

金春爽, 乔德武, 卢振权等. 青海木里冻土区水合物稳定带的特征研究——模拟与钻探结果对比. 地球物理学报, 2011, 54(1): 173~181, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.01.018

Jin C S, Qiao D W, Lu Z Q, et al. Study on the characteristics of gas hydrate stability zone in the Muli permafrost, Qinghai—comparison between the modeling and drilling results. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(1): 173~181, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.01.018

# 青海木里冻土区水合物稳定带的特征研究 ——模拟与钻探结果对比

金春爽<sup>1</sup>, 乔德武<sup>1</sup>, 卢振权<sup>2\*</sup>, 祝有海<sup>2</sup>, 张永勤<sup>3</sup>,  
文怀军<sup>4</sup>, 李永红<sup>4</sup>, 王平康<sup>2</sup>, 黄霞<sup>2</sup>

1 国土资源部油气资源战略研究中心, 北京 100034

2 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

3 中国地质科学院勘探技术研究所, 廊坊 065000

4 青海煤炭地质 105 勘探队, 西宁 810007

**摘 要** 基于青海木里冻土区的气体组成、钻孔泥浆的温度测量数据等对该区水合物稳定带的顶底深度进行了模拟计算, 并将计算结果与钻探揭示的水合物产出深度进行了对比. 模拟计算的水合物顶深在 148.8~122.7 m 间, 底深在 324.6~354.8 m 间, 水合物厚度在 175.8~232.2 m 间, 钻探揭示水合物及其异常产出在 133~396 m 间层段, 两者具有可比性, 彼此结果基本一致, 显示模拟手段可以很好地服务于水合物稳定带顶底深度的预测. 气体组成、冻土深度、冻土层内地温梯度、冻土层下地温梯度等是影响木里冻土区水合物稳定带顶底深度的主要敏感因素.

**关键词** 水合物稳定带, 模拟, 冻土, 木里, 青海

DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.01.018

中图分类号 P631

收稿日期 2010-04-19, 2010-12-23 收修定稿

## Study on the characteristics of gas hydrate stability zone in the Muli permafrost, Qinghai—comparison between the modeling and drilling results

JIN Chun-Shuang<sup>1</sup>, QIAO De-Wu<sup>1</sup>, LU Zhen-Quan<sup>2\*</sup>, ZHU You-Hai<sup>2</sup>, ZHANG Yong-Qin<sup>3</sup>,  
WEN Huai-Jun<sup>4</sup>, LI Yong-Hong<sup>4</sup>, WANG Ping-Kang<sup>2</sup>, HUANG Xia<sup>2</sup>

1 Strategic Research Center for Oil and Gas Resources, Ministry of Land and Resources, Beijing 100034, China

2 Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China

3 Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang of Hebei 065000, China

4 Qinghai No. 105 Coal Geological Exploration Team, Xining 810007, China

**Abstract** Based on gas composition and temperature measurements in the course of field drilling, the upper and lower depths of gas hydrate stability zone are calculated by modeling in the Muli permafrost, Qinghai, then the modeling results are compared with the drilling results. The modeling results show that the upper depth of gas hydrate stability zone is 148.8~122.7 m and the lower depth of gas hydrate stability zone is 324.6~354.8 m, with the thickness of gas

**基金项目** 国家重点基础研究发展计划项目(2009CB219501)、国家自然科学基金项目(41073040)、中国地质大调查项目(1212010818055)、中央公益性科研院所基本科研业务费专项基金项目(K1003)联合资助。

**作者简介** 金春爽, 女, 1974 生, 博士, 副研究员, 从事水合物与油气等相关研究工作。

\* **通讯作者** 卢振权, 男, 1972 生, 博士, 研究员, 从事水合物与油气的地球化学勘查等研究工作. E-mail: luzhq@vip.sina.com

hydrate stability zone of 175.8~232.2 m; the drilling results indicate that gas hydrate and its related indications occur at the interval of 133~396 m. These two types of results are comparable and thus are basically accordant, suggesting that the modeling can serve as a prediction of the upper and lower depths of gas hydrate stability zone. Gas composition, depth of permafrost, thermal gradients above and below the base of permafrost are sensitive factors affecting the upper and lower depths of gas hydrate stability zone in the Muli permafrost.

**Keywords** Gas hydrate stability zone, Modeling, Permafrost, Muli, Qinghai

## 1 引言

天然气水合物(简称水合物)因外貌像冰,点火可以燃烧,俗称“可燃冰”,是由水和重量轻的气体分子(如甲烷、乙烷、丙烷、异丁烷、硫化氢、二氧化碳等)在低温(一般 273.15 K 左右)、高压(一般大于 3~5 MPa)、气体浓度大于其溶解度条件下形成的一种结晶状固体物质<sup>[1~3]</sup>。在自然界中,水合物分布于水深大于 300 m 的海底沉积物中或地表 130 m 以下的多年冻土区中<sup>[1,4]</sup>。因其巨大的能源意义,加之潜在的环境效应及可能的灾害影响,水合物已成为一项当前调查研究的热点领域。

除海域外,陆上冻土区最早于上世纪 60 年代在前苏联 Messoyakha 地区发现了世界上第一个水合物藏<sup>[2]</sup>。1972 年在美国阿拉斯加北坡 Prudhoe Bay 油田区钻获到水合物实物样品<sup>[5]</sup>。加拿大 Mackenzie 三角洲地区自 1971 年和 1972 年发现水合物以来,先后钻探了 Mallik L-38、2L-38、3L-38、4L-38、5L-38 等系列井,并进行试生产<sup>[6]</sup>,是调查研究程度最高的地区<sup>[7~10]</sup>。

我国陆上冻土区面积约  $2.15 \times 10^6$  km<sup>2</sup>,主要分布在青藏高原地区<sup>[11]</sup>,是水合物一个重要潜在区<sup>[12]</sup>。自 2000 年以来,前人分别从地质<sup>[13,14]</sup>、地球物理<sup>[15]</sup>等方面开展研究并进行远景预测<sup>[16~19]</sup>。特别是从 2002 年开始,野外地质、地球化学调查结果已初现一些异常现象<sup>[20~22]</sup>。2008 和 2009 年,中国地质调查局在青海省祁连山木里冻土区实施水合物科学钻探试验,成功钻获并采集到水合物实物样品<sup>[23]</sup>,实现我国陆上冻土区水合物勘查突破<sup>[24]</sup>。钻探结果显示,水合物主要产在泥岩或粉砂岩裂隙中,其次产在砂岩孔隙中,其稳定带初始深度及厚度在不同钻孔中呈现不同特征,其产状无论在水平方向上还是垂直方向上均不连续,赋存规律不明显<sup>[25]</sup>。目前,不像海域可用三维地震属性精细分析确定天然气水合物三维分布的特征<sup>[26]</sup>,或采用时移地震监

测手段验证天然气水合物赋存状态的变化<sup>[27]</sup>,或运用天然气水合物成藏系统理论指导天然气水合物可能赋存规律的预测<sup>[28~30]</sup>,陆上冻土区天然气水合物至今还缺少有效的地球物理勘查技术和地质成藏理论帮助分析天然气水合物赋存及其稳定带分布规律。因此,当前迫切需要研究陆上冻土区天然气水合物稳定带的分布特征和规律,该项研究一方面可为研究区内后续水合物钻探及资源计算提供依据,另一方面可为木里冻土区点上水合物勘查突破后在青藏高原更大面积上的区域水合物勘查提供帮助。模拟手段特别是与钻探结果相结合是研究水合物稳定带的有效方法。本文以木里冻土区测量的相关参数为依据,研究模拟预测的水合物稳定带特征,并与钻探结果进行对比,验证模拟手段的有效性。

## 2 木里冻土区水合物地质特征

木里冻土区位于加里东构造运动期(513~386 Ma)形成的中祁连陆块西段,邻近南祁连构造带<sup>[31]</sup>(图 1),属于南祁连盆地的木里坳陷<sup>[32,33]</sup>。其内的木里煤田是青海省最大的煤田,主要为一套侏罗系陆相含煤地层,包括中侏罗统江仓组(J<sub>2j</sub>)和木里组(J<sub>2m</sub>)两套地层<sup>[34]</sup>。钻探区中部为三叠系地层组成的一个背斜,南北两侧为侏罗系含煤地层组成的两个向斜。该背向斜的南北两侧发育规模较大的逆推覆断裂,在南北两个向斜内发育北东向规模较大的剪切断裂,将凹陷切割成断续的不同块段,使得研究区呈现南北分带、东西分区的构造特征。

钻探揭示水合物呈肉眼可见的白色冰状薄层(混有泥浆时为烟灰色)出露在岩层的裂隙中,或呈肉眼难辨的微细浸染状产出在岩层的孔隙中,所在层段的岩性主要为泥岩、油页岩、粉砂岩、细砂岩等,相反,中砂岩、粗砂岩中则较少见到水合物,其产出与岩石类型关系不大,相反与断裂关系较为密切,同时受控于水合物的稳定带条件,特别是受冻土基本特征的约束<sup>[25]</sup>。

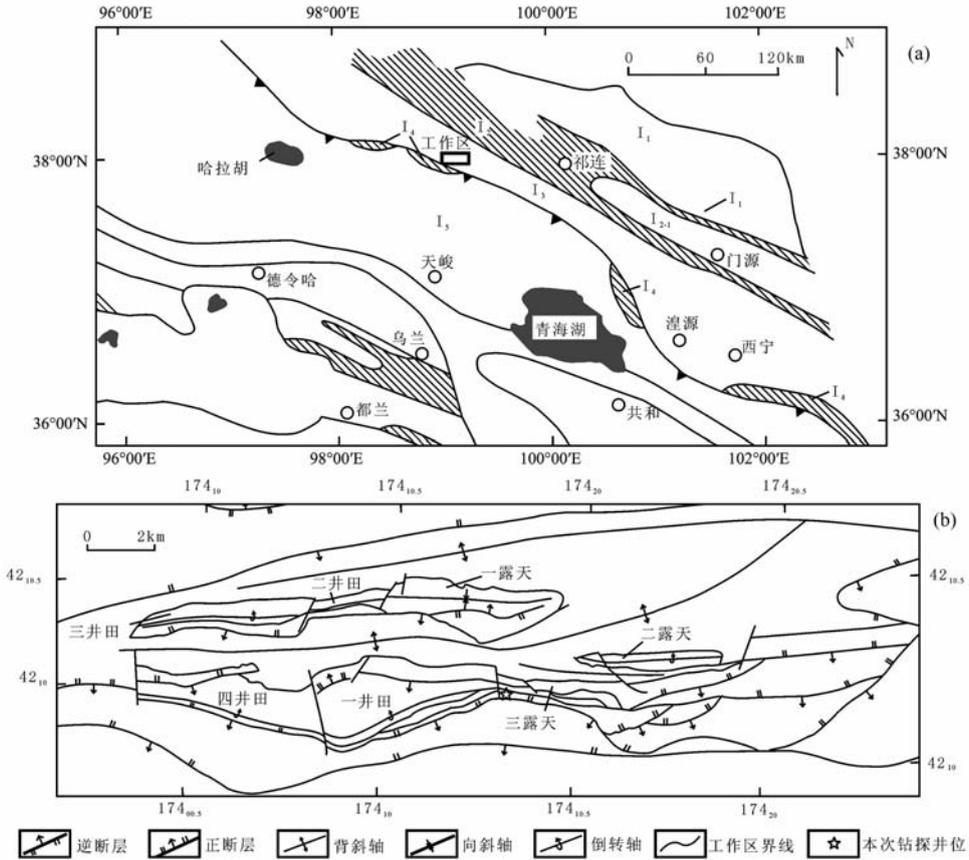


图1 木里冻土区大地构造单元与构造纲要图<sup>1)</sup>

(a)大地构造单元图;(b)构造纲要图。I<sub>1</sub>. 阿拉善陆块;I<sub>2</sub>. 北祁连新元古代—早古生代缝合带;I<sub>2-1</sub>. 祁连—门源早古生代中晚期岩浆弧带(O-S);I<sub>3</sub>. 中祁连陆块;I<sub>4</sub>. 疏勒南山—拉鸡山早古生代缝合带;I<sub>5</sub>. 南祁连陆块。

Fig.1 The outline of structures and the sketch of tectonic units in the Muli permafrost<sup>1)</sup>

(a) The tectonic unit map; (b) The structural sketch map; I<sub>1</sub> - The Alashan continental block; I<sub>2</sub> - The North Qilian suture in Neoproterozoic to Early Palaeozoic era; I<sub>2-1</sub> - The Qilian-Menyuan magmatic arc belt in middle to late Early Palaeozoic era (O-S); I<sub>3</sub> - The Middle Qilian continental block; I<sub>4</sub> - The South Shule Mt-Laji Mt suture in Early Palaeozoic era; I<sub>5</sub> - The South Qilian continental block.

### 3 木里冻土区水合物稳定带

#### 3.1 经验模型

确定冻土区水合物稳定带的两个主要条件为形成水合物的气体组成和冻土本身特征。通过对一系列由气体组成、纯水/孔隙水、孔隙大小条件组合的不同体系建立起的经验模型分析,发现所建立经验模型结果与实测实验数据吻合较好且大多数误差在5%之内<sup>[35]</sup>,故本文应用该经验模型来预测水合物的稳定带。木里冻土区中沉积岩孔隙流体的盐度目前还没有实测数据,如果借用 Mackenzie 三角洲冻土带水合物分布区中的相关资料,该区沉积物中孔

隙流体的盐度非常低,仅 $(5\sim 35)\times 10^{-9}$ <sup>[36]</sup>,那么这样低的孔隙流体盐度对木里冻土区水合物稳定带的影响可以忽略不计。木里冻土区沉积岩中孔隙大小应该不会对水合物形成条件造成抑制作用或影响,它们的孔隙大小可按非多孔介质水合物形成体系来考虑。这样,首先根据气体组成的不同可以给出水合物形成条件的经验表达式<sup>[35]</sup>:

$$P = \begin{cases} a + bT + cT^2, & T < 273.15K \quad (R^2 = 0.99999) \\ \exp(d \exp(eT)), & T \geq 273.15K \quad (R^2 = 0.999) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $P$ 、 $T$ 的单位分别为 kPa 和 K;参数  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$  依据一定的气体组成来确定(要求  $R^2 > 0.98$ )。

根据冻土的定义,冻土层内与冻土层下边界处

1)李永红,文怀军.青海省天峻县聚乎更煤矿区三井田勘探报告.青海煤炭地质105勘探队,2006

的温度应为零,即冻土表层温度( $T_0$ ,单位:K)、冻土厚度( $D$ ,单位:m)、冻土层内地温梯度( $G_1$ ,单位: $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ )、冻土层下地温梯度( $G_2$ ,单位: $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ )等之间的关系可表示为:

$$T_0 + G_1 D - 273.15 = 0, \quad (2)$$

在冻土层内或冻土层下某一深度  $h$ (单位:m)处的温度  $T$ (单位:K)可表示为:

$$T = \begin{cases} T_0 + G_1 h & (h < D), \\ 273.15 & (h = D), \\ G_2 (h - D) + 273.15 & (h > D). \end{cases} \quad (3)$$

$$P = \begin{cases} 10^{-3} \rho_1 g (T + G_1 D - 273.15) / G_1 + P_0 & (T \leq 273.15) \\ 10^{-3} \rho_2 g (T - 273.15) / G_2 + 10^{-3} \rho_1 g D + P_0 & (T > 273.15) \end{cases} \quad (5)$$

或

$$P = \begin{cases} 10^{-3} \rho_1 g (T - T_0) / G_1 + P_0 & (T \leq 273.15), \\ 10^{-3} \rho_2 g (T - 273.15) / G_2 + 10^{-3} \rho_1 g (273.15 - T_0) / G_1 + P_0 & (T > 273.15). \end{cases} \quad (6)$$

由式(1)、(5)或(6)即可共同确定木里冻土中水合物稳定带的上界和下界。

### 3.2 主要参数

由于受季节影响,木里冻土区表面冻土会出现一定深度的季节融化现象,但其最大季节融化深度相对其冻土厚度而言不大(冻土厚度一般为几十至一百多米,最大季节融化深度一般为  $1 \sim 2 \text{ m}$ )<sup>[11]</sup>. 可以假定冻土表面的季节性冻融现象对冻土层内整体上的温度和厚度影响忽略不计. 本文模拟计算木里冻土区水合物稳定带的顶底深度涉及到主要参数包括:气体组成、冰土层内地温梯度、冻土层下地温梯度等。

#### 3.2.1 气体组成

木里冻土区为煤系地层,水合物的气体来源既与煤系沉积地层有关,局部又与煤层气有关. 整体上,木里冻土区煤层气不发育,气体组成以  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2$  为主,结果见表 1. 表中  $\text{N}_2$  含量普遍较高,可能由于混入空气造成。

本次对部分含水合物岩心进行了解吸,解吸出的气体组成较为复杂,除重烃外,还含有部分氧气和氮气,结果见表 2、表 3. 显然,在解吸过程中一方面可能混入了空气,另一方面可能把岩心本身吸附的重烃气体也解吸了出来. 实际上,激光拉曼光谱仪对木里冻土区水合物样品检测的结果显示,水合物中气体主要由  $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_6$ 、 $\text{C}_3\text{H}_8$  和  $\text{CO}_2$  组成<sup>[23, 37]</sup>. 如果以对含水合物岩心解吸出的气体为依据,则形成水合物的气体由  $79.51\% \text{ CH}_4$ 、 $11.28\% \text{ C}_2\text{H}_6$ 、

在冻土层内或冻土层下某一深度  $h$ (单位:m)处,压力  $P$ (单位:kPa)可分别按静岩压力或静水压力计算:

$$P = \begin{cases} P_0 + 10^{-3} \rho_1 g h & (h \leq D) \\ P_0 + 10^{-3} \rho_1 g D + 10^{-3} \rho_2 g (h - D) & (h > D) \end{cases} \quad (4)$$

其中, $P_0$  为地面大气压力(101 kPa); $g$  为重力加速度( $9.81 \text{ m/s}^2$ ); $\rho_1$  为冻土层密度,一般为  $1500 \sim 2000 \text{ kg/m}^3$ ,模拟计算中可取  $1750 \text{ kg/m}^3$ ;  $\rho_2$  为冻土层下孔隙流体密度( $1000 \text{ kg/m}^3$ ).

由式(2)、(3)、(4)可得到冻土层内和冻土层下地温梯度的关系式:

表 1 木里冻土区煤层气组成<sup>1)</sup>

Table 1 Composition of coal-bed gases in the Muli permafrost<sup>1)</sup>

井田	钻孔	煤层	埋深(m)	煤层气成分(%)		
				$\text{CH}_4$	$\text{CO}_2$	$\text{N}_2$
一井田	37	下 <sub>1</sub>	155.8	80.12	4.27	0
		下 <sub>2</sub>	242.65	44.89	1.88	43.72
三井田	11	下 <sub>2</sub>	416.2	7.63	17.85	63.05
		下 <sub>1</sub>	436.95	76.7	1.28	21.72
63号孔	13	下 <sub>2</sub>	567.4	1.79	5.74	84.7
		向斜	下 <sub>1</sub>		37.52	0.81
二井田	南翼	下 <sub>1</sub>		52.59	2.07	45.34
		向斜	下 <sub>2</sub>		47.05	4.73
北翼	下 <sub>2</sub>			53.76	6.49	39.75
		下 <sub>1</sub>	117.5	10.03	1.7	87.99
一露天	402	下 <sub>2</sub>	212.3	2.43	0.48	96.84
		下 <sub>1</sub>	60.1	3.01	1.58	92.39
406	下 <sub>1</sub>		98.7	22.04	1.83	69.91
		下 <sub>1</sub>	43.2	13.67	1.55	84.46
410	下 <sub>2</sub>		208.2	6.97	3.89	86.16
		下 <sub>1</sub>	128.5	22.11	1.02	76.87

$7.64\% \text{ C}_3\text{H}_8$ 、 $1.57\% \text{ CO}_2$  组成. 很明显,甲烷的相对含量不高,乙烷和丙烷的相对含量较高,此种气体组成难以真正代表水合物形成时的气体组分,与世界上已知水合物的组成差别较大。

这样,在模拟计算木里冻土区水合物稳定带顶底深度时,暂以煤层气扣除氮气组分后的平均值作

表 2 木里冻土区 DK-1 孔含水合物岩心解吸气组成 (%)

Table 2 Composition of desorbed gases from gas hydrate-bearing cores in the DK-1 hole of the Muli permafrost (%)

样品号	深度(m)	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	iC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	nC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	iC <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	nC <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> +	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	备注
G-5-1-2	134	42.90	5.40	5.68	0.70	3.48	0.45	0.70	2.55	35.98	2.16	
G-6-1-2	143	10.47	1.62	3.38	0.35	0.53	0.05	0.05	0.50	76.76	6.28	
DQ-1										95.87	4.13	大气
S-1-2		59.01	6.23	9.43	0.93	1.01	0.13	0.12	1.71	19.27	2.16	泥浆气

表 3 木里冻土区 DK-2 孔含水合物岩心解吸气组成 (%)

Table 3 Composition of desorbed gases from gas hydrate-bearing cores in the DK-2 hole of the Muli permafrost (%)

样品号	深度(m)	C <sub>1</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	iC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	nC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	nC <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
GH-1	224	54.64	7.78	4.43	0.26	1.64	0.37	0.35	12.99	17.56
GH-2	230	55.36	14.62	16.11	1.56	3.70	1.05	1.66	3.24	2.70
GH-3	231	66.14	10.77	8.53	0.82	3.25	0.91	0.86	7.01	1.69
GH-4	232	66.05	10.16	6.02	0.57	2.45	0.86	1.43	11.48	0.98
GH-5	235	72.81	10.35	7.08	0.66	2.11	0.82	1.27	3.91	0.98
GH-6	250	56.67	7.75	10.68	1.14	1.67	0.00	4.20	12.00	5.88
GH-7	253	68.13	9.60	18.25	1.69	1.53	0.35	0.00	0.00	0.45
GH-8	266	66.54	8.93	20.97	1.93	1.02	0.18	0.21	0.00	0.23
GH-9	275	65.45	9.98	6.50	0.58	3.22	1.18	0.00	6.52	6.58
GH-10	288	54.51	12.21	16.14	1.43	4.25	1.39	1.64	4.77	3.67
GH-11	290	75.76	9.81	7.55	0.75	2.53	0.78	0.48	0.00	2.34
GH-12	290	65.63	9.01	21.04	2.10	1.14	0.00	0.06	0.00	1.02

为形成水合物的初始气体组成,即 89.40% CH<sub>4</sub> + 10.60% CO<sub>2</sub>.

### 3.2.2 冻土表层温度和地温梯度

前人在木里冻土区开展过冻土测量<sup>[11]</sup>,积累有部分年平均地温、冻土厚度、冻土上界等资料,见表 4. 这些数据显示年平均地温平均为 -1.95℃,冻土厚度平均约 74 m,冻土上界平均约 1.70 m,计算得到冻土层内平均地温梯度约为 0.02697℃/m.

本次在钻探过程中开展了井内温度测量.

表 4 木里冻土区观测的冻土特征数据<sup>[11]</sup>Table 4 Characteristic data on permafrost observed in the Muli permafrost<sup>[11]</sup>

孔号	海拔高度 (m)	年平均地温 (℃)	冻土厚度 (m)	冻土顶界 (m)
CK1	3977	-1.4	71.8	4.6
CK2	3989	-2.4	69.4	1.2
CK3	3968	-2.0	84.1	0.95
CK4	3977	-2.0	~60.0	<1.0
12/1	3993		60.0	1.0
15/1	4016		76.0	2.0
1	3985		95.0	1.0

等待提钻完成后,并使钻探的热效应对岩层影响最小,在时隔 24 h 后分别对 3 个充满泥浆的钻孔进行温度测井,其测井结果如图 2、3、4.

从钻孔泥浆温度测量结果来看,在 DK-1 孔中(图 2),钻孔泥浆上部约 20 m 内温度不断降低,可能反映了大气与冻土层相互作用的结果;在 20~

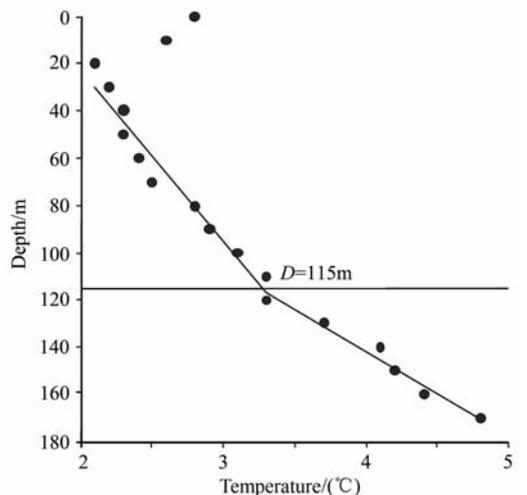


图 2 木里冻土区 DK-1 孔井中泥浆温度变化特征  
Fig. 2 Temperature changing with depth  
in the DK-1 hole in the Muli permafrost

115 m 间,泥浆温度不断增大,呈现出一定地温梯度的变化特征,其变化斜率代表着冻土层内地温梯度值约为  $0.0139^{\circ}\text{C}/\text{m}$  ( $R^2 = 0.95$ );在 120 m 深度以下,泥浆温度增大的斜率明显与 115 m 深度以上处不同,其变化斜率代表着冻土层下地温梯度值约为  $0.0286^{\circ}\text{C}/\text{m}$  ( $R^2 = 0.97$ );冻土底界约出现在 115~120 m 深度处。

在 DK-2 孔中(图 3),钻孔泥浆上部约 40 m 内的温度变化特征类似于 DK-1 孔,不断降低,可能反映了受大气及水合物分解对冻土层的共同影响;在 40~120 m 间,泥浆温度变化不大,没有显示出一定梯度的变化特征,可能与该冻土层内靠近孔口处的冻土发生融化,其所吸收的热量大量抵消了相应深度处本应与地层保持平衡的钻孔泥浆温度有关;在 120 m 深度以下,泥浆温度整体上呈现出增大的趋势,其变化斜率代表着冻土层下地温梯度值约为  $0.0121^{\circ}\text{C}/\text{m}$  ( $R^2 = 0.88$ );冻土底界约出现在 120 m 附近深度处。

在 DK-3 孔中(图 4),钻孔泥浆上部约 200 m 内的温度数据缺失. 在 200 m 深度以下,泥浆温度呈现出有规律性地增加,其变化斜率指示着冻土层下地温梯度值约为  $0.00917^{\circ}\text{C}/\text{m}$  ( $R^2 = 0.98$ ).

显然,DK-2 孔的泥浆测温存在着一定的误差,DK-3 孔的泥浆测温数据不完整,相对而言 DK-1 孔的泥浆测温要可靠些,采用前人冻土上界深度约 1.70 m 资料<sup>[11]</sup>,据此计算得到钻孔冻土上层的温度约为  $-1.60^{\circ}\text{C}$ . 由于前人测量的冻土数据与此次钻孔测量的冻土厚度和冻土层内地温梯度存在着一定差别,本次在模拟计算木里冻土区水合物稳定带顶

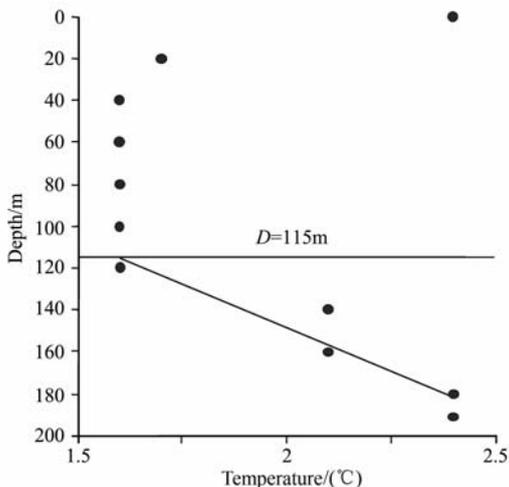


图 3 木里冻土区 DK-2 孔井中泥浆温度变化特征  
Fig. 3 Temperature changing with depth in the DK-2 hole in the Muli permafrost

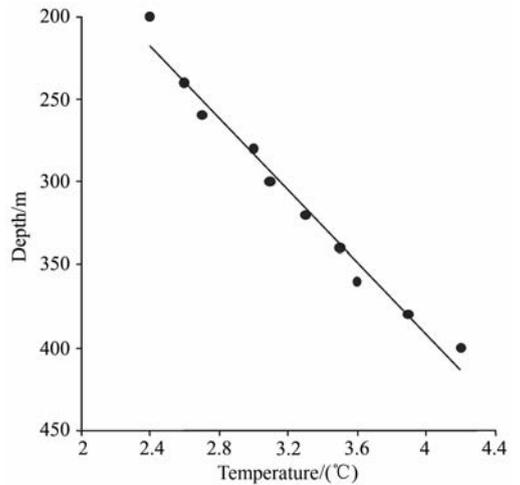


图 4 木里冻土区 DK-3 孔井中泥浆温度变化特征  
Fig. 4 Temperature changing with depth in the DK-3 hole in the Muli permafrost

底深度时,采用 DK-1 孔的泥浆温度测量数据。

### 3.2.3 稳定带的模拟结果

根据上述经验模型,采用相应的气体组成、地温梯度等参数,可以对木里冻土区水合物稳定带的顶底深度进行模拟计算,结果见表 5。

可以看出,根据钻孔泥浆温度测量结果得到的木里冻土区冻土深度在 115~120 m 间,模拟计算的水合物顶深在 148.8~122.7 m 间变化,底深在 324.6~354.8 m 间变化,水合物厚度在 175.8~232.2 m 间。

表 5 木里冻土区水合物稳定带顶底深度模拟计算结果  
Table 5 Modeling results on upper and lower depths of gas hydrate stability zone in the Muli permafrost

冻土深度 (m)	水合物顶界 (m)	水合物底界 (m)	水合物厚度 (m)
115	148.8	324.6	175.8
116	142.9	331.3	188.4
117	137.5	337.7	200.2
118	132.3	343.7	211.4
119	127.4	349.5	222.1
120	122.7	354.9	232.2

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

在木里冻土区钻探过程中,在深度约 120 m 处钻探岩心中见有片状冰花,明显与钻获的水合物岩心不同,该深度处岩心中的冰样碎片表面未见任何冒气现象<sup>[25]</sup>,表明此深度仍处于冻土层内。这一现

象说明钻孔泥浆温度测量结果推导的冻土深度数据基本可靠,冻土区的冻土深度基本在 115~120 m 间。

本次钻探结果显示,水合物及其异常现象主要出现在井下 133~396 m 的层段间,纵向上分布不连续,横向上没有明显的对比关系,主要受祁连山冻土特征(冻土厚度或冻土表层温度、冻土层内地温梯度)、冻土层下地温梯度、气源特征等所确定的天然气水合物稳定带的限制,同时受到断裂及气源条件所限<sup>[25]</sup>。水合物的产出层段应该在其稳定带内,其产出特征基本与基于木里冻土区的气体组成、钻孔泥浆测温数据(冻土表层温度、冻土层内地温梯度、冻土层下地温梯度)等资料基础上模拟计算结果一致,特别是当冻土深度处于 118~120 m 间,水合物的产出及其异常现象完全在其稳定带内。

实际上,冻土深度对天然气水合物稳定带顶、底界深度、厚度影响较大。冻土带深度主要由冻土带顶界温度和冻土层内地温梯度共同决定,如果地温梯度不变,冻土深度主要与冻土带顶界温度有关,它们之间呈负相关关系;理论计算结果表明<sup>[19]</sup>,天然气水合物的形成条件对温度要比压力(冻土深度)敏感得多,温度每升高 1℃,形成天然气水合物所需的压力将增大 700 kPa(约相当于 7 个大气压或静水压力下 70 m 深的冻土厚度增量),即当冻土层内地温梯度不变时冻土深度直接决定着天然气水合物形成或产出的深度带范围。

从水合物形成过程的热动力学理论模型来看,不同因素(温度、压力、气体组成、孔隙水盐度、沉积层孔隙大小等)对水合物稳定带的影响程度各不相同。定量-半定量模拟计算结果表明,气体组成特别是丙烷的加入对水合物稳定带的影响最大<sup>[19]</sup>。

考虑到激光拉曼光谱检测结果显示木里冻土区水合物中含有 CH<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>、C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 和 CO<sub>2</sub> 气体<sup>[23, 37]</sup>,依据对含水合物岩心解吸出的气体组成特征,假定形成水合物的初始气体可能由 79.51%CH<sub>4</sub>、11.28% C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>、7.64% C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>、1.57% CO<sub>2</sub> 组成。此种情况模拟结果显示,水合物稳定带的顶深度出现在几十米处,这明显与钻探结果揭示的水合物相关异常(如钻孔中开始出现大量气体,岩心开始冒出部分气体等)出现深度一般在 130 m 左右不相符合。木里地区多年冻土区水合物有其特殊性,其形成水合物的气体组成与世界上典型水合物不同,实际中以含水合物岩心解吸出的气体组成也是如此,较为复杂。事实上,木里冻土区煤系地层中有机质含量丰富,既有煤层产出,又有富含有机质的泥岩、油页岩产出,甚至

水合物产出层段常伴生各种油气显示现象。鉴于含天然气水合物岩心解吸的气体含有氧气,且含较多氮气(在解吸实验中用到液氮),可能混有空气,而且含天然气水合物岩心本身还含轻质油,这样真正形成天然气水合物的原始气体组成是个未知数,虽然检测到天然气水合物除含甲烷外,还含乙烷、丙烷、二氧化碳等,但其相对百分含量仍不清楚,为了在理论预测结果与实际天然气水合物产出结果之间进行比较,文中暂使用了煤层气的基本气体组成,相对是可以理解和合理的,毕竟煤层气被认为可能是天然气水合物的一个重要气源。应该说,木里冻土区形成水合物的气源较为充足,只要满足水合物的温度和压力形成条件,在水合物稳定带内就会有水合物的产出。从这一点上看,木里冻土区的气体组成是影响水合物稳定带顶底深度的一个重要因素。显然,本次含水合物岩心中解吸的气体组分难以真正代表木里冻土区水合物形成时的气体组成。

当然,文中使用的天然气水合物形成条件经验模型可能有些误差,但天然气水合物形成条件经验模型在本质上与世界上著名的 Sloan 模型一致,它们之间的相对误差也较小,经与前人实验室合成天然气水合物的温压实验数据相比较,误差小于 5%<sup>[35]</sup>,相对可以接受。

## 4.2 结 论

(1)木里冻土区水合物稳定带顶底深度主要受气体组成、冻土深度、冻土层内地温梯度、冻土层下地温梯度等因素影响。

(2)基于木里冻土区的气体组成、钻孔泥浆测温数据(冻土表层温度、冻土层内地温梯度、冻土层下地温梯度)等资料基础上模拟计算的水合物顶深在 148.8~122.7 m 间,底深在 324.6~354.8 m 间,水合物厚度在 175.8~232.2 m 间,与钻探揭示的水合物产出结果基本一致。

**致 谢** 此项工作自始至终得到了中国地质调查局科技与外事部叶建良、卢民杰、肖桂义、刘凤山等的指导。

## 参考文献(References)

- [1] Kvenvolden K A. A review of the geochemistry of methane in natural gas hydrate. *Organic Geochemistry*, 1995, **23** (11/12): 997~1008
- [2] Makogon Y F, Holditch S A, Makogon T Y. Natural gas hydrates—A potential energy source for the 21st Century. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2007, **56**: 14~31

- [3] Sloan E D. Clathrate Hydrates of Natural Gases, 2nd Edition. New York: Marcel Dekker, 1998. 1~730
- [4] 史斗, 郑军卫. 世界水合物研究开发现状和前景. 地球科学进展, 1999, **14**(4):330~339  
Shi D, Zheng J W. The status and prospects of research and exploitation of natural gas hydrate in the world. *Advance in Earth Sciences* (in Chinese), 1999, **14**(4):330~339
- [5] Collett T S. Natural gas hydrates of the Prudhoe Bay and Kuparuk River Area, North Slope, Alaska. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1993, **77**(5): 793~812
- [6] 栾锡武, 赵克斌, 孙冬胜等. 天然气水合物的开采——以马利克钻井为例. 地球物理学进展, 2007, **22**(4):1295~1304  
Luan X W, Zhao K B, Sun D S, et al. Gas hydrates production—in case of mallik test well. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2007, **22**(4):1295~1304
- [7] Dallimore S R, Uchida T, Collett T S. Scientific results from JAPEX/JNOC/GSC Mallik 2L-38 gas hydrate research well, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. *Geological Survey of Canada Bulletin*, 1999, **544**: 403
- [8] Dallimore S R, Collett T S. Scientific results from the Mallik 2002 gas hydrate production research well program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. *Geological Survey of Canada Bulletin*, 2005, **585**:140
- [9] Moridis G, Collett T S, Dallimore S R, et al. Numerical studies of gas production from several CH<sub>4</sub> hydrate zones at the Mallik site, Mackenzie Delta, Canada. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2004, **43**:219~238
- [10] Craven J A, Roberts B J, Bellefleur G, et al. Recent magnetotelluric measurements at the Mallik gas hydrate production research well site, Northwest Territories. *Geological Survey of Canada Current Research* (Online), 2009, **5**:1~70
- [11] 周幼吾, 郭东信, 邱国庆等. 中国冻土. 北京: 科学出版社, 2000. 329~353  
Zhou Y W, Guo D X, Qiu G Q, et al. Geocryology in China (in Chinese). Beijing: Science Press, 2000. 329~353
- [12] 徐学祖, 程国栋, 喻祁浩. 青藏高原多年冻土区水合物的研究前景和建议. 地球科学进展, 1999, **14**(2):201~204  
Xu X Z, Cheng G D, Yu Q H. Research prospect and suggestions of gas hydrates in permafrost regions on the Qinghai-Tibet plateau. *Advance in Earth Sciences* (in Chinese), 1999, **14**(2):201~204
- [13] 张立薪, 徐学祖, 马巍. 青藏高原多年冻土与水合物. 地球科学, 2001, **12**(1):22~26  
Zhang L X, Xu X Z, Ma W. The Qinghai-Tibet plateau permafrost and gas hydrate. *Natural Gas Geoscience* (in Chinese), **12**(1): 22~26
- [14] 吴青柏, 蒋观利, 蒲毅彬等. 青藏高原水合物的形成与多年冻土的关系. 地质通报, 2006, **25**(1):29~33  
Wu Q B, Jiang G L, Pu Y B, et al. Relationship between permafrost and gas hydrates on Qinghai-Tibet Plateau. *Geological Bulletin of China* (in Chinese), 2006, **25**(1): 29~33
- [15] 刘怀山, 韩晓丽. 西藏羌塘盆地水合物地球物理特征识别与预测. 西北地质, 2004, **37**(4):33~38  
Liu H S, Han X L. Geophysical recognition and prediction of natural gas hydrates in Qiangtang basin of Tibet. *Northwestern Geology* (in Chinese), 2004, **37**(4):33~38
- [16] 黄朋, 潘桂棠, 王立全等. 青藏高原水合物资源预测. 地质通报, 2002, **21**(11):794~798  
Huang B, Pan G T, Wang L Q, et al. Prospect evaluation of natural gas hydrate resources on the Qinghai-Tibet plateau. *Geological Bulletin of China* (in Chinese), 2002, **21**(11): 794~798
- [17] 伊海生, 时志强, 刘文均等. 青藏高原多年冻土区水合物形成潜力及远景. 西藏地质, 2002, **2002**(1):45~52  
Yi H S, Shi Z Q, Liu W J, et al. The potential and prospect of gas hydrates in the Qinghai-Tibet plateau permafrost zone. *Geology of Tibet* (in Chinese), 2002, **2002**(1):45~52
- [18] 陈多福, 王茂春, 夏斌. 青藏高原冻土带水合物的形成条件与分布预测. 地球物理学报, 2005, **48**(1):165~172  
Chen D F, Wang M C, Xia B. Formation condition and distribution prediction of gas hydrate in Qinghai-Tibet Plateau permafrost. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48**(1):165~172
- [19] 卢振权, Nabil Sultan, 金春爽等. 水合物形成条件与含量影响因素的半定量分析. 地球物理学报, 2008, **51**(1):125~132  
Lu Z Q, Sultan N, Jin C S, et al. Semi-quantitative analysis of factors affecting gas hydrate formation conditions and gas hydrate fractions. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(1):125~132
- [20] 卢振权, 吴必豪, 饶竹等. 青藏铁路沿线多年冻土区水合物地质地球化学异常. 地质通报, 2007, **26**(8):1029~1040  
Lu Z Q, Wu B H, Rao Z, et al. Geological and geochemical anomalies possibly indicating gas hydrate occurrence in the permafrost zone along the Qinghai-Tibet railway. *Geological Bulletin of China* (in Chinese), 2007, **26**(8): 1029~1040
- [21] 坚润堂, 李峰, 王造成. 青藏高原冻土区活动带水合物异常特征. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2009, **31**(2): 13~17  
Jian R T, Li F, Wang Z C. The gas hydrate abnormality in the movable zone of the Qinghai-Tibet plateau permafrost. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)* (in Chinese), 2009, **31**(2):13~17
- [22] 祝有海, 刘亚玲, 张永勤. 祁连山多年冻土区水合物的形成条件. 地质通报, 2006, **25**(1/2):58~63  
Zhu Y H, Liu Y L, Zhang Y Q. Formation conditions of gas hydrates in permafrost of the Qilian Mountains, Northwest China. *Geological Bulletin of China* (in Chinese), 2006, **25**(1/2): 58~63
- [23] 卢振权, 祝有海, 张永勤等. 青海祁连山冻土区水合物存在的主要证据. 现代地质, 2010, **24**(2):329~336  
Lu Z Q, Zhu Y H, Zhang Y Q, et al. Major evidence for gas

- hydrate existence in the Qilian permafrost, Qinghai. *Geoscience* (in Chinese), 2010, **24**(2):329~336
- [24] 祝有海,张永勤,文怀军等. 青海祁连山冻土区发现水合物. *地质学报*,2009,**83**(11):1762~1771  
Zhu Y H, Zhang Y Q, Wen H J, et al. Gas hydrates in the Qilian Mountain permafrost, Qinghai, Northwest China. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 2009, **83**(11):1762~1771
- [25] 卢振权,祝有海,张永勤等. 青海省祁连山冻土区水合物基本地质特征. *矿床地质*,2010,**29**(1):182~191  
Lu Z Q, Zhu Y H, Zhang Y Q, et al. Basic geological characteristics of gas hydrate occurrences in the Qilian Mt. permafrost, Qinghai. *Mineral Deposits* (in Chinese), 2010, **29**(1):182~191
- [26] 徐华宁,杨胜雄,郑晓东等. 南中国海神狐海域天然气水合物地震识别及分布特征. *地球物理学报*,2010,**53**(7):1691~1698  
Xu H N, Yang S X, Zheng X D, et al. Seismic identification of gas hydrate and its distribution in Shenghu area, South China Sea. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese),2010,**53**(7):1691~1698
- [27] 郝召兵,伍向阳,秦静欣等. 时移地震监测天然气水合物开采可行性分析. *地球物理学报*,2010, **53**(9):2213~2221  
Hao Z B, Wu X Y, Qin J X, et al. Feasibility analysis of the gas hydrate exploitation by time lapse seismic monitoring. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese),2010, **53**(9):2213~2221
- [28] 卢振权,吴能友,陈建文等. 试论天然气水合物成藏系统. *现代地质*,2008,**22**(3):362~375  
Lu Z Q, Wu N Y, Chen J W, et al. Preliminary discussion on gas hydrate geological system. *Geoscience.* (in Chinese), 2008,**22**(3):362~375
- [29] 吴能友,梁金强,王宏斌等. 海洋天然气水合物成藏系统研究进展. *现代地质*,2008,**22**(3):356~362  
Wu N Y, Liang J Q, Wang H B, et al. Marine gas hydrate: state of the art. *Geoscience.* (in Chinese),2008,**22**(3):356~362
- [30] 吴能友,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. *地球物理学报*,2009,**52**(6):1641~1650  
Wu N Y, Yang S X, Wang H B, et al. Gas bearing fluid influx sub-system for gas hydrate geological system in Shenhu area, northern South China Sea. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese),2009, **52**(6):1641~1650
- [31] 冯益民. 祁连造山带研究概况——历史、现状及展望. *地球科学进展*,1997,**12**(4):307~314  
Feng Y M. Investigatory summary of the Qilian orogenic belt, China: History, presence and prospect. *Advance in Earth Sciences* (in Chinese),1997,**12**(4):307~314
- [32] 符俊辉,周立发. 南祁连盆地石炭-侏罗纪地层区划及石油地质特征. *西北地质科学*,1998,**19**(2):47~54  
Fu J H, Zhou L F. Carboniferous-Jurassic stratigraphic provinces of the southern Qilian basin and their petro-geological features. *Northwest Geoscience* (in Chinese),1998,**19**(2):47~54
- [33] 符俊辉,周立发. 南祁连盆地三叠纪地层及石油地质特征. *西北地质科学*,2000, **21**(2):64~72  
Fu J H, Zhou L F. Triassic stratigraphy of the southern Qilian basin and their petro-geological features. *Northwest Geoscience* (in Chinese),2000,**21**(2):64~72
- [34] 文怀军,鲁静,尚溢君等. 青海聚乎更矿区侏罗纪含煤岩系层序地层研究. *中国煤田地质*,2006, **18**(5):19~21  
Wen H J, Lu J, Shang L J, et al. A sequence stratigraphic discussion of the Jurassic coal measures in the Juhugeng coalmine area in Qinghai Province. *Coal Geology of China* (in Chinese), 2006, **18**(5):19~21
- [35] Lu Z Q, Sultan N. Empirical expressions for gas hydrate stability law, gas hydrate fraction and gas hydrate layer density at temperature 273.15K to 290.15K. *Geochemical Journal*, 2008, **42**(2):163~175
- [36] Collett T S, Dallimore S. Permafrost-related natural gas hydrate. In: Max M D, ed. *Natural Gas Hydrate in Oceanic and Permafrost Environments*, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 2000. 43~60
- [37] 刘昌岭,业渝光,孟庆国等. 南海神狐海域及祁连山冻土区天然气水合物的拉曼光谱特征. *化学学报*,2010,**68**(18):1881~1886  
Liu C L, Ye Y G, Meng Q G, et al. Raman spectroscopic characteristics of natural gas hydrate recovered from Shenhu Area in South China Sea and Qilian Mountain permafrost. *Acta Chimica Sinica* (in Chinese), 2010,**68**(18):1881~1886

(本文编辑 胡素芳)