

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2017.06.018

南海北部神狐海域不同类型水道及其天然气水合物成藏的差异

付超¹, 于兴河¹, 梁金强², 何玉林², 匡增桂², 金丽娜¹

(1. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083; 2. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510760)

摘要:2007 年和 2015 年,我国在南海北部神狐海域的水合物钻探结果揭示,水合物在赋存空间上表现为不均匀性。该区域发育多种类型的深水水道,基于水道特征开展不同类型水道的描述,并分析其对水合物成藏差异性的影响,将对该区域水合物的勘探和后续开采具有重要意义。通过地震剖面的综合解释和井震心综合分析,对神狐海域的水道类型进行了划分,探讨了水合物成藏的差异。结果表明,研究区的水道可划分为“V”型、迁移“V”型、“U”型和碟型等 4 种类型,不同类型水道的水合物赋存特征各异。“V”型和迁移“V”型水道的水合物主要富集在峡谷壁垮塌沉积中,但富存程度较低;“U”型水道的水合物主要富集在谷底沉积和两侧天然堤中;碟型水道的水合物主要富集在水道末端朵体及越岸扇体中。综合解释认为,沉积速率和水流侵蚀速率是造成神狐海域不同类型水道中水合物成藏差异的主要因素。

关键词:浊积水道;天然气水合物;成藏差异;神狐海域

中图分类号:P736.2

文献标识码:A

文章编号:0256-1492(2017)06-0168-10

神狐海域沟壑纵横,发育多期不同形态的水道。同时深水水道发育形态受控因素较多,如重力、底流(或等深流)、大洋涡流、水下峡谷中往复的潮汐底流、各种内波、上升流和下降流等,因此造成其在南海北部陆坡范围内形态相对复杂^[1, 2]。Callow 等研究海底地形时提出多种类型的海底水道分类方案,并且指出每种水道类型对应的沉积特点和砂体分布范围均不相同^[3]。Behseresht 和 Bryant 通过对海底沉积作用和水合物分布关系进行研究,指出沉积层厚度和垂向沉积速率是控制水合物在沉积体分布的重要条件,但并未针对某一类沉积体进行研究^[4]。针对南海北部陆坡中水合物成藏和沉积作用的关系,沙志彬等和于兴河等提出烃类气体的供应、烃类气体运移通道、岩层和构造对水合物成藏都具有重要作用,并且指出滑塌体和水道-天然堤系统可以为水合物成藏提供较为优质的储集空间,但并未针对水道天然堤系统中水合物富存规律进行分类讨论^[5-7]。

从世界范围内已知的海底峡谷和海域天然气水合物的分布来看,对于不同类型的水道,其水合物富存差异较大^[8]。南海北部陆坡神狐海域广泛发育各种类型的水道,对其研究有利于厘清天然气水合物的发育规模和范围,为后期水合物储层预测和精细储层建模提供前提和依据^[9]。本次研究对象为神狐海域晚渐新世—上新世发育的不同类型水道,使用的资料包括广州海洋地质调查局 2008—2009 年收集的三维地震资料、2015 年钻取的岩心及对应的粒度资料。本次研究首先通过对三维地震的形态学解释划分出不同类型的水道,并且结合 BSR 发育位置和岩心资料对其中的水合物富集位置进行确定;然后通过对不同类型水道中的沉积速率、侵蚀速率、水道稳定性等参数进行统计;最后结合沉积参数差异和水合物成藏控制因素,探究影响不同类型水道中水合物聚集出现的原因。

1 地质概况

神狐海域位于南海北部陆坡中部,珠江口盆地南部白云凹陷的深海沉积区(图 1a)。经度范围为 115°10'~115°20'E。珠江口盆地为新生代沉积盆地,在古近纪后共发生 3 次构造运动,即古新世至早渐新世裂谷阶段、晚渐新世过渡阶段和早中新世到第四纪拗陷阶段^[10]。晚渐新世至早中新世,南海发

基金项目:国家自然科学基金项目(41272132);国家专项项目(GZH2011003-05-02-02)

作者简介:付超,(1992—)男,硕士研究生,从事沉积学研究,E-mail:fuchaopjb@163.com

通讯作者:于兴河(1958—),男,博士,博士生导师,从事沉积学教学与研究工作,E-mail:billyu@cugb.edu.cn

收稿日期:2017-03-03;**改回日期:**2017-05-27 文凤英编辑

生一次较大规模的构造运动,称为白云运动,使得珠江口外陆架坡折向北跃迁,沉积中心随之北移,白云凹陷演化为深水陆坡环境^[11]。

Haq 等建立了全球海平面变化曲线^[12],Han 等根据该曲线研究指出南海在晚中新世后海平面不断上升,南海北部海侵程度增强,珠江口陆架三角洲向海方向沉积推进受到限制,沉积作用明显向北迁移^[13]。海平面旋回(图 1c)的低位期海平面下降仅到达中陆架的程度(即珠一坳陷南部边界),粗粒物质主要沉积在外陆架的番禺低隆起区,白云凹陷的

沉积速率大大降低,大量细粒或泥质沉积物进入到白云深水区。水合物新钻遇区位于珠江口盆地南部深水区,粒度相对较细^[11]。

本次研究的主要井位分布在峡谷两侧的隆起区(井位坐标见图 1b),峡谷位于白云凹陷中部(2007 年中国第一次海域天然气水合物钻探航次(GMGS1)西侧),多为北北西向走向。水合物储层主要为粤海组的含有孔虫细粒粉砂—泥岩,上部万山组的细粒沉积物,可以作为水合物储层的区域盖层^[14];下部韩江组主体为泥岩沉积,可以作为水合

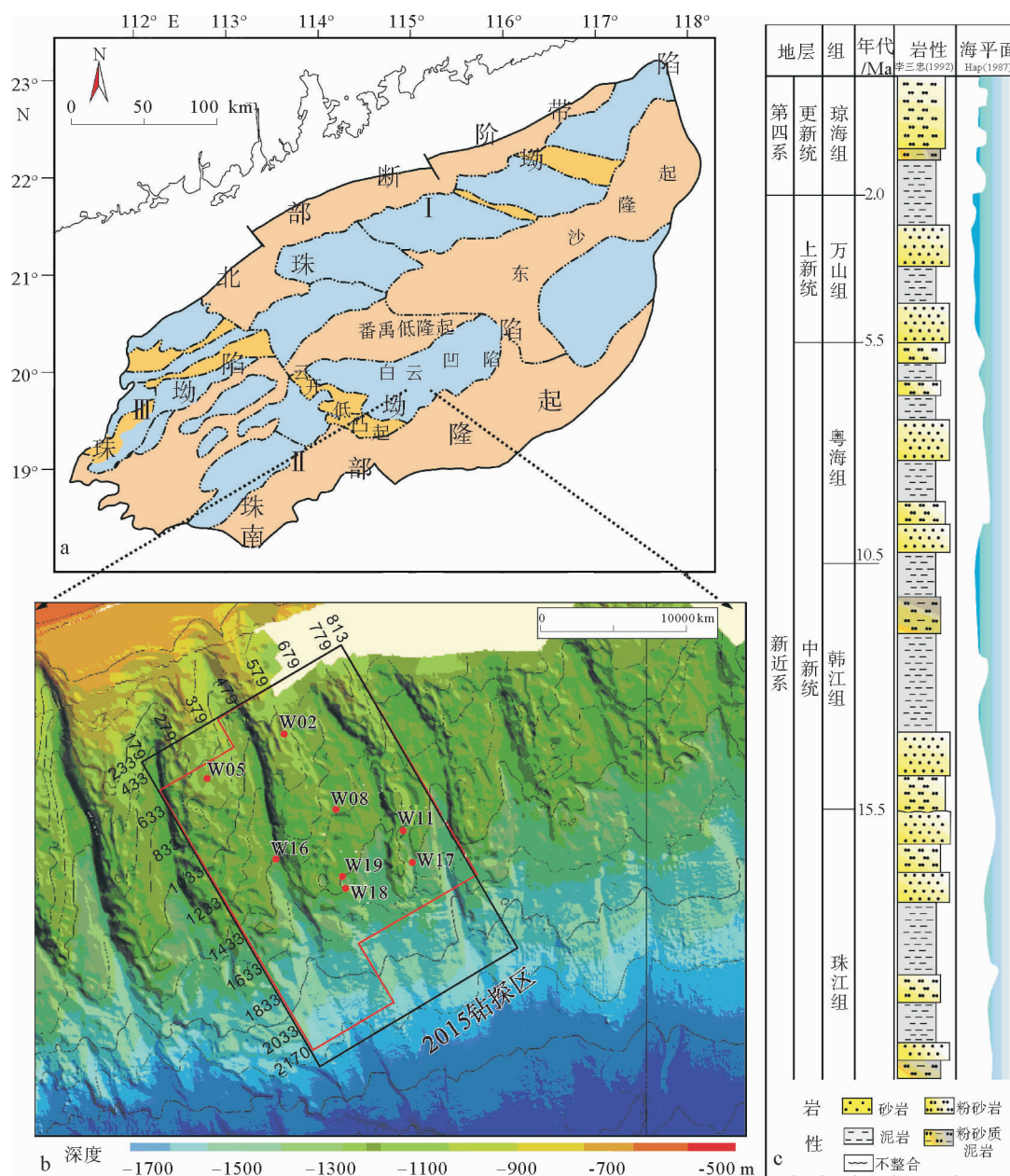


图 1 2015 年神狐水合物钻探区位置及本次研究中使用的水合物钻探井位置
a 构造分区; b 海底地貌; c 综合柱状图

Fig. 1 Location of gas hydrate drilling area in 2015 (study area) and drilling sites used in this study

物储层提供深部气源(图 1c)。根据海底地形的多波束数据可以确定其斜坡上部主要形态为不对称的 V 型和对称的 U 型,斜坡下部较为平坦。研究区坡度较大,最大坡度可以达到 2°,深度为 800~2 000 m。新钻探区(2015 年中国第三次海域天然气水合物钻探航次 GMGS3)和 GMGS1 沉积背景相近,沉积单元类型相似。依据王秀娟对研究区沉积单元的识别,峡谷的沉积建造可分成谷底沉积(TDs)、斜坡沉积(LIDs)、基底侵蚀间断(BEDs)和沉积物波^[15]。

2 水道类型

2.1 水道分类依据

深水水道按照不同因素可以划分出多种类型,

如几何形态、下切类型、叠加方式、成因机制、内部反射等(图 2)。通常从几何形态、叠加样式、成因机制、内部充填这 4 个方面进行研究。

本次研究将水道分成迁移“V”型水道、“V”型水道、“U”型水道、碟型水道。其中迁移“V”型水道和“V”型水道主要为侵蚀性水道,其发育在坡度较陡的上陆坡地区,因具有低可容纳空间和较高的流速,没有或极少发育天然堤—溢岸沉积,有时指块状水道砂岩或者大型水道,沉积物下切作用明显,在地震剖面上呈“V”型,水道曲率较小,表现顺直。其中迁移“V”型水道和“V”型主要依据水道的叠加方向进行区分^[16]:迁移“V”型水道内部砂体的叠置方式主要为侧向叠置型水道,水道内侧增生沉积,水道外侧遭受侵蚀,致使水道弯曲逐渐增大;“V”型水道主要为垂向叠置型水道。

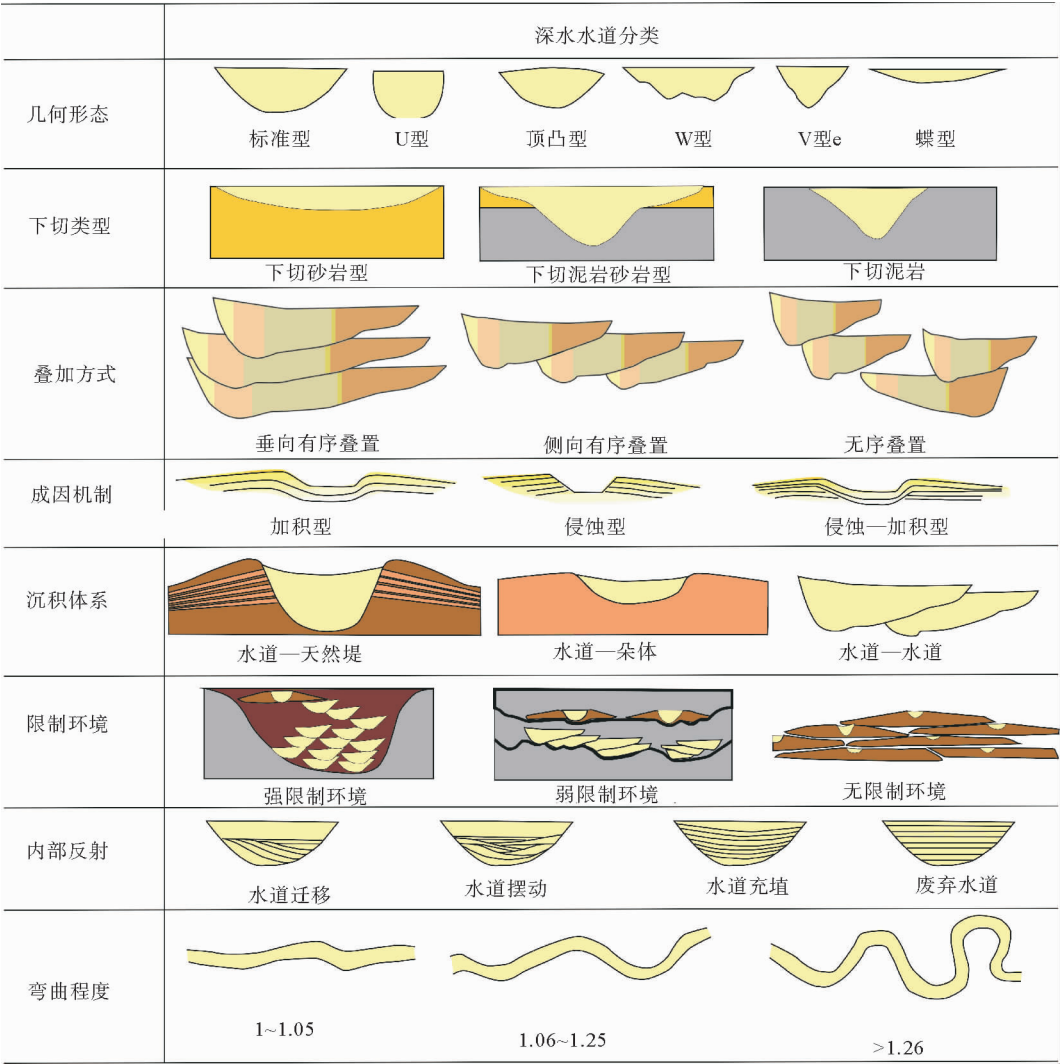


图 2 深水水道分类(改自 Clark 等(1996))
Fig. 2 Classification of channel (modified from Clark(1996))

“U”型水道主要为侵蚀/加积混合型水道,多发育在低坡度地区。Forbes 等提出深水水道与陆上河流水道相类似,均从长条形变为高弯曲度带状,类似于陆上河流的辫状河向曲流河的转换^[17],因此,沉积物下切作用减弱,在地震剖面上呈“U”型,水道曲率变大,表现为水道曲流特征。碟型水道主要是加积型水道,其天然堤—溢岸地层不断加积,形成介入性的低凹地形,水道和天然堤呈指状交叉,一般分布在坡度较缓的地区。

2.2 水道类型

依据上述水道分类方法,结合 NNW 向(图 3)和连续 SWW 向(图 4)地震剖面解释,神狐海域中可以识别出 4 种类型浊积水道,即迁移“V”型水道(图 4a 和 b)、侵蚀“V”型水道(图 4c)、“U”型水道(图 4d)、碟型水道(图 4e)。

迁移“V”型水道主要发育在斜坡上部,在地震剖面上显示为连续迁移的“V”型高值反射。谷底反射最强,Wang 等认为是谷底滞留沉积(Thalweg deposit)^[15]。强反射轴主要发育在水道两侧水道的脊部(图 4a 和 b 地震剖面),呈现单侧定向迁移的特点,该类水道向一侧定向迁移。依据该类水道附近 W02 井测井相应特征(图 3b 测井曲线),水合物段

(Rt 高值区)的 GR 向上逐渐增大,说明底部沉积物相对较粗,水合物主要富集在谷底滞留沉积中;GR 曲线可以细化成 3 段,每段曲线的 GR 值增加,但变化幅度减小。故推测水合物主要富集在谷底滞留沉积底部(水道迁移早期的谷底滞留沉积)。

“V”型水道主要发育在斜坡中上部,在地震剖面上显示为稳定的“V”型高值反射。其水道两侧有不连续的高值区,王真真等指出其可以解释成为侵蚀形成的峡谷两侧垮塌^[18]。这种类型水道附近 BSR 不发育,BSR 主要集中在“V”型水道上部。该类水道向下侵蚀,故两侧天然堤均不发育。依据该类水道附近 W08 井测井相应特征(图 3c 测井曲线),水合物段(Rt 高值区)很薄,GR 向上变大,故推测由于峡谷壁失稳,使“V”型水道两侧的隆起处滑塌体发育,为水合物提供有利的成藏场所。

“U”型水道主要发育在斜坡中下部,在地震剖面上显示为稳定的“U”型高值反射。其水道两侧偶见不太稳定的楔状反射轴,从形态上可以解释为水道两侧的天然堤。该类水道的 BSR 发育在水道两侧天然堤。该类水道属于侵蚀-加积型水道,水道两侧发育对称天然堤,水道内部富存较粗粒的沉积物。依据该类水道附近 W17 井测井相应特征(图 3d 测井曲线),水合物段(Rt 高值区)很厚,GR 较小且

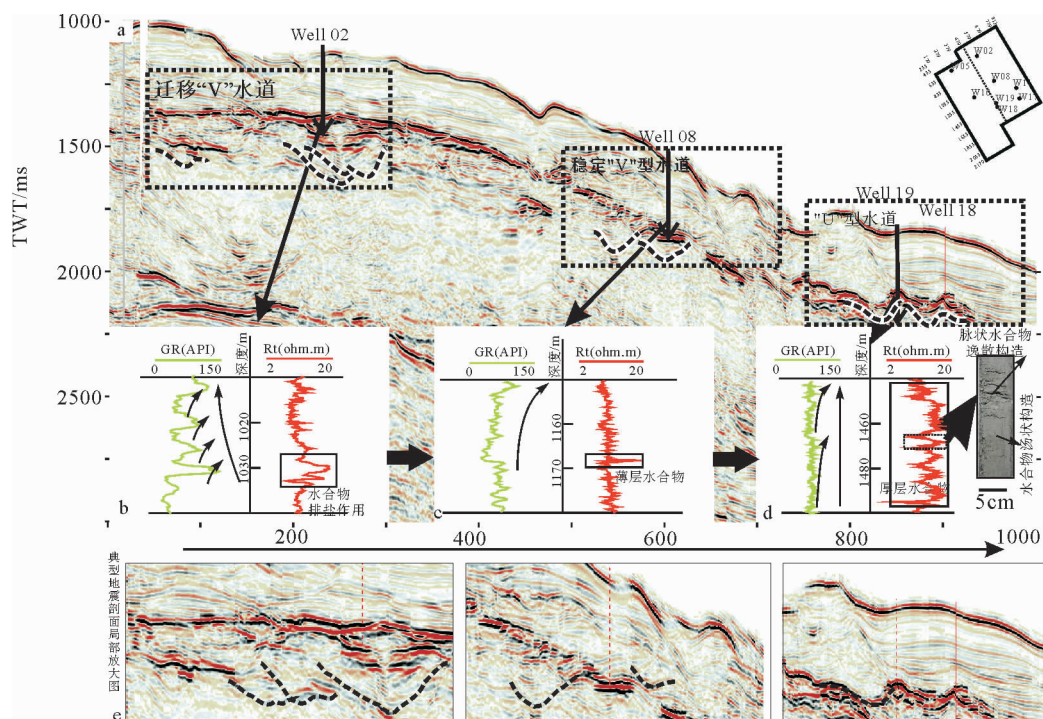


图 3 Inline 方向水合物地震剖面 and 测井岩心响应

(a) Well02-Well08-Well19-Well18 联井剖面,(b)迁移“V”型水道对应的测井曲线,

(c)“V”型水道对应的测井曲线,(d)“U”型水道对应的测井曲线及水合物岩心

Fig. 3 Integrated logging-seismic profiles and response of gas hydrate

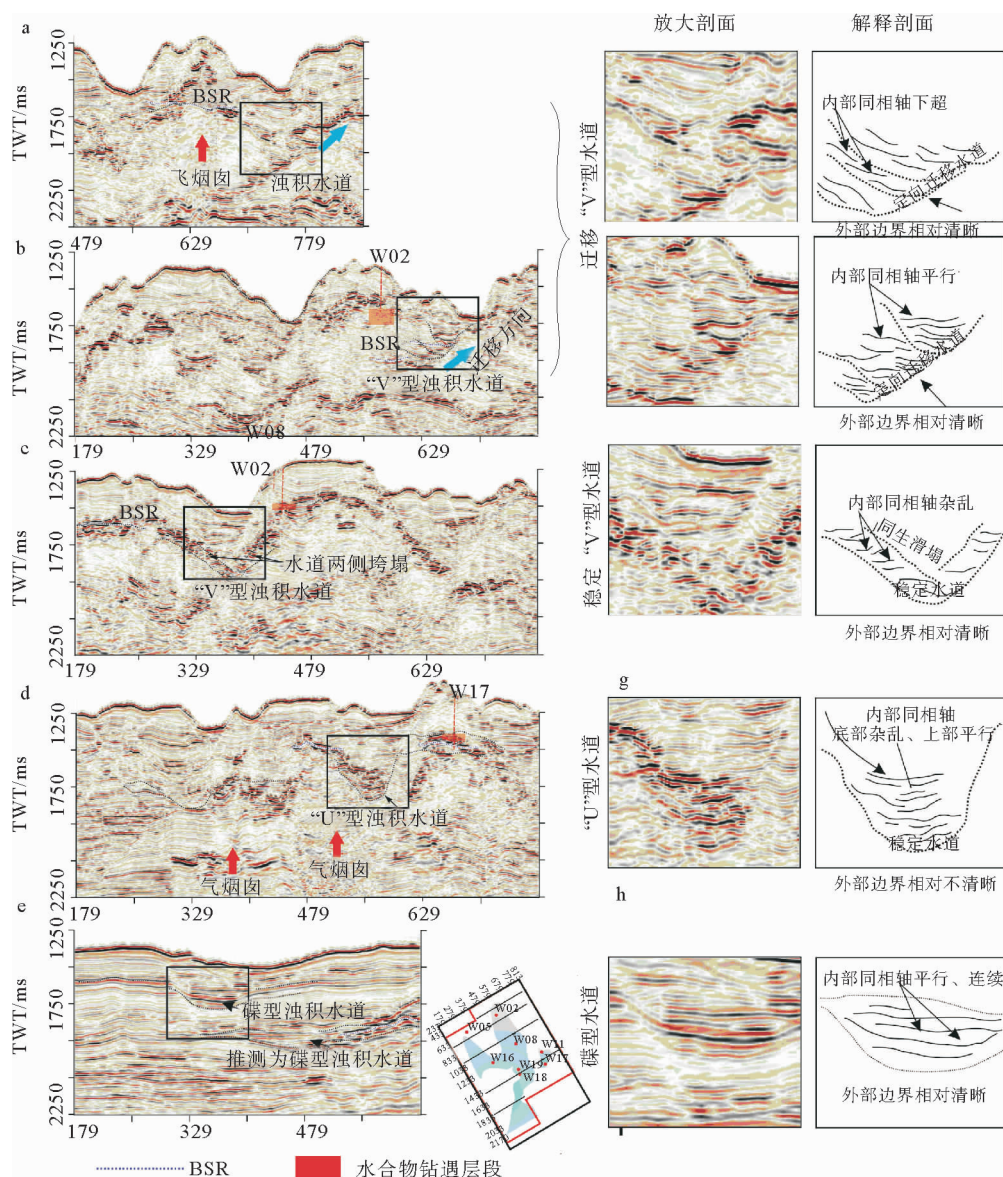


图 4 剖面方向上水合物地震响应

(a)剖面 300;(b)剖面 600;(c)剖面 900;(d)剖面 1500;(e)剖面 1800;(f)-(I)地震放大和解释剖面

Fig. 4 Seismic reflection characters of gas hydrate along the crossline

且相对均匀。根据对应的岩心(图 3d 岩心)可以在其上识别出脉状水合物的逸散裂缝,认为该类水道的天然堤复合体有利于水合物成藏。

碟型水道主要发育在斜坡底部,在地震剖面上表现为不明显的透镜状,内部反射轴多平行或上超。其水道两侧有连续的高值区,可以解释为水道末端朵体或水道天然堤。BSR 在水道两侧天然堤和水道内部充填物中均有发育。该类水道属于加积型水道,水道内部富存较粗粒的沉积物。依据地震反射特征识别出的 BSR 区域和该类水道发育区域拟合度较高。

3 不同类型水道的水合物赋存特征

前人研究指出不同沉积环境、沉积相类型、砂泥比控制了天然气水合物的发育及赋存^[5, 9, 18-20]。本次研究通过对不同类型水道中水合物发育区进行研究(图 4),发现其不同类型水道中水合物富存位置不同,建立水合物富集程度和水道稳定、沉积速率间的统计关系。其中统计过程涉及水道发育时间的计算,本次研究利用 Cliff 等(2013)对 PY33-1-1 的定年数据,结合水道在地震剖面下切深度共同求出。

3.1 “V”型水道

在剖面上“V”型可以分成两种:迁移“V”型水道和稳定“V”型水道两类。Stow 等(2000)认为在斜坡上部,由于斜坡上部峡谷上部未固结,其稳定性相对较差,而上部水道受底流影响较大,常发生侧向迁移,易形成迁移“V”型水道^[16]。由于晚渐新世后南海北部陆坡底流流动方向相对稳定^[21, 22],因此水道多发生顺陆坡走向的定向迁移(图 5b),侧向迁移造成峡谷一侧侵蚀严重,另一侧峡谷壁失稳滑塌,沉积物注入水道速度相对较快(图 5c)。因此这种沉积速率高、含砂率适中、孔隙空间较大,有利于天然气水合物的发育^[5, 19]。因此迁移“V”型水道水合物主要存在于谷底的滞留沉积中,但是由于滞留沉积受后期沉积改造较大,较快的流体导致天然气逸散,使水合物大量分解,其水合物保存程度较低。

对于稳定“V”型水道,在斜坡中上部,由于水道垂向侵蚀较强,而横向侵蚀作用较弱(图 5e),因此容易形成较为稳定的“V”型水道^[16]。连续的底部侵蚀容易造成峡谷壁垮塌,因此峡谷内主要为峡谷垮塌沉积(图 5f)。其同生变形以及有孔虫颗粒间的空隙间有利于水合物成藏^[23],但由于水道侵蚀作用较为强烈,峡谷壁垮塌沉积物的横向连续性较差,故水合物保存程度较低。

3.2 “U”型水道

依据 Clark 等的水道分类,U 型水道属于侵蚀-加积型水道,其侵蚀产生的沉积空间和浊流沉积物对原有沉积物的置换作用(Displacement)均十分强烈^[24]。这种类型的水道沉积物充填量较大,砂体横向连续性较好,并且该型水道常发育在陆坡转折处,其地形坡度发生变化,造成近源滑塌体(Slide complex)较为发育。于兴河等指出这种类型的储层由于其较好的孔隙度和适中的水动力条件;再加上该型水道多发育在“V”型水道下部,其静水压力相对较大,有利于水合物富集。从水道稳定程度曲线和水道沉积速率曲线(图 6b)及水道沉积速率(图 6c)可以推断该型水道相比于“V”型水道,平面上水合物赋存范围更广,水道两侧的天然堤^[25]、越岸扇^[26]、和水道内部^[18]均有赋存。

3.3 碟型水道

由于碟型水道多发育在斜坡底部,地势相对平缓,水道易发生小幅度的摆动(图 7b)。其沉积物主要分布在底部碟型水道末端朵体和两侧延伸较远的天然堤,朵体主要是块体搬运复合体沉积^[27],沉积速率相比上部的“U”型水道减慢(图 7c)。碟型水道底部易形成下粗上细的透镜状砂体,这种类型的

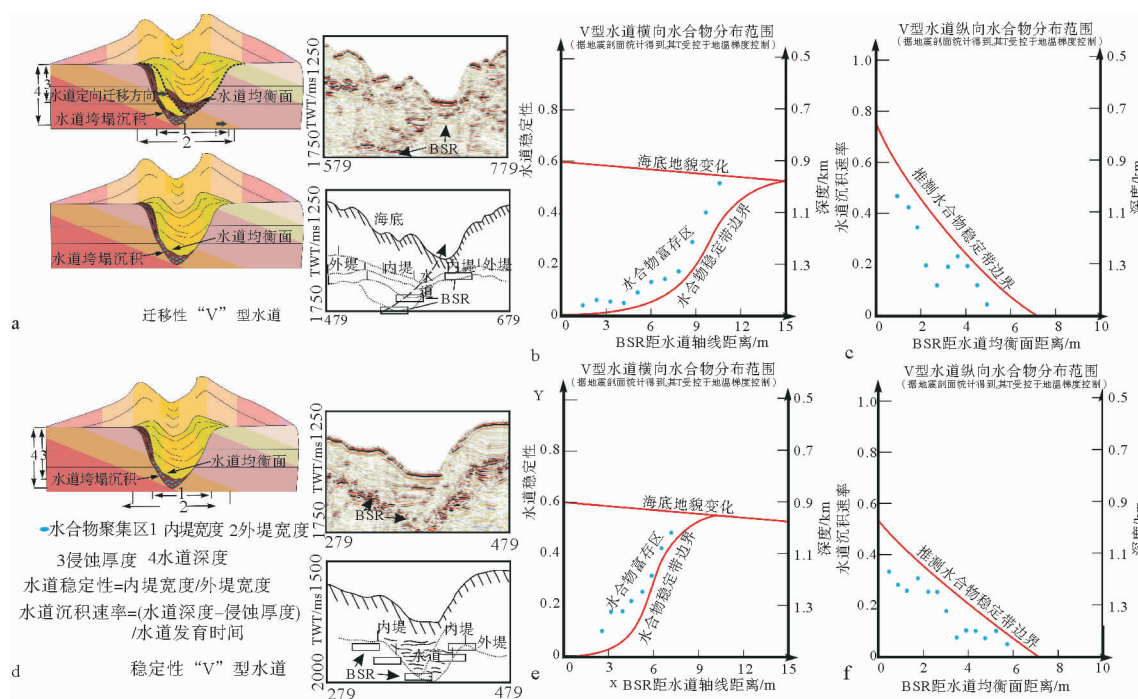


图 5 两种类型 V 型水道水合物分布特点(图中剖面为图 4 中局部放大剖面)

Fig. 5 The gas hydrate distribution in “V” shape channels

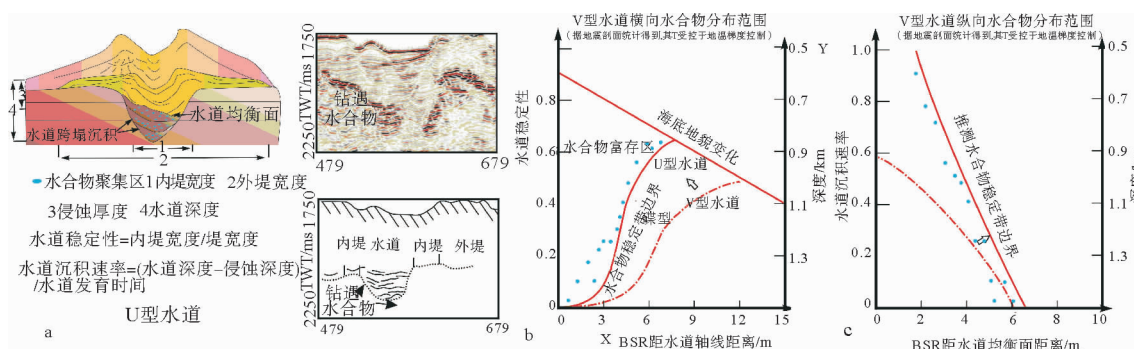


图6 “U”型水道水合物分布特点(图中剖面为图4中局部放大剖面)

Fig. 6 Gas hydrate distribution in “U” shaped channels

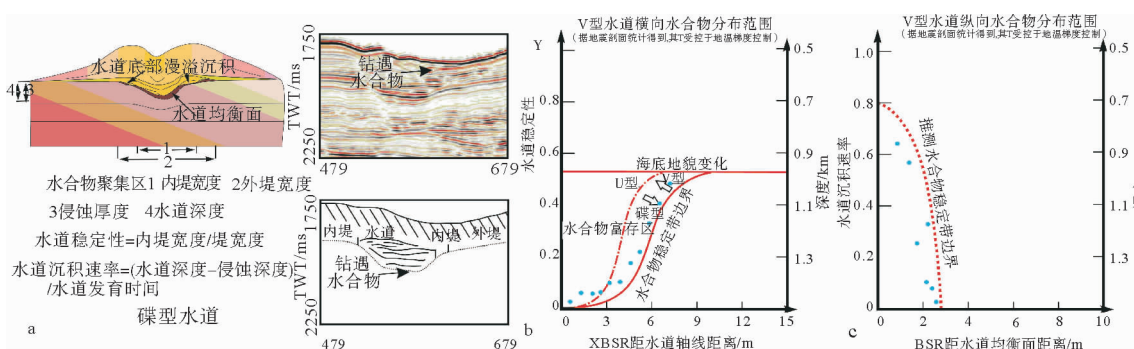


图7 碟型水道水合物分布特点(图中剖面为图4中局部放大剖面)

Fig. 7 Gas hydrate distribution in saucer shaped channels

砂体适宜水合物保存与成藏^[28]。因此,碟型水道中水合物主要保存在水道两侧的天然堤和水道内部的砂体中。

4 不同类型水道水合物成藏的影响因素

T Collett 指出影响水合物成藏的要素包括沉积速率、流体流速、烃类供给量和合适的温压条件^[29]。由于目前测试的水合物甲烷多以微生物成因为主,其主要为浅部的钙质微生物产生的甲烷^[5, 30],本次研究区选取位置位于南海北部陆坡中同一水深的不同位置,因此其温-压条件和烃类供给等因素变化不明显。而不同类型水道主要由于其保存条件差异而造成水合物形成笼型化合物的可逆反应时间(Reflection time)和反应进行方向(Reflection direction)不同,最终表现为水合物的不均匀分布(图8)。从沉积角度上主要归纳为沉积速率差异、流体速率。

沉积速率差异是造成不同类型水道水合物响应不同的重要因素之一^[19, 31],其快速堆积不但可以为水合物形成提供有利空间^[14, 32],而且其沉积物中的

有孔虫也可以产生大量的生物气^[33],从而有利于水合物形成。在南海北部陆坡中沉积速率增加的形式可以归纳为:“V”型水道两侧峡谷壁失稳产生的垮塌可以快速堆积在水道中,“U”型水道和碟型水道两侧的近源滑塌沉积中。“U”型水道和碟型水道,由于渐新世海平面上升,沉积物退积,容易形成下细上粗的垂向序列。再加上上覆第四纪琼海组的软泥对自由气起到较好的封堵作用。因此该类型水道有利于水合物保存。

流体速率过快也是水合物难以形成的原因之一^[31, 34]。王力峰等通过对东沙海域水合物进行研究指出,流体速度大于 $10 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ 会对海底热流分布产生影响,从而作用于水合物成藏^[35]。Sunil 等对巴伦支海水合物富集区进行研究指出,由于笼型水合物形成的化学反应式是可逆的,故当流体因气体溶解而带走大量的自由气会导致水合物大量分解,从而造成水合物逸散^[36]。T Collett 和 Zerp 分别从宏观和微观上说明水合物形成需要足够的时间^[29, 37]。南海北部陆坡中流体速率较快的区域主要发生在“V”型水道与迁移“V”型水道中(图8),由于剧烈的侵蚀作用导致其不利于水合物保存。

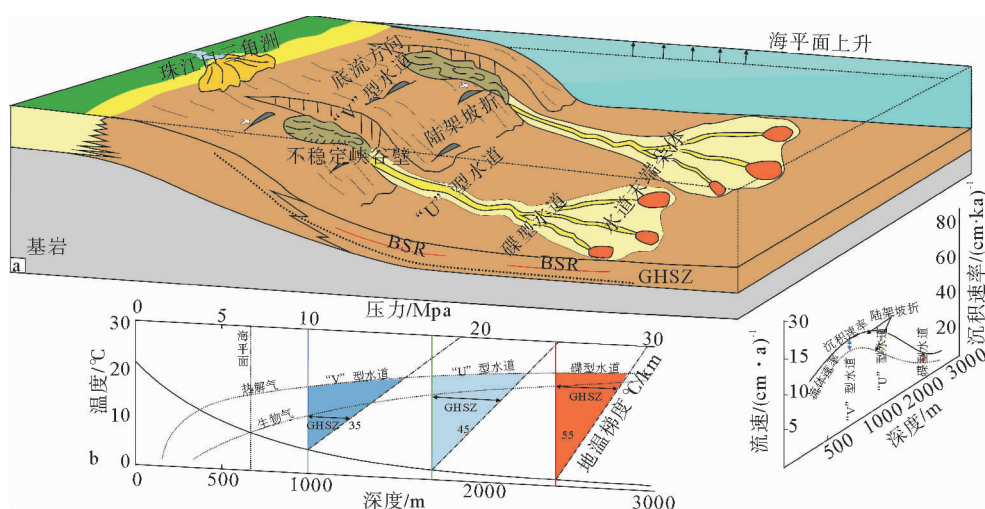


图 8 不同类型水道的水合物成藏差异及其水合物成藏影响因素示意图

(a)天然气水合物理想成藏模式;(b)温压对水合物影响(改自于兴河(2014));(c)流速和沉积速率对水合物影响

Fig. 8 Gas hydrate accumulation models for different types of channels and impact factors

5 结论

(1)南海北部陆坡神狐水合物富集区发育多条 NWW 向浊积水道,其剖面形态随着地形坡度和物源供给量的多少而发生改变,可以分成迁移“V”型水道、稳定“V”型水道、侵蚀加积“U”型水道、加积碟型水道;

(2)对几种水道剖面中 BSR 发育的位置和平面展布形态进行统计,认为不同类型的水道由于其沉积类型不同可以形成不同类型的水合物成藏体系:迁移“V”型水道和稳定“V”型水道,水合物相对较薄,多富存在峡谷垮塌沉积中,发育规模有限;“U”型水道水合物相对较厚,多富存在峡谷水道的浊积沉积中,发育规模有限;碟型水道水合物相对较厚,多富存在峡谷水道和水道末端朵体沉积中,发育规模较大。

(3)针对不同类型的浊积水道及其对应水合物成藏模式,认为影响水道体系中水合物聚集的因素可以归纳为两个:沉积速率差异和流体速率差异。

致谢:本次研究数据由广州海洋地质调查局提供,在此对为本次研究提供帮助的林霖、董亦思、单新、唐倩宇、赵晨帆等表示感谢,并且对本文提出宝贵建议的评审专家和编辑老师表示感谢。

参考文献(References)

[1] Gong C L, Wang Y M, Zheng R C, et al. Middle Miocene re-

worked turbidites in the Baiyun Sag of the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea margin: Processes, genesis, and implications[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2016, 128: 116-129.

[2] 陈泓君,蔡观强,罗伟东,等.南海北部陆坡神狐海域峡谷地貌形态特征与成因[J].海洋地质与第四纪地质,2012,32(5):19-26. [CHEN Hongjun, CAI Guanqiang, LUO Weidong, et al. Features of canyon morphology and their origin in the Shenhu area, Northern Slope of the South China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2012, 32(5): 19-26.]

[3] Callow R H T, McIlroy D, Kneller B, et al. Integrated ichnological and sedimentological analysis of a Late Cretaceous submarine channel-levee system: The Rosario Formation, Baja California, Mexico[J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 41: 277-294.

[4] Behresesht J, Bryant S L. Sedimentological control on saturation distribution in Arctic gas-hydrate-bearing sands[J]. Earth & Planetary Science Letters, 2012, 341-344: 114-127.

[5] 于兴河,王建忠,梁金强,等.南海北部陆坡天然气水合物沉积成藏特征[J].石油学报,2014,35(2):253-264. [YU Xinghe, WANG Jianzhong, LIANG Jinqiang, et al. Depositional accumulation characteristics of gas hydrate in the northern continental slope of South China Sea[J]. Acta Petrolia Sinica, 2014, 35(2): 253-264.]

[6] 曾小明,于兴河,梁金强,等.神狐海域天然气水合物地质建模及有利区预测[J].海洋地质与第四纪地质,2014,34(4):117-126. [ZENG Xiaoming, YU Xinghe, LIANG Jinqiang, et al. Geological model and prediction for favorable area of natural gas hydrate in Shenhu area[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2014, 34(4): 117-126.]

[7] 沙志彬,郭依群,杨木壮,等.南海北部陆坡区沉积与天然气水合物成藏关系[J].海洋地质与第四纪地质,2009,29(5):89-98. [SHA Zhibin, GUO Yiqun, YANG Muzhuang, et al.

- Relation between sedimentation and gas hydrate reservoirs in the Northern slope of South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(5): 89-98.]
- [8] Milkov A V, Sassen R. Economic geology of offshore gas hydrate accumulations and provinces[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2002, 19(1): 1-11.
- [9] 苏明, 沙志彬, 匡增桂, 等. 海底峡谷侵蚀-沉积作用与天然气水合物成藏[J]. *现代地质*, 2015, 29(1): 155-162. [SU Ming, SHA Zhibin, KUANG Zenggui, et al. Erosion and sedimentation of the submarine canyons and the relationship with gas hydrate accumulation[J]. *Geoscience*, 2015, 29(1): 155-162.]
- [10] 李三忠, 索艳慧, 刘鑫, 等. 南海的盆地群与盆地动力学[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(6): 55-78. [LI Sanzhong, SUO Yanhui, LIU Xin, et al. Basin dynamics and basin groups of the South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, 32(6): 55-78.]
- [11] 苏明, 沙志彬, 乔少华, 等. 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*, 2015, 58(8): 2975-2985. [SU Ming, SHA Zhibin, QIAO Shaohua, et al. Sedimentary evolution since Quaternary in the Shenhu hydrate drilling area, northern South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(8): 2975-2985.]
- [12] Haq B U, Hardenbol J, Vail P R. Chronology of fluctuating sea levels since the triassic.[J]. *Science*, 1987, 235(4793): 1156-1167.
- [13] Han J H, Xu G Q, Li Y Y, et al. Evolutionary history and controlling factors of the shelf breaks in the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 77: 179-189.
- [14] 陈芳, 周洋, 苏新, 等. 南海神狐海域含水合物层粒度变化及与水合物饱和度的关系[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, 31(5): 95-100. [CHEN Fang, ZHOU Yang, SU Xin, et al. Gas hydrate saturation and its relation with grain size of the hydrate-bearing sediments in the Shenhu Area of Northern South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2011, 31(5): 95-100.]
- [15] Wang X J, Collett T S, Lee M W, et al. 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*, 2014, 357: 272-292.
- [16] Stow D A V, Mayall M. Deep-water sedimentary systems: New models for the 21st century[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2000, 17(2): 125-135.
- [17] Forbes D L. Morphology and sedimentology of a sinuous gravel-bed channel system: lower Babbage river, Yukon Coastal Plain, Canada[M]//Collinson J D, Lewin J. *Modern & Ancient Fluvial Systems*. [S.l.]: The International Association of Sedimentologists, 2009: 195-206.
- [18] 王真真, 王秀娟, 郭依群, 等. 白云凹陷陆坡峡谷沉积与迁移特征及其对天然气水合物成藏的影响[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(3): 105-113. [WANG Zhenzhen, WANG Xiujuan, GUO Yiqun, et al. Deposition and migration of sediments in submarine canyons of Baiyun Sag and their effects on gas hydrate accumulation[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014, 34(3): 105-113.]
- [19] 沙志彬, 杨木壮, 梁劲. 天然气水合物成矿的沉积控制因素[J]. *海洋地质动态*, 2003, 19(6): 16-20. [SHA Zhibin, YANG Muzhuang, LIANG Jin. Sedimentation-controlling factors of natural gas hydration[J]. *Marine Geology Letters*, 2003, 19(6): 16-20.]
- [20] 黎明碧, 金翔龙, 初凤友, 等. 神狐——统暗沙隆起中部新生代地层序划分及沉积演化[J]. *沉积学报*, 2002, 20(4): 545-551. [LI Mingbi, JIN Xianglong, CHU Fengyou, et al. Sequence division and sedimentary evolution of Cenozoic in the middle Shenhu-Yitong Ansha uplift[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(4): 545-551.]
- [21] 栾锡武, 李晓芸. 流体迁移和海底地形与天然气水合物的形成[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(2): 1-10. [LUAN Xiwu, LI Xiaoyun. Sea floor topography of shallow gas hydrate area-data from Okhotsk Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, 32(2): 1-10.]
- [22] 钟建强, 黄慈流, 詹文欢. 南海新生代沉积建造的基本特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1996, 16(4): 25-34. [ZHONG Jianqiang, HUANG Ciliu, ZHAN Wenhuan. Basic characters of Cenozoic sedimentary formation in the South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1996, 16(4): 25-34.]
- [23] 陈芳, 苏新, 陆红锋, 等. 南海神狐海域有孔虫与高饱和度水合物的储存关系[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2013, 38(5): 907-915. [CHEN Fang, SU Xin, LU Hongfeng, et al. Relations between biogenic component (Foraminifera) and highly saturated gas hydrates distribution from Shenhu Area, Northern South China Sea[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2013, 38(5): 907-915.]
- [24] Clark J D, Pickering K T. Architectural elements and growth patterns of submarine channels: Application to hydrocarbon exploration[J]. *AAPG Bulletin*, 1996, 80(2): 194-221.
- [25] Posamentier H W. Depositional elements associated with a basin floor channel-levee system: case study from the Gulf of Mexico[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20(6-8): 677-690.
- [26] 李华, 王英民, 徐强, 等. 深水单向迁移水道-堤岸沉积体系特征及形成过程[J]. *现代地质*, 2013, 27(3): 653-661. [LI Hua, WANG Yingmin, XU Qiang, et al. Characteristics and processes of deep water unidirectionally-migrating channel-levee system[J]. *Geoscience*, 2013, 27(3): 653-661.]
- [27] 李磊, 王英民, 张莲美, 等. 南海北部白云深水区水道与朵体沉积序列及演化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(4): 71-76. [LI Lei, WANG Yingmin, ZHANG Lianmei, et al. Sedimentary sequence and evolution of submarine channel-lobe in Baiyun Deepwater area, Northern South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(4): 71-76.]

- [28] 刘昌岭, 孟庆国, 李承峰, 等. 南海北部陆坡天然气水合物及其赋存沉积物特征[J]. 地学前缘, 2017, 24(4): 41-50. [LIU Changliang, MENG Qingguo, LI Chengfeng, et al. Characterization of natural gas hydrate and its deposits recovered from the Northern Slope of the South China Sea[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(4): 41-50.]
- [29] Collett T, Johnson A, Knapp C, et al. Natural Gas Hydrates Energy Resource Potential and Associated Geologic Hazards [M]. Tulsa: AAPG, 2009: 89.
- [30] Hui G G, Li S Z, Guo L L, et al. Source and accumulation of gas hydrate in the northern margin of the South China Sea [J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 69: 127-145.
- [31] Su Z, Cao Y, Wu N. Modeling dynamic accumulation of gas hydrates in Shenhu area, northern South China Sea[C]//American Geophysical Union, Fall Meeting 2013. Washington: AGU, 2013.
- [32] 何静, 刘学伟, 余振, 等. 含天然气水合物地层的孔隙度影响因素分析[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(3): 368-378. [HE Jing, LIU Xuewei, YU Zhen, et al. Factors influencing the porosity of gas hydrate bearing sediments[J]. Science China Earth Sciences, 2013, 56(4): 557-567.]
- [33] 陈芳, 苏新, 周洋. 南海神狐海域水合物钻探区钙质超微化石生物地层与沉积速率[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2013, 38(1): 1-9. [CHEN Fang, SU Xin, ZHOU Yang. Late Miocene-Pleistocene calcareous nannofossil biostratigraphy of Shenhu Gas hydrate drilling Area in the South China Sea and variations in sedimentation rates[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2013, 38(1): 1-9.]
- [34] Fraser D R A, Gorman A R, Pecher I A, et al. Gas hydrate accumulations related to focused fluid flow in the Pegasus Basin, southern Hikurangi Margin, New Zealand[J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 77: 399-408.
- [35] 王力峰, 陆敬安, 梁金强, 等. 南海东北部陆坡水合物钻探区 BSR 推导流体运移速率研究[J]. 地学前缘, 2017, 24(4): 78-88. [WANG Lifeng, LU Jing'an, LIANG Jinqiang, et al. Research on fluid migration rates derived from BSR at the hydrate drilling area off the northeastern slope of South China Sea[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(4): 78-88.]
- [36] Vadakkepuliambatta S, Hornbach M J, Bünz S, et al. Controls on gas hydrate system evolution in a region of active fluid flow in the SW Barents Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 66: 861-872.
- [37] Zerpa L E, Sloan E D, Sum A K, et al. Overview of CSMHyK: A transient hydrate formation model[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2012, 98-99: 122-129.

TYPES OF SEA-BOTTOM CHANNELS AND RELATED GAS HYDRATE ACCULULATIONS IN THE SHENHU AREA, SOUTH CHINA SEA (SCS)

FU Chao¹, YU Xinghe¹, LIANG Jinqiang², HE Yulin², KUANG Zenggui², JIN Lina¹

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China)

Abstract: The drilling data collected from the Shenhu area in the years from 2007 to 2015 reveals that the area is rich in gas hydrate, which is greatly heterogenous in spatial distribution. There are many channels of different kinds developed in the study area. It is significant to study the types of channels and its bearing on gas hydrate accumulation as well as their impacts on future exploration. Through seismic interpretation and integrated analysis of seismic, logging and coring data, we made a classification of channel types and related hydrate accumulations. According to their shape and genesis, there are four kinds of channels: the “V” shaped channel, migrating “V” shaped channel, “U” shaped channel and saucer shaped channel. The characteristics of gas hydrate accumulation depend upon to some extent the types of channels. The gas hydrate reservoir in the “V” shape or migrating “V” shape channels, which usually have low hydrate abundance, are mostly located in the collapse deposits along the canyon wall. As to the “U” shaped channel, gas hydrates are mainly accumulated in the thalweg and levee deposits. In the Saucer shape channels, however, gas hydrates are mainly deposited in the coarse grained sediments of terminal lobes and overbank fans. The sedimentation rate and flow erosion rate are the main factors to the gas hydrate accumulation in variable shape d channels.

Key words: turbidite channel; gas hydrate; difference in gas hydrate accumulation; Shenhu sea area