

# 新疆西昆仑雪凤岭锂矿床铌钽铁矿、锡石年龄及其地质意义\*

白洪阳<sup>1,2</sup> 王核<sup>1,2\*\*</sup> 闫庆贺<sup>1,2</sup> 王赛蒙<sup>3</sup> 王振宏<sup>1,2</sup> 张晓宇<sup>1,2</sup> 高昊<sup>1,2</sup> 秦艳<sup>1</sup>

BAI HongYang<sup>1,2</sup>, WANG He<sup>1,2\*\*</sup>, YAN QinHe<sup>1,2</sup>, WANG SaiMeng<sup>3</sup>, WANG ZhengHong<sup>1,2</sup>, ZHANG XiaoYu<sup>1,2</sup>, GAO Hao<sup>1,2</sup> and QIN Yan<sup>1</sup>

1. 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, 广州 510640

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 广东省有色地质勘查院, 广州 510089

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. Guangdong Nonferrous Metals Geological Exploration Institution, Guangzhou 510089, China

2022-03-01 收稿, 2022-06-16 改回.

Bai HY, Wang H, Yan QH, Wang SM, Wang ZH, Zhang XY, Gao H and Qin Y. 2022. Columbite-tantalite and cassiterite ages of Xuefengling lithium deposit in West Kunlun, Xinjiang and their geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 38 (7):2139–2152, doi:10.18654/1000-0569/2022.07.19

**Abstract** Lithium is one of the most important strategic metals in modern industries. The Xuefengling pegmatite type lithium deposit is another large lithium deposit discovered in West Kunlun-Karakoram after the Bailongshan lithium deposit. In order to constrain the metallogenic age and metallogenic model of the deposit, and deeply understand the metallogenic regularity of the West Kunlun metallogenic belt, the LA-ICP-MS U-Pb age of columbite-(Fe) and cassiterite in the Xuefengling lithium deposit are determined. The weighted average ages of the columbite-(Fe) (containing high U and low Th) is  $208.2 \pm 2.1$  Ma, while that of the cassiterite is  $208 \pm 15$  Ma, and they are consistent with each other within acceptable errors, representing the metallogenic age of pegmatite vein. Compared with those deposits mentioned above, the Xuefengling lithium deposit was also formed in the Late Triassic. Regionally, the metallogenic age of pegmatite lithium deposits in the West Kunlun area is similar to that in Songpan-Ganzi area which is closely related to the Triassic granites in these areas. They form a 2800-km-long Paleo-Thethys lithium metallogenic belt. The Heishibeihu, Yunwuling and Muzitage areas are the prospective areas for the next breakthrough in lithium prospecting in the Paleotetian metallogenic belt.

**Key words** Metallogenic age; Columbite-(Fe) U-Pb dating; Cassiterite U-Pb dating; Pegmatite type lithium deposit; West Kunlun orogenic belt

**摘要** 锂是现代工业中重要的战略金属。雪凤岭伟晶岩型锂矿床是继白龙山锂矿后在西昆仑成矿带发现的又一个大型锂矿床。为探究雪凤岭锂矿床的成矿年龄和成矿模式,深入了解西昆仑成矿带的成矿规律,本文测定了雪凤岭锂矿床铌钽铁矿和锡石的 LA-ICP-MS U-Pb 年龄。结果表明,铌钽铁矿(含高 U 和低 Th)和锡石的加权平均年龄分别为  $208.2 \pm 2.1$  Ma 和  $208 \pm 15$  Ma,二者在误差范围内一致,因此代表了雪凤岭锂矿床的成矿年龄,即该矿床与西昆仑地区其他锂矿床均形成于晚三叠世。区域上,西昆仑地区与松潘-甘孜地区的伟晶岩型锂矿床成矿年代相近,其形成均与三叠纪花岗岩密切相关,即它们共同构成了 2800km 长的古特提斯锂成矿带。本文认为黑石北湖、云雾岭和木孜塔格地区是古特提斯成矿带下一步锂矿找矿突破的远景区。

\* 本文受国家重点研发项目(2019YFC0605201)、第二次青藏高原综合科学考察(2019QZKK0802)、国家自然科学基金项目(91962215、41972088)和新疆维吾尔自治区科技重大专项、重点研发专项(2019B00011、2020A03005)联合资助。

第一作者简介:白洪阳,男,1996年生,博士生,矿床学专业,E-mail: baihongyang@gig.ac.cn

\*\* 通讯作者:王核,男,1966年生,研究员,博士生导师,矿床学专业,E-mail: wanghe@gig.ac.cn

**关键词** 成矿时代; 铌钽铁矿 U-Pb 定年; 锡石 U-Pb 定年; 伟晶岩型锂矿床; 西昆仑成矿带  
**中图法分类号** P597.3; P618.71

锂是重要的战略资源, 广泛应用于新能源、国防、航天、航空等工业领域(翟明国等, 2019; 许志琴等, 2021)。随着我国“碳中和”目标的提出, 中国未来对于锂的需求也会跨越式增长, 但是我国锂资源主要依赖进口, 对外依存度高达80%。因此锂矿资源的研究依然十分重要, 不仅具有很高的经济价值, 还有重要的战略意义(刘丽君等, 2019; 翟明国等, 2019; 许志琴等, 2021)。

我国的伟晶岩型锂矿床主要集中在川西、西昆仑、阿尔泰、东秦岭、阿尔金北缘、茶卡北山、喜马拉雅、华南等地区(Li *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2020; 李杭等, 2020; 秦克章等, 2019, 2021; 王核等, 2021; 周楷麟, 2021; 周起凤等, 2021), 成矿时代主要为加里东期、印支期、燕山期和喜山期。西昆仑-喀喇昆仑伟晶岩型锂矿床主要集

中在西段的木吉-布伦口地区和东段的大红柳滩地区(图1)。木吉一带的肖尔布龙锂矿床( $\sim 204.6\text{Ma}$ )和霍什塔什锂矿床( $\sim 205.7\text{Ma}$ )和大红柳滩一带的大红柳滩锂矿床( $\sim 211\text{Ma}$ )、白龙山锂矿床( $\sim 208.1\text{Ma}$ )都形成于晚三叠世, 与西昆仑造山带广泛出露的三叠纪花岗岩密切相关(Yan *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2020)。

雪凤岭锂矿床是在西昆仑地区继白龙山矿床后新发现的又一个大型锂矿床, 前人对雪凤岭锂矿床的地质特征等进行了初步研究(王核等, 2020), 但是对该矿床的成矿年龄和成矿模式尚未进行研究。本文利用铌钽铁矿和锡石 U-Pb 定年厘定雪凤岭矿床的成矿年龄, 以期为深入了解西昆仑造山带乃至整个古特提斯稀有金属成矿带的成矿规律提供新证据, 进而探讨该地区稀有金属矿产勘查方向。

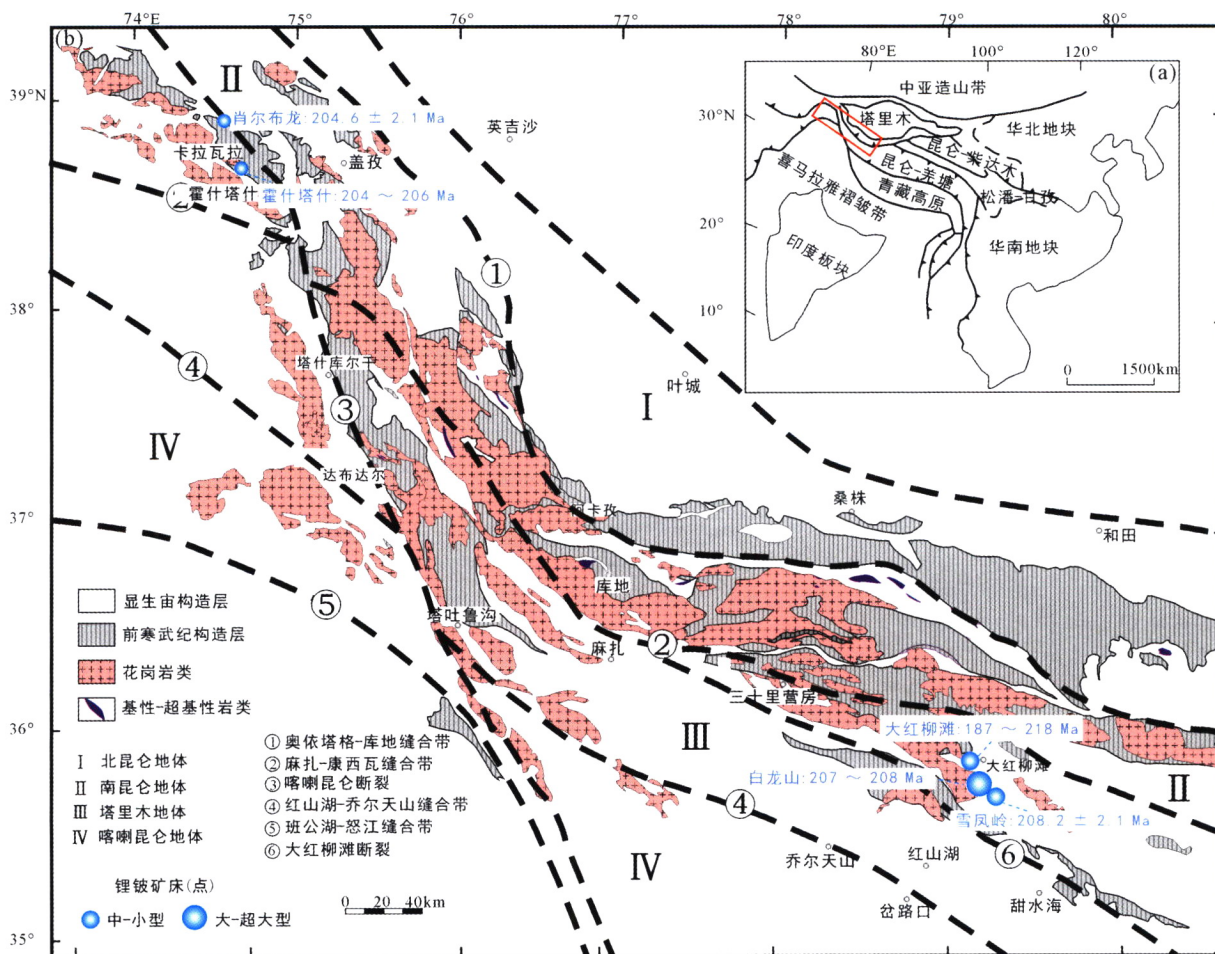


图1 西昆仑造山带区域构造图(a, 据 Xiao *et al.*, 2005; Yan *et al.*, 2022 修改)及西昆仑-松潘-甘孜造山带主要伟晶岩型锂矿床分布简图(b, 据 Yan *et al.*, 2022 修编)

Fig. 1 Regional tectonic map showing the location of the West Kunlun orogenic belt (a, modified after Xiao *et al.*, 2005; Yan *et al.*, 2022) and simplified map of the major pegmatite-type Li deposits in the West Kunlun-Songpan-Garzê (b, modified after Yan *et al.*, 2022)

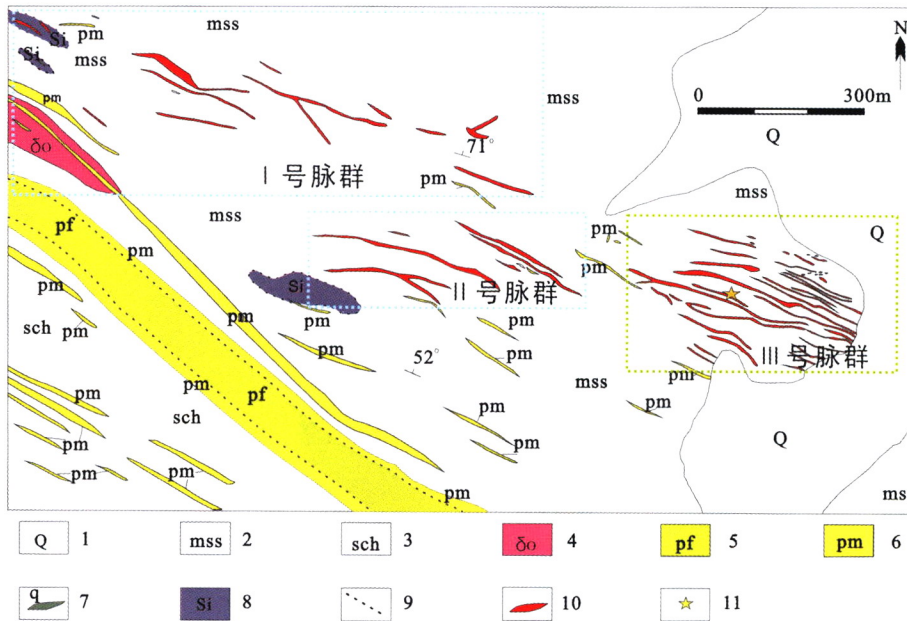


图2 喀喇昆仑雪凤岭锂矿床地质简图(据王核等,2020 修编)

1-第四系; 2-变砂岩; 3-片岩; 4-石英闪长岩; 5-块体长石伟晶岩; 6-石英钠长石白云母伟晶岩; 7-石英脉; 8-硅化; 9-岩相界线; 10-锂矿体; 11-采样位置

Fig. 2 Geological map of the Xuefengling lithium deposit in Karakoram (after Wang *et al.*, 2020)

1-Quaternary; 2-metasandstone; 3-schist; 4-granodiorite; 5-block feldspar pegmatite; 6-quartz albite Muscovite pegmatite; 7-quartz vein; 8-silicification; 9-lithofacies boundary; 10-lithium ore body; 11-sampling location

## 1 矿区地质背景

雪凤岭锂多金属矿床是项目组近年来发现的大型锂矿床(王核等, 2020), 矿床位于和田县城西南方向约 200km (地理坐标:  $35^{\circ}47'45'' \sim 35^{\circ}48'10''N, 79^{\circ}18'20'' \sim 79^{\circ}19'40''E$ ), 大地构造位于西昆仑-喀喇昆仑造山带的甜水海地体东段。西昆仑-喀喇昆仑造山带南接青藏高原, 北接塔里木盆地, 是特提斯造山带的重要组成部分, 从北到南分为四个构造单元, 即: 北昆仑地体、南昆仑地体、甜水海地体和喀喇昆仑地体(Yan *et al.*, 2018; 张传林等, 2019; Wang *et al.*, 2020; 吴福元等, 2020)(图 1)。甜水海地体呈 NW-SE 向, 北起麻扎-康西瓦缝合带, 南至红山湖-乔尔天山缝合带(图 1b; Hu *et al.*, 2016; Yan *et al.*, 2018)。前人认为甜水海地体是一个巨大的增生楔, 是原特提斯洋长期向麻扎尔-甜水海地体之下俯冲的结果, 记录了南昆仑地体与喀喇昆仑地体之间古生代-中生代俯冲相关的造山过程(Xiao *et al.*, 2005)。甜水海地块大红柳滩地区是目前我国锂矿勘查开发的热点地区, 主要矿床有大红柳滩锂矿、白龙山锂矿、509 道班西锂矿、俘虏沟 1 号脉等(王核等, 2017; 李侃等, 2019; 王威等, 2022)。

雪凤岭锂矿区主要出露地层为中生界三叠系巴颜喀拉山群, 主要岩性为灰绿色变砂岩和灰-深灰色二云母石英片岩, 变质程度较低, 属绿片岩相, 片理和节理比较发育。矿区

主要岩浆岩为石英闪长岩和花岗伟晶岩脉, 花岗伟晶岩脉有大小不同的 80 余条。

矿区主要出露一条长约 1750m、宽约 300m 的含锂辉石伟晶岩脉群(图 2), 整体可划分出 3 个含矿伟晶岩脉群带, 含有锂多金属矿体 47 条(图 2、图 3a), 矿体长 32 ~ 360m, 厚 0.9 ~ 8m。含矿伟晶岩  $Li_2O$  含量 0.6% ~ 3.74%, 伴生  $BeO$  品位 0.04% ~ 0.15%,  $Rb_2O$  品位 0.10% ~ 0.23%,  $Nb_2O_5$  品位 0.007% ~ 0.047%,  $Ta_2O_5$  品位 0.003% ~ 0.046%(王核等, 2020)。

伟晶岩脉群走向主要呈 NW-SE 向, 由北而南可分为石英脉、含矿伟晶岩脉群、石英-钠长石-白云母伟晶岩脉群(pm)、块体长石伟晶岩脉群(pf)和含黑色电气石伟晶岩脉群(pt)。其中含矿花岗伟晶岩脉又可分锂辉石-石英伟晶岩型、石英-锂辉石-钠长石型和石英-钠长石-锂辉石伟晶岩脉(王核等, 2020)。

## 2 样品特征及测试方法

### 2.1 样品特征

实验样品(18XFL-B02)取自 III-5 号矿体(图 2), 为石英-锂辉石-钠长石伟晶岩脉, 含石英(30% ~ 34%)、钠长石(19% ~ 25%)、锂辉石(30% ~ 34%)、白云母(1% ~ 2%)、钨钽铁矿(~0.01%)和锡石(~0.2%)。手标本中锂辉石粒径长约 1 ~ 10cm, 锆石、锡石、钨钽铁矿和白云母是主要的

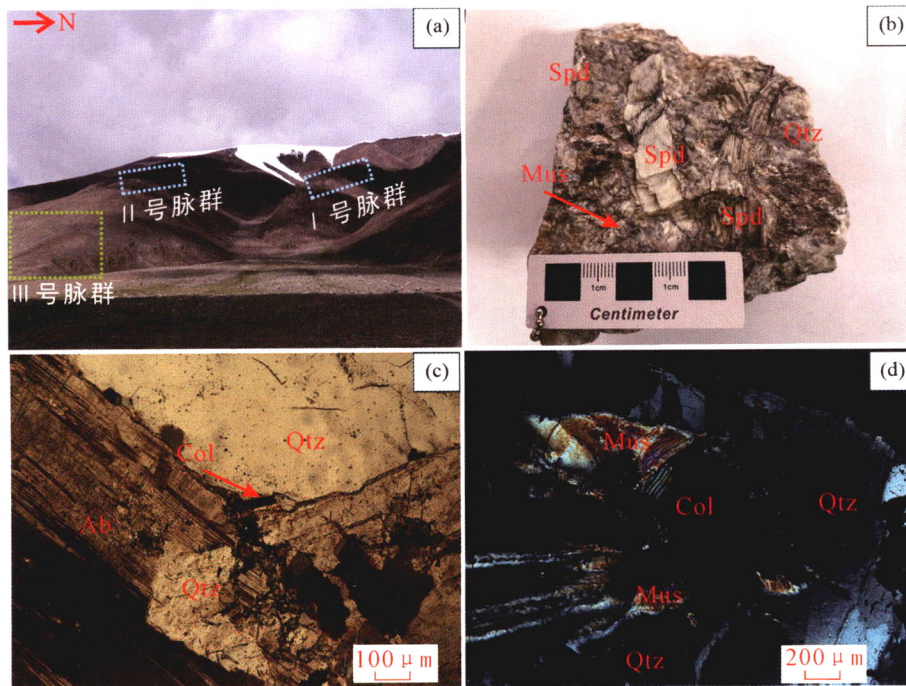


图3 雪凤岭锂矿床的野外和手标本照片及显微照片

(a)雪凤岭远景;(b)18XFL-B02手标本样品特征;(c)铌钽铁矿与石英、钠长石共生(正交偏光);(d)铌钽铁矿与石英、白云母共生(正交偏光)。Qtz-石英;Mus-白云母;Spd-锂辉石;Col-铌钽铁矿;Ab-钠长石

Fig. 3 Photographs and photomicrographs of the Xuefengling lithium deposit

(a) overview of the Xuefengling prospect; (b) 18XFL-B02 hand specimen sample characteristics; (c) columbite-(Fe) coexists with quartz and albite (orthogonal polarization); (d) columbite-(Fe) coexists with quartz and muscovite (orthogonal polarization). Qtz-quartz; Mus-muscovite; Spd-spodumene; Col-columbite-(Fe); Ab-albite

副矿物,与白云母、钠长石和石英共生(图3c, d)。

## 2.2 铌钽铁矿和锡石 U-Pb 定年

铌钽铁矿、锡石单矿物分选及制靶在广州拓岩公司完成:首先机械破碎含铌钽铁矿和锡石的新鲜岩样品,经过磁选、重选后在显微镜下挑选出晶形较好的铌钽铁矿,粘在环氧树脂上,将固化的树脂刨磨至大部分铌钽铁矿颗粒露出。铌钽铁矿和锡石阴极发光(CL)、背散射(BSE)图像的拍摄也在广州拓岩公司完成。

铌钽铁矿和锡石 U-Pb 年代学测定在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室电感耦合等离子体质谱 Thermo Fisher Scientific iCAP-Q 型 ICP-MS 与 RESOLUTION S155 型 193nm 的 ArF 准分子激光器联用完成。Squid 平滑设备用于减少由激光烧蚀脉冲引起的统计误差并提高数据质量(涂湘林等, 2011; Li *et al.*, 2012)。用于烧蚀样品气溶胶的氦气载气与作为额外双原子气体的氩气载气和氮气混合以提高灵敏度,最后流入 ICP。

铌钽铁矿 U-Pb 定年的详细分析步骤参见文献(Che *et al.*, 2015)。铌钽铁矿定年采用 Coltan139 作为外部标准进行校正。激光束斑直径为 43 $\mu\text{m}$ ,频率 4Hz,每个分析点的气体背景采集为 20s,信号采集时间 50s, $^{204}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}$  和  $^{208}\text{Pb}$  驻留时间为 15ms, $^{207}\text{Pb}$  为 30ms, $^{232}\text{Th}$  和  $^{238}\text{U}$  为 10ms,其他元

素均为 6ms。每测定 8 个样品点,分析 2 次外部标样(Coltan 139)和 2 次 NIST SRM 610。

使用 4J/cm<sup>2</sup> 的能量密度、43 $\mu\text{m}$  的光斑尺寸和 6Hz 的重复频率对锡石样品进行分析。NIST SRM 614 和锡石标准 XHL (Yuan *et al.*, 2011) 用作外部标准。NIST SRM 614 每次分析两次,而 CLGH 每五次分析两次。每个点分析都包含大约 20s 的背景采集,然后是 40s 的样本数据采集(Li *et al.*, 2016)。在时间分辨模式下测量同位素。对于 U/Pb 测年, $^{204}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}$  和  $^{208}\text{Pb}$ 、 $^{238}\text{U}$  和  $^{235}\text{U}$  的每次质量扫描的驻留时间为 15ms, $^{207}\text{Pb}$  的驻留时间为 25ms (Li *et al.*, 2016)。ICPMSDataCal 进行了背景和分析信号的离线选择和整合,以及微量元素分析和 U-Pb 测年的时间漂移校正和定量校准(Liu *et al.*, 2008, 2010)。Isoplot4.15 (Ludwig, 2003) 用于计算 U-Pb 年龄。

## 2.3 电子探针测试

电子探针测试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完成。铌钽铁矿和锡石主元素含量采用 JEOL JXA-8230 型电子探针(EPMA)进行分析。分析条件采用加速电压 15kV,电流 20nA,电流束斑直径为 1 $\mu\text{m}$ 。每个元素数据采集时间 20~40s。测试使用的标准样品为天然样品和人工合成氧化物,包括金红石(Ti)、石榴石(Fe)、蔷薇

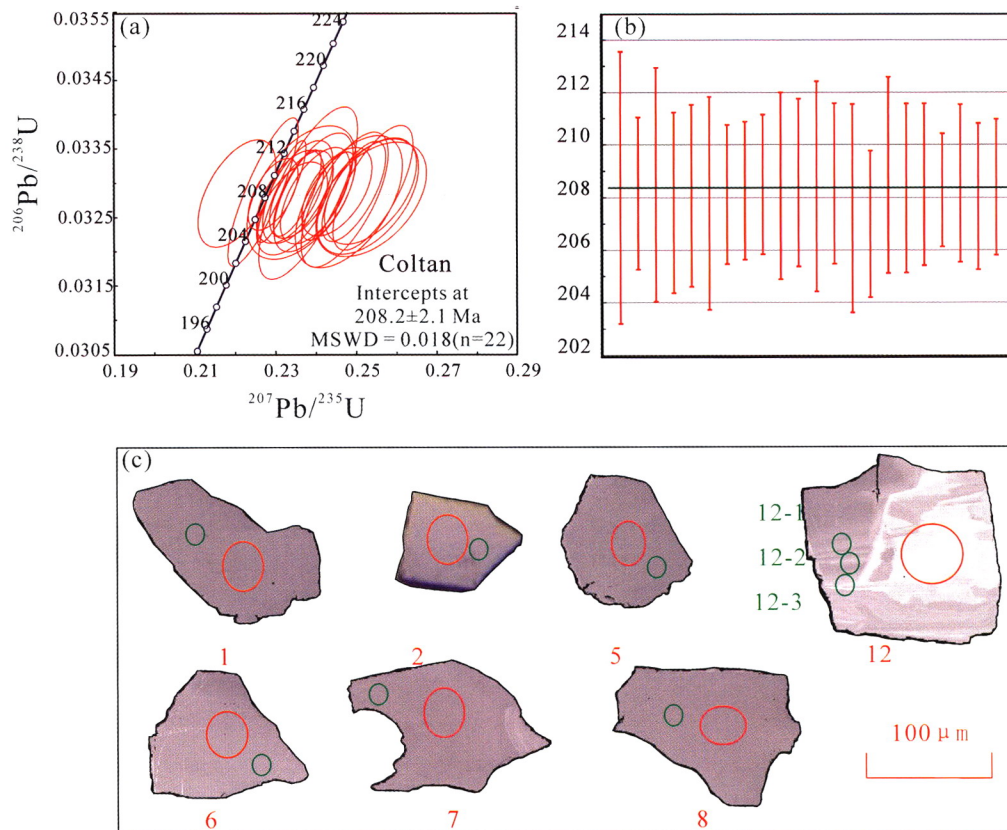


图4 雪凤岭锂矿床18XFL-B02样品中铌钽铁矿U-Pb年龄谐和图(a)、加权平均年龄图(b)和背散射(BSE)图像(c) 蓝色圈表示电子探针分析点位置,红色圈表示LA-ICP-MS U-Pb年龄分析点位置

Fig. 4 Columbite-(Fe) U-Pb concordia diagrams (a), weighted average age diagram (b) and back scattering (BSE) images (c) of the 18XFL-B02 sample from the Xuefengling lithium deposit

The blue circles indicate the location of EMPA analysis, the red circles indicate the location of LA-ICP-MS U-Pb analysis

辉石(Mn)、铌金属(Nb)、钽金属(Ta)、钪金属(Sc)、锡石(Sn)、 $ZnWO_4$ (W)等。原始数据采用ZAF程序校正,主元素的分析误差小于2%。

### 3 测试结果

#### 3.1 铌钽铁矿U-Pb年龄

18XFL-B02样品中铌钽铁矿呈白色、半透明、自形-半自形晶体,背散射图像显示其内部结构较简单,环带不发育,少见矿物包裹体(图4c)。铌钽铁矿测点共22个, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 值变化范围为0.03263~0.03293, $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 值变化范围为0.22047~0.25412, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 值变化范围为0.04883~0.05617(表1);铌钽铁矿颗粒的U含量在 $266.5 \times 10^{-6}$ ~ $3638 \times 10^{-6}$ 之间,Th含量在 $0.70 \times 10^{-6}$ ~ $8.68 \times 10^{-6}$ ,跨度都很大,总体来说高U低Th,Th/U在0.00172~0.00285之间,这两个元素还呈现正相关性。铌钽铁矿共22个测点产生的 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和年龄为 $208.2 \pm 2.1\text{Ma}$ (图4a, b)。

#### 3.2 锡石U-Pb年龄

18XFL-B02样品中锡石为深褐色-黑色、半透明、自形-半

自形晶体,阴极发光(CL)、背散射(BSE)图像显示其内部结构较简单,环带不发育,少见矿物包裹体(图5b, c)。锡石测点共27个, $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ 值变化范围为1.73~27.74, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 值变化范围为0.09~1.04(表2),锡石 $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ 谐和年龄为 $208 \pm 15\text{Ma}$ (图5a)。

#### 3.3 铌钽铁矿和锡石电子探针分析结果

铌钽铁矿矿物长约100~120 $\mu\text{m}$ ,宽约40~100 $\mu\text{m}$ (图4c, d),大多数矿物没有成分分带。22个没有成分分带的铌钽铁矿(1~22)的EMPA分析显示出轻微的成分变化,其中FeO含量为10.15%~12.78%,MnO含量为7.14%~9.70%, $\text{Nb}_2\text{O}_5$ 含量为36.01%~69.55%, $\text{Ta}_2\text{O}_5$ 含量为8.13%~44.84%(表3),另外还有大量的 $\text{WO}_3$ (0.53%~2.05%)和少量 $\text{TiO}_2$ (0.18%~0.63%), $\text{SnO}_2$ (<0.26%), $\text{ZrO}_2$ (0.03%~0.42%) and  $\text{Sc}_2\text{O}_3$ (<0.19%)。对12号铌钽铁矿进行的三次EMPA分析表明,从核部到边部,Ta/(Ta+Nb)为0.12~0.29,但Mn/(Mn+Fe)的范围非常狭窄。这一结果表明,Ta、Nb可以描述花岗岩伟晶岩的分异趋势。有成分分带铌钽铁矿样品含有11.42%~12.22% FeO、7.14%~

表1 雪凤岭锂矿床铌钽铁矿 LA-MC-ICP-MS U-Pb 定年结果

Table 1 LA-MC-ICP-MS U-Pb isotope data of the columbite-(Fe) from the Xuefengling lithium deposit

测点号	含量(×10 <sup>-6</sup> )			Th/U	同位素比值						年龄(Ma)			
	Pb	Th	U		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 $\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 $\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 $\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 $\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 $\sigma$
1	14.32	0.97	498.3	0.002	0.05290	0.00150	0.23807	0.00811	0.03285	0.00083	216.8	6.7	208.4	5.2
2	39.54	2.63	1358	0.002	0.05283	0.00095	0.23983	0.00570	0.03282	0.00046	218.3	4.7	208.2	2.9
3	35.85	2.69	1242	0.002	0.05021	0.00075	0.22693	0.00578	0.03287	0.00071	207.7	4.8	208.5	4.5
4	20.82	1.26	730.8	0.002	0.05588	0.00161	0.25370	0.00907	0.03276	0.00055	229.6	7.3	207.8	3.4
5	14.45	0.87	500.9	0.002	0.05561	0.00144	0.25287	0.00832	0.03280	0.00055	228.9	6.7	208.1	3.5
6	9.40	0.75	312.3	0.002	0.05539	0.00146	0.24710	0.00715	0.03276	0.00065	224.2	5.8	207.8	4.1
7	60.82	4.35	1986	0.002	0.05369	0.00069	0.24312	0.00437	0.03281	0.00042	221.0	3.6	208.1	2.6
8	26.88	1.90	911.7	0.002	0.05209	0.00093	0.23641	0.00523	0.03283	0.00042	215.5	4.3	208.3	2.6
9	14.34	1.06	475.7	0.002	0.05415	0.00115	0.24519	0.00576	0.03287	0.00043	222.7	4.7	208.5	2.7
10	16.43	1.05	551.7	0.002	0.05278	0.00113	0.23941	0.00650	0.03286	0.00057	217.9	5.3	208.4	3.6
11	10.84	0.70	348.9	0.002	0.05617	0.00164	0.25354	0.00756	0.03288	0.00051	229.4	6.1	208.6	3.2
12	8.53	0.70	266.5	0.003	0.05246	0.00182	0.23647	0.00894	0.03286	0.00064	215.5	7.3	208.4	4.0
13	112.3	9.52	3638	0.003	0.05097	0.00049	0.23156	0.00397	0.03288	0.00049	211.5	3.3	208.5	3.1
14	11.51	0.71	385.3	0.002	0.05462	0.00148	0.24817	0.00878	0.03273	0.00064	225.1	7.1	207.6	4.0
15	23.79	1.64	821.4	0.002	0.05214	0.00114	0.23409	0.00580	0.03263	0.00045	213.6	4.8	207.0	2.8
16	30.92	2.34	1040	0.002	0.05554	0.00084	0.25412	0.00658	0.03293	0.00060	229.9	5.3	208.9	3.7
17	16.29	1.14	573.0	0.002	0.04883	0.00124	0.22047	0.00636	0.03285	0.00052	202.3	5.3	208.4	3.2
18	18.41	1.15	618.8	0.002	0.05210	0.00112	0.23549	0.00575	0.03287	0.00049	214.7	4.7	208.5	3.1
19	39.83	2.89	1320	0.002	0.05064	0.00072	0.22939	0.00407	0.03284	0.00034	209.7	3.4	208.3	2.1
20	17.74	1.47	591.2	0.002	0.05562	0.00117	0.24939	0.00523	0.03288	0.00048	226.1	4.3	208.5	3.0
21	18.32	1.18	631.2	0.002	0.05205	0.00117	0.23363	0.00551	0.03280	0.00045	213.2	4.5	208.0	2.8
22	91.30	8.68	3047	0.003	0.05190	0.00058	0.23540	0.00392	0.03286	0.00041	214.6	3.2	208.4	2.6

7.49% MnO、47.53% ~ 64.00% Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、14.95% ~ 32.24% Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 0.85% ~ 1.28% WO<sub>3</sub>, 以及少量 SnO<sub>2</sub> (< 0.23%)、ZrO<sub>2</sub> (< 0.17%)、TiO<sub>2</sub> (< 0.35%) 和 Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (< 0.11%)。在铌钽铁矿-钽铁矿四边形图中,所有数据点均位于铌钽铁矿区域内(图 6a),表明 III-5 号伟晶岩的分异相对较低(Ercit, 1994)。

来自 27 个锡石的数据显示几乎纯 SnO<sub>2</sub> (> 91.74%), 含有少量 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (0.02% ~ 3.80%; 平均 0.58%)、Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (0.00% ~ 3.08%; 平均 0.87%)、FeO (0.02% ~ 1.41%; 平均 0.29%) 和 TiO<sub>2</sub> (0.04% ~ 0.18%; 平均 0.15%) 和可忽略不计的 MnO 和 WO<sub>3</sub> (表 4)。所有雪凤岭锡石数据均呈线性排列, Nb + Ta 和 Fe + Mn 主要以 2 : 1 的比例变化(图 7)。此外,锡石的 Ta/(Ta + Nb) 大多在 0.5 ~ 0.9 范围内(表 4), 以 Nb 为主, 表明它们的岩浆成因(Černý and Ercit, 1989)。

## 4 讨论

### 4.1 雪凤岭锂矿床成矿时代

现今铌钽铁矿 U-Pb 定年和锡石 U-Pb 定年被广泛被用来确定稀有金属伟晶岩矿床的成矿年龄(Romer and Wright,

1992; Romer and Lehmann, 1995; Romer *et al.*, 1996; Smith *et al.*, 2004; 刘玉平等, 2007; Lupulescu *et al.*, 2011; 钟龙等, 2011; 崔玉荣等, 2017; Li *et al.*, 2019a; Feng *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020)。铌钽铁矿族矿物普遍存在于稀有金属伟晶岩矿床(Černý and Lenton, 1995)、与花岗岩有关的热液型钨锡矿床(Lerouge *et al.*, 2007)和稀土矿床中。自 Aldrich *et al.* (1956) 建立铌钽铁矿 U-Pb 定年方法以来, 现今有许多学者测定铌钽铁矿 U-Pb 年龄, 特别是与富含稀有元素的花岗岩和伟晶岩有关的矿床(Melleton *et al.*, 2013)。Camacho *et al.* (2012) 成功测定了加拿大东南部著名的 Tanco 和 Silverleaf 稀有金属矿床花岗岩伟晶岩中铌钽铁矿 U-Pb 年龄为 2641 ± 3Ma。Che *et al.* (2015) 在国内首先提出铌钽铁矿 U-Pb 定年方法, 现今也是被许多学者应用, 例如, Li *et al.* (2019a) 测定扎乌龙锂矿床铌钽铁矿 U-Pb 年龄为 204.5 ± 1.8Ma。雪凤岭铌钽铁矿在伟晶岩中通常与石英、钠长石共生(图 3d), 表明铌钽铁矿为岩浆成因, 其年龄可以代表雪凤岭 Li-Be-Nb-Ta 矿化伟晶岩的成岩年龄。

锡石是稀有金属伟晶岩中常见的副矿物, 常与铌钽矿物伴生。锡石通常含有大量的 U 并保留放射成因的 Pb, 并且

表2 雪凤岭锂矿床锡石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 定年结果  
Table 2 Cassiterite LA-MC-ICP-MS U-Pb isotope data of the Xuefengling lithium deposit

测点号	U-Pb 谐和年龄 (T-W) (Ma)			
	$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$	$\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\sigma$
1	14.38	3.0	0.67	7.1
2	3.33	2.4	0.96	2.6
3	18.07	3.0	0.58	4.7
4	2.31	9.8	1.02	3.5
5	5.56	3.2	0.90	4.8
6	3.24	6.6	0.86	7.7
7	24.47	5.6	0.09	24.1
8	21.88	3.0	0.42	10.2
9	18.37	2.6	0.57	6.3
10	11.43	6.6	0.74	7.3
11	2.14	1.9	1.01	2.4
12	7.56	8.4	0.81	4.7
13	21.32	7.7	0.10	18.4
14	8.51	4.3	0.80	3.9
15	13.06	3.1	0.74	5.8
16	1.73	4.5	1.04	3.6
17	5.26	3.0	0.94	3.7
18	3.03	5.9	0.91	6.4
19	12.14	4.6	0.70	9.1
20	4.40	3.7	0.98	5.1
21	13.60	5.6	0.54	9.4
22	9.90	2.0	0.74	2.8
23	8.23	6.7	0.83	6.2
24	27.74	5.0	0.21	14.3
25	8.52	3.0	0.79	6.9
26	26.88	4.4	0.15	13.1
27	7.15	3.6	0.86	4.0

具有保持 U 和 Pb 的能力,使得锡石 U-Pb 测年成为确定锡矿化过程的重要方法(刘玉平等, 2007; Yuan *et al.*, 2011), 适合开展 U-Pb 定年工作,可以用来厘定稀有金属伟晶岩矿床的形成时代(崔玉荣等,2017)。雪凤岭锡石数据在 (Nb + Ta)-(Fe + Mn)图中显示 2 : 1 的线性排列,属于稀有元素伟晶岩区,且大多数锡石  $\text{Ta}/(\text{Ta} + \text{Nb}) = 0.5 \sim 0.9$  (表 4), 所有这些都表明岩浆成因(Tindleand Breaks, 1998)。因此,雪凤岭伟晶岩中锡石年龄可被视为含矿伟晶岩的成岩成矿年龄。

为此本文采用上述方法测定雪凤岭锂矿床伟晶岩中铌钽铁矿和锡石的年龄,分别为  $208.2 \pm 2.1\text{Ma}$  和  $208 \pm 15\text{Ma}$ , 二者在误差范围内相一致,表明该矿床的成矿年龄为

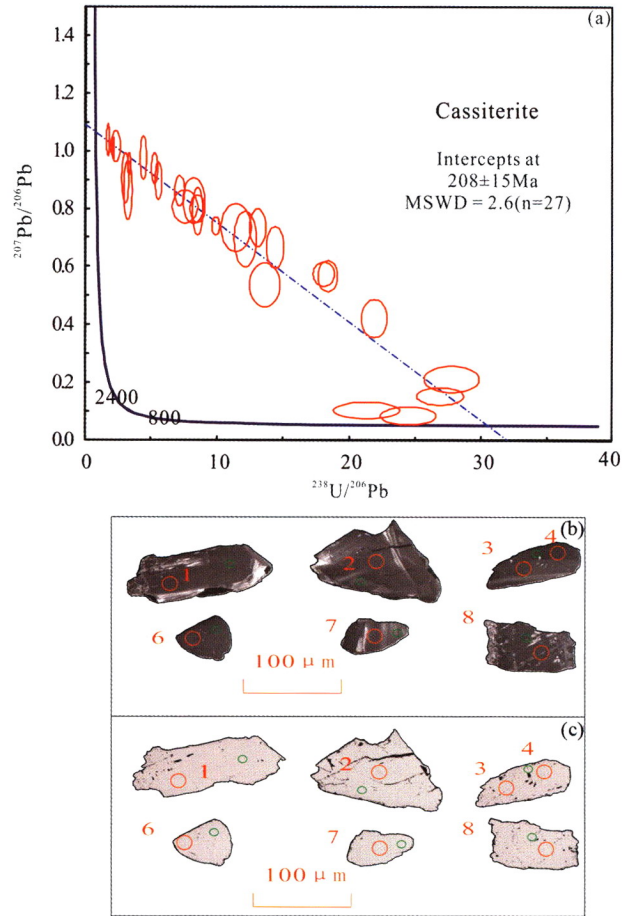


图5 雪凤岭锂矿床 18XFL-B02 样品中锡石 U-Pb 年龄谐和图(a)和阴极发光 (CL) 图像 (b)、背散射 (BSE) 图像(c)

蓝色圈表示电子探针分析点位置,红色圈表示 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分析点位置

Fig. 5 Cassiterite U-Pb concordia diagrams (a), and CL images (b) and BSE images (c) of the 18XFL-B02 sample from Xuefengling lithium deposit

The blue circles indicate the location of EMPA analysis, the red circles indicate the location of LA-ICP-MS U-Pb analysis

~208.1Ma。

#### 4.2 区域成矿意义

Dai *et al.* (2019)、郝雪峰等(2015)、李建康(2006)和王登红等(2005)测定甲基卡锂矿床的锆石 U-Pb 定年结果为  $214 \pm 2\text{Ma}$ 、 $217 \pm 1.1\text{Ma}$ , 铌钽铁矿 U-Pb 定年结果为  $214 \pm 2\text{Ma}$ , 锡石 U-Pb 定年结果为  $210.9 \pm 4.6\text{Ma}$ 。Fei *et al.* (2018, 2020)和邓运等(2018)测定可尔因地区锆石 U-Pb 定年结果为  $198 \pm 3.4\text{Ma}$ 、 $200.1 \pm 4.6\text{Ma}$ 、 $202.8 \pm 4.9\text{Ma}$ , 铌钽铁矿 U-Pb 和锡石 U-Pb 定年结果为  $211 \pm 1.0\text{Ma}$ 、 $211.4 \pm 3.3\text{Ma}$ 。Zhang *et al.* (2014a)和李建康(2006)测定雪宝顶锂矿床锡石 U-Pb 定年结果为  $199.6 \pm 6\text{Ma}$ 。Li *et al.* (2019a)

表3 雪凤岭锂矿床中铌钽铁矿主要化学组成的 EMPA 分析结果 (wt%)

Table 3 Chemical compositions of the Xuefengling lithium deposit columbite-(Fe) analyzed by EMPA (wt%)

测点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12-1
TiO <sub>2</sub>	0.38	0.44	0.40	0.48	0.51	0.30	0.54	0.52	0.50	0.63	0.34	0.31
MnO	8.88	9.70	9.02	8.18	9.05	8.05	9.27	9.11	8.74	8.42	9.12	7.49
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	9.78	8.13	10.02	8.73	8.63	18.99	9.97	10.13	8.36	8.19	10.13	14.95
FeO	11.04	10.62	11.24	12.48	11.33	11.21	10.85	11.02	11.26	11.78	10.90	12.22
ZrO <sub>2</sub>	0.06	0.22	0.03	0.12	0.14	0.03	0.27	0.09	0.08	0.13	0.09	0.15
Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05	0.01	0.04	0.02	0.02	0.07	0.04	0.04	0.00	0.01	0.02	0.05
SnO <sub>2</sub>	0.22	0.16	0.10	0.09	0.11	0.08	0.15	0.19	0.27	0.17	0.18	0.17
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	68.52	68.49	68.26	68.06	68.66	58.07	65.94	66.58	67.95	69.37	66.99	64.00
WO <sub>3</sub>	0.55	0.93	0.77	0.61	0.53	0.82	0.65	1.00	0.86	0.93	0.74	0.85
O	6											
Total	99.45	98.70	99.89	98.76	98.97	97.61	97.68	98.68	98.03	99.63	98.50	100.17
Ti	0.017	0.020	0.018	0.021	0.022	0.014	0.024	0.023	0.022	0.028	0.015	0.014
Mn	0.442	0.483	0.447	0.406	0.449	0.425	0.469	0.457	0.439	0.416	0.459	0.379
Ta	0.157	0.130	0.160	0.139	0.138	0.322	0.162	0.163	0.135	0.130	0.164	0.243
Fe	0.543	0.522	0.550	0.612	0.556	0.584	0.541	0.546	0.559	0.574	0.542	0.610
Sn	0.005	0.004	0.002	0.002	0.002	0.002	0.004	0.004	0.006	0.004	0.004	0.004
Nb	1.822	1.820	1.806	1.805	1.819	1.634	1.779	1.784	1.823	1.829	1.800	1.728
W	0.008	0.014	0.012	0.009	0.008	0.013	0.010	0.015	0.013	0.014	0.011	0.013
Total	2.994	2.993	2.995	2.995	2.994	2.993	2.989	2.993	2.997	2.995	2.996	2.991
Nb + Ta	1.98	1.95	1.97	1.94	1.96	1.96	1.94	1.95	1.96	1.96	1.96	1.97
Mn + Fe	0.99	1.00	1.00	1.02	1.00	1.01	1.01	1.00	1.00	0.99	1.00	0.99
Ta/Nd + Ta	0.08	0.07	0.08	0.07	0.07	0.16	0.08	0.08	0.07	0.07	0.08	0.12
Mn/Mn + Fe	0.45	0.48	0.45	0.40	0.45	0.42	0.46	0.46	0.44	0.42	0.46	0.38
测点号	12-2	12-3	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
TiO <sub>2</sub>	0.35	0.31	0.18	0.59	0.38	0.49	0.51	0.39	0.34	0.37	0.41	0.47
MnO	7.14	7.17	7.20	8.50	7.19	8.55	8.72	8.92	9.15	8.85	9.08	9.26
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	22.24	32.24	44.84	11.90	12.58	9.08	9.87	9.57	10.50	9.82	10.03	8.98
FeO	12.15	11.42	10.15	11.39	12.78	11.94	11.70	11.35	11.14	11.34	11.20	11.06
ZrO <sub>2</sub>	0.17	0.09	0.00	0.42	0.20	0.06	0.12	0.07	0.07	0.11	0.07	0.21
Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.08	0.11	0.19	0.05	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	0.05	0.01
SnO <sub>2</sub>	0.21	0.23	0.21	0.26	0.16	0.12	0.22	0.16	0.13	0.14	0.15	0.21
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	56.78	47.53	36.01	65.32	63.59	68.32	67.87	67.46	68.37	68.04	68.19	69.55
O	6											
WO <sub>3</sub>	1.15	1.28	2.05	0.75	0.59	0.37	0.73	0.69	0.62	0.55	0.60	0.61
Total	100.26	100.36	100.82	99.18	97.48	98.94	99.76	98.63	100.33	99.27	99.77	100.37
Ti	0.016	0.015	0.009	0.026	0.017	0.022	0.022	0.017	0.015	0.017	0.018	0.020
Mn	0.372	0.390	0.415	0.427	0.368	0.425	0.432	0.447	0.453	0.441	0.450	0.455
Ta	0.372	0.563	0.830	0.192	0.207	0.145	0.157	0.154	0.167	0.157	0.160	0.142
Fe	0.625	0.613	0.577	0.566	0.647	0.586	0.572	0.561	0.544	0.557	0.548	0.537
Sn	0.005	0.006	0.006	0.006	0.004	0.003	0.005	0.004	0.003	0.003	0.003	0.005
Nb	1.579	1.379	1.108	1.754	1.740	1.812	1.795	1.803	1.806	1.809	1.805	1.825
W	0.018	0.021	0.036	0.012	0.009	0.006	0.011	0.011	0.009	0.008	0.009	0.009
Total	2.987	2.986	2.980	2.983	2.992	2.997	2.995	2.996	2.996	2.992	2.994	2.993
Nb + Ta	1.95	1.94	1.94	1.95	1.95	1.96	1.95	1.96	1.97	1.97	1.96	1.97
Mn + Fe	1.00	1.00	0.99	0.99	1.01	1.01	1.00	1.01	1.00	1.00	1.00	0.99
Ta/Nd + Ta	0.19	0.29	0.43	0.10	0.11	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07
Mn/Mn + Fe	0.37	0.39	0.42	0.43	0.36	0.42	0.43	0.44	0.45	0.44	0.45	0.46



表4 雪凤岭锂矿床中锡石主要化学组成的 EMPA 分析结果(wt%)

Table 4 Chemical composition of the Xuefengling cassiterite analyzed by EMPA (wt%)

测点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
TiO <sub>2</sub>	0.13	0.15	0.17	0.19	0.01	0.16	0.12	0.27	0.68	0.07	0.12	0.02	0.06	0.04
MnO	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.03	0.09	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.36	0.67	2.21	0.00	0.16	0.50	2.28	1.99	1.12	0.98	0.47	0.00	1.61	0.09
FeO	0.17	0.17	0.38	0.26	0.02	0.63	1.41	0.31	0.40	0.13	0.28	0.30	0.31	0.23
ZrO <sub>2</sub>	0.01	0.00	0.05	0.09	0.02	0.16	0.31	0.00	0.07	0.00	0.05	0.03	0.03	0.01
Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.21	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00
SnO <sub>2</sub>	99.27	99.76	96.58	98.39	99.64	96.42	92.02	97.49	97.27	99.27	98.18	98.66	99.21	97.92
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.14	0.17	0.18	0.72	0.04	1.67	3.80	0.39	0.69	0.11	1.04	1.35	0.08	1.20
WO <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.14	0.07	0.03	0.00	0.00	0.00
Total	100.29	101.04	99.68	99.65	99.9	99.57	100.04	100.54	100.38	100.88	100.17	100.36	101.31	99.53
O	4													
Ti	0.005	0.006	0.007	0.007	0.001	0.006	0.010	0.004	0.025	0.003	0.005	0.001	0.002	0.001
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002
Ta	0.005	0.009	0.030	0.000	0.002	0.007	0.027	0.031	0.015	0.013	0.006	0.000	0.022	0.001
Fe	0.007	0.007	0.016	0.011	0.001	0.026	0.013	0.058	0.017	0.005	0.012	0.013	0.013	0.010
Sn	1.964	1.965	1.940	1.964	1.995	1.918	1.940	1.811	1.924	1.957	1.953	1.956	1.960	1.959
Nb	0.003	0.004	0.004	0.016	0.001	0.038	0.009	0.085	0.016	0.002	0.023	0.030	0.002	0.027
W	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
Total	1.984	1.991	1.998	1.998	2.000	1.997	2.001	1.995	1.999	1.981	1.999	2.000	2.000	2.000
Nb + Ta	0.01	0.01	0.03	0.02	0.00	0.04	0.04	0.12	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03
Mn + Fe	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.03	0.01	0.06	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Ta/Nd + Ta	0.61	0.70	0.88	0.00	0.73	0.15	0.75	0.27	0.49	0.84	0.21	0.00	0.93	0.04
测点号	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
TiO <sub>2</sub>	0.06	0.17	0.12	0.14	0.05	0.11	0.18	0.09	0.25	0.12	0.19	0.14	0.18	
MnO	0.03	0.00	0.00	0.04	0.04	0.00	0.01	0.00	0.04	0.01	0.00	0.02	0.04	
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.88	0.92	0.41	0.45	0.32	0.29	2.49	0.25	3.08	0.71	0.48	0.47	1.15	
FeO	0.48	0.19	0.18	0.09	0.08	0.05	0.62	0.07	0.80	0.16	0.10	0.15	0.23	
ZrO <sub>2</sub>	0.05	0.00	0.00	0.03	0.03	0.04	0.02	0.00	0.10	0.05	0.02	0.10	0.05	
Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.15	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
SnO <sub>2</sub>	97.23	99.20	99.69	98.41	99.51	98.18	91.74	98.26	90.97	99.48	99.34	98.31	98.56	
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.38	0.09	0.48	0.09	0.19	0.04	0.58	0.04	0.97	0.25	0.15	0.46	0.00	
WO <sub>3</sub>	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27	0.00	0.00	0.00	0.05	
Total	100.15	100.57	100.86	99.24	100.22	98.71	96.77	99.16	96.48	100.77	100.28	99.66	100.24	
O	4													
Ti	0.002	0.006	0.004	0.003	0.005	0.002	0.007	0.003	0.005	0.007	0.010	0.005	0.007	
Mn	0.002	0.000	0.000	0.000	0.002	0.002	0.001	0.000	0.001	0.000	0.003	0.001	0.002	
Ta	0.012	0.013	0.005	0.000	0.006	0.004	0.034	0.003	0.010	0.007	0.043	0.006	0.016	
Fe	0.020	0.008	0.007	0.001	0.004	0.004	0.026	0.003	0.006	0.004	0.035	0.006	0.010	
Sn	1.932	1.971	1.972	1.994	1.981	1.984	1.830	1.954	1.972	1.978	1.882	1.968	1.965	
Nb	0.031	0.002	0.011	0.000	0.002	0.004	0.013	0.001	0.006	0.003	0.023	0.011	0.000	
W	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000	0.001	
Total	1.999	2.000	1.999	1.998	2.000	2.000	1.911	1.964	2.000	1.999	2.000	1.997	2.001	
Nb + Ta	0.04	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01	0.05	0.00	0.02	0.01	0.07	0.02	0.02	
Mn + Fe	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.03	0.00	0.01	0.00	0.04	0.01	0.01	
Ta/Nd + Ta	0.28	0.86	0.34	0.00	0.75	0.50	0.72	0.80	0.63	0.66	0.66	0.38	1.00	

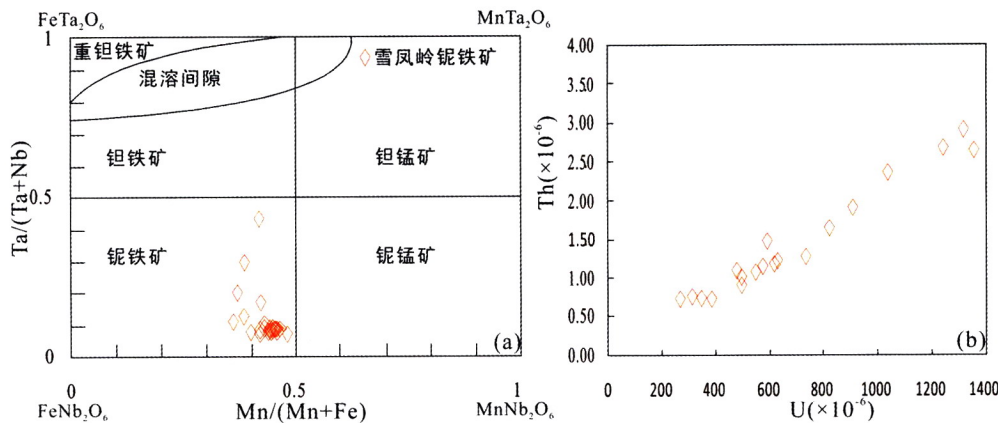


图6 铌钽铁矿  $Mn/(Mn+Fe)$ - $Ta/(Nb+Ta)$  相关性图解(a, 据Černý and Ercit, 1989 修改)及 U-Th 相关性图解(b)  
Fig. 6 Composition of columbite-group minerals expressed in terms of the  $Mn/(Mn+Fe)$  vs.  $Ta/(Nb+Ta)$  quadrilateral (a, modified after Černý and Ercit, 1989) and positive U vs. Th correlation (b)

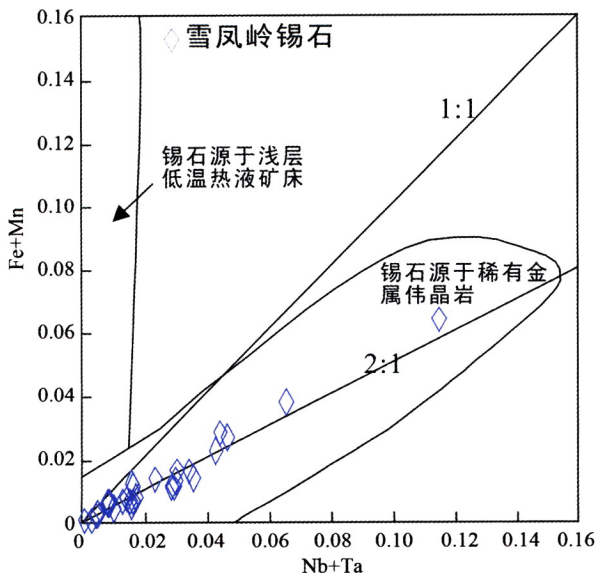


图7 雪凤岭锂矿床锡石单位化学结构式中  $Nb+Ta$  与  $Fe+Mn$  原子数的相关性图解(据 Tindle and Breaks, 1998)  
Fig. 7 Covariation of  $Nb+Ta$  vs.  $Fe+Mn$  in cassiterite from the Xuefengling deposit (modified after Tindle and Breaks, 1998)

测定扎乌龙锂矿床铌钽铁矿 U-Pb 定年结果  $204.5 \pm 1.8$  Ma。Wang *et al.* (2020) 和 Yan *et al.* (2022) 测定白龙山锂矿床铌钽铁矿 U-Pb 定年结果  $208.1 \pm 1.5$  Ma, 独居石定年结果为  $207.4 \pm 0.6$  Ma。Liu *et al.* (2020)、Yan *et al.* (2018) 和 Li *et al.* (2019a) 测定大红柳滩锂矿床锆石 U-Pb 定年结果  $196.1 \pm 1.0$  Ma、 $195.2 \pm 1.5$  Ma, 铌钽铁矿 U-Pb 定年结果和锡石 U-Pb 定年结果分别为  $211.9 \pm 2.4$  Ma、 $218 \pm 12$  Ma。Yan *et al.* (2022) 测定肖尔布龙锂矿床铌钽铁矿 U-Pb 定年结果为  $204.6 \pm 2.1$  Ma, 霍什塔什锂矿床铌钽铁矿 U-Pb 定年结果和

独居石定年结果分别为  $205.7 \pm 2.7$  Ma、 $204.2 \pm 0.8$  Ma。Liu *et al.* (2022) 测定茶卡北山稀有金属伟晶岩铌钽铁矿 U-Pb 定年结果为  $214.9 \pm 1.7$  Ma、 $217.0 \pm 2.3$  Ma 和  $215.0 \pm 1.5$  Ma, 云母 Ar-Ar 定年结果为  $213.00 \pm 0.97$  Ma、 $211.67 \pm 0.35$  Ma 和  $211.78 \pm 0.29$  Ma。结果表明, 西昆仑成矿带的大红柳滩锂矿床 (~211 Ma)、白龙山锂矿床 (~208.1 Ma)、肖尔布龙锂矿床 (~204.6 Ma) 和霍什塔什矿床 (~205.7 Ma) 都形成于晚三叠世 (Yan *et al.*, 2018, 2022; Wang *et al.*, 2020), 松潘-甘孜成矿带的甲基卡 (~214 Ma)、可尔因 (~211.1 Ma) 和扎乌龙 (~204.5 Ma) 矿床也形成于晚三叠世 (郝雪峰等, 2015; Li *et al.*, 2019a; Fei *et al.*, 2020; Yan *et al.*, 2020), 其形成均与三叠纪花岗岩密切相关, 进一步论证了西昆仑成矿带与松潘-甘孜成矿带之间的联系。Liu *et al.* (2022) 测定茶卡北山稀有金属伟晶岩年龄约为 217.0 ~ 211.7 Ma, 与西昆仑成矿带、松潘-甘孜成矿带锂矿床年龄相近, 向北扩大了我国潜在锂矿床分布面积。

综上所述, 雪凤岭矿床与西昆仑的大红柳滩锂矿床和白龙山锂矿床以及松潘-甘孜成矿带甲基卡、可尔因和扎乌龙矿床均形成于晚三叠世, 都与晚三叠世 S 型花岗岩和复理石沉积岩具有空间和成因关系 (Li *et al.*, 2015, 2019a; Wang *et al.*, 2020; Yan *et al.*, 2018, 2020, 2022; Liu *et al.*, 2022), 这些矿床构成了一条延伸 2800 km 的古特提斯锂成矿带 (图 8)。

在古特提斯成矿带的东段松潘-甘孜地区和西段大红柳滩地区均发育有大型-超大型的锂矿床, 而在其中段的东昆仑-可可西里一带是否具有寻找大中型锂矿床的条件? 前人在东昆仑黑石北湖、云雾岭和木孜塔格地区发现大量晚三叠世花岗岩出露 (Zhang *et al.*, 2014b; Li *et al.*, 2019b), 1:50 万东昆仑地区地球化学异常 (周军, 2017<sup>①</sup>) 中黑石北湖、云

① 周军. 2017. 新疆东昆仑-阿尔金成矿带 1:50 万锂地球化学图

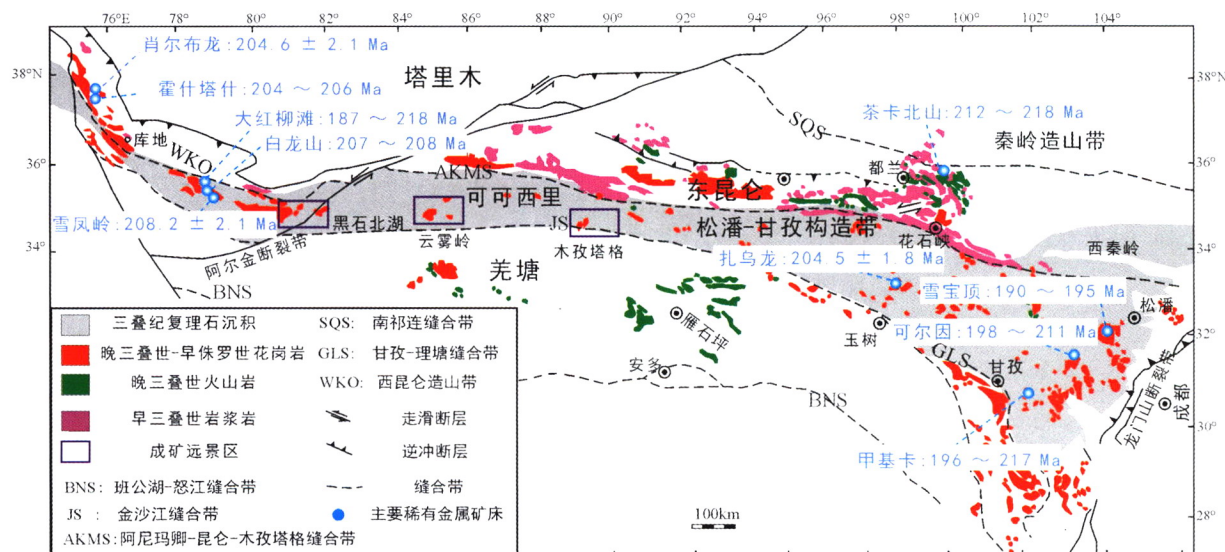


图8 西昆仑-松潘-甘孜造山带主要伟晶岩型锂矿床分布及成矿预测简图(据 Yan *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2022 修编)

Fig. 8 Simplified map of metallogenic prediction and major pegmatite-type Li deposits in the West Kunlun-Songpan-Garzê and North Qaidam terranes (modified after Yan *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2022)

雾岭和木孜塔格地区具有较好的锂异常,且这三个地区的锂异常均围绕着晚三叠世花岗岩昆仑山岩体、云雾岭岩体和木孜塔格岩体分布,具有形成大中型锂矿的有利条件。因此,本文认为黑石北湖、云雾岭和木孜塔格地区(图8)是古特提斯成矿带下一步锂矿找矿突破的远景区。

## 5 结论

(1)雪凤岭锂矿床的成矿年龄:钽钼铁矿和锡石的 LA-ICP-MS U-Pb 测年表明,雪凤岭锂矿床的成矿年龄 ~208Ma,形成时代为晚三叠世。

(2)雪凤岭锂矿和其他矿床的成矿时代对比:雪凤岭矿床与西昆仑的大红柳滩锂矿床和白龙山锂矿床以及松潘-甘孜成矿带甲基卡、可尔因和扎乌龙矿床均形成于晚三叠世,这些矿床具有相近的年龄,都与晚三叠世 S 型花岗岩和复理石沉积岩具有空间和成因的联系,构成了一条延伸 2800km 的古特提斯锂成矿带。

(3)下一步找矿建议:古特提斯稀有金属成矿带的伟晶岩矿床都与晚三叠世 S 型花岗岩和复理石沉积岩具有空间和成因关系,因此我们认为下一步找矿工作应围绕东昆仑地区内与白龙山、大红柳滩、雪凤岭相似年代学、地球化学的晚三叠世 S 型花岗岩展开。

## References

Aldrich LT, Davis GL, Tilton GR and Wetherill GW. 1956. Radioactive ages of minerals from the Brown Derby Mine and the Quartz Creek granite near Gunnison, Colorado. *Journal of Geophysical Research*, 61(2): 215 - 232

Camacho A, Baadsgaard H, Davis DW and Černý P. 2012. Radiogenic isotope systematics of the Tanco and Silverleaf granitic pegmatites, Winnipeg River pegmatite district, Manitoba. *The Canadian Mineralogist*, 50(6): 1775 - 1792

Černý P and Ercit TS. 1989. Mineralogy of niobium and tantalum: Crystal chemical relationships, paragenetic aspects and their economic implications. In: Möller P, Černý P and Saupé F (eds.). *Lanthanides, Tantalum and Niobium*. Berlin Heidelberg: Springer, 27 - 79

Černý P and Lenton PG. 1995. The Buck and Pegli lithium deposits, southeastern Manitoba: The problem of up-dip fractionation in subhorizontal pegmatite sheets. *Economic Geology*, 90(3): 658 - 675

Che XD, Wu FY, Wang RC, Gerdes A, Ji WQ, Zhao ZH, Yang JH and Zhu ZY. 2015. In situ U-Pb isotopic dating of columbite-tantalite by LA-ICP-MS. *Ore Geology Reviews*, 65: 979 - 989

Cui YR, Tu JR, Chen F, Hao S, Ye LJ, Zhou HY and Li HM. 2017. The research advances in LA-(MC)-ICP-MS U-Pb dating of cassiterite. *Acta Geologica Sinica*, 91(6): 1386 - 1399 (in Chinese with English abstract)

Dai HZ, Wang DH, Liu LJ, Yu Y and Dai JJ. 2019. Geochronology and geochemistry of Li (Be)-bearing granitic pegmatites from the Jiajika superlarge Li-polymetallic deposit in Western Sichuan, China. *Journal of Earth Science*, 30(4): 707 - 727

Deng Y, Fei GC, Li J, Tang WC, Zhong W and Yang GB. 2018. Study of C-H-O isotopes and geochronology of the Lijiagou pegmatite spodumene deposit in Sichuan Province. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 38(3): 40 - 47 (in Chinese with English abstract)

Ercit TS. 1994. The geochemistry and crystal chemistry of columbite-group minerals from granitic pegmatites, southwestern Grenville Province, Canadian Shield. *The Canadian Mineralogist*, 32(2): 421 - 438

Fei GC, Tian JJ, Yang JY, Gao JG, Tang WC, Li J and Gu CH. 2018. New zircon U-Pb age of the super-large Lijiagou spodumene deposit in Songpangarze fold belt, eastern Tibet: Implications for Early Jurassic rare-metal polymetallic event. *Acta Geologica Sinica*, 92(3): 1274 - 1275

Fei GC, Menuge JF, Li YQ, Yang JY, Deng Y, Chen CS, Yan YF, Yang Z, Qin LY, Zheng L and Tang WC. 2020. Petrogenesis of the

- Lijiagou spodumene pegmatites in Songpan-Garze Fold Belt, West Sichuan, China: Evidence from geochemistry, zircon, cassiterite and coltan U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions. *Lithos*, 364 – 365: 105555
- Feng YG, Liang T, Linnen R, Zhang Z, Zhou Y, Zhang Z and Gao JG. 2020. LA-ICP-MS dating of high-uranium columbite from No. 1 pegmatite at Dakalasu, the Chinese Altay orogen: Assessing effect of metamictization on age concordance. *Lithos*, 362 – 363: 105461
- Hao XF, Fu XF, Liang B, Yuan LP, Pan M and Tang Y. 2015. Formation ages of granite and 3# pegmatite vein in Jiajika, western Sichuan, and their geological significance. *Mineral Deposits*, 34 (6): 1199 – 1208 (in Chinese with English abstract)
- Hu J, Wang H, Huang CY, Tong LX, Mu SL and Qiu ZW. 2016. Geological characteristics and age of the Dahongliutan Fe-ore deposit in the Western Kunlun orogenic belt, Xinjiang, northwestern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 116: 1 – 25
- Lerouge C, Deschamps Y, Piantone P, Gilles C and Breton J. 2007. Metal-carrier accessory minerals associated with  $W \pm Sn$  mineralization, La Chataigneraie tungsten ore district, Massif Central, France. *The Canadian Mineralogist*, 45(4): 875 – 889
- Li CY, Zhang H, Wang FY, Liu JQ, Sun YL, Hao XL, Li YL and Sun WD. 2012. The formation of the Dabaoshan porphyry molybdenum deposit induced by slab rollback. *Lithos*, 150: 101 – 110
- Li CY, Zhang RQ, Ding X, Ling MX, Fan WM and Sun WD. 2016. Dating cassiterite using laser ablation ICP-MS. *Ore Geology Reviews*, 72: 313 – 322
- Li H, Hong T, Yang ZQ, Chen JZ, Ke Q, Wang XH, Niu L and Xu XW. 2020. Comparative studying on zircon, cassiterite and coltan U-Pb dating and  $^{40}Ar/^{39}Ar$  dating of muscovite rare-metal granitic pegmatites: A case study of the northern Tugeman lithium-beryllium deposit in the middle of Altyn Tagh. *Acta Petrologica Sinica*, 36 (9): 2869 – 2892 (in Chinese with English abstract)
- Li JK. 2006. Mineralizing mechanism and continental geodynamics of typical pegmatite deposits in western Sichuan, China. Ph. D. Dissertation. Beijing: China University of Geosciences, 1 – 225 (in Chinese with English abstract)
- Li JK, Zou TR, Liu XF, Wang DH and Ding X. 2015. The metallogenetic regularities of lithium deposits in China. *Acta Geologica Sinica*, 89(2): 652 – 670
- Li K, Gao YB, Teng JX, Jin MS and Li W. 2019. Metallogenetic geological characteristics, mineralization age and resource potential of the granite-pegmatite-type rare metal deposits in Dahongliutan area, Hetian County, Xinjiang. *Northwestern Geology*, 52(4): 206 – 221 (in Chinese with English abstract)
- Li P, Li JK, Chou IM, Wang DH and Xiong X. 2019a. Mineralization epochs of granitic rare-metal pegmatite deposits in the Songpan-Ganze orogenic belt and their implications for orogeny. *Minerals*, 9 (5): 280
- Li S, Chung SL, Hou ZQ, Chew D, Wang T, Wang BD and Wang YB. 2019b. Early Mesozoic magmatism within the Tibetan Plateau: Implications for the Paleo-Tethyan tectonic evolution and continental amalgamation. *Tectonics*, 38(10): 3505 – 3543
- Liu JH, Wang Q, Xu CB, Zhou JS, Wang BZ, Li WF, Li SP, Huang TY, Yan QH, Song TZ, Wang CT, Zheng Y and Wang JS. 2022. Geochronology of the Chakabeishan Li-(Be) rare-element pegmatite, Zongwulong orogenic belt, Northwest China: Constraints from columbite-tantalite U-Pb and muscovite – lepidolite  $^{40}Ar/^{39}Ar$  dating. *Ore Geology Reviews*, 146: 104930
- Liu LJ, Wang DH, Gao JQ, Yu F and Wang W. 2019. Breakthroughs of lithium exploration progress (2017 – 2018) and its significance to China's strategic key mineral exploration. *Acta Geologica Sinica*, 93 (6): 1479 – 1488 (in Chinese with English abstract)
- Liu XQ, Zhang CL, Zou HB, Wang Q, Hao XS, Zhao HX and Ye XT. 2020. Triassic-Jurassic granitoids and pegmatites from Western Kunlun-Pamir syntax: Implications for the Paleo-Tethys evolution at the northern margin of the Tibetan Plateau. *Lithosphere*, (1): 7282037
- Liu YP, Li ZX, Li HM, Guo LG, Xu W, Ye L, Li CY and Pi DH. 2007. U-Pb geochronology of cassiterite and zircon from the Dulong Sn-Zn deposit: Evidence for Cretaceous large-scale granitic magmatism and mineralization events in southeastern Yunnan Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 967 – 976 (in Chinese with English abstract)
- Liu YS, Hu ZC, Gao S, Günther D, Xu J, Gao CG and Chen HH. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257(1 – 2): 34 – 43
- Liu YS, Hu ZC, Zong KQ, Gao CG, Gao S, Xu J and Chen HH. 2010. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 55 (15): 1535 – 1546
- Ludwig KR. 2003. *Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, Special Publication, 1 – 39
- Lupulescu MV, Chiarenzelli JR, Pullen AT and Price JD. 2011. Using pegmatite geochronology to constrain temporal events in the Adirondack Mountains. *Geosphere*, 7(1): 23 – 39
- Melleton J, Gloaguen E, Frei D, Milan N and Breiter K. 2013. How are the emplacement of the rare-element pegmatites, regional metamorphism and magmatism interrelated in the Moldanubian domain of the Variscan Bohemian Massif, Czech Republic? *The Canadian Mineralogist*, 50(6): 1751 – 1773
- Qin KZ, Zhou QF, Tang DM and Wang CL. 2019. Types, internal structural patterns, mineralization and prospects of rare element pegmatites in East Qinling Mountain in comparison with features of Chinese Altay. *Mineral Deposits*, 38(5): 970 – 982 (in Chinese with English abstract)
- Qin KZ, Zhao JX, He CT and Shi RZ. 2021. Discovery of the Qongjiagang giant lithium pegmatite deposit in Himalaya, Tibet, China. *Acta Petrologica Sinica*, 37(11): 3277 – 3286 (in Chinese with English abstract)
- Romer RL and Wright JE. 1992. U-Pb dating of columbites: A geochronologic tool to date magmatism and ore deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(5): 2137 – 2142
- Romer RL and Lehmann B. 1995. U-Pb columbite age of Neoproterozoic Ta-Nb mineralization in Burundi. *Economic Geology*, 90(8): 2303 – 2309
- Romer RL, Smeds SA and Černý P. 1996. Crystal-chemical and genetic controls of U-Pb systematics of columbite-tantalite. *Mineralogy and Petrology*, 57(3): 243 – 260
- Smith SR, Foster GL, Romer RL, Tindle AG, Kelley SP, Noble SR, Horstwood M and Breaks FW. 2004. U-Pb columbite-tantalite chronology of rare-element pegmatites using TIMS and Laser Ablation-Multi Collector-ICP-MS. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 147(5): 549 – 564
- Tindle AG and Breaks FW. 1998. Oxide minerals of the Separation Rapids rare-element granitic pegmatite group, northwestern Ontario. *The Canadian Mineralogist*, 36(2): 609 – 635
- Tu XL, Zhang H, Deng WF, Ling MX, Liang HY, Liu Y and Sun WD. 2011. Application of resolution in-situ laser ablation ICP-MS in trace element analyses. *Geochimica*, 40(1): 83 – 98 (in Chinese with English abstract)
- Wang DH, Li JK and Fu XF. 2005.  $^{40}Ar/^{39}Ar$  dating for the Jiajika pegmatite-type rare metal deposit in western Sichuan and its significance. *Geochimica*, 34(6): 3 – 9 (in Chinese with English abstract)
- Wang H, Li P, Ma HD, Zhu BY, Qiu L, Zhang XY, Dong R, Zhou KL, Wang M, Wang Q, Yan QH, Wei XP, He B, Lu H and Gao H. 2017. Discovery of the Bailongshan superlarge lithium-rubidium deposit in Karakorum, Hetian, Xinjiang, and its prospecting implication. *Geotectonica et Metallogenia*, 41(6): 1053 – 1062 (in Chinese with English abstract)
- Wang H, Gao H, Zhang XY, Yan QH, Xu YG, Zhou KL, Dong R and Li P. 2020. Geology and geochronology of the super-large Bailongshan Li-Rb-(Be) rare-metal pegmatite deposit, West Kunlun orogenic belt, NW China. *Lithos*, 360 – 361: 105449

- Wang H, Gao H, Ma HD, Zhu BY, Xing CH, Zhou KL, Zhu BZ, Wang ZH, Wang M, Dong R, Yan QH and Zhang XY. 2020. Geological characteristics and pegmatite vein group zoning of the Xuefengling, Xuepen, and Shuangya lithium deposits in Karakorum, Hetian, Xinjiang. *Geotectonica et Metallogenia*, 44 (1): 57 - 68 (in Chinese with English abstract)
- Wang H, Xu YG, Yan QH and Zhang XY. 2021. Research progress on Bailongshan pegmatite type lithium deposit, Xinjiang. *Acta Geologica Sinica*, 95(10): 3085 - 3098 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Wan B, Zhao L, Xiao WJ and Zhu RX. 2020. Tethyan geodynamics. *Acta Petrologica Sinica*, 36 (6): 1627 - 1674 (in Chinese with English abstract)
- Xiao WJ, Windley BF, Liu DY, Jian P, Liu CZ, Yuan C and Sun M. 2005. Accretionary tectonics of the Western Kunlun orogen, China: A Paleozoic-Early Mesozoic, long-lived active continental margin with implications for the growth of southern Eurasia. *The Journal of Geology*, 113(6): 687 - 705
- Xu ZQ, Zhu WB, Zheng BH, Shu LS, Li GW, Che XD and Qin YL. 2021. New energy strategy for lithium resource and the continental dynamics research: Celebrating the centenary of the School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University. *Acta Geologica Sinica*, 95(10): 2937 - 2954 (in Chinese with English abstract)
- Yan QG, Li JK, Li XJ, Liu YC, Li P and Xiong X. 2020. Source of the Zhawulong granitic pegmatite-type lithium deposit in the Songpan-Ganze orogenic belt, Western Sichuan, China: Constraints from Sr-Nd-Hf isotopes and petrochemistry. *Lithos*, 378 - 379: 105828
- Yan QH, Qiu ZW, Wang H, Wang M, Wei XP, Li P, Zhang RQ, Li CY and Liu JP. 2018. Age of the Dahongliutan rare metal pegmatite deposit, West Kunlun, Xinjiang (NW China): Constraints from LA-ICP-MS U-Pb dating of columbite-(Fe) and cassiterite. *Ore Geology Reviews*, 100: 561 - 573
- Yan QH, Wang H, Chi GX, Wang Q, Hu H, Zhou KL and Zhang XY. 2022. Recognition of a 600-km-long Late Triassic rare-metal (Li-Rb-Be-Nb-Ta) pegmatite belt in the Western Kunlun orogenic belt, western China. *Economic Geology*, 117(1): 213 - 236
- Yuan SD, Peng JT, Hao S, Li HM, Geng JZ and Zhang DL. 2011. In situ LA-MC-ICP-MS and ID-TIMS U-Pb geochronology of cassiterite in the giant Furong tin deposit, Hunan Province, South China: New constraints on the timing of tin-polymetallic mineralization. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 235 - 242
- Zhai MG, Wu FY, Hu RZ, Jiang SY, Li WC, Wang RC, Wang DH, Qi T, Qin KZ and Wen HJ. 2019. Critical metal mineral resources: Current research status and scientific issues. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 33 (2): 106 - 111 (in Chinese with English abstract)
- Zhang CL, Ma HD, Zhu BY, Ye XT, Qiu L, Zhao HX, Liu XQ, Ding T, Wang Q and Hao XS. 2019. Tectonic evolution of the Western Kunlun-Karakorum Orogenic Belt and its coupling with the mineralization effect. *Geological Review*, 65(5): 1077 - 1102 (in Chinese with English abstract)
- Zhang DL, Peng JT, Coulson IM, Hou LH and Li SJ. 2014a. Cassiterite U-Pb and muscovite  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  age constraints on the timing of mineralization in the Xuebaoding Sn-W-Be deposit, western China. *Ore Geology Reviews*, 62: 315 - 322
- Zhang LY, Ding L, Pullen A, Xu Q, Liu DL, Cai FL, Yue HY, Lai QZ, Shi RD, Ducea MN, Kapp P and Chapman A. 2014b. Age and geochemistry of western Hoh-Xil-Songpan-Ganzi granitoids, northern Tibet: Implications for the Mesozoic closure of the Paleo-Tethys ocean. *Lithos*, 190 - 191: 328 - 348
- Zhong L, Wang ZH and Liu YL. 2011. The geochronology research status of Altai Pegmatite, NW China: The Confusion of the conventional dating methods used in granitic pegmatite. *Xinjiang Geology*, 29 (4): 412 - 415 (in Chinese with English abstract)
- Zhou KL. 2021. Pegmatite evolution characteristics and constraints on genesis of Bailongshan lithium deposit, West-Kunlun. China. Ph. D. Dissertation. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 1 - 176 (in Chinese with English abstract)
- Zhou QF, Qin KZ, Tang DM, Wang CL and Ma LS. 2021. The features of geology and rare-elemental enrichment of the East Qinling pegmatite district. *Acta Geologica Sinica*, 95 (10): 3115 - 3126 (in Chinese with English abstract)

## 附中文参考文献

- 崔玉荣, 涂家润, 陈枫, 郝爽, 叶丽娟, 周红英, 李惠民. 2017. LA-(MC)-ICP-MS 锡石 U-Pb 定年研究进展. *地质学报*, 91 (6): 1386 - 1399
- 邓运, 费光春, 李剑, 唐文春, 钟伟, 杨贵兵. 2018. 四川李家沟伟晶岩型锂辉石矿床碳氢氧同位素及成矿时代研究. *矿物岩石*, 38(3): 40 - 47
- 郝雪峰, 付小方, 梁斌, 袁简平, 潘蒙, 唐屹. 2015. 川西甲基卡花岗岩和新三号矿脉的形成时代及意义. *矿床地质*, 34(6): 1199 - 1208
- 李杭, 洪涛, 杨智全, 陈建中, 柯强, 王学海, 牛磊, 徐兴旺. 2020. 稀有金属花岗岩伟晶岩锆石、锡石与钽铍铁矿 U-Pb 和白云母  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  测年对比研究——以阿尔金中段吐格曼北锂铍矿床为例. *岩石学报*, 36(9): 2869 - 2892
- 李建康. 2006. 川西典型伟晶岩型矿床的形成机理及其大陆动力学背景. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学(北京), 1 - 225
- 李侃, 高永宝, 滕家欣, 金谋顺, 李伟. 2019. 新疆和田县大红柳滩一带花岗岩伟晶岩型稀有金属矿成矿地质特征、成矿时代及找矿方向. *西北地质*, 52(4): 206 - 221
- 刘丽君, 王登红, 高娟琴, 于泐, 王伟. 2019. 国外锂矿找矿的新突破(2017~2018年)及对我国关键矿产勘查的启示. *地质学报*, 93(6): 1479 - 1488
- 刘玉平, 李正祥, 李惠民, 郭利果, 徐伟, 叶霖, 李朝阳, 皮道会. 2007. 都龙锡铍矿床锡石和锆石 U-Pb 年代学: 滇东南白垩纪大规模花岗岩成岩-成矿事件. *岩石学报*, 23(5): 967 - 976
- 秦克章, 周起凤, 唐冬梅, 王春龙. 2019. 东秦岭稀有金属伟晶岩的类型、内部结构、矿化及远景——兼与阿尔泰地区对比. *矿床地质*, 38(5): 970 - 982
- 秦克章, 赵俊兴, 何畅通, 施睿哲. 2021. 喜马拉雅琼嘉岗超大型伟晶岩型锂矿的发现及意义. *岩石学报*, 37(11): 3277 - 3286
- 涂湘林, 张红, 邓文峰, 凌明星, 梁华英, 刘颖, 孙卫东. 2011. RESOLUTION 激光剥蚀系统在微量元素原位微区分析中的应用. *地球化学*, 40(1): 83 - 98
- 王登红, 李建康, 付小方. 2005. 四川甲基卡伟晶岩型稀有金属矿床的成矿时代及其意义. *地球化学*, 34(6): 3 - 9
- 王核, 李沛, 马华东, 朱炳玉, 邱林, 张晓宇, 董瑞, 周楷麟, 王敏, 王茜, 闫庆贺, 魏小鹏, 何斌, 卢鸿, 高昊. 2017. 新疆和田县白龙山超大型伟晶岩型锂钽多金属矿床的发现及其意义. *大地构造与成矿学*, 41(6): 1053 - 1062
- 王核, 高昊, 马华东, 朱炳玉, 邢春辉, 周楷麟, 朱宝彰, 王振宏, 王敏, 董瑞, 闫庆贺, 张晓宇. 2020. 新疆和田县雪凤岭锂矿床、雪盆锂矿床和双牙锂矿床地质特征及伟晶岩脉群分带初步研究. *大地构造与成矿学*, 44(1): 57 - 68
- 王核, 徐义刚, 闫庆贺, 张晓宇. 2021. 新疆白龙山伟晶岩型锂矿床研究进展. *地质学报*, 95(10): 3085 - 3098
- 吴福元, 万博, 赵亮, 肖文交, 朱日祥. 2020. 特提斯地球动力学.

- 岩石学报, 36(6): 1627-1674
- 许志琴, 朱文斌, 郑碧海, 舒良树, 李广伟, 车旭东, 秦宇龙. 2021. 新能源锂矿战略与大陆动力学研究——纪念南京大学地球科学与工程学院100周年华诞. 地质学报, 95(10): 2937-2954
- 翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 蒋少涌, 李文昌, 王汝成, 王登红, 齐涛, 秦克章, 温汉捷. 2019. 战略性关键金属矿产资源: 现状与问题. 中国科学基金, 33(2): 106-111
- 张传林, 马华东, 朱炳玉, 叶现韬, 邱林, 赵海香, 刘晓强, 丁腾, 王倩, 郝晓妹. 2019. 西昆仑-喀喇昆仑造山带构造演化及其成矿效应. 地质论评, 65(5): 1077-1102
- 钟龙, 王政华, 刘玉琳. 2011. 阿尔泰花岗伟晶岩年代学研究现状——兼谈常规年代学方法在花岗伟晶岩定年中之困惑. 新疆地质, 29(4): 412-415
- 周楷麟. 2021. 西昆仑白龙山锂矿伟晶岩演化特征及对矿床成因的制约. 博士学位论文. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 1-176
- 周起凤, 秦克章, 唐冬梅, 王春龙, 马留锁. 2021. 东秦岭古生代伟晶岩稀有金属成矿特色与成矿条件分析. 地质学报, 95(10): 3115-3126