

火山、泥火山/泥底辟及含气陷阱与油气运聚关系

何家雄¹ 祝有海² 马文宏³ 陈胜红⁴ 龚晓峰¹ 崔莎莎¹

(1.中国科学院边缘海地质重点实验室,广东 广州 510640;2.中国地质科学院矿产资源研究所,北京 100037;3.中海石油有限公司湛江分公司,广东 湛江 524057;4.中海石油有限公司深圳分公司研究院,广东 广州 510240)

摘要:火山、泥火山/泥底辟及含气陷阱这些特殊的地质体,不仅是揭示地球深部构造运动的窗口和地球深部流体活动特点的表征,而且其与油气运聚关系密切,具有非常重要的油气地质意义。火山与泥火山/泥底辟的主要差异及区别是所形成的物质基础及源动力不同,前者主要反映地壳深部地球动力学过程,其物质基础来源于火山幔源活动上侵和喷发的岩浆物质;后者则是在结晶基底以上的沉积盆地中,由快速沉积充填的欠压实泥页岩发生塑性流动而产生底辟上拱所形成的产物,其物质基础为巨厚欠压实泥页岩。含气陷阱则为气侵或富含气地层所形成的地震反射畸变之痕迹。火山、泥火山/泥底辟发育演化及展布与油气运聚成藏存在明显的成因联系和耦合关系,且控制和制约了沉积盆地中油气分布与聚集。

关键词:火山及火山活动;泥底辟/泥火山;含气陷阱;地质地球物理特征;油气运聚特点

中图分类号:P618.130 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2010)06-1720-13

火山、泥火山/泥底辟等地质体在很多沉积盆地中均有分布,这些特殊地质体的形成及发育演化乃至展布特征均与油气运聚成藏存在密切的成因联系和耦合关系。同时,火山、泥火山/泥底辟的形成及其活动,亦是揭示地球深部构造运动的窗口和观测地壳深部流体上侵活动极好的天然实验室,更是地球深部物质向上运动的极好指示和明显的标志。火山活动主要与地壳构造运动及深大断裂活动密切相关,亦与地震伴生,其对促进沉积盆地中烃源岩有机质演化及油气生成的地温场、油气运聚富集的应力场及流体流动的流体势场的影响和控制作用均非常明显。因此,研究火山、泥火山/泥底辟等地质体形成演化及其对油气运聚成藏的控制作用,不仅具有重要的地球科学意义,亦具有非常重要的油气地质意义。

火山岩与火山活动及其发育演化与油气运聚成藏存在一定的成因联系,其既能起到促进有机质热演化生烃形成油气和作为油气储层提供油气储集空间而充分发挥其积极作用,但在油气分布富集区,亦

能对已形成的油气藏产生强烈的破坏作用,导致油气散失和产生烃类热裂解作用。因此,火山活动及火山岩的发育展布,对油气运聚成藏具有“建设性”和“破坏性”的双重作用。

泥底辟/泥火山成因机制相同、发育演化特征相似,其均是由地壳深部密度较小的高塑性巨厚欠压实泥页岩,在密度倒置的区域动力学体系下产生差异重力作用而导致流动上侵和上拱挤入上覆地层,使得上覆岩层弯曲隆起或刺穿上覆地层和断裂薄弱带而形成的一种地质构造,其中,未刺穿上覆地层即未出露地表或海底的为泥底辟,而刺穿上覆地层出露地表或海底的则称为泥火山^[1-2]。泥底辟及泥火山在全球范围内分布广泛,地球上已知泥火山数量已近 900 座,世界上比较著名的泥火山有伊朗的马克兰和罗马尼亚的布扎,最大的泥火山分布在阿塞拜疆的巴库,美国黄石公园泥火山亦非常闻名。海底泥火山在里海、黑海、挪威海、地中海及巴巴多斯近海、尼日利亚近海和墨西哥湾等海域亦有发现。大量研

收稿日期:2009-11-06;改回日期:2010-04-25

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2007CB41170501)和(2009CB219501)联合资助。

作者简介:何家雄,男,1956年生,研究员,博士,长期从事油气勘探与地质综合研究;E-mail:hejx@gig.ac.cn。

究表明^[3-9],泥底辟及泥火山发育演化均与油气运聚成藏存在密切的成因联系,因此,泥底辟及泥火山的发育及广泛存在,亦是勘探寻找石油天然气及“渗漏型”天然气水合物的重要线索和示踪标志。

本文拟重点剖析火山、泥火山/泥底辟及含气陷阱的地质地球物理特征,深入探讨其发育演化过程、展布特点及其与油气运聚成藏的关系,旨在抛砖引玉为综合判识和预测以及勘探这种特殊类型的油气藏提供借鉴和指导。

1 火山、泥火山/泥底辟及含气陷阱地质地球物理特征

1.1 火山岩地质地球物理特征

火山活动及火山岩是揭示地球深部地壳构造运动的窗口和标志,亦是不同地质时期大地构造运动及其活动特点的具体表征。因此,深入研究火山活动及火山岩地质地球物理和地球化学特征与发育演化及分布规律、火山作用对油气运聚成藏的控制和影响等,均具有非常重要的油气地质意义。火山活动及火山岩地质地球物理特征,一般在地表露头和海底观察测定均比较容易,但要在地下埋深几千米广阔

的陆上和海域,准确地识别、正确地判识火山活动特点及发育演化过程、火山岩分布特征等的难度则比较大。

火山活动及火山岩展布特征与沉积充填作用及沉积岩发育特征具有明显的差异,其地质地球物理特征与沉积作用及沉积岩的重要区别及其特点,具体可总结概括为以下方面:

(1)火山岩及火山活动在二维及三维多道反射地震剖面上(图 1~2),一般均具有明显的强振幅和高波阻抗特征(火山岩体反射振幅和波阻抗明显高于相邻沉积岩及围岩),且多具中低—中高的反射波频率,断续或连续的内部反射或杂乱模糊的空白反射,波状及杂乱、平行、亚平行的结构;顶面反射表现为多种特征,丘状或层状,强振幅或中强振幅,相对较低的频率,具较明显的波阻抗差。另外,火山岩体的地震反射同相轴产状特殊,一般与围岩产状不协调,或具有明显的丘状及上拱隆起和底辟挤入的背斜形态特征。另外,据赵文智和蒙启安等研究^[10-12],处在火山活动的不同位置,火山岩岩相及岩性特征明显不同。位于火山口及近火山口处多为爆发相火山岩,地震响应特征为丘状或楔状外形,内部地震反射特

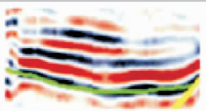
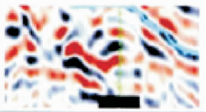
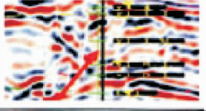
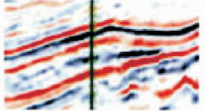
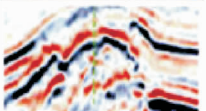
类型	地震剖面	频率	振幅	反射特征	岩相	分布区域及部位
A		中高频	强振幅	层状	火山沉积相	低洼部位
B		中高频	强振幅	杂乱	侵入相	火山口附近
C		中低频	强振幅	杂乱	火山通道相	火山口
D		中高频	强振幅	层状或楔状	溢流相	斜坡、低洼处
E		中低频	强振幅	丘状	爆发相	火山口

图 1 松辽盆地典型火山岩地震反射特征及研样类型与地质分布特点(据赵文智等,2008)

Fig.1 Seismic reflection characteristics of typical volcanic rocks, sample types and geological distribution features in Songliao basin

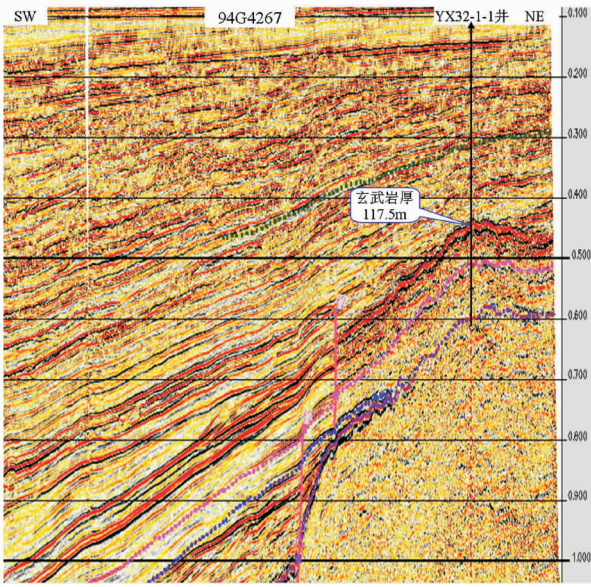


图2 南海莺歌海盆地莺东斜坡带钻遇火山岩典型地震剖面
 Fig.2 Typical seismic profile of volcanic rocks intersected by drill holes on Yingdong slope zone of South China Sea-Yingge Sea basin

征为强振幅、中低频、连续性差的杂乱模糊反射；而远离火山口位置的斜坡或低洼部位，则多为溢流相火山岩，以近似层状或楔状、席状的外形为主，内部

地震反射特征为强振幅、中高频、连续性较好的平行、亚平行地震反射结构特征(图1)。

(2)火山岩由于其密度一般比沉积岩大(含气孔及流体除外)，地震传播速度普遍偏高，在地震速度谱和VSP测井及常规电测井的声波时差曲线上，均存在明显的高速异常显示，故火山岩体的层速度明显高于其相邻砂泥岩及围岩的层速度。同时，由于岩浆岩侵入上覆地层及围岩，亦可导致其地层产状发生改变或部分改变而形成较明显的不同类型的构造形态特征。

(3)火山岩及火山活动在磁力分布图上，具有明显的磁力异常特征(图3)。沉积岩一般均具有无磁性或弱磁性特点，部分火成岩及变质岩如基底闪长岩、板岩、千枚岩及花岗岩亦呈无磁性或弱磁性特征，而火山岩则磁性最强。通过沉积岩与火成岩以及不同类型火山岩及变质岩磁化率变化特点的对比(表1)，可以明显看出，沉积岩磁化率最低，闪长玢岩、板岩磁化率亦较低，而火山岩磁化率最高，且火山岩中从火山角砾岩及凝灰岩、酸性流纹岩到中性安山岩再到基性玄武岩，其磁化率亦逐渐增强。因此，可以利用磁力异常特征判识与确定火山岩的宏观分布特征。在上述研究基础上，根据赵文智等^[10]，

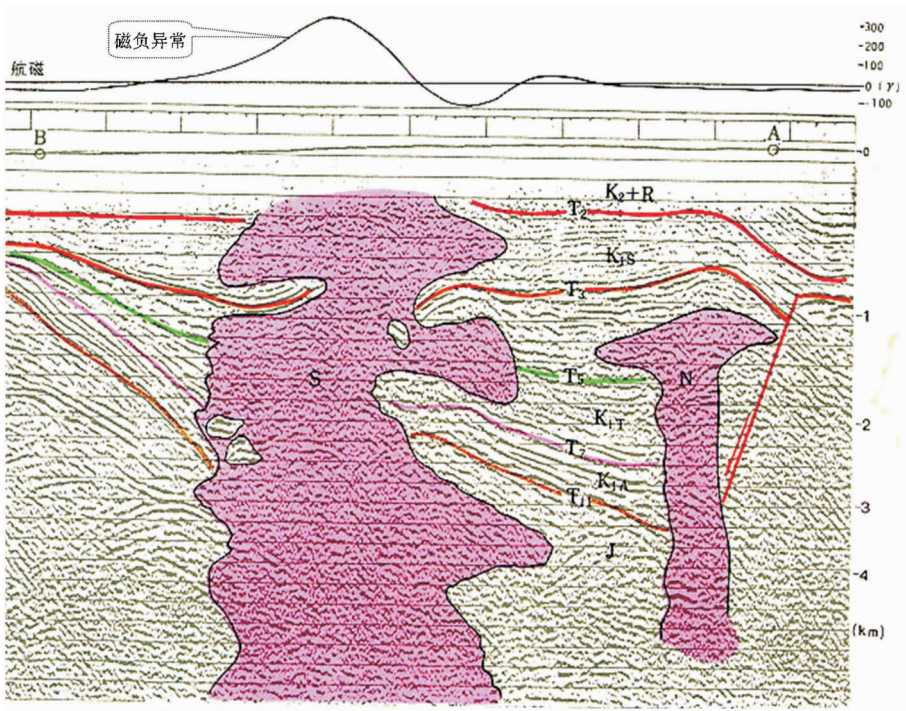


图3 马尼特拗陷西部火山岩典型二维反射地震剖面及磁力异常特征
 Fig.3 Typical 2D reflection seismic profile and magnetic anomaly characteristics of volcanic rocks in western Manite sag

表 1 松辽盆地北部沉积岩与火山岩磁化率对比
Table 1 Magnetic susceptibility comparison between sedimentary rocks and volcanic rocks in northern Songlian basin

地层	岩性	磁化率/ 10^{-6}SI	
		变化范围	平均值
登楼库组	粉砂岩	0~300	28
	砂岩	10~20	16
	砾岩	0~42	22
	细砂、粉砂岩	0~20	3
	泥岩	0~60	21
侏罗系	火山角砾岩	0~60	23
	凝灰岩	0~1200	105
	流纹岩	0~400	180
	安山岩	10~1300	285
	玄武岩	1800~2000	1900
二叠系	闪长玢岩	3~100	17
	板岩	0~46	6

还可利用延拓回返垂直二次导数目标优化处理技术,进一步对火山岩进行精细描述和深入刻画,亦可利用多参数组合滤波技术,滤除基底区域背景磁异常,提取目的层段火山岩异常,进而对火山岩分布规模及有利油气勘探区带进行优选与评价。同时,由于火山岩多富含高密度重矿物,故其重力值亦颇高,因此在重力分布图上,火山岩一般均显示出明显的高重力异常特征,据此亦可判识与确定火山岩及其分布特征和展布规模。

1.2 泥火山/泥底辟地质地球物理特征

前已论及,泥底辟/泥火山成因机制相同、发育演化特征相似,其均是由深部密度较小的巨厚欠压实泥页岩,在密度倒置的重力差异作用体系与特定的区域地质构造动力学背景相互配合和作用下,所孕育的高温超压潜能沿地层薄弱带及张性断裂发育处,促使泥质物资发生塑性流动即底辟上拱和上侵入作用,最终导致上覆岩层弯曲隆起或刺穿上覆地层薄弱带而形成的一种正向地质构造。泥底辟/泥火山发育演化及其地质地球物理特征与火山幔源岩浆活动及火成岩发育展布特点,具有一定的相似性但其存在的差异则更为明显。由于篇幅所限,笔者在综合分析国内外有关泥底辟及泥火山的地质地球物理资料的基础上,选择南海西北部边缘莺歌海盆地中央泥底辟带为其典型实例进行系统剖析与重点阐述。

南海西北部边缘莺歌海盆地中央泥底辟带主要

形成于中新世晚期,展布于盆地中部巨厚的新近系海相拗陷沉积区,泥底辟形成及发育展布的地质地球物理特征具有以下显著特点和规律:

(1)区域上展布于盆地中部东南区沉降最深、沉积最厚的莺歌海拗陷。该区沉积充填规模巨大,新近系及第四系海相拗陷沉积厚逾万米,其中,快速沉积的欠压实泥页岩及泥质粉砂岩等细粒沉积物占地层总厚的 70%以上。很显然,这种巨厚欠压实海相泥页岩等细粒沉积物是形成该区大规模泥底辟的物质基础。

(2)平面上沿盆地北西长轴方向泥底辟展布呈 5 行雁行式排列,并由此构成了规模巨大的中央泥底辟背斜构造带,其展布面积达 20000 km²。其中,泥底辟单个最大面积超过 700 km²,一般多为几十至百余平方千米^[2-5]。

(3)具有低密低速的地球物理特征和异常高温超压的地质特点。由于该区泥底辟的泥源层物质均为快速沉积的中新统及上新统底部富含流体的巨厚海相欠压实泥页岩等细粒沉积物,故其岩石密度非常低(大大低于 2.3 g/cm³),导致地震传播速度出现明显的低速异常,在常规二维反射地震剖面及速度谱资料上,均可见到明显的低速异常特征。同时,钻井及地震资料亦揭示泥底辟分布区存在明显的异常高温超压的地质特点,据钻井测试表明,盆地中央泥底辟带地温梯度及大地热流值偏高,最大分别高达 5.7°C/100 m 和 95 mW/m² 以上,而盆地边缘斜坡

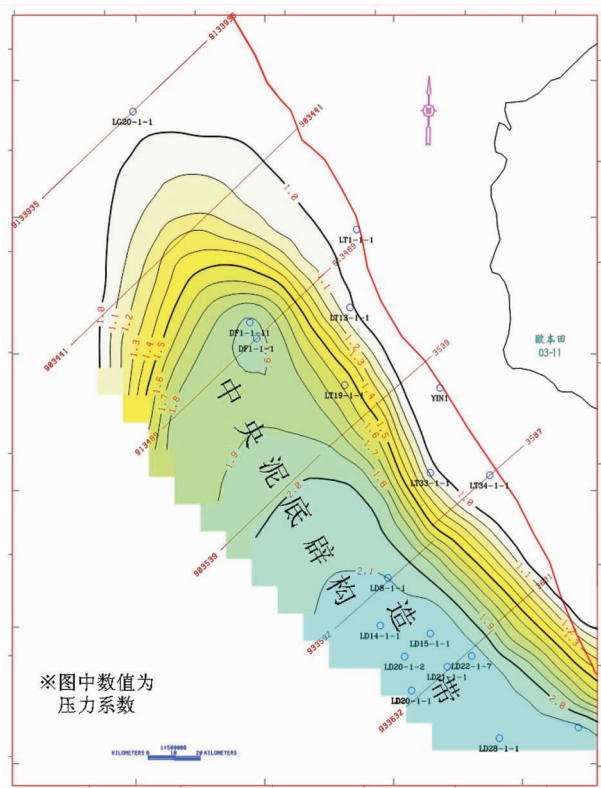


图4 莺歌海盆地泥底辟带异常超压分布特征
(据欧本田,2003,修改)

Fig.4 Anomalous ultra-pressure distribution characteristics of mud diapirs zone in Yingge Sea Basin (modified after Ou Bentian, 2003)

区则地温梯度及大地热流值偏低,分别为 $3.69^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 和 $73.8\text{ mW}/\text{m}^2$,大大低于盆地中部的中央泥底辟带^[13-14]。此外,中央泥底辟带的异常超压特征则更为明显,根据钻井及地震资料解释与预测证实(图4),中央泥底辟带地层孔隙流体压力系数一般均大于1.5,最高达2.2以上,异常超压展布范围与泥底辟带分布规模基本一致。

(4)在泥底辟主体多具有各种形态的杂乱模糊反射或空白反射的地球物理特征,其两侧或顶部则具有明显的强振幅特点(图5)。在二维、三维多道地震反射剖面上,由于泥底辟热流体强烈的上侵活动,导致其在底辟主体、通道和周缘均产生了各种形态各异、模糊杂乱反射或空白反射所构成的复杂地震地质体。

(5)根据该区泥底辟剖面形态特征、活动能量及喷出程度、底辟侵入及拱起高度等特点,可将其划分为深埋型低幅度弱—中能量泥底辟、浅埋型高幅度

中—强能量泥底辟、柱状喷口型特强能量泥底辟等3种成因类型^[2-5]。“深埋型低幅度弱—中能量泥底辟”如图5-A所示,其主要特点是,泥底辟上侵拱起(向上底辟挤入)的幅度较低,且未刺穿或基本上未刺穿上覆地层而被上覆巨厚地层覆盖。由于该类型泥底辟的内能及活动能量极弱,上侵拱起的幅度(向上底辟高度)低,且一般多被巨厚的上覆地层深埋,故属于底辟能量弱、未刺穿上覆地层的低幅度上拱型泥底辟。该类泥底辟最重要的特点是具有低密低速、异常高温高压,即“两低两高”的地质地球物理特点,剖面形态多为低幅度背斜。“浅埋型高幅度中—强能量泥底辟”如图5-B所示,其最突出的特点是,底辟活动能量强,上侵拱起即底辟挤入的幅度较高,亦具低密低速及高温高压的地质地球物理特点。由于泥底辟活动时上侵挤入(底辟)之垂向上拱作用力强,底辟拱起幅度高,其底辟能量及作用力已接近或达到上覆地层的破裂极限强度,但尚未完全刺穿上覆地层,故底辟顶部及上覆地层中拱张断裂可能较发育,剖面上往往形成不同类型断裂系统所造成的空白杂乱模糊地震反射带。“柱状喷口型特强能量泥底辟”如图5-C所示,其最典型最突出的特点是,泥底辟上部“柱状喷口”非常明显且延伸长、规模大,泥底辟之上侵底辟活动的能量极强,上侵拱起(底辟挤入)的幅度高,亦有非常明显的低密低速及高温高压之地质地球物理特征。由于泥底辟活动时上侵挤入(底辟)之垂向上拱作用力极强,底辟拱起幅度高,且底辟活动能量及作用力特强,故已大大超过了上覆地层岩石的破裂极限强度。因此,该类型泥底辟刺穿及喷发活动相当强烈,其泥底辟刺穿活动已达当时的地表或海底,故在泥底辟顶部往往形成了规模颇大的类似火山喷发活动所形成的“柱形漏斗状”下凹型喷口遗迹,其上则被上覆地层所充填覆盖而现今尚未出露地表。

1.3 含气陷阱地质地球物理特征

含气陷阱及气烟囱均是由于地层中富含天然气或者气侵所形成的一种特殊的地质地球物理现象,属于地层富含流体后导致岩石物性及其地球物理参数发生畸变所产生的一种异常的地质地球物理表征。在二维或三维多道反射地震剖面上,大多数含气陷阱及气烟囱,通常是由于地层含气或强烈的气侵作用,造成地震波被大量吸收、地震波能量严重衰减而产生明显的低速异常,进而导致地震反射同相轴

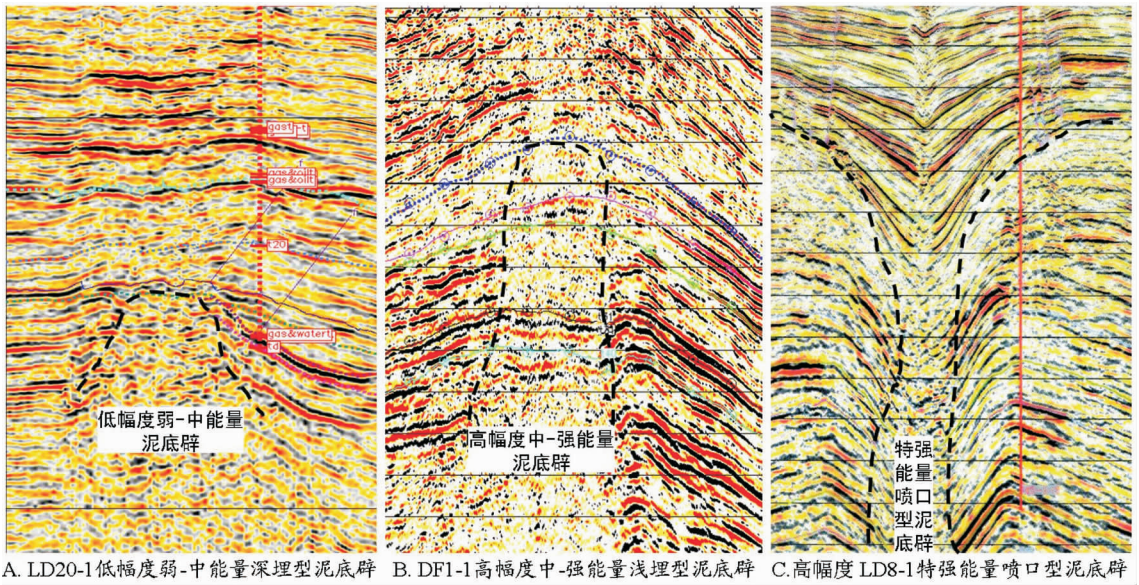


图 5 莺歌海盆地中央泥底辟构造带 3 种类型泥底辟发育特征之典型地震地质解释剖面
 Fig.5 Typical seismic geological interpretation profile of development characteristics of three kinds of mud diapirs in central mud diapirs tectonic belt of Yingge Sea basin

明显下拉或出现断续反射,而在含气陷阱及气烟囱的主体部位,由于气侵严重、天然气等流体充注强烈,则多表现为模糊杂乱的地震反射或空白反射(图6)。必须强调指出的是,由于含气陷阱及气烟囱形成的根本原因,是由于富含天然气及强烈气侵作用所致,因此,这种大规模的流体幕式充注及强烈气侵作用的最终结果,一般均不会改变或彻底改变地层的产状及其原始地质构造形态,除非地层被超压流体压裂而发生错动位移,导致其地层产状有所改变。因此,根据含气陷阱及气烟囱之模糊、杂乱及空白的地震反射特征和地震反射同相轴明显下拉而地层产状未改变等一系列的地质地球物理特点,可以对其进行地质综合判识与确定,亦可与火山、泥火山/泥底辟等特殊地质体进行对比而加以区分和甄别。

2 火山、泥火山/泥底辟及含气陷阱的差异性

2.1 火山与泥火山/泥底辟的差异性

火山及火山活动与泥火山/泥底辟在地质地球物理特征上的差异性较明显,其主要表现在以下诸方面:其一,火山及火山岩浆活动主要发生在地球深部由地幔岩石圈提供岩浆物资来源,且与深大断裂活动发育及其耦合配置密切相关。火山幔源活动可

以提供丰富的来自地球深部壳幔圈层的大量地质地球物理信息尤其是壳幔流体及各种矿物岩石等物质。火山幔源岩浆活动形成的火山岩地质体,其地质地球物理特征往往具有明显的高密(高岩石密度)高速(地震传播速度偏大)和强烈的重磁异常等特点。在二维、三维地震剖面上往往具有明显的强振幅、高波阻抗、中高-中低频率、顶部多为丘形或其他构造形态、内部空白杂乱反射等特点;其二,火山及火山活动与泥火山/泥底辟地质体的地质地球物理特征及形成机理明显不同。火山及火山幔源岩浆活动的物质基础及来源,主要为地球深部的地幔岩石圈所提供的大量原始幔源岩浆物质;而泥火山/泥底辟活动及形成的物质基础,则主要来自沉积盆地基底以上快速沉降和沉积的大套巨厚欠压实泥页岩等细粒沉积物所构成的泥源层。因此,泥火山/泥底辟发育演化特点及其地质地球物理特征与火山及火山岩浆活动的巨大区别和差异,就在于其所形成泥火山/泥底辟的物质来源与火山幔源岩浆作用明显不同,其为地壳深部结晶基底以上沉积的巨厚欠压实泥页岩等细粒沉积物之泥源层,而该泥源层往往具有低密低速及高温超压和无重磁异常等地质地球物理特点,很显然,其与火山作用所形成的具高密高速和重磁异常的火山岩地质体之差异非常明显;其三,火山

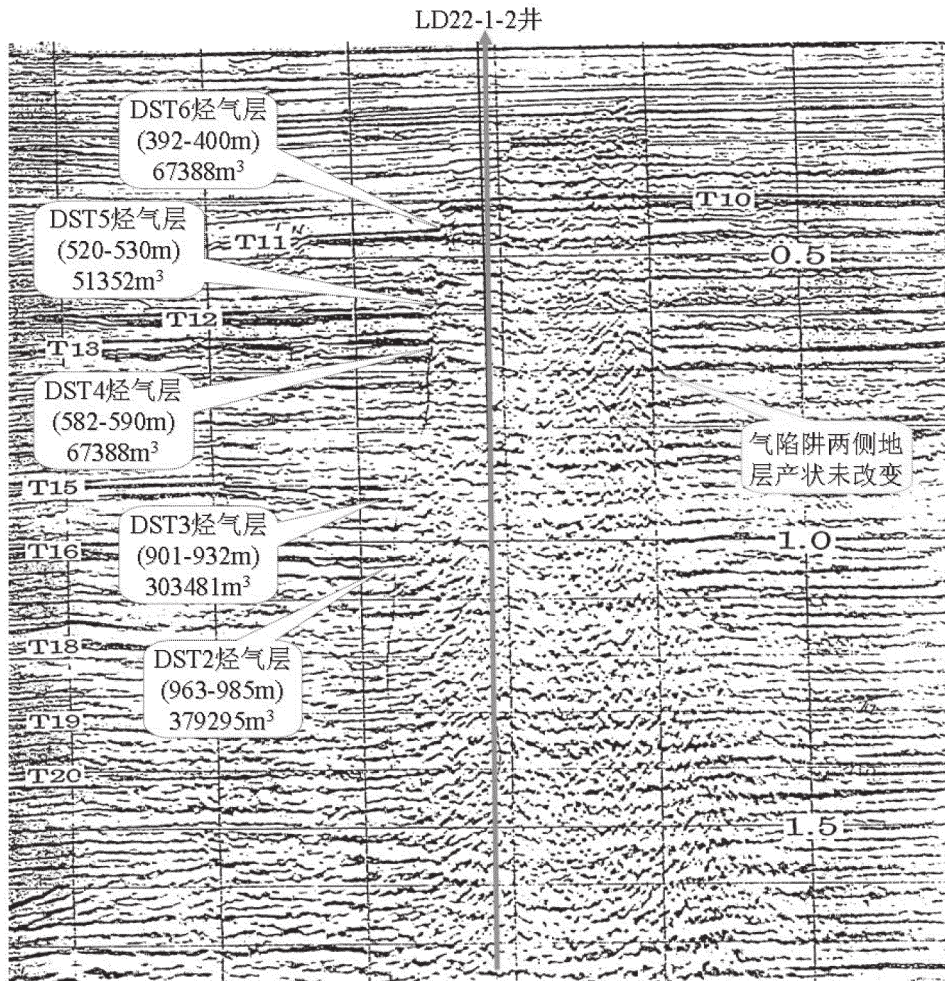


图 6 莺歌海盆地某气田含气陷阱模糊区典型地震剖面

Fig.6 Typical seismic profile of gas-bearing trap obscure area in a gas field of Yingge Sea basin

岩属地球深部火山幔源岩浆活动的产物,故主要由重矿物所组成,密度普遍偏大,且部分火山岩矿物磁化率偏高,故总体上火山岩的重磁场背景明显偏高。由于泥火山/泥底辟地质体属泥质岩类,且其泥源层为巨厚欠压实泥页岩等细粒沉积物,主要以粘土矿物为主,故具有低密度、低速度、无磁性或弱磁性等特点,不具有重磁异常特征,或一般显示区域重磁背景值或特低的重磁特征值。

2.2 火山、泥火山/泥底辟与含气陷阱的差异性

前已论及,含气陷阱、气烟囱均是由于地层富含天然气或发生气侵,导致地震波传播速度剧减、能量被大量吸收而衰减严重,最终在二维和三维地震剖面上所形成的一种模糊或空白地震反射现象。含气

陷阱、气烟囱与火山及火山活动和泥火山/泥底辟等地质体的重要区别和巨大差异,主要表现为:含气陷阱及气烟囱均是由于地层富含气和强烈气侵所致,因此其气侵及天然气强烈充注的最终结果及残留的痕迹(含气陷阱及气烟囱),均往往不会改变地层原始产状及地质构造形态。由图 7-A 所示可以看出,含气陷阱及气烟囱在二维地震剖面上均显示和表征为空白或模糊地震反射特征,或者具反射同相轴下拉弯曲的特点;而火山幔源活动所形成的火山岩,则往往改变了上覆地层及围岩地质产状和构造形态,且其地震剖面上多显示为强振幅反射、中高-中低频率和波状起伏的丘状外形或背斜形态等地质地球物理特点(图 7-B)。

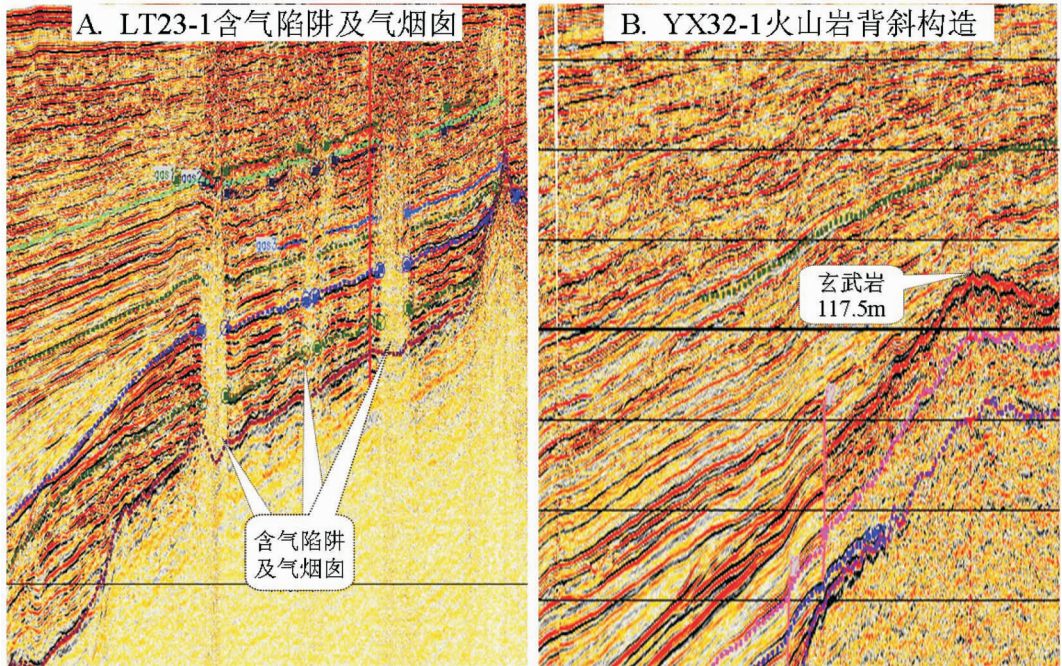


图 7 莺东斜坡带含气陷阱及气烟囱及火山岩地震反射特征对比

Fig.7 Comparison of seismic reflection characteristics between gas-bearing trap and gas chimney and volcanic rocks on Yingdong slope zone

3 火山、泥火山/泥底辟发育演化与油气运聚关系

3.1 火山岩及火山活动与油气运聚关系

国内外油气勘探实践及研究表明^[15-23],火山岩油气藏在沉积盆地中分布较普遍。火山岩储层类型及时空展布、火山岩对烃源岩有机质成熟生烃演化的促进作用、火山岩油气藏分布规律,对沉积盆地含油气系统的构建及油气运聚成藏地质条件等,均具有重大的影响和控制作用。因此,火山岩及火山活动与油气运聚成藏及分布规律等,均存在一定的成因联系和耦合关系。其重要的油气地质意义则主要体现在以下方面:

(1)火山活动及火山岩的存在,表明地史上其曾经历过强烈的地质热作用过程。这种强烈的热作用效果,对沉积盆地中局部地区的地温场及大地热流,均会产生重大和深刻的影响,能够大大促进和加快烃源岩有机质成熟生烃演化进程^[24-25],进而导致有机质成熟生成大量油气,为形成油气藏提供充足的油气源。

(2)在油气藏分布富集区带,如果发生强烈的火

山活动或存在分布广泛的火山岩,则其必然会对业已存在的油气藏产生严重的破坏作用,最终导致油气藏破坏,造成大量油气散失和油气遭受高温裂解,或原生油气藏被破坏而形成一些次生油气藏,或油气藏完全被破坏而不复存在。因此,火山活动及大规模火山岩的存在,对已形成的油气富集区带及油气藏具有极大的破坏作用。

(3)部分火山岩本身具有一定的储集空间,加之通过后期的地质改造作用即可形成良好的油气储集层,故可以作为一种特殊类型的油气储层^[26-28],该储集层只要能够与相邻烃源层、上覆盖层及有效圈闭良好配置,即可形成油气聚集及油气藏,甚至形成大油气田。近年来,中国在以火山岩为储集层的油气勘探领域中已经获得了重大突破和长足的进展,先后在松辽盆地深层、准噶尔盆地、三塘湖盆地、二连盆地和渤海湾盆地中,均陆续勘探发现了大量具有一定规模的火山岩油气藏^[10-12],展示了火山岩油气勘探领域的巨大勘探潜力和资源前景。

3.2 泥火山/泥底辟发育演化与油气运聚关系

泥火山/泥底辟发育演化过程与油气生成及运聚成藏等,均具有成因联系和耦合配置关系,而且其

严格控制 and 制约了油气分布富集规律及展布特点。通过深入分析南海西北部边缘莺歌海盆地泥底辟和东北部边缘台西南盆地泥火山发育演化特征及其与油气运聚成藏的关系，具体可以总结出如下几点重要的油气地质规律及特点：

(1)形成泥火山/泥底辟的物质基础——沉积盆地中快速沉降与沉积的巨厚海相欠压实泥源层（泥页岩）本身就是烃源岩，具备良好生烃条件及巨大的生烃潜力^[29-31]。莺歌海盆地中央泥底辟构造带迄今勘探发现的大量浅层气田及含气构造，其气源均主要来自盆地中部沉降最深、沉积最厚的下中新统三亚组—上新统莺歌海组底部浅海—半深海相巨厚的底辟泥页岩（图8），这已为该区油气勘探实践及烃源对比的结果所充分证实^[32-33]。

(2)泥底辟/泥火山发育演化过程中孕育的高温超压潜能，提供了生烃热动力学条件和油气运聚的驱动力。前已论及，莺歌海盆地中央泥底辟带普遍存在异常高温超压地层系统，其大地热流及地温场均明显高于盆地边缘斜坡区^[13-14]。该区泥底辟发育演化过程中所孕育的高温超压潜能，导致其烃源岩有机质演化及成熟生烃门槛值（ R_o ），即达到相同成熟度的深度门槛明显浅于邻区及周边地区（图9），且

有机质热演化生成物之油气的成熟度普遍偏高，主要以成熟—高熟甚至过熟煤型烃类气为主，同时亦有壳源型非生物二氧化碳大量产出。

(3)泥底辟/泥火山上侵活动产生的各种底辟运聚通道系统（底辟喷口、微裂隙系统、流体压裂通道体系等）为油气大规模运聚及高效富集成藏开辟了纵向运移的快速运移通道，同时亦控制油气运聚与分布富集规律^[2-6,30]。

(4)泥底辟/泥火山发育演化过程中，底辟上拱隆起或刺穿上覆地层所形成的各种不同类型的底辟伴生构造圈闭，为油气运聚成藏提供了良好的聚集场所。泥底辟、泥火山伴生构造多以背斜、断背斜及断块圈闭为主，亦有构造—地层岩性复合圈闭。如莺歌海盆地泥底辟带浅层形成的背斜、断背斜及断块圈闭和中深层形成的背斜、断背斜等底辟伴生构造即为其典型实例。由于这些底辟伴生构造均邻近泥底辟烃源供给中心及油气运聚通道系统，故非常有利于减少油气运聚过程中的散失损耗而高效富集成藏^[9-7]。

4 结论与认识

(1)火山、泥火山/泥底辟形成及发育演化过程，是揭示地球深部构造运动极好的窗口和观察地壳深部流体上侵活动的天然实验室，亦是地球深部幔源岩浆物质向上运动的极好指示和重要表征。火山活动及火山作用主要与地球深部大地构造运动及壳幔深大断裂活动密切相关，亦与地震伴生，其对沉积盆地中烃源岩有机质生烃演化及油气形成的地温场和油气运聚富集的应力场、流体势场等，均具有重要的影响和控制作用。

(2)火山及火山作用与油气运聚成藏具有成因联系和耦合关系，其既能起到促进烃源岩有机质热演化生烃形成大量油气和作为油气储层提供油气储集空间而充分发挥其积极作用；但其在油气藏形成后所发生的火山活动及所形成的火山岩，则会对油气藏的存在产生消极破坏作用，导致油气藏遭受破坏、大量油气发生高温裂解和散失。因此，火山活动及火山岩发育展布与油气运聚成藏的关系，具有“建设性”和“破坏性”的双重作用。火山岩及火山活动多分布于盆地中深大断裂活动发育区，具有明显的高密高速、高波阻抗、强振幅、中低—中高频和重磁异常等一系列地质地球物理特征，藉此可进行地质地球物理解释与综合判识。

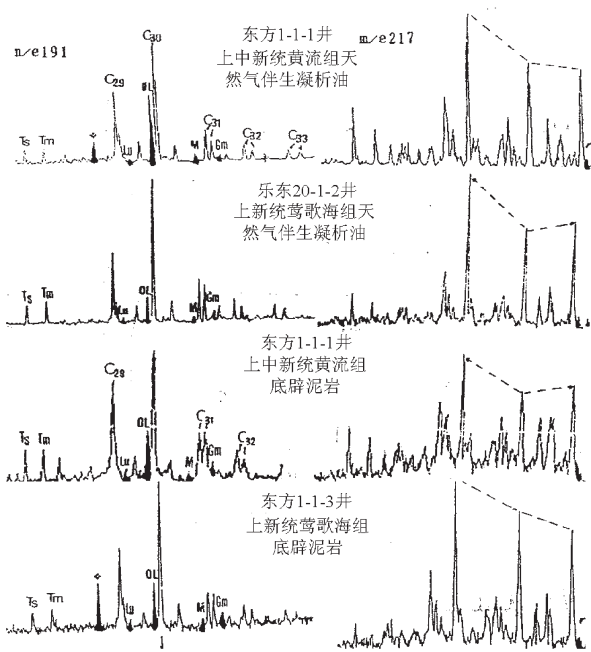


图8 莺歌海盆地泥底辟烃源岩与天然气伴生凝析油甾萜烷对比
Fig.8 Comparison between mud diapirs hydrocarbon rock and natural gas-associated condensate alkyl in Yingge Sea basin

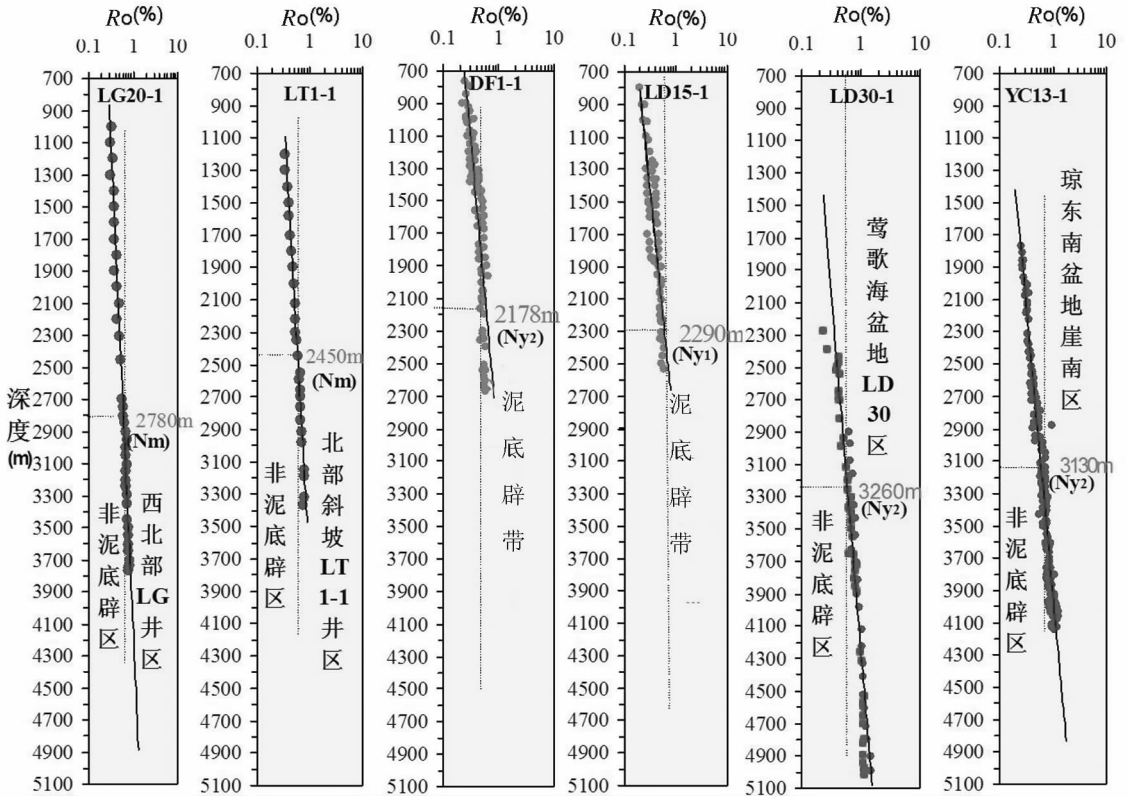


图 9 莺歌海盆地泥底辟带与相邻非泥底辟区古近-新近系有机质热演化特征对比
 Fig.9 Comparison of thermal evolution characteristics of Tertiary organic matters between mud diapers zone and neighboring non-mud diapers in Yingge Sea basin

(3)泥火山/泥底辟具有低密低速及高温超压的地质地球物理特征,多分布在盆地中沉降最深、沉积最厚的深大坳陷。泥底辟/泥火山发育演化与油气运聚成藏密切相关,其不仅能提供流体纵向运聚通道,而且其所孕育高温超压潜能亦提供了促使烃源岩成熟生烃的热动力和促进油气运聚的驱动力。深入分析泥底辟/泥火山发育演化特征及其与油气运聚成藏关系,优选有利油气富集的泥底辟构造带及伴生构造圈闭实施评价与勘探,可以提高油气勘探成功率,开辟这种“泥底辟型”油气藏勘探的新领域。

(4)火山、泥火山/泥底辟及含气陷阱/气烟囱的地质地球物理特征均存在明显的差异,根据其不同的地质地球物理特征及其展布规律,通过地质综合分析和应用各种地球物理方法及技术,可以进行综合判识与区分。由于火山、泥火山/泥底辟及含气陷阱与油气运聚成藏存在一定的成因联系和耦合关系,因此,在分析油气运聚成藏及油气田分布规律时,应充分考虑和重视火山、泥火山/泥底辟发育演

化对油气分布富集规律的控制和影响作用。

参考文献 (References):

[1] 曹成润,刘志宏. 含油气盆地构造分析原理及方法 [M]. 吉林: 吉林大学出版社, 2005.
 Cao Chengrun, Liu Zhihong. The Tectonic Analysis Theory and Method in Petroliferous Basin[M]. Jilin: Jilin University Press, 2005 (in Chinese with English abstract).
 [2] 何家雄,夏斌,张树林,等. 莺歌海盆地泥底辟成因、展布特征及其与天然气运聚成藏关系 [J]. 中国地质, 2006, 33(6):149-157.
 He Jiaxiong, Xia Bin, Zhang Shulin, et al. The causes, distribution characteristics of mud diapir and its relationship with the relationship between migration and accumulation of natural gas in Yingge Sea Basin [J]. Geology in China, 2006, 33 (6): 149 -157 (in Chinese with English abstract).
 [3] 何家雄,等. 莺歌海盆地泥底辟发育演化与油气运聚机制 [J]. 沉积学报 1994;12(3):120-129.
 He Jiaxiong, et al. Evolution and development of mud diapir and oil gas migration mechanisms in Yingge Sea Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1994;12 (3):120-129 (in Chinese with English abstract).

- [4] 何家雄, 王振峰, 解习农, 等. 莺歌海盆地泥-流体底辟带热流体活动对天然气运聚成藏的控制作用 [J]. 地球科学, 2004, 29(2): 203-210.
He Jiaxiong, Wang Zhenfeng, Xie Xinong, et al. The mud - fluid diapir with a thermal fluid flow of natural gas migration and accumulation control effect in Yingge Sea Basin [J]. Earth Science, 2004, 29 (2): 203 -210(in Chinese with English abstract).
- [5] 何家雄, 咎立声, 陈龙操, 等. 莺歌海盆地泥丘发育演化特征与油气远景 [J]. 石油与天然气地质, 1990, 11(4):436-445.
He Jiaxiong, Zan Lisheng, Chen Longcao, et al. The mud mound development and evolution of characteristics and hydrocarbon prospects in Yingge Sea Basin [J]. Oil and Gas Geology, 1990, 11 (4): 436-445(in Chinese with English abstract).
- [6] 郝芳, 李思田, 龚再升, 等. 莺歌海盆地底辟发育机制与流体幕式充注 [J]. 中国科学, 2001, 31(6):471-476.
Hao Fang, Li Sitian, Gong Zaisheng, et al. The diapiric development of mechanisms and episodic fluid injection in Yingge Sea Basin [J]. Science in China, 2001, 31 (6): 471-476 (in Chinese with English abstract).
- [7] 范卫平, 郑雷清, 龚建华, 等. 泥火山的形成及其与油气的关系 [J]. 吐哈油气, 2007, 12(1):43-47.
Fan Weiping, Zheng Leiqing, Gong Jianhua, et al. The formation of mud volcano and their relationship with the oil and gas [J]. Turpan-Hami Oil and Gas, 2007, 12 (1): 43-47 (in Chinese with English abstract).
- [8] 沙志彬, 张光学, 梁金强, 等. 泥火山——天然气水合物存在的活证据 [J]. 南海地质研究, 2005, (1):48-56.
Sha Zhibin, Zhang Guangxue, Liang Jinqiang, et al. The mud volcano—a living evidence of the existence of gas hydrate [J]. South China Sea, Geological Studies, 2005, (1):48-56 (in Chinese with English abstract).
- [9] 何家雄, 祝有海, 陈胜红, 等. 天然气水合物成因类型及成矿特征与南海北部资源前景 [J]. 天然气地球科学, 2009, 20(2):237-243.
He Jiaxiong, Zhu Youhai, Chen Shenghong, et al. Gas hydrate genetic types and metallogenic characteristics and resource prospects in the northern South China Sea [J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20 (2): 237-243(in Chinese with English abstract).
- [10] 赵文智, 邹才能, 冯志强, 等. 松辽盆地深层火山岩气藏地质特征及评价技术 [J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(2):129-142.
Zhao Wenzhi, Zou Caineng, Feng Zhiqiang, et al. Deep volcanic gas reservoir geology and evaluation techniques in Songliao Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35 (2): 129-142(in Chinese with English abstract).
- [11] 赵文智, 邹才能, 李建忠, 等. 中国陆上东、西部地区火山岩成藏比较研究与意义 [J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(1):1-11.
Zhao Wenzhi, Zou Caineng, Li Jianzhong, et al. The eastern and western regions forming volcanic contrast research and significance on the China's onshore [J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36 (1): 1-11 (in Chinese with English abstract).
- [12] 蒙启安, 门广田, 赵洪文, 等. 松辽盆地中生界火山岩储层特征及对气藏的控制作用 [J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(3):285-288.
Meng Qian, Men Guangtian, Zhao Hongwen, et al. Mesozoic volcanic reservoir characteristics and control effect of the gas reservoir in Songliao Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2002, 23 (3): 285-288(in Chinese with English abstract).
- [13] 何家雄, 夏斌, 张树林, 等. 莺歌海盆地泥底辟成因、展布特征及其与天然气运聚成藏关系 [J]. 中国地质, 2006, 33 (6):1336-1344.
He Jiaxiong, Xia Bin, Zhang Shulin, et al. Origin and distribution of mud diapirs in the Yinggehai basin and their relation to the migration and accumulation of natural gas [J]. Geology in China, 2006, 33(6):1336-1344(in Chinese with English abstract).
- [14] 何家雄, 姚永坚, 刘海龄, 等. 南海北部莺歌海盆地壳源型非生物 CO₂ 运聚成藏特征与资源潜力 [J]. 中国地质, 2007, 34(5):887-893.
He Jiaxiong, Yao Yongjian, Liu Hailing, et al. Migration and accumulation characteristics and resource potential of crust-derived inorganic CO₂ in the Yinggehai basin, northern South China Sea [J]. Geology in China, 2007, 34 (5): 887-893 (in Chinese with English abstract).
- [15] 贾承造, 赵文智, 邹才能, 等. 岩性地层油气藏地质理论与勘探技术 [J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(3):257-272.
Jia Chengzao, Zhao Wenzhi, Zou Caineng, et al. Lithologic stratigraphic reservoirs geological theory and exploration techniques [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34 (3): 257-272(in Chinese with English abstract).
- [16] 杨辉, 张研, 邹才能, 等. 松辽盆地北部徐家围子断陷火山岩分布及天然气富集规律 [J]. 地球物理学报, 2006, 49(4):1136-1143.
Yang Hui, Zhang Yan, Zou Caineng, et al. Songliao Basin in northern Xujiaweizi faulted volcanic distribution and regular of natural gas enrichment [J]. Acta Geophysica Sinica, 2006, 49 (4) : 1136-1143(in Chinese with English abstract).
- [17] 郭占谦. 火山作用与油气田的形成和分布 [J]. 新疆石油地质, 2002, 23(3):183-185.
Guo Zhanqian. Volcanism and the formation and distribution of oil and gas fields [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2002, 23 (3): 183-185(in Chinese with English abstract).
- [18] 邹才能, 赵文智, 贾承造, 等. 中国沉积盆地火山岩油气藏形成与分布 [J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(3):257-271.
Zou Caineng, Zhao Wenzhi, Jia Chengzao, et al. The formation and distribution of volcanic oil and gas reservoir in the China sedimentary basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35 (3): 257-271(in Chinese with English abstract).
- [19] 吴昌志, 顾连兴, 任作伟, 等. 中国东部中、新生代含油气盆地火成岩油气藏成藏机制 [J]. 地质学报, 2005, 79(4):522-529.
Wu Changzhi, Gu Lianxing, Ren Zuowei, et al. The mechanism of volcanic oil and gas reservoir in Mesozoic and Cenozoic in eastern China [J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79 (4): 522-529(in

- Chinese with English abstract).
- [20] 伊培荣, 彭峰, 韩芸. 国外火山岩油气藏特征及其勘探方法[J]. 特种油气藏, 1998, 5(2):65-70.
Yi Peirong, Peng Feng, Han Yun. The volcanic oil and gas reservoir characteristics and exploration methods overseas [J]. Special Reservoir, 1998, 5 (2):65-70 (in Chinese with English abstract).
- [21] Yuli Mitsuhata, Koichi Matsuo, Matsto Minegishi. Magnetotelluric survey for exploration of a volcanic-rock reservoir in the Yurihara oil and gas field, Japan [J]. Geophysical Prospecting, 1999, 47(2): 195-218.
- [22] Potter J, Konnerup -Madsen J. A review of the occurrence and origin of abiogenic hydrocarbons in igneous rocks [C]//Petford N, McCaffrey K J W. Hydrocarbons in Crystalline Rocks. London: The Geological Society of London, 2003. 151-175.
- [23] Schutter S R. Hydrocarbon occurrence and exploration in and around igneous rocks [C]//Petford N, McCaffrey K J W. Hydrocarbons in Crystalline Rocks. London: The Geological Society of London, 2003. 7-35.
- [24] 金强. 裂谷盆地生油层中火山岩及其矿物与有机质的相互作用[J]. 地球科学进展, 1998, 13(6):542-546.
Jin Qiang. The volcanic rocks and minerals and organic matter interactions in source rock of rift basin [J]. Earth Science, 1998, 13 (6):542-546(in Chinese with English abstract).
- [25] 牛嘉玉, 张映红, 袁选俊, 等. 中国东部中、新生代火山岩石油地质研究、油藏勘探前景及面临的问题[J]. 特种油气藏, 2003, 10(1): 7-12.
Niu Jiayu, Zhang Ying, Yuan Xuanjun et al. Petroleum geology research, reservoir exploration prospects of Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks in eastern China and the faced problems [J]. Special Reservoir, 2003, 10 (1):7-12(in Chinese with English abstract).
- [26] 王璞君, 迟元林, 刘万洙, 等. 松辽盆地火山岩相: 类型、特征和储层意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2003, 33(4):449-458.
Wang Pujun, Chi Yuanlin, Liu Wanzhu, et al. Songliao Basin volcanic phase: types, characteristics and reservoir significance [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2003, 33 (4): 449-458(in Chinese with English abstract).
- [27] 刘为付, 刘双龙, 孙立新. 莺山断陷侏罗系火山岩储层特征[J]. 大庆石油地质与开发, 1999, 18 (4): 9-11.
Liu Weifu, Liu Shuanglong, Sun Lixin. Jurassic volcanic reservoir characteristics in Yingshan fault [J]. Daqing Petroleum Geology and Development, 1999, 18 (4):9-11(in Chinese with English abstract).
- [28] 李慧君, 陈立英, 童英. 汪家屯地区侏罗系火山岩储层特征[J]. 大庆石油地质与开发, 1999, 18 (4):12-14.
Li Huijun, Chen Liying, Tong Ying. Jurassic volcanic reservoir characteristics in Wangjiatun district [J]. Daqing Petroleum Geology and Development, 1999, 18 (4):12-14 (in Chinese with English abstract).
- [29] 何家雄, 徐瑞松, 刘全稳, 等. 莺歌海盆地泥底辟发育演化与天然气及 CO₂ 运聚成藏规律研究 [J]. 第四纪地质与海洋地质, 2008, 28(1):91-98.
He Jiaxiong, Xu Ruisong, Liu Quanwen, et al. The development and evolution of mud diapirism and gas and CO₂ accumulation study in Yingge Sea Basin [J]. Quaternary Geology and Marine Geology, 2008, 28 (1):91-98(in Chinese with English abstract).
- [30] 何家雄, 李明兴, 陈伟煌, 等. 莺歌海盆地热流体上侵活动与天然气运聚富集关系探讨[J]. 天然气地球科学, 2000, 11(6):29-43.
He Jiaxiong, Li Mingxing, Chen Weihuang, et al. Yingge Sea Basin, thermal fluid on the invasion of activities and to discuss the relationship between gas accumulation accumulation [J]. Natural Gas Geoscience, 2000, 11 (6):29-43 (in Chinese with English abstract).
- [31] 何家雄, 陈红莲, 陈刚, 等. 莺歌海盆地泥底辟带天然气成藏条件及近期勘探方向[J]. 中国海上油气, 1995, 9(3):157-163.
He Jiaxiong, Chen Honglian, Chen Gang, et al. Yingge Sea Basin, mud diapir belt of natural gas into the reservoir conditions and the recent exploration direction [J]. China's Offshore Oil and Gas, 1995, 9 (3) :157-163(in Chinese with English abstract).
- [32] 何家雄, 姚永坚, 刘海龄, 等. 南海北部边缘盆地天然气成因类型及气源构成特点[J]. 中国地质, 2008, 35(5):997-1006.
He Jiaxiong, Yao Yongjian, Liu Hailing, et al. The type of natural gas, and gas source compositional characteristics in the northern South China Sea Basin [J]. Geology in China, 2008, 35 (5):997-1006(in Chinese with English abstract).
- [33] 何家雄, 刘海龄, 姚永坚, 等. 南海北部边缘盆地油气地质及资源前景[M]. 北京:石油工业出版社, 2008:1-178.
He Jiaxiong, Liu Hailing, Yao Yongjian, et al. The Petroleum and Gas Geology and Resources Prospects in Northern South China Sea Marginal Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 1-178(in Chinese with English abstract).

Volcanoes, mud volcanoes/mud diapers and gas traps and their relationship with oil and gas

HE Jia-xiong¹, ZHU You-hai², MA Wen-hong³,
CHEN Shen-hong⁴, GONG Xiao-feng¹, CUI Sha-sha¹

(1. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. Zhanjiang Company, CNOOC, Zhanjiang 524057, Guangdong, China; 4. Shenzhen Company, CNOOC, Guangzhou 510240, Guangdong, China)

Abstract: Volcanoes, mud volcanoes/mud diapers and gas traps not only serve as windows of tectonic movement and symptoms of fluid movement in the deep earth but also have intimate relationship with the migration and accumulation of oil and gas. The differences between volcanoes, mud volcanoes and mud diapers constitute the material base and dynamics. The volcanoes serve as the symptom of deep earth dynamic system and their material base stems from the upward movement of the mantle and the igneous magma in the depositional basin over the crystalline basement, whereas the mud volcanoes/mud diapers are mud diapers of the uncompacted argillaceous shale whose material base was the heavy uncompacted argillutite. The gas trap is the trace of gas upward migration or gas layer seismic reflection distortion. Volcanoes, mud volcanoes, mud diapers have origin-coupled relationship with the migration and accumulation of oil and gas and control the distribution and accumulation of the oil and gas.

Key words: Volcanoes and volcanoes movements; mud diapers/mud volcanoes; gas traps; geological-geophysical characteristics; characteristics of migration and accumulation of oil and gas.

About the first author: HE Jia-xiong, male, born in 1956, senior researcher, doctor, long engages in integrated oil and gas exploration and geological research; E-mail: hejx@gig.ac.cn.