

# 湘西沃溪 Au-Sb-W 矿床中白钨矿 Sm-Nd 和石英 Ar-Ar 定年

彭建堂<sup>①</sup> 胡瑞忠<sup>①</sup> 赵军红<sup>①</sup> 符亚洲<sup>①</sup> 林源贤<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550002; <sup>②</sup>国土资源部天津地质矿产研究所, 天津 300170.)

E-mail: jtpeng@chinese.com, jtpeng@ms.gyig.ac.cn)

**摘要** 利用白钨矿对金属矿床进行了 Sm-Nd 同位素定年. 研究表明, 湘西沃溪 Au-Sb-W 矿床中白钨矿的 Sm, Nd 含量较高, Sm/Nd 值较大. 在  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ - $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  图解中, 浸染状白钨矿样品呈良好的线性分布, 其对应的等时线年龄为  $402 \pm 6 \text{ Ma}$ ,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值为  $-30.7$ . 该矿两个石英样品的  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年龄谱均呈“马鞍型”, 样品的最小视年龄、坪年龄和等时线年龄基本一致, 其最小视年龄 ( $420 \pm 20$  和  $414 \pm 19 \text{ Ma}$ ) 与白钨矿的 Sm-Nd 同位素数据相当吻合. 白钨矿的 Sm-Nd 年龄和石英 Ar-Ar 年龄均表明沃溪矿床形成于加里东晚期, 这与湖南雪峰山地区的构造演化和一些金锑钨矿床的同位素年代数据相吻合. 白钨矿的初始  $\epsilon_{\text{Nd}}$  值异常低, 远低于湖南元古宇地层的相应值, 成矿流体中的 Nd 很可能来自下伏的更老的陆壳基底. 对该矿成矿时间的厘定和对其成矿物源的制约为进一步认识其矿床成因奠定了基础.

**关键词** Sm-Nd 同位素定年 白钨矿 Ar-Ar 同位素定年 沃溪 Au-Sb-W 矿床 湘西

自 Fryer 等人<sup>[1]</sup>首次利用 Sm-Nd 同位素方法对热液矿床进行定年以来, 该同位素体系被广泛应用于金属矿床的同位素年代学研究, 萤石<sup>[2-6]</sup>、电气石<sup>[7,8]</sup>、黑钨矿<sup>[5,9,10]</sup>、方解石<sup>[11,12]</sup>等热液矿物相继成为被研究的对象. 白钨矿是含钙矿物, 白钨矿中稀土元素主要是以替代晶格中  $\text{Ca}^{2+}$  的形式存在; 白钨矿中稀土元素通常含量较高, 在许多金矿床中与自然金共生, 且矿石中的 W 与 Au 含量常呈正相关关系<sup>[13-16]</sup>. 因此, 自 20 世纪 80 年代末以来, 国外学者对金矿床中的白钨矿 Sm-Nd 同位素体系进行了研究, 用以制约金矿化的时间和矿床成因<sup>[7,17-20]</sup>. 但目前的研究对象主要局限于太古代-早元古代绿岩带型金矿床. 尽管白钨矿在我国许多金矿、钨矿床中均有分布, 但目前国内尚未有人利用其进行同位素定年研究.

沃溪 Au-Sb-W 矿床位于湖南雪峰山金-锑成矿带的中部, 是江南古陆产量最高的金矿, 其金、锑储量均具大型规模. 由于其有特色的元素组合和悠久的开采历史, 沃溪 Au-Sb-W 矿床闻名于世, 吸引了大量地质工作者. 然而, 由于缺乏合适的供常规同位素定年的矿物, 该矿的成矿时代一直是困扰研究者的难题. 在 20 世纪 90 年代以前, 人们根据矿床的层控特征和铅模式年龄, 推测该矿与雪峰期区域变质作用有关, 其成矿年龄为 800 Ma 左右<sup>[21-24]</sup>; 20 世纪 90 年代以来, 一些学者相继提出, 该区的金成矿与区域变质作用关系不大, 成矿作用主要发生在印支-燕山

期<sup>[25]</sup>或燕山期<sup>[26,27]</sup>. 但由于目前缺乏可靠的年龄数据, 在许多金矿文献中, 沃溪矿床仍被视为我国元古代金成矿的典型代表<sup>[28-30]</sup>. 本文以白钨矿和石英为研究对象, 利用 Sm-Nd 和 Ar-Ar 同位素定年方法, 对沃溪矿床的形成时间和流体来源进行制约, 为进一步正确认识其矿床成因奠定基础.

## 1 矿床地质特征

沃溪 Au-Sb-W 矿床位于湘西地区, 距长沙约 200 km. 在构造上, 沃溪矿床处于江南古陆西南端的雪峰山弧形隆起带, 产在该隆起带由北东转向东西向的转折部位. 区内出露地层主要是中元古界的冷家溪群( $\text{Pt}_2l$ )和上元古界的板溪群( $\text{P}_3bn$ ). 前者是一套由海相碎屑岩组成的复理石建造, 局部夹火山熔岩; 后者又分为马底驿组( $\text{Pt}_3bnm$ )和五强溪组( $\text{Pt}_3bnw$ ), 是一套板岩、千枚岩组成的类复理石建造, 局部夹细碧岩等火山碎屑物质. 矿体仅赋存于马底驿组中段的紫红色含钙绢云母板岩中, 受层间破碎带控制. 区域上岩浆活动微弱, 矿区及其外围无岩浆岩出露.

按其产出形态, 该矿矿体可分为层间脉、网脉和节理脉 3 类, 其中层间脉为该矿最主要的含矿脉体, 约占总储量的 70%<sup>[21]</sup>. 含矿层间脉共 4 条, 走向近东西向, 倾向北, 产状平缓且较稳定, 倾角为  $20^\circ \sim 30^\circ$ , 赋矿层位厚约 120 ~ 350 m. 单层脉通常由多个含 Au, Sb, W 石英脉的扁豆体组成. 按其有用矿物组合, 沃

溪矿床可划分 5 种主要矿石类型: 白钨矿-石英型、辉锑矿-自然金-石英型、白钨矿-辉锑矿-自然金-石英型、黄铁矿-自然金-石英型和白(黑)钨矿-自然金-石英型, 其中白钨矿-辉锑矿-自然金-石英型矿石最普遍。金属矿物主要为自然金、辉锑矿、白钨矿、黑钨矿、黄铁矿, 以及少量毒砂、闪锌矿和方铅矿等, 非金属矿物以石英为主, 次为绢云母、方解石、绿泥石等。围岩蚀变有退色化、硅化、黄铁矿化、碳酸盐化、绢云母化等。

## 2 样品采集与测试

本次研究所用的白钨矿样品采自十六棚工矿区 4 号脉体的井下露头, 采样位置见表 1。该脉体位于层间脉型矿体的最上部, 在 4 个层间脉型矿体中规模最大; 其单个矿体的走向长为 50~350 m, 倾斜延深 590~2280 m, 平均厚度为 0.52 m; 其 Au 的平均品位为 10.13  $\mu\text{g/g}$ , Sb 为 5.55%,  $\text{WO}_3$  为 0.75%<sup>[29]</sup>。在沃溪矿床中, 4 号脉体的 W, Sb 含量最高, 且矿化分带明显, 靠近地表 W 矿化最强, 而 Au, Sb 矿化较弱。从地表往矿区深部, W 矿化趋于减弱, 而 Au, Sb 矿化有增强趋势。4 号脉体中的白钨矿主要以两种形式产出, 一种是呈浸染状、不规则状分布于石英中; 另一种是呈团块状产出, 并常见晚期石英细脉穿插。白钨矿通常呈乳白色, 油脂光泽, 在紫外光照射下, 常发天蓝或淡蓝色荧光。

在系统的野外和室内观察的基础上, 将白钨矿碎至 40~60 目, 利用重选的方法将其初步富集, 然后借助荧光灯, 在双目显微镜下将杂质剔除, 使白钨矿的纯度达到 99% 以上, 最后将纯净的白钨矿碎至 200 目。样品的 Sm, Nd 同位素分析在天津地质矿产研究所同位素室完成。Sm, Nd 含量采用同位素稀释法, Nd 同位素比值是对提纯的样品直接测定。白钨矿样品的溶解先采用  $\text{HF}+\text{HClO}_4$  法, 将样品置于可密封的 Teflon 溶样器中, 加入适量  $\text{HF}+\text{HClO}_4$ , 在低温(约 70 $^{\circ}\text{C}$ )电热板上加热 72 小时。尔后, 打开盖子, 缓慢蒸干, 直至不冒白烟为止; 加入 5 mol/L HCl 溶样; 清液吸出, 保存备用。对溶样器中未溶解的样品又加入适量 5 mol/L HCl, 密封后在电热板上缓慢溶样 24 小时左右, 冷却, 将清液吸出。又加入适量 5 mol/L HCl 将剩余残渣再次缓慢(低温)溶样, 再次吸出清液。如此反复 3~4 次, 直至样品完全溶解为止。各次吸出的清液合并后, 蒸干。再加入适量 2 mol/L 的 HCl。Nd 和 Sm 的分离采用 HDEHP 反相色层法。

Sm, Nd 的同位素稀释法定量测定和 Nd 同位素比值测定均在 MAT-261 型热电质谱仪上进行, 所有数据均以  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$  作为同位素校正因子进行校正。国家一级 Sm-Nd 法标准岩石样 GBS04419 的测定结果为  $\text{Sm} = 3.02 \mu\text{g/g}$ ,  $\text{Nd} = 10.07 \mu\text{g/g}$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512739(\pm 5)(2\sigma)$ ; 国际标准岩石样品 BCR-1 的测定结果为  $\text{Sm} = 6.57 \mu\text{g/g}$ ,  $\text{Nd} = 28.75 \mu\text{g/g}$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512644(\pm 5)(2\sigma)$ 。JMC Nd 标准质谱样的测试结果为  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.511132(\pm 5)(2\sigma)$ 。全流程 Sm, Nd 的本底空白分别为  $3.0 \times 10^{-11}$  和  $5.4 \times 10^{-11}$  g。Sm, Nd 含量的分析误差优于 0.5%,  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  的分析误差(2 $\sigma$ )为  $\pm 0.5\%$ 。本文采用的衰变常数  $\lambda$  ( $^{147}\text{Sm}$ ) 为  $6.54 \times 10^{-12}/\text{a}$ , 球粒陨石均一储集库  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  和  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  的现代值分别为 0.1967 和 0.512636。

本次用于 Ar-Ar 定年研究的石英样品均采自沃溪矿床的主矿脉。其中样品 WX-17 采自十六棚工矿区的 4 号脉体, 石英呈乳白色、油脂光泽、致密块状, 与长条状、柱状辉锑矿共生, 另有少量浸染状黄铁矿和自然金分布; 样品 YRS-30 采于鱼儿山矿区 1 号脉体的井下露头, 石英呈致密块状、微带肉红色、光泽暗淡, 与致密块状辉锑矿共生。

在野外和室内研究的基础上, 将选取的样品碎至 60 目左右, 然后利用双目显微镜将杂质剔除, 使石英的纯度达到 99% 以上。石英  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  分析采用快中子活化法, 样品和标样的制备、快中子照射、阶段加热 Ar 的提取与纯化、质谱分析, 均采用文献[31]报道的方法。样品的快中子照射在中国原子能科学研究院 49-2 反应堆 H8 孔道进行, 照射时间为 62 小时, 积分中子通量为  $1.45 \times 10^{18}/\text{cm}^2$ , 用于监测中子通量的标样为中国标样 ZBJ 角闪石和 ZBH-25 黑云母、澳大利亚标样 77600 角闪石和国际标样 BSP-1 角闪石, 其年龄分别为  $132.8 \pm 1.4$ ,  $132.7 \pm 1.2$ ,  $414.5 \pm 3.7$  和  $2060 \pm 8$  Ma。照射后的样品置于氩提取系统中进行阶段加热以析出 Ar, 提纯后的 Ar 用英国 RGA-10 型质谱仪进行静态 Ar 同位素测定。原始数据进行了时间零点、质量歧视、分馏效应、空白本底、K.Ca.Cl 干扰同位素及  $^{37}\text{Ar}$  放射性衰变校正。年龄计算采用的  $\lambda$  ( $^{40}\text{K}$ ) 为  $5.543 \times 10^{-10}/\text{a}$ 。Ar 同位素测试在中国科学院地质与地球物理研究所 Ar-Ar 实验室进行。

## 3 结果

### 3.1 白钨矿的 Sm-Nd 年龄

白钨矿样品的 Sm, Nd 含量及其同位素组成见表

1. 从表1不难发现, 浸染状的白钨矿 Sm, Nd 含量分别为 2.23 ~ 6.20  $\mu\text{g/g}$  和 1.86 ~ 4.54  $\mu\text{g/g}$ ; 而团块状样品的 Sm, Nd 含量相对较低. 从目前已有的数据来看, 沃溪白钨矿的 Sm, Nd 含量有随标高变化的趋势(表1). 浸染状白钨矿的  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  值变化范围分别为 0.6409 ~ 1.0749, 0.512229 ~ 0.513372, 而团块状白钨矿  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  值明显偏高. 所有白钨矿样品 Sm 含量大于 Nd, Sm/Nd 值较大, 同位素分馏明显, 这有利于 Sm-Nd 同位素定年.

在  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ - $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  图解中, 所有浸染状白钨矿样品均表现出良好的线性关系(图1). 利用 ISOPLOT 程序, 可求得白钨矿构筑的等时线  $t = 402 \pm 6 \text{ Ma}$  ( $2\sigma$ ), MSWD 为 0.3,  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$  为 0.510544  $\pm$  9, 对应的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值为 -30.7. 考虑到所有浸染状白钨矿样品是采自同一矿脉, 属同源、同期热液活动的产物, 且未受到后期热液蚀变作用的影响; 不同样品根据等时线年龄计算的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值变化范围也很窄(表1), 因此本次确定的年龄数据应代表白钨矿真实的形成时间. 值得注意的是, 团块状白钨矿样品 W-77-1 无法参加线性拟合, 这可能与其 Sm-Nd 体系受到晚期热液作用影响有关, 因为这种白钨矿中通常有许多晚期石英细脉穿插.

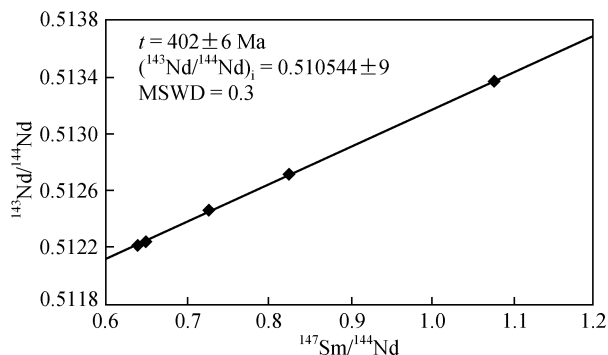


图1 沃溪 Au-Sb-W 矿床白钨矿的 Sm-Nd 同位素等时线图

### 3.2 石英的 Ar-Ar 年龄

石英样品的 Ar 同位素测试结果见表2和3. 从表2, 3 和图2 不难发现, 沃溪矿床的两个样品均显示出两侧高、中间低的“马鞍型”年龄谱. 这种年龄谱中的坪年龄或最小视年龄值应接近样品的结晶年龄<sup>[32]</sup>. 与白钨矿采自同一脉体的样品 WX-17, 其最小的视年龄为  $419.8 \pm 20.2 \text{ Ma}$ (表2), 与白钨矿的 Sm-Nd 同位素年龄( $402 \pm 6 \text{ Ma}$ )在误差范围内基本一致; 其坪年龄  $423.2 \pm 1.2 \text{ Ma}$ (图2(a))和等时线年龄  $421.6 \pm 4.5 \text{ Ma}$ (图2(b))稍高于白钨矿 Sm-Nd 年龄. 采自1号脉体的样品 YRS-30, 其最小的视年龄为  $414.4 \pm 19.2 \text{ Ma}$ (表3), 亦与白钨矿年龄和样品 WX-17 最小视年龄相

表1 沃溪 Au-Sb-W 矿床中白钨矿的 Sm, Nd 同位素组成<sup>a)</sup>

采样位置	样号	Sm/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	Nd/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}(2\sigma)$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$
7 中段	W-77-1	0.925	0.558	1.0027	0.514194(7)	-11.00
	W-67	2.23	1.86	0.7267	0.512457(6)	-30.73
9 中段	WX-18	2.30	2.18	0.6409	0.512229(7)	-30.77
	WX-19	2.86	2.66	0.6492	0.512251(8)	-30.77
10 中段	WX-20	5.73	3.22	1.0749	0.513372(7)	-30.76
	WX-21	6.20	4.54	0.8260	0.512714(6)	-30.82

a) 测试单位: 天津地质矿产研究所同位素室; 分析者: 张慧英、林源贤. 除 W-77-1 为团块状白钨矿外, 其余样品均为浸染状白钨矿

表2 沃溪 Au-Sb-W 矿床石英样品 WX-17 的  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年龄测定数据<sup>a)</sup>

加热阶段	温度/ $^{\circ}\text{C}$	$(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$(^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$(^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$(^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$^{39}\text{Ar}_{\text{k}}/\text{mol}$	$^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_{\text{k}}(1\sigma)$	$^{39}\text{Ar}_{\text{k}}/\%$	视年龄/Ma ( $1\sigma$ )
1	400	74.00	0.1333	2.780	0.7600	$0.8683 \times 10^{-12}$	$35.13 \pm 0.08$	8.65	$649.5 \pm 42.7$
2	480	33.54	0.0416	1.523	0.3698	$2.224 \times 10^{-12}$	$21.45 \pm 0.04$	22.1	$423.6 \pm 14.7$
3	560	40.00	0.0645	1.820	0.5210	$1.436 \times 10^{-12}$	$21.23 \pm 0.05$	14.3	$419.8 \pm 20.2$
4	650	48.94	0.0941	2.352	0.6918	$0.9844 \times 10^{-12}$	$21.53 \pm 0.07$	9.81	$425.0 \pm 27.0$
5	760	58.54	0.1266	2.993	0.8449	$0.7316 \times 10^{-12}$	$21.66 \pm 0.09$	7.29	$427.3 \pm 33.1$
6	880	64.05	0.1370	2.533	0.7479	$0.8453 \times 10^{-12}$	$24.06 \pm 0.08$	8.42	$468.9 \pm 31.8$
7	1020	73.87	0.1666	2.938	0.8600	$0.6945 \times 10^{-12}$	$25.19 \pm 0.09$	6.92	$488.3 \pm 37.8$
8	1150	70.76	0.1515	2.801	0.8697	$0.7641 \times 10^{-12}$	$26.53 \pm 0.09$	7.61	$510.9 \pm 39.8$
9	1300	72.03	0.1351	2.760	0.8189	$0.8567 \times 10^{-12}$	$32.62 \pm 0.08$	8.54	$610.2 \pm 43.6$
10	1500	98.26	0.1852	3.225	1.1560	$0.6250 \times 10^{-12}$	$44.24 \pm 0.12$	6.23	$785.7 \pm 75.6$

a) 样品质量 = 0.2214 g, 照射参数  $J = 0.012335$ ; 分析者: 桑海清、王英菊

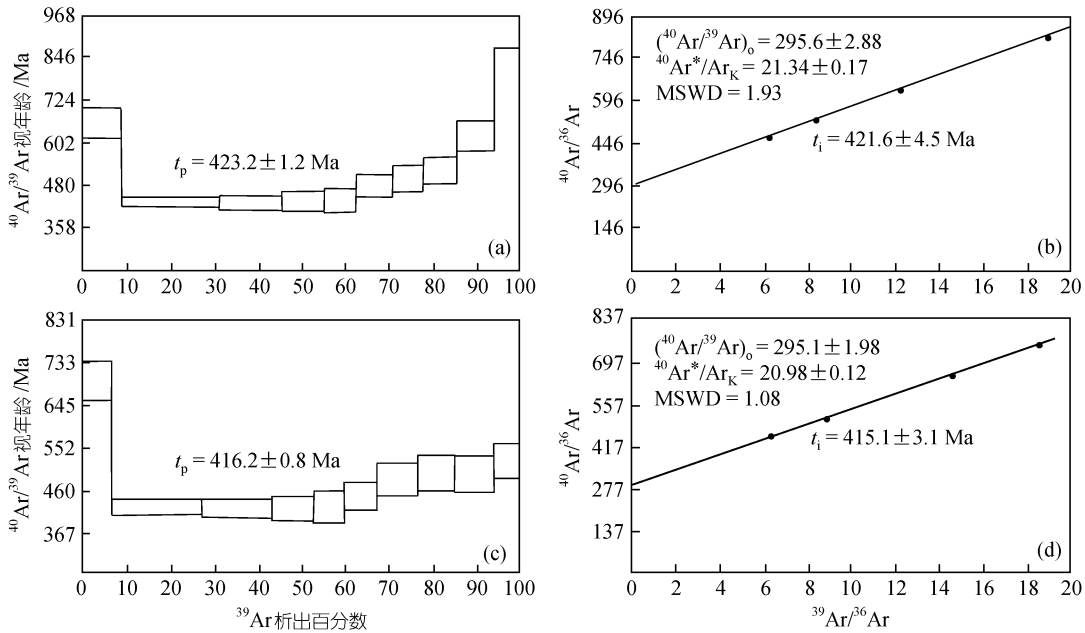


图 2 沃溪矿床石英样品的  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年龄谱、坪年龄和等时线年龄

(a) 样品 WX-17 的年龄谱及坪年龄  $t_p$ ; (b) 样品 WX-17 的等时线年龄  $t_1$ ; (c) 样品 YRS-30 的年龄谱及坪年龄  $t_p$ ; (d) 样品 YRS-30 的等时线年龄  $t_1$

表 3 沃溪 Au-Sb-W 矿床石英样品 YRS-30 的  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年龄测定数据<sup>a)</sup>

加热阶段	温度/°C	$(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$(^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$(^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$(^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$^{39}\text{Ar}_k/\text{mol}$	$^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_k (1\sigma)$	$^{39}\text{Ar}_k/\%$	视年龄/Ma ( $1\sigma$ )
1	400	97.56	0.2034	1.545	0.7220	$0.6836 \times 10^{-12}$	$37.95 \pm 0.07$	6.84	$692.8 \pm 42.8$
2	480	34.32	0.0454	0.991	0.4068	$2.040 \times 10^{-12}$	$21.07 \pm 0.04$	20.4	$416.9 \pm 15.9$
3	560	37.83	0.0579	1.226	0.4986	$1.599 \times 10^{-12}$	$20.93 \pm 0.05$	16.0	$414.4 \pm 19.2$
4	660	48.81	0.0952	1.762	0.6857	$0.9732 \times 10^{-12}$	$21.01 \pm 0.07$	9.74	$415.9 \pm 26.2$
5	780	60.17	0.1333	2.136	0.8867	$0.6949 \times 10^{-12}$	$21.22 \pm 0.09$	6.95	$419.5 \pm 34.1$
6	900	58.85	0.1242	1.949	0.7547	$0.7460 \times 10^{-12}$	$22.55 \pm 0.08$	7.46	$442.9 \pm 30.5$
7	1050	61.13	0.1250	2.279	0.8375	$0.9265 \times 10^{-12}$	$24.64 \pm 0.09$	9.27	$478.9 \pm 36.2$
8	1200	65.53	0.1370	2.335	0.8877	$0.8454 \times 10^{-12}$	$25.54 \pm 0.09$	8.46	$494.1 \pm 39.4$
9	1350	63.82	0.1316	2.277	0.8763	$0.8802 \times 10^{-12}$	$25.40 \pm 0.09$	8.80	$491.8 \pm 38.8$
10	1500	83.27	0.1923	2.668	0.8269	$0.6020 \times 10^{-12}$	$27.03 \pm 0.08$	6.02	$519.1 \pm 38.4$

a) 样品质量=0.2243 g, 照射参数  $J = 0.012335$ ; 分析者: 桑海清、王英菊

当吻合; 其坪年龄  $416.2 \pm 0.8 \text{ Ma}$ (图 2(c))和等时线年龄为  $415.1 \pm 3.1 \text{ Ma}$ (图 2(d))相当一致. 本次所测样品的最小视年龄、坪年龄和等时线年龄均十分接近, 反映了所测样品年龄真实可信. 两等时线对应的初始  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  值分别为  $295.6 \pm 2.88$ (图 2(b))和  $295.1 \pm 1.98$ (图 2(d)), 与尼尔值( $295.5 \pm 5$ )相当吻合, 亦暗示所测年龄受过剩  $^{40}\text{Ar}$  的影响甚小, 本次研究得到的 Ar-Ar 年龄数据准确可靠, 所测样品的最小视年龄或坪年龄应代表石英的形成时间.

#### 4 讨论

本次研究得到的白钨矿 Sm-Nd 等时线年龄和石英  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  同位素年龄, 均表明沃溪 Au-Sb-W 矿床

形成于加里东晚期. 这些数据明显老于前人测定的年龄值<sup>[27]</sup>. 史明魁等人<sup>[27]</sup>的研究表明, 沃溪矿床中与辉锑矿共生石英的流体包裹体 Rb-Sr 等时线年龄为  $144.8 \pm 11.7 \text{ Ma}$ . 但由于: (1) 流体包裹体 Rb-Sr 同位素定年方法本身可能存在一些问题<sup>[33,34]</sup>, (2) 该矿燕山期的成矿作用未得到其他同位素方法的证实, (3) 目前尚无确凿的地质证据表明该矿存在燕山期成矿事件, 该年龄的可靠性有待于进一步验证.

值得指出的是, 本文的定年结果与该区构造演化以及区域上一些金锑钨矿床的成矿时间相吻合. 近年的大量研究表明, 加里东运动是雪峰山一带的一次重要构造事件, 它导致湘西、黔东一带许多脆、韧性剪切带的产生和矿源层中成矿元素的活化迁移,

表 4 湖南雪峰山一带金锑钨矿床的成矿年龄<sup>a)</sup>

地区	矿床	成矿元素及赋矿层位	测试对象及方法	年龄/ Ma
			白钨矿, Sm-Nd 法等时线	402 ± 6
	沃溪	W-Sb-W, Pt <sub>3</sub> bnm	石英, <sup>40</sup> Ar- <sup>39</sup> Ar 法坪年龄(最小视年龄)	423.2 ± 1.2(419.8 ± 20.2) 416.2 ± 0.8(414.4 ± 19.2)
湘西	西安	W, Pt <sub>3</sub> bnm	蚀变板岩, K-Ar 法	412.2 ± 6.6
	柳林钨	Au, Pt <sub>3</sub> bnw	钾长石, K-Ar 法	412.46
	板溪	Sb, Pt <sub>3</sub> bnw	石英, <sup>40</sup> Ar- <sup>39</sup> Ar 法坪年龄(最小视年龄)	397.4 ± 0.4(396.4 ± 30.6) 422.2 ± 0.2(421.6 ± 31.9)
	平茶	Au-Sb, Z <sub>1j</sub>	含金石英的流体包裹体, Rb-Sr 法等时线	435 ± 9
湘西南	肖家	Au, Pt <sub>3</sub> bnw	含金石英的流体包裹体, Rb-Sr 法等时线 蚀变围岩, Rb-Sr 法等时线	412 ± 33 418 ± 4
	漠滨	Au, Pt <sub>3</sub> bnw	钾长石, K-Ar 法	404.20
	阳湾团	Au, Pt <sub>3</sub> bnw	含金石英, <sup>40</sup> Ar- <sup>39</sup> Ar 法坪年龄(最小视年龄)	381.7 ± 0.4(381.1 ± 19.2)

a) 西安数据引自文献[40], 柳林钨和漠滨数据引自文献[41], 肖家和平茶数据引自文献[42], 其余均为本文数据

对该区的构造演化与成矿有着非常重要的影响<sup>[35-39]</sup>. 前人的研究也表明, 沃溪附近的西安钨矿、柳林钨金矿均存在加里东期的成矿作用(表 4). 湘西的板溪锑矿与辉锑矿共生的 2 个石英样品, 其 <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 坪年龄分别为 397.4 ± 0.4 和 422.2 ± 0.2 Ma; 最小视年龄分别为 396.4 ± 30.6 和 421.5 ± 31.9 Ma(表 4), 与本次测定的白钨矿和石英年龄值相吻合. 湘西南一带 Au-(Sb) 矿床的加里东期成矿特别明显, 其成矿年龄为 381 ~ 435 Ma(表 4), 与本次确定的年龄数据亦相当一致.

沃溪矿床白钨矿构筑的等时线对应的初始  $\epsilon_{Nd}$  值异常低(-30.7), 暗示沉淀白钨矿的成矿流体应为壳源. 计算表明, 该矿赋矿地层板溪群的  $\epsilon_{Nd}$ (402 Ma) 为 -7.0 ~ -16.1, 该区中元古界冷家溪群和下元古界仓溪岩群的  $\epsilon_{Nd}$ (402 Ma) 值分别为 -7.7 ~ -10.9 和 -9.4 ~ -12.3(彭建堂, 未刊资料), 均远大于沃溪矿床白钨矿的初始值. 因此, 沃溪白钨矿中的 Nd 可能并非来自湘西一带出露的元古宇地层, 而是来自下伏更古老、更成熟的陆壳基底. 这一认识与已有的元素地球化学和 Sr 同位素研究成果相吻合. 最新的研究发现<sup>[43]</sup>, 湘西马底驿组地层不是沃溪矿床的矿源层, 该地层中 Au, Sb 和 W 的背景值仅分别为 0.0014, 0.42 和 1.9  $\mu\text{g/g}$ , 沃溪矿床的成矿物质和矿区地层中高含量的成矿元素主要是热液从外界带入的. 我们的 Sr 同位素研究表明, 沃溪矿床白钨矿的 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 值为 0.7468 ~ 0.7500<sup>[44]</sup>, 远高出板溪群和冷家溪群岩石的测定值(均小于 0.729), 成矿流体很可能从下伏更老的陆壳基底获取这种高放射成因 Sr 的. 目前越来越多的地质、地球化学和地球物理资料也证实, 在湖南雪峰山地区的深部存在晚太古代甚至更老的地层<sup>[45-48]</sup>, 华南陆壳可能最初形成于 3.1 Ga 之前<sup>[47,49]</sup>.

## 5 结论

(i) 本文利用白钨矿对金属矿床进行了 Sm-Nd 同位素定年研究, 测得湘西沃溪 Au-Sb-W 矿床的成矿年龄为 402 ± 6 Ma.

(ii) 该矿石英的 <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 年龄谱呈“马鞍型”, 其最小视年龄、坪年龄和等时线年龄基本接近, 且石英样品的最小视年龄(420 ± 20 Ma 和 414 ± 19 Ma) 与白钨矿 Sm-Nd 同位素年龄吻合较好.

(iii) 本次测定的白钨矿和石英年龄值, 表明该矿形成于加里东晚期. 这与区域上一些金锑钨矿床的年龄数据相吻合, 并与雪峰山地区加里东期构造演化特征相一致.

(iv) 白钨矿的初始  $\epsilon_{Nd}$  值低达 -30.7, 远低于湖南元古宇地层的相应值, 成矿流体中的 Nd 很可能是来自下伏更成熟的陆壳基底而不是该区赋矿的元古宇地层.

**致谢** 野外工作得到湖南湘西金矿的大力帮助; 样品的分析测试得到国土资源部天津地质矿产研究所同位素室张慧英和中国科学院地质与地球物理研究所桑海清的大力支持; 室内工作得到张宝贵的大力帮助, 论文初稿承蒙陈江峰教授和李朝阳研究员提供宝贵建议; 论文修改过程中, 评审专家提供了宝贵意见, 在此一并致以诚挚的谢意. 本工作受国家重点基础研究发展规划项目(G1999043200)、国家杰出青年基金(批准号: 49925309)和中国科学院重要方向项目(KZCX3-SW-125)资助.

## 参 考 文 献

- 1 Fryer B J, Taylor R P. Sm-Nd direct dating of the Collins Bay hydrothermal uranium deposit, Saskatchewan. *Geology*, 1984, 12: 479-482
- 2 李志昌, 万建华, 杜国民. 萤石 Sm-Nd 等时线. *地质地球化学*, 1987, 15(9): 67-68
- 3 Halliday A N, Shepherd T J, Dicken A P, et al. Sm-Nd evidence for

- the age and origin of a Mississippi Valley Type ore deposit. *Nature*, 1990, 344: 54-56
- 4 Chesley J T, Halliday A N, Scrivener R C. Samarium-Neodymium direct dating of fluorite mineralization. *Science*, 1991, 252: 949-951
  - 5 李华芹, 刘家齐, 杜国民, 等. 内生金属矿床成矿作用年代学研究——以西华山钨矿为例. *科学通报*, 1992, 37(12): 109-1112
  - 6 聂凤军, 江思宏, 刘妍, 等. 阿拉善东七一大型萤石矿床萤石钨-铋同位素年龄及地质意义. *矿床地质*, 2002, 21(1): 10-15
  - 7 Anglin C D, Jonasson I R, Franklin J M. Sm-Nd dating of scheelite and tourmaline: Implications for the genesis of Archean gold deposits, Val d'Or, Canada. *Econ Geol*, 1996, 91: 1372-1382
  - 8 Jiang S Y, Slack J F, Palmer M R. Sm-Nd dating of the giant Sullivan Pb-Zn-Ag deposit, British Columbia. *Geology*, 2000, 28: 751-754
  - 9 Kempe U, Belyatsky B V. Sm-Nd ages of wolframites from the Western Erzgebirge-Vogtland region: Possible genetic implications. In: Seltman R, Kämpf H, Möller P, eds. *Metallogeny of Collisional Orogens*. Prague: Czech Geological Survey, 1994. 142-149
  - 10 聂凤军, 江思宏, 白大明, 等. 北京密云沙厂环斑花岗岩体黑钨矿钨-铋同位素研究. *地质论评*, 2002, 48(1): 29-33
  - 11 Nie F J, Bjørlykke A B, Nilsen K S. The origin of the Proterozoic Bidjovagge gold-copper deposit, Finnmark, Northern Norway, as deduced from rare earth element and Nd isotope evidences on calcites. *Resource Geology*, 1999, 49(1): 13-25
  - 12 彭建堂, 胡瑞忠, 林源贤, 等. 锡矿山钨矿床热液方解石的 Sm-Nd 同位素定年. *科学通报*, 2002, 47(10): 789-792
  - 13 Boyle R W. The geochemistry of gold and its deposits. *Geological Survey of Canada Bulletin*, 280. 1979. 1-584
  - 14 Ludden J N, Daigneault R, Robert F, et al. Trace element mobility in alteration zones associated with Archean Au lode deposits. *Econ Geol*, 1984, 79: 1131-1141
  - 15 Anglin C D, Franklin J M, Jonasson I R, et al. Geochemistry of scheelites associated with Archean gold deposits: Implications for their direct age determination. In: *Current research, Part A: Geological Survey of Canada Paper 87-1A*, 1987. 591-596
  - 16 Ghaderi M, Palin J M, Campbell I H, et al. Rare earth element systematics in scheelite from hydrothermal gold deposits in the Kalgoorlie-Norseman region, Western Australia. *Econ Geol*, 1999, 94: 423-438
  - 17 Bell K, Anglin C D, Franklin J M. Sm-Nd and Rb-Sr isotope systematics of scheelites: Possible implications for the age and genesis of vein-hosted gold deposits. *Geology*, 1989, 17: 500-504
  - 18 Kent A J R, Campbell I H, McCulloch M T. Sm-Nd systematics of hydrothermal scheelite from the Mount Charlotte Mine, Kalgoorlie, Western Australia: An isotopic link between gold mineralization and komatiites. *Econ Geol*, 1995, 90: 2329-2335
  - 19 Darbyshire D P F, Pitfield P E J, Campbell S D G. Late Archean and Early Proterozoic gold-tungsten mineralization in the Zimbabwe Archean craton: Rb-Sr and Sm-Nd isotope constraints. *Geology*, 1996, 24: 19-22
  - 20 Oberthür T, Blenkinsop T G, Hein U F, et al. Gold mineralization in the Mazowe area, Harare-Bindura-Shamva greenstone belt, Zimbabwe: Genetic relationships deduced from mineralogical fluid inclusions and stable isotope studies, and the Sm-Nd isotopic composition of scheelites. *Mineral Deposita*, 2000, 35: 138-156
  - 21 罗献林, 易诗军, 梁金城. 论湘西沃溪金铋矿床的成因. *地质与勘探*, 1984, 20(3): 1-10
  - 22 罗献林. 论湖南前寒武系金矿床的形成时代. *桂林冶金地质学院学报*, 1989, 9(1): 25-34
  - 23 张景荣, 罗献林. 论华南地区内生金矿床的形成时代. *桂林冶金地质学院学报*, 1989, 9(4): 369-379
  - 24 黎盛斯. 湖南金矿地质概论. 长沙: 中南工业大学出版社, 1991. 1-120
  - 25 刘继顺. 关于雪峰山一带金成矿区的成矿时代. *黄金*, 1993, 14(7): 7-12
  - 26 王甫仁, 权正钰, 胡能勇, 等. 湖南省岩金矿床成矿条件及分布富集规律. *湖南地质*, 12(3): 163-170
  - 27 史明魁, 傅必勤, 靳西祥, 等. 湘中铋矿. 长沙: 湖南科技出版社, 1993. 41-52
  - 28 韦永福, 吕英杰, 江雄新, 等. 中国金矿床. 北京: 地震出版社, 1994. 215-254
  - 29 中国人民武装警察部队黄金指挥部. 湖南省沃溪式层控金矿地质. 北京: 地震出版社, 1996. 18-47
  - 30 陈柏林. 中国金矿床的成矿时代. *地质地球化学*, 2002, 30(2): 66-73
  - 31 桑海清, 王松山. 石英的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  定年方法及 Ar 同位素质谱分析. *质谱学报*, 1994, 15(2): 17-27
  - 32 Zeidler P K, Gerald D F. Saddle-shaped  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age spectra from young, micro-structurally complex potassium feldspars. *Geochim Cosmochim Acta*, 1986, 50: 1185-1199
  - 33 Pettke T, Diamond L W. Rb-Sr isotopic analysis of fluid inclusions in quartz: Evaluation of bulk extraction procedures and geochronometer systematics using synthetic fluid inclusions. *Geochim Cosmochim Acta*, 1995, 59: 5191-5197
  - 34 姚海涛, 郑海飞. 流体包裹体 Rb-Sr 等时线定年的可靠性. *地球化学*, 2001, 30(6): 507-511
  - 35 贾宝华. 雪峰山区韧性剪切构造带. *湖南地质*, 1992, 11(2): 203-208
  - 36 杨宗文. 雷山县开觉韧性剪切带特征及其构造意义. *贵州地质*, 1992, 9(1): 41-46
  - 37 朱霭林, 王常微, 易国贵, 等. 贵州雷公山地区过渡型剪切带及其与铋金多金属矿关系. *贵州地质*, 1995, 12(1): 1-22
  - 38 丘元禧, 张渝昌, 马文璞. 雪峰山陆内造山带的构造特征与演化. *高校地质学报*, 1998, 4(4): 432-443
  - 39 侯光久, 索书田, 郑贵州, 等. 雪峰山加里东运动及其体制转换. *湖南地质*, 1998, 17(3): 141-144
  - 40 万嘉敏. 湘西西安白钨矿矿床的地球化学研究. *地球化学*, 1986, 15(2): 183-192
  - 41 王秀璋, 梁华英, 单强, 等. 金山金矿成矿年龄测定及华南加里东成金期的讨论. *地质论评*, 1999, 45(1): 19-25
  - 42 彭建堂, 戴塔根. 雪峰地区金成矿时代问题的探讨. *地质与勘探*, 1998, 34(4): 37-41
  - 43 Yang S X, Blum N. A fossil hydrothermal system or a source-bed in the Madiyi Formation near the Xiangxi Au-Sb-W deposit, NW Hunan, P R China. *Chem Geol*, 1999, 155: 151-169
  - 44 彭建堂, 胡瑞忠, 赵军红, 等. 沃溪 Au-Sb-W 矿床中富放射成因 Sr 的成矿流体及其指示意义. *矿物岩石地球化学通报*, 2003, 23(3): 193-196
  - 45 秦葆瑚. 台湾-四川黑水地学大断面所揭示的湖南深部构造. *湖南地质*, 1991, 10(2): 89-95
  - 46 李献华, 赵振华, 桂训唐, 等. 华南前寒武纪地壳形成时代的 Sm-Nd 和铅石 U-Pb 同位素制约. *地球化学*, 1991, 20(3): 255-264
  - 47 甘晓春, 赵凤清, 金文山, 等. 华南火成岩中捕获锆石的早元古代-太古宙 U-Pb 年龄信息. *地球化学*, 1996, 25(2): 112-120
  - 48 彭建堂. 湖南雪峰地区金成矿演化机理探讨. *大地构造与成矿学*, 1999, 23(2): 144-151
  - 49 郑永飞. 新元古代岩浆活动与全球变化. *科学通报*, 2003, 48(16): 1705-1720

(2003-06-10 收稿, 2003-07-11 收修改稿)