

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.040>



西藏安多纳葺矿区石英闪长玢岩成因及地质意义

刘海永^{1,2}, 唐菊兴^{3*}, 王雨², 曾庆高⁴, 赵洪飞², 央宗², 华康⁵, 张鹏⁶

1. 成都理工大学地球科学学院, 四川成都 610059
2. 西藏自治区地质调查院, 西藏拉萨 850000
3. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037
4. 西藏自治区地质矿产勘查开发局, 西藏拉萨 850000
5. 西藏地勘局第二地质大队, 西藏拉萨 850000
6. 四川省国土科学技术研究院, 四川成都 610045

摘要: 纳葺矿区位于南羌塘南缘东段, 是认识班公湖-怒江成矿带构造-岩浆-成矿作用的理想窗口。以纳葺矿区出露的石英闪长玢岩为研究对象, 对其进行了系统的锆石U-Pb定年、全岩地球化学、锆石原位Hf同位素及全岩Sr-Nd同位素研究。结果显示纳葺矿区石英闪长玢岩形成于晚侏罗世(158~155 Ma), 属于钙碱性系列, 具有高Sr(178×10^{-6} ~ 1086×10^{-6})含量以及高Sr/Y(15~82)和(La/Yb)_N(17~34)比值, 亏损重稀土元素(如Yb=1.05×10⁻⁶~1.45×10⁻⁶, Y=10.50×10⁻⁶~14.78×10⁻⁶), 整体呈现出与埃达克质岩石相似的地球化学特征。石英闪长玢岩样品低MgO、Cr、Ni, 高Th和Th/U, 锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在-1.7~4.3之间, (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i比值为0.705 93~0.706 81, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值在-2.67~-0.49之间。结合区域地质资料, 指示其是俯冲背景下加厚下地壳部分熔融的产物。将本文研究结果与南羌塘中西段的同期岩浆作用相结合, 表明班公湖-怒江洋向北俯冲至羌塘地体之下, 在晚侏罗世形成了超过1 200 km的近东西向岩浆弧。纳葺矿区与多龙矿集区内成矿岩体具有相似的锆石Hf同位素组成, 锆石微量元素具有高Ce/Ce⁺、Eu/Eu⁺比值, 全岩微量元素具有较高的Sr/Y、V/Sc比值, 显示纳葺矿区具有较好的成矿潜力。

关键词: 青藏高原; 纳葺矿区; 晚侏罗世; 岩石成因; 成矿潜力; 地球化学。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2022)03-1059-19

收稿日期: 2021-11-23

Petrogenesis and Geological Significance of Quartz Diorite Porphyry in Narong Mining Area, Tibet

Liu Haiyong^{1,2}, Tang Juxing^{3*}, Wang Yu², Zeng Qinggao⁴, Zhao Hongfei², Yang Zong², Hua Kang⁵, Zhang Peng⁶

1. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
2. Tibet Institute of Geological Survey, Lhasa 850000, China
3. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China
4. Tibet Bureau of Geological and Mineral Exploration and Development, Lhasa 850000, China
5. The Second Geological Party, Tibet Bureau of Geological and Mineral Exploration and Development, Lhasa 850000, China
6. Sichuan Institute of Land Science and Technology, Chengdu 610045, China

基金项目: 中国地质调查项目(No. DD20190167); 第二次青藏高原综合科学考察研究典型地区岩石圈组成、演化与深部过程专题(No. 2019QZKK0702)。

作者简介: 刘海永(1987—), 男, 工程师, 在读博士, 从事青藏高原基础地质矿产研究。ORCID: 0000-0002-8413-4115. E-mail: Liuhy_vip@126.com
* 通讯作者: 唐菊兴, E-mail: tangjuxing@126.com

引用格式: 刘海永, 唐菊兴, 王雨, 曾庆高, 赵洪飞, 央宗, 华康, 张鹏, 2022. 西藏安多纳葺矿区石英闪长玢岩成因及地质意义. 地球科学, 47(3): 1059—1077.

Citation: Liu Haiyong, Tang Juxing, Wang Yu, Zeng Qinggao, Zhao Hongfei, Yang Zong, Hua Kang, Zhang Peng, 2022. Petrogenesis and Geological Significance of Quartz Diorite Porphyry in Narong Mining Area, Tibet. *Earth Science*, 47(3): 1059—1077.

Abstract: Narong mining area is located in the southern margin of southern Qiangtang Block, providing an ideal window for understanding the tectonic-magmatic activities and mineralization of Bangong Co-Nujiang metallogenic belt. In this case study, we focus on the quartz diorite porphyries in the Narong mining area and report new zircon U-Pb ages, geochemical, zircon Hf and whole-rock Sr-Nd isotopic data. The results show that the Narong quartz diorite porphyries were emplaced during the Late Jurassic (158–155 Ma). Geochemically, the quartz diorite porphyry samples belong to calc-alkaline series. They are characterized by high Sr (178×10^{-6} – $1 086 \times 10^{-6}$) contents, and high Sr/Y (15–82), $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ (17–34) ratios with depletions of heavy rare earth elements (such as $\text{Yb}=1.05 \times 10^{-6}$ – 1.45×10^{-6} , $\text{Y}=10.50 \times 10^{-6}$ – 14.78×10^{-6}). These geochemical features are generally consistent with those of typical adakitic rocks. Additionally, the studied samples have lower MgO, Cr, Ni but higher Th and Th/U. Their zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values are between –1.7 to +4.3, initial $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$ values are between 0.705 93–0.706 81 and the $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ are between –2.67 to –0.49. These features, along with regional geological information, indicate that they are products of partial melting of thickened lower crust during slab subduction process. In combination with data from the middle and western segments of South Qiangtang, we infer that the Bangong Co-Nujiang Ocean subducted northward beneath the Qiangtang Block, forming a nearly E-W direction magma arc (>1 200 km) during the Late Jurassic. The ore-forming intrusions in the Narong mining area and the Duolong ore concentration area have similar zircon Hf isotopic compositions, and zircon trace elements have high Ce/Ce* and Eu/Eu* ratios, and whole rock trace elements have high Sr/Y and V/Sc ratios, showing positive mineralization potential.

Key words: Tibetan Plateau; Narong mining area; Late Jurassic; petrogenesis; mineralization potential; geochemistry.

0 引言

班公湖–怒江缝合带近东西向横亘于青藏高原中部,东西向延伸超2 000 km,根据区域地质资料,该缝合带内部及其南、北两侧均发育了大量的中生代岩浆岩(Li *et al.*, 2014a, 2014b, 2016b; Fan *et al.*, 2016; Wu *et al.*, 2016; 刘海永等,2019),这些岩浆作用主要集中发生在晚侏罗世和早白垩世中晚期,记录了班公湖–怒江洋盆演化过程的大量信息,是反演班公湖–怒江缝合带构造演化历史的关键所在。近年来,关于这些中生代岩浆岩的成因,一些学者提出班公湖–怒江洋盆北向俯冲模型,强调其于晚侏罗世发生了洋脊俯冲(Li *et al.*, 2016b),并于早白垩世晚期发生了板片断离(Zhu *et al.*, 2016)。然而,南羌塘上现有的弧型岩浆岩资料主要来自于双湖及其以西地区,亟需东部的岩浆岩资料对班公湖–怒江洋盆北向俯冲这一模型提供新的支撑。

不仅如此,近年来在班公湖–怒江缝合带内及其南北两侧先后发现了大量的大型–超大型铜多金属矿床(点),尤以北侧多龙矿集区内铁格隆南、拿若、多不杂、拿顿、地堡那木岗等斑岩型–浅成低温热液型铜金矿床为代表,因此也确立了班公湖–怒江成矿带的重要地位。这些矿床(点)呈带状分布于班公湖–怒江缝合带内及其两侧,时空展布与中生代岩浆岩高度吻合(张璋等,2011;陈华安等,2013;孙嘉,2015;孙振明,2015;祝向平等,2015a, 2015b)。然而,以往关于班公湖–怒江缝合带北侧南羌塘地区的成岩、成矿作用研究主要集中在西

段早白垩世中晚期的岩浆–成矿系统,与白垩纪岩浆–成矿系统相比,南羌塘晚侏罗世岩浆作用同样广泛发育,但除了西部材玛、弗野等地发现有少量的铁多金属矿点外,区域上(尤其是东段)却鲜有该期铜金矿床(点)的报道,这严重制约了班公湖–怒江成矿带晚侏罗世岩浆–成矿作用研究。

纳茸铜矿区行政区划属那曲市安多县管辖,是南羌塘东段鲜见的铜矿。矿区见有侵入岩发育,岩石类型主要为石英闪长玢岩,与成矿作用关系密切,对其成岩–成矿作用开展研究对区域构造演化及找矿标志的建立具有重要意义。然而,目前关于这些侵入岩研究程度较低,直接制约了人们对区域构造背景与成矿潜力的认识。本文首次报道了矿区石英闪长玢岩的锆石U-Pb年龄、Hf同位素组成及全岩地球化学等数据,为班公湖–怒江洋盆演化及构造–岩浆–成矿作用的研究提供了新的约束。

1 地质背景

青藏高原地处阿尔卑斯–喜马拉雅特提斯造山带的东段,是全球典型的洋陆俯冲、陆陆碰撞造山带,它的形成与演化涉及了多个洋盆俯冲消亡与陆陆碰撞过程,并由此形成了青藏高原上近东西向分布的多条构造缝合带(图1a;许志琴等,2006)。班公湖–怒江缝合带作为青藏高原的重要缝合带之一,构成了西藏中部羌塘与拉萨地体之间的地质界线(图1b; Zhu *et al.*, 2011)。缝合带内部

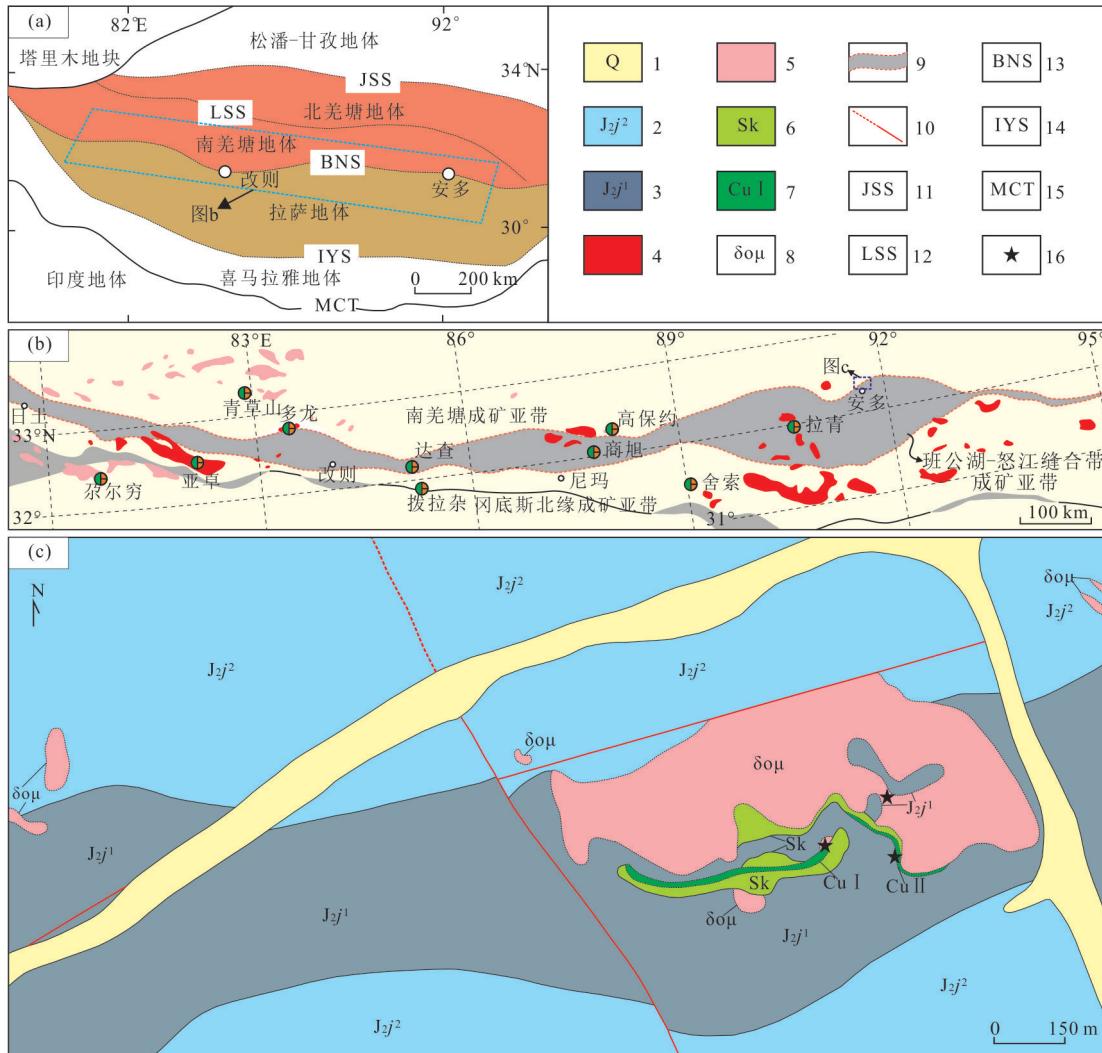


图1 青藏高原构造单元划分(a);班公湖-怒江成矿带(点)分布(b);纳鲁矿区地质简图及采样位置(c)

Fig.1 Tectonic subdivision of the Tibetan Plateau (a); distribution map of major ore deposits (spots) in the Bangong Co-Nujiang metallogenic belt (b); simplified geological map of the Narong mining area, Tibet and sample locations (c)

图c据李宏伟和赵鹏(2019);1.第四系;2.捷布曲组二段;3.捷布曲组一段;4.早白垩世花岗岩类;5.中晚侏罗世花岗岩类;6.矽卡岩;7.铜矿体;8.石英闪长玢岩;9.蛇绿混杂岩带;10断层;11.金沙江缝合带;12.龙木错-双湖缝合带;13.班公湖-怒江缝合带;14.雅鲁藏布江缝合带;15.主中央断裂;16.采样位置

及南北两侧与之演化相关的岩浆岩区及在这一演化过程中所伴生的矿床,共同构成了广义的班公湖-怒江成矿带(宋扬等,2014).以班公湖-怒江缝合带为界,可将班公湖怒江成矿带进一步划分为南羌塘成矿亚带、班公湖-怒江缝合带成矿亚带和冈底斯北缘成矿亚带(图1b).

纳鲁铜矿区位于南羌塘东段南缘,区内出露地层主要有中侏罗统捷布曲组一段(J_{2j}¹)、中侏罗统捷布曲组二段(J_{2j}²)及第四系(Q)(图1c).捷布曲组一段(J_{2j}¹)为滨浅海相碳酸盐岩和碎屑岩沉积建造组合,与岩浆岩接触部位形成矽卡岩带,是矿区的赋矿层位;捷布曲组二段(J_{2j}²)为滨浅海相碳酸盐岩建

造,局部夹少量泥质碎屑岩建造;第四系(Q)主要为现代冲洪积、残坡积.矿区内地内侵入岩发育,以小岩基、岩株形式产出,岩性主要为石英闪长玢岩,岩体普遍具有不同程度的蚀变,边部最强,具硅化、碳酸盐化、绿帘石化等蚀变现象,其与捷布曲组的接触带附近矽卡岩发育,形成铜、铁等矿化,矿化主要表现为褐铁矿化、黄铁矿化及孔雀石化(图2a),石英闪长玢岩与矿化关系密切,初步认定为成矿岩体.岩石样品呈斑状结构,块状构造,斑晶由石英(±4%)、黑云母(±6%)、钾长石(±15%)和斜长石(±35%)等组成,基质(±40%)以细小长英质物质为主(图2b).

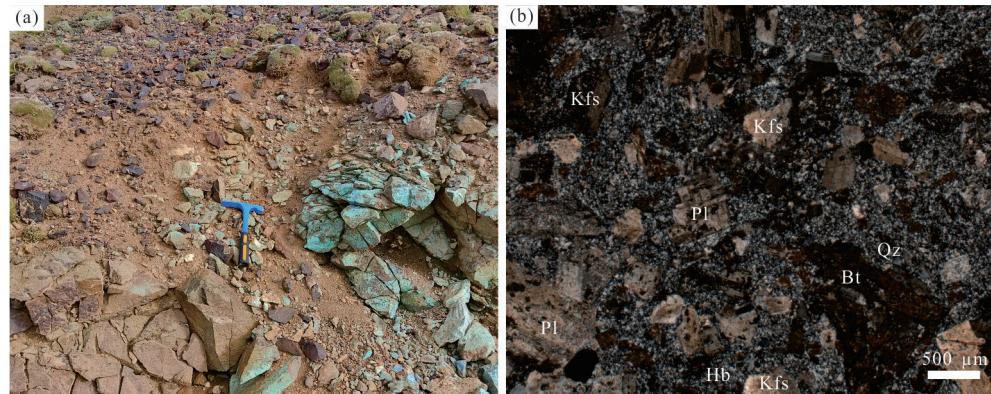


图 2 纳茸矿区石英闪长玢岩野外露头及镜下照片

Fig.2 Field and microscopic photos of quartz diorite porphyry in Narong area

Qz. 石英; Kfs. 碱性长石; Pl. 斜长石; Hb. 角闪石; Bt. 黑云母

2 分析测试方法

本次在纳茸铜矿区采集了 2 件锆石 U-Pb 年龄样品与 19 件全岩主微量元素地球化学样品进行测试分析。锆石 U-Pb 定年、锆石 Hf 同位素测试、全岩主微量元素及 Sr-Nd 同位素分析均在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。

首先将样品粉碎后进行锆石分选, 制成样品靶, 对其进行打磨、抛光后拍摄透射光、反射光和阴极发光(CL)图像, 选择晶型较为完整、环带发育的岩浆成因锆石, 尽可能避开裂隙、包裹体进行锆石 U-Pb 测年。锆石 U-Pb 同位素定年利用 LA-ICP-MS 同时分析完成。详细的仪器参数和分析流程见 Zong *et al.* (2017)。ICP-MS 型号为 Agilent 7700e, 激光剥蚀系统由 COMPexPro 102 ArF 193 nm 准分子激光器和 MicroLas 光学系统组成, 本次分析的激光束斑和频率分别为 32 μm 和 5 Hz, 同位素比值校正采用 91500 标准锆石作为外标, 同位素比值监控标准样品为 GJ-1 (599.7 \pm 2.6 Ma, MSWD=0.001 3), 采用 Isoplot 完成加权平均年龄的计算及 U-Pb 年龄谐和图的绘制。

原位微区锆石 Hf 同位素比值测试分析在配备了信号平滑装置的赛默飞(Neptune Plus) LA-MC-ICP-MS 上完成(Hu *et al.*, 2012a)。测试过程中用国际锆石 91500 和 GJ-1 作为标样, 用于优化测试结果及监控数据校正质量(91500, Mean=0.282 302 \pm 0.000 013, MSWD=1.16; GJ-1, Mean=0.282 020 \pm 0.000 014, MSWD=0.18), 以确保分析数据的可靠性。采用单点剥蚀模式, 斑束固定为 44 μm , 详细仪器操作条件和分析方法见 Hu *et al.* (2012b)。

采取新鲜样品并除去风化表面后, 将其磨至 200 目以下, 用以进行全岩主、微量元素及稀土元素的测试。主量元素含量利用日本理学 Primus II X 射线荧光光谱仪(XRF)分析完成。微量元素和稀土元素含量利用 Agilent 7700e ICP-MS 分析完成。Sr-Nd 同位素分析采用美国 Thermo Fisher Scientific 公司的 MC-ICP-MS(Neptune Plus)完成, 实验中采用 Alfa 公司的 Sr、Nd 单元素溶液优化仪器操作参数, 其中 Sr 国际标准溶液(NBS SRM 987, 200 $\mu\text{g}/\text{L}$)的 ^{88}Sr 信号一般高于 4 V, Nd 国际标准物质(JNd-1, 200 $\mu\text{g}/\text{L}$)的 ^{144}Nd 信号一般高于 2.5 V。

3 分析测试结果

3.1 锆石 U-Pb 年代学及锆石 Hf 同位素

纳茸铜矿区 2 件样品(NR2001、NR2012)的锆石 U-Pb 和 Hf 同位素数据见表 1 和表 2。挑选的锆石无色透明, 含少量包裹体, 裂隙发育, 自形至半自形, 长宽比 1:1~3:1, 阴极发光(CL)图像(图 3)显示良好的岩浆振荡环带, 指示其岩浆成因特征。两件样品的锆石 Th/U 比值在 0.29~1.52 之间, 且在锆石稀土配分模式图(图 4a)中, 总体呈现左倾特点, 具有明显的 Ce 正异常, 显示了明显的轻稀土亏损、重稀土富集, 为典型岩浆锆石的稀土配分模式; 在岩浆锆石成因和热液锆石成因判别图(图 4b)中, 大部分点落在岩浆成因附近, 少部分点落在热液成因附近, 指示其可能是后期岩浆热液上涌所形成。这些微量元素特征也说明研究区样品的锆石为岩浆成因锆石。样品 NR2001 锆石颗粒整体较灰暗, 样品 NR2012 锆石颗粒整体较明亮(图 3)。

测试结果显示样品 NR2001 的 Th 含量为 68 \times

表 2 锯石 Hf 同位素特征

Table 2 Zircon Hf isotopic data

测点	年龄 (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_t$	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	T_{DM} (Ma)	T_{DM}^{c} (Ma)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
NR2001-01	237	0.081 001	0.001 497	0.002 811	0.000 063	0.282 714	0.000 036	0.282 701	-2.1	2.7	1.3	802	1 094	-0.92
NR2001-04	151	0.041 947	0.000 445	0.001 526	0.000 015	0.282 748	0.000 027	0.282 744	-0.8	2.3	0.9	725	1 052	-0.95
NR2001-05	150	0.068 462	0.000 923	0.002 609	0.000 037	0.282 742	0.000 024	0.282 735	-1.1	2.0	0.8	756	1 074	-0.92
NR2001-06	158	0.041 541	0.000 816	0.001 524	0.000 030	0.282 795	0.000 018	0.282 790	0.8	4.1	0.7	658	943	-0.95
NR2001-07	158	0.052 634	0.000 332	0.001 831	0.000 009	0.282 771	0.000 019	0.282 765	0.0	3.2	0.7	698	999	-0.94
NR2001-08	153	0.051 694	0.001 272	0.001 887	0.000 033	0.282 674	0.000 080	0.282 669	-3.5	-0.3	2.8	839	1 220	-0.94
NR2001-09	155	0.035 660	0.000 204	0.001 389	0.000 006	0.282 751	0.000 029	0.282 747	-0.8	2.5	1.0	719	1 044	-0.96
NR2001-10	156	0.061 540	0.002 173	0.002 125	0.000 068	0.282 736	0.000 037	0.282 729	-1.3	1.9	1.3	755	1 082	-0.94
NR2001-12	157	0.022 285	0.000 303	0.000 824	0.000 009	0.282 759	0.000 037	0.282 757	-0.5	2.9	1.3	696	1 020	-0.98
NR2001-13	158	0.026 631	0.000 622	0.000 985	0.000 016	0.282 747	0.000 023	0.282 744	-0.9	2.5	0.8	717	1 049	-0.97
NR2001-16	152	0.051 818	0.000 612	0.001 811	0.000 017	0.282 751	0.000 017	0.282 746	-0.7	2.4	0.6	726	1 047	-0.95
NR2001-17	1 801	0.021 112	0.000 537	0.000 766	0.000 019	0.281 335	0.000 017	0.281 308	-50.8	-11.7	0.6	2 662	3 182	-0.98
NR2001-18	151	0.025 742	0.000 100	0.000 931	0.000 004	0.282 802	0.000 021	0.282 800	1.1	4.3	0.7	637	927	-0.97
NR2012-01	806	0.019 362	0.000 408	0.000 642	0.000 014	0.282 114	0.000 018	0.282 104	-23.3	-5.9	0.7	1 590	2 068	-0.98
NR2012-03	156	0.030 711	0.000 523	0.001 078	0.000 014	0.282 757	0.000 014	0.282 754	-0.5	2.8	0.5	703	1 026	-0.97
NR2012-04	155	0.049 054	0.000 461	0.001 731	0.000 018	0.282 757	0.000 018	0.282 752	-0.5	2.7	0.6	716	1 031	-0.95
NR2012-05	156	0.053 248	0.000 314	0.001 824	0.000 008	0.282 765	0.000 017	0.282 760	-0.2	3.0	0.6	706	1 013	-0.95
NR2012-06	154	0.057 950	0.000 801	0.002 090	0.000 032	0.282 741	0.000 017	0.282 735	-1.1	2.1	0.6	746	1 069	-0.94
NR2012-07	158	0.038 073	0.000 920	0.001 459	0.000 026	0.282 758	0.000 016	0.282 754	-0.5	2.8	0.6	709	1 026	-0.96
NR2012-08	892	0.035 498	0.000 358	0.001 295	0.000 012	0.282 524	0.000 019	0.282 502	-8.8	10.2	0.7	1 039	1 124	-0.96
NR2012-09	163	0.049 367	0.000 196	0.001 715	0.000 009	0.282 759	0.000 017	0.282 754	-0.5	2.9	0.6	713	1 023	-0.95
NR2012-10	156	0.041 864	0.000 251	0.001 535	0.000 004	0.282 776	0.000 016	0.282 771	0.1	3.4	0.6	685	988	-0.95
NR2012-12	163	0.022 091	0.000 209	0.000 733	0.000 004	0.282 761	0.000 016	0.282 758	-0.4	3.1	0.6	692	1 012	-0.98
NR2012-15	155	0.019 745	0.000 067	0.000 667	0.000 003	0.282 746	0.000 013	0.282 744	-0.9	2.4	0.5	711	1 050	-0.98
NR2012-16	155	0.041 566	0.000 408	0.001 408	0.000 014	0.282 764	0.000 014	0.282 759	-0.3	3.0	0.5	701	1 015	-0.96
NR2012-17	157	0.043 940	0.000 603	0.001 458	0.000 017	0.282 745	0.000 013	0.282 741	-0.9	2.3	0.5	728	1 056	-0.96
NR2012-18	161	0.027 977	0.000 874	0.000 930	0.000 032	0.282 628	0.000 016	0.282 625	-5.1	-1.7	0.6	883	1 314	-0.97
NR2012-19	154	0.061 276	0.000 172	0.002 430	0.000 001	0.282 778	0.000 019	0.282 771	0.2	3.3	0.7	700	990	-0.93

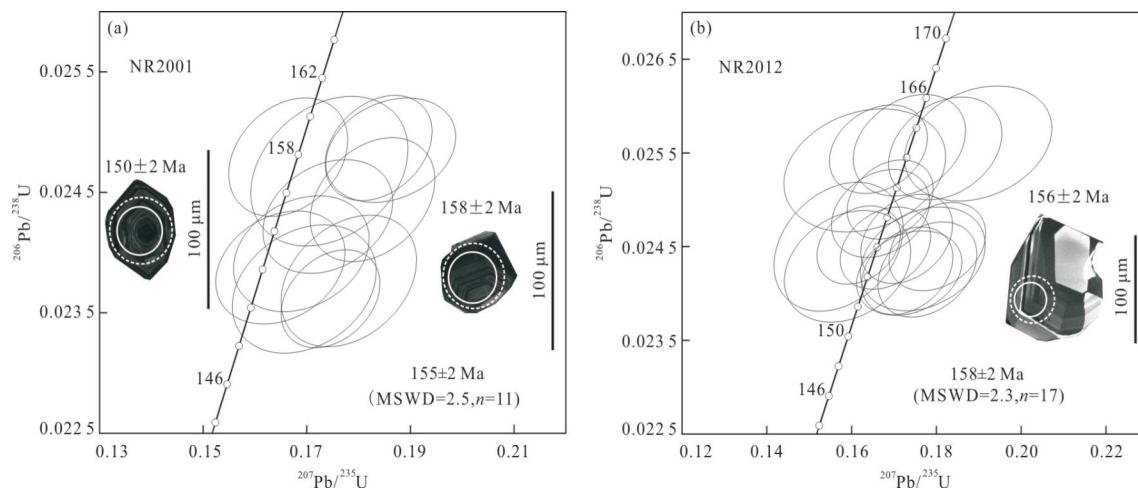


图 3 纳菖矿区石英闪长玢岩典型锯石阴极发光(CL)图像和锯石 U-Pb 谱和图

Fig.3 Cathodoluminescence (CL) images of representative zircons and zircon U-Pb concordia plots

白色实线圈和虚线圈分别代表 U-Pb 定年和 Hf 同位素分析位置

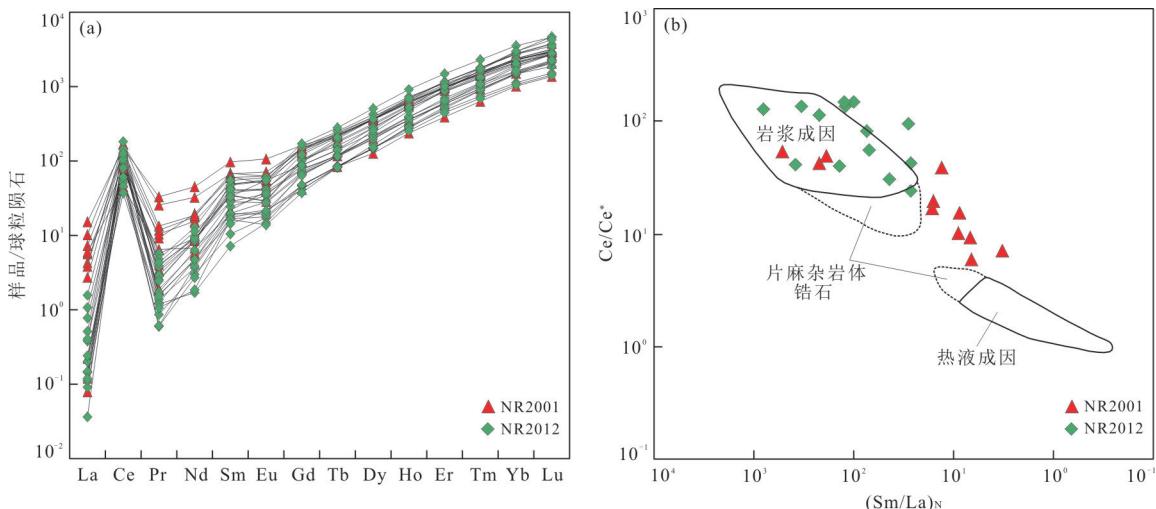


图4 锆石稀土元素球粒陨石标准化分配模式图(a); Ce/Ce^{*}-(Sm/La)_N元素图解(b;据蒋修未等,2020)

Fig.4 Chondrite-normalized REE pattern diagram of zircon (a); Ce/Ce^{*}-(Sm/La)_N diagram (b; by Jiang et al., 2020)

2件样品中有5个测点(NR2001-01、NR2001-05、NR2001-10、NR2012-06、NR2012-19)的¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf值大于0.002(予以剔除),其余23个测点的¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf值在0.000 642~0.001 707之间,说明成岩后基本没有放射性成因的Hf累积,可以代表其形成时的Hf同位素组成(吴福元等,2007).其中3个测点(NR2001-17、NR2012-01、NR2012-08)为捕获锆石,(¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_i值为0.281 308~0.282 502,对应的ε_{Hf}(t)值为-11.7~+10.2,二阶段模式年龄(T_{DM}^C)为3 182~1 124 Ma;其余20个测点(¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_i值为0.282 625~0.282 800,对应的ε_{Hf}(t)值为-1.7~+4.3,二阶段模式年龄为1 314~927 Ma(表2).

3.2 全岩地球化学

纳草矿区19件样品的全岩地球化学分析结果见表3.样品中SiO₂含量为57.72%~61.29%,富钠(Na₂O=4.39%~9.43%),Na₂O/K₂O=0.61~28.14,且大部分大于1,较高的全碱(Na₂O+K₂O=9.41%~11.60%)、Al₂O₃(16.48%~19.22%)含量,MgO含量为0.53%~1.92%.由于本次所采样品均处于围岩接触带附近,具有较强的蚀变,导致样品烧失量偏高($LOI=2.08\%\sim 5.66\%$),去烧失量归一化处理之后,在10 000Zr/TiO₂-SiO₂分类图解中(图5a),样品点大多落入英安岩、安山岩区域,少数落入英安岩、安山岩与粗面安山岩交汇区域,由于镜下未见典型的(碱性)暗色矿物,综合认为研究区所采样品不属于碱性岩类,在FeO^T/MgO-SiO₂

图解中(图5b),样品点投在钙碱性区域内.

本文样品以高Sr($178\times 10^{-6}\sim 1 086\times 10^{-6}$,多数大于 400×10^{-6})、Sr/Y(15~82,绝大多数大于20)、La/Yb(26~51)和亏损重稀土元素(HREE)(如Yb= $1.05\times 10^{-6}\sim 1.45\times 10^{-6}$,小于 1.9×10^{-6} ;Y= $10.50\times 10^{-6}\sim 14.78\times 10^{-6}$,小于 18×10^{-6})为特征,在Sr/Y-Y图解(图5c)和(La/Yb)_N-Yb_N图解(图5d)中,大部分样品落在埃达克岩区域内,显示埃达克(质)岩的亲缘性.

样品的稀土配分曲线呈明显的右倾型(图6a),稀土总量(Σ REE)为 $128.71\times 10^{-6}\sim 231.71\times 10^{-6}$.其中轻稀土总量为 $121.47\times 10^{-6}\sim 223.03\times 10^{-6}$,较为富集;重稀土总量为 $7.23\times 10^{-6}\sim 10.97\times 10^{-6}$,相对亏损.轻、重稀土总量比为15.17~25.69,(La/Yb)_N比值为17.68~34.14,(La/Sm)_N比值为4.58~9.04,整体显示轻、重稀土分异明显.Eu^{*}为0.66~1.26,显示不同程度的Eu正、负异常,微量元素蛛网图(图6b)显示明显富集Th、U,亏损Nb、Ta、P、Ti等高场强元素.

全岩Sr-Nd同位素数据列于表3.笔者在研究区所采2件样品获得的锆石U-Pb年龄分别为155 Ma和158 Ma,用于对区内岩体的Sr-Nd同位素进行校正.三件样品显示出均一的Sr-Nd同位素组成,(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i值为0.705 93~0.706 81,ε_{Nd}(t)值为-2.67~-0.49,均为负值(图7),对应的二阶段模式年龄(T_{DM}^C)为986~1 164 Ma.

表 3 全岩主量(%)、微量元素(10^{-6})和 Sr-Nd 同位素分析结果
Table 3 Whole-rock major (%) and trace (10^{-6}) elements data and Sr-Nd isotope data

样品名称	NR2001	NR2002	NR2003	NR2004	NR2005	NR2006	NR2009	NR2010	NR2011	NR2012
样品性质	石英闪长玢岩									
SiO ₂	58.63	59.27	59.92	59.01	59.05	59.23	59.84	59.25	60.96	58.38
TiO ₂	0.44	0.39	0.41	0.42	0.41	0.45	0.38	0.38	0.40	0.37
Al ₂ O ₃	18.60	18.96	18.82	18.85	19.03	19.22	17.59	18.18	18.14	18.74
TFe ₂ O ₃	1.28	1.37	1.71	1.53	1.48	1.28	0.98	1.43	1.01	0.85
MnO	0.03	0.04	0.02	0.04	0.04	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02
MgO	1.49	1.63	1.48	1.67	1.56	1.45	0.65	1.16	0.83	1.02
CaO	4.82	4.63	2.90	5.10	4.70	4.22	5.20	4.21	4.06	5.07
Na ₂ O	6.43	5.42	7.57	5.42	5.44	5.77	9.15	9.43	8.78	5.18
K ₂ O	4.09	5.30	2.84	5.04	5.11	5.00	0.35	0.52	0.66	6.08
P ₂ O ₅	0.24	0.21	0.29	0.24	0.24	0.28	0.22	0.22	0.30	0.20
LOI	3.00	2.20	3.26	2.21	2.08	2.72	4.86	4.67	4.30	3.60
SUM	99.03	99.42	99.21	99.53	99.13	99.64	99.26	99.47	99.46	99.51
Sc	5.28	5.77	5.12	5.99	5.83	6.09	4.94	4.29	5.27	3.62
V	73.4	62.4	74.1	76.7	73.1	64.4	84.7	94.5	77.6	108.0
Cr	3.28	3.93	3.80	7.51	5.71	3.08	4.67	3.18	3.17	2.50
Co	1.88	1.69	1.64	2.21	2.17	1.15	0.81	2.79	1.17	0.77
Ni	4.20	3.64	5.23	4.63	4.08	3.76	3.84	5.12	3.38	2.58
Cu	52.2	22.7	342.0	120.0	83.5	32.5	37.6	92.6	118.0	15.5
Ga	19.4	19.8	19.9	19.4	19.4	19.7	20.0	19.6	18.8	19.2
Rb	101.0	120.0	69.7	111.0	115.0	118.0	18.0	23.4	28.3	135.0
Sr	1 079	875	374	1 087	1 081	1 019	494	423	745	936
Y	13.2	11.7	11.7	13.8	13.9	13.7	11.4	13.2	14.8	13.2
Zr	156	122	150	172	162	161	151	151	176	163
Nb	20.7	18.3	19.2	17.7	18.1	20.3	17.9	19.1	24.2	18.6
Cs	1.29	2.30	0.49	2.62	2.37	1.92	0.29	0.56	0.64	1.77
Ba	2 044.0	2 027.0	867.0	1 934.0	2 028.0	1 957.0	63.7	51.9	170.0	2 538.0
La	52.9	48.7	38.8	50.5	50.8	48.1	48.0	64.7	45.4	59.6
Ce	101.0	89.7	78.8	96.8	97.7	92.4	82.3	107.0	92.7	95.5
Pr	10.40	9.24	8.35	10.70	10.70	9.77	8.35	10.80	10.40	9.52
Nd	33.4	29.5	28.5	35.5	35.4	33.1	26.8	34.1	37.1	30.5
Sm	4.90	4.33	4.20	5.45	5.33	5.12	3.87	4.84	5.83	4.41
Eu	1.25	1.22	1.02	1.32	1.38	1.40	0.86	1.28	1.24	1.47
Gd	3.11	2.83	2.94	3.10	3.58	3.05	2.51	2.88	3.76	2.92
Tb	0.42	0.39	0.39	0.44	0.45	0.45	0.33	0.41	0.55	0.40
Dy	2.41	2.07	2.11	2.46	2.48	2.50	1.98	2.15	2.68	2.24
Ho	0.41	0.38	0.37	0.45	0.47	0.43	0.37	0.41	0.52	0.41
Er	1.23	1.05	1.12	1.42	1.39	1.33	1.07	1.15	1.58	1.32
Tm	0.20	0.16	0.16	0.20	0.19	0.20	0.16	0.19	0.22	0.18
Yb	1.25	1.09	1.06	1.41	1.28	1.25	1.11	1.28	1.44	1.39
Lu	0.19	0.16	0.16	0.20	0.21	0.19	0.18	0.21	0.23	0.21
Hf	4.21	3.34	4.15	4.55	4.57	4.19	4.07	4.13	4.43	4.44
Ta	1.05	1.00	0.92	1.03	1.02	1.06	0.99	1.00	1.10	0.92
Pb	26.40	17.10	3.02	11.70	11.40	13.10	2.55	29.90	60.10	10.10
Th	32.8	33.2	33.5	36.8	33.6	33.6	30.7	30.6	30.6	33.2
U	6.31	5.71	5.60	7.64	7.22	4.85	7.42	7.30	8.00	7.92
(La/Yb) _N	28.58	30.25	24.56	24.16	26.83	25.96	29.15	34.14	21.32	28.97

续表3

样品名称	NR2001	NR2002	NR2003	NR2004	NR2005	NR2006	NR2009	NR2010	NR2011	NR2012
样品性质	石英闪长玢岩									
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	0.270 8									0.417 3
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.706 889									0.706 866
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	0.706 29									0.705 93
$^{147}\text{Sm}/^{143}\text{Nd}$	0.088 7									0.087 4
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.512 446									0.512 500
$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	-1.61									-0.49
$T_{\text{DM}}^{\text{C}}(\text{Ma})$	1 075									986
样品名称	NR2013	NR2014	NR2015	NR2016	NR2017	NR2018	NR2021	NR2022	NR2023	
样品性质	石英闪长玢岩									
SiO_2	58.33	58.80	58.05	58.61	58.78	57.72	60.08	60.20	61.29	
TiO_2	0.37	0.37	0.36	0.38	0.37	0.37	0.36	0.36	0.37	
Al_2O_3	18.74	18.92	18.76	18.74	18.87	18.61	17.03	16.48	16.63	
TFe_2O_3	0.69	0.86	0.82	0.88	0.85	0.72	1.71	1.47	1.32	
MnO	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04	0.03	
MgO	0.62	0.92	0.89	1.12	1.04	0.53	1.70	1.92	1.79	
CaO	5.20	5.12	4.73	5.34	5.03	5.38	3.79	4.07	3.77	
Na_2O	5.25	4.97	4.39	4.69	4.90	5.12	9.35	9.09	9.05	
K_2O	5.72	6.26	7.21	6.45	6.33	5.54	0.42	0.32	0.40	
P_2O_5	0.19	0.17	0.16	0.17	0.17	0.18	0.19	0.19	0.21	
LOI	4.39	3.15	3.38	2.98	2.96	4.91	5.17	5.66	5.15	
SUM	99.52	99.56	98.78	99.37	99.32	99.10	99.80	99.80	100.00	
Sc	3.93	3.69	3.58	4.24	3.89	3.88	4.55	4.94	5.22	
V	103.0	103.0	96.8	111.0	106.0	104.0	64.5	63.6	78.2	
Cr	2.40	2.46	2.48	2.63	3.57	2.57	11.60	10.80	17.80	
Co	1.10	0.71	0.52	0.67	0.58	0.85	3.10	2.31	3.00	
Ni	3.27	3.43	3.37	3.06	2.77	2.92	5.97	4.89	4.35	
Cu	23.70	115.00	84.10	20.20	29.10	113.00	8.90	4.65	3.86	
Ga	19.2	19.7	19.1	19.7	19.8	19.2	18.6	18.3	18.9	
Rb	126.0	139.0	163.0	147.0	139.0	128.0	14.9	10.8	13.4	
Sr	876	991	955	993	968	813	207	178	204	
Y	13.4	13.7	13.9	14.0	13.3	13.5	11.3	11.6	10.5	
Zr	160	166	173	173	171	159	147	142	151	
Nb	19.3	19.7	19.9	20.5	19.6	19.8	17.6	17.8	17.0	
Cs	2.17	1.33	1.86	1.47	1.46	2.19	0.33	0.16	0.21	
Ba	3 325.0	2 669.0	3 208.0	2 782.0	2 962.0	4 127.0	61.7	61.8	75.1	
La	56.4	58.3	63.8	59.8	57.4	56.4	30.5	28.1	28.6	
Ce	94.2	95.0	103.0	98.3	93.5	93.8	63.4	59.6	58.9	
Pr	9.53	9.58	10.3	9.84	9.24	9.38	7.12	6.77	6.73	
Nd	31.2	30.3	33.1	31.8	29.7	30.2	24.1	23.8	23.0	
Sm	4.40	4.57	4.44	4.77	4.32	4.66	3.62	3.86	3.51	
Eu	1.47	1.54	1.58	1.53	1.52	1.64	0.83	0.74	0.74	
Gd	2.99	2.90	3.14	2.90	2.89	2.98	2.77	2.75	2.39	
Tb	0.42	0.42	0.41	0.44	0.41	0.40	0.36	0.39	0.36	
Dy	2.41	2.32	2.29	2.37	2.23	2.26	2.08	2.05	1.76	
Ho	0.42	0.42	0.43	0.45	0.39	0.42	0.33	0.37	0.36	
Er	1.36	1.23	1.40	1.41	1.21	1.29	1.08	1.14	1.01	
Tm	0.20	0.20	0.21	0.20	0.20	0.19	0.15	0.16	0.15	

续表3

样品名称	NR2013	NR2014	NR2015	NR2016	NR2017	NR2018	NR2021	NR2022	NR2023
样品性质	石英闪长玢岩								
Yb	1.34	1.32	1.40	1.45	1.35	1.35	1.07	1.07	1.05
Lu	0.22	0.22	0.24	0.24	0.23	0.21	0.15	0.17	0.16
Hf	4.45	4.52	4.56	4.71	4.47	4.38	3.89	3.93	4.03
Ta	0.90	0.94	0.95	0.97	0.87	0.91	0.84	0.96	0.85
Pb	9.11	9.48	9.07	9.86	10.40	8.50	1.24	1.21	1.43
Th	34.3	32.5	34.0	33.5	32.5	33.9	31.2	29.1	26.5
U	5.95	8.21	9.68	9.50	8.99	7.37	4.25	4.82	5.76
(La/Yb) _N	28.39	29.72	30.75	27.78	28.59	28.22	19.16	17.68	18.35
⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr									0.190 0
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr									0.707 233
(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i									0.706 81
¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴³ Nd									0.092 3
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd									0.512 393
$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$									-2.67
$T_{\text{DM}}^{\text{C}}(\text{Ma})$									1 164

4 讨论

4.1 岩石成因

锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果显示纳苒矿区两个石英闪长玢岩样品均存在少量三叠纪-古元古代的捕获锆石, 暗示其原始岩浆在上升过程可能经受了围岩的同化混染。因此, 在利用元素-同位素地球化学数据讨论岩石成因之前, 有必要评估一下地壳混染的影响。纳苒石英闪长玢岩的全岩 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值分别为 0.705 93~0.706 81 和 -2.67~-0.49, 呈现出相对均一的同位素组成。此外, 全岩 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i、 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 SiO₂ 含量之间不具有明显的线性协变关系, 表明石英闪长玢岩在岩浆就位固结之前未受到显著围岩同化混染的改造影响。矿区野外调研在石英闪长玢岩露头处未见任何围岩捕虏体, 结合其变化范围较小的锆石 Hf 同位素组成, 进一步支持了上述结论。

Defant and Drummond (1990) 在研究阿留申群岛时提出埃达克岩概念, 确定其为产生在俯冲消减环境由年轻大洋板片部分熔融形成的一套中酸性火山岩, 其地球化学标志是亏损重稀土元素与 Y (Yb $\leqslant 1.9 \times 10^{-6}$, Y $\leqslant 18 \times 10^{-6}$) 和高 Sr ($\geqslant 400 \times 10^{-6}$, 很少小于 400×10^{-6}), 且通常 Sr/Y $> 20.0 \sim 40.0$, La/Yb $> 7.6 \sim 15.0$ (许继峰等,

2014)。此外, 许继峰等 (2014) 将具有埃达克岩地球化学组成特征但非板片熔融成因的火成岩统称为埃达克质岩。如前文所述, 除少数 Sr 含量偏低外, 绝大多数纳苒矿区石英闪长玢岩具有与埃达克(质)岩相似的地球化学特征。

近年来的研究揭示具有埃达克(质)岩石地球化学属性的中酸性火成岩可以形成于多种构造背景, 具有多样的源区组成和岩浆演化过程。目前, 学术界普遍接受的埃达克(质)岩成因主要包括:(1) 俯冲板片的部分熔融 (Defant and Drummond, 1990; Wang *et al.*, 2008); (2) 拆沉陆壳的部分熔融 (Xu *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2007); (3) 增厚镁铁质下地壳的部分熔融 (Zeng *et al.*, 2011; Hou *et al.*, 2013); (4) 玄武质母岩浆的分离结晶 (Castillo *et al.*, 1999; Macpherson *et al.*, 2006); (5) 镁铁质与长英质岩浆混合作用 (Streck *et al.*, 2007)。俯冲板片起源和拆沉陆壳熔融形成的埃达克(质)岩浆会与上覆地幔楔发生交代作用, 使之具有相对较高的 MgO、Cr 和 Ni 的含量, 而本文样品具有较低的 MgO 和 Cr、Ni 等相容元素的含量, 与上述两种成因的埃达克(质)岩特征不符, 此外, 加厚地壳拆沉过程一般发生在两个陆块碰撞拼贴之后, 而区域上最新的

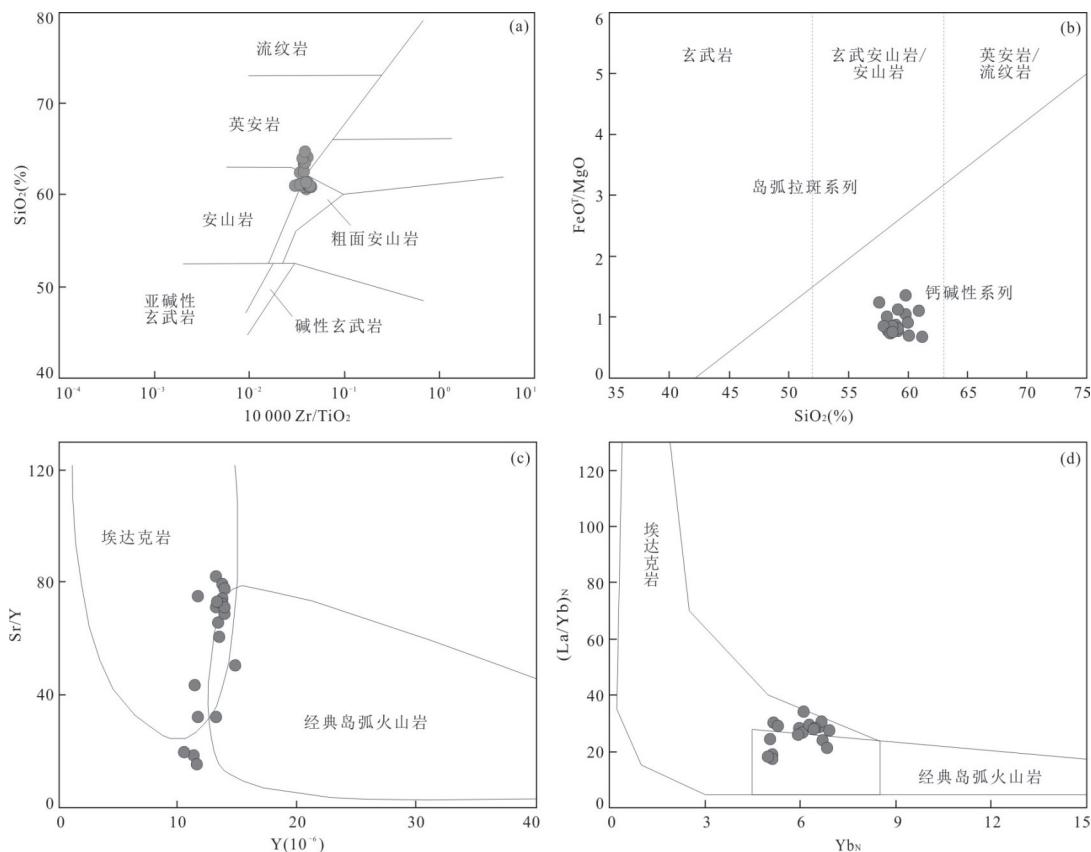


图5 $\text{SiO}_2\text{-Zr/TiO}_2$ 图解(a); $\text{FeO}^\text{T}/\text{MgO}-\text{SiO}_2$ 图解(b); Sr/Y-Y 图解(c); $(\text{La/Yb})_\text{N}-\text{Yb}_\text{N}$ 图解(d)
Fig.5 $\text{SiO}_2\text{-Zr/TiO}_2$ diagram (a); $\text{FeO}^\text{T}/\text{MgO}-\text{SiO}_2$ diagram (b); Sr/Y-Y diagram (c); $(\text{La/Yb})_\text{N}-\text{Yb}_\text{N}$ diagram (d)

图a据 Winchester and Floyd(1977);图b据 Miyashiro(1974);图d据 Defant and Drummond(1990)

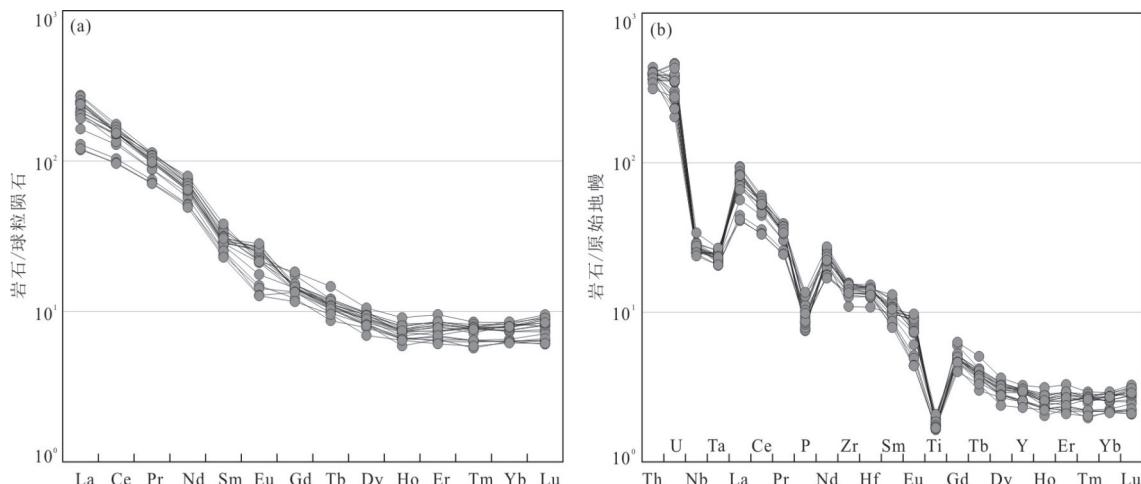


图6 稀土配分模式图(a);微量元素蛛网图(b);底图据 Sun and McDonough, 1989)

Fig.6 Chondrite-normalized REE pattern diagram (a); primitive mantle-normalized trace element diagram (b; modified by Sun and McDonough, 1989)

研究成果表明,研究区南侧的班公湖-怒江洋此时并未完全闭合(Zeng *et al.*, 2021),即此时研究区仍处于俯冲背景,这也从侧面证明纳昆矿区埃达克(质)岩石并非起源于拆沉陆壳的部分熔融;Castillo

et al.(1999)和Macpherson *et al.*(2006)根据菲律宾南部埃达克质熔岩与玄武质熔岩具有紧密的时空联系和相似的同位素地球化学特征,首次提出埃达克质岩石可以由起源于交代地幔楔的初始玄武质

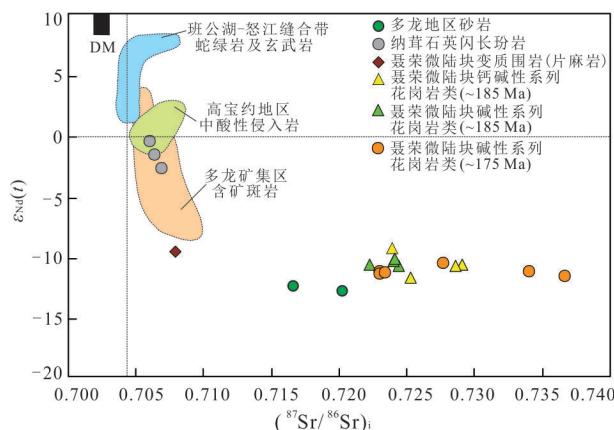


图 7 纳草矿区石英闪长玢岩 Sr-Nd 同位素组成

Fig.7 Sr-Nd isotopic data of quartz diorite porphyry in Narong mining area

多龙地区砂岩数据引自 Li *et al.*(2016a);班公湖-怒江缝合带蛇绿岩及玄武岩数据引自 Bao *et al.*(2007)、Zhang *et al.*(2014)、Liu *et al.*(2016);高宝约矿区侵入岩数据引自 Li *et al.*(2016b)、笔者未刊数据;多龙矿集区侵入岩数据引自陈华安等(2013)、祝向平等(2015a, 2015b)、林彬等(2019);聂荣微陆块数据引自刘敏(2012)

岩浆在低压或高压条件下经历高 Y 和重稀土元素分配系数矿物的分离结晶而形成。但是,玄武质岩浆经分离结晶作用形成埃达克质岩的一个重要前提是区域上有同时代大规模基性岩浆的存在(Guo, 2007)。研究区内除见少量的中酸性岩体呈岩株产出外,未见同期大面积的基性岩出露,并且在 La/Sm 与 La 关系图解中显示部分熔融趋势(图 8a),而非分离结晶的产物。此外,基性岩浆的分离结晶可分为低压环境和高压环境,在低压条件下,分离结晶作用导致 Cr、Ni、V 等元素与 SiO₂ 呈负相关关系,高压条件下石榴石发生分离结晶,导致轻重稀土元素分异显著,La/Y 和 Dy/Yb 比值与 SiO₂ 呈正相关关系(Macpherson *et al.*, 2006)。本文研究的石英闪长玢岩样品 SiO₂ 含量与上述元素比值未呈现出对应的低压或高压分离结晶的相关性(图 8b~8f),进而排除观点(4)成因的可能性。考虑到区内缺乏同期基性岩浆岩、岩体中未见镁铁质暗色包体以及显微镜下未见岩浆混合的结构特征,笔者认为纳草石英闪长玢岩也并非起源于基性岩浆与酸性岩浆的混合。石英闪长玢岩样品普遍具有较高的 Th 含量和 Th/U 比值,低的 MgO、Cr、Ni 含量,与增厚下地壳熔融成因的埃达克质岩特征一致。综上所述,笔者认为纳草晚侏罗世埃达克质石英闪长玢岩最可能来源于加厚大陆下地壳的部分熔融。

关于加厚下地壳源区的性质,其同位素组成和

特征可以给出限制。纳草石英闪长玢岩样品锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值主体在 +2.3~+4.3 之间,表明它们主要由加厚的新生镁铁质下地壳部分熔融形成。需要注意的是,还有另外两个岩浆锆石测点(NR2001-08、NR2012-18)的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为负值(-0.3 和 -1.7),暗示地壳源区可能还存在少量古老再循环物质的参与。在全岩 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解中(图 7),可以看到本文研究样品分布在班公湖-怒江洋蛇绿岩和聂荣微陆块片麻岩之间,进一步指示纳草石英闪长玢岩地壳源区的不均一性,即由大量新生镁铁质下地壳成分和少量古老再循环陆壳物质组成。

4.2 地球动力学背景及构造意义

在聂荣微陆块的南北两侧均可见洋壳残余,表明其曾经是一个漂泊在班公湖-怒江洋盆中的孤立陆块,早中侏罗世洋体制开始由伸展机制逐渐转变为闭合机制(许荣科等, 2007),班公湖-怒江洋壳在聂荣微陆块的两侧均开始向北俯冲,北侧于 185~175 Ma 期间完成消减,研究区所在的羌南地块和聂荣微陆块重新拼贴在一起。此外,刘若涵等(2019)提出研究区所在的南羌塘凹陷东南部在早-中侏罗世主要为三角洲-潮坪相沉积环境,是聂荣微陆块与南羌塘地块最初碰撞造山的盆山响应。贞晓瑞等(2019)通过对研究区内侏罗纪砂岩及钙质砂岩进行碎屑锆石年代学分析,结果显示其年龄分布特征与聂荣微陆块及南羌塘地块相似,而与拉萨地体显著不同,说明研究区下-中侏罗统沉积岩物源主要来自聂荣微陆块及南羌塘地块,即在早-中侏罗世时,聂荣微陆块与南羌塘地块发生了碰撞造山。俯冲、碰撞作用导致了研究区新生地壳的持续产出及不断加厚。陈玉禄等(2006)在聂荣微陆块南侧那曲觉翁地区发现了完整的蛇绿岩剖面,并在堆晶岩中获得了 128 Ma 的年龄信息,表明在早白垩世中期该区洋盆仍存在一定规模。到早白垩世晚期(110~118 Ma),北拉萨地块发生了大规模以高钾钙碱性为主的岩浆事件,从活动陆缘转入陆内造山(解超明, 2013 及其参考文献),表征该区洋盆最终闭合。综上所述,在 175 Ma 至早白垩世晚期,研究区和聂荣微陆块一起处于聂荣微陆块南侧洋壳的俯冲背景之下,持续的俯冲作用也使得聂荣微陆块以及研究区地壳进一步增厚,之后玄武质岩浆底侵,使得加厚的新生地壳(研究区)和古老地壳(聂荣微陆块)同时发生熔融,最终形成本区的埃达克质岩石。

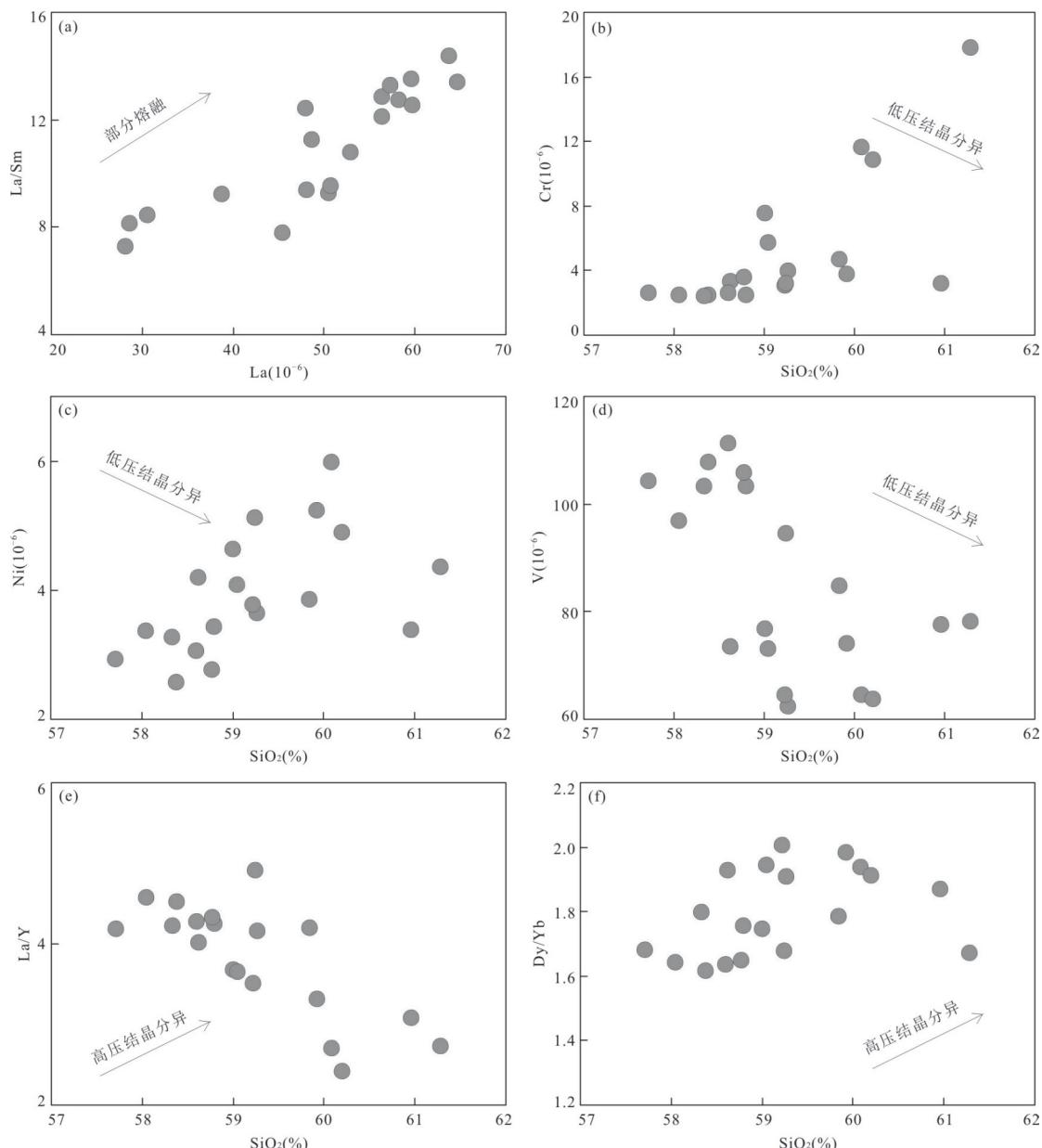


图8 岩石成因判别图解

Fig.8 Discrimination diagrams of rock genesis

近年来,大量的野外地质调查与高精度年代学数据显示中晚侏罗世岩浆岩在南羌塘南缘广泛发育,主要分布在改则以西的拉热拉新、材玛、弗野、青草山及多龙东部,改则以东分布有限,但在热那错、荣玛、高宝约等地均有少量报道,自日土县班公错至双湖县高宝约,东西向延伸逾1000 km,是反演班公湖-怒江缝合带晚侏罗世构造演化的重要媒介。其中前人在西段拉热拉新中酸性岩体中获得锆石U-Pb年龄为160~168 Ma(Li *et al.*, 2014b);材玛地区中酸性岩体中获得锆石U-Pb年龄为160~169 Ma(Li *et al.*, 2014a, 2014b);弗野地区中酸性

岩体中获得锆石U-Pb年龄为151~157 Ma(陈士海等,2014);青草山地区中酸性岩体中获得锆石U-Pb年龄为154~165 Ma(Li *et al.*, 2014a);多龙地区中酸性岩体中获得锆石U-Pb年龄为150~153 Ma(Li *et al.*, 2014a);拉布错地区中酸性岩体中获得锆石U-Pb年龄为156~168 Ma(Wu *et al.*, 2016);荣玛地区中酸性岩体中获得锆石U-Pb年龄为150 Ma(冉皞等,2015);高宝约地区中酸性岩体中获得锆石U-Pb年龄为147~149 Ma(Li *et al.*, 2016b)。

上述已有研究证实了班公湖-怒江洋向北俯冲至羌塘地体之下,然而这些证据主要来自南羌塘中

西段(拉热拉新-康琼),未从南羌塘东段获得相关信息.笔者本次的研究证实,纳苒埃达克岩有可能来源于俯冲背景下增厚地壳熔融,为晚侏罗世南羌塘东段存在大洋俯冲提供了有利证据.因此,与班公湖-怒江洋俯冲相关的岩浆活动已经延伸到安多地区,形成了超过1 200 km的晚侏罗世岩浆弧.

4.3 成矿指示意义

侯增谦等(2018)指出,Hf-Nd同位素填图可以圈定地壳块体的空间分布,揭示深部地壳组成架构对成矿系统发育空间的控制作用,用以评价成矿潜力和圈定战略靶区.莫宣学(2020)通过对青藏高原岩浆岩,特别是其Nd、Hf同位素的研究,证明青藏高原并存着新生地壳和再循环地壳两类地壳,并指出所有的斑岩铜矿产出在南、北拉萨地块之内,与新生地壳分布区相对应,即对造山带斑岩Cu矿床的形成起最重要控制作用的因素是新生下地壳.与研究区同处南羌塘地块南缘的多龙矿集区,位于班公湖-怒江成矿带西段,因其区内系列大型-超大型斑岩型-浅成低温热液型铜金矿床的发现而迅速闻名于世.前人研究表明,多龙矿集区内波龙矿区含矿斑岩(117.4~126.4 Ma)锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在+0.6~+12.2之间,Hf同位素两阶段模式年龄 T_{DM}^{c} 在494~1 107 Ma之间(陈华安等,2013;李兴奎等,2015;孙振明,2015);多不杂矿区含矿斑岩(116.1~125.2 Ma)锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在+0.0~+11.1之间,Hf同位素两阶段模式年龄 T_{DM}^{c} 在468~1174 Ma之间(孙嘉,2015;孙振明,2015;祝向平等,2015b);拿若矿区含矿斑岩(117.2~126.4 Ma)锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在+0.1~+11.3之间,Hf同位素两阶段模式年龄 T_{DM}^{c}

在412~1 252 Ma之间(孙嘉,2015;孙振明,2015;祝向平等,2015a);铁格隆南矿区含矿斑岩(117.5 Ma)锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在+2.1~+7.4之间,Hf同位素两阶段模式年龄 T_{DM}^{c} 在702~1 044 Ma之间(孙嘉,2015);色那矿区含矿斑岩(118 Ma) $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为+0.28~+11.77,Hf同位素两阶段模式年龄 T_{DM}^{c} 在424 Ma~1 159 Ma之间(韦少港,2017);东窝东矿区含矿斑岩(121 Ma)锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为+3.4~11.1,Hf两阶段模式年龄 T_{DM}^{c} 为467~963 Ma(韦少港,2017).上述岩体Hf同位素的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均以正值为主,仅见极少量负值.本文研究区位于班公湖-怒江成矿带东段,区内侵入岩样品的锆石Hf同位素特征与多龙矿集区相似(图9), $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均以正值为主,表明研究区附近或深部具有寻找斑岩型铜金矿床的可能.

已有研究表明锆石微量元素的Ce/Ce*和Eu/Eu*比值可指示氧逸度高低,是探讨岩浆氧化态的有效手段之一(Loader *et al.*, 2017),Eu/Eu*>0.3、Dy/Yb<0.3、10 000×(Eu/Eu*)/Y>1指示其具有较好的成矿潜力(Lu *et al.*, 2016;杨昕等,2021).本文样品锆石中Ce/Ce*在1.20~170.85之间,平均值为61.20;Eu/Eu*在0.01~0.91之间,平均为0.59;Dy/Yb在0.12~0.28之间;10 000×(Eu/Eu*)/Y在0.09~16.91之间,平均值为7.28.以上元素的比值显示该岩体具有寻找斑岩型铜矿的可能(图10a~10b).此外,本文样品具有较高的Sr/Y比值(15.30~81.65,平均值为56.80)和V/Sc比值(10.58~29.74,平均值为19.07),同样显示了较好的找矿潜力(图10c~10d).

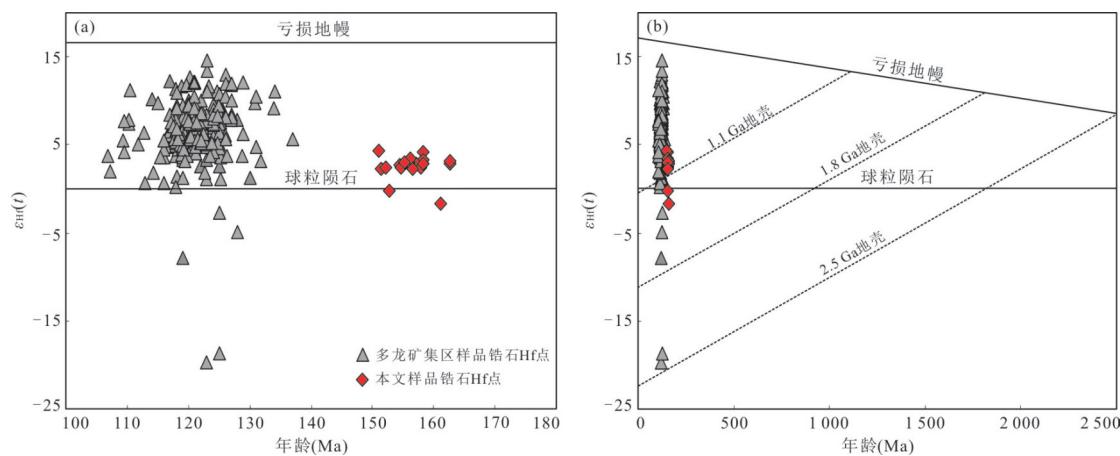


图9 锆石Hf同位素 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ -年龄(Ma)图解

Fig.9 Zircon Hf isotopic $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ -age(Ma) diagram

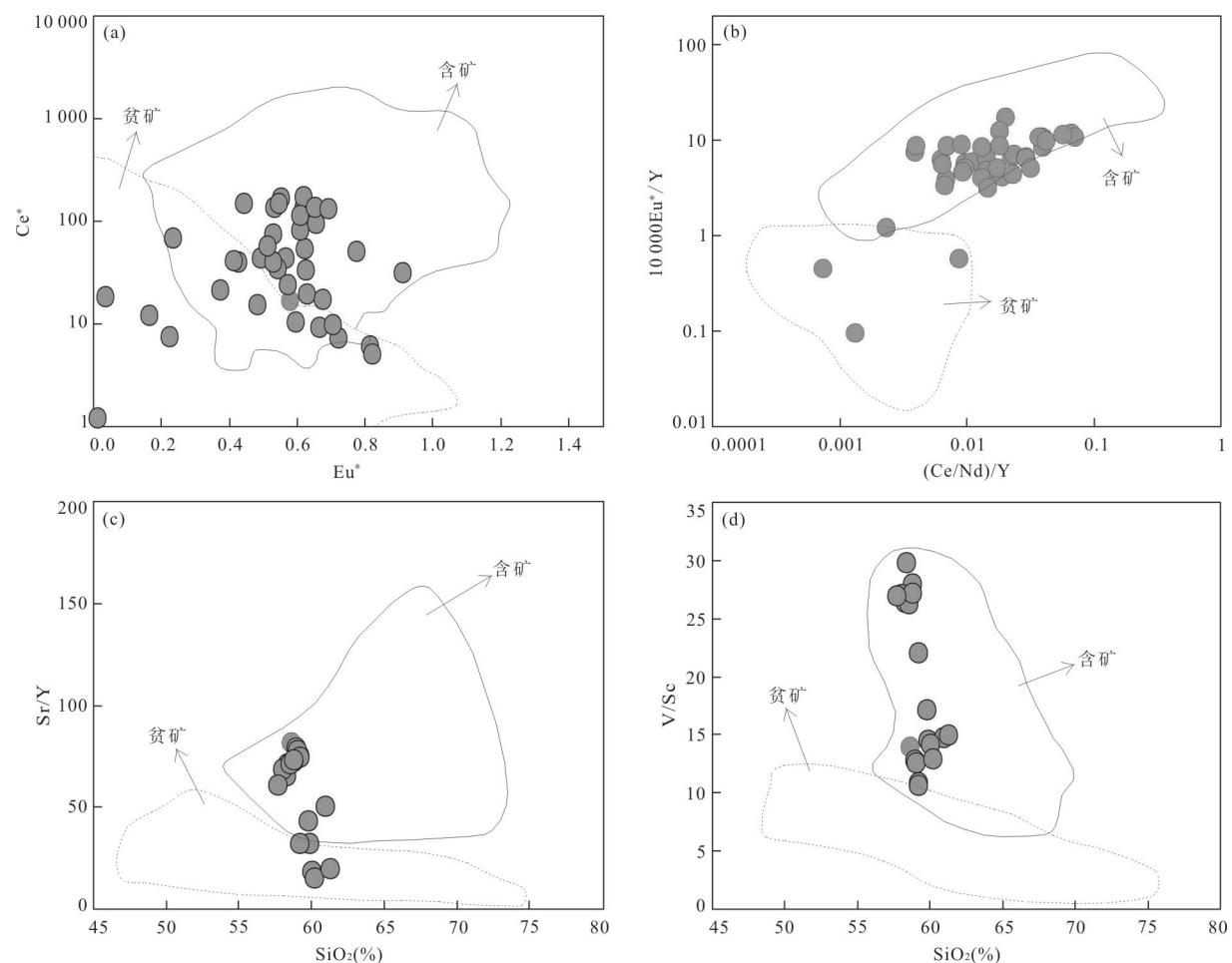


图10 锆石 Ce^* - Eu^* 图解(a);锆石 $10\ 000\text{Eu}^*/\text{Y}$ - $(\text{Ce}/\text{Nd})/\text{Y}$ 图解(b);全岩 Sr/Y - SiO_2 图解(c);全岩 V/Sc - SiO_2 图解(d;据杨昕等,2021)

Fig.10 Ce^* - Eu^* diagram of zircon (a); $10\ 000\text{Eu}^*/\text{Y}$ - $(\text{Ce}/\text{Nd})/\text{Y}$ diagram of zircon (b); Sr/Y - SiO_2 diagram (c); V/Sc - SiO_2 diagram (d; by Yang *et al.*, 2021)

5 结论

(1) 纳革矿区石英闪长玢岩整体显示埃达克质岩石的地球化学特征,研究表明其起源于加厚下地壳的部分熔融,并受到了少量古老再循环物质的混染。

(2) 对纳革矿区埃达克质岩石的识别表明,班公湖-怒江洋在晚侏罗世向北俯冲至羌塘地体之下,形成了一条超过1 200 km的近东西向岩浆弧。

(3) 纳革矿区与多龙矿集区内成矿岩体具有相似的锆石Hf同位素组成,锆石微量元素具有高 Ce/Ce^* 、 Eu/Eu^* 、 Dy/Yb 比值,全岩微量元素具有较高的 Sr/Y 、 V/Sc 比值,显示纳革矿区具有较好的成矿潜力。

致谢:感谢武汉上谱分析科技有限责任公司的老师在样品分析测试过程中提供大量帮助,感谢编

辑老师的悉心指导,感谢审稿专家对本文提出的建设性修改意见和建议!

References

- Bao, P. S., Xiao, X. C., Su, L., et al., 2007. Petrological, Geochemical and Chronological Constraints for the Tectonic Setting of the Dongco Ophiolite in Tibet. *Science China Earth Sciences*, 50(5): 660–671. <https://doi.org/10.1007/s11430-007-0045-5>
- Castillo, P. R., Janney, P. E., Solidum, R. U., 1999. Petrology and Geochemistry of Camiguin Island, Southern Philippines: Insights to the Source of Adakites and Other Lavas in a Complex Arc Setting. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134(1): 33–51. <https://doi.org/10.1007/s004100050467>
- Chen, H. A., Zhu, X. P., Ma, D. F., et al., 2013. Geochronology and Geochemistry of the Bolong Porphyry Cu-Au

- Deposit, Tibet and Its Mineralizing Significance. *Acta Geologica Sinica*, 87(10): 1593—1611 (in Chinese with English abstract).
- Chen, S. H., Wang, B., Zhang, J. R., et al., 2014. Litho-geochemical Characteristics and Chronology of Fuye Granitic Pluton from the Western Bangong - Nujiang Metallogenic Belt in China. *Journal of East China Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 37(1): 37—44 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y. L., Zhang, K. Z., Yang, Z. M., et al., 2006. Discovery of a Complete Ophiolite Section in the Jueweng Area, Nagqu County, in the Central Segment of the Bangong Co-Nujiang Junction Zone, Qinghai-Tibet Plateau. *Geological Bulletin of China*, 25(6): 694—699 (in Chinese with English abstract).
- Defant, M. J., Drummond, M. S., 1990. Derivation of some Modern Arc Magmas by Melting of Young Subducted Lithosphere. *Nature*, 347 (6294): 662—665. <https://doi.org/10.1038/347662a0>
- Fan, J. J., Li, C., Wu, H., et al., 2016. Late Jurassic Adakitic Granodiorite in the Dong Co Area, Northern Tibet: Implications for Subduction of the Bangong - Nujiang Oceanic Lithosphere and Related Accretion of the Southern Qiangtang Terrane. *Tectonophysics*, 691: 345—361. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.10.026>
- Guo, F., Nakamuru, E., Fan, W. M., et al., 2007. Generation of Palaeocene Adakitic Andesites by Magma Mixing; Yanji Area, NE China. *Journal of Petrology*, 48(4): 661—692. <https://doi.org/10.1093/petrology/egl077>
- Hou, Z. Q., Wang, T., 2018. Isotopic Mapping and Deep Material Probing (II): Imaging Crustal Architecture and Its Control on Mineral Systems. *Earth Science Frontiers*, 25(6): 20—41 (in Chinese with English abstract).
- Hou, Z. Q., Zheng, Y. C., Yang, Z. M., et al., 2013. Contribution of Mantle Components within Juvenile Lower-Crust to Collisional Zone Porphyry Cu Systems in Tibet. *Mineralium Deposita*, 48(2): 173—192. <https://doi.org/10.1007/s00126-012-0415-6>
- Hu, Z. C., Liu, Y. S., Gao, S., et al., 2012a. A “Wire” Signal Smoothing Device for Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry Analysis. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 78: 50—57. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2012.09.007>
- Hu, Z. C., Liu, Y. S., Gao, S., et al., 2012b. Improved in Situ Hf Isotope Ratio Analysis of Zircon Using Newly Designed X Skimmer Cone and Jet Sample Cone in Combination with the Addition of Nitrogen by Laser Ablation Multiple Collector ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 27(9): 1391—1399. <https://doi.org/10.1039/c2ja30078h>
- Jiang, X. W., Gong, D. X., Zou, H., et al., 2020. Geochemical Characteristics and U-Pb Geochronological Significance of the Dusong Monzogranite in the Songpan-Ganzi Orogen. *Mineralogy and Petrology*, 40(3): 26—41 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. X., Qin, K. Z., Li, G. M., et al., 2014a. Geochronology, Geochemistry, and Zircon Hf Isotopic Compositions of Mesozoic Intermediate-Felsic Intrusions in Central Tibet: Petrogenetic and Tectonic Implications. *Lithos*, 198—199: 77—91. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.03.025>
- Li, J. X., Qin, K. Z., Li, G. M., et al., 2016a. Petrogenesis of Cretaceous Igneous Rocks from the Duolong Porphyry Cu-Au Deposit, Central Tibet: Evidence from Zircon U-Pb Geochronology, Petrochemistry and Sr-Nd-Pb-Hf Isotope Characteristics. *Geological Journal*, 51(2): 285—307. <https://doi.org/10.1002/gj.2631>
- Li, S. M., Zhu, D. C., Wang, Q., et al., 2014b. Northward Subduction of Bangong - Nujiang Tethys: Insight from Late Jurassic Intrusive Rocks from Bangong Tso in Western Tibet. *Lithos*, 205: 284—297. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.07.010>
- Li, Y. L., He, J., Han, Z. P., et al., 2016b. Late Jurassic Sodium-Rich Adakitic Intrusive Rocks in the Southern Qiangtang Terrane, Central Tibet, and Their Implications for the Bangong-Nujiang Ocean Subduction. *Lithos*, 245: 34—46. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.10.014>
- Li, H. W., Zhao, P., 2019. Tectonic Evolution and Research Significance of Iron and Copper Deposits in Narong Mining Area, Anduo County, Tibet Autonomous Region. *Sichuan Nonferrous Metals*, (3): 27—29 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. K., Li, C., Sun, Z. M., et al., 2015. Zircon U-Pb Geochronology, Hf Isotope, and Whole-Rock Geochemistry of Diorite in the Saijiao Cu-Au Deposit, Tibet, and Its Ore-Forming Significance. *Geological Bulletin of China*, 34(5): 908—918 (in Chinese with English abstract).
- Lin, B., Fang, X., Wang, Y. Y., et al., 2019. Petrologic Genesis of Ore-Bearing Porphyries in Tiegelongnan Giant Cu (Au, Ag) Deposit, Tibet and Its Implications for the Dynamic of Cretaceous Mineralization, Duolong. *Acta Petrologica Sinica*, 35(3): 642—664 (in Chinese with English abstract).
- Liu, T., Zhai, Q. G., Wang, J., et al., 2016. Tectonic Significance of the Dongqiao Ophiolite in the North-Central

- Tibetan Plateau: Evidence from Zircon Dating, Petrological, Geochemical and Sr-Nd-Hf Isotopic Characterization. *Journal of Asian Earth Sciences*, 116: 139–154. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.11.014>
- Liu, H. Y., Yue, Y. Z., Dunzhu, W., et al., 2019. Petrogenesis and Geological Significance of Late Jurassic Volcanic Rocks in Mami Area, Central Tibetan Plateau. *Earth Science*, 44(7): 2368–2382 (in Chinese with English abstract).
- Liu, M., 2012. Petrogenesis and Tectonic Significance of Early Jurassic Alkaline Pluton in Nyainrong Microcontinent, Central Tibet (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Liu, R. H., He, B. Z., Zheng, M. L., et al., 2019. Tectonic-Sedimentary Evolution during Late Triassic-Jurassic Period in the Eastern Part of the Qiangtang Basin, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 35(6): 1857–1874 (in Chinese with English abstract).
- Loader, M. A., Wilkinson, J. J., Armstrong, R. N., 2017. The Effect of Titanite Crystallisation on Eu and Ce Anomalies in Zircon and Its Implications for the Assessment of Porphyry Cu Deposit Fertility. *Earth and Planetary Science Letters*, 472: 107–119. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.05.010>
- Lu, Y. J., Loucks, R. R., Fiorentini, M., et al., 2016. Zircon Compositions as a Pathfinder for Porphyry Cu±Mo±Au Deposits. In: Richards, J., ed., Society of Economic Geologists Special Publication No.19 on Tethyan Tectonics and Metallogeny. Society of Economic Geologists, Littleton, 329–347.
- Macpherson, C. G., Dreher, S. T., Thirlwall, M. F., 2006. Adakites without Slab Melting: High Pressure Differentiation of Island Arc Magma, Mindanao, the Philippines. *Earth and Planetary Science Letters*, 243(3–4): 581–593. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.12.034>
- Miyashiro, A., 1974. Volcanic Rock Series in Island Arcs and Active Continental Margins. *American Journal of Science*, 274(4): 321–355. <https://doi.org/10.2475/ajs.274.4.321>
- Mo, X. X., 2020. Growth and Evolution of Crust of Tibetan Plateau from Perspective of Magmatic Rocks. *Earth Science*, 45(7): 2245–2257 (in Chinese with English abstract).
- Ran, H., Wang, G. H., Liang, X., et al., 2015. The Late Jurassic Diorite in Rongma Area, Southern Qiangtang Terrane, Tibetan Plateau: Product of Northward Subduction of the Bangong Co-Nujiang River Tethys Ocean. *Geological Bulletin of China*, 34(5): 815–825 (in Chinese with English abstract).
- Song, Y., Tang, J. X., Qu, X. M., et al., 2014. Progress in the Study of Mineralization in the Bangongco-Nujiang Metallogenic Belt and Some New Recognition. *Advances in Earth Science*, 29(7): 795–809 (in Chinese with English abstract).
- Streck, M. J., Leeman, W. P., Chesley, J., 2007. High-Magnesian Andesite from Mount Shasta: A Product of Magma Mixing and Contamination, not a Primitive Mantle Melt. *Geology*, 35(4): 351–354. <https://doi.org/10.1130/g23286a.1>
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313–345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Sun, J., 2015. Magmatism and Metallogenesis at Duolong Ore District, Tibet (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Sun, Z. M., 2015. Copper-Gold Mineralization and Metallogenic Regularity of Duolong Mineralization Area in Western Bangongco-Nujiang Metallogenic Belt, Tibet (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., Wyman, D. A., Xu, J. F., et al., 2007. Early Cretaceous Adakitic Granites in the Northern Dabie Complex, Central China: Implications for Partial Melting and Delamination of Thickened Lower Crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(10): 2609–2636. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.03.008>
- Wang, Q., Wyman, D. A., Xu, J. F., et al., 2008. Eocene Melting of Subducting Continental Crust and Early Uplift of Central Tibet: Evidence from Central-Western Qiangtang High-K Calc-Alkaline Andesites, Dacites and Rhyolites. *Earth and Planetary Science Letters*, 272(1–2): 158–171. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.04.034>
- Wei, S. G., 2017. Study on the Early Cretaceous Magmatism and Tectonic Dynamic Setting of the Duolong Cu Mining District in the Bangong-Nujiang Metallogenic Belt, Tibet (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Winchester, J. A., Floyd, P. A., 1977. Geochemical Discrimination of Different Magma Series and Their Differentiation Products Using Immobile Elements. *Chemical Geology*, 20: 325–343. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(77\)90057-2](https://doi.org/10.1016/0009-2541(77)90057-2)
- Wu, H., Xie, C. M., Li, C., et al., 2016. Tectonic Shortening and Crustal Thickening in Subduction Zones: Evi-

- dence from Middle-Late Jurassic Magmatism in Southern Qiangtang, China. *Gondwana Research*, 39: 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.06.009>
- Wu, F. Y., Li, X. H., Zheng, Y. F., et al., 2007. Lu-Hf Isotopic Systematics and Their Applications in Petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185–220 (in Chinese with English abstract).
- Xie, C. M., 2013. Tectonic Evolution of the Nyainrong Microcontinent, Tibet: Constraints from Geochronology and Geochemistry (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Xu, J. F., Shinjo, R., Defant, M. J., et al., 2002. Origin of Mesozoic Adakitic Intrusive Rocks in the Ningzhen Area of East China: Partial Melting of Delaminated Lower Continental Crust? *Geology*, 30(12): 1111–1114. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2002\)0301111:oomair>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)0301111:oomair>2.0.co;2)
- Xu, J. F., Wu, J. B., Wang, Q., et al., 2014. Research Advances of Adakites and Adakitic Rocks in China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 33(1): 6–13 (in Chinese with English abstract).
- Xu, R. K., Zheng, Y. Y., Zhao, P. J., et al., 2007. Definition and Geological Significance of the Gacangjian Volcanic Arc North of Dongqiao, Tibet. *Geology in China*, 34(5): 768–777 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. Q., Yang, J. S., Li, H. B., et al., 2006. The Qinghai-Tibet Plateau and Continental Dynamics: A Review on Terrain Tectonics, Collisional Orogenesis, and Processes and Mechanisms for the Rise of the Plateau. *Geology in China*, 33(2): 221–238 (in Chinese with English abstract).
- Yang, X., Tang, J. X., Yang, Z. Y., et al., 2021. Late Cretaceous Adakite in Sinongduo Area, Tibet: Implications for Petrogenesis and Mineralization. *Earth Science*, 46(5): 1597–1612 (in Chinese with English abstract).
- Yun, X. R., Cai, Z. H., He, B. Z., et al., 2019. Early Paleozoic and Mesozoic Orogenic Records in Amdo Region, Tibet: Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotopic Compositions from the Amdo Micro-Continent and South Qiangtang Terrane. *Acta Petrologica Sinica*, 35(6): 1673–1692 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, L. S., Gao, L. E., Xie, K. J., et al., 2011. Mid-Eocene High Sr/Y Granites in the Northern Himalayan Gneiss Domes: Melting Thickened Lower Continental Crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 303(3–4): 251–266. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.01.005>
- Zeng, Y. C., Xu, J. F., Chen, J. L., et al., 2021. Early Cretaceous (~138–134 Ma) Forearc Ophiolite and Tectonomagmatic Patterns in Central Tibet: Subduction Termination and re-Initiation of Meso-Tethys Ocean Caused by Collision of an Oceanic Plateau at the Continental Margin? *Tectonics*, 40(3): e2020TC006423. <https://doi.org/10.1029/2020tc006423>
- Zhang, K. J., Xia, B., Zhang, Y. X., et al., 2014. Central Tibetan Meso-Tethyan Oceanic Plateau. *Lithos*, 210–211: 278–288. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.09.004>
- Zhang, Z., Geng, Q. R., Peng, Z. M., et al., 2011. Geochemistry and Geochronology of the Caima Granites in the Western Part of the Bangong Lake-Nujiang Metallogenic Zone, Xizang. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 31(4): 86–96 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, D. C., Li, S. M., Cawood, P. A., et al., 2016. Assembly of the Lhasa and Qiangtang Terranes in Central Tibet by Divergent Double Subduction. *Lithos*, 245: 7–17. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.06.023>
- Zhu, D. C., Zhao, Z. D., Niu, Y. L., et al., 2011. The Lhasa Terrane: Record of a Microcontinent and Its Histories of Drift and Growth. *Earth and Planetary Science Letters*, 301(1–2): 241–255. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.11.005>
- Zhu, X. P., Chen, H. A., Liu, H. F., et al., 2015a. Geochronology and Geochemistry of Porphyries from the Naoru Porphyry Copper Deposit, Tibet and Their Metallogenic Significance. *Acta Geologica Sinica*, 89(1): 109–128 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, X. P., Chen, H. A., Liu, H. F., et al., 2015b. Zircon U-Pb Ages, Geochemistry of the Porphyries from the Duobuza Porphyry Cu-Au Deposit, Tibet and Their Metallogenic Significance. *Acta Geologica Sinica*, 89(3): 534–548 (in Chinese with English abstract).
- Zong, K. Q., Klemd, R., Yuan, Y., et al., 2017. The Assembly of Rodinia: The Correlation of Early Neoproterozoic (Ca. 900 Ma) High-Grade Metamorphism and Continental Arc Formation in the Southern Beishan Orogen, Southern Central Asian Orogenic Belt (CAOB). *Precambrian Research*, 290: 32–48. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.12.010>

附中文参考文献

- 陈华安, 祝向平, 马东方, 等, 2013. 西藏波龙斑岩铜金矿床成矿斑岩年代学、岩石化学特征及其成矿意义. *地质学报*, 87(10): 1593–1611.
- 陈士海, 王斌, 张健仁, 等, 2014. 班公湖-怒江成矿带西段弗野岗岩体的岩石地球化学特征及年代学研究. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 37(1): 37–44.
- 陈玉禄, 张宽忠, 杨志民, 等, 2006. 青藏高原班公湖-怒江结合带中段那曲县觉翁地区发现完整的蛇绿岩剖面.

- 地质通报, 25(6): 694—699.
- 侯增谦, 王涛, 2018. 同位素填图与深部物质探测(Ⅱ): 揭示地壳三维架构与区域成矿规律. 地学前缘, 25(6): 20—41.
- 蒋修未, 龚大兴, 邹灏, 等, 2020. 松潘-甘孜造山带独松花岗岩体地球化学特征、U-Pb年代学及地质意义. 矿物岩石, 40(3): 26—41.
- 李宏伟, 赵鹏, 2019. 西藏自治区安多县纳革矿区铁铜矿构造演化及研究意义. 四川有色金属, (3): 27—29.
- 李兴奎, 李才, 孙振明, 等, 2015. 西藏赛角铜金矿闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素和地球化学特征及成矿意义. 地质通报, 34(5): 908—918.
- 林彬, 方向, 王艺云, 等, 2019. 西藏铁格隆南超大型铜(金、银)矿含矿斑岩岩石成因及其对多龙地区早白垩世成矿动力学机制的启示. 岩石学报, 35(3): 642—664.
- 刘海永, 岳鋆璋, 顿珠旺堆, 等, 2019. 青藏高原中部麻米地区晚侏罗世火山岩岩石成因及其地质意义. 地球科学, 44(7): 2368—2382.
- 刘敏, 2012. 青藏高原中部聂荣微陆块侏罗纪早期富碱侵入岩的岩石成因及构造意义(博士学位论文). 北京: 中国地质大学.
- 刘若涵, 何碧竹, 郑孟林, 等, 2019. 羌塘盆地东部晚三叠世-侏罗纪构造-沉积演化. 岩石学报, 35(6): 1857—1874.
- 莫宣学, 2020. 从岩浆岩看青藏高原地壳的生长演化. 地球科学, 45(7): 2245—2257.
- 冉皞, 王根厚, 梁晓, 等, 2015. 青藏高原南羌塘荣玛晚侏罗世闪长岩: 班公湖-怒江特提斯洋向北俯冲产物. 地质通报, 34(5): 815—825.
- 宋扬, 唐菊兴, 曲晓明, 等, 2014. 西藏班公湖-怒江成矿带研究进展及一些新认识. 地球科学进展, 29(7): 795—809.
- 孙嘉, 2015. 西藏多龙矿集区岩浆成因与成矿作用研究(博士学位论文). 北京: 中国地质大学.
- 孙振明, 2015. 西藏班-怒成矿带西段多龙矿集区铜金成矿作用与成矿规律(博士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 韦少港, 2017. 西藏班-怒成矿带多龙矿集区早白垩世岩浆作用及动力学背景(博士学位论文). 北京: 中国地质大学.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等, 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报, 23(2): 185—220.
- 解超明, 2013. 青藏高原聂荣微陆块构造演化——年代学与地球化学制约(博士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 许继峰, 邬建斌, 王强, 等, 2014. 埃达克岩与埃达克质岩在中国的研究进展. 矿物岩石地球化学通报, 33(1): 6—13.
- 许荣科, 郑有业, 赵平甲, 等, 2007. 西藏东巧北砾岩见岛弧的厘定及地质意义. 中国地质, 34(5): 768—777.
- 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等, 2006. 青藏高原与大陆动力学: 地体拼合、碰撞造山及高原隆升的深部驱动力. 中国地质, 33(2): 221—238.
- 杨听, 唐菊兴, 杨宗耀, 等, 2021. 西藏斯弄多地区晚白垩世埃达克岩: 岩石成因及成矿潜力指示. 地球科学, 46(5): 1597—1612.
- 贞晓瑞, 蔡志慧, 何碧竹, 等, 2019. 西藏安多地区早古生代及中生代造山记录: 来自安多微陆块-南羌塘锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素研究. 岩石学报, 35(6): 1673—1692.
- 张璋, 耿全如, 彭智敏, 等, 2011. 班公湖-怒江成矿带西段材玛花岗岩体岩石地球化学及年代学. 沉积与特提斯地质, 31(4): 86—96.
- 祝向平, 陈华安, 刘鸿飞, 等, 2015a. 西藏拿若斑岩铜金矿床成矿斑岩年代学、岩石化学特征及其成矿意义. 地质学报, 89(1): 109—128.
- 祝向平, 陈华安, 刘鸿飞, 等, 2015b. 西藏多不杂斑岩铜矿斑岩锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学特征及其成矿意义. 地质学报, 89(3): 534—548.