

准噶尔盆地西北缘二叠纪原型盆地分析

张元元*, 曾宇轲, 唐文斌

北京大学地球与空间科学学院造山带和地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871

* 通信作者, yy-zhang@pku.edu.cn

收稿日期: 2021-06-15

国家自然科学基金委重大项目课题“陆相富有机质细粒沉积岩形成演化与有效储集空间发育模式”(42090021)资助

摘要 准噶尔盆地西北缘玛湖凹陷是准噶尔盆地重要的生烃凹陷, 二叠纪原型盆地属性和构造演化, 是制约盆地油气勘探的关键要素。玛湖凹陷二叠纪—早三叠世的陆相沉积序列是准噶尔盆地西北缘构造演化的沉积记录。本文在综合分析构造、沉积、物源及古地理重建的基础上, 对准噶尔盆地西北缘二叠纪—早三叠世构造和沉积过程进行解剖。二维地震剖面显示早二叠世受控于边界正断层, 具半地堑结构, 而晚二叠世—早三叠世的右旋走滑断裂带为构造反转。区域内下二叠统软沉积物变形构造是边界正断层活动的沉积响应。玛湖凹陷二叠系—三叠系包含两个二级湖侵—湖退层序。早二叠世湖侵体系域1的沉积环境由扇三角洲逐渐过渡到了深湖, 沉积中心沿边界正断层分布, 构造机械沉降速率大于沉积速率。中二叠世湖退体系域1沉积环境由湖泊向扇三角洲过渡, 沉积中心向玛湖凹陷中心迁移, 以热沉降为主。晚二叠世—早三叠世, 扇三角洲沿红车断裂带、克百断裂带和乌夏断裂带分布。二叠纪—早三叠世玛湖凹陷经历了早二叠世同断陷机械沉降阶段, 中二叠世后断陷热沉降阶段, 及晚二叠世—早三叠世构造反转阶段, 其构造演化受控于中亚造山带西南缘晚古生代增生造山后的伸展作用。

关键词 准噶尔盆地西北缘; 二叠纪; 原型盆地; 玛湖凹陷; 断陷; 构造反转

Permian attributes and tectonic evolution of the west Junggar Basin

ZHANG Yuanyuan, ZENG Yuke, TANG Wenbin

Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution of the Ministry of Education, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract The Mahu sag in the northwestern margin of the Junggar Basin is one of the most important hydrocarbon-rich sags in the Junggar Basin. The understanding of basin attributes and tectonic evolution of the Junggar Basin during the Permian-early Triassic is significant for oil and gas exploration and development. The Permian to early Triassic terrestrial successions in the Mahu sag record the tectonic evolution of the northwestern margin of the Junggar Basin. Comprehensive studies of structures, sequence stratigraphy, sedimentary infill, sediment dispersal and paleogeographic construction were performed on the Permian-early Triassic successions. 2D seismic profiles show the occurrences of basin-bounding normal faults and half-graben structures during the Early Permian and the tectonic inversion during the late Permian to early Triassic. Widespread soft-sediment deformation structures in the lower Permian Fengcheng Formation with lateral continuity correspond with the main activity on basin-bounding normal faults. The Permian to Triassic strata are organized into two second-order transgressive-regressive (T-R) sequences. During the early Permian, sediments of transgressive systems tracts 1 recorded depositional system transition from

引用格式: 张元元, 曾宇轲, 唐文斌. 准噶尔盆地西北缘二叠纪原型盆地分析. 石油科学通报, 2021, 03: 333-343

ZHANG Yuanyuan, ZENG Yuke, TANG Wenbin. Permian attributes and tectonic evolution of the west Junggar Basin. Petroleum Science Bulletin, 2021, 03: 333-343. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.03.027

fan delta to deep lacustrine setting, and the depocenter was distributed along the boundary normal fault. At this time, tectonic mechanical subsidence exceeded sediment supply. During the middle Permian, the depositional system of regressive system tracts 1 transitioned from lacustrine to fan delta setting, and the location of the depocenter shifted to the center of the Mahu sag, where thermal subsidence played a great role. During the late Permian-early Triassic, fan-deltas were distributed along the Hong-Che, Ke-Bai and Wu-Xia fault zones. Therefore, three stages of the tectonic evolution of the Permian-early Triassic Mahu in the northwestern margin of Junggar Basin are recognized: early Permian syn-rift mechanical subsidence, middle Permian post-rift thermal subsidence, and late Permian to early Triassic tectonic inversion. The dynamic mechanism of the tectonic evolution of the northwestern margin of the Junggar Basin is consistent with the evolutionary pattern of the late Paleozoic post-accretionary orogenic stage in the southwestern margin of the Central Asian Orogenic Belt.

Keywords west Junggar Basin; Permian; basin attributes; Mahu sag; rift basin; tectonic inversion

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.03.027

0 引言

准噶尔盆地是中国西北地区重要的大型叠合型含油气盆地之一^[1],其大地构造位置上位于西伯利亚板块、哈萨克斯坦板块和塔里木板块三大板块交汇关键部位。准噶尔盆地处于中亚造山带的西南缘,伴随着古亚洲洋的消减,演化历史复杂,经历了从古生代碰撞成盆、断陷、拗陷、和再生前陆盆地阶段^[2-5]。由于古亚洲洋在新疆北部闭合方式及闭合时限存在较大争议^[6-9],导致准噶尔盆地晚古生代的盆地属性和构造演化存在较大分歧。尤其是二叠纪为晚古生代大陆拼合和中、新生代陆内盆地转换的重要时期,也是认识晚古生代造山如何向陆内体制转换的重要研究阶段^[10]。准噶尔盆地二叠纪的研究仍存在争议,特别是原型盆地性质,究竟是前陆盆地还是陆内伸展断陷,严重制约了准噶尔盆地油气勘探的发展。

准噶尔盆地西北缘玛湖凹陷是准噶尔盆地重要的生烃凹陷之一,主力烃源岩是下二叠统风城组的中—高成熟度碱湖优质烃源岩,是玛湖凹陷常规—非常规油气有序共生与全油气系统形成的物质基础^[11]。发育于准噶尔西北缘扎伊尔山和哈拉阿拉特山山前的以红一车(红浅一车排子)、克一百(克拉玛依一百口泉)、乌一夏(乌尔禾—夏子街)断裂带为代表的构造带,是影响和控制准噶尔盆地西北缘油气成藏的关键要素之一。准西北缘构造带被认为形成于古生代晚期—中生代早期的前陆冲断带^[12-13],因此盆地属性为前陆盆地^[14];有研究认为此构造带是发生在二叠纪断陷阶段和侏罗纪拗陷阶段之间的具右行走滑特征的走滑转换挤压构造^[15-17],晚二叠—早三叠世造成玛湖凹陷的构造反转^[17-18]。构造带性质及盆地属性认识的不同直接决定了勘探目标和方向的分歧,在一定程度上制约了玛湖凹陷深层油气的勘探部署和远景评价。准

噶尔盆地西北缘玛湖凹陷二叠纪构造背景及盆地属性,是制约盆地油气勘探的关键要素之一,对探究烃源岩发育与富集因素和成藏机理有重要的意义。本文从构造、沉积、物源及古地理重建等方面,综合分析准噶尔盆地西北缘二叠系原型盆地属性,明确二叠纪盆地演化过程。

1 区域地质背景

准噶尔盆地是我国重要的大型含油气盆地之一,位于显生宙最大的增生型造山带—中亚造山带的西南缘(图 1a),因构造位置特殊,位于中亚造山带哈萨克斯坦构造域和蒙古—图瓦构造域的连接部位,被认为是研究中亚造山带古生代构造演化的关键部位^[6,9]。准噶尔盆地的形成演化是与古亚洲洋在北疆地区的俯冲消减密切相关。西准噶尔地区出露众多蛇绿岩带,包括达拉布特、白碱滩、巴尔雷克、唐巴勒、玛依勒等多处蛇绿岩带,是解剖造山带演化的关键证据。达拉布特和白碱滩蛇绿岩带是区内最显著的北东向构造带(图 1b),与准噶尔盆地西北缘基本平行。两条蛇绿岩带两侧均发育石炭系,主体上由海相复理石到滨浅海相沉积,再到陆相沉积,为一套水体向上变浅的沉积层序。并且在石炭系底部发育区域范围内可以对比连接的熔积岩层系(图 1b),同上覆的石炭系构成一个稳定的沉积层序,被认为是西准噶尔地区自泥盆纪末期保留的残余洋盆在石炭纪被逐渐充填的洋盆充填层序^[18]。玛湖凹陷正是在西准噶尔地区残余洋盆古生界基底上发育的。西准噶尔地区在晚石炭世—二叠纪出现大量的后碰撞“A”型花岗岩和中基性岩墙群^[19-20],与整个北疆地区的造山后伸展背景相一致。二叠系在西准噶尔地区缺失,三叠系至白垩系不整合覆盖在石炭系之上。

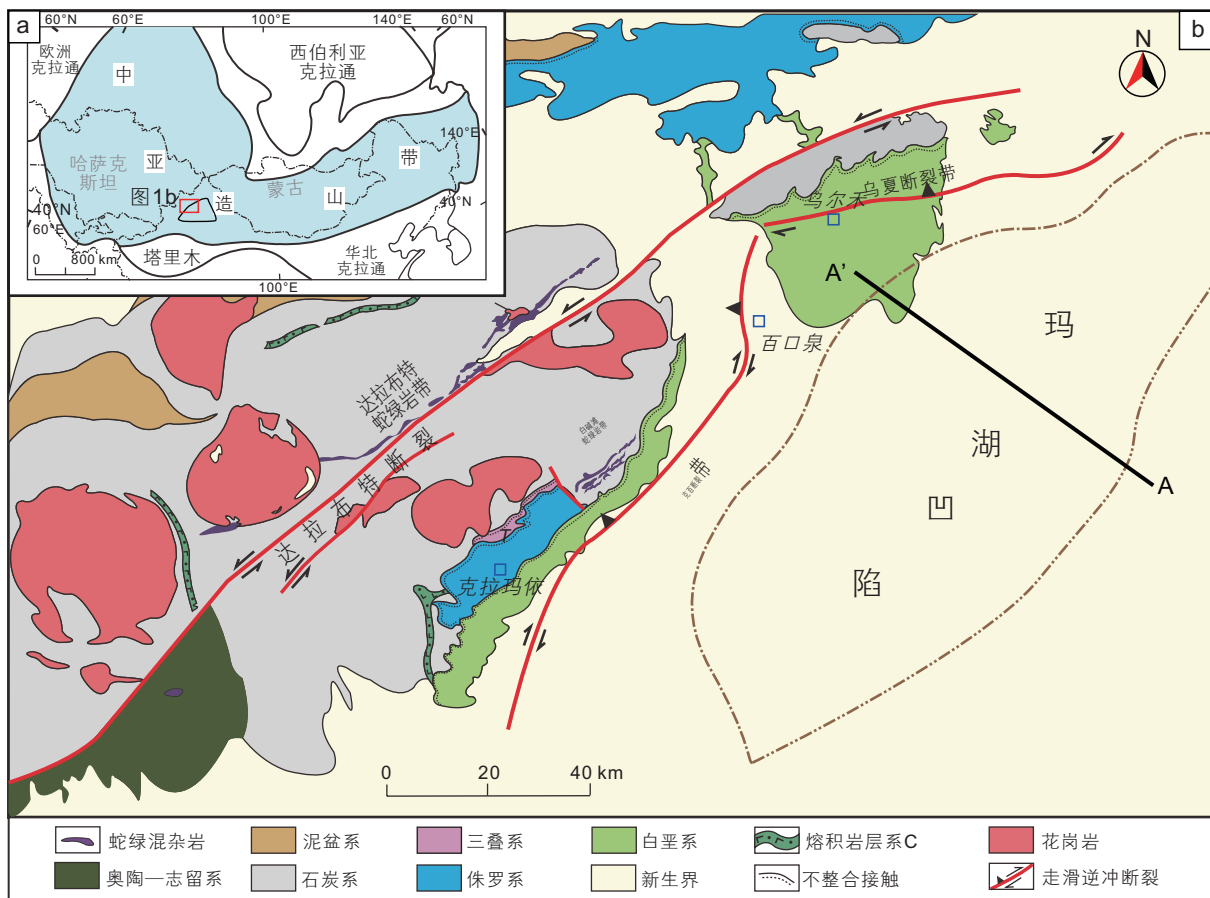


图1 准噶尔西北缘地质简图(据陈石等^[17]修改)

Fig. 1 Schematic geological map of west Junggar (modified from CHEN S et al^[17])

玛湖凹陷位于准噶尔盆地西北缘,是准噶尔盆地重要的生烃凹陷之一,呈北东—南西走向,与乌—夏断裂带以及克—百断裂带相邻(图1b)。玛湖凹陷地层发育比较全,充填了二叠纪—新生代的陆相沉积序列,沉积中心厚度超过8000 m。二叠系到三叠系自下而上包括佳木河组、风城组,夏子街组、下乌尔禾组,上乌尔禾组,百口泉组,克拉玛依组和白碱滩组(图2)。玛湖凹陷主要发育二叠系佳木河组、风城组、下乌尔禾组及石炭系4套有效烃源岩,其中以风城组烃源岩为主^[11]。多年的研究和勘探表明,克—百和乌—夏断裂带控制着凹陷内二叠系—三叠系的倾斜和剥蚀以及油气成藏^[21]。佳木河组主要由玛湖凹陷西斜坡的扇三角洲泥质和砂质砾岩组成,向盆地中心过渡为湖相泥岩和砂岩,东斜坡发育河流相砂岩和泥岩。风城组纵向上主要由扇三角洲泥质和砂质砾岩过渡为湖相白云质泥岩和浊流沉积夹层。沉积中心发育的碱湖沉积是玛湖凹陷最重要的烃源岩层系,并且具有页岩油勘探潜力^[11]。夏子街组和下乌尔禾组主要由玛湖凹陷边缘的扇三角洲砾岩和粗砂岩,以及凹陷中心的湖相砂岩、

泥岩和砾岩夹层组成。上乌尔禾组主要由扇三角洲砂砾岩和顶部的湖相泥岩夹层组成。百口泉组主要由扇三角洲泥质、砂质砾岩以及泥岩夹层组成。上乌尔禾组和百口泉组是玛湖凹陷主要的储集层^[22]。克拉玛依组主要由河道砂体和湖相泥岩组成。白碱滩组由下部的湖相泥岩,逐渐过渡到顶部的辫状河三角洲沉积。克拉玛依组和白碱滩组形成玛湖凹陷的区域盖层。玛湖凹陷主要发育三期不整合:石炭系和二叠系之间的角度不整合、二叠系与三叠系之间的削截不整合、三叠系和侏罗系之间的超覆不整合^[23]。

2 二叠系构造特征

玛湖凹陷获取的大量钻井和地球物理数据较完整地保存了不同构造演化阶段的地质记录。垂直于乌夏断裂带,横贯玛湖凹陷的剖面(图3)中,受断裂带控制,晚古生界地层由西北缘向凹陷内部倾斜,中生界地层相对缓倾,向构造带之上逐层超覆。近垂直的主断裂和卷入前侏罗系的高角度分支断层形成了一个花

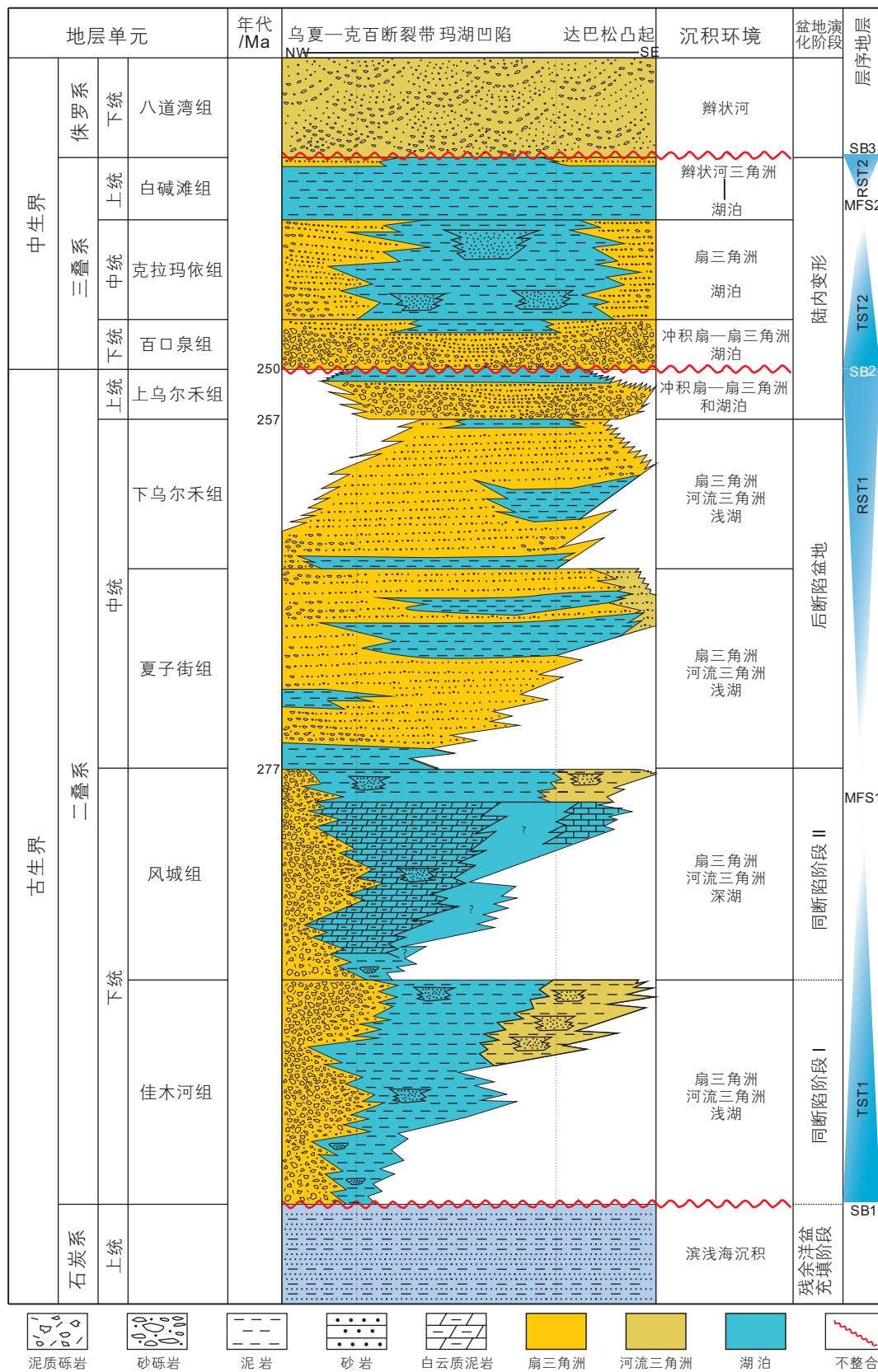


图2 玛湖凹陷二叠系—三叠系岩石地层框架概述(据TANG W B等^[23]修改)。SB, 层序界面; MFS, 最大湖泛面; RST, 湖退体系域; TST, 湖侵体系域

Fig. 2 Stratigraphic framework of the Permian to Triassic basin infill from the west to the east slope in the Mahu sag (modified from TANG W B et al^[23]). SB, sequence boundary; MFS, maximum flooding surface; RST, regressive system tract; TST, transgressive systems tract

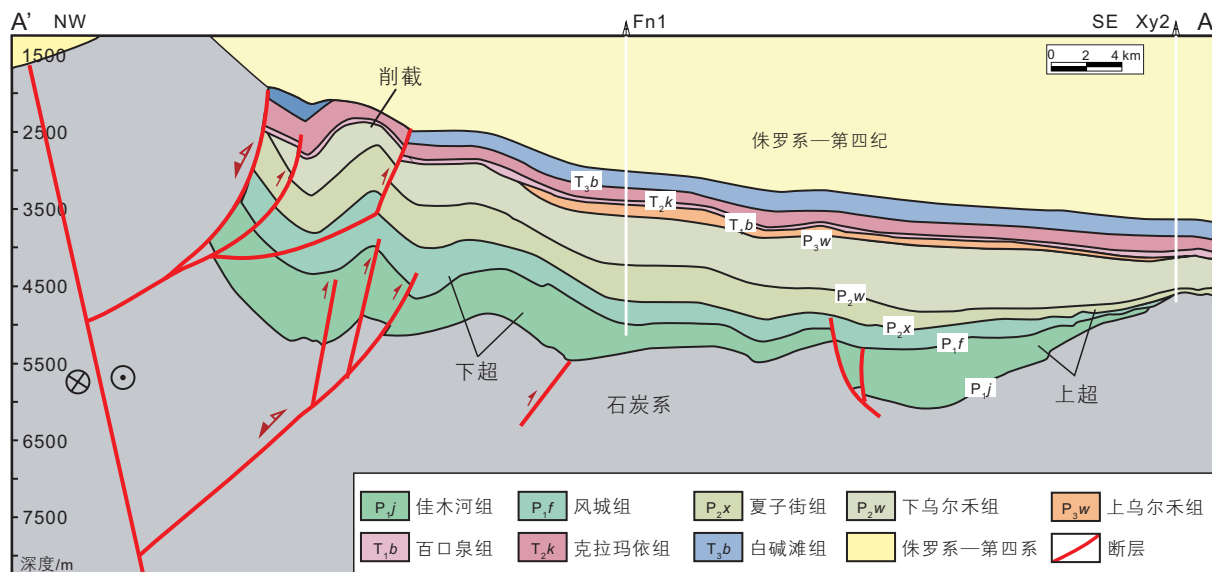


图3 横贯玛湖凹陷地震剖面结构图(据唐勇等^[21], TANG W B et al^[23]修改), 剖面位置见图1

Fig. 3 Seismic profiles cross the Mahu sag showing the features of structures and stratigraphic infilling (modified from TANG Y et al^[21], TANG W B et al^[23]), See the location in Fig. 1

状构造, 变形分布在狭窄区域内。在逆冲分支断裂两侧, 下盘佳木河组和风城组地层厚于上盘, 指示早期正断属性。早二叠世具有半地堑结构。从西向东, 二叠系地层整体上呈现逐渐减薄的现象, 并且被下三叠统不整合覆盖。地层厚度展布特征和半地堑结构指示下二叠统佳木河组和风城组主要受控于早二叠世的边界正断层。早二叠世活动的边界正断层在晚二叠世一早三叠世再活化发生构造反转, 并且以右旋走滑为特征^[21]。此外, 上二叠统上乌尔禾组在乌夏断裂带缺失, 并且与下三叠统百口泉组呈削截不整合接触。

二叠纪构造活动同时被记录在凹陷内的沉积地层内, 尤其是在下二叠统风城组内发育大量的软沉积物变形构造。软沉积物变形构造涵盖了从塑性、塑性—脆性和脆性一系列变形构造, 主要包括微褶皱和包卷层理、负载构造、塑性—脆性混合变形构造、微断层、碎屑角砾岩、香肠构造和沉积岩脉等(图4)。这些软沉积物变形构造层系在凹陷内具有横向连续性和垂向重复性的特征, 所以在连井地层剖面中进行相似软沉积物变形构造层对比。Tang 等^[24]厘定出 11 个软沉积物变形构造层系, 变形构造层 1 出现在风一段火山岩夹层之间的浅湖砂岩和粉砂岩中。变形构造层 2-11 出现在风二段深湖—碱湖相中, 3-5, 7 层可能与热液活动相关。地震触发的液化变形构造主要集中在风二段, 同沉积间歇性的地震活动可能是风城组软沉积物变形构造的主要触发机制。因此, 软沉积物变形构造是边界正断层活动的沉积响应。

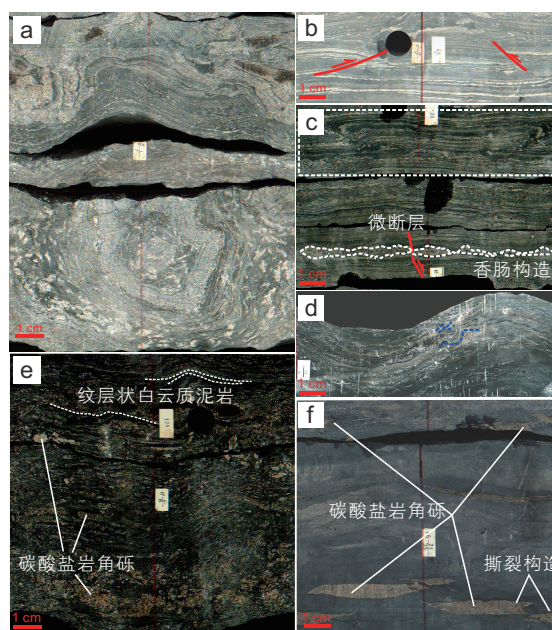


图4 玛湖凹陷风城组岩心中的微观变形特征(a) 泥岩包卷层理; (b) 白云质泥岩的逆冲断层; (c) 泥岩微褶皱、微断层和香肠构造; (d) 泥岩负载构造和微褶皱; (e) 白云质泥岩中的微褶皱和碎屑角砾岩; (f) 泥岩中的碳酸盐岩角砾

Fig. 4 Core photographs showing microstructures in the Fengcheng Formation in Mahu sag (a) Convolute lamination in mudstone and carbonate; (b) Reverse microfaults in dolomitic mudstone; (c) Upright folds in mudstone and carbonate (top), microfault and boudinage structure in carbonate (base). (d) Fold and load structure in mudstone; (e) Carbonate breccias near the base and folds in laminated dolomitic mudstone at the top; (f) Carbonate clasts in mudstone with tear structure

3 二叠系沉积充填特征

在对玛湖凹陷40余口钻井的岩心序列进行详细观察和描述的基础上,在玛湖凹陷二叠系—三叠系识别出16种岩相^[23],主要与牵引流搬运机制相关(包括河道和片流沉积);另外少数的非牵引流搬运机制,包括碎屑流、碱湖内源沉积和火山活动。根据不同的岩相组合,划分出扇三角洲、河流三角洲以及湖泊沉积体系。一些相同的岩相可以在扇三角洲、河流三角洲以及湖泊环境中,以不同的沉积过程形成。基于二维地震剖面解释识别的层序界面,通过单井和连井沉积相对比以及相关录测井资料,识别了两个区域性最大湖泛面(MFS),并将玛湖凹陷的二叠纪—三叠纪沉积充填序列划分为两个受构造控制的二级T-R层序(图2)。二叠系,三叠系和侏罗系底界的三个区域可追踪的不整合层序界面(SB)(图3),分别代表二级湖侵—湖退层序地层的界面。层序界面1(SB1)是石炭系和二叠系之间的区域性角度不整合。层序界面2(SB2)位于下三叠统百口泉组底部,为区域性削截不整合。层序界面3(SB3)位于侏罗系底界,为区域性超覆不整合。

层序1的湖侵体系域1(TST1)以层序界面1(SB1)为底界和最大湖泛面(MFS1)为顶界,该体系域以粒序向上变细的退积序列为特征。湖侵体系域1(TST1)由下二叠统佳木河组和风城组组成,由底部的扇三角洲向顶部碱湖沉积过渡。该体系域的地层厚度展布显示沉积中心沿断裂带分布,集中出现在玛湖凹陷西斜坡。佳木河组主要以加积序列为特征,由湖盆边缘的扇三角洲前缘向湖盆中心逐渐过渡为湖相沉积。风城组主要发育退积序列,以扇三角洲退积、湖盆扩张和沉积碱湖烃源岩为特征。湖退体系域(RST1)分别以MFS1为底界和SB2为顶界,湖退体系域(RST1)由夏子街组、下乌尔禾组和上乌尔禾组组成。垂向上,以进积和粒度向上变粗的沉积序列为特征,由底部湖相泥岩向顶部的扇三角洲前缘砂砾岩过渡。在玛湖凹陷西斜坡,风城组的湖相泥岩被中—晚二叠世的扇三角洲和湖相沉积物超覆,以进积和加积为主;在玛湖凹陷东斜坡,夏子街组辫状河三角洲不整合超覆于石炭系之上,逐渐过渡到下乌尔禾组的扇三角洲沉积。平面上,夏子街组和下乌尔禾组表现为湖盆萎缩,扇三角洲进积。上乌尔禾组的沉积范围进一步发生萎缩,退覆式扇三角洲和湖泊相局限分布于玛湖凹陷西南缘。

层序2的湖侵体系域2(TST2)以SB2为底界,以MFS2为顶界,下切侵蚀湖退体系域(RST1)。TRT2以

退积、向上变细的沉积序列为特征,从下至上依次发育粗粒扇三角洲前缘、河流三角洲和湖泊相。下三叠统百口泉组主要发育多个退覆式扇三角洲,并且不整合超覆在中—上二叠统下乌尔禾组和上乌尔禾组之上。克拉玛依组主要发育超覆的“河流型”扇三角洲,湖盆发生扩张。湖退体系域2(RST2)以上三叠统白碱滩组底部的深湖相逐渐过渡为顶部的辫状河三角洲为特征,垂向上呈向上变粗的进积序列;平面上,则表现为湖盆萎缩,辫状河三角洲进积为特征。湖退体系域2的顶部在局部地区遭受剥蚀。

4 二叠纪物源分析及古地理重建

玛湖凹陷二叠纪—早三叠世砂岩主要为棱角状—次棱角状,分选较差的火山岩屑、沉积岩屑和碎屑矿物颗粒组成,成分成熟度和结构成熟度较低,指示近源沉积,因此西准噶尔山系是准噶尔盆地西北缘的主要潜在物源区。碎屑锆石数据^[23]指示西准噶尔地块中部的扎伊尔山是佳木河组的主要物源区。两个环形沉积中心分别位于扎伊尔山(~1700 m)和哈拉阿拉特山前(~1000 m)(图5a)。扇三角洲沿玛湖凹陷西斜坡的正断层分布,向湖盆过渡为湖泊相。玛湖凹陷东斜坡发育河流三角洲。风城组沉积期为主要的湖泊扩张期,沉积中心受控于玛湖凹陷西斜坡的正断层(~1250 m)(图5b)。碎屑锆石数据^[23]指示西准噶尔中部的扎伊尔山仍是主要的物源供给区,东部的陆梁凸起为次要物源区。东西斜坡分别由河流三角洲前缘和扇三角洲前缘向湖盆中心过渡到湖相沉积。

夏子街组沉积期,沉积中心由西斜坡迁移至玛湖凹陷中央以及哈拉阿拉特山前坡折带^[25](图5c)。碎屑锆石年代学^[23]显示主要物源区为西准噶尔中部的扎伊尔山,次要物源区为西准噶尔南部的玛依勒山和新疆北部的古生代岛弧。在玛湖凹陷西斜坡的扇三角洲超覆在风城组湖相泥岩之上。玛湖凹陷东斜坡发育河流三角洲,不整合超覆于石炭系之上。

下乌尔禾组沉积期,古地貌研究显示东北缘为高地貌区,西南缘为低地貌区,古地貌控制了古水系分布,沉积中心由玛湖凹陷的东北缘向西南缘迁移(图5d)。该时期主要发育“河流型”扇三角洲沉积,东斜坡由夏子街组时期的河流三角洲过渡为了扇三角洲。此时玛湖凹陷周缘的隆起区为主要物源区,包括西准噶尔中部、南部和北部,以及陆梁凸起。

上乌尔禾组主要发育冲积扇—扇三角洲,局限分布在东拐凸起和玛湖凹陷西南缘,在北东缘为沉积间

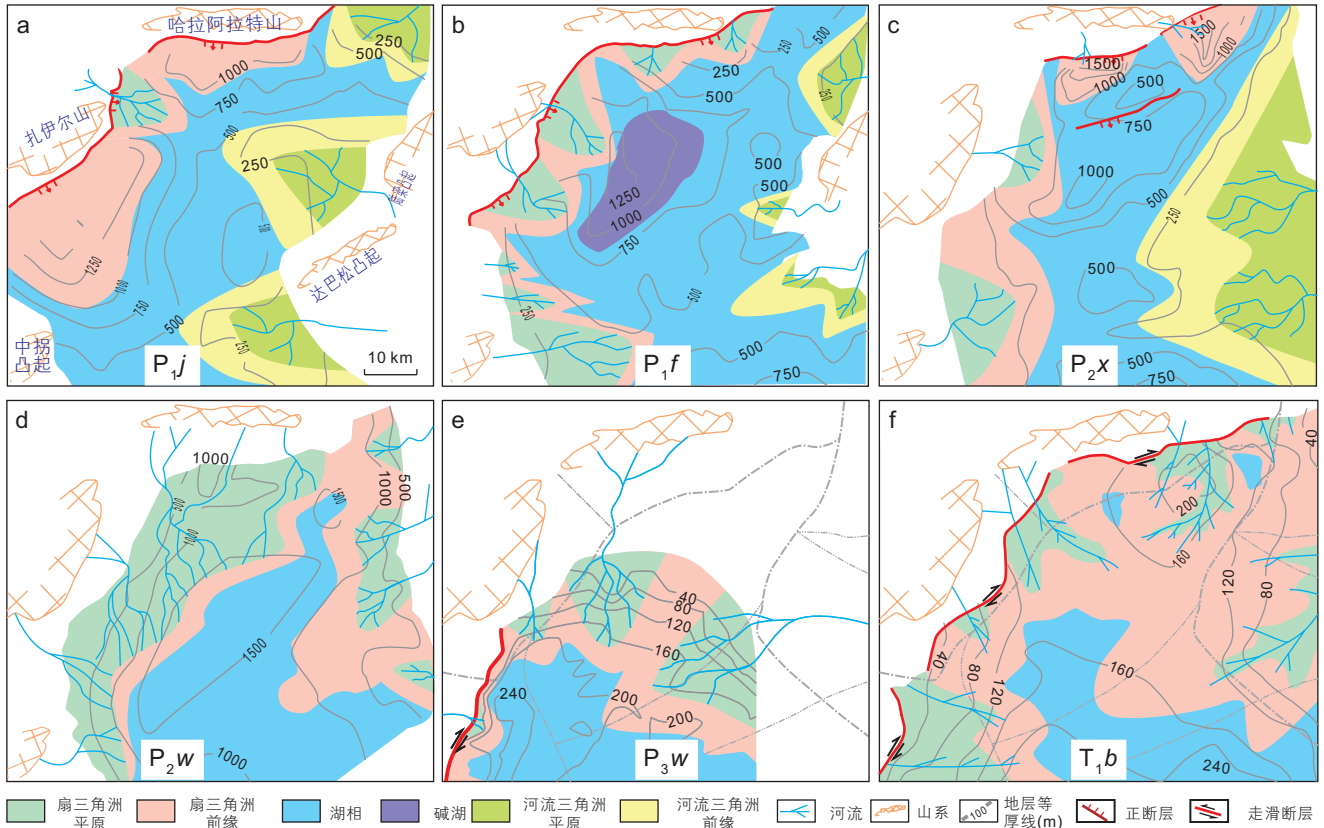


图 5 玛湖凹陷二叠纪—早三叠世古地理演化和残余地层厚度展布图(据 TANG W B 等^[23]修改)

Fig. 5 Permian to early Triassic paleogeography and isopach maps of the Mahu Sag (modified from TANG W B et al^[23])

断。沉积中心(~260 m)由玛湖凹陷西南缘迁移至中拐凸起(图 5e)。与下乌尔禾组进行对比,该时期沉积格局发生了颠覆性变化。碎屑锆石 U-Pb 年代学显示^[23],西准噶尔地块中部的扎伊尔山是主要物源区;北部的博什库尔—成吉思弧和扎玛尔—萨乌尔弧和南部的玛依勒山为次要物源区,并且供给量显著增加。

下三叠统百口泉组冲积扇—扇三角洲沿走滑断裂带分布,在玛湖凹陷东北缘重新接受沉积。沉积中心进一步向西南方向迁移,次级沉积中心位于玛湖凹陷东北缘(图 5f)。物源区与上乌尔禾组时期类似,西准噶尔中部的扎伊尔山是主要物源区;新疆北部的古生代岛弧和西准噶尔南部的玛依勒山为次要物源区,来源于西准噶尔南部的陆源碎屑物质供给量显著增加。

5 准噶尔盆地西北缘二叠纪原型盆地属性及构造演化

二叠纪是准噶尔盆地发展的重要时期,盆地主体进入陆相或海陆交互沉积演化阶段,是海陆转换的重要时期。准噶尔盆地周边自早二叠世起几乎全部隆起成陆,盆地内起伏不平,形成拗隆相间的构造格局。

基于构造、沉积、物源、古地理等综合研究,佳木河组和风城组沉积中心和扇三角洲沿边界正断层分布,湖侵序列(TST1)由扇三角洲逐渐过渡到了深湖环境,具有半地堑结构,均指示准噶尔西北缘玛湖凹陷早二叠世为断陷盆地。

大多数陆相断陷盆地的初始演化阶段,通常由于地壳伸展减薄而发生机械沉降,在随后的演化过程中,由于地壳伸展的结束而导致热梯度逐渐降低,由机械沉降逐渐演变为区域热沉降。基于陆内断陷盆地不同构造演化阶段的沉降机制,对二叠纪—早三叠世玛湖凹陷进行了构造演化阶段划分(图 6): (1)早二叠世为同断陷机械沉降阶段; (2)中二叠世为后断陷热沉降阶段; (3)晚二叠世—早三叠世为构造反转阶段。

早二叠世湖侵体系域 1(TST1)记录佳木河组和风城组湖侵序列由扇三角洲逐渐过渡到了深湖环境,该阶段构造机械沉降速率大于沉积速率。在垂向上,由底部的扇三角洲向上过渡浅湖沉积;在平面上,扇三角洲和沉积中心沿北东—南西向的边界正断层展布(图 6a),局部沉积碱湖烃源岩。风城组的软沉积物变形构造层是同断陷阶段的沉积响应。此外,早二叠世玛湖凹陷为同断陷期的解释得到了其他区域证据的支

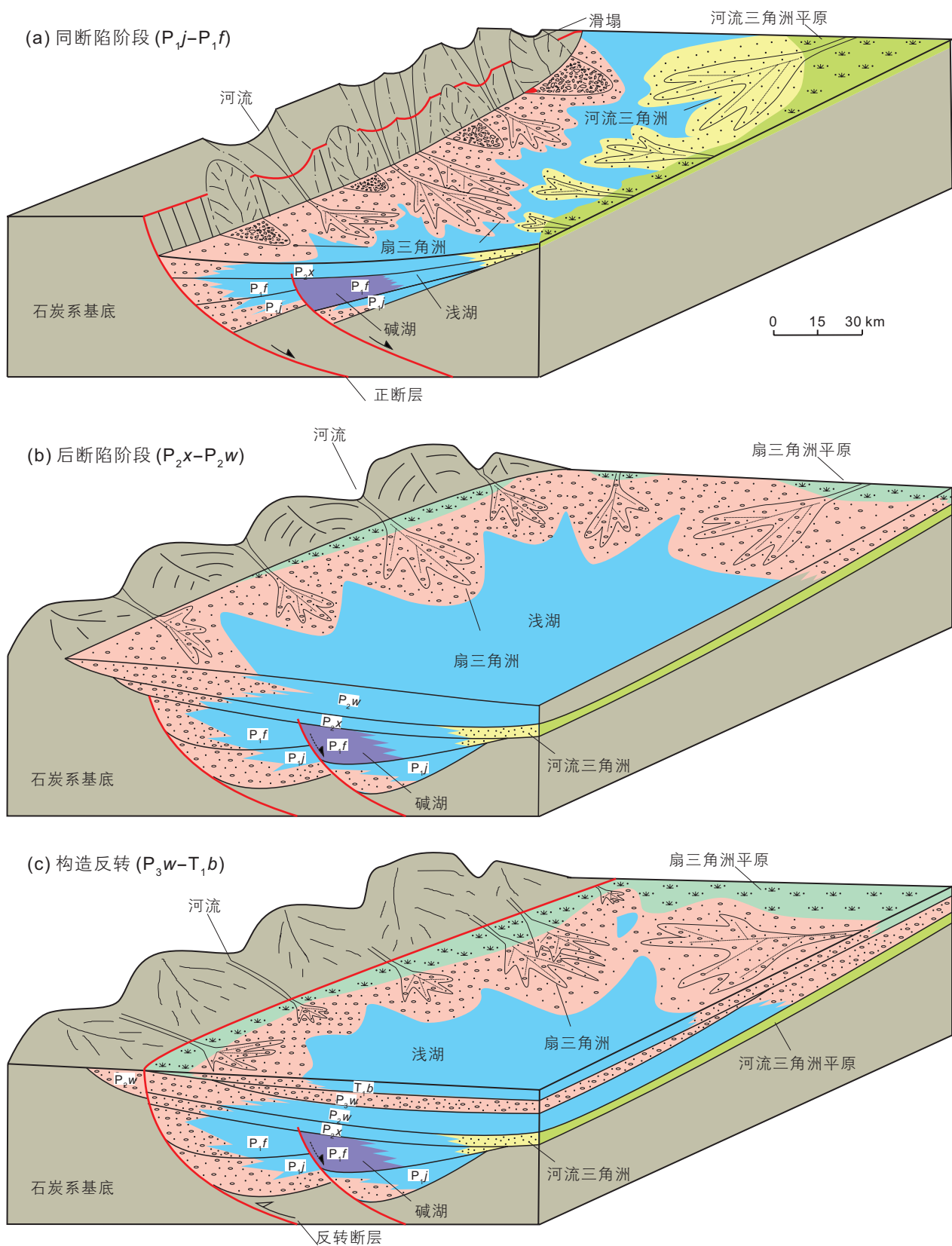


图6 玛湖凹陷二叠纪—早三叠世盆地演化模式图。(a) 早二叠世同断陷阶段 (P_{1j} - P_{1f}); (b) 中二叠世后断陷阶段 (P_{2x} - P_{2w}); (c) 晚二叠世—早三叠世构造反转阶段 (P_{3w} - T_{1b})

Fig. 6 Simplified dynamic model of the Mahu sag during Permian to early Triassic. (a) Syn-rift stage (P_{1j} - P_{1f}); (b) Post-rift stage (P_{2x} - P_{2w}); (c) Tectonic inversion (P_{3w} - T_{1b})

持。西准噶尔以及邻近区域的双峰式火山岩和基性侵入岩墙年代学(310~255 Ma)与断陷盆地的岩浆活动特征吻合。基于玛湖凹陷二叠纪成熟有机质的热流值计算,早二叠世的峰值为 85 mW/m^2 ,中一晚二叠世逐渐降低^[26]。埋藏史恢复也指示快速构造沉降集中在早二叠世^[27]。

中二叠世湖退体系域1(RST1)夏子街组和下乌尔禾组的沉积环境由湖泊向扇三角洲过渡,以发育扇三角洲和河流三角洲进积为特征,并且沉积中心向玛湖凹陷中心迁移,具有准夷平化的特征,沉积范围扩张,湖泊萎缩,指示该阶段岩石圈逐渐发生冷却,在区域上发生热沉降。同时,该时期地层展布较稳定,边界正断层活动的停止,主要是以热沉降为主,盆内热流值降低,沉积物的供给速率逐渐超过构造沉降速率,充填湖退沉积序列。

晚二叠世一早三叠世,沉积中心由中二叠世的玛湖凹陷中央向东南缘发生迁移,扇三角洲沿红车断裂带和克百断裂带,局限分布在中拐凸起以及玛湖凹陷的西南缘,湖盆进一步发生萎缩,并且在玛湖凹陷东北缘出现沉积间断。与早一中二叠世相比,晚二叠世上乌尔禾组的沉积环境和物源体系均出现了颠覆性变化,标志着构造反转的启动。三叠系削截不整合于二叠系之上,造成二叠系的抬升和倾斜。这期反转可能是西准噶尔和准噶尔盆地相对于成吉思汗弧在晚二叠世发生逆时针旋转的结果^[28],形成了克一百和乌一夏右行走滑逆冲带。这期走滑活动造成了玛湖凹陷的构造反转,其侧向挤压伴生逆冲断层和褶皱形成以断块、鼻状构造、断背斜和雁行式排列的背斜等类型为主的构造圈闭,而玛湖斜坡带中二叠系和中生界齐全,构造变形微弱,发育多期不整合,地层超覆明显,形成

大量的地层岩性圈闭。这些圈闭在晚三叠世基本定型,与玛湖凹陷的生排烃过程有较好的配置关系,是准噶尔盆地西北缘油气成藏的关键因素^[17]。

准噶尔盆地西北缘二叠纪原型盆地类型与中亚造山带西南缘晚古生代增生造山后伸展作用密切相关。玛湖凹陷二叠纪断陷盆地的初始轴向位置被认为主要受控于西准噶尔厚地壳和玛湖凹陷薄地壳交汇位置石炭纪先前断裂带的再活化^[29]。晚石炭世准噶尔盆地下部地壳总体厚度较薄,但“A”型花岗岩的侵入、冷却和抬升,加固了西准噶尔地区。早二叠世额尔齐斯左旋走滑剪切带和北天山右旋走滑断裂带之间为区域张性应力场,两条断裂带不同的走滑量导致了准噶尔盆地下部地壳的进一步减薄和石炭纪先前断裂带的再活化。中亚造山带西南缘早二叠世形成的一系列陆内断陷盆地^[30],可能具有类似的动力学机制。

6 结论

(1)准噶尔盆地西北缘二叠纪不同阶段的原型盆地属性是控制沉积物展布、古地理演化和油气聚集的主控因素。

(2)二叠纪一早三叠世玛湖凹陷主要经历了早二叠世为同断陷机械沉降阶段,中二叠世为后断陷热沉降阶段,及晚二叠世一早三叠世为构造反转阶段。构造反转形成的克一百和乌一夏右行走滑逆冲带,是准噶尔盆地西北缘油气成藏的关键因素。

(3)西准噶尔厚地壳和玛湖凹陷薄地壳交界位置石炭纪先前断裂带的再活化决定了早二叠世玛湖凹陷初始断陷盆地的轴向位置,这与中亚造山带西南缘增生造山后的伸展作用密切相关。

参考文献

- [1] 马宗晋, 曲国胜, 陈新发. 准噶尔盆地构造格架及分区[J]. 新疆石油地质, 2008, 29(01): 1-6. [MA Z J, QU G S, CHEN X F. Tectonic framework and division in Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2008, 29(01): 1-6.]
- [2] 蔡忠贤, 陈发景, 贾振远. 准噶尔盆地的类型和构造演化[J]. 地学前缘, 2000, 7(04): 431-440. [CAI Z X, CHEN F J, JIA Z Y. Types and tectonic evolution of Junggar Basin[J]. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing), 2000, 7(04): 431-440.]
- [3] 陈新, 卢华复, 舒良树, 等. 准噶尔盆地构造演化分析新进展[J]. 高校地质学报, 2002, 8(03): 257-267. [CHEN X, LU H F, SHU L S, et al. Study on tectonic evolution of Junggar Basin[J]. Geological Journal of China Universities, 2002, 8(03): 257-267.]
- [4] 陈发景, 汪新文, 汪新伟. 准噶尔盆地的原型和构造演化[J]. 地学前缘, 2005, 12(03): 77-89. [CHEN F J, WANG X W, WANG X W. Prototype and tectonic evolution of the Junggar Basin, northwestern China[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(03): 77-89.]
- [5] 何登发, 张磊, 吴松涛, 等. 准噶尔盆地构造演化阶段及其特征[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(05): 845-861. [HE D F, ZHANG L, WU S T, et al. Tectonic evolution stages and features of the Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(05): 845-861.]
- [6] XIAO W, WINDLEY B F, HAN C, et al. Late Paleozoic to early Triassic multiple roll-back and oroclinal bending of the Mongolia collage in central Asia[J]. Earth-Science Reviews, 2018, 186: 94-128.

- [7] TANG G, WANG Q, WYMAN D A, et al. Ridge subduction and crustal growth in the central Asian orogenic belt: Evidence from late Carboniferous adakites and high-Mg diorites in the western Junggar region, northern Xinjiang (west China)[J]. *Chemical Geology*, 2010, 277(3-4): 281-300.
- [8] HAN Y, ZHAO G. Final amalgamation of the Tianshan and Junggar orogenic collage in the southwestern central Asian orogenic belt: constraints on the closure of the Paleo-Asian ocean[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 186: 129-152.
- [9] CHOULET F, FAURE M, CLUZEL D, et al. From oblique accretion to transpression in the evolution of the Altaid collage: New insights from West Junggar, northwestern China[J]. *Gondwana Research*, 2012, 21(2): 530-547.
- [10] 方世虎, 贾承造, 郭召杰, 等. 准噶尔盆地二叠纪盆地属性的再认识及其构造意义[J]. *地学前缘*, 2006, 13(03): 108-121. [FANG S H, JIA C Z, GUO Z J, et al. New view on the Permian evolution of the Junggar Basin and its implications for tectonic evolution[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(03): 108-121.]
- [11] 支东明, 唐勇, 何文军, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组常规—非常规油气有序共生与全油气系统成藏模式[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(01): 38-51. [ZHI D M, TANG Y, HE W J, et al. Orderly coexistence and accumulation models of conventional and unconventional hydrocarbons in lower Permian Fengcheng Formation, Mahu sag, Junggar Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(01): 38-51.]
- [12] 况军, 张越迁, 侯连华. 准噶尔盆地西北缘克百掩伏带勘探领域分析[J]. *新疆石油地质*, 2008, 29(04): 431-434. [KUANG J, ZHANG Y Q, HOU L H. Exploratory targets of Karamay-Baikouquan buried structural belt in northwestern margin of Junggar Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2008, 29(04): 431-434.]
- [13] 管树巍, 李本亮, 侯连华, 等. 准噶尔盆地西北缘下盘掩伏构造油气勘探新领域[J]. *石油勘探与开发*. 2008, 35(01): 17-22. [GUAN S W, LI B L, HOU L H, et al. New hydrocarbon exploration areas in footwall covered structures in northwestern margin of Junggar Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2008, 35(01): 17-22.]
- [14] 何登发, 陈新发, 张义杰, 等. 准噶尔盆地油气富集规律[J]. *石油学报*, 2004, 25(03): 1-10. [HE D F, CHEN X F, ZHANG Y J, et al. Enrichment characteristics of oil and gas in Junggar Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2004, 25(03): 1-10.]
- [15] 邵雨, 汪仁富, 张越迁, 等. 准噶尔盆地西北缘走滑构造与油气勘探[J]. *石油学报*, 2011, 32(06): 976-984. [SHAO Y, WANG R F, ZHANG Y Q, et al. Strike-slip structures and oil-gas exploration in the NW margin of the Junggar Basin, China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(06): 976-984.]
- [16] 张越迁, 汪新, 刘继山, 等. 准噶尔盆地西北缘乌夏走滑构造及油气勘探意义[J]. *新疆石油地质*, 2011, 32(05): 447-450. [ZHANG Y Q, WANG X, LIU J S, et al. Wuerhe-Xiazijie strike-slip structure and petroleum exploration significance in northwestern margin of Junggar Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2011, 32(05): 447-450.]
- [17] 陈石, 郭召杰, 漆家福, 等. 准噶尔盆地西北缘三期走滑构造及其油气意义[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(03): 322-331. [CHEN S, GUO Z J, QI J F, et al. Three-stage strike-slip fault systems at northwestern margin of Junggar Basin and their implications for hydrocarbon exploration[J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(03): 322-331.]
- [18] CHEN S, GUO Z J, PE-PIPER G, et al. Late Paleozoic peperites in West Junggar, China, and how they constrain regional tectonic and palaeoenvironmental setting[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23(2): 666-681.
- [19] 韩宝福, 季建清, 宋彪, 等. 新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长(I)——后碰撞深成岩浆活动的时限[J]. *岩石学报*, 2006, 22(5): 1077-1086. [HAN B F, JI J Q, SONG B, et al. Late Paleozoic vertical growth of continental crust around the Junggar Basin, Xinjiang, China (Part I): Timing of post-collisional plutonism[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(5): 1077-1086.]
- [20] 李辛子, 韩宝福, 季建清, 等. 新疆克拉玛依中基性岩墙群的地质地球化学和K-Ar年代学[J]. *地球化学*, 2004, 33(6): 574-584. [LI X Z, HAN B F, JI J Q, et al. Geology, geochemistry and K-Ar ages of the Karamay basic-intermediate dyke swarm from Xinjiang, China [J]. *Geochimica*, 2004, 33(6): 574-584.]
- [21] LIANG Y Y, ZHANG Y Y, CHEN S, et al. Controls of a strike-slip fault system on the tectonic inversion of the Mahu Depression at the northwestern margin of the Junggar Basin, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2020, 198: 104229.
- [22] 唐勇, 郭文建, 王霞田, 等. 玛湖凹陷砾岩大油区勘探新突破及启示[J]. *新疆石油地质*, 2019, 40(02): 127-137. [TANG Y, GUO W J, WANG X T, et al. A new breakthrough in exploration of large conglomerate oil province in Mahu Sag and its implications[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2019, 40(02): 127-137.]
- [23] TANG W B, ZHANG Y Y, PE-PIPER G, et al. Permian to early Triassic tectono-sedimentary evolution of the Mahu sag, Junggar Basin, western China: Sedimentological implications of the transition from rifting to tectonic inversion[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 123: 104730.
- [24] TANG W B, ZHANG Y Y, PE-PIPER G, et al. Soft-sediment deformation structures in alkaline lake deposits of Lower Permian Fengcheng Formation, Junggar Basin, NW China: Implications for syn-sedimentary tectonic activity[J]. *Sedimentary Geology*, 2020, 406: 105719.
- [25] 瞿建华, 郭文建, 尤新才, 等. 玛湖凹陷夏子街斜坡折带发育特征及控砂作用[J]. *新疆石油地质*, 2015, 36(2): 127-133. [QU J H, GUO W J, YOU X C, et al. Characteristics of Xiazijie slope breaks in Mahu Sag and control effect on sand bodies[J]. *Xinjiang*

- Petroleum Geology, 2015, 36(2): 127–133.]
- [26] WANG S J, HE L J, WANG J Y, Thermal regime and petroleum systems in Junggar Basin, northwest China[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2001, 126: 237–248.
- [27] 田孝茹, 张元元, 卓勤功, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷下二叠统风城组致密油充注特征——碱性矿物中的流体包裹体证据. *石油学报*, 2019, 40(6): 646–659. [TIAN X R, ZHANG Y Y, ZHUO Q G, et al. Tight oil charging characteristics of the Lower Permian Fengcheng Formation in Mahu sag, Junggar Basin: Evidence from fluid inclusions in alkaline minerals[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(6): 646–659.]
- [28] YI Z Y, HUANG B C, XIAO, W J, et al. Paleomagnetic study of Late Paleozoic rocks in the Tacheng Basin of West Junggar (NW China): Implications for the tectonic evolution of the western Altai[J]. *Gondwana Research*, 2015. 27: 862–877.
- [29] TANG W B, ZHANG Y Y, PE-PIPER G, et al. Permian rifting processes in the NW Junggar Basin, China: Implications for the post-accretionary successor basins[J]. *Gondwana Research*, 2021, doi: 10.1016/j. gr.2021.06.005]
- [30] XIA, L Q, XU, X Y, LI, X M, et al. Reassessment of petrogenesis of Carboniferous–Early Permian rift-related volcanic rocks in the Chinese Tianshan and its neighboring areas[J]. *Geoscience Frontiers*, 2012, 3: 445–471.

(责任编辑 刘冬冬 编辑 付娟娟)