浅水扇三角洲沉积特征及演化规律：以准噶尔盆地玛东斜坡区百口泉组为例

代超[1]，康逊[1*]，谭静强[1]，鲁锋[2,3]，连丽霞[2,3]，胡瑞璞[1]

1. 中南大学地球科学与信息物理学院，长沙 410083；
2. 中国石油新疆油田分公司实验检测研究院，新疆 克拉玛依，834000；
3. 新疆砾岩油藏重点实验室，新疆 克拉玛依，834000

第一作者，E-mail：2362552662@qq.com

* 通信作者，E-mail：xunkang@csu.edu.cn

2023-09-07 收稿；2024-01-15 修回；2024-01-17 接受

基金项目：国家自然科学基金项目(42272179)

中图分类号：P618.13　　文章编号：2096-8523(2025)02-0285-20　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20230518

摘　要：砾岩作为一类特殊的油气储集层，理解其沉积成因及发育规律对于准确预测优质储层的分布至关重要。基于岩心描述、岩矿鉴定、重矿物与粒度分析等研究，结合测井、录井等资料，明确了准噶尔盆地玛东斜坡区下三叠统百口泉组砾岩的沉积特征、空间展布规律与沉积物来源，厘清了该组砾岩的沉积机制并构建了其沉积模式。研究结果表明，玛东斜坡区百口泉组沉积于浅水扇三角洲，扇体发育了扇三角洲平原、扇三角洲前缘、前扇三角洲 3 个亚相，包括泥石流、水上辫状河道、洪泛沉积、水下泥石流、水下主干河道、水下分支河道、砂质碎屑流、远砂坝、前扇三角洲泥共 9 种沉积微相，其中包含了 10 类岩相。结合研究区早三叠世由干旱转为湿润的古气候背景，确定该组砾岩为洪水诱发重力流的沉积产物，具有岩相组合复杂、事件性沉积标志显著、沉积模式受古气候主导、后期湖浪改造明显等特点。在空间上，玛东斜坡区百口泉组砾岩自下而上粒度逐渐变细，体现出湖侵的退覆式沉积序列，同时呈现出泥石流、水下泥石流和水下河道沉积多期叠置的特点。研究结果可为下一步油气勘探开发提供理论支持。

关键词：砾岩成因；扇三角洲；洪水成因重力流；百口泉组；准噶尔盆地；玛东斜坡区

砾岩作为一类特殊的油气储集层，在深层–超深层油气勘探中具有不可或缺的位置[1-3]。在全球范围内，砾岩沉积成因复杂多样，例如：近物源区的冲积扇砾岩，如美国堪萨斯州 Garfield 砾岩、我国准噶尔盆地克拉玛依油田二叠系–三叠系砾岩[4-5]；以冲积扇为物源的扇三角洲砾岩，如松辽盆地徐家围子砾岩、玛湖凹陷百口泉组砾岩[6-7]；在断陷湖盆深陷期的近岸水下扇砾岩，如渤海湾盆地东营凹陷北部陡坡带砾岩、廊固凹陷古近系大兴砾岩[8-9]；与波浪和潮汐作用有关的滨海沉积砾岩，如加拿大西部深盆地的白垩系砾岩、挪威北部巴伦支海侏罗系砾岩[10-11]；与河流作用相关的辫状河道、辫状河三角洲沉积砾岩，如英格兰西南部威塞克斯盆地二叠系砾岩、美国东德克萨斯油田上白垩统砾岩[12-13]。此外，滑塌扇、海底扇、重力流水道、海啸以及高能风暴、冰川成因重力流等均能形成大型砾岩体，具备形成优质储层的潜力[14-18]。

在陆相湖盆沉积体系中，砾岩具有近源、快速堆积，纵向上沉积厚度变化大，岩相变化多样，组分以及结构复杂等特点[19-20]。例如，冲积扇成因砾岩由季节性洪水事件形成，整体位于水上，受气候、地形、构造活动等影响，以洪积层理、支撑砾岩等为特征[21-23]。

著录信息：代超，康逊，谭静强，等. 浅水扇三角洲沉积特征及演化规律：以准噶尔盆地玛东斜坡区百口泉组为例 [J]. 地质科技通报，2025，44(2)：285-304.
DAI Chao, KANG Xun, TAN Jingqiang, et al. Sedimentary characteristics and evolution of the shallow-water fan delta: A case study of the Baikouquan Formation in the Madong slope area, Junggar Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(2): 285-304.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjqb.cug.edu.cn

近岸水下扇砾岩是由洪水携带的碎屑物质直接入湖堆积形成，整体位于水下且多夹于泥岩之中，砾岩为混杂堆积结构，具粒度向上变细的正旋回[8, 24]。而扇三角洲沉积砾岩则是受冲积扇物源供给形成，部分位于水上，部分位于水下，可能同时具有多种沉积机制[7, 25]。可见，近源区的砾岩储集层非均质极强，其沉积过程从根本上决定了其物性差异很大，因此深入理解其成因及演化规律对于明确优质储层的分布至关重要[2-3]。以准噶尔盆地玛湖凹陷为例，该地区下三叠统百口泉组发育一套厚度为 140 ~ 240 m，延伸超过数百公里的砾岩储集层，如此大规模的砾岩体其沉积成因及模式引起了众多沉积学家的关注[7, 25-26]。前人研究认为该凹陷北部，西斜坡区百口泉组砾岩属于浅水扇三角洲成因，同时发育有重力流、牵引流 2 类沉积机制[27-28]。不同于传统的 Gilbert 型和深水斜坡型等小型、陡坡的扇三角洲沉积体系，浅水扇三角洲是指具有较浅的水深、缓慢倾斜的扇三角洲前缘以及以顶积为主的一类特殊的扇三角洲沉积体系[29-31]。基于野外观测、水槽模拟实验和数值模拟等方法目前已开展了一定研究，然而深入剖析扇三角洲体系中砾岩沉积动力学成因的研究仍较为有限，特别是对陆相浅水湖盆重力流沉积的诱发机制、流体类型转化等方面的认识仍有明显不足[32-34]。因此，本研究选取玛湖凹陷东斜坡区（简称玛东斜坡区）百口泉组开展研究，基于精细的岩心观察与素描，结合岩矿鉴定、粒度分析、重矿物分析和测井相识别等方法，以明确玛东斜坡区百口泉组砾岩储集层的岩相类型及特征、沉积相展布及演化规律、沉积物来源，进而阐明砾岩成因机制并构建沉积模式，以期为下一步油气勘探开发提供理论支持。

1　地质背景

玛湖凹陷是准噶尔盆地西北缘最富生烃的凹陷之一，其凹陷周缘及斜坡区是油气勘探的重点区域[35]。玛湖凹陷东斜坡区位于玛湖凹陷东侧，东接夏盐凸起，南邻达巴松凸起（图 1a）。自晚石炭世开始，玛湖凹陷在泥盆系褶皱基底之上接受沉积，形成一套火山岩及碎屑岩层序[36]。在海西运动末期，准噶尔–吐鲁番板块向哈萨克斯坦板块俯冲、碰撞，在西北缘形成了一系列古隆起以及逆冲断层[7]。早三叠世，随着构造的隆升，位于乌伦古坳陷和中央坳陷之间的陆梁隆起成为一个较稳定的剥蚀供源区，为玛湖凹陷东侧提供了充足的物源，进而在东斜坡区形成了夏盐扇、达巴松扇两大扇三角洲沉积体系[37]。地层整体呈东南倾的平缓单斜，局部地区发育背斜或鼻状隆起，存在多套 NE-SW 向的断裂系统，具备形成大型油气藏的有利构造条件[38-39]。

玛湖凹陷东斜坡区三叠系从下到上依次划分为百口泉组（T_1b）、克拉玛依组（T_2k）、白碱滩组（T_3b），其中下三叠统百口泉组与下伏的二叠系为角度不整合接触（图 1b），目的层位百口泉组自下而上又可细分为百一段（T_1b_1）、百二段（T_1b_2）和百三段（T_1b_3）。

2　岩相与沉积相特征

2.1　岩相划分

岩相是岩石物理相的简称，是组成油气储层的最基本单元，其反映了岩石形成时的水动力条件、搬运方式等，是分析沉积过程的第一要素[31, 40]。在对岩心进行细致观察与描述的基础上，本研究根据岩石的颜色、结构和组分、粒度、支撑方式和沉积构造等特征对研究区砂砾岩进行了划分，并将其划分为 3 类 10 种岩相。

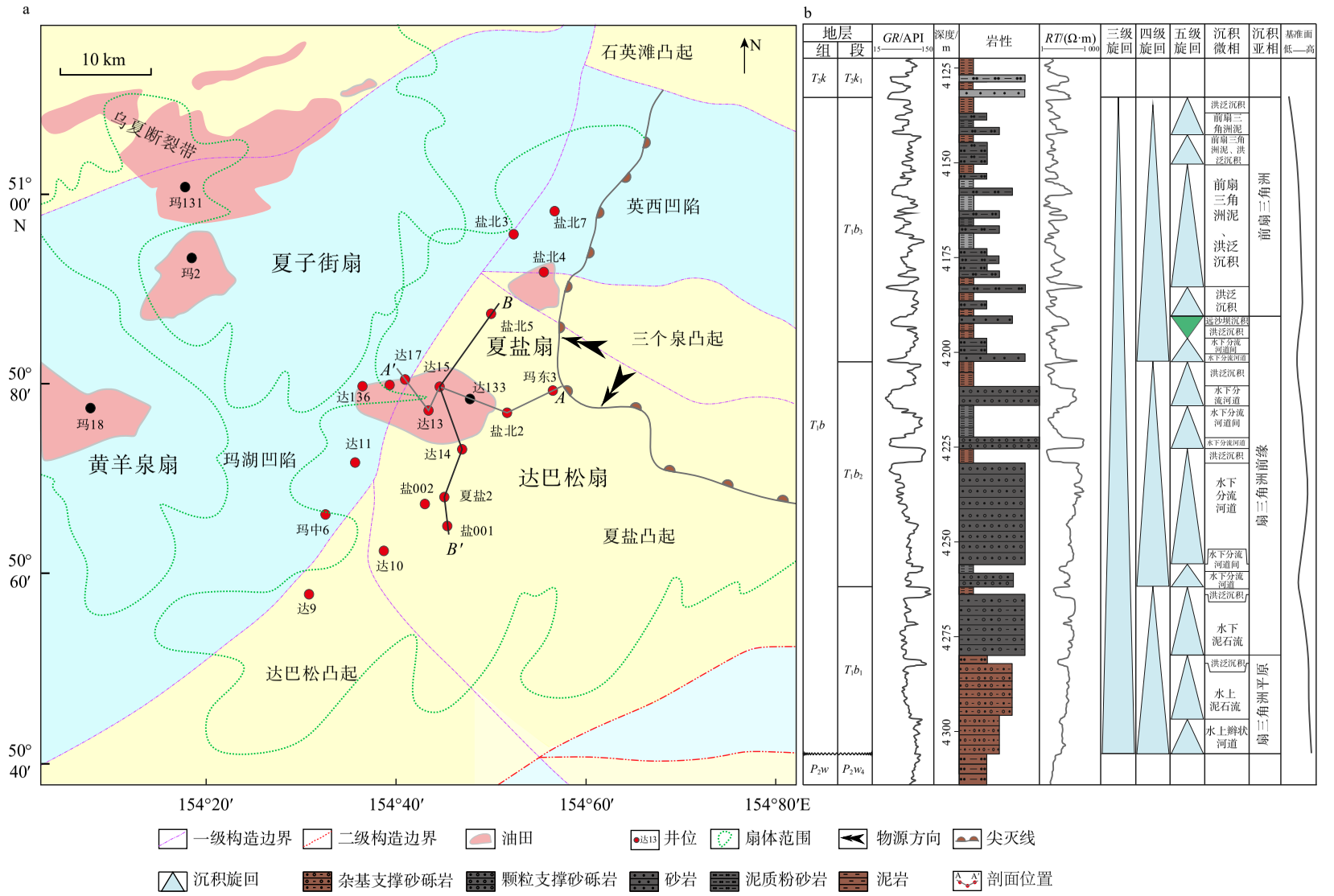
2.1.1　砾岩类

（1）杂基支撑中砾岩（Gmm）

颜色为红褐色或灰绿色，砾石体积分数>70%，粒径为 10 ~ 70 mm，砾石之间多为泥质杂基（体积分数为 10% ~ 20%），砂质体积分数<10% ，砾石磨圆及分选很差，整体呈杂基支撑。砾石颗粒大小混杂，整体呈块状构造，偶见逆粒序（图 2）。其粒度概率曲线为“缓慢上拱形”，曲线无明显截点，不具有牵引流沉积的“三段式”的特征，颗粒大小混杂，整体为悬浮搬运。其孔隙度为 1.30% ~ 11.40%，均值为 6.93%，渗透率为 0.001×10^{-3} ~ 75.8×10^{-3} μm^2，均值为 0.70×10^{-3} μm^2，物性较差（图 3）。

（2）颗粒支撑中砾岩（Gcm）

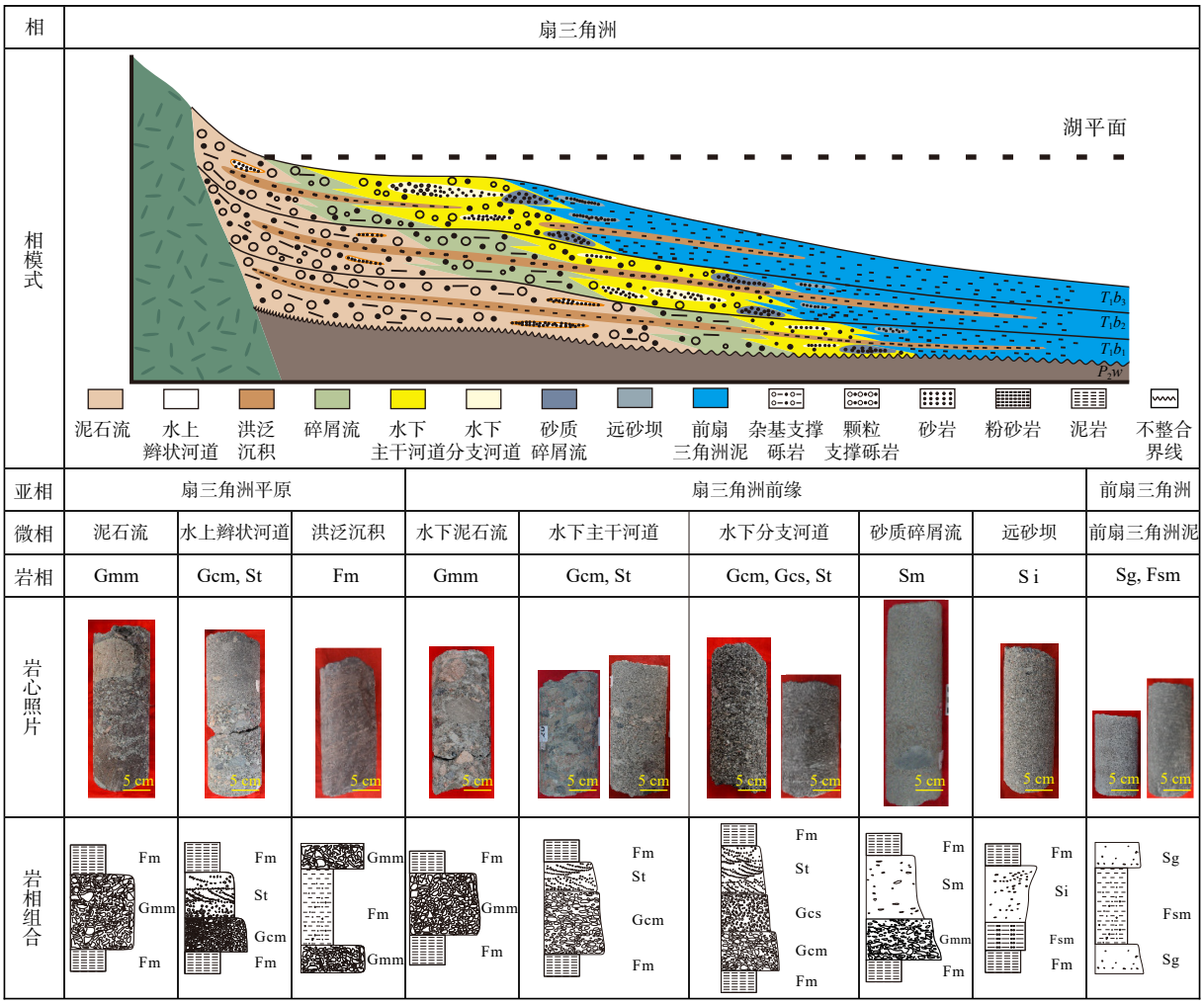
颜色为红褐色或灰白色，砾石体积分数>70%，粒径为 10 ~ 30 mm，砾石之间主要为砂质（体积分数约 20%），泥质体积分数<10%，砾石磨圆以及分选较差，整体呈颗粒支撑。砾石之间常呈叠瓦状排列，彼此相交构成槽状交错层理，整体呈正粒序（图 2）。其粒度概率曲线为“三段式”，其中“滚动”组分主要为中砾，其体积分数约 40%，“跳跃”组分主要为细砾，其体积分数达 30% ~ 40%，“悬浮”组分主要为粗砂至细砂，其体积分数达 20%。其孔隙度为 4.90% ~ 15.10%，均值为 9.27%，渗透率为 0.017×10^{-3} ~ 29.5×10^{-3} μm^2，均值为 0.75×10^{-3} μm^2，物性中等（图 3）。



T_2k_1. 中三叠统克拉玛依组一段; T_1b_3. 百口泉组百三段; T_1b_2. 百口泉组百二段; T_1b_1 百口泉组百一段; P_2w. 中二叠统下乌尔禾组; P_2w_4. 中二叠统下乌尔禾组四段; 下同

图 1　玛湖凹陷基本地质背景[35](a) 与百口泉组岩性柱 (b)（以达 13 井为例）

Fig. 1　Geological background of the Mahu Sag [35] (a) and lithologic histogram of the Baikouquan Formation (b) (taking Da13 Well as an example)



Gmm. 杂基支撑中砾岩; Gcm. 颗粒支撑中砾岩; St. 槽状交错层理砂岩; Fm. 块状泥岩; Gcs. 砂质细砾岩; Sm. 块状砂岩; Si. 逆粒序砂岩; Sg. 含泥细砂岩; Fl. 纹层状粉砂岩; Fsm. 粉砂质泥岩; 下同

图 2　玛东斜坡区百口泉组扇三角洲内部成因单元综合图版

Fig. 2　Comprehensive map of internal genetic units in fan deltas of the Baikouquan Formation, Madong slope area

(3)砂质细砾岩(Gcs)

颜色为灰白色或灰黑色, 砾石体积分数>50%, 粒径为 3 ~ 8 mm, 砾石间基本为砂质(体积分数>40%), 泥质体积分数<10%, 砾石磨圆以及分选好至中等, 整体呈颗粒支撑。单个沉积序列底部发育冲刷面, 整体呈正粒序(图 2)。其粒度概率曲线为“三段式”, 其中“滚动”组分为中砾至细砾, 体积分数为 5% ~ 30%, “跳跃”组分主要为细砾至中砂, 体积分数达 65% ~ 90%, “悬浮”组分为细粉砂, 体积分数<5%。其孔隙度为 6.40% ~ 18.00%, 均值为 10.98%, 渗透率为 0.041×10^{-3} ~ 113×10^{-3} μm^2, 均值为 1.77×10^{-3} μm^2, 物性最好(图 3)。

2.1.2　*砂岩类*

(1)槽状交错层理砂岩(St)

颜色为红褐色或灰白色, 包括细砾质粗砂岩、含砾中–粗砂岩、中–细砂岩, 杂基体积分数<15%, 分选以及磨圆较好, 砾石之间整体呈颗粒支撑, 常见槽状交错层理, 一般具正粒序(图 2)。其粒度概率曲线为“三段式”, “滚动”组分主要为粗砾至中砂, 体积分数为 15% ~ 35%, “跳跃”组分主要为粉砂至粗砂, 体积分数为 45% ~ 80%, “悬浮”组分主要为黏土至细砂, 体积分数为 5% ~ 20%(图 3)。

(2)块状砂岩(Sm)

颜色为灰白色, 包括含砾中–粗砂岩、中–细砂岩, 杂基体积分数为 3% ~ 20%, 分选以及磨圆较好(图 2)。其粒度概率曲线为缓慢上升的“准一段式”, 显示出颗粒大小混杂、悬浮搬运的重力流沉积特点(图 3)。

槽状交错层理砂岩和块状砂岩的孔隙度为 5.30% ~ 17.00%, 均值为 10.79%, 渗透率为 0.011×10^{-3} ~ 14.8×10^{-3} μm^2, 均值为 0.72×10^{-3} μm^2, 物性较好(图 3)。

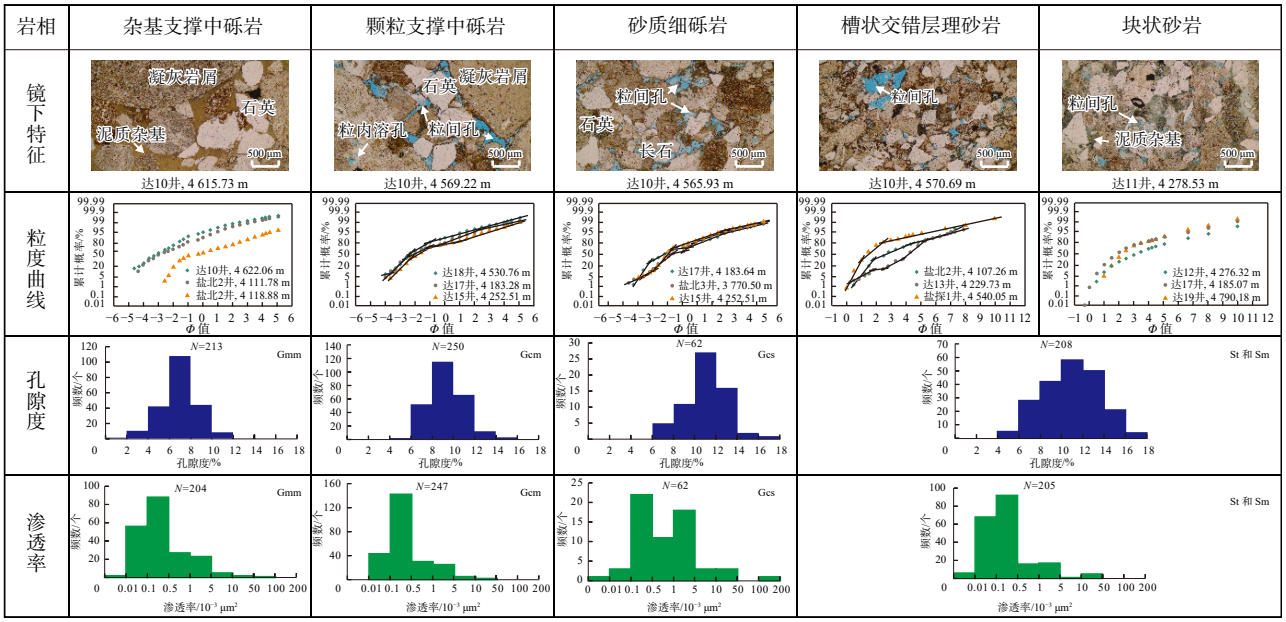


图 3　玛东斜坡区百口泉组主要储集岩相镜下、粒度及物性特征

Fig. 3　Lithofacies, grain size and physical properties of the Baikouquan Formation reservoir in the Madong slope area

(3)逆粒序砂岩(Si)

颜色为灰白色，主要为含砾中砂岩、杂基体积分数为 3%～20%，砂石整体分选以及磨圆中等，以逆粒序为主要识别标志，主要表现为粒度向上逐渐变粗，同时伴随着泥砾含量增加和粒径变大(图 2)。研究区逆粒序砂岩通常与正粒序砂岩构成逆–正粒序层，二者逐渐过渡且无明显的变化面，这种现象可能是在流体转化过程中，含碎屑流体由强黏性向弱黏性变化所形成的[31]。

(4)含泥细砂岩(Sg)

颜色为灰白色或灰黑色，泥质杂基体积分数一般>15%，砂石磨圆以及分选较好，整体呈正粒序(图 2)。一般只在粒序层底部出现砾石，多呈长轴水平的扁圆状，多个正粒序层叠加发育。该岩相是在流速逐渐减慢的过程中，首先沉积粗粒成分，其次沉积细粒物质，被认为是紊流搬运和沉积的结果[31]。

(5)纹层状粉砂岩(Fl)

颜色为灰白色，泥质杂基体积分数一般>25%，砂石磨圆以及分选较好。呈多期叠置发育的特点，以密集而互相平行的纹层为主要识别标志(图 4)。该岩相是在稳定的水动力条件下缓慢沉降形成的，多出现于扇三角洲前缘或前扇三角洲亚相，由砂岩向泥岩过渡的水流缓慢地带[40]。

2.1.3　泥岩类

研究区泥岩类型可分为块状泥岩(Fm)和粉砂质泥岩(Fsm)，颜色为红褐色或深灰色，底部常含细砾(体积分数 10%～20%)，以泥质或粉砂质为主，无明显沉积构造，多呈块状堆积，受阵发性洪水影响，该岩相在研究区广泛分布(图 2, 5)。

2.2　岩相组合与沉积相

明确各类岩相在垂向上的叠置形式是研究沉积序列的重要方法[7]。通过对岩心的细致观察与描述，笔者认为研究区百口泉组沉积于浅水粗碎屑扇三角洲体系，具体又可细分为 3 个亚相和 9 种岩相组合。

2.2.1　扇三角洲平原

扇三角洲平原是指扇三角洲沉积体系中的水上部分，由冲积作用主导[41]。根据沉积成因及岩相类型共分为泥石流沉积、水上辫状河道沉积、洪泛沉积 3 类。

(1)泥石流沉积(Gmm)

水上泥石流是指洪水携带大量的泥、砂、砾混合物，在山口形成的席状沉积物，具有重力流沉积特征，是扇三角洲平原的主体[31]，由红褐色杂基支撑砾岩组成，常呈厚层状产出(图 6, 7)。

(2)水上辫状河道沉积(Gcm-St-Fm)

水上辫状河道沉积是指扇三角洲平原之上的辫状河流沉积，具有牵引流沉积特征[25, 27]。底部为红褐色颗粒支撑中细砾岩向上逐渐过渡到红褐色槽状交错层理砂岩，顶部为褐色泥岩(图 2, 6)。颗粒之间排列有序，粒度向上逐渐变细，具有河流相典型的二元结构。

(3)洪泛沉积(Gmm-Fm)

洪泛沉积是指洪泛期洪水溢出辫状河道之后在

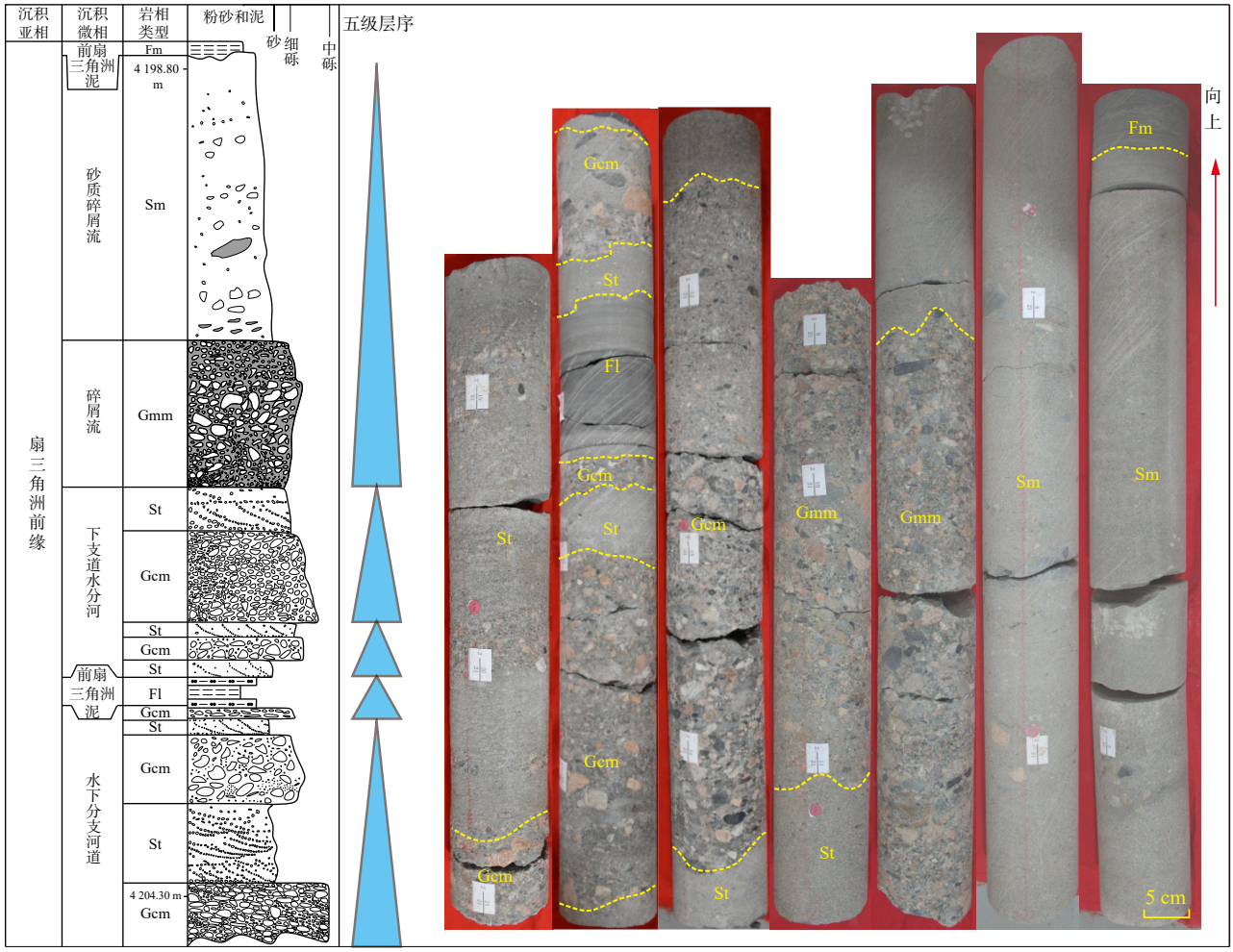


图 4　玛东斜坡区百口泉组典型岩相组合（以达 133 井为例）

Fig. 4　Typical lithofacies assemblages of the Baikouquan Formation in the Da133 Well of the Madong slope area



图 5　玛东斜坡区百口泉组典型岩相组合（以达 10 井为例）

Fig. 5　Typical lithofacies assemblages of the Baikouquan Formation in the Da10 Well of the Madong slope area

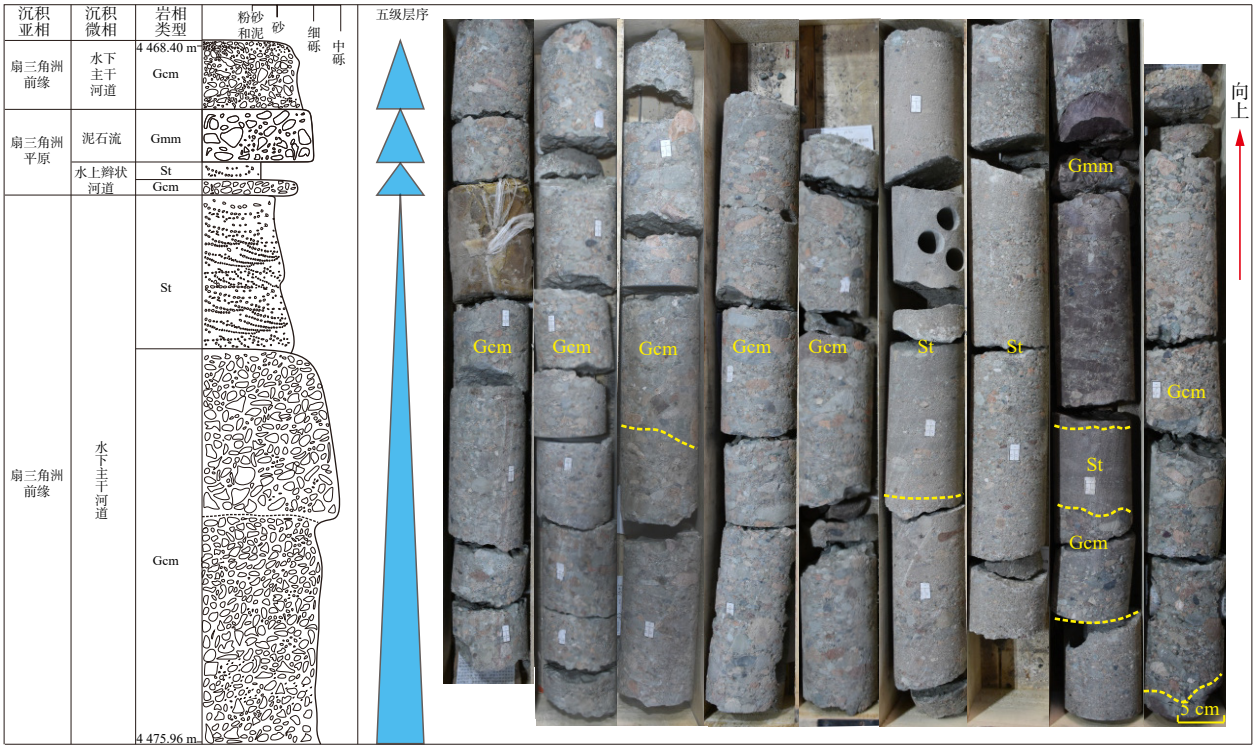


图 6　玛东斜坡区百口泉组典型岩相组合（以玛中 6 井为例）

Fig. 6　Typical lithofacies assemblages of the Baikouquan Formation in the Mazhong6 Well of the Madong slope area

河道侧缘沉积而形成的红褐色粉砂岩、泥岩[31]（图 2, 5）。由于季节性洪水的频发，洪泛沉积在研究区大面积分布（图 7, 8）。

2.2.2　扇三角洲前缘

扇三角洲前缘是指在扇三角洲中时而处于水上、时而处于水下的部分，是扇三角洲的主体[7, 42]，可细分为 5 种岩相组合。

（1）水下泥石流沉积（Gmm）

水下泥石流沉积是泥石流在水下的延伸，又称碎屑流沉积，其沉积特征与泥石流类似，具有重力流沉积的特征[3-4]。主要岩相为灰绿色杂基支撑中砾岩，顶部有时过渡为水下河道间的深灰色块状泥岩（图 2）；或者在扇体退积过程中接受下一期水下河道的沉积，从而向上过渡为颗粒支撑中砾岩（图 5）。

（2）水下主干河道沉积（Gcm-St-Fm）

水下主干河道是扇三角洲前缘的主要组成部分，分布范围较广，是水动力条件较强的水下河道沉积，属于牵引流沉积[25, 28]。底部为灰白色颗粒支撑中砾岩向上逐渐过渡为槽状交错层理砂岩，顶部为深灰色泥岩（图 2）。具多期叠置的特征，单个河道沉积序列粒序向上逐渐变细，具有河流相沉积的典型的二元结构（图 5）。

（3）水下分支河道沉积（Gcm-Gcs-St-Fm）

水下分支河道是水动力条件较弱的的水下河道沉积，粒度相较于主干河道较细，同属于牵引流沉积。底部为颗粒支撑中细砾岩、砂质细砾岩向上过渡为槽状交错层理砂岩，顶部为深灰色泥岩（图 5）。具多期叠置的特征，单个河道具有典型的二元结构（图 5）。

（4）砂质碎屑流（Sm-Fm）

砂质碎屑流是指富砂质、具塑性流变性质的一类重力流沉积类型，常由于扇三角洲前缘沉积物受构造作用而滑动、垮塌、再搬运而形成的一套组合[43]。底部为块状砂岩，块状砂岩内部无明显沉积构造且多见泥质碎屑，顶部与深灰色泥岩呈突变接触（图 2, 4）。

（5）远砂坝沉积（Fsm-Fl-Si）

远砂坝沉积是水下河道向湖盆延伸而在河口形成的沉积类型[28]。沉积物粒度较细，底部为粉砂质泥岩、粉砂岩，向上过渡为逆粒序的砂岩，单个沉积旋回呈现出下细上粗的反韵律特征（图 2）。远砂坝沉积一般位于河口砂坝前较远的位置，粒度较细，沿层理面可见较多的植物碎屑。

2.2.3　前扇三角洲

前扇三角洲是扇三角洲前缘向浅湖区过渡的区域，处于浪基面之下，沉积速率较慢，一般是扇三角洲沉积体系中分布最广、沉积最厚的地方，主要发育浅湖相悬浮沉积，主要岩相为深灰色泥岩[7]（图 2, 5）。

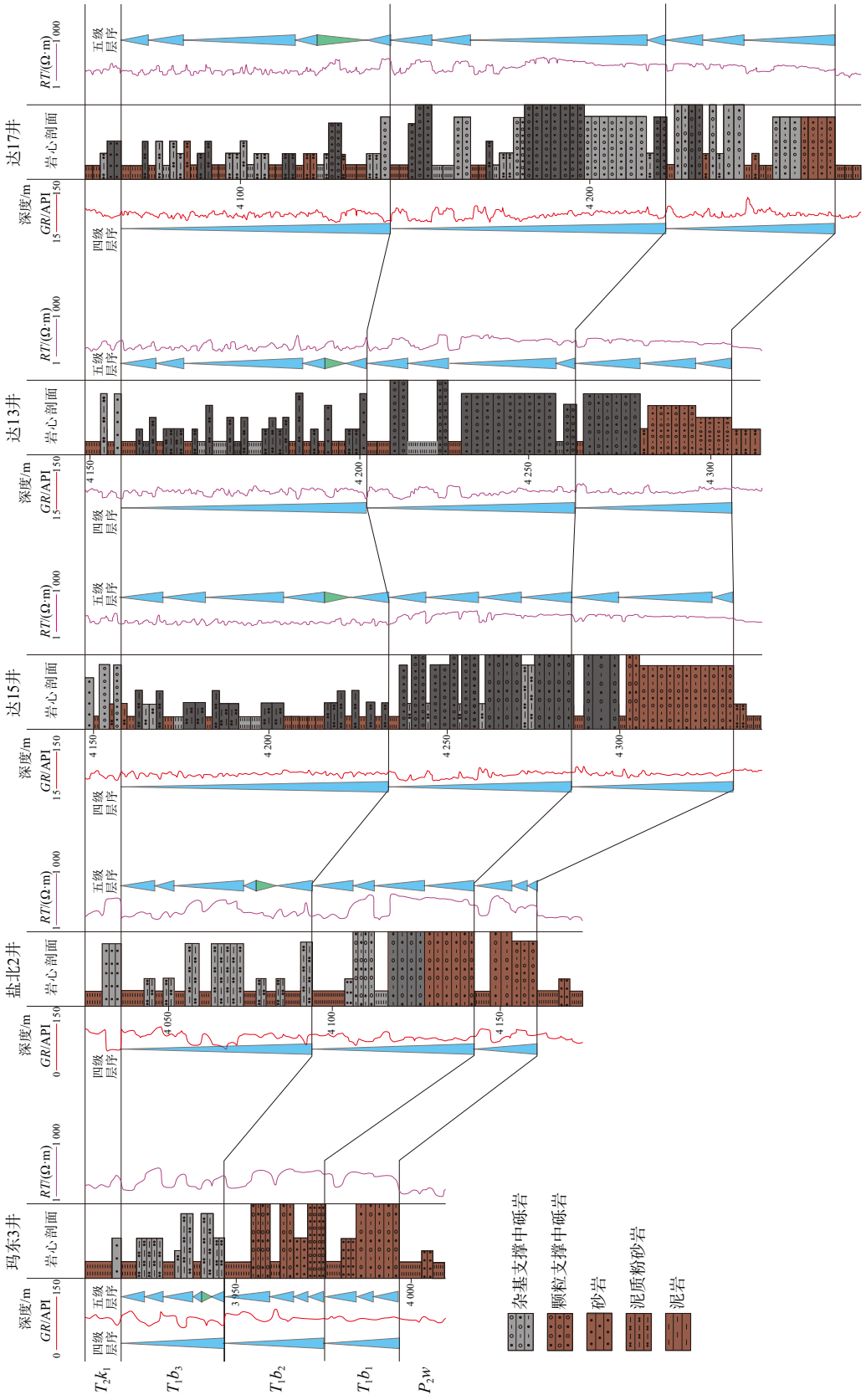


图 7　玛东斜坡区百口泉组层序划分对比剖面（*A*−*A*′剖面位置见图 1a）

Fig. 7　Sequence stratigraphic division in the cross section of the Baikouquan Formation in the Madong slope area

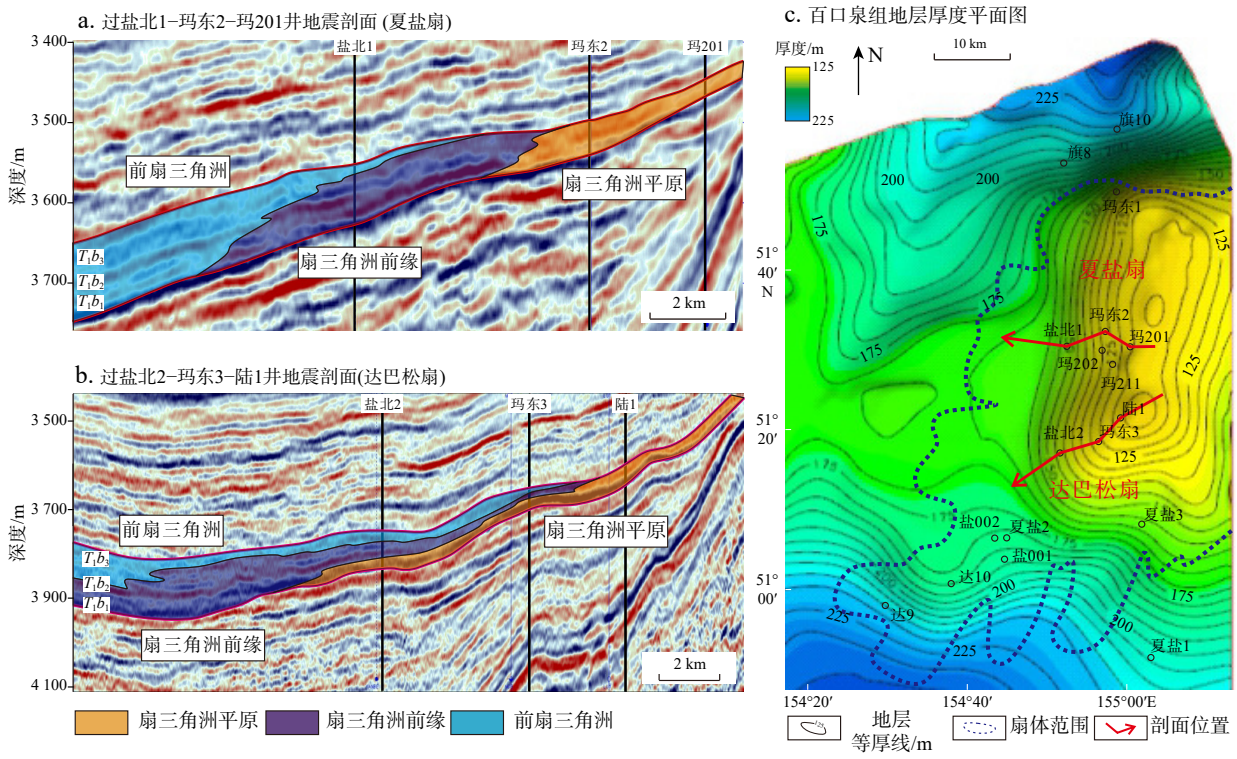


图 8　玛东地区百口泉组夏盐扇和达巴松扇地震剖面

Fig. 8　Seismic profiles of the Xiayan fan and Dabasong fan of the Baikouquan Formation in the Madong slope area

3　层序地层格架的建立

层序地层格架的建立是研究高分辨率地层学的基础，同时也是进行地层等时对比研究的关键[44]。综合岩性、测井曲线特征、录井资料以及相关古环境研究的资料，通过对岩心界面、测井层序界面以及地震反射面等的识别，将研究区百口泉组划分为1个三级层序、3个四级层序以及13个五级层序。

3.1　层序界面的识别

3.1.1　三级层序界面的识别

三级层序主要是由海平面或湖平面升降变化以及沉积物供给速率变化引起的，研究区百口泉组总体上是一个水进的退积旋回，基于测井、录井以及地震资料的研究表明，百口泉组为一个三级层序[45]。其顶界面为持续水进形成的湖泛面，主要识别标志是百三段沉积末期的一套细粒沉积与克下组的一套灰色砂砾岩沉积的转换界面，测井曲线上表现为低电阻率泥岩突变为高电阻率砂砾岩段的特征(图 1b, 7)。其底界面为二叠系与三叠系之间的角度不整合界面，测井上表现为 *RT* 曲线由低幅齿型变为高幅箱型(图 1b, 7)。

3.1.2　四级层序界面的识别

四级层序属于区域性的高频旋回层序，是高精度地层格架中的基本单元[44]。本研究主要依据岩性、测井曲线的响应特征，将研究区百口泉组划分为3个四级层序，分别对应百一段、百二段和百三段。百一段四级旋回底界为三级层序界面底部，岩性以厚层、巨厚层的灰褐色杂基支撑砂砾岩为主，测井曲线特征为低伽马、高电阻率的厚层箱型；顶界为褐色泥岩，测井曲线特征为低电阻率的锯齿型(图 7)，说明百一段表现为一个水进的过程，水动力条件不稳定。

百二段四级旋回底界为百一段低阻褐色泥岩与百二段砂砾岩的岩性突变界面，顶界为褐色泥岩与上覆百三段砂岩、粉砂岩岩性界面。该旋回岩性主要为灰色颗粒支撑砂砾岩以及砂质细砾岩，其中夹少量深灰色河道间泥岩，测井曲线特征整体表现为低伽马、高电阻率的厚层箱型，但相较于百一段四级旋回，其 *RT* 与 *SP* 值整体增大，*GR* 值整体变小(图 7)，表明百二段依旧为一个水进过程，在可容纳空间增大的过程中沉积速率相对稳定。

百三段四级旋回岩性进一步过渡为以厚层的灰色、灰褐色泥岩以及粉砂岩为主，局部地区发育薄层颗粒支撑砂砾岩，该段粒度明显较细，测井曲线呈典型的钟型特征(图 7)，表明在大规模水进过程中，可容纳空间较大，而物源供给相对不足的情况。

3.1.3　五级层序界面的识别

五级层序是记录短期沉积旋回内，代表一次单一的进积到退积的沉积作用，对储集层储、盖组合的预测至关重要[44-45]。本研究主要依据岩性和沉积界面的变化（包括冲刷面、不同岩性的叠置样式等）以及相关变化在测井曲线上的响应，在百口泉组识别出 13 个五级层序（图 1b，7）。区内最常见的是水下分流河道沉积，其底部主要为颗粒支撑中砾岩，向上变为含砾砂岩及粉砂岩，表现为向上变细的正旋回沉积序列（图 4，5，6），其 *GR* 曲线主要为钟型（图 7）；其次在百三段，识别出多个由湖相沉积的粉砂岩到洪泛泥岩的沉积序列，被认为是在物源供给不足的情况下洪水成因重力流的产物。

3.2　层序地层格架的建立

通过对玛湖凹陷东斜坡区百口泉组各级层序界面的识别，以五级层序的精细对比为基础，三、四级层序界面作为地层等时对比标志，建立了研究区百口泉组高精度的等时层序地层对比格架（图 7），为百口泉组地层精细划分和对比以及沉积相研究提供了基础地质依据，结果如下：

（1）玛东斜坡区百口泉组两扇体从斜坡区向凹陷区推进的过程中，地层厚度逐渐增大，从约 70 m 增加至约 200 m，整体厚度变化较大。

（2）三级、四级层序界面较易识别，通常是厚层砂砾岩与泥岩的岩性突变界面，可以作为研究区地层等时对比的标志；而四级层序内部的五级层序对砂体的控制尤为重要，百二段内识别出的 4 个五级层序，其沉积时物源供给充足、水动力条件较为平稳，形成的水下河道砂体等时追踪性能较好，同时可以作为优质储层；而百一段和百三段砂体发育较少，应以等时洪水事件形成的区域性褐色泥岩作为对比标志，实践证明其同样具有良好的追踪性能。

（3）研究区百口泉组物源由洪水携带的碎屑物质供给，各类岩性的空间叠置样式复杂，同时由于季节性洪水突发性，增加了地层等时对比的难度。因此，在扇三角洲沉积体系中，由于同一砂体连续性较好，顺物源方向的地层等时对比可能得到较好结果，然而在横切物源方向地层格架的建立时，由于砂体发育的多样性以及构造运动的复杂性，地层等时对比存在难度，应以四级层序为控制并细化小层识别为基础。

总体而言，研究区百口泉组发育一个水进的退积三级层序，进一步可以划分为 3 个四级层序和 13 个五级层序，且五级层序大体上以上升半旋回为主，表现为以水下河道沉积与水下河道间沉积组合为主，该类型砂体分布广泛、连通性好、砂体厚度最大，是研究区主要的储集层。

4　沉积相空间展布特征

4.1　地震相解释

地震相是基于特定地震反射参数所限定的地层三维空间的反射特征，是沉积相及沉积特征在地震剖面上的反映，由于地下岩石物理相的改变会引起地震反射参数的变化，因此经过系统分析后可以将具有相似地震反射参数的单元划为同一地震相[46]。从两扇体地震剖面上可以看出，夏盐扇玛 201 井和玛东 2 井以及达巴松扇陆 1 井百口泉组地层在地震剖面上表现为中高频、中等振幅、连续反射的特征，对应扇三角洲平原亚相；夏盐扇盐北 1 井剖面表现为中低频、中弱振幅、弱连续反射特征，解释为扇三角洲前缘亚相；而两扇体向凹陷内部延伸的过程中，大部分地层在剖面上表现为中高频、中弱振幅、连续反射的特征，解释为前扇三角洲亚相（图 8）。

4.2　连井沉积相解释

基于单井岩相类型、组合等的分析与识别，综合测井、录井以及地震资料，在高精度的等时层序地层格架下，对研究区典型井进行单井沉积序列识别之后，结合研究区古地貌、古水流向，选取近 EW 方向（图 1a，*A*–*A*′剖面，玛东 3 井，盐北 2 井，达 15 井，达 13 井，达 17 井）和近 SN 方向（图 1a，*B*–*B*′剖面，盐北 5 井，达 15 井，达 14 井，夏盐 2 井，盐 001 井）2 条典型剖面展开连井沉积相横向对比。结果显示，玛东斜坡区扇体非玛北、玛西斜坡区扇体的延伸。

在近 EW 方向上，随着离物源区的距离越远，水体越深，岩性逐渐由红褐色杂基支撑砾岩转变为灰白色颗粒支撑砾岩、砂岩、深灰色泥岩，沉积环境由扇三角洲平原过渡为扇三角洲前缘及前扇三角洲，呈现出典型的退覆式沉积（图 9）。

在百一段沉积初期，靠近物源区的玛东 3 井和盐北 2 井，接受了大量山麓间泥石流的供给，沉积了大量红褐色杂基支撑砂砾岩和褐色泥岩，属于扇三角洲平原带；在百一段沉积末期，随着水体的加深，在达 14 井、夏盐 2 井和盐 001 井地区，大量泥石流沉积物直接入水堆积，沉积了灰绿色杂基支撑砂砾岩，同时还发育少量深灰色泥岩，指示该地区属于扇三角洲前缘带（图 9）。

在百二段沉积期，玛东 3 井由于处于构造高位

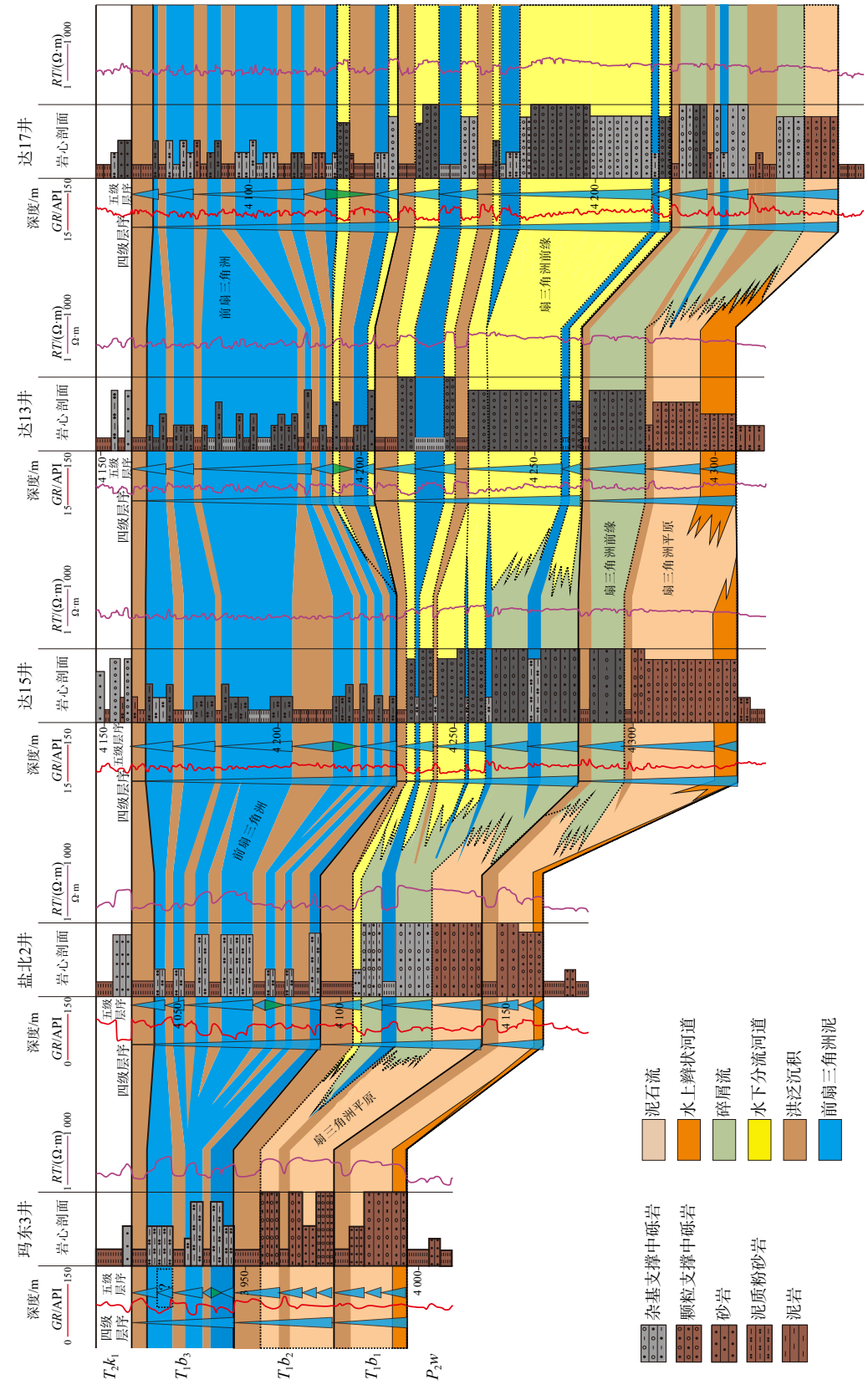


图 9　近 EW 方向沉积相展布特征（*A*–*A*′剖面位置见图 1a）

Fig. 9　Distribution of sedimentary facies in the EW trending cross section

且离物源较近，仍处于扇三角洲平原带，随着碎屑物质的持续输入，大量泥石流以及辫状河道沉积物向凹陷内部搬运，同时由于持续的水进，入水的泥石流沉积物经过不断地淘洗，泥质含量不断降低，物性逐渐变好，在达 15 井，达 13 井，达 17 井等井区发育大量多期叠置的水下河道砂体，成为油气勘探的有利区块。

在百三段沉积期，物源供给逐渐减弱，同时水体进一步加深，整个研究区发育以悬浮沉积形成的深灰色泥岩和洪泛沉积形成的红褐色泥岩为主，沉积环境以前扇三角洲和浅湖相为主(图 9)。

在近 SN 方向上，玛东地区百口泉组体现出泥石流、水下泥石流、水下河道沉积多期叠置的特点(图 10)。在百一段沉积期，各个井区均接受了巨厚层的泥石流沉积，而在扇三角洲平原河道间沉积了大量洪泛泥岩，随着水体逐渐加深，除位于构造高位的盐北 5 井外，其余井位均接受了多期直接入水的泥石流沉积，形成了大量灰绿色杂基支撑砾岩，同时在河道间沉积了深灰色泥岩。

在百二段沉积期，盐北 5 井处于扇三角洲平原，其余井区均处于扇三角洲前缘，自下至上存在多期叠置的水下泥石流、水下分流河道，由灰绿色杂基支撑砂砾岩向上过渡为灰白色颗粒支撑砂砾岩，同时河道的厚度、粒度逐渐变小，表明物源的供给逐渐减弱，同时水动力条件也逐渐减弱，沉积了砂质细砾岩以及槽状交错层理砂岩，物性较好，成为油气勘探的主要目标(图 10)。

在百三段沉积期间，构造活动逐渐减弱，水体进一步加深，盐北 5 井、夏盐 2 井和盐 001 井由于离物源较近且处于斜坡区，仍发育多期水下分支河道，岩性以灰白色颗粒支撑砂砾岩、河道间深灰色泥岩为主，其余井区岩性以褐色泥岩、湖相泥岩为主，指示其处于前扇三角洲的沉积环境(图 10)。

5 沉积物来源

前人基于古构造、古地貌、古水流等特征，认为在玛湖凹陷东斜坡区发育夏盐扇和达巴松扇两大扇体，并且认为 2 个扇体的物源均来自于陆梁隆起[27, 37]。本研究基于岩矿组成、重矿物含量变化特征，认为 2 个扇体在物源及母岩性质上存在一定差异。

5.1 岩矿组成特征

碎屑岩中的碎屑组分特征能够反映物源区的特征、搬运距离等，同时不同砾石的成分、含量是反映母岩岩性的直接证据[47]。通过对研究区 14 口井约 160 m 长岩心的细致观察、70 余片岩石薄片的精细鉴定，明确了研究区 2 个扇体百口泉组砾岩储集层的岩矿组成特征(图 11)。研究结果表明，2 个扇体在碎屑组分上无明显差异，均以岩屑砂砾岩为主，岩屑体积分数为 48% ~ 100%，均值为 83.11%，碎屑石英、长石体积分数分别为 0 ~ 28%，0 ~ 24%，均值分别为 9.22%，7.67%，其中达巴松扇石英、长石的体积分数略高于夏盐扇，表明其成分成熟度较高，搬运距离较远。在砾石成分上，夏盐扇以凝灰岩、中酸性喷出岩(霏细岩、安山岩、花岗岩和流纹岩)为主，达巴松扇同样以凝灰岩、中酸性喷出岩和变质岩为主，二者在砾石成分上无明显差异(图 11)。

5.2 重矿物分布特征

重矿物因其物理化学性质相对稳定，具有一定的抗风化和抗磨蚀能力，所以来自同一时期、同一母岩的重矿物组合具有相似性，可以通过重矿物组合来反映物源特征[37, 48]。研究结果显示，在百二段，夏盐扇和达巴松扇的重矿物组合存在明显差异：夏盐扇的重矿物组合以绿帘石−白钛石−钛铁矿组合为主，而达巴松扇的重矿物组合以白钛石−褐铁矿组合为主(图 12)。

总体而言，夏盐扇和达巴松扇在物源及母岩性质上存在一定差异，究其原因可能是夏盐扇同时受到陆梁隆起和玛北物源区的供给。一是基于火山岩地球化学的分析表明，陆梁隆起带火山岩类型主要是石炭系高钾钙碱性安山岩−英安岩组合，北部夏子街扇物源区火山岩类型为长英质火山岩，而夏盐扇火山岩类型为凝灰岩和中酸性火山岩(霏细岩、安山岩、花岗岩和流纹岩)，可能同时与 2 个物源剥蚀区具有亲缘性[49-50]；二是北部夏子街扇重矿物组合以绿帘石−褐铁矿−白钛矿−钛铁矿为主，夏盐扇则主要为绿帘石−白钛石−钛铁矿组合，两个扇体在重矿物主成分上较为相似。这些现象表明，达巴松扇可能直接由陆梁隆起剥蚀区供给，而夏盐扇除直接受到陆梁隆起剥蚀区物源供给外，有可能还接受北部物源的供给，因而显示出差异性(图 12)。

6 重力流诱发机制与沉积相模式

6.1 重力流诱发机制

在全球范围内，砾岩成因类型复杂，且其诱发因素、沉积机制各不相同，形成的砾岩体规模、岩相及沉积相各具特色[2-3]。如上所述，玛东地区百口泉组

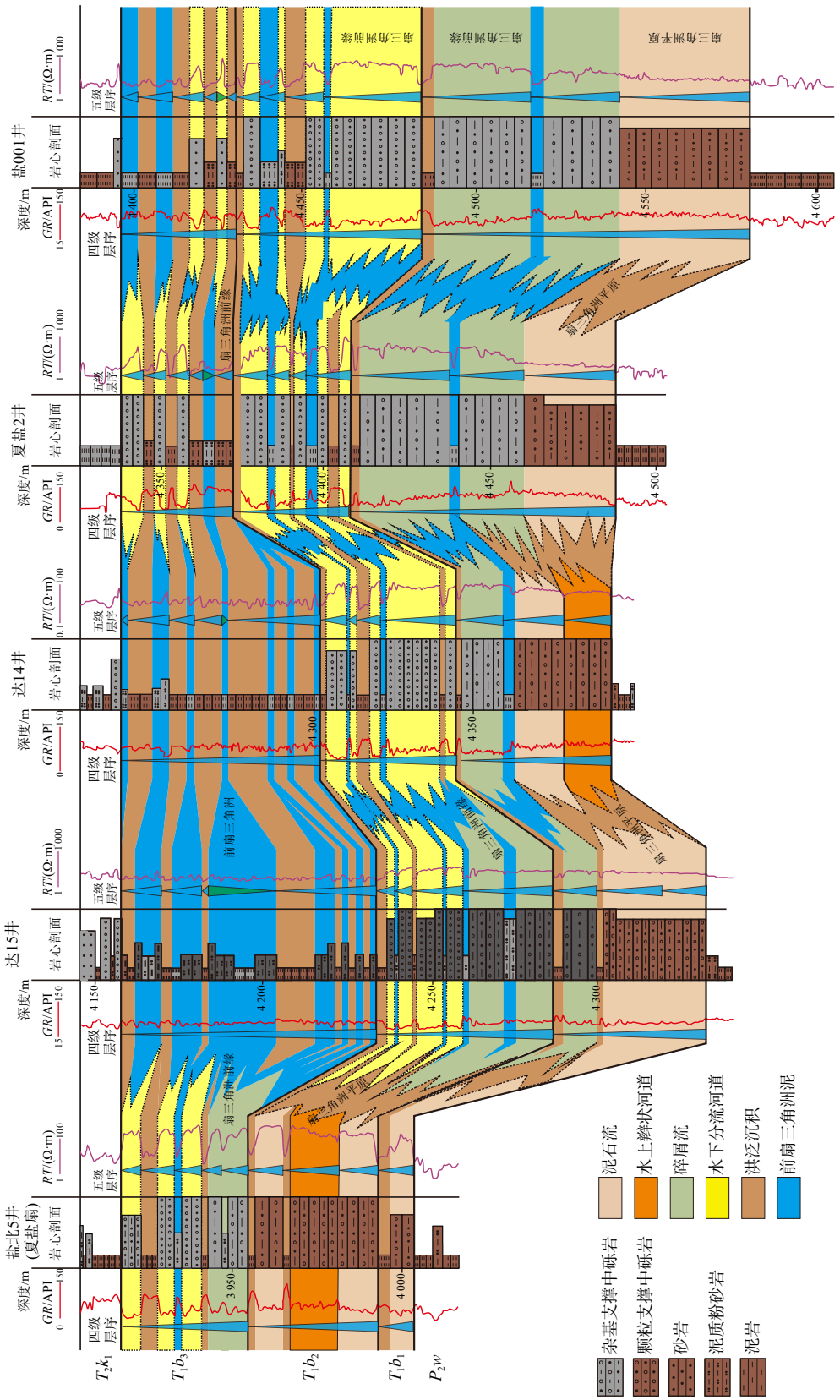


图 10　近 SN 方向沉积相展布特征（*B*–*B*′剖面位置见图 1a）

Fig. 10　Distribution of sedimentary facies in the SN striking cross section

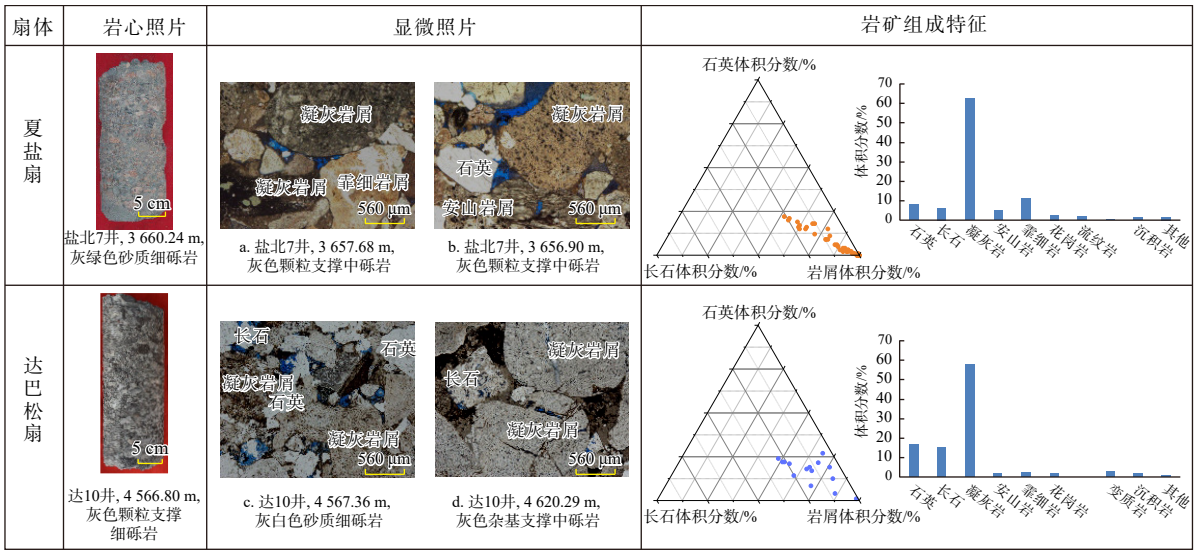


图 11　玛东斜坡区夏盐扇和达巴松扇岩矿组成特征

Fig. 11　Rock composition characteristics of the Xiayan fan and Dabasong fan in the Madong slope area

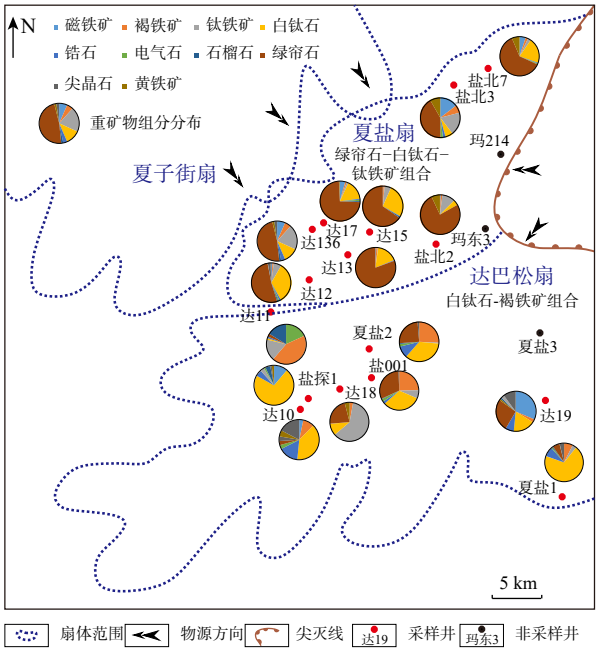


图 12　玛东斜坡区百二段重矿物组分分布特征

Fig. 12　Distribution characteristics of heavy mineral components in T_1b_2 in the Madong slope area

发育一套以重力流沉积为主的砾岩，然而对于该套砾岩体的重力流诱发机制仍不明确。典型砾岩体重力流成因包括冰川成因、滑塌成因、海啸成因、地震成因、洪水成因等[3, 14, 18, 51-54]。其中陆相湖盆中近源的砾岩体多属于洪水或滑塌成因，例如：冲积扇砾岩、近岸水下扇砾岩和扇三角洲砾岩等[22, 24, 29]。在扇三角洲沉积体系中，重力流的诱发多需要在扇三角洲平原之上存在陡坡或者强烈的构造运动使得碎屑物质在短时间内快速堆积[53-54]。然而，在玛东地区百口泉组沉积期，其古坡度为 1° ~ 3°[32]，除由偶发事件引起外，含碎屑流体具极大势能，否则在如此平缓的坡度下不足以诱发重力流沉积。此外，三叠纪时期玛东地区古构造活动较为微弱，凹陷进入沉积发展阶段，仅发育少量低幅度背斜和断鼻构造[55]，微弱的古构造活动同样不足以诱发碎屑物质的大规模堆积。因此，本研究认为玛湖凹陷东斜坡区百口泉组砾岩属于在缓坡之上洪水诱发重力流沉积的产物，具有以下几个特征：

（1）岩相组合类型复杂多样，事件性沉积特征显著。季节性洪水的频发对正常沉积分异过程的影响较为严重。例如，泥石流常见于扇三角洲平原，然而在远离物源区的水下河道之上仍能见到颗粒混杂堆积的泥石流沉积物（图 4）；水下泥石流常分布于湖平面附近，然而在水下河道砂体之中仍能见到呈逆粒序的杂基支撑砂砾岩（图 10）。此外，研究区褐色块状含砾泥岩的大规模分布（图 9, 10），表明其可能是由多期次特大洪水事件所形成的。

（2）古气候对洪水供给的主导作用。百一段和百二段沉积期间，处于干旱–半干旱气候，降水强度和频次较低，洪水的流量及含沙量也较低，同时物源区抬升接受强烈的剥蚀，风化作用增强[56]，碎屑物质供给充足，短暂洪水在缓坡之上可能形成水上辫状河道以及厚层泥石流沉积砂砾岩（图 4, 13a）；而在百三段沉积期间，研究区古气候逐渐温暖湿润[52]，降水强度和频次较高，扇体上河道由季节性河流变为常年有水河流，河水流量及含沙量增高，然而风化作用减弱，物源供给降低，导致沉积物粒度显著降低[57]

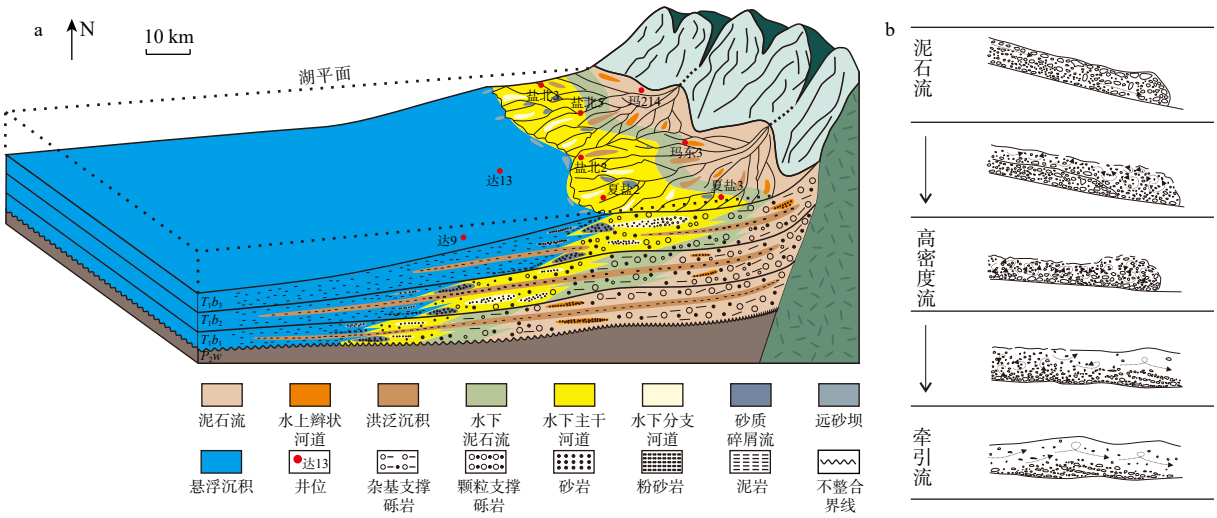


图 13　玛东斜坡区百口泉组砾岩成因模式 (a) 及运移过程示意图 (b)[54]

Fig. 13　Genetic model (a) and transport process (b) of conglomerate in the Baikouquan Formation, Madong slope area[54]

(图 13a)。此外, 高频次的洪水可能形成大面积展布的褐色泥岩[58](图 9, 10)。

(3)湖浪对沉积物的牵引改造特征明显(图 13b)。多期次季节性洪水以泥石流的形式所搬运的碎屑物质在近源区堆积形成杂基支撑砂砾岩以及泥岩, 在搬运的过程中流体逐渐被稀释, 转化为高密度流, 随后入湖后在波浪、水流的作用下沉积出具有牵引流性质的水下河道颗粒支撑砂砾岩[3, 31, 59], 其沉积物颜色、泥质杂基含量、沉积构造等发生显著改变, 物性逐渐变好, 具备形成优质储层的潜力(图 5, 6)。

洪水成因重力流广泛存在于粗粒三角洲以及沟槽沉积中[3, 40], 甚至在陆相湖盆深水区也有发育, 比如异重流沉积[60-61]。理解其发育特征及演化规律对于明确优质储层的分布至关重要。玛东斜坡区百口泉组这种洪水成因重力流沉积形成的杂基支撑砂砾岩的物性较差, 而经湖浪改造之后的颗粒支撑砂砾岩则物性较好, 成为油气勘探的“甜点”[62-64]。然而, 不同的古地理背景之下, 洪水成因重力流的诱发机制、发育特征及沉积模式各不相同[3, 23, 31], 因此更进一步的水槽模拟实验、基于现代沉积及露头的研究将是洪水成因重力流研究的重点。

6.2　与玛北、玛西扇体的差异

在陆相湖盆中, 古坡度、物源供给方式、水深等显著影响扇体的发育规模以及沉积特征, 在玛湖凹陷百口泉组各大扇体中则具体表现在重力流沉积的单层厚度及延伸范围、分布、湖浪改造程度的差异等[2-3, 59]。

(1)古坡度影响了沉积物搬运的速度以及距离, 控制着重力流沉积的规模。玛湖凹陷北斜坡与西斜坡区坡度相对较陡(玛西黄羊泉扇坡度为 1.9°、玛北夏子街扇坡度为 3.3°)[32], 阵发性洪水所携带的碎屑物质在陡坡下快速堆积, 在夏子街扇和黄羊泉扇发育了厚层、粒度较粗、延伸较短的重力流沉积(夏子街扇单层砂体厚度最大可达 20 m, 延伸长度不足 10 km); 而玛东斜坡区坡度则相对较缓(达巴松扇和夏盐扇缓坡区坡度为 1°左右)[32], 沉积物搬运速度较慢、搬运距离较长、沉积出一套厚度相对较薄、粒度相对较细、延伸较长的重力流沉积(达巴松扇单层厚度最大仅为 12 m, 延伸长度超 20 km)。

(2)物源供给方式影响着沉积物的搬运方式, 控制着重力流沉积的分布。玛西黄羊泉扇碎屑物质由物源区山口通道直接供给, 且颗粒支撑砂砾岩占比较高, 河流直接搬运形成的牵引流沉积占比较高, 表明物源区汇水面积较大, 以河流主导的冲积作用为主, 形成了以牵引流沉积为主、重力流沉积为辅的沉积特点; 玛东斜坡区 2 扇体碎屑物质由凸起上断裂沟槽通道供给, 水上辫状河道沉积形成的颗粒支撑砂砾岩占比较低, 以泥石流沉积形成的杂基支撑砂砾岩为主, 表明物源区汇水面积较少, 以洪流和片流主导沉积, 形成了以重力流沉积为主、牵引流沉积为辅的沉积特点。

(3)水深影响着湖浪对泥石流的改造程度, 控制着重力流沉积的保存。玛西黄羊泉扇以及玛北夏子街扇由于古坡度较陡、水体相对较深, 泥石流直接入水后受湖浪的改造程度较低, 重力流沉积的保存程度较好, 在岩心上可见整体固结的大段杂基支撑砂砾岩[62]; 玛东 2 扇体由于古坡度较缓、水体相对较浅, 泥石流直接入水后在湖平面附近受到了较强程度的

湖浪改造，重力流沉积的保存程度较差，在岩心上可见自下而上泥质含量逐渐降低、流体逐渐被“稀释”的特点(图 5)。

6.3　沉积相模式

扇三角洲沉积特征及模式与沉积时期古气候，沉积物供给、古坡度、古构造等息息相关，典型的扇三角洲沉积模式包括 Gilbert 型、深水斜坡型、浅水大陆架型扇三角洲等[30-31]。其中，Gilbert 型扇三角洲具典型的“三褶”结构(顶积层、前积层、底积层)，而前积层以倾斜的陡坎为特征[29]。在深水斜坡型扇三角洲模式中，存在一个斜坡将发育不良的扇三角洲前缘与前扇三角洲分隔开[65]。浅水大陆架型扇三角洲发育于大陆架之上，具有发育良好的扇三角洲平原、扇三角洲前缘以及前扇三角洲，同时可能受到波浪、潮汐的改造[53]。玛东地区百口泉组沉积时水浅、坡缓，同时具备重力流以及牵引流 2 类沉积机制，不符合上述 3 类典型的扇三角洲沉积模式。

综合前人对玛湖凹陷古地理背景的研究，本研究基于岩相类型及组合的识别、单井沉积相序、连井沉积相展布、沉积物来源的精细刻画，认为玛东斜坡区百口泉组沉积时期由于相对平缓的古地貌，为扇体的大规模展布提供了有利地形[27]，同时季节性的洪水为百口泉组提供了充足的碎屑物质，干旱向半干旱气候的转变导致湖平面的显著上升[66]，最终形成了一套浅水退覆式扇三角洲沉积体系。

百一段沉积期间，研究区水体较浅，大部分为水上氧化环境，以扇三角洲平原为主，扇三角洲前缘及前扇三角洲的沉积范围相对较小。沉积早期，来自陆梁隆起山麓间的冲积扇为百口泉组提供了充足的物源，以泥石流形式搬运了大量碎屑物质，沉积了巨厚层的红褐色杂基支撑砂砾岩，而水上辫状河道和洪泛沉积仅在河道及河道侧缘呈“透镜体”分布；在扇三角洲前缘，由于水体较浅，仅发育了少量水下泥石流、水下河道沉积(图 13a)。

百二段沉积期间，随着气候逐渐温暖湿润，湖平面显著上升，导致可容纳空间的增加速率大于沉积物沉降速率，扇体逐渐向物源区退积：扇三角洲平原面积逐渐缩小，扇三角洲前缘及前扇三角洲面积逐渐增大(图 13a)。在扇三角洲平原之上，依旧以泥石流为主体。而在扇三角洲前缘，水下泥石流经过长距离的搬运，在水体的不断牵引和淘洗之下，泥质含量逐渐降低，砾石分选、磨圆逐渐变好，粒径逐渐变小，发育大量多期叠置的水下河道砂体，沉积了颗粒支撑砾岩以及槽状交错层理砂岩，河口坝末端发育了远砂坝沉积。而在前扇三角洲发育了浅湖相悬浮沉积形成的细粒沉积物。

百三段沉积期间，水体进一步加深，扇三角洲平原面积进一步缩小，扇三角洲前缘和前扇三角洲的面积进一步增大。沉积物粒度显著降低，岩性以深灰色泥岩和泥质粉砂岩为主。

玛东斜坡区百口泉组这种浅水退覆式扇三角洲沉积模式为研究区油气聚集提供了有利沉积基础。百一段和百二段底部为扇三角洲平原红褐色杂基支撑砂砾岩和泥岩，在空间上形成了致密的底板。百三段多发育湖相泥岩和褐色泥岩，形成了区域性的盖层。而百二段多期叠置的水下河道砂体大面积广布且物性较好，形成了有效的储集层。这种优质的储盖组合是玛东斜坡区百口泉组油气大面积成藏的重要条件。

7　结　论

(1)玛东斜坡区百口泉组沉积于浅水扇三角洲沉积体系，发育达巴松扇和夏盐扇两大扇体，两大扇体的物源均来自于陆梁隆起，但在岩矿组成、重矿物特征上存在差异。两大扇体发育了扇三角洲平原、扇三角洲前缘、前扇三角洲 3 个亚相，进一步划分出 9 种沉积微相，其中包含了 10 类岩相。

(2)百口泉组砾岩属于洪水诱发重力流沉积的产物，具有岩相组合类型复杂、事件性沉积显著，古气候主导了洪水供给进而影响了扇体的发育，湖浪对沉积物的改造也较为明显等特征。

(3)在空间上，由于沉积时期处于水浅、坡缓、干旱–半干旱的气候条件下，百口泉组砾岩自下而上粒度逐渐变细，扇三角洲平原面积不断缩小，扇三角洲前缘及前扇三角洲面积不断扩大，体现出湖侵的退覆式沉积序列，同时呈现出泥石流、水下泥石流和水下河道沉积多期叠置的特点。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1] 庞雄奇，李丕龙，陈冬霞，等. 陆相断陷盆地相控油气特征及其基本模式 [J]. 古地理学报，2011，13(1)：55-74.
PANG X Q，LI P L，CHEN D X，et al. Characteristics and basic model of facies controlling oil and gas in continental fault basin[J]. Journal of Palaeogeography，2011，13(1)：55-74.（in Chinese with English abstract）

[2] 张昌民，朱锐，尹太举，等. 扇三角洲沉积学研究进展 [J]. 新疆石

油地质, 2015, 36(3): 362-368.
ZHANG C M, ZHU R, YIN T J, et al. Advances in fan deltaic sedimentology[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36(3): 362-368. (in Chinese with English abstract)

[3] 于兴河, 李顺利, 谭程鹏, 等. 粗粒沉积及其储层表征的发展历程与热点问题探讨 [J]. 古地理学报, 2018, 20(5): 713-736.
YU X H, LI S L, TAN C P, et al. Coarse-grained deposits and their reservoir characterizations: A look back to see forward and hot issues[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2018, 20(5): 713-736. (in Chinese with English abstract)

[4] ROGERS J P. New reservoir model from an old oil field: Garfield conglomerate pool, Pawnee County, Kansas[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(10): 1349-1365.

[5] 吴胜和, 范峥, 许长福, 等. 新疆克拉玛依油田三叠系克下组冲积扇内部构型 [J]. 古地理学报, 2012, 14(3): 331-340.
WU S H, FAN Z, XU C F, et al. Internal architecture of alluvial fan in the Triassic Lower Karamay Formation in Karamay Oilfield, Xinjiang[J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(3): 331-340. (in Chinese with English abstract)

[6] 冯子辉, 印长海, 陆加敏, 等. 致密砂砾岩气形成主控因素与富集规律: 以松辽盆地徐家围子断陷下白垩统营城组为例 [J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(6): 650-656.
FENG Z H, YIN C H, LU J M, et al. Formation and accumulation of tight sandy conglomerate gas: A case from the Lower Cretaceous Yingcheng Formation of Xujiaweizi Fault Depression, Songliao Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(6): 650-656. (in Chinese with English abstract)

[7] 于兴河, 瞿建华, 谭程鹏, 等. 玛湖凹陷百口泉组扇三角洲砾岩岩相及成因模式 [J]. 新疆石油地质, 2014, 35(6): 619-627.
YU X H, QU J H, TAN C P, et al. Conglomerate lithofacies and origin models of fan deltas of Baikouquan Formation in Mahu Sag, Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 35(6): 619-627. (in Chinese with English abstract)

[8] 鄢继华, 陈世悦, 姜在兴. 东营凹陷北部陡坡带近岸水下扇沉积特征 [J]. 石油大学学报(自然科学版), 2005, 29(1): 12-16.
YAN J H, CHEN S Y, JIANG Z X. Sedimentary characteristics of nearshore subaqueous fans in steep slope of Dongying Depression[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 2005, 29(1): 12-16. (in Chinese with English abstract)

[9] 刘晖, 姜在兴, 张锐锋, 等. 廊固凹陷大兴砾岩体成因类型及其对油气的控制 [J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(5): 545-551.
LIU H, JIANG Z X, ZHANG R F, et al. Genetic types of Daxing conglomerate bodies and their controls on hydrocarbons in the Langgu Sag, Bohai Bay Basin, East China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(5): 545-551. (in Chinese with English abstract)

[10] CLIFTON H E. Supply, segregation, successions, and significance of shallow marine conglomeratic deposits[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2003, 51(4): 370-388.

[11] KLAUSEN T G, MÜLLER R, SLÁMA J, et al. Depositional history of a condensed shallow marine reservoir succession: Stratigraphy and detrital zircon geochronology of the Jurassic Stø Formation, Barents Sea[J]. Journal of the Geological Society, 2018, 175(1): 130-145.

[12] NEWELL A J. Bounding surfaces in a mixed aeolian-fluvial system (Rotliegend, Wessex Basin, SW UK)[J]. Marine and Petroleum Geology, 2001, 18(3): 339-347.

[13] AMBROSE W A, HENTZ T F, BONNAFFé F, et al. Sequence-stratigraphic controls on complex reservoir architecture of high-stand fluvial-dominated deltaic and lowstand valley-fill deposits in the Upper Cretaceous (Cenomanian) Woodbine Group, East Texas field: Regional and local perspectives[J]. Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists, 2009, 93(2): 231-269.

[14] ZHENG L J, JIANG Z X, LIU H, et al. Core evidence of paleoseismic events in Paleogene deposits of the Shulu Sag in the Bohai Bay Basin, East China, and their petroleum geologic significance[J]. Sedimentary Geology, 2015, 328: 33-54.

[15] HICKSON T A, LOWE D R. Facies architecture of a submarine fan channel-levee complex: The Juniper Ridge Conglomerate, Coalinga, California[J]. Sedimentology, 2002, 49(2): 335-362.

[16] 姜在兴, 赵徵林, 刘孟慧. 一种沿深水箕状谷纵向搬运的重力流沉积 [J]. 石油实验地质, 1988, 10(2): 106-116.
JIANG Z X, ZHAO W L, LIU M H. Replaced deposition of gravity flows along moving a deep water dustpan thalweg[J]. Petroleum Geology & Experiment, 1988, 10(2): 106-116. (in Chinese with English abstract)

[17] BáDENAS B, AURELL M, GASCA J M. Facies model of a mixed clastic-carbonate, wave-dominated open-coast tidal flat (Tithonian-Berriasian, north-east Spain)[J]. Sedimentology, 2018, 65(5): 1631-1666.

[18] LE HERON D P, BUSFIELD M E. Pulsed iceberg delivery driven by Sturtian ice sheet dynamics: An example from Death Valley, California[J]. Sedimentology, 2016, 63(2): 331-349.

[19] 吴崇筠. 湖盆砂体类型 [J]. 沉积学报, 1986, 4(4): 1-27.
WU C Y. Sandbodies in lake basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1986, 4(4): 1-27. (in Chinese with English abstract)

[20] 顾家裕. 陆相盆地层序地层学格架概念及模式 [J]. 石油勘探与开发, 1995, 22(4): 6-10.
GU J Y. Framework concepts and models of sequence stratigraphy in nonmarine petroliferous basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 1995, 22(4): 6-10. (in Chinese with English abstract)

[21] 张纪易. 粗碎屑洪积扇的某些沉积特征和微相划分 [J]. 沉积学报, 1985, 3(3): 75-85.
ZHANG J Y. Some depositional characteristics and microfacies subdivision of coarse clastic alluvial fans[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1985, 3(3): 75-85. (in Chinese with English abstract)

[22] BLAIR T C. Alluvial fan and catchment initiation by rock avalanching, Owens Valley, California[J]. Geomorphology, 1999, 28(3/4): 201-221.

[23] GAO C L, JI Y L, WU C L, et al. Facies and depositional model of alluvial fan dominated by episodic flood events in arid conditions: An example from the Quaternary Poplar Fan, north-western China[J]. Sedimentology, 2020, 67(4): 1750-1796.

[24] 朱筱敏, 查明, 张卫海, 等. 陆西凹陷上侏罗统近岸水下扇沉积特征 [J]. 石油大学学报(自然科学版), 1995, 19(1): 1-6.
ZHU X M, ZHA M, ZHANG W H, et al. Sedimentary Features of

Upper jurassic nearshore subaoueous fanin luxidepression[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 1995, 19(1): 1-6. (in Chinese with English abstract)

[25] 邹志文, 李辉, 徐洋, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷下三叠统百口泉组扇三角洲沉积特征 [J]. 地质科技情报, 2015, 34(2): 20-26.
ZOU Z W, LI H, XU Y, et al. Sedimentary characteristics of the baikouquan formation, Lower Triassic in the Mahu Depression, Junggar Basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2015, 34(2): 20-26. (in Chinese with English abstract)

[26] 宫清顺, 黄革萍, 倪国辉, 等. 准噶尔盆地乌尔禾油田百口泉组冲积扇沉积特征及油气勘探意义 [J]. 沉积学报, 2010, 28(6): 1135-1144.
GONG Q S, HUANG G P, NI G H, et al. Characteristics of alluvial fan in baikouquan formation of Wuerhe oil field in Junggar Basin and petroleum prospecting significance[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(6): 1135-1144. (in Chinese with English abstract)

[27] 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]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 35(6): 628-635. (in Chinese with English abstract)

[28] 邹妞妞, 史基安, 张大权, 等. 准噶尔盆地西北缘玛北地区百口泉组扇三角洲沉积模式 [J]. 沉积学报, 2015, 33(3): 607-615.
ZOU N N, SHI J A , ZHANG D Q, et al. Fan delta depositional model of Triassic Baikouquan Formation in Mabei area, NW Junggar Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(3): 607-615. (in Chinese with English abstract)

[29] GILBERT K. The topographic features of lake shores[M]. Washington: Govt. Prtg. Office, 1885.

[30] ALBINA C, PERIO D. Coarse grained deltas[M]. New Jersey: Blackwell Scientific Publications, 1990: 3-13.

[31] FAN DELTAS. Sedimentology and tectonic settings[M]. Glasgow: Blackie, 1988.

[32] 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]. Xinjiang Petroleum Geology, 2018, 39(1): 16-22. (in Chinese with English abstract)

[33] 唐勇, 尹太举, 覃建华, 等. 大型浅水扇三角洲发育的沉积物理模拟实验研究 [J]. 新疆石油地质, 2017, 38(3): 253-263.
TANG Y, YIN T J, QIN J H, et al. Development of large-scale shallow-water fan delta: Sedimentary laboratory simulation and experiments[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2017, 38(3): 253-263. (in Chinese with English abstract)

[34] ZHANG K, WU S H, WANG H H, et al. Sedimentary architecture of shallow-water fan-delta front in a lacustrine basin: Sangyuan section of Lower Cretaceous Xiguayuan Formation, Luanping Basin, Northeast China[J]. Swiss Journal of Geosciences, 2023, 116(1): 3.

[35] 袁云峰, 曹剑, 胡文瑄, 等. 准噶尔盆地腹部断裂和不整合面流体活动特征对比 [J]. 地质科技情报, 2015, 34(4): 78-83.
YUAN Y F, CAO J, HU W X, et al. Comparison of fluid activities between fault and unconformity zones in the central Junggar Basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2015, 34(4): 78-83. (in Chinese with English abstract)

[36] 何登发, 吴松涛, 赵龙, 等. 环玛湖凹陷二叠–三叠系沉积构造背景及其演化 [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. (in Chinese with English abstract)

[37] 单祥, 邹志文, 孟祥超, 等. 准噶尔盆地环玛湖地区三叠系百口泉组物源分析 [J]. 沉积学报, 2016, 34(5): 930-939.
SHAN X, ZOU Z W, MENG X C, et al. Provenance analysis of Triassic Baikouquan Formation in the area around Mahu Depression, Junggar Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2016, 34(5): 930-939. (in Chinese with English abstract)

[38] 宋永, 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]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(6): 631-637. (in Chinese with English abstract)

[39] JIANG W L, IMIN A, WANG X Y, et al. Geochemical characterization and quantitative identification of mixed-source oils from the Baikouquan and Lower Wuerhe Formations in the eastern slope of the Mahu Sag, Junggar Basin, NW China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 191: 107175.

[40] 赵澄林, 刘孟慧, 纪友亮. 东濮凹陷下第三系碎屑岩沉积体系与成岩作用 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1992.
ZHAO C L, LIU M H, JI Y L. Sedimentary system and diagenesis of Paleogene clastic rock in Dongpu Depression[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992. (in Chinese)

[41] HOLMES A. Principles of physical geology[M]. London: Thomas Nelson and Sons Ltd., 1992.

[42] KOSTER E H, STEEL R J. Sedimentology of gravels and conglomerates[M]. Calgary, Alta. , Canada: Canadian Society of Petroleum Geologists, 1984.

[43] 杨哲翰, 刘江艳, 吕奇奇, 等. 古地貌恢复及其对重力流沉积砂体的控制作用: 以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7_3 亚段为例 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(2): 146-158.
YANG Z H, LIU J Y, LÜ Q Q, et al. Paleogeomorphological restoration and its control on gravity flow sand bodies: A case study of the Chang 7_3 submember of the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(2): 146-158. (in Chinese with English abstract)

[44] 邓宏文, 王洪亮, 李熙喆. 层序地层地层基准面的识别、对比技术及应用 [J]. 石油与天然气地质, 1996(3): 177-184.
DENG H W, WANG H L, LI X Z. Identification and correlation technicals of sequence stratigraphic base-level and their application[J]. Oil & Gas Geology, 1996(3): 177-184(in Chinese with English abstract)

[45] 马永平, 黄林军, 滕团余, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷斜坡区三叠系

百口泉组高精度层序地层研究 [J]. 天然气地球科学, 2015, 26(增刊 1): 33-40.
MA Y P, HUANG L J, TENG T Y, et al. Study on high-precision sequence stratigraphy of Triassic Baikouquan Formation in the slope area of Mahu Depression in Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(S1): 33-40. (in Chinese with English abstract)

[46] 郭璇, 潘建国, 谭开俊, 等. 地震沉积学在准噶尔盆地玛湖西斜坡区三叠系百口泉组的应用 [J]. 天然气地球科学, 2012, 23(2): 359-364.
GUO X, PAN J G, TAN K J, et al. Application of seismic sedimentology in Triassic Baikouquan Formation of western Mahu Slope of Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(2): 359-364. (in Chinese with English abstract)

[47] 汪正江, 陈洪德, 张锦泉. 物源分析的研究与展望 [J]. 沉积与特提斯地质, 2000, 20(4): 104-110.
WANG Z J, CHEN H D, ZHANG J Q. Provenance analysis: Perspectives[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2000, 20(4): 104-110. (in Chinese)

[48] 赵红格, 刘池洋. 物源分析方法及研究进展 [J]. 沉积学报, 2003, 21(3): 409-415.
ZHAO H G, LIU C Y. Approaches and prospects of provenance analysis[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(3): 409-415. (in Chinese with English abstract)

[49] HAN S J, SANG S X, LIANG J J, et al. Characteristics and genesis of diachronous Carboniferous volcano-sedimentary sequences: Insights from geochemistry, petrology and U-Pb dating in the north Junggar Basin, China[J]. International Geology Review, 2019, 61(4): 404-423.

[50] YUAN X G, YANG Y D, LI W F, et al. Provenance of Triassic Xiazijie fan-delta in Junggar Basin, northwestern China: Insights from U-Pb dating of detrital zircons[J]. Minerals, 2023, 13(4): 467.

[51] MUTTI E, LUCCHI F R, SEGURET M, et al. Seismoturbidites: A new group of resedimented deposits[J]. Marine Geology, 1984, 55(1/2): 103-116.

[52] 杜远生, 韩欣. 论海啸作用与海啸岩 [J]. 地质科技情报, 2000, 19(1): 19-22.
DU Y S, HAN X. Tsunami and tsunamites[J]. Geological Science and Technology Information, 2000, 19(1): 19-22. (in Chinese with English abstract)

[53] BASSETT K N, ORLOWSKI R. Pahau terrane type locality: Fan delta in an accretionary prism trench-slope basin[J]. New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 2004, 47(4): 603-623.

[54] 李聪, 鲜本忠, 王鹏宇, 等. 南堡凹陷东北部东二段重力流砂岩储层发育规律 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(2): 159-169.
LI C, XIAN B Z, WANG P Y, et al. Development law of gravity flow sandstone reservoir in the Second Member of the Dongying Formation in the northeastern Nanpu Depression[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(2): 159-169. (in Chinese with English abstract)

[55] 周路, 朱江坤, 宋永, 等. 玛湖凹陷玛中-玛东地区三叠系百口泉组断裂特征及控藏作用分析 [J]. 地学前缘, 2019, 26(1): 248-261.
ZHOU L, ZHU J K, SONG Y, et al. Analysis of fault characteristics and reservoir control in Triassic Baikouquan Formation in central and eastern Mahu Depression[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(1): 248-261. (in Chinese with English abstract)

[56] 黄云飞, 张昌民, 朱锐, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷晚二叠世至中三叠世古气候、物源及构造背景 [J]. 地球科学, 2017, 42(10): 1736-1749.
HUANG Y F, ZHANG C M, ZHU R, et al. Palaeoclimatology, provenance and tectonic setting during Late Permian to Middle Triassic in Mahu Sag, Junggar Basin, China[J]. Earth Science, 2017, 42(10): 1736-1749. (in Chinese with English abstract)

[57] 郑燕. 玛湖凹陷下三叠统百口泉组孢粉与元素地球化学特征及地质意义 [D]. 湖北 荆州: 长江大学, 2022.
ZHENG Y. Sporopollen and element geochemical characteristics of Lower Triassic Baikouquan Formation in Mahu Sag and its geological significance[D]. Jingzhou Hubei: Yangtze University, 2022. (in Chinese with English abstract)

[58] 张坦, 张昌民, 瞿建华, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷百口泉组相对湖平面升降规律研究 [J]. 沉积学报, 2018, 36(4): 684-694.
ZHANG T, ZHANG C M, QU J H, et al. A research on relative lacustrine level changes of the lower Triassic Baikouquan Formation in Mahu Sag of Junggar Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2018, 36(4): 684-694. (in Chinese with English abstract)

[59] TAN C P, YU X H, LIU B B, et al. Conglomerate categories in coarse-grained deltas and their controls on hydrocarbon reservoir distribution: A case study of the Triassic Baikouquan Formation, Mahu Depression, NW China[J]. Petroleum Geoscience, 2017, 23(4): 403-414.

[60] 杨仁超, 金之钧, 孙冬胜, 等. 鄂尔多斯晚三叠世湖盆异重流沉积新发现 [J]. 沉积学报, 2015, 33(1): 10-20.
YANG R C, JIN Z J, SUN D S, et al. Discovery of hyperpycnal flow deposits in the Late Triassic lacustrine Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(1): 10-20. (in Chinese with English abstract)

[61] 杨仁超, 李作福, 张学才, 等. 异重流沉积研究进展与展望 [J]. 沉积学报, 2023, 41(6): 1917-1933.
YANG R C, LI Z F, ZHANG X C, et al. Advances and perspectives in the study of hyperpycnal flow deposition[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2023, 41(6): 1917-1933. (in Chinese with English abstract)

[62] KANG X, HU W X, CAO J, et al. Controls on reservoir quality in fan-deltaic conglomerates: Insight from the Lower Triassic Baikouquan Formation, Junggar Basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 103: 55-75.

[63] 吴海光, 康逊, 秦明阳, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷百口泉组砂砾岩非均质储层孔隙结构特征与成因 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(9): 3337-3353.
WU H G, KANG X, QIN M Y, et al. Pore structure characteristics and genesis of heterogeneous conglomerate reservoir of Baikouquan Formation in Mahu Sag, Junggar Basin[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(9): 3337-3353. (in Chinese with English abstract)

[64] 康逊, 胡瑞璞, 胡文瑄, 等. 准噶尔盆地下三叠统百口泉组烃类

热氧化的氧化性物质研究 [J]. 地球科学进展, 2021, 36(10): 1004-1014.
KANG X, HU R P, HU W X, et al. Oxidizing materials involving in thermochemical oxidation of hydrocarbons in the Lower Triassic Baikouquan Formation, Junggar Basin[J]. Advances in Earth Science, 2021, 36(10): 1004-1014. (in Chinese with English abstract)

[65] READING H G, COLLISON J D. Sedimentary environments: Processes, facies and stratigraphy[M]. Oxford: Blackwell Science Ltd., 1996: 154-231.

[66] 蒋庆平, 孔垂显, 李维锋, 等. 陆相湖盆大型扇三角洲沉积特征与演化规律：以准噶尔盆地玛湖凹陷西斜坡区三叠系百口泉组为例 [J]. 沉积学报, 2020, 38(5): 923-932.
JIANG Q P, KONG C X, LI W F, et al. Sedimentary characteristics and evolution law of a lacustrine large-scale fan delta: A case study from the Triassic Baikouquan Formation on the west slope of Mahu Sag[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2020, 38(5): 923-932. (in Chinese with English abstract)

Summary for “浅水扇三角洲沉积特征及演化规律：以准噶尔盆地玛东斜坡区百口泉组为例”

Sedimentary characteristics and evolution of the shallow-water fan delta: A case study of the Baikouquan Formation in the Madong slope area, Junggar Basin

DAI Chao[1], KANG Xun[1*], TAN Jingqiang[1], LU Feng[2,3], LIAN Lixia[2,3], HU Ruipu[1]

1. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;
2. Research Institute of Experiment and Detection, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay Xinjiang 834000, China;
3. Xinjiang Key Laboratory of Conglomerate Petroleum Reservoir, Karamay Xinjiang 834000, China

First author, E-mail: 2362552662@qq.com

* Corresponding author, E-mail: xunkang@csu.edu.cn

Abstract: [**Objective**] Conglomerates are unique petroleum reservoirs, and understanding their sedimentary origin and evolution is crucial for accurately predicting the distribution of high-quality reservoirs. [**Methods**] Based on core logging, petrologic identification, heavy mineral and grain size analysis, and well logging data, the sedimentary characteristics, spatial distribution, and sedimentary provenance of the Lower Triassic Baikouquan Formation conglomerate in the Madong slope area are defined. Meanwhile, the sedimentary mechanism of the formation is clarified, and a sedimentary model is established. [**Results**] The Baikouquan Formation was deposited as a shallow-water fan delta, and the fan body consists of three subfacies: the fan delta plain, fan delta front, and pro-fan delta, and can be divided into nine microfacies: debris flow, braided channel, flood deposit, subaqueous debris flow, subaqueous main channel, subaqueous branch channel, sandy clastic flow, far sand bar, and pro-fan delta mudstone deposits. Summarily, it contains 10 lithofacies types. The conglomerate was a sedimentary product of flood-induced gravity flow, reflecting complex lithofacies associations, significant evidence of event deposition, a sedimentary model dominated by paleoclimate, and a clear transformation of lake waves. Spatially, the grain size of the Baikouquan Formation conglomerate in the Madong slope region becomes finer from bottom to top, indicating a sedimentary sequence of lake transgression and a multi-period superposition of debris flows, underwater debris flows, and subaqueous channel deposits.

Key words: genesis of conglomerate; fan delta; flood-induced gravity flow; Junggar Basin; Madong slope area; Baikouquan Formation

Received: 2023-09-07; Revised: 2024-01-15; Accepted: 2024-01-17

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20230518