

# 湖侵背景古地貌对优质储层形成和分布的控制作用

——以准噶尔盆地四棵树凹陷高泉构造带清水河组为例

司学强<sup>1</sup>, 彭博<sup>1</sup>, 郭华军<sup>1</sup>, 陈希光<sup>1</sup>, 李亚哲<sup>1</sup>, 冀冬生<sup>2</sup>, 邹志文<sup>1</sup>, 易俊峰<sup>1</sup>

1. 中国石油杭州地质研究院, 杭州 310023

2. 中国石油新疆油田公司勘探开发研究院地球物理研究所, 乌鲁木齐 830013

**摘要** 【目的】准噶尔盆地南缘四棵树凹陷高泉构造带白垩系清水河组底部砂砾岩储层非均质性强, 优质储层形成和分布有待明确。【方法】通过对研究区岩心相、测井相和地震相的分析, 明确了清水河组沉积储层发育特征, 再结合高泉构造带清水河组沉积前古地貌研究, 建立了古地貌控制下的沉积演化模式, 厘清了微古地貌单元对优质储层分布的影响。【结果】清水河组沉积前研究区发育三个近北西—南东走向的坡折带, 每个坡折带上又可划分出沟槽和平台两种古地貌单元。湖侵背景下, 三个坡折带上依次形成了三期退积型扇三角洲, 每期扇三角洲可形成 10~15 m 厚的砂砾岩储层。在每个坡折带上, 沟槽和平台两种微古地貌单元控制了砂砾岩储层的泥质含量, 沟槽区易沉积泥质含量高的褐色砂砾岩, 平台区主要沉积泥质含量低的灰色或灰绿色砂砾岩, 平台区低泥质含量的砂砾岩易形成粒间孔发育的优质储层。【结论】坡折带及坡折带上的沟槽、平台两种微古地貌单元是研究区清水河组底部优质砂砾岩储层形成和分布的主控因素, 每个坡折带的平台区是寻找优质砂砾岩储层的有利区。

**关键词** 高泉构造带; 清水河组; 古地貌; 坡折带; 扇三角洲

**第一作者简介** 司学强, 男, 1979 年出生, 博士, 高级工程师, 储层沉积学, E-mail: sixq\_hz@petrochina.com.cn

**中图分类号** P618.13 **文献标志码** A

## 0 引言

古地貌是指地质历史时期由构造变形、风化剥蚀、沉积充填等地质作用所形成的地貌形态<sup>[1]</sup>, 它对沉积盆地源—汇配置关系、沉积体系类型、优质储层分布及地层流体的运移均有控制作用<sup>[2-5]</sup>。自 20 世纪 70 年代开始, 国内学者把古地貌研究应用于含油气盆地的勘探工作中, 取得了一系列研究成果, 有效指导了油气勘探开发。纵观前人古地貌研究成果既包括在盆地尺度的物源方向判定、砂体成因分析、优质储层预测及有利勘探区带优选等方面的应用<sup>[6-10]</sup>, 也有在重点区带三维区块内沉积微相刻画、岩性圈闭落实等工作中的应用<sup>[11-12]</sup>。随着理论方法的进步, 古地貌恢复研究由区域性、定性认识逐步向三维区、定量表征过渡, 为油气勘探工作提供的帮助越发重要。准噶尔盆地为多期叠合盆地, 发育多个不整合界面, 不整合界面的古地貌特征对界面之上沉积体系及有利储层分布都有重要影响<sup>[13]</sup>, 多位学者已对准噶尔盆地二叠系与三叠系、侏罗系与白垩系之间不整合界面古地貌特征及对后期沉积响

**收稿日期:** 2023-10-27; **收修改稿日期:** 2024-03-10

**基金项目:** 中国石油天然气集团有限公司基础性前瞻性重大科技专项 (2023ZZ02) [Foundation: the Fundamental Forward-looking Major Project of PetroChina, No. 2023ZZ02]

应影响开展了相关研究<sup>[14-16]</sup>。2019年位于准噶尔盆地南缘四棵树凹陷高泉地区的风险井高探1井在白垩系清水河组底部砂砾岩段获得了高产油气流，随后在同一构造带上部署了6口钻井，但油气显示远低于预期，研究发现相邻钻井储层物性特征存在明显差异，从而制约了高泉地区的勘探部署。本文利用三维地震资料对高泉地区侏罗系与白垩系之间不整合界面之上的古地貌进行刻画，划分了不同古地貌单元，并结合地质露头、钻井资料对清水河组底部砂砾岩段的沉积特征、沉积演化过程进行了解剖，揭示了白垩系清水河组沉积前古地貌对优质砂砾岩储层形成和分布的控制作用，旨在为高泉地区油气勘探提供参考和依据。

## 1 地质概况

四棵树凹陷位于准噶尔盆地南缘西段，南邻北天山，北接车排子凸起，受准噶尔盆地周缘右旋压扭体系影响，凹陷深层发育北西—南东走向的高泉断裂和艾卡断裂两条走滑断裂，在这两条断裂控制下，形成了高泉构造带和艾卡构造带<sup>[17-18]</sup>。高泉构造带主要发育背斜、断背斜和断鼻圈闭，其中高探1井位于高泉背斜的主体，高101井、高102井、高103井及GHW001井也位于该背斜上，高泉5井、高泉6井则位于高泉背斜南部的两个次级背斜上（图1）。露头和钻井揭示高泉构造带缺失上侏罗统喀拉扎组地层，白垩系清水河组与下伏侏罗系呈不整合接触，清水河组底部沉积了厚度为10~15 m灰褐色、灰绿色砂砾岩，向上逐渐变为灰色粉细砂岩夹薄层状泥岩，再向上过渡为灰色泥岩，岩性组合表现为一个水进沉积序列，因此四棵树凹陷在清水河组沉积时期属于湖侵背景<sup>[19-20]</sup>。

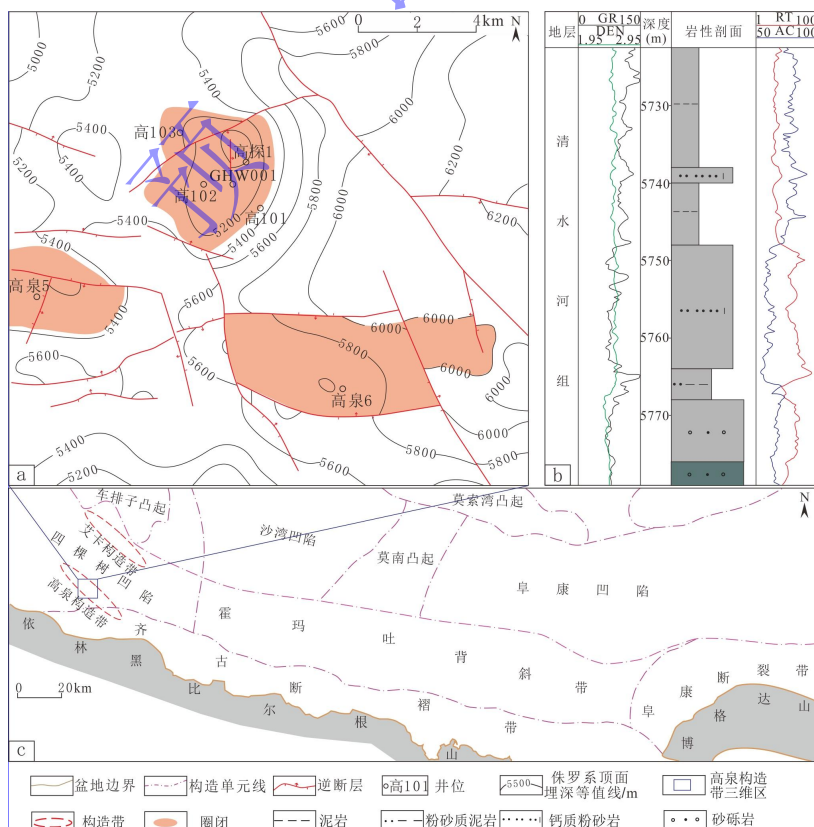


图1 四棵树凹陷高泉构地区构造位置及白垩系清水河组岩性柱状图

(a) 高泉构造带三维区清水河组底部构造图; (b) 高泉构造带清水河组底部岩性柱状图; (c) 准噶尔盆地南缘构造纲要图

Fig.1 Tectonic location map in Jaquan structural zone, Silesi Sag and lithological column of Cretaceous Qingheites Formation

(a) structure outline of the bottom of the Qingshuihe Formation in Gaoquan structural zone; (b) lithological column of Qingshuihe Formation; (c) structure outline of southern margin of Junggar Basin

## 2 沉积储层特征

### 2.1 砂砾岩特征及成因

高泉构造带6口钻井均揭示清水河组底部发育10~15 m厚的砂砾岩层。高103、高101和高泉6井砂砾岩颜色既有褐色又有灰绿色,褐色砂砾岩分布于灰绿色砂砾岩之下,其他井的砂砾岩均为灰色。岩心观察可见砂砾岩中砾石分选差,砾石直径0.2~3 cm不等;砾石多呈次棱角状,少量为次圆状。岩心中砾石相互接触形成支撑,砾石间充填泥杂基或砂级碎屑,局部可见到砾石间发育粒间孔隙。褐色砂砾岩的砾石间泥杂基含量高(图2a),灰绿色或者灰色砂砾岩的砾石间砂级碎屑含量高,常见到粒间孔隙(图2b)。褐色砂砾岩层理特征不明显,多呈块状,底部与侏罗系泥岩接触时可见明显的冲刷充填构造,褐色砂砾岩整体呈现多个正韵律沉积特征,单一韵律厚度1~2 m不等(图3)。灰色或灰绿色砂砾岩发育递变层理,岩心观察也可见多个正韵律沉积特征,单一韵律厚度0.5~1.5 m(图4)。综上可知高泉构造带清水河组底部的砂砾岩分选差,磨圆以次棱状为主,说明这套砂砾岩属于近源沉积;砂砾岩段是由多期次辫状河道叠置沉积而成,综合分析认为砂砾岩属于扇三角洲沉积,其中褐色砂砾岩属于扇三角洲平原亚相的辫状河道沉积,而灰色、灰绿色砂砾岩明显受到湖盆水体的淘洗作用,泥杂基含量低,属于扇三角洲前缘亚相。高探1井、GHW001井、高102井、高泉5井砂砾岩颜色以灰色和灰绿色为主,位于扇三角洲的前缘亚相,而高101井和高泉6井砂砾岩颜色自下而上由褐色变为灰绿色或灰色,说明这两口井位于扇三角洲平原和前缘亚相的叠置分布区(图3)。另外,录井显示在砂砾岩段之上发育钙质粉细砂岩,GHW001井岩心发育浪成沙纹层理(图2c),且粉砂岩段内部含条带状分布的粗砂岩纹层,分析认为该粉细砂岩为滨浅湖滩坝砂体(图4)。

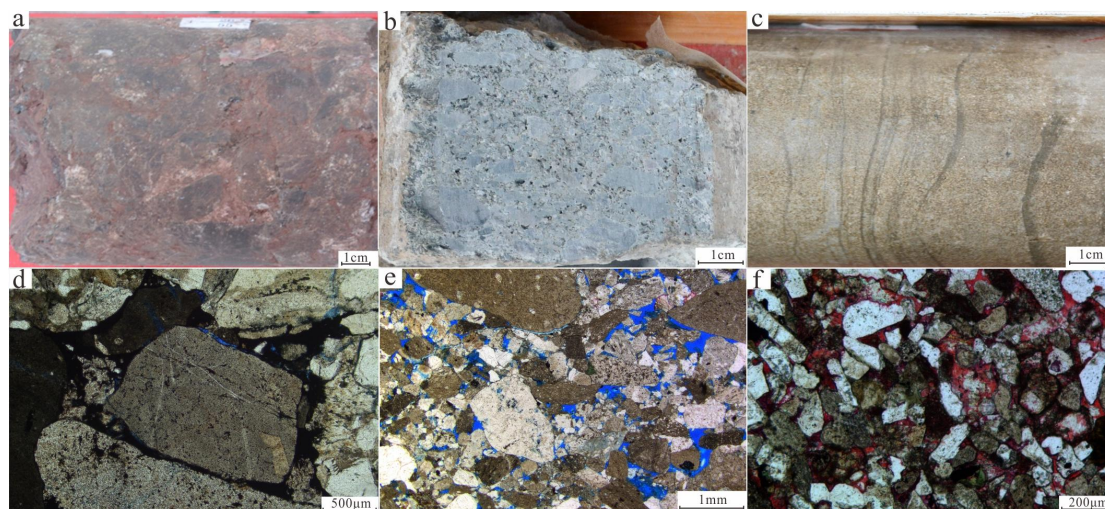


图2 四棵树凹陷高泉构造带白垩系清水河组沉积特征

(a) 高 101 井, 6 023.8~6 023.9 m, 褐色块状砂砾岩, 砾石间充填褐色泥杂基; (b) 高泉 5 井, 6 051.2~6 051.3 m, 灰绿色砂砾岩, 砾石间泥杂基含量低, 粒间孔发育; (c) GHW001 井, 5 822.8~5 823 m, 钙质细砂岩, 浪成沙纹层理; (d) 高 101 井, 6 021.3 m, 砂砾岩粒间泥杂基充填; (e) 高泉 5 井, 6 051.2 m, 砂砾岩粒间泥杂基含量低, 粒间孔发育; (f) GHW001 井, 5 820.3 m, 细粒长石岩屑砂岩, 方解石基底式胶结, 无可见孔

Fig.2 Sedimentary characteristics of the Cretaceous Qingshuihe Formation in the Gaoquan structural zone of the Sikeshu Sag

(a) well Gao 101, 6 023.8–6 023.9 m, red conglomerate, intergranular pores filled with red muddy matrix; (b) well Gaoquan 5, 6 051.2–6 051.3 m, greyish-green conglomerate, intergranular pores with low matrix content; (c) well GHW001, 5 822.8–5 823 m, calcareous fine sandstone, wave-generated cross bedding; (d) well Gao 101, 6 021.3 m, conglomerate, intergranular pores filled with muddy matrix; (e) well Gaoquan 5, 6 051.2 m, conglomerate, intergranular pores with low matrix content; (f) well GHW001, 5 820.3 m, fine-grained feldspathic litharenite, basal cementation by calcite

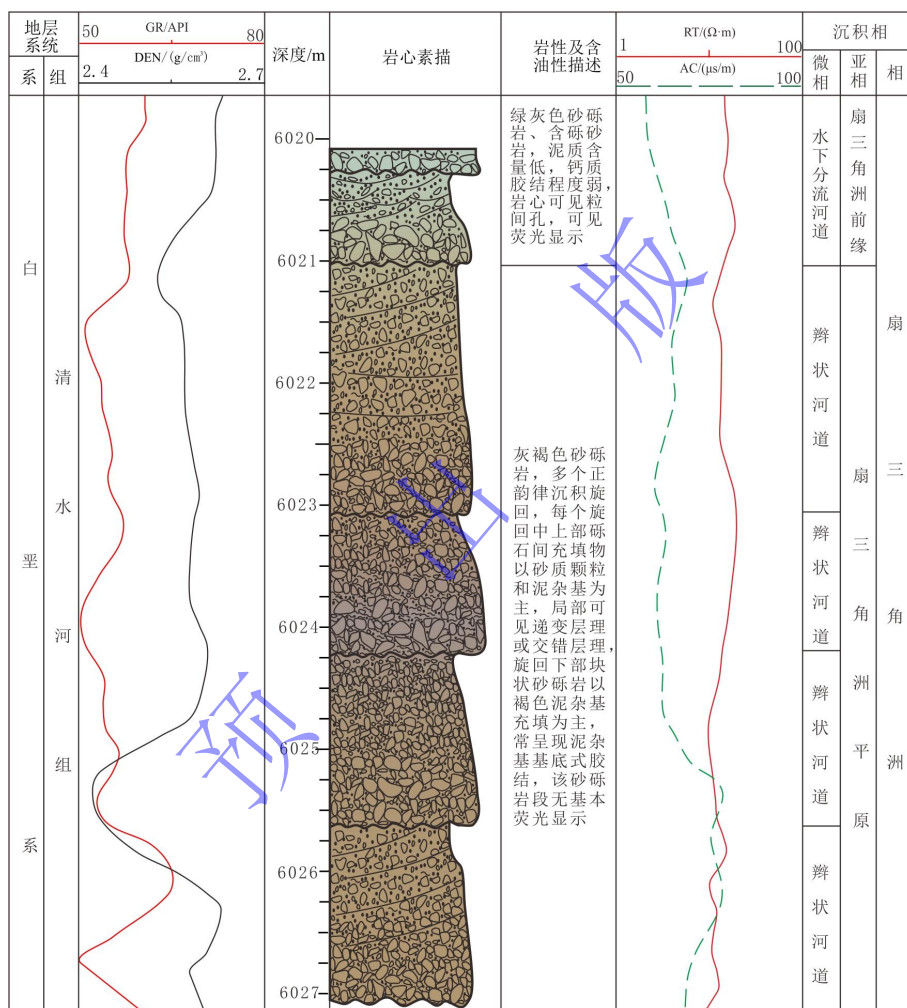


图3 四棵树凹陷高泉构造带高 101 井清水河组岩心相特征

Fig.3 Core facies of Cretaceous Qingshuihe Formation in well Gao 101, Gaoquan structural zone, Sikeshu Sag



其次为黄铁矿、硅质和硬石膏。褐色砂砾岩粒间多充填泥杂基，局部发育微孔隙（图 2d），而灰色和灰绿色砂砾岩镜下可见大量剩余粒间孔（图 2e）。另外砂砾岩物性具有明显差异，统计显示褐色砂砾岩孔隙度 3%~5%，灰色和灰绿色砂砾岩孔隙度 7%~11%（表 1）。在砂砾岩之上的钙质粉细砂岩呈现碳酸盐基底式胶结（图 2f），孔隙度 1%~3%。

表 1 四棵树凹陷高泉构造带白垩系清水河组底部储层特征

Table 1 Reservoir properties, bottom of Cretaceous Qingshuihe Formation, Gaoquan structural zone, Sikeshe Sag

岩性	岩石特征	高泉 5	高泉 6	高探 1	高 101	高 102	GHW001
灰色钙质粉细砂岩	厚度/m	8	8.5	16	18	16	19.5
	胶结物含量/%	15.6	13.7	/	17.5	18.9	23.7
	胶结物类型	碳酸盐	碳酸盐	/	碳酸盐	碳酸盐	碳酸盐
	杂基含量/%	1.4	2.1	/	0.4	2.2	2.7
	孔隙度/%	1.4	2.1	/	0.4	2.2	2.7
灰色或灰绿色砂砾岩	厚度/m	13	7.6	11	7	6	11
	胶结物含量/%	5.3	4.4	/	4.6	/	3.4
	胶结物类型	碳酸盐、硅质、 黄铁矿、伊利石	碳酸盐、硅质、 黄铁矿、伊利石	/	碳酸盐、硅质、 伊利石	/	碳酸盐、硅质、 黄铁矿、伊利石
	杂基含量/%	2.8	2.4	/	1.3	/	3.1
	孔隙度/%	7.2	7.8	10.1	8.6	7.1	7.9
灰褐色砂砾岩	厚度/m	0	2	0	7	0	0
	胶结物含量/%	/	3.4	/	2.4	/	/
	胶结物类型	/	碳酸盐、硅质、 硬石膏、伊利石	/	碳酸盐、硅质、 硬石膏、伊利石	/	/
	杂基含量/%	/	6.8	/	6.6	/	/
	孔隙度/%	/	3.5	/	4.4	/	/

由上述分析可知，灰色和灰绿色砂砾岩段泥质含量低，粒间孔发育，孔隙度 7%~11%，是优质储层段；而褐色砂砾岩及砂砾岩段之上的粉细砂岩段粒间孔不发育，孔隙度 1%~5%，储层物性差，为致密储层段。

### 3 古地貌特征

四棵树凹陷高泉构造带面积仅约 250 km<sup>2</sup>，但清水河组沉积相及储层特征在垂向和平面上均有较大变化，因此需要借助古地貌特征对高泉构造带沉积演化过程进行解剖，探讨优质砂砾岩储层分布规律。

古地貌恢复方法较多，常用方法有地层厚度法、印模法、声波时差法和高分辨率层序地层学法等<sup>[21-22]</sup>。侏罗纪末，高泉地区地层遭受剥蚀，缺失侏罗系喀拉扎组，侏罗系顶为一个古侵蚀面，白垩系清水河组是在此古侵蚀面之上沉积的一套薄层砂砾岩+粉细砂岩+厚层泥岩的岩性组合。基于三维地震资料利用印模法来恢复清水河组沉积前古地貌，首先选取侏罗系顶古侵蚀面的反射界面为底界面，再选取清水河组顶部稳定泥岩反射界面作为顶界面，结

合钻井校正计算两个界面之间的地层厚度，依据补偿沉积原理，厚度大的地方为古地貌低洼区，厚度小的地方为古地貌的凸起区。

由清水河组沉积前古地貌图可知，研究区自东北向西南方向地势逐渐增高，可分为三个近北西—南东走向的坡折带，三个坡折带被两条近北西—南东走向的坡折分割（图 5a），第一个坡折位于高探 1 井东北侧，第二个坡折位于高泉 5 井与高探 1 井之间，两条坡折近似平行，且与两条近北西—南东走向的断裂位置一致，推测坡折的形成与断裂是相关的（图 5b）。由古地貌图可知高探 1 井东北侧的坡折带地势最低，宽度最大超过 10 km；目前高泉构造带钻井主要位于中部坡折带上，该坡折带宽度 3~8 km 不等；高泉 5 井则位于高泉地区地势最高的坡折带上。每个坡折带上均发育两种微古地貌单元，即沟槽和平台（图 5c），沟槽一般呈南西—北东走向，与坡折带走向垂直或者斜交，相邻的沟槽之间为平台区。古地貌图显示高探 1 井、高 102 井、GHW001 井位于中部坡折带的平台上，该平台的东南侧发育一条延伸较长的沟槽，该沟槽由地势较高的坡折带一直延伸至地势较低的坡折带，且在中部坡折带上该沟槽分布较宽，最宽处超过 5 km，高 101 井和高泉 6 井则位于该沟槽的左右两侧。高 103 井位于上述平台的西北侧沟槽内，该沟槽规模相对较小。

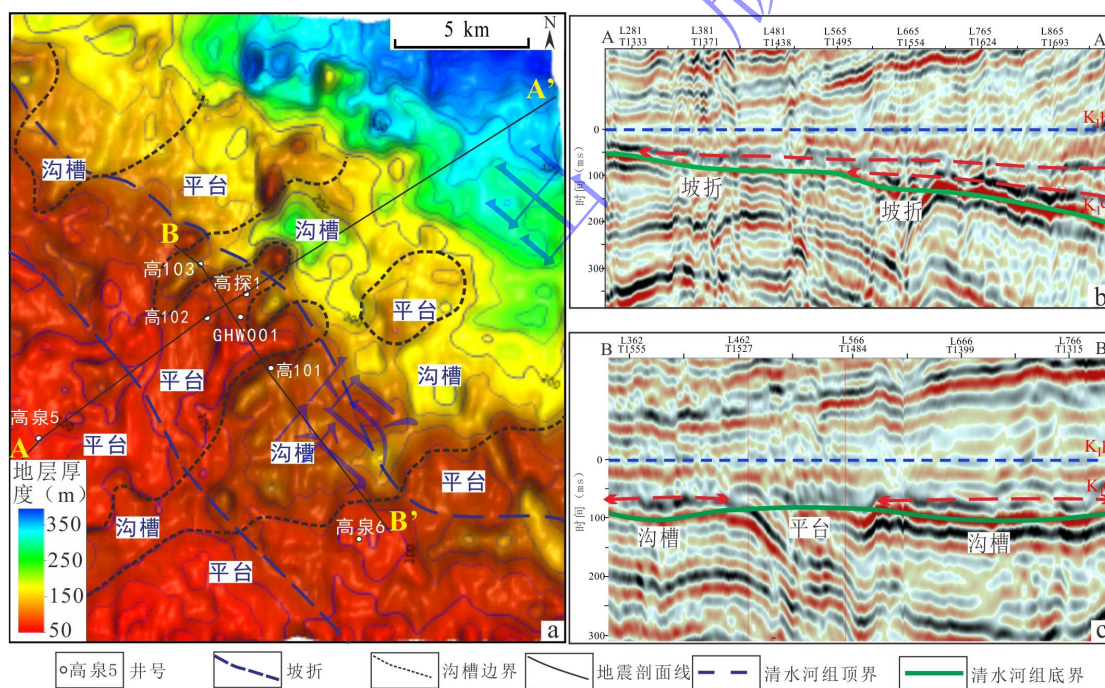


图 5 四棵树凹陷高泉构造带白垩系清水河组古地貌特征及地震剖面图

(a) 高泉构造带白垩系清水河组古地貌图；(b) 垂直坡折带走向的地震剖面；(c) 平行坡折带走向的地震剖面

Fig.5 Paleogeomorphic map and seismic section of Cretaceous Qingshuihe Formation, Gaoquan structural zone, Sikesu Sag

(a) paleogeomorphic map of Cretaceous Qingshuihe Formation, Gaoquan structural zone; (b) Seismic profile which is vertical to the slope break zone; (c) Seismic profile which is parallel to the slope break zone

#### 4 古地貌对沉积体系及优质储层的控制作用

由单井相分析可知，高泉构造带清水河组沉积相纵向上演化较快，由下至上依次发育扇

三角洲平原、扇三角洲前缘、滨浅湖；平面上相带变化频繁，相邻钻井沉积亚相存在明显差异，例如处于一个坡折带上的高 101 井和高 103 井清水河组以扇三角洲平原亚相沉积为主，而 GHW001 井以扇三角洲前缘亚相沉积为主。因此须结合古地貌特征来解剖清水河组沉积相在垂向和平面上快速变化的过程。

#### 4.1 两级坡折控制三期扇三角洲砂体的分布

侏罗纪末准噶尔盆地气候干旱<sup>[23-24]</sup>，仅在地势低洼处发育小型湖盆。高泉构造带地势较高，长期遭受风化剥蚀，缺失侏罗系喀拉扎组地层。进入白垩纪后，气候由干旱向潮湿转变，湖平面逐渐上升，清水河组沉积时期盆地整体表现为湖侵特征。高泉构造带北东—南西向地震剖面显示白垩系清水河组地层由北东向南西方向逐步上超，且上超点位于坡折发育处（图 5b），说明坡折对清水河组沉积具有明显的控制作用。

由单井分析可知，高泉 5 井清水河组砂砾岩以灰绿色为主，属于扇三角洲前缘亚相沉积，高 101 井砂砾岩以褐色为主，主体属于扇三角洲平原亚相沉积。但在清水河组沉积前古地貌平面图上，高泉 5 井位于地势较高的坡折带上，而高 101 井位于地势稍低的坡折带上，高泉 5 井比高 101 井更靠近盆地边缘，显然两口井的砂砾岩不属于同一期扇三角洲。结合清水河组整体表现为湖侵的沉积背景，认为由高 101 井到高泉 5 井呈现出扇三角洲逐步向湖盆边缘退积的一个过程，高 101 井处于早期扇三角洲的平原亚相，而高泉 5 井处于晚期的扇三角洲前缘亚相。

在单井相分析基础上结合高泉构造带古地貌特征，对高泉构造带清水河组沉积演化过程进行了解剖。高泉构造带发育三个坡折带，研究认为每一个坡折带上均发育一期扇三角洲，地势越低的坡折带上形成的扇三角洲期次越早。清水河组开始沉积时，高地势的 2 个坡折带处于沉积过路区，湖平面位于第一个坡折之下，地势较低的坡折带上先形成第一期扇三角洲（图 6a）；随着湖平面的上升，扇三角洲向湖盆边缘退积，中间坡折带上沉积了第二期扇三角洲（图 6b），而第一期扇三角洲砂体之上形成了湖泊滩坝沉积；随着湖平面继续上升，扇三角洲开始在地势最高的坡折带上沉积，第二期扇三角洲砂体之上沉积了滨浅湖的滩坝砂体（图 6c）。湖侵背景下，在每一期扇三角洲的主体沉积区自下至上由扇三角洲平原亚相向扇三角洲前缘亚相过渡，主要表现为砂砾岩颜色由灰褐色向灰绿色、灰色逐渐过渡。综合分析认为，湖侵背景下高泉构造带上三个坡折带由低到高的分布控制了三期退积型扇三角洲的发育（图 6d）。



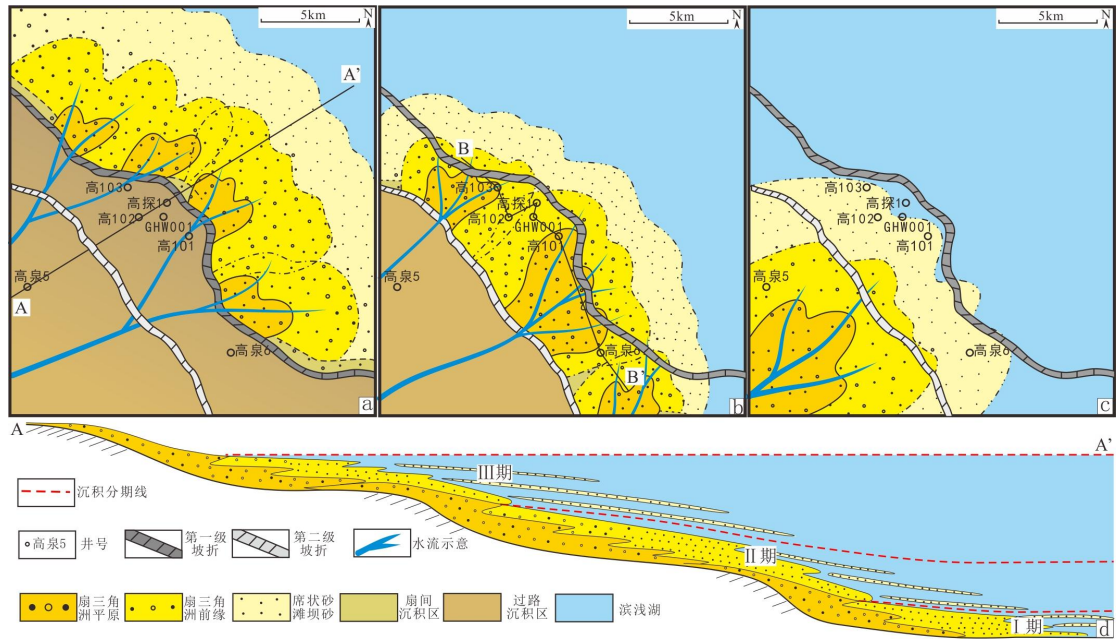


图6 四棵树一凹陷高泉构造带白垩系清水河组三期扇三角洲沉积相平面及沉积模式图  
(a-c) 清水河组3期扇三角洲沉积相图; (d) 清水河组底部退积型扇三角洲沉积模式

Fig.6 Sedimentary facies map and sedimentary model of Qingshuihe Formation in the Gaoquan structural zone, Sikeshu Sag

(a-c) fan delta facies maps of 3 depositional phases of the Qingshuihe Formation; (d) regression model

#### 4.2 微古地貌单元控制优质砂砾岩储层分布

侏罗纪末高泉构造带长时间遭受风化剥蚀,在各级坡折带上形成了沟槽和平台两种微古地貌单元(图7a)。进入白垩纪后准噶尔盆地南缘气候由干旱向潮湿转变,在盆地的低洼区首先发生沉积作用,此时坡折带上的微古地貌单元对早期的沉积充填具有较强的控制作用。较低地势坡折带的沟槽是主要的沉积充填区,大量泥杂基、砂级碎屑、砾石等碎屑物质形成的混杂沉积物首先在沟槽内沉积,形成的混杂砂砾岩多呈现褐色,分选差,泥质含量高(图7b),此时的平台区不接受沉积,为过路沉积区。混杂沉积物在沟槽内不断沉积,沟槽与平台之间的落差逐渐缩小,直至沟槽被填平补齐。早期沟槽内的沉积均属于扇三角洲平原沉积,平原亚相主要分布在地势低洼的沟槽区,分布较局限。沟槽被填平后,位于沟槽区的主水道前端开始分支,形成多个分支河道,砂体分布面积也随之扩大,可以沉积到平台区。湖侵背景下,湖平面不断上升,水体逐渐淹没该坡折带,但沉积作用一直持续,在该坡折带上形成了多个以主水道为中心的扇形沉积体,即扇三角洲前缘沉积体(图7c)。前缘亚相不但分布于沟槽区之上,也在沟槽区两侧的平台区形成大面积沉积。前缘亚相沉积的砂砾岩受到了湖盆水体的淘洗,泥质含量较低,颜色以灰绿色或灰色为主。就沉积演化而言,沟槽内沉积褐色砂砾岩时,坡折带上主要发育扇三角洲平原亚相,当湖平面淹没到坡折带之上时,坡折带上形成了扇三角洲前缘亚相沉积。这样的沉积过程使得每一期坡折带的沟槽区内首先充填

了高泥质含量的褐色砂砾岩，再逐渐转变为低泥质含量的灰绿色或灰色砂砾岩，而平台区一般只沉积了低泥质含量的灰绿色或灰色砂砾岩，即便沉积褐色砂砾岩，厚度也相对较薄。

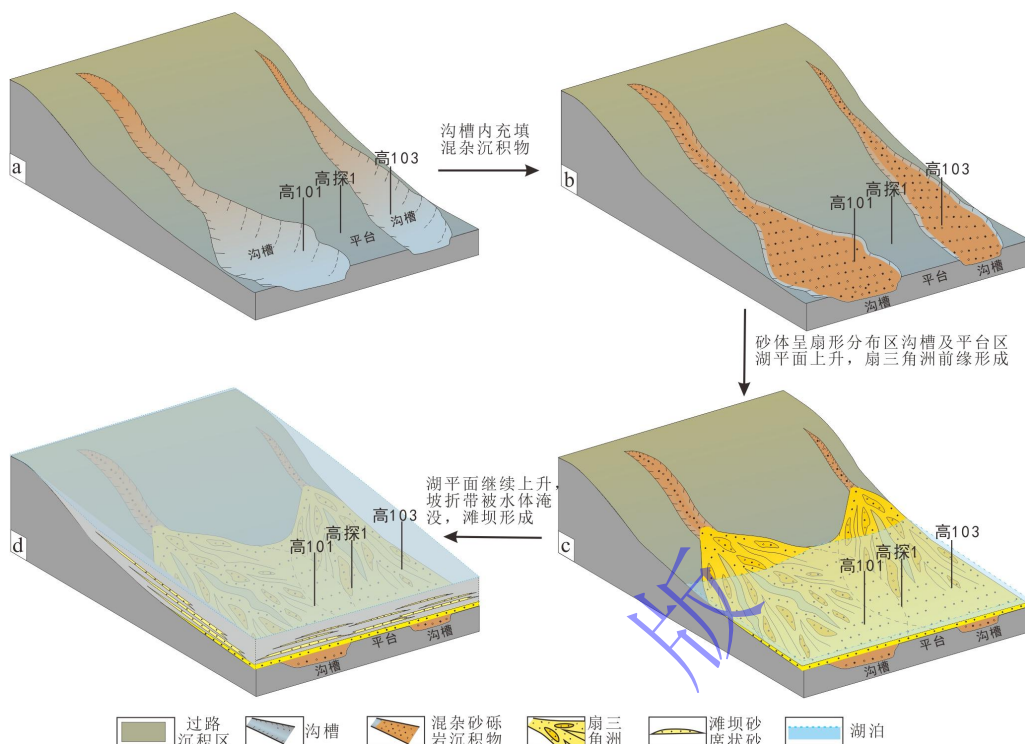


图7 四棵樹凹陷高泉构造带白垩系清水河组底砂岩沉积模式

Fig.7 Sedimentary model of Cretaceous Qingshuihe Formation basal sandstone in Gaoquan structural zone, Sikeshu Sag

随着较低地势坡折带完全淹没于湖平面之下，该坡折带上形成了席状砂或者滩坝砂体（图7d），而扇三角洲沉积体系进一步向湖盆边缘退积。在更高地势的坡折带上再次形成新一期的扇三角洲沉积体系，同时沟槽和平台微古地貌单元也再次控制了扇三角洲不同特征砂砾岩体的分布。最终，在高泉构造带三个坡折带上，沟槽区沉积的既有泥质含量高、物性差的砂砾岩，也有泥质含量低、物性好的砂砾岩，平台区沉积的主要是泥质含量低、物性好的砂砾岩；在砂砾岩段之上则形成了强钙质胶结的薄层滩坝砂岩。

依据高泉构造带单井相和储层物性特征，认为位于平台区的钻井有高探1井、GHW001井、高102井和高泉5井，位于沟槽区的钻井有高101井和高103井（图8）。平台区钻井清水河组底部砂砾岩颜色多为灰绿色和灰色，属于扇三角洲前缘亚相沉积，砂砾岩泥质含量低，粒间孔含量高，整体物性较好。位于沟槽区钻井清水河组底部发育扇三角洲平原亚相的褐色砂砾岩，向上逐渐变为前缘亚相的灰色或灰绿色砂砾岩，其中褐色砂砾岩储层泥质含量高，粒间孔不发育，整体物性差；褐色砂砾岩之上的灰绿色或灰色砂砾岩泥质含量逐步降低，物性明显好于下伏的褐色砂砾岩（表1）。可见微古地貌对优质砂砾岩储层的分布具有明显的控制作用，每一级坡折带的平台区是优质砂砾岩储层分布的主要地区。

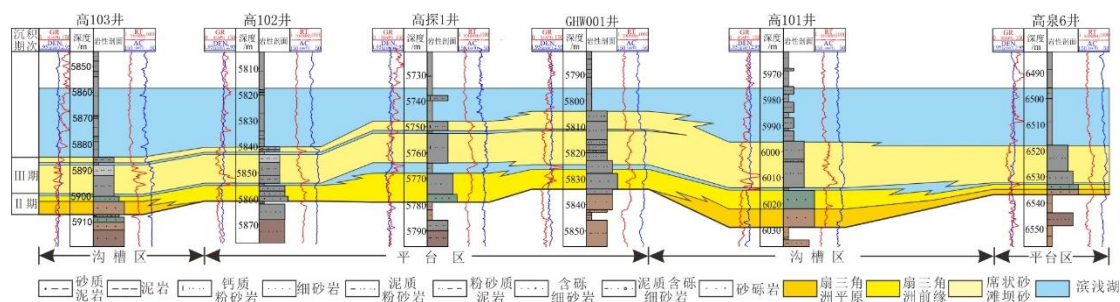


图8 四棵树凹陷高泉构造带白垩系清水河组连井剖面图 (剖面位置见图 6b)

Fig.8 Well section of Cretaceous Qingshuihe Formation basal sandstone in Gaoquan structural zone, Sikeshu Sag (The location of cross-well section is showing on Fig.6b)

## 5 结论

(1) 四棵树凹陷高泉构造带清水河组底部发育厚度 10~15 m 的砂砾岩储层，砂砾岩相带变化较快，由下至上可见到扇三角洲平原亚相的褐色砂砾岩、扇三角洲前缘亚相的灰色或灰绿色砂砾岩以及滨浅湖亚相的滩坝或席状砂；平面上微相变化快，形成的砂砾岩储层非均质性较强。砂砾岩储层物性主要受泥质含量影响，泥质含量高的砂砾岩物性差，反之物性较好。

(2) 高泉构造带发育三个近北西—南东走向的坡折带，每个坡折带上又可划分出沟槽和平台两种微古地貌单元。湖侵背景下，扇三角洲首先沉积在地势较低的坡折带上，随湖平面上升砂体向地势较高的坡折带上退积，形成新一期的扇三角洲，最终在两级坡折的控制下形成了三期扇三角洲，位于盆地内部的扇三角洲目前无井钻遇。在每个坡折带上，沟槽区主要沉积泥质含量较高的扇三角洲平原亚相砂砾岩，平台区则沉积泥质含量较低的扇三角洲前缘砂砾岩，平台区砂砾岩储层物性明显好于沟槽区砂砾岩储层，每个坡折带的平台区是优质砂砾岩储层分布区。

致谢 审稿专家、编辑老师为本文的完善提出了中肯的建议在此表示诚挚的感谢。

### 参考文献 (References)

- [1] 李思田, 解习农, 王华, 等. 沉积盆地分析基础与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 13-58. [LI Sitian, XIE Xinong, WANG Hua, et al. Sedimentary Basin analysis: Principle and application[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 13-58.]
- [2] 鲜本忠, 王震, 马立驰, 等. 沉积区—剥蚀区古地貌一体化恢复及古水系研究: 以渤海湾盆地辽东地区馆陶组为例[J]. 地球科学, 2017, 42(11): 1922-1935. [Xian Benzong, Wang Zhen, Ma Lichi, et al. Paleo-drainage system and integrated paleo-geomorphology restoration in depositional and erosional areas: Guantao Formation in east Liaodong area, Bohai bay Basin, China[J]. Earth Science, 2017, 42(11): 1922-1935.]
- [3] 辛云路, 任建业, 李建平. 构造-古地貌对沉积的控制作用: 以渤海南部莱州湾凹陷沙三段为例[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(3): 302-308. [Xin Yunlu, Ren Jianye, Li Jianping. Control of tectonic-paleogeomorphology on deposition: A case from the Shahejie Formation Sha 3 member, Laizhouwan Sag, southern Bohai sea[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(3): 302-308.]
- [4] 冯有良. 断陷湖盆沟谷及构造坡折对砂体的控制作用[J]. 石油学报, 2006, 27(1): 13-16. [Feng Youliang. Control of valley and tectonic slope-break zone on sand bodies in rift-subsidence Basin[J]. Acta Petroli Sinica, 2006, 27(1): 13-16.]
- [5] 闫海军, 何东博, 许文壮, 等. 古地貌恢复及对流体分布的控制作用: 以鄂尔多斯盆地高桥区气藏评价阶段为例[J]. 石油

- 学报, 2016, 37(12): 1483-1494. [Yan Haijun, He Dongbo, Xu Wenzhuang, et al. Paleotopography restoration method and its controlling effect on fluid distribution: A case study of the gas reservoir evaluation stage in Gaoqiao, Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(12): 1483-1494.]
- [6] 蒙启安, 纪友亮. 塔南凹陷白垩纪古地貌对沉积体系分布的控制作用[J]. 石油学报, 2009, 30(6): 843-848, 855. [Meng Qi'an, Ji Youliang. Controlling of paleo geomorphology to distribution of sedimentary system in the Cretaceous of Tanan Depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(6): 843-848, 855.]
- [7] 赵俊兴, 陈洪德, 时志强. 古地貌恢复技术方法及其研究意义: 以鄂尔多斯盆地侏罗纪沉积前古地貌研究为例[J]. 成都理工大学学报, 2001, 28(3): 260-266. [Zhao Junxing, Chen Hongde, Shi Zhiqiang, et al. The way and implications of rebuilding palaeogeomorphology: Taking the research of palaeogeomorphology of the Ordos Basin before Jurassic deposition as example[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2001, 28(3): 260-266.]
- [8] 徐长贵, 赖维成, 薛永安, 等. 古地貌分析在渤海古近系储集层预测中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(5): 53-56. [Xu Changgui, Lai Weicheng, Xue Yongan, et al. Palaeo-geomorphology analysis for the Paleogene reservoir prediction in Bohai sea area[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2004, 31(5): 53-56.]
- [9] 闫海军, 彭先, 夏钦禹, 等. 高石梯—磨溪地区灯影组四段岩溶古地貌分布特征及其对气藏开发的指导意义[J]. 石油学报, 2020, 41(6): 658-670, 752. [Yan Haijun, Peng Xian, Xia Qinyu, et al. Distribution features of ancient karst landform in the fourth member of the Dengying Formation in the Gaoshiti-Moxi region and its guiding significance for gas reservoir development[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(6): 658-670, 752.]
- [10] 刘文栋, 钟大康, 孙海涛, 等. 川西北中二叠统栖霞组沉积特征及古地貌响应[J]. 沉积学报, 2021, 39(5): 1275-1291. [Liu Wendong, Zhong Dakang, Sun Haitao, et al. Sedimentary characteristics and paleogeomorphic responses of the Middle Permian Qixia Formation in the Northwestern Sichuan Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(5): 1275-1291.]
- [11] 厚刚福, 王力宝, 宋兵, 等. 坳陷湖盆古地貌对沉积体系的控制作用: 以准噶尔盆地中部侏罗系三工河组二段一砂组为例[J]. 地质学报, 2022, 96(7): 2519-2531. [Hou Gangfu, Wang Libao, Song Bing, et al. Analysing the controlling effect of palaeogeomorphology on sedimentary systems: A case study of the Jurassic Sangonghe Formation in the central Junggar Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(7): 2519-2531.]
- [12] 朱珍君, 李琦, 李剑, 等. 准噶尔盆地莫西庄—永进地区白垩系清水河组地貌演化及沉积响应[J]. 现代地质, 2022, 36(1): 105-117. [Zhu Zhenjun, Li Qi, Li Jian, et al. Geomorphic evolution and sedimentary response of Cretaceous Qingshuihe Formation in Moxizhuang-Yongjin area, Junggar Basin[J]. *Geoscience*, 2022, 36(1): 105-117.]
- [13] 高崇龙, 纪友亮, 靳军, 等. 古隆起埋藏期沟谷残丘地貌下沉积体系及油气藏发育模式: 以准噶尔盆地腹部石南地区清水河组一段为例[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(8): 1120-1137. [Gao Chonglong, Ji Youliang, Jin Jun, et al. Development model of sedimentary system and reservoir under valley-monadnock paleotopography during buried stage of paleouplift: Case study of 1<sup>st</sup> member of K<sub>1q</sub> in Shinan area, hinterland of Junggar Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2018, 29(8): 1120-1137.]
- [14] 任本兵, 瞿建华, 王泽胜, 等. 玛湖凹陷三叠纪古地貌对沉积的分级控制作用[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2016, 38(5): 81-89. [Ren Benbing, Qu Jianhua, Wang Zesheng, et al. Hierarchical control function of the paleogeomorphology in Triassic Period to Sedimentary in Mahu Sag[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2016, 38(5): 81-89.]
- [15] 程逸凡, 董艳蕾, 朱筱敏, 等. 准噶尔盆地春光探区白垩纪古地貌恢复及其控砂机制[J]. 古地理学报, 2020, 22(6): 1127-1142. [Cheng Yifan, Dong Yanlei, Zhu Xiaomin, et al. Cretaceous paleogeomorphology restoration and its controlling mechanism on sand-bodies in Chunguang exploration area, Junggar Basin[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2020, 22(6): 1127-1142.]
- [16] 高盾, 杨少春, 赵永福. 准噶尔盆地车排子地区白垩纪古地貌及其对沉积的控制[J]. 大庆石油地质与开发, 2019, 38(3): 32-39. [Gao Dun, Yang Shaochun, Zhao Yongfu. Cretaceous paleogeomorphology and its control on the sedimentation in Chepaizi area of Junggar Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2019, 38(3): 32-39.]
- [17] 朱明, 袁波, 梁则亮, 等. 准噶尔盆地周缘断裂属性与演化[J]. 石油学报, 2021, 42(9): 1163-1173. [Zhu Ming, Yuan Bo, Liang Zeliang, et al. Fault properties and evolution in the periphery of Junggar Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(9): 1163-1173.]
- [18] 杨迪生, 肖立新, 阎桂华, 等. 准噶尔盆地南缘四棵树凹陷构造特征与油气勘探[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(2): 138-144. [Yang Disheng, Xiao Lixin, Yan Guihua, et al. Structural characteristics and petroleum exploration in Sikeshu Sag, southern margin of Junggar Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2019, 40(2): 138-144.]
- [19] 司学强, 袁波, 郭华军, 等. 准噶尔盆地南缘清水河组储集层特征及其主控因素[J]. 新疆石油地质, 2020, 41(1): 38-45. [Si Xueqiang, Yuan Bo, Guo Huajun, et al. Reservoir characteristics and main controlling factors of Cretaceous Qingshuihe Formation in the southern margin of Junggar Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2020, 41(1): 38-45.]

- [20] 司学强, 袁波, 彭博, 等. 准噶尔盆地南缘冲断带侏罗系喀拉扎组沉积特征[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(4): 389-398. [Si Xueqiang, Yuan Bo, Peng Bo, et al. Sedimentary characteristics of Jurassic kalazha Formation in the thrust belt on the southern Margin of Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(4): 389-398.]
- [21] 赵敏, 王多云, 刘军锋, 等. 沉积前古地貌对油藏成藏的有利条件分析: 以鄂尔多斯盆地子午岭地区下侏罗统为例[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(3): 476-481. [Zhao Min, Wang Duoyun, Liu Junfeng, et al. Favorable conditions for petroleum accumulation by paleogeomorphology before deposition: Taking Lower Jurassic in Ziwuling area, Ordos Basin as an example[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(3): 476-481.]
- [22] 赵俊兴, 陈洪德, 向芳. 高分辨率层序地层学方法在沉积前古地貌恢复中的应用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2003, 30(1): 76-81. [Zhao Junxing, Chen Hongde, Xiang Fang. The possibility of rebuilding paleogeomorphology before Basin deposition by high-resolution sequence stratigraphy[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2003, 30(1): 76-81.]
- [23] 胡小文, 杨晓勇, 任伊苏, 等. 准噶尔盆地沉积环境-构造演化对砂岩型铀矿成矿的控制作用[J]. 大地构造与成矿学, 2020, 44(4): 725-741. [Hu Xiaowen, Yang Xiaoyong, Ren Yisu, et al. Sedimentary environment and tectonic evolution of Junggar Basin: Constrains on the mineralization of sandstone-type Uranium deposits[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2020, 44(4): 725-741.]
- [24] 查显锋, 李平, 高晓峰, 等. 北天山构造带晚侏罗世构造隆升与沉积学响应: 来自霍尔沟地区喀拉扎组地震岩及区域构造变形的启示[J]. 沉积学报, 2022, 40(5): 1250-1264. [Zha Xianfeng, Li Ping, Gao Xiaofeng, et al. Sedimentary response to tectonic uplift of the North Tianshan orogenic belt in the Upper Jurassic: Implication for the seismites in the Karazha Formation and regional deformation in Que'ergou area, Xinjiang[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(5): 1250-1264.]

## Paleogeomorphologic Controls on the Formation and Distribution of High-quality Reservoirs During Lake Transgression: An example from the Qingshuihe Formation in Gaoquan structural zone of Sikesu Sag, Junggar Basin

SI XueQiang<sup>1</sup>, PENG Bo<sup>1</sup>, GUO HuaJun<sup>1</sup>, CHEN XiGuang<sup>1</sup>, LI YaZhe<sup>1</sup>, JI DongSheng<sup>2</sup>, ZOU ZhiWen<sup>1</sup>, YI JunFeng<sup>1</sup>

1. PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, Hangzhou 310023, China

2. Geophysics Institute of Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Urumqi 830013, China

**Abstract:** [Objective] The reservoirs in the bottom conglomerate of the Qingshuihe Formation in the Gaoquan structural zone of the Sikesu Sag, southern Junggar Basin, are strongly heterogeneous. The objective was to clarify the development and distribution of high-quality reservoirs in the study area. [Methods] The sedimentary and reservoir characteristics of the Qingshuihe Formation were examined by facies analysis in cores, well logs and seismic records, and a model of the sedimentary evolution was established based on paleogeomorphological data. The influence of microgeomorphology on the distribution of high-quality reservoirs is clarified. [Results] Three slope breaks developed in the Gaoquan structural zone, each striking northwest-southeast and comprising groove and platform paleogeomorphological units. A regressive fan delta was formed on the slope breaks during lake transgression, each of which formed conglomerate reservoirs 10–15 m thick. Groove and platform areas controlled the mud content of the reservoirs. Brown conglomerate with high mud content readily developed in the groove areas. Gray or gray-green conglomerate with low mud content developed in the platform areas, forming high-quality reservoirs. [Conclusions] Groove/platform units at slope breaks controlled the formation and distribution of high-quality reservoirs in the Qingshuihe Formation. The most favorable reservoirs in the study area are in the platform units at each slope break.

**Key words:** Gaoquan structural zone; Qingshuihe Formation; paleogeomorphology; slope break zone; fan delta