

西藏洛巴堆矽卡岩型铁多金属矿床石榴子石和锆石 U-Pb测年及地质意义*

次仁拉姆^{1,2}, 李金祥^{1,3**}, 岳雅慧¹, 谢静¹, 张利云^{1,3}, 丁林^{1,2,3}

(1 中国科学院青藏高原研究所大陆碰撞与高原隆升重点实验室, 北京 100101; 2 中国科学院大学, 北京 100049;

3 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101)

摘要 石榴子石是矽卡岩型矿床中最常见的蚀变矿物之一, 因此, 对石榴子石进行年代学研究能够准确限定矽卡岩型矿床的成矿时代。青藏高原冈底斯成矿带中部发育众多矽卡岩型多金属矿床, 由于缺乏精确的成矿年代学数据, 制约着对这些矿床成因和动力学背景的深入认识。因此, 文章以该成矿带具有代表性的洛巴堆矽卡岩型铁多金属矿床为研究对象, 通过对赋矿矽卡岩中石榴子石和花岗闪长岩中锆石分别进行LA-ICP-MS U-Pb测年, 以期能够准确限定该矿床的成矿时代。背散射图像和电子探针分析显示, 洛巴堆矽卡岩矿床中石榴子石普遍发育环带结构特征, 端员组成上以钙铝-钙铁榴石为主, $w(U)$ 为 $0.4 \times 10^{-6} \sim 28.1 \times 10^{-6}$, LA-ICP-MS U-Pb测年数据显示石榴子石形成时代为 $(62.7 \pm 2.3)\text{Ma}$ ($n=94$)。同时, 与矽卡岩密切接触的花岗闪长岩中的锆石U-Pb年龄为 $(62.6 \pm 0.8)\text{Ma}$ ($n=30$), 与石榴子石形成时代一致。这一结果说明, 洛巴堆矽卡岩型铁多金属矿床形成于古新世, 与同期的花岗闪长岩具有密切的成因联系。结合区域 $65\sim50\text{ Ma}$ 时的印度-欧亚大陆碰撞事件, 该测年结果显示了洛巴堆矽卡岩型铁多金属矿床形成于印度-欧亚大陆初始碰撞的构造背景。此外, 通过本次研究显示, 相对于云母等 Ar-Ar 测年, 石榴子石 U-Pb 测年体系受青藏高原剥蚀隆升作用的影响较小, 能够更好的约束成矿时代, 具有广泛的应用前景。

关键字 地球化学; 石榴子石, LA-ICP-MS U-Pb 定年; 洛巴堆矽卡岩型矿床; 冈底斯成矿带; 青藏高原

中图分类号:P618.31

文献标志码:A

Garnet/zircon U-Pb dating and geological significance of Luobadui skarn iron polymetallic deposit in Tibet

Cirenlamu^{1,2}, LI JinXiang^{0,3}, YUE YaHui¹, XIE Jing¹, ZHANG LiYun^{1,3} and DING Lin^{1,2,3}

(1 Key Laboratory of Continental Collision and Plateau Uplift, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract

Garnet is one of the most common alteration minerals in the skarn deposit, and hence garnet geochronology can accurately define the ore-forming age of the skarn deposit. Many skarn-type polymetallic deposits are developed in the central part of the Gangdese metallogenic belt, Tibet. However, the lack of accurate mineralization chronologic data severely restricts deep understanding of the genesis and geodynamic setting of these deposits. Therefore, in this paper, the authors chose the representative Luobadui skarn iron polymetallic deposit in this metallogenic belt as the research object to conduct investigation. Through LA-ICP-MS U-Pb dating of garnet in

* 本文得到国家重点研发计划(编号:2016YFC0600303)、第二次青藏高原综合科学考察(编号:2019QZKK0708)和国家自然科学基金(编号:41672091)项目联合资助

第一作者简介 次仁拉姆,女,1996年生,硕士研究生,构造地质专业。Email:1018792572@qq.com

**通讯作者 李金祥,男,1981年生,研究员,主要从事斑岩-矽卡岩-浅成低温成矿系统的研究。Email:ljx@itpcas.ac.cn

收稿日期 2020-06-24; 改回日期 2020-12-01。秦思婷编辑。

ore-bearing skarn and granodiorite, the authors expect that U-Pb dating could accurately define the mineralization age of the deposit. Backscattering and electron microprobe analysis shows that the garnet in the Luobadui skarn deposit has generally developed zoning structure, and the end member composition is dominated by grossular-andradite, which has the U values from 0.4×10^{-6} to 28.1×10^{-6} . The garnet LA-ICP-MS U-Pb dating data show that the age of garnet formation is $(62.7 \pm 2.3)\text{Ma}$ ($n=94$). Meanwhile, the zircon U-Pb age of the granodiorite in close contact with skarn is $(62.6 \pm 0.8)\text{Ma}$ ($n=30$), which is consistent with the formation age of the garnet. This result indicates that the Luobadui deposit was formed in the Paleocene and had a close genetic relationship with synchronous granodiorite. Combined with the 65~50 Ma India-Eurasia collision event, the dating results show that the Luobadui skarn iron polymetallic deposit was formed in the India-Eurasia initial collision setting. In addition, this study shows that the garnet U-Pb dating system is less affected by the erosion and uplift of the Tibet Plateau compared with the result of Ar-Ar dating method. The garnet U-Pb dating can accurately define mineralization age of the skarn-type deposit and has an extensive application prospect.

Key words: geochemistry, garnet, LA-ICP-MS U-Pb dating, Luobadui skarn deposit, Gangdese metallogenic belt, Tibetan Plateau

大陆碰撞成矿作用一直是矿床学研究的热点之一,而青藏高原作为一个新生代发育的年轻碰撞造山带,伴随着印度-欧亚大陆碰撞发生了强烈的岩浆活动和成矿作用,孕育了一系列大型-超大型岩浆热液矿床,形成了冈底斯斑岩铜钼成矿带、冈底斯北缘铅-锌-银-铁-钼-钨多金属成矿带、雅鲁藏布江缝合带周边的造山型金矿带和特提斯喜马拉雅中的铅-锌-银-金多金属矿床带(Zheng et al., 2015)及热液相关铯-金矿床成矿带(Yang et al., 2009))等。这些矿床具有成矿规模大,成矿时代新、类型丰富和保存良好等特征,对于研究大陆碰撞成矿作用具有天然的优势(侯增谦等,2006;Zheng et al., 2015)。

冈底斯北缘多金属成矿带位于冈底斯斑岩铜钼成矿带北部,目前已发现20余个多金属矿床,以亚贵拉铅-锌矿床、恰功铁矿床、列廷岗-勒青拉多金属矿床及洛巴堆矽卡岩型铁多金属矿床为代表(图1b和表1;Zheng et al., 2015)。该成矿带的矿化类型以矽卡岩型为主,与区域内中酸性侵入岩密切相关,其成矿岩浆大多具有壳幔混源特征(Hou et al., 2009)。目前的研究表明,该成矿带内的矿床成矿时代跨度较大($65\sim45\text{ Ma}$),制约了探讨这些矿床的形成过程与印度-欧亚大陆碰撞作用之间的内在联系。目前对矽卡岩型矿床成矿年龄的测定除了通过成矿岩体的锆石U-Pb年龄来间接限定以外,主要是利用辉钼矿Re-Os和热液云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年等方法来限定(赵振华等,2019)。但是,冈底斯带矽卡岩型铁多金属矿床中辉钼矿并不是很发育(如洛巴堆、恰功、龙马拉等);并且青藏高原后期强烈的隆升剥蚀作用会使

热液蚀变矿物的Ar-Ar年龄发生重置(Chiaradia et al., 2013),如蒙亚啊矽卡岩Pb-Zn矿床的白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄(约54 Ma; Fu et al., 2017)明显新于辉钼矿的Re-Os年龄(约64 Ma; Wang et al., 2015)。因此,辉钼矿Re-Os和热液云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年对于限定青藏高原冈底斯成矿带的矽卡岩型铁多金属矿床成矿年龄存在一定的局限,寻求新的成矿年龄测试方法显得尤为重要。

石榴子石是矽卡岩型矿床中最常见的蚀变矿物之一,它的地球化学特征已经广泛用于反演热液流体演化过程(Jamtveit et al., 1993; Caddick et al., 2010; Baghban et al., 2016)。近年的研究表明,相较于其他矿物,石榴子石具有较高的U-Pb系统封闭温度($>850^\circ\text{C}$; Mezger et al., 1989),而且钙铁榴石中U、Pb含量较高,完全能够满足LA-ICP-MS的测试矿物元素测试含量范围,使得石榴子石成为了限定矽卡岩型矿床成矿年龄的新测试对象,引起了众多学者的关注(Deng et al., 2017; Gevedon et al., 2018; Fu et al., 2018; Li et al., 2018; Wafforn et al., 2018; Zhang et al., 2018; Zang et al., 2019; Duan et al., 2020)。

洛巴堆(又名加拉普)矽卡岩型铁多金属矿床位于冈底斯北缘多金属成矿带的北侧,其形成被认为主要与矿区内的古新世花岗闪长岩密切相关(付强等,2013)。但是,关于该矿床的成矿年龄并未得到限定,从而制约了矿床形成机制和相应的构造动力学背景的认识。因此,本文在研究详细的矿床地质特征的基础上,对洛巴堆矽卡岩矿床中的石榴子石和花岗闪长岩中的锆石进行了LA-ICP-MS U-Pb同

位素定年,以期能够准确厘定该矿床的成岩成矿时代,探讨矿床形成与印度-欧亚大陆碰撞作用之间的耦合关系。

1 地质背景概况

1.1 区域地质特征

青藏高原主要由不同的陆块及缝合带组成(图1a),从北到南主要为松潘-甘孜地块、羌塘地块、拉萨地块和喜马拉雅地块,4个地块分别由金沙江缝合带、班公湖-怒江缝合带、印度-雅鲁藏布江缝合带分开(Yin et al., 2000; Zhang et al., 2012)。其中,拉萨地体位于西藏南部,是由冈瓦纳大陆裂解并且沿着特提斯洋向北漂移而来。该地块与羌塘地块的北向碰撞标志着晚白垩时期中特提斯洋的关闭(Zhang et al., 2012)。随后,拉萨地块与向北漂移的印度大陆在约 65~50 Ma 碰撞以及伴随新特提斯洋闭合(Ding et al., 2017)。由于新特提斯洋俯冲和印度-欧亚大陆的碰撞,在拉萨地块发育规模宏大的冈底斯岩浆带(图1b),广泛分布着侏罗纪—古近纪的基性-酸性侵入岩和火山岩(Zhu et al., 2015),强烈的岩浆活动也在区域内形成了众多的铜钼金铅锌矿床,成为了中国最重要的成矿带之一(侯增谦等,2006; Zheng et al., 2015)。前人根据冈底斯带上沉积盖层、侵入岩和火山岩的差异(莫宣学等,2003; Zhu et al., 2011),以隆格尔-错麦断裂和噶尔-永珠-嘉黎-波密断裂为界限,自南向北将其划分为南、中、北3个亚带。南冈底斯带出露的地层以上三叠统砂质板岩、砂岩及白垩系火成岩为主;中冈底斯带则以石炭纪一二叠纪沉积岩和晚侏罗世—早白垩世火山-沉积岩地层为主要出露地层;北冈底斯带广泛分布奥陶系沉积岩和变质岩、石炭系板岩以及二叠系沉积岩地层(莫宣学等,2005)。新生代以来经历了印度-欧亚大陆的碰撞,促使该区域形成了一系列逆冲断裂和推覆构造(付强,2013)。

冈底斯北缘多金属成矿带位于中拉萨地体,主要沿着洛巴堆-米拉山断层分布,南、北分别以雅鲁藏布江缝合带和米拉山-松多断裂为界(Zheng et al., 2015)。根据已发表的矿床数据发现,带内的矿床成矿年龄分布在 65~45 Ma(表1)。这些矿床与带内广泛发育的中-酸性侵入体有关,主要以花岗闪长岩、二长花岗岩和花岗斑岩为主。由于该成矿带沿着洛巴堆-米拉山断层发育,所以这些矿床在不同程度上

均受到断层的影响。此外,在该区域内有1条东西走向的大断裂(旁多-措勤逆冲推覆系),并发育有多条次级断裂带,对于成矿带上的矿床的形成及保存起着很大的作用。

1.2 矿床地质特征

洛巴堆铁多金属矿床位于林周县春堆乡,分布在冈底斯岩浆弧的北侧,地处冈底斯-念青唐古拉复合岩浆弧的东部。该矿床位于冈底斯北缘多金属成矿带内,是该带上的代表性矽卡岩型矿床(图1b)。矿区主要出露二叠纪—侏罗纪地层,以下二叠统洛巴堆组紫红色砾岩、碎屑砂岩及含生物碎屑灰岩和下侏罗统甲拉浦组碎屑砂岩及板岩为主,此外,还有上三叠统麦隆岗组灰岩和大理岩及始新统帕那组的流纹岩和凝灰岩分布(付强等,2013)。矿区内的侵入岩浆岩主要为花岗闪长岩,岩体主要以岩株状侵入到了下三叠统麦隆岗组灰岩中,并在接触带部位发育了大量的矽卡岩,与铁-锌的矿化有密切的共生联系(图2)。

洛巴堆铁多金属矿床的矿体主要赋存于花岗闪长岩和麦隆岗组灰岩接触带附近的矽卡岩中。矿床内发育1条近东西向的逆断层,倾向北,倾角 50°(Zheng et al., 2015),矿体在一定程度上受到了该断层的控制。目前的勘查表明,矿床主要发育有9条矿体,矿体由于受到断层的影响以近东西走向为主;形态以透镜状、瘤状、似层状为主,少量以脉状产出;大小不一,长约 10~100 m、宽 1.5~20 m(图2);矿体中铁的品位都比较高,平均品位介于 40%~66%,铁矿石储量可达 60 万吨,金属资源储量约为 28 万吨(付强,2013)。金属矿物主要有磁铁矿、褐铁矿、闪锌矿等,含少量的黄铁矿和黄铜矿;脉石矿物主要有石榴子石、阳起石、绿帘石等,还有一些透辉石、绿泥石、方解石和石英等。

矿床中的围岩蚀变有矽卡岩、大理岩化、绿帘石化等,与成矿有关的主要为矽卡岩。花岗闪长岩与灰岩地层的接触部位及其周边形成了钙质矽卡岩,厚约 10~30 m。根据矿物共生关系及相互交代关系等,该矿床的成矿作用可以分为4个阶段:①早期矽卡岩阶段:主要形成了石榴子石、透辉石等无水矿物,其中石榴子石晶型较好,分布在各种类型的矽卡岩中(图3b~d);透辉石则呈细粒状分布;②退化蚀变阶段:主要形成的是以绿帘石、透闪石为主的含水矿物,显微镜下可见绿帘石穿插于石榴子石之中(图3c);同时,在此阶段形成了磁铁矿,常沿石榴子

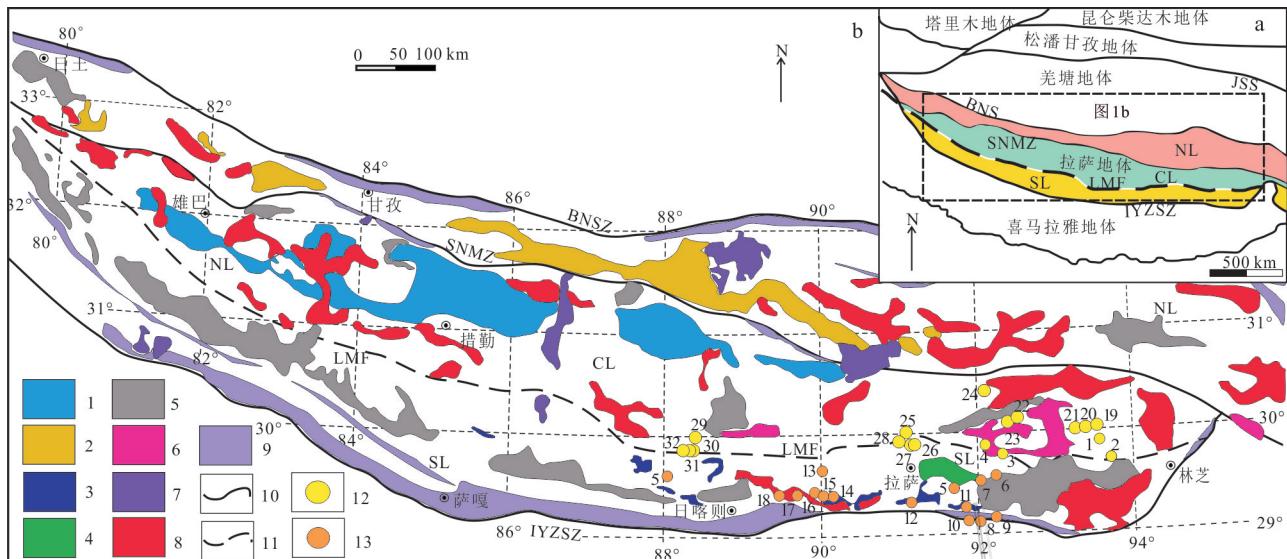


图1 拉萨地体地质简图(a)和冈底斯成矿带地质图及典型矿床分布图(b)(据Zhu et al., 2015修改)

图1b为图1a中的红色虚线方框所框出的区域;NL—北拉萨地体;CL—中拉萨地体;SL—南拉萨地体;JSS—金沙江缝合带;BNSZ—班公湖-怒江缝合带;SNMZ—狮泉河-纳木错蛇绿岩混杂岩带;LMF—洛巴堆-米拉山断裂带;IYZSZ—印度河-雅鲁藏布江缝合带
1—下白垩纪泽东组;2—下白垩纪多尼组;3—上侏罗纪一下白垩纪桑日群;4—下侏罗统叶巴组;5—晚白垩世岩浆岩;6—早白垩世岩浆岩;
7—早侏罗世岩浆岩;8—晚三叠世岩浆岩;9—蛇绿岩套;10—缝合带;11—断裂带;12—矽卡岩型矿床;13—斑岩型矿床

图1b中数字所代表冈底斯成矿带典型矿床:1—沙让斑岩型钼矿;2—汤不拉斑岩型钼矿;3—帮普斑岩型钼矿;4—哈海岗矽卡岩型钨钼多金属矿;5—朱诺斑岩型铜钼矿;6—甲玛斑岩-矽卡岩型铜多金属矿;7—驱龙斑岩型铜钼矿;8—努日矽卡岩型铜钨钼矿;9—冲木达矽卡岩型铜金矿;10—明则斑岩型铜矿;11—拉抗俄斑岩型铜钼矿;12—南木斑岩型铜钼矿;13—白荣斑岩型铜钼矿;14—厅官斑岩型铜钼矿;15—岗讲斑岩型铜钼矿;16—冲江斑岩型铜钼矿;17—南木林斑岩型铜多金属矿;18—吉如斑岩型铜钼矿;19—亚贵拉矽卡岩型铅锌多金属矿;20—洞中松多矽卡岩型铅锌矿;21—洞中拉矽卡岩型铅锌矿;22—蒙亚啊矽卡岩型铅锌矿;23—龙马拉矽卡岩型铅锌矿;24—拉屋矽卡岩型铜铅锌多金属矿;25—勒青拉矽卡岩型铁多金属矿;26—加拉普(即洛巴堆)矽卡岩型铁多金属矿;27—热马矽卡岩型铁矿;28—新嘎果矽卡岩型铅锌矿;29—纳如松多矽卡岩型铅锌矿;30—加多捕勒矽卡岩型铁-铜矿;31—将嘎矽卡岩型铅锌矿;32—恰功矽卡岩型铁矿

Fig. 1 Geological map of Lhasa terrane (a) and geological map (b) of the Gangdese metallogenic belt and distribution of typical deposits (modified after Zhu et al., 2015)

Fig. 1b is the area framed by the red dashed box in Fig. 1a: NL—Northern Lhasa terrane; CL—Central Lhasa terrane; SL—South Lhasa terrane; JSS—Jinshajiang suture zone; BNSZ—Bangong Co-Nujiang suture zone; SNMZ—Shiquan River-Namu Co ophiolite melange zone; LMF—Lobadui-Mila Mountain fault zone; IYZSZ—Indus River-Yarlung Zangbo suture zone

1—Lower Cretaceous Zedong Formation; 2—Lower Cretaceous Duoni Formation; 3—Upper Jurassic-Lower Cretaceous Sangri Group; 4—Lower Jurassic Yeba Formation; 5—Late Cretaceous magmatic rocks; 6—Early Cretaceous magmatic rock; 7—Early Jurassic magmatic rock; 8—Late Triassic magmatic rocks; 9—Ophiolite suite; 10—Suture zone; 11—Fault zone; 12—Skarn deposits; 13—Porphyry deposits

The numbers in Fig. b represent typical deposits in the Gangdese metallogenic belt, as follows: 1—Shangrang porphyry-type Mo deposit; 2—Tongbula porphyry-type Mo-Cu deposit; 3—Bangpu porphyry-type Mo deposit; 4—Hahaigang Skarn-type W-Mo Polymetallic deposit; 5—Zhunuo porphyry-type Cu-Mo deposit; 6—Jiamu porphyry-type Cu polymetallic deposit; 7—Qulong Porphyry-type Cu-Mo deposit; 8—Nuri skarn-type Cu-W-Mo deposit; 9—Chongmuda skarn-type Cu-Au deposit; 10—Mingze porphyry-type Mo deposit; 11—Lakange porphyry-type Cu-Mo deposit; 12—Nanmu porphyry-type Cu-Mo deposit; 13—Bairang porphyry-type Cu-Mo deposit; 14—Tinggong porphyry-type Cu-Mo deposit; 15—Gangjiang porphyry-type Cu-Mo deposit; 16—Chongjiang porphyry-type Cu-Mo deposit; 17—Nanmulin porphyry-type Cu polymetallic deposit; 18—Jiru porphyry-type Cu-Mo deposit; 19—Yaguila skarn-type Pb-Zn polymetallic deposit; 20—Dongzhongsongduo skarn-type Pb-Zn deposit; 21—Dongzhongla skarn-type Pb-Zn deposit; 22—Mengyaa skarn-type Pb-Zn deposit; 23—Longmala skarn-type Pb-Zn deposit; 24—Lawu skarn-type Cu-Pb-Zn polymetallic deposit; 25—Leqingla skarn-type Fe polymetallic deposit; 26—Jialapu skarn-type Fe polymetallic deposit; 27—Rema skarn-type Fe deposit; 28—Xingaguo skarn-type Pb-Zn deposit; 29—Narusongduo skarn-type Pb-Zn deposit; 30—Jiaduobule skarn-type Fe-Cu deposit; 31—Jiangga skarn-type Pb-Zn deposit; 32—Qiagong skarn Fe deposit

石缝隙发育,显示其形成晚于石榴子石的形成(图3b);③石英-硫化物阶段:主要形成石英、闪锌矿、黄

铁矿、黄铜矿等,常见闪锌矿穿插早期的磁铁矿;④碳酸盐阶段:该阶段代表着最晚期热液活动,在

表1 冈底斯北缘成矿带典型矿床概况

Table 1 Overview of typical deposits on the northern margin of Gangdise metallogenic belt

矿床	位置	矿化类型	金属类型	储量	成矿岩体	赋矿地层	矿体形态	矿石矿物	蚀变特征	成矿年龄	资料来源
龙马拉	那曲市嘉黎县	矽卡岩型	铜-铁-铅-锌	铅9.2万吨；锌7.5万吨	花岗斑岩	下二叠统洛巴堆组灰岩、乌鲁龙组大理岩	块状、似条带状	磁铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿	矽卡岩、大理岩化、绿帘石化、绿泥石化、硅化	54 Ma (Ar/Ar)	Wang et al., 2017
纳如松多	谢通门县	矽卡岩型	铅-锌-铜-银	铅-锌>150.6万吨	闪长岩	下二叠统下拉组灰岩	块状、浸染状、网脉状	方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、黄铜矿	矽化、矽卡岩、绿帘石化、绿泥石化	63 Ma (U-Pb)	孙骥, 2013 Zheng et al., 2015
亚贵拉	工布江达县	矽卡岩型	铅-锌-银	铅187万吨；锌117万吨	花岗斑岩	上石炭统一下二叠统来姑组砂岩、灰岩、板岩、大理岩	块状、网脉状	闪锌矿、方铅矿、磁黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿	矽卡岩、大理岩化、硅化	63 Ma (U-Pb)	黄克贤等, 2012 徐净, 2017
洞中拉	墨竹工卡	矽卡岩型	铅-锌-银-金	铅-锌23万吨	花岗斑岩	中二叠统洛巴堆组灰岩、炭质板岩	层状、似层状、透镜状	黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、磁黄铁矿、黄铁矿、黄铁矿	矽化、绿泥石化、绿帘石化、黄铁绢云岩化、矽卡岩	42 Ma (Ar-Ar)	Fei et al., 2018
蒙亚啊	嘉黎县绒乡	矽卡岩型	铅-锌-(银)	铅20万吨；锌26万吨；银204吨	花岗斑岩	上石炭统一下二叠统来姑组细碎屑岩夹灰岩、大理岩	似层状、脉状	闪锌矿、方铅矿、磁黄铁矿、黄铜矿、蓝铜矿	矽卡岩、硅化、大理岩化、绿泥岩化、碳酸盐化	54 Ma (Ar/Ar)	滕磊等, 2017 徐净, 2017
恰功	谢通门县春哲乡	矽卡岩型	铁	2750万吨	二长花岗斑岩	白垩系下统塔克那组灰岩、泥质粉砂岩、粉砂岩	似层状、透镜状、不规则状	磁铁矿、黄铁矿、黄铜矿、斑铜矿、赤铁矿、方铅矿、闪锌矿	矽卡岩化、绿帘石化、绿泥石化	67 Ma (U-Pb)	赵洪飞等, 2014
热马	林周县春堆乡	矽卡岩型	铁	44万吨	花岗岩	白垩系下统塔克那组灰岩、泥质粉砂岩、粉砂岩	透镜状、脉状	磁铁矿、磁黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿	矽卡岩化、绿帘石化、绿泥石化	50 Ma (U-Pb)	Zheng et al., 2015
加多捕勒	谢通门县春哲乡	矽卡岩型	铁-铜-铅-锌-(钼)	大型	黑云母二长花岗岩	中二叠统下拉组微晶灰岩夹薄层砂质板岩	层状、脉状	磁铁矿、黄铜矿、斑铜矿、赤铁矿、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿	矽卡岩化、绿泥石化、绿帘石化	54 Ma (U-Pb)	王彦锋, 2017
勒青拉-列廷冈	堆龙德庆县	矽卡岩型	铁-铜-铅-锌-(钼)	铁809万吨；铅+锌55.3万吨	花岗闪长岩	查曲浦组灰岩、大理岩	透镜状、长条状、囊状、似层状	磁铁矿、黄铜矿、辉钼矿、方铅矿、闪锌矿	矽卡岩化、硅化、大理岩化	51 Ma (Ar/Ar)	周梦林等, 2017
洛巴堆	林周县春堆乡	矽卡岩型	铁	约27.7万吨	花岗闪长岩	下三叠统麦隆岗组灰岩、大理岩、矽卡岩	似层状、脉状、透镜状	磁铁矿、黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿	矽卡岩化、绢云母化	63 Ma (U-Pb)	付强等, 2013

显微镜下可见方解石等矿物沿着石榴子石的裂隙发育(图3d)。结合镜下薄片观察、BSE图以及矿物之间的穿插和叠加关系,可以厘定出主要矿物的形成顺序为石榴子石、磁铁矿、闪锌矿、绿帘石、方解石,并且闪锌矿等硫化物晚于磁铁矿沉淀。

2 样品及分析方法

2.1 样品描述

用于石榴子石主量元素分析和U-Pb定年的样

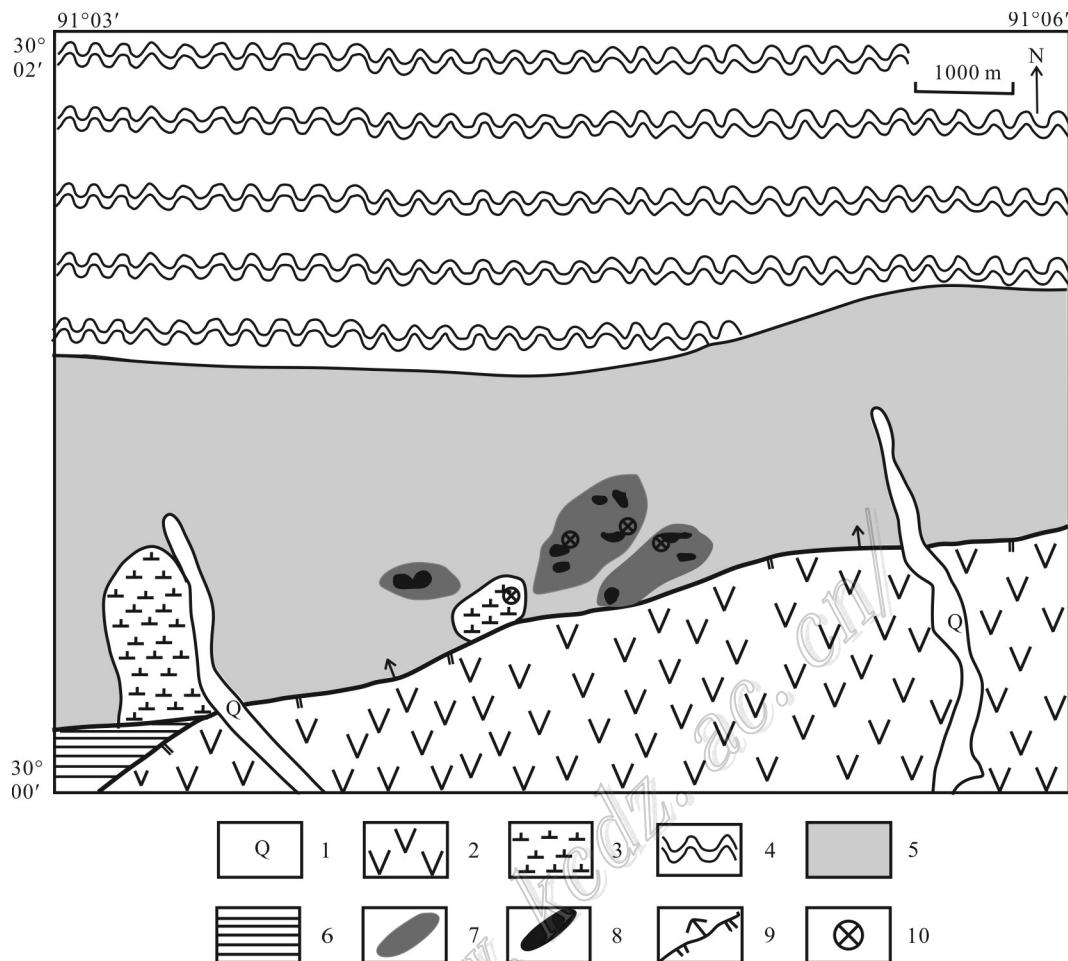


图2 洛巴堆矿区地质图(据付强等,2013修编)

1—第四纪沉积;2—始新统帕那组火山岩;3—古近世花岗闪长岩;4—下侏罗统拉浦组板岩;5—上三叠统麦隆岗组灰岩;6—下二叠统洛巴堆组灰岩;7—矽卡岩;8—磁铁矿矿体;9—逆冲断层;10—采样点

Fig. 2 Geological map of the Luobadui deposit (modified after Fu et al., 2013)

1—Quaternary sediments; 2—Eocene Pana volcanic rocks; 3—Paleogene granodiorite; 4—Slate of the Lower Jurassic Lapu Formation; 5—Limestone of the Upper Triassic Mailonggang Formation; 6—Limestone of the Lower Permian Luobadui Formation; 7—Skarn; 8—Magnetite orebody; 9—Thrust fault; 10—Sampling point

品(LBD-09、LBD-20B、LBD-31A)采自洛巴堆矽卡岩地表(图2),均为粗粒含磁铁矿-闪锌矿石榴子石矽卡岩,矿物组成以石榴子石、闪锌矿、磁铁矿为主。石榴子石呈棕红色,环带明显,粒径在1~2 cm左右,与磁铁矿、闪锌矿等矿物共生。此外,可见石榴子石被后期矿物(透辉石、石英、绿帘石等)穿插。相较于其他样品,LBD-31A碳酸盐化及绿帘石化明显,可见石英、方解石、绿帘石等矿物存在。

锆石U-Pb定年所用的花岗闪长岩(LBD-01)同样采自矿区地表出露的与矽卡岩临近的岩体(图2);岩石呈灰白色,似斑状结构,主要矿物为黑云母、角闪石、石英、斜长石和钾长石等,副矿物以磷灰石、榍

石和锆石为主,其中还可见少量绿泥石、绿帘石等蚀变矿物。

2.2 分析方法

电子探针(EMPA)和LA-ICP-MS U-Pb定年中所采用的石榴子石均为手标本下直接切取的探针片。石榴子石的电子探针化学成分分析是用中国科学院青藏高原研究所的JEOL JXA-8230电子探针测定完成的。该仪器的工作条件为:加速电压15 kV,加速电流20 nA,束斑直径5 μm。测试数据利用ZAF校正处理。在此次测试中,单个样品的元素峰测试时间为10 s,上下背景测量时间为5 s。使用的标样包括钠长石(Na)、刚玉(Al)、橄榄石(Mg)、透辉

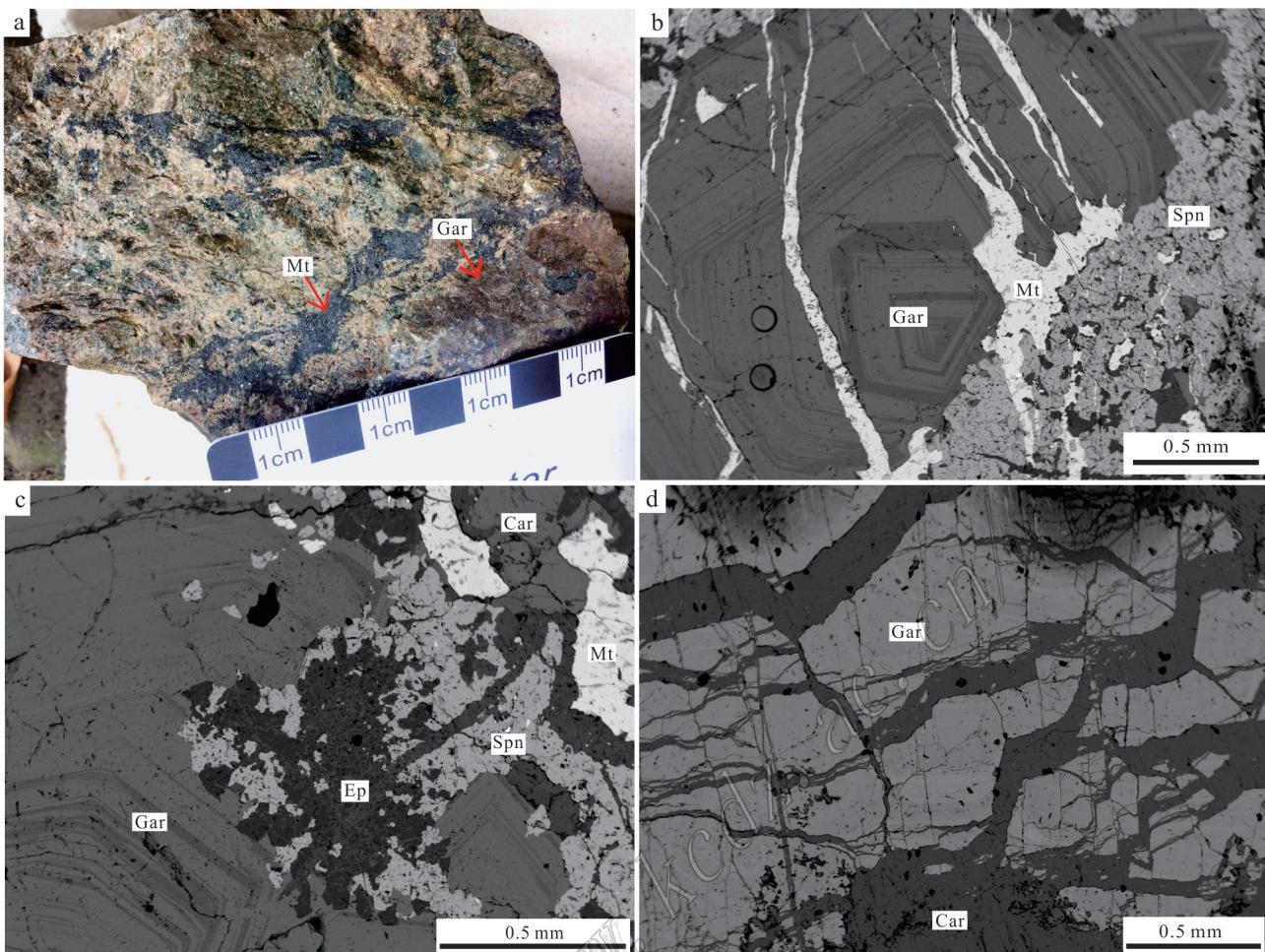


图3 洛巴堆矿床矽卡岩及矿物组合特征

a. 磁铁矿化石榴子石矽卡岩; b. 磁铁矿沿石榴子石裂隙分布,晚期的闪锌矿包裹早期磁铁矿;c. 绿帘石-闪锌矿组合交代早期石榴子石、磁铁矿;d. 最晚期的方解石沿着石榴子石裂隙分布
Gar—石榴子石; Sph—闪锌矿; Mt—磁铁矿; Ep—绿帘石; Car—碳酸盐

Fig. 3 Skarn and mineral assemblage characteristics of the Luobadui deposit

a. Magnetized garnet skarn; b. Magnetite distributed along fissures of early-stage garnet, and early magnetite inclusions in late-stage sphalerite;
c. Epidote-sphalerite replacing early garnet and magnetite; d. Final-stage carbonate distributed along garnet fissures
Gar—Garnet; Sph—Sphalerite; Mt—Magnetite; Ep—Epidote; Car—Carbonate

石(Si, Ca)、正长石(K)、金红石(Ti)、蔷薇辉石(Mn)、赤铁矿(Fe)。

利用扫描电镜对石榴子石和锆石进行仔细观察后,选择成分均匀、环带清晰、无裂缝、无矿物包裹体、无流体包裹体的石榴子石和锆石进行LA-ICP-MS U-Pb定年。实验在中国科学院青藏高原研究所大陆碰撞与隆升重点实验室完成,测试仪器为Agilent 7500a与DUV193 nm ArF-excimer laser的联机。锆石和石榴子石的激光剥蚀束斑直径分别设置为35 μm和120 μm,激光能量密度为5 J/cm²,剥蚀频率为5 Hz。实验采用样品插标样法,采集空白15 s,信

号采集40 s,之后还有45 s的样品室冲洗。选取了锆石标样91500作为石榴子石和锆石测试的外标,并用锆石标样GJ-1监控,每分析10个样品点,插一组标样点(91500, GJ-1, NIST610)。Liu等(2011)提出较小的激光能量能够有效降低不同矿物之间的基体效应;并且Deng等(2017)认为,锆石与石榴子石之间的U-Pb同位素分馏并不存在明显的基体效应,可利用锆石91500作测试标样。测试时所用的能量密度(5 J/cm²)比较小,所以用锆石91500作为石榴子石定年标样具有可行性,前人对石榴子石U-Pb定年方法的研究过程中也进一步表明了锆石91500作为石

石榴子石U-Pb年龄外标的可适用性(Zhang et al., 2018; Wafforn et al., 2018)。元素含量采用国际标准NIST610作为外标。对于测试数据的离线处理主要用Glitter软件完成,相关年龄的图件由Isoplot 4.0软件绘制。

3 测试结果

3.1 石榴子石主量元素成分

石榴子石的主量元素的代表性结果如表2所示。

3个样品中的石榴子石表现出相同的主量元素成分特征, $w(\text{SiO}_2)$ 为30.48%~54.92%, $w(\text{CaO})$ 为11.4%~33.43%, 其 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为0~10.90%, $w(\text{FeO})$ 为3.40%~29.81%。根据主量元素成分计算出该石榴子石端员组成主要为钙铁榴石(33.7%~99.7%)和钙铝榴石(0~65.3%), 此外, 还有少量的镁铝榴石(0.05%~1.5%)和锰铝榴石(0.4%~5.1%)。

3.2 锆石LA-ICP-MS U-Pb测年结果

洛巴堆矽卡岩型铁多金属矿床花岗闪长岩中的锆石单矿物晶形完

好, 主要呈长柱状和短柱状, 无色、透明, 阴极发光图像显示锆石具有明显的环带结构。锆石的Th/U比值介于0.32~0.75之间(表3), 具有岩浆锆石特征(吴元保等, 2004)。

在本次测试中, 通过30个测试点得到了锆石 $^{206}\text{Pb} / {^{238}\text{U}}$ 的加权平均年龄为 $(62.6 \pm 0.8)\text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=0.2, n=30$)(图4), 指示成矿花岗闪长岩形成于古新世。

3.3 石榴子石LA-ICP-MS U-Pb测年结果

石榴子石LA-ICP-MS U-Pb定年所选对象主要来自于LBD-09、LBD-20B、LBD-31A三个矽卡岩样品。3个样品的石榴子石U和Th含量变化较大, $w(\text{U})$ 为 0.43×10^{-6} ~ 28.1×10^{-6} , $w(\text{Th})$ 为 $0 \sim 1.95 \times 10^{-6}$ 。其中, 样品LBD-09石榴子石 $w(\text{U})$ (0.43×10^{-6} ~ 4.69×10^{-6})和 $w(\text{Th})$ ($<0.10 \times 10^{-6}$)较低; 样品LBD-20B中的石榴子石U、Th含量相对较高, $w(\text{U})$ 为 0.85×10^{-6} ~ 28.1×10^{-6} , $w(\text{Th})$ 为 0.03×10^{-6} ~ 1.28×10^{-6} ; 样品LBD-31A中的石榴子石 $w(\text{U})$ 为 0.87×10^{-6} ~ 4.92×10^{-6} , $w(\text{Th})$ 为 0.01×10^{-6} ~ 1.95×10^{-6} (表4)。

表2 洛巴堆矽卡岩型铁多金属矿床石榴子石电子探针数据

Table 2 Representative EMPA data of garnet from the Luobadui deposit

组分	LBD-09			LBD-20B			LBD-31A		
	最大值	最小值	平均值($n=24$)	最大值	最小值	平均值($n=19$)	最大值	最小值	平均值($n=20$)
$w(\text{B})/\%$									
SiO_2	34.71	36.96	38.67	35.84	51.53	37.68	35.21	36.96	34.99
Al_2O_3	0.05	9.87	2.62	3.09	0.44	4.41	0.02	9.87	3.34
FeO	28.20	15.02	22.47	24.54	28.16	22.55	28.28	15.02	19.17
MnO	1.97	2.04	2.17	0.37	0.80	1.04	0.35	2.04	0.34
MgO	0.05	0.22	1.09	0.11	4.94	0.77	0.14	0.22	0.06
CaO	30.94	32.76	30.00	33.17	11.96	30.14	32.57	32.76	32.26
总和	95.92	96.87	-	97.12	97.83	-	96.57	96.87	-
根据12个氧原子计算									
Si	3.035	3.021	3.209	3.029	4.038	3.144	3.042	3.021	2.922
Al	0.005	0.985	0.264	0.326	0.042	0.460	0.002	0.985	0.337
Ti	0	0.026	0.004	0.008	0.002	0.007	0	0.026	0.427
Fe^{3+}	1.623	0.828	1.260	1.370	0.761	1.168	1.619	0.828	1.078
Fe^{2+}	0.439	0.198	0.326	0.364	1.084	0.410	0.424	0.198	0.278
Mn	0.146	0.141	0.150	0.026	0.053	0.073	0.025	0.141	0.024
Mg	0.006	0.026	0.126	0.014	0.577	0.090	0.018	0.026	0.008
Ca	2.899	2.868	2.699	3.003	1.004	2.715	3.015	2.868	2.887
总和	8.152	8.095	-	8.141	7.561	-	8.146	8.095	-
钙铁榴石	99.72	46.53	85.40	81.64	94.33	74.10	99.90	46.53	69.49
钙铝榴石	0	47.12	11.53	16.72	0	22.44	0	47.12	29.06
镁铝榴石	0.25	0.99	1.08	0.57	5.67	0.86	0.10	0.99	0.25
锰铝榴石	0.03	5.30	1.91	1.05	0	2.55	0	5.30	0.96

表3 洛巴堆矿床花岗闪长岩锆石LA-ICP-MS U-Pb分析数据
Table 3 Zircon LA-ICP-MS U-Pb data for granodiorite in the Luobadui deposit

测点 编号	$w(B)/10^{-6}$						同位素比值测量值						同位素比值校正值						$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$					
	Pb*	U	Th	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
LBD-01	4.09	396	176	0.45	0.0487	0.0194	0.0655	0.0257	0.0098	0.0006	0.0030	0.0005	0.0655	0.0257	0.0098	0.0006	0.0006	0.0003	64	25	63	4		
LBD-02	8.09	642	426	0.66	0.0486	0.0095	0.0660	0.0128	0.0099	0.0003	0.0031	0.0002	0.0660	0.0128	0.0099	0.0003	0.0003	65	12	63	2			
LBD-03	3.78	348	221	0.64	0.0511	0.0126	0.0585	0.0166	0.0097	0.0005	0.0023	0.0002	0.0685	0.0166	0.0097	0.0005	0.0005	67	16	62	3			
LBD-04	4.05	372	207	0.55	0.0509	0.0066	0.0693	0.0088	0.0099	0.0002	0.0024	0.0002	0.0693	0.0088	0.0099	0.0002	0.0002	68	8	63	1			
LBD-05	1.87	169	70.5	0.42	0.0507	0.0188	0.0689	0.0252	0.0099	0.0005	0.0038	0.0006	0.0689	0.0252	0.0099	0.0005	0.0005	68	24	63	3			
LBD-06	3.53	348	162	0.47	0.0505	0.0112	0.0676	0.0147	0.0097	0.0004	0.0028	0.0003	0.0676	0.0147	0.0097	0.0004	0.0004	66	14	62	2			
LBD-07	5.25	507	336	0.66	0.0503	0.0067	0.0663	0.0087	0.0096	0.0003	0.0029	0.0002	0.0663	0.0087	0.0096	0.0003	0.0003	65	8	61	2			
LBD-08	1.22	103	73.7	0.72	0.0517	0.0136	0.0710	0.0184	0.0100	0.0004	0.0027	0.0002	0.0710	0.0184	0.0100	0.0004	0.0004	70	17	64	2			
LBD-09	5.52	459	343	0.75	0.0522	0.0090	0.0715	0.0122	0.0099	0.0003	0.0034	0.0002	0.0715	0.0122	0.0099	0.0003	0.0003	70	12	64	2			
LBD-10	2.64	249	123	0.50	0.0513	0.0114	0.0696	0.0152	0.0098	0.0004	0.0022	0.0003	0.0696	0.0152	0.0098	0.0004	0.0004	68	14	63	2			
LBD-11	4.31	383	276	0.72	0.0519	0.0085	0.0709	0.0115	0.0099	0.0003	0.0030	0.0002	0.0709	0.0115	0.0099	0.0003	0.0003	70	11	63	2			
LBD-12	2.69	242	118	0.49	0.0495	0.0105	0.0675	0.0141	0.0099	0.0004	0.0028	0.0003	0.0675	0.0141	0.0099	0.0004	0.0004	66	13	63	2			
LBD-13	3.98	375	191	0.51	0.0508	0.0101	0.0586	0.0134	0.0098	0.0004	0.0025	0.0002	0.0586	0.0134	0.0098	0.0004	0.0004	67	13	63	2			
LBD-14	2.22	220	89.0	0.41	0.0497	0.0159	0.0658	0.0207	0.0099	0.0006	0.0019	0.0005	0.0658	0.0207	0.0096	0.0006	0.0006	65	20	62	4			
LBD-15	3.86	364	188	0.52	0.0501	0.0062	0.0663	0.0081	0.0096	0.0002	0.0024	0.0002	0.0663	0.0081	0.0096	0.0002	0.0002	65	8	62	1			
LBD-16	3.23	306	148	0.48	0.0499	0.0109	0.0576	0.0146	0.0098	0.0003	0.0025	0.0002	0.0576	0.0146	0.0098	0.0003	0.0003	66	14	63	2			
LBD-17	2.79	251	165	0.66	0.0520	0.0071	0.0714	0.0095	0.0099	0.0003	0.0025	0.0002	0.0714	0.0095	0.0099	0.0003	0.0003	70	9	64	2			
LBD-18	2.92	304	97.9	0.32	0.0505	0.0119	0.0695	0.0161	0.0100	0.0004	0.0025	0.0003	0.0695	0.0161	0.0100	0.0004	0.0004	68	15	64	3			
LBD-19	2.78	283	104	0.37	0.0515	0.0126	0.0686	0.0165	0.0097	0.0004	0.0034	0.0004	0.0686	0.0165	0.0097	0.0004	0.0004	67	16	62	3			
LBD-20	2.80	273	107	0.39	0.0479	0.0114	0.0657	0.0155	0.0100	0.0003	0.0022	0.0003	0.0657	0.0155	0.0100	0.0003	0.0003	65	15	64	2			
LBD-21	3.35	307	184	0.60	0.0470	0.0136	0.0626	0.0179	0.0097	0.0005	0.0024	0.0003	0.0626	0.0179	0.0097	0.0005	0.0005	62	17	62	3			
LBD-22	3.58	327	167	0.51	0.0489	0.0077	0.0653	0.0101	0.0097	0.0003	0.0026	0.0002	0.0653	0.0101	0.0097	0.0003	0.0003	64	10	62	2			
LBD-23	4.46	355	226	0.64	0.0501	0.0098	0.0675	0.0129	0.0098	0.0004	0.0028	0.0003	0.0675	0.0129	0.0098	0.0004	0.0004	66	12	63	2			
LBD-24	3.72	340	151	0.44	0.0494	0.0106	0.0669	0.0142	0.0098	0.0003	0.0023	0.0002	0.0669	0.0142	0.0098	0.0003	0.0003	66	14	63	2			
LBD-25	0.91	81.1	53.9	0.67	0.0502	0.0320	0.0648	0.0411	0.0094	0.0006	0.0023	0.0005	0.0648	0.0411	0.0094	0.0006	0.0006	64	39	60	4			
LBD-26	3.96	359	179	0.50	0.0494	0.0077	0.0666	0.0103	0.0098	0.0003	0.0028	0.0002	0.0666	0.0103	0.0098	0.0003	0.0003	65	10	63	2			
LBD-27	3.33	317	152	0.48	0.0495	0.0145	0.0662	0.0193	0.0097	0.0004	0.0021	0.0004	0.0662	0.0193	0.0097	0.0004	0.0004	65	18	62	2			
LBD-28	2.70	247	123	0.50	0.0499	0.0142	0.0671	0.0188	0.0098	0.0005	0.0025	0.0003	0.0671	0.0188	0.0098	0.0005	0.0005	66	18	63	3			
LBD-29	3.03	276	134	0.48	0.0518	0.0139	0.0694	0.0183	0.0097	0.0005	0.0024	0.0003	0.0694	0.0183	0.0097	0.0005	0.0005	68	17	62	3			
LBD-30	0.82	80.1	42.9	0.53	0.0506	0.0102	0.0675	0.0133	0.0097	0.0004	0.0023	0.0002	0.0675	0.0133	0.0097	0.0004	0.0004	66	13	62	2			

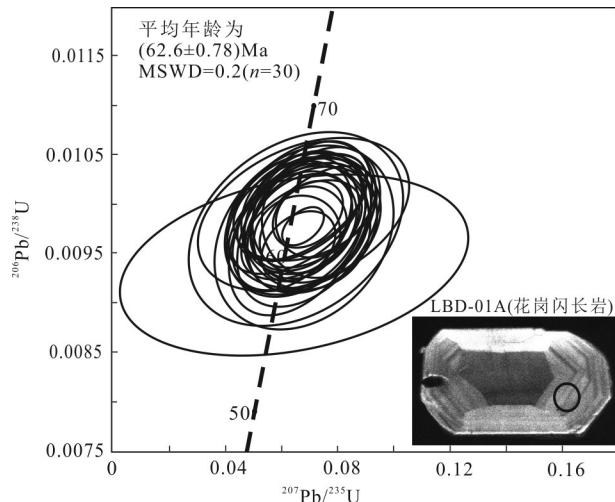


图4 洛巴堆矿床中花岗闪长岩中锆石U-Pb年龄

Fig. 4 U-Pb age of zircon in granodiorite from the Luobadui deposit

3个样品(LBD-09、LBD-20B、LBD-31A)中的石榴子石 $w(U)$ 平均值在 $1.8 \times 10^{-6} \sim 3.7 \times 10^{-6}$ 之间,且以钙铁榴石-钙铝榴石为主。3个样品的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 和 $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ 同位素比值进行谐和曲线作图,94个测试点整体较均匀分布在谐和线上及附近(图5),并获得下交点年龄为 $(62.7 \pm 2.3)\text{ Ma}$ (MSWD=1.01, $n=94$)。

4 讨 论

4.1 石榴子石成分对矽卡岩形成的制约

根据主要化学成分的不同组成,石榴子石可以分为钙铝榴石($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$)、钙铁榴石($\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$)、锰铝榴石($\text{Mn}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$)、铁铝榴石($\text{Fe}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$)以及镁铝榴石($\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$)等。矽卡岩矿床中出现最多的石榴子石为钙铝铁榴石,是钙铝榴石($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$)和钙铁榴石($\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$)的固溶体(图7a~d)。本次研究的洛巴堆矿床中石榴子石也以钙铝铁榴石为主,这与世界范围矽卡岩型Fe矿床中石榴子石成分一致(图6, Meinert et al., 2005)

本次研究的洛巴堆矿床中石榴子石环带结构明显,并且在BSE图(图7a、b)中,石榴子石的环带呈现出明暗相间的特征。通过对样品LBD-09和LBD-20B中具有比较典型环带的石榴子石颗粒从核部到边部进行电子探针分析,结果显示石榴子石环带的明暗关系与Fe含量有关,环带暗色部分的 $w(\text{Fe})$ 较少

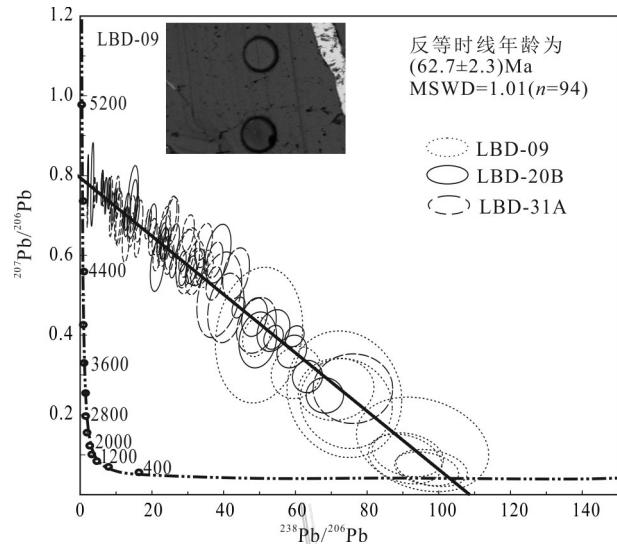


图5 洛巴堆矿床矽卡岩中石榴子石U-Pb年龄

Fig. 5 U-Pb age of garnet in skarn from the Luobadui deposit

(14.3%~20.1%),以富铝钙铁榴石为主;而环带的亮色部分的 $w(\text{Fe})$ 相对较高(25.7%~28%),主要是钙铁榴石,并且 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 也相对更高一些。总体上显示出,钙铁榴石和富铝钙铁榴石含量交替变化的特征,对应了石榴子石中 FeO_t 和 Al_2O_3 含量具有相反的变化趋势特征(图7b)。这种成分变化表明,石榴子石在结晶生长过程中流体成分及物理化学环境等可能呈幕式变化,而这种变化则可能是由成矿流体化学成分的自身再平衡造成的(Holten et al., 2000),也可能是由于石榴子石在生长过程中流体流量的改变而引起生长速率改变造成的(Jamtveit et al., 1993; Jamtveit, 1999)。

矽卡岩在形成过程中氧化还原环境、成矿流体的酸碱度变化对矽卡岩型矿床及矿化类型的形成具有重要的作用,而石榴子石的成分与成矿流体成分、温度、pH值以及氧逸度密切相关,因此,石榴子石成分反映出矽卡岩形成时的氧逸度等特征。Kwak (1994)和Lu等(2003)都认为,钙铁榴石常形成于氧化环境,而钙铝榴石则通常形成于还原环境。本次研究显示,洛巴堆矿床中石榴子石主要以钙铁榴石为主,其成矿流体具有较高的氧逸度,而这则为后期磁铁矿的沉淀提供了有利条件。

4.2 石榴子石U-Pb年代学及意义

4.2.1 元素U进入石榴子石的替代机制

元素U在石榴子石中的存在方式对于石榴子石U-Pb年代学而言起着至关重要的作用,决定了U-Pb

表4 洛巴堆矽卡岩铁矿床石榴子石 LA-ICP-MS U-Pb 分析数据

Table 4 Garnet LA-ICP-MS U-Pb data from the Luobadui deposit

测点编号	$w(B)/10^{-6}$		同位素比值					
	U	Th	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
LBD-09-01	1.68	0.04	0.2643	0.0614	0.5093	0.1080	0.0140	0.0014
BD-09-02	1.93	0.04	0.3064	0.0519	0.6986	0.1067	0.0165	0.0013
LBD-09-03	1.37	0.01	0.1261	0.0849	0.1818	0.1203	0.0105	0.0013
LBD-09-04	1.44	0.05	0.2285	0.0849	0.4237	0.1502	0.0135	0.0015
LBD-09-05	0.86	0.03	0.2519	0.1192	0.4702	0.2126	0.0135	0.0019
LBD-09-06	1.80	0.04	0.6043	0.0607	2.1551	0.1754	0.0259	0.0016
LBD-09-07	0.64	-	0.4003	0.1367	1.1014	0.3341	0.0200	0.0032
LBD-09-08	2.84	-	0.0894	0.0438	0.1358	0.0658	0.0110	0.0008
LBD-09-09	3.37	-	0.1002	0.0392	0.1510	0.0582	0.0109	0.0008
LBD-09-10	3.16	-	0.3954	0.0394	1.1046	0.0970	0.0203	0.0010
LBD-09-11	4.31	-	0.0670	0.0325	0.0941	0.0452	0.0102	0.0007
LBD-09-12	4.59	0.01	0.0649	0.0296	0.0926	0.0419	0.0103	0.0006
LBD-20B-01	0.85	0.30	0.8279	0.0239	67.759	1.9944	0.5935	0.0167
LBD-20B-02	4.54	0.15	0.7016	0.0434	7.2291	0.3617	0.0747	0.0033
LBD-20B-03	1.09	0.27	0.7779	0.0761	28.939	2.4478	0.2698	0.0211
LBD-20B-04	28.1	1.28	0.5638	0.0276	2.4918	0.1016	0.0321	0.0010
LBD-20B-05	1.79	0.18	0.7331	0.0742	6.7678	0.5405	0.0670	0.0047
LBD-20B-06	6.99	0.07	0.7343	0.0442	6.6240	0.3192	0.0654	0.0028
LBD-20B-07	8.16	0.72	0.7581	0.0275	13.966	0.4311	0.1336	0.0038
LBD-20B-08	4.23	0.76	0.7767	0.0209	16.831	0.4013	0.1571	0.0035
LBD-20B-09	2.32	-	0.4244	0.0572	1.1851	0.1359	0.0203	0.0015
LBD-20B-10	4.28	1.08	0.5953	0.0238	3.2819	0.1062	0.0400	0.0011
LBD-20B-11	1.54	0.23	0.5008	0.0888	1.7703	0.2582	0.0256	0.0027
LBD-20B-12	1.41	1.08	0.6158	0.0238	3.5743	0.1159	0.0421	0.0011
LBD-20B-13	4.48	1.04	0.6866	0.0247	4.8797	0.1420	0.0515	0.0013
LBD-20B-14	1.50	0.39	0.6850	0.0294	10.663	0.3798	0.1129	0.0035
LBD-20B-15	4.95	0.17	0.5605	0.0278	2.2566	0.0915	0.0292	0.0009
LBD-20B-16	1.04	0.03	0.7511	0.0367	11.748	0.4646	0.1134	0.0041
LBD-20B-17	5.15	0.23	0.6246	0.0456	2.4860	0.1451	0.0289	0.0014
LBD-20B-18	4.77	0.99	0.5657	0.0385	2.2234	0.1232	0.0285	0.0012
LBD-20B-19	5.32	0.20	0.5768	0.0254	2.6892	0.0974	0.0338	0.0010
LBD-20B-20	3.07	0.45	0.6346	0.0312	5.3944	0.2165	0.0616	0.0021
LBD-20B-21	1.15	0.04	0.7049	0.0228	41.366	1.2728	0.4255	0.0122
LBD-20B-22	1.08	0.05	0.6921	0.0544	8.5370	0.5429	0.0895	0.0049
LBD-20B-23	1.20	0.10	0.7587	0.0287	24.382	0.8022	0.2331	0.0071
LBD-20B-24	1.24	0.54	0.6851	0.0513	6.4496	0.3889	0.0683	0.0035
LBD-20B-25	2.38	0.04	0.5515	0.0214	2.6268	0.0855	0.0346	0.0009
LBD-20B-26	0.69	0.03	0.4680	0.0711	1.5791	0.2055	0.0245	0.0020
LBD-20B-27	2.78	0.11	0.2657	0.0677	0.4807	0.1137	0.0131	0.0013
LBD-20B-28	5.34	0.35	0.7452	0.0422	9.6749	0.4428	0.0942	0.0039
LBD-20B-29	2.64	0.40	0.6863	0.0485	3.6544	0.2044	0.0386	0.0018
LBD-20B-30	4.35	0.39	0.5948	0.0343	3.2773	0.1542	0.0400	0.0015
LBD-20B-31	4.86	0.72	0.6565	0.0368	2.9776	0.1347	0.0329	0.0012
LBD-20B-32	4.74	0.48	0.7364	0.0206	9.9481	0.2322	0.0980	0.0021
LBD-31A-01	3.31	0.91	0.6752	0.0378	3.8797	0.1729	0.0417	0.0016
LBD-31A-02	4.92	0.21	0.5591	0.0473	2.4009	0.1675	0.0311	0.0016
LBD-31A-03	2.52	0.55	0.7554	0.0296	12.524	0.4144	0.1202	0.0036

续表 4

Continued Table 4

测点编号	$w(B)/10^{-6}$		同位素比值					
	U	Th	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
LBD-31A-04	2.98	0.89	0.6859	0.0420	5.6549	0.2811	0.0598	0.0025
LBD-31A-05	4.61	0.58	0.6302	0.0316	3.6720	0.1506	0.0423	0.0015
LBD-31A-06	3.15	0.40	0.6459	0.0372	4.3384	0.2044	0.0487	0.0019
LBD-31A-07	2.32	0.63	0.5919	0.0601	2.7513	0.2286	0.0337	0.0021
LBD-31A-08	4.17	0.26	0.5699	0.0375	2.3770	0.1291	0.0303	0.0013
LBD-31A-09	3.33	0.60	0.5545	0.0526	1.7490	0.1383	0.0229	0.0013
LBD-31A-10	2.78	0.47	0.5759	0.0540	3.6431	0.2774	0.0459	0.0028
LBD-31A-11	3.56	1.95	0.7549	0.0230	15.305	0.4076	0.1470	0.0036
LBD-31A-12	4.72	0.17	0.6400	0.0301	4.1351	0.1615	0.0469	0.0015
LBD-31A-13	3.35	0.05	0.6975	0.0410	3.7433	0.1749	0.0389	0.0016
LBD-31A-14	4.29	0.01	0.5863	0.0678	2.6677	0.2505	0.0330	0.0024
LBD-31A-15	4.34	0.06	0.5805	0.0451	2.4639	0.1578	0.0308	0.0015
LBD-31A-16	2.92	0.83	0.6809	0.0385	4.6061	0.2108	0.0491	0.0019
LBD-31A-17	2.20	2.28	0.7534	0.0217	12.110	0.3008	0.1166	0.0027
LBD-31A-18	2.60	0.42	0.6826	0.0176	6.3489	0.1415	0.0675	0.0014
LBD-31A-19	2.28	0.05	0.7381	0.0226	10.082	0.2618	0.0991	0.0023
LBD-31A-20	3.04	0.39	0.6389	0.0201	3.6368	0.0975	0.0413	0.0009
LBD-31A-21	1.22	0.42	0.7118	0.0299	6.0980	0.2104	0.0622	0.0019
LBD-31A-22	1.99	0.94	0.6367	0.0345	3.3185	0.1413	0.0378	0.0014
LBD-31A-23	2.26	0.31	0.6364	0.0531	3.7088	0.2489	0.0423	0.0023
LBD-31A-24	3.87	0.08	0.6892	0.0144	7.6531	0.1442	0.0806	0.0014
LBD-31A-25	2.34	0.39	0.6717	0.0236	4.8594	0.1411	0.0525	0.0013
LBD-31A-26	3.30	0.46	0.6977	0.0160	7.6556	0.1553	0.0796	0.0015
LBD-31A-27	3.36	2.24	0.5702	0.0205	3.0055	0.0926	0.0382	0.0009
LBD-31A-28	1.80	0.98	0.5884	0.0370	2.1493	0.1087	0.0265	0.0011
LBD-31A-29	3.40	0.01	0.2491	0.0342	0.5019	0.0647	0.0146	0.0007
LBD-31A-30	4.88	0.21	0.3974	0.0210	0.9128	0.0421	0.0167	0.0005
LBD-31A-31	1.22	0.08	0.5993	0.0301	3.8167	0.1582	0.0462	0.0015
LBD-31A-32	4.32	0.07	0.6066	0.0163	3.6682	0.0848	0.0439	0.0009
LBD-31A-33	3.58	0.08	0.6548	0.0205	3.8497	0.1011	0.0427	0.0010
LBD-31A-34	3.41	0.22	0.7221	0.0121	13.571	0.2170	0.1364	0.0021
LBD-31A-35	2.41	0.70	0.7575	0.0174	21.019	0.4392	0.2013	0.0040
LBD-31A-36	3.48	1.14	0.6268	0.0194	3.8542	0.1006	0.0446	0.0010
LBD-31A-37	2.73	1.32	0.6930	0.0234	7.2205	0.2026	0.0756	0.0019
LBD-31A-38	4.14	0.15	0.4694	0.0208	1.4579	0.0555	0.0225	0.0006
LBD-31A-39	0.60	0.05	0.7699	0.0333	16.445	0.5945	0.1550	0.0052
LBD-31A-40	3.22	0.21	0.5846	0.0198	2.7979	0.0797	0.0347	0.0008
LBD-31A-41	2.98	0.84	0.6501	0.0542	6.8234	0.4661	0.0761	0.0042
LBD-31A-42	0.93	0.03	0.3880	0.0564	1.0751	0.1384	0.0201	0.0014
LBD-31A-43	0.74	0.25	0.7009	0.0573	8.9699	0.5941	0.0928	0.0051
LBD-31A-44	0.81	0.03	0.7147	0.0327	10.501	0.3935	0.1066	0.0035
LBD-31A-45	2.40	0.02	0.4453	0.0395	1.2568	0.0955	0.0205	0.0010
LBD-31A-46	3.33	-	0.4118	0.0426	1.0489	0.0931	0.0185	0.0010
LBD-31A-47	4.72	0.77	0.3588	0.0330	0.8355	0.0678	0.0169	0.0008
LBD-31A-48	4.33	0.16	0.3947	0.0240	1.0048	0.0536	0.0185	0.0006
LBD-31A-49	3.96	0.03	0.2963	0.0315	0.6423	0.0631	0.0157	0.0007
LBD-31A-50	3.65	0.08	0.5301	0.0342	1.9443	0.1040	0.0266	0.0010

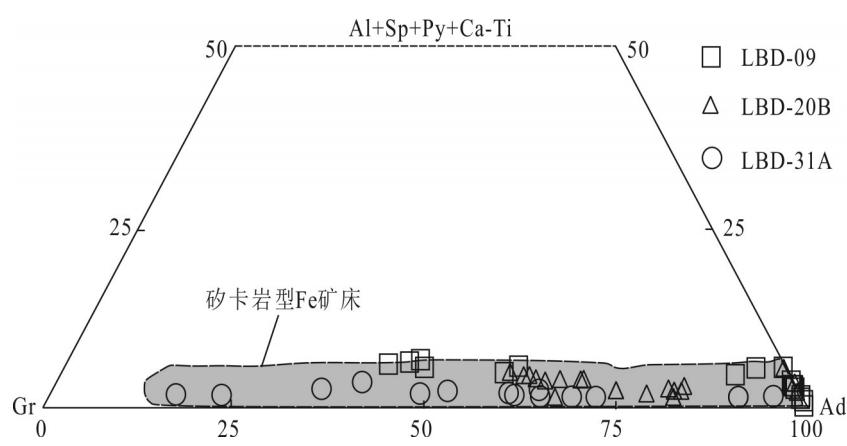


图6 洛巴堆矿床石榴子石样品类型分布三角图(底图据Meinert et al., 2005)

Gr—钙铝榴石; Ad—钙铁榴石; Al—铁铝榴石; Sp—锰铝榴石; Py—镁铝榴石; Ca-Ti—钙钛榴石

Fig. 6 Triangular diagram of garnet classification from the Luobadui deposit (base map after Meinert et al., 2005)

Gr—Grossularite; Ad—Andradite; Al—Almandine; Sp—Spessartite; Py—Pyrope; Ca-Ti—Perovskite

定年的准确性。元素U在石榴子石中有3种存在方式,矿物包裹体、微粒子以及赋存于石榴子石晶格中(Duan et al., 2020)。近年的研究结果表示,石榴子石中的U可能主要存在于矿物晶格中,主要以替代的方式进入(Dewolf et al., 1996)。Rák等(2011)提出随着四面体中二价铁离子的增加会导致十二面体中U含量的减少,该结论也从侧面论证了U主要存在于石榴子石的晶格结构中这一观点。

此外,U与REE表现出了正相关关系,也因此推断U与REE具有相似的替代机制(Smith et al., 2004)。根据离子半径(Ca^{2+} 为 0.99\AA , Mg^{2+} 为 0.66\AA , U^{2+} 为 0.52\AA),认为U进入石榴子石主要是通过替代十二面体中的二价阳离子(Ca、Mg等),其替代过程中的电荷平衡则主要是依靠铁离子进行电荷转移,该机制通过铁铝榴石含量与U含量的正相关关系进一步得到了证实。虽然,近期研究发现U进入石榴子石的方法可能还受到其他因素的影响(如流体成分、水岩比、物理条件、矿物生长动力学和交代动力学等)(Smith et al., 2004),但均与石榴子石的生长密切相关。而且石榴子石中的U与铁铝含量总体呈正相关关系(Duan et al., 2020),因此,本文认为石榴子石的(尤其是钙铁榴石)U-Pb年龄可以真实反映矽卡岩中石榴子石的形成年龄。

4.2.2 石榴子石U-Pb年龄约束矿床成矿年龄

矽卡岩矿床中常常发现侵入体与矽卡岩并未有直接接触关系,因此,导致利用侵入体的年龄来间接限制矽卡岩矿床成矿时代具有不确定性,无法直接

指示成矿时代。矽卡岩型铁多金属矿床中的辉钼矿并不发育(甚至缺失),无法利用辉钼矿Re-Os定年来进行成矿年龄的测定。再者,云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年方法很容易受到后期岩浆和构造的重置(Chiaradia et al., 2013),所以该方法也不十分准确。石榴子石作为矽卡岩矿床中最常见的蚀变矿物,其性质稳定,受后期的岩浆热液和构造活动影响较小,是一种十分理想的矽卡岩定年矿物(Deng et al., 2017)。根据地质特征可以发现,洛巴堆矿床中铁多金属矿化与矽卡岩形成具有密切成因联系,是同一期热液流体演化的产物。因此,本次研究获得的洛巴堆矿床矽卡岩中的石榴子石U-Pb年龄可以很好的代表该矿床的成矿年龄,而且矿区内出露的花岗闪长岩的锆石U-Pb年龄与石榴子石U-Pb年龄一致,均为63 Ma,表明本次研究所获得的石榴子石U-Pb年龄是真实、可靠的,能够准确反映洛巴堆矽卡岩型铁多金属矿床的成矿时代。

丁林等(2017)通过对桑丹林剖面利用周缘前陆盆地中的沉积响应方法,确定了印度-欧亚大陆的初始碰撞时间是在65~63 Ma,对印度大陆与欧亚大陆的初始碰撞时间进行约束。结合本次获得的洛巴堆矿床的成岩成矿年龄也为63 Ma,可以约束该矿床是在印度-欧亚大陆初始碰撞的构造背景下形成的(丁林等,2017)。目前,冈底斯成矿带北侧的矽卡岩型多金属矿床已知的成矿时代变化范围较大(65~45 Ma),甚至是同一矿区不同定年方法也显示出不一致性,如蒙亚啊矿床中辉钼矿Re-Os年龄约

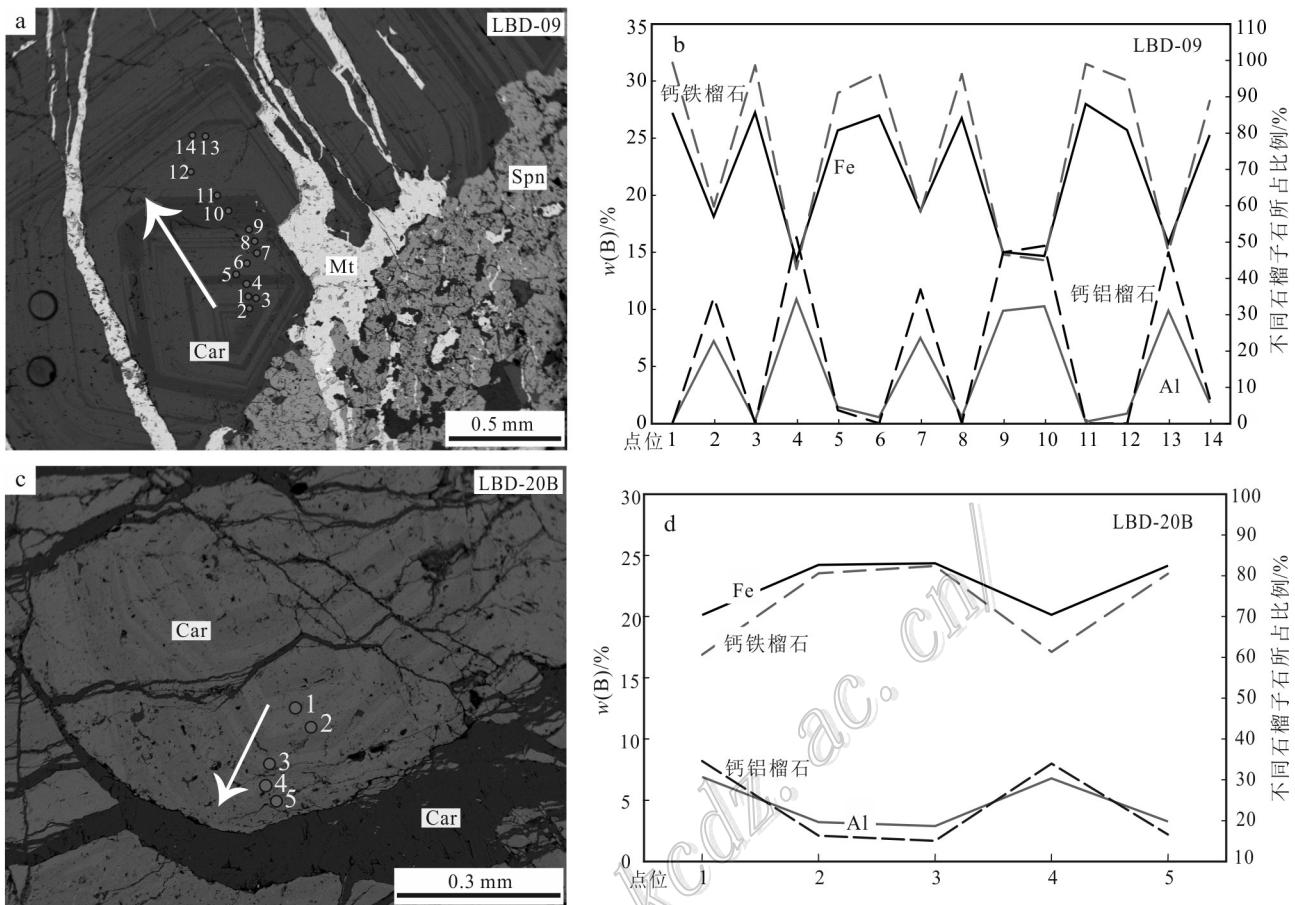


图7 洛巴堆矽卡岩型铁多金属矿床石榴子石颗粒环带成分变化图

a. LBD-09石榴子石环带探针点;b. LBD-09石榴子石环带铁、铝变化图;c. LBD-20B石榴子石环带探针点;d. LBD-20石榴子石环带铁、铝变化图
Gar—石榴子石; Sph—闪锌矿; Mag—磁铁矿; Car—碳酸盐岩; Ad—钙铁榴石; Gr—钙铝榴石(图7a、c中的箭头表示点位方向)

Fig. 7 Composition variation of garnet zone from the Luobadui deposit

a. Garnet zone with probe points of LBD-09; b. Variation of iron and aluminum in garnet zone of LBD-09; c. Garnet zone with probe points of LBD-20B; d. Variation of iron and aluminum in garnet zone of LBD-20B
Gar—Garnet; Sph—Sphalerite; Mag—Magnetite; Car—Carbonate; Ad—Andradite; Gr—Grossularite (Arrow represents the direction of the points in Fig. 7a, c)

为64 Ma,而绢云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄约为55 Ma(Wang et al., 2015; Fu et al., 2017),尤其是绢云母的Ar-Ar年龄易受后期构造事件影响,可能没有反映出真实的成矿时代。因此,通过石榴子石U-Pb定年能够更好地限定冈底斯成矿带北侧的矽卡岩型多金属矿床的成矿作用与青藏高原构造演化之间的内在联系。

4.2.3 石榴子石U-Pb定年的发展前景

Kawk等(1987)测出矽卡岩型矿床中的石榴子石的 $w(\text{U})$,发现其可达到 2.7×10^{-3} ,为后续石榴子石U-Pb定年的出现奠定了基础。Barrie等(2011)和Deng等(2017)分别成功的对不同矿化类型的矽卡岩矿床中石榴子石进行了U-Pb定年,证明了该方法

在矿床成矿学研究中的可行性。

目前,除了对矽卡岩矿床富U钙铁榴石进行定年以外,在对低U钙铝榴石及锰铝榴石的U-Pb定年方面也取得了很大的进展(Li et al., 2018; 2019)。另外,在研究高温高压变质作用及相关矿床的时候,相对于常用的云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年法和锆石U-Pb定年法,石榴子石高封闭温度的优势使得石榴子石U-Pb定年更具有精确性,可以很好的约束变质事件的时间(Chiaradia et al., 2013)。

因此,基于石榴子石U-Pb定年法的优越性,该方法有望在厘定变质作用和高分异花岗岩(含有丰富的石榴子石)等方面提供新的年代学约束。

5 结 论

通过对洛巴堆矽卡岩铁多金属矿床中石榴子石和成矿花岗闪长岩中的锆石进行LA-ICP-MS U-Pb定年,结果显示石榴子石U-Pb年龄为(62.7 ± 2.3) Ma,锆石U-Pb年龄为(62.6 ± 0.8) Ma;两者具有一致性,显示洛巴堆矿床形成于约63 Ma,形成于印度-欧亚大陆初始碰撞的构造背景。

同时,这2种矿物一致的U-Pb年龄也表明石榴子石定年能够准确限定矽卡岩型矿床的成矿时代,尤其是对缺乏其他定年手段或是遭受强烈后期构造活动的矿床具有广泛应用前景。

致 谢 感谢野外工作中西藏林周县钢源矿业有限公司工作人员以及中国科学院青藏高原研究所宋培平、陈耀飞和曾登的支持。感谢匿名审稿专家提出的宝贵审改意见。

References

- Baghban S, Hosseinzadeh M R, Moayyed M, Mokhtari M A A, Gregory D D and Mahmoudi Nia H. 2016. Chemical composition and evolution of the garnets in the Astamal Fe-LREE distal skarn deposit, Qara-Dagh-Sabalan metallogenic belt, Lesser Caucasus, NW Iran[J]. Ore Geology Reviews, 78:166-175.
- Barrie C T. 2011. U-Pb garnet and titanite age for the Bristol Township lamprophyre suite, western Abitibi Subprovince, Canada[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 27(11): 1451-1456.
- Caddick M J, Konopásek J and Thompson A B. 2010. Preservation of garnet growth zoning and the duration of prograde metamorphism[J]. Journal of Petrology, 51(11): 2327-2347.
- Chiaradia M, Schaltegger U, Spikings R, Wotzlaw J F and Ovtcharova M. 2013. How accurately can we date the duration of magmatic-hydrothermal events in porphyry systems?—an invited paper[J]. Econ. Geol., 108(4): 565-584.
- Deng X D, Li J W, Luo T and Wang H Q. 2017. Dating magmatic and hydrothermal processes using andradite-rich garnet U-Pb geochronometry[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 172(9): 71-82.
- Dewolf C P, Zeissler C J, Halliday A N, Mezger K and Essene E J. 1996. The role of inclusions in U-Pb and Sm-Nd garnet geochronology: Stepwise dissolution experiments and trace uranium mapping by fission track analysis[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 60(1): 121-134.
- Ding L, Maksatbek S, Cai F L, Wang H Q, Song P P, Ji W Q, Xu Q, Zhang L Y, Muhammad Q and Upendra B. 2017. Time limit, closure method and process of initial collision between India and Eurasia[J]. Science in China: Earth Science, 47(3): 293-309(in Chinese).
- Duan Z, Gleeson S A, Gao W S, Wang F Y, Li C J and Li J W. 2020. Garnet U-Pb dating of the Yinan Au-Cu skarn deposit, Luxi district, North China Craton: Implications for district-wide coeval Au-Cu and Fe skarn mineralization[J]. Ore Geology Reviews, 118:103310.
- Fei G C, Zhou Y, Deng Y, Chen X, Wen C Q, Yu Q L, Ding F, Zhou X and Huo Y. 2018. Geology and isotope geochemistry of the Dongzhongla Pb-Zn deposit in Tibet: Implications for the origin of the ore-forming fluids and storage condition of Certain Metals[J]. Resource Geology, 68: 227-243.
- Fu Q. 2013. Study on metallogenesis of skarn-type iron (copper) deposits in northern Gangdise, Tibet (master degree thesis)[D]. Tutor: Hou Z Q and Zheng Y C. Beijing: China University of Geosciences. 108P (in Chinese).
- Fu Q, Yang Z S, Zheng Y C, Huang K X, Li Q Y, Li W, Liang W, Sun Q Z and Zhang S. 2013. Zircon U-Pb age, Hf isotope and geochemistry of granodiorite in the Jialapu iron deposit[J]. Geology Deposit, 32(3): 564-578 (in Chinese with English abstract).
- Fu Q, Xu B, Zheng Y C, Yang Z S, Hou Z Q, Huang K X, Liu Y C, Zhang C and Zhao L. 2017. Two episodes of mineralization in the Mengya's deposit and implications for the evolution and intensity of Pb-Zn-(Ag) mineralization in the Lhasa terrane, Tibet[J]. Ore Geology Reviews, 90: 877-896.
- Fu Y, Sun X M, Li D F and Lin H. 2018. U-Pb geochronology and geochemistry of U-rich garnet from the giant Beiya gold-polymetallic deposit in SW China: Constraints on skarn mineralization process[J]. Minerals, 8(4): 128.
- Gevedon M, Seman S, Barnes J D, Lackey J S and Stockli D F. 2018. Unraveling histories of hydrothermal systems via U-Pb laser ablation dating of skarn garnet[J]. Earth and Planetary Science Letters, 498: 237-246.
- Holten T, Jamtveit B and Meakin P. 2000. Noise and oscillatory zoning of minerals[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 64(11): 1893-1904.
- Hou Z Q, Mo X X, Yang Z M, Wang A J, Pan G T, Qu X M and Nie F J. 2006. Metallogenesis in the collision orogenic belt of the Qinghai-Tibet Plateau: Tectonic background, spatial and temporal distribution and main types[J]. Chinese Geology, 33(2): 340-351 (in Chinese).
- Hou Z Q and Cook N J. 2009. Metallogenesis of the Tibetan collisional orogen: A review and introduction to the special issue[J]. Ore Geology Reviews, 36: 2-24.
- Huang K X, Zheng Y C, Zhang S, Li W, Sun Q Z, Li Q Y, Liang W, Fu Q and Hou Z Q. 2012. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geological significance of the two-stage rock mass in Yaguila mining area, Tibet[J]. Rock Minerals Journal of Science, 31(3): 348-360 (in Chinese with English abstract).
- Jamtveit B, Wogelius R and Fraser D. 1993. Zonation patterns of skarn

- garnets: Records of hydrothermal system evolution[J]. *Geology*, 21(2): 113-116.
- Jamtveit B. 1999. Crystal growth and intracrystalline zonation patterns in hydrothermal environments[A]. In: Jamtveit B and Meakin P, eds. *Growth, dissolution and pattern formation in Geosystems*[C]. Kluewer Academic Publishers. 65-84.
- Kwak T A P. 1994. Hydrothermal alteration in carbonate replacement deposits[J]. *Geological Association of Canada, Short Course Notes* 11: 381-402.
- Kwak T. 1987. Rare earth and uranium minerals present as daughter crystals in fluid inclusions, Mary Kathleen U-REE Skarn, Queensland, Australia[J]. *Mineralogical Magazine-Miner Mag*, 51 (363): 665-670.
- Li D F, Fu Y and Sun X M. 2018. Onset and duration of Zn-Pb mineralization in the Talate Pb-Zn (-Fe) skarn deposit, NW China: Constraints from spessartine U-Pb dating[J]. *Gondwana Research*, 63: 117-128.
- Li D F, Tan C Y, Miao F Y, Liu Q F, Zhang Y and Sun X M. 2019. Initiation of Zn-Pb mineralization in the Pingbao Pb-Zn skarn district, South China: Constraints from U-Pb dating of grossular-rich garnet[J]. *Ore Geology Reviews* 107: 587-599.
- Liu Z C, Wu F Y, Guo C L, Zhao Z F, Yang J H and Sun J F. 2011. In situ U-Pb dating of Xenotime by Laser Ablation (LA)-ICP-MS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 56(27): 2948-2956.
- Lu H Z, Liu Y M, Wang C L, Xu Y Z and Li H Q. 2003. Mineralization and fluid inclusion study of the Shizhuyuan W-Sn-Bi-Mo-F skarn deposit, Hunan Province, China[J]. *Econ. Geol.*, 98(5): 955-974.
- Meinert L D, Dipple G and Nicolescu S. 2005. World skarn deposits[J]. *Economic Geology*: 100th Anniversary Volume, 299-336.
- Mezger K, Hanson G N and Bohlen S R. 1989. U-Pb Systematics of garnet: Dating the growth of garnet in the Late Archean Pikwitonei Granulite Domain at Cauchon and Natawhanun Lakes, Manitoba, Canada[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 101 (2): 136-148.
- Mo X X, Zhao Z D, Deng J F, Dong G C, Zhou S, Guo T Y, Zhang S Q and Wang L L. 2003. Volcanic response in the main collision process between India and the Asian continent[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 135-148(in Chinese).
- Mo X X, Dong G C, Zhao Z D, Zhou S, Wang L L, Qiu R Z and Zhang F Q. 2005. Spatiotemporal distribution characteristics and crustal growth and evolution information of granite in Gangdese belt, Tibet[J]. *Geological Journal of Universities*, 11(3): 281-290(in Chinese).
- Rák Z S, Ewing R and Becker U. 2011. Role of Iron in the Incorporation of uranium in Ferric garnet matrices[J]. *Physical Review B*, 84(15): 155128.
- Smith M P, Henderson P, Jeffries T E R, Long J and Williams C T. 2004. The rare earth elements and uranium in garnets from the Beinn an Dubhaich Aureole, Skye, Scotland, UK: Constraints on processes in a dynamic hydrothermal system[J]. *Journal of Petrology*, 45(3): 457-484.
- Sun J. 2013. Genesis of Narusong lead-zinc deposit in the middle section of Gangdese (master degree thesis)[D]. Tutor: Wei Q R. Wuhan: China University of Geosciences. 95p(in Chinese).
- Teng L and Li H F. 2017. The mineralogical characteristics and geological significance of the skarn minerals in the Mengyaa lead-zinc deposit in Tibet[J]. *Geological Review*, 63: 217-218(in Chinese).
- Wafforn S, Seman S, Kyle J R, Stockli D, Leys C, Sonbait D and Cloos M. 2018. Andradite garnet U-Pb geochronology of the big Gossan skarn, ertsberg-grasberg mining district, indonesia[J]. *Econ. Geol.*, 113(3): 769-778.
- Wang L Q, Tang J X, Bagas Leon, Wang Y, Lin X, Li Z and Li Y B. 2017. Early Eocene Longmala skarn Pb-Zn-Cu deposit in Tibet, China: Geochemistry, fluid inclusions, and H-O-S-Pb isotopic compositions[J]. *Ore Geology Reviews*, 88: 99-115.
- Wang L Q, Tang J X, Deng J, Kang H R, Lin X, Cheng W B, Li Z and Zhang Z. 2015. The Longmala and Mengya's skarn Pb-Zn deposits, Gangdese region, Tibet: Evidence from U-Pb and Re-Os geochronology for formation during Early India-Asia collision[J]. *International Geology Review*, 57(14): 1825-1842.
- Wang Y F. 2017. Identifying of metallogenic rock masses and geochemical characteristics of the Gadozhare skarn iron-copper deposit in Tibet (master degree thesis)[D]. Tutor: Sun X and Liu M. Y. Beijing: China University of Geosciences. 74p (in Chinese).
- Wu Y B and Zheng Y F. 2004. Research on zircon genesis mineralogy and its restriction on the interpretation of U-Pb age[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1590-1604(in Chinese).
- Xu J. 2017. Metallogenic mechanism and model of the Paleogene Fe-Cu-Pb-Zn skarn deposit in Nyainqntanglha, Tibet. (PhD thesis)[D]. Tutor: Zheng Y Y. Wuhan: China University of Geosciences. 256p (in Chinese).
- Yang Z S, Hou Z Q, Meng X J, Liu Y C, Fei H C, Tian S H, Li Z Q and Gao W. 2009. Post-collisional Sb and Au mineralization related to the South Tibetan detachment system, Himalayan orogen[J]. *Ore Geology Reviews*, 36(1): 194-212.
- Yin A and Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(1): 211-280.
- Zang Z J, Dong L L, Liu W, Zhao H, Wang X S, Cai K D and Wan B. 2019. Garnet U-Pb and O isotopic determinations reveal a shear-zone induced hydrothermal system[J]. *Scientific Reports*, 9(1): 1-10.
- Zhang Y, Shao Y J, Zhang R Q, Li D F, Liu Z F and Chen H Y. 2018. Dating ore deposit using garnet U-Pb geochronology: Example from the Xinqiao Cu-S-Fe-Au deposit, eastern China[J]. *Minerals*, 8(1): 31.
- Zhang Z M, Dong X, Liu F, Lin Y H, Yan R, He Z Y and Santosh M. 2012. The making of Gondwana: Discovery of 650 Ma HP granulites from the North Lhasa, Tibet[J]. *Precambrian Research*, 212-213: 107-116.
- Zhao H F and Zhong K H. 2014. Geological characteristics and genesis of the Chagong skarn iron deposit in Tibet[J]. *Sichuan Nonferrous*

- Metals,(3): 15-17(in Chinese with English abstract).
- Zhao Z H and Yan S. 2019. Minerals-mineralization and prospecting[J]. Acta Petrologica Sinica, 35(1): 31-68(in Chinese with English abstract).
- Zheng Y C, Fu Q, Hou Z Q, Yang Z S, Huang K X, Wu C D and Sun Q Z. 2015. Metallogeny of the northeastern Gangdese Pb-Zn-Ag-Fe-Mo-W polymetallic belt in the Lhasa Terrane, southern Tibet[J]. Ore Geology Reviews, 70: 510-532.
- Zhou M L, Zhou X K, Lu S Y and Ma W. 2017. Muscovite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age and geology of the Leitingang-Leqingla skarn-type Fe-Cu-Pb-Zn polymetallic deposit in Tibet significance[J]. Journal of Rock Mineralogy, 36: 241-258.
- Zhu D C, Wang Q, Zhao Z D, Chung S L, Cawood P A, Niu Y L, Liu S A, Wu F Y and Mo X X. 2015. Magmatic record of India-Asia collision[J]. Scientific Reports, 5(1): 1-8.
- Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, Mo X X, Chung S L, Hou Z Q, Wang L Q and Wu F Y. 2011. The Lhasa terrane: Record of a microcontinent and its histories of drift and growth[J]. Earth and Planetary Science Letters, 301(1-2): 241-255.
- 附中文参考文献**
- 丁林, Maksatbek S, 蔡福龙, 王厚起, 宋培平, 纪伟强, 许强, 张利云, Muhammad Q, Upendra B. 2017. 印度与欧亚大陆初始碰撞时限、封闭方式和过程[J]. 中国科学: 地球科学, 47(3): 293-309.
- 付强, 杨竹森, 郑远川, 黄克贤, 李秋耘, 李为, 梁维, 孙清钟, 张松. 2013. 加拉普铁矿区花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素及地球化学研究[J]. 矿床地质, 32(3): 564-578.
- 付强. 2013. 西藏冈底斯北部矽卡岩型铁(铜)矿床成矿作用研究(硕士论文)[D]. 导师: 侯增谦, 郑远川. 北京: 中国地质大学. 108 页.
- 侯增谦, 莫宣学, 杨志明, 王安建, 潘桂棠, 曲晓明, 聂凤军. 2006. 青藏高原碰撞造山带成矿作用: 构造背景、时空分布和主要类型[J]. 中国地质, 33(2): 340-351.
- 黄克贤, 郑远川, 张松, 李为, 孙清钟, 李秋耘, 梁维, 付强, 侯增谦. 2012. 西藏亚贵拉矿区两期岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 31(3): 348-360.
- 莫宣学, 董国臣, 赵志丹, 周肃, 王亮亮, 邱瑞照, 张风琴. 2005. 西藏冈底斯带花岗岩的时空分布特征及地壳生长演化信息[J]. 高校地质学报, 11(3): 281-290.
- 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 董国臣, 周肃, 郭铁鹰, 张双全, 王亮亮. 2003. 印度-亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应[J]. 地学前缘, 10(3): 135-148.
- 孙骥. 2013. 冈底斯中段纳如松多铅锌矿床成因研究(硕士论文)[D]. 导师: 魏启荣. 武汉: 中国地质大学. 95 页.
- 滕磊, 李海峰. 2017. 西藏蒙亚啊铅锌矿床矽卡岩矿物学特征及其地质意义[J]. 地质论评, 63: 217-218.
- 王彦锋. 2017. 西藏加多捕勒矽卡岩型铁铜矿床成矿岩体识别及地球化学特征(硕士论文)[D]. 导师: 孙祥, 刘敏院. 北京: 中国地质大学. 74 页.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 49(16): 1590-1604.
- 徐净. 2017. 西藏念青唐古拉古近矽卡岩型铁铜铅锌矿床成因机制与成矿模式(博士论文)[D]. 导师: 郑有业. 武汉: 中国地质大学. 265 页.
- 赵洪飞, 钟康惠. 2014. 西藏恰功矽卡岩型铁矿床地质特征与成因分析[J]. 四川有色金属, (3): 15-17.
- 赵振华, 严爽. 2019. 矿物——成矿与找矿[J]. 岩石学报, 35(1): 31-68.
- 周梦林, 周向科, 卢世银, 马旺. 2017. 西藏列廷冈-勒青拉矽卡岩型 Fe-Cu-Pb-Zn 多金属矿床白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 36(2): 241-25.