

# 早侏罗世叶巴组与桑日群火山岩:特提斯洋俯冲过程中的陆缘弧与洋内弧?\*

黄丰<sup>1,2</sup> 许继峰<sup>1,3\*\*</sup> 陈建林<sup>1,3</sup> 康志强<sup>4</sup> 董彦辉<sup>5</sup>

HUANG Feng<sup>1,2</sup>, XU JiFeng<sup>1,3\*\*</sup>, CHEN JianLin<sup>1,3</sup>, KANG ZhiQiang<sup>4</sup> and DONG YanHui<sup>5</sup>

1. 同位素地球化学国家重点实验室,中国科学院广州地球化学研究所,广州 510640

2. 中国科学院大学,北京 100049

3. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心,北京 100101

4. 桂林理工大学地球科学学院,桂林 541004

5. 国家海洋局海底科学重点实验室,国家海洋局第二海洋研究所,杭州 310012

1. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China

4. School of Earth Science, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

5. Key Laboratory of Submarine Geosciences, Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China

2014-08-26 收稿, 2014-12-05 改回.

**Huang F, Xu JF, Chen JL, Kang ZQ and Dong YH. 2015. Early Jurassic volcanic rocks from the Yebe Formation and Sangri Group: Products of continental marginal arc and intra-oceanic arc during the subduction of Neo-Tethys Ocean? *Acta Petrologica Sinica*, 31(7):2089–2100**

**Abstract** Studying evolutionary history of the Yarlung-Zangbo Neo-Tethys Ocean can help us to better understand how the Tibetan Plateau formed. The volcanic-sedimentary rocks of Yebe Formation and Sangri Group are widely distributed in southern Lhasa subterranean, which are usually considered to be the early-stage products of the Neo-Tethyan subduction. By dating of the LA-ICPMS U-Pb zircons from Yebe Formation volcanic rocks in Dazi, an andesitic sample and a basaltic sample yield  $175 \pm 2\text{Ma}$  and  $188 \pm 2\text{Ma}$ , respectively, which are in agreement with published dating results ( $174 \sim 193\text{Ma}$ ). These dating results indicate that both Yebe Formation and Sangri Group volcanics were formed in the Early Jurassic. Both volcanic rocks in Yebe Formation and Sangri Group show arc-like geochemical characteristics. In the other hand, volcanic rocks from the Yebe Formation show relatively higher Nb and Zr concentrations, Th/Y ratios and relatively lower La/Nb ratios than volcanic rocks of Sangri Group, demonstrating that the former were formed in a continental arc. Meanwhile the volcanic rocks from Sangri Group have geochemical signature similar to those from an intra-oceanic arc. Moreover, the Sangri Group, locating at the south side of the Yebe Formation and southern margin of Lhasa terrane, display igneous association different from the Yebe Formation. These facts hint that the Yebe Formation and Sangri Group represent a continental arc and an intra-oceanic arc, respectively, when the Neo-Tethys Ocean subducted northward below the Lhasa terrane in Early Jurassic.

**Key words** Yebe Formation; Sangri Group; Arc volcanics; Neo-Tethys Ocean; Tibetan Plateau

**摘要** 雅鲁藏布特提斯洋的演化对研究青藏高原的形成具有重要的意义,一般认为广泛分布于拉萨地块南部叶巴组和桑日群火山-沉积岩系是该特提斯洋早期的俯冲岩浆产物。本研究选取了拉萨附近达孜地区叶巴组中的2个中基性火成岩样

\* 本文受中国科学院先导专项(XDB03010300)、国家973项目(2015CB452602)、国际合作项目(IGCP/SIDA-600)、国家基金委创新群体项目(41121002)和国家自然科学基金项目(40872055、41273039、41373030)联合资助。

第一作者简介:黄丰,男,1988年生,博士生,地球化学专业,E-mail:wapfh@163.com

\*\* 通讯作者:许继峰,男,1963年生,研究员,地球化学专业,E-mail:jifengxu@gig.ac.cn

品进行了锆石 LA-ICPMS U-Pb 分析,结果显示其年龄分别为  $188 \pm 2\text{Ma}$  和  $175 \pm 2\text{Ma}$ ,与已发表的叶巴组中酸性火成岩的形成时代(174~193Ma)一致,已发表的桑日群火山岩的年龄也在相同范围内,因此叶巴组和桑日群火山岩喷发时间主要为早侏罗世。叶巴组和桑日群基性及中酸性岩浆均类似岛弧型火山岩,但前者具有相对高的 Nb、Zr 含量, Th/Y 比值及相对较低的 La/Nb 比值,呈现出大陆地壳组分增加的趋势,叶巴组火山岩表现为典型的大陆边缘弧特征而桑日群类似于洋内弧火山岩,桑日群火山岩分布于叶巴组南侧,并呈碎片似展布于拉萨地块南部,同时显示了与叶巴组不同的岩性组合,暗示同时代的叶巴组和桑日群火山-沉积岩可能分别代表特提斯洋俯冲过程中的形成的陆缘弧和洋内弧。

**关键词** 叶巴组;桑日群;弧火山岩;新特提斯洋;青藏高原

**中图法分类号** P588.14; P597.3

## 1 引言

雅鲁藏布蛇绿岩所代表的新特提斯洋的消失导致印度-亚欧大陆碰撞,最终形成了青藏高原(Yin and Harrison, 2000),而对于新特提斯洋的形成和演化过程目前并不是很清楚,以往一直认为新特提斯洋北向俯冲的最早地质记录是位于高原南部的桑日群火山-沉积岩系列,根据区域地质调查将其时代确定为晚侏罗到早白垩世,最近, Kang *et al.* (2014)报道了拉萨南部桑日县桑日群比马组火山岩的锆石 U-Pb 年龄为 189~195Ma,表明其时代为早侏罗世,显示出类似叶巴组的时代特征,而与原来划归为桑日群下部的麻木下组(136.5Ma, Zhu *et al.*, 2009)完全不同。因此,新特提斯洋俯冲早期可能产生了叶巴组和桑日群比马组两类火山岩,它们的形成时代类似,但是空间分布位置不同,并且岩性组合和产出形式上有明显差异,因此深入的研究对比叶巴组和桑日群火山岩的岩石学和地球化学特征,有助于了解新特提斯洋早期俯冲历史。本次研究选取了高原南部驱龙和甲马沟的叶巴组代表性基性和中性样品进行锆石年代学和主微量地球化学研究,并对比已有的叶巴组和桑日群火山岩地球化学数据,探讨叶巴组和桑日群在特提斯洋俯冲过程中可能代表的构造环境和早期演化历史。

## 2 地质概况

青藏高原由四个东西向延伸的陆块组成,由北向南主要包括松潘-甘孜、羌塘、拉萨及喜马拉雅地块,其缝合带分别为金沙江-班公湖-怒江及印度-雅鲁藏布江缝合带(Yin and Harrison, 2000; 潘桂棠等, 2004)。根据出露火山岩的形成时代,拉萨地块被划分为南冈底斯带和北岩浆带(Coulon *et al.*, 1986),而叶巴组和桑日群火山沉积岩组合主要分布于拉萨地块南部(朱弟成等, 2008a, b);根据沉积盖层和岩石基底性质差异, Zhu *et al.* (2011)将拉萨地块划分为北,中,南三部分,其分界线分别是狮泉河-纳木错蛇绿混杂岩带(SNMZ)和洛巴堆-米拉山断裂带(LMF),本文所研究的叶巴组和桑日群火山岩均出露于南拉萨地块的南部。

叶巴组火山岩主要分布于拉萨地块东部拉萨-墨竹工卡-工布江达之间(图 1),由浅海相钙碱性火山岩组合夹变质砂

板岩组成,火山岩岩性主要为浅变质玄武岩,玄武质熔结凝灰岩,英安岩,酸性凝灰岩及火山角砾岩等,叶巴组大致可划分为 3 个岩性段,一段以含火山角砾岩、火山集块岩为特征,二段以中酸性安山岩、英安岩、流纹岩、晶屑岩屑凝灰岩为主,三段则由沉凝灰岩、变质砂岩、粉砂岩及硅质岩、板岩、结晶灰岩组成,总厚达 5796~7748m 以上,其中玄武岩厚度从几十米到三千米不等,中酸性岩浆厚度可达 7000m(王全海等, 2002; 耿全如等, 2005)。晚侏罗统多底沟组和白垩系门中组地层角度不整合覆盖叶巴组变火山沉积岩组合之上(图 2),同时叶巴组内可见少量基性岩脉侵入(Zhu *et al.*, 2008)。本文研究的样品位于拉萨东达孜县一带,已有研究表明该处叶巴组内火山岩基性-中酸性端元属于同一地层端元(耿全如等, 2005, 2006; Zhu *et al.*, 2008),达孜叶巴组火山岩东西延伸约 250km,分布区南北最宽约 30km,向东西两端尖灭(董彦辉等, 2006),样品显示出较弱的片理化。

桑日群火山-沉积岩组合主要分布于拉萨地块南部的中部和东部,典型剖面位于拉萨南部的桑日县(图 1)。桑日群大致可划分出 12 个以上的韵律层,主要由灰白色角砾状灰岩、条带状泥质灰岩、泥灰岩、砂岩夹安山岩、火山角砾岩等组成,角砾状灰岩由大小不等的灰岩砾块堆积而成,砾块一般 3~4cm,大者可达 1m,无分选性,杂基支撑;砾块为由含浅水生物的礁块灰岩和少量泥灰岩、砂岩组成。火山岩主要由上部的比马组和下覆的麻木下组组成,比马组以玄武岩,玄武安山岩,安山岩为主,间夹及少量英安岩,夹细粒的砂板岩及较多的碳酸盐岩,区域上厚度稳定,总厚度可达 2400m,其中火山岩厚度为 1600~1800m。桑日群下部麻木下组沉积岩部分为灰岩质砾岩及细晶灰岩,其北侧原划归为麻木下组火山岩,前人通过对这些火山岩的定年指示其形成在早白垩世(Zhu *et al.*, 2009; 康志强等, 2010),呈现与上部比马组完全不同的时代和组成,暗示两组岩石可能形成完全不同的构造背景,前者应该不属于早侏罗世的桑日群,因而本文在余下的讨论中,所述桑日群仅以典型标准剖面上的比马组为代表,不再涉及麻木下组。

## 3 分析方法

将选作锆石分析的样品粉碎后利用传统重磁筛选法挑选锆石,所有锆石挑选后粘在环氧树脂上进行抛光后在双目

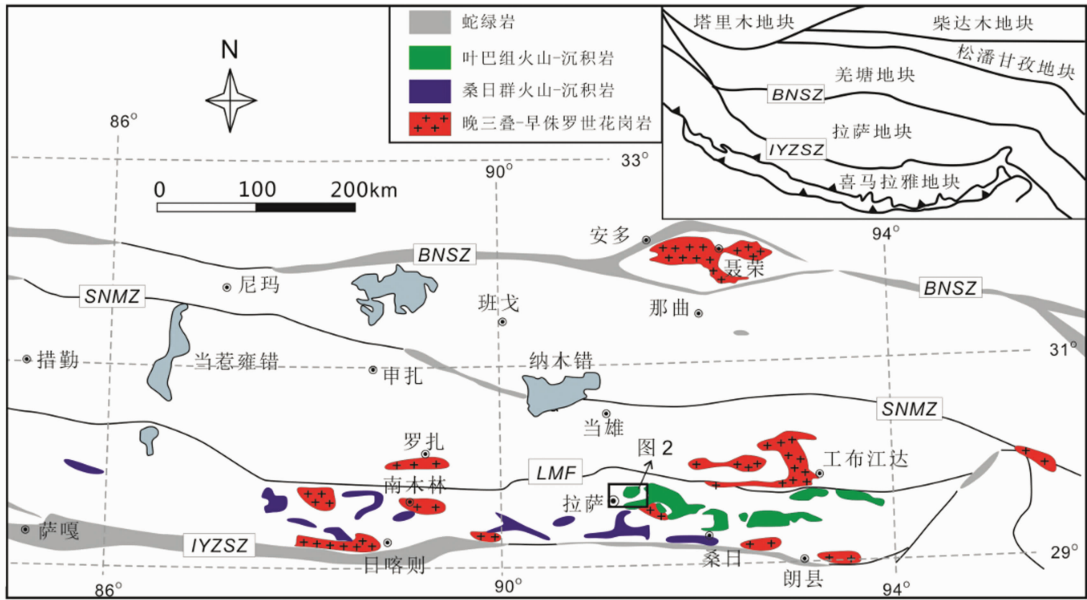


图1 叶巴组及桑日群火山-沉积岩分布简图(据 Zhu *et al.*, 2013 修改)

Fig.1 Simplified map of Lhasa terrane showing the distribution of Yeba Formation and Sangri Group volcanic-sedimentary rocks (after Zhu *et al.*, 2013)

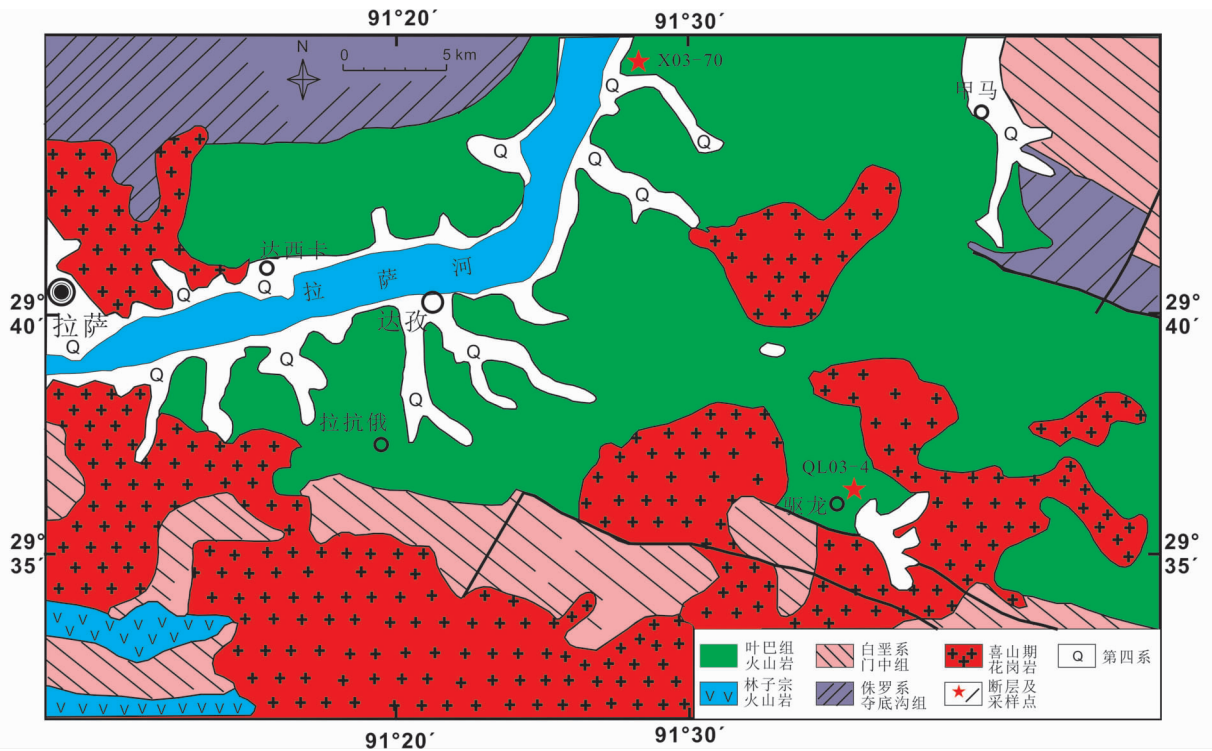


图2 达孜地区叶巴组火山岩分布图

Fig.2 Simplified geological map of Yeba Formation in Dazi

显微镜观察并利用阴极发光照相,从而选择未被改造和破坏的锆石进行 U-Pb 定年,本研究的年代学分析均在澳大利亚 Macquarie 大学 GEMOC 研究中心进行单颗粒锆石定年,定年所用仪器为带 Merchantek LUV 266 nm 型激光的 Agilent

HP4500 型 ICPMS。激光功率 1350kW,等离子气体 Ar 速率为 14L/min,补气气 Ar 速率 0.8L/min,激光剥蚀载气 He 速率 1L/min。激光剥蚀系统为 Nd:YAG266nm,脉冲频率 10Hz,测试脉冲能量约为 0.9mJ,剥蚀孔径 50μm,数据采集

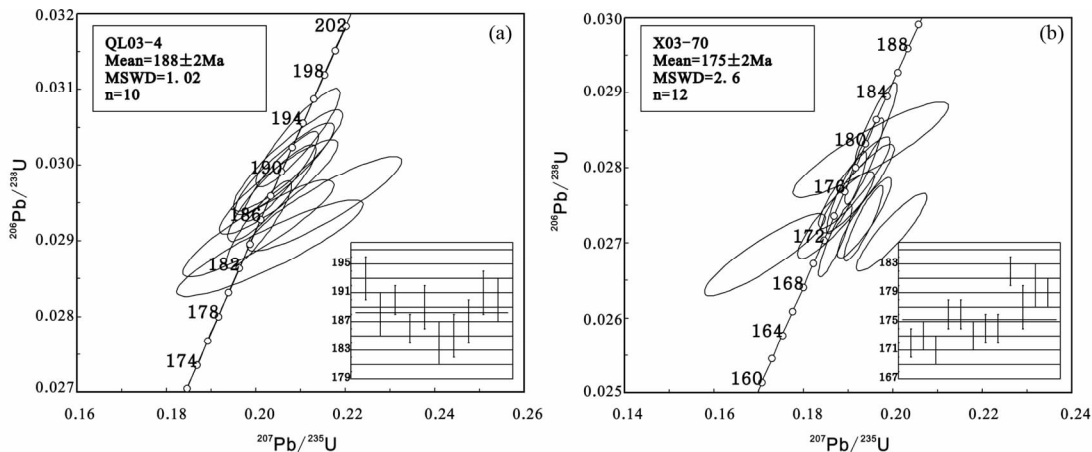


图3 达孜叶巴组中基性火成岩的锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 3 U-Pb concordia diagrams of the basalt and andesite of Yeba Formation in Dazi

表1 达孜叶巴组基性岩 (QL03-4) 和安山岩 (X03-70) 的锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年结果

Table 1 Zircon LA-ICPMS U-Pb data of the basalt (QL03-4) and andesite (X03-70) of Yeba Formation in Dazi

测点号	元素含量 ( $\times 10^{-6}$ )			同位素比值						年龄 (Ma)					
	Th	U	Th/U	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$
QL03-4 基性岩															
QL03-4-01	144.0	192.7	0.75	0.05004	0.00147	0.20950	0.00621	0.03036	0.00043	197	43	193	5	193	3
QL03-4-02	121.8	140.3	0.87	0.04985	0.00158	0.20364	0.00654	0.02963	0.00042	188	48	188	6	188	3
QL03-4-03	81.7	130.9	0.62	0.04994	0.00133	0.20557	0.00560	0.02985	0.00039	192	39	190	5	190	2
QL03-4-04	166.8	181.8	0.92	0.04983	0.00119	0.20064	0.00488	0.02921	0.00038	187	33	186	4	186	2
QL03-4-05	39.3	76.4	0.51	0.05008	0.00212	0.20515	0.00872	0.02971	0.00041	199	73	189	7	189	3
QL03-4-06	41.1	65.0	0.63	0.05099	0.00353	0.20317	0.01377	0.02890	0.00042	240	159	188	12	184	3
QL03-4-07	132.6	139.8	0.95	0.04989	0.00287	0.20058	0.01119	0.02916	0.00042	190	132	186	9	185	3
QL03-4-08	87.2	107.4	0.81	0.05296	0.00291	0.21533	0.01143	0.02949	0.00041	327	128	198	10	187	3
QL03-4-09	90.1	108.3	0.83	0.04999	0.00195	0.20724	0.00810	0.03006	0.00044	195	63	191	7	191	3
QL03-4-10	88.6	102.1	0.87	0.04999	0.00177	0.20646	0.00734	0.02995	0.00040	195	58	191	6	190	3
X03-70 安山岩															
X03-70-01	948.1	1179.3	0.80	0.05021	0.00058	0.18713	0.00245	0.02703	0.00032	205	14	174	2	172	2
X03-70-02	165.0	235.5	0.70	0.05337	0.00138	0.19974	0.00518	0.02714	0.00034	345	36	185	4	173	2
X03-70-03	121.2	150.8	0.80	0.04631	0.00249	0.17142	0.00891	0.02684	0.00036	14	117	161	8	171	2
X03-70-04	610.9	925.8	0.66	0.04969	0.00068	0.18970	0.00294	0.02767	0.00036	181	16	176	3	176	2
X03-70-05	281.1	299.6	0.94	0.05025	0.00138	0.19211	0.00541	0.02772	0.00039	207	40	178	5	176	2
X03-70-06	564.7	739.3	0.76	0.05147	0.00070	0.19349	0.00289	0.02726	0.00033	262	16	180	2	173	2
X03-70-07	196.1	255.1	0.77	0.04961	0.00147	0.18731	0.00568	0.02737	0.00038	177	45	174	5	174	2
X03-70-08	226.3	314.4	0.72	0.05137	0.00100	0.19365	0.00400	0.02733	0.00035	257	25	180	3	174	2
X03-70-09	570.5	902.5	0.63	0.04981	0.00069	0.19625	0.00314	0.02856	0.00038	186	17	182	3	182	2
X03-70-10	333.6	337.5	0.99	0.04995	0.00134	0.19143	0.00529	0.02780	0.00040	193	38	178	5	177	3
X03-70-11	67.9	100.1	0.68	0.05009	0.00294	0.19503	0.01148	0.02824	0.00042	199	107	181	10	180	3
X03-70-12	1341.2	1460.1	0.92	0.05000	0.00061	0.19360	0.00282	0.02809	0.00038	195	15	180	2	179	2

模式为快速跳峰下的时间分辨分析,详细的分析方法参见文献(董彦辉等,2006)。

选择尽可能新鲜的样品用于主微量分析,所有火山岩样品主微量实验均在中国科学院广州地球化学研究所完成。主量元素分析采用碱熔玻璃片法,然后利用 XRF 测试,分析精度优于 5%,详细步骤参见文献(李献华等,2002)。微量元素利用 HF + HNO<sub>3</sub> + HClO<sub>4</sub> 混合酸在高温高压下溶解,稀释后在 Perjub-Ekmer Scienc Elan 6000 型电感耦合等离子体

谱仪(ICP-MS)上完成,分析精度优于 10%,相关的方法参见刘颖等(1996)和 Chen *et al.* (2010)。

## 4 分析结果

### 4.1 锆石 U-Pb 年代学

进行锆石 U-Pb 年代学测定样品为玄武岩(QL03-4)和安山岩(X03-70),分别位于驱龙和甲马附近,所选出的锆石均

表2 达孜叶巴组火山岩主量 (wt%)、微量 ( $\times 10^{-6}$ ) 元素组成

Table 2 Whole rock major (wt%) and trace ( $\times 10^{-6}$ ) element compositions of Yeba Formation in Dazi

样品号	QL03-4	X03-70 *	10CWD-01	10CWD-02
岩性	玄武岩	安山岩	玄武岩	玄武岩
SiO <sub>2</sub>	53.42	57.75	45.29	48.52
TiO <sub>2</sub>	1.17	0.71	0.87	0.92
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.45	15.64	18.06	16.13
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>T</sup>	7.24	7.76	9.86	9.59
MnO	0.08	0.12	0.17	0.17
MgO	2.55	5.05	6.03	6.53
CaO	7.06	6.00	9.15	6.13
Na <sub>2</sub> O	5.42	3.84	4.28	4.96
K <sub>2</sub> O	1.30	0.06	0.02	0.06
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.14	0.03	0.19	0.18
LOI	1.00	3.50	5.90	4.70
Total	99.8	100.5	99.80	97.90
Mg <sup>#</sup>	45	60	59	61
Cr	11.9	200	65.3	112
Rb	67.1	1.40	0.26	0.25
Ba	99.0	41.0	28.7	58.4
Th	3.31	1.42	0.94	1.14
U	0.86	0.62	0.25	0.30
Nb	6.35	2.20	2.68	2.81
Ta	0.40	0.14	0.18	0.18
La	15.7	5.83	8.25	8.23
Ce	35.2	12.3	18.7	19.2
Pr	4.54	1.72	2.68	2.74
Sr	445	640	301	313
Nd	19.6	7.39	12.3	12.6
Zr	133	62.3	29.3	65.4
Hf	3.68	1.63	1.07	1.81
Sm	4.61	1.97	2.99	3.04
Eu	1.48	0.74	0.95	0.92
Gd	4.95	2.67	3.14	3.23
Tb	0.84	0.39	0.55	0.54
Dy	5.15	2.43	3.46	3.48
Y	28.1	13.3	17.4	17.7
Ho	1.10	0.48	0.74	0.76
Er	3.03	1.29	2.01	2.07
Tm	0.45	0.21	0.29	0.31
Yb	2.82	1.43	1.82	1.95
Lu	0.44	0.23	0.27	0.30

注：\* 数据引自董彦辉等，2006

无色透明，锆石自形程度完好，选取阴极发光图上没有明显裂隙和变质的锆石颗粒进行分析。QL03-4 和 X03-70 两个样品中锆石的 Th/U 比值变化于 0.51 ~ 0.95 和 0.63 ~ 0.99 之间，属于典型的岩浆成因锆石 (Corfu *et al.*, 2003; 吴元保和郑永飞, 2004)。所有锆石 U-Pb 比值均利用 Andersen 的软件进行普通铅校正 (Andersen, 2002)，<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄具有较小的变化范围 (表 1)，两个样品分别集中在 184 ~ 193Ma 和 171 ~ 182Ma，这些样品具有谐和的 U-Pb 年龄 (图 3a, b)，<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄的加权平均值分别为 188 ± 2Ma 和 175 ± 2Ma，该年龄可代表岩石的岩浆结晶年龄。

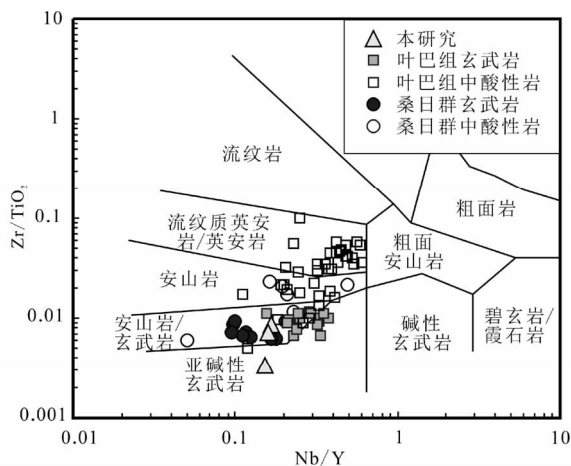


图4 叶巴组和桑日群火山岩的 Zr/TiO<sub>2</sub>-Nb/Y 岩石分类图解

叶巴组和桑日群火山岩数据引自耿全如等, 2005; 董彦辉等, 2006; Zhu *et al.*, 2008; 曾忠诚等, 2009; 陈炜等, 2009; Kang *et al.*, 2014. 图 5 ~ 图 8 的叶巴组和桑日群火山岩数据来源同此图 Fig. 4 Zr/TiO<sub>2</sub>-Nb/Y diagram of the Yeba Formation and Sangri Group volcanic rocks

#### 4.2 主微量元素

叶巴组内的基性岩具有较大变化范围的 SiO<sub>2</sub> 含量 (45.29% ~ 57.75%)，明显的富 Na 特征，MgO 含量均在 2.5% 以上，最高可达 6.5% 以上，具有较高的 Mg<sup>#</sup> 值 (45 ~ 60) (表 2)。考虑到火山岩均已经遭受轻微蚀变，本文主要利用微量元素进行岩性分类，成分上主要为钙碱性玄武岩-安山岩系列 (图 4)。

在微量元素组成上，叶巴组基性岩的稀土配分模式近于平坦，(La/Yb)<sub>N</sub> 仅为 2.9 ~ 3.3，并没有大量的轻重稀土分异，δEu = 0.90 ~ 0.98，并不出现较大异常，与叶巴组酸性火山岩呈现出完全不同的分配特征 (图 5)。基性岩大离子亲石元素含量较低，如 Rb = 0.25 × 10<sup>-6</sup> ~ 67.1 × 10<sup>-6</sup>，Ba = 28.7 × 10<sup>-6</sup> ~ 99.0 × 10<sup>-6</sup>，微量元素蛛网图上仅有 Sr 显示出正异常，高场强元素 (如 Nb, Ta) 含量也较低，在蛛网图上显示出明显的负异常，显示出典型的弧岩浆成分特征。

### 5 讨论

#### 5.1 叶巴组和桑日群火山岩的时代

火成岩的形成时代对于研究其地质过程具有重要意义，正确的厘定火成岩的结晶年龄，可以为探索地质构造活动提供线索。对于叶巴组和桑日群的形成时代一直都颇多争议，早期 (王乃文等, 1983) 根据拉萨附近叶巴组火成岩覆盖在晚白垩世柳梧组之上，断定其为晚白垩世产物，而后大量的区域地质调查根据叶巴组内沉积岩中发现的双壳，虫迹及珊瑚化石，认为叶巴组是侏罗纪的岩浆活动产物，但是对于叶巴

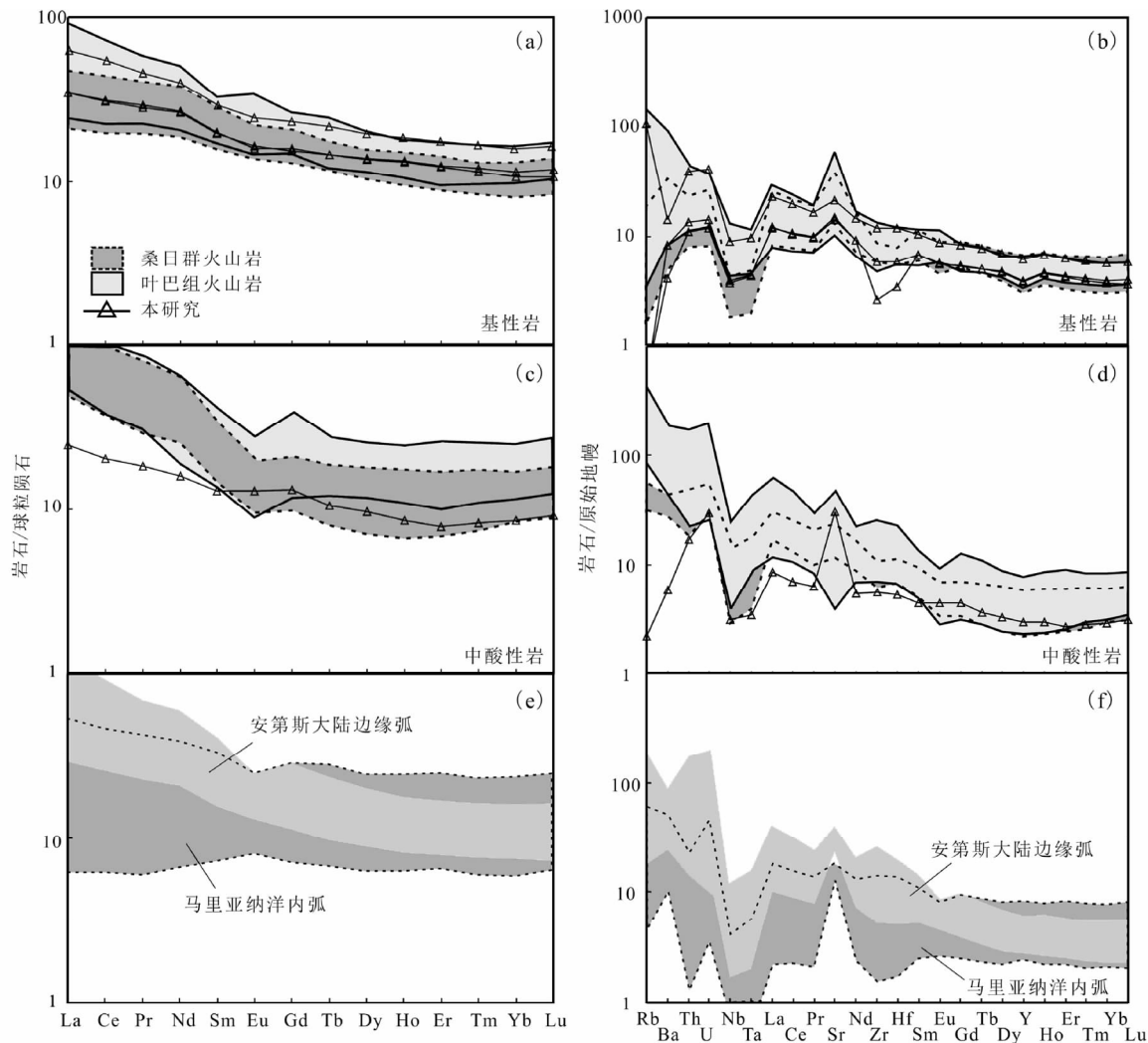


图5 叶巴组、桑日群火山岩及安第斯大陆边缘弧、马里亚纳洋内弧火山岩的稀土元素配分图和微量元素蛛网图(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

安第斯大陆边缘弧火山岩数据引自 Stern (2004), 马里亚纳洋内弧火山岩数据引自 Tamura *et al.* (2014)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace-element spider diagrams of Yeba Formation, Sangri Group, Andes and Mariana arc volcanic rocks (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

组属于早、中或晚侏罗世仍存在争议(苟金, 1994; 阴家润等, 1998; 裴树文, 1999; 毛国政和胡敬仁, 2002; Yin and Grant-Mackie, 2005)。由于化石指示的年代可能有较宽的变化范围, 因为并不能完全准确确定叶巴组的时限。董彦辉等(2006)首次使用锆石 U-Pb 定年确定了叶巴组英安岩形成时代为  $174.4 \pm 1.7\text{Ma}$ , 而后耿全如等(2006)和 Zhu *et al.* (2008)对拉萨附近叶巴组酸性火山岩锆石 U-Pb 定年显示叶巴组火成岩时代为早侏罗世, 最近, 陈炜等(2009)报道了靠近工布江达得明顶地区的叶巴组英安岩年龄为  $192.7 \pm 1.3\text{Ma}$ , 这些最新的高精度定年结果显示叶巴组火山岩喷发时代为早侏罗世。

尽管目前对于叶巴组火山岩形成时代限定已经很多, 然而已有的岩浆锆石年龄均从英安岩中获得, 并不能代表与其

共生的基性岩的形成年龄, 本文的研究表明叶巴组中基性岩浆喷发时代为  $175 \sim 188\text{Ma}$ , 显示了与酸性岩近于一致的年龄, 证实了叶巴组基性及中酸性火山岩喷发时代一致, 均处于早侏罗世。

桑日群和叶巴组为拉萨地块中生代早期拉萨地块上仅有的火山岩出露, 对于桑日群火山岩形成时代目前还存在争议, 西藏地质局第二地质队曾在桑日群采集到较多的生物化石, 在 1994 年泽当区域地质调查工作中增加了一些新的种属, 经鉴定为晚侏罗世-早白垩世, 同时采集了桑日群比马组安山岩进行 Rb-Sr 等时线测年, 获得了  $125\text{Ma}$  和  $92\text{Ma}$  的年龄, 因此确定桑日群形成时代为早白垩世。2007 年对泽当地区进行了 1:25 万区域地质调查表明, 桑日群中包含大量晚侏罗世双壳、腹足、珊瑚等化石, 因此将泽当地区桑日群时代

归属为晚侏罗世。由于拉萨地块上侏罗纪火山岩均遭受了不同程度的蚀变, 全岩 Rb-Sr 可能遭受后期变质作用影响, 而化石并不能良好的指示火成岩形成时代。最近, Kang *et al.* (2014) 选取了桑日县桑日群比马组的火山沉积岩剖面进行同位素年代学和地球化学研究, 表明桑日群比马组中基性凝灰岩和安山岩的形成时代为  $189 \pm 3\text{Ma}$  和  $195 \pm 3\text{Ma}$ , 更新了以往对桑日群形成时代的认识。同时在日喀则地区也同时发现了少量桑日群火山沉积岩组合, 其中英安岩锆石定年显示其形成时代为  $177\text{Ma}$  (康志强, 未发表数据), 表明桑日群火山岩主要形成于早侏罗世, 基本与叶巴组同期。

## 5.2 叶巴组和桑日群火山岩的成因和构造环境

叶巴组和桑日群火山岩广泛分布于拉萨地块南缘, 它们均形成于早侏罗世, 二者均包括基性-中酸性的岩石组合系列, 已有研究表明叶巴组和桑日群中基性-中酸性岩石组合形成于具有相同的时代和类似的地球化学特征, 因此可能形成于相同的构造环境 (Kang *et al.*, 2014; Zhu *et al.*, 2008)。本文结合前人发表的相关资料, 试图厘定和比较叶巴组和桑日群火山岩的成因和构造环境。

### 5.2.1 基性岩

由于叶巴组和桑日群火山岩均遭受了不同程度的蚀变, 在火山岩就位后长期的地质演化过程中活动性元素可能发生迁移 (Ding *et al.*, 2013), 较高的烧失量说明火成岩存在蚀变, 因此高活动性元素如 K、U、Ba 等并不能代表岩石源区组成, 交代作用会导致 Sr 含量增加和 Sr 同位素的快速增长, 然而在 Sr-Nd 同位素上叶巴组和桑日群均显示了较低的变化范围 (图 6), Sr-Nd 同位素可能并未遭受后期蚀变和海水交代作用影响, 可以代表源区组成。在蚀变和低程度的变质过程中, 相容元素 Cr、Ni、稀土元素及高场强元素 (如 Th、Ti、Nb、Ta、Zr、Hf) 不会受到影响, 因而可以指示源区特征 (Bienvenu *et al.*, 1990)。叶巴组和桑日群火山岩均显示了一致的稀土和高场强元素含量和配分模式, 进一步证明了这些元素在后期演化过程中并未遭受重大改变。

叶巴组和桑日群玄武岩均呈现出变化范围较大的  $\text{Mg}^\#$  值 (35~65), Cr 及 Ni 含量, 高  $\text{MgO}$  玄武岩并未表现出结晶分异和明显的地壳混染, 可以代表其源区组成, 微量元素蛛网图上类似岛弧岩浆的分配模式 (相对富集 LILE 而亏损 HFSE), 可以推断两套玄武岩均源自俯冲环境地幔楔物质部分熔融 (Zhu *et al.*, 2008; Kang *et al.*, 2014)。在 Sr-Nd 同位素上, 桑日群具有更原始的特征, 接近于雅江蛇绿岩 (图 6), 而叶巴组相对富集, 暗示源区地幔物质可能有所差异, 或者叶巴组遭受了部分地壳物质混合 (Zhu *et al.*, 2008)。

从微量元素蛛网图上叶巴组和桑日群玄武质系列均表现出类似岛弧火山岩的元素配分模式 (图 5), Hf/3-Th-Ta 判别图解上两套火山岩均落在岛弧岩浆内 (图 7a), 暗示两套岩石均源自新特提斯洋北向俯冲过程中形成的岛弧背景, 大洋与大陆演化过程中常常伴随着元素的迁移与富集趋势, 利

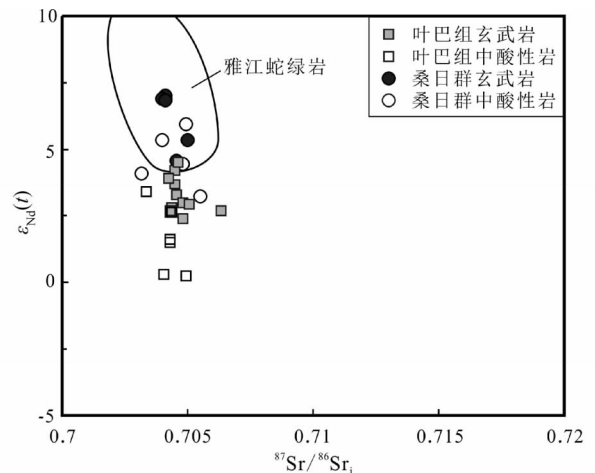


图 6 叶巴组和桑日群火山岩的 Sr-Nd 同位素组成  
雅江蛇绿岩数据引自 Miller *et al.*, 2003; Xu and Castillo, 2004

Fig. 6  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  vs.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$  diagrams of Yeba Formation and Sangri Group volcanic rocks

用这些元素的活动性可以区分大陆边缘弧和洋内弧, 在 Nb-Zr 图解上, 叶巴组玄武岩中 Zr 和 Nb 含量呈现了不同程度的增长趋势, 显示了类似安第斯型大陆边缘弧的特征, 而桑日群玄武岩 Nb 含量普遍在  $4 \times 10^{-6}$  以下, Zr 含量低于  $100 \times 10^{-6}$ , 显示了类似马里亚纳弧火山岩的特征 (图 7b), 利用 Th/Yb-Ta/Yb 图解可以有效的区分陆缘弧和洋内弧, 对叶巴组和桑日群中的玄武质岩石进行对比, 可以看出叶巴组主要显示为大陆边缘弧特征, 桑日群火山岩相对于叶巴组火山岩来说表现出更亏损的地球化学特征 (图 7c)。在 La/Nb-Th/Y 图解上叶巴组玄武岩具有更接近大陆边缘弧 (如安第斯弧) 的元素组成, 桑日群火山岩也显示了类似洋内弧 (如马里亚纳弧) 亲性和性 (图 7d)。Sr-Nd 同位素上桑日群火山岩类似更亏损的雅江蛇绿岩, 叶巴组火山岩同位素变化范围较大且更加富集, 暗示大陆地壳物质的不断加入, 考虑到桑日群火山岩均分布在叶巴组火山岩的南侧, 更靠近雅江蛇绿岩带 (图 1), 而两者有具有同样的岩浆结晶时间 (早侏罗世), 表明在俯冲背景下叶巴组和桑日群源区遭受的俯冲物质影响不同, 叶巴组遭受了更多陆源地壳物质的混染, 暗示其源自大陆边缘, 相对于叶巴组来说, 桑日群更靠近大洋内部, 岩浆产生过程中并未出现大量陆源物质混染, 在叶巴组内含有大量砂板岩存在, 而桑日群内部大量出露灰岩层, 尽管灰岩仅在浅海环境下形成, 但也表明桑日群具有更多的大洋特征, 桑日群火山岩东西向间断延伸约 400km, 零星分布于拉萨地块南部, 可能为新特提斯洋俯冲早期形成的洋内弧一侧火山弧在后期地质作用下变成无根的火山-沉积岩组合。

### 5.2.2 中酸性岩

对于中酸性岩浆成因一般具有两种认识, 一是基性岩浆的结晶分异作用 (Bacon and Druitt, 1988), 形成成分连续变化的岩浆系列, 如玄武岩, 安山岩, 英安岩等, 在俯冲带之下

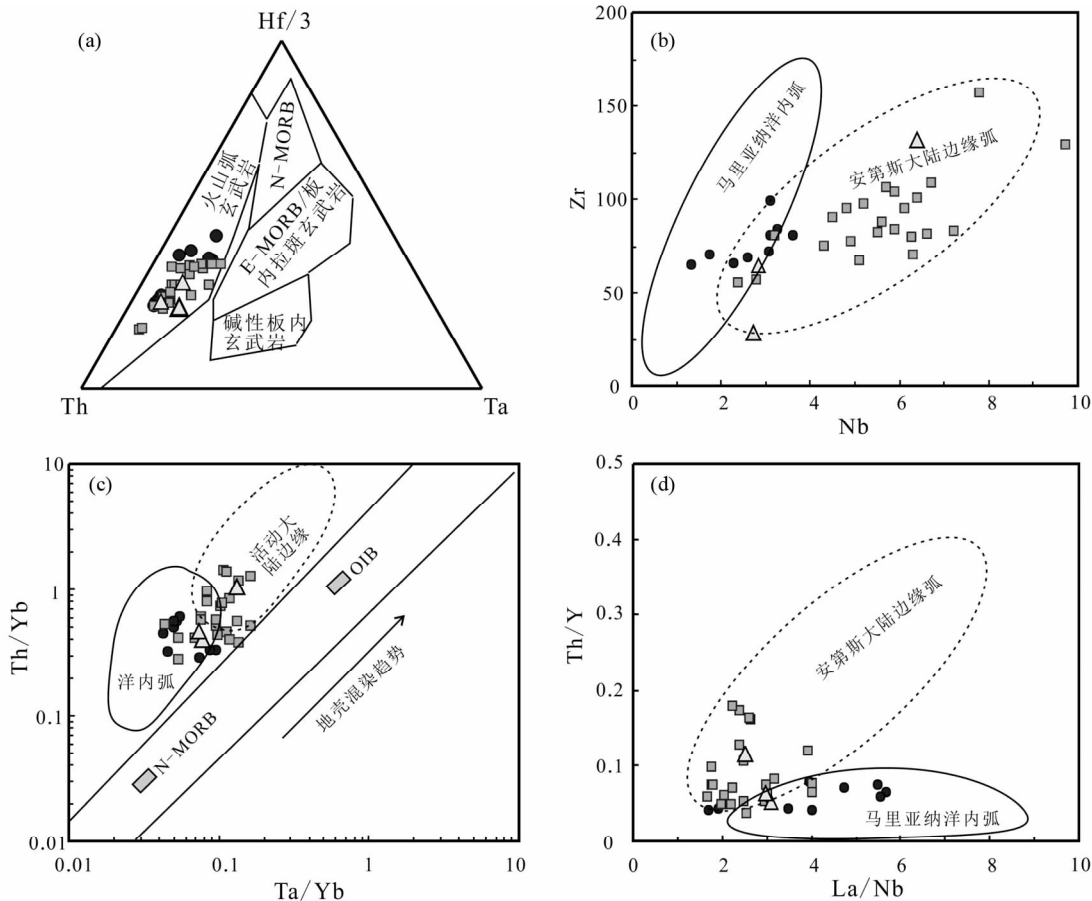


图7 叶巴组和桑日群基性火山岩的构造判别图

Fig. 7 Tectonic discrimination diagrams for Yeba Formation and Sangri Group basaltic volcanic rocks

地幔部分形成的岩浆常常表现出结晶分异特征；二是地壳深部部分熔融作用 (Roberts and Clemens, 1993)，即地幔部分熔融形成热的基性岩浆侵入到冷的地壳岩石使地壳部分发生部分熔融，从而产生酸性岩浆，这种岩浆特征具有与幔源基性岩明显不同的同位素特征。基性岩浆结晶分异会造成基性岩浆与中酸性物质具有类似的同位素组成，桑日群基性-酸性火山岩表现出类似的 Sr-Nd 同位素特征，且酸性岩出露体积小（仅为玄武岩的四分之一以下），这与基性岩浆分异形成中酸性岩结果一致 (Kang *et al.*, 2014)。

以往认为叶巴组火山岩是一套双峰式火山岩 (耿全如等, 2005, 2006)，最近的研究表明叶巴组是一套基性-中性-酸性连续演化的火成岩系列，并不具有典型的双峰式火山岩特征。叶巴组中酸性岩的分布体积可达 90%，微量元素及 Sr-Nd 同位素上均与基性岩具有明显差别，因此不可能是基性岩浆分异的结果，La-La/Sm 图解表明叶巴组中酸性岩浆源于部分熔融（未示出），稀土配分模式图上显示出中稀土的相对亏损，可能源于富集角闪石的下地壳的部分熔融 (Zhu *et al.*, 2008)。

叶巴组和桑日群的中酸性岩在 Nb-Y 图解上显示了岛弧/同碰撞的岩浆特征，而在 Rb-Y + Nb 图解上均落在岛弧

岩浆范围内，在拉萨地块南部出现零散分布的早侏罗世花岗岩侵入体，主要集中在桑日县，谢通门，尼木，南木林，工布江达及雄村 (张宏飞等, 2007；朱弟成等, 2008a, b；陈炜等, 2009；Zhu *et al.*, 2011；Guo *et al.*, 2013；董昕和张泽明, 2013；Lang *et al.*, 2014；郎兴海等, 2014)，这些花岗岩均显示出岛弧型的微量元素特征，与同时期的桑日群和叶巴组中酸性岩特征相似 (图 8)，微量元素蛛网图上叶巴组中酸性岩具有比桑日群更加富集的特征，与两套玄武岩成分特征一致 (图 5)，虽然二者均源自岛弧背景，结合上述对两类基性火山岩的分析，叶巴组和桑日群火山岩可能分别源自陆缘弧和洋内弧。

### 5.3 对新特提斯早期俯冲及成矿的指示

叶巴组和桑日群火山岩的锆石 U-Pb 年龄显示为早侏罗世，反映了早期新特提斯洋俯冲事件，尽管一些学者认为拉萨地块早侏罗火山岩可能和班公湖怒江洋向南俯冲有关 (耿全如等, 2005, 2006；Zhu *et al.*, 2011, 2013)。但是叶巴组位于拉萨地块南侧，距离班公湖怒江缝合带 300km 以上，在早白垩世拉萨地块南部出现了大量的地壳缩短 (England and Houseman, 1986；Murphy *et al.*, 1997)，形成埃达克质岩石，叶



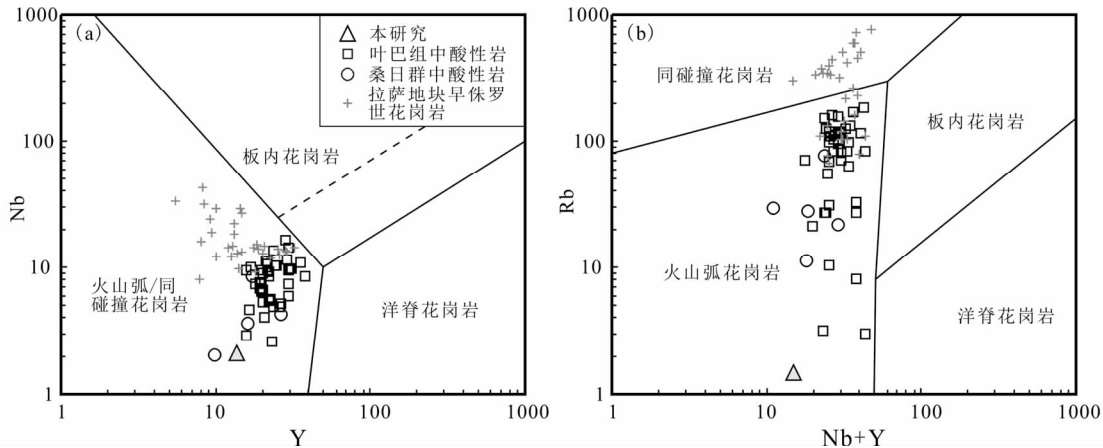


图8 叶巴组和桑日群中酸性火山岩的构造判别图

拉萨地块早侏罗纪花岗岩数据引自张宏飞等, 2007; 朱弟成等, 2008a, b; 陈炜等, 2009; Zhu *et al.*, 2011; Guo *et al.*, 2013; 董昕和张泽明, 2013; 和钟铨等, 2006

Fig. 8 Tectonic discrimination diagrams for Yeba Formation and Sangri Group felsic volcanic rocks

巴组出露的位置可能在班怒带 500km 外或者更远, 而桑日群位于叶巴组更南边, 不太可能受到班公湖怒江洋的南向俯冲影响。同时, 如果班公湖怒江洋的俯冲确实对拉萨地块早侏罗世岩浆活动有所贡献, 在靠近班公湖怒江缝合带的拉萨地块北侧应该出现同时代火山岩, 目前的资料表明, 拉萨地块北部仅有聂荣出现少量早侏罗世花岗岩 (朱弟成等, 2008a, b; Zhu *et al.*, 2011), 而这一套花岗岩被认为是班公湖怒江洋与安多地体的小规模碰撞形成, 而与班公湖怒江洋的大规模南向俯冲无关 (Guynn *et al.*, 2006; Zhu *et al.*, 2011)。

因此本文认为叶巴组和桑日群火山岩属于新特提斯洋俯冲产物, 拉萨地块中部和南部出露大量中生代火成岩 (朱弟成等, 2008a, b), Chu *et al.* (2006) 首次报导了拉萨地块南部早侏罗世花岗岩, 并认为其是新特提斯洋北向俯冲的结果, 随后大量晚三叠-早侏罗世花岗岩体被发现, 这一系列花岗岩均表现出典型的岛弧特征 (朱弟成等, 2008a, b), 结合叶巴组和桑日群的弧火山岩地球化学特征, 可以确定新特提斯洋俯冲在晚三叠-早侏罗世就已经开始。雅鲁藏布江中段硅质岩中发现了中-晚三叠放射虫 (朱杰等, 2005), 可能代表目前新特提斯洋最早的打开时间, 通过对早侏罗世火山岩沉积组合中生物化石调查, 确定了叶巴组主要形成于晚三叠-早侏罗世, 这与本文所获得的锆石年龄一致, 因此新特提斯洋俯冲在侏罗世就已经开始, 而大洋的打开很可能在早侏罗世甚至在此之前。

Aitchison *et al.* (2000) 通过对拉萨地块南部泽当地区的泽当, 大竹卡以及白朗三套地体研究认为, 其可能代表了新特提斯洋内俯冲过程中形成的残留洋弧, 弧前蛇绿岩及俯冲增生杂岩。McDermid *et al.* (2002)、Aitchison *et al.* (2007) 及韦栋梁等 (2007) 进一步证实了这种推断, 确定泽当洋内弧形成于晚侏罗纪, 然而 Zhang *et al.* (2014) 通过对泽当火山岩的研究认为, 钾含量增加是蚀变的结果, 而并不指示泽当地

区出现了洋内俯冲形成的钾玄岩, 泽当晚侏罗纪火山岩显示了类似叶巴组火山岩特征, 因而提出泽当也是冈底斯大陆边缘弧的一部分。本文通过对叶巴组和桑日群火山-沉积岩组合进行系统的分析研究认为, 叶巴组岩石组分遭受了更多的地壳物质混染, 可能代表新特提斯洋俯冲过程中靠近大陆边缘的陆缘弧, 而桑日群火山岩显示了较为原始的地球化学特征, 可能代表新特提斯洋北向俯冲过程中的洋内弧 (类似马里亚纳火山弧的结构), 新特提斯洋内俯冲的最早时间可以据桑日群火山岩形成的时代追溯为早侏罗世, 这一结论还需要更多的地球化学及沉积学资料证明。

在拉萨地块南部日喀则附近雄村地区发现的超大型斑岩铜矿引起了地质学者的广泛关注, 已有研究表明雄村地区存在大量早侏罗世侵入岩体 (181 ~ 171 Ma, Lang *et al.*, 2014; Tafti *et al.*, 2014), 显示了与桑日群火山岩类似的亏损岛弧火山岩特征 ( $Zr < 100 \times 10^{-6}$ ,  $\epsilon_{Nd}(t) = +5.5 \sim +7.6$ , 曲晓明等, 2007; 黄勇等, 2011), 并不同于叶巴组代表的大陆边缘弧环境, 同时在日喀则附近发现了 177 Ma 的桑日群流纹岩 (康志强, 未发表数据), 桑日群火山岩显示了与雄村矿床成矿火山岩相似的年代学及地球化学特征, 暗示桑日群火山岩可能与超大型斑岩矿床形成具有成因联系, 探索在拉萨地块南部东西延伸约 400 km 的桑日群火山岩, 对下一步找矿工作可能具有指导意义。深入探讨雅江特提斯洋的早期演化, 可以更好地理解早侏罗世俯冲的成岩及成矿过程。

## 6 结论

(1) 本文首次对拉萨地块南缘的叶巴组中的中基性岩进行了锆石 U-Pb 年代学研究, 结果表明其形成时代为 188 ~ 175 Ma, 为早侏罗世的岩浆活动产物, 与叶巴组英安岩年龄一致。

(2) 叶巴组 and 桑日群属于早侏罗世岩浆活动产物, 它们的火山岩具有类似弧火山岩的地球化学特征, 相对富集 LILE 而亏损 HFSE, 基性岩系列可能源自新特提斯洋俯冲的地幔楔源区。叶巴组中酸性系列很可能是富含角闪石的地壳部分熔融形成, 而桑日群中酸性系列应该是由基性岩浆分异而来。

(3) 叶巴组火山岩代表了新特提斯洋俯冲早期的大陆边缘弧, 相对于叶巴组火山岩, 桑日群火山岩显示了更加亏损的特征, 可能代表新特提斯洋内弧的火山岩单元。

**致谢** 感谢邬建斌、曾云川、熊秋伟和陈雪峰在野外采样过程中的帮助。感谢中国科学院广州地球化学研究所刘颖老师和胡光黔老师在岩石主微量分析方面的帮助。两位匿名审稿人对本文提出了宝贵的修改意见, 在此致以诚挚的谢意。

## References

Aitchison JC, Badengzhu, Davis AM, Liu JB, Luo H, Malpas JG, McDermid IRC, Wu H, Ziabrev SV and Zhou MF. 2000. Remnants of a Cretaceous intra-oceanic subduction system within the Yarlung-Zangbo suture (southern Tibet). *Earth and Planetary Science Letters*, 183(1-2): 231-244

Aitchison JC, McDermid IRC, Ali JR, Davis AM and Ziabrev SV. 2007. Shoshonites in southern Tibet record Late Jurassic rifting of a tethyan intraoceanic island arc. *The Journal of Geology*, 115(2): 197-213

Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report <sup>204</sup>Pb. *Chemical Geology*, 192(1-2): 59-79

Bacon CR and Druitt TH. 1988. Compositional evolution of the zoned calcalkaline magma chamber of Mount-Mazama, Crater Lake, Oregon. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 98(2): 224-256

Bienvenu P, Bougault H, Joron JL, Treuil M and Dmitriev L. 1990. MORB alteration-rare-earth element non-rare-earth hygromagmaphile element fractionation. *Chemical Geology*, 82: 1-14

Chen JL, Xu JF, Wang BD, Kang ZQ and Jie L. 2010. Origin of Cenozoic alkaline potassic volcanic rocks at Konglongxiang, Lhasa terrane, Tibetan Plateau: Products of partial melting of a mafic lower-crustal source? *Chemical Geology*, 273(3-4): 286-299

Chen W, Ma CQ, Bian QJ, Hu YQ, Long TC, Yu SL, Chen DM and Tu JH. 2009. Evidences from geochemistry and zircon U-Pb geochronology of volcanic rocks of Yeba Formation in Demingding area, the east of middle Gangdise, Tibet. *Geological Science and Technology Information*, 28(3): 31-40 (in Chinese with English abstract)

Chu MF, Chung SL, Song BA, Liu DY, O'Reilly SY, Pearson NJ, Ji JQ and Wen DJ. 2006. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints on the Mesozoic tectonics and crustal evolution of southern Tibet. *Geology*, 34(9): 745-748

Corfu F, Hanchar JM, Hoskin PWO and Kinny P. 2003. Atlas of zircon textures. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 469-500

Coulon C, Maluski H, Bollinger C and Wang S. 1986. Mesozoic and cenozoic volcanic rocks from central and southern Tibet: <sup>39</sup>Ar-<sup>40</sup>Ar dating, petrological characteristics and geodynamical significance. *Earth and Planetary Science Letters*, 79(3-4): 281-302

Ding X, Hu YH, Zhang H, Li CY, Ling MX and Sun WD. 2013. Major Nb/Ta fractionation recorded in garnet amphibolite facies

metagabbro. *Journal of Geology*, 121(3): 255-274

Dong X and Zhang ZM. 2013. Genesis and tectonic significance of the Early Jurassic magmatic rocks from the southern Lhasa terrane. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 1933-1948 (in Chinese with English abstract)

Dong YH, Xu JF, Zeng QG, Wang Q, Mao GZ and Li J. 2006. Is there a Neo-Tethys' subduction record earlier than arc volcanic rocks in the Sangri Group? *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 661-668 (in Chinese with English abstract)

England P and Houseman G. 1986. Finite strain calculations of continental deformation 2. Comparison with the India-Asia collision zone. *J. Geophys. Res.*, 91(B3): 3664-3676

Geng QR, Pan GT, Jin ZM, Wang LQ, Zhu DC and Liao ZL. 2005. Geochemistry and genesis of the Yeba volcanic rocks in the gangdise magmatic arc, Tibet. *Earth Science*, 30(6): 747-760 (in Chinese with English abstract)

Geng QR, Pan GT, Wang LQ, Zhu DC and Liao ZL. 2006. Isotopic geochronology of the volcanic rocks from the Yeba Formation in the Gangdise zone, Xizang. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 26(1): 1-7 (in Chinese with English abstract)

Gou J. 1994. A new knowledge on the attributes of Yeba Formation in Lhasa area. *Tibet Geology*, (11): 1-6 (in Chinese with English abstract)

Guo LS, Liu YL, Liu SW, Cawood PA, Wang ZH and Liu HF. 2013. Petrogenesis of Early to Middle Jurassic granitoid rocks from the Gangdise belt, Southern Tibet: Implications for early history of the Neo-Tethys. *Lithos*, 179: 320-333

Guyann JH, Kapp P, Pullen A, Heizier M, Gehrels G and Ding L. 2006. Tibetan basement rocks near Amdo reveal "missing" Mesozoic tectonism along the Bangong suture, central Tibet. *Geology*, 34(6): 505-508

He ZH, Yang DM, Zheng CQ and Wang TW. 2006. Isotopic dating of the Mamba granitoid in the Gangdise tectonic belt and its constraint on the subduction time of the Neotethys. *Geological Review*, 52: 100-106 (in Chinese with English abstract)

Huang Y, Tang JX, Lang XH, Zhang L and Chen Y. 2011. Geochemical characteristics of intrusive and volcanic rocks in No. II ore body of Xiongcu copper-gold deposit, Tibet: Constraints on rock genesis and tectonic setting. *Mineral Deposits*, 30(2): 361-373 (in Chinese with English abstract)

Kang ZQ, Xu JF, Chen JL, Wang BD and Dong YH. 2010. The geochronology of Sangri Group volcanic rocks in Tibet: Constraints from later Mamen intrusions. *Geochimica*, 39(6): 520-530 (in Chinese with English abstract)

Kang ZQ, Xu JF, Wilde SA, Feng ZH, Chen JL, Wang BD, Fu WC and Pan HB. 2014. Geochronology and geochemistry of the Sangri Group volcanic rocks, Southern Lhasa Terrane: Implications for the early subduction history of the Neo-Tethys and Gangdise magmatic arc. *Lithos*, 200-201: 157-168

Lang XH, Tang JX, Li ZJ, Huang Y, Ding F, Yang HH, Xie FW, Zhang L, Wang Q and Zhou Y. 2014. U-Pb and Re-Os geochronological evidence for the Jurassic porphyry metallogenic event of the Xiongcu district in the Gangdise porphyry copper belt, southern Tibet, PRC. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79(Part B): 608-622

Lang XH, Tang JX, Xie FW, Li ZJ, Huang Y, Ding F, Yang HH, Zhou Y and Wang Q. 2014. Geochronology and geochemistry of the southern porphyry in the Xiongcu district, Tibet and its geological implications. *Geotectonica et Metallogenia*, 38(3): 609-620 (in Chinese with English abstract)

Li XH, Liu Y, Tu XL, Hu GQ and Zeng W. 2002. Precise determination of chemical compositions in silicate rocks using ICP-AES and ICP-MS: A comparative study of sample digestion techniques of alkali fusion and acid dissolution. *Geochimica*, 31(3): 289-294 (in Chinese with English abstract)

Liu Y, Liu HC and Li XH. 1996. Simultaneous and precise determination of 40 trace elements in rock samples using ICP-MS. *Geochimica*, 25(6): 552-558 (in Chinese with English abstract)

- Mao GZ and Hu JR. 2002. Characteristics and genetic environment of the Yaiba Formation in Lhasa region. *Tibet Geology*, 20(1): 12 - 18 (in Chinese with English abstract)
- McDermid IRC, Aitchison JC, Davis AM, Harrison TM and Grove M. 2002. The Zedong terrane: A Late Jurassic intra-oceanic magmatic arc within the Yarlung-Tsangpo suture zone, southeastern Tibet. *Chemical Geology*, 187(3-4): 267 - 277
- Miller C, Thöni M, Frank W, Schuster R, Melcher F, Meisel T and Zanetti A. 2003. Geochemistry and tectonomagmatic affinity of the Yungbwa ophiolite, SW Tibet. *Lithos*, 66(3-4): 155 - 172
- Murphy MA, Yin A, Harrison TM, Dürr SB, Chen Z, Ryerson FJ, Kidd WSF, Wang X and Zhou X. 1997. Did the Indo-Asian collision alone create the Tibetan Plateau? *Geology*, 25(8): 719 - 722
- Pan GT, Wang LQ and Zhu DC. 2004. Thoughts on some important scientific problems in regional geological survey of the Qinghai-Tibet Plateau. *Geological Bulletin of China*, 23(1): 12 - 19 (in Chinese with English abstract)
- Pei SW. 1999. Early and Middle Jurassic bivalve fauna in volcanic rocks of Tibetan Lhasa block and its paleobiogeography. *Geoscience*, 13(3): 291 - 297 (in Chinese with English abstract)
- Qu XM, Xin HB and Xu WY. 2007. Petrogenesis of the ore-hosting volcanic rocks and their contribution to mineralization in Xiongcu superlarge Cu-Au deposit, Tibet. *Acta Geologica Sinica*, 81(7): 964 - 971 (in Chinese with English abstract)
- Roberts MP and Clemens JD. 1993. Origin of high-potassium, calc-alkaline, I-type granitoids. *Geology*, 21(9): 825 - 828
- Stern CR. 2004. Active Andean volcanism: Its geologic and tectonic setting. *Revista Geologica De Chile*, 31(2): 161 - 206
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313 - 345
- Tafti R, Lang JR, Mortensen JK, Oliver JL and Rebagliati CM. 2014. Geology and geochronology of the Xietongmen (Xiongcu) Cu-Au porphyry district, Southern Tibet, China. *Economic Geology*, 109(7): 1967 - 2001
- Tamura Y, Ishizuka O, Stern RJ, Nichols ARL, Kawabata H, Hirahara Y, Chang Q, Miyazaki T, Kimura JI, Emsley RW and Tatsumi Y. 2014. Mission immiscible: Distinct subduction components generate two primary magmas at Pagan Volcano, Mariana Arc. *Journal of Petrology*, 55(1): 63 - 101
- Wang NW, Wang S, Liu GF, Bassoulet J, Colehen M, Mascle L and Jaeger J. 1983. The Juro-Cretaceous marine-terrestrial alternating formations in Lhasa area, Xizang (Tibet). *Acta Geologica Sinica*, (1): 83 - 95 (in Chinese with English abstract)
- Wang QH, Wang BS, Li JG, Yao P, Li Z, Zhou ZY, Cheng LJ and Liu HF. 2002. Basic features and ore prospect evaluation of the Gangdise island arc, Tibet, and its copper polymetallic ore belt. *Geological Bulletin of China*, 21(1): 35 - 40 (in Chinese with English abstract)
- Wei DL, Xia B, Zhou GQ, Yan J, Wang R and Zhong LF. 2007. Geochemistry and Sr-Nd isotope characteristics of tonalites in Zêtang, Tibet: New evidence for intra-Tethyan subduction. *Science in China (Series D)*, 50(6): 836 - 846
- Wu YB and Zheng YF. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1554 - 1569
- Xu JF and Castillo PR. 2004. Geochemical and Nd-Pb isotopic characteristics of the Tethyan asthenosphere: Implications for the origin of the Indian Ocean mantle domain. *Tectonophysics*, 393(1-4): 9 - 27
- Yin A and Harrison TM. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28: 211 - 280
- Yin J and Grant-Mackie JA. 2005. Late Triassic-Jurassic bivalves from volcanic sediments of the Lhasa block, Tibet. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 48(3): 555 - 577
- Yin JR, Gou J, Pei SW and Jiang GW. 1998. The middle Jurassic bivalve fauna in the volcanic rock series (Yaiba Formation) of the Lhasa massif and its paleogeographic significance. *Regional Geology of China*, 17(2): 132 - 136 (in Chinese with English abstract)
- Zeng ZC, Liu DM, Zeren ZX and Nima CR. 2009. Geochemistry and tectonic setting of lavas in the Yeba Formation in the eastern part of the Gangdise belt. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 39(3): 435 - 445 (in Chinese with English abstract)
- Zhang HF, Xu WC, Guo JQ, Zong KQ, Cai HM and Yuan HL. 2007. Zircon U-Pb and Hf isotopic composition of deformed granite in the southern margin of the Gangdise belt, Tibet: Evidence for Early Jurassic subduction of Neo-Tethyan oceanic slab. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1347 - 1353 (in Chinese with English abstract)
- Zhang LL, Liu CZ, Wu FY, Ji WQ and Wang JG. 2014. Zedong terrane revisited: An intra-oceanic arc within Neo-Tethys or a part of the Asian active continental margin? *Journal of Asian Earth Sciences*, 80: 34 - 55
- Zhu DC, Pan GT, Chung SL, Liao ZL, Wang LQ and Li GM. 2008. SHRIMP zircon age and geochemical constraints on the origin of Lower Jurassic volcanic rocks from the Yeba Formation, southern Gangdise, South Tibet. *International Geology Review*, 50(5): 442 - 471
- Zhu DC, Pan GT, Wang LQ, Mo XX, Zhao ZD, Zhou CY, Liao ZL, Dong GC and Yuan SH. 2008a. Spatial-temporal distribution and tectonic setting of Jurassic magmatism in the Gangdise belt, Tibet, China. *Geological Bulletin of China*, 27(4): 458 - 468 (in Chinese with English abstract)
- Zhu DC, Pan GT, Wang LQ, Mo XX, Zhao ZD, Zhou CY, Liao ZL, Dong GC and Yuan SH. 2008b. Tempo-spatial variations of Mesozoic magmatic rocks in the Gangdise belt, Tibet, China, with a discussion of geodynamic setting-related issues. *Geological Bulletin of China*, 27(9): 1535 - 1550 (in Chinese with English abstract)
- Zhu DC, Zhao ZD, Pan GT, Lee HY, Kang ZQ, Liao ZL, Wang LQ, Li GM, Dong GC and Liu B. 2009. Early cretaceous subduction-related adakite-like rocks of the Gangdise Belt, southern Tibet: Products of slab melting and subsequent melt-peridotite interaction? *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(3): 298 - 309
- Zhu DC, Zhao ZD, Niu YL, Mo XX, Chung SL, Hou ZQ, Wang LQ and Wu FY. 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
- Zhu DC, Zhao ZD, Niu YL, Dilek Y, Hou ZQ and Mo XX. 2013. The origin and pre-Cenozoic evolution of the Tibetan Plateau. *Gondwana Research*, 23(4): 1429 - 1454
- Zhu J, Du YS, Liu ZX, Feng QL, Tian WX, Li JP and Wang CP. 2005. Mesozoic radiolarian chert from the middle sector of the Yarlung-Zangbo suture zone, Tibet and its tectonic implications. *Science in China (Series D)*, 35(12): 1131 - 1139 (in Chinese)

## 附中文参考文献

- 陈炜, 马昌前, 边秋娟, 胡远清, 龙桃成, 喻水林, 陈冬明, 屠江海. 2009. 西藏得明顶地区叶巴组火山岩地球化学特征和同位素 U-Pb 年龄证据. *地质科技情报*, 28(3): 31 - 40
- 董昕, 张泽明. 2013. 拉萨地体南部早侏罗世岩浆岩的成因和构造意义. *岩石学报*, 29(6): 1933 - 1948
- 董彦辉, 许继峰, 曾庆高, 王强, 毛国政, 李杰. 2006. 存在比桑日群弧火山岩更早的新特提斯洋俯冲记录么? *岩石学报*, 22(3): 661 - 668
- 耿全如, 潘桂棠, 金振民, 王立全, 朱弟成, 廖忠礼. 2005. 西藏冈底斯带叶巴组火山岩地球化学及成因. *地球科学*, 30(6): 747 - 760
- 耿全如, 潘桂棠, 王立全, 朱弟成, 廖忠礼. 2006. 西藏冈底斯带叶巴组火山岩同位素地质年代. *沉积与特提斯地质*, 26(1): 1 - 7

- 苟金. 1994. 对拉萨地区叶巴组时代归属的新认识. 西藏地质, (11): 1-6
- 和钟铎, 杨德明, 郑常青, 王天武, 2006. 冈底斯带门巴花岗岩同位素测年及其对新特提斯洋俯冲时代的约束. 地质论评, 52: 100-106
- 黄勇, 唐菊兴, 郎兴海, 张丽, 陈渊. 2011. 雄村铜金矿床 II 号矿体侵入岩-火山岩的地球化学特征: 对岩石成因及构造背景的约束. 矿床地质, 30(2): 361-373
- 康志强, 许继峰, 陈建林, 王保弟, 董彦辉. 2010. 西藏南部桑日群火山岩的时代: 来自晚期马门侵入体的约束. 地球化学, 39(6): 520-530
- 郎兴海, 唐菊兴, 谢富伟, 李志军, 黄勇, 丁枫, 杨欢欢, 周云, 王勤. 2014. 西藏雄村矿区南部玢岩的地质年代学、岩石地球化学及其地质意义. 大地构造与成矿学, 38(3): 609-620
- 李献华, 刘颖, 涂湘林, 胡光黔, 曾文. 2002. 硅酸盐岩石化学组成的 ICP-AES 和 ICP-MS 准确测定: 酸溶与碱熔分解样品方法的对比. 地球化学, 31(3): 289-294
- 刘颖, 刘海臣, 李献华. 1996. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素. 地球化学, 25(6): 552-558
- 毛国政, 胡敬仁. 2002. 拉萨地区叶巴组的特征及形成环境. 西藏地质, 20(1): 12-18
- 潘桂棠, 王立全, 朱弟成. 2004. 青藏高原区域地质调查中几个重大科学问题的思考. 地质通报, 23(1): 12-19
- 裴树文. 1999. 拉萨地块火山岩系内早-中侏罗世双壳类动物群及其古生物地理. 现代地质, 13(3): 291-297
- 曲晓明, 辛洪波, 徐文艺, 2007. 西藏雄村特大型铜金矿床容矿火山岩的成因及其对成矿的贡献. 地质学报, 81(7): 964-971
- 王乃文, 王思恩, 刘桂芳, 巴苏雷 J, 柯尔申 M, 马斯克 L, 让格 J. 1983. 西藏拉萨地区的海陆交互相侏罗系与白垩系. 地质学报, 1(1): 83-95
- 王全海, 王保生, 李金高, 姚鹏, 李志, 周祖翼, 程力军, 刘鸿飞. 2002. 西藏冈底斯岛弧及其铜多金属矿带的基本特征与远景评估. 地质通报, 21(1): 35-40
- 韦栋梁, 夏斌, 周国庆, 闫俊, 王冉, 钟立峰. 2007. 西藏泽当英云闪长岩的地球化学和 Sr-Nd 同位素特征: 特提斯洋内俯冲的新证据. 中国科学(D 辑), 37(4): 442-450
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. 科学通报, 49(16): 1589-1604
- 阴家润, 苟金, 裴树文, 蒋光武. 1998. 拉萨地块叶巴组内中侏罗世双壳类动物群及其古地理意义. 中国区域地质, 17(2): 132-136
- 曾忠诚, 刘德民, 泽仁扎西, 尼玛次仁. 2009. 西藏冈底斯东段叶巴组火山岩地球化学特征及其地质构造意义. 吉林大学学报(地球科学版), 39(3): 435-445
- 张宏飞, 徐旺春, 郭建秋, 宗克清, 蔡宏明, 袁洪林. 2007. 冈底斯南缘变形花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成: 新特提斯洋早侏罗世俯冲作用的证据. 岩石学报, 23(6): 1347-1353
- 朱弟成, 潘桂棠, 王立全, 莫宣学, 赵志丹, 周长勇, 廖忠礼, 董国臣, 袁四化. 2008a. 西藏冈底斯带侏罗纪岩浆作用的时空分布及构造环境. 地质通报, 27(4): 458-468
- 朱弟成, 潘桂棠, 王立全, 莫宣学, 赵志丹, 周长勇, 廖忠礼, 董国臣, 袁四化. 2008b. 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. 地质通报, 27(9): 1535-1550
- 朱杰, 杜远生, 刘早学, 冯庆来, 田望学, 李金平, 王昌平. 2005. 西藏雅鲁藏布江缝合带中段中生代放射虫硅质岩成因及其大地构造意义. 中国科学(D 辑), 35(12): 1131-1139