

引用格式: 李刚, 王宁, 张凯逊, 等, 2023. 西巴伦支海盆地含油气系统分析与资源评价 [J]. 地质力学学报, 29 (2): 174-187. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022134

Citation: LI G, WANG N, ZHANG K X, et al., 2023. Analysis of petroleum systems and assessment of petroleum resources in the West Barents Sea Basin, Arctic [J]. Journal of Geomechanics, 29 (2): 174-187. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022134

西巴伦支海盆地含油气系统分析与资源评价

李刚¹, 王宁^{1,2}, 张凯逊³, 白国平¹, 贺昱搏¹, 胡靖靖¹, 孟秋含¹, 邱海华¹
LI Gang¹, WANG Ning^{1,2}, ZHANG Kaixun³, BAI Guoping¹, HE Yubo¹, HU Jingjing¹, MENG Qiuhan¹, QIU Haihua¹

1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;

2. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459;

3. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

1. College of Geoscience, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

2. Tianjin Branch, CNOOC Ltd., Tianjin 300459, China;

3. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

Analysis of petroleum systems and assessment of petroleum resources in the West Barents Sea Basin, Arctic

Abstract: The West Barents Sea Basin in the Arctic is one of the most promising petroleum basins in the world. With the latest data from the IHS database, this study investigated the petroleum geology of the basin, documented the distribution characteristics of petroleum resources, systematically analyzed the petroleum systems and plays, evaluated the resource potential, and predicted the favorable exploration fairways in the West Barents Sea Basin. The results show that regionally, discovered oil and gas accumulations are mainly distributed in the southwest area of the basin; stratigraphically, oil and gas reserves are mainly confined to the Jurassic and Triassic reservoirs, which host 72.6% and 15.5% of the total proved and probable reserves, respectively. The basin has two known petroleum systems; the Jurassic/Triassic composite petroleum system and the Permian/Carboniferous composite petroleum system. The resource evaluation by the Monte Carlo statistical methodology indicates that the means of undiscovered resources in the West Barents Sea Basin are 487.4×10^6 t of oil, 1375.6×10^9 m³ of gas, and 84.6×10^6 t of condensate, amounting to 1681.9×10^6 t, of which the gas accounts for 66.0%. Based on the results of resource evaluation and comprehensive analysis of petroleum geology, two favorable exploration fairways were selected: the favorable exploration zone of the Jurassic play and the favorable exploration zone of the Triassic play in the southern area of the basin.

Keywords: West Barents Sea Basin; petroleum system; play; resource assessment; favorable play fairways

摘要: 北极西巴伦支海盆地是全球最具勘探潜力的含油气盆地之一。基于 IHS 数据库最新资料, 分析了该盆地油气地质特征, 揭示了盆地油气分布特征, 划分了含油气系统和成藏组合, 评估了盆地资源潜力, 并优选了有利勘探区带。研究表明, 区域上西巴伦支海盆地已发现油气藏主要分布于盆地的西南部; 层系上油气主要富集于侏罗系和三叠系储层, 其已发现控制和探明(2P)可采储量分别占盆地总 2P 可采储量的 72.6% 和 15.5%。盆地内主要发育 2 个已知的含油气系统, 分别为侏罗系/三叠系复合含油气系统

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20221810); 国家自然科学基金项目 (91755104)

This research is financially supported by the Geological Survey Project of the China Geological Survey (Grant DD20221810) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 91755104).

第一作者: 李刚 (1994—), 男, 在读博士, 主要从事非常规油气评价与勘探研究工作。E-mail: cup932014@163.com

通讯作者: 张凯逊 (1985—), 男, 副研究员, 主要从事储层成岩作用及油气资源评价研究。E-mail: zhangkaixun@163.com

收稿日期: 2022-11-21; **修回日期:** 2023-02-25; **责任编辑:** 范二平

和二叠系/石炭系复合含油气系统。蒙特卡洛模拟评估出西巴伦支海盆地石油、天然气和凝析油待发现可采资源量(均值)分别为 487.4×10^6 t、 1375.6×10^9 m³和 84.6×10^6 t,折合成油当量为 1681.9×10^6 t,其中天然气占66.0%。综合资源评价结果和油气成藏条件地质分析优选出2个有利勘探区带,分别是盆地南部的侏罗系成藏组合有利勘探区带和三叠系成藏组合有利勘探区带。

关键词: 西巴伦支海盆地;含油气系统;成藏组合;资源评价;有利勘探区带

中图分类号: [TE122.3] **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2023) 02-0174-14

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022134

0 引言

在全球油气需求旺盛、常规油气勘探区勘探难度逐年提高的情况下,蕴藏着丰富油气资源的北极在未来油气勘探与开发中必将占据重要的位置(Gautier et al., 2009; 卢景美等, 2010; 杨静懿等, 2013; 刘建民等, 2017; Coen, 2018; 张凯逊等, 2020; 杜星星和刘建民, 2021; 赵越等, 2021)。西巴伦支海盆地是北极地区重要的含油气盆地之一,属于勘探新区,该盆地内已发现多个大中型油气田,油气资源潜力较大。

1970年,挪威对西巴伦支海盆地进行了第一次二维地震勘探活动,并于1971年9月在斯瓦尔巴特群岛钻探了第一口油井,但仅有少量油气显示。1984年10月,在斯诺维特地区钻探发现了Snohvit气田,其控制和探明(2P)可采储量高达 176.1×10^9 m³,是该地区最大的油气田(IHS Energy Group, 2020)。2006年1月完钻的7122/7-3井,确认了在1800 m左右的三叠系斯纳德组砂岩和中三叠统科比组中也存在石油,并发现了2个更深的储层,从此拉开了盆地深层勘探的序幕(Doré, 1995)。

尽管相关学者对西巴伦支海盆地的研究取得了一定进展(Barrèr, 2009; Glørstad-Clark et al., 2010; 李学杰等, 2018; USGS, 2019; 耿威等, 2020),但该盆地含油气系统的划分仍然存在一定争议,且已有资源评价所用的数据资料相对较老,无法体现出近些年来最新的勘探成果。因此利用最新数据,对西巴伦支海盆地含油气系统进行详细的划分,并对其待发现油气资源量进行评价是非常有必要的。文中系统分析了西巴伦支海盆地构造演化与沉积地层等基础地质特征,总结了油气分布规律,根据盆地内油气地质特征确定了含油气系统,最后以成藏组合为评价单元评估了资

源潜力,并对有利勘探区带进行预测,以期石油公司在北极地区油气勘探的战略部署提供参考依据。

1 区域地质背景

西巴伦支海盆地位于挪威的巴伦支海域,盆地面积约 60.5×10^4 km²。盆地西缘为斯匹茨卑尔根西侧断裂边界和西巴伦支陆架边缘的深水盆地,向东延伸到俄罗斯海域的东巴伦支海盆地的断裂边界,向南延伸到挪威北方海岸线,向北以西巴伦支海陆架北缘为限(IHS Energy Group, 2020)。盆地内主要构造单元包括卡尔王台地、埃季岛台地、布亚姆兰台地、芬马克台地、盆地中部隆起带、西南巴伦支坳陷带以及斯匹茨卑尔根岛(图1)。盆地内台地和隆起带的沉积厚度较小,一般在3000 m以内,在埃季岛台地一带沉积层厚度不足1000 m,至盆地西北缘邻近的斯瓦尔巴群岛部分地区甚至有结晶基岩出露地表。然而,受晚古生代和中生代裂谷作用控制,盆地南部的诺德卡普坳陷和西南巴伦支坳陷带的沉积厚度超过5000 m(Norwegian Petroleum Directorate, 2019)。

西巴伦支海盆地的构造沉积演化始于晚泥盆世并一直持续至新生代,可分为6个阶段,分别为晚泥盆世—早石炭世断陷阶段、晚石炭世—中侏罗世坳陷阶段、中侏罗世晚期—早白垩世断陷阶段、晚白垩世裂后坳陷阶段、古近纪陆间裂谷阶段和新近纪—第四纪被动边缘阶段。晚泥盆世,盆地内发生裂谷作用,导致北部地区呈北北西—南南东走向,而南部地区则呈北东—南西走向(Marello et al., 2010)。这一时期在地堑构造中沉积了比勒峡湾群碎屑沉积物和含煤沉积物(Worsley, 2008; Bergh et al., 2011; Braathen et al., 2011)。早石炭世末期,西巴伦支海盆地发生了大规模海侵,在早期裂谷沉积物之上开始广泛

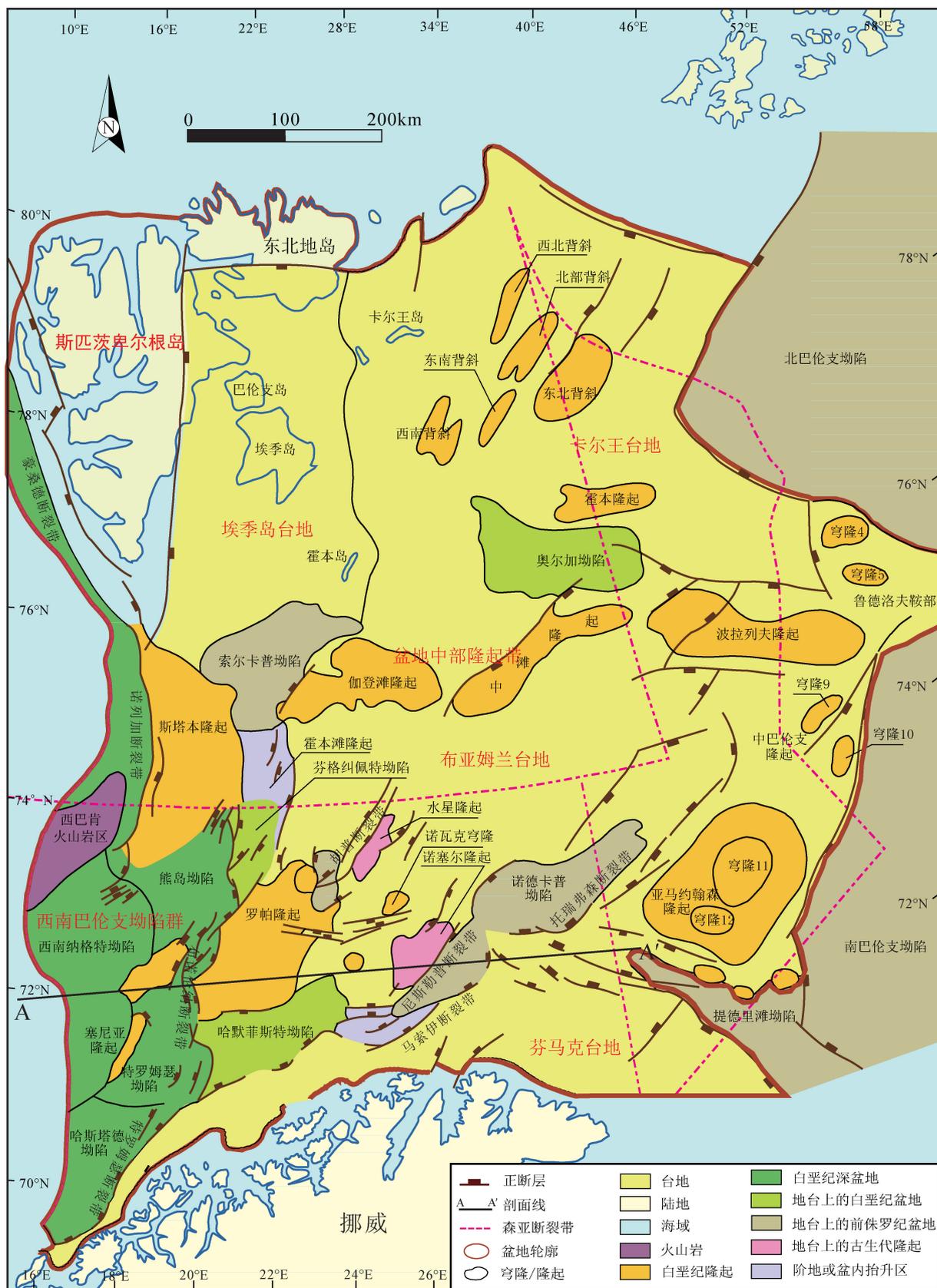


图1 西巴伦支海盆地构造分区图 (据 Norwegian Petroleum Directorate, 2019 修改)

Fig.1 Structural subdivision of the West Barents Sea Basin (modified from Norwegian Petroleum Directorate, 2019)

发育碳酸盐台地 (Faleide et al., 1984; Larssen et al., 2002)。晚石炭世早期,盆地发生区域沉降 (Gudlaugsson et al., 1998),并沉积了吉普斯达伦群红褐色砾岩、粗砂岩和少量粉砂岩。晚二叠世,水体进一步加深,且开始沉积普尔峡湾群深水硅质骨针岩和泥岩。早三叠世,盆地内形成了一套巨厚的硅质碎屑岩沉积层序 (哈沃特组和克拉普米斯组;李学杰等,2018),周边陆地的侵蚀导致在盆地边缘形成了河流-三角洲和三角洲前缘滨海相沉积物。晚三叠世,周边陆地再次抬升导致沉积物供应增加,并开始沉积瑞尔格伦嫩群 (IHS Energy Group, 2020)。中侏罗世晚期-早白垩世,西巴伦支海盆地进入了新一轮构造伸展和裂谷作用阶段 (Faleide et al., 1993; 图2)。晚中生代裂

谷作用之后,西巴伦支陆架边缘的哈斯塔德、特罗姆瑟、西南纳格特和熊岛等坳陷继续区域性沉降,并堆积了一套巨厚的尼格伦嫩群页岩和泥岩 (IHS Energy Group, 2020)。至白垩纪末,沿着盆地西缘断裂带又发生了伸展断层活动和部分反转。早始新世,劳亚大陆解体使得格陵兰岛与欧亚大陆分离,从而形成陆间裂谷并发育了大洋地壳,导致了西巴伦支陆架边缘的坳陷和隆起的大规模重组 (IHS Energy Group, 2020)。新近纪-第四纪被动边缘阶段,在巴伦支海陆架西缘发育了巨厚的诺德兰群碎屑沉积扇体 (Faleide et al., 2015),这是巴伦支海地区遭受强烈的冰川侵蚀和沉积的结果 (Bjarnadóttir et al., 2014)。强烈的侵蚀导致西巴伦支海盆地的含油气远景明显下降。

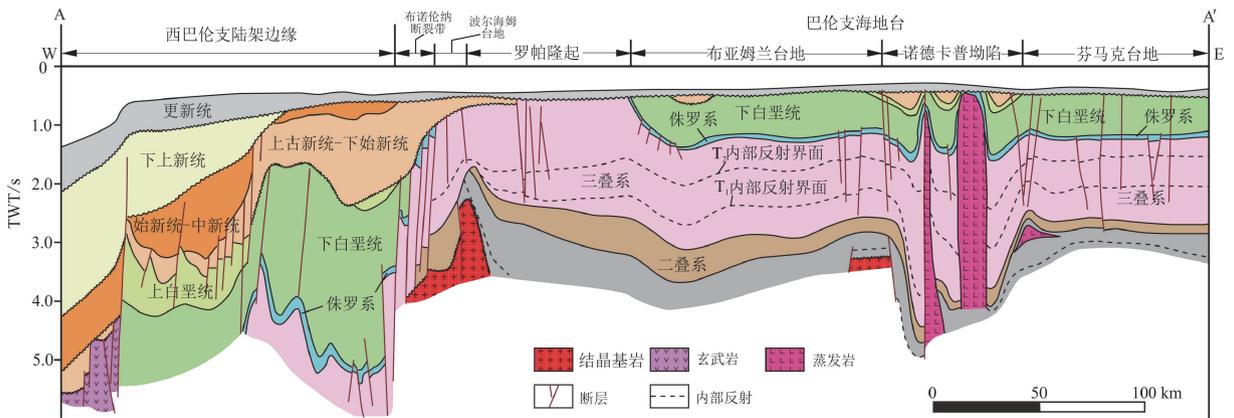


图2 西巴伦支海盆地南部区域构造剖面示意图 (据 Colpaert et al., 2007 修改; 剖面位置见图1中 A-A')

Fig. 2 Schematic geological cross-section of the southern West Barents Sea Basin (modified from Colpaert et al., 2007; The position of the cross-section is shown as A-A' in Fig. 1)

2 油气分布规律

截至2020年底,西巴伦支海盆地共完钻170口勘探井,已发现油气田57个,其中包括油藏30个,气藏57个。石油、天然气和凝析油2P可采储量分别为 224.7×10^6 t、 419.8×10^9 m³和 31.5×10^6 t,合计油当量为 594.9×10^6 t (IHS Energy Group, 2020)。天然气2P可采储量占盆地总2P可采储量的56.9%。

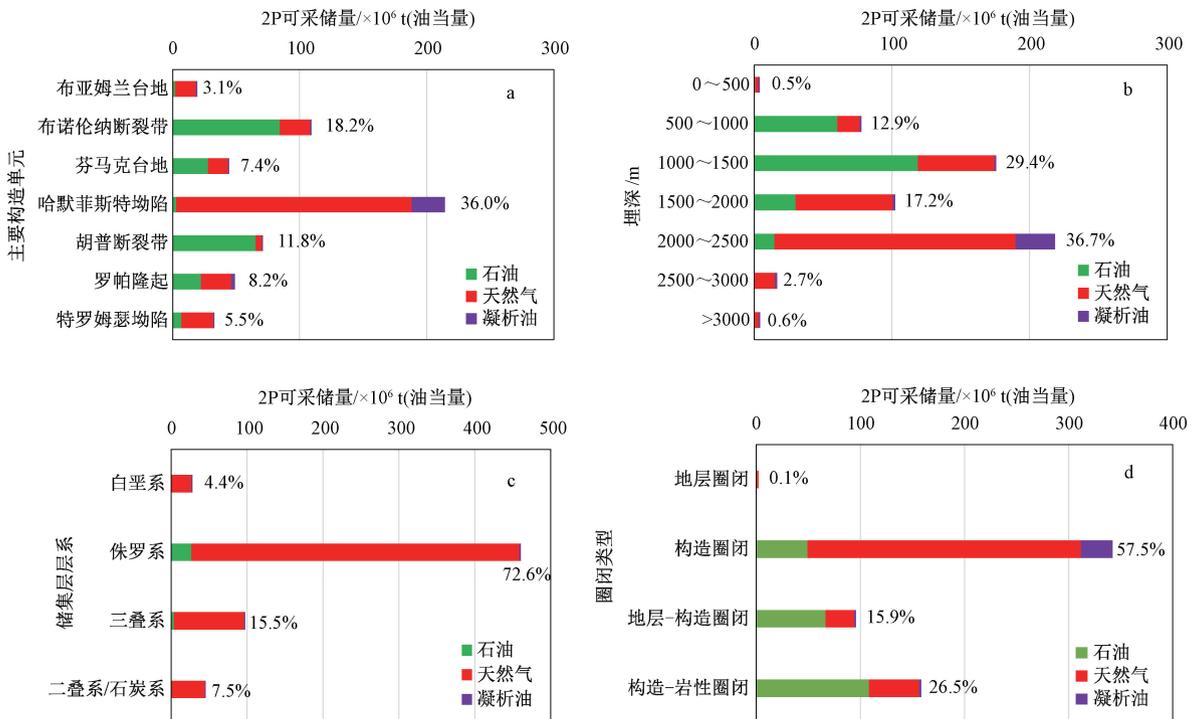
区域上,西巴伦支海盆地油气资源主要分布在西南部的坳陷区,并以天然气为主,是一个富气盆地。哈默菲斯特坳陷内油气储量最为丰富,其石油、天然气和凝析油2P可采储量分别为 2.9×10^6 t、 229.6×10^9 m³和 26.0×10^6 t,合计油当量为 214.2×10^6 t。少部分油气发现分布于布亚姆兰台

地、芬马克台地和特罗姆瑟坳陷 (图3a)。盆地北部地区勘探程度较低,仅有极少量的地震勘探,目前未进行实质性的油气勘探工作。

垂向上,油气主要分布在埋深为500~2500 m的地层中,储集石油、天然气和凝析油2P可采储量分别为 224.1×10^6 t、 412.7×10^9 m³和 31.4×10^6 t,合计油当量 572.5×10^6 t (图3b),占总储量的96.2%。

层系上,油气主要储集在侏罗系和三叠系 (图3c),两套储层中油气2P可采储量分别占盆地总2P可采储量的72.6%和15.5%。此外,石油和天然气在侏罗系占绝对优势,二者在该储层中的2P可采储量分别占盆地内石油和天然气总2P可采储量的77.9%和67.9%。

构造圈闭、构造-地层圈闭、构造-岩性圈闭以及岩性圈闭构成了西巴伦支海盆地主要圈闭类



a—西巴伦支海盆地主要构造单元中已发现油气 2P 可采储量分布；b—西巴伦支海盆地不同埋深下已发现油气 2P 可采储量分布；c—西巴伦支海盆地不同储集层中已发现油气 2P 可采储量分布；d—西巴伦支海盆地不同圈闭中已发现油气 2P 可采储量分布

图 3 西巴伦支海盆地已发现油气 2P 可采储量分布

Fig. 3 Distribution of proved and probable reserves in the West Barents Sea Basin

(a) Distribution of proved and probable reserves in the main tectonic units of the West Barents Sea Basin; (b) Distribution of proved and probable reserves at different burial depths in the West Barents Sea Basin; (c) Distribution of proved and probable reserves in different reservoirs in the West Barents Sea Basin; (d) Distribution of proved and probable reserves in different traps in the West Barents Sea Basin

型。已探明与构造圈闭相关的油气藏 55 个、与构造-地层圈闭相关的油气藏 19 个、与构造-岩性圈闭相关油气藏 12 个以及 1 个与岩性圈闭相关的油气藏。构造圈闭聚集了石油、天然气和凝析油 2P 可采储量分别为 49.3×10^6 t、 325.5×10^9 m³ 和 262.6×10^6 t，合计油当量 342.0×10^6 t，占盆地总 2P 可采储量的 57.5%。此外，天然气和凝析油主要储存在构造圈闭中，而石油主要储存在复合圈闭中（图 3d）。

3 成藏要素分析

中—上侏罗统赫金根组以及下白垩统科努尔组、科尔杰组泥页岩是西巴伦支海盆地主要烃源岩，其主要分布在盆地的西南部；此外，上古生界、三叠系等潜在烃源岩在盆地南部也有零星发育（图 4，图 5）。中—上侏罗统赫金根组高伽马页岩 TOC 含量通常随着水深和放射性的升高而增

大，在哈默菲斯特坳陷，TOC 含量为 8%~45%，HI（氢指数）为 100~475 mg/g；在诺德卡普坳陷，TOC 含量一般为 4%~21%，HI 为 200~430 mg/g， R_0 仅为 0.25%~0.32%，尚处于未成熟阶段（Baig et al., 2016）。伽马放射性较低的页岩中多含 II/III 型干酪根，而伽马放射性较高的页岩中则以 II 型干酪根为主。在西巴伦支陆架边缘一带的特罗姆瑟和熊岛坳陷，下白垩统发育了良好的烃源岩，其 R_0 为 0.9%~1.5%，仍处于生油窗内。熊岛坳陷东翼的下白垩统科努尔组 TOC 含量为 2.0%~3.8%，HI 为 50~120 mg/g；科尔杰组发育一套 25 m 厚的高伽马页岩，TOC 含量为 1%~10%，干酪根类型为 II/III 型。在特罗姆瑟坳陷东缘布诺伦纳断裂带，科尔杰组页岩为偏气型烃源岩；在哈默菲斯特坳陷西端的 7122/6-1 井，科努尔组页岩的 TOC 含量达 6.0%，HI 为 430 mg/g（Abay et al., 2018）。

西巴伦支海盆地的储集层包含多套层系（图 5），

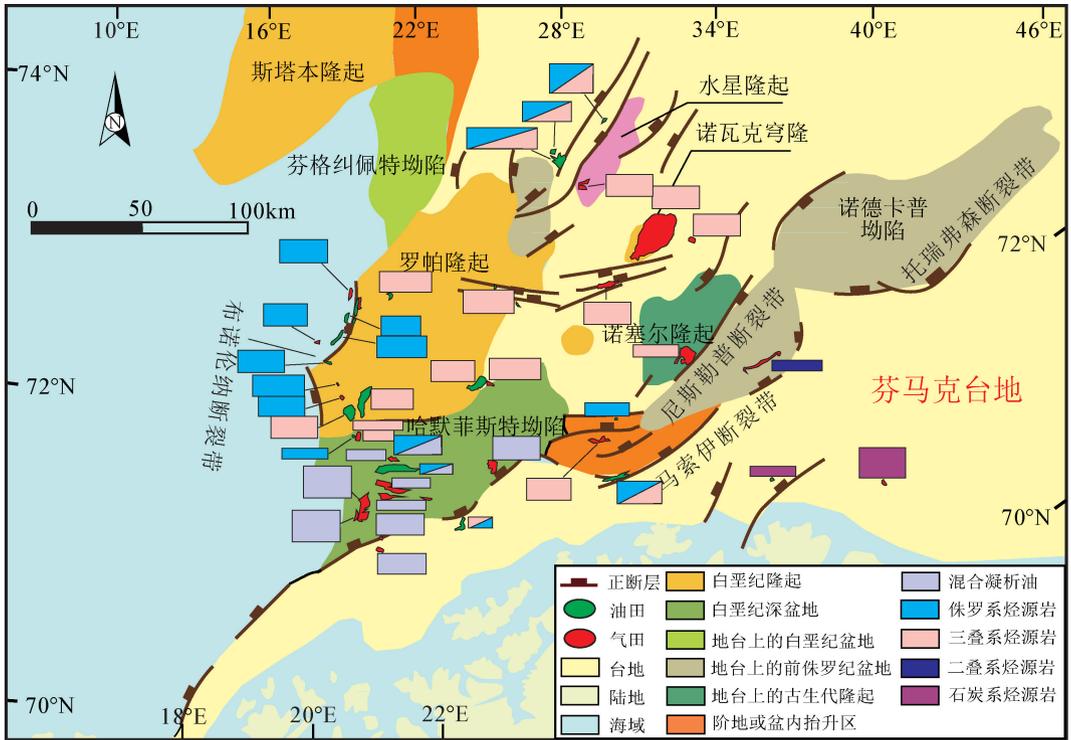


图 4 西巴伦支海盆地油气田分布和烃源岩展布图 (据 IHS Energy Group, 2020 修改)
 Fig. 4 Distribution of oil and gas fields and source rocks in the West Barents Sea Basin (modified from IHS Energy Group, 2020)

哈默菲斯特拗陷以侏罗系储层为主, 陆架边缘一带则为下白垩统储层, 盆地东部还存在上古生界潜在储层。在哈默菲斯特拗陷, 下侏罗统图巴恩组发育高能滨海相砂岩, 孔隙度高达 23%~26% (Norwegian Petroleum Directorate, 2019); 诺德梅拉组发育潮坪或泛滥平原相粉砂岩、砂岩和泥页岩; 斯托组发育滨海相厚层砂岩与薄层泥页岩, 平均孔隙度为 15% (IHS Energy Group, 2020)。在哈默菲斯特拗陷西南缘发育了白垩统科努尔组浊积扇砂岩, 孔隙度达 15.8% (Norwegian Petroleum Directorate, 2019)。此外, 布诺伦纳断裂带最南端的下白垩统科尔杰组还发育了一个大型丘状碎屑扇体, 在该扇体的西部远端相带, 发现了厚度为 52 m 的含气砂岩, 平均孔隙度为 13% (IHS Energy Group, 2020)。中一下三叠统因格纠皮特群为一套厚层海相页岩和泥岩, 并夹河流-三角洲相和滨岸相砂岩; 砂岩通常分布在东南部的芬马克台地, 厚度向东南方向增大, 储层性质变好。上泥盆统一下石炭统索尔多格组砂岩仅在芬马克台地钻遇, 为一套发育交错层理的河流相砂岩和砾岩。

西巴伦支海盆地区域性盖层主要为中一上侏罗统弗格伦组和赫金根组页岩, 潜在盖层包括

下一中三叠统因格纠皮特群泥页岩、上白垩统尼格伦嫩群和下一中白垩统西北滩群泥页岩 (图 5)。

4 含油气系统分析与成藏组合划分

基于 IHS (IHS Energy Group, 2020) 数据库资料, 将研究区的油气藏进行了归类, 综合分析了不同烃源岩的有机地球化学特征, 确定了有效烃源岩的展布, 并通过油源或气源对比, 建立了有效烃源岩与油气之间的成因关系, 最后将西巴伦支海盆地划分出 2 个已知的复合含油气系统 (侏罗系/三叠系复合含油气系统、二叠系/石炭系复合含油气系统), 以及 1 个推测的复合含油气系统 (上古生界/中生界复合含油气系统)。

4.1 侏罗系/三叠系复合含油气系统及其成藏组合

侏罗系/三叠系复合含油气系统是西巴伦支海盆地最重要的含油气系统。截至 2020 年底, 该含油气系统内包含 73 个油气藏, 其中油藏 22 个, 气藏 51 个; 发现石油、天然气和凝析油 2P 可采储量分别为 194.3×10^6 t、 385.4×10^9 m³ 和 31.0×10^6 t, 折合成油当量为 536.2×10^6 t (表 1), 占盆地总 2P 可采储量的 90.1%。该套含油气系统的烃源岩以三叠系—上侏罗统泥页岩为主, 下白垩统页岩可

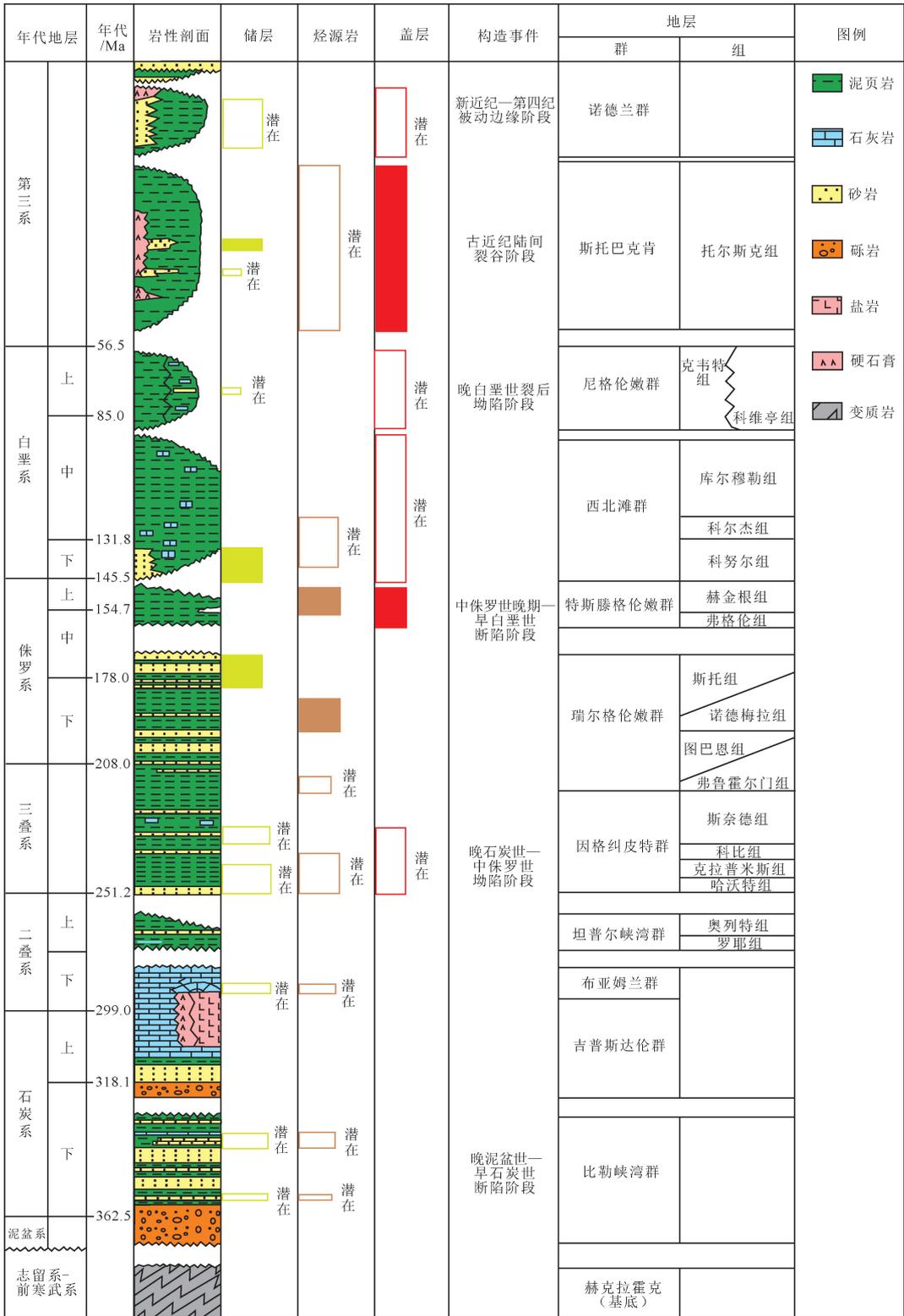


图 5 西巴伦支海盆地综合地层柱状图 (据 IHS Energy Group, 2020 修改)

Fig. 5 Integrated stratigraphic chart of the West Barents Sea Basin (modified from IHS Energy Group, 2020)

能也有少量贡献, 储层为三叠系—下白垩统河流三角洲相和滨岸相砂岩。

侏罗系/三叠系复合含油气系统可划分为 3 个

成藏组合, 分别为三叠系成藏组合、侏罗系成藏组合和白垩系成藏组合。三叠系成藏组合主要分布于罗帕隆起、布诺伦纳和胡普断裂带 (图 1,

表 1 西巴伦支海盆地成藏组合控制与探明可采储量一览表

Table 1 Proved and probable reserves of different plays in the West Barents Sea Basin

含油气系统	成藏组合	油气藏数/个	石油/ $\times 10^6$ t	天然气/ $\times 10^9$ m ³	凝析油/ $\times 10^6$ t	油当量/ $\times 10^6$ t	占总 2P 可采储量比例/%	平均规模/ $\times 10^6$ t
侏罗系/三叠系复合含油气系统	白垩系成藏组合	8	4.8	26.1	0.5	26.4	4.4	3.3
	侏罗系成藏组合	40	157.3	295.6	27.0	422.7	71.1	10.6
	三叠系成藏组合	25	32.2	63.7	3.5	87.1	14.6	3.5
二叠系/石炭系复合含油气系统	侏罗系/三叠系成藏组合	9	22.5	26.9	0.4	44.6	7.5	5.0
	二叠系/石炭系成藏组合	5	7.9	7.5	0.1	14.1	2.4	2.8
上古生界/中生界复合含油气系统		0	0	0	0	0	0.0	0
总计		87	224.7	419.8	31.5	594.9	100.0	6.8

图 6)。截至 2020 年底, 该成藏组合包含油气藏 25 个, 其中油藏 9 个, 气藏 16 个; 油气藏平均规模为 3.5×10^6 t, 以小型油气藏为主; 发现石油、天然气和凝析油 2P 可采储量分别为 32.2×10^6 t、 63.7×10^9 m³ 和 3.5×10^6 t, 折合油当量 87.1×10^6 t, 占盆地总 2P 可采储量的 14.6% (表 1)。三叠系成藏组合储集层主要为科比组滨岸砂岩和斯奈德组细砂岩, 其中斯奈德组砂岩物性很好, 平均孔隙度高达 15% ~ 20% (Norwegian Petroleum Directorate, 2019), 目前在套储层已发现 13 个油气藏, 圈闭类型主要为构造圈闭。弗鲁霍尔门组海侵页岩构成了斯奈德组砂岩的盖层。侏罗系成藏组合是侏罗系/三叠系复合含油气系统中最重要成藏组合, 主要分布于哈默菲斯特坳陷、特罗姆瑟坳陷和布诺伦纳断裂带 (图 1, 图 6)。截至 2020 年底, 该成藏组合内包含油气藏 40 个, 其中油藏 12 个, 气藏 28 个; 油气藏平均规模达 10.6×10^6 t, 多为大—中型油气藏; 发现石油、天然气和凝析油 2P 可采储量分别为 157.3×10^6 t、 295.6×10^9 m³ 和 27.0×10^6 t, 折合油当量 422.7×10^6 t (表 1), 占盆地总 2P 可采储量的 71.1%。图巴恩组高能滨海相砂岩、弗鲁霍尔门组河流—三角洲相砂岩和斯托组浅海相砂岩构成了侏罗系成藏组合的储层。其中斯托组浅海相砂岩是最重要的储层, 为哈默菲斯特坳陷的 Snohvit、Askeladd、Albatross、Alke 和 7122/6-1 等油气田的主力储层, 目前在套储层已发现 22 个油气藏。侏罗系成藏组合主要发育构造圈闭和构造—岩性圈闭, 目前已发现的油气藏也都属于这两类圈闭。弗格伦组和赫金根组泥页岩不整合覆盖于斯托组之上, 构成了该套储层的盖层。白垩系成藏组合主要分布于哈默菲斯特坳陷、罗帕隆起和特罗姆瑟坳陷 (图 1, 图 6)。截至 2020 年底, 该成藏组合已发现油气藏 8 个, 其中油藏 1 个, 气藏 7 个; 油气藏平均规模达 3.3×10^6 t。

石油、天然气和凝析油 2P 可采储量分别为 4.8×10^6 t、 26.1×10^9 m³ 和 0.5×10^6 t, 折合油当量 26.4×10^6 t (表 1), 占盆地总 2P 可采储量的 4.4%。白垩系成藏组合储集层主要为科努尔组油积扇砂岩, 总厚度超过 100 m (IHS Energy Group, 2020), 具备良好的储集条件。构造—岩性圈闭是该成藏组合中油气藏的主要圈闭类型。上白垩统泥页岩具备良好的封盖性, 构成了该成藏组合的区域性盖层。

4.2 二叠系/石炭系复合含油气系统及其成藏组合

二叠系/石炭系复合含油气系统是西巴伦支海盆地次重要的含油气系统。该含油气系统内包含 14 个油气藏, 其中油藏 8 个, 气藏 6 个; 发现石油、天然气和凝析油 2P 可采储量分别为 30.4×10^6 t、 34.4×10^9 m³ 和 0.5×10^6 t, 折合成油当量为 58.7×10^6 t (表 1), 占盆地总 2P 可采储量的 9.9%。二叠系/石炭系复合含油气系统的烃源岩主要包括比勒峡湾群煤层和煤质页岩。此外, 吉普斯达伦群碳酸盐岩以及布亚姆兰群页岩和碳酸盐岩也可能具有一定的生油潜力, 坦普尔峡湾群海相页岩也是潜在的烃源岩。

二叠系/石炭系复合含油气系统可划分为 2 个成藏组合, 分别为石炭系/二叠系成藏组合和三叠系/侏罗系成藏组合。石炭系/二叠系成藏组合主要分布于罗帕隆起和芬马克台地 (图 1, 图 7)。截至 2020 年底, 该成藏组合中包含油气藏 5 个, 其中油藏 3 个, 气藏 2 个; 油气藏平均规模为 2.8×10^6 t, 以小型油气藏为主; 发现石油、天然气和凝析油 2P 可采储量分别为 7.9×10^6 t、 7.5×10^9 m³ 和 0.1×10^6 t, 折合油当量 14.1×10^6 t (表 1), 占盆地总 2P 可采储量的 2.4%。石炭系/二叠系成藏组合的主要储层为吉普斯达伦群砂岩和碳酸盐岩、坦普尔峡湾群奥列特组浅海相砂岩。另外, 在芬马克台地的罗耶组骨针岩由于次生溶蚀

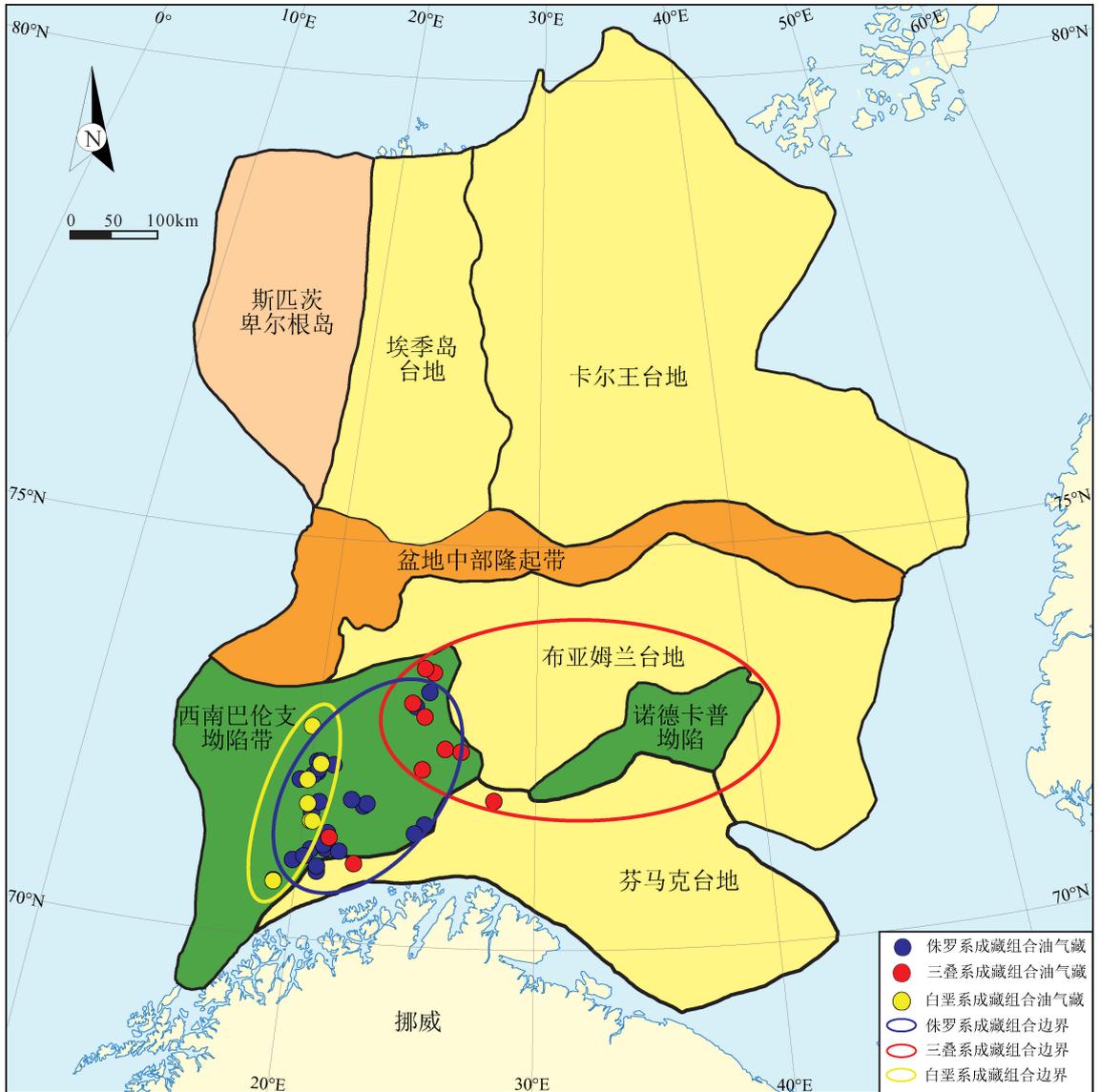


图6 西巴伦支海盆地侏罗系/三叠系复合含油气系统内成藏组合展布图

Fig. 6 Plays of the Jurassic/Triassic composite petroleum system in the West Barents Sea Basin

作用,具有高孔隙度(20%~25%)和高渗透性(IHS Energy Group, 2020),也是一套良好的储层。构造-岩性圈闭和构造-地层圈闭是石炭系/二叠系成藏组合中油气藏的主要圈闭类型。比勒峡湾群泥岩和煤层、吉普斯达伦群页岩以及致密碳酸盐岩构成了油气藏的盖层。三叠系/侏罗系成藏组合是二叠系/石炭系复合含油气系统中的主力成藏组合,主要分布于罗帕隆起和芬马克台地(图1,图7)。截至2020年底,该成藏组合包含油气藏9个,其中油藏5个,气藏4个;油气藏平均规模为 5.0×10^6 t,以小型油气藏为主;已发现石油、天然气和凝析油2P可采储量分别为 22.5×10^6 t、 26.9×10^9 m³和 0.4×10^6 t,折合油当量 44.6×10^6 t(表

1),占盆地总2P可采储量的7.5%。三叠系/侏罗系成藏组合的主要储层为图巴恩组高能滨海相砂岩、科比组滨岸砂岩和斯奈德组细砂岩。该成藏组合已发现的油气藏全部为构造圈闭。弗鲁霍尔门组页岩构成了该套成藏组合的盖层,弗格伦组和赫金根组不整合覆盖于图巴恩组之上并构成了该套储层的另一套盖层。

4.3 上古生界/中生界复合含油气系统

西巴伦支海盆地北部的勘探程度极低,因此对其油气地质特征知之甚少。基于区域构造沉积演化史的类比分析,推断盆地北部的的主力烃源岩与南部类似,可能为三叠系—白垩系和石炭系—二叠系烃源岩,且以中生界烃源岩为主。截至

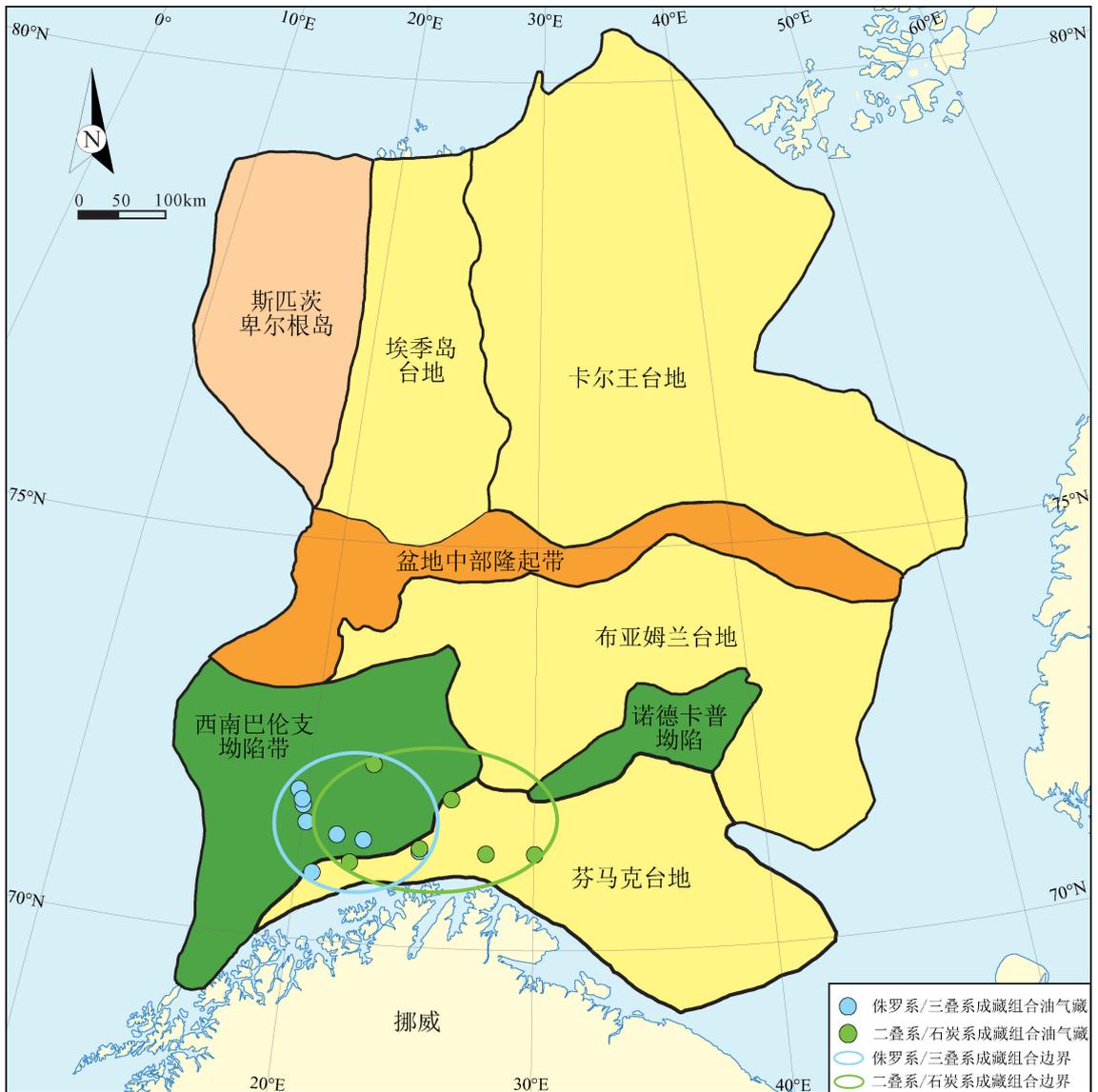


图 7 西巴伦支海盆地二叠系/石炭系复合含油气系统成藏组合展布图

Fig. 7 Plays of the Permian/Carboniferous composite petroleum system in the West Barents Sea Basin

2020 年底, 尚未有任何油气发现。因此, 盆地北部的含油气系统类型为推测型, 其主力储集层和圈闭特征与盆地南部的三叠系/侏罗系复合含油气系统类似。

5 油气资源评价及有利勘探区带优选

5.1 油气资源潜力评价

成藏组合是含油气系统的一部分, 由一组具有相同或相似地质特征的勘探目标和 (或) 油气藏成, 相同或相似的储集层和圈闭类型是划分成藏组合的关键因素之一 (童晓光, 2009; 侯平等, 2014; 田作基等, 2014; 王大鹏等, 2016, 2017), 最适宜作

为商业性评价勘探的基本单元。油气资源评价方法包括成因法、统计法和类比法 3 大类 (李建忠等, 2016; 白琨琳等, 2021), 其中统计法主要包括以下 4 个步骤: 油气地质评价、评价参数选取、蒙特卡洛法计算和盆地资源量汇总 (高济稷等, 2010; 田纳新等, 2017)。基于油气地质特征和划分的成藏组合, 并结合盆地勘探历史以及已发现油气藏的规模和数量, 选取 3 组评价参数 (第 1 组为待发现油气藏个数的低值、中值和高值; 第 2 组为待发现油气藏规模的低值、中值和高值; 第 3 组为油藏的气油比和凝析油/天然气比的低值、中值和高值以及气藏的凝析油/天然气比和油气比的低值、中值和高值), 再输入 Crystal Ball 软件, 通过蒙特卡洛模拟法进行随

机模拟,最后得出不同概率下的4个待发现可采资源量值:低值(F5)、中值(F50)、高值(F95)和均值(文环明,2002;郭秋麟等,2015;余一欣等,2015;张凯逊等,2018)。

评价结果表明,西巴伦支海盆地待发现石油、

天然气和凝析油可采资源量均值分别为 487.4×10^6 t、 1375.6×10^9 m³和 84.6×10^6 t,折合成油当量 1681.9×10^6 t(表2)。其中待发现可采资源量中天然气占66.0%、石油占29.0%、凝析油占5.0%,因此盆地未来油气勘探将以天然气为主。

表2 西巴伦支海盆地待发现油气可采资源量评价结果汇总表

Table 2 Assessment results of undiscovered oil and gas resources in the West Barents Sea Basin

资评结果	上古生界/中生界 含油气系统	侏罗系/三叠系含油气系统			二叠系/石炭系含油气系统		合计	
		白垩系	侏罗系	三叠系	侏罗系/三叠系	二叠系/石炭系		
石油/ $\times 10^6$ t	F5	48.7	2.3	126.6	26.7	9.4	7.2	220.8
	F50	101.0	6.5	261.7	55.7	23.9	16.7	465.4
	F95	175.2	14.6	444.7	103.5	53.4	29.2	820.5
	均值	105.3	7.2	271.7	59.3	26.7	17.2	487.4
天然气/ $\times 10^9$ m ³	F5	111.7	156.0	343.8	105.7	34.4	18.5	646.3
	F50	231.6	72.4	657.4	207.9	89.2	51.3	1309.8
	F95	401.9	141.6	1165.5	326.7	171.0	105.8	2312.5
	均值	241.6	78.1	694.6	211.2	94.7	55.4	1375.6
凝析油/ $\times 10^6$ t	F5	7.2	0.6	7.0	4.0	0.7	0.1	19.6
	F50	14.9	2.6	29.8	21.8	3.0	0.6	72.7
	F95	25.8	7.5	82.8	62.7	8.9	1.7	189.5
	均值	15.5	3.1	35.5	26.0	3.7	0.7	84.6
油当量/ $\times 10^6$ t	F5	145.9	28.9	411.0	116.0	37.8	22.2	761.8
	F50	302.7	67.5	821.9	245.3	98.9	58.6	1594.9
	F95	525.2	136.4	1467.8	429.8	200.2	116.3	2875.8
	均值	315.8	73.3	867.7	255.7	106.7	62.7	1681.9

与中国石油勘探开发研究院(赵喆等,2014)和USGS(美国地质调查局,2019)的资评结果相比(图8),此次评估出的待发现油气可采资源量均值(1681.9×10^6 t)介于二者之间,主要是因为西巴伦支海盆地在2008年之前的十几年间少有油气发现,因此基于2008年之前的资料,USGS的评价结果(1131.6×10^6 t)偏悲观,而2012年是盆地油气发现的集中阶段,2015年之后,勘探成果逐渐减少,导致中石油的评价结果(1918.5×10^6 t)偏乐观。表2中资评结果是基于截至2020年底的最新资料,并且综合考虑了各方面的因素,因此参数的选取和评价结果应该更加客观和可信。

5.2 有利勘探区带优选

有利勘探区带的优选标准一般包括研究区内的油气地质特征、资源评价结果以及初探井的分布情况(何斌等,2018;蔚远江等,2019)。基于以上3条标准,优选出侏罗系成藏组合和三叠系成藏组合为西巴伦支海盆地最具潜力的成藏组合,勘探重点区域主要位于布诺伦纳断裂带和罗帕隆起(图1,图4)。其余成藏组合待发现可采资源量较少,考虑到北极勘探成本较高,不作为优先考虑勘探区带。

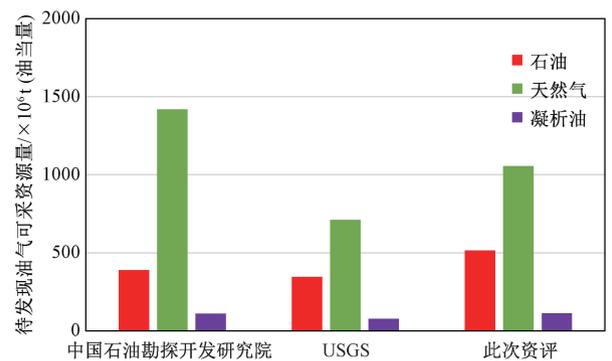


图8 西巴伦支海盆地待发现油气可采资源量评价结果类比图

Fig. 8 Comparison of assessment results of undiscovered oil and gas resources in the West Barents Sea Basin

侏罗系成藏组合待发现可采资源量为 867.7×10^6 t,占盆地总待发现油气可采资源量的51.6%(表2),具有良好的勘探潜力。该成藏组合的斯托组浅海相砂岩具有良好的储集物性,且分布范围广,为油气的储存提供了良好的条件;此外,大量的断层为油气的运移提供了良好的通道。目前侏罗系成藏组合已发现的油气藏主要集中在哈默菲斯特坳陷,探井密度高,属于勘探成熟区。近年来在布诺伦纳断裂带有多个油气田发现,且探

井数量少, 因此该地区是未来侏罗系成藏组合勘探的有利区带。

三叠系成藏组合待发现可采资源量为 255.7×10^6 t, 占盆地总待发现油气资源量的 15.2%。该成藏组合中的油气藏主要集中于构造圈闭中, 发育科比组滨岸砂岩和斯奈德组细砂岩, 具备良好的储集条件, 上覆的弗鲁霍尔门组阿卡尔段和上克拉比段海侵页岩, 能够有效地保存聚集的油气。近年来在罗帕隆起发现多个油气藏, 如: 2019 年发现的位于罗帕隆起的 Sputnik 油气藏, 目前该地区仍处于勘探上升期, 因此将三叠系成藏组合认定为有利勘探区带。

6 结论

(1) 截至 2020 年底, 西巴伦支海盆地内已发现油气田 57 个, 油气 2P 可采储量为 594.9×10^6 t。区域上, 油气藏主要分布于盆地西南部的哈默菲斯特坳陷、罗帕隆起、特罗姆瑟坳陷以及布诺伦纳断裂带; 层系上, 油气主要储集于侏罗系和三叠系储集层, 油气 2P 可采储量分别占盆地总 2P 可采储量的 72.6% 和 15.5%; 圈闭类型以构造圈闭为主。

(2) 西巴伦支海盆地发育两个已知的复合含油气系统: 侏罗系/三叠系复合含油气系统和二叠系/石炭系复合含油气系统。前者分布于盆地的西南部, 其油气 2P 可采储量占盆地总 2P 可采储量的 90.1%; 后者主要分布于芬马克台地和罗帕隆起, 其 2P 可采储量占盆地总 2P 可采储量的 9.9%。2 个已知复合含油气系统可以划分为 5 个成藏组合, 其中侏罗系成藏组合为盆地内最具勘探潜力的成藏组合, 其油气 2P 可采储量占盆地总 2P 可采储量的 71.1%。

(3) 西巴伦支海盆地石油、天然气和凝析油待发现可采资源量 (均值) 分别为 487.4×10^6 t、 1375.6×10^9 m³ 和 84.6×10^6 t, 合计为 1681.9×10^6 t; 该盆地的油气潜力以天然气为主, 占比达 66.0%。

(4) 基于油气资源评价结果和含油气系统综合分析, 优选出 2 个有利勘探区带, 依次为侏罗系成藏组合有利勘探区带和三叠系成藏组合有利勘探区带, 二者主要分布在盆地内布诺伦纳断裂带和罗帕隆起。

References

- ABAY T B, KARLSEN D A, PEDERSEN J H, et al., 2018. Thermal maturity, hydrocarbon potential and kerogen type of some Triassic-Lower Cretaceous sediments from the SW Barents Sea and Svalbard [J]. *Petroleum Geoscience*, 24 (3): 349-373.
- BAIG I, FALEIDE J I, JAHREN J, et al., 2016. Cenozoic exhumation on the southwestern Barents Shelf; estimates and uncertainties constrained from compaction and thermal maturity analyses [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 73: 105-130.
- BARRÈRE C, EBBING J, GERNIGON L, 2009. Offshore prolongation of Caledonian structures and basement characterisation in the western Barents Sea from geophysical modelling [J]. *Tectonophysics*, 470 (1-2): 71-88.
- BERGHS G, MAHER H D JR, BRAATHEN A, 2011. Late Devonian transpressional tectonics in Spitsbergen, Svalbard, and implications for basement uplift of the Sørkapp-Hornsundhigh [J]. *Journal of the Geological Society*, 168 (2): 441-456.
- BJARNADÓTTIR L R, WINSBORROW M C M, ANDREASSEN K, 2014. Deglaciation of the central Barents Sea [J]. *Quaternary Science Reviews*, 92: 208-226.
- BRAATHEN A, BÆLUM K, MAHER H JR, et al., 2011. Growth of extensional faults and folds during deposition of an evaporite-dominated half-graben basin; the Carboniferous Billefjorden Trough, Svalbard [J]. *Norwegian Journal of Geology*, 91 (3): 137-160.
- BAI K L, ZHAO Y D, 2021. Valuation model of the migration-accumulation coefficient in the genetic method for assessment of oil and gas resources [J]. *Geology and Exploration*, 57 (3): 656-666. (in Chinese with English abstract)
- COEN R, 2018. Heritage and change in the Arctic: resources for the present, and the future. Robert C. Thomsen and LillRastadBjørst (eds). 2017. Aalborg: Aalborg University Press. 242 p, paperback. ISBN 978-87-7112-624-2. GBP 34 [J]. *Polar Record*, 54 (4): 293-294.
- COLPAERT A, PICKARD N, MIENERT J, et al., 2007. 3D seismic analysis of an Upper Palaeozoic carbonate succession of the Eastern Finnmark Platform area, Norwegian Barents Sea [J]. *Sedimentary Geology*, 197 (1-2): 79-98.
- DORÉ A G, 1995. Barents sea geology, petroleum resources and commercial potential [J]. *Arctic*, 48 (3): 207-221.
- DU X X, LIU J M, 2021. Prospects and directions of China's participation in the development and utilization of oil and gas resources in the Arctic [J]. *Journal of Geomechanics*, 27 (5): 890-898. (in Chinese with English abstract)
- FALEIDE J I, GUDLAUGSSON S T, JACQUART G, 1984. Evolution of the western Barents Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1 (2): 123-150.
- FALEIDE J I, VÅGNES E, GUDLAUGSSON S T, 1993. Late Mesozoic-Cenozoic evolution of the south-western Barents Sea in a regional rift-shear tectonic setting [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 10 (3): 186-214.

- FALEIDE J I, BJØRLYKKE K, GABRIELSEN R H, 2015. Geology of the Norwegian continental shelf [M] //BJØRLYKKEK. Petroleum geoscience. 2nd ed. Berlin; Springer: 603-637.
- GAO J J, BAI G P, QIN Y Z, et al., 2010. Monte carlo simulation-a case study of MARIB-SHABWA Basin in Yemen [J]. Petroleum Geology & Experiment, 32 (3): 305-308. (in Chinese with English abstract)
- GAUTIER D L, BIRD K J, CHARPENTIER R R, et al., 2009. Assessment of undiscovered oil and gas in the arctic [J]. Science, 324 (5931): 1175-1179.
- GENG W, SUN Z L, WU N Y, et al., 2020. Influence factors for gas hydrate formation and Decomposition in southwest Barents Sea: a review [J]. Marine Geology Frontiers, 36 (9): 109-120. (in Chinese with English abstract)
- GLØRSTAD-CLARK E, FALEIDE J I, LUNDSCHIEN B A, et al., 2010. Triassic seismic sequence stratigraphy and paleogeography of the western Barents Sea area [J]. Marine and Petroleum Geology, 27 (7): 1448-1475.
- GUDLAUGSSON S T, FALEIDE J I, JOHANSEN S E, et al., 1998. Late Palaeozoic structural development of the South-western Barents Sea [J]. Marine and Petroleum Geology, 15 (1): 73-102.
- GUO Q L, CHEN N S, LIU C L, et al., 2015. Research advance of hydrocarbon resource assessment method and a new assessment software system [J]. ActaPetroleiSinica, 36 (10): 1305-1314. (in Chinese with English abstract)
- HE B, BAI G P, HE Y H, et al., 2018. Characteristics and favorable target optimization of hydrocarbon plays in the Gabon Coastal Basin [J]. China Petroleum Exploration, 23 (3): 99-108. (in Chinese with English abstract)
- HOU P, TIAN Z J, ZHENG J Z, et al., 2014. Evaluation of conventional hydrocarbon resources in sedimentary basins of central Asia region [J]. Earth Science Frontiers, 21 (3): 56-62. (in Chinese with English abstract)
- IHS Energy Group, 2020. Arctic Region Basin [DB/OL]. Basin Monitor, 2020. Database available from IHS Energy Group, 15 Inverness Way East, Englewood, Colorado, 80112, USA.
- LARSSEN G B, ELVEBAKK G, HENRIKSEN L B, et al., 2002. Upper Palaeozoic lithostratigraphy of the southern Norwegian Barents Sea [R]. NorskGeologiskUnderøkelse, Bulletin 444, 43. Geological Survey of Norway, Trondheim.
- LI X J, YANG C P, WU J Q, et al., 2018. Tectonic features of the Western Barents Sea and its evolution [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 38 (2): 1-12. (in Chinese with English abstract)
- LIU J M, ZHAO Y, YIN J Y, et al., 2017. Arctic geology and oil and gas exploration [M]. Beijing: Geology Press. (in Chinese)
- LU J M, SHAO Z J, FANG D Y, et al., 2010. Analysis of oil-gas resources potential in the Arctic Circle [J]. Resources & Industries, 12 (4): 29-33. (in Chinese with English abstract)
- LI J Z, WU X Z, ZHENG M, et al., 2016. General philosophy, method system and key technology of conventional and unconventional oil & gas resource assessment [J]. Natural Gas Geoscience, 27 (9): 1557-1565. (in Chinese with English abstract)
- MARELLO L, EBBING J, GERNIGON L, 2010. Magnetic basement study in the Barents Sea from inversion and forward modelling [J]. Tectonophysics, 493 (1-2): 153-171.
- Norwegian Petroleum Directorate, 2019. Geology of the Barents Sea [EB/OL]. (2019-01-23). <https://www.npd.no/en/facts/publications/CO2-atlases/CO2-atlas-for-the-norwegian-continental-shelf/6-the-barents-sea/6.1-geology-of-the-barents-sea>.
- TIAN N X, YIN J Y, TAO C Z, et al., 2017. Petroleum geology and resources assessment of major basins in Middle East and Central Asia [J]. Oil & Gas Geology, 38 (3): 582-591. (in Chinese with English abstract)
- TIAN Z J, WU Y P, WANG Z M, et al., 2014. Global conventional oil and gas resource assessment and its potential [J]. Earth Science Frontiers, 21 (3): 10-17. (in Chinese with English abstract)
- TONG X G, 2009. A discussion on the role of accumulation association in the exploring evaluation [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 31 (6): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- USGS (United States Geological Survey), 2019. World oil and gas resource assessments [EB/OL]. [2021-01-01]. <https://www.usgs.gov/centers/central-energy-resources-science-center/science/world-oil-and-gas-resource-assessments>.
- WANG D P, BAI G P, LU H M, et al., 2016. Analysis of petroleum systems and resources evaluation in the Zagros Foreland Basin [J]. Geoscience, 30 (2): 361-372. (in Chinese with English abstract)
- WANG D P, YIN J Y, TIAN N X, et al., 2017. Division and resource evaluation of hydrocarbon plays in the Senegal Basin, West Africa [J]. Geoscience, 31 (6): 1201-1213. (in Chinese with English abstract)
- WEI Y J, YANG T, GUO B C, et al., 2019. Oil and gas resources potentials, exploration fields and favorable zones in foreland thrust belts [J]. China Petroleum Exploration, 24 (1): 46-59. (in Chinese with English abstract)
- WEN H M, XIAO C X, LI W, et al., 2002. Applications of the monte-Carlo method to the petroleum reserves estimation [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 29 (5): 487-492. (in Chinese with English abstract)
- WORSLEY D, 2008. The post-Caledonian development of Svalbard and the western Barents Sea [J]. Polar Research, 27 (3): 298-317.
- YANG J Y, LI J H, MAO X, 2013. Petroleum geology characteristics and prospect of basingroups in arctic region [J]. Chinese Journal of Polar Research, 25 (3): 304-314. (in Chinese with English abstract)
- YU Y X, YIN J Y, ZHENG J Z, et al., 2015. Division and resources evaluation of hydrocarbon plays in the Amu Darya Basin, Central Asia [J]. Petroleum Exploration and Development, 42 (6): 750-756. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG K X, HAN S Q, WANG Z X, et al., 2018. Characteristics of petroleum systems and resources potential in the Afghan-Tajik Basin [J]. Geology in China, 45 (5): 920-930. (in Chinese with English abstract)

English abstract)

ZHANG K X, HAN S Q, MENG Q H, et al., 2020. Classification of sedimentary basins and distribution patterns of oil and gas resources in the Arctic [J]. *Journal of Geomechanics*, 26 (6): 901-910. (in Chinese with English abstract)

ZHAO Y, LIU J M, HAN S Q, et al., 2021. Polar Silk Road and Arctic petroleum and gas resources [J]. *Journal of Geomechanics*, 27 (5): 880-889. (in Chinese with English abstract)

ZHAO Z, LIANG Y B, HU J J, et al., 2014. Arctic oil and natural gas potential and exploration and development trend [J]. *Earth Science Frontiers*, 21 (3): 47-55. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

白琨琳, 赵迎冬, 2021. 油气资源评价中成因法分析与运聚系数取值模型研究 [J]. *地质与勘探*, 57 (3): 656-666.

杜星星, 刘建民, 2021. 中国参与北极油气资源开发利用前景与方向 [J]. *地质力学学报*, 27 (5): 890-898.

高济稷, 白国平, 秦养珍, 等, 2010. 蒙特卡洛模拟法在也门马里卜—夏布瓦盆地中的应用 [J]. *石油实验地质*, 32 (3): 305-308.

耿威, 孙治雷, 吴能友, 等, 2020. 巴伦支海西南部天然气水合物形成与分解影响因素 [J]. *海洋地质前沿*, 36 (9): 109-120.

郭秋麟, 陈宁生, 刘成林, 等, 2015. 油气资源评价方法研究进展与新一代评价软件系统 [J]. *石油学报*, 36 (10): 1305-1314.

何斌, 白国平, 贺永红, 等, 2018. 加蓬海岸盆地油气成藏组合特征及有利目标优选 [J]. *中国石油勘探*, 23 (3): 99-108.

侯平, 田作基, 郑俊章, 等, 2014. 中亚沉积盆地常规油气资源评价 [J]. *地学前缘*, 21 (3): 56-62.

李学杰, 杨楚鹏, 吴蛟歧, 等, 2018. 西巴伦支海地质构造特征及其演化 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 38 (2): 1-12.

刘建民, 赵越, 殷进银, 等, 2017. 北极地质与油气资源 [M]. 北京: 地质出版社.

卢景美, 邵滋军, 房殿勇, 等, 2010. 北极圈油气资源潜力分析 [J]. *资源与产业*, 12 (4): 29-33.

李建忠, 吴晓智, 郑民, 等, 2016. 常规与非常规油气资源评价的总体思路、方法体系与关键技术 [J]. *天然气地球科学*, 27 (9): 1557-1565.

田纳新, 殷进垠, 陶崇智, 等, 2017. 中东-中亚地区重点盆地油气地质特征及资源评价 [J]. *石油与天然气地质*, 38 (3): 582-591.

田作基, 吴义平, 王兆明, 等, 2014. 全球常规油气资源评价及潜力分析 [J]. *地学前缘*, 21 (3): 10-17.

童晓光, 2009. 论成藏组合在勘探评价中的意义 [J]. *西南石油大学学报 (自然科学版)*, 31 (6): 1-8.

王大鹏, 白国平, 陆红梅, 等, 2016. 扎格罗斯盆地含油气系统分析与资源潜力评价 [J]. *现代地质*, 30 (2): 361-372.

王大鹏, 殷进垠, 田纳新, 等, 2017. 塞内加尔盆地成藏组合划分与资源潜力评价 [J]. *现代地质*, 31 (6): 1201-1213.

蔚远江, 杨涛, 郭彬程, 等, 2019. 前陆冲断带油气资源潜力、勘探领域分析与有利区带优选 [J]. *中国石油勘探*, 24 (1): 46-59.

文环明, 肖慈珣, 李薇, 等, 2002. 蒙特卡洛法在油气储量估算中的应用 [J]. *成都理工学院学报*, 29 (5): 487-492.

杨静懿, 李江海, 毛翔, 2013. 北极地区盆地群油气地质特征及其资源潜力 [J]. *极地研究*, 25 (3): 304-314.

余一欣, 殷进垠, 郑俊章, 等, 2015. 阿姆河盆地成藏组合划分与资源潜力评价 [J]. *石油勘探与开发*, 42 (6): 750-756.

张凯逊, 韩淑琴, 王宗秀, 等, 2018. 阿富汗—塔吉克盆地含油气系统特征与资源潜力 [J]. *中国地质*, 45 (5): 920-930.

张凯逊, 韩淑琴, 孟秋含, 等, 2020. 北极地区盆地分类与油气资源分布规律 [J]. *地质力学学报*, 26 (6): 901-910.

赵越, 刘建民, 韩淑琴, 等, 2021. 冰上丝绸之路与北极油气资源 [J]. *地质力学学报*, 27 (5): 880-889.

赵喆, 梁英波, 胡菁菁, 等, 2014. 北极地区含油气潜力及勘探开发趋势分析 [J]. *地学前缘*, 21 (3): 47-55.