

藏南夏瓦地区基性脉岩锆石 U-Pb 定年、 地球化学特征及地质意义

成 明, 娄元林, 唐 饶, 廖 驾, 陈澍民, 李 毅, 郭 威, 许开宏
(中国地质调查局长沙自然资源综合调查中心, 湖南长沙 410600)

摘要: 西藏夏瓦地区位于特提斯喜马拉雅构造带中东部, 广泛发育大量近东西向的基性脉岩, 这些基性脉岩对于研究该区域地质构造演化具有重要的意义。本文对夏瓦地区基性脉岩开展了系统的岩石学、年代学、地球化学等研究。夏瓦基性脉岩的岩石类型以辉绿岩和辉长玢岩为主。锆石 U-Pb 年代学揭示基性脉岩结晶年龄为 146~145 Ma。夏瓦基性脉岩具有低 SiO_2 (47.20%~50.54%) 和高 $\text{Mg}^{\#}$ (39.78~53.79) 特征, 富集 Ti、Fe、P 元素, 属碱性系列, 富集轻稀土元素(LREE), 高场强元素(Nb、Ta、Zr、Hf、Th) 相对富集, 显示出似 OIB 的地球化学特征, 指示夏瓦基性脉岩来源于软流圈地幔的部分熔融, 形成于大陆边缘裂谷背景下。结合区域大火成岩省基性岩的发育, 认为夏瓦地区基性脉岩是大陆边缘裂谷背景下 Kerguelen 地幔柱作用的产物。夏瓦基性脉岩的结晶年龄虽然早于 Kerguelen 地幔柱活动的峰期(132 Ma), 但可能属于地幔柱峰期之前的小规模岩浆活动。

关键词: 年代学; 地球化学; 基性脉岩; Kerguelen 地幔柱; 夏瓦地区

中图分类号: P588.12⁺⁴

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2022)03-0504-15

Zircon U-Pb dating, geochemistry characteristics and tectonic implications of mafic dykes in the Chaiwa area, Southern Tibet

CHENG Ming, LOU Yuan-lin, TANG Yao, LIAO Jia, CHEN Shu-min, LI Yi, GUO Wei and XU Kai-hong
(Changsha Natural Resources Comprehensive Survey, China Geological Survey, Changsha 410600, China)

Abstract: The Chaiwa area of Tibet was located in the middle eastern part of the Tethys Himalayan structural belt, and a large number of nearly East-West trending mafic dykes were widely developed. These mafic dykes were of great significance for studying the geological structural evolution in this area. This paper has carried out systematic petrology, chronology, and geochemistry studies on the mafic dyke rocks in the Chaiwa area. The rock types of mafic dykes in Chaiwa area were mainly diabase and gabbro porphyrite. Zircon U-Pb geochronology revealed that the crystallization ages of mafic dykes are 146~145 Ma. The basic dykes in Chaiwa were enriched in Ti, Fe, and P elements, belonged to alkaline series and enriched in LREE, showing the feather of low SiO_2 (47.20%~50.54%) and high $\text{Mg}^{\#}$ (39.78~53.79), which were relatively enriched in high field strength elements(Nb, Ta, Zr, HF, Th) and were similar to the geochemical characteristics of the OIB. These geochemical characteristics indicated that the Chaiwa mafic dykes were originated from the partial melting of the asthenosphere mantle and were formed in continental margin rift setting. Combined with the development of mafic rocks in regional volcanic province, it is considered that the mafic dykes in the Chaiwa area were the products of the Kerguelen mantle plume under the background of continental margin rift. Although the crystallization age of the Chaiwa dyke was earlier than the peak period

收稿日期: 2021-06-10; 接受日期: 2022-03-25; 编辑: 尹淑萍

基金项目: 中国地质调查局项目(DD12120114083401)

作者简介: 成 明(1990-), 男, 硕士, 工程师, 从事区域地质调查工作, E-mail: 206038970@qq.com。

of Kerguelen mantle plume activity (132 Ma), it might belong to the small-scale magmatic activity before the peak period of mantle plume.

Key words: geochronology; geochemistry; mafic dykes; Kerguelen mantle plume; Chaiwa area

Fund support: Project of China Geological Survey (DD12120114083401)

基性脉岩不仅是地球深部岩浆活动的重要载体,而且是地球深部动力背景的指示标志,不同类型与时代的基性脉岩既能反映拉伸扩张的构造环境,又能为深部岩浆活动提供新的岩石记录和时间坐标,因此,基性脉岩成为近年来地学领域尤为关注的研究对象,其侵位机制、形成及演化规律与造山带活动密切相关(崔玉良等, 2017; 裴英茹等, 2017; Deng *et al.*, 2017; Liang *et al.*, 2018; 丁枫等, 2020)。此外,放射状的基性脉岩群还是地幔柱活动的重要标志(Ernst *et al.*, 1995; 李宏博等, 2010; Li *et al.*, 2015)。

喜马拉雅构造带自北向南可分为特提斯喜马拉雅、高喜马拉雅、低喜马拉雅、西瓦里克前陆盆地 4 个构造单元(图 1a), 其中特提斯喜马拉雅构造单元介于雅鲁藏布缝合带(YZSZ) 和藏南拆离系(STDS) 之间。藏南特提斯喜马拉雅构造带广泛出露近东西向展布的晚侏罗世-早白垩世火成岩, 众多学者对江孜-康马、隆子-洛扎、浪卡子-打隆、绒布-措美等一带的基性脉岩开展了大量研究, 研究表明基性脉岩侵位主要集中在 136~130 Ma 和 150~140 Ma 两个时期, 显示了 OIB 型、N-MORB 型和过渡型 3 种类型特征, 均形成于被动大陆边缘强烈拉伸、岩石圈减薄的构造环境下(夏瑛等, 2012; 王亚莹等, 2016; 侯晨阳, 2017; 丁枫等, 2020)。但是, 该地区晚侏罗世-早白垩世基性脉岩的岩石成因一直存在争议, 主要包括两种模式: ① 基性脉岩是大陆裂谷构造背景下 Kergrelen 地幔柱与岩石圈地幔相互作用的产物, 与 Comei-Bunbury 大火成岩内诸多 OIB 型基性脉岩的岩石成因相似(朱弟成等, 2004; 侯晨阳, 2017; 丁枫等, 2020); ② 基性脉岩是靠近大陆边缘的热点或地幔柱与软流圈地幔相互作用产生的岩浆, 沿深部大断裂运移至大陆边缘侵位的产物, 与 N-MORB 型基性脉岩的岩石成因相似(裴碧波等, 2010; 夏瑛等, 2012; 朱弟成等, 2013; 侯晨阳, 2017; 丁枫等, 2020)。

武警黄金第十一支队在洛扎-措美一带承担 1:5 万区域地质调查时发现, 藏南特提斯喜马拉雅带中的夏瓦地区也广泛发育大量的早白垩世基性脉岩, 为系

统研究特提斯喜马拉雅构造带深部构造演化提供了直接的证据。因此, 本文在区域地质调查工作的基础上, 以藏南夏瓦地区基性脉岩为研究对象, 通过系统的岩相学、年代学和地球化学研究, 探讨其成岩时代、构造环境和岩石成因等问题, 为探讨特提斯喜马拉雅带构造-岩浆演化作用和地球动力学背景等问题提供约束。

1 区域地质概况

藏南夏瓦地区位于特提斯喜马拉雅构造带中东部, 属喜马拉雅地块, 地层分区属冈底斯-喜马拉雅地层大区中的康马-隆子地层分区和北喜马拉雅分区。区内出露地层有古生界、侏罗系、白垩系和第四系(图 1b), 以侏罗系、白垩系为主, 走向明显受区域断裂、褶皱控制, 大致呈北西-东南向展布, 由早到晚分别为: 古生界洛扎岩组(P₂l), 为一套变质岩, 以灰色、深灰色变质砂岩、变质粉砂岩、板岩、千枚岩、页岩、灰岩为主; 下中侏罗统日当组(J₁r), 以灰、深灰色、灰黑色泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、粉砂岩、页岩为主; 下中侏罗统陆热组(J₁₋₂l), 为一套灰色泥质粉砂岩、泥岩与灰岩、泥灰岩互层的岩性组合, 局部发育基性火山岩; 中侏罗统遮拉组(J₂z), 以细砂岩、石英砂岩、长石石英杂砂岩为主, 发育以玄武岩为主的基性火山岩; 上侏罗统维美组(J₃w), 为一套灰白色、灰色、褐灰色石英砂岩夹少量泥岩为主的岩性组合; 上侏罗统-下白垩统桑秀组(J₃-K₁s), 发育大量火山岩(以玄武岩、英安岩为主)及泥岩、粉砂岩, 为一套火山-沉积地层。区内构造主要以洛扎断裂和措美断裂为界, 划分为觉拉-玉美褶皱冲断带、吉日-乃西褶皱带和得嘎勒-下藏拆离带 3 个构造带, 构造带内发育大量近东西、北西-南东向逆冲推覆断裂和近南北向张性断裂。变质程度普遍较低, 主要为低绿片岩相。区内岩浆活动强烈, 火山岩主要产出于侏罗系和白垩系中, 岩性以玄武岩、粗玄岩、英安岩为主, 侵入岩以脉岩的形式侵入于侏罗系中, 岩性以辉长玢岩、辉绿岩为主。

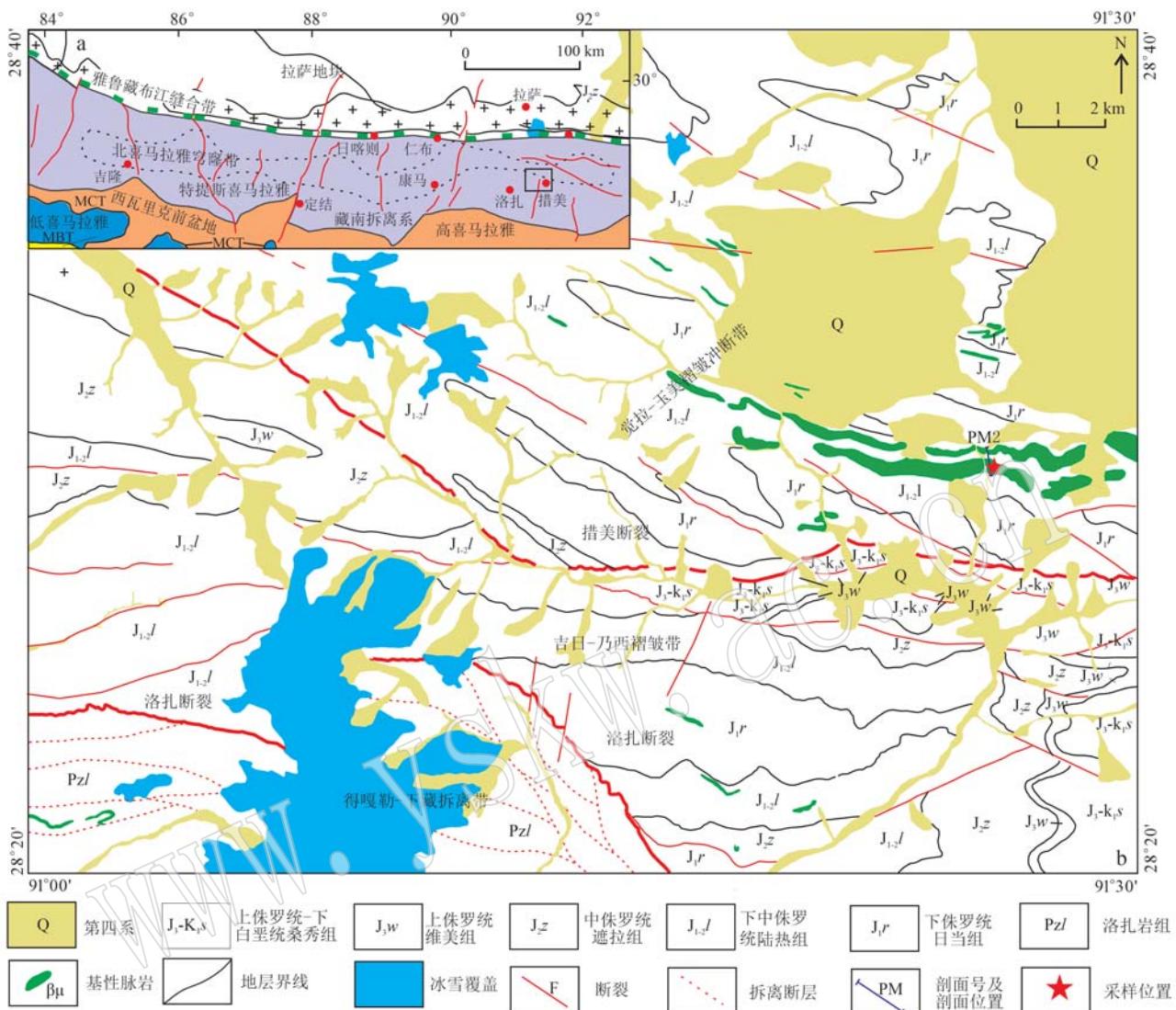


图 1 藏南夏瓦地区大地构造略图(a, 据张进江等, 2007)和区域地质简图(b)

Fig. 1 Sketch map showing tectonic units(a, modified from Zhang Jinjiang et al., 2007) and simplified regional geological map (b) of the Chaiwa area, Southern Tibet

藏南夏瓦地区基性脉岩广泛分布于措美-琼结县及措美-洛扎公路两侧, 呈近东西向带状展布, 受地层与断裂控制明显, 局部见碎裂岩发育。岩石类型以辉绿岩、辉长玢岩为主(图2), 脉岩一般宽0.5~20 m, 延伸长度不等, 最长可达10 km。侵入于下侏罗统日当组(J₁r)、下中侏罗统陆热组(J₁-J₂L)和中侏罗统遮拉组(J₂z)中, 围岩以泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、黑色页岩、细砂岩、泥灰岩、长石石英杂砂岩为主。基性岩脉与围岩多数呈顺层侵入接触关系, 在接触部位发育强烈的碳酸盐化、绿泥石化、高岭土化、黄铁矿化等。受后期构造影响, 发育多组

节理, 以剪节理为主, 方解石、石英沿节理面充填。

辉绿岩: 新鲜面为灰绿色, 风化面为红褐色, 主要由斜长石组成的三角形格架和分布格架中的辉石以及少量不透明钛铁氧化物等组成, 构成辉绿结构。斜长石约60%, 粒径0.2~0.9 mm, 自形-半自形板柱状, 粘土化强烈, 绢云母化微弱。单斜辉石约30%, 他形板状、他形粒状, 正高突起, 可见两组解理, 偶见简单双晶, 分布在斜长石的三角形格架中。不透明钛铁氧化物约5%, 呈线纹状、针状, 杂乱分布。岩石发育微裂隙, 裂隙中充填晶粒石英、碳酸盐微脉(图3a、3b)。

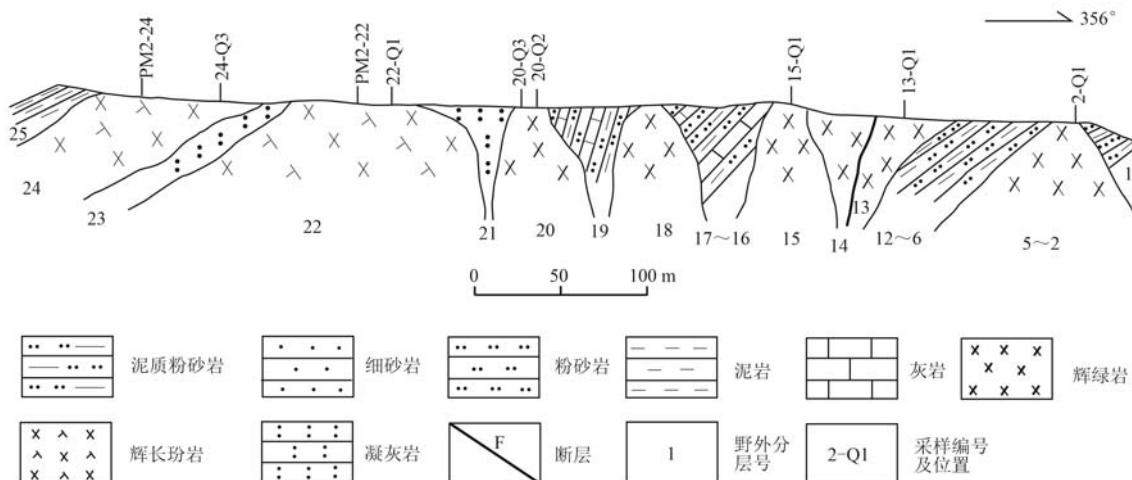


图 2 藏南夏瓦地区仁温勒-宗瓦基性脉岩实测剖面(PM2)图

Fig. 2 Profile map of mafic dykes in Renwenle-Zongwa in the Chaiwa area, Southern Tibet

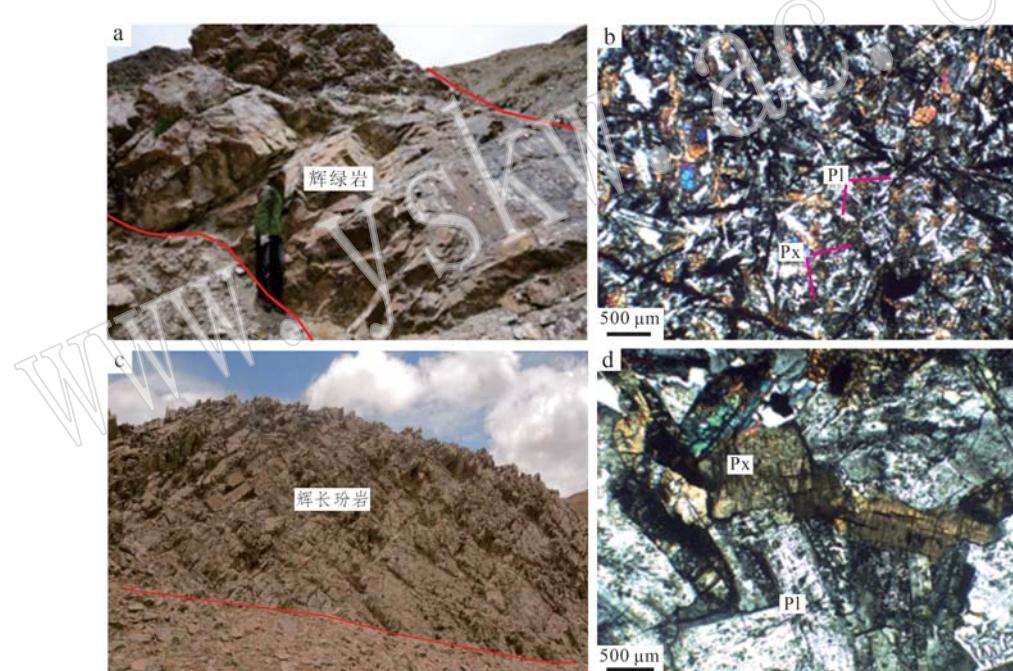


图 3 藏南夏瓦地区辉绿岩(a、b)与辉长玢岩(c、d)野外和正交偏光照片

Fig. 3 Field and orthogonal polarized photographs of diabase (a, b) and gabbro porphyrite (c, d) in the Chaiwa area,

Southern Tibet

Pl—斜长石; Px—辉石

Pl—plagioclase; Px—pyroxene

辉长玢岩: 新鲜面为灰黑色, 风化面为褐黄色, 主要由斜长石、辉石和少量石英、绿泥石、不透明钛铁氧化物等组成, 细中粒自形-半自形结构。斜长石约 57%, 粒径 0.9~4.0 mm, 自形-半自形板柱状, 组成三角形格架, 聚片双晶明显, 绢云母化强烈, 粘土化, 与长石接触处多见交代蠕虫结构。辉石约

30%, 他形板状、他形粒状, 分布在斜长石的三角形格架中, 部分晶体绿泥石化强烈。绿泥石约 8%, 叶片状、叶片集合体状、不规则状, 淡绿色, 异常干涉色, 正低突起, 交代辉石多呈辉石假像。石英约 3%, 他形粒状, 分散分布, 属于次生矿物。不透明钛铁氧化物约 4%, 他形粒状, 分散分布(图 3c、3d)。

2 测试方法

采集仁温勒-宗瓦一带剖面 PM2(图 1)上 7 件基性脉岩样品进行全岩主微量元素分析, 其中有 5 件样品为辉绿岩(样品编号为 2-Q1、13-Q1、15-Q1、20-Q2、20-Q3), 2 件样品为辉长玢岩(样品编号为 22-Q1、24-Q3), 另选取剖面 PM2 上 2 件典型辉长玢岩(样品编号为 PM2-22、PM2-24)进行锆石 U-Pb 测年(图 2)。

辉长玢岩中锆石的碎样、淘洗和挑选等工作由河北地勘局廊坊实验室完成, 在双目镜下挑出无熔蚀、熔圆现象的锆石, 且在测定时选择晶体内部结构完整和无裂纹、无包裹体的锆石颗粒。锆石挑选后经树胶固定制靶、抛光, 选择同位素稀释-热电离质谱法(ID-TIMS), 在天津地质矿产研究所同位素实验室完成。采用 ^{206}Pb - ^{235}U 混合稀释剂(Krogh, 1973), 质谱测定在 VG354 热离子发射质谱计上采用单接收器动态测定模式和 Daly 检测器完成, 数据处理采用 PBDAT 和 Isoplot 软件(Ludwig, 1998, 2000)处理。

全分析样品均由湖南省有色地质勘查研究院完成, 硅酸盐全分析采用重量法、容量法和原子吸收法等(依据 GB/T 14506-1993), 有色金属、稀土、稀有稀散元素采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS), Sn 采用 ICP 直读光谱法(依据 YD1. 1. 22-91)。室内温度为 20℃, 相对湿度为 61%。

3 结果与分析

3.1 锆石 U-Pb 年龄

锆石阴极发光(CL)图像显示, 锆石自形程度较好, 以自形-半自形长柱状为主, 长一般在 110~180 μm 之间, 长宽比多为 1:1~3:1, 发育岩浆锆石典型的振荡环带(图 4)。从表 1 可知, 样品锆石 Th、U 含量较高, 其中 PM2-22 样品的 Th、U 含量分别为 $125 \times 10^{-6} \sim 8 019 \times 10^{-6}$ 和 $417 \times 10^{-6} \sim 3 172 \times 10^{-6}$, PM2-24 样品的 Th、U 含量分别为 $1 091 \times 10^{-6} \sim 5 537 \times 10^{-6}$ 和 $559 \times 10^{-6} \sim 1 460 \times 10^{-6}$, 2 个样品锆石的 Th/U 值分别为 0.06~5.31 和 1.87~3.79, 除 PM2-22 样品的 11.1 测点比值小于 0.5 外, 其余比值均大于 0.5, 与岩浆成因锆石特征一致(Hoskin and Black, 2000)。2 件辉长玢岩的谐和年龄分别为 146.12 ± 0.72 Ma(MSDW=1.3, 图 5a) 和 145.99 ± 0.98 Ma(MSWD=1.7, 图 5b)。

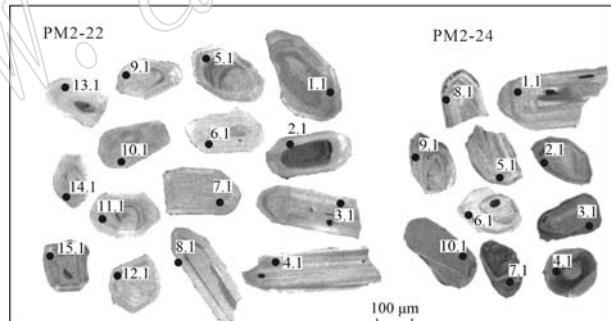


图 4 藏南夏瓦地区基性脉岩锆石阴极发光图像
Fig. 4 Zircon cathodoluminescence images of mafic dykes in the Chaiwa area, Southern Tibet

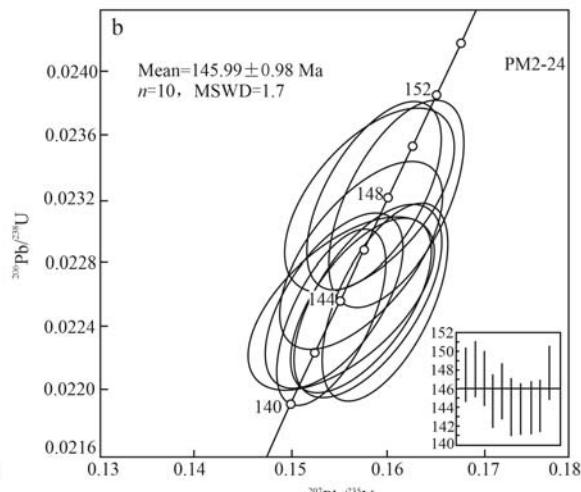
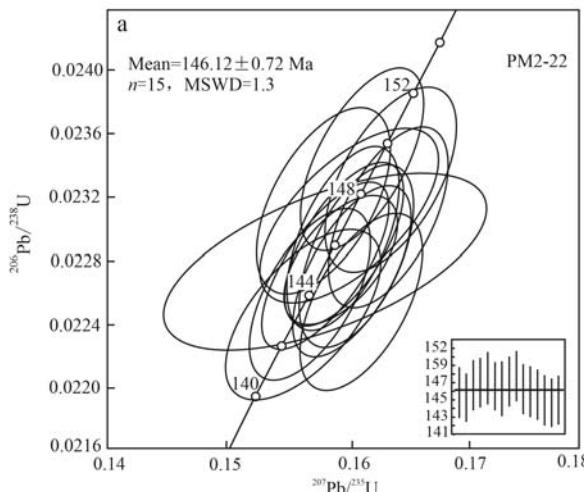


图 5 藏南夏瓦地区基性脉岩锆石谐和年龄图
Fig. 5 Zircon U-Pb concordia diagrams of mafic dykes in the Chaiwa area, Southern Tibet

表 1 藏南夏瓦地区基性脉岩锆石 U-Pb 定年结果
Table 1 Zircon U-Pb dating of mafic dykes in the Chaiwa area, Southern Tibet

样品号	$u_{\text{B}}/10^{-6}$			同位素比值			年龄 Ma			
	Pb	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$			$^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}$			
				$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	
PM2-22										
1.1	40	4 034	759	5.31	0.049 6	0.001 4	0.156 5	0.004 4	0.022 9	0.000 2
2.1	78	5 886	1 990	2.96	0.049 0	0.001 8	0.154 0	0.005 7	0.022 8	0.000 2
3.1	23	1 043	740	1.41	0.049 1	0.001 3	0.155 9	0.004 2	0.023 0	0.000 2
4.1	14	687	417	1.65	0.049 2	0.001 0	0.156 4	0.003 3	0.023 1	0.000 2
5.1	43	2 270	1 317	1.72	0.048 6	0.000 6	0.155 3	0.002 3	0.023 1	0.000 2
6.1	52	2 830	1 622	1.74	0.048 7	0.000 6	0.154 5	0.002 2	0.023 0	0.000 2
7.1	109	8 019	3 172	2.53	0.052 9	0.000 7	0.167 5	0.002 5	0.023 0	0.000 3
8.1	30	1 857	938	1.98	0.050 0	0.000 6	0.159 1	0.002 2	0.023 1	0.000 2
9.1	62	4 533	1 786	2.54	0.048 0	0.000 7	0.153 6	0.002 5	0.023 2	0.000 2
10.1	38	3 137	1 036	3.03	0.049 1	0.000 6	0.155 3	0.002 2	0.022 9	0.000 2
11.1	43	125	2 040	0.06	0.049 8	0.000 7	0.157 1	0.002 3	0.022 9	0.000 2
12.1	63	5 189	1 718	3.02	0.049 7	0.000 6	0.156 6	0.002 0	0.022 8	0.000 2
13.1	39	1 692	1 428	1.18	0.049 6	0.000 6	0.155 0	0.002 1	0.022 7	0.000 2
14.1	84	6 368	2 343	2.72	0.049 7	0.000 7	0.155 5	0.002 4	0.022 7	0.000 2
15.1	55	4 114	1 539	2.67	0.049 8	0.000 6	0.156 3	0.002 1	0.022 7	0.000 2
PM2-24										
1.1	50	3 884	1 102	3.53	0.048 2	0.002 2	0.153 9	0.007 5	0.023 1	0.000 2
2.1	69	5 537	1 460	3.79	0.048 6	0.000 7	0.155 7	0.002 6	0.023 2	0.000 2
3.1	24	1 540	712	2.16	0.048 3	0.000 8	0.153 6	0.003 2	0.023 1	0.000 2
4.1	44	2 675	1 431	1.87	0.048 8	0.000 6	0.152 7	0.002 1	0.022 7	0.000 2
5.1	28	2 321	835	2.78	0.049 1	0.001 1	0.152 6	0.003 6	0.022 6	0.000 2
6.1	31	2 281	1 083	2.11	0.053 4	0.000 8	0.159 4	0.002 8	0.021 7	0.000 2
7.1	50	4 410	1 344	3.28	0.048 5	0.001 0	0.155 3	0.003 3	0.023 2	0.000 2
8.1	19	1 091	559	1.95	0.049 3	0.000 7	0.157 6	0.002 6	0.023 2	0.000 3
9.1	29	1 896	757	2.50	0.050 1	0.004 8	0.163 5	0.015 4	0.023 7	0.000 3
10.1	44	3 450	1 084	3.18	0.059 3	0.000 9	0.176 8	0.002 9	0.021 6	0.000 2

3.2 岩石地球化学特征

3.2.1 主量元素特征

从表 2 可见, 夏瓦地区基性脉岩的 SiO_2 含量为

47.20% ~ 50.54%, 均值为 49.13%, 在 $\text{Zr}/\text{TiO}_2 - \text{Nb}/\text{Y}$ 图解中落入碱性玄武岩区域(图 6), Al_2O_3 含量为 11.96% ~ 14.13%, 均值为 13.40%, TiO_2 含

表 2 藏南夏瓦地区基性脉岩主量($w_{\text{B}}/\%$)、微量元素($w_{\text{B}}/10^{-6}$)组成及相关参数

Table 2 Major($w_{\text{B}}/\%$), trace and REE($w_{\text{B}}/10^{-6}$) elements of mafic dykes in the Chaiwa area, Southern Tibet

岩性 样品号	辉绿岩						辉长玢岩	
	2-Q1	13-Q1	15-Q1	20-Q2	20-Q3	22-Q1	24-Q3	
SiO_2	47.20	47.66	48.86	50.38	50.54	49.90	49.40	
TiO_2	4.20	4.23	3.46	3.62	3.60	3.81	3.89	
Al_2O_3	11.96	13.20	13.40	13.31	13.80	14.13	14.00	
Fe_2O_3	2.50	3.43	2.46	1.57	2.07	1.86	3.86	
FeO	9.07	7.08	7.91	9.00	8.17	9.78	9.13	
MnO	0.15	0.12	0.13	0.14	0.13	0.16	0.16	
MgO	5.91	5.23	6.61	5.23	5.54	4.69	4.67	
CaO	9.71	7.44	8.94	8.31	7.46	9.22	9.32	
Na_2O	2.68	2.62	2.59	2.98	2.96	2.72	2.51	
K_2O	0.60	0.86	0.82	1.39	1.62	0.92	0.82	
P_2O_5	0.50	0.46	0.42	0.52	0.52	0.47	0.47	
LOI	4.73	7.07	3.90	2.70	3.22	2.34	2.02	
Total	99.22	99.42	99.49	99.14	99.63	99.99	100.26	
FeO^{T}	11.32	10.17	10.12	10.41	10.03	11.45	12.60	
$\text{Mg}^{\#}$	48.20	47.84	53.79	47.24	49.60	42.19	39.78	
A/CNK	0.92	1.21	1.09	1.05	1.15	1.10	1.11	
σ	1.73	1.65	1.57	2.22	2.40	1.72	1.58	
SI	28.47	27.21	32.42	25.93	27.21	23.49	22.25	
AR	1.36	1.41	1.36	1.51	1.55	1.37	1.33	
Cr	274.82	143.26	248.86	180.06	218.28	84.23	87.92	
Ni	94.12	56.50	110.69	67.28	83.14	51.52	53.52	
Co	37.72	31.37	37.41	29.60	32.90	33.77	34.76	
V	341.36	246.95	280.98	185.66	272.67	257.38	260.11	
Rb	29.31	42.31	45.33	271.02	82.15	26.70	15.38	
Sr	501.85	571.70	565.35	820.47	1159.31	597.02	593.27	
Ba	372.22	468.34	430.06	510.68	632.32	403.60	367.69	
Sc	38.02	35.61	35.92	32.39	34.77	27.90	24.39	
Nb	41.22	30.57	27.39	35.35	37.85	30.88	32.16	
Ta	2.70	3.01	2.19	2.20	2.52	2.11	2.24	
Li	26.32	30.07	23.92	29.80	30.56	14.00	14.94	
Zr	724.08	298.87	283.17	751.41	762.48	817.10	693.29	
Hf	15.48	9.05	8.82	16.98	14.88	17.91	15.73	
U	0.88	0.55	0.56	1.00	0.92	0.99	0.89	
Th	4.09	3.45	3.37	7.18	4.24	4.45	4.00	
W	11.96	5.22	13.13	14.21	10.40	11.59	13.22	
Pb	17.47	16.84	18.77	14.99	13.18	13.53	14.26	
Cu	70.02	27.07	31.68	38.62	38.79	25.68	27.20	
Zn	146.75	140.33	141.56	122.46	138.39	141.73	150.68	
Sn	4.65	4.95	3.87	3.87	3.75	5.10	6.14	
Sb	0.90	1.50	1.34	1.15	1.05	1.65	1.27	
La	51.47	46.34	43.61	46.11	54.39	40.00	37.45	
Ce	93.41	83.55	77.42	102.22	98.31	75.76	74.75	
Pr	14.15	13.36	12.22	16.86	15.73	12.25	11.97	
Nd	52.02	47.88	44.80	57.59	53.91	44.62	44.22	
Sm	12.38	11.24	10.71	13.44	12.69	11.23	10.88	
Eu	4.25	4.32	3.69	4.25	3.99	3.86	3.67	
Gd	13.27	12.10	11.41	13.97	13.63	12.05	11.81	
Tb	1.92	1.67	1.63	1.99	1.92	1.79	1.71	
Dy	10.11	9.05	8.53	10.71	10.21	9.73	9.60	
Ho	2.01	1.88	1.78	2.09	2.03	2.02	1.89	
Er	4.71	4.34	4.28	5.08	4.89	4.93	4.84	
Tm	0.62	0.56	0.56	0.66	0.60	0.64	0.59	
Yb	3.40	3.16	3.11	3.72	3.43	3.71	3.34	
Lu	0.41	0.37	0.38	0.48	0.42	0.46	0.39	
Y	30.64	28.35	36.00	32.00	41.00	28.00	34.00	
ΣREE	294.78	268.17	259.73	311.18	316.70	251.21	250.65	
LREE	227.68	206.69	192.44	240.47	239.02	187.72	182.94	
HREE	67.09	61.47	67.29	70.71	77.68	63.49	67.72	
LREE/HREE	3.39	3.36	2.86	3.40	3.08	2.96	2.70	
δEu	0.33	0.37	0.33	0.31	0.30	0.33	0.32	

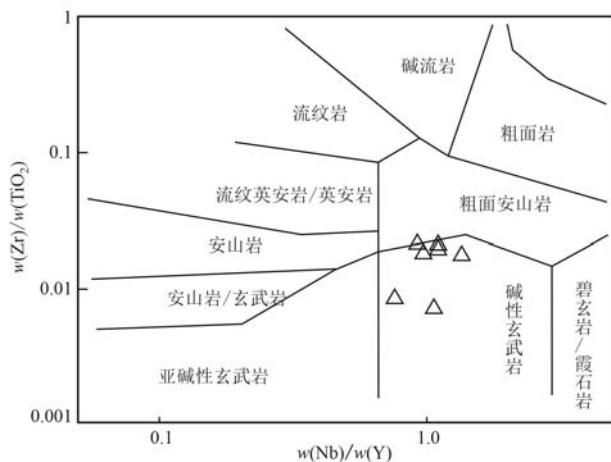


图 6 藏南夏瓦地区基性脉岩 Zr/TiO_2 - Nb/Y 图
(据 Middlemost, 1994)

Fig. 6 The Zr/TiO_2 - Nb/Y diagram of mafic dykes in the Chaiwa area, Southern Tibet (after Middlemost, 1994)

量为 $3.46\% \sim 4.23\%$, 均值为 3.83% , P_2O_5 含量为 $0.42\% \sim 0.52\%$, 均值为 0.48% , FeO^T 含量为 $10.03\% \sim 12.60\%$, 均值为 10.87% , 接近 OIB 型玄武岩值 (10.86%)。A/CNK 值为 $0.92 \sim 1.21$, 显示弱过铝质特征。里特指数 σ 为 $1.57 \sim 2.40$, 均值为 1.84 , 碱度率 (AR) 为 $1.33 \sim 1.55$, 均值为 1.41 , 全碱质量分数 (ALK) 为 $3.39 \sim 4.75$, 均值为 3.89 , TiO_2 含量较高均值为 3.83% , 与夏威夷碱性玄武岩 TiO_2 含量 (平均为 3.22%) 相似, 显示碱性特征。镁铁指数 ($\text{Mg}^{\#}$) 为 $39.78 \sim 53.79$, 均值为 46.95 , 远低于原生玄武岩岩浆 $\text{Mg}^{\#}$ 值 ($68 \sim 78$), 固结指数 (SI) 为 $22.25 \sim 32.42$, 均值为 26.71 。从夏瓦地区基性

脉岩的主量元素特征来看, 显示高 P_2O_5 、 FeO^T 、 TiO_2 含量特征, 表现为弱过铝质、碱性, 且 $\text{Mg}^{\#}$ 、SI 指示了较低的岩浆结晶分异 (Rittmann, 1957; Thornton and Tuttle, 1960; Wright, 1969; 朱弟成等, 2005a, 2006)。

3.2.2 微量元素特征

夏瓦地区基性脉岩的 ΣREE 含量为 $250.65 \times 10^{-6} \sim 316.70 \times 10^{-6}$, 均值 278.92×10^{-6} , LREE/HREE 值为 $2.70 \sim 3.40$, 均值为 3.11 , 其轻稀土元素 (LREE) 较为富集, δEu 值为 $0.30 \sim 0.37$, 均值为 0.32 , 显示负 Eu 异常, 稀土元素配分曲线为右倾型, 其配分曲线与 OIB 相似 (图 7a) (Sun and McDonough, 1989)。基性脉岩大离子亲石元素相对富集 Ba, 亏损 K、Pb、Sr 元素; 高场强元素相对富集 Nb、Ta、Zr、Hf、Th 元素, 亏损 U、Ti 元素 (图 7b)。Sr 元素相对亏损, 可能与斜长石在低压条件下分离结晶有关。Th/Yb 值、Ce/Zr 值分别为 $1.08 \sim 1.93$ 、 $0.09 \sim 0.28$, 均值分别为 1.28 、 0.16 , 与 OIB 玄武岩 (分别为 1.9 、 0.3) (Pearce, 1982; 王一伟, 2015) 相似。以上特征均指示它们的岩浆来源和岩石成因可能相似。

4 讨论

4.1 基性脉岩的形成时代

藏南特提斯喜马拉雅构造带江孜-康马、隆子-洛扎、浪卡子-打隆、绒布-措美等地出露的基性脉岩或岩墙有较多年龄数据报道, 如洛扎地区基性岩墙

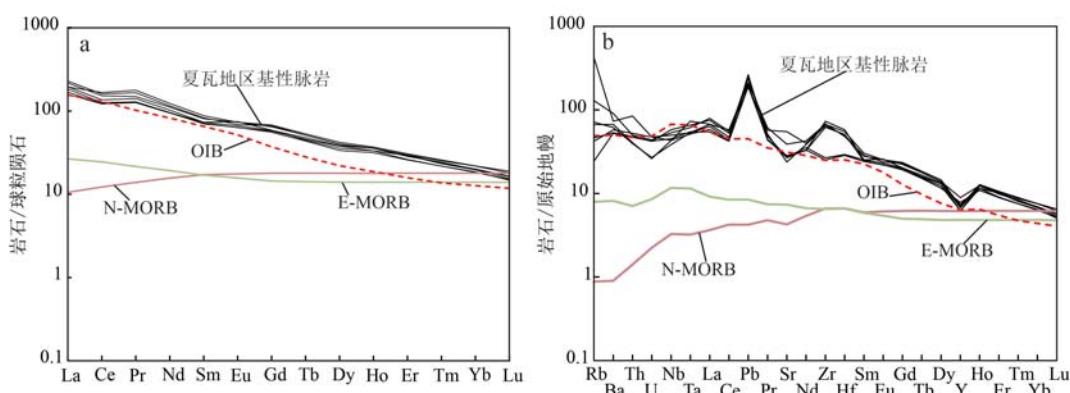


图 7 藏南夏瓦地区基性脉岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式图与原始地幔标准化微量元素蜘蛛图
(标准化值和标准 OIB、MORB 数据据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams of mafic dykes in the Chaiwa area, Southern Tibet (standardized values and standard OIB、MORB data after Sun and McDonough, 1989)

群结晶年龄为 138 ± 11 Ma(童劲松等, 2007); 浪卡子地区基性脉岩结晶年龄分别为 134.9 ± 1.8 Ma 和 135.5 ± 2.1 Ma(Jiang et al., 2006); 古堆、哲古地区基性脉岩结晶年龄为 $138 \sim 133$ Ma、 131.71 ± 2.7 Ma 和 135.0 ± 2.4 Ma(任冲等, 2014; 任冲, 2015); 扎西康辉绿岩结晶年龄为 132.9 ± 2.4 Ma(杨超等, 2014); 绒布地区基性岩脉结晶年龄分别为 137.3 ± 1.6 Ma、 147.3 ± 3.6 Ma(丁枫等, 2020)。可见, 藏南特提斯喜马拉雅带基性岩浆活动主要集中于 $136 \sim 130$ Ma 和 $150 \sim 140$ Ma 两个时段(唐菊兴等, 2010, 2016; 丁枫等, 2020)。本次研究获得 2 个辉长玢岩的结晶年龄分别为 145.99 ± 0.98 Ma 和 146.12 ± 0.72 Ma, 表明它们也为特提斯喜马拉雅带基性岩浆活动主要集中时期所形成。

4.2 基性脉岩的源区特征

夏瓦地区基性脉岩在 La/Nb-La(Nb) 图解(图 8a)与 Nb/Th-Nb 图解(图 8b)中主要落入洋岛玄武岩与靠近洋岛玄武岩的区域, 在 Y/Nb-Zr/Nb(图 8c)与 Th/Yb-Ta/Yb(图 8d)图解中落入靠近富集地幔的区域。另外, 从表 3 可知, 夏瓦地区基性脉岩 Zr/Nb、La/Nb、Ba/Nb、Ba/Th、K/Nb、Rb/Nb、Th/La 等多数参数值与 EM I OIB 型富集地幔接近, 与 Kerguelen 地幔柱有关的火成岩同样属于 I 型富集地幔, Th/Nb、Ba/La 等少数参数值与 EM II OIB 型富集地幔接近(Weaver, 1991)。上述研究表明, 夏瓦地区基性脉岩的岩浆来自深部地幔, 与藏南特提斯喜马拉雅构造带诸多处的 OIB 型基性岩墙群的岩浆源区特征相似(江思宏等, 2007; 裴碧波, 2011; 任冲等, 2014)。

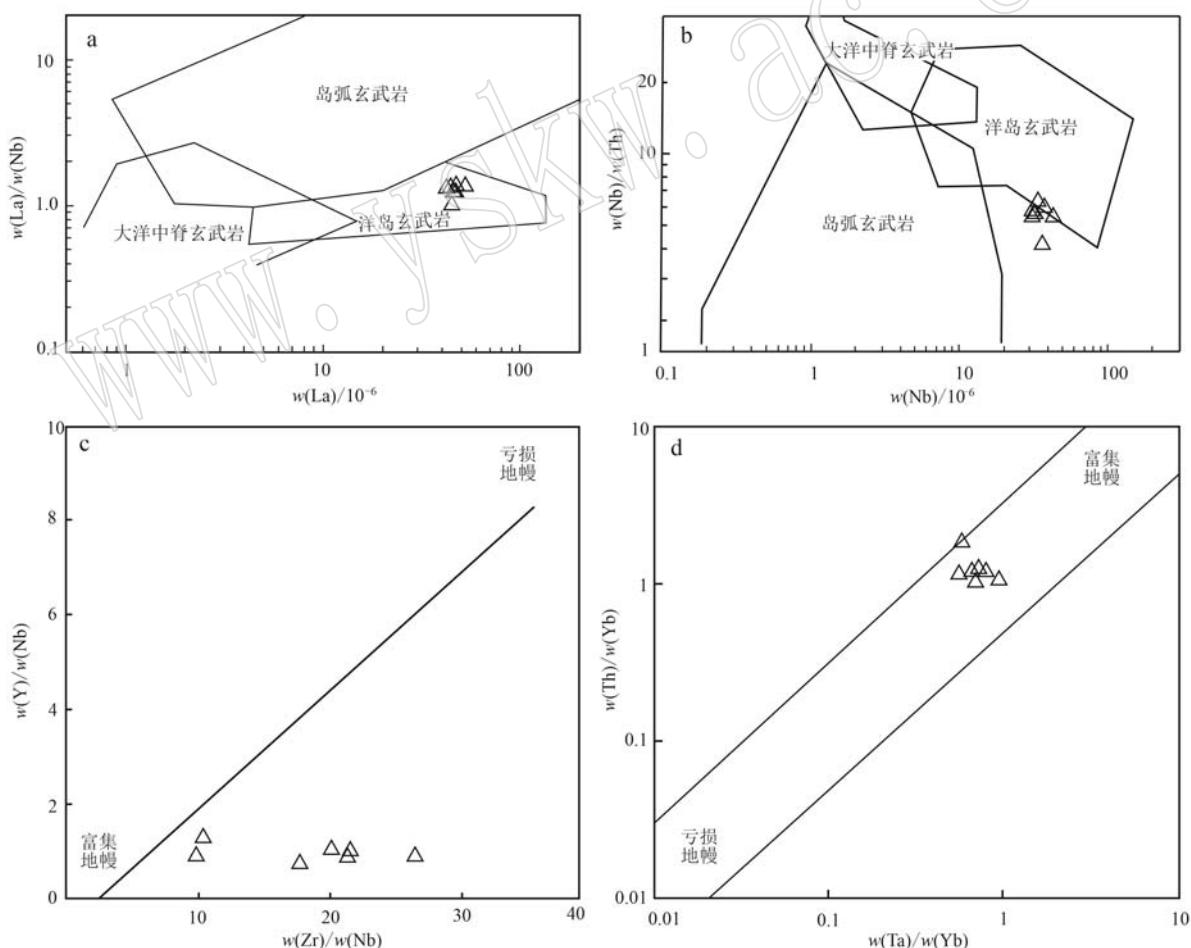


图 8 藏南夏瓦地区基性脉岩 La/Nb-La、Nb/Th-Nb 和 Y/Nb-Zr/Nb、Th/Yb-Ta/Yb 图解(a, b 据李曙光, 1993; c, d 据 Wilson, 1989)

Fig. 8 La/Nb-La, Nb/Th-Nb and Y/Nb-Zr/Nb, Th/Yb-Ta/Yb diagrams of mafic dykes in the Chaiwa area, Southern Tibet (a, b after Li Shuguang, 1993; c, d after Wilson, 1989)

表 3 藏南夏瓦地区基性脉岩和 OIB 型火成岩中微量元素比值 (OIB 数据据 Weaver, 1991)

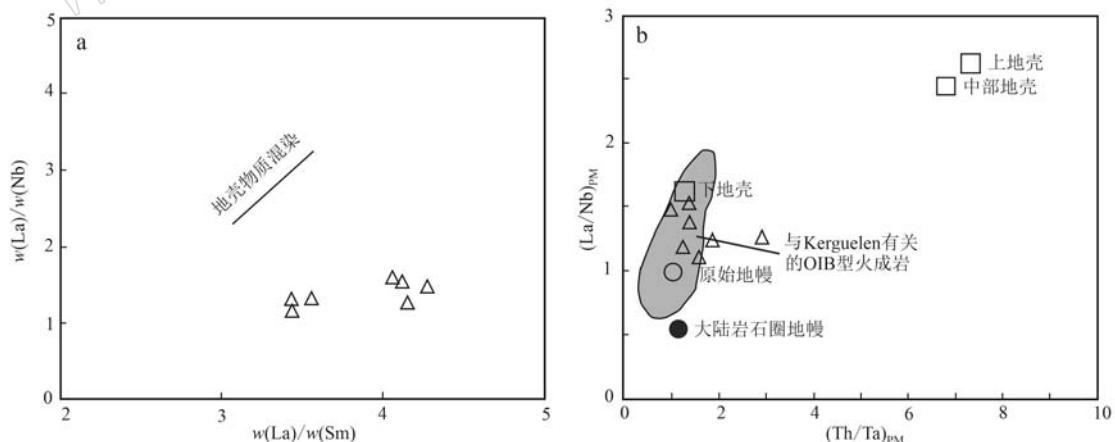
Table 3 Ratios of trace elements in mafic dikes and OIB igneous rocks in the Chaiwa area, Southern Tibet
(OIB data after Weaver, 1991)

	Zr/Nb	La/Nb	Ba/Nb	Ba/Th	K/Nb	Rb/Nb	Th/La	Th/Nb	Ba/La
本文	18.2	1.37	13.7	108	249	2.1	0.098	0.131	10.0
	9.8~26.5	1.16~1.59	9.0~16.7	71~149	121~355	0.48~7.67	0.074~0.156	0.099~0.203	7.2~11.6
EM I OIB									
Walvis Ridge	11.5	1.19	17.8	-	213	-	-	-	14.9
Walvis Ridge	8.4	0.92	14.0	-	267	-	-	-	15.1
Walvis Ridge	6.1	0.87	14.7	-	373	-	-	-	16.9
Gough	6.8	0.97	16.1	154	432	0.99	0.110	0.105	16.6
Tristan da Cunha	4.2	0.86	11.4	103	307	0.88	0.128	0.108	13.2
Kerguelen	5.3	1.14	14.4	126	355	1.17	0.107	0.122	13.5
EM II OIB									
Tutuila, Samoa	7.3	0.89	7.3	67	248	0.59	0.126	0.111	8.3
Upolu, Samoa	4.5	1.09	11.0	84	254	0.76	0.122	0.133	10.4
Tahaa, Society	6.5	0.97	10.9	71	378	0.85	0.163	0.157	11.3

4.3 地壳混染

通常认为来自地幔柱的岩浆具有低的 La/Ta 值(一般为 8~15), 受到岩石圈地幔混染后该比值会迅速增加(一般大于 25), 而 La/Sm 值变化不大; 如果岩浆受到地壳混染后, 该比值会迅速增加(一般大于 5) (Lassiter and DePaolo, 1997; 张招崇, 2004)。夏瓦地区基性脉岩 La/Ta 值为 15.42~21.58, 均值为 18.95, La/Sm 值为 3.43~4.29, 均值为 3.87, 其岩浆在上升过程中未遭受明显的岩石

圈地幔或地壳物质的混染; Th/Ta 值为 1.15~3.27, 均值为 1.86, Zr/Hf 值为 32.11~51.23, 均值为 41.77, 均远离地壳值(Sun and McDonough, 1989; Weaver, 1991), 指示未遭受地壳混染。在 La/Nb-La/Sm 图解(图 9a)中, 夏瓦地区基性脉岩明显远离地壳物质混染的趋势线, 且未表现出正相关性, 在 $(La/Nb)_{PM}-(Th/Ta)_{PM}$ 图解(图 9b)中, 除 2 个样品外, 大部分样品落入与 Kerguelen 地幔柱有关的 OIB 型火成岩区域, 同样显示未遭受地壳混染。

图 9 藏南夏瓦地区基性脉岩 La/Nb-La/Sm 和 $(La/Nb)_{PM}-(Th/Ta)_{PM}$ 判别图解(据 Zhu et al., 2007)Fig. 9 La/Nb-La/Sm and $(La/Nb)_{PM}-(Th/Ta)_{PM}$ discrimination diagrams for mafic dykes in the Chaiwa area, Southern Tibet (after Zhu et al., 2007)

数据来源: 上地壳、中部地壳、下地壳据 Rudnick and Gao (2003); 原始地幔据 Taylor and McLennan (1985); 岩石圈地幔据 McDonough (1990); 与 Kerguelen 有关的 OIB 火成岩据 Zhu et al. (2007)

data sources: upper crust, middle crust and lower crust according to Rudnick and Gao (2003); primitive mantle data according to Taylor and McLennan (1985); lithospheric mantle according to McDonough (1990); OIB igneous rocks associated with Kerguelen according to Zhu et al. (2007)

4.4 大陆动力学背景

古生代以来，特提斯喜马拉雅带以海相沉积岩为主，在晚三叠—早白垩世处于被动大陆边缘环境（余光明等，1990；王根厚等，2000；朱弟成等，2005a）。新特提斯洋在晚侏罗世—早白垩世时发生大规模的扩张，导致雅鲁藏布缝合带南侧喜马拉雅地区被动大陆边缘处于拉张的构造环境和岩石圈减薄、软流圈持续上涌的动力学背景，诱发强烈的岩浆活动，使特提斯喜马拉雅带发育大量的中基性火成岩（朱弟成等，2005a；童劲松等，2007）。众多学者研究表明，特提斯喜马拉雅带隆子—洛扎一带中

基性脉岩和桑秀组玄武岩均形成于被动大陆边缘拉张的构造环境（钟华明等，2005；朱弟成等，2005b；任冲等，2014；任冲，2015）。夏瓦地区基性脉岩在Th/Hf-Ta/Hf图解中落入初始裂谷玄武岩和陆内裂谷碱性玄武岩区域（图10a），在微量元素Zr/Y-Zr和Ti-Zr图解中主要落在板内玄武岩区域（图10b、10c）。与前人在区域上的研究结果对比来看，夏瓦地区基性脉岩与特提斯喜马拉雅带隆子—洛扎一带基性脉岩、桑秀组玄武岩的地球化学特征相似，反映其构造环境和岩浆源区特征应相同。以上研究证实了夏瓦地区基性脉岩形成于大陆边缘裂谷环境。

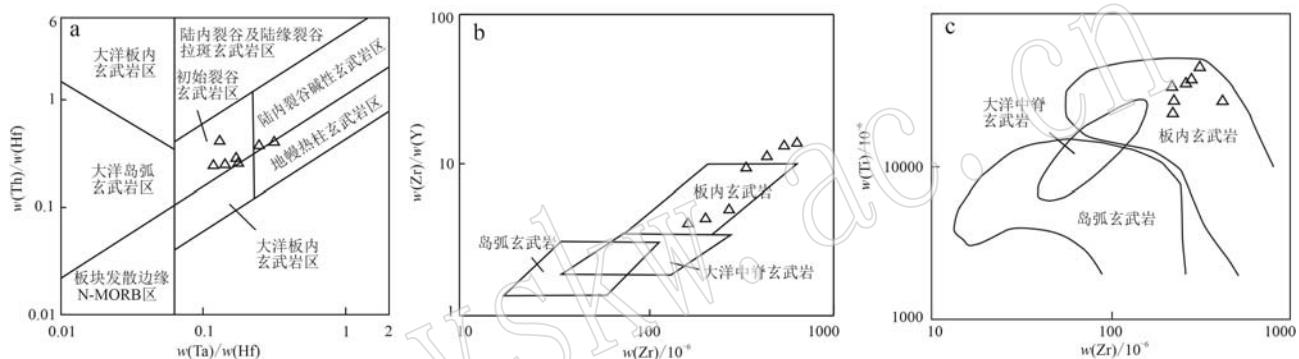


图10 藏南夏瓦地区基性脉岩 Th/Hf-Ta/Hf/Zr/Y-Zr 和 Ti-Zr 图解(a 据汪云亮等, 2001; b 据 Pearce and Norry, 1979; c 据 Pearce, 1982)

Fig. 10 Th/Hf-Ta/Hf/Zr/Y-Zr and Ti-Zr diagrams of mafic dykes from the Chaiwa area, Southern Tibet (a after Wang Yunliang et al., 2001; b after Pearce and Norry, 1979; c after Pearce, 1982)

普遍认为 Comei-Bunbury 大火成岩省主要分布于澳大利亚西部和中国西藏东南部，与 Kerguelen 地幔柱头部玄武岩具有相似的地球化学特征和相近的成岩时代，指示它们均与 Kerguelen 地幔柱岩浆的活动密切相关（朱弟成等，2004, 2005a, 2005b, 2009；夏瑛等，2012；王亚莹等，2016）。从结晶年龄和研究区大地构造位置对比，夏瓦地区基性脉岩与特提斯喜马拉雅带多处基性岩脉属于同期岩浆活动，指示其岩石成因可能与 Kerguelen 地幔柱密切相关。夏瓦地区基性脉岩的结晶年龄约为 146 Ma，与 Comei-Bunbury 大火成岩省桑秀组玄武岩、绒布地区基性脉岩的结晶年龄（147 Ma 左右）非常接近（丁枫等，2020）；与 OIB 的地球化学特征相似，暗示它们应为同源异相的产物。一般认为，该区 OIB 是与 Kerguelen 地幔柱作用相关的产物（朱弟成等，2005a），因此，夏瓦地区基性脉岩应该是大陆边缘裂谷背景下 Kerguelen 地幔柱作用的产物。

早期研究发现，在 Comei-Bunbury 大火成岩省南部谷觉-错那和西部江孜-康马地区出露大量的 OIB 型基性侵入岩和喷出岩（拉康组），结晶年龄为 144~140 Ma，明显早于特提斯喜马拉雅带北部地区结晶年龄为 135~131 Ma 的桑秀组玄武岩。从获取的年龄数据来看，夏瓦地区基性脉岩与 Comei-Bunbury 南部和西部 OIB 型火成岩的结晶年龄接近，明显早于 Kerguelen 地幔柱峰期（132 Ma）（Zhu et al., 2009；侯晨阳, 2017；丁枫等, 2020），可能代表了地幔柱峰期之前的小规模岩浆活动，类似的情况也发生于塔里木大火成岩省（Zhang et al., 2013）。

5 结论

(1) 夏瓦地区发育大量呈近东西向、以辉绿岩和辉长玢岩为主的基性脉岩，具有低 SiO₂ (47.20%

~50.54%) 和高 Mg[#] 值(39.78~53.79) 特征, 属碱性系列, 富集轻稀土元素(LREE), 高场强元素(Nb、Ta、Zr、Hf、Th) 相对富集, 显示出似 OIB 的地球化学特征;

(2) 基性脉岩的结晶年龄为 146~145 Ma, 其年龄明显早于 Kerguelen 地幔柱活动的峰期(132 Ma), 可能代表了地幔柱峰期之前的小规模岩浆活动;

(3) 夏瓦基性脉岩来源于软流圈地幔的部分熔融, 形成于大陆边缘裂谷背景下, 结合区域大火成岩省基性岩的发育, 夏瓦地区基性脉岩应是大陆边缘裂谷背景下 Kerguelen 地幔柱作用的产物。

致谢 本文是在 1:5 万区域地质矿产调查的基础上完成的, 参加工作的还有杨斌、任冲、邱杨、邱海、周春华等, 在此表示感谢!

References

- Cui Yuliang, Wang Genhou and Liang Xiao. 2017. Geochemical characteristics and tectonic implications of gabbro in Mayigangri area, Tibet [J]. Geoscience, 31(2): 258~266 (in Chinese with English abstract).
- Deng J, Liu X F, Wang Q F, et al. 2017. Isotopic characterization and petrogenetic modeling of Early Cretaceous mafic dike-Lithospheric extension in the North China craton, eastern Asia [J]. Geological Society of America Bulletin, 129: 1 379~1 407.
- Ding Feng, Gao Jianguo and Xu Kunzhi. 2020. Geochemistry, geochronology and geological significances of the basic dykes in Rongbu area, southern Tibet [J]. Acta Petrologica Sinica, 36(2): 391~408 (in Chinese with English abstract).
- Ernst R E, Head J W, Parfitt E, et al. 1995. Giant radiating dyke swarms on Earth and Venus [J]. Earth-Science Reviews, 39(1~2): 1~58.
- Hoskin P and Black L. 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon [J]. Journal of Metamorphic Geology, 18: 423~439.
- Hou Chenyang. 2017. Zircon SHRIMP U-Pb Age and Geochemistry of the Lakang Formation Volcanic Rocks in the Tethyan Himalaya [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Jiang S H, Nie F J, Hu P, et al. 2006. An important spreading event of the Neo-Tethys Ocean during the Late Jurassic and Early Cretaceous: Evidence from zircon U-Pb SHRIMP dating on diabase in Nagarzê, southern Tibet [J]. Acta Geologica Sinica, 80(4): 522~527.
- Jiang Sihong, Nie Fengjun, Hu Peng, et al. 2007. Geochemical characteristics of the mafic dyke swarms in South Tibet [J]. Acta Geologica Sinica, 81(1): 60~71 (in Chinese with English abstract).
- Krogh T E. 1973. A low contamination method for hydrothermal decomposition of zircon and extraction of U and Pb for isotopic age determinations [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 37: 485~494.
- Lassiter J C and DePaolo D J. 1997. Plume/lithosphere interaction in the generation of continental and oceanic flood basalts: Chemical and isotopic constraints [A]. Mahoney J J and Coffin M F. Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism [C]. Washington: American Geophysical Union, 335~355.
- Li H B, Zhang Z C, Ernst R, et al. 2015. Giant radiating mafic dyke swarm of the Emeishan Large Igneous Province: Identifying the mantle plume centre [J]. Terra Nova, 27(4): 247~257.
- Li Hongbo, Zhang Zhaochong and Liu Linsu. 2010. Geometry of the mafic dyke swarms in Emeishan large igneous Province implications for mantle plume [J]. Acta Petrologica Sinica, 26(10): 3 143~3 152 (in Chinese with English abstract).
- Li Shuguang. 1993. Ba-Nb-Th-La diagrams used to identify tectonic environments of ophiolite [J]. Acta Petrologica Sinica, 9(2): 146~157 (in Chinese with English abstract).
- Liang Y Y, Deng J, Liu X F, et al. 2018. Major and trace element, and Sr isotope compositions of clinopyroxene phenocrysts in mafic dykes on Jiaodong Peninsula, southeastern North China Craton: Insights into magma mixing and source metasomatism [J]. Lithos, 302~303: 480~495.
- Ludwig K R. 1998. On the treatment of concordant uranium-lead ages [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 62: 655~676.
- Ludwig K R. 2000. Users manual for isoplot/ex: A geochronological toolkit for microsoft excel [A]. Berkeley Geochronology Center Special Publication [C]. Berkeley, CA, USA, 53.
- McDonough W F. 1990. Constraints on the composition of the continental lithospheric mantle [J]. Earth and Planetary Science Letters, 101(1): 1~18.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system [J]. Earth-Science Reviews, 37(3~4): 215~224.
- Pearce J A. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries [A]. Thorpe R S. Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks [C]. Chichester, England: John Wiley and Sons, 528~548.
- Pearce J A and Norry M J. 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y,

- and Nb variations in volcanic rocks [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 69(1): 33~47.
- Pei Yingru, Yang Zhusen, Zheng Yuanchuan, et al. 2017. The geochemical characteristics of the Pengcuolin adakitic dykes, southern Tibet: Petrogenesis and implications for regional metallogenesis [J]. Acta Petrologica Sinica, 33(2): 515~528 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Bibo. 2011. New Evidence of Plume Origin for the Comei Fragmented Large Igneous Province in Southeastern Tibet [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Qiu Bibo, Zhu Dichen, Zhao Zhidan, et al. 2010. The westward extension of Comei fragmented large igneous province in Southern Tibet and its implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 26(7): 2 207~2 216 (in Chinese with English abstract).
- Ren Chong. 2015. Geochemistry, Geochronology and its Geological Significances of Early Cretaceous Magmatic Rocks of Comei District in Tibet [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Ren Chong, Liu Shun, Zhu Lidong, et al. 2014. Geochemistry and zircon SHRIMP U-Pb dating and their tectonic significance for intermediate-basic dyke in the Gudui region, South Tibet [J]. Acta Geologica Sichuan, 34(4): 496~500 (in Chinese with English abstract).
- Rittmann A. 1957. On the serial character of igneous rocks [J]. Egyptian Journal of Geology, 1(1): 23~48.
- Rudnick R L and Gao S. 2003. The composition of the continental crust [A]. Holland H D and Turekian K K. Treatise on Geochemistry (Vol. 3) [C]. Oxford: Elsevier, 1~64.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D and Norry M J. Magmatism in Ocean Basins [C]. Geological Society Publication, 42: 313~345.
- Tang Juxing, Ding Shuai, Meng Zhan, et al. 2016. The first discovery of the low sulfidation epithermal deposit in Linzizong volcanics, Tibet: A case study of the Sinongduo Ag polymetallic deposit [J]. Acta Geoscientica Sinica, 37(4): 461~470 (in Chinese with English abstract).
- Tang Juxing, Li Fengji, Li Zhijun, et al. 2010. Time limit for formation of main geological bodies in Xiongcun copper-gold deposit, Xietongmen County, Tibet: Evidence from zircon U-Pb ages and Re-Os age of molybdenite [J]. Mineral Deposits, 29(3): 461~475 (in Chinese with English abstract).
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. The continental crust: Its composition and evolution [J]. Oxford: Blackwell Scientific Publication, 209 ~230.
- Thornton P C and Tuttle O F. 1960. Chemistry of igneous rocks, Differentiation index [J]. American Journal of Science, 258(9): 664~684.
- Tong Jinsong, Liu Jun, Zhong Huaming, et al. 2007. Zircon U-Pb dating and geochemistry of mafic dike swarms in the Lhazag area, southern Tibet, China, and their tectonic implications [J]. Geological Bulletin of China, 26(12): 1 654~1 664 (in Chinese with English abstract).
- Wang Genhou, Liang Dingyi, Liu Wencan, et al. 2000. Extensional movement and extending action in Southern Tibet since hercynian [J]. Geoscience, 14(2): 133~139 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yaying, Gao Li'e, Zeng Lingsen, et al. 2016. Multiple phases of cretaceous mafic magmatism in the Gyangze-Kangma area, Tethyan Himalaya, southern Tibet [J]. Acta Petrologica Sinica, 32(12): 3 572~3 596 (in Chinese with English abstract).
- Wang YWei. 2015. Geochemistry of Intrusive Rocks in Jiangzi-Kangmar Region, Tibet [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Wang Yunliang, Zhang Chengjiang and Xiu Shuzhi. 2001. Th/Hf-Ta/Hf identification of tectonic setting of basalts [J]. Acta Petrologica Sinica, 17(3): 413~421 (in Chinese with English abstract).
- Weaver B L. 1991. The origin of ocean island basalt end-member compositions: Trace element and isotopic constraints [J]. Earth and Planetary Science Letters, 104(2~4): 381~397.
- Wilson M. 1989. Igneous Petrogenesis [J]. London: Unwin Hyman, 1~466.
- Wright J B. 1969. A simple alkalinity ratio and its application to questions of non-orogenic granite genesis [J]. Geological Magazine, 106(4): 370~384.
- Xia Ying, Zhu Dichen, Zhao Zhidan, et al. 2012. Whole-rock geochemistry and zircon Hf isotope of the OIB-type mafic rocks from the Comei Large Igneous Province in southeastern Tibet [J]. Acta Petrologica Sinica, 28(5): 1 588~1 602 (in Chinese with English abstract).
- Yang Chao, Tang Juxing, Zheng Wenbao, et al. 2014. Study on zircon U-Pb geochronology and petrogeochemistry of diabase in Zhaxikang Zn-polymetallic deposit, southern Tibet [J]. Nonferrous (Mining Section), 66(6): 30~37 (in Chinese with English abstract).
- Zhang D Y, Zhang Z C, Santoshb M, et al. 2013. Perovskite and baddeleyite from kimberlitic intrusions in the Tarim large igneous province signal the onset of an end-Carboniferous mantle plume [J]. Earth and Planetary Science Letters, 361(1): 238~248.

- Zhang Jinjiang, Guo Lei and Zhang Bo. 2007. Structure and kinematics of the yalashangbo Dome in the northern hmalayan dome belt, China [J]. Chinese Journal of Geology, 42(1): 16~30 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong, Wang Fusheng, Hao Yanli, et al. 2004. Geochemistry of picrites and associated basalts from the Emeishan large igneous basalt province and constraints on their source region [J]. Acta Geologica Sinica, 78(2): 171~180.
- Zhong Huaming, Tong Jinsong, Xia Jun, et al. 2005. Characteristics and tectonic setting of volcanic rocks of the Sangxiu Formation in the southern part of Yangzho southern Tibet [J]. Geological Bulletin of China, 24(1): 72~79 (in Chinese with English abstract).
- Zhu D C, Chung S L, Mo X X, et al. 2009. The 132 Ma Comei-Bunbury large igneous province: Remnants identified in present-day southeastern Tibet and southwestern Australia [J]. Geology, 37(7): 583~586.
- Zhu Dichen, Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, et al. 2009. Permian and Early Cretaceous tectonomagmatism in southern Tibet and Tethyan evolution: New perspective [J]. Earth Science Frontiers, 16(2): 1~20 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Dichen, Pan Guitang, Mo Xuanxue, et al. 2005a. Geochemistry and petrogenesis of the Sangxiu Formation basalts in the central segment of Tethyan Himalaya [J]. Geochimica, 34(1): 7~19 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Dichen, Pan Guitang, Mo Xuanxue, et al. 2005b. SHRIMP U-Pb zircon dating for the dacite of the Sangxiu Formation in the central segment of Tethyan Himalaya and its implications [J]. Chinese Science Bulletin, 50(6): 563~568.
- Zhu Dichen, Pan Guitang, Mo Xuanxue, et al. 2006. Geochemistry and petrogenesis of the Triassic volcanic rocks in the east-central segment of Tethyan Himalaya [J]. Acta Petrologica Sinica, 22(4): 804~816 (in Chinese with English abstract).
- Zhu D C, Pan G T, Mo X X, et al. 2007. Petrogenesis of volcanic rocks in the Sangxiu Formation, central segment of Tethyan Himalaya: A probable example of plume-lithosphere interaction [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 29(2~3): 320~335.
- Zhu Dichen, Wang Liquan, Pan Guitang, et al. 2004. Discrimination of OIB-type magma and its significances of basalts from Middle Jurassic Zhela Formation in the central belt of Tethyan Himalayas, South Tibet [J]. Geological Science and Technology Information, 23(3): 15~24 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Dichen, Xia Ying, Qiu Bibo, et al. 2013. Why do we need to propose the Early Cretaceous Comei large igneous province in southeastern Tibet? [J]. Acta Petrologica Sinica, 29(11): 3 659~3 670 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 崔玉良, 王根厚, 梁 晓. 2017. 西藏玛依岗日地区辉长玢岩地球化学特征及其构造意义 [J]. 现代地质, 31(2): 258~266.
- 丁 枫, 高建国, 徐琨智. 2020. 西藏南部绒布地区基性岩脉岩石地球化学、年代学特征及地质意义 [J]. 岩石学报, 36(2): 391~408.
- 侯晨阳. 2017. 特提斯喜马拉雅带拉康组火山岩锆石年代学、地球化学特征及地质意义 [D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 江思宏, 聂凤军, 胡 朋, 等. 2007. 藏南基性岩墙群的地球化学特征 [J]. 地质学报, 81(1): 60~71.
- 李宏博, 张招崇, 吕林素. 2010. 峨眉山大火成岩省基性岩墙群几何学研究及其对地幔柱中心的指示意义 [J]. 岩石学报, 26(10): 3 142~3 152.
- 李曙光. 1993. 蛇绿岩生成构造环境的 Ba-Th-Nb-La 判别图 [J]. 岩石学报, 9(2): 146~157.
- 裴英茹, 杨竹森, 郑远川, 等. 2017. 藏南彭措林埃达克质岩脉的岩石成因及对区域成矿作用的启示 [J]. 岩石学报, 33(2): 515~528.
- 裘碧波. 2011. 藏东南措美残余大火成岩省地幔柱成因新证据 [D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 裘碧波, 朱弟成, 赵志丹, 等. 2010. 藏南措美残余大火成岩省的西延及意义 [J]. 岩石学报, 26(7): 2 207~2 216.
- 任 冲. 2015. 西藏措美地区早白垩世岩浆岩地质年代学、地球化学及地质意义 [D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 任 冲, 刘 顺, 朱利东, 等. 2014. 藏南古堆地区中基性脉岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及构造意义 [J]. 四川地质学报, 34(4): 496~500.
- 唐菊兴, 丁 帅, 孟 展, 等. 2016. 西藏林子宗群火山岩中首次发现低硫化型浅成低温热液型矿床——以斯弄多银多金属矿为例 [J]. 地球学报, 37(4): 461~470.
- 唐菊兴, 黎风佶, 李志军, 等. 2010. 西藏谢通门县雄村铜金矿主要体质形成时限: 锆石 U-Pb、辉钼矿 Re-Os 年龄的证据 [J]. 矿床地质, 29(3): 461~475.
- 童劲松, 刘 俊, 钟华明, 等. 2007. 藏南洛扎地区基性岩墙群锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及构造意义 [J]. 地质通报, 26(12): 1 654~1 664.
- 王根厚, 梁定益, 刘文灿, 等. 2000. 藏南海西期以来伸展运动及伸展作用 [J]. 现代地质, 14(2): 133~139.

- 王亚莹, 高利娥, 曾令森, 等. 2016. 藏南特提斯喜马拉雅带内江孜-康马地区白垩纪多期基性岩浆作用[J]. 岩石学报, 32(12): 3 572~3 596.
- 王一伟. 2015. 西藏江孜-康马地区侵入岩地球化学特征[D]. 成都: 成都理工大学.
- 汪云亮, 张成江, 修淑芝. 2001. 玄武岩类形成的大地构造环境的 Th/Hf-Ta/Hf 图解判别[J]. 岩石学报, 17(3): 413~421.
- 夏瑛, 朱弟成, 赵志丹, 等. 2012. 藏东南措美大火成岩省中 OIB 型镁铁质岩的全岩地球化学和锆石 Hf 同位素[J]. 岩石学报, 28(5): 1 588~1 602.
- 杨超, 唐菊兴, 郑文宝, 等. 2014. 藏南扎西康锌多金属矿床辉绿岩锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学特征研究[J]. 有色金属(矿山部分), (5): 30~37.
- 余光明, 王成善. 1990. 西藏特提斯沉积地质[M]. 北京: 地质出版社, 10~49.
- 张进江, 郭磊, 张波. 2007. 北喜马拉雅雅拉香波穹隆的构造组成和运动学特征[J]. 地质科学, 42(1): 16~30.
- 张招崇, 王福生, 郝艳丽, 等. 2004. 峨眉山大火成岩省中苦橄岩与其共生岩石的地球化学特征及其对源区的约束[J]. 地质学报, 78(2): 171~180.
- 钟华明, 童劲松, 夏军, 等. 2005. 藏南羊卓雍错南部桑秀组火山岩的特征及构造环境[J]. 地质通报, 24(1): 72~79.
- 朱弟成, 莫宣学, 赵志丹, 等. 2009. 西藏南部二叠纪和早白垩世构造岩浆作用与特提斯演化: 新观点[J]. 地学前缘, 16(2): 1~20.
- 朱弟成, 潘桂棠, 莫宣学, 等. 2005a. 特提斯喜马拉雅带中段桑秀组玄武岩的地球化学和岩石成因[J]. 地球化学杂志, 34(1): 7~19.
- 朱弟成, 潘桂棠, 莫宣学, 等. 2005b. 特提斯喜马拉雅桑秀组英安岩锆石 SHRIMP 年龄及其意义[J]. 科学通报, 50(4): 375~379.
- 朱弟成, 潘桂棠, 莫宣学, 等. 2006. 特提斯喜马拉雅带中段东部三叠纪火山岩的地球化学和岩石成因[J]. 岩石学报, 22(4): 804~816.
- 朱弟成, 王立全, 潘桂棠, 等. 2004. 藏南特提斯喜马拉雅带中段中侏罗统遮拉组 OIB 型玄武岩浆的识别及其意义[J]. 地质科技情报, 23(3): 15~24.
- 朱弟成, 夏瑛, 裴碧波, 等. 2013. 为什么要提出西藏东南部早白垩世措美大火成岩省[J]. 岩石学报, 29(11): 3 659~3 670.