青藏高原昆仑山垭口盆地发现天然气水合物赋存的证据

吴青柏*, 蒋观利, 张鹏, 邓友生, 杨玉忠, 侯彦东, 张宝贵

中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 冻土工程国家重点实验室, 兰州 730000

* 联系人, E-mail: qbwu@lzb.ac.cn

2014-03-11 收稿, 2014-08-26 接受, 2014-12-10 网络版发表

中国科学院西部行动计划(KZCX2-XB-03)和国家自然科学基金(41101070, 41001038)资助

摘要 青藏高原多年冻土区是否存在天然气水合物一直是国内外广泛关注的问题, 但一直没有确定的答案. 通过钻探、地球物理测井以及气体地球化学研究, 在昆仑山垭口盆地发现了天然气水合物赋存的证据. 钻探发现 250 m 以下多个深度岩层存在大量气体释放异常, 甲烷气体浓度为 22%~32%, 且具有天然气水合物分解间歇性释放的特征, 这些气体释放层位具有显著的含天然气水合物特有的密度降低、侧向电阻率和声波波速的增大特征. 同时多个深度上发现了与水合物分解产生甲烷密切相关的碳酸盐和黄铁矿等自生矿物.

关键词

昆仑山垭口盆地
多年冻土
天然气水合物
地球物理测井异常
气体释放

天然气水合物, 俗称“可燃冰”, 广泛分布于多年冻土区、大陆架边缘的深海和深湖泊沉积物中, 估计全球天然气水合物的碳储量为 $2 \times 10^{16} \text{ m}^3$, 相当于全球已探明的化石燃料总碳储量的 2 倍以上^[1]. 目前在北半球多年冻土区已发现了大量天然气水合物赋存, 加拿大麦肯齐三角洲^[2]和美国阿拉斯加北坡^[3]从测井和实物样品分别证实了在多年冻土层下 900~1000 和 300~600 m 深处赋存天然气水合物, 在多年冻土层间也发现了天然气水合物^[4]. 在俄罗斯西伯利亚通过气体释放和地球化学等特征, 证实了多年冻土区 200~300 m 深处存在天然气水合物^[5]. 中国青藏高原北缘祁连山从测井和实物样品发现了多年冻土区天然气水合物赋存, 这是世界上第一次在中低纬度多年冻土区发现了天然气水合物^[6,7], 并首次证实了在远离海洋大陆架的陆地多年冻土区也可赋存天然气水合物.

我国青藏高原多年冻土区天然气水合物赋存一直备受关注^[8~10], 近年来, 多名学者对多年冻土区天然气水合物的前景进行了预测^[11~13]. 然而, 截至目前, 除祁连山冻土区发现了天然气水合物之外, 青藏高原多年冻土区一直尚未发现天然气水合物赋存证

据. 2013 年, 我们在昆仑山垭口盆地多年冻土区开展了 450 m 钻探, 通过钻孔岩芯气体释放异常、地球物理测井和气体地球化学分析特征, 揭示了昆仑山垭口盆地冻土区天然气水合物的赋存证据. 它的发现标志着青藏高原腹地多年冻土区也赋存有天然气水合物, 对青藏高原能源、环境和气候将产生重大影响.

1 区域地质背景

昆仑山垭口盆地位于青藏高原腹地的东昆仑山脉中段, 南以垭口至不冻泉之间断裂为界, 北临昆仑山南缘断裂(西大滩-玛曲断裂)和东昆仑山主脊(玉珠峰-西大滩南山)^[14](图 1), 为上新世-中更新世断陷盆地, 沉积了约 600 m 厚的晚第三纪至第四纪中期沉积物^[15]. 发育了较完整的晚第三纪至第四纪中期沉积序列, 这套地层由下至上划分为昆仑组砾石层、羌塘组湖相-扇三角洲沉积和望昆冰期冰碛层三部分^[14].

昆仑山垭口盆地多年冻土较为发育, 但冻土年平均地温、厚度和地温梯度存在差异. 据昆钻 1 和昆钻 2 的实测地温资料^[16], 昆仑山垭口(昆钻 2)多年冻土年平均地温为 -2.9°C , 冻土厚度为 112 m, 多年冻土层内地温梯度为 $3.6^\circ\text{C}/100 \text{ m}$, 多年冻土层下地温

引用格式: 吴青柏, 蒋观利, 张鹏, 等. 青藏高原昆仑山垭口盆地发现天然气水合物赋存的证据. 科学通报, 2015, 60: 68–74

Wu Q B, Jiang G L, Zhang P, et al. Evidence of natural gas hydrate in Kunlun Pass basin, Qinghai-Tibet Plateau, China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 68–74, doi: 10.1360/N972014-00088

图1 昆仑山垭口盆地、钻孔位置和区域地质图. 据文献[14]修改

Figure 1 Map of regional geology, borehole location and Kunlun Pass basin (revised by [14])

梯度为 $4.3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$; 垭口盆地(昆钻 1)多年冻土年平均地温为 -2.4°C , 冻土厚度为 82 m , 多年冻土层内地温梯度为 $3.3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, 多年冻土层下地温梯度为 $4.9^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. 此次钻探(昆钻 3)显示, 多年冻土厚度为 81.5 m , 温度测井和热敏电阻测温显示多年冻土层下地温梯度平均为 $2.5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, 与昆钻 1 和 2 冻土层下地温梯度相比存在较大的异常.

2 天然气水合物钻探试验井

2009 和 2010 年分别在昆仑山开展了天然气水合物试验孔的钻探工作, 分别施钻 200 和 300 m (图 1 中昆钻 1 和昆钻 2), 获得了多年冻土、气体组分和测井等第一手资料. 2013 年 6 月 22 日开始了第三个昆仑山天然气水合物试验孔钻探(图 1, 昆钻 3), 钻孔地理位置为北纬 $35^{\circ}39.512'$, 东经 $94^{\circ}3.296'$, 海拔 4714 m , 2013 年 8 月 30 日终孔, 进尺 450 m . 昆钻 3 钻孔位于昆仑山垭口断裂南侧, 构造活动性较大. $0\sim 250\text{ m}$ 采用常规双管联动拌合取芯的钻探方法, $250\sim 450\text{ m}$ 采用了绳索取芯钻探方法, 提高了取芯速度, 终孔后开展地球物理测井, 然后下 300 m 深热敏电阻测温电缆(冻土工程国家重点实验室制作、标定, 其精度为 0.05°C), 在钻孔稳定 2 个月后对钻孔温度进行测量. 钻探过程中随时对岩芯表面冒气情况进行观察并采

用顶空法提取岩芯气体, 同时采集了孔口释放的气体并测量气体释放量. 采集气体后用美国安捷伦技术公司生产的 Agilent 490-G 便携式气相色谱仪(检出限 1 ppm , $1\text{ ppm}=1\text{ }\mu\text{L/L}$, 下同)对烃类气体组分含量进行测试分析. 其余气体分别用盐水瓶和采气袋带回实验室做同位素分析.

3 天然气水合物赋存证据

3.1 气体释放异常

钻探采集的岩芯样品在现场置于冷水中冒泡显著, 置于热水中强烈冒泡(图 2(a)和 3), 冒泡时间长短不一, 最长可持续近 4 min . 直径 76 mm 长 15 cm 的岩芯置于顶空采样罐内 8 h 内可收集超过 $100\sim 150\text{ mL}$ 气体. 有些深度上被泥浆污染的岩芯表面直接可观察到气体释放, 用液氮冷冻后岩芯表面可见呈蜂窝状的细小气孔分布. 同时, 钻探过程中多个深度孔口可直接观察到气体释放异常(图 2(b)和 3), 孔口气体释放表现出水合物分解的间歇性特征, 气体释放量可达 $0.16\sim 0.52\text{ m}^3/\text{h}$, 气体释放量远大于岩芯的孔隙率. 孔口收集的气体可直接燃烧(图 2(b)), Agilent 490-G 便携式气相色谱仪测定的甲烷浓度在 $22\%\sim 32\%$ 之间变化(图 3). 图 3 给出了各深度上岩芯水中冒泡

图2 昆钻3孔岩芯冒气异常(a)和孔口冒气异常及燃烧(b)
Figure 2 Anomaly bubbling of core (a) and borehole and gas flame (b) for Kunlun drilling-3

图3 昆钻3孔岩芯水中冒泡和孔口冒气层位。蓝色实心圆点代表钻探岩芯置于水中冒泡的层位，红色空心圆点为钻孔孔口大量直接取气和气体点燃的层位，灰色直线表示混凝土封孔层厚度，黄色线条代表钻探岩芯中可见黄铁矿和碳酸盐自生矿物的层位

Figure 3 Strata of borehole bubbling and core bubbling within water for Kunlun drilling-3. Blue solid circles are the strata of core bubbling within water, red open circles are the strata of directly collecting gas from borehole and gas flaming, grey lines are the strata thickness of borehole sealed by concrete, and yellow lines are the strata of visible pyrite and carbonate within core

层位和孔口冒气层位。由于孔口冒气异常，因而采用混凝土封孔(图3)，使封孔后冒气层位互不影响。岩芯在水中冒泡异常和孔口冒气异常特征均显示天然

气水合物存在。

3.2 地球物理测井异常

地球物理测井是野外确定天然气水合物的重要标志之一，通过测井资料的综合分析发现了阿拉斯加北坡和加拿大麦肯齐三角洲冻土区赋存有天然气水合物^[6,17,18]。一般来说，含天然气水合物层的密度减小，具有相对高的电阻率和波速偏移，同时井径增大^[18,19]。昆钻3钻孔给出了部分深度的地球物理测井曲线，其结果显示，在250~450 m之间具有多层天然气水合物赋存的低密度、高侧向电阻率和高声波波速的证据(图4)，而且测井曲线显示的天然气水合物赋存的层位与实际钻探中岩芯气体释放和钻孔孔口气体释放异常具有显著的一致性(图3和4)，充分说明了昆仑山垭口盆地多年冻土区赋存有天然气水合物。

3.3 自生矿物异常

天然气水合物赋存的岩性主要为泥质砂岩、泥质板岩的破碎带内含泥质碎石土，泥质砂岩、泥质板岩层理间的软弱夹层。同时在250~450 m深度的许多层位发育有与天然气水合物分解产生甲烷气体密切相关的自生碳酸盐和黄铁矿矿物(图3)^[6,20]，钻探岩芯样品及其电子显微镜扫描照片和能谱图上Fe、S元素含量增高特征，可以清楚证实岩芯中存在黄铁矿矿物(图5)。

4 讨论和结论

钻探岩芯置于水中持续释放气体时间可长达2~4 min，而从孔口异常释放气体量可达0.16~0.52 m³/h，且可持续上涌达数小时，若不对井孔进行封孔处理，钻探无法继续进行，这说明地层中赋存有大量的气体。地层岩性主要为黑色的泥质板岩和砂岩，并可见主要为断裂破碎带和软弱夹层。岩芯气体释放主要是从断层破碎带和软弱带释放出来的，通过钻孔上涌的气体也来自断层破碎带。因此，地层中孔隙空间是不能容纳如此大量以游离态形式存在的气体，只能以固态的天然气水合物形式赋存于地层孔隙空间中，这一点与西伯利亚水合物证据较为相似^[5,21]，俄罗斯西伯利亚天然气水合物分布主要是依据异常气体释放获得的^[5,21]。天然气水合物分解过程中由于地层孔隙压力增大会导致水合物分解逐渐减慢，然后随着温度升高又会重新分解释放，因此，表现出具有较强的间歇性释放特征。西伯利亚多年冻土区通

图 4 昆钻 3 孔测井曲线图. 图中黄色标记了天然气水合物层位, 含天然气水合物沉积层密度降低、声波波速增大和侧向电阻率增高的典型特征

Figure 4 Well log map of Kunlun drilling-3. Yellow labels are the strata of natural gas hydrate, typical features in the density decreasing and the acoustic velocity and the lateral resistivity increasing of the sediment within gas hydrate

过气体异常释放来调查研究天然气水合物的分布时, 这种特征是非常显著的^[5]. 同时麦索亚哈气田开采天然气水合物层中的天然气时也曾遇到类似现象^[21,22].

钻探孔口采集天然气样品各种 CH_4 含量最大可达 32%, 乙烷含量为 0.01%, 根据 CSM 计算软件^[23], 获得了实测组分水合物相平衡曲线(图 6). 根据昆钻

2 地温实测资料和昆钻 3 的测井与地温测量冻土层下地温梯度平均值推算出温度随深度的变化曲线(图 6). 图 6 看出, 发生在 250~450 m 深度内的气体释放异常均在天然气水合物稳定带内, 符合天然气水合物的形成条件, 进一步证实了天然气水合物存在.

陆地多年冻土区天然气水合物测井异常被作为

图 5 昆钻 3 孔岩芯中黄铁矿
Figure 5 Pyrite within cores of Kunlun drilling-3

图 6 昆钻 3 实测气体组分的水合物稳定带
Figure 6 Gas hydrate stability zone of *in-situ* gas component for Kunlun drilling-3

麦肯齐三角洲、阿拉斯加北坡和我国祁连山多年冻土区天然气水合物赋存的重要证据之一,也得到了钻探含天然气水合物岩芯实物样品的证实. 含天然气水合物井径、地层密度、声波波速和侧向电阻率异常是水合物测井识别标志,本钻探测井资料显示了强烈的水合物测井识别标志,但井径增大标志不太显著,这可能与含水合物层赋存厚度较小且多层位分布有关.

从钻探岩芯采集烃类气体含量和同位素特征来看(图 7),主要是以甲烷气体为主,岩芯气体最高含量可达近 9%,且 250 m 以下甲烷气体含量分布层位明显增多,且显著增大. 乙烷含量较小,小于 3000 ppm. $C_1/(C_2+C_3)$ 比值主要集中在 1.62~68.24,且 $\delta^{13}CH_4$ 变化范围在 -26.69‰ ~ -76.4‰ ,这预示着天然气属于热成因和微生物成因的混合成因,主要是深部气体迁移的结果. 这些深部气体主要是沿羽状分布的断层破碎带迁移至水合物形成的稳定带内而形成的,与钻探中含天然气水合物岩芯的岩性是一致的. $\delta^{13}CO_2$ 变化范围在 -17.8‰ ~ -10.5‰ ,主要为有机成因, CO_2 应是甲烷被氧化的产物,这也为自生碳酸盐矿物提供了佐证.

图7 岩芯采集烃类气体和同位素沿深度分布

Figure 7 Variation of gas component and isotope collecting from cores with depth

从钻探岩芯冒气异常和孔口冒气异常、地球物理测井以及自生碳酸盐及黄铁矿矿物综合判断, 昆仑山垭口盆地多年冻土区赋存有天然气水合物, 大致可划分为 6 层: 257.5~282, 289.5~295, 332~336,

374~385, 389~394 和 430~439 m 具有天然气水合物。综合根据测井、钻孔测温和实测气体组分以及实测岩芯密度, 推算出天然水合物的稳定带底界埋深约为 510 m。

参考文献

- 1 Kvenvolden K A. Methane hydrate—A major reservoir of carbon in the shallow geosphere? *Chem Geol*, 1988, 71: 41–51
- 2 Bily C, Dick J W L. Natural occurring gas hydrates in the Mackenzie Delta, Northwest Territories. *B Can Petrol Geol*, 1974, 22: 340–352
- 3 Collett T S. Detection and evaluation of natural gas hydrates from well logs, Prudhoe Bay, Alaska. In: *Proceedings of the Fourth International Conference on Permafrost*, Fairbanks, Alaska. Washington DC: National Academy of Sciences, 1983. 169–174
- 4 Dallimore S R, Collett T S. Intrapermafrost gas hydrate from a deep core hole in the Mackenzie delta, Northwest Territories, Canada. *Geology*, 1995, 23: 527–530
- 5 Yakushev V S, Chuvilin E M. Natural gas and gas hydrate accumulations within permafrost in Russia. *Cold Reg Sci Technol*, 2000, 31: 189–197
- 6 Zhu Y H, Zhang Y Q, Wen H J, et al. Gas hydrate in the Qilian Mountain Permafrost, Qinghai, Northwest China (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 2009, 83: 1762–1771 [祝有海, 张永勤, 文怀军, 等. 青海祁连山冻土区发现天然气水合物. *地质学报*, 2009, 83: 1762–1771]
- 7 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]
- 8 Xu X Z, Chen G D, Yu Q H. Research prospect and suggestions of gas hydrates in permafrost regions on the Qinghai-Tibet Plateau (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 1999, 14: 201–204 [徐学祖, 程国栋, 俞祁浩. 青藏高原多年冻土区天然气水合物的研究前景和建议. *地球科学进展*, 1999, 14: 201–204]
- 9 Zhang L X, Xu X Z, Ma W. Permafrost and Gas hydrates in the Qinghai-Tibet Plateau (in Chinese). *Nat Gas Geosci*, 2001, 12: 22–26 [张立新, 徐学祖, 马巍. 青藏高原多年冻土与天然气水合物. *天然气地球科学*, 2001, 12: 22–26]
- 10 Wu Q B, Jiang G L, Pu Y B, et al. Relationships between permafrost and gas hydrate on Qinghai-Xizang Plateau (in Chinese). *Geol Bull China*, 2006, 25: 29–33 [吴青柏, 蒋观利, 蒲毅彬, 等. 青藏高原天然气水合物形成与多年冻土关系分析. *地质通报*, 2006, 25: 29–33]
- 11 Chen D F, Wang M C, Xia B. Formation condition and distribution prediction of gas hydrate in Qinghai-Tibet Plateau permafrost (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2005, 48: 179–187 [陈多福, 王茂春, 夏斌. 青藏高原冻土带天然气水合物的形成条件与分布预测. *地球物理学报*, 2005, 48: 165–172]

- 12 Huang P, Pan G T, Wang L Q, et al. Prospect evaluation of natural gas hydrate resources on the Qinghai-Tibet Plateau (in Chinese). *Geol Bull China*, 2002, 21: 794–798 [黄朋, 潘桂棠, 王立全, 等. 青藏高原天然气水合物资源预测. *地质通报*, 2002, 21: 794–798]
- 13 Ku X B, Wu Q B, Jiang G L. Potential distribution of natural gas hydrate in the permafrost regions of Qinghai-Tibet Plateau (in Chinese). *Nat Gas Geosci*, 2007, 18: 588–592 [库新勃, 吴青柏, 蒋观利. 青藏高原多年冻土区天然气水合物可能分布范围研究. *天然气地球科学*, 2007, 18: 588–592]
- 14 Song C H, Gao D L, Fang X M, et al. Late Cenozoic high-resolution magnetostratigraphy in the Kunlun Pass Basin and its implications for the uplift of the northern Tibetan Plateau. *Chin Sci Bull*, 2005, 50: 1912–1922 [宋春晖, 高东林, 方小敏, 等. 青藏高原昆仑山垭口盆地晚新生代高精度磁性地层及其意义. *科学通报*, 2005, 50: 2145–2154]
- 15 Wu Y Q, Cui Z J, Ge D K, et al. When the Qinghai-Xizang Plateau Uplift to Present Elevation (in Chinese). *Sci Geogr Sin*, 1999, 19: 481–484 [伍永秋, 崔之久, 葛道凯, 等. 青藏高原何时隆升到现代高度——以昆仑山垭口地区为例. *地理科学*, 1999, 19: 481–484]
- 16 Yang Y Z, Wu Q B, Deng Y S, et al. Chemical composition of borehole gas in Kunlun Pass basin in permafrost regions in Qinghai-Tibet Plateau (in Chinese). *Nat Gas Geosci*, 2011, 22: 1076–1081 [杨玉忠, 吴青柏, 邓友生, 等. 昆仑山垭口多年冻土区钻孔气体组分分析. *天然气地球科学*, 2011, 22: 1076–1081]
- 17 Collett T S. Natural gas hydrates of the Prudhoe Bay-Kuparuk river area, North Slope, Alaska. *AAPG Bull*, 1993, 77: 793–812
- 18 Gao X J, Yu X H, Li S L, et al. Application of geophysical well logging technology in exploration of gas hydrate (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2003, 18: 305–311 [高兴军, 于兴河, 李胜利, 等. 地球物理测井在天然气水合物勘探中的应用. *地球科学进展*, 2003, 18: 305–311]
- 19 Collett T S, Ladd J. Detection of gas hydrate with downhole logs and assessment of gas hydrate concentrations (saturation) and gas volumes on the Blake ridge with electrical resistivity log data. In: Paull C K, Matsumoto R, Wallace P J, et al., eds. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 164. Texas: Texas A&M University, College Station, 2000. 179–191
- 20 Wang P K, Zhu Y H, Lu Z Q, 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 Reg Sci Technol*, 2014, 98: 8–17
- 21 Collett T S, Ginsburg G D. Gas hydrates in the Messoyakha gas field of the West Siberian Basin: An examination of the geologic evidence. *Int J Offshore Polar*, 1998, 8: 22–29
- 22 Grover T, Moridis G, Holditch S A. Analysis of reservoir performance of Messoyakha Gas hydrate Field. In: *Proceedings of the Eighteenth (2008) International Offshore and Polar Engineering Conference Vancouver, BC, Canada*. 2008. 49–56
- 23 Sloan E D, Koh C. *Clathrate Hydrate of Natural Gases*. 3rd ed. New York: CRC Press, 2003. 685–692

Evidence of natural gas hydrate in Kunlun Pass basin, Qinghai-Tibet Plateau, China

WU QingBai, JIANG GuanLi, ZHANG Peng, DENG YouSheng, YANG YuZhong, HOU YanDong & ZHANG BaoGui

State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

The possible occurrence of natural gas hydrate in permafrost of the Qinghai-Tibet Plateau has significant potential impact on energy resources, climate change and the environment. New data from a scientific drilling project in the Kunlun Pass basin indicates the presence of natural gas hydrate in permafrost on the plateau at Kunlun Pass, Qinghai Province, China. A full suite of petrophysical logs was run in the borehole, and gas geochemistry was logged during drilling. Gas recovered from multi-layer strata below the depth of 250 m was characterized by intermittent gas peaks and methane concentration ranges from 22% to 32% during drilling. Petrophysical analysis indicates that these multi-layer strata are dominated by typical gas hydrate features including low density, high lateral resistivity, and high acoustic velocity. Corroborating petrographic evidence includes authigenic carbonate minerals and pyrite found in these strata, closely related with methane and expected as a product of gas hydrate dissociation.

Kunlun Pass Basin, permafrost, natural gas hydrate, well logging anomaly, methane peaks

doi: 10.1360/N972014-00088