冈底斯中段卡热辉长岩锆石 U-Pb 年代学、 地球化学及构造意义

徐向珍¹⁾,熊发挥¹⁾,杨经绥¹⁾,巴登珠¹⁾,张然¹⁾,段建兵²⁾,赵娇²⁾

1) 地幔研究中心,自然资源部深地动力学重点实验室,中国地质科学院地质研究所,北京,100037;
 2) 核资源与环境省部共建国家重点实验室培育基地,东华理工大学,南昌,330013

内容提要:以冈底斯中段曲水县西南方向卡热乡一带出露的辉长岩为研究对象,进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年以及全岩地球化学的系统测定,据此讨论岩石的成因及其构造意义。该辉长岩主要由单斜辉石和斜长石 组成,辉长岩具有低硅、贫碱、富铝,中等富集轻稀土,富集大离子亲石元素,亏损高场强元素的地球化学特征,与岛 弧和大陆边缘地区产出的高铝玄武岩化学组成十分相似,表明辉长岩原生岩浆为被俯冲改造的岩石圈幔源岩浆, 在演化过程中受到了上地壳物质的混染。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 49.01±0.51Ma(MSWD=0.41),指示岩 体形成时代为始新世。卡热辉长岩具有显著亏损的锆石 Hf 同位素组成, ε_{Hf}(t)值均为正值,分布在+10.88~+ 13.71 之间,综合分析表明卡热辉长质侵入体可能为近期遭受俯冲板片析出流体交代作用的亏损地幔部分熔融的 产物。结合区域构造演化史认为该岩体在冈底斯南缘的始新世期间存在着强烈的岩浆底侵和壳幔岩浆混合作用。

关键词:辉长岩;LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年;岩石成因;冈底斯;西藏

岩浆弧形成在汇聚板块边界,是与板块俯冲有 关的岩浆作用产物,是研究板块构造、壳一幔相互作 用和大陆地壳生长的天然实验室(Ducea et al., 2015; Jagoutz et al., 2015)。冈底斯岩浆岩带记录 了新特提斯俯冲和印度一欧亚大陆碰撞的整个地质 过程,对揭示青藏高原的形成与演化和探讨大陆地 壳的增生、再造过程都具有重要的意义。西藏冈底 斯发育一条巨型花岗岩带,它大致夹持于洛巴堆一 米拉山断裂以南、印度河一雅鲁藏布缝合带以北 (Zhu Dicheng et al., 2011),是冈底斯带岩浆岩最集 中的地区。

冈底斯岩浆弧形成在中生代新特提斯大洋岩石 圈向北部的拉萨地体之下的长期俯冲过程中,而且 在印度与亚洲大陆的碰撞过程中叠加了强烈的新生 代岩浆作用(Coulon et al., 1986; Debon et al., 1986; Harris et al., 1988; Pearce et al., 1988; Ding Lin et al., 2003; Chung Sunlin et al., 2005; Chu Meifei et al. ,2006; Mo Xuanxue et al. ,2016; Zhao Zhidan et al., 2006, 2011; Zhu Dicheng et al., 2008, 2011; Ji Weiqiang et al., 2009, 2014; Dong Xin et al. ,2013; Liu Dong et al. ,2014; Wang Qing et al., 2015; Pan Fabin et al., 2016; Weller et al., 2016; Meng Yuanku et al. ,2018; Yang Xinpeng et al.,2019)。在该岩带的南缘断续分布一系列辉长 质侵入体,它们与相伴产出的花岗质岩体形成年龄 基本一致,构成辉长岩一花岗岩杂岩体。以往的研 究认为这些杂岩体主要形成于始新世(53~40Ma), 是新特提斯洋板片俯冲过程中由基性岩浆底侵及其 诱发壳幔岩浆混合作用的产物(Dong Guocheng et al.,2006,2008),后续针对冈底斯中段早侏罗世辉 长岩-花岗岩杂岩体的研究,表明在新特提斯洋板 片的整个俯冲过程中(>205~40Ma),冈底斯南缘 应存在多次的基性岩浆底侵及其诱发的壳幔岩浆混 合作用(Qiu Jiansheng et al., 2015)。本次研究以

注:本文为国家自然科学基金项目(编号 41672046、41502062、41720104009)、中国地质调查局工作项目(编号 DD20160023-01、 DD20190060)联合资助成果。

收稿日期:2019-08-02;改回日期:2019-08-27;网络发表日期:2019-09-12;责任编辑:黄敏。

作者简介:徐向珍,女,1980年生。副研究员,矿物、岩石、矿床学专业。Email:xuxiangzhensjl@aliyun.com。

 引用本文:徐向珍,熊发挥,杨经绥,巴登珠,张然,段建兵,赵娇. 2019. 冈底斯中段卡热辉长岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及构造意义. 地质学报,93(10):2542~2555, doi: 10.19762/j.cnki. dizhixuebao. 2019243. Xu Xiangzhen, Xiong Fahui, Yang Jingsui, Ba Dengzhu, Zhang Ran, Duan Jianbing, Zhao Jiao. 2019. Zircon U-Pb dating and geochemistry of the Kare gabbro in the middle segment of the Gangdese belt and its tectonic implications. Acta Geologica Sinica, 93(10):2542~2555.

2543

冈底斯中段曲水县西南方向卡热乡一带出露的辉长 岩为研究对象,通过系统的 LA-ICP-MS 错石 U-Pb 测年以及全岩元素地球化学的系统测定,阐明了研 究区内辉长岩的形成环境及物质来源等信息,为进 一步明确新特提斯洋构造演化过程提供了新的有力 证据。

1 地质背景及岩石学特征

西藏冈底斯复合辉长岩一花岗岩杂岩体主要分 布于岩带中段的南缘,以曲水一谢通门一线最为发 育。研究区大陆构造位置地处雅鲁藏布江断裂带, 该区出露了不连续的石炭一二叠系大理岩和砂板 岩,三叠系砂板岩夹灰岩透镜体,白垩系砂砾岩夹火 山岩及第三系粗碎屑岩。雅鲁藏布江断裂产生的次 级构造纵横全区,白垩系一古近系之酸性一中性、基 性一超基性侵入岩,均有一定分布范围,其中以辉长 岩、闪长岩、花岗岩类较为发育(图1)。

本次研究的样品采自曲水县西南方向约

120km,位于曲水县附近雅鲁藏布江北侧的卡热乡 一带,采样位置还留有探槽,是前人为找刚玉矿床所 挖掘(图 2a)。刚玉矿体产于次闪石化辉长岩中,与 围岩界线较为清楚,走向北西西,倾向北,倾角 45° ~75°。采集的大样野外观察定为角闪辉长岩(图 2b),辉长质岩体的围岩主要是中粒斑状黑云母角 闪二长花岗岩。辉长岩与周围的花岗质岩体无截然 的侵入接触关系,呈不同形式的过渡接触。

卡热辉长岩呈灰黑色,块状构造,半自形中细粒 粒状结构。显微镜下观察主要矿物为斜长石(55% ~60%)和辉石(25%~30%)(图 2c,2d),副矿物为 磷灰石、磁铁矿和榍石等。斜长石呈半自形板状,粒 度大小在1~3mm之间,聚片双晶发育,局部可见 环带结构,其中多数颗粒与辉石互嵌构成辉长结构。 辉石多为普通辉石,少量透辉石,单偏光镜下辉石呈 浅黄色为主,高突起,呈板状或粒状,大颗粒辉石发 生扭折变形(图 2c),少量辉石已经蚀变为角闪石。 角闪石多呈它形、半自形,多色性明显,部分颗粒弱



图 1 青藏高原板块划分简图(a)和冈底斯中段卡热辉长岩地质简图(b)

Fig. 1 (a)Simplified tectonic map of the Tibetan Plateau; (b)geological map of the Kare gabbro in the middle segment of the Gangdese belt



图 2 冈底斯中段卡热辉长岩野外露头(a、b)和显微镜下照片(c、d) Fig. 2 Outcrop(a, b) photos and microphotographs (c, d) of the Kare gabbro in the middle segment of the Gangdese belt Pl-斜长石;Py-辉石;Amp-角闪石 Pl-Plagioclase; Py-pyroxene; Amp-amphibole

绿泥石化。

2 测试分析方法

本文针对卡热辉长岩进行了矿物电子探针分 析、全岩地球化学和锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年等 方面的分析。在显微镜下进行岩相学观察后,选择 蚀变较弱的矿物进行电子探针分析。电子探针分析 测试在东华理工大学核资源与环境教育部重点实验 室完成。仪器为 JEOL-JXA8230 电子探针,工作条 件如下:工作电压 15kV,加速电流 20nA,电子束斑 直径 2µm。所有测试数据均采用 ZAF 程序进行校 正处理。

选择了7件辉长岩样品进行全岩地球化学分析,包括主量和微量元素。全岩样品的测试分析在 国家地质实验测试中心完成,主量元素采用X射线 荧光光谱法(XRF,型号:PW4400)测定,分析精度 为5%。微量元素通过等离子质谱仪(ICP-MS,型 号:X-series)分析,含量大于10×10⁻⁶的元素分析 精度为5%,小于10×10⁻⁶的元素精度为10%。

样品的破碎和锆石的挑选由河北省廊坊市宇能 岩石矿物分选技术服务有限公司完成,通过重力和 磁选方法分选并在双目镜下挑纯。分选出来的锆石 经过挑选、制靶和抛光,然后对其进行阴极发光 (CL)成像观察,以了解被测锆石的内部结构,为锆 石年龄测定选取分析点位的依据。阴极发光显微照 相在自然资源部深地动力学重点实验室完成,仪器 型号为 Mono CL4, 加速电压 15.0kV。锆石原位 U-Pb 同位素年龄和锆石 Hf 同位素分析测定在自 然资源部深地动力学重点实验室完成,锆石 U-Pb 定年工作所用的 MC-ICP-MS 为美国 Thermo Fisher 公司最新一代 Neptune Plus 型多接收等离 子体质谱仪。采用的激光剥蚀系统为美国 Coherent 公司生产的 GeoLasPro 193nm。激光剥 蚀所用斑束直径 32μm,频率 10Hz,能量密度约 2.5J/cm²,以He为载气。结合锆石反射、透射照 片,避开锆石内部裂隙和包裹体。在开始测试分析 之前,先用国际上通用的锆石标样 91500 作为参考 物质进行仪器最佳化,并选用 GJ-1 作为辅助标样 对数据的准确性进行验证,²⁰⁶ Pb/²³⁸ U 年龄的加权 平均值误差为±1 σ 。详细实验测试过程可参见 Hou Kejun et al. (2007),采用 ICPMSDataCal 程序 (Liu Yongsheng et al., 2013)和 Ludwig K R 的 Isoplot程序(Ludwig,2003)进行数据处理;年龄计算 以标准锆石 91500为外标进行同位素比值分馏。锆 石 Hf 同位素测试过程中锆石标准 GJ-1¹⁷⁶ Hf /¹⁷⁷ Hf 测试加权平均值为 0.282007±0.000025(2 σ)。初 始¹⁷⁶ Hf/¹⁷⁷ Hf 计算,Lu 的衰变常数采用 1.865 × 10⁻¹¹ y⁻¹ (Scherer et al.,2001)。计算 $\epsilon_{\rm Hf}$ (*t*)时采用的 球粒陨石 Hf 同位素值¹⁷⁶ Lu/¹⁷⁷ Hf = 0.0336,¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf=0. 282785(Bouvier et al., 2008).

3 分析结果

3.1 矿物化学

本文对辉长岩中的单斜辉石做了电子探针成分 分析,其代表性数据列于表 1。

从图 3 和表 1 中可以看出,单斜辉石分为两类, 主要为普通辉石和透辉石, $Mg \ddagger =100 \times Mg/(Mg + Fe)$ 为 44.9 ~ 80.8, 端员组成为 $Wo_{47\sim49.9}$ $En_{36.7\sim42.4}$ $Fs_{10.1\sim14.7}$,属于透辉石;而 $Wo_{22.7\sim31.8}$ $En_{32\sim58.4}$ $Fs_{13.8\sim39.3}$,属于普通辉石。从 $Mg \ddagger -Al_2$ $O_3 成分演化图解来看(图 3b),卡热辉长岩中的 Al_2$ $O_3 与 Mg \ddagger 呈近似负相关关系。$



图 3 单斜辉石电子探针成分分类图解



(a) 一单斜辉石分类的 Wo-En-Fs 图解(据 Morimoto, 1988); (b) 一单斜辉石 Mg #-Al₂O₃成分演化图解

(a)—Wo-En-Fs (after Morimoto, 1988); (b)—Mg # vs. Al₂O₃

表 1 冈底斯中段卡热辉长岩中单斜辉石的代表性电子探针分析结果	(%))
---------------------------------	-----	---

Table 1	Representative	microprobe analys	s of cli	nopyroxene ii	nthe Kare	gabbro in	the middle	segment of	the Gangd	ese belt	(%)
---------	----------------	-------------------	----------	---------------	-----------	-----------	------------	------------	-----------	----------	----	---

	•	-	·	10		0		0	0	
样晶号	793-2-3	793-2-4	793-11-8	793-11-27	793-2-27	793-13-29	793-13-33	793-11-4	793-11-10	793-11-11
SiO_2	45.71	45.52	42.14	45.09	56.17	54.22	51.04	55.06	55.11	49.44
Al_2O_3	13.11	13.51	11.52	9.17	4.21	1.97	5.12	0.40	1.01	5.95
${\rm TiO}_2$	0.09	0.21	2.32	0.89	0.53	0.45	0.97	0.00	0.08	0.87
$\mathrm{Cr}_2\mathrm{O}_3$			0.11	0.16	0.01	0.03	0.01	0.01		
FeO	12.78	11.83	15.18	20.89	7.93	6.66	8.98	7.29	6.52	8.90
MnO	0.26	0.22	0.12	0.17	0.14	0.21	0.24	0.21	0.15	0.14
MgO	15.65	15.16	11.39	9.55	18.76	15.20	13.07	13.78	14.76	12.52
CaO	9.31	10.39	12.89	11.93	12.39	23.58	22.34	24.73	24.78	23.10
Na_2O	2.04	2.29	1.56	1.22	0.35	0.18	0.49	0.16	0.12	0.32
K_2O	0.05	0.08	1.31	1.08	0.03	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00
Total	99.00	99.20	98.53	100.14	100.51	102.50	102.25	101.64	102.53	101.24
En	53.0	51.8	39.1	32.0	58.4	42.4	38.3	38.7	40.7	36.7
Fs	24.3	22.7	29.2	39.3	13.8	10.4	14.7	11.5	10.1	14.6
Wo	22.7	25.5	31.8	28.7	27.7	47.2	47.0	49.9	49.2	48.7
Mg #	68.6	69.6	57.2	44.9	80.8	80.3	72.2	77.1	80.1	71.5

3.2 全岩地球化学

7件辉长岩的全岩地球化学分析测试结果列于 表 2 中。

主量元素组成上,卡热辉长岩硅、碱(尤其是钾) 含量较低,含较低的 SiO₂(42.11%~50.30%,平均 为 45.11%)、Na₂ O(0.77%~1.93%,平均为 1.01%)、K₂ O(0.1%~0.24%,平均为 0.19%)、 TiO₂(0.15%~1.07%,平均为 0.56%)和 P₂ O₅ (0.01%~0.2%,平均为 0.05%),但有较高的 CaO (10.52%~17.63%,平均为 14.16%)、Al₂ O₃ (11.06%~23.68%,平均为 18.44%)、和 FeO_T (3.71%~12.15%,平均为 8.33%)。全碱含量低 (Na₂O+K₂O=0.93%~2.15%,平均为 1.2%),在 TAS 图解上投到辉长岩区域,为亚碱性系列基性岩 (图 4)。

卡热辉长岩在化学组成上的另一重要特征是富 铝,与岛弧和大陆边缘地区产出的高铝玄武岩化学 组成十分相似,如印尼苏门答腊北部 Barren 现代火 山产出的高铝玄武岩均为低钾拉斑系列,Al₂O₃含 量最高可达 22.80%(Luhr et al.,2006)。

总体上看,卡热辉长岩具有高 Al 低 Ti、贫 P₂ O₅、低碱及 Na₂O>K₂O 的特征,指示其与岛弧拉斑 系列亚碱性玄武岩接近,明显区别于板内玄武岩。 由 Harker 图解(图 5)可知,SiO₂与 CaO、MgO、 TFeO 具有一定的相关性,表明结晶分异在岩浆演 化过程中具有重要作用(Kong Huilei et al.,2018)。

卡热辉长岩的稀土总量低($\Sigma REE = 5.89 \times 10^{-6} \sim 39.61 \times 10^{-6}$,平均为21.16×10⁻⁶),均中等 富集轻稀土,(La/Yb)_N=2.06~6.34,在稀土元素 球粒陨石标准化图解中,与 N-MORB的稀土配分 曲线相似,呈缓右倾型,Eu 弱负异常到正异常(δ Eu =0.91~2.48)(图 6a),说明存在一定的斜长石的 堆晶作用(Qiu Jiansheng et al.,2015)。

微量元素组成上,卡热辉长岩富集大离子亲石 元素(Cs、Sr、Pb),亏损高场强元素(Nb、Ta、Zr、Hf、 Ce、HREE,图 6b),表现出消减带岩浆岩的典型特 征(Kelemen et al.,1990),指示岩浆源区受到了俯 冲相关组分的影响,并与受俯冲板片析出流体(熔 体)交代地幔楔部分熔融形成的辉长质侵入体 (Wang Yuejun et al.,2013)十分相似。

3.3 锆石 U-Pb 年代学

本次采集卡热辉长岩典型样品进行锆石分离, 共选出 100 余粒,大多为无色透明,晶体比较复杂, 多数晶形完整,晶面发育,粒径多在 100 µm 左右,有

表 2 冈底斯中段卡热辉长岩的主量元素(%)

和微量元素含量(×10⁻)

Table 2 Major elements (%) and trace element ($\times 10^{-6}$)

contents of the Kare gabbro in the middle segment

of the Gangdese belt

样品号	793-1	793-6	793-13	793-12	793-3	793-10	793-7
SiO ₂	44.36	43.44	50.3	48.87	42.41	42.11	44.26
Al_2O_3	18.41	16.76	19.16	11.06	23.68	22.48	17.55
CaO	12.94	15.13	15.62	17.63	11.62	10.52	15.66
$\mathrm{Fe}_2\mathrm{O}_3$	2.48	6.88	1.13	2.69	2.83	2.24	5.46
FeO	6.14	5.96	2.69	5.28	5.21	6.22	5.5
K_2O	0.24	0.22	0.22	0.21	0.1	0.18	0.19
MgO	12.49	7.56	5.43	10.06	10.23	11.96	7.45
MnO	0.13	0.12	0.1	0.13	0.13	0.16	0.11
Na_2O	0.77	0.92	1.93	0.86	0.83	0.9	0.86
P_2O_5	0.03	0.02	0.2	0.04	0.01	0.02	0.02
TiO_2	0.33	1.07	0.37	0.9	0.15	0.15	0.93
CO_2	0.33	0.1	0.35	0.25	0.3	0.25	0.1
H_2O^+	1.3	0.9	1.66	1.2	1.72	1.92	1.14
LOI	1.46	0.85	2.17	1.16	1.79	2	0.89
La	2	2.31	6.32	4.07	1.12	1.46	2.61
Ce	4.64	5.06	13.7	9.76	2.18	2.99	6.18
Pr	0.68	0.82	1.83	1.46	0.27	0.39	0.96
Nd	3.57	4.38	8.17	7.63	1, 15	1.72	5.13
Sm	1 04	1 41	2 02	2 19	0.26	0.41	1 57
Fu	0.4	0.52	0.63	0.73	0.20	0.27	0.58
Gd	1 22	1.8	2 21	2 57	0.21	0.41	1 88
Th	0 19	0.27	0.32	0.4	< 0.05	0.41	0.3
Du	1 08	1 58	1 70	0.4 2.17	0.03	0.00	1 75
Бу Но	0.21	1.00	0.36	0.44	0.2	0.04	1.10
П0 Бъ	0.21	0.5	1 05	1 21	0.12	0.00	0.00
Tm	0.02	0.00	0.14	0.17	0.12	0.21	0.99
	0.08	0.12	0.14	1.00	0.03	0.03	0.14
ID Lu	0.54	0.70	0.95	0.16	0.12	0.21	0.02
ΣDEE	1.0.09	0.11	0.14	0.10	_0.03	0.03	0.12
ΔKEE	10.30	20.32	39.01	34.05	5.89	8.00	23.30
	2.52	2.06	4.62	2.34	0.34	4.72	2.10
o'Eu V	1.09	1.00	0.91	0.94	2.48	2.02	1.03
Ŷ	5.72	8.21	10	12	1.16	1.96	9.26
Sr	630	441	623	309	819	856	526
Ba	53.1	42.9	77.1	47.5	22	45.4	43.8
Rb	5.25	1.5	2.84	2.45	1.39	6.14	1.81
Cs	0.86	0.15	0.44	1.79	0.73	3.03	0.2
l h	0.21	0.19	1.63	0.76	0.11	0.1	0.26
Pb	3.1	2.87	2.7	3.78	4.37	2.44	2.74
Nb	0.32	0.34	1.13	0.88	0.12	0.22	0.45
Ta	bd.	bd.	0.12	0.08	bd.	bd.	0.05
V	144	606	130	324	65.1	45.2	547
Zr	10.8	14.4	37.1	40.9	3.22	6.51	16.8
Hf	0.46	0.7	1.35	1.76	0.12	0.24	0.78
Sc	35	56	32	80.8	4.13	3.53	66.4
Co	63	48.8	21.5	41.9	64.4	80.9	47.7
Ni	95.7	47.6	30.6	54.7	85.1	121	49
U	0.06	0.16	0.57	0.32	0.05	0.05	0.15
Zn	40.4	42.5	30.2	41.3	81	176	46.3
Cu	9.02	15.7	16.8	11.3	15.4	2.22	17.6
Cr	346	139	53.4	325	91.3	210	132

注:bd. 表示低于检测线。

Fig. 4





(a)—SiO₂-K₂O + Na₂O 图解(据 Middlemost,1994);(b)—Ta/Yb-Th/Yb 图解(据 Pearce,2008)

(a) $-{\rm SiO_2-K_2O}$ + Na₂O diagram (after Middlemost, 1994); (b) $-{\rm Ta/Yb-Th/Yb}$ diagram (after Pearce, 2008)



图 5 冈底斯中段卡热辉长岩 Harker 图解 Fig. 5 Harker diagram for the Kare gabbro in the middle segment of the Gangdese belt

完整的长柱状,也有晶形不规则锆石碎粒或浑圆状, 长宽比多大于 2:1(图 7)。

阴极发光(CL)照片显示(图 7),多数锆石成分 不均匀,绝大多数的锆石具有典型的岩浆震荡环带, 部分显示核一边结构。由于岩石并未遭受后期变 质,锆石边部不可能为变质成因,CL 特征差异可能 是由于岩浆在冷凝结晶过程中微量元素含量变化所 致。本次研究精选了 36 粒锆石进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测定,表 3 列出了被测样品的定年 结果,图 8 为年龄谐和图和加权平均值。

锆石的 Th/U 比值在一定程度上能反应锆石 的成因环境,岩浆锆石多具有特征的韵律环带,Th、 U含量较高,且 Th/U 比值较大(一般>0.4),而变 质锆石则以无环带、弱环带等,低 Th、U 含量及低 Th/U 比值(一般 < 0.1)为特征(Simon et al., 2007)。根据测试结果(表 3),本次分析 36 粒锆石 的 U含量在 $118 \times 10^{-6} \sim 4625.2 \times 10^{-6}$; Th 含量 $120.1 \times 10^{-6} \sim 5710.5 \times 10^{-6}$, Th/U 在 0.4980~ 2.3238 之间,多数大于 1,以上特征均说明锆石为典 型的岩浆结晶成因,且没有发生显著的 Pb 丢失 (Connelly,2001)。

本次共获得该样品 32 个有效测试点数据,在 ²⁰⁶ Pb/²³⁸ U-²⁰⁷ Pb/²³⁵ U 谐和图上,这些数据点均投影 在谐和线上(图 8),表明被测锆石未遭受明显的后

表 3 冈底斯中段卡热辉长岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年结果

Table 3 Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating resultsof the Kare gabbro in the middle segment of the Gangdese belt

	含量(×10 ⁻⁶)					年龄(Ma)						
侧点亏	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}{ m Pb}/^{206}{ m Pb}$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	los
793-14-01	28.0	661.4	742.8	0.89	0.0479	0.0034	0.0505	0.0040	0.0076	0.0002	49.1	1.5
793-14-02	33.2	797.4	918.3	0.87	0.0488	0.0066	0.0508	0.0079	0.0075	0.0002	48.4	1.3
793-14-03	45.8	1034.6	1416.0	0.73	0.0473	0.0025	0.0507	0.0034	0.0078	0.0003	49.8	1.9
793-14-04	34.7	884.4	827.2	1.07	0.0486	0.0034	0.0494	0.0038	0.0074	0.0002	47.3	1.3
793-14-05	57	1410.5	1318.9	1.07	0.0469	0.0020	0.0493	0.0024	0.0076	0.0002	48.9	1.6
793-14-06	156	3944.3	2287.3	1.72	0.0482	0.0027	0.0506	0.0033	0.0076	0.0002	48.8	1.5
793-14-07	8.9	185.6	372.7	0.50	0.0527	0.0145	0.0546	0.0164	0.0075	0.0003	48.0	1.7
793-14-08	38.5	911.0	1161.1	0.78	0.0478	0.0038	0.0497	0.0041	0.0075	0.0002	48.4	1.5
793-14-09	227	5710.5	3210.2	1.78	0.0488	0.0021	0.0515	0.0024	0.0076	0.0003	49.1	1.7
793-14-10	41.7	1071.7	585.2	1.83	0.0479	0.0052	0.0497	0.0058	0.0075	0.0003	48.3	1.6
793-14-11	72	1688.1	1044.4	1.62	0.0556	0.0062	0.0586	0.0074	0.0076	0.0003	48.9	1.6
793-14-12	22.0	501.6	346.4	1.45	0.0518	0.0248	0.0576	0.0299	0.0080	0.0003	51.4	1.9
793-14-13	160	3753.3	3048.1	1.23	0.0468	0.0024	0.0518	0.0031	0.0080	0.0002	51.5	1.5
793-14-14	29.7	736.7	514.4	1.43	0.0496	0.0112	0.0534	0.0137	0.0078	0.0002	49.9	1.5
793-14-15	29.5	743.2	476.9	1.56	0.0505	0.0085	0.0527	0.0095	0.0076	0.0002	48.6	1.5
793-14-16	79	1873.5	1724.4	1.09	0.0472	0.0020	0.0509	0.0029	0.0078	0.0002	50.1	1.6
793-14-17	34.0	811.9	722.6	1.12	0.0473	0.0048	0.0503	0.0054	0.0077	0.0002	49.5	1.4
793-14-18	29.7	709.1	758.9	0.93	0.0473	0.0028	0.0491	0.0033	0.0075	0.0002	48.4	1.4
793-14-19	49.0	1158.2	1596.3	0.73	0.0474	0.0030	0.0498	0.0040	0.0076	0.0002	48.8	1.5
793-14-20	63	1607.6	787.8	2.04	0.0460	0.0027	0.0481	0.0034	0.0076	0.0002	48.8	1.5
793-14-21	15.3	353.6	324.4	1.09	0.0514	0.0086	0.0546	0.0096	0.0077	0.0002	49.4	1.5
793-14-22	44.9	1136.6	685.7	1.66	0.0474	0.0030	0.0498	0.0034	0.0076	0.0002	49.0	1.3
793-14-23	66	1574.1	1446.9	1.09	0.0475	0.0028	0.0512	0.0036	0.0078	0.0002	50.2	1.4
793-14-24	12.5	307.3	230.9	1.33	0.0484	0.0047	0.0512	0.0050	0.0077	0.0002	49.4	1.5
793-14-25	5.8	120.1	118.0	1.02	0.0525	0.0072	0.0583	0.0080	0.0081	0.0003	51.9	2.0
793-14-26	79	1957.8	916.3	2.14	0.0524	0.0064	0.0545	0.0068	0.0076	0.0002	48.5	1.3
793-14-27	156	3855.7	3429.1	1.12	0.0471	0.0024	0.0493	0.0029	0.0076	0.0002	48.7	1.3
793-14-28	27.1	680.1	392.1	1.73	0.0531	0.0142	0.0559	0.0158	0.0076	0.0002	48.9	1.4
793-14-29	60.2	1378.5	2172.0	0.63	0.0472	0.0032	0.0488	0.0037	0.0075	0.0002	48.2	1.3
793-14-30	196	4478.7	4625.2	0.97	0.0483	0.0032	0.0531	0.0040	0.0080	0.0003	51.2	1.7
793-14-31	47.0	1160.4	771.7	1.50	0.0472	0.0049	0.0498	0.0058	0.0076	0.0002	49.1	1.4
793-14-32	31.3	226.9	176.9	1.28	0.0492	0.0044	0.1745	0.0168	0.0257	0.0007	163.8	4.6
793-14-33	14.9	355.4	442.4	0.80	0.0482	0.0071	0.0496	0.0078	0.0075	0.0002	47.9	1.3
793-14-34	101	1960.7	1744.8	1.12	0.0588	0.0033	0.0677	0.0041	0.0084	0.0003	53.6	2.2
793-14-36	85	643.6	276.9	2.32	0.0644	0.0038	0.2214	0.0144	0.0249	0.0006	158.7	3.5
793-14-37	35.1	246.8	187.5	1.32	0.0537	0.0039	0.1865	0.0128	0.0252	0.0006	160.5	3.9
793-14-38	59.3	1370.6	2236.3	0.61	0.0461	0.0022	0.0482	0.0026	0.0076	0.0002	48.7	1.1
793-14-39	35.5	261.2	167.8	1.56	0.0511	0.0030	0.1813	0.0111	0.0258	0.0006	163.9	3.7

期热事件的影响。锆石的²⁰⁶ Pb/²³⁸ U 年龄介于 47.3 ~51.9Ma 之间,计算获得的²⁰⁶ Pb/²³⁸ U 加权平均值 为 49.01±0.51Ma(MSWD=0.41)(图 8),结果精 确度较高,可以准确反映岩体的成岩年龄,解释为岩 浆结晶年龄。

还有 4 个测点的数据没有位于谐和线上,锆石的²⁰⁶ Pb/²³⁸ U 年龄介于 158.7~163.9 Ma 之间。

3.4 锆石 Hf 同位素组成

本次对已做 U-Pb 定年的锆石同时进行了 Lu-Hf 同位素分析,共获得了 18 颗锆石的 Hf 同位素 结果(表 4)。¹⁷⁶ Hf/¹⁷⁷ Hf 初始比值和 $\epsilon_{\rm Hf}(t)$ 值是根据 同一锆石 U-Pb 定年数据计算,阶段模式年龄是根 据亏损幔源计算得到(Griffin et al.,2000)。由数 据可以看出辉长岩样品¹⁷⁶ Hf/¹⁷⁷ Hf 比值相对稳 定,介于 0.282991 ~ 0.283130 之间,平均为 0.283080。¹⁷⁶ Lu/¹⁷⁷ Hf 比值有两个点大于 0.002, 其变化范围为 0.000454 ~ 0.002537,平均 0.001190,表明锆石在形成后具有较低的放射性 成因 Hf 积累,因此所测定的¹⁷⁶ Hf/¹⁷⁷ Hf 比值基本 可以代表锆石结晶时体系的 Hf 同位素组成(Pan Xuefeng et al.,2019)。

所有样品点的 ε_{Hf}(t) 值均为较高的正值,分布



图 6 冈底斯中段卡热辉长岩的球粒陨石标准化稀土元素配分曲线(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图 (b)(标准化值据 McDonough et al., 1995)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE distribution patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spidergrams (b) (normalized values after McDonough et al., 1995) of the Kare gabbro in the middle segment of the Gangdese belt

表 4 冈底斯中段卡热辉长岩的锆石 Hf 同位素分析结果 Table 4 Zircon Hf isotopic compositions f the Kare gabbro in the middle segment of the Gangdese belt

测点号	年龄(Ma)	$^{176}{ m Yb}/^{177}{ m Hf}$	$^{176}Lu/^{177}Hf$	$^{176}{ m Hf}/^{177}{ m Hf}$	2σ	$^{176}Hf/^{177}Hf_{i}$	$\varepsilon_{\rm Hf}(0)$	$\varepsilon_{\rm Hf}(t)$	$t_{\rm DM}({\rm Ma})$	$t_{\rm DM}{}^{\rm C}({\rm Ma})$	$f_{ m Lu/Hf}$
793-14-01	49.10	0.031799	0.001085	0.283107	0.000020	0.283106	11.8	12.9	205	401	-0.97
793-14-05	48.90	0.042399	0.001520	0.283059	0.000021	0.283058	10.2	11.2	277	556	-0.95
793-14-06	48.80	0.075883	0.002537	0.283069	0.000020	0.283066	10.5	11.5	270	529	-0.92
793-14-07	48.00	0.026529	0.000953	0.283051	0.000017	0.283050	9.9	10.9	285	584	-0.97
793-14-10	48.30	0.025384	0.000912	0.283095	0.000017	0.283094	11.4	12.4	222	441	-0.97
793-14-11	48.90	0.025845	0.000925	0.283067	0.000016	0.283067	10.4	11.5	261	528	-0.97
793-14-13	51.50	0.016323	0.000591	0.283082	0.000017	0.283082	11.0	12.1	238	476	-0.98
793-14-14	49.90	0.035067	0.001231	0.283130	0.000019	0.283129	12.7	13.7	173	326	-0.96
793-14-16	50.10	0.022614	0.000844	0.283085	0.000019	0.283084	11.1	12.1	235	470	-0.97
793-14-17	49.50	0.046619	0.001740	0.283080	0.000021	0.283078	10.9	11.9	249	491	-0.95
793-14-20	48.80	0.035437	0.001318	0.283070	0.000019	0.283069	10.5	11.6	259	521	-0.96
793-14-23	50.20	0.017879	0.000647	0.283089	0.000018	0.283088	11.2	12.3	228	457	-0.98
793-14-26	48.50	0.043989	0.001872	0.283124	0.000024	0.283123	12.5	13.5	184	348	-0.94
793-14-27	48.70	0.011828	0.000454	0.283101	0.000019	0.283100	11.6	12.7	211	420	-0.99
793-14-28	48.90	0.025358	0.000910	0.283055	0.000017	0.283055	10.0	11.1	278	567	-0.97
793-14-29	48.20	0.026134	0.000985	0.283105	0.000024	0.283105	11.8	12.8	207	407	-0.97
793-14-30	51.20	0.057887	0.002025	0.283083	0.000021	0.283081	11.0	12.1	245	478	-0.94
793-14-31	49.10	0.026932	0.001013	0.283074	0.000020	0.283073	10.7	11.7	252	507	-0.97

在+10.88~+13.71之间,平均为+12.07,对应的 Hf 同位素亏损地幔模式年龄(*t*_{DM})为173~371Ma, 平均为245Ma。二阶段模式年龄(*t*_{DM}^c)主要集中在 326~611Ma之间,平均为480Ma。

4 讨论

4.1 岩浆源区和岩石成因

镁铁质岩石通常起源于岩石圈地幔或软流圈地 幔(Sklyarov et al.,2003),起源于岩石圈地幔的岩 石通常相对原始地幔富集大离子亲石元素和轻稀土 元素,亏损高场强元素(如 Nb、Ta 和 Ti),而起源于 软流圈地幔的物质通常富集大离子亲石元素和高场 强元素。卡热辉长岩样品均具有相对低的 TiO₂ (0.15%~1.07%,平均为 0.56%),相对于原始地 幔富集大离子亲石元素(Cs、Sr、Pb),亏损高场强元 素(Nb、Ta、Zr、Hf、Ce、HREE),表明卡热辉长岩应 起源于岩石圈地幔。

卡热辉长岩呈中粗粒块状,为典型的岩浆结构,
 局部显示堆晶岩特征。辉长岩具有较低的 SiO₂ 含量(42.11%~50.30%,平均为 45.11%)、和 Cr、N



图 7 冈底斯中段卡热辉长岩的锆石阴极发光照片(圈旁边数字代表 U-Pb 分析点,其他数字代表²⁰⁶ Pb/²³⁸ U 表面年龄) Fig. 7 CL images of zircons of the Kare gabbro in the middle segment of the Gangdese belt (numbers close to the circles represent analytical spots of U-Pb dating, and the values represent ages of ²⁰⁶ Pb/²³⁸ U)

含量(Cr = 53.4×10⁻⁶ ~ 346×10⁻⁶, Ni = 30.9× 10⁻⁶~121×10⁻⁶),也显示了幔源岩浆的成分特征。 但样品的 Sr 含量(309×10⁻⁶~×10⁻⁶,平均值为 600×10^{-6})显著高于地幔值(17.8×10⁻⁶,据 Taylor et al.,1985),这同样验证了可能存在斜长石 的堆晶作用(Bédard,2006)。

Nb/U比值可作为判别地壳混染的标志,洋中

脊玄武岩和洋岛玄武岩 Nb/U 比值为 47±10,而大 陆地壳和原始地幔 Nb/U 平均值分别为 8.93 和 33.59(Taylor et al.,1985),卡热辉长岩 Nb/U 比 值在 1.98~5.33 之间,远离原始地幔平均值,接近 大陆地壳,反映岩浆在上升过程中有陆壳物质的加 人,这与岩石中具有大量捕获锆石的特征相一致。

Neal et al. (2002)提出可以用(La)_{PM}/(Nb)_{PM}



图 8 冈底斯中段卡热辉长岩中锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 谐和图(a)和加权年龄平均值(b) Fig. 8 Concordia curves of zircon LA-ICP-MS U-Pb data (a) and weighted mean ages diagram (b) of the Kare gabbro in the middle segment of the Gangdese belt

与(Th)_{PM}/(Ta)_{PM}图解(图 9a)来区分上地壳和下地 壳物质对原始岩浆的混染作用,其中(La)PM、 (Nb)_{PM}、(Th)_{PM}和(Ta)_{PM}为元素含量的原始地幔 标准化后的值。由图 9 可知,岩体可能遭受了上地 壳物质的混染。另外在 Th/Yb-Nb/Yb 图解中辉长 岩样品投点均明显偏离 MORB-OIB 演化线(图 9b),暗示其形成明显受到俯冲组分的影响(Pearce et al., 1995)。综上所述,本研究区辉长岩原生岩浆 为被俯冲改造的岩石圈幔源岩浆。同时,岩浆在演 化过程中可能遭受了上地壳物质的同化混染,并经 历了一定程度的结晶分异作用。本区获得的锆石的 Hf 同位素亏损地幔模式年龄(t_{DM})为 173~371Ma, 平均为 245Ma。二阶段模式年龄(t_{DM}^C)主要集中在 326~611Ma 之间,平均为 480Ma。该岩体的 Hf 模 式年龄大于其形成年龄,也表明幔源岩浆在侵位过 程中受到了不同程度地壳物质的混染(Wu Fuyuan et al.,2007)。

本区获得的锆石 $\varepsilon_{\rm Hf}(t)$ 值全部落入亏损地幔线 以下,并且 $\varepsilon_{\rm Hf}(t)$ 值均为正值(图 10),分布在+ 10.88~+13.71之间,平均为+12.07,这与之前已 报道的拉萨地块南部晚白垩世角闪辉长岩的 $\varepsilon_{\rm Hf}(t)$ 值(=+11.8~+17.2)十分相似(Guan Qi et al., 2011),更接近于桑日群火山岩的 $\varepsilon_{\rm Hf}(t)$ 值(= +11.0~+15.5)(Zhu Dicheng et al.,2009),说明 卡热辉长岩也应起源于高度亏损的地幔。但正如前 述,这些辉长质侵入体同时具有富轻稀土和大离子 亲石元素、亏损高场强元素的地球化学特征,岩石的 La/Nb、Ba/Nb 比值(分别为 4.63~9.33 和 53.98 ~206.36)远高于亏损地幔起源的洋脊玄武岩(分别 为 1.07 和 4.30,Weaver,1991),Ce/Pb 比值(=0.5 ~2.58)与全球平均大洋沉积物(Ce/Pb = 2.9, Plank et al.,1998)接近,Nb/U、Ta/U比值(分别为 1.98~5.33 和 0.21~0.33)明显偏低,与遭受俯冲 板片析出流体交代作用地幔楔部分熔融派生岩浆的 特点相似(Ayers,1998),上述元素和同位素组成的 解耦现象被认为是源区亏损地幔在部分熔融形成岩 浆之前遭受过近期交代作用所致,因为交代作用发 生的时间距今较近,使得放射成因同位素的积累有 限,因 而 保 留 了 亏 损 地 幔 的 同 位 素 印 记(Zh Xiacheng,1990),因此,卡热辉长质侵入体最可能为 近期遭受俯冲板片析出流体交代作用的亏损地幔部 分熔融的产物。

4.2 辉长岩形成时代及其构造意义

本文获得卡热辉长岩的加权平均年龄为 49.01 ±0.51Ma(MSWD=0.41),表明岩体形成时代为始 新世。区域上在巨型冈底斯岩浆岩带南端产出有一 个辉长岩带,与雅鲁藏布江蛇绿岩带平行共生。它 们与相伴产出的花岗质岩体形成年龄基本一致,构 成辉长岩一花岗岩杂岩体。以往的研究认为这些杂 岩体主要形成于始新世(53~40Ma),与本文研究的 辉长岩年代基本一致,是新特提斯洋板片俯冲过程 中由基性岩浆底侵及其诱发壳幔岩浆混合作用的产 物(Dong Guocheng et al.,2006,2008)。

本区辉长岩稀土元素分布形式呈中等轻稀土富



图 9 冈底斯中段辉长岩源区性质与地壳混染判别图解(a,据 Neal et al.,2002;b,据 Pearce,2008) Fig. 9 Discrimination diagram of the source characteristics and crustal contamination of the Kare gabbro in the middle segment of the Gangdese belt (a, after Neal et al., 2002; b, after Pearce, 2008)



图 10 冈底斯中段卡热辉长岩锆石 Hf 同位素演化图 (桑日群火山岩数据来自 Zhu Dicheng et al.,2009) Fig. 10 Zircon ε_{Hf}(t) values vs. age diagram of the Kare gabbro in the middle segment of the Gangdese belt (Data of Sangri Group volcanic rocks are from Zhu Dicheng et al., 2009)

集的特征,岩石明显富集大离子亲石元素(Cs、Sr、Pb),亏损高场强元素(Nb、Ta、Zr、Hf、Ce、HREE),与典型的岛弧型火山岩地球化学特征一致。一般地,岛弧玄武岩和部分亏损型洋中脊玄武岩 Nb/La <1,La/Ta>15,而板内玄武岩、过渡型洋中脊玄武 岩和富集型洋中脊玄武岩则正好相反(Condie, 1989)。本区卡热辉长岩的 Nb/La=0.15~0.22 (平均为 0.16),La/Ta = 50.88~52.67(平均为 51.91),表明此辉长岩形成于岛弧玄武岩或亏损型 洋中脊玄武岩的构造环境。岛弧玄武岩或亏损型 洋中脊玄武岩的构造环境。岛弧玄武岩的 Th/Yb>>0.1,Th/Nb>0.07,Nb/La<0.8,Hf/Th<8,而 亏损型洋中脊相反(Condie, 1989)。卡热辉长岩的 Th/Yb=0.25~1.75(平均为 0.69),Th/Nb=0.45

~1.44(平均为 0.78),Nb/La=0.11~0.22(平均 为 0.16),Hf/Th=0.83~3.68(平均为 2.22),可知 为岛弧性质。我们利用不活动元素协变关系进行构 造环境判别。在 Ta/Yb-Th/Yb 图解中岩石表现出 岛弧拉斑玄武岩特征(图 4b)。

本次研究的卡热辉长岩位于冈底斯南缘,形成 于始新世(49.01±0.51Ma),与前人认为的区内侵 入体主要形成于 53~40Ma 一致,指示冈底斯南缘 在始新世期间存在着强烈的岩浆底侵和岩浆混合作 用。而印度一欧亚陆陆碰撞时间在 65~45Ma 之 间,表明底侵作用与印度一欧亚陆陆碰撞密切相关, 推测陆陆碰撞改变了板块俯冲构造环境(Dong Guocheng et al., 2008). Qiu Jiansheng et al. (2015)通过冈底斯中段日喀则东嘎杂岩体的研究, 提出冈底斯南缘在侏罗纪时期应处于新特提斯洋板 片俯冲的构造背景,在新特提斯洋板片的整个俯冲 过程中(>205~40Ma),冈底斯南缘应存在多次的 基性岩浆底侵及其诱发的壳幔岩浆混合作用。本次 获取卡热辉长岩还有 4 个测点的数据没有位于谐和 线上,锆石的²⁰⁶ Pb/²³⁸ U 年龄介于 158.7~163.9 Ma 之间,为中侏罗世,也有可能再次验证了冈底斯南缘 在侏罗纪时期也存在岩浆底侵及相关的壳幔岩浆混 合作用。

5 结论

(1)岩石地球化学特征表明,本区辉长岩具有高 Al低Ti、贫P2O5、低碱及Na2O>K2O的特征,指 示其与岛弧拉斑系列亚碱性玄武岩接近,明显区别 于板内玄武岩。辉长岩中等富集轻稀土,在稀土元 素球粒陨石标准化图解中,与 N-MORB 的稀土配 分曲线相似,呈缓右倾型,Eu 弱负异常到正异常,富 集大离子亲石元素,亏损高场强元素,表现出消减带 岩浆岩的典型特征,指示岩浆源区受到了俯冲相关 组分的影响。

(2)本文获得辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年 龄为 49.01±0.51Ma(MSWD=0.41),表明岩体形 成时代为始新世,指示冈底斯南缘在始新世期间存 在着强烈的岩浆底侵和壳幔岩浆混合作用。

(3)本区辉长岩原生岩浆为被俯冲改造的岩石 圈幔源岩浆。同时,岩浆在演化过程中可能遭受了 上地壳物质的同化混染,并经历了一定程度的结晶 分异作用。锆石 Lu-Hf 同位素分析结果表明卡热 辉长岩起源于高度亏损的地幔。二阶段模式年龄大 于其形成年龄,表明幔源岩浆在侵位过程中受到了 不同程度地壳物质的混染。

References

- Ayers J. 1998. Trace element modeling of aqueous fluid-peridotite interaction in the mantle wedge of subduction zones. Contributions to Mineralogy and Petrology, 132 (4): 390 ~404.
- Bédard J H. 2006. Trace element partitioning in plagioclase feldspar. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 70: 3717~3742.
- Bouvier A, Vervoort J D, Patchett P J. 2008. The Lu-Hf and Sm-Nd isotopic composition of CHUR: Constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets. Earth and Planetary Science Letters, 273(1~2): 48~57.
- Chu Meifei, Chung Sunlin, Song Biao, Liu Dunyi, O'Reilly S Y, Pearson N J, Ji Jianqing, Wen Dajen. 2006. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints on the Mesozoic tectonics and crustal evolution of southern Tibet. Geology, 34(9): 745~748.
- Chung Sunlin, Chu Meifei, Zhang Yuquan, Xie Yingwen, Lo C H, Lee T Y, Lan Chingying, Li Xianhua, Zhang Qi, Wang Yizhao. 2005. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism. Earth-Science Reviews, 68(3~4):173~196.
- Condie K C. 1989. Geochemical changes in basalts and andesites across the Archaean-Proterozoic boundary: Identification and significance. Lithos, 23(1): 1~18.
- Connelly J N. 2001. Degree of preservation of igneous zonation in zircon as a signpost for concordancy in U/Pb geochronology. Chemical Geology, 172(1~2): 25~39.
- Coulon C, Maluski H, Bollinger C, Wang S. 1986. Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks from central and southern Tibet:³⁹ Ar/⁴⁰ Ar dating, petrological characteristics and geodynamical significance. Earth and Planetary Science Letters, 79(3~4): 281~302.
- Debon F, Le Fort P, Sheppard S M F, Sonet J. 1986. The four plutonic belts of the Transhimalaya-Himalaya: A chemical, mineralogical, isotopic, and chronological synthesis along a Tibet-Nepal section. Journal of Petrology, 27(1): 219~250.
- Ding Lin, Lai Qingzhou. 2003. New geological evidence of crustal thickening in the Gangdese block prior to the Indo-Asian collision. Chinese Science Bulletin, 48(15): 1604~1610.
- Dong Guocheng, Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Zhu Dicheng, Wang Liangliang, Chen Tao, Li Bing. 2006. Magma mixing in middle part of Gangdese magma belt: Evidences from granitoid

Chinese with English abstract). Dong Guocheng, Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Zhu Dicheng, Song Yuntao, Wang Lei. 2008. Gabbros from southern Gangdese:

- 1 untao, wang Lei. 2008. Gabbros from southern Gangdese: Implication for mass exchange between mantle and crust. Acta Petrologica Sinica, 24(2): 203~210 (in Chinese with English abstract).
- Dong Xin, Zhang Zheming. 2013. Genesis and tectonic significance of the Early Jurassic magmatic rocks from the southern Lhasa terrane. Acta Petrologica Sinica, 29(6): 1933 \sim 1948 (in Chinese with English abstract).
- Ducea M N, Saleeby J B, Bergantz G. 2015. The architecture, chemistry, and evolution of continental magmatic arcs. The Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 43(1): 299 ~ 331 .
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICP-MS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. Geochimica et Cosmochimica Acta, 64(1): 133~147.
- Guan Qi, Zhu Dicheng, Zhao Zhidan, Dong Guocheng, Mo Xuanxue, Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Yuan Honglin. 2011. Zircon U-Pb chronology, geochemistry of the Late Cretaceous mafic magmatism in the southern Lhasa Terrane and its implications. Acta Petrologica Sinica, 27(7): 2083~2094 (in Chinese with English abstract).
- Harris N B W, Xu R H, Lewis C L, Jin C W. 1988. Plutonic rocks of the 1985 Tibet Geotraverse, Lhasa to Golmud. Philosophical transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 327(1594): 145~168.
- Hou Kejun, Li Yanhe, Zhou Tianren, Qu Xiaoming, Shi Yuruo, Xie Guiqing. 2007. LA-ICP-MS zircon Hf isotope analysis method and its geological application. Journal of Petrology, 23 (10): 2595~2604 (in Chinese with English abstract).
- Jagoutz O, Kelemen P B. 2015. Role of arc processes in the formation of continental crust. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 43(1): 363~404.
- Ji Weiqiang, Wu Fuyuan, Chung Sunlin, Li Jinxiang, Liu Chuanzhou. 2009. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic constraints on petrogenesis of the Gangdese batholith, southern Tibet. Chemical Geology, 262(3~4): 229~245.
- Ji Weiqiang, Wu Fuyuan, Chung Sunlin, Liu Chuanzhou. 2014. The Gangdese magmatic constraints on a latest Cretaceous lithospheric delamination of the Lhasa terrane, southern Tibet. Lithos, 210~211: 168~180.
- Kelemen P B, Johnson K T M, Kinzler R J, Irving A J. 1990. High-fieldstrength element depletions in arc basalts due to mantle-magma interaction. Nature, 345(6275): 521~524.
- Kong Huilei, Li Jinchao, Li Yazhi, Jia Qunzi, Guo Xianzheng, Zhang Bin. 2018. Zircon U-Pb dating and geochemistry of the Jiadang olivine gabbro in the Eastern section of East Kunlun, Qinghai Province and their geological significance. Acta Geologica Sinica, 92(5): $964 \sim 978$ (in Chinese with English abstract).
- Liu Dong, Zhao Zhidan, Zhu Dicheng, Niu Yaoling, DePaolo D J, Harrison T M, Mo Xuanxue, Dong Guocheng, Zhou Su, Sun Chenguang, Zhang Zhaochong, Liu Junlai. 2014. Postcollisional potassic and ultrapotassic rocks in southern Tibet: Mantle and crustal origins in response to India-Asia collision and convergence. Geochimica et Cosmochimica Acta, 143:207~231.
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Li Ming, Gaoshan. 2013. Application of LA-ICP-MS in the elemental analyses of geological samples. Chinese Science Bulletin, 58(36): 3863 ~3878.
- Ludwig K R. 2003. User's Manual for Isoplot 3.0: A Geochronological Toolkit for MicrosoftExcel. Berkeley CA: Berkeley Geochronology Center.
- Luhr J F, Haldar D. 2006. Barren Island Volcano (NE Indian Ocean): Island-arc high-alumina basalts produced by troctolite

contamination. Journal of Volcanology and Geothermal Research, $149(3 \sim 4)$: 177 ~ 212 .

- McDonough W F, Sun S S. 1995. The composition of the Earth. Chemical Geology, 120(3): 223~254.
- Meng Yuanku, Xu Zhiqin, Xu Yang, Li Rihui, Sun Jingbo, Zhang Kuihua. 2018. The determination of the early Jurassic magmatism in the middle Gangdese batholith, Southern Tibet and its tectonic significance. Acta Geologica Sinica, 92(6): 1196~1215 (in Chinese with English abstract).
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma /igneous rock system. Earth-Science Reviews, 37(3~4): 215~224.
- Mo Xuanxue, Pan Guitang. 2006. From the Tethys to the formation of the Qinghai-Tibet Plateau: Constrained by tectono-magmatic events. Earth Science Frontiers, 13(6): 43~51 (in Chinese with English abstract).
- Morimoto N. 1988. Nomenclature of pyroxene. Acta Mineralogica, 8(4): 289~305.
- Neal C R, Mahoney J J, Chazey W J. 2002. Mantle sources and the highly variable role of continental lithosphere in basalt petrogenesis of the Kerguelen Plateau and Broken Ridge LIP: Results from ODP Leg 183. Journal of Petrology, 43(7): 1177 ~1205.
- Pan Fabin, Zhang Hongfei, Xu Wangchun, Guo Liang, Luo Biji, Wang Shuai. 2016. U-Pb zircon dating, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic compositions of mafic intrusive rocks in the Motuo, SE Tibet constrain on their petrogenesis and tectonic implication. Lithos, 245: 133~146.
- Pan Xuefeng, Jiao Jiangang, Wu Cailai, Gao Yuanhong, Zheng Kun, Gao Dong, Wu Di, Guo Wenfeng, Chen Hongjie. 2019. Zircon U-Pb dating and Hf isotope characteristics of the Aketishan granite in the southern margin of Altun and their tectonics implications. Acta Geologica Sinca, 93(3): 633~646 (in Chinese with English abstract).
- Pearce J A, Mei H J. 1988. Volcanic rocks of the 1985 Tibet Geotraverse: Lhasa to Golmud, Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 327(1594): 169~201.
- Pearce J A, Peate D W. 1995. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 23(1): 251~285.
- Pearce J A. 2008. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. Lithos, 100(1/4): 14~48.
- Plank T, Langmuir CH. 1998. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle. Chemical Geology, 145(3~4): 325~394.
- Qiu Jiansheng, Wang Ruiqiang, Zhao Jiaolong, Yu Sibin. 2015. Petrogenesis of the Early Jurassic gabbro-granite complex in the middle segment of the Gangdese belt and its implications for tectonic evolution of Neo-Tethys. A case study of the Dongga pluton in Xi'gaze. Acta Petrologica Sinica, 31(12): 3569~ 3580 (in Chinese with English abstract).
- Scherer E, Münker C, Mezger K. 2001. Calibration of the lutetiumhafnium clock. Science, 293(5530): 683~687.
- Simon L H, Nigel M K. 2007. Zircon: Tiny but timely. Elements, 3(1): 13~18.
- Sklyarov E V, Gladkochub D P, Mazukabzov A M, Menshagin Y V, Watanabe T, Pisarevsky S A. 2003. Neoproterozoic mafic dike swarms of the Sharyzhalgai metamorphic massif, southern Siberian craton. Precambrian Research, 122(1): 359~376.
- Taylor S R, Mclennan S M. 1985. The continental crust: Its composition and evolution. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 57~72.
- Wang Qing, Zhu Dicheng, Cawood P A, Zhao Zhidan, Liu Shengao, Chung Sunlin, Zhang Liangliang, Liu Dong, Zheng Yuanchuan, Dai Jingen. 2015. Eocene magmatic processes and crustal thickening in southern Tibet. Insights from strongly fractionated ca. 43Ma granites in the western Gangdese Batholith. Lithos, 239: 128~141.

- Wang Yuejun, Zhang Aimei, Fan Weiming, Zhang Yanhua, Zhang Yuzhi. 2013. Origin of paleosubduction-modified mantle for Silurian gabbro in the Cathaysia Block: Geochronological and geochemical evidence. Lithos, 160~161: 37~54.
- Weaver B L. 1991. The origin of ocean island basalt end-member compositions: Trace element and isotopic constraints. Earth and Planetary Science Letters, 104(2~4): 381~397.
- Weller O M, St-Onge M R, Rayner N, Searle M P, Waters D J. 2016. Miocene magmatism in the Western Nyainqentanglha Mountains of southern Tibet: An exhumed bright spot? Lithos, 245: 147~160.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, Gao Shan. 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology. Acta Petrologica Sinica, 23(2): 185~220(in Chinese with English abstract).
- Yang Xinpeng, Zhang Zhenli, Zhang Zeguo, Wang Jingui, Deng Ke, Hou Dehua. 2019. Zircon U-Pb age and Lu-Hf isotopes for middle Jurassic gabbro-diorite in southern margin of Gangdese magmatic belt and its tectonic implications. Geoscience, 33(1): 63~72 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhidan, Mo Xuanxue, Momade S,Renne P R, Zhou Su, Dong Guocheng, Wang Liangliang, Zhu Dicheng, Liao Zhongli. 2006. Post-collisional ultrapotassic rocks in Lhasa Block, Tibetan Plateau: Spatial and temporal distribution and its' implications. Acta Petrologica Sinica, 22(4): 787~794 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhidan, Zhu Dicheng, Dong Guocheng, Mo Xuanxue, DePaolo D, Jia Lili, Hu Zhaochu, Yuan Honglin. 2011. The ~ 54 Ma gabbro-granite intrusive in southern Dangxung area, Tibet: Petrogenesis and implications. Acta Petrologica Sinica, 27 (12):3513 \sim 3524(in Chinese with English abstract).
- Zhi Xiacheng. 1990. Trace element geochemistry and petrogenesis of Cenozoic alkalic basalts from the Penglai and Lingju areas, Shandong Province, Geological Review, 36(5): 385~ 393 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Dicheng, Pan Guitang, Chung Sunlin, Liao Zhongli, Wang Liquan, Li Guangming. 2008. SHRIMP zircon age and geochemical constraints on the origin of Lower Jurassic volcanic rocks from the Yeba Formation, southern Gangdese, South Tibet. International Geology Review, 50(5): 442~471.
- Zhu Dicheng, Zhao Zhidan, Pan Guitang, Lee H Y, Kang Zhiqiang, Liao Zhongli, Wang Liquan, Li Guangming, Dong Guocheng, Liu Bo. 2009. Early Cretaceous subduction-related adakite-like rocks in the Gangdese belt, southern Tibet: products of slab melting and subsequent melt-peridotite interaction? Journal of Asian Earth Sciences, 34: 298~309.
- Zhu Dicheng, Zhao Zhidan, Niu Yaoling, Mo Xuanxue, Chung Sunlin, Hou Zengqian, Wang Liquan, Wu Fuyuan. 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.

参考文献

- 董国臣,莫宣学,赵志丹,朱弟成,王亮亮,陈涛,李冰. 2006. 冈底 斯 岩浆岩带中段岩浆混合作用:来自花岗杂岩的证据. 岩石学报, 22(4):835~844.
- 董国臣,莫宣学,赵志丹,朱弟成,宋云涛,王磊.2008. 西藏冈底斯 南带辉长岩及其所反映的壳幔作用信息.岩石学报,24(2):203 ~210.
- 董昕,张泽明.2013. 拉萨地体南部早侏罗世岩浆岩的成因与构造意 义. 岩石学报,29(6):1933 ~1948.
- 管琪,朱弟成,赵志丹,董国臣,莫宣学,刘勇胜,胡兆初,袁洪林. 2011. 西藏拉萨地块南缘晚白垩世镁铁质岩浆作用的年代学、 地球化学及意义. 岩石学报,27(7):2083~2094.
- 侯可军,李延河,邹天人,曲晓明,石玉若,谢桂清. 2007. LA-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用. 岩石学报,23(10): 2595~2604.

- 孔会磊,李金超,栗亚芝,贾群子,国显正,张斌. 2018. 青海东昆仑 东段加当橄榄辉长岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及地质意义. 地质学报,92(5):964~978.
- 孟元库,许志琴,徐扬,李日辉,孙敬博,张奎华.2018.藏南冈底斯带 中段早侏罗世岩浆作用的厘定及其大地构造意义.地质学报, 92(6):1196~1215.
- 莫宣学,潘桂棠.2006.从特提斯到青藏高原形成:构造-岩浆事件的 约束.地学前缘,13(6):43~51.
- 潘雪峰,焦建刚,吴才来,部源红,郑坤,高栋,吴迪,郭文峰,陈红杰. 2019. 阿尔金南缘阿克提山岩体锆石 U-Pb 定年、Hf 同位素特 征及构造意义.地质学报,93(3):633~646.
- 邱检生,王睿强,赵姣龙,喻思斌.2015. 冈底斯中段早侏罗世辉长 岩一花岗岩杂岩体成因及其对新特提斯构造演化的启示:以日 喀则东嘎岩体为例.岩石学报,31(12):3569~3590.

- 吴福元,李献华,郑永飞,高山.2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学 应用. 岩石学报,23(2):185~220.
- 杨鑫朋,张振利,张泽国,王金贵,邓科,侯德华.2019.西藏冈底斯南 缘中侏罗世辉长闪长岩锆石 U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素组成及 其构造意义.现代地质,3(1):63 ~72.
- 赵志丹,莫宣学,Nomade S,Renne P R,周肃,董国臣,王亮亮,朱 弟成,廖忠礼. 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.岩石学报,24(4):787~794.
- 赵志丹,朱弟成,董国臣,莫宣学,Depaolo D.,贾黎黎,胡兆初,袁洪林.2011. 西藏当雄南部约 54Ma 辉长岩-花岗岩杂岩的 岩石成因及意义,岩石学报,27(12):3513~3524.
- 支震臣.1990.山东蓬莱、临朐新生代碱性玄武岩的痕量元素和岩石 成因.地质论评,36(5):385~393.

Zircon U-Pb dating and geochemistry of the Kare gabbro in the middle segment of the Gangdese belt and its tectonic implications

XU Xiangzhen^{*1)}, XIONG Fahui¹⁾, YANG Jingsui¹⁾, BA Dengzhu¹⁾,

ZHANG Ran¹⁾, DUAN Jianbing²⁾, ZHAO Jiao²⁾

1) CARMA (Center for Advanced Research on Mantle), Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics of Ministry of

Natural Resources, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037

2) State Key Laboratory Breeding Base of Nuclear Resources and Environment,

East China Institute of Technology, Nanchang, 330013

* Corresponding author: xuxiangzhensjl@aliyun.com

Abstract

In this paper, we collected the gabbro samples from Kare near Qushui county in the middle segment of the Gangdese belt, and conducted an integrated study including petrological, elemental geochemical analyses and LA-ICP-MS zircon dating, aiming at understanding their petrogenesis and the implications for tectonic evolution. speaking, Gabbro is lithologically composed of clinopyroxene and plagioclases. Chemically, the gabbro has low SiO₂ and K₂O+Na₂O, but high Al₂O₃ contents, and is enriched in LREEs and LILEs, depleted in HFSEs, showing the chemical features similar to the high-alumina basalts of island arcs and continental margins. The geochemical characteristics indicate the gabbro has subduction-reformed lithospheric mantle-derived primary magma that was contaminated by upper crustal materials during its evolution. The LA-ICP-MS U-Pb age of zircon is 49.01+0.51 Ma (MSWD=0.41), indicating the Eocene formation age. The Kare gabbro has highly depleted zircon Hf isotopic compositions, with $\epsilon_{\rm Hf}(t)$ values of +10.88~+13.71. The integrated lithologic and chemical compositions suggest that the gabbros were generated by the hydrous partial melting of depleted mantle metasomatized by fluids released from subducted oceanic slab. Combining with the regional tectonic evolution history, strong magmatic underplating and crust-mantle magmatic mixing might be occur during the Eocene in the southern margin of Gangdese belt.

Key words: Gabbro; LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; petrogenesis; Gangdise; Tibet