

DOI: 10.3724/SP.J.1140.2013.02121

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

何家雄¹, 颜文¹, 祝有海², 胡扬¹, 张景茹¹, 龚晓峰¹

(1. 中国科学院 边缘海地质重点实验室, 广州 510640; 2. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要:根据天然气水合物形成的特殊地质条件及分布富集规律,深入剖析了全球天然气水合物成矿成藏气体的地质地球化学特征及主要成因类型与气源构成特点。在此基础上,根据全球迄今勘查发现的天然气水合物地球化学分析统计结果及其形成的地质条件综合分析,指出全球天然气水合物成因类型主要以生物成因、生物—热解混合成因为主,热解成熟成因次之,其成矿成藏气体主要来自生物气和生物—热解成熟混合气的供给;而天然气水合物形成富集的决定性因素则取决于其是否具有充足的气源供给与特定的高压低温环境。

关键词:天然气水合物;成矿成藏气体来源;成因类型;分布规律;主控因素

中图分类号:P744.4 文献标识码:A 文章编号:0256-1492(2013)02-0121-08

随着世界上常规油气资源逐渐减少,不断攀升的能源需求和日益增大的能源压力,促使人们不断寻找新的接替能源。天然气水合物作为一种重要的非常规天然气资源,已逐渐进入人类视野并引起了极大的关注和重视。作为一种新的自然能源,天然气水合物既是常规天然气资源的巨大替代能源,亦是一种新型低碳高效的绿色节能环保能源。其高效主要体现在标准大气压下,1 m³饱和天然气的水合物可释放出160~180 m³标准状态下的甲烷气体,且其能量密度约是煤及黑色页岩的10倍,亦是常规天然气的2~5倍。天然气水合物的绿色环保性则是其完全燃烧后几乎不产生任何有害污染物。再者,由于天然气水合物在全球深海海域和永久冻土带的蕴藏量及储量规模极大^[1],故其是自然界中一个不可忽视的巨大不稳定碳库,而分解释放出的甲烷气体亦是一种特殊的温室气体(温室效应相当于同等重量CO₂的20倍),其不仅影响大气环境及自然生态平衡,在海洋领域它还是导致大规模海底滑坡等地质灾害的重要影响因素之一。因此,深入分析研究天然气水合物成矿成藏气体的成因类型及其气源构成特点,摸清天然气水合物成矿成藏的成因机理及主要控制因素,对于将来大规模勘探开发和综合利用这种非常规油气资源至关重要。

1 天然气水合物基本特征

1.1 组成特点

天然气水合物是由天然气气体和水分子混合形成的一种具有笼状结构的似冰状结晶化合物。由于其形状外观与冰类似,点火即燃,因此亦称“可燃冰”^[2]。组成天然气水合物的气体主要为烃类气体,且一般多为低分子烃类化合物,有时亦有少量无机组分,如CO₂或H₂S等,但甲烷(CH₄)等低分子烃类气体居绝对优势,故天然气水合物往往又称为甲烷水合物。天然气水合物的分子式可用M·nH₂O表示,其中M表示天然气水合物中的气体分子,n为水合指数^[3],即水分子数。诚然,自然界亦存在以CO₂等非烃气为主的天然气水合物,但相对较少,且分布非常局限或具有特殊的地质背景方可存在。

1.2 结构类型

迄今为止的研究表明^[4-6],天然气水合物晶体化学结构主要由作为主体的水分子借助于氢键作用形成不同形状构架的空腔(亦称“笼”),而作为客体的天然气甲烷分子则充填于该构架空腔内部,其气体分子和水分子之间没有化学计量关系,它们之间主要靠范德华力连接,故亦属于“窗格形”的化合物。根据其构型特点,一般可以将天然气水合物结构类型划分为3种不同的结构形式,即I型、II型及H型。其中,I型结构类型的天然气水合物为12面和

基金项目:国家自然科学基金项目(41176052);国家重点基础研究发展规划项目(2009CB219501)

作者简介:何家雄(1956—),男,研究员,博士,长期从事油气勘探与地质综合研究,E-mail:hejx@gig.ac.cn

收稿日期:2012-07-21;改回日期:2012-10-23. 文凤英编辑

14面体,属立方晶体结构,其笼状格架以体心堆积,只能容纳小分子低碳数碳氢化合物或少量小分子非烃气,如甲烷和乙烷(C_1 和 C_2)低碳烃类气,或极微量非烃气体,如 N_2 、 CO_2 和 H_2S 等;II型结构类型的天然气水合物为12面和16面体,多为菱形晶体结构,其笼状格架较大,不但可以容纳甲烷和乙烷(C_1 和 C_2),而且还可以容纳较大烃类分子量的丙烷(C_3H_8)和异丁烷(iC_4)分子;H型结构类型的天然气水合物为12面和20面体,属六方晶体结构类型,具有最大的笼状格架,它可以容纳分子直径大于 iC_4 或更大的有机气体分子。II型和H型结构类型的天然气水合物比I型在自然界中相对稳定一些,但其赋存与分布均非常局限。因此,自然界中广泛分布和赋存的大量天然气水合物,其水合物结构类型均以I型结构为主^[7],且分布非常普遍。

2 成矿气体成因类型及气源构成

2.1 天然气水合物分布富集特点

天然气水合物在世界范围分布广泛,目前全球发现的天然气水合物矿点或天然气水合物成矿带,大致沿麦索雅哈河—普拉德霍湾—马更些三角洲—青藏高原和北冰洋—大西洋—太平洋—印度洋构成了2个天然气水合物分布带(图1)。在环西太平洋地区,如俄罗斯—朝鲜—日本和澳大利亚—新西兰等地区亦有较多的天然气水合物发现^[8]。从区域构造地质环境上来看,天然气水合物主要集中分布在两类地区:一类地区为活动和被动大陆边缘的加积

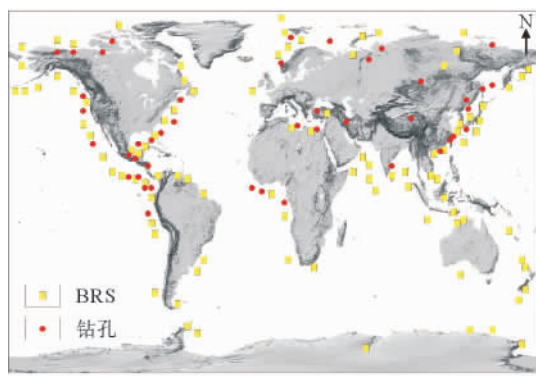


图1 全球不同海域和陆地天然气水合物区域分布规律及特点

Fig. 1 Regional distribution and characteristics of gas hydrate in seas and continents of the world

楔顶端、陆坡盆地、弧前盆地、滨外海底海山,乃至内陆海或深水湖区,尤其是海洋深水海域底部和深海平原等高压低温的深水环境处,均是天然气水合物矿藏形成与赋存的最好场所。世界深海富有机质的大洋水域90%的面积都是天然气水合物形成的富集区或潜在富集区域。因此,全球范围的天然气水合物一般多分布于水深为300~4000m的深水海域海底以下0~1500m的松散黏土或未成岩的沉积岩中,以及100~250m以下极地陆架海砂砾中^[1];另一类天然气水合物富集区则是大陆永久冻土带区域,这些地区的天然气水合物主要分布在冻土带下130~2000m的沉积地层中^[2,9],当然在更浅的冻土带地层中亦有可能分布^[10]。

2.1.1 深水海域中天然气水合物广泛分布

天然气水合物在海域中分布主要集中于300m以下的深水区,据不完全统计其在海洋深水区的成矿面积约占全部海洋面积的30%以上,而资源量则是陆地区域的100倍以上。目前,全球海洋勘查发现并圈定有天然气水合物的地区,主要分布在西太平洋海域的白令海、鄂霍茨克海、冲绳海槽、日本海、南开海槽、苏拉威西海、澳大利亚西北海域及新西兰北岛外海,东太平洋海域的中美海槽、加利福尼亚—俄勒冈滨北海岸及秘鲁海槽,大西洋西部海域的布莱克海台、墨西哥湾、加勒比海及南美东海岸外陆缘海,以及非洲西海岸海域、印度洋的阿曼海湾、北极的巴伦支海和波弗特海、南极的罗斯海和威德尔海、内陆的黑海和里海等海域^[11]。以上这些区域主要以太平洋边缘海域最多,其次是大西洋西海岸。我国在西沙海槽、东沙陆坡、台湾西南陆坡、冲绳海槽以及南海北部广大深水区等均发现了天然气水合物存在的大量地球物理与地球化学证据,且近年来在南海北部深水区珠江口盆地神狐调查区钻获了天然气水合物的实物样品,取得了南海北部深水海域天然气水合物勘探的第一手地质地球化学资料,为天然气水合物成矿成藏机制研究及气源成因类型与构成特点分析奠定了基础。

2.1.2 陆地永久冻土带天然气水合物富集

全球天然气水合物在陆地上分布主要集中于永久冻土带地区。迄今为止勘查发现的天然气水合物主要分布于阿拉斯加北坡、加拿大马更些三角洲高纬度环北冰洋等冻土区域^[12-13]。近年来的研究及勘查钻探结果^[14],证实我国青藏高原祁连山中低纬度永久冻土带区域(木里煤矿区)也蕴藏着大量的天然气水合物资源(表1),迄今为止,该区不仅获得了大量天然气水合物实物样品,而且还获取了大量冻土

带地区天然气水合物地质地球化学和地球物理方面的资料,为进一步勘查和研究天然气水合物形成条件及分布规律奠定了基础。陆地永久冻土带以外的其他区域,不具备天然气水合物成矿地质条件,故无天然气水合物存在与分布。

表 1 天然气水合物在全球大陆的主要分布区域

Table 1 The major locations of natural gas hydrate on land

| 分布地区 | 天然气水合物存在的证据 |
|--------------|-------------|
| 阿拉斯加北坡 | 测井、取样 |
| 加拿大马更些三角洲 | 测井、取样 |
| 加拿大西北部北极诸岛 | 测井 |
| 俄罗斯季曼—伯朝拉地区 | 气体分析 |
| 西西伯利亚麦索雅哈气田 | 取样 |
| 东西伯利亚贝略依气田 | 气体分析、测井 |
| 勘察加 | 气体分析 |
| 中国青海祁连山木里煤矿区 | 测井、钻井取样 |

2.2 成因类型及气源构成

天然气水合物主要是由深水海底或冻土带浅层沉积物中生物化学作用形成的生物气(自源)或深部沉积物中有机质成熟热解生成的成熟天然气(他源),通过扩散型和渗漏型等不同运聚方式,进入浅层沉积物具备特定高压低温条件的天然气水合物稳定带中所形成^[8,15]。因此,其成矿成藏气体的气源构成特点决定了天然气水合物成因类型。迄今为止全球范围勘查发现的天然气水合物的气源构成,均以甲烷(CH₄)为主,一般占气源天然气组成的 95% 以上,而不同成因类型的甲烷则代表和表征了其气源类型的形成条件及构成特点的差异,进而指示其来源于不同的生源母质及其形成的地质环境。研究表明,不同生源母质及地质条件下所形成不同成因的甲烷,除了其烃类气组成中甲烷含量差异明显外,更主要的是其具有完全不同的碳同位素值及其组成分布特征,生物化学作用成因甲烷的碳同位素值($\delta^{13}\text{C}_1$)其分布范围为 $-55\% \sim -94\%$,且一般均小于 -55% ,甲烷含量在烃类气组成中至少大于 95% 以上;而有机质热解成熟成因的甲烷之 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值,其分布范围为 $-29\% \sim -55\%$ ^[16],且一般均大于 -48% ,烃类气组成中甲烷含量小于 85%;有机质高—过成熟热解成因甲烷在烃类气组成中含量高(一般大于 95% 以上),与生物化学作用成因气类似,但其甲烷碳同位素值 $\delta^{13}\text{C}_1$ 明显偏重,其分布范

围至少为 $-29\% \sim -33\%$ 。因此根据甲烷碳同位素组成特征及其在烃类气中的含量,可以分析确定其甲烷成因与生源母质及气源构成特点,进而判识与确定天然气水合物成矿成藏气体的成因类型及气源构成特征。20 世纪 70 年代 Bernard 等^[17]提出了利用烃类气组成中 C₁与(C₂+C₃) 比值 R 和甲烷碳同位素 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值分析判识与确定甲烷成因类型的图版,并强调指出如果 C₁与(C₂+C₃) 烃类成分比 R 值 $> 1\ 000$,即甲烷含量居绝对优势,且其 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值在 $-90\% \sim -55\%$ 之间,亦即 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值小于 -55% 为典型的微生物化学作用成因;而当 R 值 < 100 ,其 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值 $> -55\%$,且一般均大于 -48% ,则属热解成熟成因;R 值和 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值介于上述二者之间者,则为生物—热解成熟之混合成因。鉴此,依据形成天然气水合物的甲烷气体的碳同位素特征与烃类气组成比值 R 的相互关系(表 2),即可综合判识与确定天然气水合物成矿成藏气体的成因类型,剖析其气源构成特点并追踪其气源。

表 2 甲烷气体成因类型划分判识

Table 2 Genetic types of methane gas

| 成因类型 | 划分与判识指标 | |
|-----------|--|--|
| | $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}/\%$ | $R = \text{C}_1 / (\text{C}_2 + \text{C}_3)$ |
| 生物成因 | < -55 | 1 000 |
| 生物—热解混合成因 | $-55 \sim -48$ | 1 000~100 |
| 热解成熟成因 | > -48 | < 100 |

注:据 Bernard, 1977; Kvenvolden, 1995, 1999; 戴金星, 1992, 1993, 1997; 徐永昌, 1994 等判识标准综合修定。

截止 2011 年资料,据不完全统计,迄今为止全球已经累计发现超过了 220 个天然气水合物矿点并获得了大量的天然气水合物实物样品,取得了大量的地球化学分析数据及资料^[18-24]。笔者将这些天然气水合物样品分析获得的烃类气组成之 C₁与(C₂+C₃) 比值 R 和甲烷碳同位素值 $\delta^{13}\text{C}_1$ 等数据及资料,与我国西北部青海祁连山永久冻土带和南海北部深水陆坡神狐调查区(白云凹陷及周缘)钻获的天然气水合物样品和该区所获常规天然气样品分析所获得的 R 值和 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值进行了详细的统计分析对比,且将其绘制在 R 与 $\delta^{13}\text{C}_1$ 关系图版上(图 2),即可明显看到,世界深水海域迄今勘查发现的天然气水合物成因类型,其绝大多数样品均以生物成因甲烷为主,生物—热解成熟混合成因形成的混合气(即由生物成因与热成因气混合构成)次之,而热解成熟成因的成熟—过成熟甲烷气较少。地质条件下生物化学

作用成因甲烷,主要是通过微生物还原沉积有机质中的 CO_2 所形成。由这种气源构成所供给形成的天然气水合物成因类型,在全球深水海域和陆地永久冻土带均非常普遍,而单纯由热解成因类型之气源供给所形成天然气水合物,在全球范围的天然气水合物分布区中均较局限,据不完全统计,迄今仅在墨西哥湾、里海、加拿大 Mallik 等局部地区,且发育有连通深部气源供给通道的特殊区域被勘查发现,因此,热解成因类型的天然气水合物矿藏矿点非常少,其成矿成藏必须具备良好的运聚通道条件。

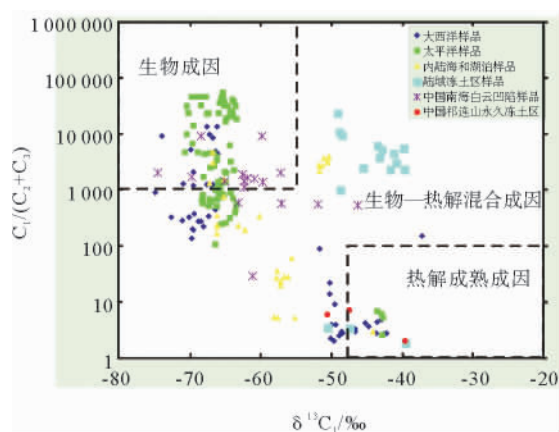


图2 全球不同地区天然气水合物分布特征及成矿气体成因类型(截止2011年资料统计)

Fig. 2 Gas hydrate distribution and genetic types in different regions of the world

与世界上迄今发现的天然气水合物样品相比,我国南海北部大陆边缘神狐陆坡深水调查区白云凹陷及周缘,近年来勘查及钻探发现的天然气水合物类型(图3),主要属生物成因和生物-热解混合成因两种类型,但以生物成因类型为主^[8]。生物成因类型的天然气水合物 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值为 $-74.3\text{‰} \sim -55\text{‰}$,其烃类气体成分比值 R 多在 $900 \sim 1400$ 之间;而该区生物-热解混合成因(图中亚生物气点群)的天然气水合物 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值则分布于 $-63\text{‰} \sim -46.2\text{‰}$,其烃类气体成分比值 R 多在 $700 \sim 1000$ 之间。与世界各地已发现天然气水合物样品的烃类气 R 值和 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值分布特征相比,南海北部白云凹陷天然气水合物的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值与全球发现的生物成因类型天然气水合物基本一致,但其烃类气体成分比值 R 却明显偏低,表明白云凹陷深水常规天然气和天然气水合物的气源构成中其重烃组含量相对较高^[25-26]。少量生物-热解混合成因天然气水合物亦与全球已发现的该成因类型天然气水合物碳同位

素组成特点一致。我国陆上永久冻土带祁连山木里煤矿区勘查发现的天然气水合物,根据其气源之甲烷 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值,具有热解成熟烃类气特征^[27],天然气水合物之气源甲烷的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值均大于 -48‰ ,一般多在 $-39.5\text{‰} \sim -47.4\text{‰}$ 之间,因此,属于热解正常成熟天然气水合物成因类型(图2),其气源构成及供给,主要来自该天然气水合物稳定带以下的侏罗系陆源有机质在成熟热解阶段所形成的烃类气。

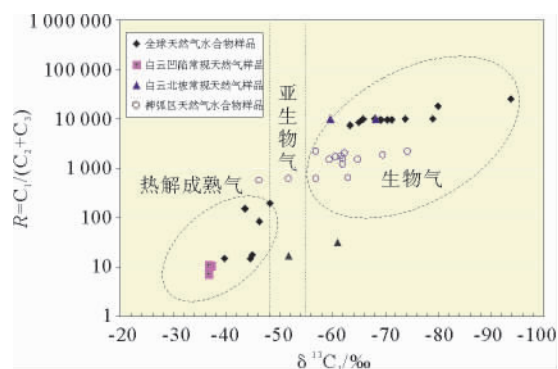


图3 全球天然气水合物成因类型与南海北部天然气水合物及常规天然气对比

Fig. 3 Genetic types of gas hydrate and the comparison of gas hydrate in the northern part of the South China Sea with conventional natural gas

3 形成条件与主控因素

天然气水合物形成主要受气源条件、温压条件、构造沉积条件等主要控制因素的制约和影响^[28],上述这些基本地质条件及关键地质要素,控制和制约了自然界中天然气水合物赋存状态、分布富集规律及展布规模,但其最重要的直接控制和决定天然气水合物稳定带形成及展布规模的地质条件与关键控制因素,根据国内外大量研究成果与勘查实践证实,主要为以下3点:

(1) 特定的高压低温环境

天然气水合物是在特定的低温高压之特殊物理化学条件下所形成的产物,因此,其严格受温压参数所控制。形成天然气水合物稳定带的温度,一般均要低于 $0 \sim 10\text{℃}$,只有当其天然气水合物的气源供给中 C_2^+ 重烃和非烃等杂质含量有所增加时,其形成温度范围方可拓宽至 25℃ ,但超过该温度门槛,则不能形成天然气水合物;同时,形成天然气水合物的压力必须高于 10MPa ,低于该压力值亦不能形成天然气水合物。因此,天然气

水合物稳定带是在特定的低温高压条件下形成的产物,一旦温度升高或压力降低,不能满足其特殊的低温高压环境之要求和条件,则会导致天然气水合物分解而不复存在。

(2) 充足的气源供给

天然气水合物稳定带的形成,除了低温高压的地质条件外,必须具有充足的气源不断地输送供给,其与常规天然气藏一样,如果没有充足的气源供给,亦会成为无源之水、无本之木,不能形成天然气水合物。因此,天然气水合物的气源供给输送系统与充足的气源条件至关重要。研究表明,天然气水合物的气源构成及供给,主要有 4 种来源^[16,29]:其一为大气中的烃类气体溶解于海水而进入沉积物;其二是浅层沉积物中的有机质在细菌的降解作用(生物化学作用)下产生的生物成因气;其三是深部沉积有机物热成熟或石油在热裂解作用下产生的热解成因气;其四为火山作用产生的无机成因的烃类气体,前三种气体为生物有机成因气,是天然气水合物的主要气源,尤其是有机质成熟热解气和生物成因气,是天然气水合物气源供给的主要贡献者,但如果热成熟烃类气作为天然气水合物的主要气源供给者,则其深部地层系统必须有非常发育的断裂、底辟及不整合和砂体等构成的有效运聚输导系统的配置,方可构成良好的天然气水合物气源供给系统,最终形成天然气水合物矿藏。

(3) 构造活动及断裂通道与有利成矿场所

区域构造背景及构造和断裂活动亦是天然气水合物富集成矿成藏的重要控制因素之一。构造活动形成的断裂及裂隙通道和局部正向构造区带既是流体运移通道,亦是流体及天然气水合物成矿成藏的有利区带及场所^[30]。大量天然气水合物勘查成果资料及地震剖面上的似海底反射(BSR)显示均表明,主动大陆边缘的增生楔、断裂—褶皱系、底辟构造或泥火山、滑塌构造、海底扇、“麻坑”构造和陆地永久冻土区等多种特殊的地质构造格局及地貌背景,一般都具备天然气水合物形成所必须的充足气源供给条件及成矿成藏与富集的基本地质条件,其均是天然气水合物矿藏形成的有利场所和富集区带^[31]。因此,上述这些特殊的地质构造格架类型及地貌背景,均是形成天然气水合物稳定带、富集天然气水合物矿藏有利区带和重要场所。

必须强调指出的是,近年来,对于天然气水合物形成模式及成矿机制方面的研究,许多学者在总结国内外大量研究成果的基础上,以天然气水合物成矿气源、成矿成藏机制和成矿成藏动力学等为研究

核心和主线,建立了一些天然气水合物的成矿成藏模式及成因机制,如基于天然气水合物烃类气体来源特点的原地微生物成烃“自源型”供给系统的“扩散型”天然气水合物成矿模式和基于深部有机质热解成烃“他源型”供给系统的“渗漏型”天然气水合物成矿模式(即通过断裂及底辟通道将深部烃气源供给输送至浅层的“渗漏型”成矿模式);基于胶结形式的低温冷冻模式、海浸加压模式和成岩作用模式;基于流体驱动方式的常压周期渗流模式和超压周期流动模式等^[32]。在上述这些天然气水合物成矿成藏模式中,以“自源扩散型”微生物成因成矿成藏模式、“他源渗漏型”热解成因和混合烃源“渗漏型”成矿成藏模式最重要且比较符合客观地质实际,其能够较全面地反映和表征形成天然气水合物的地质及物理化学等因素综合作用的影响和控制。目前世界范围内勘查及钻探发现的天然气水合物亦多以“自源扩散型”生物成因成矿类型的天然气水合物为主,而深部“他源渗漏型”热解成烃及混合烃源供给的“渗漏型”成因成矿类型的天然气水合物较少,且受特殊地质条件控制而分布局限。

4 结论

(1) 天然气水合物作为绿色低碳高效新能源已成为全球非常规油气资源勘探开发的新亮点,亦是未来接替常规油气资源的必然选择。因此,加快天然气水合物的勘探开发,已成为目前全球自然资源勘探开发接替的重要战略选择和未来自然资源勘查的核心。为了加快探索和勘查我国天然气水合物的资源潜力,应采取自主勘查与对外合作勘探并举的形式和策略,学习借鉴国外天然气水合物勘探开发的技术方法和管理运行模式及经验,尽量降低和减少勘查和开发天然气水合物的各种技术风险,不断开创我国天然气水合物资源勘查评价与前期开发探索的新局面。

(2) 天然气水合物形成主要受气源条件、特定温压环境、构造沉积条件等主要控制因素的制约和影响。这些基本地质条件及关键地质要素,控制和制约了自然界中天然气水合物赋存状态、分布富集规律及展布规模,但决定天然气水合物稳定带形成及展布规模的关键地质条件,则主要取决于特定的高压低温地质条件与充足的气源供给。

(3) 迄今为止,全球勘查发现的天然气水合物成因类型主要以生物成因及生物—热解混合成因为主,单纯热解成因类型水合物较少,且其必须具有天

然气纵向运聚通道的良好配置。天然气水合物存在扩散型(自源)和渗漏型(他源)两种主要供气运聚成矿模式,因此,其成矿成藏气体的气源构成特点及运聚富集方式的差异决定了天然气水合物成因类型。

(4)我国海域深水区如南海北部陆坡、东海部分陆坡区、西北部陆上冻土带如青藏高原永久冻土区和东北漠河冻土带等区域,均具有形成天然气水合物的基本地质条件,且近年来已在南海北部陆坡深水区 and 青藏高原祁连山冻土带钻获了天然气水合物实物样品。在东海—冲绳海槽深水区 and 东北漠河冻土带等区域,虽然目前尚未获得天然气水合物勘查的重大突破,但这些区域均具备天然气水合物形成的高压低温环境和良好气源供给等基本地质条件,预测这些区域应具有良好的天然气水合物资源潜力和勘探前景。

参考文献 (References)

- [1] 何家雄. 天然气水合物研究进展和南海北部勘探前景初探[J]. 海洋石油, 2003, 23(1): 57-64. [HE Jiexiong. Research progress of gas hydrate and exploration prospects of the northern part of the South China Sea [J]. Offshore Oil, 2003, 23(1): 57-64.]
- [2] Makogon, Yuri F. Natural gas: A promising source of energy [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2010(2): 49-59.
- [3] 郝丽, 崔永兴. 天然气水合物资源潜力及其开发前景[J]. 应用能源技术, 2009(7): 5-6. [HAO Li, CUI Yongxing. Resource potential and development prospects of gas hydrate [J]. Applied Energy Technology, 2009 (7): 5-6.]
- [4] 潘钟祥. 石油地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1986: 20-22. [PAN Zhongxiang. The Petroleum Geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1986: 20-22.]
- [5] 戴金星, 戚厚发, 郝石生. 天然气地质学概论[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989: 118-121. [DAI Jinxing, QI Houfa, HAO Shisheng. Natural Gas Geology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989: 118-121.]
- [6] 张厚福, 张万选. 石油地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989: 88-96. [ZHANG Houfu, ZHANG Wanxuan. The Petroleum Geology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989: 88-96.]
- [7] 别沁, 郑云萍, 蒋宏业. 天然气水合物研究的最新进展[J]. 油气储运, 2007, 26(3): 1-4. [BIE Qin, ZHENG Yunping, JIANG Hongye. The latest research progress of gas hydrate [J]. Gas Storage and Transportation, 2007, 26(3): 1-4.]
- [8] 何家雄, 祝有海, 陈胜红. 天然气水合物成因类型及成矿特征与南海北部资源前景[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(2): 237-243. [HE Jiexiong, ZHU Youhai, CHEN Shenghong. Genetic types and mineralization characteristics of gas hydrate and the resource prospects of the northern South China Sea [J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20 (2): 237-243.]
- [9] Makogon Y F, Holditch S A, Makogon T Y. Natural gas-hydrates-A potential energy source for the 21st century [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2007, 56: 14-31.
- [10] Safronov A F, Shits E Y, Grigor'ev M N, et al. Formation of gas hydrate deposits in the Siberian Arctic shelf [J]. Russian Geology and Geophysics, 2010, 51: 83-87.
- [11] 邵仲妮. 天然气水合物资源分布及勘探开发进展[J]. 当代石油石化, 2007, 15(5): 24-29. [SHAO Zhongni. Distribution of natural gas hydrate resources and the exploration development progress [J]. Contemporary Oil and Petrochemical, 2007, 15(5): 24-29.]
- [12] Collett T S, Dallimore S R. Permafrost related natural gas hydrate[C]//Natural Gas Hydrate in Oceanic and Permafrost Environments. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2000: 43-60.
- [13] Dallimore S R, Collett T S. Summary and implication of the Mallik 2002 gas hydrate production research well program[C]//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.
- [14] 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): 1702-1711. [ZHU Youhai, ZHANG Yongqin, WEN Huaijun, et al. Gas hydrate found in Qilian Mountain Permafrost, Qinghai [J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(11): 1702-1711.]
- [15] 苏正, 陈多福. 海洋天然气水合物的类型及特征[J]. 大地构造与成矿学, 2006, 30(2): 256-264. [SU Zheng, CHAN Duofu. The type and characteristics of the marine gas hydrate [J]. Geology and Mineral, 2006, 30 (2) : 256-264.]
- [16] 杨静红, 蒋少涌, 凌洪飞. 天然气水合物的成因及其碳同位素判别标志[J]. 海洋地质动态, 2001, 17(8): 1-4. [YANG Jinghong, JIANG Shaoyong, LING Hongfei. The causes of gas hydrate and its carbon isotope symbol [J] Marine Geology, 2001, 17(8): 1-4.]
- [17] Bernard B, Brooks J M, Sackett W M. A geochemical model for characterization of hydrocarbon gas source in marine sediments [C]//Proceeding 9th Annual Offshore Technology Conference. Houston: Offshore Technology Conference, 1977: 435-438.
- [18] Kvenvolden K A. A review of geochemistry of methane in nature gas hydrate [J]. Organic Geochemistry, 1995, 23(11/12): 997-1008.
- [19] Kvenvolden K A, Kastner M. Gas Hydrates of the Peruvian Outer Continental Margin [C]. ODP Science Results, 1999, 112: 413-440.
- [20] 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[J]. 现代地质, 2010, 24(3): 581-588. [LU Zhenquan, ZHU Youhai, ZHANG Yongqin, et al. The causes of gas hydrates gas in Qilian Mountain permafrost, Qinghai [J]. Geoscience, 2010, 24(3): 581-588.]

- [21] Stern L A, Lorenson T D, Pinkston J C. Gas hydrate characterization and grain-scale imaging of recovered cores from the Mount Elbert Gas Hydrate Stratigraphic Test Well, Alaska North Slope [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 08, 003, doi: 10.1016/j. marpetgeo. Pape T, Kasten S, Zabel M, et al. Gas hydrates in shallow deposits of the Amsterdam mud volcano, Anaximander Mountains, Northeastern Mediterranean Sea [J]. *Geo-Marine Letters*, 2010, 30(3): 187-206.
- [22] Hachikubo A, Krylov A, Sakagami H, et al. Isotopic composition of gas hydrates in subsurface sediments from offshore Sakhalin Island, Sea of Okhotsk [J]. *Geo-Marine Letters*, 2010, 30(3): 313-319.
- [23] Vaular E N, Barth T, Haflidason H, et al. The geochemical characteristics of the hydrate-bound gases from the Nyegga pockmark field, Norwegian Sea [J]. *Organic Geochemistry*, 2010, 41(5): 437-444.
- [24] Klapp S A, Murshed M M, Pape T, et al. Mixed gas hydrate structures at the Chapopote Knoll, southern Gulf of Mexico [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 299(1-2): 207-217.
- [25] 何家雄,姚永坚,刘海龄,等. 南海北部边缘盆地天然气成因类型及气源构成特点 [J]. *中国地质*, 2008, 35(5): 1007-1016. [HE Jiaxiong, YAO Yongjian, LIU Hailing, et al. Genetic types and gas source characteristics of natural gas in edge basin of the northern South China Sea [J]. *The Chinese Geological*, 2008, 35(5): 1007-1016.]
- [26] 何家雄,马文宏,祝有海,等. 南海北部边缘盆地天然气成因类型及运聚规律与勘探新领域 [J]. *海洋地质前沿*, 2011, 27(4): 1-10. [HE Jiaxiong, MA Wenhong, ZHU Youhai, et al. The genetic type of natural gas and the law of migration and accumulation and the exploration New areas in the edge basin of the northern South China Sea [J]. *Marine Geology Forefront*, 2011, 27(4): 1-10.]
- [27] 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): 182-191. [LU Zhenquan, ZHU Youhai, ZHANG Yongqin, et al. The geological characteristics of gas hydrate in the Qilian Mountains permafrost region, Qinghai. [J]. *Geology*, 2010, 29(1): 182-191.]
- [28] 姚永坚,黄永祥,吴能友. 天然气水合物的形成条件及勘探现状 [J]. *新疆石油地质*, 2007, 28(6): 668-672. [YAO Yongjian, HUANG Yongxiang, WU Nengyou. The formation conditions and exploration status of natural gas hydrate [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2007, 28(6): 668-672.]
- [29] 付少英. 烃类成因对天然气水合物成藏的控制 [J]. *地质学前沿*, 2005, 12(3): 263-267. [FU Shaoying. The control of causes of hydrocarbon to gas hydrate reservoir [J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(3): 263-267.]
- [30] 魏伟,张金华,吝文,等. 天然气水合物成藏机理及主控因素 [J]. *新疆石油地质*, 2010, 31(6): 563-566. [WEI Wei, ZHANG Jinhua, LIN Wen, et al. Gas hydrate accumulation mechanism and main controlling factors [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2010, 31(6): 563-566.]
- [31] 王健,邱文弦,赵俐红. 天然气水合物发育的构造背景分析 [J]. *地质科技情报*, 2010, 29(2): 100-106. [WANG Jian, QIU Wenxian, ZHAO Lihong. Structural background of the gas hydrate [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2010, 29(2): 100-106.]
- [32] 樊栓狮,刘锋,陈多福. 海洋天然气水合物的形成机理探讨 [J]. *天然气地球科学*, 2004, 15(5): 524-530. [FAN Shuanshi, LIU Feng, CHEN Duofu. Formation mechanism of marine gas hydrate [J]. *Gas Earth Sciences*, 2004, 15(5): 524-530.]

GENETIC TYPES OF GAS HYDRATE IN THE WORLD AND THEIR MAIN CONTROLLING FACTORS

HE Jiexiong¹, YAN Wen¹, ZHU Youhai², HU Yang¹, ZHANG Jingru¹, GONG Xiaofeng¹

(1. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, CAS, Guangzhou 510640, China;

2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: As a special kind of unconventional gas resources with great resource potential, gas hydrate is not only an important supplement and substitute for conventional natural fossil gas, but also a new low-carbon green and efficient energy. In order to better understand the special geological formation conditions and distribution pattern of the gas hydrate, the geological and geochemical characteristics of the global gas hydrate and their sources were studied in-depth by the authors. According to the statistical results of the geochemical compositions of natural gas hydrate explored in the world so far and their geological formation conditions, the main genetic types of gas hydrate are biogenetic and biogenetic-pyrolytic mixed, followed by matured pyrolytic gases in terms of the sources of gases. The formation of gas hydrate deposits depends on the sources for gas supply in addition to a high-pressure and low-temperature environment.

Key words: gas hydrate; origins of reservoir-forming gases; genetic types; distribution pattern; main controlling factors