

云南金平晚二叠纪玄武岩特征及其与峨眉地幔柱关系——地球化学证据*

肖龙 徐义刚 梅厚钧 何斌

XIAO Long, XU YiGang, MEI HouJun and HE Bin

中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2001-12-24 收稿, 2002-07-20 改回.

Xiao L, Xu YG, Mei HJ and He B. 2003. Late Permian flood basalts at Jinping area and its relation to Emei mantle plume: geochemical evidences. Acta Petrologica Sinica, 19(1):38-48

Abstract The late Permian flood basalts at Jinping area, located to the SW of Ailaoshan-Red River fault in SW Yunnan province, are characterized by low-Ti tholeiite, which has low TiO_2 contents ($<2.5\%$) and low Ti/Y ratios (<500). Their geochemical characteristics are similar to those of the oceanic island basalt (OIB). Based on their petrography, major elements and trace elements data, they are further sub-divided into two geochemical types, i. e. LT1 and LT2 basalts. The LT1 basalts at the lower part exhibit high $\text{Mg}^\#$ (49~63), SiO_2 (47%~53%), Th, U and ΣREE (118~145 $\mu\text{g/g}$), and low Fe_2O_3 (1.36%~1.63%), Na_2O (1.88%~3.17%), TiO_2 (1.37%~1.92%) and Nb, Ta, and negative Sr anomalous. The LT2 basalts at the upper part exhibit relatively lower $\text{Mg}^\#$ (30~59), ΣREE (72~117 $\mu\text{g/g}$), higher Fe_2O_3 (1.56%~2.47%), Na_2O (2.33%~5.03%), TiO_2 (1.49%~2.34%), and strong Sr negative anomaly. Element data suggest that chemical variations of the LT1 and LT2 lavas are evolved from a common parental magma by different degree of crystallization and crustal contamination. The lavas might be generated from a shallow volatile metasomatism mantle with high-degree of partial melting, and then experienced garnet + clinopyroxene fractional crystallization and crustal contamination. The LT1 lavas had obtained more significant crustal component (contamination) than the LT2 lavas. Comparing their geochemical stratigraphy with that of the Emeishan basalts in the Binchuan area, these features are similar to the LT1 and LT2 basalts of Binchuan area respectively, which were generated from a shallow volatile metasomatism mantle at the early active stage of the Emeishan mantle plume. These basalts are the products of Emei mantle plume and are a part of Emeishan flood basalts. The sinistral movement of the Ailaoshan-Red River shear zone resulted in the displacement of Jinping and Binchuan basalts.

Key words Basalts, Low-Ti basalts, Geochemistry, Petrogenesis, Emei mantle plume, Jinping

摘要 分布于哀牢山-红河断裂带西南侧的金平上二叠纪玄武岩属于低钛拉斑玄武岩(LT)(Ti/Y<500)。其地球化学特征总体与洋岛玄武岩(OIB)相似。根据其岩相学、主量元素、微量元素特征,将其划分为LT1和LT2两个地球化学亚类型。它们的分布和主要地球化学标志为:LT1分布于下部,高 $\text{Mg}^\#$ (48~63), SiO_2 (50%~56%),高 ΣREE (118~145 $\mu\text{g/g}$)、低 Fe_2O_3 (1.36%~1.63%), Na_2O (1.88%~3.17%), TiO_2 (1.37%~1.92%),高Th、U,低Nb、Ta和Sr负异常;LT2分布于上部,低 SiO_2 (47%~56%), $\text{Mg}^\#$ (34~59),低 ΣREE (75~117 $\mu\text{g/g}$),高 Fe_2O_3 (1.56%~2.47%)、 Na_2O (2.33%~5.03%)、 TiO_2 (1.49%~2.34%),Sr强负异常。二者地球化学特征的差异是同一母岩浆经不同的分离结晶和同化混染作用的结果。金平与宾川峨眉山的化学地层学对比表明,金平LT1和LT2玄武岩与宾川峨眉山玄武岩下部的LT1、LT2十分相似,它们可能是同时,或在类似的环境下形成的。金平玄武岩属于峨眉山大火山岩省的一部分,同为峨眉地幔柱早期活动的产物。新生代哀牢山-红河断裂的左滑剪切运动导致了宾川与金平玄武岩的错位。

关键词 玄武岩; 地球化学; 岩石成因; 峨眉地幔柱; 金平

中图法分类号 P588.144 P581 P591.2

* 中国科学院知识创新项目(KZCX2-101),国家973项目(G1999043205)和中国博士后科学基金(2002031004)的资助。

第一作者简介:肖龙,男,1963年生,博士后,岩石学及矿床学专业。

1 前言

金平地区的晚二叠纪玄武岩分布于区域性哀牢山-红河断裂带西南侧,空间上远离主体峨眉山玄武岩分布区。前人对峨眉山玄武岩的研究给予了较多的关注(黄开年等,1988;张云湘等,1988; Chung *et al.*, 1995; 1998; 徐义刚等, 2001; Xu *et al.*, 2001; Song *et al.*, 2001; 肖龙等,2002),而对金平上二叠统玄武岩研究资料较少。吴根耀(1993)基于地层对比发现丽江与金平二叠纪玄武岩有成因联系。钟孙霖等(Chung *et al.*, 1997)通过一些二叠纪玄武岩和早第三纪高钾岩浆的研究认为,越南 Song Da 地区基性岩浆性质与滇西北相似。对哀牢山-红河断裂带两侧同时代玄武岩的成因归属的正确认识对于解释哀牢山-红河断裂带的性质意义重大,同时对确定峨眉山玄武岩的区域分布和峨眉地幔柱的活动性质的研究具有重要意义。它有助于解决该对断裂带左行滑移量的长期争论(Tapponnier *et al.*, 1976, 1982; 1990; 吴海威等,1989; 钟大赉等,1989; Allen *et al.*, 1984; Leloup *et al.*, 1993, 1995; 纪纪舜等,1996)。

本文在研究金平玄武岩地球化学特征的基础上,通过岩石地球化学地层的对比,探讨其与宾川玄武岩的成因联系、与峨眉地幔柱的关系以及哀牢山-红河断裂的左滑位移量。

2 地质背景和采样位置、分析方法

金平地区上二叠统玄武岩分布于哀牢山-红河断裂西南侧,金平县城以西,向南进入越南境内。火山岩层总体走向为北北西至近南北向,最大厚度达 4536 米以上,它与上伏岩层(下三叠统碎屑沉积岩)多为断层接触,与下伏下二叠统茅口灰岩沉积不整合接触(图 1)。主要岩石类型包括火山角砾岩、块状无斑和斜斑玄武岩,杏仁状玄武岩和少量凝灰岩夹层。

本次工作选择金平-那发剖面进行了系统岩石采样,控制厚度约 4000 米,顶部岩层可能有断失。

样品的主、微量元素均在中国科学院广州地球化学研究所同位素分析中心完成。主量元素采用 ICP-AES 分析, SiO₂ 用碱溶法分析,灼失量采用重量法分析,其它氧化物采用酸溶法测定。微量元素用 PE Elan 6000 型等离子体质谱测定(ICP-MS)。ICP-AES 分析使用的标样为国家标准样 GSR-1、GSR-2、GSR-3、GSR-4 和 GSR-5。ICP-MS 分析工作曲线使用的岩石标准样品为 W2、AGV-1、GSR-1、GSR-3 和 MRG-1,监控样为 EAV-56(澳大利亚玄武岩)。分析误差主量元素为小于 0.5%,微量元素为 <10%,一般小于 5%(刘颖等,1996)。

3 分析结果及地球化学特征

对金平地区典型玄武岩样品的主量及微量元素分析结果见表 1

3.1 岩石类型划分

金平玄武岩出露厚度约 4000 余米,在主量元素硅碱图中均落入拉斑玄武岩区,根据岩相学及元素地球化学特征划分的两个地球化学类型玄武岩(LT1, LT2)分别分布于剖面上部和下部。由于露头较差,野外接触界线不易确定。金平玄武岩均属低钛玄武岩(TiO₂ < 2.5%, Ti/Y < 500),但它们的地球化学特征又有相当明显的差异。LT2 表现为低 Mg[#]、SiO₂ 和 REE,高 Fe₂O₃、Na₂O 和 TiO₂ 以及低 Rb、Ba 和 Sr 强负异常; LT1 则为高 Mg[#]、SiO₂ 和 REE,低 Fe₂O₃、Na₂O 和 TiO₂ 以及高 Th、V 低 Nb、Ta 和 Sr 负异常(表 2)。

3.2 岩相学特征

LT1 主要由包括底部的玄武质火山角砾岩,无斑玄武岩构成。LT2 玄武岩岩性较复杂,下部为斜斑玄武岩,中部块状无斑玄武岩夹杏仁玄武岩和顶部斜斑玄武岩、凝灰岩。它们的主要矿物组成见表 3。

LT1 为少斑或无斑玄武岩,岩石为显微斑状结构,斑晶为橄榄石,单斜辉石和斜长石,斑晶中出现较多橄榄石是其区别于 LT2 的主要标志,其基质成分与 LT2 相似。LT2 大部分为无斑隐晶或显微斑状结构,斑晶以斜长石为主,单斜辉石次之。基质主要由斜长石,单斜辉石,钛-铁氧化物和火山玻璃组成。

3.3 主量元素

两类玄武岩的主量元素变化较大,分异程度亦有较大差异,但总体表现出较好的相关性,由早期 LT1 到晚期 LT2 玄武岩浆演化程度逐渐升高(Mg[#] 降低),且随着 Mg[#] 降低出现 SiO₂、CaO 和 Al₂O₃ 降低,和 Fe₂O₃、Na₂O 和 TiO₂ 的升高(图 2)

3.4 微量元素

和主量元素类似,两类玄武岩中相容微量元素 V、Cr、Ni、和 Zr、Nb 等的含量随 Mg[#] 变化而变化(图 3)。表现为 LT2 具有相对较高的 V,低 Cr、Zr 和 Sr, Ni 和 Nb 随 Mg[#] 变化不明显。

不相容元素中,二者的总体配分型式与 OIB 相似,大离子亲石元素和 HFSE 微量元素的总体富集程度偏低。LT2 富集 Rb 和 Ba, LT1 相对富集 Th、V、LREE。

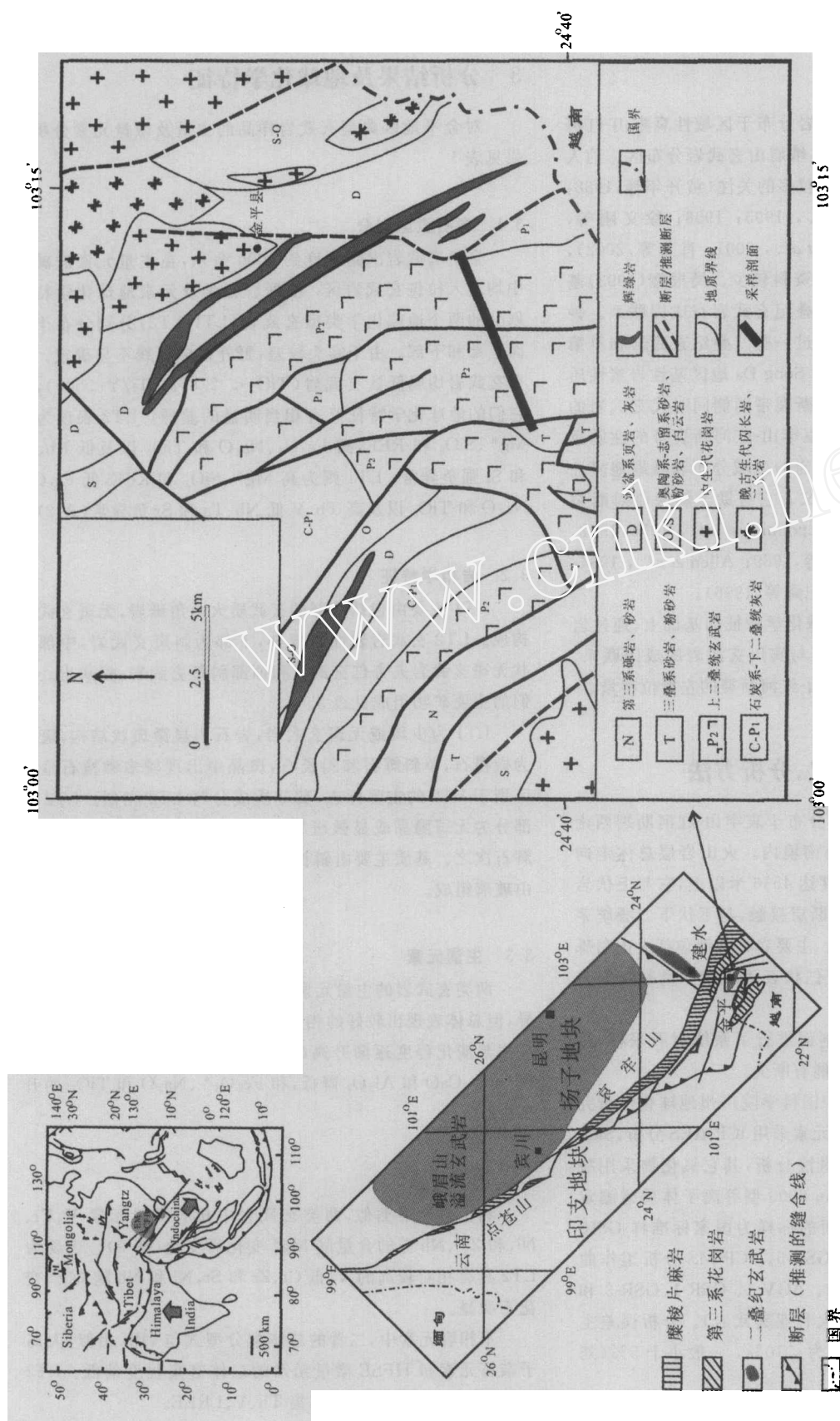


图1 金平地区地质图和采样位置(左)东亚构造体系图和区域地质略图据Harrison et al. (1996)修改
 Fig. 1. Schematic geological map of the Jingping area showing the location of sampling profile
 (inset regional geological map and major Cenozoic fault system are modified after Harrison et al. (1996))

表1 金平地区玄武岩的主量(%)及微量($\mu\text{g/g}$)元素分析结果

Table 1 Major and trace elements data for the basalts at Binchuan area

样品号	低钛玄武岩(LT2)								低钛玄武岩(LT1)					
	jp-3	jp-4	jp-7	jp-8	jp-9	jp-11	jp-12	jp-13	jp-15	jp-17	jp-18	jp-19	jp-20	jp-21
SiO ₂	49.25	47.33	47.71	47.68	47.56	48.54	50.40	48.41	55.49	55.98	53.28	53.82	55.89	50.81
TiO ₂	2.29	2.34	2.09	2.15	1.96	2.28	2.14	1.49	1.61	1.53	1.39	1.37	1.87	1.92
Al ₂ O ₃	13.10	13.49	14.42	13.57	12.60	12.38	14.58	13.90	14.23	14.39	15.04	14.71	11.67	12.90
Fe ₂ O ₃	2.29	2.38	2.29	2.32	2.19	2.47	2.14	1.67	1.56	1.53	1.36	1.52	1.54	1.63
FeO	11.67	12.13	11.67	11.81	11.18	12.59	10.89	8.52	7.96	7.83	6.94	7.76	7.84	8.30
MnO	0.25	0.24	0.24	0.27	0.24	0.32	0.38	0.14	0.14	0.15	0.13	0.15	0.15	0.15
MgO	6.27	6.27	4.99	7.61	6.29	5.55	6.11	7.48	5.30	5.66	5.72	6.95	5.27	7.92
CaO	6.33	5.96	9.11	6.90	10.15	9.26	4.40	11.97	5.50	5.05	8.74	8.58	8.56	10.63
Na ₂ O	3.76	5.03	4.46	3.66	3.43	3.19	2.95	2.51	2.33	2.47	2.42	2.00	3.17	1.88
K ₂ O	1.84	0.35	0.06	0.28	0.06	1.25	1.14	1.31	2.03	2.85	1.53	1.43	0.71	0.41
P ₂ O ₅	0.20	0.25	0.23	0.19	0.22	0.22	0.10	0.22	0.20	0.21	0.13	0.18	0.16	0.17
LOI	2.87	3.72	3.63	3.63	3.68	1.08	4.00	2.38	2.96	2.31	3.82	2.30	2.65	3.90
total	100.14	99.53	100.92	100.12	99.61	99.14	99.27	100.02	93.34	100.97	100.52	100.80	99.50	100.66
Mg#	41.37	40.17	34.54	47.45	42.88	35.40	42.78	59.03	48.60	51.56	56.54	59.83	48.97	62.34
Ba	731.60	105.50	11.87	45.87	17.77	444.40	371.90	468.30						
Rb	48.24	3.89	0.55	6.87	0.93	34.27	32.41	29.59	29.41	105.40	40.88	71.39	16.50	10.38
Sr	284.80	100.40	82.59	420.40	67.15	389.40	318.20	337.90	340.00	425.80	149.30	416.20	128.70	100.60
Y	35.62	36.40	29.11	30.92	34.54	36.55	33.57	23.05	23.09	31.17	28.30	32.46	28.34	29.26
Zr	153.30	158.60	134.20	135.50	133.00	142.20	214.30	124.90	125.80	190.40	183.90	187.60	179.90	184.00
Nb	15.92	15.99	14.28	14.70	14.26	15.72	26.43	14.38	14.34	16.98	14.53	13.96	17.39	16.80
Th	1.70	1.74	2.30	1.51	1.64	1.60	4.04	1.66	1.63	7.48	7.11	6.75	4.65	4.26
Ga	20.28	21.61	33.78	19.11	21.97	21.17	22.51	19.18	19.07	18.31	22.42	21.58	17.43	22.59
Ni	83.88	52.54	79.70	67.09	99.55	50.39	66.50	116.50	116.50	44.55	39.08	63.57	81.40	83.64
V	416.00	361.20	357.40	411.20	399.90	472.50	263.40	258.70	259.80	241.00	215.70	231.40	252.00	275.20
Cr	46.33	52.59	48.98	38.96	44.26	24.13	72.45	25.30	327.20	127.50	270.20	332.20	194.10	323.90
Hf	3.89	3.78	3.17	3.26	3.23	3.58	4.76	3.06	2.95	4.65	4.35	4.36	4.20	3.29
Cs	0.80	0.21	0.13	0.90	0.22	0.38	1.30	0.64	0.65	2.37	0.54	0.92	0.69	0.66
Sc	39.18	38.56	25.79	40.36	42.24	39.56	32.96	30.49	30.26	29.60	27.61	29.12	27.32	30.94
Ta	0.96	0.91	0.85	0.87	0.84	0.93	1.49	0.81	0.81	1.07	0.90	0.88	1.08	1.06
Co	48.60	52.10	42.49	52.25	53.39	54.49	48.98	46.46	46.44	31.62	31.93	39.69	39.11	43.85
U	0.41	0.36	0.45	0.29	0.35	0.37	0.68	0.42	0.40	1.52	1.56	1.49	1.11	0.73
La	12.29	10.74	15.17	9.91	12.69	10.43	19.35	11.00	10.89	27.19	25.49	25.09	20.47	22.08
Ce	26.59	25.92	30.16	23.08	27.13	24.30	41.00	23.90	23.71	54.25	50.06	50.04	42.65	45.75
Pr	3.85	3.91	4.54	3.33	3.85	3.62	5.58	3.37	3.35	7.04	6.32	6.45	5.82	6.13
Nd	18.14	18.51	20.17	15.20	17.36	17.22	23.54	15.38	15.01	28.70	25.02	26.49	24.20	26.49
Sm	4.80	5.07	4.75	4.05	4.50	4.78	5.39	3.83	3.79	6.03	5.25	5.73	5.34	5.88
Eu	1.73	1.71	1.63	1.47	1.56	1.75	1.64	1.38	1.35	1.57	1.45	1.51	1.59	1.85
Gd	6.00	6.00	5.36	4.97	5.57	6.01	6.00	4.46	4.35	6.39	5.52	5.86	5.46	6.06
Tb	1.02	1.01	0.87	0.86	0.93	1.02	1.00	0.71	0.69	0.98	0.86	0.98	0.89	0.94
Dy	6.14	6.13	4.91	5.17	5.64	6.18	5.91	4.11	4.02	5.55	4.89	5.56	4.98	5.22
Ho	1.19	1.21	0.93	1.03	1.13	1.23	1.15	0.79	0.77	1.05	0.92	1.04	0.92	0.94
Er	3.28	3.26	2.60	2.78	3.07	3.38	3.12	2.10	2.08	2.86	2.48	2.95	2.49	2.56
Tm	0.50	0.48	0.36	0.42	0.45	0.51	0.46	0.32	0.31	0.42	0.37	0.42	0.36	0.36
Yb	3.12	2.96	2.28	2.65	2.87	3.24	2.91	1.96	1.96	2.64	2.32	2.71	2.20	2.23
Lu	0.50	0.46	0.35	0.43	0.46	0.51	0.46	0.31	0.30	0.42	0.38	0.41	0.35	0.35
Ti/Y	422.75	404.82	480.00	443.64	379.69	414.06	419.78	443.97	445.17	335.26	332.81	395.00	438.24	459.00
Th/Hf	0.44	0.46	0.73	0.46	0.51	0.45	0.85	0.54	0.55	1.61	1.63	1.55	1.11	1.29
Th/Ta	1.76	1.91	2.70	1.73	1.95	1.71	2.71	2.03	2.01	6.97	7.88	7.65	4.32	4.00
Ta/Hf	0.25	0.24	0.27	0.27	0.26	0.26	0.31	0.27	0.27	0.23	0.21	0.20	0.26	0.32
Th/Zr	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.04	0.04	0.04	0.03	0.02
Th/Nb	0.11	0.11	0.16	0.10	0.12	0.10	0.15	0.12	0.11	0.44	0.49	0.48	0.27	0.25
Nb/Zr	0.10	0.10	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	0.12	0.11	0.09	0.08	0.07	0.10	0.09

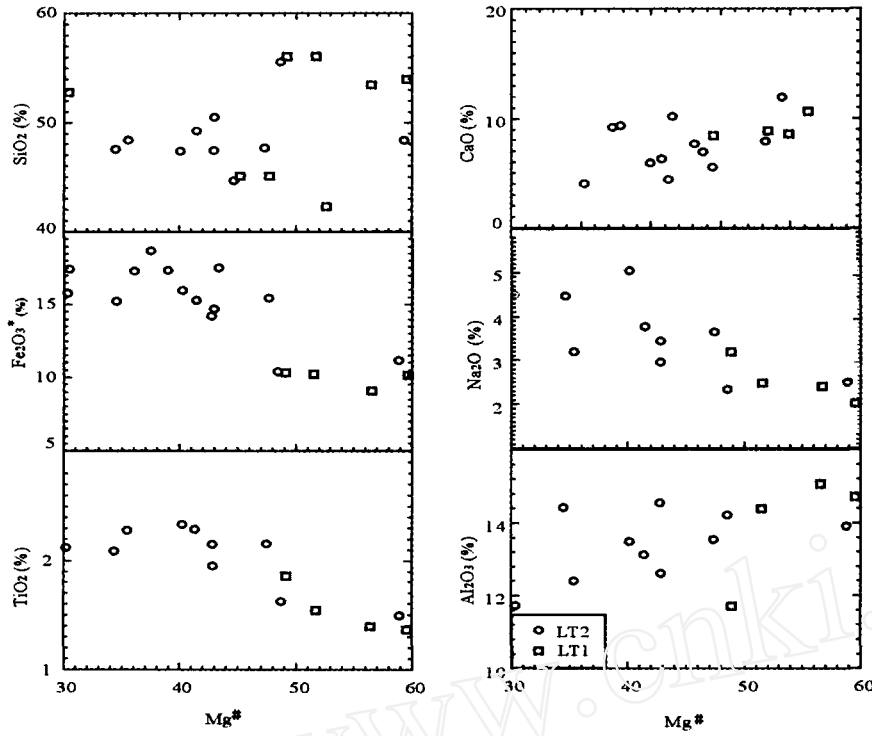


图2 $Mg^{\#}$ 与 SiO_2 、 $Fe_2O_3^*$ 、 Na_2O 和 TiO_2 相关性的图解

Fig. 2 Variation of SiO_2 , TiO_2 , $Fe_2O_3^*$, CaO , Al_2O_3 and Na_2O versus $Mg^{\#}$ for the basalts at Jinping area

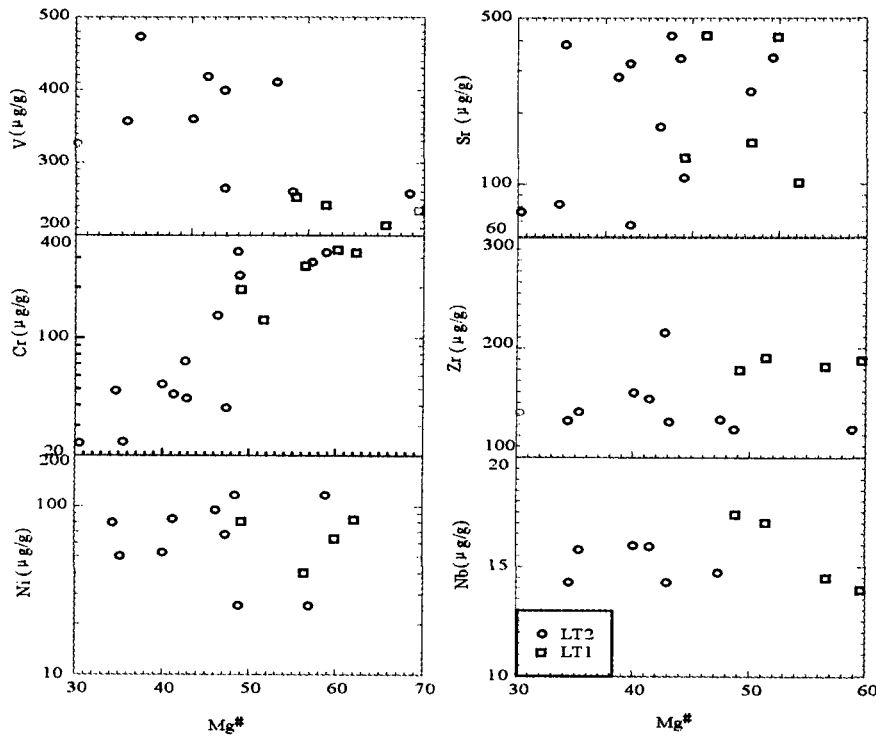


图3 $Mg^{\#}$ 与 V, Ni, Zr, Cr, Nb 和 Sr 的相关性

Fig. 3 Variation of V, Ni, Zr, Cr, Nb and Sr versus $Mg^{\#}$ for the Emeishan basalts at Binchuan area

表2 金平玄武岩的主要地球化学参数

Table 2 Major geochemical parameters of the flood basalts at Jinping area

岩石类型	LT2	平均值	LT1	平均值
Ti/Y	379~480	428	332~459	392
TiO ₂	1.49~2.34	2.04	1.37~1.92	1.61
Mg [#]	34~59	44	48~62	56
SiO ₂	47.3~55.49	44	50~56	54
Fe ₂ O ₃	1.56~2.47	2.14	1.36~1.63	1.51
REE	72~118	87	117~145	131
(La/Yb) _n	2.6~4.78	3.4	6.65~7.87	9.1
Sm/Yb	1.54~2.08	1.71	2.11~2.61	2.33
Th/Nb	0.1~0.16	0.12	0.25~0.49	0.39
Nb/U	32~51	39	3.4~23	13.7

表3 金平地区玄武岩的岩相学特征

Table 3 Petrographic characteristics of the Emeishan basalts at Jinping area

玄武岩类型	斑晶	基质
低钛(LT2)	斜长石(2%~6%) 单斜辉石(1%~7%)	斜长石(35%~50%)
		单斜辉石(15%~25%)
		磁铁矿(3%~5%)
		玄武玻璃(30%~55%)
低钛(LT1)	橄榄石(3%~15%) 单斜辉石(2%~10%) 斜长石(5%~15%)	斜长石(25%~60%)
		磁铁矿(3%~5%)
		单斜辉石(10%~25%)
		玄武玻璃(20%~45%)

4 讨论

金平地区的两类玄武岩的地球化学差异表现出一定的规律性,与宾川低钛玄武岩(肖龙等,2002)有相似性。造成这一现象的因素可能包括源区成分差异,结晶分异和地壳混染作用的程度不同等。本文试图依据其化学成分特点分析结晶分异和地壳混染作用对它们的影响,探讨源区成分和它们在成因和时间的相互关系。

4.1 岩浆(结晶)分异

两类岩石的主要氧化物含量随岩浆分异指数(Mg[#])呈现连续而规律性的变化,说明它们很可能是由同一母岩浆演化的产物,结晶分异是重要的演化方式之一。

LT2玄武岩中主要矿物结晶相为以斜长石为主的(显微)斑晶(含量<10%)和极少量单斜辉石。该类岩石明显的Sr负异常和低Rb、Ba含量,说明其经历了斜长石的晶出,而这类岩石未出现明显的Eu负异常,可能是与源区成分有关(Frey,1991)

LT1玄武岩中斑晶以橄榄石和较多的单斜辉石为特征,

这些铁镁矿物的结晶分异可能是导致岩石出现Mg[#]-Ni的正相关的主要原因。部分样品(JP-18,20,21)中明显的Sr负异常和弱Eu负异常说明亦有斜长石的晶出。

由稀土元素(REE)资料(表1和图6)可见,岩石在主量和微量元素方面的系列变化主要是由地幔熔融决定的。这些矿物相的分离结晶没有对部分熔融造成的REE演化方向产生重大影响。

4.2 形成条件分析

从前面的分析可知,该区玄武岩浆经历过一定程度的演化,应用现有岩石地球化学数据来探讨其形成条件,应尽量消除结晶分异对成分的影响。本文应用Klein和Langmuir(1987)提出的方法,即将演化岩浆的成分用最小二乘法线性回归,把MgO的含量返回到8%(表示为MgO₈),然后将其它氧化物含量据MgO₈重新计算。用于回归计算的只限于MgO含量大于5%的样品。

在用Mg₈回归计算后的Ti₈-Mg[#]、Si₈-Mg[#]、Si₈-Fe₈和Na₈-Fe₈图解中(图4)主要氧化物间均存在程度不等的关联性和连续变化的规律性。

由于熔体中Si₈的丰度与其形成的压力负相关(Garland *et al.*, 1996),而与Fe₈正相关(Klein and Langmuir 1987)暗示LT2形成于较高的压力条件下,说明其低熔融程度和分异程度。与之比较,LT1的高Mg[#]、Si₈、低Fe₈和Na₈则说明其形成于低压条件和具较高的熔融程度。

在微量元素方面,LT1较LT2低的Ce/Yb比值亦说明其形成深度较浅(尖晶石为主要残留相)、熔融程度高,而后期形成的LT2深度较大,熔融程度低。

综合主量元素分析中得出的LT1形成于相对低压(较浅部)和高熔融程度下的特点,其Th/Yb明显升高更可能是由于熔融深度不断变浅进入交代富集的岩石圈地幔的结果。主量元素的连续变化亦支持岩浆作用过程的连续性。

4.3 与峨眉山玄武岩的对比及成因联系

4.3.1 玄武岩化学地层学对比

图5分别表示了金平和宾川地区玄武岩地层柱状剖面(图5a)和主要地球化学参数随剖面高度的变化(图5b)。可见,宾川下部的低钛玄武岩与金平玄武岩的主要地球化学指标具有高度的一致性。

4.3.2 微量元素特征对比

将金平上二叠统玄武岩的地球化学特征与宾川峨眉山玄武岩(黄开年,1988;张云湘等,1988;Chung *et al.*, 1995, 1998;徐义刚等,2001;Xu *et al.*, 2001;肖龙等,2002)进行对比发现,金平玄武岩的总体特征与峨眉山大火山岩省宾川地区低Ti玄武岩(Xu *et al.*, 2001;肖龙等,2002)相似(表4)。

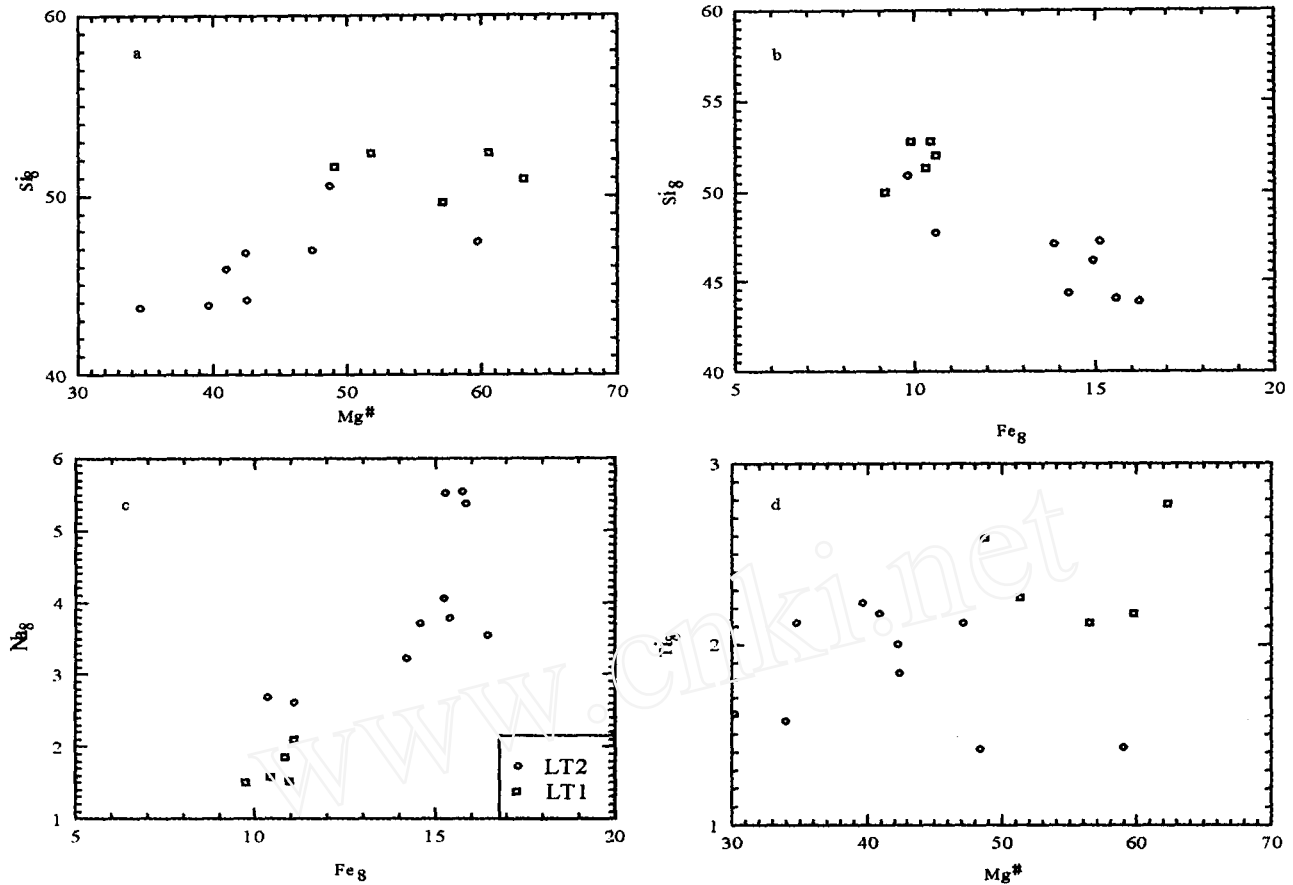


图4 $Si_8 - Mg^\#$ (a)、 $Si_8 - Fe_8$ (b)、 $Fe_8 - Na_8$ (c) 和 $Mg^\# - Ti_8$ (d)图解

Fig. 4 Si_8 versus $Mg^\#$ (a), Si_8 versus Fe_8 (b) and Fe_8 versus Na_8 (c), $Mg^\#$ versus Ti_8 (d) plots of basalts at Jinping area

表4 金平和宾川玄武岩不相容元素比值

Table 4 Incompatible trace element ratios of Emeishan basalts and OIB end members and major chemical reservoirs

	宾川			金平	
	LT1	LT2	HT	LT2	LT1
Zr/Nb	11.711	8.124	7.703	8.66	11.7
La/Nb	1.245	0.701	0.837	0.73	1.53
Ba/Nb	11.743	21.465	6.594	27	19.57
Ba/Th	47.059	198.482	56.289	235	45.892
Rb/Nb	1.204	2.092	0.482	1.88	3.14
Th/Nb	0.264	0.121	0.116	0.118	0.387
Th/La	0.209	0.169	0.140	0.17	0.248
Ba/La	9.529	31.046	7.827	36.8	12.061

在用原始地幔标准化的蛛网图中(图6),两岩区的微量元素配分特征极为相似。

此外,根据汪云亮等(2001)对不同大地构造环境玄武岩中微量元素 Th、Ta 和 Hf 的研究,不同构造环境玄武岩具有不同的 Th/Hf 和 Ta/Hf 比值。本文所研究的金平和宾川

LT1 和 LT2 玄武岩具有十分相似的 Th/Hf 和 Ta/Hf 比值,一方面说明了其形成背景的不同,另一方面早期 LT1 玄武岩的 Th/Ta 比值为 4~7.88,而晚期 LT2 为 1.73~2.71(表1)说明该区玄武岩的形成可能经历了与地幔柱有关从早期的大陆拉张到晚期裂谷的形成。

4.3.3 源区特征对比

在 Th/Yb-Ta/Yb 判别图解(图7)中,两岩区的 LT1 均落入活动大陆边缘区域岩石圈地幔,LT2 落入富集地幔源区。说明它们的源区是相同的。

此外,它们的 Ta/Hf 比值多大于 0.24(表1),较汪云亮等(2001)所定义的地幔热柱成因玄武岩(Ta/Hf > 0.3)略低,这可能是峨眉山玄武岩并非原始岩浆(MgO < 8%)所造成的。但大部分 LT2 样品的 Th/Nb 小于或等于 0.11,说明其有地幔热柱影响的痕迹。

4.3.4 成因联系

以上对两岩区玄武岩地球化学地层的对比、微量元素配分型式及源区特征的对比均表明,金平地区的玄武岩与宾川地区的低钛玄武岩具有相同的地球化学性质和演化规律。

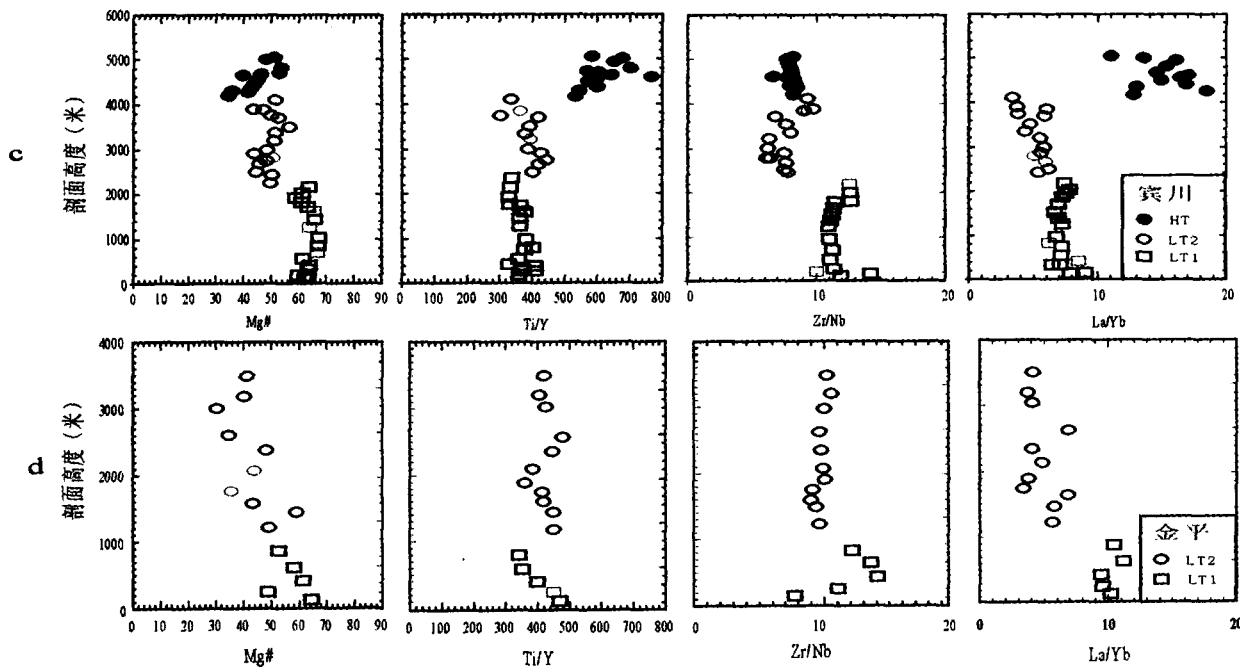
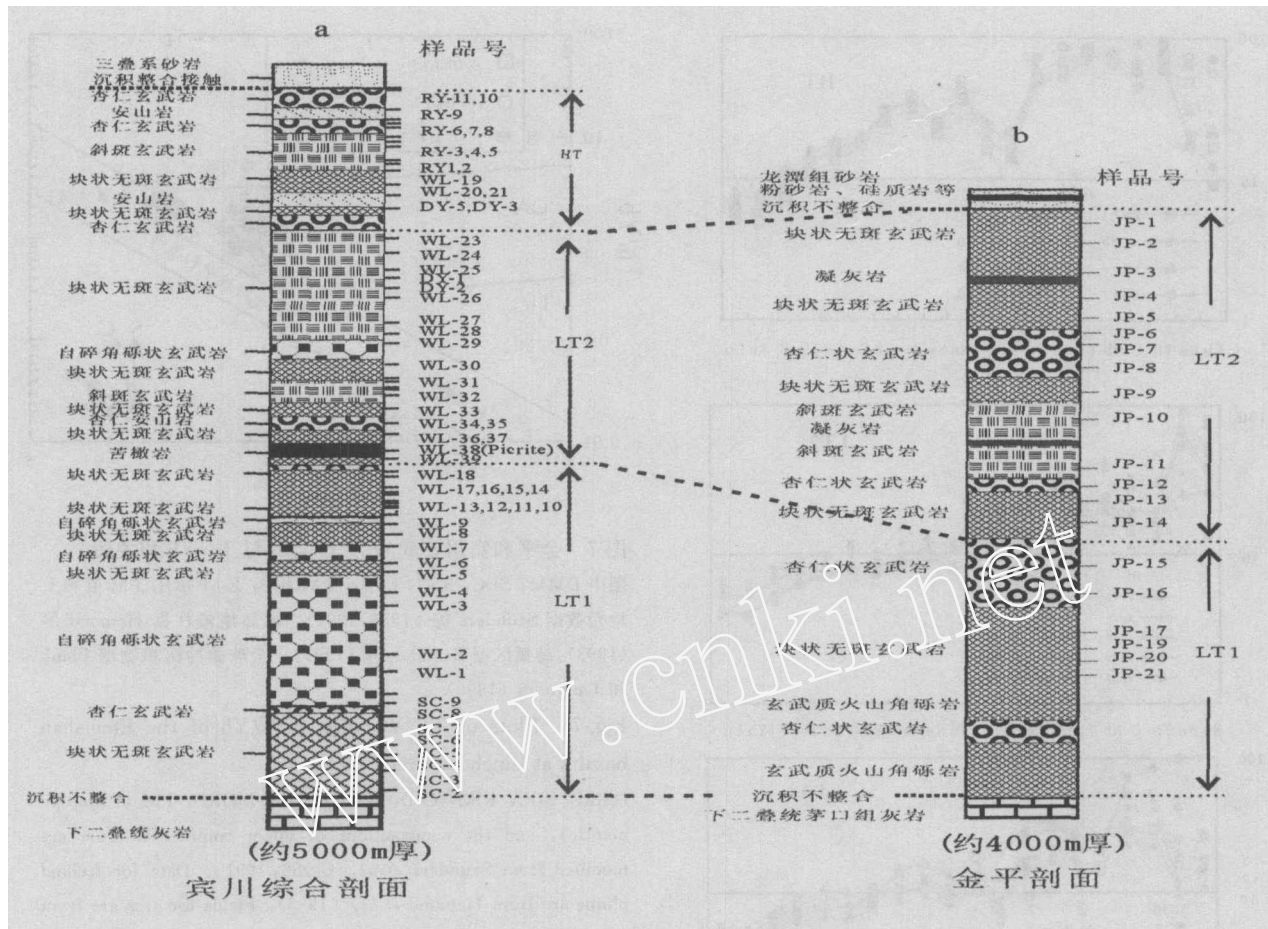


图5 金平和宾川玄武岩柱状剖面及主要元素和地球化学参数随剖面高度变化图。(a)为宾川地区玄武岩综合柱状图，(b)为金平地区玄武岩柱状图，(c)为宾川地区玄武岩地球化学柱状剖面；(d)为金平地区玄武岩地球化学柱状剖面。

Fig. 5 Variation in major elements and geochemical parameters with stratigraphic height.

The upper part is from Binchuan basalts and the lower part is Jinping basalts

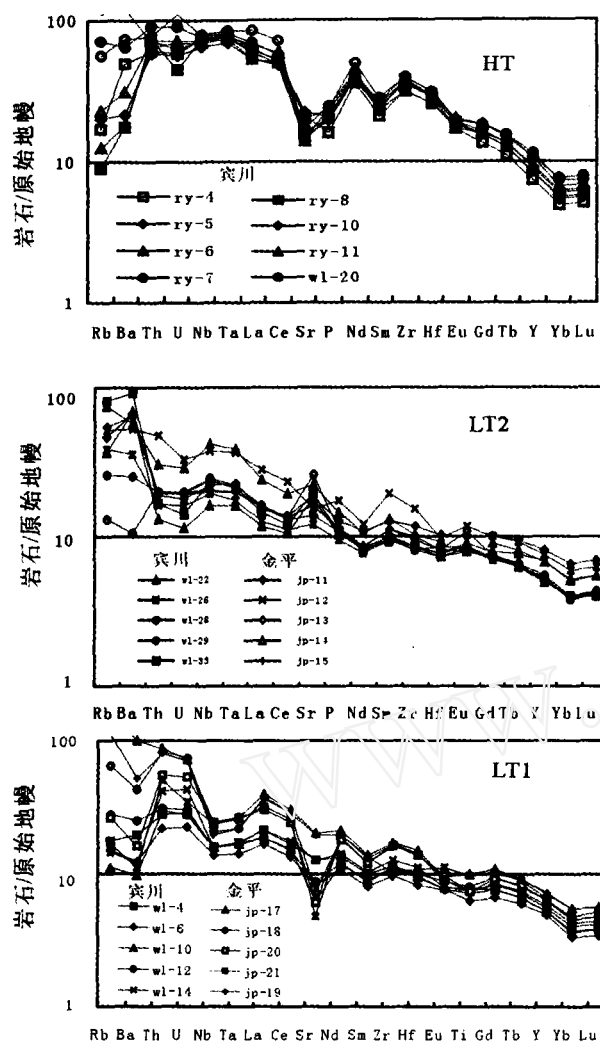


图6 原始地幔标准化的玄武岩微量元素蛛网图

Fig. 6 Primitive mantle-normalized incompatible element of the Jinping and Binchuan basalts

故认为它们的成因是相同的,即早期形成的LT1玄武岩起源于地幔浅部(尖晶石稳定区),其中含有大量壳源物质,较弱的分离结晶作用形成橄辉石和单斜辉石。随着地幔柱上升、易熔壳源物质的耗尽和地壳减薄形成LT2岩浆的地幔源区相对“亏损”壳源物质,并且后期的地壳混染不强,分离结晶作用主要形成单斜辉石和斜长石(肖龙等,2002)。

4.4 对哀牢山-红河断裂位移量的推断

从峨眉山大火山岩省中岩石类型的空间分布上来看,哀牢山-红河断裂以东地区存在着这样的现象:西岩区(宾川地区)存在LT和HT(Xu *et al.*, 2001、徐义刚等,2001、肖龙等,2002)两类玄武岩,而中、东部则仅有HT玄武岩。如果把金平LT放回宾川以西一带,并纳入峨眉山大火山岩省体系,则它表现为由西而东的LT→LT+HT→HT玄武岩组合变化规律。这可能揭示其特有的幔柱活动动力学机制。

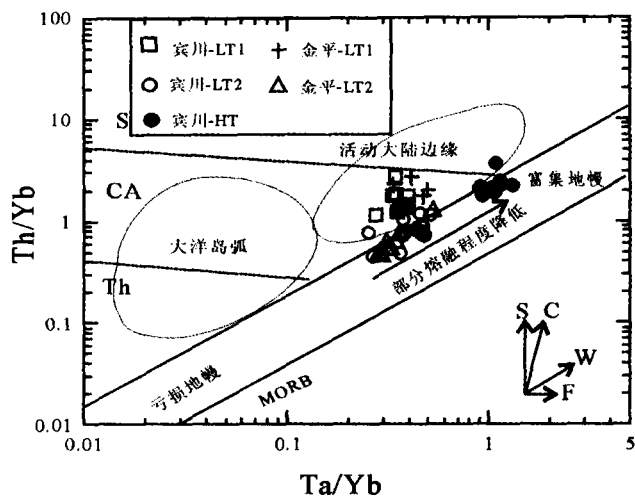


图7 金平和宾川玄武岩的Th/Yb与Ta/Yb相关图

图中DMM, SDC, RSC, OIB, N-MORB, E-MORB, PM值和上地壳数据(Saunders等(1988,1991)。冰岛地幔柱据Hemond等(1993),岛弧区据Saunders等(1991)。全球俯冲沉积物据Plank和Langmuir(1998)

Fig. 7 Plots of Th/Yb versus Ta/Yb of the Emeishan basalts at Binchuan area

DMM, SDC, RSC, OIB, N-MORB, E-MORB, PM (Primitive mantle), and the compositions of upper continental crust are modified from Saunders *et al.* (1988, 1991). Data for Iceland plume are from Hemond *et al.* (1993). Fields for arcs are from Saunders *et al.* (1991). Global subducting sediment composition (GLOSS) after Plank and Langmuir (1998)

由前面的讨论可知,金平LT和宾川LT的演化特征亦相似,即都表现为由早而晚岩浆产生的源区由浅而深(总体应为尖晶石稳定区),熔融程度由高到低的连续演化特征,更为有趣的是,金平LT1和LT2分别与宾川的LT1,LT2的诸多特征十分接近。它们应是在类似的条件下形成的。

需要指出的是,金平玄武岩与宾川低钛玄武岩相似的地球化学特征说明,在新生代哀牢山-红河断裂活动之前它们在空间上是相连的。即金平玄武岩原来的位置应在宾川以西,与宾川玄武岩相连。据此推测哀牢山-红河断裂的左滑距离应大于600公里。而此前针对哀牢山-红河断裂带的性质和位移距离曾有过多种认识。Tapponnier和Molnar(1976)从模拟实验探讨东亚新生代构造时,首先提出该断裂是一大型左旋走滑断裂。其后吴海威等(1989)、钟大赉等(1989)认为该带经历了早期的左滑韧性变形形成一套糜棱岩,后来又历经右行滑移(Allen *et al.*, 1984)。Leloup *et al.* (1993, 1995)估计的左行位移为 700 ± 200 km,另外应加上几十公里的右行滑移量。钟孙霖等(1988,1997)根据对断裂带两侧二叠-三叠纪玄武岩和晚老第三纪富钾岩石的对比研究,认为第三纪中期的左行滑距为约600km。而钟大赉等根据带内变形计算的位移是为320km。Rangin *et al.* (1995)根据Tonkin地震剖面研究认为第三纪中期的左行位移是不

超过 100km。段建中等根据古地磁等推断的位移是为 150~300km。任纪舜等(1996)根据对断裂带两侧地层对比认为滑距最少达 400km。本文的研究为这一问题的探讨提供了直接的证据。

5 结论

金平地区皆为低钛玄武岩组合的两类低钛玄武岩的总体特征与第一类富集地幔端元(EM1)-OIB 相似,它们是浅部地幔(尖晶石稳定区)连续熔融的产物,其地球化学特征与宾川地区峨眉山玄武岩下部的低钛玄武岩十分相似,它们是在相同的大地构造背景下(同时)形成的。后因新生代哀牢山-红河断裂的左行滑移被带至现在的位置,左滑距离应大于 600 公里,研究结果还发现峨眉山大火山岩省由西到东依次出露 LT、LT+HT 和 HT 玄武岩。它是峨眉地幔柱经复杂的地幔柱—地幔—地壳互相作用的产物。

致谢 成文过程中曾得益于和周新华研究员及莫宣学教授的讨论,一并致谢。

References

- Allen CR, Gillespie AR, Han Y, Sieh KE, Zhang LB and Zhu C. 1984. Red River and associated faults, Yunnan Province, China; Quaternary geology slip rates and seismic hazard; *Geological Society of America Bulletin*, 95:686-700
- Chung SL, Jahn BM. 1995. Plume-lithosphere interaction in generation of the Emeishan flood basalts at the Permian-Triassic boundary. *Geology*, 23: 889-892
- Chung SL, Lee TY, Lo CH, Wang PL, Chen CY. 1997. Intraplate extension prior to continental extrusion along the Ailaoshan-red River shear zone. *Geology*. 25(4):311-314
- Chung SL, Jahn BM, Wu GY *et al.* 1998. The Emeishan flood basalt in SW China: A mantle plume initiation model and its connection with continental break-up and mass extinction at the Permian-Triassic boundary. In: Flower M, Chung SL, Lo GH *et al.* (eds.). *Mantle dynamics and plate interaction in east Asia*. Washington D C; AGU Monograph 27: 47-58
- Cong BL. 1988. Formation and evolution of the Panxi paleorift; Beijing; Science Press, 424p
- Ellam RM. 1992. Lithospheric thickness as a control on basalt geochemistry. *Geology*. 20:153-156
- Garland FE, Turner SP, Hawkesworth CJ. 1996. Shifts in the source of Parana basalts through time. *Lithos*. 37:223-243
- Harrison TM, Leloup PH, Ryerson FJ, Tapponnier P, Lacassin R and Wenji C. 1996. Diachronous initiation of transtension along the Ailao Shan-Red River shear zone, Yunnan and Vietnam. In: Yin A and Harrison TM (eds.). *The tectonic evolution of Asia*. New York; Cambridge University Press, 205-226
- Hemond C, Arndt NT, Lichtenstein U, Hofmann AW, Oskarsson N and Steinthorsson S. 1993. The heterogeneous Iceland plume; Nd-Sr-O isotope and trace element constrains. *Journal of Geophysical Research*, 98:15833-15850
- Huang KN, Yang RY and Wang XC. 1988. A preliminary study on trace element geochemistry of Emeishan basalts from SW China. *Acta Petrologica Sinica*. 4: 49-60 (in Chinese with English abstract)
- Keer A. 1994. Lithosphere thinning during the evolution of continental large igneous provinces; a case study from North Atlantic Tertiary province. *Geology*. 22:1027-1039
- Klein EM and Langmuir CH. 1987. Global correlations of ocean ridge basalt chemistry with axial depth and crustal thickness. *J. Geophys. Res.*, 92:8089-8115
- Leloup PH, Harrison TM, Ryerson FJ, Chen W, Li Q, Tapponnier P and Lacassin R. 1993. Structural, petrological and thermal evolution of a Tertiary ductile strike-slip shear zone, Diancang Shan, Yunnan. *Journal of Geophysical Research*. 98: 6715-6743
- Leloup PH and nine others. 1995. The Ailao Shan-Red River shear zone (Yunnan, China). Tertiary transform boundary of Indochina; *Tectonophysics*. 251:3-84
- 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)
- Plank T and Langmuir CH. 1998. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle; *Chemical Geology*, 145:325-394
- Rangin C, Klein M, Roques D, Le Pichon X and Le VT. 1995. The Red River fault system in the Tonkin Gulf, Vietnam; *Tectonophysics*. 243:209-222
- Ren JS, Jin XC. 1996. New observation of the Red River fault. *Geological Review*, 42(5):439-442 (in Chinese with English abstract)
- Saunders AD, Norry MJ and Tarney J. 1988. Origin of MORB and chemically-depleted mantle reservoirs; Trace-element constraints. *Journal of Petrol.*, (Spec. Lithosphere Issue), 415-445
- Saunders AD, Norry MJ and Tarney J. 1991. Fluid inclusion on the trace element compositions of subduction zone magmas; *Philosophical Transactions of the Royal Society, London*, v. A335:337-392
- Song XY, Zhou MF, Hou ZQ, Cao ZM, Wang YL, Li YG. 2001. Geochemical constraints on the mantle source of the upper Permian Emeishan continental flood basalt, Southwestern China. *International Geology Review*. 43:213-225
- Tapponnier P, Peltzer G, Armijo R, Le Dain, AY and Cobbold P. 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia; New insights from simple experiments with plasticine; *Geology*. 10:611-616
- Tapponnier P and nine others. 1990. The Ailao Shan-Red River metamorphic belt; Tertiary left-lateral shear zone between

- Indochina and South China, *Nature*, 343, 431-437
- Tapponnier P and Molnar P. 1976. Slip-line field theory and large scale continental tectonics, *Nature*, 264, 319-324
- Wang YL, Zhang CJ and Xiu SZ. 2001. Th/Hf - Ta/Hf identification of tectonic setting of basalts. *Acta Petrologica Sinica*, 17(3), 413-421(in Chinese with English abstract)
- Wang YZ, Li XL, Dun LL, Huang ZX *et al.* 2000. Geotectonics and metallogeny in the south Nujiang-Lancangjiang-Jinshajiang Rivers area. Beijing: Geological Publishing House. 123p (in Chinese)
- Wilson M. 1989. *Igneous Petrogenesis - A global tectonic approach*. Unwin Hyman, London, 466p
- Wooden JL, Czamanske GK, Fedorenko VA, Arndt NT, Chauvel C, Bouse RM, King B. SW, Knight RJ and Siems DF, 1993. Isotopic and trace-element constraints on mantle and crustal contributions to Siberian continental flood basalts, Noril'sk area, Siberia. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 57, 3677-3704
- Wu GY. 1993. Permian basalts in Lijiang and Jinping, western Yunnan, A comparative study and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 9(supp.), 63-69
- Wu HW, Zhang LS and Ji SC. 1989. The Red River-Ailaoshan fault zone - a Himalayan large sinistral strike slip intracontinental shear zone. *Scientia Geologica Sinica*. 10(1):1-7 (in Chinese)
- Xiao L, Xu YG, Mei HJ, Sha SL. 2002. Geochemistry of Emeishan flood basalts at Binchuan area, SW China: rock types and temporal evolution. *Chinese Journal of Geology*. (in press)
- Xu YG, Chung SL, Bor-ming Jahn, Genyao Wu. 2001. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian-Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China. *Lithos*, 58, 145-168
- Xu YG and Chung SL. 2001. The Emeishan large igneous province: evidence for mantle plume activity and melting conditions. *Geochimica*, 30(1):1-9 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YX, Luo YN and Yang ZX. 1988. Panxi Rift. Beijing: Geological Publishing House. 466p (in Chinese)
- Zhong DL, Tapponnier P, Wu HW *et al.* 1989. Large strike-slip fault-significant post-intercontinental deformation pattern. *Chinese Science Bulletin*. 7:526-529 (in Chinese)

附中文参考文献

- 黄开年, 杨瑞英, 王小春. 1988. 峨眉山玄武岩微量元素地球化学的初步研究. *岩石学报*, (4):49-60
- 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):553-558
- 任纪舜, 金小赤. 1996. 红河断裂的新观察. *地质评论*, 42(5):439-442
- 汪云亮, 张成江, 修淑芝. 2001. 玄武岩类形成的大地构造环境的 Th/Hf - Ta/Hf 图解判别. *岩石学报*, 17(3):413-421
- 王义昭, 李兴林, 耿丽兰. 2000. 三江地区南段大地构造与成矿. 北京:地质出版社, 122p
- 吴海威, 张连生, 嵇少丞. 1989. 红河-哀牢山断裂带-喜山期陆内大型左行滑剪切带. *地质科学*, 10(1):1-7
- 吴根耀. 1993. 滇西丽江和金平二叠纪玄武岩:对比研究和地质意义. *岩石学报*, 9(增刊):63-69
- 肖龙, 徐义刚, 梅厚钧, 沙绍礼. 2002. 云南宾川地区峨眉山玄武岩地球化学特征:岩石类型及随时间演化规律. *地质科学*, (出版中)
- 徐义刚, 钟孙霖. 2001. 峨眉山大火成岩省:地幔柱活动的证据及其熔融条件. *地球化学*. 30(1):1-9
- 张云湘, 骆耀南, 杨崇喜. 1988. 攀西裂谷. 北京:地质出版社. 1-466
- 钟大赉, Tapponnier, 吴海威. 1989. 大型走滑断层-碰撞后陆内变形的重要形式. *科学通报*, 7:26-529