

卢振权, Sultan Nabil, 金春爽等. 青藏高原多年冻土区天然气水合物形成条件模拟研究. 地球物理学报, 2009, 52(1): 157~168
Lu Z Q, Sultan N, Jin C S, et al. Modeling on gas hydrate formation conditions in the Qinghai-Tibet plateau permafrost. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2009, 52(1): 157~168

青藏高原多年冻土区天然气水合物 形成条件模拟研究

卢振权¹, SULTAN Nabil², 金春爽³, 饶竹⁴, 罗续荣¹, 吴必豪¹, 祝有海¹

1 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

2 Département de Géosciences Marines, IFREMER, Centre de Brest, Plouzané 29280, France

3 国土资源部油气资源战略研究中心, 北京 100034

4 国家地质实验测试中心, 北京 100037

摘 要 基于野外气体地球化学调查研究, 以及前人有关冻土表层温度、冻土层内地温梯度、冻土层下地温梯度等的资料, 对青藏高原多年冻土区天然气水合物的形成条件开展了模拟研究. 结果显示: 研究区冻土条件能够满足天然气水合物形成的基本要求; 气体组成、冻土特征(如冻土厚度或冻土表层温度、冻土层内地温梯度、冻土层下地温梯度等)是影响研究区天然气水合物稳定带厚度的最重要因素, 其不同点位上的差异性可能导致天然气水合物分布的不均匀性的主要原因; 研究区最可能的天然气水合物为甲烷与重烃(乙烷和丙烷)的混合气体型天然气水合物; 在天然气水合物分布的区域, 其产出的上临界点深度在几十至一百多米间, 下临界点深度在几百至近一千米间, 厚度可达几百米. 与 Canadian Mallik 三角洲多年冻土区相比, 青藏高原多年冻土区除了冻土厚度小些外, 其他条件, 如冻土层内地温梯度、冻土层下地温梯度、气体组成等条件较为相近, 具有一定的可比性, 预示着良好的天然气水合物潜力.

关键词 多年冻土, 天然气水合物, 形成条件, 模拟, 青藏高原

文章编号 0001-5733(2009)01-0157-12

中图分类号 P631

收稿日期 2008-03-13, 2008-09-28 收修定稿

Modeling on gas hydrate formation conditions in the Qinghai-Tibet plateau permafrost

LU Zhen-Quan¹, SULTAN Nabil², JIN Chun-Shuang³, RAO Zhu⁴,

LUO Xu-Rong¹, WU Bi-Hao¹, ZHU You-Hai¹

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

2 Département de Géosciences Marines, IFREMER, Centre de Brest, Plouzané 29280, France

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

4 National Center for Geological Experiment and Test, Beijing 100037, China

Abstract Based on field-investigated gas geochemistry and predecessors' data such as the permafrost ground temperature, thermal gradients within/below the frozen layer, the modeling on gas hydrate formation conditions is conducted in the Qinghai-Tibet plateau permafrost. The modeled results show that the permafrost characteristics generally meet gas hydrate formation

基金项目 国家重点基础研究发展计划项目“南海天然气水合物富集规律与开采基础研究”(2009CB219501)、中央公益性科研院所基本科研业务费专项基金项目“青藏高原多年冻土区天然气水合物形成条件模拟技术研究”、中国地质调查局地质大调查项目“我国陆域永久冻土带天然气水合物资源远景调查”、中国地质科学院矿产资源研究所预调查项目“青藏高原铁路沿线多年冻土区天然气水合物先期调查研究”联合资助.

作者简介 卢振权, 男, 1972 生, 博士, 研究员, 从事天然气水合物与油气的地球化学勘查等研究工作. E-mail: luzhq@vip.sina.com

conditions in the study area. Gas composition, temperature-related permafrost parameters (e. g. permafrost thickness or its ground temperature and thermal gradients within / below the frozen layer) are the most important factors affecting gas hydrate occurrences, whose variance may cause the heterogeneity of gas hydrate occurrences in the study area. The most probable gas hydrate is the kind of hybrid of methane and weight hydrocarbon gases (ethane and propane). In the predicted gas hydrate locations, the upper gas hydrate occurrence depth may be around several ten to more than one hundred meters and the lower depth may range from several hundred meters to about one thousand meters and the thickness may reach several hundred meters. Compared with Canadian Mallik permafrost, the Qinghai-Tibet plateau permafrost has similar thermal gradients within / below the frozen layer and gas composition, except for relatively thinner permafrost, still suggesting great gas hydrate potentials.

Keywords Permafrost, Gas hydrate, Formation conditions, Modeling, Qinghai-Tibet plateau

1 引言

天然气水合物是由水和重量轻的气体分子(如甲烷、乙烷、丙烷、硫化氢、二氧化碳等)在低温、高压、气体浓度大于溶解度条件下形成的一种结晶状固体物质,常稳定存在于温度 $0\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 压力 $3\sim 5\text{ MPa}$ 的环境中. 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^[1]. 由于天然气水合物巨大的能源意义,经过三十多年天然气水合物研究的发展,其逐渐被誉为 21 世纪洁净替代能源,同时由于其分解可能对全球碳循环及沉积物稳定性造成不良影响,天然气水合物已成为当今的热点调查研究领域之一. 我国起步较晚,直到 20 世纪 90 年代中后期才开始天然气水合物的调查研究,且主要工作集中在海域,特别是在南海北部陆坡区^[2~4]. 2007 年,我国在南海神狐海域开展了天然气水合物专项钻探,获得了天然气水合物的实物样品,取得了海域天然气水合物调查研究的突破^[5].

相比较而言,青藏高原多年冻土区天然气水合物的调查研究工作还显得很不足. 青藏高原作为“世界第三极”,多年冻土面积约 150 万 km^2 , 占世界多年冻土面积的 7% , 约占中国冻土总面积的 70% ^[6], 理应是天然气水合物一个重要的资源远景区. 在国外,经过大量的调查研究,多年冻土区中天然气水合物勘查早已实现了突破,并且显示出良好的开发前景,如前苏联在 1965 年开发西伯利亚 Messoyakha 气田时发现了该区多年冻土天然气水合物藏,并在后来的开采中获得了一定的成功^[7~8]. 阿拉斯加北部斜坡多年冻土区也在钻探中揭示到天

然气水合物的存在,科学家根据测井等资料估计包含在其天然气水合物中的天然气体积大约有 $1.0\sim 1.2\times 10^{12}\text{ m}^3$ ^[9~11]. 加拿大 Mallik 三角洲地区更是先后钻探了 Mallik L-38、2L-38、3L-38、4L-38、5L-38 等天然气水合物系列钻井,并进行了试生产^[12,13].

最近几年,青藏高原多年冻土区天然气水合物的调查研究已引起了有关方面的重视,并见有初步成果报道. 这些调查研究结果显示青高原多年冻土区不仅具有天然气水合物形成的基本冻土条件和气源条件^[14~19],而且还存在着一些地球物理、地球化学异常现象^[20~23],显示着良好的资源前景. 但是,受调查研究程度所限,这些异常多呈点状分布,它们还不能反映和代表整个青藏高原多年冻土区天然气水合物的可能分布状况,因而该区天然气水合物的资源潜力在整体上还并不清楚.

陈多福等^[24]根据邻区柴达木盆地涩北气田和塔里木盆地克拉 2 气田的天然气组成特征对整个青藏高原多年冻土区天然气水合物可能产出的部位及资源量进行了预测. 但是柴达木盆地和塔里木盆地气田的天然气组成与青藏高原多年冻土区的烃类气体组成之间存在着一定差别,这些气田的天然气组成不能完全代替青藏高原多年冻土区天然气水合物形成的烃类气体组成. 过去研究工作表明,烃类气体组成不仅是除温压条件外天然气水合物形成的最重要影响因素,而且还是天然气水合物含量的重要决定因素^[25].

本文在过去工作中积累的野外气体地球化学调查数据及前人揭示的有关冻土条件(如冻土表层温度、冻土层内地温梯度、冻土层下地温梯度)等资料基础上,从天然气水合物形成的物理化学条件入手,利用建立起的经验模型对青藏高原铁路沿线多年冻

土区天然气水合物的形成条件开展计算模拟研究,一方面探讨烃类气体组成的不同对青藏高原多年冻土区天然气水合物形成条件的影响,即将本次基于实际测量烃类气体组成之上的模拟结果与前人基于邻区盆地气田天然气组成之上的计算结果进行对比,另一方面利用模拟手段对该区铁路线多年冻土区天然气水合物的可能分布特征进行初步研究。

2 研究区区域地质背景和天然气水合物形成的基本条件

2.1 区域地质背景概况

青藏高原多年冻土区主要分布在昆仑山北坡至唐古拉山南坡安多县北的广大地域,沿着青藏铁路线横跨约 550 km 长^[6],其内分布着一系列中新代残留盆地,如可可西里盆地、沱沱河盆地、羌塘盆地、唐古拉盆地等,它们特别是羌塘盆地,分布面积广、沉积厚度大、有机质含量丰富,且已发现有大量的油气显示或工业油流,这些条件可为研究区天然气水合物成藏提供良好物质基础^[18]。上述盆地是在伴随着青藏高原多期脉动性急剧而又整体隆升过程中形成的构造残留盆地,在高原隆升过程中由于不同的构造演化,后期改造作用一方面形成相应的构造圈闭,使油气相对聚集成藏,另一方面构造运动太强烈,抬升和切割幅度太大,对油气的保存起着破坏作用,使大量的轻烃难以保存而逃逸。这种构造破坏作用造成的烃类气体重新分配现象在上新世—更新世以来尤为明显。此间,在上新世至更新世期间,深海有孔虫氧的同位素记录显示全球总体上为强烈的降温时期;在更新世末期至全新世期间(约在 0.71 Ma),青藏高原也整体进入冰冻期,形成了大面积的冻土,出现了大规模的山地冰川,当时的冰川总面积超过 500000 km²,除夏季以外,高原上稳定的积雪及大规模的冰川提高了地表反射率,增强了冬季高原上空的冷高压,促使高原进一步变冷,其中,晚更新世末期是末次冰期最盛期,青藏高原处于严寒、干旱的冰缘环境,在这种干冷的气候下,青藏高原开始形成大面积的多年冻土。进入全新世,虽然大规模的冰期已经结束,但由于整个高原仍处于不断隆升状态,且高原海拔已上升到 4000 m 以上,特殊的海拔高度决定着整个高原仍处在冰缘环境下^[26]。上新世至更新世期间的降温环境,特别是更新世末期至全新世期间的冰川环境为同期构造作用

破坏的油气藏烃类气体进一步被圈闭提供了一种耦合机制,即游离的烃类气体在低温(冻土层)环境和地层压力条件作用下重新被圈闭形成天然气水合物藏。

2.2 天然气水合物形成的基本条件

冰土区天然气水合物形成的两个主要基本条件是烃类气体的组成特征和冻土本身的条件。前人在青藏铁路沿线多年冻土区中开展过一定程度的烃类气体组成特征研究^[21,22],他们通过对冻土表层以下约 0.5 m 深处取样并进行冻土沉积物中酸解烃分析测试(共 557 件样品),所得样品酸解烃甲烷、乙烷、丙烷平均含量分别为 529.05 $\mu\text{L}/\text{kg}$ 、22.53 $\mu\text{L}/\text{kg}$ 、12.28 $\mu\text{L}/\text{kg}$,这些烃类气体的组成可表示为: 93.83%CH₄ + 3.99%C₂H₆ + 2.18%C₃H₈。显然,这些组成的烃类气体只能孤立地反映研究区冻土沉积物中烃类气体的组成特征,并不能完整地说明可能的天然气水合物形成气体的组成。

我们曾在青藏铁路沿线多年冻土区对低空大气、冷泉气、冻土地下冰包裹气、冻土吸附气不同介质中的烃类气体开展过详细调查,分析结果显示:研究区冻土沉积物吸附气中的烃类气体平均组成可表示为 91.13%CH₄ + 6.54%C₂H₆ + 2.33%C₃H₈,冻土地下冰包裹气中的烃类气体平均组成为 96.38%CH₄ + 2.93%C₂H₆ + 0.69%C₃H₈,冷泉气中的烃类气体平均组成为 100%CH₄ 或 99.20%CH₄ + 0.80%C₂H₆,低空大气中的烃类气体平均组成为 100%CH₄^[23]。

可以看出,冻土地下冰包裹气、冻土沉积物吸附气中的烃类气体平均组成与前人所得的冻土沉积物中酸解烃平均组成较为相近,而低空大气、冷泉气中的烃类气体平均组成则与它们差别较大。考虑到低空大气、冷泉气中的烃类气体与冻土地下冰包裹气、冻土沉积物吸附气中的烃类气体及冻土沉积物中的酸解烃气体可能存在着一定的成因联系,它们之间的相似性或差异性就不难得到理解。

根据过去研究中对墨西哥湾北部陆坡典型天然气水合物产区不同介质(天然气水合物、海底气泡、沉积物等)中的气体成分对比分析,发现沉积物、天然气水合物、海底气泡中的烃类气体组成整体上较为相似,但依次略微变轻,推测它们可能共同来源于海底深部的气体渗漏系统,同时气体在渗漏系统中从深部到达海底过程中以及在天然气水合物形成过程中会发生一些质量分馏效应,以致海底气泡中的烃类气体组成最轻,天然气水合物中次之,沉积物中

的烃类气体组成最重^[27]. 虽然青藏高原多年冻土区天然气水合物的成藏过程可能与墨西哥湾北部陆坡典型产区有所不同,但气体的地球化学演化过程应具有一定的相似性. 从过去开展的该区气体地球化学测量结果看,除甲烷和乙烷外,青藏高原铁路沿线多年冻土区一些冻土和地下冰样中还含有一定量的丙烷和正丁烷,根据烃类气体扩散速率的不同,乙烷、丙烷、丁烷与甲烷一起大量出现一般指示着烃类气体并非简单地由原地有机质转化而成,相反应由深部运移而来^[28],特别是丁烷的出现指示了深部渗漏扩散作用^[29]. 青藏铁路沿线多年冻土区发育着一系列活动断裂,如昆仑山活动断裂、通天河活动断裂、雁石坪活动断裂、西大滩活动断层、不冻泉活动断层、楚玛尔河活动断层、北麓河活动断层、二道沟盆地边界活动断层、沱沱河活动断层等^[30]. 其中,五道梁、可可西里山北、可可西里山南地区近东西—北西向的活动走滑断层在全新世发生的强烈构造活动切割至三叠系地层,并且在断层部位还发现了多期晚更新世—全新世砂质构造楔^[31]. 风火山地区近东西或北西西向断裂系错动到下第三系风火山群紫红色砂岩,断层破裂带中还发育有构造透镜体^[32]. 乌丽地区不同规模、不同性质近东西向或北西西向的活动断层,部分显著地切割了晚更新世湖相泥灰岩层和粘土层及地下多年冻土层^[33]. 这些断裂构造能为深部气体的运移提供可能,不仅可为深部气体的运移提供动力而且还可提供通道空间,特别是其深切作用会对地下水运动有着显著的控制作用,深部富含气体的泉水能沿着断裂运移至近地表甚至出现泉水冒气现象^[33].

基于这样的认识,在对青藏高原铁路沿线多年冻土区天然气水合物形成条件的模拟中可以考虑两种情况的气体组成:一种情况为冻土地下冰包裹气中的平均烃类气体组成(96.38% CH₄ + 2.93% C₂H₆ + 0.69% C₃H₈),另一种情况为冷泉气中的烃类气体组成(99.20% CH₄ + 0.80% C₂H₆). 它们及该区其他介质中烃类气体的组成列在表1中. 前一种情况可能代表了研究区整体上形成天然气水合物的烃类气体供应条件. 后一种情况可能代表了研究区局部异常点上形成天然气水合物的烃类气体供应条件. 例如,在托纠山地区,冻土沉积物吸附气、冻土地下冰包裹气均显示出高含量烃类气体的特征,它们中的烃类气体组成分别为 99.95% CH₄ + 0.03% C₂H₆ + 0.02% C₃H₈、~100% CH₄; 在昆仑山口地区,冻土地下冰包裹气、冷泉气中的烃类气体

表1 青藏高原铁路沿线多年冻土区不同介质中烃类气体组成及本次模拟取值列表

Table 1 Hydrocarbon gas composition in various media within the study area and the designated value for this modeling

介质	烃类气体组成(%)			文献
	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	
浅部冻土	93.83	3.99	2.18	[21, 22]
浅部冻土	91.13	6.54	2.33	
地下冰	96.38	2.93	0.69	
冷泉	99.20	0.80	—	[23]
	100.00	—	—	
低空大气	100.00	—	—	
潜在的天然气	96.38	2.93	0.69	
水合物	99.20	0.80	—	本文

均呈现出高含量特征,其中的烃类气体组成分别为 98.14% CH₄ + 1.60% C₂H₆ + 0.26% C₃H₈、~100% CH₄^[23]. 它们的烃类气体组成特征基本与上述第二种情况一致. 陈多福等^[24]在研究青藏高原多年冻土区天然气水合物形成条件和分布预测中以青海柴达木盆地涩北气田和新疆塔里木盆地克拉2气田的天然气平均组成为例加以分析,这两个气田的天然气组成中 CH₄ 含量分别为 97.71% 和 99.18%. 本次基于野外地球化学调查基础上的两种烃类气体组成与它们也有相似之处.

当然,研究区是否具备天然气水合物的形成条件还要取决于有关冻土条件. 由于受季节影响,青藏高原多年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 1~2 m)^[6]. 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.

依据中国科学院兰州冰川冻土研究所科学家的研究资料,青藏高原多年冻土年平均地温一般在 -1~-3℃,冻土厚度在昆仑山、高平原丘陵、唐古拉山地区分别可达 50~120 m、60~120 m、80~120 m^[6]. 据实测资料,青藏高原多年冻土区冻土厚度为 10~175 m^[15]. 如果根据冻土厚度随纬度和海拔高度的经验关系,计算得到的冻土最大厚度可达 700 m^[34]. 青藏高原多年冻土区冻土层内的地温梯度一般为 0.01℃/m 左右,冻土层下的地温梯度一般为 0.025~0.03℃/m^[6]. 张立新等^[15]的资料显

示, 研究区冻土层内的地温梯度为 $0.011 \sim 0.033^\circ\text{C}/\text{m}$, 冻土层下的地温梯度为 $0.028 \sim 0.051^\circ\text{C}/\text{m}$. 徐学祖等^[14]引用的地温梯度资料则显示, 冻土层内地温梯度为 $0.011 \sim 0.013^\circ\text{C}/\text{m}$, 冻土层下地温梯度为 $0.028 \sim 0.051^\circ\text{C}/\text{m}$. 在本次模拟过程中, 冻土表层温度、冻土层内地温梯度和冻土层下的地温梯度取它们的中间值, 即分别取 $0.0175^\circ\text{C}/\text{m}$ 、 $0.0333^\circ\text{C}/\text{m}$. 其中, 所取的冻土层内地温梯度值与羌塘盆地现今的地温梯度值($0.015 \sim 0.018^\circ\text{C}/\text{m}$)^[35]基本一致. 冻土厚度与冻土表层温度、冻土层内地温梯度密切相关, 如取上述冻土层内地温梯度值时, 当表层温度取 -2.10°C 时, 冻土厚度约 120 m ; 当表层温度取 -3.05°C 时, 冻土厚度约 175 m .

3 经验模型

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^[36]. 同时, 青藏高原多年冻土区中沉积物孔隙流体的盐度, 目前还没有报道, 如果借用 Mackenzie 三角洲冻土带天然气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 $5 \sim 35 \times 10^{-9}$ ^[37], 那么这样低的孔隙流体盐度对青藏高原多年冻土区天然气水合物形成温度和压力条件的影响可以忽略不计. 青藏高原铁路沿线多年冻土区中地下冰呈块状或层状发育, 其冻土沉积物中孔隙大小应该不会对天然气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天然气水合物形成体系来考虑. 因此, 本次工作中重点考虑青藏高原多年冻土区烃类气体组成, 以及温度、压力等因素对天然气水合物形成条件的影响.

这样, 根据前述两种情况下的气体组成可以得出研究区天然气水合物的基本形成条件经验表达式^[36]:

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

其中, P 、 T 的单位分别为 kPa 和 K ; 当气体组成为 $96.38\% \text{CH}_4 + 2.93\% \text{C}_2\text{H}_6 + 0.69\% \text{C}_3\text{H}_8$ 时, 参数 a 、 b 、 c 、 d 、 e 分别为 31879.57405 、 -272.5307809 、 0.5887745117 、 0.1245853818 、 0.01487345542 ; 当气体组成为 $99.20\% \text{CH}_4 + 0.80\% \text{C}_2\text{H}_6$ 时, 参数 a 、

b 、 c 、 d 、 e 分别为 31539.62631 、 -281.6419421 、 0.6404997557 、 0.2988228732 、 0.01195015602 .

同时, 根据冻土的定义, 冻土层内与冻土层下边界处的温度应为零, 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:

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

在冻土层内或冻土层下某一深度 h (单位: m) 处的压力 P (单位: kPa) 可分别按静岩压力或静水压力^[38,39]计算:

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

其中, P_0 为地面大气压力 (101 kPa); g 为重力加速度 (9.81 m/s^2); ρ_1 为冻土层密度, 实验测定值为 $1500 \sim 2000\text{ kg/m}^3$ ^[40,41], 模拟计算中可取 1750 kg/m^3 ^[24]; ρ_2 为冻土层下孔隙流体密度 (1000 kg/m^3).

由式(2)、(3)、(4)可得到研究区冻土层内和冻土层下地温梯度的关系式为:

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

或

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

可以看出, 由式(1)、(5)或(6)即可共同确定研究区多年冻土中天然气水合物的形成上限和下限条件.

4 模拟结果

运用上述经验模型, 首先可以得出研究区多年冻土中天然气水合物形成的基本条件和特征(图1). 由图中可以看出, 冻土表层温度、冻土层内地温梯

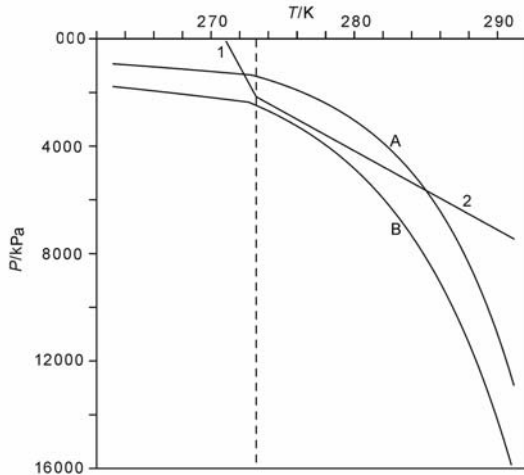


图1 青藏高原铁路沿线多年冻土区
天然气水合物形成条件预测图

1—冻土层内地温梯度线;2—冻土层下地温梯度线;
A—气体组成为 96.38%CH₄+2.93%C₂H₆+0.69%C₃H₈
的天然气水合物稳定边界曲线;B—气体组成为
99.20%CH₄+0.80%C₂H₆ 的天然气
水合物稳定边界曲线.

Fig. 1 The predictive curve for gas hydrate
formation conditions in the study area

1—The thermal gradient curve within the frozen layer;
2—The thermal gradient curve below the frozen layer;
A—The gas hydrate formation curve when gas composition
is 96.38%CH₄+2.93%C₂H₆+0.69%C₃H₈;
B—The gas hydrate formation curve when gas composition
is 99.20%CH₄+0.80%C₂H₆.

度、冻土层下地温梯度、天然气水合物相平衡边界共同决定着天然气水合物的热力学稳定分布特征。其中,冻土层内地温梯度线与天然气水合物相平衡边界曲线的上交点为天然气水合物埋藏的上临界点,冻土层下地温梯度线与天然气水合物相平衡边界曲线的下交点为天然气水合物埋藏的下临界点,两交点之间的范围为天然气水合物埋藏的的稳定带分布。同时,从图中还可看出,当气体组成为 96.38%CH₄+2.93%C₂H₆+0.69%C₃H₈ 时,研究区冻土沉积物中可以形成天然气水合物;而当气体组成为 99.20%CH₄+0.80%C₂H₆ 时,研究区冻土沉积物中则难以形成天然气水合物。具体的模拟计算结果还显示(表 2):在两种气体组成条件下,研究区形成天然气水合物所需的最小冻土厚度分别为~50 m 和~134 m,而在给定条件下研究区的冻土厚度约 114 m,显然在第二种气体组成条件下研究区不能形成天然气水合物;计算得到第一种气体组成条件下形成天然气水合物的上限深度、下限深度、产出厚度分别为~71 m、~463 m 和~392 m。

表 2 青藏高原铁路沿线多年冻土区天然气
水合物形成条件模拟计算结果

Table 2 The modeled results for gas hydrate
formation conditions in the study area

基本参数的输入		
冻土层内地温梯度(°C/m)	0.0175	
冻土层下地温梯度(°C/m)	0.0333	
冻土表层温度(°C)	-2.00	
相应的冻土厚度(m)	114.29	
计算结果的输出		
不同条件下的模拟值	第一种气体组分	第二种气体组分
形成天然气水合物的冻土 表层临界最大温度(°C)	-0.88	-2.35
形成天然气水合物的冻土 层临界最小厚度(m)	50.57	134.41
实测数据下的模拟天然气 水合物层顶界深度(m)	71.61	/
实测数据下的模拟天然气 水合物层底界深度(m)	463.67	/
实测数据下的模拟天然气 水合物层厚度(m)	392.06	/

注:两种气体组成分别为(1)96.38%CH₄+2.93%C₂H₆+0.69%C₃H₈, (2)99.20%CH₄+0.80%C₂H₆; /—未能形成天然气水合物。

5 讨论与结论

从天然气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、沉积物孔隙大小等)对天然气水合物形成条件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天然气水合物形成的温度和压力条件影响最大(例如,当甲烷在纯水体系中分别与1%、3%、5%的乙烷混合,天然气水合物在相同压力下形成时所需的温度要比纯甲烷气体形成天然气水合物所需的温度平均增大0.40°C、1.12°C、1.78°C;当甲烷在纯水体系中分别与1%、2%、3%的丙烷混合,天然气水合物形成的温度条件平均增大2.26°C、4.13°C、5.57°C);孔隙水盐度也会对天然气水合物形成的温度和压力条件产生一定影响(如甲烷在接近海水条件下(31.42%wt NaCl)形成天然气水合物所需的温度平均比其在纯水体系中低1.5°C);沉积物孔隙在一定范围内(1×10⁻⁶~4×10⁻⁸m)其实对天然气水合物形成的温度和压力条件影响有限,可以忽略不计;同时,温度比压力对天然气水合物稳定性的影响要灵敏得多(如温度每升高1°C,形成天然气水合物所需的压力将增大约7

个大气压)^[25].

青藏高原多年冻土区孔隙水盐度资料不详,沉积物孔隙 $1 \times 10^{-6} \sim 4 \times 10^{-8} \text{ m}$ 是大多数沉积物或岩石孔隙的平均范围,因此,对研究区而言,除了气体组成外,冻土条件(如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)是影响天然气水合物形成和产出(或天然气水合物稳定带厚度)的最重要因素.

本次采用的气体组成直接源于地球化学调查结果,可能基本代表着研究区两类端元情况下的气体组成. 本次模拟结果即是在这两种气体组成情况下取平均冻土层内地温梯度、冻土层下地温梯度、冻土表层温度值计算得到. 这样,研究区内在以第二种气体组成为主的分布区域就可能难以形成天然气水合物(表 2). 当然,研究区内不同地方的冻土层内地温梯度、冻土层下地温梯度、冻土表层温度的不同同样将直接影响到天然气水合物形成条件和产出状态的差异.

理论上,天然气水合物的产出状态可由冻土层内地温梯度线、冻土层下地温梯度线与天然气水合物形成温度和压力曲线的相互交割关系来确定,如冻土层内地温梯度线、冻土层下地温梯度线与天然气水合物形成温度和压力曲线均存在着有四种可能关系:相离、相切、相割、相交,分别对应着八种可能的天然气水合物产出状态. 经理论计算,气体组成在第一种情况和第二种情况下,冻土层内地温梯度需分别大于 0.352 、 $0.254^\circ\text{C}/\text{m}$ 时才会出现冻土层内地温梯度线与天然气水合物形成温度和压力曲线出现相切或相割的情况. 事实上,如此大的冻土层内地温梯度在研究区出现的可能性应该不大. 这样,研究区出现的天然气水合物可能的产状主要有:(1)冻土层内地温梯度线与天然气水合物形成温度和压力曲线相离,而冻土层下地温梯度线与天然气水合物形成温度和压力曲线相切,即 1 与 1' 组合时,此时天然气水合物在剖面上以点状产出为特征;(2)冻土层内地温梯度线与天然气水合物形成温度和压力曲线相离,而冻土层下地温梯度线与天然气水合物形成温度和压力曲线相割,即 2 与 2' 组合时,此时天然气水合物产出在冻土层之下;(3)冻土层内地温梯度线、冻土层下地温梯度线均与天然气水合物形成温度和压力曲线相交,即 3 与 3' 组合时,此时天然气水合物的产出横跨冻土层(图 2). 其中,计算表明,在第一种气体组成和第二种气体组成条件下,当冻土层下地温梯度大于 0.0652 、 $0.0478^\circ\text{C}/\text{m}$ 时,天

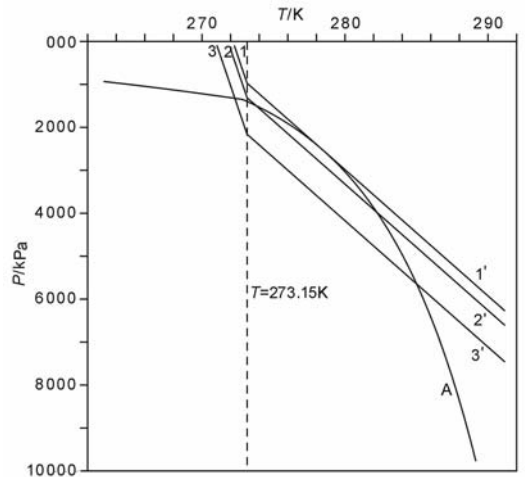


图 2 不同冻土条件下天然气水合物可能的产出特征
A—气体组成为 $96.38\% \text{CH}_4 + 2.93\% \text{C}_2\text{H}_6 + 0.69\% \text{C}_3\text{H}_8$
条件下的天然气水合物形成温度和压力曲线;1、2、3、1'、
2'、3'—分别为不同冻土厚度条件下的冻土层内地温梯度线和
冻土层下地温梯度线;不同冻土条件的冻土层内地温梯度线和
冻土层下地温梯度线共同决定了不同的天然气
水合物产出状态(见正文).

Fig. 2 Characterization of possible gas hydrate formation conditions

A—Gas hydrate curve with gas composition of $96.38\% \text{CH}_4 + 2.93\% \text{C}_2\text{H}_6 + 0.69\% \text{C}_3\text{H}_8$; 1, 2, 3, 1', 2', 3'—The possible thermal gradient curve within / below the frozen layer. Gas hydrate formation conditions are controlled by gas hydrate curve and the thermal gradient curves within/below the frozen layer (details are given in text).

然气水合物的产状至多会出现上述第(3)种情况;当冻土层下地温梯度小于或等于 0.0652 、 $0.0478^\circ\text{C}/\text{m}$ 时,天然气水合物的产状依据冻土其他特征的不同可能出现上述(1)、(2)、(3)种情况.

如果前述两种情况的气体组成及冻土表层温度、冻土层内地温梯度、冻土层下地温梯度的变化范围基本能代表研究区冻土的整体情况,那么可以模拟出研究区可能端元情况下的天然气水合物产出特征,模拟结果见表 3. 从表中可以看出,研究区多年冻土区中局部可能不具备天然气水合物的形成条件;在可能存在天然气水合物的产出部位,其上临界点深度在 ~ 67 至 $\sim 186 \text{ m}$ 间,下临界点深度在 $\sim 244 \text{ m}$ 至 $\sim 1000 \text{ m}$ 间,厚度 $\sim 145 \text{ m}$ 至 935 m . 对比前人的研究成果,本次所模拟计算的研究区天然气水合物可能产出的上临界点深度(满足天然气水合物形成条件的最小深度)、下临界点深度(满足天然气水合物形成条件的最大深度)、厚度均在陈多福等^[24]计算结果的范围之内,但要小些,显示出该区天然气水合物资源量将会随着调查的深入可能需要

表 3 不同冻土条件下天然气水合物的形成条件和产出特征

Table 3 The modeled features of possible gas hydrate formation conditions

气体组成	冻土层内地温梯度端点值(°C/m)	冻土层下地温梯度端点值(°C/m)	冻土表层温度端点值(°C)	预测冻土厚度(m)	预测边界冻土厚度(m)	预测上临界点深度(m)	预测下临界点深度(m)	预测天然气水合物厚度(m)
组成 1*	0.01	0.025	-1.00	100.00	13.98	73.19	648.93	575.74
	0.01	0.025	-3.00	300.00	13.98	67.26	1002.59	935.33
	0.01	0.051	-1.00	100.00	72.98	73.19	244.58	171.39
	0.01	0.051	-3.00	300.00	72.98	67.26	585.44	518.18
	0.033	0.025	-1.00	30.30	13.98	186.57	447.99	261.42
	0.033	0.025	-3.00	90.91	13.98	71.95	628.20	556.25
	0.033	0.051	-1.00	30.30	72.98	—	—	—
	0.033	0.051	-3.00	90.91	72.98	71.95	217.88	145.93
组成 2**	0.01	0.025	-1.00	100.00	113.76	—	—	—
	0.01	0.025	-3.00	300.00	113.76	127.00	882.32	755.32
	0.01	0.051	-1.00	100.00	138.70	—	—	—
	0.01	0.051	-3.00	300.00	138.70	127.00	513.07	386.07
	0.033	0.025	-1.00	30.30	113.76	—	—	—
	0.033	0.025	-3.00	90.91	113.76	—	—	—
	0.033	0.051	-1.00	30.30	138.70	—	—	—
	0.033	0.051	-3.00	90.91	138.70	—	—	—

注: * 气体组成为 96.38%CH₄+2.93%C₂H₆+0.69%C₃H₈, ** 气体组成为 99.20%CH₄+0.80%C₂H₆, —不能形成天然气水合物。

表 4 青藏高原多年冻土区和世界已知含天然气水合物冻土区的特征对比

Table 4 Characteristics of Qinghai-Tibet permafrost and other recognized onshore gas hydrates

地区	多年冻土厚度/m	冻土层内地温梯度/°C·100 m ⁻¹	冻土层下地温梯度/°C·100 m ⁻¹	水合物埋藏深度/m	气体成分	气体成因	产出层位	远景储量/m ³	形成时代	备注
俄罗斯麦索亚哈	320	0.6	1.8	720~820	甲烷	热成因与生物成因混合	砂岩、页岩	(2.6~2.7) × 10 ¹⁰	更新世早期	唯一开采实例
美国阿拉斯加	174~630	1.5~4.5	1.6~5.2	0~950	甲烷、乙烷、丙烷、氮气	微生物成因和热成因混合	砂岩、页岩、砾岩	(1.0~1.2) × 10 ¹²	上新世末至今	钻遇深度 666m
加拿大马更些三角洲	510~740	1.8	2.7	890~1110	甲烷丙烷、二氧化碳	热成因来源	砂岩、页岩	1.9 × 10 ¹¹	渐新世—上新世	已试生产钻井
中国青藏高原冻土区	28~128.5	1.1~1.3	2.8~5.1	67~1002 ^a	甲烷、乙烷、丙烷 ^b	热成因来源 ^c	未知	1.2 × 10 ¹¹ ~2.4 × 10 ¹⁴	未知	调查程度低

注: a—据本次模拟结果, b—据本次不同介质中气体组成的推测, c—本文分析推测, 其他资料主要引自 [6, 14~16, 24]。

不断修正。

如果从天然气水合物形成条件看, 青藏高原多年冻土区除了冻土厚度小些外, 其他条件如冻土层内地温梯度、冻土层下地温梯度、气体组成等条件与世界上已知含天然气水合物冻土区特别是加拿大 Mallik 三角洲多年冻土区较为相近(表 4), 具有一定的可比性。Mallik 天然气水合物区位于加拿大西北领地的 Mallik 河三角洲上, 紧靠北冰洋边缘, 处

于加拿大北极区波弗特—马更些盆地的波弗特海南缘马更些三角洲东北部。波弗特—马更些盆地由晚白垩世到第四纪地层组成, 地处加拿大海盆张裂作用形成的裂陷槽南端, 在晚白垩纪至第三纪以来, 马更些三角洲没有遭受任何重大构造运动影响, 致使在波弗特—马更些地区堆积了一套 12~16 km 厚的地层 [42~43]。马更些三角洲—波弗特海地区的构造基底由高度断裂化的下白垩统组成, 区域上的不

整合面把这套地层与 12~16 km 厚的晚白垩世至全新世三角洲、陆棚、陆坡和深水沉积分隔开^[44]。在 Mallik 地区,在马期特里赫特阶—古新统界线以上的地层中识别出了八个三角洲层序^[43]:(1)Fish River 层(晚马期特里赫特期—早古新世)为由砾岩、砂岩和页岩组成的重力流沉积;(2)Reindeer 层(晚古新世—中始新世)为一套广泛分布的厚层页岩盆地海侵沉积;(3)Richards 层(晚始新世)以页岩为主,代表着 Reindeer 层的延续;(4)Kugmallit 层(早—晚渐新世)与下覆层表现为侵蚀不整合接触;(5)Mackenzie Bay 层(晚渐新世—中中新世)和(6)Akpud 层(晚中新世)整体上以页岩为主;(7)Iperk 层(早上新世—早更新世)则由砂岩和砾岩组成;(8)Shallow Bay 层(更新世—全新世)几乎难以与下覆层分开。

该地区从 20 世纪 60 年代以来发现了许多油气田,是加拿大重要的含油气盆地,同时也是世界上最著名的陆上多年冻土区天然气水合物产地,其中在 Mallik 2L-38 井和 Mallik 5L-38 天然气水合物生产研究井中均钻取到多层天然气水合物。Mallik 2L-38 井钻穿了上部 1150 m 渐新世到全新世沉积物,上部 640 m 为多年冻土,岩心分析和测井数据表明该井在约 897.25 m 至约 1109.8 m 间存在着约 113 m 厚的五个主要含天然气水合物层,现场肉眼观察到天然气水合物主要分布在粗粒砂岩层中,也有低含量天然气水合物分布在细粒粉砂质沉积物中,还偶见薄的脉状、碎屑状或结核状天然气水合物,显示出强烈的岩性控制作用,其含天然气水合物的沉积物主要为未固结到弱胶结的 Kugmallit、Mackenzie Bay 和 Ipek 层,测井数据显示在最深处的天然气水合物赋存带(1108.4~1109.8 m)底部存在着一个薄的游离气层^[42~44]。根据垂直地震剖面(VSP)揭示的 P 波和 S 波速度,计算得到 Mallik 2L-38 井 897~1110 m 深度范围内天然气水合物(排除不含天然气水合物的层段)的最大含量可达 75%,平均值分别为 37%和 21%,根据声波测井的 P 波和 S 波速度则计算得到天然气水合物最大含量分别为 60%和 50%^[45]。

Mallik 5L-38 天然气水合物生产研究井与 Mallik 2L-38 井相距几百米,位于 NW-SE 走向的 Mallik 背斜冠部处 E-W 向正断层下降盘,其上部 0~650 m 间为多年冻土,取心的沉积层从下至上包括:渐新统 Kugmallit 层上部(932.64~1150.79 m)、上渐新统—中新统 Mackenzie Bay 层下部(885.63~932.64 m),其

间分别识别出了三个主要的天然气水合物层(892~930 m、942~993 m、1070~1107 m),其中, Mackenzie Bay 层主要由未固结的分选好的粉砂到砂层组成,夹有砾石层,形成于浅水陆棚至前缘三角洲环境,Kugmallit 层则由冲积/叉道间河道砂和河滩/漫滩粉砂和煤组成,与泛滥平原/三角洲平原环境一致,天然气水合物则主要见于砂层孔隙中,饱和度达到 90%,在砾石层中偶尔见到结核状或单个天然气水合物碎屑^[42,43]。据初步估算,包含 Mallik L-38、2L-38、3L-38、4L-38、5L-38 在内的 Mallik 天然气水合物区大型背斜构造冠部周围 1 km² 面积内,天然气水合物拥有标准条件下 2.93×10^9 至 4.15×10^9 m³ 的天然气^[44]。

青藏高原多年冻土区其内也分布着一系列中新世残留含油气盆地(如可可西里盆地、沱沱河盆地、羌塘盆地、唐古拉盆地等),已发现有大量的油气显示或工业油流;在更新世末期至全新世期间(约在 0.71 Ma),青藏高原整体进入冰冻期,形成了大面积的冻土,出现了大规模的山地冰川,其中,晚更新世末期末次冰期最盛期,青藏高原处于严寒、干旱的冰缘环境,在这种干冷的气候下,青藏高原开始形成大面积的多年冻土,进入全新世,高原海拔已上升到 4000 m 以上,决定着整个高原仍处在冰缘环境下^[26]。上新世至更新世期间的降温环境,特别是更新世末期至全新世期间的冰川环境为同期构造作用破坏的油气藏烃类气体被进一步圈闭形成天然气水合物提供了条件。特别地,世界已知多年冻土区天然气水合物的分布产状表明,天然气水合物可以产在冻土层内,也可产在冻土层下沉积物中,如俄罗斯麦索亚哈天然气水合物藏就产在其冻土层下 250~350 m 处^[1],加拿大马更些三角洲天然气水合物的分布更是如此,说明青藏高原多年冻土下部同样可能蕴藏着天然气水合物,进一步表明研究区具有良好的天然气水合物资源潜力。

致谢 论文写作过程中得到了中国科学院广州地球化学研究所陈多福研究员和中国科学院地质与地球物理研究所宋海斌博士的大力帮助。

参考文献(References)

- [1] 史斗,郑军卫. 世界天然气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
- [2] 宋海斌. 天然气水合物的地球物理研究. 北京:海洋出版社,

- 2003, 1~174
- Song H B. Geophysical Research on Gas Hydrate. Beijing: Oceanographic Publishing House (in Chinese), 2003. 1~174
- [3] 吴时国,张光学,郭常升等. 东沙海区天然气水合物形成及分布的地质因素. 石油学报, 2004, **25**(4): 7~12
- Wu S G, Zhang G X, Guo C S, et al. Geological constraint on the distribution of gas hydrate in the Dongsha continental slope of South China Sea. *Acta Petrolei Sinica* (in Chinese), 2004, **25**(4): 7~12
- [4] Lu Z Q, Wu B H, Zhu Y H, et al. Geochemical indications of possible gas hydrates in the northeastern South China Sea. *Acta Geologica Sinica*, 2006, **80**(4): 564~573
- [5] 吴能友,张海敏,杨胜雄等. 南海神狐海域天然气水合物成藏系统初探. 天然气工业, 2007, **27**(9): 1~6
- Wu N Y, Zhang H Q, Yang S X, et al. Preliminary discussion on natural gas hydrate reservoir system of Shenhu area, North slope of South China Sea. *Natural Gas Industry* (in Chinese), 2007, **27**(9): 1~6
- [6] 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. Beijing: Scientific Publishing House (in Chinese), 2000. 329~353
- [7] Makogon Y F. Russia's Contributions to the Study of Gas Hydrates. *Annals New York Academy of Sciences*, 1993
- [8] Collett T S, Ginburg G D. Gas hydrates in the Messoyakha gas field of the west Siberian basin: an extermination of the geologic evidence. Proceedings of 7th International Offshore and Polar Engineering Conference, 1997, 96~103
- [9] Collett T S, Kvenvolden K A, Magoon L B. Characterization of hydrocarbon gas within the stratigraphic interval of gas-hydrate stability on the North Slope of Alaska. U. S. A. *Applied Geochemistry*, 1990, **5**(3): 279~287
- [10] Collett T S. Natural gas hydrates of the Prudhoe Bay and Kuparuk River area, North Slope, Alaska. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 1993, **77**(5): 793~815
- [11] Kamath A, Godbole S P, Ostermann R D, et al. Evaluation of the stability of gas hydrates in Northern Alaska. *Cold Regions Science and Technology*, 1987, **14**(2): 107~119
- [12] 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*, 544, 1999
- [13] 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*, 585, 2005
- [14] 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
- [15] 张立薪,徐学祖,马巍. 青藏高原多年冻土与天然气水合物. 天然气地球科学, 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
- [16] 吴青柏,蒋观利,蒲毅彬等. 青藏高原天然气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
- [17] 黄朋,潘桂棠,王立全等. 青藏高原天然气水合物资源预测. 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
- [18] 伊海生,时志强,刘文均等. 青藏高原多年冻土区天然气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
- [19] 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. 天然气地球科学, 2007, **18**(4): 588~592
- Ku X B, Wu Q B, Jiang G L. Potential distribution of natural gas hydrate in the permafrost regions of Qinghai-Tibet plateau. *Natural Gas Geoscience* (in Chinese), 2007, **18**(4): 588~592
- [20] 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. 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
- [21] 吴自成,吕新彪,王造成. 青藏高原多年冻土区天然气水合物的形成及地球化学勘查. 地质科技情报, 2006, **25**(4): 9~14
- Wu Z C, Lü X B, Wang Z C. Formation and geochemical exploration model of gas hydrate in the perennial frozen soil area, Qinghai-Tibet plateau. *Geological Science and Technology Information* (in Chinese), 2006, **25**(4): 9~14
- [22] 坚润堂,王造成. 青藏高原多年冻土区活动带天然气水合物地球化学特征. 甘肃冶金, 2006, **28**(2): 33~35
- Jian R T, Wang Z C. The geochemical characteristics of gas hydrate in the active zone of the Qinghai-Tibet plateau permafrost. *Gansu Metallurgy* (in Chinese), 2006, **28**(2): 33~35
- [23] 卢振权,吴必豪,饶竹等. 青藏铁路沿线多年冻土区天然气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
- [24] 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. 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
- [25] 卢振权, Sultan Nabil, 金春爽等. 天然气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
- [26] 施雅凤,李吉均,李炳元等. 晚新生代青藏高原的隆升与东亚环境变化. 地理学报, 1999, **54**(1): 10~20
Shi Y F, Li J J, Li B Y, et al. Uplift of the Qinghai-Xizang (Tibetan) plateau and east Asia environmental change during Late Cenozoic. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 1999, **54**(1): 10~20
- [27] Lu Z Q, Sultan N, Géli L, et al. Two-dimensional modeling of gas hydrate occurrences in the northern Gulf of Mexico. *International Journal of Earth Science*, 2008 (in press)
- [28] 卢振权,吴必豪,祝有海. 南海潜在天然气水合物藏的成因及形成模式初探. 矿床地质, 2002, **21**(3): 232~239
Lu Z Q, Wu B H, Zhu Y H. Preliminary discussion on the origin and formation of the potential gas hydrates in the South China Sea. *Mineral Deposits* (in Chinese), 2002, **21**(3): 232~239
- [29] Abrams M A. Significance of hydrocarbon seepage relative to petroleum generation and entrapment. *Marine and Petroleum Geology*, 2005, **22**:457~477
- [30] 吴珍汉,胡道功,吴中海等. 青藏铁路沿线的地裂缝及工程影响. 现代地质, 2005, **19**(2): 165~175
Wu Z H, Hu D G, Wu Z H, et al. Surface fractures and their hazard effects on engineering construction along the Golmud-Lhasa railway across the Tibetan Plateau. *Geoscience* (in Chinese), 2005, **19**(2): 165~175
- [31] 吴珍汉,吴中海,胡道功等. 可可西里东部活动断裂的地质特征. 地学前缘, 2003, **10**(4): 583~589
Wu Z H, Wu Z H, Hu D G, et al. Geological features of active faults in east Hohxil mountains of northern Tibetan Plateau. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2003, **10**(4): 583~589
- [32] 吴珍汉,吴中海,胡道功等. 青藏高原北部风火山活动断裂系及工程危害性研究. 地质科技情报, 2003, **22**(1): 1~6
Wu Z H, Wu Z H, Hu D G, et al. Geological features and hazard effects of the Fenghuoshan active fault system of north Tibetan plateau. *Geological Science and Technology Information* (in Chinese), 2003, **22**(1): 1~6
- [33] 吴珍汉,吴中海,张永双等. 青海西南部乌丽活动断裂系的地质特征及灾害效应. 地质通报, 2003, **22**(6): 437~444
Wu Z H, Wu Z H, Zhang Y S, et al. Geological features and hazard effects of the Wuli active fault system on the northern Qinghai-Tibet plateau. *Geological Bulletin of China* (in Chinese), 2003, **22**(6): 437~444
- [34] 吴青柏,施 斌,刘永智. 青藏公路沿线冻土与公路相互作用研究. 中国科学(D), 2002, **32**(6): 514~520
Wu Q B, Shi B, Liu Y Z. Interaction study of permafrost and highway along Qinghai-Xizang highway. *Science in China* (Ser. D) (in Chinese), 2003, **46**: 97~105
- [35] 王岫岩,云金表,罗笃清等. 西藏羌塘盆地动力学演化与油气前景分析. 石油学报,1999,**20**(3): 38~42
Wang X Y, Yun J B, Luo D Q, et al. Discussion on geodynamic evolution and oil-gas prospect of Qiangtang basin. *Acta Petrolei Sinica* (in Chinese), 1999, **20**(3): 38~42
- [36] 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
- [37] 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
- [38] 宋海斌, Matsubayashi O, 杨胜雄等. 含天然气水合物沉积物的岩石物性模型与似海底反射层的 AVA 特征. 地球物理学报, 2002, **45**(4): 546~556
Song H B, Matsubayashi O, Yang S X, et al. Physical property models of gas hydrate bearing sediments and AVA character of bottom simulating reflector. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, **45**(4): 546~556
- [39] 宋海斌,江为为,张文生等. 天然气水合物的海洋地球物理研究进展. 地球物理学进展, 2002, **17**(2): 224~229
Song H B, Jiang W W, Zhang W S, et al. Progress on marine geophysical studies of gas hydrates. *Progress in Geophysics*. (in Chinese), 2002, **17**(2): 224~229
- [40] 刘增利,李洪升,朱元林等. 冻土初始与附加细观损伤的 CT 识别模型. 冰川冻土, 2002, **24**(5): 676~680
Liu Z L, Li H S, Zhu Y L, et al. A distinguish model for initial and additional micro-damages on frozen soil. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 2002, **24**(5): 676~680
- [41] 汪崇鲜. 淤泥质冻土的物理力学性能试验研究. 煤炭科学技术, 2000, **28**(8): 9~12
Wang C X. Experimental study of mechanical characteristics of silt permafrost. *Coal Technology* (in Chinese), 2000, **28**(8): 9~12
- [42] Tomaru H, Fehn U, Lu Z, et al. Halogen systematics in the Mallik 5L-38 gas hydrate production research well, Northwest Territories, Canada; implications for the origin of gas hydrates under terrestrial permafrost conditions. *Applied Geochemistry*, 2007, **22**: 656~675

- [43] Haberer R M, Mangelsdorf K, Wilkes H, et al. Occurrence and palaeoenvironmental significance of aromatic hydrocarbon biomarkers in Oligocene sediments from the Mallik 5L-38 Gas Hydrate Production Research Well (Canada). *Organic Geochemistry*, 2006, **37**:519~538
- [44] Moridis G J, Collett T S, Dallimore S R, et al. Numerical studies of gas production from several CH₄ hydrate zones at

- the Mallik site, Mackenzie Delta, Canada. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2004, **43**:219~238
- [45] Carcione J M, Gei D. Gas - hydrate concentration estimated from P- and S-wave velocities at the Mallik 2L-38 research well, Mackenzie Delta, Canada. *Journal of Applied Geophysics*, 2004, **56**:73~78

(本文编辑 胡素芳)

2007 年中国科技期刊 CSTPCD 地球科学类期刊 总被引频次、影响因子前 15 名排行表

总位次	学科内位次	期刊名称	总被引频次	总位次	学科内位次	期刊名称	影响因子
30	1	地球物理学报	3565	3	1	地球物理学报	2.823
55	2	地学前缘	3023	9	2	地学前缘	2.306
74	3	中国沙漠	2592	20	3	地球物理学进展	1.885
97	4	第四纪研究	2224	23	4	中国沙漠	1.836
99	5	地球科学	2200	28	5	第四纪研究	1.780
128	6	地球科学进展	2029	33	6	大地测量与地球动力学	1.673
163	7	地球化学	1694	34	7	地球化学	1.662
175	8	地球物理学进展	1626	35	8	地球科学	1.657
166	9	地球学报	1277	73	9	地球学报	1.278
179	10	地震工程与工程振动	1246	106	10	地球科学进展	1.103
385	11	大地测量与地球动力学	990	133	11	石油地球物理勘探	1.023
391	12	地震学报	979	239	12	石油物探	0.78
401	13	石油地球物理勘探	965	248	13	地震地质	0.763
447	14	吉林大学学报地球科学版	897	296	14	吉林大学学报地球科学版	0.701
587	15	石油物探	725	320	15	地震学报	0.673

来源文献: 2008 版《中国科技期刊引证报告(核心版)》(CJCR). 北京: 科学技术文献出版社.