

引用格式:曹正林,李攀,王瑞菊.准噶尔盆地玛湖凹陷P—T转换期层序结构、坡折发育及油气地质意义[J].天然气地球科学,2022,33(5):807-819.

CAO Zhenglin, LI Pan, WANG Ruiju. Sequence architecture, slope-break development and hydrocarbon implications of the Mahu Sag during the P-T transition, Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(5): 807-819.

DOI: 10.11764/j.issn.1672-1926.2021.12.011

# 准噶尔盆地玛湖凹陷P—T转换期层序结构、坡折发育及油气地质意义

曹正林, 李攀, 王瑞菊  
(中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

**摘要:**对应晚二叠世—早三叠世地球系统转换期(简称P—T转换期),准噶尔盆地玛湖凹陷 $P_3-T_1$ 经历了从前陆冲断向整体拗陷的转变,发育 $T_1/P$ 、 $P_3w/P_2w$  2期大型不整合及上乌尔禾组( $P_3w$ )、百口泉组( $T_1b$ )2套退覆型低位沉积,形成了一批大型—特大型砾岩油田。针对 $T_1/P$ 和 $P_3w/P_2w$  2个三级层序界面,识别出与构造挠曲和侵蚀作用相关的2类坡折带:构造挠曲坡折带受控于持续性古隆起,控制层序界面之上地层向斜坡高部位逐层“单向超覆”,侵蚀坡折带受控于古残丘,控制层序界面之上地层向古残丘“双向超覆”或沿下切沟谷低位充填。2类坡折带均控制地层沉积变化,有利于形成上倾超覆型、低位充填型和地层削截型岩性地层圈闭。研究成果对于指导古地貌背景坡折控制下的大型岩性地层油气藏勘探具有重要意义。

**关键词:**准噶尔盆地;玛湖凹陷;P—T转换期;挠曲坡折带;侵蚀坡折带

**中图分类号:**TE122.2

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-1926(2022)05-0807-13

## 0 引言

晚二叠世—早三叠世是地球系统从古生代向中生代演化的重要变革期(简称P—T转换期),这一时期除了发生过生物大灭绝、极端气候变化、全球海平面变化等重大事件外<sup>[1]</sup>,还发育区域性甚至全球性不整合面<sup>[2-3]</sup>。对应该地质历史时期,准噶尔盆地西北部玛湖凹陷经历了从前陆盆地冲断到大型拗陷盆地的转变<sup>[4]</sup>,形成了上二叠统底部( $P_3w/P_2w$ )和三叠系底部( $T_1b/P$ )大型不整合面。目前,玛湖凹陷上述2套不整合面上、下相邻地层的油气勘探已取得重大突破,形成了10亿吨级、全球最大砾岩油田——玛湖油田,并还有向盆地南部、东部凹陷进一步扩展的趋势<sup>[5-8]</sup>。

前人<sup>[3,9-17]</sup>对玛湖凹陷P—T转换期2套区域性

不整合面和古地貌特征开展过广泛研究,在不整合面成因类型、分布特征、控藏作用及古地貌控相等方面取得了一系列进展。然而,目前对于这2套不整合面之上相关地层的层序结构、古地貌成因类型及其对低位砂体、储盖组合和岩性地层圈闭的控制作用还缺乏整体性研究。针对这些问题,本文利用二三维地震数据及钻井资料,对玛湖凹陷上二叠统—下三叠统层序结构、坡折发育特征及其油气成藏控制效应进行了分析,研究成果不仅有利于揭示准噶尔盆地二叠纪—三叠纪重大地质历史转换期大型岩性地层油气藏的形成分布规律,对于全盆地大型岩性地层油气藏勘探也具有重要指导意义。

## 1 地质概况

准噶尔盆地是一个大型的含油气叠合盆地,经

收稿日期:2021-09-07;修回日期:2022-01-06;网络首发日期:2022-03-08.

基金项目:“十三五”国家科技重大专项“大型地层油气藏形成条件、分布规律与勘探方向”(编号:2017ZX05001001-007);中石油“十四五”前瞻性基础性重大科技项目“岩性油气藏群富集规律与有利区带评价技术研究”(编号:2021DJ0404)联合资助.

作者简介:曹正林(1970-),男,重庆合川人,教授级高级工程师,博士,主要从事含油气盆地评价、储层地质及油藏描述研究.

E-mail:caozl@petrochina.com.cn.

通信作者:李攀(1985-),男,湖北黄冈人,高级工程师,博士,主要从事沉积学与层序地层学研究.E-mail:panlicc@petrochina.com.cn.

历了海西、印支、燕山、喜马拉雅等多期构造旋回<sup>[17]</sup>。玛湖凹陷位于盆地西北部,西接乌夏—克百断裂带和中拐凸起,东邻陆梁隆起带(包括滴南凸起、石西凸起、三南凹陷、夏盐凸起、三个泉凸起等次级构造单元),南接达巴松凸起和盆1井西凹陷,面积约为6 000 km<sup>2</sup>[图1(a)]。玛湖凹陷是在前石炭纪基底上形成的一个内陆凹陷,堆积了数千米厚、以陆源碎屑为主的二叠系—三叠系,由老到新依次为二叠系佳木河组( $P_j$ )、风城组( $P_f$ )、夏子街组( $P_x$ )、下乌尔禾组( $P_w$ )、上乌尔禾组( $P_u$ )及三叠系百口泉组( $T_b$ )、克拉玛依组( $T_k$ )和白碱滩组( $T_n$ )<sup>[3]</sup>。玛湖凹陷P—T转换期发育上二叠统上乌尔禾组( $P_u$ )和下三叠统百口泉组( $T_b$ )2套地层,以及 $P_u/P_w$ 和 $T_b/P$  2个大型不整合面。此外,二叠系—三叠系还发育二叠系底部、中二叠统底部、三叠系顶部(侏罗系底部)等3个大型不整合面,以及内部层组之间的次级不整合面[图1(b)]。

百口泉组和上乌尔禾组总体上都表现为下粗上细的沉积序列:下部均以扇三角洲砂砾岩沉积为

主,构成2套大面积分布的砂砾岩储集体;上部则以湖相泥岩沉积为主,形成了2套重要的局部盖层<sup>[4,12,18]</sup>。三叠系白碱滩组广泛发育近百米厚的暗色湖相泥岩,为这2套砂砾岩储集体提供了良好的区域盖层;二叠系风城组碱湖沉积则为其提供了优质高效烃源岩,整体上构成了玛湖凹陷的中成藏组合<sup>[6,12,19]</sup>。自2010年以来,准噶尔盆地西北缘油气勘探按照“跳出断裂带、走向斜坡区”的思路,在玛湖地区 $T_b/P$ 和 $P_u/P_w$ 不整合面之上的百口泉组、上乌尔禾组中相继发现了大型岩性地层油气藏,形成了以百口泉组为主的北部大油区和以上乌尔禾组为主的南部大油区<sup>[5]</sup>,呈现出“南北割据”的分布格局。

## 2 P—T转换期层序结构特征与地层发育模式

### 2.1 二叠系—三叠系宏观层序结构特征

玛湖凹陷综合地层及区域地震层序剖面分析表明, $P_j/C$ 、 $P_x/P_f$ 和 $J_b/T_b$  3个界面上下地层在

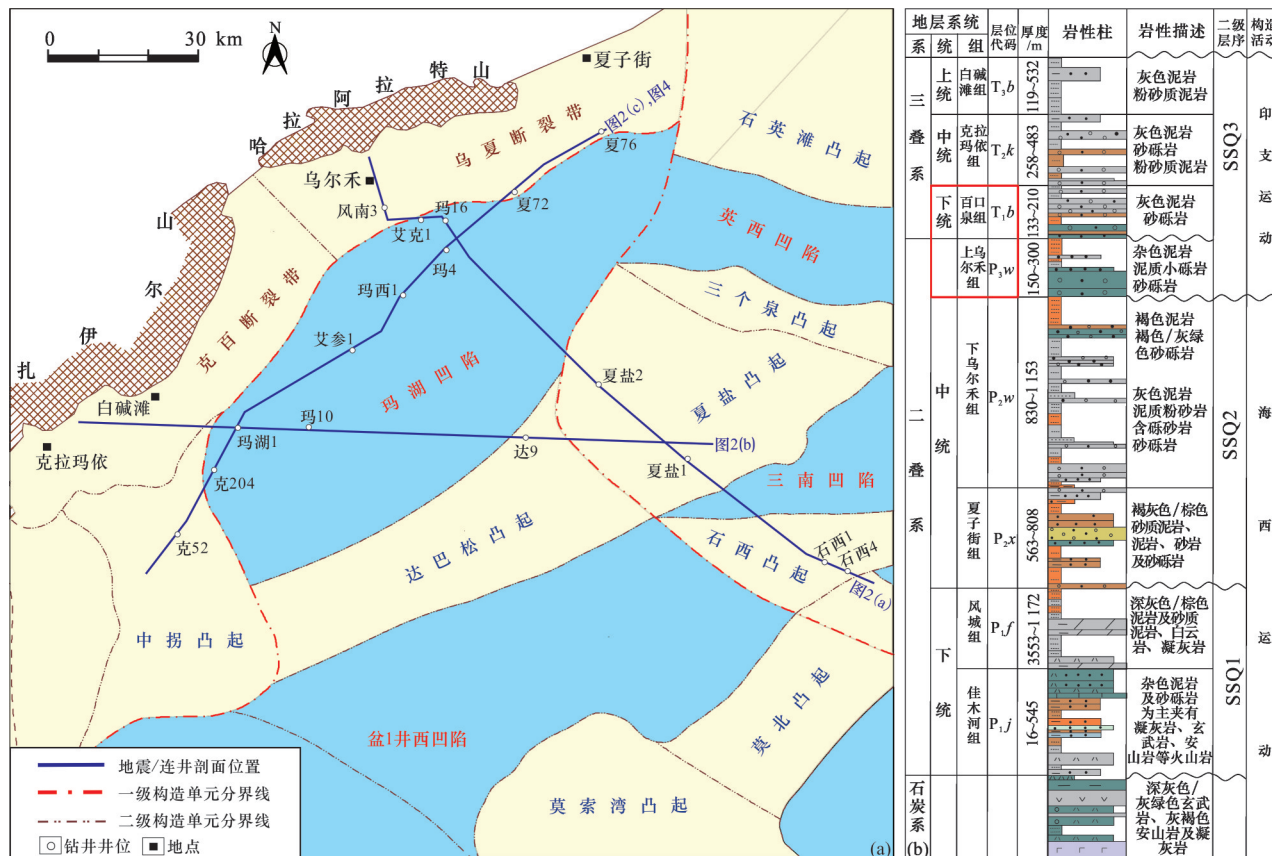


图1 准噶尔盆地玛湖凹陷位置及地层发育概况

Fig.1 Location and stratigraphic column of the Mahu Sag, Junggar Basin

(a)玛湖凹陷构造单元及地震剖面位置图;(b)玛湖凹陷二叠系—三叠系综合地层柱状图

广大斜坡区或盆内隆起区表现为角度不整合接触,代表了3次主要构造运动所形成的区域不整合面[图1(b),图2];此外, $P_3w/P_2w$ 与 $T_1b/P_2w-P_j$ 上下地层也广泛存在角度不整合接触关系,它们在空间上对接形成了一个区域性的复合不整合面<sup>[20-21]</sup>(composite unconformity)[图2(c)]。中晚二叠世之交( $P_3w/P_2w$ )和晚二叠世一早三叠世之交( $T_1b/P_3w$ )的构造活动对这个复合界面的形成可能都有贡献,但以前者为主,主要表现在3个方面:①无论是在研究区还是盆内其他区域, $T_1b$ 与 $P_3w$ 之间均以整合或微角度不整合接触为主(图2,图3);② $T_1b$ 与 $P_3w$ 未受后期剥蚀影响的地层超覆区,具有相似的平面展布形态<sup>[3]</sup>;③ $T_1b$ 和 $P_3w$ 的垂向沉积序列极其相似,而与 $P_3w$ 之前的沉积差异较大(图1)。这些特征表明, $P_3w/P_2w$ 期构造活动奠定了整体的构造古地理格局, $P_3w$ 与 $T_1b$ 应属于同一构造旋回早期沉积产物<sup>[22]</sup>,因此二者在地层展布形态和垂向沉积序列方面具有明显相似性。综上所述,以 $P_j/C$ 、 $P_{2x}/P_{1f}$ 、 $P_3w/P_2w+T_1b/P_2w-P_j$ 和 $J_1b/T_3b$ 4个区域不整合面为界,可将二叠系—三叠系划分为3个二级层序(构造层序)[图1(b),图2],即下二叠统二级层序(SSQ1)、中二叠统二级层序(SSQ2)和上二叠统一三叠系二级层序(SSQ3)。下二叠统二级层序(SSQ1),包括下二叠统佳木禾组( $P_j$ )和风城组( $P_{1f}$ ),剖面上以楔形充填为主,反映前陆盆地早期沉积序列;中二叠统二级层序(SSQ2),包括中二叠统夏子街组( $P_{2x}$ )和下乌尔禾组( $P_2w$ ),剖面上以楔形—透镜型(碟型)充填为主,相当于海西晚期地层,反映前陆盆地鼎盛期—萎缩期沉积序列;上二叠统一三叠系二级层序(SSQ3),包括上二叠统上乌尔禾组( $P_3w$ )和三叠系百口泉组( $T_1b$ )、克拉玛依组( $T_2k$ )和白碱滩组( $T_3b$ ),剖面上以透镜型—席状充填为主,相当于印支早期地层,反映盆地转换后的大型拗陷期沉积序列[图2(a),图2(b)]。二叠纪末—三叠纪初的转换期发育 $P_3w$ 和 $T_1b$ 2套地层,构成了SSQ3二级层序底部的低位域沉积[图2(c)]。

## 2.2 转换期不整合面及地层分布特征

根据地震层序边界与内部地层的形态特征,前人将地层界面划分为“整一”和“不整一”2种基本类型<sup>[23]</sup>;在参考地震地层学术语的基础上,本文根据界面上、下相邻地层与界面之间的几何关系(如上超、削截),将“不整一型”进一步划分为超覆型、削截型和超覆/削截型(兼有界面之上的超覆和界面

之下的削蚀)3种类型<sup>[23-26]</sup>。相对于上述3种从地震剖面上可以确切识别的不整合接触关系而言,“整一型”由于地震分辨率或钻井数据的限制而具有一定不确定性,代表的可能是平行/微角度不整合(斜坡区)或整合接触(凹陷区)。研究区北部上乌尔禾组( $P_3w$ )缺失,三叠系百口泉组( $T_1b$ )直接与中下二叠统接触(图3)。斜坡高部位如玛北斜坡、西北缘断阶带和玛东—陆西地区百口泉组( $T_1b$ )与下乌尔禾组( $P_2w$ )及其以下地层呈超覆/削蚀不整合接触,斜坡低部位如玛中平台—夏盐—达巴松地区,百口泉组( $T_1b$ )与下乌尔禾组( $P_2w$ )地层呈整一接触。玛湖凹陷上乌尔禾组地层尖灭线以南地区,发育上乌尔禾组( $P_3w$ )地层,三叠系百口泉组( $T_1b$ )与上二叠统上乌尔禾组( $P_3w$ )直接接触,两者主要表现为整一接触,局部地区(如中拐凸起高部位)表现为超覆不整合接触(图3)。上乌尔禾组( $P_3w$ )局限分布于研究区南部,在斜坡高部位(如中拐凸起)与下乌尔禾组( $P_2w$ )及其以下地层呈削蚀或超覆/削蚀不整合接触,在斜坡低部位或深凹区(如玛湖凹陷南部、盆1井西—莫西地区),上乌尔禾组( $P_3w$ )与下乌尔禾组( $P_2w$ )地层呈整一接触(图3)。根据上乌尔禾组地层向北超覆的趋势和顶部不整合面形态特征及发育位置可判断,研究区北部上乌尔禾组地层缺失的原因既有原始未沉积的因素,也有后期剥蚀(上乌尔禾组三段)的影响。

上述地层接触关系及地层分布特征表明,P—T转换期上乌尔禾组地层尖灭线以南发育 $T_1b/P_3w$ 和 $P_3w/P_2w$ 2套不整合,它们在上乌尔禾组地层尖灭线以北地区叠加复合,形成 $T_1b/P_2w-P_j$ 单一(叠合)不整合(图3—图5)。由于 $P_3w$ 与 $T_1b$ 同属上二叠统一三叠系( $P_3w-T$ )这个二级构造层序, $T_1b/P_3w$ 相对于 $P_3w/P_2w$ 这一期主要不整合而言,属于构造层序内部的一个次级不整合(三级层序界面)。

## 2.3 转换期层序构成与地层发育模式

上乌尔禾组( $P_3w$ )和百口泉组( $T_1b$ )在玛湖凹陷为一套扇三角洲—滨浅湖沉积,构成2个三级层序。上乌尔禾组分布在凹陷南部(艾参1井以南),充填于 $P_3w/P_2w$ 不整合面之上,由3个向上变细的正旋回构成(图4)。百口泉组( $T_1b$ )在凹陷北部充填于 $T_1b/P_2w-P_j$ 叠合不整合面之上,同样由3个向上变细的正旋回构成,在凹陷南部(艾参1井以南)百口泉组叠置于上乌尔禾组之上,由2~3个向上变细正旋回组成。南部地区上乌尔禾组和百口



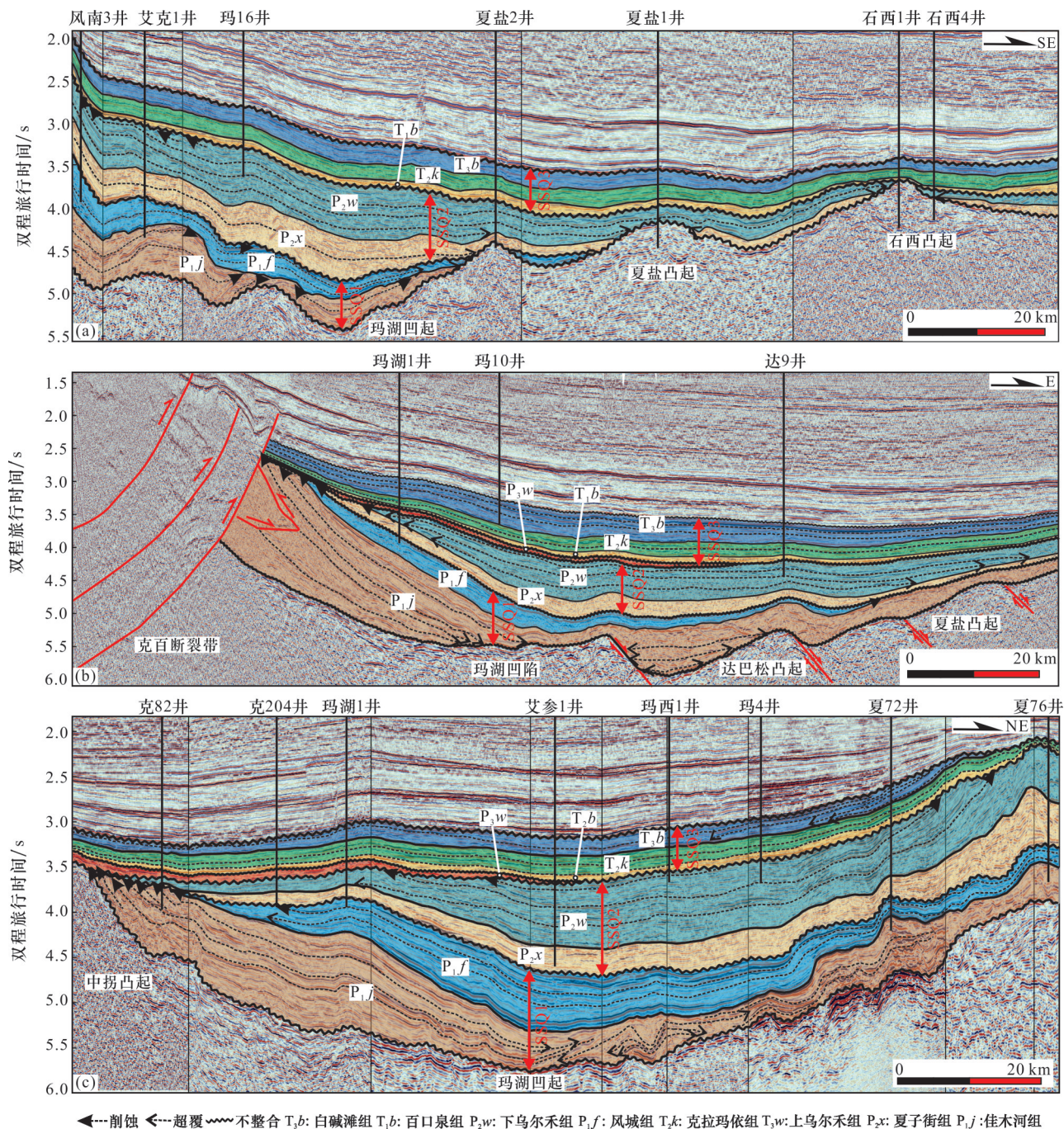


Fig.2 Architecture of the Permian-Triassic second-order sequences of the Mahu Sag, Junggar Basin (see location for Fig.1)

泉组同为上二叠统一三叠系二级构造层序(SSQ3)的低位充填沉积,而北部地区由于上乌尔禾组缺失,SSQ3二级构造层序的低位沉积仅发育百口泉组(图3,图4)。

玛湖凹陷P—T转换期晚海西—早印支期构造运动造就了P<sub>3</sub>w/P<sub>2</sub>w和T<sub>1</sub>b/P<sub>2</sub>2套不整合,早期P<sub>3</sub>w/P<sub>2</sub>w不整合控制了上乌尔禾组(P<sub>3</sub>w)低位沉积,主要发育在凹陷南部地区,主要由3期水进退积

形成的正旋回组成。晚期T<sub>1</sub>b/P<sub>3</sub>w不整合构造运动对前期上乌尔禾组(P<sub>3</sub>w)进行局部剥蚀,控制百口泉组(T<sub>1</sub>b)在北部地区形成低位充填沉积,也由3期水进退积形成的正旋回构成。上乌尔禾组(P<sub>3</sub>w)和百口泉组(T<sub>1</sub>b)均为多期叠置的向上变细正旋回沉积,旋回顶部形成区域性的湖泛泥岩,可作为盖层与低位期扇三角洲砂砾岩配置形成岩性地层圈闭。玛湖凹陷P—T转换期周缘老山持续隆升和稳定的



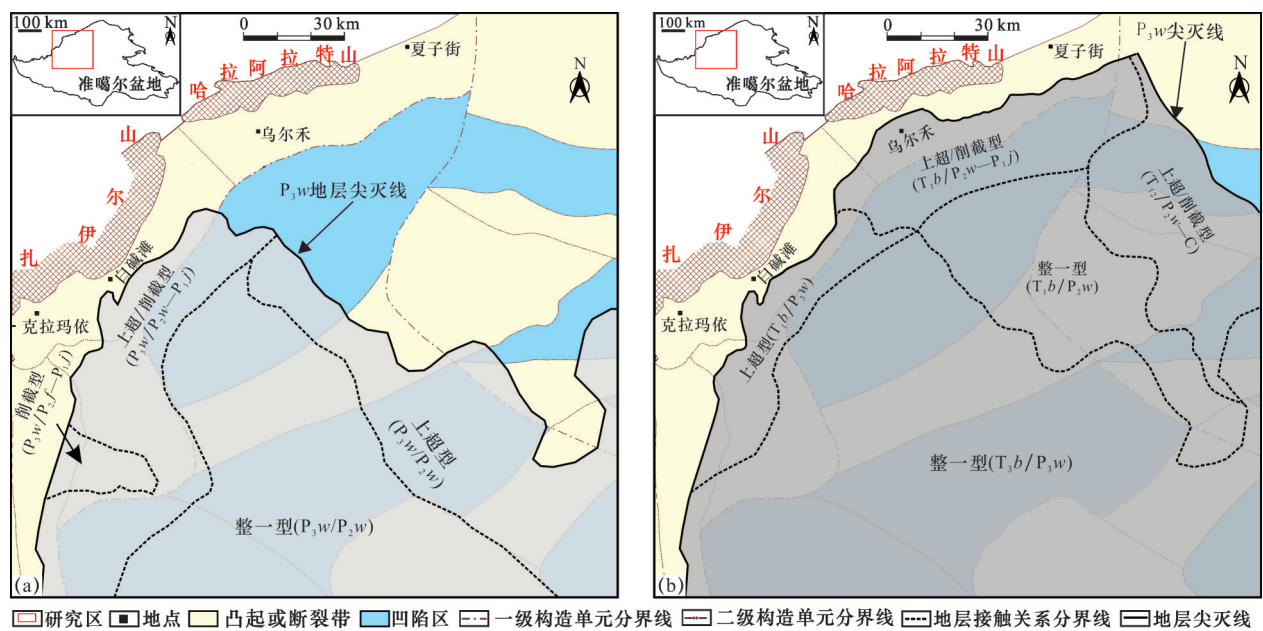


Fig.3 Stratigraphic distribution and contact relationships across the P-T transition in the Mahu Sag, Junggar Basin (modified from Ref.[3])

(a)  $P_3w$  地层分布及其与下伏地层接触关系; (b)  $P_3b$  地层分布及其与下伏地层接触关系

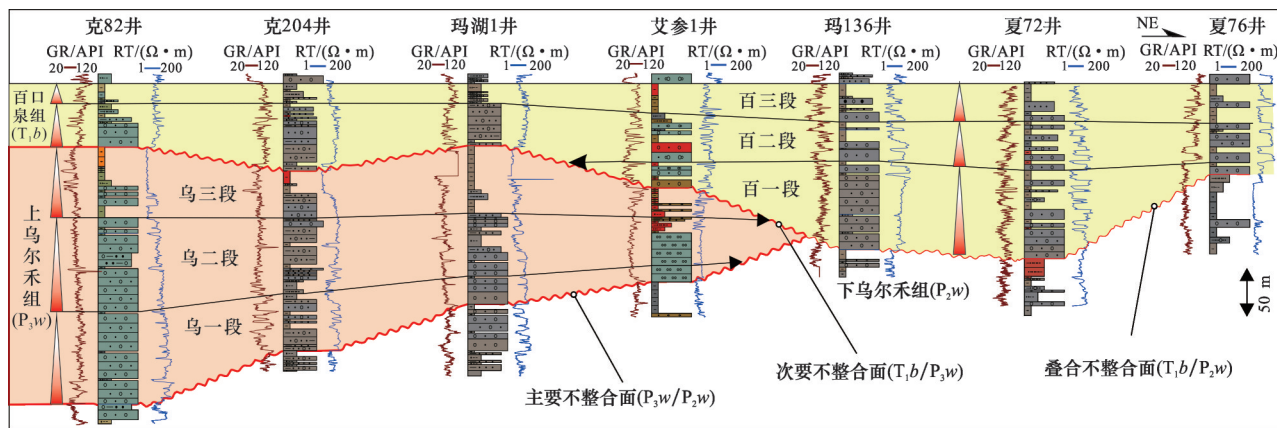


Fig.4 Well sequence correlation and stacking pattern of the P-T transition of the Mahu Sag, Junggar Basin (modified from Ref.[3]; see location for Fig.1)

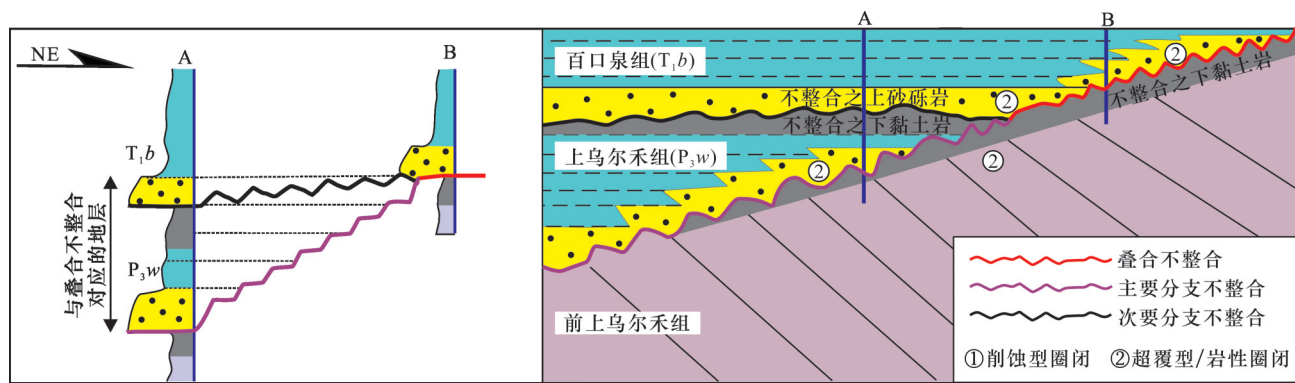


Fig.5 Sequence architecture model for the P-T transition of the Mahu Sag, Junggar Basin

水系为玛湖凹陷提供了充足的物源<sup>[4]</sup>,大型坳陷湖盆浅水、缓坡背景为低位砂砾岩扇体的连片分布提供了必要基础,这些与转换期不整合面、多期水进泥岩沉积相配置,特别有利于形成大型岩性地层圈闭群。目前已发现的玛湖10亿吨大型岩性地层油藏群就发育于北部的百口泉组 and 南部的上乌尔禾组低位扇三角洲沉积中。

### 3 转换期2类坡折识别与地层沉积控制模式

#### 3.1 坡折带概念

坡折带(slope-break zone)是一个地貌学术语,特指地形坡度发生突变的地带。最初主要应用于经典层序地层学中,用于表征被动大陆边缘的陆架坡折<sup>[27-29]</sup>。近年来,坡折带概念在陆相湖盆中得以广泛应用,按照成因机制可划分为构造坡折带、沉积坡折带和侵蚀坡折带等3类<sup>[30-32]</sup>。构造坡折带是指受同沉积构造变形而形成的地形坡度明显变化带,可划分为2种类型:受同沉积断裂控制的断裂坡折带和受褶皱作用形成的挠曲坡折带。沉积坡折带是指因不同地区沉积速率差异而造成的地形坡度突变地带,三角洲平原与前缘结合部位一般可形成沉积坡折带。侵蚀坡折带是指风化侵蚀等外动力地质作用造成的地形坡度突变带,在持续时间较长但侵蚀还没有达到准平原化的不整合面下发育。

前人<sup>[33-35]</sup>针对准噶尔盆地侏罗系和白垩系坡折带控砂开展过大量研究,明确准噶尔盆地侏罗系三

工河组发育挠曲和断裂2类坡折带,控制着辫状河三角洲沉积;认为白垩系清水河组发育多级坡折带,坡折带之下沟谷地貌中低位体系域发育的三角洲前缘亚相是富砂带。相对而言,对于深部二叠系—三叠系坡折带研究较为薄弱。随着勘探领域不断拓展,发现玛湖凹陷上二叠统底部和三叠系底部2套不整合面之上古地貌形态变化剧烈,发育古隆起、古残丘等地貌突变带,具有坡折带形成的良好条件。

#### 3.2 2类坡折带的特征及分布

通过层拉平技术恢复古地貌,明确了在玛湖凹陷 $T_1b$ 和 $P_3w$ 不整合面上识别出侵蚀坡折和构造挠曲坡折2类坡折。如前所述,二叠纪海西运动具有多幕性特点,形成多个不整合,而晚三叠世印支运动期为稳定沉积阶段。因此,选择以 $T_3b$ 底界洪泛泥岩段拉平,利用 $T_3b$ 界面至 $T_1b$ 界面之间双程旅行时间 $T_0$ 图的变化来识别研究区的坡折带。在层拉平后地震剖面上,玛湖北斜坡区 $T_1b$ 界面下显示明显的削截现象,其上为上超现象。反映了百口泉组沉积前发生了区域暴露侵蚀,从而形成残丘和下切沟谷之间的地形差异,沉积充填自坡折带下部向上不断超覆。这种类型的坡折带形成的主控因素为侵蚀地貌,即为侵蚀坡折带(图6)。而在中拐斜坡构造带,地震剖面同相轴特征揭示 $T_1b$ 界面下地层受隆升作用控制挠曲倾斜,形成挠曲坡折带,坡折带下部沉积较早,并向坡折带上部超覆(图7)。2种坡折带最大的区别在于构造挠曲坡折受控于持续性古隆起,控制层序界面之上地层向斜坡高部位

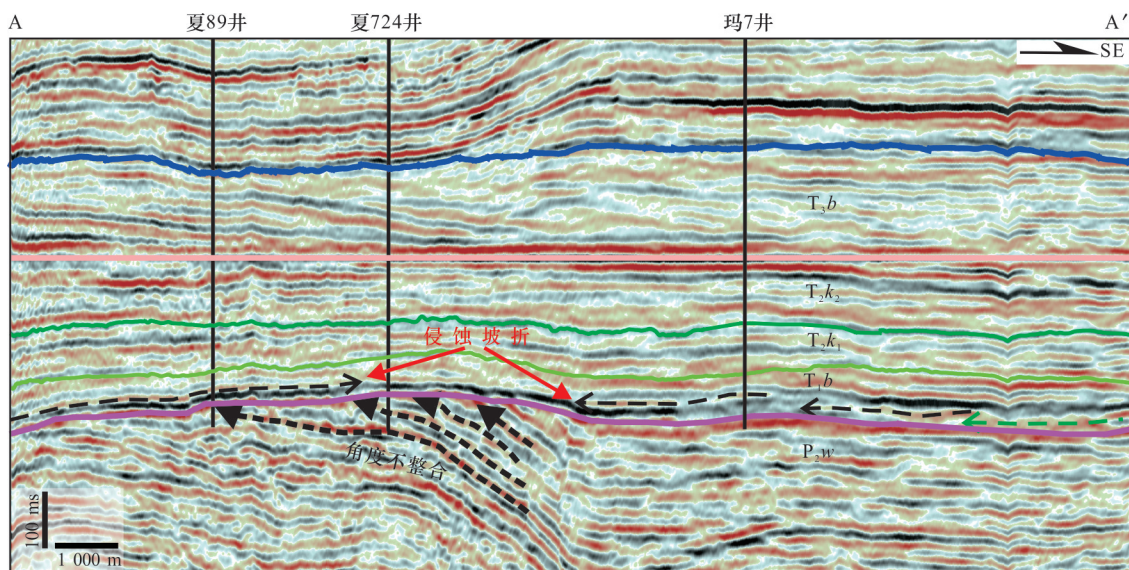


图6 玛北斜坡区剖面侵蚀坡折发育特征(剖面位置见图8)

Fig.6 Characteristics of erosional slope breaks in the Mabei area (see location for Fig.8)



逐层“单向超覆”,侵蚀坡折受控于古残丘,控制层序界面之上地层向古残丘“双向超覆”或沿下切沟谷低位充填。

基于不整合面之上的百口泉组和上乌尔禾组残余厚度图和层拉平地震剖面上反映的地层接触关系综合分析,明确了2种类型坡折带的分布范围及其对沉积中心的控制作用(图8)。坡折带之上地

层沉积厚度普遍较薄,坡折带之下沉积厚度显著增大。其中,侵蚀坡折带主要受古残丘控制,发育在早期剥蚀后残留古地貌高地周缘,侵蚀坡折主要分布在玛北—玛南斜坡区。挠曲坡折带主要受继承性古凸起控制,发育在古凸起周缘,挠曲坡折主要分布在中拐古凸起、夏盐—达巴松古凸起和莫索湾古隆起周缘。

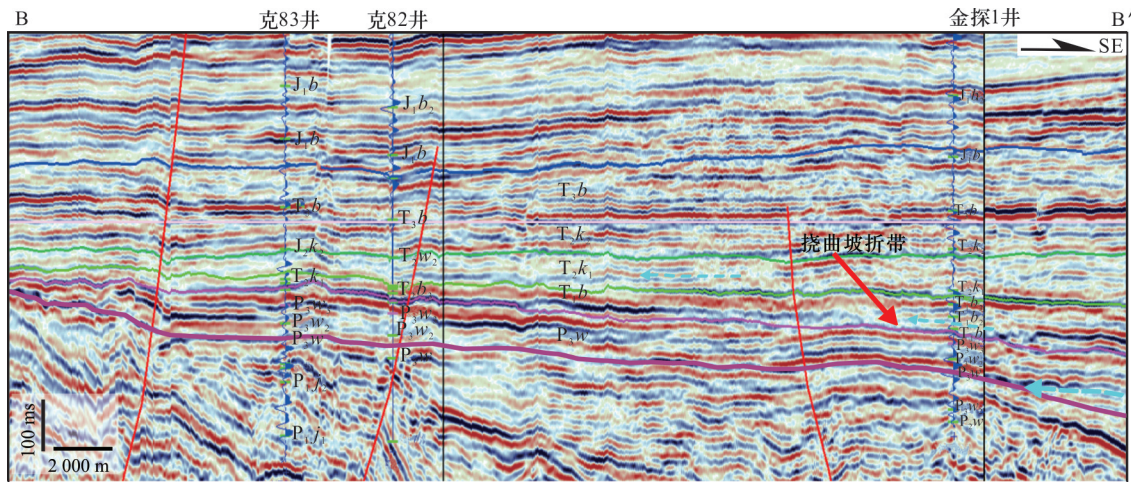


图7 中拐斜坡构造挠曲坡折发育特征(剖面位置见图8)

Fig.7 Characteristics of flexural slope breaks in the Zhongguai slope area (see location for Fig.8)

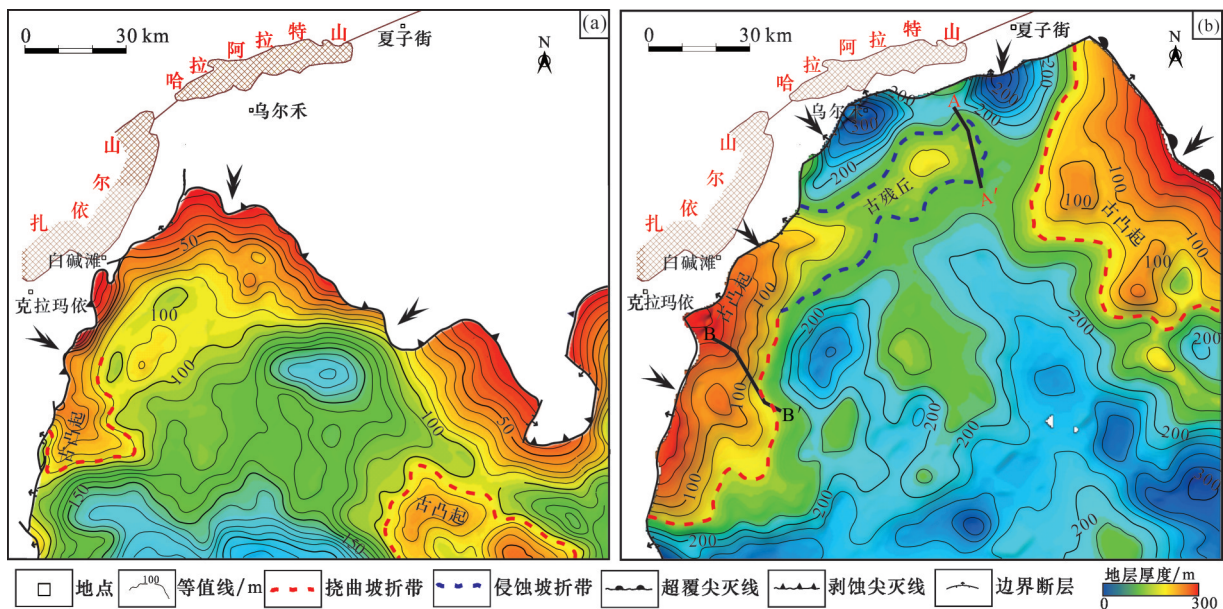


图8 准噶尔盆地玛湖凹陷P—T转换期(乌尔禾组和百口泉组)地层残余厚度及坡折分布(A-A', B-B'据图6,图7剖面位置)

Fig.8 Isopach maps and slope break distribution for the P-T transition (Wu'erhe and Baikouquan formations)

of the Mahu Sag, Junggar Basin (A-A' and B-B' as shown in Fig.6 and Fig.7)

(a)上乌尔禾组残余厚度图及坡折分布;(b)百口泉组残余厚度图及坡折分布

### 3.3 坡折带对地层沉积控制作用

坡折带的存在造成地形坡度发生突变,进而控制沉积可容纳空间的快速变化。因此,坡折带是控

制沉积相带变迁,沉积岩性变化的重要分界。不同类型的坡折带对沉积控制作用不同。侵蚀型坡折带形成于沉积之前,古残丘为坡折带上部,控制地

层向古残丘“双向”超覆。若侵蚀古地貌上发育侵蚀沟谷(下切谷),则在层序界面之上形成低位沟道型充填沉积。因此,侵蚀坡折带可形成地层超剥带或沟谷充填沉积,其上有利于超覆型、沟道充填型

岩性地层圈闭发育,其下有利于削蚀型地层圈闭发育。挠曲型坡折带层序界面之上地层向古凸起“单向”超覆,发育大型地层超覆带,其上有利于超覆型岩性地层圈闭发育(图9)。

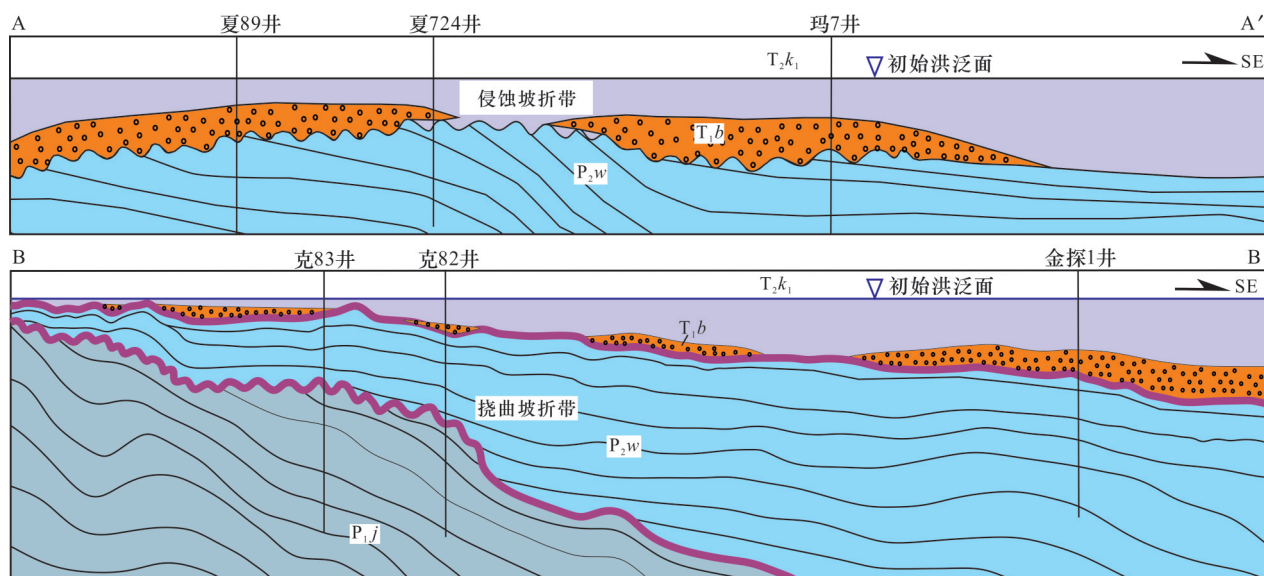


图9 玛湖凹陷转换期2类坡折控制地层沉积模式(剖面位置见图8)

Fig. 9 Cartoon illustrating the control of two types of slope breaks on deposition during the P-T transition in the Mahu Sag, Junggar Basin (see location for Fig.8)

从坡折发育演化特征分析看,挠曲坡折带从百口泉组到克拉玛依组沉积期继承性发育,侵蚀坡折带因百口泉组的填平补齐,在克拉玛依组沉积期逐渐消亡。玛北—玛南斜坡区克拉玛依沉积期,NE—SW向的古残丘逐渐消失,侵蚀坡折也随之消失,顺斜坡方向近SN向的沟谷出现,地层沉积由侵蚀坡折控制过渡为斜坡背景下的沟谷控制(图8)。

由于百口泉组是初始沉积期地层,无论是侵蚀坡折,或是挠曲坡折,对百口泉组的控制作用均十分明显。该区域百口泉组主体为扇三角洲沉积,受坡折控制,坡折上下百口泉组地层厚度发生明显变化,坡折带之下地层厚度急剧增大。如中拐斜坡区,坡折带之上的克82井区百口泉组扇三角洲河道砂砾岩厚度为20~30 m,而坡折带之下的金探1井区百口泉组砂砾岩厚度迅速增加到130~150 m。说明坡折之下可容空间明显增大,导致堆积巨厚的扇三角洲砂砾岩体(图10),可能为岩性地层的勘探重要目标。

#### 4 P—T转换期2类坡折油气地质意义

玛湖凹陷转换期发育的2类坡折带,对地层沉积均有重要的控制作用,坡折带上下岩性岩相带的

突变,有利于岩性地层圈闭的发育。

构造挠曲坡折主要控制地层向古隆起、古斜坡逐层“单向超覆”尖灭,斜坡低部位易形成低位期厚层砂砾岩体,斜坡高部位易形成高位期泥岩沉积,因此挠曲坡折带古凸起、古斜坡低部位是上倾尖灭型岩性地层圈闭发育的有利部位。侵蚀坡折主要受古残丘或侵蚀地貌控制,地层向古残丘“双向超覆”尖灭,或者充填侵蚀沟谷,因此侵蚀坡折带古残丘两侧或侵蚀沟谷岩性地层型圈闭发育有利场所。如玛北斜坡区发育侵蚀坡折,古残丘对百口泉组一克下段具有明显控制作用,百口泉组一克下段向古残丘高部位超覆尖灭,有利于在古残丘两侧形成上倾尖灭型岩性地层圈闭(图11)。同时,侵蚀坡折控制了古残丘两侧的玛154井和玛7井百口泉组一克下段砂体发育,并向古残丘高部位尖灭减薄,形成了玛154井和玛7井岩性圈闭,进而形成了玛7井和玛154井岩性地层油藏,已被勘探所证实(图12)。因此,玛湖凹陷转换期形成 $P_3w/P_2w$ 和 $T_1b/P_3w$ 2期不整合面,其上发育了构造挠曲和侵蚀2类坡折,对地层沉积具有重要控制作用,进而控制不整合面上、下岩性地层圈闭群及岩性地层油气藏的分布。



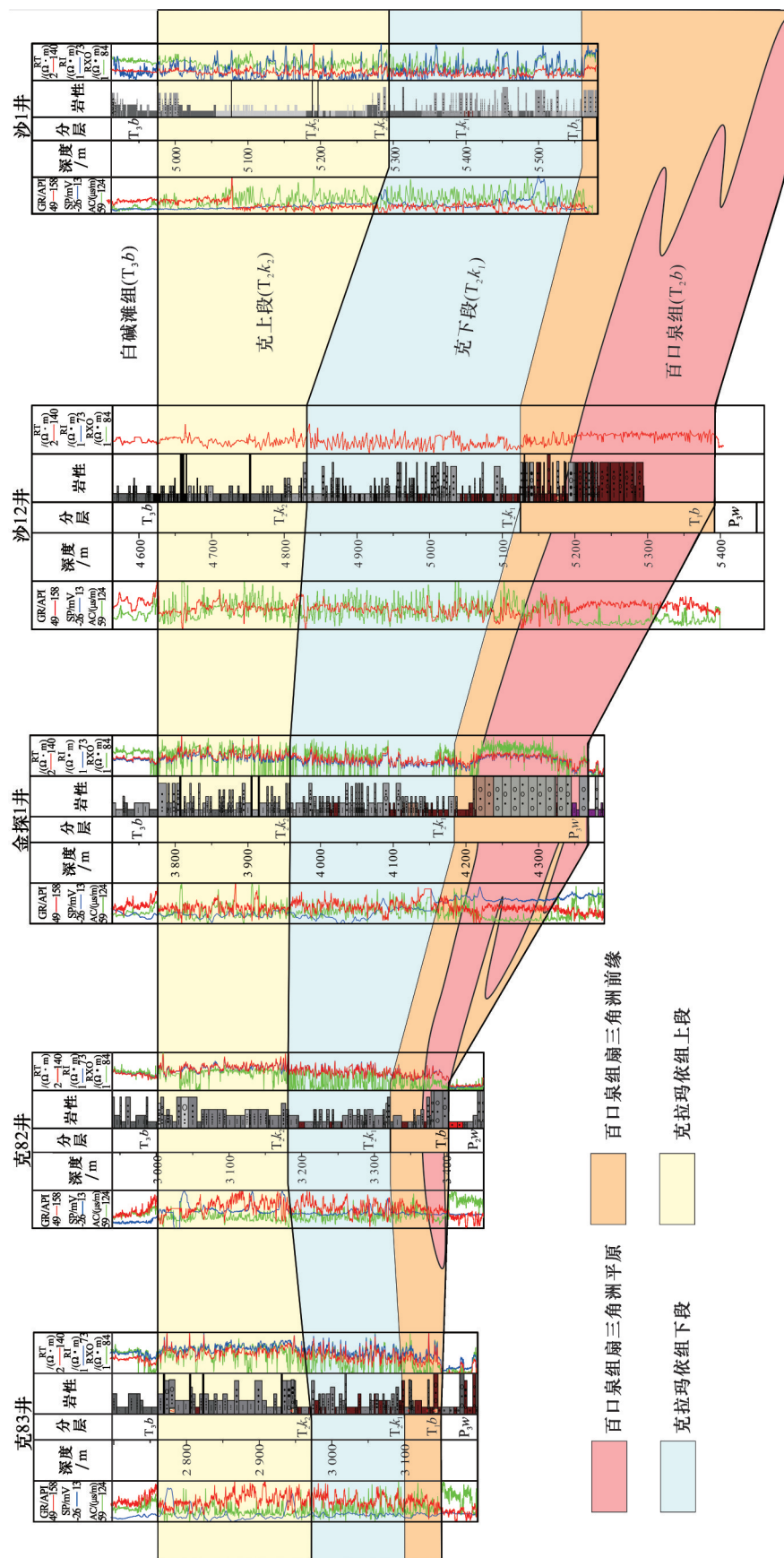


图 10 中拐斜坡构造挠曲坡折对地层沉积控制

Fig. 10 Well correlation showing the control of Zhongguai flexural slope breaks on deposition

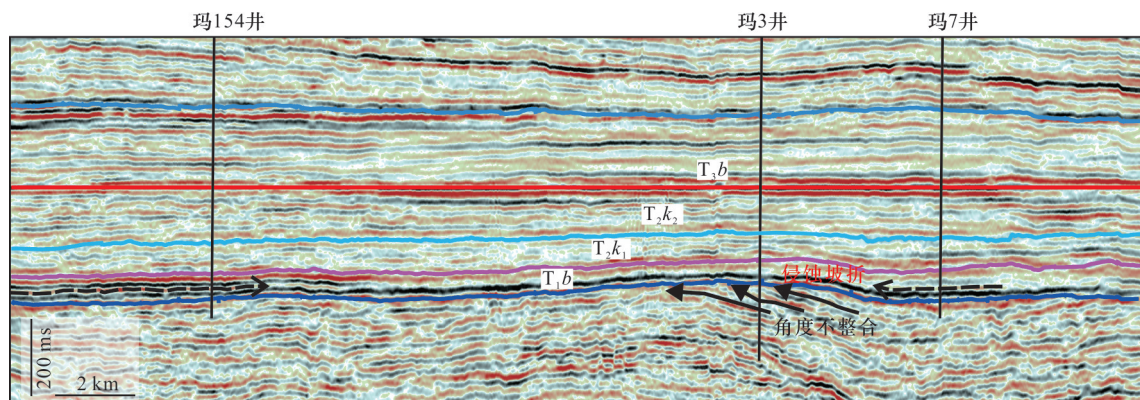


图 11 玛北斜坡区侵蚀坡折对百口泉组—克下段地层控制作用

Fig. 11 Control of Mabei erosion slope break on Baikouquan-lower Karamay formations

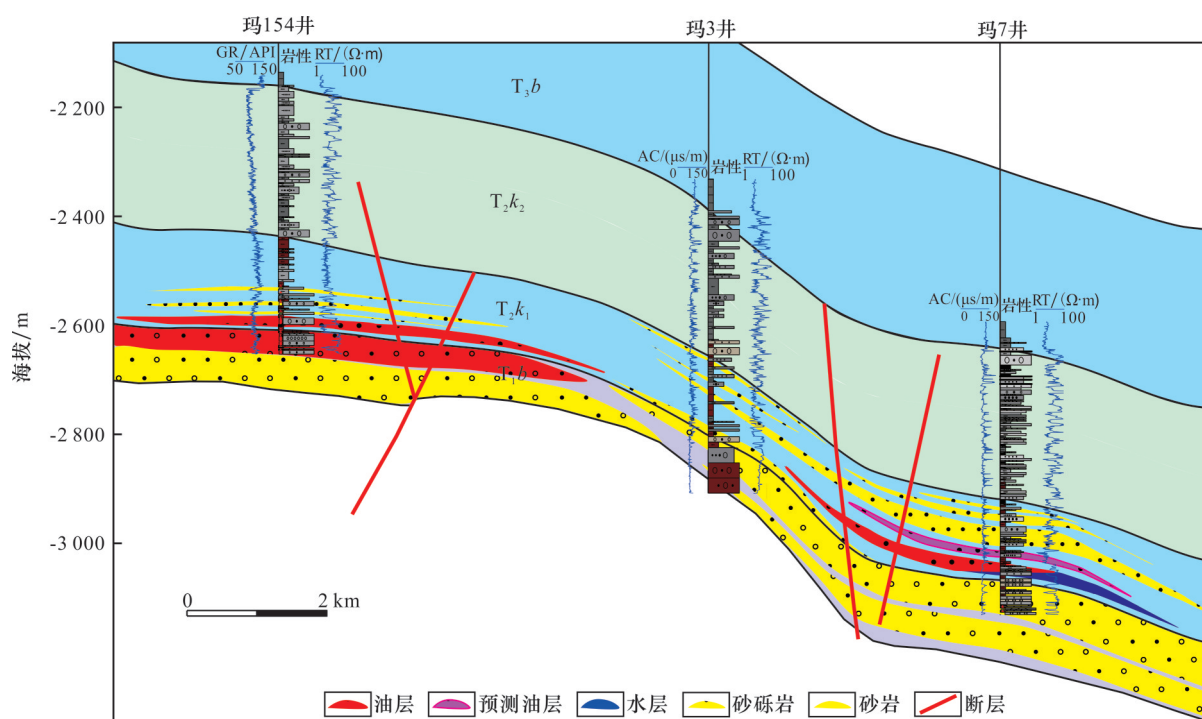


图 12 玛北斜坡区侵蚀坡折对百口泉组—克下段砂砾岩体和油藏的控制作用

Fig.12 Well correlation showing the control of Mabei erosion slope break on Baikouquan-lower Karamay formations reservoirs and plays

## 5 结论与认识

(1) 准噶尔盆地玛湖凹陷 P—T 转换期是前陆盆地向大型拗陷湖盆的转变时期, 晚海西和早印支构造运动造就了上二叠统底部和三叠系底部 2 套区域性不整合, 之上形成了上乌尔禾组 ( $P_3w$ ) 和百口泉组 ( $T_1b$ ) 2 套大面积分布的退覆型扇三角洲沉积。它们同属于上二叠统一三叠系构造层序的早期低位沉积, 因此在沉积序列和层序结构等方面具有一定的相似性和类比性。

(2) 综合层序地层学分析表明, 2 套区域性不整

合面之上发育了构造挠曲和侵蚀 2 类坡折, 对地层沉积均具有重要控制作用。挠曲坡折控制地层向古凸起或斜坡高部位“单向超覆”尖灭, 侵蚀坡折带控制地层向古残丘“双向超覆”尖灭或沟谷充填。

(3) 转换期构造挠曲和侵蚀坡折控制上乌尔禾组和百口泉组沉积变化, 进而控制岩性地层圈闭发育, 最终控制了转换期岩性地层油气藏分布。

## 参考文献 (References)

- [1] YING H F, SONG H J. Mass extinction and pangea integration during the Paleozoic-Mesozoic transition[J]. Science Chi-



- na; Earth Sciences, 2013, 56(11): 1791-1803.
- [2] EMBRY A F. Global sequence boundaries of the Triassic and their recognition in the western Canada Sedimentary Basin[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1997, 45: 415-433.
- [3] 李攀, 李永强, 经俭波, 等. 准噶尔盆地西北部P—T转换期不整合的发育演化特征及意义[J]. 古地理学报, 2020, 22(4): 693-715.
- LI P, LI Y Q, JING J B, et al. Unconformities formed during the P-T transition in the northwestern Junggar Basin: Nature, evolution and implications[J]. Journal of Palaeogeography, 2020, 22(4): 693-715.
- [4] 唐勇, 徐洋, 李亚哲, 等. 玛湖凹陷大型浅水退覆式扇三角洲沉积模式及勘探意义[J]. 新疆石油地质, 2018, 39(1): 16-22.
- TANG Y, XU Y, LI Y Z, et al. Sedimentation model and exploration significance of large-scaled shallow retrogradation fan delta in Mahu Sag[J]. Xingjiang Petroleum Geology, 2018, 39(1): 16-22.
- [5] 支东明, 唐勇, 郑孟林, 等. 玛湖凹陷源上砾岩大油区形成分布与勘探实践[J]. 新疆石油地质, 2018, 39(1): 1-8.
- ZHI D M, TANG Y, ZHENG M L, et al. Discovery, distribution and exploration practice of large oil provinces of above-source conglomerate in Mahu Sag[J]. Xingjiang Petroleum Geology, 2018, 39(1): 1-8.
- [6] 杜金虎, 支东明, 唐勇, 等. 准噶尔盆地上二叠统风险领域分析与沙湾凹陷战略发现[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(1): 24-35.
- DU J H, ZHI D M, TANG Y, et al. Prospects in Upper Permian and strategic discovery in Shawan Sag, Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(1): 24-35.
- [7] 何海清, 支东明, 唐勇, 等. 准噶尔盆地阜康凹陷勘探1井重大突破及意义[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(2): 1-11.
- HE H Q, ZHI D M, TANG Y, et al. A great discovery of Well Kangtan 1 in the Fukang Sag in the Junggar Basin and its significance[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(2): 1-11.
- [8] 钱海涛, 苏东旭, 阿布力米提·依明, 等. 准噶尔盆地盆1井西凹陷斜坡区油气地质特征及勘探潜力[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(4): 551-561.
- QIAN H T, SU D X, ABLIMIT Y M, et al. Petroleum geological characteristics and exploration potential in slope area of Well Pen-1 Western Depression in Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(4): 551-561.
- [9] 陈建平, 查明, 柳广弟, 等. 准噶尔盆地西北缘斜坡区不整合面在油气成藏中的作用[J]. 石油大学学报, 2000, 24(4): 75-78.
- CHEN J P, ZHA M, LIU G D, et al. Importance of unconformity in oil and gas accumulation in the northwestern slope of Junggar Basin[J]. Journal of China University of Petroleum, 2000, 24(4): 75-78.
- [10] 吴孔友, 查明, 柳广弟. 准噶尔盆地二叠系不整合面及其油气运聚特征[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(2): 53-54.
- WU K Y, ZHA M, LIU G D. The unconformity surface in the Permian of Junggar Basin and the characters of oil-gas migration and accumulation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(2): 53-54.
- [11] 曹剑, 胡文瑄, 张义杰, 等. 准噶尔盆地油气沿不整合运移的主控因素分析[J]. 沉积学报, 2006, 24(3): 399-406.
- CAO J, HU W X, ZHANG Y J, et al. The main factor controlling petroleum migration along unconformity in the Junggar Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(3): 399-406.
- [12] 唐勇, 徐洋, 瞿建华, 等. 玛湖凹陷百口泉组扇三角洲群特征及分布[J]. 新疆石油地质, 2014, 35(6): 628-635.
- TANG Y, XU Y, QU J H, et al. Fan-delta group characteristics and its distribution of the Triassic Baikouquan reservoirs in Mahu Sag of Junggar Basin[J]. Xingjiang Petroleum Geology, 2014, 35(6): 628-635.
- [13] 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 B B, QU J H, WANG Z S, 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.
- [14] 韩宝, 王昌伟, 盛世锋, 等. 准噶尔盆地中拐一五区二叠系不整合面对油气成藏控制作用[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(12): 1821-1828.
- HAN B, WANG C W, SHENG S F, et al. Controls of the Permian unconformity on reservoir formation in Zhongguai district 5 of Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(12): 1821-1828.
- [15] 宋勇, 周路, 吴勇, 等. 准噶尔盆地玛东地区百口泉组多物源砂体分布预测[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(6): 631-637.
- SONG Y, ZHOU L, WU Y, et al. Prediction of multi-provenance sand body distribution in Triassic Baikouquan Formation of Madong area, Junggar Basin[J]. Xingjiang Petroleum Geology, 2019, 40(6): 631-637.
- [16] 邹妞妞, 张大权, 史基安, 等. 准噶尔盆地中拐凸起二叠系上乌尔禾组油气成藏及其主控因素[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(4): 540-550.

- ZOU N N, ZHANG D Q, SHI J A, et al. Formation conditions and main controlling factors of hydrocarbon accumulation of the Upper Wuerhe Formation of Permian in Zhongguai Uplift, Junggar Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(4): 540-550.
- [17] 何登发, 吴松涛, 赵龙, 等. 环玛湖凹陷二叠—三叠纪的构造—沉积背景及其演化[J]. *新疆石油地质*, 2018, 39(1): 35-47.
- HE D F, WU S T, ZHAO L, et al. Tectono-depositional setting and its evolution during Permian to Triassic around Mahu Sag, Junggar Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2018, 39(1): 35-47.
- [18] 瞿建华, 杨荣荣, 唐勇. 准噶尔盆地玛湖凹陷三叠系源上砂砾岩扇—断—压三控大面积成藏模式[J]. *地质学报*, 2019, 93(4): 915-927.
- QU J H, YANG R R, TANG Y. Large-area petroleum accumulation model of the Triassic glutenite reservoirs in the Mahu Sag, Junggar Basin: Triple controls of fan, fault and over pressure[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(4): 915-927.
- [19] 雷德文, 陈刚强, 刘海磊, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷大油(气)区形成条件与勘探方向研究[J]. *地质学报*, 2017, 91(7): 1604-1619.
- LEI D W, CHEN G Q, LIU H L, et al. Study on the forming conditions and exploration fields of the Mahu giant oil (gas) province, Junggar Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(7): 1604-1619.
- [20] CATUNEANU O. Principles of Sequence Stratigraphy[M]. Amsterdam: Elsevier, 2006: 1-375.
- [21] ZECCHIN M, CATUNEANU O. High-resolution sequence stratigraphy of clastic shelves I: Units and bounding surfaces[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 39(1): 1-25.
- [22] 郑孟林, 樊向东, 何文军, 等. 准噶尔盆地深层地质结构叠加演变与油气赋存[J]. *地学前缘*, 2019, 26(1): 22-32.
- ZHENG M L, FAN X D, HE W J, et al. Superposition of deep geological structure evolution and hydrocarbon accumulation in the Junggar Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(1): 22-32.
- [23] 何登发. 不整合面的结构与油气聚集[J]. *石油勘探与开发*, 2007, 34(2): 142-149.
- HE D F. Structure of unconformity and its control on hydrocarbon accumulation[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2007, 34(2): 142-149.
- [24] 何登发. “下削上超”地层不整合的基本类型与地质意义[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(6): 995-1006.
- HE D F. Basic types and geologic significance of “truncation and onlap” unconformities[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(6): 995-1006.
- [25] 牟中海, 何琰, 唐勇, 等. 准噶尔盆地陆西地区不整合与油气成藏的关系[J]. *石油学报*, 2005, 26(3): 16-20.
- MOU Z H, HE Y, TANG Y, et al. Relation of unconformity with hydrocarbon accumulation in Luxi area of Junggar Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2005, 26(3): 16-20.
- [26] 隋风贵. 准噶尔盆地西北缘构造演化及其与油气成藏的关系[J]. *地质学报*, 2015, 89(4): 779-793.
- SUI F G. Tectonic evolution and its relationship with hydrocarbon accumulation in the northwest margin of Junggar Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(4): 779-793.
- [27] VAIL P R, MITCHUM R M. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 4: Global cycles of relative changes of sea level[C]// PAYTON C E. *Seismic Stratigraphy-Applications to Hydrocarbon Exploration*. Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists, AAPG Memoir, 1977, 26: 83-97.
- [28] WAGONER J C, POSAMENTIER H W, MITCHUM R M, et al. An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions[C]// WILGUS C, HASTINGS B S, KENDALL C G, et al. *Sea Level Changes: An Integrated Approach*. Oklahoma: Society of Economic Paleontologist and Mineralogists, SEPM Special Publication, 1988, 42: 39-46.
- [29] POSAMENTIER H, JERVEY M, VAIL P. Eustatic controls on clastic deposition I—conceptual framework[C]// WILGUS C, HASTINGS B S, KENDALL C G, et al. *Sea Level Changes: An Integrated Approach*. Oklahoma, Society of Economic Paleontologist and Mineralogists, SEPM Special Publication, 1988, 42: 109-124.
- [30] 林畅松, 潘元林, 肖建新, 等. “构造坡折带”——断陷盆地层序分析和油气预测的重要概念[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2000, 25(3): 260-266.
- LIN C S, PAN Y L, XIAO J X, et al. Structural slope-break zone: Key concept for stratigraphic sequence analysis and petroleum forecasting in fault subsidence basin[J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 2000, 25(3): 260-266.
- [31] 王英民, 刘豪, 李立诚, 等. 准噶尔大型坳陷湖盆坡折带的类型及分布特征[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2002, 27(6): 683-688.
- WANG Y M, LIU H, LI L C, et al. Types and distribution characteristics of slope breaks of large-type down-warped lake basins[J]. *Earth Science (Journal of China University of Geo-*



- sciences), 2002, 27(6): 683-688.
- [32] 刘豪, 王英明, 王媛, 等. 大型拗陷湖盆坡折带的研究及其意义——以准噶尔盆地西北缘侏罗纪拗陷湖盆为例[J]. 沉积学报, 2004, 22(1): 95-102.
- LIU H, WANG Y M, WANG Y, et al. Study on slope breaks in large down warped lake basins and its significance: A case study from Jurassic lake in northwestern Junggar Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(1): 95-102.
- [33] 刘豪, 王英民. 准噶尔盆地拗陷湖盆坡折带在非构造圈闭勘探中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(4): 422-427.
- LIU H, WANG Y M. Significance of slope break zones in downwarped lake basins to exploration of non-structural traps in Junggar Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(4): 422-427.
- [34] 李啸, 刘海磊, 王学勇, 等. 坡折带砂体成因及分布规律——以准噶尔盆地车排子地区下白垩统清水河组为例[J]. 岩性油气藏, 2017, 29(1): 35-42.
- LI X, LIU H L, WANG X Y, et al. Origin and distribution of sandbody in slope break zone: A case study of the Lower Cretaceous Qingshuihe Formation in Chepaizi area, Junggar Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2017, 29(1): 35-42.
- [35] 费李莹, 王仕莉, 吴涛. 坡折带对砂质碎屑流沉积的控制作用——以准噶尔盆地盆1井西凹陷及周缘侏罗系三工河组为例[J]. 油气地质与采收率, 2020, 27(2): 26-34.
- FEI L Y, WANG S L, WU T. Control of slope break zone on sandy debris flow deposition: A case study of Jurassic Sangonghe Formation in west sag of Well Pen-1 and its periphery in Junggar Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(2): 26-34.

## Sequence architecture, slope-break development and hydrocarbon implications of the Mahu Sag during the P-T transition, Junggar Basin

CAO Zhenglin, LI Pan, WANG Ruiju

(Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Corresponding to the transitional period of the earth system from Late Permian to Early Triassic times (referred to as the P-T transition period), the Mahu Sag of the Junggar Basin experienced a transition from a foreland basin to a large depression lake basin, with the development of two sets of unconformities ( $T_1/P$  and  $P_3w/P_2w$ ) and two sets of lowstand deposits, the Upper Wuerhe Formation ( $P_3w$ ) and Baikouquan Formation ( $T_1b$ ) that host a series of large or giant conglomerate oil fields. For the two third-order sequence boundaries  $T_1/P$  and  $P_3/P_2$ , two types of slope-break zones which are associated with flexure or erosion have been identified: flexural slope-break zone is controlled by a persistent paleo-uplift and controls the layer-by-layer “unidirectional onlapping” of the strata above the sequence boundary towards the higher part of the slope; while erosional slope-break zone is controlled by the erosional remnant of paleo-mounds. It is typically characterized by “two-way onlapping” towards the residual mounds or filling along the lower part of the valleys. The two types of slope-break zones both control changes in stratigraphy and sedimentation, and are conducive to the formation of lithostratigraphic traps of up-dip onlapping, lowstand filling and truncated types. The research results are of great significance to guide the exploration of large-scale lithostratigraphic plays under the control of paleotopography.

**Key words:** Junggar Basin; Mahu Sag; P-T transition; Flexural slope-break zone; Erosional slope-break zone

**Foundation items:** The China National Science and Technology Major Project of the 13<sup>th</sup> Five-Year (Grant No. 2017ZX05001001-007); the Frontier and Fundamental Major Science and Technology Project for 14<sup>th</sup> Five-Year (Grant No. 2021DJ0404).