

文章编号:1000-0550(2025)06-2220-17

# 新疆三塘湖盆地沉积体系演化及物源分析 ——以条湖—马朗凹陷中下侏罗统为例

彭旸<sup>1</sup>, 王波<sup>2</sup>, 于海跃<sup>3</sup>, 董雨洋<sup>2</sup>, 盛莉娜<sup>1</sup>, 杨琳娜<sup>1</sup>, 刘少治<sup>2</sup>, 王少依<sup>2</sup>, 朱晨<sup>1</sup>

1.中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249

2.中国石油杭州地质研究院,杭州 310023

3.中国石油吐哈油田分公司勘探开发研究院,新疆哈密 839009

**摘要** 【目的】三塘湖盆地是新疆北部重要的油气勘探区块,明确盆地内部的沉积相、砂体展布以及物源体系,对研究区的油气勘探开发具有重要的指导作用。【方法】利用岩心和测井数据,对条湖—马朗凹陷中下侏罗统的沉积相平面分布特征及沉积演化规律进行了系统研究,同时利用重矿物和碎屑锆石U-Pb定年测试对重点地层进行初步的物源分析。【结果】三塘湖盆地条湖—马朗凹陷早中侏罗世主要为辫状河三角洲沉积环境。八道湾组沉积时期北部辫状河三角洲沉积体系较为发育,向南延伸较远,而南部沉积体系分布范围较小。三工河组沉积时期湖盆范围扩大,凹陷内部以辫状河三角洲前缘和前三角洲—浅湖沉积为主,三角洲前缘朵体展布范围小且孤立。西山窑组一段沉积时期,沉积中心向南迁移,北部发育大量辫状河三角洲水下分流河道和前缘砂体,与南侧的三角洲下平原和三角洲前缘沉积交汇。条湖—马朗凹陷存在近物源和远物源混合,近物源来自盆地南缘和北缘逆冲推覆带,远物源来自额德伦金山,经过长距离搬运,最终从条湖凹陷东北部和马朗凹陷北部汇入盆地。【结论】沉积体系和“源—汇”系统综合分析明确了条湖—马朗凹陷中下侏罗世沉积相和砂体展布情况,为三塘湖盆地油气勘探提供了地质依据。

**关键词** 三塘湖盆地;条湖凹陷;马朗凹陷;辫状河三角洲;物源分析

**第一作者简介** 彭旸,女,1988年出生,副教授,沉积学和地层学,E-mail: ypeng@cup.edu.cn

**通信作者** 王波,男,高级工程师,沉积学和储层地质学,E-mail: wangbo\_hz@petrochina.com.cn

**中图分类号** P512.2 **文献标志码** A

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2023.125

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2023.125

## 0 引言

三塘湖盆地位于新疆维吾尔自治区东部,盆地面积约为 $2.3\times10^4\text{ km}^2$ ,是新疆北部重要的油气勘探区块。盆地内油气资源丰富,目前在三塘湖的侏罗系、二叠系、石炭系三套层系发现了5个油田,探明储量为1.68亿吨。侏罗系西山窑组已经探明储量6 908万吨,控制储量914万吨,预测储量1 809万吨,三级储量近1.0亿吨。盆地内部的马朗凹陷牛圈湖、牛东、马北、西峡沟等区块发现多个油藏,并且获得工业油气流<sup>[1]</sup>,展现了良好的油气勘探前景。

随着近些年勘探程度的不断提高,前人对三塘

湖盆地开展了一些初步研究,马朗凹陷和条湖凹陷区域内已经取得了一定进展<sup>[1-9]</sup>。但目前对于三塘湖盆地的沉积相展布的认识不足并且存在争议。例如,司学强等<sup>[1]</sup>认为马朗凹陷西山窑下段主要发育大面积的辫状河三角洲,研究区内部由辫状河三角洲前缘的水下分流河道频繁改道、迁移,相互切割,叠置成厚20~50 m连片分布的砂体所组成。但是,袁文俊<sup>[6]</sup>则认为西山窑组下段沉积微相以辫状河三角洲前缘水下分流河道为主,在凹陷的中部等区域主要发育河口坝、席状砂,凹陷西南部地区以辫状河三角洲前缘水下分流河道微相为主,在靠近中心部位,各水下分流河道相互交汇、叠置和切割。

收稿日期:2023-11-23;修回日期:2024-07-16;录用日期:2024-09-27;网络出版日期:2024-09-27

基金项目:国家自然科学基金项目(42202107);中国石油大学(北京)科研基金项目(2462021BJRC002)[**Foundation:** National Natural Science Foundation of China, No. 42202107; Science Foundation of China University of Petroleum (Beijing), No. 2462021BJRC002]

目前对三塘湖盆地各区块缺乏整体性的认识,物源方向和沉积相展布特征及其演化规律仍不确定。因此,本文主要针对条湖—马朗凹陷下侏罗统和西山窑组一段这两个油气勘探的重点层位展开研究,综合利用岩心、测井数据对区域内沉积体系进行研究,建立研究层位沉积相平面分布特征及沉积演化规律,并且利用重矿物和碎屑锆石U-Pb定年测试对条湖和马朗凹陷开展初步的物源分析。开展对研究区源—汇体系的研究,不仅能够指导区域内沉积相和砂体展布的分析,而且对优质储层的预测起到重要作用,可为研究区的油气勘探开发提供一定的理论依据和指导意义。

## 1 地质概况

三塘湖盆地位于北侧阿尔泰褶皱山系和南侧天山褶皱山系之间(图1),经历了多期构造演化阶段(图2)。三塘湖盆地基底在太古代末期形成原始古地核,中元古代形成了稳定的大陆地块,随后在寒武纪—石炭纪经历了洋盆俯冲、陆块增生拼合、板块碰撞造山作用等过程<sup>[3]</sup>。晚石炭世—早二叠世,准噶尔地块不断向北挤压,三塘湖地区内盆地活动开始,形成了三塘湖前陆盆地的雏形<sup>[10-11]</sup>。早二叠世初期,由于造山后伸展作用,三塘湖地区形成断陷盆地,随后在中二叠世—晚二叠世沉积芦草沟组和条湖组地层(图2)。晚二叠世—早三叠世,三塘湖地区的海西

晚期构造运动,致使西伯利亚板块与哈萨克斯坦板块发生陆—陆叠覆造山作用,在盆地南缘和北缘分别形成逆冲推覆断裂带,形成“两隆夹一坳”的构造格局<sup>[11-12]</sup>。中、晚三叠世盆地地形基本准平原化,形成稳定的坳陷盆地,此时沉积小泉沟群;晚三叠世末期,印支运动致使盆地整体抬升,沉积地层强烈剥蚀。侏罗纪盆地面积扩大,沉积八道湾组、三工河组、西山窑组三套地层。早白垩世,燕山晚期构造运动造成三塘湖盆地全面抬升,早期沉积地层遭受剥蚀,燕山运动末期基本形成现今盆地构造格局(图2)<sup>[12]</sup>。

三塘湖盆地现今整体呈北西—南东向狭长带状展布,东西长约500 km,南北宽约60 km,面积约为23 000 km<sup>2</sup>。三塘湖盆地呈南北分带、东西分块的构造格局。一级构造单元分为北部的冲断隆起带、中间的中央坳陷带,以及南部的逆冲推覆带。盆地中央坳陷带可划分出九个二级构造单元,分别为汉水泉、条湖、马朗、淖毛湖和苏鲁克五个凹陷,以及石头梅、西峡沟、方方梁和苇北四个凸起(图1)。研究区为条湖凹陷和马朗凹陷,位于三塘湖盆地中央坳陷带的中部,凹陷内沉积主体为晚古生代—中生代地层。具体研究层位包括下侏罗统的八道湾组(J<sub>1b</sub>)和三工河组(J<sub>1s</sub>),以及中侏罗统西山窑组一段(J<sub>2x1</sub>)。条湖—马朗凹陷内下侏罗统地层厚度为30~200 m,中侏罗统西山窑组地层厚度为50~230 m。

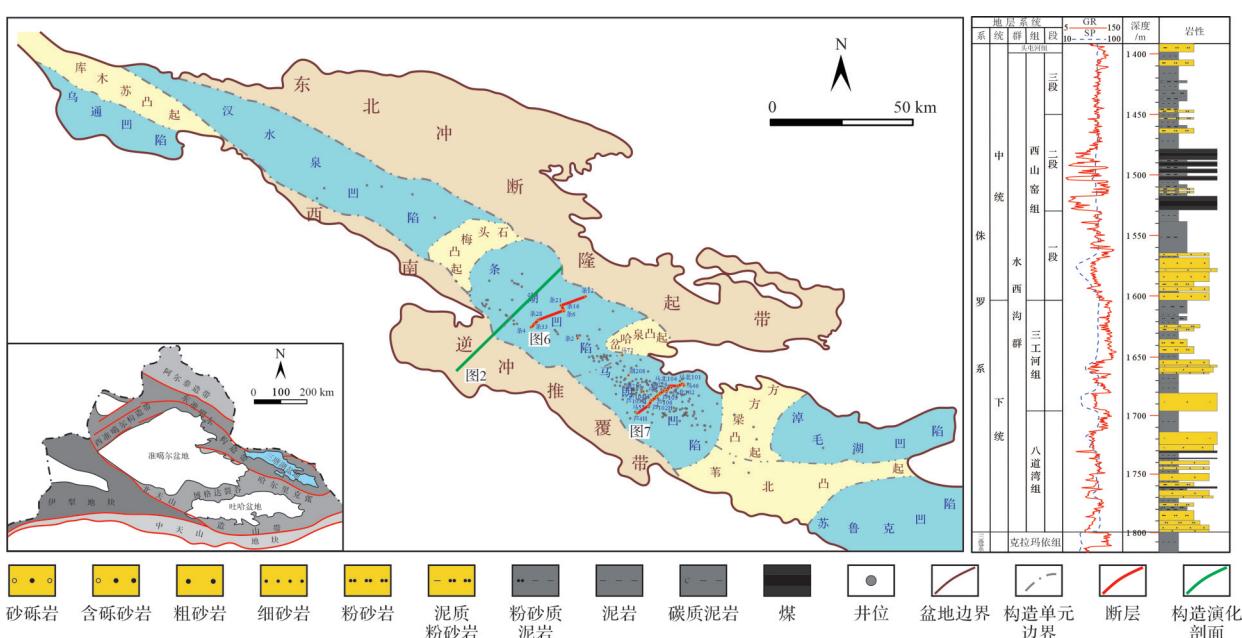


图1 三塘湖盆地构造单元划分及条湖—马朗凹陷地层综合柱状图

Fig.1 Tectonic units and stratigraphic column in the Tiaohu-Malang Sags, Santanghu Basin

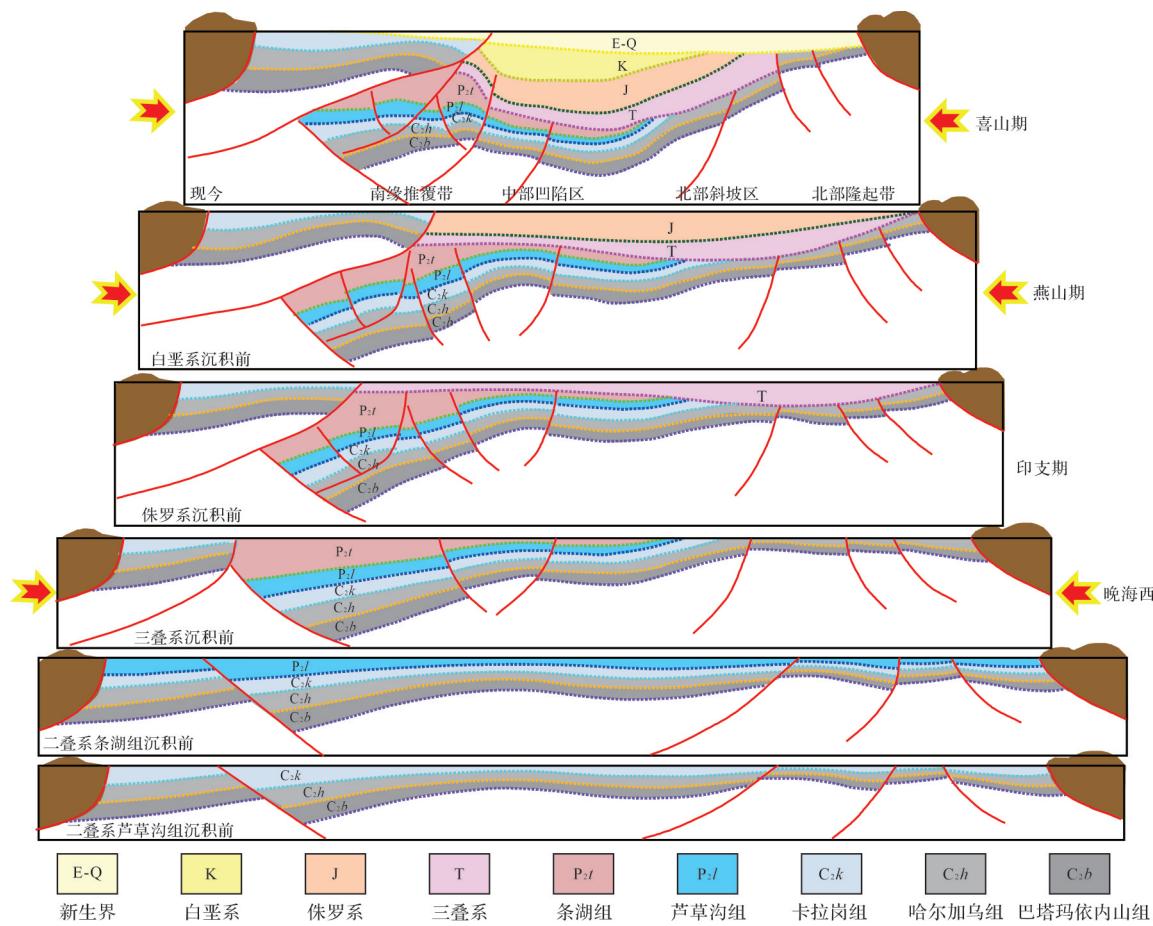


图2 三塘湖盆地典型剖面构造演化图

Fig.2 Structural evolution maps with cross sections in Santanghu Basin

## 2 沉积相特征及分布规律

### 2.1 沉积相类型及特征

条湖—马朗凹陷下侏罗统和西山窑组一段主要为辫状河三角洲沉积环境,包括辫状河三角洲平原、辫状河三角洲前缘和前辫状河三角洲。

条湖—马朗凹陷内部沉积的辫状河三角洲平原主要为下平原(枯水线—洪水线之间),其内部发育辫状河道和沼泽沉积(图3)。辫状河道砂体厚度介于2~6 m,以含砾砂岩和细砂岩为主,粒度整体自下而上由粗变细构成正旋回序列,测井曲线(GR、SP)形态主要呈顶底突变接触的箱形。河道底部为较厚的砾岩层,底部可见冲刷面,砾岩层的厚度为0.5~1.0 m,砾岩呈块状层理,砾岩层内部有时可见下粗上细的正韵律层理。砾岩的成分复杂,具体包括凝灰岩、流纹岩、玄武岩、板岩等浅变质岩类,以及一些灰色和黄褐色泥砾(图3a~c)。砾石的分选中等—较好,粒径变化较大,一般介于0.5~3.0 cm,最大粒径可

达6 cm。砾石形态多数为次圆状—圆状(图3a,c),灰色泥砾为棱角状—次圆状,黄褐色泥砾比灰色泥砾磨圆较好,多为次圆状(图3b)。砾石之间为砂质沉积物充填,构成杂基支撑结构,砾石偶尔可见一定程度的顺层定向排列(图3b,c)。辫状河道沉积上部为中砂岩—细砂岩,部分层位砂岩含有炭屑,炭屑粒径最大可达10 cm(图3e~g)。砂岩内部发育槽状交错层理(图3h)、板状交错层理(图3i)和平行层理<sup>[13]</sup>。沼泽沉积为泥层,内部含有较厚的煤层<sup>[14~15]</sup>(图3d)。

辫状河三角洲前缘在条湖凹陷八道湾组和马朗凹陷西山窑一段分布较广泛,主要包括水下分流河道、水下分流河道间(图4)和河口坝沉积(图5),其中水下分流河道为三角洲前缘地层的主体。相对于三角洲平原的辫状河道,三角洲前缘水下分流河道的规模较小,厚度介于1~2 m,整体粒度向上变细,测井曲线(GR、SP)形态呈箱形或者钟形<sup>[16]</sup>,顶底主要为突变接触。河道底部发育明显的冲刷面<sup>[17]</sup>,其上为砾岩和含砾砂岩,与三角洲平原辫状河道中砾石相比,此

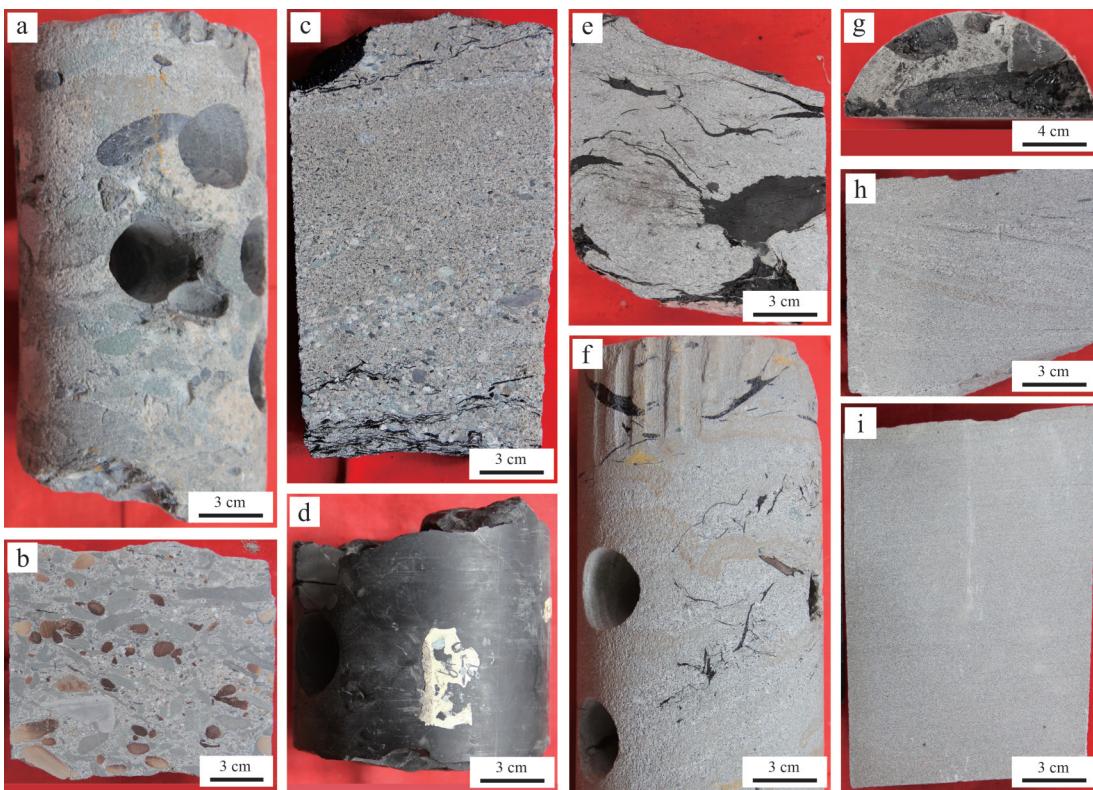


图3 三塘湖盆地辫状河三角洲平原沉积特征

(a) 条2井,  $J_2x$ , 1 525.40 m, 三角洲平原辫状河道滞留沉积, 块状砾岩; (b) 湖208井,  $J_2x^1$ , 1 803.50 m, 三角洲平原辫状河道沉积, 砂质砾岩, 发育明显正粒序层理; (c) 湖208井,  $J_2x^1$ , 1 792.23 m, 三角洲平原辫状河道沉积, 砂质砾岩, 发育明显正粒序层理; (d) 马9井, 4 116.30 m, 三角洲平原沼泽沉积, 煤层; (e) 湖213井,  $J_2x$ , 1 822.00 m, 块状含炭屑中砂岩; (f) 条2井,  $J_2x$ , 1 524.60 m, 含炭屑中砂岩, 发育交错层理; (g) 湖213井,  $J_2x$ , 1 822.00 m, 含炭屑中砂岩; (h) 湖208井,  $J_2x^1$ , 1 797.23 m, 槽状交错层理细砂岩; (i) 湖213井,  $J_2x$ , 1 810.76 m, 板状交错层理细砂岩

Fig.3 Sedimentary characteristics of the braided-river delta plain in the Santanghu Basin

处砾石粒径较小,通常为0.1~1.0 cm,部分灰色泥砾的粒度较大,最大可达3 cm(图4a~e)。砾石的成分与三角洲平原辫状河道类似,但泥砾含量明显增加,泥砾的磨圆为次圆状—圆状。岩心某些层位可见炭屑,炭屑总体较小,与砾石顺层分布在砂岩层中(图4b,c)。水下分流河道上部为细砂岩,主要发育块状层理、板状交错层理、平行层理<sup>[14,18]</sup>,局部发育含碳质条纹的流水砂纹层理(图4f,g),整体反映水动力条件自下到上逐渐减弱的过程。水下分流河道间不太发育,地层局部可见薄层的粉砂质泥岩,内部发育块状层理或较弱的水平层理(图4h),为水下分流河道越岸溢流出的细粒沉积。河口坝发育在前三角洲泥质沉积之上,其上部逐渐被水下分流河道所切割。河口坝厚度介于1~3 m,局部厚度可叠置到5 m,底部以粉砂岩为主,向上过渡为细砂岩,整体呈向上变粗的反旋回序列<sup>[18~19]</sup>,测井曲线(GR、SP)形态为漏斗形。河口坝底部发育波状—脉状层理,砂岩内部发育单向的不对称流水砂纹交错层理(图5g),向上过渡为

互层的细砂岩和碳质泥层(或泥层)(图5b),碳质泥层中可见较小的碳质碎屑(图5c),该段地层代表河口坝远端沉积,反映逐渐减弱的水动力条件。河口坝上部发育单向的流水砂纹交错层理,局部可见碳质纹层或泥质纹层(图5a,d,e),向上逐渐过渡为板状交错层理和块状层理(图5f,f),整体代表河口坝近端沉积,反映三角洲向盆地推进时水动力条件逐渐增加的过程。

前辫状河三角洲以粉砂质泥岩为主,厚度介于1.5~4.0 m,主要为块状层理和水平层理<sup>[14,17]</sup>,粉砂质泥岩中可见较薄的砂质透镜体,内部可见小型的流水砂纹交错层理(图5h),条2井的前三角洲沉积中的粉砂质泥岩中可见递变层理(图5i)。

## 2.2 沉积相分布特征

### 2.2.1 纵向展布特征

条湖凹陷八道湾组主要为辫状河三角洲下平原和辫状河三角洲前缘,其中北侧沉积体系较为发育,砂体较厚且分布范围广,南侧沉积体系分布范围较

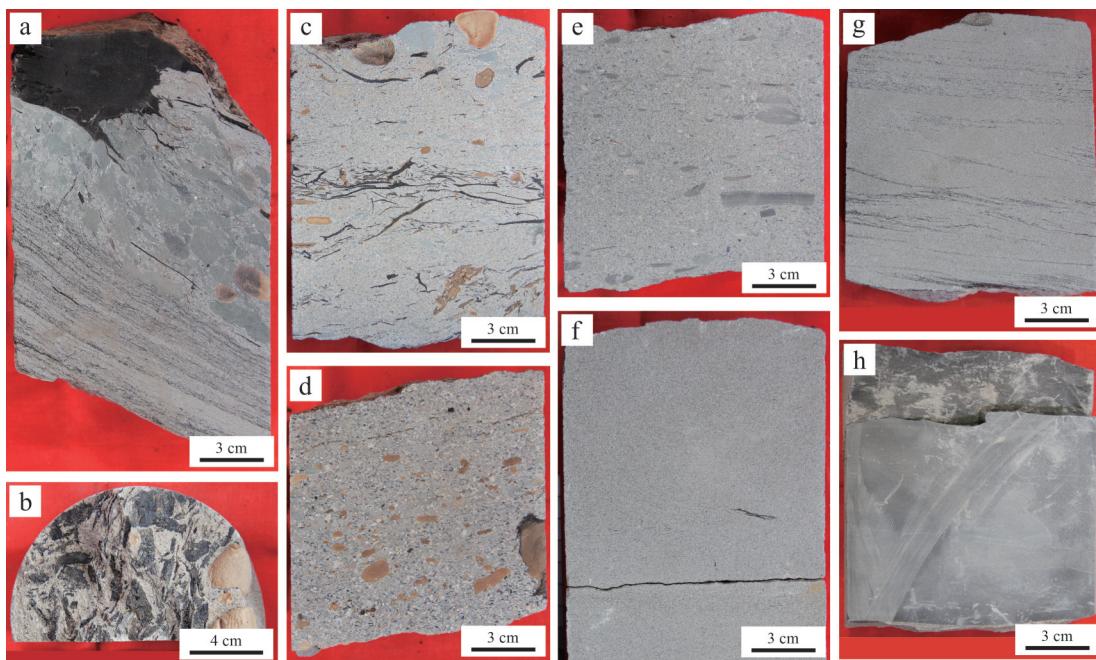


图4 三塘湖盆地辫状河三角洲前缘水下分流河道沉积特征

(a)湖208井,J<sub>2x<sup>1</sup></sub>,1 810.65 m,水下分流河道滞留沉积,含炭屑砾岩,底部发育冲刷面;(b)湖208井,J<sub>2x<sup>1</sup></sub>,1 807.26 m,水下分流河道中保存有大量炭屑;(c)湖208井,J<sub>2x<sup>1</sup></sub>,1 807.03 m,含炭屑和泥砾砂岩;(d)湖208井,J<sub>2x<sup>1</sup></sub>,1 809.26 m,含泥砾细砂岩,泥砾为黄褐色;(e)湖213井,J<sub>2x</sub>,1 831.67 m,含泥砾细砂岩,泥砾为灰色;(f)湖213井,J<sub>2x</sub>,1 805.44 m,块状细砂岩;(g)湖213井,J<sub>2x</sub>,1 824.28 m,砂纹交错层理,夹有薄层碳质条带;(h)湖213井,J<sub>2x</sub>,1 823.35 m,粉砂质泥岩,废弃水下分流河道或水下分流河道间泥质填充

Fig.4 Sedimentary characteristics of distributary channels in the braided-river delta front, Santanghu Basin

局限,剖面内主要为薄层的河口坝和前三角洲—浅湖沉积(图6)。北侧的沉积体系地层下部为进积式叠加样式(图6),主要由水下分流河道和少量河口坝过渡为下平原分流河道和沼泽沉积,沼泽泥质沉积内部可见较厚的煤层;上部为退积式叠加样式,主要为水下分流河道和少量较薄的河口坝沉积(图6)。八道湾组北侧地层叠加样式整体反映相对湖平面先下降后上升的过程。三工河组主要为辫状河三角洲前缘和前三角洲—浅湖沉积,其中北侧地层以前三角洲—浅湖沉积为主,夹有少量薄层的河口坝砂体(图6),为湖进期退积沉积。三工河时期的南侧沉积体系相对较发育,地层整体呈进积式叠加样式,下部为薄层的河口坝和前三角洲—浅湖泥质沉积,上部逐渐发育叠置的水下分流河道砂体(图6)。西山窑组一段南侧自下而上由辫状河三角洲前缘水下分流河道过渡为辫状河三角洲下平原沉积,反映沉积体系进一步向盆地内部推进的过程。凹陷北侧沉积的砂体较厚且分布更广,主要为多期叠置的水下分流河道砂体(图6)。

马朗凹陷八道湾组南侧以辫状河三角洲前缘水

下分流河道沉积为主,多期水下分流河道叠置形成厚层砂体(图7)。凹陷中部为三角洲平原辫状河道和河道间泥质沉积,内部可见较薄的煤层,地层相对较薄,可能是局部地区抬升导致可容空间较小的结果。凹陷北侧下部发育叠置的三角洲前缘水下分流河道,向上过渡为厚层的辫状河三角洲平原沉积,主要包括辫状河道和沼泽泥质地层,整体呈进积式叠置样式(图7),表明该区域在该时期相对湖平面下降。三工河组在凹陷南侧边缘发育扇三角洲沉积,向凹陷内部过渡为辫状河三角洲前缘沉积,由一系列叠置的水下分流河道构成,砂体横向分布较广。凹陷北侧三角洲沉积体系不太发育,主要为厚层的前三角洲—浅湖沉积夹有薄层的河口坝砂体(图7)。西山窑组一段以辫状河三角洲前缘沉积为主<sup>[1]</sup>,北侧沉积体系非常发育,下部为水下分流河道和薄层河口坝沉积,上部逐渐变为叠置的水下分流河道,在芦103井附近可见河口坝沉积,表明辫状河三角洲体系在该时期向凹陷内部大幅度推进到凹陷南侧(图7)。南侧的沉积体系不太发育,分布在凹陷南缘,可见少量的河口坝和水下分流河道砂体。

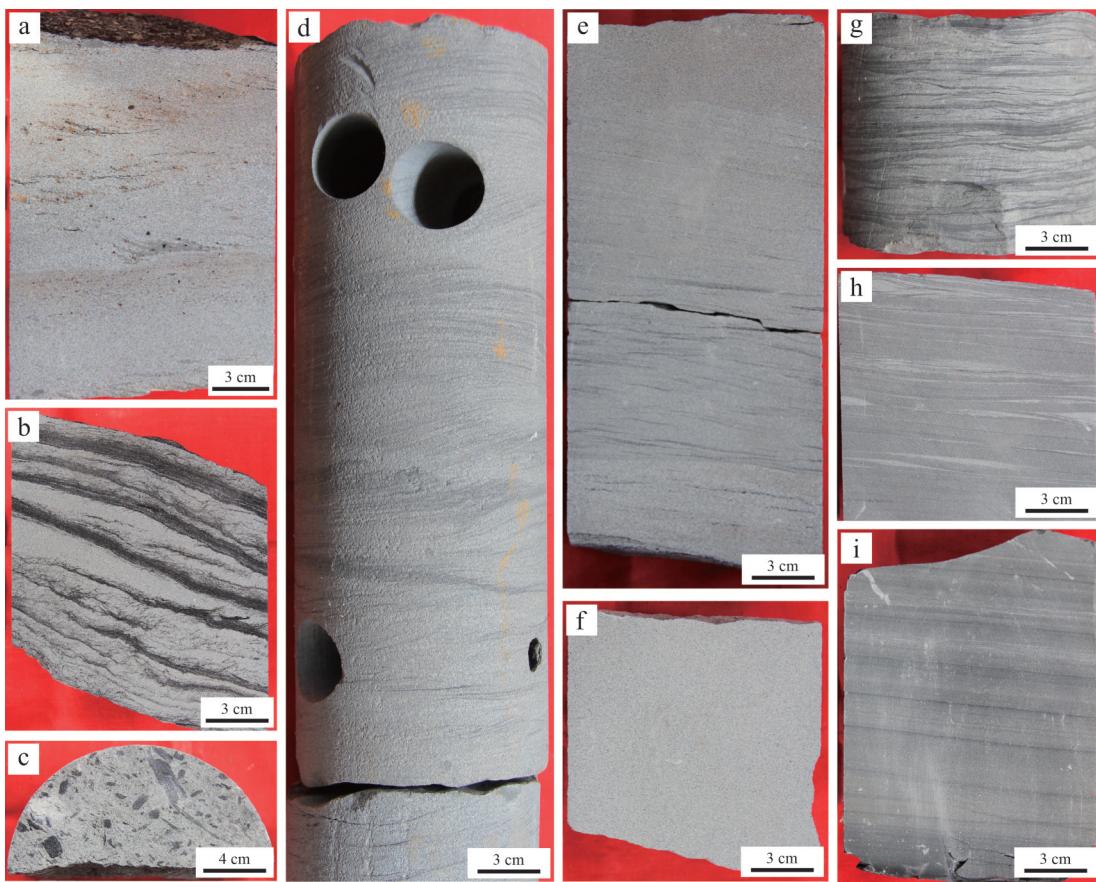


图5 三塘湖盆地辫状河三角洲前缘河口坝和前辫状河三角洲沉积特征

(a) 湖208井,  $J_2x^1$ , 1 811.27 m, 砂纹交错层理细砂岩, 含有少量炭质条带, 河口坝沉积; (b) 湖208井,  $J_2x^1$ , 1 812.25 m, 细砂岩与炭质泥层互层, 河口坝远端沉积; (c) 湖213井,  $J_2x$ , 1 832.68 m, 含炭屑细砂岩, 河口坝沉积; (d) 条2井,  $J_2x$ , 1 534.80 m, 砂纹交错层理细砂岩, 含有少量泥质条带, 河口坝沉积; (e) 湖213井,  $J_2x$ , 1 832.48 m, 由下到上为砂纹交错层理砂岩变为交错层理砂岩, 砂纹交错层理砂岩夹有炭质条带, 河口坝沉积; (f) 湖213井,  $J_2x$ , 1 834.12 m, 块状细砂岩, 河口坝近端沉积; (g) 条2井,  $J_2x$ , 1 887.64 m, 波状—脉状层理, 河口坝远端沉积; (h) 湖213井,  $J_2x$ , 1 837.75 m, 粉砂质泥岩, 夹有砂纹交错层理粉砂岩, 前三角洲泥质沉积; (i) 湖213井,  $J_2x$ , 1 840.92 m, 递变层理粉砂质泥岩, 前三角洲泥质沉积

Fig.5 Sedimentary characteristics of mouth bars in the delta front and prodelta of the braided river delta in Santanghu Basin

### 2.2.2 平面展布特征

八道湾组沉积时期, 条湖—马朗凹陷以辫状河三角洲沉积为主。条湖凹陷北部砂地比数值较高, 多个区域数值大于0.6, 形态上以朵状连片发育, 砂体向南延伸较远, 在凹陷内的延伸距离为20~40 km。凹陷南部砂地比分布范围较小, 主要分布在南侧10 km以内(图8a)。北侧地层自下而上逐渐由三角洲前缘水下分流河道和少量河口坝地层过渡为三角洲平原的辫状河道和沼泽泥质沉积, 说明该时期的湖盆面积逐渐萎缩(图9a), 辩状河三角洲快速向凹陷推进可能是沉积物供给增加所致。条湖凹陷东北侧发育较大的沉积体系, 西北侧(北小湖地区)南北沉积体系交汇, 砂体连片分布。马朗凹陷南部、北部砂地比相当, 均由构造尖灭线向凹陷内部展开, 砂体延伸距离约为10 km。北侧以辫状河三角洲平原辫

状河道和沼泽泥质沉积为主, 南侧以三角洲前缘分流河道为主。凹陷中部存在低凸起, 作为剥蚀区向凹陷周围提供沉积物, 砂体以辫状河三角洲平原向周围展开。

三工河组条湖—马朗凹陷主要为辫状河三角洲—湖泊沉积体系。与八道湾组相比, 砂地比总体数值减小, 砂体延伸距离缩短(10~20 km), 说明湖盆范围扩大, 三角洲上、下平原界线向盆地边缘移动(图8b)。条湖凹陷和马朗凹陷以辫状河三角洲前缘水下分流河道沉积为主, 三角洲前缘朵体展布范围小且孤立(图9b)。条湖凹陷该时期的南侧沉积体系较八道湾时期发育得好。马朗凹陷南侧三角洲沉积体系较为发育, 砂体延伸范围介于15~20 km, 在凹陷中部偏西北位置(牛圈湖地区)大量沉积, 以三角洲前缘水下分流河道为主, 砂体连片分布(图9b), 说明

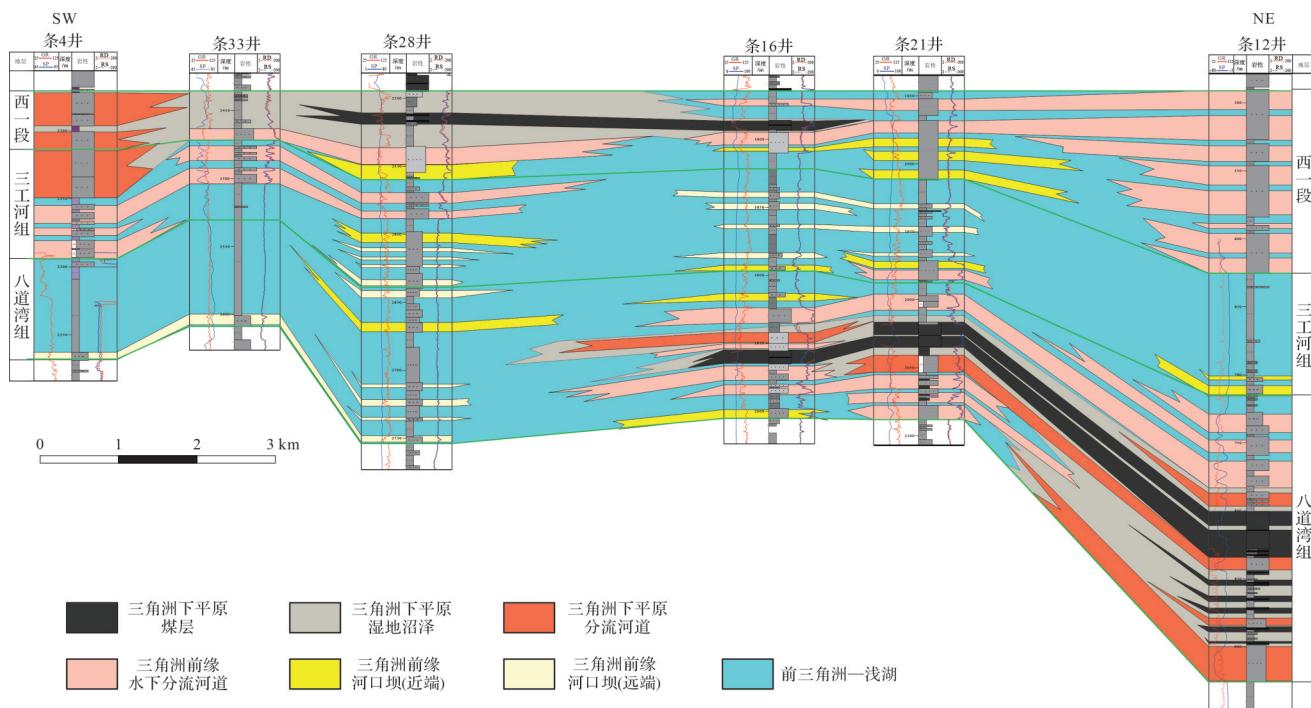


图 6 条湖凹陷中部南北向沉积剖面

Fig.6 N-S cross section along the middle of the Tiaohu Sag, Santanghu Basin

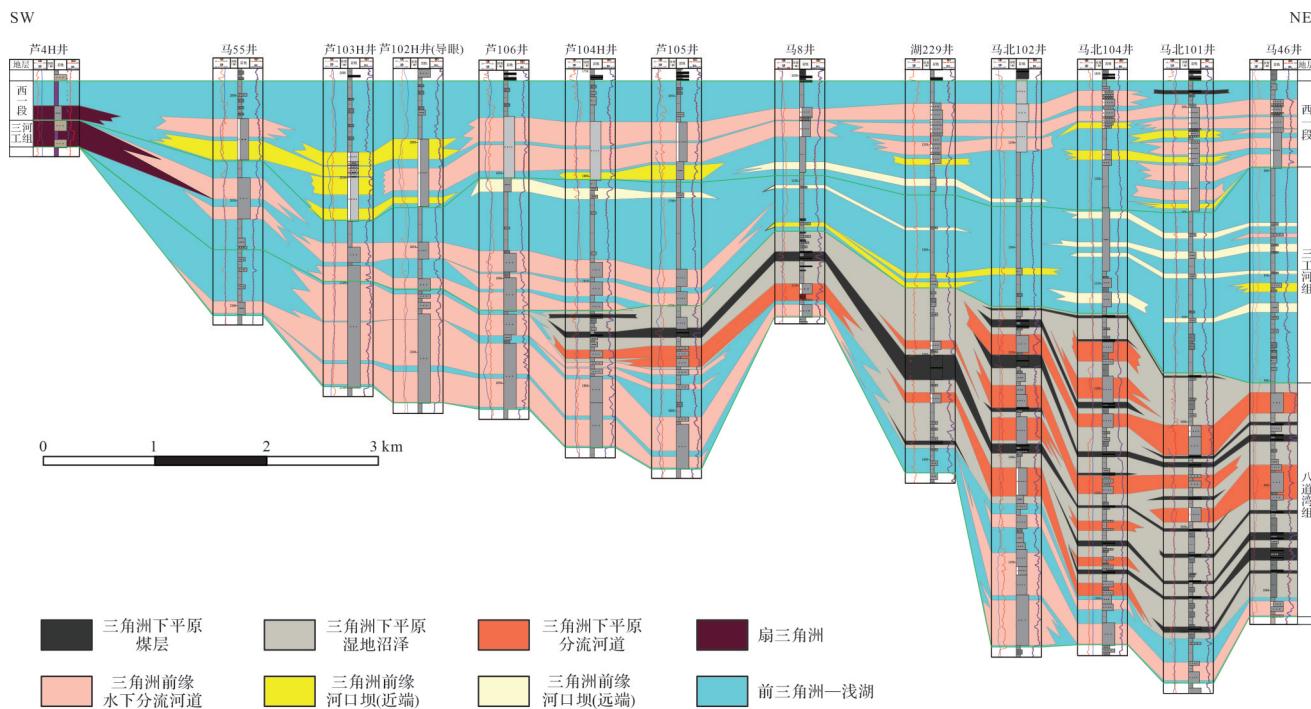


图 7 马朗凹陷中部南北向沉积剖面

Fig.7 N-S cross section along the middle of the Malang Sag, Santanghu Basin

南侧此时沉积物供给较强。凹陷北侧主要为前三角洲—浅湖泥质沉积, 沉积体系快速呈退积式向盆地边缘移动, 可能是湖盆水体加深和北侧沉积物供给不足所导致。

相对于三工河时期, 条湖—马朗凹陷内西山窑组一段的砂体分布整体范围变大(图8c)。条湖凹陷南侧发育薄层辫状河三角洲前缘砂体和上覆的三角洲下平原沉积(图6,9), 砂体局限在凹陷南部10 km

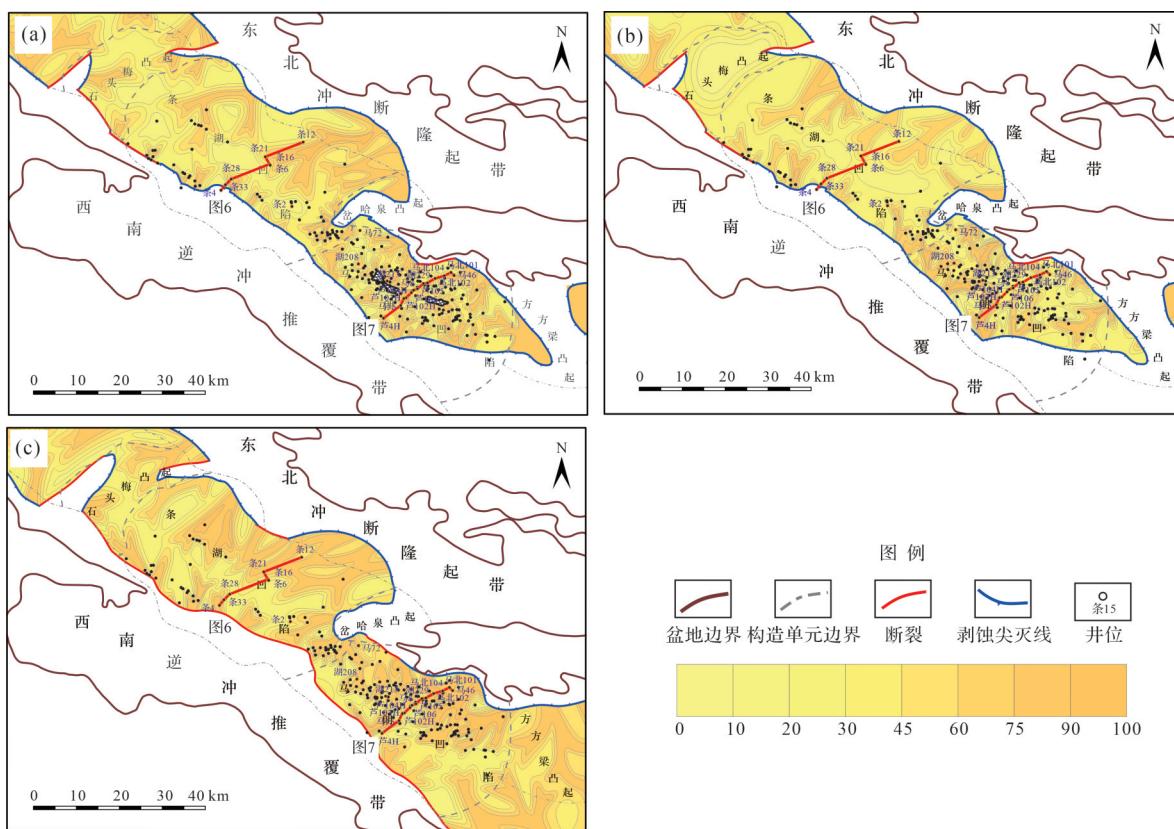


图8 三塘湖盆地条湖—马朗凹陷八道湾组、三工河组和西山窑一段砂地比平面图  
(a)八道湾组;(b)三工河组;(c)西山窑一段

Fig.8 Spatial distributions of sandstone proportion for the Badaowan Formation, Sangonghe Formation, and the First member of Xishanyao Formation in the Tiaohu-Malang Sags, Santanghu Basin

以内(图8c)。薄层的三角洲前缘以及较小分布范围表明湖盆南部的可容空间较小,湖盆深度较浅(图9c)。条湖凹陷北侧以辫状河三角洲前缘水下分流河道和少量河口坝沉积为主,砂体延伸距离为30~40 km。从该时期开始,马朗凹陷北部的砂体显著增加(0.60~0.75),砂体连片分布(图8c),沉积体系以大面积辫状河三角洲前缘水下分流河道为主(图7,9),可能表明北侧沉积物供给量大幅增加。凹陷南部砂体分布较局限且孤立,以薄层的辫状河三角洲水下分流河道和河口坝为主。

### 3 物源分析

#### 3.1 重矿物组合及其分布特征

三塘湖盆地重矿物分析主要集中于条湖凹陷下侏罗统和马朗凹陷西山窑一段。由于条湖凹陷八道湾组和三工河组取样数量较少,所以将下侏罗统的重矿物进行了合并分析。两个重点层位识别出的重矿物主要包括锆石、石榴石、白钛矿、绿帘石、金红

石、电气石、磁铁矿等。

条湖凹陷下侏罗统重矿物组合类型的平面分布具有明显的差异性,主要有四个重矿物组合(图10a)。I类重矿物组合以石榴石、锆石、白钛矿为主,含有少量磁铁矿,分布在凹陷东北部。这类组合中石榴石和锆石相对较多,指示母岩主要为变质岩和中酸性岩浆岩,而且绝大多数重矿物种类为极稳定—稳定矿物,说明条湖凹陷东北侧存在一些较远的物源区。Ⅱ类重矿物组合以白钛矿和绿帘石为主,含有少量锆石和磁铁矿,分布在凹陷西北部。这类组合含有绿帘石并且伴有磁铁矿、白钛矿,指示母岩为中基性岩浆岩和变质岩,其中绿帘石为不稳定矿物,主要来自变质岩,说明条湖凹陷西北侧存在距离较近的变质岩物源。Ⅲ类重矿物组合以磁铁矿和赤铁矿为主,含有少量白钛矿,分布在凹陷西南部。Ⅳ类重矿物组合以磁铁矿和白钛矿为主,含有少量锆石,分布在凹陷东南侧。Ⅲ类和Ⅳ类组合含磁铁矿较多,指示母岩主要为中基性岩浆岩,但物源体系略有差异,表明凹陷南部有西南侧和东南侧两个物源体系。

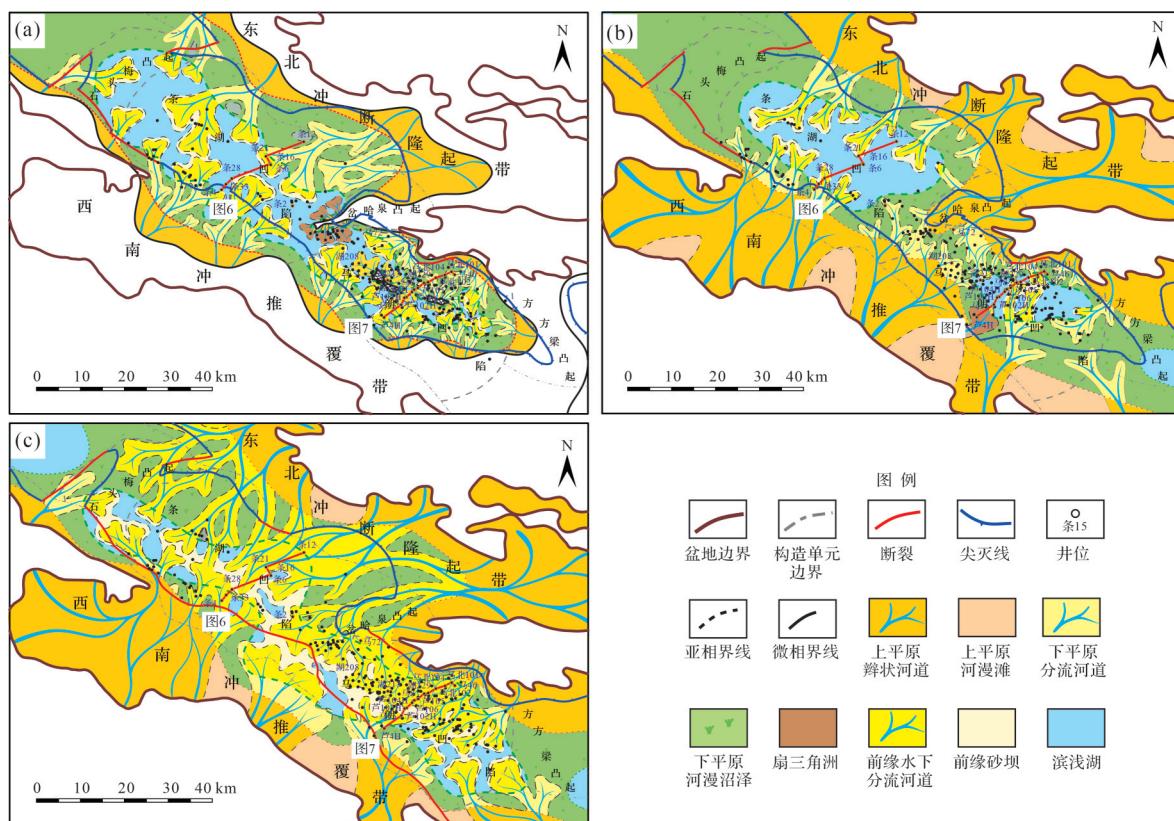


图9 三塘湖盆地条湖—马朗凹陷八道湾组、三工河组和西山窑一段沉积相平面图

(a)八道湾组;(b)三工河组;(c)西山窑一段

Fig.9 Spatial distributions of depositional environments and sedimentary facies for the Badaowan Formation, Sangonghe Formation, and the First member of Xishanyao Formation in the Tiaohu-Malang Sags, Santanghu Basin

马朗凹陷西山窑一段主要有五个重矿物组合,北侧和南侧的重矿物组合类型存在明显的差异(图10b)。I类重矿物组合以石榴石、锆石、白钛矿为主,含有少量磁铁矿和金红石,分布在凹陷西北侧。这类组合含石榴石和锆石较多,指示母岩为变质岩和中酸性岩浆岩,石榴石的含量大于锆石,说明物源体系中含有较大比例的变质岩类。II类重矿物组合以锆石和石榴石为主,白钛矿含量相对I类和III类组合中的要少,同时含有一定量的磁铁矿,分布在凹陷北侧的中部位置。这类组合指示母岩为中酸性—中基性岩浆岩和变质岩,其中锆石含量明显多于石榴石,说明中酸性岩浆岩的母岩占有较大比例。I类和II类重矿物组合总体上存在一定相似性,可能是中酸性岩浆岩和变质岩类的母岩为盆地提供不同比例的沉积物混合。III类重矿物组合以白钛矿为主,含有一定的锆石和石榴石,但含量相对于I类和II类组合明显减少,其中锆石含量相对较高,同时还有少量磁铁矿,分布在凹陷东北侧。此类组合中较多的白钛

矿指示母岩存在一定量的再旋回沉积岩<sup>[20]</sup>,其他重矿物指示少量的母岩来自中酸性—中基性岩浆岩以及变质岩类。马朗凹陷北侧的I~III类重矿物种类整体属于极稳定—稳定矿物,说明北侧距离物源区较远。IV类重矿物组合以绿帘石和磁铁矿为主,分布在凹陷西南侧。V类重矿物组合以绿帘石、石榴石、磁铁矿为主,含有少量白钛矿,分布在凹陷东南侧。马朗凹陷北侧的IV类和V类重矿物组合均含有较大比例的绿帘石和磁铁矿,指示母岩主要为变质岩和中基性岩浆岩,其中绿帘石较不稳定,说明沉积区存在较近物源区的汇入。

结合条湖—马朗凹陷沉积体系的空间展布情况,区域内北侧的中下侏罗统地层较厚、沉积体系相对更发育(图6~9),表明北部物源在该时期内向盆地内输入大量沉积物,这与前人对马朗凹陷西山窑时期的物源研究基本一致<sup>[4,21]</sup>。因此,明确北侧沉积体系的物源对砂体和储层的预测具有重要意义。

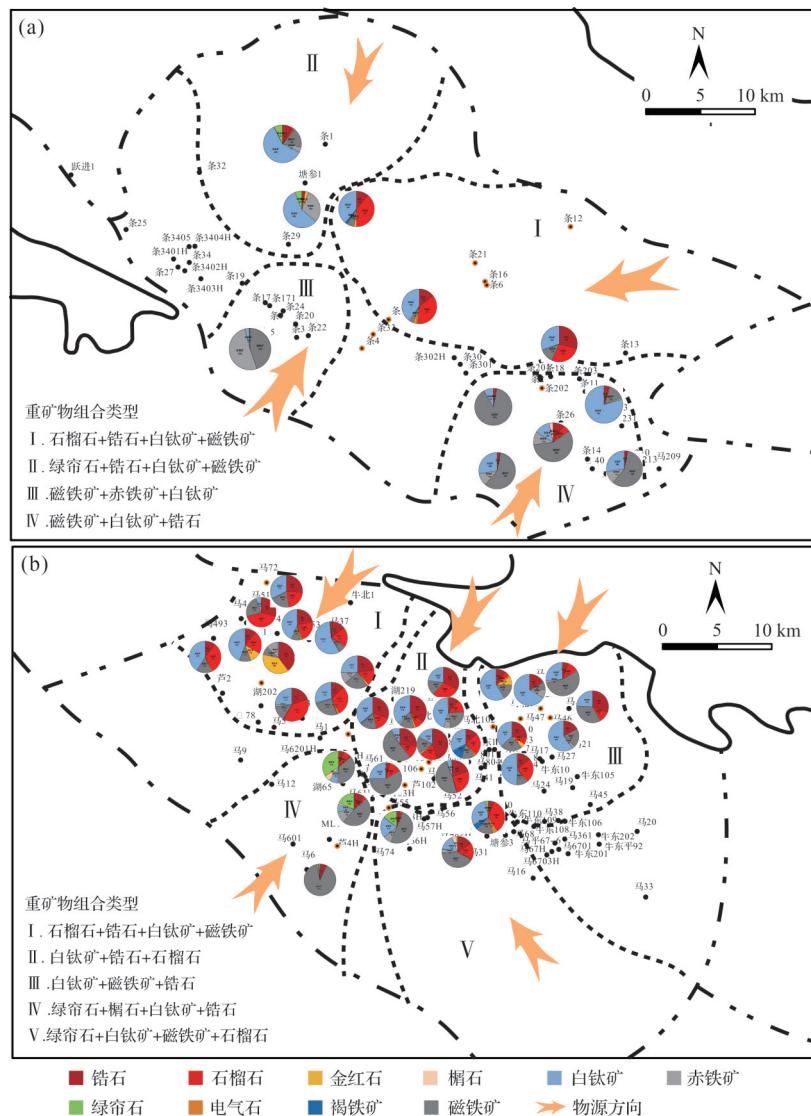


图 10 三塘湖盆地条湖凹陷下侏罗统和马朗凹陷西山窑一段重矿物组合分布  
(a)条湖凹陷;(b)马朗凹陷

Fig.10 Distribution of the heavy-mineral assemblage in the Lower Jurassic in the Tiaohu Sag and the First member of Xishanyao Formation in the Malang Sag, Santanghu Basin

### 3.2 碎屑锆石特征及年龄分布

为了进一步明确三塘湖盆地条湖—马朗凹陷的物源,对三塘湖盆地的碎屑锆石进行锆石U-Pb定年测试,选取条湖凹陷下侏罗统八道湾组一个岩心样品(T6)和马朗凹陷西山窑组两个岩心样品(M72, MB101),总共得出225个锆石U-Pb年龄。

#### 3.2.1 锆石颗粒特征

大部分锆石颗粒的阴极发光图像(CL)可见核—边结构,具有明显的振荡环带和扇形分带结构,晶体呈半自形—自形、柱形—长柱形,具有较大的长宽比,主要为岩浆成因锆石<sup>[22-23]</sup>(图11)。少量锆石呈无分带或弱分带结构,内部可见继承锆石的残留晶核,

晶型为圆形、椭圆形,长宽比较小,为变质成因的锆石<sup>[22-23]</sup>(图11)。

#### 3.2.2 锆石年龄分布特征

条湖凹陷八道湾组条6井中符合谐和度要求(大于90%)的锆石有76颗,U-Pb年龄整体分布范围为205~422 Ma,年龄数据明显分为3个区间:2颗锆石年龄分布在205~227 Ma,属于三叠纪;68颗锆石分布在269~355 Ma,属于石炭纪一二叠纪,具有两个峰值,峰值年龄分别为287 Ma和323 Ma;6颗锆石分布在406~422 Ma,属于志留纪—早泥盆纪,峰值年龄为421 Ma(图12a)。

马朗凹陷西山窑组马72井中符合谐和度要求的

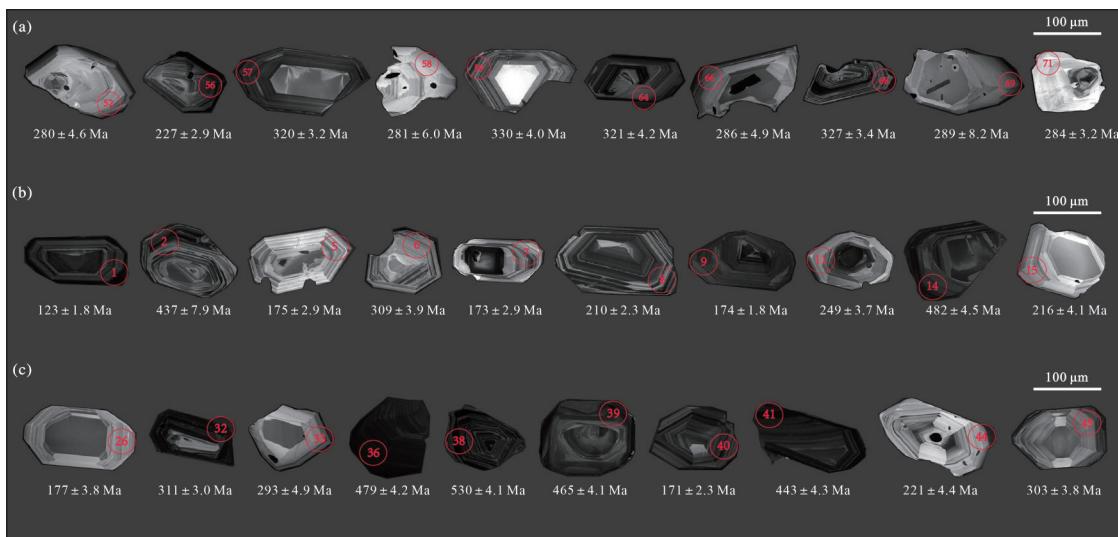


图 11 三塘湖盆地条湖—马朗凹陷砂岩样品中碎屑锆石阴极发光照片

(a)条6井,八道湾组,1978.9~1970.0 m;(b)马72井,西山窑组,1478.8~1469.4 m;(c)马北101井,西山窑组,874.4~858.7 m

Fig.11 Cathodoluminescence (CL) image of detrital zircons from the Tiaohu-Malang Sags, Santanghu Basin

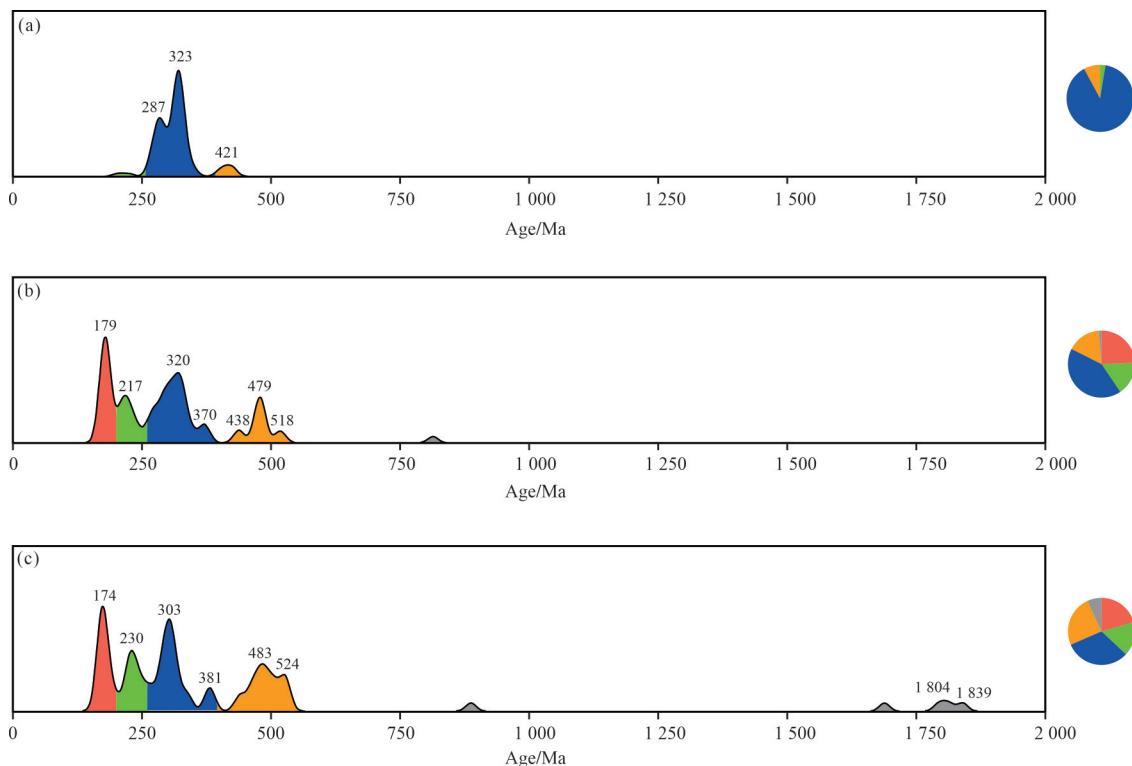


图 12 三塘湖盆地条湖—马朗凹陷碎屑锆石 U-Pb 年龄分布

(a)条6井;(b)马72井;(c)马北101井

Fig.12 U-Pb age distribution map for detrital zircons from the Tiaohu-Malang Sags, Santanghu Basin

锆石有 75 颗, U-Pb 年龄整体分布范围为 173~2 844 Ma, 年龄数据明显分为 4 个区间: 18 颗锆石年龄分布在 173~185 Ma, 属于侏罗纪, 峰值年龄为 179 Ma; 12 颗锆石年龄分布在 204~249 Ma, 属于三叠纪, 峰值年龄为 217 Ma; 31 颗锆石年龄分布在 268~

376 Ma, 属于晚泥盆纪一二叠纪, 具有两个峰值, 较大的峰值在 320 Ma, 较小的峰值在 370 Ma; 12 颗锆石年龄分布在 437~522 Ma, 属于寒武纪—志留纪, 峰值年龄为 479 Ma; 另外有两颗锆石分别分布在新元古代(814 Ma)和中太古代(2 975 Ma)(图 12b)。

马朗凹陷西山窑组马北101井中符合谐和度要求的锆石有74颗,U-Pb年龄整体分布范围为167~2 975 Ma,年龄数据明显分为5个区间:15颗锆石年龄分布在167~191 Ma,属于侏罗纪,峰值年龄为174 Ma;11颗锆石年龄分布在204~251 Ma,属于三叠纪,峰值年龄为230 Ma;24颗锆石年龄分布在258~384 Ma,属于晚泥盆纪一二叠纪,具有两个峰值,较大的峰值在303 Ma,较小的峰值在381 Ma;18颗锆石年龄分布在436~531 Ma,属于寒武纪—志留纪,具有两个峰值,较大的峰值在483 Ma,较小的峰值在524 Ma;另外有1颗锆石分布在新元古代(887 Ma)、4颗锆石分布在古元古代(1 689~1 840 Ma)、1颗锆石分布在中太古代(2 844 Ma)(图12c)。

总体而言,三塘湖盆地条湖凹陷下侏罗统和马朗凹陷西山窑组的锆石年龄分布具有一定差异性。条湖凹陷下侏罗统的锆石U-Pb年龄主要分布在269~299 Ma、300~355 Ma。马朗凹陷西山窑组的两个样品的锆石年龄分布较为相似,主要分布在167~191 Ma、204~251 Ma、258~384 Ma、436~531 Ma 4个峰值年龄段。

### 3.3 物源分析

条湖—马朗凹陷除了南缘和北缘逆冲推覆带作为近物源为盆地提供沉积物以外,同时可能存在潜在的远物源。将三塘湖盆地条湖凹陷下侏罗统和马朗凹陷西山窑组的锆石年龄与盆地周缘出露岩体年龄进行比对,并结合重矿物和其他沉积学特征,可揭示相应地层内沉积物的一些物源信息。三塘湖盆地周缘已发表的年龄数据主要分布在额德伦金山、大黑山、纸房沟以及白依山四个主要的区域(图13)<sup>[24-43]</sup>。

条湖凹陷条6井下侏罗统中的碎屑锆石年龄主要分布在石炭纪一二叠纪(269~335 Ma),占到总体锆石年龄的90%,这区间内有两个年龄峰值(287 Ma和323 Ma),其中年龄峰值323 Ma占主导,另有7%的锆石年龄分布在406~422 Ma。周缘基岩的年龄数据显示,额德伦金山西部地区锆石年龄主要集中在309~354 Ma,东部地区锆石年龄主要集中在410~427 Ma(图13)。根据锆石年龄的比对,条6井的大部分锆石年龄与额德伦金山西部地区的年龄存在一定相似性,说明条6井有较大部分物源来自额德伦金山

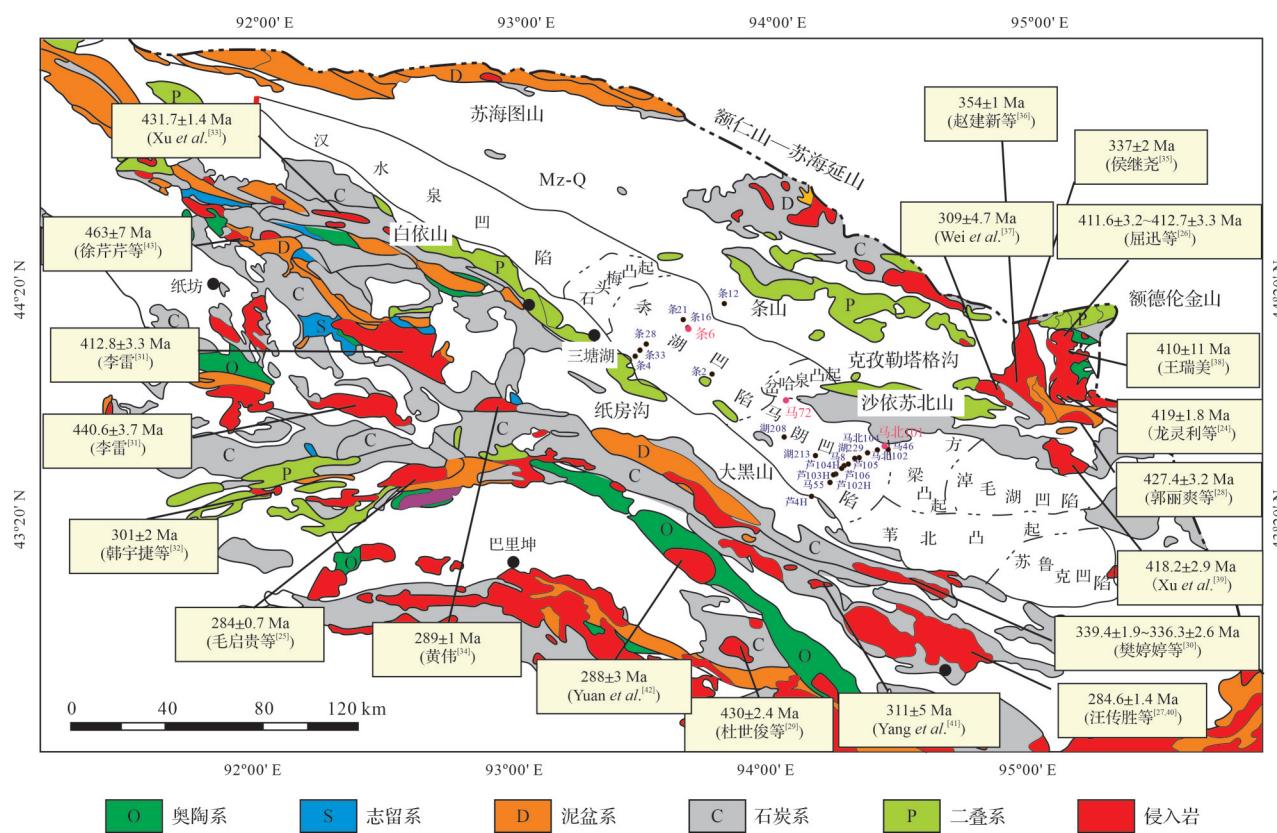


图13 三塘湖盆地周缘地质图及岩浆岩年龄分布

Fig.13 Geological map of the Santanghu Basin and surrounding areas showing published ages of igneous rocks

西部,少量年龄分布在406~422 Ma的锆石可能来自额德伦金山的东部。条湖凹陷东北部下侏罗统的锆石、石榴石和白钛矿均为非常稳定的重矿物(图10),说明该地区的沉积物可能经历了较长距离的搬运,所以东北部可能存在较远物源区的汇入。结合地层内沉积体系的空间展布情况,条湖凹陷东北部的砂体逐渐向盆地内部呈减薄的趋势,推测条湖凹陷下侏罗统的沉积物可能来自额德伦金山,通过克孜勒塔格沟汇入条湖东北地区。条湖凹陷东北侧的沙依乌苏山和岔哈泉凸起可能作为近物源为盆地提供一些沉积物(图9,13)。条湖凹陷西北侧的重矿物和沉积体系展布特征表明额仁山—苏海延山和条山的沉积物可能作为物源汇入盆地内部(图14a)。

马朗凹陷马72井和马北101井的锆石年龄谱与条湖凹陷条6井存在较大的差异(图12),表明马朗凹陷北部和条湖凹陷东北部的物源体系不同。马72井和马北101井分别有41%和32%的锆石来自晚泥盆纪一二叠纪(258~384 Ma),这部分锆石可能来自额德伦金山西部;16%和24%的锆石来自寒武纪—志留纪(436~531 Ma),这部分可能来自额德伦金山的东部(图13)。此外,马朗凹陷北部的重矿物组合均含有较大比例的锆石和石榴石,这些稳定的重矿物指示马朗凹陷北部存在较远的物源体系,沉积物经历了较长距离的搬运最终汇入马朗凹陷,这也在一定程度上证实了额德伦金山作为物源的可能性。马朗凹陷北部同时有侏罗纪和三叠纪年龄的锆石

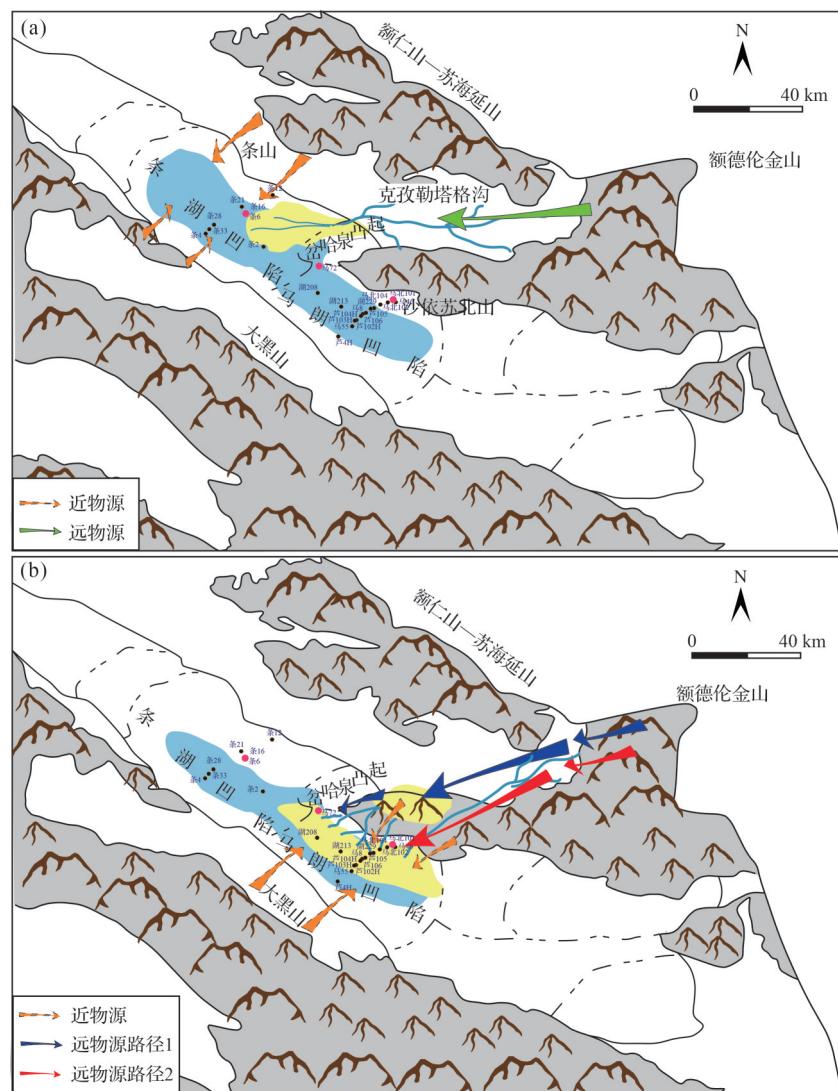


图14 三塘湖盆地条湖—马朗凹陷北部中下侏罗统沉积物搬运模式

(a)下侏罗世条湖凹陷;(b)中侏罗世马朗凹陷

Fig.14 Sediment transport models for the Lower and Middle Jurassic strata in the northern Tiaohu-Malang Sags, Santanghu Basin

(167~251 Ma),但目前在盆地周围没有相关记录,所以暂时无法确定这部分锆石的具体来源。三塘湖盆地在三叠纪时期受海西运动的影响发生构造挤压,应有岩浆活动发生,但此时期盆地整体抬升,沉积地层遭受强烈剥蚀<sup>[12]</sup>,可能导致盆地周围缺失三叠系及其相关的年代学研究。结合沉积体系发育特征和重矿物分布特征,马朗凹陷北部的源—汇体系的沉积物搬运路径存在两种可能。一种情况是沉积物来自额德伦金山,通过克孜勒塔格沟沉积到沙依苏北山和岔哈泉凸起附近,随后经历再旋回最终搬运和沉积到马朗凹陷北部(图14)。此外,马朗凹陷西山窑组一段和条湖凹陷东北部的下侏罗统重矿物组合存在相似性,也一定程度表明了这两个时期内额德伦金山持续为盆地提供沉积物的可能性。另一种情况是沉积物从额德伦金山沿着低古地貌区域,经过多次的搬运和再沉积,最终汇入马朗凹陷北部。马朗凹陷北部的重矿物组合中存在较大比例的白钛矿,在一定程度上表明沉积物存在再旋回搬运和沉积的过程。结合重矿物和其他沉积学特征,马朗凹陷北侧同样存在近距离物源的沉积物供给(图14b)。

## 4 结论

(1) 三塘湖盆地条湖—马朗凹陷中下侏罗时期以辫状河三角洲沉积环境为主。八道湾组时期,条湖—马朗凹陷北部沉积体系较为发育,辫状河三角洲下平原向南延伸较远,南部沉积体系分布范围较小且较孤立,凹陷内主要为薄层辫状河三角洲前缘沉积。三工河组时期湖盆范围增大、水体加深,条湖—马朗凹陷北部辫状河三角洲呈退积式发育,凹陷内主要为辫状河三角洲前缘和前三角洲—浅湖沉积,三角洲前缘朵体展布范围小且孤立。同一时期条湖—马朗凹陷内南部的沉积体系相对发育,以三角洲前缘水下分流河道和少量河口坝为主。西山窑组一段时期,条湖—马朗凹陷北部沉积体系普遍向南推进,凹陷北侧沉积较厚的砂体,主要为多期叠置的辫状河三角洲前缘水下分流河道砂体。条湖凹陷北部体系向南发育到凹陷中部,与南侧的辫状河三角洲下平原交汇。马朗凹陷北部的三角洲前缘大幅度推进至凹陷南侧,凹陷内部辫状河三角洲前缘水下分流河道和前缘砂体大面积连片分布,推测可能是北侧物源供给量增加所导致。马朗凹陷南部沉积体系较不发育,分布在凹陷南缘且砂体较孤立。

(2) 条湖—马朗凹陷除了盆地南缘和北缘逆冲推覆带作为近物源,同时还存在远物源的汇入。重矿物和锆石U-Pb年龄分析指示,条湖凹陷东北部下侏罗时期部分沉积物来自额德伦金山西部较远物源区,少量沉积物来自额德伦金山东部,沉积物主要通过克孜勒塔格沟经过远距离搬运,最终汇入条湖凹陷东北地区。马朗凹陷北部中侏罗时期源—汇体系存在两种可能的沉积物搬运路径,一种情况是沉积物物源来自额德伦金山,通过克孜勒塔格沟沉积到沙依苏北山和岔哈泉低凸起附近区域,随后经历再旋回最终搬运和沉积到马朗凹陷北部;另外一种情况是沉积物从额德伦金山沿着低古地貌区域汇入马朗凹陷北部。

致谢 感谢三位审稿专家和编辑部老师对文章提出的修改意见。

## 参考文献(References)

- [1] 司学强,郭沫贞,杨志力,等. 新疆三塘湖盆地马朗凹陷侏罗系西山窑组沉积特征及沉积模式[J]. 古地理学报,2015,17(4): 553-564. [Si Xueqiang, Guo Mozhen, Yang Zhili, et al. Sedimentary characteristics and models of the Jurassic Xishanyao Formation in Malang Depression, Santanghu Basin, Xinjiang[J]. Journal of Palaeogeography, 2015, 17(4): 553-564. ]
- [2] 宁松华,孙红军. 三塘湖盆地条湖凹陷沉积相特征分析[J]. 江汉石油学院学报,2003,25(1):38-40. [Ning Songhua, Sun Hongjun. Sedimentary facies in Tiaohu Depression[J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 2003, 25(1): 38-40. ]
- [3] 李玮,周鼎武,柳益群,等. 三塘湖盆地二叠纪构造层划分及其构造特点[J]. 西北大学学报(自然科学版),2005,35(5):617-620. [Li Wei, Zhou Dingwu, Liu Yiqun, et al. The division of Permian tectonic sequence and the feature of residual tectonic in Santanghu Basin[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2005, 35(5): 617-620. ]
- [4] 杨斌,郭翔,刘洪彦,等. 三塘湖盆地马朗地区重矿物特征与物源分析[J]. 石油天然气学报,2008,30(3):57-60. [Yang Bin, Guo Xiang, Liu Hongyan, et al. Application of heavy minerals in the analysis of provenance in Santanghu Basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2008, 30(3): 57-60. ]
- [5] 梁辉,李新宁,常玉琴. 条湖—马朗凹陷煤层气富集规律及开发潜力评价[J]. 中国煤层气,2016,13(1):13-17. [Liang Hui, Li Xinning, Chang Yuqin. CBM enrichment regularity and development potential evaluation in Tiaohu-Malang Sag[J]. China Coalbed Methane, 2016, 13(1): 13-17. ]
- [6] 袁文俊. 三塘湖盆地马朗凹陷中侏罗统西山窑组沉积相研究[D]. 成都:成都理工大学,2018: 1-65. [Yuan Wenjun. Three Malang Sag Santanghu Basin sedimentary Jurassic Xishanyao Formation of Middle Jurassic in the research phase[D]. Chengdu:

- Chengdu University of Technology, 2018: 1-65. ]
- [7] 张利伟,严德天,刘文慧,等.三塘湖盆地条湖凹陷中侏罗统西山窑组层序地层及聚煤规律[J].煤炭学报,2019,44(2):545-556. [Zhang Liwei, Yan Detian, Liu Wenhui, et al. Sequence strata and coal accumulation of Xishanyao Formation in Tiaohu Sag of Santanghu Basin, Sinkiang[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(2): 545-556. ]
- [8] 潘永帅,黄志龙,郭小波,等.火山灰影响下的湖相富有机质页岩油成藏条件分析:以三塘湖盆地条湖—马朗凹陷芦草沟组为例[J].地质学报,2022,96(3):1053-1068. [Pan Yongshuai, Huang Zhilong, Guo Xiaobo, et al. Analysis of accumulation conditions of lacustrine organic-rich shale oil affected by volcanic ash: A case study of the Lucaogou Formation in the Tiaohu-Malang Sag, Santanghu Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96 (3): 1053-1068. ]
- [9] 张新涛,王英民,石文龙,等.新疆东北部三塘湖盆地马朗凹陷西山窑组层序地层格架及沉积相预测[J].地质论评,2009,55(2):181-189. [Zhang Xintao, Wang Yingmin, Shi Wenlong, et al. Sequence stratigraphic framework and sedimentary facies prediction of the Xishanyao Formation in the Malang Sag, Santanghu Basin, northeastern Xinjiang[J]. Geological Review, 2009, 55(2): 181-189. ]
- [10] 欧阳征健,周鼎武,冯娟萍,等.三塘湖盆地中央拗陷南缘构造特征与油气勘探[J].西北大学学报(自然科学版),2006,36(2):285-289. [Ouyang Zhengjian, Zhou Dingwu, Feng Juanping, et al. Tectonic features and prospecting for oil and gas in the south of the center geotectogenec in Santanghu Basin[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2006, 36(2): 285-289. ]
- [11] 张军东.三塘湖盆地石炭一二叠系地层分布特征研究[D].西安:西安石油大学,2018:1-55. [Zhang Jundong. Study on the distribution characteristics of Carboniferous-Permian in Santanghu Basin[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2018: 1-55. ]
- [12] 刘艳.三塘湖盆地构造演化及其与油气的关系[D].北京:中国地质大学(北京),2010:1-64. [Liu Yan. The tectonic evolution in the Santanghu Basin and its relationship to oil and gas [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2010: 1-64. ]
- [13] 周洪瑞,王训练,刘智荣,等.准噶尔盆地南缘上三叠统黄山街组辫状河三角洲沉积[J].古地理学报,2006,8(2):187-198. [Zhou Hongrui, Wang Xunlian, Liu Zhirong, et al. Braided river delta sediments of the Huangshanjie Formation of Upper Triassic in southern Junggar Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2006, 8(2): 187-198. ]
- [14] 李维锋,何幼斌,彭德堂,等.新疆尼勒克地区下侏罗统三工河组辫状河三角洲沉积[J].沉积学报,2001,19(4):512-516. [Li Weifeng, He Youbin, Peng Detang, et al. Braided-river delta of the Lower Jurassic Sangonghe Formation in the Nileke region, Xinjiang[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(4): 512-516. ]
- [15] 邵龙义,张鹏飞,陈代钊,等.滇东黔西晚二叠世早期辫状河三角洲沉积体系及其聚煤特征[J].沉积学报,1994,12(4):132-139. [Shao Longyi, Zhang Pengfei, Chen Daizhao, et al. Braided delta depositional system and coal accumulation during early Late Permian period in eastern Yunnan and western Guizhou, Southwest China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1994, 12(4): 132-139. ]
- [16] 周丽清,吴胜和,熊琦华,等.吐哈盆地WM油田辫状河三角洲前缘砂体分析[J].沉积学报,2000,18(2):248-252. [Zhou Liqing, Wu Shenghe, Xiong Qihua, et al. Analysis of sandbodies in the braided delta front, WM oilfield, Turpan-Hami Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(2): 248-252. ]
- [17] 朱筱敏,邓秀芹,刘自亮,等.大型坳陷湖盆浅水辫状河三角洲沉积特征及模式:以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组为例[J].地学前缘,2013,20(2):19-28. [Zhu Xiaomin, Deng Xiuping, Liu Ziliang, et al. Sedimentary characteristics and model of shallow braided delta in large-scale lacustrine: An example from Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(2): 19-28. ]
- [18] 高崇龙,纪友亮,任影,等.准噶尔盆地莫索湾地区白垩系清水河组沉积演化与有利砂体展布[J].古地理学报,2015,17(6):813-828. [Gao Chonglong, Ji Youliang, Ren Ying, et al. Sedimentary evolution and favorable sandbody distribution of the Cretaceous Qingshuihe Formation in Mosuowan area, Jungar Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2015, 17(6): 813-828. ]
- [19] 尹泽,刘自亮,彭楠,等.鄂尔多斯盆地西缘上三叠统延长组沉积相特征研究[J].沉积学报,2019,37(1):163-176. [Yin Ze, Liu Ziliang, Peng Nan, et al. Study on sedimentary facies features of the Upper Triassic Yanchang Formation, in the western margin, Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(1): 163-176. ]
- [20] 呼其图,关平,王大华,等.柴达木盆地北缘东段中侏罗统物源分析:来自重矿物、元素地球化学及碎屑锆石年代学的证据[J].沉积学报,2024,42(2):466-485. [Hu Qitu, Guan Ping, Wang Dahua, et al. Provenance analysis of the Middle Jurassic in northeastern Qaidam Basin: Evidence from heavy minerals, elemental geochemistry and detrital zircon U-Pb geochronology [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2024, 42(2): 466-485. ]
- [21] 张元,郭翔,刘宏彦,等.三塘湖盆地马朗地区重矿物特征及物源分析[J].中外能源,2007,12(4):48-51. [Zhang Yuan, Guo Xiang, Liu Hongyan, et al. Analysis for heavy mineral combination characteristics and detritus sources in Malang Depression of Santanghu Basin[J]. Sino-Global Energy, 2007, 12(4): 48-51. ]
- [22] Vavra G. Systematics of internal zircon morphology in major Variscan granitoid types[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1994, 117(4): 331-344.
- [23] 吴元保,郑永飞.锆石成因矿物学研究及其对U-Pb年龄解释的制约[J].科学通报,2004,49(16):1589-1604. [Wu Yuanbao,

- Zheng Yongfei. Study on the mineralogy of zircon origin and its constraints on U-Pb age interpretation[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(16): 1589-1604. ]
- [24] 龙灵利,高俊,熊贤明,等. 新疆中天山南缘比开(地区)花岗岩地球化学特征及年代学研究[J]. 岩石学报,2007,23(4): 719-732. [Long Lingli, Gao Jun, Xiong Xianming, et al. Geochemistry and geochronology of granitoids in Bikai region, southern Central-Tianshan mountains, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(4): 719-732. ]
- [25] 毛启贵,肖文交,韩春明,等. 东准噶尔地区晚古生代向南增生:来自A型花岗岩的启示[J]. 岩石学报,2008,24(4): 733-742. [Mao Qigui, Xiao Wenjiao, Han Chunming, et al. Late Paleozoic south-ward accretionary polarity of the eastern Junggar orogenic belt: Insight from the Dajishan and other A-type granites[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(4): 733-742. ]
- [26] 屈迅,徐兴旺,梁广林,等. 蒙西班牙型铜钼矿地质地球化学特征及其对东准噶尔琼河坝岩浆岛弧构造属性的制约[J]. 岩石学报,2009,25(4): 765-776. [Qu Xun, Xu Xingwang, Liang Guanglin, et al. Geological and geochemical characteristics of the Mengxi Cu-Mo deposit and its constraint to tectonic setting of the Qiongheba magmatic arc in eastern Junggar, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(4): 765-776. ]
- [27] 汪传胜,顾连兴,张遵忠,等. 东天山哈尔里克山区二叠纪高钾钙碱性花岗岩成因及地质意义[J]. 岩石学报,2009,25(6): 1499-1511. [Wang Chuansheng, Gu Lianxing, Zhang Zunzhong, et al. Petrogenesis and geological implications of the Permian High-K calc-alkaline granites in Harlik Mountains of eastern Tianshan, NW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(6): 1499-1511. ]
- [28] 郭丽爽,张锐,刘玉琳,等. 新疆东准噶尔铜华岭中酸性侵入体锆石U-Pb年代学研究[J]. 北京大学学报(自然科学版),2009,45(5): 819-824. [Guo Lishuang, Zhang Rui, Liu Yulin, et al. Zircon U-Pb age of Tonghualing intermediate-acid intrusive rocks, eastern Junggar, Xinjiang[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2009, 45(5): 819-824. ]
- [29] 杜世俊,屈迅,邓刚,等. 东准噶尔和尔赛斑岩铜矿成岩成矿时代与形成的构造背景[J]. 岩石学报,2010,26(10): 2981-2996. [Du Shijun, Qu Xun, Deng Gang, et al. Chronology and tectonic setting of the intrusive bodies and associated porphyry copper deposit in Hersai area, eastern Junggar[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(10): 2981-2996. ]
- [30] 樊婷婷,周小虎,柳益群,等. 新疆大黑山东部姜巴斯套组下段的凝灰岩锆石LA—ICP—MS U—Pb年龄及其地质意义[J]. 沉积学报,2011,29(2): 312-320. [Fan Tingting, Zhou Xiaohu, Liu Yiqun, et al. Crystal tuff zircon LA-ICP-MS U-Pb ages from the Lower Jiangbasitao Formation in the East Daheishan area, Xinjiang and their geological implications[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(2): 312-320. ]
- [31] 李雷. 新疆东准噶尔地区志留纪花岗岩浆作用及构造意义研究[D]. 西安:西北大学,2012: 1-60. [Li Lei. Silurian granitic magmatism and dynamic significance in eastern Junggar, Xinjiang[D]. Xi'an: Northwest University, 2012: 1-60. ]
- [32] 韩宇捷,唐红峰,甘林. 新疆东准噶尔老鸦泉岩体的锆石U-Pb年龄和地球化学组成[J]. 矿物学报,2012,32(2): 193-199. [Han Yujie, Tang Hongfeng, Gan lin. Zircon U-Pb ages and geochemical characteristics of the Laoyaquan A-type granites in east Junggar, north Xinjiang, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2012, 32(2): 193-199. ]
- [33] Xu X W, Jiang N, Li X H, et al. Tectonic evolution of the East Junggar terrane: Evidence from the Tahei tectonic window, Xinjiang, China[J]. Gondwana Research, 2013, 24(2): 578-600.
- [34] 黄伟. 东天山哈密地区石炭—二叠纪碱性花岗岩年代学、地球化学及成因[D]. 北京:中国地质大学(北京),2014: 1-79. [Huang Wei. Geochronology, geochemistry and origin of Carboniferous-Permian alkali granites in eastern Tianshan, Hami, NW China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014: 1-79. ]
- [35] 侯继尧. 东准噶尔淖毛湖地区晚古生代花岗岩成因及地质意义[D]. 北京:中国地质大学(北京),2015: 1-55. [Hou Jiyao. East Junggar Naomo Lake area Late Paleozoic granite genesis and geological implication[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015: 1-55. ]
- [36] 赵建新,童英,孟贵祥,等. 新疆东准噶尔绿石沟高Ba-Sr石英二长岩的锆石U-Pb年龄、成因及地质意义[J]. 岩石矿物学杂志,2017, 36 (5): 743-754. [Zhao Jianxin, Tong Ying, Meng Guixiang, et al. Zircon U-Pb age and petrogenesis of the Lushigou high Ba-Sr quartz-monzonite in East Junggar, Xinjiang, and its geological significance[J]. Acta Petrologica Et Mineralogica, 2017, 36(5):743-754. ]
- [37] Wei X F, Zhang X, Xu J H, et al. Geochemical and geochronological studies of the Aketas granite from Fuyun county, Xinjiang: the implications of the petrogenesis and tectonic setting [J]. Chinese Journal of Geochemistry, 2015, 34(4): 579-591.
- [38] 王瑞美. 新疆东准噶尔蒙西铜矿床地球化学特征及矿床成因探讨[D]. 西安:长安大学,2014: 1-66. [Wang Ruimei. Geochemical characteristics and genesis of Mengxi Cu deposit in the eastern Junggar, Xinjiang[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012: 1-66. ]
- [39] Xu X W, Mao Q, Li X H, et al. Copper-zinc albite porphyry in the Hersai porphyry copper deposit, east Junggar, China: A transition between late magmatic and hydrothermal porphyry copper deposit[J]. Ore Geology Reviews, 2014, 61:141-156.
- [40] 汪传胜,张遵忠,顾连兴,等. 东天山伊吾二叠纪花岗质杂岩体的锆石定年、地球化学及其构造意义[J]. 岩石学报,2010, 26 (4): 1045-1058. [Wang Chuansheng, Zhang Zunzhong, Gu Lianxing, et al. Zircon geochronology and geochemical characteristics of the Permian granitic complex at Yiwu, eastern Tianshan: Their tectonic significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(4):1045-1058. ]

- [41] Yang G X, Li Y J, Wu H G, et al. Geochronological and geochemical constrains on petrogenesis of the Huangyangshan A-type granite from the east Junggar, Xinjiang, NW China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 40(3): 722-736.
- [42] Yuan C, Sun M, Wilde, S, et al. Post-collisional plutons in the Balikun area, east Chinese Tianshan: Evolving magmatism in response to extension and slab break-off[J]. Lithos, 2010, 119(3/4): 269-288.
- [43] 徐芹芹, 赵磊, 牛宝贵. 新疆东准噶尔纸房地区早古生代花岗岩的确定及其地质意义[J]. 地质力学学报, 2015, 21(4): 502-516. [Xu Qinjin, Zhao Lei, Niu Baogui. Determination of the Early Paleozoic granite in Zhifang area, east Junggar, Xinjiang and its geological implications [J]. Journal of Geomechanics, 2015, 21(4): 502-516. ]

## Depositional Evolution and Provenance Analysis of the Santanghu Basin, Xinjiang: An example from the Early to Middle Jurassic Tiaohu-Malang Sags

PENG Yang<sup>1</sup>, WANG Bo<sup>2</sup>, YU HaiYue<sup>3</sup>, DONG YuYang<sup>2</sup>, SHENG LiNa<sup>1</sup>, YANG LinNa<sup>1</sup>, LIU ShaoZhi<sup>2</sup>, WANG ShaoYi<sup>2</sup>, ZHU Chen<sup>1</sup>

1. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

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

3. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina TuHa Oilfield Company, Hami, Xinjiang 839009, China

**Abstract:** [Objective] The Santanghu Basin is an important oil and gas exploration area in northern Xinjiang. A thorough understanding of sedimentary facies, sandbody distribution, and associated provenance system within the basin is crucial for guiding the oil and gas exploration and development in the study area. [Methods] Using core and well logging data, the distribution characteristics and depositional evolution were studied for the Lower to Middle Jurassic Tiaohu-Malang Sags in the Santanghu Basin. Additionally, heavy minerals and detrital U-Pb dating were combined to analyze the provenance for key stratigraphic intervals. [Results] During the Lower to Middle Jurassic, the Tiaohu-Malang Sags were in braided-river deltaic depositional environments. During the depositional period of the Badaowan Formation, the braided-river deltaic system in the north was more developed and extended far to the south, whereas the southern system had a limited distribution. The Sangonghe Formation was dominated by braided-river delta front and prodelta-shallow lake deposits as the lacustrine basin expanded. As the depocenter migrated southward during the early Xishanyao, a large number of braided-river distributary channels and delta-front sandbodies developed in the north, intersecting with the lower braided-river delta plain and delta front of the southern system. Sediments originated from a mix of short-distance and long-distance source areas. The short-distance sources were the thrust-nappe belts in the northern and southern margins of the basin, whereas the long-distance source likely came from the Edelunjin Mountains, transported into the northeastern part of the Tiaohu Sag and the northern part of the Malang Sag through low paleotopographic areas. [Conclusions] Analysis of the sedimentary system and the ‘source-to-sink’ system reveals the distribution of sedimentary facies and sandbodies in the Middle Jurassic Tiaohu-Malang Sags. This provides a geological basis for oil and gas exploration in the Santanghu Basin.

**Key words:** Santanghu Basin; Tiaohu Sag; Malang Sag; braided river delta; provenance analysis