

文章编号: 0253-2697(2011) 02-0226-08

南海北部神狐海域天然气水合物成藏动力学模拟

苏丕波¹ 梁金强² 沙志彬² 付少英² 雷怀彦^{1,3,4} 龚跃华²

(1. 厦门大学海洋与环境学院 福建厦门 361005; 2. 广州海洋地质调查局 广东广州 510760;

3. 厦门大学近海海洋环境国家重点实验室 福建厦门 361005; 4. 中国科学院地质与地球物理研究所兰州油气中心 甘肃兰州 730000)

摘要: 为进一步了解南海北部神狐海域天然气水合物的成藏匹配条件,利用典型二维地震剖面,构建了该区的地质模型,并对其进行了天然气水合物成藏动力学的模拟。研究结果表明:神狐海域具备天然气水合物成藏的温度、压力条件;生物气和热解气的资源潜力巨大,满足水合物形成的气源条件;运移条件优越,有利于天然气水合物的聚集成藏。并提出了该区天然气水合物的成藏模式。
关键词: 南海; 神狐海域; 天然气水合物; 成藏模式; 生物气; 热解气

中图分类号: TE112 文献标识码: A

Dynamic simulation of gas hydrate reservoirs in the Shenhu area, the northern South China Sea

SU Pibo¹ LIANG Jinqiang² SHA Zhibin² FU Shaoying² LEI Huaiyan^{1,3,4} GONG Yuehua²

(1. College of Oceanography & Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China; 3. State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 4. Lanzhou Research Center of Petroleum Resources, Institute of Geology & Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The north slope of the South China Sea is structurally characterized by a passive continental margin and has various Cenozoic oil- and gas-bearing depositional basins, where hydrocarbon resources are abundant, and the geological and tectonic settings, the temperature and pressure regimes as well as the methane-generative potential of thick organic-rich sediments are all favorable for the formation of gas hydrate. As a result, this region is also an ideal area for studying gas hydrate accumulations. In order to understand natural conditions of the gas hydrate formation, based on the typical 2-dimensional seismic image of the Shenhu area, a geological model of gas hydrate reservoirs was established and a dynamic simulation of gas hydrate accumulations was carried out as well. The results indicated that the temperature and pressure of the Shenhu area are appropriate for gas hydrate accumulations, source rocks there have a huge gas-generative potential and hydrocarbon migration conditions are favorable, providing an abundant gas source and good pathways for the gas hydrate formation. A forecasting model of the gas hydrate formation was given based on basin analysis, indicating that the Shenhu area is a better prospect area of gas hydrate because of its huge potential of gas hydrate resources.

Key words: South China Sea; Shenhu area; gas hydrate; reservoir forming model; biogas; thermogenic gas

天然气水合物是在低温、高压环境下由水和天然气组成的类冰结晶化合物,主要赋存在陆地永久冻土带和水深超过 300 m 的海洋沉积物中。目前发现的海底天然气水合物主要分布于世界各大洋边缘海域的大陆斜坡、陆隆海台和盆地,以及一些内陆海区的大洋沉积物中,水深一般为 300~4000 m,赋存沉积物一般分布于海底以下 0~1500 m 深度^[1]。

控制海洋天然气水合物成藏的关键因素包括温度、压力、气体组分、气体饱和度及孔隙水组成,水合物

的结晶和生长还取决于沉积物颗粒大小、形状和组成^[2],但是这些因素受到海洋中一系列构造和沉积作用的影响,在不同的时间尺度上可能导致多种天然气水合物成藏的动力学反映^[3-5]。目前,国内外对天然气水合物赋存及分布主控因素的研究仍局限于对影响水合物成藏的个别因素探讨上,如全球气温变化、构造活动与地热史、沉积作用效应、地温梯度和冰川性海平面相对移位等^[6],这些因素均可改变天然气水合物形成所需要的温压条件与沉积物的物性特征,从而影响

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项(200811014)“天然气水合物成藏的控制因素研究”、国家自然科学基金项目(No. 40930845)“南海北部深水盆地油气渗漏系统与天然气水合物富集机制研究”和国家重点基础研究发展规划(973)项目(2009CB219501)“南海北部天然气水合物成藏的气源条件研究”联合资助。

第一作者及通讯作者: 苏丕波,男,1981年3月生,2004年毕业于长江大学,现为厦门大学在读博士研究生,主要从事天然气水合物的气源条件与成藏模拟研究。E-mail: spb_525@sina.com

天然气水合物系统的稳定性。除温压条件外,充足的气体供应是天然气水合物形成的另一个重要控制因素,从动态过程来考虑,除了烃类气体的供应外,还涉及烃类气体到达天然气水合物稳定带的运移通道、天然气水合物形成的构造环境等。

南海北部陆坡含油气盆地发育,气源丰富、类型众多,深部热解气、浅层生物气均有可能形成天然气水合物,虽然部分学者分别就烃类气体供应问题、烃类运移条件、岩层和构造对天然气水合物产状与分布影响或控制做过单方面的研究^[7-9],但还没有将它们作为一个有机整体在时空尺度上开展水合物的成藏系统研究。笔者选取南海北部神狐海域的典型地震剖面,通过水合物成藏动力学模拟,对其天然气水合物成藏模式进行了初步探讨。

1 研究区地质概况

神狐海域水合物研究区地理上位于南海北部陆缘的陆坡区中段的神狐暗沙东南海域,即西沙海槽与东沙全岛之间海域,构造上位于珠江口盆地珠江二拗陷白云凹陷(图 1)。白云凹陷水深 200~2 000 m,面积约为 20 000 km²,新生代最大沉积厚度约为 12 000 m,地史上经历多次地壳运动和多阶段的构造演化,地质构造复杂,断裂-褶皱体系非常发育^[10-13]。

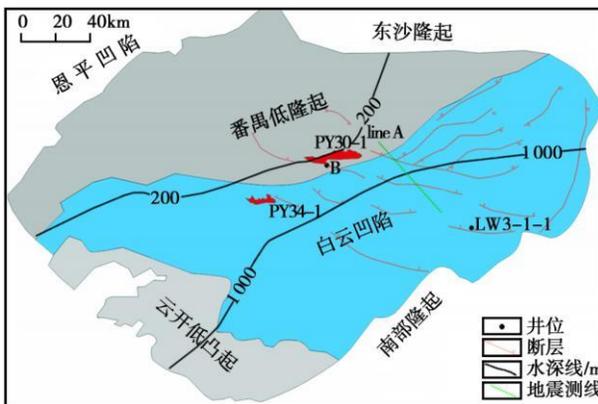


图 1 研究区位置及范围

Fig. 1 Location and range of the studied area

神狐海域研究区晚期断裂极其发育^[14],新近纪断层主要形成于晚中新世和上新世以来两个时期。晚中新世断层以 NW 向为主,断层大部分切割上中新统,部分切割上新统,是研究区最主要的断层;上新世以来活动断层以 NEE 向为主,断层活动较弱,但数目众多,部分断层切穿较新的沉积层延伸至海底附近。深部断层为天然气向浅部水合物稳定带运移创造了有利

条件,而褶皱构造易于捕获天然气,促使水合物的形成。同时,神狐海域海底滑塌作用非常强烈,有分析认为可能与水合物的形成和分解有关^[15]。此外,根据沉积相分析^[16-17],南海北部陆坡自晚渐新世以来处于拗陷沉降期,以滨、浅海—半深海沉积环境为主,陆源碎屑供给充足,沉积速率大,厚度大,粒度总体上中等偏细。其中,晚中新世以来神狐海域研究区以三角洲、扇三角洲、滑塌扇、浊积扇沉积为主,重力流非常发育,特别是第四纪,广泛发育滑塌沉积。这些沉积体普遍具有较高的沉积速率,沉积厚度相对较大,含有大量的有机质,并能得以有效地保存,能为天然气水合物的形成提供充足的气源。总之,神狐海域研究区具备良好的天然气水合物成藏地质条件。

2 模型选择及参数选取

由于神狐海域探井缺乏,因此,根据既要在神狐海域水合物研究区具有代表性,还要兼顾该区及邻区是否有可以借鉴的模拟参数资料的原则,选取神狐海域水合物研究区的二维地震测线 line A 进行模拟。该测线处水深为 400~1 700 m,地层自下而上发育有始新统文昌组,渐新统恩平组、珠海组,中新统珠江组、韩江组、粤海组,上新统万山组和第四系,并且在水深 500~1 000 m 的万山组内识别出了指示水合物存在的 BSR (Bottom Simulating Reflection, 似海底反射) 特征标志(图 2)。

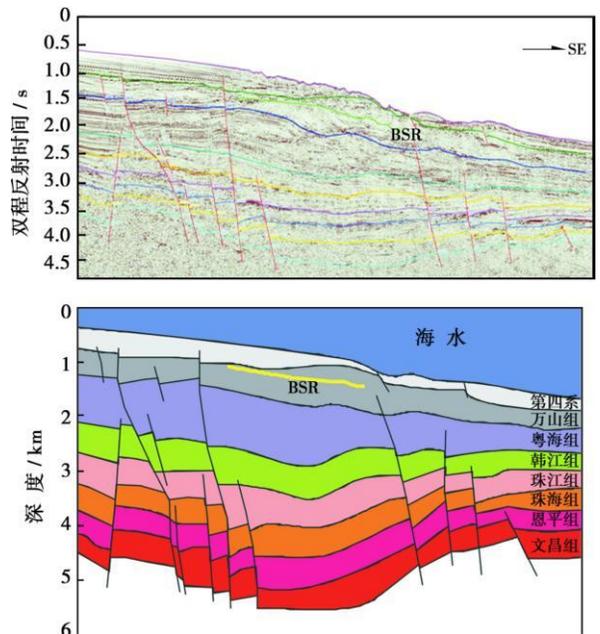


图 2 神狐海域 line A 地震解释剖面及模拟地质模型
Fig. 2 Seismic profile and its geological interpretation of line A in Shenhu area

●于兴河,苏新,陈芳,等.南海天然气水合物成矿的沉积条件初步研究.中国地质大学(北京)、广州海洋地质调查局,2002.

采用 IES 软件中的 PetroMod 2D 模块, 主要对研究区新生界地层的温压场、有机质热演化指数 R_o 和流体运移进行了模拟。地层压力的演化基于 2 个假设, 应用有限元模拟方法来模拟: 首先假设岩石和孔隙流体在压缩和变形过程中保持质量平衡; 其次压实过程中, 流体排出极其缓慢, 能够以达西定律来描述。热史恢复则采用地球热力学和地球化学相结合方法, 即将正演技术与反演技术、地史恢复与热史恢复结合起来, 利用已知的地层信息和古温标资料作为约束条件, 对研究区的热演化史进行模拟。有机质成熟度的计算采用 Sweeney 和 Burnham 提出的 $EA-S-Y\%$ R_o 模型^[18-19], 它是目前用于成熟度计算最为完善的一种模型, 不仅考虑了众多一级平行化学反应及其相应反应的活化能, 而且还考虑了加热速率, 适用范围广, 能比较精确地模拟地质过程中有机质成熟度演化。

模拟中主要需要岩石性质、地质界面、烃源岩地球化学和断层活动性等参数。对这些模拟参数的选取, 综合借鉴了研究区各方面的研究成果。岩性参数来源于中海油钻探资料^[20]。地质界面参数中, 古水深来源于高红芳等^[21]的研究结果; 热流值来源于 ODP184 航次调查成果^[22-23]; 古地温由 IES 系统根据剖面所在的全球位置, 利用全球平均地表温度窗口以及古水深变化来计算。综合目前研究资料及地质分析, 认为该区主要烃源岩层为文昌组和恩平组, 对于其烃源岩地球化学参数, 采用傅宁等^[24]的研究成果, 其中恩平组 TOC 平均值为 2.19%, HI 平均值为 157.4 mg/g; 文昌组 TOC 平均值为 2.94%, HI 平均值为 483.4 mg/g。而断层活动性的分析主要是基于断层在剖面地震剖面上断穿的层位以及研究区构造活动的时间来判断和估算, 本次模拟研究中, 根据断层活动期次将其划分为始新世及之前形成的活动断层、晚中新世形成的活动断层以及上新世以来的活动断层, 对剖面经过的每一条断层均进行了属性定义; 在模拟过程中, 各断层活动性自构造活动时间开始均设为完全开启状态。

3 模拟结果分析

模拟结果是否可靠需要通过其与钻井实测值的对比来进行检验。研究区番禺低隆起有部分探井, 其中井 B 有实测的地温和镜质体反射率^[25], 且该井与测线 line A 较近, 两者的演化环境与受热历史相差不大, 因此, 可以利用该井的实测值对模拟结果进行检验。从距该井最近的剖面点模拟结果与实际井资料的对比

(图 3) 可以看出, 测线点模拟曲线与井测试值趋势比较一致, 说明模拟结果比较准确, 可以用于相关解释。

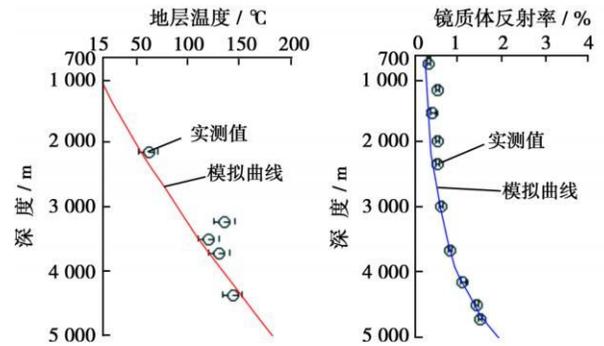


图 3 研究区井 B 地温、 R_o 实测值与模拟值对比

Fig. 3 Relations of modeling temperature and R_o trend with measured values in Well B

3.1 温压场模拟

天然气水合物的形成与成藏需要特定的温压条件, 低温和高压有利于水合物的形成和稳定赋存^[26]。通过模拟得到该区现今的温度场(图 4)与压力场(图 5), 在剖面上 BSR 所处温度约为 16°C, 压力约为 15 MPa。对比世界上已知天然气水合物区, 结合甲烷在海水中形成水合物的相平衡曲线表明^[27], 该测线剖面 BSR 区域处于天然气水合物稳定存在的温压场范围内, 符合天然气水合物的成藏要求。

3.2 有机质成熟度模拟

对神狐海域地质调查站位资料^[28] 的分析表明: 研究区浅表层沉积物中普遍存在游离气, 其甲烷碳同位素 $\delta^{13}C_1$ 值为 -46.2‰ ~ -74.3‰(PDB), 平均为 -60.9‰(PDB), 除 2 个样品的 $\delta^{13}C_1$ 值为 -46.2‰和 -51‰(PDB) 外, 大多数样品的 $\delta^{13}C_1$ 值小于 -57‰(PDB), 证实神狐海域浅表层沉积物顶空气主要来源于生物气。同时, 许多调查站位顶空气甲烷的含量在垂向上保持了相对较高的丰度, 特别是在调查区北部白云凹陷内的两个调查站位, 其顶空气甲烷的含量分别约为 120 $\mu\text{L}/\text{kg}$ 和 200 $\mu\text{L}/\text{kg}$, 暗示其深部可能有持续稳定的游离甲烷供应(来源于深部的热解气)。王建桥等^[29] 对研究区东部 ODP1146 站位顶空气样品的分析结果显示为混合气体的特征。由此推测, 研究区浅部地层中的天然气可能兼有生物气和热解气两种来源。

镜质体反射率 R_o 值是反映烃源岩成熟度的重要指标。通常, 生物气的烃源岩应处于未熟—低成熟阶

●郭依群, 梁劲, 龚跃华, 等. 南海北部神狐海区天然气水合物资源概查报告. 广州海洋地质调查局, 2004.

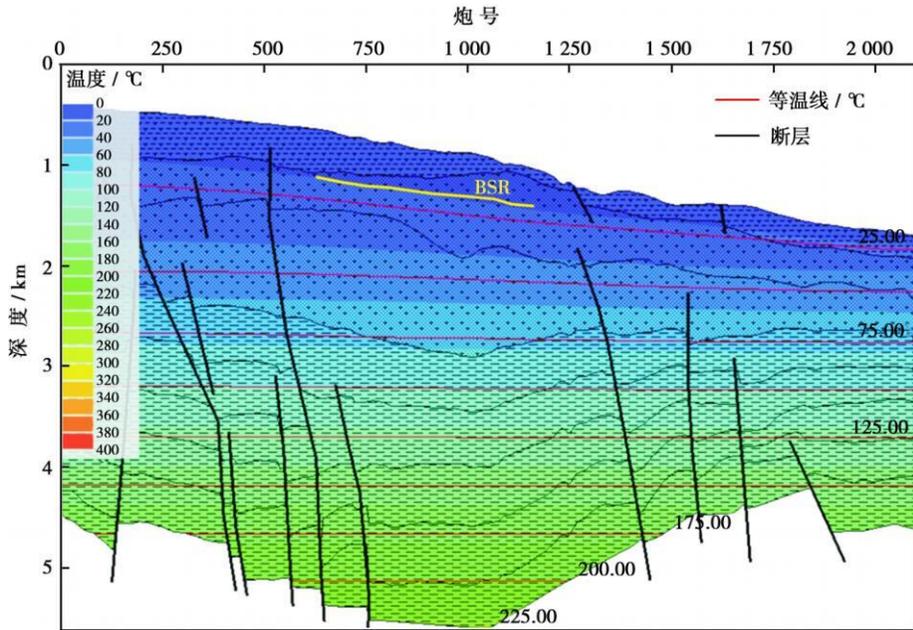


图 4 神狐海域 line A 现今温度场模拟

Fig. 4 Temperature field simulation of line A in Shenhu area

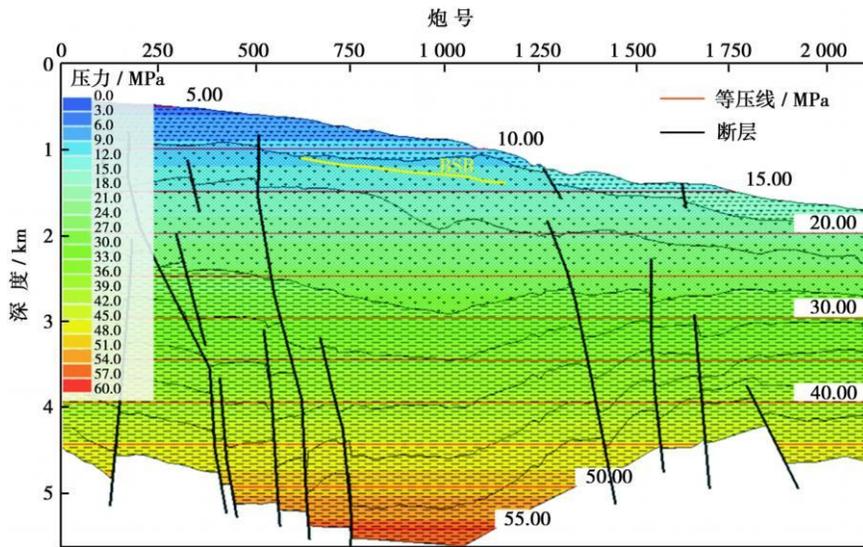


图 5 神狐海域 line A 现今压力场模拟

Fig. 5 Pressure field simulation of line A in Shenhu area

段, 其 $R_o < 0.7\%$ 。 R_o 模拟结果显示(图 6): 浅部地层第四系—粤海组以及局部地区的韩江组 R_o 为 $0.2\% \sim 0.6\%$, 均未进入生油门限, 但其厚度大, 有机质丰度较高。其中, 第四系 TOC 平均为 $0.22\% \sim 0.28\%$, 万山组 TOC 平均为 $0.30\% \sim 0.39\%$, 粤海组 TOC 平均为 0.49% ; 粤海组—第四系海相泥岩生烃潜力($S_1 + S_2$) 平均为 $0.13 \sim 0.32 \text{ mg/g}$, 均已达到了生物气烃源岩的有机质丰度和生烃潜力标准^①, 这几套地层可以成为良好的生物成因气的主力“生物烃源岩”, 具备生成生物气的巨大潜力。在合适的条件下, 能

够为水合物成藏提供大量的生物气气源。

同时, 模拟结果也表明了凹陷内的“热解烃源岩”文昌组和恩平组有机质的演化程度普遍较高。其中, 文昌组 $R_o > 2\%$, 最大超过 3% , 处于过成熟生干气阶段, 已产生大量热解气; 恩平组 R_o 为 $1.3\% \sim 2.6\%$, 处于高演化阶段, 以生气为主。高分辨率地震资料解释结果显示^②, 文昌组在白云凹陷中面积达 1900 km^2 , 厚度为 $1700 \sim 3000 \text{ m}$, TOC 平均值为 2.94% , 氯仿沥青“ A ”平均值为 0.225% , 有机质类型以 II_1 型为主, HI 平均为 483.4 mg/g ; 恩平组在白云凹陷中分布面

①梁金强, 郭依群, 沙志彬, 等. 天然气水合物资源量评价方法及成矿远景研究. 广州海洋地质调查局, 2002.

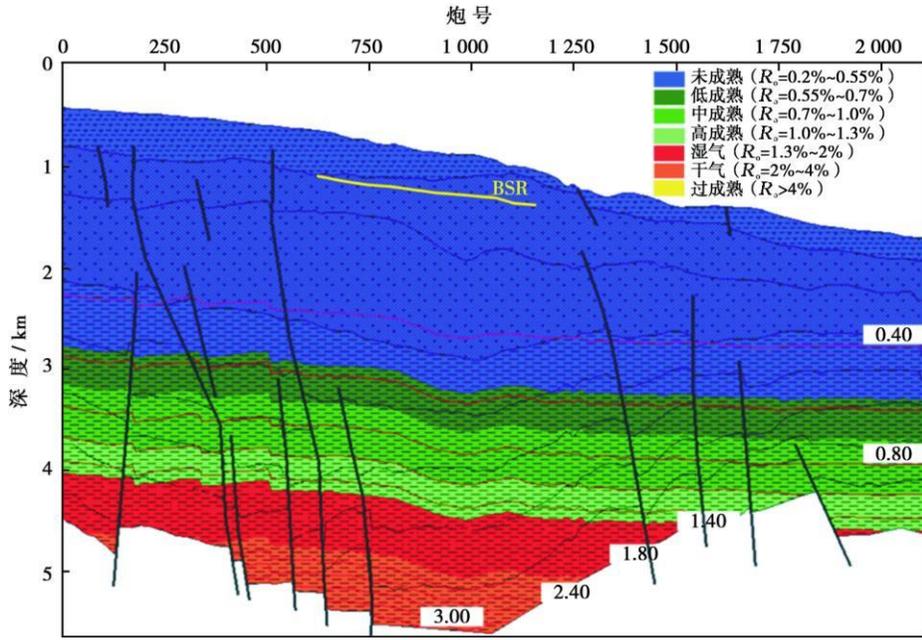


图6 神狐海域 line A 有机质成熟度模拟

Fig. 6 Organic maturity simulation of line A in Shenhu area

积为 2860 km², 厚度为 1100~ 2300 m, TOC 平均值为 2.19%, 氯仿沥青“ A ”平均值为 0.1976%, 有机质类型以 II₂—III 型为主。岩石热解分析测定恩平组烃源岩 S₁+ S₂ 为 0.22~ 34.36 mg/g, 平均为 3.11 mg/g, HI 为 41.6~ 400.0 mg/g, 平均为 157.4 mg/g。研究区热解生气潜力同样巨大。

3.3 流体运移模拟

从测线剖面所在区域的文昌组和恩平组烃源岩产生的油气流体运移模拟结果可以看到(图7), 深部的

文昌组和恩平组烃源岩已经开始产生大量的热解气, 并且所产热解气通过断层或上部渗透率高的岩层, 可以运移至浅部水合物稳定带, 为水合物成藏提供一定的热解气。同时也应注意到, 虽然深部烃源岩层能够大量产气, 但是大部分气体运移至珠海组和珠江组的有利构造部位集聚成藏, 然后, 这些成藏的气体部分以断裂为主要运移通道向上运移至浅部水合物稳定带。而当断层断至海底时, 气体将沿着断层逸散至海面, 造成气体的散失, 不利于水合物的成藏。另外, 深部热解

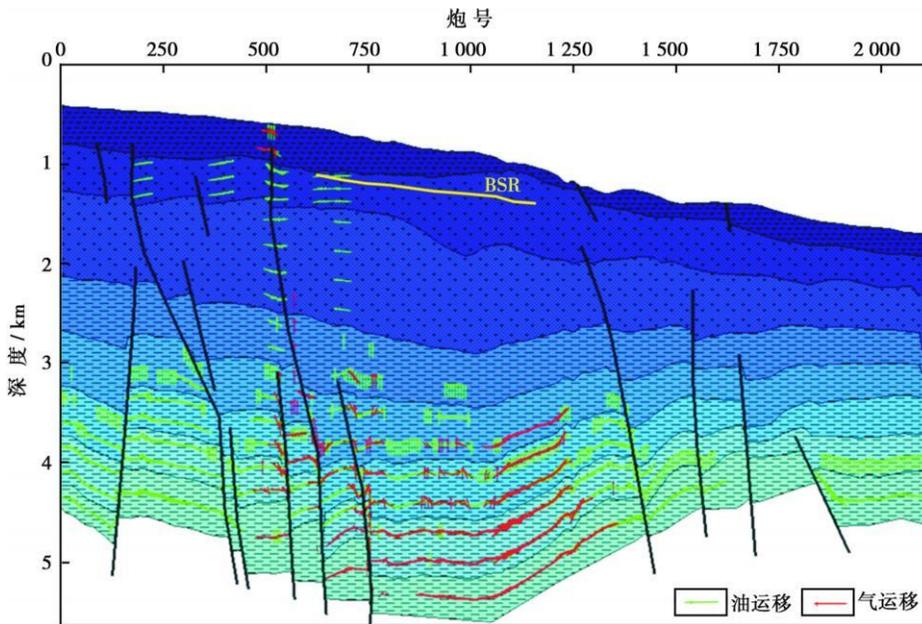


图7 神狐海域 line A 油气运移模拟

Fig. 7 Migration simulation of oil and gas of line A in Shenhu area

气也可以随超压孔隙流体向上运移, 与浅部生物气混合形成水合物。而在浅部, 由于断裂构造不发育, 受流体势控制, 浅部生物气主要以侧向运移的方式运移至水合物稳定带区域。

4 天然气水合物成藏模式的构建

天然气水合物成藏是一个复杂的过程。其成藏系统包括烃类生成体系、流体运移体系和成藏富集体系, 它们在时间和空间上的有效匹配共同决定着天然气水合物的成藏特征。始新世—早渐新世, 白云凹陷在潮湿的气候环境、全封闭的深洼陷及高的沉积速率下形成了巨厚的文昌组、恩平组烃源岩, 随后, 这两套烃源岩在裂后相对构造平静期大量生烃, 而以高沉积速率的深水细粒为主的充填作用导致白云凹陷形成超压, 随后的东沙运动使白云凹陷发育大型底辟构造和大量 NW 向张扭断裂, 压力随之得到释放, 逐步形成现今趋于正常地层压力的状态^[30]。超压存在说明油气运移曾经不畅, 现今白云凹陷趋于正常压力, 则表明超压得到了有效释放, 油气运移通畅, 大量油气已经运移出来。因此, 可以认为晚期底辟和断裂产生的垂向通道为油气垂向输导的有效通道。油气勘探也显示白云凹陷北坡天然气藏具有晚期断裂控制成藏的特点, 同时白云凹陷深水区存在的大量与底辟构造和断裂相关的浅层亮点气异常反射, 也证明了凹陷深部的油气被垂直输导到浅部地层, 即白云凹陷存在晚期活动的断裂和底辟带的垂向输导系统, 可以大大改善天然气的垂向运移条件。代一丁等^[31]通过盆地模拟表明: 文昌组和恩平组两套烃源岩层在白云凹陷已处于产生裂解气的阶段, 这与本次模拟吻合。另外, 离该测线不

远处, 有中国第一口深水钻井 LW3-1-1 井, 该井在上渐新统珠海组和下中新统珠江组钻遇了大量天然气, 累计探明天然气地质储量约为 $(800 \sim 1100) \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[32-33]。据此推测, 该区域深部烃源岩在一定程度上可以产生大量热解气, 这些热解气通过合适的断层和底辟为天然气水合物的成藏提供一定的热解气源。

同时, 近海油气勘探表明^[34], 南海北部边缘盆地生物气的烃源岩分布相当广泛, 纵向上从上中新统至第四系, 甚至在局部区域的中中新统的不同层段也有分布; 区域上盆地内均有大套浅海相一半深海相的泥质烃源岩展布, 其有机质丰度相对较高, 已达到了作为生物气烃源岩的标准, 具有一定的生烃潜力。并且已在白云凹陷北斜坡 PY34-1 和 PY30-1 构造的浅层发现了生物气气藏。

在上述分析基础上, 构建了该区的水合物成藏模式(图 8): 神狐海域水合物气源由深海平原生物气和深部热解气两部分组成。在硫酸盐-甲烷界面(SMI)之上是富硫酸盐的沉积层, 由于硫酸盐对产甲烷菌有明显的抑制作用, 不可能存在甲烷水合物, 在 SMI 之下, 由于硫酸盐被消耗掉, 甲烷菌不受抑制作用, 在一定条件下开始产生大量甲烷生物气并主要通过横向迁移至有利部位形成水合物; 深部热解烃源岩具有良好的生烃能力, 生成的大量气体以活动断裂为主要运移通道向上运移, 并在合适的条件下在源岩上部有利构造部位形成一定规模的天然气气藏。同时, 这些深源高成熟气体持续以断裂为主要运移通道或者随超压孔隙流体向上运移, 至浅部与浅部生物成因气混合在一起, 在合适的温压域内形成水合物藏。

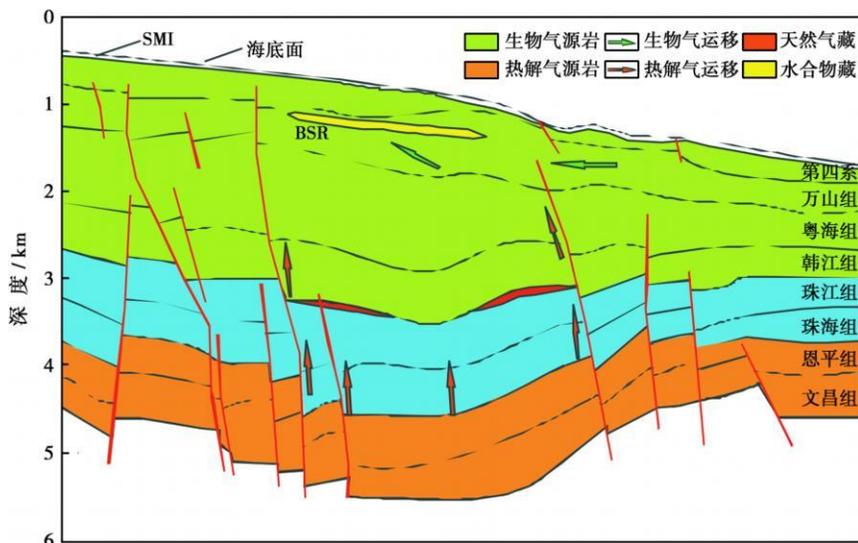


图 8 神狐海域天然气水合物成藏模式

Fig. 8 Reservoir forming model for gas hydrate in Shenhu area

5 结 论

(1) 神狐海域具备有利于天然气水合物成藏的水深、温度、压力条件及其地质条件。

(2) 神狐海域气源条件充足,白云凹陷深部发育文昌组和恩平组两套主要的烃源岩,其有机碳含量和镜质体反射率值均较高,以产气为主,部分气体通过断裂构造运移至水合物稳定带,为天然气水合物成藏提供一定的热解气气源;神狐海域浅部韩江组、粤海组、万山组及第四系镜质体反射率为 0.2%~0.6%,热成熟程度低,厚度大,泥岩及有机质含量高,是良好的生物气源岩,生物气资源潜力巨大,可为天然气水合物的形成提供生物成因气气源。

(3) 神狐海域运移条件优越,发育沟通气源岩层的断裂与底辟构造,为水合物的成藏提供气体的垂向运移通道;而在浅部,气体则主要通过侧向运移方式运移至水合物稳定带。

参 考 文 献

- [1] Kvenvolden K A, Ginsburg G D, Soloviev V A. Worldwide distribution of subaquatic gas hydrates[J]. *Geo-Marine Letters*, 1993, 13(1): 32-40.
- [2] Clennell M B, Hovland M, Booth J S, et al. Formation of natural gas hydrates in marine sediments 1: Conceptual model of gas hydrate growth conditioned by host sediment properties [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(B10): 22985-23003.
- [3] Kvenvolden K A. Methane hydrates and global climate [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1988, 2(3): 221-229.
- [4] Dickens G R, O'Neil J R, Rea D C, et al. Dissociation of oceanic methane hydrate as a cause of the carbon isotope excursion at the end of the Paleocene [J]. *Paleoceanography*, 1995, 10(6): 965-971.
- [5] Buffett B, Archer D. Global inventory of methane clathrate: Sensitivity to changes in the deep ocean [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 227: 185-199.
- [6] Grevemeyer I, Villing er H. Gas hydrate stability and the assessment of heat flow through continental margins [J]. *International Journal of Geophysics*, 2001, 145(3): 647-660.
- [7] 樊栓狮,刘锋,陈多福. 海洋天然气水合物的形成机理探讨[J]. *天然气地球科学*, 2004, 15(5): 524-530.
Fan Shuanshi, Liu Feng, Chen Duofu. The research of the origin mechanism of marine gas hydrate[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2004, 15(5): 524-530.
- [8] 陈多福,苏正,冯东. 海底天然气渗漏系统水合物成藏过程及控制因素[J]. *热带海洋学报*, 2005, 24(3): 38-46.
Chen Duofu, Su Zheng, Feng Dong. Formation and its controlling factors of gas hydrate reservoir in marine gas vent system[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2005, 24(3): 38-46.
- [9] 吴时国,姚根顺,董冬冬,等. 南海北部陆坡大型气田区天然气水合物的成藏地质构造特征[J]. *石油学报*, 2008, 29(3): 324-328.
Wu Shiguo, Yao Genshun, Dong Dongdong, et al. Geological structures for forming gas hydrate reservoir in the huge deepwater gas field of the northern South China Sea [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(3): 324-328.
- [10] 张功成,米立军,吴时国,等. 深水区——南海北部大陆边缘盆地油气勘探新领域[J]. *石油学报*, 2007, 28(2): 15-21.
Zhang Gongcheng, Mi Lijun, Wu Shiguo, et al. Deepwater area: The new prospecting targets of northern continental margin of South China Sea [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(2): 15-21.
- [11] 张光学,祝有海,梁金强,等. 构造控制型天然气水合物矿藏及其特征[J]. *现代地质*, 2006, 20(4): 605-612.
Zhang Guangxue, Zhu Youhai, Liang Jinqiang, et al. Tectonic controls on gas hydrate deposits and their characteristics [J]. *Geosciences*, 2006, 20(4): 605-612.
- [12] 庞雄,陈长民,朱明,等. 南海北部陆坡白云深水区油气成藏条件探讨[J]. *中国海上油气*, 2006, 18(3): 145-149.
Pang Xiong, Chen Changmin, Zhu Ming, et al. A discussion about hydrocarbon accumulation conditions in Baiyun deep water area, the northern continental slope, South China Sea [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2006, 18(3): 145-149.
- [13] 张功成. 南海北部陆坡深水区构造演化及其特征[J]. *石油学报*, 2010, 31(4): 528-533.
Zhang Gongcheng. Tectonic evolution of deepwater area of northern continental margin in South China Sea [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(4): 528-533.
- [14] 吴能有,杨胜雄,王宏斌,等. 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*, 2009, 52(6): 1641-1650.
Wu Nengyou, Yang Shengxiong, Wang Hongbin, et al. Gas-bearing fluid influx sub-system for gas hydrate geological system in Shenhu area, northern South China Sea [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(6): 1641-1650.
- [15] 龚跃华,杨胜雄,王宏斌,等. 南海北部神狐海域天然气水合物成藏特征[J]. *现代地质*, 2009, 23(2): 210-216.
Gong Yuehua, Yang Shengxiong, Wang Hongbin, et al. Gas hydrate reservoir characteristics of Shenhu area, north slope of the South China Sea [J]. *Geoscience*, 2009, 23(2): 210-216.
- [16] 于兴河,张志杰,苏新,等. 中国南海天然气水合物沉积成藏条件初探及其分布[J]. *地学前缘*, 2004, 11(1): 311-315.
Yu Xinghe, Zhang Zhijie, Su Xin, et al. Primary discussion on accumulation conditions for sedimentation of gas hydrate and its distribution in South China Sea [J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(1): 311-315.
- [17] 于兴河,张志杰. 南海北部陆坡区新近系沉积体系特征与天然气水合物分布的关系[J]. *中国地质*, 2005, 32(3): 470-476.
Yu Xinghe, Zhang Zhijie. Characteristics of Neogene depositional systems on the northern continental slope of the South China Sea and their relationships with gas hydrate [J]. *Geology in China*, 2005, 32(3): 470-476.
- [18] Sweeney J J, Burnham A K. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics [J]. *AAPG Bulletin*, 1990, 74(10): 1559-1570.
- [19] Burnham A K, Sweeney J J. A chemical kinetic model of vitrinite

- m aturation and reflectance [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53(10): 2649-2657.
- [20] 翟光明, 王善书. 中国石油地质志: 卷十六: 沿海大陆架及毗邻海域油气区 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1990: 101-121.
Zhai Guangming, Wang Shanshu. *Petroleum geology of China: Vol. 16: Oil & gas bearing areas on the continental shelf and its neighbouring regions* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1990: 101-121.
- [21] 高红芳, 杜德莉, 钟广见. 珠江口盆地沉降史定量模拟和分析 [J]. *南海地质研究*, 2006(1): 11-20.
Gao Hongfang, Du Deli, Zhong Guangjian. *Quantitative simulation of subsidence history and analysis of Pearl River Mouth Basin in South China Sea* [J]. *Geological South China Sea*, 2006(1): 11-20.
- [22] 吴能友, 蔡秋容. 南海大洋钻探 184 航次初步成果简介 [J]. *海洋地质*, 1999(4): 9-52.
Wu Nengyou, Cai Qiurong. *The introduction of preliminary report of ODP Leg184 in the South China Sea* [J]. *Marine Geology*, 1999(4): 9-52.
- [23] 黄永祥, 张光学. 我国海域天然气水合物地质-地球物理特征及前景 [M]. 北京: 地质出版社, 2009: 95-105.
Huang Yongxiang, Zhang Guangxue. *The geologic geophysical characteristic and foreground of gas hydrate in China sea* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009: 95-105.
- [24] 傅宁, 米立军, 张功成. 珠江口盆地白云凹陷烃源岩及北部油气成因 [J]. *石油学报*, 2007, 28(3): 32-38.
Fu Ning, Mi Lijun, Zhang Gongcheng. *Source rocks and origin of oil and gas in the northern Baiyun Depression of Pearl River Mouth Basin* [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(3): 32-38.
- [25] 石万忠, 陈红汉, 陈长民, 等. 珠江口盆地白云凹陷地层压力演化与油气运移模拟 [J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2006, 31(2): 229-236.
Shi Wanzhong, Chen Honghan, Chen Changmin, et al. *Modelling of pressure evolution and hydrocarbon migration in the Baiyun Depression, Pearl River Mouth Basin, China* [J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2006, 31(2): 229-236.
- [26] Kvenvolden K A, Redden G D. Hydrocarbon gas in sediment from the shelf, slope, and basin of the Bering Sea [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1980, 44(8): 1145-1150.
- [27] Hyndman R D, Davis E E. A mechanism for the formation of methane hydrate and seafloor bottom-simulating reflectors by vertical fluid expulsion [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(B5): 7025-7041.
- [28] 雷新民, 张光学, 郑艳. 南海北部神狐海域天然气水合物形成及分布的地质因素 [J]. *海洋地质动态*, 2009, 25(5): 1-9.
Lei Xinmin, Zhang Guangxue, Zheng Yan. *Geological factors for formation and distribution of natural gas hydrate in Shenhu Sea area, northern South China Sea* [J]. *Marine Geology Letters*, 2009, 25(5): 1-9.
- [29] 王建桥, 祝有海, 吴必豪, 等. 南海 ODP1146 站位烃类气体地球化学特征及其意义 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2005, 25(3): 53-59.
Wang Jianqiao, Zhu Youhai, Wu Bihao, et al. *Geochemistry of hydrocarbon gases from Site 1146, ODP Leg 184, the South China Sea and the implications* [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2005, 25(3): 53-59.
- [30] 朱伟林, 张功成, 杨少坤, 等. 南海北部大陆边缘盆地天然气地质 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2007: 138-144.
Zhu Weilin, Zhang Gongcheng, Yang Shaokun, et al. *Natural gas geology in the northern continental margin basin of South China Sea* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007: 138-144.
- [31] 代一丁, 庞雄. 珠江口盆地珠二坳陷石油地质特征 [J]. *中国海上油气(地质)*, 1999, 13(3): 169-173.
Dai Yiding, Pang Xiong. *Petroleum geological characteristics of Zhu II Depression, Pearl River Mouth Basin* [J]. *China Offshore Oil and Gas(Geology)*, 1999, 13(3): 169-173.
- [32] 朱俊章, 施和生, 何敏, 等. 珠江口盆地白云凹陷深水区 LW3-1 井天然气地球化学特征及成因探讨 [J]. *天然气地球科学*, 2008, 19(2): 229-233.
Zhu Junzhang, Shi Hesheng, He Min, et al. *Origins and geochemical characteristics of gases in LW3-1 Well in the deep sea region of Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin* [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2008, 19(2): 229-233.
- [33] 朱伟林, 张功成, 高乐. 南海北部大陆边缘盆地油气地质特征与勘探方向 [J]. *石油学报*, 2008, 29(1): 1-9.
Zhu Weilin, Zhang Gongcheng, Gao Le. *Geological characteristics and exploration objectives of hydrocarbons in the northern continental margin basin of South China Sea* [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(1): 1-9.
- [34] 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.

(收稿日期 2010-06-07 改回日期 2010-10-19 责任编辑 王秀)