

文章编号: 0253-2697(2024)01-0115-18 DOI:10.7623/syxb202401007

三塘湖盆地油气勘探开发新领域、新类型及资源潜力

支东明¹ 李建忠¹ 周志超² 焦立新² 范谭广² 李斌² 梁辉² 王兴刚²

(1. 中国石油吐哈油田公司 新疆哈密 839009; 2. 中国石油吐哈油田公司勘探开发研究院 新疆哈密 839009)

摘要:过去30年,三塘湖盆地在侏罗系低压砂岩油藏、二叠系凝灰岩油藏和石炭系火山岩风化壳油藏的油气勘探开发中取得了重要进展,探明石油地质储量为 1.68×10^8 t,建成 56×10^4 t/a的原油产能。三塘湖盆地剩余油气资源潜力大,但已探明未动用储量不足,需要落实油气勘探开发新领域和新类型,实现新的发现和突破,支撑稳健可持续发展的油气生产。基于盆地构造、烃源岩分布、储层特征研究及煤岩实验取得的认识,提出了南部冲断带、洼陷区页岩油、源边粗碎屑油藏和石炭系火山岩内幕型油藏4个新领域,其石油地质资源量分别为 0.86×10^8 t、 2.45×10^8 t、 0.69×10^8 t和 0.96×10^8 t,以及侏罗系西山窑组煤层气和八道湾组富油煤2种新类型,其煤层气资源量为 1427×10^8 m³,焦油资源量为 60.20×10^8 t,资源潜力大,勘探开发前景广阔。根据勘探程度、地质条件和开发技术,按照战略展开、战略突破和战略准备3个层面进行了部署安排。

关键词:资源潜力;勘探开发;前陆冲断带;页岩油;火山岩油藏;煤基油气;三塘湖盆地

中图分类号:TE132.1

文献标识码:A

New fields, new types and resource potentials of oil-gas exploration and development in Santanghu Basin

Zhi Dongming¹ Li Jianzhong¹ Zhou Zhichao² Jiao Lixin² Fan Tanguang²
Li Bin² Liang Hui² Wang Xinggang²

(1. Petrochina Tuha Oilfield Company, Xinjiang Hami 839009, China;

2. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Tuha Oilfield Company, Xinjiang Hami 839009, China)

Abstract:Over the past 30 years, significant progress has been made in the oil-gas exploration and development of Jurassic low-pressure sandstone reservoirs, Permian tuff reservoirs, and Carboniferous volcanic weathering crust reservoirs in Santanghu Basin, with the proved geological reserves of 168×10^8 t and a production capacity of crude oil of 56×10^4 t/a. The remaining oil-gas resources in Santanghu Basin have great potentials, but the proved unused reserves are insufficient. It is necessary to expand new fields and implement new types of oil-gas exploration and development, so as to achieve new discoveries and breakthroughs, and support stable and sustainable oil-gas production. Based on the understandings from the recent research on basin structure, source rock distribution, reservoir characteristics, as well as coal rock experiment, four new fields are proposed, i. e., southern thrust belt, shale oil in subsag areas, megaclast reservoirs at the near-source margin, and interior reservoirs in Carboniferous volcanics, with the petroleum geological resources of 0.86×10^8 t, 2.45×10^8 t, 0.69×10^8 t and 0.96×10^8 t, respectively. Also, two new types are proposed, i. e., coalbed methane in Jurassic Xishanyao Formation and tar-rich coal in Badaowan Formation, with the coalbed methane resources of 1427×10^8 m³ and tar resources of 60.1×10^8 t, respectively. There is great resource potentials and broad prospects for exploration and development. Based on the hydrocarbon exploration degrees, geological conditions, and development technologies, deployments and arrangements were made at three levels, i. e., strategic deployment, strategic breakthrough, and strategic preparation.

Key words:resource potential; exploration and development; foreland thrust belt; shale oil; volcanic reservoirs; coal-based oil-gas; Santanghu Basin

引用:支东明,李建忠,周志超,焦立新,范谭广,李斌,梁辉,王兴刚.三塘湖盆地油气勘探开发新领域、新类型及资源潜力[J].石油学报,2024,45(1):115-132.

Cite:ZHI Dongming, LI Jianzhong, ZHOU Zhichao, JIAO Lixin, FAN Tanguang, LI Bin, LIANG Hui, WANG Xinggang. New fields, new types and resource potentials of oil-gas exploration and development in Santanghu Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(1): 115-132.

基金项目:新疆维吾尔自治区科学技术厅“天山英才”培养计划科技创新领军人才项目“北疆地区二叠系超级盆地全油气系统地质理论与战略接替领域优选”(2022TSYCLJ0070)和中国石油天然气股份有限公司前瞻性基础性技术攻关项目“含煤盆地富油煤岩石物理响应与测井方法研究”(2021DJ3805)资助。

第一作者及通信作者:支东明,男,1971年1月生,2009年获西南石油大学硕士学位,现为中国石油吐哈油田公司教授级高级工程师,主要从事石油天然气地质综合研究及油气勘探开发管理工作。Email:zhidm@petrochina.com.cn

三塘湖盆地前期的油气勘探开发主要集中在构造稳定的凹陷区和中—浅层,但新领域、新区带、新层系也具有很大的勘探潜力^[1]。为实现三塘湖盆地油气资源的有序接替,推动新领域和新类型的油气勘探开发进程,笔者针对盆地南部冲断构造复杂区、页岩油、中—深层和煤基油气资源,开展了构造分析、烃源岩落实、沉积储层刻画和煤岩实验等研究,提出了南部山前冲断掩伏带大构造、洼陷区页岩油、源边粗碎屑油藏、石炭系火山岩内幕型油藏、富油煤及煤层气6个勘探开发新领域及新类型,明确勘探思路和节奏,以期三塘湖盆地油气

勘探开发的可持续发展和战略接替指明方向。

1 区域地质及油气勘探开发简况

三塘湖盆地位于新疆东北部,面积约为23000 km²,呈NW—SE狭长带状夹持于阿尔泰山系和天山山系之间(图1),是在古生代造山褶皱基底之上叠合发育的晚古生代—中生代陆内沉积盆地^[2-3]。盆地周缘出露泥盆系和下石炭统火山—沉积岩系基底。钻探揭示,盆地内部主要地层为上石炭统、中二叠统、中—上三叠统、侏罗系、白垩系和新生界^[4]。

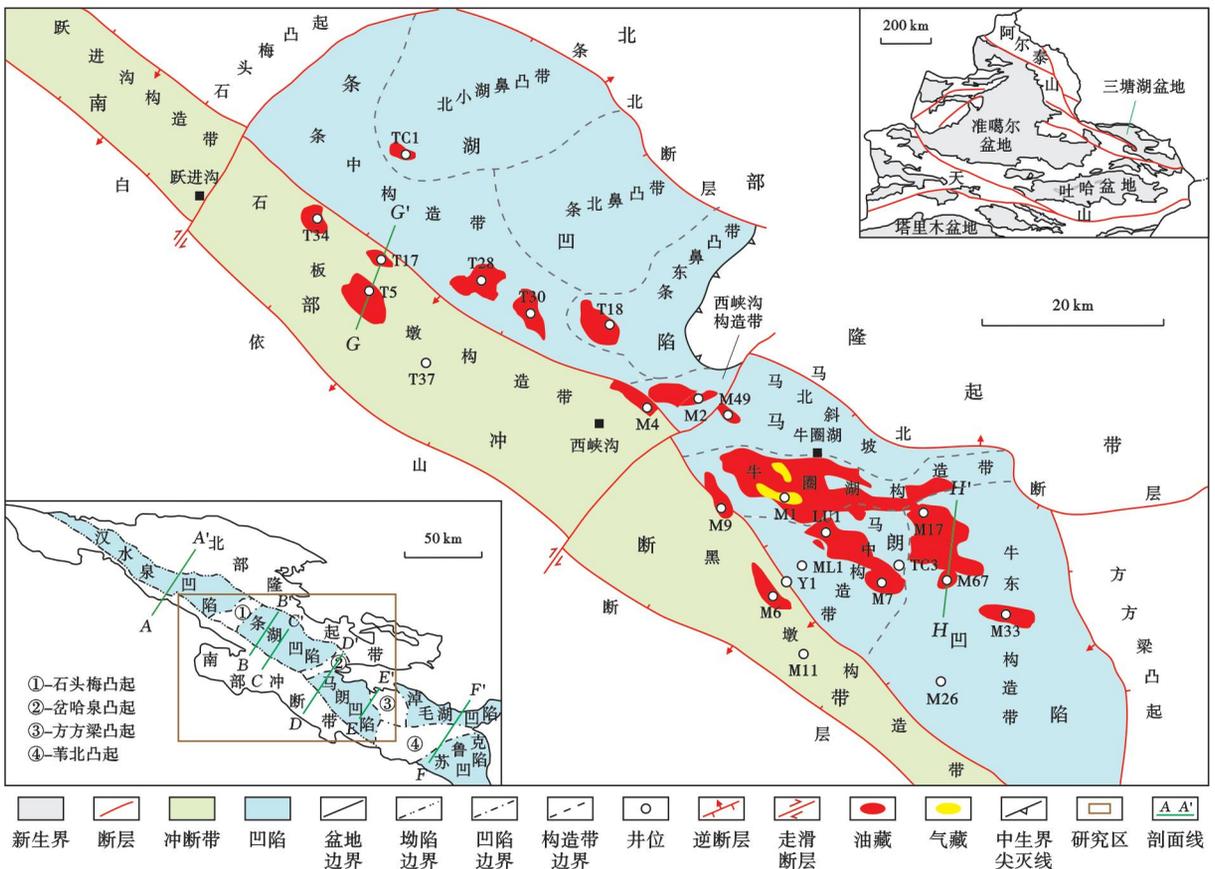


图1 三塘湖盆地构造单元及条湖凹陷—马朗凹陷油气勘探成果

Fig. 1 Tectonic units of Santanhu Basin and the oil-gas exploration achievements of Tiaohu-Malang sags

三塘湖盆地的油气钻探始于1993年,钻井和油气发现主要集中在盆地中部的条湖凹陷和马朗凹陷(图1)。三塘湖盆地围绕上石炭统哈尔加乌组、中二叠统芦苇沟组和中—上三叠统小泉沟群3套烃源岩,发育形成下、中、上3个含油气系统;纵向上,9个层组获得工业油气流(图2),共发现30多个油气藏和含油气构造;相继取得了中生界砂岩、石炭系火山岩和二叠系致密油及页岩油3个亿吨级油气藏的勘探发现,累计落实三级石油地质储量 3.32×10^8 t,其中,探明石油地质储量 1.68×10^8 t^[5]。根据第四次油气资源评价结果,三塘湖盆地的石油资源量为 9.1×10^8 t,石油资源探明率

为18.4%,处于早期勘探阶段,具备持续勘探潜力^[6]。截至2022年底,累计生产原油500余万吨,平均采出程度为5.07%,采出程度低。

三塘湖盆地的油气藏类型复杂多样,包括中生界常规砂岩油气藏和石炭系—二叠系火山岩、凝灰岩及页岩油等非常规油藏,勘探开发历程大致可划分为6个阶段(图3)。

1.1 区域普查阶段(1953—1991年)

该阶段通过1:200000地质调查、1:200000重力普查、1:200000航磁测量和1:400000电法勘探,初步查明了盆地周缘地层系统和地层分布,明确了盆

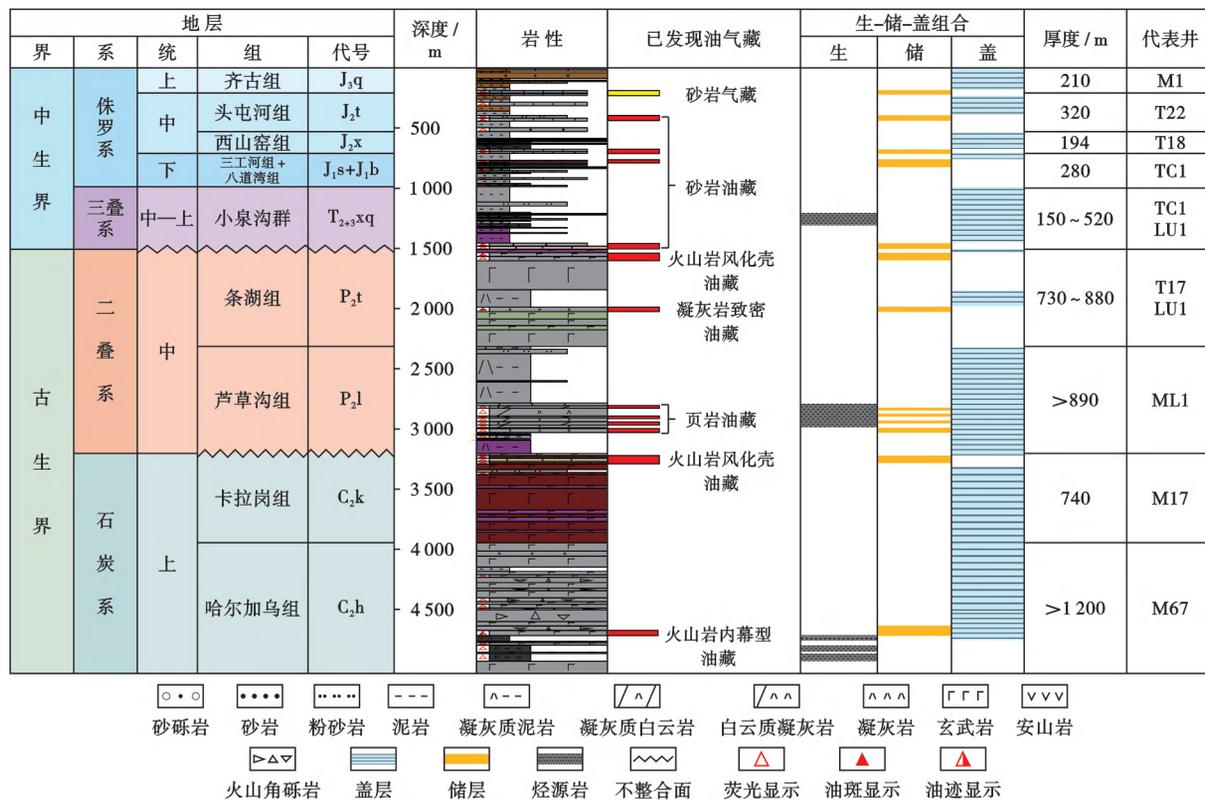


图 2 三塘湖盆地综合地层特征

Fig. 2 Comprehensive stratigraphic characteristics of Santanhu Basin

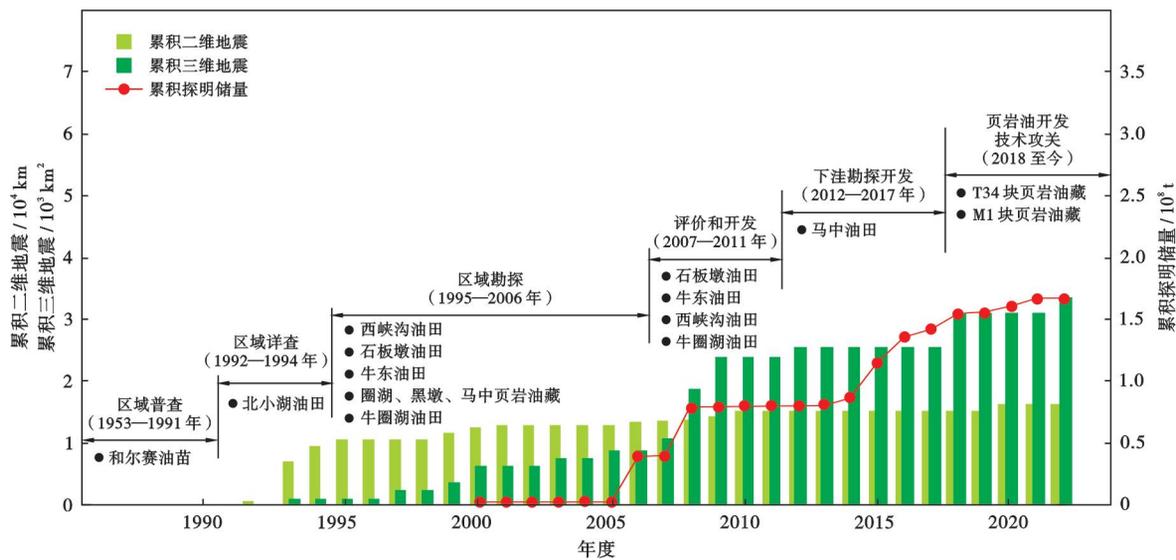


图 3 三塘湖盆地油气勘探开发阶段

Fig. 3 Oil-gas exploration and development stages in Santanhu Basin

地基本构造特征,将盆地划分为南部冲断带、中部拗陷带和北部隆起带,提出了中部拗陷带“五凹四凸”是油气勘探的有利地区。

1.2 区域详查阶段(1992—1994年)

该阶段通过大规模二维地震测线采集,在盆地内部发现了一系列正向构造,随后在条湖凹陷、汉水泉凹

陷和马朗凹陷分别钻探了参数井 TC1 井、TC2 井和 TC3 井,完钻层位均为石炭系。TC1 井钻探揭示了条湖凹陷中一上三叠统小泉沟群煤系烃源岩和北小湖鼻凸带下侏罗统八道湾组常规砂岩油藏^[5],发现了三叠系—侏罗系油气成藏组合。TC2 井未揭示有效烃源岩。TC3 井小泉沟群烃源岩不发育,但发现了上石炭统哈尔

加乌组和中二叠统芦草沟组成熟优质烃源岩,上石炭统和中二叠统油气显示丰富,但试油仅见油花。

1.3 区域勘探阶段(1995—2006年)

该阶段通过三维地震勘探,基本落实了盆地内部的主要构造。区域预探始于1996年,M1井在马朗凹陷牛圈湖构造带发现了中二叠统芦草沟组页岩油藏、中侏罗统西山窑组及头屯河组低压砂岩油藏、上侏罗统齐古组天然气藏,油源来自芦草沟组^[5]。同年,M2井在西峡沟构造带发现了中二叠统条湖组火山岩风化壳油藏。2006年,M17井在牛东构造带发现了上石炭统卡拉岗组火山岩风化壳油藏^[7],此为构造-地层型油藏^[8],油源来自于下部的哈尔加乌组^[9]。自此,落实了盆地内二叠系—侏罗系油气成藏组合和上石炭统油气成藏组合。

1.4 评价和开发阶段(2007—2011年)

该阶段通过评价中生界砂岩油藏,累计落实约 1.00×10^8 t 三级石油地质储量。除北小湖油田的油藏位于下侏罗统八道湾组外,主体油藏位于中侏罗统西山窑组,少量位于中侏罗统头屯河组和中—上三叠统小泉沟群,牛圈湖构造带探明上侏罗统齐古组天然气地质储量为 13.6×10^8 m³。该阶段的开发建产以西山窑组为主,油藏具有低压、低孔、低渗的特征。为解决直井产量低的问题,发展形成了水平井井网超前注水、整体压裂的开发方式,已实现效益动用和持续稳产,标定采收率为18.0%,采出程度为7.8%。

此外,通过评价中二叠统条湖组和上石炭统卡拉岗组火山岩油藏,新发现哈尔加乌组火山岩油藏,累计落实约 1.50×10^8 t 的三级石油地质储量,储量主体位于卡拉岗组。开发动用以牛东油田卡拉岗组火山岩风化壳油藏为主,直井初期产量高,但递减快。通过建设水平井井网、实施大型体积压裂实现了有效开发动用,标定采收率为15.0%,采出程度为4.8%。

1.5 下洼勘探开发阶段(2012—2017年)

2012年开始下洼勘探,LU1井在马朗凹陷马中构造带条湖组发现了凝灰岩致密油藏^[10-12],后评价落实探明石油地质储量约为 37×10^6 t。油源主要来自于下部的芦草沟组,同时也有少许的本地供源^[13]。条湖组凝灰岩致密油藏在直井常规测试中无自然产能或低产,压裂可以获得较高的产量,但稳产时间短,累计产油少^[14]。该阶段形成了水平井+体积压裂、单井注水吞吐、井组渗析+驱替和CO₂井组渗驱协同的开发技术路线,储量得到有效动用,原标定采收率为5.5%,因技术进步使得采出程度达6.3%。

1.6 页岩油开发技术攻关阶段(2018年至今)

自1997年M1井发现芦草沟组页岩油藏开始,至

2011年仍处于正向构造带直井探索阶段,并先后发现了M6、M7、M9等多个含油构造。2012年,马中构造带相继部署ML1井、ML2井和LY1井等井以探索洼陷区页岩油,虽然油气显示丰富,直井获得油流,但未能建成产能^[15]。2017年,石板墩构造带部署的T34井获得页岩油勘探突破,纵向上揭示了9个储层“甜点层”,单个“甜点”的厚度为4.3~20.0 m。2018年以来,T34块和M1块设立了页岩油开发技术攻关试验区,共钻探水平井23口,平均水平段长为1100 m,平均油层钻遇率为84%。按照“水平井细分切割+大型体积压裂”思路进行储层改造,1年期的平均产油量为9.3 t/d,建产的产量为 7.0×10^4 t/a。截至2022年底,累计生产原油 14.0×10^4 t,标定采收率为5.9%,采出程度为0.7%。

2 油气地质特征

2.1 盆地构造特征

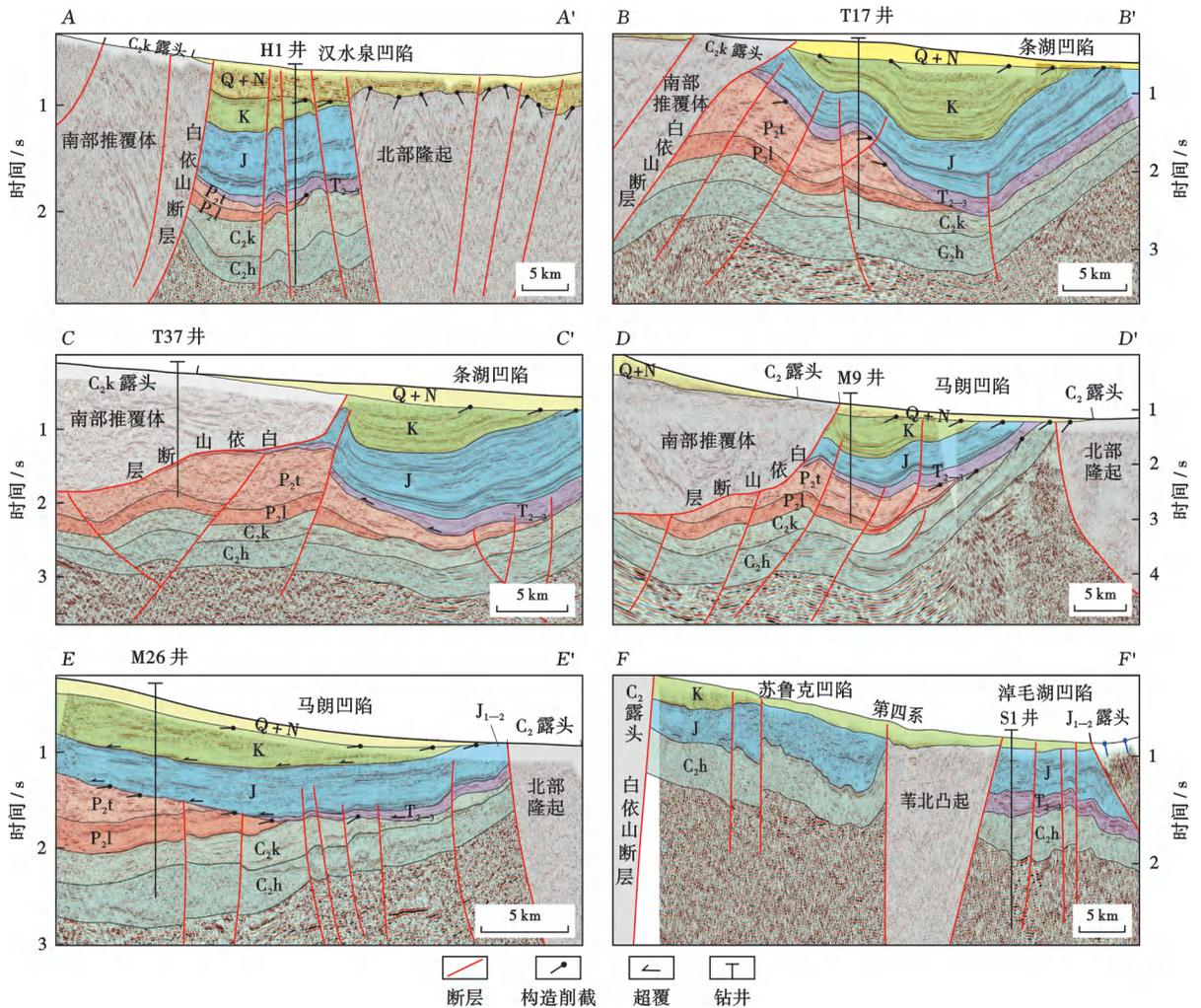
火山岩地球化学分析表明,三塘湖盆地早石炭世发育典型的弧火山岩^[16],为克拉麦里洋向北俯冲的产物^[3]。该套火山岩经历了造山褶皱作用,当前被当作盆地基底对待^[4]。上石炭统哈尔加乌组和中二叠统条湖组发育陆内火山岩,形成于伸展构造背景^[4,17]。盆地内部缺失下二叠统和上二叠统—下三叠统^[11,18-19]。中二叠统与下部石炭系呈不整合接触,表明晚石炭世和中二叠世两期伸展作用不连续。中二叠统与中—上三叠统之间的不整合面对应早三叠世区域挤压抬升构造作用^[20],之后在中生代—新生代多期挤压构造作用影响下,形成了现今盆地形态及复杂的盆地结构和构造样式。

2.1.1 盆地构造样式分析

三塘湖盆地构造格局总体上受控于一系列反倾的、NW—SE走向为主的逆断层,发育南、北双向对冲构造体系(图4),导致盆地在南北向上具有构造分带特征,由南向北依次发育南部冲断带、中央拗陷区和北部隆起带。南部冲断带主要受控于NW—SE走向、南倾的白依山断层,该断层为大型的逆断层。在盆地东、西两侧,白依山断层的断面陡倾,断层上盘发育基底卷入式厚皮构造,下盘掩伏带的宽度窄。在盆地中部,白依山断层的断面较为平缓,断层上盘发育宽阔的楔形逆掩推覆体,推覆体主体为石炭系火山岩,顶部直接出露于地表或覆盖新近系和第四系;断层下盘构造宽缓,构造宽度最大可达20余千米,发育逆冲叠瓦构造和冲起构造,形成多排断背斜及断块构造。北部隆起带主要受控于NW—SE走向、北倾的大型逆断层,其断面陡倾,断层上盘石炭系直接出露于地表或覆盖数十米的新近系和第四系,断层下盘掩伏带的宽度窄。中央

坳陷区的逆冲推覆作用相对较弱,发育次级逆断层及相关构造,局部可见浅层滑脱构造。盆地现今的构造形态是中生代—新生代挤压构造叠加改造的结果,但

晚石炭世和中二叠世的两期伸展构造通过地震资料难以刻画,控沉积正断层在地震剖面上难以识别和追踪,未发现大型的铲式正断层(图 4)。



注: Q—第四系;N—新近系;K—白垩系;J—侏罗系;T₂₋₃—中、上三叠统;J₁₋₂—中、下侏罗统;P_{2t}—条湖组;P_{2l}—芦草沟组;C₂—上石炭统;C_{2k}—卡拉岗组;C_{2h}—哈尔加乌组。

图 4 三塘湖盆地地震解释剖面(剖面位置见图 1)

Fig. 4 Seismic interpretation section of Santanhu Basin

2.1.2 构造期次及构造层

三塘湖盆地共识别出 3 个大型的角度不整合面(图 4),分别为:①中—上三叠统底界,为大型削截和超覆界面,凹陷北部最大剥蚀厚度超过 600 m;②白垩系底界,在马朗凹陷东南部见大规模向南和东南超覆的现象;③新生界底界,为大型削截界面,分布在凹陷两侧,最大剥蚀厚度超过 2000 m。结合火山岩地球化学研究认识,三塘湖盆地在晚古生代造山作用后经历了晚石炭世和中二叠世 2 期伸展构造作用以及早三叠世、早白垩世和新生代 3 期挤压构造作用。盆地在纵向上发育 5 个构造层,分别为:①上石炭统,包括哈尔加乌组和卡拉岗组,其地层厚度变化受火山机构及

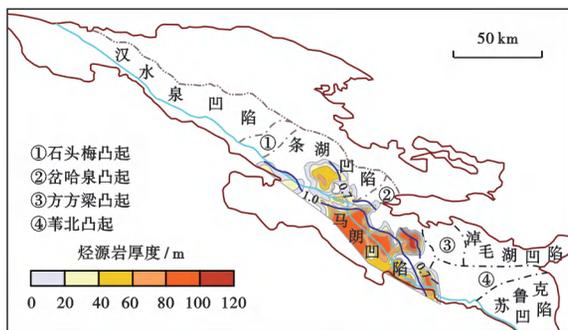
火山地貌控制;②中二叠统,包括芦草沟组和条湖组,其地层南厚北薄;③中上三叠统一侏罗系,其地层北厚南薄;④白垩系,厚度中心位于凹陷中部;⑤新生界,盆地地形呈南高北低。

2.2 烃源岩特征

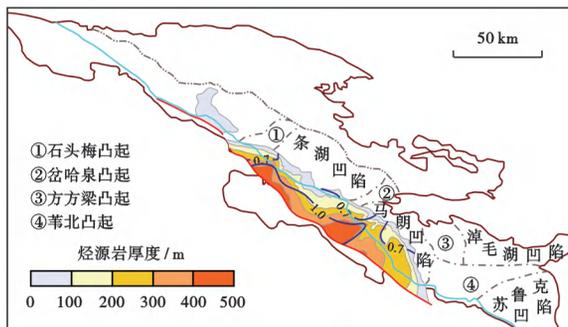
2.2.1 哈尔加乌组烃源岩

三塘湖盆地哈尔加乌组发育陆上和下水两种火山喷发环境,在水下火山喷发岩体之间形成的火山洼地沉积了最厚百余米的灰黑色泥岩,其总有机碳(TOC)含量平均为 5.6%,生烃潜量(S₁ + S₂)平均为 18.2 mg/g,为优质烃源岩。有机质来源主要为低等浮游植物和细菌,有机显微组分以腐泥组为主^[21],有机质类型以

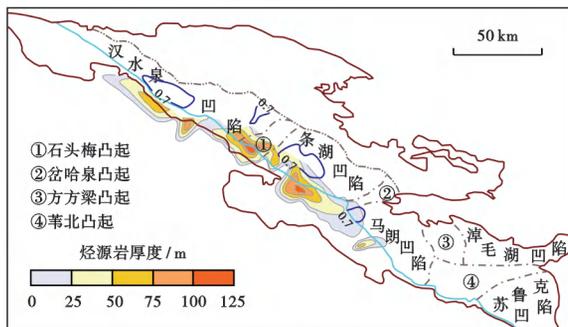
I—II₁型为主^[22],主体达到成熟热演化阶段,深洼区已达到高成熟热演化阶段^[23]。盆地内部已有50口井钻揭哈尔加乌组。钻井揭示,汉水泉凹陷、条湖凹陷及马朗凹陷北部、方方梁凸起、苇北凸起和淖毛湖凹陷的哈尔加乌组主要发育棕红色、褐色火山岩和火山碎屑岩,形成于陆上喷发环境,不具备烃源岩发育条件。全盆地仅在条湖凹陷和马朗凹陷中南部的哈尔加乌组中发育水下火山喷发,在火山洼地中形成了规模烃源岩,其平面分布呈团块状,最大实钻厚度为130 m,分布面积为1820 km²[图5(a)]。围绕马朗凹陷牛东地区的哈尔加乌组烃源岩灶,井控落实的源岩面积为178 km²,勘探发现了牛东油田,探明石油地质储量为 6650×10^4 t。



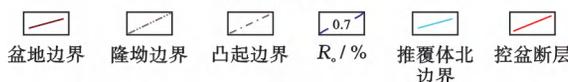
(a) 哈尔加乌组



(b) 芦草沟组



(c) 小泉沟群



2.2.2 芦草沟组烃源岩

根据沉积及岩电特征,三塘湖盆地芦草沟组在纵向上划分为3段,由下到上分别为芦草沟组一段(芦一段)、芦草沟组二段(芦二段)和芦草沟组三段(芦三段)^[18]。芦一段和芦三段的沉积水体较浅,水体盐度为淡水,有机质丰度低且类型差,不具备生烃条件。芦二段的沉积水体较深,水体盐度为半咸水,有机质丰度普遍大于1%,有机质类型为I—II₁型,发育优质烃源岩^[18,24]。芦二段是火山灰和碳酸盐矿物的混合沉积,主要矿物成分为白云石、石英、长石及部分方解石,黏土矿物含量低。有机质丰度与长英质矿物含量呈正比,与碳酸盐矿物含量呈反比^[25],碳酸盐成分起到稀释有机质堆积的作用^[26]。

芦二段并非在全盆广泛分布,而是集中在条湖凹陷和马朗凹陷中南部,厚度上具有南厚北薄的变化趋势,最大实钻厚度为502 m,平面分布范围为2610 km²[图5(b)]。芦二段烃源岩的热演化程度达到了低成熟—成熟演化阶段,凹陷南部的热演化程度高于北部。汉水泉凹陷仅局部发育芦二段,面积为240 km²,岩性为灰色细砂岩、泥质粉砂岩与灰黑色泥岩互层,其中,泥岩厚度为84 m,其TOC含量平均为5.56%(据14件样品统计),有机质类型为Ⅲ型,镜质体反射率(R_0)为0.62%(据8件样品统计),处于低成熟演化阶段。由于汉水泉凹陷的芦二段烃源岩分布局限,热演化程度较低,有机质类型明显差于条湖凹陷和马朗凹陷,在紧邻源岩的细砂岩岩心中未见油气充注,由此认为其不具备大规模生烃条件。淖毛湖凹陷和苏鲁克凹陷缺失二叠系,芦草沟组烃源岩不发育[图5(b)]。

2.2.3 三叠系烃源岩

三塘湖盆地中—上三叠统小泉沟群发育一套煤系烃源岩,岩性为深灰色泥岩、灰黑色碳质泥岩和黑色煤。平面上,小泉沟群煤系烃源岩主要分布在汉水泉凹陷和条湖凹陷[图5(c)],烃源岩的最大厚度为125 m,分布面积为2400 km²。烃源岩的TOC含量为0.11%~66.2%(据84件样品统计)、平均为6.4%, $S_1 + S_2$ 为0.03~308.40 mg/g、平均为24.2 mg/g,主体为一套一般—好的烃源岩;有机质来源主要为陆源高等植物,有机质类型为II—III型;镜质体反射率 R_0 为0.50%~0.75%,整体处于低成熟演化阶段,仅局部达到早期成熟演化阶段。条湖凹陷中部的小泉沟群煤系烃源岩具备一定规模,面积约为280 km²。在围绕这一生烃灶进行的长期勘探中,仅发现北小湖油田侏罗系砂岩油藏,其含油面积小、油气充注不足、油藏含水,反映烃源岩的生/排烃有限,资源潜力不足。

图5 三塘湖盆地哈尔加乌组、芦草沟组和小泉沟群烃源岩厚度
Fig. 5 Source rock thicknesses of Haerjiawu Formation, Lucaogou Formation and Xiaoquangou Group in Santanghu Basin

2.3 主要储层特征

2.3.1 石炭系火山岩内幕型储层

中国的陆上火山岩发育风化壳地层型和内幕岩性型 2 类储层^[27]。三塘湖盆地上石炭统卡拉岗组位于大型不整合面之下,火山岩经历了长时间的风化淋滤作用,形成了好的风化壳储层^[8]。哈尔加乌组位于卡拉岗组之下,发育厚层火山岩但缺乏风化壳储层的发育条件。在与哈尔加乌组烃源岩相邻或其上部火山岩中可见到丰富的油气显示,表明哈尔加乌组发育火山岩内幕型储层。储层岩性以气孔杏仁玄武岩为主,其储集空间为构造-溶蚀缝、杏仁收缩缝、杏仁溶蚀孔和

基质微孔(图 6)。哈尔加乌组发育 1 个火山喷发旋回、2 个火山喷发亚旋回^[28]。每个亚旋回由下部块状致密玄武岩和上部气孔杏仁玄武岩组成,气孔杏仁玄武岩较块状致密玄武岩更容易经受溶蚀作用,形成有效储层^[29]。哈尔加乌组气孔杏仁玄武岩储层在纵向上与烃源岩呈互层叠置或通过断层沟通,具备近源成藏的条件。在牛东构造带,M67 井在 3 286~3 300 m 井段的哈尔加乌组玄武岩段开展了常规射孔试油,其自喷产油量为 65.6 m³/d、产气量为 2 000 m³/d,累计产油量为 1.9 余万吨、天然气产量为 42×10⁴ m³,表明火山岩内幕型储层可作为油气勘探的重要对象。

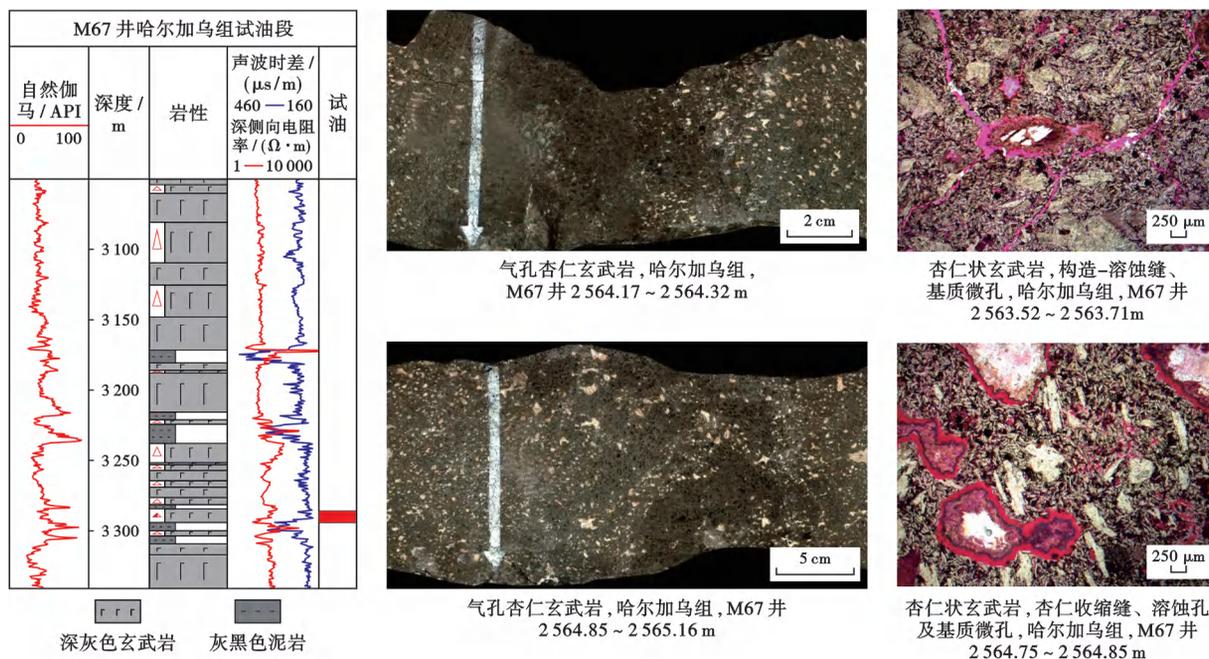


图 6 M67 井哈尔加乌组火山岩储层特征

Fig. 6 Characteristics of volcanic reservoir in Haerjiawu Formation of Well M67

2.3.2 芦草沟组页岩油储层

三塘湖盆地的芦二段具有源-储一体、整体含油的特点,在纵向上因局部富集而形成页岩油“甜点”。评价落实“甜点”、找准主力油层是三塘湖盆地页岩油勘探开发的关键^[19]。由于芦二段发育复杂的混积岩,包括凝灰岩类和白云岩类 2 种过渡岩类、共 7 种岩性,导致对页岩油“甜点”的岩性存在不同认识:①“甜点”岩性为白云岩类^[17];②“甜点”岩性为中酸性晶屑凝灰岩^[14];③不同岩性均能形成储层“甜点”,其中,凝灰岩最优,其次为白云岩、凝灰质白云岩,最差为白云质凝灰岩^[15]。

为进一步深化芦二段页岩油“甜点”岩性的认识,笔者针对 7 口钻井共 9 个核磁共振测井的高孔隙度解释页岩油“甜点”层/段采集了 41 件岩心样品,开展了全岩 X 射线衍射分析(表 1)。核磁共振测井揭示,芦二段页岩油“甜点”的单层厚度变化大,为 2.1~22.5 m,平

均总孔隙度为 7.1%~12.6%,平均有效孔隙度为 5.5%~12.0%。芦二段页岩油“甜点”的矿物成分以白云石为主(51.8%~75.0%),其次为石英和长石(24.0%~40.0%),黏土矿物含量低(0~5.8%),岩性主要为凝灰质白云岩。岩心铸体薄片观察表明,芦二段页岩油“甜点”发育白云石粒内溶蚀孔、溶蚀孔洞和构造溶蚀缝等储集空间,且白云石结晶程度越高、孔隙发育越好(图 7)。因此,白云岩类是芦二段页岩油重要的储集层。结合常规组合测井和核磁共振测井资料,可以较好地识别芦二段页岩油“甜点”(图 7),为后续“甜点”预测提供基础。芦二段页岩油“甜点”具有高核磁有效孔隙度(≥6.0%);根据测井资料分析,“甜点”在深侧向电阻率-补偿密度和声波时差-补偿密度交会图中呈现出明显的包络面特征,表现为低声波时差、低补偿密度和中-高电阻率。

表 1 三塘湖盆地芦二段页岩油甜点核磁共振测井及全岩 X 射线衍射分析数据

Table 1 Nuclear magnetic resonance logging and whole rock X-ray diffraction analysis data of shale oil sweet spots in Member 2 of Lucaogou Formation, Santanghu Basin

井名	岩性	核磁共振测井				岩心全岩 X 射线衍射分析				
		高孔隙度异常井段/m	储层厚度/m	平均总孔隙度/%	平均有效孔隙度/m	样品数	矿物平均含量/%			
							黏土矿物	白云石	石英+长石	其他
T34	凝灰质白云岩	3 283.4~3 301.6	18.2	9.7	9.3	3	0	64.7	35.3	0
T3403	凝灰质白云岩	3 343.5~3 362.8	19.3	7.8	7.4	15	0.8	51.8	36.6	10.3
M6103	凝灰质白云岩	2 949.0~2 960.3	9.7	8.2	7.3	2	0	67.5	31.5	1.0
M708	凝灰质白云岩	2 176.6~2 179.4	16.2	8.2	8.1	3	1.0	55.0	34.6	9.4
LU1	凝灰质白云岩	3 056.5~3 064.5	8.0	7.9	6.8	3	0	57.3	40.0	2.7
LU1	凝灰质白云岩	3 122.0~3 125.0	3.0	7.3	6.0	2	0	58.0	30.5	11.5
LU1	凝灰质白云岩	3 162.8~3 164.9	2.1	7.1	6.3	1	0	75.0	24.0	1.0
M62	凝灰质白云岩	2 879.3~2 903.3	18.0	12.6	12.0	7	1.9	57.0	38.6	2.5
M804	凝灰质白云岩	1 915.3~1 937.8	22.5	9.9	8.7	5	5.8	53.6	35.4	5.2

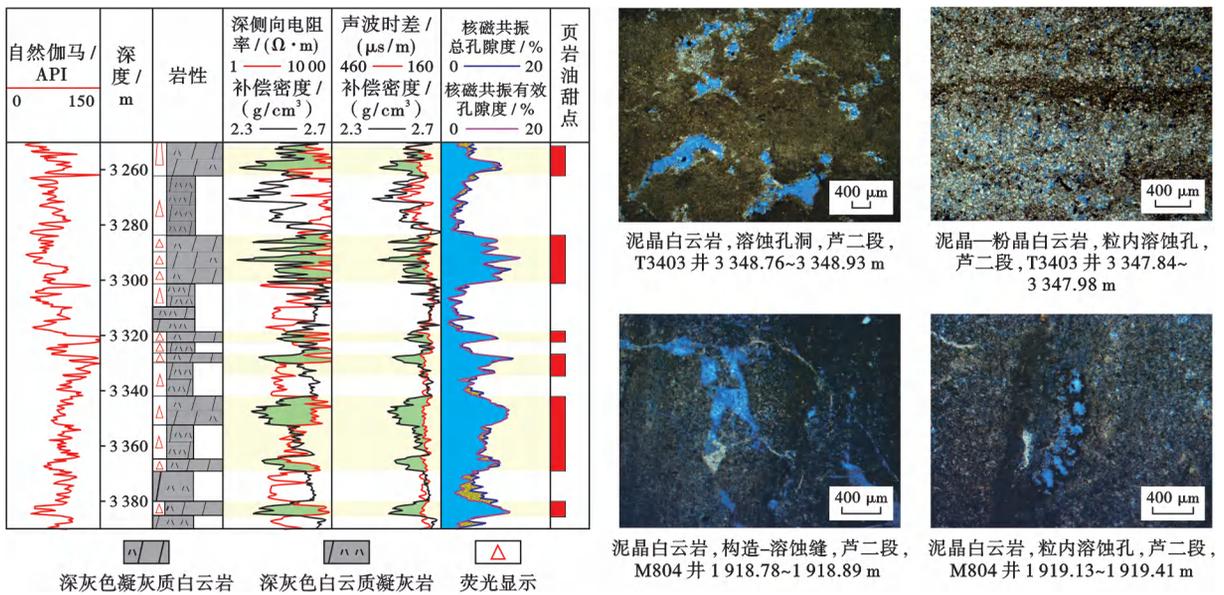


图 7 T34 井页岩油“甜点”测井评价及储集空间类型

Fig. 7 Well logging evaluation and reservoir space types of shale oil sweet spots in Well T34

2.3.3 芦草沟组碎屑岩储层

三塘湖盆地在芦草沟组沉积期被认为是一个欠补偿型盆地^[22,30],主要发育以内碎屑和火山灰为主的混合细粒沉积,缺乏陆源粗碎屑物质的规模输入^[15]。受准噶尔盆地东部中二叠统砂岩油藏勘探突破的启示^[31],笔者系统梳理了三塘湖盆地芦草沟组的录井、测井和岩心资料,在盆地边缘的 M6 井、Y1 井、M11 井等多口钻井中发现了规模的陆源碎屑沉积(图 8、图 9),表明芦草沟组沉积期存在一定的陆源输入。芦草沟组在纵向上 3 个层段均发育陆源碎屑沉积。以 M6 井为例,其芦二段厚度为 545 m(未钻穿),主要岩性为砂砾岩、细砂岩、粉砂岩及部分砾岩、灰岩和灰质泥岩;岩心观察砾岩的砾石成分较为单一,主要为火山岩碎屑,砾径为 1~4 cm,分选差,磨圆度呈次棱角状,为盆地南缘断控陡坡扇沉积。M6 井的芦二段发育砂

岩优质储层,储集空间类型为粒内溶蚀孔、粒间孔和粒内缝(图 9),对 3 056~3 142 m 井段和 3 265~3 298 m 井段进行射孔后自喷,分别获得产油量为 15.2 t/d 和 22.2 t/d,实现了盆地南缘芦草沟组粗碎屑油藏的勘探突破。截至 2022 年底,M6 井的累计产油量为 15 650 t,表明芦草沟组盆缘常规砂岩储层具备勘探价值。

2.4 煤基油气地质特征

2.4.1 煤层气实验分析及结果

三塘湖盆地中一下侏罗统八道湾组和西山窑组煤炭资源丰富,其中,在汉水泉凹陷、条湖凹陷和马朗凹陷的叠合总面积为 4 216 km²,煤层厚度为 5~61 m,具备煤层气成藏的物质基础。笔者对马朗凹陷 Tang1 井和条湖凹陷 T15 井的西山窑组分别采集了 23 件和 15 件煤心样品,采样深度分别为 993.05~1 035.25 m 和 843.72~851.93 m,开展了煤层气含量测试、煤质

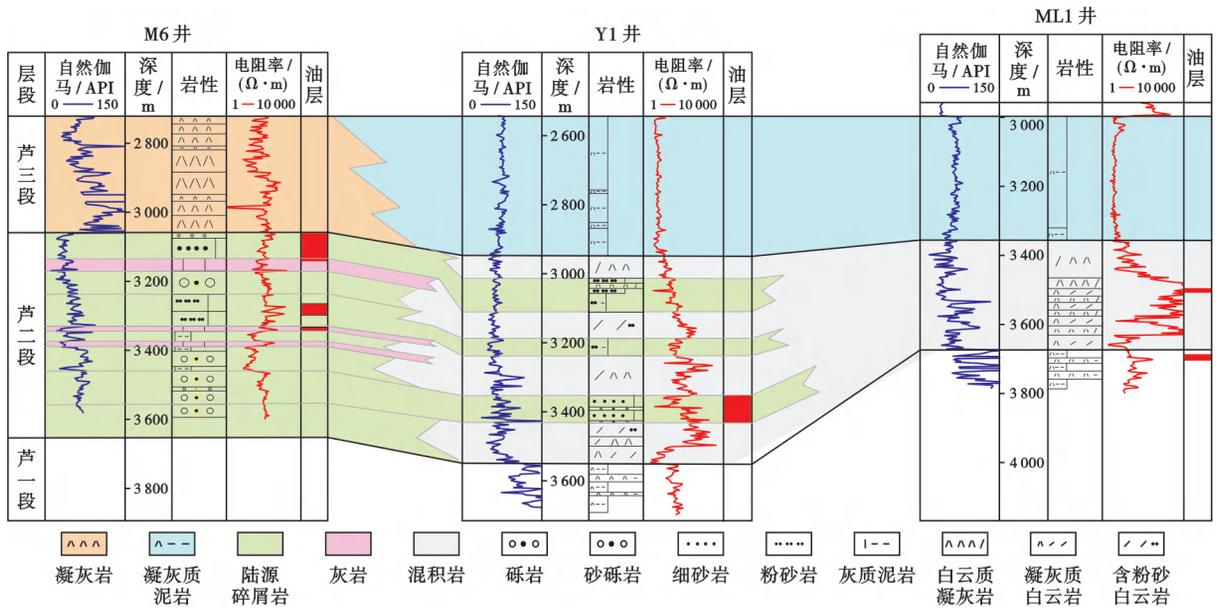


图 8 三塘湖盆地南部芦草沟组陆源碎屑沉积

Fig. 8 Terrigenous clastic sedimentary of Lucaogou Formation in southern Santanghu Basin

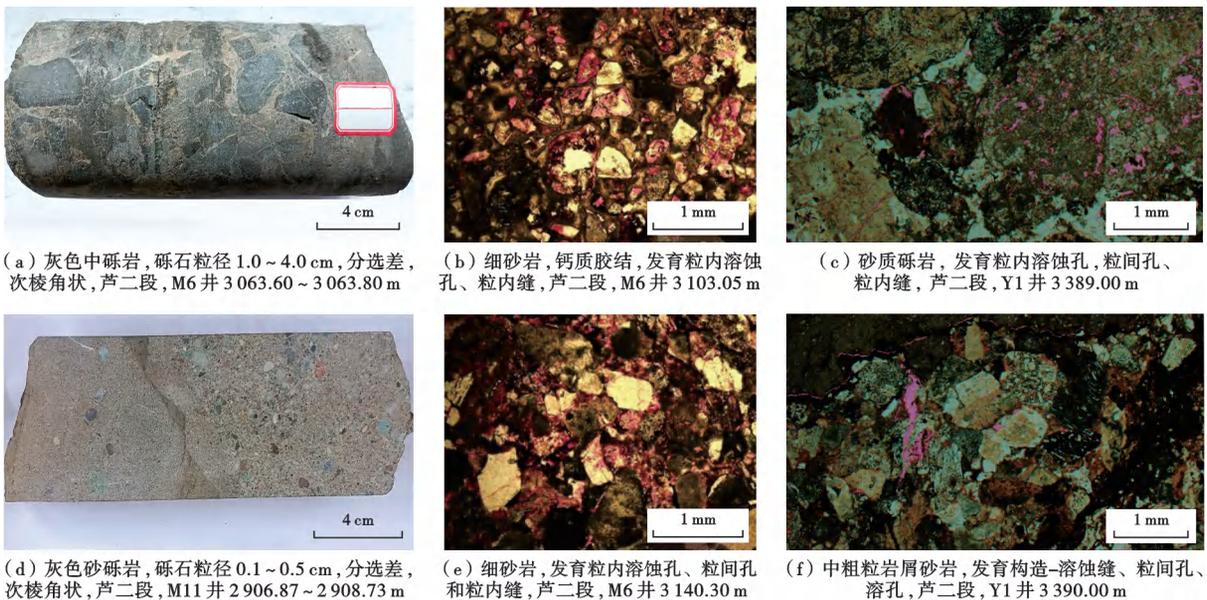


图 9 三塘湖盆地芦草沟组碎屑岩储集层特征

Fig. 9 Reservoir characteristics of clastic rocks of Lucaogou Formation in Santanghu Basin

分析、煤岩测试等实验,并评价煤层气成藏条件。

研究区的宏观煤岩类型主要为暗淡煤和半暗煤,煤岩成分以暗煤为主,夹少量线理状一条带状镜煤及少量薄层状丝炭。煤岩的煤体结构以原生结构煤为主,显微组分为低含量壳质组、中等含量镜质组(腐殖组)和较高含量惰质组,具有含中—低水分、低灰分、高挥发分等特征(表 2)。煤心的平均孔隙度为 9.77%,渗透率为 0.31~1.33 mD; R_o 为 0.39%~0.53%、平均 0.45%,为低阶煤,相当于褐煤焦化阶段。煤岩的含

气量为 3.09~6.14 m³/t,平均为 4.01 m³/t(表 3);甲烷浓度为 73.72%~86.55%,平均 79.74%;二氧化碳含量为 0.52%~1.36%,平均为 0.98%;氮气含量为 12.52%~24.97%,平均为 19.28%。煤层中气体样品的甲烷碳同位素($\delta^{13}C$)为 -55.30‰~-52.63‰,氢同位素(δD)为 -267‰~-238‰;煤层气属于以生物成因气为主、热成因气为辅的混合成因气类型。深部煤岩的 R_o 达到 0.8%,具备煤热成因气生成条件^[32]。

表2 Tang1井和T15井侏罗系煤岩样品工业分析与显微组分测试结果

Table 2 Industrial analyses and maceral measurements of Jurassic coal samples from Well Tang1 and Well T15

井名	埋深/m	工业组分/%			显微组分/%			
		水分	灰分	挥发分	镜质组(腐殖组)	惰质组	壳质组	无机矿物
Tang1	993.05~	1.14~3.57/	2.18~20.70/	24.39~40.83/	11.80~66.30/	26.60~81.80/	0~0.50/	5.30~6.90/
	993.40	2.94(23)	6.33(23)	6.33(23)	34.16(5)	59.48(5)	0.10(5)	6.26(5)
T15	843.72~	7.74~8.89/	2.94~9.82/	26.93~40.77/	24.50~67.90/	30.50~68.70/	0.40~2.50/	0~5.90/
	851.93	8.46(15)	5.38(15)	31.96(15)	4.10(15)	53.10(15)	1.00(15)	1.87(15)

注：“/”后为平均值；括号内为样品数。

表3 Tang1井和T15井侏罗系煤岩样品储层参数

Table 3 Reservoir parameters of Jurassic coal samples from Well Tang1 and Well T15

井名	埋深/m	孔隙度/%	渗透率/mD	镜质体反射率/%	含气量/(m ³ /t)
Tang1	993.05~993.40	7.17~11.60/9.44(5)	0.31~18.90/6.88(5)	0.42~0.54/0.48(7)	3.46~6.14/4.17(23)
T15	843.72~851.93	8.07~11.59/9.89(15)		0.39~0.46/0.44(15)	3.09~3.75/3.41(6)

注：“/”后为平均值；括号内为样品数。

2.4.2 富油煤实验分析及结果

富油煤具有油气资源属性,可纳入非常规油气资源,主要赋存于中—低阶煤类中^[33]。三塘湖盆地侏罗系的低阶煤资源丰富,煤层落实程度高,单层及累计厚度大,具备开展富油煤研究与试验的基础条件。

三塘湖盆地周缘各煤田矿区已广泛开展侏罗系煤层焦油产率测试,分析结果表明,八道湾组和西山窑组发育富油—高油煤层^[34]。其中,八道湾组煤岩的焦油产率为7.20%~22.20%,平均为14.55%(据70件样品统计),样品均达到富油煤评级标准(焦油产率>

7.00%)。西山窑组煤岩的焦油产率为4.40%~22.80%,平均为14.60%(据70件样品统计),仅部分样品达到富油煤评价标准。

在三塘湖盆地内,侏罗系煤层的埋深跨度大,主体超过500m,最大埋深可达2500m。笔者采集了汉水泉凹陷HD1井八道湾组煤岩岩屑样品和条湖凹陷Tang2井八道湾组煤岩岩心样品,开展了低温干馏实验。分析结果表明,三塘湖盆地凹陷区八道湾组煤岩的焦油产率为8.40%~16.40%,达到了富油—高油煤评价标准(表4)。

表4 Tang2井和HD1井侏罗系煤岩样品低温干馏实验结果

Table 4 Experimental results of low temperature retorting of Jurassic coal samples from Well Tang2 and Well HD1

井名	地层	深度/m	焦油产率/%	半焦产率/%	总水分产率/%	煤气+损失/%	评价结果
Tang2	八道湾组	1081.16	16.1	56.3	13.0	14.6	高油煤
		1083.64	15.6	58.0	13.5	12.9	高油煤
		1085.58	15.5	57.4	13.5	13.6	高油煤
		1087.59	14.5	59.7	13.0	12.8	高油煤
HD1	八道湾组	1938.00	15.0	69.0	5.8	10.2	高油煤
		1940.00	14.2	70.3	6.4	9.1	高油煤
		1942.00	14.0	71.6	6.1	8.3	高油煤
		1944.00	16.4	68.9	6.0	8.7	高油煤
		1946.00	8.4	79.8	6.6	5.2	富油煤

3 勘探开发新领域、新类型及其资源潜力

随着油气勘探开发程度不断提高和难度加大,复杂构造、复杂岩性、深层和非常规逐渐成为盆地的主要勘探开发目标,是战略接替和目标准备的重要领域^[35]。立足近期在构造、烃源岩和储层等研究上的进展和认识,基本明确了三塘湖盆地的油气勘探开发重点仍为条湖凹陷和马朗凹陷,下一阶段将立足南部山前冲断掩伏带的大构造、洼陷区页岩油、源边粗碎屑油

藏和石炭系火山岩内幕型油藏4个勘探新领域,以及煤层气、富油煤2种新资源类型,实现油气勘探开发的战略接替和目标准备。

3.1 4个油气勘探开发新领域及其资源潜力

3.1.1 南部冲断带大型构造

三塘湖盆地南部冲断带具备前陆盆地特有的油气地质特征,即在早期拉张构造背景下沉积了有效的烃源岩层系,在晚期挤压背景下发育前陆逆冲带,从而形成成排成带的大型构造圈闭,其成藏组

合好,具备勘探潜力^[36]。条湖凹陷和马朗凹陷南部冲断带的勘探面积为 1685 km²,在白依山断裂下盘发育单排或双排正向构造,基本落实背斜或断背

斜圈闭 17 个,圈闭总面积为 263 km²(图 10),估算圈闭资源量为 1.24 × 10⁸ t,已提交三级石油地质储量 3751 × 10⁴ t。

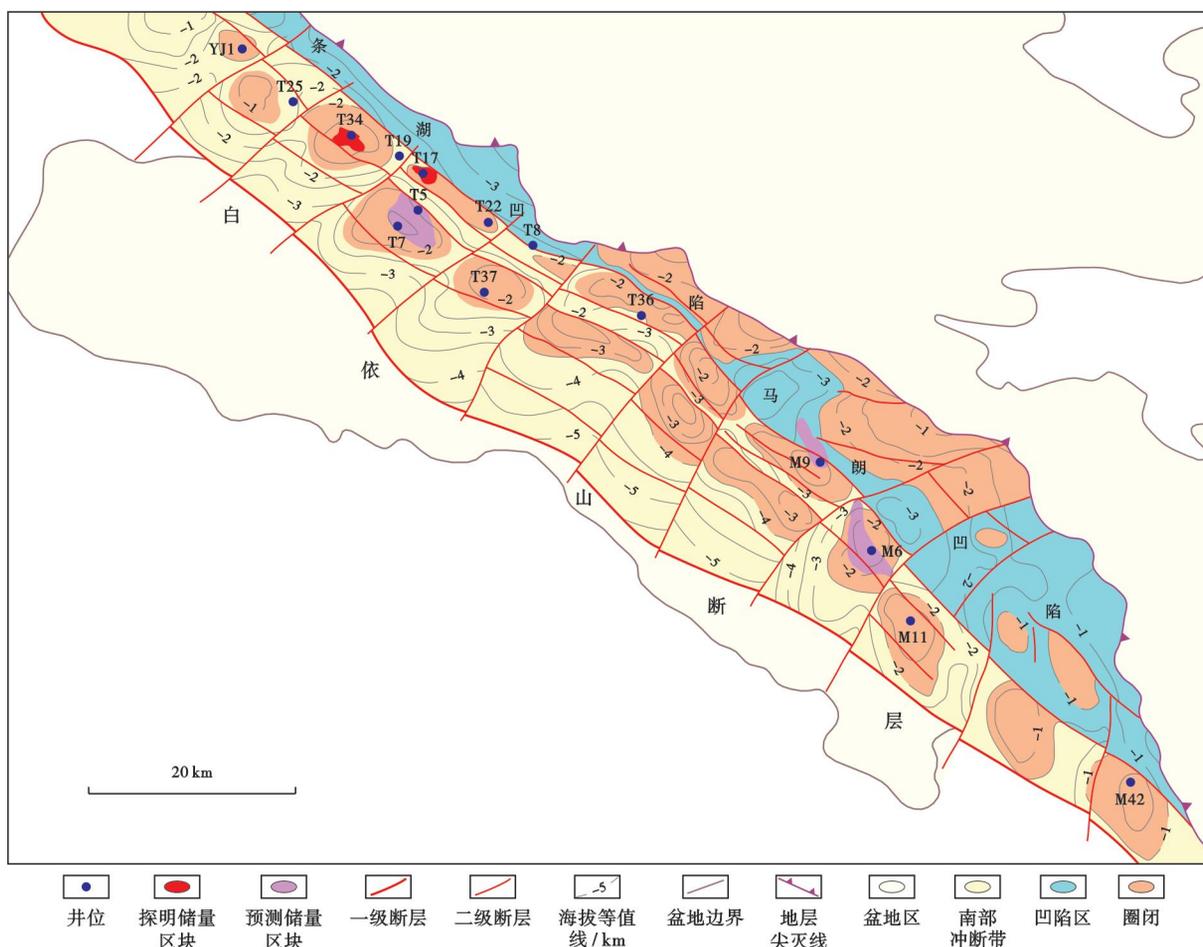


图 10 条湖凹陷和马朗凹陷芦苇沟组顶界构造

Fig. 10 Top structure of Lucaogou Formation in Tiaohu-Malang sags

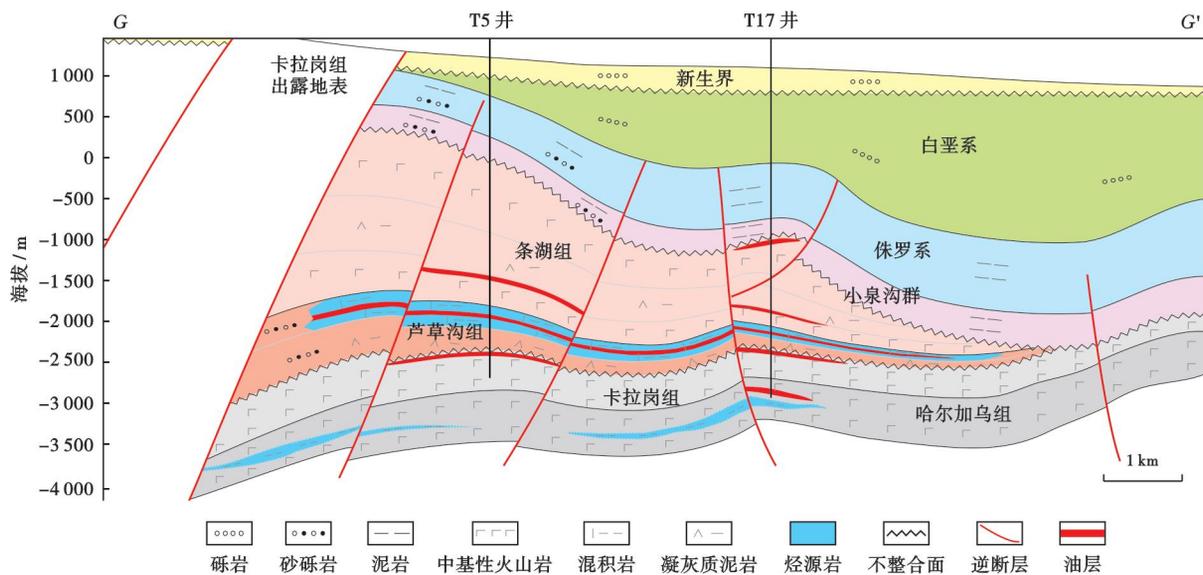


图 11 三塘湖盆地南部冲断带油藏剖面(剖面位置见图 1)

Fig. 11 Reservoir profile of the southern thrust belt in Santanghu Basin

(1) 南部冲断带紧邻生烃凹陷。受早期拉张正断层控制,南部冲断带石炭系、二叠系的沉积厚度大,发育断陷期生烃洼槽,烃源岩分布范围广、厚度大且品质好,油源条件优越;烃源岩的热演化程度整体较凹陷区高, R_o 达 0.71%~1.10%,主要生成中质油和轻质油,原油密度为 0.8473~0.8811 g/cm³,原油黏度为 9~47 mPa·s。

(2) 南部冲断带已发现条湖组和卡拉岗组火山岩油藏、芦草沟组页岩油藏和粗碎屑油藏(图 11),油藏类型丰富且均证实具备高产和稳产条件。例如,T17 井的条湖组在直井开采初期产油量为 10.38 t/d、累计已产油量为 1.36×10⁴t,T34 块芦草沟组页岩油水平井单井的累积产量为(0.70~2.07)×10⁴t。

(3) 南部冲断带围绕石炭系和二叠系 2 套烃源岩发育多种成藏组合,包括自生自储、下生上储,以及由侧向对接形成的芦草沟组生油、卡拉岗组储集的成藏模式。

(4) 南部冲断带发育正常或偏高的地层压力系统。T17 井条湖组的压力系数为 0.915,T34 井、M9 井、M6 井和 M11 井芦草沟组的压力系数为 0.990~1.235,T5 井卡拉岗组的压力系数为 0.990,均有利于油气生产。

3.1.2 洼陷区页岩油

2018—2022 年,油公司在条湖凹陷和马朗凹陷正向构造带,包括石板墩构造带 T34 块和牛圈湖构造带 M1 块,开展了芦草沟组页岩油开发技术先导试验,基本形成“甜点”井-震识别、水平井钻探和储层改造系列技术,水平井的建产效果较好。T34 块的油藏埋深为 3280~3430 m,钻探水平井 3 口,累计产油量为 3.85×10⁴t;M1 块的油藏埋深为 2220~3350 m,钻探水平井 20 口,累计产油量为 16.00×10⁴t。通过开展芦草沟组页岩油“甜点”井-震识别,基本落实发育面积 1390 km²(图 12),地质资源量 3.00×10⁸t,资源潜力大。其中,提交页岩油三级石油地质储量 0.55×10⁸t。马朗凹陷洼陷区页岩油“甜点段”与 M1 块的对应关系好,平面分布稳定,累积厚度最大可达 60 余米,是下一阶段探索开发动用的关键。芦草沟组页岩油的原油密度整体具有 NE 向高、SW 向低的特征,原油密度对页岩油的开发动用有明显影响,其中,M9 井及其以西地区是芦草沟组页岩油开发动用的最有利区带。

3.1.3 芦草沟组近源粗碎屑油藏

岩性组合以细粒砂岩与泥页岩、或细粒砂岩与化学沉积过渡性岩类为主的烃源岩层,可在富砂质层段形成含油饱和度高的油藏^[35]。芦草沟组沉积期,三塘湖盆地的原型为断陷湖盆,控盆断层位于盆地南部,南

部为沉积中心,地层整体南厚北薄。自下到上,芦草沟组经历了一个完整的断陷湖盆构造升降旋回,其中,芦一段沉积期为早期断陷作用阶段,芦二段沉积期为中期强烈断陷作用阶段,芦三段沉积期为晚期断陷萎缩阶段。钻井揭示,盆地边缘的芦草沟组发育陆源碎屑沉积体系。盆地南缘主要发育断控陡坡扇沉积,其中,在马朗凹陷南缘,基于井-震结合分析,沉积砂体相对落实,面积约为 360 km²(图 13),是油气勘探的重点对象,预估资源量为 6900×10⁴t;盆地北缘斜坡区局部有陆源砂体输入,但规模较小,勘探价值有限。

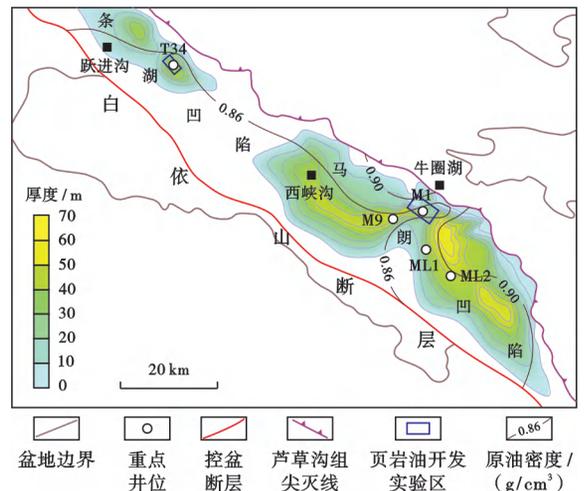


图 12 条湖凹陷和马朗凹陷芦二段页岩油“甜点”厚度分布
Fig. 12 Thickness distribution of shale oil sweet spots in Member 2 of Lucaogou Formation in Tiaohu-Malang sags

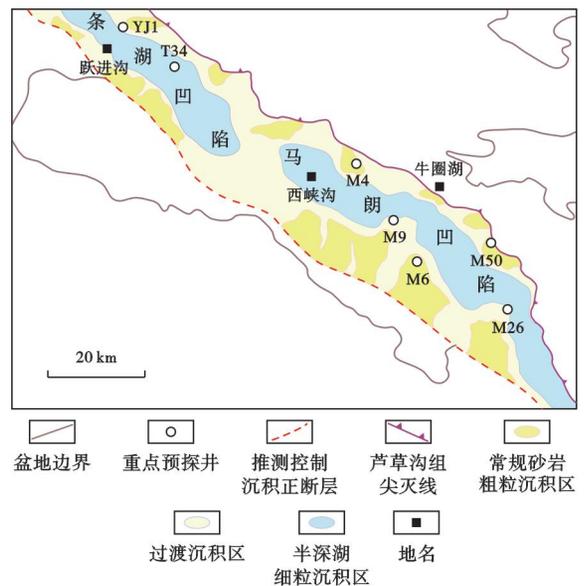


图 13 条湖凹陷和马朗凹陷芦草沟组沉积相
Fig. 13 Sedimentary facies of Lucaogou Formation in Tiaohu-Malang sags

3.1.4 石炭系火山岩内幕型油藏

三塘湖盆地条湖凹陷和马朗凹陷哈尔加乌组烃源岩的分布面积为 3 100 km²,资源量为 3.53 × 10⁸ t。以哈尔加乌组为油源,已探明牛东油田卡拉岗组火山岩风化壳油藏的整装储量为 6 519 × 10⁴ t 以及 M67 块哈尔加乌组火山岩内幕型油藏(图 14)储量为 213 × 10⁴ t,剩余资源量为 2.85 × 10⁸ t。受油源断裂影响,哈尔加乌组烃源岩生成的油气主要在哈尔加乌组内部及卡拉岗组成藏^[9]。由于盆地北部卡拉岗组火山岩风化壳油藏的勘探程度高,石炭系的勘探重点转变为哈尔加乌组火山岩内幕型油藏。条湖凹陷和马朗凹陷钻遇哈尔加乌组的预探井有 42 口,试油井有 12 口,其中,5 口井(T16 井、M67 井、M36 井、M71 井和 M73 井)已获得工业突破(图 15)。成藏的关键在于紧邻厚层烃源岩并且发育溢流相气孔杏仁玄武岩储层。将哈尔加乌组烃源岩和玄武岩储层发育区进行叠合分析,基本落实了火山岩内幕型油藏的有利勘探区,主要集中在马朗凹陷,面积为 320 km²,预估资源量为 9 600 × 10⁴ t。

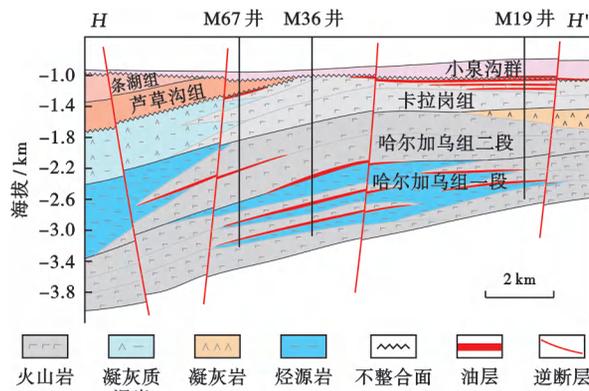


图 14 牛东地区石炭系火山岩油藏剖面(剖面位置见图 1)
Fig. 14 Carboniferous volcanic reservoir profile in Niudong area

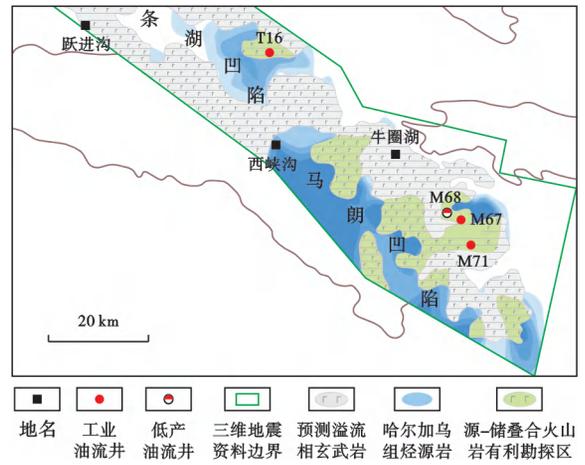


图 15 条湖凹陷和马朗凹陷哈尔加乌组火山岩油藏有利勘探区评价
Fig. 15 Evaluation of the prospective area for Haerjiawu volcanic reservoir in Tiaohu and Malang Sag

3.2 两种新资源类型及其资源潜力

3.2.1 煤层气

三塘湖盆地西山窑组煤层主要分布在汉水泉凹陷东部、条湖凹陷和马朗凹陷西北部[图 16(a)],总面积为 2 595 km²,以分布多层薄煤、多层厚煤和单层巨厚煤为特征,单层煤岩的厚度为 3~48 m,累积厚度为 5~61 m。西山窑组的煤层气资源相对富集,含气量为 1.71~10.00 m³/t^[32],平均资源丰度为 1.12 × 10⁸ m³/km²,煤层气的资源总量估算为 2 700 × 10⁸ m³^[37]。为进一步落实有利勘探区,油公司构建了三塘湖盆地低煤阶煤层气 I 类区评价标准,即主煤层的埋深在 800~1 500 m、厚度 ≥ 20 m、含气量 ≥ 4.00 m³/t。评价结果表明,西山窑组煤层气 I 类区分布在马朗凹陷马北斜坡和条湖凹陷条东-西峡沟地区,总面积为 884 km²,预测资源量为 1 427 × 10⁸ m³,资源丰度为 (1.62~2.43) × 10⁸ m³/km²(表 5)。三塘湖盆地八道湾组的煤层气资源评价仍有待进一步研究。

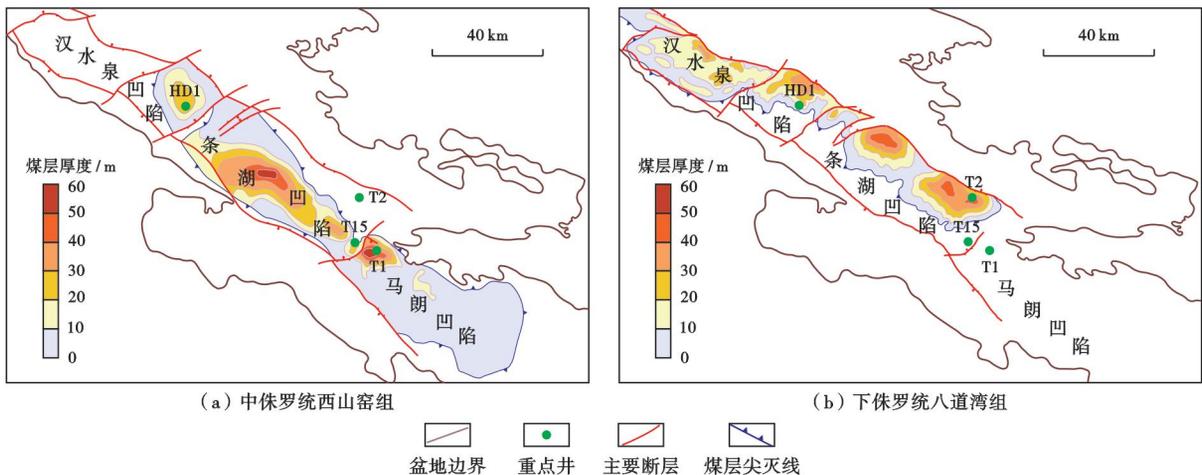


图 16 三塘湖盆地侏罗系煤层厚度
Fig. 16 Thickness of Jurassic coal seam in Santanghu Basin

表5 三塘湖盆地西山窑组煤层气资源评价

Table 5 Resource evaluation of coalbed methane in Xishanyao Formation of Santanhu Basin

凹陷	I类区面积/ km ²	平均厚度/ m	煤岩密度/ (g/cm ³)	含气量/ (m ³ /t)	资源量/ 10 ⁸ m ³	资源丰度/ (10 ⁸ m ³ /km ²)
条湖	813	30	1.35	4.0	1254	2.43
马朗	71	40	1.35	4.5	173	1.62

三塘湖盆地的煤层气钻探及排采始于2018年,在马朗凹陷马北区块部署实施了T1梅花井组,先后钻探了7口煤层气井,揭示煤层厚度为43.0~47.5 m,气测全烃含量最高在6.9%~23.3%,展现出较好的含气性。煤层气排采采用六段双压排采控制方法,遵循连续、缓慢、稳定和长期的原则。在排采的过程中,累计排采124~395 d见套压产气,临界解吸压力为2.7~5.8 MPa,临储比为0.30~0.54,7口井均见气。排采500 d后,产气量进入快速上升阶段,单井产气最高达到2298 m³/d,井组最高产气量为6000 m³/d,累积产气量为154×10⁴ m³,展现出三塘湖盆地具有低煤阶煤层气的勘探潜力。

3.2.2 富油煤

三塘湖盆地侏罗系八道湾组和西山窑组2套煤层的焦油产率为4.40%~22.80%,其中,八道湾组煤层的焦油产率整体高于西山窑组。八道湾组煤层的焦油产率普遍达到富油煤标准,西山窑组煤层仅部分达到了富油煤标准^[34]。西山窑组富油煤层的分布规律有待进一步研究。两套煤层的自然伽马和孔隙度测井响应特征一致,但八道湾组煤层的电阻率(1000~170000 Ω·m)显著高于西山窑组(80~600 Ω·m),这可能与煤层的含油率存在一定的相关性。三塘湖盆地八道湾组煤层主要分布在汉水泉凹陷和条湖凹陷[图16(b)],总面积为2275 km²,其中,在汉水泉凹陷内的分布面积为1371 km²、平均煤层厚度为9 m,在条湖凹陷内的分布面积为904 km²、平均煤层厚度为19 m。三塘湖盆地汉水泉凹陷和条湖凹陷八道湾组的计算焦油资源量为60.20×10⁸ t,其中,在汉水泉凹陷内为24.50×10⁸ t,在条湖凹陷内为35.70×10⁸ t(表6)。

表6 三塘湖盆地八道湾组富油煤资源评价

Table 6 Resource evaluation of tar-rich coal in Badaowan Formation of Santanhu Basin

凹陷	含煤面积/ km ²	平均厚度/ m	煤岩密度/ (g/cm ³)	煤炭资源 量/10 ⁸ t	平均焦油 产率/%	焦油资源 量/10 ⁸ t
汉水泉	1371	9	1.35	166	14.70	24.5
条湖	904	19	1.35	231	15.40	35.7

4 勘探开发思路和部署安排

三塘湖盆地油气勘探开发在下洼、深层、复杂构造区和煤基油气等领域面临着难题,需要整体推进勘探地质研究和开发工艺实验。基于优选的6大勘探开发新领域和新类型,根据认识程度、地质研究进展和开发条件,从战略展开、战略突破和战略准备3个层次确定勘探开发部署安排。

4.1 战略展开

战略展开层次主要指该领域已在某一区域获得勘探发现和效益开发,需要将成功的模式应用到具有类似油气地质条件的有利区带。战略展开领域主要包括南部冲断带大型构造、洼陷区页岩油、石炭系火山岩内幕型油藏。

由于紧邻二叠系生烃中心,油源条件好,三塘湖盆地南部冲断带成排成带的大型构造是当前油气勘探的重点,也是难点,核心问题是构造变形复杂、地震成像困难,因而构造圈闭的准确落实难度大。为进一步刻画落实三塘湖盆地南部冲断带的构造形态,油公司计划在条湖凹陷和马朗凹陷南部部署实施面积达775 km²的“两宽一高”三维地震,其中,2022—2023年已先在黑墩西地区实施并完成采集三维地震面积180 km²。通过优化采集参数,采用拓展低频激发、增加接收道数、减小道距、增大非纵距、增大观测方位、提高覆盖次数等一系列方式,提高成像品质;2024—2025年,计划依托黑墩西地区三维地震成果,以实现规模发现为目的,在南部冲断带前缘第一排构造进行预探。

在三塘湖盆地正向构造带,T34块和M1块页岩油开发技术先导试验区,页岩油的 R_o 分别为0.85%~0.91%和0.94%,地层压力系数分别为1.01和1.22~1.27,原油密度为0.8559~0.8570 g/cm³,达到了陆相页岩油攻关目标层次二的标准^[38]。两区块通过水平井大型体积压裂提高驱动能量,发展储层增能技术,有效提高了开发效率。三塘湖盆地页岩油勘探开发下一阶段的重点区为马朗凹陷M9区块,其页岩油的 $R_o \geq 0.90\%$,地层压力系数为1.14~1.24,原油密度 ≤ 0.8600 g/cm³。后续将以直井控制规模、水平井提产的方式稳步推进勘探开发进程,力争在“十五五”(2026—2030年)规划期间实现洼陷区规模效益建产。

有效烃源岩与穿插其中的火山岩在平面上的叠覆和剖面上的交互为火山岩油气藏的形成提供了充沛的油气源供给条件^[39]。三塘湖盆地石炭系哈尔加乌组火山岩和烃源岩具有叠覆和交互关系,具备近源成藏条件。在条湖凹陷和马朗凹陷北部,近源成藏的哈尔

加乌组火山岩内幕型油藏已获得勘探发现,下一阶段将围绕已发现区块持续开展扩展勘探和油藏评价工作,落实储量规模。在马朗凹陷南部,石炭系的勘探程度低,预测发育多个生烃中心,烃源岩的成熟度高($R_o > 1.0\%$),是下一步甩开预探、实现火山岩油气藏规模发现的重要领域。由于火山岩油藏的储层物性受埋深影响小^[27],因此,尽管凹陷区哈尔加乌组目的层的埋深大于 3 500 m,但并不限制发育自生自储式大型火山岩油藏。

4.2 战略突破

战略突破主要是指该领域已有井揭示重要苗头,地质评价的成藏条件好,具备勘探突破和规模开发潜力,需要勘探发现和开发工艺进步带动整个领域突破。战略突破领域主要包括芦草沟组近源粗碎屑油藏和煤层气。

近源粗碎屑油藏是在烃源岩层的富砂质段中形成的具有高含油饱和度的油藏,具备好的开发动用效果^[40]。三塘湖盆地芦草沟组主要发育细粒混积岩沉积,但在盆地边缘则发育规模陆源碎屑沉积。在马朗凹陷南缘,芦草沟组陆源沉积砂体的落实程度相对较高,砂体分布具有一定规模,是当前勘探的重点区。后续将围绕 M6 块实施扩展勘探和滚动评价,进一步研究油藏地质特征,落实储量规模和开发条件。同时甩开预探,力争实现新的勘探发现。

三塘湖盆地的煤层气勘探开发将以马朗凹陷马北斜坡带的西山窑组煤层为重点,通过建立先导试验区,持续攻关中—浅层低煤阶煤层气效益动用技术。2024—2025 年,计划利用直井顶板射孔+低密度支撑剂压裂、水平井+大规模体积压裂等工艺进一步提高单井产量,力争实现整体效益突破。马北斜坡带先导试验区的煤层气储量规模为 $173 \times 10^8 \text{ m}^3$,工艺突破后,可建成煤层气产量 $(2 \sim 3) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。待马北斜坡区实现稳产后,再大规模开展条湖凹陷煤层气井网部署和开发动用,逐步实现三塘湖盆地千亿立方米的煤层气资源效益勘探开发。

4.3 战略准备

战略准备是指该领域宏观判断的油气地质条件较好,但由于资料情况、认识程度和勘探程度较低,尚未获得实质性进展,需要开展前期研究准备,例如富油煤领域。

富油煤是一种具有油气资源属性的特殊煤炭资源^[41],富油煤所蕴含的煤基油气资源对富煤盆地油气勘探开发接替具有重要战略意义。三塘湖盆地八道湾组煤层的分布特征通过大量钻井和地震资料已准确落实,在汉水泉凹陷和条湖凹陷的分布面积为 $2\,275 \text{ km}^2$,

厚度为 4~50 m。基于各煤田矿区和盆地内的钻井资料,基本落实八道湾组煤层普遍达到了富油煤标准,焦油资源量为 $60.20 \times 10^8 \text{ t}$ 。煤炭原位干馏是实现富油煤资源有效动用的关键技术。三塘湖盆地富油煤的原位加热干馏将首先以条湖凹陷北缘侏罗系八道湾组高油煤为目标层系,优选煤层厚度适中、构造稳定、顶底板条件良好、地面配套工程便利的干馏有利区开展试验。通过建立钻井式 U 型干馏炉,在地下煤层建立热量导入和产品产出通道,使煤在原地发生干馏反应(热解),生产液态(焦油、水)和气态(以 CH_4 和 H_2 为主)碳氢化合物,同时将煤中的碳元素以半焦形式留在地下,通过取氢留碳(半焦、 CO_2)实现煤炭资源清洁转化。热解反应具有无机硫释放量低、产物中 H_2S 排放量小等特点,且热解反应产生的污染物能被吸附能力极强的半焦捕获,难以进入地下水,降低了地下水污染的风险。按照实验及地下干馏炉环境开展的模拟结果表明,单炉的产煤气量可达到 $4\,500 \sim 12\,000 \text{ m}^3/\text{d}$,其中, CH_4 和 H_2 的占比可达 85% 以上。预计“十四五”(2021—2025 年)规划末期在三塘湖盆地开展现场试验,试验成功后在“十五五”期间可建成相当规模油气当量的地下富油煤原位干馏示范基地。

5 结 论

(1) 三塘湖盆地经历了晚古生代晚期 2 期伸展构造作用和中生代—新生代 3 期挤压构造作用,纵向上形成了 5 个构造层,其中,上石炭统和中二叠统为伸展构造层,中—上三叠统至侏罗系、白垩系和新生界为前陆褶皱冲断构造层。

(2) 三塘湖盆地发育 3 套有效烃源岩。三叠系煤系烃源岩的品质为一般—好,有机质类型差,热演化程度较低,有效分布范围和规模有限;芦草沟组和哈尔加乌组烃源岩的品质为好—优质,有机质类型好,热演化程度较高,有效分布范围和规模大,主要分布在条湖凹陷和马朗凹陷。

(3) 三塘湖盆地在中生代—新生代挤压构造的作用下形成了南、北双向逆冲构造体系,其中,条湖凹陷和马朗凹陷南部冲断带下盘构造宽缓,发育多排逆冲叠瓦构造和冲起构造,源-储配置关系好,具备良好的勘探前景。

(4) 三塘湖盆地中—深层发育多种类型的有利储层,其中,石炭系哈尔加乌组发育火山岩内幕型储层,二叠系芦草沟组发育页岩油和常规砂岩储层。

(5) 三塘湖盆地侏罗系煤基油气资源丰富,其中,西山窑组煤层气成藏条件好,马北斜坡区煤层气排采已见到效果;八道湾组煤层的焦油产率普遍达到了富

油—高油煤评价标准。

(6) 三塘湖盆地下一阶段油气勘探开发的重点为南部山前冲断掩伏带大构造、洼陷区页岩油、源边粗碎屑油藏和石炭系火山岩内幕型油藏 4 个新领域以及西山窑组煤层气、八道湾组富油煤 2 个新类型。

参 考 文 献

- [1] 侯启军,何海清,李建忠,等. 中国石油天然气股份有限公司近期油气勘探进展及前景展望[J]. 中国石油勘探,2018,23(1):1-13. HOU Qijun, HE Haiqing, LI Jianzhong, et al. Recent progress and prospect of oil and gas exploration by PetroChina Company Limited[J]. China Petroleum Exploration,2018,23(1):1-13.
- [2] 周鼎武,柳益群,邢秀娟,等. 新疆吐哈、三塘湖盆地二叠纪玄武岩形成古构造环境恢复及区域构造背景示踪[J]. 中国科学 D 辑:地球科学,2006,36(2):143-153. ZHOU Dingwu, LIU Yiqun, XING Xiujuan, et al. Formation of the Permian basalts and implications of geochemical tracing for paleo-tectonic setting and regional tectonic background in the Turpan-Hami and Santanghu basins, Xinjiang[J]. Science in China Series D:Earth Science,2006,49(6):584-596.
- [3] LI Wei, LIU Yiqun, DONG Yunpeng, et al. The geochemical characteristics, geochronology and tectonic significance of the Carboniferous volcanic rocks of the Santanghu area in northeastern Xinjiang, China[J]. Science China Earth Sciences,2013,56(8):1318-1333.
- [4] 陈石,张元元,郭召杰. 新疆三塘湖盆地后碰撞火山岩的锆石 SHRIMP-U-Pb 定年及其地质意义[J]. 岩石学报,2009,25(3):527-538. CHEN Shi, ZHANG Yuanyuan, GUO Zhaojie. Zircon SHRIMP U-Pb dating and its implications of post-collisional volcanic rocks in Santanghu Basin, Xingjiang[J]. Acta Petrologica Sinica,2009,25(3):527-538.
- [5] 梁世君. 吐哈探区油气勘探成果及潜力[J]. 新疆石油地质,2020,41(6):631-641. LIANG Shijun. Achievements and potential of petroleum exploration in tuha oil and gas province[J]. Xinjiang Petroleum Geology,2020,41(6):631-641.
- [6] 郑民,李建忠,吴晓智,等. 我国主要含油气盆地油气资源潜力及未来重点勘探领域[J]. 地球科学,2019,44(3):833-847. ZHENG Min, LI Jianzhong, WU Xiaozhi, et al. Potential of oil and natural gas resources of main hydrocarbon-bearing basins and key exploration fields in China[J]. Earth Science,2019,44(3):833-847.
- [7] 张明民,陈红汉,郑建平,等. 新疆东北部三塘湖盆地卡拉岗组火山岩的形成时代:锆石 U-Pb 定年[J]. 矿物岩石地球化学通报,2010,29(4):400-408. ZHANG Mingmin, CHEN Honghan, ZHENG Jianping, et al. The age of Kalagang Formation in the Santanghu Basin, north-east Xinjiang: evidence from zircons U-Pb dating of volcanic rocks[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry,2010,29(4):400-408.
- [8] 邹才能,侯连华,陶士振,等. 新疆北部石炭系大型火山岩风化体结构与地层油气成藏机制[J]. 中国科学:地球科学,2011,41(11):1613-1626. ZOU Caineng, HOU Lianhua, TAO Shizhen, et al. Hydrocarbon accumulation mechanism and structure of large-scale volcanic weathering crust of the Carboniferous in northern Xinjiang, China[J]. Science China Earth Sciences,2011,55(2):221-235.
- [9] 马剑,黄志龙,李华明,等. 马朗凹陷断裂—烃源岩空间配置关系与石油垂向运移特征[J]. 沉积学报,2012,30(6):1140-1148. MA Jian, HUANG Zhilong, LI Huaming, et al. Matching relationship between faults and source rock and vertical migration characteristics of the oil in the malang sag[J]. Acta Sedimentologica Sinica,2012,30(6):1140-1148.
- [10] 梁浩,李新宁,马强,等. 三塘湖盆地条湖组致密油地质特征及勘探潜力[J]. 石油勘探与开发,2014,41(5):563-572. LIANG Hao, LI Xinning, MA Qiang, et al. Geological features and exploration potential of Permian Tiaohu Formation tight oil, Santanghu Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development,2014,41(5):563-572.
- [11] MA Jian, HUANG Zhilong, LIANG Shijun, et al. Geochemical and tight reservoir characteristics of sedimentary organic-matter-bearing tuff from the Permian Tiaohu Formation in the Santanghu Basin, Northwest China[J]. Marine and Petroleum Geology,2016,73:405-418.
- [12] SI Xueqiang, WANG Xin, ZHI Fengqin. Microscopic characteristics of Tiaohu Formation sedimentary tuff tight oil reservoir from Malang sag, Santanghu Basin[J]. Acta Geologica Sinica: English Edition,2015,89(S1):75-76.
- [13] MA Jian, HUANG Zhilong, GAO Xiaoyu, et al. Oil-source rock correlation for tight oil in tuffaceous reservoirs in the Permian Tiaohu Formation, Santanghu Basin, northwest China[J]. Canadian Journal of Earth Sciences,2015,52(11):1014-1026.
- [14] 陈旋,刘俊田,龙飞,等. 三塘湖盆地二叠系凝灰岩致密油勘探开发实践及认识[J]. 中国石油勘探,2019,24(6):771-780. CHEN Xuan, LIU Juntian, LONG Fei, et al. Practical experience and understanding of exploration and development of Permian tight tuff reservoir in the Santanghu Basin[J]. China Petroleum Exploration,2019,24(6):771-780.
- [15] 范谭广,徐雄飞,范亮,等. 三塘湖盆地二叠系芦草沟组页岩油地质特征与勘探前景[J]. 中国石油勘探,2021,26(4):125-136. FAN Tanguang, XU Xiongfei, FAN Liang, et al. Geological characteristics and exploration prospect of shale oil in Permian Lucaogou Formation, Santanghu Basin[J]. China Petroleum Exploration,2021,26(4):125-136.
- [16] 赵泽辉,郭召杰,韩宝福,等. 新疆三塘湖盆地古生代晚期火山岩地球化学特征及其构造-岩浆演化意义[J]. 岩石学报,2006,22(1):199-214. ZHAO Zehui, GUO Zhaojie, HAN Baofu, et al. The geochemical characteristics and tectonic-magmatic implications of the latest-Paleozoic volcanic rocks from Santanghu Basin, eastern Xinjiang, northwest China[J]. Acta Petrologica Sinica,2006,22(1):199-214.
- [17] 郝建荣,周鼎武,柳益群,等. 新疆三塘湖盆地二叠纪火山岩岩石地

- 球化学及其构造环境分析[J]. 岩石学报, 2006, 22(1): 189-198.
- HAO Jianrong, ZHOU Dingwu, LIU Yiqun, et al. Geochemistry and tectonic settings of Permian volcanic rocks in Santanghu Basin, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(1): 189-198.
- [18] LIU Bo, BECHTEL A, SACHSENHOFER R F, et al. Depositional environment of oil shale within the second member of Permian Lucaogou Formation in the Santanghu Basin, Northwest China[J]. International Journal of Coal Geology, 2017, 175: 10-25.
- [19] 梁世君, 罗劝生, 王瑞, 等. 三塘湖盆地二叠系非常规石油地质特征与勘探实践[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(5): 624-635.
- LIANG Shijun, LUO Quansheng, WANG Rui, et al. Geological characteristics and exploration practice of unconventional Permian oil resources in the Santanghu Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5): 624-635.
- [20] GREENE T J, CARROLL A R, WARTES M, et al. Integrated provenance analysis of a complex orogenic terrane: Mesozoic uplift of the Bogda Shan and inception of the Turpan-Hami Basin, NW China[J]. Journal of Sedimentary Research, 2005, 75(2): 251-267.
- [21] 王书荣, 宋到福, 何登发. 三塘湖盆地火山灰对沉积有机质的富集效应及凝灰质烃源岩发育模式[J]. 石油学报, 2013, 34(6): 1077-1087.
- WANG Shurong, SONG Daofu, HE Dengfa. The enrichment effect of organic materials by volcanic ash in sediments of the Santanghu Basin and the evolutionary pattern of tuffaceous source rocks[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 34(6): 1077-1087.
- [22] 李玉婷, 黄志龙, 安成龙, 等. 三塘湖盆地石炭系哈尔加乌组上、下段烃源岩特征及差异[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(1): 73-86.
- LI Yuting, HUANG Zhilong, AN Chenglong, et al. Characteristics and differences of source rocks in the lower and upper members of Carboniferous Ha'erjiawu Formation in the Malang sag of the Santanghu Basin, NW China[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(1): 73-86.
- [23] SONG Daofu, HE Dengfa, WANG Shurong. Source rock potential and organic geochemistry of carboniferous source rocks in Santanghu Basin, NW China[J]. Journal of Earth Science, 2013, 24(3): 355-370.
- [24] 徐银波, 毕彩芹, 李锋, 等. 三塘湖盆地石头梅地区巴油页1井二叠系芦草沟组有机相分析[J]. 煤炭学报, 2022, 47(11): 4094-4104.
- XU Yinbo, BI Caiqin, LI Feng, et al. Analysis of organic facies in Permian Lucaogou Formation in Shitoumei area of Santanghu Basin: a case from well Byy1[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(11): 4094-4104.
- [25] PAN Yongshuai, HUANG Zhilong, LI Tianjun, et al. Environmental response to volcanic activity and its effect on organic matter enrichment in the Permian Lucaogou Formation of the Malang sag, Santanghu Basin, northwest China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2020, 560: 110024.
- [26] ZHANG Shaohua, LIU Chiyang, LIANG Hao, et al. Paleoenvironmental conditions, organic matter accumulation, and unconventional hydrocarbon potential for the Permian Lucaogou Formation organic-rich rocks in Santanghu Basin, NW China[J]. International Journal of Coal Geology, 2018, 185: 44-60.
- [27] 赵文智, 邹才能, 李建忠, 等. 中国陆上东、西部地区火山岩成藏比较研究与意义[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(1): 1-11.
- ZHAO Wenzhi, ZOU Caineng, LI Jianzhong, et al. Comparative study on volcanic hydrocarbon accumulations in western and eastern China and its significance[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(1): 1-11.
- [28] 司学强, 王鑫, 陈薇, 等. 三塘湖盆地马朗凹陷哈尔加乌组火山岩旋回与期次划分[J]. 地质科技情报, 2012, 31(6): 74-79.
- SI Xueqiang, WANG Xin, CHEN Wei, et al. Division of volcanic cycles and stages of the Haerjiawu Formation in Malang depression, Santanghu Basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2012, 31(6): 74-79.
- [29] 侯连华, 罗霞, 王京红, 等. 火山岩风化壳及油气地质意义——以新疆北部石炭系火山岩风化壳为例[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(3): 257-265.
- HOU Lianhua, LUO Xia, WANG Jinghong, et al. Weathered volcanic crust and its petroleum geologic significance: a case study of the Carboniferous volcanic crust in northern Xinjiang[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(3): 257-265.
- [30] 柳波, 吕延防, 孟元林, 等. 湖相纹层状细粒岩特征、成因模式及其页岩油意义——以三塘湖盆地马朗凹陷二叠系芦草沟组为例[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(5): 598-607.
- LIU Bo, LÜ Yanfang, MENG Yuanlin, et al. Petrologic characteristics and genetic model of lacustrine lamellar fine-grained rock and its significance for shale oil exploration: a case study of Permian Lucaogou Formation in Malang sag, Santanghu Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(5): 598-607.
- [31] 梁世君, 罗劝生, 康积伦, 等. 准噶尔盆地吉南凹陷萨探1井风险勘探突破及意义[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(4): 72-83.
- LIANG Shijun, LUO Quansheng, KANG Jilun, et al. Breakthrough and significance of risk exploration in Well Satan 1 in Jinan sag, Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(4): 72-83.
- [32] 匡立春, 温声明, 李树新, 等. 低煤阶煤层气成藏机制与勘探突破——以吐哈—三塘湖盆地为例[J]. 天然气工业, 2022, 42(6): 33-42.
- KUANG Lichun, WEN Shengming, LI Shuxin, et al. Accumulation mechanism and exploration breakthrough of low-rank CBM in the Tuha-Santanghu Basin[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(6): 33-42.
- [33] 王双明, 师庆民, 王生全, 等. 富油煤的油气资源属性与绿色低碳开发[J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1165-1177.
- WANG Shuangming, SHI Qingmin, WANG Shengquan, et al. Resource property and exploitation concepts with green and low-carbon of tar-rich coal as coal-based oil and gas[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1165-1177.
- [34] 东振, 张梦媛, 陈艳鹏, 等. 三塘湖-吐哈盆地富油煤赋存特征与资源潜力分析[J]. 煤炭学报, 2023, 48(10): 1-16.
- DONG Zhen, ZHANG Mengyuan, CHEN Yanpeng, et al. Analy-

- sis on the occurrence characteristics and resource potential of tar-rich coal in Santanghu and Turpan-Hami Basins[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(10): 1-16.
- [35] 何海清, 范土芝, 郭绪杰, 等. 中国石油“十三五”油气勘探重大成果与“十四五”发展战略[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(1): 17-30.
HE Haiqing, FAN Tuzhi, GUO Xujie, et al. Major achievements in oil and gas exploration of PetroChina during the 13th Five-Year Plan period and its development strategy for the 14th Five-Year Plan[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(1): 17-30.
- [36] 贾承造, 魏国齐, 李本亮, 等. 中国中西部两期前陆盆地的形成及其控气作用[J]. 石油学报, 2003, 24(2): 13-17.
JIA Chengzao, WEI Guoqi, LI Benliang, et al. Tectonic evolution of two-epoch foreland basins and its control for natural gas accumulation in China's mid-western areas[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(2): 13-17.
- [37] 黄卫东, 李新宁, 李留中, 等. 三塘湖盆地煤层气资源勘探前景分析[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(4): 733-737.
HUANG Weidong, LI Xingning, LI Liuzhong, et al. Prospect of coalbed methane exploration in Santanghu Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(4): 733-737.
- [38] 金之钧, 白振瑞, 高波, 等. 中国迎来页岩油气革命了吗? [J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 451-458.
- JIN Zhijun, BAI Zhenrui, GAO Bo, et al. Has China ushered in the shale oil and gas revolution? [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 451-458.
- [39] 陈振岩, 仇劲涛, 王璞珺, 等. 主成盆地火山岩与油气成藏关系探讨[J]. 沉积学报, 2011, 29(4): 798-808.
CHEN Zhenyan, QIU Jintao, WANG Pujun, et al. Relationship between volcanic rocks and hydrocarbon accumulation during dominant period of basin formation in Liaohede depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(4): 798-808.
- [40] 支东明, 唐勇, 杨智峰, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷陆相页岩油地质特征与聚集机理[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 524-534.
ZHI Dongming, TANG Yong, YANG Zhifeng, et al. Geological characteristics and accumulation mechanism of continental shale oil in Jimusaer sag, Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 524-534.
- [41] 付德亮, 段中会, 杨甫, 等. 富油煤钻井式地下原位热解提取煤基油气资源的几个关键问题[J]. 煤炭学报, 2023, 48(4): 1759-1772.
FU Deliang, DUAN Zhonghui, YANG Fu, et al. Key problems in in-situ pyrolysis of tar-rich coal drilling for extraction of coal-based oil and gas resources[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(4): 1759-1772.

(收稿日期 2023-08-22 改回日期 2023-09-15 编辑 雷永良)

(上接第 51 页)

- [49] 陈思谦, 周义军, 郭庆, 等. 鄂尔多斯盆地中新元古界拗拉槽特征及勘探潜力[J]. 地质科学, 2020, 55(3): 692-702.
CHEN Siqian, ZHOU Yijun, GUO Qing, et al. Characteristics and exploration potential of the Mid-Late Proterozoic aulacogens in Ordos Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2020, 55(3): 692-702.
- [50] 张威, 闫相宾, 刘超英, 等. 鄂尔多斯盆地北部中元古界潜山圈闭特征与成藏模式[J]. 地质学报, 2023, 97(1): 168-178.
ZHANG Wei, YAN Xiangbin, LIU Chaoying, et al. Characteristics and reservoir forming model of Mesoproterozoic buried hill traps in the northern Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(1): 168-178.
- [51] 杨智, 邹才能, 陈建军, 等. “进(近)源找油”: 油气地质理论创新与重点领域勘探思考[J]. 石油学报, 2021, 42(10): 1310-1324.
YANG Zhi, ZOU Caineng, CHEN Jianjun, et al. “Exploring petroleum inside or near the source kitchen”: innovations in petroleum geology theory and reflections on hydrocarbon exploration in key fields[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(10): 1310-1324.
- [52] 姜福杰, 贾承造, 庞雄奇, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界全油气系统成藏特征与天然气富集地质模式[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(2): 250-261.
JIANG Fujie, JIA Chengzao, PANG Xiongqi, et al. Upper Paleozoic total petroleum system and geological model of natural gas enrichment in Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(2): 250-261.
- [53] 李辛子, 王运海, 姜昭琛, 等. 深部煤层气勘探开发进展与研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 24-31.
LI Xinzi, WANG Yunhai, JIANG Zhaochen, et al. Progress and study on exploration and production for deep coalbed methane [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 24-31.

(收稿日期 2023-10-10 改回日期 2023-12-09 编辑 雷永良)