

## 柴达木盆地干柴沟地区勘探突破及启示

陈琰<sup>1,2</sup>, 张永庶<sup>1,2</sup>, 徐兆辉<sup>1,2,3</sup>, 姜莹海<sup>1,2</sup>, 朱超<sup>4</sup>, 张静<sup>1,2</sup>, 张彩燕<sup>1,2</sup>

(1. 中国石油青海油田分公司, 甘肃敦煌 736202; 2. 青海省高原咸化湖盆油气地质重点实验室, 甘肃敦煌 736202; 3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 4. 中国石油杭州地质研究院, 浙江杭州 310023)

**摘要:**柴达木盆地西部干柴沟地区历经60余年勘探未获重大油气发现。2019年以来,通过强化山地三维地震勘探技术攻关和深化高原咸化湖相混积型碳酸盐岩成储、成藏研究,油气勘探终获突破,发现了古近系下干柴沟组构造油气藏,同时英雄岭页岩油和湖相碳酸盐岩岩性油气藏勘探也展现出良好前景。研究成果主要得益于以下几点:①高品质三维地震资料揭示干柴沟地下构造形态,发现东翼发育断背斜,为油气聚集提供了有利圈闭条件;②大面积咸化湖相混积碳酸盐岩具备储集能力,碎屑岩、湖相碳酸盐岩和膏盐岩层在纵、横向上均呈有序分布,构成了良好的生-储-盖组合;③基于全油气系统理论,认为研究区常规油气(源外)和非常规油气(源内)立体成藏。剖析干柴沟地区油气勘探历程发现:①地震勘探技术进步是干柴沟复杂构造区地下构造圈闭得以落实和油气地质特征得以揭示的基础;②干旱咸化湖盆发育的大面积混积碳酸盐岩不仅是烃源岩而且具备储集能力,这一认识拓展了勘探领域,是勘探取得突破的关键;③全油气系统理论的引入,推动油气勘探向源内拓展,揭示了英雄岭页岩油的良好勘探前景。

**关键词:**地震勘探;基础地质;全油气系统;非常规油气;干柴沟地区;柴达木盆地

中图分类号:TE132 文献标识码:A

Breakthroughs in hydrocarbon exploration in the Ganchaigou area,  
Qaidam Basin and their implicationsCHEN Yan<sup>1,2</sup>, ZHANG Yongshu<sup>1,2</sup>, XU Zhaohui<sup>1,2,3</sup>, JIANG Yinghai<sup>1,2</sup>, ZHU Chao<sup>4</sup>, ZHANG Jing<sup>1,2</sup>, ZHANG Caiyan<sup>1,2</sup>

(1. Qinghai Oil Field Branch, PetroChina, Dunhuang, Gansu 736202, China; 2. Qinghai Provincial Key Laboratory of Plateau Saline-Lacustrine Basinal Oil &amp; Gas Geology, Dunhuang, Gansu 736202, China; 3. Research Institute of Petroleum Exploration &amp; Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 4. Hangzhou Research Institute of Geology, PetroChina, Hangzhou, Zhejiang 310023, China)

**Abstract:** No significant hydrocarbon exploration discoveries were achieved for over 60 years of efforts, and breakthroughs have ultimately been made since 2019 when seismic survey targeting mountainous regions was performed and study on the formation of and hydrocarbon accumulation in mixed siliciclastic-carbonate reservoirs developed in plateau salinized lacustrine environment went further. The discovery of structural reservoirs located in the Lower Ganchaigou Formation of the Paleogene, along with great potentials shown in the exploration and development of Yingxiongling shale oil and lacustrine carbonate lithological reservoirs in this area, can be attributed to the following factors. First, high-quality 3D seismic data serve to reveal the underground structure geometry in the Ganchaigou area, where a faulted anticline favorable for hydrocarbon accumulation as a trap is detected in the east; Second, large-scale mixed carbonate rocks of salinized lacustrine facies have storage capacity, while clastic rocks, lacustrine carbonate rocks and gypsolyte are well-aligned both laterally and vertically, thus being of a good source rock-reservoir-caprock assemblage as a whole; Third, both conventional (out of source rocks) and unconventional (within source rocks) hydrocarbon are generated and accumulate as a total petroleum system (TPS) in the study area. In investigating the exploration process in the study area, we confirm that the progress in seismic exploration technology lays a solid foundation for the discovery of the complex structural trap underground and its petroleum geological characteristics. The mixed carbonate rocks developed in large scale in the dry salinized lacustrine environment function as both source rocks

收稿日期:2024-01-10;修回日期:2024-06-16。

第一作者简介:陈琰(1972—),女,博士、教授级高级工程师,油气地质勘探。E-mail:licqh@petrochina.com.cn。

通信作者简介:徐兆辉(1981—),男,博士、高级工程师,地震沉积学和油气勘探。E-mail:zhaohui.xu@petrochina.com.cn。

and reservoirs, a finding that has extended our understanding in exploration and been a key in fulfilling the breakthroughs. The adoption of the TPS concept serves to push hydrocarbon exploration to go further into the source rocks while revealing the great potentials of Yingxiongling shale oil to be developed.

**Key words:** seismic exploration, basic geology, total petroleum system (TPS), unconventional oil and gas, Ganchaigou area, Qaidam Basin

引用格式:陈琰,张永庶,徐兆辉,等. 柴达木盆地干柴沟地区勘探突破及启示[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(4): 1018-1031. DOI: 10. 11743/ogg20240409.

CHEN Yan, ZHANG Yongshu, XU Zhaohui, et al. Breakthroughs in hydrocarbon exploration in the Ganchaigou area, Qaidam Basin and their implications[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(4): 1018-1031. DOI: 10. 11743/ogg20240409.

柴达木盆地位于青藏高原东北部,是本区最大的新生代高原陆相沉积盆地<sup>[1]</sup>,也是中国西部唯一以新生界为主的大型陆相含油气盆地<sup>[2-4]</sup>。盆地西起阿尔金山,南至东昆仑山,北接祁连山,东西长逾 850 km,南北宽达 350 km<sup>[5]</sup>,面积约 12×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,现今盆地海拔约 3 000 m<sup>[6]</sup>,周围的阿尔金山、东昆仑山、祁连山等山脉海拔超 4 000 m,为典型的高海拔沉积盆地<sup>[7]</sup>,其油气地质理论和勘探关键技术也独具特色<sup>[8]</sup>。

干柴沟地区(本文研究区)位于柴达木盆地英雄岭,紧邻阿尔金山前,地表山高坡陡、沟谷纵横。1954年地面地质调查发现鼻状隆起构造,地表油砂多点出露<sup>[9-10]</sup>,但历经 60 余年,始终未获勘探突破。前期勘探经历了 3 个主要阶段:地面地质调查、地面构造钻探和山地二维地震攻关阶段。

1) 地面地质调查阶段(1954—1958年):基于地面地质调查,在干柴沟地区山前出露的上油砂山组一下干柴沟组上段(N<sub>2</sub><sup>2</sup>—E<sub>3</sub><sup>2</sup>)发现油砂,认识到该区具有油气勘探潜力。

2) 地面构造钻探阶段(1958—2003年):根据地表油砂出露层位,沿地面鼻状构造向东开展钻探,相继部署了柴中 1 和柴 6 等 9 口井,见到油气显示,但未获工业油流。

3) 山地二维地震攻关阶段(2004—2013年):先后于 2004 年、2006—2007 年和 2012—2013 年,分 3 轮次开展山地二维地震攻关,采集技术不断提升,覆盖次数达 960 次。这些二维地震探测到研究区地下“自西向东倾伏、南北两翼变深、主体区相对隆起”的构造轮廓,但由于地表高陡、地下复杂,在构造隆起区始终未获得有效地震资料。基于二维地震资料,沿干柴沟地面构造轴部又钻探 3 口井,其中,针对碎屑岩储集层钻探的柴 7 井和柴 8 井,见油气显示但未获工业油流。钻探揭示,干柴沟地区埋深 2 600 m 以浅,物性相对较好,发育有效碎屑岩储集层;埋深超过 2 700 m,碎屑岩的物性变差,孔隙度大多低于 5%<sup>[11]</sup>。

2019 年,借鉴邻区英西成功的三维地震勘探经验,在干柴沟地区开展山地三维地震采集处理攻关。地震采集方面,综合利用“高密度高覆盖、震检组合、长排列接收”技术,三维覆盖密度、方位宽度和覆盖次数大幅提升,采集参数强化助力获取了高品质地震资料;地震处理方面,采用“真地表 TTI 各向异性叠前深度偏移”复杂山地地震处理技术,大幅提升构造主体陡倾角地层成像质量,首次在干柴沟地区取得有效地震反射和高品质地震资料,为刻画构造特征奠定资料基础。

山地三维地震攻关为落实干柴沟地区构造特征,深化湖相混积型碳酸盐岩、碎屑岩等领域的成储、成藏研究奠定基础,油气勘探终获突破,不但发现了古近系下干柴沟组构造油气藏,英雄岭页岩油也展现出良好勘探开发前景<sup>[12]</sup>。本文深入剖析干柴沟油气勘探历程,系统梳理构造、沉积、储集层和成藏等地质理论新认识,认为高海拔、复杂构造区油气勘探有赖于理论深化、技术进步和理念创新。

## 1 研究区概况

### 1.1 区域构造特征

青藏高原东北缘因受印度与欧亚板块碰撞影响,造山带复活并发生构造变形。中中新世(15 Ma)以来,柴达木盆地内部沉积速率显著增加,而周缘山系强烈隆升,说明板块汇聚作用致使地壳缩短,成为高原东北部构造变形的强大驱动力<sup>[13]</sup>。柴达木盆地受印度与欧亚板块碰撞影响<sup>[14]</sup>,成为青藏高原北侧的高原盆地(图 1a)。

地处柴达木盆地西部的柴西坳陷面积 3.4×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,石油储量和产量占全盆地 70% 以上,是盆地油气资源最丰富的地区之一<sup>[15]</sup>。英雄岭位于柴西坳陷中心,属于典型晚期隆起,油源条件优越(图 1b)。新生代以来受东昆仑山逆冲和阿尔金山左行走滑断裂的联合控

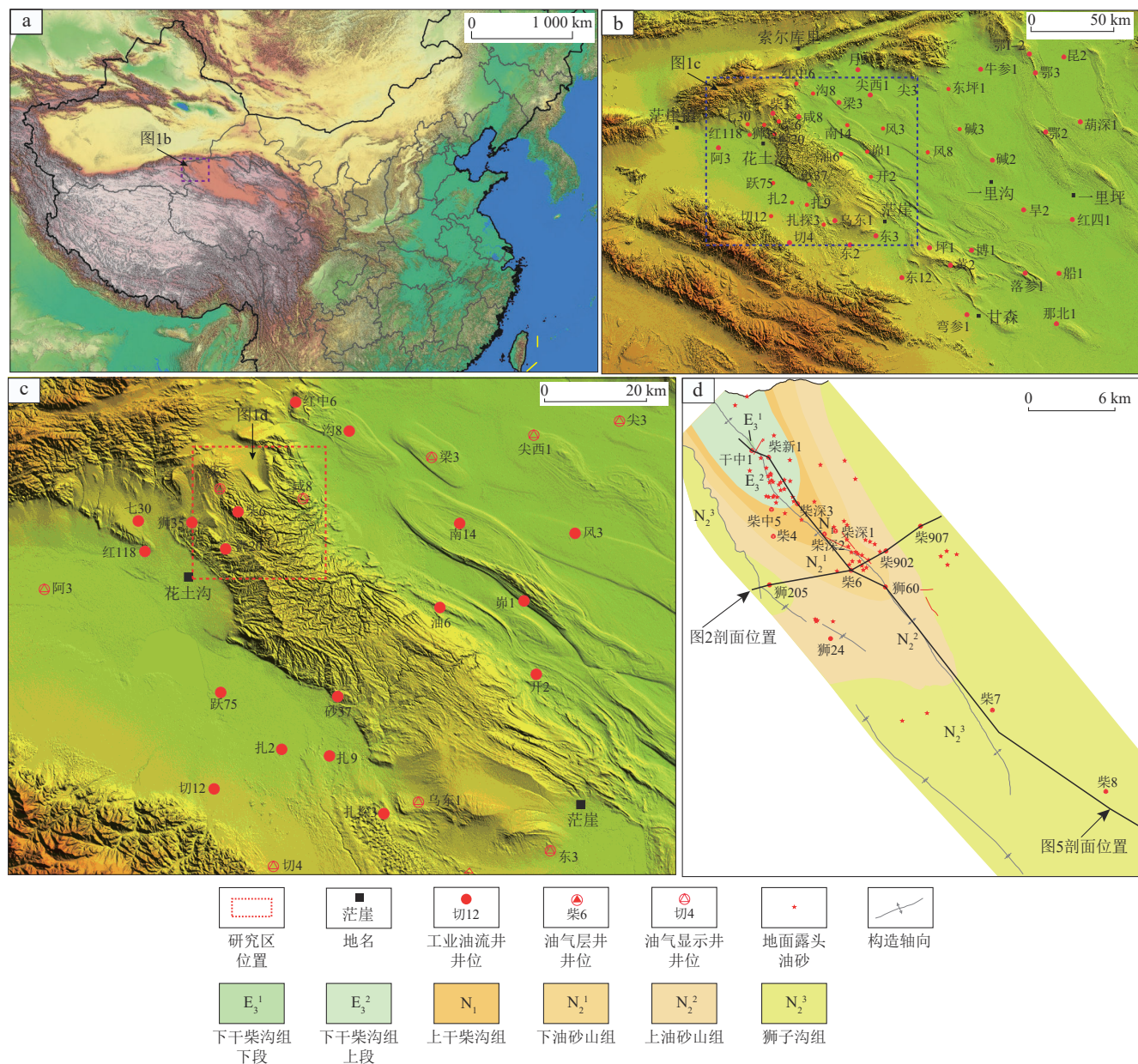


图1 柴达木盆地干柴沟地区位置、地貌及干柴沟地面地质图

Fig. 1 Maps showing the location and landforms of the Ganchaigou area in the Qaidam Basin, and the surface geology of Ganchaigou area  
a. 柴达木盆地位置; b. 柴西坳陷位置; c. 英雄岭地区现今地貌; d. 干柴沟地区地表地质图与关键井位

制,古近纪英雄岭为柴西坳陷沉积中心,渐新统下干柴沟组上段( $E_3^2$ )沉积了盆内最优质的咸化湖相烃源岩<sup>[16-17]</sup>。新近纪末受喜马拉雅晚期构造运动影响而反转隆起成山,现今英雄岭自阿尔金山前向东南部盆地腹部方向倾没。

干柴沟地区位于英雄岭西部,紧邻阿尔金山(图1c),地面以风蚀山地为主,山高坡陡,沟壑纵横,海拔3 200~3 800 m。该区地面整体表现为向东南方倾没的鼻状构造<sup>[18]</sup>,西部高部位地层剥蚀严重,出露地层为下干柴沟组( $E_3$ ),腹部地层保留相对较全,出露地层为新近系( $N_1-N_2$ )<sup>[19]</sup>。构造高部位两翼地层较陡,东南

部倾没端两翼地层平缓。地面地质调查发现地面油砂出露(图1d),主要见于地面构造轴部,在 $E_3^2-N_2^1$ 均有分布,其中 $E_3^2$ 油砂最发育。

## 1.2 地层发育情况

干柴沟地区纵向上发育4套地层,根据柴10和柴902等井实钻资料及地面地质情况,梳理自上而下发育的地层。

1) 下油砂山组( $N_2^1$ ):岩性为棕黄色、棕灰色泥岩,砂质泥岩,泥质粉砂岩,含少量棕红色泥岩、砂质泥岩、泥质粉砂岩及灰色泥岩,与下伏地层呈整合接

触,厚度860~1 220 m。

2) 上干柴沟组( $N_1$ ):上部以棕黄色泥岩和砂质泥岩为主,夹棕黄色、灰色泥质粉砂岩及灰色泥岩和砂质泥岩。下部以灰色砂质泥岩及灰质泥岩为主,夹灰色泥质粉砂岩,含少量灰色泥灰岩及灰白色盐岩,与下伏地层呈整合接触,厚度950~1 500 m。

3) 下干柴沟组上段( $E_3^2$ ):自上而下包括 I—VI 共6个油层组,上部(I—III油层组)岩性以页岩、薄层状灰云岩、纹层状灰云岩和膏盐岩为主,夹泥灰岩、泥质粉砂岩,以及膏质泥岩。下部(IV—VI油层组)岩性以纹层状灰云岩、泥质灰云岩和页岩为主,夹少量灰色含膏泥岩和膏质泥岩,与下伏地层呈整合接触,厚度2 000~2 200 m。

4) 下干柴沟组下段( $E_3^1$ ):上部岩性主要为灰云岩、泥质灰云岩及灰质泥岩,含少量泥岩,可见灰色砂质泥岩及泥质粉砂岩。下部岩性以棕褐色泥岩、砂质泥岩和泥质粉砂岩为主,夹棕红色泥岩、砂质泥岩及泥质粉砂岩,含少量棕灰色泥岩、砂质泥岩、泥质粉砂岩及棕褐色粉砂岩,与下伏地层呈整合接触,厚度400~600 m。

## 2 油气地质认识

柴达木盆地干柴沟地区油气勘探始于20世纪50年代初,当时利用地面细测资料结合少量品质较低的老二维地震资料,针对山前带陡坡区扇三角洲沉积体系碎屑岩构造-岩性油气藏开展探索,先后实施钻井12口,均未获得工业油流。分析认为山前陡坡区具有沉积相带窄、物性变化快的特征,有利相带难以实现精细刻画,使得碎屑岩勘探停滞不前,始终未取得规模发现。随着地质和地球物理等新技术日益进步,高原咸化湖相层系构造、成储和成藏等地质研究不断深化,有力支撑了勘探部署,取得以下主要认识。

### 2.1 喜马拉雅晚期昆仑山逆冲控制干柴沟断裂下盘形成断背斜

在昆仑山逆冲推覆和阿尔金山左行走滑双重应力作用下,英雄岭凹陷晚期构造发生反转,具有“早凹晚隆”的构造演化特征。喜马拉雅晚期的褶皱变形造就了英雄岭—柴西北区隆—洼相间的构造格局,沿阿尔金山前平行发育系列鼻状隆起。 $N_2^1$ 沉积时期受喜马拉雅运动影响,干柴沟地区发育大型深层滑脱断层(干柴沟断裂),受其控制形成深、浅两套构造层,构造样式及圈闭类型具明显差异。浅部构造层位于滑脱断层上盘,地层遭受抬升并出露地表,圈闭被破坏;深

部构造层位于滑脱断层下盘,地层宽缓,形成相对完整的构造圈闭。

通过高品质三维地震资料解译,梳理了干柴沟地区构造特征和断裂发育情况,明确地下构造圈闭与地表构造不匹配。该区断裂以北西西向为主,总体呈向阿尔金山前抬升的鼻隆状,东西向产状宽缓,受干南断层控制,局部发育断背斜,围斜部位地层倾角 $15^\circ \sim 30^\circ$ (图2)。在干柴沟构造南侧,浅表层地面构造被干柴沟滑脱断层所改造,保存条件差,是前期勘探未获突破的主要原因。三维地震资料揭示,在干柴沟构造东翼发育断背斜圈闭,形态完整,面积4.7 km<sup>2</sup>,高点海拔1 250 m,闭合幅度50 m。该断背斜被干南和干北2条断裂所夹持,地层相对平缓、稳定,未发育断层,有利于油气聚集成藏。

### 2.2 大面积咸化湖相混积碳酸盐岩具备储集能力

#### 2.2.1 沉积环境及展布

柴达木盆地西部新生代湖盆发育干旱气候背景下的咸化湖相沉积<sup>[20]</sup>,具有蒸发强度大、陆源间歇补偿、湖平面高频振荡等特点<sup>[21]</sup>。在此背景下,形成了薄层湖相碳酸盐岩、页岩和膏盐岩相互叠置的岩性组合特征(图3)。其中,湖相碳酸盐岩表现为薄层状灰云岩、纹层状灰云岩及藻灰岩等。根据岩性组合的差异,湖相碳酸盐岩的平面分布具有分带性:受古地貌控制,湖盆斜坡区以藻灰岩-薄层状灰云岩-颗粒灰云岩沉积为主,凹陷区以纹层状灰云岩-页岩沉积为主。

纵向上,下干柴沟组上段( $E_3^2$ )沉积时期英雄岭凹陷经历了半咸化、咸化和盐湖3个沉积演化阶段:早期半咸化阶段为最大湖泛期,水体盐度相对较低,沉积了一套半深湖相页岩及纹层状灰云岩;中期咸化阶段为湖盆缓慢收缩期,浅湖-半深湖间互发育,水体盐度增大,沉积了一套薄层状、纹层状灰云岩;晚期盐湖阶段蒸发作用增强,水体变浅、盐度急剧增大,沉积厚层膏盐岩,盐湖中心位于南侧狮子沟地区(图4)。 $E_3^2$ 顶部膏盐岩累计厚度可达300 m,封盖条件优越;盐下、盐间均发育碳酸盐岩。盐下以半深湖优势相为主,主要发育纹层状灰云岩+页岩有利岩相组合;盐间以浅湖优势相为主,主要发育薄层状灰云岩+颗粒灰云岩组合<sup>[22]</sup>。

沉积相对比剖面显示,干柴沟地区从物源区到湖盆区碎屑岩、湖相碳酸盐岩和膏盐岩层在纵、横向上均呈有序分布(图5)。横向上,山前带发育陆源扇三角洲砂体沉积,延伸距离较短;向湖盆区过渡为滨浅湖

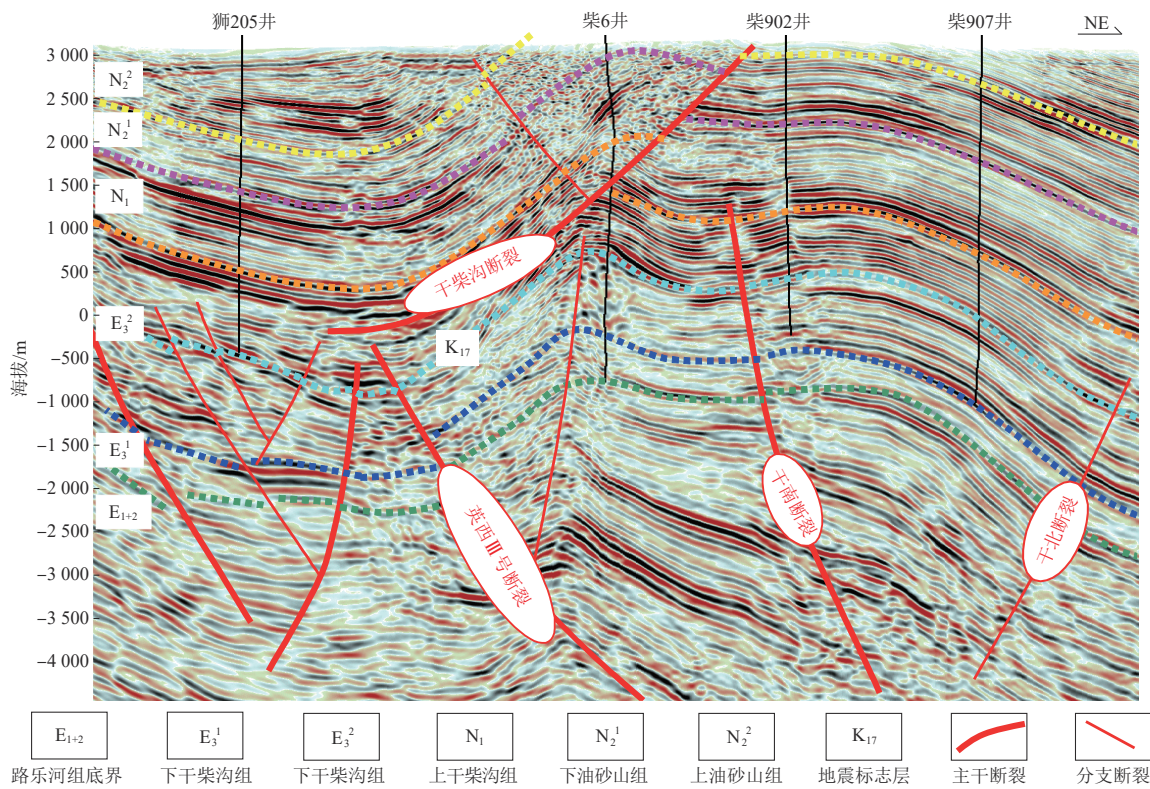


图2 英雄岭凹陷干柴沟构造SW-NE向过井地震剖面(剖面井位置见图1d)

Fig. 2 Well-tie seismic section striking SW-NE of the Ganchaigou area, Yingxiongling Sag (see Fig. 1d for the well locations)

相,发育碎屑岩滩坝、混积滩等碳酸盐岩沉积;近湖盆中心浅湖相带主要发育(含膏)碳酸盐岩或盐岩层,至半深湖区,发育大量深水纹层状碳酸盐岩。纵向上,在半咸化、咸化和盐湖3个演化阶段,湖平面整体经历了快速上升和缓慢下降的演化过程,其中半咸化阶段利于咸湖相烃源岩发育,咸化阶段利于多类型碳酸盐岩储集体发育,盐湖阶段利于膏盐岩盖层发育。总体而言,每个演化阶段受湖平面高频振荡影响,不同沉积物频繁互层,构成了良好的生-储-盖组合。

利用野外露头、钻井、岩心及地震资料预测英雄岭 $E_3^2$ 早、晚期沉积相平面展布(图6)。早期(半咸化-咸湖阶段)湖盆范围广,其中干柴沟地区半深湖相以柴6井区为界线,东南部范围大,沉积纹层状碳酸盐岩,滨浅湖相处于柴6井区与柴深3井区之间,沉积薄层状碳酸盐岩,扇三角洲主要分布在柴深3井区西北部;晚期(盐湖阶段),湖盆相对萎缩,干柴沟主要处于滨浅湖相带,局部发育混积滩,岩性以薄层状碳酸盐岩为主,半深湖区迁移至柴7井区以东,同时在干柴沟、狮子沟发育大量膏盐岩层沉积<sup>[23]</sup>。

### 2.2.2 储集层类型及特征

干柴沟地区早期油气勘探主要针对碎屑岩储集

层,近年来通过对新钻井岩心开展岩矿、储集层质量及含油性等综合分析,发现咸化湖相碳酸盐岩优质储集层,其物性不受理深影响,是重要的勘探领域<sup>[24]</sup>。研究发现, $E_3^2$ 湖相碳酸盐岩储集层岩石矿物组分复杂,以方解石和白云石为主,其次为黏土、石英和长石等,多具有陆源碎屑混积特征<sup>[25]</sup>。

铸体薄片及扫描电镜观察揭示,研究区咸化湖相碳酸盐岩发育晶间孔、溶蚀孔、角砾化缝洞等不同尺度的储集空间。据此将研究区碳酸盐岩储集层的成因类型分为3种:溶孔型、晶间孔型和裂缝-孔洞型。①溶孔型:以颗粒灰云岩为主,主要为砂屑灰云岩,溶蚀孔、晶间孔发育,孔隙度4%~13%,渗透率 $(0.010 \sim 0.100) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。溶孔以大气淡水溶蚀、有机酸溶蚀及硫酸盐热化学还原反应(TSR)溶蚀形成的方解石溶蚀孔和硬石膏溶蚀晶模孔为主。②晶间孔型:以泥晶灰云岩为主,包括薄层状泥晶灰云岩和纹层状泥晶灰云岩2种类型,是柴西湖相碳酸盐岩最主要的储集层类型。薄层状泥晶灰云岩形成于滨浅湖环境,局部含有石膏,呈斑状结构,发育晶间孔及少量膏模孔,物性好,孔隙度4%~10%,渗透率 $(0.001 \sim 0.500) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;纹层状泥晶灰云岩形成于半深湖环境,主要发育晶间孔及纹层缝(图7),孔隙度3%~8%,渗透率 $(0.010 \sim$

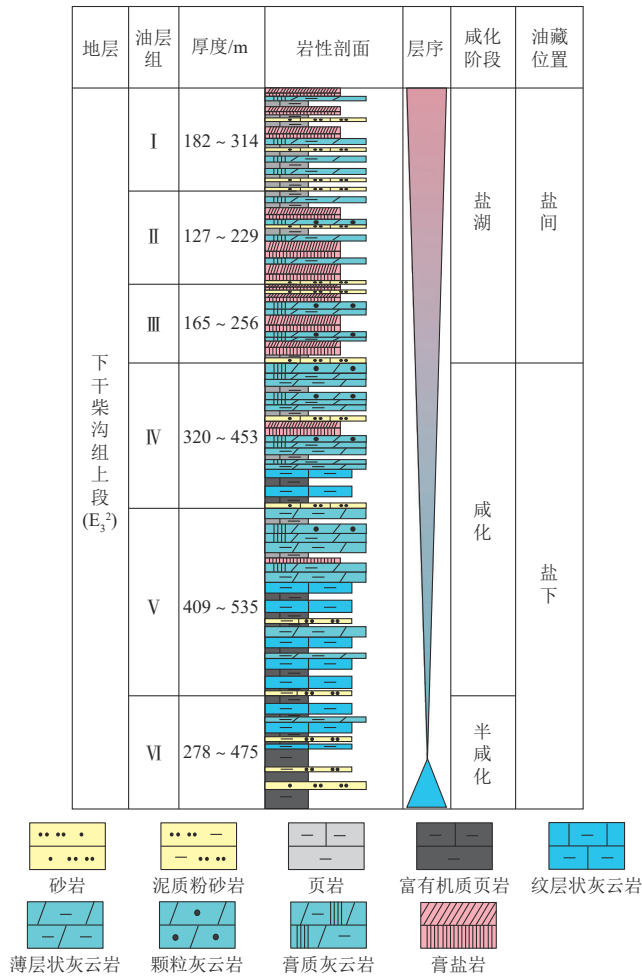


图3 英雄岭凹陷下干柴沟组上段沉积演化柱状图

Fig. 3 Evolutionary column showing the sedimentation in the  $E_3^2$  in the Yingxiongling Sag

$5.000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。晶间孔主要形成于准同生期白云石化作用。③裂缝-孔洞型: 各类碳酸盐岩均可发育, 多见于构造复杂变形区, 物性最好, 孔隙度  $6\% \sim 15\%$ , 渗透率大于  $1.000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 为晚期构造挤压角砾化成因, 是油气高产富集的主要储集层。通过研究, 建立了岩相组构、准同生白云化、多期流体溶蚀和晚期构造挤压角砾化“四元”复合成储新模式, 发现碳酸盐岩有效储集层不受埋深限制, 深、浅层均具备储集能力。

整体而言, 干柴沟地区湖相碳酸盐岩大多发育纳米-微米级晶间孔, 其成因为准同生期蒸发浓缩白云石化作用, 白云石化作用越强, 晶间孔越发育<sup>[26]</sup>。这种晶间孔呈集群式大量发育, 为湖相碳酸盐岩形成规模有效储集层奠定基础, 同时晶间孔抗压实力强, 故在深层也能发现有效储集层。目前揭示的干柴沟  $E_3^2$  碳酸盐岩主要储集空间类型是晶间孔, 其次为纹层缝, 可有效改善渗透性能。  $E_3^2$  溶蚀孔主要

发育在该储集层沉积晚期, 其成因包括大气淡水、有机酸及深埋期 TSR 溶蚀, 有利于形成高效储集层。

### 2.3 咸化湖相混积碳酸盐岩源-储组合形成构造、岩性和源内全油气系统

研究区下干柴沟组沉积期为典型的高原咸化湖相混积环境, 通过取心测试分析, 根据矿物组成(即碳酸盐、黏土矿物和长英质矿物)和沉积构造厚度(即层理厚度  $\geq 1 \text{ cm}$  为层状、层理厚度  $< 1 \text{ cm}$  为纹层状), 将  $E_3^2$  页岩划分为纹层状灰云岩、纹层状云灰岩、纹层状黏土质页岩、层状灰云岩、层状云灰岩和层状泥岩 6 种岩相类型。

干柴沟地区  $E_3^2$  发育有效“生-储-盖”组合,  $E_3^2$  中下部(IV—VI 油层组)发育优质咸化湖相烃源岩, 储集层主要为灰云岩和云灰岩, 自  $N_1$  下部至  $E_3^2$  II 油层组上部则稳定分布膏盐岩优质盖层, 为该区油气成藏提供了良好的封盖条件。

从烃源岩方面来看,  $E_3^2$  优质烃源岩主要分布在 IV—VI 油层组的纹层状灰云岩、纹层状云灰岩和黏土质页岩中, 由碳酸盐纹层与富有机质黏土质纹层组成(图 8a—c)。单纹层厚度集中在  $0.05 \sim 0.20 \text{ mm}$ , 线密度为  $4000 \sim 4500 \text{ 条/m}$ 。实测烃源岩中总有机碳含量(TOC)为  $0.4\% \sim 2.7\%$ , 平均约  $0.8\%$ 。纹层状云灰岩与纹层状黏土质页岩 TOC 相对较高, 薄片和扫描电镜分析表明, 黏土质纹层富含有机质, 呈集块状顺层面分布, 长轴延伸方向与纹层平行(图 8c), 有机质主要赋存于黏土质纹层的顶和底。研究发现, 水体越深、纹层越细密, 有机质丰度越高。

从储集层方面来看,  $E_3^2$  I—III 油层组以薄层状灰云岩或云灰岩储集层为主, 埋藏浅, 溶蚀作用更强, 储集空间以晶间孔为主。储集层平均孔隙度为  $8.3\%$ , 平均渗透率为  $1.82 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。  $E_3^2$  IV—VI 油层组薄层状灰云岩及纹层状灰云岩为最佳储集岩相。薄层状灰云岩孔隙度最大( $\Phi > 5\%$ , 占比超过  $40\%$ ), 纹层状灰云岩渗透率最高( $K > 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 占比超过  $45\%$ )。纹层状灰云岩储集层埋藏相对较深, 发育晶间孔和纹层缝, 纹层缝有效改善其渗透性能。

从盖层方面来看,  $E_3^2$  上段 I—II 油层组发育盐岩盖层, 厚度自南向北(英西—干柴沟—咸水泉)逐渐减薄。钻井统计盐岩层单层厚度  $1.5 \sim 4.2 \text{ m}$ , 累计厚度  $4.0 \sim 31.7 \text{ m}$ 。井-震结合落实干柴沟及周缘盐岩层面积约  $810 \text{ km}^2$ , 平面覆盖整个干柴沟地区。以此盐岩为有效盖层, 盐下  $E_3^2$  II—VI 油层组形成自封闭系统, 产生异常高压(实测目的层压力系数普遍大于  $1.7$ , 局

综合以上“生-储-盖”组合和成藏研究,认为干柴沟地区喜马拉雅晚期构造活动强烈,由凹陷反转成隆

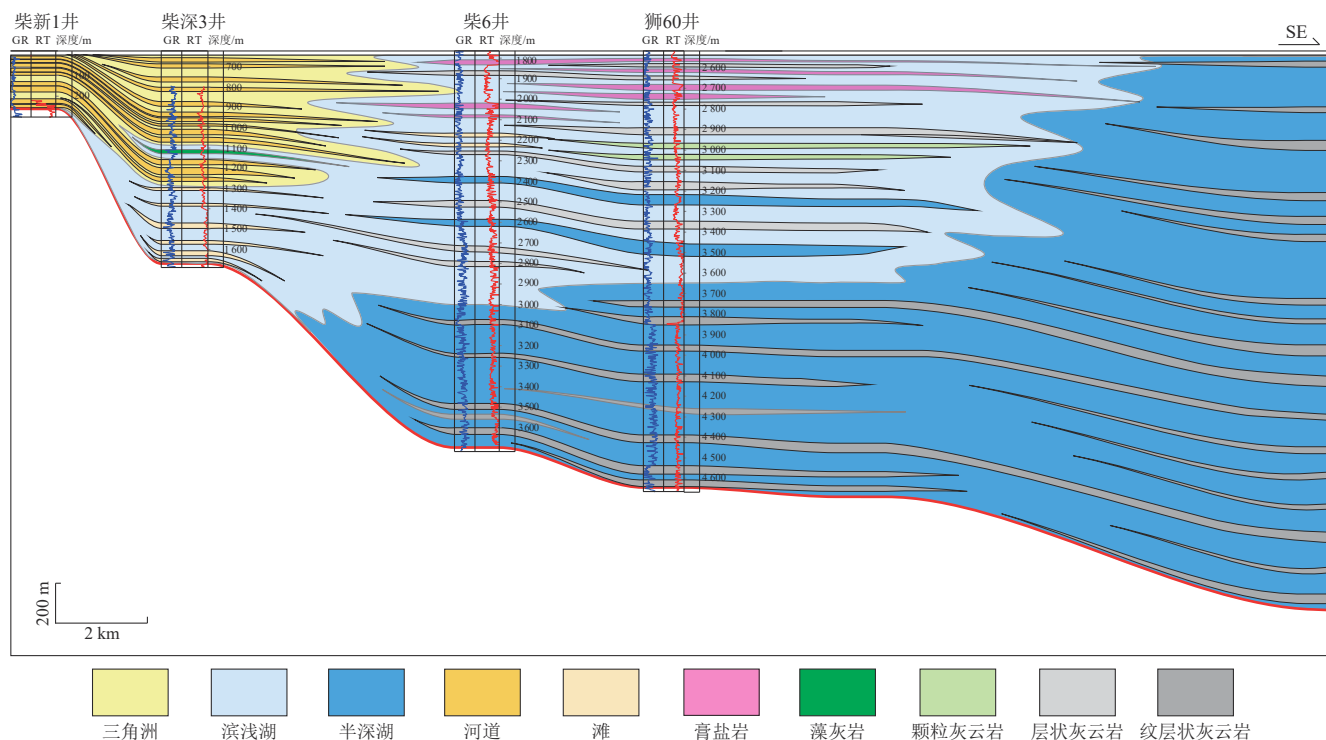
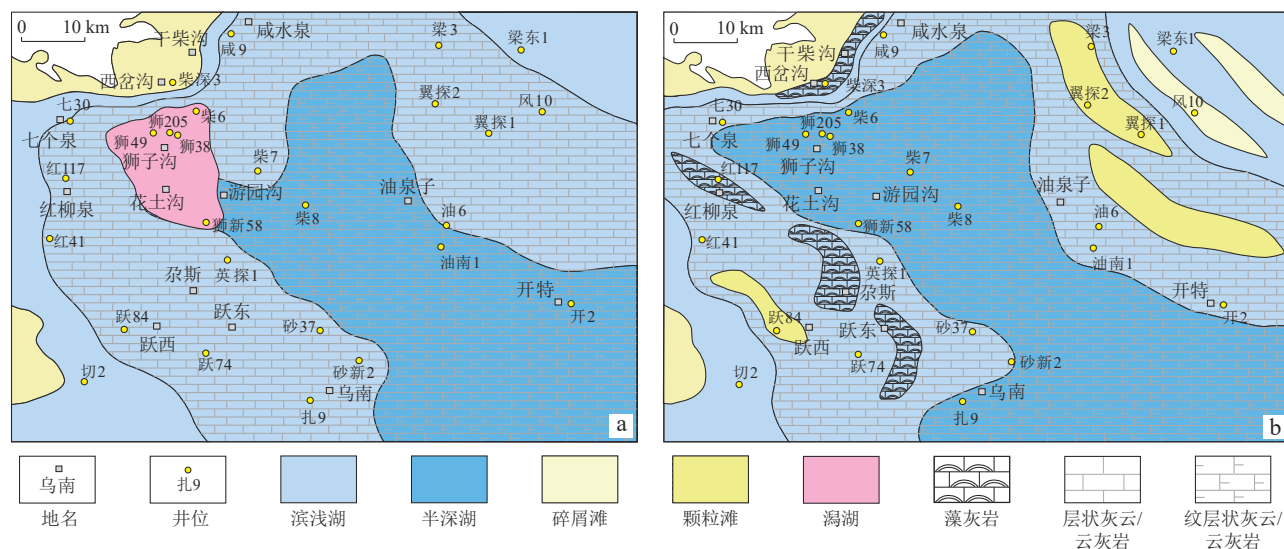
图5 干柴沟地区下干柴沟组上段( $E_3^2$ )沉积相对比剖面(剖面位置见图1d)Fig. 5 Sedimentary facies profile of the upper section of the Lower Ganchaigou Formation ( $E_3^2$ ) in the Ganchaigou area (see Fig. 1d for the section location)

图6 柴西地区英雄岭构造带下干柴沟组上段早、晚期沉积相平面分布

Fig. 6 Maps showing the planar distribution of sedimentary facies of the early and late stages of the  $E_3^2$  deposition in the Yingxiongling tectonic zone, western Qaidam Basin

a. 沉积晚期(I—III油层组沉积期); b. 沉积早期(IV—VI油层组沉积期)

起,形成现今高陡山地地貌<sup>[29]</sup>。 $E_3^2$  I—III油层组的碳酸盐岩埋藏浅、物性好,来自下部IV—VI油层组优质生油岩的油气在浮力作用下,向上运移至构造或岩性圈闭中聚集成常规油气藏,其中柴901井II油层组实测气/油比为144.5 m<sup>3</sup>/t; IV—VI油层组烃源岩达到生

烃门限后,生成烃在页岩中发生原位滞留或微距运移,形成源内页岩油,微距运移的动力可能包括源-储压差、浮力和分子扩散。统计IV—VI油层组的气/油比,在构造高部位介于79~120 m<sup>3</sup>/t,在斜坡区介于78~1147 m<sup>3</sup>/t。在多种成藏动力的联合驱动下,干柴沟地

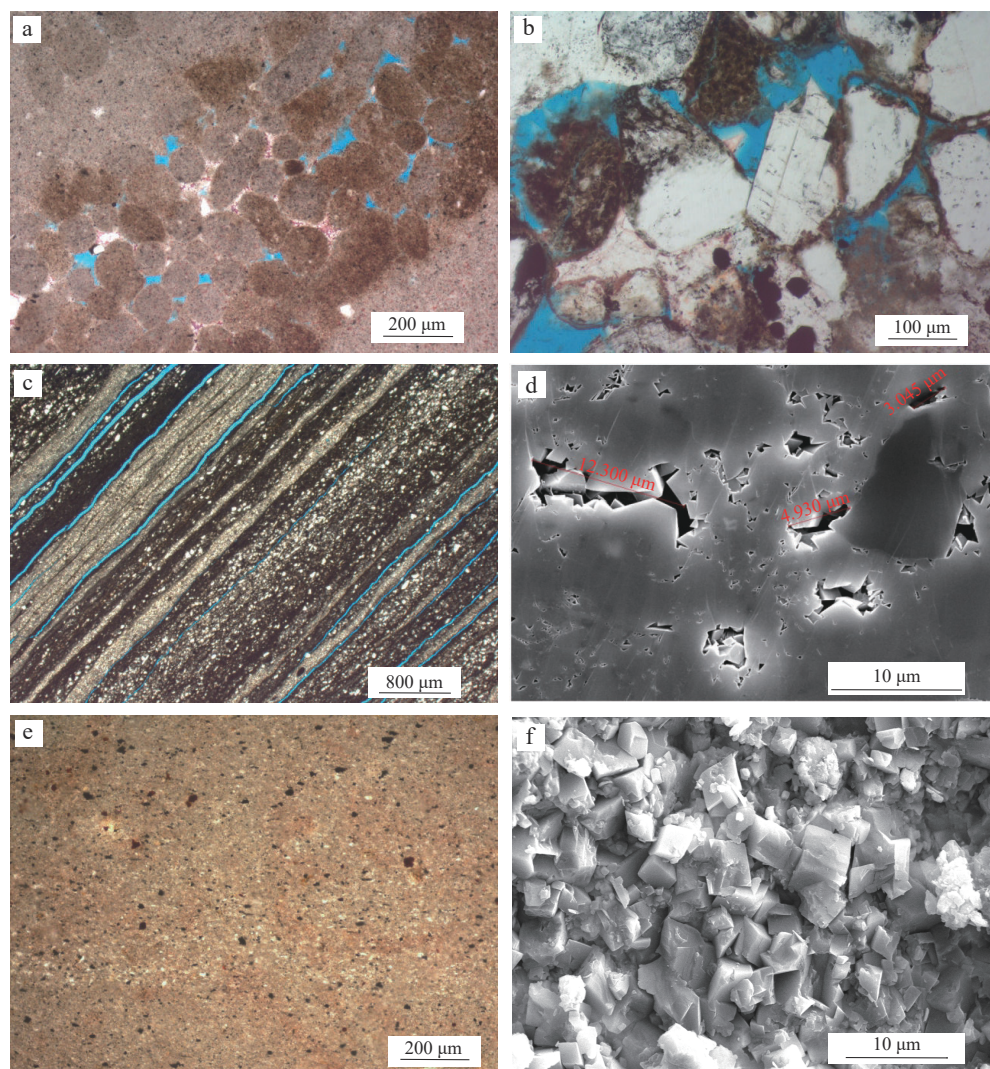


图7 柴西地区英雄岭构造带 $E_3^2$ 湖相碳酸盐岩储集层微观特征照片

Fig. 7 Microscopic characteristics of lacustrine carbonate reservoirs in the  $E_3^2$  in the Yingxiongling tectonic zone, western Qaidam Basin  
a. 柴2-4井,埋深2 843.88 m,砂屑灰云岩,铸体薄片,单偏光;b. 狮41-6-1井,埋深3 868.57 m,含陆源碎屑颗粒灰云岩,溶蚀孔发育,铸体薄片,单偏光;c. 柴1-5井,埋深2 565.87 m,纹层状泥晶灰云岩,铸体薄片,单偏光;d. 柴906井,埋深3 229.29 m,薄层状泥晶灰云岩,晶间孔,氩离子抛光扫描电镜;e. 狮60井,埋深3 338.25 m,薄层状灰云岩,铸体薄片,单偏光;f. 柴906井,埋深3 238.02 m,白云石晶间孔,扫描电镜

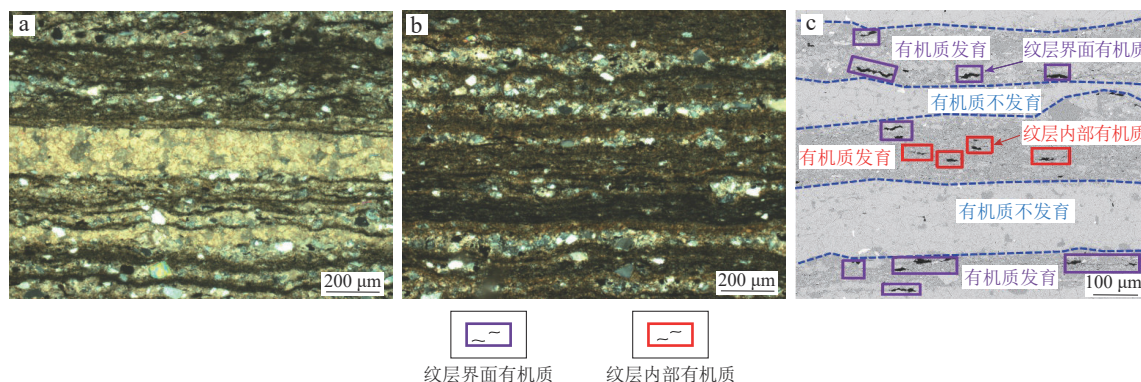


图8 干柴沟地区纹层状碳酸盐岩源-储组合微观特征照片

Fig. 8 Microscopic characteristics of source rock-reservoir assemblages in lamellar carbonate rocks in the Ganchaigou area  
a. 柴2-4井,埋深2 807.10 m,纹层状灰云岩,铸体薄片,正交偏光;b. 柴906井,埋深3 230.20 m,纹层状灰云岩( $\Phi=0.2\%$ ,  $TOC=1.7\%$ ),铸体薄片,正交偏光;c. 柴2-4井,埋深2 844.13 m,纹层状灰云岩,背反射扫描电镜

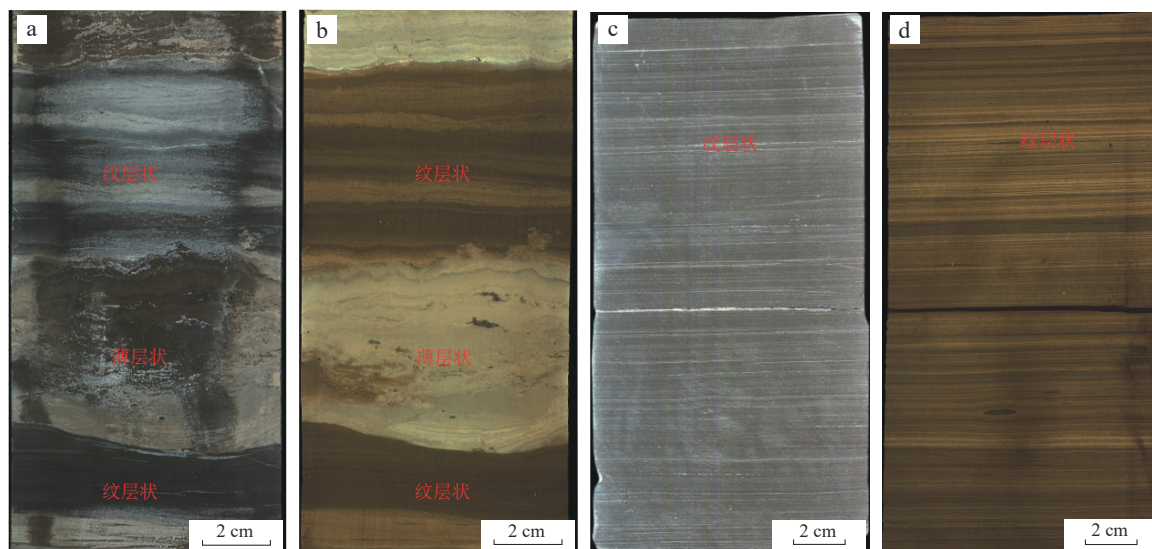


图9 干柴沟地区  $E_3^2$  页岩岩心展示薄层状和纹层状源-储组合

Fig. 9 Thinly laminated and lamellar source rock-reservoir assemblages present in shale cores from  $E_3^2$  in the Ganchaigou area

a. 薄层状与纹层状碳酸盐岩切面白光显微照片,埋深2 800.26 ~ 2 800.42 m; b. 薄层状与纹层状碳酸盐岩切面荧光显微照片,埋深2 800.26 ~ 2 800.42 m; c. 纹层状碳酸盐岩切面白光显微照片,埋深2 807.34 ~ 2 807.55 m; d. 纹层状碳酸盐岩切面荧光显微照片,埋深2 807.34 ~ 2 807.55 m

区源内、源外形成常规-非常规立体油气藏,空间上构成了全油气系统(图10),勘探潜力较大<sup>[30-33]</sup>。

### 3 油气勘探突破

干柴沟地区具备形成构造、岩性和页岩油等多种类型油气藏的条件,在新的地质认识指导下,分层次开展勘探部署,终于在经历了60余年的艰难探索之后,油气勘探获得重大突破。

#### 3.1 构造油气藏勘探获得重大发现

2019年,在干柴沟采集并获得了较高品质三维地震资料,落实了构造细节,发现干柴沟断层上盘浅表构造地层高陡,圈闭遭受破坏,下盘断背斜圈闭则较完整。2020年,为探索断裂下盘构造圈闭勘探潜力,部署了柴9井,钻探过程中油气显示活跃,钻至  $E_3^2$  上段 II 油层组录井全烃达100%,槽面见到30%的油花和40%的气泡,测井解释油层21.1 m/(9层)。优选埋深

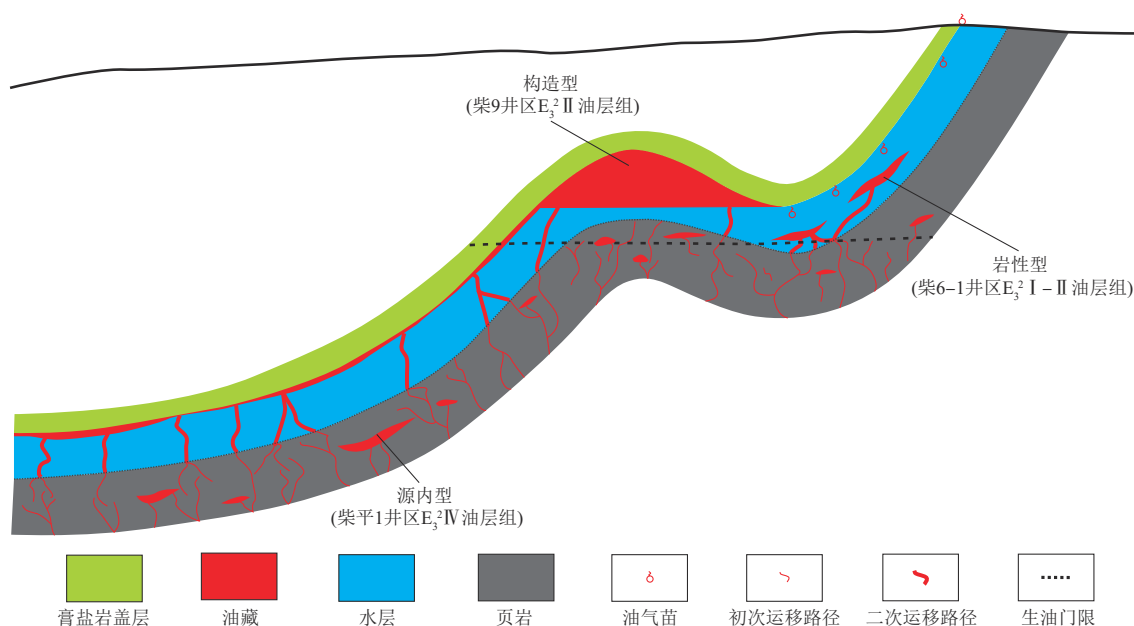


图10 干柴沟地区油气成藏模式

Fig. 10 Diagram showing the hydrocarbon accumulation in the Ganchaigou area

2 234.0 ~ 2 246.0 m 和 2 254.0 ~ 2 260.0 m 井段进行试油,最高日产油 120.92 m<sup>3</sup>,最高日产气 50 337 m<sup>3</sup>,发现干柴沟 E<sub>3</sub><sup>2</sup> II 油层组为高产油气藏。

该油气藏具有埋藏浅(2 300 ~ 2 500 m)、厚度大(46 m)、压力系数高(2.26)、高产(30 t/d)、密度低(0.840 7 g/cm<sup>3</sup>)和气/油比高(144.5 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)的特点,实现了干柴沟地区断层下盘构造圈闭的重大突破。通过勘探开发一体化快速实施,1年内即实现了该套油气藏的发现—建产—探明,建成产能 10×10<sup>4</sup> t,探明石油地质储量 1 361.31×10<sup>4</sup> t。该油气藏受干南断层遮挡及边水控制,各层间无统一油—水界面,是典型的构造型油气藏。

同时, E<sub>3</sub><sup>2</sup> II 油层组顶部发育一套稳定盐岩盖层,平面延展性好,井间对比分布稳定,单层厚度 2 ~ 4 m,累计厚度 10 ~ 30 m,为裂缝—孔洞型储集层提供高效盐岩盖层,使得 E<sub>3</sub><sup>2</sup> II 油层组形成自封闭系统,异常高压,地层能量充足,持续高产、稳产。同时试油试采证实,同一连通油层因构造高低不同而展现出不同的含油性特征,具有高部位出油、低部位产水的特点,且不同油层边水位置高低不等,从而明确干柴沟 E<sub>3</sub><sup>2</sup> II 油层组为层状边水构造型油气藏,圈闭内油层平面均质性好,且不同井在同一连通层对比显示单层厚度稳定,岩性、储集层物性变化不大。

### 3.2 页岩油勘探呈现良好前景

2021年,干柴沟在主攻 E<sub>3</sub><sup>2</sup> 上段 II 油层组构造型油气藏的同时,立足源内油藏大面积含油的思路,引入“非常规”理念,探索干柴沟地区页岩油潜力,优选柴 902 井针对 E<sub>3</sub><sup>2</sup> IV—VI 油层组进行加深钻探。对埋深 2 800 ~ 2 803 m 井段(IV 油层组)压裂试油,日产油 32.53 t,日产气 2 582 m<sup>3</sup>,试采日产油 10 ~ 12 t,170 d 累产油 2 113.7 t,累产气 78.2×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,证实了该区页岩油直井具备稳产能力。

截至 2023 年已完钻 19 口直井,试油在 18 口井 35 个层组获工业油流,揭示英雄岭页岩具有厚度大(>1 000 m)、有效烃源岩厚(600 ~ 700 m)、岩心含油性好(荧光—油浸)、产油量高(5.4 ~ 44.9 m<sup>3</sup>/d)、压力系数大(1.8 ~ 2.3)、油质轻(0.79 ~ 0.83 g/cm<sup>3</sup>)等特点,具备良好页岩油勘探前景。直井钻探证实 E<sub>3</sub><sup>2</sup> 下段 IV—VI 油层组发育上、中、下 3 套甜点段,平面已落实井控含油面积 70.1 km<sup>2</sup>,提交预测地质储量 1.38×10<sup>8</sup> t。

为探索页岩油高效动用方式,开展水平井+体积压裂现场试验,针对 IV 油层组钻探了柴平 1 井,完钻井

深 3 924.33 m,水平段长 997.33 m,21 段 124 簇压裂,压后焖井 16 d,开井即见油。4 mm(直径)油嘴放喷,日产油 124 m<sup>3</sup>、日产气 15 025 m<sup>3</sup>,708 d 累产油 1.3×10<sup>4</sup> t、气 159×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。目前已实施水平井共计 24 口,其中针对上甜点实施 14 口水平井,中甜点实施 9 口水平井,下甜点实施 1 口水平井,初步证实了水平井+体积压裂可实现 E<sub>3</sub><sup>2</sup> 下段 IV—VI 油层组页岩油效益开发。

该类油气藏储集层主体为晶间孔型,形成于浅湖—半深湖沉积环境,与富有机质页岩形成源—储组合,烃类微距离就近运移至纹层状灰云岩、薄层状灰云岩中,广泛发育于 E<sub>3</sub><sup>2</sup> IV—VI 油层组,累计厚度约 500 m。干柴沟页岩油主要赋存在晶间孔、纹层缝中,不同岩相中原油赋存状态也存在差异,具有“微距运移”和“原位滞留”2 种成藏模式。

### 3.3 岩性油气藏勘探展现有利苗头

勘探在构造主体区的构造圈闭和页岩油取得突破后,逐渐向山前扩展,为落实斜坡区页岩油特征而钻探的柴 908 井,在 E<sub>3</sub><sup>2</sup> 下段 IV—VI 油层组页岩油成功后,也在 E<sub>3</sub><sup>2</sup> 上段 I—II 油层组见到良好显示,测井解释油层 84.1 m/(23 层)。

围绕碳酸盐岩岩性勘探新领域,钻探柴 102 井和柴 103 井,均见良好显示,但未获得工业产能,表明岩性油气藏具有一定平面非均质性。原油分析显示,地面原油密度为 0.844 g/cm<sup>3</sup>,地面原油黏度为 8.587 8 mPa·s,气/油比为 211.2 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>。研究分析认为,向山前上倾方向沉积相转变为滨浅湖相,发育上倾方向的碳酸盐岩岩性和物性遮挡,有利于形成碳酸盐岩岩性圈闭。

为落实该套油层的分布和产能特征,2022 年钻探了柴 6-1 井,在 E<sub>3</sub><sup>2</sup> I—II 油层组解释油层 45.7 m,与柴 908 井油层对比性好。针对柴 6-1 井 1 865 ~ 1 905 m 深度段(有效孔隙度 6.9% ~ 10.9%),8 段合层小规模压裂试油,2 mm(直径)油嘴最高日产油 30.32 m<sup>3</sup>,日产气 6 403 m<sup>3</sup>,随后甩开部署的柴 101 井,再次获得工业油流,展现出山前斜坡区 E<sub>3</sub><sup>2</sup> 上段 I—II 油层组碳酸盐岩岩性油气藏的勘探潜力。

## 4 油气勘探启示与发展方向

### 4.1 油气勘探启示

通过系统梳理干柴沟地区的油气勘探实践历程,明确困扰勘探发现的资料技术难点,综合运用新资料 and 新技术,总结出研究区勘探终获成功的 3 点启示,相

关经验为在以干柴沟地区为代表的高海拔、复杂构造区开展地质研究和油气勘探提供借鉴。

1) 加强地震技术攻关,获取有效地下资料,是开展复杂构造区油气勘探的前提。柴达木盆地属于高原强改造盆地,构造变形强烈,发育多个构造层,取得有效的地震资料对于认识其地下构造、落实石油地质特征,开展油气勘探都至关重要。2019年之前,由于缺乏有效地震资料,干柴沟地区勘探均围绕地面构造轴部开展。尽管油砂显示丰富,但历经60年先后钻探12口井,均未获得工业油流。2019年,采用以“高密度高覆盖、震检组合、长排列接收”采集技术和“真地表各向异性叠前深度偏移”处理技术为核心的复杂山地三维地震勘探技术,开展干柴沟地震攻关,终于取得有效地震反射,落实了地下构造特征。利用新资料开展解释,发现受滑脱断层控制,干柴沟地面构造地层高陡,圈闭条件不佳,导致钻探失利。根据三维地震资料,落实断背斜构造圈闭,部署的柴9井终获成功,发现了 $E_3^2$  II油层组的构造油气藏。

2) 深化基础地质研究,攻克关键工程技术,是开辟油气勘探新领域的关键。柴达木盆地古近系-新近系高原干旱咸化湖盆内部广泛沉积碳酸盐岩,碎屑岩则主要分布于盆缘,范围相对有限。咸化湖相混积型碳酸盐岩的岩性致密,以往认为其烃源条件好、储集性能差、源-储不匹配,属低渗难采储集层,导致油气产量低、效益差,故将碎屑岩作为主要的勘探对象,碳酸盐岩层系长期未引起重视。近年来,通过深化储集条件研究,发现柴西咸化湖相混积型碳酸盐岩普遍发育纳米-微米级晶间孔,可作为有效储集层。湖相碳酸盐岩抗压实能力优于碎屑岩,因此深层碳酸盐岩同样具备储集能力。在新认识的指导下,有利勘探区纵向扩展至深层,平面延展至整个湖盆,干柴沟地区也摆脱了以往仅针对碎屑岩开展油气勘探的禁锢,终于在碳酸盐岩中获得油气新发现。

3) 引入非常规油气理念,建立富油气凹陷全油气系统概念,是油气勘探向源内扩展的密钥。尽管已历经60余年,柴达木盆地油气勘探仍以常规构造型为主。近两年,引进非常规油气勘探理念和研究方法流程,开展全油气系统研究,积极探索干柴沟地区页岩层系,获得重大发现。揭示英雄岭页岩油的良好勘探开发前景,反映柴达木盆地柴西地区非常规油气具有较大潜力,是今后值得重视的接替资源。

## 4.2 勘探发展方向

技术进步和资料提升带来了勘探认识的飞跃和勘

探领域的突破,相继在山前地表地下双复杂的干柴沟地区发现了构造、岩性和源内页岩油多类型油气藏。总结理论认识和勘探实践得出的宝贵经验,笔者认为干柴沟组下一步油气勘探包括3大方向:①高部位有通源断裂沟通的小型构造圈闭,依靠资料品质的提升,可以提高构造解释精度,这类小圈闭虽然单体规模小,但是整体数量多,可以发挥集群式效应,总体资源潜力较大;②斜坡区构造-岩性复合型或岩性圈闭,这类圈闭在中国东部富油气坳陷已成为主力,在干柴沟地区也展现良好态势,对于柴西富油气坳陷而言,应借鉴东部经验,精细刻画其构造-岩性复合圈闭,落实成藏条件;③源内页岩油,虽然目前已经取得页岩油勘探突破,但是随着勘探深入,发现干柴沟地区巨厚的页岩中甜点分布规律仍有待细化,需要不断提升水平井靶层选取和后期勘探开发效果。

与此同时,干柴沟地区在构造、页岩油和岩性3大领域取得突破或展现好苗头,表明成藏条件有利。从勘探方向上看,除了进一步在本区深入挖潜之外,也应该跳出干柴沟,落实更大范围的英雄岭凹陷乃至柴西坳陷有利成藏条件及其配置关系,进一步扩展勘探领域。

## 参 考 文 献

- [1] 尹成明,李伟民,ANDREA R,等. 柴达木盆地新生代以来的气候变化研究:来自碳氧同位素的证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(5): 901-907.  
YIN Chengming, LI Weimin, ANDREA R, et al. Cenozoic climate changes in the Qaidam Basin, Western China: Evidenced from carbon and oxygen stable isotope [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2007, 37(5): 901-907.
- [2] 张道伟,马达德,陈琰,等. 柴达木盆地油气地质研究新进展及勘探成果[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(5): 505-512.  
ZHANG Daowei, MA Dade, CHEN Yan, et al. Research progress on oil and gas geology and exploration practice in Qaidam Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(5): 505-512.
- [3] 王倩倩,袁四化,王亚东,等. 柴达木盆地西部地区新生代盆地性质[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(1): 160-181.  
WANG Qianqian, YUAN Sihua, WANG Yadong, et al. The nature of the Cenozoic Western Qaidam Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(1): 160-181.
- [4] 吴磊,杨惠童,张永庶,等. 新生代柴达木盆地与周缘造山带的构造耦合[J]. 地质学报, 2023, 97(9): 2939-2955.  
WU Lei, YANG Huitong, ZHANG Yongshu, et al. Structural coupling between the Qaidam Basin and bordering orogenic belts in the Cenozoic [J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(9): 2939-2955.
- [5] 徐兆辉,李江涛,李剑,等. 九分量横波三维地震在生物气区

- 沉积储层研究中的应用——以柴达木盆地三湖坳陷台东地区更新统七个泉组为例[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(3): 565–577.
- XU Zhaohui, LI Jiangtao, LI Jian, et al. Application of 9-component S-wave 3D seismic data to study sedimentary facies and reservoirs in a biogas-bearing area: A case study on the Pleistocene Qigequan Formation in Taidong area, Sanhu Depression, Qaidam Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(3): 565–577.
- [6] 赵凡, 孙德强, 闫存凤, 等. 柴达木盆地中生代构造演化及其与油气成藏关系[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(5): 940–947.
- ZHAO Fan, SUN Deqiang, YAN Cunfeng, et al. Meso-Cenozoic tectonic evolution of Qaidam Basin and its relationship with oil and gas accumulation [J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(5): 940–947.
- [7] 曹正林, 孙秀建, 吴武军, 等. 柴达木盆地盆缘冲断古隆起的形成演化及对油气成藏的影响[J]. 石油学报, 2018, 39(9): 980–989.
- CAO Zhenglin, SUN Xiujian, WU Wujun, et al. Formation and evolution of thrust paleo-uplift at the margin of Qaidam Basin and its influences on hydrocarbon accumulation [J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(9): 980–989.
- [8] 李国欣, 朱如凯, 张永庶, 等. 柴达木盆地英雄岭页岩油地质特征、评价标准及发现意义[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(1): 18–31.
- LI Guoxin, ZHU Rukai, ZHANG Yongshu, et al. Geological characteristics, evaluation criteria and discovery significance of Paleogene Yingxiongling shale oil in Qaidam Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(1): 18–31.
- [9] 王桂宏, 李永铁, 张敏, 等. 柴达木盆地英雄岭地区新生代构造演化动力学特征[J]. 地学前缘, 2004, 11(4): 417–423.
- WANG Guihong, LI Yongtie, ZHANG Min, et al. Cenozoic dynamics characteristics of tectonic evolution in Yingxiongling (YL) area in Qaidam Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(4): 417–423.
- [10] 余刚, 马丽娟, 徐永发, 等. 油砂储层特征及测井评价方法研究——以柴达木盆地干柴沟地区为例[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(6): 119–124.
- SHE Gang, MA Lijuan, XU Yongfa, et al. Reservoir characteristics of oil sands and logging evaluation methods: A case study from Ganchaigou area, Qaidam Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2015, 27(6): 119–124.
- [11] 伍劲, 刘占国, 朱超, 等. 柴达木盆地西部下干柴沟组下段碎屑岩储层物性差异主控因素分析[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(4): 46–54.
- WU Jin, LIU Zhanguo, ZHU Chao, et al. Main controlling factors of elastic reservoir property difference of Lower Ganchaigou Formation in western Qaidam Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(4): 46–54.
- [12] 赵喆, 白斌, 刘畅, 等. 中国石油陆上中-高成熟度页岩油勘探现状、进展与未来思考[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(2): 327–340.
- ZHAO Zhe, BAI Bin, LIU Chang, et al. Current status, advances, and prospects of CNPC's exploration of onshore moderately to highly mature shale oil reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 327–340.
- [13] 王伟涛, 张培震, 段磊, 等. 柴达木盆地新生代地层年代框架与沉积-构造演化[J]. 科学通报, 2022, 67(28): 3452–3475.
- WANG Weitao, ZHANG Peizhen, DUAN Lei, et al. Cenozoic stratigraphic chronology and sedimentary-tectonic evolution of the Qaidam Basin [J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(28): 3452–3475.
- [14] 辛后田, 王惠初, 周世军. 柴北缘的大地构造演化及其地质事件群[J]. 地质调查与研究, 2006, 29(4): 311–320.
- XIN Houtian, WANG Huichu, ZHOU Shijun. Geological events and tectonic evolution of the north margin of the Qaidam Basin [J]. Geological Survey and Research, 2006, 29(4): 311–320.
- [15] 石亚军, 曹正林, 张小军, 等. 大型高原内陆咸化湖盆油气特殊成藏条件分析及勘探意义——以柴达木盆地柴西地区为例[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(4): 577–583, 592.
- SHI Yajun, CAO Zhenglin, ZHANG Xiaojun, et al. Special reservoir formation conditions and their exploration significance of the large saline lacustrine basin of inland plateau-taking the western Qaidam Basin for example [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(4): 577–583, 592.
- [16] 马新民, 吴武军, 石亚军, 等. 柴达木盆地英雄岭构造带油气成藏模式[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(2): 289–303.
- MA Xinmin, WU Wujun, SHI Yajun, et al. Hydrocarbon accumulation mode of Yingxiongling structural belt in Qaidam Basin [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(2): 289–303.
- [17] 龙国徽, 王艳清, 朱超, 等. 柴达木盆地英雄岭构造带油气成藏条件与有利勘探区带[J]. 岩性油气藏, 2021, 33(1): 145–160.
- LONG Guohui, WANG Yanqing, ZHU Chao, et al. Hydrocarbon accumulation conditions and favorable exploration plays in Yingxiongling structural belt, Qaidam Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2021, 33(1): 145–160.
- [18] 路俊刚, 陈世加, 欧成华, 等. 柴达木盆地西部北区干柴沟地区深层勘探潜力分析[J]. 石油实验地质, 2010, 32(2): 136–139, 146.
- LU Jungang, CHEN Shijia, OU Chenghua, et al. The deep reservoir exploration analysis in the Ganchaigou region of north area of western Qaidam Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(2): 136–139, 146.
- [19] 付国民, 李永军, 阎海卿, 等. 柴达木盆地干柴沟地区油气成藏条件及其勘探意义[J]. 甘肃地质学报, 2000, 9(1): 66–73.
- FU Guomin, LI Yongjun, YAN Haiqing, et al. Factors for

- forming oil-gas pool and their exploration significance in Ganchaigou area of Qaidam Basin [J]. *Acta Geologica Gansu*, 2000, 9(1): 66-73.
- [20] 任雪萍. 柴达木盆地晚新生代古气候和化学风化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- REN Xueping. Late Cenozoic paleoclimate and silicate chemical weathering research in the Qaidam Basin [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.
- [21] 刘占国, 张永庶, 宋光永, 等. 柴达木盆地英西地区咸化湖盆混积碳酸盐岩岩相特征与控储机制[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(1): 68-80.
- LIU Zhanguo, ZHANG Yongshu, SONG Guangyong, et al. Mixed carbonate rocks lithofacies features and reservoirs controlling mechanisms in the saline lacustrine basin in Yingxi area, Qaidam Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(1): 68-80.
- [22] 王建功, 张永庶, 孙秀建, 等. 柴西地区新生界湖相碳酸盐颗粒结构多样性及成因[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(6): 1134-1152.
- WANG Jiangong, ZHANG Yongshu, SUN Xiujian, et al. Structural diversity and genesis of Cenozoic lacustrine carbonate particles in western Qaidam Basin [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2021, 50(6): 1134-1152.
- [23] 付国民, 鲁新便, 苏建平, 等. 柴达木盆地干柴沟地区第三系沉积及含油气性[J]. 新疆石油地质, 2001, 22(6): 489-492.
- FU Guomin, LU Xinbian, SU Jianping, et al. The fan-delta sedimentary system and oil and gas characteristics of Tertiary in Ganchaigou area of Qaidam Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2001, 22(6): 489-492.
- [24] 崔俊, 毛建英, 陈登钱, 等. 柴达木盆地西部地区古近系湖相碳酸盐岩储层特征[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(2): 45-53.
- CUI Jun, MAO Jianying, CHEN Dengqian, et al. Reservoir characteristics of Paleogene lacustrine carbonate rocks in western Qaidam Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2022, 34(2): 45-53.
- [25] 欧成华, 蒋书虹, 梁成钢, 等. 柴达木盆地干柴沟—咸水泉地区中深层储集层分布规律[J]. 特种油气藏, 2011, 18(4): 11-13, 135.
- OU Chenghua, JIANG Shuhong, LIANG Chenggang, et al. Reservoir distribution in the mid-deep formation of the Ganchaigou-Xianshuiquan region, Qaidam Basin [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2011, 18(4): 11-13, 135.
- [26] 屈海洲, 郭新宇, 徐伟, 等. 碳酸盐岩微孔隙的分类、成因及对岩石物理性质的影响[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(5): 1102-1117.
- QU Haizhou, GUO Xinyu, XU Wei, et al. Classification and origin of micropores in carbonates and their effects on physical properties of rocks [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(5): 1102-1117.
- [27] 伍坤宇, 廖春, 李翔, 等. 柴达木盆地英雄岭构造带油气藏地质特征[J]. 现代地质, 2020, 34(2): 378-389.
- WU Kunyu, LIAO Chun, LI Xiang, et al. Geological characteristics of hydrocarbon pool in Yingxiogling structural zone, Qaidam Basin [J]. *Geoscience*, 2020, 34(2): 378-389.
- [28] ZHANG Tongwei, FU Qilong, SUN Xun, et al. Meter-scale lithofacies cycle and controls on variations in oil saturation, Wolfcamp A, Delaware and Midland Basins [J]. *AAPG Bulletin*, 2021, 105(9): 1821-1846.
- [29] 易立. 青藏高原隆升对柴达木盆地新生界油气成藏的控制作用[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
- YI Li. Effect of the Tibetan Plateau uplift on the hydrocarbon accumulation of Cenozoic Qaidam Basin [D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2020.
- [30] 贾承造, 庞雄奇, 宋岩. 论非常规油气成藏机理: 油气自封闭作用与分子间作用力[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3): 437-452.
- JIA Chengzao, PANG Xiongqi, SONG Yan. The mechanism of unconventional hydrocarbon formation: Hydrocarbon self-containment and intermolecular forces [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(3): 437-452.
- [31] 庞雄奇, 贾承造, 宋岩, 等. 全油气系统定量评价: 方法原理与实际应用[J]. 石油学报, 2022, 43(6): 727-759.
- PANG Xiongqi, JIA Chengzao, SONG Yan, et al. Quantitative evaluation of whole petroleum system: Principle and application [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(6): 727-759.
- [32] 唐勇, 曹剑, 何文军, 等. 从玛湖大油区发现看全油气系统地质理论发展趋势[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(1): 1-9.
- TANG Yong, CAO Jian, HE Wenjun, et al. Development tendency of geological theory of total petroleum system: insights from the discovery of Mahu large oil province [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2021, 42(1): 1-9.
- [33] 唐勇, 宋永, 何文军, 等. 准噶尔叠合盆地复式油气成藏规律[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 132-148.
- TANG Yong, SONG Yong, HE Wenjun, et al. Characteristics of composite hydrocarbon accumulation in a superimposed basin, Junggar Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(1): 132-148.

(编辑 张 晟)