

文章编号: 1001-1986(2009)06-0026-05

## 青海木里煤田天然气水合物特征与成因

王 佟<sup>1,2</sup>, 刘天绩<sup>1</sup>, 邵龙义<sup>1</sup>, 曹代勇<sup>1</sup>, 郭晋宁<sup>2</sup>, 刘益芬<sup>2</sup>, 文怀军<sup>2</sup>, 王 丹<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083;

2. 中国煤炭地质总局, 北京 100039;)

**摘要:** 青海木里煤田成功钻获天然气水合物实物样品, 使我国成为世界上首次在中低纬度冻土区发现天然气水合物的国家。通过对钻获天然气水合物样品的分析, 以及对以往异常可燃气体涌出钻孔的测井曲线的重新解释和对比分析, 初步确定天然气水合物赋存于中侏罗统江仓组页岩段的细粉砂岩夹层内的孔隙和裂隙中。研究结果显示, 天然气水合物中的气体以重烃类为主, 甲烷达 52%~68%; 其  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $-50.5\text{‰}$ (PDB 标准), 并具有  $\delta^{13}\text{C}_1 < \delta^{13}\text{C}_2 < \delta^{13}\text{C}_3 < \delta^{13}\text{C}_4 < \delta^{13}\text{nC}_4$  的特征, 其  $\delta\text{D}$  值分别为  $-266\text{‰}$  和  $-262\text{‰}$ (VSMOW 标准), 显示出明显的深部热解气特征。结合木里煤田煤层气地质特征, 认为煤层气是木里煤田天然气水合物的主要来源, 并将其命名为“煤型气源”天然气水合物。

**关键词:** 天然气水合物; 冻土带; 煤型气源; 木里煤田

**中图分类号:** P618.11; P618.13 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2009.06.007

### Characteristics and origins of the gas hydrates in the Muli coalfield of Qinghai

WANG Tong<sup>1,2</sup>, LIU Tianji<sup>1</sup>, SHAO Longyi<sup>1</sup>, CAO Daiyong<sup>1</sup>, GUO Jinning<sup>2</sup>, LIU Yifen<sup>1</sup>,  
WEN Huaijun<sup>2</sup>, WANG Dan<sup>1</sup>

(1. State key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, CUMTB, Beijing 100083, China;

2. China National Administration of Coal Geology, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Gas hydrates samples are successfully obtained by drilling in the Muli coalfield of Qinghai Province, which makes China the country which firstly discovers gas hydrate in the permafrost of the medium and low latitudes. The gas hydrates are preserved in the pores and cracks of the siltstone layers sandwiched in the oil shale member of the Middle Jurassic Jiangcang Formation. The gas in the gas hydrates is dominated by heavy hydrocarbons, with the methane accounting up to 52%~68%. The  $\delta^{13}\text{C}$  of the gas hydrates is  $-50.5\text{‰}$ (PDB) and demonstrates a trend of  $\delta^{13}\text{C}_1 < \delta^{13}\text{C}_2 < \delta^{13}\text{C}_3 < \delta^{13}\text{C}_4 < \delta^{13}\text{nC}_4$ . The  $\delta\text{D}$  values range between  $-266\text{‰}$  and  $-262\text{‰}$ (VSMOW). These facts indicate that the gas in the gas hydrates in the Muli Coalfield is from pyrolysis in the deep Earth. In consideration of coalbed methane geology of the Muli Coalfield, we proposed that the coalbed methane is the main source of the gas in the gas hydrates in the Muli Coalfield and we name the gas hydrates “coal-prone gas hydrates”

**Key words:** gas hydrates; permafrost; coal-prone gas source; Muli coalfield

天然气水合物(俗称可燃冰)是一种清洁能源, 它和常规天然气一样, 燃烧后只剩下二氧化碳和水, 不会留下任何污染。此外,  $1\text{ m}^3$  天然气水合物释放出的能量相当于  $164\text{ m}^3$  的常规天然气<sup>[1]</sup>。据估计, 全球天然气水合物的总能量是所有煤、石油、天然气总和的 2~3 倍<sup>[2]</sup>。在自然界中, 天然气水合物除分布于水深大于 300 m 的海底沉积物中外, 还见于地表 130 m 以下的多年冻土区中<sup>[3]</sup>。在导致全球气候变暖方面, 甲烷作为一种温室气体, 所起的作用比二氧化碳要大近 20 倍。而天然气水合物矿藏哪怕受到微

小的破坏, 都足以导致甲烷气体的大量泄漏, 一旦这种气体进入大气, 无疑会增大温室效应。

木里煤田聚乎更矿区是当前青藏高原地质研究的热点地区之一, 也是区内煤炭地质研究和勘查开发程度较高的地区。20 世纪 50 年代, 中国煤炭地质总局青海煤田地质局发现了木里煤田, 使之成为青海的主要煤炭工业基地。进入 21 世纪以来, 随着西部大开发的进展, 尤其是青藏铁路的开通, 加大了本区煤炭资源的开发力度, 与煤炭资源具有成因联系的天然气水合物随之被发现<sup>[4-8]</sup>。本文结合木里

收稿日期: 2009-09-19

基金项目: 中国煤炭地质总局科技发展专项基金项目(2008-01-02)

作者简介: 王 佟(1959—), 男, 甘肃会宁人, 教授级高工, 主要从事煤炭地质与勘查技术研究。

煤田的勘探成果, 拟对木里煤田聚乎更矿区天然气水合物的特征及成因予以阐述。

## 1 木里煤田概况

木里煤田位于青藏高原东北部的中祁连含煤区。该区地域广阔、自然地理条件复杂, 属于高寒山区, 生态环境相对脆弱, 多以草甸构成<sup>[9]</sup>。木里煤田大地构造单元属于古亚洲动力学体系(秦祁昆造山系)的一部分, 其构造单元属中祁连褶皱隆拗带的西段, 具有特殊的区域地质背景和地质演化历史<sup>[10]</sup>。该煤田包括聚乎更、江仓和热水等矿区, 其中聚乎更矿区因煤层厚、储量丰富集中及煤质好而受到广泛关注。

聚乎更矿区整体为一复式背向斜构造, 由一个背斜和两个向斜组成。其中, 北向斜分布有三井田、

二井田和一露天 3 个井田; 南部向斜由四井田、一井田、三露天和二露天组成(图 1)。矿区基底之上, 三叠统广泛裸露于矿区南北部及背斜轴部, 岩性以黑色粉砂岩、泥岩及薄煤层为主, 与上覆中侏罗统呈假整合接触。中侏罗统为研究区含煤地层, 分为下部木里组和上部江仓组(图 2)。木里组下段为辫状河冲积平原相, 沉积了一套粗碎屑岩, 底部砾岩发育; 上段以湖泊—沼泽相为主, 发育本区主要可采煤层下<sub>1</sub>和下<sub>2</sub>煤。江仓组下段主要为三角洲—湖泊相, 含煤 2~6 层; 上段以浅湖—半深湖相为主, 沉积了一套细碎屑泥岩、粉砂岩, 不含煤, 由于后期剥蚀, 主要残留于一井田中部。上侏罗统不含煤, 为干旱气候下的河流冲积相, 主要残留于三露天东南部, 岩性以黄、紫、紫灰色砾岩为主, 夹灰黄色厚层状粗砂岩, 大型斜层理广泛发育<sup>[11]</sup>。

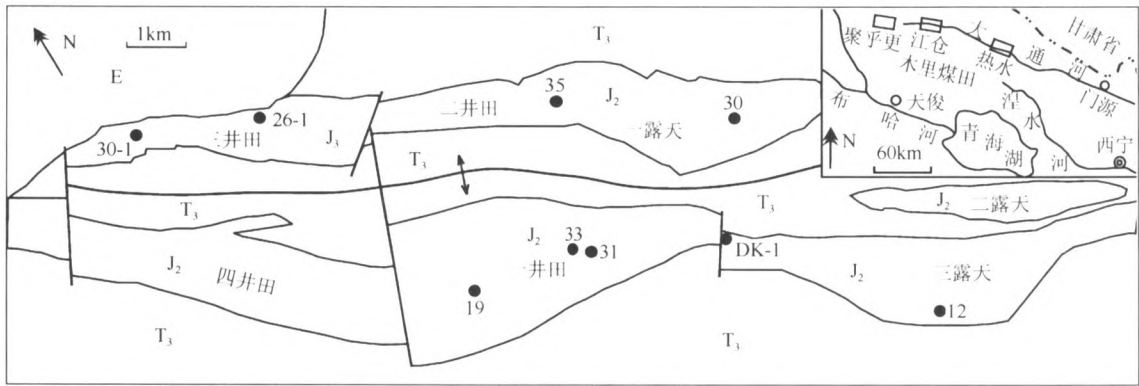


图 1 研究区地理位置及钻孔分布图

Fig. 1 Location of study area and boreholes

注: 图中黑圆点(●)表示钻孔。

## 2 天然气水合物的发现过程

木里煤田为青海的主要煤炭工业基地<sup>[12]</sup>。进入 21 世纪以来, 特别是 2004 年以来, 青海煤炭地质局进一步加强了该煤田的煤矿生产勘探和煤层气研究与评价工作。在聚乎更矿区勘探施工时, 发现部分钻孔中有可燃气体涌出, 以后施工的多个钻孔均见到这种现象, 而现场解吸时发现这些煤层的煤层气含量又相对较低。通过观测和研究认为, 涌气层位基本位于冻土带之下的煤层上部或下部的砂岩层中。大量可燃气体涌出井口的现象, 引起了地质工作者的高度重视。经过初步研究, 基本排除了可燃气体是煤层气的可能性。那么, 这种神秘的气体是什么呢? 猜测是否为天然气水合物逸散的气体? 青海煤炭地质工作者提出了疑似可燃冰的认识, 测井人员通过测井曲线解释出了疑似可燃冰层段的深度和厚度, 对木里地区永冻层的分布特征进行了初步研究。

同任何科学新发现一样, 木里煤田天然气水合物的发现也经历了一个认识过程。2006 年青海煤炭地质局在开展高原冻土绳索取心钻探技术研究项目时, 与中国地质科学院勘探技术研究所开展了合作<sup>[7]</sup>, 对疑似可燃冰的判断和认识引起了中国地质科学院的重视。祝有海、张永勤等认为, 木里煤田基本具备形成天然气水合物的温压条件<sup>[13]</sup>。2008 年, 中国地质调查局立项对青藏高原冻土带天然气水合物进行勘查; 张洪涛亲自领导了青海天峻县木里煤田天然气水合物的科学钻探。中国地质科学院矿产资源研究所、勘探技术研究所和青海煤炭地质 105 勘探队共同承担了高原冻土带天然气水合物勘探钻孔的施工, 青海煤炭地质 105 勘探队提供了曾有可燃气体涌出的钻孔分布情况, 并提出了科研试验钻孔的井位布置建议。青海煤炭地质 105 勘探队与中国地质科学院矿产资源研究所、勘探技术研究所共同在 2009 年成功采集到了可燃冰的实物样品。

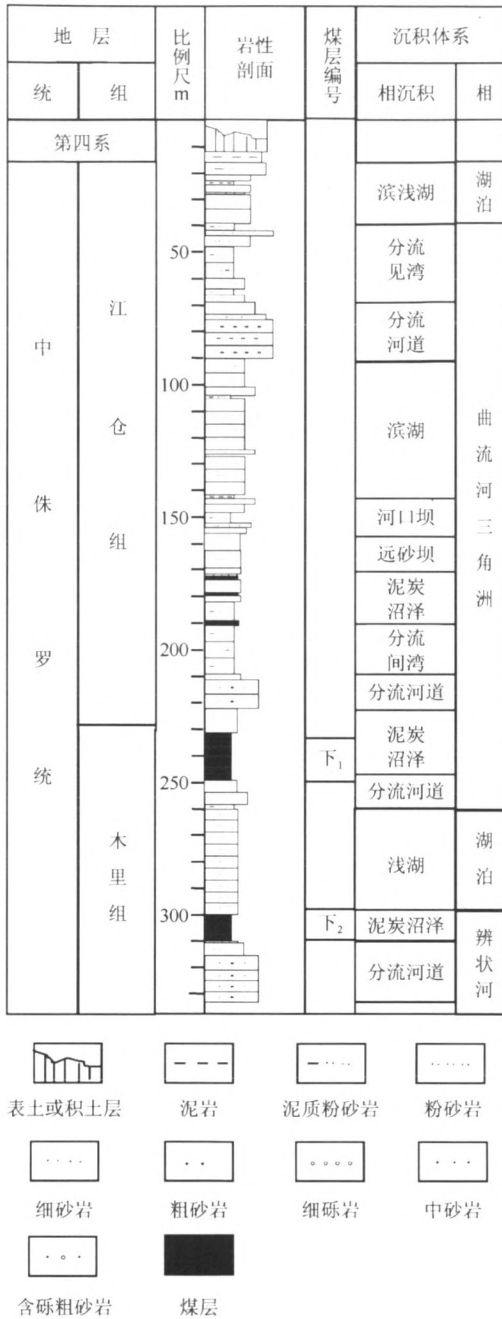


图 2 聚乎更矿区 31 号孔侏罗纪地层和沉积相柱状图  
Fig. 2 The 31<sup>#</sup> column of sedimentary facies and stratigraphy of Jurassic in the Juhugeng mining area

异常高压气体，其中上部 3 层的井深与水合物层段基本一致。钻孔所取岩心面上不断有气体和水滴冒出，遇泥浆污染呈米黄色，岩心裂隙面上可见白色、乳白色的水合物晶体以及晶型完好的自生碳酸盐矿物；水合物样品点火能直接燃烧，甚至持续 0.5 min 以上，并不断释放出气体和水；将岩心放进水里，能不断冒泡，放进瓦斯罐内，能解吸出大量气体，天然气水合物分解后岩心呈蜂窝状构造。

通过对采集样品的激光拉曼光谱测试，发现其结果与青岛所及国外人工合成样品的激光拉曼光谱非常相似(图 3)。谱峰在 2 900~2 940 cm<sup>-1</sup> 之间表现出最大峰值，而在 3 100 cm<sup>-1</sup> 左右处显示次高值，曲线形态也很相似。此外，天然气水合物在测井曲线中还表现出明显的高电阻率和高声速特征。

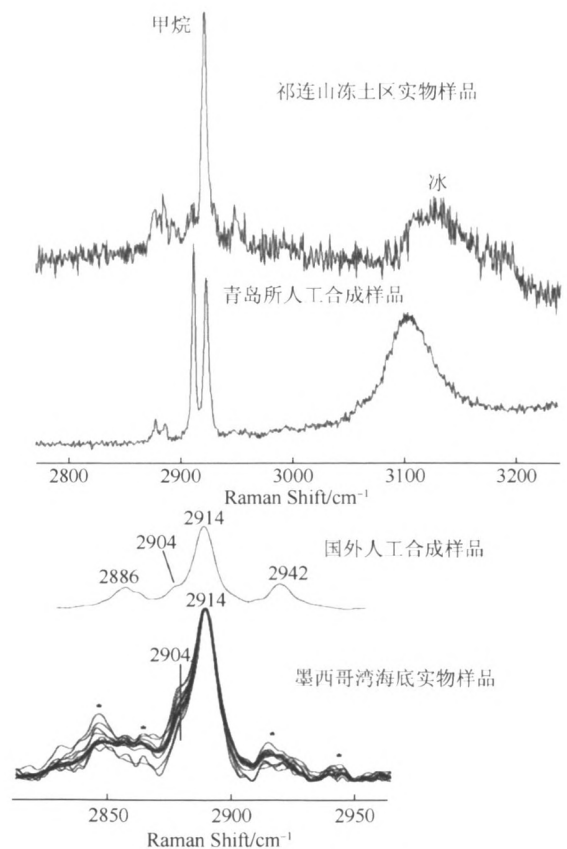


图 3 样品的激光拉曼光谱对比图  
Fig. 3 Laser Raman spectra of the gas hydrate samples (据国土资源部 2009 年 9 月 25 日新闻发布稿)

### 3 天然气水合物的基本特征

#### 3.1 产出层位及赋存状态

木里煤田聚乎更矿区的天然气水合物主要赋存于常年冻土带之下的煤系中。科考 DK-1 钻孔发现的 3 个天然气水合物层位和此前在 33 号钻孔的疑似可燃冰层位，均位于中侏罗统江仓组油页岩段的细粉砂岩夹层内(图 2)；赋存状态为孔隙或裂隙中分布，裂隙宽一般为 0.5~1 mm，最宽可达 3 mm。

#### 3.2 物理特征

通过钻孔岩心研究发现，130 m 以下存在 4 层

#### 3.3 天然气水合物的成分特征

根据测试成果可知，木里煤田天然气水合物中含有较多重烃类气体。在一井田 33 号钻孔井口采集的气体成分中，甲烷为 96.6 % (乙烷、丙烷分别为 3.3 % 和 0.1 %)；DK-1 井的天然气水合物样品，甲烷可达 52 % ~ 68 % (表 1)。中国地质科学院矿产资源研究所对其中甲烷的碳氢同位素进行了测试

表 1 木里煤田聚乎更矿区 DK-1 孔气体组分特征(据青海煤炭地质 105 勘探队, 2009)  
Table 1 Compositions of the gas from the DK-1 borehole in Juhugeng mining area of the Muli Coalfield

样品号	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	iC <sub>4</sub>	nC <sub>4</sub>	iC <sub>5</sub>	nC <sub>5</sub>	C <sub>6+</sub>	CO <sub>2</sub>	备注
G-5-1-2	68.75	8.65	9.10	1.12	5.58	0.72	1.12	4.09	0.98	采样深度 134 m
G-6-1-2	52.56	8.13	16.97	1.76	2.66	0.25	0.25	2.51	14.93	采样深度 143 m
S-1-2	73.85	7.80	11.80	1.16	1.26	0.16	0.15	2.14	1.66	样品为泥浆气

注: 标题栏中分子式依次表示: 甲烷、乙烷、丙烷、异丁烷、正丁烷、异戊烷、正戊烷、六烷及以上碳数烷烃、二氧化碳。

表 2 木里煤田冻土区天然气水合物气体碳氢同位素分析结果表(据青海煤炭地质 105 勘探队, 2009)  
Table 2 Stable carbon isotope compositions of the gas hydrates from the permafrost of the Muli Coalfield

样品号	$\delta^{13}C_1$	$\delta^{13}C_2$	$\delta^{13}C_3$	$\delta^{13}iC_4$	$\delta^{13}nC_4$	$\delta^{13}C_{CO_2}$	$\delta DC_1$	$\delta DC_2$	备注
G-5-1-1	-50.5	-35.8	-31.9	-31.9	-31.0	-18.0	-262	-240	采样深度 134 m
G-6-1-1	-39.5	-32.7	-30.8	-31.1	-30.4	-18.0	-266		采样深度 143 m
S-1-1	-47.4	-35.0	-31.8	-31.8	-30.9	-17.0	-268	-254	样品为泥浆气
42-1	-50.7	-36.5				-24.0	-242		样品为泥浆气
42-2	-52.5	-39.8				-21.8	-252		样品为泥浆气

注: 标题栏中分子式依次表示: 甲烷碳同位素、乙烷碳同位素、丙烷碳同位素、异构丁烷碳同位素、丁烷碳同位素、二氧化碳碳同位素、甲烷氢同位素、乙烷氢同位素。

分析(表 2), 其  $\delta^{13}C$  值为  $-50.5\text{‰}$ (PDB 标准), 并具有  $\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2 < \delta^{13}C_3 < \delta^{13}iC_4 < \delta^{13}nC_4$  的特征, 其  $\delta D$  值分别为  $-266\text{‰}$  和  $-262\text{‰}$ (VSMOW 标准)。

#### 4 木里煤田天然气水合物成因分析

前人研究测试资料表明, 我国煤层混合气甲烷  $\delta^{13}C$  为  $-78\text{‰} \sim -18\text{‰}$ , 其分布范围广, 同位素组成总体上偏轻, 而且不同地区、不同地质时代和不同煤级煤中  $\delta^{13}C$  的分布特征也有所不同<sup>[14]</sup>。研究区煤层形成于中—新生代; 热演化历程及其控制因素相对简单; 煤级普遍较低; 甲烷  $\delta^{13}C$  较轻且分布较为集中。有研究证实, 天然气水合物中甲烷的成因有热成因、微生物成因和二者混合成因 3 种。在解释形成天然气水合物的气体来源时, 甲烷  $\delta^{13}C \geq -50\text{‰}$  为热成因气; 甲烷  $\delta^{13}C \leq -60\text{‰}$  为微生物成因气。同样, 当烃类湿度比值  $C_1/(C_2+C_3) \leq 100$ , 指示热成因气; 当  $C_1/(C_2+C_3) \geq 100$ , 指示有微生物气存在<sup>[15]</sup>; 当  $C_1/C_2+C_3$  为  $100 \sim 1\,000$ , 指示混合成因气; 当  $C_1/C_2+C_3 > 1\,000$ , 指示典型微生物成因气<sup>[16]</sup>。

木里煤田的天然气水合物的  $\delta^{13}C$  为  $-50.5\text{‰}$ (PDB 标准), 与煤层气组成相近, 显示出热成因气的特征, 而  $C_1/(C_2+C_3)$  也小于 100, 显示出明显的深部热解气特征, 而非浅部微生物气。

在甲烷碳同位素值与  $C_1/(C_2+C_3)$  散点图上, 木里煤田天然气水合物的样品落在深部热解气范围内(图 4), 在  $\delta^{13}C$ - $\delta D$  散点图上, 木里煤田天然气水合物的样品亦落在深部热解气区(图 5)。

综合分析认为, 木里煤田天然气水合物中的甲烷主要来自煤层气。理由如下:

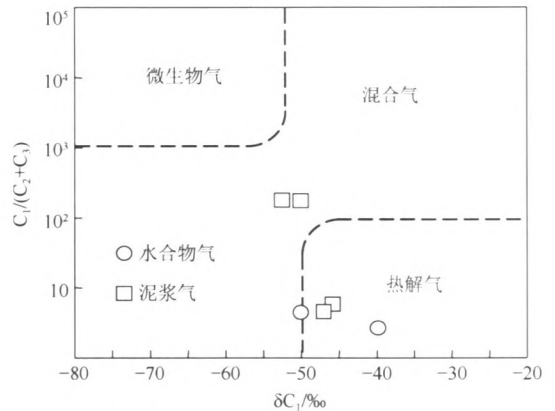


图 4 木里煤田冻土区 DK-1 孔甲烷碳同位素值与  $C_1/(C_2+C_3)$  分布图(据国土资源部 2009 年 9 月 25 日新闻发布稿)

Fig. 4 A plot of  $\delta^{13}C$  and  $C_1/(C_2+C_3)$  of the methane released from the DK-1 borehole in the collected from the permafrost of Muli Coalfield

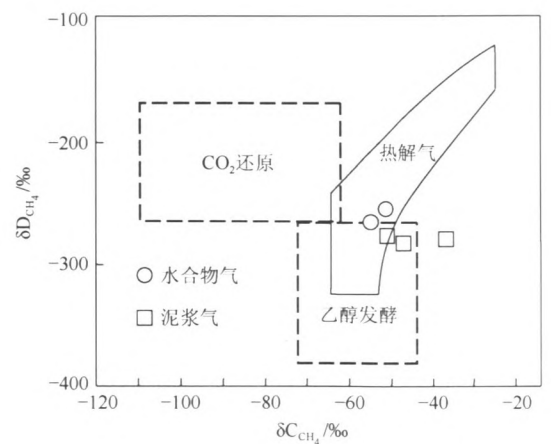


图 5 木里煤田冻土区 DK-1 孔甲烷碳、氢同位素值分布图  
Fig. 5 A plot of  $\delta^{13}C$  and  $\delta D$  of the methane released from the DK-1 borehole from the permafrost of Muli Coalfield

a. 木里煤田侏罗纪煤层及有机质曾产出相当数量的煤层气, 但根据测试和研究发现, 目前赋存于煤层中的气量偏低。这可能是在地质历史中甲烷气体大量逸出并富集于冻土带中, 进而成为天然气水合物的主要气体来源。

b. 木里坳陷分布有石炭系暗色泥(灰)岩、下二叠统草地沟组暗色灰岩、上三叠统尕勒得寺组暗色泥岩和侏罗系暗色泥页岩等数套烃源岩。这些烃源岩质量较好, 处于成熟—过成熟阶段, 具有良好的生油、生气潜力<sup>[17]</sup>; 但因其资源有限, 迄今在木里煤田及其邻区尚未发现具规模的常规油气藏。因此, 常规天然气至多是本区天然气水合物中甲烷的次要来源。

c. 根据煤炭勘查钻孔涌出的气体成分和 DK-1 孔采集的气体成分(表 1)数据分析, 气体具有较多的重烃类气体; 碳氢同位素分析(表 2)显示出明显的深部热解气特征, 基本排除浅部微生物气的可能。

d. 根据测井曲线解释的天然气水合物疑似层位均分布在煤系中(江仓组)。

为表征木里煤田天然气水合物的特点, 故将其称为“煤型气源”天然气水合物。

## 5 结论

在对木里煤田多年冻土层的煤炭地质勘查施工中, 发现了天然气水合物的存在, 通过对钻获天然气水合物样品的分析, 以及对以往异常可燃气体涌出钻孔的测井曲线的重新解释和对比分析, 初步确定了天然气水合物赋存于中侏罗统江仓组油页岩段的细粉砂岩夹层内的孔隙和裂隙中; 由气体成分组成可知, 其含有较多重烃类气体, 甲烷可达 52%~68%; 同时, 根据碳同位素分析结果, 认为该区天然气水合物主要源于木里煤田的煤层气, 并将其命名为“煤型气源”天然气水合物。

## 参考文献

- [1] 郭平, 刘士鑫, 杜建芬. 天然气水合物气藏开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006: 1-22.
- [2] KVENVOLDEN K A. Potential effects of gas hydrate on human welfare[C]// Proceeding of National Academy of Science Colloquium. USA, 1999.
- [3] 史斗, 郑军卫. 世界天然气水合物研究开发现状和前景[J]. 地球科学进展, 1999, 14(4): 330-339.
- [4] 陈多福, 王茂春, 夏斌. 青藏高原冻土带天然气水合物的形成条件与分布预测[J]. 地球物理学报, 2005, 48(1): 165-172.
- [5] 黄朋, 潘桂棠, 王立全, 等. 青藏高原天然气水合物资源预测[J]. 地质通报, 2008, 21(11): 794-798.
- [6] 坚润堂, 李峰, 王造成. 青藏高原冻土区活动带天然气水合物异常特征[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2009, 31(2): 13-17.
- [7] 蒋国盛, 王达, 汤凤林, 等. 天然气水合物的勘探与开发[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2002.
- [8] 库新勃, 吴青柏, 蒋观利. 青藏高原多年冻土区天然气水合物可能分布范围研究[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(4): 588-592.
- [9] 曹伟, 盛煜, 陈继. 青海木里煤田冻土环境评价研究[J]. 冰川冻土, 2008, 30(1): 157-164.
- [10] 国家地震局地质研究所, 国家地震局兰州地震研究所. 祁连山—河西走廊活动断裂系[M]. 北京: 地震出版社, 1993.
- [11] 文怀军, 鲁静, 尚璐君, 等. 青海聚乎更矿区侏罗纪含煤岩系层序地层研究[J]. 中国煤田地质, 2006, 18(5): 19-21.
- [12] 陈建洲, 谢海林, 李世金, 等. 论木里煤田江仓矿区的勘探类型[J]. 资源与产业, 2006, 8(3): 67-68.
- [13] 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.
- [14] 秦勇, 唐修义, 叶建平, 等. 中国煤层甲烷稳定碳同位素分布与成因探讨[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(2): 113-119.
- [15] 蔡峰. 气体水合物中甲烷的地球化学特征[J]. 海洋地质动态, 2000, 16(11): 5-8.
- [16] MATSUMOTO R, UCHIDA T, WASEDA A, et al. Occurrence, structure, and composition of natural gas hydrate recovered from the Blake Ridge, Northwest Atlantic[C]//PAULL C K, MATSUMOTO R, WALLACE P J, et al. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 2000, 164: 13-28
- [17] 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[J]. 西北地质科学, 1998, 19(2): 47-54.