

引用格式: 宋德康, 刘晓雪, 邵泽宇, 等. 柴达木盆地三湖坳陷第四系泥岩气藏成藏模式[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(4): 495-504.
SONG Dekang, LIU Xiaoxue, SHAO Zeyu, et al. Accumulation mode of Quaternary mudstone gas reservoir in Sanhu Depression, Qaidam Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(4): 495-504.
DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2023.04.011

柴达木盆地三湖坳陷第四系泥岩气藏成藏模式

宋德康¹, 刘晓雪², 邵泽宇¹, 姜振学², 侯栗丽¹, 王昱超², 贺世杰², 刘冀蓬²

(1. 中国石油青海油田分公司勘探开发研究院, 甘肃 酒泉 736202; 2. 中国石油大学(北京), 北京 102249)

摘要: 研究三湖坳陷生物成因泥岩气藏形成的条件和成藏模式, 有利于完善生物气成藏机理与富集规律, 对指导第四系泥岩气藏勘探开发具有重要理论和现实意义。以三湖坳陷第四系泥岩为研究对象, 通过可溶解有机碳分析、孔隙度测定、色谱质谱分析等实验, 明确了三湖坳陷第四系泥岩气藏成藏条件, 建立了第四系泥岩气藏的成藏模式。研究结果表明, 三湖坳陷第四系泥岩可溶解有机碳含量高, 有机质类型为草本腐殖型, 气温极低、气候干旱, 有利于生物成因气的生成; 三湖坳陷第四系具有高孔低渗的特征, 发育大量微纳米孔隙, 为生物成因气的赋存提供了大量孔隙空间; 气体运移方式以菲克扩散和滑脱流动为主, 由于泥岩自封闭作用, 生成的生物成因气在原位聚集成藏。在晚喜马拉雅构造运动影响下, 泥岩自封闭性被破坏, 受浮力作用, 生物成因气向上运移, 在相邻的构造高部位泥岩中重新聚集成藏, 在纵向上与常规砂岩生物气藏相互叠置。

关键词: 生物成因泥岩气藏; 形成条件; 成藏模式; 三湖坳陷; 第四系

中图分类号: TE122

文献标识码: A

Accumulation mode of Quaternary mudstone gas reservoir in Sanhu Depression, Qaidam Basin

SONG Dekang¹, LIU Xiaoxue², SHAO Zeyu¹, JIANG Zhenxue², HOU Lili¹, WANG Yuchao², HE Shijie², LIU Jipeng²

(1. Research Institute of Exploration and Development, Qinghai Oilfield Company, PetroChina, Jiuquan, Gansu 736202, China;

2. China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China)

Abstract: The study of formation conditions and accumulation mode of biogenetic mudstone gas reservoir in Sanhu Depression is essential for understanding the accumulation mechanisms and enrichment rules of such gas reservoirs. It holds significant theoretical and practical implications for guiding the exploration and development of Quaternary mudstone gas reservoirs. This research focuses on the Quaternary mudstone in the Sanhu Depression as the main subject. To determine the reservoir formation conditions and establish the accumulation mode, various experiments were conducted, including soluble organic carbon analysis, porosity determination, and chromatography-mass spectrometry analysis. The results reveal that the presence of high levels of soluble organic carbon and herbaceous humic organic matter, along with cold and dry conditions, create favorable conditions for the generation of biogenetic mudstone gas. The Quaternary formation in Sanhu Depression has the characteristics of high porosity and low permeability with numerous micro-nano pores that provide ample space for the occurrence of biogenetic gas. Gas flow primarily occurs through Fick diffusion and slip flow. The self-sealing effect of mudstone leads to the in-situ accumulation of biogenetic gas. However, during the late Himalayan tectonic movement, the gas containment of mudstone is disrupted. As a result of buoyancy, the gas migrates upward and accumulates in high parts of the mudstone, which are adjacent to the gas-generating center, and are superimposed longitudinally with sandstone biogenetic gas reservoirs.

Keywords: biogenetic mudstone gas reservoir; reservoir forming conditions; accumulation mode; Sanhu Depression; Quaternary

收稿日期: 2022-03-02。

第一作者简介: 宋德康(1992—), 男, 本科, 工程师, 现从事油气勘探工作。地址: 甘肃省酒泉市敦煌市七里镇昆仑中路青海油田勘探开发研究院, 邮政编码: 736202。E-mail: sdkjyqh@petrochina.com.cn

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“陆相页岩储层岩石组构和孔隙机构特征及其对含气性的控制机理”(41872135)。

生物气是厌氧条件下,产甲烷菌利用简单小分子物质(CO₂、H₂、乙酸等)所形成的重要终极产物^[1],储量占世界天然气储量的20%以上^[2-3]。柴达木盆地是中国重要的生物气产区,在三湖坳陷先后发现了涩北一号、涩北二号和台南等多个气田,三湖坳陷生物气藏埋藏浅、产量高、效益好,是青海油田主力产气区和效益支柱^[4]。近年来,通过加大地震攻关力度,围绕主力气田外围和斜坡—凹陷区开展低幅度构造和岩性圈闭探索,但受圈闭识别精度和含气检测效果的制约,未获规模发现^[5-6]。面对被动勘探形势和气田稳产的迫切需求,近两年在气田内部针对泥岩段试气,多口直井获得工业产能(台南18井日产量2.85×10⁴ m³)。三湖坳陷第四系泥岩中微生物活动强烈,在产甲烷菌等厌氧菌的共同作用下不断生成甲烷气,是生物气藏持续形成的动力源泉^[7]。第四系泥岩沉积速度快、大面积连续分布、压实作用小,具有高孔隙度的特征,极具成藏潜力^[8-9]。但是前人研究集中于砂岩生物气藏,而针对三湖坳陷第四系泥岩气藏的研究较少,尤其是泥岩气藏形成条件不明、成藏模式不清,制约了进一步的勘探开发。因此,以三湖坳陷第四系泥岩为研究对象,通过有机碳分析、孔隙度测定等实验,明确了三湖坳陷第四系泥岩成藏条件,在此基础上建立了三湖坳陷第四系泥岩独特的成藏模式,研究成果对完善生物气成藏机理与富集规律、指导第四系泥岩气藏勘探开发具有重要理论和现实意义。

1 区域地质概况

柴达木盆地是一个大型中生代内陆沉积盆地,以阿尔金山、祁连山、昆仑山三大山系为界,总面积约为12.1×10⁴ km²,盆地海拔介于2 650~3 000 m(图1a)。三湖坳陷位于柴达木盆地的东南部,北以陵间断裂为界,南至昆众山前的边界断裂,西起西台吉乃尔湖,东至南北霍布逊湖,面积约50 000 km²。在喜马拉雅构造运动的影响下,沉积中心不断向东迁移,第四纪时三湖坳陷成为沉积中心(图1b),进一步可以划分为北斜坡带、中央凹陷带、南斜坡带^[10-11]。

勘探实践显示,第四系七个泉组是三湖坳陷生物气藏段,也是目前最具勘探潜力的层段,与下伏新近系狮子沟组多为整合接触,仅在局部地区(盆地边缘)呈不整合接触。三湖坳陷第四系岩性以灰色泥

岩和泥质粉砂岩互层为主,夹碳质泥岩(图1c)。

2 生物成因泥岩气藏形成条件

2.1 烃源岩条件

2.1.1 有机碳含量

常规烃源岩分析测定有机碳含量时,需要经过酸洗和水洗,测定的主要是干酪根等不溶有机碳含量。考虑到酸洗和水洗对未熟烃源岩的有机质丰度测试结果的影响较大,因此,针对同一块样品,将其分成3份,分别测定其总碳含量、无机碳含量、不溶有机碳含量。引用可溶解有机碳参数:

$$D=T-I-C \quad (1)$$

式中: D 为可溶解有机碳含量,单位%; T 为总碳含量,单位%; I 为无机碳含量,单位%; C 为不溶有机碳含量,单位%。

可溶解有机碳是指微生物降解时形成的有机质中的有机碳,是产甲烷菌可利用的重要物质来源,包括碳水化合物、蛋白质、氨基酸、脂肪等。烃源岩总有机碳含量为可溶解有机碳含量和不溶有机碳含量之和。

研究表明,三湖坳陷可溶解有机碳含量较高,平均约为不溶有机碳的2.95倍(图2a),可溶解有机碳是微生物可利用的重要底物,高含量的可溶解有机碳指示三湖坳陷正处于生物甲烷大量生成的阶段,原始沉积大分子有机物被大量改造、利用,是形成第四系泥岩气藏的重要基础。总有机碳含量为0.20%~1.68%,45个样品中29个样品总有机碳含量高于0.6%(湖相泥页岩中等烃源岩有机碳含量下限)^[13],可溶解有机碳含量较高,即产甲烷菌可利用的碳水化合物、蛋白质、氨基酸、脂肪等物质含量高,有利于生气。

2.1.2 有机质类型

根据元素分析,三湖坳陷有机质元素主要是碳元素,占19.04%~74.47%,其次是氧元素,占4.76%~13.79%,氢元素占1.63%~5.00%,氮元素仅占0.74%~3.36%。三湖坳陷有机质大部分为Ⅲ型(腐殖型)、部分为Ⅱ型(过渡型),C/N小于40、C₂₇-甾烷含量高指示有机质母质来源主要为草本植物,有机质类型属于草本腐殖型(图2b、图2c),前人研究

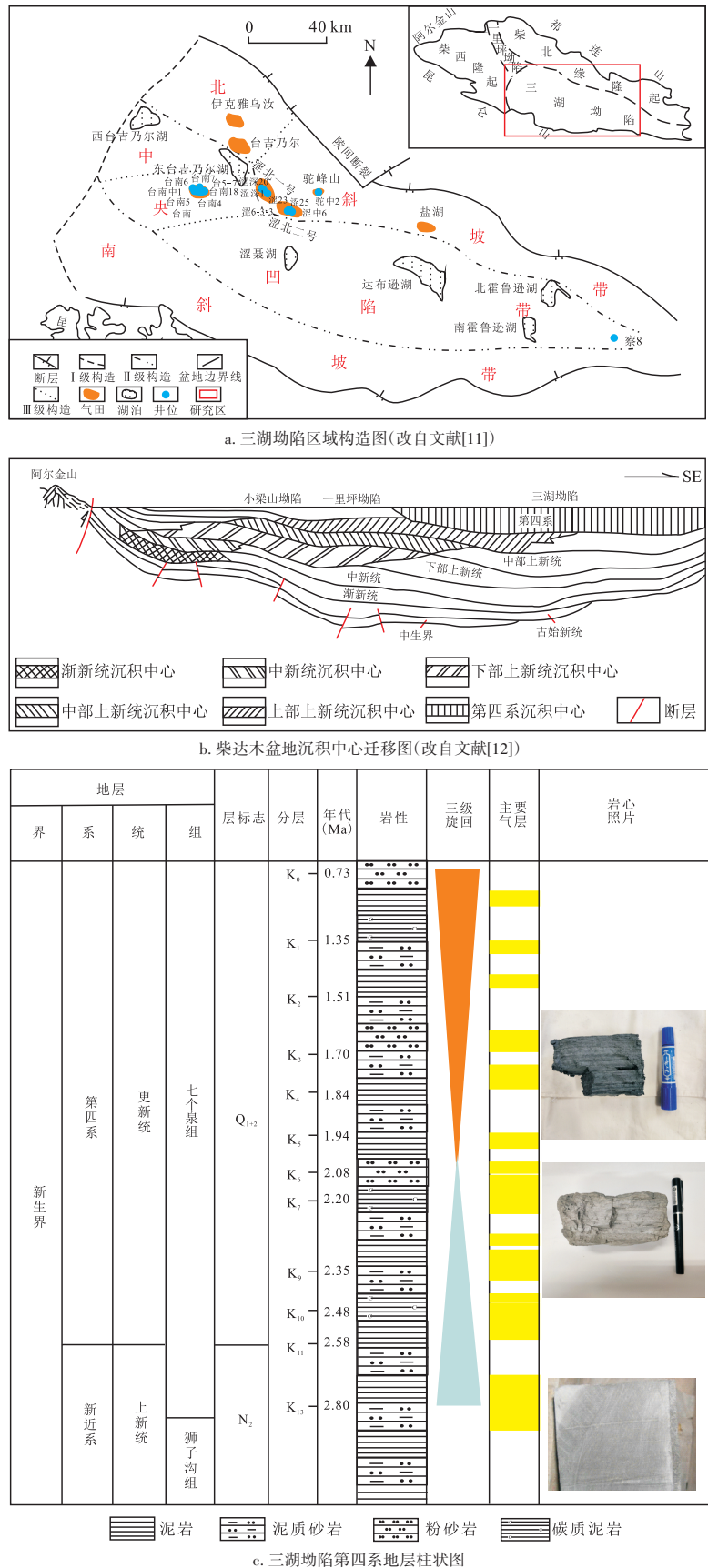


图1 三湖坳陷构造图及地层柱状图

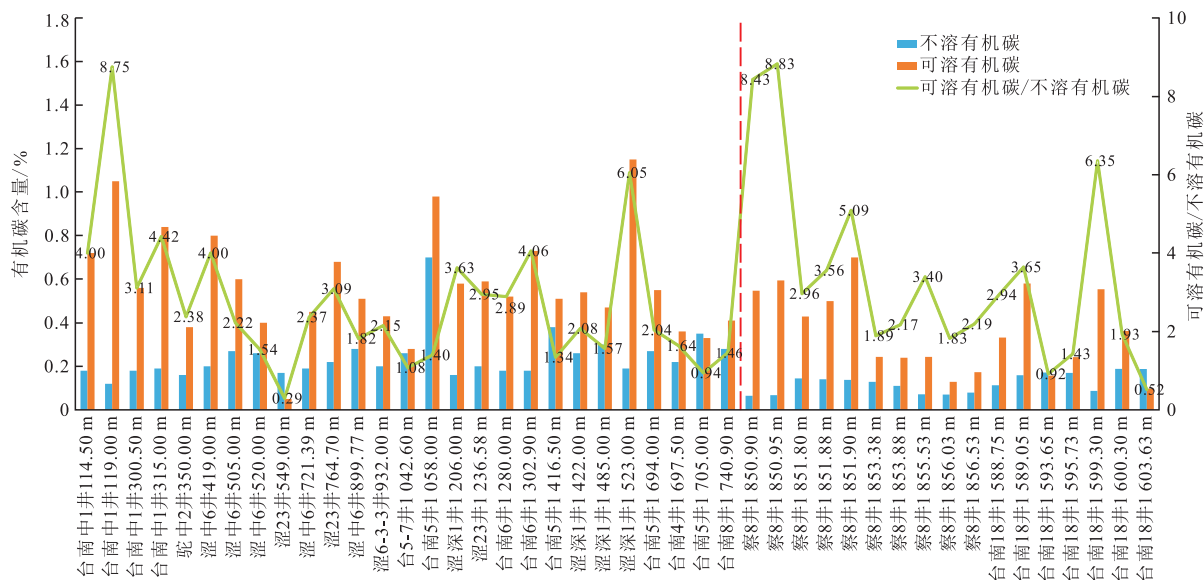
Fig. 1 Structural map and stratigraphic histogram of Sanhu Depression

表明草本腐殖型母质富含半纤维素、糖、淀粉、果胶等碳水化合物和蛋白质,是产甲烷菌可利用的重要物质^[3,14],且 R_o 低(0.25%~0.45%),处于未成熟演化阶段,有利于生物成因气的生成。

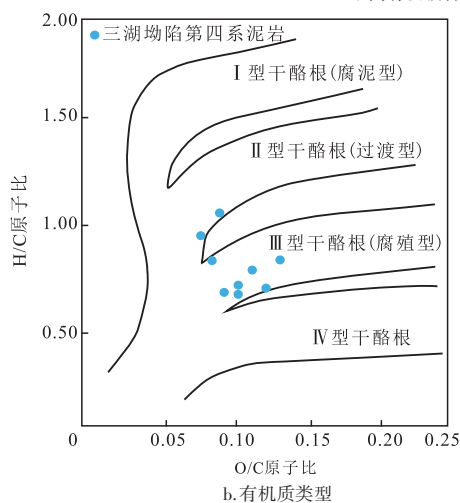
前人研究表明,三湖坳陷第四系沉积时气温极低、气候干旱^[14-15],寒冷气候条件时,草本植物较为发育,为生物成因气的生成提供了更多的陆源碳水化合物底物,同时使得甲烷菌在浅部的活动受到抑制,使利于生成生物成因气的有机质不被过早消耗,进入深埋后,温度上升,甲烷菌活性增强,形成的生物成因气更有利于聚集成藏。第四纪气候干旱,易形成高盐度水体,有益于有机质的保存,有利于后期生物成因气的生成。

2.2 储集条件

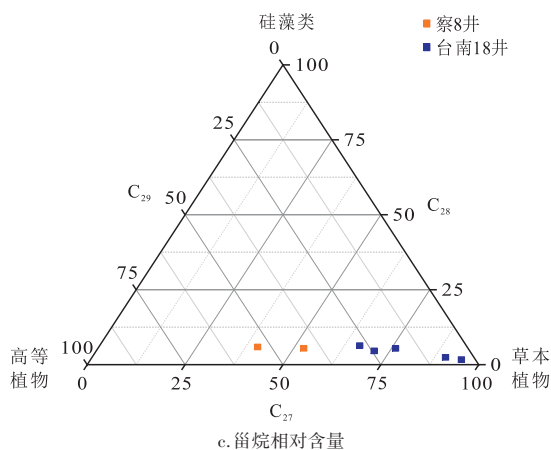
三湖坳陷泥岩黏土矿物含量较高(4.32%~35.77%),变化范围较大,说明其沉积环境、物源供给变化较大(图3)。黏土矿物的比表面积较大,其对甲烷具有一定吸附能力,三湖坳陷第四系泥岩不溶有机碳含量很低(平均为0.3%),但仍具有一定的甲烷吸附能力,主要归因于黏土矿物的贡献。另一方面,黏土矿物粒度较细,会充填在石英等矿物形成的孔隙中,降低孔隙度,进而影响游离气含量。因此,依据黏土矿物含量将泥岩划分为I类泥岩(黏土矿物含量大于25%)、II类泥岩(黏土矿物含量介于15%~25%)、III类泥岩(黏土矿物含量小于15%),



a. 不同有机碳含量(红色虚线左侧数据来自于文献[13])



b. 有机质类型



c. 甾烷相对含量

图2 三湖坳陷第四系泥岩有机碳含量和有机质类型

Fig. 2 Organic carbon contents and organic type of Quaternary mudstone in Sanhu Depression

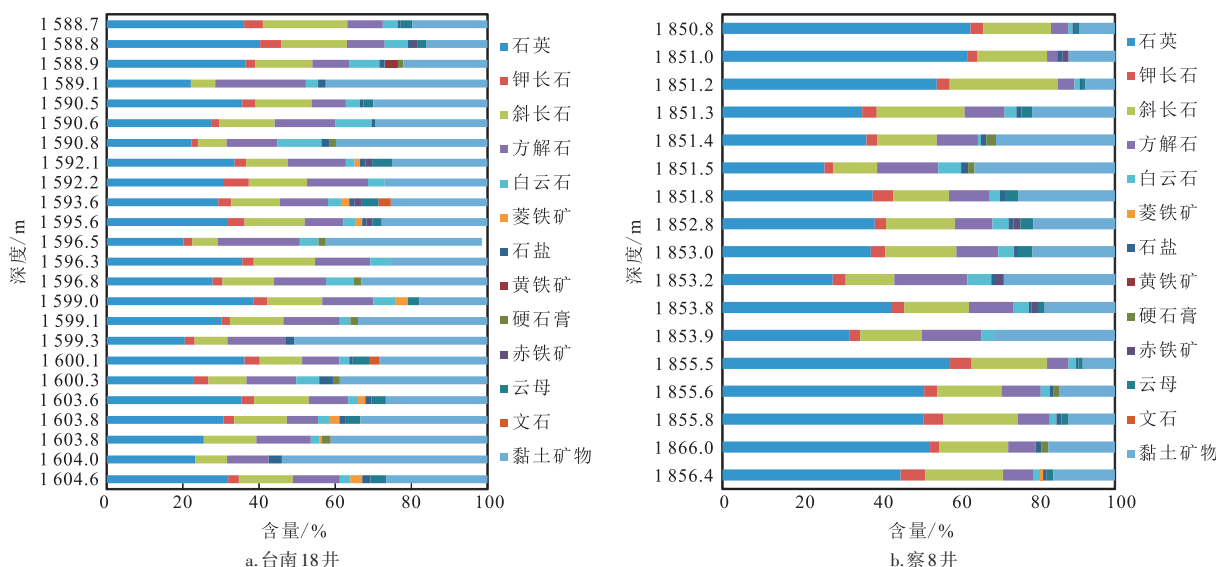


图3 三湖坳陷第四系泥岩矿物组成

Fig. 3 Mineral composition map of Quaternary mudstone in Sanhu Depression

其中以 I 类泥岩(占比 70.07%)和 II 类泥岩(占比 29.38%)为主。

三湖坳陷第四系泥岩整体孔隙度介于 15%~30%,具备非常好的储集空间;渗透率约为 $(0.1 \sim 10) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,与同等孔隙度砂岩储层渗透率相差 1~2 个数量级,渗透率相对较小。第四系泥岩在饱和近似研究区高矿化度地层水后,渗透率下降 3~4 个数量级,甚至低于四川盆地龙马溪组泥岩渗透率(图 4)。因此,三湖坳陷第四系具有高孔低渗的特征,为游离气的赋存提供大量孔隙空间,同时为气体的保存提供有利条件。

泥岩的孔径分布范围广,从纳米到微米尺度均有分布,因此,采用结合 N_2 吸附实验和高压压汞实验结合的方法,表征三湖坳陷第四系泥岩全尺度孔隙结构特征。由于各种测试技术的实验方法和计算原理不同,对不同尺度孔隙的测试可信度也不同,且测试孔径范围也存在重叠区,基于此,选取各种技术方法的最佳测量孔径段进行叠加分析,泥岩微孔体积较小,主要由 1~1.5 nm 孔径范围的孔隙贡献,介孔主要贡献孔径为 5~20 nm,泥岩宏孔孔体积主要由 100~300 nm 级孔隙贡献,粉砂岩宏孔孔体积主要由微米级孔隙贡献(图 5a)。三湖坳陷第四系泥岩总孔体积为 0.098~0.173 mL/g,平均 0.124 mL/g,其中微孔孔体积介于 0~0.000 1 mL/g,约占总孔体积不到 0.1%;介孔孔体积介于 0.042~0.074 mL/g,平均孔体

积为 0.052 mL/g,约占总孔体积的 41.93%;宏孔孔体积介于 0.045~0.086 mL/g,平均孔体积为 0.071 mL/g,约占总孔体积的 57.25%(图 5b、图 5c)。由此可见三湖坳陷第四系泥岩介孔和宏孔对泥岩孔体积为主要贡献,微孔提供的孔体积非常少,以介孔和宏孔贡献为主,两者共占总孔体积的 99%以上。泥岩中大量的微纳米孔隙为气体的赋存提供大量孔隙空间,同时为气体的保存提供有利条件。

2.3 保存条件

三湖坳陷第四系七个泉组砂岩、泥岩孔隙结构发育程度存在差异,据此可以将其划分为 2 个流体动力场,即达西流动场和局限流动场。泥岩内部具有整体含气的特征,其原因在于发育在气藏内部的一种自封闭作用,这是一种依赖气体自身内部或气体与储层介质界面之间的分子间作用力,与外界隔离并独立成藏富集保存的地质作用。第四系泥岩发育大量微纳米孔隙,泥岩渗透率平均值为 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (渗透率不大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$),孔喉半径小于 200 nm(孔喉半径不大于 1 μm),符合非浮力成藏和非达西流动场的物性条件^[6]。在此物性条件下,浮力无法克服油气运聚的阻力,即阻力大于浮力,使其生成的气体滞留在原地。

三湖坳陷第四系泥岩孔隙结构类型多样,导致其润湿性更为复杂,通过对不同岩性界面的陆相泥

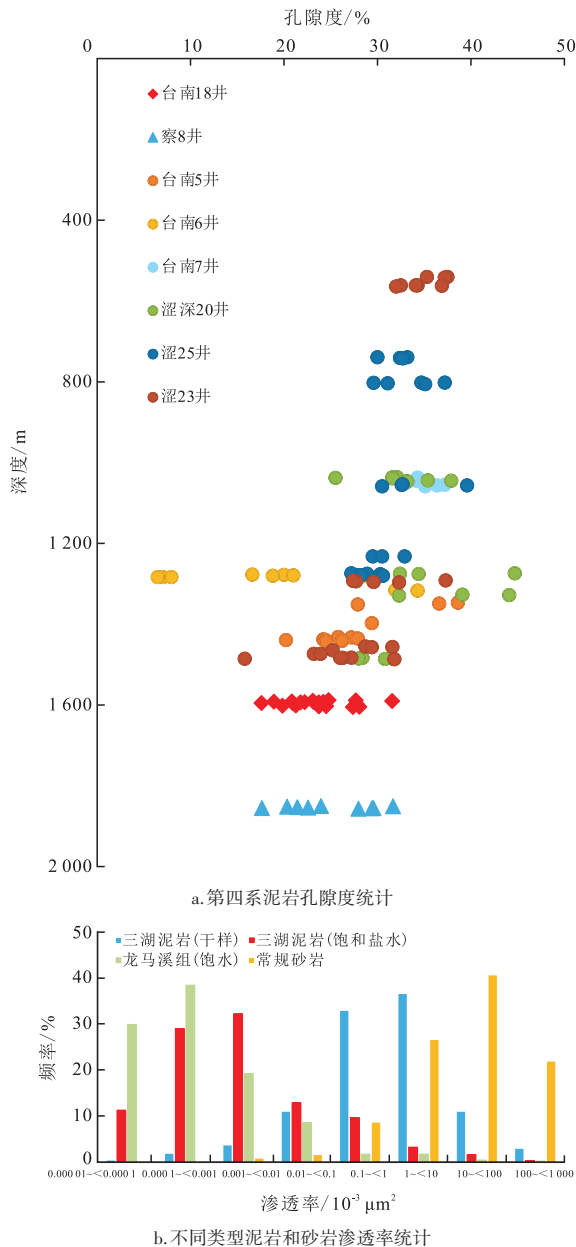


图4 三湖坳陷第四系泥岩孔渗统计及与龙马溪组页岩渗透率对比

Fig. 4 Statistics of porosity and permeability of Quaternary mudstone in Sanhu Depression and comparison with permeability of shale of Longmaxi Formation

岩样品接触进行测定,整体第四系泥岩表现为亲水性(润湿角约为 23°),台南、涩北一号和涩北二号气田第四系七个泉组地层水平平均矿化度分别为112.34、95.30、98.01 g/L,高于海水的矿化度(35 g/L),整体矿化度相对比较高,地层含高矿化度水的情况下矿物颗粒表面易形成水膜,水膜对气体的保存至关重要。吸附水膜的存在是固液相互作用的结果,

当极性分子相互接近时,它们的固有偶极将同极相斥异极相吸,定向排列。根据地层压力、分离压力以及毛管力平衡关系计算水膜厚度^[17]。

三湖坳陷第四系泥岩随着埋深加大(地层压力5 MPa增加到30 MPa),水膜厚度从45.36 nm减少到5.28 nm,当喉道半径小于计算水膜厚度时,孔喉对气藏起封闭作用(图6)。因此,不同条件下的水膜厚度即为此条件下孔喉封闭气体的临界孔喉半径。

通过计算3种泥岩孔喉封闭气体的临界半径,临界半径具有I类泥岩>II类泥岩>III类泥岩的特征,I类泥岩中的气体不受浮力作用影响,II类泥岩具有自封闭非浮力成藏和达西流动浮力成藏的特征,III类泥岩中气体受浮力影响,无法自封闭成藏。三湖坳陷以I类泥岩和II类泥岩为主,自封闭条件较好。

三湖坳陷第四系泥岩气藏形成较晚,只受喜马拉雅期构造运动影响,基底稳定,褶皱断层均较少,气藏形成后保存条件好。

3 成藏过程和成藏模式

3.1 成藏过程

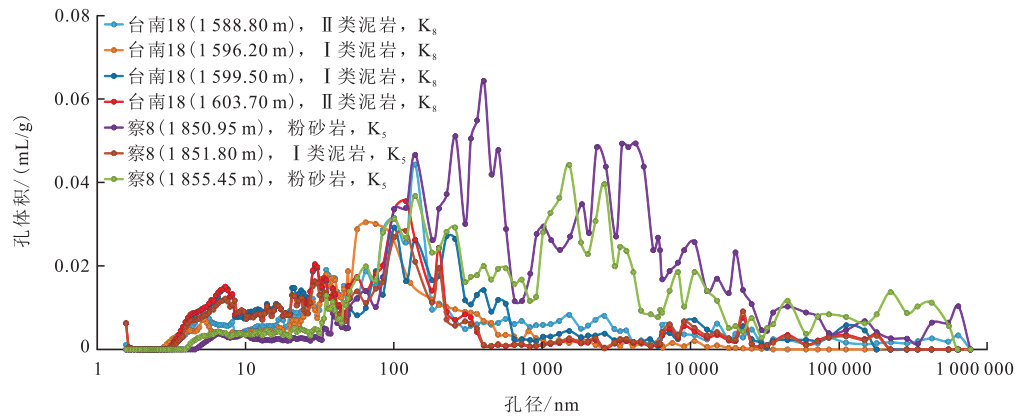
3.1.1 气体运移方式

在现今三湖坳陷第四系泥岩气藏温压特征(18 MPa、 60°C)条件下,有4种气体运移形式:水膜封闭(0~10 nm)、菲克扩散(10~40 nm)、滑脱流动(40~400 nm)、达西流动(大于400 nm)^[18]。气体在孔隙中的流动方式可通过克努森数(K_n)进行判断,计算公式为:

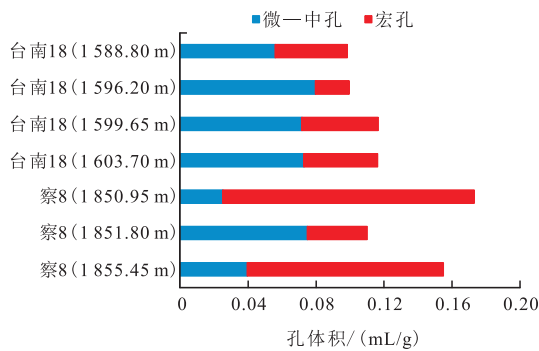
$$K_n = \frac{\lambda}{2r} \quad (2)$$

式中: λ 为平均分子自由程,即气体微粒与其他微粒相互碰撞所通过的平均距离,单位nm; r 为孔隙半径,单位nm。

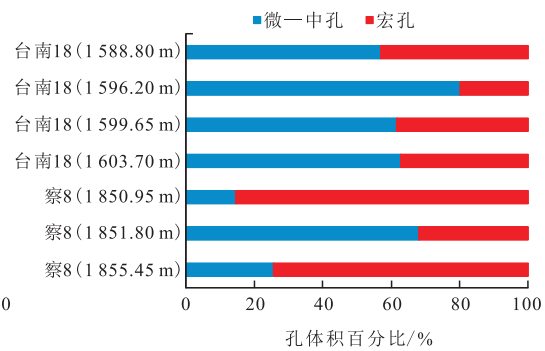
其中I类泥岩不同运移形式对应孔隙体积占比依次为16.2%、37.6%、38.5%、7.7%,宏孔主要提供了气体渗流空间、中孔主要提供扩散空间,具备自封闭成藏的特征;II类泥岩不同运移形式对应的孔隙体积占比依次为15.5%、34.0%、31.2%、19.3%,部分宏孔发生达西流动气体散失,同时具有自封闭非浮力成藏和达西流动浮力成藏的特征;III类泥岩不同运移形式对应孔隙体积占比依次为3.3%、6.8%、



a. 三湖坳陷第四系泥岩全孔径体积分布



b. 三湖坳陷第四系泥岩孔体积统计



c. 三湖坳陷第四系泥岩孔体积占比统计

图5 三湖坳陷孔径分布及对孔体积的贡献

Fig. 5 Pore size distribution and its contribution to pore volume in Sanhu Depression

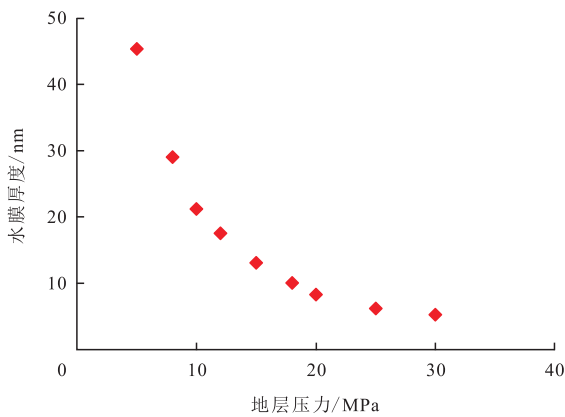


图6 三湖坳陷第四系泥岩水膜厚度(临界孔喉半径)随地层压力变化关系

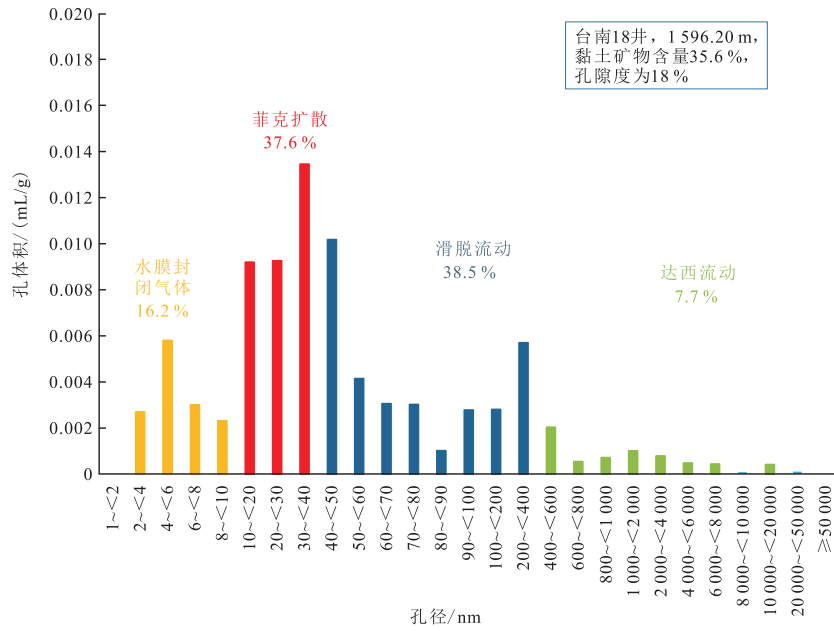
Fig. 6 Relationship between water film thickness (critical pore-throat radius) and pressure of Quaternary mudstone in Sanhu Depression

三湖坳陷以 I 类泥岩和 II 类泥岩为主,封闭性较好。

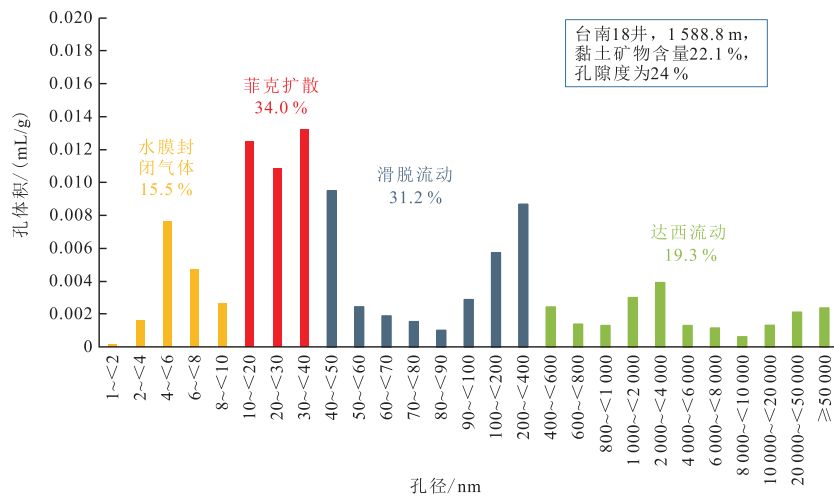
3.1.2 运移动力和运移方向

当生气量大于水溶气量与吸附气量之和,则气体呈游离态和水溶态存在;当生气量小于水溶气量与吸附水量之和,则气体呈水溶态存在,当埋深超过一定深度(II型有机质为650 m,III型有机质为950 m),尽管孔隙水溶解气量达到峰值,但该深度已进入主生气阶段,孔隙水不能溶解全部所生成的甲烷,所以,三湖坳陷生物成因气在地下运移的相态主要为水溶相和游离相^[19-20],水溶相生物成因气运移动力主要是由压实作用所产生的剩余压力(由下往上)和水动力(由南向北),游离相生物成因气运移的主要动力是剩余压力和浮力(由下往上)^[20-21]。气体运移受控于区域构造条件,在晚喜马拉雅运动作用下,三湖坳陷临近生气坳陷中心的北部形成纵弯褶皱,是气体运移的主要指向区。但是只有当动力能够突破毛细管阻力,气体才能发生运移。

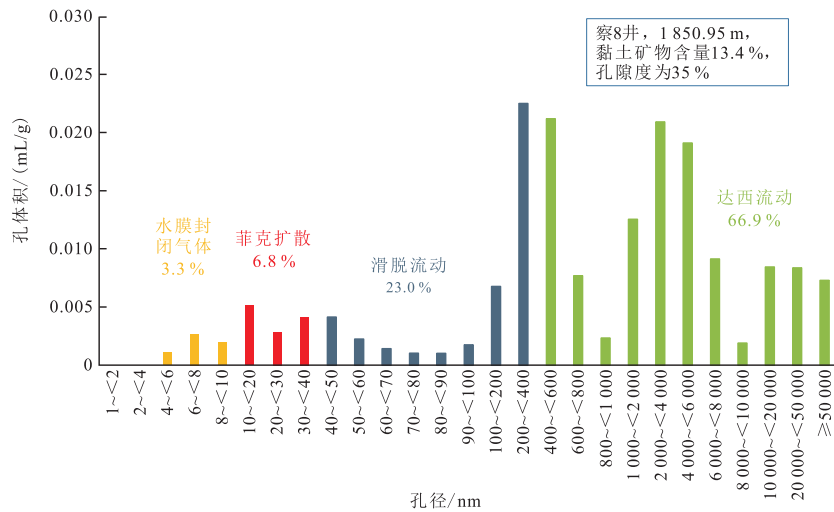
23.0%、66.9%,宏孔过于发育,气体基本都通过达西流动的方式散失,难以存在自封闭成藏现象(图7)。



a. I类泥岩气体运移方式



b. II类泥岩气体运移方式



c. III类泥岩气体运移方式

图7 不同泥岩气体运移方式

Fig. 7 Different mudstone gas migration modes

3.2 成藏模式

3.2.1 原地成藏模式

三湖坳陷受晚喜马拉雅运动影响,湖水频繁进退,导致地层纵向上砂、泥岩频繁互层,滨浅湖相和半深湖相交替沉积,仍以泥岩沉积为主,泥岩累计厚度占地层70%以上^[10],可溶解有机碳含量高,在较低

温、缺氧的环境下,生物降解程度高,产生了大量的小分子有机物(氨基酸、碳水化合物等),甲烷菌利用小分子有机物生成甲烷,由于生气较晚、成岩作用较弱,成藏环境对气藏的形成更加重要。坳陷中心(较深部位)的第四系泥岩孔隙相对较小,泥岩介质吸附作用和毛细管力束缚作用导致生物成因气不能长距离运移,处于自封闭状态,生物成因气生成并在原地聚集成藏(图8)。

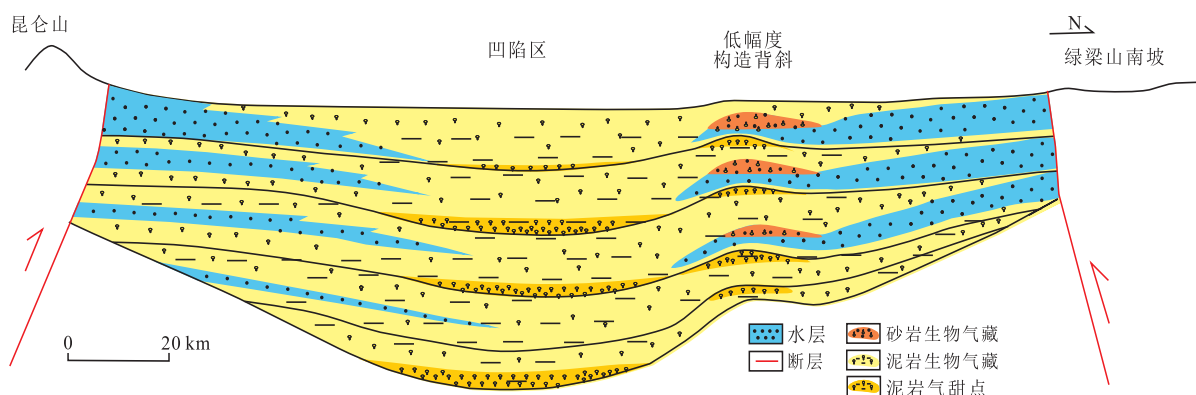


图8 三湖坳陷生物成因泥岩气藏成藏模式

Fig. 8 Accumulation mode of biogenic gas of mudstone in Sanhu Depression

3.2.2 与常规砂岩生物气藏叠置的成藏模式

在晚喜马拉雅构造运动影响下,北部地区形成纵弯褶皱,泥岩自封闭状态遭到破坏,生物成因气在浮力和水动力的作用下发生短距离运移,在近距离相邻的构造高部位重新聚集成藏,纵向上与常规生物气藏叠置(图8)。

2) 三湖坳陷第四系泥岩气体流动以菲克扩散和滑脱流动为主,三湖坳陷生物成因气在地下运移的相态主要有水溶相和游离相,运移的主要动力是剩余压力、水动力和浮力,气体运移受控于区域构造条件,临近生气坳陷中心的构造高部位是气体运移的主要指向区;但是只有当动力能够突破毛细管阻力,气体才能发生运移。

4 结论

以三湖坳陷第四系泥岩为研究对象,通过可溶解有机碳分析、孔隙度测定、色谱质谱分析等实验,得到以下结论。

1) 三湖坳陷第四系泥岩可溶解有机碳含量高,母质来源以草本植物为主,气温极低,气候干旱,有利于生物成因气的生成;三湖坳陷第四系具有高孔低渗的特征,黏土矿物含量较高,岩性以Ⅰ类泥岩和Ⅱ类泥岩为主,发育大量微纳米孔隙,为游离气的赋存提供大量孔隙空间,同时为气体的保存提供有利条件;泥岩自封闭性好,且三湖坳陷构造较为稳定,气体保存条件好。

3) 三湖坳陷的坳陷中心(较深部位)的第四系泥岩孔隙相对较小,泥岩介质吸附作用和毛细管力束缚作用导致生物成因气能长距离运移,处于自封闭状态,生物成因气生成并在原地聚集成藏。在晚喜马拉雅构造运动影响下,北部地区形成纵弯褶皱,原地气藏泥岩自封闭状态遭到破坏,天然气在浮力和水动力的作用下发生短距离运移,在近距离相邻的构造高部位重新聚集成藏,纵向上与常规生物气藏叠置。

参考文献

- [1] CHAPELLE F H, O' NEILL K, BRADLEY P M, et al. A hydrogen-based subsurface microbial community dominated by methanogens[J]. Nature, 2002, 415(6869): 312-315.
- [2] 孙春岩,赵浩,贺会策,等.洞庭盆地生物气地球化学勘探及资源远景评价[J].物探与化探,2018,42(1): 1-13.

- SUN Chunyan, ZHAO Hao, HE Huice, et al. Geochemical exploration and resource potential evaluation of biogenic gas in Dongting Lake Basin[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2018, 42(1): 1-13.
- [3] 杨松岭, 张科, 陈景阳, 等. 全球生物气藏分布特征及成藏条件[J]. *天然气工业*, 2019, 39(8): 10-24.
- YANG Songling, ZHANG Ke, CHEN Jingyang, et al. Distribution characteristics and hydrocarbon accumulation conditions of biogenic gas reservoirs all over the world[J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(8): 10-24.
- [4] 付锁堂, 关平, 张道伟. 柴达木盆地近期勘探工作思路[J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(5): 813-819.
- FU Suotang, GUAN Ping, ZHANG Daowei. Consideration about recent oil and gas exploration of Qaidam Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(5): 813-819.
- [5] 焦贵浩, 张林, 李剑, 等. 柴达木盆地三湖地区生物气资源潜力及勘探方向[J]. *中国石油勘探*, 2009, 14(2): 1-6.
- JIAO Guihao, ZHANG Lin, LI Jian, et al. Resources potential and exploration direction of biogas in Sanhu Region in Qaidam Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2009, 14(2): 1-6.
- [6] 史晓辉, 倪祥龙, 李红哲, 等. 地震属性在预测生物气中的应用——以柴达木盆地三湖地区台南构造为例[J]. *石油天然气学报*, 2014, 36(1): 50-54.
- SHI Xiaohui, NI Xianglong, LI Hongzhe, et al. Application of seismic attributes in detecting biogas——By taking Tainan structure of Sanhu Area in Qaidam Basin for example[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2014, 36(1): 50-54.
- [7] 帅燕华, 张水昌, 苏爱国, 等. 柴达木盆地三湖地区产甲烷作用仍在强烈进行的地球化学证据[J]. *中国科学D辑(地球科学)*, 2009, 32(4): 734-740.
- SHUAI Yanhua, ZHANG Shuichang, SU Aiguo, et al. Geochemical evidence for strong ongoing methanogenesis in Sanhu region of Qaidam Basin[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2009, 32(4): 734-740.
- [8] CHEN Z H, SHUAI Y H, OSADETZ K, et al. Comparison of biogenic gas fields in the Western Canada Sedimentary Basin and Qaidam Basin: Implications for essential geological controls on large microbial gas accumulations[J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 2015, 63(1): 33-52.
- [9] SHUAI Y H, ZHANG S C, MA D D, et al. Quaternary biogenic gases in the Qaidam Basin, Western China[J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 2015, 63(1): 75-83.
- [10] 单俊峰, 鞠俊成, 张文伟, 等. 柴达木盆地三湖坳陷盐壳遮挡型生物气成藏模式[J]. *天然气工业*, 2019, 39(8): 25-32.
- SHAN Junfeng, JU Juncheng, ZHANG Wenwei, et al. Hydrocarbon accumulation patterns of salt crust covered biogenic gas reservoirs in the Sanhu Depression, Qaidam Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(8): 25-32.
- [11] YIN M S, HUANG H P, CHENG L. Molecular fingerprints in shales from the Sanhu biogenic gas fields in eastern Qaidam Basin, NW China: Evidence of biodegradation of shale organic matter[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 133: 105289.
- [12] 杨梅. 柴达木盆地三湖坳陷新近纪—第四纪古环境演变[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- YANG Mei. Paleoenvironmental evolution in the neogene-quaternary period of the Sanhu Depression, Qaidam Basin[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.
- [13] 张英, 李剑, 张奎, 等. 柴达木盆地三湖地区第四系生物气源岩中可溶有机质丰度及地质意义[J]. *地质学报*, 2007, 86(12): 1716-1722.
- ZHANG Ying, LI Jian, ZHANG Kui, et al. Organic matter abundance in Quaternary source rocks and its application assessment of biogenic gas in Sanhu Lake Area, Qaidam Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 86(12): 1716-1722.
- [14] 刘建, 徐莹, 赵智鹏, 等. 生物气源岩评价指标体系研究[J]. *海洋地质前沿*, 2015, 31(1): 16-23.
- LIU Jian, XU Ying, ZHAO Zhipeng, et al. Research of the evaluation indicator system for biogenic gas source rocks[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2015, 31(1): 16-23.
- [15] 戚厚发, 关德师, 钱贻伯, 等. 中国生物气成藏条件[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
- QI Houfa, GUAN Deshi, QIAN Yibo, et al. Conditions of biogas accumulation in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.
- [16] 何登发, 李德生, 童晓光, 等. 中国沉积盆地油气立体综合勘探[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(2): 265-284.
- He Dengfa, Li Desheng, Tong Xiaoguang, et al. Integrated 3D hydrocarbon exploration in sedimentary basins of China[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(2): 265-284.
- [17] 王伟明, 卢双舫, 田伟超, 等. 吸附水膜厚度确定致密油储层物性下限新方法——以辽河油田大民屯凹陷为例[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(1): 135-140.
- WANG Weiming, LU Shuangfang, TIAN Weichao, et al. A new method to determine porosity and permeability cutoffs of tight oil reservoirs by using thickness of adsorption water film: A case study from the Damintun Sag, Liaohe oilfield[J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(1): 135-140.
- [18] FISSELL W H, CONLIS A T, DATTA S, et al. High Knudsen number fluid flow at near-standard temperature and pressure conditions using precision nanochannels[J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2011, 10(1): 425-433.
- [19] 李明宅, 张洪年. 生物气成藏规律研究[J]. *天然气工业*, 1997, 17(2): 18-22.
- LI Mingzhai, ZHANG Hongnian. Research on the formation of biogas reservoir[J]. *Natural Gas Industry*, 1997, 17(2): 18-22.
- [20] 李明宅, 李剑, 张凤敏, 等. 柴达木盆地三湖地区第四系生物气运聚成藏的定量研究[J]. *石油学报*, 2009, 30(6): 810-815.
- LI Mingcheng, LI Jian, ZHANG Fengmin, et al. Quantitative research on biogas migration-accumulation and pool-forming in the Quaternary of Sanhu area in Qaidam Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 30(6): 810-815.
- [21] 李明宅, 张洪年, 郜建军. 生物气的生成演化模式和初次运移特征[J]. *石油实验地质*, 1995, 33(2): 147-155.
- LI Mingzhai, ZHANG Hongnian, GAO Jianjun. Generation and evolution models and primary migration features of biogases[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 1995, 33(2): 147-155.

(编辑 徐佩)