

四川木里地区二叠纪苦橄岩和玄武岩成因 及源区性质

资 锋^{1,2} 林广春^{3,4} 李 杰⁵

(1. 湖南科技大学地质研究所, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南科技大学矿业工程研究院, 湖南 湘潭 411201;

3. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 4. 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 5. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640)

摘要:前人对峨眉山玄武岩的研究已经取得大量的研究成果,但对于一些关键科学问题如岩浆源区组成、源区温压条件等还存在分歧,或有待进一步探讨。本文报道了四川木里地区二叠纪苦橄岩和相关玄武岩的岩石学、地球化学和 Sr-Nd 同位素特征,并进一步探讨了苦橄岩和相关玄武岩的岩浆源区性质、岩浆形成条件。研究表明:四川木里地区二叠纪火成岩主要岩石类型为苦橄岩、高钛玄武岩和低钛玄武岩;苦橄质岩浆来源于地幔柱头部中心的高温区域(地幔柱轴部),岩浆主要起源于石榴石稳定域;高钛和低钛玄武质岩浆来源于地幔柱尾部,高钛玄武质岩浆主要起源于石榴石稳定域,而低钛玄武质岩浆起源于石榴石稳定域和尖晶石稳定域的过渡带;苦橄质和玄武质岩浆在上升过程中都不同程度混染了大陆岩石圈地幔物质,其中低钛玄武质岩浆可能有少量地壳物质的混染。

关键词:苦橄岩;地幔柱;源区性质;二叠纪;四川木里地区

中图分类号:P597;P581

文献标志码:A

文章编号:1000-3657(2011)05-1168-11

广泛出露于扬子板块西缘川、滇、黔三省的晚二叠世峨眉山大火成岩省举世瞩目,已成为地学界研究的热点,近年来取得了大量的研究成果^[1-19]。峨眉山玄武质岩主要由苦橄岩、高钛玄武岩和低钛玄武岩组成^[2,3]。前人研究显示,峨眉山玄武岩含有陆壳物质的印记,有的学者认为这可能是由于源区交代富集所致^[8,13,16,17],而有的学者则认为幔源岩浆与地壳物质的同化混染是主导性因素^[9,14,15]。此外对于岩浆源区的认识也存在争议:徐义刚等认为高钛和低钛玄武岩的母岩浆分别形成于石榴子石和尖晶石稳定区,而且高钛和低钛玄武岩分别代表了热柱边部或消亡期地幔低程度部分熔融(1.5%)的产物和地幔柱轴部高程度部分熔融(16%)的产物^[3,4];张招崇等则强

调峨眉山玄武岩是地幔柱、富集型岩石圈地幔和地壳三种组分不同程度混合的产物^[9];肖龙等认为高钛和低钛玄武岩分别起源于地幔柱源区和岩石圈地幔^[6-8];许继峰等认为高钛和低钛玄武岩分别起源于岩石圈地幔和地幔柱源区^[13];李杰等则强调岩石圈地幔的混合/混染作用^[16,17]。

综上所述,尽管对峨眉山玄武岩的研究已经取得了诸多成绩,但对一些科学问题的认识还存在分歧,或有待进一步探讨。例如,地壳物质印记是由于地幔源区交代富集还是幔源岩浆与地壳物质之间的同化混染?苦橄岩、高钛和低钛玄武岩是由一种岩浆演化而成,还是各自具有自己的原生岩浆?若为后者,它们部分熔融程度和深度如何?形成于何种地幔

收稿日期:2011-03-13; **改回日期:**2011-07-18

基金项目:国家自然科学基金项目(41002022,40903007)、中央高校基本科研业务费专项基金(CHD2010JC038)、教育部高等学校特色专业建设项目(TS11027)和湖南省教育厅科学研究项目(10C0671)联合资助。

作者简介:资锋,男,1980年生,博士,讲师,主要从事岩石地球化学研究;E-mail:zifeng@hnust.edu.cn。

通讯作者:林广春,E-mail:lgchunxa@126.com。

源区? 本文以四川木里地区二叠纪苦橄岩和相关玄武岩为研究对象,详细分析其岩石学、元素地球化学和 Sr-Nd 同位素特征,并进一步探讨苦橄岩和相关玄武岩的岩浆形成条件和源区性质。

1 地质背景

峨眉山大火成岩省主要分布于中国西南云贵川三省,分为松藩—甘孜、盐源—丽江、攀西和贵州高原四大岩区,出露面积约 25 万 km²。其火成岩平行不整合于早二叠世茅口组灰岩之上,被晚二叠世黑泥哨组或三叠纪地层所覆盖^[1,3]。四川省木里藏族自治县位于金河断裂以西(图 1-a),该区玄武岩的喷发环境为海相,其厚度一般为 1000~2000 m。区内苦橄岩大量出露,构成苦橄岩-苦橄质玄武岩-玄武岩旋回,覆盖于早二叠统茅口组灰岩之上,并被三叠系千枚岩所覆盖(图 1-b, 图 2)。

用于研究的样品采自木里县白雕乡境内,苦橄岩与其共生的玄武岩在野外难以肉眼区分,笔者主要通过室内岩石薄片观察以及主量元素组成确定。苦橄岩位于玄武岩下部,与玄武岩呈互层产出。木里地区出露的苦橄岩大部分已经遭受了一定程度的蛇纹石化蚀变,部分苦橄岩可见到残余的斑晶,以

辉石和橄榄石为主。辉石斑晶呈自形和半自形,大多数为单斜辉石,也可见针状辉石或者呈微晶辉石;基质主要由辉石微晶和绿泥石、蛇纹石化的隐晶质组成(图 3)。

2 分析方法

主量元素和微量元素分别在中国科学院广州地球化学研究所的 Rigaku RIX 2000 型荧光光谱仪(XRF) 和 Perkin-Elmer Sciex ELAN 6000 型电感耦合等离子体-质谱仪(ICP-MS)上分析,XRF 主量元素分析方法与 Goto and Tatsumi 报道的相似^[20],分析精度优于 5%。ICP-MS 微量元素分析流程见刘颖等^[21],分析精度优于 3%。Sm-Nd 同位素的化学分离采用常规的阳离子树脂(REE 和其他元素分离)和 HDEHP(Sm、Nd 分离)方法,Sr、Nd 同位素测试在广州地球化学研究所的 Micromass Isoprobe 型多接受器电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP MS)上进行,详细的分析程序参见梁细荣等^[22]。⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 和 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 比值分别用 ⁸⁶Sr/⁸⁸Sr=0.1194 和 ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd=0.7219 进行校正,测得的 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 比值校正到 Shin Etsu JNdi-1 标准的 0.512115^[23]。Sr-Nd 同位素分析的全流程本底<100 pg。

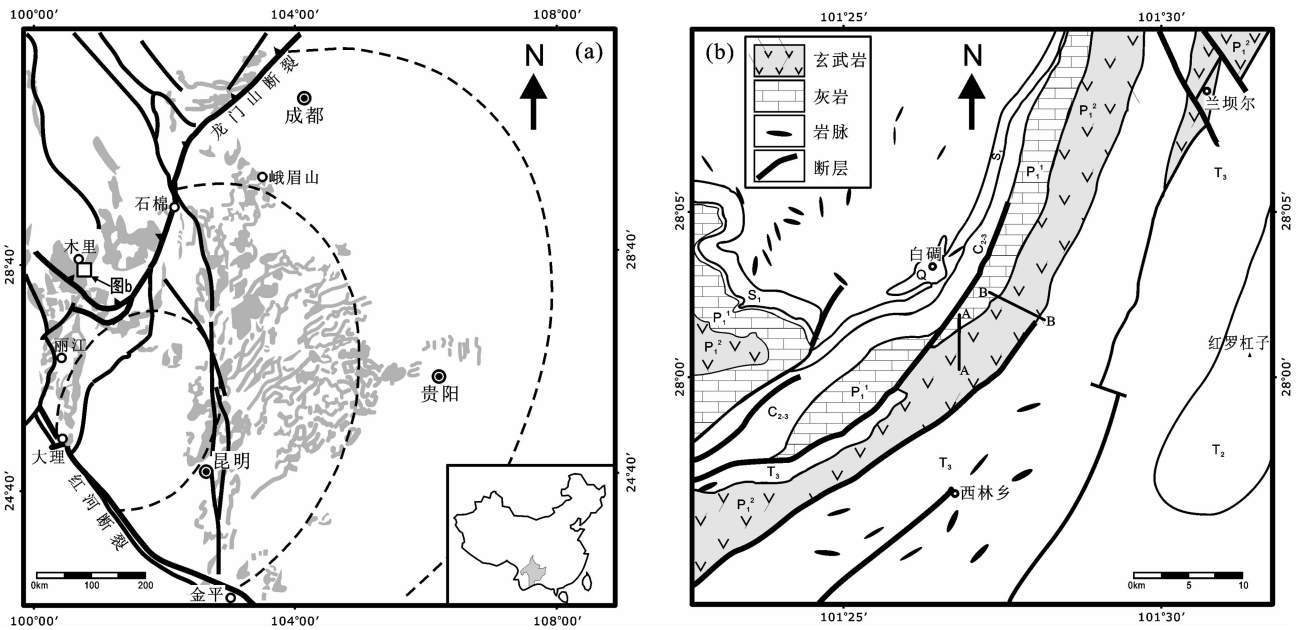


图 1 峨眉山大火成岩省(a)和四川木里地区二叠纪苦橄岩-玄武岩分布简图(b)(据文献[4,17]修改)
Fig.1 Simplified geological map of Emeishan large igneous province (a) and distribution of Permian picrites and basalts in Muli area, Sichuan Province (b) (modified after references [4, 17])

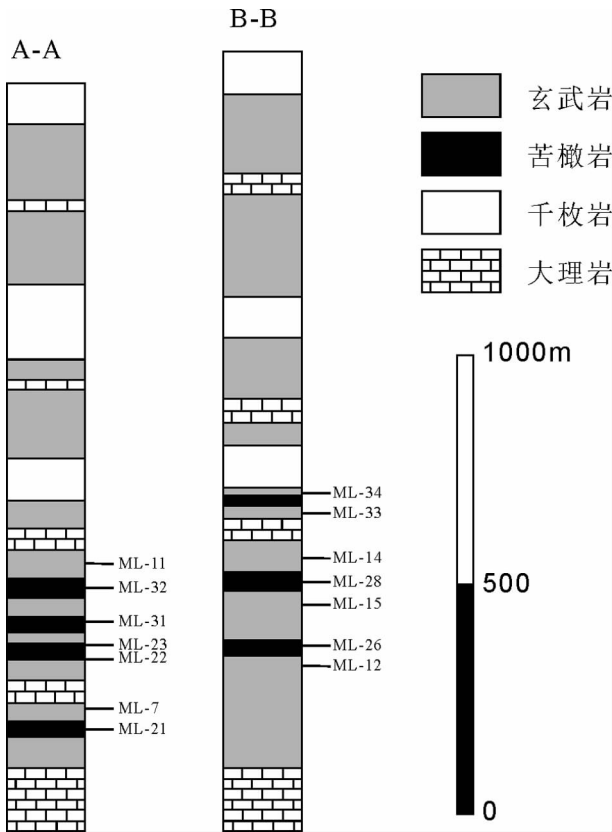


图 2 木里 A-A 和 B-B 剖面柱状图(已标出采样位置)
Fig.2 Simplified stratigraphic columns of A-A and B-B section in Muli area, showing sampling locations

3 测试结果

从木里地区火山岩样品的主量和微量元素分析结果(表 1)和 Sr-Nd 同位素分析结果(表 2)可以看

出: 样品普遍具有不同程度的蚀变 (烧失量 LOI > 1.5%), 由于 K、Na 和低场强元素(LFSE: Cs、Rb、Sr、Ba)在蚀变过程中可能发生了迁移,因此本文将主要依据高场强元素 (HFSE: Ti, Zr, Y, Nb, Ta, Hf)、Th 和稀土元素(REE)等不活泼元素对样品进行岩石学分类、成因和源区性质讨论。

3.1 主量元素特征

依据主量元素特征,可将样品划分为两类:第一类为高镁 ($MgO > 12\%$) 的苦橄岩类, $MgO = 12.34\% \sim 24.37\%$, $SiO_2 = 39.96\% \sim 49.46\%$, 为超基性-基性火山熔岩, $Fe_2O_3^T = 11.38\% \sim 16.11\%$, $TiO_2 = 1.40\% \sim 2.27\%$, $Mg^{\#}$ 值为 0.68~0.79, 属接近原始岩浆的组分;第二类为正常的玄武质岩石, $MgO = 6.23\% \sim 10.29\%$, $SiO_2 = 43.44\% \sim 52.59\%$, 为超基性-基性火山熔岩, $Fe_2O_3^T = 11.76\% \sim 16.67\%$, $TiO_2 = 1.49\% \sim 4.36\%$, $(K_2O + Na_2O) = 2.33\% \sim 5.10\%$, $Mg^{\#}$ 值介于 0.51~0.67, 包括了从接近原始岩浆到弱分异演化岩浆的组分。在 Nb/Y-Zr/TiO₂ 岩石分类图^[24]上(图 4), 样品投影于玄武岩-碱性玄武岩范围。依据 Ti/Y 比值, 可将第二类岩石样品(玄武质岩石)进一步划分为高钛($Ti/Y > 500$)和低钛玄武岩($Ti/Y < 500$)(表 1)。

3.2 微量元素特征

苦橄岩的 $\sum REE = 34.8 \times 10^{-6} \sim 76.2 \times 10^{-6}$, $(La/Yb)_N = 1.67 \sim 4.51$, $(La/Sm)_N = 0.67 \sim 1.67$, $(Gd/Yb)_N = 1.92 \sim 2.48$, $\delta Eu = 0.98 \sim 1.06$ 。经球粒陨石标准化的稀土元素配分图(图 5-a)和微量元素蛛网图(图 5-b)显示, 苦橄岩的轻重稀土分馏不明显, 整体上呈现 LREE 轻度富集, 配分曲线较平缓, 无明显 Eu 异常。其微

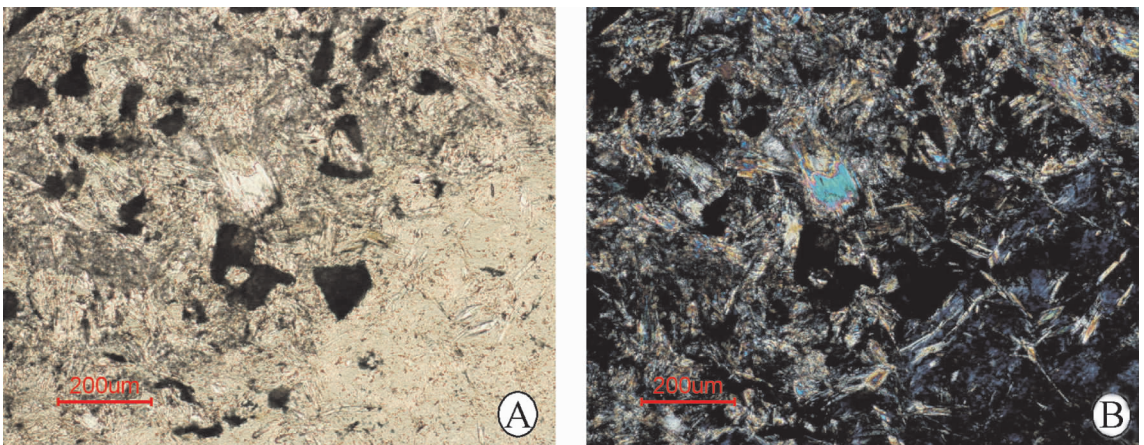


图 3 四川木里地区苦橄岩的显微结构特征(A 单偏光; B 正交偏光)
Fig.3 Photomicrographs of picrites from Muli area, Sichuan Province

表 1 四川木里地区二叠纪苦橄岩-玄武岩主量元素(%)和微量元素分析结果(10⁻⁶)

Table 1 Major (%) and trace element (10⁻⁶) analyses of Permian picrites and basalts in Muli area, Sichuan Province

岩性	ML-21	ML-22*	ML-23*	ML-26*	ML-28*	ML-31	ML-32*	ML-7	ML-11	ML-12	ML-13	ML-15	ML-16	ML-29	ML-10	ML-14	ML-33	ML-34
	Pic	Pic	Pic	Pic	Pic	Pic	Pic	HTB	HTB	HTB	HTB	HTB	HTB	HTB	LTB	LTB	LTB	LTB
SiO ₂	49.46	41.06	47.29	42.56	42.36	48.34	39.96	43.44	49.32	52.59	50.83	44.02	44.26	49.03	44.28	52.03	50.51	50.36
TiO ₂	1.40	1.49	1.90	1.45	1.75	2.27	1.73	4.36	2.18	2.43	1.87	3.00	2.95	1.94	1.49	2.56	1.75	1.88
Al ₂ O ₃	10.57	10.26	13.59	8.67	11.20	11.03	11.38	15.44	15.02	12.93	14.19	14.72	14.56	14.64	11.11	15.46	14.89	15.24
Fe ₂ O ₃ ^T	13.04	16.11	13.5	15.51	15.01	11.38	15.17	16.67	14.21	13.65	12.25	14.58	14.34	14.70	11.76	13.47	12.06	12.86
MnO	0.16	0.20	0.18	0.20	0.15	0.21	0.21	0.16	0.18	0.11	0.16	0.18	0.19	0.17	0.14	0.07	0.18	0.16
MgO	15.91	22.73	12.34	24.37	17.54	14.74	23.27	7.31	8.00	8.36	6.98	8.40	8.52	7.26	10.29	6.23	6.94	7.62
CaO	6.82	7.95	7.82	7.13	11.01	9.01	8.15	8.73	5.97	5.82	10.4	10.45	10.63	7.20	18.19	4.60	8.96	6.65
Na ₂ O	2.57	0.12	3.24	0.01	0.77	2.85	0.01	2.77	2.95	3.40	2.72	0.15	0.30	4.90	2.02	4.57	3.59	4.04
K ₂ O	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05	0.01	0.71	1.92	0.38	0.42	4.08	3.83	0.02	0.31	0.53	0.96	1.01
P ₂ O ₅	0.07	0.07	0.14	0.10	0.15	0.17	0.12	0.41	0.27	0.34	0.18	0.42	0.41	0.11	0.40	0.47	0.18	0.19
LOI	4.07	6.02	4.10	6.06	5.66	3.38	7.10	7.51	4.29	3.92	4.19	3.35	3.37	2.15	7.81	3.87	2.59	2.83
Mg [#]	74	77	68	79	73	75	78	51	57	59	57	57	58	54	67	52	57	58
Ti	7789	8044	10353	7676	9539	12816	9052	23415	10504	13171	10798	16234	17177	10984	8394	13957	9894	10320
V	249	276	331	223	328	341	228	267	314	343	316	479	508	332	277	392	278	277
Cr	1091	2126	904	1986	1640	544	1238	49.9	116	105	154	10.3	9.04	181	1290	27.9	188	197
Rb	2.01	1.58	2.33	1.23	1.95	2.91	1.46	10.8	15.6	5.94	6.27	59.2	60.0	2.10	6.77	7.40	13.9	20.7
Sr	43.1	14.6	98.7	23.2	54.3	51.0	39.2	344	178	177	274	328	394	671	203	460	95.3	144
Y	18.3	21.1	21.6	15.1	17.4	22.7	18.6	25.6	20.5	19.7	21.0	26.4	27.3	20.1	21.0	28.5	28.6	28.2
Zr	74.3	73.5	97.9	65.1	103	131	91.9	194	135	143	121	199	206	90.2	148	200	158	161
Nb	5.16	7.22	6.03	5.69	6.56	9.23	8.07	26.7	16.7	24.5	14.8	33.9	35.3	6.42	28.4	30.9	12.6	12.5
Ba	10.7	24.9	47.3	18.9	24.5	26.9	23.1	106	110.7	126	175	618	566	42.8	71.1	167	1021	573
La	3.59	3.56	6.79	2.72	7.55	8.56	9.59	18.9	20.3	22.8	13.3	28.9	30.3	6.21	17.2	35.6	17.5	16.8
Ce	10.8	5.96	17.3	8.27	20.6	23.8	22.5	43.4	41.7	48.3	31.0	62.6	64.8	16.1	42.1	76.9	38.5	38.4
Pr	1.80	1.69	2.84	1.65	3.24	3.72	3.30	6.09	5.16	5.89	4.33	8.09	8.34	2.61	5.70	9.43	5.25	5.26
Nd	8.97	8.92	13.8	8.67	15.5	17.9	15.1	26.8	21.0	24.0	19.1	33.3	35.3	12.6	24.3	38.3	22.7	23.3
Sm	2.50	3.02	3.95	2.61	3.91	4.67	3.70	6.00	4.16	4.62	4.37	7.05	7.20	3.53	4.97	7.16	5.31	5.43
Eu	0.86	1.10	1.40	0.97	1.27	1.61	1.28	2.10	1.19	1.42	1.43	2.11	2.25	1.36	1.50	2.20	1.47	1.59
Gd	2.84	3.65	4.47	2.95	4.00	4.99	3.86	5.67	4.06	4.13	4.13	6.55	6.85	4.07	4.69	6.47	5.40	5.71
Tb	0.50	0.64	0.75	0.51	0.62	0.79	0.66	0.87	0.64	0.59	0.65	0.94	0.96	0.71	0.69	0.94	0.91	0.94
Dy	2.91	3.75	4.45	2.91	3.61	4.71	3.80	4.52	3.49	3.26	3.52	4.75	4.94	4.07	3.62	4.90	5.62	5.61
Ho	0.56	0.74	0.84	0.55	0.64	0.86	0.70	0.81	0.66	0.59	0.65	0.84	0.86	0.77	0.65	0.88	1.05	1.06
Er	1.62	2.00	2.16	1.43	1.69	2.22	1.87	2.14	1.83	1.63	1.84	2.15	2.27	2.06	1.74	2.43	2.91	2.80
Tm	0.23	0.29	0.31	0.20	0.25	0.32	0.28	0.29	0.29	0.23	0.26	0.29	0.31	0.29	0.34	0.42	0.40	0.40
Yb	1.23	1.54	1.80	1.16	1.33	1.79	1.53	1.72	1.64	1.33	1.53	1.65	1.82	1.68	1.46	2.11	2.43	2.38
Lu	0.19	0.24	0.26	0.18	0.20	0.27	0.23	0.26	0.25	0.20	0.23	0.25	0.26	0.26	0.21	0.31	0.38	0.36
Hf	1.76	2.11	2.88	1.92	2.83	3.80	2.60	4.14	2.95	3.27	2.62	4.06	4.27	2.76	2.93	4.20	4.46	4.64
Ta	0.29	0.48	0.39	0.37	0.46	0.63	0.57	1.84	0.66	1.09	0.65	1.84	1.94	0.43	1.93	1.71	0.86	0.89
Th	0.21	0.67	0.91	0.44	0.66	0.83	1.02	1.39	2.10	2.73	1.96	3.91	3.99	0.58	1.60	4.32	4.12	4.31
U	0.17	0.12	0.21	0.08	0.18	0.26	0.27	0.47	0.70	0.57	0.26	0.85	0.85	0.12	1.25	2.28	0.95	0.98
Ti/Y	425	380	480	510	548	565	486	915	512	670	514	616	628	548	400	490	345	366
Nb/U	30.3	60.0	28.6	69.8	37.1	35.6	30.1	57.2	24.0	43.0	56.9	39.8	41.8	51.6	22.7	13.6	13.2	12.8

注: Pic-苦橄岩, HTB-高钛玄武岩, LTB-低钛玄武岩; Rb, Sr, Sm, Nd 含量采用 ICP-MS 测试结果; t = 0.255 Ga; 带“*”号数据引自文献[17]。

表 2 四川木里地区苦橄岩-玄武岩 Sr-Nd 同位素组成
Table 2 Sr-Nd isotopic data of Permian picrites and basalts in Muli area, Sichuan Province

样号	岩性	Rb	Sr	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _m	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _t	Sm	Nd	(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) _m	ε Nd(t)
ML-21	Pic	2.01	43.1	0.705485	0.705006	2.50	8.97	0.512985	7.68
ML-22*	Pic	1.58	14.6	0.705141	0.704026	3.02	8.92	0.512987	6.56
ML-23*	Pic	2.33	98.7	0.705081	0.704838	3.95	13.8	0.512925	6.37
ML-26*	Pic	1.23	23.2	0.705390	0.704848	2.61	8.67	0.512953	6.62
ML-28*	Pic	1.95	54.3	0.704795	0.704425	3.91	15.5	0.512960	7.70
ML-31	Pic	2.91	51.0	0.705471	0.704884	4.67	17.9	0.512577	0.07
ML-32*	Pic	1.46	39.2	0.705216	0.704831	3.70	15.1	0.512850	5.69
ML-07	HTB	10.8	344	0.705565	0.705243	6.00	26.8	0.512776	4.65
ML-11	HTB	15.6	178	0.705891	0.704989	4.16	21.0	0.512716	3.97
ML-12	HTB	5.94	177	0.704574	0.704229	4.62	24.0	0.512712	4.01
ML-13	HTB	6.27	274	0.704356	0.704121	4.37	19.1	0.512795	4.92
ML-15	HTB	59.2	328	0.706387	0.704532	7.05	33.3	0.512806	5.47
ML-16	HTB	60.0	394	0.706106	0.704538	7.20	35.3	0.512801	5.53
ML-29	HTB	2.10	671	0.705090	0.705058	3.53	12.6	0.512932	6.63
ML-10	LTB	6.77	203	0.705310	0.704967	4.97	24.3	0.512618	1.93
ML-14	LTB	7.40	460	0.705519	0.705354	7.16	38.3	0.512714	4.14
ML-33	LTB	13.9	95.3	0.708627	0.707128	5.31	22.7	0.512531	-0.33
ML-34	LTB	20.7	144	0.707613	0.706130	5.43	23.3	0.512711	3.20

注: Pic-苦橄岩, HTB-高钛玄武岩, LTB-低钛玄武岩; Rb、Sr、Sm、Nd 含量采用 ICP-MS 测试结果; t = 0.255 Ga; 带“*”号数据引自文献[17]。

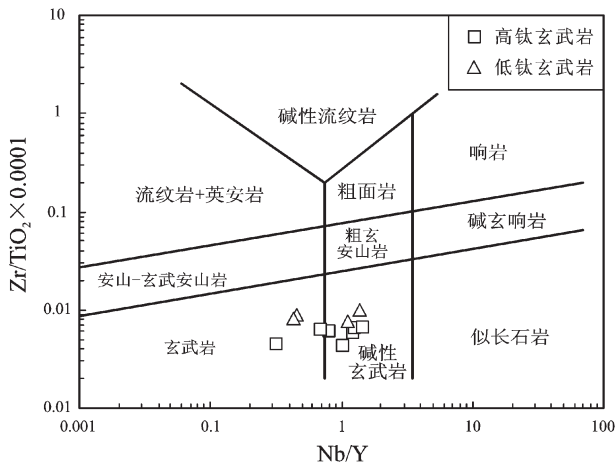


图 4 四川木里地区二叠纪玄武岩 Zr/TiO₂-Nb/Y 岩石分类图解(据文献[24])

Fig.4 Zr/ TiO₂-Nb/Y diagram of Permian basalts from Muli area, Sichuan Province (after reference [24])

微量元素地球化学特征表现为 Y 和 HREE 相对亏损。

高钛玄武岩的 $\sum REE = 56.4 \times 10^{-6} \sim 166 \times 10^{-6}$, $(La/Yb)_N = 2.66 \sim 12.6$, $(La/Sm)_N = 1.14 \sim 3.18$, $(Gd/Yb)_N = 2.00 \sim 3.28$, $\delta Eu = 0.88 \sim 1.09$ 。稀土配分曲线属 LREE 富集型,轻重稀土分馏较明显,基本无 Eu 异常(图 5c)。微量元素表现为 Th、Nb、Ta、Zr、Hf 和 LREE 富集,以及 Y 和 HREE 明显亏损(图 5-d)。低钛玄武岩的 $\sum REE = 109 \times 10^{-6} \sim 188 \times 10^{-6}$, $(La/Yb)_N = 5.10 \sim 12.2$, $(La/Sm)_N = 2.00 \sim 3.21$, $(Gd/Yb)_N = 1.84 \sim 2.66$, $\delta Eu = 0.83 \sim 0.98$ 。稀土配分曲线与高钛玄武岩相似,但部分样品具轻微的 Eu 负异常(图 5-e)。Th、Nb、Ta、Zr、Hf 和 LREE 富集, Y 和 HREE 亏损,但相对亏损程度低于高钛玄武岩(图 5-f)。

3.3 Sr-Nd 同位素

苦橄岩样品的 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_t = 0.704026 \sim 0.705006$, 除样品 ML-31 的 $\epsilon Nd(t)$ 值偏低(0.07)外,其他样品的

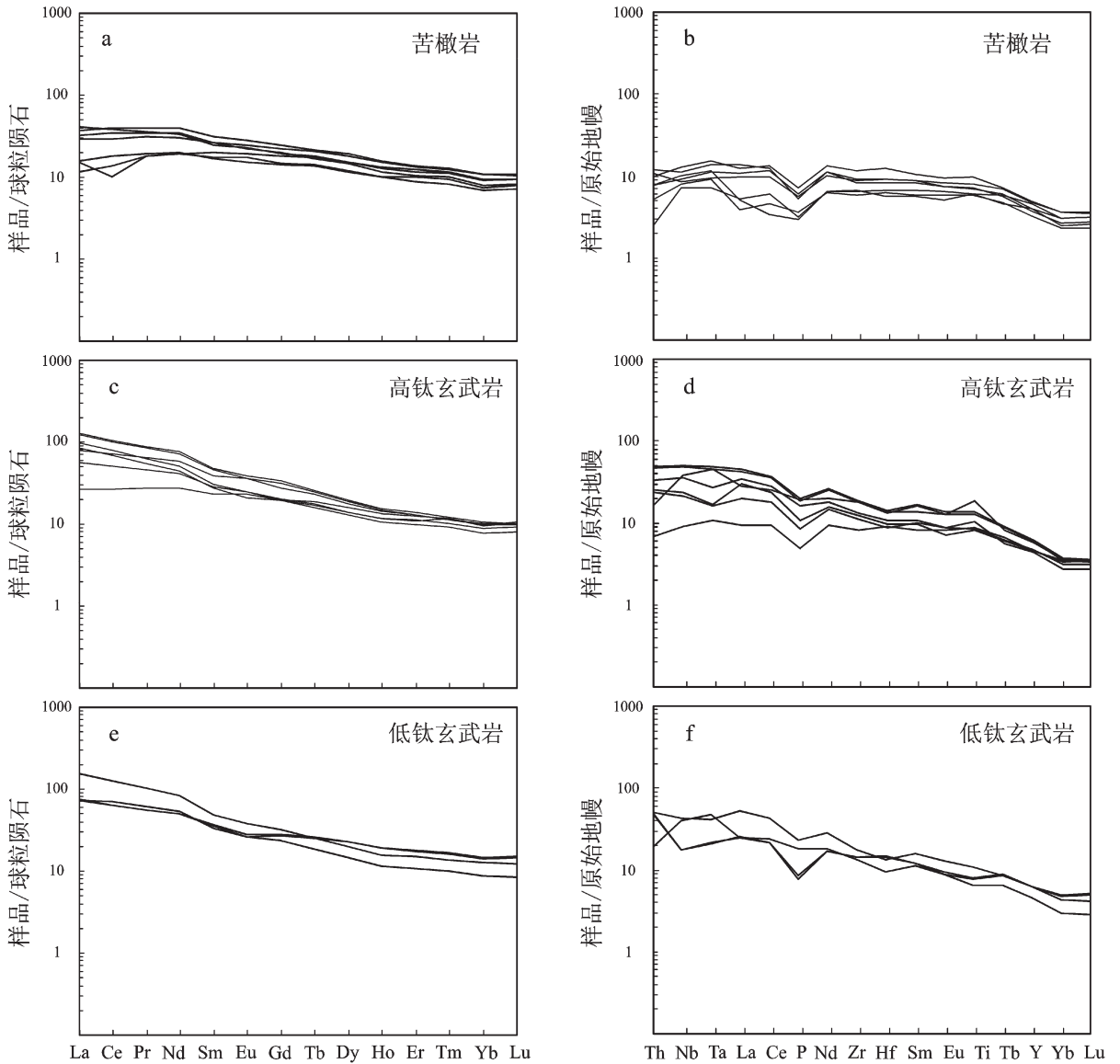


图 5 四川木里地区二叠纪苦橄岩-玄武岩的稀土元素分布形式和微量元素蛛网图
 (球粒陨石 REE 和原始地幔数据引自文献[25])
 Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized spidergrams of
 Permian picrites and basalts from Muli area, Sichuan Province

ϵ Nd(t)均较高,介于 5.69~7.70。高钛玄武岩的($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_t=0.704121~0.705243, ϵ Nd(t)=3.97~6.63。低钛玄武岩的($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_t=0.704967~0.707128, ϵ Nd(t) = -0.33~4.14。总体上看,从苦橄岩、高钛玄武岩到低钛玄武岩,具($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_t增加, ϵ Nd(t)降低的趋势。

4 讨论

4.1 源区富集与地壳混染

前人对于峨眉山玄武岩在不同程度上具有陆壳

物质印记的认识大体上是一致的^[1,3,15-17],但对于其成因的解释却各不相同。是源区富集(岩石圈地幔加入)还是地壳混染?还是两者兼而有之?对此问题的认识往往与岩浆源区、地幔动力学机制等问题密切相关。本文根据四川木里地区二叠纪苦橄岩和相关玄武岩的元素地球化学和 Sr-Nd 同位素特征,并结合前人的研究成果,就相关问题作一些探讨。

由于不同元素在不同矿物中具有不同的相容性,随结晶作用的进行,残余岩浆逐渐亏损早期结晶

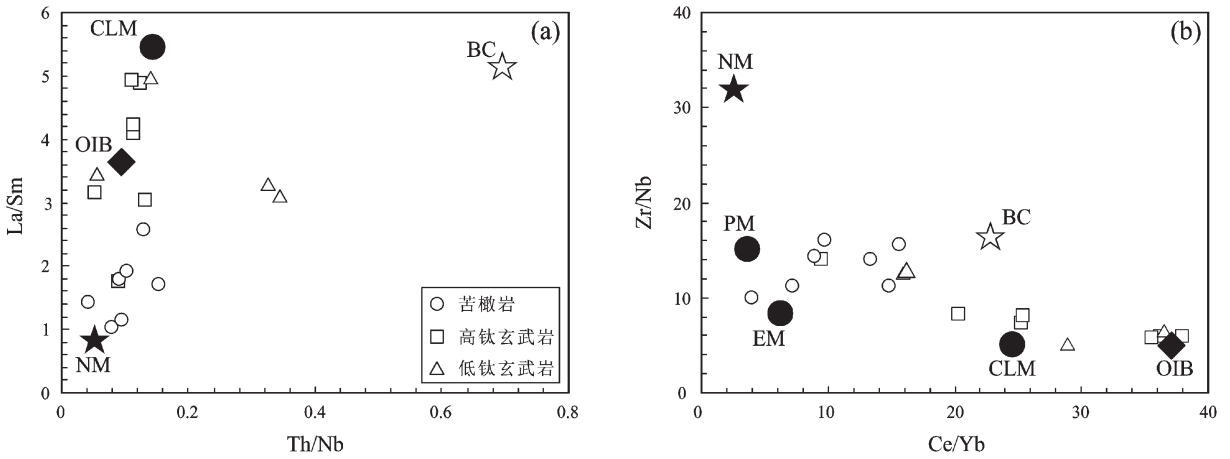


图6 四川木里地区二叠纪苦橄岩-玄武岩 Th/Nb-La/Sm 图解(a)和 Ce/Yb-Zr/Nb 图解(b)
(NM, PM, EM, OIB 数据引自文献[25]; BC 数据引自文献[26]; SCLM 数据引自文献[27])

Fig.6 Th/Nb-La/Sm(a) and Ce/Yb-Zr/Nb diagrams (b) of Permian picrites and basalts from Muli area, Sichuan Province

相中的相容元素，并逐渐富集早期结晶相中的不相容元素，但总分配系数相同或相近的元素比值不会因岩浆的结晶作用而改变。因此，选取总分配系数相同或很相近、对不同源区存在显著差别的元素比值(如 Th/Nb、La/Sm、Ce/Yb、Zr/Nb 等)，可以检验是否存在同化混染作用，并可大致判别混染程度。在 Th/Nb-La/Sm 相关图上(图 6-a)，苦橄岩分布于亏损地幔(NM)和大陆岩石圈地幔(CLM)之间，高钛和低钛玄武岩分布于 OIB 和 CLM 之间，同时低钛玄武岩有向地壳组分(BC)延伸的趋势。在 Ce/Yb-Zr/Nb 相关图上(图 6-b)，苦橄岩、高钛玄武岩和低钛

玄武岩样品表现出与图 6-a 相似分布特征。上述特征显示苦橄岩、高钛玄武岩和低钛玄武岩岩浆应有大陆岩石圈地幔物质的参与，而低钛玄武岩还可能混染了少量的地壳物质。Nb/U 比值是判别地壳物质混染的灵敏指标(在 OIB 和 MORB 中 Nb/U 比值为 47，球粒陨石和原始地幔为 34，大陆地壳为 9.7^[25-27])，笔者注意到，苦橄岩的 Nb/U=28.6~69.8，高钛玄武岩的 Nb/U=24.0~57.2，低钛玄武岩的 Nb/U 比值明显偏低，为 12.8~22.7，也暗示了低钛玄武岩有少量地壳物质的加入。

在 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t - \epsilon \text{Nd}(t)$ 同位素相关图上(图 7)，苦

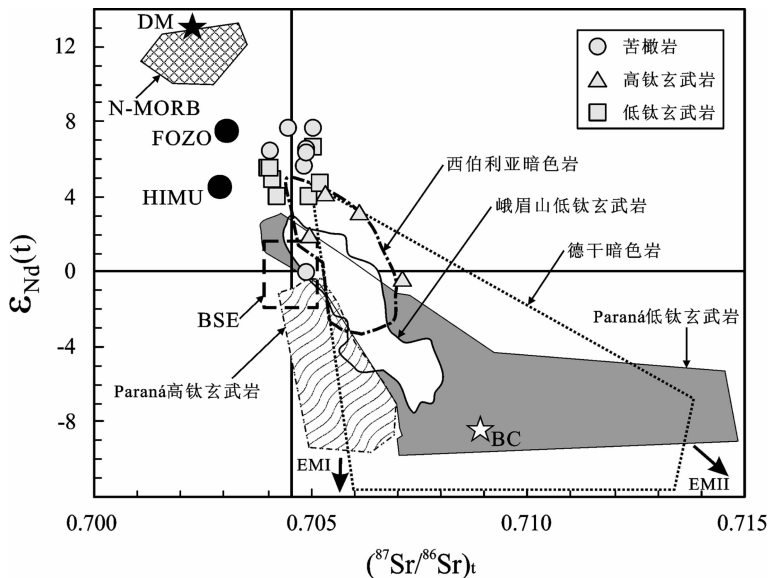


图7 四川木里地区二叠纪苦橄岩-玄武岩 $\epsilon \text{Nd}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ 图解(据文献[28])

Fig.7 $\epsilon \text{Nd}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ diagram of Permian picrites and basalts from Muli area, Sichuan Province (after reference[28])

橄岩样品相对接近亏损地幔(DM)区域,高钛玄武岩次之,低钛玄武岩样品分布则指向地壳组分,也印证了低钛玄武岩遭受了地壳物质的混染。因此,本文认为,研究区苦橄质和玄武质岩浆在上升过程中都不同程度地混染了大陆岩石圈地幔物质,其中低钛玄武质岩浆还可能有少量地壳物质的混染。

4.2 熔融深度

在 $(La/Sm)_N - (Tb/Yb)_N$ 相关图上(图 8-a),苦橄岩和高钛玄武岩样品主要分布于石榴石稳定域,少量样品分布于尖晶石稳定域,值得注意的是,部分熔融不是发生于某一特定深度,而是在石榴石稳定域中有明显变化范围的深度区间。低钛玄武岩样品主

要分布在石榴石稳定域和尖晶石稳定域的过渡带,少量样品分布在石榴石稳定域,同样,部分熔融也不是发生于某一特定深度,也是有明显变化范围的深度区间。在 $Sm/Yb - La/Sm$ 相关图上(图 8-b),样品表现出与图 8-a 类似的分布特征。另外,高钛和低钛玄武质岩浆的深度区间,明显大于苦橄质岩浆的深度区间,这应该是高钛和低钛玄武岩的稀土配分曲线斜率和 $(La/Yb)_N$ 变化较大的主要原因。

4.3 源区性质和组成

在 $Zr/Nb - Nb/Th$ 相关图上(图 9-a),苦橄岩样品 Zr/Nb 、 Nb/Th 比值相对较高,大多投影于地幔柱头分布区,岩浆可能起源于亏损地幔(DM),并受

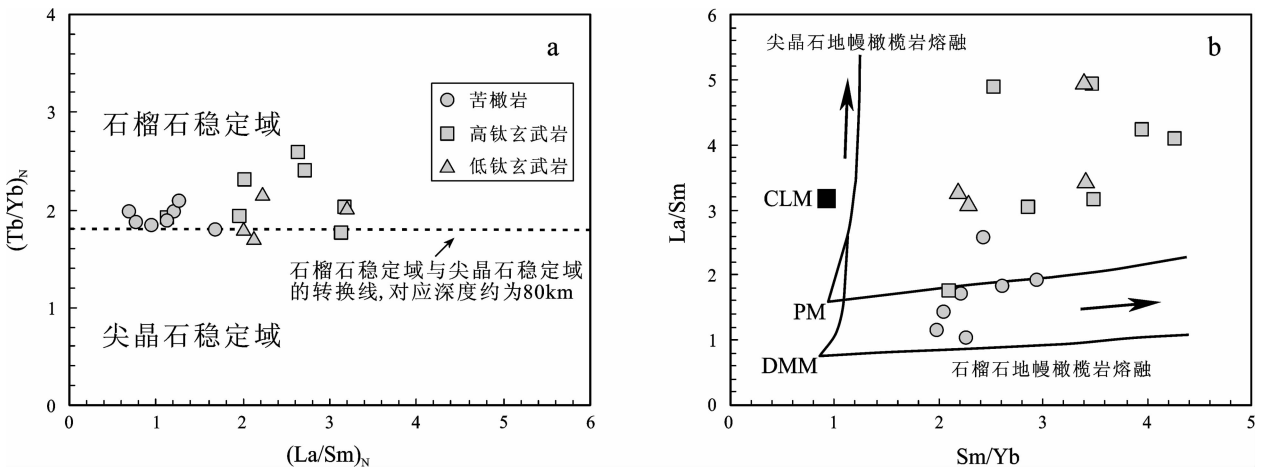


图 8 四川木里地区二叠纪苦橄岩-玄武岩 $(La/Sm)_N - (Tb/Yb)_N$ (a)和 $Sm/Yb - La/Sm$ (b)图解

Fig.8 $(La/Sm)_N - (Tb/Yb)_N$ (a) and $Sm/Yb - La/Sm$ (b) diagrams of Permian picrites and basalts from Muli area, Sichuan Province

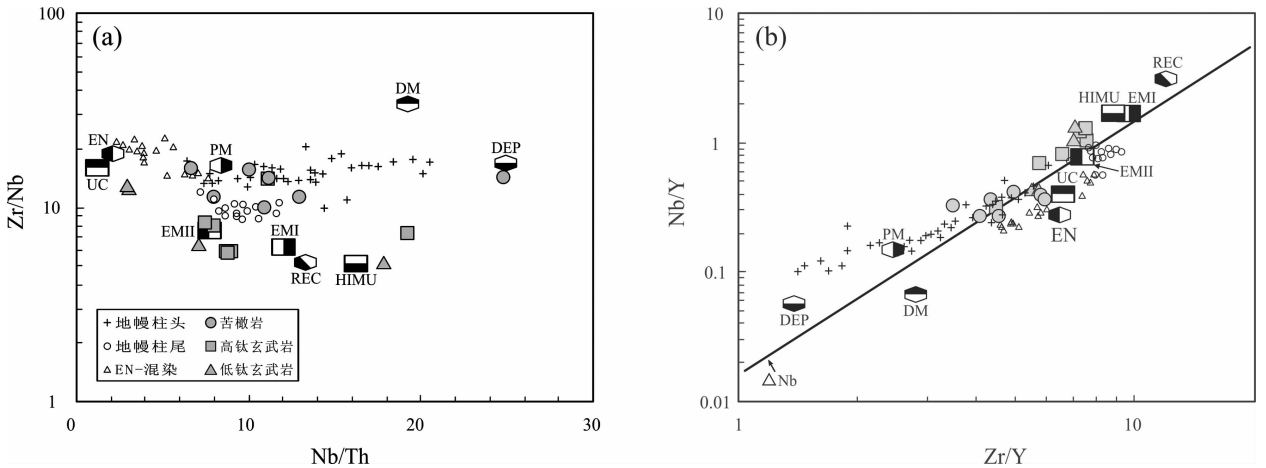


图 9 四川木里地区二叠纪苦橄岩-玄武岩 $Nb/Th - Zr/Nb$ (a)和 $Zr/Y - Nb/Y$ (b)图解(据文献[29])

Fig.9 $Nb/Th - Zr/Nb$ (a) and $Zr/Y - Nb/Y$ diagrams (b) of Permian picrites and basalts from Muli area, Sichuan Province

到富集组分(EN)的混染;高钛玄武岩和低钛玄武岩样品大多投影于地幔柱尾分布区,接近于EMI、EMII组分。在Zr/Y-Nb/Y相关图上(图9-b),也呈现类似的分布特征。

在 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t - \varepsilon \text{Nd}(t)$ 同位素相关图上(图7),苦橄岩的 $\varepsilon \text{Nd}(t)$ 相对较高, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ 较低,更接近于亏损地幔(DM),而高钛玄武岩和低钛玄武岩样品分布则有向EMI、EMII延伸的趋势。通常认为:EMI型富集地幔,包含有再循环的下地壳物质,而EMII型富集地幔,则包含了再循环的上地壳物质、远洋沉积物等。这些图解都暗示了再循环的镁铁质物质(主要是消减的洋壳)参与了岩浆源区。

通常认为,具有更高温度的地幔柱轴部的熔融会产生苦橄质岩浆,而温度较低的地幔柱头部的熔融只会产生玄武质岩浆^[1-3]。因此,四川木里地区的苦橄质岩浆应来源于地幔柱头部中心的高温区域(地幔柱轴部),地幔柱头部不断有岩浆的抽取,源区极度亏损,产生 $\varepsilon \text{Nd}(t)$ 相对较高的苦橄质岩浆。高钛和低钛玄武质岩浆来源于地幔柱尾部(类似于OIB),源区可能有少量再循环的地壳/洋壳物质加入。

5 结 论

四川木里地区二叠纪火成岩主要岩石类型为苦橄岩、高钛玄武岩和低钛玄武岩。苦橄质岩浆来源于地幔柱头部中心的高温区域(地幔柱轴部),高钛和低钛玄武质岩浆来源于地幔柱尾部(类似于OIB)。苦橄岩和高钛玄武岩样品主要分布于石榴石稳定域,低钛玄武岩样品主要分布在石榴石稳定域和尖晶石稳定域的过渡带。苦橄质和玄武质岩浆在上升过程中都不同程度混染了大陆岩石圈地幔物质(SCLM),其中低钛玄武质岩浆可能有少量地壳物质的混染。

致谢:感谢审稿专家审阅全文,并提出了宝贵的修改建议,感谢编辑部老师的热情帮助。梁细荣副研究员、涂湘林高级工程师、刘颖高级工程师、胡光黔高级工程师、曾文高级工程师指导了样品的室内处理和测试,在此表示衷心感谢。

参考文献(References):

[1] Chung Sunlin, Jahn Borming. Plume lithosphere interaction in generation of the Emeishan flood basalts at the Permian Triassic boundary [J]. *Geology*, 1995, 23:889-892.
[2] 徐义刚, 钟孙霖. 峨眉山大火成岩省: 地幔柱活动的证据及其熔

融条件[J]. *地球化学*, 2001, 30(1):1-9.

- Xu Yigang, Chung Sunlin. The Emeishan large igneous province: evidence for mantle plume activity and melting conditions [J]. *Geochemistry*, 2001, 30(1):1-9 (in Chinese with English abstract).
- [3] Xu Yigang, Chung Sunlin, Jahn Borming, et al. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China [J]. *Lithos*, 2001, 58: 145-168.
- [4] Xu Yigang, He Bin, Chung Sunlin, et al. Geologic, geochemical and geophysical consequences of plume involvement in the Emeishan flood-basalts province [J]. *Geology*, 2004, 32:917-920.
- [5] He Bin, Xu Yigang, Chung Sunlin, et al. Sedimentary evidence for a rapid, kilometer-scale crustal doming prior to the eruption of the Emeishan flood basalts [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 213: 391-405.
- [6] Xiao Long, Xu Yigang, Chung Sunlin, et al. Chemostratigraphic correlation of upper Permian lavas, from Yunnan Province, China: extent of the Emeishan large igneous province [J]. *International Geology Review*, 2003, 45:754-766.
- [7] 肖龙, 徐义刚, 梅厚钧, 等. 云南金平晚二叠纪玄武岩特征及其与峨眉山地幔柱关系——地球化学证据 [J]. *岩石学报*, 2003, 19(01): 38-48.
Xiao Long, Xu Yigang, Mei Houjun, et al. Large Permian flood basalts at Jinping area and its relation to Emei mantle plume: geochemical evidences [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 18:38-48 (in Chinese with English abstract).
- [8] Xiao Long, Xu Yigang, Mei Houjun, et al. Distinct mantle sources of low-Ti and high-Ti basalts from the western Emeishan large igneous province, SW China: implications for plume lithosphere interaction [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 228:525-546.
- [9] 张招崇, 王福生. 峨眉山玄武岩 Sr, Nd, Pb 同位素特征及其物源探讨[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2003, 28(4):431-439.
Zhang Zhaochong, Wang Fusheng. Sr, Nd and Pb isotopic characteristics of Emeishan basalt province and discussion on their source region [J]. *Earth Science——Journal of China University of Geosciences*, 2003, 28 (4):431-439 (in Chinese with English abstract).
- [10] 张招崇, 王福生, 郝艳丽, 等. 峨眉山大火成岩省中苦橄岩与其共生岩石的地球化学特征及其对源区的约束 [J]. *地质学报*, 2004, 78(2):171-180.
Zhang Zhaochong, Wang Fusheng, Hao Yanli, et al. Geochemistry of the picrites and associated basalts from the Emeishan large igneous basalt province and constraints on their source region [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78 (2):171-180 (in Chinese with English abstract).
- [11] 张招崇, John J Mahoney, 王福生, 等. 峨眉山大火成岩省西部苦橄岩及其共生玄武岩的地球化学: 地幔柱头部熔融的证据 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(6):1538-1552.
Zhang Zhaochong, John J M, Wang Fusheng, et al. *Geochemistry*

- of picritic and associated basalt flows of the western Emeishan flood basalt province, China: evidence for a plume-head origin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22 (6):1538-1552 (in Chinese with English abstract).
- [12] Zhang Zhaochong, Mahoney J, Mao Jingwen, et al. Geochemistry of picritic and associated basalts flows of the western Emeishan flood basalt province, China [J]. *Journal of Petrology*, 2006, 47: 1997-2018.
- [13] Xu Jifeng, Suzuki K, Xu Yigang, et al. Os, Pb and Nd isotope geochemistry of the Permian Emeishan continental flood basalts: insight into the source of a large igneous province [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71:2104-2019.
- [14] 姜常义, 钱壮志, 姜寒冰, 等. 云南宾川—永胜—丽江地区低钛玄武岩和苦橄岩的岩石成因与源区性质[J]. *岩石学报*, 2007, 23 (4): 777-792.
Jiang Changyi, Qian Zhuangzhi, Jiang Hanbing, et al. Petrogenesis and source characteristics of low-Ti basalts and picrites an Binchuan-Yongsheng-Lijiang region, Yunnan, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(4): 777-792 (in Chinese with English abstract).
- [15] 姜寒冰, 姜常义, 钱壮志, 等. 云南峨眉山高钛和低钛玄武岩的岩石成因[J]. *岩石学报*, 2009, 25(5):1117-1134.
Jiang Hanbing, Jiang Changyi, Qian Zhuangzhi, et al. Petrogenesis of high-Ti and low-Ti basalts in Emeishan, Yunnan, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25 (5):1117-1134 (in Chinese with English abstract).
- [16] 李杰, 许继峰, 何斌, 等. 青藏高原东南木里地区二叠纪苦橄岩的 Sr-Nd-Os 同位素地球化学研究 [J]. *岩石学报*, 2008, 24(2): 337-347.
Li Jie, Xu Jifeng, He Bin, et al. Sr-Nd-Os isotope geochemistry of Permian picrites from Muli area, southeast Tibet [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(2):337-347(in Chinese with English abstract).
- [17] Li Jie, Xu Jifeng, Katsuhiko Suzuki, et al. Os, Nd and Sr isotope and trace element geochemistry of the Muli picrites: Insights into the mantle source of the Emeishan large igneous province [J]. *Lithos*, 2010, 119: 108-122.
- [18] Ali J R, Thompson C M, Zhou Meifu, et al. Emeishan large igneous province, SW China [J]. *Lithos*, 2005, 79:475-489.
- [19] 张招崇. 关于峨眉山大火成岩省一些重要问题的讨论[J]. *中国地质*, 2009, 36(3):634-646.
Zhang Zhaochong. A discussion on some important problems concerning the Emeishan large igneous province [J]. *Geology in China*, 2009, 36(3):634-646(in Chinese with English abstract).
- [20] Goto A, Tatsumi Y. Quantitative analysis of rock samples by an X-ray fluorescence spectrometer (I) [J]. *The Rigaku Journal*, 1994, 11: 40-59.
- [21] 刘颖, 刘海臣, 李献华. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素[J]. *地球化学*, 1996, 25(6):552-558.
Liu Ying, Liu Haicheng, Li Xianhua. Simultaneous and precise determination of 40 trace elements in rock samples using ICP-MS [J]. *Geochimica*, 1996, 25 (6):552-558 (in Chinese with English abstract).
- [22] 梁细荣, 韦刚健, 李献华, 等. 利用 MC-ICPMS 精确测定 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 和 Sm/Nd 比值[J]. *地球化学*, 2003, 32(1):91-96.
Liang Xirong, Wei Gangjian, Li Xianhua, et al. Precise measurement of $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ and Sm/Nd ratios using Multiple-Collectors Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer (MC-ICPMS) [J]. *Geochimica*, 2003, 32 (1):91-96 (in Chinese with English abstract).
- [23] Tanaka T, Togashi S, Kamioka H, et al. JNdi-1: a neodymium isotopic reference in consistency with LaJolla neodymium [J]. *Chemical Geology*, 2000, 168:279-281.
- [24] Winchester J A, Floyd P A. Geochemical magma type discrimination: application to altered and metamorphosed igneous rocks [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1976, 28:459-469.
- [25] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [C]//Saunders A D, Norry M J (eds). *Implications for Mantle Composition and Processes, Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications 42, 1989:313-345.
- [26] Rudnick R L, Gao Shan. Composition of the continental crust [C] // Rudnick R L. *The Crust: Vol.3. Treatise on Geochemistry*. Oxford: Elsevier-Pergamon, 2003:1-64.
- [27] McDonough W F. Constraints on the composition of the continental lithospheric mantle [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1990, 101:1-18.
- [28] Condie K C. *Mantle Plume and Their Record in Earth History* [M]. Cambridge, U K, Cambridge University Press, 2001:1-305.
- [29] Condie K C. High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes? [J]. *Lithos*, 2005, 79(3/4): 491-504.

Petrogenesis and source characteristics of Permian picrites and basalts in Muli area, Sichuan Province

ZI Feng^{1,2}, LIN Guang-chun^{3,4}, LI Jie⁵

(1. Institute of Geology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China; 2. Institute of Mineral Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China; 3. College of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 4. Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 5. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

Abstract: Numerous papers have been published for Emeishan Permian basalts; nevertheless, some key scientific problem, such as magma source components and P-T conditions, remain problems of hot debate. This paper reported petrologic, geochemical and Sr-Nd isotopic data of the Permian picrites and related basalts in Muli area of eastern Sichuan, and discussed magma source characteristics and P-T conditions of these volcanic rocks. The authors have detected that main rock types are picrites and high-Ti and Low-Ti basalts. Picritic magmas were probably derived from the high temperature area at the center of the plume head (the axial zone of mantle plume) and melted within the garnet stable field. However, high-Ti and low-Ti basaltic magmas were probably derived from the mantle plume tail area. High-Ti basalts were mainly melted within the garnet stable field, but the low-Ti basalts were probably melted around the garnet-spinel transition. Both picritic and basaltic magmas were mixed with a subcontinental lithospheric mantle (SCLM) in various degrees during their upward migration, and the low-Ti basaltic magmas might have been contaminated by crust materials.

Key words: picrite; mantle plume; source characteristics; Permian; Muli

About the first author: ZI Feng, male, born in 1980, doctor, lecturer, engages in the study of litho-geochemistry; E-mail: zifeng@hnust.edu.cn.