

doi:10.3799/dqkx.2014.004

# 广东三水盆地始新世火山岩地球化学特征

张 维, 方念乔\*

中国地质大学海洋学院, 北京 100083

**摘要:** 广东三水盆地的演化伴随着强烈的火山活动, 为研究三水盆地各类岩石之间的演化关系, 对在盆地内的玄武岩、粗面岩和流纹岩样品进行常量、微量元素地球化学分析, 对样品的地球化学投图表明: 玄武岩样品表现为轻稀土富集的板内玄武岩稀土配分模式, 而其微量元素也具有 Nb、Ti 富集、Sr 弱亏损的特征, 由部分熔融产生; 粗面岩与流纹岩样品稀土与微量元素配分模式相似, 两类岩石均经历以斜长石为主的分离结晶过程。华南陆缘在始新世早期处于与红海相似的大陆裂谷环境, 喷发来源于深部软流圈地幔的岩浆, 但在 42 Ma 之后, 火山活动因区域挤压作用而停止, 其后的南海扩张可能是两种作用的叠加影响的结果。

**关键词:** 三水盆地; 火山岩; 结晶分离; 部分熔融; 地球化学。

**中图分类号:** P595

**文章编号:** 1000-2383(2014)01-0037-08

**收稿日期:** 2013-09-06

## Geochemistry Characteristics of Eocene Volcanic Rocks in Sanshui Basin, Guangdong

Zhang Wei, Fang Nianqiao\*

*School of Ocean Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*

**Abstract:** Guangdong Sanshui basin developed with extreme volcanic activities. Eruptions from Paleocene to Eocene were concentrated on Xinzhuang, Buxin, Baoyue and Huayong formations. For research of the relationship between various kind of rocks, geochemistry analyses such as multi-element and rare-earth element determination were launched on basalt, trachyte and rhyolite samples from the research area. Geochemistry diagrams suggest that: REE distribution of basalt followed as mid-plate alkali basalt mode, while their trace element spider diagrams act as continental alkali basalt with Nb, Ti rich and Sr loss. REE distributions of trachyte and rhyolite are similar, which indicate the same crystallization separation process. S-B diagram and pearce diagram show that: granites were partially melted from source region, while trachyte in ZMY and rhyolite in LBS originated from the same source region, and occurred with the process of crystallization separation with plagioclase advantage. Southeast China performed continental rift environment as Red Sea, and its magma may came from lithospheric mantle source. The magmatic activities suspended after 42 Ma because of regional extrusion, while breaking up of South China Sea (SCS) later may be a mixed effect of two functions.

**Key words:** Sanshui basin; volcanic rocks; crystallization separation; partial melting; geochemistry.

三水盆地位于广东省境内, 是中国东南部板块一系列雁型分布的新生代盆地之一(图 1)。区内受新华夏断裂带的仁化—英德—三水断裂带和恩平—新丰断裂带所控制, 形成东南—西北向菱形拉张盆地, 其盆地演化伴随着强烈的火山活动。

三水盆地自 20 世纪六七十年代就探明蕴含丰富

的油气资源, 对于三水盆地沉积岩、火成岩和盆地成因、演化模式的研究层出不穷。朱炳泉等(1991)曾指出三水盆地 64~43 Ma 的钙碱系列火山岩为古生代板块俯冲改变了岩浆源区性质所造成的结果, 后又依据广东四会—吴川断裂带上的茂名、三水、河源等盆地火山岩年代学和钽同位素数据的变化, 推测菲律

**基金项目:** 国家自然科学基金(No.41030853); 国家重点基础研究发展计划“973”项目(No.2007CB411703)。

**作者简介:** 张维(1983—), 男, 博士研究生, 研究方向为海洋地质学和岩石地球化学。E-mail: vincent\_zhangw@163.com

\* **通讯作者:** 方念乔, E-mail: fangnq@yahoo.com.cn

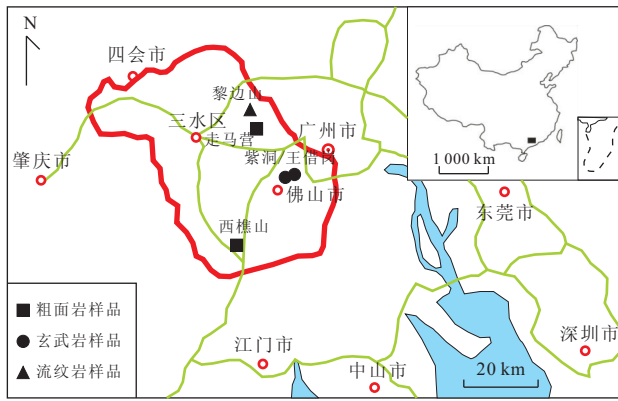


图 1 三水盆地采样点分布

Fig.1 Sampling locations in Sanshui basin

滨海与南海等东亚边缘海盆在始新世早期 (~56 Ma) 开始发生张裂。唐忠驭 (1994) 将该套钙碱性岩石的生成年代前推至白垩纪, 认为其系大陆裂谷早期开裂的产物。Chung *et al.* (1997) 提出了岩浆房双扩散模型用以解释三水盆地火山岩空间分布特点。而董月霞等 (2006) 认为岩浆房双扩散模型虽然能很好地解释各类火山岩的成因联系, 但对各旋回的火山岩喷发次序的解释较牵强。其他学者对于三水盆地火山岩的研究不胜枚举 (邹和平, 2001; 陈卫峰等, 2005; 肖龙等, 2006; 姚伯初等, 2006; Shu *et al.*, 2009)。

## 1 地层与火山岩

综合前人资料 (朱炳泉等, 1991; 张显球等, 1993; 董月霞等, 2006) 以及一些钻孔资料发现, 三水盆地古新世至始新世火山岩喷发主要集中在莘庄、怖心、宝月和华涌这 4 个组内, 早期喷发以玄武岩—安山岩—流纹岩的岩浆组合为主, 晚期则以玄武岩—粗面岩—流纹岩的岩浆组合为主。

从火山岩厚度与岩性组合 (图 2) 不难看出, 三水盆地在始新世之前一直以玄武岩喷发为主, 辅以少量的安山岩和流纹岩, 随着始新世华涌组的大范围巨量的粗面岩喷发, 碱性火山岩占据主导。粗面岩样品采集于走马营采石场和西樵山, 前人的研究资料 (李大明等, 1989; 董月霞等, 2006) 表明, 两点的粗面岩年龄分别为  $53.3 \pm 0.2$  Ma 和 ~48 Ma, 黎边山的流纹岩与走马营粗面岩喷出时间相近, 而紫洞和王借岗的玄武岩则喷发于 45~43 Ma。三类岩石的形成时间和空间展布均表明它们之间存在着密切的关系。

## 2 火山岩岩石学特征

玄武岩样品采集于盆地中部, 黑色—灰黑色, 近隐晶质结构, 块状构造。通过镜下观察 (图 3), 岩石由

世	组	旋回	主要火山岩	沉积层岩性	火山岩厚度(m)	火山岩分布	备注	样品	
始新世	华涌组	第 4 旋回	基性岩浆喷溢, 玄武岩	粉砂岩、泥岩夹玄武岩	11	金星岗一带		● 紫洞、王借岗玄武岩	
		第 3 旋回	上段	碱性岩浆喷发, 粗面质凝灰岩	粉砂岩、泥岩夹粗面质凝灰岩	9~84	中部莲子塘—洞神堂	46Ma 锆石 U-Pb 董月霞, 2006	
			下段	中基性岩浆喷发, 玄武岩为主	粉砂岩、泥岩夹玄武岩、凝灰岩及少量安山岩集块岩	1.7~43.6			
		新涌组	第 2 旋回	上段	碱性岩浆喷发, 粗面岩、粗面质凝灰岩	砂砾岩、砂岩、粉砂岩夹粗面岩、粗面质凝灰岩、火山角砾岩、集块岩及少量沉凝灰岩	>1000	北部丰岗, 西部走马营, 中部小塘和南部三多、西樵山等地	53.3 Ma 透长石 Ar-Ar 李大明等, 1989
	下段			中基性岩浆喷发, 玄武岩、安山质玄武岩	砂砾岩、砂岩、粉砂岩夹玄武岩、安山质玄武岩	162~277			
	第 1 旋回		上段	酸性岩浆喷发, 流纹岩、流纹质凝灰岩等	砾岩、砂岩、含砂砾岩与泥岩、层流纹岩、层角砾岩	5~425	南海沙头圩和南部西樵山、大同		▲ 黎边山流纹岩
			下段	中、基性岩浆喷发, 玄武岩为主	砾岩、砂岩、含砂砾岩夹玄武岩、凝灰岩	1.5~82.0			

图 2 三水盆地火山岩与地层 (参考李大明等, 1989; 张显球等, 1993; 董月霞等, 2006)

Fig.2 Volcanic rocks and stratigraphy of Sanshui basin

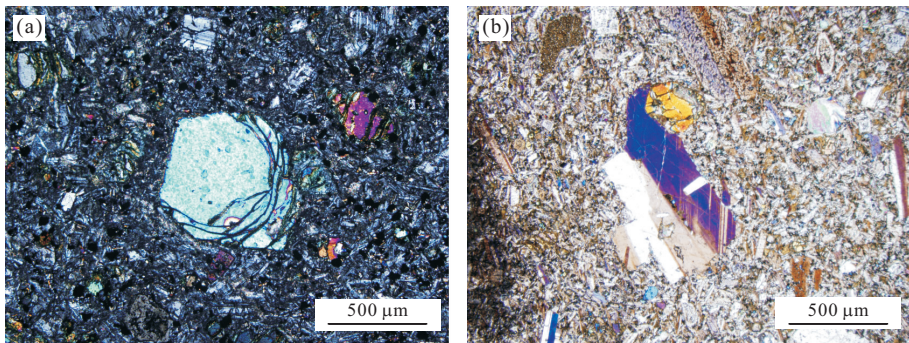


图 3 WJG 玄武岩橄榄石斑晶(a)和 ZD 玄武岩(b)镜下照片(单偏光)  
Fig.3 Photos of WJG basalt (a) and ZD basalt (b) under microscope

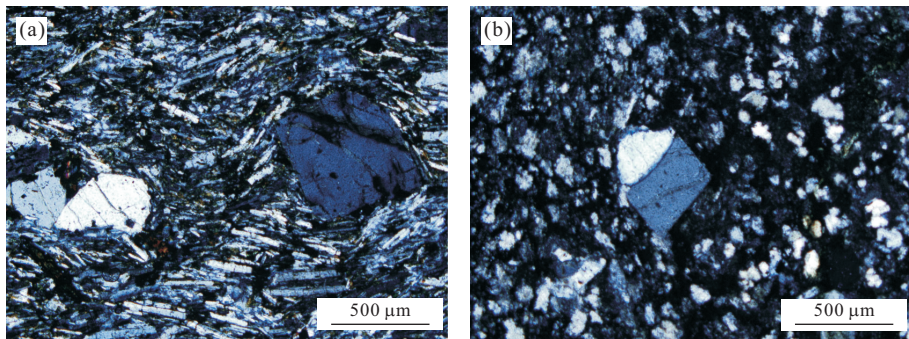


图 4 ZMY 粗面岩(a)和 LBS 流纹岩(b)镜下照片(单偏光)  
Fig.4 Photos of ZMY trachyte (a) and LBS rhyolite (b) under microscope

基质与斑晶组成,基质多为长石;斑晶则由斜长石、橄榄石、辉石组成,橄榄石多为淡黄色,少见绿色,晶体较大,常有不规则裂纹;辉石多为浅绿色至浅褐色,较小,多为四边形,颜色较深具两组节理,夹角约 90°。

粗面岩为黑灰色—灰绿色,粗面结构,块状构造,矿物组成为长石、黑云母、角闪石等。通过镜下观察(图 4a),长石类矿物多为碱性长石,少见斜长石,碱性长石以透长石为主,次为歪长石。暗色矿物按照含量依次为黑云母、角闪石、辉石。流纹岩为肉红色—淡红色,流纹结构、斑状结构,块状构造,矿物组成为长石、石英、黑云母、角闪石。通过镜下观察,长石由斜长石和碱性长石组成,暗色矿物多为黑云母,仅有少量角闪石。流纹岩为浅灰色、灰红色,流纹结构,块状构造。镜下(图 4b)可见其结晶程度较差,基质多由隐晶质和玻璃质的长石和石英组成,少量斑晶主要由透长石和石英组成。

### 3 火山岩地球化学特征

#### 3.1 常量元素

从所采集到的 36 个火山岩样品中,我们共挑选

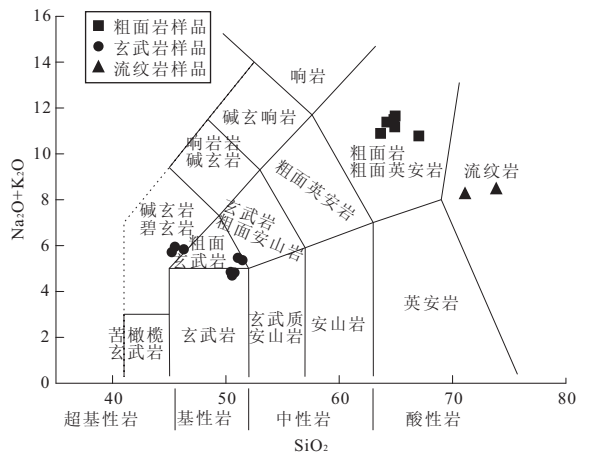


图 5 火山岩样品 TAS 图解  
Fig.5 TAS diagram for volcanic rock samples

出 16 个样品进行地球化学分析测试,其中,由于西樵山样品受风化作用影响较明显,固在地球化学分析中不予采用,所有粗面岩样品均来自于走马营。

挑选新鲜的岩石样品,经超声波洗净后碎至 200 目,常量与微量元素(共 38 项)测试在河北省区域地质调查院第一实验室完成。

根据资料,本次所采的火山岩为始新世华涌组

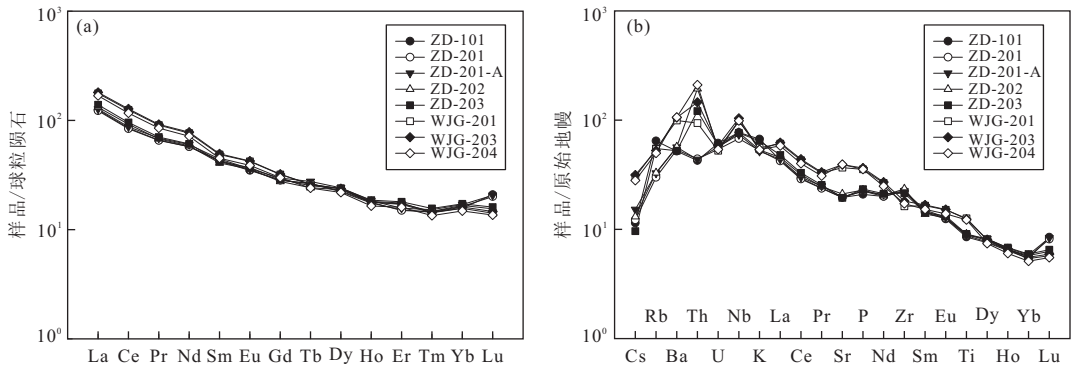


图 6 三水盆地玄武岩稀土元素配分曲线(a)与微量元素配分模式图(b)(标准化数据来源于 Sun and McDonough, 1989)

Fig.6 REE distribution and trace elements spidergram for basalts in Sanshui basin

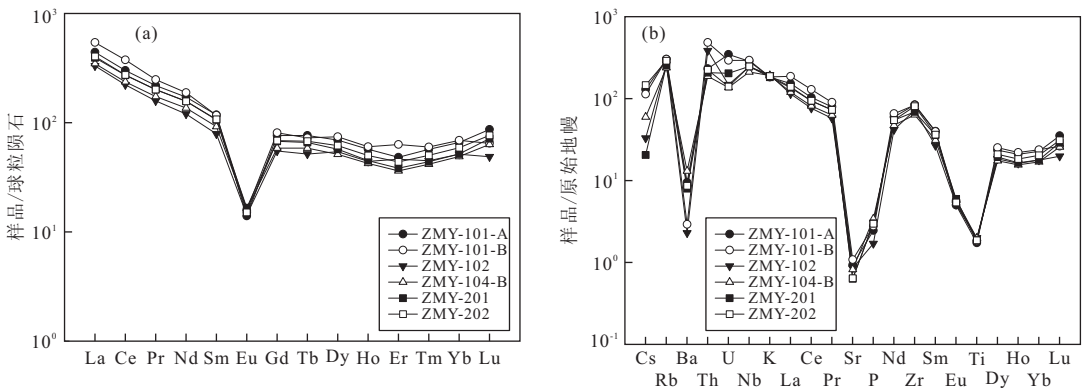


图 7 三水盆地粗面岩稀土元素配分曲线(a)与微量元素配分模式图(b)(标准化数据来源于 Sun and McDonough, 1989)

Fig.7 REE distribution and trace elements spidergram for trachytes in Sanshui basin

玄武岩、粗面岩与流纹岩(图 5)。玄武岩样品为碱性玄武岩,投于粗面玄武岩和碱性玄武岩区域内,其  $\text{SiO}_2$  含量 45.07%~51.20%,  $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  含量 4.79%~6.01%,紫洞玄武岩里特曼指数  $\sigma$  约为 3~4,而王借岗玄武岩里特曼指数  $\sigma$  高达 11~16,玄武岩样品  $\text{TiO}_2$  和  $\text{K}_2\text{O}$  含量较高,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$  和  $\text{CaO}$  较低的特点接近大陆玄武岩;粗面岩除少数几个样品由于风化作用影响而投图异常以外,大多投于粗面岩和粗面岩英安岩区域内,其  $\text{SiO}_2$  含量为 58.59%~68.99%,  $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  含量多在 10%~11%,里特曼指数 4.27~6.34;流纹岩  $\text{SiO}_2$  含量 70.89%~73.60%,  $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  在 8% 以上。三水盆地华涌组火山岩总体碱性含量较高,岩浆岩类型组合和地球化学特征与大陆裂谷环境相似。

### 3.2 稀土与微量元素特征

三水盆地玄武岩的稀土元素配分曲线均表现为轻稀土富集型(图 6a)。根据前人研究结果,中国东部新生代玄武岩为典型的大陆裂谷型玄武岩,从中国的华南区到华北区再到东北区,玄武岩的稀土总量

是逐渐增加的,而且轻稀土的富集程度也有由南到北增加的趋势。本区的玄武岩  $\Sigma\text{REE}$  值分布于  $142.65 \times 10^{-6} \sim 198.14 \times 10^{-6}$  之间,较华南区的平均值  $205 \times 10^{-6} \sim 233 \times 10^{-6}$  低,而  $\text{La}_N/\text{Yb}_N$  比值为 7.10~10.75,也较华南地区的平均比值低,总体稀土元素丰度不高。

三水盆地玄武岩表现为强不相容元素富集的配分模式(图 6b),其 Nb、Ti 较富集,而 Sr 表现为弱亏损,具备大陆碱性玄武岩的特征。Th 和 U 的高值显示出其可能混染了部分的地壳物质,这种推论也符合晚期的玄武岩  $\text{SiO}_2$  含量降低而 Ti、Ca、Al、Mg、K 等元素含量明显升高的特点。

三水盆地粗面岩与流纹岩稀土元素配分曲线形式相似(图 7,图 8),都表现为轻稀土富集型,但轻、重稀土分馏不明显,La 到 Eu 呈下降趋势,从 Eu 到 Lu 却回归平坦。其中,西樵山的样品稀土丰度较走马营高。所有粗面岩样品都具备强烈的 Eu 负异常,这显然是岩浆经历以斜长石为主的结晶分异作用的结果。推测两类岩石源于同一源区,且在形成的时间

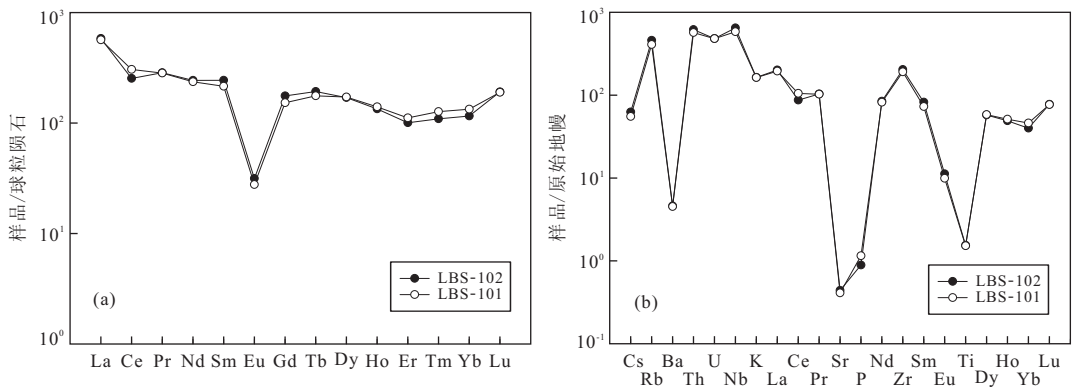


图 8 三水盆地流纹岩稀土元素配分曲线(a)与微量元素配分模式图(b)(标准化数据来源于 Sun and McDonough, 1989)  
Fig.8 REE distribution and trace elements spidergram for rhyolites in Sanshui basin

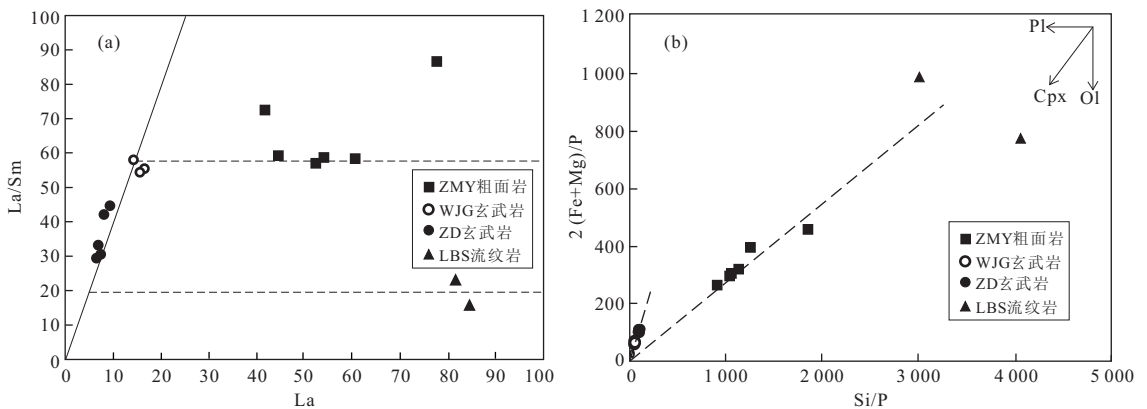


图 9 三水盆地火山岩 La/Sm vs La 比值(a)和 2(Fe+Mg)/P vs Si/P(b)图解(虚线表示结晶分离线,实线表示部分熔融线)  
Fig.9 Binary variation diagram of La/Sm vs. La (a) and 2(Fe+Mg)/P vs. Si/P (b) of volcanic rocks in Sanshui basin

与物质组成上具相关性.三水盆地粗面岩与流纹岩微量元素配分模式也非常相似,Sr 和 Ba 的亏损由 Pl 和 Cpx 等矿物的结晶分离所造成,而 P 和 Ti 的亏损与大陆弧岩石极为相似,可能由于钛氧化物的分离结晶造成.

在 La/Sm-La 图中,结晶分离作用会导致 La 的富集,而 La/Sm 比值却不会变化太大,图中虚线为结晶分离演化线,而实线为部分熔融演化线.走马营粗面岩样品与黎边山流纹岩样品均位于结晶分离线上,而玄武岩样品则为部分熔融成因(图 9a).王借岗玄武岩部分熔融程度较紫洞玄武岩高,且走马营粗面岩样品与王借岗玄武岩样品具有同源性,由其源区经结晶分离作用形成.黎边山流纹岩虽具备较高的 La 含量,La/Sm 比值却较低,显示出形成流纹岩的原始岩浆位于岩浆演化的早期,部分熔融程度较低.

Pearce(1968)在讨论岩石的常量化学成分变化趋势与矿物相分离结晶的关系时首次使用 Si/P-

2(Fe+Mg)/P 的方法(图 9b),现已扩展到微量元素范围.图中右上角的 3 个箭头分别指示了以 Ol、Cpx 和 Pl 为主的 3 种结晶分离过程所控制的点分布方向,若岩石点分布与任意一种矿物的方向结晶,便可判断岩石结晶分离以其为主.三水盆地 8 个玄武岩样品分布在极为狭窄的分区内近乎重叠,显示其只经历了很短暂的以 Ol 和 Cpx 为主的结晶分离过程,其形成主控原因为源区的部分熔融;走马营粗面岩与黎边山的流纹岩具有较好的线性相关性,且因为结晶分离曲线较缓和,推测其经历了以斜长石和单斜辉石为主的结晶分离过程.

高场强元素(Nb)相对于轻稀土元素(La)在软流圈地幔中更为富集,且软流圈地幔中具备较低的 La/Yb 比值,指示着较低的轻重稀土分馏比例.所以,当 Nb/La 比值大于 1 时,表明形成火山岩的原始岩浆来源于深部的软流圈地幔,而当 Nb/La 比值小于 0.5 时,表明原始岩浆来源于岩石圈地幔或者受到了强烈的地壳混染作用.另外,软流圈地幔相对

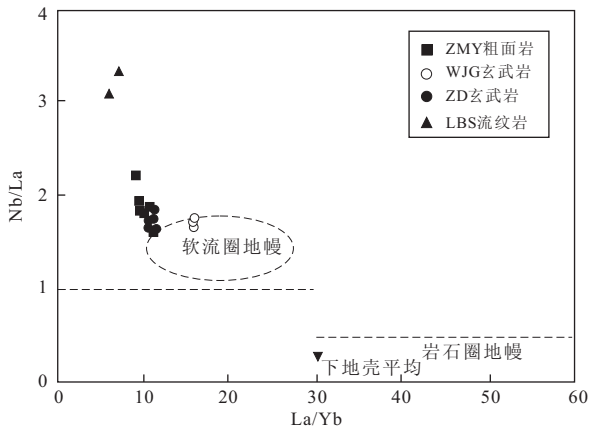


图 10 三水盆地火山岩 La/Yb vs. Nb/La 比值(参考 Moustafa and Ahmed, 2012; 下地壳平均值来源于 Chen and Arculus, 1995; 区分软流圈地幔和岩石圈地幔的虚线来源于 Smith *et al.*, 1999)

Fig. 10 Binary variation of La/Yb vs. Nb/La for volcanic rocks in Sanshui basin

于岩石圈地幔具备较低的 LREE/HREE 分馏系数, 因而具备较低的 La/Yb 比值。

三水盆地火山岩均具备较高的 Nb/La 比值(图 10), 因而投点于软流圈地幔上方。粗面岩与玄武岩具有相似的 Nb/La 比值而投点于相同区域, 表明两种类型的岩石具备较好的同源性, 显示两种火山岩形成于同一种原始岩浆, 而流纹岩样品相对于粗面岩和玄武岩更加富集高场强元素 Nb, 表明其原始岩浆处于演化的早期阶段, 且来源较深。这也印证了 La/Sm vs La 图解(图 9a)中的结论。

综上所述, 三水盆地玄武岩由 La/Sm 比值较高源区经部分熔融作用形成, 而粗面岩和流纹岩的形成均受控于以斜长石和单斜辉石为主的结晶分离作用。粗面岩是由与王借岗玄武岩样品相似的原始岩浆结晶分离产生, 而流纹岩则形成于早期, 因而其原始岩浆具备较低的 La/Sm 比值。

### 3.3 Sr、Nd 同位素特征

根据朱炳权等(1991)对于三水盆地火山岩的 Sr、Nd 同位素测试, 三水盆地多数火山岩样品具备较高的 Nd 同位素比值和较低的 Sr 同位素比值而投于第 2 象限内(图 11)。

粗面岩与玄武岩样品相对于流纹岩样品具备较高的 Nd 同位素比值, 相近的 Sr、Nd 同位素比值显示玄武岩与粗面岩形成于相同的原始岩浆, 流纹岩样品投点位置更靠近第 4 象限, 形成于结晶演化的早期。不仅如此, 所有的样品均显示出随时间向 DM 演化的趋势, 晚于 50 Ma 的样品均具备较高的 Nd

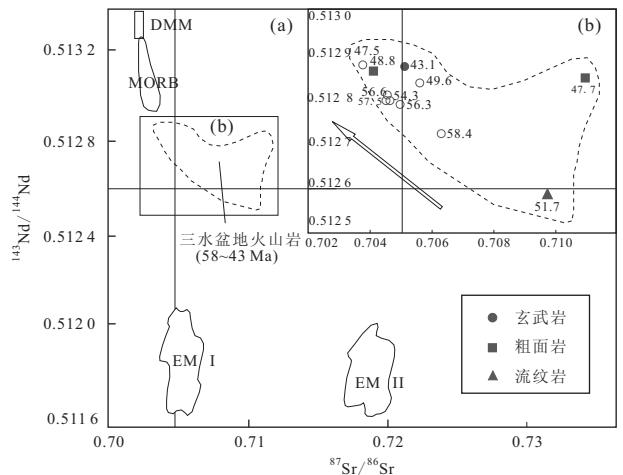


图 11 三水盆地火山岩 Sr-Nd 同位素比值(数据来源于朱炳权等, 1991; 图中数字表示 K-Ar 测年得出的年龄)

Fig. 11  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  vs.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  for volcanic rocks from Sanshui basin

同位素比值( $>0.5128$ ), 而早于 50 Ma 喷发的样品 Nd 同位素比值均较低。综上所述, 三水盆地火山岩原始岩浆来源较深, 地壳混染作用不明显, 且随着喷发, 岩浆房位置不断上移。

## 4 讨论

三水盆地自晚白垩世大琅山组至始新世华涌组地层中均发现有火山岩夹层, 而碱性火山岩一直占据着主导地位。从火山岩组合上来看, 大陆裂谷以大陆溢流玄武岩为主, 同时存在大量的碱性玄武岩、粗面岩、碱性花岗岩等碱性岩。虽缺少数据证明始新世之前的玄武岩为钙碱性, 但是粗面岩的大面积喷发可以作为一个判别标志, 因为弧后盆地虽可形成少量碱性火山岩, 但是其所占比例不会太大, 总体上应以拉斑玄武岩为主, 不具备如此大范围的粗面岩喷发的条件。所以, 三水盆地始新世华涌组粗面岩的喷发表明, 三水盆地在该时期正处于典型的陆内裂谷环境。

三水盆地是华南陆块上最接近南海的新生代盆地, 其火山喷发时间约为 56~42 Ma 之间(朱炳权等, 1991), 十分接近于南海开裂的时间, 而其火山岩累计喷发厚度超过 2 000 m(张显球等, 1993; 肖龙等, 2006), 为华南新生代盆地中喷发规模最大的一次。从火山岩地球化学特征来看, 火山岩组合为玄武岩—粗面岩—流纹岩, 且所有样品均表现出高场强元素富集(Nb、Ta、Zr、Hf 等)、 $\Sigma\text{REE}$  较低、LREE/

HREE 分馏不明显,通过微量元素(图 9a)和同位素分析(图 11)显示出岩浆岩源于深部的软流圈地幔。邓勇等(2007)指出除三水盆地外,邻近的河源盆地、龙川盆地和珠江口盆地在古近纪均有火山活动,且多为幔源深熔岩浆,且河源盆地也发现与三水盆地相似的碱性玄武岩与粗面岩喷发。则三水盆地本次火山喷发可被视为古近纪华南陆块上一次颇具规模的软流圈上涌。

红海为世界公认的由大陆裂谷转变为陆间裂谷的典型环境,其张裂时间大约在 35 Ma 左右。对于红海的研究表明,自 50 Ma 以来,随着红海的张裂,两岸均发现有大量碱性火山岩组合(张鸿翔等,2001):碱性玄武岩—粗面岩—碱性流纹岩,其地球化学特征与本区火山岩非常相似,故华南陆缘在始新世早期的大陆裂谷环境毋庸置疑。但与红海扩张模式大相径庭的是,随着裂谷的演化,中国东南部火山活动日益消减,自 40 Ma 以来,甚至在普遍认为的南海打开时间段上(32 Ma 左右),在华南陆缘始终未见大规模裂谷性质的火山活动,反而表现为与被动陆缘相似的扩张模式,从而造就了南海“陆内裂谷大张旗鼓、陆间裂谷悄无声息”的尴尬局面。而纵观红海的扩张历史,自 50 Ma 至今,红海两侧火山活动一直非常强烈(图 10),特别是东岸阿拉伯板块上,直至今日仍有喷发。如果华南陆缘与红海的早期演化模式相同,则在 42 Ma 之后,华南陆缘似乎因某区域性挤压运动的影响而抑制了原本较强烈的岩浆活动,此挤压运动可能与印度板块与欧亚板块碰撞有关,而此后的南海打开和扩张有可能是两者共同作用的结果。

## 5 结论

(1)三水盆地始新世华涌组的碱性火山岩大量喷发为中国东南部新生代盆地中所独有。在始新世,有超过 1 000 m 的粗面岩在盆地内的走马营、西樵山等地喷发,表明三水盆地此时处于大陆裂谷环境下。

(2)玄武岩样品稀土元素配分曲线表现为轻稀土富集型的板内玄武岩配分模式,而其微量元素配分模式也表现为 Nb、Ti 较富集,而 Sr 弱亏损的特征,判断其由源区部分熔融产生,只经历了短暂的结晶分异过程;粗面岩与流纹岩稀土与微量元素配分模式相似,明显的负 Eu 异常和 Sr、Ba 亏损显示其形成均受控于以斜长石为主的结晶分离过程,但粗

面岩结晶于晚期与王借岗玄武岩相似的原始岩浆;而流纹岩形成于早期,因而具备较低的 La/Sm 比值。

(3)三水盆地火山岩具备较高的 Nb/La 比值、Nd 同位素比值和较低的 La/Yb 比值、Sr 同位素比值,显示岩浆来源于深部的软流圈地幔,经历较少地壳混染作用,且随着喷发,岩浆房位置不断上移。从喷发时间上来看,流纹岩形成于早期,粗面岩和玄武岩形成于晚期。

致谢:感谢中国海洋大学田纪伟老师、赵广涛老师和中国地质大学(北京)的李琦老师在论文撰写过程中给本人的指导和帮助。感谢中国地质大学(北京)海洋学院杨蜀颖博士、胡俊杰博士、梁飞刚和林鹏师弟在野外采样工作中的大力支持,并感谢王晓明博士在排版过程中的帮助。感谢审稿专家的意见和建议!

## References

- Chen, W., Arculus, R. J., 1995. Geochemical and Isotopic Characteristics of Lower Crustal Xenoliths, San Francisco Volcanic Field, Arizona, U. S. A. *Lithos*, 36 (3): 203—225. doi:10.1016/0024—4937(95)00018—6
- Chen, W. F., Chen, P. R., Xu, X. S., et al., 2005. The Geochemical Characteristic of Cretaceous Basaltic Rocks in Southeast China and Its Constraint on Pacific Plate Subduction. *Chinese Science Bulletin (Series D)*, 35 (11): 1007—1018 (in Chinese).
- Chung, S. L., Cheng, H., Jahn, B. M., et al., 1997. Major and Trace Element, and Sr-Nd Isotope Constraints on the Origin of Paleogene Volcanism in South China Prior to the South China Sea Opening. *Lithos*, 40(2): 203—220. doi:10.1016/S0024—4937(97)00028—5
- Deng, Y., Luo, X., Qiu, R. S., 2007. The Formation and Evolution of Cretaceous Graben Basin in Guangdong and Its Metallogenic Potential. *Resources Survey & Environment*, 28(3): 165—170 (in Chinese).
- Dong, Y. X., Xiao, L., Zhou, H. M., et al., 2006. Spatial Distribution and Petrological Characteristics of the Bimodal Volcanic Rocks from Sanshui Basin, Guangdong Province: Implication for Basin Dynamics. *Geotectonica et Metallogenia*, 30(1): 82—92 (in Chinese with English abstract).
- Li, D. M., Chen, W. J., Wang, X., et al., 1989. <sup>40</sup>Ar—<sup>39</sup>Ar Age of Trachyte ZGC from Zoumayang, Nanhai County, Guangdong Province. *Seismology and Geology*, 11(3): 82—84 (in Chinese with English abstract).

- Moustafa, E., Ahmed, H., 2012. Paleozoic Alkaline Volcanism; Geochemistry and Petrogenesis of Um Khors and Um Shaghir Trachytes of the Central Eastern Desert, Egypt. *Arab. J. Geosci.*, 5 (1): 53 – 71. doi: 10.1007/S12517-010-0212-4
- Pearce, T. H., 1968. A Contribution to the Theory of Variation Diagrams. *Petrol.*, 19 (2): 142 – 157. doi: 10.1007/BF00635485
- Smith, E., Isanchez, A., Walker, J. D., et al., 1999. Geochemistry of Mafic Magmas in the Hurricane Volcanic Field, Utah: Implications for Small- and Large-Scale Chemical Variability of Lithospheric Mantle. *J. Geol.*, 4 (107): 433 – 448.
- Shu, L., Zhou, X., Deng, P., et al., 2009. Mesozoic Tectonic Evolution of the Southeast China Block: New Insights from Basin Analysis. *Journal of Asian ES*, 34 (3): 376 – 391. doi: 10.1016/j.jseaes.2008.06.004
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42: 313 ~ 345. doi: 10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19
- Tang, Z. Y., 1994. Cretaceous-Eocene Rift Valley-Type Volcanism in Sanshui Basin, Guangdong. *Guangdong Geology*, 9 (1): 49 – 57 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, L., Zhou, H. M., Dong, Y. X., et al., 2006. Geochemistry and Petrogenesis of Cenozoic Volcanic Rocks from Sanshui Basin; Implications for Spatial and Temporal Variation of Rock Types and Constraints on the Formation of South China Sea. *Geotectonica et Metallogenia*, 30 (1): 72 – 81 (in Chinese with English abstract).
- Yao, B. C., Wan, L., Zeng, W. J., et al., 2006. The Three-Dimensional Structure of Lithosphere and Its Evolution in South China Sea. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zhang, H. X., Xu, Z. F., Ma, Y. J., et al., 2001. Geochemical Features and Origin of Continental Flood Basalts. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 26 (3): 261 – 268.
- Zhang, X. Q., Zhou, X. P., Chen, X. Y., 1993. Atlas of Cretaceous-Tertiary Stratigraphic Subdivision in Sanshui Basin. Ocean Press, Beijing (in Chinese).
- Zhu, B. Q., Wang, H. F., Mao, C. X., et al., 1991. Geochronology of and Nd-Sr-Pb Isotopic Evidence for Mantle Source in the Ancient Subduction Zone beneath Sanshui Basin, Guangdong Province, China. *Geochimica*, 1: 27 – 32 (in Chinese with English abstract).
- Zou, H. P., 2001. Continental Marginal Rifting along the Northern South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 21 (1): 39 – 44 (in Chinese with English abstract).

### 附中文参考文献

- 陈卫锋, 陈培荣, 徐夕生, 等, 2005. 华南白垩纪玄武质岩石的地球化学特征及其对太平洋板块俯冲作用的制约. *中国科学(D辑)*, 35 (11): 1007 – 1018.
- 邓勇, 罗鑫, 邱瑞山, 2007. 广东白垩纪—新近纪断陷盆地形成演化及其含矿性. *资源调查与环境*, 28 (3): 165 – 170.
- 董月霞, 肖龙, 周海民, 等, 2006. 广东三水盆地双峰式火山岩: 空间展布、岩石学特征及其盆地动力学意义. *大地构造与成矿*, 30 (1): 82 – 92.
- 李大明, 陈文寄, 王昕, 等, 1989. 广东省南海县走马营 ZGC 粗面岩的  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年龄. *地震地质*, 11 (3): 82 – 84.
- 唐志取, 1994. 广东三水盆地白垩纪—早第三纪裂谷型火山作用. *广东地质*, 9 (1): 49 – 57.
- 肖龙, 周海民, 董月霞, 等, 2006. 广东三水盆地火山岩: 地球化学特征及成因——兼论火山岩性质的时空演化和南海形成的深部过程. *大地构造与成矿学*, 30 (1): 72 – 81.
- 姚伯初, 万玲, 曾维军, 等, 2006. 中国南海海域岩石圈三维结构及演化. 北京: 地质出版社.
- 张鸿翔, 徐志方, 马英军, 等, 2001. 大陆溢流玄武岩的地球化学特征及起源. *地球科学——中国地质大学学报*, 26 (3): 261 – 268.
- 张显球, 周晓萍, 陈修奕, 1993. 三水盆地白垩—第三纪钻井地层划分对比图集. 北京: 海洋出版社.
- 朱炳泉, 王慧芬, 毛存孝, 等, 1991. 广东三水盆地古俯冲带地幔源岩石的年代学与 Nd-Sr-Pb 同位素证据. *地球化学*, 1: 27 – 32.
- 邹和平, 2001. 南海北部陆缘张裂——岩石圈拆沉的地壳响应. *海洋地质与第四纪地质*, 21 (1): 39 – 44.