论文

准噶尔盆地南缘中-下侏罗统浅水三角洲类型及其构造和气候指示意义

房亚男^①, 吴朝东^{①②*}, 王熠哲^{①②}, 马健^①, 周天琪^{①②}^① 北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871;^② 北京大学石油与天然气研究中心, 北京 100871

* E-mail: cdwu@pku.edu.cn

收稿日期: 2016-05-08; 接受日期: 2016-06-01; 网络出版日期: 2016-06-24

国家科技重大专项(编号: 2011ZX05009-001)资助项目

摘要 大型坳陷湖盆浅水三角洲砂体已成为我国陆相盆地岩性油气藏勘探的重要目标. 中生代, 准噶尔盆地开始全面进入陆相坳陷湖盆发展阶段, 早-中侏罗世天山逐步的准平原化, 为准噶尔盆地南缘(简称准南)浅水三角洲的发育提供了非常有利的地形条件. 但目前准南中-下侏罗统沉积相研究仍缺乏系统性且存在较大的争议. 本文对准南多条剖面中-下侏罗统地层进行了精细的沉积特征观察, 并结合粒度分析, 最终识别出 3 种不同的湖泊浅水三角洲相: (1) 浅水辫状河平原三角洲, 见于八道湾组, 具有线状近物源, 砂砾岩为主, 发育广阔的水上和地下水分支河道, 河口坝和远砂坝欠发育; (2) 浅水河口坝型曲流河三角洲, 见于三工河组, 河口坝非常发育, 受湖浪影响横向延展性强; (3) 极浅水曲流河三角洲, 见于西山窑组, 以发育广阔的三角洲平原为特征, 前缘欠发育. 中-下侏罗统三角洲相模式的转变体现了一个先湖侵后湖退的过程, 与物源区持续后退、盆地持续扩张相矛盾, 指示了中侏罗统西山窑组相较于下侏罗统八道湾组和三工河组相对干旱的气候或盆地基底的整体抬升. 侏罗纪气候变化和盆地内部缓慢隆起共同控制了准噶尔盆地南缘可容纳空间的变化.

关键词 天山, 坳陷湖盆, 浅水三角洲, 沉积特征, 可容纳空间

1 引言

“三角洲”的研究可追溯到公元前 450 年, 航海家和历史学家 Herodotus 发现尼罗河入海口处冲积平原形态类似于古希腊字母“Δ”. 19 世纪 80 年代, Gilbert 首次对古代三角洲进行了研究(美国更新世 Bonneville 湖泊三角洲), 并识别出三角洲沉积垂向上

由三层结构组成: 顶积层、前积层和底积层, 且前积层沉积厚度远大于顶积层和底积层^[1-3]. 此后, 是否发育厚层倾斜前积层通常被作为判别古代三角洲的标志^[4-9]. 但事实上, 存在大量的三角洲以厚层顶积层为主, 形成于分支河道和河道间等沉积环境, 前积层欠发育甚至不发育, 厚层顶积层直接覆盖于底积层之上^[10-22]. 多位学者通过综合对比上述两种三角

引用格式: 房亚男, 吴朝东, 王熠哲, 等. 准噶尔盆地南缘中-下侏罗统浅水三角洲类型及其构造和气候指示意义. 中国科学: 技术科学, 2016, 46: 737-756
Fang Y N, Wu C D, Wang Y Z, et al. Lower to Middle Jurassic shallow-water delta types in the southern Junggar Basin and implications for the tectonic and climate (in Chinese). Sci Sin Tech, 2016, 46: 737-756, doi: 10.1360/N092016-00172

洲的物源供应体系类型(冲积扇、辫状河平原、辫状河或曲流河)和蓄水盆地(湖、海)水体深度及边缘坡角大小可知, 以前积层为主的三角洲(Gilbert 型三角洲)一般形成于近物源、蓄水盆地边缘坡角大、水体较深的盆地中, 如断陷盆地; 而以顶积层为主的三角洲则通常形成于边缘以缓坡浅水为特征的蓄水盆地中, 如大型陆内坳陷盆地^[15,16,22,23]。Postma^[16]将前者称为深水三角洲, 后者为浅水三角洲。

我国多个陆相大型坳陷湖盆发育典型的浅水三角洲, 如鄂尔多斯盆地^[24-27]、松辽盆地^[28-30]和渤海湾盆地^[31]等。油气勘探表明, 这些盆地的浅水三角洲砂体均为岩性油气藏勘探的重要目标。中生代准噶尔

盆地开始全面进入陆相坳陷湖盆发展阶段, 早-中侏罗世天山构造稳定, 逐步的准平原化^[32-36], 为准噶尔盆地南缘(简称淮南)浅水三角洲的发育提供了非常有利的地形条件。受印度-欧亚板块碰撞远程效应的影响, 准噶尔盆地南缘出露完整的侏罗系地层, 吸引了大量的学者对其进行古沉积环境恢复, 但由于缺乏系统性研究, 仍存在较大的争议^[37-47]。本文在准噶尔盆地南缘选取多条剖面, 首先分别对每条剖面中-下侏罗统地层进行详细的野外沉积特征观察及沉积相解释, 然后对各剖面沉积相进行时空对比, 最终得出早-中侏罗世准噶尔盆地南缘发育 3 种不同的大型坳陷湖盆浅水三角洲(图 1(b))。淮南中-下侏罗统

图 1 (网络版彩图)天山北缘地质简图^[48]

三角洲演化对区域构造和气候具有重要的指示意义。

2 地质背景

准噶尔盆地位于中亚造山带西南缘、天山北缘(图 1)。晚石炭世中亚造山运动基本结束, 准噶尔盆地开始进入全面陆相湖盆发展阶段, 并依次经历了晚古生代造山后伸展期、中生代-古近纪构造相对平静期和新近纪强烈拗陷期^[49-52]。因此, 现今准噶尔盆地为一个大型复合叠加盆地, 分别由二叠纪裂陷盆地^[32,53,54]、中生代-古近纪陆内拗陷盆地^[32,33,36,42,43,54,55]和新近纪前陆盆地^[56-65]叠加而成。

受印度-欧亚板块碰撞远程效应的影响, 准噶尔盆地南缘出露有完整的中生代地层, 自下而上可划分为三叠系、下侏罗统八道湾组和三工河组、中侏罗统西山窑组、中-上侏罗统头屯河组、齐古组和喀拉扎组以及白垩系^[48](图 2)。中-下侏罗统八道湾组和西山窑组为准噶尔盆地重要的含煤层系, 盆地边缘可见大面积煤层自燃现象, 总体为河流-三角洲相沉积; 下侏罗统三工河组为一套三角洲-湖泊相沉积, 无工业煤层^[42,43,66-69]。准噶尔盆地南缘中-上侏罗统头屯河组和齐古组沉积以红色基调为主, 有机质含量极低, 并发育大量的石膏、钙质结核、泥裂及雨痕等, 整体为一套干旱气候下的河湖相沉积; 上侏罗统喀拉扎组砾岩则为典型的冲积扇砾岩^[42,43,66,67]。

3 淮南中-下侏罗统沉积相分析

相的概念首次由瑞士地质学家 Gressly^[70]提出, 并被 Middleton^[71]较好的总结。相是指形成于特定沉积环境中的具有相似沉积特征的岩石单元。为了便于区分不同的沉积相, 相通常根据其形成的沉积环境进行命名, 如河流相、三角洲相、湖泊相等^[72]。沉积特征是判别沉积相的重要标志, 主要包括岩石的颜色、物质成分、结构、构造、化石、岩石组合特征等。本文对准噶尔盆地南缘后峡、玛纳斯河、桃树园、头屯河和白杨沟剖面, 中-下侏罗统八道湾组到西山窑组进行了详细的野外沉积特征观察及描述, 并在此基础上恢复了各剖面不同时期的主要沉积相类型(图 1(b))。

3.1 八道湾组

准噶尔盆地南缘八道湾组在多条剖面中出露齐

全, 但各剖面沉积特征显示较大的差异, 下文为不同剖面八道湾组沉积特征的详细描述及沉积相解释。

3.1.1 后峡剖面

(1) 沉积特征描述。后峡为天山北缘、乌鲁木齐南部的小型山间盆地, 八道湾组出露良好(图 1(b))。下部由厚层砂砾岩(图 3(a), (b))和大段炭质泥岩夹煤层(图 3(c), (d))交替沉积而成。厚层砂砾岩段中含多个宽/厚比值较高的透镜体, 单个透镜体向上粒度变细, 发育大型斜层理及底部冲刷构造。此外, 透镜状砂砾岩在横向和垂向上充分叠置拼合, 相互切割, 其间不存在泥岩或细粒岩隔夹层, 仅以冲刷面分开, 构成复合砂砾体, 厚度约 2~10 m。复合砂砾体之间部分叠置, 但大部分被薄层不连续且有机质含量高的泥岩或细粒砂岩隔开, 相对独立(图 3(b))。后峡八道湾组上部主体为一系列 10 cm 左右厚的席状中细砾岩和砂岩相互叠置沉积(图 3(e), (f)), 并夹多个厚约 50 cm, 横向延伸 60~100 m, 底部具冲刷构造的透镜状砂砾岩(图 3(e), (g))。

(2) 沉积环境解释。后峡八道湾组下部厚层的砂砾岩段为典型的辫状河河道沉积。复合砂砾岩体由单个透镜状河道砂体在垂向和横向紧密叠置而成, 代表了短时间内辫状河频繁迁移改道, 由河流水动力大及沉积物可容纳空间较小造成, 通常形成于近物源区。复合河道砂体之间的薄层有机质含量高的泥岩可解释为河漫滩沉积, 可能代表洪水期过后, 河流流量相对变小, 改道能力减弱, 加之八道湾组沉积期气候温暖潮湿、植被繁盛, 有利于堤岸巩固, 从而在一定程度上抑制河流改道, 使得河漫滩可以较好的发育, 直到下一次洪水期到来, 河流再次频繁改道形成另一个河道砂岩复合体。仅凭厚层的砂砾岩段很容易将其划分为近源辫状河沉积, 但却无法解释垂向上交替沉积的厚层炭质泥岩。综合上下地层关系, 本文将后峡八道湾组下部解释为温暖潮湿气候下的冲积扇沉积。干旱环境下的山前冲积扇沉积过程更体现阵发性, 泥石流沉积占主体, 而潮湿气候形成的洪积扇(湿地扇)则具有持续性, 且扇体规模更大, 河流沉积占主体, 缺少泥石流沉积^[72,73]。湿地扇中的辫状河沉积与普通辫状河沉积不易区分, 二者的主要区别在于前者发育在盆山边界, 坡度较后者大, 在扇体的边缘易散开形成漫流。综上可知, 后峡八道湾组下部厚层砂砾岩段为湿地扇中的辫状河道

图2 准噶尔盆地南缘中生代地层综合柱状图^[37]

沉积, 而厚层炭质泥岩、煤层段则发育于扇体边缘广阔的漫流地带. 后峡八道湾组上部由席状砂岩和细砾岩层交替沉积形成的巨厚层岩层非常符合湿地扇中的漫流沉积, 为洪水期水流漫出河道沉积而成, 其所夹中厚层透镜状、底部具冲刷构造砂砾岩层则为冲积扇中的河道沉积.

3.1.2 玛纳斯河剖面

(1) 沉积特征描述. 玛纳斯河剖面位于准噶尔盆

地南缘中西部(图 1(b)), 八道湾组整体以砂砾岩沉积为主, 细粒沉积较少, 发育薄层的煤层, 由一系列向上粒度向上变细的层序组成(图 4(a)). 单个层序底部厚层的砂砾岩层(5~6 m)通常由多个宽/厚比值高的透镜体在垂向和横向上相互叠置而成, 其间几乎没有泥岩夹层, 仅以底部的冲刷面相互分开, 并常见大型斜层理及槽状交错层理. 此外, 砾石为颗粒支撑, 分选较差, 磨圆非常好, 成分复杂, 中粗砂岩粒度概率曲线呈明显的二段式, 跳跃组分占主体, 含少量悬浮

图 3 (网络版彩图)后峡八道湾组沉积特征及环境解释

组分(图 5(a)). 单个层序上部的薄层细砂岩粒度概率曲线仍包含 2 个次总体, 但悬浮组分含量明显增多(图 5(b)).

(2) 沉积环境解释. 玛纳斯河剖面八道湾组沉积特征类似于后峡剖面湿地扇中的辫状河沉积, 但相较于后峡剖面, 缺少厚层炭质泥岩沉积, 仅发育薄层

图 4 (网络版彩图)准噶尔盆地南缘八道湾组地层综合对比图

图 5 (网络版彩图)淮南中-下侏罗统典型沉积环境粒度概率图

(a) 分支河道; (b) 河漫滩(支流间湾); (c) 河口坝; (d) 浅湖

的细粒沉积。因此, 玛纳斯河剖面八道湾组为典型的辫状河沉积, 靠近物源区, 河流水动力大, 改道频繁, 横向、垂向紧密叠置的砂砾岩为辫状河心滩沉积, 薄层欠发育的细粒岩为河漫滩沉积。

3.1.3 桃树园剖面

(1) 沉积特征描述。桃树园剖面位于吐哈盆地西

北部, 1:150 万地质图中未将侏罗系地层绘制出来(图 1(b))。受新生代印度-欧亚板块碰撞远程效应影响, 桃树园地区中生代地层变形强烈, 形成多个背向斜, 本文研究剖面(图 6(a))位于背斜的左翼, 地层发生倒转, 图 6(b)为解释层段经过地层矫正后的结果。由全景剖面图可知, 桃树园八道湾组垂向上由透镜状砂砾岩群和厚层泥岩交替沉积组成(图 6(a), (b))。透镜

图6 (网络版彩图)桃树园剖面八道湾组沉积特征及环境解释

状砂砾岩群横向延伸数千米, 透镜体之间常被薄层深灰色泥岩分割, 彼此孤立不连通, 长度分布在10~50 m之间, 厚度约1~2 m, 宽/厚比值大, 底部发育冲刷构造, 粒度向上变细, 常见不对称性波痕及保存完整的植物茎秆(图6(c), (d)). 厚层泥岩有机质含量非常丰富, 夹少量薄层透镜状中砂岩, 粒度概率曲线由2个次总体组成——跳跃组分和悬浮组分, 并以悬浮组分为主, 悬浮组分中中细粒颗粒含量较多, 表明较强的水动力(图5(c), 6(e)).

(2) 沉积环境解释. 桃树园剖面八道湾组沉积组合特征非常符合浅水辫状河平原三角洲(braidplain delta)沉积特征. 横向延伸数千米的砂砾岩透镜体群可解释为浅水辫状河平原三角洲前缘线状水下分支河道频繁改道的产物. 辫状河向湖泊延伸过程中, 沉积可容纳空间增大, 河流水动力和改道能力相对降低, 因此河道砂体呈孤立式分布, 不同于后峡和玛纳斯河剖面中发育的紧密叠加式河道. 与陆上辫状河相比, 尽管水下分支河道改道能力降低, 但仍然保持活跃的改道特性, 从而导致水下分支河道间的细粒沉积物无法较好的保存. 此外, 水下分支河道的频繁

迁移改道也抑制了前缘河口坝的形成, 仅保留少数薄层河口坝砂体, 河口较强的水动力使得碎屑物质以悬浮沉积为主. 厚层有机质含量丰富的泥岩可解释为前三角洲沉积. 垂向上水下分支河道透镜体群与前三角洲泥岩交替沉积表明湖平面频繁变化, 指示了浅水缓坡型湖盆特征, 小规模湖平面上升都会造成大范围的湖侵.

3.1.4 头屯河剖面

(1) 沉积特征描述. 头屯河剖面位于乌鲁木齐西侧(图1(b)), 八道湾组地层出露完整, 整体表现为厚层泥岩夹横向分布稳定的砂砾岩层, 砂岩粒度概率曲线表现为明显的三段式, 以跳跃组分为主(图4(b), 5(a), 7(a)). 砂砾岩层内部往往由多个透镜体相互叠置而成, 主要存在两种叠置方式: ① 透镜体之间侧向叠加, 其间无泥岩夹层或存在薄层的不连续性泥岩夹层(图7(b)); ② 透镜体呈孤立式分布, 彼此不连通, 被泥岩完全分隔开(图7(e)). 单个透镜体厚约1~3 m, 横向延伸10~50 m, 宽厚比值较大, 粒度向上变细, 底部发育冲刷构造, 常见大型槽状交错层理及大

图 7 (网络版彩图)头屯河剖面八道湾组沉积特征及环境解释

(c), (d) 部分重叠, (e)为(c), (d)的解释图

型斜层理(图 7(f)). 巨厚层泥岩有机质含量丰富, 常见植物叶片化石, 大部分泥岩段在垂向 5~10 m 的厚度中泥质含量几乎 100%, 透镜状砂砾岩直接冲刷其上(图 7(g)); 部分泥岩段含厚 20~30 cm, 横向延伸数米的上凸型透镜砂岩体(图 7(h)).

(2) 沉积环境解释. 总体上, 头屯河剖面八道湾组沉积特征与桃树园剖面类似, 只是相对于桃树园剖面, 泥岩段所占比例增大, 砂砾岩段含量降低. 因此, 头屯河剖面八道湾组仍为浅水辫状河平原三角洲(braidplain delta)前缘沉积. 横向分布稳定的砂砾岩体为前缘线状水下分支河道频繁迁移改道的结果, 厚层有机质含量高的泥岩则为前三角洲沉积, 薄层上凸型砂岩透镜体可解释为前缘河口坝沉积. 因此, 与桃树园地区一样, 八道湾组沉积期头屯河地区湖盆边缘坡缓水浅, 湖平面频繁升降, 从而造成前缘水下分支河道和前三三角洲交替沉积. 只是相对于桃树园地区, 头屯河地区更靠近盆地中心, 因而泥岩含量较高.

3.1.5 白杨沟剖面

(1) 沉积特征描述. 白杨沟剖面位于乌鲁木齐东侧, 博格达山西北缘(图 1(b)). 八道湾组地层覆盖严重, 仅建立了部分地层综合柱状图(图 4(c)). 白杨沟剖面八道湾组主体由灰色泥岩夹薄层中粗砂岩组成. 下部含 3 层厚约 2~5 m 的透镜状粗砂岩, 发育大型斜层理及槽状交错层理, 粒度概率曲线由两个粒度次总体构成一跳跃组分和悬浮组分, 并以跳跃组分为主, 而其上部薄层细砂岩则主要由悬浮组分构成(图 5(a), (b)).

(2) 沉积环境解释. 基于对头屯河和桃树园剖面的解释, 白杨沟剖面八道湾组下部透镜状砂岩仍为浅水缓坡型辫状河平原三角洲前缘水下分支河道沉积, 而灰色泥岩夹薄层中粗砂岩则沉积于浅湖环境中. 因此, 相对于桃树园和头屯河剖面, 白杨沟剖面更靠近湖盆中心.

3.2 三工河组

3.2.1 头屯河剖面

(1) 沉积特征描述. 头屯河剖面三工河组地层保存非常完整, 下部 140 m 以厚层灰绿色泥岩夹薄层横向连续性非常好的细砂岩为特征(图 8(a), 9(a)), 水平层理、波纹层理(图 9(c))及小型斜层理(图 9(d))非常发育. 细砂岩粒度概率曲线由悬浮组分组成, 且被分为

2 个直线段, 二者斜率稍有差别, 可能分别为湖浪的冲流和回流沉积作用(图 5(d)). 此外, 厚层泥岩中亦夹两层透镜状、向上粒度变细、底部具明显冲刷构造的中砂岩, 发育大型斜层理(图 8(a), 9(a)). 向上 140~460 m 粗粒沉积物所占比例明显增加, 由大约 7 个粒度向上变粗的层序组成, 单个层序垂向上均由泥岩向上逐渐演化为厚层粗砂岩, 且单层砂岩的厚度、砂岩层密度向上逐渐增大, 顶部为一套厚约 5~10 m, 上下层面平整, 横向延伸数千米的粗砂岩, 常见大型板状交错层理, 粒度概率曲线由跳跃组分和悬浮组分组成, 且悬浮组分含量较高(图 5(c), 9(b), (e), (f)). 向上变粗的层序之间有时夹大段灰绿色泥岩, 沉积特征类似于三工河组下部(170~210, 240~330 m). 三工河组上部 460~525 m 则为两套厚约 15~20 m, 粒度向上变细, 底部见冲刷构造的(含砾)粗砂岩, 大型槽状交错层理及大型斜层理非常发育(图 8(a)). 三工河组顶部 20 m 的沉积特征与底部类似, 表现为灰绿色泥岩夹薄层横向连续性非常稳定的中细砂岩(图 8(a)).

(2) 沉积环境解释. 头屯河剖面三工河组底部和顶部灰绿色泥岩夹薄层横向稳定性强的中细砂岩为典型的浅湖相沉积, 沉积物处于弱氧化环境, 有机质不易保存. 中部一系列粒度向上变粗的层序符合曲流河三角洲前缘沉积特征, 其顶部厚层席状粗砂岩可解释为三角洲前缘席状砂, 在湖水作用较强的河口区, 河口砂坝受波浪和岸流的淘洗和颠选, 以跳跃和悬浮沉积为主, 发生侧向迁移, 最终呈席状或带状广泛分布于三角洲前缘. 前缘席状砂砂质纯、分选好, 沉积构造与河口坝相同, 广泛发育大型斜层理, 理论上可以形成非常优质的储层. 三角洲前缘沉积之间的大段灰绿色泥岩, 与三工河组底部和顶部沉积环境一致, 亦为浅湖沉积. 前缘和湖泊相交替沉积代表了周期性的湖侵. 三角洲前缘沉积上部粒度向上变细、发育大型槽状及板状交错层理且底部具冲刷构造的厚层粗砂岩可解释为曲流河前缘水下分支河道, 未见河道迁移, 为厚层单河道砂体, 体现了曲流河河道深且稳定的特性. 相较于头屯河剖面八道湾组浅水辫状河平原三角洲沉积, 三工河组沉积期发生湖侵, 为曲流河三角洲-湖泊沉积, 缺少砾岩沉积, 以砂泥岩为主, 且前缘发育大规模的河口坝和厚层水下分支河道.

3.2.2 白杨沟剖面

(1) 沉积特征描述. 相较于头屯河剖面, 白杨沟剖面三工河组沉积厚度明显减小, 表明三工河组

图 8 (网络版彩图)准噶尔盆地南缘三工河组地层综合对比图

沉积期, 头屯河剖面相对于白杨沟剖面更靠近盆地沉积中心, 但二者沉积旋回特征相似. 白杨沟三工河组下部和上部仍主要由巨厚层灰绿色泥岩夹薄层横向延

展性非常好的中细砂岩组成, 砂岩层中常见波状层理、水平层理及小型斜层理, 粒度概率曲线由跳跃组分和悬浮组分构成(图 8(b), 5(d)); 中部含 4 个粒度向

图9 (网络版彩图)头屯河剖面三工河组沉积特征

上逐渐变细的层序, 每个层序由厚约 5~15 m 的(含砾)粗砂岩向上逐渐演化为 10~20 m 灰绿色泥岩夹薄层细砂岩, 底部厚层粗砂岩中常发育大型板状和槽状交错层理并保存有完整的大型树木茎干化石, 概率曲线由 3 个次总体组成, 其中以跳跃组分为主(图 8(b), 5(a)).

(2) 沉积环境解释. 与头屯河地区类似, 三工河组沉积期, 白杨沟剖面亦经历了早期和晚期两次较大规模的湖侵, 形成浅湖相厚层灰绿色泥岩; 而中期湖平面相对下降, 物源进积, 从而形成厚层曲流河三角洲前缘水下分支河道(含砾)粗砂岩, 分支河道间的细粒沉积物则可以解释为支流间湾和水下天然堤沉积. 白杨沟剖面河口坝不发育可能与其位于三角洲前缘上部, 远离湖盆中心有关.

3.3 西山窑组

3.3.1 玛纳斯河剖面

(1) 沉积特征描述. 玛纳斯河剖面西山窑组出露较为完整, 整体由多个粒度向上变细的层序组成. 底部 55 m 含砂量较大, 垂向上由 25 m 厚的粗砂岩向上逐渐演化为 15 m 厚中砂岩和 7~8 m 厚粉砂岩及细砂岩互层, 最后演化为 5~7 m 厚的有机质含量丰富的泥岩(夹薄层煤层). 向上含砂量减小, 各个层序沉积特征相似, 每个层序基本上均由底部粗砂岩和上部细粒沉积物组成. 底部的粗砂岩厚度分布在 2~10 m 之间, 粒度向上变细, 常见大型板状和槽状交错层理及大型树木茎干; 上部细粒沉积的厚度明显大于底部

粗砂岩, 个别层序二者厚度相同. 细粒沉积中的薄层砂岩概率曲线由两个粒度次总体构成——跳跃组分和悬浮组分, 且二者含量相似(图 5(b)). 大段细粒沉积含两种岩相组合类型, 一是较纯净厚层灰黑色泥岩段, 有机质含量非常丰富, 常见保存完整的植物叶片化石并夹大量中薄层煤层, 二是中细砂岩与泥岩薄互层段, 其中薄层中细砂岩横向厚度较为稳定, 内部常见水平层理和波状层理(图 10(a)).

(2) 沉积环境解释. 玛纳斯河剖面西山窑组沉积特征为典型的曲流河三角洲平原沉积. 曲流河一般发育于河流中下游、地势平坦的地区, 因此其河道坡度较缓, 水动力小, 河道稳定, 深度较大, 泛滥平原发育. 曲流河三角洲平原沉积特征与曲流河基本相同, 在一定程度上为河流相的缩影, 但二者最大的区别为三角洲平原沼泽沉积广泛, 可占总沉积面积的 90%. 鉴于玛纳斯河地区西山窑组细粒沉积物厚度明显大于粗砂岩, 因此将其解释为曲流河三角洲平原沉积. 单个层序底部厚层粗砂岩为曲流河三角洲平原中的分支河道沉积; 上部有机质含量丰富的纯净泥岩段及中薄层煤层则沉积于平原沼泽环境中, 砂泥薄互层则为天然堤沉积.

3.3.2 头屯河剖面

(1) 沉积特征描述. 头屯河剖面西山窑组仅有部分地层出露, 本文对该部分地层进行了精细的沉积特征观察与描述(图 10(b)). 头屯河剖面西山窑组沉积特

图 10 (网络版彩图)准噶尔盆地南缘西山窑组地层综合对比图

征与玛纳斯河类似, 垂向上也是由多个向上粒度变细的层序组成, 单个层序由底部厚约 3~10 m, 粒度向上变细, 发育大型槽状交错层理及树木茎干化石的含砾粗砂岩向上演化为厚层有机质含量丰富的泥岩, 常见煤层及保存非常完整的植物化石, 部分泥岩段夹薄层粉砂岩及细砂岩, 发育水平层理及波纹层理(图 10(b)).

(2) 沉积环境解释. 同玛纳斯河剖面西山窑组, 头屯河剖面西山窑组亦为曲流河三角洲平原沉积, 厚层的砂岩为平原分支河道沉积, 有机质含量丰富的泥岩、煤层及薄层粉细砂岩则沉积于平原沼泽和天然堤环境中. 大量保存完好的植物叶片化石代表非常平静的沉积环境.

3.3.3 白杨沟剖面

(1) 沉积特征描述. 白杨沟剖面西山窑组地层覆盖较为严重, 本论文仅在煤矿区建立了部分地层综合柱状图(图 10(c)). 底部为厚约 10 m、粒度向上变细的粗砂岩, 发育大型槽状交错层理, 粒度概率曲线表现为明显的三段式, 以跳跃组分占主体(图 5(a)); 向上演化为厚层煤层夹粉砂岩; 上部则为有机质含量丰富的泥岩和粉砂岩交替沉积. 泥岩和粉砂岩中保存了大量完整的植物叶片化石和垂直于层面的植物根茎化石, 代表极其稳定的构造背景及非常安静的沉积环境. 此外, 粉砂岩中常见水平层理和波状层理(图 10(c)).

(2) 沉积环境解释. 白杨沟剖面西山窑组仍为三角洲平原沉积, 底部粗砂岩为平原分支河道沉积, 中上部则为非常典型的平原沼泽相沉积, 植被繁茂, 排水不良, 为停滞的还原环境, 因此沉积物通常为深色有机质黏土、煤层并夹洪水成因的纹层状粉砂岩, 富含保存完好的植物化石.

4 讨论

4.1 淮南中-下侏罗统 3 种坳陷湖盆浅水三角洲沉积特征

综上所述, 准噶尔盆地南缘中-下侏罗统八道湾组到西山窑组发育 3 种不同的坳陷湖盆浅水三角洲, 分别为八道湾组浅水辫状河平原三角洲、三工河组浅水河口坝型曲流河三角洲和西山窑组极浅水曲流河三角洲. 三种浅水三角洲的沉积特征分别如下.

4.1.1 浅水辫状河平原三角洲

前人通过大量的古流、沉积环境、碎屑锆石年龄及碎屑磷灰石裂变径迹数据得出, 晚二叠世到早侏罗世, 准噶尔盆地和吐哈盆地为统一的泛盆, 物源区均来自于南部的天山地区^[74-78]. 尽管淮南不同的地区八道湾组沉积相差异较大, 但平面上呈连续的相变, 由后峡湿地扇向北逐渐演化为玛纳斯河辫状河、桃树园和头屯河浅水辫状河平原三角洲及白杨沟浅水辫状河平原三角洲-浅湖, 展现了完整的物源区到蓄水盆地沉积相演化, 直接证明了早侏罗世八道湾组沉积期, 准噶尔盆地边缘至少到达后峡地区.

通过淮南八道湾组沉积特征总结了坳陷湖盆浅水辫状河平原三角洲主要有以下几点特征: (1) 线状近物源, 沉积物粒度较大; (2) 具有广泛分布的辫状河水上和水下分支河道, 保持了辫状河宽浅且频繁改道的特性, 形成横向延伸数千米且厚度稳定的河道砂砾岩透镜体群, 透镜体之间相互孤立, 单个透镜体宽/厚比大; (3) 河口坝不发育或欠发育; (4) 水下分支河道与前三三角洲频繁交替沉积, 无大型前积层(图 11(a)).

4.1.2 浅水河口坝型曲流河三角洲

相较于浅水辫状河平原三角洲, 浅水河口坝型曲流河三角洲沉积特征如下: (1) 点状远物源, 沉积物粒度相对较细; (2) 分支河道沉积以厚层块状砂体为特征, 体现了曲流河河道深且稳的特性; (3) 发育大规模的河口坝, 易受后期湖浪作用影响形成厚层席状砂; (4) 不发育大型前积层(图 11(b)).

4.1.3 极浅水曲流河三角洲

相对于上述 2 种浅水三角洲, 极浅水曲流河三角洲主要沉积特征如下: (1) 点状远物源, 沉积物粒度细, 以砂泥岩沉积为主; (2) 发育非常广阔的三角洲平原, 其中平原沼泽相沉积占主体, 分支河道沉积由厚层块状砂体组成; (3) 三角洲前缘欠发育甚至不发育, 由地势非常平坦, 曲流河分支河道入湖后水动力不足造成; (4) 无大型前积层(图 11(c)).

4.2 淮南早-中侏罗世构造和气候演化

准噶尔盆地中生代开始全面进入陆相坳陷湖盆发展阶段^[32-36]. 准噶尔盆地南缘侏罗纪构造和气候

图 11 (网络版彩图)准噶尔盆地南缘早-中侏罗世沉积模式演化图。

演化分为明显的两个阶段^[35,36]。(1) 早-中侏罗世, 天山遭受持续的剥蚀去顶, 淮南物源区由北天山逐渐向南迁移到中天山, 西山窑组沉积期, 天山基本处于准平原化状态^[32~36,42,43]。此外, 早-中侏罗世准噶尔盆地气候温暖潮湿, 植被繁盛^[66,67]。稳定的构造背景和温暖潮湿的气候为煤层的发育创造了非常有利的条件^[68,69]。(2) 自中-上侏罗统头屯河组沉积期开始, 天山再次隆升, 准平原化结束, 并沿北天山断层发生较大规模的火山喷发, 淮南物源区由西山窑组沉积期的中天山再次向北迁移到北天山^[36]。与此同时, 准噶尔盆地西北缘车莫古隆起亦快速隆升, 造成沉积中心不断的向东迁移^[79~81]。早-中侏罗世温暖潮湿的气候在头屯河组沉积期结束, 气候开始干旱化。房亚男^[82]通过对准噶尔盆地上侏罗统-下白垩统地层进行详细的沉积环境解释、地层接触关系及地层综合对比

研究, 指出自头屯河组沉积期开始的构造隆升和气候干旱化在齐古组末期、喀拉扎组沉积前达到顶峰。

尽管已有学者注意到, 准噶尔盆地早-中侏罗世和中-晚侏罗世构造和气候特征明显的不同, 但中侏罗统西山窑组和头屯河组之间并不存在区域性的不整合面, 表明构造和气候的变化不是截然的, 而是存在过渡阶段。沉积盆地充填记录是构造和气候变化最直接的产物, 因此盆地充填特征演化可以完整的反演构造和气候演化^[72]。淮南中-下侏罗统不同时期发育的三角洲类型为我们深入探索侏罗纪构造和气候演化提供了有利的证据。

淮南八道湾组到三工河组, 浅水辫状河平原三角洲向上演化为浅水河口坝型曲流河三角洲, 三角洲供源体系由辫状河转化为曲流河, 沉积物粒度减小。相较于八道湾组, 三工河组发生一定规模的湖

侵, Ding 等人^[83]推测此时准噶尔盆地 80%的面积被湖水覆盖(图 11)。早侏罗世, 准噶尔盆地南缘构造稳定, 盆地热沉降缓慢, 气候温暖潮湿^[84]。本文认为, 温暖潮湿气候条件下, 天山持续的剥蚀去顶、物源区持续的后退是造成八道湾组到三工河组三角洲供源体系转化及湖侵的根本原因。西山窑组沉积期, 天山基本准平原化, 地势平坦, 准噶尔盆地扩张到最大, 南部边缘至少到达中天山地区^[36]。然而, 西山窑组并未继承三工河组湖侵, 反而发生大规模的湖退, 发育极浅水三角洲, 以广阔的三角洲平原沉积为特征(图 11)。在降水量及盆地构造背景相同的前提下, 三工河组到西山窑组的湖退与物源区后退、盆地扩张相互矛盾。陆相盆地可容纳空间变化主要受构造和气候两方面的控制。因此, 本文推测西山窑组沉积期, 气候条件相较于八道湾组和三工河组沉积期可能变得相对干旱, 从而导致降水量下降, 湖盆水体减少, 湖泊萎缩。这一观点得到王明振等人^[85]的验证, 其通过对淮南侏罗系泥岩进行黏土矿物组合及地球化学分析指出淮南早侏罗世气候温暖潮湿, 而中侏罗世(西山窑组)属于温干偏湿润气候。除气候变化外, 盆地地壳整体抬升, 沉积基准面下降亦可造成上述矛盾的产生。实际上, 在中-晚侏罗世准噶尔盆地强烈隆升之前, 车莫古隆起及博格达山在西山窑组沉积期已初具规模, 尽管此时天山处于准平原化状态, 但准噶尔盆地基底可能已开始整体抬升^[82,86]。

综合上述讨论可以得出, 西山窑组处于早侏罗世和晚侏罗世气候和构造演化的过渡阶段。侏罗纪气候变化和盆地内部缓慢隆起共同控制了准噶尔盆地可容纳空间的变化。

5 结论

(1) 准噶尔盆地中-下侏罗统发育 3 种不同的坳陷湖盆浅水三角洲: 1) 八道湾组浅水辫状河平原三角洲, 线状近物源, 砂砾岩为主, 发育广阔的水上和地下水分支河道, 河口坝欠发育, 湖平面频繁变化, 因此垂向上以横向延伸非常广的水下分支河道透镜体群和前三角洲泥岩交替沉积为特征; 2) 三工河组浅水河口坝型曲流河三角洲, 点状远物源, 河口坝非常发育, 受湖浪影响横向延展性好; 3) 西山窑组极浅水曲流河三角洲, 点状远物源, 以发育广阔的三角洲平原为特征, 前缘欠发育。上述 3 种浅水三角洲均不发育大型前积层。

(2) 早-中侏罗世, 天山持续剥蚀去顶, 淮南物源区持续后退, 西山窑组沉积期, 准噶尔盆地南部边界至少到达中天山地区。而淮南中-下侏罗统三角洲相模式的转变体现了一个先湖侵后湖退的过程, 三工河组沉积期湖泊覆盖率最大, 这与物源区持续后退、盆地持续扩张相矛盾。造成这一矛盾的原因可能与西山窑组相较于八道湾组和三工河组气候开始干旱化, 从而导致降水量下降, 湖泊萎缩有关, 也可能由盆地地壳整体抬升, 沉积基准面下降所致。因此, 西山窑组处于早侏罗世和晚侏罗世气候和构造演化的过渡阶段, 气候温干偏湿润, 为早侏罗世温暖潮湿气候到晚侏罗世干旱气候的过渡; 盆地地壳开始整体抬升, 为早侏罗世盆地缓慢热沉降到晚侏罗世盆地强烈隆升的过渡。侏罗纪气候变化和盆地内部缓慢隆起共同控制了准噶尔盆地可容纳空间的变化。

致谢 野外工作得到北京大学王明振博士、王陆新、李林林博士、陈榕博士、刘经纬博士、翟丽娜博士、朱文博士和张晨晨博士的大力支持, 沉积相分析工作得到北京大学董琳副教授和李绪涛研究员的耐心指导, 在此表示衷心的感谢。

参考文献

- 1 Gilbert G K. The Topographic Features of Lake Shores. Reston, Virginia: United States Geological Survey, 1885, 5: 75-123
- 2 Gilbert G K. Lake Bonneville Mon. Reston, Virginia: United States Geological Survey, 1890, 1: 438
- 3 Barrell J. Criteria for the recognition of ancient delta deposits. Geol Soc Am Bull, 1912, 23: 377-446
- 4 Scruton P C. Delta building and the deltaic sequence. In: Shepard F P, Phleger F B, Van Andel T H, eds. Recent sediments, northwest Gulf of Mexico. Tulsa, Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists, 1960. 82-102

- 5 Colella A, Deboer P L, Nio S D. Sedimentology of a marine intermontane Pleistocene Gilbert-type fan-delta complex in the Crati Basin, Calabria, southern Italy. *Sedimentology*, 1987, 34: 721–736
- 6 Corner G D, Nordahl E, Munch-Ellingsen K, et al. Morphology and sedimentology of an emergent fjord-head Gilbert type delta: Alta delta, Norway. *Int Assoc Sedimentologists Spec Publ*, 1990, 10: 155–168
- 7 Smith D G, Jol H M. Radar structure of a Gilbert-type delta, Peyto Lake, Banff National Park, Canada. *Sediment Geol*, 1997, 113: 195–209
- 8 Uličný D. Depositional systems and sequence stratigraphy of coarse-grained deltas in a shallow-marine, strike-slip setting: The Bohemian Cretaceous Basin, Czech Republic. *Sedimentology*, 2001, 48: 599–628
- 9 Bhattacharya J P. Deltas. In: Posamentier H W, Walker R G, eds. *Facies models revisited*. SEPM Spec Publ, 2006, 84: 237–292
- 10 Russell R J, Russell R D. Mississippi River delta sedimentation: Recent marine sediments. *Am Assoc Petr Geol*, 1939: 153–177
- 11 Fisk H N, McFarlan E Jr, et al. Sedimentary framework of the modern Mississippi delta. *J Sediment Petrol*, 1954, 24: 76–99
- 12 Busch D A. Genetic units in delta prospecting. *Am Assoc Petr Geol B*, 1971, 55: 1137–1154
- 13 Wright L D, Coleman J M. Variation in morphology of major river deltas as functions of ocean wave and river discharge regimes. *Am Assoc Petr Geol B*, 1973, 57: 370–398
- 14 Cleaves A W, Broussard M C. Chester and Pottsville depositional systems, outcrop and subsurface, in the Black Warrior basin of Mississippi and Alabama. *Gulf Coast Assoc Geol Soc T*, 1980, 30: 49–60
- 15 Ethridge F G, Wescott W A. Tectonic setting, recognition and hydrocarbon reservoir potential of fan-delta deposits. In: Koster E H, Steel R J, eds. *Sedimentology of Gravels and Conglomerates*. Calgary: Canadian Society of Petroleum Geologists, 1984, 10: 217–235
- 16 Postma G. Depositional architecture and facies of river and fan deltas: A synthesis. In: Colella A, Prior D B, eds. *Coarse-Grained Deltas*. Gent, Belgium: The International Association of Sedimentologists, 1990, 10: 13–27
- 17 Overeem I, Kroonenberg S B, Veldkamp A, et al. Small-scale stratigraphy in a large ramp delta: Recent and Holocene sedimentation in the Volga delta, Caspian Sea. *Sediment Geol*, 2003, 159: 133–157
- 18 Olariu C, Bhattacharya J P. Terminal distributary channels and delta front architecture of river-dominated delta systems. *J Sediment Res*, 2006, 76: 212–233
- 19 Nichols G J, Fisher J A. Processes, facies and architecture of fluvial distributary system deposits. *Sediment Geol*, 2007, 195: 75–90
- 20 Feng Z H, Zhang S H, Cross T A, et al. Lacustrine turbidite channels and fans in the Mesozoic Songliao Basin, China. *Basin Res*, 2010, 22: 96–107
- 21 Zou C, Zhang X, Luo P, et al. Shallow-lacustrine sand-rich deltaic depositional cycles and sequence stratigraphy of the Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, China. *Basin Res*, 2010, 22: 108–125
- 22 Edmonds D A, Shaw J B, Mohrig D. Topset-dominated deltas: A new model for river delta stratigraphy. *Geology*, 2011, 39: 1175–1178
- 23 Nemec W. Deltas—Remarks on terminology and classification. In: Colella A, Prior D B, eds. *Coarse-Grained Deltas*. Gent, Belgium: The International Association of Sedimentologists, 1990, 10: 3–12
- 24 邹才能, 赵文智, 张兴阳, 等. 大型敞流坳陷湖盆浅水三角洲与湖盆中心砂体的形成与分布. *地质学报*, 2008, 82: 813–825
- 25 李元昊, 刘池洋, 独育国, 等. 鄂尔多斯盆地西北部上三叠统延长组长 8 油层组浅水三角洲沉积特征及湖岸线控砂. *古地理学报*, 2009, 11: 265–274
- 26 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. *地学前缘*, 2013, 20: 19–28
- 27 刘自亮, 沈芳, 朱筱敏, 等. 浅水三角洲研究进展与陆相湖盆实例分析. *石油与天然气地质*, 2015, 36: 596–604
- 28 孙雨, 马世忠, 姜洪福, 等. 松辽盆地三肇凹陷葡萄花油层河控浅水三角洲沉积模式. *地质学报*, 2010, 84: 1502–1509
- 29 王立武. 坳陷湖盆浅水三角洲的沉积特征——以松辽盆地南部姚一段为例. *沉积学报*, 2012, 30: 1053–1060
- 30 朱筱敏, 赵东娜, 曾洪流, 等. 松辽盆地齐家地区青山口组浅水三角洲沉积特征及其地震沉积学响应. *沉积学报*, 2013, 31: 889–897
- 31 张新涛, 周心怀, 李建平, 等. 敞流沉积环境中“浅水三角洲前缘砂体体系”研究. *沉积学报*, 2014, 32: 260–269
- 32 Yang W, Jolivet M, Dupont-Nivet G, et al. Source to sink relations between the Tian Shan and Junggar Basin (northwest China) from Late Palaeozoic to Quaternary: Evidence from detrital U-Pb zircon geochronology. *Basin Res*, 2013, 25: 219–240
- 33 Jolivet M, Dominguez S, Charreau J, et al. Mesozoic and Cenozoic tectonic history of the Central Chinese Tian Shan: Reactivated tectonic structures and active deformation. *Tectonics*, 2010, 29, doi: 10.1029/2010TC002712
- 34 Jolivet M, Heilbronn G, Robin C, et al. Reconstructing the Late Palaeozoic-Mesozoic topographic evolution of the Chinese Tian Shan: Available data and remaining uncertainties. *Adv Geosci*, 2013, 37: 7–1
- 35 Jolivet M, Bourquin S, Heilbronn G, et al. The Upper Jurassic–Lower Cretaceous alluvial-fan deposits of the Kalaza Formation (Central Asia): Tectonic pulse or increased aridity? *Geol Soc, London, Spec Publ*, 2015, 427: SP427–6

- 36 Fang Y, Wu Ch, Guo Zh, et al. Provenance of the southern Junggar Basin in the Jurassic: Evidence from detrital zircon geochronology and depositional environments. *Sediment Geol*, 2015, 315: 47–63
- 37 Hendrix M S, Graham S A, Carroll A R, et al. Sedimentary record and climatic implications of recurrent deformation in the Tian Shan: Evidence from Mesozoic strata of the north Tarim, south Junggar, and Turpan basins, northwest China. *Geol Soc Am Bull*, 1992, 104: 53–79
- 38 Hendrix M S, Brassell S C, Carroll A R, et al. Sedimentology, organic geochemistry, and petroleum potential of Jurassic coal measures: Tarim, Junggar, and Turpan basins, Northwest China. *AAPG Bull*, 1995, 79: 929–958
- 39 Bian W, Hornung J, Liu Z, et al. Sedimentary and palaeoenvironmental evolution of the Junggar Basin, Xinjiang, Northwest China. *Palaeobiodivers Palaeoenviron*, 2010, 90: 175–186
- 40 施奈德 W, 马丁 F, 赵霞飞, 等. 准噶尔盆地头屯河地区侏罗系沉积环境与构造意义. *新疆地质*, 1992, 10: 191–204
- 41 傅恒, 刘巧红, 杨树生. 陆相烃源岩的沉积环境及其对生烃潜力的影响——以准噶尔盆地侏罗系烃源岩为例. *岩相古地理*, 1996, 16: 31–37
- 42 吴朝东, 全书进, 郭召杰, 等. 新疆侏罗纪原型盆地类型. *新疆地质*, 2004, 22: 56–63
- 43 方世虎, 郭召杰, 宋岩, 等. 准噶尔盆地南缘侏罗纪沉积相演化与盆地格局. *古地理学报*, 2005, 7: 347–356
- 44 郭召杰, 吴朝东, 张志诚, 等. 乌鲁木齐后峡地区侏罗系沉积特征, 剥露过程及中生代盆山关系讨论. *高校地质学报*, 2005, 11: 558–567
- 45 胡平, 徐恒, 李新兵, 等. 准噶尔盆地东部侏罗纪含煤岩系沉积环境及基准面旋回划分. *沉积学报*, 2006, 24: 378–386
- 46 朱筱敏, 张义娜, 杨俊生, 等. 准噶尔盆地侏罗系辫状河三角洲沉积特征. *石油与天然气地质*, 2008, 29: 244–251
- 47 谭程鹏, 于兴河, 李胜利, 等. 辫状河-曲流河转换模式探讨——以准噶尔盆地南缘头屯河组露头为例. *沉积学报*, 2014, 32: 450–458
- 48 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1:100 万地质图. 北京: 地质出版社, 1993
- 49 Allen M B, Windley B F, Zhang C, et al. Basin evolution within and adjacent to the Tien Shan Range, NW China. *J Geol Soc London*, 1991, 148: 369–378
- 50 Allen M B, Windley B F, Zhang C. Palaeozoic collisional tectonics and magmatism of the Chinese Tien Shan, Central Asia. *Tectonophysics*, 1992, 220: 89–115
- 51 Han B F, Guo Z J, Zhang Z C, et al. Age, geochemistry, and tectonic implications of a late Paleozoic stitching pluton in the North Tian Shan suture zone, western China. *Geol Soc Am Bull*, 2010, 122: 627–640
- 52 Han B F, He G Q, Wang X C, et al. Late Carboniferous collision between the Tarim and Kazakhstan-Yili terranes in the western segment of the South Tian Shan Orogen, Central Asia, and implications for the Northern Xinjiang, western China. *Earth-Sci Rev*, 2010, 109: 74–93
- 53 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. *地学前缘*, 2006, 13: 108–121
- 54 刘冬冬, 郭召杰, 张子亚. 一个不整合面引发的构造故事——从天山艾维尔沟不整合谈起. *大地构造与成矿学*, 2013, 37: 349–365
- 55 方世虎, 郭召杰, 吴朝东, 等. 准噶尔盆地南缘侏罗系碎屑成分特征及其对构造属性, 盆山格局的指示意义. *地质学报*, 2006, 80: 196–209
- 56 Avouac J P, Tapponnier P, Bai M, et al. Active thrusting and folding along the northern Tien Shan and late Cenozoic rotation of the Tarim relative to Dzungaria and Kazakhstan. *J Geophys Res*, 1993, 98: 6755–6804
- 57 Abdrakhmatov K Y, Aldazhanov S, Hager B, et al. Relatively recent construction of the Tien Shan inferred from GPS measurements of present-day crustal deformation rates. *Nature*, 1996, 384: 450–453
- 58 Yin A, Nie S, Craig P, et al. Late Cenozoic tectonic evolution of the southern Chinese Tian Shan. *Tectonics*, 1998, 17: 1–27
- 59 Dumitru T A, Zhou D, Chang E Z, et al. Uplift, exhumation, and deformation in the Chinese Tian Shan. *Geol Soc Am Mem*, 2001, 194: 71–99
- 60 Bullen M, Burbank D, Garver J, et al. Late Cenozoic tectonic evolution of the northwestern Tien Shan: New age estimates for the initiation of mountain building. *Geol Soc Am Bull*, 2001, 113: 1544–1559
- 61 Bullen M, Burbank D, Garver J. Building the northern Tien Shan: Integrated thermal, structural, and topographic constraints. *J Geol*, 2003, 111: 149–165
- 62 Charreau J, Chen Y, Gilder S, et al. Magnetostratigraphy and rock magnetism of the Neogene Kuitun He section (northwest China): Implications for Late Cenozoic uplift of the Tianshan Mountains. *Earth Planet Sci Lett*, 2005, 230: 177–192
- 63 Charreau J, Gilder S, Chen Y, et al. Magnetostratigraphy of the Yaha section, Tarim Basin (China): 11 Ma acceleration in erosion and uplift of the Tian Shan Mountains. *Geology*, 2006, 34: 181–184
- 64 De Grave J, Buslov M M. Distant effects of India-Eurasia convergence and Mesozoic intracontinental deformation in Central Asia: Constraints from apatite fission-track thermochronology. *J Asian Earth Sci*, 2007, 29: 188–204

- 65 Sun J, Li Y, Zhang Z, et al. Magnetostratigraphic data on Neogene growth folding in the foreland basin of the southern Tianshan Mountains. *Geology*, 2009, 37: 1051–1054
- 66 Eberth D A, Brinkman D B, Chen P J, et al. Sequence stratigraphy, paleoclimate patterns, and vertebrate fossil preservation in Jurassic Cretaceous strata of the Junggar Basin, Xinjiang Autonomous Region, People's Republic of China. *Can J Earth Sci*, 2001, 38: 1627–1644
- 67 Ashraf A R, Sun Y, Sun G, et al. Triassic and Jurassic palaeoclimate development in the Junggar Basin, Xinjiang, Northwest China—A review and additional lithological data. *Palaeobiodivers Palaeoenviron*, 2010, 90: 187–201
- 68 Zhou J B, Zhuang X G, Alastuey A, et al. Geochemistry and mineralogy of coal in the recently explored Zhundong large coal field in the Junggar Basin, Xinjiang province, China. *Int J Coal Geol*, 2010, 82: 51–67
- 69 Li J, Zhuang X G, Querol X, et al. High quality of Jurassic coals in the Southern and Eastern Junggar coalfields, Xinjiang, NW China: Geochemical and mineralogical characteristics. *Int J Coal Geol*, 2012, 99: 1–15
- 70 Gressly A. Observations géologiques sur le Jura soleurois. *Neue Denkschr Allg Schweiz, Ges ges Naturw*, 1838, 2: 1–112
- 71 Middleton G V. Johannes Walther's law of correlation of facies. *Geol Soc Am Bull*, 1973, 84: 979–988
- 72 Reading H G. *Sedimentary environments: Processes, facies and stratigraphy*. Oxford: Blackwell Science Ltd., 1996
- 73 余宽宏, 金振奎, 李桂仔, 等. 天山北缘辫状河型洪积扇沉积特征及其对准噶尔盆地西北缘古代洪积扇油气勘探的指导意义. *高校地质学报*, 2015, 21: 288–299
- 74 Shao L, Stattegger K, Li W, et al. Depositional style and subsidence history of the Turpan Basin (NW China). *Sediment Geol*, 1999, 128: 155–169
- 75 Shao L, Stattegger K, Garbe-Schoenberg C D. Sandstone petrology and geochemistry of the Turpan basin (NW China): Implications for the tectonic evolution of a continental basin. *J Sediment Res*, 2001, 71: 37–49
- 76 Wartes M A, Carroll A R, Greene T J. Permian sedimentary record of the Turpan-Hami Basin and adjacent regions, northwest China: Constraints on post-amalgamation tectonic evolution. *Geol Soc Am Bull*, 2002, 114: 131–152
- 77 Shao L, Zhang P, Hilton J, et al. Paleoenvironments and paleogeography of the Lower and lower Middle Jurassic coal measures in the Turpan-Hami oil-prone coal basin, northwestern China. *AAPG Bull*, 2003, 87: 335–355
- 78 Tang W, Zhang Zh, Li J, et al. Late Paleozoic to Jurassic tectonic evolution of the Bogda area (northwest China): Evidence from detrital zircon U-Pb geochronology. *Tectonophysics*, 2014, 626: 144–156
- 79 Ji Y, Zhou Y, Kuang J, et al. The formation and evolution of Chepaizi-Mosuowan paleo-uplift and its control on the distributions of sedimentary facies in the Junggar Basin. *Sci China Earth Sci*, 2010, 53: 818–831
- 80 周路, 郑金云, 雷德文, 等. 准噶尔盆地车莫古隆起侏罗系剥蚀厚度恢复. *古地理学报*, 2007, 9: 243–252
- 81 何登发, 陈新发, 况军, 等. 准噶尔盆地车排子-莫索湾古隆起的形成演化与成因机制. *地学前缘*, 2008, 15: 42–55
- 82 房亚男. 天山北缘盆地演化与沉积环境研究. 博士学位论文. 北京: 北京大学, 2016
- 83 Ding A, Hui R, Zhang Z. Hydrocarbon potential of Jurassic source rocks in the Junggar Basin, NW China. *J Petrol Geol*, 2003, 26: 307–324
- 84 王敏芳, 焦养泉, 任建业, 等. 准噶尔盆地侏罗纪沉降特征及其与构造演化的关系. *石油学报*, 2007, 28: 27–32
- 85 王明振, 吴朝东, 王陆新, 等. 准噶尔盆地南缘侏罗系泥岩黏土矿物组合及地球化学特征. *矿物岩石地球化学通报*, 2014, 33: 421–430
- 86 Yang Y T, Song C C, He S. Jurassic tectonostratigraphic evolution of the Junggar basin, NW China: A record of Mesozoic intraplate deformation in Central Asia. *Tectonics*, 2015, 34: 86–115

Lower to Middle Jurassic shallow-water delta types in the southern Junggar Basin and implications for the tectonic and climate

FANG YaNan¹, WU ChaoDong^{1,2}, WANG YiZhe^{1,2}, MA Jian¹ & ZHOU TianQi^{1,2}

¹Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

²Institute of Oil & Gas, Peking University, Beijing 100871, China

Shallow-water lacustrine delta sandstone in large continental sag basins have become the most important target for the stratigraphic reservoirs. The Junggar Basin was a continental sag basin in the Mesozoic. From the Early to Middle Jurassic, the Tian Shan experienced a regional peneplanation, providing a very favorable topographic condition for the developing of shallow-water deltas. However, studies on the sedimentary facies of the Lower to Middle Jurassic generally lack of systematicness and remain controversial. This article selected several sections in the southern Junggar Basin and carried out detailed sedimentary characteristic analysis and sedimentary facies identification in each section. Three shallow-water lacustrine deltas were identified in the southern Junggar Basin: 1) shallow-water braid plain delta, well developed in the Badaowan Formation and characterized by threadiness near-sources, abundant coarse-grained sediments, widespread distributary channels and undeveloped mouth bars; 2) shallow-water mouth-bar meandering-river delta, common in the Sangonghe Formation and showing well-developed mouth bars generally reformed by lake waves; 3) extremely shallow-water meandering-river delta, well developed in the Xishanyao Formation and characterized by widespread delta plain and undeveloped delta front. According to the lake delta evolution, a lake transgression to regression process happened in the southern Junggar Basin from the Early to Middle Jurassic, which is inconsistent with the continuous retrogradation of provenance and expansion of the Junggar Basin, indicating a relatively dry climate or basement uplift of the Junggar Basin during deposition of the Xishanyao Formation in contrast to the Early Jurassic Badaowan and Sangonghe Formations. Climate changes and basin basement slowly uplift collectively controlled the evolution of accommodation.

Tian Shan, continental sag basin, shallow-water delta, sedimentary characteristics, accommodation

doi: 10.1360/N092016-00172