三水盆地中渐新世火山记录的新建与南海扩张

袁晓博,方念乔 YUAN Xiaobo, FANG Niangiao

中国地质大学(北京)海洋学院,北京 100083 School of Ocean Sciences, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China

摘要:三水盆地是南海北部邻区陆域唯一具有新生代火山活动记录的盆地,最晚一期火山喷发时间是38Ma,也是南海北部陆 域已知的在南海扩张之前最晚的火山喷发年代。应用K-Ar同位素年代测定方法,首次发现三水盆地存在29.27±1.52Ma的玄 武岩和28.25±1.14Ma的流纹岩,构造判别图解指示其产出环境是板内拉张,与盆地之前火山类型一致,为双峰式火山岩,玄武 岩具有与洋岛玄武岩相似的地球化学特征,流纹岩具有与A型花岗岩相似的地球化学特征,且玄武岩与流纹岩均与其他地区 地幔柱成因火山岩具有相似的地球化学特征。这一代表板内破裂的双峰式火山记录将南海北部陆缘的火山喷发活动从早先 已知的古新世—中始新世延续至渐新世中期,众所周知,南海的开裂起始时间约在32Ma,对于南海扩张期间周边陆域是否存 在相关联的火山活动及建立南海早期开裂模式具有重要意义。

关键词:三水盆地;渐新世火山岩;K-Ar同位素;双峰式;南海开裂 中图分类号:P534.61^{*}4 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2019)04-0689-07

Yuan X B, Fang N Q. The new volcanics record in Sanshui Basin and its relationship with the spreading of the South China Sea. *Geological Bulletin of China*, 2019, 38(4):689–695

Abstract: Sanshui Basin is the only basin that has Cenozoic volcanic records in the northern adjacent land area of the South China Sea, and the age of the last volcanic eruption in this basin is 38Ma. This age is also the last eruption age before the South China Sea spreading in its northern land. Based on the K-Ar isotope dating method, the basalts $(29.27\pm1.52Ma)$ and rhyolite $(28.25\pm1.14Ma)$ were first found in Sanshui Basin. This bimodal volcanic rock that represents intraplate rifting tectonic setting postponed the volcanic records from Palaeocene-Middle Eocene to Mid-Oligocene. As we all know, the initial age of the South China Sea spreading is about 32Ma. So, it has great significance to answer if there is the relationship between the South China Sea spreading and its surrounding land volcanic activity. Meanwhile, the findings have important significance for establishing early spreading evolution model of the South China Sea.

Key words: Sanshui Basin; Oligocene volcanic rock; K-Ar isotope; bimodal; the South China Sea spreading

三水盆地是南海北部陆缘唯一具有大规模新 生代火山喷发记录的沉积盆地。盆地新生代火山 喷发组合以粗面岩、玄武岩和流纹岩为代表,总体 体现板内的大陆裂谷环境^[1-10]。根据前人研究,三水 盆地存在13期火山喷发^[1-2,5-6,8,11],其中大多数集中于 古新世和始新世。时代最新的玄武岩年龄为 38Ma^[12],这也是南海北部大陆边缘地区迄今获得的 南海扩张之前最晚的火山喷发年龄。本文报道的 西樵山独岗流纹岩和石头村玄武岩样品是新近采 得,应用K-Ar法经过严格的测试和检验,分别测得 28.25Ma和29.27Ma的同位素地质年龄。这一新的 结果将三水盆地的火山喷发序列推迟至渐新世中 期,也改变了长期以来关于南海扩张期间(32~ 16Ma)无陆上火山喷发活动的传统认识,对于区域

资助项目:国家自然科学基金项目《三水盆地及周边地区古近纪火山-沉积组合与南海早期演化》(批准号:41572207)

收稿日期:2018-06-18;修订日期:2018-12-05

作者简介:袁晓博(1987-),男,在读博士生,从事海洋地质、大地构造方面的研究。E-mail: xiaoboyuan@cugb.edu.cn

构造环境的解读和南海扩张过程的研究具有重要意义。

1 地质背景

三水盆地位于广东省南部,是中国华南大陆最 贴近南海的内陆盆地。盆地主要断裂带是吴川-四 会断裂带、西江断裂带和三水-西樵山断裂带,新生 代地层自下而上有莘庄村组、坊心组、宝月组和华 涌组。

三水盆地是南海北部唯一存在早新生代大规 模火山喷发的陆缘盆地,前人总结的13期火山喷发 活动中绝大部分(10~11期)发生在古新世一中始新 世(60.5~38Ma),喷发岩的主要种类为玄武岩、粗面 岩和流纹岩,地表出露地点主要有紫洞、王借岗、走 马营、西樵山、狮岭、黎边山等地,基性岩与中酸性 岩呈近南北向双列线性展布。本文分析样品是采 自石头村的玄武岩和独岗的流纹岩(图1)。

西樵山是三水盆地出露面积最大的火山喷发

点,各类熔岩、集块岩、熔结凝灰岩、凝灰岩发育齐 全。根据以往报道,该地粗面岩数量巨大,年龄一 般为45Ma,是盆地火山活动最强烈的第10期喷发 的主要代表。独岗贴近西樵山,可能是西樵山火山 体系的一部分,也可能属于后期的独立喷发。独岗 岩体呈灰黄色,柱状节理非常发育,化学分析结果 表明其为典型的流纹岩。石头村位于三水盆地东 北部,是盆地内玄武岩出露的主要地区之一,但随 着当地经济建设的发展,露头已被挖掘殆尽,本文 的分析样品来自某工程施工现场。

2 K-Ar年代测试

测试玄武岩选用剔除斑晶的基质,流纹岩选用 透长石单矿物,测试在北京大学造山带与地壳演化 教育部重点实验室完成,K含量测量采用锂内标钠 缓冲火焰光度计法,火焰光度计型号为6400,所用 标样为房山花岗闪长岩体黑云母(编号ZBH-25)和 腾冲芒棒玄武岩(编号TC-18)。Ar含量测量采用



图 1 三水盆地火山岩样品位置分布(底图据参考文献[13-14];资料据参考文献[11-12,15-16]) Fig. 1 The simplified geological map and the distribution of samples in Sanshui Basin

VSS-RGA-10质谱计,稀释法静态测量,标样为房 山花岗闪长岩体黑云母(编号ZBH-25)。计算过程 中的标准值据桑海清等^[17]。计算所用衰变常数 λ = 5.543×10⁻¹⁰/a,⁴⁰K/ Σ K=1.167×10⁻⁴。

玄武岩测试年龄为29.27±1.52Ma,流纹岩测试 结果为28.25±1.14Ma,均属渐新世,具体测试结果 见表1。测试过程中所选标样房山花岗闪长岩体黑 云母(编号ZBH-25)K含量标准值为7.60%,实测值 7.04%,腾冲芒棒玄武岩(编号TC-18)K含量标准值 1.04%,实测值1.01%。Ar含量测量标样ZBH-25标 准值为132.9±1.3Ma,实测值为132.47Ma。测试方 法合理,数据可靠,笔者认为测试年龄可为后续科 学研究提供可靠的年代学依据。

3 岩石矿物和地球化学特征

3.1 岩石矿物学特征

石头村玄武岩呈黑色,少见气孔,具斑状结构 (图 2-a),斑晶为斜长石(15%)、橄榄石(10%)和辉 石(5%)。基质为拉斑玄武结构,包含斜长石微晶 (20%)和火山玻璃(30%),橄榄石形状不规则,晶体 较大,有不规则裂纹且个别橄榄石有蛇纹石化现象 (图2-b)。辉石形状较规则,呈八边形,有裂纹,发 育较弱的环带,且裂纹穿过环带(图2-c)。斜长石 形状规则,发育大量环带,且环带清晰、完整,无裂 纹、无蚀变现象。

流纹岩呈灰色,少见气孔,斑状结构,块状构造 (图 3-a),矿物组成为长石、石英、黑云母。斑晶主 要为碱性长石(10%),偶见长石斑晶中包裹小颗粒 长石(图 3-b),碱性长石斑晶呈自形-半自形,有不 规则裂纹,大小为1~1.5mm,基质为微晶结构,碱性 长石微晶半定向排列,其间充填有玻璃质成分。副 矿物为菱铁矿(1%~2%)(图 3-c)。以上岩石矿物特 征与前人研究的时代较老的同类岩石一致^[5,11,18]。

3.2 **地球化学特征**

石头村玄武岩和独岗流纹岩元素地球化学分析数据见表 2。石头村玄武岩(图 4)SiO₂含量为



图 2 三水盆地石头村玄武岩手标本(a)及显微照片(b、c)(b、c左为单偏光,右为正交光)
Fig. 2 Hand specimen(a) and photomicrographs(b, c) of Shitoucun basalt in Sanshui Basin
b一橄榄石及蛇纹石化;c一辉石环带;Ol一橄榄石;Aug一辉石;Cl一斜长石;Srp一蛇纹石



 图 3 三水盆地独岗流纹岩手标本(a)及显微照片(b、c左为单偏光,右为正交光)
Fig. 3 Hand specimen(a) and photomicrographs(b, c) of Dugang rhyolite in Sanshui Basin b-长石;c-菱铁矿及辉石;Aug-辉石;Afs-碱性长石;Mgs-菱铁矿

表1 三水盆地火山岩 K-Ar 测年数据结果 Table1 The K-Ar isotopic dating results of the volcanic rocks in Sanshui Basin

岩性	玄武岩	流纹岩					
K含量/%	1.70±2.56	4.92±2.92					
称样量/g	0.0211	0.0101					
$^{40}\text{Ar}^{*}/(\text{mol} \cdot \text{g}^{-1})$	8.70E-11	2.43E-10					
⁴⁰ Ar*%	48.8661	54.64888					
³⁸ Ar/mol	7.12E-12	7.15E-12					
^{40/38} Ar	0.527478±2.51E-05	$0.628125{\pm}0.000384$					
^{36/38} Ar	0.000932±2.01E-05	0.000984±7.39E-06					
40Ar*/40K	0.001715±8.97E-05	0.001654±6.71E-05					
年龄值/Ma	29.27±1.52	28.25±1.14					
注:" ⁴⁰ Ar*代表放射性成因 ⁴⁰ Ar							

表2 三水盆地火山岩地球化学数据分析结果

Table 2	The major, trace and rare earth elements	
---------	--	--

analysis data of the volcanic rocks in Sanshui Basin								
地名	石头村	独岗	地名	石头村	独岗			
样品编号	14SS004	14SS013	样品编号	14SS004	14SS013			
岩性	玄武岩	流纹岩	岩性	玄武岩	流纹岩			
SiO ₂	47.57	70.43	Zr	187	1504			
TiO ₂	2.78	0.24	Nb	53.1	460			
Al_2O_3	17.34	14.24	Cs	0.32	2.54			
Fe_2O_3	12.07	3.28	Ba	318	19			
MnO	0.15	0.09	La	24	175			
MgO	5.06	0.18	Ce	49.7	324			
CaO	9.67	0.17	Pr	6.48	36.8			
Na ₂ O	2.82	5.47	Nd	27.4	125			
K_2O	1.7	4.99	Sm	6.19	24.1			
P_2O_5	0.49	0.01	Eu	2.16	0.21			
总计	99.65	99.1	Gd	5.96	23.3			
Be	1.25	7.74	Tb	0.92	4.21			
Sc	24.3	1.42	Dy	5.01	26			
V	240	1.4	Но	0.91	5.43			
Cr	67.3	1.68	Er	2.4	16.2			
Со	42	9.06	Tm	0.34	2.64			
Ni	40.7	1.07	Yb	1.98	16.4			
Cu	45.6	7.08	Lu	0.29	2.46			
Zn	100	211	Hf	4.56	37.4			
Ga	22.6	44.3	Та	3.13	26.5			
Rb	32.4	325	Pb	2.57	37.6			
Sr	768	8.22	Th	2.55	58			
Y	24.2	159	U	0.73	14.7			





图 4 火山岩岩性判别图 (底图据参考文献[21];盆地火山岩据参考文献[6-7,12,15-16]) Fig. 4 SiO₂ versus K₂O+Na₂O diagram for volcanic rocks

47.57%,TiO₂含量为2.78%(大于2%),K₂O+Na₂O含量为4.54%,且Na₂O>K₂O。该类岩石富集Nb、Ta、Zr、Hf等不相容元素,稀土元素总量为133.74×10⁻⁶,轻稀土元素富集,重稀土元素亏损,La/Yb值为12.12,Ce/Yb值为25.1。在微量元素蛛网图上具有与OIB(洋岛玄武岩)相似的地球化学特征(图5-a)。La/Nb值为0.45,Nb/Zr值为0.28,Th/Nb值为0.05,与地幔热柱玄武岩特征相似^{119-20]}。构造环境投图判别为板内玄武岩(图6-a)。以上特征均与盆地时代较老的玄武岩—致(图5-a),指示伸展拉张的陆内裂谷环境。

独岗流纹岩(图4)SiO₂含量为70.43%,Na₂O为 5.47%,K₂O为4.99%,Al₂O₃为14.24%,属高钾钙碱 性;富集Nb、Ta、Zr、Hf、Th等不相容元素,亏损Ba、 Sr、P、Ti、Eu等;稀土元素总量为781.75×10⁻⁶,轻稀 土元素总量为708.41×10⁻⁶,La/Yb值为10.67,Ce/ Yb值为19.76,具有负Eu异常,构造环境判别图显 示其产出于板内环境(图6-b)。与A型花岗岩特征 相似,在微量元素蛛网图上与红海Afar地幔柱流纹 岩具有一致的分布曲线(图5-b)。以上特征与盆地 时代较老的流纹岩一致,属于板内拉张的陆内裂谷 环境。

综上所述,石头村玄武岩和独岗流纹岩与三水 盆地新生代基性岩和酸性岩的基本特征一致,均产





自板内构造环境,表明它们与前人总结的研究区 古、始新世双峰式火山喷发模式一脉相承^[5-7,15],仍属 于陆内裂谷体系^[1-6]。

4 讨 论

三水盆地古新世一始新世发生大规模的火山 喷发活动,有"三水热点"之称^[5-8]。这种多期次、多 旋回的激烈火山活动在华南地区同时期构造盆地 中"一枝独秀",没有类似的地域可供比拟。盆地基 性和中酸性喷出岩分别与OIB和Afar地区同类型 火山岩具有相似的地球化学特征,可能受控于地幔 柱上涌^[5-6],代表大陆裂谷^[1-6],是大陆边缘发生破裂 的产物。结合南海演化过程及北部陆域的区域地 质特征,推测盆地火山活动的性质和时间(38~ 60Ma),大体相当于Afar于红海开裂,属于威尔逊旋 回中洋盆扩张前的陆内裂谷阶段。

大西洋、红海的演化路径是体现威尔逊旋回的 典型范例,即它们在发生扩张的同时,邻近陆域伴



图6 玄武岩(a)和流纹岩(b)构造环境判别图

(a底图据参考文献[25];数据据参考文献[6-7,12,15-16])和流纹岩构造环境判别图;

b底图据参考文献[26];A型花岗岩数据据参考文献[27-28];其他对比数据据参考文献[5-7,12,15-16,18])

Fig. 6 The discrimination of tectonic setting of basalts (a) and rhyolites (b)

A一岛弧拉斑玄武岩;B一MORB、岛弧拉斑玄武岩、钙碱玄武岩;C一钙碱性玄武岩;D一板内玄武岩;ORG一洋脊花岗岩;

WPG一板内花岗岩;VAG一火山弧花岗岩;syn-COLG一同碰撞花岗岩

有长期的裂谷型火山喷发活动。北大西洋扩张始 于早侏罗世末期,北美大陆边缘保存有至新生代早 期的火山记录,红海扩张发生在渐新世初,其阿拉 伯一侧的火山喷发活动至今未绝。南海被认为是 大西洋式张裂形成的海盆^[29-32],但是根据以往资料, 在南海扩张期间其周缘陆地鲜有岩浆活动记录,即 使如三水盆地这类新生代早期具有陆内裂谷火山 活动特征的火山喷发中心,也在南海扩张之前的始 新世中晚期(38Ma)完全停止了岩浆活动。这一现 象受到研究者的广泛关注^[8-9,33-38],但迄今尚没有合 理的解释。

在南海海域自始新世中晚期至南海开裂期间 基本没有火山记录,洋岛火山岩年龄多集中在3.69~ 18.61Ma^[39-43],基本属于南海扩张停止以后的岩浆活 动的产物,对理解南海早期开裂-扩张机制可能不 具有太大意义。而本文火山岩喷发正值南海早期 扩张阶段,玄武岩和流纹岩构成常见的双峰裂谷模 式,与盆地之前的火山活动较一致,将伴随南海扩 张的陆域火山活动记录拉长至渐新世中期,改变了 南海扩张期间周边陆域无重要火山活动的传统认 识。虽然仅从它们的发现还不足以构建南海早期 的开裂-扩张模式,但是对传统认识已经形成突破, 为正确理解南海早期演化提供了新的材料和视角。

5 结 论

三水盆地渐新世火山岩的发现修正了关于南海早期扩张过程中在其北部陆域缺乏火山喷发记录的传统认识,将双峰式陆内裂谷岩浆活动延续至渐新世中期,即南海早期扩张阶段。这一新的认识对于通过海陆对比进一步分析和总结南海的早期演化模式具有重要意义。

致谢:野外地质工作得到中国石化集团新星石 油广州公司张显球老先生的悉心指导,专业地质路 线向导赵灿辉同志提供帮助,北京大学造山带与地 壳演化教育部重点实验室季建清教授和李晶老师 给予帮助,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] 唐忠驭. 三水盆地火山活动与油气的关系[J]. 石油与天然气地质, 1984, 5(2): 89-100.
- [2] 唐忠驭. 广东三水盆地白垩纪一早第三纪裂谷型火山作用[J]. 广 东地质, 1994, (1): 49-57.

[3]张恺,张清,姚慧君,等.中国海域及邻区中一新生代大地构造演

化特征与裂谷型含油气盆地演化系列[J]. 石油与天然气地质, 1983, 4(4): 353-364.

- [4] 丘元禧, 吴起俊, 吉雄, 等. 中国东南陆缘带及其邻近海域晚中生代, 新生代的裂陷作用[J]. 热带海洋学报, 1986, (2): 5-13.
- [5]董月霞,肖龙,周海民,等.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[J].大地构造与成矿学, 2006, 30(1): 82-92.
- [6]肖龙,周海民,董月霞,等.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[J].大地构造与成矿学,2006,30(1):72-81.
- [7]Zhou H M, Xiao L, Dong Y X, et al. Geochemical and geochronological study of the Sanshui basin bimodal volcanic rock suite, China: Implications for basin dynamics in southeastern China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 34(2): 178–189.
- [8]张维. 三水盆地陆内裂谷火山活动特征与南海早期演化[D]. 中国 地质大学(北京)博士学位论文, 2013.
- [9]Yang S Y, Fang N Q. Geochemical variation of volcanic rocks from the South China Sea and neighboring land: Implication for magmatic process and mantle structure[J]. Acta Oceanologica Sinica 2015, 34(12): 112–124.
- [10]韩琦.南海北部陆缘中、新生代流纹岩基本特征研究[D].中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2017.
- [11]广东省地质矿产局. 广东省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1988.
- [12]朱炳泉,王慧芬,陈毓蔚,等.新生代华夏岩石圈减薄与东亚边 缘海盆构造演化的年代学与地球化学制约研究[J].地球化学, 2002, 31(3): 213-221.
- [13]侯明才,陈洪德,田景春,等.广东三水盆地古近纪岩相古地理 特征及演化[J]. 沉积与特提斯地质, 2007, 27(2): 238-244.
- [14]张显球. 三水盆地白垩系的划分与对比[J]. 石油实验地质, 1984, (1): 36-44.
- [15]Chung S L, Cheng H, Jahn B M, et al. 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[J]. Lithos, 1997, 40(2/4): 203–220.
- [16]Zhu B Q, Wang H F. Nd–Sr–Pb isotopic and chemical evidence for the volcanism with MORB–OIB source characteristics in the Leiqiong area, China[J]. Geochimica, 1989, 3: 193–201.
- [17] 桑海清, 王非, 贺怀宇, 等. 中国 K-Ar 法地质年龄标准物质 ZBH-15 黑云母的研制[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2006, 26(3): 201-217.
- [18]张维,方念乔.广东三水盆地始新世火山岩地球化学特征[J].地 球科学, 2014, 39(1): 37-44.
- [19]武莉娜, 王志畅, 汪云亮. 微量元素 La, Nb, Zr 在判别大地构造 环境方面的应用[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2003, 26 (4): 343-348.
- [20]孙书勤,张成江,赵松江.大陆板内构造环境的微量元素判别[J]. 大地构造与成矿学, 2007, 31(1): 104-109.
- [21]Maitre R W L. A classification of igneous rocks and glossary of terms: recommendations of the International Union of geological

sciences subcommission on the systematics of igneous rocks[M]. Blackwell, 1989.

- [22]Sun S S, Mcdonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society London Special Publications, 1989, 42(1): 313– 345.
- [23]Ayalew D, Yirgu G. Crustal contribution to the genesis of Ethiopian plateau rhyolitic ignimbrites: basalt and rhyolite geochemical provinciality[J]. Journal of the Geological Society, 2003, 160(1): 47–56.
- [24]Ayalew D, Gibson S A. Head-to-tail transition of the Afar mantle plume: Geochemical evidence from a Miocene bimodal basaltrhyolite succession in the Ethiopian Large Igneous Province[J]. Lithos, 2009, 112(3/4): 461-476.
- [25]Pearce J A, Cann J R. Tectonic Setting of Basic Volcanic Rocks determined using Trace Element Analyses[J]. Earth Planet.sci.lett, 1973, 19(2): 290–300.
- [26]Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks[J]. J. Petrol., 1984, 25(4): 956–983.
- [27]Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A- type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. Contributions to Mineralogy & Petrology, 1987, 95(4): 407–419.
- [28]Eby G N. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis[J]. Lithos, 1990, 26(1): 115–134.
- [29]Hayes D E. Margins of the southwest sub- basin of the South China Sea--A frontier exploration target?[J]. Energy, 1985, 10(3): 373-382.
- [30]姚伯初, 万玲, 吴能友. 南海新生代构造演化及岩石圈三维结构 特征[J]. 地质通报, 2005, 24(1): 1-8.
- [31]方念乔,姚伯初,万玲,等.华南和南海北部陆缘岩石圈速度结构特征与沉积盆地成因[J].地球科学-中国地质大学学报,2007,

32(2): 147-154.

- [32]张功成, 王璞珺, 吴景富, 等. 边缘海构造旋回: 南海演化的新模式[J]. 地学前缘, 2015, 22(3): 27-37.
- [33]Zhu B Q, Wang H F, Chen Y W, et al. Geochronological and geochemical constraint on the Cenozoic extension of Cathaysian lithosphere and tectonic evolution of the border sea basins in East Asia[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2004, 24(2): 163–175.
- [34]王慧芬,杨学昌,朱炳泉,等.中国东部新生代火山岩 K-Ar 年代 学及其演化[J].地球化学,1988,(1):1-12.
- [35]朱炳泉, 王慧芬, 杨学昌. 中国东部新生代火山作用时代与构造 环境变迁[]]. 地球化学, 1988, (3): 209-215.
- [36]朱炳泉, 王一先, 王慧芬, 等. 黄山-温州地球化学剖面及廊区解 析[]]. 地球化学, 1997, (2): 1-13.
- [37]朱炳泉, 王慧芬. 雷琼地区 MORB-OIB 过渡型地幔源火山作用 的 Nd-Sr-Pb 同位素证据[J]. 地球化学, 1989, (3): 193-201.
- [38]Zhu B Q, Wang H F. Geochronology of and Nd-Sr-Pb isotopic evidences for mantle source in the ancient subduction zone beneath Sanshui basin, Guangdong Province, China[J]. Chinese J. Geochem., 1989, 8(1): 65-71.
- [39]王贤觉, 吴明清, 梁德华, 等. 南海玄武岩的某些地球化学特征[J]. 地球化学, 1984, (4): 332-340.
- [40]Tu K, Flower M F J, Carlson R W, et al. Magmatism in the South China Basin I: isotopic and trace element evidence for an endogenous dupal mantle component[J]. Chemical Geology, 1992, 97(1/2): 47–63.
- [41]王叶剑,韩喜球,罗照华,等.晚中新世南海珍贝-黄岩海山岩浆 活动及其演化:岩石地球化学和年代学证据[J].海洋学报,2009, 31(4):93-102.
- [42] 鄢全树. 南海新生代碱性玄武岩的特征及其地球动力学意 义[D]. 中国科学院研究生院海洋研究所博士学位论文, 2008.
- [43]李兆麟, 丘志力, 秦社彩, 等. 南海海山玄武岩形成条件研究[J]. 矿物学报, 1991, (4): 325-333.