何元琴,朱红涛,丁琳,等.珠一坳陷古近系火山物质分类、鉴定识别方法及其深层油气地质意义.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(6):1860-1882. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240242.
He Yuanqin, Zhu Hongtao, Ding Lin, et al. Classification, Identification and Recognition Methods of Paleogene Volcanic Material and Significance of Deep Reservoir Petroleum Geology in Zhu Ⅰ Depression. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2024,54(6):1860-1882. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240242.

珠一坳陷古近系火山物质分类、鉴定识别方法及其深层油气地质意义

何元琴[1], 朱红涛[1], 丁 琳[2,3], 陶文芳[2,3], 王 维[1], 曾智伟[4]

1.中国地质大学(武汉)资源学院,武汉 430074
2.中海石油(中国)有限公司深圳分公司,广东 深圳 518054
3.中海石油深海开发有限公司,广东 深圳 518054
4.中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院,武汉 430074

摘要:珠江口盆地珠一坳陷勘探重心逐渐由浅层转入深层古近系,古近系火山物质普遍发育,是影响深部碎屑岩储层物性的重要因素之一。本次研究综合利用镜下薄片观察、元素面扫描、碎屑锆石形态特征和年代学等方法,结合研究区火山发育背景,对珠一坳陷古近系碎屑岩储层火山物质的性质展开研究。结果表明:研究区古近系碎屑岩储层中主要发育酸性、中性、基性的火山物质。酸性火山物质常具有高硅低碱质特征,富Al和K元素,蚀变产物以高岭石、伊利石等黏土矿物为主,其形成与酸性岩浆喷发有关,常与流纹岩岩屑等伴生,并可识别出同沉积火山锆石,主要分布于陆丰凹陷;中性火山物质Si元素质量分数中等,富K元素,蚀变产物主要为自生石英,常与安山岩岩屑伴生,在恩平23构造带和恩平27构造带均有分布,少量分布于陆丰13构造带;基性火山物质Si元素质量分数极低,富Fe和Mg元素,蚀变产物以铁镁质黏土矿物和浊沸石为主,主要分布于惠州凹陷,偶见于西江凹陷。另外,研究区陆丰13构造带局部发育少量偏碱性的火山物质,主要通过蚀变产物为磷灰石来判别。凝灰质储层普遍呈低孔、低渗特征,但在特定的成岩条件下,少量火山物质以及火山物质的溶蚀性质能够起到增孔和保孔的作用,对后期油气充注具有一定的改善作用。

关键词:火山物质识别;元素面扫描;碎屑锆石;年代学;储层;油气地质;古近系;珠一坳陷
doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240242 **中图分类号**:P59;P618.13 **文献标志码**:A

Classification, Identification and Recognition Methods of Paleogene Volcanic Material and Significance of Deep Reservoir Petroleum Geology in Zhu Ⅰ Depression

He Yuanqin[1], Zhu Hongtao[1], Ding Lin[2,3], Tao Wenfang[2,3], Wang Wei[1], Zeng Zhiwei[4]

收稿日期:2024-09-30

作者简介:何元琴(1999—),女,硕士研究生,主要从事同沉积火山活动和储层发育机制方面的研究,E-mail:1143598073@qq.com

通信作者:朱红涛(1976—),男,教授,博士生导师,主要从事层序地层学、沉积学和地震沉积学方面的研究,E-mail:htzhu@cug.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(41872149,41572084);中海油"十四五"揭榜挂帅项目(CCL2022SZPS0238)
Supported by the National Natural Science Foundation of China (41872149,41572084) and the Plan Technology Project of CNOOC During "14th Five Year" (CCL2022SZPS0238)

1. *School of Earth Resource*, *China University of Geoscience* (*Wuhan*), *Wuhan* 430074, *China*
2. *CNOOC China Limited*, *Shenzhen Branch*, *Shenzhen* 518054, *Guangdong*, *China*
3. *CNOOC Deepwater Development Limited*, *Shenzhen* 518054, *Guangdong*, *China*
4. *School of Geophysics and Geomatics*, *China University of Geoscience* (*Wuhan*), *Wuhan* 430074, *China*

Abstract: The focus of exploration gradually shifted from shallow to deep Paleogene strata in Zhu Ⅰ depression, the Pearl River Mouth basin. Volcanic materials are widely developed in Paleogene strata, which is one of the important factors affecting the physical properties of deep clastic rock reservoirs. This study comprehensively utilizes methods such as thin section, element surface scanning, morphological characteristics and U - Pb dating of detrital zircons, combined with the volcanic background of the study area, to study the volcanic materials properties of the Paleogene detrital reservoirs in the Zhu Ⅰ depression. The results showed that the Paleogene in the study area mainly developed acidic, intermediate, and basic volcanic materials. Acidic volcanic materials often have a high mass fraction of Si, rich in Al and K. The alteration products are mainly clay minerals such as kaolinite and illite, and their formation is related to acidic magma eruptions. They are often associated with acidic volcanic rock fragments such as rhyolite and can be identified as synsedimentary volcanic zircons, mainly distributed in the Lufeng sag. The intermediate volcanic materials have a moderate Si mass fraction and are relatively rich in potassium. The main alteration product is authigenic quartz, often associated with intermediate volcanic rock fragments such as andesite. It is distributed in Enping sag, eastern Yangjiang sag, and Lufeng sag. The basic volcanic materials have extremely low Si mass fraction and is rich in Fe and Mg. The alteration products are mainly mafic clay minerals and zeolite, mainly distributed in the Huizhou sag, with a small amount distributed in the Xijiang sag. In addition, a small amount of alkaline volcanic materials is locally developed in the Lufeng sag 13 structural belt of the study area, which is mainly distinguished by the alteration product being apatite. Low porosity and low permeability are commonly observed in tuffaceous reservoirs, but under specific diagenetic conditions, the locally developed small amount of volcanic materials and the dissolution properties of volcanic materials can play a role in increasing and preserving pores, which has a certain improvement significance for later petroleum charging.

Key words: volcanic material identification; element surface scanning; detrital zircon; chronology; reservoir; petroleum geology; Paleogene; Zhu Ⅰ depression

0　引言

火山物质在岩石学分类中多种多样。本文所研究的火山物质主要是指粒径小于 2 mm 的火山物质，在这类火山物质中还包括了粒度更为细小的火山充填物(<0.062 5 mm)，在岩石组分中作为填隙物存在，有学者将其称为凝灰质杂基或者统称为易变形组分[1-3]。其与泥质杂基相比具有一定溶蚀性，成分更为复杂[1, 4-7]，本文更多是强调以填隙物形式存在的火山物质。在储层成岩演化过程中，不同性质的火山物质具有不同的成岩特征，其对储层物性的影响也具有多样性。前人[7-10]对火山物质的性质、含量等在不同成岩演化阶段过程中对储层物性产生的影响进行了一定的研究，认为火山物质的性质对储层的差异性改造成为现今深部低孔-低渗储层勘探的一个关键因素，但对于火山物质性质的识别尚缺乏一套完整的方法。因此，明确火山物质的发育特征、性质以及不同性质火山物质的成岩特征，对于指导深部有效储层的勘探和开发至关重要。

珠江口盆地珠一坳陷古近系构造作用强烈，火山活动频繁[11]，钻遇碎屑岩储层中普遍含有一定量的火山充填物。近些年，前人针对珠江口盆地珠一坳陷凝灰质储层的发育特征和性质展开了相关研究。田立新[3]通过对惠州凹陷古近系火山机构进行刻画表征，结合地震属性，对惠州 26 构造火山物质性质的垂向演化进行分析；靳子濠等[1]通过元素组

成,利用TAS判别图版和微量元素比值法对惠陆地区古近系文昌组的火山物质类型进行了划分。然而目前对珠一坳陷火山物质的研究仍相对薄弱,针对火山物质性质的识别缺少系统的研究,这亟待系统开展火山物质性质的识别研究,探讨不同类型的火山物质对储层发育特征的影响。

本文以珠江口盆地珠一坳陷古近系碎屑岩储层为研究对象,在前人研究的基础上,基于常规岩心分析、岩石薄片、扫描电镜、背散射、元素面扫描以及测录井资料,结合碎屑锆石形态、定年等方法,对研究区重点构造进行精细研究,对重点薄片、岩心样品进行整理、挑选,侧重分析研究区火山物质的发育特征和性质,建立了一套相对完善的珠一坳陷火山物质性质的判别标准,微观上探讨其对深部储层物性的影响,以期为珠江口盆地珠一坳陷深部储层勘探开发提供有价值的依据。

1 区域地质概况

1.1 地质背景

珠江口盆地位于南海北部陆缘,呈NE—SW走向,具有"南北分带,东西分区"的构造格局[12-20]。珠一坳陷(包含阳江东凹)位于珠江口盆地的北部,北部为北部隆起,南部被东沙隆起以及番禺低隆起与珠二坳陷分隔(图1a),珠一坳陷内部被各个低凸起分隔,由西往东依次发育恩平—阳江东凹陷、西江凹陷、惠州凹陷以及陆丰凹陷4个负向构造单元(图1b)。

1.2 地层发育情况

珠江口盆地地层在盆地多起构造演化控制下具有下断上坳、下陆上海的特征[21-22]。珠一坳陷位于珠江口盆地的北部,普遍缺乏神狐组,在中生代侵入岩基底上直接沉积文昌组,受到多期区域性构造运动的影响,珠一坳陷沉积地层自下而上依次为古近系中始新统(文昌组)、上始新统(恩平组)、渐新统(珠海组)和新近系中新统(珠江组、韩江组和粤海组)、上新统(万山组)以及第四系[23-25](图2)。

古近系文昌组(49.0~39.0 Ma)底部为T_g地震反射层,以下为前古近系基底,文昌组时期,珠一坳陷整体处于断陷期,呈现陆相湖盆的特征,岩性以湖相泥岩为主,是烃源岩发育的主力层段。恩平组底部为T_{80}地震反射层,恩平组时期(39.0~32.0 Ma)逐渐由断陷期向坳陷期过渡,各个洼陷呈现弱分隔的特征,古地貌逐渐平缓,水体变浅,洼陷范围扩大。

1.3 珠一坳陷火山活动发育背景

南海北部珠江口盆地中生代时期发育NE-NEE走向和NW-NWW走向断裂,其受控于古太平洋板块俯冲作用,处于陆缘岩浆岛弧构造背景[26-30],岩浆活动丰富[19],多期岩浆活动在空间上相互交织,形成复杂的岩浆岩岩性组合[30]。火山岩多由安山岩和英安质岩石组成,侵入岩产状以岩基和岩株为主,伴生的深成岩体多为中酸性花岗岩岩基。

郝世豪[11]通过统计钻遇古近纪岩浆岩的钻井,表明南海北部陆缘的珠江口盆地在古近纪伴随着强烈的火山活动,与传统认为的"贫岩浆型"被动陆缘有所差异。基于收集到的岩浆岩的放射性同位素定年数据,指出珠一坳陷在裂陷期的岩浆活动整体上呈现出多幕式活动的特点,以早、晚文昌期岩浆活动(约42.0 Ma)最为强烈。很多学者指出珠江口盆地岩浆活动在裂陷后期也非常活跃[31-33]。

中生代珠江口盆地处于大陆边缘岩浆岛弧背景,其北部珠一坳陷岩浆活动极其活跃,发育大型岩浆岩基底;新生代以来发生区域性裂陷作用,伴随着强烈的火山活动,火山物质丰富,作为同沉积碎屑岩储层的物质来源之一,对于珠一坳陷深部储层具有重要的影响。

2 火山物质的识别及其性质判别

研究区古近系储层火山物质普遍发育,主要包括岩屑、晶屑、玻屑以及火山灰等类型,一般以岩屑或填隙物的形态赋存在岩石颗粒间。岩屑、晶屑和玻屑具有港湾状结构,磨圆特征不明显;以填隙物的形式赋存在粒间的火山物质,或称为凝灰质杂基,无固定外形,在储层成岩演化阶段中具有更复杂蚀变过程,对储层物性影响更强[1]。

2.1 火山物质的镜下特征

凝灰质杂基在镜下一般呈不规则团状充填粒间,高倍镜下无晶面、晶棱,在正交偏光下不显光性,呈一级灰白干涉色,而泥质杂基多为细小纤维状或鳞片状,干涉色高[34-36](图3a、b)。凝灰质杂基可与具备典型火山岩性质或火山碎屑岩岩屑共生,且具有相似的结构特征和性质(图3c)。早期研究通常将细粒的火山物质识别成泥质成分,其与泥质杂基的区别在于细粒火山物质在镜下普遍具有可溶蚀性,

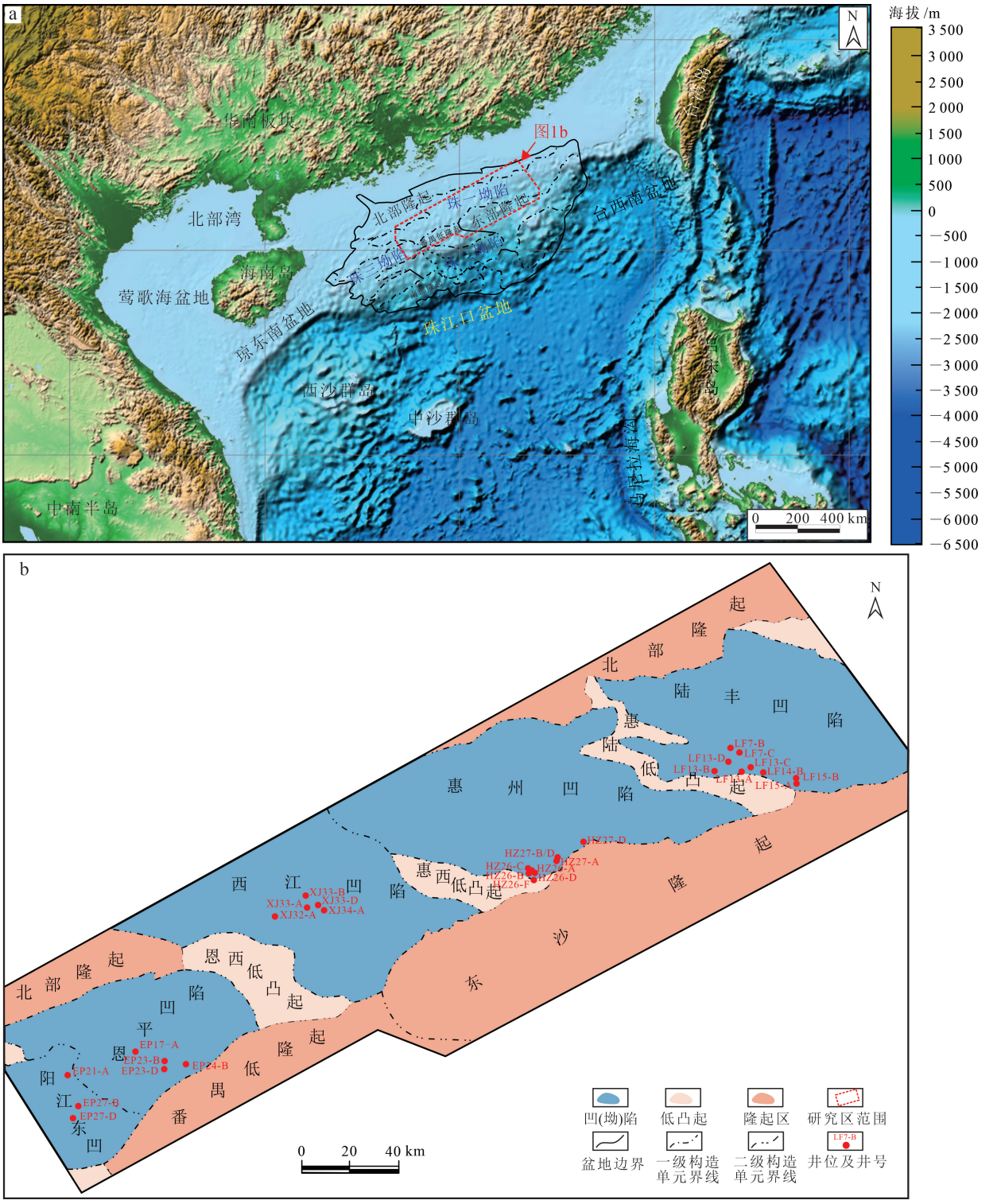
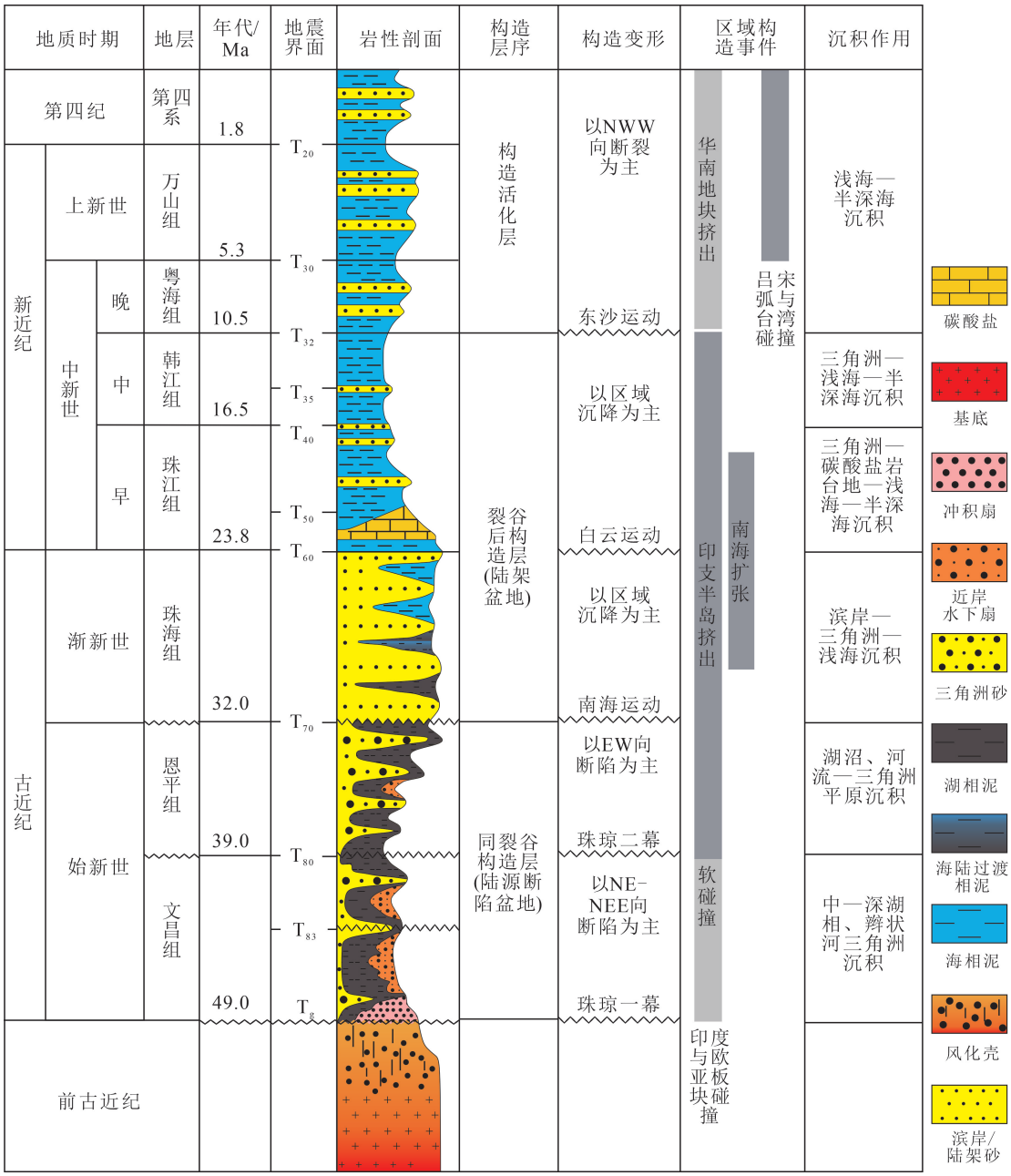


图 1　研究区区域位置图(a)及构造单元划分(b)

Fig.1　Regional location map (a) and structural unit division (b) of the study area

可溶蚀形成一定的粒间溶孔，但由于不同岩性火山作用形成的细粒火山物质的性质不同，其溶蚀程度具有一定差异性(图 3d、e、f)；部分细粒火山物质在成岩流体的改造下会产生蚀变作用，沿着溶蚀孔的边缘或者颗粒的边缘发生蚀变(图 3e、f、g、h)，有些蚀变产物在单偏光下呈棕褐色(图3e)，可见有机质



据文献[25]修编。

图2 珠一坳陷构造-地层综合柱状图

Fig.2 Comprehensive column chart of structure strata in Zhu Ⅰ depression

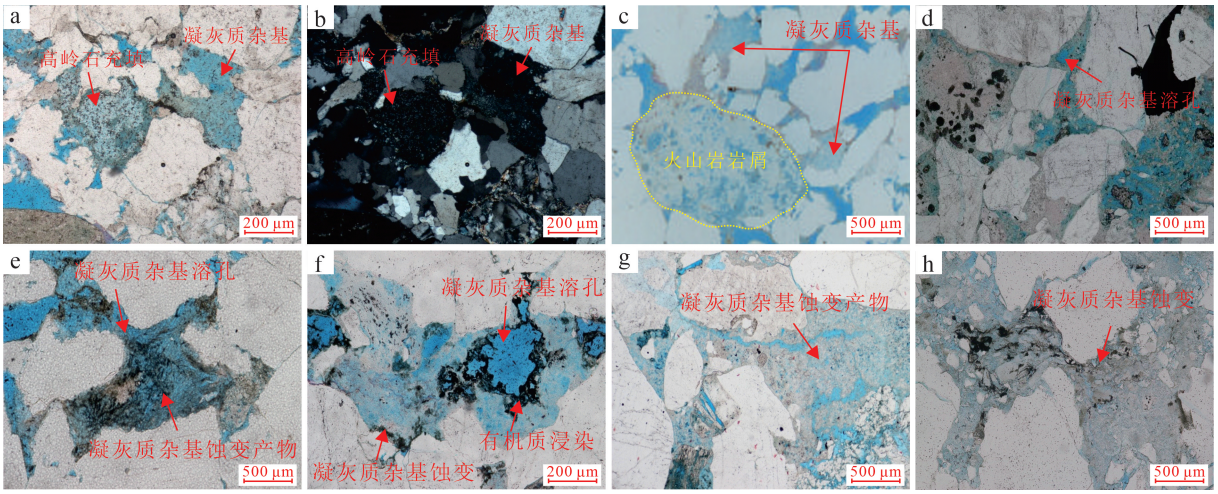
浸染(图3f)。研究区细粒火山物质的类型发育较为复杂,仅通过镜下观察难以准确识别细粒火山物质的性质,因此结合研究区勘探需求,本文针对火山物质性质的判别方法进行系统研究。

2.2 火山物质性质的判别方法

2.2.1 元素地球化学特征

20世纪有学者利用TAS图版和不活泼微量元素比值(Zr/TiO_2和Nb/Y)建立了火山物质分类标准[37],将其划分为酸性、中性、基性。酸性火山物质具有高硅低碱质特征,Al元素质量分数较高,富钾[38];中性火山物质Si元素质量分数中等,富K;基性火山物质具有低硅高碱质特征,Fe和Mg元素质量分数较高[1]。

本文通过电子探针、背散射图像采集以及主量元素能谱面扫描,对研究区不同性质的火山物质的元素质量分数特征进行分析,分析结果如下。LF7-



a. EP17－A 井，恩平组，3 553.4 m，见少量火山物质充填粒间，少量高岭石呈鳞片状充填粒间，单偏光；b. EP17－A 井，恩平组，3 553.4 m，凝灰质杂基在正交偏光下不显光性，正交偏光；c. LF7－C 井，恩平组，3 341.6 m，火山物质与火山岩岩屑共存，单偏光；d. XJ34－A 井，文昌组，4 560.7 m，凝灰质杂基溶孔，单偏光；e. HZ27－E 井，恩一、二段，3 648.0 m，凝灰质杂基溶孔，可见溶蚀产物，单偏光；f. LF13－E 井，文昌组，4 161.2 m，凝灰质杂基溶孔，并见蚀变产物，单偏光；g. LF13－E 井，文昌组，4 215.0 m，火山物质呈杂基状，见溶蚀产物形成自生黏土矿物，单偏光；h. HZ26－B 井，恩一、二段，3 050.0 m，可见少量凝灰质杂基蚀变，单偏光。

图 3　研究区古近系火山物质微观特征

Fig.3　Microscopic characteristics of volcanic material in the Paleogene of the study area

B 井火山物质广泛分布，背散射图像上可见火山物质充填在粒间孔隙中（图 4a 左）；元素能谱面扫描显示火山物质具有高 Si 元素质量分数特征，K、Al 元素质量分数较高，Fe 元素质量分数较低，为酸性火山物质特征（图 4a 右）。LF15－B 井 3 716.3 m 处火山物质以岩屑形式存在，背散射图像下可见颗粒边缘发生溶蚀，基质为隐晶质，可见斑状结构，为中性安山岩岩屑（图 4b 左）；Si 元素质量分数高，富 Al、K 元素，Fe、Mg 元素质量分数低（图 4b 右）。HZ27－D 井文五段 3 630.5 m 处背散射图像上可见大颗喷出岩岩屑，以及碱性长石发育（图 4c 左）；主量元素面扫描显示火山物质呈现 Si 元素质量分数偏低，具有典型基性火山物质特征，粒间充填火山玻璃，Fe、Mg 元素质量分数较高，为基性火山物质蚀变的中间产物（图 4c 右，红色箭头处）。

2.2.2　火山物质蚀变产物特征

火山物质具有溶蚀性，不同性质火山物质溶蚀程度有差异[1]，蚀变产物受控于火山物质自身性质以及储层成岩流体变化，常见的蚀变产物主要有高岭石、绿泥石、自生石英、浊沸石、碳酸盐胶结物及磷灰石等[1, 8, 39-41]。因此，可根据火山物质的蚀变产物来反推其性质。

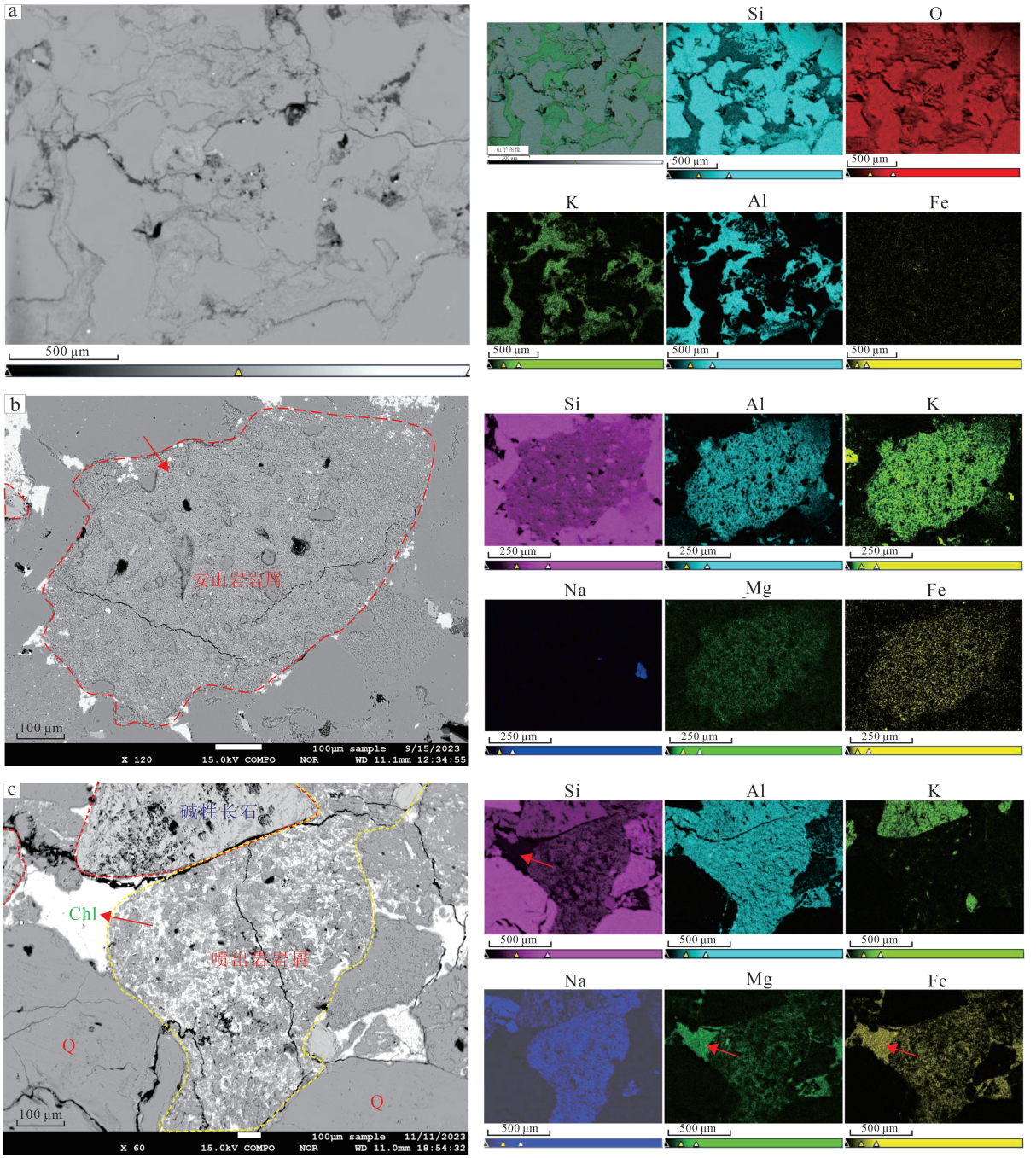
酸性火山物质的蚀变产物主要包括自生高岭石和伊利石等黏土矿物[1]。火山物质蚀变的自生高岭石形成于次生溶蚀孔内部或边缘（图 5a、b、c、d），伴随铁质矿物析出（图 5c），高岭石呈鳞片状产出（图 5b），部分可保留高岭石晶间孔（图 5d）。中性火山物质蚀变产物主要以自生石英为主，粒间溶蚀的火山物质残余部分向伊利石等黏土矿物转化（图 5e、f、g），自生石英镜下具有很好的晶型，以微晶形态存在于次生溶孔中，颗粒大小不一，生长方向随机（图 5f、g）。浊沸石可作为基性火山物质蚀变的指标矿物[38]（图 5h、i），镜下可见浊沸石呈板状充填在火山物质溶孔中，并且自身具有溶蚀性，可见溶孔发育（图 5h、i），基性火山物质富含 Fe、Mg 元素，常蚀变为富铁镁质黏土矿物，镜下可见火山物质绿泥石化[8]（图 5j）。

碱性火山物质相对富钠，多代表响岩等偏碱性岩浆的喷出产物。靳子濛等[1]对陆丰 13 构造带部分含火山物质的样品进行 TAS 图版分析，样品主要分布于偏碱性的粗面安山岩和玄武粗安岩区域，指示其来源于碱性岩浆[42]。碱性火成岩矿物组合，例如钛铁矿、磷灰石、金云母、方解石、透长石和霞石等，可以指示碱性岩浆来源。其中，磷灰石的成因大多与偏碱性的火山物质蚀变有关，在大气淋滤作用下，碱性火山物质会在原地形成磷灰石[1, 9-10]。研究区仅陆丰 13 构造带局部发育磷灰石，磷灰石镜下呈针状或球粒状散布于颗粒之间，或呈成团状

发育于火山物质溶孔内部,可见铁质沉淀(图5k、l)。

2.2.3 伴生及同生火山岩岩屑类型

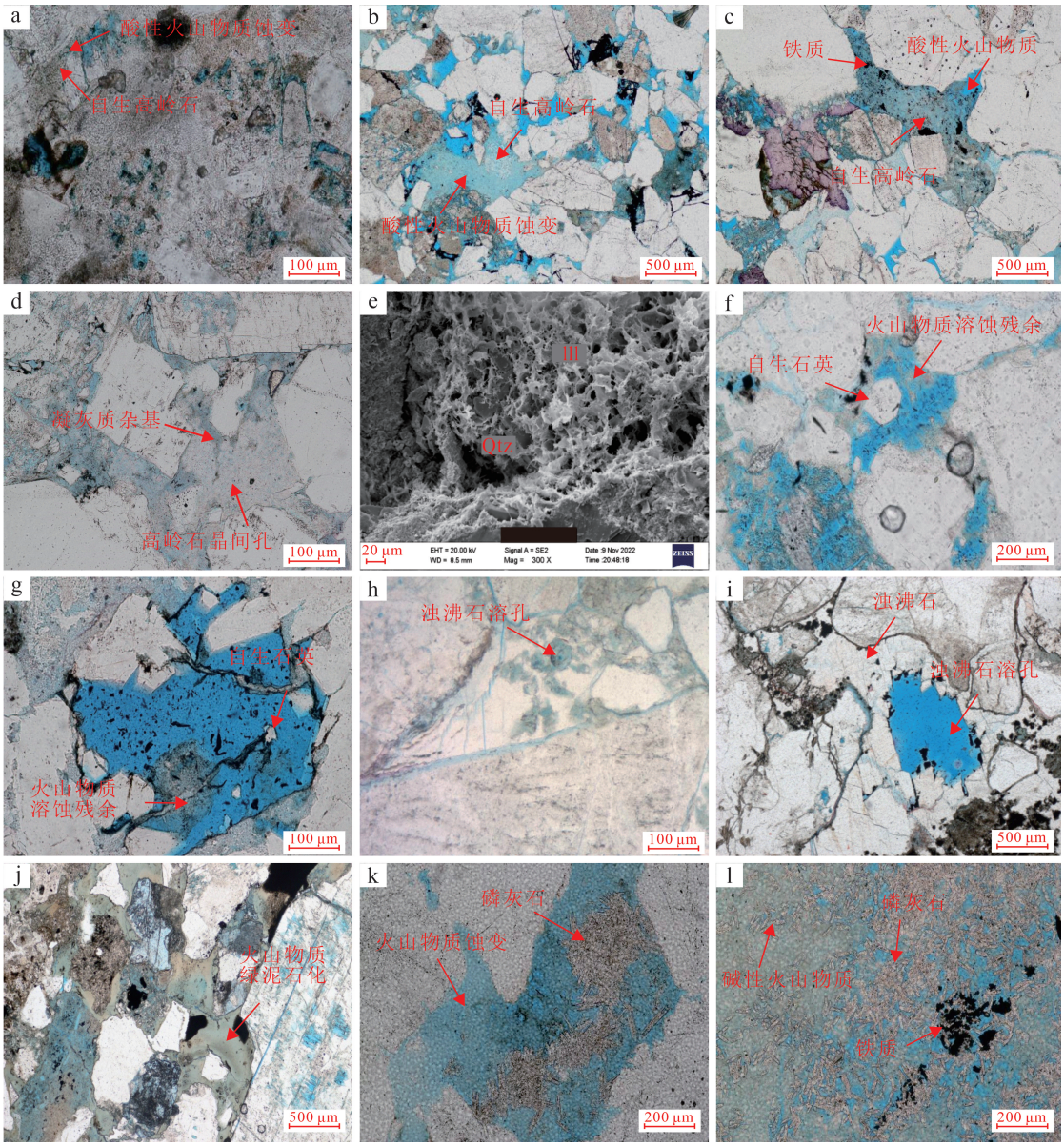
珠一坳陷古近系伴随着强烈的火山活动,存在大面积的火山喷发[11]。其钻井揭示,研究区钻遇到多种类型的火山岩以及火山碎屑岩,包括凝灰质砂岩、凝灰岩、安山岩以及玄武岩等岩性[30](表1)。通过已钻遇到的火山岩层的性质可判断同生火山物质的性质,例如恩平27构造钻遇到安山岩,推测同生火山物质主要为中性。



a. LF7-B井3 883.0 m处酸性火山物质背散射图像(左),主量元素能谱面扫描(右);b. LF15-B井3 716.3 m处中性火山物质背散射图像(左),主量元素能谱面扫描(右);c. HZ27-D井3 630.5 m处基性火山物质背散射图像(左),主量元素能谱面扫描(右)。颜色条:颜色越亮表示元素质量分数越高。Q. 石英;Chl. 火山玻璃绿泥石化。

图4 研究区不同性质火山物质微观特征

Fig.4 Microscopic characteristics of volcanic materials with different properties in the study area



a. LF15－B 井，文昌组，3 714.9 m，酸性火山物质蚀变生成高岭石，单偏光；b. LF13－D，恩平组，3 217.5 m，酸性火山物质蚀变为高岭石，单偏光；c. LF13－D，恩平组，3 346.5 m，酸性火山物质发生蚀变生成高岭石，少量火山物质发生溶蚀收缩，并见析出铁矿，单偏光；d. HZ26－B 井，恩平组，3 040.8 m，火山物质蚀变生成少量高岭石，并保留少量高岭石晶间孔，单偏光；e. EP23－B 井，恩平组，3 516.3 m，中性火山物质内部发育伊利石，并见自生石英，扫描电镜；f. EP27－B 井，恩平组，3 841.5 m，中性火山物质溶蚀残余，自生石英产出，单偏光；g. LF13－E 井，文昌组，4 135.9 m，中性火山物质溶蚀残余，生成少量自生石英颗粒，单偏光；h. HZ26－A 井，文昌组，3 569.3 m，基性火山物质蚀变为浊沸石，单偏光；i. HZ26－E 井，文昌组，3 598.0 m，浊沸石胶结，单偏光；j. HZ27－D 井，文昌组，3 630.5 m，基性火山物质绿泥石化，单偏光；k. LF13－A 井，文昌组，3 438.0 m，碱性火山物质大量蚀变，中部见大量磷灰石，单偏光；l. LF13－A 井，文昌组，3 445.7 m，大量磷灰石产出，可见铁质沉淀，单偏光。Qtz.石英；Ⅲ.伊利石。

图 5　研究区火山物质蚀变产物微观特征

Fig.5　Microscopic characteristics of volcanic material alteration products in the study area

前文 2.1 提及凝灰质杂基可与具有相似性质的火山岩岩屑共生，通过火山岩岩屑的性质也可判断伴生及同生火山物质的性质。例如：EP21－A 井发育大量流纹岩岩屑，可见典型的流纹构造（图 6a），并伴随有少量的凝灰质杂基，火山物质发生蚀变，镜下可见蚀变产物被有机质浸染，在正交偏光下显光性，部分流纹岩岩屑绢云母化严重（图 6b），推测与流纹岩岩屑伴生的同期凝灰质杂基性质为酸性特征；

表1 珠一坳陷古近系部分钻井揭示火山岩及火山碎屑岩

Table 1 Partial drilling of Paleogene in Zhu Ⅰ depression reveals volcanic rocks and pyroclastic rock

构造单元	井号	层位	岩性	厚度/m
阳江东凹	EP27-B	恩平组	安山岩	33.0
	EP27-D	恩平组、文昌组	安山岩、凝灰岩、凝灰质砂岩	不详
恩平凹陷	EP23-B	恩平组	凝灰质砂岩	47.0
	EP23-D	恩平组	凝灰岩	11.0
	EP24-B	恩平组	凝灰岩	27.0
西江凹陷	XJ32-A	恩平组	凝灰质砂岩、玄武岩	30.0
	XJ33-A	文昌组	凝灰质砂岩	6.0
	XJ33-D	文昌组	玄武岩	129.0
	XJ33-B	恩平组	凝灰岩	16.0
惠州凹陷	HZ26-A	文昌组	玄武岩	11.8
	HZ26-C	文昌组	凝灰岩	10.0
	HZ26-D	恩平组	凝灰岩	57.0
	HZ26-F	恩平组	凝灰岩	30.0
	HZ27-A	恩平组、文昌组	凝灰质砂岩	114.0
	HZ27-B	文昌组	凝灰岩	9.0
陆丰凹陷	LF7-B	文昌组	凝灰岩	20.0
	LF13-B	文昌组	安山岩	49.0
	LF13-C	文昌组	凝灰岩、凝灰质砂岩	42.0
	LF13-D	文昌组	凝灰岩、凝灰质砂岩	99.0
	LF14-B	文昌组	玄武岩	17.0

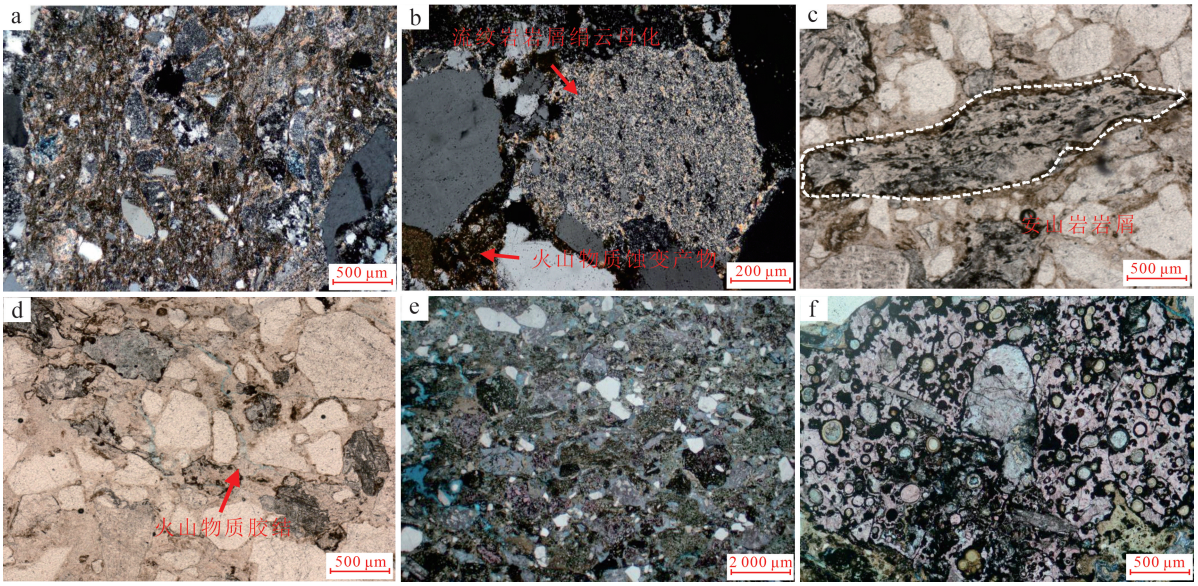
EP23-B井在恩平组钻遇到凝灰质砂岩,厚度达47.0 m(表1),在凝灰质砂岩中可见有安山岩岩屑,且边缘发生溶蚀(图6c),并伴随有大量凝灰质杂基充填粒间(图6d),推测此样品的火山物质为中性;XJ34-A井镜下薄片揭示有玄武岩岩屑发育,并有大量气孔发育,可见杏仁体(图6e、f),因此推测同期火山物质的性质为基性。

2.2.4 同沉积火山碎屑锆石

锆石作为最稳定的副矿物之一,其具备较高的U、Th质量分数,稳定性较高,即使经历多次构造-沉积改造,仍能保留丰富的原始物质信息,因此近年来广泛用于进行物源示踪工作。碎屑锆石根据成因可以分为岩浆锆石和变质锆石。目前,很多学者开始关注岩浆成因锆石自身性质的差异,不同性质的锆石产能和粒度具有显著差异性。酸性岩浆成因锆石Zr元素质量分数高,Si元素易饱和,锆石结晶早、持续时间长,更易形成大尺寸锆石颗粒[43]。而基性岩浆锆石中Zr和Si元素质量分数低,不易饱和,难以达到锆石结晶程度,因此不易生长锆石或锆石颗粒极小,很难使用常规方法挑选制靶[44-45]。因此,在常规锆石分析当中多使用的是酸性岩浆成因锆石进行分析。

本文基于LA-(MC)-ICP-MS定年的传统碎屑锆石年代学分析,采用基本一致的锆石分离提纯流程(机械粉碎、重选、磁选、双筒显微镜下挑选),制靶,阴极发光选区与激光定年。样品的预处理、阴极发光(CL)图像拍摄和LA-ICP-MS定年均在武汉上谱分析科技有限责任公司完成,激光剥蚀系统由COMPexPro 102 ArF 193 nm准分子激光器和MicroLas光学系统组成,ICP-MS型号为Agilent 7900。

以珠一坳陷东部惠陆地区为例,碎屑锆石U-Pb年龄原始数据见表2,碎屑锆石年龄从太古宙到新生代古近纪均有分布(表3)。陆丰地区受火山作用影响明显,并发育有大规模的火山物质,LF13-A与LF15-B井锆石年龄频谱中均可见38 Ma左右的年龄峰值,指示其受到古近系同沉积火山作用的影响。对两口井分别进行分析发现,LF13-A井在



a. EP21－A 井，恩平组，3 340.0 m，砾石成分主要为流纹岩，可见流纹构造，正交偏光；b. EP21－A 井，文昌组，3 648.0 m，见少量火山物质充填粒间并发生蚀变，蚀变产物在正交偏光下显光性，部分流纹岩岩屑绢云母化严重，正交偏光；c. EP23－B 井，恩平组，3 930.3 m，见安山岩岩屑，边缘有暗花边，单偏光；d. EP23－B 井，恩平组，3 930.3 m，火山物质充填粒间，并发生蚀变，可见少量白云石交代，单偏光；e. XJ34－A 井，文昌组，4 272.0 m，含大量火山物质，少量火山角砾岩，单偏光；f. XJ34－A 井，文昌组，4 272.0 m，岩屑为玄武岩岩屑，见大量气孔构造，并被方解石交代，可见圆形杏仁体，单偏光。

图 6　珠一坳陷西部(含阳江东凹)同沉积火山岩岩屑微观特征

Fig.6　Microscopic characteristics of synsedimentary volcanic rock debris in the western part of Zhu Ⅰ depression (including Eastern Yangjiang sag)

3 610.0～3 640.0 m 处共测得 71 个锆石测试点，年龄呈单峰式特征，集中在 44～34 Ma 之间(图 7a)，其中同沉积锆石约占锆石总数的 69%(表 3)；LF15－B 井样品在 3 865.0～3 875.0 m 处对碎屑锆石测得 102 个测试点，年龄分布频率图呈现多峰式特点，主要有三组峰值，第一组测得 15 个测点，年龄范围为 43～32 Ma；第二组测得 8 个测点，年龄范围为 132～118 Ma；第三组测得 11 个测点，年龄范围为 428～408 Ma(图 7b)，同沉积锆石年龄峰值最高，同沉积锆石约占该样品锆石总数的 20%(表 3)。HZ26－C 井的取样点在 3 975.0～3 995.0 m 处，共计 81 个测试点，年龄呈单峰式特征，主要在 120 Ma 左右(图 7c)。LF13－A 井锆石粒度为 50～200 μm，自形、多呈短柱状和长柱状，部分锆石可见岩浆振荡生长环带，其锆石年龄和形态指示该样品受到同沉积期酸性火山活动影响大(图 8a)。LF15－B 井碎屑锆石粒度在 100 μm 左右，半自形、不规则状，晶面有溶蚀，部分可见岩浆生长振荡环(图 8b)。HZ26－C 井碎屑锆石晶面显示明显溶蚀现象，可见岩浆生长振荡环带，具有一定棱角状(图 8c)

基于捕获到的古近系同沉积岩浆成因碎屑锆石及其年龄，指示陆丰凹陷地区主要受到酸性火山活动的影响，推测其火山物质的性质主要为酸性；而 HZ26－C 井所有锆石年龄均大于 65 Ma，未捕获到新生代年轻锆石，且钻井揭示 HZ26－C 井在古近系中钻遇到厚层凝灰质砂岩和凝灰岩(表 1)，指示其受到了同沉积期火山活动的影响，因此，推测该井受到同沉积基性火山活动的影响。

2.3　珠一坳陷古近系火山物质分布特征

通过元素面扫描、蚀变产物特征、火山岩岩屑类型和碎屑锆石定年等方法可知，研究区主要发育酸性、中性和基性火山物质，此外还发育少量偏碱性的火山物质。研究区酸性火山物质主要分布于陆丰凹陷，其元素特征为高硅低碱特征，Al、K 元素质量分数较高，蚀变产物以高岭石和伊利石等黏土矿物为主，常与流纹岩等酸性的喷出岩岩屑伴生，并且在陆丰 13、15 构造带地层中捕获到同沉积碎屑锆石。中性火山物质主要见于恩平 23 构造带和恩平 27 构造带，少量分布于陆丰 13 构造带，富 K，Si 元素质量分数不高，蚀变产物主要为自生石英，部分蚀变为黏土

表2 珠一坳陷惠陆地区重点构造碎屑锆石U-Pb年龄数据统计表

Table 2 Statistical table of key structural detrital zircon U-Pb age data in Huilu area of Zhu Ⅰ depression

样品	测点号	年龄/Ma		样品	测点号	年龄/Ma	
		$^{207}Pb/^{206}Pb(\pm1\sigma)$	$^{206}Pb/^{238}U(\pm1\sigma)$			$^{207}Pb/^{206}Pb(\pm1\sigma)$	$^{206}Pb/^{238}U(\pm1\sigma)$
LF13-A	1	160±71	139±5	LF13-A	53	14±227	38±2
	2	320±55	163±5		54	440±194	44±2
	4	523±122	114±3		55	137±103	110±4
	5	90±233	124±5		56	253±375	41±3
	6	376±327	43±2		57	35±203	38±3
	7	303±188	39±2		60	73±405	39±2
	9	38±87	157±5		61	16±264	39±3
	8	121±272	45±2		62	7±139	83±5
	10	1 655±39	1 709±51		63	664±248	43±2
	12	14±66	117±4		65	21±222	36±3
	13	148±218	61±3		66	21±245	40±2
	15	150±244	44±2		68	10±210	38±2
	16	118±265	37±2		69	625±405	39±2
	17	665±262	38±2		70	35±240	36±2
	20	9±221	35±2		71	382±289	39±1
	22	43±245	36±3		72	830±280	42±3
	23	80±311	41±4		73	26±222	41±3
	24	7±227	38±2		74	1 767±59	1 958±70
	26	283±246	38±2		75	68±351	38±3
	28	150±354	43±3		76	49±241	41±2
	29	229±295	41±3		77	135±56	158±5
	33	25±280	40±2		78	88±201	49±2
	34	82±318	34±2		79	12±260	37±2
	35	75±106	128±6		80	22±410	41±2
	38	38±231	38±2		83	274±108	132±5
	39	4±101	96±5		84	49±229	104±5
	41	1±239	38±2		86	364±206	90±4
	43	68±136	128±6		87	70±311	41±2
	45	74±313	39±3		89	333±117	87±4
	46	44±316	36±2		90	2 189±50	2 049±111
	47	4±252	38±2		91	210±390	38±3
	48	171±318	36±3		92	357±64	150±4
	49	16±319	35±2		93	257±266	42±2
	50	19±259	39±3		94	168±139	119±9
	51	38±199	36±2		98	432±69	118±5
	52	611±224	38±2				

续表 2

样品	测点号	年龄/Ma		样品	测点号	年龄/Ma	
		$^{207}Pb/^{206}Pb(\pm1\sigma)$	$^{206}Pb/^{238}U(\pm1\sigma)$			$^{207}Pb/^{206}Pb(\pm1\sigma)$	$^{206}Pb/^{238}U(\pm1\sigma)$
LF15－B	1	97±110	129±4	LF15－B	48	476±72	128±4
	2	106±68	409±9		49	279±202	38±1
	3	271±221	42±1		50	692±48	890±25
	4	134±86	180±5		51	531±456	40±2
	5	35±104	169±5		52	322±85	159±5
	6	829±59	716±18		53	444±101	217±8
	7	145±140	41±1		54	948±77	932±34
	8	549±56	372±12		55	779±59	784±32
	10	915±48	1 208±40		56	1±320	40±3
	11	417±68	195±6		57	224±102	499±20
	12	278±95	105±4		58	449±171	118±6
	13	170±316	130±6		59	959±61	924±37
	14	112±167	64±3		60	483±100	129±5
	15	32±123	428±16		61	1 834±45	1 998±69
	16	788±60	976±44		62	672±410	49±3
	17	967±55	1 063±33		63	577±81	730±31
	18	306±92	506±17		64	343±94	426±18
	19	359±97	427±12		65	641±227	39±2
	20	1 550±42	1 506±43		66	241±89	386±15
	23	49±550	35±2		68	454±143	146±6
	24	447±87	132±3		69	2 433±36	2 429±77
	26	914±59	970±25		70	2 499±42	2 471±85
	27	436±347	41±2		71	1 014±72	855±32
	28	1 695±53	1 480±49		73	243±72	163±6
	29	977±68	636±29		74	1 119±41	1 019±33
	30	528±88	378±16		75	358±101	226±8
	31	192±214	32±1		76	2 324±38	2 196±60
	33	440±271	39±2		77	1 494±110	1 571±55
	34	375±62	218±7		79	452±91	309±10
	35	513±70	416±13		80	841±51	890±29
	36	647±206	52±3		81	1 075±47	858±24
	37	234±69	197±6		82	585±89	409±16
	38	55±96	110±3		83	559±73	458±17
	39	203±60	161±5		84	65±89	145±6
	41	622±373	43±2		85	1 887±45	1 799±56
	42	2 585±41	2 360±75		86	337±189	88±4
	44	271±87	97±3		87	278±94	35±1
	45	671±516	47±3		88	223±117	150±5
	46	2 007±34	1 751±48		89	485±93	130±5
	47	158±449	39±3		90	364±209	95±5

续表2

样品	测点号	年龄/Ma		样品	测点号	年龄/Ma	
		$^{207}Pb/^{206}Pb(\pm1\sigma)$	$^{206}Pb/^{238}U(\pm1\sigma)$			$^{207}Pb/^{206}Pb(\pm1\sigma)$	$^{206}Pb/^{238}U(\pm1\sigma)$
	91	2±153	91±4		103	828±76	812±24
	92	727±242	83±5		104	511±183	132±6
	93	431±57	408±12		106	518±133	113±4
	94	741±59	421±16		107	604±361	40±2
	95	654±428	49±4		108	611±86	413±11
LF15-B	96	35±51	461±15	LF15-B	109	364±124	145±4
	97	2 287±29	2 470±67		110	465±101	423±13
	98	214±67	220±8		111	531±128	193±7
	100	828±44	889±23		112	596±115	130±5
	101	895±48	937±24		113	523±176	142±7
	102	620±118	420±14		114	344±330	34±2
	2	180±137	116±4		40	430±136	141±3
	4	509±135	133±4		41	2 480±30	2 555±54
	5	631±36	570±14		42	208±116	125±3
	6	1 839±26	1 906±32		44	495±99	120±3
	7	466±148	132±4		45	594±173	132±4
	8	233±72	282±6		46	627±237	107±5
	9	200±162	112±3		47	169±53	127±2
	11	50±79	112±3		48	75±101	131±4
	12	116±125	120±3		49	129±101	123±4
	13	18±102	122±3		50	284±125	117±2
	16	263±95	123±5		51	322±129	136±4
	17	549±150	120±2		52	315±230	116±2
	19	508±149	119±3		54	568±176	142±9
	20	47±94	125±3		57	422±84	123±4
HZ26-C	21	81±105	152±3	HZ26-C	58	347±90	174±5
	22	103±87	120±3		59	2 532±30	2 431±41
	23	302±96	121±2		60	334±79	123±2
	24	41±139	130±3		62	58±53	120±2
	25	259±85	129±3		66	541±88	130±3
	27	490±82	114±3		67	314±158	157±3
	28	356±146	127±3		68	200±80	238±5
	29	97±134	120±4		69	400±224	116±4
	31	214±118	121±5		71	336±92	120±4
	33	573±77	499±13		72	137±132	118±3
	34	1 145±40	1 005±36		73	452±156	109±3
	36	248±83	157±6		74	23±86	113±3
	37	446±149	120±5		75	85±123	108±3
	38	926±38	928±22		76	32±113	151±3
	39	235±108	120±4		78	128±69	139±3

续表 2

样品	测点号	年龄/Ma		样品	测点号	年龄/Ma	
		$^{207}Pb/^{206}Pb(\pm1\sigma)$	$^{206}Pb/^{238}U(\pm1\sigma)$			$^{207}Pb/^{206}Pb(\pm1\sigma)$	$^{206}Pb/^{238}U(\pm1\sigma)$
HZ26－C	79	352±149	116±3	HZ26－C	108	258±139	117±3
	80	299±112	128±3		109	601±109	132±4
	83	458±77	159±3		110	26±154	109±3
	84	281±121	119±3		111	27±110	110±3
	88	472±121	117±3		112	1 509±48	1 587±34
	91	379±116	115±4		113	514±81	119±3
	92	612±188	113±3		114	547±146	109±4
	94	602±144	118±4		115	497±119	119±3
	101	311±100	118±3		116	62±104	119±2
	104	30±202	128±3		117	145±120	109±2
	105	15±78	121±3		119	324±98	110±2
	107	2±148	110±4				

表 3　珠一坳陷惠陆地区重点构造碎屑锆石 U－Pb 时代组成统计表

Table 3　Distribution of the U－Pb age of key structures in Huilu area of Zhu Ⅰ depression

样品	深度范围/m	n	碎屑锆石 U－Pb 时代组成分布频数													
			E	K	J	T	P	C	D	S	O	∈	Pt_3	Pt_2	Pt_1	Ar
LF13－A 井	3 610.0～3 640.0	71	49	14	5	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0
LF15－B 井	3 865.0～3 875.0	102	20	17	13	4	0	1	6	8	4	0	17	4	7	1
HZ26－C 井	3 975.0～3 995.0	81	0	61	10	1	1	0	0	0	1	1	1	2	2	1

注：n 为点数。

矿物，常与安山岩等中性的喷出岩岩屑伴生。基性火山物质主要分布于惠州凹陷，少量分布于西江 34 构造带，基性火山物质 Si 元素质量分数极低，Fe 和 Mg 元素质量分数高，蚀变产物以铁镁质黏土矿物和浊沸石为主，镜下常见火山物质绿泥石化，以及浊沸石充填火山物质次生溶孔中，可与基性玄武岩伴生。碱性火山物质少见，主要分布在陆丰凹陷，本文以蚀变产物磷灰石作为判别依据。

综上所述，研究区阳江东凹和恩平凹陷火山物质有中、酸性，西江凹陷火山物质为基性，惠州凹陷火山物质多为基性，陆丰凹陷火山物质多为中、酸性，局部可见偏碱性的火山物质。

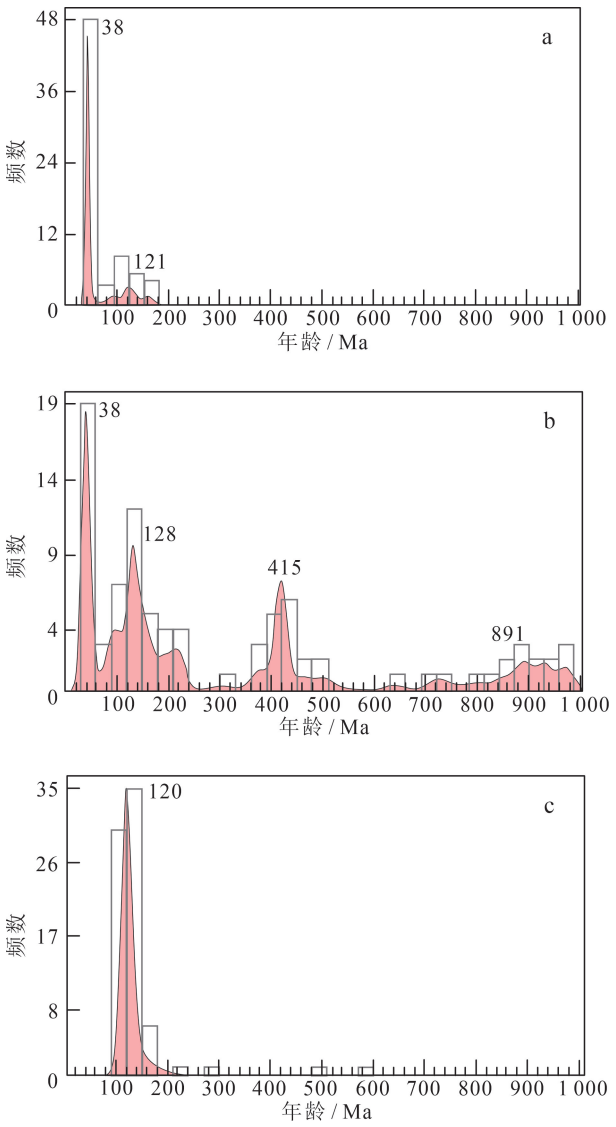
3　火山物质对深部储层的影响

3.1　凝灰质储层成岩作用

压实作用　压实作用是对深部储层物性影响最大的成岩作用。研究区深部古近系沉积地层普遍受到压实作用的影响，造成储层孔隙大量减少，渗透率大幅降低。对于含有大量具有塑性特征的火山物质的储层而言，火山物质往往充填在石英、长石等刚性颗粒之间，随着埋深加大，压实作用不断增强，火山物质在储层中发生塑性变形，加剧压实减孔（图 9a）。

胶结作用　研究区火山物质在储层中胶结作用较为普遍，镜下可见大量同沉积期形成的火山物质呈基底式胶结，颗粒之间呈点接触或线接触，粒间孔隙完全被充填（图 9b）。

溶蚀作用　溶蚀作用是凝灰质储层非常重要的作用。研究区火山物质溶蚀作用存在较大的差异，主要包括弱—强蚀变和强烈溶蚀。蚀变主要是指火山物质发生蚀变作用，其产生的蚀变产物原地堆积，镜下可见酸性火山物质发生蚀变作用生成高岭石等黏土矿物，并充填在粒间孔隙中（图 9c），中性火山物质蚀变并沉淀大量自生石英等（图 9d），基性火山物质蚀变为绿泥石以及浊沸石（图 9e、f、g），碱性火山物质蚀变沉淀大量磷灰石（图 9h、i）。强烈溶蚀



a. LF13-A井,文五段3 610.0～3 640.0 m处锆石年龄,n=71;
b. LF15-B井,文五段3 865.0～3 875.0 m处锆石年龄,n=102;
c. HZ26-C井,文四段3 975.0～3 995.0 m处锆石年龄,n=81。

图7 珠一坳陷陆丰凹陷碎屑锆石年龄频率分布图

Fig.7 Detrital zircon age frequency distribution in Lufeng sag of Zhu Ⅰ depression

是指火山物质完全溶蚀形成的次生溶孔,这类孔隙成为深部储层的重要油气储集空间(图9j)。火山物质的蚀变产物在酸性流体的作用下也会发生不同程度的溶蚀,浊沸石充填在粒间,可见发生了一定程度的溶解,内部出现溶蚀微孔(图9g),而磷灰石大部分已完全溶解,形成较为干净的溶孔,残余部分沿着颗粒边缘呈球粒状分布(图9h、i),形成的溶蚀孔隙改善了储层的物性[7]。

脱玻化作用 研究区火山物质含有玻屑等不稳定组分,在埋藏过程中易发生脱玻化作用,脱玻化过程中形成石英等矿物时体积缩小,生成一些微孔隙或微裂缝[46](图9k、l),达到增孔的目的,玻璃质的脱玻化作用是凝灰质储层的重要成岩作用[47]。镜下可见LF13-D井和EP27-B井凝灰质杂基发生收缩,形成了大小不一的收缩孔(缝)(图9k、l)。

3.2 火山物质对储层差异性影响

3.2.1 储层物性特征

本次研究统计了珠一坳陷部分重点构造古近系凝灰质储层的物性数据(表4),总结对比了其他盆地的凝灰质储层物性特征[40]。研究发现:研究区古近系储层孔隙度普遍低于15.00%,渗透率大部分小于50.00×10^{-3} μm^2,呈现出低孔、低渗—特低渗的特点;国内其他盆地凝灰质储层孔隙度大多集中在10%～20%之间,渗透率有较大差别,如准噶尔盆地西北缘乌夏断裂带平均渗透率可达149.00×10^{-3} μm^2,孔隙度为14.00%,属于低孔-中渗储层。从统计结果(表4)可知,该地区裂缝较为发育,裂缝的发育对孔隙度影响不大,但能在一定程度下增大储层渗透率。

3.2.2 储层孔隙类型

本文对研究区凝灰质储层的孔隙类型和微观特征进行统计,并结合前人[48-54]统计的其他盆地数据展开研究(表4)。研究区深部凝灰质储层孔隙多以次生溶蚀孔为主,保留极少部分原生粒间孔,受到酸性凝灰质填隙物的影响,陆丰13构造发育有火山物质收缩缝。与其他盆地不同的是,珠一坳陷凝灰质储层中脱玻化孔发育较少,裂缝仅在局部地区发育。

3.2.3 火山物质对储层的差异性改造

火山物质进入到湖盆中沉积,成岩期通过固结压实和流体改造作用对储层造成影响。火山物质是影响储层质量的关键因素之一,而火山物质的性质影响着储层的物性、储集空间类型和含油性等特征。

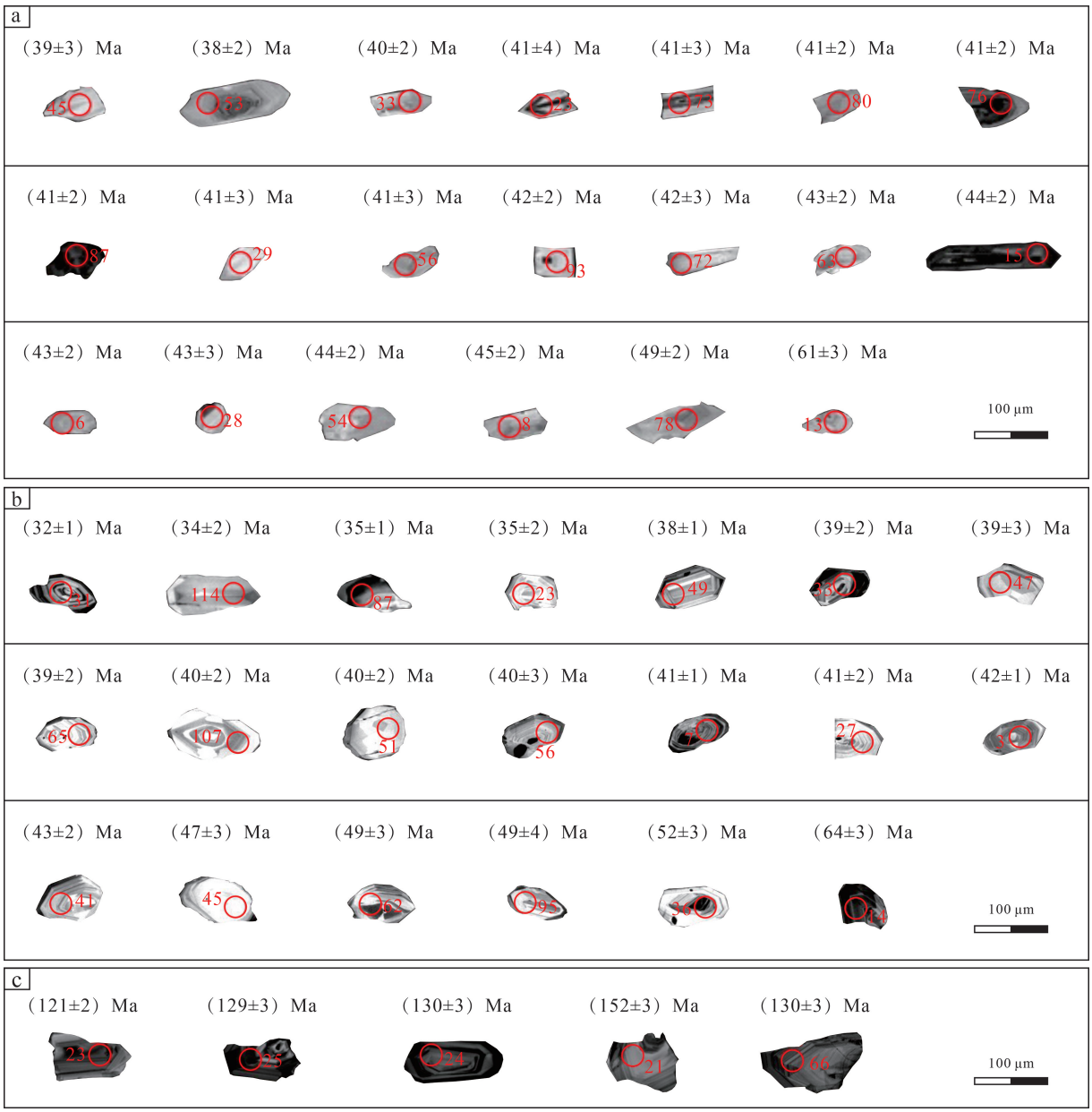
研究[7]表明基性火山物质具有较强的溶蚀能力,溶蚀孔更为发育,并且基性火山物质蚀变更易促使绿泥石、浊沸石等自生矿物产生,成岩晚期浊沸石会受到酸性流体的侵蚀而发生再次溶蚀,形成不同规模的溶蚀孔,进而提高储层的粒间溶孔占比。自生绿泥石在成岩作用早期形成颗粒包膜,通过降低胶结物的成核面积限制胶结物生长,是深部储层保孔的重要机制之一[55-56]。另外,在埋藏成岩过程中,火山物质中的玻璃质组分易发生脱玻化作用,体积收缩形成收缩缝(孔),有利于储层中流体沟通,一

定程度上能够提高储层的渗透率[2, 46]（表 4），脱玻化作用常见于中、酸性凝灰质岩中[57]。梁官忠[58]指出，二连盆地哈南地区发育中性和基性凝灰岩含油气储层，裂缝是储层的重要储集空间和流体交换通道。

结合研究区凝灰质储层发育特征及发育规律，表明基性火山物质比其他性质的火山物质更易溶蚀成孔，对储层的改善作用更为明显。

4　火山物质识别油气地质意义讨论

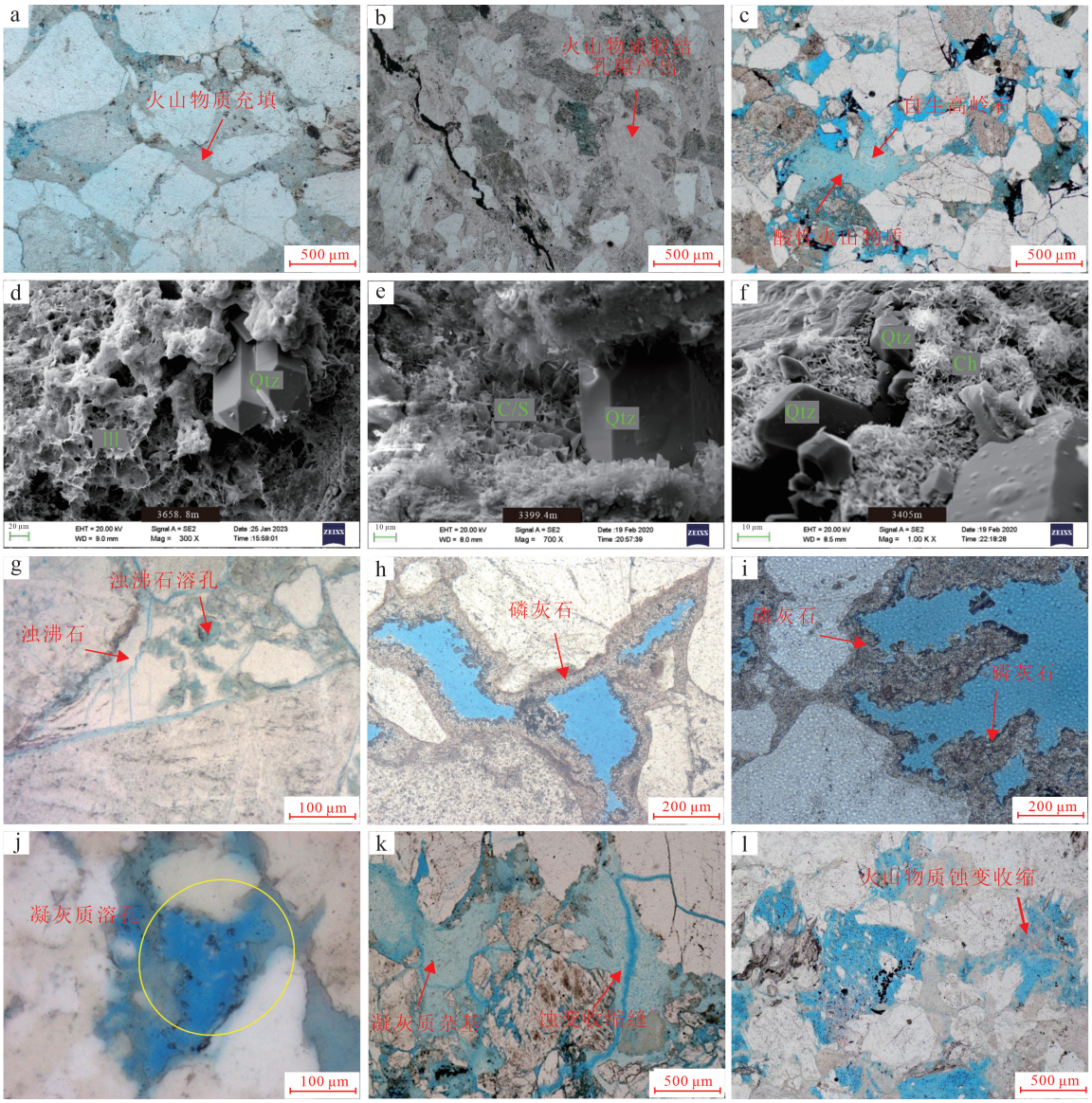
在深部储层中火山物质本身作为填隙物大量充填孔喉，加剧压实减孔，渗透率降低，使得储层更加致密，储层孔隙结构受到破坏，导致储层含油气性差，大部分储层为干层，极大地影响储层油气成藏效益。但是，前人[9]研究认为，火山物质具有可溶蚀



a. LF13－A 井 3 610.0～3 640.0 m 处同沉积锆石 CL 图像；b. LF15－B 井 3 865.0～3 875.0 m 处同沉积锆石 CL 图像；c. HZ26－C 井 3 975.0～3 995.0 m典型中生代锆石 CL 图像。

图 8　惠陆地区典型碎屑锆石 CL 图像

Fig.8　Typical detrital zircon CL map of Huilu area



a. EP17－A井,文昌组,4 331.2 m,火山物质充填,可见被压实发生塑性变形,单偏光;b. XJ34－A井,文昌组,4 485.0 m,大量火山物质胶结孔隙产出,单偏光;c. LF13－D,恩平组,3 217.5 m,酸性火山物质蚀变产物高岭石充填粒间,单偏光;d. EP23－B井,恩平组,3 658.8 m,自生石英和伊利石侵占孔隙空间,扫描电镜;e. HZ26－A井,文昌组,3 399.4 m,见绿/蒙混层和次生石英加大,扫描电镜;f. HZ26－A井,文昌组,3 405.0 m,见自生绿泥石,扫描电镜;g. HZ26－A井,文昌组,3 569.3 m,浊沸石充填粒间,可见溶蚀,单偏光;h. LF13－A井,文昌组,3 451.5 m,大量磷灰石沿颗粒边沿分布,可见溶蚀,单偏光;i.LF13－A井,文昌组,3 451.5 m,磷灰石溶蚀孔,单偏光;j. LF13－A井,文昌组,3 413.0 m,见凝灰质杂基溶孔,单偏光;k. LF13－D井,文昌组,3 775.0 m,火山物质蚀变,并见收缩缝发育,单偏光;l. EP27－B井,恩平组,4 211.5 m,大量火山物质蚀变收缩形成收缩缝(孔),单偏光。Qtz. 石英;Ill. 伊利石;C/S. 绿/蒙混层;Ch. 绿泥石。

图9 研究区古近系火山物质成岩特征

Fig.9 Diagenetic characteristics of Paleogene tuffaceous components in the study area

性,低含量的火山物质溶蚀改造能适当增加溶蚀孔占比,提高孔隙度,其溶蚀产生的次生孔隙增孔率最高,对形成较高质量油气储层是有利的[2],储层含油性好。

火山物质在油气储层质量和油气成藏中占据着非常重要的地位。目前关于火山物质对于储层油气富集的影响是具有多面性的,火山物质充填普遍会使储层呈现低孔、低渗的特征,对后期油气充注造成影响。但是在前人研究的成果中,凝灰质储层也形成了有效的油气藏,接连在国内的二连盆地、准噶尔盆地、松辽盆地等地区取得突破[53, 58],准噶尔盆地西北缘乌夏断裂带乌尔禾组凝灰质储层发育了大量

表 4　研究区凝灰质储层物性特征及孔隙类型

Table 4　Physical properties and pore types of tuffaceous reservoirs in the study area

	地区	层位	岩性	物性		储集空间类型
				孔隙度/%	渗透率/($10^{-3}\mu m^2$)	
珠一坳陷重点构造	陆丰 13 构造	文昌组	凝灰质砂岩	3.30～14.20 (平均 8.48)	0.03～5.40 (平均 1.90)	溶蚀孔、晶间孔、构造缝、收缩缝
	陆丰 15 构造	文昌组	凝灰质砂岩	5.20～13.60 (平均 9.58)	0.01～42.10 (平均 3.32)	溶蚀孔、粒间孔、晶间孔
	惠州 26 构造	文昌组	火山角砾岩、凝灰质砂岩	1.20～20.50 (平均 12.00)	0.01～411.00 (平均 30.10)	溶蚀孔、粒间孔
	惠州 27 构造	文昌组	凝灰质砂岩	4.23～14.43 (平均 9.56)	0.02～21.51 (平均 3.68)	溶蚀孔、粒间孔
	西江 33 构造	文昌组	凝灰质砂岩	11.60～13.40 (平均 12.40)	3.14～247.00 (平均 53.30)	溶蚀孔、粒间孔
	恩平 23 构造	恩平组	凝灰岩、凝灰质砂岩	2.50～17.60 (平均 12.20)	0.01～46.90 (平均 8.90)	溶蚀孔、粒间孔、晶间孔
	恩平 27 构造	恩平组	安山岩	0.80～16.23 (平均 12.30)	0.01～20.06 (平均 3.66)	溶蚀孔、粒间孔
其他盆地	松辽盆地南部查干花次凹	火石岭组(K_1h)	凝灰岩、沉凝灰岩	2.00～9.60 (平均 3.80)	0.01～61.00 (平均 0.03)	脱玻化孔、次生溶蚀孔
	海拉尔盆地贝尔凹陷	南屯组(K_1n)	凝灰质砂砾岩、沉凝灰岩	10.00～20.00	＜1.00	粒间孔、脱玻化孔
	准噶尔盆地西北缘乌夏断裂带	乌尔禾组(P_2w)	凝灰岩、沉凝灰岩、凝灰质砂砾岩	平均 14.00	平均 149.00	溶蚀孔隙、次生泄水道孔，裂缝发育
	准噶尔盆地西北缘夏 72 井区	风城组(P_1f)	熔结凝灰岩	平均 14.60	平均 0.20	气孔、脱玻化孔
	三塘湖盆地马朗凹陷	条湖组(P_2t)	凝灰岩、沉凝灰岩	5.50～24.40 (平均 16.00)	＜0.50 (平均 0.24)	粒间孔、脱玻化微孔及晶屑溶蚀微孔
	三塘湖盆地条湖-马郎凹陷	芦草沟组(P_2l)	凝灰岩	0.10～21.20 (平均 4.90)	＜ 0.10	粒间孔、脱玻化孔、晶间孔、溶蚀孔及微裂缝

注：其他盆地数据来源于文献[48－54]。

裂缝型的储集空间，改善了储层的储集性能及油气藏的分布和规模[53]。脱玻化气孔(缝)的发育程度能在一定程度上决定储层物性的好坏，同时对储层的含油性产生一定的影响[59]。珠一坳陷古近系火山物质对储层的改善作用大多集中在增加次生溶蚀孔，以及溶蚀产物形成的黏土包膜的保孔作用方面。

少量的火山物质以及火山物质的溶蚀性质能够起到增孔和保孔的作用，从而对后期油气充注起到改善作用。然而，针对火山物质对油气成储和成藏的差异性作用还需深入研究，以及需要进一步明确火山物质在成岩—成储—成藏过程中差异性演化的成因机制和影响模式。

5　结论

1)珠一坳陷古近系碎屑岩储层中火山物质主要为酸性、中性和基性，局部受到碱性岩浆的影响，发育碱性的火山物质。

2)酸性火山物质具有高硅低碱特征，富含 Al、K 元素，低 Fe、Mg 元素质量分数，蚀变产物通常为高岭石和伊利石等黏土矿物，其形成与酸性岩浆喷发相关，其同沉积火山锆石颗粒较大，易于识别，主要分布于陆丰凹陷。中性火山物质 Si 质量分数中

等,富K元素,蚀变产物以自生石英为主,部分可蚀变为黏土矿物,常与安山岩等中性喷出岩岩屑伴生,多见于恩平23构造带和恩平27构造带,少量分布于陆丰13构造带。基性火山物质Si质量分数极低,富含Fe、Mg元素,蚀变产物以铁镁质黏土矿物和浊沸石为主,常见基性凝灰质绿泥石化,与基性火山活动相关,其同沉积火山锆石颗粒较小,难以识别,主要分布于惠州凹陷,偶见于西江凹陷。偏碱性火山物质以蚀变产物磷灰石为主要特征,仅仅分布于陆丰13构造带。

3)凝灰质储层普遍呈现低孔、低渗特征,次生孔隙是凝灰质储层的主要储集空间,裂缝能增大储层渗透率。基性火山物质更易溶蚀成孔,对储层的改善作用更为明显。珠一坳陷古近系火山物质对于储层的改善作用大多集中在增加次生溶蚀孔,以及溶蚀产物形成的黏土包膜的保孔作用方面。

参考文献(References):

[1] 靳子濠,远光辉,张向涛,等. 砂岩储集层凝灰质溶蚀作用的差异性及其物性响应:以珠一坳陷惠州—陆丰地区古近系文昌组为例[J]. 石油勘探与开发,2023, 50(1): 100-112.
Jin Zihao, Yuan Guanghui, Zhang Xiangtao, et al. Differences of Tuffaceous Components Dissolution and Their Impact on Physical Properties in Sandstone Reservoirs: A Case Study on Paleogene Wenchang Formation in Huizhou-Lufeng Area, Zhu I Depression, Pearl River Mouth Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(1): 100-112.

[2] 王桥,张薇,姜楠,等. 易变形组分对致密砂岩储层的控制机理:以鄂尔多斯盆地大牛地气田H井区山西组为例[J/OL]. 岩石矿物学杂志, 2024:1-15.[2024-10-29]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20240705.1017.002.
Wang Qiao, Zhang Wei, Jiang Nan, et al. The Control Mechanism of Deformable Compositions on Tight Sandstone Reservoirs: An Example of the Shanxi Formation in the H Well Area of the Daniudi Gas Field in the Ordos Basin[J/OL]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2024:1-15.[2024-10-29]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20240705.1017.002.

[3] 田立新. 珠江口盆地惠州凹陷古近系规模性砂砾岩储层凝灰质成因及其油气地质意义[J]. 地球科学,2022, 47(2): 452-463.
Tian Lixin. Genesis Mechanism of Tuffaceous Materials in Paleogene Large-Scale Glutenite Reservoirs and Lmplications for Hydrocarbon Exploration in the Huizhou Depression, Pearl River Mouth Basin[J]. Earth Science, 2022, 47(2): 452-463.

[4] 彭浩,尹成,何青林,等. 川西地区二叠系热碎屑流火山岩发育特征及其油气地质意义[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(1): 56-67.
Peng Hao, Yin Cheng, He Qinglin, et al. Development Characteristics and Oil and Gas Geological Significance of Permian Pyroclastic Flow Volcanic Rocks in Western Sichuan Region[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(1): 56-67.

[5] Wei W, Zhu X M, Azmy K, et al. Depositional and Compositional Controls on Diagenesis of the Mixed Siliciclastic-Volcaniclastic Sandstones: A Case Study of the Lower Cretaceous in Erennaoer Sag, Erlian Basin, NE China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 188: 106855.

[6] 刘冉,罗冰,李亚,等. 川西地区二叠系火山岩展布与茅口组岩溶古地貌关系及其油气勘探意义[J]. 石油勘探与开发,2021, 48(3): 575-585.
Liu Ran, Luo Bing, Li Ya, et al. Relationship Between Permian Volcanic Rocks Distribution and the Karst Paleogeomorphology of the Maokou Formation and Its Significance for Petroleum Exploration in Western Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(3): 575-585.

[7] 朱世发,朱筱敏,刘学超,等. 油气储层火山物质蚀变产物及其对储集空间的影响:以准噶尔盆地克—夏地区下二叠统为例[J]. 石油学报,2014, 35(2): 276-285.
Zhu Shifa, Zhu Xiaomin, Liu Xuechao, et al. Alteration Products of Volcanic Materials and Their Influence on Reservoir Space in Hydrocarbon Reservoirs: Evidence from Lower Permian Strata in Ke-Xia Region, Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(2): 276-285.

[8] 王宏语,樊太亮,肖莹莹,等. 凝灰质成分对砂岩储集性能的影响[J]. 石油学报,2010, 31(3): 432-439.
Wang Hongyu, Fan Tailiang, Xiao Yingying, et al. Effect of Tuffaceous Components on Physical Property of Sandstone Reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(3): 432-439.

[9] 李晓艳，丁琳，李小平，等. 珠江口盆地陆丰凹陷文昌组凝灰质砂岩储层成岩相及发育模式[J]. 世界地质，2024，43(2)：228－241.
Li Xiaoyan，Ding Lin，Li Xiaoping，et al. Diagenetic Facies and Development Model of Tuffaceous Sandstone Reservoirs in Wenchang Formation in Lufeng Sag，Pearl River Mouth Basin[J]. World Geology，2024，43(2)：228－241.

[10] 李晓艳，张向涛，丁琳，等. 珠江口盆地陆丰地区文昌组低渗透凝灰质砂岩储集特征与差异演化[J]. 中国海上油气，2023，35(3)：34－44.
Li Xiaoyan，Zhang Xiangtao，Ding Lin，et al. Reservoir Characteristics and Differential Evolution of Low Permeability Tuffaceous Sandstone in Wenchang Formation，Lufeng Sag，Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas，2023，35(3)：34－44.

[11] 郝世豪. 南海北部陆缘强减薄带地壳结构、裂陷特征、岩浆活动以及陆缘分段模型[D]. 武汉：中国地质大学(武汉)，2023.
Hao Shihao. The Crustal Structure，Rifting Style，and Syn-Rift Magmatism in the Hype-Thinned Domain of the Northern South China Sea，Insights into the Margin Segmentation[D]. Wuhan：China University of Geosciences(Wuhan)，2023.

[12] 庞雄，陈长民，彭大钧，等. 南海北部白云深水区之基础地质[J]. 中国海上油气，2008，20(4)：215－222.
Pang Xiong，Chen Changmin，Peng Dajun，et al. Basic Geology of Baiyun Deep-Water Area in the Northern South China Sea[J]. China Offshore Oil and Gas，2008，20(4)：215－222.

[13] 马兵山，漆家福，王俊怀，等. 南海北部珠江口盆地珠一坳陷西江凹陷与陆丰凹陷差异裂陷过程定量分析[J]. 高校地质学报，2022，28(5)：669－687.
Ma Bingshan，Qi Jiafu，Wang Junhuai，et al. Quantitative Analysis of Differential Rifting Process in the Xijiang and Lufeng Sags of the Zhu Ⅰ Depression，Pearl River Mouth Basin，Northern South China Sea[J]. Geological Journal of China Universities，2022，28(5)：669－687.

[14] 王维，叶加仁，杨香华，等. 珠江口盆地惠州凹陷古近纪多幕裂陷旋回的沉积物源响应[J]. 地球科学：中国地质大学学报，2015，40(6)：1061－1071.
Wang Wei，Ye Jiaren，Yang Xianghua，et al. Sediment Provenance and Depositional Response to Multistage Rifting，Paleogene，Huizhou Depression，Pearl River Mouth Basin[J]. Earth Science：Journal of China University of Geosciences，2015，40(6)：1061－1071.

[15] 代一丁. 珠江口盆地西江南洼古近系构造演化与沉积特征[J]. 中国海上油气，2013，25(3)：1－7.
Dai Yiding. Paleogene Tectonic Evolution and Sedimentation in South Xijiang Sag，Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas，2013，25(3)：1－7.

[16] 刘志峰，王升兰，印斌浩，等. 珠江口盆地珠Ⅰ、珠Ⅲ坳陷裂陷期湖相分布差异及其控制因素[J]. 石油实验地质，2013，35(5)：523－527.
Liu Zhifeng，Wang Shenglan，Yin Binhao，et al. Different Distribution of Lacustrine Facies and Its Controlling Factors During Rifting Stage，Zhu Ⅰ and Zhu Ⅲ Depressions，Pearl River Mouth Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment，2013，35(5)：523－527.

[17] 米立军，张向涛，陈维涛，等. 珠江口盆地珠一坳陷古近系油气富集规律及下一步勘探策略[J]. 中国海上油气，2018，30(6)：1－13.
Mi Lijun，Zhang Xiangtao，Chen Weitao，et al. Hydrocarbon Enrichment Law of Paleogene Zhu Ⅰ Depression and Its Next Exploration Strategy in Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas，2018，30(6)：1－13.

[18] 施和生，朱俊章，姜正龙，等. 珠江口盆地珠一坳陷油气资源再评价[J]. 中国海上油气，2009，21(1)：9－14.
Shi Hesheng，Zhu Junzhang，Jiang Zhenglong，et al. Hydrocarbon Resources Reassessment in Zhu Ⅰ Depression，Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas，2009，21(1)：9－14.

[19] 吴琼玲，彭光荣，肖张波，等. 岩浆底辟改造型洼陷复杂结构特征及演化规律：以珠江口盆地陆丰 22 洼为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，2023，53(4)：1048－1065.
Wu Qiongling，Peng Guangrong，Xiao Zhangbo，et al. Complex Structural Characteristics and Evolution of Magmatic Diapirism Reformed Subsag：A Case of Lufeng 22 Subsag，Pearl River Mouth Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition)，2023，53(4)：1048－1065.

[20] 李康，单玄龙，郝国丽，等. 珠江口盆地西江凹陷裂陷期构造转换及其对沉积的意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，2024，54(4)：1095－1109.
Li Kang，Shan Xuanlong，Hao Guoli，et al. Tectonic Transformation of Xijiang Sag During Rifting and Its Significance to Sedimentation in Pearl River Mouth

Basin[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2024, 54(4): 1095-1109.

[21] 朱红涛,杨香华,舒誉,等. 陆相湖盆层序构型及其岩性预测意义:以珠江口盆地惠州凹陷为例[J]. 地学前缘,2012, 19(1): 32-39.
Zhu Hongtao, Yang Xianghua, Shu Yu, et al. The Sequence Stratigraphic Architecture of Continental Lake Basin and Its Significance on Lithofacies Prediction: Taking Huizhou Sag in Pearl River Mouth Basin as an Example[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(1): 32-39.

[22] 李松峰,徐思煌,施和生,等. 珠江口盆地惠州凹陷古近系烃源岩特征及资源预测[J]. 地球科学:中国地质大学学报,2013, 38(1): 112-120.
Li Songfeng, Xu Sihuang, Shi Hesheng, et al. Characteristics of Paleogene Source Rocks and Prediction of Petroleum Resources in Huizhou Depression, Pearl River Mouth Basin[J]. Earth Science:Journal of China University of Geosciences, 2013, 38(1): 112-120.

[23] 刘豪,徐长贵,高阳东,等. 断陷湖盆低勘探区源-汇系统与烃源岩预测:以珠江口盆地珠一坳陷北部洼陷区为例[J]. 石油与天然气地质,2023, 44(3): 565-583.
Liu Hao, Xu Changgui, Gao Yangdong, et al. Source-to-Sink System and Hydrocarbon Source Rock Prediction of Underexplored Areas in Rifted Lacustrine Basins: A Case Study on Northern Lows in Zhu I Depression, Pearl River Mouth Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2023, 44(3): 565-583.

[24] 阙晓铭,舒誉,汪旭东,等. 珠一坳陷古近纪物源特征及其沉积演化:来自碎屑锆石年龄的指示[J]. 地球科学,2024, 49(7): 2373-2387.
Que Xiaoming, Shu Yu, Wang Xudong, et al. Provenance Characteristics and Sedimentary Evolution of Zhu I Depression in Paleogene: Indications from Detrital Zircon Ages[J]. Earth Science, 2024, 49(7): 2373-2387.

[25] 朱俊章,朱明,史玉玲,等. 珠一坳陷油气成藏组合划分及有利成藏组合预测[J]. 海洋地质前沿,2022, 38(5): 67-75.
Zhu Junzhang, Zhu Ming, Shi Yuling, et al. Division of Hydrocarbon Accumulation Assemblage and Prediction of Favorable Accumulation Assemblage in Zhu I Depression[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(5): 67-75.

[26] Cui Y C, Shao L, Li Z X, et al. A Mesozoic Andean-Type Active Continental Margin Along Coastal South China: New Geological Records from the Basement of the Northern South China Sea[J]. Gondwana Research, 2021, 99: 36-52.

[27] Shi H S, Li C F. Mesozoic and Early Cenozoic Tectonic Convergence-to-Rifting Transition Prior to Opening of the South China Sea[J]. International Geology Review, 2012, 54(15): 1801-1828.

[28] Xu C H, Shi H S, Barnes C G, et al. Tracing a Late Mesozoic Magmatic Arc Along the Southeast Asian Margin from the Granitoids Drilled from the Northern South China Sea[J]. International Geology Review, 2016, 58(1): 71-94.

[29] 周蒂,孙珍,陈汉宗,等. 南海及其围区中生代岩相古地理和构造演化[J]. 地学前缘,2005, 12(3): 204-218.
Zhou Di, Sun Zhen, Chen Hanzong, et al. Mesozoic Lithofacies, Paleo-Geography, and Tectonic Evolution of the South China Sea and Surrounding Areas[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(3): 204-218.

[30] 高阳东,张向涛,张丽丽,等. 珠江口盆地中生代陆缘岩浆弧地质特征及构造背景[J]. 地球科学,2022, 47(7): 2317-2327.
Gao Yangdong, Zhang Xiangtao, Zhang Lili, et al. Geological Characteristics and Tectonic Settings of Mesozoic Continenta Margin Magmatic Arc in Pearl River Mouth Basin[J]. Earth Science, 2022, 47(7): 2317-2327.

[31] Zhao F, Alves T M, Wu S G, et al. Prolonged Post-Rift Magmatism on Highly Extended Crust of Divergent Continental Margins (Baiyun Sag, South China Sea)[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2016, 445: 79-91.

[32] Franke D. Rifting, Lithosphere Breakup and Volcanism: Comparison of Magma-Poor and Volcanic Rifted Margins[J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 43: 63-87.

[33] Yan P, Deng H, Liu H L, et al. The Temporal and Spatial Distribution of Volcanism in the South China Sea Region[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2005, 27(5): 647-659.

[34] Cui H, Zhu S F, Tan M X, et al. Depositional and Diagenetic Processes in Volcanic Matrix-Rich Sandstones from the Shanxi and Shihezi Formations, Ordos Basin, China: Implication for Volcano-Sedimentary System[J]. Basin Research, 2022, 34

(6)：1859－1893.

[35] Chen J H，Zhu H T，Peng G R，et al. Diagenetic Evolution of Syngenetic Volcanogenic Sediment and Their Influence on Sandstone Reservoir：A Case Study in the Southern Huizhou Sag，Pearl River Mouth Basin，Northern South China Sea[J]. Journal of Marine Science and Engineering，2024，12(8)：1459.

[36] Zhang K，Liu R，Liu Z J，et al. Influence of Volcanic and Hydrothermal Activity on Organic Matter Enrichment in the Upper Triassic Yanchang Formation，Southern Ordos Basin，Central China [J]. Marine and Petroleum Geology，2020，112：104059.

[37] Winchester J A，Floyd P A. Geochemical Discrimination of Different Magma Series and Their Differentiation Products Using Immobile Elements [J]. Chemical Geology，1977，20：325－343.

[38] Cicerali D，Arslan M，Yazar E A，et al. Mineralogy，Chemistry，and Genesis of Zeolitization in Eocene Tuffs from the Bayburt Area (NE Turkey)：Constraints on Alteration Processes of Acidic Pyroclastic Deposits[J]. Journal of African Earth Sciences，2020，162：103690.

[39] 王宏博，马存飞，曹铮，等. 基于岩相的致密砂岩差异成岩作用及其储层物性响应：以准噶尔盆地莫西庄地区下侏罗统三工河组为例[J]. 石油与天然气地质，2023，44(4)：976－992.
Wang Hongbo，Ma Cunfei，Cao Zheng，et al. Differential Diagenesis and Reservoir Physical Property Responses of Tight Sandstone Based on Lithofacies：A Case Study on the Lower Jurassic Sangonghe Formation in Moxizhuang Area，Junggar Basin[J]. Oil and Gas Geology，2023，44(4)：976－992.

[40] 张成林，张鉴，吴建发，等. 凝灰质储层研究进展综述及探讨[J]. 断块油气田，2016，23(5)：545－548.
Zhang Chenglin，Zhang Jian，Wu Jianfa，et al. Summary and Discussion on Tuffaceous Reservoir Research Progress[J]. Fault-Block Oil and Gas Field，2016，23(5)：545－548.

[41] 展云翔，王凤琴，张立宽，等. 致密砂岩储层中凝灰质对储层质量的影响：以鄂尔多斯东南部上古生界山西组储层为例[C]//陕西省石油学会. 2021 油气田勘探与开发国际会议论文集：上册. 西安：西安石油大学，2021：9.
Zhan Yunxiang，Wang Fengqin，Zhang Likuan，et al. The Influence of Tuffaceous Matter on Reservoir Quality in Tight Sandstone Reservoirs：A Case Study of the Shanxi Formation Reservoir in the Southeastern Part of Ordos Province[C]//Shaanxi Petroleum Society Proceedings. 2021 International Conference on Oil and Gas Field Exploration and Development：Volume One. Xi'an：Xi'an University of Petroleum，2021：9.

[42] Lawrence L，Spandler C，Roberts E M，et al. Mineralogy and Origin of the Alkaline Nsungwe Formation Tuffs of the Rukwa Rift Basin，Southwestern Tanzania [J]. Lithos，2020，380：105885.

[43] Lissenberg C J，Rioux M，Shimizu N，et al. Zircon Dating of Oceanic Crustal Accretion[J]. Science，2009，323：1048－1050.

[44] Yuan Y，Zong K，Guo J，et al. Linking Significant Zr Isotopic Fractionation in Magmatic Zircons with Petrographic Textures[J]. Journal of Geophysical Research：Solid Earth，2023，128(10)：e2023JB026915.

[45] Harrison T M，Watson E B，Aikman A B. Temperature Spectra of Zircon Crystallization in Plutonic Rocks[J]. Geology，2007，35(7)：635－638.

[46] 刘晓健，王清斌，代黎明，等. 凝灰质砂砾岩复合型储集空间特征及其成因：以莱州湾南斜坡沙河街组为例[J]. 海洋地质前沿，2019，35(3)：48－58.
Liu Xiaojian，Wang Qingbin，Dai Liming，et al. Characteristics and Genesis of Compound Reservoirs Space in Tuffaceous Glutenite：A Case from Shahejie Formation on the South Slope of Laizhou Sag[J]. Marine Geology Frontiers，2019，35(3)：48－58.

[47] 彭晓蕾，曾翔鹏，洪雪. 拉布达林盆地上库力组火山碎屑岩成岩作用特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，2010，40(4)：961－970.
Peng Xiaolei，Zeng Xiangpeng，Hong Xue. Diagenetic Characteristics of Pyroclastic Rocks in Shangkuli Formation，Labudalin Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition)，2010，40(4)：961－970.

[48] 肖莹莹，樊太亮，王宏语. 贝尔凹陷苏德尔特构造带南屯组火山碎屑沉积岩储层特征及成岩作用研究[J]. 沉积与特提斯地质，2011，31(2)：91－98.
Xiao Yingying，Fan Tailiang，Wang Hongyu. Research on Reservoir Characteristics and Diagenesis of Volcanic Clastic Sedimentary Rocks in the Nantun Formation of the Sudert Structural Belt in the Beier

Depression[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2011, 31(2): 91-98.

[49] 潘永帅. 火山灰影响下咸化湖盆混积岩特征与优质储层形成机理:以三塘湖盆芦草沟组为例[D]. 北京:中国石油大学(北京), 2023.
Pan Yongshuai. Characteristics of Mixed Rocks and Formation Mechanism of High-Quality Reservoir in Saline Lacustrine Basin Affected by Volcanic Ash: A Case Study of the Lucaogou Formation in Santanghu Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2023.

[50] 焦立新,刘俊田,张宏,等. 三塘湖盆地沉凝灰岩致密储集层特征及其形成条件[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(11): 1697-1705.
Jiao Lixin, Liu Juntian, Zhang Hong, et al. Tight Reservoir Characteristics and Formation Conditions of Tuff in Santanghu Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(11): 1697-1705.

[51] 冷庆磊,朱建峰,刘玉虎. 松辽盆地南部查干花次凹下白垩统火山岩储层特征与发育规律[J]. 世界地质, 2023, 42(3): 527-535.
Leng Qinglei, Zhu Jianfeng, Liu Yuhu. Characteristics and Development Regularity of Lower Cretaceous Volcanic Rock Reservoirs in Chaganhua Subsag, Southern Songliao Basin[J]. World Geology, 2023, 42(3): 527-535.

[52] 李宁,李瑞磊,苗贺,等. 松辽盆地深层中-基性火山岩有利相带及储层"甜点"逐级识别[J]. 石油与天然气地质,2024, 45(3): 801-815.
Li Ning, Li Ruilei, Miao He, et al. Stepwise Identification of Favorable Facies Belts and Reservoir Sweet Spots of Deep Intermediate-Basic Volcanic Rocks in the Songliao Basin [J]. Oil and Gas Geology, 2024, 45(3): 801-815.

[53] 宫清顺,倪国辉,芦淑萍,等. 准噶尔盆地乌尔禾油田凝灰质岩成因及储层特征[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(4): 481-485.
Gong Qingshun, Ni Guohui, Lu Shuping, et al. Genesis and Reservoir Features of Tuffaceous Rocks in Wuerhe Oilfield of the Junggar Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2010, 31(4): 481-485.

[54] 陈永波,潘建国,许多年,等. 准噶尔盆地西北缘火山岩储层的综合地球物理预测[J]. 石油物探,2010, 49(4): 364-372.
Chen Yongbo, Pan Jianguo, Xu Duonian, et al. Integrated Geophysical Prediction of Volcanic Reservoir in Northwestern Margin Area of Junggar Basin[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2010, 49(4): 364-372.

[55] Nguyen B T T, Jones S J, Goulty N R, et al. The Role of Fluid Pressure and Diagenetic Cements for Porosity Preservation in Triassic Fluvial Reservoirs of the Central Graben, North Sea [J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(8): 1273-1302.

[56] 操应长,远光辉,杨海军,等. 含油气盆地深层—超深层碎屑岩油气勘探现状与优质储层成因研究进展[J]. 石油学报,2022, 43(1): 112-140.
Cao Yingchang, Yuan Guanghui, Yang Haijun, et al. Current Situation of Oil and Gas Exploration and Research Progress of the Origin of High-Quality Reservoirs in Deep-Ultra-Deep Clastic Reservoirs of Petroliferous Basins[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(1): 112-140.

[57] 杨献忠. 酸性火山玻璃的脱玻化作用[J]. 华东地质, 1993, 13(2): 73-81.
Yang Xianzhong. The Devitrification of Acid Volcanic Glass[J]. East China Geology, 1993, 13(2): 73-81.

[58] 梁官忠. 二连盆地哈南凝灰岩油藏裂缝发育特征[J]. 石油实验地质,2001, 23(4): 412-417.
Liang Guanzhong. Fracture Development of Tuff Reservoirs in the Hanan Area of the Erlian Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2001, 23(4): 412-417.

[59] 朱世发,朱筱敏,刘继山,等. 富孔熔结凝灰岩成因及油气意义:以准噶尔盆地乌—夏地区风城组为例[J]. 石油勘探与开发,2012, 39(2): 162-171.
Zhu Shifa, Zhu Xiaomin, Liu Jishan, et al. Genesis and Hydrocarbon Significance of Vesicular Ignimbrite: A Case Study from Fengcheng Formation, Wu-Xia Area, Junggar Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 162-171.