

doi: 10.11720/wtyht.2017.6.02

孙忠军,方慧,刘建勋,等.祁连山冻土区三露天天然气水合物矿藏勘查模型[J].物探与化探,2017,41(6):998-1004.<http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.6.02>

Sun Z J, Fang H, Liu J X, et al. An exploration model of gas hydrate in Sanlutian permafrost region, Qilian Mountain[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(6): 998-1004. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.6.02>

祁连山冻土区三露天天然气水合物 矿藏勘查模型

孙忠军^{1,2}, 方慧^{1,2}, 刘建勋^{1,3}, 张舜尧^{1,2,3}

(1. 国家现代地质勘查技术研究中心, 河北 廊坊 065000; 2. 中国地质科学院 地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000; 3. 中国地质科学院地球表层碳-汞地球化学循环重点实验室, 河北 廊坊 065000)

摘 要: 祁连山三露天天然气水合物矿藏不同于海域, 需要研究冻土区天然气水合物地质模型和勘查模型。根据天然气水合物地质、物化探和钻探成果, 应用含油气系统理论建立了三露天天然气水合物矿藏的“五位一体”地质模型。在总结了近几年祁连山木里物化探勘查成果的基础上, 建立了冻土区天然气水合物勘查模型。不同地球化学指标分别发育顶部异常、环状异常和负异常; 冻土层音频大地电磁测深出现连续分布的高阻, 探地雷达的特征是电磁波速度快、衰减慢, 在冻土底界处有明显的反射信号; 控矿断裂的地震标志主要是反射波同向轴发生错断、终止、扭曲、突变或分叉合并等, AMT 的主要特点是电性不连续; 天然气水合物矿层形成的反射波组呈现低速、高频、弱振幅的特征, 测井响应特征为高电阻率、低声波时差、低自然伽马、低密度。

关键词: 冻土区; 天然气水合物; “五位一体”地质模型; 勘查模型

中图分类号: P632 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2017)06-0998-07

0 引言

2008 年中国地质调查局首次在祁连山冻土区钻采到天然气水合物实物样品, 实现了陆上冻土区天然气水合物的勘查突破^[1-2]。到目前为止, 中国地质调查局和神化青海能源有限公司已经在三露天钻探 26 口天然气水合物钻井, 其中 11 口井(DK-1、DK-2、DK-3、DK-7、DK-8、DK-9、DK-12、DK13-11、DK12-13、DK11-14、DK8-19)钻到天然气水合物实物样品。同时期, 国土资源部和中国地质调查局在该区安排了 7 个天然气水合物地质和物化探项目, 取得了中纬度冻土区天然气水合物勘查的一些成果^[3-10], 为天然气水合物地质模式和勘查模型的研究提供了基础。

研究天然气水合物的地质模型, 有助于理解天

然气水合物控矿因素和成藏理论。天然气水合物勘查模型的建立可以提升物化探勘查技术的水平, 为水合物物化探异常解释评价提供理论依据。

1 三露天天然气水合物“五位一体”地质模型

Milkov 等提出了海域与常规油气圈闭概念相似的构造圈闭、地层圈闭、泥火山圈闭和复合圈闭 4 种类型水合物成藏模式(图 1)^[11]。构造圈闭型水合物矿藏主要由热成因气、生物成因气和混合气从较深部的含油气系统沿断裂、泥火山或其他构造通道快速运移到水合物稳定域形成, 如墨西哥湾西北部、水合物脊、哈肯摩滋比泥火山等, 该圈闭类型水合物矿藏的三维形态受流体通道的几何形态、流体的流速、天然气的组成和温压场等因素控制。地层圈闭

收稿日期: 2017-09-08

基金项目: 中国地质调查局油气项目(DD20179192); 国土资源部公益性行业科研专项项目(201111019); 国家 127 专项“天然气水合物资源勘查与试采工程”项目(GZHL20110324, GZH201400302)

作者简介: 孙忠军(1961-), 男, 研究员, 地球化学专业, 主要从事油气和天然气水合物研究与勘查工作。Email: sunzhongjun@igge.cn

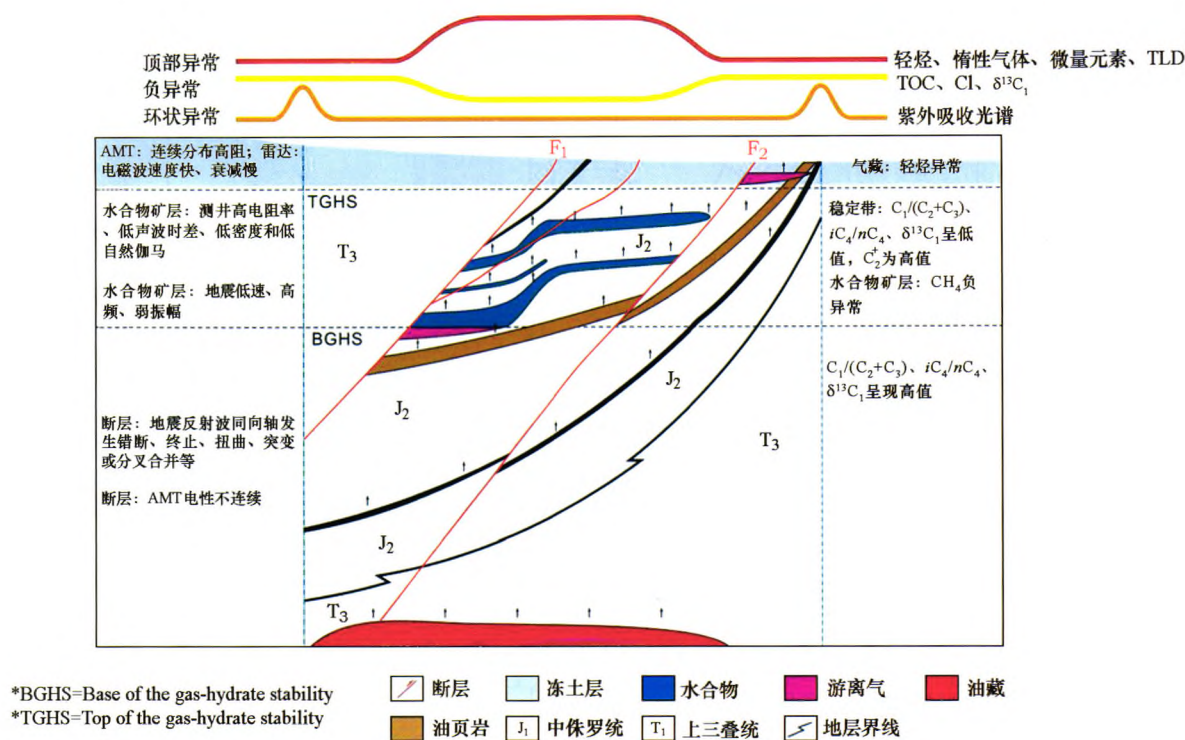


图 2 祁连山三露天天然气水合物勘查模型

岩生成的气体运移至浅部,直接或间接由较晚形成具有压型断裂封堵形成浅部气体聚集,经晚更新世以来冰期作用,形成水合物或仍以游离和吸附气存在于地层中^[19]。总之,测区内具有良好的气源条件,下伏地层中的烃源岩、油页岩和煤层气均可作为水合物矿藏提供气源。

冻土区天然气水合物形成于低温高压环境,并受沉积物中孔隙流体的盐度、气体组分等因素的影响^[20]。祝有海等根据木里煤田聚乎更矿区一井田 33 号孔气体组分数据,利用 Sloan 的 CSMHYD 软件对祁连山天然气水合物形成的温压条件进行了计算^[21]。计算结果表明,33 号钻孔具备形成天然气水合物的条件,其稳定带的顶、底界埋深分别为 171~574 m,稳定带厚度为 403 m。近几年木里天然气水合物钻探确定的天然气水合物稳定带深度为 140~330 m,厚度将近 200 m。极地天然气水合物存在于地下 130~2 000 m^[14]。由此可见,中纬度冻土区天然气水合物产出深度低于极地冻土区。

地质、地震、化探和钻井岩心研究表明,木里水合物受到 NE 向的 F₁、F₂ 逆断层(图 2)、NEE 向次级断裂和层间破碎带的控制^[2-5,22]。F₁ 和 F₂ 断裂为燕山期形成的逆冲推覆断裂,具持续压性特征,是油气运移的主要通道^[12,23]。NEE 向的次级断裂与水合物矿藏的形成关系密切,与层间破碎带一起控制了水合物矿藏的形成。水合物钻探结果表明,天

然气水合物矿藏位于 F₂ 断层的南部,而且 F₂ 断层北部钻探的 DK-4、DK-10、DK10-18、DK-6 和 DK5-22 均为干井。F₂ 断层北部存在浅层气藏(图 2),2013 年钻探的 DK-10 井,钻探到 50 多米,发生气喷现象,这说明该气藏埋藏很浅。

祁连山三露天可能深部是油气,中部是天然气水合物,浅部存在浅层气。目前已钻探水合物发现井 11 个,包括 DK-1、DK-2、DK-3、DK-7、DK-8、DK-9、DK13-11、DK11-14、DK12-13、DK11-14、DK8-19 井,天然气水合物分布在 140~330 m 深度区间,赋存于侏罗统江仓组上段含油页岩段和江仓组下段的细砂岩、泥质粉砂岩、泥岩和油页岩中。“裂隙型”以薄层状、片状、团块状赋存于粉砂岩、泥岩和油页岩的裂隙面上;“孔隙型”呈浸染状赋存于粉砂岩、中砂岩的孔隙中^[22]。水合物层甲烷含量为 54%~76%,乙烷含量为 8%~15%,丙烷含量为 4%~21%,并有少量的丁烷、戊烷等,CO₂ 含量一般为 1%~7%,高的可达 15%~17%。水合物光谱曲线与墨西哥海底水合物样品相似,属于 II 型水合物^[24]。

应用含油气系统理论建立了三露天天然气水合物矿藏的“五位一体”地质模型,五位是指五种控矿因素,分别是成熟烃源岩和煤层、热解成因气、温压条件、控矿断裂和层间破碎带,一体为水合物矿藏,“五位一体”地质模型可以帮助我们对该区水合物远景进行科学的预测。

2 三露天天然气水合物勘查模型

以天然气水合物油气系统理论为指导,系统研究天然气水合物的控矿要素的物化探探测技术,总结祁连山冻土区天然气水合物的勘查模型。

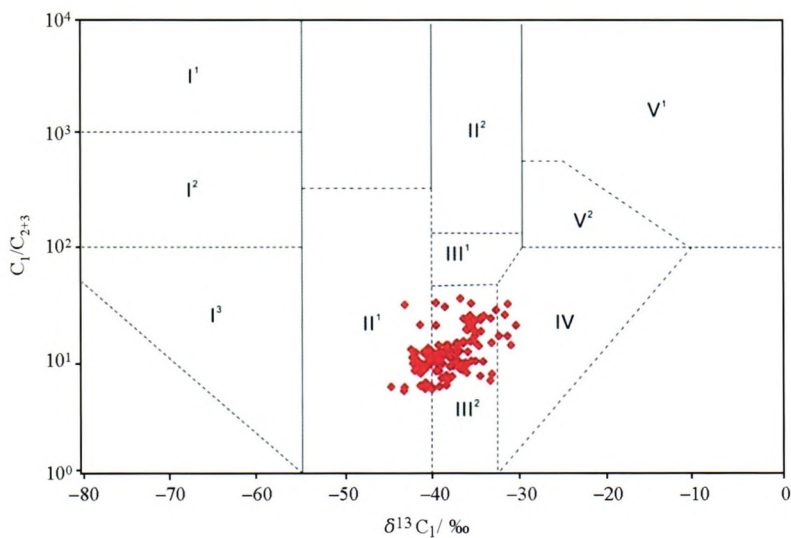
2.1 气源条件探测技术

地球化学研究气源条件主要包括水合物矿藏的物质来源、地球化学异常和地球化学勘查模式。

图 3 是三露天 DK-8 井顶空气 $C_1/(C_2+C_3)-\delta^{13}C_1$

C_1 分布图,样品采自三露天 DK-8 井的岩屑,分析指标有顶空气轻烃和甲烷碳同位素等。从图中可以看出,天然气水合物成藏物质主要是凝析油伴生气和煤层气,其次是原油伴生气。这与木里地区土壤样品的判断结果一致^[5-6]。

研究表明,祁连山木里天然气水合物矿藏存在明显的地球化学异常,它们或者是水合物的主要成分,或者是水合物矿藏的微量组分,或者是烃类微渗漏的地球化学蚀变产物。



I¹—生物气; I²—生物气和亚生物气; I³—亚生物气; II¹—原油伴生气; II²—油型裂解气; III¹—油型裂解气和煤气; III²—凝析油伴生气和煤气; IV—煤气; V¹—无机气; V²—无机气和煤气

图 3 祁连山三露天 DK-8 井顶空气 $C_1/(C_2+C_3)-\delta^{13}C_1$ 图(底图自戴金星,1992)

顶部异常组合:主要有酸解烃、顶空气、游离烃和热释烃的异常^[5,8-9],顶空气氮和氦的异常,微量元素 Ba、V、Fe、Ca、Hg 等的异常^[7],热释光异常^[4]。

环状异常组合:UV222、UV254、UV280 的异常,土壤 I 和 I/Cl 的异常^[25]。

负异常组合:土壤有机碳、游离烃甲烷碳同位素和土壤 Cl 元素的负异常(图 4)。

祁连山三露天天然气水合物矿藏地球化学异常最大面积是 4.3 km²,最小面积是 1.2 km²,目前钻探确定的水合物矿藏面积约 1.3 km²。

2.2 冻土条件探测技术

冻土区天然气水合物温压条件的主要衡量标准是冻土层的厚度。冻土厚度的测量技术主要是测井、探地雷达、音频大地电磁测深等地球物理技术。祁连山三露天钻井 SK-2 井测温确定的冻土厚度为 50 m。音频大地电磁测深在冻土层的反映是连续分布的高阻,祁连山木里剖面测量的冻土厚度为 40~150 m (图 5)。冻土层探地雷达的特征是电磁波速

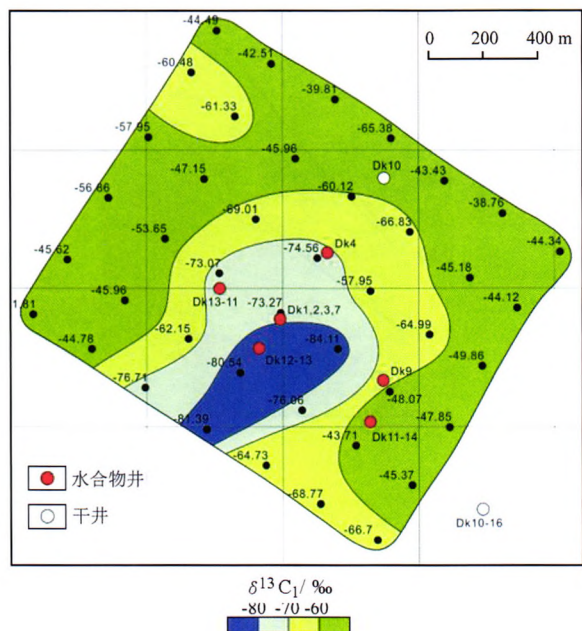


图 4 三露天天然气水合物矿藏甲烷碳同位素负异常平面

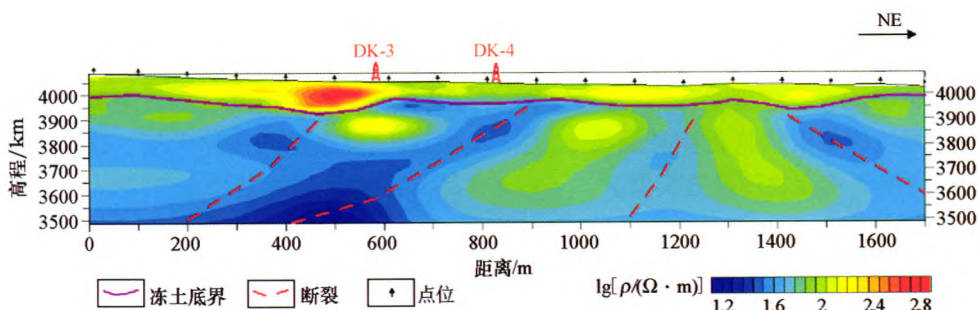


图 5 木里 L10 测线反演电阻率剖面

度快、衰减慢,在冻土底界处有明显的反射信号,木里探地雷达探测的冻土厚度是 65~105 m。虽然不同方法确定的冻土厚度有差异,但是可以确定冻土水合物的形成需要的冻土条件大于 50 m。

2.3 运移通道探测技术

此次主要研究了用地震和 AMT 方法确定运移通道。断层的地震标志主要是反射波同向轴发生错断、终止、扭曲、突变或分叉合并等。AMT 解释断层的主要特点是电性不连续。祁连山三露天天然气水合物矿藏的运移通道主要是 F_1 和 F_2 逆断层(图 2、图 6)。 F_1 和 F_2 是区域逆断层,在测区中西部近乎平行,呈 NWW 向展布,天然气水合物矿藏位于 F_2 断层以南, F_1 和 F_2 断层附近。所以, F_1 和 F_2 断层是三露天天然气水合物的运移通道和控矿断裂。

2.4 天然气水合物矿层探测技术

此次探测天然气水合物矿藏的主要技术是测井、地震和井中化探。三露天含天然气水合物层位测井响应特征表现为高电阻率、低声波时差、低自然伽马、低密度(“一高三低”),与国外其他已发现水合物地区测井响应特征一致^[26]。在木里地区含天然气水合物的矿层形成的反射波组呈现低速、高频、弱振幅的特征^[27](图 6)。天然气水合物稳定带范围(140~300 m)的地球化学特征: $C_1/(C_2+C_3)$ 、 iC_4/nC_4 、 iC_5/nC_5 和 $\delta^{13}C_1$ 呈现低值特征, C_2^+ 为高值异常,天然气水合物矿层 CH_4 呈现负异常(见图 4)。浅层气的酸解烃、顶空气和 $\delta^{13}C_1$ 呈现高值异常。深部油气的主要标志是钻孔中发现油气显示,土壤紫外吸收光谱呈现环状异常。

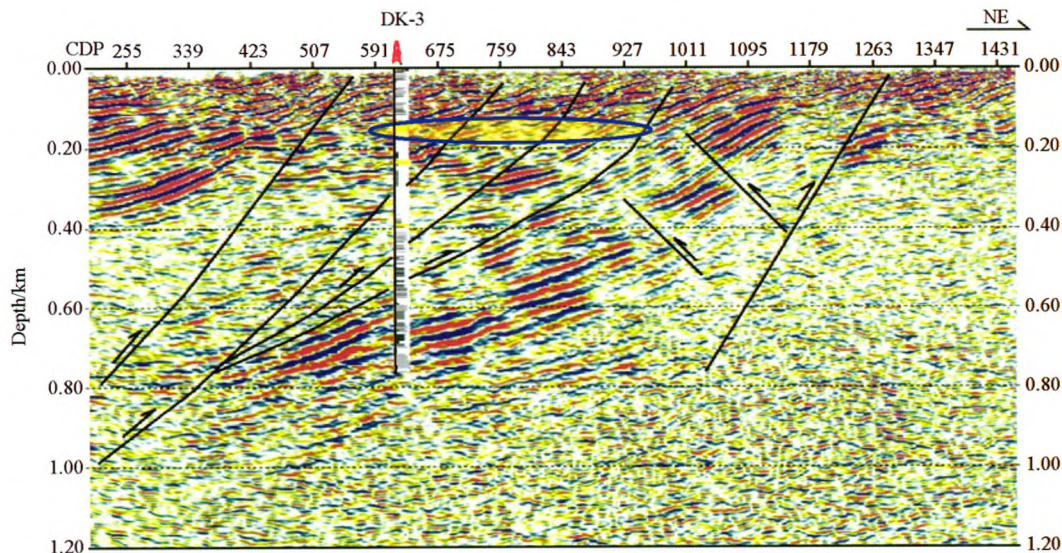


图 6 过 DK-3 井地震剖面构造解释

3 结论和建议

本文研究了祁连山木里三露天天然气水合物矿藏的地质模型,从成熟烃源岩和煤层、热解成因气、冻土温压条件、气体运移通道、水合物成藏特征五方

面研究出三露天水合物控矿因素,研究出“五位一体”的耦合地质模型。

建立了冻土区天然气水合物勘查模型。近地表地球化学异常存在三种模式,分别是顶部异常、环状异常和负异常;冻土层 AMT 的反映是连续分布的高

阻,探地雷达的特征是电磁波速度快、衰减慢,在冻土底界处有明显的反射信号;断层的地震标志主要是反射波同向轴发生错断、终止、扭曲、突变或分叉合并等,AMT 的主要特点是电性不连续;天然气水合物矿层形成的反射波组呈现低速、高频、弱振幅的特征,测井响应特征表现为高电阻率、低声波时差、低自然伽马、低密度。总结出中纬度冻土区冻土区天然气水合物勘查的有效技术组合为:水合物化探、AMT、探地雷达、地震、综合测井和井中化探。

冻土区天然气水合物较海底天然气水合物在成藏和围岩方面有很大的差异,只有提高地球物理探测精度,才能攻克冻土区水合物矿体与固化围岩物性差异小的难题,大幅提高中纬度冻土区天然气水合物勘查的成功率。

参考文献:

- [1] 祝有海,张永勤,文怀军,等.青海祁连山冻土区发现天然气水合物[J].地质学报,2009,83(11):1762-1771.
- [2] Lu Z Q, Zhu Y H, Zhang Y Q, et al. Gas hydrate occurrences in the Qilian Mountain permafrost, Qinghai Province, China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2011, 43: 341-348.
- [3] Sun Z J, Xu M C, Yang Z B, et al. Geochemical characteristics of the soil above Muli gas hydrate reservoir [M] // Jin S Chung, Takeshi Komai. Proceeding of the Tenth (2013) ISOPE Ocean and Gas Hydrates Symposium. Cupertino, California: international Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), 2013:92-98.
- [4] Sun Z J, Han Z Y, Fang H, et al. Natural Thermoluminescence Prospecting of Gas Hydrate in the Qilian Mountains permafrost, Qinghai [M] // Jin S Chung, Tfabian Vorpahl, SEOK-Won Hong, et al. Proceedings of the Twenty-fourth (2014) International Ocean and Polar Engineering Conference. Cupertino, California: international Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), 2014:15-20.
- [5] Sun Z J, Yang Z B, Mei H, et al. Geochemical characteristics of the shallow soil above Muli gas hydrate reservoir in the permafrost region of Qilian Mountains [J]. China. Journal of Geochemical Exploration, 2014, 139: 160-169.
- [6] 孙忠军,杨志斌,秦爱华,等.中纬度带天然气水合物地球化学勘查技术[J].吉林大学学报:地球科学版,2014,44(4):1063-1070.
- [7] 孙忠军,杨志斌,卢振权,等.青海木里三露天天然气水合物矿藏土壤微量元素地球化学特征[J].现代地质,2015,29(5):1164-1172.
- [8] 周亚龙,孙忠军,张富贵,等.青海木里三露天天然气水合物土壤热释气技术应用研究[J].现代地质,2015,29(5):1173-1179.
- [9] 秦爱华,周亚龙,李永红,等.青海木里三露天天然气水合物地球化学远景评价[J].现代地质,2015,29(5):1242-1250.
- [10] 郝纯,孟庆芬,梅海.青海木里三露天天然气水合物微生物地球化学勘查研究[J].现代地质,2015,29(5):1157-1163.
- [11] Milkov A V, Sassen R. Economic geology of offshore gas hydrate accumulations and provinces [J]. Marine and Petroleum Geology, 2002, 19: 1-11.
- [12] 卢振权,李永红,王伟超,等.青海木里三露天冻土天然气水合物成藏模式研究[J].现代地质,2015,29(5):1014-1023.
- [13] Collett T S, Johnson A, Knapp C, et al. Natural gas hydrates—a review [M] // Natural gas hydrates—energy resource potential and associated geologic hazards. Tulsa, Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists Memoir, 2009, 146-219.
- [14] Collett T S, Lee M W, Agena W F, et al. Permafrost-associated natural gas hydrate occurrences on the Alaska North Slope [J]. Marine and Petroleum Geology, 2011, 28:279-294.
- [15] 曹代勇,刘天绩,王丹,等.青海木里地区天然气水合物形成条件分析[J].中国煤炭地质,2009,21(9):3-6.
- [16] 黄霞,祝有海,王平康,等.祁连山冻土区天然气水合物烃类气体组分的特征和成因[J].地质通报,2011,30(12):1851-1856.
- [17] 杨志斌,周亚龙,孙忠军,等.祁连山木里地区天然气水合物地球化学勘查[J].物探与化探,2013,37(6):988-992.
- [18] 龚文强,张永生,宋天锐,等.南祁连盆地木里凹陷侏罗系烃源岩沉积环境与生烃潜力[J].中国地质,2014,41(1):215-221.
- [19] 卢振权,祝有海,张永勤,等.青海祁连山冻土区天然气水合物的气体成因研究[J].现代地质,2010,24(3):581-588.
- [20] Sloan E D, Koh C A. Clathrate Hydrate of Natural Gases [M]. 3rd ed. New York: CRC Press of Taylor and Francis Group, 2008.
- [21] 祝有海,刘亚玲,张永勤.祁连山多年冻土区天然气水合物的形成条件[J].地质通报,2006,25(1/2):58-63.
- [22] 王平康,祝有海,卢振权,等.祁连山冻土区天然气水合物岩性和分布特征[J].地质通报,2011,30(12):1839-1850.
- [23] 文怀军,卢振权,李永红,等.青海木里三露天井田天然气水合物调查研究新进展[J].现代地质,2015,29(5):983-994.
- [24] Zhu Y H, Zhang Y Q, Wen H J, et al. Gas Hydrate in the Qilian Mountain Permafrost, Qinghai, Northwest China [J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2010, 84(1):1-10.
- [25] 唐瑞玲,孙忠军,张舜尧,等.冻土区天然气水合物的探途元素——卤族元素 I 和 Cl [J].物探化探计算技术,2016,38(4):553-559.
- [26] 林振洲,李洋,高文利,等.祁连山冻土区天然气水合物层位测井物性分析[J].物探与化探,2013,37(5):834-837.
- [27] 徐明才,刘建勋,柴铭涛,等.青海天峻县木里地区天然气水合物地震响应特征[J].地质通报,2011,30(12):1883-1890.

An exploration model of gas hydrate in Sanlutian permafrost region, Qilian Mountain

SUN Zhong-Jun^{1,2}, FANG Hui^{1,2}, LIU Jian-Xun^{1,3}, ZHANG Shun-Yao^{1,2,3}

(1. National Modern Geological Exploration Technology Research Center, Langfang 065000, China; 2. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, China; 3. Key Laboratory of Geochemical Cycling of Carbon and Mercury in the Earth's Critical Zone, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China)

Abstract: Gas hydrate in Sanlutian area of Qilian Mountain is different from that of marine gas hydrate, and hence it is very urgent to study geoscience and exploration model. According to the theory of petroleum system and the achievements of geology, geography, geochemistry and drilling, the authors created a four-in-one geological model for gas hydrate deposit. Based on the summary of geophysical and geochemical exploration in recent years, the authors further established a model of gas hydrate exploration in permafrost region. Various geochemical indicators show top anomaly, annular anomaly and negative anomaly. Continuous distribution of high resistance was detected by audio magnetotelluric survey (AMT), the feature of ground penetrating radar is high-speed electromagnetic wave, slow attenuation and obvious reflected signal along bottom boundary of permafrost. The seismic indicators of ore-controlling fault find expression in such phenomena as faulting, termination, distortion, mutation or bifurcation in accordant axis of reflection wave, and the feature of AMT is electrical discontinuity. The reflected signal in gas hydrate bed is low velocity, high frequency and weak amplitude. The logging response is high resistivity, low acoustic time, low natural gamma and low density.

Key words: permafrost; gas hydrate; five-in-one geological model; exploration model

(本文编辑:沈效群)