

· 专题研究 ·

玉树杂岩带三叠纪玄武岩岩石成因及构造意义

——对青藏高原中北部古特提斯演化的约束

程先锋^{1,2}, 张洪瑞¹

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 云南国土资源职业学院, 云南 昆明 652501)

摘要: 玉树杂岩带位于金沙江缝合带和甘孜-理塘缝合带的结合部位, 对其物质组成进行详细解剖, 有望为揭示青藏高原中北部的特提斯演化过程提供重要信息。本文报道该带内歇武玄武岩的主量、微量和 Sr-Nd 同位素数据, 结合区域岩浆事件讨论该区构造演化过程。研究表明歇武玄武岩为钙碱性系列, 具有较高的 MgO 和 Cr、Ni 含量, 富集 K、Rb、Ba、Sr 等大离子亲石元素, 轻微亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素, 具有高 Sr 正 Nd 同位素组成, 为流体交代的尖晶石橄榄岩部分熔融的产物; 歇武玄武岩具有岛弧玄武岩的特征, 是甘孜-理塘特提斯支洋初始俯冲的产物。结合区域资料, 认为玉树杂岩带的物质组成与甘孜-理塘缝合带相类似, 明显不同于金沙江缝合带。从二叠纪到三叠纪, 玄武岩岩浆源区中石榴石含量逐步减少, 最后转变为尖晶石橄榄岩, 反映该区已经从大陆岩石圈地幔伸展为正常大洋岩石圈地幔。这一转变与弧后岩石圈减薄、洋盆扩张的构造过程相对应。

关键词: 地球化学; 玄武岩; 歇武; 玉树杂岩带; 古特提斯

中图分类号: P588.14+5

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2018)04-0521-12

Triassic basalts in the Yushu melange: Constraint on the Paleo-Tethyan evolution of the northern central Tibetan Plateau

CHENG Xian-feng^{1,2} and ZHANG Hong-rui¹

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Yunnan Land and Resources Vocational College, Kunming 652501, China)

Abstract: Located in the junction part of the Jinshajiang suture zone and the Ganzi-Litang suture zone, the Yushu melange is a key area to reveal the Paleo-Tethyan tectonics of the northern central Tibetan Plateau. This study presents new geochemical data for the Xiewu basalts of the Yushu melange. These rocks have preserved a record of island arc magmatism on the northern margin of the North Qiangtang block. The basalts belong to calc-alkaline affinities. They are relatively enriched in large-ion lithophile elements and slightly depleted in high field strength elements. Their high MgO, Ni, and Cr values, relatively high La/Sm and low Sm/Yb ratios and positive bulk $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ values suggest that they were derived from the partial melting of a depleted spinel-lherzolite mantle source metasomatized by hydrous fluids. The Xiewu basalts are geochemically similar to island arc basalts. Their eruption was related to initial subduction of the Ganzi-Litang Paleo-Tethyan oceanic plate beneath the North Qiangtang block. Combined with existing data, the authors hold that the Yushu melange converged with the Ganzi-Litang suture zone

收稿日期: 2017-09-14; 接受日期: 2018-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41472067, 41772088); 中国地质调查局项目(DD20160024); 云南省地矿局科技创新基金项目(2015JJ02)

作者简介: 程先锋(1982-), 男, 副教授, 主要从事矿山资源与环境研究; 通讯作者 张洪瑞(1982-), 男, 副研究员, 主要从事区域地质与成矿研究, E-mail: 13581620980@126.com。

to the east, rather than with the Jinshajiang suture zone to the southeast. The magma source of the basalts in the Yushu melange was changed from garnet lherzolite to spinel lherzolite during Permian-Triassic period, corresponding to the rifting and spreading processes of the Ganzi-Litang Paleo-Tethyan ocean.

Key words: geochemistry; basalt; Xiewu; Yushu melange; Paleo-Tethys

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41472067, 41772088); Project of China Geological Survey (DD20160024); Science and Technology Innovation Project of Yunnan Bureau of Geology and Mineral Resource (2015JJ02)

特提斯构造域位于欧亚大陆南缘,由 Anatolides、外高加索、Alborz、伊朗中部、鲁特、阿富汗、帕米尔、南羌塘、北羌塘、拉萨、保山、中缅马苏、西缅甸等若干小陆块及陆块中间的造山带组成,是在晚古生代到新生代期间,古、新特提斯洋扩张与闭合过程中,历经两次大规模的板块俯冲、碰撞形成的 (Sengor, 1979, 1987; 潘桂棠, 1994; 张洪瑞等, 2010a)。这一复杂拼贴过程在欧亚大陆南缘形成了显著的陆块和缝合带相间出现的镶嵌构造格架 (Hou and Zhang, 2015, 图 1a)。

作为特提斯构造域的重要组成部分,青藏高原也是由陆块及陆间缝合带组成。主要的古特提斯缝合带有龙木错-双湖、金沙江、甘孜-理塘缝合带等 (图 1b, 李才, 1987; Yin and Harisson, 2000; Yang *et al.*, 2014)。这几条缝合带之中,龙木错-双湖缝合带被认为代表古特提斯主洋盆 (李才, 1987; Zhang *et al.*, 2012), 记录了从寒武纪到三叠纪的洋盆演化过程 (Liu *et al.*, 2011; Zhai *et al.*, 2013, 2016; Hu

et al., 2014)。相对而言,金沙江和甘孜-理塘缝合带的构造演化过程还存在争议,争议的焦点在于两条缝合带的衔接。Coward 等 (1988) 和 Dewey 等 (1988) 认为金沙江缝合带向西一直延伸,与北羌塘地块一起共同构成该区的主要构造格架。但 Reid 等 (2005) 和 Yang 等 (2012, 2014) 提出,北羌塘地块北缘的缝合带应该向东与甘孜-理塘缝合带相连,北羌塘地块北缘和义敦岛弧带上的连续出露的三叠纪岩浆弧即是该缝合带所代表洋盆俯冲的产物。这两种不同解释分别建立起各自的构造模型,造成了该区演化认识的混乱。

玉树杂岩带位于北羌塘地块北缘,其北部以治多-歇武断层与巴颜喀拉褶皱带 (松潘-甘孜地块) 毗连,南部以隆宝-玉树断裂与北羌塘地块相邻。作为金沙江和甘孜-理塘缝合带结合部位,玉树杂岩带内含有大量古特提斯演化信息,是恢复青藏高原中北部古特提斯演化的重要部位 (张洪瑞等, 2013), 对其

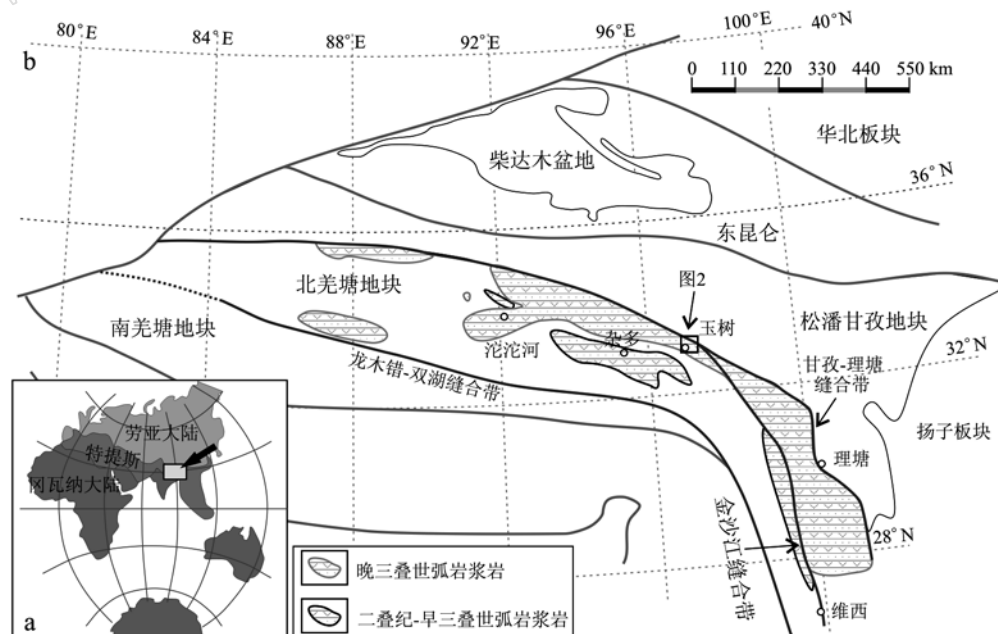


图 1 青藏高原中北部大地构造简图 (据 Yang *et al.*, 2011)
Fig. 1 Tectonic framework of northern Tibet (after Yang *et al.*, 2011)

物质组成进行详细解剖,有望为解决缝合带延伸问题的争议提供重要约束,从而厘清青藏高原中北部的特提斯演化过程。本文报道该带三叠纪玄武岩地球化学特征,讨论岩石成因,同时结合区域岩浆事件试图恢复该区大地构造演化。

1 地质背景和样品

1.1 区域地质

北羌塘地块位于青藏高原中北部,以龙木错-双湖缝合带与南羌塘地块相隔,以金沙江西段缝合带与松潘甘孜地块相邻。该地块上大面积出露显生宙碎屑岩和碳酸盐岩沉积(赵政璋等,2001),碎屑岩中夹有大量基性-中性-酸性火山岩(Wang *et al.*, 2008; Yang *et al.*, 2011)。岩浆岩可分为泥盆纪-早三叠世和晚三叠世两期,都具有弧岩浆的地球化学特征(张洪瑞等,2010b; Yang *et al.*, 2012, 2014; Zhang *et al.*, 2013, 2016)。前者主要分布在北羌塘地块中部,如杂多地区,被称为杂多弧(Yang *et al.*, 2011)。后者主要沿北羌塘地块北缘展布,被称为玉树弧(Yang *et al.*, 2012)。

北羌塘地块周缘的缝合带中,龙木错-双湖带以发育蛇绿混杂岩和高压变质带而闻名。锆石 U-Pb 年龄资料表明蛇绿岩形成于寒武纪至石炭纪之间,

而高压变质作用发生在三叠纪(Zhang *et al.*, 2006a; Pullen *et al.*, 2008; Zhai *et al.*, 2013, 2016; Hu *et al.*, 2014)。根据龙木错-双湖蛇绿岩、高压变质岩及杂多弧的时空配置关系,龙木错-双湖缝合带被认为是古特提斯主洋盆闭合的产物,而杂多弧为洋盆向北俯冲的结果(Yang *et al.*, 2011)。甘孜-理塘缝合带主要由超基性-基性岩、玄武岩、辉长岩、放射虫硅质岩以及复理石沉积组成(Mo *et al.*, 1994)。其所含的辉长岩定年结果为 292 Ma,该年龄被认为代表了洋盆形成时代(闫全人等,2005)。蛇绿岩上覆的放射虫硅质岩主要形成于晚二叠世-中三叠世,该时段代表了洋盆的存在时限。金沙江缝合带东南段由一系列蛇绿混杂岩块组成(Wang *et al.*, 2000),其所含辉长岩的锆石 U-Pb 年龄为 347 ~ 329 Ma,表明洋盆至少在石炭纪时已经存在(Jian *et al.*, 2008, 2009; Zi *et al.*, 2012)。

玉树杂岩带位于金沙江和甘孜-理塘缝合带结合部位,总体呈向西尖灭的楔形平面展布。该带主要由二叠纪-三叠纪碎屑岩、火山岩组成,含有部分枕状玄武岩、辉长岩、超基性岩(王永文等,2004; 陈健等,2007; 丁妍等,2011)。详细的野外地质调查结果表明,玉树杂岩带可分为3套构造岩石单元(图2):①最底部为变质杂岩,以多硅白云母的出现为标志,主要岩性有片岩、石英岩、变玄武岩、变辉长

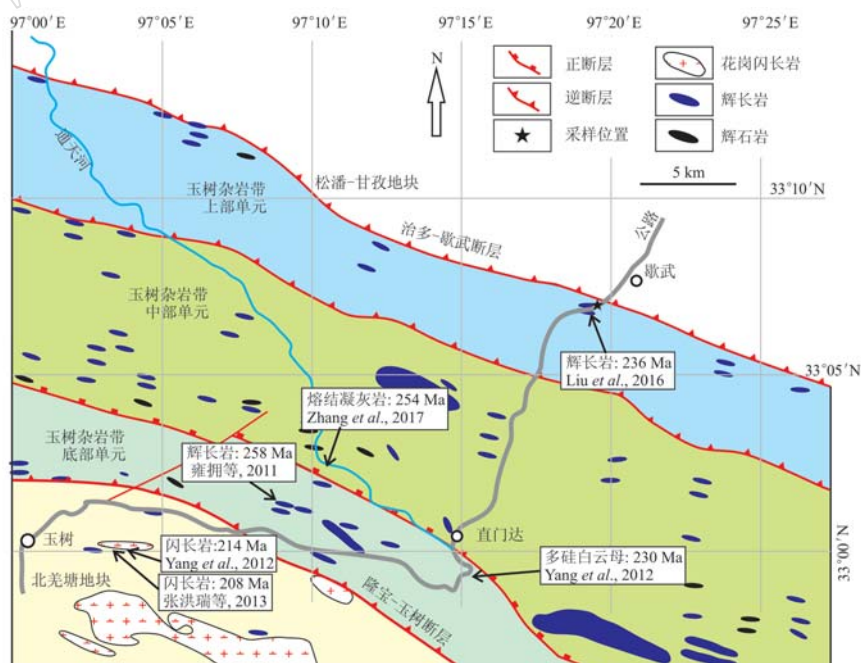


图2 玉树地区地质简图(Zhang *et al.*, 2017)

Fig. 2 Simplified geological map of the Yushu area (after Zhang *et al.*, 2017)

岩和大理岩。该套单元中侵位的辉长岩具有洋岛玄武岩(OIB)的地球化学特征,锆石 U-Pb 年龄为 258 Ma(雍拥等, 2011),多硅白云母 Ar-Ar 定年结果在 230 Ma 左右(Yang *et al.*, 2012)。(2) 中部主要为变玄武岩、熔结凝灰岩和火山凝灰岩,火山岩层中夹有厚层变陆源碎屑岩和少量的大理岩。熔结凝灰岩 U-Pb 定年显示,该套火山喷发于晚二叠世(254 Ma, Zhang *et al.*, 2017),所含玄武岩地球化学特征与现代弧后盆地型玄武岩(BABB)相类似。(3) 上部单元以低级变质的碎屑岩、碳酸盐岩和少量火山岩为主。基性岩定年表明,该套地层主要沉积于中三叠世

(240~234 Ma, 段其发等, 2009; Liu *et al.*, 2016),部分岩石具有洋中脊玄武岩和洋岛玄武岩(MORB/OIB)的地球化学特征。

1.2 歇武玄武岩特征及样品情况

歇武玄武岩位于歇武南部 2 km 处,属于玉树杂岩带的最上部单元。该区出露陆源碎屑岩夹玄武岩。陆源碎屑岩主要有石英砂岩、粉砂岩、硅质岩和板岩。玄武岩枕状构造明显(图 3a、3b),其岩枕呈椭圆形,长 40~80 cm,宽 30~50 cm,岩枕间缺少深海沉积物。大量辉长岩、辉绿岩脉侵入到该套单元中。

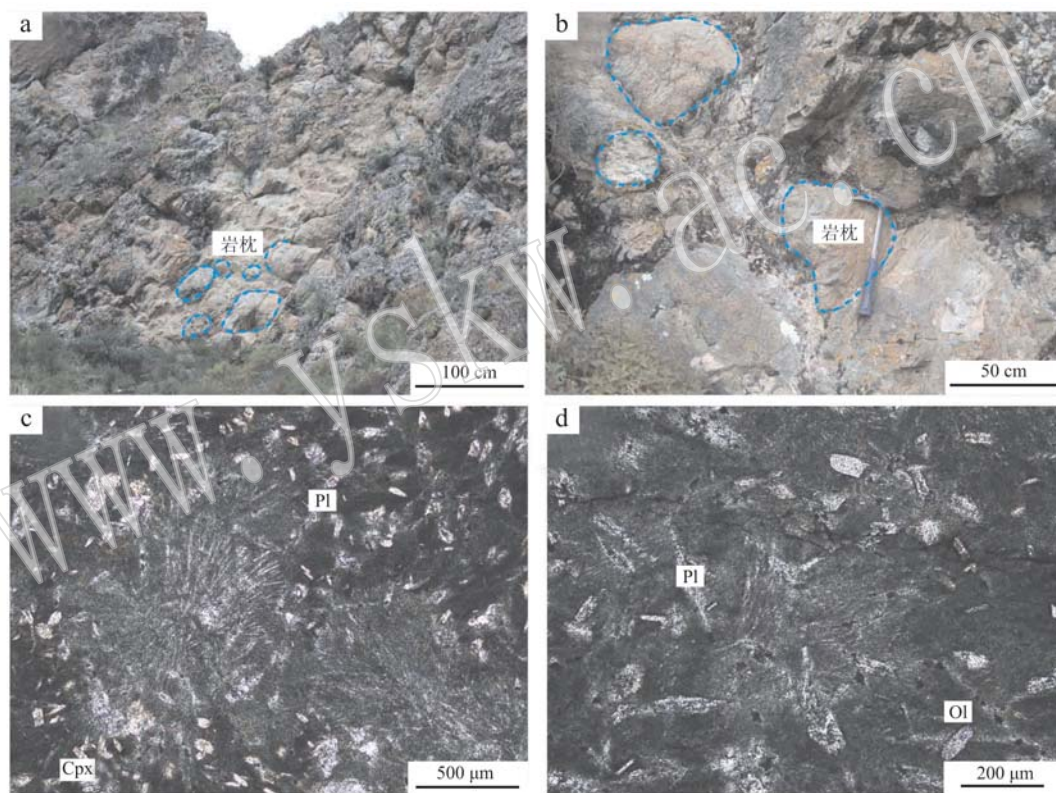


图3 玉树杂岩带歇武玄武岩野外(a、b)和显微照片(c、d,单偏光)

Fig. 3 Field Photographs (a, b) and microphotographs (c, d, plainlight) of Xiewu basalts in the Yushu melange

Pl—斜长石; Cpx—单斜辉石; Ol—橄榄石
Pl—plagioclase; Cpx—clinopyroxene; Ol—olivine

野外采集到新鲜、蚀变弱的玄武岩枕样品。显微镜下观察,玄武岩由斑晶、基质两部分组成(图 3c、3d)。斑晶由斜长石、辉石组成,偶见橄榄石。斜长石呈半自形板状,轻黝帘石化。辉石为单斜辉石,呈半自形柱状,部分被绿泥石、绿帘石交代呈假像产出。基质由纤状的斜长石及火山玻璃构成,集合体呈束状、帚状、放射状等构成球状结构(图 3c)。基质被黝帘石呈散状交代明显。

2 分析方法

样品的主量、微量元素分析在国家地质实验测试中心完成,绝大部分主量元素采用 X 荧光光谱法(XRF, 2100)分析,FeO 和 Fe₂O₃ 用湿化学法单独分析,分析相对误差低于 5%。微量元素在电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, X-series)上完成,分析相对

误差低于5%~8%。

Sr-Nd 同位素在中国地质科学院地质研究所同位素地质研究实验室完成。Sr 同位素测定由 MAT-262 固体同位素质谱计完成, 标样 NBS987 测定结果为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710\,238 \pm 12(2\sigma)$, Sr 同位素质量分馏采用 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8.375\,21$ 校正。Nd 同位素分析仪器为 Nu Plasam HR MC-ICP-MS (Nu Instruments)。具体测试方法见何学贤等(2007)。Nd 同位素质量

分馏采用 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.721\,9$ 校正。标样 JMC 的测试结果为 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.511\,126 \pm 10(2\sigma)$ 。

3 分析结果

歇武玄武岩样品的主量和微量元素分析结果列于表1。歇武玄武岩 SiO_2 含量在 45.74% ~ 52.20% 之间, MgO 含量在 5.62% ~ 12.16% 间, 具有高 $\text{Mg}^\#$

表1 玉树杂岩带歇武玄武岩主量、微量元素分析表
Table 1 Whole-rock major and trace element compositions for Xiewu basalts of the Yushu melange

	Q8-1	Q8-3	Q8-4	Q8-5	Q8-6	Q8-7	Q8-8	Q8-9	Q8-12	Q8-14	Q8-15
SiO_2	46.33	48.67	49.55	48.56	47.46	52.20	45.74	46.51	51.06	50.40	50.44
TiO_2	0.56	0.61	0.54	0.52	0.52	0.53	0.57	0.50	0.44	0.44	0.58
Al_2O_3	11.35	12.07	14.78	14.90	15.44	15.43	14.47	13.61	15.24	15.73	14.38
Fe_2O_3	1.26	0.08	1.21	2.06	2.40	1.60	2.33	1.33	0.98	2.11	1.25
FeO	8.22	7.67	6.16	4.98	5.01	5.44	5.93	6.59	6.39	5.33	7.15
MnO	0.20	0.18	0.13	0.11	0.13	0.12	0.16	0.16	0.12	0.11	0.15
MgO	12.16	9.71	7.49	5.62	6.65	6.27	8.65	8.52	8.93	8.97	9.52
CaO	13.84	14.47	11.41	14.29	15.83	9.97	16.38	14.24	9.57	8.57	8.29
Na_2O	1.28	2.26	4.06	3.57	2.36	4.68	1.25	2.34	3.49	4.24	3.99
K_2O	0.70	0.35	0.07	0.10	0.14	0.18	0.51	0.59	0.49	0.01	0.21
P_2O_5	0.05	0.04	0.08	0.07	0.06	0.08	0.05	0.06	0.03	0.04	0.06
H_2O^+	3.50	2.46	2.14	1.84	1.84	1.90	2.04	3.12	2.78	3.00	3.14
CO_2	0.40	1.03	2.10	2.73	1.47	1.21	1.29	2.01	0.31	1.03	0.22
LOI	3.31	2.64	4.06	3.97	2.87	2.92	2.65	4.35	2.77	3.22	2.57
Total	99.26	98.75	99.54	98.75	98.87	99.42	98.69	98.80	99.51	99.17	98.59
$\text{Mg}^\#$	69.86	69.10	64.81	59.45	62.31	61.90	65.77	66.11	68.64	68.87	67.22
Be	0.47	0.54	0.22	0.20	0.25	0.21	0.41	0.30	0.14	0.15	0.14
Sc	42.5	45.9	37.9	31.3	34.1	35.0	36.5	37.8	39.1	41.1	36.6
V	163	172	206	192	206	196	214	154	211	209	188
Cr	682	699	662	630	641	621	660	592	693	664	714
Co	51.1	46.4	45.1	41.8	38.9	37.4	43.0	46.8	47.2	39.0	52.4
Ni	219	210	188	164	155	150	193	207	197	145	239
Cu	44.9	42.8	70.4	125	81.9	86.1	35.4	104	72.2	27.7	59.7
Ga	9.41	10.1	10.8	11.7	16.1	9.80	16.3	12.5	10.7	11.9	8.78
Rb	15.5	8.17	0.90	1.09	2.57	1.99	10.8	13.4	9.18	0.29	3.78
Sr	69.7	156	230	359	405	430	293	224	115	181	169
Y	9.19	9.85	15.0	13.2	14.7	13.8	13.0	12.0	13.1	13.4	11.9
Zr	33.5	35.3	34.4	31.3	33.8	30.9	34.4	31.7	18.4	20.2	34.9
Nb	3.62	4.08	3.76	3.44	3.57	3.47	3.78	3.30	1.15	1.21	3.87
Cs	0.62	0.19	0.13	0.06	0.09	0.07	0.4	0.27	0.22	<0.05	0.16
Ba	156	93.1	65.6	74.1	122	117	113	173	93.4	19.7	91.4
La	1.55	2.33	4.13	4.65	4.59	4.99	2.87	3.66	1.31	1.58	3.40
Ce	4.41	5.00	8.51	9.18	8.94	9.36	6.95	7.88	3.28	4.55	7.81
Pr	0.69	0.74	1.34	1.37	1.40	1.46	0.97	1.12	0.58	0.66	1.17
Nd	3.33	3.46	5.88	6.07	6.13	6.50	4.62	5.04	3.34	3.58	5.24
Sm	1.15	1.14	1.58	1.54	1.72	1.95	1.25	1.45	1.12	1.34	1.48
Eu	0.28	0.25	0.49	0.50	0.55	0.72	0.50	0.43	0.41	0.49	0.37
Gd	1.48	1.34	2.04	2.10	2.09	2.25	1.82	1.77	1.77	1.86	1.82
Tb	0.25	0.25	0.38	0.35	0.38	0.37	0.34	0.31	0.32	0.34	0.32
Dy	1.85	1.76	2.62	2.41	2.65	2.55	2.37	2.14	2.49	2.42	2.25
Ho	0.38	0.42	0.60	0.52	0.57	0.53	0.50	0.46	0.56	0.56	0.49
Er	1.30	1.24	1.86	1.67	1.76	1.61	1.57	1.50	1.74	1.79	1.46
Tm	0.18	0.18	0.26	0.22	0.24	0.22	0.22	0.20	0.25	0.24	0.21
Yb	1.36	1.29	1.85	1.61	1.75	1.48	1.59	1.42	1.74	1.67	1.41
Lu	0.22	0.21	0.27	0.22	0.25	0.24	0.24	0.21	0.26	0.27	0.22
Hf	1.13	1.15	1.14	0.93	0.97	0.97	0.99	1.03	0.75	0.78	1.07
Ta	0.30	0.30	0.28	0.26	0.25	0.24	0.27	0.25	0.10	0.10	0.26
Pb	0.92	0.83	0.59	1.37	1.43	0.85	1.41	1.09	0.63	0.68	0.85
Th	0.51	0.51	0.51	0.45	0.46	0.46	0.47	0.48	0.14	0.16	0.53
U	0.06	<0.05	0.07	0.08	0.08	0.07	0.07	0.08	<0.05	0.027	0.03
δEu	0.66	0.62	0.83	0.85	0.89	1.05	1.01	0.82	0.89	0.95	0.69

(59.45 ~ 69.86)、低 TiO_2 (0.44% ~ 0.61%) 的特征。全碱含量 ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) 在 1.76% ~ 4.86% 间, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值都大于 1.0。在抗蚀变元素图解 $\text{Zr}/$

$\text{TiO}_2 - \text{Nb}/\text{Y}$ 上, 所有样品都位于亚碱性玄武岩区域内 (图 4a), 在 AFM 判别图上样品显示出富碱方向演化趋势, 说明岩石为钙碱性系列 (图 4b)。

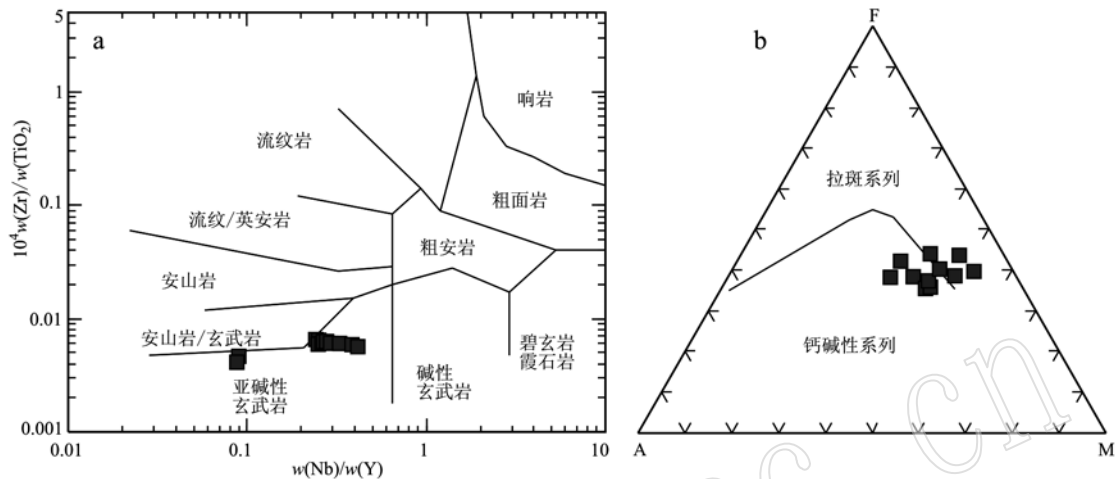


图 4 玉树混杂带歇武玄武岩 $\text{Zr}/\text{TiO}_2 - \text{Nb}/\text{Y}$ 图和 AFM 图

Fig. 4 Zr/TiO_2 versus Nb/Y diagram (a) and AFM diagram (b) for Xiewu basalts in the Yushu melange

歇武玄武岩具较低的稀土元素总量 ($18.43 \times 10^{-6} \sim 34.23 \times 10^{-6}$), 低于 E-MORB、N-MORB 值 (Sun and McDonough, 1989) 和典型岛弧玄武岩 IAB (Peate *et al.*, 1997)。经球粒陨石标准化, 大多数样品具有轻微的轻、重稀土元素分异, $(\text{La}/\text{Yb})_N =$

0.51 ~ 2.27, 平均为 1.38, 具 Eu 负异常 ($\delta\text{Eu} = 0.62 \sim 1.05$, 平均为 0.84)。稀土元素配分曲线整体与 E-MORB 或 IAB 相类似, 明显不同于 N-MORB 和 OIB (图 5a)。

歇武玄武岩具较高的 Cr ($592 \times 10^{-6} \sim 714 \times$

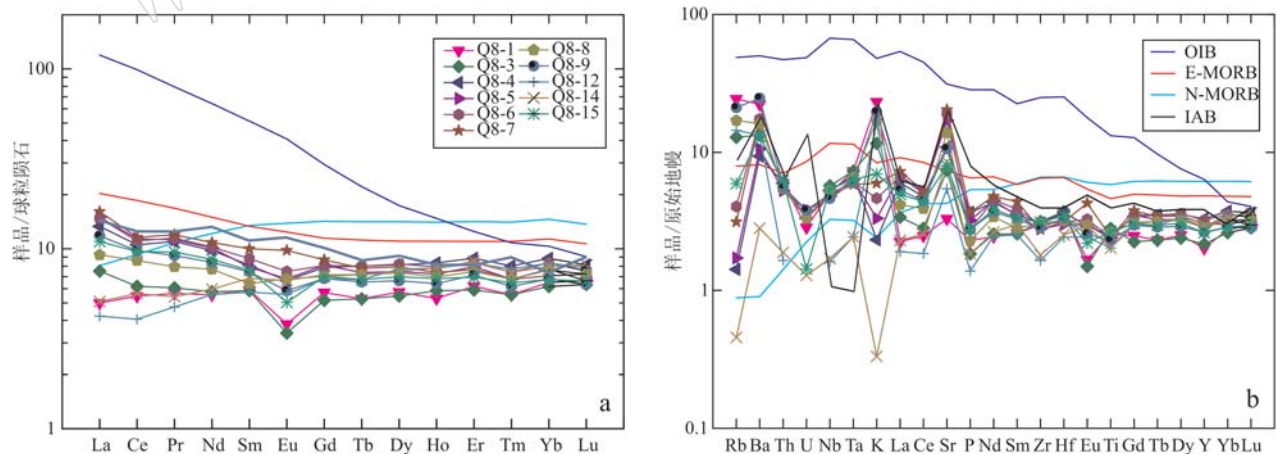


图 5 玉树杂岩带歇武玄武岩稀土元素配分图(a)和微量元素蛛网图(b)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element diagram (b) for Xiewu basalts in the Yushu melange

球粒陨石和原始地幔的标准化数据分别引自 Boynton (1984)、Sun 和 McDonough (1989), OIB、N-MORB 和 E-MORB 数据引自 Sun 和 McDonough (1989), IAB 数据引自 Peate 等 (1997)

Normalizing values after Boynton (1984), Sun and McDonough (1989) respectively, OIB, N-MORB and E-MORB data after Sun and McDonough (1989), and IAB data after Peate *et al.* (1997)

10^{-6})、Ni ($145 \times 10^{-6} \sim 239 \times 10^{-6}$) 含量, Zr ($18.4 \times 10^{-6} \sim 35.3 \times 10^{-6}$) 含量明显偏低, 甚至低于岛弧玄武岩 (43.8×10^{-6})。在原始地幔标准化微量元素蛛网图中(图 5b), 歇武玄武岩富集 Rb、Ba、K 和 Sr 大离子亲石元素, 轻微亏损 Nb、Ta 和 Ti 等高场强元素。这些都是典型岛弧玄武岩的特征。与典型岛弧玄武岩不同的是, 歇武玄武岩 U 含量低, Nb、Ta 的亏损也没有岛弧玄武岩那么明显。

歇武玄武岩 Sr-Nd 同位素分析结果列于表 2。歇武玄武岩具有较高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值 (0.708 42 ~ 0.710 62), 高 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 初始比值 (0.512 393 ~ 0.512 773)。与后者相对应, 其 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 值在 1.1 ~ 8.5 之间(表 2)。在 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - \varepsilon\text{Nd}(t)$ 同位素图解(图 6)上, 样品投点落于第一象限, 明显偏离地幔阵列。

表 2 玉树杂岩带歇武玄武岩 Sr-Nd 同位素组成
Table 2 Sr-Nd isotope compositions for Xiewu basalts of the Yushu melange

样号	Q8-8	Q8-9	Q8-11	Q8-12
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	0.148 5	0.246 1	0.108 3	0.252 9
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.711 102	0.711 315	0.708 871	0.709 251
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.182 0	0.171 6	0.207 6	0.222 4
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.512 687	0.512 689	0.512 706	0.513 108
t/Ma	230	230	230	230
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	0.710 62	0.710 51	0.708 52	0.708 42
$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	0.512 413	0.512 431	0.512 393	0.512 773
$\varepsilon\text{Nd}(t)$	1.5	1.9	1.1	8.5

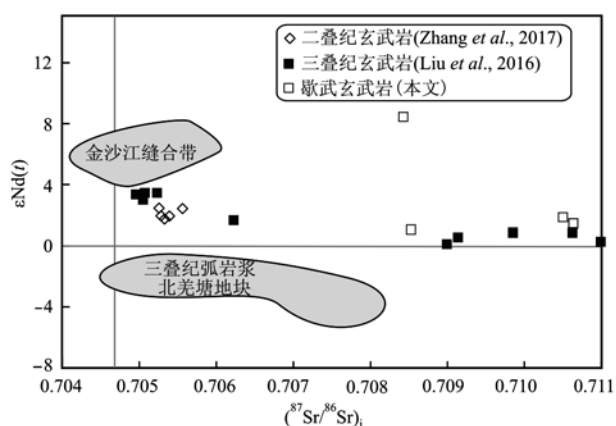


图 6 玉树杂岩带歇武玄武岩 $\varepsilon\text{Nd}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图
Fig. 6 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ versus $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ diagram for Xiewu basalts in the Yushu melange

4 讨论

4.1 岩石成因

歇武玄武岩样品具有中等偏高的烧失量 ($\text{LOI} = 2.57\% \sim 4.35\%$)。一般来说, 这种情况多用蚀变作用来解释。然而, 本文样品中, 烧失量与主量、微量元素的含量并没有出现规律性变化, 说明蚀变对样品地球化学组成的影响有限。实际上, 玄武岩组成矿物中含有较多结晶水 ($\text{H}_2\text{O}^+ = 1.84\% \sim 3.50\%$), 烧失量高很可能与此有关。

主微量元素数据表明, 大多数歇武玄武岩样品都具有较高的 $\text{Mg}^\#$ 值和 Cr、Ni、Co 等元素含量。在 $\text{Mg}^\# - \text{SiO}_2$ 图中, 除 Q8-5、Q8-6 和 Q8-7 以外的样品都落入橄榄岩熔融体(实验)的范围内(图 7), 说明这些样品几乎代表了原生岩浆, 后期的分异结晶和同化混染作用影响有限, 其主微量元素含量可以较好地代表它们岩浆源区的组成特征。而样品 Q8-5、Q8-6 和 Q8-7 具有较低 $\text{Mg}^\#$ 值, 可能与后期分异结晶和同化混染作用有关。因此, 下文岩浆源区讨论中将剔除这几件样品。

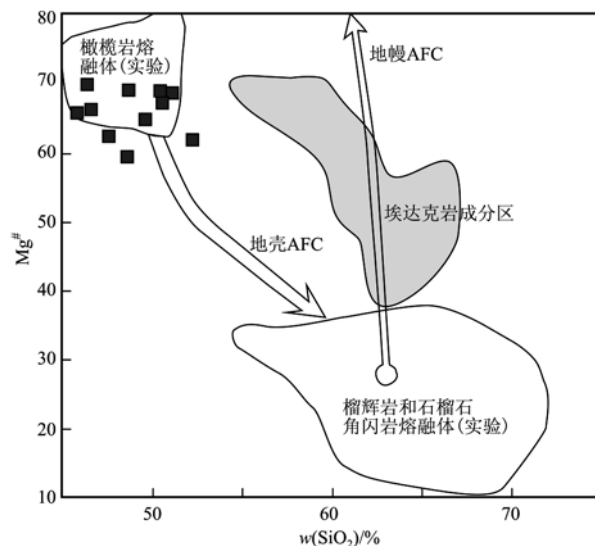


图 7 玉树杂岩带歇武玄武岩 $\text{Mg}^\# - \text{SiO}_2$ 图 (Stern and Kilian, 1996)
Fig. 7 $\text{Mg}^\#$ versus SiO_2 diagram of Xiewu basalts in the Yushu melange (after Stern and Kilian, 1996)

歇武玄武岩具有较高的 La/Sm 值 (1.17 ~ 3.02) 和较低的 Sm/Yb 值 (0.64 ~ 1.32)。在 La/Sm - Sm/Yb 图中, 样品投在由尖晶石橄榄岩组成的原始地幔熔融线上, 明显区别于玉树杂岩带内二叠纪

玄武岩的石榴石橄榄岩源区(图8a)。在 $(\text{Tb/Yb})_p$ – $(\text{Yb/Sm})_p$ 图解(图8b, Zhang *et al.*, 2006b)上, 歇武玄武岩投点落在尖晶石橄榄岩模拟源区附近, 没

有石榴石的参与; 而二叠纪玄武岩样品(Zhang *et al.*, 2017)则显示为含石榴石(10% ~ 50%)橄榄岩低度部分熔融(~5%)的产物。

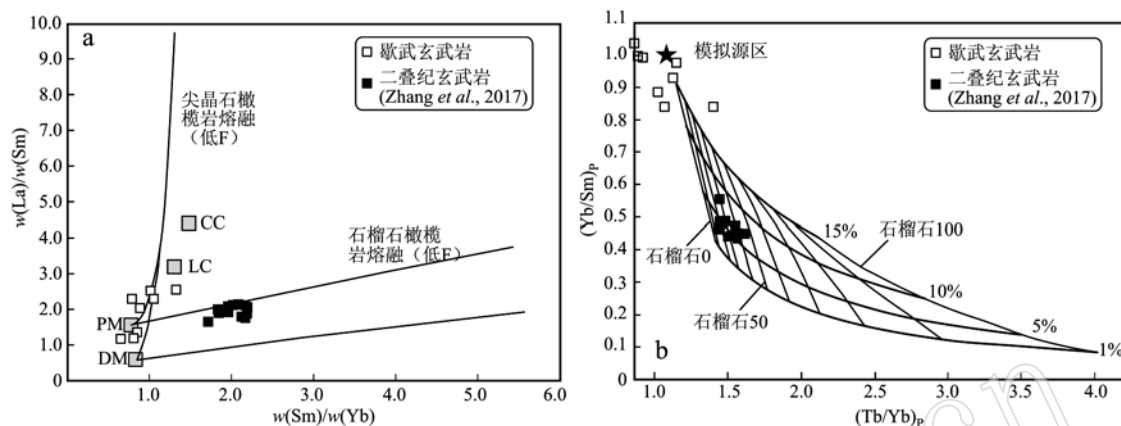


图8 玉树杂岩带歇武玄武岩 $\text{La/Sm} - \text{Sm/Yb}$ 图(a)和 $(\text{Yb/Sm})_p - (\text{Tb/Yb})_p$ 图(b)(底图据 Zhang *et al.*, 2006b)
Fig. 8 La/Sm versus Sm/Yb (a) and $(\text{Yb/Sm})_p$ versus $(\text{Tb/Yb})_p$ (b) diagrams of Xiewu basalts in the Yushu melange (modified after Zhang *et al.*, 2006b)

歇武玄武岩具有高 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值和高 Sr 同位素初始值。一般而言, Sr 同位素的偏移可以用流体交代源区、地壳混染及后期蚀变等情况来解释。地壳流体中富含 Rb、Ba、K 和 Sr 等大离子亲石元素, 但基本不含稀土元素, 所以流体的存在会使岩石 Rb–Sr 同位素受不同程度的干扰, 但基本不影响 Sm–Nd 同位素体系。鉴于前述已经排除地壳混染和后期蚀变的影响, 因此样品 Sr–Nd 同位素解耦很可能与流体交代的源区有关。样品的微量元素特征(富集 Rb、Ba、K 和 Sr 等大离子亲石元素)也支持这一结论。由此可知, 流体在尖晶石橄榄岩源区熔融过程中起着重要作用。这一形成过程与岛弧玄武岩相类似(Stern, 2002)。实际上, 除了大离子亲石元素外, 样品的相容元素、高场强元素也显示了岛弧玄武岩的特征(图9a、9b)。在 $\text{Th/Yb} - \text{Ta/Yb}$ 图上, 样品都偏离正常地幔演化阵列, 表现出受俯冲带组分的影响(图9c)。

5.2 构造意义

歇武玄武岩的厘定明确了玉树杂岩带物质成分, 结合带内其他组成以及区域构造岩浆事件, 有望恢复玉树缝合带乃至青藏高原中北部的古特提斯演化过程。

前人研究表明, 玉树杂岩带由3部分组成(Yang *et al.*, 2012)。底部高压变质岩由多硅白云母片岩等组成。变质作用发生在 230 Ma (Yang *et al.*, 2012)。该单元含有 258 Ma 的 OIB 型辉长岩(雍拥

等, 2011), 中部含有 254 Ma 的弧后盆地型玄武岩(BABB, Zhang *et al.*, 2017), 上部含有 240 ~ 234 Ma 的洋中脊玄武岩(MORB, Liu *et al.*, 2016)。本文数据表明, 除 MORB 外, 上部单元中还含有岛弧玄武岩(IAB)。值得提出的是, 与 MORB 相比, IAB 样品位置更靠近歇武, 其层位应该在 MORB 之上。这些资料表明, 玉树杂岩带主要为一套二叠纪–三叠纪岩石组合, 这一组成与甘孜–理塘缝合带相类似, 明显不同于具有石炭纪–二叠纪物质组分的金沙江缝合带。因此, 本文支持 Reid 等(2005)和 Yang 等(2012, 2014)的观点, 认为玉树杂岩带应该向东与甘孜–理塘缝合带相连。

另外, 玉树杂岩带岩浆演化序列还为恢复青藏高原中北部古特提斯洋盆演化提供了重要信息。作为最底部单元, 多硅白云母片岩带内应该含有洋盆初始裂解的记录, 但由于后期变质作用, 现在难以找到。该单元被晚二叠世辉长岩侵入, 故洋盆裂解不会晚于二叠纪。这一过程与松潘–甘孜洋盆的 292 Ma 辉长岩(闫全人等, 2005)相对应。中部单元含晚二叠世弧后盆地型玄武岩, 岩浆起源于石榴石橄榄岩的地幔源区(Zhang *et al.*, 2017)。二叠纪时洋盆规模尚小, 还具有大陆岩石圈地幔属性。结合龙木错–双湖蛇绿岩、杂多弧的时空配置关系可知, 玉树地区古洋盆应该是与龙木错–双湖特提斯主洋俯冲有关, 是弧后裂解而成的特提斯支洋(图10)。三

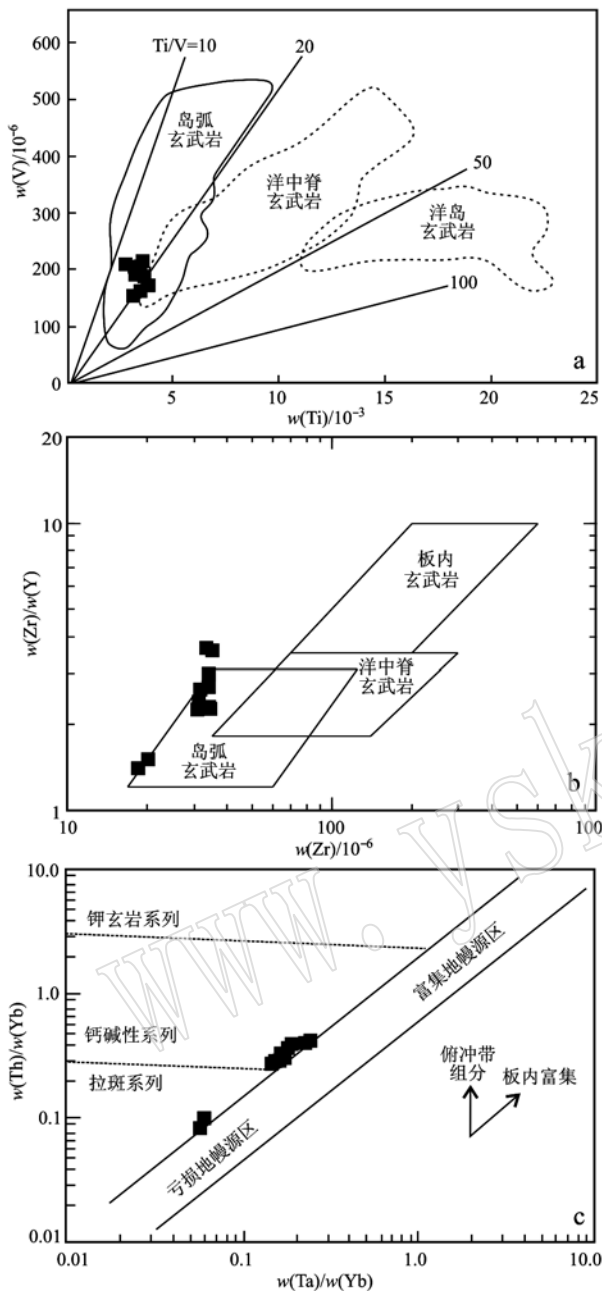


图9 玉树杂岩带歇武玄武岩的 V-Ti(a, Shervais, 1982)、Zr/Y-Zr(b)和 Th/Yb-Ta/Yb(c)判别图解 (Pearce and Peat, 1995)

Fig. 9 V-Ti (a, after Shervais, 1982), Zr/Y-Zr (b) and Th/Yb-Ta/Yb (c) classification diagrams for Xiewu basalts in the Yushu melange (Pearce and Peat, 1995)

叠纪时支洋盆已经颇具规模,发育洋中脊玄武岩,岩浆源区为石榴石和少量橄榄石或者橄榄石和少量石榴石的橄榄岩源区(Liu *et al.*, 2016)。另外,该支洋内含有富集型地幔源区,导致晚二叠世 OIB 型辉

长岩的侵位和三叠纪 MORB 中含有 OIB 组分(Liu *et al.*, 2016)。晚三叠世该洋盆开始俯冲,玉树杂岩带内的多硅白云母变质带和北羌塘地块上的玉树弧,共同组成了俯冲双变质带。歇武 IAB 型玄武岩也在此期间形成(图 10)。本文数据表明,此时岩浆源区已经为尖晶石橄榄岩,不含石榴石,可见从二叠纪到三叠纪,玄武岩岩浆源区中石榴石含量逐步减少,最后转变为尖晶石橄榄岩,反映该区已经从大陆岩石圈地幔伸展为正常大洋岩石圈地幔。这一转变与弧后岩石圈减薄、洋盆扩张的构造过程相对应。另外,歇武玄武岩源区已经有俯冲组分的加入,表明洋盆俯冲已经开始。最终在三叠纪末,洋盆闭合将玉树杂岩带焊接在北羌塘地块和松潘甘孜地块之间(张洪瑞等, 2013)。

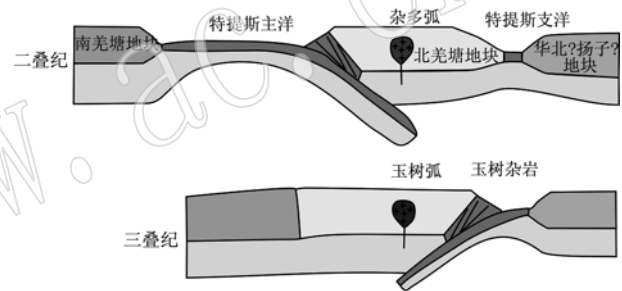


图 10 玉树杂岩带构造演化模型

Fig. 10 Tectonic model for the Yushu melange

6 结论

(1) 歇武玄武岩岩浆起源于流体交代的尖晶石橄榄岩源区。

(2) 玉树杂岩带记录了特提斯支洋从裂解到扩张再到俯冲闭合的全部过程。

(3) 玉树杂岩带应该向东与甘孜-理塘缝合带相连。

(4) 北羌塘地块在二叠纪、三叠纪经历了古特提斯主、支洋盆相继俯冲的增生历史。

References

- Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies[A]. Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry: Developments in Geochemistry 2[C]. Amsterdam: Elsevier, 63 ~ 114.
- Chen Jian, Li Jianfang, An Yongsheng, *et al.* 2007. Xijianwulan Lake-

- Jinsha River ophiolite melange zone and its evolution in the Fenghuo Mountain area[J]. *Northwestern Geology*, 40(3): 36 ~ 43(in Chinese with English abstract)
- Coward M P, Kidd W S F, Yun P, *et al.* 1988. The structure of the 1985 Tibet geotraverse, Lhasa to Golmud[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London: Series A*, 327: 307 ~ 336.
- Dewey J, Shackleton R, Chang C, *et al.* 1988. The tectonic evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London: Series A*, 327: 379 ~ 413.
- Ding Yan, Yang Tiannan, Zhang Hongrui, *et al.* 2011. Zircon xenocrysts in diabase dykes, a potential lithosphere probe for the thermo-tectonic evolution of the crust: A case study of zircon xenocrysts of diabase in Yushu Melange[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(3): 438 ~ 448(in Chinese with English abstract).
- Duan Qifa, Wang Jianxiong, Bai Yunshan, *et al.* 2009. Zircon SHRIMP U-Pb dating and lithogeochemistry of gabbro from the ophiolite in southern Qinghai Province[J]. *Geology in China*, 36(2): 291 ~ 299(in Chinese with English Abstract).
- He Xuexian, Tang Suohan, Zhu Xiangkun, *et al.* 2007. Precise measurement of Nd isotopic ratios by means of multi-collector magnetic sector inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 28(4): 405 ~ 410(in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q and Zhang H R. 2015. Geodynamics and metallogeny of the eastern Tethyan metallogenic domain[J]. *Ore Geology Reviews*, 70: 346 ~ 384.
- Hu Peiyuan, Li Cai, Wu Yanwang, *et al.* 2014. Opening of the Longmu Co-Shuanghu-Lancangjiang ocean: Constraints from plagiogranites[J]. *Chinese Science Bulletin*, 59(25): 3 188 ~ 3 199.
- Jian Ping, Liu Dunyi, Kröner Alfred, *et al.* 2009. Devonian to Permian plate tectonic cycle of the Paleo-Tethys Orogen in southwest China (II): Insights from zircon ages of ophiolites, arc/back-arc assemblages and within-plate igneous rocks and generation of the Emeishan CFB province[J]. *Lithos*, 113(3 ~ 4): 767 ~ 784.
- Jian Ping, Liu Dunyi and Sun Xiaomeng. 2008. SHRIMP dating of the Permo-Carboniferous Jinshajiang ophiolite, southwestern China: Geochronological constraints for the evolution of Paleo-Tethys[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(5 ~ 6): 371 ~ 384.
- Li Cai. 1987. The Longmu Tso-Shuanghu-Lancang River plate suture and the north boundary of distribution of Gondwana facies Permo-Carboniferous system in northern Xizang, China[J]. *Journal of Changchun College of Geology*, 17(2): 155 ~ 166(in Chinese with English abstract).
- Liu Bin, Ma Changqian, Guo Yuheng, *et al.* 2016. Petrogenesis and tectonic implications of Triassic mafic complexes with MORB/OIB affinities from the western Garzê-Litang ophiolitic melange, central Tibetan Plateau[J]. *Lithos*, 260: 253 ~ 267.
- Liu Yan, Santosh M, Zhao Zhongbao, *et al.* 2011. Evidence for palaeo-Tethyan oceanic subduction within central Qiangtang, northern Tibet[J]. *Lithos*, 127(1 ~ 2): 39 ~ 53.
- Mo Xuanxue, Deng Jinfu and Lu Fengxiang. 1994. Volcanism and the evolution of Tethys in Sanjiang area, southwestern China[J]. *Journal of southeast Asian Earth Sciences*, 9(4): 325 ~ 333.
- Pan Guitang. 1994. An evolution of Tethys in global ocean-continent transformation[J]. *Tethyan Geology*, 18: 23 ~ 40(in Chinese with English abstract).
- Pearce J A and Peate D W. 1995. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23: 251 ~ 286.
- Peate D W, Pearce J A and Hawkesworth C J. 1997. Geochemical variations in Vanuatu arc lavas: the role of subducted material and a variable mantle wedge composition[J]. *Journal of Petrology*, 38(10): 1 331 ~ 1 358.
- Pullen A, Kapp P, Gehrels G E, *et al.* 2008. Triassic continental subduction in central Tibet and Mediterranean-style closure of the Paleotethys Ocean[J]. *Geology*, 36(5): 351 ~ 354.
- Reid A J, Fowler A P, Phillips D, *et al.* 2005. Thermochronology of the Yidun Arc, central eastern Tibetan Plateau: Constraints from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ K-feldspar and apatite fission track data[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 25(6): 915 ~ 935.
- Servais J W. 1982. Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 59(1): 101 ~ 118.
- Stern C R and Kilian R. 1996. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral Volcanic Zone[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 123(3): 263 ~ 281.
- Stern R J. 2002. Subduction zones[J]. *Reviews of Geophysics*, 40(4): 10 ~ 12.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins* [C]. *Geological Society of London*, 42: 313 ~ 345.
- Sengor A M C. 1979. Mid-Mezozoic closure of Permo-Triassic Tethys and its implications[J]. *Nature*, 279: 590 ~ 593.

- Sengor A M C. 1987. Tectonics of the Tethysides: Orogenic collage development in a collisional setting[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 15: 213 ~ 244.
- Wang Qiang, Wyman D A, Xu Jifeng, *et al.* 2008. Triassic Nb-enriched basalts, magnesian andesites, and adakites of the Qiangtang terrane (Central Tibet): Evidence for metasomatism by slab-derived melts in the mantle wedge[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 155: 473 ~ 490.
- Wang Xiaofeng, Metcalfe Ian, Jian Ping, *et al.* 2000. The Jinshajiang suture zone: Tectono-stratigraphic subdivision and revision of age [J]. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 43(1): 10 ~ 22.
- Wang Yongwen, Wang Yude, Li Shanping, *et al.* 2004. Characteristics of the Xijin Ulan tectonic melange belt[J]. *Northwestern Geology*, 37(3): 15 ~ 20 (in Chinese with English abstract).
- Yan Quanren, Wang Zongqi, Liu Shuwen, *et al.* 2005. Opening of the Tethys in southwest China and its significance to the breakup of East Gondwanaland in late Paleozoic: Evidence from SHRIMP U-Pb zircon analyses for the Garze ophiolite block[J]. *Chinese Science Bulletin*, 50(3): 256 ~ 264.
- Yang T N, Ding Y, Zhang H R, *et al.* 2014. Two-phase subduction and subsequent collision defines the Paleotethyan tectonics of the south-eastern Tibetan Plateau: Evidence from zircon U-Pb dating, geochemistry, and structural geology of the Sanjiang orogenic belt, southwest China[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 126 (11 ~ 12): 1 654 ~ 1 682.
- Yang T N, Hou Z Q, Wang Y, *et al.* 2012. Late Paleozoic to Early Mesozoic tectonic evolution of northeast Tibet: Evidence from the Triassic composite western Jinsha-Garze-Litang suture [J]. *Tectonics*, 31 (4): TC4004.
- Yang T N, Zhang H R, Liu Y X, *et al.* 2011. Permo-Triassic arc magmatism in central Tibet: Evidence from zircon U-Pb geochronology, Hf isotopes, rare earth elements, and bulk geochemistry[J]. *Chemical Geology*, 284(3 ~ 4): 270 ~ 282.
- Yin A and Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(28): 211 ~ 280.
- Yong Yong, Chen Wen, Zhang Yan, *et al.* 2011. Zircon SHRIMP U-Pb dating and geochemistry of the Rangnianggongba gabbro in Yushu area, Qinghai Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(3): 419 ~ 426 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Qingguo, Jahn Borming, Wang Jun, *et al.* 2013. The Carboniferous ophiolite in the middle of the Qiangtang terrane, Northern Tibet: SHRIMP U-Pb dating, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic characteristics[J]. *Lithos*, 168 ~ 169: 186 ~ 199.
- Zhai Qingguo, Jahn Borming, Wang Jun, *et al.* 2016. Oldest Paleotethyan ophiolitic melange in the Tibetan Plateau[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 128(3/4): 355 ~ 373.
- Zhang Hongrui, Hou Zengqian and Yang Zhiming. 2010a. Metallogensis and geodynamics and of Tethyan metallogenic domain: A review[J]. *Mineral Deposits*, 29: 113 ~ 133 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongrui, Hou Zengqian, Yang Tiannan, *et al.* 2010b. Subduction-related quartz syenite porphyries in the eastern Qiangtang terrane, Qinghai-Xizang Plateau: Constraints from geochemical analyses[J]. *Geological Review*, 56(3): 403 ~ 412 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongrui, Yang Tiannan, Hou Zengqian, *et al.* 2013. Petrogenesis and tectonics of late Permian felsic volcanic rocks, eastern Qiangtang block, north-central Tibet: Sr and Nd isotopic evidence[J]. *International Geology Review*, 55(8): 1 017 ~ 1 028.
- Zhang Hongrui, Yang Tiannan, Hou Zengqian, *et al.* 2013. Chronology and geochemistry of mylonitic quartz diorites in the Yushu melange, central Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(11): 3 871 ~ 3 882 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongrui, Yang Tiannan, Hou Zengqian, *et al.* 2016. Devonian Nb-enriched basalts and andesites of north-central Tibet: Evidence for the early subduction of the Paleo-Tethyan oceanic crust beneath the North Qiangtang Block[J]. *Tectonophysics*, 682: 96 ~ 107.
- Zhang Hongrui, Yang Tiannan, Hou Zengqian, *et al.* 2017. Permian back-arc basin basalts in the Yushu area: New constrain on the Paleotethyan evolution of the north-central Tibet[J]. *Lithos*, 286 ~ 287: 216 ~ 226.
- Zhang Kaijun, Zhang Yuxiu, Li Bing, *et al.* 2006a. The blueschist-bearing Qiangtang metamorphic belt (northern Tibet, China) as an in situ suture zone: Evidence from geochemical comparison with the Jinsha suture[J]. *Geology*, 34(6): 493 ~ 496.
- Zhang Yichun, Shen Shuzhong, Shi G R, *et al.* 2012. Tectonic evolution of the Qiangtang Block, northern Tibet during the Late Ciszuralian (Late Early Permian): Evidence from fusuline fossil records[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 350 ~ 352: 139 ~ 148.
- Zhang Z C, Mahoney J J, Mao J W, *et al.* 2006b. Geochemistry of picritic and associated basalt flows of the western Emeishan flood basalt province, China[J]. *Journal of Petrology*, 47(10): 1 997 ~ 2 019.
- Zhao Zhengzhang, Li Yongtie, Ye Hefei, *et al.* 2001. The Strata of the

Tibetan Plateau[M]. Beijing: Science Press, 1~542(in Chinese).

Zi Jianwei, Cawood P A, Fan Weiming, *et al.* 2012. Contrasting rift and subduction-related plagiogranites in the Jinshajiang ophiolitic melange, southwest China, and implications for the Paleo-Tethys[J]. *Tectonics*, 31(2): TC2012.

附中文参考文献

陈 健,李建放,安勇胜,等. 2007. 风火山地区西金乌兰湖-金沙江蛇绿构造混杂带的物质组成及发展演化特征[J]. *西北地质*, 40(3): 36~43.

丁 妍,杨天南,张洪瑞,等. 2011. 辉绿岩脉中的俘获锆石:地壳构造-热历史的“探针”——来自玉树混杂带辉绿岩俘获锆石的研究实例[J]. *岩石矿物学杂志*, 30(3): 438~448.

段其发,王建雄,白云山,等. 2009. 青海南部蛇绿岩中辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年和岩石地球化学特征[J]. *中国地质*, 36(2): 291~299.

何学贤,唐索寒,朱祥坤,等. 2007. 多接收器等离子体质谱(MC-ICPMS)高精度测定 Nd 同位素方法[J]. *地球学报*, 28(4): 405~410.

李 才. 1987. 龙木错-双湖-澜沧江板块缝合带与石炭二叠纪冈瓦

纳北界[J]. *长春地质学院学报*, 17(2): 155~166.

潘桂棠. 1994. 全球洋-陆转换中的特提斯演化[J]. *沉积与特提斯地质*, 18: 23~40.

王永文,王玉德,李善平,等. 2004. 西金乌兰构造混杂岩带特征[J]. *西北地质*, 37(3): 15~20.

闫全人,王宗起,刘树文,等. 2005. 西南三江特提斯洋扩张与晚古生代东冈瓦纳裂解:来自甘孜蛇绿岩辉长岩的 SHRIMP 年代学证据[J]. *科学通报*, 50(2): 158~166.

雍 拥,陈 文,张 彦,等. 2011. 玉树地区让娘贡巴辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年和地球化学特征[J]. *岩石矿物学杂志*, 30(3): 419~426.

张洪瑞,侯增谦,杨天南,等. 2010b. 青藏高原北羌塘南缘俯冲型石英正长斑岩的发现:来自地球化学分析证据[J]. *地质论评*, 56(3): 403~412.

张洪瑞,侯增谦,杨志明. 2010a. 特提斯成矿域主要金属矿床类型与成矿过程[J]. *矿床地质*, 29(1): 113~133.

张洪瑞,杨天南,侯增谦,等. 2013. 青藏高原玉树混杂带糜棱岩化石英闪长岩年代学和地球化学研究[J]. *岩石学报*, 29(11): 3 871~3 882.

赵政璋,李永铁,叶和飞. 2001. 青藏高原地层[M]. 北京:科学出版社.