

全球前寒武系一下寒武统 原生油气藏地质及分布特征

李刚^{1,2,3}, 白国平^{1,2}, 高平³, 马生晖^{1,2}, 陈君^{1,2}, 邱海华^{1,2}

(1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;

2. 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;

3. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083)

摘要:近年来,前寒武系一下寒武统原生油气资源在全球油气勘探领域越来越受重视。位于俄罗斯的东西伯利亚盆地、中东的阿曼盆地以及我国的四川盆地前寒武系一下寒武统的原生油气藏储量最为丰富。以这 3 个盆地为例,系统全面地阐释全球前寒武系一下寒武统原生油气藏的地质及其分布特征,以期为古老层系油气勘探的进一步突破提供参考。全球前寒武系一下寒武统原生油气藏油气探明和控制储量已达 30 090 MMboe (4.12×10^8 t 油当量),其中 84.2% 分布于东西伯利亚盆地,而阿曼盆地和四川盆地分别占 8.9% 和 6.5%。烃源岩以海相泥页岩、碳酸盐岩为主,整体处于低熟—过熟阶段,且大部分分布于构造低部位;储集岩主要为碎屑岩和碳酸盐岩,早期白云岩化作用、表生淋滤作用和油气早期充注是古老碳酸盐岩储层发育的重要机制;深层和超深层古老层系的油气大部分储于碳酸盐岩中。同时,广泛发育的优质区域性盖层是油气得以有效保存的一个重要因素。自生自储成藏模式、源储相邻近源成藏模式和源储相隔“远”源成藏模式构成了前寒武系一下寒武统原生油气藏的主要成藏模式。

关键词:成藏模式;前寒武系一下寒武统;东西伯利亚盆地;阿曼盆地;四川盆地

中图分类号: TE122.3

文献标识码: A

Geological characteristics and distribution of global primary hydrocarbon accumulations of Precambrian–Lower Cambrian

LI Gang^{1,2,3}, BAI Guoping^{1,2}, GAO Ping³, MA Shenghui^{1,2}, CHEN Jun^{1,2}, QIU Haihua^{1,2}

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

2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, Beijing 102249, China;

3. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In recent years, primary hydrocarbon accumulations of Precambrian–Lower Cambrian have caused an increasing attention in the oil and gas explorations worldwide. The Eastern Siberian Basin in Russia, the Oman Basin in the Middle East, and the Sichuan Basin in China are endowed with the richest oil and gas reserves in the Precambrian–Lower Cambrian primary hydrocarbon accumulations. This study takes these three basins as examples to systematical and comprehensively document the geological characteristics and distribution of the global Precambrian–Lower Cambrian primary hydrocarbon accumulations through a large amount of data analysis and statistics, to provide insights for further breakthroughs of oil and gas explorations in ancient stratigraphic successions of sedimentary basins. The global proven and controlled reserves of Precambrian–Lower Cambrian primary hydrocarbon accumulations have reached 30.09×10^9 boe (4.12×10^8 t), of which 84.2% are distributed in the Eastern Siberian Basin, while the Oman Basin and the Sichuan Basin account for 8.9% and 6.5%, respectively. The source rocks are dominated by marine mudstones, shales and carbonate rocks, which are generally immature to over-mature and mostly distribute in low structural parts. Carbonate rocks and clastic rocks are important types of reservoir rocks. Early dolomitization, superficial leaching and hydrocarbons injection are important mechanisms for the development of ancient carbonate reservoirs. Most of the hydrocarbons in deep and ultra-deep ancient strata are stored in carbonate rocks. At the same

收稿日期: 2020-11-18; 修订日期: 2021-09-02。

作者简介: 李刚(1994—), 男, 博士研究生, 从事深层油气成藏过程、非常规油气评价与勘探研究。E-mail: ligang2020@cugb.edu.cn。

通信作者: 白国平(1963—), 男, 教授, 从事全球油气分布、含油气系统分析与资源评价研究。E-mail: baigp@cup.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金(91755104)和国家科技重大专项(2017X05005001-006)联合资助。

time, the extensively developed high-quality regional caprocks are the key to preserving abundant hydrocarbons. Three types of accumulation models, self-generating and self-preserving, reservoirs adjacent to source rocks, and reservoirs isolated to source rocks, constitute the main models of Precambrian – Lower Cambrian primary hydrocarbon accumulations.

Key words: hydrocarbon accumulation model; Precambrian–Lower Cambrian; Eastern Siberian Basin; Oman Basin; Sichuan Basin

前寒武系—下寒武统油气勘探在世界油气勘探中占有重要的地位,已成为全球石油公司非常重视的油气勘探层系。国外,在俄罗斯、中东、北非、印度和巴西等地,在这套古老层系中已有油气发现,其中俄罗斯的东西伯利亚盆地和中东的阿曼盆地已获得重大油气发现。在我国的四川盆地,继1964年于震旦系发现威远气田后,2011年又在震旦系—下寒武统发现了安岳特大型气田。基于全球油气藏数据库的资料,本研究分析表明全球前寒武系—下寒武统烃源岩生成了46 810 MMboe ($1 \text{ MMboe} = 1 \times 10^6 \text{ bbl}$ 油当量, $1 \text{ bbl} = 0.137 \text{ t}$)的探明和控制(2P)常规油气可采储量(下文中的储量均为可采储量),占全球常规油气储量的1.1%。数十年的研究和勘探开发结果表明前寒武系—下寒武统是一个值得关注的油气勘探层系^[1-6]。

1950年以前,前寒武系尚未确认具有可靠的生物化石,且仅发现有个别“显生古储”油气藏,即油气来自显生宇烃源岩,储于元古宇储层^[7]。当时普遍认为前寒武系不可能具备含有原生烃类的沉积^[8]。然而,此后的研究证实中—新元古界不仅存在多样化的生命形式,而且发育优质的烃源岩。1960年后,在前寒武系中,全世界至少已发现数十处原生油气藏,油气均源自前寒武系的烃源岩,有的还具有相当规模的油气储量^[9-11]。1973年,前苏联就已经着手东西伯利亚盆地中—新元古界油气田的商业性开采^[10-11]。1977年以来,在我国华北燕山地区,陆续发现中—新元古界大量原生的液体油苗与固体沥青^[12-16]。

国外的古老层系经历了较长时间的油气勘探,具有一系列成功的经验与失败的教训。但国内对于前寒武系—下寒武统油气生、运规律、储层发育控制因素及油气藏保存条件等方面的研究还有待进一步深化,在一定程度上制约了我国前寒武系—下寒武统油气勘探的进一步突破。因此,基于国外重点盆地前寒武系—下寒武统原生油气资源宏观分布规律的研究,梳理古老层系油气成藏条件、成藏模式和主控因素,通过国内外古老层系油气成藏要素的类比分析,可为我国前寒武系—下寒武统的

油气勘探提供参考依据,推动该领域的油气勘探。

1 全球前寒武系—下寒武统原生油气资源分布

原生油气藏一般是指生油期后第一次构造运动期间,油气首次发生区域性运移而形成的油气藏,此时油气运移暂时达到平衡,油气藏未遭到破坏。自1954年在东西伯利亚盆地发现第一个元古宇原生油气藏以来,截至2016年底,在全球9个盆地内的前寒武系—下寒武统已发现179个油气田,其中前寒武系—下寒武统原生油气藏(油气不仅生于亦储于前寒武系—下寒武统)共计363个(图1)。

统计分析表明全球已发现的363个前寒武系—下寒武统原生油气藏的2P储量为:石油6 780 MMb(占22.6%, $1 \text{ MMb} = 1 \times 10^6 \text{ bbl}$),天然气132 400 Bscf(占73.3%, $1 \text{ Bscf} = 1 \times 10^9 \text{ ft}^3$, $1 \text{ ft}^3 = 0.028 \text{ 3 m}^3$)和凝析油1 240 MMb(占4.1%),合计为30 090 MMboe。已发现的前寒武系—下寒武统原生油气资源的分布呈现出高度不均衡的特征,东西伯利亚盆地内发现265个油气藏,占总个数的73.0%,2P储量为石油5 590 MMb、天然气112 200 Bscf和凝析油1 040 MMb,合计25 330 MMboe(表1),占全球总量的84.2%(图1)。其次为阿曼盆地和四川盆地,储量分别为2 580 MMboe和1 840 MMboe(表1),占8.9%和6.5%(图1)。需要指出的是四川盆地内发现的原生油气藏虽然个数不多,但发现的单个气藏的储量规模可观,四川盆地前寒武系油气藏的储量平均规模最大,藏均储量达220 MMboe(表1)。在已发现的前寒武系原生油气藏中,仅东西伯利亚盆地、阿曼盆地和四川盆地的少数油气田投入了开发。截至2016年底,其油气采出程度(累计产量占油气总储量的比例)分别为0.9%、3.4%和5.5%。

全球前寒武系—下寒武统原生油气藏储集岩可分为三大类:碎屑岩、碳酸盐岩和其他岩类(主要为硅质岩)。其中,前寒武系—下寒武统油气2P储量的72.8%(21 850 MMboe)储于碎屑岩中,而碳酸盐岩和其他岩类中分别占26.4%(7 920 MMboe)和0.8%(250 MMboe)(图2)。古老层系油气资源

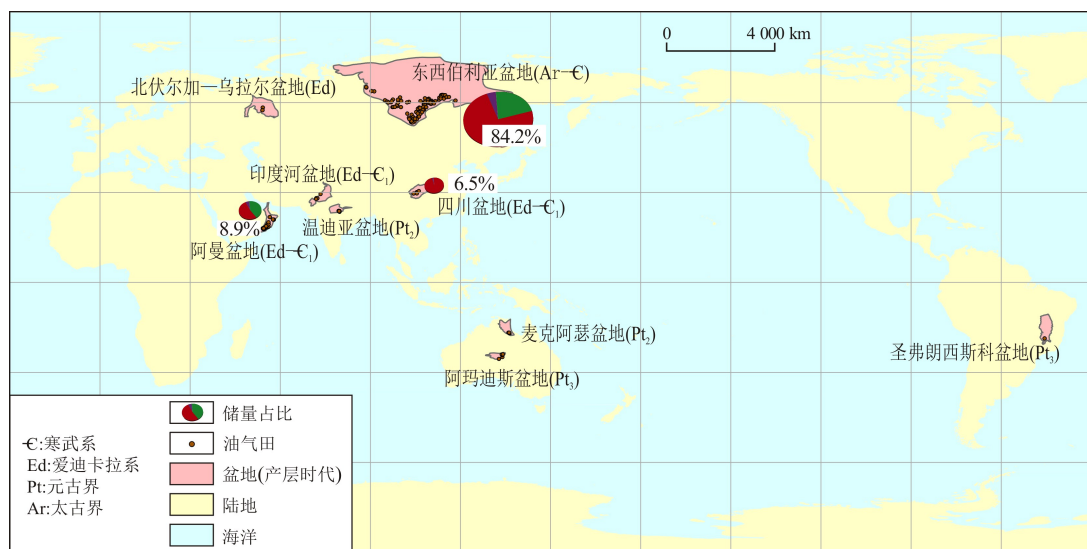


图 1 全球前寒武系—下寒武统原生气藏分布

Fig.1 Distribution of global Precambrian-Lower Cambrian hydrocarbon accumulations

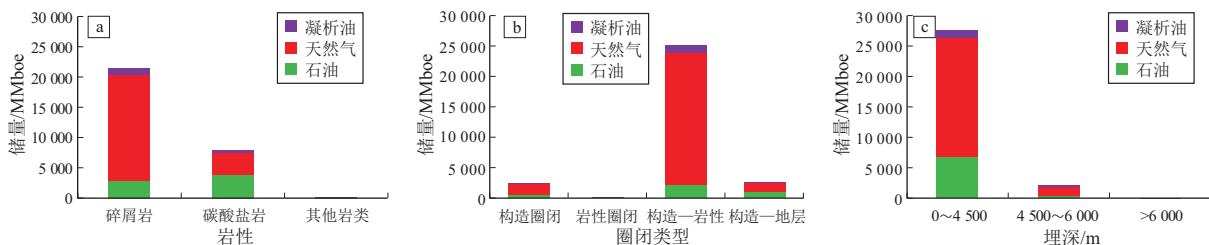


图 2 全球前寒武系—下寒武统原生气在不同储层、圈闭、埋深中的分布特征

Fig.2 Distribution of Precambrian-Lower Cambrian primary hydrocarbons in different reservoirs, traps and burial depths

天然气占绝对优势,天然气在碎屑岩储层中占 79.4%,石油和凝析油分别占 15.7%和 4.9%;碳酸盐岩储层中,天然气、石油和凝析油分别占 46.6%、49.2%和 4.2%(图 2a)。

构造圈闭、岩性圈闭、构造—岩性圈闭以及构造—地层圈闭构成了全球前寒武系—下寒武统原生气藏的圈闭类型。其中,构造—岩性圈闭聚集了已发现油气 2P 储量的 83.3%(25 060 MMboe),而构造—地层圈闭和构造圈闭比例相近,约占 8.4%,岩性圈闭占比最小,仅为 0.3%(图 2b)。

已发现的全球前寒武系—下寒武统原生气藏的油气 2P 储量随埋深的增加而递减,且油气储量绝大部分分布于中浅层(埋深小于 4 500 m)储层中,比例高达 92.8%(27 930 MMboe);深层(埋深在 4 500~6 000 m)油气占 7.1%(2 130 MMboe),超深层(埋深大于 6 000 m)仅占 0.1%(图 2c)。

2 成藏要素分析

基于收集的数据资料^[17],梳理了全球已发现

前寒武系—下寒武统原生气藏或有油气显示的前寒武系含油气盆地的油气成藏条件,其中东西伯利亚盆地、阿曼盆地和四川盆地前寒武系—下寒武统原生气藏的油气储量最为丰富(表 1),因此本文将这 3 个盆地作为重点讨论对象。

2.1 烃源岩

全球前寒武系—下寒武统原生气藏发育优质烃源岩(表 2)。其中,东西伯利亚盆地主力烃源岩分布于里菲系(相当于中—上元古界)和文德系(相当于上元古界震旦系),前者地层厚度可达 2~7.5 km,烃源岩由海相泥页岩和泥灰岩组成,干酪根为 II 型,有机质几乎全部是细菌或藻类^[8]。文德系烃源岩 TOC 的平均含量基本不超过 0.5%,仅在盆地东南部的帕托姆坳陷可达 0.5%~1.0%,但新的油源对比表明,文德系烃源岩也是东西伯利亚盆地重要的烃源岩^[18]。

阿曼盆地的前寒武系—下寒武统烃源岩包括 3 套:盐上哈哈班组(Dhahaban)、盐间阿拉群(Ara)和盐下奈丰群(Nafun)。在 TERKEN 等^[19]有关阿曼盆地含油气系统的研究中,后两者归属于侯格夫

表1 全球前寒武系—下寒武统原生气储量
Table 1 Global primary hydrocarbon reserves of Precambrian–Lower Cambrian

盆地	油气田个数	油气藏个数	石油/MMb	天然气/Bscf	凝析油/MMb	总储量/MMboe	总剩余储量/MMboe	单个油气藏平均规模/MMboe
东西伯利亚盆地	95	265	5 595.0	112 180.2	1 040.4	25 332.1	25 105.6	95.6
阿曼盆地	53	56	1 121.3	8 424.9	146.9	2 672.3	2 581.6	47.7
四川盆地	4	9	0.0	11 390.6	47.6	1 944.4	1 837.2	216.0
印度温迪亚和印度河盆地	12	14	67.5	19.5	0.0	70.8	70.8	5.1
巴西圣弗朗西斯科盆地	1	3	0.0	185.4	0.0	30.9	90.9	10.3
北非陶丹尼盆地	3	3	0.0	162.0	0.2	27.2	27.2	9.1
澳大利亚阿玛迪斯盆地和麦克阿瑟盆地	8	10	2.0	80.9	0.1	15.6	15.6	1.6
伏尔加乌拉尔盆地	3	3	1.5	0.1	0.0	1.5	1.5	0.5
合计	179	363	6 787.3	132 433.6	1 235.2	30 094.8	29 670.4	82.9

注:原始数据源于 IHS^[17]。

表2 东西伯利亚盆地、阿曼盆地和四川盆地烃源岩特征
Table 2 Characteristics of source rocks in the Eastern Siberian, Oman and Sichuan Basins

盆地	烃源岩	岩性	$\omega(\text{TOC})/\%$	$R_o/\%$	干酪根类型	生烃时间
东西伯利亚盆地	文德系(前寒武系)	暗色泥页岩、碳酸盐岩	中南部; <0.5 前帕托姆坳陷; $0.5\sim 1.0$	$0.9\sim 2.0$	II	$\text{C}_2\text{-S}$
	里非系(前寒武系)	海相泥页岩、泥灰岩	叶尼塞—拜基特; $0.7\sim 16.0$; 贝加尔—前帕托姆; $0.6\sim 12.9$			
阿曼盆地	盐上寒武系达哈哈班组	碳酸盐岩	平均 5.0, 最大 8.0		I/II	
	盐间文德系—下寒武统阿拉群	海相泥页岩、海相沉积硅质岩和海相碳酸盐岩	海相碳酸盐岩; $0.1\sim 1.9$,平均 0.9; Al Shoumou 组硅酸盐岩; $3.0\sim 4.0$; U 页岩; $5.0\sim 15.0$; Thuleilat 组页岩; $5.0\sim 15.0$		I/II	Z 烃源岩:O; C_1 烃源岩: $\text{P}_3\text{-C}_1$
	盐下文德系奈丰群	页岩、白云岩	最大 7.0,平均 4.0		II	
四川盆地	寒武系沧浪铺组	泥岩	$0.5\sim 5.8$,平均 1.3		I/II	
	寒武系筇竹寺组	页岩	$0.5\sim 7.6$,平均 1.9	$1.8\sim 3.9$	I/II	
	震旦系灯影组	泥岩、泥质白云岩	$0.2\sim 3.7$,平均 0.6	$2.0\sim 3.5$	I/II	P-T ₂ 生油, T ₃ -K 裂解成气
	震旦系陡山沱组	页岩	$0.6\sim 4.6$,平均 2.1	$2.1\sim 3.8$	I/II	

超群(Huqf)(相当于震旦系—下寒武统)烃源岩。岩性上,除了发育碳酸盐岩和泥页岩之外,还包括一套独特的硅质岩,其 TOC 高于碳酸盐岩,可达 3.0%~4.0%(表 2)。四川盆地主要发育震旦系陡山沱组、灯影组和下寒武统沧浪铺组、筇竹寺组烃源岩。烃源岩生烃时间普遍晚于东西伯利亚盆地和阿曼盆地,于二叠纪—中三叠世生油,晚三叠世—白垩纪裂解生气(表 2)。

需要指出的是全球前寒武系—下寒武统含油气盆地烃源岩发育均与裂谷的形成有关。早里非世初期,东西伯利亚盆地开始发生大规模断陷,形成台内拗陷和台缘拗陷。同裂谷阶段早期,沉积充填以碎屑岩为主,随后以碳酸盐岩为主夹泥页岩,

构成了里非系烃源岩。盆地在文德纪处于裂后拗陷发育期,发育泥页岩和碳酸盐岩烃源岩。阿曼盆地在成冰纪晚期—早寒武世经历了两期断陷(同裂谷)—拗陷的构造沉积旋回。早期的断陷范围分布局限,断陷内充填了阿布玛哈若群(Abu Mahara),随后的裂后拗陷内充填了奈丰群。阿曼盆地的盐盆发育于第二个沉积旋回的断陷期,主要充填了阿拉群,随后的裂后拗陷充填了尼姆尔群(Nimr)及其上覆地层(表 2)。其中奈丰群和阿拉群泥页岩、碳酸盐岩是阿曼盆地重要烃源岩。四川盆地“德阳—安岳”古裂陷槽继承性发育,对烃源岩厚度有明显的控制作用,裂陷槽内筇竹寺组和麦地坪组总厚 300~450 m,烃源岩厚 140~160 m,面

积 $15 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[20]。此外,沧浪铺组也发育有效烃源岩(表 2)。

研究发现,品质一般的前寒武系一下寒武统烃源岩也可以形成规模储量。东西伯利亚盆地里非系烃源岩的地化指标明显优于文德系烃源岩(表 2),据此,推测油气主要源自里非系^[21]。然而,最新的基于生物标志化合物的油源对比表明东西伯利亚盆地的石油有相当一部分是源自文德系烃源岩^[22]。利用这些新的研究成果和油气藏资料,本研究重新统计分析了东西伯利亚盆地 2 个含油气系统的油气储量,结果表明文德系(含下寒武统烃源岩)含油气系统的油气储量为 10 950 MMboe,占盆地油气总储量的 43.2%;里非系含油气系统的油气储量为 14 390 MMboe,占盆地油气总储量的 56.8%(表 3)。同样,基于 GROSJEAN 等^[23]的油源对比结果,南阿曼盐盆内发育 5 个子含油气系统:阿拉群硅质岩和页岩—后侯格夫砂岩、阿拉群硅质岩和页岩—硅质岩、Birba 台地碳酸盐岩、豪威尔台地碳酸盐岩和奈丰群—侯格夫子系统(表 4)。其中,Birba 和豪威尔台地碳酸盐岩子系统的烃源岩和储集岩均为阿拉群的碳酸盐岩。虽然阿拉群碳酸盐岩烃源岩的地化指标明显逊于阿拉群硅质岩和页岩烃源岩以及盐下奈丰群烃源岩(表 2),但其仍贡献了 1 730 MMboe 的油气储量,占南阿曼盐盆 5 个子含油气系统油气总储量的 34.0%(表 4)。

2.2 储层

砂岩、碳酸盐岩以及硅质岩储层是全球前寒武系一下寒武统原生气藏主要储层类型。其中,东西伯利亚盆地的储集岩由河流相、三角洲相和边缘海相砂岩、海相碳酸盐岩组成。砂岩是最重要的储层,这类储层储集了盆地 76.6% 的油气储量,孔隙度为 4%~19%,渗透率为 $(3 \sim 600) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,单个油气藏储集层的总厚度 3~90 m,净厚度 1~35 m(表 5)。阿曼盆地储层包括盐下奈丰群布阿赫(Buah)白云岩、盐间阿拉群碳酸盐岩和硅质岩以及盐上尼姆尔群陆相砂岩(表 5)。与东西伯利亚盆地不同,碳酸盐岩是阿曼盆地最重要的储层,油气储量为 2 220 MMboe,占阿曼盆地原生气藏总储量的 83.1%。其次为硅质岩,油气储量为 333 MMboe,占总量的 12.5%。四川盆地震旦系一下寒武统的主力储层包括震旦系灯影组二段、四段和下寒武统龙王庙组。灯二段和灯四段储层由丘滩复合相的藻凝块云岩、藻叠层云岩、藻格架云岩和砂屑云岩组成^[24]。龙王庙组发育白云岩储层,主要为砂屑白云岩、残余砂屑白云岩和细—中晶白云岩等。其储层孔隙度为 2.0%~18.5%,平均 4.3%;渗透率为 $(0.000 1 \sim 248) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;储层厚度 10~60 m,远远低于阿曼盆地(表 5)。

深层和超深层中碳酸盐岩地层是勘探重点。统计分析表明全球前寒武系一下寒武统原生气藏储层内油气储量随埋深呈现出规律性的变化。

表 3 东伯利亚盆地已发现前寒武系一下寒武统原生气藏储量

Table 3 Proved and probable primary hydrocarbon reserves of Precambrian-Lower Cambrian in the Eastern Siberian Basin

类别	石油/ MMb	天然气/ Bscf	凝析油/ MMb	总储量/ MMboe	占盆地总量 百分比/%
文德系含油气系统	3 742.1	41 668.7	259.5	10 946.4	43.2
里非系含油气系统	1 852.9	70 511.5	780.9	14 385.7	56.8
合计	5 595.0	112 180.2	1 040.4	25 332.1	100.0

注:原始数据源于 IHS^[17]。

表 4 南阿曼盐盆烃源岩及其油气储量贡献率

Table 4 Source rocks and their rates of contribution to hydrocarbon reserves in the South Oman Salt Basin

烃源岩—主力储集层	石油/ MMb	天然气/ Bscf	凝析油/ MMb	总储量/ MMboe	占盆地总量 百分比/%
奈丰群—侯格夫子系统	789.5	9.1	0.0	791.0	15.5
阿拉群硅质岩和页岩— 后侯格夫砂岩子系统	2 342.3	196.1	0.0	2 374.9	46.7
阿拉群硅质岩和页岩—硅质岩子系统	146.0	296.0	0.0	195.3	3.8
Birba 台地碳酸盐岩原油子系统	321.0	1 508.8	26.6	599.0	11.8
豪威尔台地碳酸盐岩原油子系统	571.6	2 696.0	106.0	1 126.9	22.2
合计	4 170.4	4 706.0	132.6	5 087.1	100.0

注:原始数据源于 IHS^[15],后侯格夫砂岩指比侯格夫超群更年轻的砂岩储层。

表 5 东西伯利亚盆地、阿曼盆地和四川盆地储层特征

Table 5 Characteristics of reservoir rocks in the Eastern Siberian, Oman and Sichuan Basins

盆地	储层	岩性	沉积相	孔隙度/ %	渗透率/ 10 ⁻³ μm ²	总厚度/ m	净厚度/ m
东西伯利亚	文德系	砂岩	河流、三角洲和边缘海	4~19	3~600	3~90	1~35
	文德系、寒武系	碳酸盐岩	潮缘、浅海陆架	3~13	1~45	6~30	2~19
	里菲系	碳酸盐岩	浅海陆架	1~4.5	平均 30		9~217
阿曼	下寒武统尼姆尔群	砂岩	冲积扇和河流相			150~457	25~250
	下寒武统阿拉群	硅质岩	深水盆地相	11.6~30	5.2~9	90~555	29~366
	文德系奈丰群	碳酸盐岩	潮坪、浅海	7~8.9	2.8~120	20~400	10~111
四川	寒武系龙王庙组	白云岩	局限台地台内浅滩、台内边缘礁滩相	2.0~18.5	0.000 1~248	10~60	
	震旦系灯影组四段	白云岩为主	碳酸盐台地	2.1~8.6	0.01~10.0	<40	
	震旦系灯影组二段	白云岩为主	碳酸盐台地	2.7~4.5	1~10		5.1~69.1 (上部)

在中浅层储层中,碎屑岩的油气储量占优势,储集了 76.0% 的油气储量,碳酸盐岩仅占 23.2%;在深层储集层中,碎屑岩储量占比 26.2%,而碳酸盐岩储集了 73.4% 的油气储量;在超深层储集层中,油气全部储集于碳酸盐岩(图 3)。

前寒武系—下寒武统碳酸盐岩有效储集岩的形成受高能相带、早期白云化和表生淋滤作用的控制。此外,油气的早期充注抑制了胶结作用,这也是储层孔隙度得以保持的因素之一。在南阿曼盐盆 Birba 油田中,高能相带的微生物白云岩和砂屑白云岩的渗透率可达数百毫达西。另外,有证据表明油气层中白云岩储集层的平均孔隙度为 11.6%,而水层中的白云岩储集层的平均孔隙度则仅为 7.7%^[25],很可能是因为早期油气充注阻碍了碳酸盐岩和蒸发岩的胶结作用,而水层中的成岩作用则持续地进行了。东西伯利亚盆地里菲系储层均为碳酸盐岩,其碳酸盐岩储层内的孔隙、裂缝和溶洞是重结晶和淋滤作用形成的,其中淋滤作用更重要。由于漫长的喀斯特化,里菲系碳酸盐岩产生了

大量的次生孔隙,这种次生储集层的有效孔隙度不大,最大仅为 2%~3%。但里菲系碳酸盐岩具有较高的裂缝空间,与孔隙和溶洞共同构成了很高的缝洞率,因此里菲系产层的储集性能良好。

2.3 盖层

区域性盖层是全球前寒武系—下寒武统原生油气藏得以保存的一个重要条件。东西伯利亚盆地在寒武纪沉积了一套区域蒸发岩盖层(图 4),其厚度大,面积广,使得盆地内前寒武纪—早寒武世聚集成藏的油气保存了下来。阿曼盆地亦发育区域盖层,但由于盐构造活动,形成盐窗,结果盐下和盐间烃源岩生成的油气大部分油气运移至盐上聚集成藏,前寒武系—下寒武统原生油气藏的油气储量为 2 670 MMboe,仅占前寒武系—下寒武统烃源岩贡献的油气总储量 19 380 MMboe 的 13.8%(表 6)。这一点与东西伯利亚盆地截然不同,东西伯利亚盆地前寒武系烃源岩生成的油气(25 330 MMboe)几乎全部储集于前寒武系—下寒武统。四川盆地虽未发育蒸发岩,但广泛发育的泥页岩构成了有效的区域盖层,从而形成了原生油气藏。

3 成藏模式

东西伯利亚盆地、阿曼盆地和四川盆地油气成藏特征的综合分析表明前寒武系—下寒武统原生油气藏具有 3 种成藏模式:自生自储、源储相邻近源和源储相隔“远”源成藏模式。

南阿曼盐盆的盐间碳酸盐岩和硅质沉积岩夹于蒸发岩间,油源对比表明盐间油气层的油气就源

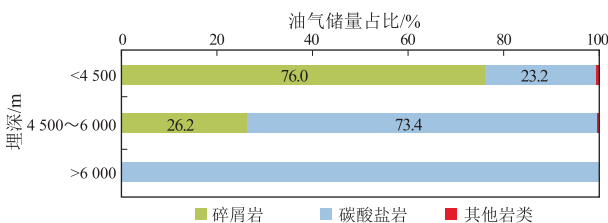


图 3 不同埋深下各储层所含前寒武系—下寒武统油气储量比例

Fig.3 Ratio of Precambrian-Lower Cambrian hydrocarbon reserves at different reservoirs and burial depths

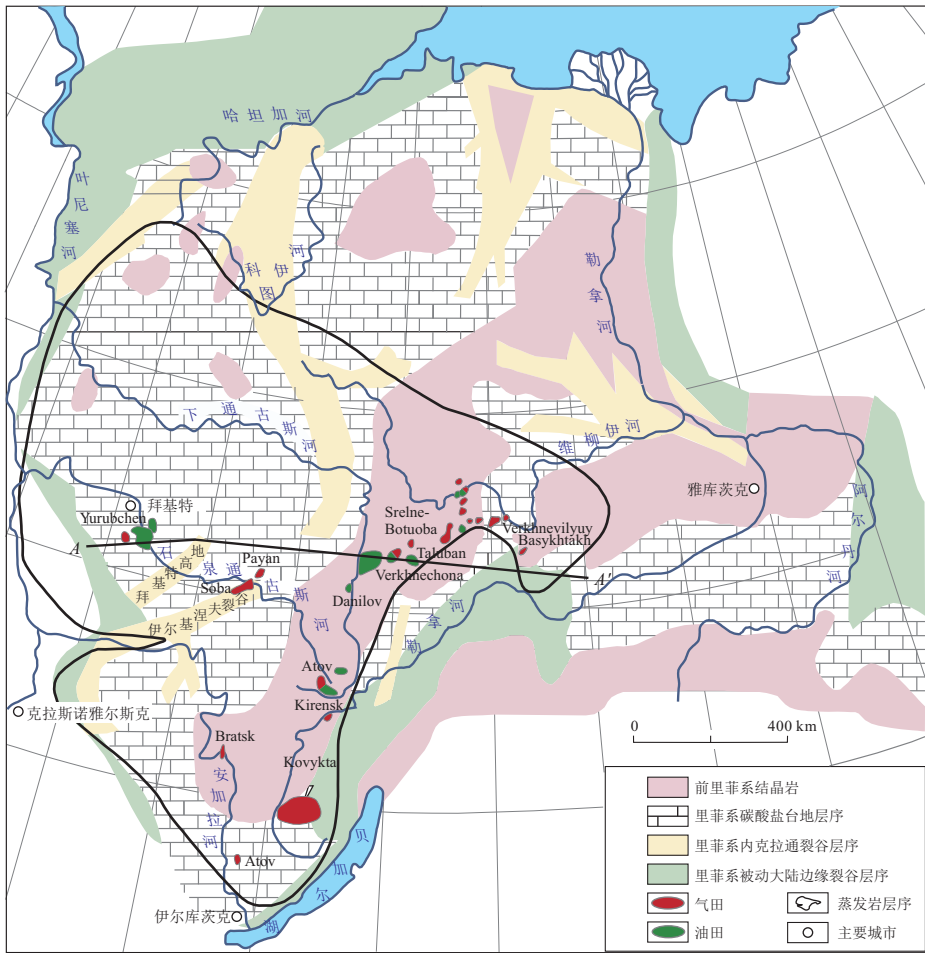


图 4 东西伯利亚盆地里菲系地层、寒武系蒸发岩及油气田分布
据参考文献[26]修改。

Fig.4 Distribution of Riphean rocks beneath pre-Vendian unconformity, oil and gas fields as well as Cambrian evaporites in the Eastern Siberian Basin

表 6 阿曼盆地已发现油气储量

Table 6 Discovered oil and gas reserves in the Oman Basin

类别	石油/ MMb	天然气/ MMscf	凝析油/ MMb	总储量/ MMboe	占盆地总量 百分比/%
前寒武系/下寒武统 超含油气系统	9 361.95	53 575 847	1 086.53	19 377.79	70.4
前寒武系/下寒武统超 含油气系统原生气藏	1 121.28	8 424 915	146.85	2 672.28	9.7
全盆地	15 367.75	65 885 888	1 180.55	27 524.28	100.0

注:原始数据源自 IHS^[15]

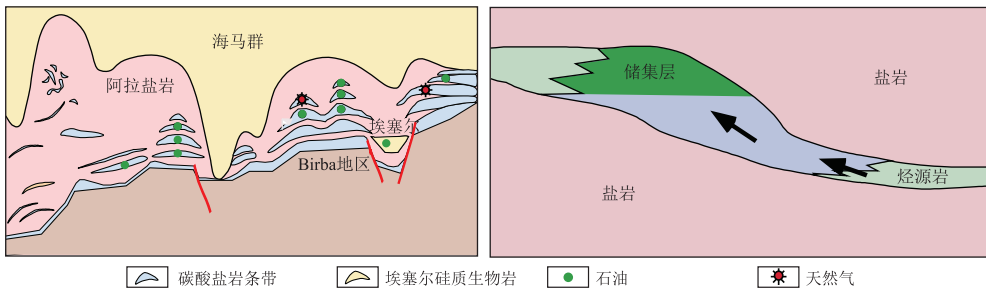


图 5 南阿曼盐盆盐间油气藏自生自储成藏模式
据参考文献[27-28]修改。

Fig.5 Self-generating and self-preserving inter-salt hydrocarbon accumulation model in the South Oman Salt Basin

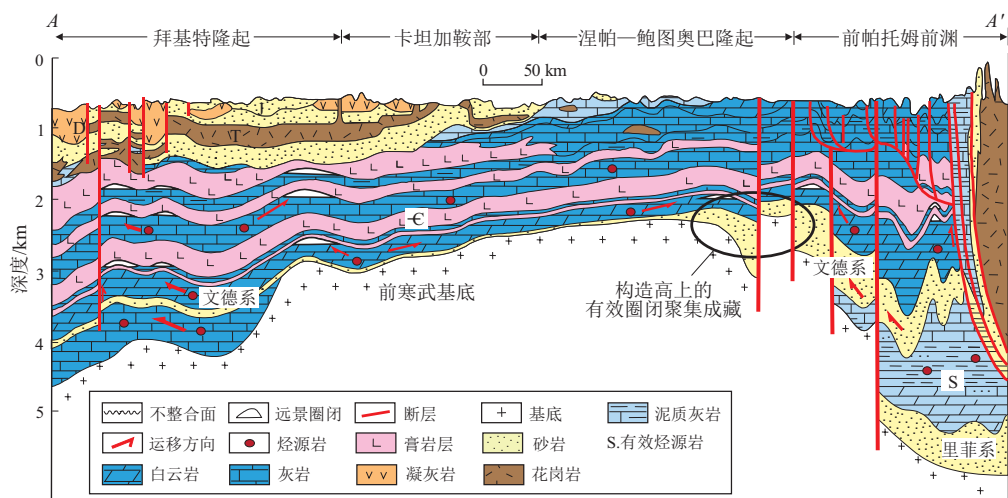


图6 东西伯利亚盆地油气成藏模式

据参考文献[26]修改,剖面位置见图4的A-A'。

Fig.6 Hydrocarbon accumulation model in the Eastern Siberia Basin

自一同时代沉积的碳酸盐岩烃源岩(图5),为自生自储成藏模式。就盐间碳酸盐岩油气藏而言,储集层一般沉积于高能环境,烃源岩则沉积于低能环境。

生烃灶上倾方向的构造高部位(古隆起和古斜坡)处于油气运移的有利区,发现的油气藏规模偏大,多以源储相邻的近源成藏模式聚集成藏(储层为碳酸盐岩)或者源储相隔的“远”源成藏模式聚集成藏(目标层系或其相邻层系发育碎屑岩输导层)。位于东西伯利亚盆地拜基特台背斜卡莫凸起之上的几个大油气田(如Yurubchen巨型油气田,图4),该油气聚集带的主要含油气层系是上里菲统,储层为喀斯特碳酸盐岩。油气被区域展布的文德系碳酸盐岩和寒武系蒸发岩所封堵,油源对比表明油气源自下伏的里菲系烃源岩,表现为源储相邻的近源油气成藏模式。此外,四川盆地德阳—安岳克拉通内裂陷区发育的震旦系灯影组台缘带丘滩体紧邻生烃中心,亦为近源成藏。寒武系龙王庙组位于烃源岩之上,油气通过断层和裂缝近距离垂向运移至储层聚集成藏。

东西伯利亚盆地涅帕—鲍图奥巴台背斜发现的油气主要源自其东南边的前帕托姆坳陷的文德系烃源岩,坳陷内烃源岩生成的油气通过广泛分布的文德系河流—三角洲—边缘海砂岩和断层运移至台背斜东部的相关圈闭聚集成藏,油气成藏表现为源储相隔“远”源成藏特征(图6)。该成藏模式更适合于发育碎屑岩层系的前寒武系—下寒武统含油气系统,原因在于远源需要输导层,砂体等可以构成有效的输导层,而前寒武系

的微生物岩、滩坝相白云岩则不大可能形成广泛分布的输导体。

4 结论

(1) 全球前寒武系—下寒武统原生气藏油气探明和控制储量已达 30 090 MMboe, 东西伯利亚盆地,阿曼盆地和四川盆地分别占 84.2%、8.9% 和 6.5%。

(2) 前寒武系—下寒武统烃源岩多广布于构造低部位,发育于同裂谷期(断陷期)和裂后拗陷期;品质一般的烃源岩可以贡献规模储量,在古老层系的油气勘探中应给予足够重视。

(3) 相控高能相带碳酸盐岩和碎屑岩是重要的储集岩类型,早期白云岩化、表生淋滤作用和油气早期充注是古老碳酸盐岩储集层发育的重要机制;深层和超深层古老层系的油气大部分储于碳酸盐岩中。

(4) 全球前寒武系—下寒武统原生气藏主要有 3 种成藏模式:自生自储、源储相邻近源和源储相隔“远”源成藏模式。

参考文献:

- [1] BHAT G M, CRAIG J, HAFIZ M, et al. Geology and hydrocarbon potential of Neoproterozoic-Cambrian basins in Asia: an introduction[J]. Geological Society, 2012, 366(1): 1-17.
 - [2] 杨一珉, 罗键, 徐云龙, 等. 渤南低凸起下古生界碳酸盐岩潜山储层特征及控制因素[J]. 断块油气田, 2020, 27(4): 448-453.
- YANG Yimin, LUO Jian, XU Yunlong, et al. Reservoir characteristics and controlling factors of carbonate buried hill in the Lower

- Paleozoic of Bonan low uplift[J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2020, 27(4): 448-453.
- [3] 文舰, 彭军, 陈友莲, 等. 四川盆地中部—北部地区沧浪铺组层序地层研究[J]. *断块油气田*, 2020, 27(4): 424-431.
WEN Jian, PENG Jun, CHEN Youlian, et al. Study on sequence stratigraphy of Canglangpu Formation in the central-northern Sichuan Basin [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2020, 27(4): 424-431.
- [4] 赵文智, 胡素云, 汪泽成, 等. 中国元古界—寒武系油气地质条件与勘探地位[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(1): 1-13.
ZHAO Wenzhi, HU Suyun, WANG Zecheng, et al. Petroleum geological conditions and exploration importance of Proterozoic to Cambrian in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(1): 1-13.
- [5] 马新海, 王年梅, 田小彬. 塔东地区震旦系白云岩成因及储层发育模式[J]. *断块油气田*, 2019, 26(5): 566-570.
MA Xinhai, WANG Nianmei, TIAN Xiaobin. Genesis mechanism and reservoir model of Sinian dolomite in eastern Tarim area[J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2019, 26(5): 566-570.
- [6] NIE Haikuan, LI Donghui, LIU Guangxiang, et al. An overview of the geology and production of the Fuling shale gas field, Sichuan Basin, China[J]. *Energy Geoscience*, 2020, 1(3/4): 147-164.
- [7] 王铁冠, 韩克猷. 论中—新元古界的原生油气资源[J]. *石油学报*, 2011, 32(1): 1-7.
WANG Tieguan, HAN Keyou. On Meso-Neoproterozoic primary petroleum resources[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(1): 1-7.
- [8] CRAIG J, BIFFI U, GALIMBERTI R F, et al. The palaeobiology and geochemistry of Precambrian hydrocarbon source rocks[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 40: 1-47.
- [9] DICKAS A B. Precambrian as a hydrocarbon exploration target[J]. *Geoscience Wisconsin*, 1986, 11(9): 5-7.
- [10] DICKAS A B. Worldwide distribution of Precambrian hydrocarbon deposits[J]. *Geoscience Wisconsin*, 1986, 11(9): 8-13.
- [11] KUZNETSOV V G. Riphean hydrocarbon reservoirs of the Yurubchen-Tokhom Zone, Lena-Tunguska Province, NE Russia[J]. *Journal of Petroleum Geology*, 1997, 20(4): 459-474.
- [12] MURRAY G E, KACZOR M J, MCARTHUR R E. Indigenous Precambrian petroleum revisited [J]. *AAPG Bulletin*, 1980, 64(10): 1681-1700.
- [13] 杜汝霖. 燕山地区震旦界及其矿产[J]. *河北地质学院学报*, 1978(2): 5-15.
DU Rulin. The Sinian subsphere and its mineral resources in Yanshan area[J]. *Journal of Hebei Institute of Geology*, 1978(2): 5-15.
- [14] 张长根, 熊继辉. 燕山西段震旦界油气生成问题探讨[J]. *华东石油学院学报*, 1979(1): 88-102.
ZHANG Changgen, XIONG Jihui. Discussion on oil and gas generation in the Sinian subsphere in the western part of Yanshan[J]. *Journal of East China Petroleum Institute*, 1979(1): 88-102.
- [15] 黄醒汉, 张一伟. 燕山西段震旦界、下古生界含油性[J]. *华东石油学院学报*, 1979(1): 103-114.
HUANG Xinghan, ZHANG Yiwei. The oiliness of Sinian and Lower Paleozoic in the western part of Yanshan[J]. *Journal of East China Petroleum Institute*, 1979(1): 103-114.
- [16] 王铁冠. 燕山地区震旦界油苗的原生性及其石油地质意义[J]. *石油勘探与开发*, 1980(2): 34-52.
WANG Tieguan. The primary nature of Sinian subsphere oil seedlings in Yanshan area and their petroleum geological significance[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1980(2): 34-52.
- [17] IHS Energy Group. International petroleum exploration and production database includes data current as of August[R]. Englewood; IHS Energy, 2017.
- [18] FROLOV S V, AKHMANOV G G, BAKAY E A, et al. Meso-Neoproterozoic petroleum systems of the Eastern Siberian sedimentary basins[J]. *Precambrian Research*, 2015, 259: 95-113.
- [19] TERKEN J M J, FREWIN N L, INDRELID S L. Petroleum systems of Oman: charge timing and risks [J]. *AAPG Bulletin*, 2001, 85(10): 1817-1845.
- [20] 邹才能, 杜金虎, 徐春春, 等. 四川盆地震旦系—寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(3): 278-293.
ZOU Caineng, DU Jinhu, XU Chunchun, et al. Formation, distribution, resource potential and discovery of the Sinian-Cambrian giant gas field, Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(3): 278-293.
- [21] KONTOROVICH A E, IZOSIMOVA A N, KONTOROVICH A A, et al. Geological structure and conditions of the formation of the giant Yurubchen-Tokhoma zone of oil and gas accumulation in the Upper Proterozoic of the Siberian Platform[J]. *Russian Geology and Geophysics*, 1996, 37(8): 166-195.
- [22] KELLY A E, LOVE G D, ZUMBERGE J E, et al. Hydrocarbon biomarkers of Neoproterozoic to Lower Cambrian oils from Eastern Siberia[J]. *Organic Geochemistry*, 2011, 42(6): 640-654.
- [23] GROSJEAN E, LOVE G D, STALVIES C, et al. Origin of petroleum in the Neoproterozoic-Cambrian South Oman Salt Basin [J]. *Organic Geochemistry*, 2009, 40(1): 87-110.
- [24] 汪泽成, 王铜山, 文龙, 等. 四川盆地安岳特大型气田基本地质特征与形成条件[J]. *中国海上油气*, 2016, 28(2): 45-52.
WANG Zecheng, WANG Tongshan, WEN Long, et al. Basic geological characteristics and accumulation conditions of Anyue giant gas field, Sichuan Basin [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2016, 28(2): 45-52.
- [25] C&C Reservoirs. Field Evaluation Report: Birba Field, South Oman Salt Basin, Oman[R]. Houston: C&C Reservoirs, 2009.
- [26] ULMISHEK G F. Petroleum geology and resources of the Nepa-Botuoba High, Angara-Lena Terrace, and Cis-Patom Foredeep, southeastern Siberian Craton, Russia[J]. *Bulletin of United States Geological Survey Report*, 2001, 2201-c: 1-16.
- [27] QOBI L, ATLAS B, DE KUIJPER A, et al. Permeability determination from Stoneley waves in the Ara Group carbonates, Oman [J]. *GeoArabia*, 2001, 6(4): 649-666.
- [28] AL-SIYABI H A. Exploration history of the Ara intrasalt carbonate stringers in the South Oman Salt Basin [J]. *GeoArabia*, 2005, 10(4): 39-72.