

引用格式：李剑，田继先，王波，等，2023. 柴达木盆地深层天然气富集条件及勘探潜力 [J]. 地质力学学报，29（5）：618–630. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022084

Citation: LI J, TIAN J X, WANG B, et al., 2023. Accumulation conditions and exploration potential of deep natural gas in the Qaidam Basin [J]. Journal of Geomechanics, 29（5）：618–630. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022084

## 柴达木盆地深层天然气富集条件及勘探潜力

李 剑<sup>1</sup>，田继先<sup>1</sup>，王 波<sup>2</sup>，朱 军<sup>2</sup>，周 飞<sup>2</sup>，李森明<sup>3</sup>，邵泽宇<sup>2</sup>，李海鹏<sup>2</sup>，  
乔柏翰<sup>2</sup>

LI Jian<sup>1</sup>，TIAN Jixian<sup>1</sup>，WANG Bo<sup>2</sup>，ZHU Jun<sup>2</sup>，ZHOU Fei<sup>2</sup>，LI Senming<sup>3</sup>，SHAO Zeyu<sup>2</sup>，LI Haipeng<sup>2</sup>，  
QIAO Bohan<sup>2</sup>

1. 中国石油勘探开发研究院，河北 廊坊 065007；
2. 中国石油青海油田公司勘探开发研究院，甘肃 敦煌 736200；
3. 中国石油杭州地质研究院，浙江 杭州 310000

1. *Research Institute of Petroleum Exploration and Development of PetroChina, Langfang 065007, Hebei, China;*
2. *Research Institute of Drilling and Production Technology, PetroChina Qinghai Oilfield Company, Dunhuang 736200, Gansu, China;*
3. *PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, Hangzhou 310000, Zhejiang, China*

### Accumulation conditions and exploration potential of deep natural gas in the Qaidam Basin

**Abstract:** This paper examines the enrichment conditions of deep natural gas reservoirs in the Qaidam Basin and delineates the exploration potential utilizing seismic, geological, geochemical, well-logging, and drilling data. The findings indicate the presence of two high-quality gas source formations, namely the Jurassic and Paleogene formations, along the northern margin and the western part of the basin, respectively. The formations both exhibit advanced evolution and robust gas-generating capacity. The deep layers along the northern margin consist of bedrocks and Paleogene clastic reservoirs, while the western deep layers feature Paleogene lacustrine carbonate reservoirs. The reservoirs west of Qaidam Basin are widely distributed on the plane and vertically form multiple reservoir cap combinations. The primary pores, dissolution pores, fractures, and other pore types developed in the reservoirs are considered as the storage space for deep gas accumulation. The continuous active deep faults serve as high-quality channels for deep gas sources; furthermore, the formation of deep structures is well-matched with natural gas generation. The deep hydrocarbon source rocks in the western Qaidam Basin are characterized by early and continuous hydrocarbon generation. Early-generated liquid hydrocarbons undergo high-temperature cracking into gas during later burial, resulting in a robust gas-generating capacity and significant potential for deep resources. The widely developed salt rocks, argillaceous rock, and abnormally high-pressure layers in the deep Qaidam Basin contribute to preserving deep natural gas. In conclusion, it is believed that deep gas reservoirs in the Qaidam Basin are enriched in the traps around hydrocarbon-generating sags with developed faults. Key favorable areas for deep-seated natural gas exploration include the basement rocks of the ancient piedmont uplift in the northern margin of Qaidam, the Paleogene clastic rocks in the central structural belt, and the carbonate rocks along the Yingxiongling structural belt in the western part of the basin.

**基金项目：**中国石油天然气股份有限公司前瞻性与基础性重大科技项目（2021DJ0603）

This research is financially supported by the Prospective and Fundamental Major Science and Technology Project of the China National Petroleum Corporation (Grant No. 2021DJ0603).

**第一作者：**李剑（1966—），男，博士，教授级高级工程师，天然气地球化学与油气成藏。E-mail: lijian69@petrochina.com.cn

**通讯作者：**田继先（1981—），男，博士，高级工程师，主要从事天然气综合地质研究。E-mail: tjx69@petrochina.com.cn

**收稿日期：**2022-07-08；**修回日期：**2023-06-10；**责任编辑：**范二平

**Keywords:** deep gas reservoir; accumulation conditions; exploration potential; lacustrine carbonatite; Qaidam Basin

**摘 要:** 为明确柴达木盆地深层天然气勘探潜力，基于地震、地质、地球化学、录井及钻井等多种资料分析了柴达木盆地深层天然气藏的富集条件，并指出了有利勘探方向。结果表明：柴达木盆地深层具备形成大型气田的成藏条件，深层发育柴北缘侏罗系和柴西古近系两套优质气源，演化程度高，生气能力强；柴北缘深层发育基岩和古近系碎屑岩储层，柴西深层发育古近系湖相碳酸盐岩储集层，多种类型储层平面上分布广泛，纵向上组成多套储盖组合，发育的原生孔、溶蚀孔及裂缝等多种孔隙类型被认为是深层气藏富集的储存空间；持续活动的深大断裂是深层气源的优质通道；同时深层构造的形成与天然气生成具有良好的匹配关系，深层烃源岩具有早生烃、持续生烃特征，早期生成的液态烃在后期深埋过程中高温裂解成气，生气能力强，深层资源潜力大；盆地深层广泛发育的盐岩、泥质岩层及异常高压层有利于深层天然气保存。综合认为柴达木盆地深层气藏富集于断裂发育的生烃凹陷周围的圈闭中，柴北缘山前古隆起基岩、腹部构造带古近系碎屑岩和柴西环英雄岭构造带碳酸盐岩是深层天然气勘探有利区。

**关键词:** 深层气藏；富集条件；勘探潜力；湖相碳酸盐岩；柴达木盆地

**中图分类号:** TE122. 3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1006-6616 (2023) 05-0618-13

**DOI:** 10. 12090/j. issn. 1006-6616. 2022084

0 引言

深层—超深层地层已经成为中国油气重大发现的主阵地，其油气资源达 761 亿吨油气当量，勘探潜力巨大（孙龙德等，2013）。中国在塔里木、鄂尔多斯、四川等盆地发现了多个深层领域的大型气田（李剑等，2019），塔里木盆地轮探 1 井在寒武系获得高产工业气流，其埋藏深度超过 8200 m（杨海军等，2020）；四川盆地在埋深大于 5000 m 的地层中发现多个大气田（郭旭升等，2020），寻找深层油气资源已成为目前油气勘探的重点（张光亚等，2015）。柴达木盆地天然气资源丰富，已发现涩北、台南、东坪、牛东、尖北、开特米里克等多个气藏，累计探明天然气地质储量  $3938\times10^8\text{ m}^3$ ，但主要以埋深在 3500 m 以上的浅层为主，探明率仅 12.2%，处于勘探早期（付锁堂等，2016）。近年来，在柴北缘东坪、尖顶山及昆特依构造带深层基岩及柴西英雄岭构造带深层均获得了工业气藏，其中昆 2 井埋深超过 7000 m，狮新 58 井埋深超过 5500 m，表明柴达木盆地深层具备形成油气藏的地质条件（石亚军等，2020；田继先等，2020a）。

相关学者曾对柴达木盆地已发现气藏进行了成藏等相关研究（付锁堂等，2009，2013；田光荣等，2011；马峰等，2014；田继先等，2014，2017；张永庶等，2018；石亚军等，2020），指出

柴北缘侏罗系湖相淡水煤系烃源岩分布面积广、演化程度高；东坪及马仙等构造气藏以基岩及碎屑岩储层为主，基岩以溶蚀孔和裂缝为主，碎屑岩以粒间孔为主，浅层物性好，深层也有好的储层段发育，已发现的气藏紧邻生烃凹陷，为典型源外成藏，古隆起区是有利勘探区；柴西主要发育古近系咸化湖相烃源岩，凹陷区具备形成天然气的成藏条件，但油气同出，点多面广，纯气藏少，发育湖相碳酸盐岩孔缝储层，具有自生自储成藏特征，目前未有规模气藏发现。总体上柴达木盆地天然气勘探以浅层为主，深层天然气勘探和研究程度较低，对于全盆地深层天然气成藏条件、资源潜力及勘探方向等方面研究相对薄弱，比如柴北缘深层是否发育优质储盖组合？多期构造活动条件下是否具备良好封盖条件？柴西以油田为主，深层是否具备形成规模气田条件？深层有利勘探方向是什么？等等。在前期对柴达木盆地深层烃源岩分布特征、成熟度、沉积储层特征研究基础上（Tian et al.，2018，2021；田继先等，2019，2020a），结合最新地质、地球化学、录井及钻井资料，分析了柴达木盆地深层气藏形成的有利地质条件，指出了有利勘探方向，为柴达木盆地深层天然气领域的勘探突破提供技术支持。

1 区域地质背景

柴达木盆地是印支运动以后形成的中—新生

代山间地块盆地，为典型的内陆咸化湖盆，四周受昆仑山、祁连山和阿尔金山所夹持（付锁堂等，2016；图 1）。受燕山运动、喜马拉雅运动 2 期构造运动的影响，发育柴北缘坳陷、柴东坳陷和柴西坳陷 3 个一级构造带，形成了多个由挤压、走滑作用形成的大型构造带。柴北缘发育祁连山隆起带、阿尔金山前隆起带、马仙隆起带和腹部构造带等多个构造单元。柴西发育昆仑山前带、环英雄岭构造带和中央古隆起带三大构造带，形成了数量众多的背斜、断背斜等构造圈闭，圈闭面积大，数量多（张金明等，2021；完颜泽等，2023）。地层上盆地主要由中—新生界陆相沉积物组成，即中生界侏罗系、新生界古近系和新近系、第四系。沉积上湖盆中心具有明显迁移规律，中生界沉积中心位于柴北缘，古—新近系湖盆中心迁移至柴西坳陷，第四系主要分布在柴东坳陷。此外，在盆地北部深层发育部分古生界石炭系和中生界白垩系，但在该地层中未发现良好的油气显示，不是主要目的层。柴北缘烃源岩以中—下侏罗统煤系源岩为主，厚度为 100~2000 m，埋深大，演化程度高，生烃能力强。柴北缘储层以基岩和上覆碎屑岩为主，基岩包括花岗岩、变质岩等，新

近系发育河流—三角洲—湖泊沉积体系，河流相砂岩和互层泥质岩组成良好的储盖组合。目前柴北缘发现了冷湖、马北、牛东砂岩背斜油气藏和东坪、尖顶山等基岩断背斜气藏，深层发现了昆特依气藏及碱山基岩、冷湖七号下干柴沟组上段（ $E_3^2$ ）砂岩等含气构造，表明柴北缘具备深层气藏成藏条件。柴西以咸化湖相烃源岩为主，受湖盆演化迁移影响，柴西南以下干柴沟组上段（ $E_3^2$ ）烃源岩为主，而柴西北发育新近系的上干柴沟组（ $N_1$ ）烃源岩，也是柴西富烃凹陷主力源岩，山前演化程度低，而柴西腹部演化程度高，具有生烃强度大、分布面积广的特征（冯德浩等，2022）。受咸化沉积环境影响，昆仑山前和阿尔金山前以新近系砂岩油藏为主，而柴西湖盆腹部广泛发育湖相碳酸盐岩沉积，面积大，单层厚度薄，纵向叠置，储层以裂缝和溶孔为主，是目前油气勘探重点领域，已发现了英西、大风山等自生自储和下生上储油气藏（范昌育等，2015；李培等，2021）。虽然柴西以石油勘探为主，但多个构造带发现了天然气显示，特别是英中、黄瓜茆及开特地区多口井见到工业气流，证实柴西不但是富油坳陷，同时也是天然气勘探重要接替领域。

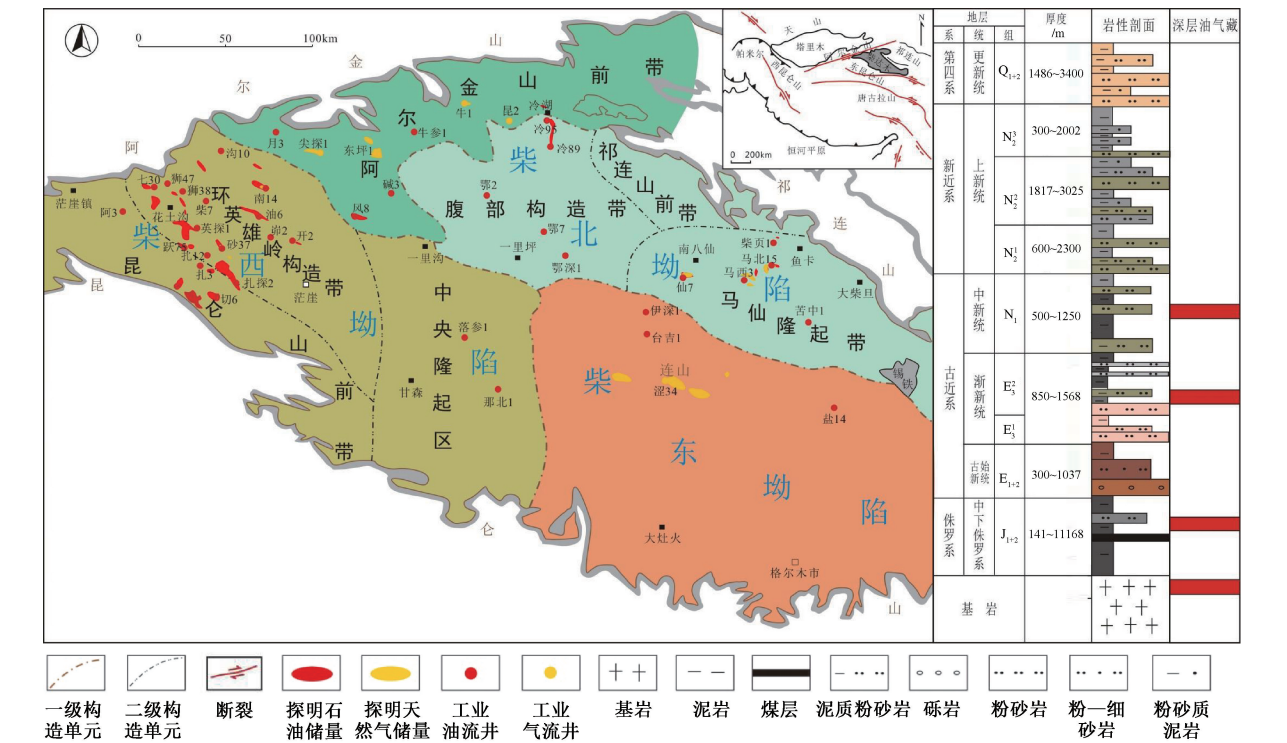


图 1 柴达木盆地构造分区图及综合柱状图

Fig. 1 Structural zoning map and comprehensive bar chart of the Qaidam Basin



## 2 深层天然气富集条件

### 2.1 烃源岩发育特征

勘探实践已证实,柴西天然气主要来源于古近系咸化湖盆烃源岩,而柴北缘天然气主要来源于中一下侏罗统煤系烃源岩(田继先等,2017)。侏

罗系烃源岩在柴北缘分布广泛,厚度为100~2000 m,岩性以深灰色泥岩和灰黑色泥岩为主,部分层段含煤,泥岩有机碳含量平均为1.3%~2.7%(翟志伟等,2013)。盆地模拟得出的柴达木盆地深层主力气源成熟度分布规律表明,柴北缘侏罗系烃源岩 $R_0$ 主要分布在0.5%~2.0%,热演化程度从山前到盆地腹部逐渐增加(图2)。

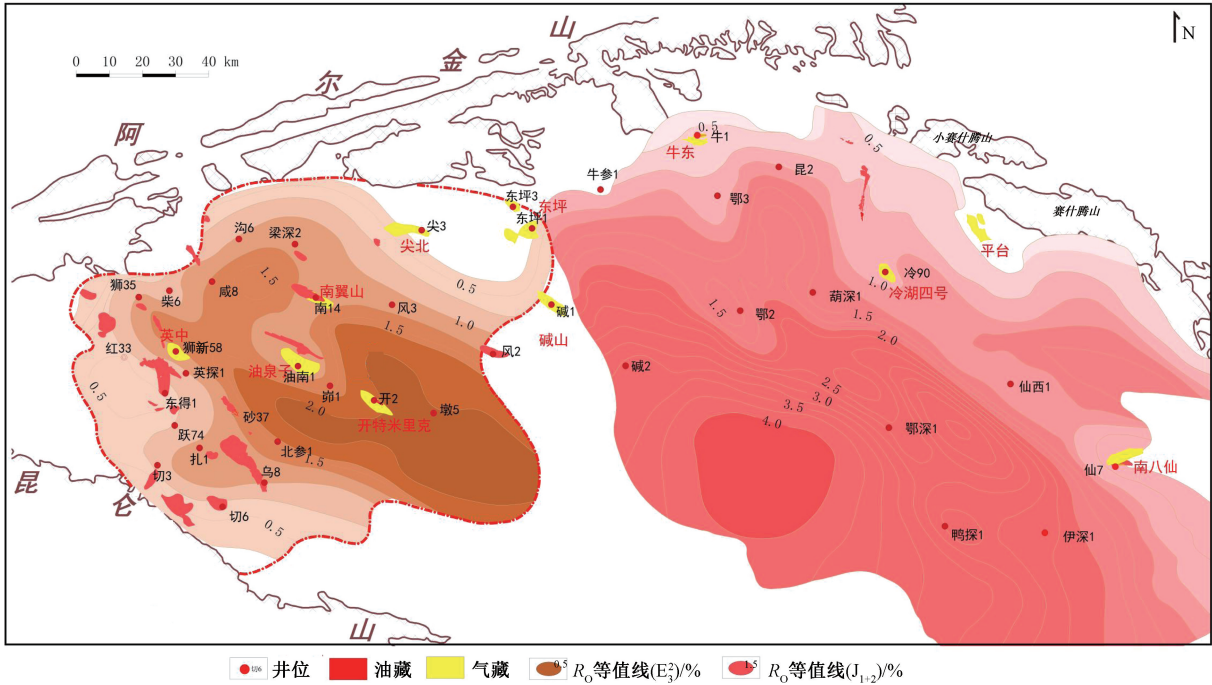


图2 柴达木盆地深层主力气源 $R_0$ 等值线分布图(据田继先等,2017;郭泽清等,2017修改)

Fig. 2 Distribution of  $R_0$  isoline of the deep main gas source in the Qaidam Basin (modified from Tian et al. , 2017; Guo et al. , 2017)

柴西坳陷盆地腹部 $R_0$ 在1.5%以上,处于生气阶段,生气强度大,资源量接近 $8303.4\times10^8\text{ m}^3$ ,气源充足,具备形成深层大气田的基础条件。柴西烃源岩与柴北缘侏罗系烃源岩相比,总体埋深较浅,目前发现了大量油田,且近年来在英雄岭地区发现了多个古近系烃源岩来源的气藏,表明其具备形成天然气藏条件。由于湖盆迁移的影响,柴西主要发育下干柴沟组上段( $E_3^2$ )和上干柴沟组( $N_1$ )两套咸化湖相烃源岩,这两套烃源岩有机碳含量平均为0.6%~1.7%,有机质类型以 $\text{II}_1$ 和 $\text{II}_2$ 型为主(张斌等,2018),并且在纵向上相互叠置,在平面上则具有互补的特征,热演化程度趋势为自西向东、由南向北逐渐增加。在盆地边缘其烃源岩的埋深较浅,有机质热演化程度较低,因此主要以生油为主,但在盆地腹部,有机质热演化程度高,烃源岩则以生气为主。特别是主力生气层下干柴沟组上段( $E_3^2$ )烃源岩具有厚

度大、分布广的特点,源岩面积达 $1.2\times10^4\text{ km}^2$ , $R_0$ 分布范围为0.26%~2.00%(图2),在柴西腹部 $R_0$ 达到1.30%以上,达到生气阶段,具备形成深层大气田的物质条件。近年来发现的英中狮新58井 $E_3^2$ 碳酸盐岩气藏埋深在5300 m以上,证实该套烃源岩能够为深层气藏的形成提供优质气源条件(曾旭等,2018)。

### 2.2 储层发育特征

一般来说,深部地层的原生孔隙会随埋深的增大而大幅度地减少,故此时原生孔隙很难作为其优质储集空间,但次生孔隙的发育可为深层气藏富集提供优质储集空间(吴迅达等,2021)。柴达木盆地深层储层岩性主要为碎屑岩、湖相碳酸盐岩和基岩。其中柴西坳陷深层主要为古近系 $E_3^2$ 和新近系 $N_1$ 湖相碳酸盐岩储层;柴北缘坳陷的腹部深层主要为古近系至新近系( $E_3^2-N_1$ )的砂岩储层,而阿尔金山前和祁连山前深层主要为基岩



储层。

柴北缘坳陷深层主要发育基岩和砂岩两类有利储层。第一种为基岩储层，其与上覆路乐河组  $E_{1+2}$  泥岩组成良好的储盖组合，受燕山运动影响，柴北缘坳陷基底长期处于隆升状态，受风化、剥蚀、淋滤等作用，形成了大面积分布的基岩缝洞型储集体 (Guo et al., 2017)。勘探证实，不同岩性的基岩均发育有效储层，形成裂缝和溶蚀孔缝双重储集空间 (图 3a—3c)。目前发现的东坪 17 井区、昆特依及尖顶山深层气藏储层已被证实是基岩储层，岩性以花岗岩、变质岩为主，基岩储集空间类型主要包括溶蚀缝、溶蚀孔和构造缝等，孔隙度为 2%~5%，渗透率低于 1 mD。研究表明，基岩储层物性在纵向上受埋深影响小，深层储集空间保存良好，有效储层纵向上厚度可达 500 m 以上，横向变化不大，分布稳定 (马峰等, 2014)。

基岩储层在阿尔金山前带、祁连山前带及马仙隆起带广泛分布，是柴北缘坳陷深层天然气勘探的主要储层类型，勘探潜力巨大。第二种为砂岩储层，主要为古近系和新近系内部砂泥岩组成的储盖组合，柴北缘古近系主要以河流-三角洲-湖泊沉积体系为主，以下干柴沟组上段 ( $E_3^2$ ) 为例 (图 4)，三角洲相砂岩厚度大而且横向分布稳定 (陈吉等, 2013)。该套储层在南八仙等古隆起区具有极好的储层物性，原生孔隙发育，随着埋深增加及成岩作用的增强，深层主要发育次生孔隙，形成了原生孔隙、次生孔隙、混合孔隙等储集空间 (田继先等, 2022)。柴北缘昆 2 井在深层 6616 m 发现了孔隙度达 10% 左右的溶蚀孔 (图 3d—3f)，仙西 1 井在深层发现了保存良好的原生粒间孔隙，埋深 4800 m 以上，但孔隙度达 10% 以上，渗透率在 1 mD 以上，表明深层具备形成优质储层的条件。

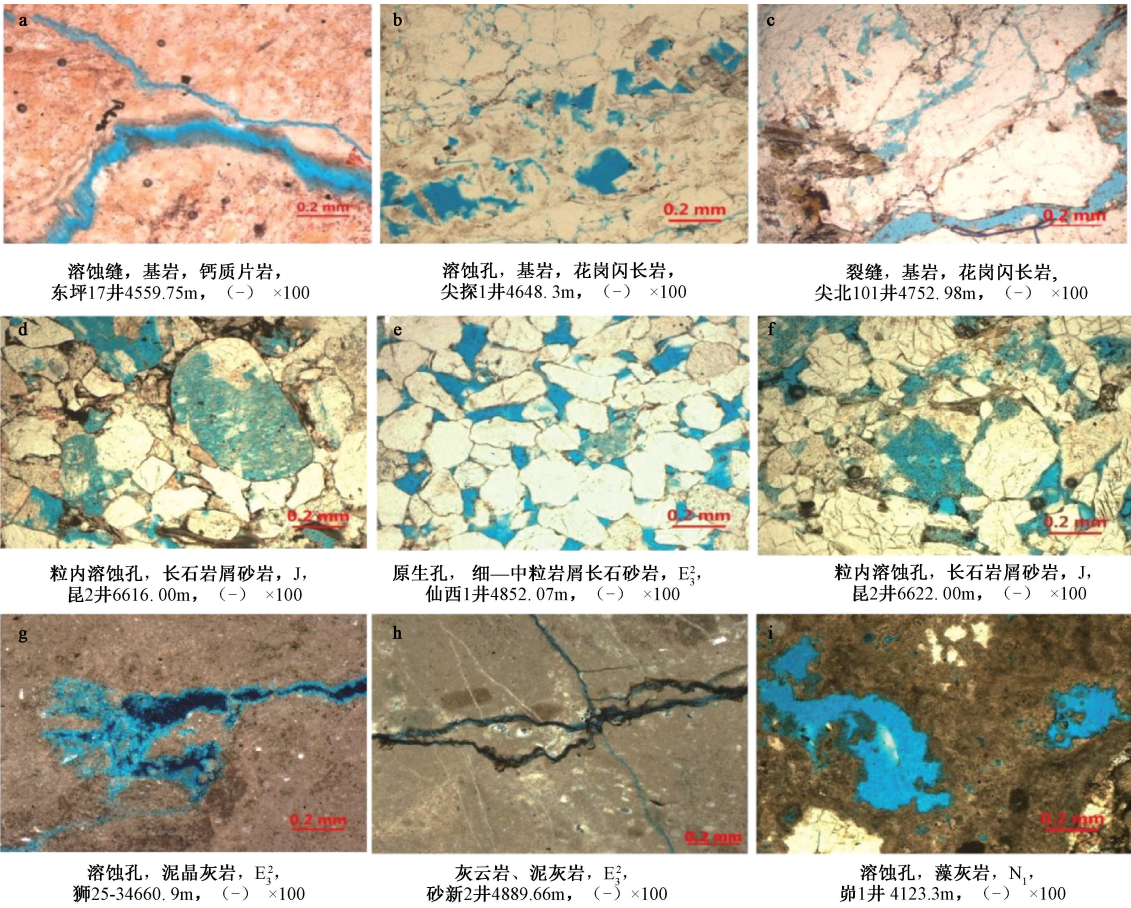


图 3 柴达木盆地深层储集空间特征

Fig. 3 Spatial types of deep reservoirs in the Qaidam Basin

柴西坳陷古近系  $E_3^2$  和新近系  $N_1$  发育的湖相碳酸盐岩主要分布在英雄岭构造带及以北地区，分布面积约 8000 km<sup>2</sup>，与稳定分布的大段盐岩层和

广覆分布的泥岩层组成良好的储盖组合 (田继先等, 2022)。古近纪以来，柴西总体处于相对稳定的构造阶段，湖盆面积扩大并形成含氧充足的沉

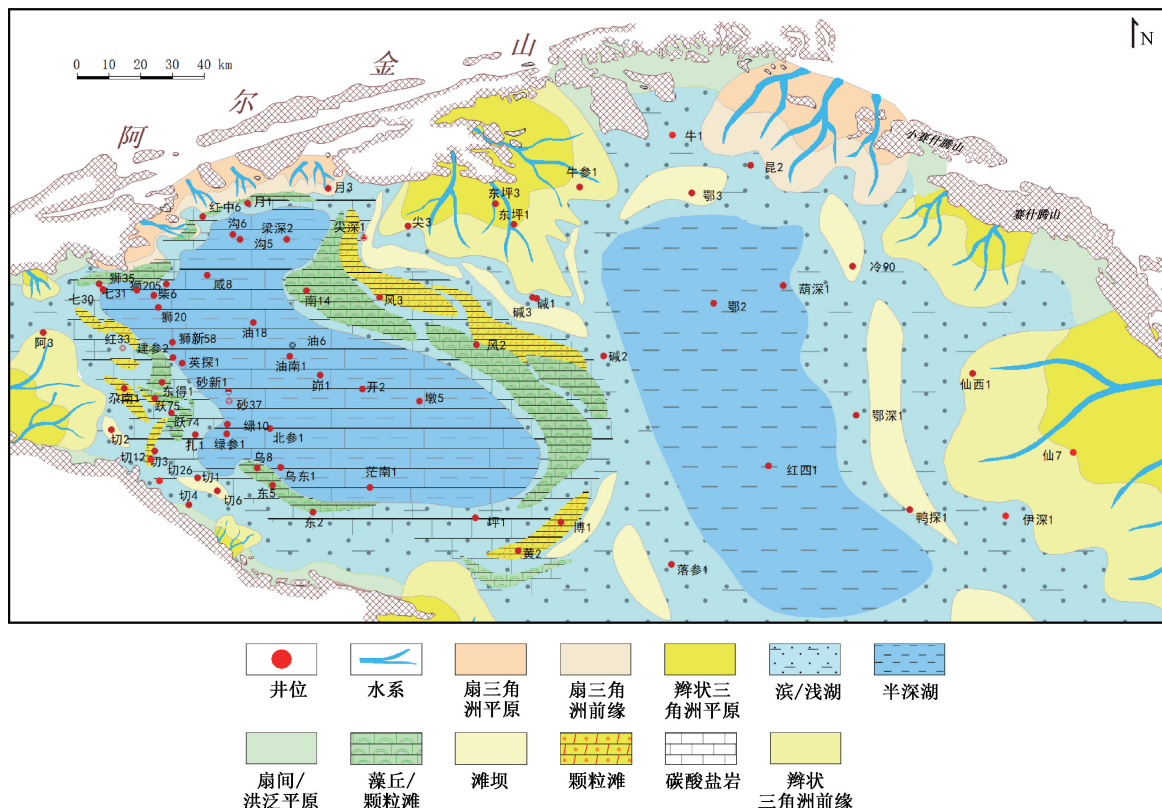


图 4 柴达木盆地古近系  $E_3^2$  沉积相

Fig. 4 Sedimentary facies of  $E_3^2$  in the Qaidam Basin

积环境, 故在该阶段碳酸盐岩较为发育 (图 4)。柴西主要发育灰云坪、滩坝、藻席等易形成储层的沉积微相, 储层主要以泥晶灰质白云岩为主, 包含部分砂屑灰质白云岩和藻灰岩, 与泥质烃源岩互层叠置, 有利于近源聚集成藏。柴西的储集空间类型为晶间孔、溶蚀孔、角砾化孔洞和裂缝, 且具有双重孔隙介质特征 (黄成刚等, 2017)。基质孔隙以晶间孔和溶孔为主, 分布广泛, 扩大了油气储存空间 (图 3g—3i)。除了基质孔隙外, 英西部分地区还发育多级别裂缝, 在不同区域、不同储层中裂缝类型及发育尺度也有所不同。由基质缝+基质孔+裂缝构成的孔缝复合疏导往往综合控制着油气运聚。目前柴西地区钻至 4500 m 以下的井取心较少, 但从已有的英西地区岩心样品物性统计来看, 孔隙度分布范围为 6.0%~15.2%, 中值 7.8%, 平均孔隙度为 8.3%。岩心分析渗透率变化范围为 0.0001~40.2000 mD, 中值为 0.05 mD, 平均值为 0.56 mD。虽然整体为致密储层, 但部分地区溶孔及微裂缝发育, 可形成优质储层, 特别是英中地区可见到 TSR 作用形成的高含硫化氢气藏, 表明该地区具备 TSR 溶蚀条件 (田继先等,

2020b)。英中地区狮新 58 井在 5502~5514 m 获得高产工业气流, 成像测井显示狮新 58 井孔洞发育程度明显好于英西地区, 表明深层具备形成优质碳酸盐岩储层的条件。柴西深层碳酸盐岩储层在全区具有大面积薄层分布、纵向多层叠置的特点 (图 5), 储层的强非均质性为大面积碳酸盐岩深层气藏富集提供了良好的储集条件。

### 2.3 圈闭发育类型

柴达木盆地受燕山、喜马拉雅等多期构造运动影响 (吴颜雄等, 2013; 付锁堂等, 2015), 深层发育大型背斜、断背斜及构造-岩性圈闭等多类型构造圈闭。在不同构造带发育的圈闭类型有所差异, 柴北缘的赛什腾凹陷、昆伊特凹陷及坪东凹陷深层以背斜-断背斜构造为主, 此类圈闭形成早, 具有古圈闭特征, 有利于油气早期捕获成藏, 昆 2 井、东坪 17 井区等深层气藏便是此类型 (图 6); 此类圈闭在柴北缘数量多、面积大, 是深层天然气勘探的重要类型。柴北缘腹部构造带深层及柴西环英雄岭构造带则以晚期大型背斜圈闭为主 (图 7), 圈闭构造幅度大、分布范围广, 主要形成于晚喜马拉雅运动之后, 以晚期成藏为主,



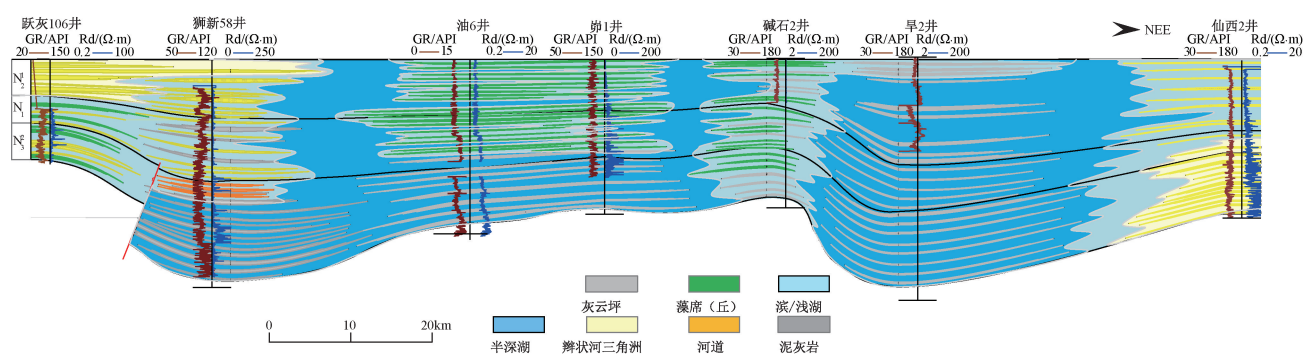


图 5 柴西-柴北缘  $E_3^2-N_2^1$  连井沉积相图

Fig. 5 Sedimentary facies of  $E_3^2-N_2^1$  from west to north of the Qaidam basin

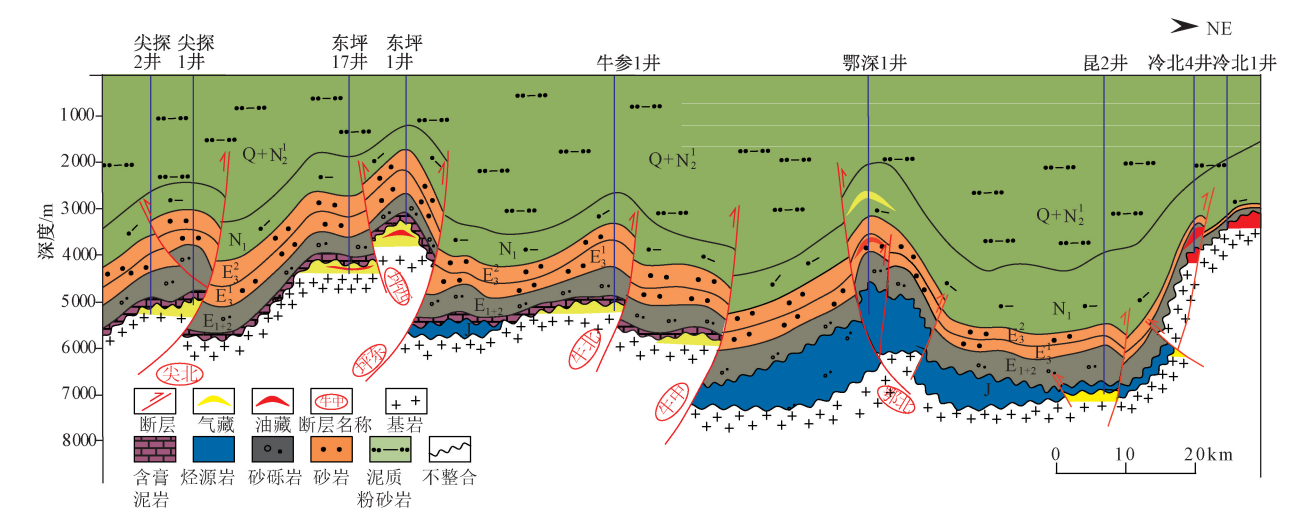


图 6 柴北缘阿尔金山前复式隆起带油气藏地质剖面图

Fig. 6 Geological profile of oil and gas reservoirs in the Altun piedmont complex uplift belt in the northern margin of the Qaidam Basin

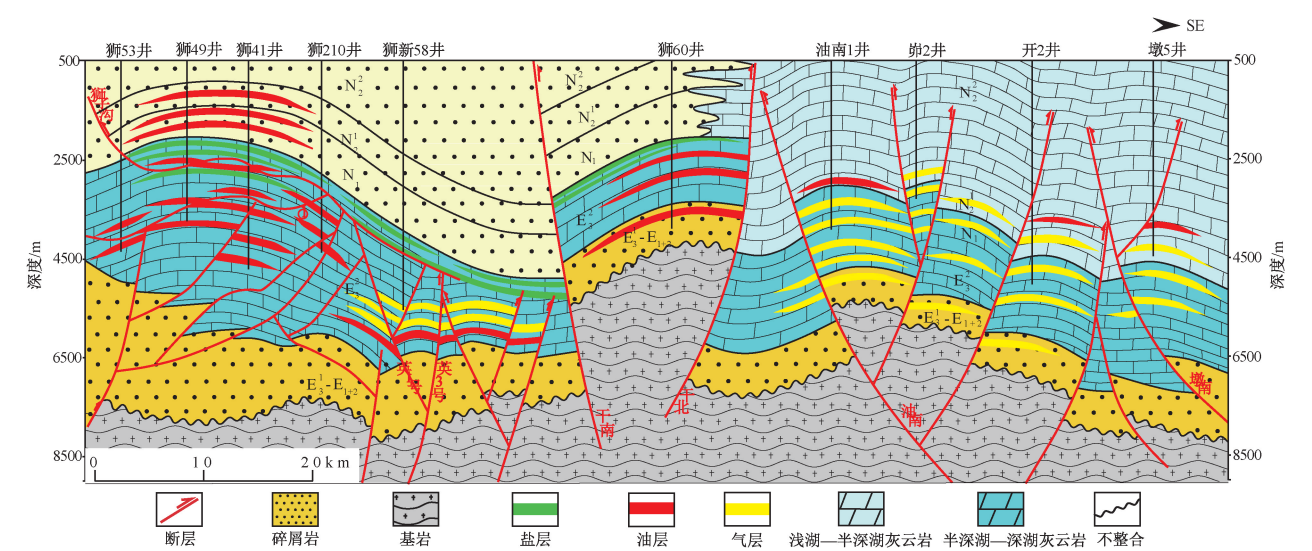


图 7 柴西地区英西-英中-英北油气藏地质剖面图

Fig. 7 Geological profile of the Yingxi-Yingzhong-Yingbei oil and gas reservoirs in the western Qaidam Basin

此类圈闭在柴西及柴北缘腹部构造带广泛发育，仙西 1 井及狮新 58 井所钻遇气藏为此类型圈闭。



总之,受多期构造运动影响,柴达木盆地深层构造圈闭数量多、面积大,目前勘探以浅层圈闭为主,深层勘探程度低,资源潜力巨大。

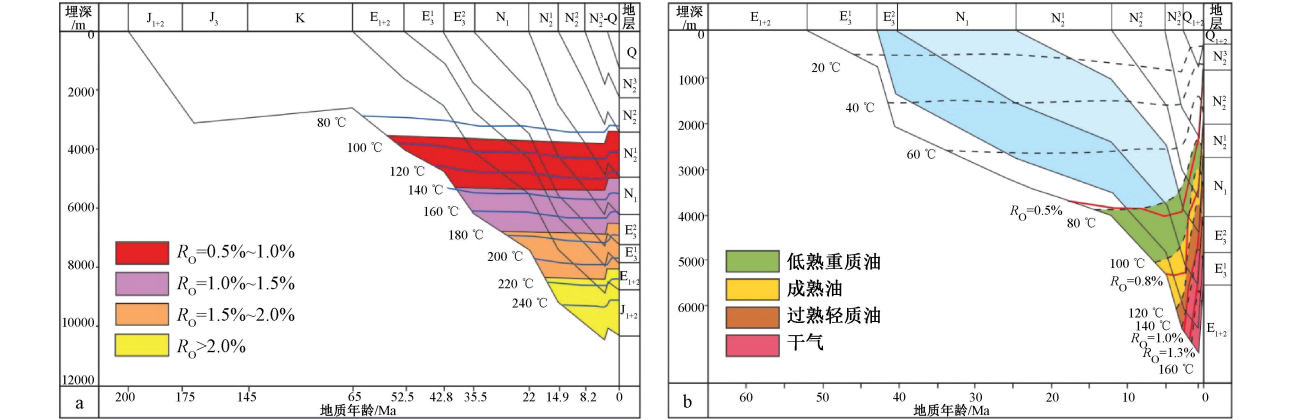
2.4 输导体系发育情况

柴达木盆地深层烃源岩埋深大、距储集层远,如柴北缘伊北凹陷生烃深度最深可达 15000 m,因此输导体系是深层气成藏的关键因素之一。受晚喜马拉雅运动影响,柴达木盆地发育以深大断裂为主,由断层、不整合、砂层及裂缝等多种输导体系组成多种油气输导模式。第一种是断层与不整合组成的输导模式,主要分布在山前盆缘古隆起区,由于古隆起区长期处于凹陷高部位,远离生气中心,深层凹陷内生成的天然气依靠深大断裂和不整合面运移至圈闭聚集。目前柴北缘已发现的深层尖探 1 井、牛参 1 井及昆 2 井等气藏便属于此类型(图 6),此类运移模式也是深层天然气勘探的重要类型。第二种是深浅两套断裂组成的接力输导模式,该类型主要分布在盆地腹部大型构造带上,比如柴北缘鄂博梁-冷湖构造带(图 6)。柴北缘早期深层断裂均有控凹作用,侏罗系烃源岩沿着深层断裂分布,而晚期浅层滑脱层与深层断裂沟通,有利于深层天然气的聚集成藏,目前已发现的仙西 1 井及鄂博梁深层气藏为此类型。第三种类型为源内输导体系,主要是深层烃源岩生成天然气通过微裂缝及断裂等运移至附近圈闭聚集成藏,该类型主要分布在柴北缘侏罗系及柴西古近系,以源内气藏为主。柴西古近系及柴北缘侏罗系烃源岩分布广,源内多类型储层发

育,泥质烃源岩生成的天然气能够通过微裂缝运移至附近聚集成藏,柴西狮新 58 井气藏为此类型气藏(图 7)。因此,柴达木盆地广泛分布由深大断裂与相应输导体系组成的多类型输导模式,使得深层生烃凹陷生成的天然气能够运移至不同类型圈闭聚集成藏,从而在深层形成多种类型的油气藏。

2.5 源储配置关系

通常情况下,除构造圈闭外,深层圈闭形成较早,主力生气期必须晚于岩性圈闭形成期才可形成深层气藏。柴北缘侏罗系烃源岩演化表明,侏罗系烃源岩生烃时间早,为古—始新世。以柴北缘拗陷南部的伊北凹陷(图 1 中腹部构造带与马仙隆起带的交汇区)为例,侏罗系烃源岩在  $E_{1+2}$  沉积时期已具备生烃能力,在  $E_3$ — $N_1$  沉积时期进入成熟阶段,达到生油高峰期,而在  $N_1$  沉积末期进入大量生气阶段,  $R_o$  已达到 1.3%,现今为过成熟干气阶段,  $R_o$  在 3.0% 以上(图 8a)。侏罗系烃源岩早期生成的原油充注成藏于先前形成的古圈闭中,在后期深埋过程中,由于温度增加,早期原油可裂解成气藏,目前已发现的深层尖北、东坪气藏属于此类型(田继先等, 2020a)。柴北缘拗陷腹部构造带深层大型圈闭定型于晚喜马拉雅期(付锁堂等, 2015),现今侏罗系深层高一过成熟度演化阶段的烃源岩仍然是其晚期深层气源的主要来源之一,因此柴北缘拗陷构造带大量生气时期与深层构造形成时期具有良好的时间和空间匹配关系,完全具备了形成深层气藏的条件。



a—柴北缘拗陷伊北凹陷侏罗系; b—柴西拗陷英雄岭地区古近系

图 8 柴达木盆地烃源岩演化史图

Fig. 8 Hydrocarbon generation history of the Qaidam basin

(a) Evolution history of the Jurassic source rocks in the Yibei Sag, northern margin of the Qaidam Depression; (b) Evolution history of the Paleogene source rocks in Yingxingling area, western Qaidam Depression

相对侏罗系烃源岩,柴西古近系烃源岩埋藏较浅,从柴西坳陷英雄岭地区古近系  $E_3^2$  烃源岩演化来看(图 8b),早期以生油为主,主要生气期为  $N_2$  以后,目前处于成熟—高成熟阶段,英雄岭构造带构造定型于  $N_2$  末期,与生气期匹配度较好,因此具备形成气藏的条件。柴西是一个典型的高地温梯度坳陷(刘震等,2012),故深层具备形成二次裂解气条件,早期生成的原油在经历了后期深埋后,可裂解成天然气,从而为深层天然气成藏提供优越的源储配置关系。

## 2.6 优质封盖条件

总体上柴达木盆地广泛发育的盐岩、泥质岩层及异常高压层有利于深层天然气保存。其中柴北缘坳陷阿尔金山前  $E_{1+2}$  广泛发育膏泥岩,为下部基岩成藏提供了优质盖层(马峰等,2014),东坪及尖北气藏便为此类型盖层;北缘祁连山前、腹部构造带等地区深层主要以泥岩盖层为主,柴北缘坳陷滨/浅湖—半深湖相泥岩分布广泛,有利于形成优质盖层,目前已发现的昆 2 井、仙西 1 井等气藏都是以泥岩盖层为主。柴西咸化沉积环境形成的大段盐岩层和泥岩层为深层气的优质区域盖层,如英雄岭地区盐岩分布广、厚度大(图 7),说明英中地区发育了大套的优质盖层,具备形成高产工业气流的条件。除盐岩外,以开特—黄瓜崂为代表的泥质盖层为深层气藏的保存提供了优质的封盖条件。柴达木盆地受新生界快速沉积影响,深层广泛分布异常高压,钻井显示深层压力系数在 1.5 以上,异常高压层同样为深层气藏的保存提供优质条件,超压层不仅可以作为油气运移的动力源,也可以阻止深层气藏向上运移,已发现的鄂博梁Ⅲ号、冷湖七号等深层气藏都具有异常高压特征(郭佳佳等,2018),表明异常高压对于深层气藏的保存具有重要作用。因此,广泛发育的盐岩、泥质岩层及异常高压层有利于深层天然气保存。

## 3 深层有利勘探方向

柴达木盆地侏罗系和古近系两套烃源岩分布广、埋深大、演化程度高,因此具备了形成大气田的基础条件,而多种输导体系则可为深层天然气运移提供优质通道。根据上述分析认为柴北缘坳陷北缘山前古隆起、腹部构造带和柴西环英雄

岭构造带深层是有利的天然气勘探方向。

### 3.1 柴北缘坳陷山前古隆起区

柴北缘坳陷山前古隆起区离侏罗系凹陷近,圈闭类型多样、以背斜—断背斜构造为主、具有古圈闭特征,侏罗系烃源岩与基岩和砂岩储层、含膏泥岩和泥岩盖层形成了良好的生储盖组合,断裂、不整合等输导体系较为发育,侏罗系和古近系的勘探前景广阔。柴北缘坳陷山前古隆起以基岩和砂岩储层为主,主要包括阿尔金山前、祁连山前及马仙古隆起深层,其浅层已发现多个油气藏,证实该区域成藏条件优越。古隆起区紧邻侏罗系生烃凹陷,断裂、不整合等输导体系较为发育,凹陷内生成的天然气在压差和浮力等油气运移动力的作用下,自凹陷内部向古斜坡运移聚集(图 7)。其中阿尔金山前包括东坪、尖顶山、牛中、昆特依等构造带,圈闭数量多、面积大,在断层附近的基岩中,裂缝极为发育,这为油气运移提供优良的运移通道,同时也是水和有机酸运移的重要通道,因此极大改善了深层基岩的储集空间,是侏罗系煤型气勘探的重点领域;东坪、尖顶山及昆特依等构造深层多口井见到工业气流,证实该地区是深层天然气勘探的有利地区。祁连山前带紧邻冷湖及赛什腾生烃凹陷,侏罗系烃源岩演化程度高,具备较强生烃能力;祁连山前深层构造活动强烈,分布多种类型的圈闭,深层基岩及碎屑岩储层都有发育,特别是深层碎屑岩储层,以河流相砂岩为主,有利于形成优质储层;目前祁连山前深层勘探程度低,但在冷科 1 井及平台地区等见到良好的油气显示,表明该地区具备形成天然气的成藏条件。马仙古隆起区浅层已发现的油田有南八仙油气田和马北油气田,证实该地区具备较强生烃能力,该地区深层圈闭面积大、数量多,资源潜力大,为深层天然气勘探的有利区域之一。

### 3.2 柴北缘坳陷腹部构造带

柴北缘坳陷腹部构造带以晚期大型背斜圈闭为主,侏罗系烃源岩与碎屑岩储层、上覆泥岩盖层形成了良好的生储盖组合,深浅两套断裂组成的接力输导模式为油气运移提供动力,  $E_3^2$ — $N_1$  具有良好的勘探前景。受晚喜马拉雅运动影响,柴北缘坳陷的腹部构造带主要以晚期大型背斜圈闭为主,圈闭面积大、幅度高,发育深层断裂(图 9),包括盆地腹部的鄂博梁Ⅱ、Ⅲ号以及冷湖

六、七号等构造。侏罗系烃源岩厚度大、分布范围广、成熟度高、生烃能力强。深层储层以碎屑岩为主，为河流三角洲相砂岩，虽然深层碎屑岩储层成岩作用强，物性致密，但由于异常高压、溶蚀作用等影响，深层部分层段可发育好的储层。仙西 1 井在接近 5000 m 深度发现该段储层孔隙度达 10%，渗透率在 1 mD 以上；昆 2 井在

6600 m 深的侏罗系砂岩储层中发现了大量溶蚀孔，其孔隙度为 10% 左右。该地区虽然烃源岩埋深大，但深大断裂发育，而且圈闭幅度大，深层背斜完整。仙西 1 井在深层  $E_3^2$  获得工业气流，鄂深 1 井等在深层 4600 m 左右有良好的油气显示，表明晚期深层构造带是深层天然气勘探的有利地区。

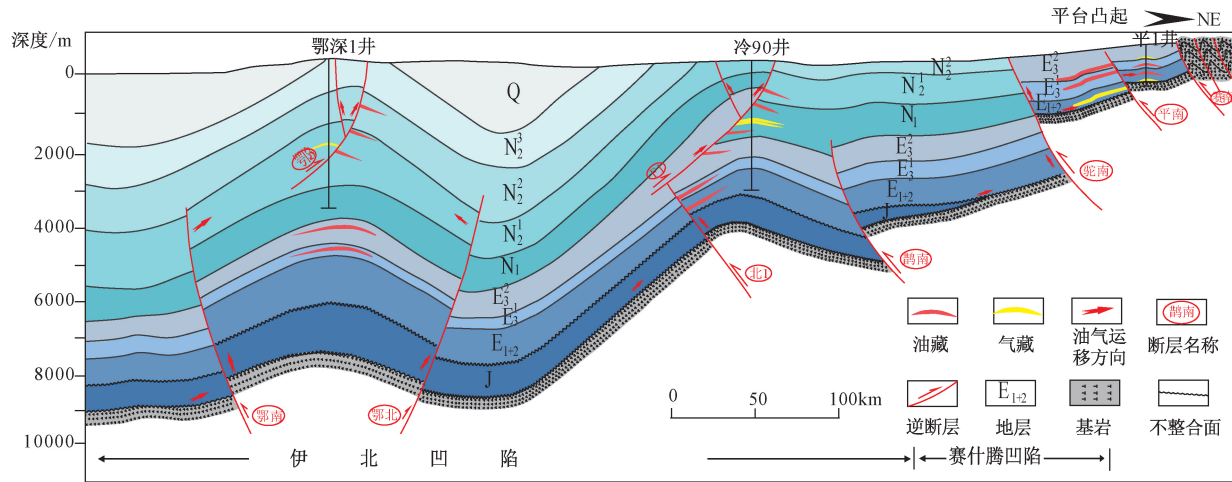


图 9 柴北缘深层晚期构造带成藏模式图  
Fig. 9 Accumulation model of the late tectonic zone in the deep of the northern margin of the Qaidam Basin

3.3 柴西环英雄岭构造带

柴西环英雄岭构造带以晚期大型背斜圈闭为主， $E_3^2$  和  $N_1$  烃源岩与碎屑岩储层、上覆泥岩盖层形成了良好的生储盖组合，深层油气通过微裂缝及断裂等输导体系运移， $E_3^2$  和  $N_1$  是下一步深层天然气勘探的重点方向。柴西环英雄岭地区包括英雄岭主体构造带的英西-英中-英东、南翼山-有圈子和黄瓜崂-开特米里克-油墩子等多个含气构造带。该地区处于  $E_3^2$  气源中心，有机质丰度高，分布面积广，埋深大，成熟度  $R_o$  达 1.0% 以上，生气强度达到  $200 \times 10^8 \sim 260 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ，具备形成大气田的条件（郭泽清等，2017）。英雄岭地区发育大面积优质的碳酸盐岩储层，在湖盆不断迁移、咸化水体震荡频繁的沉积环境下，发育了多种细粒碳酸盐岩沉积物，其有效储层具有大面积、多层系的特点（图 5）。深层碳酸盐储层中裂缝、溶蚀孔洞、基质孔发育和角砾化孔洞较为发育，同时深层碳酸盐储层受有机酸及 TSR 等多种作用影响，为优质储层的形成提供了物质基础。在构造上，英雄岭深层发育油墩子、黄瓜崂、开特米里克、英中等多个构造圈闭。深大断裂及微裂缝的发育有利于沟通深层气源。目前在该地区已发现

英中、南翼山、开特等深层气藏，证实该领域深层具备形成大型气藏的条件。

4 结论

- (1) 柴达木盆地发育埋深大、成熟度高、生烃能力强的侏罗系和古近系两套优质气源，生气期与深层圈闭形成期在时空上有良好的匹配关系，为深层气藏的形成提供了物质基础。
- (2) 柴达木盆地深层发育基岩、碎屑岩和湖相碳酸盐岩等多类型储层，形成多套储盖组合，深层发育原生孔、溶蚀缝、溶蚀孔和构造缝等多种储集空间类型，为气藏的富集提供了储存空间，基岩储层物性不受深度控制，碳酸盐岩和碎屑岩虽然在深层容易致密，但在有机酸溶蚀、岩相等因素影响下，依然可以在深层发育优质储层，且多口井的钻探结果也证实了深层具备形成大规模优质储层的条件。
- (3) 生气凹陷周围的圈闭是深层天然气聚集的有利区域，且多种输导体系为深层天然气运移提供优质通道，深大断裂是主要运移通道。而盆地内广泛发育的盐岩、厚层泥质岩层及异常高压



层则有利于深层天然气保存。综合研究区地质特征和钻井显示,笔者认为柴北坳陷北缘山前古隆起、腹部构造带和柴西环英雄岭构造带深层是有利的深层天然气勘探方向。

## References

- CHEN J, SHI J A, LONG G H, et al., 2013. Sedimentary facies and models for the Palaeogene-Neogene deposits on the northern margin of the Qaidam Basin, Qinghai [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 33 (3): 16-26. (in Chinese with English abstract)
- FAN C Y, WANG Z L, WANG A G, et al., 2015. Mechanisms for overpressure generation and origin of overpressured gas and aquifer layers, Eboliang structure belt, northern Qaidam Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 36 (6): 699-706, 714. (in Chinese with English abstract)
- FENG D H, LIU C L, TIAN J X, et al., 2022. Erosion thickness recovery and its significance to hydrocarbon accumulation in northwestern Qaidam Basin [J]. *Petroleum Experimental & Geology*, 44 (1): 188-198. (in Chinese with English abstract)
- FU S T, WANG L Q, XU Z Y, et al., 2009. Geological conditions of deep gas pools and their favorable prospects [J]. *Natural Gas Geoscience*, 20 (6): 841-846. (in Chinese with English abstract)
- FU S T, ZHANG D W, XUE J Q, et al., 2013. Exploration potential and geological conditions of tight oil in the Qaidam basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31 (4): 672-682. (in Chinese with English abstract)
- FU S T, MA D D, GUO Z J, et al., 2015. Strike-slip superimposed Qaidam Basin and its control on oil and gas accumulation, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 42 (6): 712-722. (in Chinese with English abstract)
- FU S T, MA D D, CHEN Y, et al., 2016. New advance of petroleum and gas exploration in Qaidam Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 37 (S1): 1-10. (in Chinese with English abstract)
- GUO J J, SUN G Q, MEN H J, et al., 2018. Genetic analysis of anomalously high porosity zones in deeply buried reservoirs in the west part of northern edge of Qaidam Basin, NW China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 36 (4): 777-786. (in Chinese with English abstract)
- GUO X S, HU D F, HUANG R C, et al., 2020. Deep and ultra-deep natural gas exploration in the Sichuan Basin; progress and prospect [J]. *Natural Gas Industry*, 40 (5): 1-14. (in Chinese with English abstract)
- GUO Z Q, MA Y S, LIU W H, et al., 2017. Main factors controlling the formation of basement hydrocarbon reservoirs in the Qaidam Basin, western China [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 149: 244-255.
- GUO Z Q, MA Y S, YI S W, et al., 2017. Simulation and exploration direction of Paleogene-Neogene gas system in the western Qaidam Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 28 (1): 82-92. (in Chinese with English abstract)
- HUANG C G, NI X L, MA X M, et al., 2017. Petroleum and gas enrichment pattern and major controlling factors of stable and high production of tight lacustrine carbonate rock reservoirs; a case of the Yingxi area in Qaidam Basin [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 47 (5): 724-738. (in Chinese with English abstract)
- LI J, SHE Y Q, GAO Y, et al., 2019. Onshore deep and ultra-deep natural gas exploration fields and potentials in China [J]. *China Petroleum Exploration*, 24 (4): 403-417. (in Chinese with English abstract)
- LI P, LIU C L, FENG D H, et al., 2021. Characteristics and origin mechanism of formation overpressure in the saline lacustrine basin; a case study from the Oligocene in the west of Yingxiong ridge, Qaidam Basin [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 50 (5): 864-876. (in Chinese with English abstract)
- LIU Z, ZHU W Q, SUN Q, et al., 2012. Characteristics of geotemperature-geopressure systems in petroliferous basins of China [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 33 (1): 1-17. (in Chinese with English abstract)
- MA F, LE X F, WANG P, et al., 2014. Accumulation conditions and exploration domain of coal-type gas in Qaidam Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 19 (3): 87-94. (in Chinese with English abstract)
- SHI Y J, YANG S Y, GUO J J, et al., 2020. Petroleum accumulation conditions and favorable exploration plays of deeply buried strata in Qaidam Basin [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 49 (3): 506-522. (in Chinese with English abstract)
- SUN L D, ZOU C N, ZHU R K, et al., 2013. Formation, distribution and potential of deep hydrocarbon resources in China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 40 (6): 641-649. (in Chinese with English abstract)
- TIAN G R, YAN C F, TUO J C, et al., 2011. Late hydrocarbon accumulation characteristic of coal related gas in northern Qaidam Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 22 (6): 1028-1032. (in Chinese with English abstract)
- TIAN J X, SUN P, ZHANG L, et al., 2014. Accumulation conditions of natural gas and exploration domains in Pingtai Area, piedmont zone of the North Qaidam [J]. *Natural Gas Geoscience*, 25 (4): 526-531. (in Chinese with English abstract)
- TIAN J X, LI J, ZENG X, et al., 2017. Geochemical characteristics and petroleum geologic significance of natural gas in the north margin of the Qaidam Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 38 (2): 355-362. (in Chinese with English abstract)
- TIAN J X, LI J, PAN C F, et al., 2018. Geochemical characteristics and factors controlling natural gas accumulation in the northern margin of the Qaidam Basin [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 160: 219-228.
- TIAN J X, LI J, ZENG X, et al., 2019. Accumulation conditions and favorable plays for deep gas exploration at the northern margin of Qaidam Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 40 (5): 1095-1105. (in Chinese with English abstract)
- TIAN J X, LI J, ZENG X, et al., 2020a. Discovery and accumulation

model of oil cracking gas reservoirs in Dongping area, Qaidam Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 41 (2): 154-162, 225. (in Chinese with English abstract)

TIAN J X, ZHAO J, ZHANG J, et al., 2020b. Formation mechanism and distribution prediction of hydrogen sulfide in Yingxiongling area, Qaidam Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 32 (5): 84-92. (in Chinese with English abstract)

TIAN J X, LI J, KONG H, et al., 2021. Genesis and accumulation process of deep natural gas in the Altun foreland on the northern margin of the Qaidam Basin [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 200: 108147.

TIAN J X, JI B Q, ZENG X, et al., 2022. Development characteristics and main controlling factors of deep clastic reservoir of Xiaganchaigou Formation in the northern margin of Qaidam Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 33 (5): 720-730. (in Chinese with English abstract)

WAN Y Z, LONG G H, YANG W, et al., 2023. Hydrocarbon accumulation and evolution characteristics of Paleogene in Yingxiongling area, Qaidam Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 35 (2): 94-102. (in Chinese with English abstract)

WU X D, LIAO J, SUN W Z, et al., 2021. Natural gas distribution and reservoir-forming law of the Yinggehai Basin, China [J]. Journal of Geomechanics, 27 (6): 963-974. (in Chinese with English abstract)

WU Y X, XUE J Q, FENG Y F, et al., 2013. Neotectonic movement feature and its controlling effect on accumulation in western Qaidam Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 35 (3): 243-248. (in Chinese with English abstract)

YANG H J, CHEN Y Q, TIAN J, et al., 2020. Great discovery and its significance of ultra-deep oil and gas exploration in well Luntan-1 of the Tarim Basin [J]. China Petroleum Exploration, 25 (2): 62-72. (in Chinese with English abstract)

ZENG X, TIAN J X, ZHANG G Q, et al., 2018. Main types and hydrocarbon exploration direction of the paleo-uplifts in the Qaidam Basin [J]. Journal of Geomechanics, 24 (3): 381-390. (in Chinese with English abstract)

ZHAI Z W, ZHANG Y S, YANG H M, et al., 2013. Characteristics of effective source rocks in the Jurassic and hydrocarbon accumulation patterns in the areas near the northern margin of the Qaidam Basin [J]. Natural Gas Industry, 33 (9): 36-42. (in Chinese with English abstract)

ZHANG B, HE Y Y, CHEN Y, et al., 2018. Formation mechanism of excellent saline lacustrine source rocks in western Qaidam Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 39 (6): 674-685. (in Chinese with English abstract)

ZHANG G Y, MA F, LIANG Y B, et al., 2015. Domain and theory-technology progress of global deep oil & gas exploration [J]. Acta Petrolei Sinica, 36 (9): 1156-1166. (in Chinese with English abstract)

ZHANG J M, FU Y W, TIAN C X, et al., 2021. Lithofacies paleogeography and genesis of salt rock in the late Eocene of western Qaidam Basin [J]. Journal of Stratigraphy, 45 (4): 545-553. (in Chinese with English abstract)

ZHANG X, LIU C L, GUO Z Q, et al., 2020. Hydrocarbon accumulation conditions of neogene lacustrine fine-grained sedimentary rocks in northwestern Qaidam Basin [J]. Journal of China Coal Society, 45 (8): 2824-2837. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Y S, WU K Y, JIANG Y H, et al., 2018. Geological characteristics of deep carbonate hydrocarbon-bearing pool in the western Yingxiongling area in Qaidam Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 29 (3): 358-369. (in Chinese with English abstract)

### 附中文参考文献

陈吉, 史基安, 龙国徽, 等, 2013. 柴北缘古近系-新近系沉积相特征及沉积模式 [J]. 沉积与特提斯地质, 33 (3): 16-26.

范昌育, 王震亮, 王爱国, 等, 2015. 柴达木盆地北缘鄂博梁构造带超压形成机制与高压气、水层成因 [J]. 石油学报, 36 (6): 699-706, 714.

冯德浩, 刘成林, 田继先, 等, 2022. 柴达木盆地西北区地层剥蚀厚度恢复及对油气成藏的启示 [J]. 石油实验地质, 44 (1): 188-198.

付锁堂, 汪立群, 徐子远, 等, 2009. 柴北缘深层气藏形成的地质条件及有利勘探区带 [J]. 天然气地球科学, 20 (6): 841-846.

付锁堂, 张道伟, 薛建勤, 等, 2013. 柴达木盆地致密油形成的地质条件及勘探潜力分析 [J]. 沉积学报, 31 (4): 672-682.

付锁堂, 马达德, 郭召杰, 等, 2015. 柴达木走滑叠合盆地及其控油气作用 [J]. 石油勘探与开发, 42 (6): 712-722.

付锁堂, 马达德, 陈琰, 等, 2016. 柴达木盆地油气勘探新进展 [J]. 石油学报, 37 (S1): 1-10.

郭佳佳, 孙国强, 门宏建, 等, 2018. 柴北缘腹部深层异常高孔—渗储层成因分析 [J]. 沉积学报, 36 (4): 777-786.

郭旭升, 胡东风, 黄仁春, 等, 2020. 四川盆地深层—超深层天然气勘探进展与展望 [J]. 天然气工业, 40 (5): 1-14.

郭泽清, 马寅生, 易士威, 等, 2017. 柴西地区古近系—新近系含气系统模拟及勘探方向 [J]. 天然气地球科学, 28 (1): 82-92.

黄成刚, 倪祥龙, 马新民, 等, 2017. 致密湖相碳酸盐岩油气富集模式及稳产、高产主控因素: 以柴达木盆地英西地区为例 [J]. 西北大学学报 (自然科学版), 47 (5): 724-738.

李剑, 余源琦, 高阳, 等, 2019. 中国陆上深层—超深层天然气勘探领域及潜力 [J]. 中国石油勘探, 24 (4): 403-417.

李培, 刘成林, 冯德浩, 等, 2021. 咸化湖盆地层超压特征及成因机制: 以柴达木盆地英西地区渐新统为例 [J]. 中国矿业大学学报, 50 (5): 864-876.

刘震, 朱文奇, 孙强, 等, 2012. 中国含油气盆地地温-地压系统 [J]. 石油学报, 33 (1): 1-17.

马峰, 乐幸福, 王朴, 等, 2014. 柴达木盆地煤型气成藏条件及勘探领域 [J]. 中国石油勘探, 19 (3): 87-94.

石亚军, 杨少勇, 郭佳佳, 等, 2020. 柴达木盆地深层油气成矿 (藏) 条件及有利区带 [J]. 中国矿业大学学报, 49 (3): 506-522.

孙龙德, 邹才能, 朱如凯, 等, 2013. 中国深层油气形成、分布与潜力分析 [J]. 石油勘探与开发, 40 (6): 641-649.

田光荣, 阎存凤, 妥进才, 等, 2011. 柴达木盆地柴北缘煤成气晚期成藏特征 [J]. 天然气地球科学, 22 (6): 1028-1032.

田继先, 孙平, 张林, 等, 2014. 柴达木盆地北缘山前带平台地区天

然气成藏条件及勘探方向 [J]. 天然气地球科学, 25 (4): 526-531.

田继先, 李剑, 曾旭, 等, 2017. 柴达木盆地北缘天然气地球化学特征及其石油地质意义 [J]. 石油与天然气地质, 38 (2): 355-362.

田继先, 李剑, 曾旭, 等, 2019. 柴北缘深层天然气成藏条件及有利勘探方向 [J]. 石油与天然气地质, 40 (5): 1095-1105.

田继先, 李剑, 曾旭, 等, 2020a. 柴达木盆地东坪地区原油裂解气的发现及成藏模式 [J]. 石油学报, 41 (2): 154-162, 225.

田继先, 赵健, 张静, 等, 2020b. 柴达木盆地英雄岭地区硫化氢形成机理及分布预测 [J]. 岩性油气藏, 32 (5): 84-92.

田继先, 纪宝强, 曾旭, 等, 2022. 柴北缘下干柴沟组深部碎屑岩储层发育特征及主控因素 [J]. 天然气地球科学, 33 (5): 720-730.

完颜泽, 龙国徽, 杨巍, 等, 2023. 柴达木盆地英雄岭地区古近系油气成藏过程及其演化特征 [J]. 岩性油气藏, 35 (2): 94-102.

吴迅达, 廖晋, 孙文钊, 等, 2021. 莺歌海盆地天然气运聚成藏条件与分布富集规律 [J]. 地质力学学报, 27 (6): 963-974.

吴颜雄, 薛建勤, 冯云发, 等, 2013. 柴西地区新构造运动特征及其对成藏影响 [J]. 石油实验地质, 35 (3): 243-248.

杨海军, 陈永权, 田军, 等, 2020. 塔里木盆地轮探1井超深层油气勘探重大发现与意义 [J]. 中国石油勘探, 25 (2): 62-72.

曾旭, 田继先, 张国卿, 等, 2018. 柴达木盆地古隆起主要类型及油气勘探方向 [J]. 地质力学学报, 24 (3): 381-390.

翟志伟, 张永庶, 杨红梅, 等, 2013. 柴达木盆地北缘侏罗系有效烃源岩特征及油气聚集规律 [J]. 天然气工业, 33 (9): 36-42.

张斌, 何媛媛, 陈琰, 等, 2018. 柴达木盆地西部咸化湖相优质烃源岩形成机理 [J]. 石油学报, 39 (6): 674-685.

张光亚, 马锋, 梁英波, 等, 2015. 全球深层油气勘探领域及理论技术进展 [J]. 石油学报, 36 (9): 1156-1166.

张金明, 付彦文, 田成秀, 等, 2021. 柴达木盆地西部始新世晚期岩相古地理特征及盐岩成因 [J]. 地层学杂志, 45 (4): 545-553.

张永庶, 伍坤宇, 姜营海, 等, 2018. 柴达木盆地英西深层碳酸盐岩油气藏地质特征 [J]. 天然气地球科学, 29 (3): 358-369.