

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020052602

# 北极波弗特—马更些三角洲盆地天然气水合物成藏模式

杨楚鹏<sup>1,2</sup>, 刘杰<sup>3</sup>, 杨睿<sup>4</sup>, 姚永坚<sup>1</sup>, 李学杰<sup>1</sup>, 苏明<sup>5</sup>

1. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510760

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室, 广州 511458

3. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640

4. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071

5. 中山大学海洋科学学院, 珠海 519082

**摘要:** 北极波弗特—马更些三角洲盆地常规油气和水合物资源十分丰富, 是全球开展天然气水合物调查研究最早的地区之一。对该盆地水合物和常规油气的共生共藏关系的研究, 不但对能源资源的勘探具有直接价值, 而且对海域工程施工中海底稳定性评价以及全球气候变化和碳循环研究具有重要的理论和实际意义。在大量文献资料综合分析的基础上, 系统总结了影响水合物成藏的地质和稳定条件, 结合极地冰川演化特征, 提出水合物与下伏油气藏渗漏共生并受冻土调节的成藏模式。认为波弗特—马更些三角洲盆地天然气水合物气源主要为下伏含油气系统中的热成因烃气; 构造要素(断裂、背斜)密度与水合物富集丰度呈正相关, 水合物赋存主要与 Iperk、Kugmallit 和 Richards 组的三角洲平原相砂体有关; 水合物稳定带之上的冻土带对天然气水合物的成藏起着关键性调节作用。

**关键词:** 天然气水合物; 成藏模式; 波弗特—马更些三角洲盆地

中图分类号: P744

文献标识码: A

## Accumulation model of natural gas hydrate in the Beaufort-Mackenzie Delta Basin, the Arctic

YANG Chupeng<sup>1,2</sup>, LIU Jie<sup>3</sup>, YANG Rui<sup>4</sup>, YAO Yongjian<sup>1</sup>, LI Xuejie<sup>1</sup>, SU Ming<sup>5</sup>

1. Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou 510760, China

2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory, Guangzhou 511458, China

3. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

4. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China

5. School of Marine Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China

**Abstract:** The Beaufort-Mackenzie Delta is an Arctic basin which contains abundant conventional hydrocarbon and natural gas hydrate. It is also one of the earliest regions in the world to carry out producing test of natural gas hydrate. To study the coexistence relationship between the hydrate and conventional hydrocarbon in the basin has not only direct significance to energy resource exploration, but also important theoretical and practical significance to seabed stability assessment, global climate change and carbon cycle research. In this paper, geological factors and stability conditions for hydrate reservoir generation was systematically summarized based on the large number of data available. Furthermore, combined with the analysis of glacier evolution, it was concluded that the accumulation of natural gas hydrate in the basin is controlled by the leakage of the underlying petroleum system and the change in permafrost zone. It is revealed that the gas source of hydrate in the basin is mainly the thermogenic hydrocarbon gas coming from the buried petroleum system. The activities of tectonic elements, such as faults and folders, were positively correlated with the enrichment of hydrate, and the hydrate occurrence was mainly related to the sand bodies of the delta plain in the Iperk, Kugmallit and Richards sequences. The permafrost above the hydrate stabilization zone plays a key role in the accumulation of gas hydrate.

**Key words:** natural gas hydrate; accumulation model; the Beaufort-Mackenzie Delta Basin

形成条件、分布规律、成藏模式是天然气水合物研究领域的核心问题, 其中成藏理论的发展对指

导天然气水合物富集区的勘探开发具有重要的理论和实践意义。天然气水合物成藏是一个复杂的

资助项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20190577); 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才引进重大专项(GML2019ZD0106)

作者简介: 杨楚鹏(1980—), 男, 博士, 教授级高工, 从事海洋基础地质和极地地质研究, E-mail: GMGS\_yang@foxmail.com

收稿日期: 2020-05-26; 改回日期: 2020-07-03. 蔡秋蓉编辑

地质过程,涉及地质、物理、化学、微生物等众多地球营力作用。国际上以 Collett 等<sup>[1-2]</sup>为代表的科学家提出了“天然气水合物油气系统”(Natural Gas Hydrate Petroleum System)的概念,认为剖析天然气水合物油气系统的关键是气源条件、温压条件、储集条件、输导系统、水源供给以及聚集逸散时间6大要素,具体分析中,天然气水合物稳定条件(稳定带)的评价除了温压条件外,还包括天然气组成、孔隙水矿化度等。近年来,国内在南海开展了大量水合物勘探和试采实践,取得了举世瞩目的成就,形成了独具南海特色的天然气水合物形成机理和成藏模式<sup>[3]</sup>,也提出了类似“天然气水合物成藏系统”的概念<sup>[4-6]</sup>。这些成藏模式概念的归纳过程中都涉及到了天然气水合物与传统油气之间的共生共藏关系。尤其是位于海洋陆架和陆坡的被动陆缘沉积盆地群具有天然气水合物与传统油气藏有利的时空共存条件<sup>[7-9]</sup>。国内学者雷新华等<sup>[10]</sup>提出了水合物与传统油气之间的渗漏共生、封盖共生和遮盖侧储共生3种共生模式;刘金龙等<sup>[11]</sup>进一步梳理了气源共生、封盖共生和遮盖侧储共生3种共生关系,并对南海北部水合物与深水油气的共生机理进行了探讨。在北极天然气水合物研究中学者们也进一步认识到,北冰洋陆架—陆坡浅层的天然气水合物的形成和分解逸散在绝大多数情况下均可看作是下伏含油气系统在浅部的衍生<sup>[12-14]</sup>。对此类共生关系机制的研究不但对能源资源的勘探具有重要而直接的价值,而且对海域工程施工中海底稳定性评价<sup>[15]</sup>以及全球气候变化和碳循环研究<sup>[16-17]</sup>具有重要的理论和实际意义。

波弗特—马更些三角洲盆地是加拿大北极地区重要的油气产区,也蕴含着巨大的天然气水合物资源量,是全球最早开展天然气水合物工业化试采的地区。分别于2002年和2008年成功完成了2次水合物开采实验,获得了极其重要的科研和工程成果,在很大程度上引领了全球的水合物勘探和开发。前人的调查研究已发现,该盆地中天然气水合物与传统油气存在密切的共生关系<sup>[18-19]</sup>,但缺乏对其共生成藏模式和后期与冰川协同演化规律的探讨。本文通过大量文献的调研,整理波弗特—马更些盆地油气和天然气水合物的勘探开发数据资料,分析该盆地天然气水合物成藏构成要素和主控因素,总结了水合物和传统油气共生共藏关系,结合极地冰川演化特征,归纳出该盆地的天然气水合物成藏模式,以期能为海域水合物调查与研究提供一些借鉴,并能为高纬度地区天然气水合物分解和甲

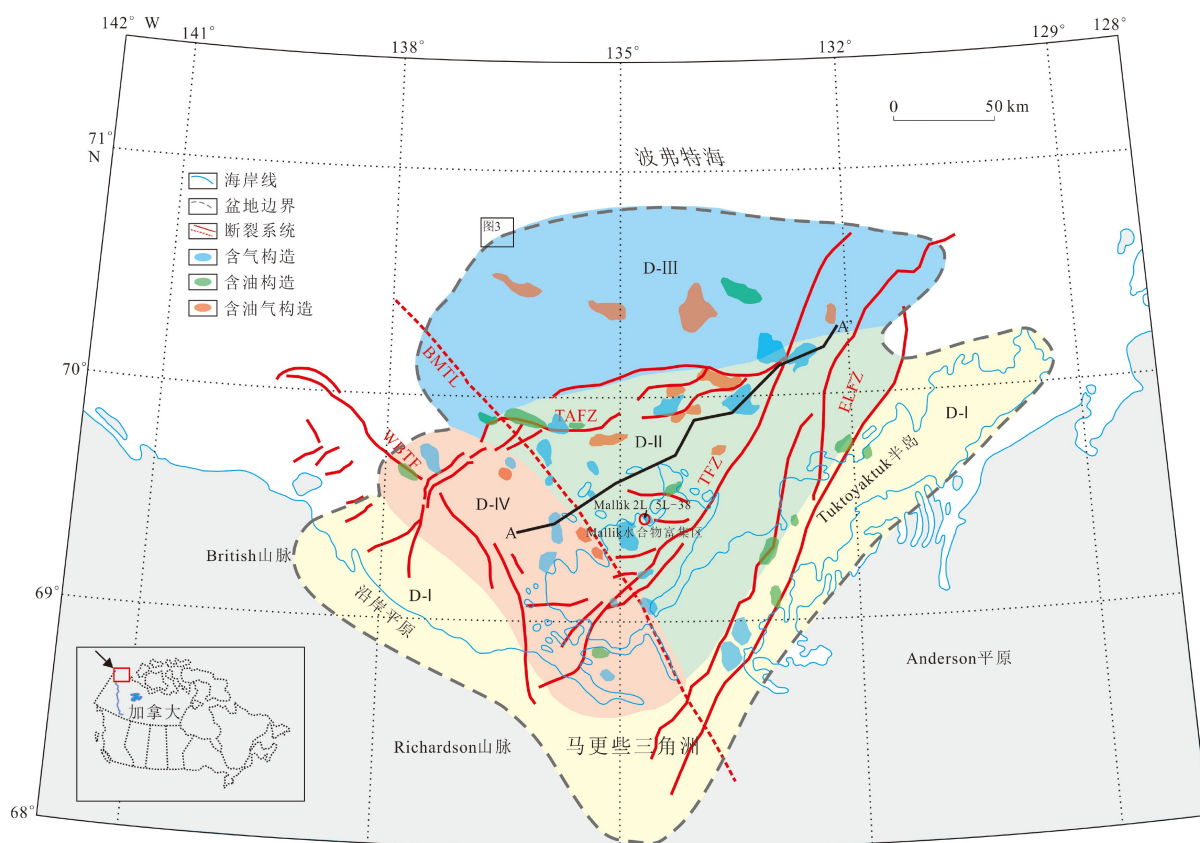
烷渗漏等环境科学研究提供参考。

## 1 区域地质背景

波弗特—马更些三角洲盆地位于北极加拿大西北部波弗特海陆架之上,包括现今的马更些河三角洲、图克托亚克图克(Tuktoyaktuk)半岛和波弗特(Beaufort)海(图1),总面积约为 $12.0 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,其中海上部分约为 $7.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。盆地东部以大型的张性爱斯基摩湖(Eskimo Lakes)断裂带为界,西南部以布鲁克斯(Brooks)山脉为界,北部延伸至陆架边缘(一般将现代陆架坡折带作为盆地北部边界),以坡折带与加拿大海盆分界。盆地的构造特征整体表现为由4条断裂带和1条复杂线性构造将盆地划分为4个构造区<sup>[20]</sup>(图1)。其中,4条断裂带分别为爱斯基摩湖断裂带(ELFZ)、Taglu断裂带(TFZ)、Tarsiut-Amauligak断裂带(TAFZ)、西波弗特逆冲前缘断裂(WBTF)。呈NE-SW走向的ELFZ断层带为盆地侏罗纪—早白垩纪裂谷体系的东南边缘;TFZ断裂带与ELFZ近乎平行,控制着盆地晚白垩纪至新近纪的沉降中心;TAFZ几乎呈E-W向延伸,为晚中新世沉积中心的南部边界;WBTF位于波弗特海西部,平行于波弗特西南海岸,限定了盆地内逆冲断层收缩变形的前缘<sup>[20]</sup>。波弗特—马更些构造线(Beaufort-Mackenzie Tectonic Lineament, BMTL)为一条复杂线性构造带,其平行于西南近岸海域冲断带前缘,可能代表了加拿大海盆波弗特断裂带南部的拉张。该区域西部以挤压构造为主,向三角洲中部和东部过渡为铲状断层带。

该盆地是一个在元古界结晶基岩上发育的中生代被动陆缘裂谷盆地。盆地演化受裂谷作用、加拿大洋盆扩张和科迪勒拉造山运动等构造事件影响,盆地构造演化可大致分为裂前阶段、裂谷阶段、洋盆张开阶段、挤压阶段、前陆阶段和被动沉降阶段<sup>[21-22]</sup>(图2)。

盆地基底包括元古界—石炭系变质岩,主要沉积盖层包括侏罗纪裂谷作用及之后沉积的地层。古生代地台层序、中生代裂谷层序和新生代三角洲层序均为不整合接触。受盆地演化控制,根据沉积岩性组合特征可将盆地沉积盖层(侏罗系—第四系)划分为5套地层组合<sup>[21-22]</sup>(图2):①裂谷期地层(上侏罗统—下白垩统),包括Husky组、Parsons群、Mount Goodenough组等地层,是晚侏罗世—早白垩世期间的裂谷沉积,受到区域拉张作用影响发育半地堑、地堑,充填了以海相泥页岩为主的碎屑

图1 波弗特—马更些三角洲盆地地理位置及构造单元分布图<sup>[20]</sup>Fig.1 Geographical location and tectonic map of the Beaufort-Mackenzie Delta Basin<sup>[20]</sup>

楔形沉积地层;②洋盆张开期地层(白垩统中段),包括 Arctic Red 组、Boundary Creek 组和 Smoking Hills 组,加拿大海盆张开以来盆地地层严重缺失,赛诺曼—坎潘阶 Boundary Creek 组和 Smoking Hills 组均为富有机质页岩,为外陆架到陆坡沉积环境,沉积速率较低;③挤压期地层(上白垩统—下始新统),包括 Fish River 组、Aklak 组、Taglu 组,是科迪勒拉(Cordilleran)构造变形早期形成的陆相—滨浅海相三角洲平原和三角洲前缘沉积,以及陆架—陆坡泥质沉积,并发生了强烈的同沉积和沉积后变形,形成了对称的开阔背斜、褶皱,可能发育底辟核;④前陆期地层(上始新统—中新统),包括 Richards 组、Kugmallit 组、Mackenzie Bay 组和 Akpak 组,科迪勒拉造山运动对盆地影响明显减弱,变形前缘向海迁移,引起波弗特褶皱带内前三三角洲和陆坡泥岩的新一轮褶皱和逆冲,以前三角洲、三角洲前缘和三角洲平原泥质沉积为主;⑤被动沉降期地层(上新统—至今),包括 Iperk 组和 Shallow Bay 组,构造变形最弱,发育了低位海底扇和前积三角洲沉积,Iperk 组是现代马更些三角洲的主要组成部分,其几何形态和前积特征表明沉积物来自盆地东南。

波弗特—马更些盆地油气资源丰富。探明的油

气主要位于晚白垩纪至始新世地层中,这一时期沉积的主体为三角洲碎屑沉积<sup>[21-22]</sup>(图2)。侏罗系—下白垩统 Husky 组、Arctic Red 组和 Mount Goodenough 组页岩,上白垩统 Boundary Creek 组和 Smoking Hills 组以及古近纪 Aklak 和 Taglu 组、Richards 组、Kugmallit 组发育富有机质泥页岩,其中始新统 Richards 页岩为盆地的主力烃源岩,平均 TOC 含量为 1.41%,氢指数达 105.16 mg HC/g TOC,以陆源有机质为主<sup>[22]</sup>。上侏罗统到中新统三角洲相和浅海相地层中发育优质储层,油气发现主要分布在始新统—中新统三角洲相和浅海相砂岩内,在陆坡底部的浊积扇砂岩中也有油气发现。其中 Kugmallit、Aklak 和 Taglu 组三角洲—浅海—深海浊积扇为主力储层<sup>[23]</sup>。

## 2 天然气水合物成藏特征与主控因素

### 2.1 与水合物赋存有关的海底地貌和水体异常特征

天然气水合物的分解和释放会造成海底流体渗漏和沉积物失稳,形成块体流搬运痕迹、麻坑或气体喷口、冻胀丘等流体渗漏作用的地质记录和微地貌特征。利用高精度的声波数据、多波束和浅层

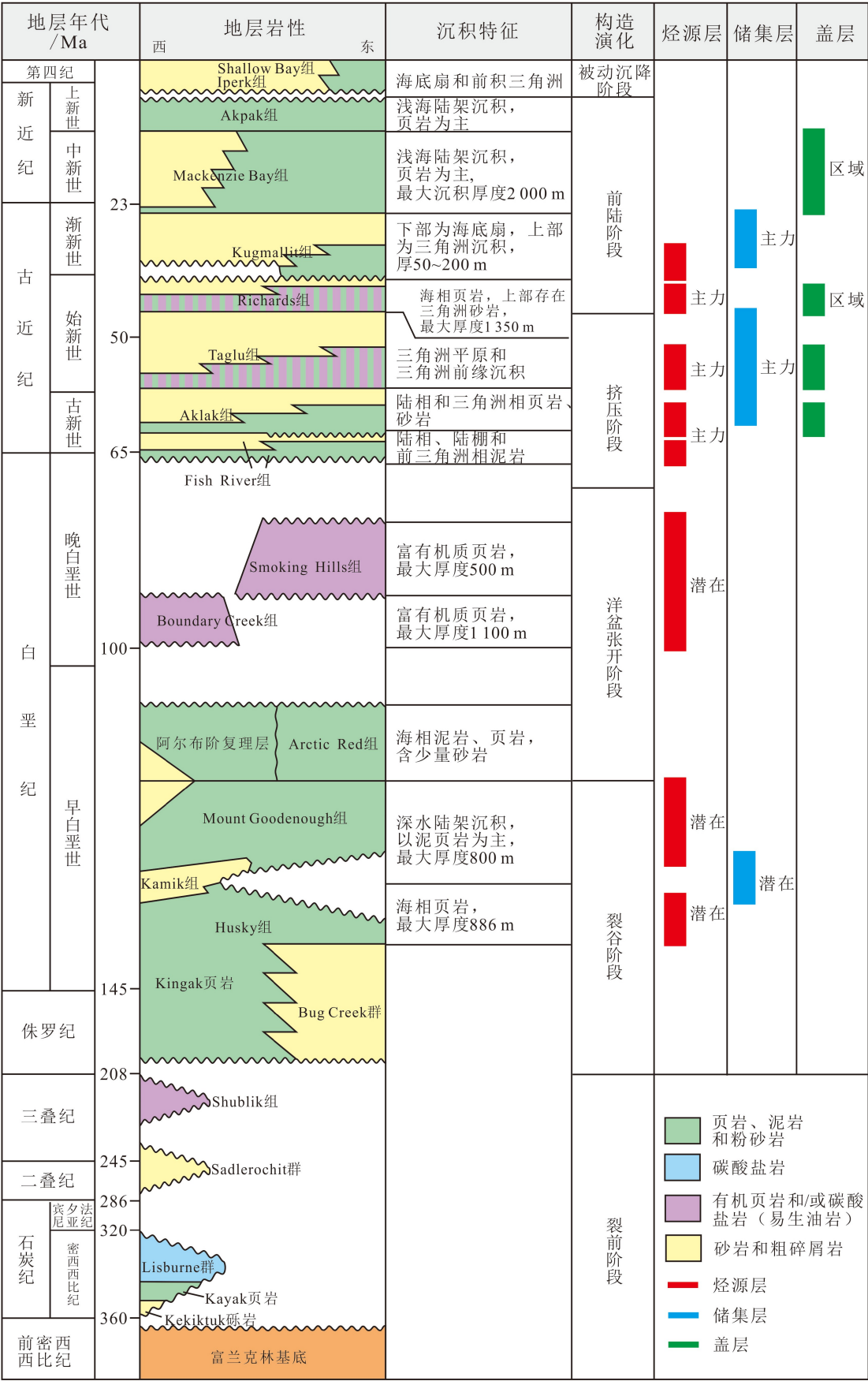


图 2 波弗特—马更些三角洲盆地地层综合柱状图<sup>[21-22]</sup>

Fig.2 The integrated stratigraphic column of the Beaufort-Mackenzie Delta Basin<sup>[21-22]</sup>



剖面资料可以对其进行定性—半定量研究。

### 2.1.1 块体流搬运痕迹

波弗特海陆架—上陆坡区域存在明显与天然气水合物分解、渗漏有关的浅地层失稳,表现出沉积块体滑动现象<sup>[24]</sup>。波弗特海陆架—陆坡海底大部分地区被与块体流(MTDs)沉积相关的杂乱地形(CT)覆盖,原本向陆坡下倾方向延伸的平滑地形(ST)由于块体流(MTDs)作用而发生了强烈扰动<sup>[24]</sup>(图3)。其中,Ikit滑塌体最为典型,该杂乱地形很可能源于陆架坡折带的斜坡沉积物失稳而造成的沉积块体滑塌<sup>[24]</sup>。浅地层剖面上可见滑塌头部陡崖将杂乱地形区与平滑地形区截然分开(图3A-A'和B-B'剖面);沉积层厚度快速变化和变形层的不

规则顶界面应该是MTD作用的表现;变形层推测是饱含气体的滑脱层,表层20~40 m的成层沉积物覆盖在该变形滑脱层之上;MTD中的气体渗漏会表现出浅地层剖面上类似席状透明相起伏的地震反射特征<sup>[25]</sup>;覆盖于变形地层之上的成层沉积物被近垂直的各种尺度的泥底辟构造截断,其中大型泥底辟在海底可形成泥火山(图3A-A'剖面);在沿陆架—陆坡倾向的剖面上可以看到近垂直或向上坡方向倾斜的生长断层,地层几乎无错断,但由于流体渗流,断层面具有强反射特征(图3B-B'剖面)。

波弗特海陆坡全新世沉积物由软泥组成,而之下的晚更新世沉积层为永冻土层,其固结较好;冻土层对下伏地层中的天然气和天然气水合物起着

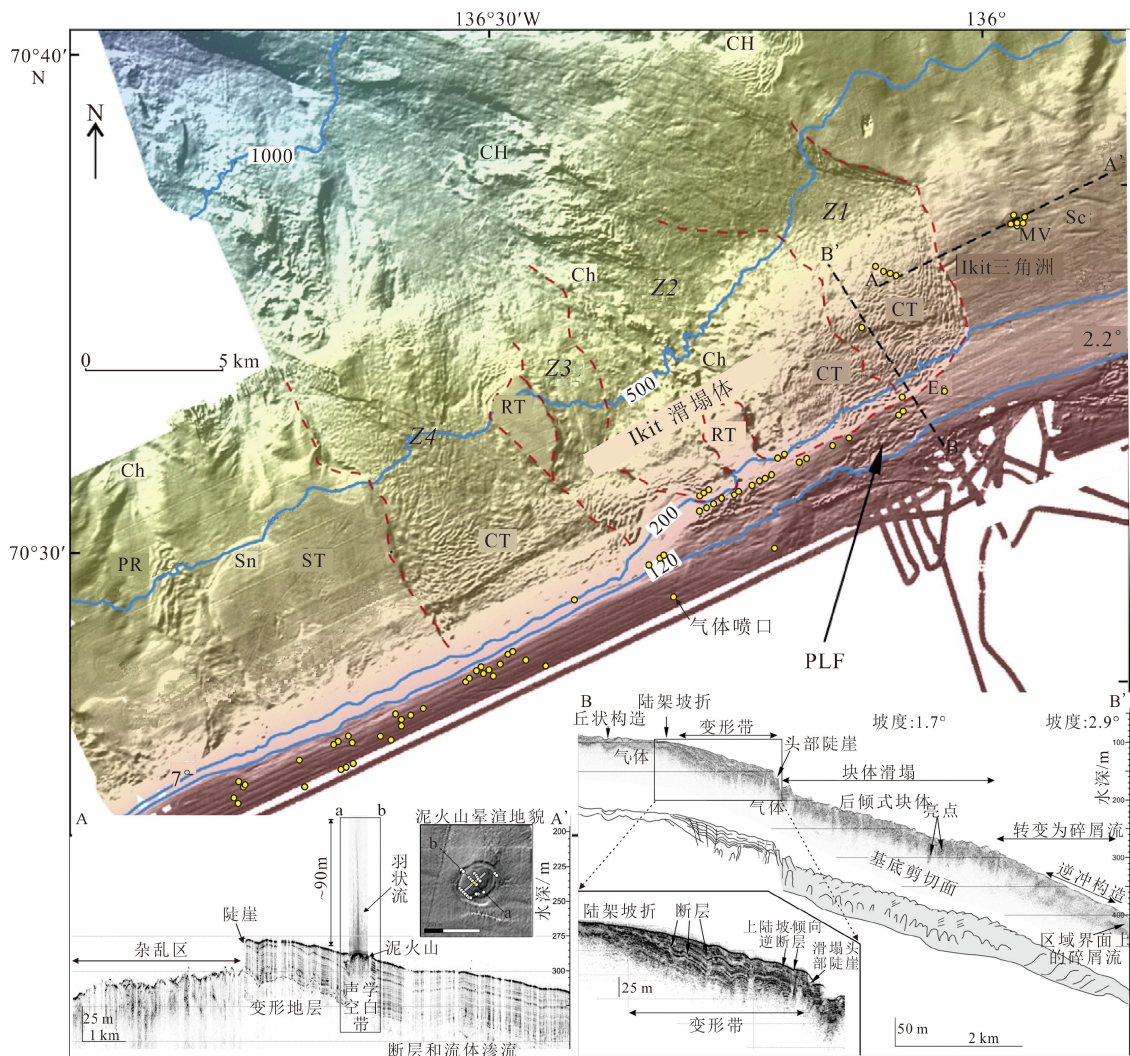


图3 波弗特海陆架—上陆坡海底块体流搬运痕迹地貌特征及浅地层特征<sup>[24]</sup>

红色断线圈定了4类杂乱地形 Z1-Z4, CT: 杂乱地形, RT: 残留平滑地形, ST: 平滑地形, CH: 峡谷头部, Ch: 水道, Es: 陡崖, MV: 泥火山, PR: 平行横脊线, PLF: 冻胀丘, Sc: 残留的冰蚀痕。

Fig.3 Bathymetry of the shelf-upper slope in the Beaufort-Mackenzie Delta Basin<sup>[24]</sup>

Major morphological zones Z1 to Z4 are outlined by red dashed lines, CT: chaotic topography, RT: remnant topography, ST: smooth topography, CH: features include canyon heads, Ch: channels, Es: escarpments, MV: mud volcanoes, PR: parallel ridges, PLF: pingo-like features, Sc: scours.

封盖和保护作用;气候环境的旋回变化可导致冻土层发生间歇式的减薄和破裂,冻土层之下的天然气水合物也会发生幕式的分解,并使分解产生的气体和水向上渗流;天然气和水从冻土层渗流出来后可能会被圈闭在由30 m厚的黏土层覆盖的多孔沉积物中;随着越来越多的气体和水被圈闭,沉积物物理强度降低,在上覆单元的负载下,富含气体的沉积层开始发生蠕变;当孔隙压力超过沉积物可塑性时,最终导致沉积层失稳<sup>[24,26]</sup>。从Ikit滑塌体的浅地层剖面特征中,可识别和推测由于气体从下伏冻土层的溢出,在浅层软泥层和深层冻土层之间形成饱含气体的滑脱层,由于某些地质营力(如地震等)的触发,在陆架—陆坡上发生块体滑塌作用。

### 2.1.2 气体喷口(泥火山)

波弗特海陆架—上陆坡区可观察到气体羽状流以孤立或组合的形式从喷口位置向海底逸散<sup>[24]</sup>。气体羽状流高度为30~40 m最为常见,也可见近百米高度的羽状流(图3A-A'剖面),典型的气体羽状

流在大型泥火山的中间部位和环形沟槽内被观察到<sup>[24]</sup>,并且浅地层剖面显示,高丰度气体羽状流发育的海底地震反射表现出空白反射和亮点反射特征(图3A-A'和B-B'剖面)。陆架边缘的喷口在90~200 m水深等深线之间(海底冻土带向海一侧附近)的区域最发育,这表明下伏冻土层里的气体向上泄露,沿着陆架边缘永久冻土带的北部边缘逃逸,造成陆架边缘分布着数百个呈线性分布的泥火山(气体喷口)(图3)<sup>[24]</sup>。

### 2.1.3 冻胀丘(pingo-like feature, PLF)

在波弗特海上陆坡一些没有失稳的地区,尤其是波弗特海陆架南部,分布着大量丘型地貌构造<sup>[24,27]</sup>。这些冻胀丘大致呈圆形,直径为1~2 km,位于10~20 m深的海底;地震反射剖面上,冻胀丘构造缺乏内部结构,并被凹槽所环绕(图4a)<sup>[27]</sup>。ROV探测显示,存在着多个气体渗漏的现象,进入到水体的气体样品主要为甲烷(其稳定同位素特征为 $\delta^{13}\text{C}=-76.6\text{‰}$ ,  $\delta\text{D}=-179\text{‰}$ )<sup>[27]</sup>。当环境发生变化

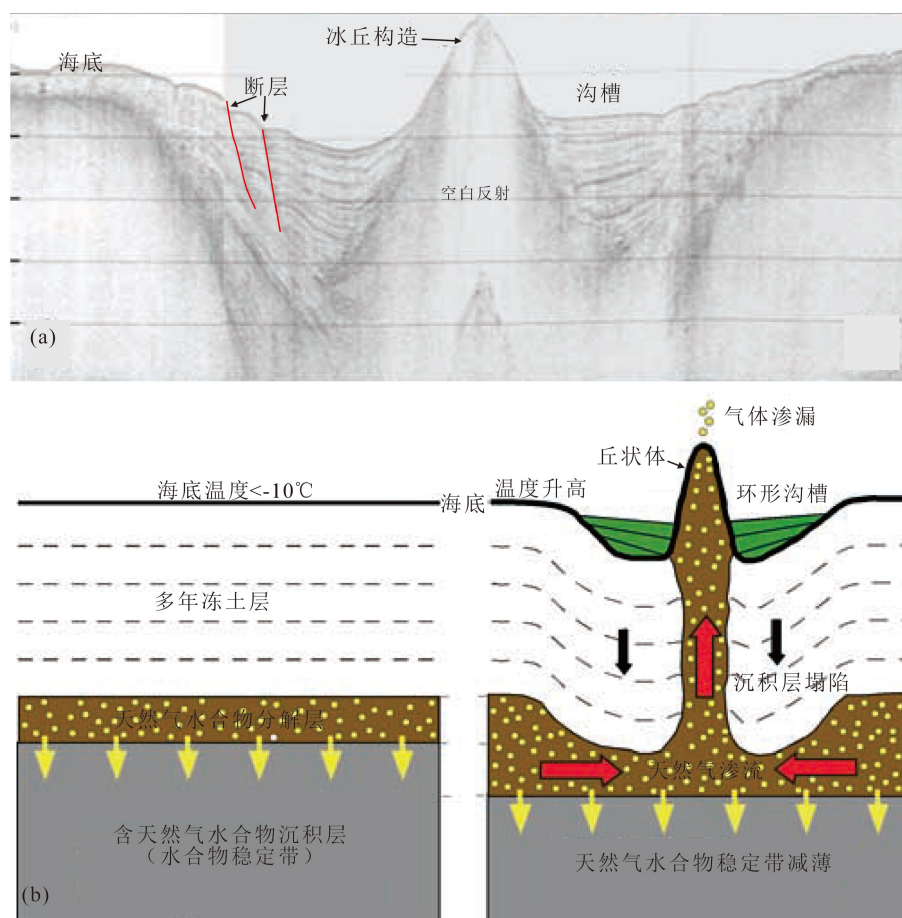


图4 波弗特海陆架南部的冻胀丘地震反射特征和形成演化模式<sup>[27]</sup>

a. 地震反射特征, b. 形成演化模式。

Fig.4 Seismic reflection profile and formation model of the PLF in the Beaufort-Mackenzie Delta Basin<sup>[27]</sup>

a. seismic reflection profile, b. formation model.



(如海底温度上升)冻土层之下的水合物稳定域失稳时水合物将分解,形成冰和气体;由于冰与水合物有基本相同的密度,产生的大量超压将迫使天然气从上覆多年冻土层的薄弱部位(如断裂、裂隙等)泄露,引起了沉积物向上挤出,并造成沉积层膨胀而形成丘状地貌。由于在此过程中沉积物发生迁移和气体的排放,地下体积损失,最终导致丘状体周围形成环形凹槽,凹槽中通常会沉积较为年轻的沉积物(图 4b),沉积物中双壳类 $^{14}\text{C}$ 测年为距今 1 000~4 475 aBP<sup>[27]</sup>。

## 2.2 天然气水合物成藏的地球物理异常特征

### 2.2.1 水合物层在测井曲线上的响应

在波弗特—马更些盆地首次证实水合物存在是基于油气勘探中测井曲线的异常特征。对盆地陆上 Mallik 井区的大量含水合物层的测井数据分析表明,含水合物层表现出高 P 波和 S 波波速、高电阻、高中子孔隙度和井径扩大,具周期跳跃的低声波速度、低密度,泥浆气测上出现峰值等特征<sup>[28-30]</sup>,这与著名的布莱克海脊含水合物沉积层的 Vs 测井结果一致<sup>[31]</sup>。

图 5 显示了其中最具代表性的 Mallik 2L-38 井的测井记录。其中井径测井曲线、自然伽马射线和

孔隙度测井是地层岩性和孔隙度变化的有效指标。含水合物层的主要识别标志是高电阻率、高的 P 波速度( $V_p$ )和 S 波速度( $V_s$ ),其中 895~920、950~995、1 005~1 030 和 1 070~1 110 m 层段(用阴影区域表示)均表现出上述特征。这些层段之间表现出的相对较高的自然伽马射值表明泥质含量较高,也说明水合物富集于沉积层的砂质含量较高的高孔隙度层段中。Guerin 和 Goldberg<sup>[32]</sup>利用电阻率和声波测井来估算了 Mallik 2L-38 附近的天然气水合物饱和度,结果表明在电阻率和声速最高的层段,水合物饱和度可接近 80%。

### 2.2.2 水合物赋存的地震反射异常

波弗特—马更些盆地过 Mallik 5L-38 井位的三维地震剖面可观察到含天然气水合物沉积层位于 0.65~0.8 s,结合声波速度曲线可识别出 3 个高速特征的天然气水合物层段<sup>[33-34]</sup>(图 6)。在真振幅剖面上,含水合物层位于背斜顶部,但没有显示较大的倾角,表现出强振幅反射特征,各水合物层顶部显示正振幅波峰,底部显示波谷(图 6a、b)。对含水合物层段进行了瞬时 Q 因子(地震波瞬时频率与两倍瞬时带宽之比)的计算反演(图 6c)。该地震属性因子是地层岩性单元地震能量相对吸收度的指标,通常与地层的孔隙度、渗透率和裂缝发育有关,因

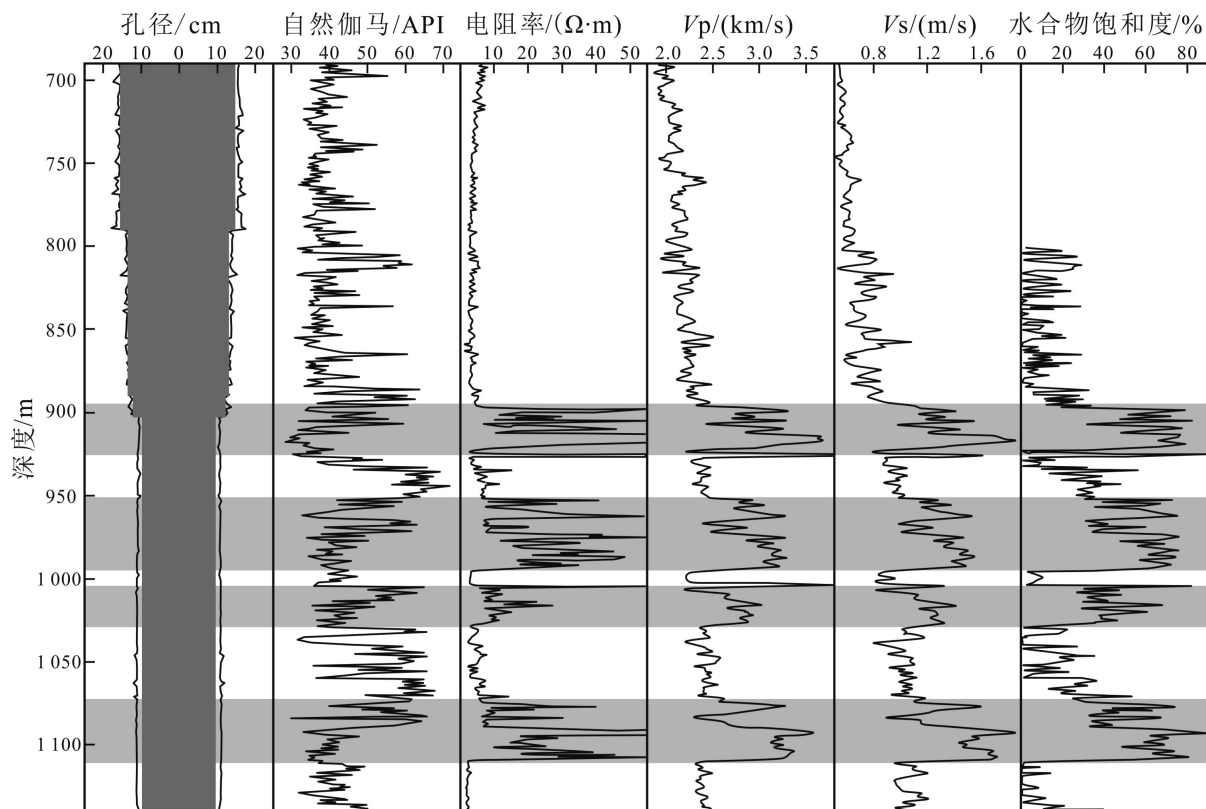


图 5 Mallik 2L-38 探井含水合物层的测井异常特征<sup>[32]</sup>

Fig.5 Well logging curves of hydrate units in the well of Mallik 2L-38<sup>[32]</sup>

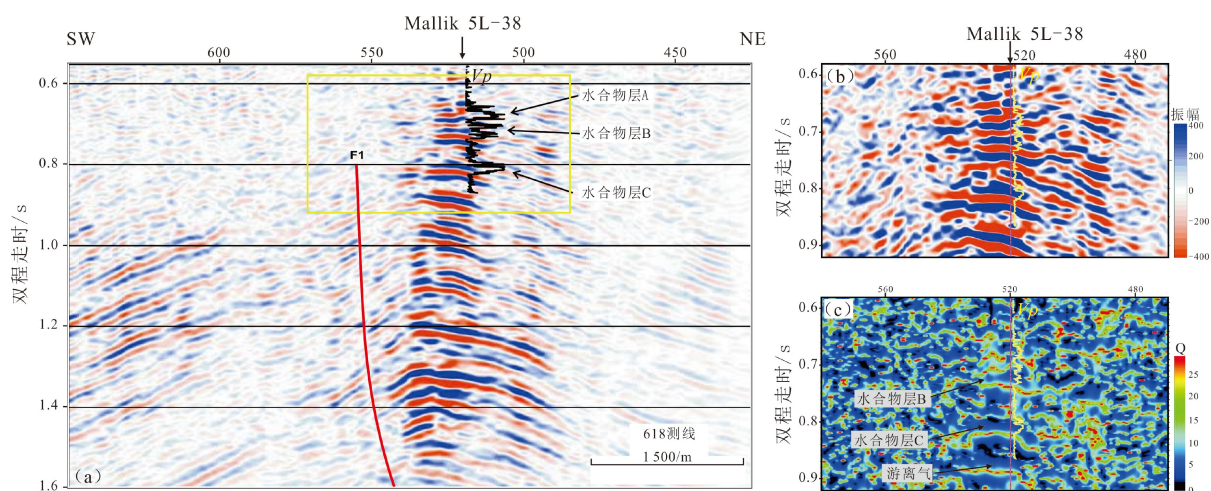


图6 过Mallik 5L-38井三维地震反射剖面特征<sup>[34]</sup>

a. 618测线地震剖面, b. 618测线中发现水合物层段的地震剖面局部放大(黄色线框),  
c. 为b剖面特殊处理剖面(根据真实振幅数据计算的瞬时Q系数剖面)。

Fig.6 The 3D seismic reflection profile across the well Mallik 5L-38<sup>[34]</sup>

a. seismic profile of line 618, b. local magnification of the seismic profile of the line 618 (yellow frame),  
c. instantaneous Q-factors calculated from the true-amplitude data of b.

此,可作为一种定性检测含水合物沉积层短波衰减效应的方法。图6c显示,天然气水合物层B和C表现为明确的低瞬时Q因子带,而周围沉积物显示Q因子的杂乱分布。在瞬时Q因子反演剖面上未发现含水合物层A,可能说明测井曲线与地震资料的相关性有限,反射地震没有正确成像。而在地震剖面的0.862 s深度,观察到在含水合物层C之下发育低瞬时Q因子带,该异常层段可能反映了水合物稳定带之下存在游离气层。地震剖面上F1断层可能控制了该区域水合物的横向分布<sup>[33]</sup>。

## 2.3 有利水合物成藏的地质条件

### 2.3.1 气源条件

波弗特—马更些盆地2 000 m以浅的地层中的气测结果显示天然气成分以甲烷为主(含量91.19%~99.53%)<sup>[35]</sup>。Collett和Dallimore<sup>[35]</sup>对马更些三角洲的3口冻土层探井((92GSCTAGLU、92GSCKUMAK和92GSCUNIPKAT井)的天然气地球化学测试分析结果表明,冻土层和之上的沉积层中的游离气的 $C_1/(C_2+C_3)$ 值一般大于1 000,甲烷稳定碳同位素( $\delta^{13}C$ )平均值为-81.3‰,表现为生物气的特征;而在冻土层底部的 $C_1/(C_2+C_3)$ 值大多为100~1 000,甲烷 $\delta^{13}C$ 为-50‰~-60‰,表现为生物气与热成因气混合的特征。对Mallik 2L-38井的岩屑、岩心(包括不含水合物和含水合物层段)的气测结果表明,烃气来源可分为3个来源:井下350 m以上沉积层天然气为生物成因气,表现为高甲烷含量和很轻的

甲烷碳同位素值;350~785 m为混合成因气层段(冻土层),其甲烷碳同位素随深度变重,说明热成因气含量随深度增加;785~1 165 m(井底)层段(包括含水合物层)为热解成因气<sup>[36]</sup>,其来自深部烃源岩或油气藏的供给,通过断裂等疏导系统向上运移至水合物稳定带内形成水合物<sup>[19]</sup>。

### 2.3.2 储集条件

波弗特—马更些盆地含水合物地层主要分布于Kugmallit组和Taglu组含砂的三角洲和三角洲前缘<sup>[37]</sup>,如滨外Mallik L-38井890~1 106 m深度范围内就证实存在水合物和游离气。近海水合物产出层主要位于Iperk、Akpak、Mackenzie Bay组中,少数情况如Kugmallit组也有水合物分布(图7)。多数情况下,水合物稳定带都位于Iperk组内,但Iperk组储层质量并不好。在陆上和近海区Iperk组由未固结到弱胶结的砾岩—砂岩组成;在陆架区Iperk组厚度近4 000 m,地层泥质含量高,部分地区被砂岩覆盖<sup>[37]</sup>。从沉积相的角度分析,三角洲前缘的重力流沉积和半远洋(近海)沉积层是天然气水合物的良好储层;其通常具有大量悬浮物质,快速沉积,沉积物的含砂率较为适中,有足够的孔隙空间和良好的孔渗性,在适当的温压条件下,有利于水合物聚集成藏。

### 2.3.3 构造条件

构造条件是天然气水合物富集成藏的重要控制因素,其不仅为流体运移提供通道,而且也是天然气水合物的储集场所。根据构造条件,可将天然



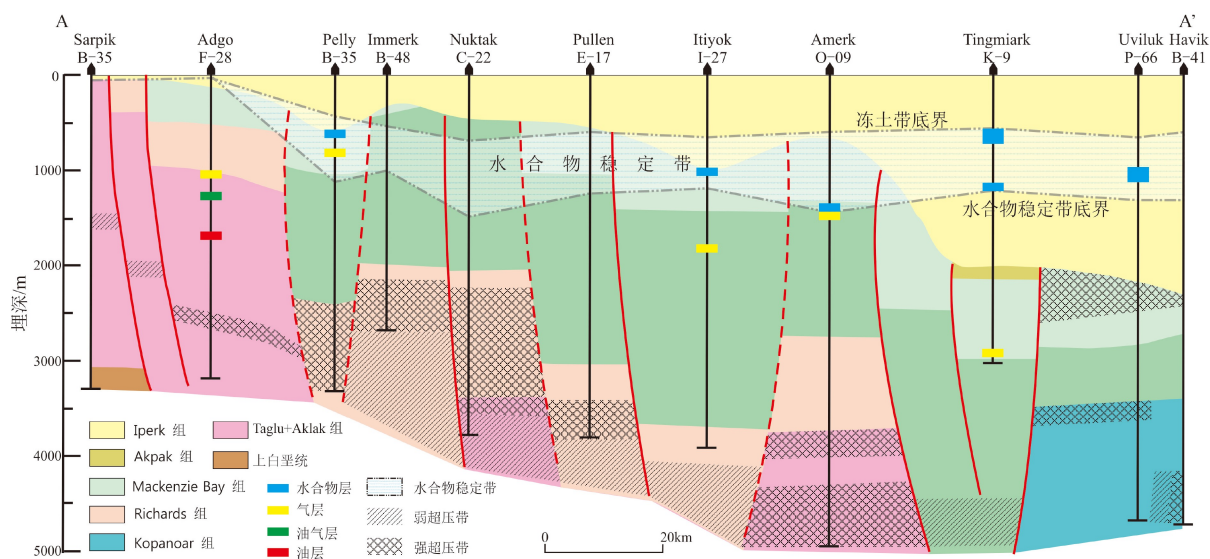


图 7 冻土带、水合物稳定带、水合物层、水合物/游离气接触带和常规油气在地层剖面上的分布关系<sup>[37]</sup>

Fig.7 Permafrost zone, hydrate stability zone, gas hydrate (H), gas hydrate-gas contact zones (H/G), and conventional oil and gas occurrences and their relationships with stratigraphy for cross section A-A'<sup>[37]</sup>

气水合物成藏模式大致分为主动大陆边缘模式和被动大陆边缘模式。波弗特—马更些盆地位于波弗特海陆架之上,属被动大陆边缘,盆地经历了多次构造运动和沉积事件,由于海底重力流、断裂及底辟作用,特别是陆缘内厚沉积层塑性物质流动、陆缘外侧火山活动及张裂作用,常常在海底浅表层形成断裂—褶皱构造、底辟构造、海底扇状地形、“麻坑”地貌和海底滑塌等多种形式的构造、沉积、地貌环境,这些环境与水合物形成有密切关系。

波弗特—马更些盆地发育了多条断裂带,尤其是北部爱斯基摩湖断裂带以一系列正断层为特征,下伏铲状断层系统;盆地中部理查德岛以北,Taglu断裂带发育大量正断层和逆断层(图1)。这些断层为深部气源向浅部运移提供了运移通道。浅部的背斜构造成为良好的圈闭。浅部地层的变形和断裂作用,可导致部分天然气继续向上运移,塑性物质的垂向流动,使沉积盖层上拱形成底辟构造,当塑性流刺穿海底时,形成泥火山(图3,图4)。海底泥火山、泥底辟、冻胀丘均是海底流体渗流的表现,当含有过饱和气体的流体从深部向上运移到海底浅部时,由于受到快速冷却作用在泥火山周围形成水合物,形成的水合物常呈环带状分布在底辟构造或海底泥火山周围(图3,图4)。

## 2.4 水合物稳定条件

### 2.4.1 地温条件

天然气水合物的稳定存在需要特定的温压条件,即低温高压环境。波弗特—马更些三角洲盆地

地表温度一般为 $-15\sim-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。通过对 268 口钻井温度数据的分析表明,地温梯度较低,拟合的地温梯度为  $25.7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ,平均热流值  $45\sim 90\text{ mW}/\text{m}^2$ ,为形成水合物创造了非常有利的物理条件<sup>[38]</sup>。热流值分布与构造带密切相关,盆地内 1 000 m 以浅地层有两个区域存在异常高温带:一为波弗特海西部和邻近陆上区域(构造域 D-IV);另一个是沿着爱斯基摩湖断裂带东南的裂谷边缘(构造域 D-I);而异常低温带位于始新世—渐新世沉积中心 D-II 和 Tarsiut-Amauligak 断裂带(TAFZ)以北的 D-III<sup>[38]</sup>。另外,盆地陆上和滨海的冻土层一般厚度大于 200 m,冻土底界温度仅为 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,一定程度上控制着水合物稳定带的深度和厚度<sup>[39]</sup>。

### 2.4.2 地层压力

对波弗特—马更些盆地 250 口钻井的地层压力数据的分析表明,在波弗特—马更些陆架近海地区水合物稳定带内的孔隙压力梯度与静水压力梯度相当,估算为  $9.795\text{ kPa}/\text{m}$ <sup>[37]</sup>。2 500 m 以浅的地层超压( $>11.5\text{ kPa}/\text{m}$ )区主要分布在 D-III 构造带内 Tarsiut-Amauligak 断裂带以北地区,浅超压的南部边界与 Tarsiut-Amauligak 断裂带近似平行<sup>[20]</sup>。Taglu 和 Kugmallit 组内两个主要超压中心位于始新世和晚中新世沉积中心,与异常低温热流场分布一致。另外,盆地中也存在深部超压(2 000 m 以下),深部超压带顶界面深度由南(靠近盆地边缘)向北逐渐降低。深部超压带在天然气水合物稳定带之下,对天然气水合物的稳定没有直接影响,但它们对含气流体向上运移起着关键作用(图7)。

2.4.3 天然气和孔隙水组成

钻井取得的天然气样品和泥浆录井的气测数据表明,波弗特—马更些盆地 1 500 m 以浅的地层中天然气(天然气水合物)以甲烷占绝对优势,占气体组分的 99.19%~99.5%,其次为乙烷和丙烷,其他气体含量非常稀少,可忽略不计<sup>[40-41]</sup>。根据 Mallik 2L-38 井的测试结果表明,水合物类型以 I 型甲烷水合物为主<sup>[36]</sup>。

盐度的增加可降低水的冰点,地层孔隙水的盐度将影响水合物形成时的温度。钻井孔隙水测试结果表明,盆地 1 500 m 以浅地层的孔隙水矿化度为 5‰~35‰<sup>[41-42]</sup>,大部分低于海水矿化度(一般为 35‰)。

2.4.4 水合物稳定带厚度

根据以上地温、压力、天然气和孔隙水组成等水合物稳定条件和钻井数据,重建地质-压力-温度剖面,分析可确定波弗特—马更些盆地天然气水合物稳定带的底界深度范围从近地表(不存在水合物)到 1 500 m,各区域变化范围较大(图 7)。陆上永久冻土区水合物稳定带底界最大深度位于理查德岛东北部之下(约 1 400 m),海上区域水合物稳定带底界最大深度约为 1 500 m<sup>[37]</sup>。一般将永久冻土带基底到水合物稳定带基底之间的深度范围视为水合物稳定带厚度。考虑到波弗特—马更些盆地永久冻土带基底深度(即水合物稳定带顶部深度)约为(220±10) m,盆地天然气水合物稳定带最大厚度可达 1 300 m。盆地陆上水合物稳定带厚度超过 800 m 的地区,包括理查德岛东北部和 Tuktoyaktuk 半岛;海上水合物稳定带厚度更大,据推算整个海上区域水合物稳定带厚度约为 1 100 m,其最大厚度可达 1 300 m<sup>[37]</sup>。

根据波弗特—马更些盆地跨海陆地质剖面的分析可知(图 7),水合物稳定带位于永久冻土带之下,部分钻井在水合物稳定带中发现了水合物—游离气过渡带,含水合物层通常下伏常规油气藏。另外,天然气水合物分布主要与 Iperk 组、Akpak 组、Mackenzie Bay 组、Kugmallit 组和 Richards 组砂岩三

角洲和三角洲平原沉积相有关,且天然气水合物的赋存受上覆地层中的冻土带限制。根据钻井录井资料测算,盆地内天然气水合物不是连续存在,而是以多套含水合物层形式存在:890~940 m,水合物饱和度为 50%~85%;945~1 035 m,水合物饱和度为 40%~80%;1 060~1 120 m,水合物饱和度为 80%~90%<sup>[32]</sup>。

3 天然气水合物与油气共生成藏模式探讨

3.1 含油气系统对水合物成藏的控制

通过钻井数据统计和剖面特征分析,发现波弗特—马更些盆地水合物赋存与下伏常规油气藏密切相关,常规天然气井中 75% 发现有水合物;常规油井中 91% 发现有水合物<sup>[19]</sup>。含水合物层厚度与下伏油气藏的发现概率呈现明显的正相关(表 1);同时,部分水合物层位于下伏含水圈闭之上<sup>[19, 37]</sup>,而这些含水圈闭可能是之前的油气藏烃类泄露散失后形成的。这种高度吻合的空间叠置关系说明深部油气藏的存在,是浅部水合物的生成和富集的前提,为其提供了充足的气源供给。从近海区域的地质剖面分析可知(图 7),水合物主要位于 Iperk 砂岩层中和 Mackenzie Bay 砂岩夹层中,水合物和游离气的接触界面通常发育于 Mackenzie Bay 组/Kugmallit 组和 Iperk 组内,而常规天然气藏位于水合物稳定带之下<sup>[37]</sup>。

另外,构造要素(断裂、褶皱)的空间分布密度和天然气水合物赋存之间存在明显的正相关性,尤其是高饱和度水合物层(水合物饱和度大于 50%)在构造要素密度高的地区更发育<sup>[19]</sup>。由此可推测构造背景对水合物聚集成藏起着重要作用,断裂系统在水合物成藏中不仅起着流体运移通道的作用,同时还可能起着储集空间的作用,使下伏油气藏中的天然气运移至稳定带中形成水合物。Mallik 水合

表 1 按照水合物净厚度分类的波弗特—马更些三角洲盆地含气体水合物的井数统计<sup>[19]</sup>  
Table 1 Gas hydrate Wells in the Beaufort-Mackenzie Delta Basin classified by net hydrate thickness<sup>[19]</sup>

| 含水合物层净厚度/m |                           | >0.1 | >1 | >2 | >5 |
|------------|---------------------------|------|----|----|----|
| 钻井数/口      | 有水合物显示的井                  | 122  | 80 | 40 | 7  |
|            | 含水合物显示的产油气井               | 57   | 32 | 21 | 5  |
|            | 含水合物显示的油气空井               | 65   | 48 | 19 | 2  |
|            | 含水合物显示的产油气井占有水合物显示的井百分比/% | 47   | 51 | 53 | 71 |

物富集区就是典型的实例,其位于这两大构造域之间的中部地区,位于平行于西南部逆冲带前缘的构造转换带上(图1),不仅毗邻生烃凹陷,气源条件充足,而且断裂体系十分发育。

### 3.2 冻土层的消长控制着水合物稳定带的发育

极地冰川事件对水合物形成、分解的控制作用十分普遍。如对阿拉斯加北坡艾尔伯特山水合物聚集区的水合物和永久冻土带深度-时间演化模拟结果<sup>[43]</sup>分析表明,当气候持续变冷,永久冻土层基底深度加深会导致水合物稳定带厚度增加,并且永久冻土层不断侵入已存的水合物稳定带中,这就导致在两者的重合带中存在冰和水合物共存的现象<sup>[4]</sup>。另外,西南巴伦支陆架区晚上新世—更新世期间的构造抬升和冰川进退也可能是诱发天然气水合物分解和天然气渗流的原因之一<sup>[13]</sup>。

据对北美第四纪冰川事件的分析,在地质历史时期的冰期/间冰期旋回中,波弗特—马更些地区冻土层厚度随冰盖的退缩与扩张发生了较大的变化。如前所述,水合物赋存主要与 Iperk、Kugmallit 和 Richards 组的三角洲平原相砂体有关,之上发育的冻土层起着重要的封盖作用。因此,与冻土层相关的天然气水合物稳定带的厚度和埋深也随之发生了调整。

由于在伊利诺斯冰期(始于 115 ka 之前)形成的冻土层在桑加蒙间冰期(Sangamonian)时已完全融化,因此,在桑加蒙间冰期时波弗特—马更些盆地水合物稳定带尚未形成<sup>[44]</sup>;至威斯康星冰期(始于约 85 ka,晚更新世最后一个冰期),冻土层重新形

成并不断加厚,控制着水合物稳定带的分布;在威斯康星冰期的 60~30 ka 期间发生海侵事件,冻土区被海水淹没,温度的升高导致冻土层减薄,导致下伏水合物分解、甲烷渗漏,水合物稳定带厚度变薄;全新世早期 15~10 ka,威斯康星冰盖再次扩张,海平面相对现在下降约 70 m,冻土层增厚联带水合物稳定带变厚;中全新世海平面快速上升,在 3 ka 时趋于稳定<sup>[37]</sup>。总之,波弗特—马更些盆地水合物形成和稳定富集时期相对较晚,期间冻土层厚度的变化影响着水合物稳定;同时不间断散失的深部热成因气被传统的岩性盖层或者冻土层下的水合物层封盖,冻土层扮演着水合物成藏系统阀门的作用,控制着下伏水合物的稳定生成或失稳分解。

### 3.3 波弗特—马更些盆地天然气水合物的成藏模式

综上所述,波弗特—马更些盆地的天然气水合物成藏模式可归纳为与下伏油气藏泄漏共生并受冻土调节的成藏模式(图8),其重要特征表现在两个方面:

(1)波弗特—马更些盆地的天然气水合物的气源主要为热成因气,与下伏常规油气藏共源;水合物富集于与始新统—渐新统含油气系统(!)有关的 Iperk、Kugmallit 和 Richards 组三角洲平原相砂体中;下伏油气藏超压驱使天然气向上运移,构造要素(断裂、背斜)密度决定水合物富集丰度。

(2)区域冻土层的封盖作用阻止了天然气的逸散,促进了下伏天然气水合物的成藏;同时冰期/间冰期旋回中冻土带厚度的变化,调节着下伏水合物的生成或分解,控制着水合物稳定带的厚度和埋深。

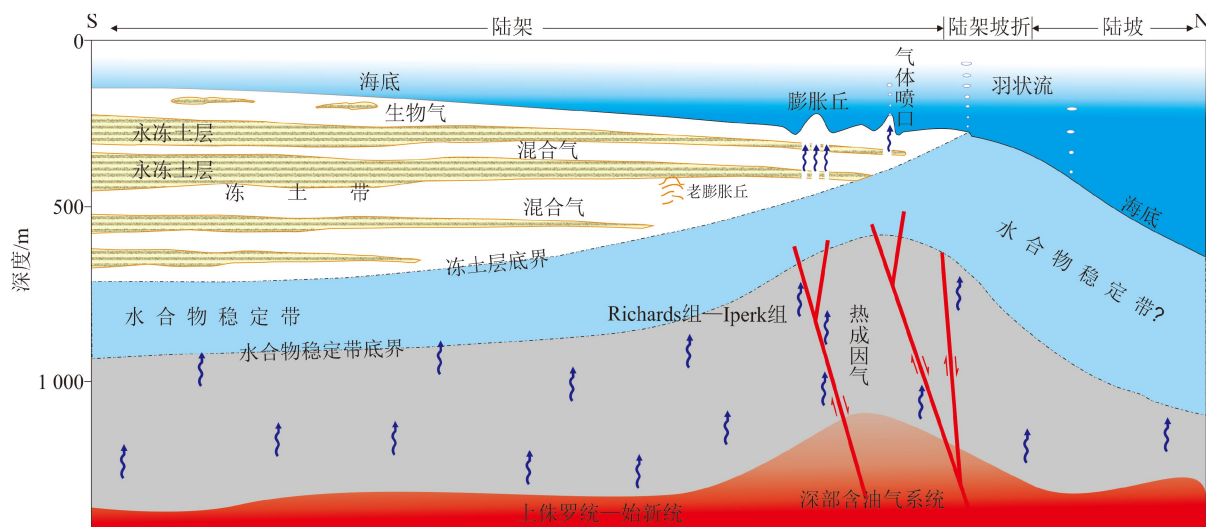


图8 波弗特—马更些三角洲盆地天然气水合物成藏模式

Fig.8 Accumulation model of gas hydrate in the Beaufort-Mackenzie Delta Basin



## 4 结论

(1)波弗特—马更些三角洲盆地具有丰富的常规油气资源,同时在浅部地层中发现了大量天然气水合物富集的地质、地球物理和地球化学证据。海底多波束资料分析表明,天然气水合物的分解和释放会形成海底块体流搬运痕迹、麻坑或气体喷口、冻胀丘等流体渗漏遗迹。测井和地震资料分析表明,水合物富集层具有高P波和S波波速、高电阻、高中子孔隙度和井径扩大,具周期跳跃的低声波速度、低密度,泥浆气测上出现峰值等特征;并在地震剖面上表现为异常强相位、强振幅和明确的低瞬时Q因子带特征。井下地球化学测试资料表明,其气源主要为下伏含油气系统中的热成因气。

(2)构造和地层岩性是控制水合物分布的主要地质因素,构造要素(断裂、背斜)密度与水合物富集丰度呈正相关,水合物赋存主要与Iperk、Kugmallit和Richards组的三角洲平原相砂体有关。水合物的稳定赋存受到地温梯度、压力以及天然气和孔隙水组成等多种因素的共同制约,水合物稳定带之上的冻土带控制着下伏水合物的稳定性,对天然气水合物的成藏起着关键性调节作用。

## 参考文献 (References)

- [1] Collett T S. Gas hydrate petroleum systems in marine and arctic permafrost environments[C]//GCSSEPM Proceedings. Houston, Texas, USA, 2009.
- [2] Collett T S, Johnson A, Knapp C C, et al. Natural Gas Hydrates: Energy Resource Potential and Associated Geologic Hazards[M]. American Association of Petroleum Geologists, 2009: 356-370.
- [3] 杨胜雄. 南海天然气水合物成藏理论[M]. 北京: 科学出版社, 2019. [YANG Shengxiong. Research on Gas Hydrate Accumulation in South China Sea[M]. Beijing: Science Press, 2019.]
- [4] 吴能友, 张海敏, 杨胜雄, 等. 南海神狐海域天然气水合物成藏系统初探[J]. 天然气工业, 2007, 27(9): 1-6. [WU Nengyou, ZHANG Haiqi, YANG Shengxiong, et al. Preliminary Discussion on Natural Gas Hydrate (NGH) reservoir system of Shenhu Area, north slope of South China Sea [J]. *Natural Gas Industry*, 2007, 27(9): 1-6.]
- [5] 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[J]. 现代地质, 2008, 22(3): 356-362. [WU Nengyou, LIANG Jinqiang, WANG Hongbin, et al. Marine gas hydrate system: state of the art [J]. *Geoscience*, 2008, 22(3): 356-362.]
- [6] 卢振权, 吴能友, 陈建文, 等. 试论天然气水合物成藏系统[J]. 现代地质, 2008, 22(3): 363-375. [LU Zhenquan, WU Nengyou, CHEN Jianwen, et al. Preliminary discussion on gas hydrate geological system [J]. *Geoscience*, 2008, 22(3): 363-375.]
- [7] 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(1-3): 14-31.
- [8] Matsumoto R, Ryu B J, Lee S R, et al. Occurrence and exploration of gas hydrate in the marginal seas and continental margin of the Asia and Oceania region [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(10): 1751-1767.
- [9] 张功成, 米立军, 屈红军, 等. 全球深水盆地群分布格局与油气特征[J]. 石油学报, 2011, 32(3): 369-378. [ZHANG Gongcheng, MI Lijun, QU Hongjun, et al. A basic distributional framework of global deepwater basins and hydrocarbon characteristics [J]. *Acta Petroleica Sinica*, 2011, 32(3): 369-378.]
- [10] 雷新华, 林功成, 苗永胜, 等. 天然气水合物与传统油气资源共生生成藏模式初探[J]. 海相油气地质, 2013, 18(1): 47-52. [LEI Xinhua, LIN Gongcheng, MIAO Yongsheng, et al. Accumulation coexistence models of natural gas hydrate and conventional hydrocarbon: an approach [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2013, 18(1): 47-52.]
- [11] 刘金龙, 王淑红, 颜文. 海洋天然气水合物与深水油气共生关系探讨[J]. 热带海洋学报, 2015, 34(2): 39-51. [LIU Jinlong, WANG Shuhong, YAN Wen. Research on coexistence between marine gas hydrate and deepwater oil [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2015, 34(2): 39-51.]
- [12] Collett T S, Lee M W, Agera W F, et al. Permafrost-associated natural gas hydrate occurrences on the Alaska North Slope [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(2): 279-294.
- [13] 杨楚鹏, 李学杰, 姚永坚, 等. 西南巴伦支海海底天然气渗漏的地球物理—地球化学标志及其成因机制[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(3): 135-144. [YANG Chupeng, LI Xuejie, YAO Yongjian, et al. The subsurface fluid-flow systems and their genetic mechanism in the southwestern Barents sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2015, 35(3): 135-144.]
- [14] 杨楚鹏, 刘杰, 杨睿, 等. 北极阿拉斯加北坡盆地天然气水合物成矿规律与资源潜力[J]. 极地研究, 2019, 31(3): 309-321. [YANG Chupeng, LIU Jie, YANG Rui, et al. Occurrence and resource potential of gas hydrate in the Alaska north slope basin of the arctic [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2019, 31(3): 309-321.]
- [15] Locat J, Lee H J. Submarine landslides: advances and challenges [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, 39(1): 193-212.
- [16] Hornbach M J, Saffer D M, Holbrook W S. Critically pressured free-gas reservoirs below gas-hydrate provinces [J]. *Nature*, 2004, 427(6970): 142-144.
- [17] Dickens G R. Rethinking the global carbon cycle with a large, dynamic and microbially mediated gas hydrate capacitor [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 213(3-4): 169-183.
- [18] 刘杰, 孙美静, 杨睿, 等. 马更些三角洲冻土区天然气水合物成藏的地质控制因素[J]. 新能源进展, 2018, 6(1): 47-54. [LIU Jie, SUN Meijing, YANG Rui, et al. Geologic controls on permafrost-associated gas hydrate occurrence in the Mackenzie delta [J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2018, 6(1): 47-54.]
- [19] Osadetz K G, Chen Z H. A re-evaluation of Beaufort Sea-Mackenzie Delta basin gas hydrate resource potential: petroleum system

- approaches to non-conventional gas resource appraisal and geologically-sourced methane flux [J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 2010, 58(1): 56-71.
- [20] Chen Z H, Issler D R, Osadetz K G, et al. Pore pressure patterns in Tertiary successions and hydrodynamic implications, Beaufort-Mackenzie Basin, Canada [J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 2010, 58(1): 3-16.
- [21] Houseknecht D W, Bird K J. Geology and petroleum potential of the rifted margins of the Canada Basin[M]//Spencer A M, Embry A F, Gautier D L, et al. Arctic Petroleum Geology. Geological Society, London, Memoirs, 2011: 509-526.
- [22] Osadetz K G, Dixon J, Dietrich J, et al. A review of Mackenzie Delta-Beaufort Sea petroleum province conventional and non-conventional (gas hydrate) petroleum reserves and undiscovered resources: a contribution to the resource assessment of the proposed Mackenzie Delta-Beaufort Sea Marine Protected Area[M]//Dallimore S R, Collett T S. Beaufort-Mackenzie Basin: A Review of Conventional and Nonconventional (Gas Hydrate) Petroleum Reserves and Undiscovered Resources in Scientific Results from the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Research Well Program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. Geological Survey of Canada Bulletin, 2005: 19.
- [23] Grantz A, Hart P E. Petroleum prospectivity of the Canada Basin, Arctic Ocean [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 30(1): 126-143.
- [24] Saint-Ange F, Kuus P, Blasco S, et al. Multiple failure styles related to shallow gas and fluid venting, upper slope Canadian Beaufort Sea, northern Canada [J]. *Marine Geology*, 2014, 355: 136-149.
- [25] Mosher D C, Moscardelli L, Shipp R C, et al. Submarine mass movements and their consequences[M]//Mosher D C, Shipp R C, Moscardelli L, et al. Submarine Mass Movements and Their Consequences. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2010: 1-8.
- [26] Paull C, Dallimore S R, Hughe-Clarke J, et al. Tracking the decomposition of submarine permafrost and gas hydrate under the shelf and slope of the Beaufort Sea[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Gas Hydrates. Edinburgh, 2012: 12.
- [27] Paull C K, Ussler III W, Holbrook W S. Assessing methane release from the colossal Storegga submarine landslide [J]. *Geophysical Research Letter*, 2007, 34(4): L04601.
- [28] Majorowicz J A, Hannigan P K. Stability zone of natural gas hydrates in a permafrost-bearing region of the Beaufort-Mackenzie basin: study of a feasible energy source I (Geological Survey of Canada Contribution No. 1999275) [J]. *Natural Resources Research*, 2000, 9(1): 3-26.
- [29] Collett T S. Seismic -and well-log- inferred gas hydrate accumulations on Richards Island [J]. *Bulletin of the Geological Survey of Canada*, 1999, 544: 357-376.
- [30] Lee M W, Collett T S. Amount of gas hydrate estimated from compressional- and shear -wave velocities at the JAPEx/JNOC/GSC Mallik 2L-38 gas hydrate research well[M]//Dallimore S R, Uchida T, Collett T S. Scientific Results from JAPEx/JNOC/GSC Mallik 2L-38 Gas Hydrate Research Well, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. Geology Survey Canada Bulletin, 1999: 313-322.
- [31] Guerin G, Goldberg D, Meltser A. Characterization of in situ elastic properties of gas hydrate-bearing sediments on the Blake Ridge [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(B8): 17781-17795.
- [32] Guerin G, Goldberg D. Sonic waveform attenuation in gas hydrate-bearing sediments from the Mallik 2L-38 research well, Mackenzie Delta, Canada [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(B5): 2088.
- [33] Bellefleur G, Riedel M, Brent T. Seismic characterization and continuity analysis of gas-hydrate horizons near Mallik research wells, Mackenzie Delta, Canada [J]. *The Leading Edge*, 2006, 25(5): 599-604.
- [34] Bellefleur G, Riedel M, Brent T, et al. Implication of seismic attenuation for gas hydrate resource characterization, Mallik, Mackenzie Delta, Canada [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(B10): B10311.
- [35] Collett T S, Dallimore S R. Hydrocarbon gases associated with permafrost in the Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada [J]. *Applied Geochemistry*, 1999, 14(5): 607-620.
- [36] Lorenson T D, Whitticar M J, Waseda A, et al. Gas composition and isotopic geochemistry of cuttings, core and gas hydrate from the JAPEx/JNOC/GSC Mallik 2L-38 gas hydrate research well[M]//Dallimore S R, Collett T S, Uchida T. Scientific Results from JAPEx/JNOC/GSC Mallik 2L-38 Gas Hydrate Research Well, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. Geology Survey Canada Bulletin, 1999: 143-163.
- [37] Majorowicz J A, Hannigan P K. Natural gas hydrates in the offshore Beaufort-Mackenzie basin—study of a feasible energy source II [J]. *Natural Resources Research*, 2000, 9(3): 201-214.
- [38] Chen Z H, Osadetz K G, Issler D R, et al. Hydrocarbon migration detected by regional temperature field variations, Beaufort-Mackenzie Basin, Canada [J]. *AAPG Bulletin*, 2008, 92(12): 1639-1653.
- [39] Majorowicz J A, Osadetz K G. Gas hydrate distribution and volume in Canada [J]. *AAPG Bulletin*, 2001, 85(7): 1211-1230.
- [40] Bily C, Dick J W L. Naturally occurring gas hydrates in the Mackenzie Delta, N. W. T. [J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 1974, 22(3): 340-352.
- [41] Weaver J S, Stewart J M. In situ hydrates under the Beaufort shelf[M]//FRENCH M H. Proceedings of the 4th Canadian Permafrost Conference 1981. National Research Council of Canada, The Roger J. E. Brown Memorial Volume, 1982: 312-319.
- [42] Hitchon B, Underschultz J R, Bachu S, et al. Hydrogeology, geopressures and hydrocarbon occurrences, Beaufort-Mackenzie Basin [J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 1990, 38(2): 215-235.
- [43] Dai S, Lee C, Santamarina J C. Formation history and physical properties of sediments from the Mount Elbert Gas Hydrate Stratigraphic Test Well, Alaska North Slope [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(2): 427-438.
- [44] Allen D M, Michel F A, Judge A S. The permafrost regime in the Mackenzie Delta, Beaufort Sea region, N. W. T. and its significance to the reconstruction of the palaeoclimatic history [J]. *Journal of Quaternary Science*, 1988, 3(1): 3-13.