

祁连山多年冻土区天然气水合物的形成条件

祝有海¹, 刘亚玲¹, 张永勤²

ZHU You-hai¹, LIU Ya-ling¹, ZHANG Yong-qin²

1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

2. 国土资源部勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000

1. *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;*

2. *Institute of Exploration Techniques, Ministry of Land and Resources, Langfang 065000, Hebei, China*

摘要:祁连山多年冻土区面积约 $10\times 10^4\text{km}^2$,年平均地表地温为 $-1.5\sim -2.4^\circ\text{C}$,冻土层厚度为50~139 m。区内侏罗纪小型含煤盆地广布,产有丰富的煤层气。南祁连盆地是一潜在的油气盆地,存在下石炭统奥牛沟组、下二叠统草地沟组、中三叠统大加连组、上三叠统尔勒得寺组4套烃源岩,具有良好的生油生气潜力。在木里煤田33号钻孔的冻土层内发现有连续逸出的高含量烃类气体,井口点燃即可燃烧,简易采气分析结果表明甲烷含量高达38.07%~75.9%。根据该钻孔的气体组分、年平均地表地温、冻土层厚度、地温梯度等数据分析,这里基本具备形成天然气水合物的温压条件,计算结果显示水合物稳定带的顶界和底界埋深分别为171 m和574 m,稳定带厚度为403 m。

关键词:天然气水合物;冻土;气体漏泄;水合物稳定带;祁连山

中图分类号:P618.130.1

文献标识码:A

文章编号:1671-2552(2006)01~02-0058-06

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*, 2006, 25(1-2):58-63

Abstract:Permafrost in the Qilian Mountains covers an area of about 100000 km² with an annual mean ground surface temperature ranging from -1.5 to -2.4°C and permafrost thickness ranging from 50 to 139 m. Small Jurassic coal-bearing basins are widespread in the Qilian Mountains, which contain abundant coal bed methane. The South Qilian basin is a potential petroleum-bearing basin, where there are four suites of hydrocarbon source rocks, namely, the Lower Carboniferous Chouniugou Formation, Lower Permian Caodigou Formation, Middle Triassic Dajialian Formation and Upper Triassic Galedesi Formation, which all have a high genetic potential. Continuous escape of hydrocarbon gases was found inside the permafrost interval at hole 33 in the Muli coal field. When we ignited the wellhead, the escaping gas burned. Simple gas sample analysis shows that it contains as high as 38.07–75.9% methane. Based on the gas composition, annual mean ground surface temperatures, permafrost thickness and thermal gradients of hole 33, the permafrost in the main has the temperature–pressure conditions for the formation of gas hydrates. Calculation indicates that the hydrate stability zone probably occurs in the 171–574 m interval with a thickness of 403 m.

Key words: gas hydrate; permafrost; gas releases; hydrate stability zone; Qilian Mountains

天然气水合物是由水和气体分子(主要是甲烷)组成的一种冰状物质,广泛分布于海底沉积物和陆上永久冻土带中。这是一种规模巨大的新型潜在能源,全球潜在资源量达

$(1.8\sim 2.1)\times 10^{16}\text{m}^3$ 的甲烷气,相当于已知煤、石油和天然气资源量总和的2倍,加上能对全球气候变化和海底稳定性产生重大影响,因而引起国内外的高度关注。中国也非常重视天然气水

收稿日期:2005-10-20;修订日期:2005-11-10

基金项目:中国地质调查局《我国陆域永久冻土带天然气水合物资源远景调查》项目(编号200410100001)、国家自然科学基金项目(40473001)和国土资源部“百人计划”项目联合资助。

作者简介:祝有海(1963-),男,研究员,从事天然气水合物、海洋地质和地球化学研究。E-mail:zyh@mx.cei.gov.cn

合物的调查研究,已在南海和东海发现大量异常标志,显示出良好的找矿前景^[1-4],但冻土区的调查研究工作相对滞后。

迄今为止,全球冻土区内共发现水合物产地9处,资源量 $10^{13}\sim 10^{16}\text{m}^3$,主要分布于俄罗斯、美国、加拿大等国的环北冰洋冻土区^[5-6]。中国多年冻土面积达 $2.15\times 10^6\text{km}^2$,主要分布于青藏高原和东北大兴安岭地区,占国土总面积的22.3%,是世界第三冻土大国^[7]。初步研究结果表明,青藏高原特别是羌塘盆地具备天然气水合物的形成条件和找矿前景^[8-12]。陈多福等^[13]运用热力学方法,预测出青藏高原多年冻土带天然气水合物的顶界埋深为27~560 m,底界埋深为77~2070 m,并估算出青藏高原冻土带中水合物甲烷气的资源量为 $1.2\times 10^{11}\sim 2.4\times 10^{14}\text{m}^3$ 。但以上研究均未涉及到祁连山冻土区,本文拟根据祁连山的冻土条件、物源条件和温压条件,对该区天然气水合物的形成条件进行初步分析。

1 区域地质背景和冻土条件

祁连山地处青藏高原北部,由走廊南山(北祁连)、托来山(中祁连)、南祁连的众多山系(党河南山、宗务隆山、拉脊山等)和盆地组成,构造上一般划分为北祁连构造带(河西走廊、走廊南山)、中祁连陆块(托来山)和南祁连构造带三大构造单元。自震旦纪以来,祁连山先后经历了大陆裂谷阶段(震旦纪—中寒武世)、海底扩张及沟弧盆地体系阶段(晚寒武世—中奥陶世)、造山阶段(中奥陶世之后分别经历了俯冲造山、碰撞造山和陆内造山作用)等演化阶段,形成了现今的地质构造格局^[14]。

早古生代期间,祁连山地区为一小型洋盆,志留纪晚期的加里东运动使古洋盆封闭并开始隆升剥蚀。石炭纪时又开始下沉形成广阔的浅海陆棚沉积,二叠纪时发生南北差异升降,北祁连抬升成陆,而南祁连仍为浅海陆棚或陆表海环境。三叠纪时南祁连沉积了一套海相砂泥岩夹灰岩建造。晚三叠世末的印支运动使古特提斯海域完全封闭,整个祁连山抬升成陆,成为剥蚀区。之后的早燕山运动使得祁连山地区局部拉张,形成一些条带状的山间断陷盆地,并沉积了一套侏罗纪的山间河湖沼泽相含煤碎屑岩建造^[15]。白垩系、古近系和新近系以细粒红色碎屑岩、粘土岩为主,第四系分布广泛,以冰水—洪积和冰川堆积物为主。

祁连山是中国西部多年冻土广泛分布的地区之一,多年冻土区面积约 $10\times 10^4\text{km}^2$ 。区内山脉与盆地相间排列,山脉主峰海拔大都超过5000 m,盆地区一般为3500~4000 m。祁连山总体上属于高原亚寒带半干旱气候区,日平均气温低于等于 0°C 的天数每年有160~240天之久。在海拔2700~4100 m的地带内,年平均气温为 $0.7\sim -5.8^\circ\text{C}$ ^[7],这为冻土发育提供了有利条件。现有资料表明,祁连山南坡冻土区下界大致在海拔3700~3900 m处,主要沿拉脊山—青海南山—柴达木山一线分布;北坡下界在3450~3650 m处,主要沿冷龙岭—走廊南山—党河南山一线分布。冻土区下界与年平均气温 $-2\sim -2.5^\circ\text{C}$ 线大致相当^[7]。平面上可分成连续冻土区和岛状冻土区,前者主要分布于祁连山中段,后者则分布于祁连山的东段和西段(图1)。

大量的实测资料表明,整个祁连山冻土区的年平均地表地温为 $0\sim -2.4^\circ\text{C}$,冻土层厚度为8.0~139.3 m(表1),其中连续冻土区的年平均地表地温为 $-1.5\sim -2.4^\circ\text{C}$,冻土层厚度为50.0~139.3 m;而岛状冻土区的年平均地温为 $0\sim -1.5^\circ\text{C}$,冻土层厚度为几米、十几米至几十米不等^[7]。随着海拔的升高,地表地温将降低,冻土层厚度也将加大。一般说来,海拔每升高100 m,地表地温将降低 $0.2\sim 1.1^\circ\text{C}$,冻土层厚度将增加8~31.9 m^[7]。

木里地区位于祁连山中部,是介于托来山和大通山之间的一个山间盆地,海拔一般4000~4300 m,是祁连山冻土区的核心,除局部融区外,多年冻土连续分布,年平均地表地温最低(-2.4°C),实测冻土层厚度60~95 m(表1),并常见厚层地下冰。

2 物源条件

天然气水合物是由气体(以甲烷为主)和水组成的固体物质。祁连山地区水源丰富,这里不再详细讨论,以下将就气源问题进行重点探讨。

祁连山侏罗纪小型含煤盆地星罗棋布,组成祁连山含煤盆地群,其中疏勒河—大通河流域就分布有瓦乌寺、雪霍立、聚乎更、木里、江仓、热水等11个含煤盆地^[16](图1),含煤层位为下侏罗统热水组和中侏罗统江仓组、木里组。木里煤田的煤质较齐全,从长焰煤到低级无烟煤均能见到,煤的变质作用以深成变质为主,有利于形成煤层气。木里煤田各矿区(井田)的测定结果表明,西部的聚乎更、江仓矿区和东部的默勒矿区煤层气含量相对较低,一般均在 2mL/g 以下,而南部的热水矿区和外力哈达矿区则相对富集,含量可达 $5\sim 12.8\text{mL/g}$ ^[17]。王嵩等^[17]的计算表明,外力哈达矿区300~2000 m深度范围内的煤层气资源量约 $5.6\times 10^8\text{m}^3$,热水矿区300~2000 m深度范围内的资源量约 $17.93\times 10^8\text{m}^3$,2个矿区的资源量共计 $24.97\times 10^8\text{m}^3$ 。

祁连山冻土区中南部的南祁连盆地是一潜在的油气盆地,又可细分成疏勒、木里、哈拉湖、下日哈和天峻5个次级坳陷^[15]。哈拉湖凹陷发育有下二叠统草地沟组碳酸盐岩、中三叠统大加连组碳酸盐岩、上三叠统尕勒得寺组暗色泥岩3套烃源岩,烃源岩厚度较大,有机质丰度较高,处于成熟—高成熟阶段,是南祁连盆地生烃条件较好的坳陷。木里坳陷则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、侏罗系暗色泥页岩4套烃源岩,烃源岩质量较好,处于成熟—过成熟阶段,是南祁连盆地最具勘探前景的坳陷^[15,18],其中下石炭统臭牛沟组以灰黑色的沥青灰岩、生物灰岩与泥岩为主,总厚度为181 m。灰岩的有机碳含量为 $0.32\%\sim 1.82\%$,泥岩的有机碳含量为 $0.98\%\sim 5.76\%$,均已达到好烃源岩的标准,具有良好的生油气潜力^[19],且已进入过成熟阶段,将以产气为主。

由此可见,祁连山冻土区,尤其是木里地区具有良好的气源条件,有利于形成天然气水合物。更为可喜的是,青海省煤炭地质105勘探队于2004年9月在木里煤田聚乎更矿区一井田施工了33号钻孔并在该孔中发现高含量的烃类气体。该

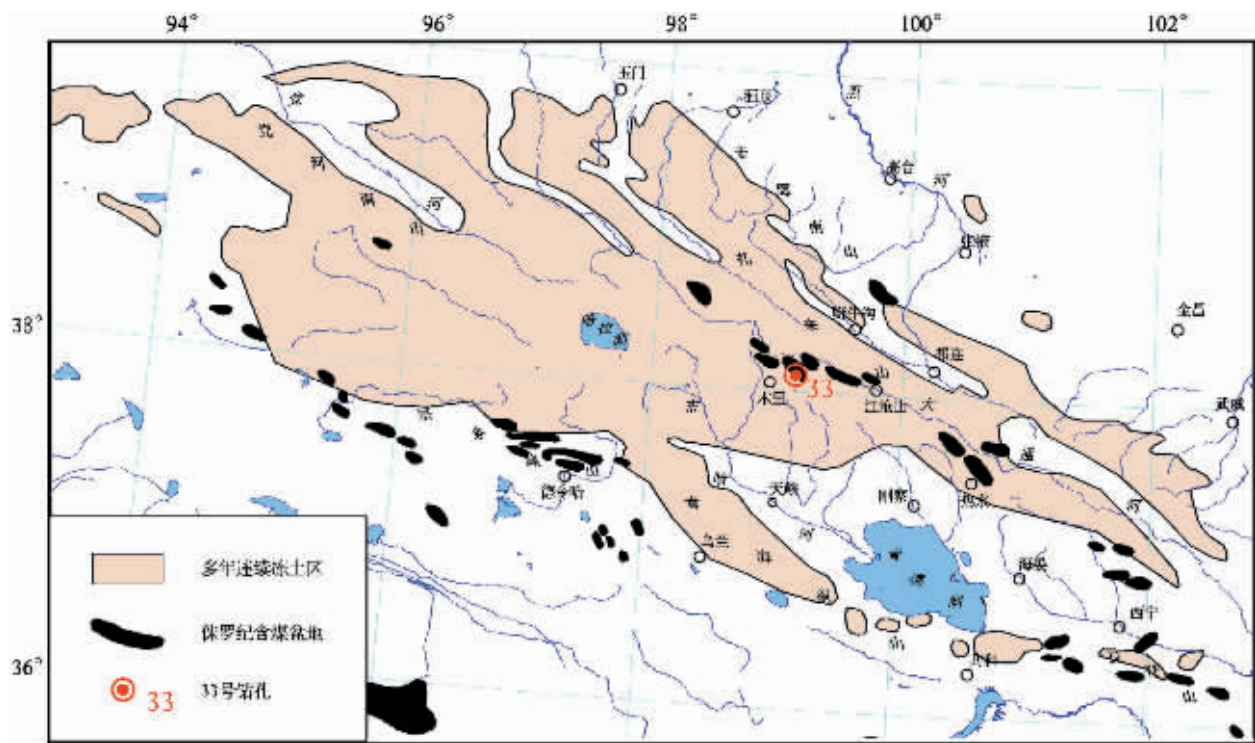


图1 祁连山多年冻土区及其煤田分布图
(多年冻土区根据参考文献[7]编绘,含煤盆地根据参考文献[16]编绘)
Fig.1 Distribution of permafrost and coal fields in the Qilian Mountains

孔的大地坐标为X:4219479、Y:17512639,即99.144072°E、38.107178°N(图1),高程4056 m。按设计该孔应打到约450m处才能见到煤层,但当打到50 m左右时(冻土层内)由于涌水和气喷而报废。稍后将该钻孔位置向北移动约50 m后再打,当打到100 m左右时再次遇到涌水和气喷,从而再次报废。钻工在井口点燃逸出的气体时即可燃烧。2005年8月笔者再次到该井位调查时发现仍有大量气体逸出(该孔未封孔),且点燃气体时仍能燃烧(图2)。井口简易采气(有大气混入)样品的分析结果表明,除大气组分外,主要是以甲烷为主的烃类气体(表2)。尽管2次采样的烃类气体绝对含量有所不同(随大气混入的多少而不同),但若折算成100%的烃类气体,甲烷含量均高达96.6%~99.2%。

3 温压条件

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^[9]。温度主要受年平均地表地温和地温梯度的影响,压力则主要取决于地层厚度。目前还没有祁连山冻土区孔隙流体盐度的实测数据,但加拿大Mackenzie三角洲冻土区内的孔隙流体盐度非常低,仅5‰~35‰,对水合物影响不大^[9],因此本次研究未考虑盐度的影响。

笔者根据木里煤田聚乎更矿区一井田33号孔2004年9月18日采集的气体组分数据(表2),利用Sloan的CSMHYD软件



图2 祁连山冻土区木里煤田33号孔气体逸出及点火燃烧
Fig.2 Photograph of gas releases and combustion from hole 33 in the Muli coal field in permafrost of the Qilian Mountains

对该区天然气水合物形成的温压条件进行了计算,所获得的热力学相平衡曲线绘于图3。数学回归分析表明水合物形成的温度、压力相平衡边界可表示为

$$p=0.0000000171\times T^6+0.0000005807\times T^5+0.0000101830\times T^4+0.0004951121\times T^3+0.0130424707\times T^2+0.1661576351\times T+2.1323044860 \quad (1)$$

($R^2=0.99993$)

式中 p 为压力(单位为MPa), T 为该压力条件下水合物的形成温度(单位为 $^{\circ}\text{C}$), R 为相关系数。为便于对比,将2005年8月20日气体组分和纯甲烷组分的相平衡曲线也绘于图3。

图3中的A点为年平均地表地温,B点为冻土层底界(即年平均地温为 0°C 的点),C、D点分别为水合物稳定带的顶界和底界,AB线为冻土层内地温梯度,BD线为冻土层下地温梯度。由冻土层内地温梯度(AB线)、冻土层下地温梯度(BD线)与水合物相平衡边界所界定的区域即为水合物的热力学稳定分布区。木里33号孔的高程为4056 m,依据祁连山冻土区年平均地表地温、冻土层厚度与海拔高度间的统计规律及其拟合公式^[7]可以得知,该钻孔的年平均地表地温约为 -2.6°C ,冻土层厚度约88 m。进一步的推算表明该钻孔冻土层内的地温梯度应为 $0.030^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。目前尚无33号孔冻土层下的地温梯度数据,但邻近地区7个钻孔(31~38号钻孔)的简易测温资料显示其冻土层下的地温梯度为 $0.013\sim 0.045^{\circ}\text{C}/\text{m}$,平均 $0.022^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。若以 $0.022^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 这一平均地温梯度作为33号孔的地温梯度,就可依据这些实际资料得出33号钻孔天然气水合物稳定带分布图(图3)。

为了准确地获得水合物稳定带顶界和底界的埋深及其厚度,还需对上述参数进行进一步的理论计算。利用陈多福等^[13]的计算公式得出冻土层下某一深度处的温度为

$$T_i=T_0+G_iH_i\text{和}T_s=T_i+G_sH_s\tag{2}$$

式中 T_i 为冻土层内深度 H_i 处的温度, T_0 为年平均地表地温, G_i 为冻土层内地温梯度($^{\circ}\text{C}/\text{m}$), H_i 为冻土层内的深度(m), T_s 为冻土层下深度 H_s 处的温度, G_s 为冻土层下的地温梯度, H_s 为冻土层底界之下的深度(m)。

冻土层下某一深度处的压力为

$$p_i=p_0+\rho_gH_i10^{-6}\text{和}p_s=p_i+\rho_gH_s10^{-6}\tag{3}$$

式中 p_i 为冻土层内的静岩压力, p_0 为地表大气压力(0.1 MPa), g 为重力加速度常数(取 $9.81\text{ m}/\text{s}^2$), ρ_i 为冻土层密度(实验测定冻土密度为 $1500\sim 2000\text{ kg}/\text{m}^3$,计算时取 $1750\text{ kg}/\text{m}^3$ ^[13]), p_s 为冻土层下的静水压力, ρ_s 为冻土层下孔隙流体密度($1000\text{ kg}/\text{m}^3$)。图3中某一深度点的压力就是依据上述公式计算的,如B点(88 m)为1.61 MPa,C点(171 m)为2.43 MPa,D点(574 m)为6.38 MPa。

水合物稳定带厚度为

$$H_z=(H_s+H_i)-H_t\tag{4}$$

式中 H_z 为水合物稳定带厚度, (H_s+H_i) 为水合物底界埋深, H_t 为水合物顶界埋深。联解方程式(1)、(2)、(3)和(4)即可获得水合物稳定带的底界、顶界埋深及其厚度^[13]。

表1 祁连山多年冻土区年平均地表地温和厚度实测数据^[7]

Table 1 Annual ground surface temperatures and thicknesses in permafrost of the Qilian Mountains

地 区	孔号	海拔高度/m	年平均地温/ $^{\circ}\text{C}$	多年冻土厚度/m	多年冻土上限/m
洪水坝 (黑河源头)	1	3890		46.0	2.0
	2	3830	-1.5	79.3	1.7
	3	4033		139.3	1.7
木里	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	约60.0	<1.0
	12/1	3993		60.0	1.0
	15/1	4016	<0	76.0	2.0
	1	3985		95.0	1.0
江仓	CK90	3888		86.7	<1.0
	CK95	3882		50.0	<1.0
热水	福1	3595	0.0~-0.1	11.0	2.8
	冻2	3480	-0.6	20.0	1.4
	冻5	3487		8.0	2.3
	69-4	3680	-0.1	8.2	1.8
	新1-1	3696	-0.6	30.0	1.1
	301	3862	-1.5	约60.0	2.4
	走廊南山北坡	K1	<0	33.2	1.8
毛来山南坡	11	3950		78.4	1.8
党河南山	40	3742		12.0	
达坂山北坡	坑道	3500		25.0	1.5~2.0
达坂山垭口段 (宁张公路)	CK2	3886		15.0	
	CK5	3991		56.0	2.5

计算结果表明,木里煤田33号钻孔2004年9月18日的气体组分具备形成天然气水合物的温压条件,其稳定带的顶底界埋深分别为171 m和574 m,稳定带厚度为403 m,但2005年8月20日的气体组分则不能形成水合物。

4 讨论与结论

冻土层内及层下的气喷或气体漏泄现象广泛出现于俄罗斯的西西伯利亚和东西伯利亚^[21]、加拿大Mackenzie三角洲的Taglu钻孔^[22]和美国阿拉斯加的Prudhoe湾地区^[23],这些地区往往都是天然气水合物或天然气田分布区。冻土层内的气喷多来自于浅层的微生物气,也有部分是由深部的热解气或天然气储层经活动断层迁移上来的,组分以甲烷为主。气喷的流量随时间的推移而逐渐降低,一般持续数天至数月,最长达6个月。这些气体在水合物稳定带内聚集时有可能形成天然气水合物,

表2 青海木里煤田聚乎更矿区一井田33号孔简易采气样品分析结果

Table 2 Analysis of gas samples from hole 33 in the Juhugeng mining areas, Muli coal field in permafrost of the Qilian Mountains

采样日期	O ₂	N ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	资料来源
2004-09-18	12.34	48.18	0.05	38.07	1.31	0.05		青海省105地质队 ^①
				96.6	3.3	0.1		按100%烃类气体计
				75.9	0.6	0.0002	0.0004	实测
2005-08-20				99.2	0.8			按100%烃类气体计

注:气体含量%;^①青海煤炭地质105勘探队.青海省天峻县聚乎更煤矿区1井田首勘区勘查(总结)报告.2005.

甚至有部分气喷就是由天然气水合物分解后所释放的,特别是那些持续时间较长的气喷往往就是水合物分解后的气体^[2]。尽管木里煤田33号钻孔喷出的气体成因尚不清楚,但持续时间将近1年(有可能还将继续延续下去)的冻土层内气体漏泄说明有源源不断的气源补给,很有可能是深部的煤层气沿活动断层迁移上来的(因冻土层本身的渗透性很差)。若这里具备适宜的温压条件就有可能形成天然气水合物,甚至这些气体有部分可能就是天然气水合物分解所释放的气体。

根据木里煤田33号钻孔附近的年平均地表地温(−2.6℃)、冻土层厚度(88 m)、平均地温梯度(0.022℃/m)和2004年9月18日的气体组分等参数,计算出该孔基本具备形成天然气水合物的温压条件,水合物稳定带位于171~574 m处,厚度403 m,说明这些气体流经这一区间时就有可能形成天然气水合物。不可否认的是,上述参数的细微变化就有可能影响到水合物稳定带的厚度,甚至关系到能否形成天然气水合物。例如气体组分的影响就甚大,在上述条件下不可能形成纯甲烷(CH₄:100%)水合物,也无法形成2005年8月20日气体组分(CH₄:99.2%)水合物,只能形成2004年9月18日气体组分(CH₄:96.6%)水合物(图3)。地温梯度的影响也甚大,若地温梯度大于0.045℃/m,33号孔附近不可能形成水合物;若地温梯度为0.028℃/m,恰好能形成2004年9月18日气体组分的水合物;若地温梯度为0.021℃/m,恰好能形成2005年8月20日气体组分的水合物;若地温梯度为0.013℃/m,则可形成各种组分的水合物,其顶底界分别为140~1470 m(2004年9月18日气体组分)和230~1400 m(2005年8月20日气

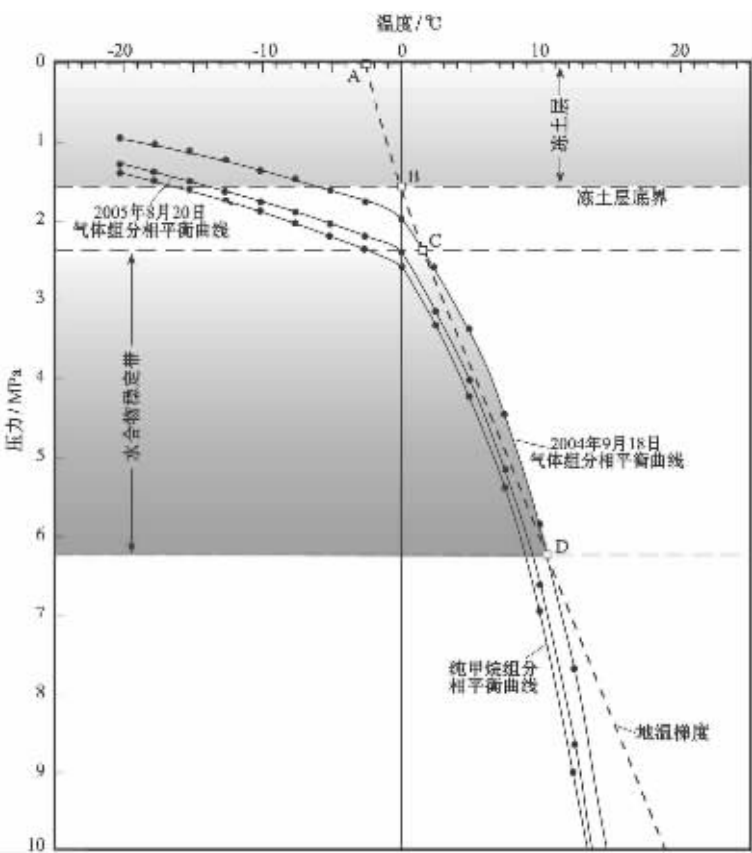


图3 祁连山冻土区木里煤田33号孔天然气水合物的温压条件
(图中A、B、C、D点的意义参见正文)

Fig.3 Temperature–pressure conditions for generation of gas hydrates from hole 33 in the Muli coal field in permafrost of the Qilian Mountains

体组分)。总之,年平均地表地温越低、冻土层越厚、地温梯度越低、气体组分所含的重烃越高,越有可能形成天然气水合物,水合物稳定带越厚。反之水合物稳定带就越薄,甚至不能形成天

然气水合物。在这些参数中,气体组分和地温梯度是水合物形成与否及其厚薄的决定性因素,冻土层厚度和年平均地表地温次之。

与高纬度冻土区相比,青藏高原冻土区的年平均地表地温相对较高,冻土层相对较薄,对形成天然气水合物相对不利。与青藏高原腹地相比,祁连山的冻土条件更为不利,但祁连山具有丰富的煤层气,并发现有长达将近1年的烃类气体漏泄,说明气源条件不成问题,冻土条件及其相应的温压条件就成为能否形成天然气水合物的关键。前面的讨论结果显示,木里煤田33号钻孔附近基本具备形成天然气水合物的冻土条件和温压条件,但祁连山冻土区总体上仍处于形成天然气水合物的临界点附近,气体组分、地温梯度、年平均地表地温和冻土厚度等参数将影响着水合物的形成或分解,这无疑将对地质找矿及其环境变化产生重要影响。因此,祁连山冻土区为我们提供了一个研究临界点附近天然气水合物形成与分解的理想场所。

综上所述,祁连山冻土区特别是木里地区具备良好的物源条件,并基本具备形成天然气水合物所需的冻土条件和温压条件,木里煤田33号钻孔长达将近1年的冻土层内气体漏泄有可能在其稳定带内(171~574 m)形成天然气水合物。

致谢:青海省煤炭地质105勘探队蔡玉良队长、贾志耀科长和杨进游高级工程师在野外工作期间给予了大力支持并提供了木里煤田的部分资料,中国科学院广州地球化学研究所陈多福博士在论文撰写过程中给予了许多帮助,在此深表谢意。

参考文献:

- [1]姚伯初.南海的天然气水合物矿藏[J].热带海洋学报,2001,20(2):20-28.
- [2]祝有海,张光学,卢振权,等.南海天然气水合物成矿条件与找矿前景[J].石油学报,2001,22(5):6-10.
- [3]黄永样,张光学,金庆煊,等.南海北部陆坡天然气水合物地质地球物理特征及其前景初探[A].见:陈毓川主编.中国地质学会80周年论文集[C].北京:地质出版社,2002.421-431.
- [4]栾锡武,秦蕴珊,张训华,等.东海陆坡及相邻槽底天然气水合物的稳定域分析[J].地球物理学报,2003,46(4):467-475.
- [5]Collett T S, Dallimore S R. Permafrost-related natural gas hydrate[A]. In: Max M D ed. Natural gas hydrate in oceanic and permafrost environments[C]. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2000.43-60.
- [6]Dallimore S R, Collett T S. Regional gas hydrate occurrences,

- permafrost conditions, and Cenozoic geology, Mackenzie Delta area[A]. In: Dallimore S R, Uchida T, Collett T S eds. Scientific results from JAPEX/JNOC/GSC Mallik 2L-38 gas hydrate research well, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada [C]. Geological Survey of Canada, Bulletin, 1999, 544:31-43.
- [7]周幼吾,郭东信,邱国庆,等.中国冻土[M].北京:科学出版社,2000.1-450.
- [8]徐学祖,程国栋,俞祁浩.青藏高原多年冻土区天然气水合物的前景和建议[J].地球科学进展,1999,14(2):201-204.
- [9]张立新,徐学祖,马巍.青藏高原多年冻土与天然气水合物[J].天然气地球科学,2001,12(1-2):22-26.
- [10]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,2002,21(11):794-798.
- [11]伊海生,时志强,刘文军,等.青藏高原多年冻土区天然气水合物形成潜力及远景[J].西藏地质,2002,20(1):46-49.
- [12]刘怀山,韩晓丽.西藏羌塘盆地天然气水合物地球物理特征识别与预测[J].西北地质,2004,37(4):33-38.
- [13]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.
- [14]冯益民.祁连造山带研究概况——历史、现状及展望[J].地球科学进展,1997,12(4):307-314.
- [15]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.
- [16]白生海.青海省侏罗纪含煤盆地及含煤地层[J].中国煤田地质,1993,5(3):20-23.
- [17]王嵩,张廷江.青海煤层气资源概况及找气方向[J].青海地质,1997,6(2):43-49.
- [18]符俊辉,周立发.南祁连盆地三叠纪地层及石油地质特征[J].西北地质科学,2000,21(2):64-72.
- [19]任拥军,纪友亮,李瑞雪.南祁连盆地石炭系可能烃源岩的甾萜烷地球化学特征及意义[J].石油实验地质,2000,22(4):341-345.
- [20]Sloan E D. Clathrate hydrates of natural gases (second edition) [M]. New York: Marcel Dekker Inc., 1998.1-628.
- [21]Yakushev V S, Chuvinil E M. Natural gas and gas hydrate accumulations within permafrost in Russia [J]. Cold Regions Science and Technology, 2000, 31: 189-197.
- [22]Dallimore S R, Collett T S. Intrapermafrost gas hydrates from a deep core hole in the Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada[J]. Geology, 1995, 23(6): 527-530.
- [23]Collett T S. Permafrost-associated gas hydrate accumulations[A]. In: Sloan E D, Happer J, Hnatow M eds. International conference on natural gas hydrates[C]. Annals of the New York Academy of Science, 1993, 715: 247-269.