

冈底斯弧西部林子宗群年波组火山岩锆石 U-Pb 年代学、岩石成因及其指示

呼建雄^{1,2}, 陈建林^{3,4*}, 姚 胜^{1,2}, 曾云川²,
雷 鸣³, 熊秋伟³, 刘希军⁵

(1. 陕西地矿研究院有限公司, 陕西 咸阳 712000; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 3. 中国科学院 广州地球化学研究所 同位素地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640; 4. 中国科学院 青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101; 5. 桂林理工大学地球科学学院 广西隐伏金属矿产勘查重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘 要: 冈底斯弧广泛发育的林子宗群火山岩被认为是新特提斯洋北向俯冲及随后印度与欧亚大陆相互碰撞作用过程的响应, 对探讨从大洋俯冲到大陆碰撞的转换有一定的指示意义。本研究通过冈底斯弧西部措勤地区杰萨错林子宗群年波组一段火山岩地球化学和锆石 U-Pb 年代学研究结果显示, 研究区形成于(59.24±0.70) Ma 的流纹岩在稀土元素中具有明显 Eu 负异常, 在原始地幔标准化蛛网图中显示 Nb、Ta、Ti 等元素的亏损, 以及高的 Y 含量和低的 La/Yb 比值。上述杰萨错年波组火山岩地球化学特征指示其形成于陆缘弧环境, 很可能为岛弧岩浆在上升过程中经历斜长石和钾长石等矿物分异的产物。同时, 研究区年波组酸性火山岩具有与冈底斯弧中西部年波组火山岩相类似的主元素、微量元素含量及其分布范围(如 K₂O、Th 等的含量), 暗示它们有着相似的物质源区。结合前人的研究内容, 初步认为冈底斯弧东西向广泛发育的林子宗群年波组火山岩几乎同期形成于陆缘弧环境中, 为北向俯冲的新特提斯大洋板片回转的产物。

关键词: 冈底斯弧; 林子宗群; 年波组; 锆石 U-Pb; 流纹岩

中图分类号: P595; P597; P581 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2018)06-0699-13

DOI: 10.19700/j.0379-1726.2018.06.010

Zircon U-Pb geochronology, genesis for Nianbo Formation volcanic rocks of Linzizong Group in the western part of Gangdese arc and its implication

HU Jian-xiong^{1,2}, CHEN Jian-lin^{3,4*}, YAO Sheng^{1,2}, ZENG Yun-chuan²,
LEI Ming³, XIONG Qiu-wei³ and Liu Xi-jun⁵

1. Academy of Regional Geological Survey and Mineral Resources Exploration of Shaanxi Co. Ltd., Xianyang 712000, China;
2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China;
3. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;
4. CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China;
5. Guangxi Key Laboratory of Hidden Metallic Ore Deposits Exploration, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

Abstract: The volcanic successions of the Linzizong Group are widely distributed along the Gangdese Arc, which has been related to the northward subduction of the Neotethyan oceanic slab and subsequent collision between the Indian and Eurasian continents. It is important to understand the change from subduction of oceanic slab to continental collision. In this paper, new geochronology and geochemical data have been presented for the rhyolite of the Nianbo Formation, which cropped from Jiesacuo of the Cuoqin region, western Gangdese Arc. Zircon U-Pb dating suggests that they were generated at (59.2 ± 0.7) Ma. The studied samples show high Y contents and low La/Yb ratios, a remarkable Eu anomaly, and depletion in high field strength elements (HFSEs: e.g. Nb, Ta, Zr, Hf,

收稿日期(Received): 2017-11-23; 改回日期(Revised): 2018-02-07; 接受日期(Accepted): 2018-06-13

基金项目: 国家重点研发计划国家深部专项专题(2016YFC0600305); 中国地质大调查冈底斯西北缘晚白垩世斑岩铜矿带综合调查(DD20160024-06); 国家自然科学基金(41573024, 41873037); 广西隐伏金属矿产勘查重点实验室开放基金(17-140-27-K01)

作者简介: 呼建雄(1984-), 男, 高级工程师, 主要从事区域地质矿产调查工作。E-mail: 281405076@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author): CHEN Jian-lin, E-mail: lzdxchen@gig.ac.cn; Tel: +86-20-85290753

and Ti), indicating that the rhyolite is a result of fractional crystallization of plagioclase and potash feldspar of the primitive magma generated in a continental marginal arc. Additionally, the similarly variable concentration range of K_2O , Th, and other elements of the volcanics of the Nianbo Formation in western, middle, and eastern Gangdese arc indicates that they originated from the same source. Considering previous studies, it is suggested that the volcanic rocks of the Nianbo Formation of the Linzizong Group developed at the same period, triggered by a rollback of the north-dip Neotethyan oceanic slab.

Key words: Gangdese Arc; Linzizong Group; Nianbo Formation; zircon U-Pb; rhyolite.

0 引言

广泛发育于冈底斯弧南部的林子宗群火山岩作为印度-欧亚大陆碰撞作用地质响应,蕴含着从晚白垩世-始新世时期新特提斯洋北向俯冲以及随后印度与欧亚大陆碰撞过程的重要信息,因而备受关注并取得了许多重要的进展^[1-17]。如,通过对冈底斯弧东部林周盆地林子宗群典型剖面的研究,将其由下至上依次划分为典中组、年波组和帕那组,并确定了这些地层的年代学格架(典中组为 69~58 Ma, 年波组为 57~53 Ma, 帕那组为 54~44 Ma)。然而,最近的研究表明,冈底斯弧西部和东部的林子宗群火山岩在形成时代上具有明显的差异性,同时认为西部的林子宗群火山岩相对于东部的林子宗群火山岩源于更加富集壳源物质^[7,9,15,18]。总体来说,相对于冈底斯弧东部林子宗群火山岩的研究进展,冈底斯弧西部的林子宗群火山岩的研究明显不足^[9,15,18]。本文拟

在 1 5 万杰萨错区域地质调查成果的基础上^[19],对冈底斯弧西部措勤杰萨错林子宗群年波组一段火山岩进行年代学和地球化学研究,探讨该地区年波组火山岩的成因,并与前人发表的有关冈底斯弧中、东部年波组火山岩进行对比,以期为理解青藏高原南部新特提斯洋北向俯冲及其印度与欧亚大陆碰撞过程中其岩浆岩的响应提供时代和地球化学约束。

1 区域构造背景

冈底斯弧位于欧亚大陆的前缘,其南部和北部分别被雅鲁藏布江缝合带和班公湖-怒江缝合带将其与喜马拉雅地块和羌塘地块分开。根据基底性质和构造演化的差异,冈底斯弧从北到南可以划分为北冈底斯带、中冈底斯弧带和南冈底斯带(即传统意义上的冈底斯)^[20-23](图 1a)。林子宗群火山岩主要分布在冈底斯弧南部,形成东起拉萨地块东部、西至狮泉河,东西向展布长约 1200 km 和南北向宽约 100 km

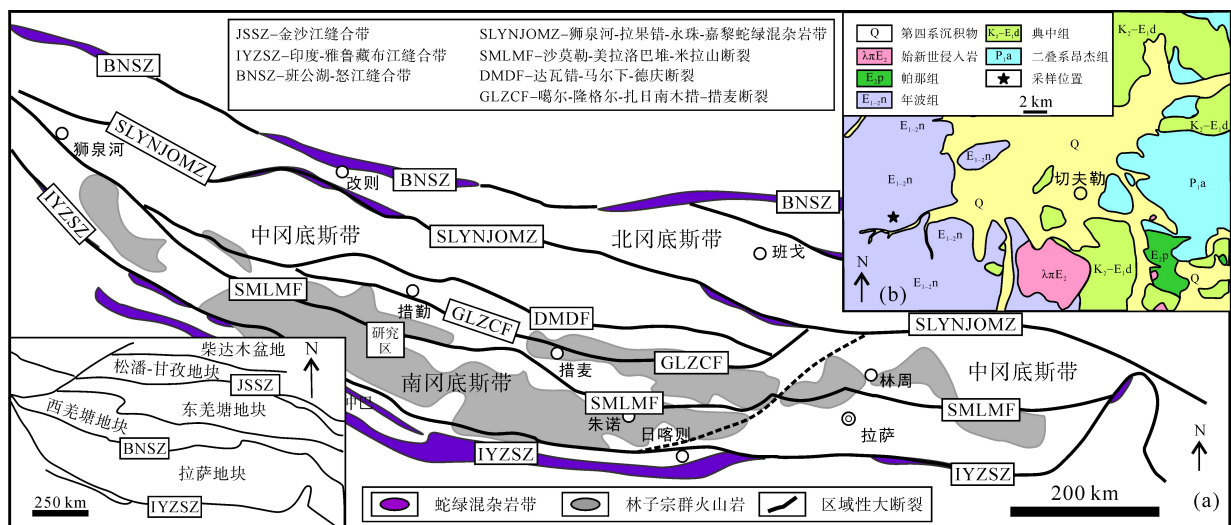


图 1 西藏冈底斯弧林子宗群火山岩分布简图(a, 据付文春等^[15]修改)及冈底斯弧西部措勤地区杰萨错地质简图(b, 据 1 5 万杰萨错地质填图^[19])

Fig. 1 Simplified map showing distribution of the volcanic rocks of Linzizong Formation in Gangdese arc, Tibet (a), and sketch of the geological map of Jiesacuo area, Western Gangdese Arc (b)

岩浆弧带, 为安第斯型的冈底斯弧岩浆带重要的组成部分。典型的林子宗群火山岩剖面位于冈底斯弧东部的林周盆地, 按照时代的演化和岩石学特征将其从下到上分为典中组、年波组和帕那组。其中典中组以流纹质-英安质岩浆为主, 随后以安山质岩浆为主体, 最后以双峰式岩浆结束; 年波组也是以流纹质-英安质岩浆开始, 并以钾玄质和钾质基性岩浆结束; 帕那组火山岩以流纹质岩浆活动为主体, 也以钾玄质岩浆活动结束^[2-8,12]。林子宗群火山岩总体上具有岛弧火山岩的地球化学特征, 形成时代主要集中于古新世到始新世之间^[2-8]。

本文采集的样品位于措勤杰萨错地区(图 1b), 根据 1:5 万夏日勒嘎和岗琼多勒图幅区域地质调查资料, 年波组火山岩在该区域大量分布。本研究的样品位于年波组一段, 与下伏典中组地层为喷发不整合接触, 其主要组成为灰色-灰白色块状流纹岩、灰白色块状流纹质角砾熔岩、紫红色块状流纹质凝灰熔岩、灰色块状流纹质火山角砾岩、灰白色块状流纹质集块岩、灰白色含角砾岩屑晶屑凝灰岩, 局部地段可见砂岩夹层及底砾岩等。采集的样品主体为流纹岩, 其主要为灰色, 斑状结构, 基质具霏细结构, 块状构造或流纹构造(图 2)。斑晶含量为 10%~15%, 基质含量为 85%~90%。斑晶主要为石英、斜长石和钾长石; 石英大小为 0.2~3.0 mm, 表面干净光洁, 大多被熔蚀成浑圆状, 干涉色为一级灰白; 斜长石, 大小为 0.2~4.0 mm, 弱蚀变并具有黏土化表面; 钾长石, 大小为 0.2~4.0 mm, 表面弱黏土化, 干涉色为一级灰白, 部分长石可见熔蚀反应边。基质中长英质矿物大多小于 0.05 mm, 个别达 0.1 mm, 部分长石绢云母化, 不同粒度的长英质矿物成不同条带分布, 形成流纹构造。

2 分析方法

样品的主元素和微量元素分析在核工业二〇三研究所分析测试中心完成。主元素采用 X 射线荧光熔片法(XRF)测定, 分析精度优于 5%, 其中 FeO 和 LOI 采用湿化学分析法测定。稀土元素和微量元素分别采用阳离子交换分离-电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-AES)和电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)完成, 分析精度优于 10%。

本研究选取了位于杰萨错西部的年波组一段流纹岩(D0246-1)进行定年。锆石制靶、阴极发光图像(CL)采集以及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年相关测试分析均在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。将选取的锆石在双目镜下粘贴在载玻片的双面胶上, 然后用环氧树脂灌注, 待固结后抛磨制成锆石激光靶。在进行 U-Pb 同位素测年之前, 对制好的样品靶进行了阴极发光(CL)、反射光和透射光显微照相综合分析, 以便了解锆石形态及其内部结构, 进而确定测点的具体位置。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 原位定年使用仪器为 Agilent 7500a, 激光剥蚀系统为 Micro Las 公司的 Geolas 200 M。测试中使用的激光束斑直径为 30 μm 。锆石 U-Pb 年龄采用国际标准锆石 91500 作为外标, 每隔 5 个测点测定一次标样 91500; 元素含量采用 NIST610 作为外标, ^{29}Si 作内标, 每隔 5 个测点测定一次标样 NIST610, 从而保证标样和测试样品的仪器条件完全一致, 详细实验步骤和方法参见 Yuan *et al.*^[24]。数据处理采用 Glitter 4.0 软件, 并按照 Anderson^[25]的方法进行普通铅校正, 年龄计算及相关谐和图制作等采用 Ludwig^[26]的 Isoplot3.75 软件完成。

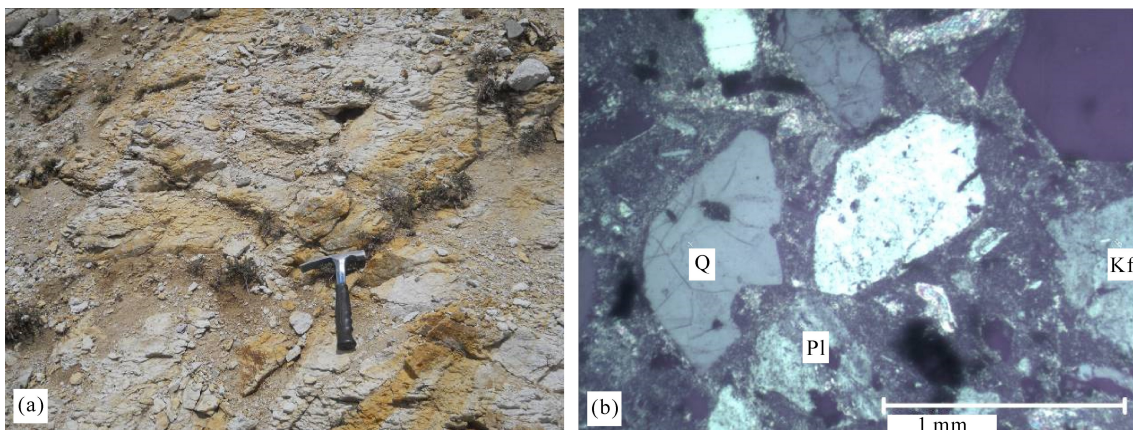


图 2 杰萨错地区年波组火山岩野外露头(a)和镜下显微照片(b) (Q-石英; Pl-斜长石; Kf-钾长石)

Fig.2 Field photo (a) and micrograph (b) of Nianbo Formation volcanics

3 测试结果

3.1 锆石 U-Pb 定年结果

样品 D0246-1 中的锆石颗粒为无色透明并呈半自

形-自形, 具有明显的环带结构(图 3), 锆石具有较高的 Th/U 比值(0.60~0.90) (表 1), 表明这些锆石为典型的岩浆锆石。在谐和图上, 所有样品点都落在了谐和线上, 获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值为(59.2 ± 0.7) Ma (MSWD = 0.13) (图 3), 代表火山岩形成的时代。

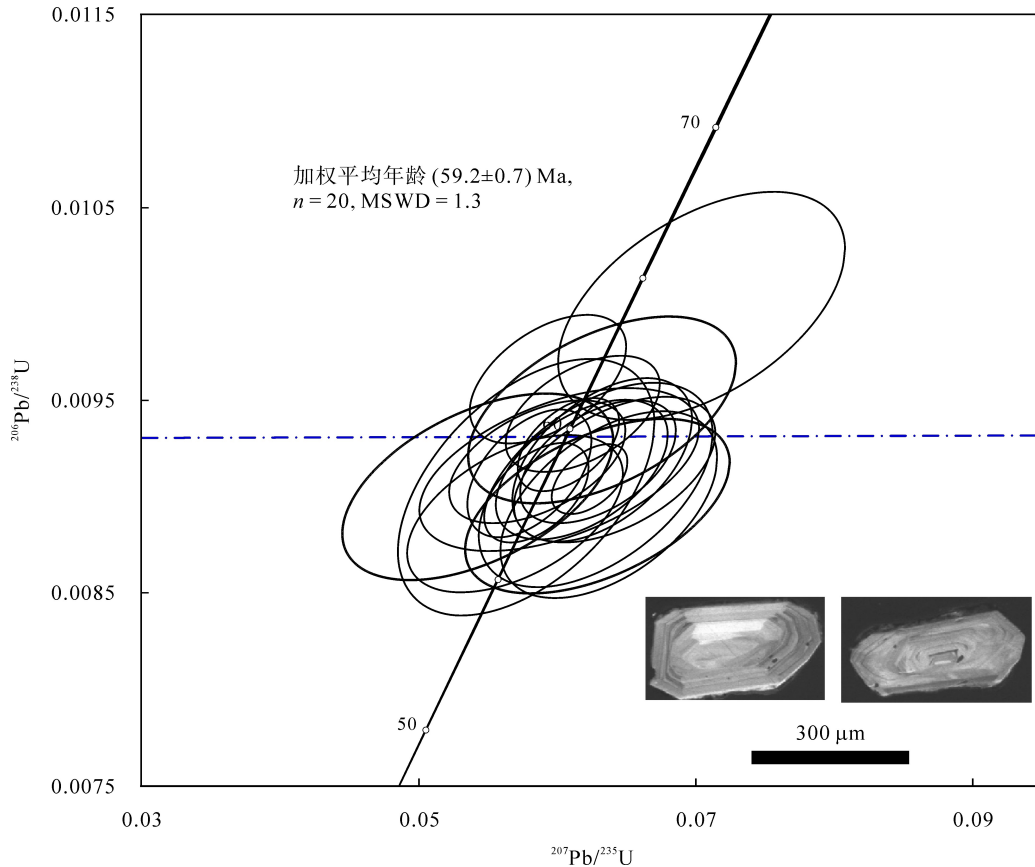


图 3 杰萨错地区林子宗群年波组流纹岩锆石 U-Pb 谐和图

Fig.3 Zircon U-Pb concordia diagram of rhyolite for the Nianbo Formation of the Linzizong Group

表 1 冈底斯弧西部措勤地区林子宗群年波组火山岩(D0246-1)锆石 U-Pb 同位素测定结果

Table 1 U-Th-Pb isotopic composition of zircons from the volcanic rocks (D0246-1) of the Nianbo Formation, Linzizong Group, in Cuoqin area, western Gangdese Arc

分析点号	含量 (μg/g)			Th/U	同位素比值				年龄 (Ma)			
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	± 1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	± 1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	± 1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	± 1σ
1	4	84	111	0.76	0.06008	0.00666	0.00914	0.00028	59	6	59	2
2	6	110	151	0.73	0.05769	0.00612	0.00905	0.00044	57	6	58	3
3	20	329	547	0.60	0.06224	0.00181	0.00909	0.00012	61	2	58	1
4	4	79	95	0.83	0.05417	0.00646	0.00905	0.00032	54	6	58	2
5	4	85	115	0.74	0.05689	0.00514	0.00891	0.00027	56	5	57	2
6	9	206	255	0.81	0.05844	0.00249	0.00902	0.00017	58	2	58	1
7	7	162	189	0.86	0.06316	0.00429	0.00919	0.00028	62	4	59	2
8	12	198	313	0.63	0.05793	0.00295	0.00912	0.00022	57	3	59	1
9	6	116	158	0.73	0.06272	0.00555	0.00906	0.00035	62	5	58	2
10	6	122	157	0.78	0.06287	0.00370	0.00918	0.00021	62	4	59	1
11	10	214	270	0.79	0.06073	0.00241	0.00927	0.00016	60	2	59	1
12	5	92	131	0.70	0.06171	0.00410	0.00914	0.00024	61	4	59	2
13	4	83	111	0.74	0.06285	0.00628	0.00895	0.00030	62	6	57	2

(续表 1)

分析 点号	含量 ($\mu\text{g/g}$)			Th/U	同位素比值				年龄 (Ma)			
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$
14	6	114	171	0.67	0.05851	0.00421	0.00918	0.00021	58	4	59	1
15	4	74	115	0.64	0.06369	0.00516	0.00896	0.00032	63	5	58	2
16	8	185	206	0.90	0.06179	0.00367	0.00943	0.00020	61	4	61	1
17	4	79	109	0.73	0.06408	0.00481	0.00914	0.00025	63	5	59	2
18	2	40	59	0.68	0.07034	0.00683	0.00999	0.00039	69	6	64	2
19	6	113	149	0.76	0.05929	0.00371	0.00961	0.00022	58	4	62	1
20	5	108	128	0.85	0.06316	0.00637	0.00945	0.00032	62	6	61	2

3.2 地球化学特征

措勤杰萨错林子宗群年波组样品主元素和微量元素测试结果见表 2。研究区林子宗群年波组火山岩为亚碱性系列, 主要为流纹岩(图 4a 和 4b); 在 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图(图 4c) 中, 研究区年波组火山岩位于钙碱性-高钾钙碱性范围之内, 为铝质-过铝质系列(图 4d), 具有与措麦地区^[7,18]和冈底斯弧中部地区(朱诺地区^[30])年波组相似分布范围; 同时研究区年波组并没有出现基性端元, 即并没有出现类似于其他地区如冈底斯弧东部(如林周盆地)和最西部(狮

泉河^[15])年波组双峰式火山岩的特征。在哈克图解(图 5)中, 研究区年波组火山岩同冈底斯弧东部林周盆地、中部朱诺地区和西部措麦地区相比, 除了具有相对较低的 MgO 、 P_2O_5 含量外, 其余主元素具有相似分布范围。研究区年波组火山岩具有与林周盆地、朱诺以及措麦地区相似的稀土元素球粒陨石标准化分布模式和微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 6), 如具有相似的轻重稀土元素分异明显的特征, 相似的 Nb、Ta、Ti 等高场强元素含量以及明显的 Eu 负异常等, 指示它们有着相似的源区和演化过程。

表 2 冈底斯弧西部杰萨错地区年波组火山岩主元素(%)和微量元素($\mu\text{g/g}$)测试结果

Table 2 Whole-rock major (%) and trace ($\mu\text{g/g}$) element contents of the Nianbo Formation volcanic rocks from Jiesacuo, western Gangdese Arc

样号	D0629/1	D1378/1	D1406/15	D1546/17	D2395/17	D2395/27	D3513/8	GQDL/1	GQDL/2
SiO_2	78.09	73.12	77.03	78.59	74.84	73.74	75.15	76.54	75.03
Al_2O_3	13.06	14.09	12.44	11.87	13.28	13.92	13.22	12.49	12.74
Fe_2O_3	1.73	2.61	1.81	1.45	1.87	2.99	1.33	2.19	3.10
MgO	0.12	0.13	0.14	0.04	0.24	0.19	0.13	0.24	0.28
CaO	0.06	0.78	0.76	0.60	1.07	1.36	0.88	1.32	1.36
Na_2O	2.36	3.76	3.16	2.9	3.54	3.33	3.62	3.46	2.82
K_2O	2.84	4.89	4.17	3.39	4.21	3.09	4.09	3.15	3.06
P_2O_5	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.04	0.03
MnO	0.02	0.09	0.04	0.04	0.04	0.09	0.01	0.05	0.09
TiO_2	0.13	0.16	0.12	0.07	0.19	0.2	0.19	0.22	0.19
CO_2	0.06	< 0.10	< 0.10	0.43	< 0.10	< 0.10	0.14	0.12	0.93
LOI	2.16	0.15	0.21	1.62	0.54	0.88	0.77	0.84	1.77
Total	100.65	99.90	100.00	101.02	99.95	99.92	99.55	100.66	101.40
Sc	5.7	4.7	3.9	4.3	4.0	9.1	6.5	7.0	7.9
V	6.4	6.9	7.2	2.1	8.9	6.4	9.7	13.8	13.4
Cr	3.2	4.5	4.0	4.8	4.8	1.9	3.0	3.8	6.0
Co	0.74	2.17	1.48	0.61	2.06	1.25	0.56	1.57	3.22
Ni	2.49	4.09	3.39	1.48	3.14	2.03	1.22	3.30	3.90
Ga	18.4	17.3	14.4	16.3	15.6	19.0	16.4	17.2	15.6
Cs	11.4	4.70	7.96	4.55	5.45	13.3	4.55	4.98	9.96
Rb	184	187	173	188	162	140	173	150	172
Ba	392	709	399	371	410	197	763	622	396
Th	15.4	10.1	38.1	15.2	10.5	13.6	8.08	14.4	17.1
U	4.15	2.48	2.05	3.42	2.54	3.22	1.30	2.52	2.67
Nb	15.6	12.0	8.77	24.1	11.0	15.0	5.61	13.3	13.8

(续表 2)

样号	D0629/1	D1378/1	D1406/15	D1546/17	D2395/17	D2395/27	D3513/8	GQDL/1	GQDL/2
Ta	4.19	1.07	1.04	3.23	1.72	2.26	1.09	3.17	2.19
La	44.3	40.3	26.6	21.0	30.2	32.9	28.8	35.9	28.1
Ce	86.4	81.0	56.9	43.6	58.1	64.5	57.2	71.3	55.9
Pb	18.2	30.5	24.9	24.8	28.7	44.4	24.5	27.8	12.0
Pr	9.42	9.25	5.94	5.34	6.63	7.91	7.29	8.13	6.14
Sr	23.5	107	116	55.4	121	119	127	155	66.1
Nd	36.9	33.2	20.6	20.6	22.3	29.4	27.1	32.1	23.7
Zr	184	166	95.9	103	110	181	119	124	146
Hf	4.40	3.36	1.38	3.46	2.26	4.84	1.04	3.27	2.28
Sm	7.86	5.93	3.88	5.34	3.86	6.26	5.48	6.51	4.81
Eu	1.18	0.87	0.51	0.53	0.69	1.16	0.91	1.27	0.77
Gd	6.40	5.40	3.46	4.58	3.30	5.47	4.41	6.46	4.81
Tb	1.17	1.03	0.68	1.00	0.61	1.20	0.83	1.17	0.77
Dy	5.67	5.22	3.68	4.78	3.33	6.60	4.14	5.60	4.20
Y	36.2	27.7	22.5	32.8	20.4	36.5	20.8	38.5	25.5
Ho	1.42	1.21	0.90	1.31	0.84	1.59	0.94	1.50	0.99
Er	3.91	3.47	2.71	3.49	2.54	4.67	2.66	4.32	2.96
Tm	0.69	0.53	0.45	0.56	0.41	0.72	0.39	0.65	0.46
Yb	4.14	3.38	2.98	3.70	2.78	4.56	2.52	4.18	2.93
Lu	0.70	0.52	0.44	0.63	0.44	0.68	0.37	0.64	0.49

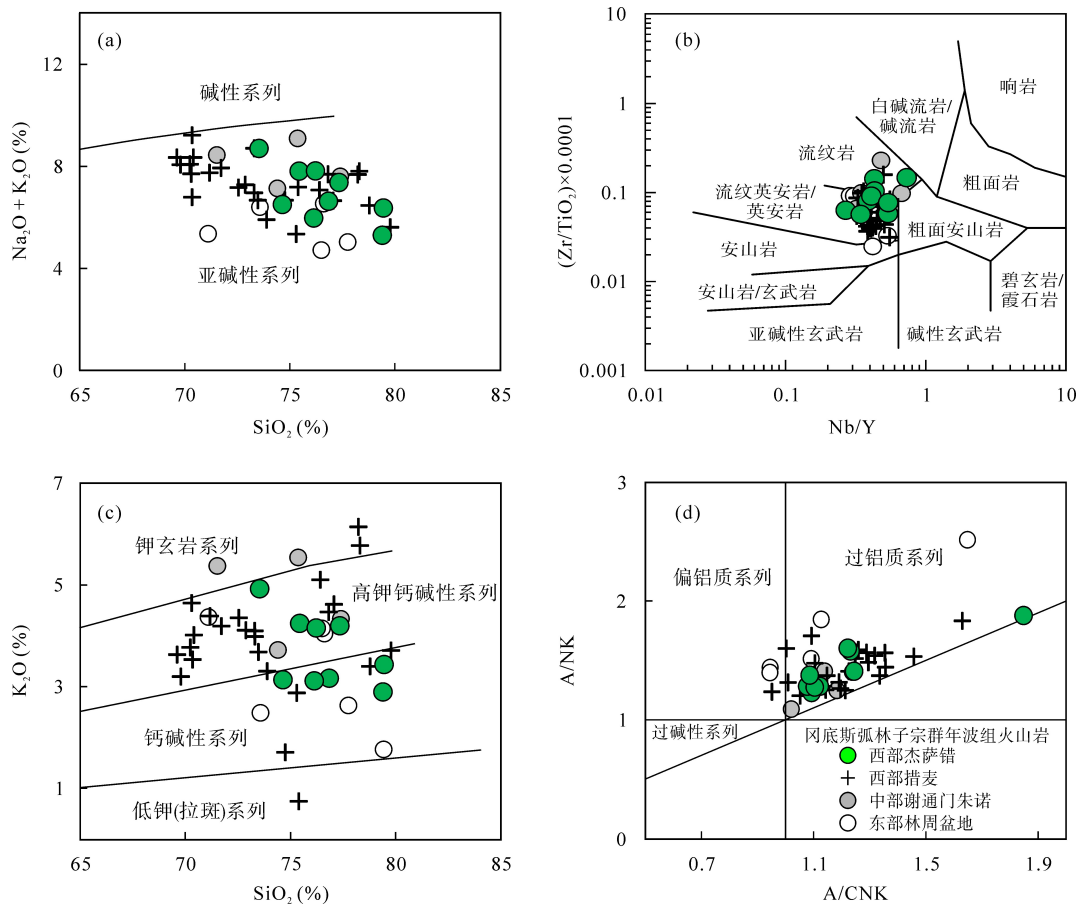


图 4 冈底斯弧东部(林周盆地)、中部(朱诺)和西部(措美和杰萨错)年波组流纹岩($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)- SiO_2 (a)、 Zr/TiO_2 - Nb/Y (b)、 K_2O - SiO_2 (c)和 A/NK - A/CNK (d)图解(数据引自文献[7, 12, 27-31])

Fig.4 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)- SiO_2 (a), Zr/TiO_2 - Nb/Y (b), K_2O - SiO_2 (c), and A/NK - A/CNK (d) diagrams for Nianbo Formation rhyolites from Eastern, Middle, and Western Gangdese Arc (Data from references [7, 12, 27-31])

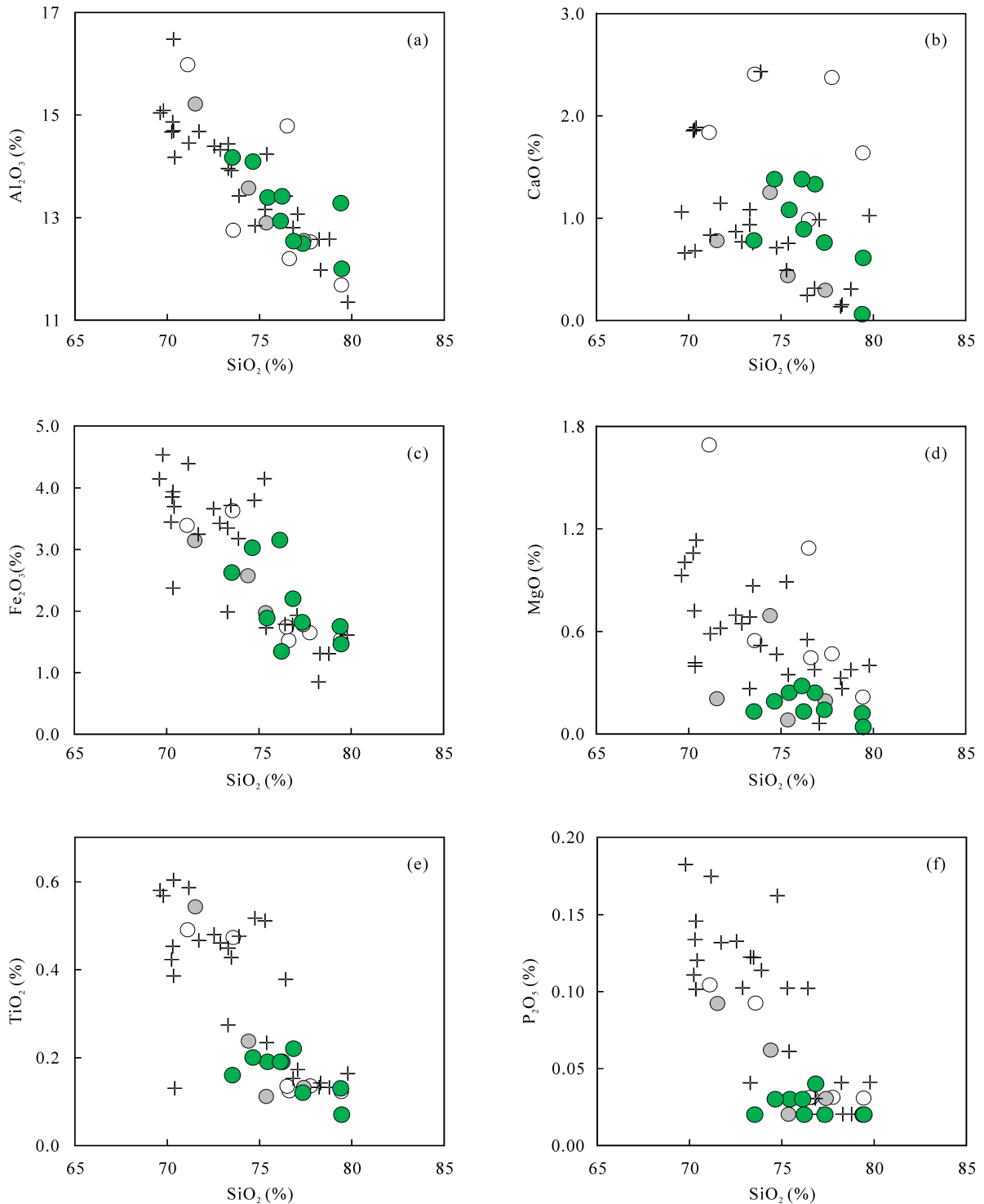


图 5 冈底斯弧东部(林周盆地)、中部(朱诺)和西部(措美和杰萨错)年波组流纹岩主元素哈克图解(数据引自文献[7, 12, 27-31])
 Fig.5 Harker diagrams for major element concentrations vs. SiO₂ for the rhyolite of Nianbo Formation from Eastern, Middle, and Western Gangdese Arc (Data from references [7, 12, 27-31])

4 讨论

4.1 冈底斯弧东西向上林子宗群火山岩形成时代

前人的研究结果显示林子宗群火山活动包括三

个旋回, 即从早到晚分别为典中组、年波组和帕那组。近年来对林子宗群火山岩高精度的年代学研究(单矿物或全岩 Ar-Ar、锆石 U-Pb 年龄)的总结结果表明, 冈底斯弧东部(林周盆地、羊应、乌郁、马区、则学等地区)林子宗群火山岩三个组形成时代从下

到上分别为 64.4~59.7 Ma (典中组)、56.5~52.7 Ma (年波组)和 53.5~38.7 Ma (帕那组)^[3,5,6,16,33,34]; 冈底斯弧中部(朱诺、桑桑等地区)林子宗群火山岩三个组形成时代分别为 64.8 Ma (典中组)、59.7 Ma (年波组)和 49.8~48.9 Ma (帕那组)^[30,35]; 冈底斯弧西部(措勤、嘎夏玛、狮泉河等地区)林子宗群火山岩三个组形成时代分别为 70.0~64.3 Ma (典中组)、47.9~42.2 Ma (年波组)和 53.9 Ma (帕那组)^[9,15,27,36]。上述冈底斯弧东、中和西部林子宗群火山岩形成年代研究结果表明,中东部林子宗群火山岩有着很好的时代连续性;

而西部的林子宗群年波组火山岩相对帕那组火山岩有着明显年轻的形成时代;另外,2010年于枫等^[18]通过对措麦地区年波组火山岩的研究认为其形成于 70~65 Ma, 指示其与西部其他地区典中组相同的形成时代。

本研究在冈底斯弧西部的措勤杰萨错地区获得了年波组一段火山岩形成时代为(59.2±0.7) Ma, 同时在研究区年波组二段火山岩获得的锆石 U-Pb 年龄为(57.6 ± 0.4) Ma^[19]; 即研究区年波组火山岩形成的时代(59.2~57.6 Ma)与东部年波组(56.5~54.0 Ma)和

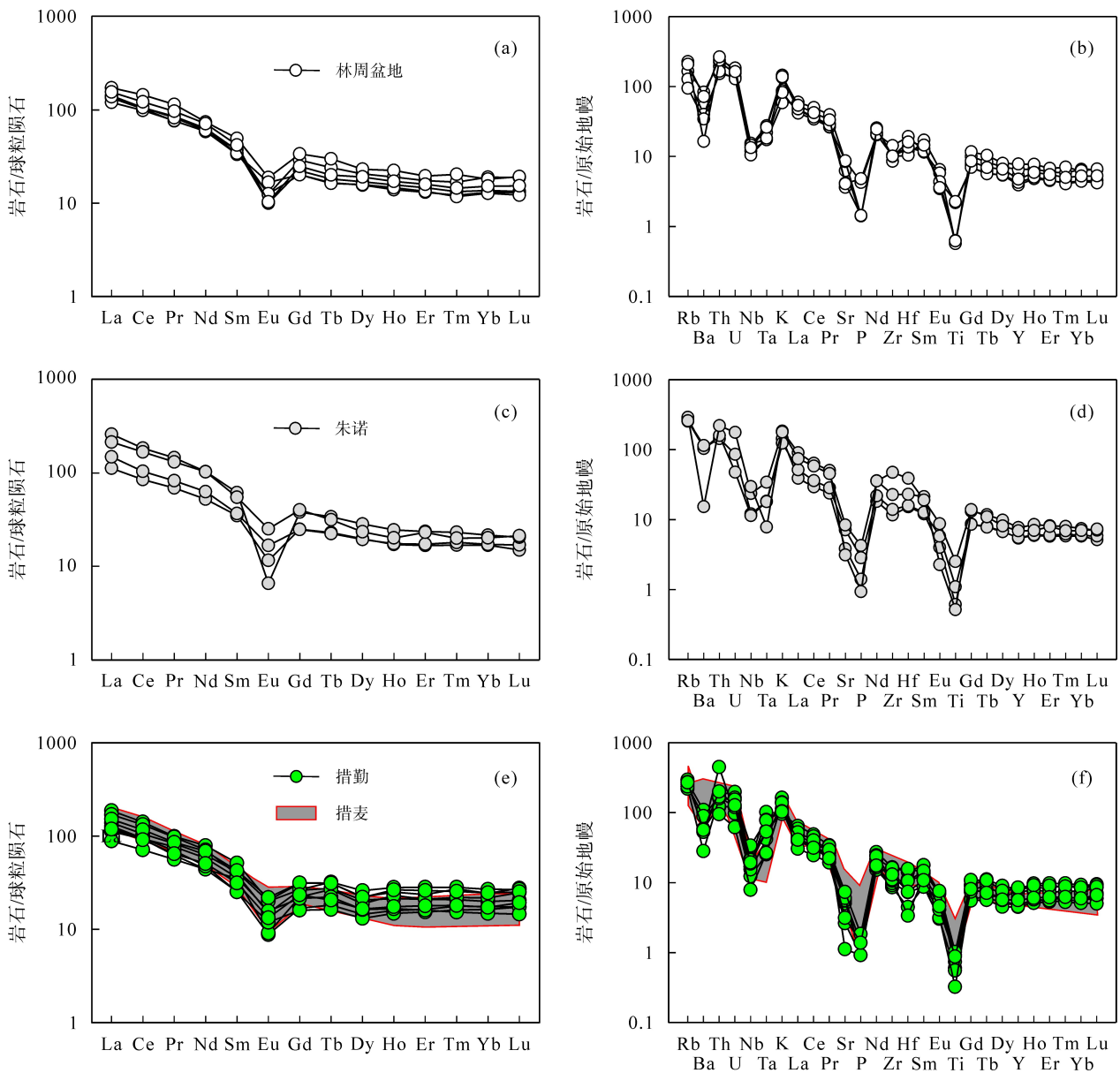


图6 冈底斯弧东部(林周盆地)、中部(朱诺)和西部(措美和杰萨错)年波组流纹岩稀土元素球粒陨石标准化分布模式(a、b、c)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(d、e、f) (标准化值据 Sun *et al.*^[32]; 数据引自文献[7,12,27~31])

Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns (a, b, c) and primitive mantle normalized spider (d, e, f) diagrams for the rhyolites of Nianbo Formation from Eastern, Middle, and Western Gangdese Arc (normalizing values from Sun *et al.*^[32], data from references [7,12,27~31])

中部年波组(59.7 Ma)具有相近的形成时代, 而与于枫等^[18]报道西部措麦地区年波组火山岩则有一定的差距(70~65 Ma)。虽然前人的研究认为, 冈底斯弧东西向上林子宗群火山岩在形成时代上具有一定的差异性(如于枫等^[18]、付文春等^[15]), 但是从上述研究结果来看, 林子宗群火山岩中东部和西部的部分地区至少在年波组火山岩是近乎同期形成的。

4.2 冈底斯弧林子宗群年波组火山岩形成机制及其构造背景

研究区林子宗群年波组一段火山岩为钙碱性铝质-过铝质火山岩(图 3), 通常认为过铝质火山岩为变沉积岩部分熔融的产物(陈建林等^[37]); 然而从主元素 P_2O_5 - SiO_2 变化特征(图 5)、Rb/Ba-Rb/Sr 相关图(图 7)以及 $(K_2O + Na_2O)/CaO$ -(Zr + Nb + Ce + Y)、 $TFeO/MgO$ -(Zr + Nb + Ce + Y)相关图及其变化范围(图 8), 指示其并非是变沉积岩部分熔融的产物, 而是变质火山岩部分熔融并发生过一定分异的结果。结合狮泉河林子宗群年波组火山岩包含有玄武安山岩组成^[15], 指示这些西部的年波组火山岩很可能为俯冲区域底侵的镁铁质岩浆与上覆的陆缘弧发生相互作用, 并引起部分活动大陆边缘弧中上地壳物质发生部分熔融的产物, 这与前人的研究结果^[12-14]认为林子宗群中酸性火山岩为深部地幔物质底侵并引起上部壳源物质发生部分熔融的产物相一致。2012 年 Ji *et al.*^[39]和 2014 年 Ma *et al.*^[40]认为, 冈底斯弧南部在古新世时期为正常的岛弧环境, 而在始新世早期印度与欧亚大陆开始碰撞才导致冈底斯弧南部地

壳开始加厚, 暗示研究区年波组流纹岩很可能形成于正常陆缘弧构造背景中。上述地球化学特征, 结合主元素变化特征、Eu 的明显负异常(图 4)以及 Ba、Rb/Sr 与 Sr 之间的变化趋势, 指示研究区年波组火山岩为弧岩浆上升过程中经历了铁钛氧化物、斜长石和钾长石等矿物分异演化的产物(图 4 和图 9), 并很可能受到一定程度的中上地壳物质的混染。另外, 研究区年波组酸性火山岩具有与冈底斯弧中西部年波组火山岩相类似的主元素、微量元素含量及其分布范围, 如 K_2O 、Th 等的含量, 指示它们有着相似的物质源区或形成过程(图 7 和图 8)。

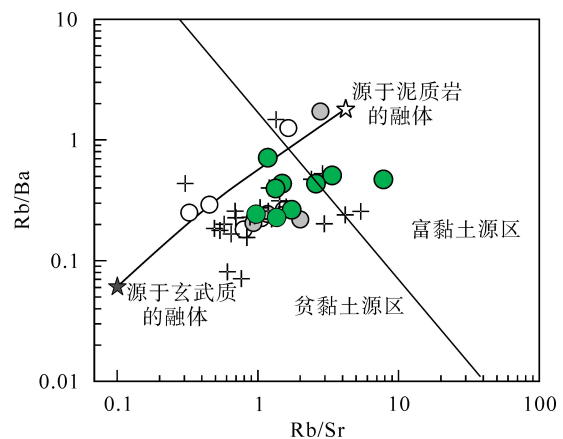


图 7 冈底斯弧东部(林周盆地)、中部(朱诺)和西部(措美和杰萨错)年波组流纹岩 Rb/Ba-Rb/Sr 相关图
(数据引自文献[7,12,27-31])

Fig.7 Rb/Ba-Rb/Sr diagram for rhyolites of the Nianbo Formation from Eastern, Middle, and Western Gangdese Arc
(Data from references [7,12,27-31])

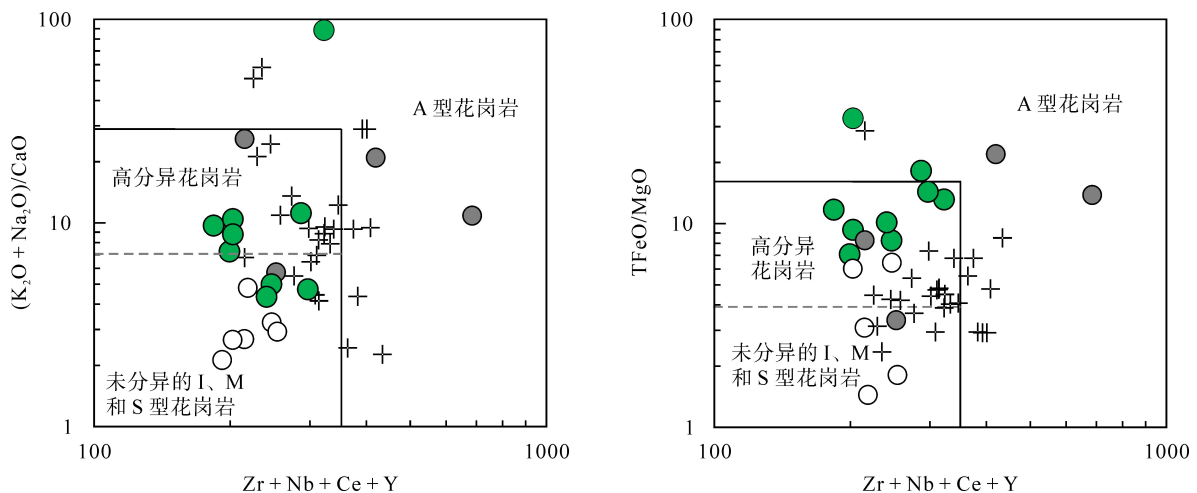


图 8 冈底斯弧东部(林周盆地)、中部(朱诺)和西部(措美和杰萨错)年波组流纹岩 $(K_2O + Na_2O)/CaO$ -(Zr + Nb + Ce + Y)和 $TFeO/MgO$ -(Zr + Nb + Ce + Y)相关图(底图据 Whalen *et al.*^[38], 数据引自文献[7, 12, 27-31])

Fig.8 $(K_2O + Na_2O)/CaO$ -(Zr + Nb + Ce + Y) and $TFeO/MgO$ -(Zr + Nb + Ce + Y) diagrams for the rhyolites of Nianbo Formation from Eastern, Middle, and Western Gangdese Arc (Data from references [7, 12, 27-31])

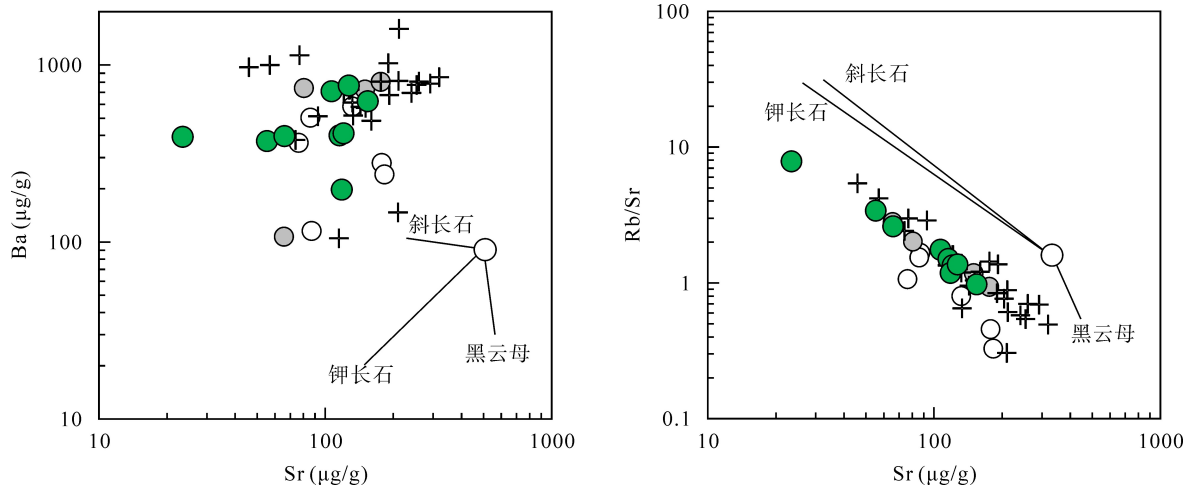


图9 冈底斯弧东部(林周盆地)、中部(朱诺)和西部(措美和杰萨错)年波组流纹岩 Sr-Ba 和 Sr-Rb/Sr 相关图
(底图据 Wang *et al.*^[41]; 数据引自文献[7,12,27-31])

Fig.9 Ba vs. Sr and Rb/Sr vs. Sr diagrams for rhyolites of Nianbo Formation from Eastern, Middle, and Western Gangdese Arc
(After Wang *et al.*^[41]; Data from references [7,12,27-31])

在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图6)中, 研究区年波组火山岩具有与冈底斯弧林子宗群年波组中酸性火山岩相一致的分布特征, 如 Nb、Ta、Ti 等高场强元素的亏损以及高的 Y 含量和低的 Sr/Y 比值, 指示其形成于与俯冲环境或壳源有关的物质源区。在微量元素构造判别图 Rb-(Y+Nb)和 Nb-Y 图解(图10)中, 研究区火山岩主体落在了弧火山岩与后碰撞火山岩的范围之中, 反映出其形成于大洋俯冲向大陆碰撞转换的构造背景条件下。Lee *et al.*^[13-14] 研究结果显示, 冈底斯弧东部林子宗群火山岩在主要集中在约 50 Ma, 同时 Ji *et al.*^[42] 在雅鲁藏布缝合带南部发现的形成于约 45 Ma 源于软流圈地幔并具有类

似于洋岛玄武岩(OIB)地球化学特征的辉长岩, 指示冈底斯弧在 50~45 Ma 北向俯冲的新特提斯大洋板片很可能从印度大陆板片断离。因此, 冈底斯弧东西向展布的形于古新世的林子宗群年波组火山岩为北向俯冲的新特提斯大洋板片俯冲并回转的产物。

5 结论

(1) 冈底斯弧西段措勤地区杰萨错林子宗群年波组中酸性火山岩锆石 U-Pb 年代学显示其形成于 (59.2±0.7) Ma, 与冈底斯弧东部和中部的年波组火山岩形成时代具有同期性。

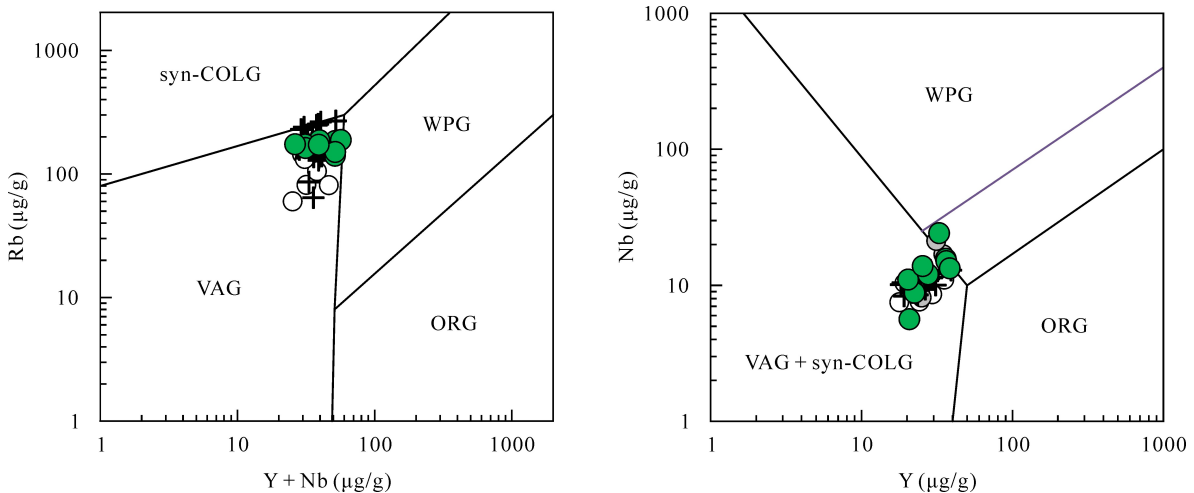


图10 冈底斯弧东部(林周盆地)、中部(朱诺)和西部(措美和杰萨错)年波组流纹岩 Rb-(Y+Nb)和 Nb-Y 相关图

Fig.10 Rb-(Y + Nb) and Nb-Y diagrams for the rhyolites of Nianbo Formation from Eastern, Middle, and Western Gangdese Arc
数据引自文献[7,12,27-31]。syn-COLG-同碰撞花岗岩; VAG-火山弧花岗岩; WPG-板内花岗岩; ORG-洋中脊花岗岩。

Data from references [7,12,27-31].

(2) 冈底斯弧西部林子宗群年波组酸性火山岩具有与东部和中部相似的地球化学组成和分布范围, 如相似的主元素、微量元素含量以及稀土元素和微量元素分布特征, 指示它们很可能具有相似的物质源区, 即很可能形成于北向俯冲的新特提斯大洋板块回转的陆缘弧构造背景下, 在镁铁质物质底侵的作用下导致部分中上地壳物质发生部分熔融并且这些初始融体经历了一定的演化从而形成研究区流纹质岩浆。

参考文献(References):

- [1] Coulon C, Maluski H, Bollinger C, Wang S. Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks from central and southern Tibet: ^{39}Ar - ^{40}Ar dating, petrological characteristics and geodynamical significance [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1986, 79: 281-302.
- [2] 刘鸿飞. 拉萨地区林子宗火山岩系的划分和时代归属[J]. *西藏地质*, 1993 (2): 59-69.
Liu Hong-fei. Division of Linzizong volcanic rock system and belong to time in Lhasa area [J]. *Tibet Geol*, 1993 (2): 59-68 (in Chinese with English abstract).
- [3] 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 董国臣, 周肃, 郭铁鹰, 张双全, 王亮亮. 印度—亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应[J]. *地学前缘*, 2003, 10(3): 135-147.
Mo Xuan-xue, Zhao Zhi-dan, Deng Jin-fu, Dong Guo-chen, Zhou Su, Guo Tie-ying, Zhang Shuang-quan, Wang Liang-liang. Response of volcanism to the India-Asia collision [J]. *Earth Sci Front*, 2003, 10(3): 135-148 (in Chinese with English abstract).
- [4] 莫宣学, 赵志丹, 周肃, 董国臣, 廖忠礼. 印度-亚洲大陆碰撞的时限[J]. *地质通报*, 2007, 26(10): 1240-1244.
Mo Xuan-xue, Zhao Zhi-dan, Zhou Su, Dong Guo-chen, Liao Zhong-li. On the timing of India-Asia continental collision [J]. *Geol Bull China*, 2007, 26(10): 1240-1244 (in Chinese with English abstract).
- [5] 周肃, 莫宣学, 董国臣, 赵志丹, 邱瑞照, 王亮亮, 郭铁鹰. 西藏林周盆地林子宗火山岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代格架[J]. *科学通报*, 2004, 49(20): 2095-2103.
Zhou Su, Mo Xuanxue, Dong Guochen, Zhao Zhidan, Qiu Ruizhao, Guo Tie-ying, Wang Liang-liang. ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology of Cenozoic Linzizong volcanic rocks from Linzhou Basin, Tibet, China, and their geological implications [J]. *Chinese Sci Bull*, 2004, 49(18): 1970-1979.
- [6] 董国臣. 西藏林周盆地林子宗火山岩及其反演的印度-欧亚大陆碰撞过程[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2002: 1-114.
Dong Guo-chen. Linzizong volcanic rocks and implications for probing India-Eurasia collision process in Linzhou Volcanic Basin, Tibet [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2002, 1-114 (in Chinese with English abstract).
- [7] 李志国. 西藏措麦林子宗群年波组火山岩地球化学及其意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2007: 1-72.
Li Zhi-guo. Geochemistry and significances of the volcanic rocks from Nianbo Formation of Linzizong Group in Cuomai, Tibet [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2007: 1-72 (in Chinese with English abstract).
- [8] 李皓扬, 钟孙霖, 王彦斌, 朱弟成, 杨进辉, 宋彪, 刘敦一, 吴福元. 藏南林周盆地林子宗火山岩的时代、成因及其地质意义: 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素证据[J]. *岩石学报*, 2007, 23(2): 493-500.
Lee Hao-yang, Chung Sun-lin, Wang Yan-bin, Zhu Di-cheng, Yang Jin-hui, Song Biao, Liu Dun-yi, Wu Fu-yuan. Age, petrogenesis and geological significance of the Linzizong volcanic successions in the Linzhou Basin, southern Tibet: Evidence from zircon U-Pb dates and Hf isotopes [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2007, 23(2): 493-500 (in Chinese with English abstract).
- [9] 谢冰晶, 周肃, 谢国刚, 田明中, 廖忠礼. 冈底斯弧中段孔隆-丁仁勒地区林子宗群火山岩锆石 SHRIMP 年龄和地球化学特征的区域对比[J]. *岩石学报*, 2013, 29(11): 3804-3816.
Xie Bing-jing, Zhou Su, Xie Guo-gang, Tian Ming-zhong, Liao Zhong-li. Zircon SHRIMP U-Pb data and regional contrasts of geochemical characteristics of Linzizong volcanic rocks from Konglong and Dinrenle region, middle Gangdese belt [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2013, 29(11): 3804-3816 (in Chinese with English abstract).
- [10] He S D, Kapp P, DeCelles P G, Gehrels G E, Heizler M. Cretaceous-Tertiary geology of the Gangdese Arc in the Linzhou area, southern Tibet [J]. *Tectonophysics*, 2007, 433(1/4): 15-37.
- [11] 吴福元, 黄宝春, 叶凯, 方爱民. 青藏高原造山带的垮塌与高原隆升[J]. *岩石学报*, 2008, 24(1): 1-30.
Wu Fu-yuan, Huang Bao-chun, Ye Kai, Fang Ai-min. Collapsed Himalayan-Tibetan orogen and the rising Tibetan Plateau [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2008, 24 (1): 1-30 (in Chinese with English abstract).
- [12] Mo X, Niu Y, Dong G, Zhao Z, Hou Z, Zhou S, Ke S. Contribution of syncollisional felsic magmatism to continental crust growth: A case study of the Paleogene Linzizong Volcanic Succession in southern Tibet [J]. *Chem Geol*, 2008, 250: 49-67.
- [13] Lee H Y, Chung S L, Lo C H, Ji J Q, Lee T Y, Qian Q, Zhang Q. Eocene Neotethyan slab breakoff in southern Tibet inferred from the Linzizong volcanic record [J]. *Tectonophysics*, 2009, 477: 20-35.
- [14] Lee H Y, Chung S L, Ji J Q, Qian Q, Gallet S, Lo C H, Lee T Y, Zhang Q. Geochemical and Sr-Nd isotopic constraints on the genesis of the Cenozoic Linzizong volcanic successions, southern Tibet [J]. *J Asian Earth Sci*, 2012, 53: 96-114.
- [15] 付文春, 康志强, 潘会彬. 西藏冈底斯带西段狮泉河地区林子宗群火山岩地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. *地质通报*, 2014, 33(6): 850-859.
Fu Wen-chun, Kang Zhi-qiang, Pan Hui-bin. Geochemistry, zircon U-Pb age and implications of the Linzizong Group volcanic rocks in Shiquanhe River area, western Gangdise belt,

- Tibet [J]. *Geol Bull China*, 2014, 33(6): 850–859 (in Chinese with English abstract).
- [16] Zhu D C, Wang Q, Zhao Z D, Chung S L, Cawood P A, Niu Y L, Liu S A, Wu F Y, Mo X X. Magmatic record of India-Asia collision [J]. *Sci Rep*, 2015, 5: 14289
- [17] Zhu D C, Wang Q, Cawood P A, Zhao Z D, Mo X X. Raising the Gangdese Mountains in southern Tibet [J]. *J Geophys Res Solid Earth*, 2017, 122: 214–223.
- [18] 于枫, 李志国, 赵志丹, 谢国刚, 董国臣, 周肃, 朱弟成, 莫宣学. 西藏冈底斯带中西部措麦地区林子宗火山岩地球化学特征及意义[J]. *岩石学报*, 2010, 26(7): 2217–2225.
Yu Feng, Li Zhi-guo, Zhao Zhi-dan, Xie Guo-gang, Dong Guo-chen, Zhou Su, Zhu Di-cheng, Mo Xuan-xue. Geochemistry and implication of the Linzizong volcanic succession in Cuomai area, central-western Gangdese, Tibet [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2010, 26(7): 2217–2225 (in Chinese with English abstract).
- [19] 陕西省地矿局区域地质矿产研究院. 区域地质调查报告(那加幅, 1:50000) [M]. 2016: 1–233.
Research Institute of Regional Geological Survey, Shaanxi Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. The Regional Geology of Najia (Scale 1:5000) [M]. 2016: 1–233 (in Chinese).
- [20] 朱弟成, 潘桂堂, 莫宣学, 王立全, 廖忠礼, 赵志丹, 董国臣, 周长勇. 冈底斯中北部晚侏罗世-早白垩世地球动力学环境: 火山岩约束[J]. *岩石学报*, 2006, 22(3): 534–546.
Zhu Di-cheng, Pan Gui-tang, Mo Xuan-xue, Wang Li-quan, Liao Zhong-li, Zhao Zhi-dan, Dong Guo-chen, Zhou Chang-yong. Late Jurassic-Early Cretaceous geodynamic setting in middle-northern Gangdese: New insights from volcanic rocks [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2006, 22(3): 534–546 (in Chinese with English abstract).
- [21] 朱弟成, 潘桂堂, 王立全, 莫宣学, 赵志丹, 周长勇, 廖忠礼, 董国臣, 袁四化. 西藏冈底斯带中生代岩浆岩的时空分布和相关问题的讨论[J]. *地质通报*, 2008, 27(9): 1535–1550.
Zhu Di-cheng, Pan Gui-tang, Wang Li-quan, Mo Xuan-xue, Zhao Zhi-dan, Zhou Chang-yong, Liao Zhong-li, Dong Guo-chen, Yuan Si-hua. Tempo-spatial variations of Mesozoic magmatic rocks in the Gangdise belt, Tibet, China, with a discussion of geodynamic setting-related issues [J]. *Geol Bull China*, 2008, 27(9): 1535–1550 (in Chinese with English abstract).
- [22] 朱弟成, 潘桂堂, 王立全, 莫宣学, 赵志丹, 周长勇, 廖忠礼, 董国臣, 袁四化. 西藏冈底斯带侏罗纪岩浆作用的时空分布及构造环境[J]. *地质通报*, 2008, 27(4): 458–468.
Zhu Di-cheng, Pan Gui-tang, Wang Li-quan, Mo Xuan-xue, Zhao Zhi-dan, Zhou Chang-yong, Liao Zhong-li, Dong Guo-chen, Yuan Si-hua. Spatial-temporal distribution and tectonic setting of Jurassic magmatism in the Gangdise belt, Tibet, China [J]. *Geol Bull China*, 2008, 27(4): 458–468 (in Chinese with English abstract).
- [23] 潘桂堂, 莫宣学, 侯增谦, 朱弟成, 王立全, 李光明, 赵志丹, 耿全如, 廖忠礼. 冈底斯造山带的时空结构及演化[J]. *岩石学报*, 2006, 22(3): 521–533.
Pan Gui-tang, Mo Xuan-xue, Hou Zeng-qian, Zhu Di-cheng, Wang Li-quan, Li Guang-ming, Zhao Zhi-dan, Geng Quan-ru, Liao Zhong-li. Spatial-temporal framework of the Gangdese Orogenic Belt and its evolution [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2006, 22(3): 521–533 (in Chinese with English abstract).
- [24] Yuan H L, Gao S, Liu X M, Li H M, Gunther D, Wu F Y. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. *Geostand Geoanal Res*, 2004, 28: 353–370.
- [25] Anderson T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chem Geol*, 2002, 192(1/2): 59–79.
- [26] Ludwig K R. User's manual for isoplot 3.75: A geochronological toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2012: 1–75.
- [27] 毛素斌, 吴旭铃, 孙国发. 西藏措勤地区年波组岩石地球化学特征[J]. *资源调查与环境*, 2005, 26(4): 235–243.
Mao Su-bin, Wu Xu-ling, Sun Guo-fa. Geochemical characteristics of Nianbo Formation at Cuoqin County, Tibet [J]. *Resour Surv Environ*, 2005, 26(4): 235–243 (in Chinese with English abstract).
- [28] 贾建称, 温长顺, 王根厚, 高春光, 杨国东. 冈底斯地区林子宗群火山岩岩石地球化学特征及其地球动力学意义[J]. *中国地质*, 2005, 32(3): 396–404.
Jia Jian-cheng, Wen Chang-shun, Wang Gen-hou, Gao Chun-guang, Yang Guo-dong. Geochemical characteristics and geodynamic significance of the Linzizong Group volcanic rocks in the Gangdise area [J]. *Geol China*, 2005, 32(3): 396–404 (in Chinese with English abstract).
- [29] 吴旭玲, 冯晔, 黄俊平. 西藏措勤地区年波组地球化学及其地质意义[J]. *东华理工学院学报*, 2005, 28(1): 5–11.
Wu Xu-ling, Feng Ye, Huang Jun-ping. Geochemical characteristics of Nianbo Formation at Cuoqin County, Tibet and its geotectonics significance [J]. *J East China Inst Technol*, 2005, 28(1): 5–11 (in Chinese with English abstract).
- [30] 梁银平, 朱杰, 次邛, 何卫红, 张克信. 青藏高原冈底斯带中部朱诺地区林子宗群火山岩锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征[J]. *地球科学*, 2010, 35(2): 211–223.
Liang Ying-ping, Zhu Jie, Ci Qiong, He Wwi-hong, Zhang Ke-xin. Zircon U-Pb ages and geochemistry of volcanic rock from Linzizong Group in Zhunuo Area in Middle Gangdise Belt, Tibet [J]. *Earth Sci*, 2010, 35(2): 211–223 (in Chinese with English abstract).
- [31] 李再会, 郑来林, 李军敏, 夏祥标. 冈底斯中段林子宗火山岩 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄及其意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2009, 28(3): 223–227.
Li Zai-hui, Zheng Lai-lin, Li Jun-min, Xia Xiang-biao. ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of Linzizong volcanic rocks in the central Gangdise area and its geological implication [J]. *Geol Bull China*, 2009, 28(3): 223–227 (in Chinese with English abstract).
- [32] Sun S-s, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. *Geol Soc London Spec Pub*, 1989, 42: 313–345.
- [33] 张小强. 西藏则学地区林子宗群火山岩岩石成因及其与成

- 矿关系的研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013: 1-118.
Zhang Xiao-qiang. Petrogenesis of Linzizong Group volcanic rocks in Zexue area, Tibet and its relation to mineralization [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013: 1-118 (in Chinese with English abstract).
- [34] 朱弟成, 王青, 赵志丹. 岩浆岩定量限定陆-陆碰撞时间和过程的方法和实例[J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(6): 657-673.
Zhu Dicheng, Wang Qing, Zhao Zhidan. Constraining quantitatively the timing and process of continent-continent collision using magmatic record: Method and examples [J]. *Sci China Earth Sci*, 2017, 60(6): 1040-1056..
- [35] 谢克家, 曾令森, 刘静, 高利娥, 胡古月. 藏南昂仁县桑桑地区林子宗群火山岩的形成时代和地球化学特征[J]. 地质通报, 2011, 30(9): 1339-1352.
Xie Ke-jia, Zeng Ling-sen, Liu Jing, Gao Li-e, Hu Gu-yue. Timing and geochemistry of the Linzizong Group volcanic rocks in Sangsang area, Ngamring County, southern Tibet [J]. *Geol Bull China*, 2011, 30(9): 1339-1352 (in Chinese with English abstract).
- [36] 王乔林. 冈底斯西段林子宗群火山岩的地球化学特征及锆石年代学研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011: 1-81.
Wang Qiao-lin. Geochemistry and zircon U-Pb chronology of Linzizong Group volcanic rocks in western Gangdese, Tibet [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2011: 1-81 (in Chinese with English abstract).
- [37] 陈建林, 郭原生, 付善明. 花岗岩研究进展——ISMA 花岗岩类分类综述[J]. 甘肃地质学报, 2004, 13(1): 67-73.
Chen Jian-lin, Guo Yuan-sheng, Fu Shan-ming. The research headway to granitoid — Classification review and synthesis of ISMA granitoid [J]. *Acta Geol Gansu*, 2004, 13(1): 67-73 (in Chinese with English abstract).
- [38] Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1987, 95: 407-419.
- [39] Ji W Q, Wu F Y, Liu C Z, Chung S L. Early Eocene crustal thickening in southern Tibet: New age and geochemical constraints from the Gangdese batholith [J]. *J Asian Earth Sci*, 2012, 53: 82-95.
- [40] Ma L, Wang B D, Jiang Z Q, Wang Q, Li Z X, Wyman D A, Zhao S R, Yang J H, Gou G N, Guo Z F. Petrogenesis of the Early Eocene adakitic rocks in the Napuri area, southern Lhasa: Partial melting of thickened lower crust during slab break-off and implications for crustal thickening in southern Tibet [J]. *Lithos*, 2014, 196-197: 321-338.
- [41] Wang Q, Zhu D C, Cawood P A, Zhao Z D, Liu S A, Chung S L, Zhang L L, Liu D, Zheng Y C, Dai J G. Eocene magmatic processes and crustal thickening in southern Tibet: Insights from strongly fractionated ca. 43 Ma granites in the western Gangdese Batholith [J]. *Lithos*, 2015, 239: 128-141.
- [42] Ji W Q, Wu F Y, Chung S L, Wang X C, Liu C Z, Li Q L, Liu Z C, Liu X C, Wang J G. Eocene Neo-Tethyan slab breakoff constrained by 45 Ma oceanic island basalt-type magmatism in southern Tibet [J]. *Geology*, 2016, 44(4): 283-286.