

青海省祁连山冻土区天然气水合物基本地质特征*

卢振权¹, 祝有海¹, 张永勤², 文怀军³, 李永红³, 贾志耀³, 刘昌岭⁴,
王平康¹, 李清海³

(1 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000;
3 青海煤炭地质 105 勘探队, 青海 西宁 810007; 4 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071)

摘要 笔者等在青海省祁连山冻土区实施的科学钻探试验井中, 直接钻获到白色冰状实物样品, 并观察到燃烧现象, 经激光拉曼光谱仪检测为天然气水合物, 这是首次在中国陆域勘查到的天然气水合物。天然气水合物主要产于泥岩、油页岩、粉砂岩、细砂岩等层段中, 与岩性关系不大, 常出露在岩层的裂隙和孔隙中, 受裂隙的控制比较明显。纵向上分布不连续, 主要出现在井下 130~400 m 之间, 横向上无明显的对比关系。该区天然气水合物可能首先受到祁连山冻土特征等所确定的天然气水合物稳定带的限制, 产出的具体部位受断裂及气源条件的双重控制, 产生的烃类气体在不同级次断裂的疏导和上覆冻土层低温的共同耦合作用下, 更易于在裂隙中形成天然气水合物。

关键词 地质学 天然气水合物 地质特征 冻土 祁连山 青海

中图分类号: P618.1

文献标志码: A

Basic geological characteristics of gas hydrates in Qilian Mountain permafrost area, Qinghai Province

LU ZhenQuan¹, ZHU YouHai¹, ZHANG YongQin², WEN HuaiJun³, LI YongHong³, JIA ZhiYao³,
LIU ChangLing⁴, WANG PingKang¹ and LI QingHai³

(1 Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 2 Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang 065000, Hebei, China; 3 Qinghai No. 105 Geological Exploration Party for Coal Resources, Xining 810007, Qinghai, China;
4 Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266071, Shandong, China)

Abstract

Four scientific experimental wells were drilled in the Qilian Mountain permafrost area of Qinghai Province in the winter of 2008 and the summer of 2009. Gas hydrate was directly obtained and white ice-like gas hydrate and its burning phenomena were observed from three of the four wells. These results were confirmed by lab-based Raman spectroscopy. In all the 4 wells, gas hydrate related anomalous phenomena were also recorded. It is the first time for researchers to find gas hydrate in China's continent. Gas hydrate and its related anomalous phenomena occur in such rocks as mudstone, oil shale, siltstone and fine-grained sandstone and are not obviously related to lithology; they mainly occur in fissures and pore space and are evidently controlled by fissures; they are vertically discontinuously distributed and horizontally irrelatively arranged; they occur from 130 m to 400 m below the surface. In the study area, gas hydrate and its related anomalous phenomena are probably confined mainly to the gas hydrate stability zone based on per-

* 本文得到中国地质调查局地质大调查项目“我国冻土区天然气水合物资源调查与评价”(编号: N0808)、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”(编号: K0718)、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)的联合资助

第一作者简介 卢振权, 男, 1972 年生, 博士, 研究员, 从事天然气水合物与油气的地质地球化学勘查研究。Email: luzhq@vip.sina.com

收稿日期 2009-11-01; 改回日期 2009-11-20。李德先编辑。

mafrost features; individual gas hydrate occurrences are controlled jointly by fissures and gas sources. When hydrocarbon gases are generated by organic matter, they are driven by all grades of fractures to migrate upwards; when they arrive in the stability zone, they are coupled by cryogenic permafrost, leading to their preferable occurrence in fissures.

Key words: geology, gas hydrate, geological characteristics, permafrost, Qilian Mountain, Qinghai

天然气水合物简称水合物,外貌像冰,点火可以燃烧,俗称可燃冰,是最近几十年发现的一种新型战略能源,由水和重量较轻的气体分子(如 CH_4 、 C_2H_6 、 C_3H_8 、 C_4H_{10} 、 H_2S 、 CO_2 等)在低温(70~350 K,一般 273.15 K 左右)、高压(一般大于 3~5 MPa,最高可达 2 000 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(Kvenvolden, 1995; Sloan, 1998; Makogon et al., 2007)。在自然界中,天然气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(Kvenvolden, 1995; 史斗等, 1999)。由于其巨大的能源意义,天然气水合物被誉为 21 世纪洁净替代燃料。但是,天然气水合物分解后,可能会对全球碳循环及沉积物稳定性造成不良影响,已成为当今的热点调查研究目标,许多国家如美国、日本、韩国、印度等已投入巨资开展天然气水合物的调查研究。

20 世纪 60 年代,前苏联在开发西西伯利亚 Messoyakha 气田时发现了世界上第一个天然气水合物矿藏(Makogon et al., 2007)。1972 年,美国在阿拉斯加北坡 Prudhoe Bay 油田钻探时,获得天然气水合物实物样品(Collett, 1993)。加拿大马更些三角洲地区自 1971 年发现天然气水合物以来,先后钻探了 Mallik L-38、2L-38、3L-38、4L-38、5L-38 等系列钻井,并对天然气水合物进行了试开采(Dallimore et al., 1999; 2005; Moridisa et al., 2004; Craven et al., 2009)。

青藏高原多年冻土区面积较大,约 $150 \times 104 \text{ km}^2$,除冻土厚度稍小些外(周幼吾等, 2000),冻土层内地温梯度、冻土层下地温梯度、气源条件等均可与前苏联西西伯利亚 Messoyakha 区、阿拉斯加北坡区、加拿大马更些三角洲 Mallik 区的天然气水合物形成条件进行对比(徐学祖等, 1999),是中国天然气水合物一个重要的潜在区(卢振权等, 2009)。2000 年后,青藏高原多年冻土区天然气水合物工作开始得到重视,先后开展了地质、地球物理、地球化学等方面的调查研究,对该区天然气水合物的远景也进行了初步预测(张立新等, 2001; 黄朋等, 2002; 伊海生等, 2002; 刘怀山等, 2004; 陈多福等, 2005; 吴青柏等, 2006; 卢振权等, 2009; 坚润堂等, 2009),特别是 2002~2003 年在青藏铁路沿线多年冻土区开展了有针对性的天然气水合物地质地球化学调查,发现了一些重要找矿线索(卢振权等, 2007);与此同时,在祁连山冻土区也尝试着开展了一些地质地球化学调查工作,结果显示出一些明显异常现象(祝有海等, 2006; 张洪涛等, 2007)。2008 年冬季和 2009 年夏天,中国地质调查局设立项目在青海省祁连山南缘

多年冻土区实施一系列天然气水合物科学试验钻探工程,首次采集到了天然气水合物实物样品,实现了中国陆域天然气水合物找矿的突破。本文在野外钻探中所揭示的天然气水合物相关资料基础上,总结该区天然气水合物产出的基本地质特征,为深入认识该区天然气水合物的分布规律及资源潜力提供基本依据。

1 区域地质概况

祁连山地处青藏高原东北部,大地构造单元分为北祁连构造带(河西走廊、走廊南山)、中祁连陆块(托莱山)和南祁连构造带等 3 大构造单元(分别对应于图 1 中 I_2 、 I_3 、 I_4-I_5)。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)、洋底扩张及沟弧盆体系阶段(晚寒武世—中奥陶世)、造山阶段(中奥陶世之后经历了俯冲造山、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(冯益民, 1997; 青海省地质学会, 2005)。

早古生代期间,祁连山地区为介于柴达木地块和华北地块之间的小洋盆。志留纪晚期的加里东运动使古洋盆封闭并开始隆升剥蚀,石炭纪又开始下沉,形成广阔的浅海陆棚沉积;二叠纪发生南北差异升降,北祁连抬升成陆,南祁连仍为浅海陆棚或陆表海环境;三叠纪南祁连仍为海盆环境,沉积一套海相砂泥岩夹灰岩建造;晚三叠纪末,印支运动使得古特提斯洋封闭,整个祁连山地区抬升成陆,成为剥蚀区;早燕山运动使得祁连山地区局部拉张成一些条带状山间断陷盆地,形成一套侏罗纪山间河湖沼泽相含煤碎屑岩建造;白垩纪和第三纪以红色细粒碎屑岩、粘土岩为主,第四系广布于盆地,以冰水-洪积相和冰川相堆积物为主(符俊辉等, 1998; 2000; 杨树锋, 2007)。

祁连山侏罗纪小型含煤盆地较为发育,如沿疏勒河-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,这些含煤盆地均是北祁连深大断裂体系在燕山期再度复活形成的裂堑式断陷盆地,呈 NW-SE 向带状断续分布(文怀军等, 2006; 青藏油气区石油地质志编写组, 1990)。其中,木里煤田是青海省最大的煤田,面积约 650 km^2 ,煤田的主体包括聚乎更矿区、弧山矿区、江仓矿区、热水矿区等。同时,祁连山南缘被多年冻土覆盖,以山地多年冻土为主,面积约十万平方公里,冻土厚度一般为 60~95 m,主要分布在祁连山中段和西段,冻土下界大致与年平均气温 $-2 \sim -2.5^\circ\text{C}$ 等温线相当(周幼吾等, 2000)。

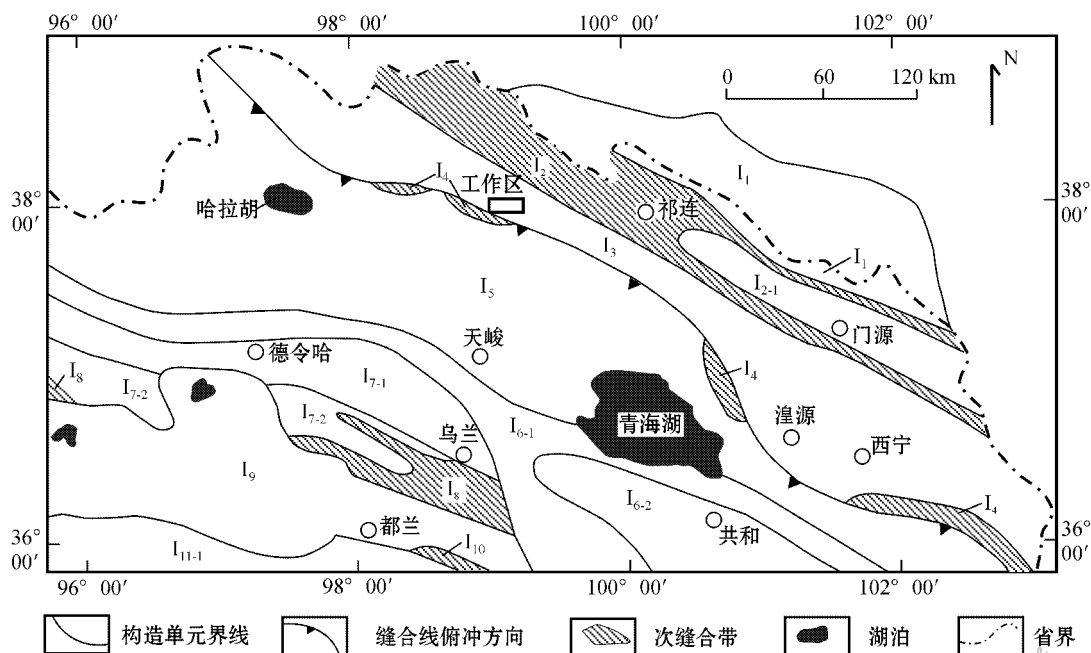


图 1 青海省祁连山地区大地构造单元略图(据青海煤炭地质 105 勘探队,2006 修改^①)

I₁—阿拉善陆块; I₂—北祁连新元古代-早古生代缝合带; I₂₋₁—祁连-门源早古生代中晚期岩浆弧带(O-S); I₃—中祁连陆块; I₄—疏勒南山-拉鸡山早古生代缝合带; I₅—南祁连陆块; I₆—宗务隆山-青海南山晚古生代-早中生代裂陷槽(D-T₂); I₆₋₁—宗务隆山-兴海坳拉槽(D-P); I₆₋₂—泽库弧后前陆盆地(T₁₋₂); I₇—欧龙布鲁克陆块; I₇₋₁—俄博山克拉通边缘盆地; I₇₋₂—丁字口-阿木尼克山-耗牛山新元古代-早古生代晚期岩浆弧带(Pt₃-S); I₈—柴北缘缝合带; I₉—柴达木地块; I₁₀—祁漫塔格-都兰缝合带; I₁₁—东昆中陆块; I₁₁₋₁—东昆中岩岩浆弧带(Pt₃-J)

Fig. 1 Schematic map showing geotectonic units in the Qilian Mountain area, Qinghai Province (modified from Qinghai No. 105 Coal Geological Exploration Party, 2006)

I₁—Alxa continental block; I₂—North Qilian Neoproterozoic-Early Palaeozoic suture zone; I₂₋₁—Qilian-Menyan middle-late Early Palaeozoic magmatic arc belt (O-S); I₃—Middle Qilian continental block; I₄—South Shule Mountain-Laji Mountain Early Palaeozoic suture zone; I₅—South Qilian continental block; I₆—Zongwulong Mountain-South Qinghai Mountain Late Palaeozoic-Early Mesozoic fault-depression trough (D-T₂); I₆₋₁—Zongwulong Mountain-Xinghai aulacogen (D-P); I₆₋₂—Zeku back-arc foreland basin (T₁₋₂); I₇—Oulongbuluke continental block; I₇₋₁—Ebo Mountain marginal eraton basin; I₇₋₂—Dingzikou-Amunike Mountain-Maoni Mountain Neoproterozoic-late Early Palaeozoic magmatic arc belt (Pt₃-S); I₈—Marginal North Qaidam suture; I₉—Qaidam block; I₁₀—Qimantage-Doulun suture zone; I₁₁—Central East Kunlun continental block; I₁₁₋₁—Central East Kunlun magmatic arc belt (Pt₃-J)

2 研究区地质特征

研究区在大地构造位置上位于加里东构造运动期(513~386 Ma)所形成的中祁连陆块西段,盆地地区划上处于南祁连盆地的木里坳陷西端(符俊辉等,1998,2000),地理位置上位于木里煤田的聚乎更矿区。研究区侏罗系含煤地层沉积于三叠系为基底的坳陷中。由于构造作用及其演化结果,研究区中部为三叠系组成的一个背斜,南、北两侧为侏罗系含煤地层组成的2个向斜。该背向斜的南、北两侧大部分发育规模较大的向坳陷内逆冲推覆断裂,控制着现存坳陷的边界。其南北2个向斜发育有一组北东向规模较大的剪切断裂,将坳陷切割成断续的不同大小块段,这组断裂成为划分聚乎更矿区

各井田的自然边界。因此,研究区呈现南北分带,东西分区的构造特征(图2)。

研究区出露的地层除第四系外,主要包括中侏罗统江仓组(J_{2j})和木里组(J_{2m}),大致对应于区域上的享堂组(J_{2x})和窑街组(J_{2y})(青海省地质矿产局,1997)。它们均含多个可采煤层,其中,前者以黑色、灰色油页岩(页岩)、泥岩为主,夹灰色粉砂岩、细砂岩、中粒岩;后者以灰色、灰白色粉砂岩、细砂岩、中砂岩、(含砾)粗砂岩为主,夹深灰色泥岩(油页岩)。研究区地形总体上呈西高东低、南高北低的特点,海拔在4 128~4 026 m之间,冻土厚度一般为60~80 m,由于受季节性冻融作用影响,冻土表层在每年4月份开始部分融化,在9月份又开始冻结,其最大冻融深度在3 m之内。2009年5~10月,本项目组在该地区实施的天然气水合物科学试验钻探施

① 青海煤炭地质 105 勘探队. 2006. 青海省天峻县聚乎更矿区三井田勘探报告(内部资料).

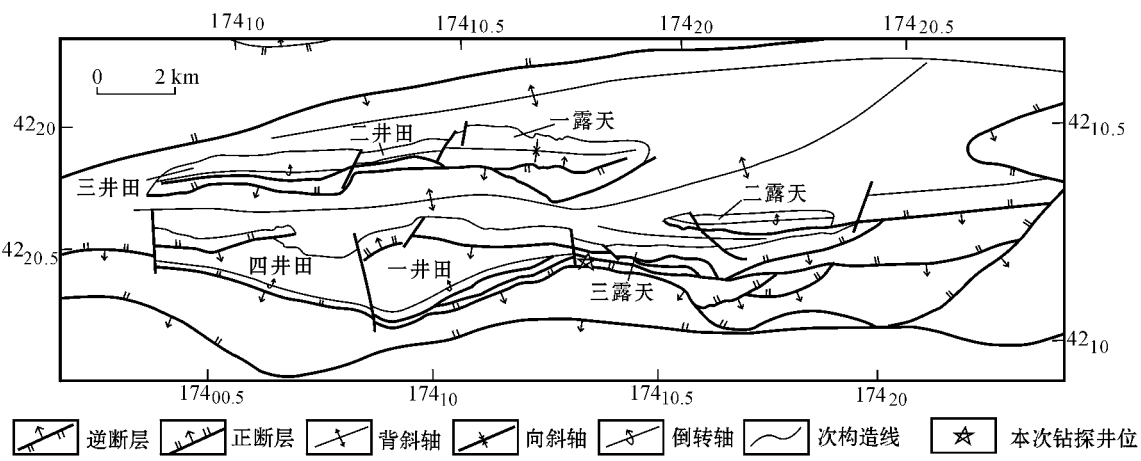


图 2 研究区构造纲要图(据青海煤田地质 105 勘探队,2006^①修改)

Fig. 2 Structure outline map of the study area (modified from Qinghai No. 105 Coal Geological Exploration Party, 2006)

表 1 青海省祁连山冻土区天然气水合物科学试验钻探孔的位置及其基本特征

Table 1 Locations and basic characteristics of hydrate drilling wells in the Qilian Mountain permafrost area, Qinghai Province

钻孔号	大地水准坐标			终孔深度/m	天然气水合物	异常现象	备注
	X	Y	Z				
DK-1	4217899.114	33514986.723	4053.336	182.23	可见	有	遇事故被迫终孔
DK-2	4217882.361	33514977.515	4053.460	635.20	可见	有	设计孔深
DK-3	4217894.413	33515000.925	4054.761	765.01	可见	有	设计孔深
DK-4	4218130.803	33515164.170	4038.451	466.65	未见	有	设计孔深

工中,观察到局部地区冻土深度可能达到 120 m 左右,开在该深度岩芯中发现有冰样碎片(其表面未见冒气现象,与天然气水合物明显不同)。

3 天然气水合物基本地质特征

2008 年冬天和 2009 年夏天,本项目组先后在祁连山冻土区木里煤田聚乎更矿区三露天井区的南侧逆冲推覆断裂带附近实施天然气水合物科学试验钻探工程,钻孔号分别为 DK-1、DK-2、DK-3、DK-4,各钻孔坐标位置见表 1。

3.1 主要异常特征

在实施的天然气水合物科学试验钻孔中,DK-1、DK-2、DK-3 号钻孔均成功钻获到了天然气水合物实物样品,并可观察到与天然气水合物密切相关的异常现象。一些天然气水合物清晰可见,呈白色冰状(混有泥浆时为烟灰色,图 3a),点火可以燃烧(图 3b),另一些天然气水合物肉眼难辨,它们多产在岩层的孔隙或裂隙中。所采集到的实物样品均表现出明显的异常现象(见表 2),归纳如下:

(1) 钻头遇到含天然气水合物的岩芯段时,井口气体压力增大,并冒出较大气泡,遇火可燃烧;

(2) 在混有泥浆的岩芯表面会出现大量的气泡,并伴随噼噼啪啪的响声,可闻到煤气味 在较纯净的岩芯表面会渗出水珠;

(3) 将岩芯放入水中可观察到气泡连续冒出,并形成气柱;

(4) 将岩芯密封置于瓦斯罐内,一定时间后(24 h)可解析出异常含量(大于 160 mL)的气体;

(5) 岩芯在大气中暴露一段时间后,其表面可见黄褐色的重烃油迹和残余的细蜂窝状构造;

(6) 岩芯段常伴生晶型完好的菱形自生方解石矿物;

(7) 岩芯段经热红外照像仪扫描后可见相对低温记录(0℃左右或 1~2℃,背景温度一般为 10℃左右);

(8) 经地球物理测井测定,岩芯段电阻率和声波速度明显偏高。

上述异常现象与天然气水合物的存在密切相关。天然气水合物外表与冰相似,物理性质也极为相似,当其充填在岩层的孔隙或裂隙中时,就会导致其电阻率和声波速度增加。一般认为,只要有充足的烃类气体(水分在地层中一般并不缺乏),就可在适当的温压条件下形成天然气水合物(卢振权等, 2009)。当温度升高(如高于冻土温度)或压力降低(如在大气压条件下)时,天然气水合物就会发生分解,释放出大量的烃类

① 青海煤炭地质 105 勘探队. 2006. 青海省天峻县聚乎更矿区三井田勘探报告(内部资料).

表 2 祁连山冻土区天然气水合物主要异常现象

Table 2 Basic anomalous features of gas hydrates in the Qilian Mountain permafrost area

主要特征或异常描述															备注	
岩性	层段/m	产出部位	主要地质特征	白色冰状	点火燃烧/助燃	表面冒泡	表面渗水珠	可燃气体	密闭下解析大量气体	重烃油迹	蜂窝状构造	伴生自生方解石	热红外低温	拉曼光谱峰		高电阻率 and 声速
				DK-1 钻孔	细砂岩	133.5~135.5	孔隙+裂隙	灰灰白色,以石英为主,次为高岭土化长石,坚硬,局部岩芯较破碎	可见	可见	可见	可见	可见	可见	可见	-
	粉砂岩泥岩	142.9~147.7	裂隙	灰深灰、黑灰色,裂隙发育,半坚硬,岩芯破碎	可见	可见	可见	可见	可见	-	未见	未见	-	-	可见	
	含泥粉砂岩	165.3~165.5	孔隙+裂隙	深灰/灰色,裂隙发育,半坚硬,破碎	可见	可见	未见	未见	可见	-	未见	未见	-	-	可见	低
	粉砂岩	169.0~170.5	孔隙+裂隙	深灰/灰色,裂隙发育,半坚硬,岩芯破碎	未见	可见	未见	未见	可见	-	未见	未见	-	-	可见	低
DK-2 钻孔																
	中_细砂岩	144.4~152.0	孔隙+裂隙	浅灰/灰褐色,以石英为主,次为长石,局部岩芯破碎,泥化,且裂隙发育	可见	可见	可见	可见	未见	可见	可见	可见	可见	可见	可见	重烃含量高,拉曼光谱检测到CO ₂ 水合物
	油页岩	156.3~156.6	裂隙	黑褐色,裂隙发育,6~8条/cm,宽0.5~1.0mm	未见	可见	可见	未见	未见	-	未见	未见	未见	未见	未见	
	泥页岩	235.0~291.3	裂隙	褐/灰黑色,局部裂隙发育	可见	可见	可见	可见	可见	可见	未见	可见	可见	可见	可见	
DK-3 钻孔																
	泥岩油页岩	133.0~156.0	裂隙	灰灰白色,以石英为主,次为长石,含大量炭屑,坚硬,局部裂隙发育、岩芯破碎	未见	可见	可见	可见	未见	-	未见	未见	未见	-	可见	岩心断面有煤气味
	泥岩油页岩	225.1~240.0	裂隙	灰褐、黑褐色,裂隙非常发育,局部岩芯破碎	可见	可见	可见	可见	可见	-	未见	可见	可见	可见	可见	
	细_粉砂岩	367.7~396.0	孔隙+裂隙	灰白/褐灰色,石英为主,长石次之,并含少量炭屑,局部裂隙发育、岩芯较破碎	未见	可见	可见	可见	可见	-	可见	未见	未见	未见	可见	
DK-4 钻孔																
	粉砂岩、细砂岩、泥岩	115.0~150.0	孔隙+裂隙	浅灰/灰深灰色,石英为主,高岭土化长石次之,含云母碎屑、炭屑、植物叶片化石及煤屑,局部含黄铁矿结核,坚硬、半坚硬,裂隙发育,岩芯破碎	未见	未见	可见	未见	可见	-	未见	可见	未见	-	可见	钻具在井中停留时间>4h
	粉砂岩	162.0~163.0	孔隙	灰色,夹煤线及泥岩薄层,半坚硬	未见	未见	可见	未见	可见	-	未见	未见	可见	-	可见	钻具在井中停留时间>4h

注: - 未进行观测。

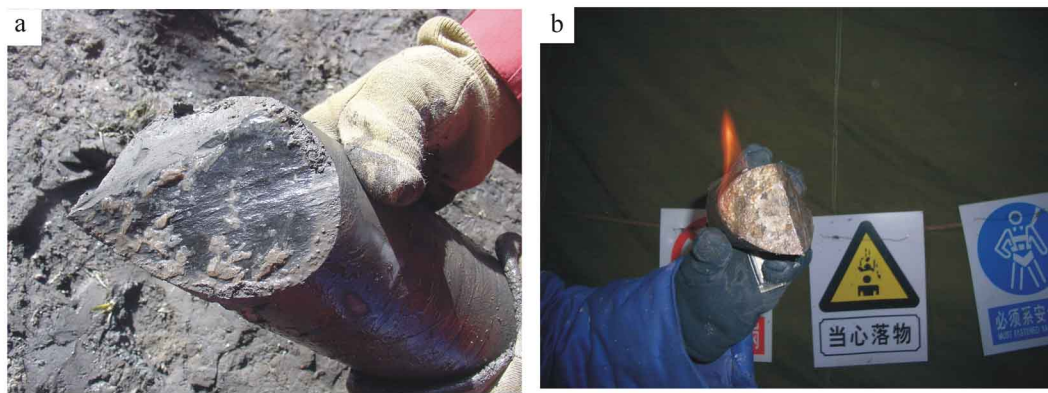


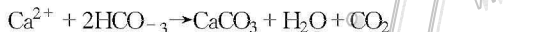
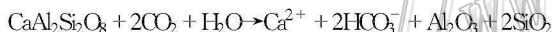
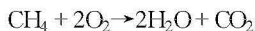
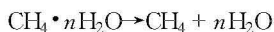
图3 天然气水合物实物样品及点火燃烧现象

a. DK-3号钻孔139.52 m处实物样品; b. DK-1号钻孔(133.5~135.5 m)含天然气水合物岩芯点火燃烧

Fig. 3 Gas hydrate sample and its burning phenomena

a. Gas hydrate sample occurring at 139.52 m in Well DK-3; b. Burning phenomena of gas hydrate-bearing core at 133.5~135.5 m in Well DK-1

气体和水(理论上, 1 m^3 的天然气水合物在标准状态下分解可释放出 164 m^3 的天然气(如甲烷)和 0.81 m^3 的水),因此在采集到含天然气水合物的钻孔中可看到很多气泡出现。同时,天然气水合物的分解是一个吸热过程,常常会导致其分布区比周围岩层的温度明显偏低。天然气水合物的分解除了会发生物理化学或物理变化(如残留蜂窝状构造等逸气构造)外,还会发生一系列次生化学变化,如:



这些化学反应能够很好地解释所观察到的异常现象。

本次所采集到的实物样品,在低温状态下(在液氮中)经过富集处理后,在激光拉曼光谱仪中可检测出天然气水合物的水(或冰,即笼状体)结构峰和其内的烃类气体等(甲烷、乙烷、丙烷、二氧化碳)峰(图4)。证实了天然气水合物的存在,且为由混合气体组成的天然气水合物。

3.2 主要地质特征

4个钻孔集中分布在三露天井区的南侧,DK-2钻孔在DK-1钻孔的南侧约20 m处,DK-3钻孔在DK-1钻孔的东南约15 m处,DK-4钻孔在DK-1钻孔北东约350 m处。DK-1、DK-2、DK-3钻孔比DK-4钻孔构造复杂,断裂更多,裂隙更发育。4个钻孔揭露的地层除第四系冲积物外,均为中侏罗统的江仓组(J_{2j})和木里组(J_{2m})(图5)。木里组岩性可分为上下2段,下段以灰色厚层状中-粗砂岩、含砾粗砂岩(局部为砾岩)为主,夹深灰色粉砂岩、细砂岩,偶夹薄层炭质泥岩或薄煤层;上段为主要含煤层段,含主要可采煤2层,2煤层之间为深灰色粉砂岩、细砂岩及灰色细-中砂岩、粗砂岩,煤层顶板常见植物叶片化石。江仓组较厚,亦分为上下2段,下段以灰色细粒砂岩为主,局部为中砂岩及深灰色泥岩、粉砂岩等,含5

个煤层组;上段为片状页岩(含油页岩)层段,以黑色、绿灰色页岩、泥岩为主,夹灰色粉砂岩等。

4个钻孔的天然气水合物及其异常现象主要见于岩层的裂隙中,其次在孔隙中;所在层段的岩性主要为细砂岩、粉砂岩、泥岩、油页岩等,中砂岩、粗砂岩中则较少见(表2)。

DK-1钻孔的133.5~135.5 m层段中,岩性为灰白色细砂岩,成分以石英为主,次为高岭土化长石,中厚层状,坚硬,局部较破碎,天然气水合物及异常现象主要见于其孔隙和裂隙中;在142.9~147.7 m层段中,岩性为灰色、深灰色、黑灰色粉砂岩、泥岩,中厚层状,均一结构,裂隙发育,半坚硬,较破碎,天然气水合物及其异常现象主要见于岩层裂隙中;在165.3~165.5 m层段中,岩芯呈深灰色、黑灰色粉砂岩,含一定泥质,均一结构,裂隙发育,半坚硬,岩芯破碎,天然气水合物及其异常现象见于岩层的裂隙和孔隙中;在169.0~170.5 m层段中,岩石为深灰色、灰色粉砂岩,中厚层状,均一结构,裂隙发育,半坚硬,岩芯破碎,天然气水合物及其异常现象主要见于岩层的裂隙和孔隙中。

在DK-2号孔的144.4~152.0 m层段中,岩性为中砂岩与细砂岩互层产出,中砂岩呈灰褐色,以石英为主,次为长石,岩芯局部破碎,裂隙发育一般,细砂岩呈浅灰褐色,成分以石英为主,次为长石,岩芯较破碎,局部泥化,裂隙发育,天然气水合物及其异常现象发育于岩层的裂隙和孔隙中;在156.3~156.6 m层段中,岩石为黑褐色油页岩,岩芯中裂隙发育,平均每厘米宽度内可见6~8条裂隙,裂隙宽0.5~1.0 mm,天然气水合物及其异常现象见于岩层的裂隙中;在235.0~291.3 m层段中,为泥页、油页岩等,粉砂质泥岩为油页岩夹层,油页岩呈黑褐色,局部碳质含量高,裂隙发育,充填有方解石,局部为黄铁矿集合体(结核状、薄膜状),泥岩呈深灰色,局部粉砂含量高,断面见云母碎屑,裂隙较为发育,并充填方解石,天然气水合物及其异常现象主要见于岩层的裂隙中;在377.3~387.5 m层段中,岩性为灰色、灰白色中砂岩,成分以

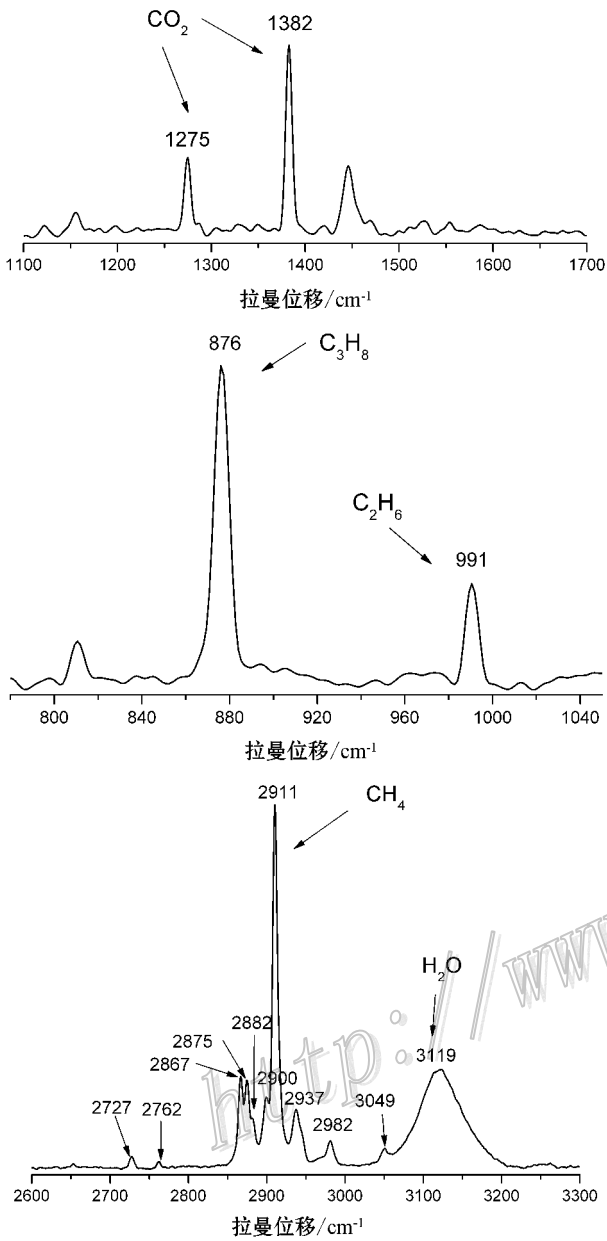


图 4 DK-3 号孔 133.50 m 处岩芯中天然气水合物的 Raman 光谱特征

Fig. 4 Raman spectrometry of gas hydrate occurring at 133.50 m of Well DK-3

石英为主,次为长石,含大量炭屑,岩芯坚硬,局部裂隙发育,且岩芯破碎,天然气水合物及其异常现象见于岩层的孔隙中。

在 DK-3 号孔的 133.0~156.0 m 层段中,上部为粉砂质泥岩与油页岩互层,下部为泥岩与油页岩互层,油页岩呈褐色、黑褐色,泥岩呈灰褐-黑褐色,含钙质细纹层,裂隙非常发育,局部岩芯破碎,成碎块状,天然气水合物及其异常现象见于岩芯孔隙中 在 225.1~240.0 m 层段中,泥岩与油页岩互层产出,泥岩呈灰色,钙质含量高,发育碳酸盐细纹层,裂隙发

育,局部破碎,油页岩呈浅褐色,破碎且呈碎片状,天然气水合物及其异常现象见于岩芯孔隙中 在 367.7~396.0 m 层段中,顶部夹泥质粉砂岩及泥岩薄层,呈塑状,可能与上覆层段以断层相接触,裂隙发育,局部具断层错动现象,上部为细砂岩,呈灰白色,局部裂隙发育,充填物为滑石,发育平行层理,局部见波状层理,中部为中砂岩,呈灰色,局部夹粗砂岩,或含砾,成分以石英为主,长石次之,含少量炭屑,岩芯具油浸现象,裂隙发育,下部为粉砂岩,呈浅灰色、灰色,较破碎,呈碎块状,天然气水合物及其异常现象见于岩层的孔隙和裂隙中。

在 DK-4 号孔的 115.0~150.0 m 层段中,粉砂岩、泥、细砂岩互层产出,粉砂岩呈深灰色,薄层状,具平行层理,层理面含云母碎屑、少量植物叶片化石及煤屑,局部含黄铁矿结核,半坚硬,岩芯破碎,泥岩呈灰色、深灰色,含炭屑,具滑面,较松软,细砂岩呈浅灰色,厚层状,成分以石英为主,高岭土化长石次之,断面含云母碎屑及炭屑,局部具波状层理,裂隙发育,充填物为方解石,坚硬-半坚硬,天然气水合物相关异常现象见于岩层的孔隙和裂隙中 在 162.0~163.0 m 层段中,岩芯为粉砂岩,呈灰色,夹煤线及泥岩薄层,薄层状,均一结构,具波状层理,层理面含云母碎屑,具滑面,半坚硬,天然气水合物相关异常现象主要见于岩层的孔隙中。

从以上分析可以看出,含天然气水合物具有如下地质特征:

(1) 天然气水合物的产出及其异常现象的出现与岩石类型关系不大,主要受控于该区天然气水合物的稳定带条件,特别是受冻土基本特征的约束。本次所采集的天然气水合物深度均大于 110 m (且主要在地表 130 m 以下),最大深度不超过 400 m。此深度范围可能预示着该区由冻土特征(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区间。

(2) 4 个钻孔中天然气水合物产出的位置存在一定的差别,这种差别主要受断裂及气源条件所限。除了一些肉眼难辨的天然气水合物及其异常现象产于细砂岩等孔隙中外,肉眼可见的几乎无一例外地均产于岩层的裂隙中,如泥岩或油页岩等的裂隙中。所有天然气水合物或其异常现象所在层段的裂隙均较为发育,且岩层较为破碎。

(3) 4 个钻孔均有煤系分布,部分煤层较厚,可达几米,部分煤层内可解吸出一定量的煤层气。

(4) 4 个孔中的油页岩非常发育,厚达几百米。部分岩芯还直接显示有油迹现象如油斑、油浸等,甚至还有沥青的产出。表明该区有机质丰富,具有产气潜力,而烃类气体的富集是天然气水合物形成的前提和物质基础。这些烃类气体在断裂的疏导作用和上覆冻土层及冻土层下低温的共同耦合作用下,更易于在裂隙中形成天然气水合物。

5 结 论

(1) 本项目组在青海省祁连山冻土区实施科学钻探工程,

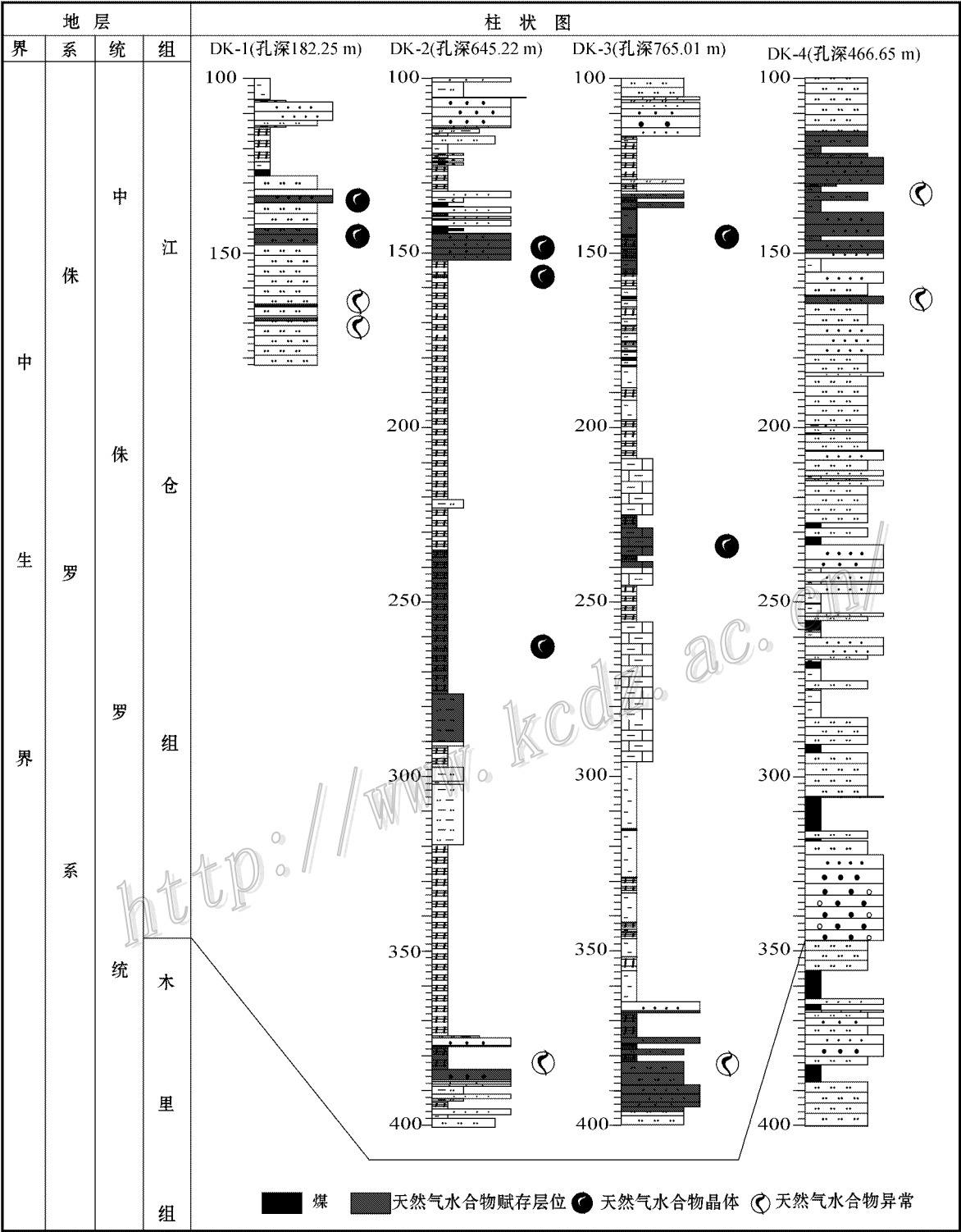


图 5 DK-1 至 DK-4 号孔柱状对比图

Fig. 5 Correlation among Well DK-1 to Well DK-4

直接钻获到天然气水合物实物样品,这是首次在中国陆域祁连山冻土区勘查到的天然气水合物。

油页岩、粉砂岩、细砂岩等层段中,与岩性关系不大,主要产于岩层的裂隙或孔隙中,明显受裂隙的控制。

(2) 本区天然气水合物及其异常现象主要出现在泥岩、

(3) 本区天然气水合物及其异常现象主要出现在井下

130~400 m 的层段,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。

志 谢 参加野外工作的还有北京化工大学吕杰博士、吉林大学郭威博士。野外期间还得到了青海煤炭地质 105 勘探队的邓生义、曹官青、耿庆明、牛索安,中国地质科学院勘探技术研究所王汉宝,中国地质科学院矿产资源研究所、中国地质大学、吉林大学、北京化工大学的博士研究生庞守吉、赵江鹏及硕士研究生郭星旺、于淼、杨旭、李国圣、贾瑞、韩路、武淑娇、李建华等的帮助。基础图件的编制得到了青海煤炭地质 105 勘探队庞建宏的帮助。室内分析测试得到了中国地质调查局青岛海洋地质研究所业渝光研究员的指导。本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主任、卢民杰副主任、肖桂义处长和刘凤山处长的指导。在此向他们表示诚挚谢意!

References

- Chen D F, Wang M C and Xia B. 2005. Formation condition and distribution prediction of gas hydrate in Qinghai-Tibet Plateau permafrost [J]. Chinese Journal of Geophysics, 48(1): 165-172 (in Chinese with English abstract).
- Collett T S. 1993. Natural gas hydrates of the Prudhoe Bay and Kuparuk River area, north Slope, Alaska [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 77(5): 793-812.
- Craven J A, Roberts B J, Bellefleur G, Spratt J, Cingel J and Fernberg P. 2009. Recent magnetotelluric measurements at the Mallik gas hydrate production research well site, northwest Territories [J]. Geological Survey of Canada Current Research, (5): 1-7.
- Dallimore S R, Uchida T and Collett T S. 1999. Scientific results from JAPEX/JNOC/GSC Mallik 2L-38 gas hydrate research well, Mackenzie Delta, northwest Territories, Canada [J]. Geological Survey of Canada Bulletin, 544: 403.
- Dallimore S R and Collett T S. 2005. Scientific results from the Mallik 2002 gas hydrate production research well program, Mackenzie Delta, northwest Territories, Canada [J]. Geological Survey of Canada Bulletin, 585: 140.
- Feng Y M. 1997. Investigatory summary of the Qilian orogenic belt, China: History, presence and prospect [J]. Advance in Earth Sciences, 12(4): 307-314 (in Chinese with English abstract).
- Fu J H and Zhou L F. 1998. Carboniferous-Jurassic stratigraphic provinces of the southern Qilian basin and their petro-geological features [J]. Northwest Geoscience, 19(2): 47-54 (in Chinese with English abstract).
- Fu J H and Zhou L F. 2000. Triassic stratigraphy of the southern Qilian basin and their petro-geological features [J]. Northwest Geoscience, 21(2): 64-72 (in Chinese with English abstract).
- Huang P, Pan G T, Wang L Q and Hu N J. 2002. Prospect evaluation of natural gas hydrate resources on the Qinghai-Tibet plateau [J]. Regional Geology of China, 21(11): 794-798 (in Chinese with English abstract).
- Jian R T, Li F and Wang Z C. 2009. The gas hydrate abnormality in the movable zone of the Qinghai-Tibet plateau permafrost [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 31(2): 13-17 (in Chinese with English abstract).
- Kvenvolden K A. 1995. A review of the geochemistry of methane in natural gas hydrate [J]. Org. Geochem., 23(11-12): 997-1008.
- Liu H S and Han X L. 2004. Geophysical recognition and prediction of natural gas hydrates in Qiangtang basin of Tibet [J]. Northwestern Geology, 37(4): 33-38 (in Chinese with English abstract).
- Lu Z Q, Wu B H and Rao Z. 2007. Geological and geochemical anomalies of gas hydrate in permafrost zones along the Qinghai-Tibet railway, China [J]. Geological Bulletin of China, 26(8): 1029-1040 (in Chinese with English abstract).
- Lu Z Q, Sultan N, Jin C S, Rao Z, Luo X R, Wu B H and Zhu Y H. 2009. Modeling on gas hydrate formation conditions in the Qinghai-Tibet plateau permafrost [J]. Chinese Journal of Geophysics, 52(1): 157-168 (in Chinese with English abstract).
- Makogon Y F, Holditch S A and Makogon T Y. 2007. Natural gas-hydrates: A potential energy source for the 21st Century [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 56: 14-31.
- Moridis G, Collett T S, Dallimore S R and Satoh T, Hancock S and Weatherill B. 2004. Numerical studies of gas production from several CH₄ hydrate zones at the Mallik site, Mackenzie Delta, Canada [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 43: 219-238.
- Petro-Geological Editorial Team for Qinghai-Tibet Area. 1990. Petro-geology in China, volume 14: Qinghai-Tibet area [M]. Beijing: Petroleum Industry Publishing House. 327p (in Chinese with English abstract).
- Qinghai Bureau of Geology and Mineral Resources. 1997. Lithological stratigraphy in Qinghai [M]. Wuhan: Publishing House of China University of Geosciences. 1-12 (in Chinese with English abstract).
- Qinghai Society of Geology. 2005. Study on geology in the northeast of Qinghai-Tibet plateau [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-10 (in Chinese with English abstract).
- Shi D and Zheng J W. 1999. The status and prospects of research and exploitation of natural gas hydrate in the world [J]. Advance in Earth Sciences, 14(4): 330-339 (in Chinese with English abstract).
- Sloan E D. 1998. Clathrate hydrates of natural gases (2nd edition) [M]. New York: Marcel Dekker. 730p.
- Wen H J, Lu J, Shang L J, Liu T J, Chen J F, Ju Q and Shao L Y. 2006. A sequence stratigraphic discussion of the Jurassic coal measures in the Juhugeng coalmine area in Qinghai Province [J]. Coal Geology of China, 18(5): 19-21 (in Chinese with English abstract).

- Wu Q B, Jiang G L, Pu Y B and Deng Y S. 2006. Relationship between permafrost and gas hydrates on Qinghai-Tibet Plateau [J]. Geological Bulletin of China, 25(1/2): 29-33 (in Chinese with English abstract).
- Xu X Z, Cheng G D and Yu Q H. 1999. Research prospect and suggestions of gas hydrates in permafrost regions on the Qinghai-Tibet plateau [J]. Advance in Earth Sciences, 14(2): 201-204 (in Chinese with English abstract).
- Yang S F. 2007. Thrust fault characteristics of the northern margin of the Qilian mountain and its petroleum prospects [M]. Beijing: Science Press. 1-27 (in Chinese with English abstract).
- Yen H S, Shui Z Q and Liu W J. 2002. Potentials and prospects of gas hydrate in the Qinghai-Tibet plateau permafrost [J]. Geology in Tibet, (1): 45-52 (in Chinese with English abstract).
- Zhang H T, Zhang H Q and Zhu Y H. 2007. Gas hydrate investigation and research in China: Present status and Progress [J]. Geology in China, 34(6): 953-961 (in Chinese with English abstract).
- Zhang L X, Xu X Z and Ma W. 2001. Qinghai-Tibet plateau permafrost and gas hydrate [J]. Natural Gas Geoscience, 12(1): 22-26 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Y W, Guo D X and Qiu G Q. 2000. Permafrost in Chian [M]. Beijing: Science Press. 329-353 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Y H, Liu Y L and Zhang Y Q. 2006. Formation conditions of gas hydrates in Permafrost of the Qilian Mountains, northwest China [J]. Geological Bulletin of China, 25(1/2): 58-63 (in Chinese with English abstract).
- 坚润堂, 李 峰, 王造成. 2009. 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), 31(2): 13-17.
- 刘怀山, 韩晓丽. 2004. 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, 37(4): 33-38.
- 卢振权, 吴必豪, 饶 竹. 2007. 青藏铁路沿线多年冻土区天然气水合物的地质、地球化学异常 [J]. 地质通报, 26(8): 1029-1040.
- 卢振权, Sultan N, 金春爽, 饶 竹, 罗续荣, 吴必豪, 祝有海. 2009. 青藏高原多年冻土区天然气水合物形成条件模拟研究 [J]. 地球物理学报, 52(1): 157-168.
- 青海省地质矿产局. 1997. 青海省岩石地层 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社. 1-12.
- 青海省地质学会. 2005. 青藏高原东北部地质研究 [M]. 北京: 地质出版社. 1-10.
- 青藏油气区石油地质志编写组. 1990. 中国石油地质志卷十四——青藏油气区 [M]. 北京: 石油工业出版社. 327 页.
- 史 斗, 郑军卫. 1999. 世界天然气水合物研究开发现状和前景 [J]. 地球科学进展, 14(4): 330-339.
- 文怀军, 鲁 静, 尚璐君, 刘天绩, 陈江峰, 鞠 崎, 邵龙义. 2006. 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, 18(5): 19-21.
- 吴青柏, 蒋观利, 蒲毅彬, 邓友生. 2006. 青藏高原天然气水合物的形成与多年冻土的关系 [J]. 地质通报, 25(1/2): 29-33.
- 徐学祖, 程国栋, 俞祁浩. 1999. 青藏高原多年冻土区天然气水合物的研究前景和建议 [J]. 地球科学进展, 14(2): 201-204.
- 杨树锋. 2007. 祁连山北缘冲断带构造特征及含油气远景 [M]. 北京: 科学出版社. 1-27.
- 伊海生, 时志强, 刘文均. 2002. 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, (1): 45-52.
- 张洪涛, 张海后, 祝有海. 2007. 中国天然气水合物调查研究现状及其进展 [J]. 中国地质, 34(6): 953-961.
- 张立薪, 徐学祖, 马 巍. 2001. 青藏高原多年冻土与天然气水合物 [J]. 天然气地球科学, 12(1): 22-26.
- 周幼吾, 郭东信, 邱国庆. 2000. 中国冻土 [M]. 北京: 科学出版社. 329-353.
- 祝有海, 刘亚玲, 张永勤. 2006. 祁连山多年冻土区天然气水合物的形成条件 [J]. 地质通报, 25(1/2): 58-63.
- 附中文参考文献**
- 陈多福, 王茂春, 夏 斌. 2005. 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, 48(1): 165-172.
- 冯益民. 1997. 祁连造山带研究概况——历史、现状及展望 [J]. 地球科学进展, 12(4): 307-314.
- 符俊辉, 周立发. 1998. 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, 19(2): 47-54.
- 符俊辉, 周立发. 2000. 南祁连盆地三叠纪地层及石油地质特征 [J]. 西北地质科学, 21(2): 64-72.
- 黄 朋, 潘桂棠, 王立全, 胡宁静. 2002. 青藏高原天然气水合物资源预测 [J]. 地质通报, 21(11): 794-798.