

文章编号: 1000-0747(2018)02-0212-11 DOI: 10.11698/PED.2018.02.04

# 酒泉盆地地下白垩统致密油类型、分布特征及勘探领域

陈启林<sup>1</sup>, 邓毅林<sup>1</sup>, 魏军<sup>2</sup>, 马国福<sup>2</sup>, 龙礼文<sup>1</sup>, 肖文华<sup>2</sup>, 李伟<sup>2</sup>, 张丽萍<sup>1</sup>

(1. 中国石油勘探开发研究院西北分院, 兰州 730020; 2. 中国石油玉门油田公司勘探开发研究院, 甘肃酒泉 735000)

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX05001); 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项(2012E-3301, 2012E-3303)

**摘要:** 基于钻井和分析化验资料, 对酒泉盆地致密油形成条件开展综合分析, 指出勘探领域。酒泉盆地早白垩世经历了3期湖平面升降旋回, 下白垩统发育中沟组、下沟组和赤金堡组3套优质烃源岩, 主要形成自生自储型和下生上储型源储组合, 发育泥云岩和砂砾岩致密储集层, 形成泥云岩和砂砾岩2类致密油, “甜点”控制油气富集。泥云岩致密油具有“源储一体”的特征, 裂缝沟通了基质微孔, 孔隙-裂缝型和裂缝-孔隙型“甜点”规模展布; 砂砾岩致密油以源储侧接为主, 可划分为下生上储型、侧接型和“三明治”型, 扇三角洲前缘有利相带和次生孔隙发育叠合区为“甜点”规模发育区。砂砾岩致密油以青西、花海和营尔等凹陷环凹分布的扇三角洲前缘沉积为主要勘探方向, 有利勘探面积达550 km<sup>2</sup>; 泥云岩致密油以青西凹陷北西向裂缝发育带为主要勘探方向, 有利勘探面积达100 km<sup>2</sup>。

图8表6参22

**关键词:** 致密油; 致密储集层; 泥云岩; 砂砾岩; 下白垩统; 酒泉盆地

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

## Types, distribution and play targets of Lower Cretaceous tight oil in Jiuquan Basin, NW China

CHEN Qilin<sup>1</sup>, DENG Yilin<sup>1</sup>, WEI Jun<sup>2</sup>, MA Guofu<sup>2</sup>, LONG Liwen<sup>1</sup>, XIAO Wenhua<sup>2</sup>, LI Wei<sup>2</sup>, ZHANG Liping<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Petroleum Exploration &amp; Development-Northwest (NWGI), PetroChina, Lanzhou 730020, China; 2. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Yumen Oil Company, Jiuquan 735000, China)

**Abstract:** Based on drilling and laboratory data, the formation conditions of tight oil reservoirs in the Jiuquan basin were comprehensively analyzed and the exploration domains were sorted out. The Jiuquan basin underwent three cycles of lake level fluctuation in early Cretaceous, leaving three sets of high-quality source rocks, the Zhonggou, Xiagou and Chijinbao Formations in the Lower Cretaceous. There are two types of reservoir assemblages, source-reservoir in one type and source below reservoir type, and two types of tight reservoirs, argillaceous dolomite and conglomerate. The “sweet spots” control the enrichment of oil and gas. Argillaceous dolomite tight oil reservoirs have the characteristic of “integrated source-reservoir”, with fractures connecting the matrix micro-pores, pore-fracture type and fracture-pore type “sweet spots” distributed in large scale. The sandy conglomerate tight oil reservoirs were formed by source-reservoir lateral connection, and can be divided into source below reservoir type, source-reservoir side by side type and “sandwich” type. The overlapping areas of the favorable facies belts of fan-delta front and the secondary pore developing belts are the “sweet spot” sites. The favorable areas for seeking conglomerate tight oil are fan-delta front deposits around the Qingxi, Ying'er and Huahai sags, with an exploration area of 550 km<sup>2</sup>; while the area to seek argillaceous dolomite tight oil is the NW fracture developed belt in Qingxi sag, with an exploration area of 100 km<sup>2</sup>.

**Key words:** tight oil; tight reservoir; argillaceous dolomite; sandy conglomerate body; Lower Cretaceous; Jiuquan Basin

引用: 陈启林, 邓毅林, 魏军, 等. 酒泉盆地地下白垩统致密油类型、分布特征及勘探领域[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(2): 212-222.

CHEN Qilin, DENG Yilin, WEI Jun, et al. Types, distribution and play targets of Lower Cretaceous tight oil in Jiuquan Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(2): 212-222.

## 0 引言

随着勘探开发技术的进步, 非常规油气资源逐渐成为勘探的热点。非常规油气包括页岩油气、致密油

气、油页岩等源储共生型油气聚集<sup>[1]</sup>。北美页岩气和致密油的开采给世界油气勘探开发带来了重大变革, 正逐渐影响着世界能源供需的格局<sup>[2]</sup>。非常规油气资源已在全球能源结构中占据重要地位<sup>[3-4]</sup>, 致密油将成为中国

非常规油气勘探开发的重要领域。致密油赋存于生油岩中或与生油岩紧邻的致密储集岩中，致密储集层的物性界限为覆压基质渗透率通常小于  $0.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  [5]，包括致密砂岩、致密碳酸盐岩等 [6]。中国陆相致密油形成的主要条件为优质烃源岩发育、近源聚集、致密储集层存在“甜点区”等。初步评价中国鄂尔多斯、松辽、准噶尔、渤海湾等重点盆地致密油有利勘探面积为  $16 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，地质资源量约为  $(160 \sim 200) \times 10^8 \text{ t}$  [7]，在鄂尔多斯盆地三叠系延长组、准噶尔盆地吉木萨尔凹陷三叠系芦草沟组等获得致密油勘探突破 [8-9]，松辽盆地深层致密砂砾岩气勘探获得突破 [10]。酒泉盆地青西、营尔等富油气凹陷烃源岩条件优越，致密油勘探将成为支撑老油田持续发展的新类型。

酒泉盆地是中国陆相含油气盆地中勘探开发历史最长的盆地之一，自1939年发现老君庙油田以来，有近80年的勘探开发历史，常规油气勘探难度越来越大，而赋存于致密储集层中的致密油勘探尚处于探索阶段。近年来，针对泥云岩（包括白云岩、泥质白云岩

和白云质泥岩） [11] 和砂砾岩的致密油勘探取得了新进展，但对其主控因素、富集规律等认识还有待深入。本文通过对盆地致密油形成条件、地质特征等方面的研究，划分致密油类型、分析特征、预测“甜点”展布，优选勘探领域。

### 1 地质概况

酒泉盆地是在古生界褶皱基底上发育起来的中、新生代叠合盆地，主要经历了早白垩世断陷盆地演化阶段和新生代前陆盆地演化阶段 [12]；中生代为伸展型断陷盆地，主要经历了早白垩世断陷发育阶段，形成了北北东向箕状断陷；新生代为挤压拗陷盆地，其中古近纪为弱挤压的拗陷盆地；新近纪以来，由于祁连褶皱带向北持续挤压，酒泉盆地南缘发生逆冲推覆，在中生代断陷盆地基础上，叠加了新生代前陆盆地。现今构造单元划分为酒西拗陷、嘉峪关隆起和酒东拗陷。早白垩世断陷期形成的青西、营尔、花海等凹陷是主要的生烃和富油气凹陷（见图1）。

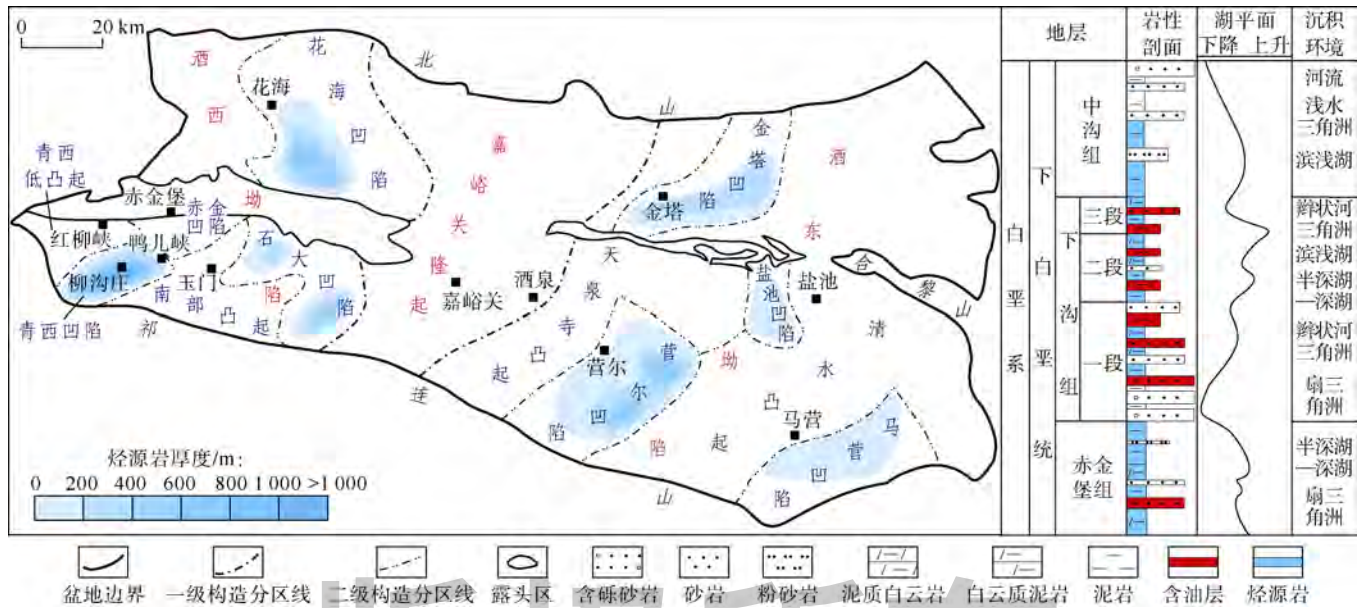


图1 酒泉盆地构造单元划分和白垩系烃源岩分布图

盆地自下而上发育下白垩统赤金堡组 ( $K_{1c}$ )、下沟组 ( $K_{1g}$ ) 和中沟组 ( $K_{1z}$ ) 断陷期沉积地层和第三系拗陷期沉积地层。下白垩统  $K_{1c}$ 、 $K_{1g}$ 、 $K_{1z}$  厚度分别为  $1000 \sim 1400 \text{ m}$ 、 $900 \sim 1400 \text{ m}$ 、 $400 \sim 600 \text{ m}$ 。第三系厚度一般为  $1000 \sim 3200 \text{ m}$ ，最厚可达  $4000 \text{ m}$ 。白垩系在酒西拗陷的青西凹陷、石大凹陷、花海凹陷和酒东拗陷的营尔凹陷、马营凹陷都有相似的沉积充填层序。纵向上，下白垩统各组均为较完整的湖平面

升降旋回，形成粗—细—粗的沉积层序 [12]，中沟组沉积早中期、下沟组沉积中晚期和赤金堡组沉积中期湖水最深，形成3套主要的烃源岩。

受构造控制的多旋回沉积形成了围绕中沟组、下沟组和赤金堡组3套烃源岩的多套储盖组合，较广泛分布的近源冲积扇—扇三角洲砂砾岩和裂缝较发育的湖相泥云岩为油气聚集提供了储集条件，也为酒泉盆地形成多类型致密油奠定了基础。

## 2 致密油形成有利条件

中国在陆相盆地致密油勘探实践中, 总结出了富有机质烃源岩大面积分布、致密储集层广覆式分布、储集层与烃源岩紧密接触等致密油形成规模储量的有利条件<sup>[3-6]</sup>。这些规律性认识表明富油气坳(凹)陷是致密油勘探的重点, 而多旋回演化特征形成多套有效生储盖组合扩展了致密油评价的层系。致密油评价研究的主要内容和流程是: ①按照烃源岩分布、有机质丰度、干酪根类型、热演化程度等指标优选有利凹陷; ②按照沉积旋回、源内和近源的储集层厚度、孔隙度、渗透率等指标优选有利区带; ③在有利区带开展“甜点”预测优选目标区。

### 2.1 烃源岩条件

勘探实践揭示, 酒泉盆地白垩系烃源岩主要分布在青西、营尔、花海等凹陷。致密油评价主要围绕这3个富油气凹陷开展。

青西、营尔富油气凹陷的面积分别为 300 km<sup>2</sup> 和 1 200 km<sup>2</sup>, 油气显示丰富的花海凹陷面积为 900 km<sup>2</sup>, 下白垩统各组烃源岩有机质丰度存在很大差异<sup>[13]</sup>, 本文对近年来探井的烃源岩分析化验资料进行统计分析, 优选致密油勘探重点凹陷。

青西凹陷发育下沟组和赤金堡组 2 套成熟烃源岩, 以暗色泥岩和白云质泥岩为主, 最大厚度达 1 100 m。下沟组和赤金堡组烃源岩有机碳含量 (TOC) 平均值分别为 1.54% 和 2.17%、生烃潜量 ( $S_1+S_2$ ) 平均值分别为 5.79 mg/g 和 4.13 mg/g (见表 1)。干酪根以 II<sub>1</sub> 型和 I 型为主。下沟组烃源岩  $R_o$  值为 0.6%~1.0%, 处于生油高峰阶段; 赤金堡组烃源岩  $R_o$  值大于 1.0%, 处于成熟—高成熟阶段。青西凹陷下沟组还发育含藻纹层的泥云岩, 纹层为富泥晶白云石纹层、富有机质纹层以及富黏土和黄铁矿纹层, 纵向上相互叠置, 形成二元纹层或三元纹层<sup>[14-15]</sup>。富含藻纹层的岩石有机碳平均含量在 2% 以上, 生烃潜量平均值为 10 mg/g, 属优质烃源岩<sup>[15]</sup>。

表 1 酒泉盆地主要凹陷烃源岩有机质丰度统计表

凹陷	层位	有机碳含量/%				氯仿沥青“A”含量/%				总烃含量/10 <sup>-6</sup>				生烃潜量/(mg·g <sup>-1</sup> )			
		最小值	最大值	平均值	样品数/个	最小值	最大值	平均值	样品数/个	最小值	最大值	平均值	样品数/个	最小值	最大值	平均值	样品数/个
青西	K <sub>1g</sub>	0.08	6.89	1.54	412	0.008	1.253	0.269	45	24	5 049	890	45	0.02	36.06	5.79	695
	K <sub>1c</sub>	1.60	2.83	2.17	24									0.85	11.16	4.13	39
营尔	K <sub>1z</sub>	0.12	14.45	1.51	492	0.005	0.556	0.120	36	26	3 122	627	70	0.04	62.95	7.49	493
	K <sub>1g</sub>	0.08	4.47	1.17	426	0.002	0.733	0.075	131	16	4 870	486	131	0.03	41.60	3.80	418
花海	K <sub>1c</sub>	0.12	1.70	0.62	127	0.004	0.291	0.083	34	7	2 289	591	34	0.04	11.20	1.62	96
	K <sub>1z</sub>	1.68	11.76	4.60	40	0.053	0.346	0.213	22	138	1 998	620	12	3.66	44.71	21.35	39
花海	K <sub>1g</sub>	0.94	7.26	2.76	41	0.044	0.397	0.158	16	163	1 775	761	16	1.29	44.11	9.06	39
	K <sub>1c</sub>	0.36	3.69	2.03	12									0.11	5.61	2.05	11

营尔凹陷中沟组、下沟组和赤金堡组 3 套成熟烃源岩分布在南、北次凹, 主要为半深湖—深湖相暗色泥岩, 最大厚度达 700 m。中沟组生烃指标高, 有机碳含量平均值为 1.51%、最高值为 14.45%, 生烃潜量平均值为 7.49 mg/g、最高值为 62.95 mg/g (见表 1); 干酪根以 I 型和 II<sub>1</sub> 型为主;  $R_o$  值在北部次凹为 0.5%~1.2%、在南部次凹为 0.7%~0.9%, 整体处于低成熟—成熟阶段。下沟组和赤金堡组的烃源岩条件较中沟组差, 有机碳含量平均值分别为 1.17% 和 0.62%, 生烃潜量平均值分别为 3.80 mg/g 和 1.62 mg/g (见表 1); 干酪根以 II<sub>2</sub> 型为主, 少量 III 型<sup>[15]</sup>; 上述 2 套地层在北部次凹的  $R_o$  值分别为 0.8%~2.0% 和 1.8%~3.6%, 处于成熟—高成熟阶段; 在南部次凹的  $R_o$  值分别为 0.8%~1.2% 和 0.8%~1.6%, 处于成熟阶段。

花海凹陷烃源岩主要分布在凹陷中南部, 最大厚度达 700 m。中沟组和下沟组烃源岩有机碳含量平均值分别为 4.60% 和 2.76%、生烃潜量平均值分别为 21.35

mg/g 和 9.06 mg/g (见表 1), 达到好生油岩标准。干酪根以 II 型为主, 热演化程度已进入成熟阶段, 是花海凹陷的主力烃源岩段<sup>[16]</sup>。

酒泉盆地主要凹陷的烃源岩有机碳含量平均值多大于 1.5%、最高值可达 14.45%, 干酪根以 II<sub>1</sub> 型和 I 型为主,  $R_o$  值多大于 0.6%, 生烃潜量平均值主要为 3.80~21.35 mg/g、最高值达到 62.95 mg/g。表明有机质丰度高、母质类型好、热演化程度适中, 生烃潜力大, 为致密油形成奠定了良好基础。青西凹陷由于深湖相暗色泥页岩和藻纹层泥云岩 2 类烃源岩发育, “小而肥”的富油气特征是其他断陷湖盆无法比拟的, 不但为远源的老君庙第三系油藏提供了丰富的油源, 而且形成了鸭儿峡、窟窿山、柳沟庄等下白垩统油藏, 按照常规-非常规油气“有序聚集”理论<sup>[17]</sup>, 也是形成致密油的最有利区。营尔凹陷、花海凹陷深湖相暗色泥岩发育, 烃源岩条件好, 致密油勘探前景较为广阔。

## 2.2 有利储盖组合

陆相断陷湖盆经历多期湖平面升降,在纵向上形成多套有效储盖组合。具有多物源、近物源、相变快的特征,碎屑岩储集层与泥页岩呈多种交互接触方式,易形成源内的砂砾岩体岩性圈闭、砂泥薄互层韵律、近源的席状滩砂、侧向接触的重力流扇体等多类型有效储盖组合。与河西走廊盆地群成盆过程基本相同<sup>[18]</sup>,各凹陷纵向上旋回沉积特征和平面上相变特征均具有相似性。

早白垩世酒泉盆地主要经历了3期湖平面升降旋回和多期次级旋回,形成赤金堡组、下沟组和中沟组3套自生自储和下生上储型储盖组合(见图1)。各凹陷具有相似的沉积演化特征,以青西凹陷下白垩统下沟组为例,平面上在东部控凹断裂带发育鸭西、柳北等5个近岸水下扇或扇三角洲沉积,向断陷内逐渐过渡为半深湖—深湖沉积,北西方向的缓坡带物源相对不发育,在柳沟庄地区形成泥云岩沉积(见图2)。沉积相带控制储集层的发育程度、储盖组合方式等,连井对比剖面显示,扇三角洲平原和前缘储集层最为发育,主要为砂砾岩和粉细砂岩储集层;浅湖、半深湖相砂岩储集层变薄,主要为粉砂质白云岩、泥质白云岩储集层(见图2)。储盖组合主要有3类:①盆缘鸭西地区扇三角洲砂砾岩侧接储盖组合;②柳北地区扇三角洲前缘和滨浅湖砂泥岩互层储盖组合;③柳沟庄地区泥云岩与泥岩“源储一体”储盖组合。柳沟庄地区储集层以泥质白云岩为主,厚度为10~15 m;盖层为泥岩、白云质泥岩,单层最大厚度可达65 m。从柳4井揭示的特征分析,在4 200~4 450 m井段,烃源岩和储集层呈互层分布,储集层主要集中在下沟组三段下部和下沟组二段上部,储集层段均见到油气显示(见图3),这种“源储一体”的特征在该区普遍存在。

营尔凹陷、花海凹陷具有典型的断陷湖盆沉积特征,储盖组合主要有3类:①盆缘冲积扇、扇三角洲相的粗碎屑岩侧接储盖组合;②斜坡区滨浅湖相泥页岩与薄砂层互层储盖组合;③半深湖—深湖相泥岩与浊积岩储盖组合。营尔凹陷湖盆面积较大,扇三角洲前缘和滨浅湖砂体沉积分布面积广,单砂体厚度薄,一般为3~5 m,砂岩和泥岩薄互层是主要的储盖组合类型。花海凹陷盆缘区厚砂体分布较广泛,中南部以源内砂泥岩互层组合为主,储集层发育,单层厚度可达15 m。墩1井揭示下沟组二段底部扇三角洲水下分流河道砂体累计厚度达130 m,与下沟组二段上部和下沟组一段湖相泥岩生油岩组成良好的储盖组合(见图

4),这类组合在各凹陷的盆缘区均有分布。

多旋回沉积演化过程中形成的泥页岩盖层在各凹陷均有分布。下白垩统暗色泥页岩既是烃源岩,又是良好的区域或局部盖层。中沟组上部累计厚度达200 m的泥岩是主要的区域盖层;下沟组中上部的厚层状泥岩单层厚度达到50~60 m,封盖能力强,是良好的局部盖层;赤金堡组中上部地层中发育的泥岩是良好的局部盖层。

## 3 致密油类型及“甜点”特征

### 3.1 致密油类型

下白垩统的沉积特征、烃源岩条件和储盖组合决定了致密油的分布,致密储集层的类型决定了致密油类型,而“甜点”控制致密油的富集。酒泉盆地主要发育泥云岩和砂砾岩储集层,孔隙度平均为4.9%,空气渗透率多小于 $2.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,均为致密储集层,形成了泥云岩致密油和砂砾岩致密油2种主要类型,存在源内自生自储型、“三明治”型和近源下生上储型、岩性侧接型等多种源储组合(见图5)。

泥云岩致密油具有源储一体的特征。实验表明,研究区泥云岩致密储集层自身亦为优质烃源岩。深灰色泥质白云岩、白云质泥岩为半咸水湖相沉积,富含有机质纹层十分发育,纹层厚度为0.03~10.00 mm,一般小于5.00 mm,有机质纹层主要由浮游藻类及其降解产物组成,富含藻纹层的岩石为优质烃源岩<sup>[14-15]</sup>。对柳102井下沟组三段24个深灰色白云质泥岩样品和36个深灰色泥质白云岩样品进行实验分析,24个深灰色白云质泥岩样品的有机碳含量平均值为1.48%、生烃潜量平均值为7.38 mg/g,其中4个样品的氯仿沥青“A”含量平均值为0.148%、总烃含量平均值为 $977 \times 10^{-6}$ ;36个深灰色泥质白云岩样品的有机碳含量平均值为1.45%、生烃潜量平均值为6.18 mg/g(见表2)。表明泥质白云岩、白云质泥岩为良好的烃源岩。

柳沟庄地区不同构造部位的钻井试油结果显示,泥云岩具有整体含油的特征,油水关系受构造幅度的影响较小,基本没有统一的油水界面,油水分异程度较低。油气在逆断层下盘富集,岩性侧向变化带、渗透层与非渗透层的过渡带含油性变差,储集层的发育程度控制油气富集,“甜点”的分布控制单井产能。

砂砾岩致密油受控于“甜点”的展布,具有环凹分布、前缘带富集的特征。沿控凹断裂带发育的砂砾岩储集层向凹陷内与湖相烃源岩侧向接触,扇体前缘由于受到湖流作用的改造,物性条件变好。



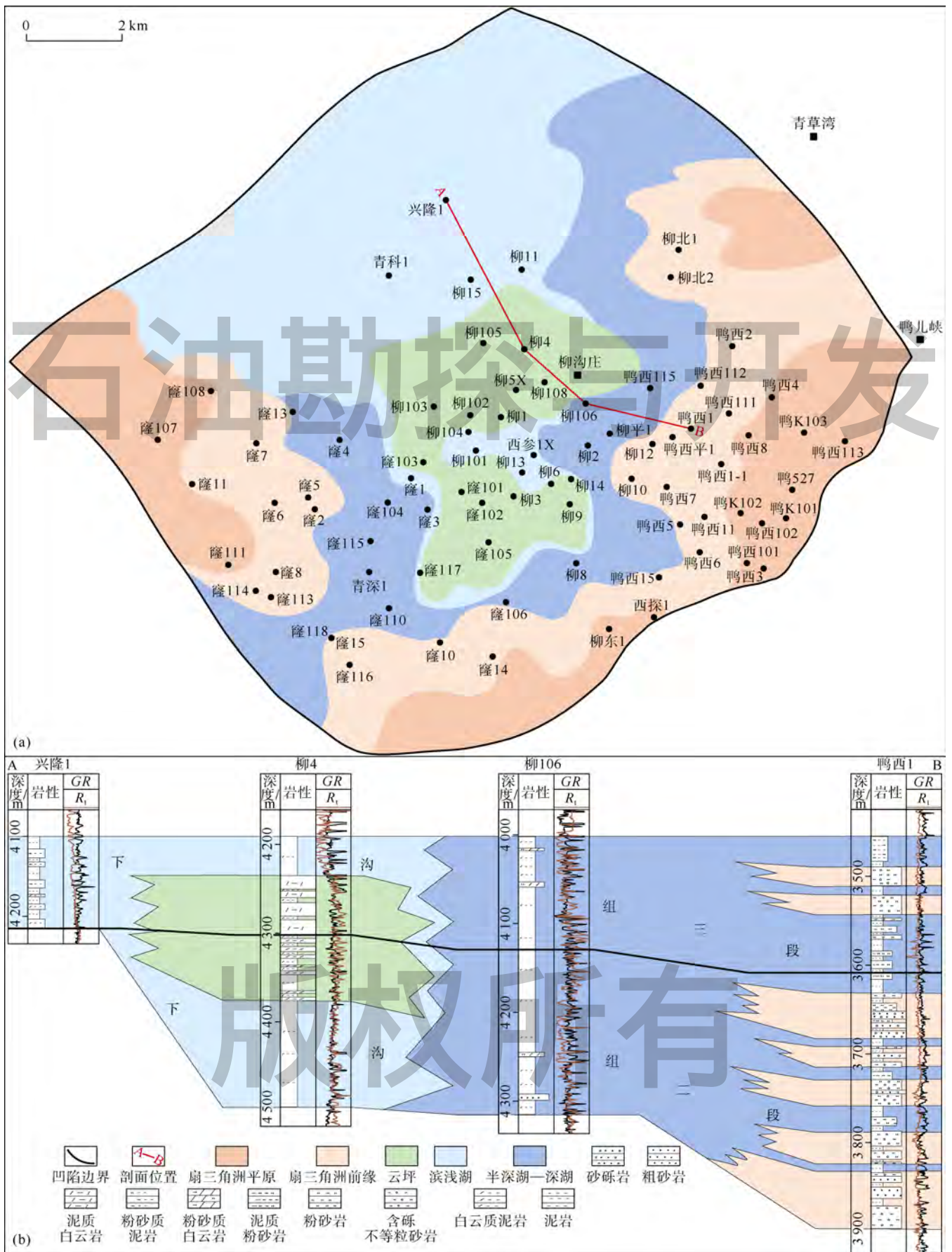


图2 酒泉盆地青西凹陷下沟组沉积相分布平面图及对比剖面图 (GR—自然伽马; R<sub>1</sub>—电阻率)

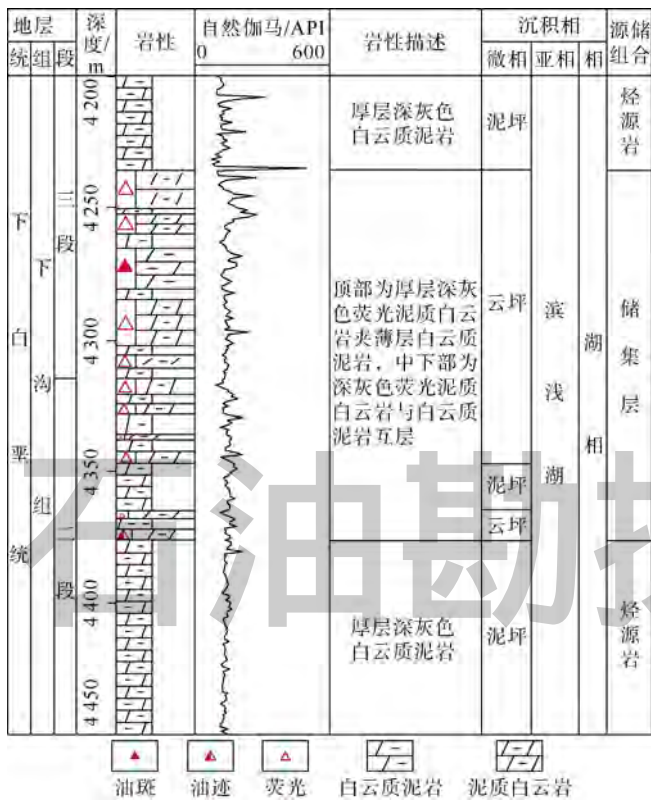


图3 青西凹陷柳4井泥云岩源储组合综合柱状图

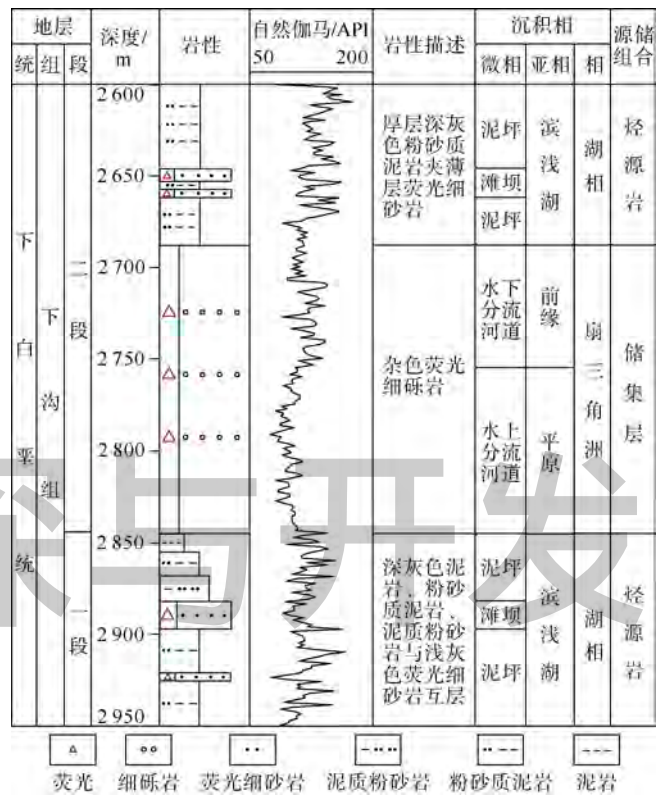


图4 花海凹陷墩1井碎屑岩源储组合综合柱状图

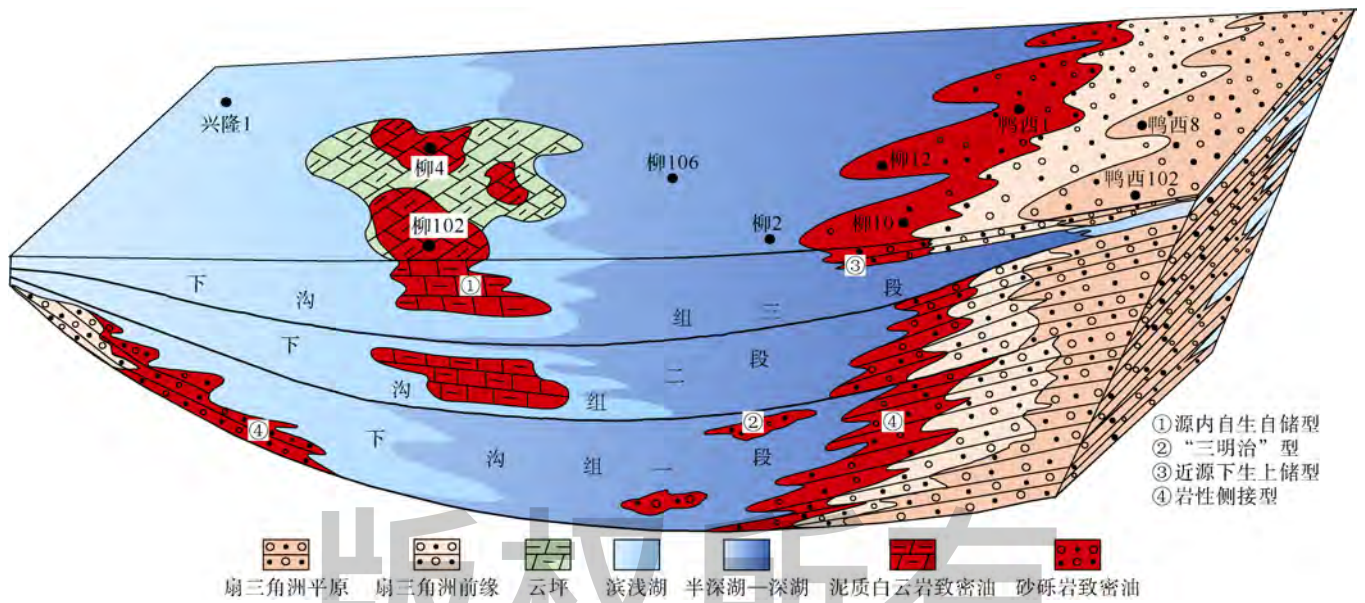


图5 酒泉盆地下白垩统致密油分布模式图

表2 青西凹陷柳102井下沟组三段烃源岩有机质丰度统计表

岩性	有机碳含量/%				氯仿沥青“A”含量/%				总烃含量/ $10^{-6}$				生烃潜量/( $mg \cdot g^{-1}$ )			
	最小值	最大值	平均值	样品数/个	最小值	最大值	平均值	样品数/个	最小值	最大值	平均值	样品数/个	最小值	最大值	平均值	样品数/个
深灰色白云质泥岩	0.87	2.26	1.48	24	0.064	0.219	0.148	4	466	1386	977	4	2.02	17.89	7.38	24
深灰色泥质白云岩	0.54	2.74	1.45	36			0.164	1			969	1	0.41	13.94	6.18	36



酒泉盆地泥云岩和砂砾岩致密油主要形成和分布于凹陷沉积中心和控凹断裂带沉降中心周缘,埋深普遍较大,效益勘探的关键是预测“甜点”规模发育区。通过已钻井资料分析储集层特征是储集层综合预测的有效手段。

### 3.2 泥云岩“甜点”特征

泥云岩储集层主要分布在青西凹陷柳沟庄地区,以粉砂质白云岩、泥质白云岩和微裂缝较发育的白云质泥岩为主。镜下观察泥质白云岩主要成分为泥晶白云石,其次为直径小于 0.03 mm 的长英质碎屑及隐晶质成分;白云质泥岩主要成分为云母绿泥质黏土及直径小于 0.03 mm 的长英质碎屑和隐晶质成分,其次

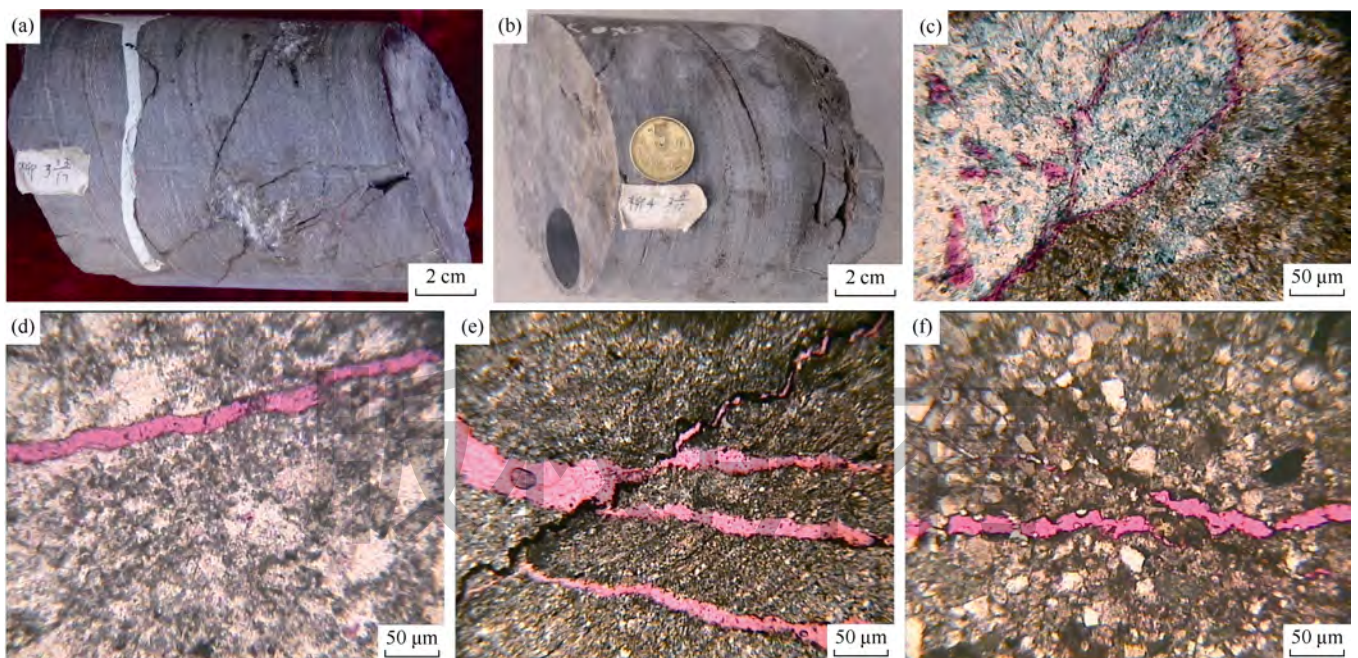
为粉晶、泥晶白云石。

泥云岩储集层物性普遍较差,孔隙度和渗透率低。孔隙类型以晶间孔为主,偶见微裂缝、晶间次生溶孔。对 4 口井 50 块岩心样品进行分析,孔隙度平均值主要为 1.1%~5.6%,以小于 5.0% 为主;空气渗透率以小于  $1.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  为主(见表 3),受裂缝影响的少数样品渗透率高达  $66.354 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

裂缝的发育改善了泥云岩物性条件,是控制“甜点”展布的重要因素。岩心观察发现柳 4 井发育张裂缝(见图 6a—图 6b),柳 4、柳 9、青 2-36 等井薄片镜下观察发现微裂缝发育,缝宽 0.01~0.05 mm,多呈单条或多条沿同一方向延伸(见图 6c—图 6f),部分被共轭发育的

表 3 青西凹陷柳沟庄地区泥云岩储集层岩心分析统计表

井名	层位	井段/m	样品数/个	岩性	孔隙度/%			空气渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	
					最小值	最大值	平均值	最小值	最大值
柳 4	K <sub>1g2+3</sub>	4 267.30~4 269.80	6	深灰色泥质白云岩	0.9	2.4	1.7	0.388	66.354
	K <sub>1g2+3</sub>	4 303.25~4 305.49	7	深灰色泥质白云岩	0.5	2.1	1.1	1.439	4.826
	K <sub>1g2+3</sub>	4 406.13~4 407.63	4	深灰色泥质白云岩	1.2	2.3	1.9	1.442	1.567
柳 6	K <sub>1g2+3</sub>	4 089.64~4 092.29	6	深灰色泥质白云岩	1.1	4.5	2.7		
	K <sub>1g2+3</sub>	4 092.82~4 094.74	5	深灰色泥质白云岩	3.0	6.0	4.0	0.382	3.044
	K <sub>1g2+3</sub>	4 455.21~4 455.25	5	深灰色泥质白云岩	2.5	5.0	3.4	0.332	0.436
青 1-1	K <sub>1g2+3</sub>	4 264.20~4 264.48	2	灰黑色泥质白云岩	11.0	13.0	12.0		
	K <sub>1g2+3</sub>	4 264.62~4 265.24	4	深灰色泥质白云岩	3.6	6.4	4.8	1.461	1.588
	K <sub>1g2+3</sub>	4 356.75~4 357.90	5	深灰色泥质白云岩	4.3	6.5	5.6	1.362	65.792
隆 102	K <sub>1g1</sub>	4 643.97~4 645.16	3	深灰色白云质泥岩	3.2	4.3	3.5		
	K <sub>1g1</sub>	4 681.48~4 683.56	3	深灰色泥质白云岩	5.1	6.0	5.5	0.399	0.459



(a)柳 4 井,4 305.00 m,深灰色油迹泥质白云岩,发育张裂缝;(b)柳 4 井,4 304.50 m,深灰色油迹泥质白云岩,发育张裂缝;(c)柳 4 井,4 304.50 m,泥云岩中由黄铁矿、铁白云石、重晶石等构成的晶洞、晶脉中可见晶间孔,另见数条微裂缝;(d)青 2-36 井,5 219.35 m,云质泥岩中见少量晶间孔和 1 条宽约 0.03 mm 的裂缝;(e)柳 9 井,4 902.14 m,泥质泥晶云岩中见压溶缝和溶蚀改造缝;(f)柳 9 井,4 902.14 m,泥质泥晶云岩中见压溶缝和溶蚀改造缝

图 6 柳沟庄地区下白垩统泥云岩岩心及铸体薄片照片

微裂缝斜交或正交切割(见图6c、图6e)。微裂缝的发育沟通了泥云岩中的基质孔隙,改善了储集层的渗流性能。

泥云岩储集层可划分为裂缝-孔隙型、孔隙-裂缝型、裂缝型和孔隙型4类(见表4)。“甜点”主要为裂缝-孔隙型、孔隙-裂缝型,既发育一定的基质孔隙、又有裂缝沟通形成高孔渗带。柳沟庄地区主要发育II类和III类储集层,局部发育I类储集层。

表4 泥云岩致密油储集层评价分类表

评价分类	储集层类型	连通性	孔隙度/%	厚度/m	压力系数
I类	裂缝-孔隙型	好	>8	>30	>1.4
II类	孔隙-裂缝型	较好	5~8	15~30	1.2~1.4
III类	裂缝型	一般	3~5	5~15	0.8~1.2
IV类	孔隙型	较差	<3	<5	<0.8

### 3.3 砂砾岩“甜点”特征

砂砾岩致密储集层在各凹陷均有分布。该类储集层岩石类型主要为砂岩、含砾砂岩及砾岩。陆源碎屑

组分主要为石英、长石和岩屑;岩屑成分主要为变质泥岩,其次为变质粉砂岩、石英岩、酸性喷出岩等;胶结物主要为泥晶白云石和粉晶铁白云石。沉积物分选差—中等,磨圆度次棱状—次圆状,颗粒支撑,胶结类型以基底-孔隙型、孔隙型为主。

局部发育次生孔隙发育的“甜点”。对鸭西地区6口井147个岩心样品进行分析发现,孔隙度平均值以2.8%~9.1%为主,空气渗透率以小于 $2.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为主(见表5),物性较差。但次生溶蚀孔发育时,储集层的物性变好,如柳10井4462.52~4463.88m井段的5个样品溶蚀孔较发育,孔隙度平均值为21.7%,渗透率最大为 $48.39 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。通过对位于扇三角洲前缘的鸭西1、柳10和位于半深湖的鸭西115等井岩心观察,岩心表面发育大量不规则的溶蚀孔、洞(见图7a—图7c),镜下观察可见部分长石颗粒被溶蚀,形成不规则状粒内及粒间溶蚀孔(见图7d—图7f),次生溶蚀孔的发育改善了致密储集层的物性条件。

表5 酒泉盆地鸭西地区碎屑岩储集层岩心分析统计表

井号	层位	井段/m	样品数/个	岩性	孔隙度/%			空气渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	
					最小值	最大值	平均值	最小值	最大值
鸭西1	K <sub>1g</sub>	3830.89~3832.24	4	灰色粗砂岩、泥质砂岩	5.5	7.5	6.4	1.098	21.687
	K <sub>1g</sub>	4014.25~4025.95	49	灰色泥质粉砂岩、中砂岩	2.3	13.1	8.5	1.052	41.268
	K <sub>1g</sub>	4079.41~4084.27	24	灰色含砾砂岩	4.2	13.8	8.9	1.084	2.162
鸭西111	K <sub>1g</sub>	3622.37~3628.71	8	灰色中砂岩	5.7	10.1	7.3	1.017	34.015
	K <sub>1g</sub>	3725.10~3729.48	9	灰色不等粒砂岩	4.8	7.9	5.8	1.119	1.999
柳10	K <sub>1g</sub>	4299.31~4304.90	10	灰色砾岩	6.3	12.1	8.2	1.182	1.875
	K <sub>1g</sub>	4462.52~4463.88	5	深灰中砂岩、细砂岩	19.7	23.8	21.7	6.261	48.390
鸭西112	K <sub>1g</sub>	4224.00~4229.41	7	灰色粗砾岩	1.5	5.3	2.8	0.648	0.736
墩1	K <sub>1z</sub>	1964.57~1968.25	8	灰色含泥砂岩、泥质砂岩	3.5	8.3	6.3	1.147	45.778
白南3	K <sub>1c</sub>	2324.73~2331.79	23	灰色粗砾岩	2.6	13.0	9.1	0.110	36.000

砂砾岩储集层可划分为孔隙-裂缝型、孔隙型和裂缝-孔隙型3类(见表6)。“甜点”主要为孔隙-裂缝型和孔隙型。由于砂砾岩中裂缝的发育程度较泥云岩低,且主要为层间缝,“甜点”主要位于扇三角洲前缘河道砂体有利相带和次生孔隙发育带叠合的局部高孔渗带,以II类储集层为主。

## 4 致密油有利勘探领域

致密油的分布受控于烃源岩发育及演化程度、与源岩匹配的储集层条件及其有效组合,而富集规律受控于储集层“甜点区”。与大型拗陷湖盆不同,中小型断陷湖盆中大面积广覆式分布的砂体是较有限的,但厚度大、多期扇体叠置的砂砾岩体广泛分布,叠合厚度和面积大,具有规模勘探价值,湖相泥云岩的分布

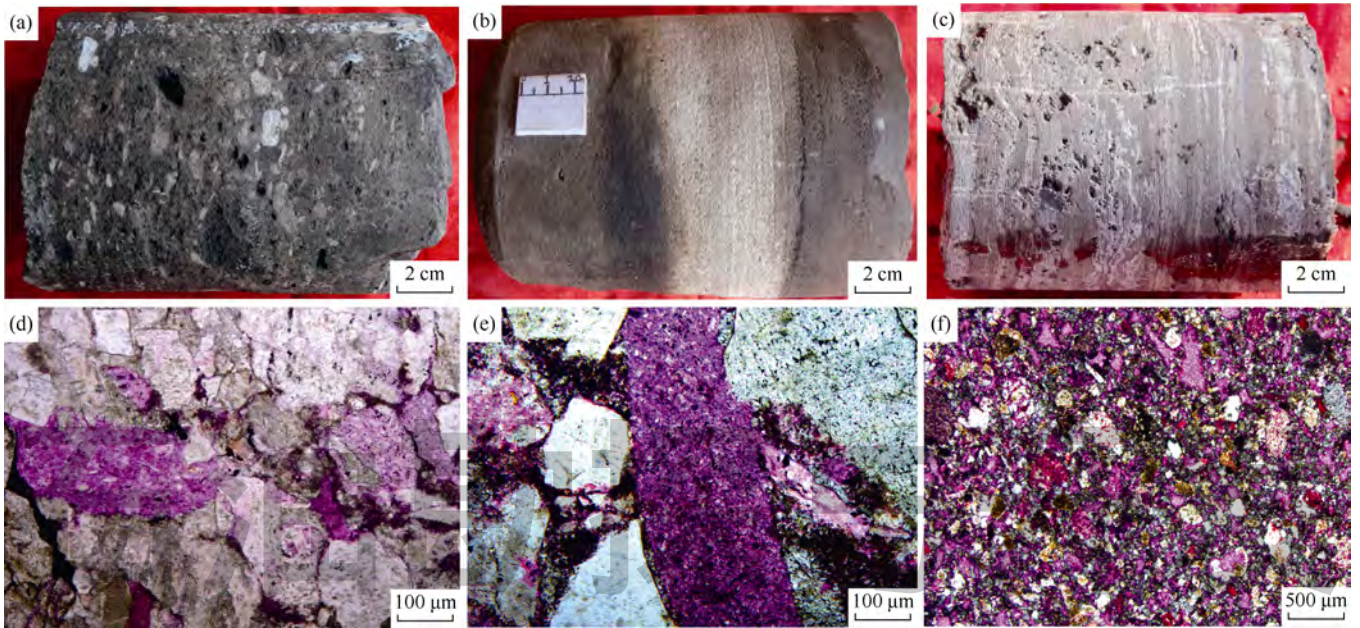
丰富了中小型断陷湖盆的致密油类型。致密油勘探的关键是预测储集层“甜点”区,岩性岩相分析是进行致密油储集层综合评价和“甜点”预测的重要方法<sup>[19]</sup>。

### 4.1 泥云岩致密油勘探领域

以柳沟庄地区为代表的泥云岩致密油具有整体含油、裂缝发育带富集的特征。裂缝对储集层的储集性能及渗流条件起到重要的改善作用。新近纪以来,受青藏高原隆升作用影响,位于其北侧的酒泉盆地受到西南方向的超强挤压应力作用,盆地南缘形成多级推覆冲断带,强烈的构造活动使下白垩统发生断裂和褶皱变形,由此派生出大量的裂缝和微裂隙<sup>[20-21]</sup>,泥云岩纹层状结构有利于裂缝的形成和溶蚀作用的发生<sup>[22]</sup>,裂缝以北西—北西西向为主。

“甜点”区是致密油勘探的主要领域,断裂和裂





(a) 鸭西 1 井, 4 021.40 m, 含砾砂岩, 岩心表面见溶蚀孔隙; (b) 柳 10 井, 4 462.14 m, 灰色细砂岩, 岩心表面见针孔状溶蚀孔隙; (c) 鸭西 115 井, 4 243.15 m, 灰色粉砂岩, 岩心表面见溶蚀孔隙; (d) 鸭西 111 井, 3 622.37 m, 长石颗粒部分被溶蚀; (e) 柳 10 井, 4 302.34 m, 长石颗粒完全溶蚀或部分被溶蚀; (f) 柳 10 井, 4 463.81 m, 溶蚀孔隙发育

图 7 鸭西地区下沟组碎屑岩岩心照片及铸体薄片

表 6 砂砾岩致密油储集层评价分类表

评价分类	储集层类型	连通性	孔隙度/ %	厚度/ m	压力系数
I 类	孔隙-裂缝型	好	>10	>30	>1.4
II 类	孔隙型	较好	8~10	15~30	1.1~1.4
III 类	裂缝-孔隙型	一般	5~8	5~15	0.8~1.1

缝发育区油气富集。位于裂缝发育带内的钻井均获得较高产能, 而裂缝不发育区的钻井产能较低。如位于裂缝较发育带的柳 1、柳 4、柳 102 和柳 108 等井, 常规试油产量为 5.8~56.2 t/d。对产层实施酸化后, 单井初期产量可得到大幅提高, 如柳 102 井 4 219.5~4 249.5 m 井段酸化后初期产量达到 112.4 t/d, 柳 4 井 4 234.0~4 309.0 m 井段酸化后初期产量达到 119.0 t/d。裂缝不发育带的井产能较低, 测试多为低产油层或干层, 如柳 103 井 4 300.4~4 352.2 m 井段试油产量仅为 0.88 t/d, 柳 106 井 4 089.0~4 540.0 m 井段试油获得 0.80 t/d 的低产油流。工程技术改造措施对提高致密油产能起到关键作用, 采用压裂技术措施后, 低产井有望获得高产, 泥云岩致密油勘探发现的潜力很大。

按照致密油评价标准, 对柳沟庄地区圈定 TOC 值大于 1%、储集层厚度大于 15 m、源储一体的致密油勘探面积近 100 km<sup>2</sup>, 柳沟庄地区是致密油勘探现实区 (见图 8a)。

#### 4.2 砂砾岩致密油勘探领域

砂砾岩致密油在各凹陷均有分布, 以鸭西、柳北等地区为代表的致密油具有环凹分布、扇体前缘带“甜点”富集的特征。井震标定预测研究表明, 下白垩统下沟组和赤金堡组烃源岩生烃门限为 3 500~4 000 m, 生排烃过程中排出大量有机酸, 使环凹分布的致密砂砾岩处在酸性成岩环境中, 碎屑岩中的长石类矿物和胶结物易发生选择性溶蚀作用, 形成次生溶蚀孔发育带。溶蚀作用改善了储集层物性, 有利于近源油气富集。如溶蚀带钻探的鸭西 115、鸭西 12 等井在 K<sub>1g1</sub> 段虽然埋深大于 4 000 m, 部分井段仍有自然产能, 压裂改造后获得 15~23 t/d 的初产。

按照致密油评价标准, 圈定青西凹陷 TOC 值大于 1%、储集层厚度大于 15 m、扇三角洲前缘与湖相泥岩侧接、埋深在 4 000~4 500 m 的面积为 80~100 km<sup>2</sup>, 鸭西、柳北等地区是近期勘探的现实区 (见图 8a)。按照同样的标准, 对花海和营尔凹陷进行致密油初步评价, 花海凹陷扇三角洲前缘砂体与深湖相泥岩互层部位是致密油勘探有利区, 有利勘探面积近 300 km<sup>2</sup> (见图 8b); 营尔凹陷扇三角洲相砂砾岩主要发育在凹陷东部, 而西部物源体系以砂岩和泥岩互层沉积为主, 有利勘探面积近 150 km<sup>2</sup> (见图 8c)。青西、花海和营尔等凹陷碎屑岩致密油勘探有利面积达到 550 km<sup>2</sup>。

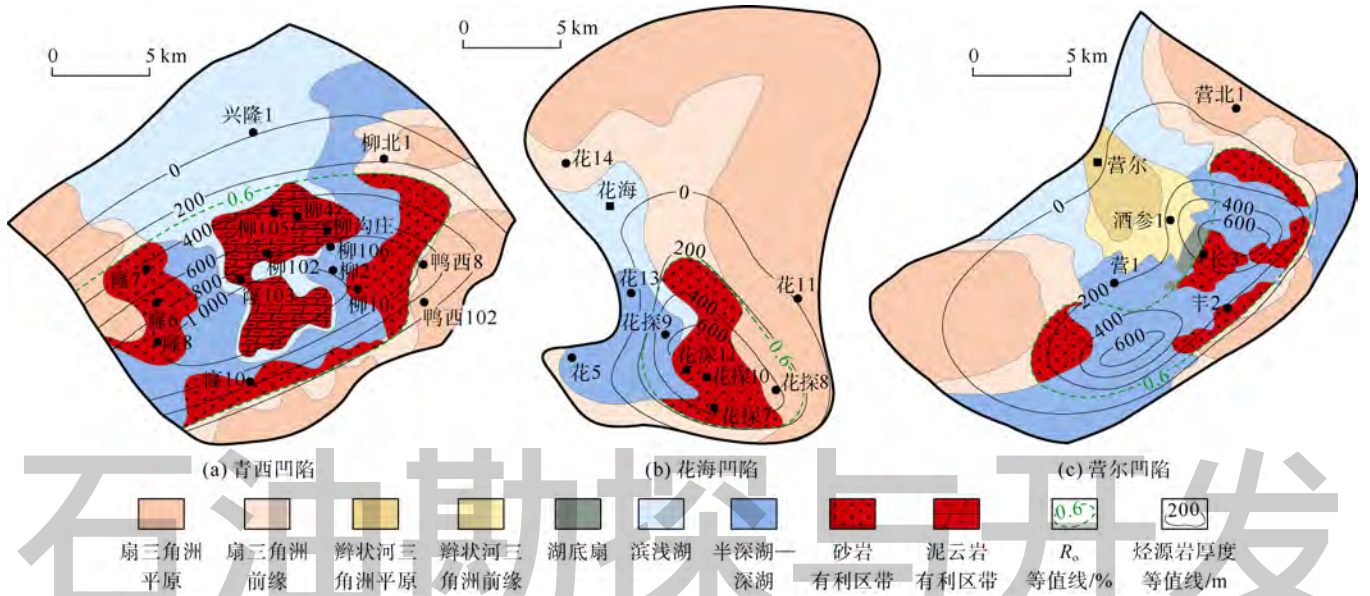


图8 酒泉盆地主要凹陷下白垩统下沟组致密油勘探有利区综合评价图

### 5 结论

酒泉盆地青西、营尔、花海等凹陷下白垩统致密油形成条件好。暗色泥岩和藻纹层泥云岩有机碳含量平均值大于 1.5%、最高达 14.45%，以 II<sub>1</sub> 型和 I 型干酪根为主， $R_o$  值多大于 0.6%，有机质丰度高、母质类型好、热演化程度适中，生烃潜量大，资源丰富。下白垩统多旋回演化形成了围绕中沟组、下沟组和赤金堡组 3 套烃源岩的有效生储盖组合。

发育泥云岩致密油和砂砾岩致密油 2 种主要类型。青西凹陷泥云岩致密油具有源储一体的特征，为自生自储型致密油。青西、花海和营尔等凹陷砂砾岩致密油具有近源和源内聚集特征，主要发育侧接型、下生上储型和“三明治”型源储类型。

“甜点”储集层规模展布，致密油具有普遍含油、“甜点”富集的特征。青西等凹陷扇三角洲前缘次生孔隙发育带环凹分布，孔隙型“甜点”储集层规模展布；泥云岩沉积在晚期挤压构造作用下，形成的北西向裂缝带沟通了基质微孔，孔隙-裂缝型和裂缝-孔隙型“甜点”规模展布。

酒泉盆地致密油勘探领域较广阔。砂砾岩致密油以青西、花海和营尔等凹陷环凹分布的扇三角洲前缘沉积为主要勘探方向，有利勘探面积达 550 km<sup>2</sup>；泥云岩致密油以青西凹陷北西向裂缝发育带为主要勘探方向，有利勘探面积达 100 km<sup>2</sup>。

致谢：在项目研究和论文编写过程中得到了中国石油玉门油田公司范铭涛教授级高级工程师和玉门油

田公司勘探开发研究院唐海忠、王崇孝和周在华高级工程师等专家的悉心指导和帮助，在此一并表示衷心的感谢！

#### 参考文献：

- [1] NELSON P H. Pore-throat sizes in sandstones, tight sandstones, and shales[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(3): 329-340.
- [2] 林森虎, 邹才能, 袁选俊, 等. 美国致密油开发现状及启示[J]. 岩性油气藏, 2011, 23(4): 25-30.  
LIN Senhu, ZOU Caineng, YUAN Xuanjun, et al. Status of tight oil exploitation in the United States and its implication[J]. Lithologic Reservoirs, 2011, 23(4): 25-30.
- [3] 许怀先, 李建中. 致密油：全球非常规石油勘探开发新热点[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 99.  
XU Huaixian, LI Jianzhong. Tight oil: New focus of unconventional oil exploration and development in the world[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 99.
- [4] 杜金虎, 李建忠, 郭彬程, 等. 中国陆相致密油[M]. 北京: 石油工业出版社, 2016: 2-18.  
DU Jinhu, LI Jianzhong, GUO Bincheng, et al. Tight oil in terrestrial lacustrine basin, China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2016: 2-18.
- [5] 国家能源局. 致密油地质评价方法: SY/T 6943—2013[S]. 北京: 石油工业出版社, 2013.  
National Energy Administration. Geological evaluating methods for tight oil: SY/T 6943—2013[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2013.
- [6] 邹才能, 朱如凯, 吴松涛, 等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望：以中国致密油和致密气为例[J]. 石油学报, 2012, 33(2): 173-187.  
ZOU Caineng, ZHU Rukai, WU Songtao, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: Taking tight oil in China as an instance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 173-187.



- [7] 马洪, 李建忠, 杨涛, 等. 中国陆相湖盆致密油成藏主控因素综述[J]. 石油实验地质, 2014, 36(6): 668-677.  
MA Hong, LI Jianzhong, YANG Tao, et al. Main controlling factors for tight oil accumulation in continental lacustrine basins in China[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2014, 36(6): 668-677.
- [8] 匡立春, 王霞田, 郭旭光, 等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油地质特征与勘探实践[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(6): 629-634.  
KUANG Lichun, WANG Xiatian, GUO Xuguang, et al. Geological characteristics and exploration practice of tight oil of Lucaogou formation in Jimsar sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36(6): 629-634.
- [9] 姚泾利, 邓秀芹, 赵彦德, 等. 鄂尔多斯盆地延长组致密油特征[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(2): 150-158.  
YAO Jingli, DENG Xiuqin, ZHAO Yande, et al. Characteristics of tight oil in Triassic Yanchang formation, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(2): 150-158.
- [10] 赵泽辉, 徐淑娟, 姜晓华, 等. 松辽盆地深层地质结构及致密砂砾岩气勘探[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(1): 12-23.  
ZHAO Zehui, XU Shujuan, JIANG Xiaohua, et al. Deep strata geologic structure and tight conglomerate gas exploration in Songliao Basin, East China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(1): 12-23.
- [11] 孙维凤, 宋岩, 公言杰, 等. 青西油田下白垩统下沟组致密油成藏条件[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2015, 37(6): 12-20.  
SUN Weifeng, SONG Yan, GONG Yanjie, et al. Accumulation condition for tight oil in Xiagou Formation, Lower Cretaceous, Qingxi Oilfield[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2015, 37(6): 12-20.
- [12] 王崇孝, 马国福, 周在华. 酒泉盆地中、新生代构造演化及沉积充填特征[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(1): 33-36.  
WANG Chongxiao, MA Guofu, ZHOU Zaihua. Structure evolution and sedimentary filling of Jiuquan Basin in Mesozoic-Cenozoic period, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(1): 33-36.
- [13] 马立元, 程克明. 酒西坳陷与酒东坳陷下白垩统生烃条件对比研究[J]. 沉积学报, 2012, 30(2): 392-398.  
MA Liyuan, CHENG Keming. Comparison of the hydrocarbon-generating conditions of the lower Cretaceous from the Jiuxi and Jiudong Depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(2): 392-398.
- [14] 马立元, 程克明, 刘大锰, 等. 酒泉盆地地下白垩统藻纹层分布特征及其与油气的关系[J]. 沉积学报, 2007, 25(1): 147-153.  
MA Liyuan, CHENG Keming, LIU Dameng, et al. Laminar algal distribution characteristics of lower Cretaceous and the relation to oil-gas of Jiuquan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(1): 147-153.
- [15] 陈建军, 程克明, 熊英, 等. 酒西坳陷下白垩统藻纹层灰岩生烃特征[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(6): 61-65.  
CHEN Jianjun, CHENG Keming, XIONG Ying, et al. Hydrocarbon generation of laminar algal limestone of lower Cretaceous in the Jiuxi depression, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(6): 61-65.
- [16] 门相勇, 王智谔. 花海凹陷白垩系含油气系统勘探潜力评价[J]. 中国石油勘探, 2005, 10(3): 26-29.  
MEN Xiangyong, WANG Zhiye. Potential evaluation of exploration in Cretaceous petroleum system in Huahai Sag[J]. China Petroleum Exploration, 2005, 10(3): 26-29.
- [17] 邹才能, 杨智, 张国生, 等. 常规-非常规油气“有序聚集”理论认识及实践意义[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(1): 14-27.  
ZOU Caineng, YANG Zhi, ZHANG Guosheng, et al. Conventional and unconventional petroleum “orderly accumulation”: Concept and practical significance[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(1): 14-27.
- [18] 陈启林, 杨占龙. 泛河西走廊盆地群油气地质特征与勘探前景[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(2): 186-192.  
CHEN Qilin, YANG Zhanlong. Petroleum geology of Pan-Hexi corridor basins and exploration prospecting[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(2): 186-192.
- [19] 周正龙, 王贵文, 冉冶, 等. 致密油储集层岩性岩相测井识别方法: 以鄂尔多斯盆地合水地区三叠系延长组 7 段为例[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(1): 61-68, 83.  
ZHOU Zhenglong, WANG Guiwen, RAN Ye, et al. A logging identification method of tight oil reservoir lithology and lithofacies: A case from Chang7 Member of Triassic Yanchang Formation in Heshui area, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(1): 61-68, 83.
- [20] 王崇孝, 田多文, 魏军, 等. 酒泉盆地窟窿山油藏裂缝分布特征[J]. 岩性油气藏, 2008, 20(4): 20-25.  
WANG Chongxiao, TIAN Duowen, WEI Jun, et al. Fractures distribution characteristics of Kulongshan Reservoir in Jiuquan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2008, 20(4): 20-25.
- [21] 赵应成, 周晓峰, 王崇孝, 等. 酒西盆地青西油田白垩系泥云岩裂缝油藏特征和裂缝形成的控制因素[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(1): 12-15.  
ZHAO Yingcheng, ZHOU Xiaofeng, WANG Chongxiao, et al. Characters of a special rock-fractured reservoir and factors of controlling fractured development at Qingxi Oilfield in Jiuxi Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(1): 12-15.
- [22] 李军, 王德发, 范洪军. 甘肃酒泉盆地青西油田裂缝特征及成因分析[J]. 现代地质, 2007, 21(4): 691-696.  
LI Jun, WANG Defa, FAN Hongjun. A description of fracture features and its formation mechanisms in Qingxi Oilfield, Jiuquan Basin, Gansu[J]. Geoscience, 2007, 21(4): 691-696.

第一作者简介: 陈启林(1963-), 男, 甘肃定西人, 博士, 中国石油勘探开发研究院西北分院教授级高级工程师, 主要从事油气地质综合评价和地震沉积分析研究工作。地址: 甘肃省兰州市城关区雁儿湾路 535 号, 中国石油勘探开发研究院西北分院, 邮政编码: 700020。E-mail: chenql@petrochina.com.cn

收稿日期: 2017-08-22 修回日期: 2018-02-02

(编辑 王晖)