https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.112

渤海湾盆地歧口凹陷沙一下亚段地质特征与页岩油勘探潜力

周立宏[1],陈长伟[1],韩国猛[1],杨　飞[1],马建英[1],周可佳[1],张　伟[1],黄传炎[2]

1. 中国石油天然气股份有限公司大港油田分公司,天津,300280
2. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室,湖北武汉 430074

摘　要: 利用系统取心、地震、测井、录井和系统取样分析资料,对歧口凹陷西南缘沙一下亚段页岩层系沉积环境、岩性及组合特征、生烃条件、储集空间、岩石脆性等方面展开综合研究.研究认为:(1)沙一下亚段为歧口凹陷古近系最大湖泛沉积,西南缘宽缓的湖湾背景有利于细粒沉积稳定分布,具备页岩油发育的沉积背景;(2)优质烃源岩纵向上连续分布(60~80 m),平面上稳定分布(1 518 km^2),埋藏适中(1 900~3 000 m),主体处于第1期大量生烃阶段,具备页岩油发育的有利生烃条件;(3)矿物成份多样,以碳酸盐岩和细粒混合沉积岩为主,薄互层白云岩、油页岩、泥岩纵向上交互发育,平面连续分布,具备页岩油发育的岩性及组合条件;(4)岩性组合及生烃条件等参数综合评价,纵向上识别出4个垂向甜点段(C1~C4),甜点段之间发育3个高GR、低RT泥岩隔板层;(5)优选有机质丰度、成熟度和甜点段厚度3个甜点评价参数,平面上识别出4个Ⅰ类甜点分布区共380 km^2,为下一步勘探的重点.

关键词: 渤海湾盆地;歧口凹陷;沙一下亚段;细粒沉积岩;页岩油;石油.

中图分类号: P618　　**文章编号:** 1000-2383(2019)08-2736-15　　**收稿日期:** 2019-01-05

Geological Characteristics and Shale Oil Exploration Potential of Lower First Member of Shahejie Formation in Qikou Sag, Bohai Bay Basin

Zhou Lihong[1], Chen Changwei[1], Han Guomeng[1], Yang Fei[1], Ma Jianyin[1], Zhou Kejia[1], Zhang Wei[1], Huang Chuanyan[2]

1. *China National Petroleum Corporation Ltd., Dagang Oilfield Branch, Tianjin* 300280, *China*
2. *Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan* 430074, *China*

Abstract: Using system coring, seismic data, logging, and various analysis data, comprehensive research focus on the sedimentary environment, lithology, hydrocarbon generation conditions, reservoir space and reservoir brittleness of the lower first member of Shahejie formation in Qikou sag, Bohai Bay Basin.The study concluded that: (1) The maximum lake flooding period of the Paleogene in the lower first member of Shahejie formation of Southwestern margin Qikou sag has wide gentle slope background which is conducive to the stable distribution of fine-grained sediments and conducive to shale oil development; (2) High-quality hydrocarbons are continuously distributed in the longitudinal direction (60~80 m) and with wide distribution area(1 518 km^2), formation depth in 1 900~3 000 m which is the first phase of the massive hydrocarbon generation phase and have hydrocarbon-generating conditions for shale oil development; (3) Diverse mineral composition and mainly with carbonate rocks and mixed fine-grained sedimentary rocks, thin interbedded dolomite, oil shale, mudstone alternately develop in the longitudinal

作者简介: 周立宏(1968-),男,教授级高工,主要从事油气勘探研究与生产管理工作. ORCID:0000-0001-9323-4479. E-mail:zhoulh@petrochina.com.cn

引用格式: 周立宏,陈长伟,韩国猛,等,2019.渤海湾盆地歧口凹陷沙一下亚段地质特征与页岩油勘探潜力.地球科学,44(8):2736-2750.

direction, plane continuous distribution; (4) C1, C2, C3 and C4 dessert are identified in the longitudinal direction which contains three high-GR and low-RT mudstone separator layers; (5) Organic matter abundance, maturity and dessert section thickness can be used for dessert evaluatio and four Class I dessert distribution areas(380 km^2) were identified on the plane which is the main exploration target of next step.

Key words: Bohai Bay Basin; Qikou sag; lower first member of Shahejie formation; fine-grained sedimentary rock; shale oil; petroleum.

0　引言

页岩油气等概念的提出主要源于美国巴肯(Bakken)(Richard,2007)、鹰潭(Eagle Ford)(Kristen,2018)等海相盆地的研究与勘探实践,2017年美国页岩气产量达4 721亿方,页岩油产量达36 272万t(马新华等,2018),对我国相关领域的研究及勘探实践起到了重要的借鉴意义.

近年来,我国在页岩气领域开展了大量的技术攻关与先导实验并已在四川盆地奥陶系五峰组—志留系龙马溪组海相页岩取得了重大突破,探明了焦石坝(郭彤楼和张汉荣,2014)、长宁—威远(马新华等,2018)等千亿立方米级的大气田.页岩油领域目前尚处于探索阶段,如鄂尔多斯盆地延长组半深湖—深湖页岩(邱振等,2016),准噶尔盆地二叠系半深湖—深湖页岩、云质泥岩等(郑民等,2018)均发育一定规模页岩油储量,但鲜有工业性开发的报道.渤海湾盆地沧东凹陷孔店组二段泥页岩中15口井均获得工业油流,措施成功率100%,其中KN9井获得日产29.6 t的高产工业油流,后期稳产5.6 t/d,试采120 d累计采油1 800 t,针对甜点段设计GD1701H和GD1702H两口水平井,水平段页岩油层钻遇率达96%,体积压裂后产能稳定在20 m^{3}以上(周立宏等,2018).众多勘探实例证实页岩内油气资源量丰富,甜点段经过工程改造后具备形成稳产工业油气流条件,源内找油是今后相当长时期的重要主攻方向之一,业已成为陆相盆地重要勘探领域,有望带来石油工业的储量增长新高峰.

渤海湾盆地黄骅坳陷歧口凹陷西南部沙一下亚段油页岩大面积稳定分布(1 500 km^2),其有机质类型好(以Ⅰ型、Ⅱ$_1$型为主),有机质丰度高(TOC>2%),油页岩厚度15~40 m,在埋深较大的歧北地区,R_o值一般为0.54%~0.90%,进入成熟阶段,是一套重要生烃源岩(于学敏等,2011;王振升等,2014).2018年,Q101x1井沙一下亚段试油泵排日产达22.6 m^{3}工业油流,该区页岩油勘探取得重大突破,证实沙一下亚段是重要的页岩油勘探领域之一.本文针对歧口凹陷西南缘沙一下亚段页岩段沉积环境、岩性组合特征、生烃特征、储层及含油性特征、甜点评价等方面展开论述,以期对该区页岩油勘探开发起一定的指导意义.

1　地质背景

歧口凹陷为渤海湾盆地次级断陷构造单元,属古近纪以来形成的新生代陆内伸展湖盆,主体位于渤海湾盆地中心(陈世悦等,2012a).古近系包括沙河街组和东营组2套地层(图1),沙河街组进一步划分为沙三段(Es_3)、沙二段(Es_2)、沙一段(Es_1),东营组进一步划分为东三段(Ed_3)、东二段(Ed_2)和东一段(Ed_1).其中,沙一段进一步划分为沙一下(E$s_1^{下}$)、沙一中(E$s_1^{中}$)和沙一上(E$s_1^{上}$)3个亚段,沙一下亚段自下而上又被细分为滨Ⅰ、板4、板3、板2共4个油组.在古近系这个二级层序内,存在SB3和SB4两个区域性不整合界面,因此将古近系进一步划分为3个三级层序,分别为SQEs_3(SQ$_2$)、SQEs_2~SQEs_1^z(SQ$_3$)和SQEs_1^s~SQEd(SQ$_4$),歧口凹陷缺失古近系孔店组地层(SQ$_1$)(陈世悦等,2012b;蒲秀刚等,2014;高福红等,2017;赵贤正等,2017a).

沙一下亚段是三级层序单元SQ$_3$的湖侵体系域,此时歧口凹陷西南缘(主要包括港西凸起周缘、歧北中高斜坡区、歧南中高斜坡区和埕海中高斜坡区)斜坡倾向方向为"水上隆起—湖坪—水下低隆起—湖湾—半深湖—深湖"沉积环境,斜坡走向方向为"隆—洼"相间的地形(图1),总体为封闭—半封闭的宽缓咸化湖湾环境(陈世悦等,2012b),埕宁隆起、港西凸起、孔店凸起和沧县隆起等物源对该区影响较弱(蒲秀刚等,2014),该时期歧口凹陷西南缘沙一下亚段发育一套细粒沉积岩,仅在埕宁隆起北缘发育辫状河三角洲砂体.

2　岩石学特征

2.1　矿物成分

细粒沉积岩主要由粒径小于62.5 μm的粘土级

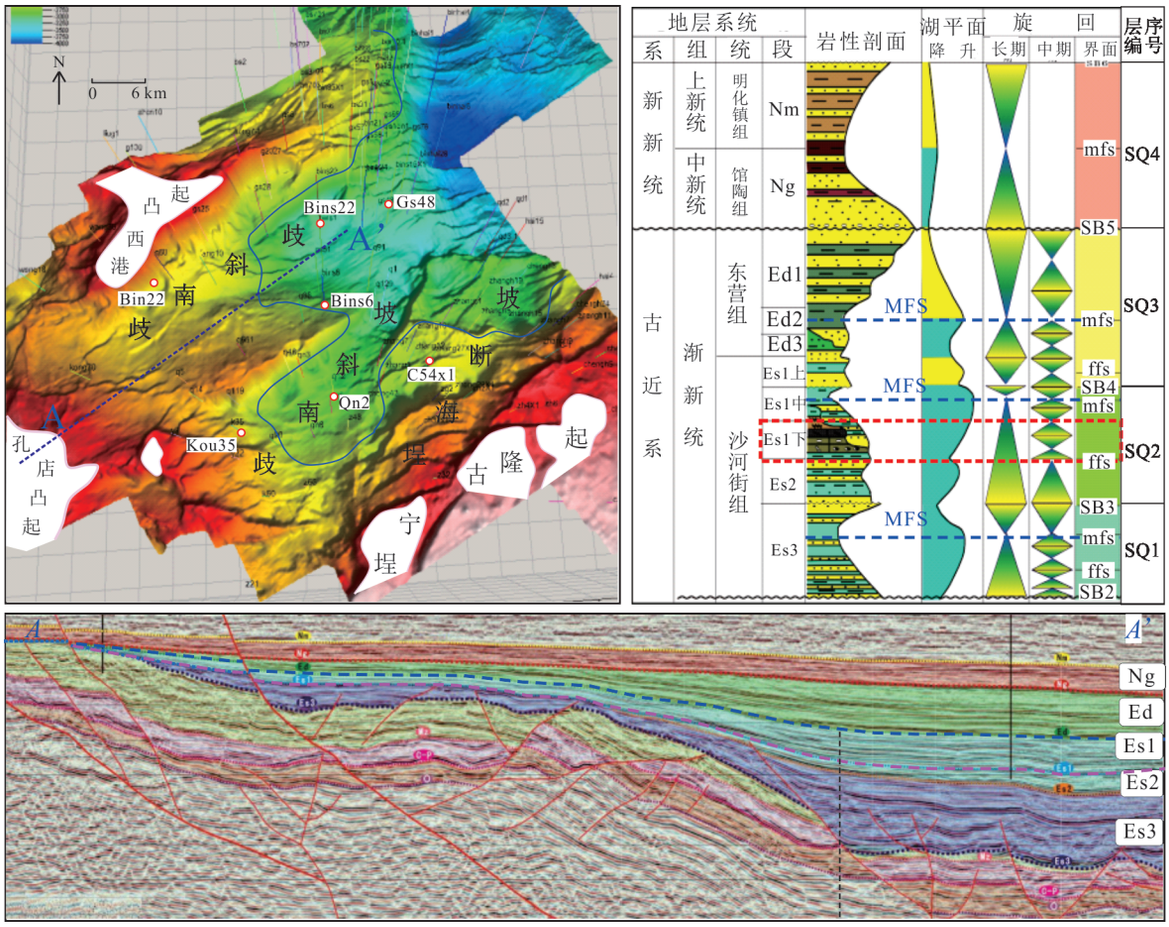


图 1　岐口凹陷西南缘沙一下亚段地层与沉积环境

Fig.1　Stratigraphy and sedimentary environment of the lower first member of Shahejie formation in the southwestern of Qikou depression

和粉砂级沉积物组成(姜在兴等,2013),矿物成分主要包括粘土、长石－石英和碳酸盐矿物,根据衍射矿物成分可将细粒沉积岩划分为长英沉积岩、碳酸盐岩、黏土岩和混合沉积岩 4 大类(周立宏等,2016). 细粒沉积岩纵向上表现为纹层状或块状沉积,平面上稳定分布,具备良好的生烃条件和一定的储集空间,含油气特征明显,非黏土岩段脆性矿物含量较高,具有较好的可压裂性,整体含油气,甜点段富集高产,通过分段分簇大型压裂改造,具备长期稳产的有利条件(周立宏等,2018).

岐口凹陷西南缘沙一下亚段录井岩性主要包括泥页岩类(泥岩、油页岩、白云质泥岩、灰质泥岩和灰质页岩)和碳酸盐类(白云岩、灰质白云岩、泥质白云岩、生物灰岩、白云质灰岩、含白云石灰岩、含泥灰岩、泥灰岩),并以泥页岩和白云岩为主,整体为一套细粒沉积岩. 以 C54x1 井为例,该井沙一下亚段地层总厚度为 81.5 m,泥页岩类 72 m,白云岩类 9 m. 泥页岩类占地层总厚度的 50% 以上.

沙一下亚段地层岩石主要由石英、钾长石、斜长石、方解石、白云石、铁白云石、文石、菱铁矿、黄铁矿、黏土等 10 种矿物组成. C54x1 井 77 m 取心段内 193 块次全岩 X 衍射矿物分析结果显示,该段岩心石英含量 2.1%～30.4%(平均 17.8%),钾长石含量 0～3.3%(平均 1.0%),斜长石 0～4.8%(平均 2.3%),方解石含量 0～59.20%(平均 18.15%),白云石含量 0～83.50%(平均 18.15%),铁白云石含量 0～40.4%(平均 6.0%),文石含量 0～30.30%(平均 4.27%),菱铁矿含量 0～32.0%(平均 2.0%),黄铁矿含量 0～30.0%(平均 3.6%),黏土含量 6.6%～51.3%(平均 29.0%). 碳酸盐矿物约占矿物总量的 44.2%,黏土矿物约占矿物总量的 29.1%,长英质矿物约占矿物总量的 21.2%,除个别样品外,菱铁矿和黄铁矿占比相对较小(图 2).

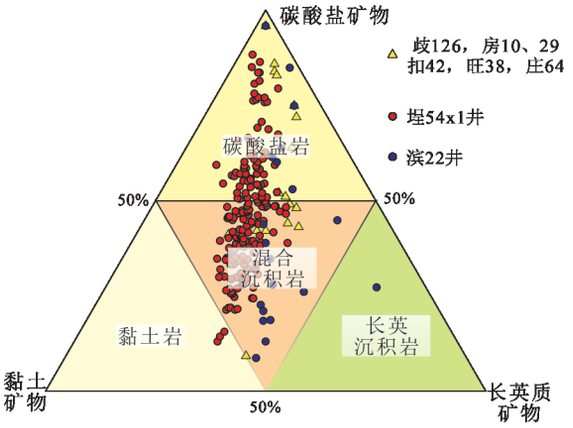


图2　歧口凹陷西南缘沙一下亚段细粒沉积岩X衍射矿物三端元图

Fig.2　Three-terminal element of fine-grained sedimentary rock X-ray diffraction mineral of the lower first member of Shahejie formation in the southwestern of Qikou depression

2.2　岩性特征

根据细粒沉积岩岩石矿物命名法则(周立宏等,2016),Bin22、C54x1、Q126等井228块样品中,岩性主要划分为碳酸盐岩和混合沉积岩2大类,总体表现为以混合沉积岩为主(占63.2%),碳酸盐岩次之(占36.8%),其中碳酸盐类矿物含量大于75%的样品约占样品总量的10%(图2).

根据方解石、文石、白云石和铁白云石含量进一步把碳酸盐岩划分为白云岩类和灰岩类.碳酸盐矿物含量占全岩矿物含量的50%以上,白云岩类白云石含量大于方解石和文石含量,灰岩类方解石和文石含量大于白云石含量.埕54x井沙一下71个碳酸盐岩样品中,白云岩样品41个,占比57.7%.

白云岩类主要包括泥晶云岩、微晶云岩、颗粒微晶云岩、灰质云岩、云质灰岩、砂质云岩和泥质云岩7种:泥晶白云岩的晶体粒度范围介于隐晶质(偏光显微镜无法识别)到微晶(单个晶体颗粒可以被偏光显微镜识别)之间(图3①);微晶白云岩偏光显微镜下可见晶粒大小约2~5 μm,铁白云石含量约占矿物总量的45%,呈他形—半自形,晶粒呈分散状(图3②);微晶颗粒云岩阴极发光下白云石呈隐晶结构,粒屑主要为螺及螺屑(成分为白云石),其次为介屑(壳壁成分为方解石)(图3③)及砂屑(图3⑥),白云石发褐色光为主,部分螺及介形虫体腔充填白云石发桔黄色光,介屑发棕黄色光;灰质云岩呈薄层条带状互层(图3④),云质成分呈灰白色条带分布,灰质成分呈暗红色条带状分布,白云石和方解石均以泥晶为主;砂质云岩内石英含量较高,砂质主要成分主要为次棱角—次圆状粉砂级石英、长石颗粒(图3⑥);泥质云岩主要为薄层条带状暗色泥岩与浅灰白色白云岩呈微波状互层(图3⑦).

灰岩类主要包括云质灰岩和泥晶白云质灰岩2种:云质灰岩与灰质云岩向上,亦呈薄层条带状互层状(图3⑤),灰质成分多与云质成分;泥晶白云质灰岩内部灰质部分被白云岩化,薄片下可观察到微晶成分和生物碎屑(图3⑧).

混合沉积岩主要包括灰质泥岩和灰质泥页岩2种,其主要成分为灰质和粘土质矿物,层理、页理发育的成为泥页岩(图3⑨,3⑩),页理不发育的成为灰质泥岩(图3⑪).

除细粒沉积岩外,该区局部层段还见有中—细砂岩(图3⑫),颗粒分选中等,中等—次磨圆状,粘土矿物含量低,主要发育在埕宁隆起周缘高斜坡区.

2.3　岩性组合特征

沙一下亚段细粒沉积岩段主要由碳酸盐、黏土、陆源碎屑(长石和石英)成分组成,岩性分异程度相对于沧东凹陷孔二段细粒沉积岩较高,出现白云石含量较高的白云岩和黏土矿物成分含量较高的泥岩、灰质页岩和灰质泥岩,长英质矿物含量相对较低,埕54x1井取心段长英质矿物含量在2.0%~34.8%,平均21.2%,在岩性剖面上仅见2薄层泥质粉砂岩和钙质砂岩(图4).

该区沙一下亚段碳酸盐岩测井响应具有高电阻低伽马的特征,碳酸盐岩段内夹有相对高电阻和低伽马薄层白云岩,混合沉积岩(泥岩、灰质泥岩、灰质页岩)具有低电阻和高伽马的特征,二者具有很好的对应关系.埕54x1井取心段内存在7层高伽马低阻混合沉积岩,由上至下依次编号为M1~M7,2层高伽马低阻混合沉积岩之间夹持一套以碳酸盐岩为主,并含有一定量碳酸盐矿物含量较高的混合沉积岩,由上至下依次编号为C1~C6.

M段内总体变现为高伽马、低电阻、高黏土、低碳酸盐岩的特征,碳酸盐岩矿物中方解石和文石含量大于白云石含量.其中,自然伽马值分布在91.8~119.5 API,平均99.8 API;电阻率值分布在5.8~13.9 Ω/m,平均9.6 Ω/m;黏土矿物含量分布在24.6%~35.8%,平均32.8%;长英质矿物含量分布在20.5%~27.9%,平均24.3%;碳酸盐矿物含量分布在31.4%~50.6%,平均37.0%;方解石和文石矿物含量分布在11.2%~30.8%,平均19.2%;白云石

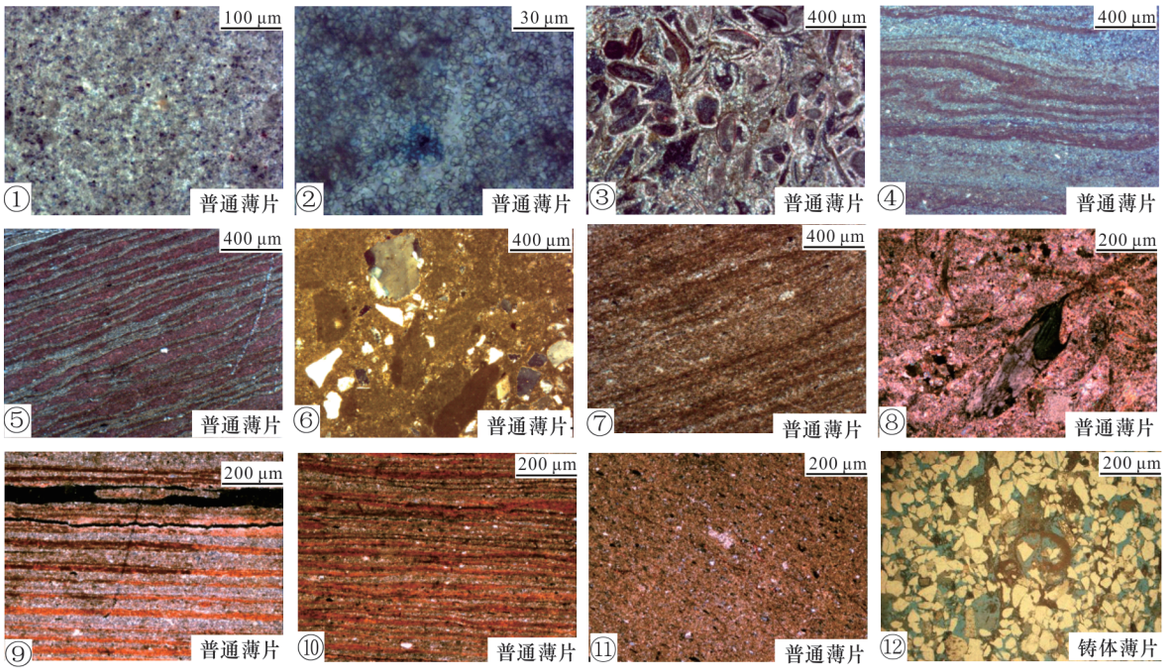


图3　歧口凹陷西南缘沙一下亚段细粒沉积岩岩性特征

Fig.3　Lithologic characteristics of fine-grained sedimentary rocks of the lower first member of Shahejie formation in the southwestern of Qikou depression

①. 泥晶白云岩，Bin22井，2 599.40 m，单偏光；②. 微晶云岩，Bin22井，2 601.90 m，单偏光，铁白云石胶结；③. 微晶颗粒云岩，W38井，1 987.40 m，单偏光；④. 灰质云岩，ZC1-4井，2 954.30 m，单偏光；⑤. 云质灰岩，F29井，2 585.90 m，单偏光；⑥. 砂质云岩，C54x1井3 227.30 m，单偏光；⑦. 泥质云岩，F29井，2 561.45 m，单偏光；⑧. 泥晶白云质灰岩，Q123井，2 881.00 m，单偏光；⑨ 灰质泥页岩，Z64井，2 602.39 m，正交光；⑩. 灰质泥页岩，Q106井，2 262.04 m，正交光；⑪. 灰质泥岩，Z64井，2 602.39 m，正交光；⑫. 中－细砂岩，Kou42井，2 300.45 m，单偏光，颗粒间被泥质和方解石近全充填

矿物含量分布在11.7%～25.1%，平均17.8%.

C段内总体变现为低伽马、高电阻、低黏土、高碳酸盐岩的特征，碳酸盐岩矿物白云石含量大于中方解石和文石含量．其中，自然伽马值分布在82.1～91.3 API，平均86.7 API；电阻率值分布在8.8～26.0 Ω/m，平均16.2 Ω/m；黏土矿物含量分布在25.6%～33.7%，平均27.6%；长英质矿物含量分布在18.4%～23.5%，平均19.7%；碳酸盐矿物含量分布在36.6%～52.5%，平均47.7%；方解石和文石矿物含量分布在8.7%～26.8%，平均19.0%；白云石矿物含量分布在18.8%～43.9%，平均28.8%.

C2和C4为2套高电阻率组合段，在歧口西南缘平面分布稳定，可作为地层对比标志层．

3　沉积微相特征

沙一下亚段沉积时期，歧口西南缘进入断坳转换演化阶段，基底的整体沉降增强，在胡阔—高位体系域湖平面总体较高，孔店凸起、羊三木凸起淹没于水下，外源碎屑供给收到抑制，波浪作用增强，以及湖水咸化，成为碳酸盐岩滩坝发育的有利条件（蒲秀刚等，2014；赵贤正等，2017b）．该层段泥－微晶灰质白云岩（白云质灰岩）、泥－微晶白云岩、亮晶生物碎屑灰质白云岩，具有富钙低镁、有序度较低的特征是快速交代的准同生期产物（陈世悦等，2012a；高福红等，2017）.

根据岩相和古地形特征，将该区沉积相划分为粒屑滩、云灰湾、云洼－灰云坪、辫状河三角洲平原、辫状河三角洲前缘、远岸水下扇、浊积体、滨浅湖、半深湖－深湖等9种（图5）.

滨Ⅰ油组沉积时期，湖平面相对较低，孔店凸起和羊三木凸起相连，大面积出露于水上，凸起范围较大．孔店－羊三木凸起周缘大面积发育粒屑滩沉积，向北延伸至齐家务、周清庄和沈青庄地区，向东呈条带状延伸至埕宁隆起．围绕粒屑滩和埕宁隆起区发育环带状云灰湾沉积，局部地区灰岩发生白云岩化，为云洼－灰云坪相．孔店－羊三木凸起周缘发育3个小型辫状河三角洲.

板4油组沉积时期，湖平面上升，孔店凸起和羊

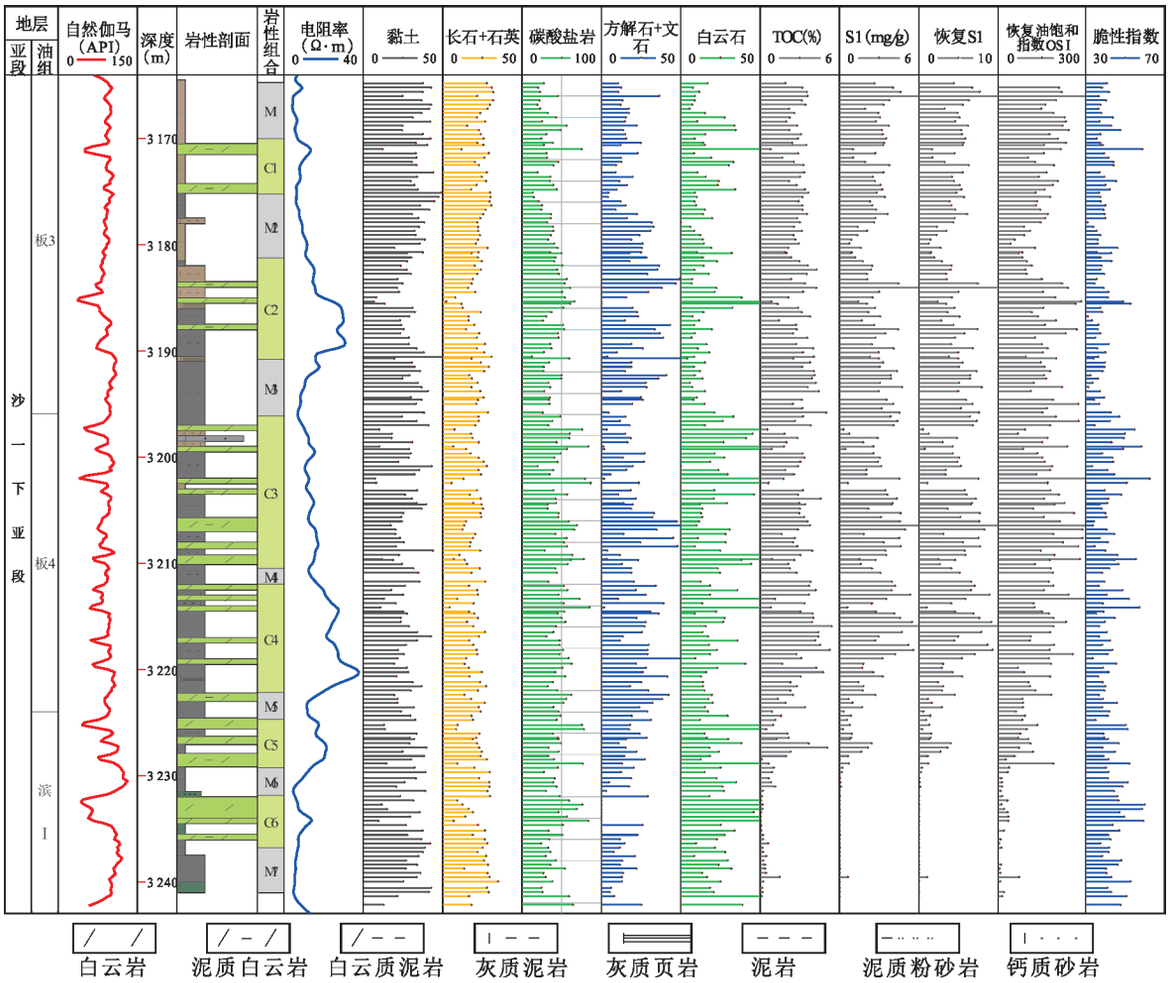


图 4　歧口西南缘 C54x1 井沙一下取心段岩性组合特征

Fig.4　Well C54x1 lithologic combination characteristics of the lower first member of Shahejie formation in the southwestern of Qikou depression

三木凸起出露面积缩小,东侧粒屑滩分布范围随湖进方向向西收缩至羊三木地区,港西凸起西侧粒屑滩分布面积扩大,该时期云灰湾广布歧口西南缘地区,灰岩发生白云岩化面积增大.孔店凸起、羊三木凸起和港西凸起 3 个内部物源供给能力较弱,凸起周缘不发育扇体,埕宁隆起物源供给能力较滨Ⅰ时期加强,在埕北低段阶区发育辫状河三角洲相.

板 2 和板 3 沉积时期,湖平面进一步上升,基本继承了板 4 沉积时期的古地貌格局,该时期沉积环境一不利于碳酸盐岩发育,仅在齐家务、周清庄、六间房和赵家堡等局部地区发育云洼灰云坪相.该时期内部物源供给能力较弱,埕宁隆起物源供给能力进一步增强,形成 2 支辫状河三角洲扇体,扇体末端发育远岸水下扇相.

4　烃源岩特征

4.1　有机质丰度

歧口凹陷西南缘沙一下亚段油页岩分布面积达 3 027 km^2,油页岩厚度 15~35 m,有机质丰富 TOC 值分布在 2.43%~5.93%(于学敏等,2011),是歧口凹陷除沙三[1]外又一套重要的生烃源岩(王振升等,2014).

本次研究中,利用 C-744 碳硫分析仪,采用沉积岩中总有机碳的测定方法(GB/T19145-2003)对 C54x1 井沙一下亚段取心段 193 块分析联测样品中有机碳进行检验.参考烃源岩评价标准(Peters,1998):差烃源岩 TOC 分布在 0~0.5%,热解 S_1 分布在 0~0.5 mg/g,热解 S_2 分布在 0~2.5 mg/g;一般烃源岩 TOC 分布在 0.5%~1.0%,热解 S_1 分布在 0.5~1.0 mg/g,热解 S_2 分布在 2.5~5.0 mg/g;好烃源岩

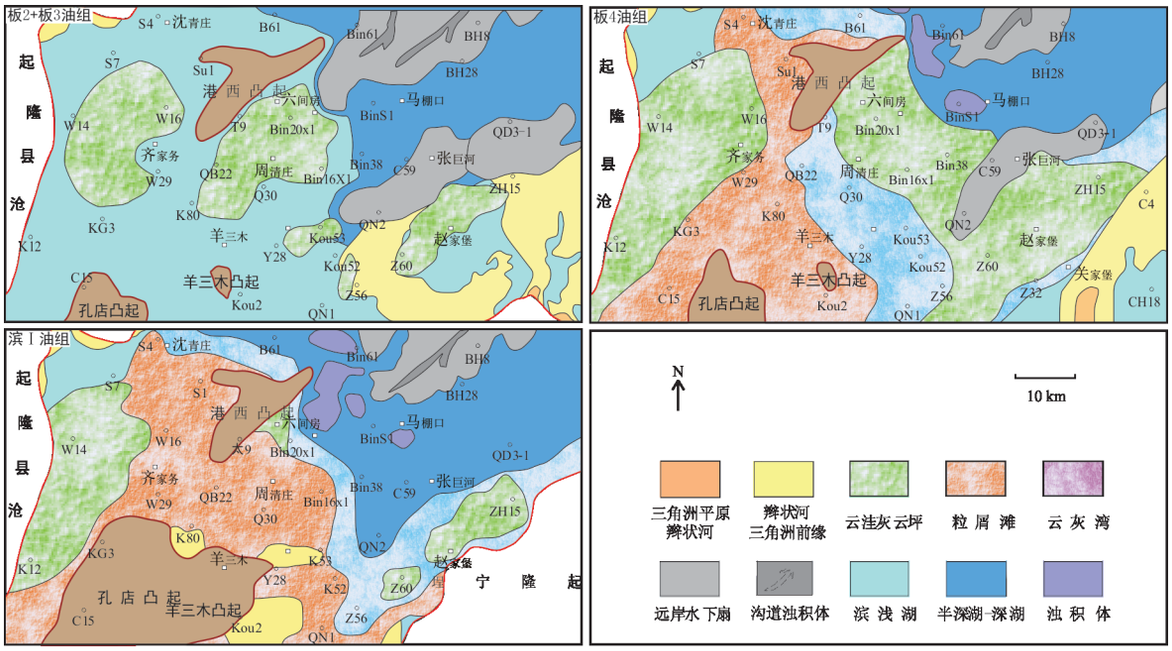


图 5　歧口凹陷西南缘沙一下亚段各油组岩相古地理特征

Fig.5　Lithofacies paleogeographic characteristics of each oil group of the lower first member of Shahejie formation in the southwestern of Qikou depression

TOC 分布在 1%～2%，热解 S_1 分布在 1～2 mg/g，热解 S_2 分布在 5～10 mg/g；很好烃源岩 TOC 分布在 2%～4%，热解 S_1 分布在 2～4 mg/g，热解 S_2 分布在 10～20 mg/g；极好烃源岩 TOC 大于 4%，热解 S_1 大于 4 mg/g，热解 S_2 大于 20 mg/g.

结果显示(图 4)，除油页岩外，该区泥岩、灰质泥岩、泥质灰岩及白云岩均具有较好的生烃潜力. 该井有机碳含量在 0.05%～5.40%(平均 2.44%)，热解 S_1 分布在 0～8.21 mg/g(平均 2.38 mg/g)，热解 S_2 分布在 0.03～101.69 mg/g(平均 26.00 mg/g)，总体达到很好烃源岩标准. 其中，差烃源岩占 13.5%，一般烃源岩占 7.5%，好烃源岩占 12.4%，很好烃源岩占 56.0%，极好烃源岩占 10.9%(图 6).

在各岩性组合段内，M1～M4、C1～C4 为很好烃源岩段，M5 和 C5 为好烃源岩段，M6 为一般烃源岩段，M7 和 C6 差烃源岩段. 其中：M1 段 TOC 为 2.77%，热解 S_1 为 3.64 mg/g，热解 S_2 为 27.60 mg/g；C1 段 TOC 为 2.72%，热解 S_1 为 2.67 mg/g，热解 S_2 为 28.95 mg/g；M2 段 TOC 为 2.75%，热解 S_1 为 1.93 mg/g，热解 S_2 为 27.12 mg/g；C2 段 TOC 为 2.96%，热解 S_1 为 2.83 mg/g，热解 S_2 为 32.48 mg/g；M3 段 TOC 为 3.%，热解 S_1 为 3.71 mg/g，热解 S_2 为 41.36 mg/g；C3 段 TOC 为 2.62%，热解 S_1 为 3.09g/g，热解 S_2 为 26.60 mg/g；M4 段 TOC 为 3.28%，热解 S_1 为 3.53 mg/g，热解 S_2 为 41.56 mg/g；C4 段 TOC 为 3.48%，热解 S_1 为 3.53 mg/g，热解 S_2 为 41.56 mg/g；M5 段 TOC 为 1.94%，热解 S_1 为 1.21 mg/g，热解 S_2 为 13.72 mg/g；C5 段 TOC 为 1.75%，热解 S_1 为 0.92 mg/g，热解 S_2 为 13.60 mg/g；M6 段 TOC 为 0.74%，热解 S_1 为 0.07 mg/g，热解 S_2 为 2.40 mg/g；C6 段 TOC 为 0.15%，热解 S_1 为 0.01 mg/g，热解 S_2 为 0.22 mg/g；M7 段 TOC 为 0.39%，热解 S_1 为 0.07 mg/g，热解 S_2 为 1.3 mg/g.

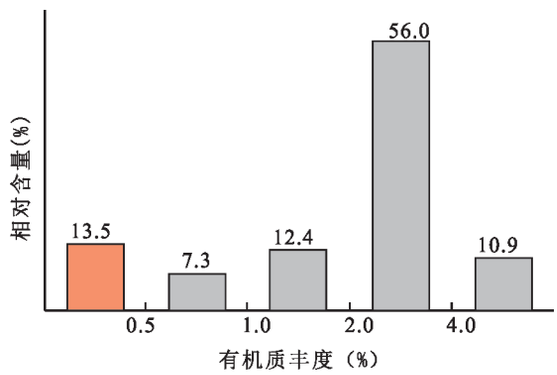


图 6　歧口凹陷西南缘 C54x1 井沙一下亚段有机质丰度

Fig.6　Well C54x1 organic abundance of the lower first member of Shahejie formation in the southwestern of Qikou depression

表 1　歧口凹陷西南缘 Bin22 井沙一下亚段干酪根组分表

Table 1　Well Bin22 kerogen component of the lower first member of Shahejie formation in the southwestern of Qikou depression

岩心深度(m)	干酪根质量(g/100g)	腐泥组(%)			壳质组(%)						镜质组(%)			惰质组(%)
		浮游藻类体	腐泥无定形体	合计	树脂体	角质体	孢粉体	菌孢体	腐质无定形体	合 计	富氢镜质体	镜质体	合计	丝质体
2 563.85	1.762	3.13	70.09	73.21		3.13	6.25	0.89	11.16	21.43	2.68	2.68	5.36	
2 564.29	1.334	4.21	70.53	74.74		4.74	6.84	0.53	4.74	16.84	3.16	4.74	7.89	0.53
2 567.35	1.582	1.38	68.66	70.05		12.90	6.45	0.46	4.15	23.96	1.84	4.15	5.99	
2 569.80	1.419	1.98	78.71	80.69		3.96	7.43	0.50		11.88	4.46	2.97	7.43	
2 578.91	2.096	3.29	73.71	77.00		12.21	3.29	0.47	2.82	18.78	3.76	0.47	4.23	
2 588.32	1.978	8.73	56.00	64.73	1.09	12.00	4.00	0.36	10.55	28.00	3.27	4.00	7.27	
2 597.67	1.340	6.45	73.79	80.24	0.40	8.47	2.02	0.40	2.82	14.11	2.42	3.23	5.65	
2 603.87	1.459	10.19	63.02	73.21	1.13	9.06	2.26		9.06	21.51	4.91	0.38	5.28	
2 610.31	1.358	8.70	69.57	78.26	0.97	9.18	3.38		0.48	14.01	6.28	1.45	7.73	
2 619.62	1.319	10.50	74.89	85.39		5.02	1.37		4.11	10.50	0.91	3.20	4.11	

4.2　干酪根类型

干酪根类型鉴定过程中,干酪根分离采用沉积岩中干酪根分离方法(GB/T 19144-2003),采用透射光—荧光干酪根显微组分鉴定及类型划分方法(SY/T 5125-2014)鉴定干酪根类型组分.

Bin22 井 10 个样品中,干酪根含量在 1.319～2.096 g/100 g 之间,平均 6 g/100 g. 干酪根各组分中,腐泥组含量最高,壳质组含量次之,镜质组含量较少,仅在 2 564.29 m 深度范围内发现少量惰性组丝质体(含量为 0.53%). 其中,腐泥组含量分布在 64.73%～85.39%(平均 75.75%),壳质组含量分布在 10.5%～28.0% 之间(平均 18.1%),镜质组含量分布在 4.11%～7.89%(平均 6.09%). 腐泥组中腐泥无定型体含量较高,分布在 64.73%～85.39%(平均 75.75%). 干酪根类型指数分布在 76.6～88.3,平均 83.2,干酪根以Ⅰ型为主,并含有少量$Ⅱ_1$型.

4.3　有机质成熟度

52 个样品镜质体反射率及其对应的取样深度数据分析结果显示,有机质成熟度 R_o 值 0.35% 对应的深度为 1 800 m,机质成熟度 R_o 值 0.5% 对应的深度为 2 500 m(图 7). 低熟油生烃阶段相应的源岩镜质体反射率 R_o 大体上在 0.2%～0.7% 范围内,相当于干酪根生烃模式的未成熟和(或)低成熟阶段(据王铁冠等,1996). 从现有勘探成果来看,该区沙一下页岩 R_o 在 0.35% 时已经开始生油;R_o 大于 0.5% 时页岩大量生油. 关于该区沙一下页岩油低熟油生烃机理研究需要进一步深入.

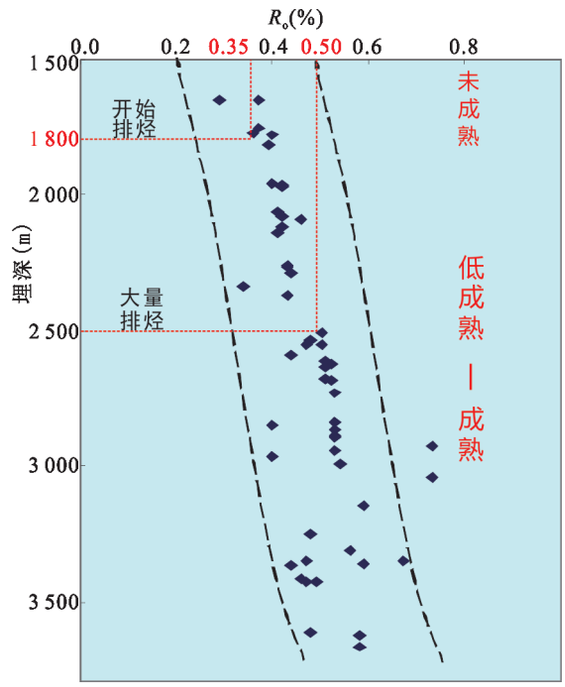


图 7　歧口凹陷西南缘沙一下亚段成熟度与深度关系曲线

Fig.7　Maturity and depth relationshipof the lower first member of Shahejie formation in the southwestern of Qikou depression

总体上,该区烃源岩空间分布广,有机质丰度高、干酪根类型好,大量生烃门限与有机质成熟度匹配关系较好,处于大量生烃阶段,为页岩油成藏提供了很好的源岩条件.

5 主要岩性孔缝特征

受沉积、成岩和构造作用控制，本区细粒沉积岩储集空间多样，其中关于碳酸盐岩储集孔空间特征前人已经做过大量研究(闫伟鹏等，2014；高福红等，2017；姚悦等，2017)．本文在结合前人研究基础之上，进一步总结碳酸盐岩、泥页岩、长英沉积岩及其过渡岩性内储集空间类型．

滨浅湖、半深湖－深湖泥岩：以长英质矿物和粘土矿物为主，靠近碳酸盐岩的泥岩，泥岩发生灰质化，以晶间孔、晶内孔和有机质孔等小孔为主，构造缝和成岩缝不发育，有机质生烃作用产生少量异常压力缝，在细粒沉积岩中，泥岩孔隙度最低．

半深湖－深湖泥页岩：以长英质矿物和粘土矿物为主，粒度相对较细，粒间孔和溶蚀孔不发育，受沉积和构造因素控制，纹层和层理较为发育(图3⑨，3⑩，图8⑬)，层间缝若被斜交的构造裂缝相互连通，形成非常好的连通裂缝网，能够改善渗流能力．在泥页岩、灰质泥页岩、泥质灰岩、长英沉积岩和混合沉积岩中，由于富长石和石英矿物层与富碳酸盐或富含粘土矿物层在垂向上互层而产生纹层缝(图3⑨，3⑩，图8⑯)．

粒屑滩生物碎屑灰岩、鲕粒灰岩等颗粒碳酸盐岩：生物孔、粒间孔、溶蚀孔、晶晶孔均较为发育，此外该类型灰岩还发育有开度较大的裂缝，储集物性好，该类型孔隙长英沉积岩、碳酸盐岩及其过渡岩类较为常见．碳酸盐岩中可见鲕粒间孔(图8①)、鲕粒—生物碎屑孔隙(图8⑧)，长英沉积岩中见有石英颗粒间孔(图3⑫)、鲕粒与石英颗粒间孔(图3⑫)．颗石灰岩具有十分发育的微粒间孔和粒内微孔(图5)，缺乏粒间胶结，纹层内的连通性“较好”．粒内溶蚀孔是碎屑颗粒发生溶蚀而产生的孔隙类型，主要包括鲕内溶孔、生物介壳内溶孔、砾屑内溶孔和藻内溶孔等．

云灰湾白云质灰岩、泥晶灰岩、泥质灰岩：生物孔不发育，晶间孔、溶蚀孔、构造缝和成岩缝较为发育，白云化灰岩晶间孔进一步增加，脆性增加，裂缝较为发育，是该区较好储集体．颗石灰岩在具有大量粒间孔的同时，生烃增压作用能够产生异常压力缝(BinS18井压力系数为1.7，证实异常有异常压力存在)，改善了缝网结构，储集物性好．

云洼—灰云坪白云岩、泥质白云岩、灰质白云岩、泥晶白云岩：粒间孔、晶间孔和溶蚀孔较为发育，并以溶蚀孔为主，白云岩储层脆性高，受北大港断层、南大港断层、孔店油田主断层、扣村断层、黄骅断层、羊二庄断层、赵北断层等断裂控制，该区碳酸盐岩含量较高的岩石中岩心见有高角度、顺层缝均有发育，多数裂缝为开启状态(图8⑪，8⑫)，同一块岩心内见有2期不同成因裂缝，前期裂缝被胶结物胶结(图8⑩)．构造缝开度较大的在2～3 mm，分布广泛、延伸长，产状比较稳定．通过对4口井34块白云岩样品统计，白云岩储层中溶蚀孔占总孔隙的43.05%，裂缝占总孔隙度的52.11%．

该区细粒沉积岩孔缝类型多样，半深湖－深湖页岩纹层和层理较为发育，粒屑滩生物碎屑灰岩、鲕粒灰岩生物孔、溶蚀孔和裂缝较为发育，云灰湾白云岩类溶蚀孔、晶间孔和裂缝较为发育，在成岩过程中产生的成岩收缩缝可形成复杂的网状裂缝(图8⑮)，辫状河三角洲、远岸水下扇、浊积砂岩粒间孔较为发育，页岩、碳酸盐岩和砂岩均是该区较好储层．泥岩以晶间孔、晶内孔和有机质孔等小孔为主，储集物性相对较差．

Bin22井30块储集物性测试样品显示，沙一下细粒岩段孔隙度分布在1.34%～17.2%(平均8.67%)，渗透率分布在0～9.0 mD之间(平均1.1 mD)(图9)，储集层孔隙度相对较高，但渗透率较低，36.7%的样品属于低孔特低渗储层，63.3%的样品属于致密储层，一般无自然产能，需工程改造．

6 甜点评价与勘探潜力

细粒沉积岩备良好的生烃条件、一定的储集空间、明显的含油气特征，其脆性矿物含量较高，具有较好的可压裂性，细粒岩油气藏空间上连续稳定分布，整体含油气，甜点段富集高产，通过分段分簇大型压裂改造，具备长期稳产的有利条件(周立宏等，2018)，通过“七性”关系综合评价，优中选优，锁定甜点段．

6.1 评价标准

水平井分簇分段大型压裂改造技术为此类型油气开发提供了重要的技术保障，沧东凹陷孔二段官东1701H水平井，水平段起点埋深为3 000 m，井底垂直深度达3 851.38 m，井底水平位移1 984.01 m，歧口凹陷沙一下亚段地层埋深分布在1 900～3 000 m，现有水平井施工工艺能够满足该区基本地质条件，甜点段分布主要受生烃条件、储集条件、含油性、盖层条件和储层脆性等因素

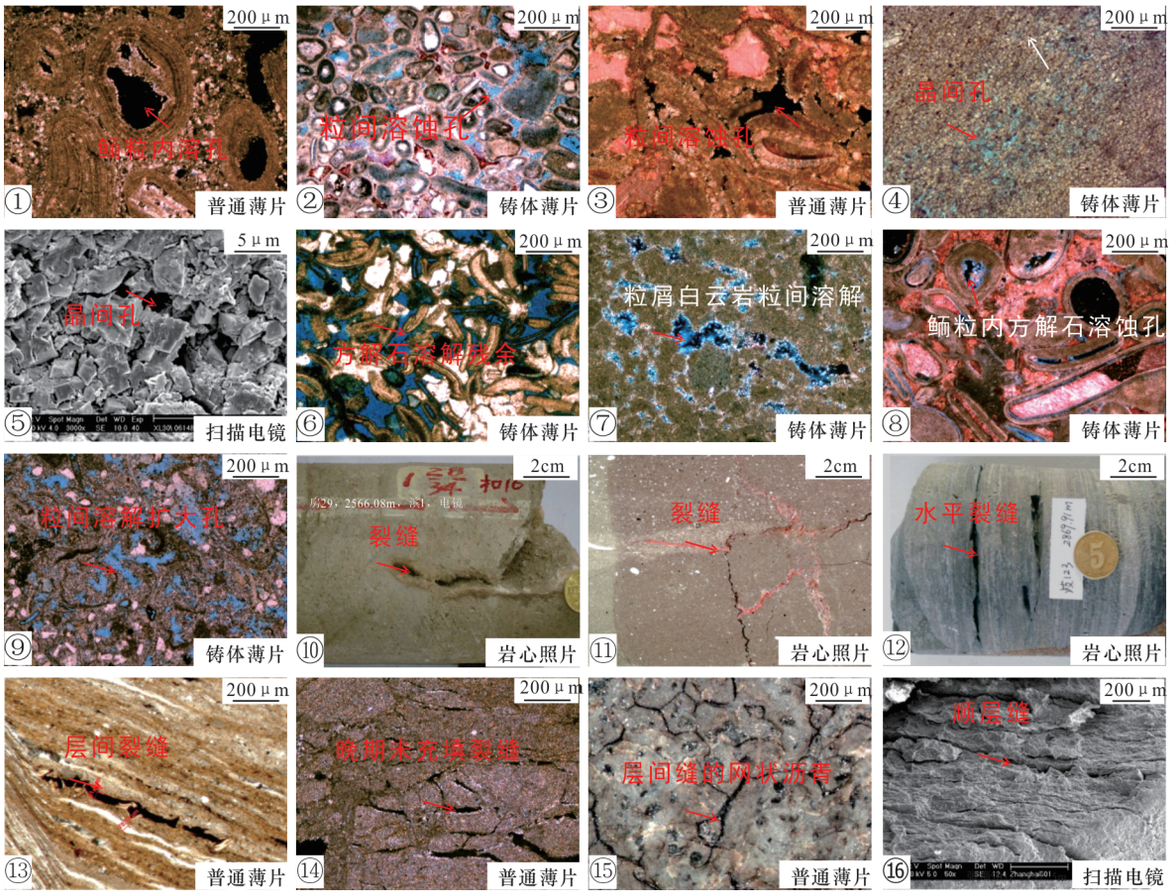


图 8　歧口凹陷沙一下亚段细粒沉积岩储集空间特征

Fig.8　Spatial characteristics of fine-grained sedimentary rocks of the lower first member of Shahejie formation in the southwestern of Qikou depression

①. 鲕粒灰岩,C46井,1 922.00 m,单偏光;②. 鲕粒白云岩,Q100井,2 896.05 m,单偏光;③. 灰质白云岩,T6井,2 504.00 m,单偏光;④. 微晶白云岩,Kou42井,2 293.60 m,单偏光;⑤. 灰质泥晶白云岩,ZC1-4井,2 974.43 m;⑥. 鲕粒灰岩,Kou42井,2 306.89 m,单偏光;⑦. 粒屑白云岩,F14井,2 718.51 m,单偏光;⑧. 鲕粒灰岩,Q100井,2 906.90 m,单偏光;⑨. 生物灰岩,Q100井,2 905.63 m,单偏光;⑩. 生物灰岩,K16井,2 101.25 m;⑪. 泥晶白云岩,Kou42井,2 281.09 m;⑫. 泥晶灰岩,Q123井,2 869.91 m;⑬. 泥质泥晶灰岩,ZH501井,2 762.00 m,单偏光;⑭. 泥晶白云岩,ZH501井,2 734.00 m,单偏光;⑮. 颗粒石灰岩,F10井,单偏光;⑯. 泥质泥晶白云岩,ZH501井,2 757.50 m

控制.

生烃条件:该区 98.5% 的泥页岩样品有机碳值超过有机质下限标准,好烃源岩和富烃源岩占比之和达 86.4%. 烃源岩干酪根类型以Ⅰ型和$Ⅱ_1$型为主,初始排烃门限成熟度为 0.35%,大量生烃门限成熟度为 0.5%. 根据有机质丰度与成熟度将烃源岩划分为Ⅰ类烃源岩、Ⅱ类烃源岩和Ⅲ类烃源岩 3 种类型. Ⅰ类烃源岩 TOC≥3%,R_o≥0.50%;Ⅱ类烃源岩 1.8%≤TOC<3%,0.35%≤R_o<0.50%;Ⅲ类烃源岩 0.8%≤TOC<1.8%,R_o≤0.35%.

储集条件:碳酸盐岩各类孔缝均较为发育,为Ⅰ类储集层,泥页岩纹层和页理较为发育,生烃增压产生的异常压力缝,改善了泥页岩的储集物性和渗透性,泥页岩成为Ⅱ类储集体. 滨浅湖、半深湖—深湖泥岩孔隙类型以晶间孔、晶内孔和有机质孔等小孔为主,构造缝和成岩缝不发育,储集物性较差,为Ⅲ类储集体.

含油性:岩石中游离烃的热增发量S_1是细粒岩油藏的可动成分,一般大于 1 mg/g 被认为是好烃源岩,S1 含量高可动油含量高(蒲秀刚等,2014;周立宏等,2018). C54X1 井 2009 年 8 月完钻,2018 年 12 月针对该井进行系统有机碳、热解取样化验分析,该井取心段S_1含量在 0~8.21 mg/g,平均 2.38 mg/g,好烃源岩样品占 72.5%. 同时,该取心段在 2009 年 12 月获得 2 块岩石样品热解分析和总有机碳分析结果:样品 1(3 160.04 m)TOC 为 4.12%,

热解 S_1 为11.19 mg/g；样品2(3 200.14 m)TOC为3.12%，热解 S_1 为8.95 mg/g. 在2018年新测试化验数据中：对应样品1(3 160.10 m)TOC为3.53%，热解 S_1 为4.6mg/g；对应样品2(3 200.14 m)TOC为3.33%，热解 S_1 为3.13 mg/g. 岩心在经过9年存放后，S_1 约挥发了60%. 将新测试解热 S_1 值除以挥发系数0.6可以间接得到该段岩心的可动烃 S_1 含量. 换算后，C54X1井可动S1含量在0～13.68，平均3.97 mg/g，油饱和指数(OSI＝S_1/TOC×100)(李水福等，2019)分布在0～527.13 mg/g TOC，平均191 mg/g TOC(图4). 可动油含量比沧东凹陷G108-8井孔二段细粒岩可动油含量约高2～3倍.

盖层条件：滨浅湖、半深湖—深湖泥岩储集物性较差，可以作为该区的有效盖层. 油气通过1 m厚的饱含水粘土盖层需要12 MPa的压力差，封闭气柱高度在1 000 m以上，理论上只要1 m厚的粘土层就足够封盖油藏高度较高的油气藏(李慧勇，2010). 西高加索区下白垩统埋深在1 200～3 000 m范围内油层泥岩盖层一般在5～10 m. W17102井、W12井、BinS6井等近东西向连井剖面显示，该区板4、板3和板2油组发育4套泥岩，单层泥岩厚度在3～20 m之间，平均厚度约5 m，泥岩段全区发育稳定，能够成为有效盖层(图10).

储层脆性：研究表明岩石脆性指数小于25时，压裂造缝效果较差，需要使用较高浓度和较大量的压裂支撑剂. 脆性指数为30时，易形成多缝，脆性指数大于40时易形成缝网和多缝过渡态(唐颖等，2012). 周立宏等(2018)根据矿物成分与工程脆性指数之间关系，得出利用X衍射矿物成分计算岩石脆性指数的经验公式：脆性指数＝石英＋0.63白云石＋0.52长石＋0.25方解石＋0.2黄铁矿＋0.18方沸石＋0.02粘土. 利用上述公式对该区埕54x1井193块样品X衍射分析结果进行脆性指数计算，样品脆性指数分布在30.9～62.5，平均41.0，50%的样品脆性指数大于40，压裂易形成缝网和多缝过渡态.

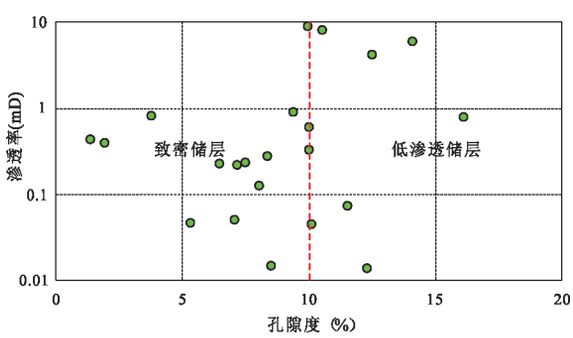


图9　岐口凹陷沙一下亚段Bin22井储集物性特征

Fig.9　Well Bin22 reservoir physical characteristics of the lower first member of Shahejie formation in the southwestern of Qikou depression

6.2　甜点综合评价

垂向甜点评价：综合以上特征分别M段和C段进行评价. M段具有高黏土低碳酸盐的特征，其主要岩性为泥岩，碳酸盐含量较低，储集空间以基质孔和层理缝为主，裂缝不发育. M1～M5虽具有较高的可动烃含量，但黏土矿物平均含量在大于30%，不利于工程改造，视为非工程甜点. C段内碳酸盐岩含量一般大于45%，缝发育具有较好的储集条件，黏土矿物含量一般小于30%，且后期白云岩化作用进一步改善了岩层脆性，C段脆性指数在38.5～48.2(平均42.6)，为有利工程甜点. C段 S_1 含量相对于M段较低，但总体仍具有很高的可动烃含量，参考本次 S_1 实测数据，C1～C4残余S1在2.6～3.4 mg/g，C5和C6段残余 S_1 小于1 mg/g. C段上下2段M段为套稳定纯泥岩段顶底板，纵向上从上至下识别出C1、C2、C3、C4共4个甜点段(图10).

平面甜点评价：甜点段内碳酸盐岩和油页岩互层，石油初次运移成藏. 特别地，C1和C2甜点段颗石灰岩内颗石藻本身具有较高的生烃潜力. 所识别出的4个甜点段，横向可对比追踪，空间分布稳定. C2甜点段厚度分布在2～12 m，平面分布面积达1 518 km^2，发育QB101井区、W37井区、Q90井区和ZH16井区4个厚度中心带(图11).

在甜点厚度平面图上叠合TOC等值线和 R_o 等值线数据，综合各评价参数：将TOC≥3.0%，R_o≥0.5%，甜点厚度≥8 m定为Ⅰ类甜点；1.8%≤TOC＜3.0%，0.35%≤R_o＜0.50%，6 m≤甜点厚度＜8 m定为Ⅱ类甜点；0.8%≤TOC＜1.8%，R_o＜0.35%，甜点厚度＜6 m定为Ⅲ类甜点. 通过上述方法在C2甜点段平面上找到4个Ⅰ类甜点体，分布面积共380 km^2，Ⅱ类甜点区围绕Ⅰ类甜点区环状分布，分布面积达270 km^2.

6.3　勘探潜力

岐口凹陷西南缘主要包括岐北斜坡区、埕北段阶区、大中旺地区和岐南斜坡区，勘探面积1 450 km^2，预测页岩油资源量达3.65亿t. 其中：岐北斜坡区勘探面积540 km^2，甜点厚度12～18 m，埋深主体位于2 500～3 500 m，局部埋深大于3 500 m，成熟

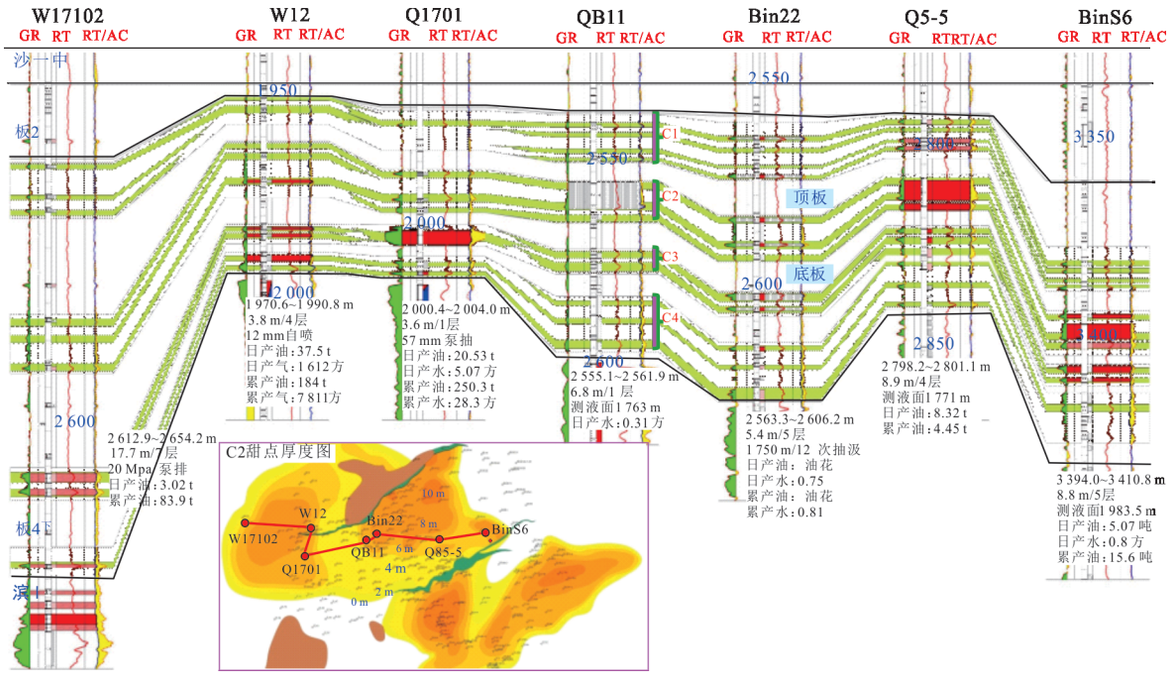


图 10　页岩油甜点综合预测

Fig.10　Shale oil dessert comprehensive forecast

度 0.55%～0.70%,预测资源量 1.85 亿 t;歧北斜坡区勘探面积 360 km^2,甜点厚度 22.8 m,埋深主体位于 2 500～3 500 m,成熟度 0.75%,预测资源量 0.7 亿 t;大中旺地区勘探面积 340 km^2,甜点厚度 16～19 m,埋深小于 2 500 m,成熟度 0.45%,预测资源量 0.5 亿 t;歧南斜坡区勘探面积 210 km^2,甜点厚度 19.8 m,埋深处于 2 500～3 500 m,成熟度 0.6%,预测资源量 0.6 亿 t.

目前工区共有探井、评价井 543 口,页岩油工业油流井 43 口,C1、C2、C3 和 C4 甜点段内均获得工业油流(图 10). QB20 井 2 489.0～2 511.8 m C1 段 11 m/5 层泥页岩和白云质灰岩储层,酸化后,泵排日产油 19.1 t. W12 井 1 970.6～1 990.8 m C2 段内 3.8 m/4 层云质灰岩储层,12 mm 油嘴自喷,日产油 37.5 t,日产气 1 612 方. F30 井 2 563.5～2 595.3 m C2、C3、C4 段内 12.5 m/5 层白云岩储层,6 mm 油嘴自喷,日产油 46t,日产气 53 846 方. 针对甜点评价结果,开展该区老井复查工作,优选出 Q85-14 井、BinS25 井、F27-17 井等 10 口井进行试油,并取得良好效果. 针对 C2 甜点段,在歧南斜坡优先实施 QY2H 井,截止到目前,该井井深 4 788 m,水平段长度 1 630 m,其中油斑 1 210 m/11 层,油迹 420 m/18 层,甜点钻遇率 100%. 勘探实践表明,沙一下亚段细粒岩油藏具有整体含油、甜点段局部富集的特点,初步形成整装油藏开发条件.

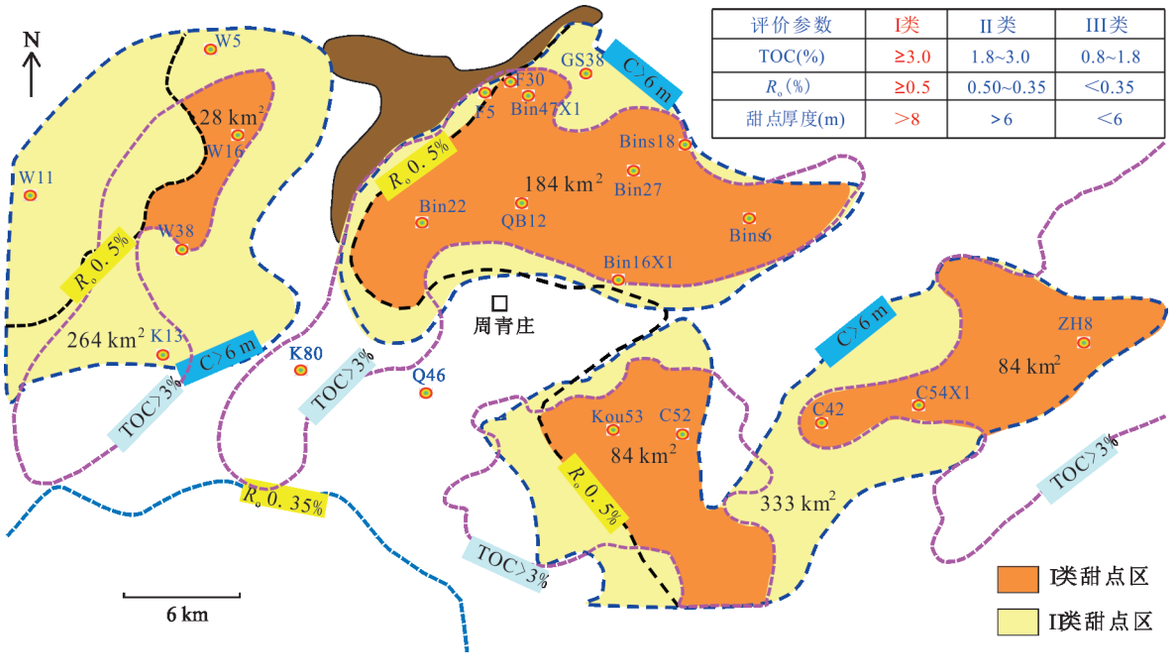
7　结论

(1)歧口西南缘沙一下亚段古近系最大湖泛沉积时期,歧口凹陷西南缘宽缓的湖湾背景有利于细粒沉积稳定分布,岩性主要混合沉积岩和碳酸盐岩,M 段混合沉积岩占优势,岩性主要为灰质泥岩和灰质泥页岩,灰质成分相对较高,C 段碳酸盐岩占优势,岩性主要为白云岩、灰岩,云质成分相对较高.

(2)优质烃源岩纵向上连续分布(60～80 m),平面上稳定分布(1 518 km^2),TOC 平均 2.44%,热解 S_1 平均 2.38 mg/g,总体达到很好烃源岩标准,干酪根类型指数分布在 76.6～88.3,以Ⅰ型为主,并含有少量Ⅱ$_1$型.

(3)C 段内孔缝类型多样,页岩纹层和层理较为发育,生物碎屑灰岩、鲕粒灰岩生物孔、溶蚀孔和裂缝较为发育,白云岩类溶蚀孔、晶间孔和裂缝较为发育,砂岩粒间孔较为发育,页岩、碳酸盐岩和砂岩均是该区较好储层;M 段以晶间孔、晶内孔和有机质孔等小孔为主,页岩段层理发育,储集物性相对较差,可以作为盖层.

(4)沙一下页岩段脆性指数分布在 30.9～62.5,平均 41.0,50% 的样品脆性指数大于 40,压裂易形成缝网和多缝过渡态,C 段碳酸盐岩含量一般大于



评价参数	I类	II类	III类
TOC(%)	≥3.0	1.8~3.0	0.8~1.8
R_o(%)	≥0.5	0.50~0.35	<0.35
甜点厚度(m)	>8	>6	<6

图 11　歧口凹陷西南缘沙一下亚段页岩油 C2 段甜点段平面分布

Fig.11　Shale oil plane distribution of C2 segment dessert segment of the lower first member of Shahejie formation in the southwestern of Qikou depression

45%，缝发育具有较好的储集条件，黏土矿物含量一般小于 30%，且后期白云岩化作用进一步改善了岩层脆性，C 段脆性指数在 38.5～48.2(平均 42.6)，为有利工程甜点.

(5)C 段 S_1 含量相对于 M 段较低，但总体仍具有很高的可动烃含量，C1～C4 残余 S_1 在 2.6～3.4 mg/g，恢复后可动烃含量约是沧东凹陷孔二段细粒岩可动油含量的 2～3 倍，C 段上下 2 段 M 段为套稳定纯泥岩段顶底板，纵向上识别出 C1、C2、C3、C4 共 4 个垂向甜点段.

(6)优选有机质丰度、成熟度和甜点段厚度 4 个甜点评价参数，将甜点划分为 Ⅰ 类甜点、Ⅱ 类甜点和 Ⅲ 类甜点 3 种类型：Ⅰ 类甜点，TOC≥3.0%，R_o≥0.5%，甜点厚度≥8 m；Ⅱ 类甜点，1.8%≤TOC<3.0%，0.35%≤R_o<0.50%，6 m≤甜点厚度<8 m；Ⅲ 类甜点，0.8%≤TOC<1.8%，R_o<0.35%，甜点厚度<6 m. 通过上述方法在 C2 甜点段内找到 4 个 Ⅰ 类甜点，分布面积共 380 km²，Ⅱ 类甜点区围绕 Ⅰ 类甜点区环状分布，分布面积达 270 km²，页岩油地质储量 3.65 亿 t，其中技术可采储量 2 546 万 t，页岩油成为歧口凹陷古近系油气勘探的重要接替领域.

References

Chen, S.Y., Li, C., Yang, Y.Q., et al., 2012a. Deposition Environment of the Lacustrine Lolomite in Sha-1 Lowsr Submember of the Qikou Sag, Huanghua Depression. *Acta Geologica Sinica*, 86(10): 1679－1687(in Chinese with English abstract).

Chen, S.Y., Wang, L., Li, C., et al., 2012b. The Saline Genesis of Lacustrine Basin in the Lower Section of the First Member of Shahejie Formation in Qikou Sag. *Acta Petrolei Sinica*, 33(01): 40－47(in Chinese with English abstract).

Gao, F.H., Zhang, Y.S., Pu, X.G., et al., 2017. Type of Dolomization and Formation Mechanism: A Case Study of Palaeogene Es_1 in Qikou Sag. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 47(2): 355－369(in Chinese with English abstract).

Guo, T.L., Zhang, H.R., 2014. Formation and Enrichment Mode of Jiaoshiba Shale Gas Field, Sichuan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 41(1): 28－36(in Chinese with English abstract).

Jiang, Z.X., Liang, C., Wu, J., et al., 2013. Several Issues in Sedimentological Studies on Hydrocarbon-Bearing Fine-Grained Sedimentary Rocks. *Acta Petrolei Sinica*, 34(6): 1031－1039(in Chinese with English abstract).

Kristen, R.M., 2018. 2015 US Geological Survey Assessment of Undiscovered Shale-Gas and Shale-Oil Resources of the Mississippian Barnett Shale, Bend Arch-Fort Worth Basin, Texas. *AAPG Bulletin*, 102(7): 1299 -

1321. https://doi.org/10.1306/0810171622017164

Li, H.Y., Xu, C.G., Liu, T.H., et al., 2010. The Formation Mechanisms and Characteristics of Thin-Layer Mudstone Caprock and Its Relationship with Hydrocarbon Accumulation in the Terrestrial Basin: An Example of Thin-Layer Mudstone Caprock in the South-Central Liaodong Bay. *Petroleum Geology & Experiment*, 32(1): 19－23(in Chinese with English abstract).

Li, S.F., Hu, A.Z., Zhang, D.M., et al., 2019. Idea, Method and Application of Evaluating Shale Oil Potential by Free Hydrocarbon Difference. *Earth Science*, 44(3): 929－938(in Chinese with English abstract).

Ma, X.H., 2018. Enrichment Laws and Scale Effective Development of Shale Gas in the Southern Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 38(10): 1－10(in Chinese with English abstract).

Peters, K. E., 1998. Guidelines for Evaluating Petroleum Source Rock Using Programmed Pyrolysis. *AAPG Bulletin*, 70(2):318－329

Pu, X. G., Zhou, L. H., Han, W. Z., et al., 2014. Gravity Flow Sedimentation and Tight Oil Exploration in Lower First Member of Shahejie Formation in Slope Area of Qikou Sag, Bohai Bay Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 41(2):138－149(in Chinese with English abstract).

Qiu, Z., Shi, Z.S., Dong, D.Z., et al., 2016. Geological Characteristics of Source Rock and Reservoir of Tight Oil and Its Accumulation Mechanism: A Case Study of Permian Lucaogou Formation in Jimusar Sag, Junggar Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 43(6): 928－939(in Chinese with English abstract).

Richard, M.P., 2007. Total Petroleum System Assessment of Undiscovered Resources in the Giant Barnett Shale Continuous (Unconventional) Gas Accumulation, Fort Worth Basin, Texas. *AAPG Bulletin*, 91(4): 551－578. https://doi.org/10.1306/06200606007

Tang, Y., Xing, Y., Li, L.Z., et al., 2012. Influence Factors and Evaluation Methods of the Gas Shale Fracability. *Earth Science Frontiers*, 19(5): 356－363(in Chinese with English abstract).

Wang, Z. S., Hua, S. J., Yu, X. M., et al., 2014. Grading Evaluation and High Quality Source Rock Distribution in Qikou Sag. *Natural Gas Geoscience*, 25(12):1896－1902 (in Chinese with English abstract).

Yan, W.P., Yang, T., Li, X., et al., 2014. Geological Characteristics and Hydrocarbon Exploration Potential of Lacustrine Carbonate Rock in China. *China Petroleum Exploration*, 19(4):11－17(in Chinese with English abstract).

Yao, Y., Wang, G., Li, L., et al., 2017. The Reservoir Heterogeneity Characteristics and Affecting Factors of Tight Lacustrine Dolomite Reservoirs. *Earth Science*, 42(12): 2327－2335(in Chinese with English abstract).

Yu, X.M., He, Y.M., Jiang, W.Y., et al., 2011. Hydrocarbon Generation of Paleogene Source Rocks in Qikou Sag. *Natural Gas Geoscience*, 22(6):1001－1008(in Chinese with English abstract).

Zhao, X.Z., Pu, X.G., Wang, J.H., et al., 2017a. Sand and Reservoir Controlling Mechanism and Exploration Discovery in the Gentle Slope of Fault Basin: A Case Study of Qibei Slope in Qikou Sag. *Acta Petrolei Sinica*, 38(7): 729－739(in Chinese with English abstract).

Zhao, X.Z., Pu, X.G., Zhou, L.H., et al., 2017b. Reconstruction of Paleogene Sedimentary System and Reservoir Evaluation in Qikou Sag, Bohai Bay Basin, China. *Journal of Chengdu University of Technology*, 44(5): 565－578(in Chinese with English abstract).

Zheng, M., Li, J.Z., Wang, G.W., et al., 2018. Analysis of Oil Charging and Accumulation Processes in Tight Reservoir Beds: A Case Study of Lucaogu Formation in Jimsar Sag of Junggar Basin, NW China. *Earth Science*, 43 (10):3719－3732(in Chinese with English abstract).

Zhou, L.H., Pu, X.G., Chen, C.W., et al., 2018. Concepe, Charcateristics and Prospecting Significance of Fine-Grained Sedimentary Oil Gas in Terrestrial Lake Basin: A Case from the Second Membei of Paleogene Kongdian Formation of Cangdong Sag, Bohai Bay Basin. *Earth Science*, 43(10): 3625－3639(in Chinese with English abstract).

Zhou, L.H., Pu, X.G., Deng, Y., et al., 2016. Several Issues in Studies on Fine-Grained Sedimentary Rocks. *Lithologic Reservoirs*, 28(1): 6－15(in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

陈世悦,李聪,杨勇强,等,2012a.黄骅坳陷歧口凹陷沙一下亚段湖相白云岩形成环境.地质学报,86(10):1679－1687.

陈世悦,王玲,李聪,等,2012b.歧口凹陷古近系沙河街组一段下亚段湖盆咸化成因.石油学报,33(1):40－47.

高福红,张永胜,蒲秀刚,等,2017.白云岩化作用类型及机理——以歧口凹陷古近系沙河街组一段为例.吉林大学学报(地球科学版),47(2):355－369.

郭彤楼,张汉荣,2014.四川盆地焦石坝页岩气田形成与富集高产模式.石油勘探与开发,41(1):28－36.

姜在兴,梁超,吴靖,等,2013.含油气细粒沉积岩研究的几个问题.石油学报,34(6): 1031－1039.

李慧勇,徐长贵,刘廷海,等,2010.陆相盆地薄层泥岩盖层形

成机制、特征与油气成藏关系——以辽东湾地区中南部为例.石油实验地质,32(1):19－23.
李水福,胡守志,张冬梅,等,2019.自由烃差值法评价页岩含油性的思想、方法及应用.地球科学,44(3):929－938.
马新华,2018.四川盆地南部页岩气富集规律与规模有效开发探索.天然气工业,38(10):1－10.
蒲秀刚,周立宏,韩文中,等,2014.歧口凹陷沙一下亚段斜坡区重力流沉积与致密油勘探.石油勘探与开发,41(2):138－149.
邱振,施振生,董大忠,等,2016.致密油源储特征与聚集机理——以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组为例.石油勘探与开发,43(6):928－939.
唐颖,邢云,李乐忠,等,2012.页岩储层可压裂性影响因素及评价方法.地学前缘,19(5):356－363.
王铁冠,钟宁宁,侯读杰,等,1996.陆相湖盆生物类脂物早期生烃机制研究.中国科学(D辑:地球科学),26(6):518－524.
王振升,滑双君,于学敏,等,2014.歧口凹陷沙河街组烃源岩分级评价及优质烃源岩分布.天然气地球科学,25(12):1896－1902.
闫伟鹏,杨涛,李欣,等,2014.中国陆上湖相碳酸盐岩地质特征及勘探潜力.中国石油勘探,19(4):11－17.
姚悦,王刚,李乐,等,2017.湖相致密白云岩不均一油藏特征及主控因素.地球科学,42(12):2327－2335.
于学敏,何咏梅,姜文亚,等,2011.黄骅坳陷歧口凹陷古近系烃源岩主要生烃特点.天然气地球科学,22(6):1001－1008.
赵贤正,蒲秀刚,王家豪,等,2017a.断陷盆地缓坡区控砂控藏机制与勘探发现——以歧口凹陷歧北缓坡带为例.石油学报,38(7):729－739.
赵贤正,蒲秀刚,周立宏,等,2017b.渤海湾盆地歧口凹陷古近系沉积体系重建与储集层评价.成都理工大学学报(自然科学版),44(5):565－578.
郑民,李建忠,王文广,等,2018.致密储层石油充注成藏过程分析:以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组为例.地球科学,43(10):3719－3732.
周立宏,蒲秀刚,陈长伟,等,2018.陆相湖盆细粒岩油气的概念、特征及勘探意义:以渤海湾盆地沧东凹陷孔二段为例.地球科学,43(10):3625－3639.
周立宏,蒲秀刚,邓远,等,2016.细粒沉积岩研究中几个值得关注的问题.岩性油气藏,28(1):6－15.