DOI:10.19826/j. cnki. 1009-3850. 2021. 03004

# 大陆碰撞过程的火山岩响应:以西藏林周林子宗 火山岩为例

# 董国臣,莫宣学,赵志丹,朱弟成

(中国地质大学(北京),北京 100083)

摘要:印度 – 亚洲大陆碰撞伴生有大量火山活动,其中,林子宗火山岩发育最广,遍布碰撞带北侧的冈底斯带,形成 长逾 1200 km 的火山岩带。林周地区作为林子宗火山岩的命名地,该套火山岩发育相对齐全,为安山岩、流纹岩及相 应的火山碎屑岩夹沉积碎屑岩组合,顶部发育巨厚流纹质凝灰岩,可以划分出三个火山旋回,其生成时代介于 63.89 ~48.73 Ma。岩石学和地球化学资料显示,林子宗火山岩自下而上 SiO<sub>2</sub>和 K<sub>2</sub>O 含量以及 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>饱和度增加,其岩浆 从早到晚由中性、中钾和准铝质变化到酸性、高钾和过铝质,晚期喷发巨厚的火山灰流,反映区域地壳明显的加厚, 由早期的 30~40 km 变化到晚期的 50~60 km。火山岩相对富集 Cs、Rb、K、U,亏损 Ta、Nb、Ti、Sr、Ba、P,早期与桑日 组安山岩地球化学特征相近,而中—晚期与乌郁、扎嘎等地渐新世高钾火山岩相似,表明早期岩浆具有新特提斯洋 俯冲板片印迹,而中—晚期具有后碰撞作用特点。林子宗火山岩作为印度 – 亚洲大陆碰撞过程的响应,记录着古新 世至始新世(64~48 Ma)印度 – 亚洲大陆之间的碰撞向碰撞后演化过程。

关键 词:大陆碰撞;火山活动;林子宗火山岩;演化;林周;西藏

中图分类号:P542; P588.1 文献标识码:A

印度-亚洲大陆碰撞产生了被称为世界屋脊 的青藏高原,并成为近年地学研究热点之一(Yin and Harrison, 2000; Chen et al., 2010; Zhu et al., 2019)。青藏高原广泛发育新生代火山岩,因其蕴 含着新生代以来青藏高原岩石圈演化和深部过程 的丰富信息(Zhang et al., 1997; 赖绍聪, 1999; 莫 宣学等, 2003, 2007; Ding et al., 2003; 莫宣学和潘 桂棠, 2006; Zhu et al., 2013) 而成为精确限定陆陆 碰撞时限和深入研究诸如地壳演化及深部过程等 问题的核心对象之一。古近纪林子宗火山岩是青 藏高原分布最广的中 - 酸性火山岩,从东到西广泛 分布在冈底斯带(王天武等, 1999; 董国臣, 2002; 贾建称等,2005;李皓揚,2006),不整合于上白垩 统设兴组强烈变形的海相地层或更老的地层之上, 长期以来一直是地学界关注的热点(莫宣学等, 2003, 2007; 莫宣学和潘桂棠, 2006)。

针对林子宗火山岩的研究主要集中在拉萨北部的林周地区(刘鸿飞, 1993; 董国臣, 2002; 董国

臣等, 2002, 2005; 李皓揚等, 2007) 和中部措勤— 桑桑一带(宋全有, 1999; 李再会等, 2008, 2009; 于枫等, 2010; 谢克家等, 2011)以及西部阿里一带 (付文春等, 2014),涉及岩石学、地球化学、同位素 及年代学(宋全有, 1999; 王天武等, 1999; 董国 臣, 2002; 董国臣等, 2002, 2005; 贾建称等, 2005;李皓揚, 2006;李再会等, 2008, 2009; 于枫 等, 2010; 谢克家等, 2011; 付文春等, 2014),初步 限定了其生成时限及岩石成因(周肃等,2001, 2004; 李再会等, 2009; 谢克家等, 2011; 付文春等, 2014),普遍认为该火山岩的生成与大陆碰撞作用 有关(赖绍聪, 1999; 董国臣, 2002; 莫宣学等, 2003, 2007; Ding et al., 2003; 贾建称等, 2005; Zhu et al., 2013),而对其成因及其地球动力学过程 等问题的研究仍存在争议,认为属于新特提斯俯冲 阶段的产物或者新特提斯洋俯冲向印度 - 亚洲大 陆碰撞过渡背景成因(莫宣学等, 2003, 2007; Ding et al., 2003)。本文拟以林周盆地林子宗火山岩为

收稿日期:2021-01-23;改回日期:2012-03-04

作者简介: 董国臣(1962—)男,教授,主要从事岩石学及矿床学研究。E-mail:donggc@cugb.edu.cn

资助项目:国家重大研究计划重点支持项目(9175520034,9196220051)联合资助

例,分析探讨林子宗火山岩的岩石成因及其大陆动 力学背景。

### 1 地质背景

林子宗火山岩集中分布在冈底斯南带,从东部 的灵芝地区到西部的阿里地区,构成一个长 1200 km 宽 200 km火山岩带,以拉萨北部的林周地区最 为典型(图1),整体为一套中酸性火山岩组合,自下 而上可以分为三个岩组,并分别命名为典中组、年 波组和帕那组(刘鸿飞,1993;董国臣,2002;董国臣 等,2005),三个组的出露岩性和发育程度在不同地 区略有差异,但总体成分基本一致(董国臣,2002; 董国臣等,2005)。

西藏林周火山盆地地处拉萨以北约60千米,位 于冈底斯岩浆岩带东部。这里林子宗火山岩系层 序比较完整,厚度大于6500m(董国臣,2002;董国 臣等,2005),与下伏上白垩统设兴组地层呈清楚的 不整合接触(图1),是林子宗火山岩的命名地。



图 1 拉萨林周盆地区域地质简图(据董国臣等,2005 修改) Fig. 1 Regional geological map of the Linzhou Basin (modified from Dong et al., 2005)

林子宗火山岩自李璞先生在林周盆地创名后, 又经不同专题研究和区域地质调查,提出了各种划 分方案(刘鸿飞,1993;西藏自治区地质矿产局, 1993;董国臣等,2005)。目前将林子宗火山岩自下 而上划分为典中、年波和帕那三个组(刘鸿飞, 1993;董国臣等,2005),其岩性分别为一套中性— 中酸性火山熔岩及火山碎屑岩组合,包括安山质、 英安质和流纹质以及少量钾玄质火山岩,其中夹沉 积砾岩和含生物碎屑灰岩,可以进一步划分成三个 火山活动演化旋回,同位素测年资料和古生物学资 料显示其形成时代介于 64~49 Ma 之间(董国臣, 2002;董国臣等,2005)。

# 2 岩相学及其所体现的火山活动特征

#### 2.1 岩相学特征

林周盆地中林子宗火山岩系的岩石类型主要 有安山岩、英安岩、安山质凝灰岩、安山质火山角砾 (集块)岩、流纹岩、流纹质、英安质与粗面质熔结凝 灰岩、流纹质火山角砾岩以及凝灰质砂/泥岩和薄 层灰岩。

安山岩:出露于典中组和年波组上部,局部含 辉石(~5%)或角闪石。岩石呈灰黑色,斑状,斑晶 为斜长石、辉石,粒径 0.25~3 mm,斜长石多具环 带,为中长石,常具正环带和净化边;黑云母和角闪 石具暗化边;局部有绿泥石化、硅化、碳酸盐化。

英安岩:产于典中组,岩石黑灰色,斑状。斑晶 为斜长石、石英、角闪石和黑云母,含量 20~30%, 其中斜长石具环带,角闪石有暗化边,副矿物有榍 石,次生变化为碳酸盐化、绢云母化和绿泥石化。

安山质凝灰岩:产于典中组及年波组上部,岩 石淡紫色、浅褐色,晶屑为斜长石,含量 20~30%。 局部含安山岩角砾。

凝灰质砂/泥岩:产于典中组、年波组及帕那组的上部,呈浅灰绿色、灰白色,凝灰质含量5~30%。

流纹岩:出露于帕那组下部,灰白色,斑晶为钾 长石(5%)、斜长石(20%)、石英(5%)和少量黑云 母,呈自形 - 半自形状,粒径 0.4~4 mm,石英具熔 蚀,黑云母交代为白云母、褐铁矿。

熔结凝灰岩:灰白色,熔结凝灰结构或凝灰结构,似流纹状构造,多见晶屑、岩屑和浆屑,晶屑(40~50%)多为钾长石、石英和斜长石,岩屑(20~30%)为酸性火山岩,浆屑(10~20%)呈不规则状,局部含角砾。

含生物碎屑泥晶灰岩:出露于年波组下部,主 要由生物屑、泥晶方解石和砂屑组成。生物屑为钙 质介形虫碎片,砂屑呈次棱角状,少量亮晶方解石 充填。

#### 2.2 火山活动特征

根据火山岩系的岩性及爆发喷溢特征,将林子 宗火山岩系划分成三个喷发旋回(董国臣等, 2005)。

(1)第一喷发旋回(典中旋回)

由安山岩、英安岩、安山质碎屑岩和少量流纹 质火山碎屑岩组成,旋回早期以流纹质火山角砾岩 的喷发开始,演化成大面积的安山质 - 英安质岩浆 喷溢,每次岩浆喷溢都伴随有爆发形成大量火山碎 屑岩,表现出先爆发后喷溢的多次重复,岩浆活动 由早到晚也表现出强—弱变化特征。

(2) 第二喷发旋回(年波旋回)

由流纹质火山碎屑岩、安山质及钾玄质火山岩 构成。岩浆活动以爆发为主,早期以流纹质岩浆爆 发开始,形成多层流纹质凝灰岩,晚期为安山质 – 钾玄质岩浆活动,多次喷发,形成多层安山岩和钾 玄岩和相应的火山碎屑岩,岩浆活动总体上由酸性 向中性钾玄质演化。

(3) 第三喷发旋回(帕那旋回)

由大套的流纹岩和流纹质火山碎屑岩构成,表

现为具层状特征和具柱状节理的流纹质火山碎屑 岩的交互发育。火山活动以爆发为主,爆发指数变 化在 60~80%之间,甚至达 100%,形成炽热的火山 灰流,火山活动剧烈。

由此可见,林周盆地林子宗火山岩由3个喷发 旋回组成,各旋回及其间具有明显演化规律和相互 关系,旋回内部从早到晚由酸性逐渐向偏基性演 化,而旋回间则由中性向酸性过渡。

# 3 岩石地球化学特征

#### 3.1 主要化学成分特征

主要化学成分(表1)分析显示,典中组火山岩 SiO<sub>2</sub>为61%~64%,年波组和帕那组火山岩的SiO<sub>2</sub> 分别为68%~78%和73%~76%。在TAS图解中 (图2),典中组样品落入安山岩区,年波组和帕那组 火山岩绝大部分落入流纹岩区,整个火山岩多属亚 碱性钙碱性系列(图3a)。



Fig. 2 TAS diagram for Linzizong volcanic rocks (after Le maitre, 2002)

按火山岩 K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>关系图解中(图 3b),典中组 火山岩多位于中钾钙碱性系列与高钾钙碱性系列 分界线附近,年波组和帕那组样品落入高钾钙碱性 系列,从典中到帕那组显示由中钾钙碱性到高钾钙 碱性演化的趋势。从 K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O、CaO 与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>分子 的数量比例来看,典中组火山岩的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>分子数小 于(K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O + CaO)的分子数,大于(K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O)的分子数,均属于亚铝质岩石;年波组和帕那

	Table 1	Characteristics of major and trace elements in Linzizong volcanic rocks, Linzhou Basin									
样品编号	LZ9924	LZ9926	1036	LZ991	LZ993	LZ994	1060	LZ9914	LZ9917	1086-2	1087-2
岩石名称	英安岩	英安岩	安山岩	凝灰岩	凝灰岩	凝灰岩	凝灰岩	凝灰岩	凝灰岩	凝灰岩	凝灰岩
组	典中组	典中组	典中组	年波组	年波组	年波组	年波组	帕那组	帕那组	帕那组	帕那组
$SiO_2$	63.7	63.23	61.09	73.9	68.13	71.56	77.64	74.62	75. 58	73.69	76.04
$TiO_2$	0.61	0.66	0.58	0.13	0.47	0.46	0.12	0.18	0.3	0.21	0.2
$Al_2O_3$	16.09	15.49	15.89	14. 28	15.31	12.4	11.42	13.16	11.21	13.37	13.04
$TFe_2O_3$	5.35	6.63	3.21	1.68	3.25	3.53	0.97	1.29	2.6	0. 57	0.82
FeO	1.32	0.9	1.91	0.4	0.4	0.28	0.48	1.3	0.38	1.02	0.44
MnO	0.09	0.16	0.12	0.02	0.04	0.12	0.04	0.02	0.03	0.1	0.06
MgO	2.15	1.94	2.56	1.05	1.62	0. 53	0.21	0.08	0.48	0.68	0.2
CaO	4.03	2.76	4.86	0.95	1.76	2.34	1.6	0.41	0.59	1.28	0.63
Na <sub>2</sub> O	3.42	3.35	3.13	0.55	0.95	3.81	3.46	3.57	1.71	2.87	2.65
K <sub>2</sub> O	2.38	2.48	2.34	4	4.18	2.41	1.72	5.24	5.55	5.3	5.06
$P_2O_5$	0.17	0.25	0.17	0.03	0.1	0.09	0.03	0.06	0.14	0.07	0.06
Loss	2.64	2.69	3.51	3. 54	4.5	3.3	2.12	1.1	1.77	0. 83	0.79
Total	100. 63	99.64	99.36	100.13	100. 31	100. 55	99.8	99.73	99.96	99.98	99.99
V	101	121	131.45	10.4	41.63	59.7	14. 93	10. 1	37.4	10.34	10.34
Cr	18.7	25.7	33.0	6.03	20.40	11.3	8.0	2.87	11.7	14	18
Co	27.6	18.9	17.0	12.9	8.25	38.2	1.3	45.8	33.5	2.63	2.62
Ni	3.89	5.47	12.08	2.57	5.29	3.84	1.96	1.69	9.80	3.75	6.56
Rb	53.2	125	96	132	143.66	59.9	81.0	185	163	265.0	219
Sr	326	329	29	86.1	87.17	183	178	151	164	319.0	246
Y	20.4	21.0	26.0	21.5	19.25	17.8	35.5	4.61	17.7	21.3	19.95
Zr	110	106	145	113	160.40	117	112	119	113	132.0	113
Nb	6.86	6.04	10.00	9.52	10.35	7.48	11.00	5.51	8.67	18.80	16.4
Ba	393	358	491	503	115.03	240	279	590	813	776	858
La	25.7	23.1	28.6	36.9	32.82	28.6	40.9	13.2	38.3	46.0	36.35
Се	51.4	47.2	59.3	74.8	64.81	60.5	88.8	38.9	60.7	82.7	70.06
Pr	6.37	5.91	6.37	9.21	7.84	7.31	10.90	2.68	8.24	8.04	6.67
Nd	23.4	23.1	21.3	33.3	28.20	27.4	34.7	8.71	29.1	22.3	20.45
Sm	4.66	4.63	4.54	6.43	5.25	5.11	7.58	1.48	5.32	4.21	3.8
Eu	1.11	1.12	1.25	0.60	0.73	0.97	1.09	0.32	1.10	0.70	0.6
Gd	3.91	4.06	4.37	5.10	4.15	4.15	6.95	1.13	4.02	3.45	3.46
Tb	0.59	0.63	0.60	0.75	0.61	0.62	1.12	0.16	0.57	0.56	0.55
Dy	4.06	4.17	3.92	4.86	4.03	3.97	5.88	0.99	3.47	2.92	3.35
Ho	0.84	0.86	0.85	0.97	0.83	0.79	1.27	0.21	0.60	0.60	0.6
Er	2.26	2.44	2.36	2.64	2.22	2.17	3.24	0.61	1.71	1.87	1.88
Tm	0.32	0.33	0.35	0.37	0.30	0.31	0.52	0.10	0.23	0.31	0.35
Yb	2.21	2.29	1.89	2.59	2.17	2.23	3.08	0.67	1.62	1.99	1.92
Lu	0.32	0.34	0.28	0.39	0.31	0.33	0.49	0.09	0.24	0.31	0.32
Hf	3.70	3.61	3.10	4.97	5.95	4.19	3.22	4.10	3.08	2.92	2.88
Та	0.65	0.56	0.79	1.07	1.13	0.75	0.71	1.08	0.74	1.67	1.46
Pb	22.9	21.8	12.3	9.86	17.30	28.0	5.3	17.2	15.9	2.7	13.33
Th	9.95	8.32	8.53	22.5	20. 25	14.0	13.0	19.3	21.0	26.1	24.74
U	2.56	1.82	1.99	3.43	3.86	2.70	2.85	6.09	4.23	5.57	5.74

表1 林周盆地林子宗火山岩主量元素及微量元素特征

注:表中主量元素单位为%,微量元素单位为×10<sup>6</sup>



图 3 AMF 图解(a)及 K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>关系图解(b)(据 Le Maitre ,2002)

Fig. 3 AMF diagram (a) and  $K_2$  O-SiO<sub>2</sub> diagram (b) for Linzizong volcanic rocks (after Le Maitre, 2002)





Fig. 4 Variations of chemical compositions of Linzizong volcanic rocks

组火山岩样品的  $Al_2O_3$ 分子数均大于( $K_2O + Na_2O + CaO$ )的分子数,属于过铝质岩石。

在林子宗火山岩岩石化学成分变异图解(图4) 中,随 SiO<sub>2</sub>的增加,TiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>O、CaO、 MgO 均呈现出减少的趋势,从早期的典中组到晚期 的年波组和帕那组构成连续的线性的演化趋势来 看,它们之间具有成因联系。

#### 3.2 微量元素特征

火山岩原始地幔标准化后微量元素配分图(图 5,表1)显示,林子宗火山岩整体上表现出相似的特 征,即大离子亲石元素 Cs、Rb、K、U 相对富集,而高 场强元素 Ta、Nb、Ti 元素明显亏损,大离子亲石元素 Ba 也出现负异常,与乌郁盆地后碰撞火山岩(赵志 丹等,2001)和冈底斯西段后碰撞火山岩(赵志 丹等,2001)和冈底斯西段后碰撞火山岩特征 (Miller et al., 1999)相近。然而林子宗火山岩的三 个组之间也存在一些差异。典中组火山岩中 Sr 元 素基本没出现亏损,P 元素的负异常也不明显;而年 波组和帕那组火山岩中 Sr、P 元素则明显亏损。另 外,Sr、Ba、P、Ti 等元素负异常程度也出现由典中 组一年波组—帕那组逐渐增大的趋势。

据研究岛弧玄武岩富集不相容元素,包括诸如 Rb、Th、K、Ba等大离子亲石元素(LILE)和轻稀土元 素(LREE),而亏损 Ta、Nb、Ti元素,在配分图上出 现 Ta-Nb槽异常是俯冲带组分(SZC)的典型特征。 因此可以说,林子宗火山岩含有俯冲带组分。但 是,林子宗火山岩,特别是酸性火山岩配分图诸如 大离子亲石元素 Ba、Sr 以及 P 的明显亏损,又反映 了岩浆源区中有地壳物质的参与,与碰撞期花岗岩 及碰撞后 K 质火山岩的配分图相似。

#### 3.3 稀土元素特征

林子宗火山岩的稀土元素变化较大,其总量介 于 69.3×10<sup>6</sup>~211.5×10<sup>6</sup>之间,主要集中于 100× 10<sup>6</sup>~180×10<sup>6</sup>范围内,LREE/HREE为5.46~ 9.31,其中,(La/Yb)<sub>N</sub>在典中组、年波组和帕那组火 山岩中分别为7.3~17.4,10.3~15.1和14.5~ 24.5,反映岩浆作用过程中从典中旋回→年波旋回 →帕那旋回稀土元素分异程度逐渐加强。稀土配 分呈右倾平滑曲线形式(图5),轻稀土相对富集,重 稀土相对亏损,其中典中组火山岩负 Eu 异常不明 显,而年波组和帕那组火山岩具有较明显负 Eu 异 常,说明斜长石的分离结晶在林子宗火山岩浆演化 中起重要作用。

不同构造背景形成的火山岩具有明显不同的

稀土元素配分样式,正常洋中脊玄武岩(N-MORB) 亏损 LREE,与岛弧有关火山岩的稀土元素配分曲 线可以平缓至 LREE 富集,板内玄武岩常具有 LREE 相对富集和稀土元素总量富集的特点。林子宗火 山岩稀土元素配分样式具有岛弧钙碱性玄武岩 (CAB)和大陆裂谷玄武岩(CRB)之间的过渡特征。 从区域上对比来看,与藏西南扎嘎等地超钾火山岩 和后碰撞钾质火山岩稀土元素配分模式具有相似 之处。



图 5 林子宗火山岩原始地幔标准化微量元素蛛网图及稀 土元素配分曲线(微量元素标准化数值采用 Wood, 1979;原 始地幔值;稀土元素标准化值采用 Boynton, 1986 的球粒陨石 值)

Fig. 5 Primitive mantle-normalized trace element spider diagrams and chondrite-normalized REE distribution patterns of Linzizong volcanic rocks

# 4 构造岩浆类型及构造环境分析

#### 4.1 构造岩浆类型

上述可知,林子宗火山岩中包含着两类岩石学 与地球化学信息,一类是俯冲带有关弧火山岩的信 息,一类是碰撞 - 后碰撞火山岩的信息。前者在其 早期(典中组)火山岩中更清晰,而后者在其中、晚 期(年波组、帕那组)火山岩中更为明显。

该套岩石所显示的弧火山岩信息主要体现在: (1)呈现安山质火山岩为主体的岩石组合;(2)火山 岩属钙碱性系列岩石;(3)微量元素配分图中有明 显的 Nb、Ta 负异常(槽)。

这就说明,这一阶段的林子宗火山岩岩浆源岩 中有俯冲大洋板片的贡献,带有俯冲作用印迹,属 于俯冲后的大陆碰撞早期。

林子宗火山岩中的碰撞 - 后碰撞火山岩的信息主要有:(1)绝大多数为钾质过铝质火山岩岩石, 具有明显的碰撞 - 后碰撞岩石组合特征;(2)其微量元素配分图与冈底斯带碰撞后高钾火山岩,如乌郁火山岩(13.6~12 Ma)(赵志丹等,2001)、冈底斯带西段扎嘎等地火山岩(25~16 Ma)(Miller et al., 1999)十分相似,与碰撞期 S型花岗岩在很多方面也相似(Thompson et al., 1984);(3)大面积巨厚熔 结凝灰岩(巨大火山灰流产物)的出现。根据 Dewey and Burke (1973)提出的模型,巨大火山灰流 (ignimbrite)是碰撞带中加厚地壳早期熔融的产物。

总体上应为碰撞 - 后碰撞条件下 (Post-Collision)产生的具有岛弧或陆源弧印迹的火山岩, 其岩浆源区可能与俯冲停止时坠落入上地幔的残 留断离板块(莫宣学等,2001)。

#### 4.2 火山岩所显示的地壳厚度变化

从早期(典中组)到晚期(帕那组)火山岩中 K<sub>2</sub>O的含量迅速增高,达到高钾钙碱性系列。Rb/Sr 比也逐渐增高,在早期(典中组)火山岩中 Rb < Sr 的含量,而在中、晚期(年波组、帕那组)火山岩中 Rb > Sr 含量。这两个指数表明,从典中旋回→帕那 旋回期间地壳发生了明显地增厚。

根据 Condie(1982) 计算地壳厚度的公式:

 $C(km) = 18.2 \times (K_2O)_{60} + 0.45$ 

可以估算出林子宗火山岩喷发早期和晚期的 地壳厚度,式中( $K_2O$ )<sub>60</sub>表示 SiO<sub>2</sub> = 60% 时的  $K_2O$ 含量,早期(64~60.7 Ma)地壳厚度约为 30~ 40km,晚期(55.9~48.7 Ma)地壳厚度增至 65~75 km。运用 Condie(1982) Rb-Sr 地壳厚度网格图 (Condie, 1982),也获得了相似的趋势。在 15 Myr 的不长时间间隔内地壳厚度增加了 1 倍以上,显然 只有大陆碰撞的环境才有可能。

#### 4.3 构造环境

林子宗火山活动反映了区域构造演化过程。 从始新世早期约65 Ma,随着新特提斯洋的关闭,印 度 – 亚洲大陆开始碰撞,在冈底斯南部形成林子宗 火山岩。

林子宗火山活动期间,典中旋回火山岩以钙碱 质安山岩为主体,其地球化学特征与典型的弧火山 岩相似(莫宣学等,2003),也与早期的桑日群火山 岩类似(李皓揚,2006),应与碰撞初期北向俯冲的 新特提斯洋壳残片有关;从年波旋回火山岩开始, 以酸性岩为主并有钾玄质火山活动(董国臣等, 2005),反映新特提斯海洋俯冲板片消耗殆尽,代之 以增厚陆壳岩浆活动为主,以至于最晚期的帕那旋 回火山活动强烈,流纹质火山岩的总厚度 2184 米 (董国臣等,2005),构成 50 Ma 的火山活动峰期。 这后期的酸性火山活动恰与冈底斯花岗质侵入岩 时限一致,暗示着与某种深部动力学机制——可能 是向北下冲板块的"折返"共同作用有关。即自大 陆碰撞开始,至林子宗火山活动中后期,板块下冲 速度锐减而产生足够的后拖拽力,使得已消减的新 特提斯洋板块残余与下冲的大陆板块因拖曳而下 沉变陡,造成软流圈物质上涌,诱发岩石圈地幔及 上覆地壳发生部分熔融,形成大规模岩浆活动(李 皓揚等,2007)。

# 5 结论

(1)林子宗火山岩早期(典中组)尽管含有较多 的弧火山岩特点,而中、晚期(年波组、帕那组)具有 明显的碰撞-后碰撞火山岩特征,总体应为碰撞-后碰撞条件下产生的具有俯冲有关弧印迹的火 山岩。

(2)林子宗火山岩特征显示出地壳厚度变化, 从早期的 30~40 km,变化到晚期的 65~75 km,在 约 15 Myr 的时间间隔内增加了 1 倍以上,暗示着大 陆碰撞的环境。

(3)林子宗火山岩组合的形成从碰撞开始持续 到后碰撞阶段,从而可以进一步推测,林子宗火山 岩底部的不整合面实际上是印度 – 亚洲大陆碰撞 的结果,林子宗火山岩底部的年龄 64 Ma,大致可以 代表碰撞的开始时的间。

感谢审稿专家对本文提出的宝贵意见,为进一步提高稿件质量提供了必不可少的帮助,同时感谢 编辑部老师对本文的细致审阅和建设性意见。投 身地质大调查,从事青藏高原及三江地区岩浆岩地 质多年,幸有潘桂棠老师指导和教诲,获益颇丰,正 值先生八十诞辰,撰文以志纪念。

#### 参考文献(References):

Chen J S, Huang B C, Sun L S, 2010. New constraints to the onset of the India-Asia collision: Paleomagnetic reconnaissance on the Linzizong Group in the Lhasa Block, China [J]. Tectonophysics, 489(1-4): 189-209.

- Condie K C, 1982. Plate Tectonics & Crustal Evolution [M]. 2<sup>nd</sup> ed. Oxford; Pergamon Press.
- Dewey J F, Burke K C A, 1973. Tibetan, Variscan, and Precambrian basement reactivation: products of continental collision [J]. The Journal of Geology, 81(6): 683 - 692.
- Ding L, Kapp P, Zhong D L, et al., 2003. Cenozoic volcanism in Tibet: evidence for a transition from oceanic to continental subduction[J]. Journal of Petrology, 44(10): 1833 - 1865.
- Le Maitre R W, 2002. Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Term: Recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks[M]. 2<sup>nd</sup> Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 33 – 39
- Miller C, Schuster R, Klötzli U, et al., 1999. Post-collisional potassic and ultrapotassic magmatism in SW Tibet: geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis[J]. Journal of Petrology, 40(9): 1399 – 1424.
- Thompson R N, Morrison M A, Hendry G L, et al., 1984. An assessment of the relative roles of crust and mantle in magma genesis: an elemental approach [J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 310 (1514): 549 - 590.
- Yin A, Harrison T M, 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen [ J ]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 28: 211 – 280.
- Zhang S Q, Mo X X, Zhao C H, et al., 1997. Petrology and geochemistry variations of Mesozoic and Cenozoic volcanism of the Tibetan Plateau and its dynamical inferences for lithospheric evolution of the plateau [C]//Proceedings of the 30th International Geol. Congress. The Netherlands: VSP. 155 – 168.
- Zhu D C, Wang Q, Chung S L, et al., 2019. Gangdese magmatism in southern Tibet and India-Asia convergence since 120 Ma [J]. Geological Society, London, Special Publications, 483 (1): 583 -604.
- Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, et al., 2013. The origin and pre-Cenozoic evolution of the Tibetan Plateau [J]. Gondwana Research, 23(4): 1429 – 1454.
- 董国臣,2002. 林周盆地林子宗火山岩及其所含的印度 欧亚大陆 碰撞信息研究[D]. 北京:中国地质大学(北京).
- 董国臣,莫宣学,赵志丹,等,2002. 西藏林周盆地林子宗火山岩研 究近况[J]. 地学前缘,9(1):153.
- 董国臣,莫宣学,赵志丹,等,2005. 拉萨北部林周盆地林子宗火山 岩层序新议[J]. 地质通报,24(6):549-557.
- 付文春,康志强,潘会彬,2014.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,33(6):850-859.
- 贾建称,温长顺,王根厚,等,2005. 冈底斯地区林子宗群火山岩岩 石地球化学特征及地球动力学意义[J]. 中国地质,32(3): 396-404.
- 赖绍聪, 1999. 青藏高原北部新生代火山岩的成因机制[J]. 岩石学报, 15(1): 98-104.
- 李皓揚, 2006. 藏南林子宗火山岩的年代学、地球化学和地体构造

2021年(2)

意义[D]. 台湾大学地质科学研究所.

- 李皓揚, 锺孙霖, 王彦斌, 等, 2007. 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, 23(2): 493-500.
- 李再会,郑来林,李军敏,等,2008. 冈底斯中段林子宗火山岩岩石 地球化学特征[J]. 矿物岩石地球化学通报,27(1):20-27.
- 李再会,郑来林,李军敏,等,2009. 冈底斯中段林子宗火山岩 <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar年龄及其意义[J]. 矿物岩石地球化学通报,28(3): 223-227.
- 刘鸿飞, 1993. 拉萨地区林子宗火山岩系的划分和时代归属[J]. 西藏地质, 10(2): 59-69.
- 莫宣学,邓晋福,董方浏,等,2001.西南三江造山带火山岩—构造 组合及其意义[J].高校地质学报,7(2):121-138.
- 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[J]. 地学前缘, 13(6): 43 – 51.
- 莫宣学,赵志丹,邓晋福,等,2003.印度-亚洲大陆主碰撞过程的 火山作用响应[J].地学前缘,10(3):135-148.
- 莫宣学,赵志丹,周肃,等,2007.印度-亚洲大陆碰撞的时限[J]. 地质通报,26(10):1240-1244.

宋全有, 1999. 措勤盆地林子宗群火山岩地球化学特征[J]. 地质力

学学报,5(2):65-70.

- 王天武,李才,杨德明,1999. 西藏冈底斯地区早第三纪林子宗群 火山岩地球化学特征及成因[J]. 地质论评,45(7):966 -971.
- 西藏自治区地质矿产局,1993. 西藏自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 谢克家,曾令森,刘静,等,2011. 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,30(9):1339 -1352.
- 于枫,李志国,赵志丹,等,2010. 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,26(7):2217 -2225.
- 赵志丹, 莫宣学, 张双全, 等, 2001. 西藏中部乌郁盆地碰撞后岩浆 作用——特提斯洋壳俯冲再循环的证据[J]. 中国科学(D辑), 31(S1): 20-26.
- 周肃,方念乔,董国臣,等,2001. 西藏林子宗群火山岩氩-氩年代 学研究[J]. 矿物岩石地球化学通报,20(4):317-319.
- 周肃,莫宣学,董国臣,等,2004. 西藏林周盆地林子宗火山岩<sup>40</sup> Ar/<sup>39</sup>Ar 年代格架[J]. 科学通报,49(20):2095-2103.

# A response of volcanic rocks to the India-Asia continental collision: A case study on Linzizong volcanic rocks in Linzhou, Tibet

DONG Guochen, MO Xuanxue, ZHAO Zhidan, ZHU Dichen

(China University of Geoscience, Beijing 100083, China)

Abstract: Intensive volcanism is usually associated with India-Asia continental collision. The Linzizong volcanic succession (shortly LVS), a result of the India-Asia continental collision, spreads as an over 1200km long volcanic rock zone in whole Gangdise belt north to the Yarlung-Zangbo collision belt. The LVS, nominated in Linzhou area, consists of andesite, rhyolite and the related pyroclastic rocks with interlayers of sedimentary rocks. With vast rhyolitic ignimbriteat at the top of the succession, the LVS can be divided into three volcanic cycles formed between 63. 89Ma and 48.73 Ma. The petrological and geochemical data show that the SiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents in the LVS increase and the magma was graded from intermediate, moderate potassium and metaluminous to acid, high potassium and peraluminous upwards. Vast hot tuff flow developed in the late stage of the succession. All the data indicate that the thickness of the crust was thickened from 30-40 km in the early stage to 50-60 km in the late stage. The volcanic rocks in LVS are relatively enriched in Cs, Rb, K, U and depleted in Ta, Nb, Ti, Sr, Ba, P. The lower part of LVS is geochemically similar to the andesite of late Mesozoic Sanri Fm., and the upper part is likely same as Miocene high potassium volcanic rocks in Wuyu and Zhaga volcanic basins. It is indicated that the early derived magma is imprinted with subducted slab of the new Tethys oceanic crust and the midlle-late magma has post-collisional characteristics. Therefore, the LVS as a response to the collision process between India and Asia continents has recorded the evolutionary process from collision to post-collision between the India and Asia continents from 64 Ma to 48 Ma in the Paleocene and Eocene.

Key words: continental collision; volcanic activity; Linzizong volcanic succession; evolution; Linzhou; Tibet