

doi: 10.12029/gc20180101

张伟, 梁金强, 苏丕波, 尉建功, 沙志彬, 林霖, 梁劲, 黄伟. 2018. 南海北部陆坡高饱和度天然气水合物气源运聚通道控藏作用[J]. 中国地质, 45(1): 1-14.

Zhang Wei, Liang Jinqiang, Su Pibo, Wei Jianguo, Sha Zhibin, Lin Lin, Liang Jin, Huang Wei. 2018. Migrating pathways of hydrocarbons and their controlling effects associated with high saturation gas hydrate in Shenhu area, northern South China Sea[J]. Geology in China, 45(1): 1-14(in Chinese with English abstract).

南海北部陆坡高饱和度天然气水合物气源运聚通道控藏作用

张伟^{1,2} 梁金强¹ 苏丕波¹ 尉建功¹ 沙志彬¹ 林霖¹ 梁劲¹ 黄伟¹

(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. 中山大学海洋科学学院, 广东 珠海 519082)

摘要:气源运聚通道与天然气水合物富集成藏关系密切。利用准三维地震资料并结合钻探成果, 深入研究了神狐海域 GMGS3 钻探区高饱和度水合物站位气源运移疏导通道地质地球物理特征及其控藏作用。结果表明: 高饱和度水合物产出站位发育多种类型运移疏导通道, 且与 BSR 空间耦合关系较好; 紧邻 BSR 之下为强振幅反射, 强振幅下部游离气体充注现象明显, 表明水合物稳定域下部存在气体运移的通道, 且深部气体向浅层发生了运移。深大断裂、底辟及气烟囱构成了沟通深部热解气及浅层生物气与浅层温压稳定域的垂向通道, 在这些通道上方可以直接形成水合物; 浅部滑塌面、水道砂及海底扇构成的高孔渗连续性砂体为浅层生物气及深部运移而来的部分热成因气横向运移通道, 气体的侧向运移扩大了气体供给范围, 增加了矿体横向展布规模。文章认为, 天然气运移疏导系统与其他成藏要素匹配良好的构造和区域是勘探高饱和度水合物的有利目标。

关键词:天然气水合物; 高饱和度; 运聚通道; GMGS3 航次; 站位选择; 神狐海域; 南海北部

中图分类号: P744.4; P618.13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2018)01-0001-14

Migrating pathways of hydrocarbons and their controlling effects associated with high saturation gas hydrate in Shenhu area, northern South China Sea

ZHANG Wei^{1,2}, LIANG Jinqiang¹, SU Pibo¹, WEI Jianguo¹, SHA Zhibin¹, LIN Lin¹, LIANG Jin¹, HUANG Wei¹

(1. MLR Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, Ministry of Land and Resources, Guangzhou 510075, Guangdong, China; 2. School of Marine Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, Guangdong, China)

Abstract: Migration pathways of gas have close relationship with migration and accumulation of natural gas hydrate. Based on high resolution quasi-3D seismic data, and combined with practical drilling results, the authors studied the geological and geophysical

收稿日期: 2018-01-24; 改回日期: 2018-02-05

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2017M622655)、国土资源部海底矿产资源重点实验室开放基金项目(KLMMR-2017-A-13)、国家自然科学基金青年科学基金项目(41602149)及中国地质调查局项目(DD20160211)联合资助。

作者简介: 张伟, 男, 1987年生, 博士, 国土资源部广州海洋地质调查局与中山大学在站博士后, 从事天然气水合物地质研究;

E-mail: zwgmgs@foxmail.com。

通讯作者: 梁金强, 男, 1967年生, 教授级高级工程师, 从事天然气水合物勘查研究工作; E-mail: ljqiang@hyd.zn。

features of gas migration pathways and their controlling effects associated with high saturation gas hydrate in GMGS3 drilling sites of Shenhu area. The results show that multiple types of migration pathways are developed in high saturation gas hydrate drilling sites in GMGS3 drilling area, which have favorable corresponding relation with BSR in space. Enhanced reflections occur closely beneath the BSR, and gas charging phenomena are obvious under the enhanced reflection, indicating migrating pathways exist under the gas hydrate stability zone and deep gas has migrated to shallow formations through those pathways. Deep faults, mud diapirs, gas chimneys act as vertical migrating pathways that connect deep thermogenic gases with shallow biogenic gas and pressure-temperature stability zones, and gas hydrate can be formed and accumulated just over those pathways. Shallow slump surface and high continuous sand bodies composed of channel sandstones and submarine fans provide lateral migrating pathways for the migration of shallow biogenic gas and partial thermogenic gas from deep formations, which expands the range of gas supply and increases the gas hydrate distribution scales. It is concluded that tectonic structures and regions with favorable coupling relationship between hydrocarbon migrating system and other elements are prospective targets with high saturation gas hydrate.

Key words: natural gas hydrate; high saturation; migration pathway; GMGS3 expedition; drilling site selection; Shenhu area; northern South China Sea

About the first author: ZHANG Wei, male, born in 1987, doctor, postdoctoral researcher, mainly engages in the study of gas hydrate geology; E-mail: zwgms@foxmail.com.

About the corresponding author: LIANG Jinqiang, male, born in 1967, professor, mainly engages in the study of gas hydrate exploration; E-mail: ljqiang@hdyz.com.

Fund support: Supported by China Postdoctoral Science Foundation (No. 2017M622655); Open Found of Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Land and Resources (No. KLMMR-2017-A-13); National Natural Science Foundation of China(No. 41602149); China Geological Survey Project for South China Sea Gas Hydrate Resource Exploration (No. DD20160211).

1 引 言

气源是天然气水合物(水合物,下同)形成和稳定存在的关键要素之一,通常原地生成的天然气量难以满足成藏需求,需要下部或邻区的气源补充,这就要求存在一定的气体运移疏导通道,才可能形成一定规模的水合物藏(Collett et al.,2009)。气源运移疏导通道在水合物成藏过程中作用关键,很大程度上直接决定着水合物的分布与规模(Parnell and Schwab,2003; Greinert et al.,2010; Horozal et al.,2009; Dewangan et al.,2010; Andresen,2012),这在世界广泛的水合物勘探研究中已得到充分证实(Milkov,2000; Crutchley et al.,2010; Matsumoto et al.,2011; Yoo et al.,2013)。尤其是在当今技术条件下能达到实验性开采要求的高饱和度水合物藏,其形成与气源运移疏导通道关系更为密切(Anderson et al.,2011; Ito et al.,2015)。

近年来海洋地质及油气地质的深入分析研究与勘探实践证实,中国南海北部水合物富集区及BSR(Bottom Simulating Reflector,似海底反射)显示区,均与不同类型流体运移疏导系统密切相关或

存在成因联系(吴能友等,2009; 龚跃华等,2009; 吴时国等,2010; 孙启良等,2014; 张伟等,2015; 何家雄等,2016)。南海北部神狐海域水合物富集区气体运聚体系分析和刻画研究表明,滑脱断层、底辟、气烟囱等天然气运移疏导通道对该区水合物成藏起到重要作用并且可能是控制水合物非均匀性分布的重要因素(Wang et al.,2014; Su et al.,2016; Su et al.,2017)。2015年神狐海域GMGS3航次成功获取水合物实物样品,进一步证实了水合物稳定域与天然气运移疏导系统之间的密切联系(Zhang et al.,2017)。GMGS3航次钻探23口水合物探井,均发现水合物,矿层厚度2~80 m,水合物饱和度介于0~76%,多个站位(Wa、Wb、Wc、Wd)发现饱和度>60%的水合物;同时,该航次首次在南海北部发现新类型(II型)水合物,与深部油气关系密切,对指导水合物勘查具有重要的指示意义(Yang et al.,2015; 杨胜雄等,2017; 郭依群等,2017)。然而,为何这几个站位能够聚集形成如此高饱和度水合物,其与含气流体运移疏导通道关系如何?运移疏导系统对生物气和热解气的疏导路径和方式?等问题悬而未解。鉴此,本研究基于GMGS3航次钻探资料、准三

维地震资料的综合分析解释,通过高饱和度水合物站位不同类型天然气运移疏导系统的刻画和解剖,阐明天然气运移疏导系统地质地球物理特点,及其与高饱和度水合物(BSR)时空耦合关系等,阐明天然气运移疏导体系对高饱和度水合物成藏的贡献,以期能为后期高饱和度水合物有利目标确定,水合物钻探站位的优选提供理论支撑和技术支持。

2 区域地质背景

神狐海域水合物富集区位于南海北部陆坡珠江口盆地南部深水区(图1a)。该区海底地形起伏变化较大,总体趋势表现为由北西向南东倾斜,水深从300 m逐渐加深到1700 m以上。神狐海域整体坡降较小,一般介于 $2.1 \times 10^{-2} \sim 3.4 \times 10^{-2}$,海底地貌类型相对简单,在地形较陡的中陆坡之上主要发育了由海底滑塌作用和侵蚀作用形成的海丘、冲蚀沟谷、反坡向陡坎、滑塌块体以及海底峡谷等地貌类型(图1b)(Wang et al.,2014; Su et al.,2017; Zhang et al.,2017)。神狐海域热流值为 $60.84 \sim 96.11 \text{ mW/m}^2$,平均热流值为 76.72 mW/m^2 ,与区域热流背景值对比发现,该区的热流平均值高出珠江口盆地中央隆

起带和南部拗陷带为 $5 \sim 6 \text{ mW/m}^2$,表明研究区地层中流体相对活跃,深部热液运移速度相对较大(梁金强等,2014; 唐晓音等,2014)。神狐海域海底温度在 $2 \sim 4^\circ\text{C}$,地温梯度为 $45 \sim 67.7^\circ\text{C/km}$;海底受到的水深压力基本大于10 MPa,因此,该区具备良好的水合物成藏条件和场所(梁金强等,2014)。

神狐海域经历了与南海北部陆缘相似的地史演化过程。晚白垩世以后,南海北部陆缘在拉张应力作用下,地壳和岩石圈厚度减薄,依次发生了神狐运动、白云运动、南海运动和东沙运动,发育了NE、NW和NWW向3组正断裂(庞雄等,2008; 何家雄等,2012; 钟志洪等,2014)。断层活动存在3个高峰期:古新世(或者更早)—渐新世早期、中新世早期—中新世中期和中新世晚期,中新世晚期以来的断裂尤为活跃,各个时期所发育的断裂系均为张性和张剪性,可以作为含气流体运移的良好疏导通道(施和生等,2014)。GMGS3钻探区沟通古近纪与新近纪的沟源大断裂发育位置主要邻近白云凹陷荔湾气田区,部分深大断裂向下可切穿至T5(古近世—新近纪界面)以下,甚至可能切断至古近纪渐新世—始新世地层(乔少华等,2013)。上新世—第四

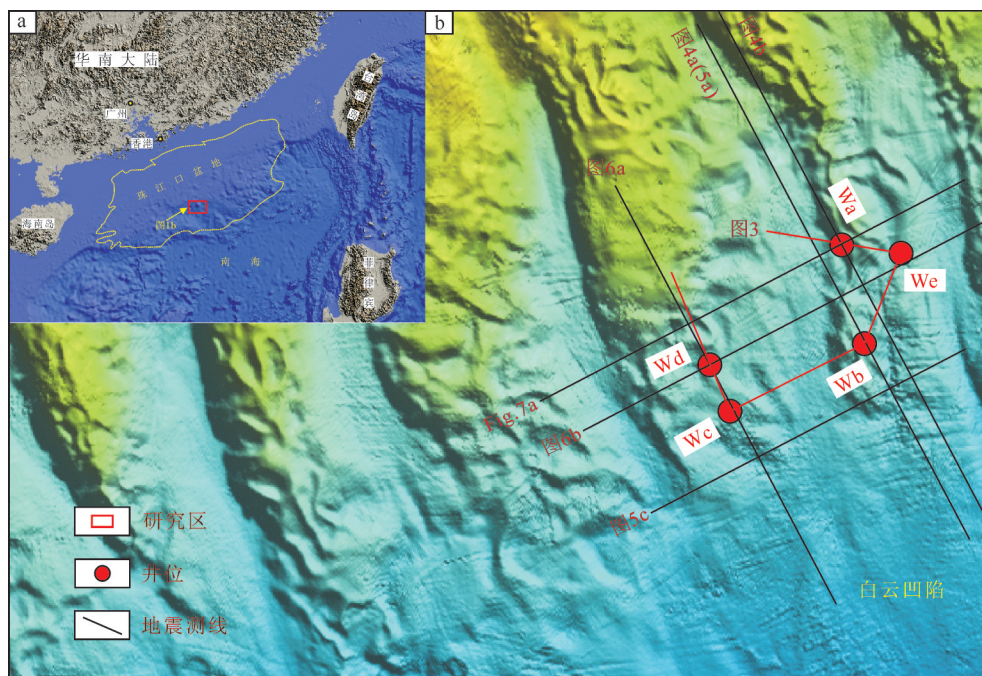


图1 南海北部神狐海域天然气水合物富集区位置图

a—神狐海域区域地质背景;b—GMGS3钻探区地震测线与井位分布

Fig.1 Location of the natural gas hydrate enrichment region in Shenhu area, northern South China Sea
a—Geological setting of Shenhu area;b—Distribution of seismic lines and well location in GMGS3 drilling area

纪活动的NE向断层数量多,规模小,是新构造运动引起区内松散、固结性差的沉积物产生拆离滑脱滑塌而形成的,表现为阶梯状的正断层(苏明等,2014)。

上述4次大规模构造运动对珠江口盆地现今构造单元的展布及新生代沉积演化产生了重要影响,盆地自下而上总体表现由陆到海的沉积充填趋势(何家雄等,2012;施和生等,2014)。古新世以冲积扇砂砾岩沉积为主,伴有火山岩及火山碎屑岩,最大厚度可达1000 m以上。早始新世以湖相泥岩夹薄层砂岩与粉砂岩沉积为主,地层厚度可达2000 m以上。晚始新世—早渐新世以平原河流相、沼泽相及湖相砂泥岩互层沉积为主,夹较多的煤线及薄煤层,最大厚度可达1000 m以上。晚渐新世以海相沉积为主,晚渐新世珠海组属海陆交互相,后期随着海平面上升以海相沉积占主导地位。中中新世以来,海进范围逐步加大,在南海北部陆缘区从北向南水深逐步增大,依次为滨海—浅海—半深海—深海碎屑岩沉积,晚中新世—全新世最厚可达4000 m以上,一般为1000~3000 m。古近纪始新世中深湖相泥岩及渐新世煤系地层与海陆过渡相泥岩构成了珠二坳陷白云凹陷主要烃源岩,生成成熟—过成熟油气,是该区常规油气藏的主要烃源灶(施和生等,2014;张功成等,2014),此外,部分埋藏较深的珠海组泥岩也达到成熟阶段。珠江组及其以上富含泥的海相沉积有机质多处于未熟或低熟阶段,生成大量生物气,为该区水合物的成藏提供了充足气源(何家雄等,2013)。必须着重指出的是,因新构造运动改造,形成了大量的晚期构造圈闭,同时诱发了较深部海相超压泥质岩类的塑性流动及排烃活动,形成了规模宏大的泥底辟及气烟囱活动带,从新近纪早期开始,至今仍处于活动状态。底辟构造、气烟囱及伴生的丰富断层裂隙共同构成天然气运移的通道,为该区高饱和度水合物富集成藏提供了气源保障(王家豪等,2006;石万忠等,2009)。

3 高饱和度水合物钻探成果

GMGS3航次在神狐海域共钻探19个站位,在23口先导孔钻井中全部获得水合物显示,在其中的Wa、Wb、Wc、Wd站位进行了原位测量和取心并获得不可视的高饱和度水合物实物样品,高饱和度水

合物产出站位位于钻探区东南角海底海脊下段位置(图1b),钻探水深1249~1310 m,实际钻探深度为222~315 mbsf(海底以下深度,m)。通过此次钻探,不仅证实神狐海域赋存高饱和度、厚度大且储量规模大的扩散型水合物矿体,而且发现了较明显的热成因气显示,并推断存在热成因的II型水合物(Yang et al.,2015; Zhang et al.,2017; 杨胜雄等,2017; 郭依群等,2017)。基于GVR电阻率成像特征识别出水合物4种宏观赋存状态,分别为厚层状、分散状、薄层状和斑块状(杨胜雄等,2017)。水合物发育层段与随钻测井曲线上异常曲线段有很好的吻合关系,通常水合物层段对应高电阻率异常及低伽马异常,且曲线异常越明显对应水合物饱和度也越高(图2a)。GMGS3钻探区所发现的高饱和度水合物在世界水合物产区也是饱和度极高的地区,4个站位水合物赋存段经由Cl⁻浓度变化计算得到的水合物饱和度介于0~76%(杨胜雄等,2017),水合物分布层、厚度、饱和度等变化特征见图2a。根据成像测井及岩心分析,可将钻获的高饱和度水合物划分为断层、裂隙充填型水合物(图2b)和细粒沉积物充填型水合物两种(图2c)。

4 高饱和度水合物及BSR地球物理特征

神狐海域水合物勘查研究证实,BSR是指示水合物存在的有效标志,通过GMGS3水合物站位BSR及其上下地震反射特征的解释和刻画(Wang et al.,2014; Su et al.,2016; 苏丕波等,2017),可以系统地分析GMGS3高饱和度水合物在地震反射剖面上的异常响应特征。

神狐海域水合物钻探区BSR异常发育,主要展布在海底脊部及斜坡部位。钻前对GMGS3识别出的BSR统计结果表明,BSR埋深介于230~400 mbsf,单段BSR延伸长度为1.7~5.36 km(Zhang et al.,2017)。钻探结果证实,GMGS3航次钻获高饱和度水合物的站位对应强反射振幅、连续或相对连续的BSR所在位置,BSR几乎均与地层斜交,表现出很明显的穿层效应(图3)。根据地震资料,高饱和度站位附近BSR的地震反射时间为1888~1966 ms,BSR埋深为135~230 mbsf。叠前偏移剖面中有良好的BSR显示,部分站位BSR上方振幅空白带显示明

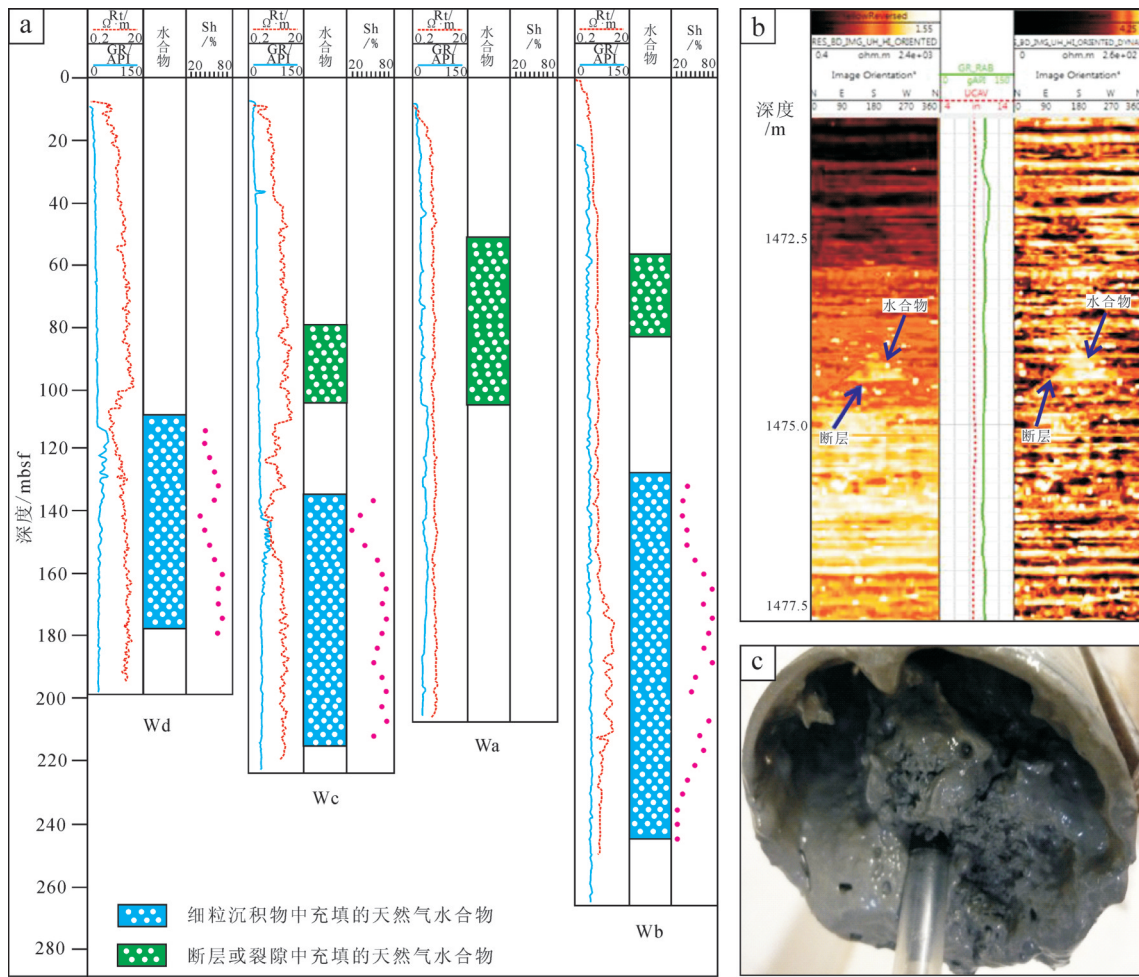


图2 神狐海域 GMGS3 钻探区高饱和度水合物随钻测井曲线及钻探岩心特征

Fig.2 Characteristics of LWD data (a-b) and cores (c) of gas hydrate with high saturation in GMGS3 drilling place of Shenhu area (Sh: Saturation of gas hydrate, 水合物饱和度)

显,多数站位附近BSR下部反射杂乱或模糊,且可明显识别出高角度断层。紧邻BSR底部通常为强振幅反射,部分站位强反射体下部显示出弱振幅的模糊或杂乱反射,反射带内部反射同相轴下拉,呈现出典型的速度振幅异常结构(V'AMP)(图3),其形成与水合物的富集及水合物下伏游离气体的充注有关(Scholl et al.,2009)。同时,在BSR发育层位下部,尤其是在断层附近,还能观察到振幅增强的“亮点”反射(图3)。上述异常地震反射特征的出现表明水合物稳定域下伏地层中聚集有游离气,而下伏游离气的富集表明BSR下部存在气体运移疏导的通道,且深部气体向浅层发生了运移(Heggland, 1997; Meldahl et al.,2001;Wang et al.,2014),因此高饱和度水合物的富集说明研究区气体充足,且气体运移通道发育,气源、运移通道与水合物温压稳定

域空间匹配条件良好。

5 高饱和度水合物气源运移疏导通道识别

准三维地震资料解释结果表明,高饱和度水合物产出站位发育包括断裂体系、泥底辟、气烟囱、滑塌面、峡谷水道砂及海底扇等多种类型天然气运移疏导通道,共同构成了高饱和度水合物运聚成藏的重要气源通道(乔少华等,2013;苏明等,2014;杨睿等,2014;Su et al.,2016;Su et al.,2017)。

5.1 断裂体系

神狐 GMGS3 钻探区位于珠二坳陷白云凹陷内,而白云凹陷油气勘探证实,断裂是控制该地区天然气成藏的主要因素,凹陷深部气体可以沿着活动的断裂带由凹陷中心向斜坡运移,再沿晚期活动

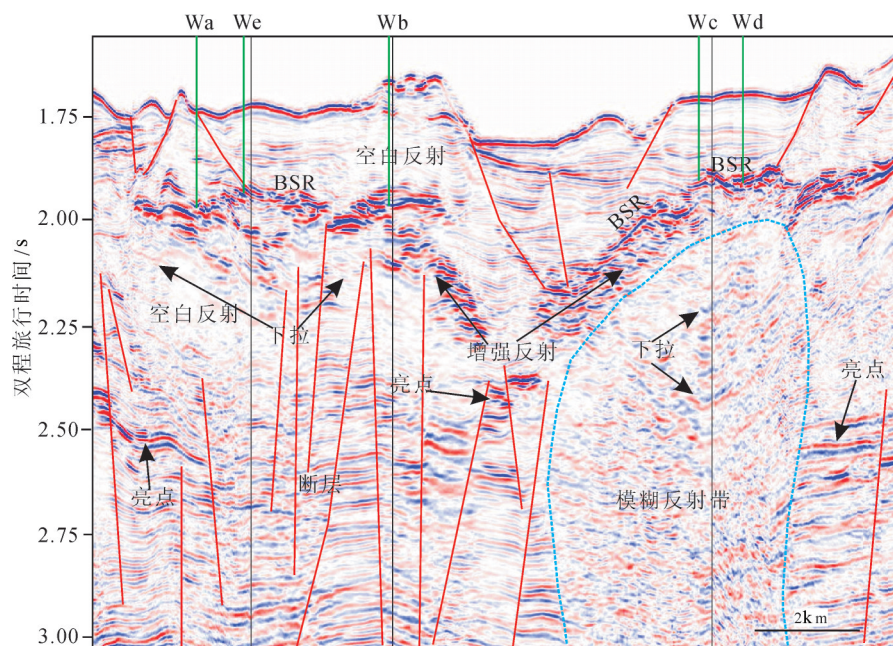


图3 神狐海域GMGS3钻探区高饱和度水合物站位连井地震反射剖面特征

Fig.3 Seismic profiles crossing high saturation gas hydrate drilling sites in GMGS3 drilling place of Shenhu area

的断裂向上运移(施和生等,2010;施和生等,2014)。同样,不同时期发育的多种类型断裂体系可为水合物的形成和聚集提供气源疏导条件。GMGS3钻探区高饱和度水合物产出站位发育了多种类型断裂,包括深大断裂、底辟/气烟囱伴生断裂及第四纪滑塌断层。沟通古近纪与新近纪的沟源断裂发育位置主要邻近荔湾气田区,也是和高饱和度水合物产出站位邻近的区域(乔少华等,2013)。部分深大断裂向下可切穿至T5以下,甚至可能切断至古近纪渐新世—始新世地层(地震资料推测)(Su et al.,2017)。如Wb站位就解释判识出沟通T1至深部T5以下的深大断裂(图4a)。这些断层活动时产生大量的裂隙,使其周围成为高孔渗带,断裂系连通了深部热成因气和与浅层水合物温压稳定域,为含气流体运移提供了通道,从地震剖面上看,大断层与BSR的发育具有良好的匹配关系,如Wa站位,高角度断层直接切割深部地层与浅部BSR直至近海底(图4b),实际钻探结果也发现在断层和裂隙中充填有水合物,在高角度断层上部水合物稳定域中钻获高饱和度水合物。

白云凹陷上新世—第四纪活动的NE向断层数量多,规模小,是新构造运动引起区内滑塌而形成的,主要是由于沉积物松散固结性差,上覆地层的压力使地层产生拆离滑脱形成阶梯状的正断层,纵

向上,大部分识别出的断层发育于晚中新世,向上可切穿晚中新世—第四纪各套地层(Su et al.,2017),共同构成了神狐海域与水合物成藏密切相关的滑塌断层体系,其与地形地貌有较好的对应关系(陈泓君等,2014;秦轲等,2014),这些断层剖面上呈上陡下缓的犁式断层,并在断层附近发现游离气形成的声空白区或振幅增强的“亮点”,表明其为气体运移通道。在GMGS3高饱和度站位附近识别出第四纪海底滑塌断层,断层多数向下切穿至T1界面并收敛于BSR之上(图4),少数断层切穿BSR并向下延伸,因此大部分滑塌断层位于温压稳定域内部,有利于通过气烟囱或断层等运移至BSR下部的气体继续通过滑塌断层向稳定域内部运移,扩大了水合物成藏的空间和范围(图4,图5)。此外,泥底辟及气烟囱两侧、内部和顶部四周往往可见高角度的底辟伴生断裂和裂缝,其是由高温超压泥页岩上拱侵入,导致围岩破裂变形或超压流体压裂造成的,构成了神狐海域底辟伴生断裂体系,也是与高饱和度水合物成藏气源运移疏导密切相关的运移通道类型(图5)。

5.2 气烟囱

气烟囱是地层内部圈闭气体由于压力释放上冲,在地震剖面上因地震波能量被吸收造成地震反射模糊或空白的结果,因外形大多似烟囱而得名,

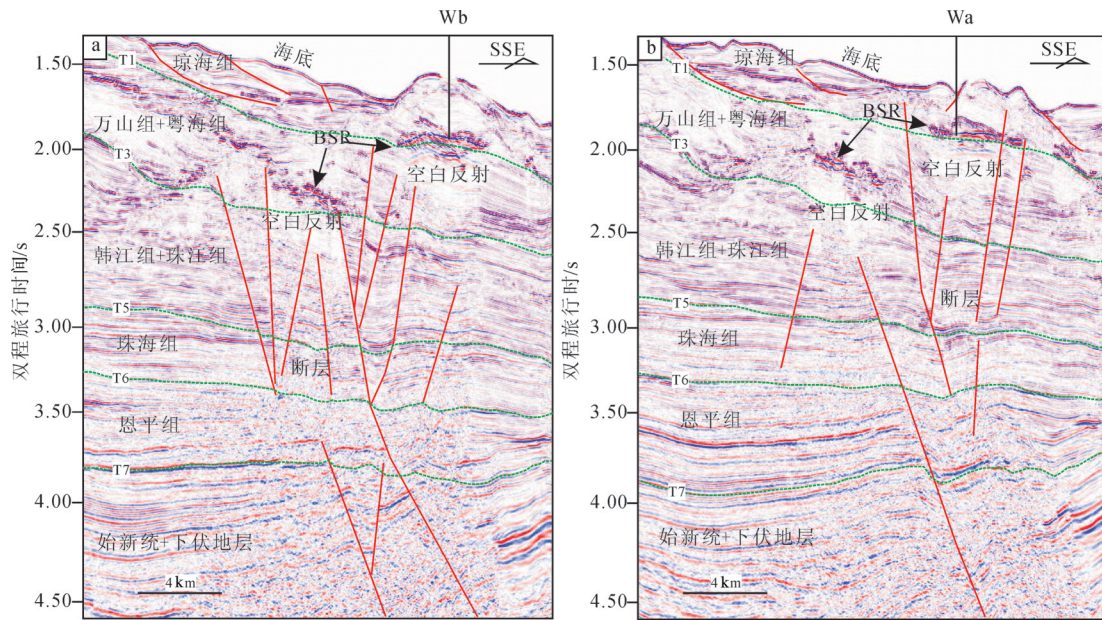


图4 神狐海域GMGS3钻探区高饱和度水合物站位断裂发育特征

Fig.4 Characteristics of faults developed in high saturation gas hydrate sites in GMGS3 drilling place of Shenhu area

大多数气烟囱沿垂向分布的系列裂缝发育,这些断裂或裂缝虽未发生明显错断或滑动,但具有幕式张合的特征,可以为深部气源向上运移提供良好的通道(Løseth et al.,2009; Hustoft et al.,2010)。GMGS3钻探区高饱和度水合物站位也发育气烟囱,在地震剖面上主要表现为反射同相轴的连续性变差或中断,内部反射较杂乱或呈现弱反射,甚至空白反射,其两侧、顶部常见亮点振幅异常(吴能友等,2009;苏明等,2014; Su et al.,2017; Yang et al.,2017)(图5a),气烟囱在瞬时频率图上表现出明显的低频特征,表明气体沿气烟囱通道发生了运移和充注(图5b)。垂向上,气烟囱上方往往出现BSR,如Wb站位气烟囱终止于BSR界面之下,在BSR之上地层中不发育(图5a),说明流体在向上运移过程中,在BSR处发生了富集,在合适的温压条件下可形成水合物,而水合物又是很好的遮挡层,促使游离气在BSR下部聚集形成更大规模的水合物藏。另外,气烟囱可能发源自古近纪深部地层,沟通始新统及渐新统烃源岩,通过其本身疏导的热成因烃类气又可作为水合物气体来源之一(Zhang et al.,2017)。

5.3 泥底辟

神狐海域处于白云凹陷大型底辟活动带之中,具有发育泥底辟的物质基础及动力来源(王家豪等,2006;石万忠等,2009)。GMGS3钻探区高饱和度水

合物产出站位附近发育有泥底辟构造(图5c),在地震剖面上表现出自深部延伸至近海底的柱状模糊带,其内部反射杂乱、模糊,两侧同相轴因泥源物质上拱而发生牵引上拉,这是典型泥底辟地震反射特征。在泥底辟内部、两侧及顶部发育了大量底辟伴生断层,同时还能观察到振幅增强的“亮点”反射,表明深部气体通过泥底辟通道及底辟伴生断层裂隙发生垂向运移并被储层所捕获,白云凹陷北坡钻井已揭示这种亮点与气层存在良好对应关系(朱伟林等,2007)。底辟构造的存在说明凹陷中心曾经蕴育着高压、超压系统。由于现今地层具有正常压力,这说明超压的累积和释放与深部烃源岩生烃及排烃有一定的关系。与底辟构造密切伴生的大量亮点指示着沿底辟构造的天然气垂向疏导,构成了古近纪油气运移到新近纪—第四纪的成藏动力系统。超压泥源物质拱张,造成上覆地层产生高角度的断裂和垂向裂隙系统,与泥底辟构造本身共同构成水合物成藏气源运移疏导的另一种通道,在泥底辟顶部形成了较连续BSR即是例证(图5c)。

5.4 滑坡(塌)面

神狐海域位于南海北部上陆坡的坡折处,由于受底流和重力流的共同作用,海底滑坡非常强烈,其上沟槽遍布,地貌上表现为海底山脊和冲蚀沟槽近南北向相间排列的格局(图1b)。神狐海域海底

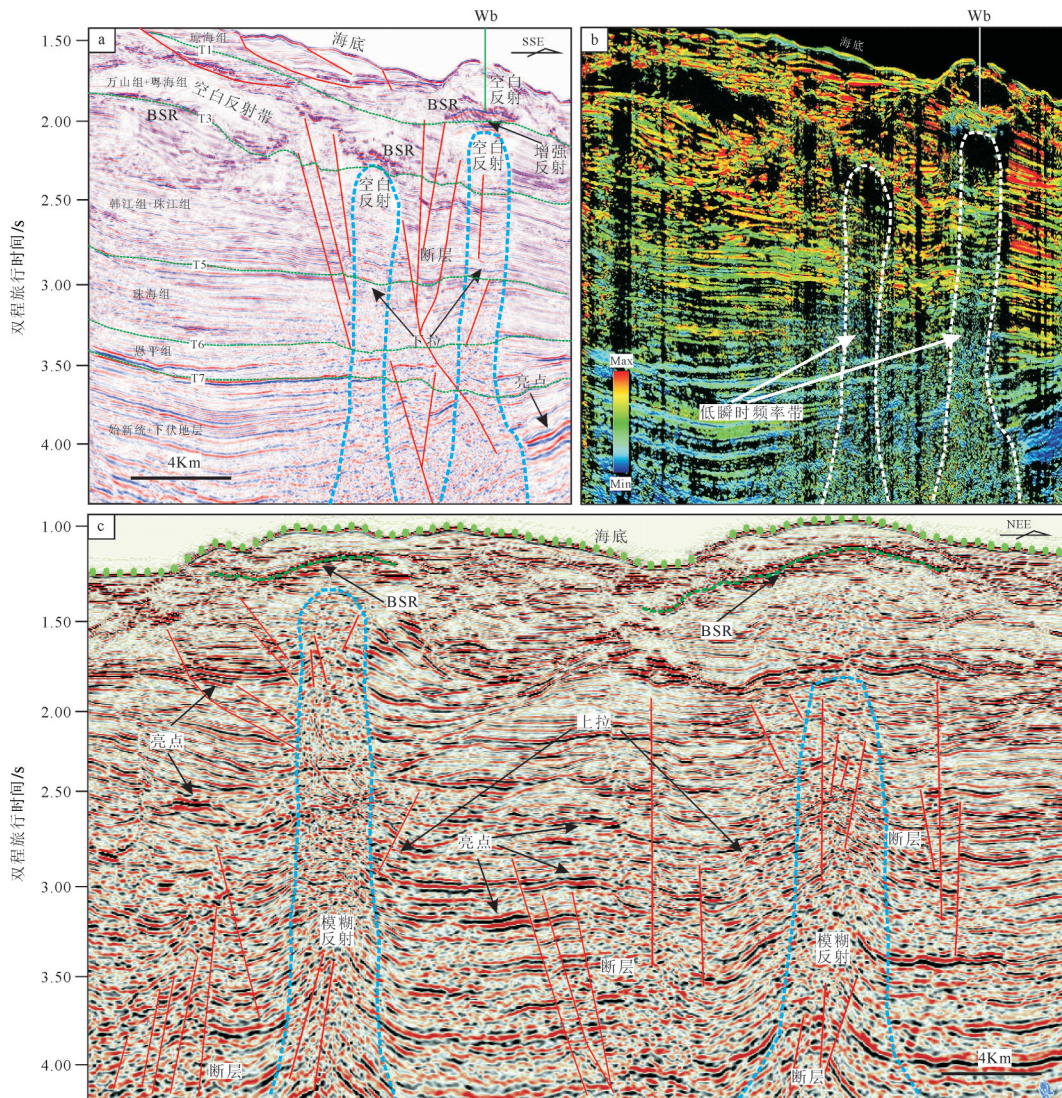


图5 神狐海域GMGS3钻探区高饱和度水合物站位气烟囱(a,b)及泥底辟(c)地震反射特征

Fig.5 Seismic reflection characteristics of gas chimneys (a,b)and mud diapirs(c)developed in high saturation gas hydrate sites in GMGS3 drilling place of Shenhu area

滑塌构造属于白云凹陷大型海底滑塌构造一部分。上新世以来,白云凹陷经历了一次较大规模的海底滑坡,大量上新世和第四纪陆架边缘碎屑物质在重力失稳或水合物分解作用下滑塌堆积在海底(陈泓君等,2014;秦轲等,2014),滑塌一方面形成了初始的滑坡(塌)面,造成滑坡面上下沉积物物性的改变,滑坡面碎屑物质堆积,沉积物疏松,且具有较高的孔渗性,可作为水合物气源横向运移的通道,尤其是生物气可沿滑塌面向上倾方向运移至稳定域内适宜水合物赋存的储层中形成水合物(苏明等,2015;Zhang et al,2017),如过 Wc 和 Wd 站位滑塌面

在地震剖面上表现出沿地层倾向(滑坡方向)强振幅反射,发育的BSR主要就位于滑移面附近(图6),在滑坡面上部稳定域内钻获高饱和度水合物,表明滑塌面构成了气体侧向运移的通道。

5.5 水道砂与海底扇

神狐钻探区主要位于陆坡区中部,坡折带下部,坡度一般为2°~4°,因此该区沉积物对陆架以下切侵蚀作用为主。第四系沉积时期,继承了上新统陆坡—峡谷沉积体系格局,因此其表现为与上新统相似的沉积类型,南北走向的多条大型水道自南西向东北依次发育,单个水道在地震剖面上以“U”型

为主。峡谷内水道的叠置方式主要以侧向有序叠置方式为主,呈单边型,反映了水道由于底流的定向作用使得水道发生明显的侧积作用。不同水道形成各自的天然堤—水下扇沉积体系(Wang et al, 2014; 苏明等,2015)。但受到沉积期海底起伏影响更显著,水下扇被迫分布于不同的低洼部分,形成不连续水下扇沉积。天然堤上的冲蚀沟槽沉积,随着水道—天然堤的发育,也相应发生迁移或垂向加积,天然堤上冲蚀沟槽和下水扇形成不规则沉积形态(图6b,图7)。在水道两侧的边坡以及天然堤前端向深水倾伏部位,由于海底地形较陡,沉积负载应力过大,在第四系还形成了大量的局部滑塌沉积(Wang et al,2014)。水道及下水扇相对粗粒沉积的分布特征,反映了其受水道体系和海底起伏双重作用的影响:水道体系通过水动力条件控制了水道的整体输送能力;

沉积期海底起伏则进一步控制了相对粗粒沉积的具体分布形态,而粗粒的高孔渗连续性砂体构成了水合物气源侧向疏导的特殊通道,对高饱和度水合物运聚成藏可能起到一定作用,且可能导致水合物不均匀分布(Wang et al,2014; 苏明等,2015)。

6 讨论

6.1 不同类型运移疏导系统与水合物气源运聚关系

6.1.1 深大断裂、底辟及气烟囱对深部气源的垂向疏导

GMGS3 航次钻探发现II型水合物,高饱和度地位水合物分解气中含有一定比例的 C_2H_6 、 C_3H_8 等以上重烃,且有随深度增加而增加的趋势(Zhang et al, 2017),表明水合物的气源中含有热成因气的贡献。白云凹陷油气地质勘探表明,凹陷深部的成熟—高熟热解气主要通过不整合面、连续性砂体及沟

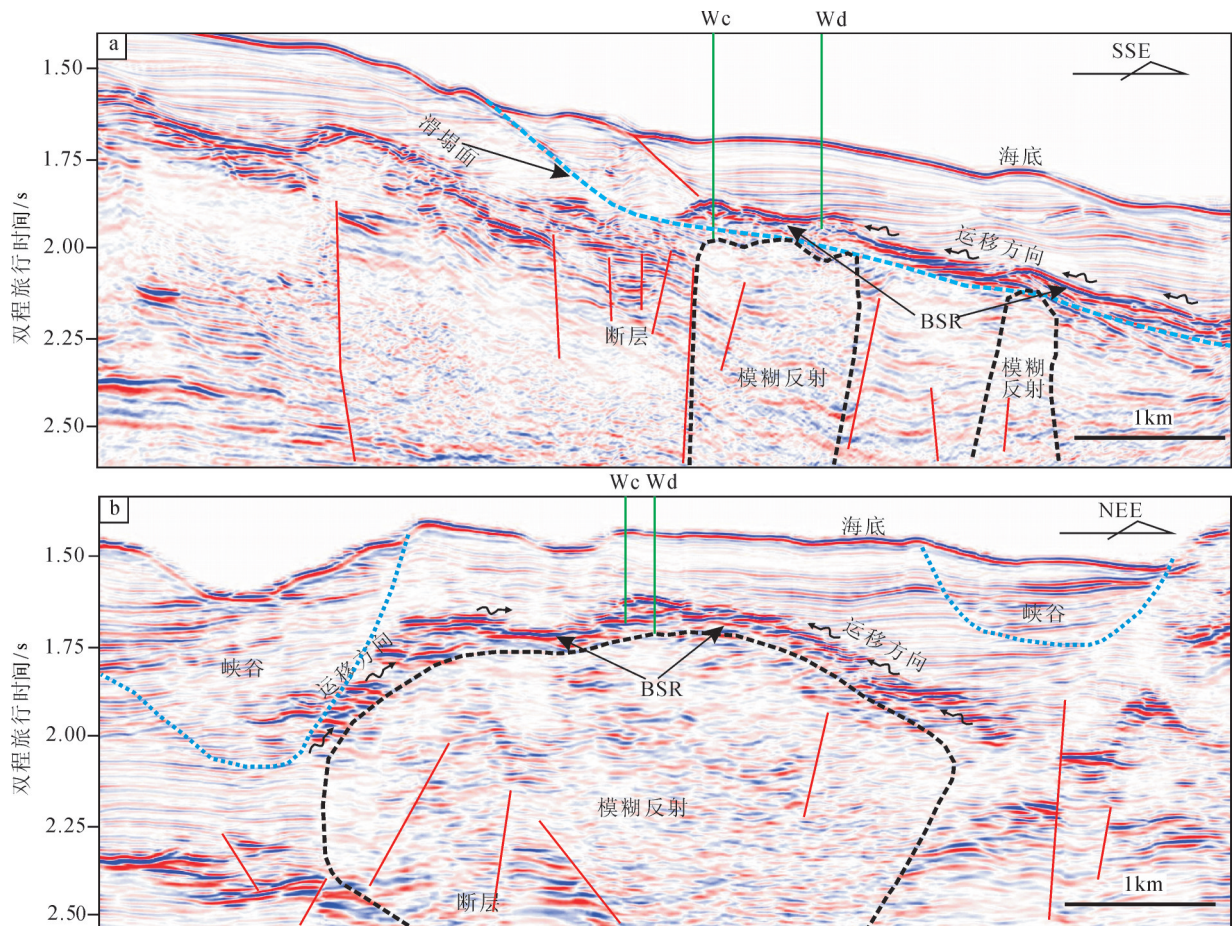


图6 神狐海域 GMGS3 钻探区 Wc 与 Wd 站位天然气侧向运移地震特征

a—过 Wc 和 Wd 站位主测线;b—过 Wc 和 Wd 站位联络测线

Fig.6 Seismic reflection of lateral migrating of natural gas in Wc&Wd drilling sites of GMGS3 drilling place in Shenhu area

a—Crossing the inline of Wc&Wd; b—Crossing the crossline of Wc&Wd

源断层、泥底辟及气烟囱等通道的复合疏导至北部斜坡带及“凹中隆”中成藏的(朱伟林等,2007;施和生等,2010;施和生等,2014),无疑这些纵横交错的通道系统可为神狐海域热成因气的运移疏导提供优良通道条件。

首先,部分发育的沟源深大断裂可能直接切穿古近纪烃源岩,始新世及渐新世烃源岩生成的成熟—高成熟热解气生成后,通过断裂向上运移,一方面,当遇到恩平组及珠海组之间的不整合面或伸入到白云凹陷的连续性砂体时,大部分气体可沿这些通道发生侧向运移,在合适的圈闭和储层中形成常规油气藏;另一方面,部分热解气可继续沿断层向新近纪浅层垂向运移,当进入到高饱和度水合物站位水合物稳定域时,热解气在断层附近被捕获而形成水合物(杨胜雄等,2017)。其次,高饱和度水合物产出站位所发育的泥底辟及气烟囱可作为深部热解气向浅层运移疏导的垂向通道(Wang et al,2014;杨胜雄等,2017;Zhang et al,2017),直接证据为在地震剖面上,泥底辟及气烟囱表现为模糊或杂乱反射带,在模糊带两侧可观察到含气的“亮点”反射,且泥底辟、气烟囱与BSR对应关系良好,在BSR附近通常能形成较典型的V'AMP结构(Zhang et al,2017),充分表明古近纪热解气通过泥底辟及气烟囱垂向通道发生了运移,在BSR下部充注了大量的

气体,部分进入稳定域的气体在合适的温压条件下聚集形成了水合物(图5)。Wa、Wb站位即为气体通过高陡断裂通道或气烟囱运移聚集形成高饱和度水合物矿体,水合物矿体下方及附近高角度断层和气烟囱发育并直通BSR底部,是高饱和度水合物气体运移供给的重要通道(图4,图5)。

6.1.2 不整合面与连续性高孔渗地层侧向疏导

如果在通道附近不具备形成水合物矿体的地质条件,气体会选择物性较好的地层横向运移。横向运移通道一般为不整合面和物性良好的地层,GMGS3钻探区内多数站位存在横向运移形成的水合物矿体,矿体形态与储层物性密切相关,平面上分布范围较大。新近纪不整合面,第四纪海底水道侵蚀充填形成的不整合面及充填的高孔渗连续性砂体及海底滑塌形成的滑塌面构成了浅层气体运移的横向疏导通道(Zhang et al,2017)。GMGS3大部分站位BSR发育位置与滑塌面基本重合,且沿滑塌面表现出连续强振幅反射,表明气体沿滑塌面向地层上倾方向发生了侧向运移,并因温压及储集物性条件适宜而形成了水合物。从过Wd站位地震测线来看,水合物矿体下部断裂特征不明显,矿体所在的强反射特征与地层产状形成明显的切割关系(图6),BSR分布与海底滑塌形成的滑塌面基本重合,说明气体沿滑塌面发生了横向运输,并在滑塌

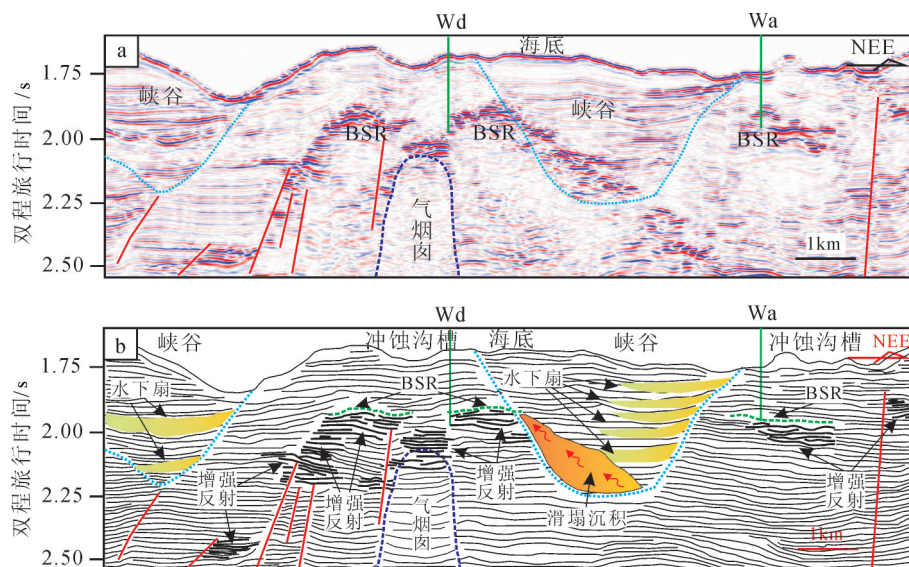


图7 神狐海域GMGS3钻探区海底峡谷沉积地震反射特征及其与高饱和度水合物成藏关系

Fig.7 Seismic reflection characteristics of canyons and their relationship with the migration and accumulation of high saturation gas hydrate in GMGS3 drilling place of Shenhu area

后壁下部聚集形成了高饱和度水合物。

峡谷水道砂及海底扇等高孔渗连续性砂体同样可作为气体侧向运移的通道,神狐海域主体位于陆坡区,峡谷水道侵蚀下切作用较强烈,峡谷水道边坡滑塌及水下扇发育,这些部位往往沉积较粗粒沉积物,且从构造沉积特征看,水道砂及海底扇向白云凹陷中心延伸,当与断层及底辟、气烟囱相匹配时,可作为运移至上新世—第四纪地层中的气体的侧向运移通道,气体通过这些粗粒的高孔渗连续性砂体沿陆坡上倾高部位方向运移疏导,当进入到水合物稳定域即可形成水合物(Wang et al,2014; 苏明等,2015)。实际水合物钻探结果表明,水合物主要分布在钻探区峡谷水道间的脊部、天然堤上冲蚀沟槽的发育区和水下扇中,这些部位的沉积物粒度相对较粗,有利于气体的运移和聚集(图7)。

6.2 气源运移疏导体系对高饱和度水合物目标优选的启示

水合物勘查研究结果表明,神狐海域海底温压条件完全满足水合物成藏的基本条件,且处于白云凹陷富生烃凹陷之中,无论是生物气资源还是热成因气资源,都以为水合物提供气源供给(何家雄等,2013; 梁金强等,2014),但实际钻探结果表明,水合物无论在垂向上还是平面上均具有不均匀分布的特征(杨胜雄等,2017; 郭依群等,2017),高饱和度水合物也仅在局部区域产出。上述研究表明,神狐海域不同类型的气体运移疏导通道发育位置及层位,构造地质特征,不同通道互相匹配及通道与稳定域空间耦合关系等均存在差异,导致该区气体运移并非“铺天盖地”,而是有选择性的通过疏导条件优良和通畅的通道发生运移。高饱和度水合物集中分布于海底峡谷嘴部的脊部位置,该区域临近荔湾气田泄压区,深大断裂及气烟囱等发育,且相对其他站位更靠近富烃凹陷中心,因此其气体运移和供给条件最为优越,而处于海脊中—上游段的部分站位,沟源深大断裂欠发育,泥底辟及气烟囱等也具有差异发育特征,造成不同站位水合物饱和度差异较大。一方面,GMGS3钻探区虽然发育了多种类型的气体运移疏导通道,但不同类型疏导通道对气源的疏导方向和方式存在差异,古近纪热成因天然气及新近纪较深层位的生物气需通过断裂,底辟及气烟囱等通道垂向疏导,为稳定带提供充足气源

供给;而运移至浅层上新世—第四纪沉积物中的气体可以通过不整合面、滑塌断层、高孔渗连续性砂体的横向运移,扩大了气体供给范围,进而扩展了水合物成藏的区域与潜力。另一方面,水道及海底扇砂体的迁移沉积,海底峡谷的侵蚀作用等也会破坏先期形成的水合物,而海底滑塌断层切穿BSR及海底,造成部分气体逃逸至海底中,或底辟伴生断层沟通泥底辟或气烟囱通道促使气体继续运移逸散,均会降低气体饱和度,最终导致水合物饱和度的降低。因此,笔者认为水合物形成和赋存除满足一定的储集条件外,沟通浅层生物气及深部热解气与浅层温压稳定域的天然气运移疏导系统是控制水合物成藏的关键要素,而天然气运移疏导系统与其他成藏要素匹配良好的构造和区域是勘探寻找高饱和度水合物的有利目标,水合物钻探站位选择必须充分分析研究天然气运移疏导系统,以提高钻获高饱和度水合物成功率。

7 结 论

GMGS3钻探区高饱和度水合物产出站位BSR为中—强振幅及中—高连续地震反射,紧邻BSR之下为振幅增强反射体,强反射体下伏游离气体充注显著,表明BSR下部存在气体运移的通道,且深部气体向浅层发生了运移。

沟源断裂、底辟及气烟囱构成了深部热成因气及浅部生物气的垂向运移通道,是高饱和度水合物气源供给的关键;浅部滑塌面、水道砂及海底扇构成的高孔渗连续性砂体为浅层生物气及深部运移而来的部分热成因气横向运移通道,其扩大了气体供给范围,增加了高饱和度水合物矿体横向展布规模。

天然气运移疏导系统与其他成藏要素匹配良好的构造和区域是勘探高饱和度水合物的有利目标,也是水合物钻前站位选择的重要地质依据。

References

- Anderson B, Hancock S, Wilson S, Enger C, Collett T, Boswell R, Hunter R. 2011. Formation pressure testing at the Mount Elbert gas hydrate stratigraphic test well, Alaska North Slope: Operational summary, history matching, and interpretations[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 28(2): 478–492.
- Andresen K J. 2012. Fluid flow features in hydrocarbon plumbing systems: What do they tell us about the basin evolution? [J].

- Marine Geology, 332–334: 89–108.
- Chen Hongjun, Huang Lei, Peng Xuechao, Wu Jiaoqi, Li Wencheng, Wang Yingming. 2012. Discussion of characteristics and formation of landslide zones in the gas hydrate survey area of northwest continental slope, the South China Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 31(5):18–25(in Chinese with English abstract).
- Collett T S, Johnson A H, Knapp C C, Boswell R. 2009. Natural gas hydrate: A review [J]. American Association of Petroleum Geologists, Memoir, 89:146–219.
- Crutchley G J, Pecher I A, Gorman A R, Henrys S A, Greinert J. 2010. Seismic imaging of gas conduits beneath seafloor seep sites in a shallow marine gas hydrate province, Hikurangi Margin, New Zealand [J]. Marine Geology, 272(1): 114–126.
- Dewangan P, Ramprasad T, Ramana M V, Mazumdar A, Desa M, Badesab F K. 2010. Seabed morphology and gas venting features in the continental slope region of Krishna–Godavari basin, Bay of Bengal: Implications in gas–hydrate exploration [J]. Marine and Petroleum Geology, 27(7): 1628–1641.
- Gong Yuehua, Yang Shengxiong, Wang Hongbin, Liang Jinqiang, Guo Yiqun, Wu Shiguo, Liu Guanghu. 2009. Gas hydrate reservoir characteristics of Shenhu Area, northern slope of the South China Sea [J]. Geoscience, 23(2):210–216 (in Chinese with English abstract).
- Greinert J, Lewis K B, Bialas J, Pecher I A, Rowden A, Bowden D A, Batist M D, Linke P. 2010. Methane seepage along the Hikurangi Margin, New Zealand: Overview of studies in 2006 and 2007 and new evidence from visual, bathymetric and hydroacoustic investigations [J]. Marine Geology, 26:1304–1319.
- Guo Yiqun, Yang Shengxiong, Liang Jinqiang, Lu Jing'an, Lin Lin, Kuang Zenggui. 2017. Characteristics of high gas hydrate distribution in the Shenhu area, northern slope of South China Sea[J]. Earth Science Frontiers, 24(4): 15–23 (in Chinese with English abstract).
- He Jiaxiong, Chen Shenghong, Ma Wenhong, Gong Xiaofeng. 2012. The evolution, migration and accumulation regularity of oil and gas in Zhujiangkou basin, northeastern South China Sea[J]. Geology in China, 39(1):106–118(in Chinese with English abstract).
- He Jiaxiong, Lu Zhenquan, Su Pibo, Zhang Wei, Feng Junxi. 2016. Source supply system and reservoir forming model prediction of natural gas hydrate in the deep water area of the northern South China Sea [J]. Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition), 38(6):8–24 (in Chinese with English abstract).
- He Jiaxiong, Yan Wen, Zhu Youhai, Zhang Wei, Gong Faxiong, Liu Shilin, Zhang Jingru, Gong Xiaofeng. 2013. Bio–genetic and sub–biogenetic gas resource potential and genetic types of natural gas hydrates in the northern marginal basins of South China Sea[J]. Natural Gas industry, 33(6), 121–134 (in Chinese with English abstract).
- Heggland R. 1997. Detection of gas migration from a deep source by the use of exploration 3D seismic data [J]. Marine Geology, 137: 41–47.
- Horozal S, Lee G H, Yi B Y, Yoo D G, Park K P, Lee H Y, Kim W, Kim H J, Lee K. 2009. Seismic indicators of gas hydrate and associated gas in the Ulleung Basin, East Sea (Japan Sea) and implications of heat flows derived from depths of the bottom– simulating reflector [J]. Marine Geology, 258: 126–138.
- Hustoft S, Bünz S, Mienert J. 2010. Three– dimensional seismic analysis of the morphology and spatial distribution of chimneys beneath the Nyegga pockmark field, offshore mid– Norway [J]. Basin Research, 22: 465–480.
- Ito T, Komatsu Y, Fujii T, Suzuki K, Egawa K, Nakatsuka Y, Konno Y, Yoneda J, Jin Y, Kida M, Nagao J, Mingagawa H. 2015. Lithological features of hydrate– bearing sediments and their relationship with gas hydrate saturation in the eastern Nankai Trough, Japan [J]. Marine and Petroleum Geology, 66: 368–378.
- Liang Jinqiang, Wang Hongbin, Su Xin, Fu Shaoying, Wang Lifeng, Guo Yiqun, Chen Fang, Shang Jiuqing. 2014. Natural gas hydrate formation conditions and the associated controlling factors in the northern slope of the South China Sea [J]. Natural Gas Industry, 34 (7): 128–135(in Chinese with English abstract).
- Løseth H, Gading M, Wensaas L. 2009. Hydrocarbon leakage interpreted on seismic data [J]. Marine Geology, 26:1304–1319.
- Matsumoto R, Hiromatsu M, Sato M. 2011. Fluid flow and evolution of gas hydrate mounds of Joetsu basin, eastern margin of Japan sea: constraints from high– resolution geophysical survey by auv[C]. Proceedings of the 7th International conference on gas hydrate, Edinburgh: 17–21.
- Meldahl P, Heggland R, Bril B, Groot P D. 2001. Identifying faults and gas chimneys using multiattributes and neural networks [J]. The Leading Edge., 20(5), 474–482.
- Milkov A V. 2000. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates [J]. Marine Geology, 167(1):29–42.
- Pang Xiong, Chen Changming, Peng Dajun, Zhou Di, Shao Lei, He Ming, Liu Baojun. 2008. Basic geology of Baiyun deep water area in the northern South China Sea [J]. China Offshore Oil Gas, 20 (4): 5–12(in Chinese with English abstract).
- Parnell J, Schwab A. 2003. Seismic evidence for the distribution and migration of fluid in sedimentary basin [J]. Geofluids, 3:213–217.
- Qiao Shaohua, Su Ming, Yang Rui, Su Pibo, Kuang Zenggui, Sha Zhibin, Liang Jinqiang, Lu Hailong, Xu Wenyue, Wu Nengyou. 2013. Migration and Accumulation System: The key control factors of heterogeneous distribution of gas hydrate [J]. Advances in New and Renewable Energy, 1 (3):245–256 (in Chinese with English abstract).
- Qin Ke, Sun Yunbao, Zhao Tiehu, Li Panfeng, Shan Rui, Mei Sai. 2015. Seismic response and genetic mechanism of the submarine landslides in Shenhu Area, South China Sea [J]. Marine Geology &

- Quaternary Geology,35(5):69–76 (in Chinese with English abstract).
- Scholl D, Barth G, Childs J. 2009. Why hydrate–linked velocity–anomaly structures are common in the Bering Sea basin: A hypothesis[C]//Collett T, Johnson A, Knapp C, Boswell R(eds.). Natural gas hydrate–Energy Resource Potential and Associated Geologic Hazards[J]. AAPG Memoir 89: 308–323.
- Shi Hesheng, He Min, Zhang Lili, Yu Qiuhua, Pang Xiong, Zhong Zhihong, Liu Lihua.2014. Hydrocarbon geology, accumulation pattern and the next exploration strategy in the eastern Pearl River Mouth Basin [J]. China Offshore Oil and Gas,26(3):11–20 (in Chinese with English abstract).
- Shi Hesheng, Liu Baojun, Yan Chengzhi, Zhu Ming, Pang Xiong, Qin Chenggang. 2010. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration potential in Baiyun–Liwan deepwater area, Pearl River Mouth Basin[J].China Offshore Oil and Gas,22(6):369–374 (in Chinese with English abstract).
- Shi Wanzhong, Song Zhifeng, Wang Xiaolong, Kong Min. 2009. Diapir Structure and Its Origin in the Baiyun Depression, Pearl River Mouth Basin, China[J].Earth Science—Journal of China University of Geosciences,34 (5):778–784 (in Chinese with English abstract).
- Su M, Sha Z B, Zhang C M, Wang H B, Wu N Y, Yang R, Liang J Q, Qiao S H, Cong X R, Liu J. 2017. Types, Characteristics and significances of migrating pathways of gas–bearing fluids in the shenhu area, Northern Continental Slope of the South China Sea[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 91(1):219–231.
- Su M, Yang R, Wang H, Sha Z, Liang J, Wu N, Qiao S, Cong X. 2016. Gas hydrates distribution in the Shenhu Area, northern South China Sea: comparisons between the eight drilling sites with gas hydrate petroleum system [J]. Geologicaacta, 14(2):79–100.
- Su Ming, Sha Zhibin, Qiao Shaohua, Yang Rui, Wu Nengyou, Cong Xiaorong, Liu Jie. 2015. Sedimentary evolution since Quaternary in the Shenhu hydrate drilling area, northern South China Sea [J]. Chinese Journal of Geophysics,58(8):2975–2985 (in Chinese with English abstract).
- Su Ming, Yang Rui, Wu Nengyou, Wang Hongbin, Liang Jinqiang, Sha Zhibin, Cong Xiaorong, Qiao Shaohua. 2014. Structural characteristics in the Shenhu Area, northern continental slope of South China Sea, and their influence on gas hydrate[J]. Acta Geologica Sinica, 88(3): 318–326 (in Chinese with English abstract).
- Su Pibo, Liang Jinqiang, Zhang Zijian, Sha Zhibin. 2017. Analysis on bright spots and dim out of seismic section for diffusion–type hydrate in Shenhu area [J]. Earth Science Frontiers, 24(4): 51–56 (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 deepwater basins of the northern South China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 57(12):4052–4062(in Chinese with English abstract).
- Tang Xiaoyin, Hu Shengbiao, Zhang Gongcheng, Yang Shuchun, Shen Huailei, Rao Song, Li Weiwei. 2014. Characteristics of surface heat flow in the Pearl River Mouth basin and its relationship with thermal lithosphere thickness[J]. Chinese Journal of Geophysics,57 (6):1857–1867(in Chinese with English abstract).
- Wang Jiahao, Pang Xiong, Wang Cunwu, Lian Shiyong. 2006. Discovery and recognition of the central diapiric zone in baiyun depression, Pearl River Mouth Basin [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences,31 (2):209–213 (in Chinese with English abstract).
- Wang X J, Collett T S, Lee M W, Yang S X, Guo Y Q, Wu S G. 2014. Geological controls on the occurrence of gas hydrate from core, downhole log, and seismic data in the Shenhu area, South China Sea [J]. Marine geology, 357:272–292.
- Wu Nengyou, Yang Shengxiong, Wang Hongbin, 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 (in Chinese with English abstract).
- Wu Shiguo, Gong 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(3):433–440 (in Chinese with English abstract).
- Yang J X, Wang X J, Jin J P, Li Y P, Li J, Qian J, Shi H S.2017.The role of fluid migration in the occurrence of shallow gas and gas hydrates in the south of the Pearl River Mouth Basin, South China Sea[J]. Interpretation,5(3):SM1–SM11.
- Yang Rui, Yan Pin, Wu Nengyou, Qiao Shaohua, Su Ming, Liang Jinqiang, Guo Pan, Huo Yuanyuan. 2014. Seismic reflecting characteristics of fluid and tis effect on gas hydrate distribution in the Shenhu Area, South China Sea[J].Journal of marine Sciences, 2014, 32(4): 19–26(in Chinese with English abstract).
- Yang S X, Zang M, Liang J Q, Lu J A, Zhang Z J, Holland M, Schultheiss P, Fu S Y, Sha Z B,GMGS3 Science Team.2015. Preliminary results of China’s third gas hydrate drilling expedition: A critical step from discovery to development in the South China Sea[J]. Fire in the Ice, 15(12): 1–5.
- Yang Shengxiong, Liang Jinqiang, Lu Jing’an, Qu Changwei, Liu Bo. 2017. New understandings on characteristics and controlling factors of gas hydrate reservoirs in Shenhu area on northern slope of South China Sea. Earth Science Frontiers, 24(4): 1–14 (in Chinese with English abstract).
- Yoo D G, Kang, N K, Yi B B, Kim G Y, Ryu B J, Lee k, Lee G H, Riedel M. 2013. Occurrence and seismic characteristics of gas hydrate in the Ullung Basin, East Sea [J]. Marine and Petroleum

- Geology, 47:236–247.
- Zhang Gongcheng, Yang Haichang, Chen Ying, Ji Mo, Wang Ke, Yang Dongsheng, Han Yinxue, Sun Yuhao. 2014. The Baiyun Sag: A giant rich gas-generation sag in the deepwater area of the Pearl River Mouth Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 34(11):11–25 (in Chinese with English abstract).
- Zhang W, Liang J Q, Lu J A, Wei J G, Su P B, Fang Y X, Guo Y Q, Yang S X, Zhang G X. 2017. Accumulation features and mechanisms of high saturation natural gas hydrate in Shenhu Area, northern South China Sea [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 44(5):708–719.
- Zhang Wei, He Jiaxiong, Lu Zhenquan, Su Pibo, Li Xiaotang, Liu Zhijie. 2015. Preliminary study of the relationship between the suspected mud diapir and natural gas hydrate in the Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea [J]. *Natural Gas Geosciences*, 26(11):2185–2197 (in Chinese with English abstract).
- Zhong Zhihong, Shi Hesheng, Zhuming, Pangxiong, Heming, Zhao Zhongxian, Liu Siqin, Wang Fei. 2014. A discussion on the tectonic-stratigraphic framework and its origin mechanism in Pearl River Mouth Basin [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 26(5): 20–29 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Weilin, Zhang Gongcheng, Yang Shaokun. 2007. Gas Geology of Continental Margin in Northern South China Sea [M]. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 陈泓君, 黄磊, 彭学超, 吴蛟歧, 李文成, 王英民. 2012. 南海西北陆坡天然气水合物调查区滑坡带特征及成因探讨 [J]. *热带海洋学报*, 31(5):18–25.
- 龚跃华, 杨胜雄, 王宏斌, 梁金强, 郭依群, 吴时国, 刘广虎. 2009. 南海北部神狐海域天然气水合物成藏特征 [J]. *现代地质*, 23(2): 210–216.
- 郭依群, 杨胜雄, 梁金强, 陆敬安, 林霖, 匡增桂. 2017. 南海北部神狐海域高饱和度天然气水合物分布特征 [J]. *地学前缘*, 24(4): 15–23.
- 何家雄, 陈胜红, 马文宏, 龚晓峰. 2012. 南海东北部珠江口盆地成生演化与油气运聚成藏规律 [J]. *中国地质*, 39(1):106–118.
- 何家雄, 卢振权, 苏丕波, 张伟, 冯俊熙. 2016. 南海北部天然气水合物气源系统与成藏模式 [J]. *西南石油大学学报*, 38(6):8–24.
- 何家雄, 颜文, 祝有海, 张伟, 龚发雄, 刘士林, 张景茹, 龚晓峰. 2013. 南海北部边缘盆地生物气-亚生物气资源与天然气水合物成矿成藏 [J]. *天然气工业*, 33(6), 121–134.
- 梁金强, 王宏斌, 苏新, 付少英, 王力峰, 郭依群, 陈芳, 尚久靖. 2014. 南海北部陆坡天然气水合物成藏条件及其控制因素 [J]. *天然气工业* 34(7): 128–135.
- 庞雄, 陈长民, 彭大钧, 周蒂, 邵磊, 何敏, 柳保军. 2008. 南海北部白云深水区之基础地质 [J]. *中国海上油气*, 20(4): 5–12.
- 乔少华, 苏明, 杨睿, 苏丕波, 匡增桂, 沙志彬, 梁金强, 卢海龙, 徐文跃, 吴能友. 2013. 运聚体系一天然气水合物不均匀性分布的关键控制因素初探 [J]. *新能源进展*, 1(3): 245–256.
- 秦轲, 孙云宝, 赵铁虎, 李攀峰, 单瑞, 梅塞. 2015. 南海北部陆坡神狐海域海底滑坡地球物理响应特征及其与流体活动相关性 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 35(5): 69–76.
- 施和生, 何敏, 张丽丽, 余秋华, 庞雄, 钟志洪, 刘丽华. 2014. 珠江口盆地(东部)油气地质特征、成藏规律及下一步勘探策略 [J]. *中国海上油气*, 26(3):11–20.
- 施和生, 柳保军, 颜承志, 朱明, 庞雄, 秦成岗. 2010. 珠江口盆地白云一荔湾深水区油气成藏条件与勘探潜力 [J]. *中国海上油气*, 22(6): 369–374.
- 石万忠, 宋志峰, 王晓龙, 孔敏. 2009. 珠江口盆地白云凹陷底辟构造类型及其成因 [J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 34(5):778–784.
- 苏明, 沙志彬, 乔少华, 杨睿, 吴能友, 丛晓荣, 刘杰. 2015. 南海北部神狐海域天然气水合物钻探区第四纪以来的沉积演化特征 [J]. *地球物理学报*, 58(8): 2975–2985.
- 苏明, 杨睿, 吴能友, 王宏斌, 梁金强, 沙志彬, 丛晓荣, 乔少华. 2014. 南海北部陆坡区神狐海域构造特征及对水合物的控制 [J]. *地质学报*, 88(3): 318–326.
- 苏丕波, 梁金强, 张子健, 沙志彬. 2017. 神狐海域扩散型水合物在地震反射剖面上的“亮点”与“暗点”分析 [J]. *地学前缘*, 24(4): 51–56.
- 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): 4052–4062.
- 唐晓音, 胡圣标, 张功成, 杨树春, 沈怀磊, 饶松, 李卫卫. 2014. 珠江口盆地大地热流特征及其与热岩石圈厚度的关系 [J]. *地球物理学报*, 57(6): 1857–1867.
- 王家豪, 庞雄, 王存武, 连世勇. 2006. 珠江口盆地白云凹陷中央底辟带的发现及识别 [J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2006, 31(2): 209–213.
- 吴能友, 杨胜雄, 王宏斌, 梁金强, 龚跃华, 卢振权, 郭黛黛, 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(3):433–440.
- 杨睿, 阎贫, 吴能友, 乔少华, 苏明, 梁金强, 郭攀, 霍元媛. 2014. 南海神狐水合物钻探区不同形态流体地震反射特征与水合物产出的关系 [J]. *海洋学研究*, 32(4):19–26.
- 杨胜雄, 梁金强, 陆敬安, 曲长伟, 刘博. 2017. 南海北部神狐海域天然气水合物成藏特征及主控因素新认识 [J]. *地学前缘*, 24(4): 1–14.
- 张功成, 杨海长, 陈莹, 纪沫, 王柯, 杨东升, 韩银学, 孙钰皓. 2014. 白云凹陷—珠江口盆地深水区一个巨大的富生气凹陷 [J]. *天然气工业*, 34(11):11–25.
- 张伟, 何家雄, 卢振权, 苏丕波, 李晚唐, 刘志杰. 2015. 琼东南盆地疑似泥底辟与天然气水合物成矿成藏关系初探 [J]. *天然气地球科学*, 26(11):2185–2197.
- 钟志洪, 施和生, 朱明, 庞雄, 何敏, 赵中贤, 刘思青, 王菲. 2014. 珠江口盆地构造—地层格架及成因机制探讨 [J]. *中国海上油气*, 26(5): 20–29.
- 朱伟林, 张功成, 杨少坤. 2007. 南海北部大陆边缘盆地天然气地质. 北京:石油工业出版社.