

天然气水合物地球化学勘查方法

杨志斌, 孙忠军

(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)

摘要: 天然气水合物是一种潜在的新能源, 广泛分布在大陆架边缘的深海沉积物和陆域多年冻土区。地球化学勘查技术作为天然气水合物勘探的重要手段之一, 愈来愈受到极大的关注。笔者综合国内外研究现状, 分别介绍海域和永久冻土带天然气水合物勘查中应用的主要地球化学方法, 并详述各种方法的机理和研究进展。

关键词: 天然气水合物; 地球化学勘查; 海底; 永久冻土带

中图分类号: P632 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2011)03-0285-05

天然气水合物是由水和小客体气体分子 (主要是甲烷) 在低温、高压条件下形成的一种固态结晶物质, 俗称“可燃冰”, 广泛分布于大陆架边缘的海底沉积物和陆上永久冻土带中。1967 年, 前苏联在西伯利亚麦索亚哈油气田区首次发现天然产出的天然气水合物, 之后美国、加拿大也相继在阿拉斯加、马更些三角洲等陆上冻土区发现了天然气水合物, 获得了大量极宝贵的数据和资料^[1-3]。

20 世纪 70 年代末, 美国借助深海钻探计划 (DSDP) 在中美洲海槽 9 个海底钻孔中发现水合物, 自此海洋水合物在科技界引起了日益增长的兴趣, 一直保持着一种方兴未艾的势头^[4]。

从 80 年代开始, 随着深海钻探计划和大洋钻探计划 (ODP) 的进一步实施, 海洋水合物研究进入了新的发展阶段, 地球化学方法也开始运用于水合物的形成标志、赋存特征及成矿气体来源等研究方面。水合物进入了多学科、多方法的综合研究阶段。1995 年 11~12 月, ODP 在大西洋西部的布莱克海台专门组织了 164 航次水合物调查, 在 994、996、997 钻孔均采集到水合物样品, 地球化学家对布莱克海台水合物进行了广泛深入的研究^[5-6]。

2007 年 5 月我国首次在南海北部钻获水合物实物样品, 2008 年又在青海木里永久冻土带钻获天然气水合物, 使得我国天然气水合物研究进入新的发展阶段。

地球化学作为一种勘查手段, 在水合物勘探和开发中发挥着越来越重要的作用。笔者通过广泛调研, 总结了目前地球化学在勘查海底和陆域冻土带

天然气水合物, 应用比较广泛的几种方法, 并分别对其机理及研究进展进行了简单的介绍。

1 海底天然气水合物地球化学勘查

海底天然气水合物地球化学的研究范围, 涉及水合物组成、沉积物气体及孔隙水的化学成分和同位素组成、气体成因、物质来源、成矿机制、资源量计算、环境变化等方面。

研究表明, 海底已发现的天然气水合物中, 气体分子以甲烷为主 (约占总量的 99%), 还有少量的乙烷、丙烷、异丁烷、正丁烷、氮、二氧化碳和硫化氢等。因此存在天然气水合物的地区, 底层海水、海底沉积物及孔隙水中的甲烷等烃类气体和 H_2S 、 CO_2 等非烃类气体的含量必然会出现异常^[7-8]。根据水合物形成的异常特征, 将海底天然气水合物地球化学识别技术分为底层海水烃类异常, 海底沉积物气体、孔隙水异常, 自生碳酸盐矿物异常, 同位素组成异常等^[9-10]。

1.1 底层海水的烃类异常

底层海水中甲烷的高异常可能是天然气水合物分解或深水常规油气渗漏所致。水合物的形成、赋存与下伏游离气体处于一种动态平衡状态。当有断裂切穿水合物稳定带, 将下伏游离气体带与海底连通时, 甲烷气体便会排至海底水体中形成气体羽^[11], 从而引起底层海水的甲烷浓度异常。例如在 Hydrate Ridge 洋底喷溢的甲烷气体羽中, 甲烷含量高达 $74\ 000 \times 10^{-9}$, 然而正常底层海水的甲烷含量都小于 20×10^{-9} 。同时, 在底层海水柱状剖面中,

收稿日期: 2010-03-30

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项经费项目 (201111019) 和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目 (AS2009J04)

联合资助

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

甲烷浓度普遍有向海底增高的趋势,异常高的 CH_4 含量也表明烃类气体来源充足。因此,可用 CH_4 异常含量作为识别天然气水合物的间接标志。

目前现场测定海水中甲烷异常的方法有真空脱气收集、动态式抽取和甲烷传感器探头等。前两种方法灵敏度高,但操作过程复杂,易产生偏差;甲烷传感器探头可以实时探测,所以具有广阔的发展前景,但现阶段还受灵敏度低的限制^[12]。“九五”期间我国自行研制了一套高灵敏度气态烃现场探测系统,可用于现场测定样品中的超微量甲烷、乙烷、丙烷及 H_2 含量^[13]。

1.2 沉积物中气体地球化学异常

烃类气体一般以两种不同形式存在——游离气或溶解气、吸附气或包裹气,它们可以分别通过顶空气法和酸解烃法释放出来。在海洋水合物分布区,由于水合物的分解释放,沉积物中的这两种烃类气体可表现出不同的特征^[14-15]。

1.2.1 顶空气异常

当渗漏的烃类气体以游离态存在于沉积物颗粒之间时,可采用顶空气法测定游离态烃类气体。在 DSDP 和 ODP 航次中发现的天然气水合物,均存在顶空气甲烷的高值异常^[16]。

国内已经尝试着利用海底浅表层沉积物中游离烃在区域上的分布,进行水合物矿藏调查研究^[17]。东沙群岛和西沙海槽海域的调查资料显示,海底浅表层沉积物中存在丰富的游离烃(顶空气),且与区域上似海底模拟反射层(BSR)的分布存在密切的对应关系。因此,海底浅表层沉积物中游离烃的丰度,在一定程度上可作为下伏地层中存在常规油气藏或者水合物的一种辅助证据。

1.2.2 酸解烃异常

烃类气体在运移过程中,往往受到生物和化学降解作用的改造,使浅表层沉积物发生蚀变,形成自生矿物。这些新生矿物中包含大量的烃类气体,使烃类气体处于一种相对封闭环境中,限制了后期的生物和化学作用对烃类的氧化和改造作用。因此次生矿物中包含或吸附的烃类气体,可以反映烃类物质在进入矿物时的信息。将矿物中吸附、包含的烃类气体物质释放出来,相对游离气,可以更加准确地判断深部是否有水合物或者常规油气资源的存在。

卢振权等选择西沙海槽水合物潜在富集区作为已知区,利用陆上油气地球化学勘查方法(酸解烃、热释烃、蚀变碳酸盐方法)开展了试验性研究。通过对海底浅表层沉积物各项测试指标的分析,认为酸解烃方法适合于海底水合物的勘查,值得进一步

推广^[18-19]。

牛滨华,宋春岩等人利用 ODP204 航次 1250 站位钻井中 44 个岩心样品进行酸解烃方法研究,结果表明水合物矿藏中高浓度的甲烷物质通过微渗漏,在上覆地表沉积物中形成高浓度甲烷指标的地球化学异常。从地下深处水合物的稳定成藏聚集带至近地表,这种浓度异常呈阶梯状递减,通过地球化学气态烃测量能够发现该异常^[20]。

1.2.3 H_2S 异常

在赋存天然气水合物的岩芯中均发现硫化氢,这可能由于上渗的甲烷与海水中的 SO_4^{2-} 在近海底附近发生化学反应,生成 H_2S ,使 H_2S 气体含量偏高。Cascadia 大陆边缘水合物存在地区发现含 H_2S 的喷溢甲烷气体^[21];北加利福尼亚滨海区 Ee River 盆地含水合物样品和 ODP164 航次在 Blake 海脊发现的表层沉积物中都含有 H_2S 气体。这些证据说明天然气水合物存在的海区,可能出现 H_2S 含量的高值异常^[22]。对含有水合物的钻孔沉积物进行气体含量分析表明,它们均含有 H_2S 气体,而不含水合物的沉积物样品,基本不含 H_2S 气体^[23]。

1.3 沉积物孔隙水地球化学异常

天然气水合物在形成和分解过程中会发生一系列物理化学变化,这些变化会导致沉积物中孔隙水的阴、阳离子含量及其同位素组成发生变化。因此,可以用孔隙水的地球化学异常来指示海底天然气水合物的存在。沉积物中孔隙水的采集有多种方法,应根据沉积物的含水量、岩性等物理性质采用不同的采集方法,如离心法、压榨法、渗析法、吸气引液法、毛细管法和真空抽滤法等^[16 24-25]。

1.3.1 孔隙水氯度

孔隙水中 Cl^- 含量异常是天然气水合物存在的一个重要标志。 Cl^- 异常是由于天然气水合物在形成与分解过程中,沉积物孔隙水中 Cl^- 浓度发生异常变化,在水合物分布层段 Cl^- 浓度急剧减小。其机理为天然气水合物在形成过程中需要充足的水源,必须从邻近地层中汲取孔隙淡水,由于 Cl^- 太大,不能进入天然气水合物的笼型结构中,使得水合物赋存层段的盐度降低并淡化,而周围海水盐度增高。ODP164 航次在 Blake 海脊就发现,随深度的增加, Cl^- 浓度从表层到水合物稳定带有急剧减少的现象^[26]。对危地马拉近海气体水合物样品进行 Cl^- 浓度测定,其 Cl^- 含量 0.051% ~ 0.32%。秘鲁海样品中 Cl^- 含量 0.18% ~ 0.82%^[24],远远低于海水平均 Cl^- 含量(1.98%)。但在海洋沉积物中, Cl^- 浓度的减少也可能是其他原因造成,如蛋白石失水

或渗滤、黏土矿物的自生成因作用等^[27]。

1.3.2 孔隙水硫酸盐浓度梯度

海洋中含有的大量溶解硫酸盐,是海洋沉积物早期成岩作用过程中孔隙水的组成。在海洋沉积还原环境中,甲烷气体在微生物作用下还原了海底沉积物中的 SO_4^{2-} ,使之消耗殆尽,随着沉积物深度增加,硫酸盐浓度逐渐降低。

据 Torres M E 等^[28]对水合物及孔隙流体的研究, SO_4^{2-} 浓度随深度的增加而急剧降低。在 Blake 海脊 ODP997 站位钻孔取到的含水合物的沉积物孔隙水,其 SO_4^{2-} 浓度随深度大幅下降,在海底以下 23 m 处,浓度降为 0。Borowski 等^[29]从全球尺度(用 DSDP 和 ODP 的孔隙水资料)和局部尺度上(卡罗来纳州隆起—布莱克岭地区)研究了水合物出现与硫酸盐浓度梯度的关系。在全球尺度上,含天然气水合物的陆坡站位与浅硫酸盐—甲烷交接带(SM I)和大硫酸盐梯度之间,存在很强的相关性,可认为线性的、陡的硫酸盐梯度和浅的 SM I 是天然气水合物可能存在的标志。

近年来人们所关注的示踪离子还有 Br^- , I^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Sr^{2+} , Li^+ , Na^+ , K^+ , HPO_4^{2-} 和 NH_4^+ 等。随着天然气水合物研究的发展,人们将更多地研究孔隙水离子,找寻一种更加灵敏的水合物示踪方法^[30-31]。

1.4 沉积物中自生碳酸盐矿物的化学和同位素异常

天然气水合物的形成与活动流体密切相关,并与自生碳酸岩伴生。主要机理是,天然气水合物分解后,释放出大量的甲烷气体,通过扩散或沿断裂系统向海底表层迁移。在海底浅表层沉积物中,由于存在大量的 CH_4 氧化菌、 H_2S 氧化菌和硫酸盐还原菌,甲烷被氧化,硫酸根被还原,反应将按照



进行。这样就在孔隙水中产生大量的 HCO_3^- ,并可能导致过饱和而形成文石、方解石或其他碳酸盐矿物,而 HS^- 进一步还原形成黄铁矿,在其他条件下还可出现菱锰矿、天青石、重晶石等矿物。同时,这些自生碳酸盐具有一种特殊的同位素地球化学特征, $\delta^{13}\text{C}$ 偏低 ($-40.6\text{‰} \sim -54.2\text{‰}$),据此可判断天然气水合物是否存在。但深水常规油气藏气体的溢出同样可以形成类似矿物,因此,自生矿物在判定水合物成矿时只能作为间接标准^[22,32]。

1.5 同位素组成地球化学异常

在天然气水合物研究中,同位素地球化学方法发挥了十分重要的作用,并已成功应用于示踪天然

气水合物的形成或分解,在天然气水合物产出的地质构造条件、形成环境和成矿(成藏)机理等方面的研究也是必不可少的手段之一。目前,研究内容多集中在 $^3\text{He}/^4\text{He}$, $\delta^{13}\text{C}$, δD , $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{34}\text{S}$ 和 $^{87}\text{Si}/^{86}\text{Si}$ 等常规同位素地球化学方法方面。近年来国际上不断将一些新发展起来的同位素技术方法(孔隙水 $\delta^1\text{B}$, $\delta^6\text{Li}$, $\delta^{37}\text{Cl}$, $\delta^{81}\text{Br}$ 和 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 等)应用到与天然气水合物有关的研究中,并已初见成效^[33-36]。

2 永久冻土带天然气水合物地球化学勘查

目前国外在马更些三角洲地区、阿拉斯加北坡地区、俄罗斯西西伯利亚地区进行了大量的研究工作,天然气水合物的勘探一度以地球物理、钻探勘探技术为主,地球化学勘探技术及其他各种勘探技术只是作为一种辅助手段。冻土区天然气水合物的地球化学研究主要针对钻井岩芯进行,地球化学勘查采用基于烃类微渗漏理论的土壤(岩石)烃类测量法,着重于研究天然气水合物化学组分的烃类异常和成因指标的检测^[37-40],而面上地球化学勘查方法研究很少。

我国冻土区天然气水合物地球化学研究还处于初步摸索阶段。吴自成等对青藏高原长达 556 km 的西大滩—安多冻土区进行了烃类有机地球化学剖面测量,并探讨了地球化学样品有效采样深度、粒度等^[41-42]。卢振权等对青藏铁路沿线多年冻土区重点地段的野外冻胀、坍塌、冷泉冒气现象进行观测,并对低空大气、冷泉气体、表层冻土沉积物、地下冰等不同介质中气体的地球化学进行分析,发现部分冻土区,如托纠山、昆仑山口、雁石坪等地区,存在明显的地质地球化学异常,认为这些异常可能与天然气水合物有关^[43]。祝有海等采集木里煤田 33 号钻孔冻土层内连续逸出的高含量烃类气体,分析结果表明甲烷体积分数高达 38.07% ~ 75.9%。根据该钻孔的气体组分、年平均地表地温、冻土层厚度、地温梯度等数据计算水合物稳定带的界线及厚度^[44]。

祝有海等对祁连山木里冻土区钻获的天然气水合物进行地球化学组分测定。初步测试结果显示,祁连山天然气水合物中的气体组分较为复杂,除甲烷外还含有较高的乙烷、丙烷等重烃组分,部分样品中甚至还含有较高的 CO_2 ,甲烷体积分数为 54% ~ 76%,乙烷体积分数为 8% ~ 15%,丙烷体积分数为 4% ~ 21%,并有少量的丁烷、戊烷等。 CO_2 体积分数普遍为 1% ~ 7%,高的可达 15% ~ 17%。甲烷的碳氢同位素分析结果显示, $\delta^{13}\text{C}_1$ 分别为 -39.5‰ 和 -50.5‰ (PDB 标准), δD 为 -266‰ 和 -262‰

(VSMOW 标准), 并有 $\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2 < \delta^{13}C_3 < \delta^{13}iC_4 < \delta^{13}nC_4$ 特征, 显示出明显的深部热解气特征, 而不是浅部微生物气^[45-46]。

笔者对青海木里多年冻土带天然气水合物已知区进行了地球化学勘查方法试验, 采用顶空气法、酸解烃法、碳酸盐法、微生物法、热释汞法、微量元素法等, 进行试验性研究。结果表明, 在已发现水合物位置, 表层顶空间轻烃、土壤酸解烃、碳酸盐、微量元素等指标表现出明显异常, 具有较好的指示作用。综合分析筛选出以顶空气甲烷、酸解烃、碳酸盐为主的地球化学勘查指标体系, 建立永久冻土区天然气水合物地球化学勘查模式。通过甲烷稳定碳同位素和烃类气体组成, 判定该区水合物为原油伴生气、凝析油伴生气和煤型气等深部热解气混合成因。

尽管国外在马更些三角洲地区、阿拉斯加北坡地区、俄罗斯西西伯利亚地区冻土带开展了大量的地球物理、地球化学以及测井技术的研究, 但目前仍未找到一种非常适合于多年冻土区天然气水合物的综合勘测技术。国内对青藏高原冻土区进行了初步的研究, 但工作程度均较低, 只处于预查探索阶段, 而且青藏高原为中—低纬度带上的高山冻土, 也有别于极地冻土。由于多年冻土的存在, 在海洋探测中广泛使用的似海底模拟反射层 (BSR) 方法基本不适合陆域多年冻土区天然气水合物勘测。目前, 在多年冻土区主要基于钻探方法开展天然气水合物的勘测。作为水合物勘查的重要手段, 地球化学方法必将在多年冻土区水合物勘探中具有更广泛的应用前景。

3 结语

当前, 天然气水合物地球化学勘查方法还处于探索阶段, 没有形成一套有效的指标体系, 尤其在陆域永久冻土带, 天然气水合物地球化学勘查还基本处于空白。随着资源日益紧张, 天然气水合物研究已备受关注, 研究水合物的地球化学识别标志, 发展海洋和陆域冻土区水合物地球化学勘探技术, 不仅在理论上具有积极的意义, 更是我国大规模开展水合物区域调查的迫切需要。

参考文献:

[1] Sloan E D. Clathrate hydrates of natural gases[M]. New York: Marcel Dekker, 1990

[2] Collett T S. Detection and evaluation of natural gas hydrates from well logs Prudhoe Bay, Alaska[C] // Proceedings of the Fourth International Conference on Permafrost Fairbanks Alaska Washington DC: National Academy of Sciences, 1983, 169-174.

[3] Bily C, Dick JW L. Natural occurring gas hydrates in the Mackenzie Delta Northwest Territories[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1974, 22(3): 340-352

[4] 陈作义, 杨晓西, 叶国兴, 等. 天然气水合物概况及最新研究进展[J]. 海洋通报, 2002, 21(2): 78-85

[5] Kvenvolden K A. A review of the geochemistry of methane in natural gas hydrate[J]. Organic Geochemistry, 1995, 23(11/12): 997-1008

[6] Paul C. Atlantic gas hydrates targets of ocean drilling program leg 1[J]. Oil and Gas Journal, 1995, 93(42): 116-119.

[7] Gerald R D. 大型天然气水合物储层中甲烷的实地直接测量[J]. 张延敏译. 天然气地球科学, 1998, 9(3/4): 77-79

[8] 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[J]. 矿物岩石, 2004, 4(24): 102-107

[9] 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[J]. 海洋地质动态, 2006, 22(12): 6-8

[10] 赵青芳. 天然气水合物的地球化学识别标志及探测技术[J]. 海洋地质动态, 2006, 22(12): 24-27.

[11] Hovland M, Gallagher JW. Gas hydrate and free gas volumes in marine sediments: example from the Niger delta front[J]. Marine and Petroleum Geology, 1997, 14(3): 245-255.

[12] 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[J]. 海洋地质动态, 2003, 19(10): 30-34

[13] 王维熙, 孙春岩, 杨慧, 等. 海洋油气勘探中高灵敏度气态烃现场探测系统的研制[J]. 地球科学, 2004, 29(2): 163-168

[14] 金庆焕, 张光学, 杨木壮, 等. 天然气水合物资源概论 [M]. 北京: 科学出版社, 2006

[15] 付少英. 海底沉积物中不同形式烃类气体的地球化学意义[J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 254-257

[16] Kvenvolden K A, Kastner M. Gas hydrate of the peruvian outer continental margin[J]. Proceeding ODP Scientific Results, 1990, 112: 517-526

[17] 王建桥, 祝有海, 吴必豪, 等. 南海 ODP1146 站位烃类气体地球化学特征及其意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(3): 53-60

[18] 卢振权, 吴必豪. 海底水合物地球化学探测方法的试验研究[J]. 现代地质, 2002, 16(3): 299-304

[19] 卢振权, 龚建明, 吴必豪, 等. 东海天然气水合物的地球化学标志与找矿远景[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(3): 77-81.

[20] 牛滨华, 孙春岩, 苏新, 等. 勘查地球化学方法适用于勘查天然气水合物的依据[J]. 现代地质, 2005, 19(1): 61-66

[21] Kastner M, Kvenvolden K A, Lorenson T D. Chemistry, Isotopic composition and origin of a methane hydrogen sulfide hydrate at the Cascadia subduction zone[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1998, 156(324): 173-183

[22] 蒋少涌, 凌洪飞, 杨竞红, 等. 海洋浅表层沉积物和孔隙水的天然气水合物地球化学异常识别标志[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(1): 87-92

[23] Brooks JM, Field M E, Kennicutt M C. Observations of gas hydrates in marine sediments offshore northern California[J]. Marine Geology, 1991, 96: 103-109

[24] Egeberg P K, Dickens G R. Thermodynamic and pore water halogen

constraints on gas hydrate distribution at ODP Site 997 Blake Ridge [J]. Chemical Geology, 1999, 153: 53– 79

[25] 凌洪飞, 蒋少涌, 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 [J]. 海洋地质动态, 2001, 17(7): 34– 37.

[26] Charles K. Paul, Ryo M. Leg 164 overview [G] //Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 2000, 164: 3– 10

[27] 史斗, 孙成权, 朱岳年, 等. 国外天然气水合物研究进展 [M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1992

[28] Torres M. E., Momanus J. Fluid and chemical fluxes in and out of sediments hosting methane hydrate deposition Hydrate Ridge OR, I Hydro logical provinces [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 201: 525– 540

[29] Borowski W. S., Paul C. K., Ussler III W. Global and local variations of in terstitial sulfate gradients in deepwater continental margin sediments: sensitivity to underlying methane and gas hydrates [J]. Marine Geology, 1999, 159: 131– 154

[30] 金翔龙. 天然气水合物的研究现状和未来展望 [J]. 天然气地球科学, 2001, 12(1/2): 122

[31] 刘昌岭, 陈敏, 业渝光, 等. 海洋天然气水合物元素地球化学异常的实验研究 [J]. 现代地质, 2005, 19(1): 96– 100.

[32] Jorgensen N. O. Methane-derived carbonate cementation of marine sediments from the Kattegat, Denmark: geochemical and geological evidence [J]. Marine Geology, 1992, 103: 1– 13

[33] 杨涛, 薛紫晨, 杨竞红, 等. 南海北部地区海洋沉积物中孔隙水的氢氧同位素组成特征 [J]. 地球学报, 2003, 24(6): 511– 514

[34] 王家生, Suess E. 天然气水合物伴生的沉积物碳, 氧稳定同位素示踪 [J]. 科学通报, 2002, 47(15): 1172– 1176

[35] 陆尊礼, 凌洪飞, 蒋少涌, 等. 稳定同位素在天然气水合物地球化学勘查中的应用简介 [J]. 海洋地质动态, 2003, 19(2): 28– 32.

[36] 蒋少涌, 凌洪飞, 杨竟红, 等. 同位素新技术方法及其在天然气水合物研究中的应用 [J]. 海洋地质动态, 2001, 7(7): 24– 29

[37] Collett T. S., Dallimore S. R. Hydrocarbon gases associated with permafrost in the Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada [J]. Applied Geochemistry, 1999, 14: 607– 620

[38] Yakushev V. S., Chuvilin E. M. Natural gas and gas hydrate accumulations with permafrost in Russia [J]. Coal Regions Science and Technology, 2000, 31: 189– 197

[39] Dallimore S. R., Collett T. S. Scientific results from the mallik 2002 gas hydrate production research well program, Mackenzie Delta Northwest Territories, Canada [J]. Geological Survey of Canada, 2005, 585: 1– 36.

[40] 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 [J]. 2008, 23(2): 111– 119

[41] 吴自成, 吕新彪, 王造成. 青藏高原多年冻土区天然气水合物的形成及地球化学勘查 [J]. 地质科技情报, 2006, 25(4): 9– 14

[42] 吴自成. 青藏高原多年冻土区天然气水合物地球化学勘查采样深度及粒度探讨 [J]. 甘肃冶金, 2006, 28(3): 86– 89

[43] 卢振权, 吴必豪, 饶竹, 等. 青藏铁路沿线多年冻土区天然气水合物的地质、地球化学异常 [J]. 地质通报, 2007, 26(8): 1029– 1040

[44] 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 [J]. 地质通报, 2006, 25(1/2): 58– 63

[45] 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 [J]. 矿床地质, 2010, 29(1): 185– 188.

[46] 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 [J]. 地质学报, 2009, 83(11): 1761– 1770.

GEOCHEMICAL EXPLORATION METHODS FOR NATURAL GAS HYDRATE

YANG Zhi-bin, SUN Zhong-jun

(Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China)

Abstract Natural gas hydrate, a new kind of potential energy, is widely distributed in deep-sea sediments and permafrost regions. Geochemical exploration, as one of the methods for exploiting gas hydrates, is becoming more and more important. Based on research results obtained both in China and abroad, this paper deals with the geochemical methods used in exploiting gas hydrates of marine and permafrost regions, and presents the mechanism and the latest research achievements in this aspect.

Key words gas hydrate; geochemical exploration; sea bottom; permafrost region

作者简介: 杨志斌 (1984–), 男, 青海民和人, 工程师。毕业于中国地质大学 (北京), 现从事油气化探方法技术研究工作。