

东巴伦支海盆地构造演化与含油气前景

徐翰,刘 强,陈 杰,高 莉

中国地质大学(北京)地球科学与资源学院,北京 100083

摘要: 东巴伦支海盆地位于北极海域,是一个发育有完整前裂谷—同裂谷—后裂谷层序的大陆边缘裂谷盆地,形成于贝加尔期—加里东期基底之上。盆地主要沉积层序为上古生界泥盆—石炭纪前裂谷期拗陷沉积单元、二叠—三叠纪同裂谷期沉积单元和三叠纪晚期—早第三纪后裂谷期拗陷沉积单元;其主力烃源岩为三叠系页岩及煤层,主要储盖组合为中-上侏罗统砂岩-泥岩,共划分为1个含油气系统和2个成藏组合。根据油藏规模序列法预测,东巴伦支海盆地百万桶以上油气田平均预测值为21个,总可采储量81755百万桶油当量(MMMBoe)。

关键词: 东巴伦支海盆地; 构造演化; 含油气前景

中图法分类号: [TE122]

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2016)03-0393-06

Tectonic Evolution and Hydrocarbon Prospects of East Barents Basin

XU Han, LIU Qiang, CHEN Jie, GAO Li

School of Earth Sciences and Resources/China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: East Barents Basin locates in the Arctic, it is a continental margin rift basin which completely developed fore-rift, syn-rift and post rift sequence and formed on the Baikal-Caledonian basement. The main sedimentary sequence of the basin are Upper Paleozoic Devonian - Carboniferous fore-rift depression sedimentary unit, Permian - Triassic syn-rift sedimentary unit and Late Triassic - Early Tertiary post-rift sedimentary unit, whose main hydrocarbon source rocks are Triassic shale and coal, and main reservoir-seal complex are upper Jurassic sandstone - mudstone that can be divided into one petroleum system and two plays. According to the reservoir trap size sequence method, the East Barents Basin is predicted to contain an average of 21 fields whose oil and gas reserve more than one million barrels, and the total recoverable reserves is 81,755 million barrels of oil equivalent (MMBoe).

Keywords: East Barents Basin; tectonic evolution; hydrocarbon prospects

1 概况

东巴伦支海盆地位于巴伦支海东部,是俄罗斯北极海域的最西端。该盆地西部边缘位于俄罗斯—挪威边界水域,这一有争议的“灰色地带”意味着油气勘探极少涉及该区域^[1]。

东巴伦支海盆地与巴伦支巨型海槽的发育有关,其边界为断裂或挠曲边界,将该盆地与东边的新地岛(Novaya Zemlya)褶皱带和前新地岛(Prinovozemelsk)构造带(包括厄德米瑞尔提(Admiralty)高地)、南部的伯朝拉地块、西边和北边的斯瓦尔巴特地块分开^[2,3]。盆地北部为格鲁曼特(Grumant)隆起,包括法兰士约瑟夫地群岛。西部海区包括俄罗斯、挪威及俄罗斯—挪威争议区水域的巴伦支台盆。盆地主要构造单元/次盆包括(图1):南巴伦支拗陷、什托克曼-鲁宁隆起(包括拉德罗夫及其他鞍形隆起区)、北巴伦支拗陷、阿尔巴诺夫-戈尔博夫隆起、圣安妮拗陷。

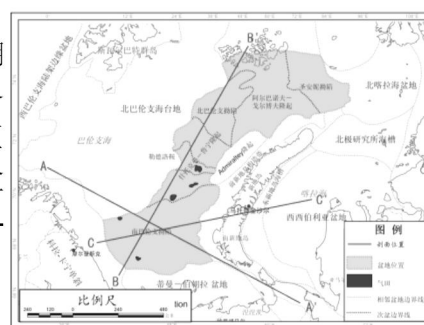


图 1 东巴伦支海盆地位置图

Fig.1 Location of East Barents Basin area

2 构造演化

2.1 盆地构造特征

东巴伦支海盆地为发育完整的前裂谷—同裂谷—后裂谷层序的大陆边缘裂谷盆地。盆地的基底为前寒武纪—早古生代贝加尔—加里东期褶皱变质岩系。晚古生代晚泥盆世—早二叠世为被动大陆边缘拗陷形成期,晚二叠世—三叠纪为裂谷活动期,侏罗—白垩纪为裂谷期后拗陷形成期,第三纪

收稿日期: 2014-10-20

修回日期: 2014-11-02

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司国家科技重大专项:全球剩余油气资源研究及油气资产快速评价技术(二期)(2011ZX05028);中国石油天然气股份有限公司专项:全球油气资源评价与利用研究(2013E-0501)

作者简介: 徐翰(1990-),男,博士,现主要从事盆地地质综合研究工作。E-mail:xuhan221915@126.com

数字优先出版:2016-04-19 http://www.cnki.net

为构造反转期^[4,5]。

东巴伦支海盆地构造的形成与控制盆地内含油气圈闭形成的三个明显的构造活动期密切相关(图2,3)。

2.1.1 二叠—三叠纪裂谷活动期 在南、北巴伦支海次盆的轴部地区，减薄的下伏大洋地壳之上发育约 15000 m 厚的二叠系及其以上地层。后裂谷期的沉降和沉积作用将这些地层深埋在被动边缘碎屑岩楔形体之下。尽管卷入了后二叠纪裂谷活动，围绕次盆边缘分布的二叠—侏罗系碎屑岩楔形体却并没有受到多少伸展断裂作用的影响。

主要形变：近EW向或NWW—SEE向的地壳伸展构造，很可能还伴有沿贝加尔期转换带的后期剪切作用。

主要形变机制：断块的倾滑（很可能为斜滑）。

主要构造：深埋的地层剖面及上覆盆地充填物中的掀斜断块（以前者为主）。

2.1.2 三叠纪挤压活动期 东巴伦支海盆地东翼发生了明显的构造反转。反射地震解释剖面显示，当从南部次盆的轴部追踪到主要反转区——厄德米瑞尔提（Admiraltey）隆起时，上二叠统并没有明显减薄，这表明反转作用发生在二叠纪后。巨厚的三叠系地层的明显减薄及与侏罗系反射层之间的超覆关系表明反转作用发生在三叠纪，很可能与新地岛的隆升及冲断作用有关。厄德米瑞尔提（Admiraltey）反转构造向西的偏移类似于新地岛隆起，但幅度要小些。向南地震反射波强度的衰减指示沿基底软弱带发育的贝加尔期造山带的转换挤压复活。

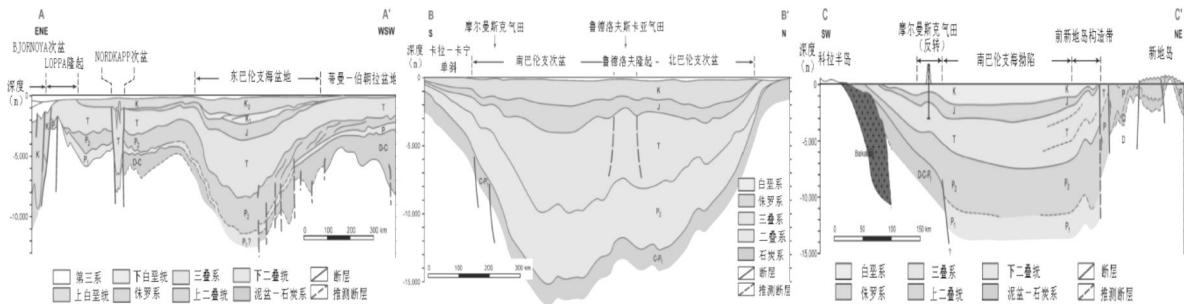


图 2 东巴伦支海盆地横剖面图

剖面位置见图1

Fig.2 Cross-section of East Barents Basin

Cross-section location was showed in Fig.1

主要形变：总体为东西向挤压，与乌拉尔洋的关闭有关；沿贝加尔期剪切带的转换挤压复活。

主要应变机制：向西的逆冲作用；新地外来地块向减薄的地壳区的重力滑动作用；地块的挤压走滑运动；褶皱作用。

主要构造：区域性反转背斜；盆内隆起（拉德诺夫隆起）；外来地块。

2.1.3 第三纪中期的构造反转期 沿南巴伦支次盆南翼和东翼发育大型圈闭构造（如摩尔曼斯克气田），白垩系卷入了这些构造。简单的几何形态、相对于前断裂活动期地层的上盘位置及与第三系地层之间的关系表明这些构造为晚白垩世或第三纪形成的反转背斜。毗邻新地岛三叠系反转构造的白垩纪地层中也可能发育相似的构造。一些大型背斜构造也毗邻拉德诺夫隆起发育，这些构造具晚期生长特征，是否与挤压或转换挤压作用有关还很难确定。

主要形变：挤压作用（可能为北西—南东向）。

主要应变机制：褶皱作用、先存伸展和逆冲断裂的反向运动。

主要构造：断裂上盘及次盆边缘的大型穹隆构造。

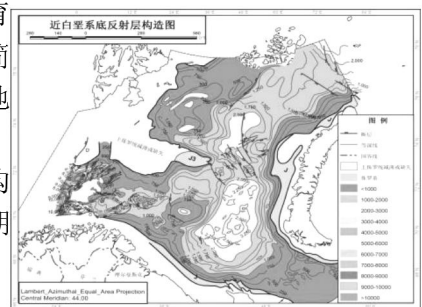


图 3 东巴伦支海盆地白垩系基底反射层构造图

Fig.3 Cretaceous bottom reflection layer structure of East Barents Basin

2.2 沉积—构造演化

东巴伦支海盆地的基底岩石在盆地的不同部位由不同造山期的褶皱岩系组成。盆地的南部主要为贝加尔造山期基底，向北和北西方向推测为加里东造山期基底，北部的台地区推测为前寒武系基底^[5]。盆地中心地壳薄，为大洋型地壳，推测由上古生界玄武岩组成，Moho面埋深30 km^[6]，而台地区玄武岩之上还发育15 km厚的大陆地壳，平均莫霍面深度45 km。盆地的沉积盖层由以下几个巨型

层序组成: 前上泥盆统、上泥盆统一下二叠统、上二叠统一三叠系、侏罗系—新生界(图4)。

2.2.1 上古生界泥盆—石炭纪被动大陆边缘拗陷沉积单元 相对稳定的被动大陆边缘环境导致上泥盆统发育灰岩、白云岩、礁灰岩互层沉积, 夹蒸发岩。这些沉积物与东欧地台上的同时期沉积建造具有相似性。盆缘岛屿上发现的生物礁的展布趋势表明这些生物礁可能延伸到了东巴伦支海盆地。东欧和西伯利亚板块首次碰撞发生在萨克马尔期和阿尔丁斯克期。

晚泥盆世—早石炭世沉积中心可能向北或北西方向迁移^[7]。石炭纪, 盆地北部较南部沉降量大, 新地岛海域碳酸盐岩建造形成, 向盆地方向硅质沉积物增加。这种较深水条件持续到晚石炭世和早二叠世。

2.2.2 二叠—三叠纪同裂谷期沉积单元 北巴伦支海次盆及南巴伦支海次盆最深部地层是根据地震资料解释得到的。与这一成因地层单元对应的巨型层序进一步分为四个层序: 上二叠统、下三叠统、下、中及上三叠统。

早-中三叠世西北欧大西洋边缘以沿古大西洋的地壳伸展为特征, 晚古生代区域性碳酸盐岩和蒸发岩沉积结束。由于晚石炭世—二叠纪乌拉尔碰撞造山作用, 乌拉尔及新地岛褶皱带形成后, 该褶皱带同时向西供给巴伦支海和蒂曼—伯朝拉盆地前渊硅质碎屑物质。

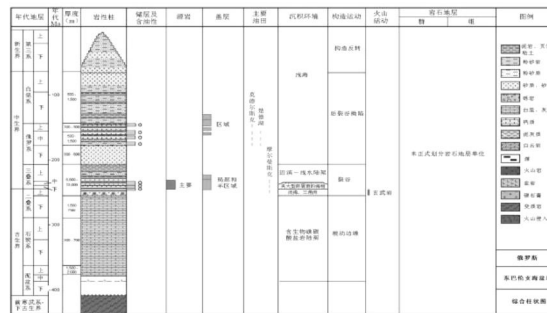


图4 东巴伦支海盆地地层综合柱状图

Fig.4 Integrated histogram formation of East Barents basin

晚二叠世, 构造体制主要为伴随强烈沉降作用(150 mm/y)的伸展构造作用^[4]。南巴伦支海次盆充填来自乌拉尔山的碎屑物, 而北巴伦支海次盆保持欠补偿沉积, 发育2~3 km的上二叠统盆地相页岩。晚二叠世的伸展和沉降持续到三叠纪, 早三叠世沉降速率加快。三叠纪, 沉积了大量的碎屑沉积物。乌拉尔高地为盆地东部重要的物源区。拗陷中部三叠系沉积厚度超过了7 km。

中-晚三叠世沉降作用持续, 但速率降低(从中三叠世早期的100 mm/1000 y到三叠纪晚期的40 mm/1000 y)。中三叠世普遍发育陆相沉积。向北、向西推进的三角洲沉积体系持续充填盆地。整个中三叠世盆地中心及北部一直保持海相环境。晚三叠世岸线退到南巴伦支海次盆的南部和东部。三叠系沉积作用以海退和侵蚀作用结束。

2.2.3 三叠纪晚期—早第三纪后裂谷期拗陷沉积单元 盆地的热沉降始于三叠纪晚期—早侏罗世, 充填了连续的浅海—近海陆缘碎屑。

晚三叠世沉降和沉积物聚集速率下降的趋势一直持续到侏罗纪, 表现为侏罗纪沉积层序比三叠纪层序要薄得多。中-下侏罗统碎屑岩区域上被上侏罗统富有机质“黑页岩”覆盖, 这套页岩相当于西西伯利亚盆地上侏罗统巴扎诺夫源岩^[5]。

发育于两次盆中央区域的中-下侏罗统以浅海陆架和滨岸平原沉积为主, 该地层向盆地翼部上超变薄, 向伯朝拉地块方向陆相沉积居主导地位。侏罗纪大部分时期沉积物源位于波罗的海地盾和蒂曼、乌拉尔山。

尼奥科姆统代表性岩性为: 盆地区为暗色页岩, 较浅的盆缘区为粉砂岩和细粒砂岩夹褐色煤层。下白垩统上部以海相和陆相沉积互层且陆相沉积占较大比重为特征。上白垩统得到的资料有限。

白垩纪早期盆地充填物主要来自北部, 部分来自东部和东北部。这一点可从地震剖面上斜坡沉积出现得到证实。东巴伦支海盆地的尼奥科姆统斜坡沉积与西西伯利亚盆地的不同之处在于前者含粘土组分, 这使得该地层实际上不具有油气远景^[4]。

早第三纪及晚第三纪大部分时期盆地隆升。侵蚀作用影响到上白垩统沉积(局部波及下白垩统)。据估计,南、北次盆的最深区域隆起幅度达0.2~0.3 km,鲁德诺夫鞍状构造区达0.75 km,盆地的北部、西北部边缘达1.5~3 km。与新生代的隆升有关的热冷却和形变影响了盖层的发育及其完整性,圈闭被改造,天然气扩散、再聚集^[7]。

3 石油地质特征分析

3.1 烃源岩

迄今为止发现的气态烃类主要来自三叠系进积型海相页岩和河流—三角洲相页岩及薄煤层。这些腐殖型源岩在晚三叠世开始成熟,并充注到下三叠统一上侏罗统成藏组合中。上侏罗统源岩广泛发育,但未成熟(图5)。

南巴伦支海次盆南部发育的三叠系源岩中含III型(腐殖型)有机质源岩,北部及鲁德洛夫鞍状隆起的烃源岩逐渐转变为II/III型和III/II型腐殖/腐泥混合型有机质。北巴伦支海次盆中部区域预测发育II型干酪根^[8]。

三叠系页岩厚度变化大,从几百米到几千米。总有机碳含量(TOC)最大20%(一般2~8%),干酪根指数(HI)200~500 mg/g TOC^[8-10]。丰富的偏气型干酪根、快速的埋藏、相对高的热演化阶段均表明三叠系源岩为偏气型源岩。向次盆轴部地区由于埋藏更深三叠系源岩中可能有天然气和天然气/凝析油生成。

三叠系源岩镜质体反射率Ro从南巴伦支次盆的<0.5%到南、北巴伦支次盆沉积中心的0.92.14%。上侏罗统页岩未达到液态油的生油成熟度,其镜质体反射率Ro除最深区域(2300~2500 m)达到0.49~0.67%外,其他地区最大仅0.5%。

3.2 储盖组合

主要储层为上侏罗统砂岩,其次为三叠系和中侏罗统进积/退积旋回中退积型富砂组分。通常三叠系储层质量差。侏罗系储层净厚度8 m~76 m,孔隙度15%~25%,渗透率几百毫达西~1达西以上^[11]。

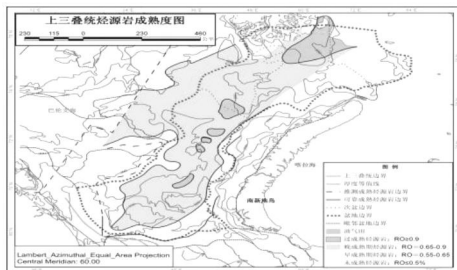


图 5 上三叠统烃源岩成熟度图

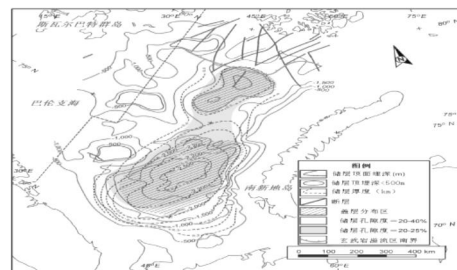


图 6 中-下侏罗统储层厚度分布特征图

Fig.5 Maturity of upper Triassic hydrocarbon source rock Fig.6 Thickness distribution of Lower-Middle Jurassic reservoir

盆地内广泛发育的中生界海相—陆相厚层页岩是好—极好局部—区域性盖层:

- (1) 中-下三叠统层间和组内页岩是与盖层同时代的超压油气藏的局部—半区域性盖层。
- (2) 中-上侏罗统内包含三套页岩盖层: 上卡洛夫阶—伏尔加阶区域性盖层,最大钻探厚度438 m; 巴通阶—卡洛夫阶半区域性盖层,厚达300 m; 上阿连阶—下巴裘阶发育两套区域性页岩盖层,最大总厚达85 m。
- (3) 下白垩统发育区域性泥岩和页岩盖层^[12]。

4 盆地含油气系统与成藏组合

4.1 含油气系统

东巴伦支海盆地发育一个含油气系统: 三叠系—下三叠统/上侏罗统(!)含油气系统。该含油气系统源岩为成熟的中-下三叠统偏气型源岩和大部分未成熟的侏罗系偏油型源岩。如果盆地内还存在古生界泥质碳酸盐岩源岩的话,该源岩可能提供盆地各类储层油气^[11,12]。

在快速埋藏区,少量下三叠统源岩可能于三叠纪末前就开始了油气生成,其他源岩的油气生成和向上的二次运移持续到第三纪中期的区域性隆升开始。三叠系源岩生成的油气充注地层圈闭和构

造圈闭中的下三叠统一上侏罗统储层。次盆沉降中心上覆层序包括厚达2 km的侏罗—白垩系岩石。新生代的隆升及与之相关的压力下降导致已形成的天然气的扩散、被圈闭的烃类的再运移、盖层被破坏及局部地区油气生成停止(图7)。

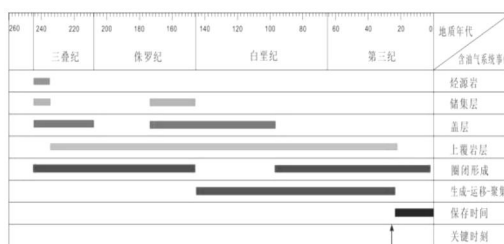


图7 东巴伦支海盆地三叠系—下三叠统/上侏罗统(!)含油气系统事件

Fig.7 Triassic - Lower Triassic / Upper Jurassic petroleum system(!) events of East Barents Basin

4.2 成藏组合

4.2.1 侏罗系地层—构造成藏组合 该成藏组合的储集层为中-上侏罗统砂岩,盖层为中-上侏罗统页岩、下白垩统页岩,圈闭成因包括地层尖灭、砂岩透镜体、不对称背斜、断裂、相变。烃源层可能为中-下三叠统泥岩(图7)。

本盆地侏罗系地层较三叠系更连续,储层质量更好。侏罗系成藏组合为东巴伦支海盆地最主要的成藏组合。Shtokmanovskoye巨型天然气田的上部储层为厚达60 m的卡洛夫阶边缘海席状砂体,该储层被上侏罗统一下白垩统“热”页岩封盖,圈闭为一些向四周倾覆的背斜型高点,这些圈闭中的干气层厚达153 m。

上侏罗统和白垩系最下部页岩具极好的封盖性能^[13]。圈闭类型和封盖机制包括断块和穹窿。地层圈闭的发育可能与砂体向古隆起上的超覆尖灭有关。

4.2.2 三叠系地层—构造成藏组合 该成藏组合的储层为下三叠统一中三叠统砂岩,盖层为上三叠统泥岩,圈闭主要为向四周倾覆的背斜及与地层尖灭、岩相变化有关的地层圈闭。砂、泥岩的互层往往形成多个储盖组合对。该成藏组合中的储层超压。烃源层可能为中下三叠统泥岩^[15]。

该成藏组合中砂岩厚度薄,不连续,孔隙度和渗透率差。已发现的天然气储量(如2005年9月的发现)较侏罗系成藏组合要小得多^[16]。

表1 东巴伦支海盆地成藏组合特征

Table 1 Features of reservoirforming assemblages in East Barents Basin

编号 NO.	名称 Names	储层 Reservoir stratum	盖层 Cover coat	圈闭 Entrapment
1	侏罗系地层— 构造成藏组合	中上侏罗统 砂岩系)	中上侏罗统页岩(俄罗斯) 下白垩统页岩(俄罗斯)	地层尖灭、砂岩透镜体、 不对称背斜、断裂、相变
2	三叠系地层 构造成藏组合	下三叠统一 中三叠统	下三叠统一上三叠统	背斜、相变、地层尖灭

据IHS资料,侏罗系成藏组合发现油气田3个,全部为气田,总储量22315.56 MMBoe,其中凝析油201.56 MMB,天然气132684 Bscf,没有油^[16]。根据勘探历史法和油藏规模序列法预测^[17],该成藏组合中可以发现500 MMB以上储量的油气田最多41个,最少11个,平均26个,总可采储量38651.46 MMBoe(表2)。三叠系系成藏组合发现油气田2个,总储量365.47百万桶当量,全部为天然气,根据预测该成藏组合500 MMB以上储量的油气田最多5个,最少0个,平均3个,总可采储量698.70 MMBoe。

表2 东巴伦支海盆地各成藏组合预测储量

Table 2 Forecast play reserves of East Barents Basin

成藏组合 Reservoirforming assemblages	油 Oil		凝析油 Condensate oil		天然气 Gas	
	储量(MMb)	百分比	储量(MMb)	百分比	储量(Bscf)	百分比
	Reserves	Percentage	Reserves	Percentage	Reserves	Percentage
侏罗系地层—构造成藏组合			394.80	100	229540.00	96
三叠系地层构造成藏组合					4192.20	2
合计			394.80	100	233732.20	100

5 结论

东巴伦支海盆地的发育包括基底形成和盖层发育两个主要阶段:基底为前寒武纪—早古生代贝加尔—加里东期褶皱变质岩系,基底完全固结于晚志留世—早泥盆世;盆地盖层发育有完整的前裂谷—同裂谷—后裂谷层序,晚古生代晚泥盆世—早二叠世为被动大陆边缘拗陷形成期,晚二叠世—三叠纪为裂谷活动期,侏罗—白垩纪为裂谷期后拗陷形成期,第三纪为构造反转期。

盆地主要沉积层序为上古生界泥盆—石炭纪前裂谷期拗陷沉积单元、二叠—三叠纪同裂谷期沉积单元和三叠纪晚期—早第三纪后裂谷期拗陷沉积单元;其主力烃源岩为三叠系进积型海相页岩和河流—三角洲相页岩及薄煤层。主要储层为上侏罗统砂岩,其次为三叠系和中侏罗统进积/退积旋回中退积型富砂组分;盆地内广泛发育的中生界海相—陆相厚层页岩是好—极好局部—区域性盖层,主要为中—上侏罗统的三套页岩盖层。

东巴伦支海盆地发育一个含油气系统和两个成藏组合:三叠系—下三叠统/上侏罗统(!)含油气系统,侏罗系地层—构造成藏组合和三叠系地层—构造成藏组合。至2014年,两个成藏组合都有气田发现,但由于千亿桶级别的超大型气田斯托克曼诺夫斯克/Shtokmanovskoye气田的发现,绝大多数可采资源量集中于侏罗系成藏组合中。据预测,盆地亿桶以上大型油气田总量在21个左右,油气田天然气总储量134876.8 Bscf(十亿立方英尺),凝析油201.56 MMb。其中侏罗系地层—构造成藏组合资源潜力最大,其天然气预测储量占盆地总预测储量的96%。

参考文献

- [1] 朱伟林,王志欣.环北极地区含油气盆地[M].北京:科学出版社,2013:202
- [2] 王志欣,金之钧.西西伯利亚盆地油气地质特征[M].武汉:武汉音像出版社,2007:1-40
- [3] 庞雄奇,周新源,姜振学,等.叠合盆地油气藏形成、演化与预测评价[J].地质学报,2012,86(1):1-103
- [4] 毛翔,李江海,杨静懿.环北极沉积盆地结构与构造演化特征——来自环北极地质长剖面的证据[J].极地研究,2013,25(3):294-302
- [5] 朱伟林,王志欣,宫少波,等.俄罗斯含油气盆地[M].北京:科学出版社,2012:293-378
- [6] 李江海,杨静懿,程雅琳,等.全球沉积盆地结构与构造演化背景——洲际经向超长构造剖面对比[J].高校地质学报,2013(4):56-81
- [7] Vining BA, Pickering SC. Petroleum geology: from mature basins to new frontiers-Proceedings of the 7th Petroleum Geology Conference[M]. London: Geological Society of London, 2010:591-619
- [8] Petrov OV, Sobolev NN, Koren TN, *et al.* Paleozoic and Early Mesozoic evolution of the East Barents and Kara Sea sedimentary basins[J]. Norwegian Journal of Geology, 2008,88(4):227-234
- [9] Burlin YK, Stoupakova AV. Geological prerequisites of petroleum prospects of the Arctic Ocean Russian Shelf[J]. Geology of Oil and Gas, 2008(4):13-23
- [10] Grigorenko YN, Sobolev VS, Zhukova LI. Marine areas of oil and gas accumulation of the Western Arctic[J]. Oil and Gas Geology, 2011(6):31-44
- [11] Dore AG. Barents Sea geology, petroleum resources and commercial potential[J]. Arctic, 1995,48(3):207-221
- [12] Spencer AM, Embry AF, Gautier DL, *et al.* An overview of the petroleum geology of the Arctic[C]//Spencer AM, Embry AF, Gautier DL, *et al.* Arctic Petroleum Geology. London: Geological Society, 2011:1-15
- [13] Golonka J. Phanerozoic palaeoenvironment and palaeolithofacies maps of the Arctic region[C]//Spencer AM, Embry AF, Gautier DL, *et al.* Arctic Petroleum Geology. London: Geological Society, 2011:79-129
- [14] Kazanin GS, Zayats IV, Shkarubo SI, *et al.* Regional seismic exploration in arctic seas-main results of new stage and further prospects[J]. Oil and Gas Geology, 2011(6):90-97
- [15] Klett TR, Pitman JK. Geology and petroleum potential of the East Barents Sea Basins and Admiralty Arch[C]//Spencer AM, Embry AF, Gautier DL, *et al.* Arctic Petroleum Geology. London: Geological Society, 2011:295-310
- [16] IHS Basin Monitor [EB/OL]. (2009-12-30) [2013-02-05]. <http://maps.www.ih.com/basin-monitor-ordering-service/russian>, Information Handling Services.
- [17] 李浩武,王彦君,汪斌.对油田规模序列法应用的一些讨论[J].石油天然气学报,2009(3):210-216