

doi: 10.12029/gc20230425002

付建刚, 李光明, 王根厚, 郭伟康, 张海, 张林奎, 金灿海, 董随亮, 焦彦杰, 李应栩. 2025. 西藏库拉岗日穹窿锂铍锡等稀有金属特征、成矿规律及其对找矿的指示[J]. 中国地质, 52(4): 1179–1203.

Fu Jiangang, Li Guangming, Wang Genhou, Guo Weikang, Zhang Hai, Zhang Linkui, Jin Canhai, Dong Suiliang, Jiao Yanjie, Li Yingxu. 2025. Characteristics and metallogeny of Li–Be–Sn rare metals in the Kulagangri Dome in Xizang and their implications for prospecting[J]. Geology in China, 52(4): 1179–1203(in Chinese with English abstract).

# 西藏库拉岗日穹窿锂铍锡等稀有金属特征、成矿规律及其对找矿的指示

付建刚<sup>1</sup>, 李光明<sup>1</sup>, 王根厚<sup>2</sup>, 郭伟康<sup>1</sup>, 张海<sup>1</sup>, 张林奎<sup>1</sup>, 金灿海<sup>1</sup>, 董随亮<sup>1</sup>,  
焦彦杰<sup>1</sup>, 李应栩<sup>1</sup>

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心(西南地质科技创新中心), 四川 成都 611230; 2. 中国地质大学(北京)  
地球科学与资源学院, 北京 100083)

**摘要:**【研究目的】喜马拉雅成矿带近年来在锂铍铌钽等稀有金属找矿方面取得重大突破, 通过 1:5 万矿产地质调查实施, 在喜马拉雅成矿带东段的库拉岗日穹窿不同位置发现并评价多个不同的矿化类型, 代表性的有嘎波伟晶岩型锂矿、次麦矽卡岩型锡铁铅锌多金属矿和木村构造-蚀变岩型金矿。本文通过对库拉岗日穹窿结构的解剖、典型矿床研究、成矿年代学综合研究, 其目的是查明喜马拉雅带典型稀有金属矿床的成矿时代、解析穹窿构造-高分异淡色花岗岩-稀有金属成矿关系、总结穹窿构造控矿规律, 从而为区域稀有金属找矿预测提供理论依据。【研究方法】本文在详细的野外地质调查基础上, 开展伟晶岩独居石定年和典型矿床地质特征研究, 查明穹窿构造与稀有金属的成矿关系。【研究结果】嘎波锂矿位于库拉岗日穹窿东端, 矿体主要赋存在穹窿滑脱系的大理岩中, 锂辉石伟晶岩获得独居石 U–Th–Pb 年龄为 23.1 Ma, 代表其成矿年龄, 矿区北部电气石花岗岩的侵位年龄为 19.3 Ma, 明显晚于锂矿的成矿时代。次麦锡铁铅锌多金属矿位于库拉岗日穹窿的东段、嘎波锂矿的南部, 目前矿区识别出两种矿化类型: (1) 矽卡岩型锡铁矿体, 矿石矿物主要以锡石、磁铁矿共生为典型特征, 在喜马拉雅带属于一种新的矿化类型; (2) 矽卡岩型铅锌多金属矿体, 两类矿体均产在穹窿滑脱系的大理岩或矽卡岩化大理岩中, 矿区与含矿矽卡岩密切相关的伟晶岩独居石 U–Th–Pb 年龄为 23.0 Ma, 代表其成矿年龄。木村金矿位于库拉岗日穹窿东南部的盖层中, 赋矿围岩主要为一套钙质的粉砂质板岩, 控矿构造为北东走向和东西走向的张性断裂。库拉岗日穹窿在空间上由内向外呈现高温岩浆型锂铍稀有金属矿(嘎波)→中—高温矽卡岩型锡铁、铅锌矿(次麦)→中—低温构造-蚀变岩型金矿(木村)的规律变化。库拉岗日穹窿滑脱系中大规模的伸展拆离构造变形、淡色花岗岩的岩浆侵位和高度结晶分异、同构造矽卡岩的形成、锂铍铌钽锡等稀有金属成矿作用在 23 Ma 左右同时进行。【结论】库拉岗日穹窿的东段作为藏南拆离系(STDS)在其北部的一种表现形式, 穹窿中高分异淡色花岗岩和大规模拆离断层(对应于区域上 STDS)的强烈活动, 是锂铍铌钽锡等稀有金属成矿的关键因素, 同时也是未来在喜马拉雅成矿带其他典型穹窿构造中寻找新的稀有金属矿的必备条件。

**关键词:** 锂铍铌钽锡; 稀有金属; 锂辉石伟晶岩; 矽卡岩; 嘎波; 次麦; 库拉岗日穹窿; 矿产勘查工程; 喜马拉雅成矿带

收稿日期: 2023–04–25; 改回日期: 2023–11–07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC2901903、2023YFC2908400)、国家自然科学基金项目(91955208)、第二次青藏高原综合科学考察研究资助(2019QZKK0806)及中国地质调查局项目(DD20230337、DD20230281)联合资助。

作者简介: 付建刚, 男, 1987 年生, 博士, 副研究员, 主要从事于构造地质与成矿理论研究; E-mail: fujiangangcd@163.com。

通信作者: 李光明, 男, 1965 年生, 研究员, 主要从事于矿产资源勘查与评价、区域成矿规律与成矿预测研究;  
E-mail: 13982257109@163.com。

**创 新 点:** (1)查明库拉岗日穹窿锂铍锡等稀有金属成矿作用的空间分布;(2)获得嘎波锂矿和次麦锡铁铅锌矿的成矿时代;(3)总结穹窿构造、高分异淡色花岗岩、稀有金属成矿的关系,为区域稀有金属找矿预测提供理论依据。

中图分类号: P618.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)04-1179-25

## Characteristics and metallogeny of Li-Be-Sn rare metals in the Kulangangri Dome in Xizang and their implications for prospecting

FU Jiangang<sup>1</sup>, LI Guangming<sup>1</sup>, WANG Genhou<sup>2</sup>, GUO Weikang<sup>1</sup>, ZHANG Hai<sup>1</sup>, ZHANG Linkui<sup>1</sup>, JIN Canhai<sup>1</sup>, DONG Suiliang<sup>1</sup>, JIAO Yanjie<sup>1</sup>, LI Yingxu<sup>1</sup>

(1. Chengdu Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Southwest China), Chengdu 611230, Sichuan, China; 2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** This paper is the result of mineral exploration engineering.

**[Objective]** In recent years, great breakthroughs have been made in the prospecting of rare metals such as lithium, beryllium, niobium and tantalum in the Himalayan metallogenic belt. Based on the 1 : 50000 mineral geological mapping, three different types mineralization have been identified: (1) The Gabo pegmatite type lithium deposit; (2) The Cimai skarn type Sn-Fe-Pb-Zn polymetallic deposit; (3) The Mucun tectonic-altered rock type Au deposit. The purpose of this paper is to find out the metallogenic age of typical rare metal deposits in the Himalayan belt, analyze the metallogenic relationship between dome structure, high differentiated granite and rare metal, and summarize the structural ore control regularity in the dome, so as to provide theoretical basis for regional rare metal prospecting and prediction. **[Methods]** Based on the detailed field geological investigation, the dating of pegmatite monazite and the geological characteristics of typical deposits are studied in this paper, and the relationship between structure in the dome and metallogenesis of rare metals is investigated. **[Results]** The Gobo lithium deposit is located at the northeast part of the Kulangangri Dome. Li-Be ore bodies are hosted by the marble in the middle unit of the Dome. Spodumene pegmatite yielded a monazite U-Th-Pb age of 23.1 Ma, which represents metallogenic age of the Gobo lithium deposit. The emplacement age of tourmaline granite in the north part of the Gabon mining area is 19.3 Ma, which is obviously later than the metallogenic age of lithium ore. The Cimai skarn type Sn-Fe-Pb-Zn polymetallic deposit is located at the south of the Gabon lithium deposit. At present, two mineralization types have been identified in the mining area: (1) Skarn type Sn-Fe bodies, which are mainly characterized by the symbiosis of cassiterite and magnetite, and belongs to a new type mineralization in the Himalayan belt; (2) Skarn-type Pb-Zn polymetallic ore bodies. Both type ore bodies are hosted in marble in middle unit of the Dome, and the U-Th-Pb age of pegmatite monazite closely related to ore-bearing skarn in the mining area is 23.0 Ma, representing its ore-forming age. The Mucun gold deposit is located in the Cover rocks in the southeast of the Kulangangri Dome, and the ore-bearing rocks are mainly a set of calcareous silty slate, and ore bodies are controlled by the northeast-strike and east-west strike faults. The mineralization in the Kulangangri Dome show a regular change from the high temperature magmatic type lithium beryllium rare metal deposit (Gabo) to the medium-high temperature skarn type tin-iron and lead-zinc deposit (Semai) to the low temperature tectonic-altered rock type gold deposit (Mucun). There are many events such as large-scale extensional detachment tectonic deformation, magmatic emplacement and high crystal differentiation of leucogranites, formation of syntectonic skarn, mineralization of Li-Be-Nb-Ta-Sn rare metals occurred at the same time at ca. 23 Ma. **[Conclusions]** As a manifestation of the STDS in the north, both high differentiated leucogranites and large-scale detachment faults are the key factors for the mineralization of Li-Be-Nb-Ta-Sn rare metals in the Kulangangri Dome, which are also a necessary condition for finding new rare metal deposits in other typical dome structures in the Himalayan metallogenic belt.

**Key words:** Li-Be-Nb-Ta-Sn; rare metals; spodumene pegmatite; skarn; Gabo; Cimai; Kulangangri Dome; mineral exploration engineering; Himalayan metallogenic belt

**Highlights:** (1) The spatial distribution of rare metals mineralization in the Kulangangri Dome was ascertained; (2) The metallogenic

age of the Gabo lithium deposit and the Cimai Sn-Fe-Pb-Zn deposit was obtained; (3) The relationship among structure in the dome, high differentiated granite and rare metal mineralization was summarized, and theoretical basis for regional rare metal prospecting and prediction was provided.

**About the first author:** FU Jiangang, male, born in 1987, Ph.D., associate researcher, engaged in the study of structural geology and metallogenic theory; E-mail: [fujiangangcd@163.com](mailto:fujiangangcd@163.com)

**About the corresponding author:** Li Guangming, male, born in 1965, professor, engaged in the study of mineral resources exploration and evaluation, regional metallogenic regularity and metallogenic prediction; E-mail: [13982257109@163.com](mailto:13982257109@163.com).

**Fund support:** Supported by National Key Research and Development Plan (No.2021YFC2901903, No.2023YFC2908400), National Natural Science Foundation of China (No.91955208), the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research (No.2019QZKK0806), and the projects of China Geological Survey (No.DD20230337, No.DD20230281).

## 1 前言

喜马拉雅成矿带作为中国境内一条十分重要的成矿带,以发育一套高分异淡色花岗岩以及与淡色花岗岩密切相关的 Li、Be、Nb、Ta、Rb、Cs、W、Sn 等一系列稀有金属矿床而备受国内外地质学家关注。李光明等(2017)在喜马拉雅带东段的错那洞穹窿首次报道了具大型以上找矿潜力的矽卡岩型铍钨锡重大找矿发现,揭开了喜马拉雅带稀有金属找矿发现的序幕,随后在 2022 年相继发现位于库拉岗日穹窿东段的嘎波伟晶岩型锂矿(李光明等, 2022)。秦克章等(2021)和赵俊兴等(2021)分别在卓奥友峰西侧普士拉山口发现琼嘉岗伟晶岩型超大型锂矿。付建刚等(2020, 2021)报道了北喜马拉雅东段拉隆穹窿中存在 3 种稀有金属矿化类型,分别为钠长石花岗岩型 Be-Nb-Ta 矿、矽卡岩型 Be-Nb-Ta 矿、构造-热液型 W-Pb-Zn 矿;随后在 2024 年库拉岗日穹窿东段的次麦地区发现次麦矽卡岩型锡铁铅锌多金属矿(付建刚等, 2024)。在此基础上,在喜马拉雅带的其他地区,也相继发现一系列的锂铍铌钽等稀有金属矿化线索,如谢磊等(2021)报道了喜马拉雅西段夏如穹窿中淡色花岗岩具有铌钽钨的矿化;刘小驰等(2021)和刘晨等(2021)报道了在珠峰热曲和前进沟地区发育有含锂辉石伟晶岩和锂电气石、锂云母的伟晶岩;周起凤等(2021)报道了喜马拉雅带东段库曲岩体的锂铍矿化。这些重要的锂铍铌钽等稀有金属矿或者矿化线索的相继发现,有力地证实了喜马拉雅带是中国一条新的稀有金属成矿带(李光明等, 2017, 2021; 王汝成等, 2017; 付建

刚等, 2021; 刘晨等, 2021; 刘小驰等, 2021; 秦克章等, 2021; 吴福元等, 2021; 谢磊等, 2021; 赵俊兴等, 2021; 周起凤等, 2021)。

库拉岗日穹窿位于喜马拉雅成矿带的东段,北邻拉隆穹窿,通过西藏洛扎地区 1:5 万矿产地质调查的实施,陆续在库拉岗日穹窿发现并评价了嘎波伟晶岩型锂矿(李光明等, 2022)和次麦矽卡岩型锡铁铅锌多金属矿(付建刚等, 2024)、木村构造-蚀变岩型金矿。三种不同的矿化类型分别位于库拉岗日穹窿的不同构造位置,目前除了对嘎波锂矿和次麦锡铁铅锌矿进行报道外,项目团队针对嘎波锂矿研究区开展了矿物学(付建刚等, 2023)、年代学和地球化学(郭伟康等, 2023)以及地球物理(焦彦杰等, 2023)研究工作,其他相关的详细研究还未展开报道。

本文通过对库拉岗日穹窿发育的嘎波锂矿、次麦锡铁铅锌多金属矿和木村金矿三种类型作一个初步的对比研究,从矿床的分布特征、矿床地质特征、成矿时代等方面入手,初步总结库拉岗日穹窿锂铍铌钽锡等稀有金属的成矿规律;探讨穹窿构造-岩浆作用-稀有金属成矿的相互关系,并初步建立穹窿构造、高分异淡色花岗岩和锂铍铌钽锡等稀有金属的成矿模型,从而为库拉岗日穹窿以及喜马拉雅成矿带上其他穹窿构造中锂铍铌钽锡等稀有金属的找矿勘查提供理论支撑。

## 2 区域地质背景

按照大地构造背景,可将喜马拉雅碰撞造山带划分为 4 个构造地层单元,由北向南依次是:特提斯喜马拉雅(THS)、高喜马拉雅(GHS)、低喜马拉雅

雅(LHS)和次喜马拉雅(SHS),对应构造边界向南依次为雅鲁藏布江缝合带(ITSZ)、藏南拆离系(STDs)、主中央逆冲断裂(MCT)、主边界逆冲断裂(MBT)和主前锋逆冲断裂(MFT)(Burg and Chen 1984; Lee et al., 2011)(图 1a、b)。特提斯喜马拉雅通常被称为北喜马拉雅带,位于雅鲁藏布江缝合带(ITSZ)和藏南拆离系(STDs)之间(图 1b),主要分布三叠纪—白垩纪沉积岩系,北喜马拉雅双穹窿构造带位于该带内,进一步可分为南穹窿带和北穹窿带。北穹窿带(简称 N-NHGD)也就是前人研究程度较高的拉轨岗日穹窿带,自东向西依次有雅拉香波、康马、然巴、岗巴、麻布迦、拉轨岗日和马拉山等穹窿(Lee et al., 2004; 张进江等, 2007, 2011; Wagner et al., 2010; Zhang et al., 2012)。南穹窿带(简称 S-NHGD)是近年来新发现并厘定的一系列穹窿,紧邻藏南拆离系,主要包括错那洞、库局、恰隆、拉隆、库拉岗日穹窿和西段的萨尔和吉隆穹窿等(付建刚等, 2018, 2021)。

研究区库拉岗日穹窿位于北喜马拉雅带的东段,介于康马穹窿和错那洞穹窿中间,是近年来笔者团队在通过西藏洛扎地区 1:5 万矿产地质填图的基础上,精细解剖并新厘定的穹窿构造。研究区的典型区域构造包括两个穹窿(拉隆穹窿和库拉岗日穹窿)和一条近东西走向的洛扎断裂(图 2)。

拉隆穹窿位于库拉岗日穹窿的北侧,由内向外由三部分组成,分别是下部单元(核部)、中部单元(滑脱系)和上部单元(盖层)(付建刚等, 2020, 2021, 2022),其中核部并非穹窿构造意义的真正核部,主要是一套高分异的淡色花岗岩组合,岩性包括二云母花岗岩、白云母花岗岩、钠长石花岗岩和伟晶岩,未见老基底花岗质片麻岩出露;中部单元和盖层的岩石组成和构造特征与北喜马拉雅带其他典型穹窿相似(张进江等, 2007; Langille et al., 2010; 张进江等, 2011)。

洛扎断裂在区域上相当于定日—岗巴断裂的

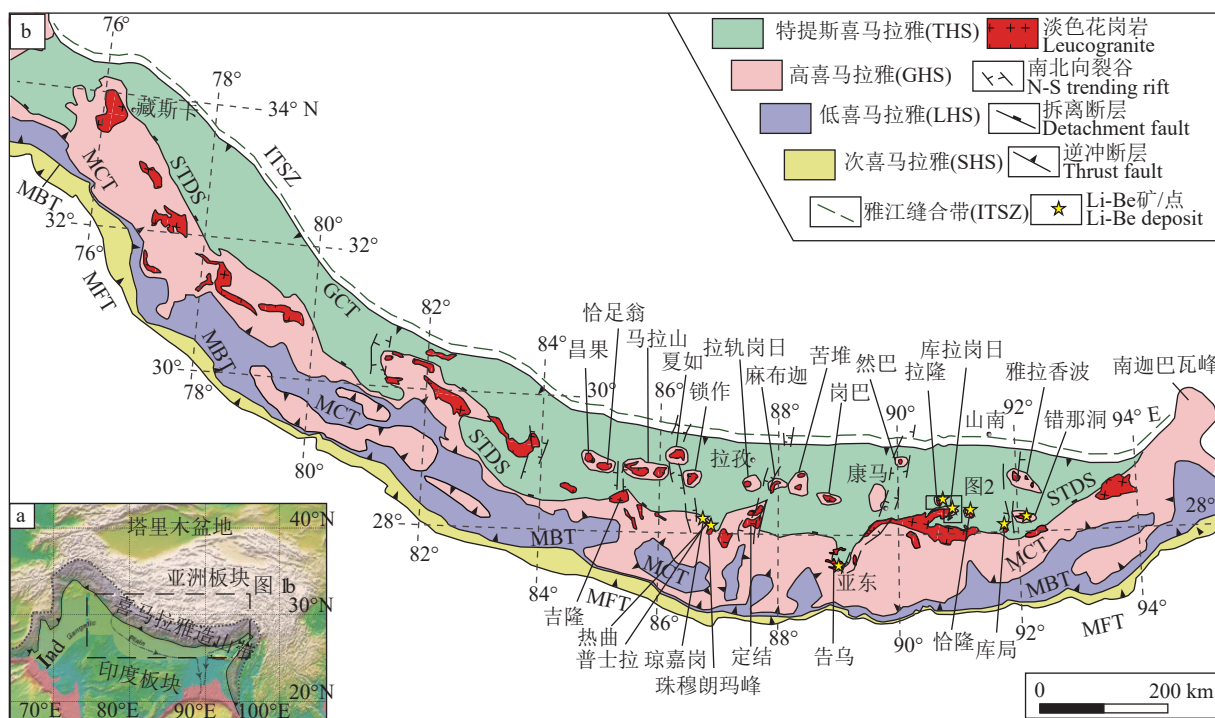


图 1 喜马拉雅碰撞造山带构造地质简图(据吴福元等, 2021)

STDs—藏南拆离系; MCT—主中央逆冲断裂; MBT—主边界逆冲断裂; MFT—主前锋断裂

Fig.1 Tectonic framework sketch of the Himalayan collision orogenic belt (after Wu Fuyuan et al., 2021)

THS—Tethyan Himalayan Sedimentary Sequence; GHS—Great Himalayan Crystalline Series; LHS—Lesser Himalayan Sequence; SHS—Sub-Himalayan Sequence (SHS); ITSZ—Indus-Tsangpo Suture Zone; STDs—The South Tibetan Detachment System; MCT—The Main Central Thrust; MBT—The Main Boundary Thrust; MFT—The Main front Thrust

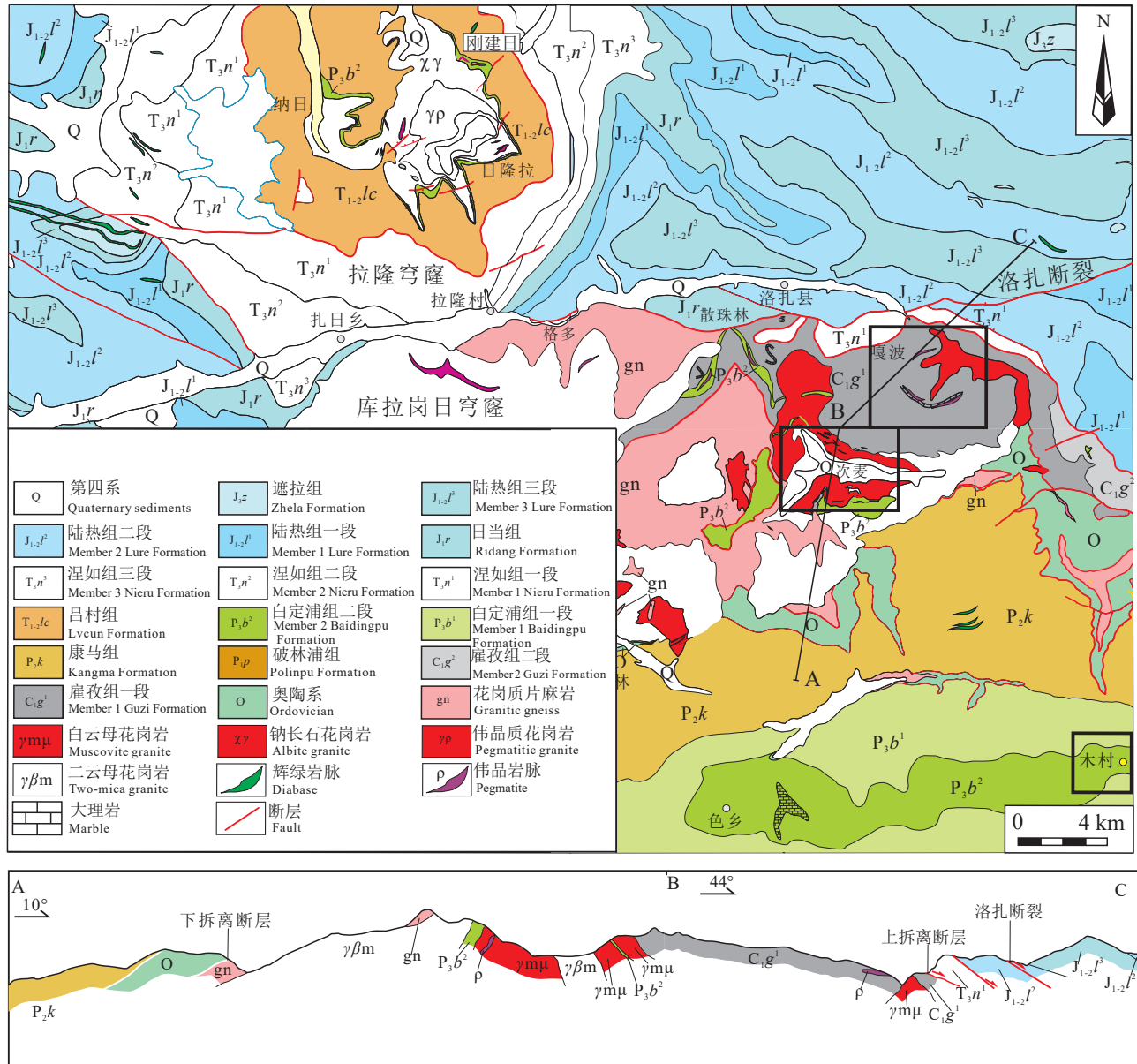


图 2 西藏洛扎地区库拉岗日穹窿地质图(据李光明等, 2022)

Fig.2 Geological map of the Kulagangri Dome in the Luozha area, Xizang (after Li Guangming et al., 2022)

东延部分, 该断裂构成了拉轨岗日(康马—隆子)过渡型壳片同北喜马拉雅陆(棚)型壳片之间的构造界面。在亚东一带, 剖面上由若干冲断层组成叠瓦构造型式, 产状一般向北倾斜, 叠瓦带内的侏罗纪—白垩纪灰岩或砂岩沿走向呈夹块状, 被冲断的始新世海相地层沿断层走向时断时续, 表明断层带形成于始新世末到渐新世(鲁如魁等, 2005)。在研究区内, 洛扎断裂主要出露在库拉岗日穹窿的北部、拉隆穹窿的南部, 走向近东西向, 沿走向呈波状起伏。断层上盘主要岩性有含石榴石片岩、千枚状板

岩、粉砂质板岩、钙质板岩和灰岩等; 下盘主要由花岗质片麻岩夹强烈变形的伟晶岩或花岗岩岩脉以及副片麻岩组成。该断层早期表现为向南逆冲性质, 在断层面上盘保留并发育一系列的与逆冲断层伴生的紧闭同斜倒转褶皱, 显示逆冲构造前缘褶皱特征; 断层晚期表现为向北拆离的特征, 拆离断层内发育一系列垂直的张性节理、S-C 组构, 以及沿主断层面两侧发育多条次级正断层, 均指示该区域断裂晚期为向北拆离的特征, 该断层面产状为  $350^{\circ} \angle 70^{\circ}$ 。

### 3 库拉岗日穹窿的地质特征

库拉岗日穹窿东西向延伸约 80 km, 是整个北喜马拉雅片麻岩穹窿中出露规模最大的穹窿构造。该穹窿具有典型的三层结构, 由内向外依次为核部(下部单元)、滑脱系(中部单元)和盖层(上部单元)。需要说明的是, 库拉岗日穹窿与东部的错那洞穹窿在结构上相似, 而与北部的拉隆穹窿略有不同, 主要体现在库拉岗日穹窿核部出露寒武纪花岗质片麻岩, 而拉隆穹窿核部未出露花岗质片麻岩。因此, 从这个角度出发, 库拉岗日穹窿和东部的错那洞穹窿发育完整的三层结构, 而拉隆穹窿应该说只发育两层结构(即滑脱系和盖层), 其真正的核部还未出来。整体上, 库拉岗日穹窿紧邻着拉隆穹窿, 除了核部已出露花岗质片麻岩之外, 其余在岩石-构造单元组成、构造变形特征以及变质作用等方面均具有十分相似的特征, 故详细的特征描述可见拉隆穹窿的特征(付建刚等, 2021), 在此部分主要描述一些库拉岗日穹窿的特殊部分。

库拉岗日穹窿的核部主要由花岗质片麻岩、片麻状花岗岩、二云母花岗岩、白云母花岗岩、钠长石花岗岩和伟晶岩组成。花岗质片麻岩在露头或者手标本上呈灰色, 灰白色, 鳞片粒状变晶结构, 眼球状、片麻状构造。眼球体成分主要为钾长石和斜长石, 眼球粒径 1~2 cm。矿物定向性排列明显, 主要矿物组成为长石(约 35%, 以钾长石为主)、石英(约 30%)、黑云母(约 25%)、白云母(约 4%)和石榴子石(3%), 以及少量电气石(2%)等。岩石中的片状黑云母和板状长石多呈定向或半定向分布构成片麻理。片麻岩具有较为明显的明暗交替层, 其中长石、石英构成浅色层, 而黑云母等镁铁质矿物则构成暗色层。花岗质片麻岩锆石 U-Pb 测试获得  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为 494 Ma, 代表该花岗质片麻岩原岩的结晶年龄(未发表数据)。

片麻状花岗岩主要出露在库拉岗日穹窿核部靠近边部一带, 云母具定向排列, 暗色矿物黑云母和浅色矿物长石、石英呈条带状产出, 块状构造(图 3a、b)。主要矿物包括石英(30%~40%)、钾长石(25%~35%)、斜长石(20%~30%)、白云母(7%~10%)、黑云母(5%~10%)、电气石(2%~3%)、石榴子石(2%~3%), 以及锆石、独居石等副矿物。

库拉岗日二云母花岗岩呈(灰)白色, 块状构造(图 3c)。主要矿物包括石英(30%~40%)、钾长石(25%~35%)、斜长石(20%~30%)、白云母(5%~10%)、黑云母(5%~10%)、石榴子石(3%~5%)和电气石(2%~3%), 局部可见斜长石的聚片双晶, 副矿物包括锆石、磷灰石以及独居石等。

白云母花岗岩呈白色, 块状构造(图 3d)。主要矿物包括石英(30%~40%)、钾长石(25%~35%)、斜长石(20%~30%)、白云母(10%~15%)、石榴子石(3%~5%), 以及锆石、磷灰石和独居石等副矿物。石榴子石呈细小粒状, 褐红色。

伟晶岩在穹窿核部广泛出露, 部分呈独立的岩脉, 或侵入或穿插于各类淡色花岗岩和花岗质片麻岩中, 在滑脱系中, 伟晶岩脉穿插于矽卡岩、大理岩及部分片岩。伟晶岩主要组成矿物有石英、长石、白云母、绿柱石、石榴子石和电气石(图 3e)。

钠长石花岗岩主要在库拉岗日穹窿分布广泛, 在嘎波和次麦矿区出露较多。在核部, 钠长石花岗岩部分呈侵入接触关系与二云母花岗岩接触, 部分与白云母花岗岩呈渐变关系接触; 在滑脱系中, 钠长石花岗岩部分侵入于滑脱系的大理岩和矽卡岩中, 或平行于大理岩面理, 或切穿大理岩面理。在露头或手标本上, 钠长石花岗岩整体呈白色, 其中含石榴石较多的局部呈现粉红色特征, 主要组成矿物有钠长石、石英、白云母和石榴石, 钠长石呈糖粒状, 白云母含量较少, 呈鳞片状(图 3f)。

滑脱系主要由一条规模较大的韧性剪切带组成, 分别以上、下拆离断层与穹窿的盖层和核部为界(图 2), 出露厚度为 100~800 m, 该带岩性主要由变形花岗岩、伟晶岩和锂辉石伟晶岩、矽卡岩、大理岩、云母石英片岩和含石榴石十字石云母片岩组成。次麦矽卡岩型锡铁铅锌多金属矿主要赋存在滑脱系的矽卡岩或矽卡岩化大理岩中, 嘎波锂矿主要赋存在滑脱系的锂辉石伟晶岩中。

盖层主要由低级变质的千枚状板岩和弱变质或未变质的粉砂质板岩组成。木村金矿位于库拉岗日穹窿的东南部, 矿体主要受构造控制, 其中赋矿围岩就是一套钙质和粉砂质的板岩。

通过矿产地质调查和构造解析, 初步在库拉岗日穹窿厘定出四期构造变形, 分别是第一期由北向南逆冲挤压构造(D1)、第二期由南向北伸展剪切构造

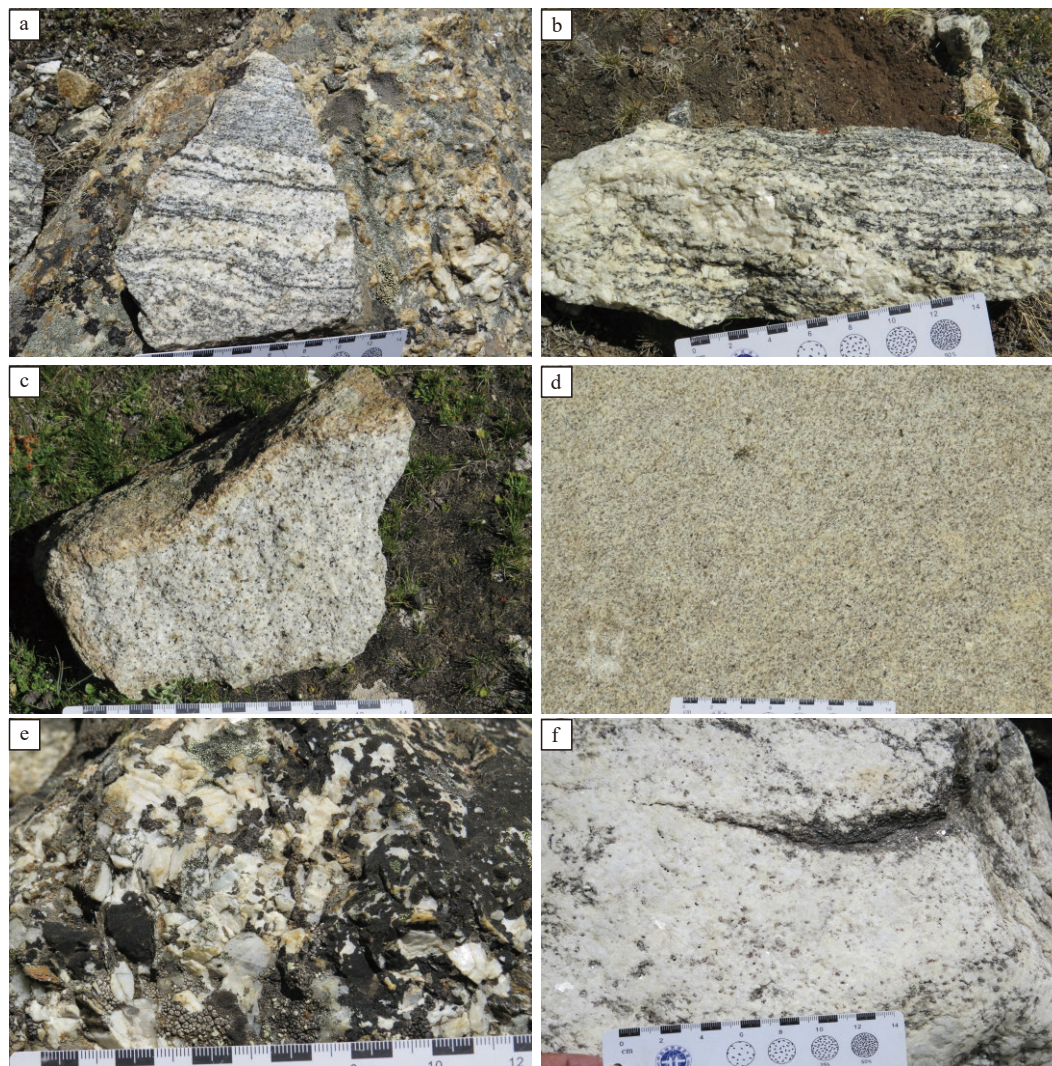


图 3 西藏库拉岗日穹窿淡色花岗岩野外手标本照片

a、b—片麻状花岗岩; c—二云母花岗岩; d—白云母花岗岩; e—含绿柱石伟晶岩; f—钠长石花岗岩

Fig.3 Photos of hand specimen of leucogranites in the Kulagangri Dome, Xizang

a, b—Gneiss granite; c—Two-mica granite; d—Muscovite granite; e—Beryl-bearing pegmatite; f—Albite granite

造(D2)、第三期成穹构造(D3)、第四期脆性断层(D4)。其中与嘎波伟晶岩型锂矿和次麦砂卡岩型锡铁铅锌多金属矿成矿密切相关的为第二期构造(李光明等, 2022; 付建刚等, 2024), 即由南向北伸展剪切变形, 对应于区域上 STDS 的活动; 与木村金矿成矿密切相关的为相对晚期的脆性断层。

## 4 库拉岗日穹窿锂铍锡等稀有金属特征

### 4.1 嘎波锂矿

#### 4.1.1 矿床地质特征

嘎波锂矿位于西藏山南市洛扎县城东侧, 地处库拉岗日穹窿的东北部。矿区出露地层相对较简

单(图 4), 滑脱系主要为石炭系雇孜组( $C_1g$ ), 整体变形强烈, 包括两段, 其中一段( $C_1g^1$ )主要包括有石英云母片岩、含石榴子石十字石云母片岩, 局部夹薄层变砂岩; 二段( $C_1g^2$ )主体为浅灰色中薄层状大理岩夹石英云母片岩组合, 锂辉石伟晶岩脉主要产于雇孜组二段中。矿区南部出露涅如组一段( $T_3n^1$ ), 属于穹窿的盖层, 主要岩性包括浅变质的千枚状板岩和粉砂质板岩(李光明等, 2022)。

矿区记录的四期构造变形与库拉岗日穹窿四期构造变形相一致, 其中与伟晶岩型锂矿密切相关的是第二期构造变形, 对应于区域上藏南拆离系(STDS)的活动, 整体在穹窿滑脱系保存最好, 以石

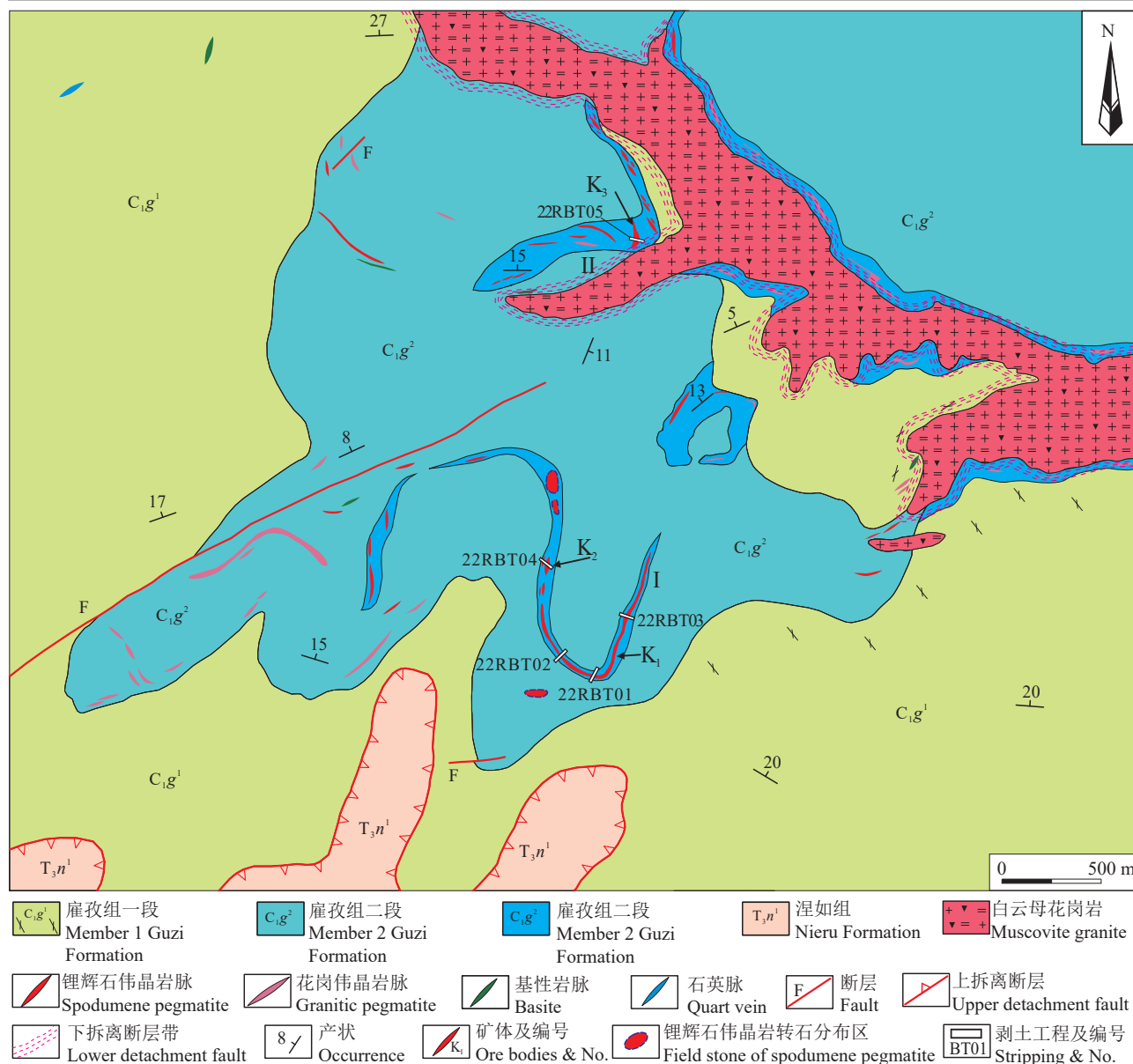


图4 西藏洛扎地区嘎波锂矿地质简图(据李光明等, 2022)

Fig.4 Geological map of the Gabo deposit in the Luozha area, Xizang (after Li Guangming et al. 2022)

英透镜体、眼球状构造、斜卧紧闭褶皱以及大量鞘褶皱等强烈的韧性剪切变形为特征。锂辉石伟晶岩脉整体呈大小不一的透镜体、肠状构造、脉状与围岩大理岩一起发生强烈变形。

矿区出露岩浆岩主要有白云母花岗岩、电气石白云母花岗岩、钠长石花岗岩、伟晶岩和锂辉石伟晶岩(图 5a、b)。白云母花岗岩出露较少, 呈独立的小岩株产出。电气石白云母花岗岩在矿区北部广泛出露, 主要造岩矿物有长石、石英、白云母、电气

石, 少量石榴石和黑云母, 副矿物有锆石、独居石、磷钇矿和铌钽铁矿等(图 5c、d)。钠长石花岗岩在矿区出露位置分为两类: (1)在电气石白云母花岗岩顶部局部出露, 厚度较薄, 一般仅几十厘米到几米, 主要矿物有钠长石、石英和少量的白云母、石榴石, 其中钠长石呈糖粒状; (2)以岩脉的形式出露在大理岩中, 脉宽一般在 5~10 m。伟晶岩脉在矿区分布较广, 包括含矿伟晶岩和不含矿伟晶岩。含矿伟晶岩主要是锂辉石伟晶岩, 产于滑脱系的大理岩中。

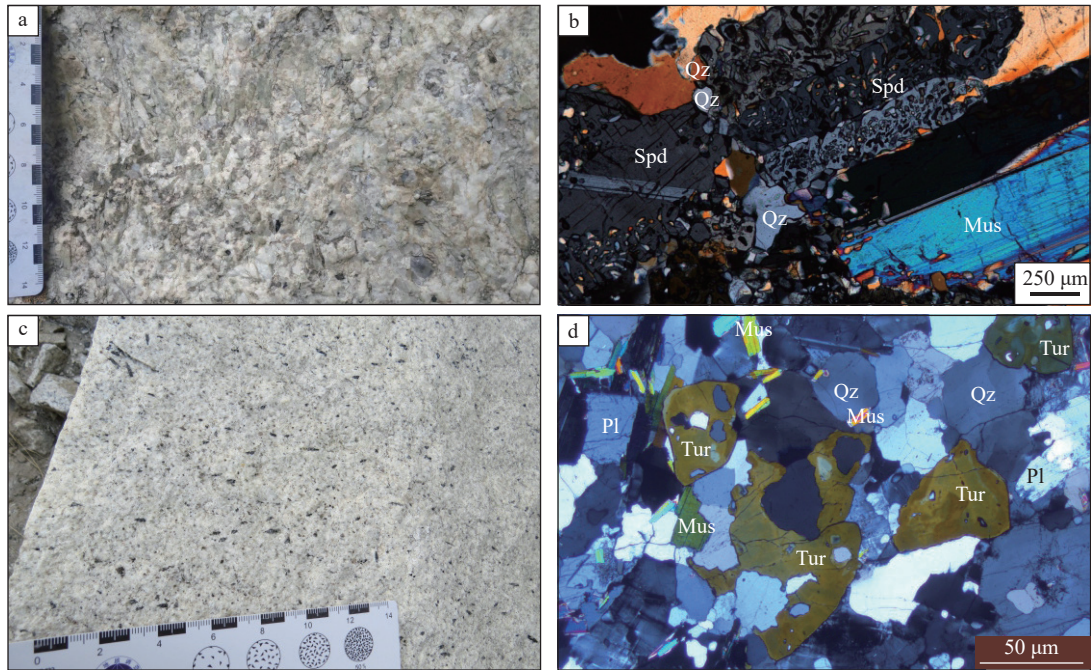


图 5 西藏洛扎嘎波锂矿样品特征照片

a、b—锂辉石伟晶岩; c、d—电气石花岗岩; Spd—锂辉石; Qz—石英; Mus—白云母; Tur—电气石; Pl—斜长石

Fig.5 Photos of hand specimen sample in the Gabon lithium deposit, Xizang

a,b—spodumene pegmatite; c,d—Tourmaline-bearing granite; Spd—Spodumene; Qz—Quartz; Mus—Muscovite; Pl—Plagioclase; Tur—Tourmaline

通过 1 : 1 万矿产地质填图, 目前在矿区圈出锂辉石伟晶岩脉 50 余条, 锂辉石伟晶岩脉整体顺层产于滑脱系的大理岩夹片岩地层中, 总体产状为  $342^{\circ} \angle 11^{\circ}$ , 单条脉长度为 1~1200 m 不等、宽度 0.8~40 m 不等, 形态有脉状、透镜状和囊状等。嘎波锂矿主体以锂、铍为主、共伴生铌、钽、铷、铯有益组分。目前稀疏的地表工程控制 3 条矿体, 以  $K_2$  矿体为例, 地表出露长约 200 m, 矿体总厚度约 45 m,  $Li_2O$  平均品位为 1.11%,  $BeO$  平均品位为 0.047%。矿石构造主要为块状构造, 矿石结构主要有自形结构、文象结构、交代结构、粒状结构等。矿区锂辉石伟晶岩脉初步可分为两个带: 细粒钠长石锂辉石带 (I 带) 和粗粒微斜长石锂辉石带 (II 带) (李光明等, 2022)。矿区主要稀有金属矿物有锂辉石、锂电石、透锂长石、磷铝锂石、锂云母、绿柱石、铌铁矿族矿物、细晶石、天河石、铯榴石、铯云母等, 主要含锂矿物有锂辉石、透锂长石、锂电石和锂云母等, 主要含铍矿物为绿柱石。

#### 4.1.2 分析方法

为了查明嘎波矿区锂辉石伟晶岩和北部电气石花岗岩的形成时代, 本文分别对矿区 K3 号矿体

采集锂辉石伟晶岩样品 RBT05-TW1 和电气石花岗岩样品 PM05-1TW1 进行独居石 U-Th-Pb 定年分析。样品的前处理包括单矿物挑选、制靶以及 CL 拍照均在廊坊诚信地质有限公司完成, 独居石 LA-ICP-MS 定年测试分别是在武汉上谱有限公司 (样品 RBT05-TW1) 和南京大学地球科学与工程学院内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验 (样品 PM05-1TW1) 室完成。实验分析方法采用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪 (LA-ICP-MS), 分析用激光剥蚀系统为 GeoLas HD, 等离子体质谱仪为 Agilent7900, 激光能量 80 mJ, 频率 2 Hz, 激光束斑直径 30  $\mu\text{m}$ 。微量元素校正标准样品为 NIST 610, 同位素比值校正标准样品为 44069, 同位素比值监控标准样品为 TRE。以上样品均为国际标准物质。实验原理和方法参见文献 (Jackson et al., 2004), 同位素比值和年龄采用软件 ICPMSDataCal 获得, 年龄计算和谐和图均采用 Isoplot 软件完成。

#### 4.1.3 成岩与成矿时代

本文锂辉石伟晶岩样品 RBT05-TW1 共分析独居石 28 个点, 测试结果见表 1, 其中 18 个测点年龄落在 U-Pb-Th 拟合线上 (图 6a), 并获得  $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$

表 1 西藏洛扎库拉岗日穹窿独居石 U-Pb 测年结果

Table 1 The U-Pb dating results of monazite from the Kulagangri dome in Luozha, Xizang

| 分析点号              | 同位素比值                            |                                   |                      |                                   |           |                                  |           |                                  |           |         | 表面年龄/Ma                           |           |                                  |           |                                  |           |                                   |           |      |     |      |     |
|-------------------|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------|-----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|---------|-----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|------|-----|------|-----|
|                   | $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ | $\text{Pb}^{(C)}/\text{Pb}^{(T)}$ | $\text{Th}/\text{U}$ | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | $1\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | $1\sigma$ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | $1\sigma$ | $\rho$  | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | $1\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | $1\sigma$ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | $1\sigma$ | $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ | $1\sigma$ |      |     |      |     |
| 锂辉石伟晶岩样品RBT05-TW1 |                                  |                                   |                      |                                   |           |                                  |           |                                  |           |         |                                   |           |                                  |           |                                  |           |                                   |           |      |     |      |     |
| RBT05-TW1-01      | 86070                            | 8397                              | 110                  | 12.5                              | 10.3      | 0.13742                          | 0.00558   | 0.07385                          | 0.00282   | 0.00395 | 0.00006                           | 0.00101   | 0.00001                          | 0.39      | 2195                             | 70.4      | 72.3                              | 2.7       | 25.4 | 0.4 | 20.5 | 0.2 |
| RBT05-TW1-02      | 94138                            | 5155                              | 110                  | 18.3                              | 18.3      | 0.17883                          | 0.00726   | 0.11331                          | 0.00421   | 0.00470 | 0.00009                           | 0.00103   | 0.00001                          | 0.50      | 2642                             | 68.1      | 109.0                             | 3.8       | 30.2 | 0.6 | 20.7 | 0.2 |
| RBT05-TW1-03      | 87481                            | 8935                              | 113                  | 9.64                              | 9.8       | 0.11691                          | 0.00483   | 0.06475                          | 0.00260   | 0.00405 | 0.00006                           | 0.00102   | 0.00001                          | 0.38      | 1910                             | 74.1      | 63.7                              | 2.5       | 26.1 | 0.4 | 20.6 | 0.2 |
| RBT05-TW1-04      | 77009                            | 8882                              | 104                  | 17.4                              | 8.7       | 0.10424                          | 0.00438   | 0.05828                          | 0.00235   | 0.00409 | 0.00006                           | 0.00102   | 0.00001                          | 0.36      | 1702                             | 77.5      | 57.5                              | 2.3       | 26.3 | 0.4 | 20.6 | 0.2 |
| RBT05-TW1-05      | 92241                            | 4636                              | 95                   | 4.25                              | 19.9      | 0.15502                          | 0.00756   | 0.07884                          | 0.00351   | 0.00377 | 0.00007                           | 0.00095   | 0.00001                          | 0.42      | 2402                             | 83.0      | 77.1                              | 3.3       | 24.3 | 0.4 | 19.2 | 0.2 |
| RBT05-TW1-06      | 87813                            | 7340                              | 109                  | 13.4                              | 12.0      | 0.12899                          | 0.00612   | 0.07079                          | 0.00297   | 0.00408 | 0.00007                           | 0.00103   | 0.00001                          | 0.38      | 2084                             | 83.6      | 69.4                              | 2.8       | 26.2 | 0.4 | 20.8 | 0.2 |
| RBT05-TW1-07      | 86886                            | 8510                              | 111                  | 16.4                              | 10.2      | 0.11915                          | 0.00527   | 0.06601                          | 0.00272   | 0.00407 | 0.00006                           | 0.00102   | 0.00001                          | 0.34      | 1944                             | 79.3      | 64.9                              | 2.6       | 26.2 | 0.4 | 20.6 | 0.2 |
| RBT05-TW1-08      | 99162                            | 6637                              | 115                  | 5.06                              | 14.9      | 0.14328                          | 0.00684   | 0.08436                          | 0.00366   | 0.00435 | 0.00007                           | 0.00099   | 0.00001                          | 0.39      | 2333                             | 81.9      | 82.2                              | 3.4       | 28.0 | 0.5 | 20.1 | 0.2 |
| RBT05-TW1-09      | 85635                            | 5474                              | 103                  | 10.9                              | 15.6      | 0.15167                          | 0.00643   | 0.09503                          | 0.00386   | 0.00459 | 0.00008                           | 0.00103   | 0.00001                          | 0.40      | 2365                             | 72.5      | 92.2                              | 3.6       | 29.5 | 0.5 | 20.7 | 0.2 |
| RBT05-TW1-10      | 77955                            | 3577                              | 85                   | 5.53                              | 21.8      | 0.17197                          | 0.00926   | 0.10421                          | 0.00488   | 0.00452 | 0.00008                           | 0.00099   | 0.00001                          | 0.37      | 2577                             | 89.8      | 100.7                             | 4.5       | 29.1 | 0.5 | 20.1 | 0.2 |
| RBT05-TW1-11      | 87428                            | 4411                              | 94                   | 9.45                              | 19.8      | 0.14727                          | 0.00731   | 0.08334                          | 0.00396   | 0.00425 | 0.00009                           | 0.00097   | 0.00001                          | 0.46      | 2315                             | 85.2      | 81.3                              | 3.7       | 27.3 | 0.6 | 19.5 | 0.2 |
| RBT05-TW1-12      | 86450                            | 8382                              | 107                  | 14.4                              | 10.3      | 0.12772                          | 0.00543   | 0.06698                          | 0.00277   | 0.00385 | 0.00006                           | 0.00098   | 0.00001                          | 0.38      | 2078                             | 74.5      | 65.8                              | 2.6       | 24.8 | 0.4 | 19.8 | 0.2 |
| RBT05-TW1-13      | 80911                            | 3569                              | 86                   | 16.2                              | 22.7      | 0.17667                          | 0.00898   | 0.10597                          | 0.00520   | 0.00447 | 0.00009                           | 0.00096   | 0.00001                          | 0.41      | 2622                             | 85.3      | 102.3                             | 4.8       | 28.8 | 0.6 | 19.4 | 0.2 |
| RBT05-TW1-14      | 85745                            | 3961                              | 88                   | 13.1                              | 21.6      | 0.18657                          | 0.01012   | 0.09597                          | 0.00478   | 0.00385 | 0.00008                           | 0.00095   | 0.00001                          | 0.41      | 2712                             | 89.5      | 93.0                              | 4.4       | 24.8 | 0.5 | 19.2 | 0.2 |
| RBT05-TW1-15      | 94933                            | 8755                              | 123                  | 6.88                              | 10.8      | 0.12829                          | 0.00516   | 0.07494                          | 0.00304   | 0.00425 | 0.00006                           | 0.00102   | 0.00001                          | 0.33      | 2076                             | 71.0      | 73.4                              | 2.9       | 27.4 | 0.4 | 20.7 | 0.2 |
| RBT05-TW1-16      | 82593                            | 3034                              | 91                   | 5.27                              | 27.2      | 0.17747                          | 0.00895   | 0.13004                          | 0.00631   | 0.00541 | 0.00010                           | 0.00100   | 0.00001                          | 0.37      | 2629                             | 84.0      | 124.1                             | 5.7       | 34.8 | 0.6 | 20.2 | 0.2 |
| RBT05-TW1-17      | 84317                            | 4589                              | 91                   | 6.03                              | 18.4      | 0.13740                          | 0.00647   | 0.07464                          | 0.00324   | 0.00398 | 0.00007                           | 0.00096   | 0.00001                          | 0.40      | 2195                             | 82.6      | 73.1                              | 3.1       | 25.6 | 0.4 | 19.3 | 0.2 |
| RBT05-TW1-18      | 98107                            | 7383                              | 119                  | 13.7                              | 13.3      | 0.11626                          | 0.00539   | 0.06527                          | 0.00271   | 0.00416 | 0.00006                           | 0.00101   | 0.00001                          | 0.35      | 1900                             | 83.3      | 64.2                              | 2.6       | 26.8 | 0.4 | 20.5 | 0.2 |
| RBT05-TW1-19      | 74544                            | 7550                              | 96                   | 12.9                              | 9.9       | 0.12135                          | 0.00585   | 0.06314                          | 0.00283   | 0.00382 | 0.00006                           | 0.00101   | 0.00001                          | 0.33      | 1976                             | 86.9      | 62.2                              | 2.7       | 24.6 | 0.4 | 20.3 | 0.2 |
| RBT05-TW1-20      | 100011                           | 7913                              | 120                  | 15.9                              | 12.6      | 0.12103                          | 0.00508   | 0.06645                          | 0.00243   | 0.00406 | 0.00006                           | 0.00099   | 0.00001                          | 0.39      | 1972                             | 74.7      | 65.3                              | 2.3       | 26.1 | 0.4 | 19.9 | 0.2 |
| RBT05-TW1-21      | 96670                            | 6527                              | 115                  | 6.11                              | 14.8      | 0.12908                          | 0.00581   | 0.07725                          | 0.00328   | 0.00439 | 0.00007                           | 0.00101   | 0.00001                          | 0.36      | 2087                             | 78.5      | 75.6                              | 3.1       | 28.3 | 0.4 | 20.5 | 0.2 |
| RBT05-TW1-22      | 73825                            | 8146                              | 98                   | 13.1                              | 9.1       | 0.11784                          | 0.00542   | 0.06145                          | 0.00269   | 0.00385 | 0.00006                           | 0.00103   | 0.00001                          | 0.35      | 1924                             | 83.2      | 60.6                              | 2.6       | 24.8 | 0.4 | 20.7 | 0.2 |
| RBT05-TW1-23      | 89792                            | 8741                              | 116                  | 13.2                              | 10.3      | 0.11252                          | 0.00429   | 0.06277                          | 0.00225   | 0.00409 | 0.00005                           | 0.00103   | 0.00001                          | 0.37      | 1840                             | 69.6      | 61.8                              | 2.2       | 26.3 | 0.3 | 20.7 | 0.2 |
| RBT05-TW1-24      | 87465                            | 8573                              | 114                  | 16.3                              | 10.2      | 0.12237                          | 0.00463   | 0.06819                          | 0.00261   | 0.00407 | 0.00006                           | 0.00104   | 0.00001                          | 0.36      | 1991                             | 66.7      | 67.0                              | 2.5       | 26.2 | 0.4 | 21.0 | 0.2 |
| RBT05-TW1-25      | 81085                            | 9237                              | 108                  | 7.04                              | 8.8       | 0.10893                          | 0.00437   | 0.06075                          | 0.00229   | 0.00411 | 0.00006                           | 0.00101   | 0.00001                          | 0.42      | 1783                             | 73.6      | 59.9                              | 2.2       | 26.5 | 0.4 | 20.3 | 0.2 |
| RBT05-TW1-26      | 99755                            | 3022                              | 95                   | 10.9                              | 33.0      | 0.18957                          | 0.01172   | 0.10062                          | 0.00510   | 0.00402 | 0.00009                           | 0.00094   | 0.00001                          | 0.45      | 2739                             | 101.8     | 97.4                              | 4.7       | 25.9 | 0.6 | 19.0 | 0.2 |
| RBT05-TW1-27      | 83834                            | 8367                              | 113                  | 15.5                              | 10.0      | 0.13402                          | 0.00476   | 0.07724                          | 0.00263   | 0.00421 | 0.00005                           | 0.00106   | 0.00001                          | 0.38      | 2152                             | 62.5      | 75.5                              | 2.5       | 27.1 | 0.3 | 21.4 | 0.2 |
| RBT05-TW1-28      | 81307                            | 7383                              | 103                  | 6.29                              | 11.0      | 0.12213                          | 0.00551   | 0.06879                          | 0.00298   | 0.00415 | 0.00007                           | 0.00102   | 0.00001                          | 0.39      | 1987                             | 80.1      | 67.5                              | 2.8       | 26.7 | 0.5 | 20.6 | 0.2 |
| 电气石花岗岩样品PM05-1TW1 |                                  |                                   |                      |                                   |           |                                  |           |                                  |           |         |                                   |           |                                  |           |                                  |           |                                   |           |      |     |      |     |
| PM05-1TW1-1       | 80830                            | 4328                              | 77.1                 | 1.69                              | 18.7      | 0.07962                          | 0.00381   | 0.03592                          | 0.00172   | 0.00319 | 0.00006                           | 0.00093   | 0.00001                          | 0.38      | 1187.0                           | 89.8      | 35.8                              | 1.7       | 20.5 | 0.4 | 18.9 | 0.2 |
| PM05-1TW1-2       | 80992                            | 7302                              | 86.5                 | 2.25                              | 11.1      | 0.06742                          | 0.00331   | 0.02993                          | 0.00138   | 0.00316 | 0.00005                           | 0.00095   | 0.00001                          | 0.36      | 850.0                            | 101.8     | 29.9                              | 1.4       | 20.3 | 0.3 | 19.2 | 0.2 |
| PM05-1TW1-3       | 69324                            | 4634                              | 70.3                 | 1.45                              | 15.0      | 0.06930                          | 0.00383   | 0.03108                          | 0.00155   | 0.00323 | 0.00006                           | 0.00096   | 0.00001                          | 0.40      | 909.3                            | 113.4     | 31.1                              | 1.5       | 20.8 | 0.4 | 19.4 | 0.2 |
| PM05-1TW1-4       | 61526                            | 3819                              | 61.2                 | 5.00                              | 16.1      | 0.07859                          | 0.00412   | 0.03478                          | 0.00169   | 0.00322 | 0.00007                           | 0.00096   | 0.00001                          | 0.42      | 1162.0                           | 104.5     | 34.7                              | 1.7       | 20.7 | 0.4 | 19.3 | 0.2 |
| PM05-1TW1-5       | 59202                            | 13103                             | 93.6                 | 6.21                              | 4.5       | 0.06831                          | 0.00213   | 0.03320                          | 0.00103   | 0.00341 | 0.00005                           | 0.00103   | 0.00001                          | 0.45      | 879.6                            | 64.8      | 33.2                              | 1.0       | 22.0 | 0.3 | 20.8 | 0.2 |
| PM05-1TW1-6       | 64182                            | 4139                              | 63.3                 | 0.85                              | 15.5      | 0.07535                          | 0.00379   | 0.03270                          | 0.00156   | 0.00311 | 0.00007                           | 0.00095   | 0.00001                          | 0.44      | 1077.5                           | 101.4     | 32.7                              | 1.5       | 20.0 | 0.4 | 19.2 | 0.2 |
| PM05-1TW1-7       | 69735                            | 4942                              | 71.2                 | 6.27                              | 14.1      | 0.09719                          | 0.00699   | 0.04527                          | 0.00391   | 0.00319 | 0.00007                           | 0.00098   | 0.00001                          | 0.25      | 1572.2                           | 134.1     | 45.0                              | 3.8       | 20.5 | 0.4 | 19.8 | 0.3 |
| PM05-1TW1-8       | 68154                            | 4333                              | 68.3                 | 5.49                              | 15.7      | 0.07291                          | 0.00408   | 0.03243                          | 0.00168   | 0.00321 | 0.00006                           | 0.00097   | 0.00001                          | 0.38      | 1013.0                           | 113.0     | 32.4                              | 1.7       | 20.7 | 0.4 | 19.5 | 0.2 |
| PM05-1TW1-9       | 82343                            | 3125                              | 75.0                 | 3.80                              | 26.3      | 0.07939                          | 0.00408   | 0.03914                          | 0.00184   | 0.00356 | 0.00008                           | 0.00094   | 0.00001                          | 0.46      | 1183.3                           | 102.3     | 39.0                              | 1.8       | 22.9 | 0.5 | 19.0 | 0.2 |
| PM05-1TW1-10      | 78101                            | 5321                              | 77.3                 | 0.00                              | 14.7      | 0.07282                          | 0.00376   | 0.03127                          | 0.00154   | 0.00306 | 0.00005                           | 0.00094   | 0.00001                          | 0.35      | 1009.3                           | 104.2     | 31.3                              | 1.5       | 19.7 | 0.3 | 19.1 | 0.2 |
| PM05-1TW1-11      | 66171                            | 6168                              | 72.4                 | 2.18                              | 10.7      | 0.06947                          | 0.00288   | 0.03078                          | 0.00127   | 0.00314 | 0.00005                           | 0.00097   | 0.00001                          | 0.42      | 922.2                            | 81.3      | 30.8                              | 1.3       | 20.2 | 0.4 | 19.7 | 0.2 |

续表 1

| 分析点号               | $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ |           |           |           | $\text{Pb}^{(D)}/\text{Pb}^{(C)}$ |                                   |           |                                  | 同位素比值                            |           |                                   |           | 表面年龄/Ma                           |           |                                  |                                  |           |                                   |           |     |      |     |
|--------------------|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------|----------------------------------|----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|----------------------------------|----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|-----|------|-----|
|                    | $10^{-6}$                        | $10^{-6}$ | $10^{-6}$ | $10^{-6}$ | $\text{Th/U}$                     | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | $1\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | $1\sigma$ | $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ | $1\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | $1\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | $1\sigma$ | $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ | $1\sigma$ |     |      |     |
| PM05-1TW1-12       | 69863                            | 9270      | 81.6      | 0.91      | 7.5                               | 0.06779                           | 0.00226   | 0.02788                          | 0.00095                          | 0.00289   | 0.00004                           | 0.00096   | 0.00001                           | 0.42      | 861.1                            | 70.4                             | 27.9      | 0.9                               | 18.6      | 0.3 | 19.4 | 0.2 |
| PM05-1TW1-13       | 80749                            | 2837      | 72.5      | 4.35      | 28.5                              | 0.07190                           | 0.00433   | 0.03602                          | 0.00198                          | 0.00357   | 0.00007                           | 0.00093   | 0.00001                           | 0.34      | 983.3                            | 123.3                            | 35.9      | 1.9                               | 23.0      | 0.4 | 18.7 | 0.2 |
| PM05-1TW1-14       | 75749                            | 5020      | 75.1      | 2.60      | 15.1                              | 0.07588                           | 0.00375   | 0.03225                          | 0.00153                          | 0.00303   | 0.00005                           | 0.00095   | 0.00001                           | 0.36      | 1092.3                           | 98.6                             | 32.2      | 1.5                               | 19.5      | 0.3 | 19.2 | 0.2 |
| PM05-1TW1-15       | 81190                            | 7127      | 84.9      | 5.75      | 11.4                              | 0.06987                           | 0.00331   | 0.02904                          | 0.00127                          | 0.00295   | 0.00005                           | 0.00095   | 0.00001                           | 0.37      | 924.1                            | 93.5                             | 29.1      | 1.3                               | 19.0      | 0.3 | 19.1 | 0.2 |
| PM05-1TW1-16       | 95833                            | 5835      | 92.8      | 0.22      | 16.4                              | 0.07525                           | 0.00331   | 0.03260                          | 0.00131                          | 0.00305   | 0.00005                           | 0.00093   | 0.00001                           | 0.42      | 1075.9                           | 88.4                             | 32.6      | 1.3                               | 19.9      | 0.3 | 18.8 | 0.2 |
| PM05-1TW1-17       | 71704                            | 3575      | 68.0      | 1.74      | 20.1                              | 0.06449                           | 0.00393   | 0.03097                          | 0.00177                          | 0.00341   | 0.00006                           | 0.00093   | 0.00001                           | 0.33      | 766.7                            | 125.0                            | 31.0      | 1.7                               | 22.0      | 0.4 | 18.9 | 0.2 |
| PM05-1TW1-18       | 90779                            | 5673      | 88.1      | 4.05      | 16.0                              | 0.07218                           | 0.00340   | 0.03127                          | 0.00143                          | 0.00306   | 0.00005                           | 0.00093   | 0.00001                           | 0.35      | 990.7                            | 95.5                             | 31.3      | 1.4                               | 19.7      | 0.3 | 18.8 | 0.2 |
| PM05-1TW1-19       | 64590                            | 7418      | 74.4      | 0.00      | 8.7                               | 0.06735                           | 0.00262   | 0.02924                          | 0.00111                          | 0.00306   | 0.00005                           | 0.00096   | 0.00001                           | 0.42      | 850.0                            | 81.5                             | 29.3      | 1.1                               | 19.7      | 0.3 | 19.4 | 0.2 |
| PM05-1TW1-20       | 42847                            | 4340      | 48.9      | 0.00      | 9.9                               | 0.06277                           | 0.00382   | 0.02693                          | 0.00157                          | 0.00306   | 0.00006                           | 0.00100   | 0.00001                           | 0.33      | 701.9                            | 134.2                            | 27.0      | 1.6                               | 19.7      | 0.4 | 20.3 | 0.3 |
| PM05-1TW1-21       | 75273                            | 5076      | 76.0      | 0.00      | 14.8                              | 0.07568                           | 0.00367   | 0.03326                          | 0.00151                          | 0.00313   | 0.00006                           | 0.00095   | 0.00001                           | 0.43      | 1087.0                           | 97.1                             | 33.2      | 1.5                               | 20.1      | 0.4 | 19.2 | 0.2 |
| PM05-1TW1-22       | 81927                            | 4360      | 77.7      | 2.77      | 18.8                              | 0.08399                           | 0.00404   | 0.03538                          | 0.00164                          | 0.00303   | 0.00006                           | 0.00094   | 0.00001                           | 0.41      | 1292.3                           | 94.0                             | 35.3      | 1.6                               | 19.5      | 0.4 | 18.9 | 0.2 |
| PM05-1TW1-23       | 69171                            | 4567      | 71.5      | 3.31      | 15.1                              | 0.06990                           | 0.00389   | 0.02990                          | 0.00140                          | 0.00313   | 0.00006                           | 0.00098   | 0.00001                           | 0.43      | 925.6                            | 114.8                            | 29.9      | 1.4                               | 20.1      | 0.4 | 19.9 | 0.2 |
| PM05-1TW1-24       | 74455                            | 5206      | 76.3      | 1.54      | 14.3                              | 0.07618                           | 0.00338   | 0.03266                          | 0.00147                          | 0.00303   | 0.00005                           | 0.00097   | 0.00001                           | 0.39      | 1099.7                           | 88.9                             | 32.6      | 1.4                               | 19.5      | 0.3 | 19.6 | 0.2 |
| 伟晶岩样品21CPM01-01TW1 |                                  |           |           |           |                                   |                                   |           |                                  |                                  |           |                                   |           |                                   |           |                                  |                                  |           |                                   |           |     |      |     |
| 21CPM01-01TW1-01   | 83531                            | 6368      | 99        | 5.5       | 13.1                              | 0.08083                           | 0.00491   | 0.04167                          | 0.00227                          | 0.00382   | 0.00006                           | 0.00107   | 0.00001                           | 0.275     | 1218                             | 119.0                            | 41.4      | 2.2                               | 24.6      | 0.4 | 21.6 | 0.2 |
| 21CPM01-01TW1-02   | 86382                            | 14273     | 133       | 4.0       | 6.1                               | 0.05982                           | 0.00336   | 0.03010                          | 0.00161                          | 0.00368   | 0.00005                           | 0.00114   | 0.00001                           | 0.241     | 598                              | 118.3                            | 30.1      | 1.6                               | 23.7      | 0.3 | 23.0 | 0.2 |
| 21CPM01-01TW1-03   | 83835                            | 15830     | 132       | 5.8       | 5.3                               | 0.05459                           | 0.00256   | 0.02714                          | 0.00122                          | 0.00362   | 0.00004                           | 0.00110   | 0.00001                           | 0.264     | 394                              | 105.5                            | 27.2      | 1.2                               | 23.3      | 0.3 | 22.2 | 0.2 |
| 21CPM01-01TW1-04   | 83091                            | 5318      | 106       | 15.7      | 15.6                              | 0.14294                           | 0.01542   | 0.11787                          | 0.02072                          | 0.00478   | 0.00017                           | 0.00112   | 0.00002                           | 0.207     | 2265                             | 186.6                            | 113       | 18.8                              | 30.7      | 1.1 | 22.6 | 0.4 |
| 21CPM01-01TW1-05   | 71296                            | 10817     | 106       | 2.5       | 6.6                               | 0.06476                           | 0.00339   | 0.03359                          | 0.00175                          | 0.00377   | 0.00005                           | 0.00110   | 0.00001                           | 0.245     | 766                              | 109.2                            | 33.5      | 1.7                               | 24.3      | 0.3 | 22.3 | 0.2 |
| 21CPM01-01TW1-06   | 88722                            | 10577     | 122       | 4.5       | 8.4                               | 0.05663                           | 0.00313   | 0.02863                          | 0.00151                          | 0.00371   | 0.00005                           | 0.00112   | 0.00001                           | 0.236     | 476                              | 122.2                            | 28.7      | 1.5                               | 23.9      | 0.3 | 22.6 | 0.2 |
| 21CPM01-01TW1-07   | 71114                            | 18323     | 131       | 9.2       | 3.9                               | 0.04857                           | 0.00224   | 0.02397                          | 0.00111                          | 0.00358   | 0.00004                           | 0.00113   | 0.00001                           | 0.245     | 128                              | 109.2                            | 24.0      | 1.1                               | 23.0      | 0.3 | 22.9 | 0.3 |
| 21CPM01-01TW1-08   | 94015                            | 7073      | 115       | 0.0       | 13.3                              | 0.05710                           | 0.00393   | 0.03211                          | 0.00199                          | 0.00415   | 0.00007                           | 0.00108   | 0.00001                           | 0.256     | 494                              | 147.2                            | 32.1      | 2.0                               | 26.7      | 0.4 | 21.8 | 0.2 |
| 21CPM01-01TW1-09   | 87103                            | 8741      | 113       | 0.0       | 10.0                              | 0.06224                           | 0.00408   | 0.03072                          | 0.00190                          | 0.00363   | 0.00006                           | 0.00111   | 0.00001                           | 0.277     | 683                              | 108.3                            | 30.7      | 1.9                               | 23.4      | 0.4 | 22.4 | 0.2 |
| 21CPM01-01TW1-10   | 75150                            | 5225      | 90        | 3.1       | 14.4                              | 0.07139                           | 0.00472   | 0.03936                          | 0.00235                          | 0.00409   | 0.00008                           | 0.00108   | 0.00001                           | 0.323     | 969                              | 135.2                            | 39.2      | 2.3                               | 26.3      | 0.5 | 21.9 | 0.2 |
| 21CPM01-01TW1-11   | 86146                            | 5197      | 88        | 0.2       | 16.6                              | 0.07288                           | 0.00535   | 0.03408                          | 0.00229                          | 0.00347   | 0.00007                           | 0.00097   | 0.00001                           | 0.284     | 1011                             | 150.0                            | 34.0      | 2.3                               | 22.3      | 0.4 | 19.5 | 0.2 |
| 21CPM01-01TW1-12   | 80009                            | 16695     | 134       | 7.9       | 4.8                               | 0.05764                           | 0.00263   | 0.02832                          | 0.00130                          | 0.00357   | 0.00004                           | 0.00113   | 0.00001                           | 0.266     | 517                              | 100.0                            | 28.4      | 1.3                               | 23.0      | 0.3 | 22.9 | 0.2 |
| 21CPM01-01TW1-13   | 62738                            | 4218      | 76        | 1.9       | 14.9                              | 0.07291                           | 0.00665   | 0.03583                          | 0.00244                          | 0.00390   | 0.00008                           | 0.00113   | 0.00001                           | 0.305     | 1013                             | 186.3                            | 35.7      | 2.4                               | 25.1      | 0.5 | 22.9 | 0.2 |
| 21CPM01-01TW1-14   | 82576                            | 5533      | 89        | 6.9       | 14.9                              | 0.08624                           | 0.00649   | 0.03947                          | 0.00257                          | 0.00342   | 0.00007                           | 0.00101   | 0.00001                           | 0.309     | 1344                             | 146.3                            | 39.3      | 2.5                               | 22.0      | 0.4 | 20.3 | 0.2 |
| 21CPM01-01TW1-15   | 81445                            | 10023     | 110       | 1.2       | 8.1                               | 0.05964                           | 0.00362   | 0.02987                          | 0.00161                          | 0.00368   | 0.00005                           | 0.00110   | 0.00001                           | 0.274     | 591                              | 131.5                            | 29.9      | 1.6                               | 23.7      | 0.3 | 22.2 | 0.2 |
| 21CPM01-01TW1-16   | 76064                            | 5943      | 92        | 6.0       | 12.8                              | 0.07029                           | 0.00564   | 0.03701                          | 0.00249                          | 0.00399   | 0.00007                           | 0.00108   | 0.00001                           | 0.265     | 937                              | 165.9                            | 36.9      | 2.4                               | 25.6      | 0.5 | 21.8 | 0.2 |
| 21CPM01-01TW1-17   | 82370                            | 4495      | 90        | 7.1       | 18.3                              | 0.08351                           | 0.00635   | 0.04252                          | 0.00290                          | 0.00384   | 0.00008                           | 0.00105   | 0.00001                           | 0.292     | 1281                             | 154.2                            | 42.3      | 2.8                               | 24.7      | 0.5 | 21.2 | 0.2 |
| 21CPM01-01TW1-18   | 97037                            | 5688      | 116       | 1.1       | 17.1                              | 0.06343                           | 0.00433   | 0.03946                          | 0.00249                          | 0.00452   | 0.00007                           | 0.00112   | 0.00001                           | 0.256     | 724                              | 144.4                            | 39.3      | 2.4                               | 29.1      | 0.5 | 22.7 | 0.2 |
| 21CPM01-01TW1-19   | 83808                            | 9784      | 115       | 5.2       | 8.6                               | 0.06823                           | 0.00411   | 0.03487                          | 0.00194                          | 0.00376   | 0.00006                           | 0.00113   | 0.00001                           | 0.290     | 876                              | 124.8                            | 34.8      | 1.9                               | 24.2      | 0.4 | 22.9 | 0.2 |
| 21CPM01-01TW1-20   | 73079                            | 10908     | 105       | 4.9       | 6.7                               | 0.06479                           | 0.00387   | 0.03292                          | 0.00188                          | 0.00372   | 0.00006                           | 0.00109   | 0.00001                           | 0.259     | 769                              | 126.7                            | 32.9      | 1.8                               | 23.9      | 0.4 | 22.0 | 0.2 |
| 21CPM01-01TW1-21   | 82836                            | 7187      | 106       | 3.3       | 11.5                              | 0.06285                           | 0.00447   | 0.03276                          | 0.00222                          | 0.00385   | 0.00006                           | 0.00115   | 0.00001                           | 0.249     | 702                              | 152.6                            | 32.7      | 2.2                               | 24.8      | 0.4 | 23.2 | 0.2 |
| 21CPM01-01TW1-22   | 74930                            | 11085     | 111       | 3.0       | 6.8                               | 0.06662                           | 0.00339   | 0.03401                          | 0.00165                          | 0.00374   | 0.00006                           | 0.00115   | 0.00001                           | 0.319     | 828                              | 105.6                            | 34.0      | 1.6                               | 24.1      | 0.4 | 23.3 | 0.3 |
| 21CPM01-01TW1-23   | 87083                            | 4678      | 89        | 4.5       | 18.6                              | 0.06142                           | 0.00597   | 0.02998                          | 0.00225                          | 0.00375   | 0.00007                           | 0.00100   | 0.00001                           | 0.254     | 654                              | 209.2                            | 30.0      | 2.2                               | 24.1      | 0.5 | 20.1 | 0.2 |
| 21CPM01-01TW1-24   | 88271                            | 5027      | 92        | 1.3       | 17.6                              | 0.07190                           | 0.00530   | 0.03657                          | 0.00244                          | 0.00366   | 0.00007                           | 0.00101   | 0.00001                           | 0.282     | 983                              | 151.1                            | 36.5      | 2.4                               | 23.6      | 0.4 | 20.3 | 0.2 |
| 21CPM01-01TW1-25   | 89935                            | 4767      | 92        | 9.0       | 18.9                              | 0.06847                           | 0.00483   | 0.03447                          | 0.00218                          | 0.00370   | 0.00008                           | 0.00100   | 0.00001                           | 0.332     | 883                              | 150.9                            | 34.4      | 2.1                               | 23.8      | 0.5 | 20.2 | 0.2 |

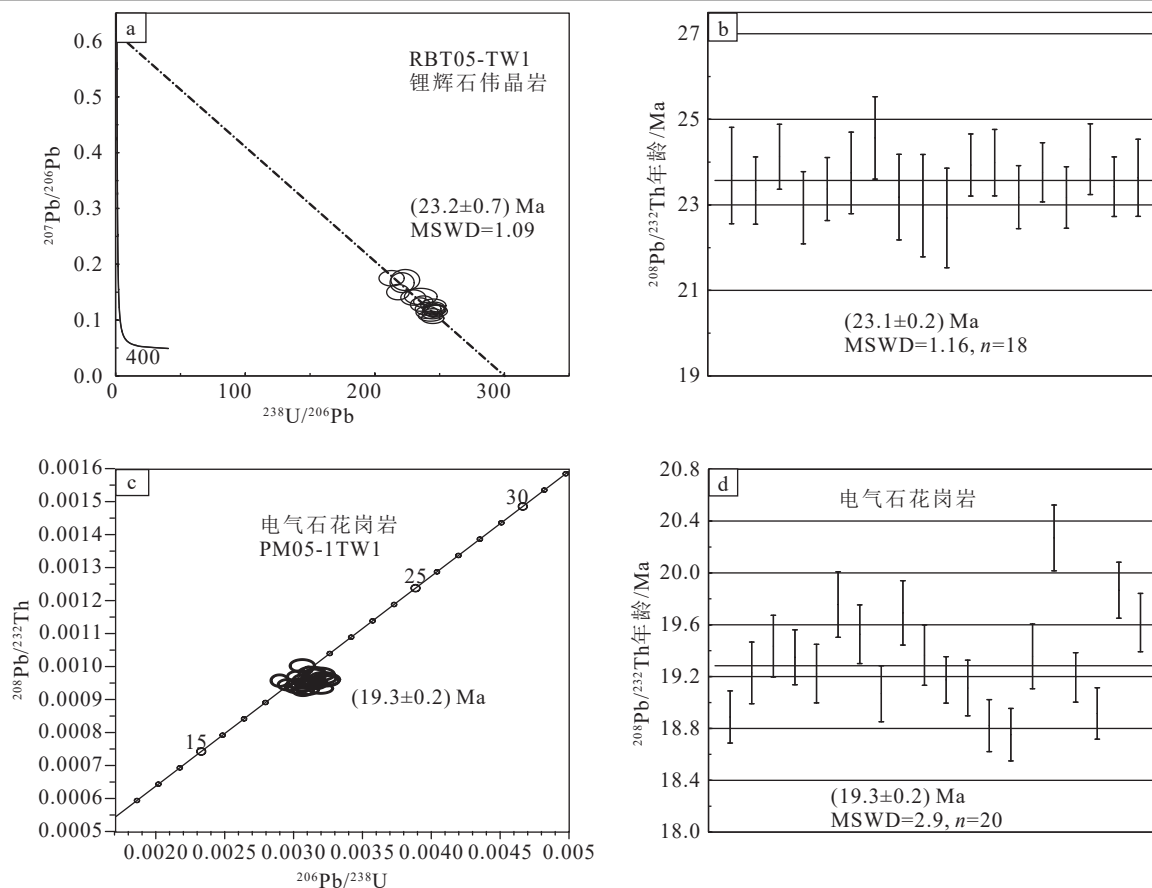


图6 西藏洛扎嘎波锂矿锂辉石伟晶岩和电气石花岗岩独居石 U-Pb 年龄谐和图(a、c)和加权平均年龄图(b、d)

Fig.6 Concordia plot of monazite U-Pb ages from spodumene pegmatite (a), weighted average age plot of monazite U-Pb ages from spodumene pegmatite (b), concordia plot of monazite U-Pb ages from tourmaline-bearing granite (c) and weighted average age plot of monazite U-Pb ages from tourmaline-bearing granite (d) in the Gabon lithium deposit

加权平均年龄为  $(23.1 \pm 0.2) \text{ Ma}$  (图 6b), 该年龄解释为锂辉石伟晶岩的结晶年龄, 同时代表了嘎波锂矿的成矿年龄。

矿区北部电气石花岗岩样品 PM05-1TW1 共分析独居石 24 个点, 测试结果见表 1, 其中 20 个测点年龄结果落在 U-Pb-Th 拟合线上 (图 6c), 并获得  $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$  加权平均年龄为  $(19.3 \pm 0.2) \text{ Ma}$  (图 6d), 该年龄解释为电气石花岗岩的结晶年龄, 该年龄明显晚于嘎波锂辉石伟晶岩的年龄。

## 4.2 次麦锡铁铅锌多金属矿

### 4.2.1 矿床地质特征

次麦锡铁铅锌多金属矿位于库拉岗日穹窿的东部, 北侧紧邻嘎波伟晶岩型锂矿 (图 2)。矿区出露地层主要有下石炭统雇孜组 ( $C_3g^1$ ) 和上二叠统白定浦组 ( $P_3b$ ), 二者均属于穹窿的滑脱系, 整体遭受了强烈的韧性剪切作用。雇孜组地层主要出露于

库拉岗日穹窿核部花岗岩或者花岗质片麻岩之上, 主要岩性包括含蓝晶石石榴石云母片、含十字石石榴石云母片岩。矿区白定浦组主要是浅灰色结晶大理岩夹砂卡岩, 整体呈层状、似层状和透镜状产出, 是次麦锡铁铅锌多金属矿的主要赋矿围岩 (付建刚等, 2024)。

次麦矿区紧邻嘎波锂矿, 其构造变形特征与嘎波矿区相类似, 也经历四期构造变形, 其中与成矿密切相关的构造为第二期, 即由南向北伸展剪切变形, 对应于区域上 STDS 的活动; 同时第四期张性断层对早期砂卡岩型矿体有一定的叠加和改造, 在次麦矿区, 发育多条近东-东南走向的断层, 该断层为叠加于 Pb-Zn 矿体, 与矿区铅锌矿体关系密切。

矿区岩浆岩包括花岗质片麻岩和淡色花岗岩, 主要分布在穹窿核部, 少量淡色花岗岩出露在穹窿的滑脱系中。花岗质片麻岩在矿区出露较少, 眼球

状构造发育。淡色花岗岩主要有二云母花岗岩、白云母花岗岩、钠长石花岗岩和伟晶岩。二云母花岗岩在穹窿中出露较少, 主要分布在核部的中心一带。白云母花岗岩在穹窿核部广泛出露, 部分呈独立的脉体产出。主要组成矿物有钠长石、钾长石、石英、白云母、石榴石和少量电气石, 副矿物有锆石、独居石、磷钇矿和铌钽矿物等。伟晶岩在矿区广泛出露, 部分呈独立的岩脉, 或侵入或穿插于二云母花岗岩和白云母花岗岩中, 部分分布于穹窿滑脱系中, 与矽卡岩关系密切。伟晶岩主要组成矿物有石英、斜长石、钾长石和白云母, 少量绿柱石、石榴石和电气石。钠长石花岗岩分布在穹窿核部的边部, 一部分侵入于滑脱系的大理岩和矽卡岩中, 主要组成矿物有钠长石、石英、白云母和石榴石。

次麦锡铁铅锌多金属矿属于矽卡岩型, 矿体主要赋存在穹窿滑脱系的矽卡岩和矽卡岩化大理岩

中。矿区发育两种矿化类型: (1) 矽卡岩型 Sn-Fe 矿体, 以锡石和磁铁矿发育为典型特征; (2) 矽卡岩型 Pb-Zn 矿体, 以 Pb-Zn 为主、伴生 Ag, 金属矿物组合有方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、磁铁矿和白钨矿等。Sn-Fe 矿体的矿石结构为自形—半自形结构和交代结构; 矿石构造主要有块状构造、条带状构造、网脉状构造等。Pb-Zn 矿体的矿石结构包括自形—半自形结构、交代结构; 矿石构造主要有条带状构造、块状结构、脉状构造、网脉状构造和浸染状构造等; 围岩蚀变主要有硅化、矽卡岩化、绢云母化和碳酸盐化等。目前在矿区圈定出锡铁矿体 2 条、铅锌银矿体 5 条 (图 7)。Sn-Fe I 矿体出露于矿区的南部, 矽卡岩呈层状、似层状, 部分呈透镜状, 厚度 5~30 m, 走向延伸方向出露长度约 300 m。主要矿石矿物为锡石和磁铁矿 (图 8a~d), 少量黄铁矿 (图 8b、c)、方铅矿、闪锌矿 (图 8e、f)、黄铜矿

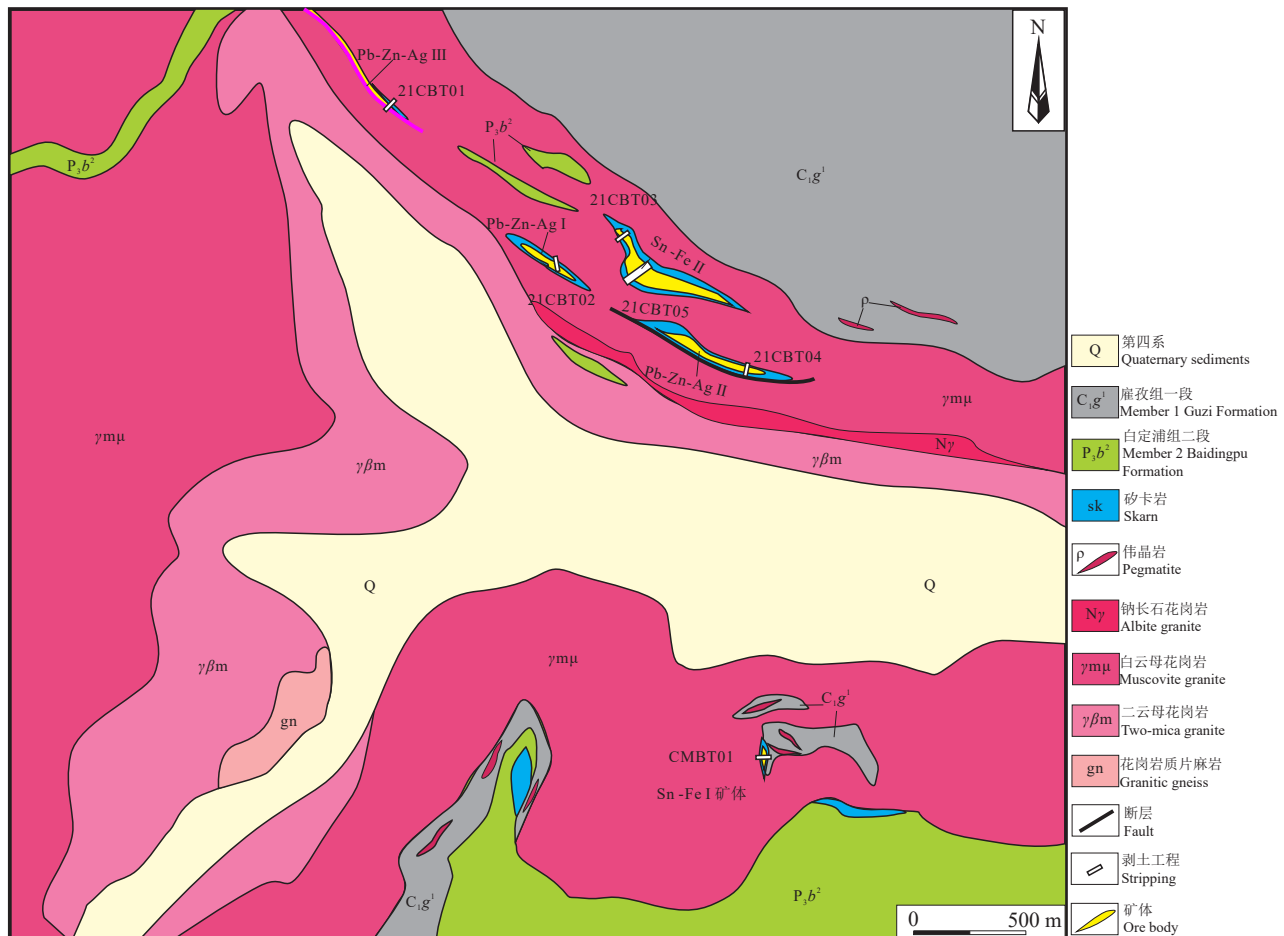


图 7 西藏洛扎地区次麦锡铁铅锌多金属矿地质图 (据付建刚等, 2022)

Fig.7 Geological map of the Cimai skarn-type Sn-Fe-Pb-Zn polymetallic deposit in Luozha area, Xizang (after Fu Jiangang et al., 2022)

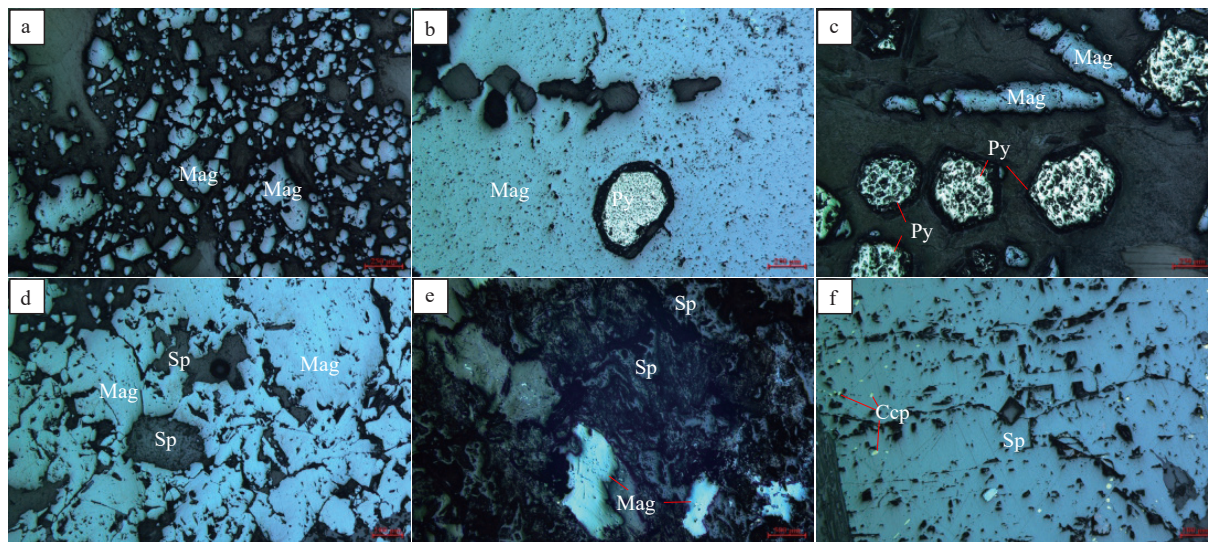


图 8 西藏洛扎次麦锡铁铅锌多金属矿矿石显微照片(正交偏光)

a—磁铁矿; b—磁铁矿和黄铁矿; c—溶蚀的黄铁矿; d—磁铁矿和闪锌矿; e—闪锌矿; f—黄铜矿呈点滴状出现在闪锌矿中; Mag—磁铁矿; Py—黄铁矿; Sp—闪锌矿; Ccp—黄铜矿

Fig.8 Microphotograph (under orthogonal polarizing microscope) of Sn-Fe and Pb-Zn polymetallic ore in Cimai, Xizang  
a—Magnetite; b—Magnetite and pyrite; c—Dissolved pyrite; d—Magnetite and sphalerite; e—Sphalerite; f—Chalcopyrite occurs in sphalerite in spots;  
Mag—Magnetite; Py—Pyrite; Sp—Sphalerite; Ccp—Chalcopyrite

(图 8f)、白钨矿等;脉石矿物有石英、方解石和矽卡岩矿物等。目前稀疏地表工程控制锡铁矿体真厚度 2.10 m, Sn 平均品位为 0.57%, 总 Fe 平均品位为 61%, 初步追索矿化带地表延伸长度约 100 m。Pb-Zn II 号矿化带出露在矿区的北部, 主要金属矿物有方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、磁铁矿和白钨矿等, 非金属矿物有石英、方解石、云母、绿帘石、绿泥石、透闪石、阳起石、符山石等。目前地表工程控制铅锌矿体的厚度为 20.32 m, 地表出露长度约 510 m, Pb 平均品位为 1.16%、Zn 平均品位为 3.76%、Pb+Zn 平均品位为 4.91%, Ag 平均品位为 40.96 g/t, TFe 平均品位为 14.49%。

#### 4.2.2 成矿时代

在次麦矿区, 矽卡岩和矽卡岩化大理岩主要围绕白云母花岗岩和伟晶岩密切产出(图 9a), 矽卡岩发生强烈的剪切变形, 矽卡岩与伟晶岩或者白云母花岗岩边界比较模糊, 部分界限清楚(图 9b), 在伟晶岩和白云母边部的矽卡岩中, 矽卡岩矿物呈定向排列。矿区矽卡岩的形成与伟晶岩或白云母花岗岩十分密切, 通过对其伟晶岩进行精确的定年, 不仅可以限定伟晶岩的形成时代, 同时可以更好地限定次麦矽卡岩型锡铁铅锌多金属矿的成矿时代。

本文通过对次麦矿区与矽卡岩密切相关的伟晶岩进行独居石 U-Th-Pb 定年, 伟晶岩样品 21CPM01-01TW1 采自矿区北部(图 9c、d), 主要矿物有石英、钾长石、斜长石、白云母, 少量的石榴子石和电气石, 副矿物有锆石、独居石等, 该伟晶岩以发育典型的文象结构为特征, 代表了岩浆演化过程的流体出溶特征(图 9d)。样品的前处理和分析测试与嘎波锂辉石伟晶岩样品相同。样品 21CPM01-01TW1 共分析独居石 25 个点, 测试结果见表 1, 其中 16 个测试点年龄结果落在 U-Pb-Th 拟合线上(图 10a), 获得谐和年龄为  $(23.0 \pm 0.3)$  Ma,  $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$  加权平均年龄为  $(23.0 \pm 0.2)$  Ma(图 10b), 二者基本一致, 其该年龄解释为伟晶岩的结晶年龄, 同时该伟晶岩与矽卡岩关系十分紧密, 可代表次麦矿区矽卡岩的形成年龄, 即代表次麦矽卡岩型锡铁铅锌多金属矿的成矿年龄。

### 4.3 木村金矿

#### 4.3.1 矿床地质特征

木村金矿位于库拉岗日穹窿的东南侧(图 2), 地处洛扎县城南东约 25 km, 行政区划属洛扎县生格乡木村。国道 G219 从矿区南部通过, 区内有数条机耕道, 交通便利。木村金矿是中国地质调查局

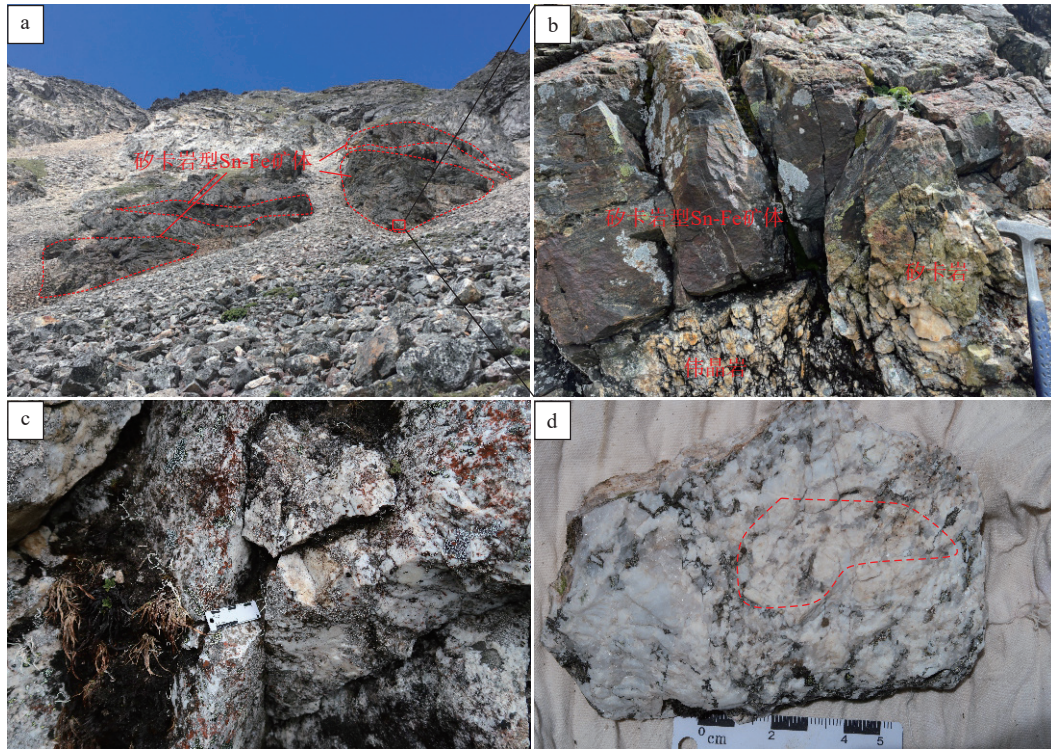


图 9 西藏洛扎次麦矿区野外照片

a—次麦矿区 Sn-Fe 矿体野外宏观照片; b—矽卡岩与伟晶岩野外关系; c—伟晶岩露头照片; d—伟晶岩样品照片

Fig.9 Field photos in the Cimai mining area, Xizang

a-Field macroscopic photo of Sn-Fe ore bodies in Cimai Mining area; b-Relationship between skarn and pegmatite; c-Outcrop photograph of pegmatite; d-Photo of pegmatite hand specimen

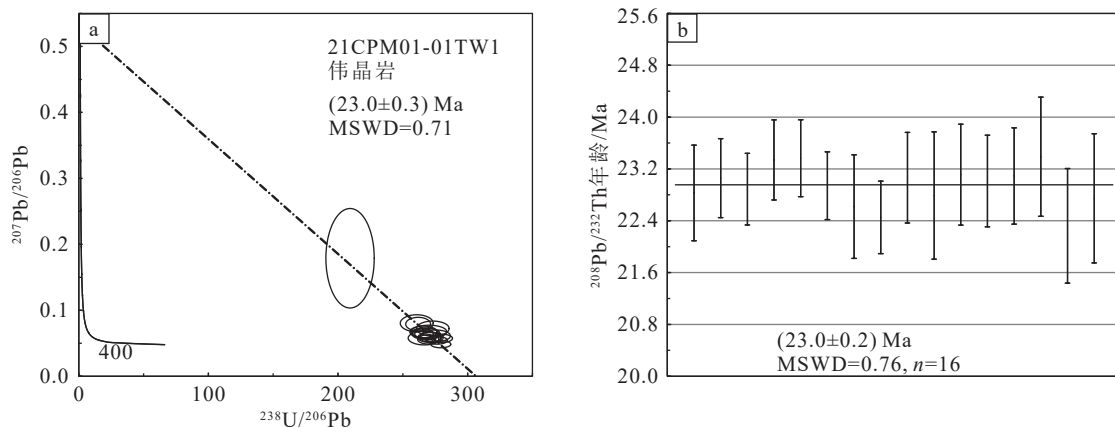


图 10 西藏洛扎次麦矿区伟晶岩独居石 U-Pb 年龄谐和图(a)和加权平均年龄图(b)

Fig.10 Concordia plot of monazite U-Pb ages (a) and weighted average age plot of monazite U-Pb ages (b) from pegmatite in the Cimai deposit

成都地质调查中心在西藏洛扎地区 1 : 5 万矿产地质调查的实施过程中新发现的矿点。

矿区出露地层主要有破林浦组( $P_{lp}$ )、康马组( $P_{2k}$ )和白定浦组( $P_3b$ )三个组。破林浦组( $P_{lp}$ )为粉砂质板岩(图 11), 康马组( $P_{2k}$ )为泥质粉砂质板岩,

白定浦组下段( $P_3b^1$ )为泥质板岩夹钙质板岩、上段( $P_3b^2$ )为泥质灰岩。

木村金矿构造位置处于库拉岗日穹窿的东南侧, 属于穹窿的盖层部分, 整体受喜马拉雅造山带早期逆冲挤压和晚期伸展构造的影响。矿区发育



图 11 西藏洛扎木村金矿地质图

Fig.11 Geological map of the Mucun Au deposit in the Luozha area, Xizang

三组方向断层: 近北东向断层( $F_1$ )、近东西向断层( $F_2$ )和近南北向断层( $F_3$ ); Au 矿体主要受断层  $F_1$  和  $F_2$  控制(图 11)。

$F_1$  断层为北东走向、南东倾的张性正断层

(图 12a)。该断裂局部露头可达 200 m, 破碎带由断层角砾、热液石英脉(图 12b、c)、断层泥、劈理化带组成。与 Au 矿化有关蚀变矿物有绢云母、绿泥石、黄铁矿、毒砂、方铅矿、铁方解石等, 呈中温热

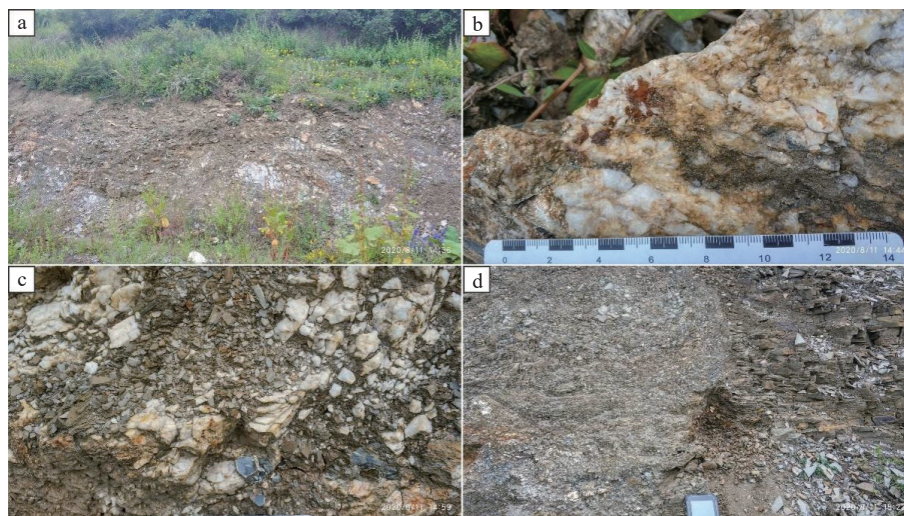


图 12 西藏洛扎木村金矿构造蚀变岩型 Au 矿化野外特征

a— $F_1$  断层破碎带; b— $F_1$  断层破碎带中的块状石英脉; c— $F_1$  断层破碎带中石英脉露头特征; d— $F_1$  断层破碎带

Fig.12 Field photos of tectonic-altered rock type Au mineralization in the Mucun gold deposit, Xizang

a— $F_1$  fault; b—Quartz vein from  $F_1$  fault; c—Field photo of quartz vein in  $F_1$  fault; d— $F_1$  fault

液型成因金矿的蚀变特征。

$F_2$  断层为东西走向。该破碎带发育两期形迹走向近似但性质存在显著差异的构造: 早期为北倾的逆冲推覆, 晚期为滑脱。早期构造活动相关的石英脉在晚期构造作用下进一步发生变形和碎裂, 并被晚期构造活动相关的含绢云母硫化物铁方解石的石英脉所胶结, 成为晚期构造的断层角砾岩。该破碎带发育两期构造: 早期为北倾的逆冲推覆, 晚期为滑脱。

$F_3$  断层走向为近南北向, 在矿区发育时间最晚, 明显穿切  $F_1$  和  $F_2$  断层, 该断层规模不大, 沿走向延伸约 300 m, 宽 1~5 m。

矿区出露少量的辉绿岩脉, 以岩脉形式侵入白定浦组和康马组地层, 规模不大, 部分呈透镜状产出, 透镜体长度 100~200 m, 宽 5~20 m。

#### 4.3.2 矿床的发现过程及矿体地质特征

中国地质调查局成都地质调查中心于 2019 年开展的 1:5 万水系沉积物测量成果显示, 区内有大于  $30 \times 10^{-9}$  的 Au 含量的采样点 7 处, 其中最高值为  $422 \times 10^{-9}$ , 可圈定出具备三级浓度分带的异常区 2 处, 面积约 1.8 km<sup>2</sup>。2020 年根据水系异常实施的 1:1 万土壤剖面测量显示, 在水系最高值点附近有 6 个连续的土壤高值点, Au 的最高值达  $5914 \times 10^{-9}$ 。2021 年以土壤高值点为中心实施了 1:1 万土壤测量, 除 2020 年的高值点附近外, 在水系异常三级浓度分带中又新发现 4 处连续的高值点, Au 的最高值达  $143 \times 10^{-9}$ ~ $935 \times 10^{-9}$ 。依据土壤异常展布情况以及 2021 年初步的 1:1 万地质草测成果, 暂圈出 2 条 Au 矿化带, 并划分了三期构造, 初步判断成矿与第二期构造活动有关, 第三期南北向构造虽然切割错动含矿断裂, 但改造不大。

Au-I 矿化带在 2020 年土壤剖面 Au 异常中心区有较好的出露。该矿化带受控于北东走向、南东倾具有滑脱性质的断裂( $F_1$  断层)。该断裂发育非常宽大(露头宽度可达 200 m)的破碎带, 破碎带由断层角砾、断层泥、热液石英脉、劈理化带组成, 带内碎裂的断层角砾岩、热液石英脉及其旁侧发育强烈的蚀变。

Au-II 矿化带在 2021 年土壤测量新发现 Au 高值点附近发育近东西向  $F_2$  断裂破碎带中有较好的出露。该破碎带发育两期形迹走向近似但性质存

在显著差异的构造: 早期为北倾的逆冲退覆, 晚期为滑脱。早期构造活动相关的石英脉在晚期构造作用下进一步发生变形和碎裂, 并被晚期构造活动相关的含绢云母硫化物铁方解石的石英脉所胶结, 成为晚期构造的断层角砾岩。两条金矿化带中与 Au 矿化有关蚀变矿物包括绢云母、绿泥石、黄铁矿(多已褐铁矿化)、毒砂、方铅矿、铁方解石等, 显示出中—低温热液型成因金矿的蚀变特征。

土壤剖面测量显示, 在水系最高值点附近( $F_1$ ) 有 6 个连续的土壤高值点, Au 的最高值达  $5914 \times 10^{-9}$ 。面积性土壤测量显示,  $F_2$  附近发现 4 处连续的高值点, Au 的最高值达  $935 \times 10^{-9}$ 。同时 6 个连续捡块样(石英脉)Au 均达到工业品位( $>1.0$  g/t), 最高品位为 0.61 g/t。剥土工程 21MBT05 中样品 21MBT05-H2 分析结果显示 Au 品位为 0.84 g/t, 基本接近其边界品位(1.0 g/t)。

木村金矿位于库拉岗日穹窿的东南侧, 可能处于穹窿活动相关的上拆离断层附近。在穹窿形成期间, 强烈的拆离作用以及同期花岗质岩浆的活动不仅能够为热液运移提供通道、为矿体就位提供空间, 还能为矿体形成提供大量的热以及热液。该区早期发育叠瓦状的逆冲—推覆构造, 这些构造在库拉岗日穹窿形成时伴随滑脱构造的发育会发生活化成为导矿构造和赋矿空间, 并伴随岩浆热液及其热驱动下的热液活动, 在部分位置形成矿体。两条 Au 矿化带相似的成矿蚀变特征显示它们中 Au 应是同期热液活动的结果, 预示着木村金矿区巨大的构造蚀变岩型金矿的找矿前景。

## 5 讨论

### 5.1 库拉岗日穹窿锂铍锡等稀有金属的成矿规律初探

库拉岗日穹窿位于特提斯喜马拉雅带的东段, 作为北喜马拉雅穹窿带中出露面积最大的穹窿构造, 穹窿整体呈东西向展布, 出露长度约 80 km, 穹窿的西段整体与高喜马拉雅结合在一起, STDS 在穹窿西段没有明确出露; 而穹窿的东段则保留了完整的三层结构, 包括核部、滑脱系和盖层。通过西藏洛扎地区 1:5 万矿产地质调查的实施(主要工作区域是在库拉岗日穹窿的东段)和综合研究, 在库拉岗日穹窿发现并厘定了三种矿化类型: 嘎波伟晶



基本没有变形, 本次获得电气石花岗岩的独居石 U-Th-Pb 年龄为 19.3 Ma, 该年龄明显晚于嘎波锂矿的成矿年龄, 单从年代学证据和野外侵入关系来看(图 13), 该电气石花岗岩并非是嘎波锂辉石伟晶岩的成矿母源, 至少是该岩体对嘎波锂矿主成矿期(23 Ma)的贡献很小, 至于该岩体是否对嘎波锂矿成矿作用存在晚期叠加作用, 还需要做进一步的研究工作。次麦矽卡岩型锡铁铅锌矿位于嘎波锂矿南侧, 矿区出露有二云母花岗岩、白云母花岗岩、伟晶岩和钠长石花岗岩, 与矽卡岩关系密切的有白云母花岗岩和伟晶岩, 其中白云母花岗岩的形成时代为 23.3 Ma(郭伟康等, 2023)、伟晶岩的形成时代为 23.0 Ma, 该年龄与嘎波锂辉石伟晶岩的形成时代一致。另一方面, 白云母花岗岩和伟晶岩整体上属于穹窿的核部、部分出露在滑脱系中, 在穹窿的构造位置上, 整体在嘎波锂辉石伟晶岩的下部(图 13)。此外, 从传统的岩浆结晶分异演化过程来看, 一般呈现出白云母花岗岩→伟晶岩→锂辉石伟晶岩的演化趋势(Badanina et al., 2004; 吴福元等, 2015, 2017, 2023; Liu et al., 2016, 2019; Ballouard et al., 2020)。综合目前现有资料分析表明, 嘎波锂辉石伟晶岩的成矿母源应该在其南部的次麦矿区, 其关系密切的应该是同时期(约 23 Ma)的白云母花岗岩和伟晶岩(图 13)。

拉隆穹窿紧邻库拉岗日穹窿, 位于其北侧, 拉隆穹窿内部发育一套呈规律变化的高分异淡色花岗岩组合, 由内向外或者从下向上依次是二云母花岗岩、白云母花岗岩、钠长石花岗岩和伟晶岩, 其形成时代相对比较集中, 分布在 23~21 Ma; 同时拉隆穹窿发育三种主要的矿化类型: 钠长石花岗岩型 Be-Nb-Ta 稀有金属矿、矽卡岩型 Be-Nb-Ta 稀有金属矿和构造-热液型 W-Pb-Zn 多金属矿(付建刚等, 2021)。库拉岗日穹窿发育的淡色花岗岩类型更加丰富, 主要包括片麻状花岗岩、黑云母花岗岩、二云母花岗岩、白云母花岗岩、电气石花岗岩、钠长石花岗岩、伟晶岩、锂辉石伟晶岩, 其形成时代变化较大, 在 28~13.8 Ma, 如片麻状花岗岩独居石 U-Th-Pb 年龄为 28 Ma(未发表数据), 次麦矿区伟晶岩独居石 U-Th-Pb 年龄为 23 Ma, 嘎波锂辉石伟晶岩年龄为 23 Ma, 嘎波矿区北部电气石花岗岩年龄为 19.3 Ma, 嘎波矿区西侧的二云母花岗岩独居

石年龄为 13.8 Ma(未发表数据), 表明库拉岗日穹窿岩浆活动时间长、期次多, 目前结果显示 23~21 Ma 为库拉岗日穹窿锂、锡成矿的主要时期, 与拉隆穹窿 23~21 Ma 铍铌钽成矿时代基本吻合。库拉岗日穹窿和拉隆穹窿相距平面距离约为 8 km, 然而二者在岩浆作用和成矿作用方面略有差异, 拉隆穹窿发育钠长石花岗岩型铍铌钽稀有金属矿、矽卡岩型铍铌钽稀有金属矿和构造-热液型钨铅锌多金属矿, 成矿元素主要是 Be-Nb-Ta、W-Pb-Zn, Li 和 Sn 的矿化暂未发现; 库拉岗日穹窿发育嘎波伟晶岩型锂矿、次麦矽卡岩型锡铁铅锌多金属矿和木村金矿, 成矿元素以 Li-Be、Sn-Fe、Pb-Zn 和 Au 为主, Nb-Ta 的矿化相对较弱, 通常作为 Li-Be 的共伴生元素, 整体上, 库拉岗日穹窿成矿类型更加丰富、稀有金属的成矿作用更强。嘎波锂矿属于花岗伟晶岩型, 属于典型的高温型稀有金成矿, 是岩浆高度结晶分异晚期 Li、Be、Nb、Ta 等稀有金属逐步富集并大规模沉淀的结果。次麦矽卡岩型锡铁铅锌多金属矿属于中-高温稀有金属成矿, 其中 Sn-Fe 矿体主体为高温, Pb-Zn 矿体经历早期矽卡岩阶段的高温成矿, 同时也经历晚期构造-热液的叠加成矿, 属于中温成矿作用, 是两阶段复合成矿的结果。木村金矿距离库拉岗日穹窿相对较远, 富矿围岩地层属于穹窿的盖层部分, 成矿作用受穹窿岩浆作用相对较弱, 主体受构造控制, 从围岩蚀变特征和区域金的成矿作用(如马扎拉金矿)对比(聂凤军等, 2005; 侯增谦等, 2006a, b; 杨竹森等, 2006; 戚学祥等, 2008; Yang et al., 2009; 莫儒伟等, 2013; Zhai et al., 2014; 卿成实等, 2014), 表明木村金矿属于中-低温成矿特征。库拉岗日穹窿这三种矿化类型整体呈现出从嘎波高温岩浆型锂铍稀有金属矿→次麦中-高温矽卡岩型锡铁、铅锌矿→木村中-低温构造蚀变岩型金矿化的规律变化, 这些规律的变化与喜马拉雅带东段围绕错那洞穹窿发育的矿化类型相似, 围绕错那洞穹窿核部向外依次分布有铍钨锡稀有金属矿(错那洞铍钨锡矿)→铅锌多金属矿(扎西康铅锌多金属矿和吉松铅锌矿)→金锑矿(马扎拉金矿)(梁维等, 2021)。

## 5.2 穹窿构造-岩浆作用-稀有金属成矿的相互关系

喜马拉雅淡色花岗岩主要分布在两个带: 北喜

马拉雅淡色花岗岩带和高喜马拉雅淡色花岗岩带(吴福元等, 2015), 其中北喜马拉雅淡色花岗岩主要分布在北喜马拉雅穹窿构造和 STDS 附近, 而在穹窿中, 淡色花岗岩主要出露在穹窿的核部和滑脱系中。库拉岗日穹窿作为北喜马拉雅穹窿带中出露面积最大的穹窿, 具有典型的特殊性, 主要体现在: (1) 出露位置特殊, 是北喜马拉雅穹窿中离 STDS 最近的穹窿, 由于该穹窿东西向延伸长, 其西段已经与 STDS 和高喜马拉雅带拼接在一起, 其东段发育穹窿的三层结构; (2) 淡色花岗岩出露的类型最为齐全, 包括片麻状花岗岩、黑云母花岗岩、二云母花岗岩、白云母花岗岩、电气石花岗岩、钠长石花岗岩、伟晶岩、锂辉石伟晶岩; 岩浆活动周期长, 从 28 Ma 到 13.8 Ma, 且岩浆活动期次多; (3) 独特的穹窿出

露形态, 库拉岗日穹窿北侧出露的是拉隆穹窿, 二者相距直线距离约 8 km, 拉隆穹窿出露的面积约是库拉岗日穹窿的 1/30, 地球物理资料显示拉隆穹窿和库拉岗日穹窿在深部可能连为一体(西藏洛扎地区 1:5 万矿产地质调查报告), 表明库拉岗日穹窿和拉隆穹窿在地表出露形式上表现为一大一小的子母复合穹窿构造(图 14); (4) 成矿类型多样、矿化类型独特, 发育嘎波伟晶岩型锂矿、次麦矽卡岩型锡铁铅锌多金属矿、木村金矿, 同时在拉隆穹窿中发育钠长石花岗岩型铍铌钽稀有金属矿、矽卡岩型铍铌钽稀有金属矿、构造热液型钨铅锌多金属矿; (5) 特殊的成矿位置, 成矿作用主要发育在穹窿的滑脱系和核部的核部。

库拉岗日穹窿发育大规模的岩浆作用, 岩浆活

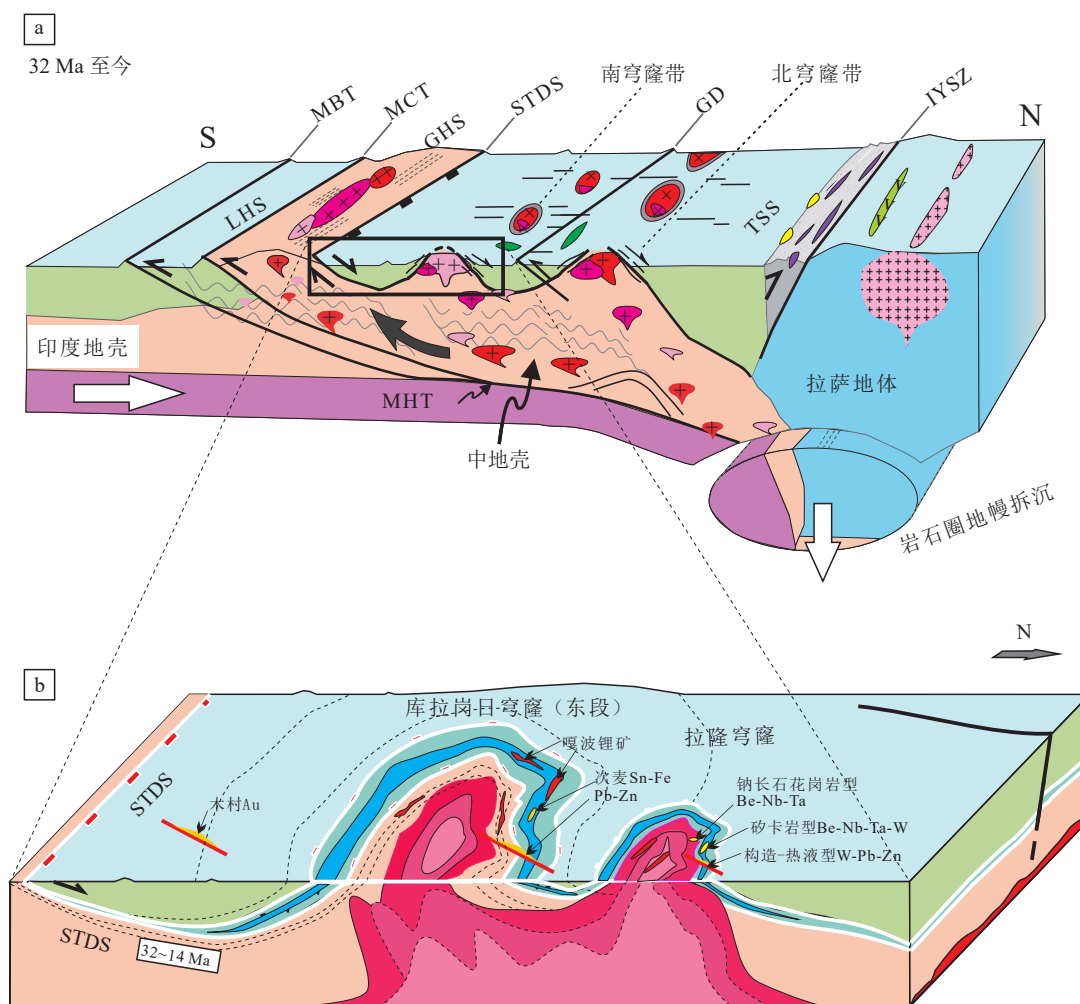


图 14 西藏洛扎库拉岗日穹窿构造-岩浆作用-稀有金属成矿综合模型图

Fig.14 Integrated model of tectonic-magmatism and rare metal mineralization in the Kulagangri Dome, Xizang

动时间从 28 Ma 到 13.8 Ma, 其活动时间与 STDS 活动时间基本一致(Fu et al., 2020), 表明这些岩浆作用主要受 STDS 控制, STDS 的活动不仅为这些淡色花岗岩的形成提供一个就位空间, 同时为这些岩浆的长距离迁移提供一个良好的通道, 从而有效地保证了岩浆的高度结晶分异。从黑云母花岗岩→二云母花岗岩→白云母花岗岩→电气石花岗岩→钠长石花岗岩→伟晶岩→锂辉石伟晶岩, 岩浆结晶分异程度逐渐增强, 稀有金属元素也呈规律性的变化, 从贫稀有金属→Be 富集→Be-Nb-Ta 富集→Li-Be-Nb-Ta 富集→Li-Cs-Be-Nb-Ta 富集连续变化(李光明等, 2022)。

库拉岗日穹窿经历四期构造变形, 其中与淡色花岗岩和稀有金属成矿关系最为密切的是第二期由南向北伸展构造(D2), 对应于区域 STDS 的活动。已有研究资料表明, 喜马拉雅带穹窿的中部单元(滑脱系)是 STDS 向北延伸的一种出露表现形式(Chen et al., 1990; Jessup et al., 2016; Liu et al., 2016; Fu et al., 2020, 2022), 该单元整体属于一条规模较大的韧性剪切带, 出露厚度变化不等, 从 200 m 到 1 km, 主要岩性包括一套中—高级变质的云母类片岩、大理岩、矽卡岩和变形的花岗岩、伟晶岩以及锂辉石伟晶岩, 云母类片岩由内向外(或者自下到上)依次表现为矽线石-石榴子石云母片岩、蓝金石榴子石云母片岩、十字石-石榴子石云母片岩和石榴子石云母片岩, 呈典型的巴罗式变质矿物分带特征(Kawakami et al., 2007; Cottle et al., 2009; Langille et al., 2012; Jessup et al., 2016; 丁慧霞等, 2019)。穹窿中矽卡岩经历强烈的韧性剪切变形, 呈透镜状、条带状, 整体产状与云母片岩基本一致, 部分矽卡岩矿物定向排列, 呈典型的同构造矽卡岩特征(Fu et al., 2021)。位于穹窿滑脱系的锂辉石伟晶岩脉, 呈透镜状、脉状, 整体产状平行与围岩大理岩或者矽卡岩的产状, 偶尔也见穿切大理岩的锂辉石伟晶岩脉, 部分锂辉石晶体发生了弯曲变形, 表明锂辉石伟晶岩是同构造岩浆的产物, 伴随着 STDS 的伸展拆离, 花岗质岩浆沿着拆离构造空间边向上迁移边侵位, 从而在滑脱系中形成锂辉石伟晶岩。因此, 区域上大规模的 SDTS 广泛活动, 是库拉岗日穹窿构造中花岗质岩浆的长距离迁移和高度结晶分异的构造保障。淡色花岗岩在区域伸展

构造背景下, 花岗质岩浆沿着构造通道上升迁移、结晶分异、构造变形和稀有金属富集成矿同步进行, 从而形成了同构造的淡色花岗岩和锂辉石伟晶岩以及同构造的矽卡岩。

综上所述, 库拉岗日穹窿作为 STDS 在北部的表现形式, 集结于穹窿构造变形、高分异淡色花岗岩、变质作用和锂铍铌钽锡等稀有金属成矿一体, 从而构成了北喜马拉雅带成矿的最佳场所(图 14)。其中穹窿中高分异淡色花岗岩和大规模拆离断层(对应于区域藏南拆离系)的强烈活动, 是控制稀有金属成矿的关键因素, 也是未来在喜马拉雅成矿带其他典型穹窿构造中寻找新的稀有金属矿的必备条件。

## 6 结论

(1) 库拉岗日穹窿嘎波矿区北部电气石花岗岩的侵位年龄为 19.3 Ma、锂辉石伟晶岩的侵位年龄为 23.1 Ma, 代表了嘎波锂矿的成矿时代; 次麦矿区紧邻矽卡岩型矿体的伟晶岩侵位年龄为 23.0 Ma, 代表了次麦矽卡岩型锡铁铅锌多金属矿的成矿时代。

(2) 围绕库拉岗日穹窿发育三种矿化类型: 嘎波伟晶岩型锂矿、次麦矽卡岩型锡铁铅锌多金属矿和木村构造-蚀变岩型金矿, 呈现出从高温岩浆型锂铍稀有金属矿(嘎波)→中—高温矽卡岩型锡铁、铅锌矿(次麦)→中—低温构造蚀变岩型金矿化(木村)的规律变化。

(3) 库拉岗日穹窿滑脱系中大规模的伸展拆离构造变形、淡色花岗岩的岩浆侵位和高度结晶分异、同构造矽卡岩的形成、锂铍铌钽锡等稀有金属成矿作用在 23 Ma 同时进行。

(4) 库拉岗日穹窿作为 STDS 在其北部的一种表现形式, 穹窿中高分异淡色花岗岩和大规模拆离断层的强烈活动, 是锂铍铌钽锡的稀有金属成矿的关键因素, 同时也是未来在喜马拉雅成矿带其他典型穹窿构造中寻找新的稀有金属矿的必备条件。

**致谢:** 野外工作得到了中国地质调查局成都地质调查中心石洪召、吴建阳、梁生贤、梁维、马国桃的热心帮助, 两位匿名审稿专家以及期刊编辑对本文提出了建设性的修改意见, 在此一并表示衷心感谢。

## References

- Badanina E V, Veksler I V, Thomas R, Syritso L F, Trumbull R B. 2004. Magmatic evolution of Li–F, rare-metal granites: A case study of melt inclusions in the Khangilay complex, Eastern Transbaikalia (Russia)[J]. *Chemical Geology*, 210(1): 113–133.
- Ballouard C, Elburg M A, Tappe S, Reinke C, Ueckermann H, Doggart S. 2020. Magmatic–hydrothermal evolution of rare metal pegmatites from the Mesoproterozoic Orange River pegmatite belt (Namaqualand, South Africa)[J]. *Ore Geology Reviews*, 116: 103252.
- Burg J P, Chen G M. 1984. Tectonics and structural zonation of southern Tibet, China[J]. *Nature*, 311(5983): 219–223.
- Chen Z, Liu Y, Hodges K, Burchfiel B, Royden L, Deng C. 1990. The Kangmar Dome: A metamorphic core complex in southern Xizang (Tibet)[J]. *Science*, 250(4987): 1552–1556.
- Cottle J, Searle M, Horstwood M, Waters D. 2009. Timing of midcrustal metamorphism, melting, and deformation in the Mount Everest region of southern Tibet revealed by U(–Th)–Pb geochronology[J]. *The Journal of Geology*, 117(6): 643–664.
- Ding Huixia, Li Wentan, Jiang Yunyun. 2019. The metamorphism and the tectonic implication of the Cuonadong dome, eastern Himalaya[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(2): 312–324 (in Chinese with English abstract)
- Fu Jiangang, Li Guangming, Guo Weikang, Zhang Hai, Dong Suiliang, Zhang Linkui, Li Yingxu, Ma Guotao, Jiao Yanjie. 2024. Discovery of the Cimai skarn-type Sn–Fe–Pb–Zn polymetallic deposit in Kulagangri Dome, Xizang, and its prospecting implications[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 48(4): 724–736 (in Chinese with English abstract)
- Fu Jiangang, Li Guangming, Guo Weikang, Zhang Hai, Zhang Linkui, Dong Suiliang, Zhou Limin, Li Yingxu, Jiao Yanjie, Shi Hongzhao. 2023. Mineralogical characteristics of columbite group minerals and its implications for magmatic–hydrothermal transition in the Gabo lithium deposit, Himalayan metallogenic belt[J]. *Earth Science Frontiers*, 30(5): 134–150 (in Chinese with English abstract)
- Fu Jiangang, Li Guangming, Dong Suiliang, Zhang Hai, Guo Weikang, Zhang Linkui, Liang Wei, Jiao Yanjie, Ling Chen. 2022. Mineral chemistry of garnet and its implication for the magmatic–hydrothermal transition in rare metal leucogranites in the Lalong dome, southern Tibet, China[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 42(2): 288–299 (in Chinese with English abstract)
- Fu J G, Li G M, Wang G H, Zhang L K, Liang W, Zhang X Q, Jiao Y J, Dong S L. 2022. Structural and kinematic analysis of the Cuonadong Dome, southern Tibet, China: Implications for middle–crust deformation[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 8: 100112.
- Fu Jiangang, Li Guangming, Wang Genhou, Dong Suiliang, Zhang Hai, Guo Weikang, Zhang Linkui, Zhang Xiaoqiong, Jiao Yanjie. 2021. Geological characteristics and metallogenic types of Be–Nb–Ta rare metals in the Lalong dome, Southern Tibet, China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 45(5): 913–933 (in Chinese with English abstract).
- Fu J G, Li G M, Wang G H, Zhang L K, Liang W, Zhang X Q, Jiao Y J, Dong S L, Huang Y. 2020. Structural analysis of sheath folds and geochronology in the Cuonadong Dome, southern Tibet, China: New constraints on the timing of the South Tibetan detachment system and its relationship to North Himalayan Gneiss Domes[J]. *Terra Nova*, 32(4): 300–323.
- Fu J G, Li G M, Wang G H, Zhang L K, Liang W, Zhang X Q, Jiao Y J, Huang Y. 2021. Structural and thermochronologic constraints on skarn rare–metal mineralization in the Cenozoic Cuonadong Dome, Southern Tibet[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 205: 104612.
- Fu Jiangang, Li Guangming, Dong Suiliang, Zhang Hai, Guo Weikang, Zhang Linkui, Zhang Xiaoqiong, Jiao Yanjie. 2020. Identification and its significances of the Lalong Be–Nb–Ta–bearing albite granite in the Northern Himalaya, Tibet[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 40(2): 91–103 (in Chinese with English abstract)
- Fu Jiangang, Li Guangming, Wang Genhou, Huang Yong, Zhang Linkui, Dong Suiliang, Liang Wei. 2018. Establishment of the North Himalayan double gneiss domes: Evidence from field identification of the Cuonadong dome, south Tibet[J]. *Geology in China*, 45(4): 783–802 (in Chinese with English abstract)
- Guo Weikang, Li Guangming, Fu Jiangang, Zhang Hai, Zhang Linkui, Wu Jianyang, Dong Suiliang, Yang Yulin. 2023. Metallogenic epoch, magmatic evolution and metallogenic significance of the Gabo lithium pegmatite deposit, Himalayan metallogenic belt, Tibet[J]. *Earth Science Frontiers*, 30(5): 275–297 (in Chinese with English abstract)
- Hou Zengqian, Mo Xuanxue, Yang Zhiming, Wang Anjian, Pan Guitang, Qu Xiaoming, Nie Fengjun. 2006a. Metallogenesis in the collisional orogen of the Qinghai–Tibet Plateau: Tectonic setting, tempo–spatial distribution and ore deposit types[J]. *Geology in China*, 33(2): 340–351 (in Chinese with English abstract)
- Hou Zengqian, Qu Xiaoming, Yang Zhusen, Meng Xiangjin, Li Zhenqing, Yang Zhiming, Zheng Mianping, Zheng Youye, Nie Fengjun, Gao Yongfeng, Jiang Sihong, Li Guangming. 2006b. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: III. Mineralization in post–collisional extension setting[J]. *Mineral Deposits*, 25(6): 629–651 (in Chinese with English abstract).
- Jackson S, Pearson N, Griffin W, Belousova E. 2004. The application of laser ablation–inductively coupled plasma–mass spectrometry to in situ U–Pb zircon geochronology[J]. *Chemical Geology*, 211(1): 47–69.
- Jessup M J, Langille J, Cottle J, Ahmad T. 2016. Crustal thickening, Barrovian metamorphism, and exhumation of midcrustal rocks during doming and extrusion: Insights from the Himalaya, NW India[J]. *Tectonics*, 35(1): 160–186.

- Jiao Yanjie, Huang Xuri, Li Guangming, Fu Jiangang, Liang Shenxian, Guo Jing. 2023. Prospecting methods and deep geological setting of the Gabo pegmatite lithium deposit in the Himalayan metallogenic belt[J]. *Earth Science Frontiers*, 30(5): 255–264 (in Chinese with English abstract).
- Kawakami T, Aoya M, Wallis S, Lee J, Terada K, Wang Y, Heizler M. 2007. Contact metamorphism in the Malashan dome, North Himalayan gneiss domes, southern Tibet: An example of shallow extensional tectonics in the Tethys Himalaya[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 25(8): 831–853.
- Langille J M, Jessup M J, Cottle J M, Lederer G, Ahmad T. 2012. Timing of metamorphism, melting and exhumation of the Leo Pargil dome, northwest India[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 30(8): 769–791.
- Langille J, Lee J, Hacker B, Seward G. 2010. Middle crustal ductile deformation patterns in southern Tibet: Insights from vorticity studies in Mabja Dome[J]. *Journal of Structural Geology*, 32(1): 70–85.
- Lee J, Hacker B, Wang Y. 2004. Evolution of North Himalayan gneiss domes: Structural and metamorphic studies in Mabja Dome, southern Tibet[J]. *Journal of Structural Geology*, 26(12): 2297–2316.
- Lee J, Hager C, Wallis S, Stockli D, Whitehouse M, Aoya M, Wang Y. 2011. Middle to Late Miocene extremely rapid exhumation and thermal reequilibration in the Kung Co rift, southern Tibet[J]. *Tectonics*, 30(2): 1–26.
- Li Guangming, Fu Jiangang, Guo Weikang, Zhang Hai, Zhang Linkui, Dong Suiliang, Li Yingxu, Wu Jianyang, Jiao Yanjie, Jin Canhai, Huang Chunmei. 2022. Discovery of the Gabo granitic pegmatite-type lithium deposit in the Kulagangri Dome, eastern Himalayan metallogenic belt, and its prospecting implication[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 41(6): 1109–1119 (in Chinese with English abstract).
- Li Guangming, Zhang Linkui, Jiao Yanjie, Xia Xiangbiao, Dong Suiliang, Fu Jiangang, Liang Wei, Zhang Zhi, Wu Jianyang, Dong Lei, Huang Yong. 2017. First discovery and implications of Cuonadong superlarge Be–W–Sn polymetallic deposit in Himalayan metallogenic belt, southern Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 36(4): 1003–1008 (in Chinese with English abstract).
- Li Guangming, Zhang Linkui, Zhang Zhi, Xia Xiangbiao, Liang Wei, Hou Chunqiu. 2021. New exploration progresses, resource potentials and prospecting targets of strategic minerals in the southern Qinghai–Tibet Plateau[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 41(2): 351–360 (in Chinese with English abstract).
- Liang Wei, Liang Guangming, Basang Yuandan, Zhang Linkui, Fu Jiangang, Huang Yong, Zhang Zhi, Wang Yiyun, Cao Huawen. 2021. Metallogenesis of Himalaya gneiss dome: An example from Cuonadong gneiss dome in Zhaxikang ore concentration area[J]. *Mineral Deposits*, 40(5): 932–948 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chen, Wang Rucheng, Wu Fuyuan, Xie Lei, Liu Xiaochi. 2021. First report of elbaite–lepidolite subtype pegmatite in the Himalaya leucogranite belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(11): 3287–3300 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xiaochi, Wu Fuyuan, Wang Rucheng, Liu Zhichao, Wang Jiamin, Liu Chen, Hu Fangyang, Yang Lei, He Shaoxiong. 2021. Discovery of spodumene-bearing pegmatites from Ra Chu in the Mount Qomolangma region and its implications for studying rare metal mineralization in the Himalayan orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(11): 3295–3304 (in Chinese with English abstract).
- Liu Z C, Wu F Y, Ding L, Liu X C, Wang J G, Ji W Q. 2016. Highly fractionated Late Eocene (–35 Ma) leucogranite in the Xiaru Dome, Tethyan Himalaya, South Tibet[J]. *Lithos*, 240–243: 337–354.
- Liu Z C, Wu F Y, Liu X C, Wang J G, Yin R, Qiu Z L, Ji W Q, Yang L. 2019. Mineralogical evidence for fractionation processes in the Himalayan leucogranites of the Ramba Dome, southern Tibet[J]. *Lithos*, 340–341: 71–86.
- Lu Rukui, Zhong Huaming, Tong Jinsong, Xia Jun, Li Yunhuai. 2005. Tectonic deformation features of the detachment fault in Luozha area, Tibet[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 29(2): 189–197 (in Chinese with English abstract).
- Mo Ruwei, Sun Xiaoming, Zhai Wei, Zhou Feng, Liang Yeheng. 2013. Ore-forming fluid geochemistry and metallogenic mechanism from Mazhala gold–antimony deposit in southern Tibet, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(4): 1427–1438 (in Chinese with English abstract).
- Nie Fengjun, Hu Peng, Jiang Sihong, Li Zhenqing, Liu Yan, Zhou Yongzhang. 2005. Type and temporal–spatial distribution of gold and antimony deposits (prospects) in Southern Tibet, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(3): 373–385 (in Chinese with English abstract).
- Qi Xuexiang, Li Tianfu, Meng Xiangjin, Yu Chunlin. 2008. Cenozoic tectonic evolution of the Tethyan Himalayan foreland fault–fold belt in southern Tibet, and its constraint on antimony–gold polymetallic minerogenesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1638–1648 (in Chinese with English abstract).
- Qin Kezhang, Zhao Junxing, He Changtong, Shi Ruizhe. 2021. Discovery of the Qongjiagang giant lithium pegmatite deposit in Himalaya, Tibet, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(11): 3277–3286 (in Chinese with English abstract).
- Qing Chengshi, Ding Jun, Li Yingxu, Dong Lei, Dai Zuowen. 2014. Element combination anomalies and prospecting direction in Mazhala gold–antimony deposit[J]. *Metal Mine*, (12): 134–137 (in Chinese with English abstract).
- Wagner T, Lee J, Hacker B, Seward G. 2010. Kinematics and vorticity in Kangmar Dome, southern Tibet: Testing midcrustal channel flow models for the Himalaya[J]. *Tectonics*, 29(6): 1–26.
- Wang Rucheng, Wu Fuyuan, Xie Lei, Liu Xiaochi, Wang Jiamin, Yang Lei, Lai Wen, Liu Chen. 2017. A preliminary study of rare-metal

- mineralization in the Himalayan leucogranite belts, South Tibet[J]. *Science China Earth Sciences*, 60(9): 1655–1663.
- Wu Fuyuan, Guo Chunli, Hu Fangyang, Liu Xiaochi, Zhao Junxing, Li Xiaofeng, Qin Kezhang. 2023. Petrogenesis of the highly fractionated granites and their mineralizations in Nanling Range, South China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 39(1): 1–36 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Liu Zhichao, Liu Xiaochi, Ji Weiqiang. 2015. Himalayan leucogranite: Petrogenesis and implications to orogenesis and plateau uplift[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(1): 1–36 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Wang Rucheng, Liu Xiaochi, Xie Lei. 2021. New breakthroughs in the studies of Himalayan rare-metal mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(11): 3261–3276 (in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Liu X C, Ji W Q, Wang J M, Yang L. 2017. Highly fractionated granites: Recognition and research[J]. *Science China Earth Sciences*, 60(7): 1201–1219.
- Xie Lei, Wang Rucheng, Tian Ennong, Liu Zhichao, Liu Xiaochi, Cheng Feiyue, Hu Huan, Che Xudong, Liu Chen. 2021. Oligocene Nb–Ta–W–mineralization related to the Xiaru leucogranite in the Himalayan Orogen[J]. *Chinese Science Bulletin*, 66: 4574–4591 (in Chinese with English abstract).
- Yang Z S, Hou Z Q, Meng X J, Liu Y C, Fei H C, Tian S H, Li Z Q, Gao W. 2009. Post-collisional Sb and Au mineralization related to the South Tibetan detachment system, Himalayan orogen[J]. *Ore Geology Reviews*, 36(1/3): 194–212.
- Yang Zhusen, Hou Zengqian, Gao Wei, Wang Haiping, Li Zhenqing, Meng Xiangjin, Qu Xiaoming. 2006. Metallogenic characteristics and genetic model of antimony and gold deposits in South Tibetan Detachment System[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(9): 1377–1391 (in Chinese with English abstract).
- Zhai W, Sun X M, Yi J Z, Zhang X G, Mo R W, Zhou F, Wei H X, Zeng Q G. 2014. Geology, geochemistry, and genesis of orogenic gold–antimony mineralization in the Himalayan Orogen, South Tibet, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 58: 68–90.
- Zhang J J, Santosh M, Wang X X, Guo L, Yang X Y, Zhang B. 2012. Tectonics of the northern Himalaya since the India–Asia collision[J]. *Gondwana Research*, 21(4): 939–960.
- Zhang Jinjiang, Guo Lei, Zhang Bo. 2007. Structure and kinematics of the Yalashanbo dome in the Northern Himalayan dome belt, China[J]. *Chinese Journal of Geology*, 42(1): 16–30 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinjiang, Yang Xiongying, Qi Guowei, Wang Dechao. 2011. Geochronology of the Malashan dome and its application in formation of the Southern Tibet detachment system (STDS) and Northern Himalayan gneiss domes (NHGD)[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(12): 3535–3544 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Junxing, He Changtong, Qin Kezhang, Shi Ruizhe, Liu Xiaochi, Hu Fangyang, Yu Kelong, Sun Zhenghao. 2021. Geochronology, source features and the characteristics of fractional crystallization in pegmatite at the Qiongiagang giant pegmatite–type lithium deposit, Himalaya, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(11): 3325–3347 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Qifeng, Qin Kezhang, He Changtong, Wu Huaying, Liu Yuchao, Niu Xianglong, Mo Lingchao, Liu Xiaochi, Zhao Junxing. 2021. Li–Be–Nb–Ta mineralogy of the Kuqu leucogranite and pegmatite in the Eastern Himalaya, Tibet, and its implication[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(11): 3305–3324 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 丁慧霞, 李文坛, 江媛媛. 2019. 喜马拉雅造山带东段错那洞片麻岩穹窿的变质作用及构造意义[J]. *岩石学报*, 35(2): 312–324.
- 付建刚, 李光明, 董随亮, 张海, 郭伟康, 张林奎, 梁维, 焦彦杰, 凌晨. 2022. 西藏拉隆穹隆淡色花岗岩中石榴子石矿物学研究及对岩浆–热液过程的指示[J]. *沉积与特提斯地质*, 42(2): 288–299.
- 付建刚, 李光明, 董随亮, 张海, 郭伟康, 张林奎, 张小琼, 焦彦杰. 2020. 西藏北喜马拉雅拉隆穹隆含 Be、Nb、Ta 钠长石花岗岩的识别及意义[J]. *沉积与特提斯地质*, 40(2): 91–103.
- 付建刚, 李光明, 郭伟康, 张海, 董随亮, 张林奎, 李应栩, 马国桃, 焦彦杰. 2024. 西藏库拉岗日穹隆次麦砂卡岩型锡铁铅锌多金属矿的发现及其意义[J]. *大地构造与成矿学*, 48(4): 724–736.
- 付建刚, 李光明, 郭伟康, 张海, 张林奎, 董随亮, 周利敏, 李应栩, 焦彦杰, 石洪召. 2023. 喜马拉雅成矿带嘎波锂矿钨钽矿床矿物学特征及对岩浆–热液过程的指示[J]. *地学前缘*, 30(5): 134–150.
- 付建刚, 李光明, 王根厚, 董随亮, 张海, 郭伟康, 张林奎, 张小琼, 焦彦杰. 2021. 西藏拉隆穹隆地质特征和 Be–Nb–Ta 稀有金属矿化的厘定及其战略意义[J]. *大地构造与成矿学*, 45(5): 913–933.
- 付建刚, 李光明, 王根厚, 黄勇, 张林奎, 董随亮, 梁维. 2018. 北喜马拉雅双穹隆构造的建立: 来自藏南错那洞穹隆的厘定[J]. *中国地质*, 45(4): 783–802.
- 郭伟康, 李光明, 付建刚, 张海, 张林奎, 吴建阳, 董随亮, 杨玉林. 2023. 喜马拉雅成矿带嘎波伟晶岩型锂矿成矿时代、岩浆演化及成矿指示意义[J]. *地学前缘*, 30(5): 275–297.
- 侯增谦, 莫宣学, 杨志明, 王安建, 潘桂棠, 曲晓明, 聂凤军. 2006a. 青藏高原原碰撞造山带成矿作用: 构造背景、时空分布和主要类型[J]. *中国地质*, 33(2): 340–351.
- 侯增谦, 曲晓明, 杨竹森, 孟祥金, 李振清, 杨志明, 郑帮平, 郑有业, 聂凤军, 高永丰, 江思宏, 李光明. 2006b. 青藏高原原碰撞造山带: III. 后碰撞伸展成矿作用[J]. *矿床地质*, 25(6): 629–651.
- 焦彦杰, 黄旭日, 李光明, 付建刚, 梁生贤, 郭镜. 2023. 喜马拉雅成矿带嘎波伟晶岩型锂矿的找矿方法与深部背景研究[J]. *地学前缘*, 30(5): 255–264.
- 李光明, 付建刚, 郭伟康, 张海, 张林奎, 董随亮, 李应栩, 吴建阳, 焦彦杰, 金灿海, 黄春梅. 2022. 西藏喜马拉雅成矿带东段嘎波伟晶岩型锂矿的发现及其意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 41(6): 1109–1119.
- 李光明, 张林奎, 焦彦杰, 夏祥标, 董随亮, 付建刚, 梁维, 张志, 吴建阳, 董磊, 黄勇. 2017. 西藏喜马拉雅成矿带错那洞超大型铍锡钨

- 多金属矿床的发现及意义[J]. 矿床地质, 36(4): 1003–1008.
- 李光明, 张林奎, 张志, 夏祥标, 梁维, 侯春秋. 2021. 青藏高原南部的主要战略性矿产: 勘查进展、资源潜力与找矿方向[J]. 沉积与特提斯地质, 41(2): 351–360.
- 梁维, 李光明, 巴桑元旦, 张林奎, 付建刚, 黄勇, 张志, 王艺云, 曹华文. 2021. 喜马拉雅带片麻岩穹窿成矿作用——以扎西康矿集区错那洞穹窿为例[J]. 矿床地质, 40(5): 932–948.
- 刘晨, 王汝成, 吴福元, 谢磊, 刘小驰. 2021. 珠峰地区锂成矿作用: 喜马拉雅淡色花岗岩带首个锂电气石–锂云母型伟晶岩[J]. 岩石学报, 37(11): 3287–3300.
- 刘小驰, 吴福元, 王汝成, 刘志超, 王佳敏, 刘晨, 胡方决, 杨雷, 何少雄. 2021. 珠峰地区热曲锂辉石伟晶岩的发现及对喜马拉雅稀有金属成矿作用研究的启示[J]. 岩石学报, 37(11): 3295–3304.
- 鲁如魁, 钟华明, 童劲松, 夏军, 李运怀. 2005. 西藏洛扎地区拆离断层构造变形特征[J]. 大地构造与成矿学, 29(2): 189–197.
- 莫儒伟, 孙晓明, 翟伟, 周峰, 梁业恒. 2013. 藏南马扎拉金锑矿床成矿流体地球化学和成矿机制[J]. 岩石学报, 29(4): 1427–1438.
- 聂凤军, 胡朋, 江思宏, 李振清, 刘妍, 周永章. 2005. 藏南地区金和锑矿床(点)类型及其时空分布特征[J]. 地质学报, 79(3): 373–385.
- 戚学祥, 李天福, 孟祥金, 于春林. 2008. 藏南特提斯喜马拉雅前陆断褶带新生代构造演化与锑金多金属成矿作用[J]. 岩石学报, 24(7): 1638–1648.
- 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[J]. 岩石学报, 37(11): 3277–3286.
- 卿成实, 丁俊, 李应栩, 董磊, 代作文. 2014. 马扎拉金锑矿元素组合异常及找矿方向[J]. 金属矿山, (12): 134–137.
- 王汝成, 吴福元, 谢磊, 刘小池, 王佳敏, 杨雷, 赖文, 刘晨. 2017. 藏南喜马拉雅淡色花岗岩稀有金属成矿作用初步研究[J]. 中国科学: 地球科学, 47(8): 871–880.
- 吴福元, 郭春丽, 胡方决, 刘小驰, 赵俊兴, 李晓峰, 秦克章. 2023. 南岭高分异花岗岩成岩与成矿[J]. 岩石学报, 39(1): 1–36.
- 吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 王佳敏, 杨雷. 2017. 高分异花岗岩的识别与研究[J]. 中国科学: 地球科学, 47(7): 745–765.
- 吴福元, 刘志超, 刘小驰, 纪伟强. 2015. 喜马拉雅淡色花岗岩[J]. 岩石学报, 31(1): 1–36.
- 吴福元, 王汝成, 刘小驰, 谢磊. 2021. 喜马拉雅稀有金属成矿作用研究的新突破[J]. 岩石学报, 37(11): 3261–3276.
- 谢磊, 王汝成, 田恩农, 刘志超, 吴福元, 刘小驰, 程飞越, 胡欢, 车旭东, 刘晨. 2021. 喜马拉雅夏如渐新世淡色花岗岩铍钽钨成矿作用[J]. 科学通报, 66(35): 4574–4591.
- 杨竹森, 侯增谦, 高伟, 王海平, 李振清, 孟祥金, 曲晓明. 2006. 藏南拆离系锑金成矿特征与成因模式[J]. 地质学报, 80(9): 1377–1391.
- 张进江, 郭磊, 张波. 2007. 北喜马拉雅穹隆带雅拉香波穹隆的构造组成和运动学特征[J]. 地质科学, 42(1): 16–30.
- 张进江, 杨雄英, 戚国伟, 王德朝. 2011. 马拉山穹窿的活动时限及其在藏南拆离系–北喜马拉雅片麻岩穹窿形成机制的应用[J]. 岩石学报, 27(12): 3535–3544.
- 赵俊兴, 何畅通, 秦克章, 施睿哲, 刘小驰, 胡方决, 余可龙, 孙政浩. 2021. 喜马拉雅琼嘉岗超大型伟晶岩锂矿的形成时代、源区特征及分异特征[J]. 岩石学报, 37(11): 3325–3347.
- 周起凤, 秦克章, 何畅通, 吴华英, 刘宇超, 牛向龙, 莫凌超, 刘小驰, 赵俊兴. 2021. 喜马拉雅东段库曲岩体锂、铍和铌钽稀有金属矿物研究及指示意义[J]. 岩石学报, 37(11): 3305–3324.