青藏高原拉萨地块新元古代(~925 Ma)变质辉长岩的确立及其地质意义

胡培远, 翟庆国*, 唐跃, 王军, 王海涛

中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

* 联系人, E-mail: zhaiqingguo@126.com

2016-01-31 收稿, 2016-03-07 修回, 2016-03-10 接受, 2016-05-27 网络版发表

国家自然科学基金(41522204, 41502216)和中国地质调查局项目(12120113093900, 12120115026901)资助

摘要 报道了西藏自治区拉萨地块中部仁错地区的念青唐古拉岩群中变质辉长岩的锆石 U-Pb 定年结果和岩石地球化学资料以及锆石 Hf 同位素组成. LA-ICP-MS 和 SIMS 锆石 U-Pb 定年结果表明, 变质辉长岩原岩形成于新元古代早期(约 925 Ma), 这是目前拉萨地块乃至整个青藏高原内部最古老的基性岩浆记录. 全岩地球化学资料显示, 变质辉长岩具有类似典型大洋中脊玄武岩(N-MORB)的地球化学特征, 并有部分岛弧拉斑玄武岩(IAT)的亲缘性. 变质辉长岩锆石具有明显正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(8.26~13.7)和年轻的 Hf 模式年龄($T_{\text{DM}}=933\sim1205$ Ma), 表明变质辉长岩原岩的岩浆来自于亏损的地幔源区. 综合这些资料可知, 变质辉长岩可能代表了新元古代早期的洋壳残片, 这为深入理解青藏高原前寒武纪的构造演化的研究提供了重要信息.

关键词 青藏高原, 拉萨地块, 变质辉长岩, 新元古代, 洋壳残片

青藏高原位于阿尔卑斯-喜马拉雅巨型特提斯造山带的东段, 是地球上最年轻、规模最大和最高的高原, 其形成、演化过程一直是中外地球科学家关注和竞相研究的热点. 当前青藏高原地球科学研究的热点和前沿主要聚焦在“一老和一新”两个关键科学问题上^[1~7]. “一老”是青藏高原各陆块的前寒武纪构造演化^[1~3], “一新”是中-新生代以来特提斯洋的闭合、碰撞造山以及高原隆升^[4~7]. 对于后者近年来国内外学者已经开展了大量的研究工作, 青藏高原中-新生代以来的构造演化过程已日趋清晰^[6~9]. 然而对于青藏高原前寒武纪的物质组成及其构造演化过程方面的研究仍很薄弱.

拉萨地块是青藏高原前寒武纪岩石出露最为广泛的地区之一^[10], 如念青唐古拉岩群^[11~15]、林芝岩群^[2,3,16]、嘉玉桥群^[17]、德玛拉岩群^[18]等均被认为是

由前寒武纪岩石组成的. 近几年来对拉萨地块起源和早期构造演化的研究, 已引起了国内外学者的广泛关注, 然而对于这些岩群的时代是否为前寒武纪, 以及它们的构造属性尚存在一些争论. 如在藏东的林芝岩群, 虽然碎屑锆石资料显示其中片麻岩的原岩以古生代沉积岩为主^[19,20], 但是新近从林芝岩群中辨别出了中元古代(1250 Ma)弧型花岗岩^[5], 以及古元古代晚期(1784 Ma)的岩浆事件的信息^[4]. 念青唐古拉岩群是拉萨地块中分布范围最为广泛的一套前寒武纪岩石组合, 它是由李璞^[11]等所称的念青唐古拉片麻岩和那更拉片岩系演变而来, 主要分布在念青唐古拉山和纳木错西一带. 念青唐古拉岩群曾被认为是拉萨地块最古老的变质基底, 但是其准确时代目前尚没有统一的认识. 截至目前, 在纳木错西的念青唐古拉岩群中已经报道了 666~758^[14], 748~

引用格式: 胡培远, 翟庆国, 唐跃, 等. 青藏高原拉萨地块新元古代(~925 Ma)变质辉长岩的确立及其地质意义. 科学通报, 2016, 61: 2176~2186
Hu P Y, Zhai Q G, Tang Y, et al. Early Neoproterozoic meta-gabbro (~925 Ma) from the Lhasa terrane, Tibetan Plateau and its geological significance (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 2176~2186, doi: 10.1360/N972016-00143

787^[12]和886~897 Ma^[15]的正片麻岩锆石U-Pb年龄信息。这些年龄资料进一步肯定了念青唐古拉岩群是一套前寒武纪的岩石,但同时也由于其年龄变化较大,使得拉萨地块前寒武纪的构造演化更加复杂化。

本文报道了拉萨地块中部仁错地区念青唐古拉岩群中的新元古代早期变质辉长岩。全岩地球化学资料显示,变质辉长岩可能代表了古老洋壳的残片。锆石U-Pb定年和Hf同位素分析结果表明,岩石的岩浆结晶年龄在925 Ma左右,岩浆来自于亏损的地幔源区。这是目前念青唐古拉岩群中已报道的最老岩基岩,同时也是青藏高原内部已知最古老的基性岩。

1 地质概况

拉萨地块在构造上夹持于班公湖-怒江缝合带和雅鲁藏布江缝合带之间(图1(a))。研究区位于拉萨地

块中北部,仁错以南约20 km,纳木错以西约50 km (图1(b))。区内地层受构造活动强烈改造,断裂构造发育,主要以东西向断裂为主。该地区出露的地层包括前寒武系念青唐古拉岩群、泥盆系、二叠系、白垩系和第四系,岩浆岩主要为中生代蛇绿岩和中生代-新生代花岗岩。念青唐古拉岩群主要呈断块状沿东西向断续出露,与中生代蛇绿岩以及古生代地层均为断层接触,主要岩石类型包括变质辉长岩、含石榴石变质辉长岩、花岗片麻岩、白云母石英片岩、大理岩以及石英岩等,不同岩性间常呈断层或韧性剪切带接触。此外,该地区曾有高压麻粒岩的报道,并且获得了麻粒岩相峰期变质年龄在650 Ma左右,而后期角闪岩相退变质作用时代在480 Ma左右^[15]。

本研究的变质辉长岩样品采自仁错南侧的念青唐古拉岩群中(图2(a)),锆石年龄样品(13T184)采样

图 1 青藏高原板块划分简图(a)和西藏拉萨地块仁错地区地质简图(b)。JSSZ, 金沙江板块缝合带; LSSZ, 龙木错-双湖-澜沧江板块缝合带; BNSZ, 班公湖-怒江板块缝合带; IYZSZ, 雅鲁藏布江板块缝合带

Figure 1 Tectonic framework of the Tibetan Plateau (a) and simplified geologic map of the Ren Co area (b), Lhasa terrane, Tibet. JSSZ, Jinsha suture zone; LSSZ, Longmu Co-Shuanghu-Lancang River suture zone; BNSZ, Bangong-Nujiang suture zone; IYZSZ, Yarlung Zangbo suture zone

图2 西藏仁错地区念青唐古拉岩群中变质辉长岩的野外露头照片(a)及显微镜下照片(b). Am, 角闪石; Pl, 蚀变斜长石残晶

Figure 2 Field photographs (a) and photomicrographs (b) of the meta-gabbro from the Nyainqentanglha Group in the Ren Co area, Tibet. Am, amphibole; Pl, altered plagioclase

位置(30°47.827'N, 89°53.956'E)见图1(b). 变质辉长岩与相邻的岩石均为断层接触, 北侧为念青唐古拉岩群中的石英岩, 南侧为变质橄榄岩; 与石英岩接触处变形强烈, 可见糜棱岩带. 变质辉长岩依然保留有完好的辉长结构, 但多数辉石都已转变为角闪石. 斜长石也发生较强的绿帘石化蚀变, 但依然保留有斜长石的晶体形态(图2(b)); 岩石矿物组合以蚀变斜长石(45%~50%)和角闪石(45%~55%)为主(图2(b)), 此外还有少量绿帘石、钛铁矿、榍石、磁铁矿等, 未见石榴石; 矿物粒度为0.5~1.0 mm.

2 样品分析方法

锆石U-Pb测年样品中锆石的分选在河北省区域地质调查院完成, 采用常规的重液和磁选方法进行分选, 最后在双目显微镜下挑纯. 锆石的阴极荧光图像分析在北京大学物理学院电镜室的阴极荧光分析系统上完成. 样品的LA-ICP-MS锆石U-Pb定年在中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成, 分析仪器为由美国New Wave Research Inc.公司生产的193 nm激光剥蚀进样系统(UP 193SS)和美国AGILENT科技有限公司生产的Agilent 7500a型四级杆等离子体质谱仪联合构成的激光等离子体质谱仪(LA-ICP-MS), 具体分析流程见参考文献[21]. 为了进一步验证年龄结果, 我们又用中国科学院地质与地球物理研究所离子探针实验室的Cameca IMS-1280型二次离子质谱仪进行了锆石SIMS U-Pb定年, 详细的分析流程参阅有关文献[22]. 所有锆石U-Pb测试点的误差均为 1σ , 加权平均值误差为95%置信度, 平均年龄值选用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄, 加权平均年龄的计算和谐和图的绘制采用ISOPLOT 3.0程序[23]. 锆石Hf同位素分析在中国科学院地质与

地球物理研究所的Neptune多接收电感耦合等离子质谱仪(MC-ICP-MS)和193 nm激光取样系统上进行, 分析时激光束直径为63 μm , 激光剥蚀时间约26 s. 测定时用标样GJ-1锆石作外标, 分析中所用激光脉冲速率为8~10 Hz, 能量密度为100 mJ/cm^2 . 仪器的运行条件及详细的分析过程参见文献[24]. 本次实验测定过程中, GJ-1锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 的测定结果是 0.282029 ± 4 , 该值与目前用溶液法获得的值在误差范围内一致[25]. 全岩地球化学样品的主量元素和微量元素的分析均在国家地质实验测试中心. 主量元素采用X-射线荧光光谱仪(PW4400)分析, 微量元素采用等离子质谱仪(X-series), 实验室分析详细方法参见文献[26].

3 分析结果

3.1 锆石U-Pb定年

阴极荧光图像显示(图3), 锆石粒度为100~200 μm , 多具有弱环带、补丁状或条带状结构. 少量锆石具有浅色的增生边, 增生边宽度一般不超过10 μm , 也有极个别锆石的增生边宽度可达30 μm 左右, 但未能获得谐和的年龄结果. 样品中锆石的LA-ICP-MS U-Pb分析共测试了25个点, 分析结果见表S1, 获得的Th含量为126~2831 ppm(1 ppm=1 $\mu\text{g}/\text{g}$, 余同), U含量为56.6~638 ppm, Th/U比值在0.73~31.6之间. 这些测点的数据在谐和曲线上成群分布, 获得的加权平均年龄为 930.8 ± 7.6 Ma (MSWD=2.0) (图3(a)). 锆石SIMS U-Pb定年的分析结果见表S2. 17个测点的Th含量为93.4~3078 ppm, U含量为57.0~698 ppm, Th/U比值为0.48~19.4. 这些测点的U-Pb同位素组成在误差范围内谐和, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的变化范围为900~942 Ma, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 925.2 ± 6.2 Ma (MSWD=0.86) (图3(b)). 两次获得年龄结果在误差范围内一致, 代表变质辉长岩原岩的形成时代为新元古代早期(约925 Ma).

3.2 锆石Hf同位素

锆石Hf同位素分析点位置和锆石SIMS U-Pb测点相对应, 分析结果见表S3. 样品中锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于0.282525~0.282673之间. 每个测点的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和模式年龄根据其SIMS U-Pb年龄计算. 所有测点具有正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(8.26~13.7)和年轻的Hf模式年龄($T_{\text{DM}}=$

图3 西藏仁错地区念青唐古拉岩群中变质辉长岩(13T184)锆石LA-ICP-MS (a)和SIMS (b) U-Pb谐和图。实线和虚线圆圈分别代表了U-Pb测年和Hf同位素分析的位置

Figure 3 Zircon LA-ICP-MS (a) and SIMS (b) U-Pb concordia diagrams for the meta-gabbro (13T184) from the Nyainqentanglha Group in the Ren Co area, Tibet. Solid and dashed circles show the locations of U-Pb dating and Hf analyses, respectively

933~1205 Ma), 反映变质辉长岩原岩的岩浆来自于亏损的地幔源区。

3.3 全岩地球化学

变质辉长岩样品的主量和微量元素的分析结果见表1。变质辉长岩样品具有较均一的SiO₂含量, 变化范围集中在47.83wt%~49.32wt%之间, 在SiO₂-Zr/TiO₂岩石分类图^[27]上, 所有样品均位于亚碱性玄武岩的区域(图4)。野外和显微镜下观察显示变质辉长岩经历了一定程度的变质和蚀变作用, 岩石中大离子亲石元素(例如K, Rb, Sr和Ba等)的含量可能受此影响而发生迁移^[28~30]。因此, 本研究主要根据高场强元素(如Ti, Nb, Ta, Zr和Hf)、稀土元素和过渡元素(如V, Fe和

Mn)等不活动元素的含量来对岩石进行分类和成因讨论。根据岩石稀土和微量元素的含量不同, 可以将样品分为A, B两组。在稀土元素球粒陨石标准化图解(图5(a))上, 两组样品均表现为左倾的曲线, 轻稀土元素相对重稀土元素亏损(La_N/Yb_N=0.22~0.65), 无明显Eu异常(Eu/Eu*比值为0.95~1.09), 这与大洋中脊玄武岩的特征(N-MORB)类似^[31], 但是A组样品的稀土元素总量明显高于B组样品。在微量元素原始地幔标准化图上(图5(b))也表现出类似的特征, 两组样品均表现出与N-MORB类似的分布型式^[31], 总体呈现平缓的曲线, 具有明显的Nb负异常和轻微Ti的负异常, A组样品的高场强元素(HFSE)含量明显高于B组样品。

4 讨论

4.1 变质辉长岩的时代

变质辉长岩中的锆石多数具有岩浆锆石的特征, 如振荡环带、补丁状或条带状结构, 以及较高的Th/U比值(>0.1)等^[33]。此外, 部分锆石还具有窄的变质增生边, 但是由于太窄而无法进行U-Pb同位素分析, 因此, 本项研究中LA-ICP-MS和SIMS U-Pb测试点, 主要集中在具有岩浆成因特征的锆石或其核部。两次分析获得的年龄结果分别为930.8±7.6和925.2±6.2 Ma, 它们在误差范围内一致, 代表了变质辉长岩原岩的岩浆结晶时代。近年来, 在拉萨地块上已获得了多处前寒武纪岩浆岩的锆石U-Pb年龄, 最老的年龄报道于藏东林芝岩群中的花岗岩质岩石, 其时代可达1250~1784 Ma^[2,3]。在念青唐古拉岩群中也发现了新元古代的岩浆岩信息, 时代变化范围主要集中在666~787 Ma之间^[12~14], 并在高压麻粒岩中识别出了886~897 Ma的岩浆作用的记录^[15]。本文报道的变质辉长岩是目前念青唐古拉岩群中乃至整个青藏高原内部最老的基性岩, 它为深入理解拉萨地块以及青藏高原前寒武纪构造演化过程提供了关键证据。

此外, 变质辉长岩中大部分辉石都已转变为角闪石, 斜长石也多数发生了绿帘石化而无完整的矿物晶体保留(图2(b)), 并且部分锆石发育有较窄的变质增生边, 这些矿物成分的转变指示辉长岩可能经历了中-高级的变质作用。最近, Zhang等人^[15]在研究区相邻地区的念青唐古拉岩群中发现了高压麻粒岩, 并获得麻粒岩相变质作用发生在650 Ma左右。尽管我们未能直接测得锆石变质增生边形成的准确年龄,

表1 西藏仁错地区念青唐古拉岩群中变质辉长岩的主量元素和微量元素分析结果

Table 1 Whole-rock major and trace element data of the meta-gabbro from the Nyainqentanglha Group in the Ren Co area, Tibet

样品	13T170	13T170-1	13T173	13T175	13T184	13T171	13T171-1	13T172	13T174
	A组	A组	A组	A组	A组	B组	B组	B组	B组
主量元素(wt%)									
SiO ₂	47.82	47.83	48.94	48.48	49.32	48.73	48.81	49.20	48.88
TiO ₂	2.38	2.50	2.26	2.51	2.15	0.83	0.86	0.85	0.84
Al ₂ O ₃	14.55	14.77	14.90	14.78	15.30	14.28	14.65	14.80	14.46
Fe ₂ O ₃ ^T	12.78	12.74	12.32	11.74	10.63	9.25	9.33	9.31	9.98
MnO	0.21	0.21	0.20	0.18	0.17	0.11	0.11	0.11	0.11
MgO	6.73	6.73	6.15	6.25	6.10	8.10	8.13	7.97	8.47
CaO	10.59	10.44	10.76	9.94	10.21	12.45	12.34	12.02	11.82
Na ₂ O	2.99	2.88	3.09	3.30	3.84	2.75	2.62	2.94	2.46
K ₂ O	0.50	0.50	0.60	0.73	0.49	0.24	0.24	0.24	0.19
P ₂ O ₅	0.20	0.21	0.21	0.20	0.09	0.04	0.05	0.05	0.05
LOI	0.77	0.83	0.67	0.92	1.18	2.19	2.19	2.63	1.69
合计	99.52	99.64	100.10	99.03	99.48	98.97	99.33	100.12	98.95
微量元素(ppm)									
Li	12.4	11.0	10.6	9.09	11.4	8.99	7.63	11.2	14.6
Be	0.66	0.65	0.66	0.62	0.65	0.18	0.18	0.19	0.15
Sc	53.2	51.8	51.6	54.9	69.6	43.1	38.8	43.4	42.4
V	410	469	379	498	323	257	293	253	299
Cr	259	302	215	262	240	134	135	133	129
Co	46.8	42.4	44.2	39.5	36.9	42.4	37.5	43.9	41.4
Ni	70.2	61.8	60.1	58.4	46.2	77.9	70.9	71.2	74.3
Ga	22.6	21.7	21.7	22.8	22.0	15.7	14.6	16.5	15.6
Rb	20.9	16.8	24.9	24.0	20.1	3.66	3.41	3.95	3.45
Sr	211	188	181	220	246	87.6	71.4	92.1	74.7
Zr	149	100	152	118	203	32.6	27.9	33.6	29.5
Nb	2.26	2.07	2.04	2.27	2.24	0.85	0.36	0.81	0.38
Cs	0.52	0.46	0.47	0.45	0.46	2.40	2.33	2.33	4.64
Ba	112	95.5	86.3	199	70.8	38.7	34.7	32.9	67.5
Ta	0.29	0.16	0.27	0.19	0.35	0.17	—	0.20	—
Pb	0.56	0.45	0.73	1.36	0.73	0.21	0.09	0.30	0.08
Th	0.21	0.17	0.20	0.2	0.27	0.05	—	0.08	—
U	0.08	0.06	0.08	0.09	0.10	—	—	—	—
Hf	4.16	3.43	4.65	3.98	5.65	1.12	1.24	1.22	1.19
La	4.16	4.24	4.15	4.44	3.24	0.76	0.93	0.82	0.96
Ce	15.7	13.3	15.0	13.7	12.1	3.31	3.02	3.66	3.35
Pr	2.84	2.65	2.73	2.82	2.37	0.62	0.68	0.70	0.78
Nd	16.3	15.1	15.3	15.6	13.6	3.95	3.99	4.51	4.29
Sm	5.58	4.56	5.24	4.78	4.84	1.71	1.58	1.83	1.6
Eu	2.04	1.78	1.97	1.87	1.80	0.73	0.71	0.72	0.65
Gd	7.25	7.22	6.66	7.16	6.73	2.47	2.81	2.54	2.69
Tb	1.24	1.29	1.20	1.35	1.23	0.49	0.55	0.50	0.52
Dy	8.01	8.02	7.78	8.54	7.97	3.42	3.62	3.51	3.66
Ho	1.80	1.64	1.79	1.78	1.85	0.82	0.78	0.84	0.80
Er	4.88	5.13	4.67	5.45	4.98	2.19	2.53	2.22	2.54
Tm	0.78	0.70	0.78	0.76	0.82	0.37	0.36	0.38	0.37
Yb	4.82	4.77	4.60	5.01	5.08	2.47	2.33	2.26	2.31
Lu	0.73	0.72	0.71	0.76	0.78	0.35	0.37	0.38	0.36
Y	49.5	44.8	43.9	46.5	46.2	21.3	19.6	21.9	21.6

图 4 西藏仁错地区念青唐古拉岩群中变质辉长岩的 SiO_2 - Zr/TiO_2 图解

Figure 4 The SiO_2 - Zr/TiO_2 diagram^[27] of the meta-gabbro from the Nyainqentanglha Group in the Ren Co area, Tibet

但是根据邻区高压麻粒岩的产出推测, 变质辉长岩可能是在邻区麻粒岩相变质作用的影响下发生变质的, 锆石增生的时代可能在650 Ma左右。

4.2 岩石成因

如前文所述, 虽然变质辉长岩样品都显示出与N-MORB类似的地球化学特征, 但是它们的稀土和微量元素含量存在一些差别, 在稀土元素和微量元素标准化图上表现出A和B两组特征。在对样品稀土元素和微量元素比值计算后发现(表2), 两组变质辉长岩样品均具有较低的Ce/Zr, Th/Yb, Th/La, La/Yb, La/Sm和La/Nb比值, 这些特征与N-MORB类似, 而与岛弧拉斑玄武岩(IAT)和富集型洋中脊玄武岩

(E-MORB)差别很大。值得注意的是, 这些样品同时还具有较高的Zr/Nb和Hf/Nb比值, 与N-MORB差别明显, 反而与IAT较为接近。在Y/Nb比值上, 两组样品出现了差异, A组样品(平均值为21.2)与N-MORB更为接近, B组样品(平均值为40.8)与IAT更为接近。构造环境判别图解上的投点也显示出类似的结果(图6), A组样品几乎全部投点落入N-MORB的区域, 而B组样品主要投点落入N-MORB和岛弧玄武岩两个区域。综合上述分析可知, 变质辉长岩具有类似典型大洋中脊玄武岩(N-MORB)的地球化学特征, 并有部分岛弧拉斑玄武岩(IAT)的特征, 其中B组样品相对于A组样品显示出更多的岛弧的亲缘性。此外, 变质辉长岩锆石具有明显正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(8.26~13.7)和相对年轻的Hf模式年龄($T_{\text{DM}}=933\sim1205$ Ma), 反映其原岩岩浆来自于亏损的地幔源区。这些特征暗示了变质辉长岩很可能形成于大洋中脊的构造环境, 它代表了一个被肢解的洋壳残片。尽管也有学者认为具有这些地球化学特征的基性岩也可以形成于大陆裂谷环境^[40~42], 但是综合野外观察和室内研究, 我们更倾向于它是一个被肢解的古老蛇绿岩的碎片, 代表了新元古代早期的洋壳信息。

4.3 地质意义

西藏拉萨地块中部新元古代早期(~925 Ma)变质辉长岩的确立为拉萨地块基底时代和属性的研究提供了新的约束。念青唐古拉岩群是一套由正片麻岩、副片麻岩、斜长角闪岩、角闪片岩、大理岩、石英岩、板岩等组成的变质地质体, 它自建立以来就被认为是拉萨地块的古老变质基底的代表^[10]。但是由于念

图 5 西藏仁错地区念青唐古拉岩群中变质辉长岩的稀土元素球粒陨石标准化(a)和微量元素原始地幔标准化(b)图解。标准化数据以及N-MORB和E-MORB数据引自参考文献[31]; IAT(岛弧拉斑玄武岩)数据引自参考文献[32]

Figure 5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive-mantle-normalized spider diagrams for the meta-gabbro (b) from the Nyainqentanglha Group in the Ren Co area, Tibet. Chondrites, primitive mantle, N-MORB and E-MORB values are after Ref. [31]. Data for the island arc tholeiite (IAT) are after Ref. [32]

表2 西藏仁错地区念青唐古拉岩群中变质辉长岩的高场强元素平均值与世界典型基性岩对比表^{a)}

Table 2 The average values of the ratios of high field strength elements (HFSE) of the world-wide typical basic rocks and the meta-gabbro from the Nyainqentanglha Group in the Ren Co area, Tibet

样品	Ce/Zr	Th/Yb	Th/La	La/Yb	La/Sm	La/Nb	Zr/Nb	Hf/Nb	Y/Nb
A组	0.10	0.04	0.05	0.84	0.81	1.87	66.3	2.01	21.2
B组	0.11	0.03	0.09	0.37	0.52	1.75	58.7	2.35	40.8
IAT	0.13	0.19	0.17	1.08	1.24	3.84	77.1	2.25	33.6
N-MORB	0.10	0.04	0.05	0.82	0.95	1.07	31.8	0.88	12.0
E-MORB	0.20	0.25	0.10	2.66	2.42	0.76	8.90	0.24	2.70

a) IAT数据引自参考文献[32]; N-MORB和E-MORB数据引自参考文献[31]

图6 西藏仁错地区念青唐古拉岩群中变质辉长岩的Hf-Th-Ta^[34](a), Y-La-Nb^[35](b), Nb-Zr-Y^[36](c), Th/Yb-Nb/Yb^[37](d), Zr/Y-Zr^[38](e)和V-Ti^[39](f)图解Figure 6 The diagram of Hf-Th-Ta^[34] (a), Y-La-Nb^[35] (b), Nb-Zr-Y^[36] (c), Th/Yb vs. Nb/Yb^[37] (d), Zr/Y vs. Zr^[38] (e), and V vs. Ti^[39] (f) for meta-gabbro from the Nyainqentanglha Group in the Ren Co area, Tibet

青唐古拉岩群岩石组成复杂, 并且受到了多期强烈变形、变质作用的改造, 其时代和属性长期以来争论很大。近年来, 对念青唐古拉岩群的研究取得了一些新的进展, 在纳木错西地区获得了斜长角闪岩和糜棱岩原岩的岩浆侵位年龄为748~787 Ma^[12], 在永珠地区获得了斜长角闪岩、斜长角闪片麻岩和斜长片麻岩原岩的岩浆结晶时代在730~758 Ma之间^[14], 在永珠和尼玛地区还报道有寒武纪(492~536 Ma)的变质流纹岩^[28,29,43,44]。这些年龄资料肯定了念青唐古拉岩群为一套寒武纪-前寒武纪变质地质体, 其时代变化

范围自新元古代早期(925 Ma), 一直延续到晚寒武世(492 Ma)。然而, 在念青唐古拉山主峰西侧一带的发育念青唐古拉岩群片麻岩中获得的锆石岩浆结晶年龄却为古近纪(59~64 Ma)^[45]。此外, 根据现有资料, 已报道的念青唐古拉岩群的岩石组成, 既有洋壳或岛弧成因的正片麻岩和火山岩, 也有大陆成因的副片麻岩、石英岩和板岩^[10,14,28,29,43,45]。因此, 过去所定义的“念青唐古拉岩群”实际上是由一些时代不同、成因不同, 甚至来源不同的构造岩片组成, 它们在多期构造的作用下最终聚合到一起, 随着下一步研究工

作的不断深入,该岩群必将解离。拉萨地块中部地区以念青唐古拉岩群为代表的基底时代,可以追溯到新元古代早期,伴随着念青唐古拉岩群的解离,其前寒武纪的构造演化历史也将日趋清晰。

5 结论

(1) 锆石U-Pb定年表明,仁错地区变质辉长岩原岩形成于新元古代早期(约925 Ma),是目前念青唐古

拉岩群中最老的岩浆岩记录,同时也是拉萨地块中乃至青藏高原内部最老的基性岩。拉萨地块中部地区的基底时代可以追溯到新元古代早期。

(2) 变质辉长岩具有类似N-MORB的地球化学特征,并有部分岛弧拉斑玄武岩(IAT)的亲缘性,岩石中锆石具有明显正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(8.26~13.7)和年轻的Hf模式年龄($T_{\text{DM}}=933\sim1205$ Ma),可能代表了新元古代早期的洋壳残片。

致谢 锆石SIMS U-Pb定年和Hf同位素分析得到了中国科学院地质与地球物理研究所李献华和吴福元等老师的帮助;锆石LA-ICP-MS U-Pb定年分析得到了中国地质科学院矿产资源研究所侯可军和王茜等的帮助;此外,两位审稿专家的建设性意见对本文的修改和提高帮助很大;在此一并致以衷心的感谢。

参考文献

- Xu Z Q, Yang J S, Liang F H, et al. Pan-African and Early Paleozoic orogenic events in the Himalaya terrane: Inference from SHRIMP U-Pb zircon ages (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2005, 21: 1-12 [许志琴, 杨经绥, 梁凤华, 等. 喜马拉雅地体的泛非-早古生代事件年龄纪录. *岩石学报*, 2005, 21: 1-12]
- Xu W C, Zhang H F, Harris N, et al. Geochronology and geochemistry of Mesoproterozoic granitoids in the Lhasa terrane, south Tibet: Implications for the early evolution of Lhasa terrane. *Precambrian Res*, 2013, 236: 46-58
- Lin Y H, Zhang Z M, Dong X, et al. Precambrian evolution of the Lhasa terrane, Tibet: Constraint from the zircon U-Pb geochronology of the gneisses. *Precambrian Res*, 2013, 237: 64-77
- Wang C S, Zhao X X, Liu Z F, et al. Constraints on the early uplift history of the Tibetan Plateau. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2008, 105: 4987-4992
- Ding L, Xu Q, Yue Y H, et al. The Andean-type Gangdese Mountains: Paleoelevation record from the Paleocene-Eocene Linzhou Basin. *Earth Planet Sci Lett*, 2014, 392: 250-264
- Wang Q, Chung S L, Li X H, et al. Crustal melting and flow beneath northern Tibet: Evidence from Mid-Miocene to Quaternary strongly peraluminous rhyolites in the Southern Kunlun Range. *J Petrol*, 2012, 53: 2523-2566
- Ding H X, Zhang Z M, Dong X, et al. Early Eocene (ca. 50 Ma) collision of the Indian and Asian continents: Constraints from the North Himalayan metamorphic rocks, southeastern Tibet. *Earth Planet Sci Lett*, 2016, 435: 64-73
- Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2000, 28: 211-280
- Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, et al. The origin and pre-Cenozoic evolution of the Tibetan Plateau. *Gondwana Res*, 2013, 23: 1429-1454
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Xizang Autonomous Region. Regional Geology of Xizang (Tibet) Autonomous Region (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1993 [西藏地质矿产局. 西藏自治区区域地质志. 北京: 地质出版社, 1993]
- Li P. Novice understanding of the geology of eastern Tibet (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 1955, 7: 62-71 [李璞. 西藏东部地质的初步认识. *科学通报*, 1955, 7: 62-71]
- Hu D G, Wu Z H, Jiang W, et al. SHRIMP zircon U-Pb age and Nd isotopic study on the Nyainqêntanglha Group in Tibet. *Sci China Ser D: Earth Sci*, 2005, 48: 1377-1386
- Zhang Z M, Dong X, Geng G S, et al. Precambrian metamorphism of the Northern Lhasa Terrane, South Tibet and its tectonic implications (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 2010, 84: 449-456 [张泽明, 董昕, 耿官升, 等. 青藏高原拉萨地体北部的前寒武纪变质作用及构造意义. *地质学报*, 2010, 84: 449-456]
- Zhang X Z, Dong Y S, Li C, et al. Delineation of Middle Neoproterozoic ophiolite mélange in the northern Lhasa terrane, South Tibet and its significance (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2013, 29: 698-722 [张修政, 董永胜, 李才, 等. 青藏高原拉萨地块北部新元古代中期蛇绿混杂岩带的厘定及其意义. *岩石学报*, 2013, 29: 698-722]
- Zhang Z M, Dong X, Liu F, et al. The making of Gondwana: Discovery of 650 Ma HP granulites from the North Lhasa, Tibet. *Precambrian Res*, 2012, 212-213: 107-116
- Yi G H, Bao G, Yang S S, et al. The granulites and ages of the Nyingchi Group Complex in the Nyingchi region, Xizang (in Chinese). *Sediment Geol Tethyan Geol*, 2006, 26: 8-15 [尹光候, 包钢, 杨淑胜, 等. 西藏林芝地区林芝岩群麻粒岩及时代讨论. *沉积与特提*

- 斯地质, 2006, 26: 8–15]
- 17 He S P, Li R S, Wang C, et al. The determination of the age of Jiayuqiao Group in northern Gangdise of Tibetan Plateau (in Chinese). *Geol China*, 2012, 39: 21–28 [何世平, 李荣社, 王超, 等. 青藏高原冈底斯北缘嘉玉桥群形成时代的确定. *中国地质*, 2012, 39: 21–28]
 - 18 Peng X J, Chen Y M, Zhang S Q. Paleoproterozoic Demala Group-complex in the Chayu area, Tibet (in Chinese). *Region Geol China*, 1999, 18: 148–154 [彭兴阶, 陈应明, 张世权. 西藏察隅地区古元古代德玛拉岩群的特征. *中国区域地质*, 1999, 18: 148–154]
 - 19 Dong X, Zhang Z M, Wang J L, et al. Provenance and formation age of the Nyingchi Group in the southern Lhasa terrane, Tibetan Plateau: Petrology and zircon U-Pb geochronology (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2009, 25: 1678–1694 [董昕, 张泽明, 王金丽, 等. 青藏高原拉萨地体南部林芝岩群的物质来源与形成年代: 岩石学与锆石 U-Pb 年代学. *岩石学报*, 2009, 25: 1678–1694]
 - 20 Dong Y S, Li C, Chen H, et al. Study on geochronology and its geological significance of the Demala Group complex in Chayu area, Southeast Tibetan Plateau (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2011, 27: 1198–1208 [董永胜, 李才, 陈辉, 等. 西藏东南部察隅地区德玛拉岩群的同位素年代学研究及其意义. *岩石学报*, 2011, 27: 1198–1208]
 - 21 Hu P Y, Li C, Yang H T, et al. Characteristic, zircon dating and tectonic significance of Late Triassic granite in the Guoganjianshan area, central Qiangtang, Qinghai-Tibet Plateau, China (in Chinese). *Geol Bull China*, 2010, 29: 1825–1832 [胡培远, 李才, 杨韩涛, 等. 青藏高原羌塘中部果干加年山一带晚三叠世花岗岩的特征、锆石定年及其构造意义. *地质通报*, 2010, 29: 1825–1832]
 - 22 Li X H, Liu Y, Li Q L, et al. Precise determination of Phanerozoic zircon Pb/Pb age by multi-collector SIMS without external standardization. *Geochem Geophys Geosyst*, 2009, 10: 1–21
 - 23 Ludwig K R. Using Isoplot/Ex, Version 3.00, A Geochronology Toolkit for Microsoft Excel. *Berkeley Geochronol Center Spec Publ*, 2003, 4: 1–70
 - 24 Wu F Y, Yang J H, Xie L W, et al. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chem Geol*, 2006, 234: 105–126
 - 25 Woodhead J, Hergt J, Shelley M, et al. Zircon Hf-isotope analysis with an excimer laser, depth profiling, ablation of complex geometries and concomitant age estimation. *Chem Geol*, 2004, 209: 121–135
 - 26 Zhai Q G, Jahn B M, Wang J, et al. Oldest Paleo-Tethyan ophiolitic mélange in the Tibetan Plateau. *Geol Soc Am Bull*, 2016, 128: 355–373
 - 27 Winchester J A, Floyd P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chem Geol*, 1977, 20: 325–343
 - 28 Hu P Y, Li C, Wang M, et al. Cambrian volcanism in the Lhasa terrane, southern Tibet: Record of an early Paleozoic Andean-type magmatic arc along the Gondwana proto-Tethyan margin. *J Asian Earth Sci*, 2013, 77: 91–107
 - 29 Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, et al. Cambrian bimodal volcanism in the Lhasa Terrane, southern Tibet: Record of an early Paleozoic Andean-type magmatic arc in the Australian proto-Tethyan margin. *Chem Geol*, 2012, 328: 290–308
 - 30 Zhai Q G, Jahn B M, Wang J, et al. The Carboniferous ophiolite in the middle of the Qiangtang terrane, Northern Tibet: SHRIMP U-Pb dating, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic characteristics. *Lithos*, 2013, 168–169: 186–199
 - 31 Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D, Norry M J, eds. *Magmatism in the Ocean Basins*. *Geol Soc Lon Spec Pub*, 1989, 42: 313–345
 - 32 Pearce J A, Baker P E, Harvey P K, et al. Geochemical evidence for subduction fluxes, mantle melting and fractional crystallization beneath the South Sandwich island arc. *J Petrol*, 1995, 36: 1073–1109
 - 33 Wu Y B, Zheng Y F. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. *Chin Sci Bull*, 2004, 49: 1554–1569 [吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. *科学通报*, 2004, 49: 1589–1604]
 - 34 Wood D A, Joron J L, Treuil M. A reappraisal of the use of trace elements to classify and discriminate between magma series erupted in different tectonic settings. *Earth Planet Sci Lett*, 1980, 45: 326–336
 - 35 Cabanis B, Lecomte M. Le diagramme La/10-Y/15-Nb/8: Un outil pour la discrimination des séries volcaniques et la mise en évidence des processus de mélange et/ou de contamination crustale. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences. Série II. Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'univers, Sciences de la Terre*, 1989, 309: 2023–2029
 - 36 Meschede M. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. *Chem Geol*, 1986, 56: 207–218
 - 37 Pearce J A, Peate D W. Tectonic implications of the composition of volcanic ARC magmas. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 1995, 23: 251–285
 - 38 Pearce J A, Norry M J. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks. *Contrib Mineral Petrol*, 1979, 69: 603–627
 - 39 Shervais J. Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas. *Earth Planet Sci Lett*, 1982, 59: 101–118

- 40 Dilek Y, Furnes H. Ophiolite genesis and global tectonics: Geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere. *Geol Soc Am Bull*, 2011, 123: 387–411
- 41 Li X H, Li X X, Sinclair J A, et al. Revisiting the “Yanbian Terrane”: Implications for Neoproterozoic tectonic evolution of the western Yangtze Block, South China. *Precambrian Res*, 2006, 151: 14–30
- 42 Zhu W G, Zhong H, Li X H, et al. SHRIMP zircon U-Pb geochronology, elemental, and Nd isotopic geochemistry of the Neoproterozoic mafic dykes in the Yanbian area, SW China. *Precambrian Res*, 2008, 164: 66–85
- 43 Pan X P, Li R S, Wang C, et al. Geochemical characteristics of the Cambrian volcanic rocks in Banglecun area on the northern margin of Gangdise, Nyima County, Tibet (in Chinese). *Geol Bull China*, 2012, 31: 63–74 [潘晓萍, 李荣社, 王超, 等. 西藏冈底斯北缘尼玛地区帮勒村一带寒武纪火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地球化学特征. *地质通报*, 2012, 31: 63–74]
- 44 Ding H X, Zhang Z M, Dong X, et al. Cambrian ultrapotassic rhyolites from the Lhasa terrane, south Tibet: Evidence for Andean-type magmatism along the northern active margin of Gondwana. *Gondwana Res*, 2015, 27: 1616–1629
- 45 Hu D G, Wu Z H, Ye P S, et al. SHRIMP U-Pb ages of zircons from dioritic gneiss in the Nyainqentanglha Mountains, Tibet. *Geol Bull China*, 2003, 22: 936–940 [胡道功, 吴珍汉, 叶培盛, 等. 西藏念青唐古拉山闪长质片麻岩锆石 U-Pb 年龄. *地质通报*, 2003, 22: 936–940]

补充材料

表 S1 仁错地区念青唐古拉岩群中变质辉长岩(13T184)的锆石 LA-ICP-MS U-Pb-Th 分析结果

表 S2 仁错地区念青唐古拉岩群中变质辉长岩(13T184)的锆石 SIMS U-Pb-Th 分析结果

表 S3 仁错地区念青唐古拉岩群中变质辉长岩(13T184)的锆石 Hf 同位素分析结果

本文以上补充材料见网络版 csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Early Neoproterozoic meta-gabbro (~925 Ma) from the Lhasa terrane, Tibetan Plateau and its geological significance

HU PeiYuan, ZHAI QingGuo, TANG Yue, WANG Jun & WANG HaiTao

Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

In the past decades, a lot of studies have been focused on the amalgamation between the Indian and Eurasian continents in the Tibetan Plateau during the Cenozoic. However, little attention was paid to the Precambrian evolution of the Tibetan Plateau though it has the same important scientific significance to those of the Cenozoic. Numerous Precambrian rocks occur in the Lhasa terrane such as the Nyainqentanglha and Nyingchi Groups, and they are commonly considered to be the Precambrian basement of the Lhasa terrane.

The Nyainqentanglha Group is one of the most important Precambrian rocks in the Tibetan Plateau, and it plays a key role in understanding the Precambrian tectonic evolution of the plateau. The Nyainqentanglha Group is composed of a suit of tectonic slices with different sizes and ages, including meta-sedimentary, meta-volcanic and meta-basic-acid intrusive rocks. In this paper, we reported new zircon U-Pb ages and Hf isotope, and whole-rock major and trace element compositions for meta-gabbro from the Nyainqentanglha Group in the Ren Co area, north-central Lhasa terrane, Tibet. Zircon LA-ICP-MS and SIMS U-Pb dating yielded weighted mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of 930.9 ± 7.3 and 925.2 ± 6.2 Ma, respectively. Zircons from the meta-gabbro exhibit pudding, fan-shaped or slight zoning structure and high Th/U ratios (0.73–31.6), indicating that these zircons are of magmatic origin. Thus these ages represent the crystallization age of the protoliths of meta-gabbro. This is the oldest ages of the mafic magmatic rocks in the Lhasa terrane, as well as within the Tibetan Plateau.

The meta-gabbros contain low SiO_2 concentrations (47.83wt%–49.32wt%) and show the sub-alkaline basalt features in the SiO_2 versus Zr/TiO_2 diagram. The chondrite-normalized rare earth element (REE) and primitive-mantle-normalized trace element multi-element patterns indicate that these rocks can be divided into two groups. The REE and trace element patterns of both groups are similar to those of N-type mid-ocean ridge basalts (N-MORB), meanwhile Group A samples have relatively higher REE and high field strength element (HFSE) contents than those of the Group B samples. The high field strength element ratios (Ce/Zr , Th/Yb , Th/La , La/Yb , La/Sm , La/Nb , Zr/Nb , Hf/Nb , and Y/Nb) of both group samples can be comparable with those of N-MORB. In addition, the meta-gabbros also display some features of island arc tholeiite (IAT), and Group B samples show some subduction affinity in the geochemical discrimination diagrams. Furthermore, zircons from meta-gabbro have clearly positive $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values (8.26–13.7) and young zircon Hf model ages ($T_{\text{DM}}=933\text{--}1205$ Ma), suggesting that the protoliths of meta-gabbros are derived from a long-term depleted mantle source. These features indicate that meta-gabbros are probably the remnant of an Early Neoproterozoic oceanic crust.

According to the published data, it is still unclear for the age of the Nyainqentanglha Group. Recently, zircon U-Pb dating showed that its ages had a large variation ranging from Early Neoproterozoic (ca. 897 Ma) to Cenozoic (ca. 59 Ma). The discovery of ca. 925 Ma meta-gabbro give us new constrain on the timing of the Nyainqentanglha Group. Thus the Nyainqentanglha Group should be disassembled in the future, and the Precambrian evolution of the Lhasa terrane will be clearer.

Tibetan Plateau, Lhasa terrane, meta-gabbro, Neoproterozoic, oceanic crust

doi: 10.1360/N972016-00143