

文章编号: 1000-6524(2003)03-0265-08

# 岩石变形对粘土矿物结晶生长影响的初步研究 ——以江西金山金矿为例

李晓峰<sup>1,2</sup>, 华仁民<sup>2</sup>, 毛景文<sup>1</sup>, 季峻峰<sup>2</sup>

(1. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037; 2. 南京大学 地球科学系, 南京 210093)

**摘要:** 作为流体作用过程中水-岩反应的产物, 粘土矿物可以帮助人们认识水-岩反应的机制和流体活动的特征。本文以江西金山金矿为例, 通过对热液蚀变粘土矿物伊利石和绿泥石结晶度、平均结晶大小和晶格应变的测定, 讨论了岩石变形对伊利石和绿泥石结晶生长差异的影响。在岩石应变较弱、水/岩比较小的糜棱岩带, 伊利石的平均结晶大小与结晶度成负相关, 而在岩石应变较强、水/岩比较大的超糜棱岩带, 绿泥石的平均结晶大小与结晶度成正相关。由应变较弱的蚀变糜棱岩带到应变较强的蚀变超糜棱岩带, 伊利石的结晶度有变小的趋势, 而绿泥石的结晶度则基本保持不变。认为在成矿流体作用过程中, 粘土矿物的形成和特点不仅受水/岩比的影响, 而且在岩石变形过程中, 岩石的应变和恢复速率也影响粘土矿物的结晶大小; 伊利石和绿泥石平均结晶大小与其结晶度之间的关系可以反映岩石变形的机制和行为。

**关键词:** 成矿流体; 粘土矿物; 伊利石; 绿泥石; 岩石变形; 结晶度; 应变速率; 金山金矿

中图分类号: P578.962

文献标识码: A

## The influence of rock deformation on the crystallinity of clay minerals: a case study of the Jinshan gold deposit in Jiangxi Province

LI Xiao\_feng<sup>1,2</sup>, HUA Ren\_min<sup>2</sup>, MAO Jing\_wen<sup>1</sup> and JI Jun\_feng<sup>2</sup>

(1. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Department of Earth Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** Being products of water-rock interaction during the migration of fluids, clay minerals can help us to understand the mechanism of water-rock interaction and features of fluids. With the Jinshan gold deposit in Jiangxi Province as an example, the authors determined the crystallinity, mean crystal size and lattice strain of illite and chlorite and, on such a basis, discussed the difference of crystallinity, mean crystal size and lattice strain between illite and chlorite caused by deformation of mylonite and untramyronite. There exist strong negative correlation between crystal size and crystallinity of illite in altered mylonite of low strain and low water/rocks ratios, and positive correlation between crystal size and crystallinity of chlorite in altered untramyronite of high strain and high water/rocks ratios. From altered mylonite to altered untramyronite, the crystallinity of illite decreases whereas that of chlorite shows no obvious variation with the increasing strain. It is held that the formation of clay minerals is affected not only by water-rock interaction but also by the strain rate and recovery rate during rock deformation. The relationship between crystallinity and crystal size of illite or chlorite can reflect the behavior and mechanism of deformed rock.

**Key words:** ore-forming fluid; clay mineral; illite; chlorite; rock deformation; crystallinity; strain rate; Jinshan gold deposit

研究热液蚀变产生的粘土矿物, 对了解热液流体-岩石作用过程的温度、压力、氧逸度、硫逸度和流体的组成具有重要意义。人们已经注意到了不同热液环境中粘土矿物的不同特

征(季峻峰等, 1997; Martinez-Serrano and Dubois, 1998; Celik *et al.*, 1999; 金章东等, 2000), 但流体成矿作用过程中粘土矿物的形成及其特征研究还处于探索阶段(Celik *et al.*, 1999;

收稿日期: 2002-12-09; 修订日期: 2003-03-17

基金项目: 国家基础研究重点规划资助项目(G1999043200)

作者简介: 李晓峰(1971-), 男, 博士, 从事矿物、岩石和矿床学研究。

Bechtel *et al.*, 1996, 1999, 2000; 李晓峰等, 2002a, 2002b)。Zang & Fyfe (1995) 讨论了巴西 Igrarape Bahia 金矿热液蚀变绿泥石与金成矿作用的关系; 金章东等 (2000) 认为德兴斑岩铜矿的品位与伊利石的结晶度有很好的正相关; Merriman 等 (1995) 研究了苏格兰推覆地体变质泥岩中与应变有关的云母和绿泥石结晶生长的差异; Arkai 等 (2000) 利用 TEM 和 XRD 方法对与变质泥岩和变质铁镁质岩有关的成岩过程和低级变质过程中的绿泥石的演化进行了较为系统的研究; Giorgetti 等 (2000) 讨论了伊利石中的亚颗粒边界对伊利石结晶度的影响; 李晓峰等 (2002) 的研究也表明银山多金属矿床的金铜矿化与绿泥石化有关, 而铅锌银矿化与伊利石化有关。但成矿流体作用过程中, 岩石的变形作用对粘土矿物的形成及其特征研究还处于萌芽阶段。本文以江西金山金矿为例, 初步探讨了流体作用过程中岩石的变形对粘土矿物形成的影响。

## 1 地质背景

金山金矿床位于江西德兴铜金矿集区, 赋存于金山韧性剪切变形带内, 其主体构造由江光-富家坞及八十源-铜厂两条北东向走滑剪切带构成 (李晓峰等, 2002b)。矿区地层主要由中元古代双桥山群组成, 其岩性为板岩、千枚岩、变质晶屑凝灰岩及变质杂砂岩夹多层变余安山玄武岩。区内岩浆活动比较发育, 除晋宁期变余角闪辉石岩、橄辉辉石岩外, 还有海西期辉石岩和闪长岩及燕山期中酸性花岗闪长斑岩、黑云母花岗岩、英安斑岩、石英闪长玢岩、辉绿玢岩等。

金山金矿严格受金山韧性剪切带的控制。金山韧性剪切带具有变形、蚀变作用的双重性, 从剪切带边部向中心部位, 随着剪切作用的增强, 热液流体的渗透交代愈加强烈, 所产出的蚀变类型、蚀变强度、矿物的共生组合以及金矿化的强度具有时空上的依存关系, 从而形成构造岩-蚀变-金矿化三位一体的分带现象 (韦星林, 1996)。金矿化类型主要有蚀变岩型和含金石英脉型两类。蚀变岩型金矿体产于下部黑色含炭千枚岩和中部凝灰质粉砂质千枚岩之间的韧性剪切带强变形部位, 矿体呈层状、似层状、透镜状产出, 产状平缓, 倾角  $10^{\circ} \sim 35^{\circ}$ , 与片理产状基本一致, 剖面上具舒缓波状, 矿石品位较稳定, 一般为  $(7 \sim 30) \times 10^{-6}$ 。该矿化类型规模大, 占矿床储量的 95% 以上。含金石英脉型金矿体主要产于蚀变糜棱岩型金矿体上部或穿插其中, 呈脉状、透镜状产出, 沿走向、倾向常尖灭再现, 金品位较高, 平均  $20.75 \times 10^{-6}$ 。该类型矿石规模小, 且极不稳定。矿石的组成矿物比较简单, 主要的金属矿物为黄铁矿, 其次为闪锌矿、黄铜矿及方铅矿等。脉石矿物主要为石英, 其次为绢云母、钠长石、铁白云石、绿泥石等。与成矿作用有关的变形序列大致可以划分为 3 个时期: 晋宁期的低绿片岩相区域变质作用使双桥山群中的金活化、迁移和初步富集; 海西期的韧性剪切变形使金进一步活化、迁移、富集成矿; 成矿作用之后, 金山金矿主要经历了后期破裂阶段 (韦

星林, 1996; 谭铁龙等, 1997; 李晓峰, 2001)。

## 2 蚀变岩石的变形特征

### 2.1 变形岩石类型

金山韧性剪切带中的蚀变岩石符合国际上公认的糜棱岩的定义和标志 (Snoke and Tullis, 1998), 因此, 可归属于糜棱岩系岩石。根据叶理、拉伸线理的发育程度、残斑与基质的比例和粒度大小等 (Snoke and Tullis, 1998), 可进一步划分为蚀变糜棱岩、蚀变超糜棱岩等 (胡志国, 1991)。蚀变超糜棱岩及其中的石英脉构成矿体。主矿体主要赋存于蚀变超糜棱岩中。蚀变超糜棱岩与区域变质岩的区别在于前者仅出现在韧性剪切带中, 而且其中发育有韧性剪切造成的拉伸线理和不对称显微构造。

### 2.2 微构造及显微构造特征

野外地质观察发现, 带内岩石发育一组近水平的透入性的分异流劈理, 它完全置换了地层层理和板劈理; 柔性地段可见 a 型褶皱; 强应变带有明显的拉伸线理、S-C 构造、旋转碎斑构造等。显微镜下可见石英的波状消光、核幔构造、变形纹、变形带、动态重结晶、拔丝构造, 长石的双晶弯曲、膝折及晶体破裂、黄铁矿的压力影以及矿物的旋转碎斑系、云母鱼、显微 S-C 构造等各种显微构造 (图 1)。上述特征表明金山剪切带属于 Snoke & Tullis (1998) 所称的摩擦-粘性剪切带。

### 2.3 岩石变形的物理条件

#### (1) 韧性剪切带形成的温度

带中稳定的矿物组合为绢云母、绿泥石、钠长石、石英, 没有新生的黑云母出现, 说明形成温度较低, 结合显微构造特征, 确定韧性剪切带形成温度为  $250^{\circ}\text{C}$  左右。这与石英包裹体以及绿泥石地质温度计所测得的结果是基本一致的 (李晓峰, 2001)。

#### (2) 韧性剪切带的差异应力

由于动态重结晶作用很容易达到稳态阶段 (林传勇等, 1994), 因此, 本文采用 Mercier (1977) 的湿态条件下重结晶粒度应力计来确定韧性剪切带形成时的差异应力, 计算公式为:  $\sigma_1 - \sigma_3 = 3.81d^{-0.71}$ ,  $\sigma_1 - \sigma_3$  是差异应力,  $d$  是重结晶石英颗粒粒度 (单位  $\mu\text{m}$ )。根据金山金矿糜棱岩和超糜棱岩重结晶石英颗粒的粒度计算形成糜棱岩时的差异应力为  $66.58 \sim 80.14 \text{ MPa}$ , 平均为  $72.2 \text{ MPa}$ ; 形成超糜棱岩时的差异应力为  $65.04 \sim 72.70 \text{ MPa}$ , 平均为  $69.18 \text{ MPa}$  (表 1), 并据此推测金山韧性剪切带形成时的差异应力约为  $71 \text{ MPa}$ 。

#### (3) 韧性剪切带的应变速率

温度和差异应力确定后, 用岩石高温流变律推导应变速率, 公式 (Tsen *et al.*, 1987) 为:  $\dot{\epsilon} = A \exp[-H/RT]^n$ , 其中  $\dot{\epsilon}$  为应变速率,  $A = 5.05 \times 10^{-6} \text{ MPa/n}^{-1}$ ,  $H$  为蠕变活化能,  $R$  为气体常数,  $T$  是绝对温度,  $\sigma$  是差异应力 (单位  $\text{MPa}$ ),  $n$  (应力指数) = 2.6。将金山韧性剪切带的形成温度  $250^{\circ}\text{C}$  代入该

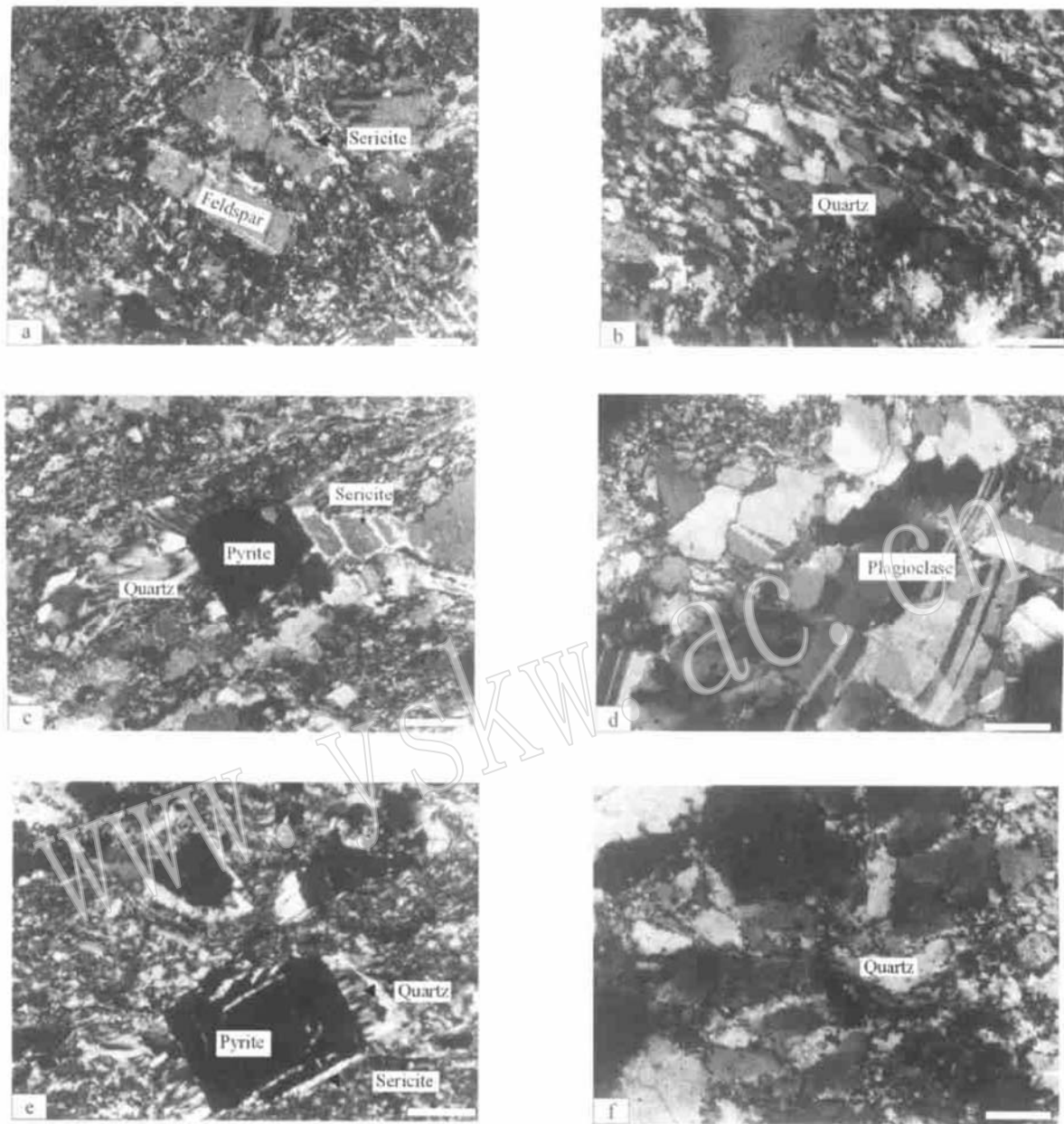


图 1 江西金山金矿蚀变变形岩石显微构造特征(单位:0.05 mm)

Fig. 1 Sketches from photomicrographs of altered mylonitic rock in the Jinshan gold deposit

a—破裂的长石及其绢云母化;b—蚀变糜棱岩中单个微剪切带;c—围绕黄铁矿的压力影,主要由白云母和石英的集合体组成,白云母呈现出“书斜构造”;d—弯曲的长石双晶以及发育于破裂裂隙中的细粒绢云母化蚀变;e—围绕破裂黄铁矿的石英压力影以及裂隙中的绢云母化蚀变;f—石英的波状消光、变形条带以及围绕颗粒边缘的细粒重结晶作用

a—fractured feldspar and its sericitization; b—individual microshear zones in untramylonites; c—pressure shadows on both sides of a pyrite crystal, the shadows are composed mainly of aggregates of white mica and quartz, with the white mica showing “bookshelf” type shearing as a result of rotation; d—plagioclase lamellae showing slight curvature as well as offset due to fracturing, chemical alteration to fine grained sericite is confined largely to fractures; e—pressure shadows on both sides of a fractured pyrite crystal, the shadows are composed of quartz, chemical alteration to sericite occurs in fractures; f—irregular patchy extinction, numerous deformation bands and extremely fine recrystallized grains of original quartz along the grain boundaries

式中,可得韧性剪切带应变速率为  $1.58 \sim 2.72 (10^{-14}/s)$ , 平均应变速率为  $2.00 \times 10^{-14}/s$  (表 1)。可见,金山韧性剪切带以低温、低应变速率、高差异应力为特征,形成于地壳的摩擦-粘性转换带(Snoke & Tullis, 1998)。

表1 变形岩石中动态重结晶石英粒度、差异应力、应变速率及富林指数

Table 1 Grain size, differential stress, strain rate and Flinn index of dynamic recrystallized quartz

岩石类型	样品号	石英粒度 / $\mu\text{m}$	差异应力 /MPa	应变速率 / $10^{-14}\cdot\text{s}^{-1}$	富林指数 (K)
蚀变糜棱岩	JS003	11.577	80.14	2.72	0.271
	JS010	16.286	70.88	1.97	0.159
	H089	17.788	66.58	1.68	0.343
蚀变超糜棱岩	JS004	16.339	70.72	1.97	0.038
	H024	15.714	72.70	2.11	0.049
	H086	18.386	65.04	1.58	0.059

#### (4) 岩石的变形机制和行为

金山变形带属于剪切变形,是单剪作用下形成的低角度旋转变形构造带(石火生,1997)。有限应变分析是研究物体变形机制的有效方法。本文沿岩石的XZ和YZ面切制定向薄片,测量石英颗粒在X、Y、Z方向上的长度,按照富林指数公式 $K = (X/Y - 1)/(Y/Z - 1)$ 求出富林指数K。由表1可知,金山韧性剪切带变形岩石 $K < 1$ ,超糜棱岩岩石的K值小于糜棱岩岩石,说明岩石为压扁变形,超糜棱岩岩石的压扁程度大于糜棱岩岩石。

### 3 蚀变岩中的粘土矿物

#### 3.1 样品的制备和测试

笔者采集了矿区千枚岩、蚀变糜棱岩和超糜棱岩样品,分离出其中的粘土矿物进行研究。样品的制备和测试根据IGCP 294小组(Kisch, 1991)和Warr等(1994)所推荐的方法和条件进行。将样品粉碎成约5 mm的颗粒,用蒸馏水浸泡48 h。用HCl、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>将样品中的碳酸盐、铁胶结物及有机质除去,再用常规方法从样品中提取 $< 2 \mu\text{m}$ 的粘土颗粒,分别制成厚度约3 mg/cm<sup>2</sup>的自然风干定向片(AD),以消除样厚度对结晶度测定结果的影响(Warr and Rice, 1994)。

粘土矿物的鉴定是在南京大学现代测试中心的D/Max-Ra型X射线衍射仪上完成的。样品测试条件为Cu靶,电压40 kV,电流20 mA,步宽 $0.01^\circ 2\theta$ ,扫描范围 $3\sim 37^\circ$ 。伊利石的结晶度是测量伊利石001(1 nm)衍射峰的半高宽,单位以 $\Delta 2\theta^\circ$ 表示,通过测量结晶度标样(CIS),将实验结果换算成Kubler标准。CIS由4块岩石样品(泥岩及板岩)和1块白云母晶体组成,由Warr提供。绿泥石的结晶度是测量绿泥石002(0.7 nm)衍射峰的半高宽而得到的。

#### 3.2 粘土矿物组合和结晶度

由表2可知,金山金矿区千枚岩、蚀变糜棱岩和蚀变超糜棱岩的粘土矿物组合均为伊利石和绿泥石。炭质千枚岩、绿泥石化千枚岩中伊利石的结晶度为0.17~0.24,绿泥石的结晶度为0.21~0.26,且绿泥石的结晶度都大于伊利石的结晶度。根据前人对区域变质带的研究结果(Kisch, 1991;

表2 蚀变岩石及变质千枚岩粘土矿物的结晶度  $\Delta 2\theta^\circ$

Table 2 Crystallinity of clay minerals in altered rock and metamorphic phyllite

样号	岩性	伊利石	绿泥石
H078	炭质千枚岩	0.21	0.25
H080	炭质千枚岩	0.24	0.26
H052	绿泥石化千枚岩	0.17	0.21
H014	蚀变糜棱岩	0.30	0.28
H007	蚀变糜棱岩	0.37	0.36
JS003	蚀变糜棱岩	0.26	0.22
H008	蚀变糜棱岩	0.25	0.17
JS004	蚀变超糜棱岩	0.32	0.28
H103	蚀变超糜棱岩	0.24	0.25
H099	蚀变超糜棱岩	0.16	0.22

Warr and Rice, 1994),它们属于绿片岩相变质带的范畴。而蚀变变形岩石则不同,在蚀变超糜棱岩中,伊利石的结晶度为0.16~0.32,绿泥石的结晶度为0.22~0.28;在蚀变糜棱岩中,伊利石的结晶度为0.25~0.37,绿泥石的结晶度为0.17~0.36。由应变较弱的糜棱岩带到应变较强的超糜棱岩带,伊利石的结晶度有变小的趋势,而绿泥石的结晶度则基本保持不变。

#### 3.3 粘土矿物的平均结晶大小和晶格应变

根据Krumm(1994)的WINFIT 1.2程序,笔者利用单峰傅立叶(Single\_line Fourier)方法和Warren\_Averbach方法分别计算了伊利石和绿泥石的平均结晶大小和晶格应变,结果列于表3。有关单峰傅立叶方法和Warren\_Averbach方法的原理可参阅有关文献(Warren and Averbach, 1952; de Keijser *et al.*, 1982)。

绿泥石化千枚岩(H052)由Warren\_Averbach方法计算的伊利石结晶的平均大小大于由单峰傅立叶方法计算的结晶大小,而炭质千枚岩(H078)、蚀变糜棱岩、蚀变超糜棱岩则正好相反。在蚀变糜棱岩和蚀变超糜棱岩中,伊利石的结晶大小和晶格应变没有明显规律性的变化,但其结晶大小明显小于绿泥石化千枚岩和炭质千枚岩中伊利石的结晶大小。绿泥石化千枚岩和炭质千枚岩中伊利石晶格应变分别为0.079%和0.058%;蚀变糜棱岩中伊利石的晶格应变为0.058%~0.161%,平均0.115%;蚀变超糜棱岩中伊利石的晶格应变为0.062~0.104%,平均0.082%(表3)。

对比分别由Warren\_Averbach法和单峰傅立叶法计算的绿泥石平均结晶大小,发现对于绿泥石化千枚岩,二者基本相等,而炭质千枚岩则前者大于后者,蚀变糜棱岩和蚀变超糜棱岩后者大于前者。绿泥石化千枚岩和炭质千枚岩中绿泥石晶格应变分别为0.032%和0.049%;蚀变糜棱岩中绿泥石的晶格应变为0.104~0.113%,平均0.108%;蚀变超糜棱岩中绿泥石的晶格应变为0.069~0.104%,平均0.085%(表3)。

伊利石和绿泥石在蚀变糜棱岩中的晶格应变都大于其在蚀变超糜棱岩中的晶格应变;而蚀变糜棱岩岩石的应变小于

表 3 金山金矿粘土矿物伊利石、绿泥石的平均结晶大小和晶格应变

Table 3 Mean crystal size and lattice strain values of illite and chlorite in the Jinshan gold deposit, Jiangxi Province

样品名称	单峰傅立叶方法				Warren_Averbach 方法		晶格应变 / %	
	伊利石		绿泥石		伊利石	绿泥石	伊利石	绿泥石
	10 Å	5 Å	7 Å	4.7 Å	(10 Å 5 Å)	(7 Å 4.7 Å)		
H052	434	294	193	192	610	201	0.079	0.032
H078	218	344	134	185	136	112	0.058	0.049
H007	84	117	137	192	77	102	0.161	0.102
H008	185	181	128	266	184	82	0.058	0.113
H014	117	179	153	118	77	192	0.096	0.104
JS003	139	272	112		121		0.144	
H099	121	220	126	112	106		0.104	0.069
H103	150	197	147	236	108	115	0.062	0.082
JS004	110	228	165	322	64	122	0.08	0.104

超糜棱岩岩石的应变。伊利石和绿泥石的平均结晶大小和晶格应变不能反映岩石变形的相对强弱,这与前人(刘瑞响, 1988)的结论是一致的,因为构造变形与晶格变形之间很少有相似性,强变形岩石中并不一定具有强变形的矿物晶格(刘瑞响, 1988)。

### 3.4 岩石的变形作用与粘土矿物的形成

与金矿化有关的韧性剪切带既是应变局部化带,又是流体渗滤和运移的通道。流体在压溶、构造变质、构造变形以及传递液压和润滑中起着间接软化作用(Andrew *et al.*, 1995; Tullis *et al.*, 1996)。在变形过程中,流体的存在有利于溶液的迁移以及微破裂和重结晶作用的发生(McCaig, 1988)。主变形期,韧性剪切与金成矿作用的关系已经被证实(林传勇等, 1994; 杨新岳等, 1995)。本文所研究的样品都具有强烈塑性变形特征,如石英的变形纹、亚颗粒、边缘细粒化、核幔构造,云母的膝折,黄铁矿的破裂等,这些都说明它们发生了较强的应变作用。不稳定的、变形的矿物溶解以及随后没有变形、相对稳定的矿物的结晶是同构造变质作用的特征(Knippe, 1981; Weber, 1981)。大规模的溶解-结晶在样品中都可以见到,如石英的动态重结晶、压力影等,而长石的碎裂及其边缘的绢云

母化、沿黄铁矿微裂隙充填的绢云母以及绢云母的“书斜构造”(图 1a、c、e)等是同构造蚀变作用的产物(Wintsch and Knipe, 1998; 李晓峰, 2001)。伊利石的 K<sub>Ar</sub> 年龄证明蚀变糜棱岩和蚀变超糜棱岩中粘土矿物的形成与矿区外围大面积燕山期岩浆活动无关,这一点也可从蚀变岩石的 Si、O 同位素得到佐证(华仁民等, 2002)。成矿流体的研究表明,金山金矿的成矿流体主要来自于变质热液(韦星林, 1996; 王可勇等, 1999; 李晓峰, 2001),即其形成与变质作用有关。而伊利石的 K<sub>Ar</sub> 年龄说明粘土矿物的形成与晋宁期的区域变质作用无关。矿区内岩浆活动极弱,在有深部工程控制的 5 km<sup>2</sup> 范围内无中酸性岩浆侵入活动。金山金矿形成后,后续的构造运动在矿区表现较弱,剪切带组构和形态没有显著的改造(韦星林, 1996)。因此,本文所研究的伊利石和绿泥石应是韧性剪切变形期间变质热液流体蚀变作用的产物。

在金山金矿蚀变变形岩石中,由应变较弱的蚀变糜棱岩带到应变较强的蚀变超糜棱岩带,伊利石的结晶度变小,而绿泥石的结晶度基本保持不变。从图 2 也可以看出,不管是伊利石还是绿泥石,在不同的应变带,伊利石(或绿泥石)的平均结晶大小与其结晶度有不同的相关关系。在蚀变糜棱岩中,

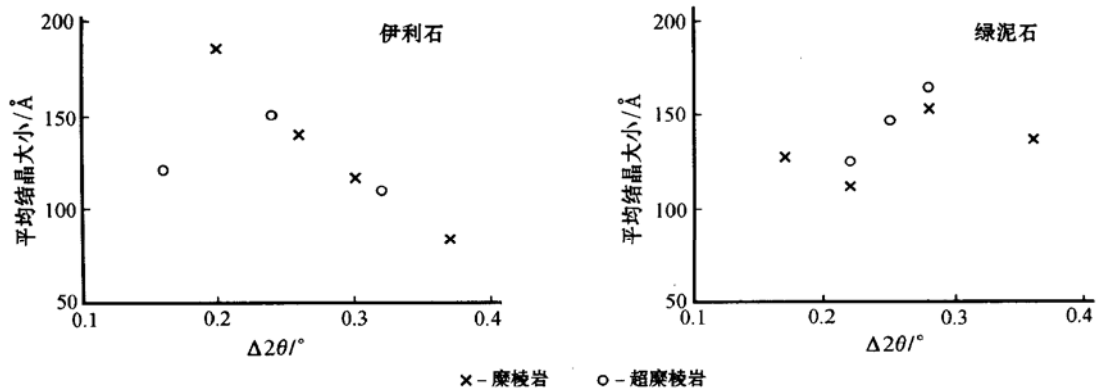


图 2 江西金山金矿伊利石和绿泥石的平均结晶大小和结晶度关系图

Fig. 2 The relationships between the mean crystal size and the crystallinity of illite and chlorite in the Jinshan gold deposit, Jiangxi Province

伊利石的平均结晶大小与伊利石的结晶度呈明显的负相关;而绿泥石的平均结晶大小与绿泥石的结晶度则没有明显的相关关系。在蚀变超糜棱岩中,绿泥石的平均结晶大小与绿泥石的结晶度呈明显的正相关,而伊利石的平均结晶大小与它的结晶度相关关系则不明显。这种情况与韧性剪切带内岩石的应变以及矿物对应变的反应有关。虽然这种关系受矿物晶体内部固有属性的制约,但是流体作用所引起的矿物晶格对构造应变的应变的影响也不容忽视。

### 3.5 粘土矿物的形成时代

金山金矿两个含金糜棱岩中伊利石的  $K_{Ar}$  年龄分别为  $299.5 \pm 2.7$  Ma 和  $317.9 \pm 1.8$  Ma, 含金石英脉中伊利石的  $K_{Ar}$  年龄为  $269.9 \pm 1.7$  Ma (李晓峰等, 2002b)。这表明,金山金矿粘土矿物的形成时代为海西期。

## 4 讨论

有关伊利石和绿泥石等粘土矿物的形成与岩石变形变质之间的关系一直受到人们的关注 (Merriman *et al.*, 1995; Jiang *et al.*, 1997; Arkai *et al.*, 2000; Giorgetti *et al.*, 2000)。伊利石和绿泥石的结晶度常被用作测定变质程度的参数。Bons (1986) 进行了绿片岩相中绿泥石的变形机制实验研究, 认为绿泥石的塑性变形机制是复杂的多边化机制, 可以在 250~350 °C 条件下发生。Bell & Wilson (1981) 发现, 随着应变的增加, 黑云母中晶格缺陷的密度也逐渐增加, 而与之共生的白云母则没有表现出这种规律。

Bons (1988) 认为, 由于伊利石具有较高弹、塑性应变能力, 其变形主要通过颗粒边界迁移来实现; 而绿泥石的变形是多边化作用, 主要通过晶内滑移和亚颗粒来实现。上述研究说明, 当伊利石受到应力作用时位错活动被延迟, 但是, 一旦位错活动发生, 由于颗粒边界迁移作用, 亚颗粒发育, 随后产生重结晶作用。相反, 普遍发育晶格缺陷的绿泥石由于具有较低的堆垛层错能, 不利于发生重结晶作用。在应变恢复过程中, 由于位错的迁移能力较低, 大多数绿泥石保留了应变诱导的晶格缺陷。

许多学者 (Kisch, 1987; Jiang *et al.*, 1997) 认为, 随着变质作用的增强, 伊利石结晶度逐渐降低。尽管大家一直认为温度是影响伊利石和绿泥石结晶的重要因素, 但是诸如水/岩比、时间、构造应力、岩石和伊利石的成分、晶格应变等也影响着二者结晶度的大小。随着应变的增强, 二者结晶度逐渐减小。Kisch (1991) 和 Franceschelli 等 (1994) 认为, 在埋藏较深的高应变带, 应变的层状硅酸盐矿物的淬火作用导致形成晶格较厚的矿物。在高应变的剪切带, 由于晶格产生的应变没有恢复, 因此会出现结晶大小的异常。

在韧性剪切带中, 由边部到中心, 应变逐渐增大, 也就是说超糜棱岩中岩石应变大于糜棱岩中岩石的应变。在流体的参与下, 不仅水对矿物晶体键有弱化作用, 而且岩石的变形有利于降低层状硅酸盐矿物的晶格活化能 (刘瑞响, 1988)。

在构造应力的作用下, 伊利石的变形主要为螺旋位错, 而绿泥石主要通过晶内滑移和亚颗粒来实现 (Bons, 1988)。相对来说, 在变形过程中, 伊利石晶格较绿泥石的晶体储存有较多的弹、塑性应变能。金山金矿变形糜棱岩主要为退化糜棱岩 (李晓峰, 2001), 而退化糜棱岩主要在低温、低的矿物晶格恢复速率/应变速率比条件下形成 (Hatcher *et al.*, 1998)。在应变恢复过程中, 由于金山金矿岩石的应变速率较低, 绿泥石亚颗粒晶格应变无法恢复, 相反, 由于伊利石晶格内部比绿泥石具有较多的弹、塑性应变能, 使得伊利石的晶体生长较绿泥石快得多。另外, 二八面体和三八面体层状硅酸盐矿物对应变的不同反应表现在八面体上位错的活化能不同 (Bons, 1988; Merriman *et al.*, 1995)。因而在剪切作用的后期, 由于重结晶作用, 伊利石产生的亚颗粒、位错等晶格缺陷得到迅速的恢复, 而绿泥石由于位错迁移的速度较小, 由应变诱导产生的晶格应变不能得到迅速恢复, 保留了部分晶格缺陷。另外, 在应力的作用下, 水/岩比直接影响着层状硅酸盐矿物活化能降低的程度。蚀变糜棱岩带的水/岩比小于蚀变超糜棱岩带的水/岩比, 因此, 在蚀变糜棱岩带和蚀变超糜棱岩带层状硅酸盐矿物活化能的降低程度不同, 糜棱岩带伊利石和绿泥石活化能降低较小。而在超糜棱岩带, 水/岩比较高, 伊利石和绿泥石的晶格活化能降低较大, 尤其是伊利石的活化能降低程度比绿泥石大, 因此, 在应变恢复的过程中, 很容易使伊利石的晶格缺陷得到恢复, 结晶速率较快, 结晶度较小, 结果由应变较弱的糜棱岩带到应变较强的超糜棱岩带, 伊利石的结晶度有变小的趋势, 而绿泥石的结晶度则基本保持不变。因此, 可以看出在不同的应变带, 伊利石和绿泥石表现出不同的性状。在蚀变糜棱岩中, 伊利石的平均结晶大小与其结晶度呈明显的负相关; 而绿泥石的平均结晶大小与绿泥石的结晶度则没有明显的相关关系。在蚀变超糜棱岩中, 绿泥石的平均结晶大小与绿泥石的结晶度呈明显的正相关, 而伊利石的平均结晶大小与其结晶度相关关系则不明显。

总之, 在流体作用过程中, 岩石的变形过程和变形机制也是影响伊利石和绿泥石结晶度的因素。高异常结晶度的产生是由于晶格的滑动和亚颗粒的形成, 而在随后的剪切作用中没有得到恢复, 相反, 如果亚颗粒边界得到恢复或者具有重结晶作用, 那么, 就可以形成较小的结晶度。所以, 在岩石变形强烈地区, 运用伊利石和绿泥石结晶度值作为测定变质程度的参数时, 应倍加小心。同时, 伊利石和绿泥石结晶大小及其结晶度与岩石应变速率和恢复速率之间的关系, 可以反映岩石的变形机制和行为。有关这方面的工作需要进一步详细地深入研究。

## 5 结论

- (1) 金山韧性剪切带是以低温、低应变速率、高差异应力为特征, 形成于地壳的摩擦-粘性 (frictional-viscous) 转换带。
- (2) 在蚀变糜棱岩带和蚀变超糜棱岩带伊利石和绿泥石

结晶度、平均结晶大小和晶格应变具有不同的特点。在岩石应变较低、水/岩比较小的糜棱岩带, 伊利石的平均结晶大小与伊利石的结晶度成负相关关系, 而在岩石应变较高、水/岩比较大的超糜棱岩带, 绿泥石的平均结晶大小与绿泥石的结晶度成正相关关系。由应变较小蚀变糜棱岩带到应变较强的蚀变超糜棱岩带, 伊利石的结晶度有变小的趋势, 而绿泥石的结晶度则基本保持不变。

(3) 伊利石和绿泥石结晶度及其结晶大小与结晶度之间的关系有可能反映岩石应变速率和恢复速率之间的关系, 可确定岩石的变形机制和行为。

## References

- Andrew H A, Geoffrey R C, Greg W, *et al.* 1995. Synchronous advanced argillic alteration and deformation in a shear zone hosted magmatic hydrothermal Au-Ag deposit at the Temora Mine, new south Wales, Australia[J]. *Economic Geology*, 90: 1570~1603.
- Arkai P, Mata M P, Giorgetti, *et al.* 2000. Comparison of diagenetic and low-grade metamorphic evolution of chlorite in associated metapelites and metabasites: an integrated TEM and XRD study [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 18: 531~550.
- Bechtel A, Elliott W C and Oszeplski S. 1996. Indirect age determination of Kupferschiefer-type mineralization in the Polish Zechstein basin by K/Ar dating of illite: preliminary result [J]. *Economic Geology*, 91: 1310~1319.
- Bechtel A, Elliott W C, Wampler J M, *et al.* 1999. Clay mineralogy, crystallinity, and K/Ar ages of illite within the Polish Zechstein basin: implication for the age of Kupferschiefer mineralization [J]. *Economic Geology*, 94: 261~272.
- Bechtel A, Shieh Y N, Elliott W C, *et al.* 2000. Mineralogy, crystallinity and stable isotopic composition of illitic clays within the Polish Zechstein basin: implication for the genesis of Kupferschiefer mineralization [J]. *Chemical Geology*, 163: 189~205.
- Bell L A and Wilson C J L. 1981. Deformation of biotite and muscovite: TEM microstructure and deformation model [J]. *Tectonophysics*, 78: 201~228.
- Bons A J. 1986. Deformation of chlorite in naturally deformed low-grade rocks [J]. *Tectonophysics*, 154: 149~165.
- Bons A J. 1988. Intracrystalline deformation and slaty cleavage development in very low-grade slates from the Central Pyrenees [J]. *Geologica Ultraiectina*, 56.
- Celik M, Karakaya N and Temel A. 1999. Clay minerals in hydrothermally altered volcanic rocks, eastern Pontides, Turkey [J]. *Clays and Clay Minerals*, 46(6): 615~628.
- de Keijser Th H, Langford J I, Mittemeijer E J, *et al.* 1982. Use of the Voigt functions in a single-line method for the analysis of X-ray diffraction line broadening [J]. *Journal of Applied Crystallography*, 11: 10~14.
- Franceschelli M, Pandeli E, Puxedu M, *et al.* 1994. Illite crystallinity in pelitic and marly rocks from the northern Apennines (Southern Tuscany and Umbria, Italy) [J]. *N. Jahrb. Min. Ab.*, 8: 367~384.
- Giorgetti G, Memmi I, Peacor D R. 2000. Retarded illite crystallinity caused by stress-induced sub-grain boundaries in illite [J]. *Clay Minerals*, 35: 693~708.
- Hatcher R D, Hooper R J. 1998. Retrograde and anneal mylonite [A]. Snoke A W, Tullis J and Todd V R. *Fault-related Rocks* [C]. Princeton University Press, 456.
- Hua Renmin, Li Xiaofeng, Zhang Kaiping, *et al.* 2002. Geochemical features of ore-forming fluid in the Jinshan gold deposit, Jiangxi Province [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science Edition)*, 38(3): 408~417 (in Chinese with English abstract).
- Hu Zhiguo. 1991. The characteristics of Jinshan ductile shear zone and its controlling to mineralization in Jiangxi [J]. *Mineral Deposits of Eastern China*, 2: 17~28 (in Chinese with English abstract).
- Kisch H J. 1987. Correlation between indicators of very low-grade metamorphism [A]. Frey M. *Low Temperature Metamorphism* [C]. Glasgow: Blackie and Son Ltd., 227~300.
- Kisch H J. 1991. Illite crystallinity: recommendation on sample preparation, X-ray diffraction settings and inter-laboratory sample [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 9: 665~670.
- Knipe R J. 1981. The interaction of deformation and metamorphism in slates [J]. *Tectonophysics*, 78: 249~272.
- Krumm S. 1994. WINFIT 1.0—a public domain program for interactive profile analysis under WINDOWS. 11th Conference on Clay Mineralogy and Petrology, Prague [J]. *Acta Universitatis Carolinae, Geologica*, 38: 253~261.
- Ji Junfeng, Browne P R L, Liu Yingjun, *et al.* 1997. Role of geothermal fluid in the formation of illite and chlorite from the Ohaaki-Broadlands field, New Zealand [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science Edition)*, 33(Geofluid and Mineralization Issue): 69~76 (in Chinese with English abstract).
- Jiang W T, Peacor D R, Arkai P, *et al.* 1997. TEM and XRD determination of crystallite size and lattice strain as a function of illite crystallinity in pelitic rocks [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 15: 267~281.
- Jin Zhangdong, Zhu Jinchu, Ji Junfeng, *et al.* 2000. Contrast between two illite of different origins and the distinctive significance of illite alteration zones at Dexing porphyry copper ore field [J]. *Geological Journal of China Universities*, 6(1): 72~79 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaofeng. 2001. The geochemistry study on the fluid flow in Jinshan gold deposit, Jiangxi [D]. Nanjing: Nanjing University (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaofeng, Hua Renmin. 2000. A study on fluid action in the ductile shear zone: A review [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 19(4): 333~340 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaofeng, Hua Renmin, Ji Junfeng, *et al.* 2002a. Origin of illite and its relation with ore-forming fluids in Yinshan polymetallic deposit, Dexing, Jiangxi Province [J]. *Chinese Journal of Geology*, 37(1): 86~95 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaofeng, Hua Renmin, Yang Fenggen, *et al.* 2002b. K/Ar age of il-

- lite in Jinshan gold deposit and its implication to the tectonic evolution of northeastern Jiangxi Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21(1): 49~ 55(in Chinese with English abstract).
- Lin Chuanyong, He Yongnian, Chen Xiaode, *et al.* 1994. Ductile shear zone and its relation to gold mineralization[J]. *Science in China (Series D)*, 24(11): 1 223~ 1 232(in Chinese).
- Liu Ruixun. 1988. *Microstructure Geology*[M]. Beijing: Geology Publishing House, 31~ 131(in Chinese).
- Martinez\_Serrano R G and Dubois M. 1998. Chemical variations in chlorite at the Los Humeros geothermal system, Mexico[J]. *Clays and Clay Minerals*, 46(6): 615~ 628.
- McCaig A M. 1988. Fluid\_rock interaction in some shear zones from the Pyrenes[J]. *Geology*, 867~ 870.
- Mercier J C C, Anderson D A and Cater N L. 1977. Stress in lithosphere: inference from steady state flow of rocks[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 115: 199~ 226.
- Merriman R J, Roberts B, Peacor D R, *et al.* 1995. Strain-related difference in the crystal growth of white mica and chlorite: A TEM and XRD study of the development of metapelitic microfabrics in the Southern Uplands thrust terrane, Scotland[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 13: 559~ 576.
- Shi Huosheng. 1997. Study on shearing mechanism of the ductile shear zone deformation zone and concentration of gold in Jinshan, Jiangxi Province[D]. Nanjing: Nanjing University(in Chinese with English abstract).
- Snoke A W and Tullis J. 1998. An overview of fault rocks[A]. Snoke A W, Tullis J and Todd V R. *Fault-related Rocks*[C]. Princeton University Press, 1~ 18.
- Tan Tielong, Fan Yongxiang, Zeng Jiannian. 1997. An analysis of geological conditions of metallogenesis and prospect for superlarge gold deposit in Jinshan, Dexing, Jiangxi[J]. *Geology—Geochemistry*, 2: 1~ 7(in Chinese with English abstract).
- Tsenn M C, Cater N L. 1987. Upper limits of power law creep of rocks[J]. *Tectonophysics*, 136: 1~ 26.
- Tullis J, Yund R, Farver J. 1996. Deformation-enhanced fluid distribution in feldspar aggregates and implications for ductile shear zones[J]. *Geology*, 24(1): 63~ 66.
- Wang Keyong, Cao Xinzhi, Lu Zuoxiang. 1999. The two mineralization types and the thermoluminescent evaluation marks of quartz in Jinshan gold deposit, Jiangxi[J]. *Gold Geology*, 5(3): 49~ 54(in Chinese).
- Warr L N and Rice H N. 1994. Interlaboratory standardization and calibration of clay mineral crystallinity and crystallite size data[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 12: 141~ 152.
- Warren B E and Averbach B L. 1952. The effect of cold\_work distortion on X-ray patterns[J]. *Journal of Applied Crystallography*, 23: 497.
- Weber. 1981. Kinematic and metamorphic aspects of cleavage formation in very low\_grade metamorphic slates[J]. *Tectonophysics*, 78: 291~ 306.
- Wei Xinglin. 1996. The geological characteristics of Jinshan ductile shear zone\_type gold deposit in Jiangxi[J]. *Geology of Jiangxi*, 10(1): 52~ 64 (in Chinese with English abstract).
- Wintsh R P and Knipe R J. 1998. Evidence for chemical processes in the evolution of mylonites[A]. Arthue W Tullis J and Victoria R. *Fault-related rocks—A Photographic Atlas*[C]. Princeton University Press, 466~ 467.
- Yang Xinyue, Xie Guoyuan, Li Zhichun. 1995. Mass balances of deformed rock and fluid\_rock interaction during deformation[J]. *China Science(series B)*, 25: 329~ 336(in Chinese).
- Zang W and Fyfe W S. 1995. Chloritization of the hydrothermally altered bedrock at the Igaragé Bahia gold deposit, Carajás, Brazil[J]. *Mineral Deposita*, 30: 30~ 38.

### 附中文参考文献

- 华仁民, 李晓峰, 张开平, 等. 2002. 江西金山金矿成矿过程流体作用地球化学特征[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 38(3): 408~ 417.
- 胡志国. 1991. 江西金山韧性剪切带特征及控矿因素探讨[J]. *华东矿产地质*, 2: 17~ 28.
- 季俊峰, Browne P-R L, 刘英俊, 等. 1997. 地热流体在伊利石和绿泥石形成过程中的作用[J]. *南京大学学报(自然科学版)(地质流体专辑)*, 33: 69~ 76.
- 金章东, 朱金初, 季俊峰, 等. 2000. 德兴斑岩铜矿田两类伊利石的存在及其在蚀变分带中的意义[J]. *高校地质学报*, 6(1): 72~ 79.
- 李晓峰. 2001. 江西金山金矿成矿流体作用的地质地球化学研究[D]. 南京: 南京大学.
- 李晓峰, 华仁民. 2000. 韧性剪切带内流体作用的研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 19(4): 333~ 340.
- 李晓峰, 华仁民, 季俊峰, 等. 2002a. 江西银山多金属矿床伊利石的形成与流体成矿作用的初步研究[J]. *地质科学*, 37(1): 86~ 95.
- 李晓峰, 华仁民, 杨风根, 等. 2002b. 金山金矿的K-Ar年龄及其对赣东北构造演化的指示意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 21(1): 49~ 55.
- 林传勇, 何永年, 陈孝德, 等. 1994. 韧性剪切带与金矿化的关系[J]. *中国科学(B辑)*, 24(11): 1 223~ 1 232.
- 刘瑞响. 1988. *显微构造地质学*[M]. 北京: 地质出版社, 31~ 131.
- 石火生. 1997. 江西金山韧性剪切带的变形机制与成矿关系研究[D]. 南京: 南京大学.
- 谭铁龙, 范永香, 曾健年. 1997. 赣东北超大型金山金矿床的成矿地质条件和找矿远景分析[J]. *地质地球化学*, 2: 1~ 7.
- 王可勇, 曹新志, 卢作祥. 1999. 江西金山金矿床两类矿化及其石英热发光特征[J]. *黄金地质*, 5(3): 50~ 54.
- 韦星林. 1996. 江西金山韧性剪切带型金矿地质特征[J]. *江西地质*, 10(1): 52~ 64.
- 杨新岳, 谢国源, 李志纯. 1995. 变形过程中的流体-岩石作用和变形岩石质量平衡[J]. *中国科学(B辑)*, 25: 329~ 336.