

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2021.04.005

冈底斯带东段日多地区航木多岩体地球化学、锆石 U-Pb 年代学、Lu-Hf 同位素特征及其地质意义

潘亮^{1,2}, 周斌¹, 鲁麟¹, 韩奎¹, 高峰¹, 乔新星¹

(1. 陕西省地质调查院, 陕西 西安 710054; 2. 陕西省矿产地质调查中心, 陕西 西安 710068)

摘要:冈底斯带古新世岩浆岩被认为是新特提斯洋消亡到印度与欧亚大陆碰撞过程的产物。林子宗群典中组火山岩及同期酸性侵入岩是冈底斯带东段典型的古新世岩浆岩组合,其对于研究冈底斯带地球动力学背景的判别有重要的指示意义。前人对林子宗群典中组火山岩虽进行过大量的研究工作,而对同期侵入岩研究较少,尤其是其成因和演化过程仍然存在较多分歧。本次以冈底斯带东段日多地区古新世航木多岩体为研究对象,进行岩石地球化学、锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学及锆石 Lu-Hf 同位素分析。结果表明,3 件花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄加权平均值分别为 (62.6 ± 0.6) Ma、 (64.9 ± 0.7) Ma 和 (62.2 ± 0.7) Ma,与林子宗群典中组火山岩(69~60 Ma)同期形成。岩石地球化学分析表明,岩石具有高 SiO_2 (72.23%~76.02%)、高铝 Al_2O_3 (12.73%~14.72%)、高 K_2O (2.19%~4.84%)、低 MgO (0.01%~0.52%)、低 TiO_2 (0.12%~0.24%)、高分异(86.35%~95.02%)、过铝质($A/\text{CNK}=1.01\sim1.26$)的地球化学性质,为 S 型花岗岩特征。但是,锆石 Lu-Hf 同位素结果显示, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-10.64\sim10.79$,二阶段模式年龄($t_{\text{DM}2}$)为 443~1 810 Ma,暗示航木多岩体源区主要为新生地壳部分熔融,具有 I 型花岗岩特征。根据岩石微量元素对物源的判别,航木多岩体具有与日多盆地内晚侏罗世—晚白垩世的碎屑岩沉积物一致的岩石学特征和地球化学特征,显示出轻稀土富集的稀土配分模式,并且富集大离子亲石元素 Rb、K、Th、U 和亏损高场强元素 Nb、Ta、P、Ti。综合前人成果,研究认为,航木多岩体为叶巴火山弧快速风化后在日多盆地内形成的具有类似新生地壳岩石学和地球化学特征的沉积物于同碰撞背景下发生部分熔融,同时还加入少量古老结晶基底,并经历了分离结晶作用而形成的具有弧岩浆特征的 S 型花岗岩。

关键词:航木多岩体; 锆石 U-Pb 年代学; 锆石 Lu-Hf 同位素; 新生地壳; 日多地区

中图分类号: P595 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-6248(2021)04-0059-23

Geochemistry, Zircon U-Pb Chronology, Lu-Hf Isotopic Compositions and Geological Significance of the Hangmuduo Granite in Riduo Area of Eastern Gangdise Belt

PAN Liang^{1,2}, ZHOU Bin¹, LU Lin¹, HAN Kui¹, GAO Feng¹, QIAO Xinxing¹

(1. Shaanxi Institute of Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Shaanxi Center of Mineral Geological Survey, Xi'an 710068, Shaanxi, China)

Abstract: The Paleocene magmatic rocks in the Gangdese belt are considered to be the product of

收稿日期:2020-07-15;修回日期:2021-04-18

基金项目:中国地质调查局“冈底斯-喜马拉雅铜矿资源基地调查”(DD20160015),陕西省地质勘查基金“陕西省勉略宁地区锰矿地质调查”(61202009346)。

作者简介:潘亮(1986-),男,工程师,本科,主要从事区域地质调查工作。E-mail:325600846@qq.com。

the demise of the New Tethys Ocean to the collision between India and Eurasia. The volcanic rocks and the contemporaneous acidic intrusive rocks of the Dianzhong Formation of the Linzizong group are typical paleocene magmatic assemblages of the eastern Gangdise belt, which is an important indicator to the geodynamic background of the Gangdise belt. Previous researchers have done much work on the volcanic rocks of the Dianzhong Formation of the Linzizong group, but few on the contemporaneous intrusions. There are still disputes on its genesis and evolution. This paper studied the Paleocene Hangmuduo granite in Riduo area of eastern Gangdise belt with the bulk-rock geochemistry, zircon U - Pb geochronology, and Lu - Hf isotope in order to shed light on this issue. The results showed that the zircon U - Pb ages of the three granites samples are (62.6 ± 0.6) Ma, (64.9 ± 0.7) Ma and (62.2 ± 0.7) Ma respectively, in accordance with the ages of the Dianzhong Formation of the Linzizong group. Geochemically, the rocks show the characteristics of high SiO_2 ($72.23\% - 76.02\%$), Al_2O_3 ($12.73\% - 14.72\%$) and K_2O ($2.19\% - 4.84\%$); low MgO ($0.01\% - 0.52\%$) and TiO_2 ($0.12\% - 0.24\%$); high differentiation (DI $86.35\% - 95.02\%$) and peraluminous (A/CNK $1.01 - 1.26$), belonging to S-type granites. However, the zircon Lu - Hf isotope results show that the $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ value is mainly between -10.64 and 10.79 , and the two-stage model age (t_{DM2}) is between 443 and 1810 Ma. It suggests that the source of the Hangmuduo granitic pluton is mainly the partial melting of the juvenile crust and has the characteristics of I-type granite. The identification of trace elements of Hangmuduo granite shows the enrichment of LILE (Rb, K, Th and U) and the depletion of HFSE (Nb, Ta, P and Ti), with the light rare earth-enriched rare earth distribution model petrologically and geochemically, which is consistent with clastic sediments in Riduo basin from late Jurassic to late Cretaceous. Combined with the previous research in Gangdise belt, it is held that the Hangmuduo granite had been derived from the partial melting of clastic sediments under the collision from the rapid weathering of the Yeba volcanic arc in Riduo basin, which has similar lithological and geochemical characteristics to juvenile crust. Meanwhile, a small amount of ancient crystallization basement mingled and formed S-type granite with the arc magmatic characteristics through crystallization differentiation.

Keywords: Hangmuduo granite; Zircon U - Pb chronology; Lu - Hf isotopic composition; Juvenile crust; Riduo area

冈底斯带是位于雅鲁藏布缝合带(YZSZ)与班公湖-怒江缝合带(BNSZ)之间近东西向长约 $2\,500$ km、南北宽 $150 \sim 300$ km、面积达 $45 \times 104 \text{ km}^2$ 的巨型构造-岩浆带(朱弟成, 2008), 其广泛发育的中-新生代岩浆岩记录了古、新特提斯洋俯冲和印度-欧亚大陆碰撞造山过程的重要地质信息, 对于反演拉萨地块的地质演化意义重大。古新世—始新世的岩浆岩作为冈底斯带岩浆活动的重要产物, 前人普遍认为具有弧岩浆特征(莫宣学等, 2003; Chung, et al., 2005; Wang, et al., 2015a), 但其成因和形成的地球动力学背景仍存在较多分歧, 归纳起来主要有 3 点: ①形成于新特提斯洋北向俯冲于欧亚大陆

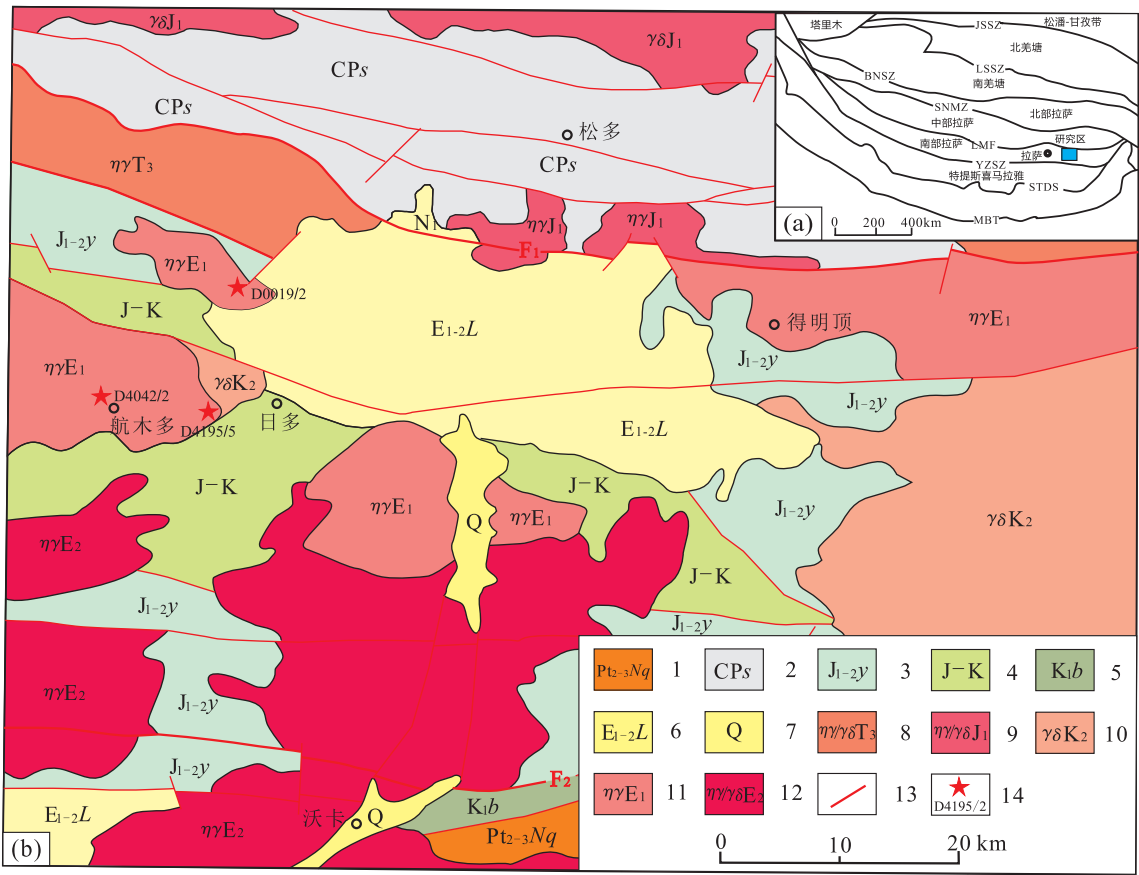
背景下的俯冲造弧阶段, 而印度-欧亚大陆的碰撞在 45 Ma 之后才开始(Chung, et al., 2005; 贾建称等, 2005)。②形成于印度-欧亚大陆碰撞早期阶段的新特提斯洋俯冲向印度-欧亚大陆碰撞过渡的背景下, 与残留的新特提斯洋壳部分熔融有关(莫宣学等, 2003; 赵志丹等, 2006)。③形成于印度-欧亚大陆碰撞背景下, 俯冲的印度大陆板片交代富集的地幔楔导致其熔融, 产生具有岩浆弧地球化学特征的岩浆(侯增谦等, 2006)。

此外, 花岗岩是大陆地壳的重要组成部分, 其作为区域构造岩浆演化的产物保留了丰富的地质信息, 对研究大陆地壳的形成、演化过程具有重要

意义(Zhu D C, et al., 2011)。林子宗群典中组火山岩及同期酸性侵入岩是冈底斯带东段典型的古新世岩浆岩组合。前人对林子宗群典中组火山岩的成因研究较为深入,对于古新世大量的同期花岗岩研究较少,而且报道以 I 型花岗岩为主(张洪亮等, 2019; 张泽明等, 2019; 李永鹏, 2019), S 型花岗岩则鲜有报道。因此,笔者在西藏日多地区 1:5 万区域地质调查项目工作和前人相关研究的基础上,以冈底斯带东段日多地区航木多岩体为研究对象,通过岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学、锆石 Lu-Hf 同位素研究等,探讨其成岩时代、岩石成因与构造背景,以期为古新世新特提斯洋俯冲消亡、印度-欧亚大陆碰撞的板块运动和地球动力学背景研究提供新的约束。

1 区域地质背景

研究区地处冈瓦纳大陆北缘,位于冈底斯带东段的墨竹工卡县日多地区,沙莫勒-麦拉-洛巴堆-米拉山断裂以南,雅鲁藏布江结合带以北(图 1)。主要经历了松多古特提斯造山带后碰撞伸展、新特提斯洋的俯冲-闭合过程、印度大陆与亚洲大陆碰撞和青藏高原的整体隆升的发展与演化。从中生代以来,岩浆活动频繁,褶皱、断裂构造较发育,地质构造复杂,现今之盆山格局是由中生代盆山演化而成。区内米拉山逆冲推覆带(F₁)以北大面积出露低绿片岩相-低角闪岩相石炭-二叠系松多岩群(CPs),沃卡脆韧性剪切带以南出露高绿片岩相-角闪岩相



1. 念青唐古拉岩群;2. 松多岩群;3. 叶巴组;4. 包括多底沟组、林布宗组、楚木龙组、塔克那组和设兴组;5. 比马组;6. 林子宗群;7. 第四系;8. 晚三叠世二长花岗岩或花岗闪长岩;9. 早侏罗世二长花岗岩或花岗闪长岩;10. 晚白垩世花岗闪长岩;11. 古新世二长花岗岩;12. 始新世二长花岗岩或花岗闪长岩;13. 断层;14. 测年样品位置;JSSZ. 金沙江缝合带;LSSZ. 龙木错-双湖缝合带;BNSZ. 班公湖-怒江缝合带;SNMZ. 狮泉河-纳木错蛇绿混杂岩带;LMF. 洛巴堆-米拉山断裂带;YZSZ. 印度-雅鲁藏布江缝合带;STDS. 藏南拆离系;F₁. 米拉山口逆冲推覆带;F₂. 沃卡脆韧性剪切带

图 1 (a)拉萨地块南缘日多地区大地构造位置图和(b)区域地质简图
Fig. 1 (a)Tectonic position and (b)geological map of Riduo area, Eastern Gangdise Belt

中新元古代念青唐古拉群($Pt_{2-3}Nq$)和早白垩世比麻组(K_1b)火山-沉积岩,两者之间出露新早一中侏特提斯洋俯冲北向俯冲阶段形成的侏罗世叶巴组($J_{1-2}y$)海相火山岩,之上为晚侏罗世—白垩纪一套浅海陆棚相—滨岸相碳酸盐岩—碎屑岩沉积建造。这些地层普遍被古近纪欧—亚大陆碰撞阶段形成的林子宗群($E_{1-2}L$)火山岩角度不整合覆盖(Zhao ZD, et al., 2009; 马元, 2017; 韩奎等, 2018; 周斌等, 2018, 2019; 潘亮等, 2018)。出露的侵入岩主要为中—新生代早中侏特提斯洋俯冲北向俯冲和欧—亚大陆碰撞阶段形成的花岗闪长岩、二长花岗岩及二长花岗斑岩等。

航木多岩体位于研究区中部航木多一带,呈岩基、岩株产出,岩体受区域构造控制,多呈东西向展布,出露总面积约为 300 km^2 (图 1),岩性主要为二长花岗岩和二云二长花岗岩,其岩石学特征如下。

二长花岗岩:岩石呈灰色,细粒花岗结构、文象结构、似斑状结构,块状构造,粒径为 $0.06\sim 1.2\text{ mm}$,主要矿物成分为斜长石(35%)、钾长石(35%)、石英(25%)、黑云母(5%)。斜长石由更长石组成,呈半自形晶,双晶发育,晶体表面相对较干净,常被钾长石包裹或交代,集合体呈团块状;钾长石主要为条纹长石、正长石,半自形宽板状、不规则粒状,边缘呈锯齿状,部分晶体包裹斜长石等细小晶体,并交代之;部分与石英交生形成文象结构,集合体呈团块状;石英呈他形粒状,包裹斜长石,与钾长石交生呈文象结构,集合体呈团块状;黑云母呈片状,析出铁质,次生绿泥石化,杂乱分布(图 2c)。

二云二长花岗岩:岩石呈浅灰色,中细粒结构,半自形粒状结构,块状构造,粒径为 $0.5\sim 2.3\text{ mm}$,岩石主要矿物成分有石英(20%)、碱性长石(45%)、斜长石(25%)、黑云母(6%)、白云母(4%)。斜长石种属为更—中长石,斜长石次生变化强烈,绢云母化、高岭土化,条纹长石次生变化为泥化强烈;石英呈不规则粒状、他形,裂纹发育,见石英呈不规则脉状在条纹长石边部穿插生长(图 2d)。

2 分析方法

笔者对航木多岩体开展岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学和锆石 Lu-Hf 同位素研究的样品来自实测地质剖面及主干路线中具代表性新鲜岩石。

分别对 8 件二长花岗岩样品进行主、微量元素测试,对其中 3 件(D4042/2、D4195/5、D0019/2)二长花岗岩样品进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年、锆石 Lu-Hf 同位素分析。

2.1 主量和微量元素

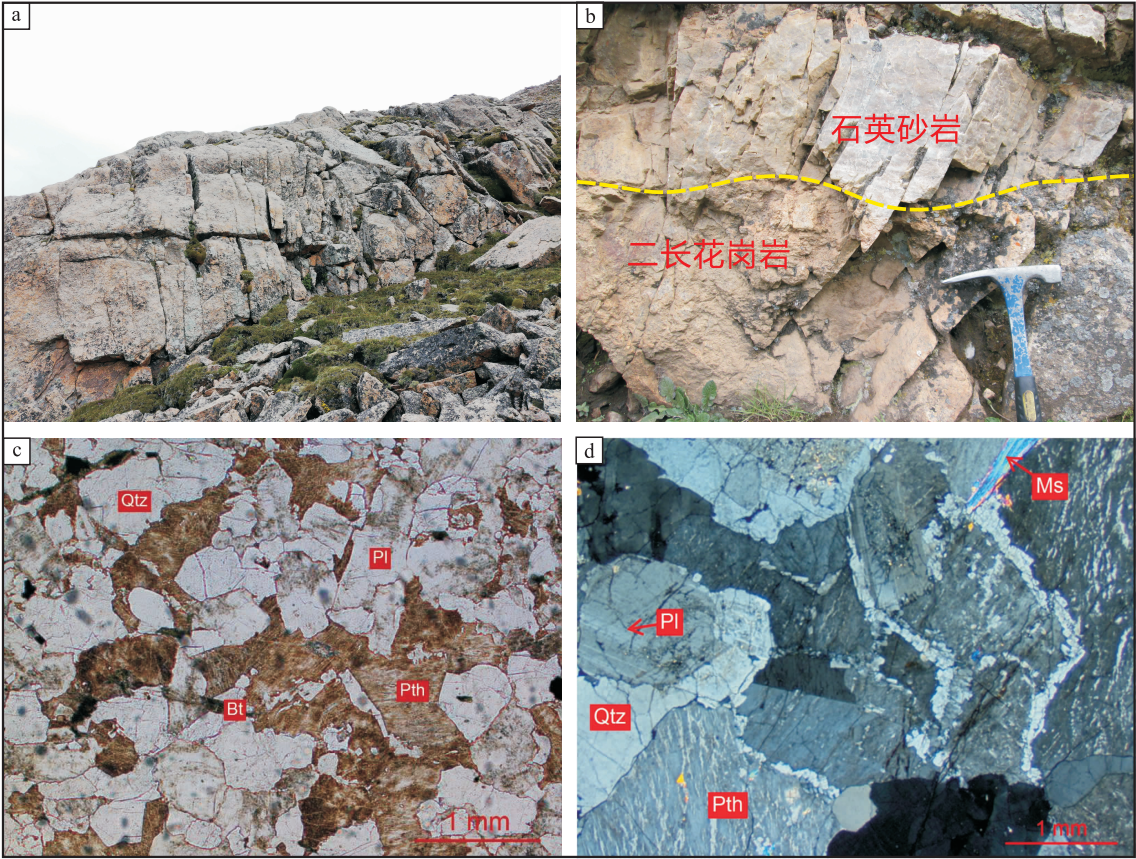
主量和微量元素分析测试由核工业二〇三研究所分析测试中心完成,测试结果见表 1。主量元素采用 XRF 法,在荷兰帕纳科制造的 Ax-iosX 射线光谱仪上测定,分析误差小于 5%;经烧失量校正后,计算主要岩石地球化学指数。微量元素的测定采用 ICP-MS 法,在 ThermoFisherScientific 制造的 XSERIES II 型电感耦合等离子体发射光谱仪上测定,分析误差一般小于 5%;对稀土元素、微量元素数据采用球粒陨石、原始地幔数据(Boynton, 1984; Sun S S, et al., 1989)进行标准化,并计算了主要稀土元素、微量元素参数。

2.2 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年

样品锆石挑选由西安瑞石地质科技公司完成。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄分析由西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。将所挑选出的锆石放置于环氧树脂中进行打磨,待锆石中心面露出后进行抛光,之后对处理好的样品进行反射光及阴极发光(CL)照相。阴极发光照相采用美国 Gatan 公司的 MonoCL3+X 型阴极荧光探头获得。锆石测试点的选择通过发射光照片和阴极发光照片反复对比,避开内部裂隙和包体,以期获得较准确的年龄数据。锆石 U-Pb 同位素分析在四极杆 ICP-MSElan6100DRC 上进行测定。激光剥蚀系统是德国 MicroLas 公司生产的 GeoLas200 M。激光束斑直径为 $30\text{ }\mu\text{m}$,激光脉冲 10 Hz ,能量为 $32\sim 36\text{ MJ}$ 。同位素组成采用澳大利亚锆石标样 GEMOC GJ-1 作为内标进行校正,采用锆石标样 Plesovice 作为外部标样进行监控,并采用 Glitter 和 Isoplot 进行数据处理和作图。在进行年龄数据分析时,结合 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 计算锆石各测点数据的谐和性,剔除 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄相对于 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄偏差大于 10% 的测点数据。

2.3 锆石 Lu-Hf 同位素

锆石 Lu-Hf 同位素分析由西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。采用配备 193 nm 激光 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪进行分析,分析过程中采用 8 Hz 的激光频率、 100 mJ 的激



Pl. 斜长石;Qtz. 石英;Pth. 条纹长石;Ep. 绿帘石;Bt. 黑云母;Ms. 白云母

图 2 (a、b)日多地区航木多岩体野外照片和(c、d)镜下照片

Fig. 2 (a,b)Outcrop photos and (c,d) microscopic pictures of the Hangmuduo Granite in Riduo area

光强度和 50 μm 的激光束斑直径,以氦作为剥蚀物质的载气,采用标准锆石 91 500 做外部标样。Hf 同位素测定时采用 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu}=0.026\ 69$ 和 $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb}=0.588\ 6$ 进行同量异位干扰校正测定样品的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值。锆石 Hf 二阶段模式年龄($t_{\text{DM}2}$)计算采用上地壳平均成分(0.008)计算,实验过程及数据处理方法见 Yuan, et al. (2008)。

3 分析结果

3.1 主量、微量元素地球化学

8 件二长花岗岩样品具高 SiO_2 (72.23% ~ 76.02%, 平均为 74.88%)、高铝 Al_2O_3 (12.73% ~ 14.72%, 平均为 13.67%)、高 K_2O (2.19% ~ 4.84%, 平均为 3.66%)、低 MgO (0.01% ~ 0.52%, 平均为 0.25%)、低 TiO_2 (0.12% ~ 0.24%, 平均为 0.18%), $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值为 0.57% ~ 1.42%, ALK 为 6.01% ~

8.6%, 分异指数 DI 为 86.35% ~ 95.02% 等特点,显示岩石经历了结晶分异作用,大多数样品表现为高分异花岗岩。

在花岗岩类 TAS 分类图解(图 3a)中,所有样品均投入花岗岩区。在 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ 图解(图 3b)中,绝大部分样品投点位于高钾钙碱性系列,少部分样品投点位于钙碱性系列与高钾钙碱性系列的分界线附近。所有样品的里特曼指数均小于 3.3 ($\delta=1.1 \sim 2.53$),岩石均属钙碱性系列。样品铝饱和指数 $A/\text{CNK}=1.01 \sim 1.26$,属铝质-过铝质花岗岩。在 $A/\text{CNK} - A/\text{NK}$ 图解(图 3c)中,所有样品投点均位于过铝质区域。

稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(图 4a)中,配分曲线总体呈右倾,稀土元素总量变化围较大, $\Sigma\text{REE}=86.34 \times 10^{-6} \sim 174.23 \times 10^{-6}$ (平均为 119.39×10^{-6}),轻、重稀土元素比值 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}=7 \sim 11.51$ (平均值为 8.55), $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=$

表 1 日多地区航木多岩体主量元素(%)和微量元素(10⁻⁶)分析结果表

Tab. 1 Major element (%) and trace element (10⁻⁶) compositions of volcanic rocks of the Hangmuduo granite in Riduo area

样品编号	D0027/1	D4042/2	D4096/1	D4195/5	D0938/1	D2861/4	D0019/2	D6322/1
SiO ₂	72.23	75.68	75.00	75.93	73.83	74.93	76.02	75.41
TiO ₂	0.24	0.16	0.21	0.23	0.17	0.12	0.14	0.15
Al ₂ O ₃	14.72	13.93	13.97	13.59	13.08	13.38	13.95	12.73
Fe ₂ O ₃	0.78	1.03	0.57	0.84	0.47	0.68	0.71	0.91
FeO	1.65	0.68	1.22	1.17	1.64	1.25	0.97	0.53
MnO	0.09	0.05	0.08	0.07	0.10	0.05	0.07	0.08
MgO	0.52	0.22	0.46	0.47	0.20	0.10	0.03	0.01
CaO	0.70	1.09	1.61	1.16	1.37	0.94	0.61	0.34
Na ₂ O	4.64	3.47	3.49	3.82	3.84	3.75	3.69	3.41
K ₂ O	3.96	3.23	3.00	2.19	4.08	4.11	3.89	4.84
P ₂ O ₅	0.07	0.03	0.05	0.07	0.03	0.03	0.02	0.02
LOI	0.80	1.01	0.79	0.74	1.14	0.69	0.40	1.03
Σ	100.02	100.01	100.02	100.02	100.03	100.02	100.03	100.01
TFe ₂ O ₃	2.61	1.79	1.93	2.14	2.29	2.07	1.79	1.50
K ₂ O/Na ₂ O	0.85	0.93	0.86	0.57	1.06	1.10	1.05	1.42
Mg [#]	31.71	22.27	35.71	33.86	16.91	10.12	3.76	1.53
AR	3.52	2.61	2.43	2.38	3.43	3.43	3.17	4.42
ALK	8.60	6.70	6.49	6.01	7.92	7.86	7.58	8.25
A/CNK	1.12	1.25	1.17	1.26	1.01	1.09	1.22	1.11
FL	92.47	86.01	80.12	83.82	85.25	89.32	92.55	96.04
MF	82.35	88.63	79.59	81.05	91.33	95.08	98.25	99.31
DI	90.19	89.01	86.35	87.45	90.18	91.30	92.02	95.02
σ	2.53	1.37	1.32	1.1	2.03	1.93	1.74	2.09
t _{Zr} (℃)	759	738	732	775	728	690	732	745
Sr	145	141	152	322	130	86.2	51.0	51.2
Zr	110	71.0	70.6	110	81.8	43.9	67.0	86.7
Ba	471	453	464	593	339	310	319	210
Rb	154	146	144	123	158	164	188	239
Th	12.7	14.4	11.4	8.03	17.8	15.8	17.2	21.2
U	1.67	4.89	1.66	2.18	3.39	2.78	2.92	3.52
Nb	12.6	11.7	8.19	9.07	17.8	11.6	14.0	12.8
Hf	4.45	3.37	1.76	1.12	1.59	1.67	1.80	3.30
Ta	1.02	0.63	0.80	0.62	1.75	0.98	1.39	0.78
La	26.1	24.8	20.4	20.6	31.4	19.4	34.4	35.4
Ce	49.8	46.5	41.4	37.3	56.3	36.3	65.2	72.5
Pr	5.33	4.94	4.61	4.14	6.08	4.62	7.28	8.30
Nd	17.0	17.1	16.3	13.4	20.1	14.5	24.3	29.8

续表 1

样品编号	D0027/1	D4042/2	D4096/1	D4195/5	D0938/1	D2861/4	D0019/2	D6322/1
Sm	3.50	2.74	3.40	2.41	4.04	3.11	4.77	6.09
Eu	0.88	0.75	0.73	0.74	0.87	0.84	0.73	0.60
Gd	3.46	2.75	3.39	2.38	4.08	3.01	4.46	5.41
Tb	0.50	0.38	0.50	0.35	0.66	0.47	0.69	0.91
Dy	2.84	1.89	2.81	1.84	3.44	2.67	3.72	5.21
Ho	0.62	0.42	0.65	0.40	0.80	0.63	0.88	1.25
Er	1.71	1.19	1.91	1.09	2.17	1.70	2.45	3.42
Tm	0.30	0.20	0.33	0.18	0.37	0.30	0.42	0.61
Yb	1.92	1.36	2.03	1.28	2.86	2.13	2.92	4.08
Lu	0.31	0.22	0.32	0.23	0.36	0.34	0.50	0.65
Y	18.9	12.6	20.1	12.4	26.2	18.3	27.7	36.8
ΣREE	114.27	105.24	98.78	86.34	133.53	90.02	152.72	174.23
LREE	102.61	96.83	86.84	78.59	118.79	78.77	136.68	152.69
HREE	11.66	8.41	11.94	7.75	14.74	11.25	16.04	21.54
LREE/HREE	8.80	11.51	7.27	10.14	8.06	7.00	8.52	7.09
La _N /Yb _N	9.75	13.08	7.21	11.54	7.88	6.53	8.45	6.22
La _N /Sm _N	4.81	5.84	3.87	5.52	5.02	4.03	4.66	3.75
Gd _N /Yb _N	1.49	1.67	1.38	1.54	1.18	1.17	1.26	1.10
δEu	0.76	0.83	0.65	0.93	0.65	0.83	0.48	0.31

注:测试单位为核工业二〇三研究所分析测试中心,2017。

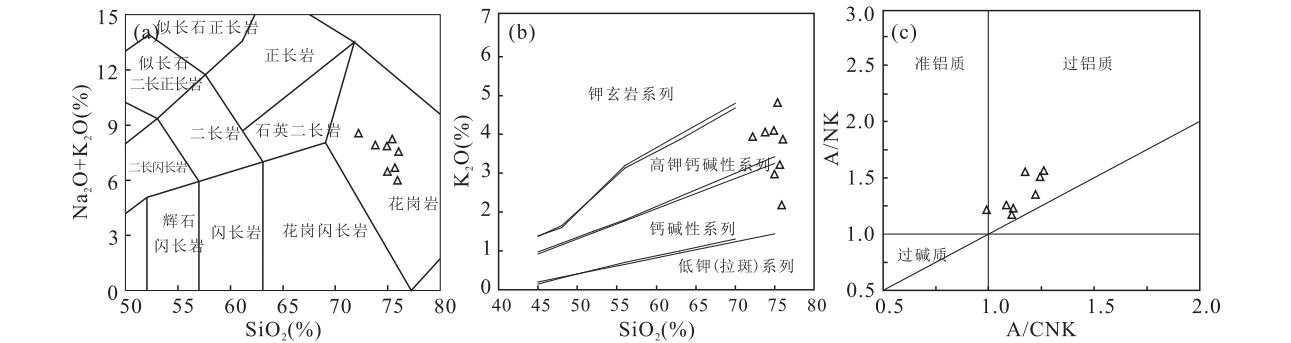


图 3 (a)日多地区航木多岩体花岗岩类 TAS 分类图解、(b)SiO₂ - K₂O 图解和 (c)A/CNK - A/NK 图解

Fig. 3 (a) Na₂O + K₂O - SiO₂, (b) K₂O - SiO₂ and (c) A/CNK - A/NK diagram of the Hangmuduo granite in Riduo area

6.22~13.08(平均值为 8.83),均表明轻稀土较重稀土富集,绝大部分样品的稀土元素分异程度较高。(La/Sm)_N=3.75~5.84(平均值为 4.69),表明轻稀土元素内部也存在明显的分馏作用;而(Gd/Yb)_N=1.1~1.67(平均值为 1.35),表明重稀土元素内部基本无分馏。δEu=0.31~0.93(平均值为 0.68)整体显示为负异常,部分显示为强负 Eu 异

常,反映在岩浆源区斜长石有残留或经历了分离结晶作用。稀土元素配分曲线走势基本一致,反映样品各单元元素相关性较好,为同源岩浆演化产物。在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 4b)中,曲线整体右倾,大离子亲石元素 K、Rb、Th、U 等相对富集,Ba、Sr 等相对亏损,Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素相对亏损。Sr 相对亏损,反映斜长石的分离结

晶作用,这与 Eu 的负异常一致。Zr 相对富集。样品中 Nb、Ta 亏损反映岩浆源区有壳源物质的混入, Ti、P 的亏损指示可能岩浆起源于富集地幔或地壳岩石,也可能与磷灰石、钛铁矿的分离结晶密切相关。K 的富集指示岩石是花岗质岩石或岛弧火山岩作用有关。蛛网图曲线上 Rb-Th 呈峰, Nb-Ta 呈槽,则指示岩浆受到上地壳混染。不同样品微量元素相关性较好,曲线形态相似,反映为同源岩浆演化产物。

3.2 锆石 U-Pb 年代学

本次在 3 件花岗岩样品中挑选出的锆石颗粒呈浅黄色-无色透明,多呈自形长柱状,部分呈短柱状,长宽比约为 2:1~3:1,粒径在 50~150 μm。在阴极发光图像中,结晶程度较好,内部结构简单,显示明显的岩浆型锆石振荡环带结构(图 5)。锆石的 Th/U 值为 0.63~3.11(平均为 1.14)(表 2),与岩浆锆石 Th/U 值(>0.1)相当(Rubatto,2002),表明 3 件二长花岗岩样品的锆石均为岩浆成因锆石。

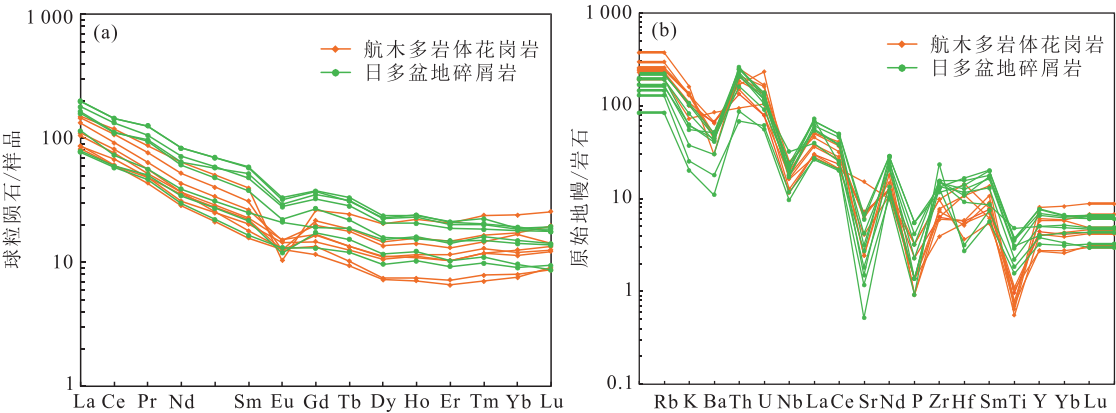


图 4 (a)日多地区航木多岩体稀土元素球粒陨石标准化配分模式图、(b)微量元素原始地幔标准化蛛网图
(标准化值据 Sun, et al. 1989)

Fig. 4 (a)Chondrite normalized REE-patterns diagram and (b)primitive mantle normalized spider diagram of the Hangmuduo granite in Riduo area



实线圆圈示 U-Pb 测点;虚线圆圈示 Lu-Hf 测点;数字代表测点号及年龄(Ma)

图 5 日多地区航木多岩体锆石阴极发光(CL)图像及测点位置示意图

Fig. 5 CL images and analyzing locations of zircons from the Hangmuduo granite in Riduo area

表 2 日多地区航木多岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素分析结果表

Tab. 2 LA-ICP-MS U-Th-Pb isotopic data of zircons from the Hangmuduo Granite in Riduo area

分析点	Pb	Th	U	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	
	含量(10 ⁻⁶)				比值(±1σ)		比值(±1σ)		比值(±1σ)		比值(±1σ)		比值(±1σ)		比值(±1σ)	
D4042/2-01	22.71	755.03	779.89	0.97	0.047 204 3	0.001 736 7	0.063 498 6	0.002 634 2	0.009 802 1	0.000 284 4	61	85	63	3	63	2
D4042/2-02	8.18	320.60	245.64	1.31	0.050 642 3	0.004 568 6	0.069 019 8	0.007 446 8	0.009 742 4	0.000 340 2	233	10	68	7	62	2
D4042/2-04	25.24	874.47	878.83	1.00	0.050 161 9	0.001 787 9	0.065 901 2	0.002 977 7	0.009 690 2	0.000 427 9	211	83	65	3	62	3
D4042/2-05	5.98	156.87	206.40	0.76	0.053 456 3	0.003 439 3	0.071 385 5	0.004 772 6	0.009 683 8	0.000 217 2	350	146	70	5	62	1
D4042/2-06	30.12	991.42	1 028.12	0.96	0.049 460 9	0.002 650 4	0.066 329 8	0.003 446 1	0.009 733 1	0.000 160 6	169	131	65	3	62	1
D4042/2-08	23.91	729.84	856.67	0.85	0.049 070 3	0.001 479 4	0.065 944 9	0.001 602 9	0.009 810 2	0.000 248 5	150	70	65	2	63	2
D4042/2-09	68.89	2 842.28	1 877.94	1.51	0.048 145 5	0.002 362 4	0.064 273 3	0.002 178 1	0.009 789 8	0.000 376 9	106	111	63	2	63	2
D4042/2-10	13.11	362.17	519.48	0.70	0.048 859 9	0.003 104 4	0.065 886 8	0.004 099 4	0.009 800 6	0.000 197 9	143	141	65	4	63	1
D4042/2-11	6.58	198.53	249.34	0.80	0.049 115 1	0.002 58	0.065 424 3	0.003 539 3	0.009 718 2	0.000 207 6	154	119	64	3	62	1
D4042/2-12	6.63	198.36	266.96	0.74	0.046 632	0.002 631 9	0.062 782 1	0.003 727 6	0.009 794	0.000 280 6	32	130	62	4	63	2
D4042/2-13	3.57	92.02	129.99	0.71	0.051 576 2	0.004 674 4	0.068 483 1	0.006 474	0.009 705 8	0.000 251 1	265	209	67	6	62	2
D4042/2-14	6.59	191.62	245.96	0.78	0.044 339 1	0.0028125	0.059 402 4	0.003 877 1	0.009 746 2	0.000 251 4		59	4	63	2	
D4042/2-15	30.43	1 038.25	1 047.76	0.99	0.050 204 9	0.0014351	0.068 051 5	0.003 514 9	0.009 746 3	0.000 283 8	211	67	67	3	63	2
D4042/2-16	5.48	150.04	201.49	0.74	0.048 749 5	0.003174	0.064 633 7	0.004 161 4	0.009 702 8	0.000 172 7	200	83	64	4	62	1
D4042/2-17	10.88	342.68	362.10	0.95	0.049 575 9	0.0016365	0.066 768 5	0.002 536 3	0.009 787 1	0.000 254 8	176	78	66	2	63	2
D4042/2-18	4.65	138.83	175.26	0.79	0.046 119 8	0.0038987	0.062 593 1	0.005 347 5	0.009 769 3	0.000 233 1	400	-206	62	5	63	1
D4042/2-19	3.85	104.43	154.60	0.68	0.050 773 3	0.0044036	0.067 450 8	0.005 389 2	0.009 795 2	0.000 240 4	232	202	66	5	63	2
D4042/2-20	3.29	111.17	114.28	0.97	0.043 856 7	0.0048678	0.058 832 2	0.006 362 7	0.009 809 2	0.000 217 7		58	6	63	1	
D4042/2-22	16.47	640.84	481.77	1.33	0.049 138 6	0.0027621	0.065 714	0.003 504 2	0.009 779 4	0.000 269 2	154	131	65	3	63	2
D4042/2-23	4.00	118.37	151.68	0.78	0.055 556 3	0.003611	0.075 571 2	0.006 016 3	0.009 804 8	0.000 290 6	435	144	74	6	63	2
D4042/2-24	29.00	970.46	1 112.90	0.87	0.049 712 4	0.0017561	0.066 560 9	0.002 767 4	0.009 736 1	0.000 355	189	81	65	3	62	2
D4042/2-25	5.33	136.67	209.43	0.65	0.052 881 8	0.003 190 2	0.070 614 7	0.004 121 2	0.009 747 1	0.000 238 5	324	132	69	4	63	2
D4042/2-26	31.34	1 010.07	1 155.34	0.87	0.049 271 7	0.001 7564	0.065 926 1	0.002 567 4	0.009 692 5	0.000 180 8	161	83	65	2	62	1
D4042/2-27	4.11	107.72	168.37	0.64	0.048 592 2	0.004 050 6	0.064 981 6	0.005 390 4	0.009 733 8	0.000 242 4	128	194	64	5	62	2
D4042/2-28	2.86	79.10	118.54	0.67	0.041 250 2	0.004 967 1	0.054 279 9	0.006 181 8	0.009 718 6	0.000 230 8		54	6	62	1	
D4042/2-29	10.86	358.11	403.71	0.89	0.050 117 9	0.002 179 1	0.067 616 6	0.003 319 8	0.009 765 6	0.000 188 3	211	102	66	3	63	1
D4042/2-30	6.98	209.01	279.20	0.75	0.049 581 5	0.002 020 2	0.066 591 8	0.002 621 4	0.009 784	0.000 230 6	176	129	65	2	63	1

分析点	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
					比值($\pm 1\sigma$)		比值($\pm 1\sigma$)		比值($\pm 1\sigma$)		比值($\pm 1\sigma$)		比值($\pm 1\sigma$)		比值($\pm 1\sigma$)	
		含量(10^{-6})														年龄
D4195/5-01	65.27	1 593.10	2 334.17	0.68	0.051 059 6	0.001 795 4	0.069 509 6	0.001 316 3	0.010 022 4	0.000 305 7	243	81	68	1	64	2
D4195/5-02	21.43	652.93	632.61	1.03	0.047 280 1	0.001 190 5	0.066 279 4	0.001 981	0.010 167 1	0.000 221 4	65	-140	65	2	65	1
D4195/5-03	34.91	1 240.96	878.38	1.41	0.046 902 9	0.001 445 3	0.065 255 3	0.002 238 9	0.010 085 2	0.000 228 1	43	74	64	2	65	1
D4195/5-04	11.70	377.63	361.91	1.04	0.047 922 3	0.002 498 3	0.067 021 8	0.003 8 89 3	0.010 159 1	0.000 432 9	95	119	66	4	65	3
D4195/5-06	17.59	459.73	658.21	0.70	0.052 981 8	0.004 761 6	0.068 747 5	0.001 760 7	0.010 086 2	0.000 390 6	328	206	68	2	65	2
D4195/5-07	16.26	484.77	531.52	0.91	0.049 255	0.001 199 5	0.068 385 2	0.001 961 9	0.010 058 2	0.000 224 9	167	57	67	2	65	1
D4195/5-08	7.13	166.74	264.26	0.63	0.048 741 8	0.001 793 5	0.067 808 1	0.003 195 3	0.010 041 1	0.000 256 9	200	82	67	3	64	2
D4195/5-10	21.98	566.81	781.61	0.73	0.048 649 2	0.001 359 7	0.067 409 8	0.002 104 9	0.010 090 8	0.000 294 6	132	65	66	2	65	2
D4195/5-11	16.07	513.57	449.31	1.14	0.050 383 5	0.001 765 5	0.070 681 8	0.002 603	0.010 161 5	0.000 227 6	213	86	69	2	65	1
D4195/5-12	20.99	635.23	656.97	0.97	0.048 240 7	0.001 298	0.067 685 8	0.002 202 4	0.010 182 2	0.000 288 4	109	58	67	2	65	2
D4195/5-13	30.74	888.82	1 012.21	0.88	0.047 388 6	0.001 138 2	0.066 057 7	0.001 753 6	0.010 120 8	0.000 248 7	78	57	65	2	65	2
D4195/5-14	18.75	482.17	657.06	0.73	0.049 336 1	0.001 132 5	0.068 820 5	0.001 903 6	0.010 117 5	0.000 221 9	165	54	68	2	65	1
D4195/5-15	24.29	762.13	726.26	1.05	0.047 399 7	0.001 404	0.065 812 1	0.002 327 9	0.010 067 2	0.000 265 4	78	61	65	2	65	2
D4195/5-16	21.43	693.81	616.27	1.13	0.047 922 6	0.002 344 5	0.065 801 2	0.002 921 9	0.010 082 7	0.000 345 1	95	111	65	3	65	2
D4195/5-17	19.26	681.66	457.42	1.49	0.048 998	0.001 593 2	0.068 525 4	0.002 919 5	0.010 109 4	0.000 226 2	146	71	67	3	65	1
D4195/5-18	11.53	331.93	376.83	0.88	0.057 662	0.009 1402	0.071 162 8	0.003 249 6	0.010 083 6	0.000 473 3	517	354	70	3	65	3
D4195/5-19	23.68	753.37	667.42	1.13	0.049 334 5	0.002 543 4	0.067 471 1	0.002 485 4	0.010 095 5	0.000 276 1	165	120	66	2	65	2
D4195/5-20	25.47	675.08	854.95	0.79	0.047 324 3	0.001 288 7	0.065 957 2	0.002 195 4	0.010 129 2	0.000 244 2	65	63	65	2	65	2
D4195/5-21	43.96	1 703.05	856.64	1.99	0.047 653 6	0.001 187	0.066 454 4	0.002 094 9	0.010 188 4	0.000 332	83	59	65	2	65	2
D4195/5-22	13.20	399.95	398.60	1.00	0.047 987 6	0.002 039 4	0.066 089 3	0.003 582 8	0.010 132 2	0.000 436	98	96	65	3	65	3
D4195/5-23	14.40	389.45	453.34	0.86	0.049 204 5	0.003 141 4	0.065 833 7	0.002 964 8	0.010 093 1	0.000 422 4	167	-49	65	3	65	3
D4195/5-24	22.52	635.32	607.42	1.05	0.047 375	0.001 994 5	0.067 069 4	0.003 349 5	0.010 274 8	0.000 343 4	78	87	66	3	66	2
D4195/5-25	56.05	1 789.96	1 352.42	1.32	0.048 930 7	0.001 167 6	0.068 750 9	0.002 069 2	0.010 247 9	0.000 308 9	143	56	68	2	66	2
D4195/5-26	36.85	1 081.02	1 056.24	1.02	0.049 266 5	0.001 471 6	0.068 524 1	0.002 559 5	0.010 183 1	0.000 356	161	64	67	2	65	2
D4195/5-27	38.77	1 065.21	1 160.56	0.92	0.052 050 8	0.001 805 4	0.070 711 7	0.002 656 8	0.010 105 2	0.000 389 8	287	80	69	3	65	2
D4195/5-28	28.14	792.73	873.73	0.91	0.050 386 8	0.001 418	0.069 707	0.002 186 8	0.010 150 1	0.000 343 4	213	65	68	2	65	2
D4195/5-29	27.98	951.70	745.62	1.28	0.048 132 6	0.001 790 2	0.066 94	0.002 556 7	0.010 102 3	0.000 271 6	106	87	66	2	65	2
D4195/5-30	29.98	865.60	923.67	0.94	0.049 238 7	0.001 951	0.067 318 8	0.002 393 3	0.009 983 2	0.000 269 5	167	93	66	2	64	2

续表 2

分析点	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	年龄	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	年龄	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	年龄
	含量(10^{-6})				比值($\pm 1\sigma$)		比值($\pm 1\sigma$)		比值($\pm 1\sigma$)		比值($\pm 1\sigma$)	年龄	比值($\pm 1\sigma$)	年龄	比值($\pm 1\sigma$)	年龄
D0019/2-01	17.74	661.56	555.03	1.19	0.046 533	0.001 624 3	0.061 433 1	0.002 412 2	0.009 639 9	0.000 288 7	33	72	61	2	62	2
D0019/2-02	4.09	149.63	115.50	1.30	0.050 263 3	0.003 432 5	0.065 671	0.004 709 6	0.009 502 1	0.000 230 1	206	164	65	4	61	1
D0019/2-03	5.49	219.12	154.02	1.42	0.042 555 9	0.002 519 9	0.055 951 9	0.003 515 6	0.009 552 6	0.000 249 7			55	3	61	2
D0019/2-04	2.49	92.82	71.43	1.30	0.054 770 4	0.004 922	0.070 529 4	0.006 055	0.009 544 5	0.000 265 2	467	202	69	6	61	2
D0019/2-05	3.81	162.38	111.02	1.46	0.054 821 6	0.004 068 1	0.073 873	0.006 068 7	0.009 748 8	0.000 289 6	406	169	72	6	63	2
D0019/2-06	9.52	367.19	272.11	1.35	0.043 376 3	0.002 676 7	0.058 263	0.003 728 9	0.009 731 6	0.000 276 3			57	4	62	2
D0019/2-07	6.77	292.35	163.17	1.79	0.049 128 3	0.004 382 7	0.066 877	0.006 560 9	0.009 806 8	0.000 223 3	154	196	66	6	63	1
D0019/2-08	19.24	787.67	418.69	1.88	0.047 520 9	0.002 880 5	0.062 945 8	0.003 411 6	0.009 721 3	0.000 273 1	76	137	62	3	62	2
D0019/2-09	3.07	114.36	97.24	1.18	0.049 221 6	0.003 979 8	0.064 921 7	0.005 391 3	0.009 710 5	0.000 277 4	167	178	64	5	62	2
D0019/2-10	5.58	220.85	130.69	1.69	0.041 252 8	0.003 909 3	0.053 916 6	0.004 669 9	0.009 721 2	0.000 244 9			53	4	62	2
D0019/2-11	8.70	316.47	259.64	1.22	0.049 485 2	0.002 566	0.066 011 1	0.004 020 3	0.009 731 4	0.000 296 4	172	116	65	4	62	2
D0019/2-12	4.65	170.48	149.81	1.14	0.050 964 1	0.003 095 6	0.066 814 2	0.003 545 3	0.009 766 2	0.000 316 6	239	136	66	3	63	2
D0019/2-13	7.03	250.01	195.79	1.28	0.049 856 5	0.002 393 4	0.065 979 9	0.003 136 7	0.009 665 7	0.000 212 1	187	113	65	3	62	1
D0019/2-15	6.17	277.30	153.73	1.80	0.052 181 5	0.004 285 1	0.071 447 9	0.007 113 2	0.009 862 5	0.000 322 6	295	189	70	7	63	2
D0019/2-16	4.39	178.21	116.37	1.53	0.047 463 8	0.003 992 7	0.064 041	0.006 025 5	0.009 734 8	0.000 258 4	72	189	63	6	62	2
D0019/2-17	10.02	299.24	376.77	0.79	0.052 115 3	0.002 214 2	0.069 911 3	0.003 045 1	0.009 938 7	0.000 324 3	300	96	69	3	64	2
D0019/2-18	19.69	709.94	693.68	1.02	0.046 321 6	0.001 454 2	0.061 203 5	0.002 047 6	0.009 641 4	0.000 252 7	13	74	60	2	62	2
D0019/2-19	26.41	958.63	827.33	1.16	0.049 024 6	0.001 277 9	0.066 138 9	0.002 654 3	0.009 780 9	0.000 332 4	150	61	65	3	63	2
D0019/2-20	4.91	223.29	127.96	1.75	0.047 445 2	0.006 947 1	0.063 343 2	0.010 244 2	0.009 756	0.000 368 1	78	309	62	10	63	2
D0019/2-21	13.15	509.51	390.22	1.31	0.048 926 9	0.001 756 7	0.064 707 3	0.002 818 1	0.009 664	0.000 342 4	143	88	64	3	62	2
D0019/2-22	16.81	778.31	428.32	1.82	0.047 786 9	0.001 970 4	0.063 163 3	0.003 323 5	0.009 66	0.000 364 7	87	96	62	3	62	2
D0019/2-23	36.38	1 705.24	837.80	2.04	0.049 181 7	0.002 174 6	0.066 386 3	0.003 475 4	0.009 805 4	0.000 296 7	167	101	65	3	63	2
D0019/2-24	51.37	3 308.07	1 063.87	3.11	0.047 82	0.002 458 4	0.063 012 3	0.004 585 7	0.009 511 9	0.000 407 7	100	109	62	4	61	3
D0019/2-26	6.37	231.37	136.51	1.69	0.049 493 3	0.007 808 9	0.065 941 6	0.010 225 6	0.009 783 4	0.000 290 2	172	330	65	10	63	2
D0019/2-27	60.14	2 238.96	1 746.15	1.28	0.045 916 3	0.000 710 4	0.061 336 5	0.001 881 7	0.009 696 4	0.000 281			60	2	62	2
D0019/2-28	19.76	706.53	684.67	1.03	0.045 963 2	0.001 371	0.061 365 3	0.002 178 3	0.009 690 5	0.000 240 2			60	2	62	2
D0019/2-29	27.29	802.68	1 033.15	0.78	0.046 833	0.001 090 3	0.062 581 8	0.002 137 7	0.009 693 6	0.000 260 6	39	56	62	2	62	2
D0019/2-30	48.02	1 919.22	1 393.00	1.38	0.047 047 1	0.000 842 2	0.063 021 6	0.001 755 3	0.009 756 8	0.000 280 7	50	45	62	2	63	2

对样品 D4042/2、D4195/5 和 D0019/2 进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年,所有测点均位于锆石的振荡环带微区,在 U-Pb 谐和图中显示出良好的谐和性,年龄分布较为集中,并且较为均匀地分布于一致曲线上或附近,表明 U-Pb 体系在锆石形成之后处于封闭状态。样品 D4042/2 有效测点为 27 个, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值为 62.1~62.9 Ma,加权平均值为 (62.6 ± 0.6) Ma(图 6a);样品 D4195/5 有效

测点为 28 个, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ U 年龄值为 64.0~65.9 Ma,加权平均值为 (64.9 ± 0.7) Ma(图 6b);样品 D0019/2 有效测点为 28 个, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值为 61.0~63.8 Ma,加权平均值为 (62.2 ± 0.7) Ma(图 6c)。3 件样品锆石 U-Pb 定年结果在误差范围内一致, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄值代表岩浆结晶年龄在 62.2~64.9 Ma,表明航木多岩体的形成时代为古新世。

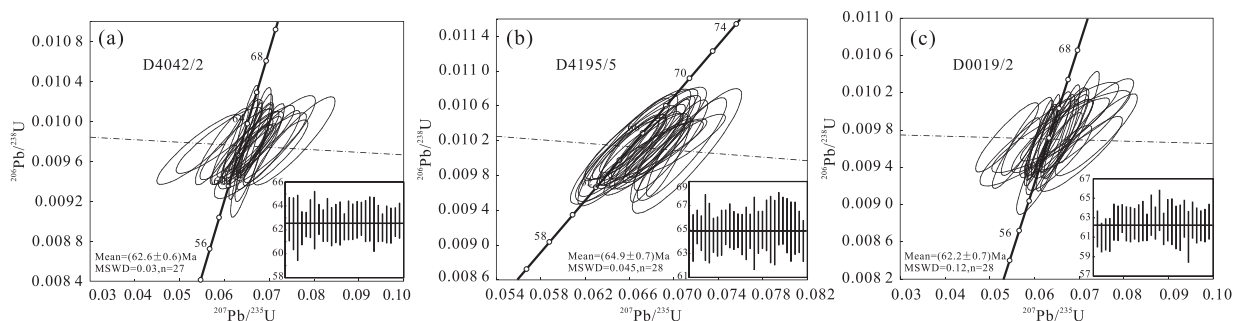


图 6 日多地区航木多岩体锆石 U-Pb 谐和图及 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值图

Fig. 6 Zircon concordia diagram and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age weighted average value diagram from the Hangmuduo granite in Riduo area

3.3 锆石 Lu-Hf 同位素

本次在 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究的基础上,对样品 D4042/2、D4195/5 和 D0019/2 三件样品进行了锆石原位 Lu-Hf 同位素分析,测试及相关计算结果见表 3。所有测点均选取与锆石 U-Pb 年代学测试点相同部位(图 5)。所有样品有效测点测得 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.000 75~0.001 97,小于 0.002,表明岩浆锆石在航木多岩体形成之后基本没有明显的放射性成因的 Hf 积累,可用于该岩体的成因研究(Griffin, et al., 2002; 吴福元等, 2007)。所有样品测点的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值为 -0.94~-0.98,平均值为 0.96,明显小于硅铝质地壳(-0.72, Amelin, et al., 1999)和硅镁质地壳(-0.34, Vervoort, et al., 1999),故二阶段模式年龄更能反映源区物质从亏损地幔被抽取的时间或源区物质在地壳的平均存留年龄(Vervoort, et al., 1996; 吴福元等, 2007)。

样品 D4042/2 测得 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.283 04~0.282 43, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值除 10 号测点为 -10.64 外,其余测点在 6.38~10.79,二阶段模式年龄(t_{DM2})除 10 号测点为 1 810 Ma 外,其余测点在 443~726 Ma;样品 D4195/5 测得 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282 62~0.283 04, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值除 16 号测点为 -3.87 外,其余测点在

6.28~10.77;二阶段模式年龄(t_{DM2})除 16 号测点为 1 381 Ma 外,其余测点在 446~734 Ma;样品 D0019/2 测得 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282 802~0.282 878, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 2.37~5.05,二阶段模式年龄(t_{DM2})为 811~982 Ma。

4 讨论

4.1 成岩时代

笔者通过日多地区 1:5 万区域地质调查发现,航木多岩体侵位的最新地层为上白垩统,同时该岩体又侵入到晚白垩世乌斯江岩体(72.2~66.8 Ma, 周斌等, 2019)中,在日多地区来加嘎布一带该岩体被古新世典中组火山岩(57.4 ± 1.4 Ma, 周斌等, 2019)角度不整合覆盖,反映航木多岩体侵位时代在晚白垩世之后、古新世晚期之前。

本次获得的日多地区航木多岩体 3 件二长花岗岩样品的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值分别为 (62.6 ± 0.6) Ma、 (64.9 ± 0.7) Ma 和 (62.2 ± 0.7) Ma。同时,王海涛等(2019)在日多地区获得花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 (62.7 ± 0.5) Ma,与本次测年结果一致。此外,林子宗群典中组火山岩已积累了大

表 3 日多地区航木多岩体锆石 Lu-Hf 同位素分析结果表
Tab. 3 Lu-Hf isotopic data of zircons from the Hangmuduo Granite in Riduo area

测点编号	t (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\epsilon\text{Hf}(t)$	t_{DM1}	t_{DM2}	$f_{\text{Lu/Hf}}$
D4042/2-01	62.9	0.062 000	0.000 390	0.001 930	0.000 010	0.282 920	0.000 020	5.32	479	711	-0.94
D4042/2-02	62.5	0.031 870	0.000 370	0.000 950	0.000 010	0.282 910	0.000 010	5.05	477	726	-0.97
D4042/2-04	62.2	0.036 380	0.000 270	0.001 170	0.000 010	0.282 970	0.000 020	6.86	407	610	-0.96
D4042/2-05	62.1	0.031 640	0.000 370	0.001 020	0.000 010	0.282 940	0.000 020	6.07	437	661	-0.97
D4042/2-06	62.4	0.059 600	0.000 180	0.001 840	0.000 010	0.282 920	0.000 020	5.18	483	720	-0.94
D4042/2-09	62.8	0.028 170	0.000 100	0.000 920	0	0.282 950	0.000 020	6.43	422	637	-0.97
D4042/2-10	62.9	0.033 330	0.000 380	0.001 010	0.000 010	0.282 430	0.000 020	-11.98	1 157	1 810	-0.97
D4042/2-11	62.3	0.033 900	0.000 150	0.001 100	0.000 010	0.282 960	0.000 020	6.66	414	623	-0.97
D4042/2-12	62.8	0.055 930	0.000 200	0.001 820	0.000 010	0.282 920	0.000 020	5.2	482	718	-0.95
D4042/2-13	62.3	0.031 590	0.000 220	0.001 060	0.000 010	0.282 980	0.000 020	7.4	384	575	-0.97
D4042/2-15	62.5	0.041 850	0.000 220	0.001 280	0.000 010	0.282 960	0.000 020	6.76	412	617	-0.96
D4042/2-16	62.2	0.037 040	0.000 380	0.001 190	0.000 010	0.282 950	0.000 020	6.26	431	649	-0.96
D4042/2-17	62.8	0.045 140	0.000 550	0.001 440	0.000 020	0.283 000	0.000 020	7.94	366	541	-0.96
D4042/2-18	62.7	0.042 820	0.000 360	0.001 380	0.000 010	0.283 000	0.000 020	8.12	358	530	-0.96
D4042/2-19	62.8	0.026 410	0.000 400	0.000 830	0.000 010	0.282 990	0.000 020	7.83	364	547	-0.97
D4042/2-20	62.9	0.028 680	0.000 280	0.000 920	0.000 010	0.282 920	0.000 020	5.28	468	711	-0.97
D4042/2-22	62.7	0.033 350	0.000 250	0.001 080	0.000 010	0.282 950	0.000 020	6.29	429	646	-0.97
D4042/2-23	62.9	0.022 590	0.000 220	0.000 750	0.000 010	0.282 970	0.000 020	6.97	398	602	-0.98
D4042/2-25	62.5	0.042 440	0.001 170	0.001 270	0.000 030	0.283 040	0.000 020	9.47	302	443	-0.96
D4042/2-26	62.2	0.039 070	0.000 140	0.001 240	0	0.282 960	0.000 020	6.57	419	629	-0.96
D4195/5-02	65.2	0.056 820	0.000 090	0.001 610	0	0.283 030	0.000 020	9.24	314	457	-0.95
D4195/5-03	64.7	0.056 420	0.000 160	0.001 630	0	0.282 910	0.000 020	4.93	491	734	-0.95
D4195/5-06	64.7	0.064 550	0.000 870	0.001 870	0.000 020	0.282 970	0.000 020	6.85	415	612	-0.94
D4195/5-07	64.5	0.057 810	0.000 260	0.001 670	0.000 010	0.282 970	0.000 020	6.86	413	611	-0.95
D4195/5-08	64.4	0.050 930	0.000 520	0.001 440	0.000 010	0.283 020	0.000 020	8.72	334	490	-0.96
D4195/5-10	64.7	0.048 700	0.000 590	0.001 410	0.000 010	0.283 030	0.000 020	9.18	315	461	-0.96

续表 3

测点编号	t (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\epsilon\text{Hf}(o)$	$\epsilon\text{Hf}(t)$	t_{DM1}	t_{DM2}	$f_{\text{Lu/Hf}}$
D4195/5-11	65.2	0.049 500	0.000 270	0.001 460	0.000 010	0.283 000	0.000 020	7.98	9.35	365	538	-0.96
D4195/5-12	65.3	0.065 590	0.000 050	0.001 900	0	0.283 030	0.000 020	9.04	10.39	325	471	-0.94
D4195/5-13	64.9	0.061 560	0.000 150	0.001 810	0	0.283 040	0.000 020	9.42	10.77	309	446	-0.95
D4195/5-14	64.9	0.054 870	0.000 110	0.001 580	0	0.282 940	0.000 020	6.07	7.43	443	660	-0.95
D4195/5-15	64.6	0.045 830	0.000 170	0.001 470	0.000 010	0.282 940	0.000 020	5.99	7.35	445	665	-0.96
D4195/5-16	64.7	0.050 500	0.000 430	0.001 410	0.000 010	0.282 620	0.000 020	-5.22	-3.87	898	1 381	-0.96
D4195/5-20	65	0.069 540	0.000 730	0.001 970	0.000 020	0.282 970	0.000 020	7	8.34	410	602	-0.94
D4195/5-22	65	0.038 920	0.000 320	0.001 130	0.000 010	0.283 010	0.000 020	8.31	9.69	348	515	-0.97
D4195/5-23	64.7	0.063 140	0.000 180	0.001 880	0.000 010	0.282 980	0.000 020	7.35	8.69	395	579	-0.94
D0019/2-01	61.8	0.054 182	0.000 269	0.001 574	0.000 006	0.282 837	0.000 020	2.29	3.59	597	904	-0.95
D0019/2-02	61	0.051 033	0.000 173	0.001 576	0.000 007	0.282 876	0.000 019	3.67	4.95	541	816	-0.95
D0019/2-03	61.3	0.048 039	0.000 484	0.001 471	0.000 013	0.282 807	0.000 020	1.22	2.51	639	973	-0.96
D0019/2-04	61.2	0.032 916	0.000 362	0.001 030	0.000 010	0.282 827	0.000 017	1.96	3.25	602	925	-0.97
D0019/2-05	62.5	0.049 503	0.000 127	0.001 536	0.000 003	0.282 867	0.000 023	3.35	4.66	553	835	-0.95
D0019/2-07	62.9	0.053 149	0.000 243	0.001 574	0.000 006	0.282 802	0.000 024	1.05	2.37	647	982	-0.95
D0019/2-08	62.4	0.053 195	0.000 079	0.001 662	0.000 002	0.282 861	0.000 016	3.14	4.45	564	850	-0.95
D0019/2-09	62.3	0.055 947	0.000 101	0.001 738	0.000 002	0.282 863	0.000 024	3.22	4.52	562	845	-0.95
D0019/2-10	62.4	0.043 577	0.000 259	0.001 336	0.000 008	0.282 858	0.000 019	3.06	4.38	562	854	-0.96
D0019/2-11	62.4	0.056 011	0.000 275	0.001 722	0.000 008	0.282 822	0.000 019	1.76	3.07	621	938	-0.95
D0019/2-12	62.7	0.063 108	0.000 665	0.001 868	0.000 018	0.282 878	0.000 018	3.75	5.05	542	811	-0.94
D0019/2-13	62	0.049 010	0.000 319	0.001 487	0.000 011	0.282 863	0.000 018	3.22	4.51	558	844	-0.96
D0019/2-15	63.3	0.046 436	0.000 202	0.001 404	0.000 006	0.282 817	0.000 020	1.59	2.91	623	948	-0.96
D0019/2-16	62.5	0.042 078	0.000 217	0.001 273	0.000 007	0.282 875	0.000 022	3.63	4.94	538	817	-0.96
D0019/2-17	63.8	0.060 669	0.000 343	0.001 826	0.000 011	0.282 810	0.000 022	1.35	2.67	640	964	-0.94
D0019/2-20	62.6	0.046 406	0.000 752	0.001 398	0.000 024	0.282 832	0.000 020	2.13	3.46	601	914	-0.96
D0019/2-21	62	0.055 920	0.000 335	0.001 743	0.000 009	0.282 822	0.000 020	1.75	3.06	622	939	-0.95

量的高质量定年数据,前人认为典中组火山岩形成于 69~60 Ma(董国臣等,2005;莫宣学等,2005,2009;李勇等,2018;Huang, et al., 2015;陈贝贝等,2016)。

因此,航木多岩体形成时代为古新世,为与林子宗群典中组火山岩同期的侵入相岩浆产物,同属于印度-欧亚大陆碰撞早期阶段的新特提斯洋俯冲向印度-欧亚大陆碰撞过渡的背景下的岩浆活动产物。

4.2 岩石成因与源区

过铝质岩类岩石被认为是同碰撞早期阶段地壳缩短的加压升温或后碰撞阶段地壳快速隆升和伸展拆离背景下因减压增温引起的部分熔融的结果(Shinjo R, et al., 2000)。花岗岩分类也一直是花岗岩类研究的主要问题,M、I、S 和 A 型是目前最常用的花岗岩成因分类方案。一般认为,在板块汇聚的构造环境下形成 S 型或 I 型花岗岩。研究区花岗

岩在 $(K_2O+Na_2O)/(CaO-Zr+Nb+Ce+Y)$ 岩浆岩成因类型判别图中(图 7a),大多数样品投入 I、S、M 型花岗岩区中。在 TiO_2-Zr 岩浆岩成因类型判别图(图 7b)中,所有样品均投入 S 型花岗岩区。CIPW 标准矿物中所有样品均出现了刚玉分子,且含量均大于 1%,且多数样品(二长二云花岗岩)镜下见到白云母(图 2d)。利用 Watson, et al. (2005)提出的全岩锆石饱和温度计算公式,得到航木多岩体锆石饱和温度为 690~775 °C,平均为 737 °C,接近 S 型花岗岩形成的平均温度(764 °C)(Chappell B W, 1999),明显小于 A 型花岗岩平均成岩温度(833 °C)(Whalen, et al., 1987;张旗等, 2007)和 I 型花岗岩的平均成岩温度(>900 °C)(张旗等,2007)。因此,上述岩浆岩成因类型图解及特征参数均指示航木多岩体为 S 型花岗岩。

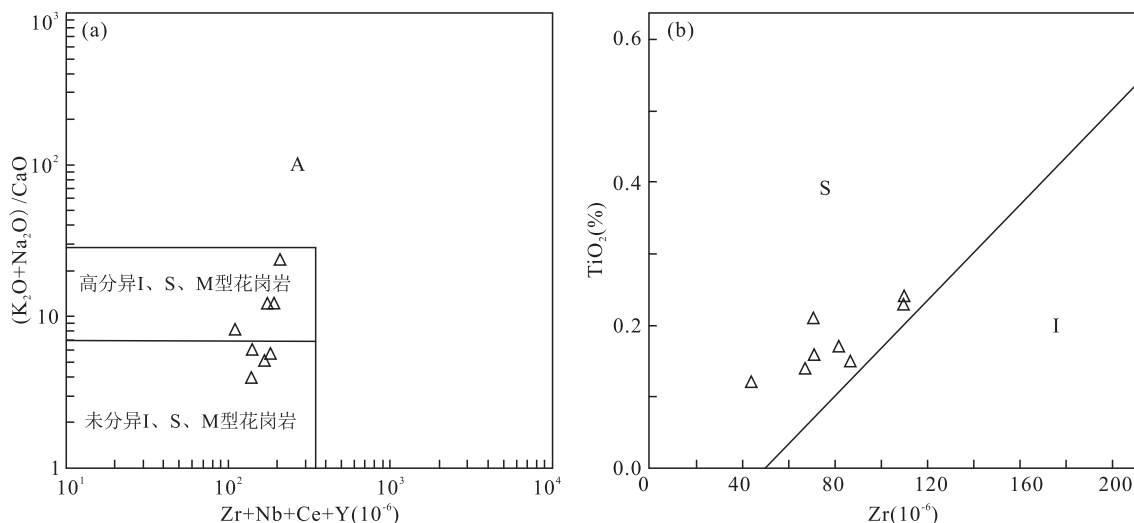


图 7 (a)日多地区航木多岩体 $K_2O+Na_2O/CaO-Zr+Nb+Ce+Y$ 图解和(b) TiO_2-Zr 图解

Fig. 7 (a) $K_2O+Na_2O/CaO-Zr+Nb+Ce+Y$ and (b) TiO_2-Zr diagram of the Hangmuduo granite in Riduo area

K/Rb 值可以用来示踪岩浆演化特征,本次所有样品 $K/Rb=148\sim214$ (平均值为 185),与地壳岩石其比值(150~350)(Taylor, et al., 1985)相近; $Rb/Sr=0.38\sim4.66$ (平均值为 1.86),远大于起源于上地幔源区岩石的比值(0.027); $Nd/Th=0.92\sim1.67$ (平均值为 1.31), $Nb/Ta=10.07\sim18.57$ (平均值为 13.04),都明显低于幔源岩石比值($Nd/Th>15$, $Nb/Ta\approx22$)(Bea, et al., 2001),而与壳源岩石比值相近($Nd/Th\approx3$, $Nb/Ta\approx12$)(Bea, et al., 2001);样品 $La/Ta=18\sim45$ (平均值为 29),大多数样品较起源于岩石圈地幔或受其混

染的岩浆 La/Ta 值下限值(25)高,表明岩浆源区受到了幔源(Lassiter, et al., 2013)或新生地壳物质的混染;样品 $Mg^\# = 2\sim36$ (平均值为 19),与来源于地壳部分熔融的岩石一致(<40)(Atherton, et al., 1993),表明其岩浆源区应以地壳物质为主。航木多岩体花岗岩与日多盆地碎屑岩微量和稀土元素地球化学特征一致(图 4a、图 4b),指示日多盆地碎屑岩可能为航木多岩体花岗岩的源岩。

在花岗岩 A/MF-C/MF 图解(图 8a)中,多数样品落入变质杂砂岩部分熔融区。在 $Rb/Sr-Rb/Ba$ 图解(图 8b)中,多数样品落在贫黏土源岩区。

过铝质花岗岩 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值可以很好的指示岩浆源区的成分,贫斜长石、富黏土的泥质岩部分熔融产生的过铝质花岗岩 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值一般小于 0.3,富斜长石、贫黏土的砂屑岩熔融生成的过铝质花岗岩 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值一般大于 0.3 (Skjerlie, et al., 1992)。航木多岩体 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 0.1~0.46,也反映了

岩浆源区由砂岩与泥质岩共同参与部分熔融形成。在 $\text{La}/\text{Sm}-\text{La}$ 图解(图 9)中,显示出航木多岩体源岩发生部分熔融,并伴随着不同程度的分离结晶作用。微量元素 P、Ti 相对亏损, Eu 呈负异常,表明岩浆在形成过程中经历了磷灰石、钛铁矿、斜长石的分离结晶作用。

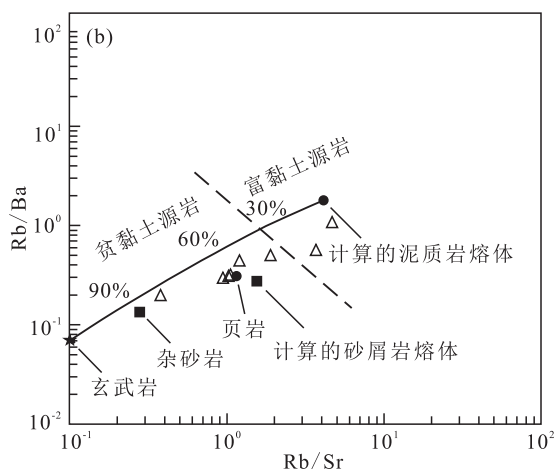
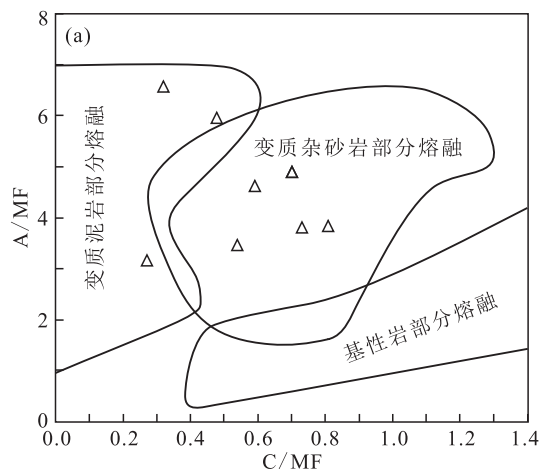


图 8 (a) 日多地区航木多岩体 $\text{A}/\text{MF}-\text{C}/\text{MF}$ 图解和 (b) $\text{Rb}/\text{Ba}-\text{Rb}/\text{Sr}$ 图解

Fig. 8 (a) $\text{A}/\text{MF}-\text{C}/\text{MF}$ and (b) $\text{Rb}/\text{Ba}-\text{Rb}/\text{Sr}$ diagram of the Hangmuduo granite in Riduo area

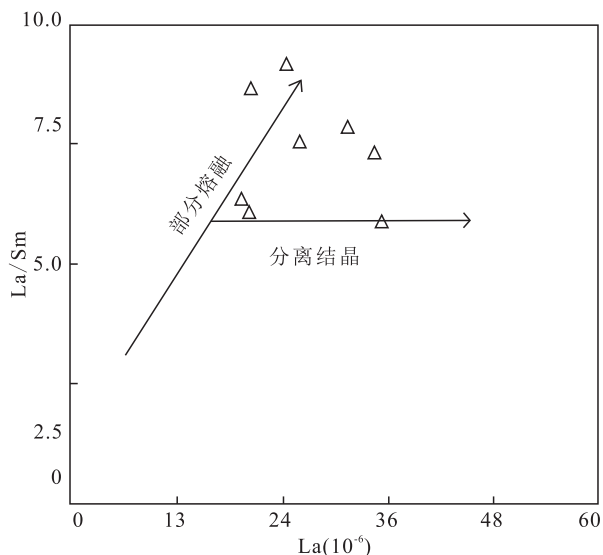


图 9 日多地区航木多岩体 $\text{La}/\text{Sm}-\text{La}$ 图解

Fig. 9 $\text{La}/\text{Sm}-\text{La}$ diagram of the Hangmuduo granite in Riduo area

本次获得航木多岩体的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化范围较大,为 -10.64~10.79,暗示岩浆在演化过程中有新的端元组分加入(吴福元等,2007),但总体上仍具有适当亏损的 Hf 同位素特征($\epsilon_{\text{Hf}}(t) > 0$),且低于亏

损地幔值(20),同时还有 2 个测点的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为负值。在 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ 图解(图 10a)中,3 件样品各测点投图绝大部分落在球粒陨石和亏损地幔同位素 Hf 演化线之间,2 个测点投点位于球粒陨石演化线下方的古拉萨结晶基底。3 件样品 t_{DM2} 变化范围较大,为 443~1 810 Ma,其中 2 个测点的 t_{DM2} 分别为 1 381 Ma 和 1 810 Ma ($>1\text{Ga}$),在 t_{DM2} 统计直方图中(图 10b),以 $t_{\text{DM2}} = 550\sim 750\text{ Ma}$ 的频数较多,峰值在 600~650 Ma,均远大于其对应的形成年龄。因此,以上特征均表明岩石为新生地壳部分熔融形成,同时有少量古老地壳物质加入(吴福元等,2007)。但是,一般认为新生地壳为基性玄武质岩石,其部分熔融应形成 I 型花岗岩,这似乎与主、微量元素特征及物源判别图解显示的航木多岩体主要由砂岩与泥质岩部分熔融形成的 S 型花岗岩相矛盾。

然而,早—中侏罗世时期(174.2~192.7 Ma)(董颜辉等,2006;耿全如等,2006;陈炜等,2009;魏友卿等,2017;熊秋伟等,2015;黄丰等,2015)新特提斯洋板片北向俯冲于拉萨地块南缘之下,在拉萨地块南缘形成了叶巴陆缘火山弧(黄丰等,2015;董颜辉等,2006;熊秋伟等,2015)。中侏罗世晚期在叶巴

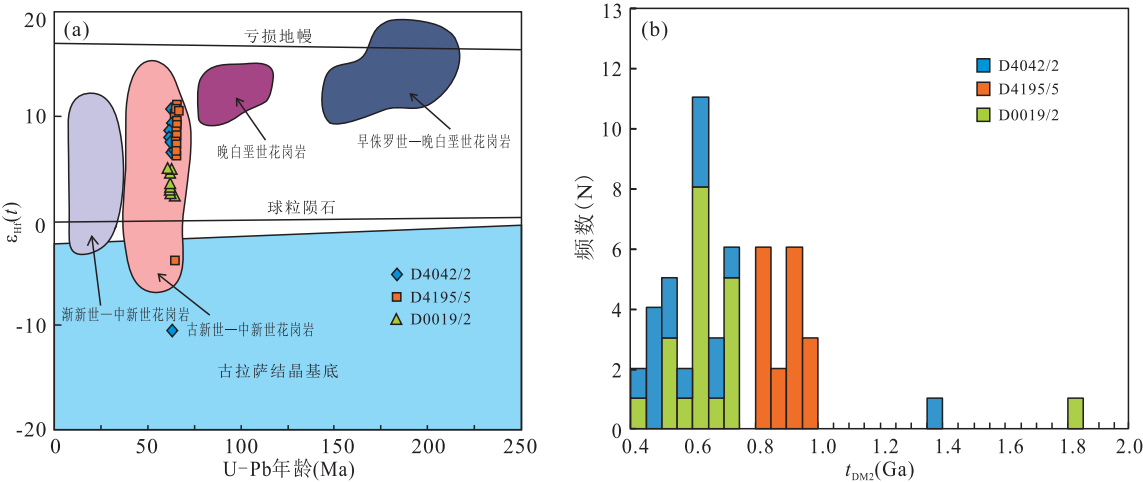
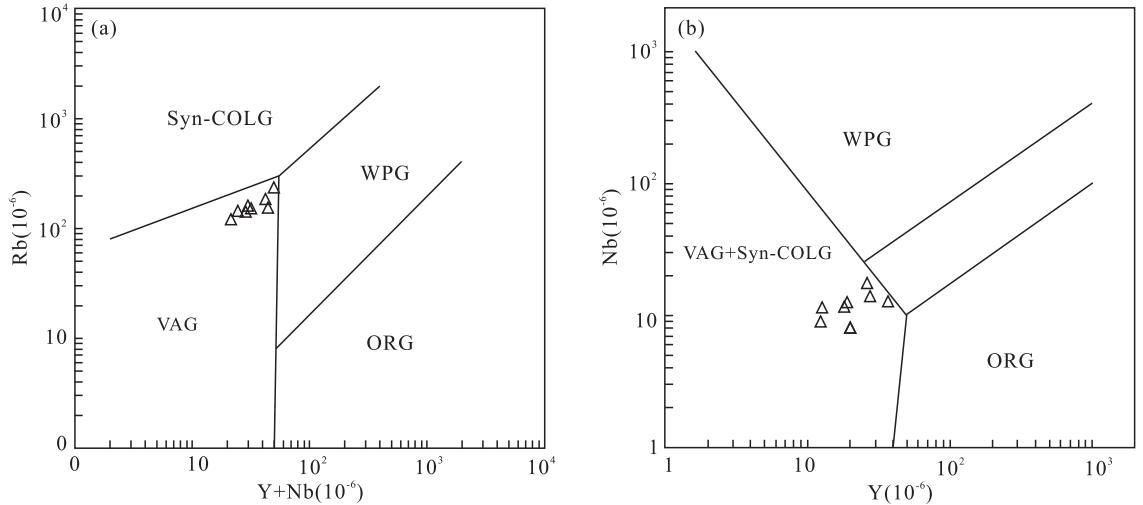


图 10 (a)日多地区航木多岩体 $\epsilon_{Hf}(t)-t$ 图解(底图据吴福元等,2007;徐旺春,2010 修改)和(b) t_{DM2} 统计直方图
Fig. 10 (a)Diagram of $\epsilon_{Hf}(t)-t$ and (b)histogram of t_{DM2} for the Hangmuduo granite in Riduo area

火山弧台地上形成了日多弧内局限盆地,其后晚侏罗—晚白垩世在盆地内快速沉积了火山弧来源的碎屑岩且具有近源堆积特征(潘亮等,2018;周斌等,2019)。一般认为岛弧来源的碎屑岩在俯冲带附近的海底沉积时间与岛弧的形成时间在几个百万年之内基本上是同期的(Hawkins JW,2003)。因此,这些碎屑岩沉积物与叶巴火山弧新生地壳具有相似的岩石学和地球化学特征,为新生地壳短期内再循环形成。航木多岩体花岗岩与日多盆

地内的碎屑岩也具有相似的微量元素与稀土元素特征(图 4),表明日多盆地内的碎屑岩应为航木多岩体的源岩,这与 A/MF-C/MF 图解和 Rb/Sr-Rb/Ba 图解显示的源岩为砂岩和少量泥质岩是一致的。

综上所述,笔者认为研究区古新世航木多岩体花岗岩应为日多盆地内广泛出露的晚侏罗—晚白垩世碎屑岩及少量古拉萨结晶基底部分熔体形成的 S 型花岗岩且兼有新生地壳地球化学特征。



WPG. 板内花岗岩;VAG. 火山弧花岗岩;syn-COLG. 同碰撞花岗岩;ORG. 洋中脊花岗岩

图 11 (a)日多地区航木多岩 Rb-Y+Nb 图解和(b)Nb-Y 图解

Fig. 11 (a) Rb-Y+Nb and (b)Nb-Y diagram of the Hangmuduo granite in Riduo area

4.3 构造环境

航木多岩体属弱过铝质-过铝质岩石、高钾钙碱性岩石系列。球粒陨石标准化稀土元素配分模式呈右陡倾、轻稀土富集型曲线,负Eu异常明显。在原始地幔蛛网图中,相对富集大离子亲石元素(LILE)Rb、K、Th、U等,相对亏损高场强元素(HFSE)Nb、Ta、P、Ti,与俯冲成因的火山弧岩浆岩地球化学特征相似(Pearce, et al., 1988)。在现代弧环境中,板片流体的加入或俯冲沉积物的部分熔融可以使与俯冲有关的岩浆交代富集(Elburg M A, et al., 2002; Guo Z, et al., 2005; 白涛等, 2019)。同时,在(Y+Nb)-Rb构造判别图解上有火山弧岩浆岩性质(Pearce J A, et al., 1984)(图 11a);在Y-Nb判别图解上,也显示为同碰撞-火山弧构造环境的产物(Pearce J A, et al., 1984)(图 11b),这与前人对南部拉萨地块古新世岩浆岩形成构造环境的认识一致(王立全等, 2006; 董铭淳等, 2015; 李洪梁等, 2019; 李永鹏, 2019)。暗示新特提斯洋壳在古新世(65~60 Ma)时正从俯冲背景向碰撞造山转换,此时印度-欧亚大陆虽已发生碰撞,但连接在印度大陆前端的新特提斯板片并未完全消失,因此,形成的岩浆具有与火山弧相同的地球化学特征。

4.4 地球动力学背景

目前,根据地磁学、沉积岩岩石学、岩浆岩岩石学等不同学科从不同研究方向对印度-欧亚大陆碰撞时限作了较好的限定,多数学者认为主碰撞时间发生在65~40 Ma(莫宣学等, 2003; H X M, et al., 2015)。本次在航木多岩体中获得的锆石U-Pb年龄为 (62.6 ± 0.6) Ma、 (64.9 ± 0.7) Ma和 (62.2 ± 0.7) Ma,时代属古新世早期,其岩浆作用发生在印度-欧亚大陆碰撞早期阶段的新特提斯洋俯冲向印度-欧亚大陆碰撞过渡的背景下。

侯增谦等(2006)认为古新世岩浆岩具有岩浆弧地球化学特征是由于俯冲的印度大陆板片因巨大的摩擦热向上覆交代富集的地幔楔传递导致其熔融。然而,即使在70~60 Ma,印度-欧亚大陆汇聚速率达到170 mm/a(Lee, et al., 1994),从印度-欧亚大陆的初始碰撞时间(65 Ma)到航木多岩体的形成时间(62.2~64.9 Ma),在3 Ma±时间内印度大陆板块不可能在日多地区下插至足够的深度导致其熔融产生岩浆作用。

因此,笔者认为航木多岩体形成于印度-欧亚大

陆碰撞早期阶段的新特提斯洋俯冲向印度-欧亚大陆碰撞过渡的构造背景下。由于碰撞作用是在俯冲作用的基础上发生的,是俯冲作用的延伸和转化,是由于俯冲的新特提斯洋壳相对滞后于地幔源区引起的(莫宣学等, 2001, 李洪梁等, 2019),从而导致航木多岩体具有与区域上古新世林子宗群典中组火山岩一致的火山弧岩浆岩特征。

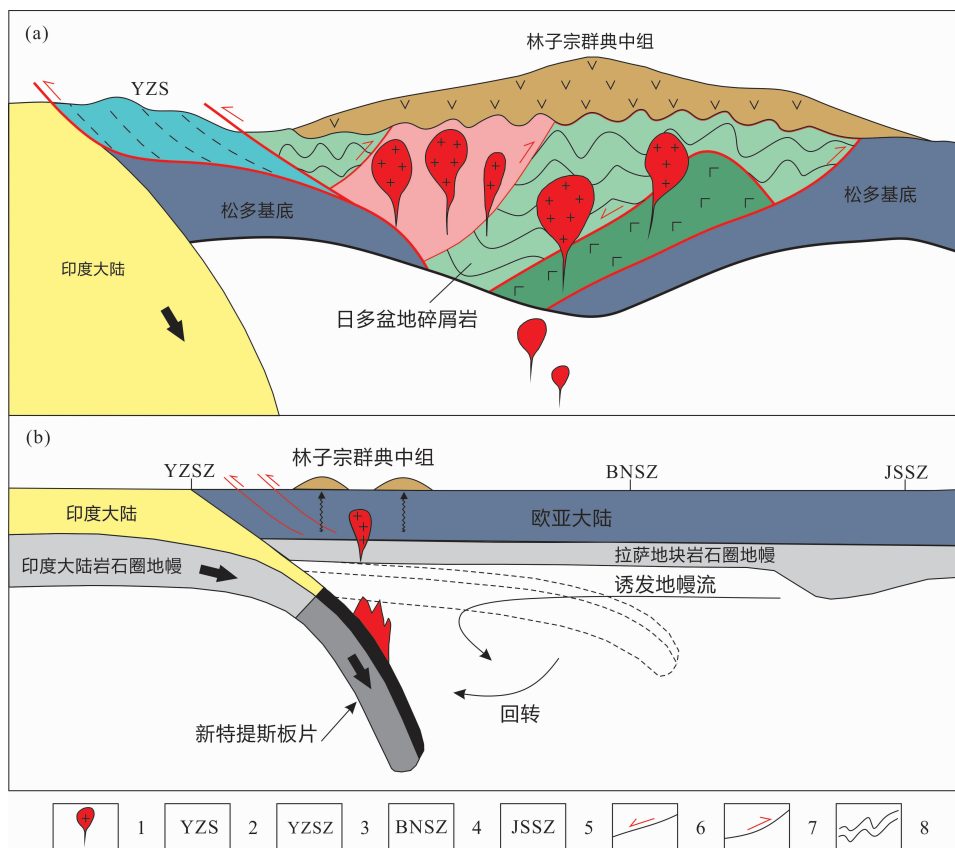
大量研究表明,白云母花岗岩或二云母花岗岩主要定位于2个大陆岩石圈汇聚使地壳加厚的部位,即大陆碰撞地壳加厚区(侯增谦等, 2006)。本次在航木多岩体中发现的大量二云二长花岗岩也进一步证明,距今62.2~64.9 Ma期间印度-欧亚大陆在日多地区已发生板块汇聚作用。由于俯冲和印度-欧亚大陆碰撞作用的持续进行,冈底斯南带发生了巨大的缩短增厚,强烈的褶皱变形、逆冲断裂及滑脱构造使原本位于上地壳的沉积物循环至中、下地壳参与部分熔融(图 12)。

综上所述,古新世时期印度大陆急剧向北漂移,随着俯冲深度增加与压力增大,连接在印度大陆前端的新特提斯板片密度增大,浮力减小并逐渐下沉,使原来低角度消减的新特提斯洋板片发生回转,板片脱水带向海沟方向扩展。消减板片的陡立回转不仅会造成板块汇聚速率突然上升,同时导致楔形地幔区的地幔对流增强而且诱发软流圈物质上涌,底侵于南拉萨地块之下,使新生地壳发生部分熔融,在南拉萨地块形成大规模的林子宗群典中组火山岩和同构造的I型花岗岩。同时,在62.2~64.9 Ma,软流圈物质上涌致使日多盆地加厚地壳内部的具有新生地壳特征的富水低成熟度沉积岩及少量古拉萨结晶基底发生部分熔融,在日多地区形成少量以航木多岩体为代表的S型花岗岩。

5 结论

(1)采用LA-ICP-MS法分别获得3件锆石U-Pb同位素年龄加权平均值为 (62.6 ± 0.6) Ma、 (64.9 ± 0.7) Ma和 (62.2 ± 0.7) Ma,表明研究区航木多岩体形成于早古新世,为与林子宗群典中组火山岩晚期同源的侵入岩。

(2)航木多岩体为叶巴火山弧快速风化后在日多盆地内形成的具有类似新生地壳岩石学和地球化学特征的沉积物在同碰撞背景下发生部分熔融,并



1. 古新世花岗岩;2. 特提斯西马拉雅;3. 印度-雅鲁藏布江缝合带;4. 班公湖-怒江缝合带;5. 金沙江缝合带;6. 滑脱带;7. 逆冲断裂;8. 褶皱

图 12 冈底斯带东段古新世构造-岩浆演化模式图(图 a 据马元, 2007; 图 b 据侯增谦等, 2006)

Fig. 12 Paleocene tectonic-magmatic evolution pattern of the eastern Gangdise belt

经历了结晶分异作用形成的 S 型花岗岩,同时还明显受到古老结晶基底的影响。

(3) 航木多岩体形成于印度-欧亚大陆碰撞早期阶段的新特提斯洋俯冲向印度-欧亚大陆碰撞过渡的构造背景下,属具火山弧岩浆岩地球化学特征的花岗岩,与残余的洋壳板片部分熔融有关。

参考文献(References):

- 白涛,樊炳良,肖霞,等. 西藏玉龙斑岩铜矿带夏日多矿区始新世岩浆活动与成矿作用——来自锆石 U - Pb 年龄、地球化学的证据[J]. 地质通报, 2019, 38(2-3): 308-327.
- BAI Tao, FAN Bing Liang, XIAO Xia, et al. The Eocene magmatism and mineralization of Xiariduo rocks in the northern Yulong porphyry copper belt, Tibet: Evidence from zircon U - Pb geochronology and geochemistry[J]. Geological Bulletin of China, 2019, 38(2-3): 308-327.

- 陈贝贝, 丁林, 许强, 等. 西藏林周盆地林子宗群火山岩的精细年代框架[J]. 第四纪研究, 2016, 36(5): 1037-1054.
- CHEN Beibei, DING Lin, XU Qiang, et al. U - Pb Age framework of the Linzizong volcanic rocks from the Linzhou basin, Tibet[J]. Quaternary Sciences, 2016, 36(5): 1037-1054.
- 陈炜, 马昌前, 边秋娟, 等. 西藏得明顶地区叶巴组火山岩地球化学特征和同位素 U - Pb 年龄证据[J]. 地质科技情报, 2009, 28(3): 31-40.
- CHEN Wei, MA Changqian, BIAN Qiujuan, et al. Evidence from Geochemistry and Zircon U - Pb Geochronology of Volcanic Rocks of Yeba Formation in Demingding Area, the East of Middle Gangdise, Tibet[J]. Geological Science and Technology Information, 2009, 28(3): 31-40.
- 董国臣, 莫宣学, 赵志丹, 等. 拉萨北部林周盆地林子宗火山岩层序新议[J]. 地质通报, 2005, 24(6): 549-557.
- DONG Guochen, MO Xuanxue, ZHAO Zhidan, et al. A new understanding of the stratigraphic successions of the Linzizong volcanic rocks in the Lhünzhub basin,

- northern Lhasa, Tibet, China[J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24(6): 549-557.
- 董颜辉, 许继峰, 曾庆高, 等. 存在比桑日群弧火山岩更早的新特提斯洋俯冲记录么? [J]. 岩石学报, 2006, 22(3): 661-668.
- DONG Yanhui, XU Jifeng, ZENG Qinggao, et al. Is There a Neo-Tethys' Subduction Record Earlier than arc volcanic rocks in the Sangri Group? [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(3): 661-668.
- 耿全如, 潘桂棠, 王立全, 等. 西藏冈底斯带叶巴组火山岩同位素地质年代[J]. 沉积与特提斯地质, 2006, 26(1): 1-7.
- GENG Quanru, PAN Guitang, WANG Liquan, et al. Isotopic geochronology of the volcanic rocks from the Yeba Formation in the Gangdise zone, Xizang[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2006, 26(1): 1-7.
- 韩奎, 周斌, 王辉, 等. 拉萨地块南缘日多地区叶巴组火山岩地球化学、年代学、锆石 Lu-Hf 同位素特征及其地质意义[J]. 地质通报, 2018, 37(8): 1554-1570.
- HAN Kui, ZHOU Bin, WANG Hui, et al. Geochemistry, chronology and zircon Lu-Hf isotopic characteristics of the volcanic rocks of Yeba Formation in Riduo area on the southern margin of Lhasa massif and their geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 2018, 37(8): 1554-1570.
- 黄丰, 许继峰, 陈建林, 等. 早侏罗世叶巴组与桑日群火山岩: 特提斯洋俯冲过程中的陆缘弧与洋内弧? [J]. 岩石学报, 2015, 31(7): 2089-2100.
- HUANG Feng, XU Jifeng, CHEN Jianlin, et al. Early Jurassic volcanic rocks from the Yeba Formation and Sangri Group: Products of continental marginal arc and intra-oceanic arc during the subduction of Neo-Tethys Ocean? [J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(7): 2089-2100.
- 侯增谦, 莫宣学, 高永丰, 等. 印度大陆与亚洲大陆早期碰撞过程与动力学模型—来自西藏冈底斯新生代火成岩证据[J]. 地质学报, 2006, 80(9): 1233-1248.
- HOU Zengqian, MO Xuanxue, GAO Yongfeng, et al. Early Processes and Tectonic Model for the Indian-Asian Continental Collision: Evidence from the Cenozoic Gangdese Igneous Rocks in Tibet[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(9): 1233-1248.
- 纪伟强, 吴福元, 鍾孙霖, 等. 西藏南部冈底斯岩基花岗岩时代与岩石成因[J]. 中国科学(D辑), 2009, 39(7): 849-871.
- Ji Weiqiang, WU Fuyuan, ZHONG Sunlin, et al. Geochronology and petrogenesis of granitic rocks in Cangdese batholith, southern Tibet[J]. Science in China (Series D), 2009, 39(7): 849-871.
- 贾建称, 温长顺, 王根厚, 等. 冈底斯地区林子宗群火山岩岩石地球化学特征及地球动力学意义[J]. 中国地质, 2005, 32(3): 396-404.
- JIA Jiancheng, WEN Changshun, WANG Genhou, et al. Geochemical characteristics and geodynamic significance of the Linzizong Group volcanic rocks in the Gangdise area[J]. Geology in China, 2005, 32(3): 396-404.
- 李洪梁, 李光明, 刘洪, 等. 拉萨地块西段达若地区古新世花岗斑岩成因: 锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学和 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素的约束[J]. 地球科学, 2019, 44(7): 2275-2294.
- LI Hongliang, LI Guangming, LIU Hong, et al. Petrogenesis of Paleocene Granite Porphyry of Daruo Area in Western Lhasa Block, Tibet: Constraints from Geochemistry, Zircon U-Pb Chronology and Sr-Nd-Pb-Hf Isotopes[J]. Earth Science, 2019, 44(7): 2275-2294.
- 李文明, 任秉琛, 杨兴科, 等. 东天山中酸性侵入岩浆作用及其地球动力学意义[J]. 西北地质, 2002, 35(04): 41-64.
- LI Wenming, REN Bingchen, YANG Xingke, et al. The intermediate-acid intrusive magmatism and its geodynamic significance in Eastern Tianshan region[J]. Northwestern Geology, 2002, 35(04): 41-64.
- 李勇, 张士贞, 李奋其, 等. 拉萨地块中段查孜地区典中组火山岩锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 地球科学, 2018, 43(8): 2755-2766.
- LI Yong, ZHANG Shizhen, LI Fenqi, et al. Zircon U-Pb Ages and Implications of the Dianzhong Formation in Chazi Area, Middle Lhasa Block, Tibet[J]. Earth Science, 2018, 43(8): 2755-2766.
- 李永鹏. 拉萨地块中段哲蚌窝地区古新世花岗岩类年代学、地球化学及岩石成因[D]. 石家庄: 河北地质大学, 2019.
- LI Yongpeng. Chronology, Geochemistry and Petrogenesis of Paleocene granitoids in the Zhebangwo area, Central Lhasa Terrane[D]. Shijiazhuang: Hebei GEO University, 2019.
- 马元. 西藏南冈底斯中东段白垩纪弧后盆地的构造演化[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
- MA Yuan. Tectonic evolution of the Cretaceous back-arc basin in the middle-east segment of the south Gangdese, south Tibet[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017.

- 莫宣学,邓晋福,董方浏,等. 西南三江造山带火山岩-构造组合及其意义[J]. 高校地质学报,2001,7(2):121-138.
- MO Xuanxue, DENG Jinfu, DONG Fangliu, et al. Volcanic Petrotectonic Assemblages in Sanjiang Orogenic Belt, SW China and Implication for Tectonics[J]. Geological Journal of China Universities, 2001,7(2):121-138.
- 莫宣学,赵志丹,邓晋福,等. 印度-欧亚大陆主碰撞过程的火山作用响应[J]. 地学前缘,2003,10(3):135-148.
- MO Xuanxue, ZHAO Zhidan, DENG Jinfu, et al. Response of Volcanism to The India - Asia Collision[J]. Earth Science Frontiers, 2003,10(3):135-148.
- 莫宣学,董国臣,赵志丹,等. 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,2005,11(3):281-290.
- MO Xuanxue, DONG Guochen, ZHAO Zhidan, et al. Spatial and Temporal Distribution and Characteristics of Granitoids in the Gangdese, Tibet and Implication for Crustal Growth and Evolution[J]. Geological Journal of China Universities, 2005,11(3):281-290.
- 莫宣学,赵志丹,朱弟成,等. 西藏南部印度-欧亚碰撞带岩石圈:岩石学-地球化学约束[J]. 地球科学,2009,34(1):17-27.
- MO Xuanxue, ZHAO Zhidan, ZHU Dicheng, et al. On the Lithosphere of Indo - Asia Collision Zone in Southern Tibet: Petrological and Geochemical Constraints [J]. Earth Science, 2009, 34(1): 17-27.
- 潘亮,周斌,韩奎,等. 西藏拉萨-日多中生代沉积盆地的性质及其形成演化[J]. 矿产勘查,2018,9(9):1736-1745.
- PAN Liang, ZHOU Bin, HAN Kui, et al. The nature and formation and evolution of Mesozoic sedimentary basins in Lhasa - Riduo[J]. Mineral Exploration,2018,9(9):1736-1745.
- 王海涛,曾令森,高利娥,等. 藏南冈底斯岩基日多地区花岗岩体形成时代和地球化学特征[J]. 岩石学报,2019,35(2):439-454.
- WANG Haitao, ZENG Lingsen, GAO Li'e, et al. Timing and geochemical characteristics of the Riduo granitic pluton within the Gangdese batholith, southern Tibet [J]. Acta Petrologica Sinica, 2019, 35(2): 439-454.
- 魏友卿. 西藏拉萨地块南缘中生代火山岩与碎屑沉积岩的年代学、地球化学及构造意义[D]. 北京:中国地质大学(北京),2017.
- WEI Youqing. Mesozoic volcanic and sedimentary rocks on the southern margin of Lhasa Terrane, southern Tibet: geochronology, geochemistry and tectonic implications [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing),2017.
- 熊秋伟,陈建林,许继峰,等. 拉萨地块南部得明顶地区叶巴组火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其成因[J]. 地质通报,2015,34(9):1645-1655.
- XIONG Qiuwei, CHEN Jianlin, XU Jifeng, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology, geochemical characteristics and genetic study of Yeba Formation lavas in Demingding area, southern Tibet[J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(9): 1645-1655.
- 吴荣新,郑永飞,吴元保. 皖南新元古代花岗岩长岩体锆石 U-Pb 定年以及元素和氧同位素地球化学研究[J]. 岩石学报,2007,21(3):587-606.
- WU Rongxin, ZHENG Yongfei, WU Yuanbao. Zircon U-Pb age, element and oxygen isotope geochemistry of Neoproterozoic granodiorites in South Anhui[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 21(3): 587-606.
- 吴福元,李献华,郑永飞,等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报,2007,23(2):185-220.
- WU Fuyuan, LI Xianhua, ZHENG Yongfei, et al. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(2): 185-220.
- 夏祖春,徐学义,夏林圻,等. 天山石炭-二叠纪后碰撞花岗岩质岩石地球化学研究[J]. 西北地质,2005,38(01):1-14.
- XIA Zuchun, XU Xueyi, XIA Linqi, et al. Geochemistry of the Carboniferous - Permian post-collisional granitic rocks from Tianshan[J]. Northwestern Geology,2005,38(01):1-14.
- 徐旺春. 西藏冈底斯花岗岩类锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成的空间变化及其地质意义[D]. 武汉:中国地质大学(武汉),2010.
- XU Wangchun. Spatial variation of zircon U-Pb age Hf isotopic compositions of the Gangdese granitoids and its geologic implications[D]. Wuhan: China University of Geoscience(Wuhan), 2010.
- 岳雅慧,丁林. 西藏林周基性岩脉的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学、地球化学及其成因[J]. 岩石学报,2006,22(4):855-866.
- YUE Yahui, DING Lin. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronology, geochemical characteristics and genesis of the Linzhou basic dikes, Tibet[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006,22(4):855-866.
- 张旗,潘国强,李承东,等. 花岗岩混合问题:与玄武岩对比的启示:关于花岗岩研究的思考之一[J]. 岩石学报,2007,23(5):1141-1152.
- ZHANG Qi, PAN Guoqiang, LI Chengdong, et al. Granitic magma mixing versus basaltic magma mixing: New

- viewpoints on granitic magma mixing process; some crucial questions on granite study(1) [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(5): 1141-1152.
- 周斌, 韩奎, 潘亮, 等. 西藏日多地区古近纪双峰式脉岩年代学、地球化学及其揭示的伸展背景[J]. *矿产勘查*, 2018, 9(9): 1746-1757.
- ZHOU Bin, HAN Kui, PAN Liang, et al. Paleogene bimodal intrusions dike in Riduo, Tibet: geochemistry, geochronology and implications for extension[J]. *Mineral Exploration*, 2018, 9(9): 1746-1757.
- 周斌, 韩奎, 潘亮, 等. 西藏日多地区 1:5 万区域地质调查成果报告[R]. 西安: 陕西省地质调查中心, 2019.
- 张立雪, 王青, 朱弟成, 等. 拉萨地块锆石 Hf 同位素填图: 对地壳性质和成矿潜力的约束[J]. *岩石学报*, 2013, 29(11): 3681-3688.
- ZHANG Lixue, WANG Qin, ZHU Dicheng, et al. Mapping the Lhasa Terrane through zircon Hf isotopes: Constraints on the nature of the crust and metallogenic potential[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(11): 3681-3688.
- 赵志丹, 莫宣学, Sebastien N, 等. 2006. 青藏高原拉萨地块碰撞后超钾质岩石的时空分布及其意义[J]. *岩石学报*, 2006, 22(4): 787-794.
- ZHAO Zhidan, MO Xuanxue, Sebastien N, et al. Post-collisional ultrapotassic rocks in Lhasa Block, Tibetan Plateau: Spatial and temporal distribution and its' implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(4): 787-794.
- 朱弟成, 潘桂棠, 王立全, 等. 西藏冈底斯带侏罗纪岩浆作用的时空分布及构造环境[J]. *地质通报*, 2008, 27(4): 458-468.
- ZHU Dicheng, PAN Guitang, WANG Liquan, et al. Spatial-temporal distribution and tectonic setting of Jurassic magmatism in the Gangdise belt, Tibet, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(4): 458-468.
- 张洪亮, 杨文光, 朱利东, 等. 南拉萨地块高分异 S 型花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义[J]. *矿物岩石*, 2019, 39(1): 52-62.
- ZHANG Hongliang, YANG Wenguang, ZHU Lidong, et al. Zircon U-Pb age, geochemical characteristics and geological significance of highly differentiated s-type Granites in the south Lhasa block[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2019, 39(1): 52-62.
- 张泽明, 丁慧霞, 董昕, 等. 冈底斯岩浆弧的形成与演化[J]. *岩石学报*, 2019, 35(2): 275-294.
- ZHANG Zeming, DING Huixia, DONG Xin, et al. Formation and evolution of the Gangdese magmatic arc, southern Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(2): 275-294.
- 朱弟成, 赵志丹, 牛耀龄, 等. 拉萨地块的起源和古生代构造演化[J]. *高校地质学报*, 2012, 18(1): 1-15.
- ZHU Dicheng, ZHAO Zhidan, NIU Yaoling, et al. Origin and Paleozoic Tectonic Evolution of the Lhasa Terrane [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2012, 18(1): 1-15.
- Ameliny, Leedc, Hallidayan, et al. Nature of the Earth's Earliest Crust from Hafnium Isotopes in Single Detrital Zircons[J]. *Nature*, 1999, 399(6733): 1497-1503.
- Atherton M, Petford N. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust [J]. *Nature*, 1993, 362(6416): 144-146.
- Bea F, Arzamastsev A, Montero P, et al. Aonmalous alkaline rocks of Soustov, Kola: evidence of mantle derived matasomatic fluids affecting crustal materials[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 2001, 140: 554-566.
- Boynton W V. Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: Meteoric Studies [J]. *Rare Earth Element Geochemistry*, 1984, (2): 63-114.
- Chappell B W. Aluminium saturation in I and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. *Lithos*, 1999, 46: 535-551.
- Chung Sl, Chu MF, Zhang YQ, et al. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism [J]. *Earth - Science Reviews*, 2005, 68(3-4): 173-196.
- Elburg M A, Van Bergen M, Hoogewerff J, et al. Geochemical trends across an arc-continent collision zone: Magma sources and slab-wedge transfer processes below the Pantar Strait volcanoes [J]. *Indonesia Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66: 2771-2789.
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, et al. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: in-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes [J]. *Lithos*, 2002, 61(3-4): 237-269.
- Guo Z, Hertogen J, Liu J, et al. Potassic magmatism in western Sichuan and Yunnan provinces, SE Tibet, China: Petrological and geochemical constraints on petrogenesis [J]. *Journal of Petrology*, 2005, 46: 33-78.
- Hawkins Jw. Geology of supra-subduction zones-Implication for the origin of ophiolites. In: Dilek Y and Newcomb S, eds. *Ophiolite concept and the Evolution of Geological Thought*: Boulder, Colorado [J]. *Geological Society of*

- America Special Paper, 2003, 373: 227-268.
- Huang W, Dupont - nivet G, Lippert P C, et al. What was the Paleogene latitude of the Lhasa terrane? A reassessment of the geochronology and paleomagnetism of Linzizong volcanic rocks (Linzhou Basin, Tibet) [J]. *Tectonics*, 2015, 34(3): 594-622.
- Hxm, Garzanti E, Moore T, et al. Direct stratigraphic dating of India - Asia collision at the Selandian (middle Paleocene, $59 \pm 1\text{Ma}$) [J]. *Geology*, 2015, 43(10): 859-862.
- Kohn M J, Parkinson C D. Petrologic case for Eocene slab breakoff during the Indo - Asian collision [J]. *Geology*, 2002, 30: 591-594.
- Lassiter J C, Depaolo D J. Plume/Lithosphere Interaction in the Generation of Continental and Oceanic Flood Basalts; Chemical and Isotopic Constraints. MAHONEY, J. J., COFFIN, M. F. Large Igneous Provinces, Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism [M]. USA: AGU, 1997, 335-355.
- Lee T Y, Lawver L A. Cenozoic plate reconstruction of the South China Sea region [J]. *Tectonophysics*, 1994, 251: 85-138.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25: 956-983.
- Pearce Ja, Houjun M. Volcanic rocks of the 1985 Tibet geotransverse: Lhasa to Golmud Philosophical Transactions of the Royal Society of London [J]. *Mathematical and Physical Sciences (Series A)*, 1988, 327: 169-201.
- Shinjo R, Kato Y. Geochemical constraints on the origin of bimodal magmatism at the Okinawa Trough, an incipient back-arc basin [J]. *Lithos*, 2000, 54(3): 117-137.
- Skjerlie Kp, Johnston A D. Vapor-absent melting at 10 kbar of a biotite-and amphibole-bearing tonalitic gneiss: Implications for the generation of A-type granites [J]. *Geology*, 1992, 20(3): 263-266.
- Sun S S and McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; Implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42(1): 313-345.
- Taylor S R and McLennan S M. The Continental crust: Its composition and evolution. Oxford [M]. UK: Blackwell Scientific Publications, 1985, 1-312.
- Rubatto D. Zircon Trace Element Geochemistry: Partitioning with Garnet and the Link between U - Pb Ages and Metamorphism [J]. *Chemical Geology*, 2002, 184(1-2): 123-138.
- Vervoort J D, Patchett P J, Gehrels G E, et al. Constraints on early earth differentiation from hafnium and neodymium isotopes [J]. *Nature*, 1996, 379: 624-627.
- Wang Q, Zhu Dc, Cawood P A, et al. Eocene magmatic processes and crustal thickening in southern Tibet: Insights from strongly fractionated ca. 43 Ma granites in the western Gangdese Batholith [J]. *Lithos*, 2015, 239: 128-141.
- Watson, E B, Harrison T M. Zircon Thermometer Reveals Minimum Melting Conditions on Earliest Earth [J]. *Science*, 2005, 308(5723): 841-844.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 95: 407-419.
- Zhu Dc, Zhao Z D, Niu Y, et al. The Lhasa Terrane: Record of a microcontinent and its histories of drift and growth [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2011, 301(1-2): 241-255.
- Zhao ZD, MO Xx, Dilek Y, et al. Geochemical and Sr - Nd - Pb - O isotopic compositions of the postcollisional ultrapotassic magmatism in SW Tibet: Petrogenesis and implications for India intra-continental subduction beneath southern Tibet [J]. *Lithos*, 2009, 113(1-2): 190-212.