

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.009>



# 南海北部陆缘古新世埃达克质岩的岩石成因

李思伟<sup>1</sup>, 王璞珺<sup>1\*</sup>, 丁琳<sup>2</sup>, 杜家元<sup>2</sup>

1. 吉林大学地球科学学院, 东北亚生物演化与环境教育部重点实验室, 吉林长春 130061  
2. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东广州 510240

**摘要:** 由于前人对南海北部陆缘新生代早期形成的火山岩岩石类型、成因和地球动力学背景存在不同的认识, 通过对珠江口盆地惠州凹陷钻井揭示的粗面质集块/角砾熔岩、粗面岩、流纹岩和粗面英安岩开展了相关锆石 U-Pb 年代学和全岩地球化学研究. 结果表明研究区新生代火山岩形成年代介于 57.53~59.15 Ma, 靠近古新世(Paleocene)和始新世(Eocene)之间的界限, 落入坦尼特阶(Thanetian). 岩石具有较高的 SiO<sub>2</sub> (64.60%~73.22%)、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (11.86%~16.57%) 含量, 低 MgO (1.16%~1.80%), 高 Sr (305.20×10<sup>-6</sup>~465.50×10<sup>-6</sup>, 平均值为 371.15×10<sup>-6</sup>) 含量, 低 Y (7.47×10<sup>-6</sup>~9.84×10<sup>-6</sup>)、Yb (0.90×10<sup>-6</sup>~1.43×10<sup>-6</sup>) 含量及高 Sr/Y 比值 (35.19~54.55), 富集轻稀土(LREE)、亏损重稀土(HREE), 富集大离子亲石元素(LILE)Ba、K 等、亏损高场强元素(HFSE)Nb、Ta、Ti 和 P 元素, 具有轻微的 Eu 正异常, 显示埃达克质岩石的地球化学特征, 属于钙碱性-高钾钙碱性-钾玄岩系列, 准铝质岩石(A/CNK=0.85~1.04). 这些早古近纪埃达克质岩可能是由先期底侵的镁铁质地壳在石榴石-角闪岩相条件下发生部分熔融作用的产物, 认为南海北部陆缘新生代时期发生的拆沉作用在岩浆形成演化过程中可能起到了重要作用.

**关键词:** 南海; 珠江口盆地; 新生代火山岩; 锆石 U-Pb 年代学; 地球化学; 埃达克岩.

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2020)11-4091-27

收稿日期: 2019-12-25

## Petrogenesis of Paleocene Adakite-Like Rocks in Northern Margin of the South China Sea

Li Siwei<sup>1</sup>, Wang Pujun<sup>1\*</sup>, Ding Lin<sup>2</sup>, Du Jiayuan<sup>2</sup>

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Key Laboratory for Evolution of Past Life and Environment in Northeast Asia, Ministry of Education, Changchun 130061, China  
2. Shenzhen Branch of China National Offshore Oil Corporation, Guangzhou 510240, China

**Abstract:** There are different understandings on the types, genesis and geodynamic mechanism of the volcanic rocks formed in the Early Cenozoic in the northern margin of the South China Sea. In this paper, it presents zircon U-Pb data and geochemical data for the trachytic agglomerate or breccia lava, trachyte, rhyolite and trachydacite revealed by drilling in Huizhou sag of the Pearl River Mouth basin. The results show that the Cenozoic volcanic rocks in the study area were formed at 57.53–59.15 Ma, near the boundary between Paleocene and Eocene, and fell into the Thanetian stage. These rocks are characterized by high SiO<sub>2</sub> (64.60%–73.22%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (11.86%–16.57%), low MgO (1.16%–1.80%), high Sr (305.20×10<sup>-6</sup>–465.50×10<sup>-6</sup>, 371.15×10<sup>-6</sup> on average), low Y (7.47×10<sup>-6</sup>–9.84×10<sup>-6</sup>), Yb (0.90×10<sup>-6</sup>–1.43×10<sup>-6</sup>) and high Sr/Y ratios (35.19–54.55). They are enriched in LREE and depleted in HREE, together with enrichment in large-ion lithophile elements (LILE) Ba, K and depletion in high field strength elements (HFSE) Nb, Ta, Ti and P, as well as small positive Eu anomalies, similar to those of adakite. These rocks are

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(Nos. 41790453, 41472304); 吉林省自然科学基金项目(No. 20170101001JC).

**作者简介:** 李思伟 (1989–), 男, 博士研究生, 矿产普查与勘探专业. ORCID: 0000-0003-2294-4355. E-mail: lisiwei4869@163.com

**\*通讯作者:** 王璞珺, E-mail: wangpj@jlu.edu.cn

**引用格式:** 李思伟, 王璞珺, 丁琳, 等, 2020. 南海北部陆缘古新世埃达克质岩的岩石成因. 地球科学, 45(11):4091–4117.

calc-alkaline, high-K calc-alkaline and shoshonite metaluminous ( $A/CNK=0.85-1.04$ ). The Early Paleogene adakites are interpreted as the products of partial melting of newly underplated mafic lower crust under garnet-amphibolite facies conditions. It is concluded that the Cenozoic delamination in the northern margin of the South China Sea plays an important role in the formation and evolution of magma.

**Key words:** South China Sea; Pearl River Mouth basin; Cenozoic volcanic rock; zircon U-Pb chronology; geochemistry; adakite.

## 0 引言

岩浆作用作为研究岩石圈构造演化的“窗口”与“探针”,通过研究其发生时间、位置以及熔融产物的类型和组成,可以再现当时的构造演化历史.古太平洋板块(伊佐奈歧板块)在中生代晚侏罗—白垩纪时期NW向俯冲消亡于欧亚板块之下,在早白垩世末洋盆完全闭合形成俯冲增生带(Zhou *et al.*, 2008).古近纪早期,南海北部陆缘发生伸展扩张,在地表形成一系列边缘海盆.上述过程中,南海北部陆缘发生了广泛而强烈的岩浆活动,形成了遍布东南沿海地区的种类繁多的火成岩(Li, 2000).近年来的研究表明,在珠江口盆地广泛分布着火山岩,且时间跨度较大,从早白垩纪持续到新近纪,其中中新世之后( $<17$  Ma)的火山岩主要以基性玄武岩为主,被认为与“海南地幔柱”直接相关(Flower *et al.*, 1992),而关于古近纪盆地形成初期喷发的中酸性火山岩由于埋深较深、取样困难,相关岩石学、地球化学和地球动力学机制等方面研究相对较少.前人在研究上述盆地初期形成的火山岩过程中已经注意到其与南海盆地的形成密切相关,并提出了一些火成岩形成时间和岩石属性在空间上的变化规律(Yan *et al.*, 2006).然而,作为中国东部中—新生代伸展构造体制下发育的这些盆地,是由于印—澳板块与欧亚板块之间的碰撞引起被动拉开的走滑—伸展型盆地(朱炳泉等, 2002),还是受太平洋板块俯冲影响形成的弧后盆地(Northrup *et al.*, 1995),或者是由地幔柱上涌导致的主动型大陆裂谷盆地(Zhou *et al.*, 2009),这些假说都需要更多的证据予以证实.本次研究选择珠江口盆地钻井钻遇的火山岩为研究对象,通过系统取样、岩矿鉴定、全岩主、微量元素地球化学和LA-ICP-MS锆石U-Pb定年等分析测试手段,阐明了南海北部陆缘火山岩的地球化学特征以及确定了其形成时代,讨论了这些南海海盆深部岩浆作用形成的火山岩的岩石成因和地球动力学背景.

## 1 区域地质背景与样品描述

珠江口盆地呈NE-SW走向,东西长约为800 km,面积约为 $2.0 \times 10^5$  km<sup>2</sup>,由北向南可划分出北部隆起带、北部拗陷带、中央隆起带、南部拗陷带和南部隆起带5个NE向的一级构造单元(图1),形成“二拗三隆”的构造格局(林畅松等, 2018).其中北部拗陷带自西向东依次为珠三拗陷和珠一拗陷,惠州凹陷位于珠一拗陷中间部位,研究区就位于惠州凹陷内(图1).珠江口盆地地层自下而上为古新统神狐组、始新统文昌组、渐新统恩平组、渐新统珠海组、中新统珠江组、中新统韩江组、中新统粤海组和上新统万山组(图2a).珠江口盆地新生代的构造运动强烈,经历过5次重要的构造运动,分别为珠琼运动一幕、珠琼运动二幕、南海运动、白云运动和东沙运动(董冬冬等, 2009;张远泽等, 2019).构造演化大体可分为裂谷期和拗陷期两大阶段:南海运动以前为裂谷期,伸展作用强烈;南海运动以后为后裂谷热沉降期,伸展作用减弱.结合构造运动可进一步细分为:古新世—始新世时期的陆内裂谷阶段,渐新世早期的裂谷—漂移转换阶段,渐新世晚期—中新世早期的断块拗陷阶段和中渐新世以来的拗陷沉降阶段.

W1和W2井位于惠州凹陷中,井位靠近凹陷南部边界.W1井完钻深度为4 643 m,钻井揭示火山岩厚度为233 m,W2井完钻深度为4 696 m,钻井揭示火山岩厚度为265 m,井位分布见图1.本文所研究火山岩的岩矿鉴定样品、锆石U-Pb测年样品和地球化学样品均采自W1井和W2井(图2b),W1井的样品为岩屑样品,W2井的样品为岩心样品,U-Pb锆石测年与地球化学采样点深度见表1和表2.

## 2 分析方法

### 2.1 年代学分析方法

锆石U-Pb测年样品的破碎和锆石分选在河北省廊坊区域地质矿产调查研究所地质实验室完成,先机械性粉碎样品至80目,重力分选后利用矿物介

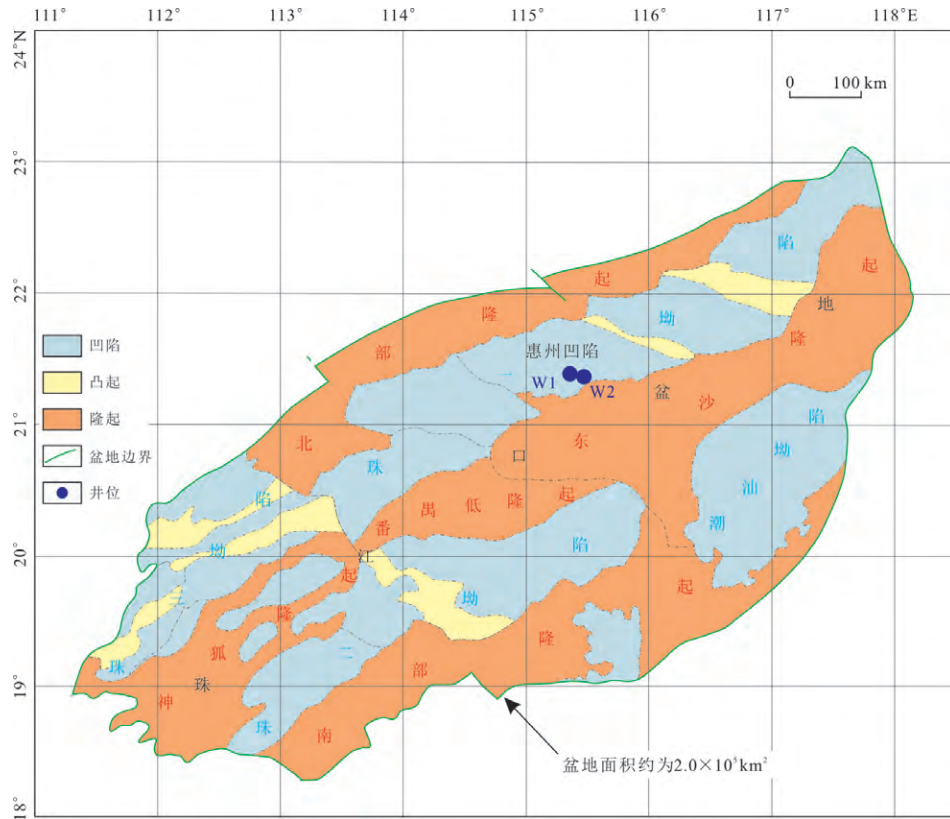


图 1 珠江口盆地构造单元分区

Fig.1 Structural divisions of the Pearl River Mouth basin

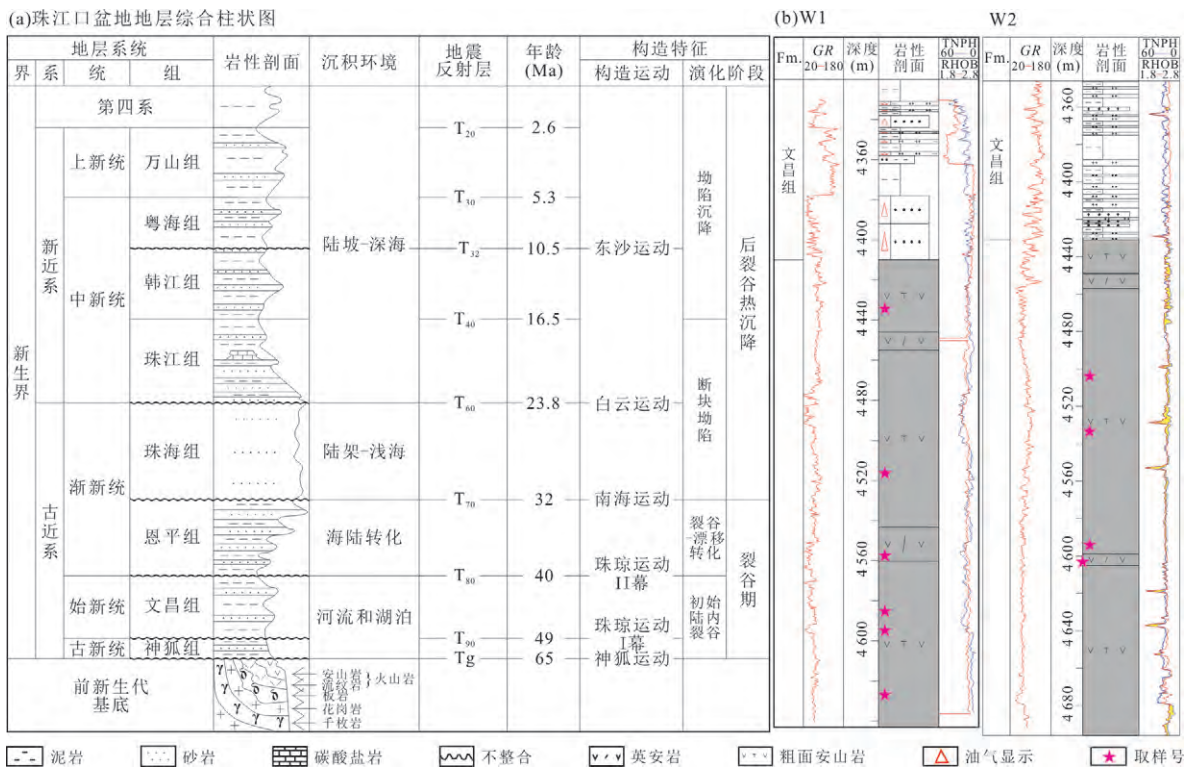


图 2 珠江口盆地地层序列柱状图

Fig. 2 Stratigraphic column of the Pearl River Mouth basin

a. 据 Quan *et al.* (2015); b. 取样井岩性柱状图(井位见图 1); Fm. 地层系统; GR. 自然伽玛(API); TNPH. 补偿中子(%); RHOB. 密度(g/cm<sup>3</sup>)

电分选仪进行磁选.在双目镜下把粒度大、晶型完好、裂隙与包裹体少的锆石颗粒挑选出来.将优选出的锆石颗粒粘在双面胶上,用无色透明的环氧树脂固定,待环氧树脂充分固化后抛光制成靶样,然后对其进行透射光、反射光和阴极发光(CL)图像的采集.参照锆石 CL 图像,选择内部结构均匀、环带特征清楚且无包裹体裂隙的区域进行分析测试.

锆石 U-Pb 年龄分析在吉林大学东北亚矿产资源评价自然资源部重点实验室完成.使用 Agilent 7900 型 ICP-MS 仪器和 COMPEX Pro 型 193 nm ArF 准分子激光器联机进行锆石 LA-ICP-MS 测试,激光斑束直径为 32  $\mu\text{m}$ ,频率为 7 Hz.实验中采用高纯氦气作为剥蚀物质的载气,用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST610 进行仪器最佳化,采用哈佛大学国际标准锆石 91500(约 1 064 Ma)作为校正外标,以  $^{29}\text{Si}$  为内标校正锆石微量元素含量,分析流程参照 Yuan *et al.* (2004).对分析数据的离线处理(样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量、U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算等)采用 ICPMSDataCal 9.0 软件完成,详细的仪器操作与数据处理方法见 Liu *et al.* (2008).采用 Andersen (2002) 的方法对结果进行普通铅校正,年龄结果处理(包括谱和图的绘制与加权平均年龄计算等)利用 Isoplot 4.15 软件完成(Ludwig, 2003).同位素比值和年龄误差为  $1\sigma$ ,锆石分析结果见表 1,代表性锆石 CL 图像见图 4,年龄谱和图见图 5.

## 2.2 主量元素和微量元素分析方法

为了进一步探讨珠江口盆地的火山岩形成机理及构造背景,本文选取代表性火山岩样品粗面岩、流纹岩和粗面英安岩进行地球化学研究.在对样品进行显微镜下矿物组成与结构观察后,挑选未蚀变或蚀变微弱的样品开展测试分析.先将岩石粉碎到 1~2 cm 大小,经过超声波清洗再晾干后在放大镜下将风化和蚀变的岩屑剔除,剩余的新鲜岩屑在玛瑙破碎机中粉碎到 20 目以下,从中缩分出一半在玛瑙球磨机中研磨至 200 目以下.主量元素由吉林大学测试科学实验中心完成,用 GB/T14506.28-2010 硅酸盐岩石化学分析方法测定,测试仪器为 X 射线荧光光谱仪,精度优于 5%.稀土微量元素的测试方法为 Q/JUTC010-2007 电感耦合等离子体质谱仪分析方法,测试仪器为 ICP-MS,精度优于 5%.

## 3 分析结果

### 3.1 岩性特征

依据钻井岩心观察及显微镜下岩矿薄片鉴定结果,得出珠江口盆地惠州凹陷研究区内主要发育以下 4 种火山岩岩石类型:

粗面岩,斑状结构,斑晶主要为碱性长石(含量约为 20%),基质为隐晶质,在显微镜下观察到存在于中性长石中的环带结构(图 3a),以及粗面岩的粗面结构(细条状钾长石微晶略呈平行排列)(图 3b),具有明显的喷出岩特征.

流纹岩,斑状结构,斑晶为石英和碱性长石(15%),还有少量斜长石(约为 5%),基质为霏细质-隐晶质,局部观察到酸性火山熔岩历经脱玻化作用形成的球粒结构(图 3c),为岩浆过冷却所形成的产物.

粗面英安岩,斑状结构,斑晶主要为碱性长石(含量为 10%~15%),斜长石(约为 10%)基质为隐晶质,观察到斜长石斑晶中间为空心,多为绿泥石或玻璃质充填,属于“中空骸晶结构”(图 3d),指示该区岩石具有水下喷发成因.

粗面质集块/角砾熔岩,灰色,集块、角砾结构,集块最大直径可达 850 mm,具有“堆砌构造”,表明这套火山岩就位于近火山口环境.显微镜下观察到斑状结构,局部见有聚斑结构,斑晶主要为碱性长石(含量为 15%~20%),基质为隐晶质(图 3e, 3f).

### 3.2 锆石 U-Pb 年代学特征

本文对珠江口盆地 W2 井中的流纹岩(a)、流纹岩(b)和粗面英安岩(c)以及 W1 井中的粗面岩(d)、粗面岩(e)和粗面岩(f),总计 6 个火山岩样品进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年,分析结果见表 1 和图 4.

珠江口盆地惠州凹陷研究区火山岩锆石大多数晶型完好,为自形一半自形长柱状、短柱状或粒状,锆石中未见明显的继承核,显示清晰的岩浆振荡生长环带结构,暗示其岩浆成因(Koschek, 1993),颗粒大小差别较大,长度介于 50~200  $\mu\text{m}$ ,集中于 80~150  $\mu\text{m}$ ,长宽比介于 1:1~1:3.

取自珠江口盆地惠州凹陷研究区 W2 井 4 602.29 m 的流纹岩(a)样品分析了 33 颗锆石,Th/U 比值为 0.77~1.30(表 1),其定年结果显示,锆石测点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值介于  $(55.3\pm 1.6\sim 62.5\pm 2.0)$  Ma,其加权平均年龄为  $58.33\pm 0.75$  Ma

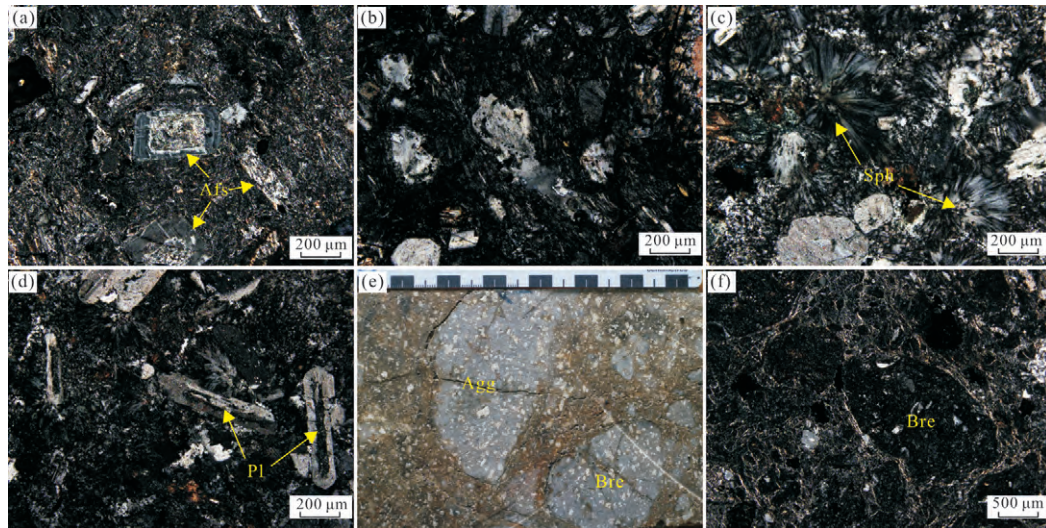


图 3 珠江口盆地惠州凹陷火山岩典型岩性特征

Fig. 3 Representative volcanic rock associations of the Huizhou sag in the Pearl River Mouth basin

a. 粗面岩, 碱性长石环带结构 (W1, 4 416 m), 正交偏光; b. 粗面岩, 粗面结构 (W1, 4 437.81 m), 正交偏光; c. 流纹岩, 脱玻化形成的球粒结构 (W1, 4 448 m), 正交偏光; d. 粗面英安岩, 斜长石中空骸晶结构 (W1, 4 448 m), 正交偏光; e. 粗面质集块熔岩, 堆砌构造 (W2, 4 604 m), 宏观照片; f. 粗面质角砾熔岩, 角砾结构 (W1, 4 410 m), 正交偏光. Afs. 碱性长石 (Alkali feldspar); Pl. 斜长石 (Plagioclase); Bre. 角砾 (Breccia); Agg. 集块 (Agglomerate); Sph. 球粒构造 (Spherulitic texture)

(MSWD=0.83) (图 5a); W2 井 4 602.49 m 的流纹岩 (b) 样品分析了 34 颗锆石, Th/U 比值介于 0.49~1.37, 该组锆石测点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为  $(55.7\pm 1.8\sim 63.0\pm 1.9)$  Ma, 加权平均年龄为  $59.15\pm 0.77$  Ma (MSWD=0.83) (图 5b); W2 井 4 530.5 m 粗面英安岩样品 (c) 分析了 32 颗锆石, 其 Th/U 比值为 0.83~1.39, 所测定的锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值介于  $(55.4\pm 1.8\sim 63.7\pm 2.0)$  Ma, 其加权平均年龄为  $57.53\pm 0.72$  Ma (MSWD=0.69) (图 5c); W1 井 4 594.5 m 粗面岩样品 (d) 分析了 63 颗锆石, 锆石的 Th/U 比值介于 0.64~1.32, 锆石测点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为  $(55.1\pm 1.6\sim 64.8\pm 1.9)$  Ma, 其加权平均年龄为  $58.01\pm 0.66$  Ma

(MSWD=0.69) (图 5d); W1 井 4 600.5 m 粗面岩样品 (e) 分析了 68 颗锆石, 其 Th/U 比值为 0.52~1.26, 所测锆石的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值介于  $(54.3\pm 1.6\sim 64.8\pm 1.9)$  Ma, 其加权平均年龄为  $59.07\pm 0.59$  Ma (MSWD=0.38) (图 5e); W1 井的 4 624.5 m 粗面岩样品 (f) 分析了 57 颗锆石, Th/U 比值为 0.58~1.41 (表 1), 所测锆石的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为  $(55.8\pm 1.9\sim 63.4\pm 1.9)$  Ma, 其加权平均年龄为  $58.78\pm 0.61$  Ma (MSWD=0.58) (图 5f).

上述测年工作获得的 6 组年代学数据集中在 57.53~59.15 Ma, 代表了岩浆的侵位时间, 说明珠江口盆地惠州凹陷新生代火山岩岩浆结晶年龄时代为早古近纪古新世.

表 1 珠江口盆地惠州凹陷火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results of the volcanic rocks of the Huizhou sag in the Pearl River Mouth basin

测点号	含量 ( $10^{-6}$ )		Th/U	同位素比值						同位素年龄 (Ma)					
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$
W2 井, 深度为 4 602.29 m, 流纹岩 (a)															
4602.29-1	100.77	109.28	1.08	0.051 98	0.005 04	0.068 80	0.006 57	0.009 60	0.000 30	284.6	207.13	67.6	6.24	61.6	1.93
4602.29-2	238.30	184.16	0.77	0.050 34	0.003 36	0.060 16	0.004 00	0.008 67	0.000 24	210.7	147.74	59.3	3.83	55.6	1.52
4602.29-3	154.11	138.62	0.90	0.051 84	0.003 91	0.064 22	0.004 79	0.008 99	0.000 26	278.4	163.67	63.2	4.57	57.7	1.66

续表1

测点号	含量 ( $10^{-6}$ )		Th/ U	同位素比值						同位素年龄 (Ma)					
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/$ $^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$ $^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/$ $^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$ $^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$ $^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/$ $^{238}\text{U}$	$1\sigma$
4602.29-4	98.10	115.43	1.18	0.055 69	0.004 67	0.070 73	0.005 85	0.009 21	0.000 28	439.7	176.90	69.4	5.54	59.1	1.78
4602.29-5	131.68	144.20	1.10	0.048 30	0.003 92	0.062 01	0.004 99	0.009 31	0.000 27	114.0	181.22	61.1	4.77	59.7	1.72
4602.29-6	71.30	92.35	1.30	0.050 17	0.004 93	0.067 37	0.006 52	0.009 74	0.000 31	202.9	213.19	66.2	6.20	62.5	1.96
4602.29-7	69.79	85.54	1.23	0.052 00	0.006 64	0.066 01	0.008 22	0.009 21	0.000 36	285.4	268.31	64.90	7.83	59.1	2.28
4602.29-8	71.35	72.95	1.02	0.054 75	0.005 87	0.067 12	0.007 08	0.008 89	0.000 30	402.1	223.90	66.0	6.73	57.1	1.90
4602.29-9	132.74	142.10	1.07	0.051 45	0.003 98	0.062 70	0.004 80	0.008 84	0.000 26	260.9	168.50	61.7	4.58	56.7	1.66
4602.29-10	90.72	98.02	1.08	0.043 16	0.004 59	0.053 97	0.005 69	0.009 07	0.000 27	0.1	86.25	53.4	5.49	58.2	1.74
4602.29-11	412.78	335.60	0.81	0.049 39	0.002 42	0.061 64	0.003 05	0.009 05	0.000 23	166.6	110.73	60.7	2.91	58.1	1.50
4602.29-12	62.46	78.42	1.26	0.054 36	0.005 64	0.070 74	0.007 19	0.009 44	0.000 32	386.1	217.74	69.4	6.81	60.6	2.07
4602.29-13	141.84	139.50	0.98	0.046 74	0.003 70	0.058 82	0.004 61	0.009 13	0.000 27	35.7	179.72	58.0	4.42	58.6	1.69
4602.29-14	76.09	88.24	1.16	0.059 57	0.005 97	0.072 77	0.007 12	0.008 86	0.000 30	588.0	203.65	71.3	6.74	56.9	1.94
4602.29-15	76.20	90.08	1.18	0.048 45	0.005 15	0.060 53	0.006 35	0.009 06	0.000 29	121.5	233.00	59.7	6.08	58.1	1.87
4602.29-16	213.65	172.60	0.81	0.055 31	0.004 09	0.071 85	0.005 24	0.009 42	0.000 28	425.1	156.95	70.5	4.97	60.4	1.77
4602.29-17	91.38	103.95	1.14	0.048 47	0.004 48	0.061 79	0.005 63	0.009 25	0.000 29	122.4	204.33	60.9	5.39	59.3	1.82
4602.29-18	90.19	113.01	1.25	0.051 26	0.005 22	0.066 36	0.006 63	0.009 39	0.000 31	252.3	217.98	65.2	6.31	60.3	2.00
4602.29-19	51.00	55.89	1.10	0.066 03	0.007 17	0.086 51	0.009 15	0.009 50	0.000 35	807.2	212.32	84.3	8.55	61.0	2.23
4602.29-20	89.54	105.04	1.17	0.080 22	0.005 07	0.103 44	0.006 41	0.009 35	0.000 28	1 202.4	119.64	99.9	5.90	60.0	1.76
4602.29-21	108.72	128.36	1.18	0.064 31	0.004 30	0.076 95	0.005 07	0.008 68	0.000 25	751.9	135.07	75.3	4.78	55.7	1.60
4602.29-22	81.78	102.12	1.25	0.056 21	0.005 19	0.071 11	0.006 45	0.009 18	0.000 29	459.7	193.55	69.7	6.12	58.9	1.88
4602.29-23	101.15	120.29	1.19	0.050 87	0.004 24	0.063 24	0.005 21	0.009 02	0.000 27	234.9	181.78	62.3	4.98	57.9	1.71
4602.29-24	63.90	73.66	1.15	0.050 66	0.005 58	0.065 90	0.007 13	0.009 44	0.000 32	225.2	235.66	64.8	6.80	60.5	2.03
4602.29-25	212.21	180.68	0.85	0.046 00	0.003 29	0.055 24	0.003 92	0.008 71	0.000 24	0.1	161.45	54.6	3.77	55.9	1.56
4602.29-26	74.61	85.12	1.14	0.047 32	0.005 11	0.061 13	0.006 51	0.009 37	0.000 30	64.8	239.51	60.2	6.23	60.1	1.95

续表1

测点号	含量 ( $10^{-6}$ )		Th/ U	同位素比值						同位素年龄 (Ma)					
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/$ $^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$ $^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/$ $^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$ $^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$ $^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/$ $^{238}\text{U}$	$1\sigma$
4602.29-27	138.37	137.79	1.00	0.047 23	0.003 87	0.057 48	0.004 65	0.008 83	0.000 26	60.3	184.82	56.7	4.47	56.7	1.67
4602.29-28	91.93	105.34	1.15	0.069 71	0.005 05	0.087 32	0.006 21	0.009 09	0.000 28	919.7	142.34	85.0	5.80	58.3	1.76
4602.29-29	123.85	131.89	1.06	0.052 22	0.004 37	0.065 32	0.005 39	0.009 07	0.000 27	295.0	179.78	64.3	5.14	58.2	1.75
4602.29-30	186.22	160.67	0.86	0.049 60	0.003 93	0.058 95	0.004 63	0.008 62	0.000 25	176.5	174.90	58.2	4.44	55.3	1.59
4602.29-31	149.68	161.57	1.08	0.048 11	0.003 60	0.060 07	0.004 45	0.009 06	0.000 26	104.6	167.97	59.2	4.26	58.1	1.69
4602.29-32	97.33	117.53	1.21	0.055 65	0.005 14	0.070 17	0.006 36	0.009 15	0.000 30	438.3	193.72	68.9	6.03	58.7	1.90
4602.29-33	107.45	122.85	1.14	0.052 46	0.004 31	0.063 12	0.005 11	0.008 73	0.000 26	305.6	176.22	62.1	4.88	56.0	1.69
W2井,深度为4 602.49 m,流纹岩 (b)															
4602.49-1	160.60	136.61	0.85	0.059 57	0.004 76	0.072 31	0.005 65	0.008 80	0.000 28	588.0	164.37	70.9	5.35	56.5	1.80
4602.49-2	231.83	153.42	0.66	0.052 55	0.003 84	0.068 01	0.004 92	0.009 39	0.000 27	309.2	157.61	66.8	4.67	60.2	1.76
4602.49-3	109.88	129.39	1.18	0.054 56	0.004 42	0.073 82	0.005 89	0.009 81	0.000 30	394.1	172.23	72.3	5.57	63.0	1.92
4602.49-4	134.82	126.20	0.94	0.051 05	0.003 91	0.065 43	0.004 94	0.009 29	0.000 28	243.2	167.51	64.3	4.71	59.6	1.79
4602.49-5	166.56	144.44	0.87	0.050 48	0.003 73	0.067 77	0.004 94	0.009 74	0.000 29	217.0	162.28	66.6	4.7	62.5	1.84
4602.49-6	238.89	162.22	0.68	0.049 09	0.005 27	0.062 26	0.006 55	0.009 20	0.000 32	151.9	233.83	61.3	6.26	59.0	2.03
4602.49-7	111.89	119.14	1.06	0.052 83	0.004 54	0.067 61	0.005 73	0.009 28	0.000 29	321.5	183.90	66.4	5.45	59.6	1.83
4602.49-8	88.06	99.65	1.13	0.054 36	0.005 01	0.070 14	0.006 36	0.009 36	0.000 30	386.0	194.90	68.8	6.04	60.0	1.91
4602.49-9	153.29	156.72	1.02	0.096 20	0.004 48	0.125 67	0.005 80	0.009 47	0.000 26	1 551.6	85.07	120.2	5.23	60.8	1.69
4602.49-10	109.02	123.56	1.13	0.046 86	0.003 95	0.058 29	0.004 86	0.009 02	0.000 27	41.9	190.41	57.5	4.66	57.9	1.74
4602.49-11	113.33	101.87	0.90	0.069 89	0.005 49	0.089 12	0.006 85	0.009 25	0.000 29	925.0	153.56	86.7	6.39	59.4	1.87
4602.49-12	89.09	116.05	1.30	0.049 00	0.004 03	0.061 91	0.005 02	0.009 16	0.000 28	147.6	182.17	61.0	4.8	58.8	1.78
4602.49-13	97.28	113.83	1.17	0.050 35	0.004 70	0.063 28	0.005 81	0.009 12	0.000 29	211.0	203.04	62.3	5.55	58.5	1.86
4602.49-14	92.29	107.00	1.16	0.049 63	0.004 41	0.065 98	0.005 79	0.009 64	0.000 30	177.7	195.07	64.9	5.51	61.9	1.90
4602.49-15	284.43	138.19	0.49	0.062 95	0.004 08	0.081 86	0.005 24	0.009 43	0.000 27	706.6	132.17	79.9	4.92	60.5	1.75
4602.49-16	116.45	121.84	1.05	0.046 46	0.004 05	0.060 88	0.005 25	0.009 51	0.000 29	21.3	197.2	60.0	5.03	61.0	1.83

续表1

测点号	含量 ( $10^{-6}$ )		Th/ U	同位素比值						同位素年龄 (Ma)					
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/$ $^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$ $^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/$ $^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$ $^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$ $^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/$ $^{238}\text{U}$	$1\sigma$
4602.49-17	399.48	234.58	0.59	0.055 63	0.003 21	0.068 73	0.003 94	0.008 96	0.000 25	437.5	123.71	67.5	3.74	57.5	1.59
4602.49-18	100.16	112.47	1.12	0.047 78	0.004 06	0.061 70	0.005 18	0.009 37	0.000 28	87.6	190.88	60.8	4.95	60.1	1.80
4602.49-19	102.85	125.86	1.22	0.051 70	0.005 08	0.066 21	0.006 38	0.009 29	0.000 31	272.3	210.19	65.1	6.08	59.6	1.97
4602.49-20	78.01	96.00	1.23	0.051 23	0.005 47	0.068 99	0.007 23	0.009 77	0.000 33	251.0	228.03	67.7	6.86	62.7	2.13
4602.49-21	117.75	121.60	1.03	0.050 40	0.004 20	0.064 22	0.005 28	0.009 24	0.000 28	213.6	182.30	63.2	5.04	59.3	1.78
4602.49-22	97.86	104.80	1.07	0.040 44	0.004 41	0.051 83	0.005 59	0.009 30	0.000 29	0.1	0	51.3	5.40	59.6	1.87
4602.49-23	78.12	105.05	1.34	0.067 30	0.004 95	0.086 81	0.006 22	0.009 36	0.000 30	847.2	145.91	84.5	5.82	60.0	1.89
4602.49-24	131.39	137.29	1.04	0.052 83	0.004 69	0.063 18	0.005 50	0.008 67	0.000 28	321.3	189.67	62.2	5.26	55.7	1.77
4602.49-25	143.78	147.76	1.03	0.044 01	0.003 62	0.053 82	0.004 38	0.008 87	0.000 26	0.1	79.81	53.2	4.22	56.9	1.67
4602.49-26	76.73	105.23	1.37	0.076 74	0.005 31	0.095 68	0.006 47	0.009 04	0.000 28	1 114.4	132.24	92.8	5.99	58.0	1.78
4602.49-27	148.05	126.41	0.85	0.048 67	0.004 20	0.062 88	0.005 35	0.009 37	0.000 29	131.9	191.25	61.9	5.11	60.1	1.84
4602.49-28	113.13	114.37	1.01	0.067 13	0.004 49	0.086 61	0.005 7	0.009 36	0.000 28	841.8	133.45	84.3	5.32	60.0	1.78
4602.49-29	244.33	184.65	0.76	0.049 01	0.003 50	0.061 08	0.004 33	0.009 04	0.000 26	148.2	159.57	60.2	4.14	58.0	1.66
4602.49-30	77.04	96.62	1.25	0.079 49	0.006 68	0.104 11	0.008 50	0.009 50	0.000 32	1 184.3	157.70	100.6	7.82	61.0	2.04
4602.49-31	87.70	105.93	1.21	0.049 84	0.004 26	0.062 25	0.005 24	0.009 06	0.000 28	187.6	187.50	61.3	5.01	58.1	1.78
4602.49-32	109.76	120.84	1.10	0.050 98	0.005 05	0.063 84	0.006 20	0.009 08	0.000 31	239.9	213.44	62.8	5.92	58.3	1.95
4602.49-33	76.85	103.79	1.35	0.048 15	0.004 18	0.06 39	0.005 46	0.009 63	0.000 30	106.7	193.30	62.9	5.21	61.8	1.91
4602.49-34	177.45	164.56	0.93	0.050 26	0.003 31	0.062 76	0.004 10	0.009 06	0.000 26	207.2	146.08	61.8	3.92	58.1	1.63
W2井, 深度为4 530.5 m, 粗面英安岩 (c)															
4530.5-1	122.73	124.33	1.01	0.044 77	0.004 85	0.055 25	0.005 88	0.008 95	0.000 30	0.1	177.38	54.6	5.66	57.4	1.92
4530.5-2	195.26	177.79	0.91	0.120 54	0.007 44	0.145 09	0.008 54	0.008 73	0.000 28	1 964.3	106.13	137.6	7.57	56.0	1.82
4530.5-3	200.28	190.97	0.95	0.068 17	0.003 87	0.081 94	0.004 59	0.008 72	0.000 24	873.8	113.53	80.0	4.31	56.0	1.57
4530.5-4	89.01	108.11	1.21	0.127 03	0.007 17	0.174 03	0.009 44	0.009 94	0.000 31	2 057.3	96.33	162.9	8.17	63.7	1.96
4530.5-5	83.48	106.72	1.28	0.128 13	0.006 78	0.167 67	0.008 56	0.009 49	0.000 29	2 072.5	90.31	157.4	7.44	60.9	1.83



续表1

测点号	含量 ( $10^{-6}$ )		Th/ U	同位素比值						同位素年龄 (Ma)					
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/$ $^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$ $^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/$ $^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$ $^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$ $^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/$ $^{238}\text{U}$	$1\sigma$
4530.5-6	84.82	101.07	1.19	0.045 85	0.004 44	0.055 27	0.005 29	0.008 74	0.000 27	0.1	208.35	54.6	5.09	56.1	1.71
4530.5-7	166.97	158.20	0.95	0.051 31	0.003 68	0.064 02	0.004 53	0.009 05	0.000 26	254.9	156.81	63.0	4.32	58.1	1.67
4530.5-8	109.03	115.18	1.06	0.049 56	0.004 28	0.063 20	0.005 37	0.009 25	0.000 28	174.3	189.79	62.2	5.13	59.4	1.81
4530.5-9	226.89	208.22	0.92	0.094 38	0.004 65	0.115 91	0.005 61	0.008 91	0.000 25	1 515.7	90.29	111.4	5.11	57.2	1.61
4530.5-10	77.58	107.24	1.38	0.140 06	0.007 15	0.184 93	0.009 09	0.009 58	0.000 29	2 228.0	85.85	172.3	7.79	61.4	1.84
4530.5-11	102.53	125.46	1.22	0.048 37	0.004 20	0.060 62	0.005 19	0.009 09	0.000 28	117.5	192.74	59.8	4.97	58.3	1.76
4530.5-12	101.51	125.22	1.23	0.102 10	0.006 75	0.129 31	0.008 23	0.009 19	0.000 30	1 662.6	117.62	123.5	7.40	58.9	1.90
4530.5-13	165.12	151.95	0.92	0.047 10	0.003 50	0.058 51	0.004 29	0.009 01	0.000 26	53.9	168.70	57.7	4.12	57.8	1.69
4530.5-14	74.34	94.03	1.26	0.050 53	0.005 22	0.063 50	0.006 46	0.009 11	0.000 30	219.5	222.75	62.5	6.17	58.5	1.90
4530.5-15	134.63	131.27	0.98	0.046 11	0.004 10	0.058 10	0.005 11	0.009 14	0.000 27	3.2	201.35	57.3	4.90	58.7	1.75
4530.5-16	191.97	160.13	0.83	0.047 15	0.003 61	0.057 04	0.004 31	0.008 77	0.000 26	56.2	173.43	56.3	4.14	56.3	1.65
4530.5-17	96.30	115.76	1.20	0.059 82	0.005 19	0.071 23	0.006 07	0.008 64	0.000 27	597.2	177.74	69.9	5.75	55.4	1.75
4530.5-18	122.21	132.20	1.08	0.044 62	0.004 17	0.053 81	0.004 96	0.008 75	0.000 27	0.1	137.56	53.2	4.78	56.1	1.70
4530.5-19	128.29	118.85	0.93	0.045 33	0.004 43	0.056 39	0.005 44	0.009 02	0.000 28	0.1	183.57	55.7	5.23	57.9	1.78
4530.5-20	94.17	125.25	1.33	0.047 61	0.004 26	0.058 88	0.005 20	0.008 97	0.000 27	79.3	200.54	58.1	4.99	57.6	1.75
4530.5-21	67.67	90.23	1.33	0.051 55	0.005 50	0.063 93	0.006 71	0.009 00	0.000 30	265.4	227.24	62.9	6.40	57.7	1.89
4530.5-22	115.39	129.90	1.13	0.046 79	0.004 25	0.058 69	0.005 27	0.009 10	0.000 28	38.3	204.46	57.9	5.06	58.4	1.76
4530.5-23	120.48	116.45	0.97	0.061 53	0.004 53	0.079 34	0.00573	0.009 35	0.000 28	657.7	150.44	77.5	5.39	60.0	1.82
4530.5-24	149.23	152.26	1.02	0.048 87	0.003 74	0.061 52	0.00465	0.009 13	0.000 27	141.4	170.34	60.6	4.45	58.6	1.72
4530.5-25	184.56	170.37	0.92	0.052 65	0.004 00	0.065 37	0.004 90	0.009 01	0.000 27	313.7	163.66	64.3	4.67	57.8	1.72
4530.5-26	151.94	166.63	1.10	0.051 85	0.004 24	0.063 02	0.005 07	0.008 81	0.000 27	279.0	176.78	62.0	4.84	56.6	1.72
4530.5-27	127.76	133.33	1.04	0.044 57	0.004 07	0.057 18	0.005 17	0.009 30	0.000 28	0.1	130.69	56.5	4.96	59.7	1.79
4530.5-28	108.38	127.37	1.18	0.048 68	0.004 65	0.061 62	0.005 76	0.009 18	0.000 30	132.3	210.31	60.7	5.51	58.9	1.94

续表1

测点号	含量 ( $10^{-6}$ )		Th/ U	同位素比值						同位素年龄 (Ma)					
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/$	$1\sigma$
				$^{206}\text{Pb}$		$^{235}\text{U}$		$^{238}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}$		$^{235}\text{U}$		$^{238}\text{U}$	
4530.5-29	122.41	134.27	1.10	0.050 76	0.004 26	0.062 61	0.005 18	0.008 95	0.000 27	230.1	183.23	61.7	4.95	57.4	1.74
4530.5-30	123.76	130.54	1.05	0.054 41	0.004 70	0.067 08	0.005 70	0.008 94	0.000 28	388.1	183.16	65.9	5.42	57.4	1.78
4530.5-31	73.07	101.60	1.39	0.093 43	0.006 43	0.126 66	0.008 48	0.009 83	0.000 31	1 496.7	124.93	121.1	7.64	63.1	1.97
4530.5-32	112.34	117.76	1.05	0.048 08	0.004 14	0.062 96	0.005 34	0.009 50	0.000 29	103.2	191.65	62.0	5.10	60.9	1.85
W1井, 深度为4 594.5 m, 粗面岩(d)															
4594.5-1	106.67	115.84	1.09	0.101 79	0.006 34	0.125 17	0.007 59	0.008 92	0.000 28	1 657.0	111.06	119.7	6.85	57.2	1.77
4594.5-2	132.09	127.14	0.96	0.082 25	0.005 72	0.100 86	0.006 86	0.008 89	0.000 27	1 251.5	130.24	97.6	6.33	57.1	1.75
4594.5-3	93.29	111.95	1.20	0.124 37	0.007 43	0.162 81	0.009 39	0.009 49	0.000 30	2 019.8	102.34	153.2	8.20	60.9	1.92
4594.5-4	292.17	191.15	0.65	0.072 38	0.004 50	0.085 69	0.005 25	0.008 59	0.000 25	996.6	121.46	83.5	4.91	55.1	1.61
4594.5-5	104.05	137.74	1.32	0.056 80	0.005 11	0.070 23	0.006 23	0.008 97	0.000 28	483.3	187.95	68.9	5.91	57.5	1.79
4594.5-6	93.10	99.30	1.07	0.077 87	0.005 80	0.103 63	0.007 57	0.009 65	0.000 30	1 143.5	141.18	100.1	6.96	61.9	1.92
4594.5-7	151.74	144.66	0.95	0.061 78	0.003 99	0.07997	0.005 12	0.009 39	0.000 27	666.6	132.62	78.1	4.82	60.2	1.72
4594.5-8	110.11	119.69	1.09	0.058 97	0.004 77	0.075 69	0.006 03	0.009 31	0.000 29	566.1	167.11	74.1	5.69	59.7	1.84
4594.5-9	140.67	145.05	1.03	0.065 13	0.004 46	0.082 41	0.005 57	0.009 18	0.000 27	778.6	137.63	80.4	5.23	58.9	1.72
4594.5-10	166.67	153.26	0.92	0.047 14	0.003 68	0.059 78	0.004 63	0.009 20	0.000 27	55.9	176.82	59.0	4.44	59.0	1.71
4594.5-11	170.66	154.71	0.91	0.059 49	0.003 95	0.074 37	0.004 90	0.009 07	0.000 26	584.9	138.00	72.8	4.63	58.2	1.67
4594.5-12	104.39	117.52	1.13	0.092 35	0.005 85	0.122 25	0.007 57	0.009 60	0.000 29	1 474.5	115.70	117.1	6.85	61.6	1.86
4594.5-13	133.07	125.89	0.95	0.058 05	0.004 95	0.074 86	0.006 28	0.009 35	0.000 29	531.1	177.10	73.3	5.93	60.0	1.88
4594.5-14	252.25	203.37	0.81	0.054 61	0.003 39	0.065 38	0.004 03	0.008 68	0.000 25	396.4	132.89	64.3	3.84	55.7	1.57
4594.5-15	185.52	179.83	0.97	0.057 30	0.003 79	0.071 81	0.004 71	0.009 09	0.000 26	502.5	139.97	70.4	4.46	58.3	1.67
4594.5-16	142.73	118.73	0.83	0.076 82	0.005 65	0.097 75	0.007 02	0.009 23	0.000 29	1 116.5	140.13	94.7	6.49	59.2	1.86
4594.5-17	144.66	149.71	1.03	0.047 33	0.003 76	0.058 26	0.004 60	0.008 93	0.000 26	65.6	179.70	57.5	4.41	57.3	1.66
4594.5-18	151.32	147.36	0.97	0.053 05	0.003 92	0.066 08	0.004 83	0.009 03	0.000 27	331.0	158.72	65.0	4.60	58.0	1.69
4594.5-19	127.29	147.83	1.16	0.092 26	0.005 45	0.121 91	0.007 05	0.009 58	0.000 29	1 472.7	108.33	116.8	6.38	61.5	1.84

续表1

测点号	含量 ( $10^{-6}$ )		Th/ U	同位素比值						同位素年龄 (Ma)					
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/$ $^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$ $^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/$ $^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$ $^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$ $^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/$ $^{238}\text{U}$	$1\sigma$
4594.5-20	89.91	112.59	1.25	0.058 21	0.005 02	0.073 27	0.006 22	0.009 13	0.000 29	536.9	178.92	71.8	5.89	58.6	1.82
4594.5-21	67.60	77.60	1.15	0.051 74	0.005 53	0.068 15	0.007 16	0.009 55	0.000 32	274.1	227.41	66.9	6.80	61.3	2.05
4594.5-22	186.96	138.17	0.74	0.159 74	0.007 05	0.219 12	0.009 39	0.009 95	0.000 29	2 453.0	72.82	201.2	7.82	63.8	1.86
4594.5-23	143.42	142.51	0.99	0.114 98	0.006 25	0.146 63	0.007 74	0.009 25	0.000 28	1 879.5	94.90	138.9	6.85	59.4	1.79
4594.5-24	98.42	100.89	1.03	0.046 11	0.004 61	0.058 13	0.005 73	0.009 14	0.000 29	3.1	224.63	57.4	5.50	58.7	1.84
4594.5-25	159.73	148.84	0.93	0.051 05	0.003 76	0.065 63	0.004 78	0.009 33	0.000 27	242.9	161.45	64.5	4.56	59.8	1.75
4594.5-26	300.57	227.44	0.76	0.054 39	0.003 03	0.070 36	0.003 91	0.009 38	0.000 26	387.2	120.05	69.0	3.71	60.2	1.64
4594.5-27	451.92	290.95	0.64	0.046 39	0.002 57	0.056 38	0.003 13	0.008 82	0.000 24	18.0	127.78	55.7	3.01	56.6	1.51
4594.5-28	426.86	281.89	0.66	0.049 43	0.002 80	0.060 38	0.003 43	0.008 86	0.000 24	168.4	127.18	59.5	3.28	56.9	1.53
4594.5-29	155.15	163.96	1.06	0.047 51	0.003 53	0.058 21	0.004 29	0.008 89	0.000 26	74.4	168.57	57.4	4.12	57.0	1.64
4594.5-30	110.36	114.70	1.04	0.077 79	0.005 90	0.094 64	0.006 98	0.008 82	0.000 29	1 141.6	143.61	91.8	6.47	56.6	1.83
4594.5-31	68.79	89.78	1.31	0.049 25	0.004 94	0.064 29	0.006 35	0.009 47	0.000 31	159.6	219.11	63.3	6.06	60.7	1.95
4594.5-32	118.39	129.56	1.09	0.056 23	0.004 22	0.072 42	0.005 35	0.009 34	0.000 28	460.6	159.01	71.0	5.07	59.9	1.79
4594.5-33	161.04	156.62	0.97	0.109 11	0.005 39	0.151 92	0.007 37	0.010 10	0.000 29	1 784.6	87.42	143.6	6.50	64.8	1.85
4594.5-34	94.50	115.36	1.22	0.063 51	0.005 17	0.080 71	0.006 44	0.009 22	0.000 29	725.5	163.92	78.8	6.05	59.1	1.87
4594.5-35	90.50	111.76	1.23	0.062 98	0.005 31	0.083 61	0.006 91	0.009 63	0.000 31	707.5	169.70	81.5	6.48	61.8	1.95
4594.5-36	86.37	99.22	1.15	0.142 74	0.008 26	0.194 34	0.010 75	0.009 88	0.000 32	2 260.7	96.60	180.3	9.14	63.3	2.03
4594.5-37	122.64	123.94	1.01	0.056 57	0.004 74	0.070 89	0.005 85	0.009 09	0.000 28	474.0	175.96	69.5	5.54	58.3	1.79
4594.5-38	202.38	172.98	0.85	0.044 06	0.003 36	0.055 13	0.004 17	0.009 08	0.000 26	0.1	69.74	54.5	4.02	58.2	1.66
4594.5-39	105.60	112.22	1.06	0.056 74	0.004 83	0.070 72	0.005 93	0.009 04	0.000 28	480.7	178.63	69.4	5.62	58.0	1.80
4594.5-40	129.45	149.16	1.15	0.049 37	0.003 82	0.062 34	0.004 77	0.009 16	0.000 27	165.6	171.31	61.4	4.56	58.8	1.72
4594.5-41	130.15	122.90	0.94	0.047 07	0.004 26	0.060 92	0.005 46	0.009 39	0.000 28	52.5	203.45	60.1	5.22	60.2	1.82
4594.5-42	117.75	115.60	0.98	0.070 52	0.006 16	0.087 97	0.007 48	0.009 05	0.000 31	943.6	169.42	85.6	6.98	58.1	1.95

续表1

测点号	含量 ( $10^{-6}$ )		Th/ U	同位素比值						同位素年龄 (Ma)					
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/$ $^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$ $^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/$ $^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$ $^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$ $^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/$ $^{238}\text{U}$	$1\sigma$
4594.5-43	88.91	114.05	1.28	0.092 17	0.006 19	0.122 17	0.007 98	0.009 61	0.000 30	1 470.7	122.52	117.0	7.22	61.7	1.93
4594.5-44	184.20	176.15	0.96	0.052 09	0.003 57	0.064 00	0.004 34	0.008 91	0.000 26	289.2	149.1	63.0	4.14	57.2	1.64
4594.5-45	256.76	200.13	0.78	0.053 18	0.003 32	0.067 62	0.004 20	0.009 22	0.000 26	336.5	135.01	66.4	4.00	59.2	1.64
4594.5-46	111.55	128.43	1.15	0.051 39	0.004 22	0.062 81	0.005 08	0.008 87	0.000 27	258.2	178.02	61.9	4.86	56.9	1.71
4594.5-47	137.83	162.04	1.18	0.055 79	0.003 84	0.068 59	0.004 66	0.008 92	0.000 26	443.7	146.45	67.4	4.43	57.2	1.66
4594.5-48	248.21	179.23	0.72	0.103 21	0.005 15	0.134 01	0.006 57	0.009 42	0.000 27	1 682.7	89.29	127.7	5.88	60.4	1.72
4594.5-49	122.96	140.40	1.14	0.051 37	0.004 02	0.064 82	0.005 01	0.009 15	0.000 27	257.6	170.30	63.8	4.78	58.7	1.73
4594.5-50	91.36	109.05	1.19	0.050 95	0.004 90	0.064 12	0.006 06	0.009 13	0.000 30	238.5	207.69	63.1	5.78	58.6	1.91
4594.5-51	205.83	185.53	0.90	0.040 94	0.003 93	0.051 18	0.004 89	0.009 07	0.000 26	0.1	0	50.7	4.72	58.2	1.69
4594.5-52	149.47	164.88	1.10	0.069 00	0.004 42	0.083 48	0.005 26	0.008 78	0.000 26	898.8	126.88	81.4	4.93	56.3	1.65
4594.5-53	125.69	124.92	0.99	0.077 75	0.005 48	0.099 32	0.006 85	0.009 26	0.000 29	1 140.6	134.00	96.1	6.33	59.4	1.82
4594.5-54	113.95	128.72	1.13	0.050 59	0.004 49	0.064 01	0.005 60	0.009 18	0.000 28	222.1	193.23	63.0	5.35	58.9	1.80
4594.5-55	227.56	194.41	0.85	0.061 91	0.003 87	0.078 24	0.004 84	0.009 17	0.000 26	671.0	128.38	76.5	4.56	58.8	1.66
4594.5-56	145.87	154.96	1.06	0.050 84	0.003 79	0.061 00	0.004 49	0.008 70	0.000 26	233.4	163.57	60.1	4.29	55.9	1.65
4594.5-57	135.91	124.16	0.91	0.055 33	0.004 55	0.070 66	0.005 71	0.009 26	0.000 29	425.4	173.73	69.3	5.41	59.4	1.83
4594.5-58	130.17	132.94	1.02	0.041 94	0.004 12	0.051 70	0.005 03	0.008 94	0.000 27	0.1	0	51.2	4.86	57.4	1.73
4594.5-59	136.00	137.14	1.01	0.048 96	0.004 08	0.061 61	0.005 07	0.009 13	0.000 27	145.8	184.77	60.7	4.85	58.6	1.75
4594.5-60	126.37	136.53	1.08	0.052 60	0.004 10	0.064 93	0.004 98	0.008 95	0.000 27	311.5	167.66	63.9	4.75	57.5	1.74
4594.5-61	96.92	103.61	1.07	0.051 68	0.004 93	0.064 12	0.006 03	0.009 00	0.000 29	271.3	204.57	63.1	5.75	57.7	1.83
4594.5-62	304.30	211.71	0.70	0.050 32	0.003 41	0.061 19	0.004 11	0.008 82	0.000 25	209.6	149.68	60.3	3.94	56.6	1.58
4594.5-63	153.00	151.38	0.99	0.047 49	0.003 69	0.058 24	0.004 47	0.008 89	0.000 26	73.4	175.73	57.5	4.29	57.1	1.68
W1井,深度为4 600.5 m,粗面岩 (e)															
4600.5-1	185.00	168.83	0.91	0.097 64	0.004 77	0.134 71	0.006 50	0.010 01	0.000 28	1 579.6	88.79	128.3	5.82	64.2	1.79
4600.5-2	83.07	88.49	1.07	0.046 04	0.004 76	0.062 03	0.006 33	0.009 77	0.000 31	0.1	231.74	61.1	6.05	62.7	1.98

续表1

测点号	含量 ( $10^{-6}$ )		Th/ U	同位素比值						同位素年龄 (Ma)					
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/$	$1\sigma$
			$^{206}\text{Pb}$	$^{235}\text{U}$		$^{238}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}$		$^{235}\text{U}$		$^{238}\text{U}$			
4600.5-3	92.99	113.59	1.22	0.149 24	0.007 66	0.189 11	0.009 30	0.009 19	0.000 28	2 337.2	85.27	175.9	7.94	59.0	1.80
4600.5-4	149.48	132.60	0.89	0.078 55	0.004 99	0.103 73	0.006 49	0.009 58	0.000 28	1 160.8	120.92	100.2	5.97	61.5	1.78
4600.5-5	84.92	89.89	1.06	0.050 13	0.008 25	0.064 20	0.010 50	0.009 29	0.000 30	200.9	342.98	63.2	10.02	59.6	1.92
4600.5-6	236.61	207.23	0.88	0.051 37	0.003 20	0.066 02	0.004 10	0.009 32	0.000 26	257.4	137.19	64.9	3.90	59.8	1.64
4600.5-7	110.81	126.22	1.14	0.067 51	0.003 87	0.087 84	0.004 99	0.009 44	0.000 26	853.6	114.80	85.5	4.66	60.6	1.69
4600.5-8	135.80	145.09	1.07	0.091 73	0.005 65	0.127 72	0.007 73	0.010 10	0.000 30	1 461.7	112.90	122.0	6.96	64.8	1.89
4600.5-9	339.19	242.66	0.72	0.063 65	0.003 30	0.079 55	0.004 11	0.009 07	0.000 25	730.0	106.08	77.7	3.87	58.2	1.57
4600.5-10	188.63	177.82	0.94	0.047 94	0.003 21	0.061 46	0.004 09	0.009 30	0.000 26	95.2	152.62	60.6	3.91	59.7	1.67
4600.5-11	120.63	148.88	1.23	0.049 81	0.004 41	0.058 08	0.005 08	0.008 46	0.000 26	186.3	193.86	57.3	4.87	54.3	1.64
4600.5-12	112.23	124.90	1.11	0.039 56	0.004 16	0.050 86	0.005 31	0.009 32	0.000 28	0.1	0	50.4	5.13	59.8	1.77
4600.5-13	161.06	135.39	0.84	0.067 02	0.004 49	0.089 80	0.005 90	0.009 72	0.000 29	838.5	133.56	87.3	5.50	62.3	1.86
4600.5-14	123.09	129.82	1.05	0.467 75	0.015 48	0.624 69	0.019 54	0.009 69	0.000 28	4 142.7	48.21	492.8	12.21	62.1	1.80
4600.5-15	186.53	176.42	0.95	0.068 89	0.003 88	0.086 54	0.004 81	0.009 11	0.000 26	895.5	112.18	84.3	4.50	58.5	1.66
4600.5-16	144.03	145.30	1.01	0.049 47	0.004 33	0.063 95	0.005 55	0.009 38	0.000 28	170.1	192.45	62.9	5.30	60.2	1.76
4600.5-17	101.76	100.20	0.98	0.057 87	0.005 89	0.073 80	0.007 33	0.009 25	0.000 33	524.6	209.20	72.3	6.93	59.4	2.08
4600.5-18	133.70	125.37	0.94	0.057 64	0.004 21	0.073 61	0.005 29	0.009 26	0.000 28	515.8	153.22	72.1	5.01	59.4	1.78
4600.5-19	146.65	132.22	0.90	0.120 29	0.006 00	0.167 30	0.008 14	0.010 09	0.000 29	1 960.5	86.39	157.1	7.08	64.7	1.88
4600.5-20	120.69	129.33	1.07	0.053 31	0.003 95	0.068 32	0.005 01	0.009 30	0.000 27	341.9	159.27	67.1	4.76	59.7	1.75
4600.5-21	202.51	182.81	0.90	0.041 13	0.002 92	0.051 28	0.003 62	0.009 04	0.000 25	0.1	0	50.8	3.50	58.0	1.63
4600.5-22	132.31	133.86	1.01	0.046 89	0.004 03	0.058 83	0.005 01	0.009 10	0.000 27	43.4	193.94	58.0	4.80	58.4	1.72
4600.5-23	180.05	161.60	0.90	0.055 00	0.003 43	0.068 17	0.004 22	0.008 99	0.000 25	412.1	133.92	67.0	4.01	57.7	1.62
4600.5-24	73.96	93.38	1.26	0.068 37	0.005 15	0.085 81	0.006 32	0.009 10	0.000 29	879.9	148.56	83.6	5.91	58.4	1.83
4600.5-25	161.23	165.21	1.02	0.044 45	0.003 16	0.055 94	0.003 94	0.009 13	0.000 26	0.1	79.00	55.3	3.79	58.6	1.66

续表1

测点号	含量 ( $10^{-6}$ )		Th/ U	同位素比值						同位素年龄 (Ma)					
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/$ $^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$ $^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/$ $^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$ $^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$ $^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/$ $^{238}\text{U}$	$1\sigma$
4600.5-26	123.12	142.07	1.15	0.043 88	0.003 65	0.056 56	0.004 66	0.009 35	0.000 28	0.1	75.18	55.9	4.48	60.0	1.76
4600.5-27	114.76	126.06	1.10	0.050 45	0.003 90	0.065 41	0.004 99	0.009 40	0.000 28	216.0	169.87	64.3	4.76	60.3	1.8
4600.5-28	84.71	94.01	1.11	0.131 24	0.008 64	0.170 28	0.010 65	0.009 41	0.000 32	2 114.6	111.09	159.7	9.24	60.4	2.05
4600.5-29	89.52	93.21	1.04	0.060 14	0.004 61	0.075 33	0.005 65	0.009 09	0.000 28	608.5	157.51	73.7	5.34	58.3	1.82
4600.5-30	212.08	232.20	1.09	0.047 09	0.002 85	0.057 89	0.003 49	0.008 92	0.000 25	53.4	138.59	57.1	3.35	57.2	1.57
4600.5-31	283.96	197.07	0.69	0.047 74	0.003 16	0.061 16	0.004 03	0.009 29	0.000 26	85.4	150.81	60.3	3.86	59.6	1.66
4600.5-32	190.55	186.33	0.98	0.057 49	0.003 47	0.071 39	0.004 27	0.009 01	0.000 26	510.0	127.82	70.0	4.04	57.8	1.64
4600.5-33	193.37	170.34	0.88	0.047 36	0.003 30	0.059 33	0.004 10	0.009 09	0.000 26	66.6	158.60	58.5	3.93	58.3	1.66
4600.5-34	186.58	160.08	0.86	0.048 56	0.003 56	0.061 41	0.004 44	0.009 17	0.000 27	126.4	163.83	60.5	4.25	58.9	1.73
4600.5-35	131.01	136.78	1.04	0.046 19	0.003 58	0.060 60	0.004 65	0.009 51	0.000 28	7.8	176.50	59.7	4.45	61.0	1.78
4600.5-36	129.57	132.16	1.02	0.095 59	0.004 94	0.127 35	0.006 49	0.009 66	0.000 28	1 539.8	94.21	121.7	5.85	62.0	1.76
4600.5-37	108.58	116.96	1.08	0.044 68	0.004 06	0.058 40	0.005 25	0.009 48	0.000 29	0.1	135.49	57.6	5.04	60.8	1.83
4600.5-38	108.78	117.19	1.08	0.054 01	0.003 99	0.066 58	0.004 87	0.008 94	0.000 26	371.2	158.24	65.4	4.64	57.4	1.68
4600.5-39	169.83	150.03	0.88	0.048 32	0.003 28	0.060 60	0.004 08	0.009 10	0.000 26	115.0	152.86	59.7	3.91	58.4	1.66
4600.5-40	141.08	142.63	1.01	0.044 64	0.003 38	0.058 56	0.004 40	0.009 51	0.000 28	0.1	98.81	57.8	4.22	61.0	1.77
4600.5-41	177.99	169.19	0.95	0.085 31	0.004 24	0.115 61	0.005 69	0.009 83	0.000 28	1 322.5	93.42	111.1	5.18	63.0	1.77
4600.5-42	455.71	237.72	0.52	0.073 05	0.003 32	0.092 59	0.004 23	0.009 19	0.000 25	1 015.3	89.52	89.9	3.94	59.0	1.58
4600.5-43	140.73	138.93	0.99	0.047 43	0.003 57	0.061 39	0.004 57	0.009 39	0.000 28	70.2	170.49	60.5	4.38	60.2	1.76
4600.5-44	248.24	182.66	0.74	0.048 32	0.003 25	0.061 38	0.004 11	0.009 21	0.000 26	115.2	151.52	60.5	3.93	59.1	1.66
4600.5-45	221.76	193.49	0.87	0.050 26	0.003 25	0.062 15	0.004 00	0.008 97	0.000 25	207.0	143.37	61.2	3.82	57.6	1.61
4600.5-46	117.74	140.09	1.19	0.049 09	0.003 65	0.064 55	0.004 75	0.009 54	0.000 28	152.1	165.60	63.5	4.53	61.2	1.79
4600.5-47	111.28	126.42	1.14	0.047 99	0.003 90	0.060 50	0.004 85	0.009 14	0.000 28	97.8	182.78	59.6	4.64	58.7	1.77
4600.5-48	110.70	137.63	1.24	0.049 86	0.003 90	0.064 05	0.004 93	0.009 32	0.000 29	188.6	172.39	63.0	4.71	59.8	1.83

续表1

测点号	含量 ( $10^{-6}$ )		Th/ U	同位素比值						同位素年龄 (Ma)					
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/$	$1\sigma$
				$^{206}\text{Pb}$		$^{235}\text{U}$		$^{238}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}$		$^{235}\text{U}$		$^{238}\text{U}$	
4600.5-49	123.06	144.74	1.18	0.045 71	0.003 53	0.058 64	0.004 48	0.009 30	0.000 27	0.1	158.83	57.9	4.30	59.7	1.75
4600.5-50	93.86	110.88	1.18	0.068 67	0.005 07	0.085 56	0.006 18	0.009 04	0.000 28	888.8	145.50	83.4	5.78	58.0	1.81
4600.5-51	143.16	143.80	1.00	0.052 57	0.004 07	0.065 78	0.005 04	0.009 07	0.000 27	310.2	166.76	64.7	4.80	58.2	1.73
4600.5-52	157.87	162.39	1.03	0.058 29	0.003 69	0.074 13	0.004 66	0.009 22	0.000 26	540.2	133.41	72.6	4.40	59.2	1.68
4600.5-53	153.53	163.17	1.06	0.051 89	0.003 51	0.065 58	0.004 40	0.009 17	0.000 27	280.5	147.77	64.5	4.19	58.8	1.70
4600.5-54	150.19	133.86	0.89	0.049 22	0.004 05	0.061 88	0.005 04	0.009 12	0.000 27	158.4	182.08	61.0	4.82	58.5	1.75
4600.5-55	130.89	132.67	1.01	0.044 23	0.003 96	0.054 61	0.004 82	0.008 95	0.000 28	0.1	108.42	54.0	4.64	57.5	1.79
4600.5-56	271.39	199.09	0.73	0.047 55	0.003 15	0.058 29	0.003 84	0.008 89	0.000 25	76.2	150.84	57.5	3.68	57.1	1.60
4600.5-57	140.37	137.77	0.98	0.045 38	0.003 63	0.058 38	0.004 62	0.009 33	0.000 28	0.1	148.31	57.6	4.43	59.9	1.77
4600.5-58	136.48	122.21	0.90	0.047 76	0.003 90	0.059 80	0.004 82	0.009 08	0.000 27	86.7	183.94	59.0	4.62	58.3	1.76
4600.5-59	373.37	233.90	0.63	0.055 53	0.002 91	0.067 05	0.003 52	0.008 76	0.000 24	433.4	112.79	65.9	3.35	56.2	1.52
4600.5-60	188.23	165.83	0.88	0.046 65	0.003 37	0.059 05	0.004 24	0.009 18	0.000 26	31.0	164.78	58.3	4.07	58.9	1.68
4600.5-61	179.77	183.69	1.02	0.055 02	0.003 54	0.069 78	0.004 44	0.009 20	0.000 27	413.1	137.67	68.5	4.22	59.0	1.70
4600.5-62	74.59	85.83	1.15	0.049 69	0.004 82	0.063 36	0.006 05	0.009 25	0.000 30	180.3	211.65	62.4	5.78	59.3	1.92
4600.5-63	272.05	180.12	0.66	0.089 41	0.004 13	0.111 67	0.005 14	0.009 06	0.000 25	1 412.8	85.88	107.5	4.69	58.1	1.60
4600.5-64	79.76	95.50	1.20	0.049 32	0.004 52	0.062 55	0.005 64	0.009 20	0.000 29	163.1	200.97	61.6	5.39	59.0	1.86
4600.5-65	158.89	154.49	0.97	0.050 29	0.003 52	0.061 43	0.004 26	0.008 86	0.000 26	208.3	154.45	60.5	4.07	56.9	1.65
4600.5-66	135.47	135.42	1.00	0.074 61	0.004 44	0.097 50	0.005 73	0.009 48	0.000 28	1 057.8	115.67	94.5	5.30	60.8	1.76
4600.5-67	163.31	135.52	0.83	0.070 76	0.004 45	0.095 52	0.005 92	0.009 79	0.000 29	950.6	123.76	92.6	5.49	62.8	1.85
4600.5-68	114.95	114.83	1.00	0.044 19	0.003 98	0.057 03	0.005 08	0.009 36	0.000 29	0.1	107.55	56.3	4.88	60.0	1.83
W1井,深度为4 624.5 m,粗面岩 (f)															
4624.5-1	166.55	149.74	0.90	0.049 46	0.004 61	0.061 89	0.005 71	0.009 08	0.000 28	169.5	204.11	61.0	5.46	58.2	1.76
4624.5-2	123.05	123.45	1.00	0.048 48	0.005 30	0.060 61	0.006 55	0.009 07	0.000 29	122.8	238.82	59.7	6.27	58.2	1.83
4624.5-3	137.09	123.34	0.90	0.048 19	0.004 38	0.063 83	0.005 72	0.009 61	0.000 30	108.8	201.70	62.8	5.46	61.6	1.92

续表1

测点号	含量 ( $10^{-6}$ )		Th/ U	同位素比值						同位素年龄 (Ma)					
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/$	$1\sigma$
				$^{206}\text{Pb}$		$^{235}\text{U}$		$^{238}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}$		$^{235}\text{U}$		$^{238}\text{U}$	
4624.5-4	130.91	120.61	0.92	0.054 27	0.005 35	0.070 24	0.00681	0.00939	0.000 31	382.1	207.58	68.9	6.46	60.2	1.96
4624.5-5	73.25	87.59	1.20	0.048 79	0.006 25	0.061 66	0.0078	0.00916	0.000 31	138.0	276.07	60.8	7.46	58.8	2.00
4624.5-6	163.92	163.80	1.00	0.050 69	0.004 02	0.063 56	0.004 98	0.009 09	0.000 27	227.0	173.13	62.6	4.75	58.4	1.73
4624.5-7	140.44	151.62	1.08	0.046 84	0.004 07	0.059 05	0.005 08	0.009 14	0.000 28	40.6	196.07	58.3	4.87	58.7	1.76
4624.5-8	130.05	129.25	0.99	0.061 69	0.004 87	0.080 54	0.006 25	0.009 47	0.000 29	663.4	160.58	78.6	5.87	60.7	1.86
4624.5-9	255.71	178.37	0.70	0.057 47	0.003 92	0.073 39	0.004 94	0.009 26	0.000 27	509.1	143.72	71.9	4.67	59.4	1.73
4624.5-10	110.56	108.52	0.98	0.066 16	0.005 84	0.085 34	0.007 38	0.009 35	0.000 30	811.4	174.50	83.1	6.90	60.0	1.94
4624.5-11	107.58	112.65	1.05	0.050 18	0.004 59	0.065 62	0.005 92	0.009 48	0.000 30	203.4	199.50	64.5	5.64	60.9	1.89
4624.5-12	192.25	187.47	0.98	0.045 18	0.003 53	0.056 75	0.004 40	0.009 11	0.000 26	0.1	134.03	56.0	4.23	58.5	1.68
4624.5-13	175.35	157.13	0.90	0.046 04	0.003 79	0.055 26	0.004 49	0.008 71	0.000 26	0.1	186.85	54.6	4.32	55.9	1.66
4624.5-14	121.36	136.32	1.12	0.056 93	0.004 88	0.070 89	0.005 95	0.009 03	0.000 29	488.0	179.23	69.5	5.64	58.0	1.85
4624.5-15	85.81	110.10	1.28	0.041 87	0.004 76	0.052 28	0.005 88	0.009 05	0.000 29	0.1	29.97	51.7	5.67	58.1	1.83
4624.5-16	97.04	108.84	1.12	0.049 86	0.004 74	0.064 78	0.006 06	0.009 42	0.000 30	188.6	207.37	63.7	5.78	60.5	1.91
4624.5-17	221.26	168.94	0.76	0.059 28	0.003 81	0.073 77	0.004 70	0.009 03	0.000 26	577.3	134.03	72.3	4.44	57.9	1.65
4624.5-18	148.52	168.90	1.14	0.050 86	0.003 74	0.062 71	0.004 57	0.008 94	0.000 26	234.7	161.55	61.8	4.36	57.4	1.66
4624.5-19	157.71	145.54	0.92	0.061 75	0.004 79	0.076 41	0.005 84	0.008 97	0.000 27	665.6	158.07	74.8	5.51	57.6	1.74
4624.5-20	152.49	151.07	0.99	0.050 69	0.004 16	0.063 99	0.005 18	0.009 16	0.000 28	226.6	179.20	63.0	4.94	58.8	1.76
4624.5-21	132.31	129.59	0.98	0.050 53	0.004 44	0.063 63	0.005 51	0.009 13	0.000 28	219.4	191.48	62.6	5.26	58.6	1.80
4624.5-22	187.83	155.05	0.83	0.050 15	0.003 97	0.064 71	0.005 07	0.009 36	0.000 28	202.0	174.07	63.7	4.84	60.0	1.77
4624.5-23	234.07	196.31	0.84	0.047 48	0.003 32	0.059 36	0.004 13	0.009 07	0.000 26	72.6	159.21	58.6	3.95	58.2	1.65
4624.5-24	121.45	122.48	1.01	0.067 15	0.005 08	0.088 14	0.006 55	0.009 52	0.000 29	842.3	150.09	85.8	6.11	61.1	1.87
4624.5-25	122.46	138.63	1.13	0.073 00	0.004 74	0.093 73	0.005 97	0.009 31	0.000 28	1 013.9	126.21	91.0	5.54	59.8	1.78
4624.5-26	118.16	143.24	1.21	0.046 09	0.003 84	0.060 68	0.005 00	0.009 55	0.000 28	2.3	189.24	59.8	4.79	61.3	1.81



续表1

测点号	含量 ( $10^{-6}$ )		Th/ U	同位素比值						同位素年龄 (Ma)					
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/$ $^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$ $^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/$ $^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$ $^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$ $^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/$ $^{238}\text{U}$	$1\sigma$
4624.5-27	66.81	78.15	1.17	0.064 69	0.006 43	0.079 19	0.007 68	0.008 88	0.000 31	764.4	196.49	77.4	7.23	57.0	1.96
4624.5-28	146.03	160.75	1.10	0.049 57	0.003 60	0.063 50	0.004 56	0.009 29	0.000 27	174.9	161.30	62.5	4.36	59.6	1.73
4624.5-29	534.37	310.59	0.58	0.052 26	0.002 83	0.064 49	0.003 49	0.008 95	0.000 24	296.6	118.84	63.5	3.33	57.4	1.55
4624.5-30	66.05	71.57	1.08	0.058 24	0.006 38	0.075 05	0.008 04	0.009 35	0.000 33	538.3	223.75	73.5	7.59	60.0	2.12
4624.5-31	118.27	133.30	1.13	0.047 34	0.004 22	0.061 05	0.005 39	0.009 35	0.000 28	65.6	200.26	60.2	5.15	60.0	1.81
4624.5-32	158.49	142.86	0.90	0.053 38	0.004 28	0.071 53	0.005 66	0.009 72	0.000 29	344.8	171.54	70.2	5.36	62.4	1.86
4624.5-33	197.97	176.24	0.89	0.048 91	0.003 28	0.062 87	0.004 17	0.009 32	0.000 27	143.5	150.05	61.9	3.98	59.8	1.71
4624.5-34	145.15	152.59	1.05	0.058 45	0.004 43	0.072 63	0.005 41	0.009 01	0.000 28	546.7	157.60	71.2	5.12	57.8	1.77
4624.5-35	149.26	136.49	0.91	0.078 95	0.004 99	0.106 53	0.006 60	0.009 79	0.000 29	1 171.0	120.07	102.8	6.06	62.8	1.86
4624.5-36	95.68	114.39	1.20	0.048 57	0.004 61	0.061 15	0.005 73	0.009 13	0.000 28	127.1	209.23	60.3	5.48	58.6	1.81
4624.5-37	182.75	163.45	0.89	0.053 70	0.003 75	0.066 31	0.004 57	0.008 96	0.000 26	358.5	149.87	65.2	4.35	57.5	1.66
4624.5-38	235.32	196.54	0.84	0.051 34	0.003 27	0.064 80	0.004 10	0.009 16	0.000 26	256.1	140.07	63.8	3.91	58.8	1.64
4624.5-39	208.12	171.19	0.82	0.050 27	0.003 74	0.063 13	0.004 64	0.009 11	0.000 27	207.7	163.78	62.2	4.43	58.4	1.71
4624.5-40	150.79	141.81	0.94	0.077 33	0.004 85	0.099 94	0.006 16	0.009 37	0.000 28	1 129.6	120.09	96.7	5.68	60.2	1.77
4624.5-41	154.06	137.82	0.89	0.066 99	0.004 60	0.081 74	0.005 51	0.008 85	0.000 27	837.5	136.74	79.8	5.17	56.8	1.7
4624.5-42	147.24	148.26	1.01	0.053 35	0.003 92	0.069 04	0.005 00	0.009 39	0.000 28	343.5	157.66	67.8	4.75	60.2	1.78
4624.5-43	86.91	99.36	1.14	0.058 23	0.005 61	0.069 76	0.006 58	0.008 69	0.000 29	537.9	198.58	68.5	6.25	55.8	1.86
4624.5-44	58.69	77.37	1.32	0.057 98	0.005 96	0.077 10	0.007 78	0.009 65	0.000 32	528.6	211.18	75.4	7.34	61.9	2.07
4624.5-45	36.63	51.62	1.41	0.052 23	0.007 95	0.065 02	0.009 71	0.009 03	0.000 36	295.7	314.59	64.0	9.25	57.9	2.33
4624.5-46	182.08	166.96	0.92	0.051 35	0.003 68	0.064 04	0.004 54	0.009 05	0.000 26	256.4	156.74	63.0	4.33	58.1	1.67
4624.5-47	123.04	122.68	1.00	0.048 61	0.004 35	0.062 19	0.005 50	0.009 28	0.000 28	129.0	197.87	61.3	5.25	59.5	1.80
4624.5-48	114.58	118.25	1.03	0.050 71	0.004 64	0.066 46	0.005 99	0.009 51	0.000 30	227.8	198.66	65.3	5.70	61.0	1.93
4624.5-49	137.24	147.34	1.07	0.044 65	0.003 83	0.055 75	0.004 73	0.009 06	0.000 27	0.1	122.67	55.1	4.55	58.1	1.72

续表1

测点号	含量 ( $10^{-6}$ )		Th/ U	同位素比值						同位素年龄 (Ma)					
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/$ $^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/$ $^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/$ $^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/$ $^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/$ $^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/$ $^{238}\text{U}$	
				$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$				
4624.5-50	92.19	112.17	1.22	0.059 63	0.004 92	0.074 77	0.006 06	0.009 09	0.000 28	590.3	169.42	73.2	5.72	58.4	1.81
4624.5-51	134.19	132.17	0.98	0.074 12	0.004 70	0.100 98	0.006 29	0.009 88	0.000 29	1 044.9	122.79	97.7	5.80	63.4	1.86
4624.5-52	95.30	97.70	1.03	0.049 95	0.005 32	0.064 26	0.006 76	0.009 33	0.000 30	192.8	230.36	63.2	6.45	59.9	1.92
4624.5-53	74.70	69.82	0.93	0.048 01	0.006 32	0.060 98	0.007 91	0.009 21	0.000 32	98.3	286.17	60.1	7.57	59.1	2.07
4624.5-54	91.02	93.24	1.02	0.049 98	0.005 10	0.063 59	0.006 39	0.009 23	0.000 30	194.0	221.36	62.6	6.10	59.2	1.90
4624.5-55	139.38	151.25	1.09	0.048 93	0.003 54	0.062 13	0.004 44	0.009 21	0.000 27	144.4	161.57	61.2	4.25	59.1	1.72
4624.5-56	53.43	71.93	1.35	0.051 08	0.006 66	0.063 60	0.008 17	0.009 03	0.000 32	244.5	275.27	62.6	7.80	58.0	2.02
4624.5-57	75.86	88.43	1.17	0.051 61	0.005 63	0.064 49	0.006 92	0.009 06	0.000 30	268.1	232.06	63.5	6.60	58.2	1.92

### 3.3 地球化学特征

珠江口盆地惠州凹陷研究区新生代火山岩的主量和微量元素分析结果见表 2。本文火山岩样品烧失量 (LOI) 在 3.62%~6.65%，结合岩石岩相学特征来看，产生这种结果的原因可能是研究区火山岩受到后期蚀变的影响。因此，通过去烧失量将样品含量重新换算为 100% 后再进行地球化学分析。

**3.3.1 主量元素** 珠江口盆地惠州凹陷研究区新生代火山岩的  $\text{SiO}_2=64.60\%\sim 73.22\%$ ， $\text{TiO}_2=0.45\%\sim 0.77\%$ ， $\text{Al}_2\text{O}_3=11.86\%\sim 16.57\%$ ，其  $\text{Mg}^\#$  值 ( $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+}_{\text{tot}})$ ) 介于 0.36~0.47， $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})=5.81\%\sim 10.25\%$ ， $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  值介于 0.71~1.34。从火山岩的全碱—二氧化硅 (TAS) 和二氧化硅—氧化钾 (图 6a, 图 6b) 变异图中可以看出，研究区火山岩落入粗面岩、粗面英安岩和流纹岩区域，属于钙碱性—高钾钙碱性—钾玄岩系列。样品铝饱和指数 (A/CNK) 为 0.85~1.04 (平均值为 0.95)，A/NK 值为 1.20~1.45 (平均值为 1.32)，属准铝质岩石 (图 7)。

**3.3.2 微量元素** 珠江口盆地惠州凹陷研究区火山岩在原始地幔标准化痕量元素蛛网图 (图 8a) 中，相对富集 Ba、K 等大离子亲石元素 (LILEs)，亏损 Nb、Ta、Ti 和 P 等高场强元素 (HFSEs)。在稀土元素球粒陨石标准化图解 (图 8b) 中，珠江口盆地惠州凹陷研究区新生代火山岩明显富集轻稀土元素

(LREEs)、亏损重稀土元素 (HREEs)，稀土元素总量 ( $\sum\text{REE}$ ) 介于  $68.03\times 10^{-6}\sim 87.83\times 10^{-6}$ ，轻重稀土分异程度大， $(\text{La}/\text{Yb})_N$  比值介于 8.41~15.51，同时存在轻微的 Eu 正异常 ( $\text{Eu}/\text{Eu}^*=1.33\sim 1.88$ )，这可能与岩石样品中富含斜长石斑晶有关。

表 2 珠江口盆地惠州凹陷新生代火山岩主量元素 (%) 和微量元素 ( $10^{-6}$ ) 组成

Table 2 Major (%) and trace ( $10^{-6}$ ) element compositions for the Cenozoic volcanic rocks of the Huizhou sag in the Pearl River Mouth basin

样品号	W1-1	W1-2	W2-1	W2-2
深度 (m)	4 438.5	4 519.5	4 588.5	4 598.6
$\text{SiO}_2$	61.19	60.30	69.73	70.44
$\text{TiO}_2$	0.68	0.72	0.45	0.43
$\text{Al}_2\text{O}_3$	15.18	15.47	12.14	11.41
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	2.61	1.22	2.65	2.91
FeO	1.76	2.29	0.74	0.65
MnO	0.09	0.12	0.08	0.08
MgO	1.27	1.68	1.28	1.12
CaO	1.07	1.60	2.44	3.09
$\text{Na}_2\text{O}$	4.22	3.94	2.75	3.20
$\text{K}_2\text{O}$	5.27	5.63	3.87	2.39
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.05	0.06	0.12	0.11
LOI	6.49	6.65	3.62	3.80
Total	99.89	99.69	99.87	99.63
$\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$	0.80	0.70	0.71	1.34
$\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$	9.49	9.57	6.62	5.59
$\text{Mg}^\#$	0.36	0.47	0.42	0.38
Rb	74.78	84.59	52.02	38.60
Ba	1 448.00	1 927.00	1 927.00	1 269.00
Th	6.18	4.77	5.23	4.71

续表2

样品号	W1-1	W1-2	W2-1	W2-2
U	1.55	1.20	1.08	1.01
Nb	9.27	8.10	6.22	5.81
Ta	1.01	1.07	0.77	0.75
Sr	346.40	465.50	305.20	367.50
Zr	153.10	143.30	64.66	61.98
Hf	4.48	4.08	2.18	2.04
Ti	4 480.00	4 579.00	2 631.00	2 744.00
Mo	3.02	2.26	0.85	0.86
Cu	38.50	33.76	76.94	25.25
Ga	17.66	17.55	11.23	10.16
Pb	7.78	8.20	15.01	9.45
As	14.32	2.62	3.89	3.65
Zn	73.76	78.88	95.07	53.43
W	2.04	2.06	1.10	0.81
Ni	16.31	21.33	14.11	14.56
Co	10.01	11.35	9.73	9.79
V	88.71	110.90	61.84	60.86
Cr	25.59	32.18	20.88	18.75
Li	23.87	32.92	33.53	38.40
Sc	15.87	16.56	10.83	10.86
Cs	2.19	2.45	0.82	1.00
Tl	4 480.00	4 579.00	2 631.00	2 744.00
Sn	2.20	2.01	2.60	1.77
Be	1.28	1.16	0.93	0.88
Bi	0.10	0.10	0.10	0.24
Y	9.843	8.532	7.521	7.465
La	18.77	14.12	18.63	19.54
Ce	36.41	27.37	35.01	37.49
Pr	4.04	3.14	3.87	4.17
Nd	14.91	12.06	14.55	15.84
Sm	2.55	2.23	2.43	2.72
Eu	1.26	1.39	1.07	1.15
Gd	2.50	2.24	2.32	2.46
Tb	0.36	0.31	0.30	0.30
Dy	2.25	2.02	1.68	1.72
Ho	0.48	0.40	0.33	0.33
Er	1.42	1.18	0.98	0.94
Tm	0.21	0.18	0.14	0.13
Yb	1.43	1.21	0.97	0.90
Lu	0.21	0.19	0.15	0.13
∑REE	86.80	68.03	82.42	87.83
∑LREE	77.94	60.30	75.56	80.91
∑HREE	8.86	7.73	6.86	6.91
LREE/HREE	8.80	7.80	11.02	11.70
(La/Yb) <sub>N</sub>	9.42	8.41	13.81	15.51
Eu/Eu*	1.50	1.88	1.35	1.33

注:  $Mg^{\#} = 100Mg / (Mg + Fe^{2+}_{tot})$ ;  $Eu/Eu^* = (Eu/0.058) / [(Sm/0.153) + (Gd/0.2055)]/2$ .

## 4 讨论

### 4.1 珠江口盆地惠州凹陷研究区火山岩的形成时代

珠江口盆地在新生代经历了多期火山作

用,按构造演化大体可分为裂谷期和拗陷期两大阶段,这两大阶段以南海运动为分界线,界线年龄为 32 Ma(图 2).早新生代(>32 Ma)的岩浆活动主要局限在南海北部陆缘和华南沿海一带,如三水、连平和河源盆地的双峰式火山岩(Chung *et al.*, 1997),K-Ar 定年结果为 64~43 Ma,主要岩性包括玄武岩、安山岩、英安岩、粗面岩、流纹岩和凝灰岩.双峰式岩浆的形成与岩石圈拉张环境中双层对流岩浆房有关,表现为板内环境.Yan *et al.* (2006)根据钻井资料认为新生代早期古新世—始新世在珠江口盆地内隆起部位形成了中酸性火山岩,包括安山岩、英安岩、流纹岩和凝灰岩,K-Ar 法定年结果为 57~49 Ma,始新世—渐新世以玄武岩和中性喷出岩为主,主要见于裂谷盆地内.所有这些测年数据表明,珠江口盆地惠州凹陷在新生代古近纪早期发生了重要的岩浆活动.

本文中珠江口盆地惠州凹陷的 6 个火山岩样品中锆石在 CL 图像中呈自形一半自形,显示出典型的岩浆生长环带或条痕状吸收(图 4),结合他们具有较高的 Th/U 比值(0.49~1.41)等特点,表明其为岩浆锆石,所测岩石样品均位于谐和线上及附近,可以认为这些定年结果反映了火山岩的形成时代,定年结果显示(流纹岩(a, b)、粗面英安岩(c)和粗面岩(d, e, f)),其形成时代介于 57.53~59.15 Ma,靠近古新世(Paleocene)和始新世(Eocene)之间的界限,落入坦尼特阶(Thanetian),这些锆石的年龄反映了本区岩浆事件的形成时间.

### 4.2 珠江口盆地惠州凹陷火山岩岩石成因

埃达克岩(adakite)的原始定义是指与洋壳俯冲作用相关的一种特殊的岛弧型岩浆岩,岩性主要以安山岩、英安岩、流纹岩和 TTG 岩系(英云闪长岩、奥长花岗岩和花岗闪长岩)为主,为俯冲的年轻洋壳(<25 Ma)经部分熔融所形成的中酸性富钠火成岩,并作为识别俯冲消减带的一项岩浆岩标志(Defant and Drummond, 1990).前人普遍认为与俯冲带相关的埃达克岩具有独特的地球化学特征与标志,具体表现为  $SiO_2 \geq 56\%$ 、 $Al_2O_3 \geq 15\%$ 、 $MgO < 3\%$ (很少高于 6%)、 $Y \leq 18 \times 10^{-6}$ 、 $Yb \leq 1.9 \times 10^{-6}$ 、 $Sr \geq 300 \times 10^{-6}$ 和轻稀土富集、重稀土亏损.珠江口盆地惠州凹陷新生代火山岩  $SiO_2$  含量介于 64.60%~

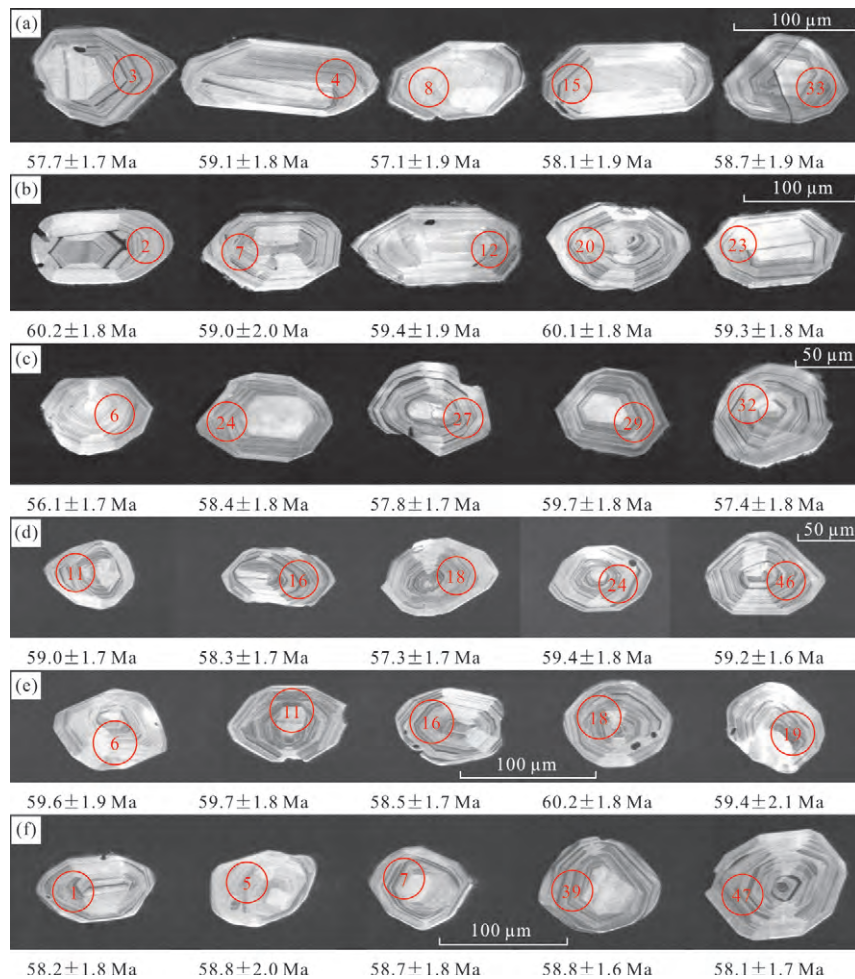


图 4 珠江口盆地惠州凹陷火山岩典型锆石阴极发光图像

Fig. 4 Representative cathode luminescence (CL) images of zircons of the Huizhou sag in the Pearl River Mouth basin  
 红圈表示 U-Pb 测年分析点位置. 红圈内数字表示锆石点号见表 1. 样品分析点直径为 32  $\mu\text{m}$

73.22%, MgO 值在 1.16%~1.80% 范围内,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量介于 11.86%~16.57%, Y 值在  $7.47 \times 10^{-6}$ ~ $9.84 \times 10^{-6}$  范围内, Yb 值为  $0.90 \times 10^{-6}$ ~ $1.43 \times 10^{-6}$ , Sr/Y 为 35.19~54.55, 相对富集大离子亲石元素 (LILE) Ba、K 等, 亏损高场强元素 (HFSE) Nb、Ta、Ti 和 P (表 2, 图 8), 稀土元素总量较低, 轻重稀土分馏明显, 稀土元素配分曲线为右倾型, Eu/Eu\* 值为 1.33~1.88, 具有轻微铕正异常, 该火山岩与埃达克岩地球化学特征相一致. 在 Sr/Y-Y 判别图解中 (图 9a), 珠江口盆地惠州凹陷新生代火山岩 4 个样品均落入埃达克岩区, 在  $(\text{La}/\text{Yb})_N$ - $\text{Yb}_N$  判别图解中投影显示 (图 9b), 研究区 2 个样品落入埃达克岩区 (W2-1 和 W2-1), 2 个样品落入埃达克岩和经典岛弧岩石叠加区域 (W1-1 和 W1-1), 在 Sr-Yb 花岗岩类型判别图解中 (图 10), 研究区的 3 个火山岩样

品落入埃达克型范围内 (W1-1、W1-2 和 W2-2), 1 个样品落在埃达克型和喜马拉雅型花岗岩的叠加区域 (W2-1), 综合这 3 次投图结果认为, 研究区岩石属性为埃达克 (质) 岩. 值得注意的是, 本文研究的埃达克质岩具有较高的  $\text{K}_2\text{O}$  含量 (2.48%~6.03%, 平均值为 4.54%). 花岗岩的部分熔融实验表明, 岩浆源区的 K 含量与派生熔体的 K 含量之间具有明显的相关性. 研究区火山岩的  $\text{K}_2\text{O}$  含量高于源于俯冲板片熔融的埃达克岩的平均  $\text{K}_2\text{O}$  含量 (1.72%, Martin, 1999), 而与下地壳部分熔融形成的埃达克岩  $\text{K}_2\text{O}$  含量 (2.90%~4.68%, 孟繁一等, 2010) 相接近, 暗示研究区埃达克质岩来源于俯冲板片熔融的可能性较小, 而与大陆下地壳部分熔融形成的埃达克质岩关系更为密切 (Xu *et al.*, 2002).

随着研究的不断深入, 学者们总结了多种埃达

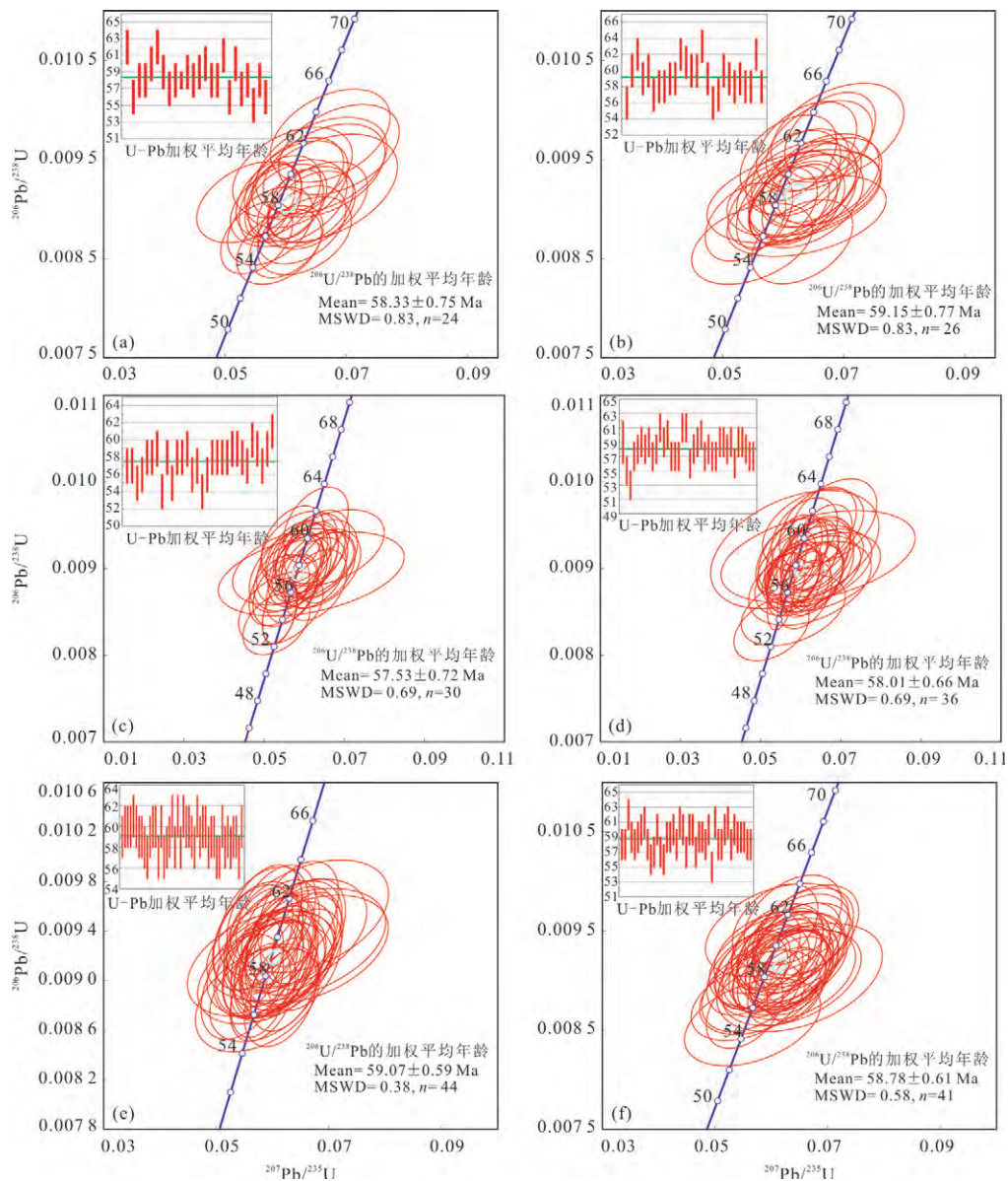


图 5 珠江口盆地惠州凹陷火山岩锆石谐和图

Fig. 5 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia age diagrams for the volcanic rocks of the Huizhou sag in the Pearl River Mouth basin  
数据以  $1\sigma$  为不确定度绘制置信水平为 95%. MSWD. 均方加权偏差;  $n$ . 分析的锆石数量

克质岩的成因模式:俯冲洋壳部分熔融(Niu *et al.*, 2006)、增厚下地壳部分熔融(Chung *et al.*, 2003)、拆沉下地壳部分熔融(Xu *et al.*, 2006)、地壳的同化混染/分离结晶作用(AFC, 汪洋等, 2004; Keller *et al.*, 2015)等.另外,源岩的组成同样制约埃达克岩的形成(Ma *et al.*, 2015).本文倾向于研究区埃达克质岩来源于增厚下地壳的部分熔融,证据在于:(1)样品的相容元素(如Cr、Ni)含量较低,Cr含量介于18.75~32.18,Ni值为14.11~21.33,明显低于源于俯冲板片并经历交代地幔楔物质混染形成的埃达克质熔体的平均值(Martin, 1999).(2)样品的

$K_2O$ 含量较高,这种富K特征与下地壳来源的埃达克质岩相类似(孟繁一等, 2010).(3)样品  $MgO$ 含量低, $Mg^{\#}$ (0.36~0.47)与下地壳来源的熔体一致,并且在  $MgO-SiO_2$ 和  $Ni-Mg^{\#}$ 图解中可以看出(图11a, 11b),珠江口盆地惠州凹陷新生代火山岩均落入下地壳部分熔融成因的埃达克质岩范围内.

综上所述,我们认为珠江口盆地惠州凹陷新生代火山岩是C型埃达克质岩,其形成机制可能为古太平洋板块(伊佐奈歧板块)俯冲背景下(Zhou *et al.*, 2008),先期形成的增厚镁铁质下地壳在石榴石-角闪岩岩相条件下发生部分熔融并向上运移,

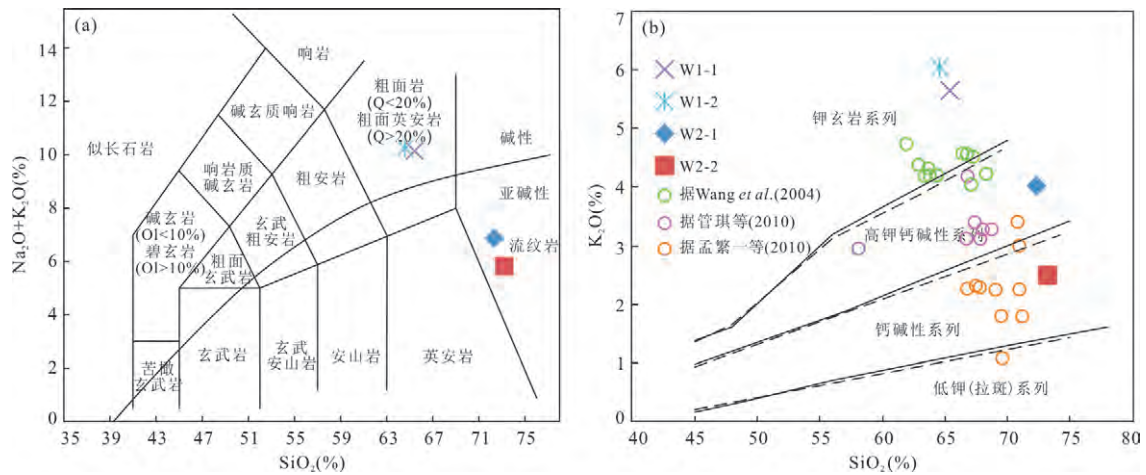


图6 珠江口盆地惠州凹陷新生代火山岩 TAS图(a)和硅钾图(b)

Fig.6 TAS (a) and  $\text{SiO}_2$  vs.  $\text{K}_2\text{O}$  diagrams (b) for the Cenozoic volcanic rocks of the Huizhou sag in the Pearl River Mouth basin. a. 据 Le Bas *et al.* (1986) 硅钾图; b. 据 Peccerillo and Taylor (1976); 投图的含量为去除烧失量后重新换算成 100% 的结果, 碱性与亚碱性系列分隔线据 Irvine and Baragar (1971)

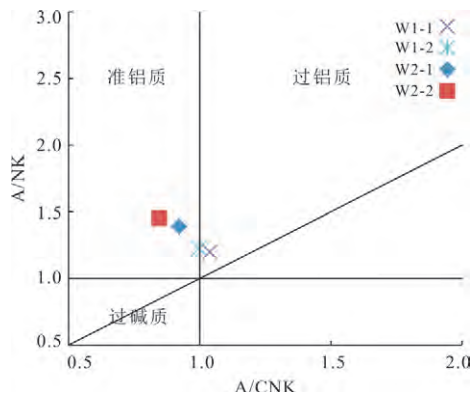


图7 珠江口盆地惠州凹陷新生代火山岩 A/NK-A/CNK 判别图解

Fig. 7 A/NK-A/CNK diagram for the Cenozoic volcanic rocks of the Huizhou sag in the Pearl River Mouth basin

据 Maniar and Piccoli (1989)

而后喷出地表形成的产物。

### 4.3 地球动力学意义

中国东南沿海普遍发育的中生代火山岩, 被认为是与中生代俯冲带相伴生的火山弧, 姚伯初等 (2004) 根据南海北部地球物理场特征及区域地质资料同样认为南海北部可能存在火山弧, 并且推测其形成机制可能与晚中生代时期古太平洋向欧亚大陆的俯冲 (南沙地块向华南地块北向拼贴) 有关。李武显和周新民 (2001) 根据公开发表的文献中晚中生代侵入/火山岩年龄值统计结果认为俯冲带活动时间为 180~85 Ma, 测年方法主要为 Rb-Sr 等时线法测定, 少量锆石 U-Pb 法

和  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  法以及极少量 K-Ar 法。Zhou and Li (2000) 根据华南陆缘出露的岩浆岩年龄分析认为俯冲带的活动时间为 180~80 Ma。Zhou *et al.* (2008) 通过对台西南盆地和北港隆起的多个钻孔中见到的古生物化石与南海南沙地块的地层对比认为俯冲带的活动时间为晚侏罗-早白垩世。

结合之前分析的南海及围区早新生代 (>32 Ma) 火山岩测年资料, 前人认为位于南海北部陆缘附近的俯冲增生带在晚中生代时期已经停止活动, 在新生代时期岩石圈整体拉伸, 南海北部陆缘地壳开始趋于伸展减薄, 由板缘环境转变为板内环境。珠江口盆地南侧在新生代时期早已不存在大洋, 因此南海北部陆缘新生代古近纪古新世的岩浆作用很难归因于北西向俯冲的中生代俯冲带。

前人对于南海北部陆缘新生代沉积盆地的拉开与扩张深部动力学过程众说纷纭, 主要有以下 3 种观点: (1) 晚白垩纪时太平洋板块运动方向为 NWW 方向相对欧亚板块运动, 平均汇聚速率达 130 mm/a, 白垩纪末-早古近纪期间 (68.5~53.0 Ma), 太平洋板块的运动方向和运动速率发生了显著改变, 由原来的 NWW 向变为向北运动, 平均汇聚速率则骤然降至 78 mm/a 的水平, 造成欧亚大陆东缘和东南缘区域构造应力场发生改变, 由晚白垩纪时期的挤压作用为主转变为早古近纪的拉伸作用, 形成了一系列初始裂陷 (Northrup *et al.*, 1995)。 (2) 南海北部陆缘在中生代晚期曾是造山带, 相关岩石学、岩相古地理学和地球物理学证据显示, 该造山带具有巨厚的陆壳 (50~60 km, 方念

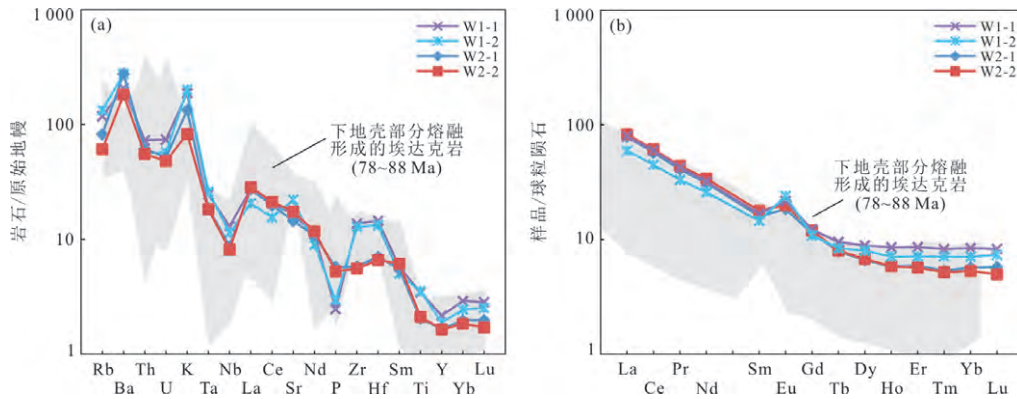


图 8 珠江口盆地惠州凹陷新生代火山岩原始地幔标准化微量元素蛛网图 (a) 和球粒陨石标准化稀土元素配分图 (b)

Fig. 8 Primitive mantle (PM)-normalized trace element spider diagram (a) and chondrite-normalized rare-earth element (REE) distributional diagram (b) for the Cenozoic volcanic rocks of the Huizhou sag in the Pearl River Mouth basin

原始地幔标准化值和球粒陨石标准化值据 Sun and McDonough(1989). 下地壳部分熔融埃达克岩 (78~88 Ma) 数据引自 Wen *et al.* (2008)、管琪等 (2010)、孟繁一等 (2010) 和陈希节等 (2014)

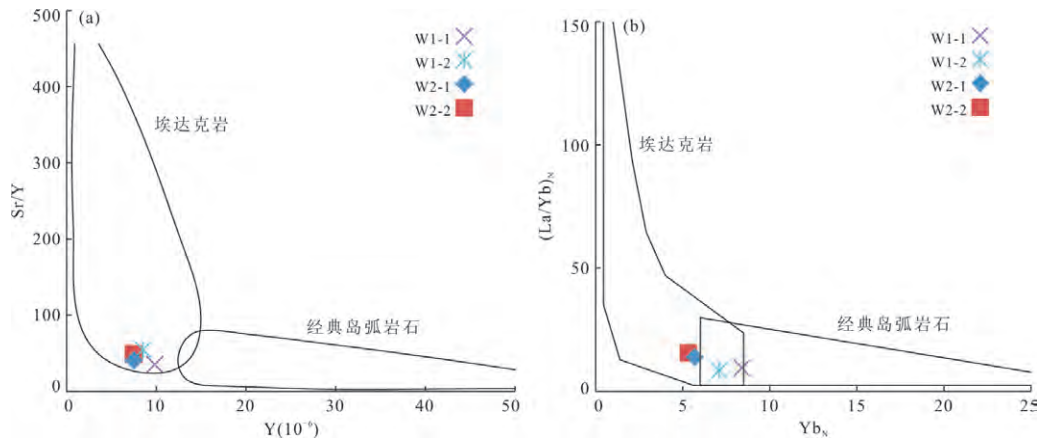


图 9 珠江口盆地惠州凹陷新生代火山岩 Sr/Y-Y (a) 和 (La/Yb)<sub>N</sub>-Yb<sub>N</sub> (b) 判别图

Fig. 9 Discrimination diagrams of Sr/Y-Y (a) and (La/Yb)<sub>N</sub>-Yb<sub>N</sub> (b) for the Cenozoic volcanic rocks of the Huizhou sag in the Pearl River Mouth basin

据 Defant and Drummond(1990); Martin(1999)

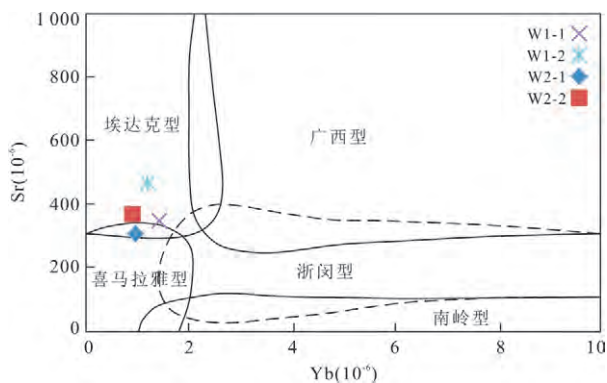


图 10 珠江口盆地惠州凹陷新生代火山岩 Sr-Yb 判别图

Fig. 10 Discrimination diagram of Sr-Yb for the Cenozoic volcanic rocks of the Huizhou sag in the Pearl River Mouth basin

据张旗(2014)

乔等, 2007),南海北部陆缘从晚白垩世以来发生的张裂作用起始于华夏陆缘造山带的拉伸塌陷,即,岩石圈拆沉作用是南海北部陆缘张裂的重要引发机制。(3) Zhou *et al.* (2009)认为位于中国东南沿海的三水盆地与南海北部陆缘的晚中生代及新生代裂谷盆地之间存在着空间和时间上的联系,包括珠江口、茂名、河源、连平、北部湾和南海盆地,这些盆地的岩浆应该来自于相同的或至少是非常相似的地幔源区,并且认为地幔柱确实存在,并对这些盆地的岩浆活动造成了影响,即,南海北部陆缘盆地的拉开和扩张与海南地幔柱有关. 本文倾向于利用第 2 种模式来解释南海北部陆缘的新生代岩浆活动. 这是因为在中生代时期南海北部陆缘带发生的俯冲作用可以形成具有高初始 Sr 值以及明

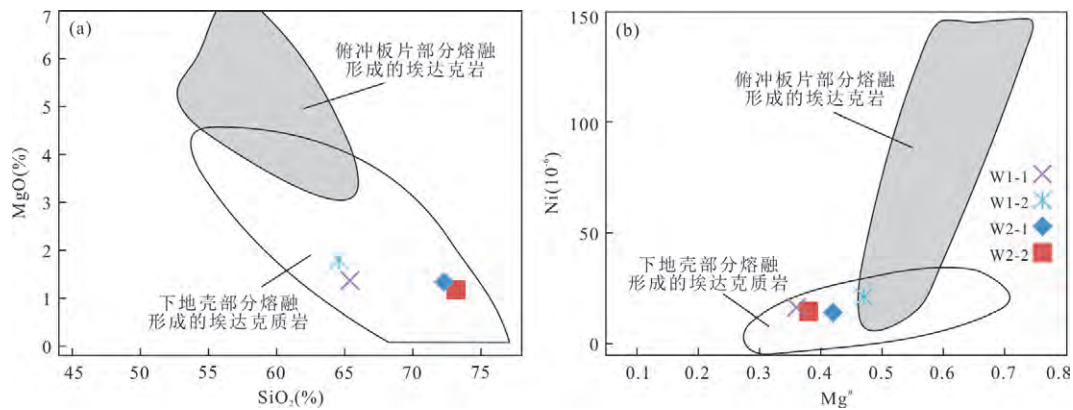


图 11 珠江口盆地惠州凹陷新生代火山岩 MgO—SiO<sub>2</sub> 图解 (a) 和 Ni—Mg<sup>#</sup> 图解 (b)

Fig. 11 MgO—SiO<sub>2</sub> (a) and Ni—Mg<sup>#</sup> (b) diagrams for the Cenozoic volcanic rocks of the Huizhou sag in the Pearl River Mouth basin

据 Zheng *et al.* (2014)

显富集 LILE 和 LREE 的加厚下地壳并以固态形式储存,这也就是南海北部陆缘早古近纪埃达克质岩的源区.新生代时期的岩石圈拆沉作用可以造成的地幔上涌,从而使得下地壳部分熔融形成研究区埃达克质岩浆,最终向上运移喷出地表. Chung *et al.* (1997) 也提出过中国南海北部陆缘自晚中生代以来的岩浆源区发生过一次明显的变化,早期岩浆来自受古俯冲作用影响的岩石圈地幔,而随着岩石圈的持续拉张减薄,在中新生代岩浆来源变为上升的软流圈地幔.

## 5 结论

(1) 珠江口盆地惠州凹陷新生代火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 (59.15±0.77~57.53±0.72) Ma, 靠近古新世 (Paleocene) 和始新世 (Eocene) 之间的界限, 落入坦尼特阶 (Thanetian), 提供了南海北部陆缘带存在古新世埃达克质岩的年代学证据与约束, 表明至少在新生代之前, 南海北部曾经存在过洋壳向陆壳的俯冲作用.

(2) 珠江口盆地惠州凹陷新生代火山岩组成主要为粗面岩、流纹岩、粗面英安岩和粗面质集块/角砾熔岩, 具有典型的中酸性喷出岩特征, 属于钙碱性—高钾钙碱性—钾玄岩系列岩石, 具有埃达克质岩石的地球化学亲缘性, 表现为高 SiO<sub>2</sub> (64.60%~73.22%), 高 Sr (305.20×10<sup>-6</sup>~465.50×10<sup>-6</sup>), 贫 Yb (0.90×10<sup>-6</sup>~1.43×10<sup>-6</sup>), 低 MgO (1.16%~1.80%), 相对富集大离子亲石元素 (LILE) Ba、K 等, 亏损高场强元素 (HFSE) Nb、Ta、Ti 和 P 等. 稀土元素总量较低, 轻重稀土分馏明显, 稀土元素配

分曲线为右倾型等特征. 这些火山岩显示富 K 特征, 较低的相容元素 (如 Cr、Ni) 含量和低的 Mg<sup>#</sup>, 部分样品具有轻微的正锆异常 (Eu/Eu\* = 1.33~1.88), 它们可能是底侵铁镁质下地壳在角闪岩岩相条件下发生部分熔融的产物.

(3) 南海北部陆缘新生代时期形成的埃达克质岩可以作为中生代时期古太平洋板块向欧亚大陆俯冲的证据, 并且暗示该时期南海北部陆缘具有加厚的下地壳. 其可能是由于新生代古近纪早期的拆沉作用引起陆壳伸展减薄导致地幔上涌, 早先形成的与中生代俯冲作用相关的基性下地壳发生部分熔融并向上运移, 最终喷出地表所形成.

致谢: 衷心感谢 3 位匿名评审专家在评审过程中所付出的辛苦工作, 提出的建设性修改意见使本文的论述和表达更为清晰、严谨, 令我受益匪浅!

## References

- Andersen, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses That do not Report <sup>204</sup>Pb. *Chemical Geology*, 192(1): 59–79. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00195-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00195-X)
- Chen, X.J., Xu, Z.Q., Meng, Y.K., et al., 2014. Petrogenesis of Miocene Adakitic Diorite-Porphyrite in Middle Gangdese Batholith, Southern Tibet: Constraints from Geochemistry, Geochronology and Sr-Nd-Hf Isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 30(8): 2253–2268 (in Chinese with English abstract).
- 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(2/3/4): 203–220. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(97\)00028-5](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(97)00028-5)
- Chung, S.L., Liu, D.Y., Ji, J.Q., et al., 2003. Adakites from Continental Collision Zones: Melting of Thickened Lower Crust beneath Southern Tibet. *Geology*, 31(11): 1021–1024. <https://doi.org/10.1130/G19796.1>
- Defant, M. J., Drummond, M. S., 1990. Derivation of Some Modern Arc Magmas by Melting of Young Subducted Lithosphere. *Nature*, 347(6294): 662–665. <https://doi.org/10.1038/347662a0>
- Dong, D.D., Wang, D.W., Zhang, G.C., et al., 2009. Cenozoic Tectonic and Sedimentary Evolution of Deepwater Area, Pearl River Mouth Basin. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 33(5): 17–22, 29 (in Chinese with English abstract).
- Fang, N.Q., Yao, B.C., Wan, L., et al., 2007. The Velocity Structure of the Lithosphere and the Origin of Sedimentary Basins in the South China and Northern Margin of the South China Sea. *Earth Science*, 32(2): 147–154. (in Chinese with English abstract).
- Flower, M. F. J., Zhang, M., Chen, C. Y., et al., 1992. Magmatism in the South China Basin. 2. Post-Spreading Quaternary Basalts from Hainan Island, South China. *Chemical Geology*, 97(1–2): 65–87. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(92\)90136-S](https://doi.org/10.1016/0009-2541(92)90136-S)
- Guan, Q., Zhu, D.C., Zhao, Z.D., et al., 2010. Late Cretaceous Adakites in the Eastern Segment of the Gangdese Belt, Southern Tibet: Products of Neo-Tethyan Ridge Subduction?. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2165–2179 (in Chinese with English abstract).
- Irvine, T. N., Baragar, W. R. A., 1971. A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523–548. <https://doi.org/10.1139/e71-055>
- Keller, C. B., Schoene, B., Barboni, M., et al., 2015. Volcanic-Plutonic Parity and the Differentiation of the Continental Crust. *Nature*, 523(7560): 301–307. <https://doi.org/10.1038/nature14584>
- Koschek, G., 1993. Origin and Significance of the SEM Cathodoluminescence from Zircon. *Journal of Microscopy*, 171(3): 223–232. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2818.1993.tb03379.x>
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., et al., 1986. A Chemical Classification of Volcanic Rocks Based on the Total Alkali-Silica Diagram. *Journal of Petrology*, 27(3): 745–750. <https://doi.org/10.1093/ptrology/27.3.745>
- Li, W. X., Zhou, X. M., 2001. Subduction of the Paleopacific Plate and Origin of Late Mesozoic Igneous Rocks in Southeastern China: Some Supplement Evidences for the Model of Lithosphere Subduction and Underplating of Mafic Magma. *Geotectonica et Metallogenia*, 25(1): 55–63 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. H., 2000. Cretaceous Magmatism and Lithospheric Extension in Southeast China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(3): 293–305. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(99\)00060-7](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(99)00060-7)
- Lin, C.S., Shi, H.S., Li, H., et al., 2018. Sequence Architecture, Depositional Evolution and Controlling Processes of Continental Slope in Pearl River Mouth Basin, Northern South China Sea. *Earth Science*, 43(10): 3407–3422 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y.S., Hu, Z.C., Gao, S., et al., 2008. In-Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257(1): 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.08.004>
- Ludwig, K. R., 2003. Isoplot 3.09—A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. *Berkeley Geochronology Center Special Publication*, 4: 1–4.
- Ma, Q., Zheng, J.P., Xu, Y.G., et al., 2015. Are Continental “Adakites” Derived from Thickened or Foundered Lower Crust?. *Earth and Planetary Science Letters*, 419: 125–133. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.02.036>
- Maniar, P. D., Piccoli, P. M., 1989. Tectonic Discrimination of Granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635–643. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1989\)1010635:TD0G>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1989)1010635:TD0G>2.3.CO;2)
- Martin, H., 1999. Adakitic Magmas: Modern Analogues of Archaean Granitoids. *Lithos*, 46(3): 411–429. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(98\)00076-0](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(98)00076-0)
- Meng, F.Y., Zhao, Z.D., Zhu, D.C., et al., 2010. Petrogenesis of Late Cretaceous Adakite-Like Rocks in Mamba from the Eastern Gangdese, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2180–2192 (in Chinese with English abstract).
- Niu, H., Sato, H., Zhang, H. X., et al., 2006. Juxtaposition of Adakite, Boninite, High-TiO<sub>2</sub> and Low-TiO<sub>2</sub> Basalts in the Devonian Southern Altay, Xinjiang, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 28(4): 439–456. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2005.11.010>
- Northrup, C. J., Royden, L. H., Burchfiel, B. C., 1995. Motion of the Pacific Plate Relative to Eurasia and Its Potential Relation to Cenozoic Extension along the Eastern Margin of Eurasia. *Geology*, 23(8): 719–722.

- [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)0230719:MOTPPR>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)0230719:MOTPPR>2.3.CO;2)
- Peccerillo, A., Taylor, S. R., 1976. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63–81. <https://doi.org/10.1007/BF00384745>
- Quan, Y. B., Liu, J. Z., Zhao, D. J., et al., 2015. The Origin and Distribution of Crude Oil in Zhu III Sub-Basin, Pearl River Mouth Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 66(66): 732–747. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.07.015>
- 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(1): 313–345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Wang, Y., Deng, J. F., Ji, G. Y., 2004. A Perspective on the Geotectonic Setting of Early Cretaceous Adakite-Like Rocks in the Lower Reaches of Yangtze River and Its Significance for Copper-Gold Mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 297–314 (in Chinese with English abstract).
- Wen, D. R., Chung, S. L., Song, B., et al., 2008. Late Cretaceous Gangdese Intrusions of Adakitic Geochemical Characteristics, SE Tibet: Petrogenesis and Tectonic Implications. *Lithos*, 105(1): 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2008.02.005>
- Xu, J., Shinjo, R., Defant, M. J., et al., 2002. Origin of Mesozoic Adakitic Intrusive Rocks in the Ningzhen Area of East China: Partial Melting of Delaminated Lower Continental Crust?. *Geology*, 30(12): 1111–1114. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2002\)0301111:OO-MAIR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)0301111:OO-MAIR>2.0.CO;2)
- Xu, W. L., Wang, Q. H., Wang, D. Y., et al., 2006. Mesozoic Adakitic Rocks from the Xuzhou-Suzhou Area, Eastern China: Evidence for Partial Melting of Delaminated Lower Continental Crust. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27(2): 230–240. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2005.03.005>
- Yan, P., Deng, H., Liu, H. L., et al., 2006. The Temporal and Spatial Distribution of Volcanism in the South China Sea Region. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27(5): 647–659. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2005.06.005>
- Yao, B. C., Wan, L., Liu Z. H., 2004. Tectonic Dynamics of Cenozoic Sedimentary Basins and Hydrocarbon Resources in the South China Sea. *Earth Science*, 29 (5): 543–549 (in Chinese).
- Yuan, H. L., Gao, S., Liu, X. M., et al., 2004. Accurate U-Pb Age and Trace Element Determinations of Zircon by Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28 (3): 353–370. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2004.tb00755.x>
- Zhang, Q., 2014. Geodynamic Implications of Continental Granites. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(4): 785–798 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. Z., Qi, J. F., Wu, J. F., 2019. Cenozoic Faults Systems and Its Geodynamics of the Continental Margin Basins in the Northern of South China Sea. *Earth Science*, 44(2): 603–625 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y. C., Hou, Z. Q., Gong, Y. L., et al., 2014. Petrogenesis of Cretaceous Adakite-Like Intrusions of the Gangdese Plutonic Belt, Southern Tibet: Implications for Mid-Ocean Ridge Subduction and Crustal Growth. *Lithos*, 190: 240–263. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.12.013>
- Zhou, D., Sun, Z., Chen, H. Z., et al., 2008. Mesozoic Paleogeography and Tectonic Evolution of South China Sea and Adjacent Areas in the Context of Tethyan and Paleo-Pacific Interconnections. *Island Arc*, 17(2): 186–207. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1738.2008.00611.x>
- Zhou, H. M., Xiao, L., Dong, Y. X., et al., 2009. Geochemical and Geochronological Study of the Sanshui Basin Bimodal Volcanic Rock Suite, China: Implications for Basin Dynamics in Southeastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(2): 178–189. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2008.05.001>
- Zhou, X. M., Li, W. X., 2000. Origin of Late Mesozoic Igneous Rocks in Southeastern China: Implications for Lithosphere Subduction and Underplating of Mafic Magmas. *Tectonophysics*, 326(3): 269–287. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(00\)00120-7](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(00)00120-7)
- Zhu, B. Q., Wang, H. F., Chen, Y. W., et al., 2002. Geochronological and Geochemical Constraint on the Cenozoic Extension of Cathaysian Lithosphere and Tectonic Evolution of the Border Sea Basins in East Asia. *Geochimica*, 31(3): 213–221 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 陈希节, 许志琴, 孟元库, 等, 2014. 冈底斯带中段中新世埃达克质岩浆作用的年代学、地球化学及 Sr-Nd-Hf 同位素制约. *岩石学报*, 30(8): 2253–2268.
- 董冬冬, 王大伟, 张功成, 等, 2009. 珠江口盆地深水区新生代构造沉积演化. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 33

- (5): 17—22, 29.
- 方念乔, 姚伯初, 万玲, 等, 2007. 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. 地球科学, 32(2): 147—154.
- 管琪, 朱弟成, 赵志丹, 等, 2010. 西藏南部冈底斯带东段晚白垩世埃达克岩: 新特提斯洋脊俯冲的产物? . 岩石学报, 26(7): 2165—2179.
- 李武显, 周新民, 2001. 古太平洋岩石圈消减与中国东南部晚中生代火成岩成因: 岩石圈消减与玄武岩底侵相结合模式的补充证据. 大地构造与成矿学, 25(1): 55—63.
- 林畅松, 施和生, 李浩, 等, 2018. 南海北部珠江口盆地陆架边缘斜坡带层序结构和沉积演化及控制作用. 地球科学, 43(10): 3407—3422.
- 孟繁一, 赵志丹, 朱弟成, 等, 2010. 西藏冈底斯东部门巴地区晚白垩世埃达克质岩的岩石成因. 岩石学报, 26(7): 2180—2192.
- 汪洋, 邓晋福, 姬广义, 2004. 长江中下游地区早白垩世埃达克质岩的大地构造背景及其成矿意义. 岩石学报, 20(2): 297—314.
- 姚伯初, 万玲, 刘振湖, 2004. 南海海域新生代沉积盆地构造演化的动力学特征及其油气资源. 地球科学, 29(5): 543—549.
- 张旗, 2014. 大陆花岗岩的地球动力学意义. 岩石矿物学杂志, 33(4): 785—798.
- 张远泽, 漆家福, 吴景富, 2019. 南海北部新生代盆地断裂系统及构造动力学影响因素. 地球科学, 44(2): 603—625.
- 朱炳泉, 王慧芬, 陈毓蔚, 等, 2002. 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. 地球化学, 31(3): 213—221.