郝国丽,蒋迪娅,许风光,等.珠江口盆地恩平凹陷西南部火山岩相和火山机构特征及其分布控制因素.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(6):1951-1967. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240233.
Hao Guoli, Jiang Diya, Xu Fengguang, et al. Characteristics and Controlling Factors of Distribution of Volcanic Facies and Volcanic Edifice in Southwestern Enping Sag, Pearl River Mouth Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(6): 1951-1967. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240233.

珠江口盆地恩平凹陷西南部火山岩相和火山机构特征及其分布控制因素

郝国丽[1],蒋迪娅[1],许风光[2],张 昊[2],金 艳[2],刘 洋[2]
1.吉林大学地球科学学院,长春 130061
2.申能油气(深圳)有限公司,上海 200041

摘要:为了进一步掌握珠江口盆地恩平凹陷西南部火山岩发育模式和分布控制因素,本次研究基于珠江口盆地恩平凹陷火山岩研究区块及周边各项资料,首先通过薄片鉴定结合测井识别了火山岩岩性和岩相特征,然后采用井震结合研究了火山机构特征,再利用地球化学方法分析了火山岩成因。结果表明:恩平凹陷西南侧发育以玄武岩为主的火山岩,通过钻井资料,判别火山岩岩性4种,分别为玻质碎屑岩、块状玄武岩、杏仁体玄武岩和火山隐爆角砾岩;研究区新生代火山岩可划分为2相4亚相,分别为火山通道相隐爆角砾岩亚相,喷溢相板状熔岩流亚相、辫状熔岩流亚相和玻质碎屑岩亚相;依据沉积岩沉积界面识别4个喷发期次,并按期次划分了火山口—近火山口、近源、中源和远源4个相带;火山岩储层复杂,火山口—近火山口—近源相物性较好;不同期次玄武质岩浆由同源幔源岩浆经分离结晶作用形成,岩浆房位于下地壳,经历了强烈的地壳同化混染作用。对于分布控制因素,本次研究根据地震资料,识别了研究区两期活动断裂,珠江组沉积期呈NEE-NE向断裂,韩江组沉积期至今主要为NWW-NW向断裂;认为其岩浆来源与深部断裂有关,NW向的左旋走滑分量使火山机构相带走向向左有微弱旋转,且从带状逐渐过渡为反S形。

关键词:珠江口盆地;恩平凹陷;阳江—一统断裂带;火山岩相;火山机构;地球化学;储层
doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240233 **中图分类号**:TE122 **文献标志码**:A

Characteristics and Controlling Factors of Distribution of Volcanic Facies and Volcanic Edifice in Southwestern Enping Sag, Pearl River Mouth Basin

Hao Guoli[1], Jiang Diya[1], Xu Fengguang[2], Zhang Hao[2], Jin Yan[2], Liu Yang[2]
1. *College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun* 130061, *China*
2. *Shenergy Oil and Gas (Shenzhen) Company Limited, Shanghai* 200041, *China*

收稿日期:2024-09-28
作者简介:郝国丽(1982—),女,副教授,硕士生导师,主要从事石油与天然气成藏方面的研究,E-mail:haoguoli@jlu.edu.cn
通信作者:蒋迪娅(2000—),女,硕士研究生,主要从事矿产普查与勘探方面的研究,E-mail:jiangdy23@mails.jlu.edu.cn
基金项目:申能油气(深圳)有限公司油气勘探项目(SZPC-KT-23-004);中国海洋石油有限公司"十四五"重大科技项目(KJGG-2022-0302)
Supported by the Oil and Gas Exploration Project of Shenergy Oil and Gas (Shenzhen) Company Limited (SZPC-KT-23-004) and the Major Science and Technology Project of CNOOC During the 14th Five-Year Plan Period (KJGG-2022-0302)

Abstract: In order to clarify the evolution model and controlling factors of distribution of volcanic rocks in the southwestern Enping sag, Pearl River Mouth basin, based on the datasets of the target area and adjacent area, the lithological and lithofacies characteristics are identified with thin section and logging firstly, then the volcanic edifice characteristics are identified with well and seismic datasets, finally, the genesis of volcanic rocks are identified with geochemical data. The results show that basalt-dominated volcanic rocks developed in southwestern Enping sag. Through drilling data, four types of volcanic rock are identified, namely hyaloclastite, massive basalt, amygdaloid basalt, and hydrothermal breccia. The Cenozoic volcanic rocks in the study area are divided into two kinds of lithofacies and four kinds of subfacies: Volcanic conduit facies (including hidden breccia subfacies), effusive facies (including hyaloclastic rock subfacies, tabular lava flow subfacies, and braid lava flow subfacies). At the same time, four eruption periods are identified based on sedimentary rock interfaces, and volcanic crater-near volcanic crater, proximal volcanic facies belts, middle-distance and distal volcanic facies belts are divided according to each period. Volcanic reservoirs are complex, and the physical properties of volcanic conduits-near volcanic crater and proximal volcanic facies belts are relatively good. The basaltic magma of different stages in the research area was formed by the separation and crystallization of homologous mantle derived magma. The magma chamber is located in the lower crust and has undergone strong crustal assimilation and mixing. According to the seismic data, it is identified that the fault in the study area is characterized by two phases of activity. The Pearl River Formation is NEE - NE trending in the sedimentary period, and the Hanjiang Formation is NWW - NW trending in the sedimentary period up to now. The origin of the magma is associated with deep-seated faults. The NW sinistral strike-slip component induces a weak leftward rotation in the volcanic facies, gradually transforming its shape from a straight line into an inverse S-curve.

Key words: Pearl River Mouth basin; Enping sag; Yangjiang-Yitong fault zone; volcanic facies; volcanic edifice; geochemistry; reservoirs

0 引言

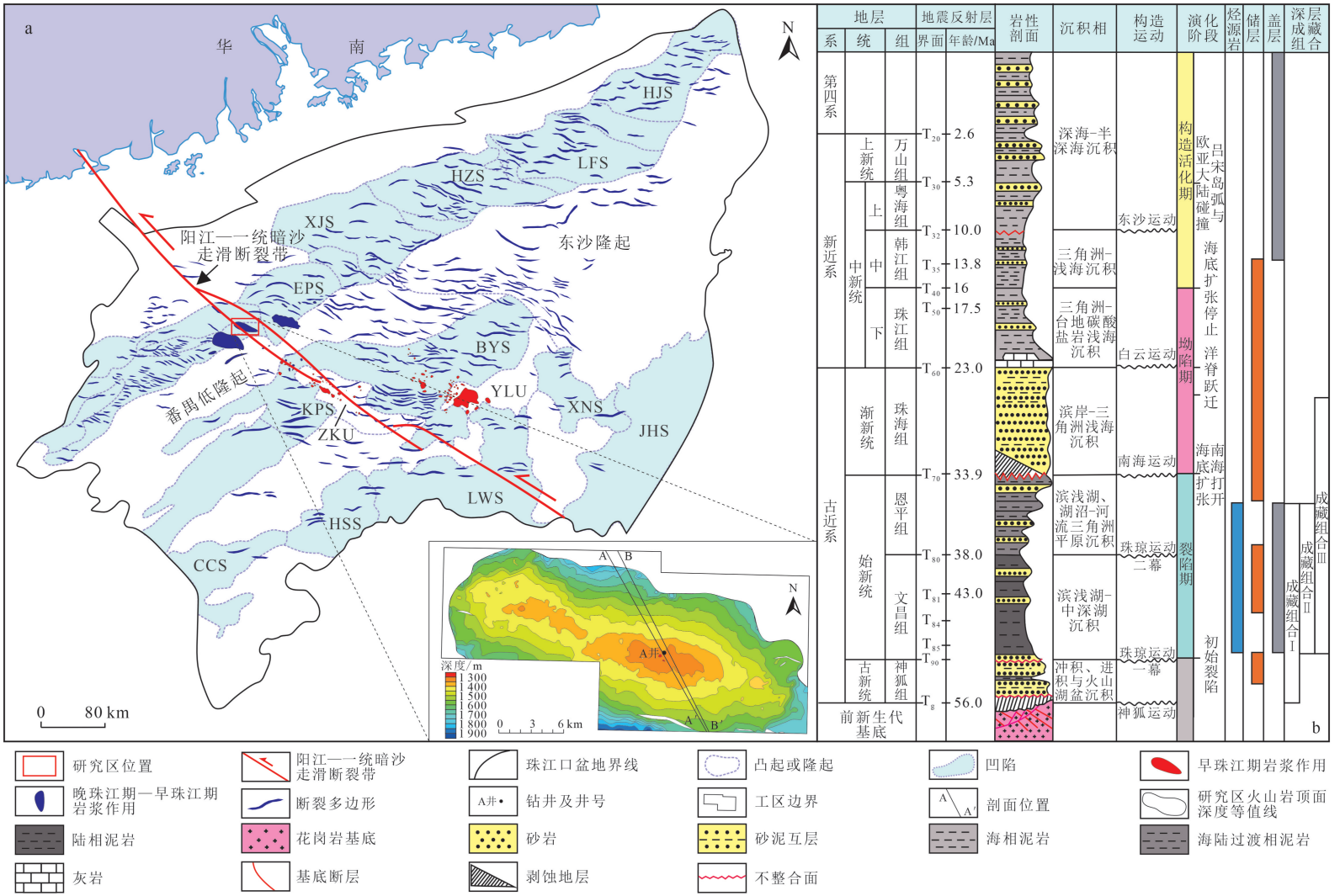
珠江口盆地新生代火山活动呈现多期次、多点频发的特征。其中,早期火山喷发具有岩性多样、东多西少、规模较小的特点,中晚期火山喷发成分单一,主要为基性岩,规模普遍较大,主要发育在盆地西南部[1-2]。我国东部及海域裂陷盆地是重要的火山岩油气藏分布区,研究区位于南海珠江口盆地珠一坳陷恩平凹陷西南侧,紧邻恩平凹陷沉积中心和生烃洼陷,周边油田已证实了其烃源岩的生烃能力。

阳江——统断裂带新近系珠江组—粤海组沉积期岩浆活动较发育,揭示岩性主要为玄武岩夹凝灰岩[3],火山喷发规模大,范围广,呈现南早北晚、多期次迁移幕式活动的特征[4]。前人[4-5]研究认为,中生代—新生代时期火山岩为太平洋板块俯冲后撤产生的区域伸展应力使岩石圈上地壳压力骤减,前期板块碰撞压力由深部向上释压,导致岩浆通过深部断裂和薄弱地带喷发而形成。白云凹陷西南端珠江组火山岩为板内碱性玄武岩,推测为海南地幔柱上涌形成,也有陆壳成分混染[6]。

研究区2005年钻探A井完钻深度2 060 m,该井在珠江组上段—韩江组上段钻遇厚约800 m的喷出岩,其主要由玄武岩与玻质碎屑岩组成,未发现油气显示。目前对阳江——统断裂带火山岩岩性、岩相、成因的研究不深入。本次研究基于珠江口盆地恩平凹陷火山岩研究区块及周边各项资料,通过火山岩岩性岩相识别和地球化学方法,利用井震结合开展了火山岩发育规模和火山机构分布规律的研究,并进一步探讨了火山岩成因及发育模式,以期为新生代火山岩油气藏勘探和碎屑岩勘探中规避岩浆活动影响等方面提供依据。

1 区域地质概况

珠江口盆地位于南海北部华南大陆南缘,欧亚板块、太平洋板块、印度板块、菲律宾板块在不同地史时期的分离与拼合,形成了珠江口盆地内部十分复杂的构造演化特征[7-8],总体上具有"三隆二坳、下陆上海"的演化历史、"南北分带、东西分块"的构造格局和"早期断陷、后期坳陷"的双层结构(图1a)。珠江口盆地基底为中生界火山岩和变质岩,新生代



EPS. 恩平凹陷；XJS. 西江凹陷；HZS. 惠州凹陷；LFS. 陆丰凹陷；HJS. 韩江凹陷；KPS. 开平凹陷；BYS. 白云凹陷；CCS. 长昌凹陷；HSS. 鹤山凹陷；LWS. 荔湾凹陷；XNS. 兴宁凹陷；JHS. 靖海凹陷；KPU. 开平低凸起；YLU. 云荔低凸起。a 图据文献[9]修编；b 图据文献[10－11]修编。n 为节理或裂缝组数。

图 1　珠江口盆地区域构造位置(a)和研究区综合柱状图(b)

Fig.1　Regional structural location of Pearl River Mouth basin (a) and comprehensive histogram of the study area (b)

盆地演化经历了裂陷期和裂后期两个阶段,分别对应湖泊—三角洲、浅海—半深海环境的两大套巨厚沉积层系并伴随岩浆活动。裂陷期以整体热沉降形成大面积坳陷型盆地为特点[7],经历了神狐运动、珠琼运动一幕、珠琼运动二幕,自下而上发育古新统神狐组(T_g—T_{90}),始新统文昌组(T_{90}—T_{80})和恩平组(T_{80}—T_{70})。裂后期包括坳陷期和构造活化期,其中:坳陷期经历了南海运动和白云运动,发育渐新统珠海组(T_{70}—T_{60}),中新统珠江组(T_{60}—T_{40})、韩江组(T_{40}—T_{32});构造活化期经历了东沙运动,发育中新统粤海组(T_{32}—T_{30})、上新统万山组(T_{30}—T_{20})以及第四系(图1b)。

三维地震解释发现珠一坳陷恩平凹陷西南侧阳江—一统断裂带内发育了一系列珠江、韩江、粤海组火山岩[4],走向与阳江—一统断裂带走向一致(图1a),其中唯一有钻井揭示且规模最大的是韩江—粤海期火山岩体。南海北部新近纪岩浆来源于南海北部地幔上涌区的下地壳高速体减压熔融,而断裂带上岩浆活动表现出的时空不均一性和幕式迁移性,可能与地幔上涌区向海倾斜特性及断裂带分段差异活动有关[4]。

2 岩性和岩相特征

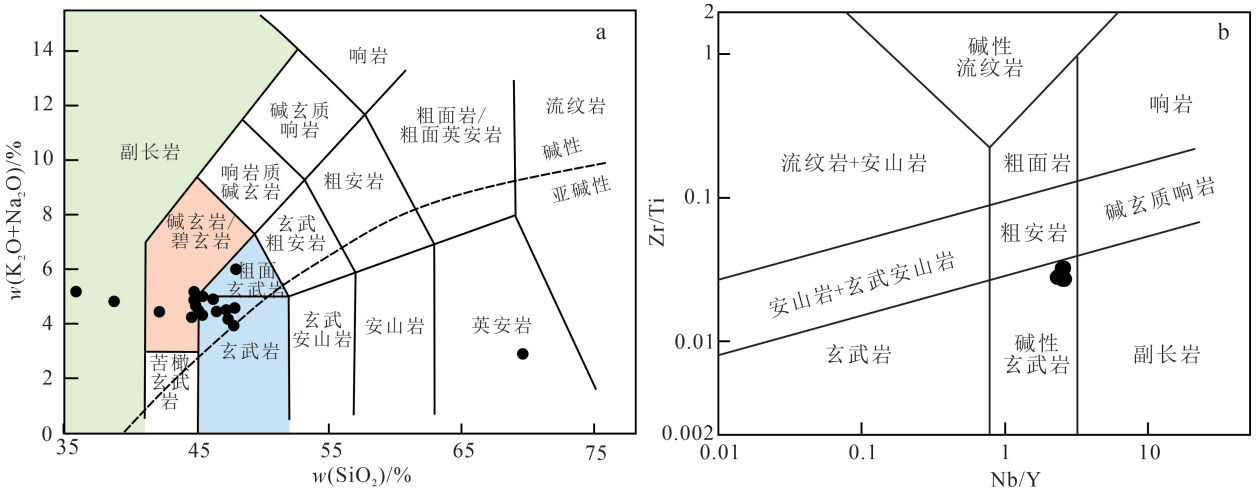
2.1 岩性类型和识别特征

本次研究采集A井火山岩岩屑样品28个,岩样来自珠江组—韩江组,所有样品主微量元素和稀土元素测试均在中海油实验中心完成。主微量元素分析分析发现,A井揭示火山岩为基性,TAS图解(图2a)显示样品为玄武岩、碱玄岩/碧玄岩、副长岩,Zr/Ti-Nb/Y图解(图2b)显示样品为碱性玄武岩。

本次研究对约790.50 m火山岩段中的34个铸体薄片进行鉴定,并进行了详细定名。鉴定发现样品岩性为玻质碎屑岩、块状玄武岩、杏仁体玄武岩和火山隐爆角砾岩,厚层火山岩段中的薄层沉积岩夹层岩性为凝灰质泥岩、生物礁灰岩、粉砂质泥岩和泥质粉砂岩(图3)。其中:玻质碎屑岩(图4a、b)由熔融的熔岩与水接触后突然淬火而成,可见由大量深褐色火山玻璃组成的玻质碎屑,少量均匀分布的不同方向斜长石和脱玻化微晶[14-15];块状玄武岩(图4c、d)厚度较大,无气孔杏仁体发育,较为致密,为斑状结构,可见基性斜长石斑晶、被蚀变长石斑晶和长石微晶等,基质为间粒结构;杏仁体玄武岩(图4e、f)为斑状结构,杏仁状构造,杏仁体占20%~70%,外形变化较大且无规则,气孔被绿泥石完全充填,极少为部分充填保留少量气孔;火山隐爆角砾岩(图4g、h)原岩为玻质碎屑岩,具隐爆角砾结构,岩石被不规则裂缝切割成角砾状,角砾缝中充填红色岩汁或热液矿物。

2.2 岩相类型和识别特征

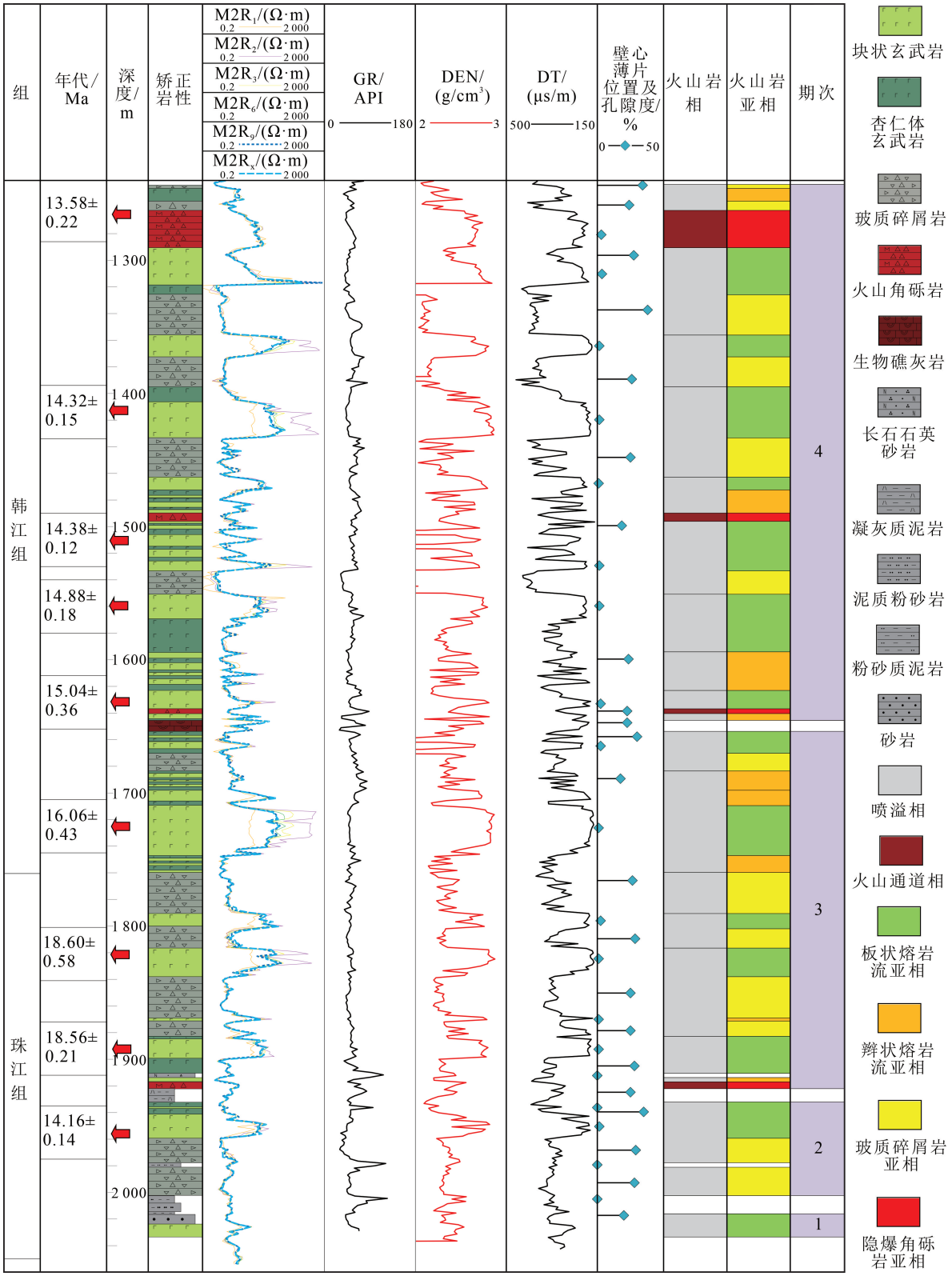
根据7相21亚相划分方案[16],研究区火山岩划分为2种岩相4种亚相,分别为火山通道相(隐爆角砾岩亚相)和喷溢相(板状熔岩流亚相、辫状熔岩流亚相、玻质碎屑岩亚相)(图3)。隐爆角砾岩亚相岩石由原位角砾岩组成,不规则裂缝将岩石切割成角砾状,测井为中高密度,箱形,中等电阻,电阻较块状玄武岩低,声波时差和自然伽马较小(图3);板状熔岩流亚相,测井整体上为多个高声波和低声波的箱形组合,熔岩单元顶部发育少量气孔,A井表现



a底图据文献[12];b底图据文献[13]。

图2 研究区TAS(a)和Zr/Ti-Nb/Y(b)图解

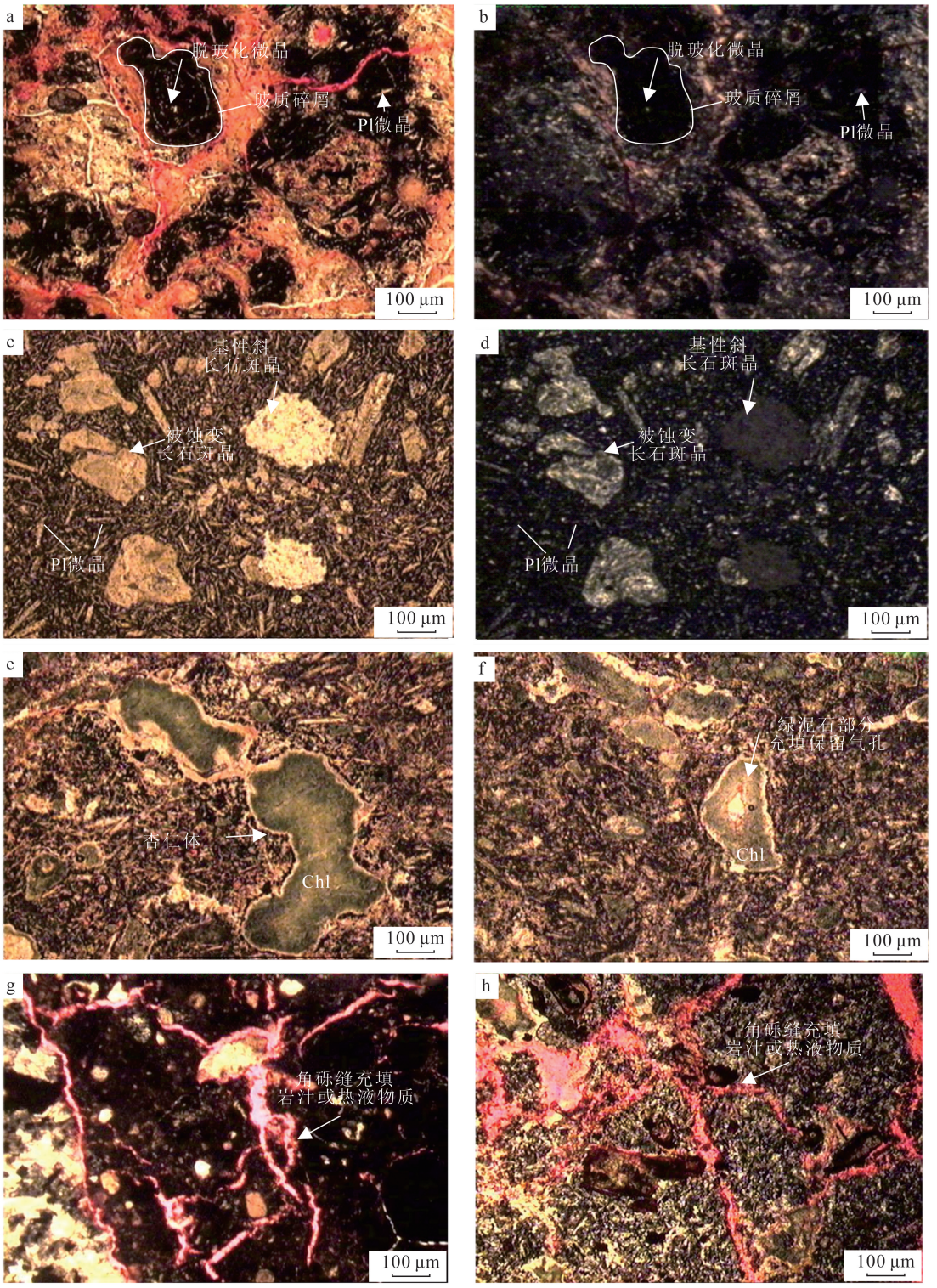
Fig.2 TAS (a) and Zr/Ti-Nb/Y (b) illustration of the study area



M2R$_1$. 高分辨率列阵感应电阻率，下标代表不同探测深度；GR. 自然伽马；DEN. 补偿密度；DT. 声波时差。

图 3　研究区 A 井综合柱状图

Fig.3　Comprehensive drilling column diagram of Well A in the study area



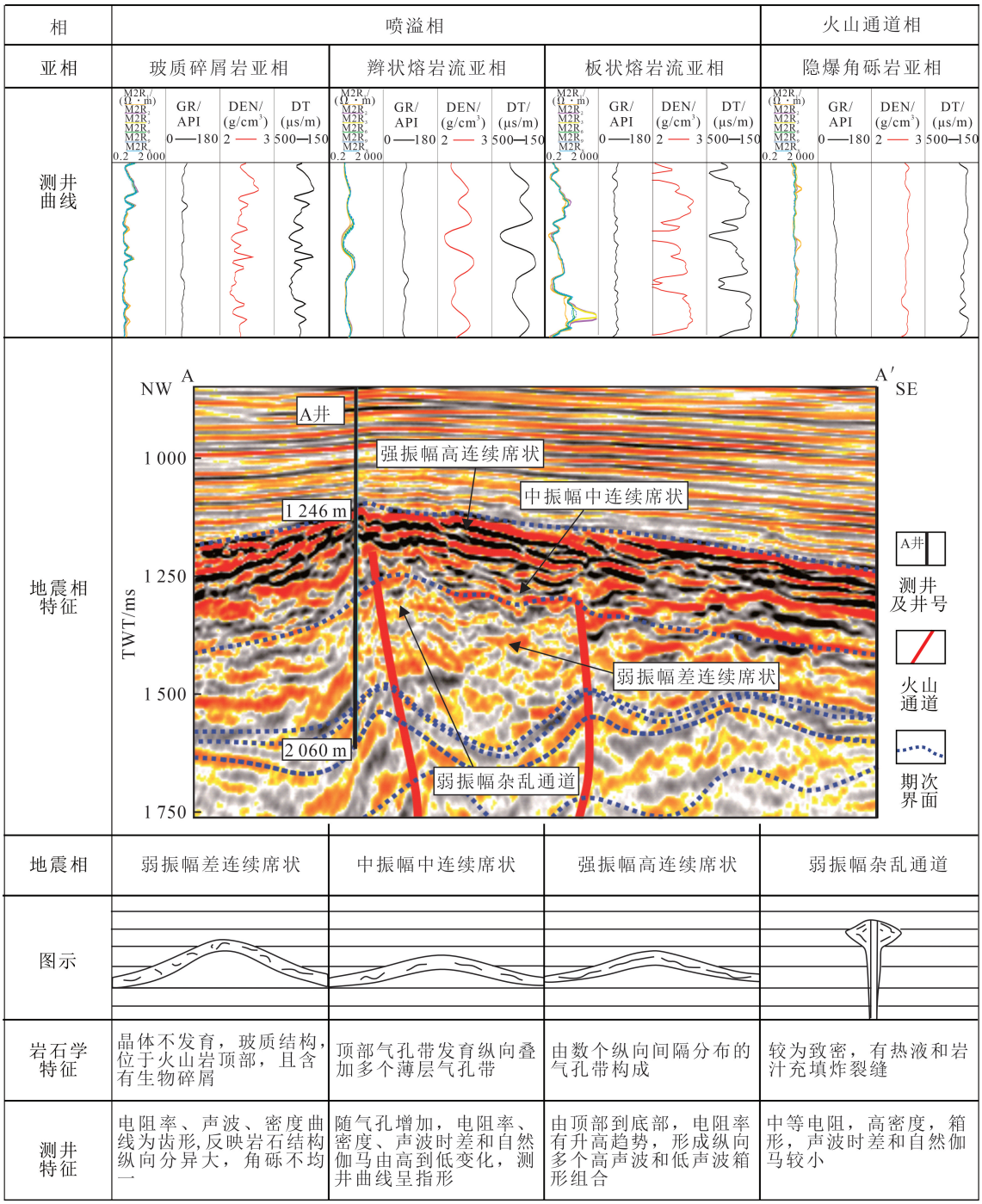
a. 1 351 m,玻质碎屑岩(单偏光),b. 1 351 m,玻质碎屑岩(正交偏光),可见深褐色火山玻璃组成的玻质碎屑、不同方向斜长石和脱玻化微晶;c. 1 627 m,块状玄武岩(单偏光),d. 1 627 m,块状玄武岩(正交偏光),可见基性斜长石斑晶、被蚀变长石斑晶和长石微晶等;e. 1 297 m,杏仁体玄武岩,杏仁体被绿泥石充填;f. 1 29 7m,杏仁体玄武岩,杏仁体被绿泥石部分充填保留少量气孔(单偏光);g. 1 235 m,火山隐爆角砾岩,角砾缝中充填红色岩汁或热液矿物(单偏光);h. 1 266 m,火山隐爆角砾岩,角砾缝中充填红色岩汁或热液矿物(单偏光)。Pl. 斜长石;Chl. 绿泥石。

图4 研究区各岩性镜下照片

Fig.4 Photos of various lithologies under microscope of the study area

为杏仁体发育，中部为厚层块状玄武岩，一般形态上呈现板状；辫状熔岩流亚相，向熔岩流单元顶部，电阻率、密度、声波时差和自然伽马均由高到低变化，测井曲线呈齿形或指形，测井表现为数个纵向间隔分布的基性熔岩单元叠加，气孔或杏仁体分布呈韵律性特征，向熔岩流单元顶部，气孔和杏仁体数量增加，一般形态上呈现辫状；玻质碎屑岩亚相，电阻率、声波、密度曲线为齿形，反映岩石结构纵向分异大，但角砾不均一。

基于火山地层学和其他盆地玄武岩体地震相特征[17]，建立了识别图版（图 5）。火山通道相隐爆角砾岩亚相是从岩浆房到火山口顶部的岩浆系统，位



TWT. 双程旅行时。剖面 A—A′位置见图 1。

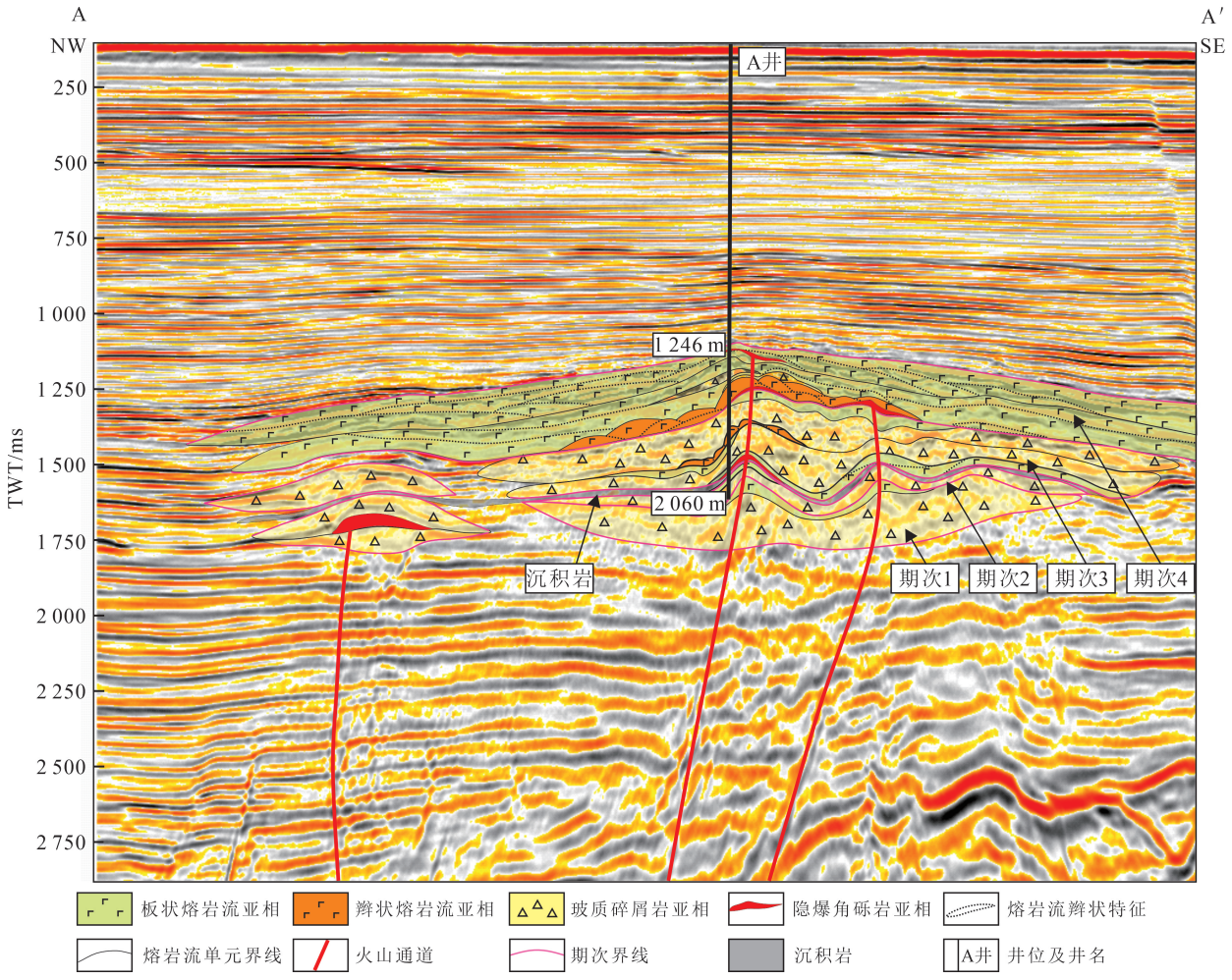
图 5　研究区岩性、岩相综合图

Fig.5　Lithology and lithofacies comprehensive diagram of the study area

于火山机构的下部和中心位置,呈现低频率、弱振幅的杂乱上凸反射特征[18-20]。喷溢相是熔浆在后续喷出物和自身重力的作用下,沿地表流动过程中逐渐冷凝固结而成,受火山喷发期次和能量控制,熔岩喷出地表能量较强时,火山通道附近喷溢相厚度较大[21]。其中喷溢相板状熔岩流亚相呈现中—高频、连续、强振幅、席状反射特征,纵横比小;辫状熔岩流亚相呈现中—低频、中振幅、中连续、席状反射特征,纵横比较小;玻质碎屑岩亚相呈现低频、弱振幅、差连续、席状反射特征,纵横比较小,反射杂乱。喷溢相3种亚相在频率、振幅和连续性上有一定差异,从板状熔岩流亚相到辫状熔岩流亚相再到玻质碎屑岩亚相频率逐渐减小,连续性逐渐变差,振幅逐渐变弱;由火山通道外推至局部低频、强振幅、平行较连续反射终止,与沉积岩中频中弱振幅连续反射有明显差异(图6),可作为喷溢相边界的识别标志[21-22]。

2.3 岩性、岩相构成

A井块状玄武岩和玻质碎屑岩居多,其中块状玄武岩占比为40%,玻质碎屑岩占比为33.0%,其余为杏仁体玄武岩及少量火山隐爆角砾岩和沉积岩。火山岩岩相主要为火山通道相和喷溢相,亚相中板状熔岩流亚相占比为49.7%,玻质碎屑岩亚相占比为32.8%,其余为辫状熔岩流亚相和少量隐爆角砾岩亚相。岩性在纵向上分为珠江组中上段和韩江组下段两部分:珠江组中上段表现为玻质碎屑岩为主,中间夹部分辫状及板状熔岩流亚相;韩江组下段以板状熔岩流为主,中间夹有部分辫状熔岩流亚相及部分玻质碎屑岩亚相。可见火山喷发初期为水下喷发,熔岩遇水快速冷却后形成玻质碎屑岩,随水深的减小,火山喷发变为水上喷发,形成上部块状玄武岩为主。薄层



剖面A—A′位置见图1。

图6 研究区火山岩相及期次界面典型剖面

Fig.6 Typical section of volcanic facies and period interfaces of the study area

沉积岩为火山爆发间歇期水下沉积形成。

3　火山喷发期次及相带分布

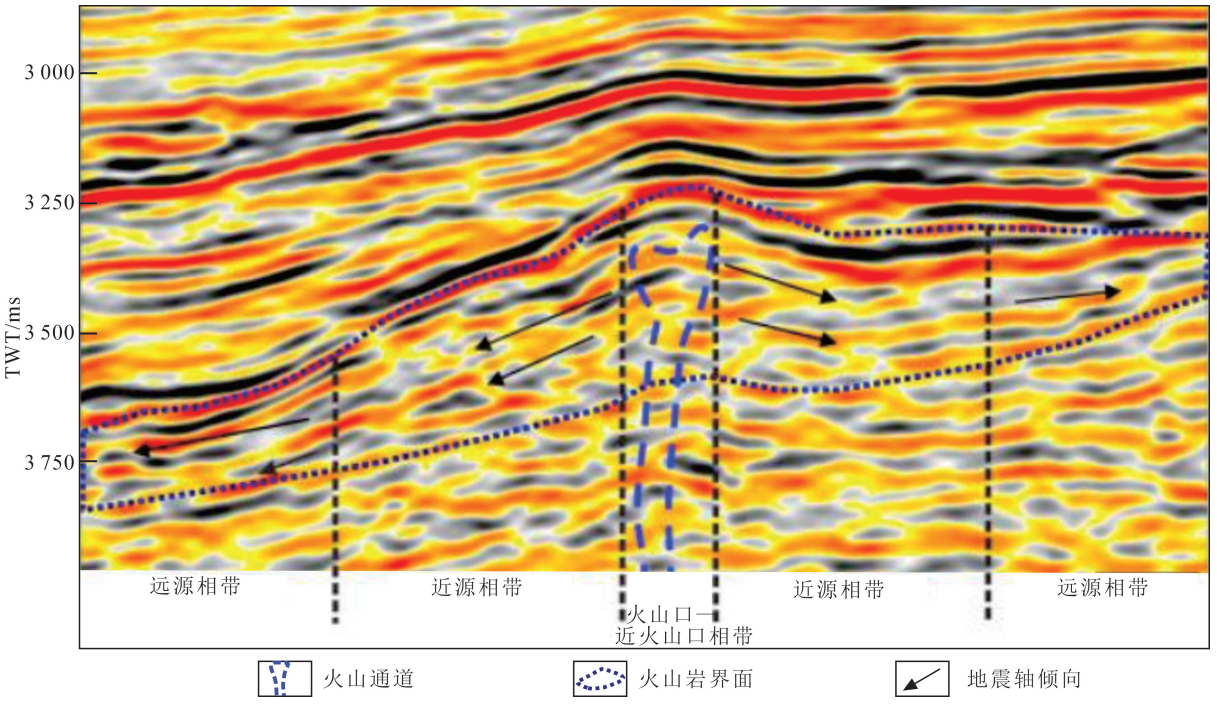
3.1　火山机构相带识别

3.1.1　火山喷发期次及岩相演化

单井上，期次界面以喷发宁静期为界，钻遇沉积岩（泥质粉砂岩、含粉砂泥岩夹薄层砂岩、凝灰质泥岩等）时表明火山活动较弱，进入喷发宁静期。地震上期次界面为强振幅—弱振幅过渡，连续—较连续反射，局部存在上超现象。结合 Ar－Ar 测年结果可知，期次 1—2、期次 3 和期次 4 喷发时间分别为 18.56 Ma 之前（珠江组沉积中晚期）、18.56～16.06 Ma（珠江组沉积中晚期—韩江组沉积早期）、15.04～13.58 Ma（韩江组早期—韩江组中期）。其中，由沉积岩夹层识别出的期次 2 岩层中样品的测年结果（14.06 Ma）实验数据误差较大（图 3）。期次 1—4 整体频率逐渐增加，振幅和连续性逐渐增强，从以玻质碎屑岩为主，转变为玻质碎屑岩和块状玄武岩互层，再转变为以块状玄武岩为主。推测火山喷发初期为水下喷发，形成玻质碎屑岩较多，中间具有三个喷发间歇期发育沉积岩，之后随水深的减小，火山喷发变为水上喷发，上部块状玄武岩厚度较大（图 3）。

3.1.2　火山岩相带识别

火山机构是指一定时间范围内，同源喷发物围绕火山通道形成的具有一定形态和共生组合关系的堆积体[17]。在不同的火山机构中，岩性、岩相分布非常复杂，预测难度大，一般情况下应先识别火山口—近火山口相带，再基于岩相和亚相地震反射特征预测近源、中源和远源相带。据前人[23-25]研究可知：火山口—近火山口相带一般具有刺穿特征，杂乱上凸反射，两侧同相轴倾向相对；近源相带以喷溢相或爆发相为主，位于火山通道附近斜坡区，具低频较连续高倾角反射特征；远源相带以平缓流纹构造的喷溢相或火山沉积相为主，岩性由火山碎屑岩和致密块状玄武岩组成，气孔、杏仁构造不发育，厚度较薄，地震反射特征为较连续，中—强振幅、层状（图 7）；中源相带介于近源和远源之间。如果研究区有足够的钻井支持，则可根据钻遇不同相带的地震反射特征先建立图版，再对目标区进行预测。本研究区仅有一口钻井，且从岩相组合上看仅发育火山口—近火山口相带和近源相带，因此中源和远源相带的识别依靠其他盆地的经验以及二者与火山口—近火山口和近源相带地震特征的差异。区内火山口—近火山口相带的特征为杂乱上凸刺穿，具有丘状反射

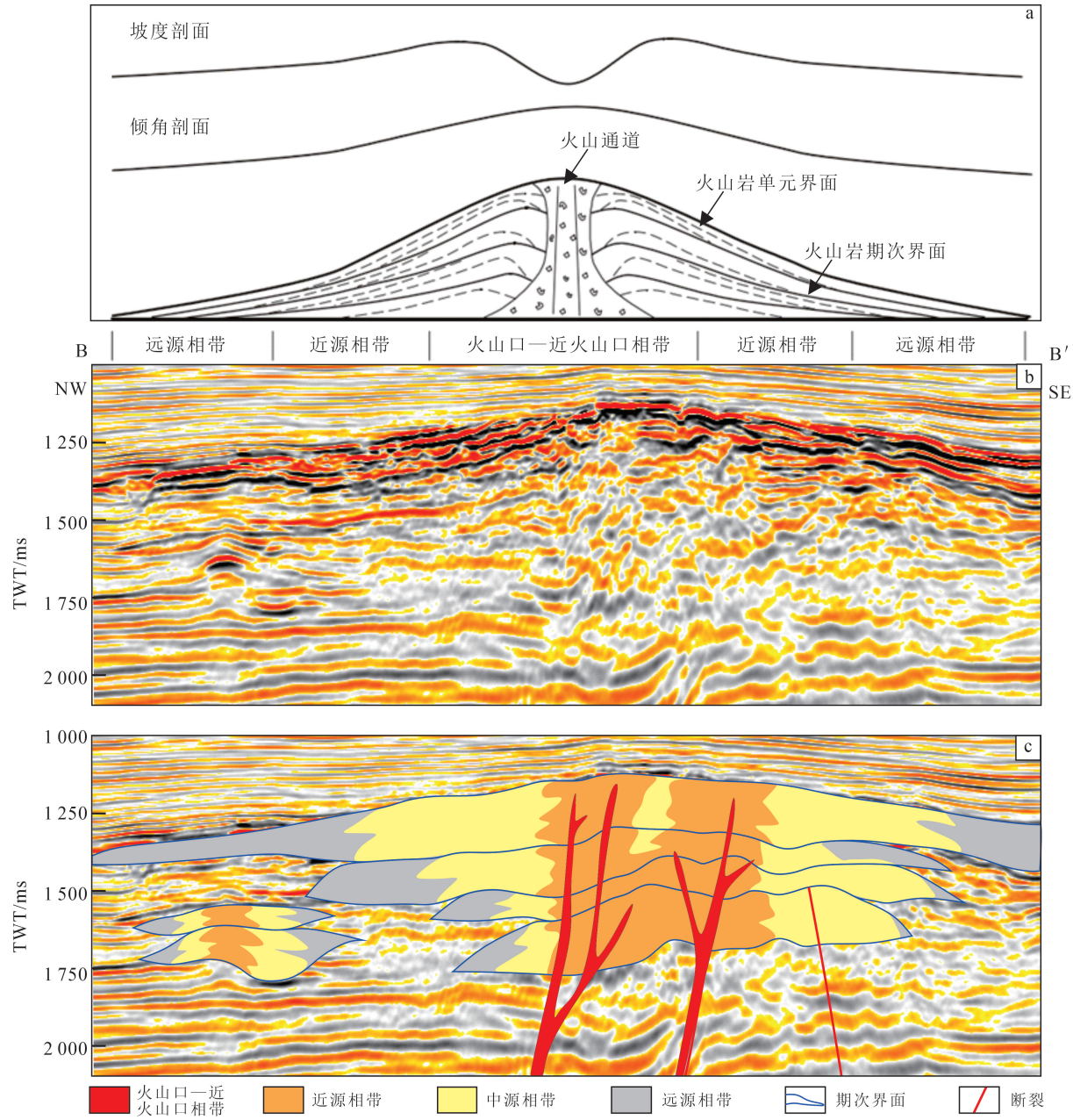


据文献[25]修编。

图 7　火山机构典型特征

Fig.7　Typical features of the volcanic structure

特征,高倾角,发育有隐爆角砾岩,与断裂有一定的伴生关系;近源相带靠近火山通道两侧,地震属性特征为中高频,连续性差—中,中—弱振幅,中等倾角,辫状熔岩流亚相、板状熔岩流亚相和玻质碎屑岩亚相均有发育;中源相带介于近源和远源相带之间,地震属性特征为中高频率,较连续,中振幅,倾角较低,主要为辫状熔岩流和板状熔岩流复合体;远源相带地震属性特征为低频,较连续,中强振幅,低倾角,可见前积反射,对比边部沉积岩振幅较强,熔岩远距离流动后气体耗尽,主要发育板状熔岩流亚相和玻质碎屑岩亚相。总体看,由火山口—近火山口相带至远源相带连续性、成层性增加,倾角逐渐减小(图7、8)。



a. 喷溢类火山机构模式图,火山机构的坡度为0~90°,倾角为0~30°,据文献[26]修编;b. 地震原始剖面;c. 研究区火山岩相带解释。剖面B—B′位置见图1。

图8 研究区火山相带特征

Fig.8 Characteristics of volcanic facies belt of the study area

3.2　各期次火山机构及相带分布特征

根据外部形态和内部结构，研究区火山机构类型主要为喷溢类机构，纵横比低（<1∶50），盾状，以喷溢相为主，垂向叠置多个熔岩流单元，熔岩流单元顶部发育大量杏仁体构造。各期次火山机构分布存在一定规律：期次 1 火山机构呈 NW 向带状，通道发育和火山喷发范围均较小，北部单独发育一小型火山机构；期次 2 火山通道大多为期次 1 的继承性发育，喷发范围扩大，北部火山机构范围缩小；期次 3 火山喷发范围进一步扩大，北部小型火山不发育，在东部发育一小型火山；期次 4 火山相带呈 NWW 向反 S 形，火山喷发范围达到最大，出现火山口连片的现象。期次 1—4 火山喷发规模逐渐扩大，早期周围发育有小型火山，后期被南部大型火山所覆盖，火山口从分散型演化为连片型，火山相带从带状演变为反 S 形（图 9）。各期次火山机构具有相似的分布规律，火山沿断裂多为中心喷发，沿 NWW 向呈条带状分布，火山通道与断裂呈现一定的伴生关系（图 9），表明火山喷发可能与断裂活动有关。

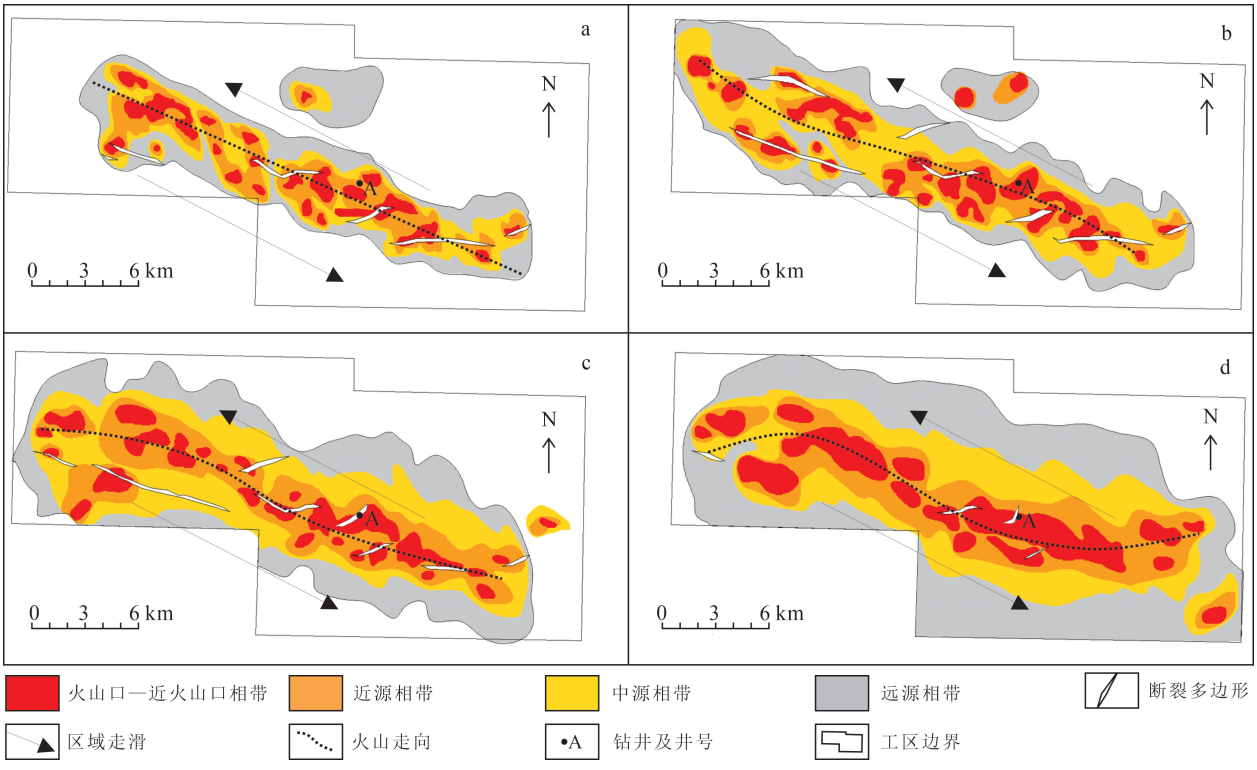
3.3　火山岩物性特征

块状玄武岩孔隙度（φ）绝大多数小于 3%，少量介于 20%～30%之间，杏仁体玄武岩孔隙度介于 15%～35%之间，玻质碎屑岩孔隙度介于 20%～40%之间，火山隐爆角砾岩孔隙度介于 0～25%之间；砂岩包括粉砂岩和泥质粉砂岩，孔隙度非常低；凝灰质泥岩孔隙度较高，火山岩中玻质碎屑岩物性最好（图 3）。喷溢相辫状熔岩流亚相（杏仁体玄武岩为主）和玻质碎屑岩亚相（玻质碎屑岩为主）孔隙度均达到了Ⅰ类储层标准[27]（φ>15%）。壁心薄片显示，期次 1—3 孔隙不发育，但发育粒缘缝，期次 4 物性较好，见原生气孔（或杏仁体内溶孔）和粒内溶孔，发育张裂缝，各期次均在局部发现网状张裂缝。其中期次 4 玻质碎屑岩物性较好，为岩浆遇水淬火近源堆积的产物，因此推测火山口—近源相带物性也较好。

4　火山岩成因和分布主控因素

4.1　岩浆来源及火山岩成因

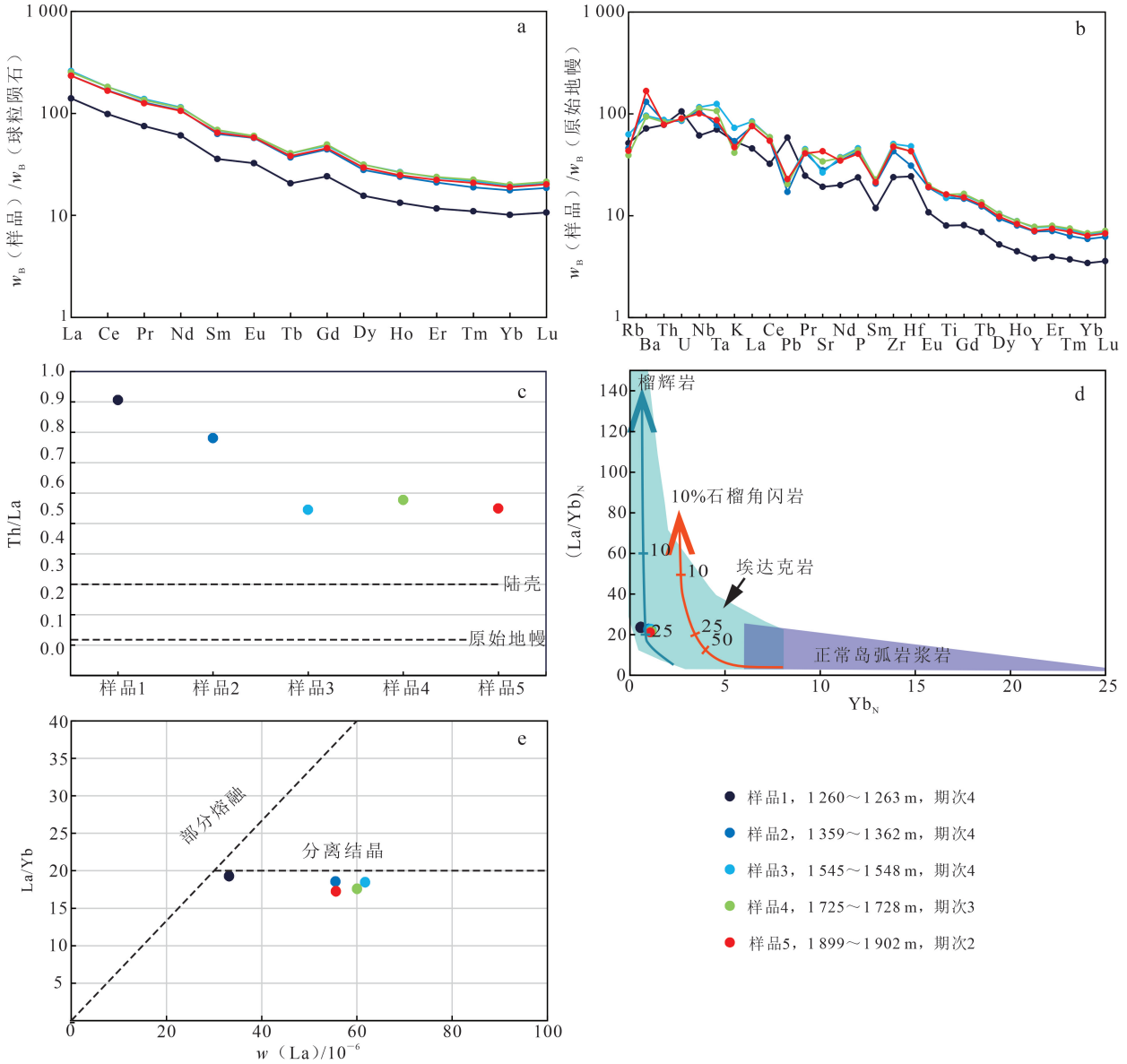
在 TAS 图解（图 2）中，火山岩样品落入玄武岩-碱玄岩/碧玄岩-副长岩区域。从稀土元素球粒陨石标准化配分图（图 10a）中可以看出，火山岩富集轻稀土元素，亏损重稀土元素，稀土元素曲线为右倾



a—d 分别代表期次 1—4 相带分布图，并叠合各期次底面断裂多边形。

图 9　研究区火山机构分布平面图

Fig.9　Volcanic organization distribution plan of the study area



a. 稀土元素球粒陨石标准化配分图；b. 微量元素原始地幔标准化蛛网图；c. Th/La 判别图；d. $(La/Yb)_N$ - Yb_N 图解散点图；e. La/Yb - w(La)关系图。

图 10 研究区微量元素投图

Fig.10 Trace element diagram of the study area

型，轻重稀土元素分馏相对明显（$(La/Yb)_N$=17.26～19.28），表明在岩浆演化过程中发生了一定的分离结晶作用。在微量元素原始地幔标准化蛛网图（图10b）中显示弱的 Nb、Ta 正异常，具有很高的绝对 Nb 质量分数（(46.5～77.0)×10^{-6}）且具有较高的 TiO_2 质量分数，原始地幔标准化 La/Nb 值（样品中 La/Nb 与球粒陨石中 La/Nb 的比值）为 0.69～0.75（<2），为典型的高 Nb 玄武岩。此外，火山岩样品具有高 Sr（(7.26～90.00)×10^{-6}）、低 Y（(1.57～28.00)×10^{-6}）和 Yb（(0.17～3.05)×10^{-6}）质量分数的特点，Sr/Y 值为 16.43～28.95，不存在 Nb、Ta 负异常，为典型的陆内裂谷环境成因[28-29]。

前人[30-31]研究表明，随着演化程度的不断增加，不同演化背景下的岩石的 Th/La 值有着明显差异，原始地幔和球粒陨石的 Th/La 值约为 0.12，而陆壳的 Th/La 值约为 0.30。计算可知，研究区火山岩的 Th/La 值在 0.50～0.90 之间（图 10c），高于陆壳水平，表示其源区为陆壳。

珠江组上段—韩江组火山岩具有与现代埃达克岩石相似的地球化学特征，即高 Sr、低 Y 和 Yb，在

$(La/Yb)_N$- Yb_N图解（图 10d）中，所有样品均落入埃达克岩区域。一般而言，埃达克岩不与玄武岩共生，但玄武质岩浆的地壳混染和分离结晶作用、基性岩浆与酸性岩浆的混合和加厚或拆沉大陆下地壳的部分熔融等均可以形成埃达克质岩石的地球化学成分特征。大部分样品的 K_2O 质量分数较高，这种富 K 特征与下地壳来源的埃达克质岩相类似[32]，且岩样 MgO 质量分数低，$Mg^{\#}$（11.2～64.2）与下地壳来源的熔体一致。从 La/Yb－w(La)关系图（图 10e）可以看出，La/Yb 值不随 La 质量分数的增加而变化，说明研究区岩体岩浆作用主要为分离结晶作用。另外与原始的高玄武质岩浆 w(MgO)＝10%～15%相比，研究区火山岩 SiO_2 和 Al_2O_3 质量分数较高，MgO 质量分数较低（图 11），也表明它们经历了一定程度的分离结晶作用。因此，本研究对火山岩成因的分析同前人研究基本一致，倾向于认为研究区埃达克质岩石来源于增厚下地壳的同化混染和分离结晶。

基性岩一般起源于岩石圈地幔或软流圈地幔，而大陆地壳常强烈亏损 Nb、Ta 等元素。如果幔源岩浆经历了一定规模的陆壳混染作用，往往会形成类似俯冲带岩浆岩的特征[33-34]，玄武质岩浆自地幔源区侵位到浅表，不可避免地会受热液交代、岩浆同化混染、结晶分异和熔体地幔相互作用影响，导致原岩元素质量分数和比值发生改变。因此，讨论玄武岩成因之前需要评估这些过程对地球化学成分的影响。镜下观察玄式岩样品的蚀变程度较高，这一特征与全岩高烧失量一致，说明全岩地球化学成分受热液蚀变和风化作用影响。陆壳混染可以通过全岩同位素和微量元素进行鉴别[35]。火山岩 Ce/Pb 值（0.19～2.47）低于陆壳（3.19[35]），也指示陆壳混染对玄武岩微量元素具有一定的影响[36]。综上，研究区不同期次玄武质岩浆由来自下地壳的同源幔源岩浆经过强烈的地壳同化混染和分离结晶作用而形成。

4.2　火山岩分布主控因素

珠江组沉积之前，由于板块之间碰撞，盆地内部形成左旋走滑断裂，叠加于之前右行走滑拉分盆地之上，主要受 NE 向断裂控制。珠江组沉积至今，南海开始收缩，区域应力场主要处于 NNE—SSW 向的拉张作用下，NW 向的左旋走滑分量使 NW 向转换带在本区继续加强，进入裂谷后被动大陆边缘演化阶段。除个别断裂活动微弱外，大部分断裂活动停止[37-39]。

阳江——统断裂带是陆架—陆坡区沟通深部岩浆的重要通道。研究[4]表明，阳江——统断裂带新近纪岩浆来源于地幔上涌区的下地壳高速体减压熔融，大陆架岩浆底侵程度强，持续时间长。新近纪，岩浆活动早期位于云开低凸起附近；珠江早期，开平东洼附近走滑断裂活动与先存 NE 向断裂交会处发育裂隙式火山；珠江晚期—韩江早期，断裂带南部断层活动减弱，北部开始增强，岩浆活动沿着该断裂带北移，海南地幔柱与阳江——统断裂带北段联合作用导致了该期主要发育在珠三坳陷东部和恩平凹陷西部的多期火山喷发作用，形成了研究区的巨厚层状玄武岩体。火山活动以大规模中心式喷发协同周缘裂隙式喷发为特征，喷发持续时间长，近 NWW 走向，与阳江——统断裂带走向近一致，表明断裂带沟通了深部岩浆房[4]。

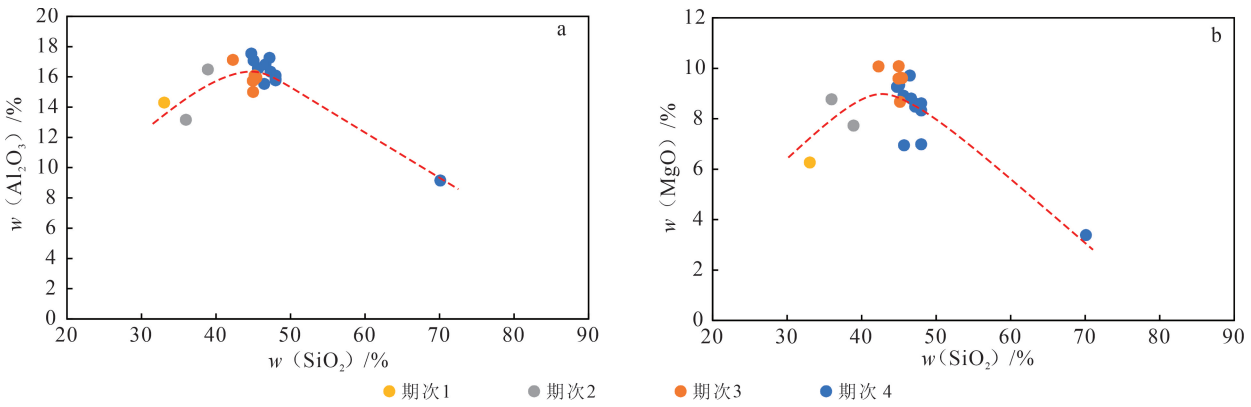


图 11　研究区主量元素质量分数与 $w(SiO_2)$ 交会图

Fig.11　Main elements and w (SiO_2) crossplot of the study area

研究区火山喷发时,在NNE—SSW向区域应力场的拉张作用下,形成了NWW向断裂体系和NEE向断裂体系控制的古近纪盆地格局,大部分断层在珠海组内消失,少数发育于韩江组中上段,局部控制了火山岩的范围。断裂总体呈现两期活动的特征:珠江组沉积期,NEE-NE向断裂连续性变差、近EW向和部分NWW-NW向断裂开始活动;中新世韩江组沉积期至今,NEE-NE向主干断裂趋于消亡,以NWW-NW向断裂活动为主。从珠江期至韩江期,断裂从NEE-NE向转变为NWW-NW向(图9)。火山通道大多沿断裂呈串珠状发育,剖面上火山通道呈株状,部分火山通道与断裂无关,但显示其岩浆来源与深部断裂有关。NW向的左旋走滑分量使得火山机构相带走向向左有微弱旋转,且从带状逐渐演变为反S形。

5 结论

1)研究区钻井识别4种火山岩岩性(玻质碎屑岩、块状玄武岩、杏仁体玄武岩和火山隐爆角砾岩),识别2种岩相4种亚相,包括喷溢相(板状熔岩流亚相、辫状熔岩流亚相、玻质碎屑岩亚相)和火山通道相(隐爆角砾岩亚相)。纵向上,珠江组中上段为玻质碎屑岩亚相为主夹辫状及板状熔岩流亚相,韩江组下段为板状熔岩流亚相为主夹辫状熔岩流亚相和玻质碎屑岩亚相。推测火山喷发初期为水下喷发,后期变为水上喷发,3个短暂的火山爆发间歇期为火山喷发期次界面。

2)从板状、辫状熔岩流亚相到玻质碎屑岩亚相呈现频率减小、连续性变差、振幅变弱的反射特征。由火山口—近火山口相带至远源相带连续性、成层性增加,倾角逐渐减小。期次1—2、3和4喷发时间分别为18.56 Ma之前、18.56~16.06、15.04~13.58 Ma,整体呈现喷发规模扩大,火山口集中连片,火山相左旋为反S形的变化特征。研究区火山岩储层复杂,火山口—近源相带物性较好。

3)研究区埃达克质岩石来源于增厚下地壳的部分熔融,陆壳混染对玄武岩微量元素质量分数具有一定的影响,研究区不同期次玄武质岩浆由来自下地壳的同源幔源岩浆经过部分熔融和分离结晶作用形成,并经历了强烈的地壳同化混染作用。

4)NWW向条带状火山多为沿断裂中心喷发,火山通道大多沿断裂呈串珠状发育,表明火山喷发可能与断裂活动有关或其岩浆来源与深部断裂有关。NW向的左旋走滑分量使得火山机构相带走向向左有微弱旋转,且从带状逐渐过渡为反S形。

参考文献(References):

[1] 张斌,王璞珺,张功成,等.珠—琼盆地新生界火山岩特征及其油气地质意义[J].石油勘探与开发,2013,40(6):657-665.
Zhang Bin, Wang Pujun, Zhang Gongcheng, et al. Cenozoic Volcanic Rocks in the Pearl River Mouth and Southeast Hainan Basins of South China Sea and Their Implications for Petroleum Geology [J]. Petroleum Exploration and Development,2013,40(6):657-665.

[2] 邹和平,李平鲁,饶春涛.珠江口盆地新生代火山岩地球化学特征及其动力学意义[J].地球化学,1995,24(增刊1):33-45.
Zou Heping, Li Pinglu, Rao Chuntao. Geochemical Characteristics and Dynamic Significance of Cenozoic Volcanic Rocks in Pearl River Estuary Basin [J]. Geochimica,1995,24(Sup.1):33-45.

[3] 张斌,王璞珺,张功成,等.珠—琼盆地新生界火山岩特征及其油气地质意义[J].石油勘探与开发,2013,40(6):657-665.
Zhang Bin, Wang Pujun, Zhang Gongcheng, et al. Cenozoic Volcanic Rocks in the Pearl River Mouth and Southeast Hainan Basins of South China Sea and Their Implications for Petroleum Geology [J]. Petroleum Exploration and Development,2013,40(6):657-665.

[4] 蔡国富,张向涛,彭光荣,等.南海北部阳江——统暗沙断裂带与新近纪岩浆活动[J].大地构造与成矿学,2021,45(1):40-52.
Cai Guofu, Zhang Xiangtao, Peng Guangrong, et al. Neogene Volcanism and Tectonics Along the Yangjing-Yitong'ansha Fault Zone in the Northern South China Sea Margin[J]. Geotectonica et Metallogenia,2021,45(1):40-52.

[5] 沈梦蓉.转换背景下岩浆改造型洼陷烃源岩分布:以珠江口盆地阳江东凹为例[D].长春:吉林大学,2022.
Shen Mengrong. Distribution of Source Rocks in the Sags Effected by Magmatism Under the Background of Transformation: A Case Study of the Eastern Yangjiang Sag in the Pearl River Mouth Basin [D]. Changchun:Jilin University,2022.

[6] 阙晓铭,李元森,陈会霞,等.深部地幔在白云凹陷的岩浆记录:基于BY7火山岩的地球化学研究[J].华南地质与矿产,2013,29(2):105-115.
Que Xiaoming, Li Yuansen, Chen Huixia, et al. Geochemistry Research on the Deep Mantle Activity in

Baiyun Sag During the Cenozoic from the Volcanic Rocks of Well BY7 [J]. South China Geology，2013，29(2)：105－115.

[7] 秦阳，刘池洋，彭光荣，等.珠江口盆地云开低凸起形成演化及构造分区作用[J/OL].地学前缘.[2024－06－16]. https://link.cnki.net/doi/ 10.13745/j.esf.sf.2024.5.26.
Qin Yang，Liu Chiyang，Peng Guangrong，et al. Formation and Evolution of the Yunkai Low Uplift in the Pearl River Mouth Basin and Its Structural Partition Effects [J/OL]. Earth Science Frontiers. [2024－06－16]. https://link.cnki.net/doi/10.13745/j.esf.sf.2024.5.26.

[8] 匡增桂，郭依群.南海北部神狐海域新近系以来沉积相及水合物成藏模式[J].地球科学：中国地质大学学报，2011，36(5)：914－920.
Kuang Zenggui，Guo Yiqun. The Sedimentary Facies and Gas Hydrate Accumulation Models Since Neogene of Shenhu Sea Area，Northern South China Sea [J]. Earth Science：Journal of China University of Geosciences，2011，36(5)：914－920.

[9] 李刚.珠江口盆地裂后期断层和岩浆发育特征、时空差异及动力学含义[D].武汉：中国地质大学(武汉)，2022.
Li Gang. Post-Rift Faulting and Magmatism Within the Pearl River Mouth Basin：Spatial-Temporal Difference，and New Insights into the Geo-Dynamics [D]. Wuhan：China University of Geosciences (Wuhan)，2022.

[10] 何金海，吴静，白海军，等.珠江口盆地恩平凹陷油气沿断层走向运移模式[J].海洋地质前沿，2022，38(8)：55－66.
He Jinhai，Wu Jing，Bai Haijun，et al. Mode of Oil-Gas Migration Along Fault Strike in Enping Sag of Pearl River Mouth Basin [J]. Marine Geology Frontiers，2022，38(8)：55－66.

[11] 贾培蒙，张向涛，陈维涛，等.珠江口盆地惠州凹陷惠州 21 古潜山的形成演化及其对深层油气成藏的控制[J].海洋地质前沿，2021，37(12)：27－37.
Jia Peimeng，Zhang Xiangtao，Chen Weitao，et al. Tectonic Ecolution of Huizhou 21 Buries Hill and Its Contral over Deep Oil Accumulations in the Huizhou Sag of Pearl River Mouth Basin [J]. Marine Geology Frontiers，2021，37(12)：27－37.

[12] Lebas M J，Lemaitre R W，Streckeisen A，et al. A Chemical Classification of Volcanic Rocks Based on the Total Alkali-Silica Diagram [J]. J Petrol，1986，27(3)：745－750.

[13] Wyman D A，Bailes A H. Trace Element Geochemistry of Volcanic Rocks：Applications for Massive Sulphide Exploration，[J]. Geological Association of Canada Mineral Deposits Division，1996，12：13－79.

[14] Wright K A，Jerram D A，Watton T J. The Petrophysical and Petrographical Properties of Hyaloclastite Deposits：Implications for Petroleum Exploration (Review) [J]. AAPG Bulletin，2014，98(3)：449－463.

[15] 杨凯凯，边伟华，王岩泉，等.准噶尔盆地东部巴塔玛依内山组玻质碎屑岩的发现及地质意义[J].中国石油大学学报(自然科学版)，2018，42(5)：14－22.
Yang Kaikai，Bian Weihua，Wang Yanquan，et al. Discovery and Geological Significance of Hyaloclastite of Batamayineishan Formation in Eastern Junggar Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)，2018，42(5)：14－22.

[16] 单玄龙，邹玉洁，衣健，等.盆地火山岩相研究进展：基性火山熔岩及水下喷发火山岩相新成果[J].吉林大学学报(地球科学版)，2024，54(3)：721－734.
Shan Xuanlong，Zou Yujie，Yi Jian，et al. Progress of Basin Volcanic Facies：New Results of Intemediate-Mafic Volcanic Lava and Volcanic Facies of Subaqueous Eruption [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition)，2024，54(3)：721－734.

[17] 王璞珺.盆地火山岩：岩性·岩相·储层·气藏·勘探[M].北京：科学出版社，2008：34－45，63－65.
Wang Pujun. Volcanic Rocks in Petroliferous Basins：Petrography·Facies·Reservoir·Pool·Exploration [M]. Beijing：Science Press，2008：34－45，63－65.

[18] 周家雄，徐春强，黄志，等.渤海湾盆地渤中凹陷 BZ8－3S 大型构造规模型火山岩储层形成条件[J/OL].地球科学.[2024－05－15].https://link.cnki.net/urlid/42.1874.P.20240412.1549.002.
Zhou Jiaxiong，Xu Chunqiang，Huang Zhi，et al. Enhanced Formation Conditions of the Large-Scale Volcanic Reservoir in the BZ8－3S Large Volcanic Structure in Bozhong Sag，Bohai Bay Basin [J]. Earth Science.[2024－05－15]. https://link.cnki.net/urlid/42.1874.P.2024041 2. 1549.002.

[19] 冯玉辉，边伟华，顾国忠，等.中基性火山岩井约束地震岩相刻画方法[J].石油勘探与开发，2016，43(2)：228－236.
Feng Yuhui，Bian Weihua，Gu Guozhong，et al. A Drilling Data-Constrained Seismic Mapping for

Intermediate-Mafic Volcanic Facies [J]. Petroleum Exploration and Development,2016,43(2):228-236.

[20] 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 & Gas Geology, 2024,45(3):801-815.

[21] 陈骁,何青林,冉崎,等.四川盆地二叠系火山岩地震相特征及识别[J].天然气工业,2019,39(2):28-36.
Chen Xiao, He Qinglin, Ran Qi, et al. Features and Recognition for Seismic Facies of Permian Volcanic Reservoirs in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry,2019,39(2):28-36.

[22] 李素华,卢齐军,李蓉,等.川西广汉地区二叠系火山岩地震响应特征及分布预测[J].石油物探,2022,61(4):694-704.
Li Suhua, Lu Qijun, Li Rong, et al. Seismic Response Characteristics and Distribution Prediction of Permian Volcanic Rocks in the Guanghan Area, Western Sichuan [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2022,61(4):694-704.

[23] 徐宏节.松辽盆地南部断陷层火山岩储层识别及评价研究[D].成都:成都理工大学,2010.
Xu Hongjie. The Identification and Evaluation About Volcanic Reservoir of Fault Depression Layer in Southern Songliao Basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology,2010.

[24] 武刚,陈利,彭寿英.胜利油田不同类型火成岩相带划分研究[J].石油天然气学报,2007,29(3):196-198.
Wu Gang, Chen Li, Peng Shouying. Study on the Zoning of Different Types of Igneous Rock Facies in Shengli Oilfield [J]. Journal of Oil and Gas Technology,2007,29(3):196-198.

[25] 李康.珠江口盆地惠州A/B构造带神狐组火山岩喷发-成山过程研究[D].长春:吉林大学,2023.
Li Kang. Study on Volcanic Eruption-Orogeny Process of Shenhu Formation in Huizhou A/B Structural Belt, Pearl River Mouth Basin [D]. Changchun:Jilin University,2023.

[26] 唐华风,王璞珺,姜传金,等.松辽盆地白垩系营城组隐伏火山机构物理模型和地震识别[J].地球物理学进展,2007,22(2):530-536.
Tang Huafeng, Wang Pujun, Jiang Chuanjin, et al. Physical Model and Seismic Recognition of Concealed Volcanic Edifices of Yingcheng Formation in Songliao Basin, Cretaceous, NE China [J]. Progress in Geophysics,2007,22(2):530-536.

[27] 油气储层评价方法:SY/T 6285—2011[S].北京:石油工业出版社,2011.
Evalution Method of Oil and Gas Reservoirs: SY/T 6285—2011[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.

[28] 王婷,牛漫兰,吴齐,等.郯庐断裂带东侧滁州盆地早白垩世高镁埃达克质火山岩地球化学特征及其岩石成因[J].岩石学报,2016,32(4):1013-1030.
Wang Ting, Niu Manlan, Wu Qi, et al. Geochemistry and Petrogenesis of Early Cretaceous Adakitic Volcanic Rocks from Chuzhou Basin, Eastern Tan-Lu Fault Belt [J]. Acta Petrologica Sinica, 2016, 32(4):1013-1030.

[29] 郑海飞,陈斌,孙樯,等.高压下玄武岩浆的不混溶及其对双峰式火山岩的成因意义[J].岩石学报,2003,19(4):745-751.
Zheng Haifei, Chen Bin, Sun Qiang, et al. Immiscibility of Basalt Magma at High Pressure and Significance to the Bimodal Volcanic Rock[J]. Acta Petrologica Sinica,2003,19(4):745-751.

[30] 李永军,李甘雨,佟丽莉,等.玄武岩类形成的大地构造环境Ta、Hf、Th、La、Zr、Nb比值对比判别[J].地球科学与环境学报,2015,37(3):14-21.
Li Yongjun, Li Ganyu, Tong Lili, et al. Discrimination of Ratios of Ta, Hf, Th, La, Zr and Nb for Tectonic Settings in Basalts[J]. Journal of Earth Sciences and Environment,2015,37(3):14-21.

[31] Cai R, Liu J, Sun Y, et al. Phosphorus Deficit in Continental Crust Induced by Recycling of Apatite-Bearing Cumulates [J]. Geology,2023,51(5):500-504.

[32] 孟繁一,赵志丹,朱弟成,等.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[J].岩石学报,2010,26(7):2180-2192.
Meng Fanyi, Zhao Zhidan, Zhu Dicheng, et al. Petrogenesis of Late Cretaceous Adakite-Like Rocks in Mamba from the Eastern Gangdese, Tibet [J]. Acta Petrologica Sinica,2010,26(7):2180-2192.

[33] Ernst R E, Buchan K L, Campbell I H, Frontiers in Large Igneous Province Research [J]. Lithos, 2005, 79(3/4):271-297.

[34] 夏林圻,夏祖春,徐学义,等.利用地球化学方法判别大陆玄武岩和岛弧玄武岩[J].岩石矿物学杂志,2007,26(1):77-89.

Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, et al. The Discrimination Between Continental Basalt and Island Arc Basalt Based on Geochemical Method [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2007, 26(1):77 - 89.

[35] Stracke A, Bizimis M, Salters V J M. Recycling Oceanic Crust: Quantitative Constraints [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2003, 4(3): 8003.

[36] 曹楚奇,熊发挥,杨胜标,等.南海北部陆缘新生代玄武岩地球化学特征及成因[J].地质学报,2022,96(8):2683 - 2704.
Cao Chuqi, Xiong Fahui, Yang Shengbiao, et al. Geochemical Characteristics and Petrogenesis of Cenozoic Basalt from the Northern Continental Margin of the South China Sea[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(8):2683 - 2704.

[37] 梁光河,张宝林.从陆缘伸展探讨新生代南海构造演化[J]. 地质通报,2024,43(1): 20 - 32.
Liang Guanghe, Zhang Baolin. Discussion on the Cenozoic Tectonic Evolution of the South China Sea from Continental Margin Extension[J]. Geological Bulletin of China, 2024, 43(1): 20 - 32.

[38] 梁卫,闫正和,杨勇,等. 南海东部西江油田低阻油层识别及主控因素研究[J]. 特种油气藏, 2022, 29(1): 10 - 14.
Liang Wei, Yan Zhenghe, Yang Yong, et al. Study on Identification and Main Controlling Factors of Low-Resistivity Oil Reservoirs in Xijiang Oilfield, Eastern South China Sea[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 29(1): 10 - 14.

[39] Zhou J, Li S, Suo Y, et al. NE-Trending Transtensional Faulting in the Pearl River Mouth Basin of the Northern South China Sea Margin [J]. Gondwana Research, 2023, 120:4 - 19.