

湖南东南部湘东钨矿区老山坳断层性质的厘定 及其对找矿的启示

倪永进^{1,2}, 单业华¹, 伍式崇³, 聂冠军^{1,2}, 张小琼^{1,2}, 朱浩峰³, 梁新权¹

(1.中国科学院 广州地球化学研究所, 边缘海地质重点实验室, 广东 广州 510640; 2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.湖南省地质矿产勘查开发局 四一六队, 湖南 株洲 412007)

摘要:老山坳断层是湖南东南部湘东钨矿区的主干断层, 目前有关其活动时代、性质和位移量的认识还存在分歧。断层带内及附近的宏观构造变形观察、断层两盘矿脉成分、结构构造和围岩变形的比较、岩石蚀变的类型和空间分布特征等都表明该断层具有正断性质, 形成于成矿之后。鉴于下盘北组脉与上盘南组脉具有平行脉壁、黑白相间的条带结构, 认为它们在老山坳断层形成前应该属于同一组脉, 进而推断出该断层的水平断距达 1.5~2.0 km。无论单一脉或连接脉, 矿脉的平均宽长比都大于 1.0×10^{-2} , 远高于前人在露头上测量得到的石英脉宽长比, 意味着脉体宽长比与观察的脉体尺度有关。在上述分析的基础上, 提出新的找矿思路: 在断层下盘北组脉的北边寻找与中组脉和南组脉对应的矿脉, 而在断层上盘南组脉的深部寻找北组脉。

关键词:断层性质; 成矿时代; 矿脉; 老山坳断层; 湘东钨矿

中图分类号: P542; P613 文献标志码: A 文章编号: 1001-1552(2015)03-0436-010

在构造-岩浆活化过程中, 地壳内或更深处的成矿物质易于发生迁移, 富集成大型或超大型的内生金属矿床。这些矿床的形成、分布和保存直接受到强烈且频繁的构造活动的影响甚至控制, 因而成为成矿学的研究内容之一(陈国达, 1985, 1987)。以断层为例(曾庆丰, 1984; 翟裕生和林新多, 1993; 陈科, 2011), 相对于成矿时代, 断层活动可以分为成矿前、成矿期和成矿后三种情形。岩浆、热液常常沿着成矿前断层上涌和运移, 并在其构成的空间中淀积; 成矿期的断层活动可以驱动矿液呈脉动式运移, 在局部有利的部位(如断层交叉、断层产状变化等)淀积成富矿, 同时造成矿体内部复杂的结构或构造; 成矿后断层会不同程度地破坏先存的矿体, 将其抬

升至地表遭受剥蚀或者深埋地下成为盲矿体。由于区域构造应力场随时变化, 自然界中普遍存在着多期断层活动。于是, 如何正确识别断层与矿床之间的时空关系对指导预测找矿工作具有极其重要的意义。

湘东钨矿位于湖南省茶陵县北东部(图 1), 属于典型的石英脉型钨矿床(孙振家, 1990), 迄今已有 70 多年的工业开采历史, 目前矿山面临可采储量日益减少的困境, 迫切需要在矿区范围内寻找新的资源量。作为矿区内的主干断层, 老山坳断层呈 NEE-SWW 向穿过矿区, 分隔了最重要的三组矿脉: 南组、中组与北组(图 1c)。早期的矿产地质调查都认为该断层曾多次活动, 具有逆断层性质, 起着导矿的作用(湖南省有色地质勘查局二一四队, 2010;

收稿日期: 2014-07-03; 改回日期: 2014-10-22

项目资助: 国土资源部公益科研专项(201211024-03)和国家自然科学基金项目(40872080, 41072081)联合资助。

第一作者简介: 倪永进(1988-), 男, 博士研究生, 主要从事构造地质学研究。Email: niyongjin11@mails.ucas.ac.cn

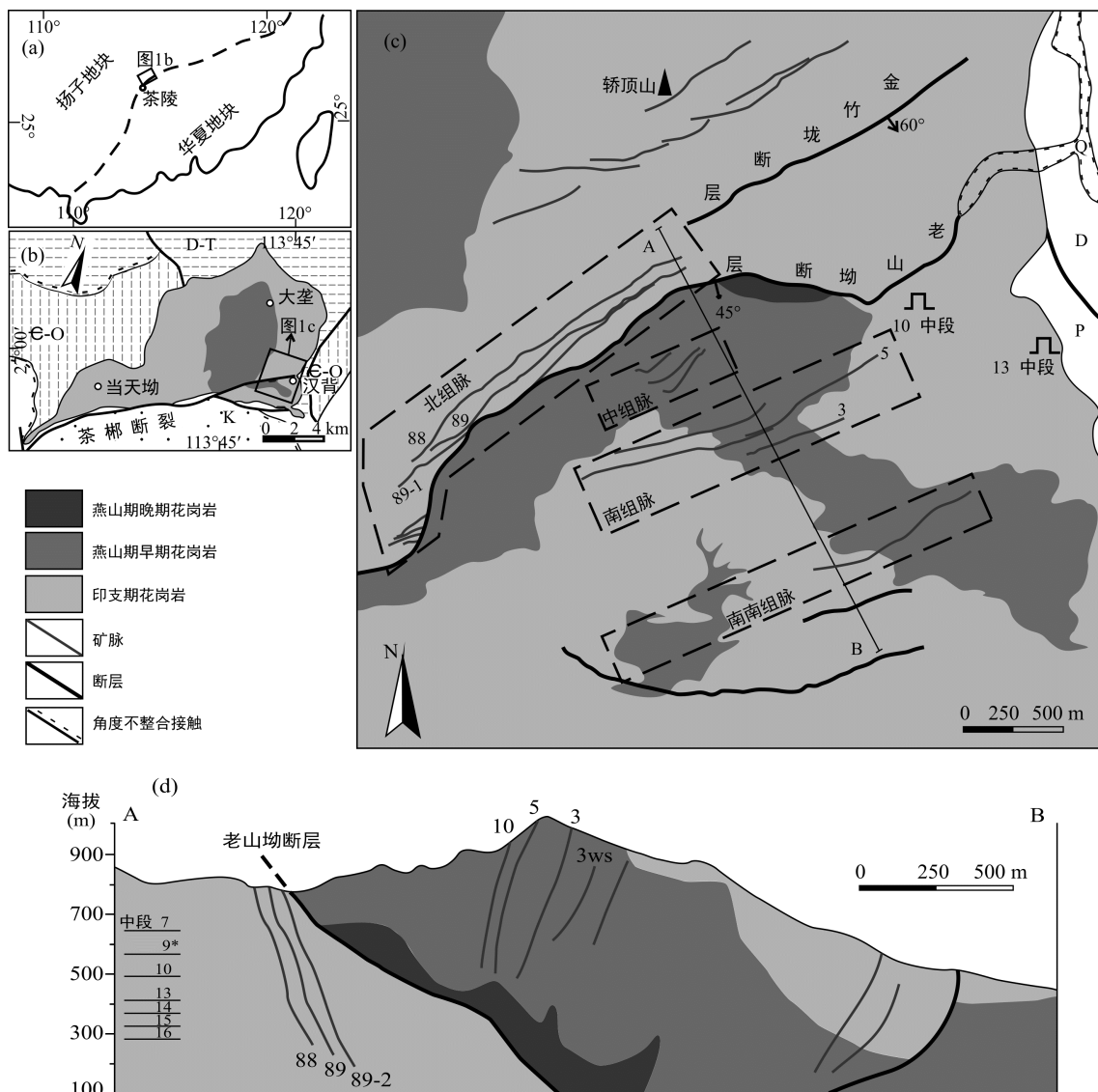


图 1 湘东钨矿区构造位置(a, b)、矿区地质简图(c)和典型的勘探剖面图(d)

Fig.1 Location (a, b), simplified geological map (c) and typical exploration profile (d) of the Xiangdong tungsten deposit, southeast Hunan province

湖南省地质矿产勘查开发局四一六队, 2011)。它可能最早出现在印支期, 造成燕山期花岗岩沿其断面侵入, 而后发生一定规模的逆冲, 成矿热液同时灌入并在先存的破裂中淀积成矿。对于所谓的后期逆冲活动是否形成了由矿脉充填的破裂, 目前有两种截然不同的看法, 一种认为矿脉是充填在由老山坳断层逆冲而形成的两组共轭裂隙中(王淑军, 2008; 马德成和柳智, 2010), 而另一种认为由矿脉充填的节理要早于老山坳断层, 二者之间不存在成因联系(陈国达, 1985)。但是, 在最近开展的成矿预测工作中, 老山坳断层却被认为是一条正断层, 属于茶榔断裂东北端的分支之一(湖南省地质矿产勘查开发局四一六队, 2012)。需要指出的是, 这些观点的提出主要基于区域地质分析, 缺乏露头尺度构造的证据。由于该区植被

覆盖度高, 一般只能利用矿山开凿的巷道进行观察, 加上岩体内缺乏良好的标志物, 增加了构造观察的难度。

考虑老山坳断层的重要性, 以上对其性质的不同认识必然会影响到矿区找矿工作的合理部署, 因此有必要深入研究该断层, 确定其运动方向和位移大小, 这正是本文研究的出发点。目前矿山内穿过老山坳断层的中段包括老山里 7 和 9 中段与 7、10、13、15 和 16 中段(图 1d), 给我们开展构造观察提供了十分难得的场所。

1 区域地质概况

湘东钨矿位于扬子地块与华夏地块交界处(图 1a), 属于南岭多金属成矿带中段(蔡杨等, 2012)。整

个矿床赋存在邓阜仙中生代复式花岗岩体的东南角。该岩体由界线分明的三期花岗岩构成(宋新华等, 1988; 蔡杨等, 2011; 黄卉等, 2011), 即主体的印支期灰白色粗粒似斑状黑云母花岗岩(锆石 U-Pb 年龄 230~218 Ma; 黄卉等, 2011; 蔡杨等, 2013)、燕山早期灰白色中粒二云母花岗岩(锆石 U-Pb 年龄 154.4±2.2 Ma; 黄卉等, 2011)和燕山晚期灰白色细粒白云母花岗岩(白云母 K-Ar 年龄 136~110 Ma; 宋新华等, 1988)。后两者在矿区内主要出露于老山坳断层上盘。

湘东钨矿床由上百条平行或近平行的含石英脉构成, 其中具有工业开采价值的矿脉十余条(湖南省地质矿产勘查开发局四一六队, 2011)。这些石英脉总体平直稳定, 主要呈透镜状、平板状或串珠状, 走向 NEE 至 EW, 倾角主要在 65°~80°(图 4c-d)。它们长 3~400 m, 以 10~100 m 居多; 宽 0.07~3.1 m, 主要集中在 1 m 以内。矿脉在空间上分布不均匀, 数条相邻、平行的矿脉可以组成更大规模的矿脉带, 即所谓的北组脉、中组脉、南组脉和南南组脉(图 1c), 其中前三组是矿山最重要的开采对象。中组脉普遍含有高品位的钨, 早已被采空; 南组脉正在开采, 仅在深部还剩有少量资源; 北组脉是目前正准备全面开采的对象。通过对 10 和 13 中段南、北组脉形

态统计测量(表 1、图 2), 我们发现区内矿脉中单一脉数少见, 常见的是由其连接成的脉, 即连接脉。前者呈透镜状, 长度小于 20 m, 最大宽度与长度的比值(宽长比)在 1.5×10^{-2} 以上, 而后者主要呈串珠状, 少数具有透镜状或平板状的平面形态, 长度大于 10 m, 宽长比小于 1.8×10^{-2} , 平均值可达 1.1×10^{-2} 。

矿脉内矿石矿物主要为黑钨矿和黄铜矿, 还有少量白钨矿、锡石、方铅矿、闪锌矿等。石英占脉石矿物 90% 以上, 另有少量萤石、方解石等(马德成和柳智, 2010)。与成矿有关的围岩蚀变以云英岩化、硅化和绢云母化为主, 局部有叶腊石化和高岭土化, 一般发育于较细小矿脉的周围, 而在粗大和大脉的侧旁往往较弱甚至不明显。

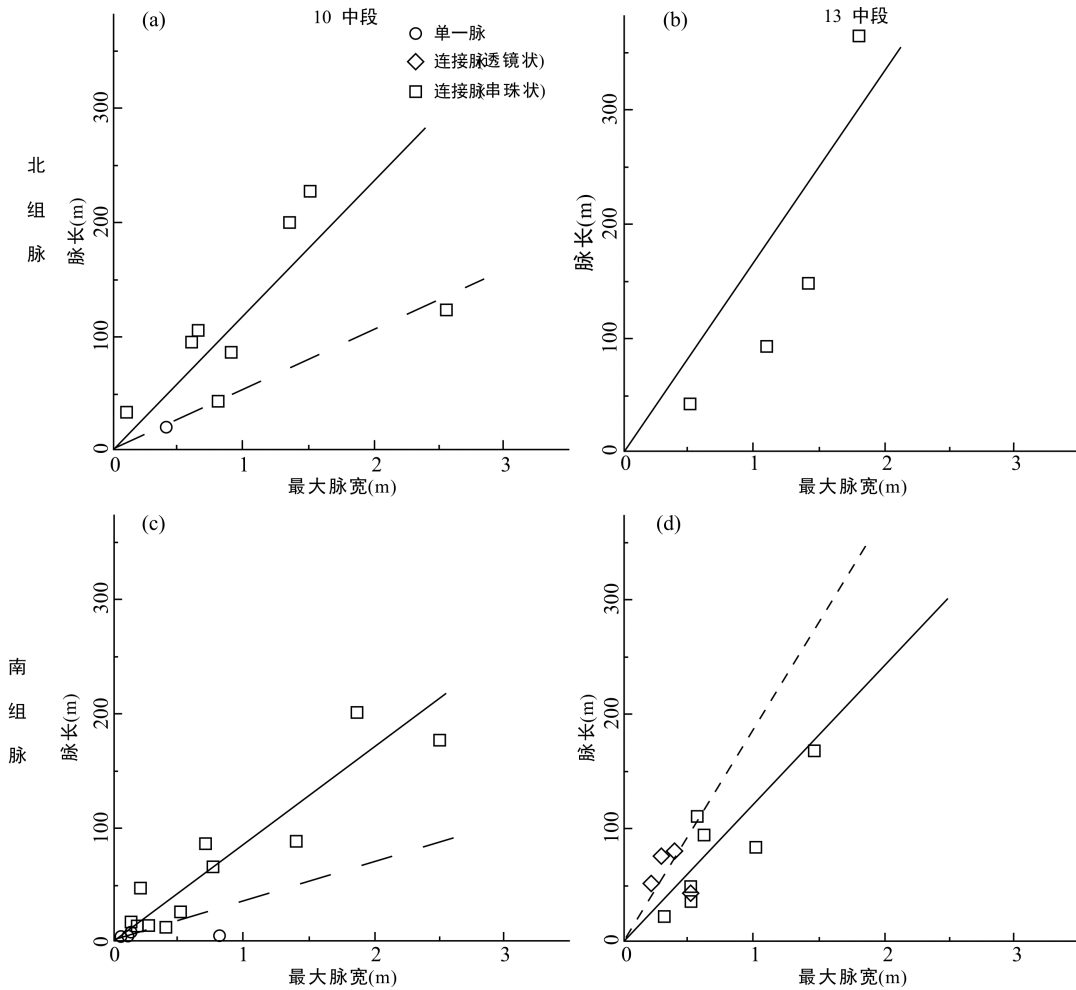
矿区内主要发育有两条较大规模的断层, 即老山坳断层和其东北侧的金竹笼断层。老山坳断层走向呈 NE-SW 向, 纵贯矿区长达 10 km 以上, 向东穿过岩体边界进入泥盆纪变质砂岩中, 向西可能连接到控制白垩纪红层盆地的茶榔断裂(湖南省地质矿产勘查开发局四一六队, 2012)。断层倾向 SE, 总体上倾角上陡下缓(图 1c、2a), 介于 26°~45°之间。除茶园里 9 中段外, 其余中段(10、13、15、16 中段)揭露的断层面上均发育 5~20 cm 厚的灰白色、黄褐

表 1 湘东钨矿石英脉形态参数统计表

Table 1 Statistics of shape parameters for quartz veins in the Xiangdong tungsten deposit, Southeast Hunan province

矿脉	参数	10中段	13中段	10+13中段
单一脉	数量	1	0	1
	脉宽(m)	0.40		0.40
	脉长(m)	20.20		20.20
	宽长比($\times 10^{-2}$)	2.0		2.0
北组脉	数量	8	4	12
	脉宽(m)	0.10~2.55	0.50~1.80	0.10~2.55
	脉长(m)	32.35~227.25	42.30~365.00	32.35~227.25
	宽长比($\times 10^{-3}$)	9.9±6.5	9.5±3.2	9.8±5.5
单一脉	数量	7	0	7
	脉宽(m)	0.07~0.11		0.07~0.11
	脉长(m)	3.10~6.70		3.10~6.70
	宽长比($\times 10^{-2}$)	4.4±6.3		4.4±6.3
南组脉	数量	11	7	18
	脉宽(m)	0.14~2.50	0.30~1.45	0.14~2.50
	脉长(m)	10.00~200.60	21.70~167	10.00~200.60
	宽长比($\times 10^{-3}$)	15±8.0	10±3.5	13±6.9
连接脉*	数量	0	4	4
	脉宽(m)		0.2~0.5	0.2~0.5
	脉长(m)		41.85~73.5	41.85~73.5
	宽长比($\times 10^{-3}$)		6.1±3.9	6.1±3.9

注: *为透镜状或平板状的连接脉; 宽长比值表示为宽长比测量结果的平均值与均方差。



实线、稀疏虚线和密集虚线分别代表串珠状连接脉、单一脉和透镜状连接脉的平均宽长比。矿脉形态参数取自文献湖南省有色地质勘查局二一四队(2010)。

图 2 矿脉最大脉宽-长度关系图

Fig.2 Length (L) -maximum aperture (A) plots for ore veins in the Xiangdong tungsten deposit

色断层泥(图 3a)。在断层泥中偶见有断层角砾, 呈不等轴状, 长轴接近平行于断层面, 粒径数厘米至十余厘米, 成分为硅质岩或硅化花岗岩。老山坳断层明显截断了矿脉(图 1c), 说明相对于后者, 断层的形成时代要晚。在茶园里 9 中段, 老山坳断层切断了其下盘属于北组脉的一条陡立矿脉(图 3b)。

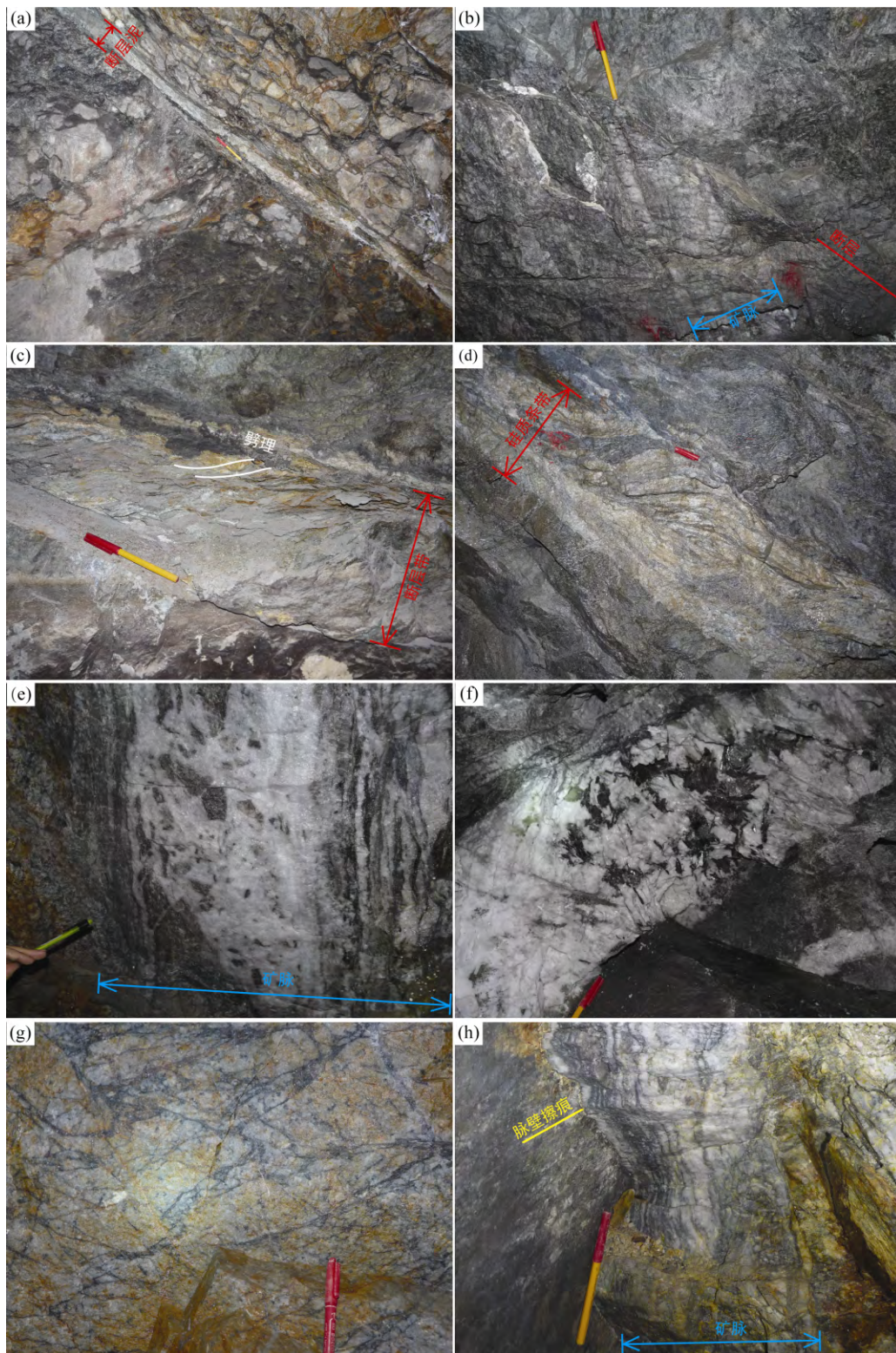
2 老山坳断层性质

尽管在矿区范围内可以通过 7 个中段直接观察到老山坳断层, 但是由于花岗岩中缺乏良好的标识物, 且断层带内反映运动学指向的构造现象少见, 我们仅在 15 和 16 中段内发现了一些诸如叶理构造和堆垛构造的现象, 它们均指示出老山坳断层的正断性质。此外, 断层两盘在矿脉结构和成分以及围岩变形的差异也佐证了这一判断。

2.1 运动学标识

老山坳断层的断层泥中经常可见一种由微破裂密集排列而成的细微结构, 呈薄片状或鳞片状, 因而可以利用二者的锐角来指示上盘的相对运动方向。这种结构一般总体上与断层带平行, 不具有明显的运动学指示意义。但是在 15 中段, 这种薄片状结构的产状(189° 26°)明显比断层的产状(150° 31°)缓(图 3c), 说明老山坳断层具有右行的正断性质。

在 16 中段, 数条长 15~20 cm、宽 2~5 cm 的暗灰色硅质条带出现在老山坳断层带中、上部, 它们叠置在一起, 并同时弯曲成开阔的背形构造(图 3d)。这种现象被解释为堆垛(duplex)构造: 沿着与断层平行的硅质条带上、下两侧分别为顶、底板断层, 其间发育着一系列相互平行、倾角较缓的小尺度断层, 它们以逆断层形式依次错开硅质条带。依据硅质条



(a) 老山坳断层带内一层厚约 5~10 cm 的断层泥, 老山里 7 中段; (b) 老山坳断层(产状: $145^{\circ} \quad 45^{\circ}$) 截开一条隶属于北组脉的矿脉, 不发育断层泥, 老山里 9 中段; (c) 老山坳断层带中局部发育着比断层面缓倾的叶理构造, 镜头向东, 15 中段; (d) 老山坳断层带内一层暗灰色条带沿断层重复叠置, 组成堆垛构造, 其底部发育厚约 5 cm 的灰白色断层泥, 镜头向东, 16 中段; (e) 北组脉的两侧发育着由灰黑色和白色条带间隔排列而成的条带状构造, 16 中段; (f) 在呈块状构造的南组脉内, 棕黑色板状黑钨矿自形粗大, 与脉壁斜交或正交生长, 15 中段; (g) 在强烈硅化的北组脉围岩中发育着网状的黑色硅质细脉, 16 中段; (h) 南南组脉内发育着像北组脉(e)那样的条带构造, 脉壁有近水平的擦痕, 民采洞。

图 3 老山坳断层及其附近矿脉的野外照片

Fig.3 Photographs showing the Laoshan'ao fault and ore veins in the vicinity

带的叠置方向可以推测老山坳断层上盘相对下盘向下滑动, 具有正断性质。

除此之外, 老山坳断层两盘还发育了大量与其平行或大致平行的小尺度断层(图 4b), 断距一般在 0.3~1.5 m 之间, 最大可达 3 m 左右。这些断层几乎不发育断层泥, 其上经常有一薄层的方解石膜, 有时在断层面上可见清晰的擦痕。根据断层阶步、两盘错开的石英细脉等现象, 判断这些断层具有正断或右行正断性质。

2.2 两盘矿脉差异

南组脉和北组脉分别处于老山坳断层上盘和下盘, 在矿物组成、矿脉结构、围岩变形等方面均存在显著差异。

2.2.1 组成和结构

北组脉往往发育有复杂的结构, 表现为平行脉壁的条带构造。条带构造分布在脉体两侧(图 3e)或全部, 由白色和(或)黑色条带交替排列而成, 条带等厚或不等厚, 宽度 1~5 cm。黑色条带富含毒砂、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿和黄铁矿等硫化物, 石英呈灰白色或烟灰色。白色条带主要由灰白色石英组成, 石英晶体的延长方向大致与脉壁垂直, 说明形成时的破裂位移基本上垂直脉壁, 意味着脉体经历了多期破裂-愈合作用(Cervantes, 2007)。

与北组脉不同的是, 南组脉结构单一, 以块状构造为特征。黑钨矿晶体自形粗大, 常聚集一起, 呈柱状或放射状, 与脉壁垂直或斜交, 可以占据着脉体的大部分宽度(图 3f)。其周围为灰白色石英以及少量硫化物。

根据前人的研究成果(湖南省有色地质勘查局二一四队, 2010), 该矿床由早至晚划分三个主要的成矿阶段, 即高温氧化物(黑钨矿和锡石)阶段、中温硫化物阶段和低温碳酸盐阶段(Lehmann, 1990)。于是, 考虑到灌入的矿液都来自深处, 一种对两组脉上述差别的合理解释是, 南组脉和北组脉的形成深度不同: 南组脉形成在浅处, 只经历一次的拉开和充填, 以高温矿化为主, 而北组脉形成在深处, 经历了多次破裂-愈合, 以高温和中温矿化为主。目前, 在同一中段(如 10 和 13 中段)形成在深处的北组脉出现在断层下盘, 形成在浅处的南组脉出现在断层上盘。这表明相对上盘, 下盘经历过大幅度的抬升, 也就是说, 老山坳断层具有正断层性质。

2.2.2 围岩变形

北组脉围岩广泛遭受了以硅化和绢云母化为主的强烈蚀变(湖南省地质矿产勘查开发局四一六队,

2012)。在接触带附近的围岩中密集发育有多方向、被黑色硅质充填的破裂, 构成网脉或细脉带; 局部甚至出现碎裂现象(图 3g), 其中的角砾多呈次棱角状, 少部分呈次圆状或次棱角状。硅质充填物由石英微晶组成, 石英呈等轴粒状, 粒径 50 μm 左右, 具有典型的三连边结构。相比而言, 南组脉整体上不仅具有轻微的围岩蚀变, 而且具有微弱且没有被充填的破裂。

在地壳浅处, 岩石变形是局限性的, 表现为脆性的破裂, 随着深度增加通常会转变成半脆性的碎裂(Sibson, 1977; Strehlau, 1986; Evans et al., 1990)。按此理解, 北组脉应要比南组脉形成得更深。同样地, 它们分别出现在同一中段(如 10 和 13 中段)断层下盘和上盘, 说明老山坳断层具有正断性质。

3 讨论

老山坳断层作为湘东钨矿区的主要断层, 其性质的确定必然会关系到矿区找矿工作的部署。在上述观察的基础上, 本节将探讨老山坳断层的位移量、断层与成矿之间的关系和矿脉连接方式。

3.1 成矿后断层

考虑到在湘东钨矿区内, 只有老山坳断层上盘存在燕山期花岗岩, 同时矿脉的形成可能需要大尺度的导矿构造来运移成矿热液, 过去的地质勘查和科研工作都认为老山坳断层形成于成矿之前, 并在之后多次活动, 燕山期岩浆和后续的成矿热液沿断层侵入或上涌(孙振家, 1990; 马德成和柳智, 2010; 湖南省有色地质勘查局二一四队, 2010; 湖南省地质矿产勘查开发局四一六队, 2011)。事实上, 在湘东钨矿北西方向 2.5 km 处是一个出露面积达 30 km^2 以上的燕山期花岗岩株(图 1b), 老山坳断层带及其附近没有明显地反映含矿热液沿其运移的蚀变分带现象。与此观点相反, 我们认为老山坳断层形成于成矿之后, 理由如下:

(1) 该断层明显截断了北组脉中的部分矿脉(图 1c), 说明断层是在高温矿脉形成之后形成的。

(2) 该断层内普遍发育着断层泥(图 3a), 至少表明断层曾在低温环境强烈活动过。

(3) 断层两盘的矿脉(即北组脉和南组脉)在矿物组成、结构构造和围岩变形甚至围岩蚀变上存在着系统性的差异, 不太支持同成矿期断层活动的观点。

3.2 断层位移量

如前所述, 老山坳断层是形成于成矿后的一条正断层, 明显断开了下盘的北组脉。这样被断开的

北组脉会在断层上盘何处出现？这是我们关心的问题。在断层上盘的三组脉(即中组脉、南组脉和南南组脉)中，中组脉和南组脉拥有类似的矿物成分、结构构造(图 3e)和围岩变形(图 3g)，与北组脉的特征相去甚远，因而无法匹配。南南组脉较窄小，在地表断续出现，以微脉带、细脉带或宽脉带形式出现，脉体内同样发育与北组脉具有极其相似的结构。即由灰白色和黑色石英平行脉壁交替排列构成的条带构造(图 3h)；围岩发生硅化和少量的绿帘石化，但并未发生碎裂。因此，我们认为南南组脉与北组脉很可能为被老山坳断层错断的同一组脉。

于是，地质图上沿老山坳断层倾向，南南组脉至北组脉范围的距离即可以视作老山坳断层的水平断距，约 1.5~2.0 km。取各中段测得的断层倾角的平均值 35° ，加上 15 中段断层泥中叶理与断层面之间的夹角指示出断层的右行正断性质，进一步计算出垂直断距约为 1.1~1.4 km，总断距约为 2.4~3.1 km。考虑到老山坳断层本身的产状在深度上存在一些变化(图 4a)，且仅局部可见反映断层滑动的构造

现象(图 3c)，该总断距值目前只能是一个粗略的近似值。

区域上，老山坳断层向西延至区域性的茶榔断裂，被认为是该断裂的一个分支(湖南省地质矿产勘查开发局四一六队，2012)。在茶榔断裂控制的白垩纪红层盆地中，沉积厚度在该断层附近达到最大，约 1.5 km (湖南省地质矿产勘查开发局四一六队，2011)，可以作为茶榔断裂垂直断距的下限。有趣的是，这一数值竟然与前面得到的老山坳断层垂直断距相当，意味着沿着盆地的边界断层至基岩山区的断层，所接受的区域伸展位移量却没有明显变化。

3.3 矿脉的连接

前述的观察表明，矿脉具有张裂成因，形成在燕山期岩体侵位之后的 NW-SE 向或 NNW-SSE 向区域性伸展体制下。从 10 和 13 中段南、北组脉统计结果(图 2，表 1)上看，单一脉呈透镜状，长不超过 20.2 m，宽最大 0.4 m，宽长比在 1.7×10^{-2} 以上；连接脉主要呈串珠状，脉长均大于 10 m，宽不小于 0.1 m，宽长比小于 2.0×10^{-2} ，平均可达 1.1×10^{-2} 。但是，在

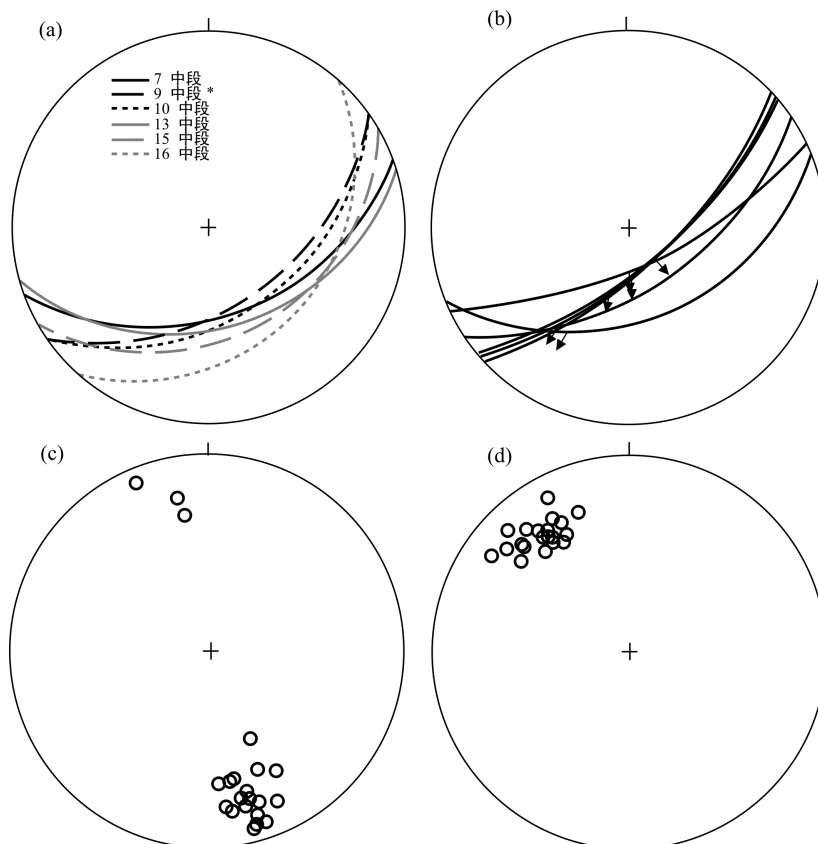


图 4 老山坳断层(a)及邻近断层(b)吴氏网投影图和南(c)、北(d)组矿脉的下半球等面积投影图

Fig.4 Low-hemisphere, equal-area projection of the Laoshan'ao fault (a), its secondary faults (b), and the south (c) and north (d) ore vein sets, respectively

13 中段南组脉还发育有类似于单一脉的透镜状或薄板状脉体，其长度可达 41 m 以上，远超出了单一脉的长度范围，但其宽长比远小于单一脉甚至相应位置的连接脉(图 2d)，我们认为这类脉体是发育程度更高的连接脉。从单一脉到连接脉反映出矿脉的不同演化阶段(图 5)。当相邻的单一脉连接成更长的脉时，矿脉的宽长比明显减小，表明随着矿脉尺度加大，矿脉急剧变长，意味着这些破裂的发育程度尚未达到饱和状态。类似的现象也见于谢焱石等(2004)对沃溪金石英脉的观测。

对比其他石英脉的测量结果(表 2)，我们注意到无论单一脉还是连接脉，湘东钨矿区石英脉的宽长比都要大近一个数量级。表 2 中，前人测量的脉体都是在露头范围内的，长度为数厘米至数米，普遍远小于湘东钨矿区矿脉长度。本文矿脉参数的获得是在矿区中段试料图上进行的。尽管矿脉尾部尖灭部分可能因为试料图的精度而没有标识出，会导致目前得到的脉体宽长比偏大，但是考虑到其值比其他石英脉的测量值大了一个数量级，我们认为忽略末端长度显然不是造成这种不同长度脉体宽长比相差悬殊的原因。一种可能的解释是石英脉的宽长比与观察的脉体尺度有关，即随着脉长的增大，脉体宽长比会相应增大。根据 Dugdale 脆-韧性破裂模型，在连续介质中，脉体的宽长比取决于围岩的泊松比、屈服强度和剪切模量等岩石力学参数(Dugdale, 1960; Vermilye and Scholz, 1995)。实验研



图 5 矿脉可能经历了独立扩展(a)、不完全连接(b)和完全连接(c)三个生长阶段

Fig.5 An imaginary growth scenario of an ore vein

究(Jaeger and Cook, 1976; Paterson, 1978; Bandis, 1980; Heuze, 1980; 马瑾, 1987)表明，随着样品尺度的增大，含裂隙岩石的力学参数(如剪切模量和屈服强度)会显著降低。于是，随着脉体尺度的增大，观测到的长宽比会减小。

3.4 找矿意义

如前所述，过去普遍认为老山坳断层形成于印支期花岗岩侵位之后，是一条曾多次活动、导岩导矿的逆断层，但并没有确定出该断层在各期次(成矿前、成矿期和成矿后)的活动性质和位移量。在此认识下，已开展的找矿工作部署都强调四组矿脉(北组脉、中组脉、南组脉和南南组脉)在空间上呈等距性分布，且矿脉沿着该断层两侧对称分布(湖南省有色地质勘查局二一四队，2010; 湖南省地质矿产勘查开发局四一六队，2011)，暗示着老山坳断层在成矿后期活动不是主要的。

然而，本文研究表明老山坳断层是一条成矿后的正断层。这样，位于断层下盘的矿脉(北组脉)与上盘矿脉(中组脉、南组脉和南南组脉)之间就不存在必然的等距分布关系。如果有的话，那么应纯属巧合。考虑到北组脉(图 3e)和南南组脉(图 3h)具有相似的矿脉结构，我们认为二者在断层形成前是同一组脉(图 6)。如果这种认识是正确的，那么不难得出以下的推断：

(1) 在老山坳断层下盘，与上盘中组脉和南组脉对应的组脉不会像原有认识的那样出现在北组脉以南，而应当在北组脉以北出现。事实上，在矿区北缘，轿顶山一带发育大量含矿石英脉，它们是否与中、南两组脉存在对应关系尚需进一步确认。

(2) 尽管在地表延伸不稳定，南南组脉在深处会变得像北组脉那样宽大且延伸稳定。这是今后找矿勘探应该关注的有利靶区。

于是，我们提出在断层下盘北组脉的北边寻找与中组脉和南组脉对应的矿脉、在断层上盘南南组脉的深部寻找北组脉的新找矿思路。

表 2 不同围岩中石英脉形态参数一览表

Table 2 Shape parameters for quartz veins in various country rocks

文献	围岩	脉长范围(m)	宽长比	
			单一脉	连接脉
本文(北组脉)	花岗岩	20.20~227.25	2.0×10^{-2}	1.0×10^{-2}
本文(南组脉)	花岗岩	3.10~200.60	4.4×10^{-2}	1.3×10^{-2}
Vermilye and Scholz, 1995	砾岩	0.05~0.90	3.1×10^{-3}	
Vermilye and Scholz, 1995	砂岩	0.11~0.55	3.3×10^{-3}	
谢焱石等, 2004	板岩	1.3~100.0		2.2×10^{-3}
Klimczak et al., 2010	花岗岩	1.3~13.0		8.4×10^{-4}

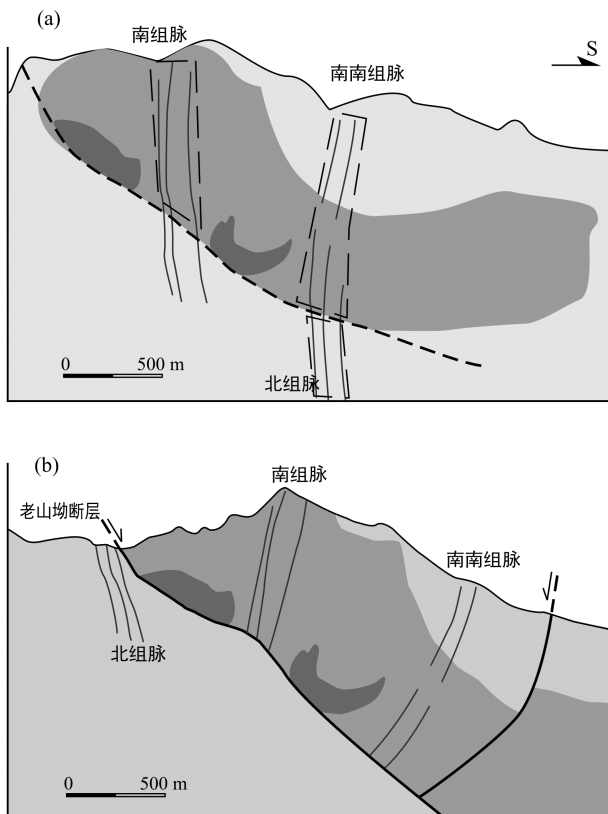


图 6 老山坳断层形成前(a)和形成后(b)的示意剖面图
Fig.6 Diagrams showing profiles before (a) and after (b) the formation the Laoshan'ao fault

4 结 论

(1) 湘东钨矿区老山坳断层具有正断层性质, 其依据来自宏观变形构造和两盘附近的矿脉两方面。前者包括断层带内缓于断面的叶理构造和指示上盘相对向下运动的堆垛构造以及其附近平行或近平行该断层的次级正断层; 后者包括上、下两盘矿脉在矿脉结构、构造和围岩变形存在明显的差异, 表明上盘矿脉(南组脉)在形成深度和变形深度上都比下盘矿脉(北组脉)浅, 意味着该断层有正断层性质。

(2) 诸多地质现象表明老山坳断层形成于成矿之后, 例如该断层明显截断北组脉; 沿着断层带未出现反映含矿热液沿其运移的蚀变分带现象; 断层带内普遍发育断层泥。这与以往的认识不同。

(3) 矿区矿脉可分为单一脉和连接脉两类。根据矿区中段试料图所获得的矿脉形态参数, 前者的平均宽长比明显大于后者, 分别为 4.0×10^{-2} 和 1.1×10^{-2} 。该值要比前人在露头上测量得到的石英脉宽长比大近一个数量级, 可能说明脉体宽长比与观察的脉体尺度有关。

(4) 考虑到南组脉与北组脉具有平行脉壁、黑

白相间的条带构造, 我们认为二者在老山坳断层形成前是同一组脉, 由此推断该断层的水平断距可达 1.5~2 km, 总断距约 2.4~3.1 km。进一步可以重建出老山坳断层两盘矿脉之间的联系: 在断层下盘与中组脉和南组脉对应的矿脉应出现在北组脉以北, 被断层错掉的北组脉会在上盘南组脉的深部再现。根据这种对应关系, 今后矿区找矿勘应该重点放在寻找断层两盘对应的矿脉。

致谢: 在坑道观察和资料收集过程中, 得到了湖南有色集团湘东钨业有限公司王超、王文龙、罗航、张天寿等和湖南省地质矿产勘查开发局四一六队刘金云的热情帮助。谨以此文纪念已故的大地构造学家和成矿构造学家陈国达院士。

参考文献(References):

- 蔡杨, 陆建军, 马东升, 黄卉, 张怀峰. 2013. 湖南邓阜仙印支晚期二云母花岗岩年代学、地球化学特征及其意义. 岩石学报, 29(12): 4215-4231.
- 蔡杨, 马东升, 陆建军, 黄卉. 2011. 湖南邓阜仙岩体和锡田岩体的地球化学及成矿差异性对比. 矿物学报, 2011(增刊): 4-6.
- 蔡杨, 马东升, 陆建军, 黄卉, 章荣清, 屈文俊. 2012. 湖南邓阜仙钨矿辉钼矿铼-钨同位素定年及硫同位素地球化学研究. 岩石学报, 28(12): 3798-3808.
- 陈国达. 1985. 成矿构造研究法. 北京: 地质出版社.
- 陈国达. 1987. 成矿学及其在中国加强研究的必要性. 大地构造与成矿学, 11(2): 105-114.
- 陈科. 2011. 构造与成矿之间的关系. 西部探矿工程, 23(4): 109-110.
- 湖南省有色地质勘查局二一四队. 2010. 湖南省茶陵县邓阜仙钨矿区第三期详查报告.
- 湖南省地质矿产勘查开发局四一六队. 2011. 湖南省茶陵县邓阜仙矿区湘东钨矿资源储量核实报告.
- 湖南省地质矿产勘查开发局四一六队. 2012. 湖南锡田地区钨锡矿成矿规律及靶区预测研究实施方案.
- 黄卉, 马东升, 陆建军, 蔡杨, 谢旭. 2011. 湖南邓阜仙复式花岗岩体的锆石U-Pb年代学研究. 矿物学报, (增刊): 590-591.
- 马德成, 柳智. 2010. 湖南茶陵湘东钨矿控矿构造研究. 南方金属, 176(5): 26-29.
- 马瑾. 1987. 构造物理学概论. 北京: 地震出版社: 82-86.
- 宋新华, 周珣若, 吴国忠. 1988. 邓阜仙花岗岩熔融实验研究. 地质科学, 23(3): 247-258.
- 孙振家. 1990. 邓阜仙钨矿成矿构造特征及深部成矿预测. 大地构造与成矿学, 14(2): 139-150.

- 王淑军. 2008. 湖南省茶陵邓阜仙钨、锡等多金属矿床地质特征、成矿规律及找矿. 怀化学院学报, 27(11): 157–160.
- 谢焱石, 谭凯旋, 陈广浩. 2004. 湘西沃溪金锑钨矿床含金石英脉的分形生长动力学. 地质论评, 50(4): 440–447.
- 翟裕生, 林新多. 1993. 矿田构造学. 北京: 地质出版社: 36–41.
- 曾庆丰. 1984. 构造矿床学简论. 地质科学, 19(4): 461–463.
- Bandis S. 1980. Experimental Studies of Scale Effects on Shear Strength, and Deformation of Rock Joints. University of Leeds Ph.D Dissertation.
- Cervantes P. 2007. Tectonic Fibrous Veins: Initiation and Evolution. Ouachita Orogen, Arkansas. Texas: Texas A&M University: 4–49.
- Dugdale D S. 1960. Yielding of steel sheets containing slits. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 8(2): 100–104.
- Evans B, Fredrich J T and Wong T F. 1990. The brittle–ductile transition in rocks: Recent experimental and theoretical progress. *The Brittle–Ductile Transition in Rocks*, 56: 1–20.
- Heuze F E. 1980. Scale effects in the determination of rock mass strength and deformability. *Rock Mechanics*, 12(3–4): 167–192.
- Jaeger J C and Cook N G W. 1976. *Fundamentals of Rock Mechanics*. New York: John Wiley.
- Klimczak C, Schultz R A, Parashar R and Reeves D M. 2010. Cubic law with aperture-length correlation: Implications for network scale fluid flow. *Hydrogeology Journal*, 18(4): 851–862.
- Lehmann B. 1990. Metallogeny of Tin. Lecture notes in earth sciences. Berlin: Springer Verlag: 32.
- Paterson M S. 1978. Theories of Brittle Failure // Paterson M S and Wong T. *Experimental Rock Deformation — The Brittle Field*. Springer Berlin Heidelberg: 51–70.
- Sibson R H. 1977. Fault rocks and fault mechanisms. *Journal of the Geological Society*, 133(3): 191–213.
- Strehlau J. 1986. A discussion of the depth extent of rupture in large continental earthquakes. *Earthquake Source Mechanics*, 37: 131–145.
- Vermilye J M and Scholz C H. 1995. Relation between vein length and aperture. *Journal of structural Geology*, 17(3): 423–434.

Determination of Slip Sense of the Laoshan'ao Fault in the Xiangdong Tungsten Deposit (Southeast Hunan) and its Implications for Mineral Exploration

NI Yongjin^{1,2}, SHAN Yehua¹, WU Shichong³, NIE Guanjun^{1,2}, ZHANG Xiaoqiong^{1,2}, ZHU Haofeng³ and LIANG Xinquan¹

(1. CAS Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. 416 Geological Team, Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Hunan Province, Zhuzhou 412007, Hunan, China)

Abstract: Different viewpoints exist about the formation age, slip sense and displacement of the Laoshan'ao fault, the most important fault in the Xiangdong tungsten deposit, southeast Hunan province, China. Structural observations within the fault zone and nearby, comparison in mineral composition, structure and horst deformation between ore sets in the walls, and the type and distribution of alteration in the area reveal a post-metallogenic, normal nature of the fault. Considering both the north and south-south ore sets have a contact-parallel, banded structure, an alternation of black and white bands, we believe that they should have come from a single ore set before the fault formation. Accordingly, the Laoshan'ao fault would have a horizontal throw of 1.5–2.0 km. Both single and connected ore veins have aspect ratios of no less than 0.01. The ratios are much larger than the measurements made at the outcrop scale, implying the influence in aspect ratio of vein size. Based upon the above analysis, we suggest that future ore prospecting in the area should focus on the footwall for vein sets corresponding with the middle and south ore sets and in the hanging wall for a vein set corresponding with the north ore set.

Keywords: fault slip sense; ore-forming age; ore veins; Laoshan'ao fault; Xiangdong tungsten deposit