

羌塘东部治多县直根尕卡一带 二叠纪栖霞期火山岩地球化学特征及其构造意义

李 莉 白云山 马丽艳 牛志军 段其发

(宜昌地质矿产研究所, 湖北 宜昌 443005)

摘要:羌塘东部治多县直根尕卡一带二叠纪栖霞期火山岩主要由中基性火山碎屑岩及熔岩组成,火山岩地球化学研究表明,其主元素表现为高 TiO_2 和低 TiO_2 两种特征,球粒陨石标准化稀土配分模式为 LREE 富集型, MORB 标准化的微量元素配分型式为大洋隆起型,显示岩浆形成于板内裂谷构造环境。Sr、Nd、Pb 同位素地球化学研究表明火山岩显示明显的亏损地幔源区特征。综合研究表明直根尕卡一带二叠纪栖霞期火山岩形成于大陆边缘拉张构造(或陆缘始裂谷)环境,岩浆起源于地幔,属地幔柱作用的产物。

关键词: 二叠纪;裂谷;构造环境;羌塘东部

中国分类号: P588.14, P594 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2009)-1289-13

羌塘位于青藏高原的北部,夹持于拉竹龙—金沙江缝合带和班公湖—怒江缝合带之间,处于冈瓦纳大陆和欧亚大陆的结合部位,是青藏高原地质研究的关键地区。对羌塘中西部一带二叠纪火山岩已有较多的研究,特别是双湖一带^[1-7],而对羌塘东部二叠纪火山岩则研究较少。在新一轮直根尕卡幅 1:25 万区域地质调查中,笔者对发育于羌塘东部治多县一带的二叠纪栖霞期火山岩地质、岩石学及地球化学特征进行了综合研究,并对其构造意义进行探讨。

1 地质及岩石学特征

羌塘东部治多县直根尕卡一带栖霞期火山岩主要分布于治多县东南尕日赛瑙贡玛—玛日啊达州—夏麻贡玛曲—苟果尕—阿日永—当郎赛一带的尕迪考组,诺日巴尕日保组中(图 1)。该期火山岩发育,属海相喷发类型,尕迪考组出露最大厚度大于 1 683.62 m,主要为中基性火山碎屑岩及熔岩;诺日巴尕日保组出露厚度大于 378.59 m,岩性以中基性火山碎屑岩为主,见少量火山熔岩。在火山活动间歇

期沉积的灰岩中,含丰富的生物化石,包括瓣类 *Misellina* cf. *Parafusulina* cf. *splendens* Dunbar et Skinner, *Schwagerina cushmani longa* Zhou, *Schubertella giraudi* (Deprat), *Wutuella wutuensis* (Kuo), *S. cushmani* Chen 等及非瓣有孔虫、珊瑚、菊石、双壳类等,瓣类动物群产出层位与贵州南部^[8]、西秦岭等地^[9]的 *Misellina* 带大体相当,地质时代为早二叠世栖霞期。

栖霞期火山岩见有火山碎屑岩和熔岩两大类,岩石颜色总体较深,呈深灰绿色、灰绿色和灰紫色,岩石多蚀变,可见到明显的绿泥石化和绿帘石化现象。岩性主要为杏仁状玄武岩、块状玄武岩、橄榄玄武岩、粗玄武岩、粗面玄武岩、杏仁状玄武安山岩、玄武质粗面安山岩、沉凝灰岩、岩屑晶屑凝灰岩、火山角砾岩、火山集块岩等。化学成分主要属中基性火山岩,蚀变作用过程中不活泼元素比值的 Nb/Y-Zr/ TiO_2 图解(图 2)显示大部分样品投点落入碱性玄武岩系列范围,个别样品落入亚碱性系列区域。

组成岩石的矿物为中—拉长石(35%~53%)、普通辉石(20%~40%)、绿泥石(2%~22%)、方解石(1%~

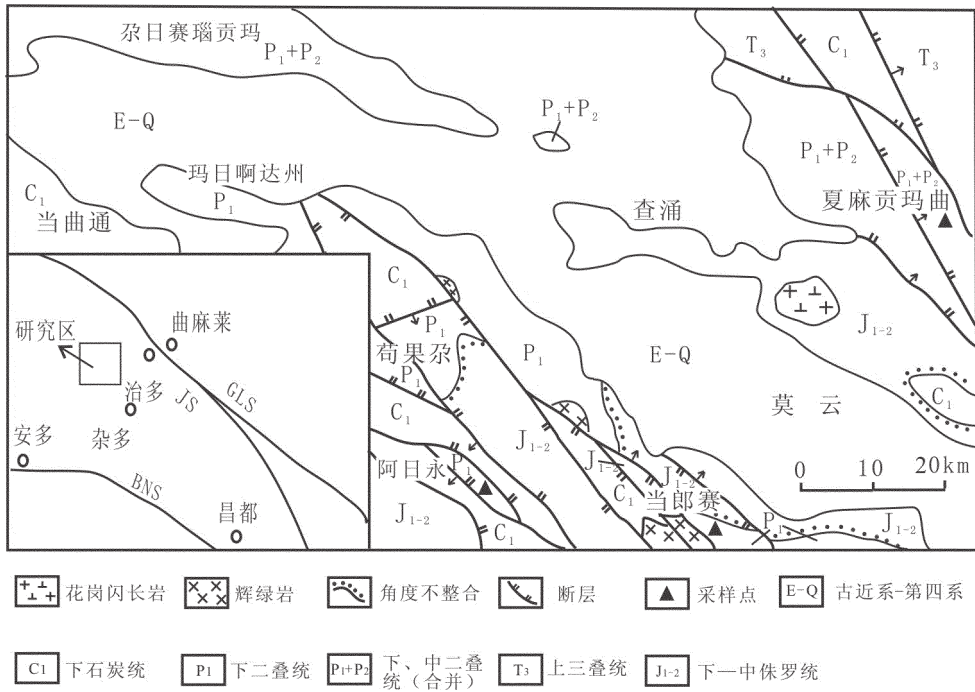


图 1 研究区地质简图
Fig.1 Geological sketch map of the study area

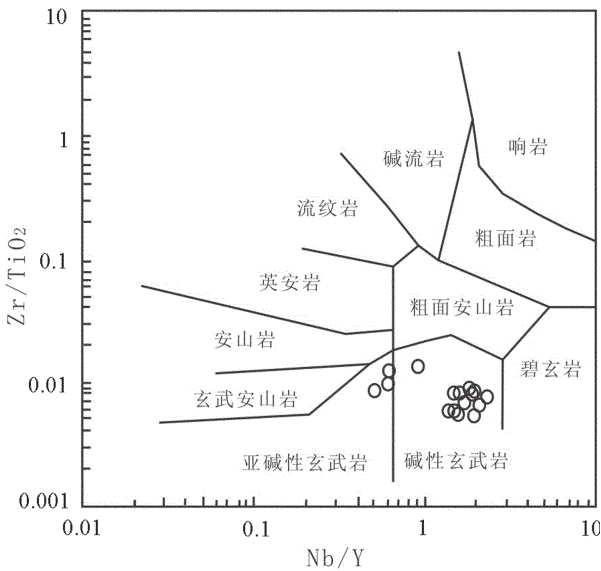


图 2 火山岩 Nb/Y—Zr/TiO₂ 图解
Fig.2 Zr/TiO₂—Nb/Y diagram of the volcanic rocks
(after Le Bas et al.,1986)

辉石(1%~4%),粒径为 0.3~1.5 mm,基质具间粒、间隙(片)结构。粒玄岩中偶见卡钠复合双晶和钠长石双晶,安山玄武岩中偶见交织结构,具有向安山岩过渡的特征。

2 分析方法

所有样品分析均在中国地质调查局宜昌地质矿产研究所中南实验检测中心完成。

Si 和烧失量采用重量法;Al 和 Fe²⁺采用容量法;Fe³⁺、Ti 和 P 采用分光光度法;K、Na、Ca、Mg 和 Mn 采用原子吸收光谱法;稀土元素和微量元素采用 ICP 电感耦合等离子体发射光谱法及 AAS 原子吸收光谱法、AES 电弧发射光谱法等。

全岩样品的 Sr、Nd、Pb 同位素组成测定在宜昌地质矿产研究所同位素地球化学开放研究实验室测定。全部化学分离流程均在超净化实验室中进行,全流程本底 Sr 为 1×10⁻⁹g,Nd 为 2.13×10⁻¹⁰g,Pb 为 2×10⁻⁹g。质谱分析在 MAT261 多接收质谱计上完成,用 ⁸⁸Sr/⁸⁶Sr = 8.3752 和 ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.7219 对 Sr 和 Nd 作质量分馏校正,计算机自动处理数据,采用国际标准样 NBS987(Sr)、NBS981(Pb)和本实验室标准 ZkbzNd(Nd)控制仪器工作状态,国家一级标准物

25%)及磁铁矿(5%~15%)、钛铁矿(或白钛矿)(1%~6%)等,偶见金红石、榍石。块状或杏仁状构造,杏仁体含量一般为 1%~12%,大小为 0.1~3.5mm,且多被绿泥石、方解石、玉髓充填;部分岩石具斑状结构,斑晶为中—拉长石(2%~4%)或橄榄石(4%~16%)、普通

质 GBW04411(Rb-Sr)和 GBW04419(Sm-Nd)监控分析流程。本批样品实际测定标准样品的结果如下:(1)GBW04411:W(Rb)= 249.35×10^{-6} g, W(Sr)= 157.95×10^{-6} g, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.7598 \pm 0.0018$;(2)GBW04419:W(Sm)= 3.018×10^{-6} g, W(Nd)= 10.08×10^{-6} g, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512719 \pm 0.000008$;(3)NBS987: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.71032 \pm 0.00015$;(4)NBS981: $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}=0.9142 \pm 0.0005$;(5)ZkbzNd: $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.511564 \pm 0.000010$,精度 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 好于 1%, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 好于 0.5%, Pb 好于 0.033%, 衰变常数采用 $\lambda(^{87}\text{Rb})=1.42 \times 10^{-11}\text{a}^{-1}$, $\lambda(^{147}\text{Sm})=6.54 \times 10^{-12}\text{a}^{-1}$, $\lambda(^{238}\text{U})=1.55125 \times 10^{-10}\text{a}^{-1}$, $\lambda(^{235}\text{U})=9.8485 \times 10^{-10}\text{a}^{-1}$, $\lambda(^{232}\text{Th})=4.9475 \times 10^{-11}\text{a}^{-1}$ 。

3 岩石地球化学特征

3.1 主量元素

栖霞期火山岩样品的岩石化学分析结果(表 1)显示主量元素含量变化较大。 SiO_2 含量为 44.33%~67.37%,其中火山熔岩 SiO_2 含量为 42.22%~60.99%,主体属基性岩—中性岩范围; TiO_2 为 0.85%~6.62%; Al_2O_3 为 12.2%~19.54%;TFe 为 3.86%~14.22%; P_2O_5 为 0.12%~1.99%; MgO 为 1.92%~8.36%, $\text{Mg}^\#$ 为 22.40~66.96; K_2O 为 0.03%~3.34%,平均 0.88%; Na_2O 为 0.87%~7.21%,平均 3.97%;($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$) 为 1.66%~8.54%,总体具有贫钾、富钠特点。在 TAS 分类图上(图 3),主要分布于玄武岩、粗面玄武岩、碱玄岩、碧玄岩、玄武安山岩、玄武质粗面安山岩和粗面安山岩区。

从主量元素特点可以看出测区火山岩明显可分为两类。

一类位于研究区南部当郎赛—荷果杂一线(图 1),主体为基性火山岩,24 个岩石样品 SiO_2 含量集中在 44.33%~51.68%,平均 47.75%; TiO_2 含量高,为 3.56%~6.62%,平均值为 5.01%,Ti/Y 平均值为 795,属高钛玄武岩。TFeO 含量较高,为 8.34%~14.64%,平均为 11.14%; P_2O_5 含量高,平均 1.21%; MgO 含量变化范围也大,为 3.73%~7.80%,此类岩石中 $\text{Mg}^\#$ 与 Al_2O_3 、 TiO_2 呈近似正相关, $\text{Mg}^\#$ 为 22.4~51.4,表明岩石经历了较高级的演化;由于岩石蚀变程度不等,里特曼指数 σ 变化较大,为 0.41~9.37,该值并不能真正反映此类岩石的系列。DI 指数为 44.2~27.1,平均 35.1,与玄武岩 DI 指数 35 接近。

另一类位于研究区中部杂日赛璐贡玛—夏麻贡玛曲一线(图 1),以 TiO_2 含量较低为特征,0.85%~

2.27%,仅 1 个样品为 2.54%,Ti/Y 主要为 380.85~489.43,平均 423,仅有 1 个样品为 570.12,属低钛类火山岩($\text{TiO}_2 < 2.5\%$, $\text{Ti}/\text{Y} < 500$)。岩石类型主要为玄武岩、玄武安山岩,部分为粗面安山岩、玄武质粗面安山岩,47 个样品 SiO_2 含量为 45.13%~67.37%, $\text{Mg}^\#$ 与 SiO_2 、 Al_2O_3 呈近似负相关, $\text{Mg}^\#$ 为 34.2~62.5,此类火山岩比前一类演化程度要低。

研究区栖霞期火山岩 TiO_2 含量变化大,为 0.85%~6.62%, MgO 含量为 2.62%~7.80%,总体富铁,全铁含量高,为 8.37%~14.64%,平均 5.72%,总体显示与峨嵋山玄武岩的特征相近^[10],只是全碱及 P_2O_5 含量略高。

3.2 稀土元素特征

上述两类不同火山岩的稀土元素特征(表 2)亦存在明显差异。高钛玄武岩稀土总量高($\sum\text{REE}$ 为 284.81×10^{-6} ~ 678.88×10^{-6}),轻重稀土分异明显,LREE 富集(LREE/HREE=8.01~12.39),(La/Yb)_N

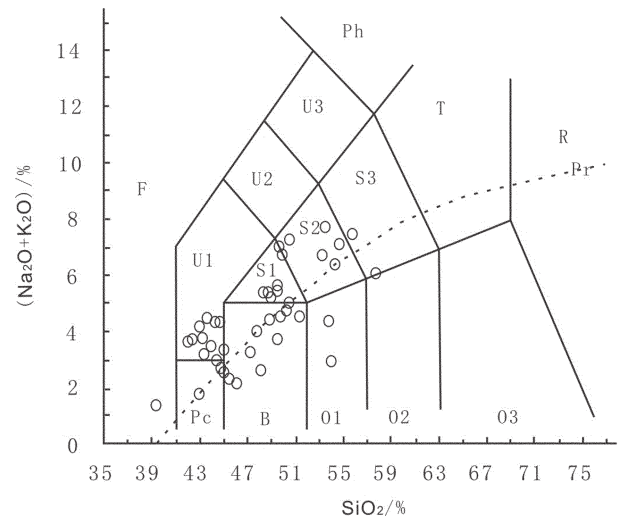


图 3 火山岩 TAS 图解(据 Le Bas 等,1986)

Pc—苦橄玄武岩;B—玄武岩;01—玄武安山岩;02—安山岩;03—英安岩;R—流纹岩;S1—粗面玄武岩;S2—玄武质粗面安山岩;S3—粗面安山岩;T—粗面岩、粗面英安岩;F—副长石岩;U1—碱玄岩、碧玄岩;U2—响岩质碱玄岩;U3—碱玄质响岩;Ph—响岩;Ir—Irvine 分界线,上方为碱性,下方为亚碱性。

Fig.3 TAS diagram of volcanic rocks(after Le Bas et al., 1986)

Pc—Picrite basalt; B—Basalt; 01—Basaltic andesite; 02—Andesite; 03—Dacite; R—Rhyolite; S1—Trachybasalt; S2—Basaltic trachyandesite; S3—Trachyandesite; T—Trachyte, trachydacite; F—Feldspathoidite; U1—Tephrite, Jasper basalt; U2—Phonolitic trachyte; U3—Tephritic phonolite; Ph—Phonolite; Ir—Boundary of Irvine, with the upper part being alkaline and the lower part being sub-alkaline

表 1 二叠纪栖霞期火山岩主量元素分析结果(10⁻²)
 Table 1 Major element analyses of Qixianian volcanic rocks(10⁻²)

样号	岩性	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	H ₂ O ⁺	CO ₂	灼失量	总量
D-4	杏仁状玄武岩	46.04	5.08	12.75	3.45	9.95	0.14	4.41	8.20	1.98	0.21	1.04	3.66	2.79		99.7
D-4/1	玄武岩	39.50	5.25	13.03	4.14	9.75	0.15	3.56	9.98	0.69	0.63	1.04	5.47	6.57		99.76
D-4/2	玄武岩	45.61	5.03	12.58	3.96	9.75	0.16	4.30	8.54	2.08	0.20	1.04	3.34	3.08		99.67
D-4/3	玄武岩	42.9	4.91	12.2	2.67	10.6	0.14	3.10	11.08	1.60	0.17	1.00	3.57	5.77		99.71
D-5h1	杏仁状粗玄武岩	44.38	4.55	13.45	5.26	8.87	0.17	6.69	6.07	4.28	0.08	1.16			4.5	99.46
D-6h2	杏仁状玄武岩	48.2	5.12	12.27	2.53	11.05	0.17	6.36	3.34	2.61	0.03	1.25			5.92	98.84
D-9h	玄武岩	44.24	3.94	14.24	5.35	8.12	0.20	6.79	9.16	2.50	0.57	1.09			3.03	99.24
D-11	橄榄玄武岩	42.22	6.01	13.48	11.06	5.95	0.24	5.10	6.59	3.52	0.14	1.16	4.01	0.18		99.66
D-11h1	橄榄玄武岩	44.88	4.65	12.7	10.91	3.90	0.15	6.26	8.75	3.35	0.88	1.43			1.86	99.73
D-11/2	橄榄玄武岩	42.55	6.13	13.47	11.39	5.75	0.21	4.97	6.33	3.60	0.12	1.16	3.85	0.14		99.67
D-11/3	橄榄玄武岩	43.51	5.92	13.4	9.11	7.30	0.16	4.90	6.39	3.12	0.07	1.22	4.53	0.06		99.69
D-12h1	橄榄玄武岩	43.94	5.39	12.14	8.48	5.52	0.15	7.11	9.64	2.67	0.75	1.59			2.22	99.6
D-12h2	橄榄玄武岩	43.28	4.84	12.83	10.46	4.35	0.16	7.05	8.93	2.53	1.27	1.50			2.74	99.94
D-13h3	橄榄玄武岩	43.79	4.68	13.32	11.18	3.7	0.24	6.15	6.70	4.16	0.28	1.43			4.18	99.81
D-14h1	橄榄玄武岩	47.20	3.52	13.89	8.49	4.92	0.17	6.27	8.25	2.96	0.30	0.83			2.84	99.64
D-14h2	橄榄玄武岩	45.04	3.76	14.13	6.09	6.67	0.36	7.2	8.24	2.36	0.22	0.99			4.64	99.69
D-22h3	玄武岩	44.8	3.91	13.86	4.84	8.33	0.19	7.52	9.06	2.43	0.40	1.06			3.16	99.56
D-23h1	玄武岩	48.46	2.28	14.55	8.09	3.59	0.13	5.88	6.98	5.22	0.15	0.70			3.38	99.42
D-26	橄榄玄武岩	49.44	3.61	13.88	11.86	5.05	0.21	2.54	5.48	3.57	0.12	1.10	2.84	0.04		99.74
D-26/2	橄榄玄武岩	45.02	3.84	16.28	9.16	6.65	0.27	3.82	5.66	3.16	0.17	1.17	4.50	0.04		99.74
D-26/3	橄榄玄武岩	48.01	4.10	15.29	5.51	8.00	0.32	3.96	5.17	3.99	0.03	1.12	4.16	0.04		99.7
D-43h3	橄榄玄武岩	44.56	3.38	13.94	9.09	3.85	0.22	7.08	8.50	2.68	0.24	1.34			4.96	99.84
X-1h	粒玄武岩	57.90	0.90	17.04	3.73	2.72	0.06	2.27	4.11	4.39	1.64	0.16			4.06	98.99
X-3h	杏仁状玄武岩	54.14	2.27	11.67	4.89	7.40	0.17	5.07	6.60	2.48	0.47	0.49			3.04	98.7
X-4h1	玄武岩	43.08	2.11	13.34	4.46	7.37	0.15	4.59	9.26	3.35	0.78	0.65			9.64	98.78
X-8h1	玄武安山岩	49.02	1.20	15.76	3.32	5.42	0.14	7.86	6.68	3.77	0.63	0.17			4.7	98.68
X-8h2	玄武岩	49.02	1.52	17.02	3.84	5.68	0.14	5.62	6.92	3.84	1.44	0.34			3.46	98.84
X-15h	玄武安山岩	49.74	1.61	18.09	3.38	4.89	0.15	3.94	6.89	5.02	1.97	0.39			2.8	98.87
X-16h	玄武安山岩	50.56	1.61	16.62	8.07	1.22	0.12	4.16	5.86	5.52	1.70	0.44			3.82	99.7
X-18h	辉石玄武岩	50.34	1.40	15.89	6.32	2.42	0.11	4.08	8.34	3.58	1.09	0.40			5.54	99.51
X-20h	玄武岩	53.33	1.54	17.24	3.85	4.19	0.11	3.47	4.68	4.59	2.08	0.40			4.04	99.51
X-21h1	橄榄玄武岩	51.32	1.62	18.25	5.77	3.54	0.13	4.31	7.78	3.58	1.00	0.42			2.1	99.82
X-25h1	玄武安山岩	49.98	1.58	18.01	4.31	4.74	0.19	4.50	6.38	5.44	1.32	0.51			2.68	99.64
X-26h	玻基安山岩	53.53	1.38	16.77	7.02	1.76	0.13	4.22	3.76	6.78	0.90	0.43			2.7	99.38
X-26h2	安山岩	49.67	2.54	15.68	4.26	5.74	0.11	3.66	6.46	3.75	0.78	0.67			6.16	99.48
X-27h	安山岩	54.46	1.35	16.18	7.52	1.66	0.11	4.42	4.66	4.15	2.24	0.38			2.53	99.65
X-28h	玻基安山岩	55.68	1.3	16.56	6.02	2.24	0.10	3.82	3.32	5.66	1.78	0.32			2.85	99.65
X-29h	杏仁状玄武岩	48.78	1.67	17.27	4.21	5.28	0.21	5.85	6.58	4.14	1.26	0.48			3.51	99.24
X-30h	玄武安山岩	54.72	1.15	13.73	5.16	2.18	0.08	2.27	7.48	6.36	0.73	0.30			5.76	99.92
X-31h	安山岩	53.98	1.52	16.16	4.01	4.90	0.15	4.36	8.01	3.12	1.22	0.43			1.62	99.48
GR-10g1	玄武岩	44.50	0.85	16.26	3.62	3.35	0.16	3.47	12.56	5.46	0.13	0.26			8.8	99.43
GR-15g1	玄武岩	45.10	1.17	15.37	5.26	4.30	0.16	3.80	14.91	3.69	0.37	0.33			5.2	99.66
GR-25g1	玄武岩	45.06	1.45	18.01	9.43	2.50	0.20	5.03	8.17	3.72	1.60	0.30			4.34	99.81
GR-26g1	玄武岩	46.82	1.45	18.45	4.68	5.22	0.15	4.96	7.16	4.39	0.83	0.30			4.28	98.68

注:数据由宜昌地质矿产研究所中南实验检测中心测试分析。

表 2 二叠纪栖霞期火山岩稀土元素分析结果(10^{-6})Table 2 Rare earth element analyses of Qixianian volcanic rocks(10^{-6})

样号	岩性	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Σ REE	L/H	δ Eu	δ Ce
D-4	杏仁玄武岩	55.30	111.00	14.10	60.20	11.70	3.56	10.50	1.44	8.32	1.42	3.63	0.49	2.76	0.39	29.50	284.81	8.79	0.97	0.92
D-4/2	玄武岩	57.30	111.00	14.90	61.90	12.10	3.79	10.70	1.39	8.65	1.48	3.76	0.48	2.85	0.38	30.90	290.68	8.45	1.01	0.88
D-5h1	杏仁粗玄武岩	77.20	134.00	16.60	81.90	14.70	4.57	12.90	2.05	11.80	2.03	5.33	0.68	3.72	0.41	40.30	367.89	9.48	1.00	0.85
D-6h2	杏仁玄武岩	87.00	176.00	20.70	101.00	19.40	4.98	14.80	2.34	13.20	2.24	5.61	0.69	3.83	0.42	43.50	452.21	9.62	0.87	0.95
D-9h	玄武岩	75.10	132.00	14.30	58.60	12.90	3.12	10.80	1.43	8.66	1.63	3.88	0.55	3.40	0.41	31.50	326.78	9.62	0.79	0.90
D-11	橄欖玄武岩	58.00	121.00	16.00	72.10	14.30	4.43	12.60	1.77	10.50	1.80	4.49	0.60	3.44	0.48	39.20	321.51	8.01	1.00	0.92
D-11h1	橄欖玄武岩	106.00	205.00	24.10	113.00	21.10	5.74	15.50	2.20	13.50	2.27	5.79	0.76	4.11	0.44	44.20	519.51	10.66	0.94	0.92
D-12h1	橄欖玄武岩	120.00	232.00	28.30	135.00	24.60	6.33	16.60	2.41	13.70	2.30	5.88	0.71	4.09	0.45	44.70	592.37	11.84	0.91	0.91
D-12h2	橄欖玄武岩	116.00	212.00	24.60	121.00	21.90	5.68	15.30	2.29	13.10	2.15	5.74	0.72	3.99	0.45	42.40	544.92	11.46	0.91	0.90
D-13h2	橄欖玄武岩	136.00	269.00	32.10	156.00	27.60	7.24	18.70	2.92	15.10	2.58	6.17	0.80	4.20	0.47	49.40	678.88	12.33	0.93	0.93
D-13h3	橄欖玄武岩	114.00	210.00	23.00	98.60	19.80	4.32	14.40	2.00	10.60	2.00	4.28	0.62	3.69	0.44	35.40	507.75	12.35	0.75	0.92
D-14h2	橄欖玄武岩	87.70	156.00	18.10	81.60	15.70	4.31	11.80	1.72	11.30	1.94	5.16	0.61	3.65	0.39	38.50	399.98	9.94	0.94	0.88
D-22h3	玄武岩	79.90	142.00	16.10	73.30	14.50	4.10	11.30	1.70	11.10	1.99	5.14	0.68	3.75	0.44	38.80	366.00	9.14	0.95	0.89
D-23h1	玄武岩	65.60	110.00	12.30	57.50	10.70	3.13	8.09	1.16	7.14	1.25	3.69	0.45	2.71	0.30	27.30	284.02	10.46	1.00	0.86
D-24h1	橄欖玄武岩	80.10	129.00	13.40	59.10	10.70	3.13	8.41	1.25	7.92	1.49	4.17	0.52	2.90	0.35	29.20	322.44	10.94	0.98	0.86
D-26	橄欖玄武岩	94.10	157.00	19.80	69.60	13.70	3.81	11.00	1.70	9.04	1.60	4.07	0.57	3.12	0.45	34.40	389.56	11.35	0.93	0.82
D-26/2	橄欖玄武岩	89.60	158.00	20.90	71.50	14.00	3.94	11.60	1.88	9.47	1.68	4.34	0.61	3.39	0.49	37.30	391.40	10.70	0.93	0.83
D-43h3	橄欖玄武岩	118.00	204.00	21.40	99.80	18.10	5.02	13.10	1.84	11.20	1.87	4.99	0.63	3.60	0.41	37.00	503.96	12.39	0.96	0.90
X-3h	杏仁玄武岩	31.60	58.90	7.47	32.20	7.02	2.20	6.78	1.17	7.70	1.52	4.28	0.64	3.77	0.48	32.40	165.73	5.29	0.97	0.88
X-4h1	玄武岩	35.20	62.70	8.08	36.30	8.36	2.64	7.87	1.25	8.29	1.59	4.35	0.62	3.77	0.47	32.90	181.49	5.43	0.99	0.85
X-5h	玄武岩	38.20	67.40	8.39	35.80	8.15	2.51	7.80	1.31	8.54	1.74	4.67	0.68	4.10	0.52	37.70	189.81	5.46	0.96	0.85
X-8h2	玄武岩	19.20	36.30	4.43	22.60	4.37	1.43	4.26	0.71	4.03	0.70	2.06	0.30	1.72	0.24	16.40	102.35	6.30	1.01	0.90
X-17h2	杏仁玄武岩	20.70	38.30	4.25	21.10	4.66	1.35	3.85	0.57	3.35	0.61	1.70	0.24	1.43	0.19	13.80	102.30	7.57	0.96	0.92
X-22h	杏仁玄武岩	46.40	82.20	9.92	44.60	10.00	2.76	7.96	1.32	7.04	1.18	3.18	0.44	2.35	0.29	26.40	219.64	8.24	0.92	0.87
X-25h1	玄武安山岩	41.20	73.60	8.84	39.90	8.12	2.23	6.55	0.98	6.51	1.20	3.35	0.47	2.77	0.34	24.80	196.06	7.84	0.91	0.87
X-26h2	安山岩	34.90	63.50	8.13	34.90	8.04	2.43	7.68	1.37	8.65	1.76	4.85	0.74	4.41	0.56	35.90	181.92	5.06	0.94	0.86
X-28h	玻基安山岩	35.50	60.70	6.93	30.40	6.35	1.70	5.00	0.86	4.77	0.81	2.48	0.36	2.00	0.27	18.20	158.13	8.55	0.90	0.86
X-29h	玄武岩	31.20	57.60	6.47	31.30	6.17	1.78	5.79	1.01	5.33	0.96	2.72	0.37	2.33	0.31	21.60	153.34	7.15	0.91	0.91
X-30h	玄武安山岩	17.40	34.30	3.99	19.80	3.88	1.16	3.91	0.59	3.38	0.62	1.63	0.24	1.47	0.22	14.20	92.59	6.68	0.91	0.94
GR-10g1	玄武岩	18.70	30.90	4.14	17.20	4.27	1.30	3.90	0.68	4.52	0.99	2.73	0.40	2.38	0.30	19.30	92.41	4.81	0.97	0.80
GR-15g1	玄武岩	13.30	25.40	3.87	17.50	4.31	1.35	4.47	0.80	5.11	1.08	2.95	0.41	2.47	0.31	20.70	83.33	3.73	0.94	0.82
A-27h	玄武岩	8.10	14.30	2.13	9.78	2.39	0.83	2.42	0.42	2.61	0.50	1.38	0.18	1.00	0.13	11.10	46.17	4.34	1.06	0.80
A-29h	玄武岩	10.50	19.10	2.98	13.20	3.43	1.23	3.45	0.57	3.72	0.69	1.99	0.29	1.45	0.18	14.30	62.78	4.09	1.09	0.79
MYA-1	玄武岩	11.90	21.00	2.90	13.80	3.47	1.25	3.91	0.59	3.74	0.68	1.94	0.28	1.59	0.25	14.40	67.30	4.18	1.04	0.82

注:数据由宜昌地质矿产研究所中南实验检测中心(2005年)测试分析。

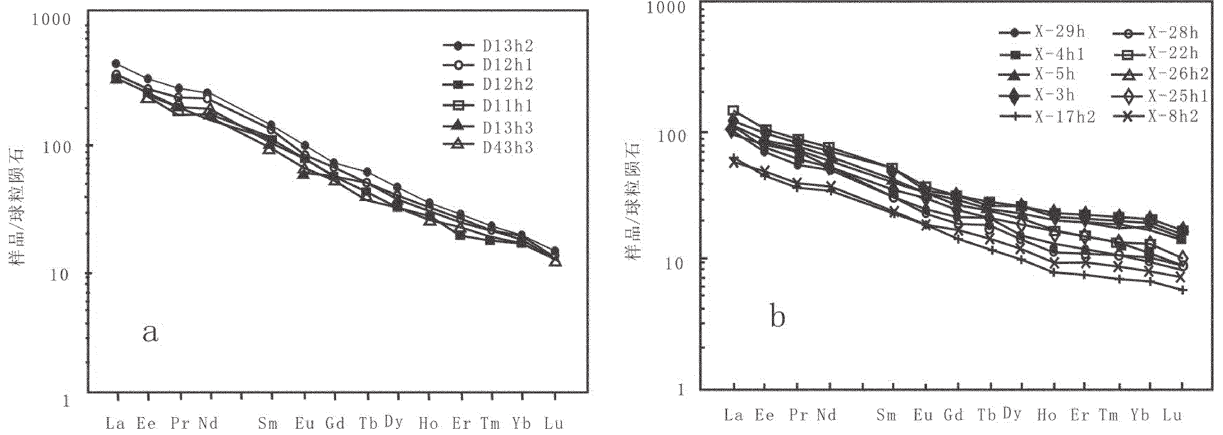


图4 栖霞期火山岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线
 (图中球粒陨石值采用 Leedy 球粒陨石值)
 a—高钛玄武岩; b—低钛玄武岩

Fig.4 Chondrite—normalized REE patterns of Qixianian volcanic rocks
 a—Chondrite—normalized REE patterns of high-Ti basalts; b— Chondrite—normalized REE patterns of low-Ti basalts

为 11.13~21.64、(Ce/Yb)_N 为 9.00~16.39、Ce/Y 比值大(3.09~5.93),无明显的铕负异常(多数 δEu=0.9~1.0,个别低于 0.9)。而低钛类火山岩稀土总量低(∑REE 为 46.17×10⁻⁶~219.64×10⁻⁶),轻重稀土分异不明显(L/H=3.73~8.55),(La/Yb)_N 为 3.56~13.04、(Ce/Yb)_N 为 2.63~8.95、Ce/Y 值小(1.23~3.34),弱铕负异常(δEu=0.9~1.1)。二者稀土元素配分曲线都为右倾型(图 4),轻稀土元素配分曲线与重稀土元素配分曲线具有相近的斜率,只是表现为高钛玄武岩的配分曲线更陡些,而含钛较低的火山岩的配分曲线相对要平坦。

研究区高钛玄武岩稀土元素配分曲线与云南宾川地区的峨眉山玄武岩中高钛玄武岩^[11]相似,只是其稀土总量远大于云南宾川地区,轻稀土分异也略强一些。

3.3 微量元素特征

微量元素含量见表 3。高钛玄武岩中的 Nb、Ta、Zr、Hf、Rb、Th、Ga、Sr、V、Cr、Co、Ni、Cu、Pb、Zn 等元素含量富集,而 U、Rb、Li 含量较低,Cs、Ba、Sc 等元素的含量相差则不大。其中高钛玄武岩的 Zr/Hf 值稳定(为 31.93~44.63,平均为 37.40),Hf/Th 值相近(变化于 0.20~1.76,平均 0.47),Zr/Nb 值低(变化于 3.66~6.03,平均 4.72),Ti/V 值高(平均 75.53)、Zr/Y 值相近(5.94~11.35,平均 8.64),Th/Nb 值低(为 0.07~0.74,平均 0.36);含钛较低的岩石中 Zr/Hf 值(25.38~37.85,平均 29.99),Hf/Th 值在 0.09~1.46,

平均 0.46,Zr/Nb 值高(变化为 8.25~20.75,平均 11.16),Ti/V 低(平均 38.89)、Zr/Y 值在 3.56~11.38,平均 8.15,Th/Nb 值高(变化在 0.24~3.72,平均 1.09)。其中高钛玄武岩的 Zr/Hf 值稳定,Zr 含量远大于 MORB 和岛弧拉斑玄武岩的丰度;Hf 含量高于 MORB 的平均含量(2.4×10⁻⁶);Nb 含量相当于板内拉斑玄武岩的(Nb>12×10⁻⁶);Ta 含量类似于过渡型、富集型 MORB 和板内玄武岩(Ta>0.7×10⁻⁶);其 Hf/Th 值类似于板内玄武岩(Hf/Th<8),Ti/V、Ti/Y、Zr/Y 值高,显示了 OIB 的地球化学特征。Th/Nb 值、Nb/Zr 值与大陆板内玄武岩一致,处于典型裂谷玄武岩与陆内裂谷带或初始裂谷玄武岩之间。含钛较低火山岩的 Hf 含量高于 MORB 的平均含量(2.4×10⁻⁶);Ta 含量类似于板内玄武岩(Ta>0.7×10⁻⁶)。Zr/Nb 值、Hf/Th 值亦类似于板内玄武岩^[12](Hf/Th<8,Condie,1989)。Th/Nb 值、Nb/Zr 值与大陆板内玄武岩一致。

与峨眉山大火成岩省西部苦橄岩及其共生玄武岩的微量元素^[13]相比,研究区玄武岩微量元素标准化图解二者具有相似的特征(图 5),说明它们可能有相同的成因,均与地幔柱活动相关。总体类似于板内玄武岩的微量元素分布型式,和许多洋岛玄武岩具有相似的特点。

3.4 Sr、Nd、Pb 同位素地球化学

本批样品实际测定标准样品的结果在误差范围内与标准值(中华人民共和国地质矿产部,1997)一

表 3 二叠纪栖霞期火山岩微量元素分析结果(10⁻⁶)
Table 3 Trace element analyses of Qixianian volcanic rocks (10⁻⁶)

样号	岩性	Li	Be	Nb	Ta	Zr	Hf	U	Th	Rb	Cs	Sr	Ba	Ga	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Pb	Zn	Ag	Au	As	B
D-4	杏仁玄武岩	19	2.1	60	3.4	275	8.3	0.58	8.68	2.2	3.5	813	198	22	27	426	235	\	\	474	77	153	\	3.2	2.1	\
D-4/2	玄武岩	23	3.1	65	3.9	317	9.3	0.75	15.7	2.7	3.7	943	237	34	26	413	235	\	\	461	53	152	\	4.6	1.2	\
D-5h1	玄武岩	19	2.4	62	3.1	263	7.6	0.65	35.4	3.7	3.5	1050	121	31	25	325	194	46	121	339	16	146	\	\	0.2	20
D-9h	玄武岩	23	2.3	74	3.7	296	7.9	0.7	21.4	6.1	3.8	812	372	31	26	319	190	49	134	134	54	134	\	\	0.3	30
D-11	橄辉玄武岩	18	2.7	75	4.7	274	8.6	0.41	4.87	4	3.5	1200	176	32	29	450	200	\	\	443	5.5	198	\	4.1	0.5	\
D-11h1	橄辉玄武岩	15	3.4	75	5.3	312	9	0.74	36.4	8.7	3.2	1050	427	39	24	295	194	46	135	215	103	145	\	\	0.4	28
D-12h1	橄辉玄武岩	19	3.3	65	3.7	317	8.1	0.65	12.5	7.2	3.3	955	327	33	28	396	260	51	179	317	22	144	\	\	0.1	24
D-12h2	橄辉玄武岩	20	3	70	2.9	403	9.5	0.65	36.8	13	3.4	1100	568	30	29	390	246	51	172	73.3	80	138	\	\	0.5	24
D-13h2	橄辉玄武岩	19	0.9	77	3.2	462	11	0.65	23.6	3.3	3.5	607	145	7.3	31	325	237	45	154	205	45	133	\	\	0.3	9.2
D-13h3	橄辉玄武岩	18	2.8	66	2.9	391	10	0.7	36.8	5.1	3	1160	220	29	32	391	232	47	191	212	37	152	\	\	0.4	23
D-14h2	橄辉玄武岩	21	2.5	65	4.3	300	9	0.65	32.9	3.8	3.6	799	274	32	26	330	172	48	112	316	20	139	\	\	0.7	23
D-22h3	玄武岩	22	0.9	78	3.8	303	8.5	0.65	16.4	5	3.5	703	274	10	31	321	141	45	140	63.8	7.3	123	\	\	0.1	4.8
D-26/1	橄辉玄武岩	19	2.8	54	4.2	200	6.3	0.98	27.9	0.5	3.2	553	132	28	33	431	191	\	\	1950	35	166	\	4.4	1.1	\
D-26/2	橄辉玄武岩	25	2.9	71	4.8	315	8.6	0.52	12.5	4.3	3.9	728	218	33	34	435	209	\	\	120	23	184	\	3.7	1.1	\
D-43h3	橄辉玄武岩	17	2	97	4.1	420	9.4	0.84	32.2	4	3.5	904	310	22	21	290	220	42	176	65.6	45	123	\	\	0.5	17
X-3h	杏仁玄武岩	37	2	20	2	217	6.9	0.84	16.5	5.9	2.9	338	174	27	35	297	46	35	24	125	51	150	\	\	1	26
X-4h1	玄武岩	44	1.7	17	1.9	175	5.6	0.65	26.6	15	4	168	154	23	31	271	39	36	26	101	27	70	\	\	1	27
X-5h	玄武岩	26	2.4	21	1.9	207	6.5	0.65	14.5	4.4	2.7	372	106	30	36	298	45	31	24	181	9.4	90	\	\	0.2	34
X-14h	安山岩	29	1.9	15	1.6	127	4.4	0.65	12.5	19	2.3	621	450	30	24	227	22	21	15	172	17	91	\	\	1.5	24
X-15h	玄武安山岩	20	2.3	18	1.6	176	6.1	0.74	13.5	34	4.2	980	438	32	25	265	21	23	15	65	60	98	\	\	1	42
X-16h	玄武安山岩	22	1.8	16	2.1	199	6.7	0.65	11.4	24	2.3	697	736	32	26	213	116	27	48	149	37	104	\	\	1.5	31
X-21h1	橄辉玄武岩	21	2	16	0.7	170	5.8	0.65	14.8	13	2.6	675	414	33	27	273	25	25	15	59.9	30	105	\	\	0.7	22
X-22h	杏仁玄武岩	34	1.9	27	2	247	8.1	0.65	13.8	31	4.2	944	354	31	20	219	50	30	38	136	85	149	\	\	1.5	28
X-26h2	安山岩	31	2.5	23	2.2	304	9.4	0.84	32.1	13	3.3	334	171	32	40	337	60	28	27	195	32	73	\	\	0.7	30
X-29h	玄武岩	31	1.8	20	1.9	215	7.3	0.65	16.9	26	4.6	814	329	29	28	276	53	33	32	102	16	113	\	\	1.1	48
X-32h	玄武岩	27	2	19	2	211	7.3	0.55	10	51	4.3	662	480	28	28	272	76	32	39	122	591	105	\	\	6.5	38
A-27g2	玄武岩	24	1.8	59	<0.5	79	2.5	0.82	14	9.1	2.5	447	63.7	18	34	224	295	32	97	607	25	62	\	\	2	13

注:数据由宜昌地质矿产研究所中南实验检测中心(2005年)测试分析。

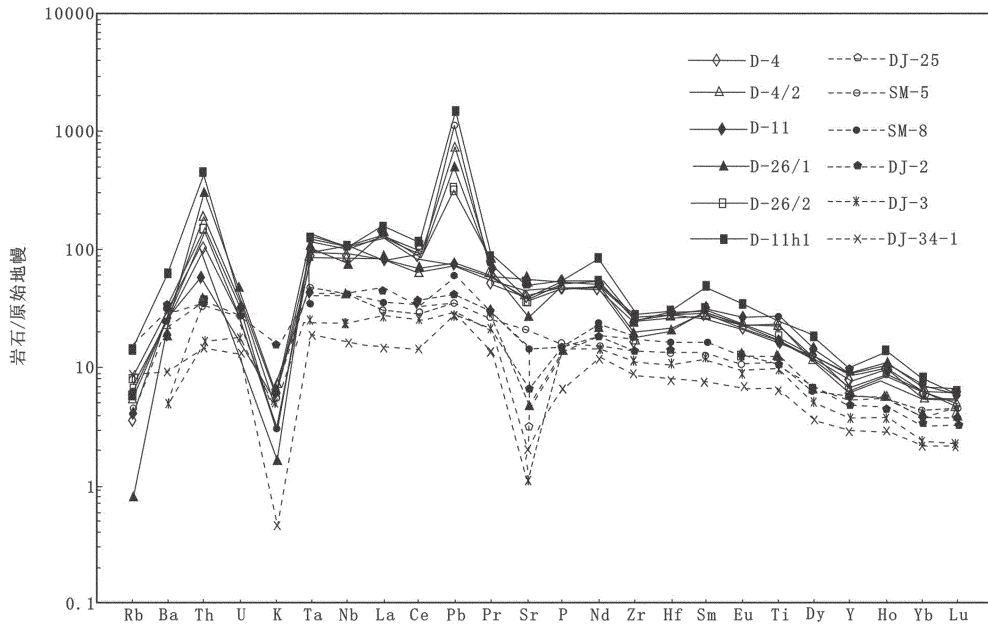


图5 火山岩微量元素原始地幔标准化蛛网图

实线为本文所测数据; 虚线数据引自文献[13]

Fig.5 Primitive-mantle normalized trace element spidergrams

Solid line indicates data measured by the authors, whereas data of dash line are from reference [13]

致,所有测试结果均用 GeoKit 软件^[14]进行了处理。在孛笛考组灰岩夹层中产早二叠世栖霞期 Misellina 筳类动物群,同时笔者在火山岩中获得单颗粒锆石年龄为 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} = (283 \pm 12) \text{Ma}$ $^{(207}\text{Pb}/^{235}\text{U}=293 \text{Ma}$, 两个年龄基本一致,属于和谐年龄),取上限 271 Ma 作为火山岩形成年龄,可与筳类化石很好地吻合。对放射成因锶、钕进行扣除和测算铅同位素各项参数,得到锶和钕的同位素初始比值(表 4)。Pb 同位素测定结果及据此测算的各种参数见表 5。栖霞期火山岩的 $\epsilon \text{Nd}(t)$ 值为 4.1~5.5,初始锶比值为 0.70345~0.70524,与峨眉山大火成岩省苦橄岩及其共生玄武岩的初始锶比值(0.703636~0.705234)以及 $\epsilon \text{Nd}(t)$ 值(-1~4.7)相近^[15]。二者在 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}-\epsilon \text{Nd}(t)$ 图解^[16](图 6)上,均落入 OIB 范围;在 $\epsilon \text{Sr}(t)-\epsilon \text{Nd}(t)$ 图解(图 7)上,均落入地幔线附近,显示亏损的地幔源区特征。因此,研究区栖霞期火山岩与峨眉山玄武岩存在某种相似性。

从 Pb 同位素测定结果及测算参数(表 5),可以看出: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别变化在

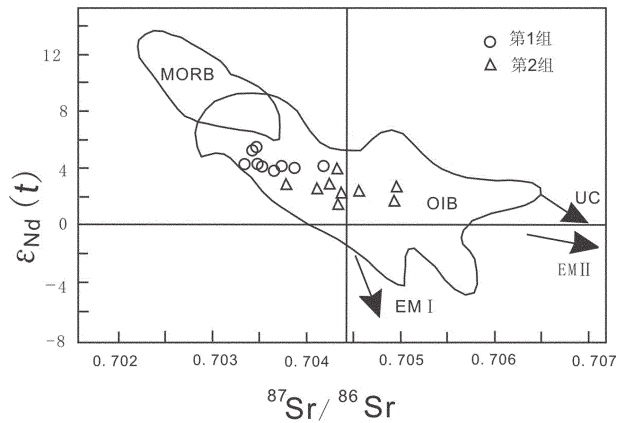


图6 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}-\epsilon \text{Nd}(t)$ 同位素相关图(据文献[16])

第 1 组为栖霞期玄武岩,第 2 组为峨眉山大火成岩省苦橄岩及其共生玄武岩(张招崇,2004)

MORB—洋中脊玄武岩;OIB—洋岛玄武岩;UC—上地壳;EM I—I 型富集地幔;EM II—II 型富集地幔

Fig.6 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}-\epsilon \text{Nd}(t)$ isotope correlation diagram (after references[16])

No. 1 - Qixianian basalts, No. 2 - Emeishan large igneous basalt province and constraints on the source region (after Zhang Zhaozhong, 2004)

MORB—Mid-ocean ridge basalts; OIB—Oceanic island basalts; UC—Upper crust; EM I—type enriched mantle; EM II—II type enriched mantle

①样品号:MYD-4,由宜昌地质矿产研究所同位素地球化学开放研究实验室测定,测试者:吕红。

表 4 二叠纪栖霞期火山岩 Nd、Sr 同位素组成
Table 4 Isotopic analyses of Nd、Sr in Qixianian volcanic rocks

样品号	D-4	D-4/1	D-4/2	D-4/3	X-3t	X-8t	X-14t	X-18t	X-25t	X-32t
岩性	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.1163	0.1177		0.1189	0.1284	0.1439	0.1206	0.1190	0.1173	0.1198
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.512712	0.512711		0.512713	0.512797	0.512815	0.512722	0.512722	0.512700	0.512713
$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	0.512506	0.512502		0.512502	0.512569	0.512560	0.512508	0.512511	0.512492	0.512500
$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	4.2	4.2		4.2	5.5	5.3	4.3	4.3	4.0	4.1
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	0.009899	0.2776	0.005603	0.006562	0.02592	0.02992	0.0696	0.08927	0.08251	0.1883
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.70377	0.70524	0.70356	0.70355	0.70355	0.70354	0.70376	0.70367	0.70399	0.70459
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	0.70373	0.70417	0.70354	0.70352	0.70345	0.70342	0.70349	0.70333	0.70367	0.70386
$\epsilon_{\text{Sr}}(t)$	-6.4	-0.2	-9.1	-9.3	-10.4	-10.7	-9.8	-12.1	-7.2	-4.5
T_{2DM}	696	701		701	595	610	692	687	718	704

注:数据由宜昌地质矿产研究所中南实验检测中心(2005年)测试。计算中 $t=271\text{Ma}$ 。

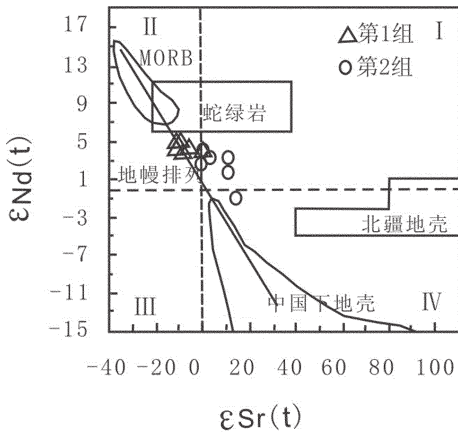


图 7 栖霞期火山岩 $\epsilon_{\text{Sr}}(t) - \epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解
(第 1 组为栖霞期玄武岩,第 2 组为峨眉山大火成岩省
苦橄岩及其共生玄武岩(张招崇,2006))

Fig.7 $\epsilon_{\text{Sr}}(t) - \epsilon_{\text{Nd}}(t)$ diagram

(No.1- Qixianian basalts, No.2 - Emeishan large igneous basalt province and constraints on the source region)

17.547~17.986、15.476~15.584、37.778~37.976 范围内,总体来说,变化非常小。 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\gamma$ 、 V_1 、 V_2 变化在 30.96~56.75、10.42~17.47、19.78~25.12、31.39~46.78、22.38~42.45, V_1 与 V_2 之间呈正相关关系。

4 岩浆成因及形成构造环境初探

4.1 形成构造环境

微量元素比值也是有效的环境判别指标。栖霞期火山岩大部分样品的 $\text{Th}/\text{Ta}>4$, 平均 7.91; Ta/Hf 为 0.12~0.68, 平均 0.38, 与峨眉山玄武岩 (Ta/Hf 为 0.36~0.66) 相当。一般说陆内拉张带或初始裂谷玄武岩 Th/Ta 值为 4~10, $\text{Ta}/\text{Hf}>0.1$; 地幔柱成因玄武岩 $\text{Ta}/\text{Hf}>0.3$, Th/Ta 值变化大, 可见测区栖霞期火山岩与陆内拉张带或初始裂谷玄武岩及幔柱成因玄武岩相似, 更接近后者。栖霞期火山岩 La/Nb 值为 0.77~2.56, 平均为 1.56, 与 OIB 的相应元

表 5 二叠纪栖霞期火山岩 Pb 同位素分析结果

Table 5 Analytical results of Pb isotope components of Permian volcanic rocks

样号	样品	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$?\alpha$	$?\beta$	$??$	V_1	V_2
MYD-4	玄武岩	17.766±0.001	15.476±0.002	37.875±0.004	43.82	10.42	22.40	39.42	31.25
MYD-4/2	玄武岩	17.547±0.002	15.515±0.002	37.778±0.006	30.96	12.97	19.78	31.39	22.38
MYA-1	玄武岩	17.986±0.008	15.524±0.006	37.944±0.011	56.75	13.56	24.26	46.78	42.45
MYA-1/1	玄武岩	17.876±0.012	15.584±0.011	37.976±0.032	50.29	17.47	25.12	44.71	38.01

注: $\Delta\alpha = [(^{206}/^{204})_{\text{样品}} / (^{206}/^{204})_{\text{地幔}} - 1] \times 1000$; $\Delta\beta = [(^{207}/^{204})_{\text{样品}} / (^{207}/^{204})_{\text{地幔}} - 1] \times 1000$; $\Delta\gamma = [(^{208}/^{204})_{\text{样品}} / (^{208}/^{204})_{\text{地幔}} - 1] \times 1000$ 。

V_1 、 V_2 为铅同位素矢量值: $V_1 = 0.444073\Delta\alpha + 0.89764\Delta\gamma$; $V_2 = 0.34648\Delta\beta - 0.41343\Delta\gamma + 0.842042\Delta\alpha$ 。参数的意义及测算依据详见文献[17, 18]。

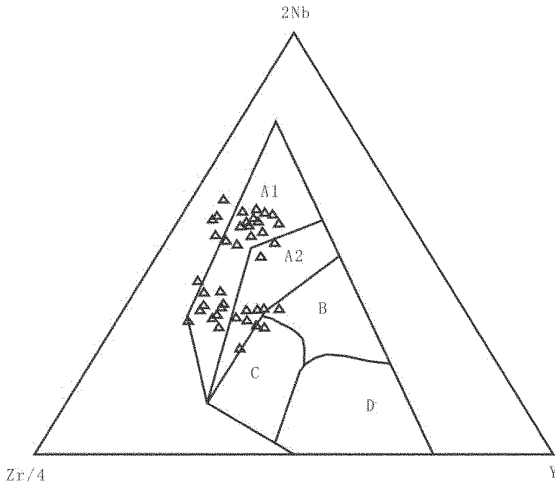


图 8 栖霞期火山岩 2Nb-Zr/4-Y 图 (Meschede,1986)

A1—碱性板内玄武岩;A2—碱性板内玄武岩和板内拉斑玄武岩;B—P—MORB—富集型洋中脊玄武岩;C—板内拉斑玄武岩和火山弧玄武岩;D—N—MORB—正常洋中脊玄武岩

Fig.8 2Nb-Zr/4-Y diagram

- A1—Alkaline intraplate basalt;A2— Alkaline intraplate basalt and intraplate tholeiite basalt;
- B— P—MORB—Enriched mid-ocean ridge basalt;
- C—Intraplate tholeiite basalt and volcanic arc basalt;
- D—N—MORB—Normal mid-ocean ridge basalt

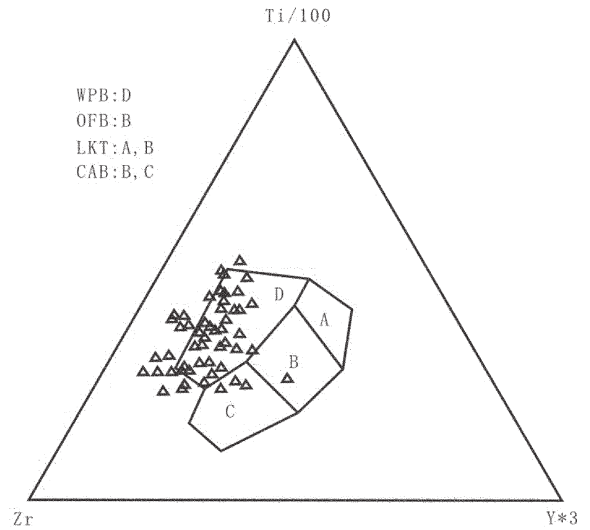


图 9 栖霞期火山岩 Ti/100-Zr-3Y 图

(Pearce and Cann, 1973)

WPB—碱性板内玄武岩;OFB—洋底拉斑玄武岩;LKT—岛弧拉斑玄武岩;CAB—钙碱性玄武岩

Fig.9 Ti/100-Zr-3Y diagram

- WPB—Alkaline intraplate basalt; OFB—Ocean floor tholeiite;
- LKT—Island arc tholeiite basalt; CAB—Calc-alkaline basalt

素比值 (Zr/ Nb 为 3.2~13.1,La/ Nb 为 0.66~1.32) 相近。栖霞期火山岩样品在 2Nb-Zr/4-Y 判别图 (图 8)和 Ti/100-Zr-3Y 判别图(图 9)上,明显集中在板内碱性玄武岩区,显示栖霞期火山岩可能形成于初始裂谷环境。

研究区火山岩缺乏酸性端元;不相容元素的丰度普遍高于 MORB 数倍至十几倍,其分布模式以及稀土元素球粒陨石标准化曲线与 MORB 的有本质区别,排除了火山岩形成于洋岛和典型裂谷环境的可能性。由此笔者认为,本区栖霞期火山岩形成于大陆边缘拉张构造环境,属陆缘初始裂谷环境。

从 Sr、Nd、Pb 同位素地球化学特征看,研究区栖霞期火山岩起源于地幔,属地幔柱作用产物。

综上所述,研究区栖霞期火山岩形成于大陆边缘拉张构造(或陆缘始裂谷)环境,岩浆起源于地幔,属地幔柱作用产物。

4.2 岩浆成因

研究区栖霞期火山岩,主要是由中基性岩石组成的碱性系列岩石。SiO₂ 含量集中在 44.33%~

67.37%,多具斑状结构,斑晶含量为 5%~45%,主要为斜长石、辉石(绢石化)和橄榄石(伊丁石化)。Sr、Nd 同位素显示岩浆来源于亏损古地幔;玄武岩中较低的 Ce/Yb 值说明有较高的熔融程度或尖晶石为主要残留相(薄岩石圈),而较高的 Ce/Yb 值说明有较低的熔融程度或石榴石为主要残留相(厚岩石圈),测区高钛玄武岩的 Ce/Yb 值为 35~64,据此可以认为本区栖霞期火山岩形成深度较大,可能为石榴石稳定区(>80 km)。

火成岩的 Sr、Nd 同位素初始比可以反映其源区特征。大量数据表明:现代大洋玄武岩即现代上地幔的 I_{Sr} 值变化在 0.702~0.706,其中 Rb 亏损强度最大的上地幔区域为 0.702,大洋岛屿下的上地幔为 0.704,而根据大陆年轻玄武岩确定的大陆下地幔 I_{Sr} 比值较高,为 0.706^[19]。本文所获得 10 个玄武岩的 I_{Sr} 值明显介于 Rb 亏损强度最大的上地幔与大洋岛屿下的上地幔之间。在 ε_{Sr}(t) - ε_{Nd}(t) 图解(图 7)上,样品落入地幔线附近,显示明显的亏损地幔源区特征。朱炳泉^[17] 研究认为现代亏损地幔派生的铅的 Δα < 65, Δβ < 15, Δγ < 30,而本文所测 4 个样品 Pb 的 Δα = 30.96 ~ 56.75, Δβ = 10.42 ~ 17.47, Δγ =

19.78~25.12,除 1 个样品的 $\Delta\beta$ 值高于 15 外,其他数据均在这个范围内,铅同位素特征也表明形成火成岩的岩浆为亏损地幔型。

样品的 Sr、Nd 同位素组成均落在 OIB 型范围内,这暗示其岩浆源区与地幔柱有关^[10,13,15,20~22]。在特提斯及相邻地区,与地幔柱作用相关的典型实例以天山石炭纪及峨眉山二叠纪的玄武岩研究最为详细。

大多数天山中段和东段石炭纪火山岩为 OIB 型,具有较低的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ 比值(0.7035~0.7053)、较高的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(3.1~6.3)和特征的大洋 Pb 同位素比值 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(t) = 17.6\sim 18.1$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(t) = 15.4\sim 15.6$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 37.1\sim 38.1$ 。夏林圻等^[16]认为这些数值特征是国际地学界当作地幔柱或软流圈组分的标志性特征^[23], 笔者的样品这些参数的值(表 5)均在此范围。可见羌塘东部治多县直根尕卡一带二叠纪栖霞期火山岩的原始岩浆与大多数天山中段和东段石炭纪火山岩一样,极有可能来自于亏损的古软流圈地幔柱。

近年来,峨眉山玄武岩与地幔柱作用之间的关系研究成为热点。张招崇等^[22]研究表明,峨眉山玄武岩的 I_{Sr} 为 0.70437~0.70757, I_{Nd} 为 0.51231~0.51253, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 -4.0~+4.4, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 17.898~18.499, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 15.522~15.584, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 38.101~38.460, 并认为峨眉山玄武岩的源区是由地幔柱、交代的富集型岩石圈地幔以及地壳组分的混合而成。笔者此次所测的二叠纪火山岩的 Sr、Nd、Pb 同位素数据与峨眉山玄武岩的同位素数据并不完全一致,相对变化范围较小,反映了火山岩的源区较为单一, Sr、Nd、Pb 多元同位素组成图上样品仅落入 OIB 范围内,与峨眉山玄武岩落入 OIB 和 MORB 两个区域有所不同。然而由于形成时代相近,又同属于特提斯区,它们之间是否存在联系值得关注。

由上可知,测区栖霞期火山岩浆可能起源于亏损的地幔源区,与地幔柱的活动相关。

5 结 论

(1)羌塘东部治多县直根尕卡一带二叠纪栖霞期火山岩主要由中基性火山碎屑岩及熔岩组成,主要属碱性玄武岩系列。火山岩地球化学研究表明:主量元素表现为高 TiO_2 和较低 TiO_2 两种特征,稀土配分模式为 LREE 富集型,微量元素标准配分型式为隆起型,相似于峨眉山大火成岩省玄武岩特征,显

示岩浆形成于板内裂谷构造环境。Sr、Nd、Pb 同位素地球化学也显示亏损地幔源区特征,与地幔柱的活动相关。

(2)综合研究表明直根尕卡一带二叠纪栖霞期火山岩形成于大陆边缘拉张构造(或陆缘始裂谷)环境,岩浆起源于地幔,属地幔柱作用产物。

参考文献(References):

- [1] 李才. 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, 1987, 17(2):155-166.
Li Cai. Thelongmucoo-Shuanghu-Lancangjiang plate suture and the north boundary of distribution of Gondwana facies Permo-Carboniferous system in northern Xizang, China[J]. Journal of Jiling University (Earth Science Edition), 1987, 17(2):155-166.
- [2] 李才, 程立人, 胡克, 等. 西藏龙木错-双湖古特提斯缝合带研究[M]. 北京:地质出版社, 1995:1-131.
Li Cai, Cheng Liren, Hu Ke, et al. Study on the paleo-Tethys suture zone of Lungmu Co-Shuanghu, Tibet [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995:1-131 (in Chinese with English abstract).
- [3] 李才, 翟庆国, 程立人, 等. 青藏高原羌塘地区几个关键地质问题的思考[J]. 地质通报, 2005, 24(4):295-301.
Li Cai, Zhai Qingguo, Cheng Liren, et al. Thought on some key geological problems in the Qiangtang area, Qinghai-Tibet plateau [J]. Regional Geology of China, 2005, 24 (4):295-301 (in Chinese with English abstract).
- [4] 翟庆国, 李才, 程立人, 等. 西藏羌塘角木日地区二叠纪蛇绿岩地质特征及构造意义[J]. 地质通报, 2004, 23(12):1228-1230.
Zhai Qingguo, Li Cai, Cheng Liren, et al. Geological features of Permian ophiolite in the Jiaomuri area, Qiangtang, Tibet, and its tectonic significance [J]. Regional Geology of China, 2004, 23(12):1228-1230(in Chinese with English abstract).
- [5] 翟庆国, 李才, 黄小鹏. 西藏羌塘中部角木日地区二叠纪玄武岩的地球化学特征及构造意义 [J]. 地质通报, 2006, 25 (12):1419-1427.
Zhai Qingguo, Li Cai, Huang Xiao Peng. Geochemistry of Permian basalt in the Jiaomuri area, central Qiangtang, Tibet, China, and its tectonic significance[J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(12):1419-1427.
- [6] 邓万明, 尹集祥, 冯中平. 羌塘茶布-双湖地区基性超基性岩、火山岩研究[J]. 中国科学(D 辑), 1996, 26(4):296-301.
Deng Wanmin, Yin Jixiang, Wo Zhongping. Geological and geochemical research of mafic-ultramafic intrusions and volcanics in Chabu-Shaungu area, Qiangtang[J]. Science in China (Series D), 1996, 26(4):296-301.
- [7] 西藏地质矿局. 西藏自治区区域地质志 [M]. 北京:地质出版社, 1993.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Xizang Autonomous

- Region. Regional geology of Xizang (Tibet) Autonomous Region [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993(in Chinese).
- [8] 肖伟民, 王洪第, 张遵信, 等. 贵州南部早二叠世地层及其生物群 [M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 1986: 1-364.
- Xiao Weiming, Wang Hongdi, Zhang Linxing, et al. Early Permian Stratigraphy and Faunas in Southern Guizhou [M]. Guiyang: Guizhou People's Press, 1986: 1-364 (in Chinese with English abstract).
- [9] 曾学鲁, 朱伟元, 何心一, 等. 西秦岭石炭纪、二叠纪生物地层及沉积环境 [M]. 北京: 地质出版社, 1996: 1-334.
- Zeng Xuelu, Zhu Weiyan, He Xinyi, et al. Permo-Carboniferous Biostratigraphy and Sedimentary Environment of West Qinling [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 1-334 (in Chinese with English abstract).
- [10] 张招崇, 王福生, 郝艳丽, 等. 峨眉山大火成岩省和西北利亚大火成岩省地球化学特征的比较及其成因启示 [J]. 岩石矿物学杂志, 2005, 24(1): 12-20.
- Zhang Zhaochong, Wang Fusheng, Hao Yanli, et al. A geochemical comparison between the Emeishan and Siberian large igneous provinces and its petrogenetic implications [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2005, 24 (1): 12-20 (in Chinese with English abstract).
- [11] 肖龙, 徐义刚, 梅厚均, 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.
- Xiao Long, Xu Yigang, Mei Houjun, et al. Geochemistry of Emeishan flood basalts at Binchuan area, sw China: rock types and temporal evolution [J]. Chinese Journal of Geology, 2003, 38(4): 478-494(in Chinese with English abstract).
- [12] Condie K C. Geochemical changes in basalts and andesites across the Archaean-Proterozoic boundary: identification and significance [J]. Lithos, 1989, 23: 1-18.
- [13] 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, Mahoney John J, Wang Fushen, 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).
- [14] 路远发. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包 [J]. 地球化学, 2004, 33(5): 459-464.
- Lu Yuanfa. GeoKit: A geochemical toolkit for microsoft excel [J]. Geochimica, 2004, 33 (5): 459-464 (in Chinese with English abstract).
- [15] 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): 172-180.
- 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): 172-180 (in Chinese with English abstract).
- [16] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 天山石炭纪大火成岩省地幔柱 [J]. 地质通报, 2004, 23(9-10): 903-910.
- Xia Linqi, Xia Zuchen, Xu Xueyi, et al. Carboniferous Tianshan igneous mega provinces and mantle plume [J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23 (9/10): 903-910 (in Chinese with English abstract).
- [17] 朱炳泉, 李献华, 戴樟谟, 等. 地球科学中同位素体系理论与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1998: 125-235.
- Zhu Binqun, Li Xianhua, Daitongmo, et al. Theory and Application of the Isotopic Systematics in the Earth Sciences [M]. Beijing: Science Press, 1998: 125-235 (in Chinese).
- [18] 朱炳泉. 地球化学省与地球化学急变带 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 24-34.
- Zhu Bingquan. Geochemical Provinces and Geochemical Steep Zones [M]. Beijing: Science Press, 2001: 24-34 (in Chinese).
- [19] 李志昌, 路远发, 黄圭成. 放射性同位素地质学方法与进展 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2004: 17-145.
- Li Zhichang, Lu Yuanfa, Huang Guichen. Methodology and Progress in Radioactivity Isotope Geology [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2004: 17-145 (in Chinese).
- [20] Wilson M, Downes H. Tertiary-Quaternary extension-related alkaline magmatism in western and central Europe [M]. Journal Petrol., 1991, 32: 811-849.
- [21] 魏启荣, 沈上越, 莫宣学, 等. 三江地区古特提斯火山岩源区物质的 Nd-Sr-Pb 同位素体系特征 [J]. 矿物岩石, 2003, 23(1): 55-60.
- Wei Qirong, Shen Shangyue, Mo Xuanxue, et al. Characteristics of Nd-Sr-Pb isotope systematic of the source in paleo-Tethyan volcanic rocks in the Sanjiang area [J]. J. Mineral Petrol., 2003, 23 (1): 55-60 (in Chinese with English abstract).
- [22] 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 Zhaocong, Wang Fushen. 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).
- [23] Saunders A D, Storey M, Kent R W, et al. Consequences of plume-lithosphere interaction [C]//Storey D C, et al. (eds.). Magmatism and causes of continental break-up. Geol. Soc. Spec. Pub., London, 1992, 68: 41-60.

Geochemical characteristics and tectonic significance of Qixianian volcanic rocks in Zhigengaka area, Zhiduo County, eastern Qiangtang

LI Li, BAI Yun-shan, MA Li-yang, NIU Zhi-jun, DUAN Qi-fa

(*Yichang Institute of Geology and Mineral Resources, Yichang 443005, Hubei, China*)

Abstract: Qixianian volcanic rocks in Zhigengaka area consist of pyroclastic rocks and lava. Geochemical researches on major elements, trace elements and Sr, Nd, Pb isotopes suggest that these volcanic rocks originated from the mantle in an extension or fresh rift basin environment on the continental margin and were induced by mantle plume upwelling. On the basis of major elements, the volcanic rocks can be divided into two types characterized respectively by high TiO_2 and low TiO_2 . Chondrite normalized REE patterns show light REE enrichment, with MORB normalized trace elements like the pig back, indicating that these volcanic rocks were formed in an intra-continental rift environment. Sr, Nd, Pb isotopic geochemistry suggests that they were derived from a depleted mantle source.

Key words: eastern Qiangtang; Permian; rift; tectonic environment

About the first author: LI Li, female, born in 1967, senior engineer, engages in the study of mineral exploration and geographic information; E-mail: yclli@cgs.gov.cn.