在韧性变形过程当中,随着剪切强度的增加,矿物颗粒减小的同时,在剪切带内还有明显的流体迁移活动,引起矿物成分也发生明显的改变,导致产生新的矿物和岩石。这是一种以构造应力为动力,在流体作用下发生普遍的水—岩反应的结果,即岩石在形变过程中使原有组成重新组合、重新调整(杨晓勇,2005)。实验结果还显示,含金剪切带各类糜棱岩中除了一个样品含 3T 白云母外,其它均为 $2M_1$ 型白云母。 $2M_1$ 型白云母形成在 $>360^{\circ}\text{C}$ 的高温环境(Weaver et al., 1984),因此糜棱岩化过程是在高温条件下发生的。另外,Stipp 等(2002)和

表 1 广东省河台金矿田糜棱岩 XRD 实验结果

Table 1 XRD experimental results of mylonite in Hetai gold orefield, western Guangdong

糜棱岩类型	样品编号	采样中段(m)	岩石组成(%)							白云母特征				压力环境	
			石英	钾长石	斜长石	云母	绿泥石	方解石	黄铁矿	多型	b_0 (nm)	d (nm)(11-4)(024)(114)(025)			
初糜棱岩	14GC10	-230	23.6	21.5	39.7	9.2	8.1	3.1	0	2M ₁	0.66353	0.35267,0.33274,0.31745,0.29787			低压
	14GC12	-230	28.6	15.4	14.7	15.5	5.7	1.1	0	2M ₁	0.62675	0.34723,0.33423,0.32437,0.29609			低压
	14GC13	-230	21.9	11.9	28.7	10.9	23.5	3.0	0	2M ₁	0.82376	0.35301,0.33373,0.31840,0.29782			低压
	14GC52	-140	19.9	29.0	30.5	11.9	7.3	1.4	0	2M ₁	0.62551	0.34890,0.33423,0.32408,0.29618			低压
	14GC57	-140	33.6	33.0	16.9	9.0	6.7	0.8	0	2M ₁	0.57624	0.34823,0.33523,0.32537,0.29809			低压
	14GC58	-140	29.0	0	32.7	17.7	17.6	3.1	0	2M ₁	0.55505	0.35167,0.33264,0.31763,0.29762			低压
无矿糜棱岩	14GC84	-40	44.1	0	30.3	13.0	10.2	0	0	2M ₁	0.90236	0.34923,0.33376,0.31845,0.29854			中压
	14GC85	-40	44.2	0	35.0	13.3	2.0	0	0.9	2M ₁	0.90234	0.34832,0.33364,0.31865,0.29843			中压
	14GC86	-40	44.2	0	27.7	19.2	8.8	0	0	2M ₁	0.90253	0.34835,0.33396,0.31875,0.29862			中压
	14GC72	-40	44.1	0	37.6	14.1	3.4	0	0.9	2M ₁	0.90216	0.34931,0.33385,0.31898,0.29816			中压
含矿糜棱岩	14GC27	-230	37.2	7.5	13.0	23.5	18.0	3.3	0	2M ₁	0.82257	0.34945,0.33367,0.31854,0.29870			低压
	14GC28	-230	35.0	12.2	10.4	16.0	20.0	3.7	0	2M ₁	0.83475	0.34922,0.33465,0.31926,0.29860			低压
	14GC29	-230	24.5	15.2	23.7	14.5	16.9	5.1	0	2M ₁	0.82480	0.34905,0.33398,0.31875,0.29880			低压
	14GC54	-140	44.1	7.2	3.5	23.3	20.5	1.4	0	2M ₁	0.75955	0.34902,0.33470,0.31930,0.29808			低压
	14GC56	-140	39.7	7.2	8.0	21.5	19.6	4.1	0	2M ₁	0.90163	0.34933,0.33447,0.31954,0.29939			中压
无矿超糜棱岩	14GC02	-230	30.0	5.0	9.0	17.0	10.0	2.0	0	2M ₁	0.96194	0.34687,0.33307,0.32329,0.29717			高压
	14GC03	-230	29.7	17.0	9.1	36.6	6.1	18.6	0	2M ₁	0.92356	0.34959,0.33267,0.32364,0.29733			高压
	14GC04	-230	31.4	6.0	9.2	40.0	10.8	2.6	0	2M ₁	0.99002	0.34695,0.33301,0.32330,0.29714			高压
	14GC25	-230	30.2	26.9	18.0	18.6	4.7	1.6	0	2M ₁	0.91318	0.34768,0.33286,0.32316,0.29790			高压
	14GC74	-40	27.9	0	0	21.8	8.6	41.7	0	2M ₁	0.92505	0.34944,0.33275,0.32319,0.29782			高压
含矿超糜棱岩	14GC104	-40	52.3	0	0	35.7	0	0	0	2M ₁	0.90453	0.34806,0.33334,0.31845,0.29791			高压
	14GC105	-40	51.4	0	0	35.0	0	0	0	2M ₁	0.91399	0.34740,0.33310,0.31826,0.29856			高压
	14GC53	-140	37.2	11.3	26.8	22.4	0	1.1	1.3	2M ₁	0.91581	0.34973,0.33496,0.31987,0.29787			高压
	14GC87	-40	54.9	0	0	43.2	0	0	1.9	2M ₁	0.85774	0.34539,0.33299,0.31977,0.29849			低压
										3T	0.30714	(105)0.36075(106)0.31069			
	14GC101	-40	58.4	0	0	41.6	0	0	0	2M ₁	0.94367	0.34808,0.33323,0.31897,0.29793			高压
	14GC103	-40	56.9	0	0	34.1	0	9	0	2M ₁	0.91981	0.34769,0.33311,0.31828,0.29849			高压

注:采样中段中“-230”表示样品在-230m中段取样。

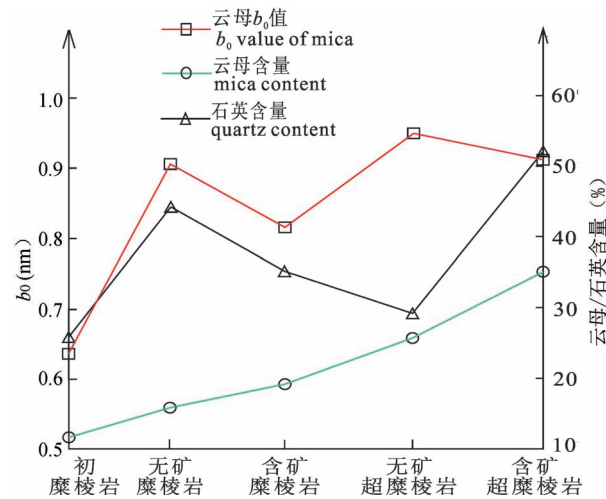


图 7 剪切带中各类糜棱岩的石英、白(绢)云母平均含量及白(绢)云母 b_0 值

Fig. 7 Quartz and muscovite (or sericite) average contents with muscovite b_0 values for types of mylonite in shear zones

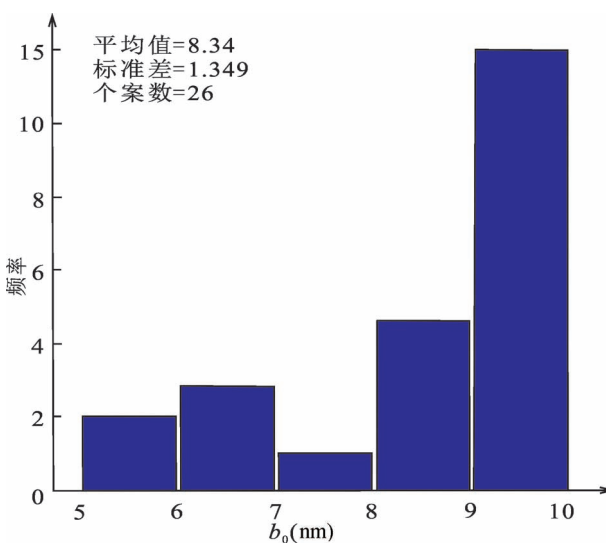


图 8 白云母 b_0 值的频率分布图

Fig. 8 Frequency distribution diagram of muscovite b_0 values

Faleiros 等(2010)认为,石英发生动态重结晶的起始温度为 300 ℃;Pryer(1993)认为长石发生动态重结晶的起始温度为 500 ℃,因此,将矿田中糜棱岩化带形成时的温度限定为 300~500 ℃。在此过程中,金发生了迁移和初步富集,从而在剪切带中形成了初始的金矿化(Jiao Qianqian et al. , 2017a)。

20 世纪 70 年代初,Sassi(1972)提出了利用白云母 b_0 值来研究岩石变质压力的方法。例如,Paudel 和 Arita(2006)利用白云母 b_0 值对尼泊尔境

内小喜马拉雅变质岩的形成环境进行研究,表明其至少经历了两期变质事件。吴根耀和李家驹(1996)利用白云母 b_0 值对滇西昌宁—孟连变质带进行研究,并将其解体为西盟—勐统变质带(加里东期中压变质带)和澜沧双变质带的高压亚带。河台金矿田含金剪切带中白(绢)云母的 b_0 值特征表明,无矿糜棱岩均形成于中压环境,无矿超糜棱岩均形成于高压环境。然而,含矿糜棱岩和超糜棱岩中却有一些形成于低压环境的白(绢)云母出现,特别是 3T 型白云母(表 1),导致含矿糜棱岩和超糜棱岩的 b_0 平均值分别低于围岩——无矿糜棱岩和超糜棱岩(图 7)。这些低压环境中形成的云母可能是另一期构造运动的产物,即在韧性剪切带形成后,其上又叠加了脆性变形,这些低压白云母则是在脆性裂隙中由于流体活动所新形成的。因此,河台金矿田最终成矿与剪切带中的脆性破裂及流体活动密切相关,并形成具有工业品位的矿体。这也进一步证明了河台金矿田成矿过程可能经历了两个成矿期:印支期的韧性变形(240 Ma±的左行剪切变形和 204 Ma±的右行变形阶段)产生糜棱岩带,并伴随金的初步富集;燕山期在剪切带上叠加脆性变形,并导致最终形成工业品位的矿体(Zhang Guilin et al. , 2001; Jiao Qianqian et al. , 2017b)。

另外,实验结果还显示,河台金矿田含金糜棱岩带中无矿超糜棱岩中的石英含量低于无矿的糜棱岩(图 7),这可能是由于在超糜棱岩中含有大量含金石英脉型矿体,而糜棱岩中则主要为蚀变岩型矿体。超糜棱岩颗粒相对糜棱岩更加细小、破碎程度更高(碎基含量>90%),糜棱面理更为发育,间隔通常小于 1 mm,所以更有利于流体的运移以及组分的交换。因此,推测在形成含金石英脉型矿体的过程中,流体可能部分来自于其围岩(无矿超糜棱岩)并迁移到脆性裂隙中沉淀成矿,从而导致其围岩中石英含量剧烈减少。而在形成蚀变糜棱岩型矿体的过程中,则没有大规模的流体从围岩(无矿糜棱岩)中排出。所以,相对于糜棱岩,超糜棱岩中更有利于金矿的形成。

5 结论

(1)从初糜棱岩到超糜棱岩的白云母 b_0 值逐渐增高,表明其分别形成于低压、中压和高压环境。然而,在含矿的糜棱岩和超糜棱岩中含有一些低压白云母,暗示其形成于脆性裂隙中。这进一步证明了成矿经历了两个主要阶段,即早期的韧性剪切变形

使金初步富集,后期叠加的脆性破裂导致最终成矿。

(2)白(绢)云母的含量从初糜棱岩到超糜棱岩逐渐增高,表明剪切带中有大量热液活动。然而超糜棱岩中石英含量明显低于糜棱岩,暗示在脆性破裂形成石英脉型矿体的过程中,部分热液可能来自于围岩(超糜棱岩)。因此,相对于初糜棱岩和糜棱岩,超糜棱岩更有利于金矿的形成。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

- 陈柏林,董法先,李中坚. 1999. 韧性剪切带型金矿成矿模式. 地质论评, 45(2): 186~192.
- 陈骏,王鹤年. 1993. 广东省河台含金剪切带中 REE 及其它微量元素含量和分布特征. 矿床地质, 12(3): 202~211.
- 程南南,刘庆,侯泉林,卫巍,石梦岩,何苗,郭谦款. 2018. 剪切带型金矿中金沉淀的力化学过程与成矿机理探讨. 岩石学报, 34(7): 2165~2180.
- 迟广成,肖刚,陈英丽,伍月,胡建飞,王海娇,岳明新,王新. 2013. X 射线粉晶衍射仪在千枚岩鉴定与分类中的应用. 地质与资源, 22(5): 409~414.
- 邓军,翟裕生,杨立强,方云,阎卫东. 1998. 论剪切带构造成矿系统. 现代地质, (4): 3~5.
- 丁汝鑫,邹和平,劳妙姬,杜晓东,周永章,曾长育. 2015. 钦—杭结合带南段韧性剪切带印支期活动记录: 以防城—灵山断裂带为例. 地学前缘, 22(2): 79~85.
- 焦骞骞,许德如,陈根文,陈延生,张建岭,高亦文,于亮亮,邹少浩. 2017. 广东省河台金矿区糜棱岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其地质意义. 岩石学报, 33(6): 1755~1774.
- 焦骞骞,贺昌坤,董有浦,许德如,陈根文,陈诚,师爽,高亦文. 2020. 广东河台金矿区印支期花岗岩与混合岩成因联系及大地构造意义. 岩石学报, 36(3): 261~280.
- 李海龙,宋传中,李加好,任升莲,王道轩,王微,杨帆. 2016. 宿松杂岩中白云母的矿物学特征及地质意义. 地质科学, 51(4): 1246~1260.
- 李晓峰,华仁民. 2000. 韧性剪切带内流体作用的研究. 岩石矿物学杂志, (4): 333~340.
- 毛景文,陈懋弘,袁顺达,郭春里. 2011. 华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律. 地质学报, 85(5): 636~658.
- 彭松柏,金振民,刘云华,付建明,何龙清,蔡明海,王彦斌. 2006. 云开造山带强过铝深熔花岗岩地球化学、年代学及构造背景. 地球科学—中国地质大学学报, 31(1): 110~120.
- 祁昌实,邓希光,李武显,李献华,杨岳衡,谢烈文. 2007. 桂东南大容山—十万大山 S 型花岗岩带的成因: 地球化学及 Sr—Nd—Hf 同位素制约. 岩石学报, 23(2): 403~412.
- 丘元禧,梁新权. 2006. 两广云开大山—十万大山地区盆山耦合构造演化—兼论华南若干区域构造问题. 地质通报, 25(3): 340~347.
- 吴根耀,李家驹. 1996. 滇西变泥质岩的白云母值及其构造—地层意义. 大地构造与成矿学, 20(4): 310~318.
- 杨晓勇. 2005. 论韧性剪切带研究及其地质意义. 地球科学进展, 20(7): 765~771.
- 翟伟,袁桂邦,李兆麟,黄栋林,文拥军. 2005. 粤西河台金矿床富硫化物含金石英脉锆石 U-Pb 测年及成矿意义. 地质论评, 51

(3): 340~346.

- 张旭东,亓歌. 2018. 辽宁韧性剪切带金矿成矿条件综述. 世界有色金属, 3: 116~118.
- 张燕,汤倩. 2011. 剪切带型金矿研究进展—以云南哀牢山金矿带为例. 黄金科学技术, 19(1): 11~15.
- 周雪瑶,于津海,王丽娟,沈林伟,张春晖. 2015. 粤西云开地区基底变质岩的组成和形成. 岩石学报, 31(3): 855~882.
- 周永章,曾长育,李红中,安燕飞,梁锦,吕文超,杨志军,何俊国,沈文杰. 2012. 钦州湾—杭州湾构造结合带(南段)地质演化和找矿方向. 地质通报, 31(2): 486~491.
- Boullier A M, Robert F. 1992. Palaeoseismic events recorded in Archaean gold—quartz vein networks, Val d’Or, Abitibi, Quebec, Canada. Journal of Structural, 14(2): 161~180.
- Chen Bailin, Dong Faxian, Li Zhongjian. 1999&. Ore-forming model of ductile shear zone type gold deposits. Geological Review, 45(2): 186~192.
- Chen Chenghong, Liu Yunhsin, Lee Chiyu, Xiang Hua, Zhou Hanwen. 2012. Geochronology of granulite, charnockite and gneiss in the poly-metamorphosed Gaozhou Complex (Yunkai massif), South China: Emphasis on the in-situ EMP monazite dating. Lithos, 144: 109~129.
- Cheng Nannan, Liu Qing, Hou Quanlin, Wei Wei, Shi Mengyan, He Miao, Guo Qianqian. 2018&. Discussions on the stress—chemical process of gold precipitation and metallogenic mechanism in shear zone type gold deposits. Acta Petrologica Sinica, 34(7): 2165~2180.
- Chi Guangcheng, Xiao Gang, Chen Yingli, Wu Yue, Hu Jianfei, Wang Haijiao, Yue Mingxin, Wang Xin. 2013&. Application of X-ray powder diffractometer in the identification and classification of phyllite. Geology and Resource, 22(5): 409~414.
- Den Jun, Zhai Yusheng, Yang Liqiang, Fang Yun, Yan Weidong. 1998&. On ore-forming system of shear zone tectonics. Geoscience, 12(4): 3~5.
- Ding Ruxin, Zou Heping, Lao Miaoji, Du Xiaodong, Zhou Yongzhang, Zeng Changyu. 2015&. Indosinian activity records of ductile shear zone in southern segment of Qing—Hang combined belt: a case study of Fangcheng—Lingshan fault zone. Earth Science Frontiers, 22(2): 79~85.
- Dubosq R, Lawley C J M, Rogowitz A, Schneider D A, Jackson S. 2018. Pyrite deformation and connections to gold mobility: Insight from micro-structural analysis and trace element mapping. Lithos, 310: 86~104.
- Fabricio-Silva W, Carlos Alberto Rosière, Bernhard Bühn. 2019. The shear zone-related gold mineralization at the Turmalina deposit, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: structural evolution and the two stages of mineralization. Mineralium Deposita, 54(3): 347~368.
- Faleiros F M, Campanha G A D C, Bello R M D S, Fuzikawa, K. 2010. Quartz recrystallization regimes, c-axis texture transitions and fluid inclusion reequilibration in a prograde greenschist to amphibolite facies mylonite zone (Ribeira Shear Zone, SE Brazil. Tectonophysics, 485(1~4): 193~214.
- Guidotti C V. 1984. Micas in metamorphic rocks. Micas Reviews in Mineralogy, 13(1): 357~467.
- Jiao Qianqian, Wang Lixing, Deng Teng, Xu Deru, Chen Genwen, Yu Deshui, Ye Tingwei, Gao Yiwen. 2017a. Origin of the ore-forming fluids and metals of the hetai goldfield in Guangdong Province of South China: constraints from C—H—O—S—Pb—He—Ar isotopes. Ore Geology Reviews, 88: 674~689.

- Jiao Qianqian, Deng Teng, Wang Lixing, Xu Deru, Chi Guoxiang, Chen Genwen, Liu Meng, Chen Yansheng, Gao Yiwen, Zou Shaohao, 2017b. Geochronological and mineralogical constraints on mineralization of the Hetai goldfield in Guangdong Province, South China. *Ore Geology Reviews*, 88: 655~673.
- Jiao Qianqian, He Changkun, Dong Youpu, Xu Deru, Chen Genwen, Chen Cheng, Shi Shuang, Gao Yiwen. 2020&. The petrogenetic links of Indosinian granitoid and migmatite in the Hetai goldfield, Guangdong Province of South China and the tectonic implication. *Acta Petrologica Sinica*, 36(3): 893~912.
- Jiao Shujuan, Li Xianhua, Huang Huiqing, Deng Xiguang. 2015. "Metasedimentary melting in the formation of charnockite: Petrological and zircon U—Pb—Hf—O isotope evidence from the Darongshan S-type granitic complex in southern China." *Lithos*, 239: 217~233.
- Kassem O M K, Abd El Rahim S H, El Nashar E S R, Al Kahtany K M. 2016. Application of kinematic vorticity and gold mineralization for the wall rock alterations of shear zone at Dungash gold mining, central eastern desert, Egypt. *Geology of Ore Deposits*, 58(6): 499~515.
- Li Hailong, Song Chuanzong, Li Jiahao, Ren Shenglian, Wang Daoxuan, Wang Wei, Yang Fan. 2016&. The mineralogical characteristics of muscovite in the Susong complex and its geological significance. *Acta Geological Sinica*, 51(4): 1246~1260.
- Lin Wei, Wang Qingchen, Chen Ke. 2009. Phanerozoic tectonics of south China block: New insights from the polyphase deformation in the Yunkai massif. *Tectonics*, 27(6): 1~16. DOI: 10. 1029/2007TC002207.
- Li Xiaofeng, Hua Renming. 2000&. A study on fluid action in the ductile shear zone: a review. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 19(4): 333~340.
- Mao Jingwen, Chen Maohong, Yuan Shunda, Guo Chunli. 2011&. Geological characteristics of the Qinhang (or Shihang) metallogenic belt in south China and spatial—temporal distribution regularity of mineral deposits. *Acta Geological Sinica*, 85(5): 636~658.
- Pawloski G A. 1985. Quantitative determination of mineral content of geological samples by X-ray diffraction. *American Mineralogist*, 70(7~8): 663~667.
- Paudel L P, Arita K. 2006. Thermal evolution of the Lesser Himalaya, central Nepal: Insights from K-white micas compositional variation. *Gondwana Research*, 9(4): 409~425.
- Paudel L P, Arita K. 2000. Tectonic and polymetamorphic history of the Lesser Himalaya in central Nepal. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(5): 561~584.
- Peng Songbai, Jin Zhenmin, Liu Yunhua, Fu Jianming, He Longqing, Cai Minghai, Wang Yanbin. 2006&. Petrochemistry, chronology and tectonic setting of strong peraluminous anatectic granitoids in Yukai orogenic belt, western Guangdong province, China. *Earth Science—Journal of Chian University of Geoscience*, 31(1): 110~120.
- Pryer L L. 1993. Microstructures in feldspars from a major crustal thrust zone: The Grenville Front, Ontario, Canada. *Journal of Structural Geology*, 15(1): 21~36.
- Qi Changshi, Deng Xiguang, Li Xianhua, Li Wuxian, Yang Yueheng, Xie Liewen. 2007&. Origin of the Darongshan—Shiwandashan S-type granitoid belt from southeastern Guangxi: geochemical and Sr—Nd—Hf isotopic constraints. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 403~412.
- Qiu Yuanxi, Liang Xinqun. 2006&. Evolution of basin—range coupling in the Yunkai Dashan—Shiwan Dashan area, Guangdong and Guangxi: with a discussion of several tectonic problems of South China. *Geological Bulletin of China*, 25(3): 340~347.
- Sassi F P. 1972. The petrologic and geological significance of the b_0 value of potassic white micas in low-grade metamorphic rock. An application to the Eastern Alps. *Tschermaks Miner. Petr. Mitt.*, 18: 105~113.
- Sassi F P and Scolari A. 1974. The b_0 Value of the Potassic White Micas as a Barometric Indicator in Low-Grade Metamorphism of Pelitic Schists. *Mineral. and Petrol.*, 45: 143~152.
- Stipp M, Stunitz H, Heilbronner R, Schmid S M. 2002. Dynamic recrystallization of quartz: correlation between natural and experimental conditions. *Geological Society London Special Publications*, 200(1): 171~190.
- Wan Yusheng, Liu Dunyi, Wilde Simona. 2010. Evolution of the Yunkai Terrane, South China: evidence from SHRIMP zircon U-Pb dating, geochemistry and Nd isotope. *Journal of Asian Earth Sciences*, 37(2): 140~153.
- Wang Yuejun, Fan Weiming, Zhao Guochun, Ji Shaocheng, Peng Touping. 2007. Zircon U-Pb geochronology of gneissic rocks in the Yunkai massif and its implications on the Caledonian event in the South China Block. *Gondwana Research*, 12(4): 404~416.
- Weaver C E, Broekstra B R. 1984. Illite—mica—▲▲science direct▲▲. *Developments in Petrology*, 10: 67~97.
- Weinberg R F. 2005. Kinematic history of the boulder—lefroy shear zone system and controls on associated gold mineralization, Yilgarn Craton, western Australia. *Economic Geology*, 100(7): 1407~1426.
- Wu Genyao, Li Jiaju. 1996&. The b_0 values of white micas in metapelite from west Yunnan, And their tectono-stratigraphic implications. *Gecitectonica et Metallurgica*, 20(4): 310~318.
- Yang Xiaoyong. 2005&. On the studies of ductile shear zones their geological significance. *Advances in Earth Science*, 20(7): 765~771.
- Zhai Wei, Yuan Cuibang, Li Zhaolin, Huang Donglin, Wen Yongjun. 2005&. U-Pb isotope age of zircons in gold-bearing quartz veins from the Hetai gold deposit, western Guangdong, China: Constraints on the timing of gold metallogenesis. *Geological Review*, 51(3): 340~346.
- Zhang Xudong, Qi Ge. 201&8. Summary of gold mineralization conditions in the ductile shear zone of Liaoning. *Mineral Resources*, 3: 116~118.
- Zhang Guilin, Boulter C A, Liang Jie. 2001. Brittle origins for disseminated gold mineralization in Mylonite: Gaocun gold deposit, Hetai goldfield, Guangdong province, South China. *Economic Geology*, 96(1): 49~59.
- Zhang Yan, Tang Qian. 2011&. Research progress of gold deposits of ductile shear zone—taking Ailaoshan gold zone as an example, 19(1): 11~15.
- Zheng Yi, Zhou Yongzhang, Wang Yuejun, Shen Wenjie, Yang Zhijun, Li Xingyuan, Xiao Fan. 2016. A fluid inclusion study of the Hetai goldfield in the Qinzhou Bay—Hangzhou Bay metallogenic belt, South China. *Ore Geology Reviews*, 73: 346~353.
- Zhou Xueyao, Yu Jinhai, Wang Linjuan, Shen Linwei, Zhang Huahui. 2015&. Compositions and formation of the basement metamorphic rocks in Yunkai terrane, western Guangdong Province, South China. *Acta Petrologica Sinica*, 31(3): 855~882.

Zhou Yongzhang, Zeng Changyu, Li Hongzhong, An Yanfei, Liang Jin, Lü Wenchao, Yang Zhijun, He Junguo, Shen Wenjie. 2012. Geological evolution and ore-prospecting targets in southern segment of Qinzhou Bay—Hangzhou Bay juncture orogenic belt, southern China. *Geological Bulletin of China*, 31 (2/3): 486~491.

Zhu Yongfeng, Zhou Jing, Zeng Yishan. 2007. The Tianger (Bingdaban) shear zone hosted gold deposit, west Tianshan, NW China: petrographic and geochemical characteristics. *Ore Geology Reviews*, 32(1): 337~365.

The XRD characteristics of mylonite in the Hetai gold orefield, western Guangdong, and its geological implication

SHI Shuang¹⁾, GONG Chaoyang²⁾, JIAO Qianqian¹⁾, XU Deru³⁾,
ZHANG Shengyin¹⁾, CHANG Huacheng¹⁾, HU Bin⁴⁾

1) College of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, 650093;

2) Guangdong Hetai Gold Mine, Zhaoqing, Guangdong, 526600;

3) State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, Donghua University of Technology, Nanchang, 330013;

4) Power China Kunming Survey, Design and Research Institute Co. Ltd, Kunming, 650051

Objectives: The Hetai gold orefield of Guangdong Province, located in the Yunkai area of southern segment of the Qinzhou Bay—Hangzhou Bay Juncture Orogenic Belt (QHJB), is occurred in shear zones. However, the favorable geological conditions and gold mineralization process in the shear zones are in controversy.

Methods: Based on the detailed field geological investigation on the Gaocun gold deposit of the Hetai goldfield, we carried out X-ray diffraction (XRD) to study the characteristics of mylonitic sequence in the auriferous shear zones, establish contrast sequence of stresses variety with petrographic composition, and further reveal the ore genesis with shear deformation.

Results: The muscovite content ranging from 9% to 40% in the shear zones, has an increase tendency from protomylonite, via barren and auriferous mylonite, to barren and auriferous ultramylonite. The muscovite in the shear zones was classified as 2M₁ type with b_0 values ranging from 0.55505 nm to 0.99002 nm, that increase from protomylonite, via mylonite, to ultramylonite mylonite, corresponding to low-, medium-, and high-pressure. Therefore, it is deduced that the ore-forming fluids were intensified with the rock deformation extent, resulted in abundant neogenic muscovite or sericite from protomylonite to ultramylonite. However, the auriferous mylonite and ultramylonite present some low-pressure muscovite which is likely associated with the ore-forming fluids in the brittle fissures overprinted the shear zones.

Conclusions: It indicates that the mineralization likely experienced two stages: minor sulfides occurred during ductile shearing stage, and economic Au precipitated in brittle fracture stage. Moreover, the quartz content in barren ultramylonite (29.8%) apparently less than mylonite (44.2%) suggests that some ore-forming fluids for the auriferous quartz vein-type ores were likely derived from the ultramylonite as wall rocks. Therefore, the Au mineralization is preferential in ultramylonite to protomylonite and mylonite in the shear zones.

Keyword: mineral content of mylonite; muscovite b_0 value; auriferous shear zones; Hetai gold deposit; Yunkai area, Guangdong

Acknowledgements: This study was supported by the Youth Project of National Natural Science Foundation of China (No. 41902086) and the Key project of National Natural Science Foundation of China (No. 41930428).

First author: SHI Shuang, male, master student; Email: 373007131@qq.com

Corresponding author: JIAO Qianqian, male, associate professor, is mainly engaged in the teaching and research of geological structure and mineralization; Email: 289284567@qq.com

Manuscript received on: 2021-04-11; Accepted on: 2021-08-03; Network published on: 2021-09-20

Doi: 10. 16509/j. georeview. 2021. 09. 016

Edited by: LIU Zhiqiang

