

阿拉斯加北坡盆地海域油气地质 及勘探潜力

张鑫

(中海油研究总院)

摘 要 阿拉斯加北坡盆地海域经历了四个主要构造演化阶段,分别为前中泥盆世埃尔斯米尔造山阶段、晚泥盆世至三叠纪被动边缘阶段、侏罗纪至早白垩世裂谷阶段以及中—晚白垩世至第四纪前陆盆地阶段。研究区发育良好的生储盖组合:三叠系 Shublik 组为主力烃源岩;下白垩统 Kuparuk 组浅海相和三角洲相砂岩为主要勘探目的层,上白垩统 Torok 组三角洲砂岩为次要目的层;下白垩统泥岩为区域盖层,且封盖条件好。研究区在构造演化过程中形成了大量圈闭,以大型低幅背斜构造圈闭、构造-地层复合圈闭为主,并发育多套成藏组合。认为北坡盆地海域具有优越的油气成藏地质条件,待发现资源量巨大,勘探前景广阔。前陆盆地挤压构造带、楚科奇海岸、巴罗拱曲等构造圈闭发育区是有利勘探区带。

关键词 阿拉斯加;北坡盆地;海洋勘探;烃源岩;油气地质条件;油气成藏;勘探潜力

中图分类号: TE122.3

文献标识码: A

1 概 况

美国地质调查局(USGS)2008年基于已发现油气田的资料,应用概率法评价技术,对北极圈进行了资源评估,结果显示北极圈内存在丰富的油气资源,如西西伯利亚盆地、阿拉斯加北坡盆地及巴伦支海盆地等。截至2009年,美国、加拿大、挪威等国家在北极圈内已发现了61个大型油气田(其中15个尚未投产)。总体来讲,北极地区勘探程度较低,尤其是海上,由于气候和设备的限制,大部分地区还处于勘探的初级阶段^[1]。

阿拉斯加北坡盆地位于北极圈内,跨越整个阿拉斯加北部,东西长1 100 km,南北宽100~600 km,面积约 $36 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。盆地南接布鲁克斯岭,北邻波弗特海陆坡,西以赫拉尔德隆起与北楚科奇盆地、南楚科奇—霍普盆地相邻(图1)。北坡盆地属于被动大陆边缘叠合盆地,已证实其油气资源丰富,美国最大的油田普鲁德霍湾(Prudhoe Bay)油田位于盆

地北部陆坡布鲁克斯层序内,同时美国在该盆地还发现了一系列大、中型油气田^[2]。盆地具有纵向上多层系含油的特点,但目前商业性油气都产自陆上。北坡盆地已证实具有极好的油气远景,截至2012年,盆地已经钻探500多口探井,获得了64个油气田发现,其中海上有16个发现,主要分布在波弗特海岸区,北坡盆地海上勘探程度还很低,具有巨大的勘探潜力。

由于北坡盆地海域勘探程度低,国内外对该区的研究成果比较少,前人多从盆地的构造演化入手,结合盆地的陆上油田资料来分析盆地的油气资源潜力^[2],对盆地海域的烃源岩潜力、储盖组合分布情况以及油气成藏规律还认识不清。本文通过大量阿拉斯加北坡盆地海域的地质、地球物理和分析化验等资料,综合研究盆地的烃源岩、储盖组合、圈闭类型等成藏要素特征,探讨了盆地油气成藏特征和资源潜力,明确了油气聚集有利区带及勘探方向,这对我们北极圈的合作勘探具有现实的指导意义。

收稿日期: 2012-12-11; 改回日期: 2013-10-28

本文受中海石油(中国)有限公司重点科技攻关项目“美洲区块勘探及战略选区研究”(编号:2012-HW-12)资助

张鑫: 1980年生,高级工程师。2009年在中国海洋大学获博士学位。主要从事石油地质综合研究工作。通讯地址: 100027 北京市东城区东直门外大街6号; 电话: (010)84526423; Email: zhxcou@126.com

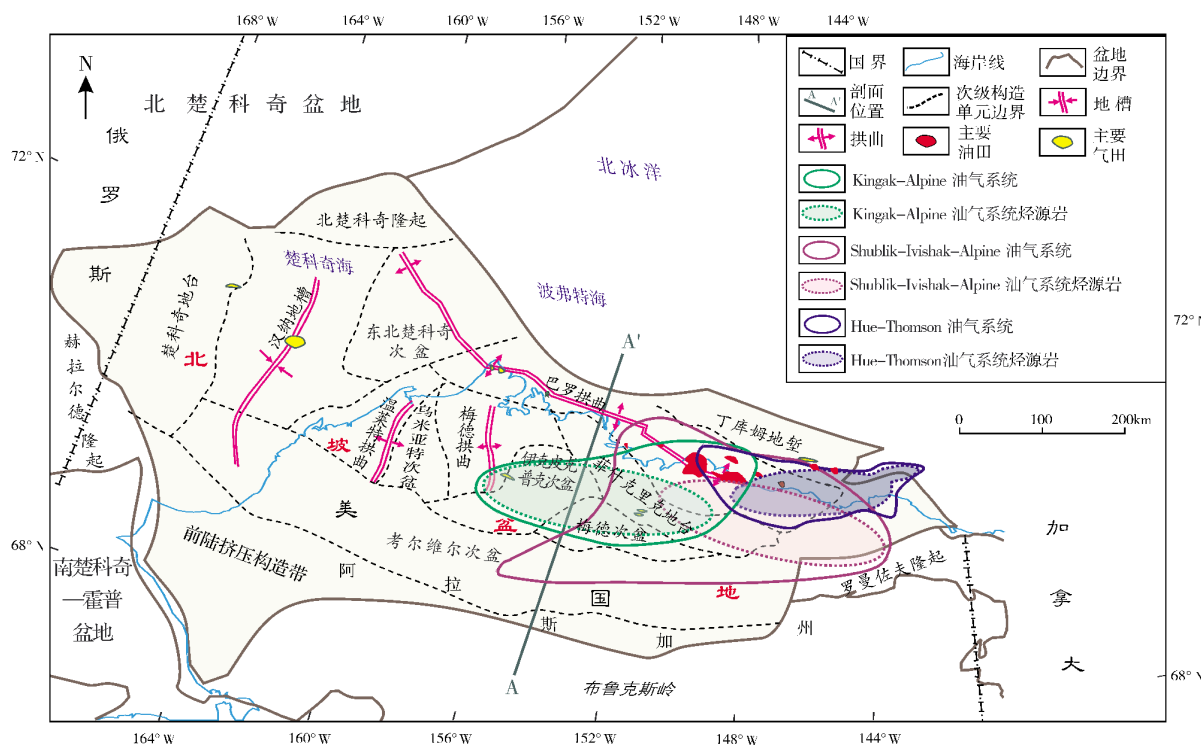


图1 阿拉斯加北坡盆地构造位置及已证实的油气系统分布(据文献[2]和①综合编绘)

2 区域地质特征

2.1 构造特征

阿拉斯加北坡盆地由一系列古生代至新生代的地台、地槽、拱曲和次盆组成,在海域主要包括前陆挤压构造带、楚科奇地台、汉纳地槽与巴罗拱曲等,挤压构造带以 NW 向断层为主,汉纳地槽和楚科奇地台以 NE、NS 向断层为主,反映出它们复杂的构造演化过程。北坡盆地的构造演化是由造山过程控制的,主要包括两大构造体制(图 2):(1)自晚泥盆世埃尔斯米尔造山运动以来,北坡盆地海域一直位于或邻近于埃尔斯米尔造山盆地的北部边缘;(2)从中、晚侏罗世一直到现今,布鲁克斯造山运动致使北阿拉斯加盆地的构造发生了反转^[3],盆地整体呈现南部抬升、挤压变形和北部沉降的构造格局,阿拉斯加北坡盆地由裂谷盆地逐步转化为前陆盆地。

2.2 地层特征

根据区域资料,北坡盆地的地层记录可追溯到前寒武系,并可划分为 4 套构造-地层层序(图 2)。由下往上依次为:(1)基底——富兰克林层序,包括晚寒武世到泥盆纪地层,这一层系包括了各种岩类的组合,常见变形和轻度变质的页岩,还见石英岩、硬砂岩、碳酸盐岩和火山岩的沉积物^[3];(2)埃尔斯米尔层序,包括晚泥盆世至三叠纪地层,对应于被动大陆边缘阶段,以区域性的二叠纪不整合面(PU)为界分为上下两个层序^②,被动边缘期三叠系发育主力烃源岩 Shublik 组,Ⅱ型干酪根,生油为主;(3)波弗特层序,包括侏罗纪至早白垩世地层,对应于裂谷阶段,主要分布在海岸线以北地区,厚度变化大^[4],裂谷期发育下白垩统浅海相和三角洲相砂岩,Kuparuk 为主要储集层,上白垩统 Torok 三角洲砂岩为次要目的层;(4)布鲁克斯层序,包括中—晚白垩世至第四纪地层,对应于前陆盆地和新的被动大陆边缘阶段。

① MAGOON L B, LILLIS P G, BIRD K J, et al. Alaskan North Slope petroleum systems[R]. United States Geological Survey, 2003: 1-3.

② CRAIG J D, SHERWOOD K W, JOHNSON P P. Geologic report for the Beaufort Sea planning area, Alaska: Regional geology, petroleum geology, environmental geology[R]. U.S. Department of the Interior Minerals Management Service, 1985, 85-111.

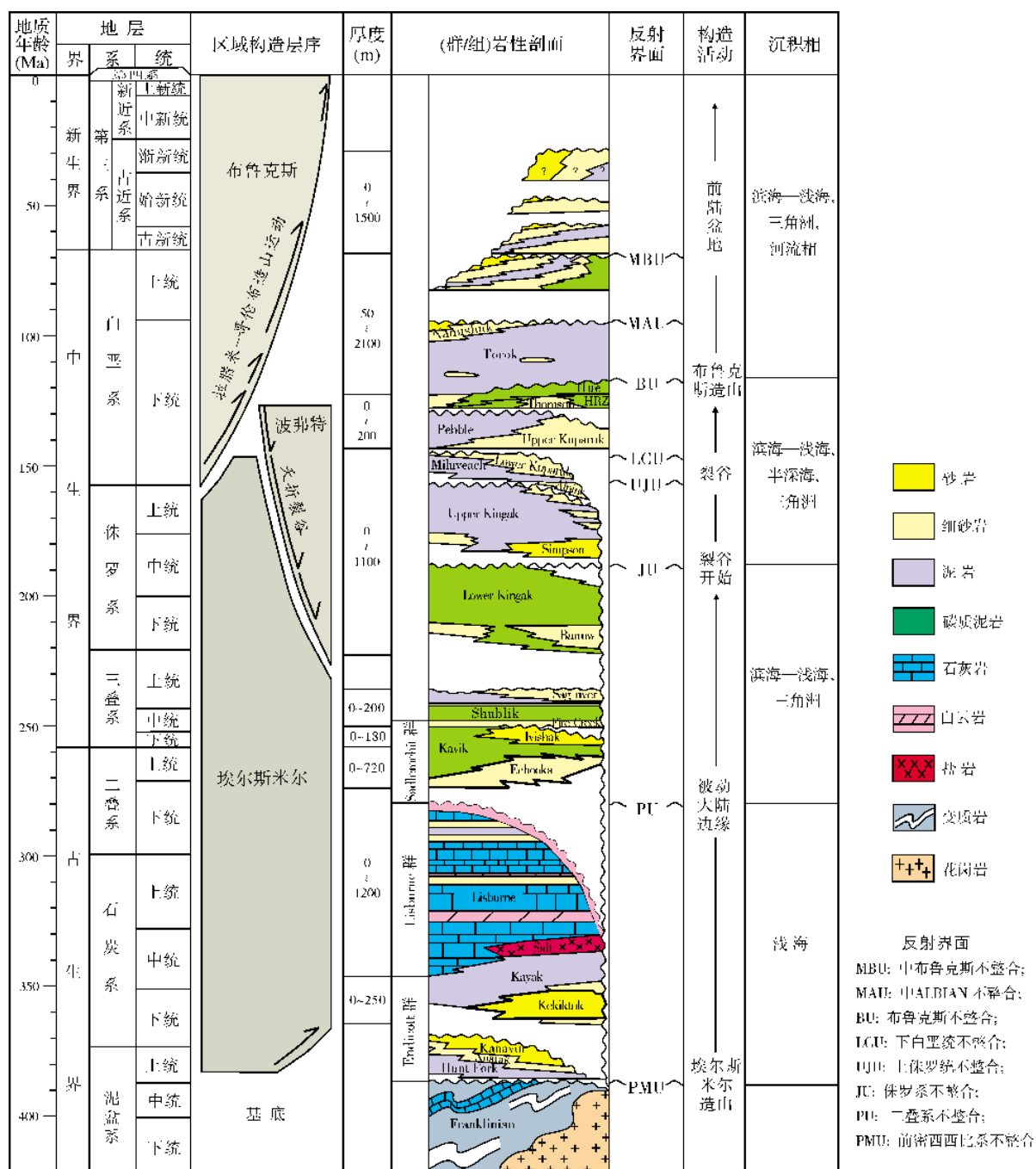


图2 阿拉斯加北坡盆地海域地层柱状图(据康菲公司,2012,有修改)

3 油气地质条件

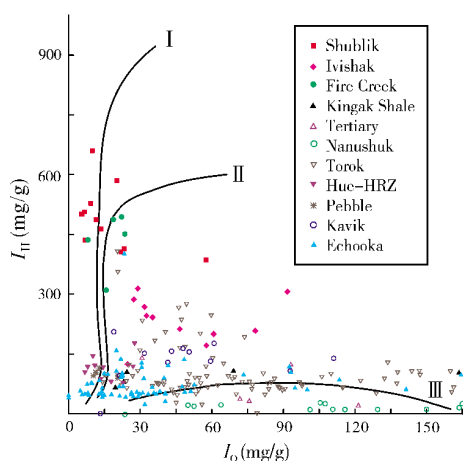
3.1 烃源岩条件

北坡盆地主要有三个沉积中心,分别位于盆地西南部、南部和东部,沉积厚度超过 6000m。盆地的发育

演化呈现多阶段、多旋回、多类型的特征,从而控制了盆地内多期次、高丰度、多类型烃源岩的发育。盆地海域主要烃源岩有三叠系 Shublik 组;次要烃源岩有上二叠统一下三叠统 Kavik 组泥岩,侏罗系—下白垩统 Kingak 组泥岩,白垩系 Hue 页岩、Pebble 泥岩、Torok 组泥岩等;潜在的烃源岩有下白垩统Nanushuk 组^[5-7]。

3.1.1 有机质类型

通过对北坡盆地海域烃源岩样品的岩石热解参数进行分析,三叠系Shublik组、Fire Creek组和上二叠统一三叠系Ivishak组的样品氢指数(I_H)分布范围为200~600 mg/g,表明烃源岩有机质类型主要为腐泥型的。其他层系烃源岩样品氢指数分布范围多在50~200 mg/g,表明烃源岩有机质类型主要为腐殖型



或含腐泥腐殖型的。

运用氢指数—氧指数(I_H-I_O)和氢指数—热解峰值(I_H-T_{max})图版,绘制出该区烃源岩的类型判别图(图3),由图可见,三叠系Shublik组、Fire Creek组以及上二叠统一三叠系Ivishak组烃源岩属于I—II₁型干酪根,其他层系多属于II₂—III型干酪根(图3)。

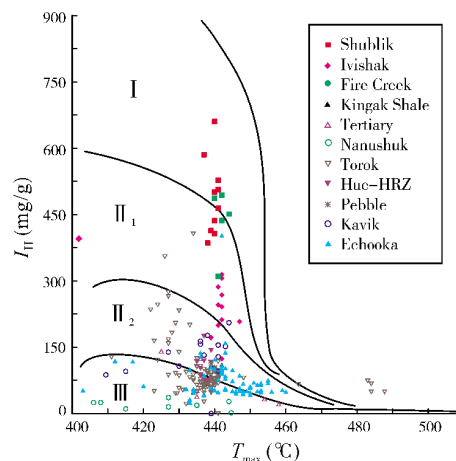


图3 阿拉斯加北坡盆地海域有机质类型判别图

3.1.2 有机质丰度

有机质丰度主要受有机质来源、生物生产率、沉积环境、沉积速率及矿物岩石等因素的影响。根据不同有机质类型的烃源岩评价标准,北坡盆地海域三叠系Shublik组、Fire Creek组和三叠系—上二叠统一三叠系Ivishak组烃源岩(有机质类型为I—II₁型干酪

根)属于好—很好烃源岩。Shublik组的岩性在区域上具有非均一的特征,主要包括海相碳酸盐岩、泥灰岩、页岩和磷灰岩等,其形成环境为东西走向的陆架环境,向北为海岸线,向南为宽阔海洋,古纬度大约50°N^[8]。其他层系烃源岩(有机质类型为II₂—III型干酪根)从差到好都有分布,但主要为中等—好烃源岩(图4)。

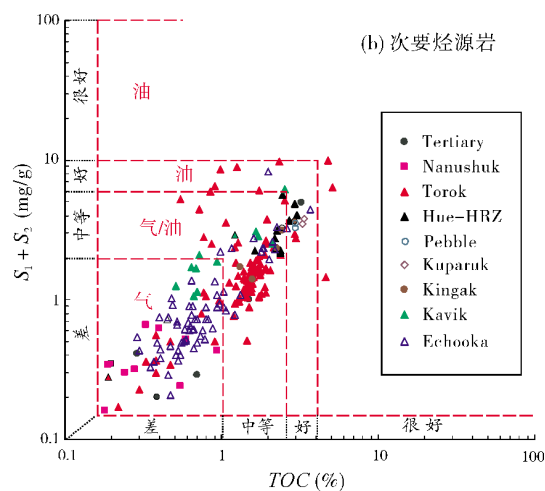
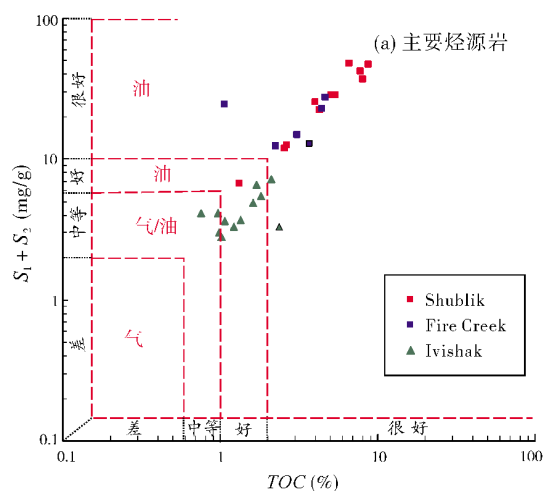


图4 阿拉斯加北坡盆地海域有机质丰度判别图

3.1.3 有机质成熟度

北坡盆地海域镜质组反射率(R_o)分析结果显示:该区有机质在白垩系Torok组中部(深度大约1500 m)进入低成熟阶段($0.5\% < R_o \leq 0.7\%$),在白垩系底部(埋深约2800 m)进入成熟阶段($0.7\% < R_o \leq 1.3\%$),没有样品显示有机质成熟度达到高成熟阶段(图5)。

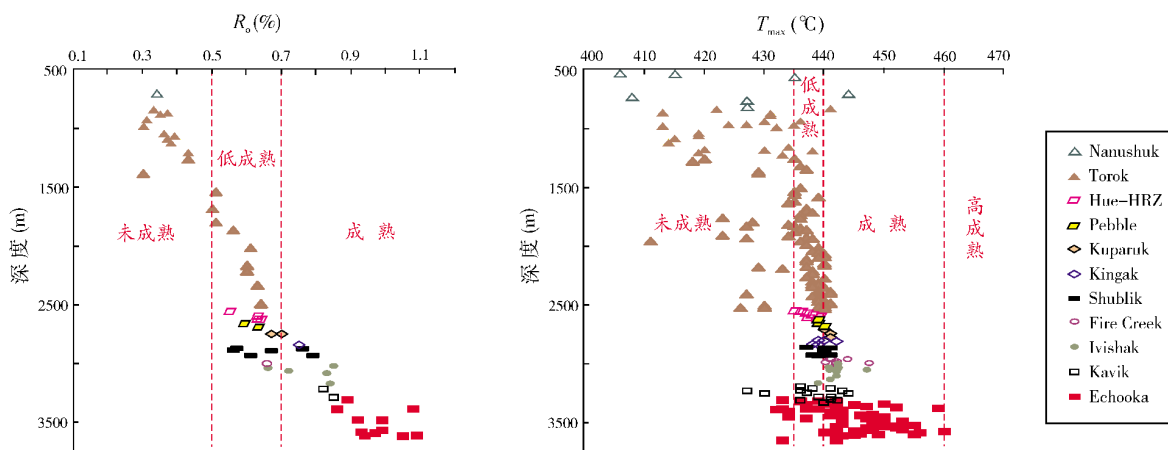


图5 阿拉斯加北坡盆地海域有机质成熟度分布图

3.2 储盖组合条件

3.2.1 储层条件

北坡盆地海域埃尔斯米尔、波弗特及布鲁克斯层序中(图2)拥有众多砂岩储层,碳酸盐岩储层则主要发育在石炭系和三叠系内,白垩系—第三系的煤层是潜在的煤层气储层。

埃尔斯米尔层序为陆架被动大陆边缘沉积,该时期盆地北高南低,主物源为北部隆起的基底剥蚀区,向南往现今布鲁克斯岭一侧水体加深,储层主要分布在盆地的东北部,属过渡相、浅海相沉积环境。储层主要包括二叠系—泥盆系碳酸盐岩、下三叠统一上二叠统浅海相、三角洲相砂岩。二叠系—泥盆系碳酸盐岩主要为灰岩,孔隙度一般在1%~10%之间,渗透率一般在 $(0.01\sim 2)\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,总体上为差—中等的储层,该盆地古生界油气藏主要分布在石炭系碳酸盐岩储层中^[10]。下三叠统一上二叠统发育浅海相、三角洲相砂岩,以长石石英砂岩和岩屑石英砂岩为主,成岩作用属于中成岩作用阶段A期。储层孔隙度一般在5%~30%之间,渗透率范围一般在 $(0.1\sim 100)\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,差—好储层均有分布。该套地层沉积期间经历过

Shublik组为近源古地理环境,其下部为海侵形成的层状泥灰岩和页岩,富含海藻等缺氧环境下沉积的壳质组沉积物,烃源岩样品的 R_o 值在0.6%~0.9%之间,且以I—II₁型干酪根为主,研究认为, R_o 介于0.6%~1.35%之间,相当于烃源岩的液态烃生成阶段^[9],该套烃源岩有机质成熟度适中,以生油为主。

多期海泛与海退,其上被三叠系Shublik组页岩覆盖。

北坡盆地裂谷期以早白垩世发育的裂谷作用为主,北部存在继承性的局部短物源,西部陆架区的楚科奇地台抬升。早白垩世晚期,布鲁克斯岭开始抬升,物源转为南部的布鲁克斯岭,碎屑岩发育于盆地的坡折地带,北部形成一系列小型地堑与半地堑。该时期先后经历河流—过渡相、边缘相与海相沉积环境。主要储层为下白垩统Kugaruk组三角洲相和浅海相砂岩,其物源来自西部楚科奇地台和北部的隆起,储层主要分布在盆地的中部和北部地区,储层成岩作用属于中成岩作用阶段A期。储层孔隙度范围一般为10%~25%,渗透率范围为 $(1\sim 1000)\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于较好—好的储层,三角洲前缘水下分流河道、河口砂坝分布区是主要的有利勘探目标区。

前陆盆地阶段,盆地物源以南部布鲁克斯岭为主,巴罗拱曲为前缘隆起。盆地先后经历了浅海相、海相三角洲与陆相河流相沉积。该时期主要储层为下白垩统Torok组的三角洲、海底扇和浅海—半深海相砂岩,Nanushuk组的三角洲、河流相砂岩,成岩作用属于早成岩作用阶段A期和B期。储层孔隙度范围一般为20%~35%,渗透率范围为 $(10\sim 4000)\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,大部分属于好的储层。

3.2.2 盖层条件

阿拉斯加北坡盆地海域经历了多次海进、海退的变化以及构造活动,古生代、中生代、新生代均发育有盖层,主要包括埃尔斯米尔层序的上石炭统一下二叠统灰岩、三叠系 Shublik 组页岩,波弗特层序的 Kingak 组、Kuparuk 组和 Pebble 组页岩,布鲁克斯层序的 Torok 组、Nanushuk 组页岩和泥岩等。上述

页岩、泥岩和灰岩,既是盆地烃源岩,又是盖层。综合评价认为研究区三叠系一下白垩统下部盖层孔隙度<3%,沉积环境为浅海—半深海,岩性为泥岩和钙质泥岩,单层厚度为 10~210 m,成岩阶段为中成岩 A 期,综合评价为好的盖层。下白垩统上部的盖层孔隙度在 3%~10%之间,沉积环境为三角洲平原,岩性为泥岩,单层厚度为 5~90 m,成岩阶段为早成岩 A 期和 B 期,为较好—中等的盖层(表 1)。

表 1 阿拉斯加北坡盆地海域盖层条件综合评价表

| 地 层 | 孔隙度 (%) | 沉积相 | 岩 性 | 单层厚度 (m) | 成岩阶段 | 综合评价 |
|------------------|---------|--------|---------|----------|--------------|-------|
| K ₁ 上 | 3~10 | 三角洲平原 | 泥 岩 | 5~90 | 早成岩 A 期和 B 期 | 较好—中等 |
| K ₁ 下 | <3 | 浅海—半深海 | 泥 岩 | 10~210 | 中成岩 A 期 | 好 |
| J | <3 | 浅 海 | 泥 岩 | 10~85 | 中成岩 A 期 | 好 |
| T | <3 | 浅 海 | 泥岩、钙质泥岩 | 10~73 | 中成岩 A 期 | 好 |

3.3 含油气系统

北坡盆地经历了多期构造运动,发育了多套烃源岩和盖层,形成了多套成藏组合,已证实有三套含油气系统:Shublik—Ivishak 系统、Kingak—Alpine 系统以及 Hue—Thomson 系统,主要分布在盆地的东部^①(图 1)。其中,三叠系 Shublik 组页岩为主要烃源岩,相应的 Shublik—Ivishak 含油气系统也是最大的,该系统储层从石炭系至第三系均有分布,主要储层为 Ivishak 组,平面上该系统主要分布在巴罗拱曲。

三叠系 Shublik 组烃源岩在晚白垩世—古新世进入生烃高峰,该区域最大埋藏深度发生于晚白

垩世,油气运聚时间为晚白垩世—古新世(图 6)。晚白垩世到古新世,Shublik 组生成的油气可能排入邻近的输导层,纵向上油气沿断层向上或向下运移,横向上油气沿不整合面及砂岩运移。沿断裂边缘的隆升及侵蚀活动导致区域不整合面的发育,下白垩系不整合面(LCU,图 2)被认为是一个裂开不整合,LCU 截断了老的地层单元,包括烃源岩和储层,上超在巴罗拱曲之上,构成了运移通道,巴罗拱曲为油气运移的有利指向区。前陆盆地地层的形变发生在有机质成熟之后,这一时期所形成的褶皱和断层会改造或破坏早期形成的油气藏,促使油气的再运聚。

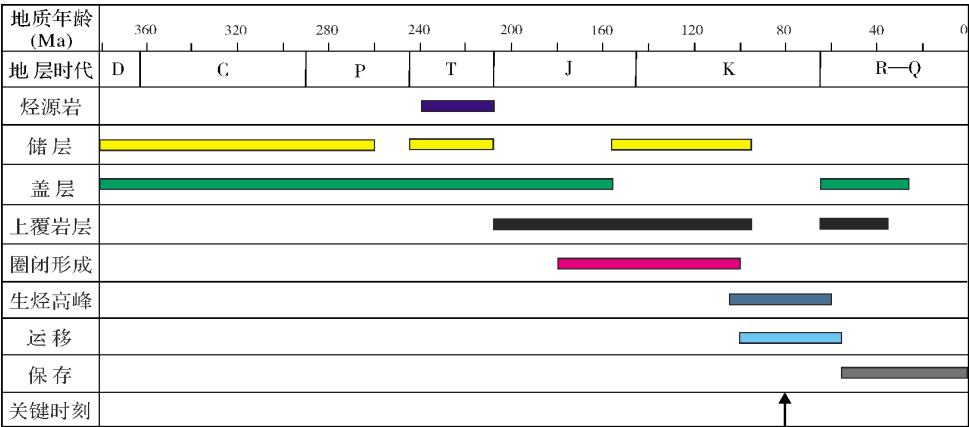


图 6 阿拉斯加北坡盆地海域含油气系统事件图

3.4 圈闭类型

研究区在构造演化过程中形成了大量圈闭,圈

闭类型以构造圈闭、构造-地层复合圈闭为主。
(1)晚泥盆世—中侏罗世被动大陆边缘阶段,北坡盆地海域以拉伸与张扭作用为主,上泥盆统Endicott

群—中侏罗统Kingak组形成了局部次盆和拱曲、地槽、地堑等构造,圈闭类型以构造-不整合、背斜为主。

(2)中侏罗世—早白垩世裂谷阶段,盆地以拉伸作用为主,中侏罗统Kingak组—下白垩统Hue组发育正断层、地槽、地堑等构造,圈闭类型主要为背斜、断背斜、断块等。

(3)白垩世以来布鲁克斯造山和前陆盆地阶段,下白垩统Torok组—第三系发育,盆地南部为挤压

构造带,北部拉伸,在盆地海域形成褶皱背斜、单斜构造、逆冲断层和正断层。

北坡盆地海域的油气发现多在构造圈闭中,圈闭类型多样,包括大型低幅度背斜圈闭、断背斜、断块等(图7)。目前已发现的油气田多位于波弗特海岸巴罗拱曲附近,该区处于优势运移方向,油气沿断层作垂向运移、沿储层或不整合面作横向运移,在背斜等圈闭中聚集成藏。

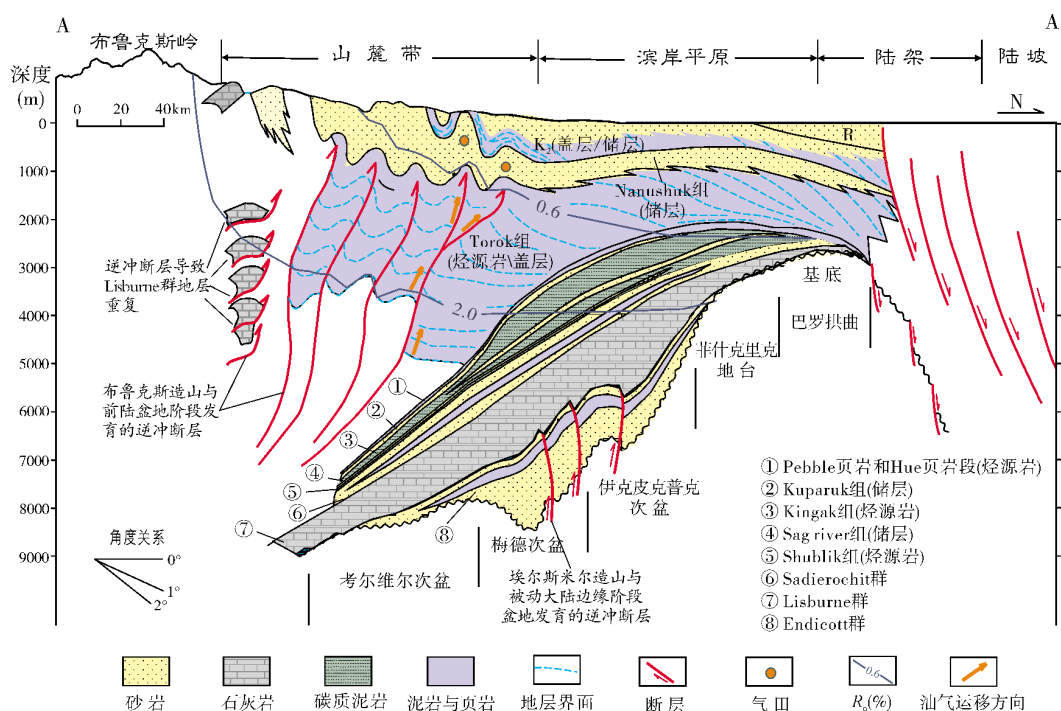


图7 阿拉斯加北坡盆地南北向地质剖面图

A—A'剖面位置见图1

4 勘探潜力

北极地区的油气资源极为丰富,美国地质调查局对北极潜在的常规油气资源进行估计,结果为石油近 900×10^8 bbl、天然气 $1\,669 \times 10^{12}$ ft³和凝析油 440×10^8 bbl,并且待发现的石油和天然气资源主要分布于海域^[11-12]。目前海上最大的天然气发现,预计可采天然气储量达 14×10^{12} ft³,虽然由于严酷的气候、基础设施的缺乏和高昂的作业费用,暂时未达到商业性开发标准,但随着对油气需求的增长,楚科奇海域会得到更多的投资。

2011年美国海洋能源管理局(BOEM)对阿拉斯加陆架区技术可采的待发现油气储量进行评估,结果表明其油气资源潜力大,石油(包括凝析油)和天然气待发现技术可采储量分别超过 260×10^8 bbl和 130×10^{12} ft³,且大部分待发现油气资源位于阿拉斯加北坡盆地的楚科奇海域和波弗特海域,楚科奇海域液态油和天然气待发现技术可采储量分别为 154×10^8 bbl和 77×10^{12} ft³,波弗特海域的分别为 82×10^8 bbl和 28×10^{12} ft³^③,具有巨大的勘探潜力。北坡盆地海域前陆挤压构造带、楚科奇海岸、巴罗拱曲及其向西部的延伸区域,圈闭与储层都比较发育,并

③ BOEM. Assessment of undiscovered technically recoverable oil and gas resources of the nation's outer continental shelf [R]. US: Bureau of Ocean Energy Management, 2011.

紧邻生油凹陷,并且处于油气运移有利指向区,生储盖组合配置良好,为油气勘探的有利区带。

5 结 论

阿拉斯加北坡盆地海域由一系列古生代至新生代的地台、拱曲和次盆等构造带组成,经历了四个主要的构造演化阶段,分别为前中泥盆世埃尔斯米尔造山阶段、晚泥盆世至三叠纪被动边缘阶段、侏罗纪至早白垩世裂谷阶段和中—晚白垩世至第四纪前陆盆地阶段。

北坡盆地海域的构造演化呈现多阶段、多旋回、多类型的特征,从而控制了盆地内多期次、高丰度、多类型烃源岩的发育,其中被动边缘期发育三叠系 Shublik 组主力烃源岩,该套烃源岩形成于开阔海陆架环境,干酪根类型为 I—II 型,生油为主。裂谷期发育下白垩统浅海相和三角洲相砂岩,其中 Kuparuk 组为主要目的层,前陆盆地阶段上白垩统 Torok 组三角洲砂岩为次要目的层。该区下白垩统泥岩为区域盖层,封盖条件好。由此,构成了良好的生储盖组合配置。在构造演化过程中形成了大量圈闭,圈闭类型以构造圈闭、构造-地层复合圈闭为主,发育了多套成藏组合。

北坡盆地海域油气资源丰富,待发现资源量巨大,具有很好的勘探前景。前陆挤压构造带、楚科奇海岸、巴罗拱曲及其向西部的延伸区域是有利勘探区带。

参 考 文 献

- [1] 李浩武,童晓光. 北极地区油气资源及勘探潜力分析[J]. 中国石油勘探,2010,15(3):73-82.
- [2] 姚永坚,李学杰,杨楚鹏,等. 北极阿拉斯加北坡盆地地质构造特征与油气资源潜力[J]. 海洋地质前沿,2012,27(12):18-26.
- [3] HUBBARD R J, EDRICH S P, RATTY R P. Geologic evolution and hydrocarbon habitat of the 'Arctic Alaska Microplate' [J]. Marine and Petroleum Geology, 1987, 4(1/4): 2-34.
- [4] HOUSEKNECHT D W, BIRD K J. Sequence stratigraphy of the Kingak Shale (Jurassic-Lower Cretaceous), National Petroleum Reserve in Alaska [J]. AAPG Bulletin, 2004, 88(3): 279-302.
- [5] PETERS K E, MAGOON L B, BIRD K J, et al. North Slope, Alaska: Source rock distribution, richness, thermal maturity, and petroleum charge [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(2): 261-292.
- [6] DZOU L I. Kuparuk oil field, Alaska, a mixture of Kekiktuk gas condensate and Shublik oil [J]. AAPG Bulletin, 2010, 94(11): 1761-1778.
- [7] SEIFERT W K, MOLDOWAN J M, JONES R W. Application of biologic markers in combination with stable carbon isotopes to source rock/oil correlations, Prudhoe Bay, Alaska [J]. AAPG Bulletin, 1981, 65(5): 990-991.
- [8] PARRISH J T, DROSER M L, BOTTJER D J. A Triassic upwelling zone: The Shublik Formation, Arctic Alaska, U.S.A. [J]. Journal of Sedimentary Research, 2001, 71(2): 272-285.
- [9] 黄玲, 李洋, 李国军, 等. 黔东南凯里地区奥陶系原油及灰岩缝洞油苗地球化学特征与成因[J]. 海相油气地质, 2013, 18(1): 19-25.
- [10] 孙绍清. 论古生界海相油气的分布与聚集[J]. 海相油气地质, 2005, 10(4): 1-4.
- [11] GAUTIER D L, BIRD K J, CHARPENTIER R R, et al. Assessment of undiscovered oil and gas in the Arctic [J]. Science, 2009, 324(5931): 1175-1179.
- [12] 李学杰, 万玲, 万荣胜, 等. 北冰洋地质构造及其演化[J]. 极地研究, 2010, 22(3): 271-285.

编辑:董庸,金顺爱

Petroleum Geology and Exploration Potential in Offshore Arctic Slope Basin, Alaska

Zhang Xin

Abstract: Alaska Arctic Slope Basin is partly located in land of Alaska and partly in seas. It is shown that the basin has experienced four stages of tectonic evolutions, which are the pre-middle Devonian Ellesmere orogeny, the late Devonian to Triassic passive margin, the Jurassic to early Cretaceous rifting and the middle-late Cretaceous to Quaternary foreland, respectively. A good source-reservoir-cap assemblage develops in offshore area. The Triassic Shublik source rock is the major source rock. The lower Cretaceous Kuparuk neritic and deltaic sandstone is the main target reservoir and the upper Cretaceous Torok deltaic sandstone is the secondary target reservoir. The lower Cretaceous mudstone with good seal condition is regarded as the regional cap rock. A large number of traps formed during the tectonic evolutions, predominantly including large-scaled low-rising anticlinal traps and structural/stratigraphic combined traps, and developing several plays. Based on comprehensive analysis, it is shown that there are excellent geological conditions for hydrocarbon accumulation and enormous undiscovered hydrocarbon resources in the offshore area. The compressional structural belt in the foreland, Chukchi coast and Barrow Arch should be the favorable area of exploration.

Key words: Arctic Slope Basin; Source rock; Petroleum geology condition; Hydrocarbon accumulation; Offshore exploration; Exploration potential; Alaska

Zhang Xin: male, DSc., Senior Geology Engineer. Add: CNOOC Research Institute, 6 Dongzhimen Wai Xiaojie, Beijing, 100027, China