

doi: 10.12029/gc20180104

鄢伟, 张光学, 张莉, 夏斌, 杨振, 雷振宇, 林珍, 钱星, 骆帅兵. 2018. 南海南部陆缘地质流体类型及其油气成藏意义[J]. 中国地质, 45(1): 39–47.
Yan Wei, Zhang Guangxue, Zhang Li, Xia Bin, Yang Zhen, Lei Zhenyu, Lin Zhen, Qian Xing, Luo Shuaibing. 2018. Focused fluid flow systems and their implications for hydrocarbon accumulations on the southern margin of South China Sea[J]. Geology in China, 45(1): 39–47(in Chinese with English abstract).

南海南部陆缘地质流体类型及其油气成藏意义

鄢伟^{1,2,3} 张光学^{1,2} 张莉^{1,2} 夏斌³ 杨振^{1,2,3} 雷振宇^{1,2} 林珍^{1,2} 钱星^{1,2} 骆帅兵^{1,2}

(1. 广州海洋地质调查局, 国土资源部海底矿产资源重点实验室, 广东 广州 510075; 2. 广州海洋地质调查局, 中国地质调查局海洋石油天然气地质研究中心, 广东 广州 510075; 3. 中山大学, 海洋学院, 广东 广州 510075)

摘要:南海南部陆缘蕴藏着非常丰富的油气资源。为了解南海南部陆缘流体活动系统以及与油气藏之间的关系, 以高精度 2D 地震资料为基础, 对南海南部陆缘流体活动系统的类型、地震反射特征、以及对油气成藏的意义开展了研究。在南海南部陆缘发现了多种流体活动系统, 包括: 泥底辟/泥火山、气烟囱、管状通道、与构造断层相关的流体活动系统。这些流体活动系统具有不同的地震反射特征, 常常出现含气强振幅异常带、弱振幅杂乱反射带以及“下拉”或者“上拱”地震反射形态等流体活动系统的标志特征。流体活动系统受到构造运动和沉积因素的影响, 并且与深部高温高压塑性流体密切相关, 流体活动系统优先发育在地层薄弱部位。流体活动系统及所伴生的断裂和裂隙常常作为油气富集区的运输通道; 并且流体活动系统所运移的强溶蚀性流体和深部热液流体有利于油气储层的形成, 特别是对于碳酸盐岩储层的改造尤为明显。因此, 流体活动系统不仅能作为油气运移通道, 也可以改善储层, 对油气成藏具有重要意义。

关键字:南海; 陆缘; 流体活动系统; 泥底辟; 气烟囱; 油气藏

中图分类号: P736.15; P744.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2018)01-0039-09

Focused fluid flow systems and their implications for hydrocarbon accumulations on the southern margin of South China Sea

YAN Wei^{1,2,3}, ZHANG Guangxue^{1,2}, ZHANG Li^{1,2}, XIA Bin³, YANG Zhen^{1,2,3},
LEI Zhenyu^{1,2}, LIN Zhen^{1,2}, QIAN Xing^{1,2}, LUO Shuaibing^{1,2}

(1. MLR Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, Guangdong, China; 2. Marine Petroleum and Gas geological Research Center, China Geological Survey, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, Guangdong, China; 3. Marine Institute, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510075, Guangdong, China)

Abstract: The southern margin of South China Sea (SCS) has abundant hydrocarbon resources. Based on high-resolution 2D seismic data, the authors conducted the research on various focused fluid flow systems and their seismic response, implications for hydrocarbon accumulations with the purpose of understanding the characteristics and their relations with hydrocarbon. Diverse

收稿日期: 2017-06-03; 改回日期: 2017-06-23

基金项目: 国土资源部海底矿产资源重点实验室开放基金(KLMMR-2017-A-16)和中国地质调查局项目(DD20160155)联合资助。

作者简介: 鄢伟, 男, 1987年生, 博士后, 主要从事碳酸盐岩沉积和储层方面的研究; E-mail: yanwei021066@126.com。

通讯作者: 张光学, 男, 1965年生, 教授级高级工程师, 主要从事深水油气与天然气水合物地质研究; E-mail: zhguangxue@tom.com。

focused fluid flow systems were identified, such as mud–diapir/mud–volcano, gas chimney, pipes and the focused flow fluid related fault. Different seismic characteristics are shown for these focused fluid flow systems, which include gas–bearing high–amplitude anomalous field, low–amplitude chaotic reflection, and “drop–down”/ “arch up” reflections considered to be recognition marks of focused fluid flow systems that appear frequently. Focused fluid flow systems were affected by tectonic movement and sedimentation factors and were closely related to the deep high temperature and high pressure plastic fluid. Focused fluid flow systems were preferentially developed in the weak part of the strata. Focused fluid flow systems and associated faults and fractures were often used as transport channels for hydrocarbon accumulation zones. Moreover, the strong dissolved fluid and deep hydrothermal fluid transported by the fluid movement system were beneficial to the formation of reservoirs, especially the carbonate reservoirs. Focused fluid flow systems not only served as migration passage of hydrocarbons but also could improve reservoirs. Therefore, they are of great significance for hydrocarbon accumulation.

Key words: South China Sea; margin; focused fluid flow systems; mud diapir/mud volcano; gas chimney; hydrocarbon accumulation

About the first author: YAN Wei, male, born in 1987, post–doctor researcher, engages in the study of carbonate deposits and reservoirs. E–mail: yanwei021066@126.com.

About the corresponding author: ZHANG Guangxue, male, born in 1965, professor, engages in the study of geology of deep water oil gas and gas hydrate; E–mail: zhguangxue@tom.com.

Fund support: Supported by Open Fund of MLR key Laboratory of Marine Mineral Resources(No.KLMR–2017–A–16)and Geological Investigation Project of China Geological Survey (No. DD20160155)

1 引 言

目前,南海流体活动系统研究主要集中在南海北部,主要是利用2D地震资料对流体活动系统做了大量的研究工作,并识别出了多种类型的流体活动系统(郝芳等, 2003; 张光学等, 2006; 吴能友等, 2009; 何家雄等, 2010; 孙启良等, 2014)。另外中国东海盆地也发现了泥底辟和泥火山等流体活动系统,吴时国等(2015a)对所获取的高分辨率地震资料研究发现,东海冲绳海槽南部西侧槽坡附近及海槽内部发育了一系列泥火山构造(或疑似泥底辟),并发现与流体活动系统相关的渗漏型天然气水合物。除了海域盆地,对于中国西部陆上海相盆地的流体活动系统也有一些研究,例如塔里木盆地塔中和塔北地区火山热液活动区(朱东亚等, 2010),藏北羌塘盆地中部泥火山构造发育区(解超明等, 2009),新疆准噶尔盆地白杨沟等地区的泥火山(高苑等, 2012)。

流体活动系统(Focused fluid flow system)在油气和天然气水合物成藏、地质灾害和全球环境变化等方面的研究中备受关注,从而成为海洋地质科学研究的前沿热点。目前,对于南海南部流体活动系统开展的研究仍处于起步阶段,南海南部蕴含丰富的油气资源,现已发现了一些油气田,如CVX生物

礁气田、L气田、鲁科尼亚F6凝析油气田、金坛油气田和马拉帕亚气田等,流体活动系统在储层改造和油气成藏中扮演着重要角色(Vahrenkamp et al., 2004; Yao et al., 2012; Zampetti et al., 2004; David et al., 2014)。笔者以南海南部陆缘流体系统为研究对象,识别流体活动系统的类型,总结了其地震反射特征,讨论了流体活动系统对油气成藏的意义。

2 区域地质背景

南海位于欧亚、太平洋和印—澳三大板块交汇处,是西北太平洋边缘海中面积最大的海盆,从新生代起南海经历多次扩张形成小洋盆,面积约为 $3.5 \times 10^6 \text{ km}^2$,平均水深1212 m,呈NW–SE向(Barckhausen et al., 2014; Franke et al., 2014; 吴时国等, 2015b)。南海张裂过程中形成的在扩张洋盆两边发育了裂谷系统,由此形成共轭的大陆边缘,南海北部属于离散型陆缘,而南海南部是汇聚型陆缘(李家彪, 2011)。南海南部陆缘新生代发育了一系列的盆地,包括曾母盆地、北康盆地、南薇西盆地、南沙海槽盆地和文莱沙巴盆地等,这些盆地的形成演化呈现比较大的差异性,这主要是由于各个盆地所处板块位置的不同而使得构造样式和演化阶段的差异较大(刘振湖, 2005; 解习农等, 2015)。

研究区位于南海南部陆缘盆地,主要包括曾母

盆地,北康盆地和南薇西盆地,沉积厚度分别为1000~16000 m、1000~12000 m、2000~11000 m,其中曾母盆地北部、北康盆地和南薇西盆地的大部分区域都在深水区(水深大于300 m)(图1)。据前人研究,曾母盆地为周缘前陆盆地,北康盆地和南薇西盆地为陆缘张裂盆地,这些盆地都经历了早期裂陷—周缘前陆—被动陆缘的演化阶段(张莉等, 2003; 姚永坚等, 2008; 解习农等, 2015)。南海南部陆缘沉积盆地普遍经历了古新世—中始新世的断陷湖盆相,晚始新世—中中新世的滨浅海相,到晚中新世—第四纪的浅海—半深海相。而婆罗洲北缘的曾母盆地渐新世时期开始还发育了三角洲相(王嘹亮等, 2000; 张莉等, 2003; 杨明慧等, 2015)。南海南部构造运动比较复杂,盆地演化和沉积充填受到区域构造运动和南海扩张事件的影响,并且由于南海扩张导致的地块迁移产生挤压作用使得局部构造发生发转,这些构造活动对于流体活动和油气成藏有着重要的影响。

3 流体活动系统类型及特征

流体活动系统(Focused fluid flow system)一般

在地震上呈现明显的识别特征,是沿着局限的高渗透带发生运移/流动的束状流体(孙启良等, 2014)。流体活动系统往往发育于构造活跃的地方,如汇聚型大陆边缘、前陆盆地和走滑构造带等。流体活动系统多发育在低孔低渗的地层中,由于局部形成流体垂向运移的通道而形成的,主要包括泥底辟、泥火山、气烟囱、溶蚀管状通道、构造断层、多边形断层等多种类型(孙启良等, 2014; 吴时国等, 2010)。

3.1 泥底辟/泥火山

泥底辟/泥火山的成因机制和发育演化都比较相似,是广泛分布的一种流体活动系统。两者均是在高温高压条件下,巨厚欠压实的泥质/流体由于密度倒置产生的差异重力作用而发生塑性流动上侵到上覆地层中,从而形成弯曲隆起或刺穿地层的一种特殊的正向地质构造(Kopf et al., 2010)。当塑性泥物质向上刺穿地表或海底时,形成的丘形建造为泥火山,而未刺穿或者未完全刺穿时则形成泥底辟(何家雄等, 2010; 孙启良等, 2014)。泥底辟及泥火山在全球范围内分布较广泛,地球上已知泥火山数量已近900座(陈胜红等, 2009)。

南海南部陆缘泥底辟多发生在地层较厚且泥

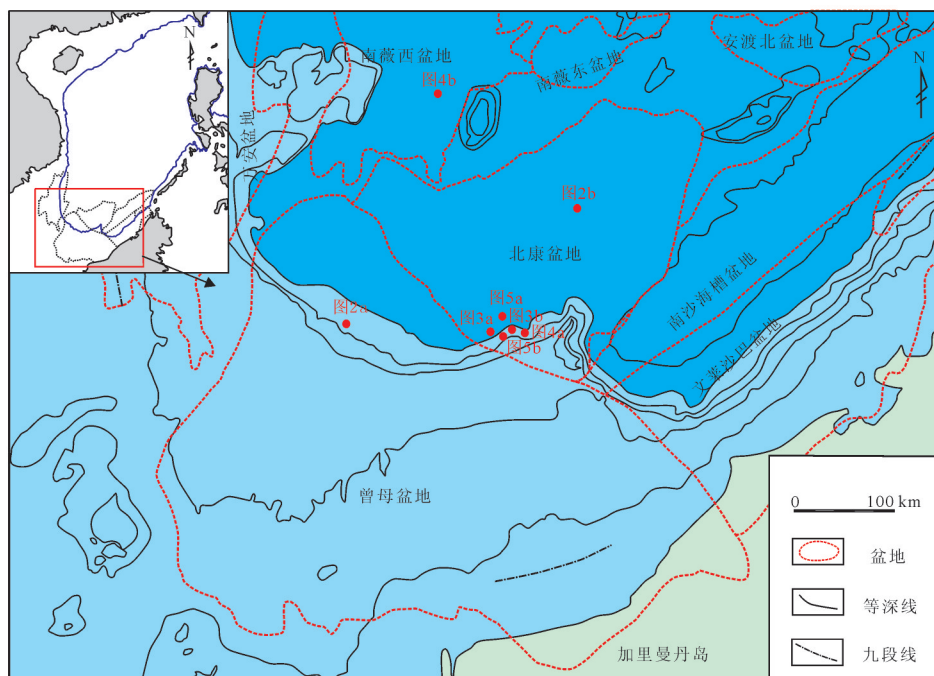


图1 南海南部陆缘研究区位置图(红色标注为图2至图5中流体活动系统所在位置)
Fig.1 The location of the study area and seismic profile on the southern margin of South China Sea
(The red labels are the locations of focused flow fluid systems from Fig. 2 to Fig. 5)

质沉积多的深洼区,有的呈现一定间距排列(图2a),有的则是单个发育(图2b),在地震剖面上均为柱状反射形态,反射特征表现为内部杂乱反射,围岩及上覆地层为中强振幅反射,地层被动褶皱。泥底辟没有刺穿上覆地层,但易使其上部地层形成较密集的正断层,这是顶部张应力造成的(图2a,b)。当泥质沉积物刺穿上覆地层时,在顶部会形成一个强振幅的丘形体,即为泥火山。泥火山顶部表现为“下拉”的地震反射特征,周围地层表现特征和泥底辟类似,呈现被动弯曲褶皱(图2a)。泥火山喷发具有周期性,喷发后会进入一个平静期,沉积地层会超

覆在泥火山之上,当压力聚集一定程度,会再次喷出(Kopf et al., 2010),泥火山形成后会有少量气体和泥质溢出,会在上方形成类似气烟囱的“柱状”的弱反射区域,形成泥火山伴生气烟囱的现象(图2a)。泥底辟/泥火山形成过程中,泥质沉积物和流体上侵过程中发生大量的流体运移,在通道周围和顶部常见含气的强振幅异常反射。

3.2 气烟囱

当底辟及其流体上侵活动导致上覆地层含气即气侵时,气体赋存在裂隙地层中形成低速含气带,地震波发生畸变而形成类似烟囱形态的现象,

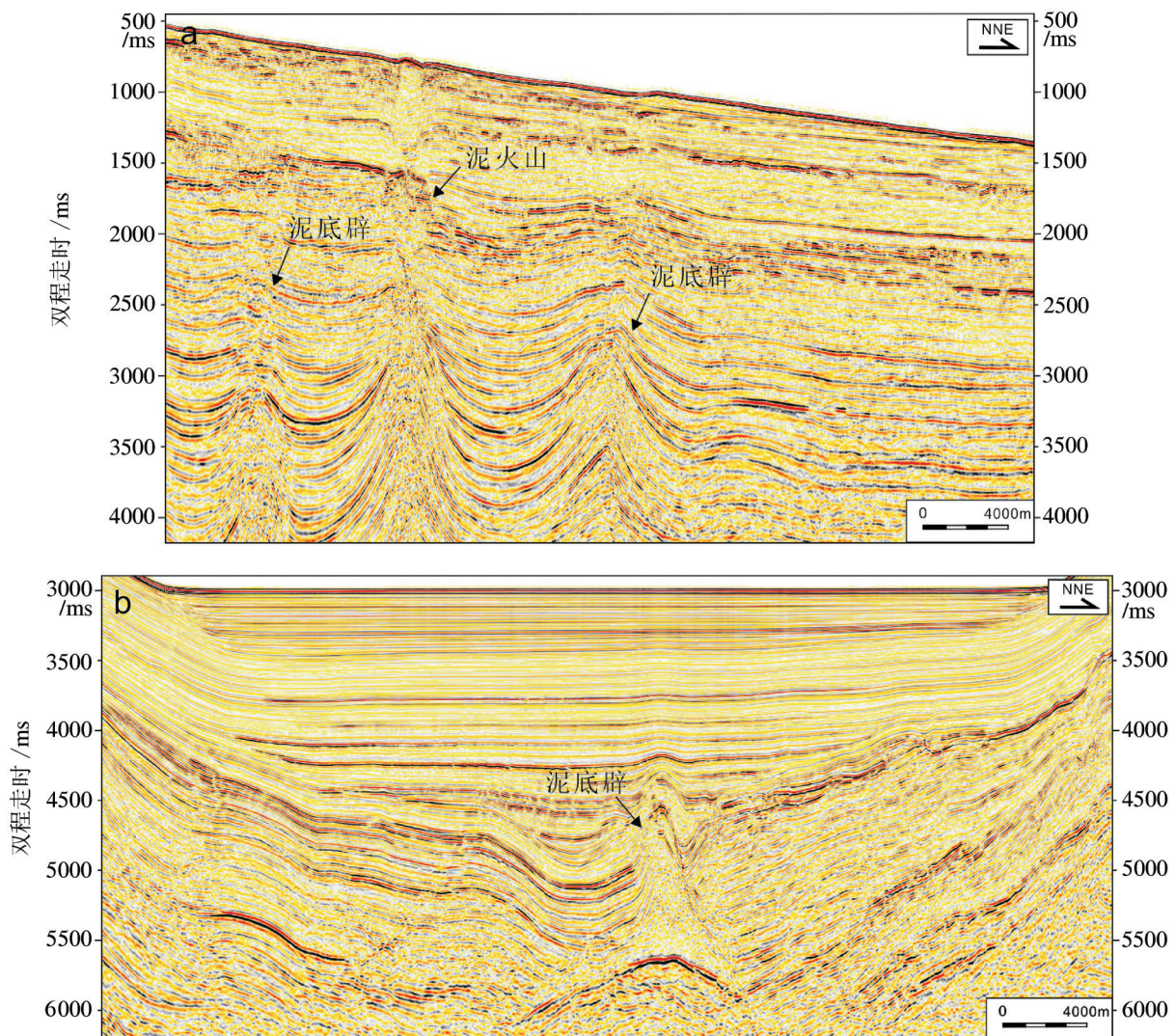


图2 南海南部陆缘盆地泥底辟地震剖面特征

a—一定距离排列的泥底辟; b—单个泥底辟

Fig.2 The seismic characteristics of mud diapir in the southern continental basin of South China Sea

a—Mud diapirs in a certain range; b—Single mud diapir

称之为气烟囱(Gas Chimney)(Sun et al., 2013a)。南海南部陆缘坡折带附近气烟囱比较常见,在地震剖面上常表现为“柱状”(图3a)或“树干状”(图3b)弱振幅反射带或者空白带,内部表现一定程度的“下拉”反射形态,气烟囱周围和顶部多呈现含气的强振幅反射异常(图3a, b)。气烟囱是较好的流体运移通道,“下拉”反射形态是由于含气造成的低速地震反射异常,这并不是地层产状改变的结果。气烟囱是由于母源区的超压超过地层屈服压力时,流体压裂并沿着裂隙垂向上运移,流体和裂隙就造成了地震上的弱振幅异常,而这种现象首先会发生在地层薄弱的部位,这也是气烟囱在坡折带发育的原因之一。气烟囱事实上就是流体的优势运移通道,在运移过程中也具有期次性,表现为顶部强异常发射的叠置(图3b)。

3.3 管状流体活动系统

管状通道一般是气体垂向运移或者沉积物垮塌所形成的管状地震异常带。在南海北部东沙隆起和广乐隆起上常见由于碳酸盐岩溶蚀垮塌形成的管状流体系统,据前人研究,这些通道是由于构造运动引起的岩浆侵入,从而带来大量腐蚀性热液流体,由于这些流体的溶蚀作用而形成溶蚀通道(Sun et al., 2013a; Sun et al., 2013b)。南海南部陆缘盆地也发现了管状流体系统,在地震上呈现一种狭长的,垂向上延伸的地震异常发射带,有的呈现“下拉”地震反射形态(图4a),有的则呈现“上拱”的

地震反射形态(图4b)。由于流体向上运移造成破裂或者溶蚀造成通道内岩层垮塌,从而形成“下拉”的反射形态;当流体向上侵入没有造成岩层垮塌,而类似于底辟作用使岩层发生弯曲,则会形成“上拱”的反射特征,这种情况也有可能是垮塌管状通道的早期阶段(图5a)。

3.4 断层相关活动流体系统

泥火山、泥底辟、气烟囱和管状通道在地震剖面上多呈现垂向延伸,柱状反射形态的聚集型流体活动系统,从形态上统称为柱状流体活动系统(孙启良等, 2014)。而另一种比较重要的流体活动系统就是与断层相关的流体活动系统,断层作为流体运移通道长期受到关注和研究,理论也比较成熟(Cartwright et al., 2007; 孙启良等, 2014)。南海南部陆缘,流体以断层作为通道运移比较多见,特别是断层发育较多的陆缘坡折带(图5b)。断层相关流体活动系统在地震剖面的特征是沿断层两侧出现呈“旗帜状”的含气强振幅异常,临近也出现运移造成的弱振幅杂乱发射区域,多呈“下拉”形态。

4 流体活动系统油气成藏意义

在构造活跃,地层较薄弱的陆缘坡折带往往是流体活动系统比较发育的地带,南海南部陆缘坡折带就发育了一些典型的流体活动系统,如气烟囱、管状通道以及与断层相关的流体活动系统等(图2~图5)。流体活动系统是深层塑性流体或气体沿

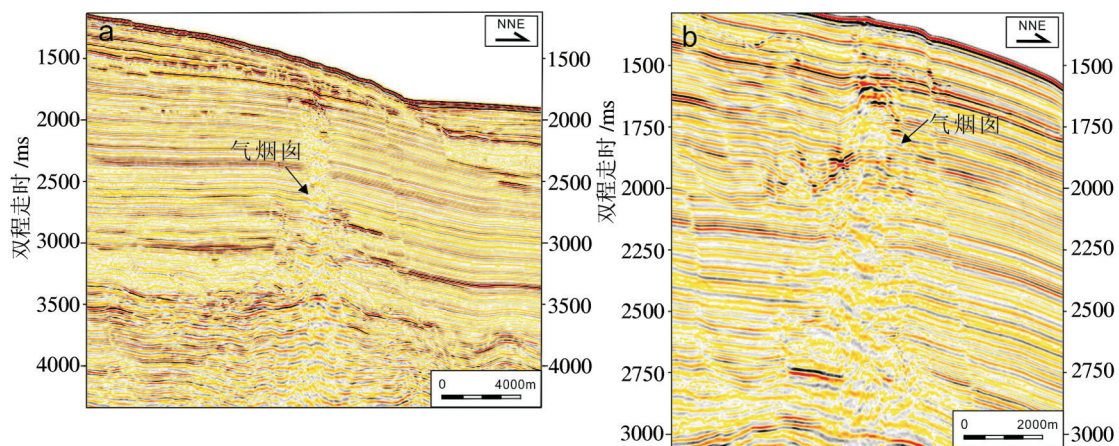


图3 南海南部陆缘盆地气烟囱地震剖面特征

a—单期次气烟囱; b—多期次气烟囱

Fig.3 The seismic characteristics of gas chimney in the southern continental basin of South China Sea

a—Single-stage gas chimney; b—Multi-stages gas chimney

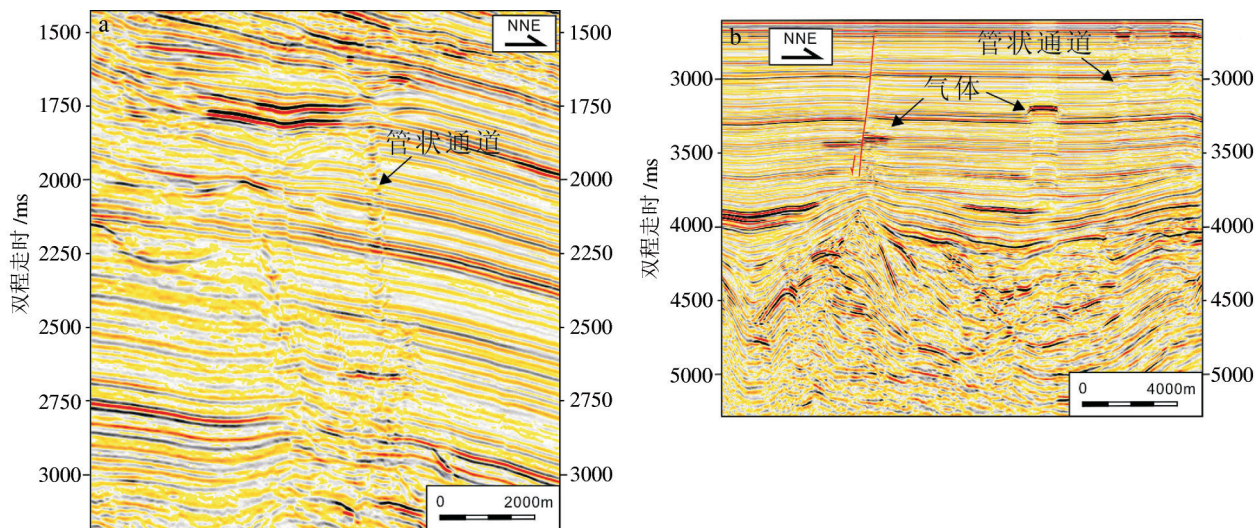


图4 南海南部陆缘盆地管状流体活动系统地震剖面特征

a—呈“下拉”反射形态的管状通道;b—呈“上拱”反射形态的管状通道

Fig.4 The seismic characteristics of focused fluid flow pipes on the southern margin of South China Sea

a—Pipes with drop-down reflection; b—Pipes with arch-up reflection

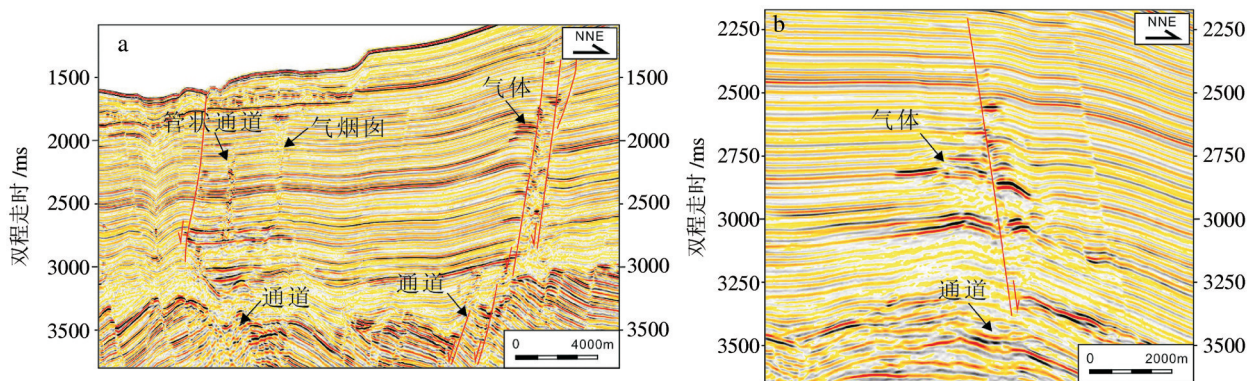


图5 南海南部陆缘盆地与断层相关流体活动系统地震剖面特征

a—与断层相关的流体活动系统与深部作为流体通道的断层相连;b—与断层相关的流体活动系统与深部流体通道相连

Fig. 5 The seismic characteristics of focused flow fluid related faults on the southern margin of South China Sea

a—The focused flow fluid related faults connected faults which served as deep fluid conduits;b—The focused flow fluid related fault which connected conduits of deep fluid

着局限的高渗带垂向运移形成的,并且与坡折带构造沉积特征有一定成因联系,当坡折带断层发育较多时,与断层相关的流体活动系统就比较多见,如北康盆地的南部(图5);而当坡折带处沉积了高压巨厚的泥质层时,则易发育泥底辟和泥火山,如曾母盆地的北部(图1,图2);另外,当坡折带处发育了碳酸盐岩台地时,则易发育碳酸盐岩管状通道(图6)。

大量流体活动系统的含气强振幅异常表明了沉积盆地油气系统比较活跃,预示着盆地油气藏的存在(孙启良等, 2014)。深部塑性流体和气体在高

温高压条件下上侵形成各种类型的流体活动系统,同时也造成断裂、微裂缝形成高孔渗通道,因此流体活动系统及所伴生的断裂和裂隙可以作为油气富集区的运输通道。垂向上运移为主的流体活动系统与横向展布的砂体和不整合面连通起来,使得油气运移的范围增大从而形成成套的油气层(图6)。在南海北部主要盆地,如莺歌海盆地、琼东南盆地、珠江口盆地以及台西南盆地都发现了大量的流体活动系统,经勘探并成功发现了一批与之相关的油气田(何家雄等, 2010; Sun et al., 2010)。国外

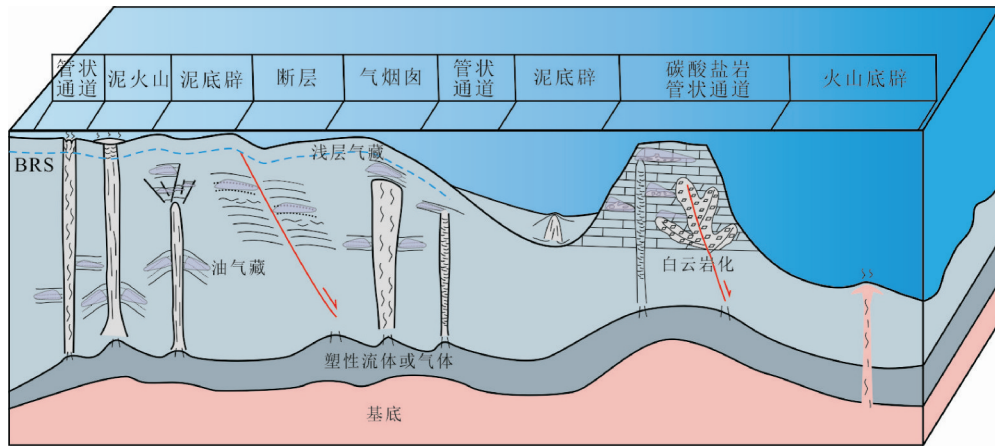


图6 南海南部陆缘流体活动系统及伴生油气藏示意图

Fig.6 Schematic diagram of focused flow fluids and associated gas reservoirs on the southern margin of South China Sea

在南海南部万安盆地和曾母盆地的勘探研究中也发现了与流体活动系统相伴生的油气藏(David et al., 2014; 杨振等, 2016)。

流体活动系统除了能作为油气运移的通道,还可以改善储层,特别是碳酸盐岩储层。碳酸盐岩是一种特殊的岩石,极易发生溶蚀,尤其是强溶蚀性流体的作用,能够使碳酸盐岩形成良好的油气储层(图6)。南海北部东沙隆起流花油田碳酸盐台地发育较为典型受流体影响的深层岩溶系统,构造运动引发的岩浆-火山活动使得碳酸盐台地之下的腐蚀性热流体向上运移,促使碳酸盐岩发生溶蚀作用从而形成良好的油气储层。流体活动系统在地震剖面上呈现气烟囱、管状通道和构造断层,在碳酸盐岩台地之上发育了碳酸盐岩溶蚀管状通道,这主要是由碳酸盐岩在深层热液流体的溶蚀作用下发生碳酸盐岩溶蚀垮塌所形成的(Sun et al., 2013b)。在南海南部曾母盆地 Mega 碳酸盐岩台地发现了典型气烟囱和管状溶蚀通道,通道周围碳酸盐岩由于流体作用发生破裂和溶蚀,并形成了良好的油气储层(Vahrenkamp et al., 2004; David et al., 2014)。深层岩溶系统是碳酸盐台地受到其下部不同类型腐蚀性流体而发生溶解作用所形成的,腐蚀成因一般是二氧化碳溶于水而形成碳酸的溶解作用,而二氧化碳多来自于深部有机物质的分解或者来自于地热源、混合源(Land and Paul, 2000)。

另外,岩浆-火山活动所伴随的热液流体不仅使得碳酸盐岩发生溶蚀,也可以使灰岩发生热液白云岩化,或者使白云岩发生重结晶作用(金之钧,

2005; 朱东亚等, 2010)(图6)。深部流体系统在断裂附近的白云岩发生重结晶作用,重结晶后的白云岩产生大量的晶间孔隙,在重结晶过程中还对白云岩产生溶蚀形成大量的溶蚀孔隙,对白云岩储层改善起着重要的作用(马永生等, 2010; 朱东亚等, 2010)。

5 结论

本文根据2D地震资料在南海南部陆缘识别出多种类型的流体活动系统,包括泥底辟/泥火山、气烟囱、管状通道和与断层相关流体活动系统。这些流体活动系统具有不同的地震反射特征,并出现含气强振幅异常带,表明南海南部陆缘流体活动比较活跃。

流体活动系统对于油气成藏有着重要意义,流体活动系统及所伴生的断裂和裂隙可以作为油气富集区的运输通道;流体活动系统所运移的强溶蚀性流体和深部热液流体有利于形成油气储层,特别是对于碳酸盐岩储层的改造尤为明显。南海南部陆缘流体活动特征以及与油气藏之间的关系对于油气以及天然气水合物的勘探具有参考意义。

References

- Barkhausen U, Engels M, Franke D, Stefan L, Manuel P. 2014. Evolution of the south China Sea: Revised ages for breakup and seafloor spreading[J]. *Marine and Petroleum Geology*, (58): 599-611.
- Cartwright J A, Aplin A, Huuse M. 2007. Seal bypass systems[J]. *AAPG Bulletin*, 91: 1141-1166.

- Chen Shenghong, He Zhenhua, He Jiexiong, Zhu Ming, Chen Xuefang, Pang Xiong, Weng Rongnan, Cui Shasha, Jiang Jian. 2009. The characters of the mud volcanoes in the north–east marginal of the South China Sea and the relationship with the accumulation and migration of oil and gas[J]. *Natural Gas Geoscience*, 20(6): 872–878(in Chinese with English abstract).
- David M, Bernard P, Aicha C, King K T, Manuel P. 2014. Morphological indicators of structural control, relative sea–level fluctuations and platform drowning on present–day and Miocene carbonate platforms[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 58:776–788.
- Franke D, Savva D, Pubellier M, Steuer S, Mouly B, Auxietre J L, Meresse F, Chamot–Rooke N. 2014. The final rifting evolution in the South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 58: 704–720. doi:10.1016/j.marpetgeo.2013.11.020.
- Gao Yuan, Wang Yongli, Zhen Guodong, Meng Pei, Wu Yingqin, Yang Hui, Zhang Hong, Wang Youxiao. 2012. Geochemical characteristics of natural gas from Dushanzi mud volcano in Junggar Basin, Xinjiang[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 33(6): 989–994(in Chinese with English abstract).
- Hao Fang, Dong Weiliang, Zou Huayao, Yang Xusheng. 2003. Overpressure fluid flow and rapid accumulation of natural gas in Yinggehai Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 24(6): 7–12(in Chinese with English abstract).
- He Jiexiong, Zhu Youhai, Weng Rongnan, Cui Shasha. 2010. Characters of northwest mud diapirs volcanoes in South China Sea and relationship between them and accumulation and migration of oil and gas[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(1):75–86(in Chinese with English abstract).
- Jin Zhijun. 2005. Particularity of petroleum exploration on marine carbonate strata in China sedimentary basins[J]. *Earth Science Frontiers*, 12(3):15–22(in Chinese with English abstract).
- Kopf A, Delisle G, Faber E, Panahi B, Aliyev C S, Guliyev I. 2010. Long–term in situ monitoring at Dashgil mud volcano, Azerbaijan: a link between seismicity, pore–pressure transients and methane emission[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 99(1): 227–240, doi:10.1007/s00531–009–0487–4.
- Land L A, Paul C K. 2000. Submarine karst belt rimming the continental slope in the Straits of Florida[J]. *Geo–Marine Letters*, 20, 123–132.
- Li Jiabiao. 2011. Dynamics of the continental margins of South China Sea: Scientific experiments and research progresses[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 54 (12): 2993–3003(in Chinese with English abstract).
- Liu Zhenhu. 2005. Distribution of sedimentary basins and petroleum potential in southern South China Sea[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 29(3): 410–417(in Chinese with English abstract).
- Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong, Zhang Xuefeng. 2010. Formation mechanism of deep–buried carbonate reservoir and its model of three–element controlling reservoir: A case study from the Puguang Oilfield in Sichuan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(8): 1087–1094(in Chinese with English abstract).
- Sun Qiliang, Wu Shiguo, Chen Duanxin, Mi Lijun. 2014. Focused fluid flow systems and their implications for hydrocarbon and gas hydrate accumulations in the deep–water basins of the northern South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(12):4052–4062,doi:10.6038/cjg20141217(in Chinese with English abstract).
- Sun Qiliang, Wu Shiguo, Lü Fuliang, Yuan Shengqiang. 2010. Polygonal faults and their implications for hydrocarbon reservoirs in the southern Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39(5):470–479.
- Sun Qiliang, Wu Shiguo, Joseph Cartwright, Thomas Lüdmann, Yao Genshun. 2013a. Focused fluid flow systems of the Zhongjiannan Basin and Guangle Uplift, South China Sea[J]. *Basin Research*, 25 (1): 97–111.
- Sun Qiliang, Joseph Cartwright, Wu Shiguo, Chen Duanxin. 2013b. 3D seismic interpretation of dissolution pipes in the South China Sea: Genesis by subsurface, fluid induced collapse[J]. *Marine Geology*, 337: 171–181.
- Vahrenkamp V C, David F, Duijndam P, Newall M, Crevello P. 2004. Growth architecture, faulting, and karstification of a middle Miocene carbonate platform, Luconia Province, offshore Sarawak, Malaysia, in seismic imaging of carbonate reservoirs and systems[J]. *AAPG Memoir*, 81: 329–350.
- Wang Liaoliang, Liang Jinqiang, Zeng Fancai. 2000. Cenozoic sedimentation of Beikang Basin[J]. *Research of Geological South China Sea*, 13(12): 58–72(in Chinese with English abstract).
- Wu Nengyou, Yang Shengxiong, Wang Hongbing, Liang Jinqiang, Gong Yuehua, Lu Zhenquan, Wu Daidai, Guan Hongxiang. 2009. Gas–bearing fluid influx sub–system for gas hydrate geological system in Shenhu Area, Northern South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(6):1641–1650, doi:10.3969/j.issn.0001–5733.2009.06.027(in Chinese with English abstract).
- Wu Shiguo, Guo Yuehua, Mi Lijun, Wang Zhijun, Wang Xiujuan. 2010. Study on hydrocarbon leakage system and associated gas hydrate reservoirs in the deepwater basin of Northern South China Sea[J]. *Geoscience*, 24(6): 433–440(in Chinese with English abstract).
- Wu Shiguo, Wang Xiujuan, Chen Ruixin, Wang Zhijun. 2015a. *Gas Hydrate Geology*[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- Wu Shiguo, Zhang Xinyuan. 2015b. Response of Cenozoic carbonate platform on tectonic evolution in the conjugated margin of South China Sea[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 40(2):234–248(in Chinese with English abstract).
- Xie Chaoming, Li Cai, Li Linqing, Wu Yanwang, Hu Peiyuan. 2009. First discovery of mud volcanoes in central Qiangtang, Northern Tibet, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 28(9):1319–1324(in Chinese with English abstract).

- Xie Xinong, Ren Jianye, Wang Zhenfeng, Li Xushen, Lei Chao. 2015. Difference of tectonic evolution of continental marginal basins of South China Sea and relationship with SCS spreading[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 77–87(in Chinese with English abstract).
- Yang Minghui, Zhang Houhe, Liao Zongbao, Luo Xiaohua, Yang Guang, Gong Ting. 2015. Petroleum systems of the major sedimentary basins in Nansha sea waters (South China Sea) [J]. *Earth Science Frontiers*, 22(3): 48–58(in Chinese with English abstract).
- Yang Zhen, Zhang Guangxue, Zhang Li. 2016. The Evolution and main controlling factors of reef and carbonate platform in Wan'an Basin[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 41(8):1349–1360 (in Chinese with English abstract).
- Yao Yongjian, Liu Hailing, Yang Chupeng, Han Bing, Tian Jijun, Yin Zhengxin, Gong Junlin, Xu Qiaoyue. 2012. Characteristics and evolution of Cenozoic sediments in the Liyue Basin, SE South China Sea[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 60: 114–129.
- Yao Yongjian, Wu Nengyou, Xia Bin, Wan Rongsheng. 2008. Petroleum geology of the Zengmu basin in the southern South China Sea[J]. *Geology in China*, 35(3): 503–513(in Chinese with English abstract).
- Zampetti V, Schlager W, Konijnenburg J H V, Everts A J. 2004. Architecture and growth history of a Miocene carbonate platform from 3D seismic reflection data: Luconia province, offshore Sarawak, Malaysia[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 21: 517–534.
- Zhang Guangxue, Zhu Youhai, Liang Jinqiang, Wu Shiguo, Yang Muzhuang, Sha Zhibin. 2006. Tectonic controls on gas hydrate deposits and their characteristics[J]. *Geoscience*, 20(4): 605–612 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Li, Wang Liaoliang, Yi Hai. 2003. The Formation and evolution of Beikang Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas(Geology)*, 17(4): 245–248(in Chinese with English abstract).
- Zhu Dongya, Jin Zhijun, Hu Wenxuan. 2010. Hydrothermal recrystallization of the Lower Ordovician dolomite and its significance to reservoir in northern Tarim Basin[J]. *Science China Earth Sciences*, 40(2): 156–170.
- 前缘, 12(3): 15–22.
- 郝芳, 董伟良, 邹华耀, 杨旭升. 2003. 莺歌海盆地汇聚型超压流体流动及天然气晚期快速成藏[J]. *石油学报*, 24(6): 7–12.
- 何家雄, 祝有海, 翁荣南, 崔莎莎. 2010. 南海北部边缘盆地泥底辟及泥火山特征及其与油气运聚关系[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 32(1):75–86.
- 李家彪. 2011. 南海大陆边缘动力学:科学实验与研究进展[J]. *地球物理学报*, 54 (12): 2993–3003.
- 刘振湖. 2005. 南海南沙海域沉积盆地与油气分布[J]. *大地构造与成矿学*, 29(3): 410–417.
- 马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 张学丰. 2010. 深层超深层碳酸盐岩优质储层发育机理和“三元控储”模式——以四川普光气田为例[J]. *地质学报*, 84(8): 1087–1094.
- 孙启良, 吴时国, 陈端新, 米立军. 2014. 南海北部深水盆地流体活动系统及其成藏意义[J]. *地球物理学报*, 57(12): 4053–4062.
- 王嘹亮, 梁金强, 曾繁彩. 2000. 北康盆地新生代沉积特征[J]. *南海地质研究*, 13(12): 58–72.
- 吴能友, 杨胜雄, 王宏斌, 梁金强, 龚跃华, 卢振权, 邹黛黛, 管红香. 2009. 南海北部陆坡神狐海域天然气水合物成藏的流体运移体系[J]. *地球物理学报*, 52(6): 1641–1650.
- 吴时国, 龚跃华, 米立军, 王志君, 王秀娟. 2010. 南海北部深水盆地油气渗漏系统及天然气水合物成藏机制研究[J]. *现代地质*, 24 (6): 433–440.
- 吴时国, 王秀娟, 陈端新, 王志君. 2015a. 天然气水合物地质[M]. 北京:科学出版社.
- 吴时国, 张新元. 2015b. 南海共轭陆缘新生代碳酸盐台地对海盆构造演化的响应[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 40(2):234–248.
- 解超明, 李才, 李林庆, 吴彦旺, 胡培远. 2009. 藏北羌塘中部首次发现泥火山[J]. *地质通报*, 28(9): 1319–1324.
- 解习农, 任建业, 王振峰, 李绪深, 雷超. 2015. 南海大陆边缘盆地构造演化差异性及其与南海扩张耦合关系[J]. *地学前缘*, 22(1): 77–87.
- 姚永坚, 吴能友, 夏斌, 万荣胜. 2008. 南海南部海域曾母盆地油气地质特征[J]. *中国地质*, 35(3): 503–513.
- 杨明慧, 张厚和, 廖宗宝, 罗晓华, 杨光, 龚婷. 2015. 南海南沙海域主要盆地含油气系统特征[J]. *地学前缘*, 22(3): 48–58.
- 杨振, 张光学, 张莉. 2016. 万安盆地生物礁及碳酸盐台地的发育演化及控制因素[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 41(8):1349–1360.
- 张莉, 王嘹亮, 易海. 2003. 北康盆地的形成与演化[J]. *中国海上油气(地质)*, 17(4): 245–248.
- 张光学, 祝有海, 梁金强, 吴时国, 杨木壮, 沙志彬. 2006. 构造控制型天然气水合物矿藏及其特征[J]. *现代地质*, 20(4): 605–612.
- 朱东亚, 金之钧, 胡文瑄. 2010. 塔北地区下奥陶统白云岩热液重结晶作用及其油气储集意义[J]. *中国科学:地球科学*, 40(2): 156–170.

附中文参考文献

- 陈胜红, 贺振华, 何家雄, 朱明, 陈雪芳, 庞雄, 翁荣南, 崔莎莎, 姜建. 2009. 南海东北部边缘台西南盆地泥火山特征及其与油气运聚关系[J]. *天然气地球科学*, 20(6): 872–878.
- 高苑, 王永莉, 郑国东, 孟培, 吴应琴, 杨辉, 张虹, 王有孝. 2012. 新疆准格尔盆地独山子泥火山天然气地球化学特征[J]. *地球学报*, 33 (6): 989–994.
- 金之钧. 2005. 中国海相碳酸盐岩层系油气勘探特殊性问题[J]. *地学*