



青海祁连山冻土区天然气水合物研究进展综述

王平康^{*}, 祝有海^{*}, 卢振权, 白名岗, 黄霞, 庞守吉, 张帅, 刘晖, 肖睿

中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100083

^{*}联系人, 王平康, E-mail: wangpk@cags.ac.cn; 祝有海, E-mail: zyh@mx.cei.gov.cn

收稿日期: 2018-04-20; 接受日期: 2018-07-16; 网络出版日期: 2018-10-08

中国地质调查局项目《青南藏北冻土区天然气水合物调查》(编号: DD20160222)和《祁连山冻土区天然气水合物调查》(编号: DD20160223)资助

摘要 祁连山冻土区是我国陆域天然气水合物调查研究的重点地区之一, 也是我国目前在陆域冻土区唯一一处取得天然气水合物找矿发现的地区. 自2008年首次钻获天然气水合物实物样品以来, 调查研究工作逐步向广度和深度迈进, 取得了由点到面的扩边勘查进展、油气等多种能源的发现以及试采试验成功等系列成果, 同时基础理论认识水平得到了显著提升. 在水合物地质特征和成藏系统研究方面, 各要素描述得更加全面和深入, 尤其是对气源和构造条件的深入分析, 进一步丰富了水合物含油气系统的内涵. 在调查研究方法研究方面, 通过开展试验性实验, 初步形成了从点上钻探调查技术到面上地球物理-地球化学调查综合性的技术方法体系, 在勘探实践中发挥了重要的作用. 在水合物试采试验方面, 证实了降压试采工艺、控制监测等关键技术成岩储层中应用的可行性, 提出水平井试采工艺结合储层压裂改造技术将是未来提高产气量重要的科技攻关方向之一. 在环境效应研究方面, 发现了可以证实水合物稳态发生过变化或正处于变化之中的矿物学证据, 提出了气候变暖引起水合物系统的演变模式, 环境影响作用已逐步显现. 由此可见, 在祁连山冻土区, 天然气水合物具有资源与环境并重的双重意义, 不仅作为一种新型能源具有潜在的资源价值, 而且还是一种会引起环境效应的不稳定因素. 不难预测, 随着青藏高原持续变暖, 水合物储层稳定性评价研究将成为祁连山冻土区水合物资源环境效应研究的一个重要方面.

关键词 天然气水合物, 冻土区, 研究进展, 祁连山, 青海

PACS: 89.30.Aa, 89.60.Ec, 89.20.Bb

天然气水合物是由具有相对较低分子质量的气体(如甲烷、乙烷、丙烷、二氧化碳、氮气等)和水在低温高压条件(通常 T 为 $0\sim 10^{\circ}\text{C}$, $P > 10\text{ MPa}$)下形成的一种内含笼形结构的固态类冰状物质, 主要赋存于海底沉积物、陆域永久冻土带以及一些深水湖泊底部沉积

物中^[1-5]. 天然气水合物因其能量密度高、分布广、规模大、埋藏浅、成藏物化条件优越, 被视为是21世纪最具潜力的代替煤炭、石油和天然气的新型洁净能源之一^[6]. 随着全球天然气需求的快速增长和环保压力的日益增大, 资源量巨大、高效、清洁、低碳的天然

引用格式: 王平康, 祝有海, 卢振权, 等. 青海祁连山冻土区天然气水合物研究进展综述. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 034606
Wang P K, Zhu Y H, Lu Z Q, et al. Research progress of gas hydrates in the Qilian Mountain permafrost, Qinghai, Northwest China: Review (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2019, 49: 034606, doi: 10.1360/SSPMA2018-00133

气水合物资源的有效开发利用逐渐引起多国政府和能源界的高度重视. 特别是, 2017年我国南海天然气水合物试采成功^[7], 给天然气水合物调查研究注入了新动能, 极大地促进了我国乃至全球的天然气水合物产业化进程.

在我国, 除海域具有潜力巨大的天然气水合物资源外, 陆域天然气水合物资源前景亦为广阔. 祁连山冻土区地处青藏高原东北缘, 年平均地表温度较低, 发育大片连续冻土, 面积近 $1.0 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[8], 且成矿气源丰富, 具备优越的水合物成矿条件, 是我国陆域天然气水合物调查研究的重点地区之一. 2008年, 在该区首次钻获天然气水合物实物样品^[5], 实现了我国陆域水合物找矿工作的重大突破. 在之后的10年里, 调查研究工作逐步向广度和深度迈进, 取得了由点到面的扩边勘查进展、油气等多种能源的发现以及试采试验成功等系列成果^[9,10], 同时在基础研究领域形成了一批新认知. 本文将对近10年以来该地区天然气水合物的地质特征、成藏系统、调查技术、试采试验、环境效应等研究方面取得的主要进展进行总结论述.

1 研究区地质概况

研究区位于青海省北部的天峻县木里煤田境内, 海拔4000–4300 m, 年平均气温 -5.1°C , 煤田范围内多年冻土层广泛发育, 冻土层呈岛状分布, 平均厚度95 m, 相当一部分地区多年冻土层厚度大于100 m^[7,11,12], 地质上属于北祁连深大断裂体系在燕山期再度复活形成的一个裂堑式断陷盆地, 在大地构造位置上位于中祁连与南祁连两构造单元间的拗陷区内. 胡道功等人^[13]最新研究表明, 祁连山白垩纪造山作用导致祁连山早期隆升, 始新世早期(53–40 Ma)、始新世末期(~33 Ma)、中新世(13–8 Ma)和上新世以来的构造与强隆升作用将祁连山抬升到接近现在的高度, 上新世末祁连山已经隆升到冰川作用所需要的临界高度, 中更新世受全球降温耦合作用影响明显.

聚乎更矿区是木里煤田主体之一, 其中部是三叠系地层组成的一个背斜, 南北两侧为侏罗系含煤地层组成的两个向斜. 该背向斜的南北两侧发育规模较大的逆推覆断裂, 在南北两个向斜内发育北东向规模较大的剪切断裂, 将凹陷切割成断续的不同块段, 呈现南北分带、东西分区的构造特征^[14]. 该矿区出露的地

层主要包括第四系、中侏罗统和上三叠统. 上三叠统广泛出露于矿区南北部及背斜轴部, 岩性以黑色粉砂岩、泥岩及薄煤层为主, 与上覆侏罗系呈平行不整合接触. 中侏罗统包括木里组(J_2m)和江仓组(J_2j), 木里组从下往上, 分别为辫状河冲积平原环境形成的一套中–粗粒碎屑岩, 偶夹薄层炭质泥岩或薄煤层, 底部底砾岩发育和湖泊~沼泽环境形成的深灰色粉砂岩、细粒砂岩及灰色细–中粒砂岩、粗粒砂岩, 夹两层主煤层. 江仓组从下往上分别为三角洲~湖泊环境形成的灰色细粒砂岩、中粒砂岩及深灰色泥岩、粉砂岩, 含煤2–6层; 浅湖~半深湖环境形成的细碎屑泥岩、粉砂岩, 夹灰色粉砂岩及透镜状菱铁矿层. 第四系在钻探区内广泛分布, 为冲积、洪积成因的腐植土、砂、砾石, 坡积的角砾, 冰积的泥砂、冰层、漂砾等^[5].

2 天然气水合物地质特征

自2008年以来, 在祁连山冻土区中国地质调查局先后实施了12口水合物调查井和3口试采井, 在7口调查井和2口试采井中发现了天然气水合物, 其余调查井仅发现存在水合物异常现象; 神华青海能源有限责任公司实施14口水合物调查井, 在4口井中发现天然气水合物, 其余钻井也仅发现水合物异常现象^[15,16]. 通过近些年的钻井调查和室内实验研究, 基本上查明了天然气水合物基本地质特征.

祁连山冻土区天然气水合物产状类型分为两类. 一类为“裂隙型”水合物, 以肉眼可见的薄层状、片状、团块状赋存于粉砂岩、泥岩、油页岩的裂隙面中, 多呈白色、乳白色晶体, 有的因泥浆污染呈土黄色; 另一类为“孔隙型”水合物, 以浸染状赋存于细粉砂岩孔隙中, 肉眼观察不到晶体, 只能通过如岩心不断冒出气泡和水珠、热红外呈分散状低温异常等相关水合物异常标志来间接推测^[5,17,18]. Li等人^[16]对发现水合物样品的12口钻井进行了水合物产状类型统计, 发现水合物产状以裂隙型为主, 占比达55%, 孔隙型仅为3%, 裂隙–孔隙混合型占比为42%. Boswell等人^[19]和Koh等人^[20]将祁连山这种水合物储层类型分类为R型储层, 即水合物产出于不同的岩石类型中, 具有低孔隙度、低渗透率和高力学强度特征.

天然气水合物赋存层位主要为中侏罗统江仓组, 产于冻土层之下, 主要储集层段深度为133.0–396 m区

间,各钻井中水合物纵向分布不具有连续性,钻井间横向分布规律不明显,岩石裂缝系统对其分布具有重要的控制作用^[18].水合物样品激光拉曼光谱和含水合物岩心气体组分测试结果显示,天然气水合物除含甲烷外,还含有较高的乙烷、丙烷等重烃组分,部分样品含有较高的二氧化碳,认为水合物有可能为s II型结构水合物^[5,21-26].水合物饱和度估测范围差异较大,卢振权等人^[27]依据含水合物砂岩孔隙度测试结果和岩心气解析实验,计算认为砂岩孔隙中水合物平均饱和度为5.1%;郭星旺等人^[28]、林振洲等人^[29]利用测井数据计算获得水合物饱和度范围分别为13%–86%和11.47%–81.61%,结果较为相近,但在选取饱和度计算模型时,均存在一定程度的假设,还有待进一步开展岩石物理实验、岩电测试和地层水分析等工作^[30].此外,在水合物富集层段常伴生方解石、黄铁矿、三斜钡解石、铁白云石等自生矿物^[18,31-33].总体而言,与极地冻土区相比,祁连山冻土区水合物具有产状类型特殊、埋深浅、冻土层薄、气体组分复杂、饱和度变化大以及横纵向分布不均匀等特征.

3 天然气水合物成藏系统

天然气水合物不管在海域沉积物中还是在陆域冻土区环境中形成、聚集和成藏,均有着自身的成藏系统^[34-39].自2008年在祁连山冻土区发现天然气水合物样品后,有关针对我国陆域冻土区天然气水合物成藏系统研究也在不断深入.王平康等人^[40]基于祁连山冻土区天然气水合物勘探实践,认为天然气水合物是在“气源-岩性-构造-冻土”耦合机制体系下成藏的,并指出通过对这四大控矿因素的精细研究对于了解天然气水合物分布规律具有重要的指导作用.卢振权等人^[41]通过对祁连山冻土区已知天然气水合物钻孔资料的详细研究,认为祁连山冻土区由于烃类生成体系、流体运移体系、成藏富集体系的耦合与匹配关系即天然气水合物成藏系统在不同站位具有很大的差异性,从而影响该区天然气水合物在横向平面上和纵向剖面上的成藏与分布不均性.翟刚毅等人^[42]则运用由烃类生成体系、流体运移体系、成藏富集体系构成的天然气水合物成矿系统理论阐述了祁连山冻土区天然气水合物成藏作用过程,并总结提出了天然气水合物成矿系统模式进而探讨了影响天然气水合物成矿控制因素.可

见,有关祁连山冻土区天然气水合物成藏系统的研究,虽然在表述角度和形式上有所差异,但实质上都是围绕影响天然气水合物成藏的冻土、气源、储层及构造等地质因素展开的.

3.1 冻土特征

冻土是陆域天然气水合物形成的必要条件,主要通过控制 p - T 条件限制天然气水合物稳定带的空间范围.早期祁连山木里地区多年冻土实测数据多介于60–95 m^[7],局部大于100 m^[12],推算认为冻土层内地温梯度为3.0°C/100 m,冻土层下地温梯度介于1.3°C/100 m–4.5°C/100 m,平均2.2°C/100 m^[11].随着井温测井技术的应用,尤其对DK-9井开展长期地温实时监测,获得了稳态的地温数据.结果表明,冻土层内的地温梯度为1.38°C/100 m,冻土层以下的地温梯度为4.85°C/100 m,所测地温参数值更加科学准确,根据水合物温-压条件分析,稳定带底界深度处于510–617 m之间^[43].Wang等人^[44]基于陆域冻土区钻探调查结果,依据冻土层岩土类型和含冰情况将沉积物覆盖区的冻土层划分为3种结构类型,指出祁连山冻土区主要为第1种类型,即冻土层由上往下依次由冻融层、含冰沉积物冻土层、含冰基岩冻土层、非含冰基岩冻土层组成,并定量评价了含冰冻土层对浅层烃类气体的封盖性.何梅兴等人^[45]依据木里地区电阻率剖面中浅部地表上连续或间断分布中高层划分出了冻土层厚度,冻土以岛状形态分布,南部和东部发育,厚度介于30–150 m,同时指出高程、地形、河流和断层是影响冻土发育的主要因素.

关于冻土形成的时间,胡道功等人^[13]基于在青海湖周边发现了形成于0.5–0.7 Ma的倒数第三次冰期或最大冰期、13–30万年的例数第二次冰期及1–7万年的末次冰期的冰碛与冰水沉积物,初步建立了祁连山地区第四纪冰期-间冰期演化序列,重建了祁连山第四纪冰期-间冰期的古气温与古环境,认为祁连山地区冻土形成时间不晚于中更新世早期.

3.2 气源特征

气源是天然气水合物成藏富集的核心因素,开展气源对比和鉴定是认识天然气生成、运移和水合物成藏以及资源评估的重要支撑性研究.由于天然气水合物大部分为贫重烃气的干气,缺乏重烃气和轻烃等科

学信息, 只能依靠水合物气中低碳分子气组分及碳氢同位素有关的参数进行气源研究^[46]. 有关祁连山冻土区天然气水合物气的成因类型和气源主要存在两种观点. 一种观点认为是以油型气为主, 如卢振权等人^[47]对含天然气水合物岩心解吸出的气体样品测试研究指出气体为有机成因, 且以热解成因为主, 夹少量微生物成因(醋酸根发酵), 其中, 热解成因气主要与原油裂解气、原油伴生气有关, 少部分与凝析油伴生气、煤成气、干酪根裂解气有关, 认为水合物气体来源与油型气密切相关, 而与煤型气关系不大; 唐世琪等人^[48]根据DK-9井天然气水合物岩心顶空气组分和碳同位素组成研究, 指出水合物气为油型气, 并含有少量生物气; 黄霞等人^[49]根据12口钻井资料研究, 认为水合物气主要为石油伴生气或油型气, 与煤型气关系不大, 推测气源来自深部上三叠统尕勒得寺组烃源岩. 另一种观点认为是以煤型气源为主, 如曹代勇等人^[50]认为天然气水合物中烃类气体主要来自侏罗系煤层和煤系分散有机质热演化的产物, 进一步研究认为水合物气源成因类型属于以广义煤系气为主的混合气^[51]. 戴金星等人^[46]依据 $\delta^{13}\text{C}_1$ - $\delta^{13}\text{C}_2$ - $\delta^{13}\text{C}_3$ 天然气成因鉴别图版^[52,53]对以往9口井45个天然气水合物气体样品烷烃气碳同位素组成进行投点判识, 认为天然气水合物气绝大部分与油型气密切相关, 仅两个样品显示为煤成气, 综合分析认为, 分布在中侏罗统江仓组的天然气水合物气主要为油型气, 是自生自储型, $\delta^{13}\text{C}_1$ 值为-52.7‰- -35.8‰, $\delta^{13}\text{C}_2$ 值为-42.3‰- -29.4‰; 少量煤成气, 其气源岩可能主要为中侏罗统江仓组底部、木里组及上三叠统尕勒得寺组含煤地层, $\delta^{13}\text{C}_1$ 值为-35.7‰- -31.3‰, $\delta^{13}\text{C}_2$ 值为-27.5‰- -25.7‰.

有关天然气水合物气的主力气源岩主要存在两种观点. 一种观点认为中侏罗统含煤岩系为主力气源岩, 如王佟等人^[54]、曹代勇等人^[50]主要基于早期区域地质调查研究成果^[55]认为侏罗系煤层、炭质泥岩和油页岩是主要的气源岩, 上石炭统的暗色泥(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为次要烃源岩; 张家政等人^[56]根据钻井岩心分析结果认为中侏罗统江仓组、木里组煤系地层烃源岩总体上处于生烃高峰期的生油阶段或凝析油阶段, 属于好、很好烃源岩, 为天然气水合物主力生烃层系, 而上三叠统尕勒得寺组煤系地层烃源岩有机质成熟度高, 生烃潜力差, 对天然气水合物成藏贡献不大. 但程

青松等人^[57]认为侏罗系烃源岩处于成熟阶段但未到主生气期, 不是水合物主力气源岩. 另一种观点认为上三叠统或更深层系为主力气源岩, 如卢振权等人^[15,58]认为中侏罗统的烃源岩不足以产生形成天然气水合物所需的大量气体, 气源主要由下部或更深部上三叠统或二叠系提供; 唐世琪等人^[59]认为中侏罗统和上三叠统气源岩有机质演化整体处于成熟阶段, 或处于凝析油阶段, 还没有达到湿气和干气阶段, 可能只能为水合物提供一定的气源, 其主力气源岩可能来自更深部层系; Lu等人^[24,60]根据热模拟温度与镜质体反射率之间关系及镜质体反射率与古地温、埋藏深度的关系, 推算天然气水合物气源岩来自约2000 m以下泥岩或油页岩; 除此之外, 还有一种观点认为中侏罗统窑街组煤系泥岩和晚三叠世尕勒得寺组湖相泥岩均为水合物主要气源岩^[61]. 从各学者的气源岩主要评价指标的测试结果(表1^[24,56,57,59-61])来看, 每套气源岩评价指标值都存在差异性, 可能主要跟岩石样品采自不同的钻井以及测试样品主观性选取有关, 但总体上, 中侏罗统含煤岩系与上三叠统尕勒得寺组总有机碳含量均较高, 但有机质类型差异明显, 中侏罗统含煤岩系主要以II₁, II₂型为主, 而上三叠统尕勒得寺组则主要以III, II型为主. 虽然II型干酪根生烃潜量大, 但形成产物以石油为主, 这与在中侏罗统观察到的油迹、油斑、油浸、油染等不同级别油气显示现象^[62]相符, 并且DK-9井在中侏罗统发现近8 m厚的含油层, 油源对比显示, 油层来自中侏罗统烃源岩^[9,63]. 而III型干酪根虽然生烃潜力较小, 但形成产物却以天然气为主, 可为天然气水合物形成提供持续稳定的气体来源. 天然气水合物与油气在空间上的这种共生关系, 进一步丰富了水合物含油气系统的内涵. 浅部天然气水合物的存在对深部油气藏有着非常好的指示作用, 因此, 中侏罗统与上三叠统烃(气)源岩可作为今后寻找常规油气的主要勘探目标.

3.3 储层特征

根据DK-1、DK-2、DK-3、DK-7和DK-8井中含天然气水合物层(含异常层)横向对比, 可见大致存在3个天然气水合物储集单元, 即A、B、C单元(图1). 其中A单元最大深度区间为133.0-175.01 m, 岩性由中砂岩、细砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩和油页岩组成, 且主要以粉砂岩、油页岩和泥岩为主, 分别占该单元

表 1 祁连山冻土区天然气水合物气源岩评价表

Table 1 Hydrocarbon source rock assessment in the Qilian Mountain permafrost

气源岩层系	样品数	主要评价指标及测试结果						参考文献
		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)	氢指数(HI) (mg/g)	生烃潜量(S1+S2) (mg/g)	
中侏罗统含 煤岩系	71	>1%的样品占 78.9%	>0.1%的样品 占72.2%	以Ⅱ ₂ , Ⅱ ₁ 型 为主	0.7%–1.2%	33.0–569.1, 平均256	平均8.8	[56]
	44	1.42%–16.6%, 平均8.9%	未测	Ⅱ ₂ –Ⅲ型	0.71%–0.79%, 平均0.74%	8.18–256, 平均106.5	0.26–57.15, 平均9.19	[57]
	12	1.28%–5.89%, 平均3.22%	未测	Ⅱ ₁ 型为主	0.83%	149	1.23–12.27, 平均5.18	[61]
	76	>1%的样品占 72.97%	未测	Ⅱ ₂ –Ⅲ型	0.5%–1.05%	>350样品 占27%	>6%的样品占 43.25%	[59]
	98	2.08%–8.11%	>0.12%	Ⅱ ₁ , Ⅱ ₂ 型	0.35%–0.78%	>120样品占 67.67%	>2%的样品占 75.76%	[24,60]
上三叠统尕 勒得寺组	43	>1%的样品占 76.9%	<0.05%	以Ⅲ, Ⅱ ₁ 型 为主	1.1%–1.77%	4.5–63.6, 平均21.5	平均0.35	[56]
	15	>1%的样品占 37.50%	未测	以Ⅱ ₂ , Ⅲ型 为主	0.81%–1.04%	>150样品占 42%	>6%的样品占 12.5%	[59]

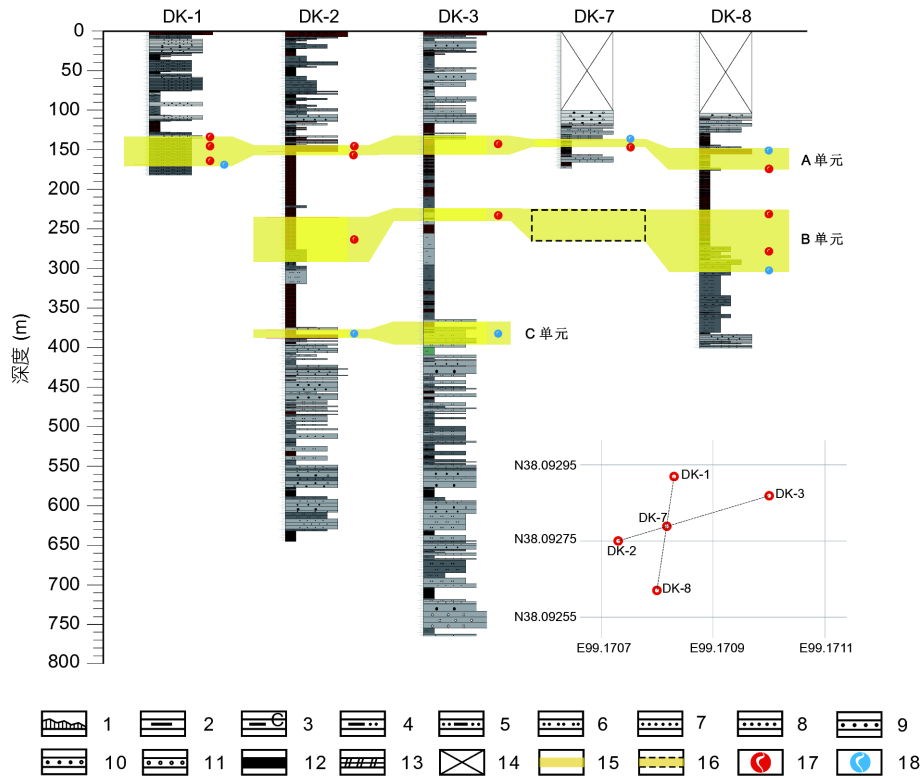


图 1 (网络版彩图)祁连山冻土区含天然气水合物钻孔间水合物分布图. 1: 第四纪沉积物; 2: 泥岩; 3: 炭质泥岩; 4: 粉砂质泥岩; 5: 泥质粉砂岩; 6: 粉砂岩; 7: 细砂岩; 8: 中砂岩; 9: 粗砂岩; 10: 含砾粗砂岩; 11: 细砾岩; 12: 煤; 13: 油页岩; 14: 含天然气水合物层; 15: 含天然气水合物晶体; 16: 见天然气水合物异常

Figure 1 (Color online) Gas hydrate distribution between gas hydrate-bearing drill holes in the Qilian Mountain permafrost. 1: Quaternary sediments; 2: mudstone; 3: carbonaceous mudstone; 4: silty mudstone; 5: muddy siltstone; 6: siltstone; 7: fine sandstone; 8: middle sandstone; 9: coarse sandstone; 10: pebbly coarse sandstone; 11: fine conglomerate; 12: coal; 13: oil shale; 14: gas hydrate-bearing layer; 15: gas hydrate crystals; 16: gas hydrate anomaly.

岩性组成的35.8%, 29.48%和18.31%; B单元最大深度区间为225.01–304.28 m, 岩性由粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩和油页岩组成, 且主要以油页岩、泥岩为主, 分别占该单元岩性组成的56.08%和15.37%; C单元最大深度区间为367.7–396.0 m, 岩性由中砂岩、细砂岩、粉砂岩和油页岩组成, 且主要以油页岩和粉砂岩为主, 分别占该单元岩性组成的44.55%和24.55%(表2). 由此可见, 天然气水合物储集层均以粉砂岩、油页岩和泥岩为主, 均为致密型岩石类型, 经测定粉砂岩孔隙度介于2.2%–5.1%, 平均3.45%, 气体渗透率介于 0.043×10^{-3} – $0.099 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均 $0.068 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ [62]. 由于受多期构造运动和断层系统的影响, 岩石裂缝较为发育. 现场观测结果显示, 裂隙

发育层段与水合物储集层段具有较好的一致性, 表明裂缝系统对水合物分布具有重要的控制作用 [18]. 陈利敏等人 [64] 通过对钻井岩心观察与统计分析, 从线密度、倾角、充填程度等方面对裂隙的特征进行研究, 表明, 裂隙型储层所占比例达62.5%, 厚度占总厚度的45.78%, 孔隙型储层所占比例为12.5%, 厚度占总厚度的1.56%, 同时指出裂隙以未充填、低角度裂隙为主, 中角度次之. 李承峰等人 [65] 采用微米级计算机断层扫描技术(微CT)对岩心内部的微观孔隙和裂隙进行了形态表征和定量分析表明, 泥岩样品中的裂隙较为丰富且连通性较好, 裂隙宽度多为100–200 μm , 而砂岩样品中孔隙分布较为分散且少有显著的连通喉道, 数量上以体积小于0.1 mm^3 的微孔隙为主, 并通过三维图像

表 2 祁连山冻土区天然气水合物储层特征
Table 2 Gas hydrate reservoir characteristics in the Qilian Mountain permafrost

储集单元	最大深度区间 (m)	岩性组成 (%)
A	133.0–175.01	
B	225.01–304.28	
C	367.7–396.0	

体系统计法估算了孔隙和裂隙相对整个岩心的体积含量, 其中砂岩样品的孔(裂)隙度为2.36%–2.89%, 泥岩样品的孔(裂)隙度为1.04%–3.64%。

鉴于以上储层特征, 结合Nelson^[66]提出的天然裂缝性储层的分类系统, 认为祁连山冻土区水合物储层主要分为两类, 一类是裂缝提供主要的孔隙度和渗透率; 另一类是基岩具有低孔低渗特点, 裂缝提供气体渗透性。目前, 在煤层、页岩气等非常规储层中, 天然裂缝是影响产能的主要因素。因此, 下一步开展不同规模的天然裂缝识别、预测和特征描述研究, 将对今后水合物这种裂缝性储层开发、模拟以及产能评价十分重要。

3.4 断裂构造特征

断裂构造以及封堵性, 是影响烃类气体由气源岩向储层运移、聚集的重要通道条件, 是构成天然气水合物成藏系统中流体运移体系的重要组成部分。在祁连山冻土区, 从区域构造演化与天然气水合物成矿关系上看, 早古生代缝合带发育长期活动性断裂, 如大通山北缘断裂带控制着侏罗纪沉积边界, 靠近主干断裂越近, 从构造上越有利于气体从深部运移至浅部, 对水合物形成越有利, 其中燕山期形成的逆冲推覆断裂, 具持续压性特征, 对运移来的气体可起着良好封堵作用, 对形成天然气水合物有利^[42]。徐明才等人^[67]综合地震剖面、测井和地质资料进行综合解释认为, 水合物分布与深部断裂破碎带有关。卢振权等人^[62]通过对比分析钻井不同深度岩心中气体组分和甲烷同位素变化特征与天然气水合物及异常现象产出层段、断层或破碎带分布之间的空间关系, 认为断裂对烃类气体具有明显的通道运移作用, 提出下部断层或破碎带是烃类主要运移通道, 中上部断层或破碎带可成为水合物赋存空间。于常青等人^[68,69]依据三维地震探测结果发现, 天然气水合物储层在地震剖面上呈现低速、中低频、中弱振幅的特征, 在天然气水合物异常区域断裂发育, 在断裂破碎带周围, 由于岩石破裂, 岩石空间裂隙增大, 地震剖面上显示为中等偏弱的不连续反射、频率偏低的特征, 指出受区域性断裂影响, 研究区裂隙、裂缝发育, 这些构造控制着研究区天然气水合物的分布, 其分布深度范围为180–400 m, 推测断裂发育区存在天然气水合物的可能性更大, 同时也是其主要赋存空间。

3.5 孔隙水特征

在天然气水合物系统中, 孔隙水盐度对水合物相平衡有着重要影响, 如孔隙水中的盐度增加, 会使其结晶温度降低^[70], 同时, 天然气水合物形成时, 大量的水分子被用于形成天然气水合物晶格, 受水合物排盐效应的影响, Cl^- 等盐类离子将被大量排斥^[4], 从而引起沉积物中孔隙流体盐度增加。因此, 在海域和极地冻土区非成岩水合物储层调查研究中, 沉积物中孔隙水氯度或盐度异常变化已被作为天然气水合物存在的有效识别标志之一^[71–74]。在祁连山冻土区, 水合物主要形成于细粒岩石的裂隙和粗粒岩石的孔隙之中, 岩心裂隙水孔隙水盐度的变化除与水合物排盐效应有关外, 还与地层水来源密切相关。王平康等人^[75]测定DK-8井岩心裂隙孔隙水盐度结果显示, 含水合物岩心的裂隙孔隙水盐度为7.5‰–8.0‰, 非含水合物岩心的裂隙孔隙水盐度基本小于1‰。为了查明水合物钻探区岩石中裂隙孔隙水较高的盐度是否与地层水补给、径流和排泄条件有关, 进一步开展了含水合物岩心裂隙水孔隙水的氢、氧同位素测试分析, 结果显示, δD 值平均为–53‰, $\delta^{18}\text{O}$ 值平均为–7.9‰, 具有明显的大气降水来源。同时, 由于非含水合物层裂隙水盐度很低, 排除了围岩对地层水矿化程度的影响。据此, 认为高的盐度值对含水合物层具有一定的指示作用。同时指出, 含水合物层受后期沉积压实作用影响较小, 裂隙孔隙流体的运移受限, 当含水合物的岩心被提至地面后, 由于压力变小, 具有相对较高盐度的裂隙孔隙水便会沿裂隙或孔隙处渗出, 随着赋存于岩心中的水合物会缓慢分解生成淡水, 进而使裂隙孔隙水的盐度逐渐降低, 可见含水合物岩心裂隙孔隙水盐度值随时间将会发生由高到低的变化。

4 调查技术研究进展

4.1 现场识别技术

在祁连山冻土区天然气水合物研究过程中, 钻探取样和含天然气水合物岩心研究是现场识别和推断天然气水合物是否存在最直接有效的方法。由于赋存于岩石裂隙或孔隙中的天然气水合物呈亚稳定状态, 其形成和/或分解依赖于压力和温度、气体组成、水的盐度和多孔介质的特性^[6]。在钻探取样过程中, 为了抑

制或降低因压力降低、温度升高引起水合物分解的速率, 采用大直径钻具、低温泥浆(0–2°C)、绳索打捞不提钻快速取心等技术^[76], 确保了获得了肉眼可见的高饱和度水合物样品, 但对于低饱和度水合物样品却不易被观察到. 在水合物分解成甲烷等烃类气体和水时, 会伴生一系列物理、化学过程, 例如, 水合物分解吸热效应、水合物排盐效应以及甲烷厌氧氧化和硫酸盐还原过程等, 王平康等人^[75]据此特性总结出一套天然气水合物现场识别技术, 主要包括水合物肉眼观测技术、孔口气涌观测技术、岩心红外测温技术、岩心裂隙孔隙水盐度测定技术、岩心气体解析与组分测定技术、岩心次生构造与伴生矿物鉴别技术等, 为研究区水合物产状识别和分布特征研究提供了行之有效研究方法. 近年来, 引入了气测录井技术, 通过优化方法, 克服了高寒缺氧等不利环境因素的影响, 取得了良好的应用效果, 建立了天然气水合物气测录井实时预判方法^[77], 进一步提高了现场识别水合物的准确度.

4.2 地球物理调查技术

地球物理调查技术在海域天然气水合物资源调查与评价中发挥了重要作用, 特别是地震学的似海底反射层(BSR)、电磁学的高阻异常已经成为判断海域水合物存在与否、成藏规模等方面的重要依据. 由于海域水合物储层主要是未固结松散沉积物, 产状平缓、孔隙度大、饱和度相对较高, 而祁连山冻土区水合物储层主要为中生界砂岩、泥岩, 成岩性好, 产状陡、孔隙度小、饱和度低, 造成常规水合物地球物理调查技术难以直接应用于祁连山冻土区的水合物调查研究中. 因此, 地球物理调查技术方法的有效性研究成为一个重要攻关方向.

近年来, 地球物理调查技术方法有效性实验研究主要是围绕探测水合物储层响应特征和查明影响水合物成矿的地质条件两大主线进行的^[78]. 攻克了高原复杂地震地质条件、高速冻土层屏蔽效应、可控震源谐波干扰、低信噪比等技术难题, 提出了可控震源激发、冬季施工、小道间距、长排列、高覆盖次数、中高频检波器点组合、全通频带接收的高分辨率地震数据采集技术和小参数多方法去噪的高保真地震数据处理技术, 取得了高质量的反射地震资料^[79–81]. 初步确定了地震反射波“高频”和“弱振幅”两大特征为祁连山冻土区水合物储层的地震学识别标志^[82–84]. 运用电磁探

测技术, 确定了水平展布的中高阻异常、水平中高阻异常带与地层产生的斜向低阻带存在的相交现象、中高阻异常带出现在气源通道(断裂)附近等三大特征可以作为识别水合物储层的电学标志^[84,85]. 首次应用基于伪随机编码技术的低频探地雷达系统在祁连山冻土区实现探测深度达到200 m以上, 在水合物储层发现明显的雷达波反射信号, 反射信号的“高频、强振幅”特征可以作为天然气水合物储层的电磁学识别标志, 并总结出了f-k二维滤波抑制地表杂波、Hilbert-Huang变换方法处理非稳态信号、加强相干法提高空间分辨率等低频探地雷达探测水合物的数据处理方法^[86,87]. 地面核磁共振(SNMR)试验研究表明, 核磁共振信号对冻土层发育区表现出含水率较低、纵向弛豫时间常数T1*较小和渗透系数变化不明显等特征, 可作为划分冻土层与非冻土层的标志^[88]. 在地球物理测井方面, 郭星旺等人^[28]、林振洲等人^[29]、侯颀等人^[89]、覃瑞东等人^[90]分析了水合物测井响应特征, 从不同角度提出了测井识别方法和建立了估算模型. 总体上看, 水合物储层具有高电阻率、低声波时差、低自然伽玛、低密度等特征, 但因受储层裂隙发育、水合物饱和度低等因素影响, 测井准确识别水合物储层难度仍较大. 秦臻等人^[91]利用VB语言开发了包括测井数据预处理技术、测井响应特征与岩性分析、岩性与储层识别技术以及储层参数计算的测井评价系统, 实现水合物储层解释符合率达到85%以上, 取得了较好的应用效果.

4.3 地球化学调查技术

地球化学调查技术是海域水合物调查的重要手段之一^[92–94], 受厚层冻土影响, 在以往极地冻土区地球化学调查技术仅作为一种辅助手段, 主要针对钻井岩心进行. 基于烃类微渗漏理论的土壤(岩石)烃类测量法, 着重于研究水合物化学组分的烃类异常和成因指标的检测^[95–98]. 在祁连山冻土区取得水合物发现后, 杨志斌等人^[99–101]、张富贵等人^[102,103]、周亚龙等人^[104,105]开展了浅表层地球化学调查技术试验性研究, 发现在水合物区表层顶空气轻烃、土壤酸解烃、碳酸盐以及微量元素等指标表现出明显的异常. 进一步研究认为, 土壤酸解烃、顶空气、稀有气体、土壤热释烃、甲烷碳同位素等可以作为天然气水合物矿藏的直接探测指标, 尤其酸解烃和顶空气C₂⁺比值的地球化学异常与水合物矿藏对应关系非常好, 并能有效地与浅层气藏进

行区分^[106]. 除此之外, 微生物地球化学调查技术也进行了探索性试验研究^[107,108], 指出微生物群落对天然气水合物的响应主要体现在微生物群落结构的改变, 尤其是烃氧化微生物丰度对水合物有一定的指示作用. 目前, 综合浅表地球化学各指标的异常分布情况, 在祁连山木里、哈拉湖等地区圈定出了不同级别尺度的水合物找矿远景区和钻探靶区^[109-111], 但其有效性及可靠性还有待钻探进一步验证.

5 试采试验研究

开展天然气水合物试采试验研究是科学评估从试采到开发过程技术可行性、经济合理性和环境安全性的必经途径. 由于在陆域冻土区开展试采试验相比在海域具有施工难度小、成本低和基础设施较全等优势, 国际上, 在俄罗斯西伯利亚盆地的麦索雅哈气田、加拿大马更些三角洲和美国阿拉斯加北坡等极地冻土区开展了不同时间尺度的水合物试采或试验. 目前, 公认的开采方法主要包括降压法、加热法、注入抑制剂法和二氧化碳置换法. 其中, 降压法分别应用于麦索雅哈气藏上方水合物的开采^[6,112]和2007–2008年加拿大Mallik试采试验^[113], 加热法应用于2002年Mallik试采试验^[114], 二氧化碳置换法应用于2012年美国Alaska试采试验^[115]. 从全球以往陆域水合物试采实践来看(表3^[6,9,112-114,116]), 俄罗斯麦索雅哈气田并非专门针对

天然气水合物开展的试验、试生产及开发过程, 由于浅部水合物藏与中深部天然气藏在空间上的共存关系, 通过开采水合物层下伏的天然气层, 使得储层压力降低, 导致水合物层加速分解并释放出甲烷气体, 实现了天然气与水合物的综合性开发. 在加拿大马更些三角洲、美国阿拉斯加北坡专门针对未固结成岩的砂砾岩或砂岩开展了试采, 但由于试采效率低或因出砂严重均被迫终止了试验. 中国地质调查局先后于2011和2016年在祁连山冻土区组织实施了两次试采试验, 初步掌握了试采的关键技术^[117,118].

2011年9–10月, 运用降压法和加热法对祁连山冻土区天然气水合物进行了试采. 此次试采采用单井直井方案, 通过钻探取样、异常标志识别和地球物理测井技术综合确定DK-8试采井水合物层位后, 安装开采套管(花管)并固井止水, 然后在井底预定位置安装高压潜水泵, 对井深146–305 m间的水合物进行试采. 试采过程中, 启动孔底潜水泵进行排水, 随着水位的下降, 水合物层的压力降低, 水合物发生分解释放出甲烷气体(图2(a))并在地表进行回收. 降压开采结束后, 采用电磁加热、太阳能加热水蒸气加热三种加热方法进行试采(图2(b)). 从降压法试采的产气量及井底压力变化关系来看(图3), 压降幅度与瞬时产气量存在明显的正相关和滞后效应. 在每一阶段降压过程中, 随着快速降压, 产气量稍候会快速增大达到产气峰值, 当压力趋稳时, 产气量呈线性逐渐变小, 可见水合物在储层

表 3 全球陆域冻土区天然气水合物试采情况对比表

Table 3 Comparison of gas hydrate production tests in the global permafrost

试采地点	试采时间	储层特征					试采方法	试采井型	试采时长	总产气量 (m ³)	参考文献
		岩性	厚度 (m)	孔隙度 (%)	渗透率 (mD)	饱和度 (%)					
俄罗斯麦索雅哈	1971	砂质粘土岩	84	16–38	10–1000	29–50	降压法+注入抑制剂法	开发井	断续生产40余年	截止2011年底, 5.4×10 ⁹	[6,112]
	2002						加热法	单直井	123.65 h	516	
国外 加拿大马更些三角洲	2007	砂砾岩(未成岩)	126	40	100–1000	50–90	降压法+加热法	单直井	12.5 h	830	[113]
	2008						降压法	单直井	139 h	1.3×10 ⁴	
美国阿拉斯加北坡	2012	砂岩(未成岩)	72	40	1000	70	CO ₂ 置换法+降压法	单直井	30 d	2.4×10 ⁴	[114]
中国 青海祁连山	2011	细砂岩、粉砂岩	263	2.2–5.1	0.043–0.099	5.1	降压法+加热法	单直井	101 h	95	[9,116]
	2016						降压法	水平井(3井对接)	23 d	1078.4	

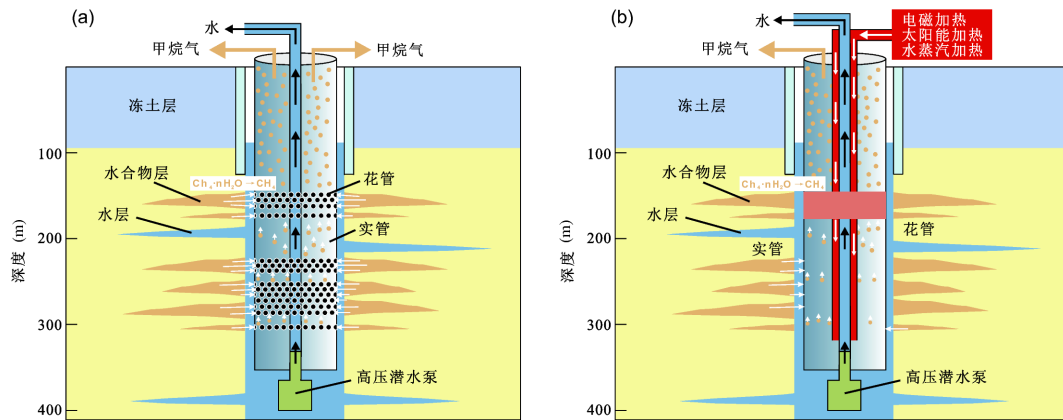


图 2 (网络版彩图)祁连山冻土区单直井天然气水合物试采原理. (a) 降压法; (b) 加热法

Figure 2 (Color online) Gas hydrate production tests principle in single well in the Qilian Mountain permafrost. (a) Depressurization method; (b) heating method.

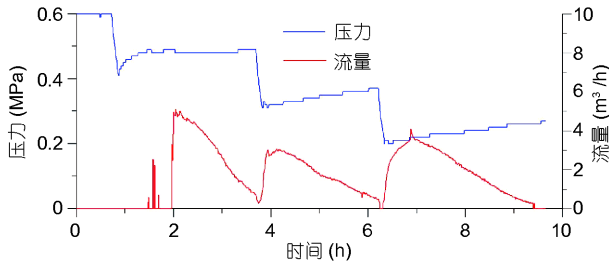


图 3 (网络版彩图)祁连山冻土区降压法试采的产气量及井底压力曲线图

Figure 3 (Color online) Gas production and bottom hole pressure curves by depressurization method in the Qilian Mountain permafrost.

中的稳定性明显受控于压力的变化, 并且其“自保护效应”延缓了解析产气过程. 辅助的加热法, 虽然在开始时瞬时产气量有所增加, 但受冻土及岩层导热性影响热量消耗较大, 储层持续升温现象不明显, 未能持续增产. 利用水合物藏开采模拟软件(TOUGH+HYDRATE)分析在不同饱和度下分别采用降压法和加热法试采的效能, 结果显示, 大的压差导致下部水合物层分解前缘比上部水合物层移动的快, 同时指出加热法主要会加速井壁周围气体运移, 导致轻微的产气率增长, 对于低饱和度的水合物储层的产气效果不明显^[119], 这与实际结果基本相符. 此次试采断续进行了 9 d, 累计 101 h, 产气量为 95 m³, 虽然持续产气时间短、产气量小, 但这是我国首次开展的试采试验, 也是继俄罗斯麦索雅哈气田和加拿大马更些冻土区后的第三个陆上试采地, 科学意义重大. 此次试采证实了降压试采工艺、控制监测等关键技术成岩储层中应用

的可行性, 同时极大地带动了我国陆域试采模拟实验技术的快速发展^[120,121], 也促使针对不同试采井型的模拟实验成为一个新的研究方向^[122-127].

2016年10-11月, 创新运用“山”字形水平对接井对祁连山冻土区的天然气水合物进行再次试采. 试采原理是将三口井在地下水合物层相互连通, 以增加水合物储层暴露面积, 使得降压作用影响到更多的区域, 从而增加水合物的开采效率. 试采井由1口主井(SK-0)和水平距离达629.7 m的2口分支井(SK-1和SK-2)组成(图4). 试采目标层为地下350 m处的水合物富集层, 利用定向钻探技术使3口井在水合物富集层连通, 并在每口井之间下入水平套管, 为水合物分解处的甲烷气体进入采集主井提供通道. 在SK-0井实施排水降压作业, 分两个阶段进行试采, 累计生产 23 d, 总产气量 1078.4 m³, 最高日产量 136.55 m³. 从试采产气量图来看(图5), 第一阶段当储层压力平衡被打破后, 产气量快速增大, 随着持续排采, 产气量有逐渐减小的趋势; 当静置 6 d 后开始第二阶段降压开采时, 产气量随压降影响较小, 逐渐趋于平衡, 这可能与试采影响半径有限, 井筒周边的水合物在“自保护效应”下其分解程度与压降影响达到了一种平衡. 此次试采探索性地对产出水和产出气变化进行了监测, 从两者的变化关系来看, 两个阶段日产水量基本上保持稳定, 第一阶段试采产出气主要以水合物分解产生的甲烷为主, 第二阶段试采产出气则主要以游离态或溶解态的甲烷为主, 从而造成了产气量与产水量比值的降低.

从青海祁连山两次水合物试采试验实践来看, 虽

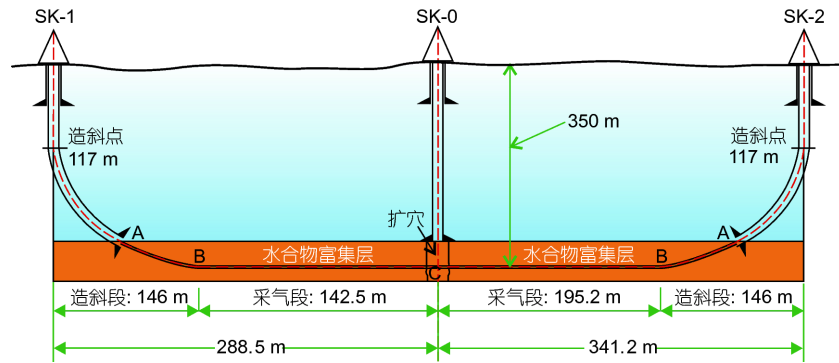


图 4 (网络版彩图)祁连山冻土区“山字型”水平对接井结构图

Figure 4 (Color online) Horizontal buttressing well structure for gas hydrate production tests in the Qilian Mountain permafrost.

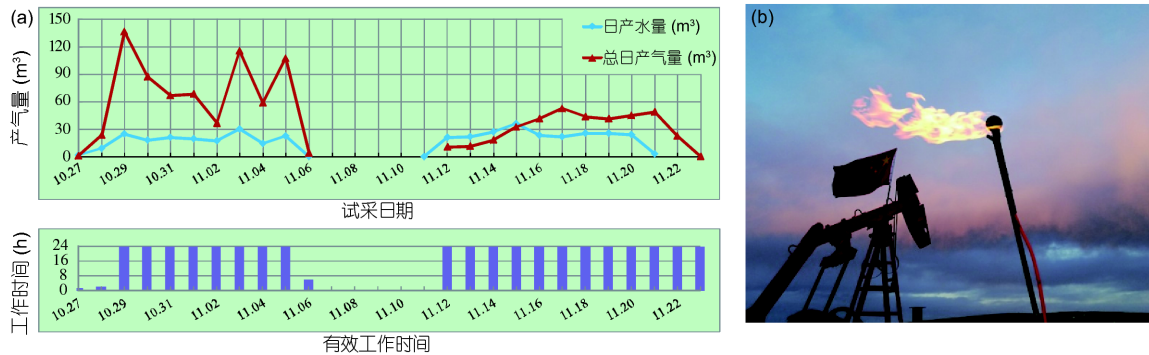


图 5 (网络版彩图)祁连山冻土区水平对接井天然气水合物试采产气量图(a)和试气点火照片(b)

Figure 5 (Color online) Gas production chart using horizontal buttressing well for gas hydrate production tests (a) and test gas ignition photo (b) in the Qilian Mountain permafrost.

然通过创新试采工艺, 试采产量有明显提高, 但与国外冻土区试采试验相比, 祁连山水合物储层具有的特低孔、特低渗以及低饱和度特点是导致影响产气效率低下的最直接原因(表3)。因此, 水平井试采工艺结合储层压裂改造技术将是未来提高产气量的重要方法之一。

6 环境效应研究

有关天然气水合物稳态变化及环境效应问题已成为国际上天然气水合物资源环境研究的一个重要内容^[128-130]。在祁连山冻土区, 天然气水合物在冻土层下的稳定性以及所引起的地质环境效应问题也日益被关注。Zhu等人^[5]、卢振权等人^[14]、王平康等人^[18,75]报道了在祁连山冻土区天然气水合物储层中存在一种蜂窝状构造和伴生“裂隙型”黄铁矿和方解石等矿物, 认为是天然气水合物失稳后导致储层物理/化学过程发生

变化形成的产物, 并将其作为一个天然气水合物存在或曾经存在的证据。Wang等人^[31]通过开展含天然气水合物岩心“裂隙型”黄铁矿空间分布、矿物形态学与硫同位素地球化学研究, 进一步揭示了该区天然气水合物稳定带底界上升顶界下降的迁移变化过程, 并依据“裂隙型”黄铁矿顶底界的分布, 结合模拟计算推测该区冻土层厚度曾减薄10余米。2013年, 天然气水合物钻探试验井DK-10井在52.9 m处钻遇高压浅层天然气, 出现强烈气喷现象, 点燃后火焰高达3-4 m, 持续72 h 焰高无减小趋势, 估算气体流量达4800 m³/d, 最终因无法继续钻进被迫封孔。就此次气喷事件, Wang等人^[44]通过对浅层天然气组分和甲烷碳同位素分析, 并结合冻土层含冰饱和度与甲烷气体渗透率间的定量变化关系, 认为钻遇的这种高压浅层天然气主要来源于天然气水合物稳定带顶部处的天然气水合物的分解, 经断裂系统向上溢散后被渗透率极低的含冰冻土层封盖或圈闭于浅部地层之中。自晚更新世末期以来受冻

土退化影响, 祁连山冻土区天然气水合物-油气系统是动态变化的, 目前已演变成一个经由断裂系统连接的深部烃类储层-中部水合物储层-浅部天然气藏系统(图6). 以上地质现象和钻探事实均表明祁连山冻土区天然气水合物稳定性已经发生过局部变化, 并且还正处于变化之中.

本世纪以来, 气候变暖已经引起青藏高原冻土层的减薄和冻融层的加厚^[131], 并且数值模拟显示青藏高原气温会持续增高进而会导致大范围的冻土退化^[132,133], 因此, 开展长时间尺度的气候变暖对于冻土区天然气水合物稳定性影响的过程及程度研究将显得尤为重要, 已成为祁连山冻土区环境效应研究的一个重要方面. 同时, 祁连山水合物发现区具有丰富多样的高寒冻土生态类型^[134], 在冻融层和永冻层中有着不同的甲烷代谢微生物群落结构^[135], 其对甲烷所参与的碳循环过程的影响以及对于温室气体的释放和调节作用的研究也不可忽视. 目前, 中国地质调查局已经在祁连山木里地区初步建成我国首个冻土区天然气水合物长期观测基地, 具备开展水合物储层、冻土、生态、气象、岩土工程等5类近30项关键参数监测的能力^[136], 将为冻土区环境效应评价研究提供有力支撑.

7 结论

(1) 祁连山冻土区是我国陆域天然气水合物调查研究的重点地区之一, 也是我国目前在陆域冻土区唯一一处获得天然气水合物实物样品的地区, 成为陆域

天然气水合物调查技术的试验基地, 初步形成了从点上钻探调查技术到面上地球物理-地球化学调查综合性的技术方法体系.

(2) 通过开展天然气水合物地质特征和成藏系统研究, 查明了影响天然气水合物成藏的冻土、气源、储层及构造等地质因素特征, 尤其是对气源和构造条件的深入分析, 进一步丰富了水合物含油气系统的内涵. 鉴于浅部天然气水合物的存在对深部油气藏有着非常好的指示作用, 中侏罗统与上三叠统烃(气)源岩将会成为今后该地区寻找常规油气的主要勘探目标.

(3) 在祁连山冻土区组织实施的两次天然气水合物试采试验, 因受水合物储层条件影响, 虽然产气效率低下, 但证实了降压试采工艺、控制监测等关键技术 在成岩储层中应用的可行性, 提出水平井试采工艺结合储层压裂改造技术将是未来提高产气量重要的科技攻关方向之一, 同时极大地带动了我国陆域试采模拟实验技术的快速发展.

(4) 环境效应研究结果显示, 祁连山冻土区天然气水合物稳定性已经发生过局部变化, 并且还正处于变化之中, 浅层天然气可能是因冻土退化引起水合物稳态变化局部发生分解的产物, 环境影响逐步显现. 但是, 在时间尺度上, 气候变暖对于天然气水合物稳定性影响的过程及程度仍缺乏系统的认识, 进而无法准确预测和研判未来水合物储层的演化趋势. 建议下一步充分发挥祁连山长观基地优势, 加强科研力量融合, 构建“产学研用”科技创新体系, 开展多学科、多领域的环境调查评价研究.

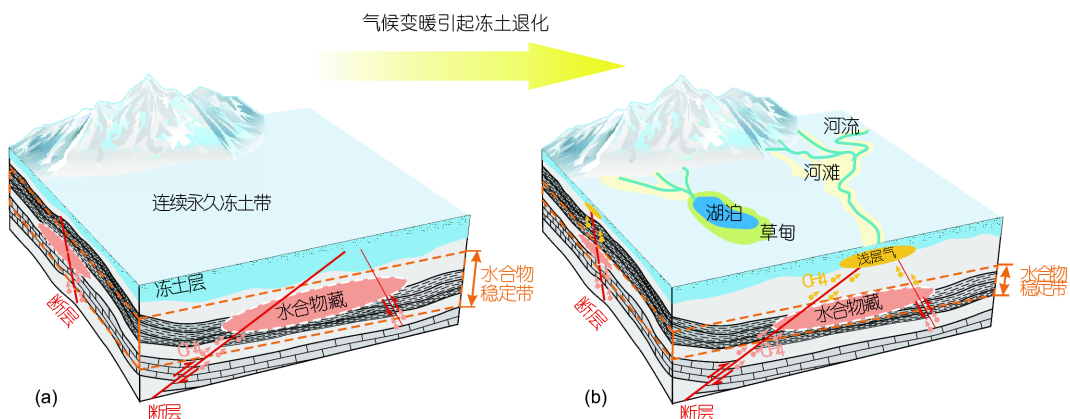


图6 (网络版彩图)气候变暖引起冻土区天然气水合物系统的演变^[44]

Figure 6 (Color online) Evolution of gas hydrate system due to climate warming in permafrost [44].

参考文献

- 1 Kvenvolden K A. Gas hydrates-geological perspective and global change. *Rev Geophys*, 1993, 31: 173–187
- 2 Sloan E D. *Clathrate Hydrate of Natural Gases*. 2nd ed. New York: Marcel Dekker Inc., 1998. 1–628
- 3 Collett T S. Permafrost—Associated Gas Hydrate. In: Max M D, ed. *Natural Gas Hydrate in Oceanic and Permafrost Environments*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000, 43–60
- 4 Kvenvolden K A, Lorenson T D. The global occurrence of natural gas hydrate. *Ame Geophys Union*, 2001, 124: 3–18
- 5 Zhu Y, Zhang Y, Wen H, et al. Gas hydrates in the qilian mountain permafrost, Qinghai, northwest China. *Acta Geologica Sin-Engl Ed*, 2010, 84: 1–10
- 6 Makogon Y F, Holditch S A, Makogon T Y. Natural gas-hydrates—A potential energy source for the 21st Century. *J Pet Sci Eng*, 2007, 56: 14–31
- 7 Li J, Ye J, Qin X, et al. The first offshore natural gas hydrate production test in South China Sea. *ChinaGeol*, 2018, 1: 5–16
- 8 Zhou Y W, Guo D X, Qiu G Q, et al. *China Permafrost* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2000. 1–450 [周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土. 北京: 科学出版社, 2000. 1–450]
- 9 Zhu Y H. Land field gas hydrate resources exploration and trial production obtains a series of achievements (in Chinese). *News Lett China Geolog Survey*, 2017, 3: 1–5 [祝有海. 陆域天然气水合物资源勘查与试采取得系列成果. 中国地质调查成果快讯, 2017, 3: 1–5]
- 10 Zhang Y Q. Successful implementation of horizontal wells trial production engineering of gas hydrate in Qilian Mountain (in Chinese). *News Lett China Geological Survey*, 2017, 3: 47–50 [张永勤. 成功实施祁连山天然气水合物水平对接井试采工程. 中国地质调查成果快讯, 2017, 3: 47–50]
- 11 Zhu Y H, Liu Y L, Zhang Y Q. Formation conditions of gas hydrates in permafrost of the Qilian Mountains, Northwest China (in Chinese). *Geol Bull China*, 2006, 25: 58–63 [祝有海, 刘亚玲, 张永勤. 祁连山多年冻土区天然气水合物的形成条件. 地质通报, 2006, 25: 58–63]
- 12 Pan Y L, Tian G F, Luan A H, et al. Application of well logging in frozen earth researches in Muri Coalfield, Qinghai (in Chinese). *Coal Geol China*, 2008, 20: 7–9 [潘语录, 田贵发, 栾安辉, 等. 测井方法在青海木里煤田冻土研究中的应用. 中国煤炭地质, 2008, 20: 7–9]
- 13 Hu D G, Zhang Y L, Qi B S, et al. New knowledge obtained from geological survey of gas hydrate in permafrost of Northeast China (in Chinese). *News Lett China Geolog Survey*, 2017, 3: 33–36 [胡道功, 张耀玲, 戚帮申, 等. 祁连山冻土区天然气水合物成藏机制研究带动调查新发现. 中国地质调查成果快讯, 2017, 3: 33–36]
- 14 Lu Z Q, Zhu Y H, Zhang Y Q, et al. Basic geological characteristics of gas hydrates in Qilian Mountain permafrost area, Qinghai Province (in Chinese). *Mineral Deposits*, 2010, 29: 182–191 [卢振权, 祝有海, 张永勤, 等. 青海省祁连山冻土区天然气水合物基本地质特征. 矿床地质, 2010, 29: 182–191]
- 15 Lu Z Q, Li Y H, Wang W C, et al. Study on the accumulation pattern for permafrost-associated gas hydrate in Sanlutian of Muli, Qinghai (in Chinese). *Geoscience*, 2015, 29: 1014–1023 [卢振权, 李永红, 王伟超, 等. 青海木里三露天冻土天然气水合物成藏模式研究. 现代地质, 2010, 29: 1014–1023]
- 16 Li B, Sun Y, Guo W, et al. The mechanism and verification analysis of permafrost-associated gas hydrate formation in the Qilian Mountain, Northwest China. *Mar PetGeol*, 2017, 86: 787–797
- 17 Lu Z Q, Zhu Y H, Zhang Y Q, et al. Major evidence for gas hydrate existence in the Qilian permafrost, Qinghai (in Chinese). *Geoscience*, 2010, 24: 329–336 [卢振权, 祝有海, 张永勤, 等. 青海省祁连山冻土区天然气水合物存在的主要证据. 现代地质, 2010, 24: 329–336]
- 18 Wang P K, Zhu Y H, Lu Z Q, et al. Gas hydrate in the Qilian Mountain permafrost and its distribution characteristics (in Chinese). *Geol Bull China*, 2011, 30: 1839–1850 [王平康, 祝有海, 卢振权, 等. 祁连山冻土区天然气水合物岩性和分布特征. 地质通报, 2011, 30: 1839–1850]
- 19 Boswell R, Moridis G, Reagan M, et al. Gas hydrate accumulation types and their application to numerical simulation. In: *Proceedings of the Seventh International Conference on Gas Hydrate*. Edinburgh, 2011
- 20 Koh C A, Sum A K, Sloan E D. State of the art: Natural gas hydrate as a natural resource. *J Nat Gas Sci Eng*, 2012, 8: 132–138
- 21 Meng Q G, Liu C L, He X L, et al. Laser-Raman spectroscopy characteristics of natural gas hydrates from Qilian Mountain permafrost (in Chinese). *Geol Bull China*, 2011, 30: 1863–1867 [孟庆国, 刘昌岭, 贺行良, 等. 祁连山冻土区天然气水合物激光拉曼光谱特征. 地质通报, 2011, 30: 1863–1867]
- 22 Huang X, Zhu Y H, Wang P K, et al. Hydrocarbon gas composition and origin of core gas from the gas hydrate reservoir in Qilian Mountain permafrost (in Chinese). *Geol Bull China*, 2011, 30: 1851–1856 [黄霞, 祝有海, 王平康, 等. 祁连山冻土区天然气水合物烃类气体组分的特征和成因. 地质通报, 2011, 30: 1851–1856]

- 23 Liu C L, He X L, Meng Q G, et al. Carbon and hydrogen isotopic compositions characteristics of the released gas from natural gas hydrates in the Qilian Mountain permafrost (in Chinese). *Rock Mineral Analysis*, 2012, 31: 489–494 [刘昌岭, 贺行良, 孟庆国, 等. 祁连山冻土区天然气水合物分解气碳氢同位素组成特征. *岩矿测试*, 2012, 31: 489–494]
- 24 Lu Z, Zhu Y, Liu H, et al. Gas source for gas hydrate and its significance in the Qilian Mountain permafrost, Qinghai. *Mar PetGeol*, 2013, 43: 341–348
- 25 Meng Q G, Liu C L, Li C F, et al. Raman spectroscopic characteristics of natural gas hydrates from Juhugeng drilling area, Qinghai (in Chinese). *Geoscience*, 2015, 29: 1180–1188 [孟庆国, 刘昌岭, 李承峰, 等. 青海聚乎更钻探区天然气水合物拉曼光谱特征. *现代地质*, 2015, 29: 1180–1188]
- 26 Liu C, Meng Q, He X, et al. Comparison of the characteristics for natural gas hydrate recovered from marine and terrestrial areas in China. *J GeoChem Explor*, 2015, 152: 67–74
- 27 Lu Z Q, Zhu Y H, Zhang Y Q, et al. Estimation method of gas hydrate resource in the Qilian Mountain permafrost area, Qinghai, China—a case of the drilling area (in Chinese). *Geol Bull China*, 2010, 29: 1310–1318 [卢振权, 祝有海, 张永勤, 等. 青海祁连山冻土区天然气水合物资源量的估算方法——以钻探区为例. *地质通报*, 2010, 29: 1310–1318]
- 28 Guo X W, Zhu Y H. Well logging characteristics and evaluation of hydrates in Qilian Mountain permafrost (in Chinese). *Geol Bull China*, 2011, 30: 1868–1873 [郭星旺, 祝有海. 祁连山冻土区DK-1钻孔天然气水合物测井响应特征和评价. *地质通报*, 2011, 30: 1868–1873]
- 29 Lin Z Z, Li Y, Gao W L, et al. Physical character analysis of logging data for natural gas hydrate in Qilian Mountain permafrost area (in Chinese). *Geophys Geochem Explor*, 2013, 37: 834–837 [林振洲, 李洋, 高文利, 等. 祁连山冻土区天然气水合物层位测井物性分析. *物探与化探*, 2013, 37: 834–837]
- 30 Lin Z Z, Kong G S, Pan H P, et al. Parameters calculation for the gas hydrate reservoir in Muli area (in Chinese). *Geophys Geochem Explor*, 2017, 41: 1099–1104 [林振洲, 孔广胜, 潘和平, 等. 木里地区天然气水合物储层参数计算. *物探与化探*, 2017, 41: 1099–1104]
- 31 Wang P, Zhu Y, Lu Z, et al. Gas hydrate stability zone migration occurred in the Qilian mountain permafrost, Qinghai, Northwest China: Evidences from pyrite morphology and pyrite sulfur isotope. *Cold Regions Sci Tech*, 2014, 98: 8–17
- 32 Wang P, Huang X, Pang S, et al. Geochemical dynamics of the gas hydrate system in the Qilian Mountain Permafrost, Qinghai, Northwest China. *Mar PetGeol*, 2015, 59: 72–90
- 33 Tan P P, Lu Z Q, Wang W C, et al. Mineralogical and geochemical characteristics of carbonates occurred at gas hydrate-bearing intervals in Sanlutian of Muli of Qilian Mountains (in Chinese). *Geoscience*, 2015, 29: 1223–1233 [谭盼盼, 卢振权, 王伟超, 等. 祁连山木里三露天天然气水合物层段碳酸盐矿物学地球化学特征. *现代地质*, 2015, 29: 1223–1233]
- 34 Xu W, Ruppel C. Predicting the occurrence, distribution, and evolution of methane gas hydrate in porous marine sediments. *J Geophys Res*, 1999, 104: 5081–5095
- 35 Bünz S, Mienert J, Berndt C. Geological controls on the Storegga gas-hydrate system of the mid-Norwegian continental margin. *Earth Planet Sci Lett*, 2003, 209: 291–307
- 36 Milkov A V, Claypool G E, Lee Y J, et al. Gas hydrate systems at Hydrate Ridge offshore Oregon inferred from molecular and isotopic properties of hydrate-bound and void gases. *GeoChim CosmoChim Acta*, 2005, 69: 1007–1026
- 37 Wu N Y, Zhang H Q, Yang C X, et al. Preliminary discussion on natural gas hydrate (NGH) reservoir system of Shenhu area, north slope of south China sea (in Chinese). *Natural Gas Industry*, 2007, 27: 1–6 [吴能友, 张海啟, 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: 1–6]
- 38 Wu N Y, Liang J Q, Wang H B, et al. Marine gas hydrate system: State of the art (in Chinese). *Geoscience*, 2008, 22: 356–362 [吴能友, 梁金强, 王宏斌, 等. 海洋天然气水合物成藏系统研究进展. *现代地质*, 2008, 22: 356–362]
- 39 Lu Z Q, Wu N Y, Chen J W, et al. Preliminary discussion on gas hydrate geological system (in Chinese). *Geoscience*, 2008, 22: 363–375 [卢振权, 吴能友, 陈建文, 等. 试论天然气水合物成藏系统. *现代地质*, 2008, 22: 363–375]
- 40 Wang P K, Zhu Y H, Lu Z Q, et al. Analysis on the gas hydrate accumulation system in the Qilian Mountain permafrost (in Chinese). In: *Cross-strait Gas Hydrate Academic Exchange Conference Proceedings*, Qingdao, 2010. 52 [王平康, 祝有海, 卢振权, 等. 浅析祁连山冻土区天然气水合物成藏体系. 见: *海峡两岸天然气水合物学术交流会论文集*. 青岛, 2010. 52]
- 41 Lu Z Q, Zhu Y H, Zhang Y Q, et al. Gas hydrate accumulation system in the Qilian Mountain permafrost (in Chinese). In: *Proceedings of the China Geological Society 2013 Academic Annual Meeting*. Kunming, 2013, 459–461 [卢振权, 祝有海, 张永勤, 等. 祁连山冻土区天然气水合物成藏系统. 见: *中国地质学会2013年学术年会*. 昆明, 2013, 459–461]

- 42 Zhai G Y, Lu Z Q, Lu H L, et al. Gas hydrate geological system in the Qilian Mountain permafrost (in Chinese). *J Mineral Petrol*, 2014, 34: 79–92 [翟刚毅, 卢振权, 卢海龙, 等. 祁连山冻土区天然气水合物成矿系统. *矿物岩石*, 2014, 34: 79–92]
- 43 Wang C Q, Ding Y Y, Hu D G, et al. Temperature monitoring results for gas hydrate borehole DK-9 and thickness of gas hydrate stability zone in the Qilian Mountains permafrost (in Chinese). *Geoscience*, 2017, 31: 158–166 [王超群, 丁莹莹, 胡道功, 等. 祁连山冻土区DK-9孔温度监测及天然气水合物稳定带厚度. *现代地质*, 2017, 31: 158–166]
- 44 Wang P K, Zhang X H, Zhu Y H, et al. Effect of permafrost property on gas hydrate petroleum system in the Qilian Mountain, Qinghai, Northwest China. *Environ Sci: Processes Impacts*, 2014, 16: 2711–2720
- 45 He M X, Fang H, Pei F G, et al. Fault and frozen soil distribution characteristics of Muli natural gas hydrate area in Qinghai Province (in Chinese). *Geophys Geochem Explor*, 2017, 41: 1133–1141 [何梅兴, 方慧, 裴发根, 等. 青海木里地区冻土层、断层分布特征与天然气水合物成藏条件分析. *物探与化探*, 2017, 41: 1133–1141]
- 46 Dai J X, Ni Y Y, Huang S P, et al. Genetic types of gas hydrate in China (in Chinese). *Petroleum Explor Develop*, 2017, 44: 837–848 [戴金星, 倪云燕, 黄士鹏, 等. 中国天然气水合物气的成因类型. *石油勘探与开发*, 2017, 44: 837–848]
- 47 Lu Z Q, Zhu Y H, Zhang Y Q, et al. Study on genesis of gases from gas hydrate in the Qilian Mountain permafrost, Qinghai (in Chinese). *Geoscience*, 2010, 24: 581–588 [卢振权, 祝有海, 张永勤, 等. 青海祁连山冻土区天然气水合物的气体成因研究. *现代地质*, 2010, 24: 581–588]
- 48 Tang S Q, Lu Z Q, Rao Z, et al. The indicative significance of gas composition and isotopes of headspace gases from the gas hydrate drilling core in the Qilian Mountain permafrost: A case study of well DK-9 (in Chinese). *Geolog Bull China*, 2015, 34: 961–971 [唐世琪, 卢振权, 饶竹, 等. 祁连山冻土区天然气水合物岩心顶空气组分与同位素的指示意义: 以DK-9孔为例. *地质通报*, 2015, 34: 961–971]
- 49 Huang X, Liu H, Zhang J Z, et al. Genetic-type and its significance of hydrocarbon gases from permafrost-associated gas hydrate in Qilian Mountain (in Chinese). *Chin J Geology*, 2016, 51: 934–945 [黄霞, 刘晖, 张家政, 等. 祁连山冻土区天然气水合物烃源气体成因及其意义. *地质科学*, 2016, 51: 934–945]
- 50 Cao D Y, Liu T J, Wang D, et al. Analysis of formation conditions of natural gas hydrate in Muri coalfield, Qinghai Province (in Chinese). *Coal Geology of China*, 2009, 21: 3–6 [曹代勇, 刘天绩, 王丹, 等. 青海木里地区天然气水合物形成条件分析. *中国煤炭地质*, 2009, 21: 3–6]
- 51 Cao D Y, Wang D, Li J, et al. Gas source analysis of natural gas hydrate of Muri coalfield in Qilian Mountain permafrost, Qinghai Province, China (in Chinese). *J China Coal Society*, 2012, 37: 1364–1368 [曹代勇, 王丹, 李靖, 等. 青海祁连山冻土区木里煤田天然气水合物气源分析. *煤炭学报*, 2012, 37: 1364–1368]
- 52 Dai J X. Identification and distinction of various alkane gases. *Sci China Ser B-Chem*, 1992, 35: 1246–1257
- 53 Dai J X, Ni Y Y, Huang S P, et al. Significant function of coal-derived gas study for natural gas industry development in China (in Chinese). *Natural Gas Geosci*, 2014, 25: 1–22 [戴金星, 倪云燕, 黄士鹏, 等. 煤成气研究对中国天然气工业发展的重要意义. *天然气地球科学*, 2014, 25: 1–22]
- 54 Wang T, Liu T J, Shao L Y, et al. Characteristics and origins of the gas hydrates in the Muli coalfield of Qinghai (in Chinese). *Coal Geology Explor*, 2009, 37: 26–30 [王佟, 刘天绩, 邵龙义, 等. 青海木里煤田天然气水合物特征与成因. *煤田地质与勘探*, 2009, 37: 26–30]
- 55 Fu J H, Zhou L F. Carboniferous-Jurassic stratigraphic provinces of the southern Qilian Basin and their petro-geological features (in Chinese). *Northwest Geosci*, 1998, 19: 47–54 [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. *西北地质科学*, 1998, 19: 47–54]
- 56 Zhang J Z, Zhu Y H, Huang X, et al. Characterization and evaluation on the source rock of gas hydrate in Muli permafrost area, Nanqilian Basin (in Chinese). *Geolog Bull China*, 2017, 36: 634–643 [张家政, 祝有海, 黄霞, 等. 南祁连盆地木里冻土区天然气水合物烃源岩特征及评价. *地质通报*, 2017, 36: 634–643]
- 57 Cheng Q S, Gong J M, Zhang M, et al. Geochemical characteristics of Jurassic source rocks in the Muli coal field, Qilian Mountain permafrost (in Chinese). *Geoscience*, 2016, 30: 1408–1416 [程青松, 龚建明, 张敏, 等. 祁连山冻土区木里煤田侏罗系烃源岩地球化学特征. *现代地质*, 2016, 30: 1408–1416]
- 58 Lu Z Q, Zhu Y H, Zhang Y Q. Gas source conditions for gas hydrate in Qilian Mountain permafrost of Qinghai and their implications (in Chinese). *Mineral Deposits*, 2013, 32: 1035–1044 [卢振权, 祝有海, 张永勤. 青海祁连山冻土区天然气水合物的气源条件及其指示意义. *矿床地质*, 2013, 32: 1035–1044]
- 59 Tang S Q, Lu Z Q, Wang W C, et al. Organic geochemical characteristics of gas source rocks in the Sanlutian Mine of the Muli Mining Area, Qinghai (in Chinese). *Geoscience*, 2015, 29: 1214–1222 [唐世琪, 卢振权, 王伟超, 等. 青海木里三露天天然气水合物气源岩有机地球化学特征. *现代地质*, 2015, 29: 1214–1222]

- 60 Lu Z Q, Xue X H, Liao Z W, et al. Source rocks for gases from gas hydrate and their burial depth in the Qilian Mountain Permafrost, Qinghai: Results from thermal stimulation. *Energy Fuels*, 2013, 27: 7233–7244
- 61 Xu J S, Wen Z G, Hu D G, et al. Evaluation of the hydrocarbon generation potential of source rocks of the Jurassic Yaojie formation in Muli depression of Qilian Mountain (in Chinese). *J Geomech*, 2015, 21: 446–452 [徐久晟, 文志刚, 胡道功, 等. 祁连山木里地区侏罗系窑街组烃源岩生烃潜力评价. *地质力学学报*, 2015, 21: 446–452]
- 62 Lu Z Q, Rao Z, Zhu Y H, et al. Gas geochemical features of the DK-8 gas hydrate drilling hole in the permafrost of Qilian Mountain, and their indicative significance (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 2013, 87: 1167–1178 [卢振权, 饶竹, 祝有海, 等. 祁连山冻土区天然气水合物DK-8孔岩心顶空气地球化学特征及其指示意义. *地质学报*, 2013, 87: 1167–1178]
- 63 Cheng B, Xu J, Lu Z, et al. Hydrocarbon source for oil and gas indication associated with gas hydrate and its significance in the Qilian Mountain permafrost, Qinghai, Northwest China. *Mar PetGeol*, 2018, 89: 202–215
- 64 Chen L M, Qin R F, Jiang A L, et al. Structural fracture characteristics of cores from gas-hydrate drillholes in Sanlutian of Muli coalfield, Qinghai (in Chinese). *Geoscience*, 2015, 29: 1087–1095 [陈利敏, 秦荣芳, 蒋艾林, 等. 青海木里三露天天然气水合物钻孔岩心构造裂隙特征. *现代地质*, 2015, 29: 1087–1095]
- 65 Li C F, Liu C L, Meng Q G, et al. CT image characterization of pores and fissures in rock core from Juhugeng Gas hydrate area in Qinghai (in Chinese). *Geoscience*, 2015, 29: 1189–1193 [李承峰, 刘昌岭, 孟庆国, 等. 青海聚乎更水合物赋存区岩心微观孔隙、裂隙的微CT图像表征. *现代地质*, 2015, 29: 1189–1193]
- 66 Nelson R A. Evaluating Fractured Reservoirs: Introduction. *Geologic Analysis of Naturally Fractured Reservoirs*. Woburn: Gulf Professional Publishing, 2001. 1-2: 101–124
- 67 Xu M C, Liu J X, Chai M T, et al. Seismic characteristics of natural gas hydrate in Muli area, Tianjun County, Qinghai Province (in Chinese). *Geol Bull China*, 2011, 30: 1910–1917 [徐明才, 刘建勋, 柴铭涛, 等. 青海省天峻县木里地区天然气水合物地震响应特征. *地质通报*, 2011, 30: 1910–1917]
- 68 Yu C Q, Li Y H, Lu Z Q, et al. Structural features and the relation with gas hydrate distribution in Sanlutian of Muli, Qinghai (in Chinese). *Geoscience*, 2015, 29: 1138–1143 [于常青, 李永红, 卢振权, 等. 青海木里三露天井田构造特征及其与天然气水合物分布关系. *现代地质*, 2015, 29: 1138–1143]
- 69 Yu C Q, Wang Q, Lu Z Q, et al. 3D seismic detection for natural gas hydrate in Muli area, Qinghai (in Chinese). *Geoscience*, 2015, 29: 1130–1137 [于常青, 王琪, 卢振权, 等. 青海木里地区天然气水合物三维地震探测. *现代地质*, 2015, 29: 1130–1137]
- 70 Holder G D, Malone R D, Lawson W F. Effects of gas composition and geothermal properties on the thickness and depth of natural-gas-hydrate zone. *J Petrol Tech*, 1987, 39: 1147–1152
- 71 Kvenvolden K A, Kastner M. Gas hydrate of the Peruvian outer continental margin. *Proc Ocean Drilling Program Sci Results*. 1990, 112: 517–526
- 72 Ling H F, Jiang S Y, Ni P, et al. Sediment pore water geochemical anomalies: Indicators for the presence of natural gas hydrates (in Chinese). *Marine Geology Prog*, 2001, 7: 34–37 [凌洪飞, 蒋少勇, 倪培, 等. 沉积物孔隙水地球化学异常: 天然气水合物存在的指标. *海洋地质动态*, 2001, 7: 34–37]
- 73 Collett T A, Bird K J, Kvenvolden K A, et al. Geologic interrelations relative to gas hydrates within the north slope of Alaska. U S Department Energy Open-File Report. U S Department of Commerce, 1988, 8–389
- 74 Collett T S, Lee M W, Agena W F, et al. Permafrost-associated natural gas hydrate occurrences on the Alaska North Slope. *Mar PetGeol*, 2011, 28: 279–294
- 75 Wang P K, Zhu Y H, Lu Z Q, et al. Gas hydrate field identification methods in Qilian Mountain permafrost (in Chinese). *Mineral Deposits*, 2013, 32: 1045–1056 [王平康, 祝有海, 卢振权, 等. 祁连山冻土区天然气水合物现场识别方法. *矿床地质*, 2013, 32: 1045–1056]
- 76 Zhang Y Q, Zhu Y H. Research and application of the natural gas hydrate drilling technique in Qilian Mountain permafrost (in Chinese). *Geol Bull China*, 2011, 30: 1904–1909 [张永勤, 祝有海. 祁连山永久冻土带天然气水合物钻探工艺与应用. *地质通报*, 2011, 30: 1904–1909]
- 77 Fan W K, Wang W C, Yu Y G, et al. Application of gas logging to natural gas hydrate prognosis in Sanlutian of Muli, Qinghai (in Chinese). *Geoscience*, 2015, 29: 1151–1156 [范文科, 王伟超, 俞永刚, 等. 青海木里三露天天然气水合物预判气测录井应用研究. *现代地质*, 2015, 29: 1151–1156]
- 78 Fang H, Sun Z J, Xu M C, et al. Main achievements of gas hydrate exploration technology in permafrost regions of China (in Chinese). *Geophys Geochem Explor*, 2017, 41: 991–997 [方慧, 孙忠军, 徐明才, 等. 冻土区天然气水合物勘查技术研究主要进展与成果. *物探与化探*, 2017,

- 41: 991–997]
- 79 Liu J X, Zhang B W, Wang X J, et al. The method for shallow seismic exploration in Qiangtang basin (in Chinese). *Geophys Geochem Explor*, 2015, 39: 678–685 [刘建勋, 张保卫, 王小江, 等. 羌塘盆地浅层地震探测方法技术. *物探与化探*, 2015, 39: 678–685]
- 80 Liu J X, Xu M C, Wang X J, et al. A study of three-component seismic exploration in plateau permafrost region (in Chinese). *Geophys Geochem Explor*, 2015, 39: 327–333 [刘建勋, 徐明才, 王小江, 等. 高原冻土区三分量地震探测方法试验. *物探与化探*, 2015, 39: 327–333]
- 81 Xu J Y, Jiang C X, Zhang B W, et al. Existent problems and countermeasures in application of shallow seismic technology to exploring natural gas hydrate in land area (in Chinese). *Geophys Geochem Explor*, 2017, 41: 1127–1132 [徐建宇, 姜春香, 张保卫, 等. 浅层地震技术在陆域天然气水合物勘探中存在的问题及对策. *物探与化探*, 2017, 41: 1127–1132]
- 82 Xu M C, Liu J X, Chai M T, et al. An experimental study of natural gas hydrates in the Muli region, Qinghai Province by the seismic reflection method (in Chinese). *Geology and Exploration*, 2012, 48: 1180–1187 [徐明才, 刘建勋, 柴铭涛, 等. 青海木里地区天然气水合物反射地震试验研究. *地质与勘探*, 2012, 48: 1180–1187]
- 83 Jiang C X, Li P, Wang X J, et al. An analysis of seismic attribute characteristics of terrestrial gas hydrate in Muli area (in Chinese). *Geophys Geochem Explor*, 2017, 41: 1019–1026 [姜春香, 李培, 王小江, 等. 木里地区天然气水合物地震属性分析. *物探与化探*, 2017, 41: 1019–1026]
- 84 Fang H, Xu M, Lin Z, et al. Geophysical characteristics of gas hydrate in the Muli area, Qinghai province. *J Nat Gas Sci Eng*, 2017, 37: 539–550
- 85 Fang H, Pei F G, He M X, et al. Effectiveness of audio magnetotelluric sounding for detecting gas hydrate in permafrost regions (in Chinese). *Geophys Geochem Explor*, 2017, 41: 1068–1074 [方慧, 裴发根, 何梅兴, 等. 音频大地电磁测深法探测冻土区天然气水合物有效性实验. *物探与化探*, 2017, 41: 1068–1074]
- 86 Bai D W, Du B R, Fang H, et al. Forward simulation and feasibility study of applying the low frequency ground penetrating radar to detecting gas hydrate in permafrost area (in Chinese). *Geophys Geochem Explor*, 2017, 41: 1248–1254 [白大为, 杜炳锐, 方慧, 等. 低频探地雷达探测冻土带天然气水合物正演模拟研究. *物探与化探*, 2017, 41: 1248–1254]
- 87 Bai D W, Du B R, Zhang P H. Weak signal processing technology of low frequency GPR based on Hilbert-Huang transform and its application in permafrost area gas hydrate exploration (in Chinese). *Geophys Geochem Explor*, 2017, 41: 1248–1254 [白大为, 杜炳锐, 张鹏辉. 基于希尔伯特-黄变换的低频探地雷达弱信号处理技术及其在天然气水合物勘探中的应用. *物探与化探*, 2017, 41: 1248–1254]
- 88 Peng Y, Li Z Y, Zheng Z B, et al. The research and practice of NMR signals in frozen soil layer structure at Qiangtang basin (in Chinese). *CT Theory Appl*, 2015, 24: 37–46 [彭耀, 李振宇, 郑宗祺, 等. 羌塘盆地冻土层结构核磁共振信号响应研究与实践. *CT理论与应用研究*, 2015, 24: 37–46]
- 89 Hou J, Zou C C, Qu L, et al. Classification and identification of gas hydrate reservoirs from well log data in Sanlutian, Muli coalfield, Qinghai (in Chinese). *Geoscience*, 2015, 29: 1110–1121 [侯颀, 邹长春, 曲璐, 等. 青海木里三露天天然气水合物储层测井识别与划分. *现代地质*, 2015, 29: 1110–1121]
- 90 Qin R D, Lin Z Z, Pan H P, et al. Identification of hydrate and lithology based on well logs in Muli area (in Chinese). *Geophys Geochem Explor*, 2017, 41: 1088–1098 [覃瑞东, 林振洲, 潘和平, 等. 木里地区水合物及岩性测井识别方法. *物探与化探*, 2017, 41: 1088–1098]
- 91 Qin Z, Lin Z Z, Pan H P, et al. Logging evaluation system of natural gas hydrate in Muli area (in Chinese). *Geophys Geochem Explor*, 2017, 41: 1275–1280 [秦臻, 林振洲, 潘和平, 等. 木里水合物测井评价系统. *物探与化探*, 2017, 41: 1275–1280]
- 92 Cheng S H, Chen D H, Zhang X, et al. Submarine gas hydrate geochemical detection technology (in Chinese). *Marine Geology Prog*, 2003, 19: 30–34 [程思海, 陈道华, 张欣, 等. 海底天然气水合物地球化学探测技术. *海洋地质动态*, 2003, 19: 30–34]
- 93 Chen M, Cao Z M, Gong J M, et al. New geochemistry exploration technology for submarine gas hydrate (in Chinese). *J Mineral Petrol*, 2004, 4: 102–107 [陈敏, 曹志敏, 龚建明, 等. 海底天然气水合物地球化学勘探新技术. *矿物岩石*, 2004, 4: 102–107]
- 94 Gong J M, Lu Z Q, Wu B H. Gas hydrate geochemistry three-dimensional identification method (in Chinese). *Marine Geology Prog*, 2006, 22: 6–8 [龚建明, 卢振权, 吴必豪. 天然气水合物地球化学三维识别方法. *海洋地质动态*, 2006, 22: 6–8]
- 95 Collett T S, Dallimore S R. Hydrocarbon gases associated with permafrost in the Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. *Appl GeoChem*, 1999, 14: 607–620
- 96 Yakushev V S, Chuvilin E M. Natural gas and gas hydrate accumulations within permafrost in Russia. *Cold Regions Sci Tech*, 2000, 31: 189–197
- 97 Dallimore S R, Collett T S. Summary and implication of the Mallik 2002 gas hydrate production research well program. In: Dallimore S R, Collett T S, eds. *Scientific Results from the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Research Well Program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada*. Geological Survey of Canada, Bulletin, 2005, 585: 1–36

- 98 Wu Q B, Cheng G D. Research summarization on natural gas hydrate in permafrost regions (in Chinese). *Adv in Earth Sci*, 2008, 23: 111–119 [吴青柏, 程国栋. 多年冻土区天然气水合物研究综述. *地球科学进展*, 2008, 23: 111–119]
- 99 Yang Z B, Sun Z J. Geochemical exploration methods for natural gas hydrate (in Chinese). *Geophys Geochem Explor*, 2011, 35: 285–289 [杨志斌, 孙忠军. 天然气水合物地球化学勘查方法. *物探与化探*, 2011, 35: 285–289]
- 100 Yang Z B, Zhou Y L, Sun Z J, et al. Geochemical exploration of natural gas hydrate in Muli permafrost area in the Qilian Mountain (in Chinese). *Geophys Geochem Explor*, 2013, 37: 988–992 [杨志斌, 周亚龙, 孙忠军, 等. 祁连山木里地区天然气水合物地球化学勘查. *物探与化探*, 2013, 37: 988–992]
- 101 Yang Z B, Zhou Y L, Pu G. Cause analysis on gas hydrate geochemical anomalies of land area permafrost region (in Chinese). *Comput Tech Geophys Geochem Explor*, 2014, 36: 723–729 [杨志斌, 周亚龙, 普嘎. 祁连山木里冻土区天然气水合物地球化学异常成因分析. *物探化探计算技术*, 2014, 36: 723–729]
- 102 Zhang F G, Tang R L, Yang Z B, et al. Experimental research on geochemical methods in search for gas hydrates in permafrost areas (in Chinese). *Geophys Geochem Explor*, 2013, 37: 1043–1048 [张富贵, 唐瑞玲, 杨志斌, 等. 陆域天然气水合物地球化学勘查技术试验研究. *物探与化探*, 2013, 37: 1043–1048]
- 103 Zhang F G, Yang Z B, Tang R L, et al. Application of hydrocarbon acidolysis technique to gas hydrate exploration in the Qilian mountain permafrost, Qinghai, China (in Chinese). *China Mining Magazine*, 2016, 25: 227–233 [张富贵, 杨志斌, 唐瑞玲, 等. 酸解烃技术在青海祁连山天然气水合物勘探中的应用. *中国矿业*, 2016, 25: 227–233]
- 104 Zhou Y L, Sun Z J, Zhang F G, et al. Application of the pyrolysis-desorbed hydrocarbon technology to the geochemical exploration of gas hydrate in the Sanlutian Area in Muli permafrost, Qinghai (in Chinese). *Geoscience*, 2015, 29: 1173–1179 [周亚龙, 孙忠军, 张富贵, 等. 青海木里三露天天然气水合物土壤热释烃技术应用研究. *现代地质*, 2015, 29: 1173–1179]
- 105 Zhou Y L, Zhang F G, Yang Z B, et al. Test of natural hydrate free-gas measuring technique in permafrost region of Qilian Mountain (in Chinese). *Geophys Geochem Explor*, 2017, 41: 1075–1080 [周亚龙, 张富贵, 杨志斌, 等. 祁连山冻土区天然气水合物游离气测量技术试验. *物探与化探*, 2017, 41: 1075–1080]
- 106 Qin A H, Zhou Y L, Li Y H, et al. Geochemical prospect evaluation of gas hydrate in the Sanlutian area, Muli, Qinghai Province (in Chinese). *Geoscience*, 2015, 29: 1242–1250 [秦爱华, 周亚龙, 李永红, 等. 青海木里三露天天然气水合物地球化学远景评价. *现代地质*, 2015, 29: 1242–1250]
- 107 Hao C, Meng Q F, Mei H. Microbial geochemical exploration and research on gas hydrate in Sanlutian of Muli, Qinghai Province (in Chinese). *Geoscience*, 2015, 29: 1157–1163 [郝纯, 孟庆芬, 梅海. 青海木里三露天水合物微生物地球化学勘查研究. *现代地质*, 2015, 29: 1157–1163]
- 108 Chu H J, Hao C, Deng S C, et al. A study of gas hydrate light hydrocarbon microseepage microbial communities and response characteristics of hydrocarbon oxidizing microorganism in Muli area (in Chinese). *Geophys Geochem Explor*, 2017, 41: 1037–1043 [褚厚娟, 郝纯, 邓诗财, 等. 木里地区水合物轻烃微渗漏微生物群落及烃氧化菌响应特征研究. *物探与化探*, 2017, 41: 1037–1043]
- 109 Sun Z J, Yang Z B, Qin A H, et al. Geochemical exploration technology of natural gas hydrate in middle-latitudes permafrost zone (in Chinese). *J Jilin Univ: Earth Sci Ed*, 2014, 44: 1063–1070 [孙忠军, 杨志斌, 秦爱华, 等. 中纬度带天然气水合物地球化学勘查技术. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2014, 44: 1063–1070]
- 110 Sun Z J, Yang Z B, Lu Z Q, et al. Geochemical characteristics of trace elements in soil above Sanlutian natural gas hydrates in the Qilian Mountains (in Chinese). *Geoscience*, 2015, 29: 1164–1172 [孙忠军, 杨志斌, 卢振权, 等. 青海木里三露天天然气水合物矿藏土壤微量元素地球化学特征. *现代地质*, 2015, 29: 1164–1172]
- 111 Sun Z, Yang Z, Mei H, et al. Geochemical characteristics of the shallow soil above the Muli gas hydrate reservoir in the permafrost region of the Qilian Mountains, China. *J GeoChem Exploration*, 2014, 139: 160–169
- 112 Makogon Y F, Omelchenko R Y. Commercial gas production from Messoyakha deposit in hydrate conditions. *J Nat Gas Sci Eng*, 2013, 11: 1–6
- 113 Yamamoto K, Dallimore S. Aurora-JOGMEC/NRC/Mallik 2006–2008 Gas Hydrate Research Project progress. *Fire in the Ice*, 2008, 7: 1–5
- 114 Hancock S H, Collett T S, Dallimore S R, et al. Overview of thermal-stimulation production-test results from the JAPEX/JNOC/GSC. Mallik 5L-38 gas hydrate production research well. In: Dallimore S R, Collett T S, eds. *Scientific Results from the Mallik. Gas Hydrate Production Research Well Program*, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. Geological Survey of Canada, Bulletin, 2005, 585: 1–5
- 115 Ignik Sikumi Gas Hydrate Exchange Trial Project Team. Ignik Sikumi gas hydrate field trial completed. *Fire in the ice*, 2012, 12: 1–3
- 116 Lu Z Q, Zhu Y H, Zhang Y Q, et al. Estimation method of gas hydrate resource in the Qilian Mountain permafrost area, Qinghai, China—a case of the drilling area (in Chinese). *Geolog Bull China*, 2010, 29: 1310–1318 [卢振权, 祝有海, 张永勤, 等. 青海祁连山冻土区天然气水合物资源

量的估算方法—以钻探区为例. 地质通报, 2010, 29: 1310–1318]

- 117 Zhang Y Q, Li X M, Li X Y, et al. Technical progress of gas hydrate production in permafrost and research on oceanic gas hydrate production (in Chinese). *Explor Eng (Rock Soil Drilling Tunneling)*, 2016, 43: 154–159 [张永勤, 李鑫淼, 李小洋, 等. 冻土天然气水合物开采技术进展及海洋水合物开采技术方案研究. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43: 154–159]
- 118 Li X M, Zhang Y Q, Liang J, et al. Technology of flushing fluid for gas hydrate trial mining horizontally butted well in permafrost area (in Chinese). *Explor Eng (Rock Soil Drilling Tunneling)*, 2016, 43: 28–32 [李鑫淼, 张永勤, 梁健, 等. 冻土区天然气水合物试采对接井冲洗液技术. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43: 28–32]
- 119 Sun Y, Li B, Guo W, et al. Comparative analysis of the production trial and numerical simulations of gas production from multilayer hydrate deposits in the Qilian Mountain permafrost. *J Nat Gas Sci Eng*, 2014, 21: 456–466
- 120 Li B, Sun Y H, Guo W, et al. Heat calculation and numerical simulation in steam mining of permafrost gas hydrate. *Global Geology*, 2012, 15: 135–139
- 121 Li K, Zhang Y Q, Sun Y H, et al. Numerical calculation of steam mining for natural gas hydrate exploitation in permafrost region and the field application (in Chinese). *Explor Eng (Rock Soil Drilling Tunneling)*, 2014, 41: 14–16 [李宽, 张永勤, 孙友宏, 等. 注热蒸汽开采冻土区天然气水合物数值计算与野外应用. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41: 14–16]
- 122 Li X S, Li B, Li G, et al. Numerical simulation of gas production potential from permafrost hydrate deposits by huff and puff method in a single horizontal well in Qilian Mountain, Qinghai Province. *Energy*, 2012, 40: 59–75
- 123 Li X S, Yang B, Li G, et al. Numerical simulation of gas production from natural gas hydrate using a single horizontal well by depressurization in Qilian Mountain permafrost. *Ind Eng Chem Res*, 2012, 51: 4424–4432
- 124 Zhao J, Yu T, Song Y, et al. Numerical simulation of gas production from hydrate deposits using a single vertical well by depressurization in the Qilian Mountain permafrost, Qinghai-Tibet Plateau, China. *Energy*, 2013, 52: 308–319
- 125 Li B, Li G, Li X S, et al. The use of heat-assisted antigravity drainage method in the two horizontal wells in gas production from the Qilian Mountain permafrost hydrate deposits. *J Pet Sci Eng*, 2014, 120: 141–153
- 126 Li B, Li X S, Li G, et al. Evaluation of gas production from Qilian Mountain permafrost hydrate deposits in two-spot horizontal well system. *Cold Regions Sci Tech*, 2015, 109: 87–98
- 127 Liang Y P, Li X S, Li B. Assessment of gas production potential from hydrate reservoir in qilian mountain permafrost using five-spot horizontal well system. *Energies*, 2015, 8: 10796–10817
- 128 Majorowicz J, Safanda J, Osadetz K. Inferred gas hydrate and permafrost stability history models linked to climate change in the Beaufort-Mackenzie Basin, Arctic Canada. *Clim Past*, 2012, 8: 667–682
- 129 Bogoyavlensky V I, Mazharov A V, Titovsky A L, et al. Gas blowouts from permafrost zone of Yamal Peninsula. Preliminary results of the expedition on 8-th July 2015. *Oil Drilling*, 2015, 7-8: 8–13
- 130 Andreassen K, Hubbard A, Winsborrow M, et al. Massive blow-out craters formed by hydrate-controlled methane expulsion from the Arctic seafloor. *Science*, 2017, 356: 948–953
- 131 Wu Q, Lu Z, Liu Y. Permafrost changes in the Tibetan Plateau. *Adv Clim Change Res*, 2006, 2: 77–80
- 132 Yang M, Nelson F E, Shiklomanov N I, et al. Permafrost degradation and its environmental effects on the Tibetan Plateau: A review of recent research. *Earth-Sci Rev*, 2010, 103: 31–44
- 133 Yang Z, Ou Y H, Xu X, et al. Effects of permafrost degradation on ecosystems. *Acta Ecologica Sin*, 2010, 30: 33–39
- 134 Li Y J, Su X, Zhu Y H, et al. Winter seasonal characteristics of the archaeal communities in different alpine ecosystem topsoils collected from the gas hydrate drilling area, Qilian Mountains (in Chinese). *Geoscience*, 2015, 29: 1047–1060 [李月娟, 苏新, 祝有海, 等. 祁连山水合物分布区不同高寒生态类型冬季表层土壤中古菌群落及变化特征. 现代地质, 2015, 29: 1047–1060]
- 135 Wang Y F, Wei S P, Cui H P, et al. Methane metabolic microbial community structure in the active layer and the permafrost layer of the Qilian permafrost, China (in Chinese). *Chin J Appl Environ Biol*, 2016, 22: 592–598 [王艳发, 魏士平, 崔鸿鹏, 等. 祁连山冻土区土壤活动层与冻土层中甲烷代谢微生物群落结构特征. 应用与环境生物学报, 2016, 22: 592–598]
- 136 Pang S J, Zhu Y H, Huang X, et al. Preliminary establishment of long-term observation base for gas hydrate in Qilian Mountain (in Chinese). *News Lett China Geolog Survey*, 2017, 3: 51–54 [庞守吉, 祝有海, 黄霞, 等. 初步建成祁连山天然气水合物长期观测基地. 中国地质调查成果快讯, 2017, 3: 51–54]

Research progress of gas hydrates in the Qilian Mountain permafrost, Qinghai, Northwest China: Review

WANG PingKang^{*}, ZHU YouHai^{*}, LU ZhenQuan, BAI MingGang, HUANG Xia,
PANG ShouJi, ZHANG Shuai, LIU Hui & XIAO Rui

Oil and Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100083, China

The Qilian Mountain permafrost is one of the key areas for the investigation and study of gas hydrates in China, and is also the only area where gas hydrate has been discovered in China's permafrost. Since gas hydrate sample was firstly recovered in 2008, the investigation and research work is gradually progressing toward breadth and depth. It has achieved series of achievements such as the breakthrough in point-to-face prospecting, the discovery of various energy sources such as oil and gas, and the success of trial production tests. Moreover, the basic theoretical understanding has been significantly improved. The various elements of gas hydrate system are described more comprehensively and deeply, especially the in-depth analysis of gas sources and structural conditions further enriches the connotation of gas hydrate petroleum system. The effective survey technology system including geological, geophysical, geochemical, and drilling was summarized. In the aspect of gas hydrate production test, the feasibility of the use of key technologies such as depressurization technology and control monitoring in diagenetic reservoirs was confirmed. It is proposed that horizontal well production technology will be one of the key scientific and technological research directions for increasing gas production in the future. For the environmental effects, mineralogical evidence that hydrates have changed or are changing in their steady state has been discovered, and the evolutionary pattern of the gas hydrate system caused by climate warming has been proposed, and the environmental impact has gradually emerged. Thus, gas hydrate not only has potential resource value as a new type of energy, but also is an unstable factor that can cause environmental effects. It is not difficult to predict that with the continuous warming of Qinghai-Tibetan Plateau, the study on the stability evaluation of gas hydrate reservoirs in permafrost will become an important aspect for environmental effects.

gas hydrate, permafrost, research progress, Qilian Mountain, Qinghai

PACS: 89.30.Aa, 89.60.Ec, 89.20.Bb

doi: [10.1360/SSPMA2018-00133](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00133)