文章编号: 0258-7106 (2020) 02-0326-11

Doi: 10. 16111/j. 0258-7106. 2020. 02. 007

祁连山冻土区天然气水合物地球化学迁移机理探讨*

张富贵^{1,2,3},秦爱华^{3**},祝有海⁴,孙忠军^{2,3},张舜尧^{1,2,3},王惠艳^{2,3},杨志斌^{2,3},周亚龙^{2,3} (1成都理工大学地球科学学院,四川成都 610059; 2地球表层碳-汞地球化学循环重点实验室,河北廊坊 065000; 3中国 地质科学院地球物理地球化学勘查研究所,河北廊坊 065000; 4中国地质调查局油气资源调查中心,北京 100029)

摘 要 陆域冻土区天然气水合物成矿机制较为复杂,水合物横向难以对比,形成机理不清楚,急需对天然气水合物迁移机理进行研究。文章根据祁连山冻土区天然气水合物发现区钻井揭示的地质和地球化学资料以及岩芯样品分析测试结果进行了综合分析。结果显示,研究区中侏罗统和上三叠统均为较好烃源岩,天然水合物气源以热解气为主,主要由上三叠烃源岩迁移和中侏罗统木里组烃源岩扩散提供,显示了多源多期次的特点。根据地质和地球化学分析,祁连山天然气水合物的形成经历了晚侏罗世一早白垩世的气体运移与聚集、中新世中晚期一上新世整体抬升、第四纪游离气体转化成天然气水合物矿藏3个阶段,经历了"先聚集-再抬升-后成藏"等过程,是构造-气候耦合作用的结果,初步建立了祁连山冻土区天然气水合物迁移机理。

关键词 地球化学;天然气水合物;烃源岩;迁移机理;祁连山冻土区 中图分类号:P618.13 文献标志码:A

A discussion on geochemical migration mechanism of natural gas hydrate in Qilian Mountain permafrost

ZHANG FuGui^{1, 2, 3}, QIN AiHua³, ZHU YouHai⁴, SUN ZhongJun^{2, 3}, ZHANG ShunYao^{1, 2, 3}, WANG HuiYan^{2, 3}, YANG ZhiBin^{2, 3} and ZHOU YaLong^{2, 3}

(1 College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2 Key Laboratory of Geochemical Cycling of Carbon and Mercury in the Earth's Critical Zone, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, Hebei, China; 3 Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, Hebei, China; 4 Oil and Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100029, China)

Abstract

The accumulation mechanism for natural gas hydrate (NGH) is sophisticated and it is difficult to conduct lateral correlation for NGH to figure out its mechanism. Therefore, it is urgent to conduct researches related to its accumulation mechanism. According to the NGH in the research well exploited in Muri, Qilian Mountain, the authors made a comprehensive analysis of its geological and geochemical data and the test results of core samples. It is revealed that the source rocks of Middle Jurassic and Upper Triassic can be regarded as the very good ones in the study area, and pyrolysis gas seems to have been the main source of the NGH, which was largely provided by the transfer and diffusion from the source rocks in Upper Triassic and Middle Jurassic respectively, exhibiting the features of multi-sources and multi-stages. Based on geological and geochemical analysis, the authors hold that the formation of NGH in Qilian Mountain experienced three phases, i.e., the gas migration and aggregation in

^{*} 本文得到中国地质调查局地质项目(编号:DD20160224)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(项目编号:AS2016Y01)联合 资助

第一作者简介 张富贵, 男, 1980年生, 高级工程师, 勘查地球化学专业。Email: zhangfugui@igge.cn

^{* *} 通讯作者 秦爱华,女,1965年生,教授级高级工程师,勘查地球化学专业。Email:qinaihua@igge.cn 收稿日期 2019-09-05;改回日期 2020-03-02。秦思婷编辑。

Late Jurassic to Early Cretaceous, the overall uplift in Middle and Late Miocene to Pliocene and the free gas to NGH deposits in Quaternary. The whole process experienced aggregation, uplift and accumulation, resulting from coupling effect of tectonics and climate. On such a basis, the accumulation mechanism of the NGH in permafrost of Qilian Mountain can be initially established.

Key words: geochemistry, natural gas hydrate, source rock, migration mechanism, Qilian Mountain permafrost

天然气水合物是在低温和高压条件下由水和气 体分子(主要是甲烷)形成的一种结晶状固体物质, 广泛分布于海底沉积物和陆地永久冻土层中(Kvenvolden, 1993; Collett, 1994; Collett et al., 2003; 2009; 2011)。随着全球对能源需求的增大,环境要求的增 加,各国政府都十分重视天然气水合物的开发和利 用(Makogon et al., 2007; 邹才能等, 2015; 傅飘儿等, 2016)。2017年,中国南海神狐地区天然气水合物试 采实现连续8天的稳定产气,累计产气超12万m3, 取得天然气水合物试开采的历史性突破(Li et al., 2018)。除了海域巨大的天然气水合物资源外,中国 多年冻土区天然气水合物资源也具有极大的潜力 (祝有海等, 2011a; 2011b; Zhu et al., 2010; Lu et al., 2011)。特别是2008年,中国地质调查局在祁连山 首次获得天然气水合物实物样品(Zhu et al., 2010), 在冻土区天然气水合物勘查方面取得了重大突破, 也拉开了天然气水合物勘查的序幕,在之后的10年 里取得了勘查方法技术、试采试验成功等系列成果, 与此同时,在基础研究领域也形成了新的认识(徐明 才等, 2011; Lu et al., 2013; Sun et al., 2014; Wang et al., 2014; 2015; 韩建光等, 2016; Fang et al., 2017; Lin et al., 2018; 王平康等, 2019; 张富贵等, 2019)。 天然气水合物的聚集包括一系列过程,如气体的生 成、运移、聚集和储存等,以往多侧重于对气体成因 的研究(卢振权等, 2010;黄霞等, 2011; 2016; 谭富荣 等,2017),近年来人们对气体运移和聚集过程也有 了进一步的了解(Wang et al., 2014; 卢振权等, 2015),但是对陆域天然气水合物的迁移过程,目前 还未达成共识。气体运移机理研究仍然是薄弱环 节,有关气体来源还存在不同的见解(曹代勇等, 2009; Lu et al., 2011; Lu et al., 2013; 戴金星等, 2014; 张家政等,2017)。研究区构造和岩性变化复杂,即 便钻孔相距不足百米,水合物仍难以横向对比,天然 气水合物迁移机理研究还不够深入,仅停留在推测 阶段(何家雄等, 2013; 翟刚毅等, 2014)。本次在近 几年地球化学工作的基础上,通过烃源岩评价、气体

来源及成因类型、烃类垂向运移机制、生烃史等方面,提出了冻土区天然气水合物迁移机理。

1 地质概况

研究区地处祁连山木里煤田聚乎更矿区,是中 生代形成的拗陷型含煤盆地。晚三叠纪末期,受印 支运动影响,整个祁连山抬升成陆,成为剥蚀区,中 祁连盆地沉积了一套侏罗纪的山间河湖沼泽相含 煤碎屑岩建造,晚侏罗世末期一早白垩世期间强烈 的造山运动导致白垩系与前白垩系的区域角度不 整合,自新生代地层不整合覆盖于前新生代地层之 上。新生代以来,受青藏高原东北缘地壳缩短变形 和西缘阿尔金断裂活动的影响,祁连山地区发育一 系列的北西西向和北北西向逆冲断裂(图1)(文怀 军等,2011)。聚乎更矿区为一复式背向斜构造,向 斜轴方向为北西向50°~70°之间,由1个背斜和2个 向斜组成(符俊辉等, 1998)。矿区出露地层主要包 括中侏罗统江仓组(J₂*j*)和木里组(J₂*m*),每套地层 含多个含煤地层(谢其锋等,2015;牛志新等,2015) (图1)。

中侏罗统木里组下段为辫状河冲积平原沉积, 岩性为含砾粗砂岩、粗砂岩,偶夹薄层碳质泥岩或薄 层煤,木里组上段为湖泊-沼泽环境沉积,岩性主要 为泥岩、粉砂岩、细砂岩、煤层,是木里煤田重要的含 煤层段,有2层主煤层。中侏罗统江仓组下段为一 薄煤层,多不具开采价值,为三角洲-湖泊环境沉积 相,岩性以深灰色泥岩、灰色细粒砂岩和粉砂岩为 主;江仓组上段为湖相沉积,以细碎屑泥岩、粉砂岩 为主,发育厚层油页岩。上侏罗统是半干旱和干旱 气候下形成的一套红色碎屑岩(王平康等,2011),是 天然气水合物勘探的关键层位。上三叠统尕勒得寺 组广泛出露于聚乎更矿区南北部和背斜轴部,与上 覆侏罗系呈平行不整合接触,岩性以暗色泥岩、黑色 泥岩、油页岩及薄煤层为主,是主要的烃源岩,储层 较发育,为潜在的油气区(符俊辉等,2000)。



图 1 研究区位置示意图(a)及祁连山聚乎更矿区天然气水合物矿藏地质简图(b)(据青海煤炭地质105队,2006修改) Fig. 1 Location of the study area (a) and geological map of the gas hydrate deposits (b) in Juhugeng in the Qilian Mountain (modified after Qinghai No. 105 Coal Geological Exploration Party, 2006)

2 样品采集与分析测试

本次在祁连山木里冻土区采集4口钻井的岩芯 样品,分别为DK-8井、DK13-11井、DK12-13井、 DK6-6井,DK6-6井离水合物发现区较远,图中未 标识。其中在DK-8井采集400件岩芯样品,将一 部分岩芯样品置于预先倒入200 mL饱和盐水的盐 水瓶中,使饱和盐水的液面升至400 mL,拧紧盐水 瓶螺丝和瓶盖,倒置摆放在室内,最大限度地保存 样品中的顶空间气体,分析顶空气轻烃;采集的另 一部分岩芯样品内衬玻璃纸装入样带后,直接送实 验室分析甲烷碳同位素,由中石化合肥培训测试中 心完成。

在DK13-11 井和DK12-13 井中分别采集岩芯样品56件、44件,采集样品深度为9.20~604.90 m,采集的岩芯样品内衬玻璃纸装入样带后,直接送实验室分析甲烷碳同位素,由中石化合肥培训测试中心完成。

在DK6-6井采集岩芯40件,其中,侏罗统样品6件,上三叠统样品34件,进行烃源岩分析,主要测试指标为总有机碳含量(TOC)、氯仿沥青"A"、干酪根化学元素的含量、镜质组反射率(*R*_o),这部分样品由长江大学地球化学实验室完成。

按分析测试的相关要求,实验室对10%的样品 进行了基本测量和检查测量,基本测量和检查测量 的相对误差小于10%,分析测试结果通过了中国地 质调查局分析测试质量中心的验收,分析质量 可靠。

3 烃源岩评价

烃源岩的定性评价是烃源岩评价的重要部分, 是判断研究区是否有足够气源的重要依据(卢双舫 等,2008)。烃源岩体积是决定生烃量的主要因素, 但烃源岩的体积受其发育厚度和分布面积的控制, 这是一个地质问题,而不是一个地球化学问题,因 此,本文不讨论烃源岩体积。本次研究区钻井岩芯 丰1 陆相极源岩方和居主度证价指标

XI 网络尾鲸石 自己放于皮 印 的 自动										
Table1 Evaluation index of organic matter abundance of continental source rocks										
	指标	非烃源岩								
			差	中等	好	最好				
	TOC(%)	< 0.4	0.4~0.6	0.6~1.0	1.0~2.0	> 2.0				
	氯仿沥青"A"(%)	< 0.015	0.015~0.050	0.05~0.10	0.10~0.20	> 0.20				
	HC(10 ⁻⁶)	< 100	100~200	200~500	500~1000	> 1000				
	$(S_1+S_2)(mg/g)$		< 2	2~6	6~20	> 20				

样品的分析结果基于中国石油天然气集团公司1995 年发布的行业标准(SY/T 5735-1995)(表1),从有机 质的丰度、类型、成熟度来比较中侏罗统木里组和上 三叠统尕勒得寺组烃源岩特征。

3.1 有机质丰度

有机质丰度是衡量生烃能力的重要指标。

本次共测试有机碳样品 40件,中侏罗统木里组 样品 6件,采样深度 630.50~678.10 m,上三叠尕勒得 寺组样品 34件,采样深度 37.52~610.50 m。中侏罗 统木里组烃源岩和上三叠统尕勒得寺组烃源岩有机 碳含量均大于 0.4%,木里组烃源岩有机碳含量较 高,50% 的样品为最好的烃源岩,超过 83.33% 样品 为好烃源岩,尕勒得寺组烃源岩有机碳含量也较 高,介于 0.63%~1.50%,超过 18.75% 的样品有机碳 含量大于 1%,2 套地层都具有较好的生烃潜力(表 2)。中侏罗统木里组烃源岩氯仿沥青"A"含量较 高,所有样品氯仿沥青"A"含量均大于 0.015%, 66.67% 的样品氯仿沥青"A"含量超过 0.1%,烃源 岩评价等级为好烃源岩。上三叠统尕勒得寺组烃 源岩氯仿沥青"A"含量大多小于 0.05%,评价等级 为差或非生油岩(表2)。

3.2 有机质类型

有机质类型是衡量有机质生烃能力的参数,同时决定了产物是以油为主还是以气为主,Ⅰ型干酪根具有较高的原始H/C原子比和较低的O/C原子比,生烃潜量大,形成产物以油为主,Ⅱ型干酪根生烃

潜量较小,形成产物以气为主(卢双舫等,2008)。

研究区的中侏罗统木里组烃源岩O/C原子比平均值为0.13,上三叠统尕勒得寺组烃源岩O/C原子数比平均值为0.20,2套地层O/C原子数比值差异较大。中侏罗统样品H/C原子数平均值0.75,差异不大。中侏罗统木里组烃源岩以II₂,II₁型干酪根为主,上三叠统尕勒得寺组烃源岩以III、II₁型干酪根为主,极少样品为I型干酪根(图2)。

3.3 有机质热演化程度

有机质成熟度是衡量有机质向油气转化程度的 重要参数。镜质体反射率(R_o)测量结果显示,所有 样品的R_o值均大于0.68%。中侏罗统木里组烃源岩 R_o值介于0.68%~1.27%,处于有机质成熟阶段,为生 油高峰期,是原油的形成阶段,产生大量的原油伴生 气。上三叠统烃源岩R_o值介于1.04%~1.81%,处于 有机质高成熟阶段,生成的烃类产物以低分子质量 的轻烃(C₁~C₅)为主(表2)。

总体来看,中侏罗统木里组烃源岩与上三叠统 尕勒得寺组烃源岩总有机碳含量均较高,有机质类 型明显不同,中侏罗统木里组含煤岩系主要以Ⅱ₁、 Ⅱ₂型为主,而上三叠统以Ⅲ、Ⅱ₁为主,处于成熟阶 段,以产油为主,油源对比也显示,DK-9井中侏罗统 的含油层来自中侏罗统烃源岩(Cheng et al., 2018)。 上三叠统干酪根处于高成熟阶段,生烃潜力较小,但 产物以轻烃为主,可为天然气水合物形成提供持续 稳定的气源。

Table2 Hydrocarbon source rock assessment in the Qilian Mountain permafrost									
左 酒	样品数	主要评价指标及测试结果							
气你石压杀	/个	总有机碳含量(TOC)	氯仿沥青"A"含量	有机质类型	镜质体反射率 (R_o) /%				
由供肥效本用组	6	>1%的样品占83.33%	0.0136%~0.1595%,平均		0.68~1.27				
中体夕纯个重组			0.0916%, > 0.05占86.33%	以॥2、॥1室乃主					
上二叒公乃點但去祖	34	均大于0.4%,>1%的样品	0.0017%~0.0526%,平均	い皿 エ 判弁子	1.04~1.81				
上二宜纯尔朝侍寸组		占 18.75%	0.0284%, < 0.05%占94.12%,	以Ⅲ、Ⅱ1型乃王					

表2 祁连山冻土区天然气水合物气源岩评价表

矿





4 天然气水合物起源成因及运移探讨

4.1 天然气水合物气体来源

祁连山木里地区获取天然气水合物实物样品以 来,国内学者对于其气源开展了相关研究,取得了一 系列成果,但目前尚未取得共识,主要有以下几种观 点:①天然气水合物气源主要来自煤层和煤系分散 有机质热演化的产物,天然气水合物的形成与煤或 煤系有关,煤层气是其主要来源,并解释为"煤型气 源"天然气水合物(曹代勇等,2009; 王佟等,2009; 张 家政等,2017);②天然气水合物的气体以热解成因 为主,主要为原油伴生气,少部分凝析油伴生气、煤 成气,与煤型气关系不大(卢振权等,2010);③天然 气水合物气源为混合成因,煤成气来自侏罗系煤层, 油型气可能来自于下伏上三叠统尕勒得寺组甚至更 深的地层(黄霞等,2011)。

笔者采集 DK-8 井、DK13-11 井、DK12-13 井岩 芯样品 500 件。DK-8 井 400 件岩芯样品 δ¹³C₁ 均大 于-50‰,平均为-47.41‰,R值(干燥系数)一般小于 100,平均为13.70,显示出明显的热解气和混合气特 征。DK13-11 井56 件岩芯样品δ¹³C₁均大于-50‰, 平均-44.20‰,R值普遍小于100,显示出明显的热解 气特征。DK12-13 井44 件岩芯样品δ¹³C₁都大 于-50‰,平均为-43.60‰,R值普遍小于100,显示 出明显的热解气特征,甲烷相对含量高,但还有较大 比例的重烃(乙烷、丙烷、丁烷等),呈现湿气的特征 (图3a)。为了研究祁连山冻土区烃类气体的成因类 型,进而初步判断气体的来源,笔者根据戴金星的鉴 别图版(戴金星, 1993),将测试数据δ¹³C₁及R值投点 到鉴别图版中, DK-8井、 DK13-11井、 DK12-13井投 点所落区域大体相同,大多数为原油伴生气、凝析油 伴生气和煤成气(图3b)。



图3 祁连山冻土区钻井岩芯气体组成(a)和碳同位素判别(b)(据Whiticar, 1999;戴金星, 1993修改)



中侏罗统木里组和上三叠统尕勒得寺组均为较 好的烃源岩。中侏罗统烃源岩正处于有机质成熟阶 段,为生油高峰期,在生成原油的过程中,产生大量 的原油伴生气。上三叠统烃源岩处于高成熟阶段, 以生干气为主,为天然气水合物提供了充足的气源, 体现了祁连山天然气水合物多源的特点。

4.2 烃类气体运移及输导体系

烃类气体沿断裂、裂缝等运移通道持续补给对 形成天然气水合物成藏至关重要(Boswell et al., 2011)。研究区侏罗系及其下伏晚古生代一中生代 地层褶皱,形成宽缓的北、向斜构造,在形成纵弯褶 皱的过程中形成一系列顺层剪节理及层间破碎带, 同时在区域近南北向挤压构造应力场作用下,形成 切层的共轭节理,这些层间破碎带、顺层剪节理、微 裂隙、岩石中的孔隙特别是区域角度不整合面之上 粗碎屑岩中的孔隙为油气运移提供了通道。

DK-8井天然气水合物主要分布在144.4~152.0m和 235~291.3 m间,在剖面上均产出在F₁、F₂断层的下 盘(卢振权等, 2015)。这些特征表明, 天然气水合物 受逆冲构造控制明显。在水合物发现层均有较高的 甲烷含量、较高的有机碳含量和较低的R值(普遍小, 于10),各烃类气体含量平均值表现为CH₄ > C₂H₆ > C₃H₈ > C₃H₆ > C₂H₄ > nC₄H₁₀ > iC₄H₁₀,显示出湿气的 特征,即祁连山冻土区钻获的天然气水合物属于Ⅱ 型水合物,烃类气体并非简单地只有原地有机质转 化而成,还存在深部烃类气体沿断裂系统向上运移 形成的。随着埋深增加,R值上升,甲烷含量比例增 加(图4),天然气水合物赋存层位R值较低,这是由 于甲烷形成水合物,游离甲烷含量降低,而乙烷、丙 烷、丁烷、二氧化碳等含量增大,在自然地质条件下, 形成上部溶解气带、水合物稳定带及下部游离气带 (或常规气藏)3个分带,甲烷含量分别呈现呈"中-低-高"特点。

DK8 井131.4~386.4 m区间的岩芯顶空气含量 较高,对应发育多层明显的破碎带,岩芯裂隙发育, 有断层发育,显示出烃类气体沿着断层或断层破碎 带向上运移的特点(图4)。且在此破碎带内多见有 天然气水合物异常层,这些断层和断层破碎带的存 在,为深部气体运移提供了通道,而浅部断层和断裂 破碎带为天然气水合物提供了自生自储的气体扩散 和储存空间。

4.3 生烃史

生烃史研究表明,木里组烃源岩在早白垩世早

期(140 Ma左右)进入生烃门限(R_o =0.5%),在早白 垩世晚期(100 Ma)进入成熟热演化阶段(R_o >0.7%), 目前处于生烃高峰附近(R_o =1.0%)。

尕勒得寺组底部烃源岩早侏罗世(190~180 Ma)
 进入生烃门限(R₀=0.5%),在中侏罗世(165 Ma)进入
 成熟热演化阶段(R₀>0.7%),进入生烃高峰阶段,在
 晚白垩世早期(100~90 Ma)进入高成熟热演化阶段,
 目前底部处于高成熟热演化阶段,顶部处于生烃高
 峰附近(R₀=1.0%),整体处于成熟-高成熟热演化阶
 段,生烃潜力大(图5)。

4.4 冻土区天然气水合物运移模式

祁连山冻土区天然气水合物气源主要以原油伴 生气为主,主要来自中侏罗统木里组烃源岩和上三 叠统尕勒得寺组烃源岩。木里组与尕勒得寺组烃源 岩达到成熟条件后生成的油气连续发生初次运移和 二次运移,一起圈闭聚集,晚侏罗纪世末期,随着盆-山差异抬升剥露,已经圈闭聚集的油气可能发生再 次运移,早期形成的深部油气圈闭进一步抬升到接 近地表位置。进入新生代后,开始于3.6 Ma的青藏 运动使祁连山迎来最强烈的隆升,直到0.8~1.2 Ma 的昆仑-黄河运动才整体抬升到冰川作用所需要的 3000 m临界高度以上,0.15 Ma的共和运动最终抬升 到现在的高度(崔之久等,1997;李吉均等,1998),青 藏高原出现第四纪以来最大的冰川(李吉均等, 1999;2013),而且至今仍处于稳定的环境。

祁连山冻土形成于稳定冻土带形成之后,时间 不早于1.2 Ma左右。天然气水合物可在充足的气源 供给、有利的气体组成、稳定带内储层特征等多种因 素下形成。根据地质和地球化学分析,初步建立了 祁连山冻土区天然气水合物运移机理(图6),晚侏罗 世-早白垩世,中侏罗统木里组和上三叠统尕勒得 寺组生成的油气发生运移和聚集,新生代以来祁连 山地区迎来一系列强烈的构造运动,油气随地层隆 升至冰川冻土作用需要的临界高度,油气沿断裂发 生再次运移,冻土层为油气提供了盖层,第四纪出现 大规模冰川,温度降低,环境趋于稳定,祁连山地区 开始具备天然气水合物的形成条件,游离气在合适 的温压条件下转化为天然气水合物。

5 结 论

(1) 祁连山冻土区天然气水合物以热解气为 主,主要为原油伴生气,少量煤成气。中侏罗统木里

组和上三叠尕勒得寺组均为较好的烃源岩,分别以 扩散作用和迁移作用沿断层和裂隙运移聚集,为天 然气水合物形成提供充足的气源,显示多源、多期次 的特点。

(2) 祁连山冻土区钻井显示,在水合物发现层 均有较高的甲烷含量、较高的有机碳含量和较低的 干燥系数,显示出湿气的特征。钻井岩芯顶空气高 含量的区间内发育多层明显的破碎带,显示出断层 或破碎带是烃类气体运移的桥梁。

(3)根据地质和地球化学分析,初步建立了祁 连山冻土区天然气水合物迁移机理。祁连山的构造 隆升不仅将深部气藏抬升到接近地表位置,而且提 供了水合物形成所需要的温度条件,是构造-气候耦 合作用的结果。祁连山天然气水合物的形成经历了



1—粗粒砂岩;2—细粒砂岩;3—泥质粉砂岩;4—泥岩;5—油页岩;6—煤层;7—天然气水合物;8—疑似天然气水合物;9—断层
 Fig. 4 Hydrocarbon concentrations and abnormal distribution of gas hydrate from borehole DK-8 in the Qilian Mountain permafrost
 1—Coarse sandstone; 2—Fine sandstone; 3—Clay siltstone; 4—Mudstone; 5—Oil shale; 6—Coal seam; 7—Gas hydrate;
 8—Suspected gas hydrate; 9—Fault



图 5 祁连山冻土区烃源岩生烃史

Fig. 5 Hydrocarbon generation history of source rocksin the Qilian Mountain permafrost



图6 祁连山冻土区天然气水合物运移机理示意图

Fig. 6 Schematic diagram of gas hydrate migration mechanism in Qilian Mountain permafrost

晚侏罗世—早白垩世的气体运移与聚集、中新世中 晚期—上新世整体抬升、第四纪游离气体转化成天 然气水合物矿藏3个阶段,经历了"先聚集-再抬升-后成藏"的过程。

致 谢 衷心感谢中国地质调查局青藏高原天 然气水合物长期观测基地提供的研究平台。项目实 施过程中得到中国地质调查局油气资源调查中心卢 振权研究员、庞守吉博士、张帅博士等的大力帮助, 吉林大学李冰博士等提供野外帮助,中国地质科学 院物化探所王小江提供了地震剖面数据,中国地质 科学院力学所胡道功研究员提供生烃史数据,分析 测试数据由长江大学地球化学实验室和中石化合肥 培训测试中心完成,均深表感谢。

References

- Boswell R, Moridis G, Reagan M and Collett T S. 2011. Gas hydrate accumulation types and their application to numerical simulation[J].
 United Kingdom: Proceedings of the Seventh International Conference on Gas Hydrate. Edinburgh, Scotland.
- Cao D Y, Liu T J, Wang D, Wang T, Wen H J and Pan Y L. 2009. Analysis of formation condition of natural gas hydrate in Muli coalfield, Qinghai Province[J]. Coal Geology of China, 21(9): 3-6 (in Chinese with Engilsh abstract).
- Cheng B, Xu J B, Lu Z Q, Li Y H, Wang W C, Yang S, Liu H, Wang T and Liao Z W. 2018. Hydrocarbon source for oil and gas indication associated with gas hydrate and its significance in the Qilian Mountain permafrost, Qinghai, northwest China[J]. Marine and Petroleum Geology, 89: 202-215.
- Collett T S. 1994. Permafrost-associated gas hydrate accumulations[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 715(1): 247-269.
- Collett T S and Dallimore S R. 2003.Permafrost-associated gas hydrate[M]. Natural Gas Hydrate. Springer Netherlands. 43-60.
- Collett T S, Johnson A H, Knapp C C and Bosewell R. 2009. Natural gas hydrates: A review[J]. American Association of Petroleum Geologists Memoir, 89: 146-219.
- Collett T S, Lee M W, Agena W F, Miller J J, Lewis K A, Zyrianova M V, Boswell R and Inks T L. 2011. Permafrost-associated natural gas hydrate occurrences on the Alaska North Slope[J]. Marine and Petroleum Geology, 28(2): 279-294.
- Cui Z J, Wu S Q and Liu G N. 1997.Discovery and properties of Kunlun yellow river movement[J]. Chinese Science Bulletin, 42(18): 1986-1988(in Chinese).
- Dai J X. 1993. Hydrocarbon isotopic characteristics and identification of various types of natural gas[J]. Natural Gas Geoscience, 4(2-3): 1-40(in Chinese).

- Dai J X, Ni Y Y, Huang S P, Liao F R, Yu C, Gong D Y and Wu W. 2014. Significant function of coal-derived gas study for natural gas industry development in China[J]. Natural Gas Geoscience, 25 (1): 1-22(in Chinese with Engilsh abstract).
- Fang H, Xu M C, Lin Z Z, Zhong Q, Bai D W, Liu J X, Pei F G and He M X. 2017. Geophysical characteristics of gas hydrate in the Muli area, Qinghai Province[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 37: 539-550.
- Fu J H and Zhou L F. 1998. Carboniffrous-Jurassic stratigraphic provinces of the southern Qilian basin and their petro-geological features[J]. Northwest Geoscience, 19(2): 47-54(in Chinese with Engilsh abstract).
- Fu J H and Zhou L F. 2000. Triassic stratigraphic provinces of the southern Qilian basin and their petro-geological features[J]. Northwest Geoscience, 21(2): 64-72(in Chinese with Engilsh abstract).
- Fu P E, Cao J, Liu J Y, Wang Y M, Zhang X and Cheng S H. 2016. Tracing the gas hydrate reservoirs in the northern South China Sea by Iodine concentrations in pore waters from Marine sediments[J]. Geological Review, 62(5): 1344-1352(in Chinese with Engilsh abstract).
- Han J G, Yu C Q, Zhang X B, Gu B L, Wang Y and Chen P. 2016. Multiwaveseismic numerical simulation study on terrestrial gas hydrate in permafrost area[J]. Acta Geologica Sinica, 90(9) 2502-2512(in Chinese with Engilsh abstract).
- He J X, Yan W, Zhu Y H, Hu Y, Zhang J R and Gong X F. 2013. Genetic types of gas hydrate in the world and their main controlling factors[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 33(2): 121-128 (in Chinese with Engilsh abstract).
- Huang X, Zhu Y H, Wang P K and Guo X W. 2011. Hydrocarbon gas composition and origin of core gas from the gas hydrate reservoir in Qilian permafrost[J]. Geological Bulletin of China, 30(12): 1851-1856(in Chinese with English abstract).
- Huang X, Liu H, Zhang J Z, Wang P K, Xiao R, Pang S J, Zhang S and Zhu Y H. 2016. Genetic-type and its significance of hydrocarbon gases from permafrost-associated gas hydrate in Qilian Mountain[J]. Chinese Journal of Geology, 51(3): 934-945(in Chinese with English abstract).
- Kvenvolden K A. 1993. Gas hydrates-geological perspective and global change[J]. Reviews of Geophysics, 31(2): 173-187.
- Li J J 1999. Studies on the geomorphological evolution of the Qinghai-Xiang (Tibetan) plateau and Asian monsoon[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 19(1): 1-12(in Chinese with Engilsh abstract).
- Li J F, Ye J L, Qin X W, Qiu H J, Wu N Y, Lu H L, Xie W W, Lu J G, Peng F, Xu Z Q, Lu C, Kuang Z G, Wei J G, Liang Q Y, Lu H F and Kou B B. 2018. The first offshore natural gas hydrate production test in South China Sea[J]. China Geology, 1(1): 5-16.
- Li J J and Fang X M. 1998. Study on uplift and environmental change of Qinghai-tibetplateau[J]. Chinese Science Bulletin, 43(15): 1569-1574(in Chinese).
- Li J J. 2013. Qinghai-tibet plateau uplift and Late Cenozoic environ-

mental changes[J]. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences), 49(2): 5-8(in Chinese).

- Lin Z Z, Pan H P, Fang H, GaoW L and Liu D M. 2018. High-altitude well log evaluation of a permafrost gas hydrate reservoir in the Muli area of Qinghai, China[J]. Scientific Reports, 8(1): 12596.
- Lu S F and Zhang M. 2008. Oil and gas geochemistry[M]. Beijing: Petroleum Industry Press(in Chinese).
- Lu Z Q, Zhu Y H, Zhang Y Q,Wen H J, Li Y H, Jia Z Y, Wang P K and Li Q H. 2010. Study on genesis of gases from gas hydrate in the Qilian Mountain permafrost, Qinghai[J]. Geoscience, 24(3): 581-588(in Chinese with Engilsh abstract).
- Lu Z Q, Zhu Y H, Zhang Y Q, Wen H J, Li Y H and Liu C L. 2011. Gas hydrate occurrences in the Qilian Mountain permafrost, Qinghai Province, China[J]. Cold Regions Science and Technology, 66 (2-3): 93-104.
- Lu Z Q, Zhu Y H, Liu H, Zhang Y Q, Jin C S, Huang X and Wang P K. 2013. Gas source for gas hydrate and its significance in the Qilian Mountain permafrost, Qinghai[J]. Marine and Petroleum Geology, 43: 341-348.
- Lu Z Q, Li Y H, Wang W C, Liu C L and Wen H J. 2015. Study on the accumulation pattern for permafrost-associated gas hydrate in Sanlutian of Muli, Qinghai[J]. Geoscience, 29(5): 1014-1023(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(1-3): 14-31.
- Niu Z X, Geng Q M and Dou L. 2015. Palaeogeographic analysis of Muli coalfield Juhugeng coalmine area in Qinghai Province[J]. Geological Review, 61(Supp.1): 158-159(in Chinese with Engilsh abstract).
- Sun Z J, Yang Z B, Mei H, Qin A H, Zhang F G, Zhou Y L, Zhang S Y and Mei B W. 2014. Geochemical characteristics of the shallow soil above the Muli gas hydrate reservoir in the permafrost region of the Qilian Mountains, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 139: 160-169.
- Tan F R, Liu S M, Cui W X, Wan Y Q, Yang C, Zhang G C, Liu W G, Du F P and Fan Y H. 2017. Origin of gas hydrate in the Juhugeng mining area of Mulicoal field[J]. Acta Geologica Sinica, 91(5): 1158-1167(in Chinese with Engilsh abstract).
- Wang P K, Zhu Y H, Lu Z Q, Guo X W and Huang X. 2011. Gas hydrate in the Qilian Mountain permafrost and its distribution characteristics[J]. Geological Bulletin of China, 30(12): 1839-1850(in Chinese with Engilsh abstract).
- Wang P K, Zhu Y H, Lu Z Q, Huang X, Pang S J and Zhang S. 2014. Gas hydrate stability zone migration occurred in the Qilian mountain permafrost, Qinghai, northwest China: Evidences from pyrite morphology and pyrite sulfur isotope[J]. Cold Regions Science and Technology, 98: 8-17.
- Wang P K, Huang X, Pang S J, Zhu Y H, Lu Z Q, Zhang S, Liu H, Yang K L and Li B. 2015. Geochemical dynamics of the gas hy-

drate system in the Qilian Mountain permafrost, Qinghai, northwest China[J]. Marine and Petroleum Geology, 59: 72-90.

- Wang P K, Zhu Y H, Lu Z Q, Bai M G, Huang X, Pang S J, Zhang S, Liu H and Xiao R. 2019. Research progress of gas hydrates in the Qilian Mountain permafrost, Qinghai, northwest China: Review[J]. Scientia Sinica: Physica Mechanica Astronomica, 49: 034606(in Chinese with Engilsh abstract).
- Wang T, Liu T J, Shao L Y, Cao D Y, Guo J N, Liu Y F, Wen H J and Wang D. 2009. Characteristics and origins of the gas hydrates in the Muli coalfield of Qinghai[J]. Coal Geology and Exploration, 37(6): 26-30(in Chinese with English abstract).
- Wen H J, Shao L Y, Li Y H, Lu J, Zhang S L, Wang W L and Huang M. 2011. Structure and stratigraphy of the Juhugeng coal district at Muli, Tianjun County, Qinghai Province[J]. Geological Bulletin of China, 30(12): 1823-1828(in Chinese with English abstract).
- Whiticar M J. 1999. Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane[J]. Chemical Geology, 161(1-3): 291-314.
- Xie Q F, Zhou L F, Cai Y F, Liu Y, Liu Z W, Liang S W, Zhang K and Zhao J H. 2015. Geochemical characteristics of permianmarine source rocks and its constraints of the provenance and paleoenvironment in the South Qilian basin, Qinghai Province[J]. Acta Geologica Sinica, 89(7): 1288-1301(in Chinese with Engilsh abstract).
- Xu M C, Liu J X, Chai M T, Wang G K, GaoJ H, Wang X J and Zhang
 B W. 2011. Seismic characteristics of natural gas hydrate in Muli area, Tianjun County, Qinghai Province[J]. Geological Bulletin of China, 30(12): 1910-1917(in Chinese with Engilsh abstract).
- Zhai G Y, Lu Z Q, Lu H L, Zhu Y H, Yu C Q and Chen J W. 2014. Gas hydrate geological system in the Qilian Mountain permafrost[J]. Mineral Petrol, 34(4): 79-92(in Chinese with Engilsh abstract).
- Zhang F G, Tang R L, Zhou Y L, Zhang S Y, Sun Z J and Wang H Y. 2019. An new tool for natural gas hydrate exploration-analysis of inert gas Helium Neon[J]. Acta Geologica Sinica, 93(3): 751-761 (in Chinese with Engilsh abstract).
- Zhang J Z, Zhu Y H, Huang X, Wang M J, Zhao G Z, Wang P K, Zhang S and Pang S J. 2017. Characterization and evaluation on the source rock of gas hydrate in Muli permafrost area, Nanqilian basin[J]. Geological Bulletin of China, 36(4): 634-643(in Chinese with Engilsh abstract).
- Zhu Y H, Zhang Y Q, Wen H J, Lu Z Q, Jia Z Y, Li Y H, Li Q H, Liu C L, Wang P K and Guo X W. 2010. Gas hydrates in the Qilian mountain permafrost, Qinghai, northwest China[J]. Acta Geologica Sinica, 84(1): 1-10.
- Zhu Y H, Lu Z Q and Xie X L. 2011a. Potential distribution of gas hydrate in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Geological Bulletin of China, 30(12): 1918-1926(in Chinese with Engilsh abstract).
- Zhu Y H, Zhang Y Q and Wen H J. 2011b. An overview of the scientific drilling project of gas hydrate in Qilian mountain permafrost, northwestern China[J]. Geological Bulletin of China, 30(12): 1816-1822(in Chinese with Engilsh abstract).
- Zou C N, Yang Z, Zhu R K, Zhang G S, Hou L H, Wu S T, Tao S Z, Yu-

质

an X J, Dong D Z, Wang Y M, Wang L, Huang J L and Wang S F. 2015. Progress in China's unconventional oil and gas exploration and development and theoretical technologies[J]. Acta Geologica Sinica, 89(6): 979-1007(in Chinese with Engilsh abstract).

附中文参考文献

- 曹代勇,刘天绩,王丹,王佟,文怀军,潘语录.2009.青海木里地区天 然气水合物形成条件分析[J].中国煤炭地质,21(9):3-6.
- 崔之久, 伍水秋, 刘耕年. 1997. 昆仑-黄河运动的发现及其性质[J]. 科学通报, 42(18): 1986-1988.
- 戴金星.1993.天然气碳氢同位素特征和各类天然气鉴别[J].天然气 地球科学,4(2-3):1-40.
- 戴金星, 倪云燕, 黄士鹏, 廖凤蓉, 于聪, 龚德瑜, 吴伟. 2014. 煤成气 研究对中国天然气工业发展的重要意义[J]. 天然气地球科学, 25 (1):1-22.
- 符俊辉,周立发.1998.南祁连盆地石炭一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.
- 傅飘儿,曹珺,刘纪勇,王彦美,张欣,程思海.2016.南海北部孔隙水 碘与天然气水合物成藏关系研究[J].地质论评,62(5):1344-1351.
- 韩建光,于常青,张晓波,谷丙洛,王赟,陈鹏.2016.陆域冻土区天然 气水合物多波地震数值模拟研究[J].地质学报,90(9):2502-2512.
- 何家雄,颜文,祝有海,胡扬,张京茹,龚晓峰.2013.全球天然气水合物成矿气体成因类型及气源构成与主控因素[J].海洋地质与第四纪地质,33(2):121-128.
- 黄霞,祝有海,王平康,郭星旺.2011. 祁连山冻土区天然气水合物烃 类气体组分的特征和成因[J].地质通报,30(12):1851-1856.
- 黄霞,刘晖,张家政,王平康,肖睿,庞守吉,张帅,祝有海.2016. 祁连 山冻土区天然气水合物烃类气体成因及其意义[J]. 地质科学, 51(3): 934-945.
- 李吉均,方小敏.1998. 青藏高原隆升与环境变化研究[J]. 科学通报, 43(15): 1569-1574.
- 李吉均.1999. 青藏高原的地貌演化与亚洲季风[J]. 海洋地质与第四纪地质, 19(1): 1-12.
- 李吉均.2013. 青藏高原隆升与晚新生代环境变化[J]. 兰州大学学报 (自然科学版),49(2):5-8.
- 卢双舫,张敏.2008.油气地球化学[M].北京:石油工业出版社.

- 卢振权,祝有海,张永勤,文怀军,李永红,贾志耀,王平康,李清海, 等.2010.青海祁连山冻土区天然气水合物的气体成因研究[J]. 现代地质,24(3):581-588.
- 卢振权, 李永红, 王伟超, 刘昌岭, 文怀军. 2015. 青海木里三露天冻 土天然气水合物成藏模式研究[J]. 现代地质, 29(5): 1014-1023.
- 牛志新, 耿庆明, 窦路. 2015. 青海省木里煤田聚乎更矿区古地理岩 相分析[J]. 地质论评, 61(增刊1): 158-159.
- 谭富荣,刘世明,崔伟雄,万余庆,杨创,张光超,刘伟刚,杜芳鹏,范玉海.2017.木里煤田聚乎更矿区天然气水合物气源探讨[J].地质 学报,91(5):1158-1167.
- 王平康,祝有海,卢振权,郭星旺,黄霞.2011.祁连山冻土区天然气 水合物岩性和分布特征[J].地质通报,30(12):1839-1850.
- 王平康,祝有海,卢振权,白名岗,黄霞,庞守吉,张帅,刘晖,肖睿. 2019.青海祁连山冻土区天然气水合物研究进展综述[J].中国 科学:物理学力学天文学,49(3):034606.
- 王佟,刘天绩,邵龙义,曹代勇,郭晋宁,刘益芬,文怀军,王丹.2009. 青海木里煤田天然气水合物特征与成因[J].煤田地质与勘探, 37(6):26-30.
- 文怀军, 邵龙义, 李永红, 鲁静, 张少林, 王文龙, 黄曼. 2011. 青海省 天峻县木里煤田聚乎更矿区构造轮廓和地层格架[J]. 地质通 报, 30(12): 1823-1828.
- 谢其锋,周立发,蔡元峰,刘羽,刘志武,王苏里.2015.南祁连盆地二 叠系海相烃源岩地球化学特征及其对物源属性和古环境的约 束[J]、地质学报,89(7):1288-1301.
- 徐明才,刘建勋,柴铭涛,王广科,高景华,王小江,张保卫.2011.青 海省天峻县木里地区天然气水合物地震响应特征[J].地质通 报,30(12):1910-1917.
- 翟刚毅, 卢振权, 卢海龙, 祝有海, 于常青, 陈建文. 2014. 祁连山冻土 区天然气水合物成矿系统[J]. 矿物岩石, 34(4): 79-92.
- 张富贵, 唐瑞玲, 周亚龙, 张舜尧, 孙忠军, 王惠艳. 2019. 一种冻土区 天然气水合物地球化学勘查新技术——惰性气体氦氖分析[J]. 地质学报, 93(3): 751-761.
- 张家政,祝有海,黄霞,王明君,赵广珍,王平康,张帅,庞守吉.2017. 祁连盆地木里冻土区天然气水合物烃源岩特征及评价[J].地质 通报,36(4):634-643.
- 祝有海, 卢振权, 谢锡林. 2011a. 青藏高原天然气水合物潜在分布区 预测[J]. 地质通报, 30(12): 1918-1926.
- 祝有海,张永勤,文怀军.2011b. 祁连山冻土区天然气水合物科学钻 探工程概况[J]. 地质通报, 30(12): 1816-1822.
- 邹才能,杨智,朱如凯,张国生,侯连华,吴松涛,陶士振,袁选俊,董 大忠,王玉满,王岚,黄金亮,王淑芬.2015.中国非常规油气勘 探开发与理论技术进展[J].地质学报,89(6):979-1007.