

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018072701

琼东南盆地华光凹陷天然气水合物成藏条件及有利区带预测

刘杰^{1,2}, 杨睿³, 张金华⁴, 魏伟⁴, 邬黛黛^{1,2}

1. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640

2. 中国科学院南海生态环境工程创新研究院, 广州 510640

3. 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071

4. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 廊坊 065007

摘要:分析了琼东南盆地华光凹陷天然气水合物稳定条件、气源供给来源、运移通道类型等成藏条件,指出了研究区天然气水合物的勘探方向并建立了天然气水合物的成藏模式。华光凹陷浅部沉积层的温度、压力条件满足天然气水合物形成的要求,生物成因甲烷水合物稳定带最大厚度约320m,热成因天然气水合物稳定带最大厚度约为345m。气源岩主要分布在凹陷西部地区的断陷期层序中,具有早、晚两期生烃且以晚期为主的特征,有利于热解成因气在水合物稳定带内的聚集成藏。晚中新世以来快速沉降的巨厚半深海细粒沉积物为生物成因气的形成提供了物质基础。泥底辟与其伴生断裂及多边形断层等构成了天然气水合物成藏的主要流体运移体系。华光凹陷靠近①号断裂的西部地区是有利的勘探方向。晚中新世以来的快速沉降使得渐新世成熟—过熟烃源岩大量生气或裂解,而且由于欠压实作用形成的地层超压为含气流体的运移提供了强大的动力。热解天然气和生物气沿着泥底辟和多边形断层等构成的输导网络向上垂向运移至水合物稳定带,形成天然气水合物,其中深水浊流水道是寻找高饱和度水合物的有利目标体。

关键词:天然气水合物;流体输导;浊流水道;华光凹陷;琼东南盆地

中图分类号:P618.1 **文献标识码:**A

Gas hydrate accumulation conditions in the Huaguang Depression of Qiongdongnan Basin and prediction of favorable zones

LIU Jie^{1,2}, YANG Rui³, ZHANG Jinghua⁴, WEI Wei⁴, WU Daidai^{1,2}

1. Key Laboratory of Gas Hydrate, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Guangzhou 510640, China

2. Institution of South China Sea Ecology and Environmental Engineering, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

3. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China

4. Research Institute of Petroleum Exploration and Development- Langfang, Langfang 065007, China

Abstract: The temperature and pressure conditions of the shallow deposits in the Huaguang Depression meet well the requirements for natural gas hydrate accumulation. There the maximum thickness of the biogenic methane hydrate stable zone is about 320m, while the maximum thickness of the thermogenic gas hydrate stable zone is about 345m. Gas source rocks occur mainly in the rifting-stage sequence in the western part of the Huaguang Depression, in which there are two stages of hydrocarbon generation, with the later one dominating. It is favorable for the thermogenic natural gas to accumulate in the hydrate stability zone. Since Late Miocene, the rapid deposition of mudstone provided sufficient organic matters for the formation of biogenic gas. Mud diapirs, associated faults and polygonal faults constitute the main fluid migration system for natural gas hydrate accumulation. The western area close to the fault No. 1 is a favorable exploration target. The rapid subsidence since Late Miocene made the Oligocene hydrocarbon source rocks possible to produce a large amount of natural gas, and the overpressure formed by undercompaction provided a powerful driving force for the migration of gas bearing fluid. Thus the thermogenic and biogenic natural gas migrated upwards along mud diapirs and polygon faults to the hydrate stable zone, and eventually formed gas hydrate deposits there. The deep water turbidite channel is doubtlessly a favorable target for exploration.

资助项目:中国科学院天然气水合物重点实验室基金(Y807je1001);广州市珠江科技新星项目(201710010198);“天然气水合物资源评价、开采方法及安全保障技术研究”(2015A-4813);“南海水合物成藏条件对比和甲烷渗漏预警研究”(ISEE2018YB03)

作者简介:刘杰(1986—),男,硕士,助理研究员,从事海域天然气水合物成藏地质条件分析,E-mail: liujie1@ms.giec.ac.cn

收稿日期:2018-07-27;**改回日期:**2018-08-16. 周立君编辑

tion of highly saturated hydrate.

Key words: gas hydrate; fluid transport; turbidite channel; Huaguang Depression; Qiongdongnan Basin

自 2007 年在珠江口盆地神狐海域钻探发现天然气水合物以来,南海北部深水区的水合物勘探不断取得重大发现和进展^[1-3]。琼东南盆地是我国重要的油气资源产区,其深水区广泛存在指示天然气水合物发育的地质、地球物理和地球化学标志,被认为蕴藏着丰富的天然气水合物资源^[4-6]。2017 年 5 月神狐海域天然气水合物成功试采后,琼东南盆地深水区再次成为天然气水合物勘探的热点研究区之一^[7-10]。

前人从水合物的地震反射特征^[11]、气体来源^[12]、孔隙水地球化学特征^[13]和流体输导与逸散体系^[14-16]等方面,对琼东南盆地深水区水合物成藏条件进行了研究。地震反射资料显示西沙海域沉积层中发育典型的似海底反射(BSRs),且叠前地震道集上 BSRs 下伏的游离气层具有三类振幅随偏移距的变化(AVO)响应特征^[11]。琼东南盆地沉积物酸解烃测试结果和高异常段的同位素分析表明:琼东南盆地气态烃甲烷以热解成因为主,部分高值区域可能混有过成熟气或煤成气。深部热解气能够为天然气水合物的形成提供气体来源^[12]。同时,西沙西南海底麻坑内柱样的地球化学分析发现了指示水合物分解的关键证据:孔隙水 Cl^- 浓度降低,伴随 $\delta^{18}\text{O}$ 值的升高,推断西沙西南麻坑区具有良好的水合物勘探前景^[13]。琼东南盆地深水区的中新世—上新世地层中发育多边形断层,多边形断层、管状和底辟构造作为琼东南盆地裂后热沉降阶段的泄压通道,使大量流体近似垂直向上运移,为天然气水合物形成提供了充足气源^[14]。另外,位于琼东南盆地南部以及中建南盆地区域的大规模麻坑群指示了研究区内存在活跃的流体运移和渗漏^[15,16]。

然而,已有的研究主要侧重于天然气水合物成藏条件的单个因素,缺乏对水合物成藏条件的系统性研究。本文以琼东南盆地西南深水区为例,采用天然气水合物成藏系统的思路,从气源供给来源、运聚通道类型、地球物理指示等方面对研究区的天然气水合物成藏前景进行分析,最后指出有利勘探区带和目标体。

1 区域地质背景

华光凹陷位于琼东南盆地南部坳陷带,西邻莺歌海盆地,北靠陵南低凸起,南部和东部分别是广乐

隆起区和西沙隆起区。研究区主要位于华光凹陷和西沙群岛的西部地区,海底地貌变化较大,受广乐隆起和西沙隆起古地貌的影响,西南和东北方向海底地势较高(图 1a)。华光凹陷区域上构造分带为西部洼陷、华西断垒带、东部洼陷、南部斜坡区和东部凸起区。其中西部洼陷以一条北东向断裂和一条北东东向断裂为界;华西断垒带受两条北东向大断裂分割控制形成;东部洼陷的内部发育了若干条北东向小断裂,形成多个断鼻构造;南部斜坡带以一条北东向大断裂和一条北西向断裂与东部洼陷相邻(图 1b)^[17]。华光凹陷构造演化可划分为 3 个阶段:古新世—早渐新世早期裂陷阶段、晚渐新世持续裂陷阶段和拗陷阶段。古新世—早渐新世早期裂陷阶段发育基底卷入正断层;晚渐新世持续裂陷阶段发育盖层滑脱正断层;拗陷阶段断层活动弱,发育小规模的正断层和多边形断层^[18]。华光凹陷拗陷期充填下中新统三亚组、中中新统梅山组、上中新统黄流组、上新统莺歌海组和第四系乐东组,为一套厚的半深海—深海相碎屑夹碳酸盐岩沉积(图 1c)。地层总体呈由西北向东南逐渐减薄的趋势。

2 天然气水合物稳定条件

天然气水合物是在高压低温环境下主要由甲烷等低分子量气体与水分子结合形成的固态物质。天然气水合物的形成受到地温梯度、孔隙压力、气体组分及孔隙水盐度等物理-化学条件的影响。琼东南盆地南部深水区热流值为 $70 \sim 80 \text{ mW/m}^2$,平均地温梯度约为 $38 \sim 45 \text{ }^\circ\text{C/km}$,为中等地温梯度^[19,20],而神狐海域 2007 年钻探的 5 个站位温度原位测量的地温梯度为 $45 \sim 67.7 \text{ }^\circ\text{C/km}$ ^[21]。适宜的地温梯度,为水合物形成创造了非常有利的物理条件。华光凹陷水深为 $400 \sim 1500 \text{ m}$,绝大多数地区超过 600 m ,海底温度约为 $2 \sim 5 \text{ }^\circ\text{C}$,海底压力为 $6 \sim 15 \text{ MPa}$ 。由于天然气水合物一般形成于海底之下 1000 m 以浅的地层中,因此华光凹陷深部存在的异常高孔隙流体压力带对水合物的相平衡没有直接的影响。位于华光凹陷北部的崖 13 气田 CH_4 含量约为 85% ,非烃类气体 CO_2 含量为 $8.73\% \sim 11.5\%$, N_2 含量较低。采用该气体组分,地温梯度取 $40 \text{ }^\circ\text{C/km}$,应用 CSMHYD 程序计算的热成因和生物成因天然气水合物热力学相平衡表明:生物成因甲烷

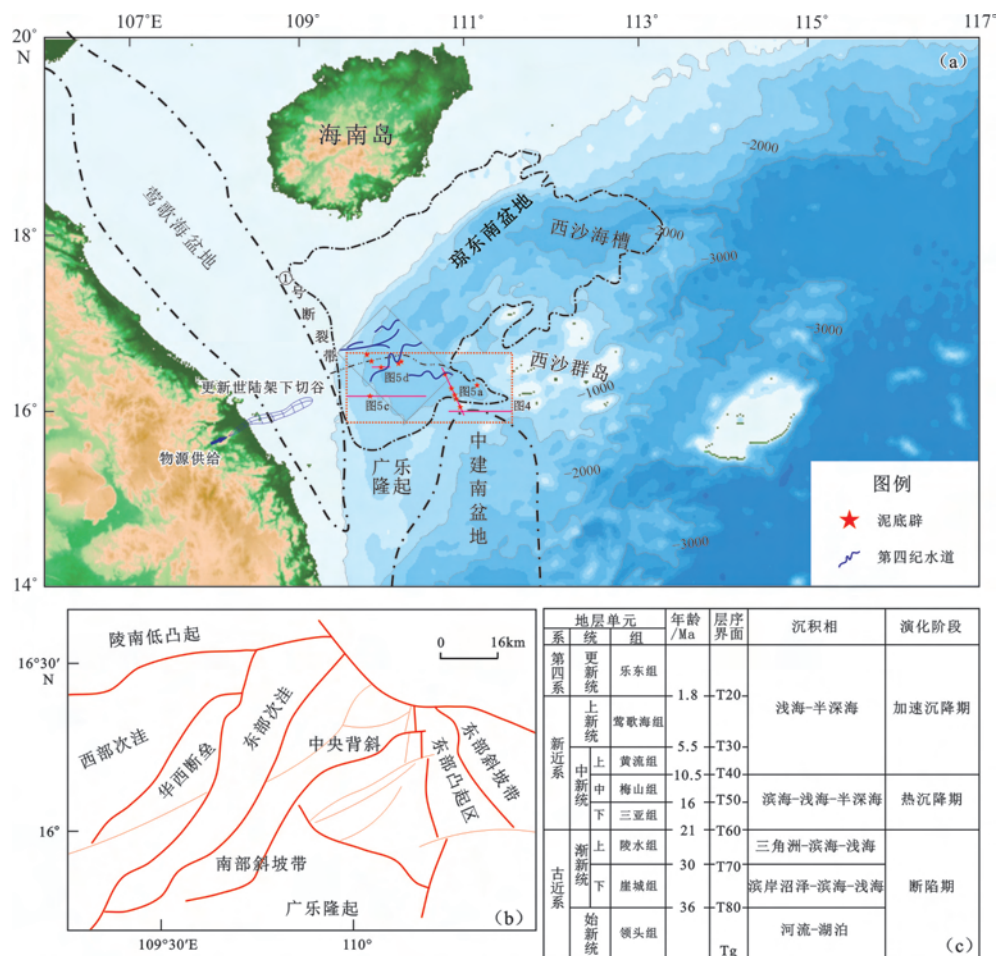


图1 琼东南盆地(a)和研究区(b)的位置图及琼东南盆地地层综合柱状图(c)(据文献[17]、[18]修改)

Fig.1 The locations of the Qiongdongnan Basin and the studying area(a), tectonic units of the Huaguang Depression(b) (modified from Cai et al., 2015)^[17] and integrated stratigraphic column for the Qiongdongnan Basin(c) (modified from Yang et al., 2012)^[18]

水合物分布于水深约大于 600m 的海底, 稳定带最大厚度约 320m; 热成因天然气水合物分布于水深约大于 550m 的海区, 稳定带最大厚度约 345m。因此, 华光凹陷具备水合物形成并富集的稳定条件。

3 天然气水合物的气源条件

形成天然气水合物的气源主要包括热分解成因气和微生物成因气。琼东南盆地华光凹陷发育始新统湖相、渐新统崖城组海陆过渡相-半封闭浅海相和上新统一第四纪半深海-深海相 3 套有利的泥质烃源岩。前二者为成熟烃源岩, 可以为天然气水合物的形成提供热解成因气, 后者为生物气源岩。

琼东南盆地深水区始新统湖相、渐新统崖城组海陆过渡相-半封闭浅海相两套主力烃源岩的规模大, 热演化程度高, 生烃潜力巨大。有机碳(Ro)的热演化分析表明: 这两套高成熟的主力烃源岩, 生烃

门限为 3800~4200m。崖城组沉积中心位于凹陷的西北部, 地层最厚 2800m, 洼陷区厚度为 1000~1800m, 厚度自西北向东南逐渐变薄, 其中崖城组二段的烃源岩最厚可达 450m, 分布范围广, 且大部分已经进入主生气阶段^[22](图 2)。沉积物酸解烃测试和同位素分析显示凹陷内海底浅表层检测到的气态烃甲烷以热解成因为主, 部分高值区域可能混有过成熟气或煤成气^[12]。这表明热解成因气完全有可能运移至浅层的水合物稳定带, 并形成水合物。盆地模拟表明: 琼东南盆地烃源岩(古近系始新统湖相泥岩-渐新统崖城组海陆过渡相煤系地层)第 1 期生排烃高峰在陵水-三亚期, 第 2 期生排烃高峰在莺歌海期至今^[23]。第 2 期生排烃高峰时, 华光凹陷整体已经处于半深海-深海环境, 大部分区域满足水合物形成的温度和压力条件。可以说“圈闭”的形成与深层主力烃源岩生排烃史匹配关系较好, 有利于热解成因气在水合物稳定带内的聚集成藏。

微生物成因气是由多种(微)生物化学作用所形成的天然气,气体成分以甲烷为主(通常含量大于 98%)。生物气的生成上限温度为 80~85℃,主产气带温度为 25~65℃,主生气阶段埋藏深度位于 550~2000m^[24,25]。琼东南盆地经历了海陆过渡→滨浅海→浅海→半深海的沉积环境演变过程;大致从渐新世起逐渐接受海侵,中新世晚期至上新世早期出现半深海环境。琼东南盆地西南部从中新世就开始进入深水沉积环境。来自越南隆起和海南岛双物源供给使得华光凹陷上新统一第四纪快速沉积了较厚的泥岩,这为生物气的形成提供了充足的物质基础^[26,27]。华光凹陷上新统一第四纪海相泥岩埋藏较浅,热力作用相对较弱,处于生物化学作用带内^[25]。表层沉积物的有机碳含量(TOC)为 0.8%~1.5%^[28],高于一般水合物富集区沉积物中的总有机碳含量(通常高于 0.5%)^[29],具有较好的生物气生烃潜力,是形成水合物的主要生物气来源。

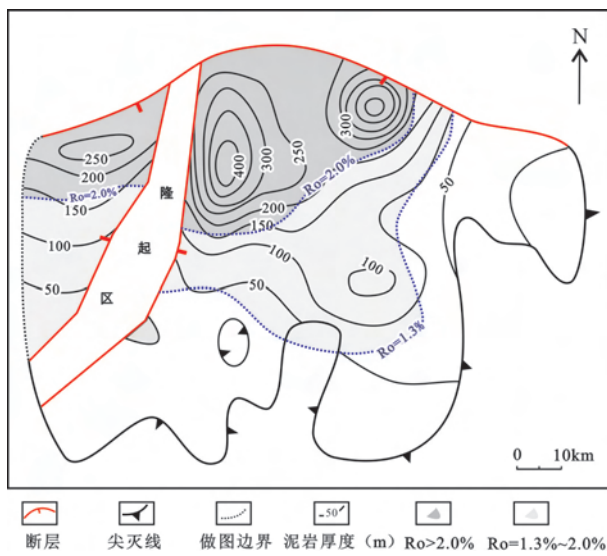


图 2 琼东南盆地华光凹陷崖二段泥岩和烃源岩 Ro 平面分布图(据文献[22]修改)

Fig.2 Distribution of source rock maturity and mudstone thickness of the 2nd Member of Yacheng Formation of Huaguang Depression of Qiongdongnan Basin (modified from Huang et al., 2015)

4 天然气水合物成藏的地球物理特征

4.1 BSR 特征

似海底反射(BSR)是近平行于海底的地震反射,通常认为 BSR 为一定温压条件控制下含天然气水合物沉积层的底界面。其在地震剖面上具有典型

的识别特征:(1)可见到 BSR 与地层斜交的现象;(2)振幅强度变化较大,横向上可在一定范围内追踪;(3)BSR 反射波与海底反射波的极性相反;BSR 附近层位存在明显的速度倒转现象。但 BSR 与水合物的关系并非一一对应,也就是说没有 BSR 的地区也可能存在水合物,有 BSR 的地区不一定存在水合物。另外,BSR 的连续追踪和准确识别与频宽关系密切,适合的频宽使得识别效果清晰、稳定和突出^[30]。

地震剖面揭示研究区 400~1500m 的水深范围内存在指示天然气水合物的似海底反射(图 3)。BSR 位于海底以下 200~370ms。海底浅层沉积物速度按照 1600m/s 计算,区内 BSR 位于海底以下 160~296m,平均埋深约 230m,且 BSR 的埋深随水深的增加而增加。BSR 之上发现振幅空白带,空白发射的时间厚度大约为 60~120ms。BSR 均位于第四纪以来的沉积层中,显示与深水浊流水道和块体流沉积有着良好的空间匹配关系。以图 4 测线为例,其上可识别出多期深水水道和块体流沉积。深水水道在地震剖面上具有典型的下切反射,内部呈现弱-强振幅相互叠置,连续性好的地震相。水道和块体流沉积以及周缘的断裂、海底的麻坑组成了含气流体运移网络。BSR1 位于 T20 界面附近,与水道充填地层单元斜交。BSR1 下伏断层的断点十分清晰明确,并延伸至 T40 界面。T20 界面之上识别出具有杂乱、弱振幅地震反射特征的块体流(MTD)。根据块体流底界面深度估算,MTD 位于水合物稳定带内。BSR2 位于浊流水道之上,同时与该 MTD 的底部吻合,具有振幅较强、连续性良好、平行于海底且极性与海底相反的反特征。

4.2 流体输导和渗漏系统

断层通常被视为最基本的聚集型流体运移通道,其他的通道还包括底辟构造、气烟囱、不整合面、高渗透层和古构造脊等类型。与周围的沉积地层相比,这些通道具有较强的渗流能力,有助于含气流体的运移。在运移通道的作用下,不仅可以将深部的热成因气,而且可以将浅部的微生物成因气运移到天然气水合物稳定带,从而促进水合物的富集与成藏。通过地震解释发现,研究区存在多种类型的流体输导系统,包括构造断层、泥底辟、气烟囱和多边形断层等。大规模的构造断层主要发育在华光凹陷古近系中;而新近系为拗陷沉降阶段,断裂微弱,但发育了一定数目的浅层断裂、泥底辟构造和多边形断层,并可以观察到大量规模较小的气烟囱。

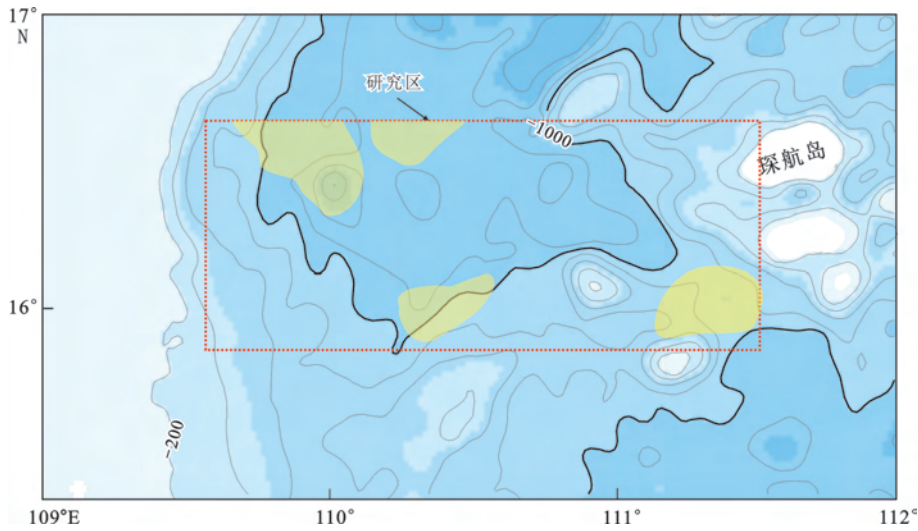


图3 研究区内似海底反射的平面分布(黄色区域代表BSR,等值线为水深)

Fig.3 The distribution map of Bottom Simulating Reflector (BSR) in the study area (contour refers to water depth; Yellow area refers to BSR)

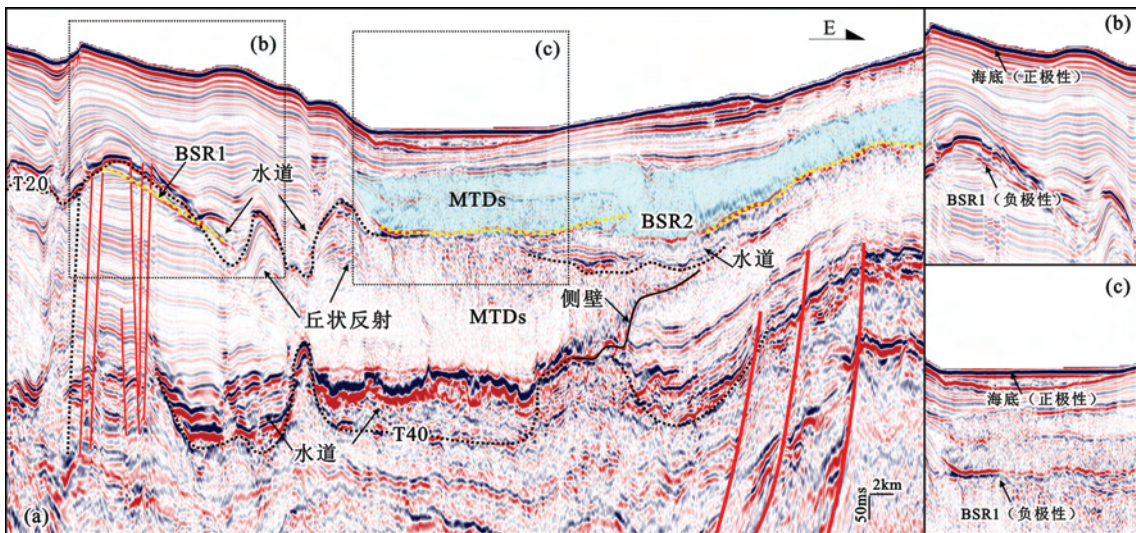


图4 BSR地震反射特征及其与浊流水道、块体流的关联(b和c显示BSR反射与海底的极性相反;MTD表示块体流;剖面位置见图1)

Fig.4 Seismic reflection characteristics of BSRs and their correlation with turbidity channels and mass transport deposits (see Fig.1 for location of the profile)

泥底辟在二维反射地震剖面上呈现出垂向延伸的杂乱模糊或者空白反射,其顶部或两侧的同相轴呈现上拉的强振幅特征。研究区发现的泥底辟根部位于古近系的泥源层,其顶部埋藏深度不一(图5)。以过研究区中部的地震剖面为例(图5a和5b),该剖面上可以清楚地识别出一系列泥底辟。埋藏较浅的底辟,其顶部距海底垂向距离约为350m,较深的约为600m。其中MD2(泥底辟)活动强烈,之上可见呈锥状的泥火山构造;两侧地层向外减薄,应为泥火山喷发时形成的泥流层。泥底辟可作为深部烃源岩生成的天然气向浅层水合物稳定域穿层运移的输

导通道。此外在梅山组和黄流组泥岩中发育的多边形断层也是华光凹陷裂后热沉降阶段重要的输导通道类型^[14]。部分多边形断层延伸到泥底辟的顶部^[31],泥底辟和多边形断层为含气流体提供了垂向的运移通道,对华光凹陷热沉降阶段含气流体的运移、天然气水合物的富集成藏具有重要的意义。

同时研究区上新世(5.5Ma)以来的地层中广泛发育变形滑塌体,其形成可能与天然气水合物的分解有关。变形滑塌体上部为滑坡构造,地震同相轴较为连续;下部发生变形,大部分演化为弱振幅-杂乱反射的块体流(MTD)沉积,具有明显的双层结

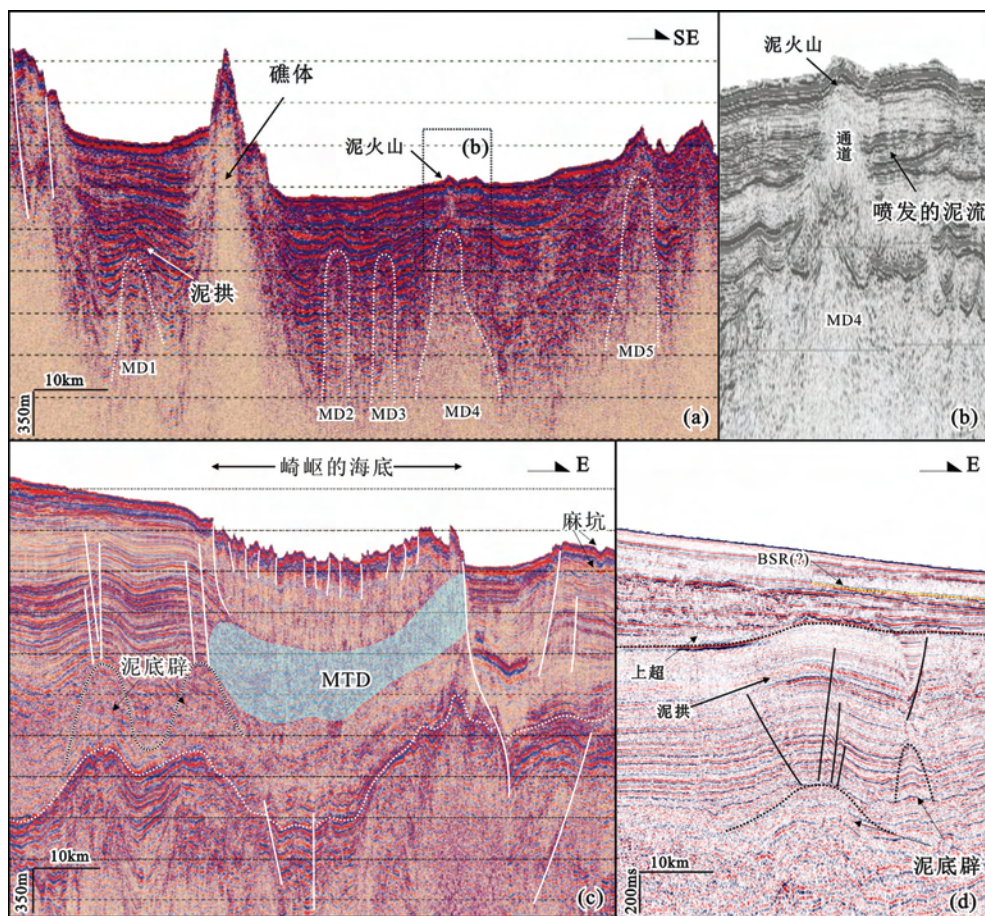


图 5 研究区内泥底辟构造二维反射地震剖面响应特征

(a 和 b 为过研究区中部剖面显示的泥底辟;c 和 d 为西部的泥底辟;MD 为泥底辟;MTD 为块体流;剖面位置见图 1)

Fig.5 Seismic characteristics of mud diapirs in the study area (for the location of the profile, see Fig.1)

构,在这些变形滑塌体中发育一系列的正断层。由于滑脱断层切入第四系,且与海底相通,一些流体也可能会沿着滑脱断层逃逸至海底形成指示流体逸散的麻坑。地震反射剖面和多波束地形图揭示华光凹陷和其南部的广乐隆起上广泛发育麻坑,麻坑表面宽度在几十米到数百米之间,并与断层、气烟囱、泥底辟、声空白声混浊、强反射等多种地震反射异常伴生^[15,16]。GC14 站点的重力活塞柱样孔隙水和 $\delta^{18}O$ 的分析表明:位于研究区东南部的某麻坑翼部有天然气水合物的发育^[13]。因此,第四纪滑移体中的滑脱断层可能更多地表现为含气流体的逃逸通道。

5 天然气水合物成藏模式和有利勘探区带探讨

盆地模拟的研究结果表明,琼东南盆地西部的乐东-陵水凹陷在渐新世崖城期就已经大面积形成超压(压力系数 > 1.27),华光凹陷仅局部形成小范

围的低幅超压。陵水组三段末期华光凹陷广泛形成超压,至梅山组早期发生小幅泄压。此后再次经历增压,并逐渐与乐东-陵水凹陷合并为一个超压系统。华光凹陷现今超压顶面和油气运移顶面都具有西浅东深特征,超压顶界面的埋深为 2500 ~ 3000m^[32,33]。晚中新世(10.5Ma)以来,由于深部烃源岩逐渐过成熟且烃类裂解作用增强,琼东南盆地西部地区地层压力增压-泄压的旋回演化中,西部各个凹陷都形成了多边形断层、气烟囱和泥底辟等泄压现象。华光凹陷晚中新世泥岩中形成的多边形断层应该是热解天然气向浅部大规模泄压释放的证据。这一时期发生的天然气运移和聚集对热解成因水合物的形成具有重要意义,是研究区这类水合物富集成藏的关键时期。异常高压为含气流体的运移提供了强大的动力,有助于天然气自深部向浅部运移。

在满足天然气水合物形成的基本稳定条件下,其富集成藏还需要气源条件、输导条件和储集空间。华光凹陷断裂主要集中发育于古近纪构造层之中,

而新近纪凹陷以拗陷为主,断裂活动微弱。断裂体系的缺乏不仅导致深部烃源层直接与浅层水合物稳定带沟通较为困难,而且从已形成的油气藏中逸散出来的天然气也难以达到水合物稳定带。可以说拗陷期内输导体系的发育与否对水合物的成藏起到十分重要的作用。显然,泥底辟构造作为直接沟通深部烃源与浅层沉积物的桥梁,是天然气垂向穿层运移的主要通道,影响着研究区内天然气水合物藏分布。同时,位于泥底辟上部的多边形断层、气烟囱和构造断层是构成输导网络的重要组成部分,在含气流体运移中起到“接力”的作用。

华光凹陷在上新世(5.5Ma)以来的地层中均可识别出典型的深水浊积水道,其中位于华光凹陷西部的更新世曲流水道呈SW—NE向展布,应与来自中南半岛的浊流侵蚀有关,水道轴部为强振幅反射,推测为富砂质沉积^[34]。西部第四系沉积物粒度分析发现,琼东南盆地华光凹陷浅表层沉积物局部含

砂率可达45%~48%^[28]。相对周围的泥岩沉积,这些深水浊流水道具有较好的孔隙度和渗透率。这些高渗透地层能够起到流体运移通道的作用,既能够将烃类气体运移至水合物稳定带之内,也可以作为高饱和度天然气水合物赋存的有利场所。

综合分析后认为华光凹陷西部地区是天然气水合物勘探的有利方向(图6)。这主要是因为盆地西部地区靠近①号断裂,物源充足。晚中新世以来快速沉降的巨厚半深海细粒沉积物不仅为生物成因气的形成提供了物质基础,而且地层超压为含气流体的运移提供了强大的动力。同时快速深埋也使得西部次洼内的渐新世成熟—过熟烃源岩大量生气或裂解。这些热解天然气和生物气都能沿着泥底辟、气烟囱和多边形断层向上垂向运移至水合物稳定带,形成天然气水合物,其中深水浊流水道是寻找高饱和度水合物的有利目标体。

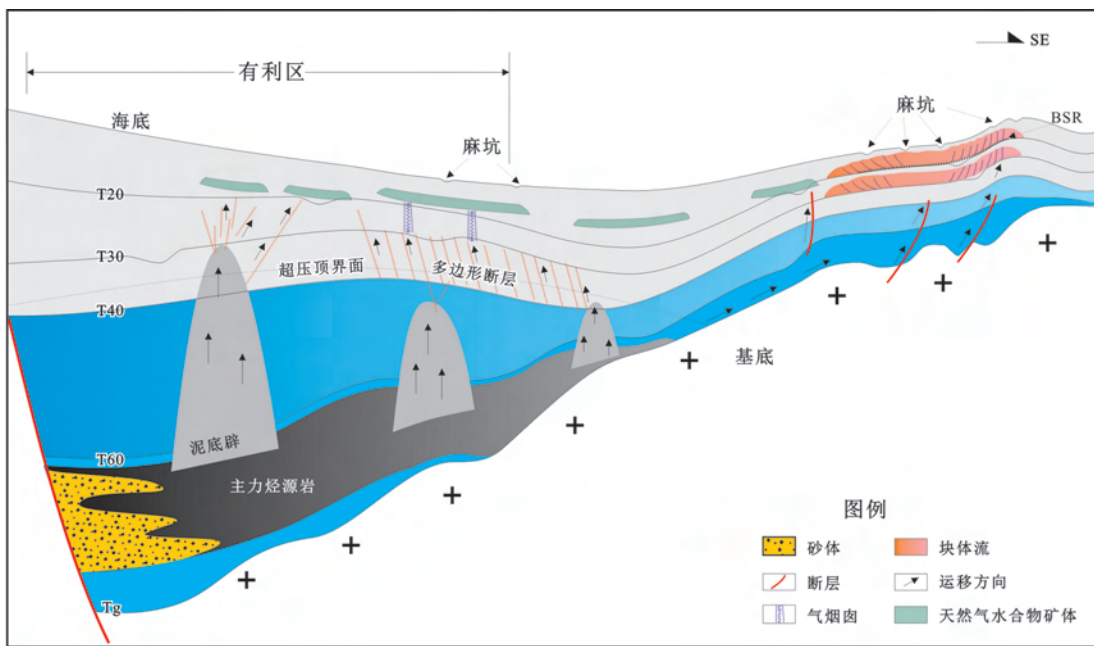


图6 琼东南盆地华光凹陷天然气水合物成藏模式与有利区预测

Fig.6 Accumulation model of natural gas hydrate in the Huaguang Depression of Qiongdongnan Basin

6 结论

(1)研究区内形成天然气水合物的气源包括始新统湖相、渐新统崖城组海陆过渡相-半封闭浅海相生成的热解天然气和上新统一第四系半深海-深海相生成的生物成因气。发生在莺歌海沉积期的第2期生排烃高峰,为热解成因气水合物的形成提供了

充足的气源。

(2)主要的流体输导系统包括构造断层、泥底辟、气烟囱和多边形断层等。泥底辟与其伴生断裂及多边形断层等构成了天然气水合物成藏的重要气源供给输导系统。研究区内 BSR 的平均埋深约230m,均位于第四纪以来的沉积层中,且显示出与深水浊流水道和块体流沉积有着良好的空间匹配关系。

(3)西部地区是天然气水合物勘探的有利方向,其中深水浊流水道是寻找高饱和度水合物的有利目标体。盆地西部地区靠近①号断裂,物源充足。晚中新世以来快速沉降的巨厚半深海细粒沉积物不仅为生物成因气的形成提供了物质基础,而且地层超压为含气流体的运移提供了强大的动力。同时快速深埋也使得西部次洼内的渐新世成熟—过熟烃源岩大量生气或裂解。热解天然气和生物气沿着泥底辟、气烟囱和多边形断层向上垂向运移,最终形成天然气水合物。

参考文献(References)

- [1] Yang S X, Zhang M, Liang J Q, et al. 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*, 2015, 15(2):1-5.
- [2] Zhang G X, Yang S X, Zhang M. GMGS2 expedition investigates rich and complex gas hydrate environment in the South China Sea[J]. *Fire in the Ice*, 2014, 14(1):1-5.
- [3] Yang S X, Liang J Q, Lei Y, et al. GMGS4 gas hydrate drilling expedition in the South China Sea[J]. *Fire in the Ice*, 2017, 17(1):7-11.
- [4] 陈多福,李绪宣,夏斌.南海琼东南盆地天然气水合物稳定域分布特征及资源预测[J].*地球物理学报*, 2004, 47(3):483-489. [CHEN Duofu, LI Xuxuan, XIA Bin. Distribution of gas hydrate stable zones and resource prediction in the qiongdongnan basin of the South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2004, 47(3):483-489.]
- [5] 满晓,朱继田,姚哲,等.琼东南盆地深水区泥—流体底辟发育特征与天然气成藏[J].*地质找矿论丛*, 2018, 33(2): 257-263. [MAN Xiao, ZHU Jitian, YAO Zhe, et al. The characteristic of Mud-Fluid diapir and its control on hydrocarbon accumulation in deep water area, Qiongdongnan Basin[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2018, 33(2): 257-263.]
- [6] Sun Q, Wu S, Hovland M, et al. The morphologies and genesis of mega-pockmarks near the Xisha Uplift, South China Sea [J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2011, 28(6):1146-1156.
- [7] Li J F, Ye J L, Qin X W, et al. The first offshore natural gas hydrate production test in South China Sea[J]. *China Geology*, 2018, 1(1):5-16.
- [8] 杨力,刘斌,徐梦婕,等.南海北部琼东南海域活动冷泉特征及形成模式[J].*地球物理学报*, 2018, 61(7): 2905-2914. [YANG Li, LIU Bin, XU Mengjie, et al. Characteristics of active cold seepages in Qiongdongnan sea area of the northern South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(7): 2905-2914.]
- [9] 刘斌,刘胜旋.南海北部陆坡气泡羽状流的发现:多波束水体数据[J].*海洋学报*, 2017, 39(9): 83-89. [LIU Bin, LIU Shengxuan. Gas bubble plumes observed at north slope of South China Sea from multi-beam water column data [J]. *Haiyang Xuebao*, 2017, 39(9): 83-89.]
- [10] 王静丽,梁金强,沙志彬,等.南海北部琼东南海域气烟囱发育特征及其对水合物形成与分布的影响[J].*海洋地质前沿*, 2017, 33(3):1-6. [WANG Jingli, LIANG Jinqiang, SHA Zhibin, et al. Development characteristics of gas chimney and its effect on formation and distribution of natural gas hydrate in the qiongdongnan area, northern South China Sea[J]. *Marine Geology Letters*, 2017, 33(3):1-6.]
- [11] 杨志力,吕福亮,吴时国,等.西沙海域天然气水合物的地震响应特征及分布[J].*地球物理学进展*, 2013, 28(6): 3307-3312. [YANG Zhili, LV Fuliang, WU Shiguo, et al. Seismic response and distribution of gas hydrates in the sediments of Xisha waters [J]. *Progress in Geophysics*, 2013, 28(6): 3307-3312.]
- [12] 孙春岩,吴能友,牛滨华,等.南海琼东南盆地气态烃地球化学特征及天然气水合物资源远景预测[J].*现代地质*, 2007, 21(1):95-100. [SUN Chunyan, WU Nengyou, NIU Binhua, et al. Geochemical Characteristics of Gaseous Hydrocarbons and Hydrate Resource Prediction in the Qiongdongnan Basin of the South China Sea[J]. *Geoscience*, 2007, 21(1): 95-100.]
- [13] 陈琳莹,罗敏.南海西沙西南海底麻坑区天然气水合物发育的孔隙水地球化学证据[J].*地球化学*, 2017, 46(6): 557-566. [CHEN Linying, LUO Min. Gas hydrate occurrences inferred from pore water geochemistry in the pockmark field in the southwestern Xisha Uplift, South China Sea [J]. *Geochimica*, 2017, 46(6): 557-566.]
- [14] 王秀娟,吴时国,王大伟,等.琼东南盆地多边形断层在流体运移和天然气水合物成藏中的作用[J].*石油地球物理勘探*, 2010, 45(1): 122-128. [WANG Xiujuan, WU Shiguo, WANG Dawei, et al. The role of polygonal faults in fluid migration and gas hydrate reservoir forming in Southeast Hainan Basin[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2010, 45(1): 122-128.]
- [15] 拜阳,宋海斌,关永贤,等.利用反射地震和多波束资料研究南海西北部麻坑的结构特征与成因[J].*地球物理学报*, 2014, 57(7):2208-2222. [BAI Yang, SONG Haibin, GUAN Yongxian, et al. Structural characteristics and genesis of pockmarks in the northwest of the South China Sea derived from reflective seismic and multibeam data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(7): 2208-2222.]
- [16] 陈江欣,关永贤,宋海斌,等.麻坑、泥火山在南海北部与西部陆缘的分布特征和地质意义[J].*地球物理学报*, 2015, 58(3):919-938. [CHEN Jiangxin, GUAN Yongxian, SONG Haibin, et al. Distribution characteristics and geological implications of pockmarks and mud volcanoes in the northern and western continental margins of the South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(3):919-938.]
- [17] Cai Z, Xia B, Baofeng L, et al. Initial rifting process and dynamics mechanism of Huaguang Sag: Evidence from a numerical modeling method[J]. *Journal of Earth Science*, 2015, 26(3):1-8.

- [18] 杨涛涛, 吴敬武, 王彬, 等. 琼东南盆地华光凹陷构造特征及沉积充填[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(5):13-18. [YANG Taotao, WU Jingwu, WANG Bin, et al. Structural pattern and sediment filling in Huaguang Sag of southern Qiongdongnan Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2012, 32(5):13-18.]
- [19] 张功成, 张义娜, 沈怀磊, 等. “源热共控”琼东南盆地的天然气勘探潜力[J]. 天然气工业, 2014, 34(1):18-27. [ZHANG Gongcheng, ZHANG Yina, SHEN Huailei, et al. An analysis of natural gas exploration potential in the Qiongdongnan Basin by use of the theory of joint control of source rock and geothermal heat[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(1): 18-27.]
- [20] 施小斌, 于传海, 陈梅, 等. 南海北部陆缘热流变化特征及其影响因素分析[J]. 地学前缘, 2017, 24(3):56-64. [SHI Xiaobin, YU Chuanhai, CHEN Mei, et al. Analyses of variation features and influential factors of heat flow in the northern margin of the South China Sea[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(3): 56-64.]
- [21] 吴能友, 张海敏, 杨胜雄, 等. 南海神狐海域天然气水合物成藏系统初探[J]. 天然气工业, 2007, 27(9):1-6. [WU Nengyou, ZHANG Haiqi, YANG Shengxiong, et al. Preliminary discussion on natural gas hydrate (NGH) reservoir system of Shenhu area, north slope of South China Sea[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(9):1-6.]
- [22] 黄艳辉, 刘震, 吕福亮, 等. 琼东南深水区华光凹陷渐新统崖城组控源岩早期预测[J]. 地质学报, 2015, 89(4):805-816. [HUANG Yanhui, LIU Zhen, LU Fuliang, et al. Early prediction on source rocks of the Oligocene Yacheng Formation in the deepwater area of Huaguang Depression, Qiongdongnan Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(4):805-816.]
- [23] 朱继田, 裴健翔, 孙志鹏, 等. 琼东南盆地新构造运动及其对晚期油气成藏的控制[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(4):649-656. [ZHU Jitian, PEI Jianxiang, SUN Zhipeng, et al. Feature of neotectonism and its control on late hydrocarbon accumulation in Qiongdongnan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(4): 649-656.]
- [24] 李明宅, 张洪年. 生物气成藏规律研究[J]. 天然气工业, 1997, 17(2):6-10. [LI Mingzhai, ZHANG Hongnian. Research on the formation of biogas reservoir[J]. Natural Gas Industry, 1997, 17(2):6-10.]
- [25] 何家雄, 夏斌, 张启明, 等. 南海北部边缘盆地生物气和亚生物气资源潜力与勘探前景分析[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(2):167-174. [HE Jiaxiong, XIA Bin, ZHANG Qiming, et al. Resources base and exploration potential of biogenic and Sub-biogenic gas in marginal basin of the northern South China Sea[J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(2):167-174.]
- [26] 姚根顺, 袁圣强, 吴时国, 等. 琼东南盆地深水区双物源沉积模式及勘探前景[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(6):685-691. [YAO Genshun, YUAN Shengqiang, WU Shiguo, et al. Double provenance depositional model and exploration prospect in deepwater area of Qiongdongnan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(6):685-691.]
- [27] 姚根顺, 袁圣强, 马玉波, 等. 琼东南华光凹陷深水重力搬运沉积体系及其油气勘探[J]. 地球科学, 2009, 34(3):471-476. [YAO Genshun, YUAN Shengqiang, MA Yubo, et al. Deepwater mass transport deposition system of Huaguang Depression, Qiongdongnan Basin and its significance for hydrocarbon exploration[J]. Earth Science, 2009, 34(3):471-476.]
- [28] 苏新, 陈芳, 于兴河, 等. 南海陆坡中新世以来沉积物特性与气体水合物分布初探[J]. 现代地质, 2005, 19(1):1-13. [SU Xin, CHEN Fang, YU Xinghe, et al. A pilot study on Miocene through Holocene sediments from the continental slope of the South China Sea in correlation with possible distribution of gas hydrates[J]. Geoscience, 2005, 19(1): 1-13.]
- [29] Waseda A. Organic carbon content, bacterial methanogenesis, and accumulation processes of gas hydrates in marine sediments[J]. Geochemical Journal, 1998, 32(3):143-157.
- [30] 姜辉, 岑芳, 于兴河. 天然气水合物 BSR 的影响因素分析[J]. 天然气工业, 2008, 28(1):64-66. [JIANG Hui, CEN Fang, YU Xinghe. Influencing factors of BSR in gas hydrates[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(1):64-66.]
- [31] 陈端新, 吴时国, 王志君, 等. 南海北部陆缘深水盆地多边形断层几何特征及成因[J]. 石油学报, 2012, 33(4):610-616. [CHEN Duanxin, WU Shiguo, WANG Zhijun, et al. Geometry and genesis of polygonal faults in epicontinental deepwater basins, northern South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(4):610-616.]
- [32] 翟普强, 陈红汉, 谢玉洪, 等. 琼东南盆地深水区超压演化与油气运移模拟[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2013, 44(10):4187-4196. [ZHAI Puqiang, CHEN Honghan, XIE Yuhong, et al. Modelling of evolution of overpressure system and hydrocarbon migration in deepwater area of Qiongdongnan basin, South China Sea[J]. Journal of Central South University of Science and Technology, 2013, 44(10):4187-4196.]
- [33] Shi W, Xie Y, Wang Z, et al. Characteristics of overpressure distribution and its implication for hydrocarbon exploration in the Qiongdongnan Basin[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 66:150-165.
- [34] Yuan S, Wu S, Thomas L, et al. Fine-grained Pleistocene deepwater turbidite channel system on the slope of Qiongdongnan Basin, northern South China Sea[J]. Marine & Petroleum Geology, 2009, 26(8):1441-1451.