

宾川—丽江地区二叠纪玄武岩 岩石地球化学特征及其成因

朱士飞¹, 秦 勇¹, 钱壮志², 高艳青³

(1 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221008;

2 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 3 徐州空军学院 机场工程系, 江苏 徐州 221000)

摘要: 通过对云南省宾川—丽江地区岩石学和地球化学研究, 系统阐述了玄武岩岩石地球化学及其岩浆活动特征。认为研究区玄武岩可划分为高镁、低镁和过渡 3 个系列火山岩, 其岩石地球化学性质呈现递变性, 富集轻稀土和大离子亲石元素, 具有与洋岛玄武岩相似的地球化学特征, 为板内拉张玄武岩。同时运用现代岩石成因理论探讨了玄武岩的地幔源区特征、岩浆过程及可能的形成机制。运用多个玄武岩大地构造环境判别图解, 确定玄武岩形成于大陆拉张环境, 与地幔柱活动有关。起源于地幔柱的岩浆与岩石圈相互作用, 经历不同程度的壳源混染, 形成系列玄武岩。

关键词: 宾川—丽江地区; 大陆溢流玄武岩; 岩石化学; 地幔柱; 构造背景

中图分类号: P588.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2008)02-0130-09

Geochemical Characteristics and Origin of Permian Basalts in Binchuan-Lijiang Area, Yunnan Province

ZHU Shi-fei¹, QIN Yong¹, QIAN Zhuang-zhi², GAO Yan-qing³

(1. School of Resources and Earth Sciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, Jiangsu, China;

2 School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3 Department of
Airdrome Engineering, Air Academy of Chinese People's Liberation Army, Xuzhou 221000, Jiangsu, China)

Abstract Applying modern theory of petrology formation, this paper described the petrochemistry and geochemistry characteristics of basalts and its magma activation in Binchuan-Lijiang area of Yunnan Province. Basalts occurring in the area can be compositionally subdivided into three types: the high-Mg (the contents of MgO is from 12.3% to 27.2%), the low-Mg (the contents of MgO is from 2.48% to 7.53%) and transitional-Mg (the contents of MgO is from 10.4% to 11.3%). All three types show progressive variation of petrochemistry property and are enriched in LREE and LILE. They exhibit geochemical features similar to oceanic island basalts and contribute to tholeiitic basalts. From geochemical diagrams, it is found that the Emeishan basalts representing major magmatic events were induced by deep-seated plumes. The magma derived from the mantle plume interacts with lithospheric materials, underwent different degrees of mixing of lithospheric mantle and crustal components, and forms a variety of basalts.

Key words: Binchuan-Lijiang Area; continental flood basalts; geochemistry; mantle plume; tectonic setting

0 引言

广泛分布于扬子地块西缘的攀西裂谷及其两翼中的晚二叠世峨眉山溢流玄武岩区被认为是世

界上大火成岩省之一, 是否与地幔柱作用有关, 成为研究和讨论的热点^[1-3]。徐义刚根据对苦橄岩中橄榄石斑晶等的研究证明峨眉山玄武岩与地幔柱活动有关, 并且通过对玄武岩的岩石学和地层学研

收稿日期: 2007-10-15

基金项目: 云南省自然科学基金项目(2003D0016Z); 中国地质调查局项目(200110200058)

作者简介: 朱士飞(1976-), 男, 江苏徐州人, 博士研究生, 从事地球化学研究。E-mail: shfzhu@163.com

©1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

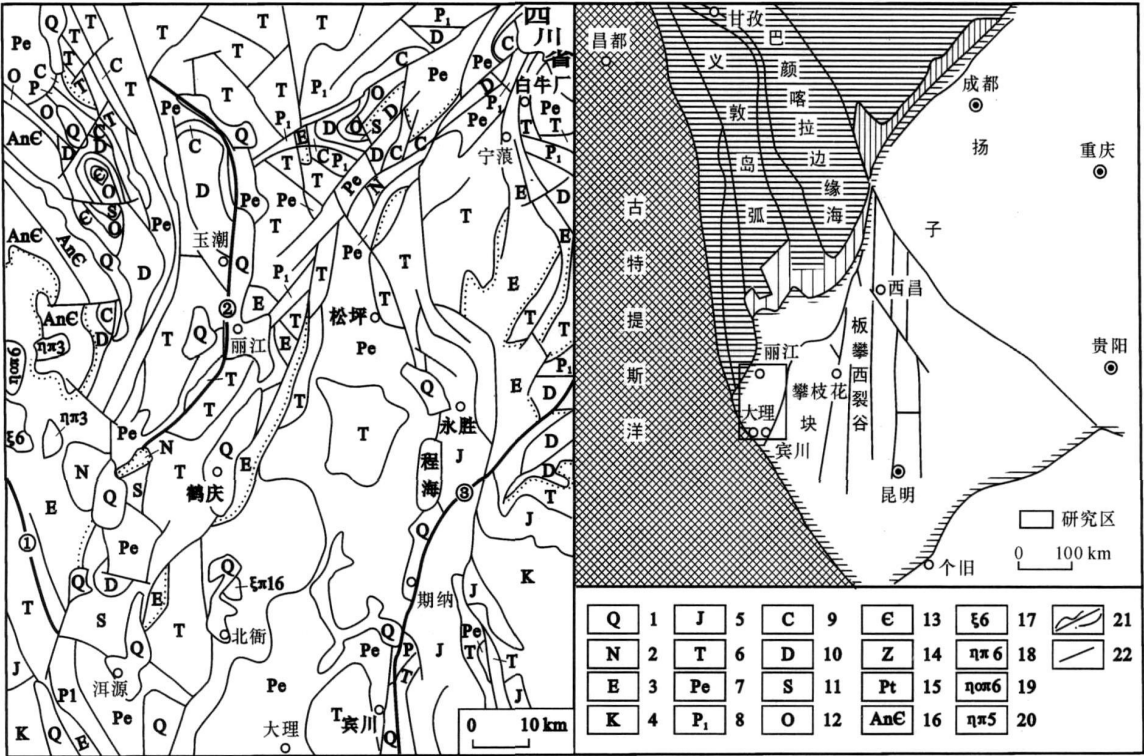
究, 将其划分为高钛与低钛两类玄武岩, 较为系统地论述了地幔柱与这类玄武岩的成因关系^[1-2]。宋谢炎等^[3]认为峨眉山玄武岩西区(盐源—丽江岩区)是富集型地幔部分熔融的产物, 以高镁低钛为特征, 主要经历了橄榄石与辉石的分离结晶。侯增谦^[4]认为广布于扬子地台西缘及邻区的巨量火成岩套, 主要包括峨眉山玄武岩, 海西期镁铁-超镁铁层状侵入体和碱性岩类, 喷发可分为 3 大段即 P_1/P_2 、 P_2/T_1 和 E。林建英^[5]和张云湘^[6]则认为是裂谷作用引起岩浆喷发形成峨眉山玄武岩, 并将其分为东、中、西 3 大岩区。

前人对其岩石类型、大陆溢流玄武岩特性等方面的认识是比较一致的, 但对其成因机制仍存在“裂谷作用”和“地幔活动”的不同看法。争论的焦点在于地幔柱仅仅是提供了热源触发岩石圈发生熔融, 还是作为主要的源区? 在峨眉山大火成岩省中, 宾川—丽江地区的溢流玄武岩厚度最大, 发育较为完整。该区位于扬子板块构造域与三江特提

斯交接部位的盐源—丽江陆架裂陷褶皱造山带, 东为程海深大断裂(图 1), 区域构造线以北东向及南北向为主, 断裂发育, 并具多期活动特征^{5-7]}。笔者较为全面研究了该区二叠纪火山岩岩石学、微量元素、地球化学特征, 运用现代岩石成因理论初步分析这些岩石的地幔源区特征、岩浆过程及其可能的形成机制。

1 二叠纪玄武岩岩相学特征

研究区火山岩岩性复杂, 主要为玄武质火山角砾岩和火山岩。玄武质火山角砾岩角砾中可见斜长石斑晶, 基质中可见单斜辉石。玻基玄武岩角砾多以橙玄玻璃为基质, 拉长石为斑晶。玄武岩角砾可见蚀变边结构, 内圈以铁质蚀变为主, 外圈以沸石化为主。玄武岩基质结构主要为间隐结构, 其次为间隐-间粒结构。常见结构为块状、斑状和杏仁状。常见无斑玄武岩(致密块状玄武岩)、斑状玄武岩和杏仁状玄武岩。各种岩石有不同程度蚀变, 总



1—第四系; 2—上第三系; 3—下第三系; 4—白垩系; 5—侏罗系; 6—三叠系; 7—上二叠统峨眉山玄武岩; 8—下二叠统; 9—石炭系; 10—泥盆系; 11—志留系; 12—奥陶系; 13—寒武系; 14—震旦系; 15—元古界; 16—前寒武系; 17—正长岩; 18—喜马拉雅期正长斑岩; 19—喜马拉雅期石英正长岩; 20—燕山期二长斑岩; 21—整合/不整合地层界线; 22—断层 ① 红河—金沙江断裂; ② 木里—丽江断裂 ③ 程海断裂; 据文献[6-7]

图 1 丽江地区地质图
Fig. 1 Geological Sketch Map of Lijiang Area

体蚀变较弱, 所见蚀变矿物为绿泥石、绿帘石、绢云母和方解石, 以绿泥石化较为常见。无斑玄武岩岩石结构上以显著发育斜长石微晶为特征; 斑状玄武岩的斑晶主要为斜长石斑晶、单斜辉石斑晶、橄榄石斑晶, 基质主要为斜长石、单斜辉石、铁质、隐晶质; 杏仁状玄武岩见杏仁状斜斑玄武岩和杏仁状无斑玄武岩, 杏仁体多呈圆形、椭圆形和各种不规则的形状, 杏仁体内充填绿泥石、绿帘石、石英, 个别

可见蛭石+ 绿泥石+ 阳起石, 主要和后期热液作用有关。

2 地球化学特征

本次研究共采集样品 16 件, 主要成分化学和微量元素由中国地质科学院国家地质实验测试中心用 ICP-MAS 和 XRF 分析完成, 其余数据为收集资料^[3, 8-9] (表 1~2)。

表 1 丽江地区火山岩岩石化学组成

Tab. 1 Major Datum for the Emeishan Basalts from Lijiang Area																	w _B / %
样品	岩石系列	岩石名称	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	烧失量	Total	Mg [#]	m/f
LM3-3	低镁系列	橄榄玄武粗安岩	48.89	1.94	12.8	5.83	3.97	0.15	6.05	9.36	0.71	6.35	0.24	3.18	99.47	0.54	0.61
LM3-4		玄武岩	45.79	1.65	12.95	6.47	3.68	0.18	7.54	13.04	1.24	2.96	0.21	4.15	99.86	0.59	0.73
ML1-1		玄武岩	47.49	3.61	12.96	5.5	9.56	0.27	4.73	7.14	2.89	0.28	0.42	4.51	99.36	0.37	0.31
ML1-2		玄武岩	49.35	3.55	13.29	5.14	9.09	0.27	4.52	6.64	2.95	0.41	0.41	4.03	99.65	0.37	0.31
S10-1		玄武岩	47.98	3.06	13.59	5.97	8.07	0.19	4.85	10.63	2.4	0.26	0.37	2.27	99.64	0.39	0.34
S5-3		橄榄粗安岩	49.07	3.77	13.23	12.6	2.32	0.15	2.48	6.36	4.18	2.2	0.48	2.52	99.33	0.24	0.16
WL3-1		玄武岩	48.97	2.48	12.73	6.34	5.41	0.18	5.86	10.28	2.58	1.45	0.32	3.04	99.64	0.48	0.49
WL3-2		玄武质安山岩	51.44	2.44	13.2	4.09	7.53	0.21	7.63	3.68	2.28	0.02	0.39	6.09	100	0.55	0.64
B1		玄武岩	48.15	1.58	13.97	4.92	7	0.18	7.53	12.28	1.99	0.25	0.15	0.90	98.90	0.54	0.62
B5		玄武岩	48.14	1.59	14.3	6.31	6.15	0.2	6.21	11.08	2.55	0.61	0.24	1.50	98.88	0.48	0.49
B9		玄武岩	44.09	2.43	12.95	4.96	6	0.11	6.47	17.17	0.15	0.02	0.27	4.30	98.92	0.52	0.58
B11		玄武岩	46.15	1.61	15.05	5.52	6.95	0.17	5.63	12.46	1.98	0.57	0.47	2.40	98.96	0.46	0.45
J1		玄武岩	47.45	3.9	12.44	7.79	6.78	0.2	4.95	8.94	3.13	0.99	0.41	1.80	98.78	0.39	0.34
J2-3		玄武质安山岩	51.39	2.48	13.16	4.99	6.85	0.18	5.62	10.29	2.58	0.28	0.26	1.30	99.38	0.47	0.47
J3-1		安山岩	57.88	1.8	12.63	0.32	7.82	0.12	3.83	7.12	0.61	1.32	0.19	5.40	99.04	0.46	0.46
J3-4		钾质粗面玄武岩	46.36	3.13	13.95	4.32	8.25	0.2	6.66	8.19	3.04	1.83	0.34	2.50	98.77	0.49	0.52
J4-1		玄武岩	46.76	3.42	12.85	5	8.25	0.18	6.97	9.43	3.74	0.24	0.32	2.40	99.56	0.49	0.52
J5-2		玄武岩	47.13	3.35	13.72	4.29	7.8	0.21	6.89	8.38	3.29	1.35	0.43	2.50	99.34	0.51	0.56
WL5-3		夏威夷岩	48.24	2.77	11.88	8.94	2.94	0.14	7.04	9.55	3.61	1.47	0.35	2.94	99.87	0.53	0.59
样品	岩石系列	岩石名称	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	烧失量	Total	Mg [#]	m/f
WL5-2	过渡系列	苦橄质玄武岩	39.55	4.3	10.64	7.89	6.81	0.15	10.4	12.06	1.07	0.75	0.54	5.32	99.48	0.57	0.7
WL5-4		苦橄质玄武岩	39.79	4.44	9.97	10.2	4.98	0.16	11.1	11.84	0.92	0.42	0.52	5.55	99.89	0.58	0.72
WL5-5		苦橄质玄武岩	39.31	4.46	10.11	9.91	5.3	0.16	11.2	11.94	0.87	0.4	0.52	5.84	100.02	0.58	0.73
WL5-6		苦橄质玄武岩	39.04	4.46	10.35	8.8	6.09	0.17	11.3	12.14	0.86	0.36	0.52	5.64	99.73	0.59	0.75
WL5-1-1	高镁系列	苦橄岩	41.11	4.21	11.1	9.33	5.93	0.25	12.3	6.39	1.57	0.32	0.51	7.14	100.16	0.6	0.79
WL5-1-2		苦橄岩	36.72	4.6	11.82	12.2	5.87	0.28	12.9	5.32	1.56	0.3	0.58	7.95	100.10	0.58	0.7
LM3-5		苦橄岩	46	1.67	10.02	5.48	5.44	0.15	14.3	8.37	1.82	1.46	0.2	4.66	99.57	0.71	1.29
Y16		麦美奇岩	40.27	1.04	5.94	3.17	7.73	0.17	27.2	6.22	0.32	0.18	0.12	6.72	99.10	0.82	2.46
Y11		麦美奇岩	42.09	1.19	6.21	3.08	7.65	0.16	25.5	7.28	0.51	0.14	0.11	4.96	98.88	0.81	2.34
YB25		麦美奇岩	41.39	1.64	4.65	6.11	5.95	0.16	26.2	5.83	0.53	0.29	0.25	6.26	99.27	0.8	2.14
YB24		麦美奇岩	43.62	1.78	8.2	4.55	7.07	0.16	18.6	8.8	1.15	0.58	0.24	3.96	98.71	0.75	1.58
YB23		苦橄岩	45.34	2.26	9.17	6.92	5.56	0.15	13.6	9.42	1.34	1.08	0.33	3.82	99.01	0.67	1.08
YB22		苦橄岩	44.14	2.14	8.79	4.98	6.76	0.17	17.4	8.7	1.4	0.7	0.31	3.68	99.14	0.73	1.46
Y1-3		麦美奇岩	43.87	1.24	8.86	3.66	7.46	0.15	19.4	7.87	0.96	0.75	0.14	3.30	97.66	0.76	1.72
Y1-2		苦橄岩	44	2.35	9.37	5.99	5.47	0.27	17.8	9.04	1.11	0.36	0	5.10	100.86	0.75	1.52
Y1-1		苦橄岩	44.52	2.75	9.78	9.19	4.31	0.39	16.5	3.46	1.14	0.26	0	7.50	99.80	0.7	1.19

注: 低镁系列样品 B1、B5、B9、B11、J1、J2-3、J3-1、J3-4、J4-1、J5-2 据文献[8], 由西北大学测试中心分析; 其余数据系本次工作所得, 由国家地质实验测试中心用 ICP-MAS 测试。采样点: M L 在永胜米厘; W L 在永胜五郎河; B 在宾川; J 在永胜五郎河。过渡系列和高镁系列样品 Y11、Y16、YB22~YB25 据文献[3], 采样点在云南丽江; 样品 Y1-1、Y1-2、Y1-3 据文献[9]; 其余数据系本次工作所得, 由国家地质实验测试中心测试。采样点: L M 在永胜拉马古; W L 在永胜五郎河。

表 2 丽江地区火山岩稀土与痕量元素地球化学组成

Tab. 2 Elements Datum for the Emeishan Basalts from Lijiang Area

Tab. 2 Elements Datum for the Emeishan Basalts from Lijiang Area																		$w_B/10^{-6}$	
样品	Ba	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Th	Pb	Ga	Zn	Cu	Ni	V	Cr	Hf	Cs	Sc	Ta	
B1	98.1	3.13	242	25.5	95	6.66	1.12	3.18	18.8	99	821	105	335	151	2.68	0.112	37.3	0.41	
B11	17.92	0.23	92.2	33.2	218	24.6	5.56	2.05	28.4	109	72	55.7	318	386	5.39	0.011	29.5	1.46	
B5	297.4	13.6	516	26.9	121	20	2.57	5.85	19.9	101	184	72.4	313	87	3	0.209	20.1	1.04	
B9	217.8	13.9	217	30.8	112	12.2	1.82	3.42	19.3	98	179	82.6	326	138	2.89	0.123	35	0.68	
J1	718	87	697	21.8	82.9	5.57	5.12	12.62	19.5	95	56.5	107.3	225	235	2.24	4.85	26.3	0.34	
J2-3	153.2	6.8	429	31.6	178	20.3	3.21	2.83	19.4	111	182	71.1	316	66	4.76	0.252	30	1.29	
J3-1	11.32	0.55	81.6	28.4	215	32.7	3.64	2.19	23.9	141	703	97.5	343	110	5.59	0.074	22.3	2.07	
J3-4	1.159	44.2	802	32.2	230	34.8	3.85	3.05	21	126	147	106.2	372	126	5.88	1.45	24	2.14	
J4-1	64.37	8.11	377	32.1	239	39.6	4.09	3.82	18.4	136	81	119	341	201	6.14	0.341	27.4	2.41	
J5-2	356.6	47.2	757	38.7	306	49.2	5.55	5.09	20.4	129	88	112.8	325	273	7.97	2.51	23.6	3.03	
LM 3-3	1.098	89.6	173	20.5	135	19.4	2.79	2.38		113	122	92.7	240	116	3.5			1.84	
LM 3-4	678	46.6	222	20.9	121	16.6	2.12	2.61		108	81.4	163	252	423	3.17			1.41	
样品	Co	U	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	\sum REE	ΔE_u	ΔC_e
B1	64.4	0.26	6.89	16.8	2.4	13	3.71	1.29	4.11	0.74	4.32	0.89	2.36	0.33	2.06	0.3	59.2	1.01	0.97
B11	52.5	1.27	32.5	67.7	8.66	38.9	7.89	2.1	7.8	1.15	6	1.12	2.94	0.4	2.46	0.36	179.98	0.81	0.93
B5	55.3	0.67	14.7	31	3.87	18.2	4.3	1.42	4.6	0.76	4.34	0.88	2.39	0.34	2.15	0.32	89.27	0.97	0.95
B9	62.2	0.39	10.43	23.1	3.08	15.5	4.1	1.34	4.62	0.83	4.95	1.02	2.81	0.41	2.54	0.39	75.12	0.94	0.95
J1	25	1.26	21	42.2	5.08	22.8	4.56	1.4	4.34	0.63	3.45	0.69	1.96	0.3	1.92	0.29	110.6	0.95	0.94
J2-3	50.5	0.85	18.4	43.4	5.7	27.2	6.04	1.85	6.2	1.01	5.55	1.1	2.96	0.42	2.65	0.41	122.89	0.92	0.99
J3-1	48.5	0.69	24.7	57.8	7.52	35.6	7.36	2.24	7.29	1.1	5.69	1.03	2.73	0.36	2.16	0.32	155.9	0.92	0.99
J3-4	45.7	0.84	30.2	65.4	8.25	37.8	7.68	2.53	7.51	1.11	5.78	1.07	2.82	0.38	2.27	0.33	173.1	1.01	0.96
J4-1	51.1	0.89	34.6	71.7	9	41.1	8.28	2.67	8.15	1.19	6.11	1.12	2.96	0.39	2.36	0.35	189.98	0.98	0.94
J5-2	46.8	1.25	41.9	89.9	11.3	51.3	10.1	3.05	9.8	1.4	7.1	1.31	3.4	0.46	2.76	0.41	234.19	0.93	0.96
LM 3-3	40.1	1	18.5	40.8	5.24	21.3	5.38	1.51	4.98	0.71	4.13	0.87	2.31	0.34	2.14	0.38	108.6	0.88	0.96
LM 3-4	45.3	0.74	18.8	38.8	4.73	19.9	4.98	1.92	5.36	0.78	4.46	0.87	2.71	0.35	2.37	0.36	106.39	1.13	0.95
样品	Ba	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Th	Pb	Ga	Zn	Cu	Ni	V	Cr	Hf	Cs	Sc	Ta	
ML1-1	269	8.26	480	35.8	300	36	6.3	9.65		189	410	46.6	401	55.3	7.8			3.17	
ML1-2	279	12.1	488	35.6	288	33.3	6.16	7.29		140	319	49.6	391	67.4	7.86			3	
S10-1	173	2.38	411	32	268	34.5	6.62	8.89		157	233	61.7	366	51.3	6.55			2.9	
S5-3	835	42.7	288	39.3	396	50	10.8	36.1		204	161	41.4	261	58.8	8.73			4.21	
WL3-1	475	38.6	900	23.3	218	26.5	3.91	18.6		146	201	126	258	198	5.29			2.33	
WL3-2	28.5	1.07	325	24.7	218	31.4	7.4	18.1		132	239	81.5	243	138	5.41			2.78	
WL5-3	302	19	133	22.9	243	34.3	5.63	7.4		112	136	295	283	700	5.27			2.87	
WL5-2	983	11.7	560	29.6	330	40	4.82	3.61		170	177	429	344	611	7.61			3.82	
WL5-4	336	7.96	284	31.1	342	39	7.45	8.08		152	156	435	360	607	7.28			3.32	
WL5-5	332	7.86	333	33.5	370	41.5	5.38	5.27		144	155	443	355	624	8.85			3.71	
WL5-6	391	9.19	411	32.6	367	46.1	5.91	7.09		192	208	440	354	655	8.52			3.19	
样品	Co	U	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	\sum REE	ΔE_u	ΔC_e
ML1-1	61.1	1.77	39.2	93.6	11.4	44.5	10.3	2.74	9.04	1.36	8.03	1.45	4.03	0.52	3.04	0.56	229.8	0.85	1.03
ML1-2	50.8	1.16	39	82.4	10.6	13.1	9.54	2.81	9.4	1.39	7.13	1.49	4.1	0.55	3.7	0.54	215.8	0.90	0.94
S10-1	58.9	1.85	36.6	81.6	9.55	38.1	9.11	2.67	8.63	1.24	6.51	1.38	3.6	0.53	3.08	0.59	203.2	0.91	1.01
S5-3	42.2	2.06	63	115	15.1	56.5	11.3	3.07	10.8	1.6	7.6	1.48	4.04	0.54	3.28	0.57	293.88	0.84	0.85
WL3-1	57.5	1.18	30.9	67.8	8.11	33.9	7.02	2.19	6.74	1.01	5.01	0.89	2.52	0.37	1.98	0.45	168.9	0.96	0.99
WL3-2	47.9	2.82	36.8	71.7	8.86	36.2	7.09	1.91	6.52	0.97	4.88	1	2.48	0.31	2.07	0.38	180.27	0.84	0.91
WL5-3	50.2	1.31	30.7	64.6	7.33	31.4	6.27	1.98	6.28	0.91	4.44	0.8	2.29	0.35	2.02	0.25	159.6	0.95	0.98
WL5-2	74.6	1.91	41.9	91.6	11.5	46	10.8	2.98	8.54	1.3	6.53	1.2	3.46	0.39	2.37	0.38	228.95	0.92	0.97
WL5-4	78.6	1.3	39.9	89.4	11.8	48.4	10.2	3.2	9.34	1.37	6.56	1.22	3.13	0.39	2.32	0.36	227.59	0.99	0.96
WL5-5	68.7	1.57	44.2	96.4	11.8	52.9	12.2	3.71	9.99	1.43	6.95	1.27	3.5	0.51	2.9	0.46	248.22	1.00	0.98
WL5-6	89.5	1.21	45.4	97.9	12.9	48.7	10.8	3.66	9.88	1.4	7.51	1.32	3.15	0.39	2.23	0.44	245.7	1.06	0.94

续表 2

Continuous Tab. 2

$w_B/10^{-6}$

样品	Ba	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Th	Pb	Ga	Zn	Cu	Ni	V	Cr	Hf	Cs	Sc	Ta	
Y1-1																			
Y1-2																			
Y1-3																			
Y11	207	4	118	8 13	82	9	1 4			69	102	855	175	2 500	1 5	0 3	15 03	0 8	
Y16	150	9	54	8 76	74	10	1 1			54	72	793	154	2 900	1 3	0 4	17 66	1 7	
YB22	594	22	371	15 6	180	20	3 7			100	109	547	219	1 100	2 4	1 9	21 58	1 4	
YB23	1 200	22	5	16	188	23	3 8			103	61	572	232	1 200	2 7	1 2	21 05	1 5	
YB24	580	19	319	15 41	148	15	3 5	5 16		84	110	634	223	1 300	1 8	1 3	22 2	1 2	
YB25	298	14	12	12 39	145	13	2 4	6 8		101	93	1 100	160	1 800	1 8	1 1	18 42	1	
WL5-1-1	211	7 48	196	28 7	293	35 8	4 81	2 71		184	291	555	370	0	7 46			3 62	
WL5-1-2	198	7 05	128	29 5	312	39 9	4 39			191	273	615	360	0	7 93			3 49	
LM 3-5	384	26 9	131	16 4	117	16 5	3 01			94 6	87 4	440	215	0	2 96			1 44	
样品	Co	U	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	\sum REE	Δ Eu	Δ Ce
Y1-1																			
Y1-2																			
Y1-3																			
Y11	45	0 4	10 26	20 34	2 6	11 25	2 88	0 91	2 77	0 36	1 88	0 4	0 72	0 1	0 59	0 1	55 16	0 97	0 91
Y16	42	0 3	9 98	18 71	2 35	10 16	2 31	0 82	2 55	0 3	1 86	0 36	0 94	0 12	0 75	0 1	51 31	1 03	0 88
YB22	67	0 9	28 68	52 33	6 67	26 36	6 11	1 83	5 42	0 69	3 64	0 71	1 73	0 22	1 22	0 14	135 8	0 95	0 86
YB23	70	0 9	31 3	56 57	71 11	28 22	6 37	1 94	5 28	0 74	3 87	0 72	1 86	0 23	1 21	0 15	145 6	0 99	0 86
YB24	69	0 8	23 69	43 89	5 39	20 91	4 92	1 46	4 68	0 62	3 44	0 66	1 79	0 24	1 25	0 19	113 1	0 92	0 88
YB25	45	0 7	20 44	37 89	4 85	19 78	4 83	1 4	3 78	0 49	2 96	0 6	1 6	0 21	0 97	0 15	99 95	0 97	0 87
WL5-1-1	91 2	1 6	35 3	77 9	10 8	17 3	11	3 02	9 7	1 4	7 05	1 14	3 51	0 47	2 87	0 51	212	0 88	0 93
WL5-1-2	110	1 13	37 7	89 8	11 5	50 7	11 3	3 36	10	1 55	6 55	1 25	3 28	0 45	2 34	0 36	230 1	0 95	1 01
LM 3-5	63	0 92	15 7	35 4	4 18	18 8	4 57	1 55	4 15	0 72	3 56	0 71	2 02	0 28	1 55	0 29	93 4	1 03	1 01

注 1: 样品 B1、B5、B9、B11、J1、J2-3、J3-1、J3-4、J4-1、J5-2 据文献 [8]。Y11、Y16、YB22~YB25 据文献 [3]。采样点在云南丽江; Y1-1~Y1-3 据文献 [9]; 其余数据系本次工作所得。由国家地质实验测试中心测试。采样点: LM 在永胜拉马古; WL 在永胜五郎河

2.1 主要元素特征

该区火成岩主要元素组成特点如表 1: 其质量分数 SiO₂ 为 39.26%~57.88%, 主要为基性玄武岩; MgO 变化幅度相对较大, 为 2.56%~29.47%, 根据图 2 火山岩 TAS 图解显示, 本区有高镁火山岩, 该区玄武岩以亚碱性玄武岩序列为主, 碱性玄武岩系列次之。在图 2AFM 图解中几乎所有点均落在拉斑玄武岩区, 且多数点远离钙碱性系列与拉斑玄武岩系列的分界线。按照最新 IUGS 划定的高镁火山岩的界限 MgO 为 12% 以及前人资料^[5, 10], 将该区玄武岩划分为 3 个系列: 高镁系列 MgO 大于 12%; 过渡系列 MgO 为 8%~12%; 低镁系列 MgO 小于 8%。对于研究区高镁火山岩, 又可按照 IUGS 的高镁和苦橄质火山岩分类方案^[10] 进一步确定其种属为苦橄岩、科马提岩和麦美奇岩。它们的特征是明显相对贫硅, SiO₂ 小于 45%, 属于喷出的超基性岩。

就区域分布, 由采样位置和测试数据分析, 可

知在研究区自南向北, 从宾川—永胜—丽江, 岩浆的分异指数 $Mg^{\#}$ 有升高趋势, m/f 值也随之增长, 说明岩石基性程度由南到北在增大。

2.2 稀土元素特征

研究区各类岩石轻稀土元素与重稀土元素配分曲线具有相同的斜率, 而不是象板块会聚边缘玄武岩那样, 轻稀土元素配分曲线向右陡倾, 而重稀土元素配分曲线相对平坦。稀土元素标准化丰度从镧到镱递减, 没有明显的铈异常。由此证明本区岩石具有板内拉张环境的稀土元素地球化学特征。配分曲线的这种特征也排除了俯冲洋壳是这些拉斑玄武岩的源区。因为俯冲洋壳的轻稀土元素相对于重稀土元素明显亏损。由图 3a、c、e 还可以看出, 轻稀土元素相对重稀土元素富集程度有从高镁火山岩向低镁系列玄武岩增强的趋势, 暗示研究区形成低镁系列玄武岩的岩浆部分熔融程度更高一些, 说明岩浆源区的不均一性。

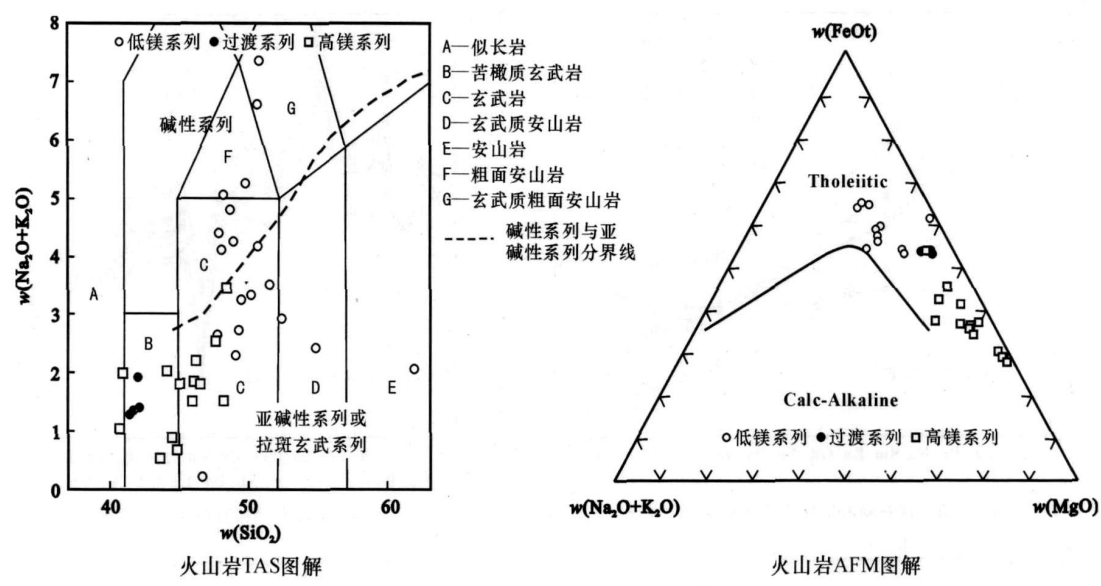


图 2 宾川—丽江地区火山岩图解

Fig. 2 TAS and AFM Diagram of Binchuan-Lijiang Area

2 3 微量元素特征

按照元素不相容性降低的顺序, 作相对原始地幔的标准化微量元素蛛网图如图 3b、d、f, 结果显示, 研究区 3 个系列火山岩的配分曲线总体变化趋势相似, Nb 正异常, Sm、Yb 具明显的负斜率, 显然不同于大洋中脊玄武岩, 而与洋岛玄武岩相似, 为强不相容元素富集型的分配形式。同时, 3 个系列玄武岩岩石样品的 Cs、Rb、Ba 具有不同程度的负异常, 但岩相学观察已经证明样品热液蚀变普遍较弱, 所以, 这些元素在不同的样品间的贫化并非热液蚀变的影响。可见, 该区样品同样显示了板内玄武岩特有的大隆起型配分曲线特征, 并且缺乏板块会聚边缘玄武岩特有的 Ta、Nb、Ti 显著贫化和 Zr、Hf、P 适度贫化等特征。其实, 板内玄武岩常常出现 Zr、Hf 负异常, 例如粤东的拉斑质基性岩脉具有明显的 Zr、Hf 亏损^[11]; Rio Grande 裂谷的过渡型玄武岩也显示出 Zr、Hf 亏损, 并有 Nb 的正异常^[13]。由此证明本区各系列玄武岩均具有板内拉张环境玄武岩的微量元素地球化学特征。

3 岩石成因

3 1 岩浆过程

该区火山岩具有相对较低的 SiO₂, 说明这些岩石是玄武质的。它们的熔融源区来自地幔, 但经历了程度不同的分异过程。Baker^[13] 和 Kirose^[14] 认为在部分熔融过程中, 玄武岩中 SiO₂ 主要受到熔融深度(压力)的控制, 且随着压力的增加而减少,

MgO 与熔融温度成正相关关系。相比较而言, 岩石中 FeO、Al₂O₃、CaO、Na₂O、TiO₂ 则不同程度地受源区橄榄岩成分和部分熔融程度的制约, FeO^{*} 则主要与压力成正相关关系。研究区高镁系列岩石质量分数 FeO^{*} 为 11.08%~15.91%, SiO₂ 为 36.72%~44.52%, Na₂O 为 0.69%~1.63%; 低镁系列岩石 FeO^{*} 为 10.93%~14.60%, SiO₂ 为 44.09%~53.70%, Na₂O 为 1.37%~3.63%, 显然, 两者的岩浆起源深度是不同的, 前者低硅高铁, 说明岩浆源区深度较大, 部分熔融程度较低; 后者低铁高硅, 说明岩浆源区深度较浅, 部分熔融程度高。过渡系列玄武岩介于熔融程度和深度处于两者之间的特征。

由 3 个系列玄武岩的微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 3)可见, 高镁玄武岩系列与洋岛型玄武岩相比, 高场强元素 Nb、Ta、Ti 等及强不相容元素质量分数较高, 显示出地幔热柱的成因特点。一些微量元素质量分数 Zr/Nb、La/Nb、Rb/Nb、Th/Nb、Th/La、Ba/La、Ba/Nb、Ba/Th(表 3)总体上与洋岛玄武岩类似, 而显著不同于洋中脊玄武岩。在通常情况下, 接近原始岩浆的玄武岩 SiO₂ 质量分数低, 微量元素中不相容元素如大离子亲石元素 K、Rb、Cs、Ba、Th 和高场强元素 Ta、Nd、Hf、Zr 以及轻稀土元素质量分数低^[15]。Green 认为如果火山岩的 Mg[#] 指数为 0.68~0.73, 则代表了幔源原始玄武岩浆, 池际尚认为幔源原始岩浆中 Mg[#] 范围更宽, 为 0.65~0.75^[16]。因此, 高镁系列玄武岩符合上述条件, Mg[#] 指数为 0.65

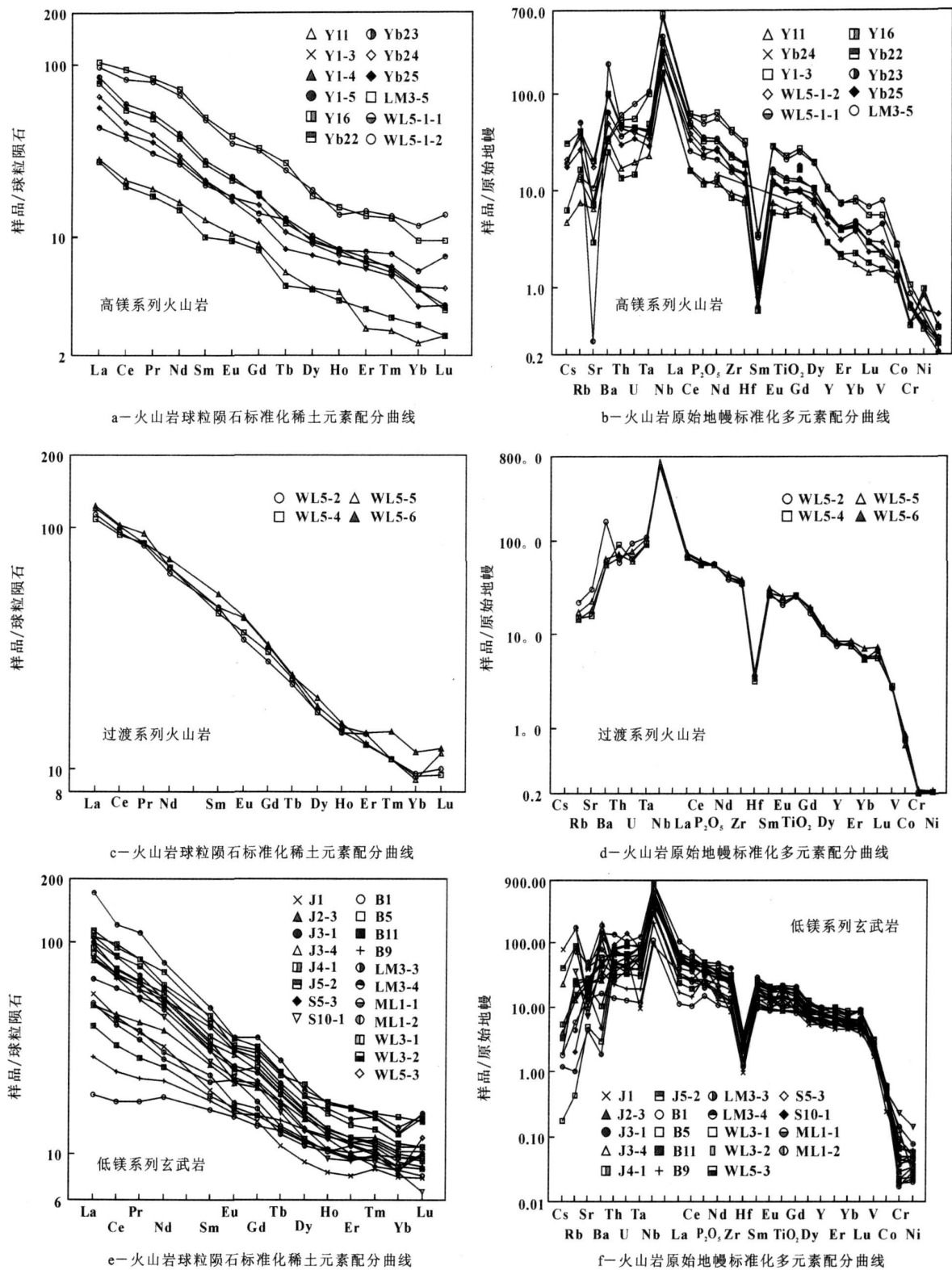


图 3 稀土元素配分曲线与微量元素蛛网图

Fig. 3 Chondrite-Normalized REE and Diagram and the PM-Normalized Trace Element Spidergram for the Basalts Lijiang Area

~0.79, MgO 为 13.19%~29.47%, 可以看成接近原始岩浆的岩石。与之相比, 低镁系列玄武岩中有地壳参与的痕迹, 暗示其可能是洋岛玄武岩受到了较

为强烈的壳源物质混染, 而过渡系列玄武岩则与高镁系列玄武岩相似。

如前所述, 本区玄武岩, 尤其是高镁系列火山岩,

表 3 峨眉山玄武岩和洋岛玄武岩端元及主要化学储库不相容元素比值

Tab. 3 Incompatible Trace Element Ratios in Emeishan Basalts OIB End Members and Major Chemical Reservoirs								
项目	w(Zr/ Nb)	w(La/ Nb)	w(Rb/ Nb)	w(Th/ Nb)	w(Th/ La)	w(Ba/ La)	w(Ba/ Nb)	w(Ba/ Th)
原始地幔	14.8	0.94	0.91	0.117	0.125	9.6	977	
N-MORB	30	1.07	0.36	0.071	0.067	4.0	4.3	60
大陆地壳	16.2	2.2	4.7	0.44	0.204	25	54	124
GLOSS	14.54	3.2	6.40	0.77	0.240	26.9	86.8	112
HIMU OIB	32.0~5.0	0.66~0.77	0.35~0.38	0.078~0.101	0.107~0.133	6.8~8.7	4.9~5.9	63~77
EM-I OIB	5.0~13.1	0.78~1.32	0.69~1.41	0.094~0.130	0.089~0.147	11.2~19.1	9.1~23.4	80~204
EM-II OIB	4.4~7.8	0.79~1.19	0.58~0.87	0.105~0.168	0.108~0.183	7.3~13.5	6.4~11.3	57~105
低镁系列	6.03~14.26	0.26~1.36	0.01~2.80	0.10~0.23	0.11~0.24	0.55~38.38	0.3~12.9	3.1~393.5
	8.24	0.98	0.674	0.16	0.16	13.42	20.5	204
过渡系列	7.96~8.91	0.94~1.02	0.19~0.30	0.12~0.19	0.12~0.19	7.51~23.46	8.0~24.5	45~203.9
	8.47	0.97	0.22	0.16	0.14	12	12.4	94.3
高镁系列	7.4~14.2	0.63~1.05	0.17~1.27	0.11~0.23	0.12~0.19	14.58~38.34	4.96~52.1	43.86~315.79
	8.86	0.86	0.86	0.13	0.13	18.78	23.8	140

注: 原始地幔、N-MORB、大陆地壳、HIMU OIB、EM-I OIB、EM-II OIB 元素比值据文献[2]; 低镁、过渡、高镁系列为本次工作结果

富集轻稀土和大离子亲石元素, 与洋岛玄武岩特征相符, 具有相同或相似的地球化学特征, 而洋岛玄武岩往往是地幔柱作用的产物。研究区高镁系列火山岩源于下地幔, 而低镁系列玄武岩岩浆源区为混合源, 系起始于地幔柱的原始岩浆与岩石圈地幔富集组分熔融的混合岩浆, 使其有大量的“壳源”印记。过渡系列玄武岩相对低镁系列玄武岩则有较少的壳源痕迹。

3.2 岩石构造背景及其成因

3 个系列玄武岩在时空上共生, 在成因上要求不同深度, 具有不同矿物组合和富集特征的地幔源区同时发生部分熔融作用, 反映了存在异常热状态的岩石圈和对流地幔。它们的产出反映了深处存在异常热状态的对流地幔。可见, 地球深部的地幔热柱冲击作用制约了该地区的构造-岩浆活动。在微量元素 Ti-Zr-Y 判别成岩构造环境的三角图解中^[17] (图 4), 几乎所有的岩石样品投影点全部落入 D 区, 表明研究区岩石为板内玄武岩。而在 Th/Hf-Ta/Hf 图解中 (图 5)^[18], 3 个系列玄武岩落入地幔柱玄武岩区, 个别投在陆内裂谷碱性玄武岩区。所以宾川—丽江地区 3 个系列玄武岩均系地幔柱活动产物。低镁系列玄武岩受到壳源物质混染较为强烈, 高镁系列火山岩几乎未受混染, 过渡系列介于两者之间。

综合分析, 可以模拟本区玄武岩形成过程:

(1) 起源于下地幔的地幔热柱上升经过下地幔, 幔柱物质除了来自热边界层的物质外, 还有裹挟带入其中的下地幔围岩。高镁火山岩源岩物质应是被裹挟进地幔柱并被来自热边界层物质加热

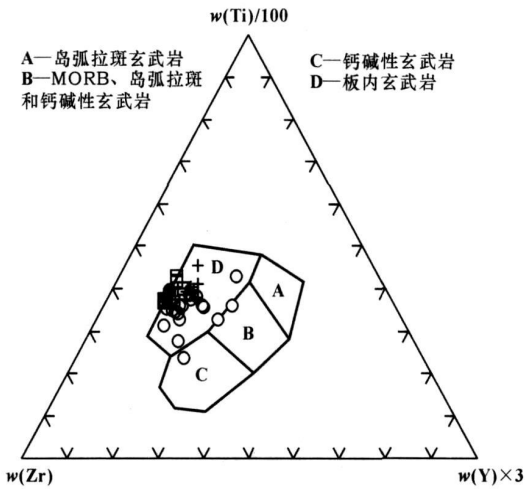


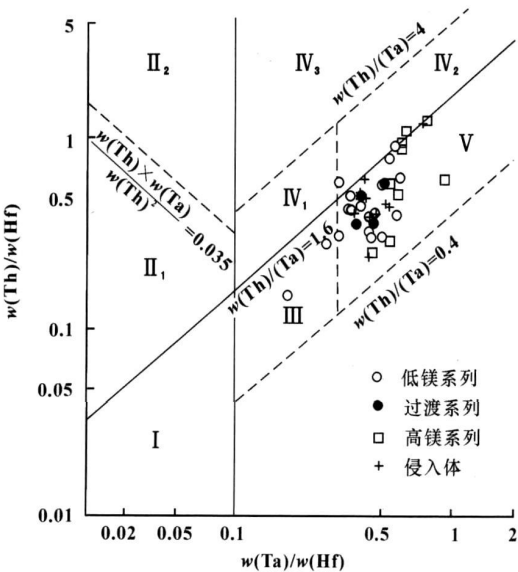
图 4 研究区火山岩 Ti-Zr-Y 判别三角图解
Fig. 4 Ti-Zr-Y Diagram for the Basalts Lijiang Area

了的下地幔岩。

(2) 当地幔柱上升到研究区岩石圈地幔的深度时, 地幔柱提供热源使大量交代富集的岩石圈地幔发生熔融, 导致幔柱岩浆污染, 富含大量壳源物质, 使地幔柱头部不断增大。随着幔柱物质的持续上涌, 产生来自于地幔柱的后续岩浆得以存在岩浆房的底部, 上部为受到壳源混染的岩浆现象。由于持续的岩浆上涌熔融, 使岩石圈伸展减薄, 最终导致岩浆房中的岩浆依次喷出地表形成系列玄武岩及其相关的侵入体 (图 6)。

4 结语

(1) 研究区二叠纪玄武岩以亚碱性玄武岩序列为主, 碱性玄武岩系列次之。据氧化镁质量分数可



I—板块发散边缘 N-MORB 区; II₁—大洋岛弧玄武岩区; II₂—陆缘岛弧及陆缘火山弧玄武岩区; III—大洋板内洋岛, 海山玄武岩区及 T-MORB、E-MORB 区; IV₁—陆内裂谷及陆缘裂谷拉斑玄武岩区; IV₂—陆内裂谷碱性玄武岩区; IV₃—大陆拉张带玄武岩区; V—地幔热柱玄武岩区

图 5 研究区玄武岩类大地构造环境的
Th/Hf-Ta/Hf 判别图解^[8]

Fig. 5 Th/Hf-Ta/Hf Diagram

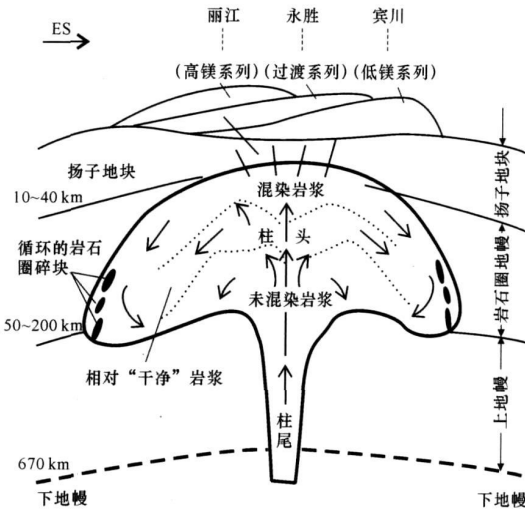


图 6 火山岩成因理想模型
Fig. 6 Ideal Model for the Cause of
the Lava Formation in Lijiang Area

分为高镁系列(大于 12%);过渡系列(8%~12%)和低镁系列(小于等于 8%);而且高镁系列岩石 MgO 质量分数相当于苦橄岩、科马提岩和麦美奇岩。

(2)高镁系列岩石接近原始岩浆的组成,岩浆源区为下地幔,其岩石地球化学特征主要受其源区控制,代表了原始岩浆的性质,形成深度大,熔融比例

小;低镁系列受较强的地壳混染作用的影响,显示出富集岩石圈地幔或地壳物质的参与,形成深度浅,熔融比例大,为混合岩浆;过渡系列介于前两者之间。

(3)结合研究区大地构造背景认为岩石成因与地幔柱活动有关,起源于地幔柱的岩浆与岩石圈相互作用,经历不同程度的壳源混染,形成系列玄武岩。

参考文献:

[1] 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.

[2] 肖 龙, 徐义刚, 杨厚钧, 等. 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[J]. 地质科学, 2003, 38(4): 478-494.

[3] 宋谢炎, 侯增谦, 曹志敏, 等. 峨眉山大火成岩省的岩石地球化学特征及时限[J]. 地质学报, 2001, 75(4): 498-505.

[4] 侯增谦, 卢记仁, 汪云亮, 等. 峨眉山火成岩省: 结构、成因与特色[J]. 地质评论, 1999, 49(增刊): 885-890.

[5] 林建英. 中国西南三省二叠纪玄武岩的时空分布及其地质特征[J]. 科学通报, 1986, 12(1): 929-932.

[6] 张云湘, 骆耀南, 杨崇喜. 攀西裂谷[M]. 北京: 地质出版社, 1988.

[7] 魏福玉. 云南宁蒗—丽江—鹤庆地区成矿地质特征[J]. 华南地质与矿产, 2000, 2(3): 43-47.

[8] 张蓬勃. 宾川—程海地区高镁火山岩岩石地球化学特征及含矿性[D]. 西安: 长安大学, 2003.

[9] 云南省第一区调队编制. 丽江幅 1: 20 万区调报告[R]. 昆明: 云南省地矿局, 1977.

[10] Le Bas M J. IUGS Reclassification of the High-Mg and Picritic Volcanic Rocks[J]. Journal of Petrology, 2000, 41(10): 1467-1470.

[11] 李献华, 胡瑞忠, 饶 冰. 粤北白垩纪基性岩脉的年代学和地球化学[J]. 地球化学, 1997, 26(2): 14-31.

[12] Wilson M. Ingenious Petrogenesis[M]. London: Allen and Unwin, 1989: 460-466.

[13] Baker M B, Stolper E M. Determining the Composition of High Pressure Mantle Melts Using Diamond Aggregates[J]. Geochim Cosmochim Acta, 1994, 58: 2812-2815.

[14] Kirose K, Kushiro I. Partial Melting of Dry Peridotites at High Pressure: Determination of Compositions of Melts Segregates from Peridotite Using Aggregates of Diamond[J]. Earth Planet Sci Lett, 1993, 114: 477-489.

[15] 张树明, 王方正. 玄武岩在研究岩石圈深部过程及构造背景中的应用[J]. 地球科学进展, 2002, 17(5): 685-692.

[16] 池际尚. 中国东部新生代玄武岩及上地幔研究(附金伯利岩)[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1988.

[17] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace Element Discrimination for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks[J]. Petrol, 1984, 25: 956-983.

[18] 汪云亮, 张成江, 修淑芝. 玄武岩类形成的大地构造环境的 Th/Hf-Ta/Hf 图解判别[J]. 岩石学报, 2001, 17(3): 2413-2421.