

# 云南麻花坪钨铍矿成矿年龄及流体包裹体特征

马骏<sup>1,2</sup>, 陶琰<sup>1\*</sup>, 何德锋<sup>1</sup>, 熊风<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081;  
2. 中国科学院大学 地球科学学院, 北京 100049

**摘要:** 为探讨云南麻花坪钨铍矿床成因及其成矿动力学意义, 对该矿床开展了白云母<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 定年及流体包裹体研究。结果表明, 矿床成矿年龄为(32.06±0.11) Ma, 成矿流体为富CO<sub>2</sub>和高F的低盐度流体。研究认为, 麻花坪钨铍矿床为花岗质岩浆热液演化晚阶段形成的热液脉型矿床, 是印度-亚洲大陆碰撞在三江构造带的成矿作用响应, 成矿可能与地壳深熔花岗质岩浆活动有关, 反映了32 Ma左右金沙江构造带强烈的挤压、走滑、逆冲推覆环境, 揭示在与地壳深熔花岗质岩浆活动有关的热液作用具有稀有多金属矿产的找矿前景。

**关键词:** 钨铍矿; 成矿年龄; 流体包裹体; 花岗质岩浆热液; 云南麻花坪

中图分类号: P618.67; P618.72 文章编号: 1007-2802(2020)02-0223-10 doi: 10.19658/j.issn.1007-2802.2019.38.123

## The Ore-Forming Age and Fluid Inclusion Characteristics of the Mahuaping Tungsten-Beryllium Deposit in Yunnan Province

MA Jun<sup>1,2</sup>, TAO Yan<sup>1\*</sup>, HE De-feng<sup>1</sup>, XIONG Feng<sup>1,2</sup>

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. College of Earth Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** In order to explore genesis of the Mahuaping tungsten-beryllium-fluorite deposit in Yunnan Province and to reveal its metallogenetic dynamic significance, the muscovite <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar dating and fluid inclusion study of the deposit have been carried out in this paper. The results show that the ore-forming age of the deposit is (32.06±0.11) Ma, and the ore-forming fluid is characterized with low salinity, rich CO<sub>2</sub> and high F content. It is believed that the Mahuaping tungsten-beryllium-fluorite deposit is a hydrothermal vein type deposit formed in the late stage of granitic magmatic hydrothermal evolution, and is the metallogenetic response of the Indian-Asian continental collision in the Sanjiang tectonic belt. Its metallogenesis could be related to the deep-melting granitic magmatism in the crust. It could be formed in the strongly compressional, strike-slip and thrust nappe environments of the Jinshajiang tectonic belt around 32 Ma. It is revealed that the hydrothermal process associated with the anatectic granitic magmatism in the crust could produce the prospective target for polymetallic rare mineral resources.

**Key words:** the tungsten-beryllium deposit; the ore-forming age; fluid inclusion; the granitic magmatic hydrothermal fluid; the Mahuaping in Yunnan Province

## 0 引言

印度-亚洲大陆在65 Ma开始对接与碰撞(莫宣学和潘桂棠, 2006), 三江地区出现了一系列构造

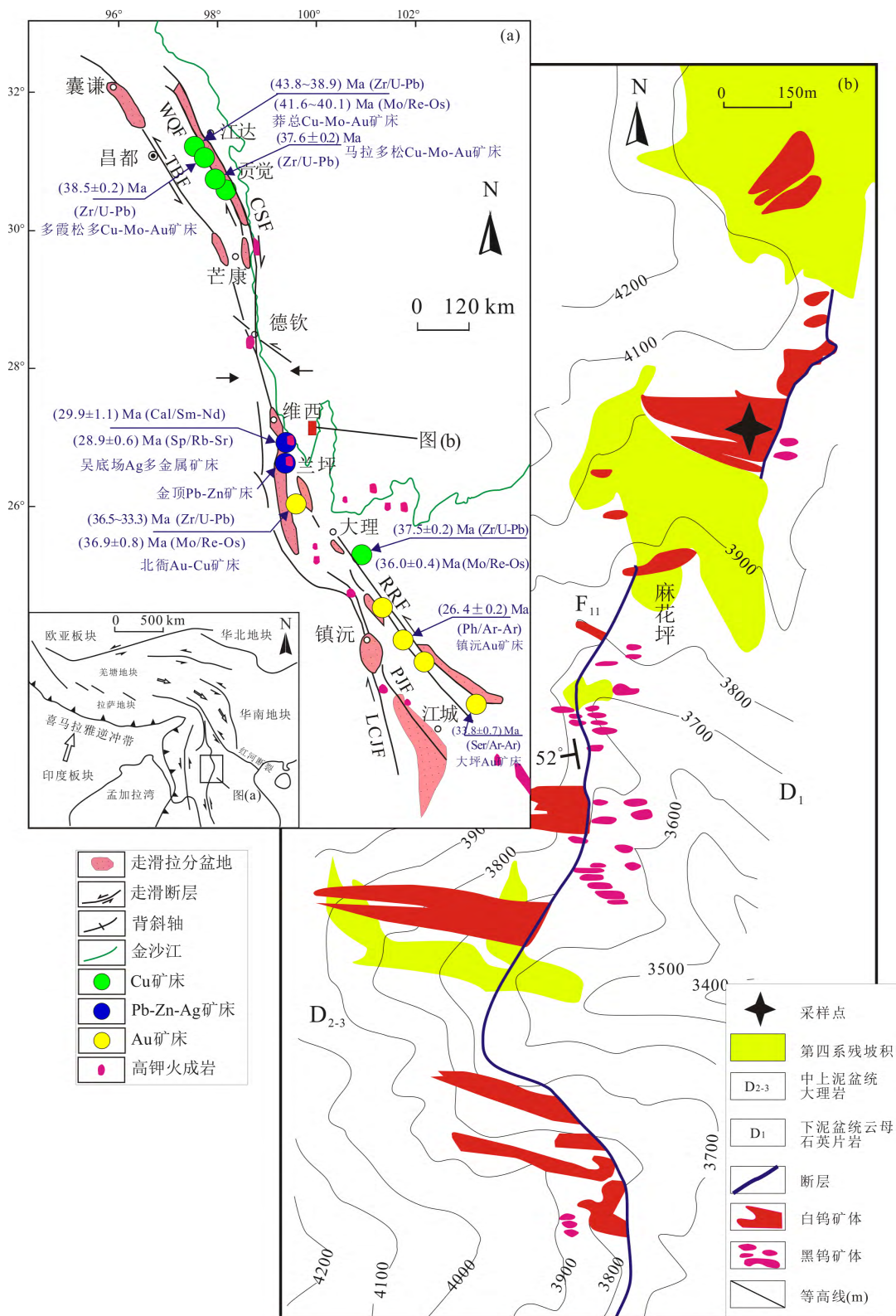
岩浆活动及成矿响应(侯增谦等, 2006; 邓军等, 2010a), 其中沿金沙江构造带大量产出新生代碱性岩、富碱斑岩、钾质碱性火山岩及与之相关的金、铜矿床(图1)。研究表明, 与成矿有关的构造岩浆活

收稿编号: 2019-057 2019-03-31 收到 2019-08-11 改回

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2015CB452603); 国家重点研发计划项目(2017YFC0602503)

第一作者简介: 马骏(1992-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 矿床地球化学。E-mail: majun@mail.gyig.ac.cn

\* 通信作者简介: 陶琰(1963-), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向: 矿床地球化学。E-mail: taoyan@vip.gyig.ac.cn



(a) 括号中为矿床年龄及其定年方法: Zr/U-Pb: 锆石 U-Pb 年龄; Mo/Re-Os: 辉钼矿 Re-Os 年龄; Cal/Sm-Nd: 方解石 Sm-Nd 年龄; Sp/Rb-Sr: 闪锌矿 Rb-Sr 年龄; Ph/Ar-Ar: 金云母 Ar-Ar 年龄; Ser/Ar-Ar: 绢云母 Ar-Ar 年龄。断裂名称: WQF-温泉断裂; RRF-红河断裂; TBF-受坝断裂; CSF-车所断裂; PJJ-碧江断裂; LCJF-澜沧江断裂。

修改自: Lin 等(2009); 冉明佳等(2011); Deng 等(2014, 2015)

图 1 金沙江-哀牢山构造带 (a) 及中甸县麻花坪钨铍矿床 (b) 地质简图

Fig.1 The simplified geological maps of the Jinshajiang-Ailaoshan tectonic belt (a) and the Mahuaping W-B deposit in the Zhongdian area (b)

动为富集岩石圈地幔或新生下地壳部分熔融 (Huang *et al.*, 2010; Xu *et al.*, 2012; 杜斌等, 2018; 刘金字等, 2017); 在金沙江构造带产出的麻花坪钨铍矿为热液脉型稀有多金属矿床, 其成因类型与金沙江-哀牢山富碱斑岩型金、铜矿床截然不同, 钨铍矿在成因上一般被认为与壳源花岗岩岩浆活动有关, 反映强烈的挤压、走滑、逆冲推覆背景下的地壳加厚、糜棱岩化及深熔作用。因此, 麻花坪钨铍矿的产出具有十分突出的科学意义, 准确界定麻花坪钨铍矿的成矿年龄、探讨其成因、揭示与成矿作用相关的构造岩浆活动, 有助于进一步认识金沙江构造带新生代成矿作用及三江地区深部动力学过程。

目前对麻花坪钨铍矿的研究还非常薄弱, 少量研究工作主要限于对矿区控矿构造的分析 (冉明佳等, 2011, 2015)。本文通过对矿床中的白云母的<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar定年对成矿年龄进行精确限定, 并结合矿化特征及成矿流体包裹体分析探讨麻花坪钨铍矿成因、揭示其成矿动力学意义, 对金沙江地区稀有金属找矿勘探提供参考依据。

### 1 矿床地质特征

麻花坪钨铍矿为金沙江构造带产出的典型热液脉型稀有金属矿床。矿区位于云南香格里拉县虎跳峡镇境内哈巴雪山南侧的麻花坪村一带, 是一个钨、铍、水晶、萤石多矿种的综合矿床。其中WO<sub>3</sub>平均品位0.368%, 资源量达到大型矿床规模; BeO资源量达到超大型矿床规模。

麻花坪矿床位于扬子地块西缘、三江构造带附近, 矿化主要产出在下泥盆统变质碎屑岩与中-上泥盆统大理岩接触界面附近, 矿带南北长约3 km、宽约0.4~0.5 km。矿区共控制矿体25个, 计算储量的矿体20个, 其中8个主矿体占总储量的97.6%, 矿体呈现近于平行的梳状矿脉带产出, 主矿体长128~489 m、宽12.26~94.22 m, 矿石平均品位: WO<sub>3</sub> 0.125%~0.751%, BeO 0.126%~0.459%。矿区共探获D级WO<sub>3</sub>金属储量52 634 t, 平均品位0.368%; BeO储量为31 943 t, 平均品位0.241% (云南省地质局第三地质大队, 1985)。

麻花坪矿区地表虽未见与矿化有关的酸性岩浆岩出露, 但围岩蚀变明显而强烈, 如褪色、硅化、黄铁矿化、碳酸盐化、白云母化、萤石化都与矿化有关, 尤其以白云母化、萤石化与矿化富集更为密切 (云南省地质局第一区域地质调查大队, 1975)。矿

化带总体上沿虎跳峡背斜西翼F<sub>11</sub>断裂带呈南北向展布 (图1), 长约2.5 km, 由于F<sub>11</sub>上、下盘的岩石类型和成矿地球化学环境不同, 因而其矿物组合、矿化特征也存在明显差异。

F<sub>11</sub>下盘的下泥盆统云母石英片岩中以黑钨矿矿化为主, 发育黑钨矿石英脉和萤石石英脉各近百条, 走向近东西, 倾角陡直, 组成6条长150~400 m、宽100~200 m的脉带, 单脉厚0.05~2.4 m, 脉距0.3~2 m。矿石中金属矿物主要是黑钨矿, 偶有白钨矿、黄铁矿、菱铁矿、辉铋矿、方铅矿、黄铜矿, 非金属矿物主要是水晶、白云母、萤石、黄玉、绿帘石等。围岩蚀变以硅化、褪色为主, 次有黄铁矿化、菱铁矿化及高岭土化。

F<sub>11</sub>上盘的中-上泥盆统大理岩中, 以白钨矿矿化为主。白钨矿石英脉沿大理岩底部发育的破劈理及F<sub>11</sub>充填。前者形成楔状矿体, 产状5°∠60°, 长10~40 m, 厚0.05~2 m; 后者形成似层状矿体, 产状250°∠38°, 长75~160 m, 厚0.47~4.45 m, 另有楔状和似层状组合的复合型矿体 (图2)。矿区有白钨矿-石英脉型和白云母-萤石型两类矿体, 后者亦含W和Be, 整个矿区以白钨矿为主, 黑钨矿较少, 绿柱石含量较高。麻花坪钨铍矿矿区照片及矿石显微照片分别如图3所示。

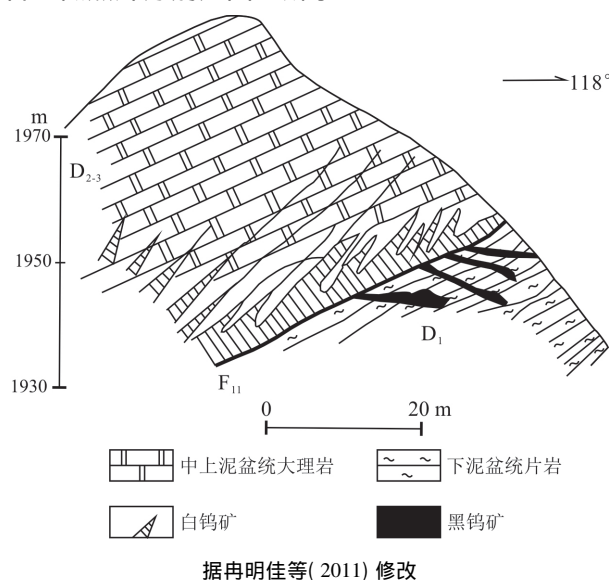
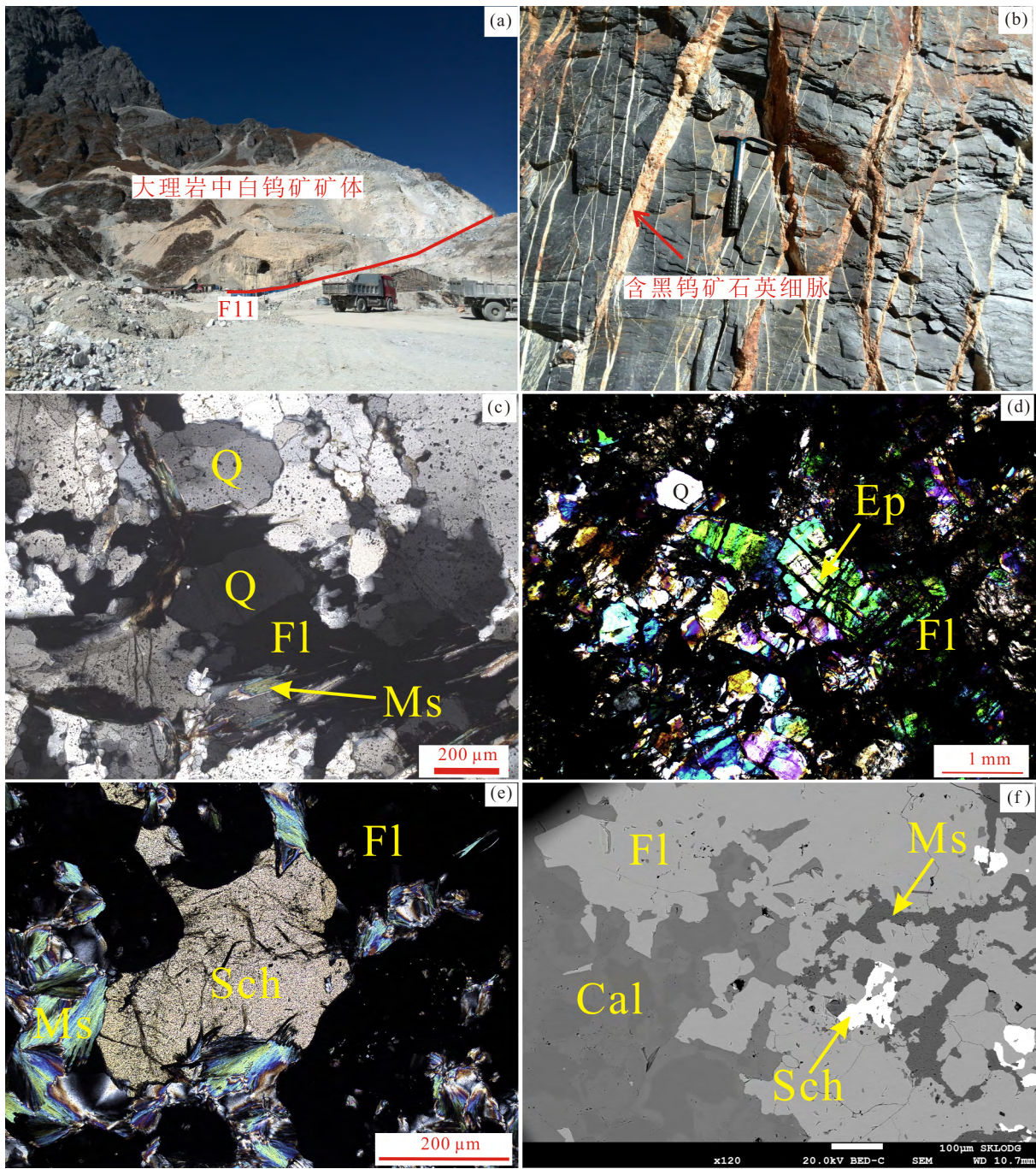


图2 F<sub>11</sub>断裂带矿体形态剖面图  
Fig.2 The profile of orebodies in the F<sub>11</sub> fracture zone

### 2 样品分析及结果

#### 2.1 <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar分析

从白钨矿-萤石-白云母组合的矿石样品中手工挑选出纯净的白云母 (图3e), 对样品进行去离子水



(a) 矿区照片; (b) 细脉状矿石; (c) 石英片岩中萤石、白云母共生组合(单偏光); (d) 石英片岩中萤石、绿帘石共生组合(正交偏光); (e) 大理岩中白钨矿、萤石、白云母共生组合(正交偏光); (f) 大理岩中白钨矿、萤石、白云母共生组合(SEM)。  
Q-石英; Fl-萤石; Ms-白云母; Sch-白钨矿; Cal-方解石; Ep-绿帘石

图3 麻花坪钨铍矿矿区照片及矿石显微照片

Fig.3 Photo of the orebody and micrographs of ores in the Mahuaping tungsten-beryllium deposit

和丙酮超声波清洗后 称取 10~60 mg,用纯铝箔纸将 40~60 目粒径的样品包装成直径约 5 mm 的圆柱形,密封于石英管中进行 24 h 中子照射,中子通量为  $2.65 \times 10^{13} \text{ n.cm}^2/\text{s}$ 。用于中子通量监测的标准样品为 FCs ( $28.294 \pm 0.036 \text{ Ma}$ ) 国际标样的测试结果: ACs 为 ( $1.174 \pm 0.008 \text{ Ma}$ ), Bern4M 为 ( $18.76 \pm 0.17 \text{ Ma}$ ), YBCs 为 ( $29.54 \pm 0.19 \text{ Ma}$ ), ZBH25 为

( $133.80 \pm 0.88 \text{ Ma}$ ),上述标样的测试结果与推荐值均在误差范围内一致。同时对纯物质  $\text{CaF}_2$  和  $\text{K}_2\text{SO}_4$  进行同步照射,得出的校正因子为: ( $^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar}$ )<sub>Ca</sub> = 0.000269, ( $^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar}$ )<sub>Ca</sub> = 0.001016, ( $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ )<sub>K</sub> = 0.006642。使用的衰减常数  $\lambda = 5.543 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$  (He et al., 2018)。  
照射后的样品冷置后,装入电阻炉顶部的样品

架上或分包于 CO<sub>2</sub> 激光器的样品盘中,密封去气 72 h 以上。样品测试由中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室的 Ar-Ar 年代学实验室完成。数据处理时,采用 ArArCalc 2.52 数据处理程序对各组 Ar 同位素测试数据进行校正计算,并计算坪年龄及等时线年龄(Koppers, 2002)。

麻花坪钨铍矿床中白云母的<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 年龄分析结果见表 1 和图 4。年龄谱线显示出平坦的坪值,85%的<sup>39</sup>Ar 被释放表明样品中的 K 和放射性<sup>40</sup>Ar 均匀分布并且 K-Ar 同位素系统不受地质历史上加热扰动的影响。白云母样品的 6 个连续过程(1000~1300 °C) 产生了加权坪年龄(32.06 ± 0.11) Ma (MSWD = 0.40; 图 4a)。等时线年龄为(32.08 ± 0.12) Ma (MSWD=0.49), 初始<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar 值为 293.9 ± 8.8 (图 4b), 反相等时线年龄为(32.07 ± 0.12) Ma (MSWD=0.48), 初始<sup>40</sup>Ar / <sup>36</sup>Ar 值为 294.1 ± 8.8 (图 4c)。最初的<sup>40</sup>Ar / <sup>36</sup>Ar 值接近大气压值,表明样品中没有过量的氩气。因此,坪年龄(32.06 ± 0.11) Ma 被认为是白云母矿化年龄的可靠估计。

### 2.2 流体包裹体分析

样品是以热液萤石为寄主矿物的流体包裹体,其直径一般为 5~10 μm,个别 20 μm(图 5);形态主要为椭圆状、不规则多边形;充填度较高,一般在

70%以上。热液萤石中原生流体包裹体有三相包裹体(CO<sub>2</sub> 气相、CO<sub>2</sub> 液相、H<sub>2</sub>O 液相)和两相包裹体(H<sub>2</sub>O 气相、H<sub>2</sub>O 液相)。

单个流体包裹体气相组分的激光拉曼光谱分析在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成,分析仪器为英国产 Renishaw inVia Reflex 型显微共聚焦激光拉曼光谱仪。分析结果显示(图 6),三相包裹体中的气相部分主要为 CO<sub>2</sub> 气相,两相流体包裹体中的气相以含 CO<sub>2</sub> 和 F 为主。

流体包裹体均一温度及冰点测定在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成,分析仪器为 LINKIM 600 型冷热台,温度范围为-196~600 °C,冷冻数据和均一温度数据精度均为 ±0.1 °C,分析结果见表 2。分析结果表明,包裹体均一温度为 180~260 °C,盐度为 3%~8%(图 7),成矿流体为富 CO<sub>2</sub> 和 F 的低盐度流体。

## 3 讨论

### 3.1 矿床成因

钨的地球化学活性一般被认为与花岗岩岩浆活动有关(刘英俊,1982)。南岭地区盘古山钨矿科学钻探纵穿从石英脉带—碱质自蚀变带—钾长花

表 1 麻花坪钨铍矿白云母<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 年龄数据

Table 1 The <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar data of muscovite samples from the Mahuaping tungsten-beryllium deposit

t/°C	<sup>36</sup> Ar [mV]	<sup>37</sup> Ar [mV]	<sup>38</sup> Ar [mV]	<sup>39</sup> Ar [mV]	<sup>40</sup> Ar [mV]	<sup>40</sup> Ar(r) / <sup>39</sup> Ar(k)	年龄 ± 2 s / Ma	<sup>40</sup> Ar(r) / %	<sup>39</sup> Ar(k) / %
800	0.926 091 4	0.000 530 3	0.175 783 4	0.120 253	278.622 1	41.237 36	27.02 ± 42.63	1.78	0.77
1 000	0.651 682 6	0.006 149 9	0.184 684 1	3.834 011	379.692 1	48.778 06	31.91 ± 0.96	49.25	24.67
1 025	0.009 170 4	0.007 812 3	0.045 823 4	2.724 708	136.661 6	49.134 79	32.14 ± 0.24	97.96	17.53
1 050	0.006 940 2	0.002 828 0	0.037 252 7	2.256 377	112.737 5	49.027 76	32.07 ± 0.27	98.13	14.52
1 075	0.005 655 0	0.000 656 2	0.028 714 2	1.696 537	84.966 0	49.069 71	32.10 ± 0.24	97.98	10.92
1 125	0.009 305 9	0.000 032 0	0.026 234 0	1.543 449	78.128 7	48.810 50	31.93 ± 0.23	96.43	9.93
1 300	0.045 205 8	0.011 444 3	0.050 788 2	2.666 055	144.212 1	49.054 48	32.09 ± 0.25	90.69	17.15
1 500	0.026 065 2	0.002 806 5	0.016 169 9	0.700 624	40.486 6	46.766 05	30.61 ± 0.32	80.93	4.51

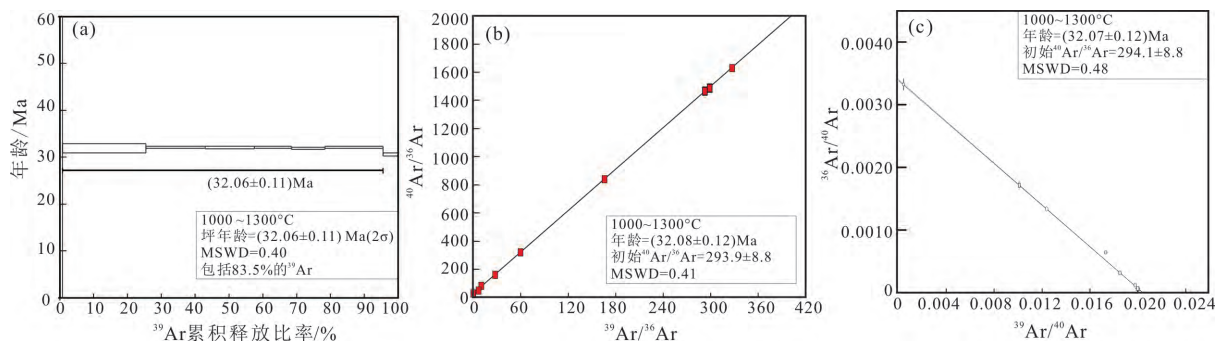
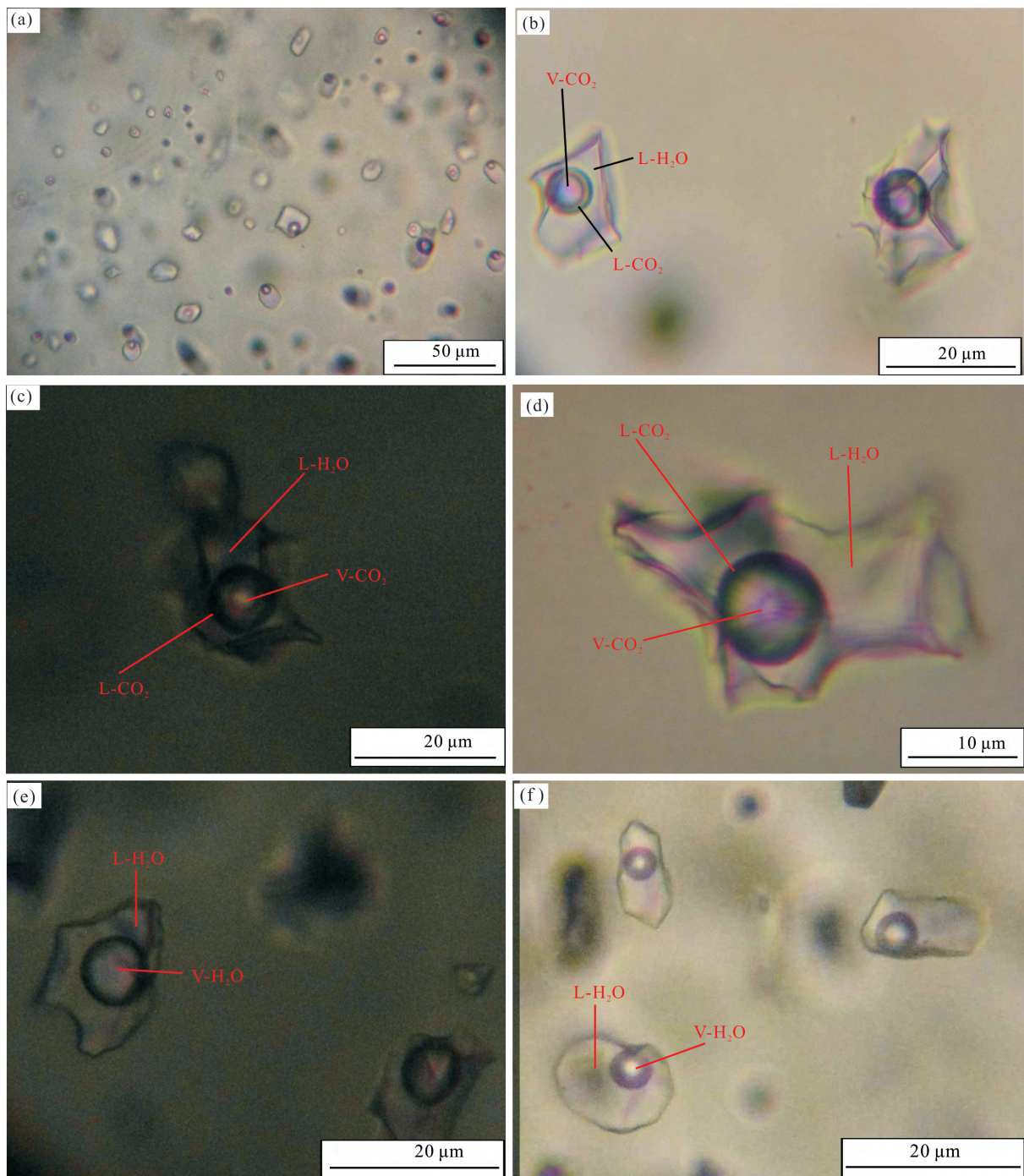


图 4 麻花坪钨铍矿中热液白云母的<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 坪年龄、等时线年龄及反相等时线年龄

Fig.4 Plateau, isochron and inverse isochron <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar ages of hydrothermal muscovite samples from the Mahuaping W-Be deposit



(a) 密集分布的流体包裹体; (b) (c) (d) 三相原生流体包裹体( CO<sub>2</sub> 气相 ,CO<sub>2</sub> 液相 ,H<sub>2</sub>O 液相);

(e) (f) 两相原生流体包裹体( H<sub>2</sub>O 气相 ,H<sub>2</sub>O 液相)

图 5 麻花坪钨铍矿床萤石中的流体包裹体

Fig.5 Fluid inclusions in the fluorite of the Mahuaping tungsten-beryllium deposit

花岗岩,证实花岗岩侵位—钾自蚀交代—云英岩化—石英脉型钨矿化在空间上和时间上都是一个连续的序列。矿化时间较岩体侵位大约晚 9~13 Ma;空间上,从上部石英脉型矿体经云英岩化、自蚀交代带到深部钾长花岗岩,有大约 1 000 m 的纵深 ( Fang *et al.*, 2018)。

铍的地球化学迁移主力为岩浆作用,单纯的

变质流体活动难以造成 Be 的成矿富集,Be 主要在伟晶岩中成矿 ( Evensen and London, 2002)。另外,铍矿也有以石英-方解石脉型等产出,如在 Gold Hill 地区产出的石英-方解石脉型铍矿床 ( Utah, USA),被认为与酸性岩浆有直接成因联系 ( Griffiths, 1965; Lindsey, 1977)。

麻花坪钨铍矿床矿石的特征矿物组合为白钨

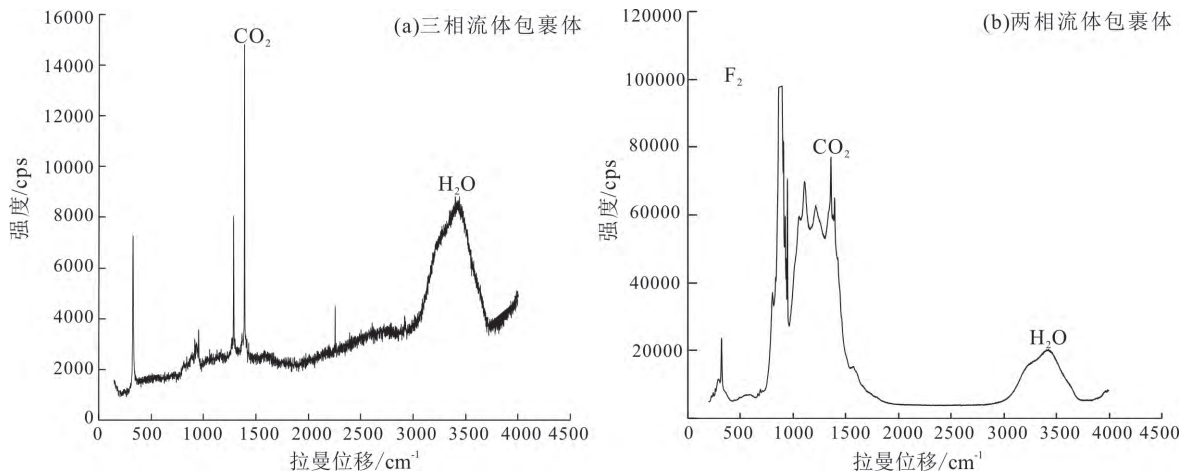


图6 麻花坪钨铍矿萤石中流体包裹体激光拉曼光谱

Fig.6 Laser Raman spectra of fluid inclusions in fluorite of the Mahuaping tungsten-beryllium deposit

表2 麻花坪钨铍矿萤石中的流体包裹体冷热台分析结果

Table 2 Microthermometric data of fluid inclusions in fluorites of the Mahuaping tungsten-beryllium deposit

样品编号	寄主矿物	冰点温度/°C	均一温度/°C	盐度/%	样品编号	寄主矿物	冰点温度/°C	均一温度/°C	盐度/%
MH8-6-1	萤石	-2.8	201.9	4.6	MH8-6-17	萤石	-3.1	209.9	5.1
MH8-6-2	萤石	-1.8	200.0	3.1	MH8-6-18	萤石	-3.2	217.0	5.3
MH8-6-3	萤石	-3.2	181.7	5.3	MH8-6-19	萤石	-3.3	201.0	5.4
MH8-6-4	萤石	-2.2	192.3	3.7	MH8-6-20	萤石	-3.6	211.3	5.9
MH8-6-5	萤石	-3.3	185.9	5.4	MH8-6-21	萤石	-2.7	248.1	4.5
MH8-6-6	萤石	-1.8	235.1	3.1	MH8-6-22	萤石	-4.5	249.3	7.2
MH8-6-7	萤石	-2.8	207.8	4.6	MH8-6-23	萤石	-2.9	247.3	4.8
MH8-6-8	萤石	-1.8	208.3	3.1	MH8-6-24	萤石	-3.9	238.5	6.3
MH8-6-9	萤石	-3.3	200.1	5.4	MH8-6-25	萤石	-4.8	250.7	7.6
MH8-6-10	萤石	-2.5	207.3	4.2	MH8-6-26	萤石	-1.1	242.8	1.9
MH8-6-11	萤石	-3	208.3	5.0	MH8-6-27	萤石	-2.3	249.3	3.9
MH8-6-12	萤石	-1.7	198.3	2.9	MH8-6-28	萤石	-4	246.5	6.4
MH8-6-13	萤石	-2.7	209.0	4.5	MH8-6-29	萤石	-5.1	239.5	8.0
MH8-6-14	萤石	-2.8	214.5	4.6	MH8-6-30	萤石	-3.9	230.1	6.3
MH8-6-15	萤石	-3.4	198.3	5.6	MH8-6-31	萤石	-4.2	251.0	6.7
MH8-6-16	萤石	-3.3	198.3	5.4					

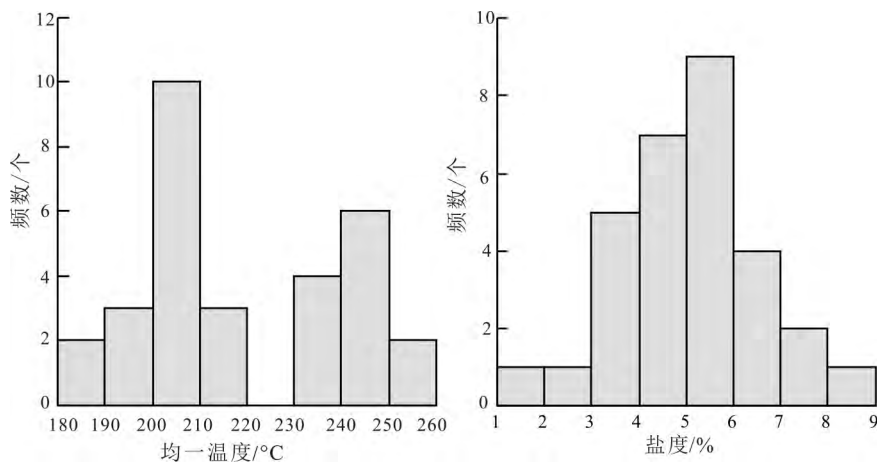


图7 麻花坪钨铍矿萤石中的流体包裹体均一温度、盐度分布直方图

Fig.7 Histograms of homogenization temperatures and salinities of fluid inclusions in fluorites of

the Mahuaping tungsten-beryllium deposit

矿、黑钨矿、萤石、绿帘石、石英、方解石、绿柱石等,显示其为花岗岩有关的热液脉型矿床的典型矿物组合特征。流体包裹体显示成矿流体富  $\text{CO}_2$  和 F, 缺乏  $\text{N}_2$ 、 $\text{CH}_4$  组分, 也与岩浆热液脉型矿床流体特征一致 (Wilkinson, 2001), 成矿流体低盐度反映麻坪钨铍矿可能形成于岩浆流体演化比较晚期的阶段。国内外对 Be 与 W 的伴生成矿少见报道, 麻坪 Be 与 W 的伴生可能是三江地区地壳中 Be 的区域背景值较高, 如云南麻栗坡、保山、贡山等地广泛产出伟晶岩型钨铍矿。

钨矿主要分为矽卡岩型、云英岩-石英脉型、细脉型, 以及斑岩中产出的钨矿床 (Zhou *et al.*, 2018; Sillitoe and Mortensen, 2010; Mao *et al.*, 2015), 不同矿化类型可以组合产出, 构成从高温到低温的成矿演化系统 (毛景文等, 2012; Zhao *et al.*, 2017)。麻坪钨铍矿呈细脉状产出, 成矿温度及盐度均较低, 相当于岩浆流体演化比较晚期形成的细脉型岩浆热液矿床。根据岩浆热液钨矿成矿系统可能存在的空间分带 (毛景文等, 2012; Fang *et al.*, 2018), 分析认为麻坪钨铍矿向下部延伸可能有云英岩化及其他类型的钨铍矿化, 推测深部有花岗岩体存在。

### 3.2 成矿区域动力学背景

印度-亚洲大陆在 65 Ma 开始对接与碰撞 (莫宣学和潘桂棠, 2006), 三江地区是重要的构造转换带, 沿金沙江-哀牢山构造带大量产出新生代碱性岩、富碱斑岩及钾质碱性火山岩 (毕献武等, 2005; 梁华英等, 2009; 邓军等, 2010b), 被认为是加厚的新生地壳或富集上地幔物质熔融作用形成的。近年来, 三江特提斯构造转换带强烈的挤压、走滑、逆冲推覆作用造成的地壳深熔作用也被逐渐得到认识, 在金沙江、澜沧江及怒江基底隆起带变质岩中发现大量新生代花岗岩脉 (Wang *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2010, 2014; Liu *et al.*, 2015; 毕献武等, 2019), 属过铝质高钾钙碱性的浅色花岗岩, 锆石 U-Pb 年龄分布在 16~38 Ma, 研究表明这些花岗岩脉是强烈逆冲推覆作用导致陆壳物质重熔的产物, 其锆石 Hf 同位素组成主要为 -10~-5 (毕献武等, 2019)。这些基底变质带中花岗岩脉的广泛发育反映了三江特提斯构造转换带强烈的挤压、走滑、逆冲推覆导致地壳加厚、糜棱岩化及深熔作用, 造成区域中上部地壳广泛的变形变质作用及岩浆活动。

研究表明, 与钨成矿有关的花岗岩主要为上地壳熔融形成的 S 型花岗岩, 如西华山钨矿、南岭宝山白钨矿等 (毛景文等, 2012; Hu and Zhou, 2012; Zhao

and Zhou, 2018); A 型花岗岩也可形成钨矿, 如广东鸚鹑岭钨锡矿, 其与成矿相关的鸚鹑岭岩体具有 A 型花岗岩的成因属性 (Zhang *et al.*, 2018); I 型花岗岩也可以形成与钨矿有关的矿床, 但一般以金成矿为主, 形成金钨矿 (Soloviev *et al.*, 2017)。根据麻坪成矿特征, 结合隆起带上同期花岗岩脉的产出, 分析认为与麻坪钨铍成矿作用有关的岩浆活动可能相当于隆起带上由强烈挤压、走滑、逆冲推覆作用引发地壳深熔形成的过铝质高钾钙碱性花岗质岩浆作用。

### 3.3 成矿时限

冉明佳 (2011) 曾对矿区的黑钨矿石英脉和绿柱石英脉样品中的石英进行电子自旋共振 (ESR) 年龄测定, 获得年龄值分别为 13.7 Ma 和 21.5 Ma, 平均 17.6 Ma, 但其 ESR 记录的是最新近一次的热扰动时间, 不能确切反映真正的成矿年龄。本次研究获得麻坪钨铍矿中白云母的  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  法年龄为  $(32.06 \pm 0.11)$  Ma, 所测热液白云母与白钨矿密切共生 (图 3e, 3f), 可以代表麻坪钨铍矿床的矿化年龄。

Lacassin 等 (1996) 对虎跳峡背斜的变形时代的研究表明, 虎跳峡剖面泥盆系大理岩中, 代表顺层韧性剪切变形的金云母 Rb-Sr 等时线年龄为  $(35.9 \pm 0.3)$  Ma, 可能代表金沙江构造带虎跳峡深部构造岩浆活动发生的时间, 即在挤压、走滑、逆冲推覆背景下的地壳加厚、糜棱岩化和深熔作用的时间。冉明佳 (2011) 获得的矿区热液石英 ESR 年龄 13.7 Ma 和 21.5 Ma 记录了最新的热扰动时间, 反映金沙江构造带持续多次的变形变质及构造隆升。

已有研究表明, 沿金沙江构造带大量产出的新生代碱性岩、富碱斑岩、钾质碱性火山岩及其有关的金、铜矿床的形成也主要集中于 32~37 Ma (Deng *et al.*, 2014)。麻坪钨铍矿成矿年龄及隆起带上广泛产出的过铝质高钾钙碱性花岗质岩脉的形成年龄 (毕献武等, 2019) 与富碱斑岩为代表的富碱质岩浆活动时限基本相同, 可见两类不同性质的岩浆活动被约束在统一的动力学背景下, 我们认为, 该动力学背景可归结于西南三江地区强烈的挤压、走滑、逆冲推覆作用, 并由此造成地壳加厚、新生的下地壳发生同熔作用 (也可能伴有富集岩石圈地幔的部分熔融叠加) 形成富碱质岩浆, 同时上地壳在走滑推覆作用下发生深熔作用形成过铝质高钾钙碱性花岗质岩浆。

以上研究表明, 晚始新世时期金沙江虎跳峡地区存在着地壳深熔花岗质岩浆活动, 麻坪钨铍矿



是印度-亚洲大陆碰撞在三江构造带的成矿作用响应。结合虎跳峡地区相关年代学研究成果综合分析认为,虎跳峡地区新生代变形变质及深熔作用可能始于(35.9±0.3) Ma。麻花坪钨铍矿中热液白云母(32.06±0.11) Ma 的<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 法年龄记录了其重要的成矿事件。

#### 4 结论

(1) 麻花坪钨铍矿床的成矿年龄为(32.06±0.11) Ma。

(2) 麻花坪钨铍矿成矿流体为富 CO<sub>2</sub> 和高 F 的低盐度流体,是地壳深熔花岗质岩浆热液演化晚阶段形成的热液脉型矿床。

(3) 金沙江构造带具有与地壳深熔花岗质岩浆活动有关的稀有金属矿产的找矿前景。

#### 参考文献(References):

Koppers A A P. 2002. Ar/Ar CALC—software for Ar/Ar age calculations. *Computers & Geosciences*, 28(5): 605–619.

Deng J, Wang QF, Li G J, Santosh M. 2014. Cenozoic tectono-magmatic and metallogenic processes in the Sanjiang region, southwestern China. *Earth-Science Reviews*, 138: 268–299

Deng J, Wang Q F, Li G J, Zhao Y. 2015. Structural control and genesis of the Oligocene Zhenyuan orogenic gold deposit, SW China. *Ore Geology Reviews*, 65: 42–54

Evensen J M, London D. 2002. Experimental silicate mineral/melt partition coefficients for beryllium and the crustal Be cycle from migmatite to pegmatite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(12): 2239–2265

Fang G C, Zhao Z, Chen Y C, Chen Z H, Krapez B, Mao J W. 2018. Genetic relationship between granitic magmatism and W mineralization recorded in the Nanling Scientific Drilling (SP-NLSD-2) in the Pangushan W mining district, South China. *Ore Geology Reviews*, 101: 556–577

Griffitts W R. 1965. Recently discovered beryllium deposits near Gold Hill, Utah. *Economic Geology*, 60(6): 1298–1305

He Defeng, Stuart F M, Barfod D N, Xiao F, Zhong H. 2018. The performance of the Noblesse multi-collector noble gas mass spectrometer for <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar geochronology. *Acta Geochimica*, 37(5): 734–745

Hu R Z, Zhou M F. 2012. Multiple Mesozoic mineralization events in South China: an introduction to the thematic issue. *Mineralium Deposita*, 47(6): 579–588

Huang X L, Niu Y L, Xu Y G, Chen L L, Yang Q J. 2010. Mineralogical and geochemical constraints on the petrogenesis of post-collisional potassic and ultrapotassic rocks from western Yunnan, SW China. *Journal of Petrology*, 51(8): 1617–1654

Lacassin R, Schärer U, Leloup P H, Arnaud N, Tapponnier P, Liu X H, Zhang L S. 1996. Tertiary deformation and metamorphism SE of Tibet: The folded Tera. leap décollement of NW Yunnan, China. *Tectonics*, 15(3): 605–622

Lin T H, Lo C H, Chung S L, Hsu F J, Yeh M W, Lee T Y, Ji J Q, Wang Y Z, Liu D Y. 2009. <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar dating of the Jiali and Gaoligong shear zones: Implications for crustal deformation around the Eastern Himalayan Syntaxis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(5): 674–685

Lindsey D A. 1977. Epithermal beryllium deposits in water-laid tuff, western Utah. *Economic Geology*, 72(2): 219–232

Liu F L, Wang F, Liu P H, Yang H, Meng E. 2015. Multiple partial melting events in the Ailao Shan-Red River and Gaoligong Shan complex belts, SE Tibetan Plateau: Zircon U-Pb dating of granitic leucosomes within migmatites. *Journal of Asian Earth Sciences*, 110: 151–169

Mao Z H, Liu J J, Mao J W, Deng J, Zhang F, Meng X Y, Xiong B K, Xiang X K, Luo X H. 2015. Geochronology and geochemistry of granitoids related to the giant Dahutang tungsten deposit, middle Yangtze River region, China: Implications for petrogenesis, geodynamic setting, and mineralization. *Gondwana Research*, 28(2): 816–836

Sillitoe R H, Mortensen J K. 2010. Longevity of Porphyry copper formation at Quellaveco, Peru. *Economic geology*, 105(6): 1157–1162

Soloviev S G, Kryazhev S G, Dvurechenskaya S S. 2017. Geology, mineralization, and fluid inclusion characteristics of the Lermontovskoe reduced-type tungsten (±Cu, Au, Bi) skarn deposit, Sikhote-Alin, Russia. *Ore Geology Reviews*, 89: 15–39

Wang Y J, Fan W M, Zhang Y H, Peng T P, Chen X Y, Xu Y G. 2006. Kinematics and <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar geochronology of the Gaoligong and Chongshan shear systems, western Yunnan, China: Implications for early Oligocene tectonic extrusion of SE Asia. *Tectonophysics*, 418(3–4): 235–254

Wilkinson J J. 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55(1): 229–272

Xu L L, Bi X W, Hu R Z, Zhang X C, Su W C, Qu W J, Hu Z C, Tang Y Y. 2012. Relationships between porphyry Cu-Mo mineralization in the Jinshajiang-Red River metallogenic belt and tectonic activity: Constraints from zircon U-Pb and molybdenite Re-Os geochronology. *Ore Geology Reviews*, 48: 460–473

Zhang B, Zhang J J, Zhong D L. 2010. Structure, kinematics and ages of transpression during strain-partitioning in the Chongshan shear zone, western Yunnan, China. *Journal of Structural Geology*, 32(4): 445–463

Zhang B, Zhang J J, Liu J, Wang Y, Yin C Y, Guo L, Zhong D L, Lai Q Z, Yue Y H. 2014. The Xuelongshan high strain zone: Cenozoic structural evolution and implications for fault linkages and deformation along the Ailao Shan-Red River shear zone. *Journal of Structural Geology*, 69: 209–233

Zhang L P, Zhang R Q, Wu K, Chen Y X, Li C Y, Hu Y B, He J J, Liang J L, Sun W D. 2018. Late Cretaceous granitic magmatism and mineralization in the Yingwuling W-Sn deposit, South China: Constraints from zircon and cassiterite U-Pb geochronology and whole-rock geochemistry. *Ore Geology Reviews*, 96: 115–129

Zhao W W, Zhou M F, Li Y H M, Zhao Z, Gao J F. 2017. Mesozoic types, mineralization styles, and geodynamic settings of Mesozoic tungsten deposits in South China. *Journal of Asian Earth Sciences*,

- 137: 109-140
- Zhao W W, Zhou M F. 2018. Mineralogical and metasomatic evolution of the Jurassic Baoshan scheelite skarn deposit, Nanling, South China. *Ore Geology Reviews*, 95: 182-194
- Zhou M F, Gao J F, Zhao Z, Zhao W W. 2018. Introduction to the special issue of Mesozoic W-Sn deposits in South China. *Ore Geology Reviews*, 101: 432-436
- 毕献武, 胡瑞忠, 彭建堂, 苏文超, 战新志. 2005. 姚安和马厂箐富碱侵入岩体的地球化学特征. *岩石学报*, 21(1): 113-124
- 毕献武, 唐永永, 陶琰, 王长明, 胥磊落, 戚华文, 兰青, 木兰. 2019. 西南三江碰撞造山带沉积岩容矿 Pb-Zn-Ag-Cu 贱金属复合成矿与深部过程. *岩石学报*, 35(5): 1341-1371
- 邓军, 侯增谦, 莫宣学, 杨立强, 王庆飞, 王长明. 2010a. 三江特提斯复合造山与成矿作用. *矿床地质*, 29(1): 37-42
- 邓军, 杨立强, 葛良胜, 袁士松, 王庆飞, 张静, 龚庆杰, 王长明. 2010b. 滇西富碱斑岩型金成矿系统特征与变化保存. *岩石学报*, 26(6): 1633-1645
- 杜斌, 王长明, 杨立飞, 石康兴, 张端, 陈奇, 祝佳萱, 张淑花. 2018. 西南三江永平卓潘碱性杂岩体源区与形成机制: 全岩元素、锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素联合约束. *岩石学报*, 34(5): 1376-1396
- 侯增谦, 莫宣学, 杨志明, 王安建, 潘桂棠, 曲晓明, 聂凤军. 2006. 青藏高原碰撞造山带成矿作用: 构造背景、时空分布和主要类型. *中国地质*, 33(2): 340-351
- 梁华英, 莫济海, 孙卫东, 张玉泉, 曾提, 胡光黔, Allen C. 2009. 玉龙铜矿带马拉松多斑岩体岩石学及成岩成矿系统年代学分析. *岩石学报*, 25(2): 385-392
- 刘金宇, 邓军, 李龚健, 肖昌浩, 孟富军, 陈福川, 吴伟, 张琦玮. 2017. 滇西兰坪盆地莲花山岩体成因与构造意义: 岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素约束. *岩石学报*, 33(7): 2115-2128
- 刘英俊. 1982. 论钨的成矿地球化学. *地质与勘探*, (1): 15-23
- 毛景文, 张作衡, 裴荣富. 2012. 中国矿床模型概论. 北京: 地质出版社, 99-103
- 莫宣学, 潘桂棠. 2006. 从特提斯到青藏高原形成: 构造-岩浆事件的约束. *地学前缘*, 13(6): 43-51
- 冉明佳, 钟康惠, 李凡友, 罗明非, 刘肇昌, 唐菊兴. 2011. 云南香格里拉麻花坪钨铍矿聚矿构造及成矿时代分析. *四川有色金属*, (2): 21-27
- 冉明佳, 钟康惠, 杨建功, 罗明非. 2015. 云南香格里拉麻花坪钨铍矿床地球化学特征及其成因意义. *四川有色金属*, (2): 42-45, 70
- 云南省地质局第三地质大队. 1985. 云南省中甸县麻花坪矿区钨铍矿初步普查地质报告. 全国地质资料馆
- 云南省地质局第一区域地质调查大队. 1975. 1:20 万丽江幅区域地质调查. 全国地质资料馆

(本文责任编辑: 龚超颖; 英文审校: 张兴春)