

# 粤东莲花山断裂带韧性剪切的温压条件及其对钨锡铜多金属成矿作用的约束\*

王军<sup>1,2,3</sup> 汪礼明<sup>3\*\*</sup> 公凡影<sup>4</sup> 王艳<sup>5</sup> 王成明<sup>6</sup> 卜安<sup>7</sup> 朱沛云<sup>7</sup>

WANG Jun<sup>1,2,3</sup>, WANG LiMing<sup>3\*\*</sup>, GONG FanYing<sup>4</sup>, WANG Yan<sup>5</sup>, WANG ChengMing<sup>6</sup>, BU An<sup>7</sup> and ZHU PeiYun<sup>7</sup>

1. 中国科学院广州地球化学研究所,中国科学院矿物学与成矿学重点实验室,广州 510640

2. 中国科学院大学,北京 100049

3. 广东省有色金属地质局,广州 510080

4. 中国地质调查局发展研究中心,北京 100037

5. 广东省有色地质勘查院,广州 510080

6. 中山大学地球科学与工程学院,珠海 519000

7. 广东省有色金属地质局九三一队,汕头 515047

1. CAS Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Geology Bureau for Nonferrous Metal of Guangdong Province, Guangzhou 510080, China

4. Development Research Center of China Geological Survey, Beijing 100037, China

5. Guangdong Nonferrous Metals Geological Exploration Institution, Guangzhou 510080, China

6. School of Earth Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519000, China

7. Geology Bureau for Nonferrous Metal of Guangdong Province 931 Battalion, Shantou 515047, China

2021-02-09 收稿, 2021-06-13 改回.

Wang J, Wang LM, Gong FY, Wang Y, Wang CM, Bu A and Zhu PY. 2021. Temperature and pressure conditions of dynamic metamorphism with its constraints on polymetallic mineralization of tungsten, tin and copper in Lianhuashan fault zone in eastern Guangdong Province. *Acta Petrologica Sinica*, 37(6):1921–1932, doi:10.18654/1000-0569/2021.06.17

**Abstract** The southwestern part of Lianhuashan fault zone distribute four dynamic metamorphic zones, Mian yang-Shuanghua ( I ), Bei Shanzhang-Jiulongzhang ( II ), Wuzhizhang-Guozizhang ( III ) and Meilong-Houmen-Guan yinshan ( IV ), with characteristic lens along the northeast fault. It has been shown that they are the important ore-bearing and ore-controlling structure in this region. According to the degree of metamorphism and mineral composition, the dynamic metamorphic zone can be divided into quartz lens, garnet (cordierite) mylonite, mylonite, schist, protolite and so on. Based on the result of the EPMA of typical minerals such as garnet and mica, through the garnet-biotite geothermometer, we estimate the temperature and pressure conditions of metamorphism in four dynamic metamorphic belts respectively, 484 ~ 526°C/4.92 ~ 7.72kbar, 458 ~ 469°C/2.17 ~ 2.67kbar, 536 ~ 551°C/1.28 ~ 1.67kbar, 512 ~ 516°C/4.38 ~ 4.87kbar, which are highly consistent with the field geological deformation and metamorphism characteristics of dynamic metamorphic rocks, and the pressures in volcanic-dominated areas are higher than that in granite-dominated areas. Studies have also shown that metamorphic conditions have obvious control over metamorphic zones and polymetallic mineralization, tungsten and tin polymetallic mineralization are mainly in I, IV belts with higher pressure conditions, while copper, lead, zinc and silver in II, III belts with lower pressure conditions.

\* 本文受中国地质调查局整装勘查区矿产地质调查与找矿预测(DD20190159)、中国科学院矿物学与成矿学重点实验室合作研究基金(KLMM20200201)和中国地质调查局项目(12120114015901)联合资助。

第一作者简介:王军,男,1985年生,在读博士,高级工程师,从事有色金属矿产勘查工作,E-mail:582515224@qq.com

\*\* 通讯作者:汪礼明,男,1963年生,博士,教授级高级工程师,长期从事有色金属矿产勘查工作,E-mail:wlm1640@163.com

**Key words** Lianhuashan Fault Zone; Dynamic metamorphic belt; Polymetallic Mineralization; Electron Probe Microanalysis (EPMA); Geothermometer

**摘要** 广东莲花山断裂带西南段分布有棉洋-双华(Ⅰ)、北山嶂-九龙嶂(Ⅱ)、五指嶂-锅子嶂(Ⅲ)、梅陇-鲛门-观音山(Ⅳ)4条韧性剪切带,呈巨型构造透镜体沿北东向展布。已有研究表明韧性剪切带与本区钨、锡、铜多金属成矿作用关系密切,控制着矿床的空间分布,是重要含矿、控矿构造。按照变质程度和矿物组成,区内韧性剪切带由核部至边部可以划分为石英透镜体→石榴子石(堇青石)糜棱岩→糜棱片岩→片岩→原岩等;通过对其中的石榴子石、黑云母等典型矿物进行电子探针分析(EPMA),并利用石榴石-黑云母地质温压计估算了4条韧性剪切带形成的温压条件,它们分别为484~526℃/4.92~7.72kbar、458~469℃/2.17~2.67kbar、536~551℃/1.28~1.67kbar、512~516℃/4.38~4.87kbar,与区内变质岩野外地质变形、变质特征相吻合,且火山岩为主的地区变质压力明显高于花岗岩为主的地区。研究显示,变质条件对区内变质分带和多金属成矿作用有明显的控制,棉洋-双华和梅陇-鲛门-观音山韧性剪切带的压力条件相对较高,金属成矿以钨、锡多金属成矿为主;而北山嶂-九龙嶂和五指嶂-锅子嶂韧性剪切带的压力相对较低,金属成矿则以铜、铅、锌成矿为主。

**关键词** 莲花山断裂带;韧性剪切带;多金属成矿作用;电子探针分析;地质温压计

**中图法分类号** P575.1; P611

广东莲花山断裂带是华南沿海地区一条重要的断裂带。位于广东莲花山断裂带西南段国家级锡铜多金属整装勘查区内,也是广东省最重要的钨、锡、铜多金属成矿带(王军, 2018)。早期研究认为该断裂带是一条多期变形的韧性剪切带,且变质作用无论在时空分布还是形成机制上都与断裂构造密切相关(李建超和丘元禧, 1990; 李兆麟和杨忠芳, 1995);但<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar年代学表明莲花山断裂带韧性剪切作用主要发生在117.5~129.7Ma(邹和平等, 2000; 王晓虎等, 2020; Li *et al.*, 2020)。近年来人们对莲花山韧性剪切带密切相关的钨、锡、铜、铅、锌等多金属成矿作用十分关注(王军等, 2014, 2016; 丘增旺等, 2016, 2017; 钱龙兵等, 2017; Qiu *et al.*, 2017a, b; 闫贺等, 2018)。基于本区地质特征与岩石地球化学特征,笔者所在的研究课题发现莲花山断裂带内金坑锡、铜多金属这类矿床定位严格受到韧性剪切带的控制,矿体主要沿着片理化、面理化分布且局部切割了早期片理,与成矿密切相关的蚀变主要有石榴石化、硅化和绿泥石化,为晚侏罗世的左行韧性剪切作用过程中变质热液改造矿床(汪礼明等, 2018)。显然,韧性剪切作用对区内钨、锡、铜多金属矿床成矿具有重要影响,但前人对莲花山断裂带内的韧性剪切带的研究相对较少且不全面(李建超和丘元禧, 1990),特别是变质温压条件对莲花山断裂带内多金属矿床成矿元素组合制约的研究尚缺乏,影响了人们对本区成矿机理的认识。

本文在对典型糜棱岩和糜棱岩化岩石进行详细岩相学研究基础上,利用石榴子石-黑云母温压计对变质温压条件进行了估算。结合已知矿床空间分布、显微矿物特征及变质温度和压力条件,探讨了莲花山断裂带内韧性剪切带的不同变质温压条件对多金属成矿作用的制约,深化了韧性剪切作用对粤东地区钨、锡、铜、铅、锌多金属成矿的认识,从而进一步指导本区成矿规律总结和找矿预测工作。

## 1 区域地质背景

莲花山断裂带大地构造位置上处于惠阳-梅县新华夏构

造带内,北起大埔,南及深圳,呈北东近45°展布,在广东省内延伸360km,宽20~40km。该断裂带是一条强烈的挤压破碎带,由120多条断裂所组成,可分为五华-深圳和大埔-海丰西、东两束(韧性剪切带Ⅰ、Ⅳ和Ⅱ、Ⅲ的主要分布区),以压性断裂、韧性剪切带和褶皱构造形迹为主,糜棱岩化、片理化及压碎岩等十分发育(汪礼明等, 2018)。

侵入岩主要为钙碱性花岗岩类岩石,分为粗粒黑云母花岗岩和细粒花岗岩两类,卷入韧性剪切的部分岩体发生明显变形,但在已揭露的钻孔中尚未在花岗岩体内部发现多金属矿化体(汪礼明等, 2018)。断裂带内出露的火山岩为上侏罗统高基坪群(J<sub>3</sub>g<sub>1</sub>)陆相中酸性火山岩和火山碎屑岩建造,厚度介于1284~6419m之间,钨、锡、铜、铅、锌等成矿元素的平均含量约为粤东地区地层平均含量的3~5倍(广东省有色金属地质局, 2018<sup>①</sup>),该地层是本区钨、锡、铜多金属矿床的主要赋矿层位。

## 2 韧性剪切带野外地质特征

韧性剪切是莲花山断裂带的主要特征之一。近年来根据野外地质和岩相学特征在莲花山断裂带内划分了4条韧性剪切带,由北东向南西依次为棉洋-双华(Ⅰ)、北山嶂-九龙嶂(Ⅱ)、五指嶂-锅子嶂(Ⅲ)、梅陇-鲛门-观音山(Ⅳ)(图1)。韧性剪切带呈北东-南西斜列的巨型构造透镜体,走向30°~60°,倾角32°~46°;单条长10~180km,宽5~15km,广泛发育糜棱岩带-糜棱岩化带-片理化带,伴有石榴石化、硅化和绿泥石化等蚀变,卷入韧性剪切的地层主要是上侏罗统高基坪群(J<sub>3</sub>g<sub>1</sub>)陆相中酸性火山岩和火山碎屑岩。

棉洋-双华和梅陇-鲛门-观音山糜棱岩的矿物以石榴子石、白云母、石英为主;而北山嶂-九龙嶂和指嶂-锅子嶂糜棱

① 广东省有色金属地质局. 2018. 广东双华-平安镇地区矿产地质调查报告. 128-236

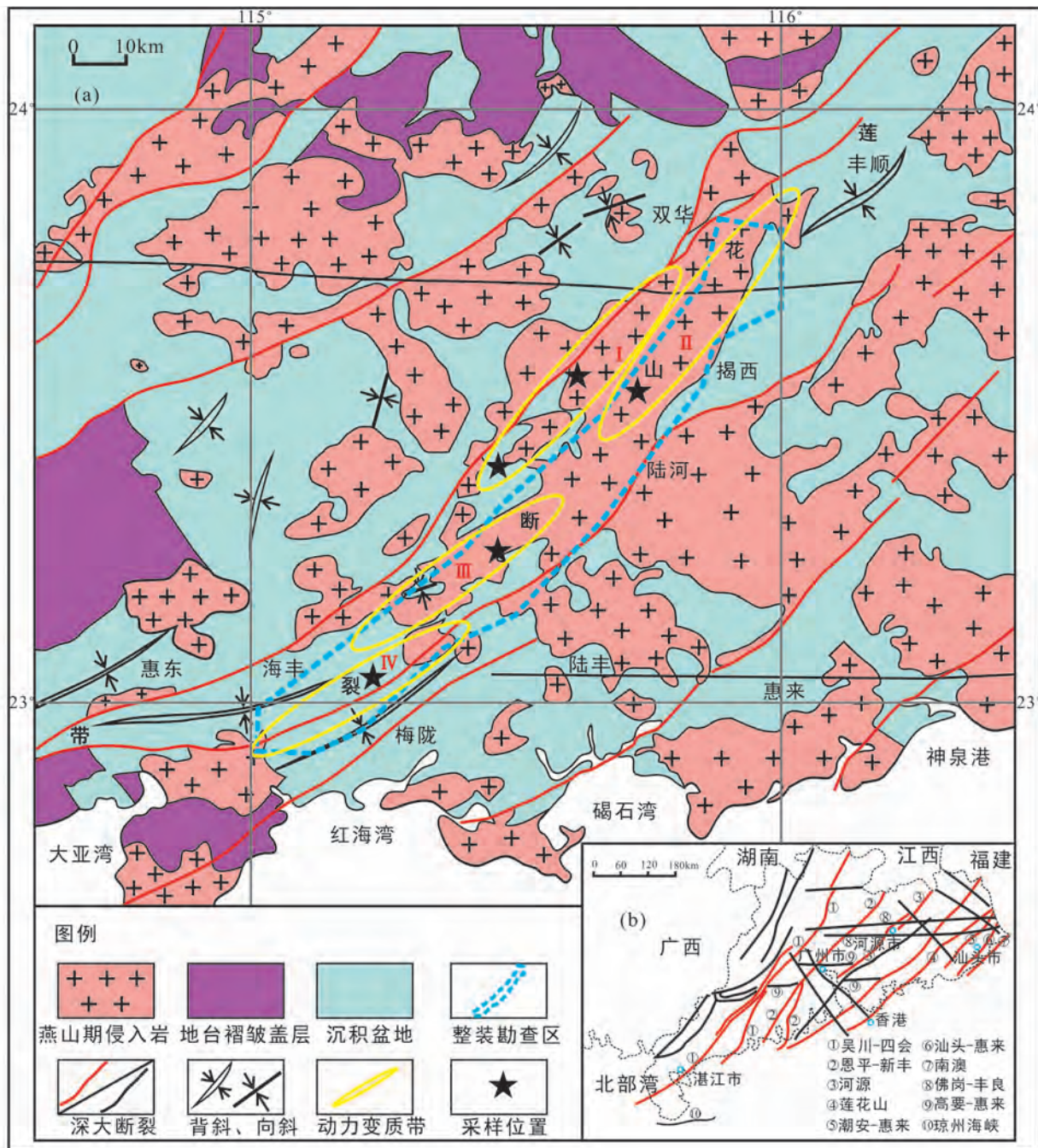


图1 广东省莲花山断裂带西南段沿线地质简图(据汪礼明等, 2018 修改)

动力变质带: I -棉洋-双华; II -北山嶂-九龙嶂; III -五指嶂-锅子嶂; IV -梅陇-鲘门-观音山

Fig.1 The brief geological map along southwestern part of Lianhuashan fault (modified after Wang *et al.*, 2018)

Dynamic metamorphic belt: I -Mianyang-Shuanghua; II -Beishanzhang-Jiulongzhang; III -Wuzhizhang-Guoizhang; IV -Meilong-Houmen-Guanyinshan

岩的矿物则主要以石榴子石、堇青石、黑云母为主。研究显示,棉洋-双华糜棱岩的黑云母、白云母和石英矿物定向性明显且具有明显拉长现象,糜棱面理、线理和牵引构造较发育(图2 I、II),石英脉及金属矿物透镜体在糜棱岩中呈透镜状、串珠状分布;北山嶂-九龙嶂和五指嶂-锅子嶂韧性剪切带以发育“构造透镜体”为显著特征,透镜体大小不一,其长轴均与挤压面大致平行,围绕着它的片理、叶理都很发育,透镜

体的拉伸方向均指示了一期左行剪切构造作用(图2 II、III);梅陇-鲘门-观音山韧性剪切带则以“石香肠构造”为典型特征,云母、石英矿物受剪切作用呈塑性向侧向流动,而夹在其中能干性较强的部分岩石被拉断(图2 IV)。

总的说来本区的韧性剪切带呈雁列状、串珠状沿断裂带展布,韧性剪切作用明显受莲花山断裂带控制,远离断裂带变质作用迅速减弱甚至消失;每条韧性剪切带内由核部到边



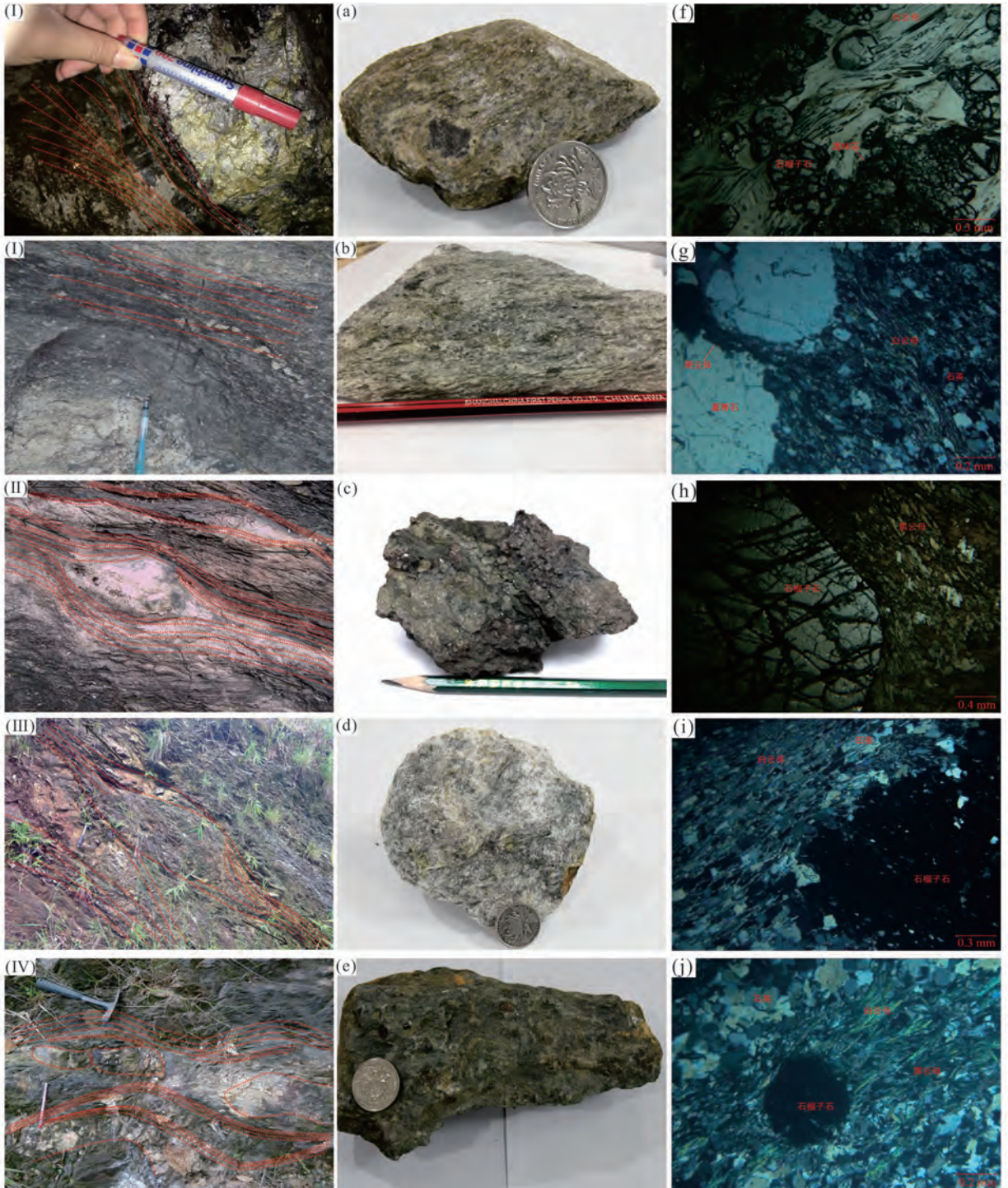


图2 莲花山断裂带韧性剪切带和代表性岩石矿物手标本(a-e)及显微镜下特征(f-j)

I: 棉洋-双华; II: 北山嶂-九龙嶂; III: 五指嶂-锅子嶂; IV: 梅陇-鲟门-观音山. (a, b) 含石榴子石(堇青石)糜棱岩; (c) 石榴子石黑云母糜棱片岩; (d) 含堇青石白云母糜棱片岩; (e) 含石榴子石云母糜棱岩. Grt-石榴子石; Bt-黑云母; Mus-白云母; Qz-石英; Di-透辉石; Crd-堇青石

Fig.2 Ductile metamorphic belts and hand specimen (a-e) with microscopic characteristics (f-j) of the typical rocks in Lianhuashan fault belts

I: Mianyang-Shuanghua; II: Beishanzhang-Jiulongzhang; III: Wuzhizhang-Guoizhang; IV: Meilong-Houmen-Guanyinshan; (a-b) garnet (cordierite)-bearing mylonite; (c) garnet-biotite-bearing mylonite; (d) cordierite-bearing muscovite-mylonite; (e) garnet-bearing mica-mylonite. Grt-garnet; Bt-biotite; Mus-muscovite; Qz-quartz; Di-diopside; Crd-cordierite

部变形强度也逐渐减弱。在高安寨、仙水沥地区由核部至边部变质分带依次为: 石英透镜体→石榴子石(堇青石)糜棱岩→糜棱片岩→片岩→原岩(火山碎屑岩), 两侧呈对称分布, 石英透镜体内以钨、锡成矿元素为主, 石榴子石糜棱岩和糜棱片岩内则以锡、铜、铅、锌等成矿元素为主。已有的研究表明, 区内的韧性剪切作用导致了莲花山断裂带内众多的的钨、锡、铜多金属矿床的形成(汪礼明等, 2014, 2018)。

### 3 样品岩石学特征

本文对莲花山断裂内棉洋-双华、北山嶂-九龙嶂、五指嶂-锅子嶂、梅陇-鲈门-观音山 4 条韧性剪切带的 5 件样品进行了研究(GSZ-1、XF-2、JS-1、TJ-2、YP-B-1, 采样位置见图 1), 其岩性分别为含石榴子石白云母糜棱岩、含堇青石白云母糜棱岩、石榴子石黑云母糜棱片岩、含堇青石白云母糜棱片岩、含石榴子石云母糜棱岩(图 2a-e)。所研究的糜棱岩石由斑晶和基质组成, 具变余糜棱组构, 显示眼球状、片状构造。变质岩的斑晶主要为石榴子石、堇青石以及石英, 常呈眼球状、碎粒状, 多为残留的碎斑矿物, 其中石榴子石含量为 3%~15%, 堇青石含量为 0~12%, 石英含量为 0~12%; 基质矿物主要为白云母、黑云母、石英、绿泥石、透辉石等, 其中白云母含量为 30%~45%, 黑云母含量为 12%~40%, 石英含量为 15%~56%。金属矿物主要有黑钨矿、白钨矿、闪锌矿、黄铜矿、方铅矿和黄铁矿等。

石榴子石呈半自形粒状, 近等轴状, 粒径为 0.8~3.5mm, 具有残缕结构。镜下特征显示其中一种石榴子石较为干净, 边界平直, 应为进变质作用产物(图 2h); 另一种石榴子石边界呈港湾状(图 2f, i), 含有石英包裹体且具有明显的定向性, 部分自形小颗粒石榴子石和黑云母、定向排列的石英、白云母共生, 且保留了早期的晶形轮廓, 具有退变质矿物特征。

黑云母呈鳞片状、片状, 粒径为 0.01~1.5mm, 少部分黑云母发生绿泥石化作用, 具有定向排列(图 2h, j), 与石榴子石的共生边界清楚, 尚未见到两者之间有溶蚀结构, 表明石榴子石和黑云母是平衡状态下的矿物组合。

白云母呈鳞片状, 粒径为 0.01~0.23mm, 个别可达 0.55mm, 白云母连续定向分布, 定向性明显, 可见白云母包裹石榴子石或堇青石(图 2f, g, i, j)。镜下特征显示图 2a 中的白云母与图 2g, h, i 中的白云母在颗粒大小、晶体形态和自形程度明显不一样, 显然本区至少存在斑晶白云母、基质白云母两种不同类型。

石英主要呈他形粒状, 部分被拉长, 波状消光, 颗粒间呈凹凸状接触, 粒径为 0.01~0.2mm, 部分石英聚集成条带状分布。少量石英晶体为 0.5~7mm, 呈碎粒状、眼球状, 为残留的碎斑矿物, 周围有重结晶的细小石英晶体。

堇青石呈他形粒状, 粒径为 0.4~3.3mm, 常被白云母、黑云母等矿物所环绕(图 2b)。

透辉石呈他形粒状, 粒径为 0.01~0.1mm, 可见透辉石交代石榴子石(图 2a), 透辉石常常是角闪岩相或相当变质温压条件的指示矿物。

绿泥石呈鳞片状, 具有浅绿色-淡褐色的多色性, 正低突起, 显蓝灰色的异常干涉色, 粒径为 0.01~0.3mm。

## 4 矿物成分特征

为了限定区内不同韧性剪切带内岩石特征及变质条件, 对采集样品的石榴子石、黑云母、白云母和绿泥石等特征矿物进行了电子探针分析。分析在中国科学院广州地球化学研究所矿物学与成矿学重点实验室进行。使用的仪器为 JEOLJXA-8230 型电子探针, 工作条件为加速电压 15kV, 束斑直径 1 $\mu$ m, 探针电流  $18 \times 10^{-8}$  A, Si、Al、Fe、Mn、Mg 和 Ca 的计数时间为峰期 20s 和上、下背景各 10s, Cr 和 Ti 的计数时间为峰期 40s 和上、下背景各 20s, Na 和 K 的计数时间为峰期 10s 和上、下背景各 5s。Si、Ti、Al、Fe、Mg 和 Ca 的相对精度为  $\pm 2\%$ , Na、K、Cr 和 Mn 相对精度为  $\pm 5\%$ 。由于石榴子石和黑云母之间会发生 Fe/Mg 等交换反应, 选取离边缘和裂隙稍远的区域进行分析。石榴子石、黑云母化学成分见表 1、表 2。

### 4.1 石榴子石

本次研究分析测试的代表性矿物石榴子石的化学成分见表 1。莲花山断裂带内的棉洋-双华、北山嶂-九龙嶂、五指嶂-锅子嶂、梅陇-鲈门-观音山 4 条韧性剪切带其主量元素含量总体变化范围为: SiO<sub>2</sub> 含量为 36.88%~37.86%, TiO<sub>2</sub> 含量为 0~0.12%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 20.94%~21.36%, FeO 含量为 15.89%~42.08%, MnO 含量为 0.08%~26.02%, MgO 含量为 0.04%~0.98%, CaO 含量为 0.89%~7.00%。研究样品石榴子石的 SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量较稳定, FeO、MnO 和 CaO 三者的含量波动较大(图 3a)。沿莲花山断裂带北东至南西石榴子石成分逐渐由锰铝榴石(Sps)过渡到铁铝榴石(Alm), Mg/Fe 比值逐渐增加, 由 0.01 增加至 0.04。石榴子石成分的差异暗示不同韧性剪切带变质条件存在一定的差异, 这与 4 条韧性剪切带在空间上呈串珠状、雁列排列密切相关(图 1)。

本文还对北山嶂-九龙嶂韧性剪切带石榴子石颗粒不同位置进行成分分析(样品编号 JS-1, 测点依次为 1-5)(图 3d)。该样品为石榴子石黑云母糜棱片岩, 石榴子石晶形完好, 化学成分稳定, 表明该石榴子石是进变质作用的产物。分析结果显示, 石榴子石核部和边部成分基本一致, 石榴子石主量元素成分剖面比较平直(图 3b); 由核部向边部 FeO 和 MgO 含量总体增加(分别由 39.99% 和 0.82% 增加至 41.17% 和 0.95%), MnO<sub>2</sub> 和 CaO 含量总体降低(分别由 0.09% 和 2.21% 降低至 0.06% 和 1.76%), 反映了在进变质作用过程中, 变质温度不断增加而压力逐渐减小。

表1 莲花山断裂内不同韧性剪切带内石榴子石的化学成分 (wt%)

Table 1 The garnet chemical compositions in different ductile shear belts Lianhuashan fault (wt%)

样品号 测点数	GSZ-1			XF-2		JS-1	TJ-2			YP-B-1			
	5	3	2	3	2	5	2	2	2	5	3	2	1
SiO <sub>2</sub>	36.88	37.18	37.28	37.31	37.86	37.31	37.42	37.16	37.41	37.69	37.49	37.64	37.42
TiO <sub>2</sub>	0.05	0.04	0.05	0.05	0.06	0.03	0.01	0.00	0.01	0.12	0.05	0.05	0.04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.07	21.05	21.18	20.94	21.36	21.04	21.21	21.23	21.11	21.10	21.03	21.22	21.16
FeO	17.34	16.15	15.89	19.09	28.28	40.57	40.96	42.08	41.35	34.02	40.47	41.00	41.50
MnO	24.81	25.00	26.02	16.71	8.06	0.08	0.16	0.23	0.19	5.87	0.41	0.20	0.13
MgO	0.09	0.12	0.13	0.04	0.08	0.89	0.80	0.98	0.79	0.65	0.84	0.82	0.81
CaO	1.34	1.59	1.14	7.00	6.78	2.24	1.20	0.89	1.34	3.08	1.69	2.09	1.75
Na <sub>2</sub> O	0.01	0.03	0.00	0.00	0.01	0.02	0.04	0.02	0.06	0.00	0.02	0.00	0.10
K <sub>2</sub> O	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01	0.01	0.00	0.01	0.03	0.02	0.05	0.05	0.03	0.02	0.02	0.00	0.01
F	0.33	0.01	0.03	0.20	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NiO	0.01	0.02	0.04	0.02	0.00	0.01	0.00	0.02	0.04	0.01	0.04	0.00	0.00
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.02	0.03	0.07	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	101.82	101.22	101.75	102.56	101.28	101.73	101.90	102.71	102.36	102.56	102.06	103.01	101.90
O	12												
Si	2.99	3.01	3.01	2.99	3.00	2.99	3.01	2.98	3.00	3.00	3.01	2.99	2.99
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Al	2.01	2.01	2.01	1.98	1.99	1.99	2.01	2.01	2.00	1.98	1.99	1.99	1.99
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe <sup>3+</sup>	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02
Fe <sup>2+</sup>	1.17	1.09	1.07	1.26	1.87	2.70	2.75	2.81	2.77	2.25	2.71	2.71	2.76
Mn	1.70	1.71	1.78	1.14	0.54	0.01	0.01	0.02	0.01	0.40	0.03	0.01	0.01
Mg	0.01	0.01	0.02	0.00	0.01	0.11	0.10	0.12	0.09	0.08	0.10	0.10	0.10
Ca	0.12	0.14	0.10	0.60	0.58	0.19	0.10	0.08	0.12	0.26	0.14	0.18	0.15
Mg/Fe	0.01	0.01	0.02	0.00	0.01	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04
And	0.24	0.00	0.00	1.15	0.26	0.86	0.00	0.41	0.17	0.61	0.40	0.64	0.77
Pyr	0.35	0.50	0.53	0.14	0.33	3.54	3.19	3.86	3.14	2.58	3.37	3.23	3.19
Sps	56.28	56.89	58.87	37.81	18.02	0.19	0.37	0.51	0.43	13.26	0.93	0.45	0.29
Gro	3.61	4.58	3.28	18.89	18.91	5.55	3.43	2.12	3.69	8.17	4.44	5.29	4.21
Alm	38.67	36.30	35.50	41.89	62.28	89.86	91.34	93.09	92.39	75.37	90.43	90.40	91.55

注:测点数表示在同一薄片测试的不同位置;数据为算术平均值

## 4.2 云母

莲花山断裂带变质岩中的云母有黑云母和白云母,其矿物成分详见表2。棉洋-双华和梅陇-鲃门-观音山两条韧性剪切带以白云母为主,其白云母  $Si_{\text{pu}}$  (pfu 为单个分子中的离子数)分别为 2.82、2.71,  $(Fe + Mg)_{\text{pu}}$  分别为 0.17、0.13,这表明本区应该至少存在两期不同类型变质作用,这与矿物显微镜下观察到的两类不同的白云母是相吻合的。而北山嶂-九龙嶂和五指嶂-锅子嶂两条韧性剪切带以黑云母为主,含有少量白云母。黑云母  $Si_{\text{pu}}$  为 2.18~2.57,明显低于白云母中  $Si_{\text{pu}}$  的含量;云母的含铁系数  $f = Fe^{2+} / (Fe^{2+} + Mn + Mg)$  达

0.69~0.93,均值 0.76,表明本区的云母属于富铁贫镁型云母; $Ti / (Mg + Fe + Ti + Mn)$  和  $Al / (Al + Mg + Fe + Ti + Mn + Si)$  分别为 0~0.06、0.23~0.46,云母成分显示了富铝的特点。

## 5 变质作用的温压条件对多金属成矿作用及探讨

### 5.1 变质温压条件

石榴石-黑云母是变质岩中最为常见的矿物对,地质学家们早已发现这两种矿物之间的 Fe-Mg 交换平衡温度有

表 2 莲花山断裂内不同韧性剪切带中云母的化学成分 (wt%)

Table 2 The mica chemical compositions in different ductile shear belts in Lianhuashan fault (wt%)

样品号(矿物)	GSZ-1 (Ms)				XF-2 (Bt)			JS-1 (Bt)			TJ-2 (Bt)				YP-B-1 (Ms)	
SiO <sub>2</sub>	46.31	46.40	46.51	46.31	33.211	34.063	34.67	34.49	35.37	35.29	33.77	32.79	31.37	32.53	44.97	45.18
TiO <sub>2</sub>	0.15	0.22	0.21	0.20	1.854	1.904	1.41	1.49	1.47	1.44	0.10	0.13	0.12	0.25	0.18	0.11
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32.46	33.24	32.94	32.48	18.735	19.02	17.67	17.42	17.69	17.72	21.58	21.45	20.87	21.01	34.47	34.35
FeO	2.79	2.51	2.32	2.46	31.153	31.058	26.55	26.22	26.48	26.86	26.85	27.09	30.30	26.63	1.96	1.79
MnO	0.31	0.27	0.18	0.18	0.142	0.201	0.02	0.05	0.05	0.07	0.06	0.13	0.10	0.03	0.02	0.00
MgO	0.48	0.34	0.38	0.44	1.154	1.196	6.24	6.48	6.76	6.49	4.05	4.06	4.49	3.86	0.43	0.39
CaO	0.02	0.01	0.01	0.00	0.005	0.008	0.13	0.02	0.00	0.05	0.10	0.12	0.02	0.05	0.00	0.02
Na <sub>2</sub> O	0.39	0.37	0.49	0.47	0.113	0.117	0.20	0.21	0.18	0.21	0.36	0.14	0.11	0.37	0.76	0.83
K <sub>2</sub> O	10.86	11.07	10.88	10.93	9.345	9.298	8.54	8.99	9.25	8.87	8.21	7.95	5.90	7.97	10.42	10.42
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.18	0.02	0.07	0.00	0.048	0.131	0.23	0.03	0.05	0.00	0.15	0.55	0.06	0.30	0.18	0.13
Total	94.73	94.61	95.11	94.70	96.40	97.63	95.93	95.72	97.64	97.34	95.28	94.48	93.35	92.99	93.39	93.232
O	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Si	2.82	2.83	2.82	2.80	2.44	2.53	2.47	2.45	2.57	2.55	2.38	2.31	2.18	2.24	2.71	2.71
Al <sup>IV</sup>	1.18	1.17	1.18	1.20	1.56	1.47	1.48	1.46	1.43	1.45	1.62	1.69	1.71	1.71	1.29	1.29
Al <sup>VI</sup>	1.15	1.22	1.18	1.12	0.06	0.19	0.00	0.00	0.09	0.07	0.18	0.09	0.00	0.00	1.15	1.14
Ti	0.01	0.01	0.01	0.01	0.10	0.11	0.08	0.08	0.08	0.08	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
Fe <sup>2+</sup>	0.14	0.13	0.12	0.12	1.91	1.93	1.58	1.56	1.61	1.63	1.58	1.59	1.76	1.54	0.10	0.09
Mn	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
Mg	0.04	0.03	0.03	0.04	0.13	0.13	0.66	0.69	0.73	0.70	0.43	0.43	0.47	0.40	0.04	0.03
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.05	0.04	0.06	0.06	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.05	0.02	0.01	0.05	0.09	0.10
K	0.84	0.86	0.84	0.84	0.87	0.88	0.78	0.81	0.86	0.82	0.74	0.71	0.52	0.70	0.80	0.80
Cr	0.01	0.001	0.004	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.04	0.00	0.02	0.01	0.01
Total	6.25	6.31	6.25	6.20	7.09	7.27	7.09	7.08	7.39	7.33	6.99	6.87	6.68	6.65	6.18	6.16
Fe <sup>2+</sup> /(Fe <sup>2+</sup> + Mn + Mg)	0.70	0.76	0.75	0.71	0.93	0.93	0.71	0.69	0.69	0.70	0.79	0.78	0.79	0.79	0.71	0.75
Ti/(Mg + Fe + Ti + Mn)	0.03	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01	0.05	0.04
Al/(Al + Mg + Fe + Ti + Mn + Si)	0.43	0.44	0.44	0.44	0.26	0.26	0.24	0.23	0.23	0.23	0.29	0.29	0.28	0.29	0.46	0.46

确定的函数关系,籍此标度了石榴石-黑云母温度计, Wu *et al.* (2006) 发现石榴子石-黑云母温度计 (Holdaway, 2000) 是中高级别泥质变质岩中误差小、准确度很高的理想温度计。石榴石-黑云母-斜长石-石英压力计是同时适用于含或者不含 Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> 矿物的中高级别泥质变质岩的理想压力计, 系统误差约为 ± 1.0kbar。石榴石-黑云母温度计 (Holdaway, 2000) 和石榴子石压力计 (Hoisch, 1991; Wu, 2019) 分别为:

$$T(\text{K}) \left[ 7.802 + 3\text{Rln} \left( \frac{X_{\text{Fe}}^{\text{grt}}/X_{\text{Mg}}^{\text{grt}}}{X_{\text{Fe}}^{\text{bio}}/X_{\text{Mg}}^{\text{bio}}} \right) + a + 17.396 (X_{\text{Mg}}^{\text{bio}} - X_{\text{Fe}}^{\text{bio}}) + 280.306X_{\text{Al}}^{\text{bio}} + 370.39X_{\text{Ti}}^{\text{bio}} \right] = 40198.0 + (0.295 - b)P(\text{bars}) - c + 22998 (X_{\text{Mg}}^{\text{bio}} - X_{\text{Fe}}^{\text{bio}}) + 245559.0X_{\text{Al}}^{\text{bio}} + 310990.0X_{\text{Ti}}^{\text{bio}}$$

$$P(\text{bar}) = \frac{-8904.5 + 24.542T(\text{K}) + 0.45\text{RTln}(X_{\text{Ca}}^{\text{grt}}/X_{\text{Fe}}^{\text{grt}}) + 0.15aT + 0.15c}{1 - 0.15b}$$

所研究样品的石榴子石粒度较大,晶形较好,且与黑云

母两者共生,说明在变质作用过程中石榴子石和黑云母两种矿物内部的化学成分已达到平衡。本文分别对棉洋-双华、北山嶂-九龙嶂、五指嶂-锅子嶂、梅陇-鲈门-观音山 4 条韧性剪切带的样品进行了变质温压条件估算,其结果分别为 484 ~ 526°C/4.92 ~ 7.72kbar, 458 ~ 469°C/2.17 ~ 2.67kbar, 536 ~ 551°C/1.28 ~ 1.67kbar, 512 ~ 516°C/4.38 ~ 4.87kbar, 详细结果见表 3。

## 5.2 钨锡多金属成矿特征

莲花山断裂带内棉洋-双华和梅陇-鲈门-观音山两条带的变质压力明显高于北山嶂-九龙嶂和五指嶂-锅子嶂韧性剪切带,温度也略高。这种差异不仅使得岩石产生差异变形和变质分带,而且导致多其金属成矿元素组合不同。野外地质特征表明韧性剪切带从核部到边部变形强度逐渐减弱,由核



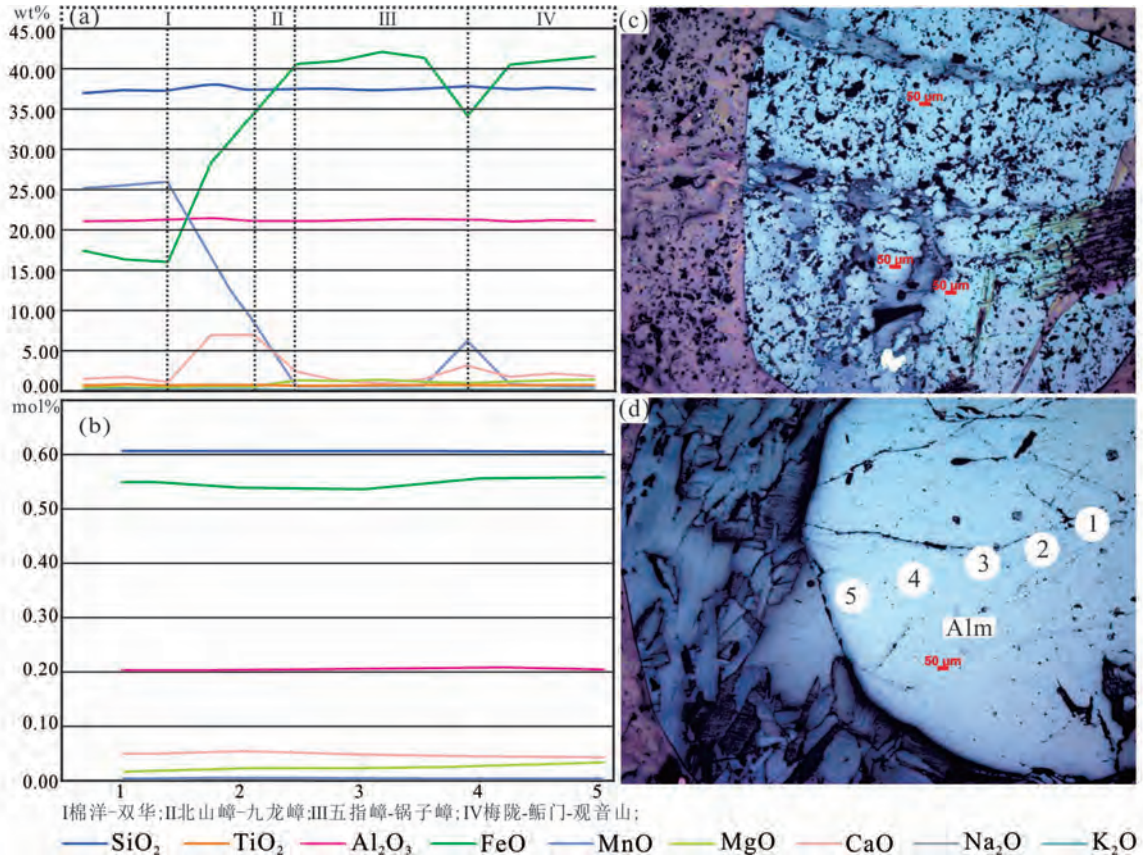


图3 莲花山断裂带内不同韧性剪切带内石榴子石含量变化及样品 JS-1 石榴子石主量元素成分剖面

(a) 不同韧性剪切带石榴子石中主量元素含量变化; (b) 石榴子石 (JS-1) 主量元素成分剖面; (c) 石榴子石、黑云母和白云母共生特征; (d) 石榴子石探针剖面点位图

Fig. 3 Variation of the garnet contents in different ductile shear belts in Lianhuashan fault belt and the main elements component profile of Samples JS-1 garnet

(a) changes of principal element content in different ductile shear zone garnet; (b) profile of main element composition in garnet; (c) symbiotic characteristics of garnet, biotite and muscovite; (d) point map of garnet probe profile

表3 莲花山断裂带内韧性剪切带内温压计算结果

Table 3 Calculation results of temperature and pressure of ductile shear zone

韧性剪切带	测点号	温度 (°C)	压力 (kbar)
棉洋-双华 (I)	XF-2-1-1-5	526	7.72
	XF-2-1-1-4	499	7.53
	XF-2-1-1-6	484	6.19
	GSZ-1-2-2-3	526	4.92
梅陇-鲛门-观音山 (IV)	YP-B-1-1-2	516	4.87
	YP-B-1-1-5	512	4.38
北山嶂-九龙嶂 (II)	JS-1-2-7	469	2.67
	JS-1-2-8	458	2.46
	JS-1-2-6	469	2.17
五指嶂-锅子嶂 (III)	TJ-2-1-3-3	536	1.67
	TJ-2-1-1-3	551	1.30
	TJ-2-1-3-4	550	1.28

部至边部变质分带依次为:石英透闪体→石榴子石糜棱岩→糜棱岩→片岩→原岩(火山碎屑岩)。在仙水沥地区(图1, XF-2)的石英透闪体内及边部温度较高,以钨、锡、铜、锌等成矿元素为主,品位分别为12.72%、1.00%、2.0%、0.51%(图4a);石榴子石糜棱岩中以锡、锌等成矿元素为主,品位分别为0.63%、0.24%(图4b);而糜棱岩中则以锡、铜、锌等成矿元素,品位分别为0.75%、0.44%、1.75%(图4c);其主要成矿物质特征如下:

黑钨矿,板状,粒径为0.005~0.9mm;白钨矿呈半自形粒状,粒径为0.02~0.3mm,可见白钨矿与黑钨矿共生,常沿裂隙分布(图4d)。

闪锌矿呈他形粒状,粒径为0.05~0.2mm,可见闪锌矿内包含黄铜矿。

黄铜矿呈他形粒状、乳滴状,粒径为0.01~0.05mm,有明显的定向排列,这与变质热液成因矿体具有明显的片理化、面理化也相吻合(汪礼明等,2018),其明显的出溶结构应为变质作用下压力或者温度降低形成的,表明黄铜矿成矿



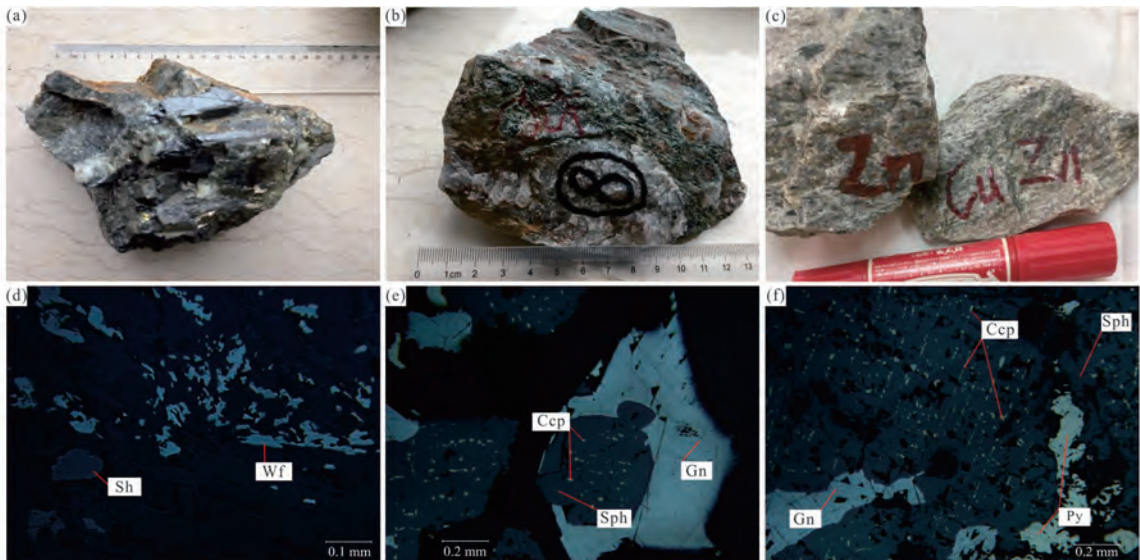


图4 莲花山断裂带韧性剪切带成矿特征

(a-c) 仙水沥地区韧性剪切带由核部至边部矿化分带: 石英脉型→石榴子石糜棱岩型→糜棱岩型; (d) 黑钨矿与白钨矿共生; (e) 闪锌矿→黄铜矿→方铅矿; (f) 闪锌矿→黄铜矿→方铅矿→黄铁矿. Sh-白钨矿; Wf-黑钨矿; Ccp-黄铜矿; Sph-闪锌矿; Gn-方铅矿; Py-黄铁矿

Fig. 4 Metallogenic characteristics of different dynamic metamorphic belts in Lianhuashan fault belt

(a-c) ductile shear zone in Xianshuili area is mineralized from core to edge: quartz vein type→garnet type→mylonite type; (d) symbiosised wolframite and scheelite; (e) sphalerite→chalcopyrite→galena; (f) sphalerite→chalcopyrite→galena→pyrite. Sh-scheelite; Wf-wolframite; Ccp-chalcopyrite; Sph-sphalerite; Gn-galena; Py-pyrite

时间基本与闪锌矿同时或稍晚(图4e, f)。

方铅矿呈他形粒状, 粒径为0.01~0.07mm, 包围或穿插较早期的闪锌矿和黄铜矿(图4e, f)。

黄铁矿则最晚期形成, 呈自形-半自形粒状, 粒径为0.01~1.4mm, 呈浸染状、团粒状(图4f)。

### 5.3 讨论

本区棉洋-双华、北山嶂-九龙嶂、五指嶂-锅子嶂、梅陇-鲛门-观音山4条韧性剪切带的变质温压条件估算结果分别为484~526℃/4.92~7.72kbar, 458~469℃/2.17~2.67kbar, 536~551℃/1.28~1.67kbar, 512~516℃/4.38~4.87kbar。李建超和丘元禧(1990)在五华、淡水等地区测得变质温压条件为400~560℃、压力4.6~6.6kbar。邱元禧等(1991)通过石榴石-黑云母温度计、白云母压力计求得本地区韧性剪切带的形成温度为400~500℃, 压力9~17kbar。本次研究显示变质作用的温度变化较小但压力变化较大; 莲花山断裂带西束(棉洋-双华、梅陇-鲛门-观音山)和东束(北山嶂-九龙嶂、五指嶂-锅子嶂)的压力整体上由北向南西降低, 莲花山断裂带西束从4.92~7.72kbar→4.38~4.87kbar; 东束从2.17~2.67kbar→1.28~1.67kbar, 同时我们也发现棉洋-双华、梅陇-鲛门-观音山火山岩为主的地区变质压力明显高于北山嶂-九龙嶂、五指嶂-锅子嶂花岗岩为主的地区。

莲花山断裂带地区基础地质研究表明, 该断裂带从福建

延伸到广东境内, 经大浦、丰顺、揭西、海丰和深圳, 韧性剪切作用逐渐减弱最终消逝在海域(李建超和丘元禧, 1990; 李兆麟和杨忠芳, 1995; 汪礼明等, 2018; Li *et al.*, 2020); 王晓虎等(2020)通过对比莲花山断裂带北段、中段和南段岩石的变形程度来分析本地区的韧性变形与成矿的关系, 北段的岩石变形有超糜棱岩出现, 而中段和南段主要是糜棱岩和糜棱片岩为主, 表明其变形程度由北向南西逐渐减弱。广东南澳韧性剪切带和莲花山韧性剪切带的黑云母单矿物的<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar年代学研究表明本区的韧性剪切作用主要发生在151~162Ma、117.5~129.7Ma、66~97Ma(邹和平等, 2000), 莲花山断裂带北段样品油45-3的<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar的坪年龄为151~162Ma, 而样品深012-1和深015-1的坪年龄分别为117.5~129.7Ma、66~97Ma, 这表明本区的韧性剪切活动逐渐有断裂带北东逐渐往南西延伸。本区的变质作用主要以绿片岩相和绿帘角闪岩相为主, 绿片岩相主要矿物有黑云母、白云母、石英等; 绿帘角闪岩相主要矿物为石榴子石、堇青石、石英、黑云母等(吴安生等, 2007), 在莲花山断裂带北部高安寨、仙水沥和金坑地区的矿物组合主要为石榴子石、堇青石、绿泥石、黑云母、白云母。西南段矿物组合主要为白云母、绿泥石、石英和长石以及少量的石榴子石。根据本区野外地质调查、岩相学特征和矿物组合以及变质温压条件, 我们认为棉洋-双华和梅陇-鲛门-观音山韧性剪切带是以石榴子石白云母糜棱岩为代表; 随着温压条件的改变尤其是压力降低而发生退变质作用, 石榴子石变斑晶逐渐由堇青石代

替,部分退变质为绿泥石和黑云母,从而在北山嶂-九龙嶂韧性剪切带和五指嶂-锅子嶂内形成了堇青石黑云母糜棱片岩。

野外地质调查研究表明,从韧性剪切带核部向边部矿化逐渐减弱,外部变形较弱或者没有发生形变的片岩和原岩基本无矿化活动。钨锡多金属矿体大多产于糜棱岩带和糜棱岩化带中,两者均表现出强烈的挤压变形,面理和片理是成矿元素运移和聚集的场所;挤压变形或糜棱岩化程度越高,成矿活动明显增强。韧性剪切带本身伴生了层间滑动断层及其伴生的节理、裂隙等,这些构造体在应力释放后滑脱,可形成相当规模的储矿空间,经韧性剪切而变形碎裂的矿物,如石榴子石旋转碎斑也可提供矿化空间,金属矿物沿其颗粒裂隙及颗粒边部压力薄弱部位沉淀富集(汪礼明等, 2018)。因此本区多金属成矿活动在时空上主要受控于韧性剪切作用。从不同韧性剪切带内的温度和压力分布情况看,温度变化范围相对较小,而压力变化幅度较大,从最低 1.28kbar 到最高 7.72kbar;从莲花山断裂带在区域上的空间展布来看,由北东延伸到南西,最终在惠州、深圳一带消失在海域,其中北山嶂-九龙嶂、五指嶂-锅子嶂两条韧性剪切带内分布有大量的花岗质岩体,其岩石的能干性相对区内的上侏罗统高基坪群火山岩较强,故而其变质作用的压力相对较低。岩石形变才能提供成矿活动需要的通道和场所,因此变质作用的压力因素是本区钨锡多金属成矿活动的主控因素。自中生代以来华南地区先后共发生了三次大规模成矿活动,分别是湘赣交界地区燕山早期(180~170Ma)铜、铅、锌成矿;南岭地区燕山中期(150~139Ma)钨、锡、铋、钼等成矿和东南沿海地区燕山晚期(125~98Ma)锡多金属成矿(华仁民等, 2005),而粤东莲花山断裂带沿线地区主要有岩浆热液成矿(Qiu *et al.*, 2017a, b; 闫庆贺等, 2018; Zhao *et al.*, 2018a, b, 2021)和动力变质热液成矿(王军等, 2014, 2016; 汪礼明等, 2018)。

目前按照韧性剪切热液成矿机制,在莲花山断裂西南段国家级整装勘查区内现已发现中型矿床 7 处,其中远景规模有望达大型矿床 2 处,小型矿床 12 处,矿点 36 处,已知矿床(点)大多产于韧性剪切带以内。位于棉洋-双华和梅陇-鲈门-观音山韧性剪切带的高安寨、长埔矿床则以钨、锡为主,远景可达大型规模;而位于北山嶂-九龙嶂韧性剪切带的金坑矿床主要为铜、锌、铅等,已控制矿体规模均达中型规模,全区资源量可达超大型规模;此外通过近年工作已新发现了江西坑、大湖、淘锡湖等一批新的勘查基地。

## 6 结论

(1) 莲花山断裂带内的韧性剪切带发育构造透镜体、石香肠、糜棱面理和线理等构造;岩石学、矿物学及矿物成分特征表明本区变质岩有含石榴子石(堇青石)糜棱岩、石榴子石(堇青石)糜棱片岩等。

(2) 利用石榴子石-黑云母地质温压计得出棉洋-双华、北

山嶂-九龙嶂、五指嶂-锅子嶂、梅陇-鲈门-观音山 4 条韧性剪切带形成的温压条件分别 484~526°C/4.92~7.72kbar, 458~469°C/2.17~2.67kbar, 536~551°C/1.28~1.67kbar, 512~516°C/4.38~4.87kbar。温度变化较小但压力变化较大,莲花山断裂带西东(棉洋-双华梅陇-鲈门-观音山)和东东(北山嶂-九龙嶂、五指嶂-锅子嶂)的变质压力整体上由北东向南西降低。

(3) 结合已有矿床时空分布规律,本区的多金属成矿活动主要为黑钨矿、白钨矿、闪锌矿、黄铜矿、方铅矿和黄铁矿,明显受控于韧性剪切作用,且棉洋-双华和梅陇-鲈门-观音山韧性剪切带的压力条件相对较高,金属成矿以钨、锡多金属成矿为主;而北山嶂-九龙嶂和五指嶂-锅子嶂韧性剪切带的压力相对较低,金属成矿则以铜、铅、锌成矿为主。

(4) 莲花山断裂带内的韧性剪切带和矿化分带是本区韧性剪切成矿的显著特征。按照变质温度压力条件和该地区的多金属成矿活动演化规律,可以进一步指导本区钨、锡、铜多金属成矿规律总结和找矿预测。

**致谢** 在论文撰写过程中得到了中国科学院广州地球化学研究所牛贺才研究员、中国地质调查局发展研究中心吕志成研究员、孙海瑞博士和中国地质大学(武汉)地球科学学院平先权老师以及临沂大学王国栋老师的指导;在野外地质工作中得到了许典葵、颜伦明、钱龙兵三位高级工程师的支持和帮助;在论文修改期间得到了两位匿名审稿人和俞良军老师的宝贵意见和建议;在此一并表示衷心感谢。

## References

- Hoisch TD. 1991. Equilibria within the mineral assemblage quartz + muscovite + biotite + garnet + plagioclase, and implications for the mixing properties of octahedrally-coordinated cations in muscovite and biotite. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 108(1): 43–54
- Holdaway MJ. 2000. Application of new experimental and garnet Margules data to the garnet-biotite geothermometer. *American Mineralogist*, 85(7): 881–892
- Hua RM, Chen PR, Zhang WL and Lu JJ. 2005. Three major metallogenic events in Mesozoic in South China. *Mineral Deposits*, 24(2): 99–107 (in Chinese with English abstract)
- Li JC and Qiu YX. 1990. A preliminary study on the basic features of the fault dynamo-thermal metamorphic belt of the Lianhuashan and its genetic mechanism. *Journal of Changchun University of Earth Science*, 20(1): 11–20 (in Chinese with English abstract)
- Li JH, Cawood PA, Ratschbacher L, Zhang YQ, Dong SW, Xin YJ, Yang H and Zhang PX. 2020. Building Southeast China in the Late Mesozoic: Insights from alternating episodes of shortening and extension along the Lianhuashan fault zone. *Earth-Science Reviews*, 201: 103056
- Li ZL and Yang ZF. 1995. A study of rock-forming and ore-forming temperatures of the Lianhuashan tungsten deposit, Guangdong Province. *Mineral Deposits*, 14(3): 252–260 (in Chinese with English abstract)
- Qian LB, Guo LR and Yu QL. 2017. Mineral prediction model of the

- integrative exploration area in the southwestern section of the Lianhuashan fault zone, Guangdong Province. *Journal of Geology*, 41(3): 468–473 (in Chinese with English abstract)
- Qiu YX, Qiu JS, Li JC and Zhong HP. 1991. Deformation and metamorphic features of Lianhuashan fault zone during Meso-Cenozoic time and mechanism of their formation. *Bulletin of The Institute of Geomechanics, CAGS*, 14: 93–106 (in Chinese with English abstract)
- Qiu ZW, Wang H, Yan QH, Li SS, Wang LM, Bu A, Mu SL, Li P and Wei XP. 2016. Zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotopic composition of quartz porphyry in the Changpu Sn polymetallic deposit, Guangdong Province, SE China and their geological significance. *Geochimica*, 45(4): 374–386 (in Chinese with English abstract)
- Qiu ZW, Li SS, Yan QH, Wang H, Wei XP, Li P, Wang LM and Bu A. 2017a. Late Jurassic Sn metallogeny in eastern Guangdong, SE China coast: Evidence from geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf-S isotopes of the Dadaoshan Sn deposit. *Ore Geology Reviews*, 83: 63–83
- Qiu ZW, Yan QH, Li SS, Wang H, Tong LX, Zhang RQ, Wei XP, Li P, Wang LM, Bu A and Yan LM. 2017b. Highly fractionated Early Cretaceous I-type granites and related Sn polymetallic mineralization in the Jinkeng deposit, eastern Guangdong, SE China: Constraints from geochronology, geochemistry, and Hf isotopes. *Ore Geology Reviews*, 88: 718–738
- Qiu ZW, Wang H, Yan QH, Li SS, Wang LM, Bu A, Wei XP, Li P and Mu SL. 2017. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Lu-Hf isotopes of granite porphyry in Taoxihu tin polymetallic deposit, Guangdong Province, SE China and its geological significance. *Geotectonica et Metallogenia*, 41(3): 516–532 (in Chinese with English abstract)
- Wang J, Wan CH, Wen CS and Wang MJ. 2014. Geological characteristics and its ore-controlling factors in Tangchun tungsten-tin ore district in the eastern Guangdong. *Resources Environment & Engineering*, 28(3): 280–283 (in Chinese with English abstract)
- Wang J, Liao MY, Bu A and Zhu PY. 2016. Construction of the geological model of “Trinity” prospecting prediction in Jinkeng tin-copper polymetallic deposit, Jiexi County, Guangdong Province. *Geological Review*, 62(Suppl. 1): 51–52 (in Chinese)
- Wang J. 2018. New progress of basic geology and comprehensive research in the tin-copper polymetallic ore-deposit in the Lianhuashan fault zone integrated exploration area, Guangdong Province. *Resources Environment & Engineering*, 32(2): 209–211 (in Chinese)
- Wang LM, Bu A, Wang H, Li SS, Chen SQ and Guo LR. 2014. New progress of exploration and prospecting in the south-west section of Lianhuashan fault zone, Guangdong. *Mineral Deposits*, 33(Suppl. 1): 965–966 (in Chinese)
- Wang LM, Wang J, Wang H, Bu A, Li SS, Qian LB and Wang W. 2018. Dynamic metamorphism origin for the tin-copper polymetallic mineralization in the Lianhuashan fault, eastern Guangdong Province. *Geotectonica et Metallogenia*, 42(5): 908–917 (in Chinese with English abstract)
- Wang XH, Zhang WG, Chen ZL, Zhou RD, Chen BL, Xu DK, Huo HL, Li JL, Zhang T, Ding ZL and Li XZ. 2020. Deformation time limit of ore-controlling structures in Lianhuashan fault zone along the South China coast: Constraints from zircon U-Pb age and stratigraphic age. *Geology in China*, 47(4): 985–997 (in Chinese with English abstract)
- Wu AS, Liu JX, Zhuang WM and Xu YX. 2007. Basic features of Shenzhen dynamic and thermal metamorphic belt in Guangdong Province. *West-China Exploration Engineering*, 19(7): 111–114 (in Chinese with English abstract)
- Wu CM and Zhao GC. 2006. Recalibration of the garnet-muscovite (GM) geothermometer and the garnet-muscovite-plagioclase-quartz (GMPQ) geobarometer for metapelitic assemblages. *Journal of Petrology*, 47(12): 2357–2368
- Wu CM. 2019. Original calibration of a garnet geobarometer in metapelite. *Minerals*, (9)9: 540
- Yan QH, Wang H, Qiu ZW, Wang M, Mu SL, Wang LM, Bu A, Wang SM, Li SS, Wei XP and Li P. 2018. Zircon and cassiterite U-Pb ages and Lu-Hf isotopic compositions of Tashan tin-bearing porphyry in Guangdong Province, SE China and its geological significance. *Geotectonica et Metallogenia*, 42(4): 718–731 (in Chinese with English abstract)
- Zhao Z, Liu C, Guo NX, Zhao WW, Wang PA and Chen ZH. 2018a. Temporal and spatial relationships of granitic magmatism and W mineralization: Insights from the Xingguo orefield, South China. *Ore Geology Reviews*, 95: 945–973
- Zhao Z, Zhao WW, Lu L and Wang HY. 2018b. Constraints of multiple dating of the Qingshan tungsten deposit on the Triassic W(-Sn) mineralization in the Nanling region, South China. *Ore Geology Reviews*, 94: 46–57
- Zhao Z, Fu TY, Gan JW, Liu C, Wang DH, Sheng JF, Li WB, Wang PA, Yu ZF and Chen YC. 2021. A synthesis of mineralization style and regional distribution and a proposed new metallogenic model of Mesozoic W-dominated polymetallic deposits in South China. *Ore Geology Reviews*, 133: 104008
- Zou HP, Wang JH and Qiu YX. 2000.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages of the Nan'ao shear zone and the Lianhuashan shear zone in Guangdong Province and their geological significance. *Acta Geoscientica Sinica*, 21(4): 356–364 (in Chinese with English abstract)

#### 附中文参考文献

- 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 陆建军. 2005. 论华南地区中生代3次大规模成矿作用. *矿床地质*, 24(2): 99–107
- 李建超, 丘元禧. 1990. 广东莲花山燕山早期断裂带热变质带的基本特征及形成机制的探讨. *长春地质学院学报*, 20(1): 11–20
- 李兆麟, 杨忠芳. 1995. 广东莲花山钨矿成岩成矿温度研究. *矿床地质*, 14(3): 252–260
- 钱龙兵, 郭丽荣, 余庆亮. 2017. 广东莲花山断裂带南西段整装勘查区矿床预测模型. *地质学刊*, 41(3): 468–473
- 邱元禧, 邱津松, 李建超, 钟宏平. 1991. 广东莲花山断裂带中、新生代多期复合变形变质带的基本特征及其形成机制的探讨. *中国地质科学院地质力学研究所所刊*, (14): 93–106
- 丘增旺, 王核, 闫贺庆, 李莎莎, 汪礼明, 卜安, 慕生禄, 李沛, 魏小鹏. 2016. 广东长埔锡多金属矿床石英斑岩锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素组成及其地质意义. *地球化学*, 45(4): 374–386
- 丘增旺, 王核, 闫贺庆, 李莎莎, 汪礼明, 卜安, 魏小鹏, 李沛, 慕生禄. 2017. 广东陶锡湖锡多金属矿床花岗斑岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学、Hf 同位素组成及其地质意义. *大地构造与成矿学*, 41(3): 516–532
- 王军, 万传辉, 文昌生, 王模坚. 2014. 粤东塘唇钨锡矿区地质特征及其主要控矿因素. *资源环境与工程*, 28(3): 280–283
- 王军, 廖明英, 卜安, 朱沛云. 2016. 广东省揭西县金坑锡铜多金属矿床“三位一体”找矿预测地质模型的构建. *地质论评*, 62(增1): 51–52
- 王军. 2018. 广东莲花山断裂带南西段锡铜多金属矿整装勘查区基础地质与综合研究新进展. *资源环境与工程*, 32(2): 209–211
- 汪礼明, 卜安, 王核, 李莎莎, 陈少青, 郭丽荣. 2014. 广东莲花山断裂带南西段整装勘查区勘查找矿新进展. *矿床地质*, 33(增



1): 965 - 966

- 汪礼明, 王军, 王核, 卜安, 李莎莎, 钱龙兵, 王玮. 2018. 粤东莲花山断裂带动力变质作用与动力变质热液成矿. 大地构造与成矿学, 42(5): 908 - 917
- 王晓虎, 张文高, 陈正乐, 周荣德, 陈柏林, 许典葵, 霍海龙, 李季霖, 张涛, 丁志磊, 李效壮. 2020. 华南沿海莲花山断裂带控矿构造变形时限: 来自锆石 U-Pb 年龄与地层时代的约束. 中国地质, 47(4): 985 - 997

- 吴安生, 刘建雄, 庄文明, 许业熙. 2007. 广东深圳动热变质带的基本特征. 西部探矿工程, 19(7): 111 - 114
- 闫庆贺, 王核, 丘增旺, 王敏, 慕生禄, 汪礼明, 卜安, 王赛蒙, 李莎莎, 魏小鹏, 李沛. 2018. 粤东塌山斑岩型锡多金属矿床锆石及锡石 U-Pb 年代学、Hf 同位素组成及其地质意义. 大地构造与成矿学, 42(4): 718 - 731
- 邹和平, 王建华, 丘元禧. 2000. 广东南澳和莲花山韧性剪切带  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄及其地质意义. 地球学报, 21(4): 356 - 364