

砂质辫状河不同级次构型表征及其界面控制下的岩性分布模式

——以山西大同盆地侏罗系辫状河露头为例

任晓旭¹, 侯加根^{1*}, 刘钰铭¹, 陈德坡², 张翔宇¹

1 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

2 中国石化胜利油田地质科学研究所, 东营 257061

* 通信作者, houjg63@cup.edu.cn

收稿日期: 2018-01-19

国家科技重大专项(2016ZX05010001、2016ZX05011-001)资助

摘要 由于水动力的变化, 厚砂层内不同级次构型界面附近会发生岩性的变化, 界面附近存在具有一定厚度的“岩性复合体”, 从而影响厚层砂体内部的非均质性。砂质辫状河构型叠置界面多样, 界面附近的岩性分布模式尤其复杂。通过对山西大同侏罗系云岗组经典砂质辫状河露头进行考察, 划分了8种构型要素类型及其内部岩石相组合模式, 阐述了不同级次构型界面附近沉积模式控制下的岩性组合模式, 并且定量统计了5级~3级界面附近岩性复合体的展布规模(长度、厚度)。分析不同级次界面附近岩性变化的成因机制, 重塑了砂质辫状河沉积过程。研究表明, 5级界面为单期河道的边界, 界面附近为厚度较大、分布稳定的泛滥平原沉积。4级界面为单一心滩坝或河道充填的边界, 界面附近有分布较不稳定的三类沉积, 一是坝侧翼的侧积披覆泥岩, 二是坝底的含泥砾砂岩, 三是废弃河道泥岩。3级界面是心滩坝内部增生体的边界, 3级界面附近有厚度较薄、分布不稳定的四类沉积, 一是增生体顶的粉砂质泥岩细粒沉积, 也称为落淤层, 二是增生体底的薄层含泥砾砂岩, 三是增生体顶的泥质冲沟沉积, 四是增生体界面附近的钙质胶结砂岩。

关键词 砂质辫状河; 构型要素; 构型界面; 岩性组合; 大同侏罗系露头

0 引言

砂质辫状河, 作为河流相储层非常重要的类型之一, 是我国油气资源主要的碎屑岩储集体^[1-2]。砂质辫状河沉积构型特征方面已经有了大量的研究, 国内外学者将辫状河分为多种类型^[3-13], 从复合河道、单一河道、河道内部心滩坝、坝内增生体、增生体内部纹层等分级次阐述了辫状河的沉积模式以及垂向和侧向

上的砂体叠置关系^[7-27], 并且根据沉积层理、粒度变化等规律, 进行辫状河古水流恢复研究^[4-6, 20, 28-29]。国内学者对于大同侏罗统云冈组露头剖面的解释也做了很多的工作, 解剖了辫状河不同类型的构型单元^[30-32], 总结了辫状河的岩石相及组合类型^[31-33], 分析了不同构型单元类型控制的砂体物性差异特征^[31-32], 识别划分了不同类型的隔夹层^[34], 并且分析了基准面旋回控制的辫状河沉积模式^[30]。

引用格式: 任晓旭, 侯加根, 刘钰铭, 陈德坡, 张翔宇. 砂质辫状河不同级次构型表征及其界面控制下的岩性分布模式——以山西大同盆地侏罗系辫状河露头为例. 石油科学通报, 2018, 03: 245-261

REN Xiaoxu, HOU Jiagen, LIU Yuming, CHEN Depo, ZHANG Xiangyu. Architectural characterization and a distribution model of lithology near the boundary surfaces of different orders in a sandy braided river—a case study from the Jurassic sandy braided-river outcrops in the Datong Basin, Shanxi Province. Petroleum Science Bulletin, 2018, 03: 245-261. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2018.03.023

但是,前人对于构型界面附近的岩性变化特征研究过于单一,将构型界面附近的岩性变化简单地视为隔夹层来处理^[28, 34-36]。实际上,辫状河储层不同级次构型界面附近的岩性分布模式复杂,不同级次构型界面附近存在具有一定厚度的“岩性复合体”,对于储层非均质性及内部渗流差异有重要的影响作用。本文以山西大同侏罗系典型砂质辫状河露头为研究对象,定性识别不同级次构型界面附近岩性复合体的岩性类型,定量测量统计不同岩性的发育规模;总结不同级次构型界面附近岩性变化的规律,形成砂质辫状河不同级次构型界面附近岩性发育模式;分析不同级次构型界面附近岩性变化的主要成因机制。形成了经典砂质辫状河的沉积模式,厘清了砂质辫状河的沉积过程。

1 研究区概况

露头观测区位于山西省大同市云冈镇。大同盆地

位于山西省东北部,为一个北东—南西向展布的晚中生代盆地。盆地内主要出露下侏罗统永定庄组(J_{1y})、中侏罗统大同组(J_{2d})、云岗组(J_{2y})和下白垩统左云组(K_{1z})地层^[32, 37-38](图1)。

中侏罗统云岗组自下而上明显的可以划分为3个岩性段^[32, 34, 37-38](图2)。第一段为砂砾岩段,为弱还原条件下的河流湖泊相沉积,以灰白色砂岩为主,中上部发育灰色页岩及粉砂岩,岩性分布较稳定。底部发育砾质砂岩或砾岩,砂砾岩段厚度约为50 m。第二段为石窟段,为弱氧化—弱还原环境下的河流湖泊相沉积,紫红色、灰白色、灰黄色砂泥岩互层,局部含砾。内部发育大型槽状、板状交错层理,厚度约为50 m。第三段以干旱氧化环境下的河流相红色碎屑岩沉积为主,主要发育泥岩夹薄层粉砂岩,厚度约为40 m。本次研究的剖面属于云冈组石窟段,古水流方向近南北向,为 $160^{\circ}\sim 200^{\circ}$,物源来自盆地北缘的太古界济宁群山地,主要沉积类型为砂质辫状河,山西大同辫状

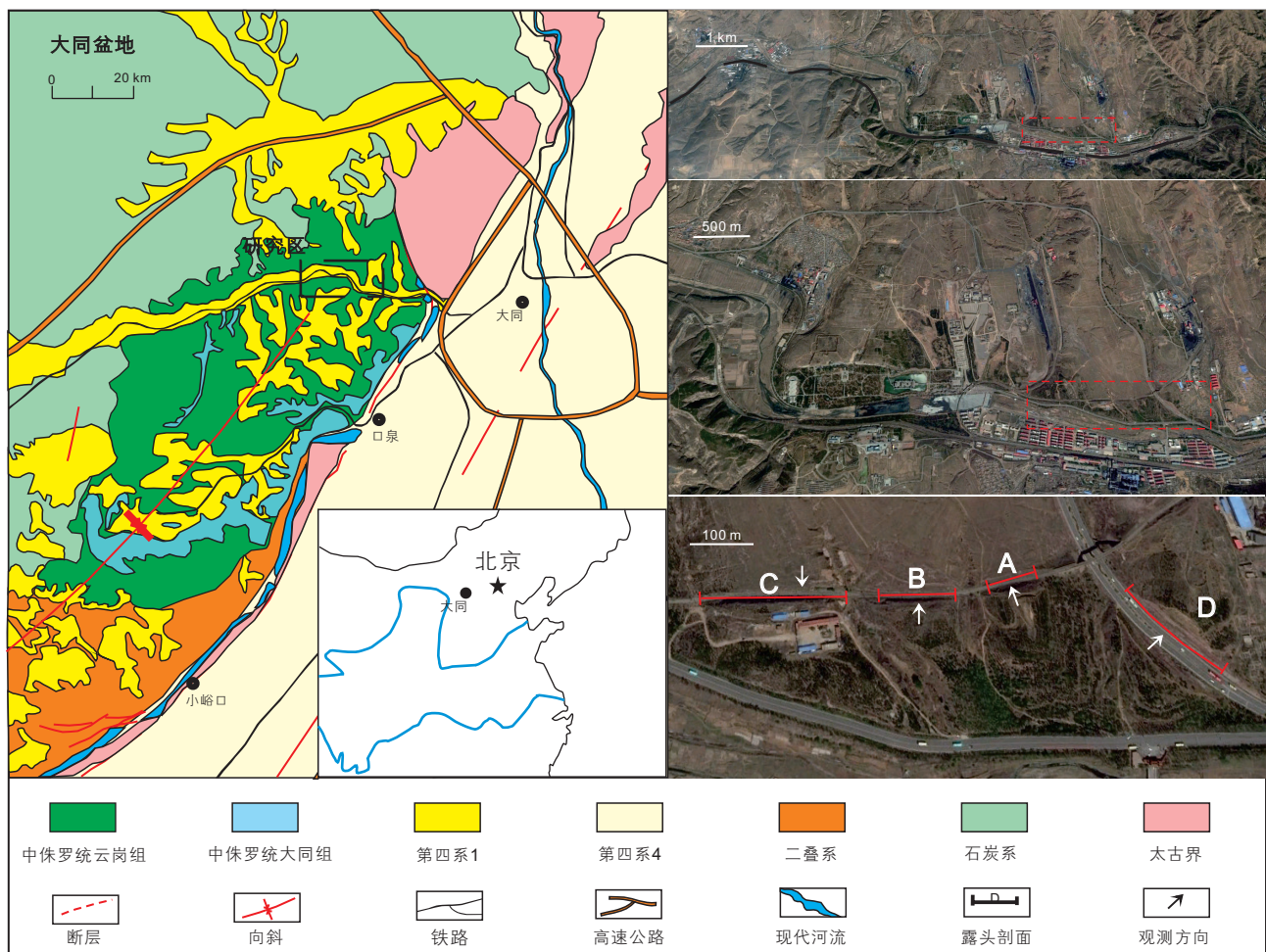


图1 山西大同云岗组露头地理位置与地层分布

Fig. 1 Geological location and stratigraphic distribution of outcrops of Yugang Formation

地层			岩性	厚度/m	地层	岩性	描述	图例
界	系	组						
中生代	白垩系	助马堡		>40	云岗组	泥岩段	以干旱氧化环境下的河流相红色碎屑岩沉积为主, 主要发育泥岩夹薄层粉砂岩, 厚度约为40 m。	砾岩 粗砂岩 中砂岩 细砂岩 粉砂岩 泥质粉砂岩 泥岩 槽状交错层理 板状交错层理 斜层理 水平层理
		左云组		276				
	侏罗系	云岗组		92		石炭段	弱氧化—弱还原环境下的河流湖泊相沉积, 紫红色、灰色、灰白色、灰黄色砂泥岩互层, 局部含砾。内部发育大型槽状、板状交错层理, 厚度约为50 m。	
		大同组		220				
永定庄		107	砂砾岩段	弱还原条件下的河流湖泊相沉积, 以灰白色砂岩为主, 中上部发育灰色、青灰色页岩及粉砂岩底部发育砾质砂岩或砾岩, 砂砾岩段厚度约为50 m。				

图2 大同盆地地层和岩性背景

Fig. 2 Stratigraphic and lithological settings of outcrops in Datong Basin

河为山前拗陷盆地的近源砂质辫状河, 露头区大约位于砂质辫状河的中游^[24-25,38]。

2 构型单元岩相类型及组合模式

2.1 主要岩相类型

根据露头观测可以看出, 研究区目的层发育水平层理、平行层理、板状交错层理、波状交错层理、槽状交错层理, 可见泥砾冲刷面以及反映砂质叠置关系的再作用面, 为河流相典型沉积构造。其中, 波状层理、槽状交错层理、板状交错层理为辫状河心滩坝的典型特征, 水平层理一般在辫状水道充填微相比较发育。

Miall^[7]将河流岩石相分为18种类型, 于兴河^[30-32], 陈彬滔^[33]等对露头区岩石相类型也进行过划分, 根据实际观测分析, 本次研究将露头区砂质辫状河岩相分为9种类型(图3, 表1)。①Gm, 含泥砾砂岩, 块状, 颜色为紫红色或杂色, 一般存在于河道底部冲刷滞留沉积。②Gt, 含泥砾砂岩, 发育槽状交错层理, 一般存在于河道底部。③St, 槽状交错层理砂岩, 岩性为中—粗砂岩, 一般存在于砂坝、活动水道

沉积下部。④Sp, 板状交错层理砂岩, 岩性为中—粗砂岩, 一般存在于顺流加积砂坝中部。⑤Sm, 块状层理砂岩, 主要为灰白色细砂岩, 是河流快速沉积的产物。⑥Sl, 斜层理砂岩, 一般存在于侧向加积作用形成的砂坝中。⑦Sh, 平行层理砂岩, 强水动力, 一般存在于垂向加积作用形成的砂坝中。⑧Fh, 水平层理泥质粉砂岩, 水动力较弱, 灰白色, 一般存在于河道充填、漫溢中。⑨Fm, 少见层理构造, 主要为紫红色泥岩, 常见漫溢沉积。

2.2 构型单元及岩相组合模式

前人对构型单元的识别和划分已经做了大量的工作, 有着较为成熟的划分标准和研究成果。本次研究中, 总结了8种单元岩石相组合类型(表2), 对应8种构型单元要素类型: 顺流加积砂坝、侧向加积砂坝、垂向加积砂坝、迁移砂坝、游荡砂坝、活动河道、废弃河道、漫溢。

①顺流加积坝(DA), 主要由顺流加积作用形成, 一般为底平顶凸的几何形态。主要岩性为粗砂岩—含砾粗砂岩。底部可见冲刷侵蚀面, 常见泥砾。下部主要是槽状交错层理和单组或多组的板状交错层理, 顶部一般为低角度板状交错层理或平行层理。主要岩石

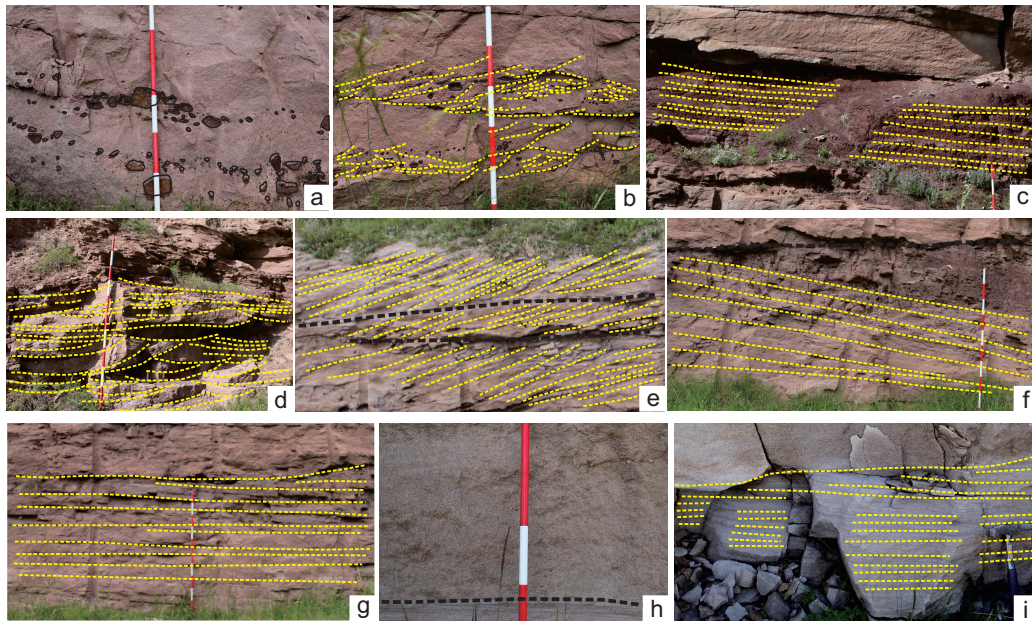


图3 大同砂质辫状河露头主要岩石相类型

(a) 块状含砾砂岩相 Gm; (b) 槽状交错层理含砾砂岩相 Gt; (c) 水平层理泥岩相 Fm; (d) 槽状交错层理砂岩相 St; (e) 板状交错层理砂岩相 Sp; (f) 斜层理砂岩相 Sl; (g) 平行层理砂岩相 Sh; (h) 块状砂岩相 Sm; (i) 水平层理粉砂岩相 Fh

Fig. 3 Generalized summary of lithofacies in sandy braided river in outcrops of Datong

(a) Massive pebbly sandstone with muddy gravel-Gm; (b) Trough cross bedded pebbly sandstone with muddy gravel-Gt; (c) Horizontal mudstone-Fm; (d) Trough cross bedded sandstone-St; (e) Tabular cross bedded sandstone-Sp; (f) Oblique bedded sandstone-Sl; (g) Parallel bedded sandstone-Sh; (h) Massive sandstone-Sm; (i) Horizontal siltstone-Fh

表1 大同盆地云岗组露头岩相描述和解释(根据 Miall^[7]; 于兴河^[31]; 李顺利^[30]修改)

Table 1 Description and interpretation of lithofacies in outcrops of Yungang Formation, Datong Basin (Modified after Miall^[7]; Yu^[31]; Li^[30])

代码	岩相&粒度	沉积构造	解释	模式
Gt	含泥砾砂岩, 粒度较粗	槽状交错层理	河道底部或坝底部冲刷滞留沉积	
Gm	含泥砾砂岩, 粒度较粗	平行层理, 砾石或呈叠瓦状定向排列	河道底部或坝底部冲刷滞留沉积	
St	中-粗砂岩	槽状交错层理	砂坝或活动水道下部(低流态)	
Sp	中-粗砂岩	板状交错层理	迁移或转换砂坝(低流态)	
Sm	中-粗砂岩	块状	快速沉积(高密度流体)	
Sl	中-细砂岩	低角度交错层理	顺流加积或侧向加积(低流态)	
Sh	中-细砂岩	平行层理	垂向加积作用砂坝(高流态)	
Fh	细-粉砂岩, 泥岩	水平层理	漫溢或河道充填沉积	
Fm	粉砂岩, 泥岩	水平层理, 或无沉积构造	漫溢沉积, 废弃河道充填	

表 2 大同盆地云冈组砂质辫状河主要构型要素以及岩相组合模式(根据 Miall^[7]; 李顺利, 于兴河^[30]; 陈彬滔^[33]修改)
Table 2 Summary of architectural elements identified in outcrops of Yungang Formation, Datong Basin(Modified after Miall^[7]; Li and Yu^[30]; Chen Bintao^[33])

构型要素	单一坝 (UB)			复合坝 (CB)			活动水道充填	废弃水道充填	漫溢	
	顺流加积坝	侧向迁移坝	垂向加积坝	迁移坝	游荡坝					
					WB	CHF				
岩相组合	DA	LA	VA	MB	Gt-St-Sp-Gm-St-Sp-Sh	WB	CHA	CHF	OF	
岩相组合	Gt-St-Sp-Sl	Gt-St-Sl-Fh-Sl	Gt-St-Sp-Sh	Gt-St-Sp-Fh-Sp-Sl-Sh	Gt-St-Sp-Gm-St-Sp-Sh	Gt-St-Sp-Gm-St-Sp-Sh	St-Fh-Sp-Fh-Fm	St-Fh-Fm	Fh-Fm-Fh-Fm	
描述	<p>顶平底平的几何形态, 中-粗砂岩, 底部含冲刷泥砾, 界面为四级界面, 厚度约为 1~2.5 m, 侧向延伸 13~30 m。</p>	<p>中粗砂岩, 主要沉积构造为板状交错层理和斜层理, 发育向河道中心方向倾斜的侧积层, 厚度约为 0.5~2 m, 侧向延伸 12~20 m。</p>	<p>底部发育槽状交错层理, 向上过渡为低角度斜层理, 坝顶一般由平行层理中-细砂岩组成, 厚度为 1~2 m, 侧向延伸 15~25 m。</p>	<p>中粗砂岩为主, 发育侧积冲刷泥岩, 侧向迁移特征明显, 可见含泥砾的冲刷侵蚀界面, 厚度为 2~3 m, 侧向延伸 14~33 m。</p>	<p>沉积构型类型多样, 多期坝体叠置而成, 可见多期的叠置界面, 厚度较大, 一般为大于 2 m, 侧向延伸较长, 侧向延伸大于 30 m。</p>	<p>顶平底凸的几何形态, 岩性以细粉砂岩和泥岩为主, 发育块状或水平层理, 或为水平层理, 厚度为 0.6~1.3 m, 侧向延伸 8~12 m。</p>	<p>薄层的细粒沉积, 以细粉砂岩或泥质粉砂岩为主, 发育水平层理或不发育沉积构造, 厚度小于 0.5 m。</p>	<p>顶平底凸的几何形态, 岩性以细粉砂岩和泥岩为主, 发育块状或水平层理, 或为水平层理, 厚度为 0.6~1.3 m, 侧向延伸 8~12 m。</p>	<p>在洪水期河道完全被淤泥充填, 或者由于坝体迁移, 原河道废弃。</p>	<p>河道决口发生漫溢, 低能量流体携带细粒沉积物卸载沉积。</p>
解释	<p>发育在河道中心, 由顺流加积作用发育而成。</p>	<p>发育在河道边部, 沉积作用类型为侧向加积作用。</p>	<p>坝内可见再作用面, 由侧向加积和垂向加积作用而成。</p>	<p>由于水流的侧向摆动而造成坝体的侧向迁移。</p>	<p>由 DA、LA 等复合而成, 沉积作用多样, 包含侧向加积、垂向加积、顺流加积等。</p>	<p>坝体两侧水流的水动力减弱, 携带的沉积物自然卸载。</p>	<p>在洪水期河道完全被淤泥充填, 或者由于坝体迁移, 原河道废弃。</p>	<p>在洪水期河道完全被淤泥充填, 或者由于坝体迁移, 原河道废弃。</p>	<p>在洪水期河道完全被淤泥充填, 或者由于坝体迁移, 原河道废弃。</p>	<p>在洪水期河道完全被淤泥充填, 或者由于坝体迁移, 原河道废弃。</p>
垂向序列										
图例										

相为Gt-St-Sp-Sl, DA一般发育在河道的中心部位, 厚度为1~2.5 m, 侧向延伸13~30 m。

②侧向加积坝(LA), 在曲流河中较为常见, 但在辫状河中也有发育, LA一般发育在河道的边部, 向河道中心发生侧向加积作用, 底部一般发育槽状交错层理砂岩, 中上部由多组板状交错层理和斜层理交替形成, 三级界面可见向河道中心方向倾斜的侧积层。主要岩石相为Gt-St-Sl-Fh-Sl-Fh, 厚度0.5~2 m, 侧向延伸12~20 m。

③垂向加积坝(VA): 与李顺利^[30]和Hjellbakk^[16]所提到的简单砂坝一致。主要由垂向加积作用形成, 底部为槽状交错层理砂岩, 可见冲刷泥砾, 向上过渡为低角度板状交错层理, 坝的顶部一般为平行层理或块状中细砂岩。砂坝中可见再作用面, 反映不连续水流卸载沉积过程中的垂向加积作用。主要岩石相为Gt-St-Sp-Sh, 厚度为1~2 m, 侧向延伸15~24 m。

④侧向迁移坝(MB), 在砂质辫状河中, 由于水动力的变化, 水流经常会发生侧向的摆动, 因此, 坝体在沉积过程中也会发生侧向的迁移, 坝体发生侧向迁移的主要标志就是斜列式的侧积披覆泥岩或者泥砾冲刷面, 反映坝体在沉积之后发生了向坝两翼的侧向迁移再沉积。主要岩石相为Gt-St-Sp-Fh-Sp-Sl-Sh-Fh, 厚度一般为2~3 m, 侧向延伸14~33 m。

⑤游荡砂坝(WB), 在辫状河砂坝沉积过程中, 河道迁移改道频繁, 易形成游荡型复合砂坝。由于后期河道的冲刷侵蚀作用, 用于界定构型要素边界的泥质界面很难保存下来, 在野外露头剖面中也较难识别, 有些厚层砂体中只可见一些切割再作用面, Li Shunli^[30]认为, 顺流加积坝、侧向加积坝等单一砂坝都可以形成复合砂坝。游荡砂坝主要岩石相类型多样, 一般组合样式为Gt-St-Sp-Gm-St-Sp-Sh, 厚度较大, 一般大于2 m, 侧向延伸大于30 m。

⑥砂质充填的活动河道(CHA), 在砂质辫状河中, 河道一般是在心滩坝沉积之后, 发生沉积物卸载充填作用, 形成河道充填。当水动力较强时, 水流携带的泥沙在心滩坝两翼发生自然卸载, 后期随着水动力的减弱, 沉积的岩性逐渐变细, 如此, 形成多期的充填序列, 底部一般发育小型槽状交错层理, 可见冲刷泥砾沉积, 向上过渡为平行层理或块状层理细粒沉积。主要岩石相为Gt-St-Fh-Sp-Fh-Fm。

⑦泥岩充填的废弃河道(CHF), 河道充填沉积的另一种情况就是在某一次洪水期, 河道被淤泥充填, 形成废弃河道, 或者辫状河决口改道以后, 早期河道就会废弃, 后被泥质细粒物质充填。废弃河道的主要岩

性为泥岩, 形态一般为顶平底凸的几何形态, 厚度一般为0.6~1 m。

⑧漫溢(OF), 主要为薄层的泥质粉砂岩或水平层理泥岩、粉砂质泥岩, 砂体厚度薄, 一般小于0.5 m。

总体来说, 大同砂质辫状河构型要素以坝为主, 其次为河道充填。坝的厚度介于1.2~4.2 m之间, 宽度在13~64 m, 宽厚比为7~17, 从宽度和厚度的相关关系图可以看出, 砂坝的厚度和宽度呈正相关关系。河道充填砂体厚度较薄, 介于0.8~2.2 m之间, 宽度为10~22 m, 宽厚比介于6~12, 为正相关关系(表3, 图4)。

3 不同级次界面附近岩性分布模式

构型界面是具有等级序列的岩层接触面, 是构型单元的边界面^[7-10], 具有层次性, 对于构型界面的划分有正序和倒序等多种划分方案(本次研究主要采用Miall的划分方案)。不同层次构型界面反映了水动力的变化, 因此, 界面附近会伴随着岩性的变化, 不同级次构型界面附近岩性变化复杂, 需要对辫状河储层不同级次构型界面附近的岩性变化规律做更为精细和系统的表征。

3.1 界面附近岩性类型及展布规模

本文通过对山西大同砂质辫状河露头进行解剖, 识别出5-3级构型界面附近岩性复合体的主要岩性类型(图5-图9), 定量统计了其展布规模(表4, 图11-图13)。

(1)5级界面附近(图5): 泛滥平原泥岩。在洪水泛滥期, 由于水动力下降沉积的由洪水携带的泥质细粒沉积, 并且未被下一期水道切割冲刷保存下来的洪泛泥岩, 厚度较厚, 有0.6~1.3 m, 侧向延伸远, 20~45 m。

(2)4级界面附近: ①坝侧翼边界附近的侧积披覆泥岩(图6、图7), 厚度只有0.3 m, 侧向延伸较短, 一般小于5 m, 与坝侧翼倾角和后期水动力环境有关。②坝底部的含泥砾砂岩(图6、图8), 泥砾直径较大, 为5~20 cm, 泥砾层厚度一般为0.3 m。③河道充填界面附近的泥岩沉积(图6)。主要为红色泥岩沉积, 厚度平均约为0.8 m, 一般为顶平底凸的几何形态, 发育较为稳定, 宽度为10 m。

(3)3级界面附近: ①增生体顶部泥质粉砂岩或粉砂质泥岩(图8), 厚度较薄, 侧向延伸长度差异较大, 一般为3~30 m不等。②坝顶冲沟泥岩沉积(图6), 形

表3 砂坝和河道充填单元定量规模统计

Table 3 Architectural parameters of the bars and channel-fills in outcrop profiles

构型单元	样品	厚度/m	宽度/m	宽厚比
坝	坝 1	2	21	10.5
	坝 2	2.2	24	10.9
	坝 3	3.5	42	12.0
	坝 4	2.3	28	12.2
	坝 5	1.7	27	15.9
	坝 6	2	33	16.5
	坝 7	3.8	90	23.7
	坝 8	2	27	13.5
	坝 9	1.8	24	13.3
	坝 10	1.2	24	20.0
	坝 11	2.4	37.5	15.6
	坝 12	1.5	19.5	13.0
	坝 13	2.7	49.5	18.3
	坝 14	1.8	45	25.0
	坝 15	2	25.5	12.8
	坝 16	2	31.5	15.8
	坝 17	2.5	34.5	13.8
	坝 18	3	46.5	15.5
	坝 19	4	87	21.8
	坝 20	4.2	93	22.1
	坝 21	4.1	96	23.4
平均	2.5	42.1	16.8	
河道充填	河道 1	1.8	18	10.0
	河道 2	2	18	9.0
	河道 3	2.3	21	9.1
	河道 4	1.8	12	6.7
	河道 5	1.6	13	8.1
	河道 6	1.9	16	8.4
	河道 7	2.2	16	7.3
	河道 8	1.2	13	10.8
	河道 9	0.8	10	12.5
	平均	0.7	15.3	9.0

态上类似废弃河道，但是规模小，厚度薄。③增生体底部含泥砾砂岩(图6-图8)，作为3级界面附近的泥砾冲刷层，泥砾直径小，只有0~5 cm，泥砾层厚度较薄，侧向延伸也较短。④增生体界面间的成岩胶结带(图9)，一般为钙质胶结，为不连续的胶结条带，厚度较薄。

3.2 不同级次界面附近岩性组合模式

结合Miall^[7-13]对于河流相构型单元级次划分方案，分别对5~3级构型界面附近岩性组合模式进行总结划分，分析沉积模式控制下的岩性组合规律(图10)。5级界面为单期河道的边界面，界面附近岩性组合模式单一，界面内部为河道粗砂岩或含泥砾粗砂岩，外部一般为泛滥平原泥岩，界面上下分别为两套“粗砂—细砂—泥岩”组合模式，界面之下的泥岩与界面上的粗砂岩一般呈突变接触。4级界面为单一坝或单一河道充填的边界面，4级界面附近岩性组合模式复杂，山西大同砂质辫状河露头4级界面附近有三种岩性组合模式。一是当坝底沉积泥砾时，界面上下分别为含泥砾砂岩—中粗砂岩—细砂岩组合模式，界面下的细砂岩与界面上的含泥砾砂岩相接触；二是当坝侧翼保留披覆泥岩时，界面之下为中细砂岩—泥岩组合模式，而界面之上一般为中粗砂岩；三是当坝缘发育废弃河道沉积时，界面附近多呈现中细砂岩—泥质粉砂岩—泥岩组合模式。3级界面为坝内增生体的边界面。3级界面附近岩性组合模式可以分为4种类型。一是增生体顶部保留泥质细粒沉积，即落淤层，界面之下一般为中细砂岩—泥岩组合，界面之上过渡为中粗砂岩，并且界面之下的泥岩和界面之上的粗砂岩呈现突变接触；二是增生体底部发育小型冲刷泥砾沉积，在界面下多为细砂岩沉积，界面之上为含泥砾砂岩—中粗砂岩组合模式；三是增生体顶部发育小型冲沟充填沉积，

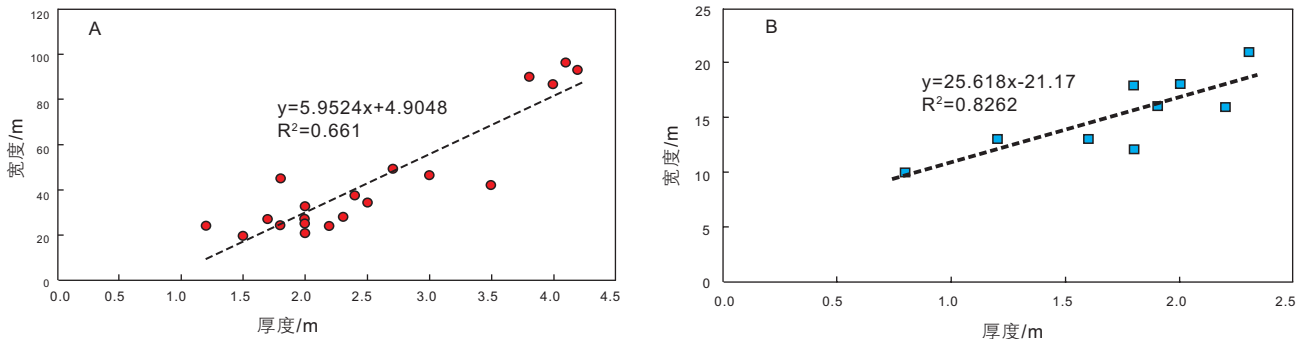


图4 砂坝(A)和河道充填(B)厚度和宽度的相关关系

Fig. 4 Width and thickness of bars (A) and channel-fills (B) in sandy braided fluvial deposits in outcrop profiles

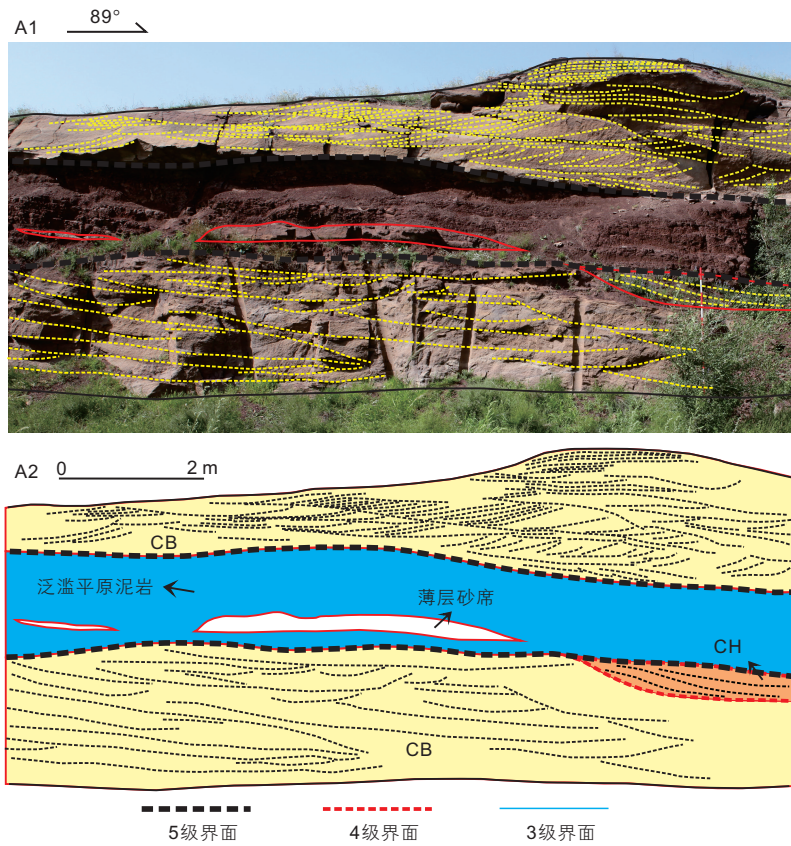


图5 5级界面附近泛滥平原泥岩沉积特征(剖面A)

Fig. 5 Depositional characteristics of floodplain mud near the 5th-order bounding surface in outcrop profile (section A)

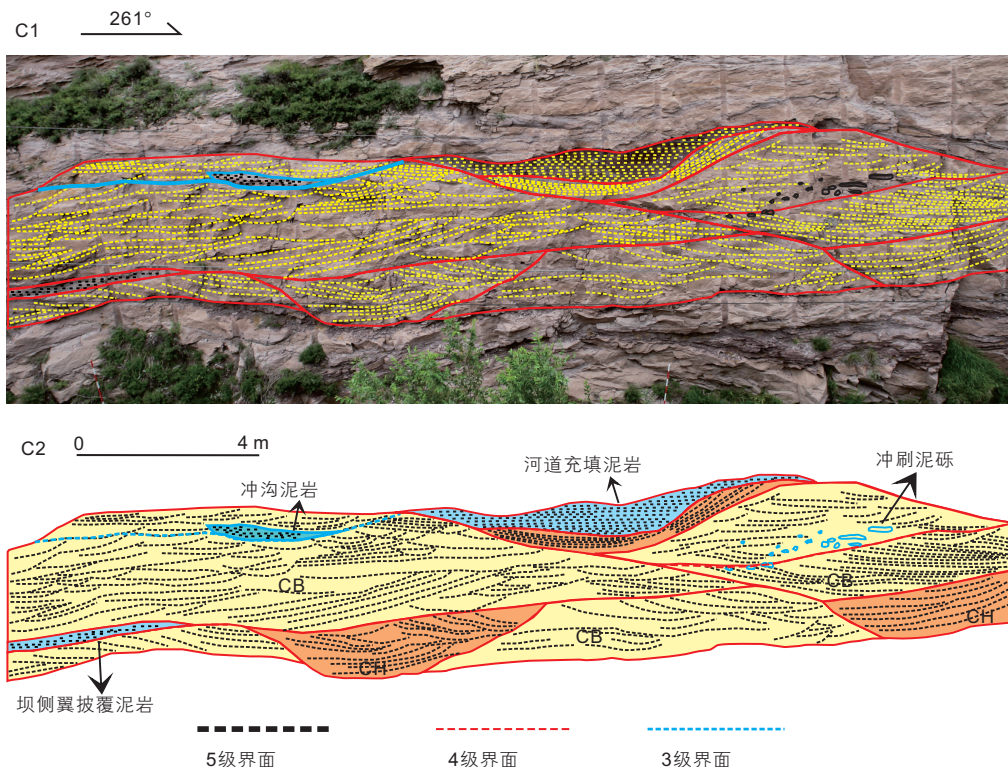


图6 不同级次构型界面附近岩性分布特征(剖面C)

Fig. 6 Depositional characteristics of lithologies near architectural bounding surfaces in outcrop profile (section C)

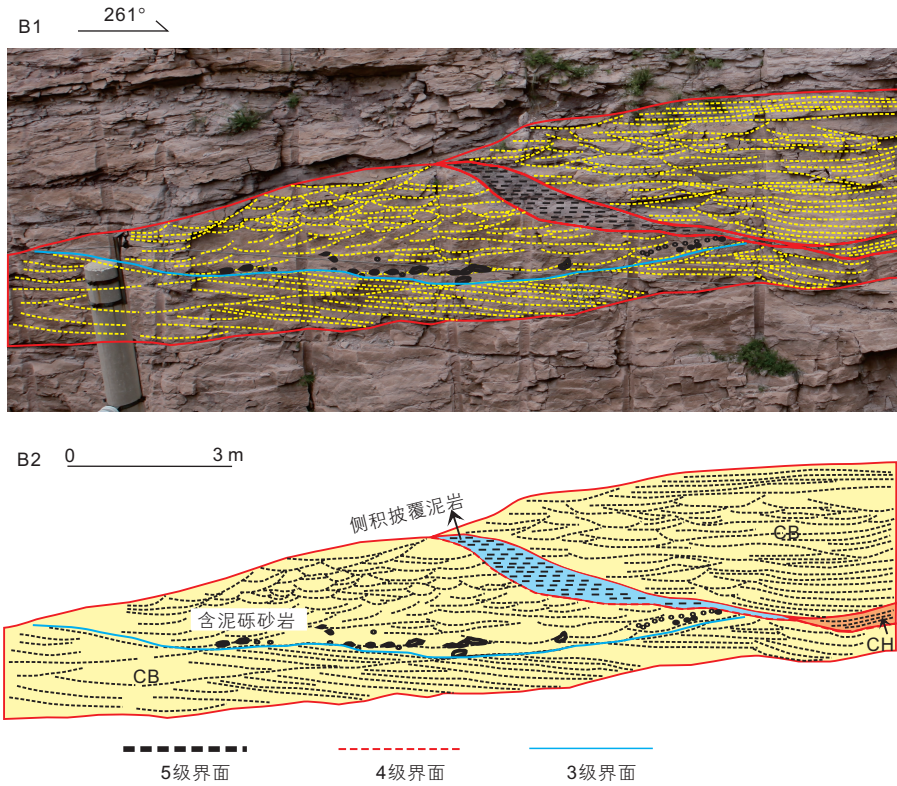


图 7 坝侧翼侧积泥岩和坝底含泥砾砂岩沉积特征 (剖面 C)

Fig. 7 Depositional characteristics of Lateral covering mud near the flank of the bar and muddy gravel in the bottom of the bar (in section C)

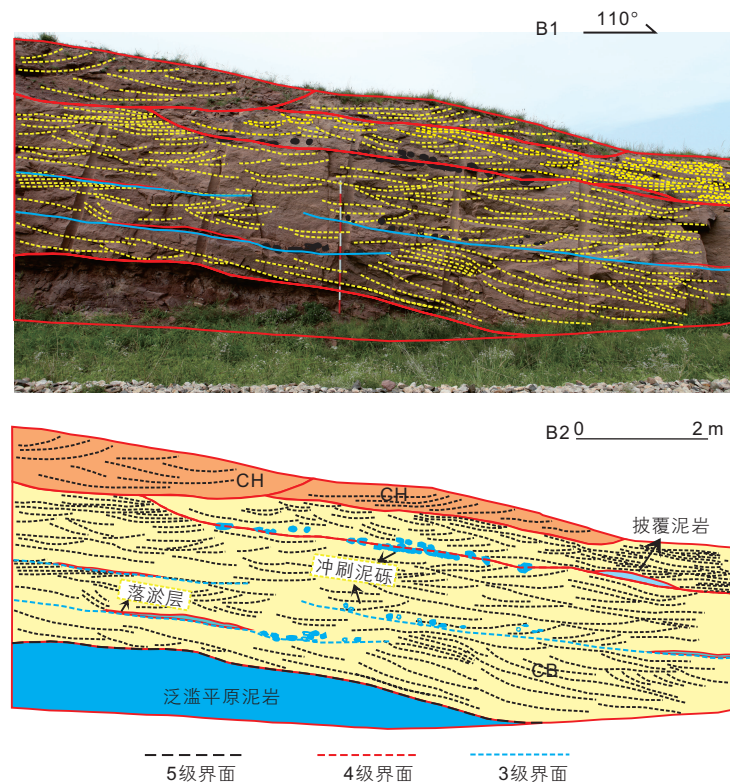


图 8 不同级次构型界面附近岩性分布特征 (剖面 B)

Fig. 8 Depositional characteristics of lithologies near architectural bounding surfaces in outcrop profile (section B)

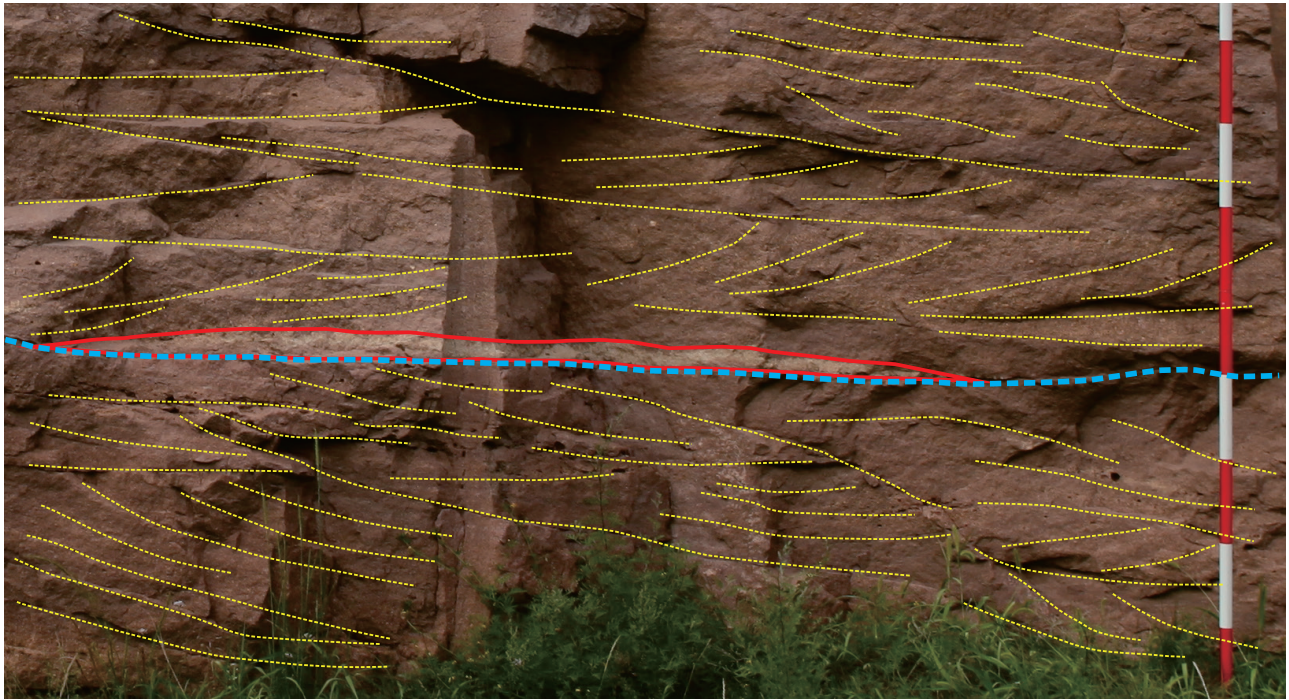


图9 3级界面附近成岩胶结带特征(剖面B)

Fig. 9 Diagenetic cementation near the 3rd-order bounding surface (in section B)

表4 不同级次构型界面附近岩性复合体定量规模统计

Table 4 Architectural parameters of the lithologic complex near the architectural bounding surfaces of different orders in outcrop profiles

级次	界面附近岩性类型	厚度/m			侧向延伸/m		
		最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
5级	泛滥平原泥岩	1.3	0.60	0.90	45	20	37
	坝侧翼披覆泥岩	0.3	0.10	0.22	5.0	3.0	4.6
4级	坝底界冲刷泥砾	0.3	0.15	0.27	7.5	3.0	6.0
	废弃河道充填泥岩	1.0	0.60	0.80	15	8.0	10
3级	增生体顶面落淤层	0.4	0.10	0.20	30	3.0	18
	增生体底面冲刷泥砾	0.2	0.10	0.14	5.0	2.5	4.2
	增生体顶面冲沟充填泥岩	0.3	0.10	0.26	4.0	2.0	3.5
	增生体界面钙质胶结条带	0.1	0.05	0.08	2.0	1.0	1.2

界面之下发育中细砂岩—泥质粉砂岩组合模式，界面之上过渡为中粗砂岩；四是增生体界面附近发育钙质胶结，在界面附近，由下而上逐渐过渡为细砂岩—钙质胶结砂岩—细砂岩组合模式。

3.3 界面附近岩性变化的主要成因机制

不同级次的构型界面附近具有不同的岩性变化特征，不同岩性类型发育不同的规模，同时具有不同的成因机制，反映不同的沉积环境和水动力变化条件。

(1) 5级界面附近岩性变化成因机制

辫状河储层5级构型界面就是单一河道的边界，在辫状河中，一期河道与下一期河道中间，一般会有稳定的泛滥平原泥岩沉积，因此，判断5级界面的一个重要标志就是泛滥平原泥岩沉积。五级界面间的泛滥平原泥岩，一般是在河流的间歇期，水动力很弱，泥岩发育稳定，厚度大，范围广。

(2) 4级界面附近岩性变化成因机制

4级构型单元为单一成因砂体，辫状河中的单一成因砂体为单一心滩坝和河道充填，因此，4级界面是心滩坝的边界或河道充填的边界。4级界面附近的

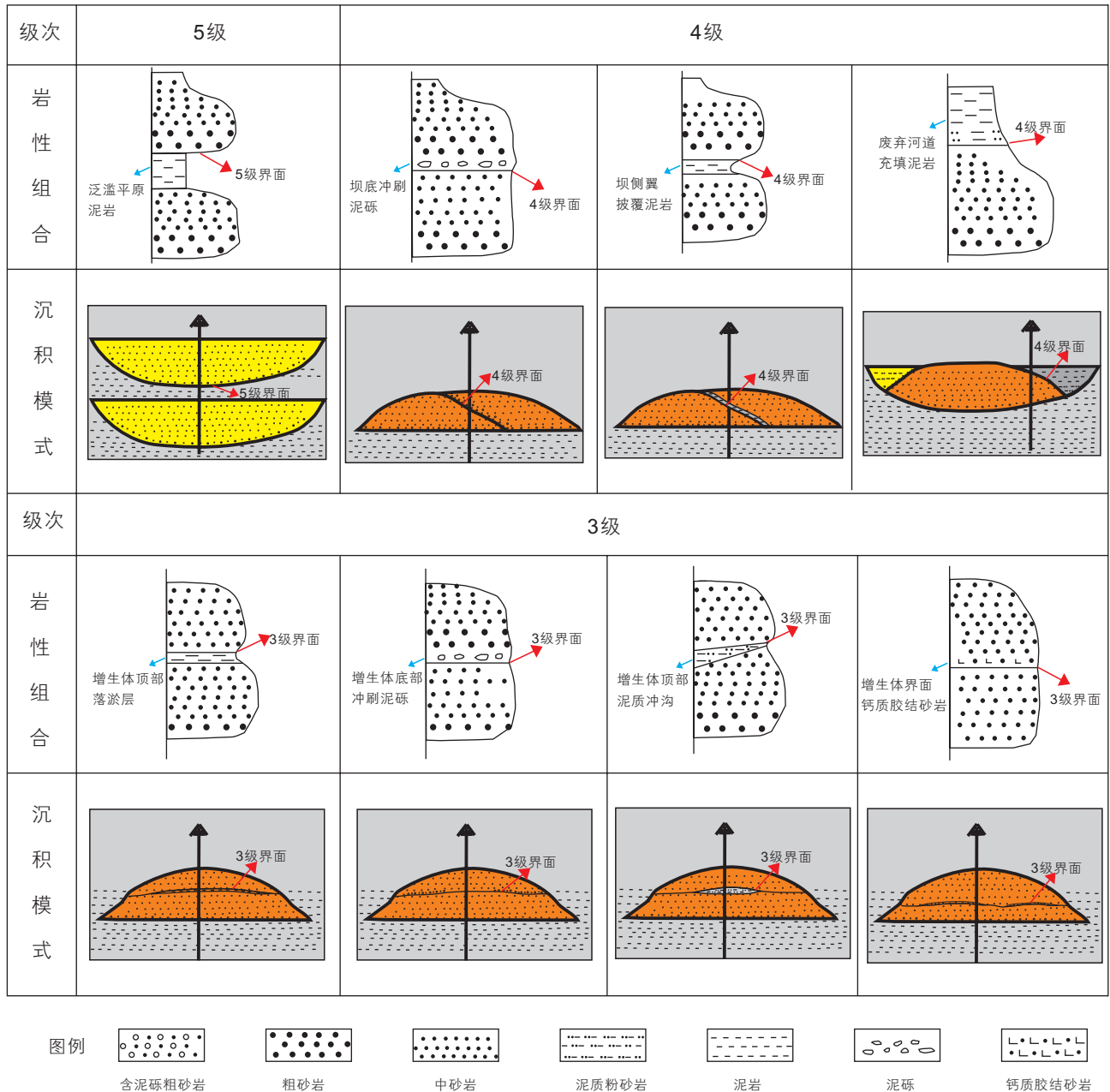


图 10 不同级次构型界面附近沉积模式及岩性组合模式

Fig. 10 Depositional model and lithological of the lithologic assemblages near the architectural bounding surfaces of different orders in outcrops

岩性主要为三种类型。

一是坝侧翼界面附近的侧积披覆泥岩，在心滩坝沉积末期，坝侧翼会沉积泥质细粒沉积物，这部分细粒沉积物没有被下一期河道冲刷，从而保存下来，形成坝间侧翼披覆泥岩，与坝侧翼倾角和后期水动力环境有关，侧向延伸较短。二是坝底面的含泥砾砂岩，如果心滩坝末期沉积的泥质细粒被下一期洪水冲刷，可以形成一定厚度的泥砾冲刷层，一般位于坝底，坝间的泥砾直径较大。三是河道充填界面附近的泥岩沉

积。泥质的废弃河道充填沉积有两种形式，一种是由于河道的改道，造成一些原河道的废弃，水量迅速下降，泥质细粒悬浮物质会沉积卸载下来，充填水道，形成废弃河道，另一种是在某一次洪水期，河道被淤泥充填，直接形成废弃的河道。如果后期水流未对其进行改造的话，泥质充填的废弃河道会保存下来。

(3) 3级界面附近岩性变化成因机制

3级构型单元为心滩坝内部的增生体，增生体的界面即为3级构型界面。3级界面附近的岩性变化可

以分为4种类型。一是薄的泥质粉砂岩或粉砂质泥岩，即在增生体沉积末期，由于水动力下降而形成的细粒沉积物卸载。由于沉积时间短，一般厚度较薄，并且当水动力由弱变强，易被冲刷，不易保存，侧向的延伸长度与坝体发育规模以及后期的水动力条件有关。二是在一期增生体沉积末期至下一期增生体沉积之前，由于水动力的突变，会在增生体顶部形成小型的冲击沟道，冲击沟道后被泥质充填，形成串沟，串沟在形态上类似废弃河道，但是规模小，厚度薄。三是增生

体末期形成的泥质细粒沉积，同样可以被下一期强水动力水流所冲刷，从而形成泥砾冲刷层，但是作为3级隔夹层的泥砾冲刷层，泥砾直径小，泥砾层厚度较薄，侧向延伸也较短。四是增生体界面附近的成岩胶结带，一般为钙质胶结，形成条件复杂，在构型界面处，成岩流体中携带的钙离子将砂岩胶结致密化，从而形成不连续的胶结条带。

整体来看，不同级次界面附近岩性复合体的厚度和侧向延伸长度呈正相关关系(图11-图13)。5级界

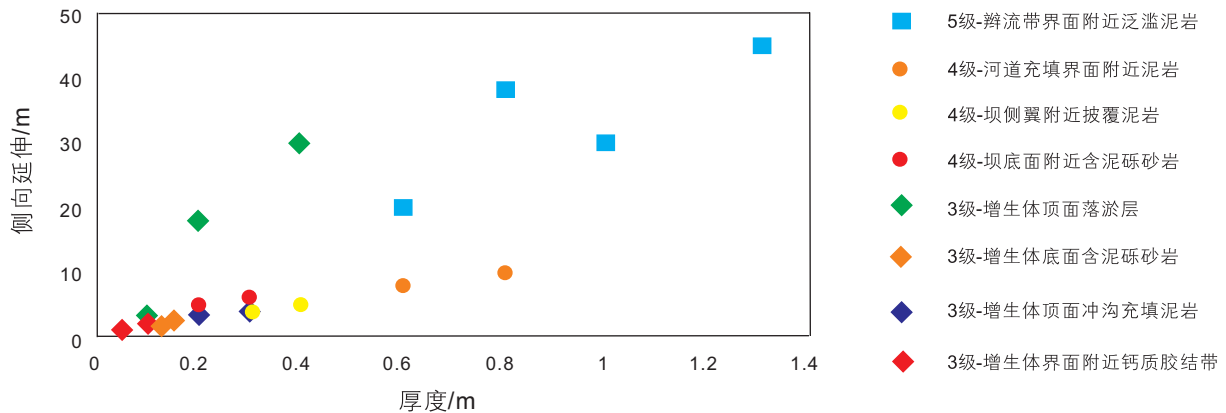


图 11 不同级次构型界面附近岩性复合体发育规模

Fig. 11 Depositional scale of the lithologic complex near the architectural bounding surfaces of different orders in outcrops

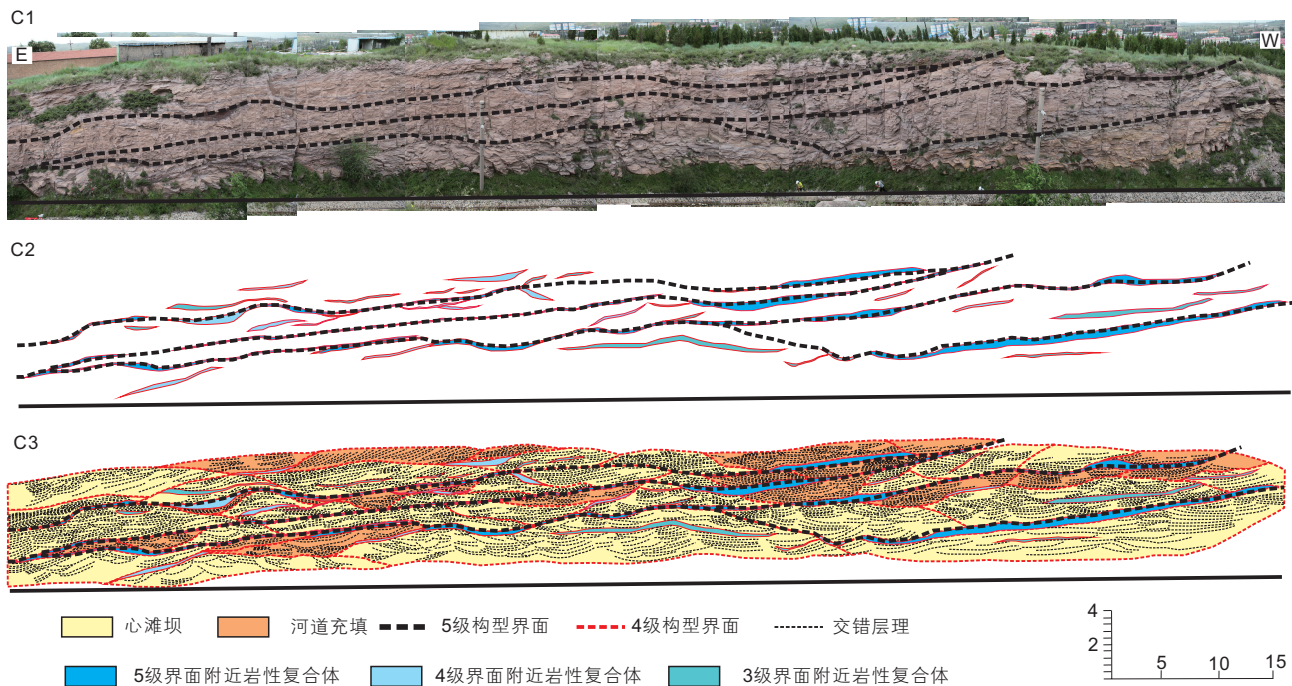


图 12 大同铁路露头剖面构型单元及界面附近岩性复合体综合解释(剖面C)

(C1)露头剖面拼合照片;(C2)不同级次界面附近岩性复合体解释;(C3)构型单元以及岩性复合体解释

Fig. 12 Photomosaic and interpretations for outcrop profile (section C)

(C1)Photomosaic for outcrop profile; (C2)Lithological complex interpretation of different orders; (C3)Architectural elements and Lithological complex interpretation

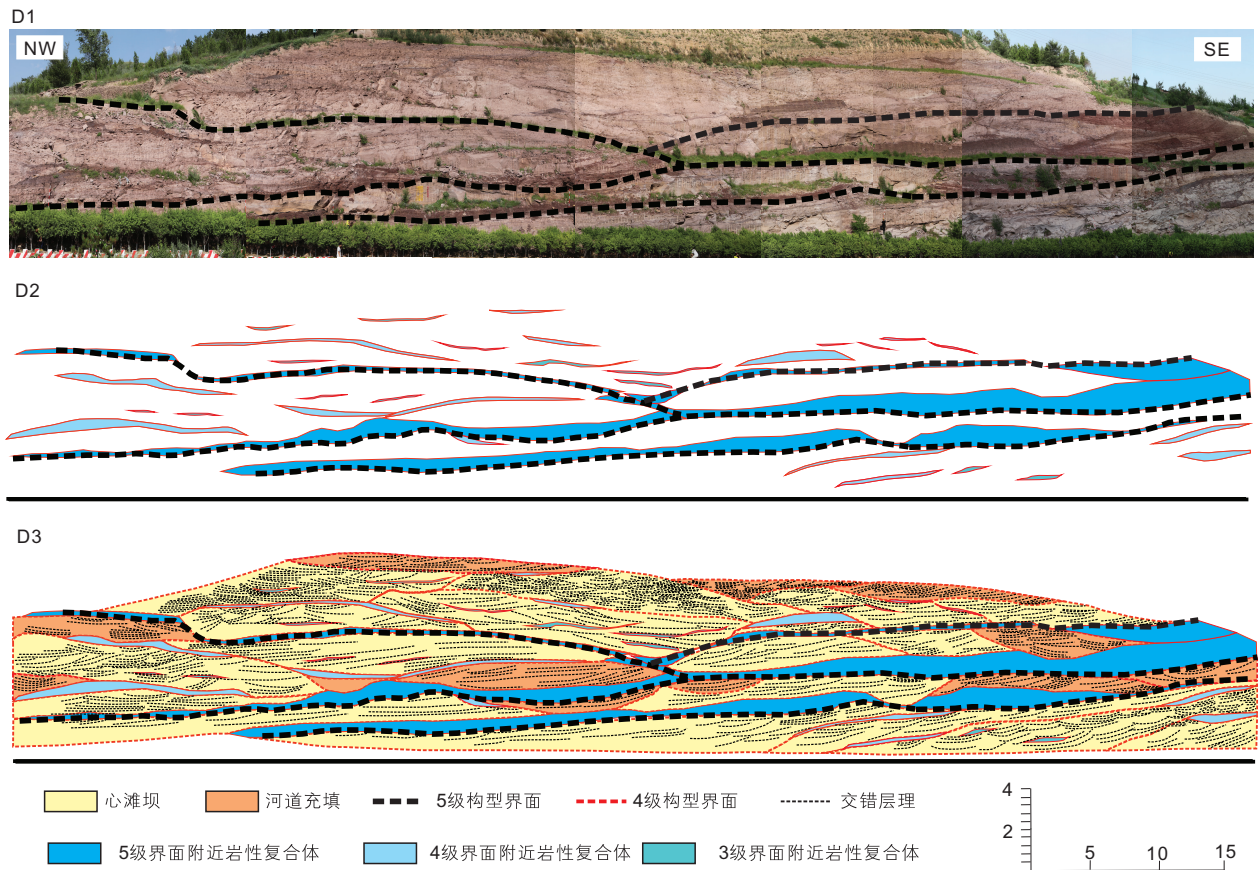


图 13 大同铁路桥露头剖面构型单元及界面附近岩性复合体综合解释(剖面 D)

(D1) 露头剖面拼合照片; (D2) 不同级次界面附近岩性复合体解释; (D3) 构型单元以及岩性复合体解释

Fig. 13 Photomosaic and interpretations for outcrop profile (section D)

(D1) Photomosaic for outcrop profile; (D2) Lithological complex interpretation of different orders; (D3) Architectural elements and Lithological complex interpretation

面附近的岩性复合体发育规模最大, 岩性发育较为稳定, 4 级界面附近其次, 3 级界面附近的岩性复合体规模小, 水动力变化快, 岩性垂向和侧向上变化较快, 分布不稳定。

4 砂质辫状河沉积模式

根据露头剖面解释, 得到不同构型要素以及其之间的相互关系、岩相类型及组合模式, 不同级次构型界面附近岩性复合体分布规律, 根据解释成果, 总结了砂质辫状河沉积的概念模式(图 14)。结合前人对于物源水系等古水流的研究成果, 认为露头区为低弯度—高辫状化的砂质辫状河。

不同级次构型界面附近的岩性变化反映了水动力条件的变化, 界面附近岩性复合体的不连续分布, 也反映出当时干旱—半干旱的气候环境, 间歇性的洪水导致河流内部废弃河道以及多期次的冲刷泥砾层的形

成。厚层砂体内发育的主要构型单元为单一砂坝和复合砂坝, 约占主要成因砂体的 80%, 河道充填规模小, 数量少。单一砂坝的厚度较薄, 侧向延伸较短, 但侧向上和垂向上的叠置关系极其复杂, 判断辫状河为宽浅型河道, 而且辫状化较强。不同期次的河道被泛滥平原泥岩分隔开来, 由于辫状河道频繁的迁移摆动, 垂向上砂体之间互相切割叠置。河道由于冲刷作用, 构型界面附近保存下来的泥岩沉积厚度较薄, 规模小。

砂质辫状河沉积具有旋回性及层次性, 将本区砂质辫状河沉积过程分为 4 个时期, 分别为冲刷侵蚀期, 沉积发育期, 衰退稳定期和消亡充填期。河道形成的初期, 快速的水流会形成多个下切面, 侵蚀早期沉积物, 快速的水流会侵蚀冲刷古地貌表层的泥岩, 形成泥砾, 再卸载沉积, 形成含泥砾的河床底部冲刷滞留沉积, 随后沉积大型的砂质底形, 多为大一中型的槽状交错层理。河道发育的中期为沉积发育期, 沉积发

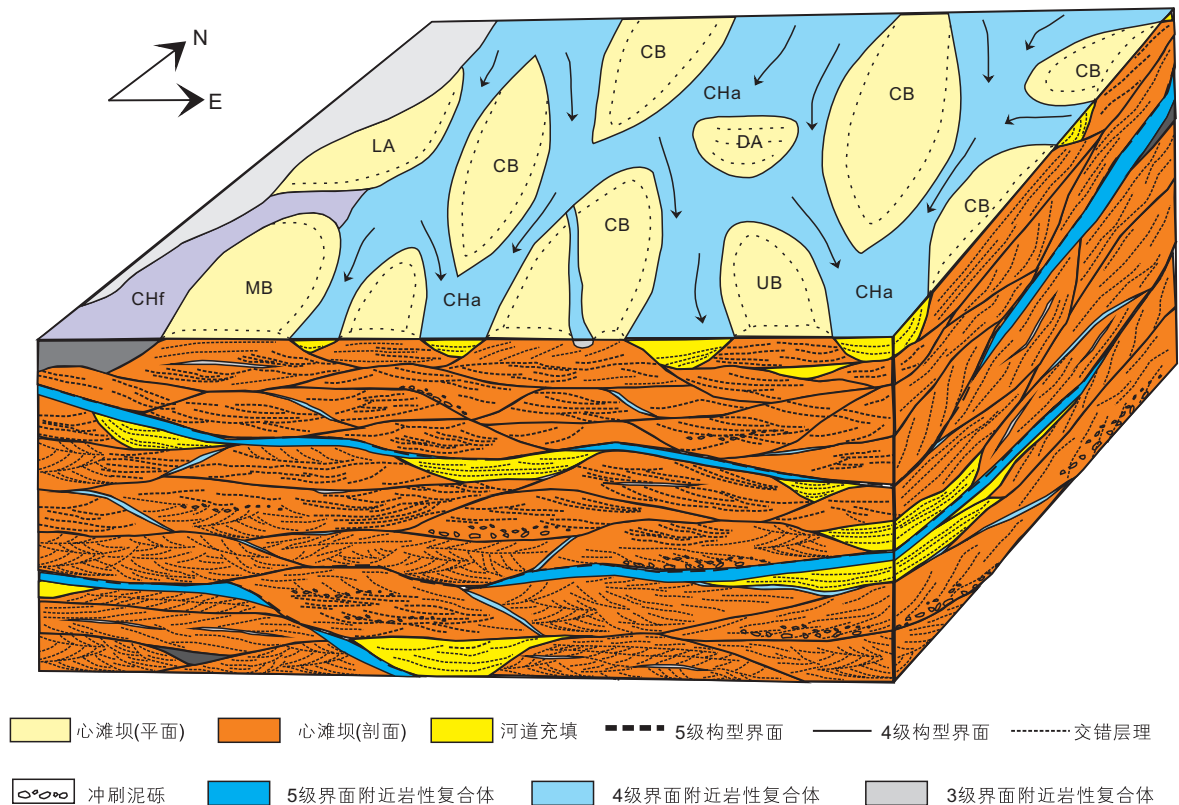


图 14 砂质辫状河沉积概念模型

Fig. 14 Conceptual model for sandy braided river

育各类砂坝, 沉积构造类型多样, 以槽状交错层理和板状交错层理为主。坝两侧的水道也会发生沉积物卸载充填, 河道改道, 继而发育形成新的坝体, 垂向上形成多个沉积旋回。至后期为衰退稳定期, 水动力减弱, 以小型砂质底形为主, 主要发育低角度交错层理或水平层理细粒沉积。末期河道水动力继续减弱, 在多期旋回之后, 水动力衰退至消亡, 细粒物质卸载充填河道, 后被洪水漫溢形成的泛滥平原泥岩覆盖。

5 结论

本文通过对山西大同侏罗系云岗组野外露头进行精细描述与解释, 得到如下结论:

- (1) 识别划分了山西大同侏罗系砂质辫状河 9 种岩石相类型, 8 种构型要素及其内部岩石相组合模式。
- (2) 定性识别了不同级次构型界面附近的岩性类型, 总结了不同级次构型界面附近沉积模式控制下的

岩性组合模式, 并且定量统计了 5 级~3 级界面附近岩性复合体的展布规模(长度、厚度)。5 级界面附近为泛滥平原沉积, 发育稳定, 具有较大厚度。4 级界面附近岩性分为三种类型, 一是坝侧翼面附近的侧积披覆泥岩沉积, 二是坝底面的含泥砾砂岩沉积, 三是河道充填界面附近的泥岩沉积。3 级界面附近的岩性类型为四种, 一是增生体顶面附近的粉砂质泥岩细粒沉积, 也称为落淤层, 二是增生体底界面附近的薄层含泥砾砂岩沉积, 三是增生体顶的泥质冲沟沉积, 四是增生体间的钙质胶结砂岩沉积。不同级次界面附近岩性复合体的厚度和侧向延伸长度呈正相关关系。

- (3) 阐述了不同级次界面附近岩性变化的成因机制, 总结了砂质辫状河的构型样式, 重塑了砂质辫状河沉积过程, 露头区为低弯度—高辫状化的砂质辫状河。辫状河沉积具有旋回性和层次性, 将砂质辫状河的形成分为 4 个时期, 分别为冲刷侵蚀期, 沉积发育期, 衰退稳定期和消亡充填期。

参考文献

- [1] 裘亦楠. 中国陆相碎屑岩储层沉积学的进展[J]. 沉积学报, 1992(3):16-24. [QIU Y N. The reservoir sedimentology advances of terrestrial clastic rocks, China[J]. Acta Sedimentary Petrology, 1992, 57:222-233.]

- [2] 徐安娜,穆龙新,裘怿楠. 我国不同沉积类型储集层中的储量和可动剩余油分布规律[J]. 石油勘探与开发,1998,05:41-44. [XU A N, MU L X, QIU Y N. Distribution pattern of OOIP and remaining mobile oil in different types of sedimentary reservoir of China[J]. Petroleum Exploration and Development. 1998, 05: 41-44.]
- [3] ALLEN J R L. Studies in fluvial sedimentation: bars, bar-complexes and sandstone sheets (low-sinuosity braided streams) in the Brownstones(L. Devonian)[J]. Welsh Borders. Sedimentary Geology, 1983, 33:237-293.
- [4] BRIDGE J S. The interaction between channel geometry, water flow, sediment transport and deposition in braided rivers[J]. Geological Society of London, Special Publication, 1993, 75:13-71.
- [5] BRIDGE J S, TYE R S. Interpreting the dimensions of ancient fluvial channel bars, channels, and channel belts from wireline-logs and cores[J]. American Association of Petroleum Geologists, Bulletin, 2000, 84:1205-1228.
- [6] BRIDGE J S. Rivers and floodplains: Forms, process, and sedimentary record[J]. Australian Geographical Studies, 2003, 48(3):386-387.
- [7] MIALL A D. Architectural-element analysis : A new method of facies analysis applied to fluvial deposits[J]. Earth Science Reviews , 1985, 22(4) : 261 308 .
- [8] MIALL A D. Reservoir heterogeneities in fluvial sandstones: Lessons from outcrop studies[J]. American Association of Petroleum Geologists, Bulletin, 1988, 72: 682-697.
- [9] MIALL A D. Hierarchies of architectural units in terrigenous clastic rocks , and their relationship to sedimentation rate[J]. Concepts in Sedimentology and Paleontology , 1992, 3:6-12.
- [10] MIALL A D. The geology of fluvial deposits: Sedimentary facies, basin analysis and petroleum geology[J]. Springer Verlin Heidelberg , 1996, 582 p.
- [11] MIALL A D. Architecture and sequence stratigraphy of Pleistocene fluvial systems in the Malay Basin, based on seismic time-slice analysis[J]. American Association of Petroleum Geologists, Bulletin, 2002, 86: 1201-1216.
- [12] MIALL A D, JONES B G. Fluvial architecture of the Hawkesbury Sandstone (Triassic), near Sydney, Australia[J]. Journal of Sedimentary Research, 2003, 73: 531-545.
- [13] MIALL A D. Reconstructing the architecture and sequence stratigraphy of the preserved fluvial record as a tool for reservoir development: a reality check[J]. American Association of Petroleum Geologists, Bulletin, 2006, 90: 989-1002.
- [14] CANT D J, WAKER R G. Development of a braided fluvial facies model for the Devonian Battery Point sandstone, Quebec[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1976, 13: 102-119.
- [15] CANT D J, WAKER R G. Fluvial processes and facies sequences in the sandy braided South Saskatchewan River, Canada[J]. Sedimentology, 1978, 25: 625-648.
- [16] HJELLBAKK A. Facies and fluvial architecture of a high-energy braided river: The Upper Proterozoic Segladden Member, Varanger Peninsula, northern Norway[J]. Sedimentary Geology, 1997, 114: 131-160.
- [17] HOPKINS J C. Channel-fill deposits formed by aggradation in deeply scoured, superimposed distributaries of the Lower Kootenai Formation (Cretaceous)[J]. Journal of Sedimentary Research, 1985, 55: 42-52.
- [18] JIAO Y Q, YAN J X, LI S T, et al. Architectural units and heterogeneity of channel reservoirs in the Karamay Formation, outcrop area of Karamay oil field, Junggar basin, northern China[J]. American Association of Petroleum Geologists, Bulletin, 2005, 89(4): 529-545.
- [19] KRAUS M J, GWINN B. Facies and facies architecture of Paleogene floodplain deposits, Willwood Formation, Bighorn Basin, Wyoming, USA[J]. Sedimentary Geology, 1997, 114: 33-54.
- [20] OLIVER J W, WAKEFIELD E H, ALEX W P. Architectural analysis of a Triassic fluvial system: The Sherwood Sandstone of the East Midlands Shelf, UK[J]. Sedimentary Geology, 2015, 327:1-13.
- [21] REESINK A J H, BRIDGE J S. Influence of bedform superimposition and flow unsteadiness on the formation of cross strata in dunes and unit bars[J]. Sedimentary Geology, 2009, 222:274-300.
- [22] 孙天建,穆龙新,吴向红,等. 砂质辫状河储层构型表征方法——以苏丹穆格莱特盆地Hegli油田为例[J]. 石油学报, 2014, 04: 715-724. [SUN T J, MU L X, WU X H, et al. A quantitative method for architectural characterization of sandy braided river reservoirs: taking Hegli oilfield of Muglad Basin in Sudan as an example. Acta Petrolei Sinica, 2014, 04:715-724.]
- [23] 牛博,高兴军,赵应成,等. 古辫状河心滩坝内部构型表征与建模——以大庆油田萨中密井网区为例[J]. 石油学报,2015,01:89-100. [NIU B, GAO X J, ZHAO Y C, et al. Architecture characterization and modeling of channel bar in paleo-braided river: a case study of dense well pattern area of Sazhong in Daqing oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 01:89-100.]
- [24] 廖保方,张为民,李列,等. 辫状河现代沉积研究与相模式——中国永定河剖析[J]. 沉积学报,1998,32(3):32-36.[LIAO B F, ZHANG W M, LI L, et al. Study on Modern Deposit of a Braided Stream a Facies Model – Taking the Yongding River as an Example. Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 32(3):32-36.]
- [25] 刘钰铭,侯加根,王连敏,等. 辫状河储层构型分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2009,01:7-11+17. [LIU Y M, HOU J G, WANG L M, et al. Architecture analysis of braided river reservoir[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009, 01:7-11+17.]

- [26] 金振奎,杨有星,尚建林,等. 辫状河砂体构型及定量参数研究——以阜康、柳林和延安地区辫状河露头为例[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(3): 311–317. [JIN Z K, YANG Y X, SHANG J L, et al. Sandbody architecture and quantitative parameters of single channel sandbodies of braided river: Cases from outcrops of braided river in Fukang, Liulin and Yanan areas[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(3): 311–317.]
- [27] 吴胜和,翟瑞,李宇鹏,等. 地下储层构型表征: 现状与展望[J]. 地学前缘, 2012, 02: 15–23. [WU S H, ZHAI R, LI Y P. Subsurface reservoir architecture characterization: Current status and prospects[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(2): 015–023.]
- [28] RANIE L, ELIZABETH H. Conceptual model for predicting mudstone dimensions in sandy braided-river reservoirs[J]. *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin*, 2006, 90(8): 1273–1288.
- [29] ROMAN S, NIGEL P M. Interpreting complex fluvial and barform architecture: Carboniferous Central Pennine Province, northern England[J]. *Sedimentology*, 2016, 63, 207–252.
- [30] LI S L, YU X H, et al. Quantitative characterization of architecture elements and their response to base-level change in a sandy braided fluvial system at a mountain front[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2015, 85: 1258–1274.
- [31] YU X H, MA X X, QING H R. Sedimentology and reservoir characteristics of a Middle Jurassic fluvial system, Datong Basin, northern China[J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 2002, 50: 105–117.
- [32] 于兴河. 辫状河储层地质模式及层次界面分析[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004. [YU X H. Geological model and hierarchical bounding surface analysis of braided river reservoir[M]. Beijing: Petroleum industry press, 2004.]
- [33] 陈彬滔, 于兴河, 王天奇, 等. 砂质辫状河岩相与构型特征——以山西大同盆地中侏罗统云冈组露头为例[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(1): 111–117. [CHEN B T, YU X H, et al. Lithofacies and architectural characteristics of sandy braided river deposits: a case from outcrops of the Middle Jurassic Yungang Formation in the Datong Basin, Shanxi Province[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(1): 111–117.]
- [34] 杨丽莎, 陈彬滔, 李顺利, 等. 基于成因类型的砂质辫状河泥岩分布模式——以山西大同侏罗系砂质辫状河露头为例[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(01): 93–98. [YANG L S, CHEN B T, LI S L, et al. Pattern of genesis-based mudstone distribution for sandy braided river: A case study of sandy braided-river outcrop, Datong, Shanxi province, China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(01): 93–98.]
- [35] 李海燕, 高阳, 王延杰, 等. 辫状河储集层夹层发育模式及其对开发的影响——以准噶尔盆地风城油田为例[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(03): 364–373. [LI H Y, GAO Y, WANG Y J, et al. Intercalation pattern and its impact on development of braided river reservoirs: A case of Fengcheng Oilfield, Junggar Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(03): 364–373.]
- [36] 印森林, 吴胜和, 陈恭洋, 等. 基于砂砾质辫状河沉积露头隔夹层研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2014, 36(04): 29–36. [YIN S L, WU S H, CHEN G Y, et al. A study on intercalation of sand-gravel braided river deposit based on outcrop section[J]. *Journal of southwest petroleum university (Science & Technology Edition)*, 2014, 36(04): 29–36.]
- [37] CHEN Y X, DAI D L. Depositional facies of Jurassic in Datong area, Shanxi province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1962, 42: 321–338.
- [38] DU P. Structure characteristics and relations with neighbouring area in Datong coal field[J]. *Geological Review*, 1964, 22: 259–266.

Architectural characterization and a distribution model of lithology near the boundary surfaces of different orders in a sandy braided river—a case study from the Jurassic sandy braided-river outcrops in the Datong Basin, Shanxi Province

REN Xiaoxu¹, HOU Jiagen¹, LIU Yuming¹, CHEN Depo², ZHANG Xiangyu¹

¹ College of Geoscience, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

² Geological Science Research Institute of Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying 257061, China

Abstract In multistory sandstones, lithofacies near the architectural bounding surface vary due to the hydrodynamic changes, which affect the heterogeneity inside the sand bodies. Especially for braided fluvial deposits, the hydrodynamic changes are more frequent, and the lithofacies near the bounding surfaces are distributed rather complicatedly and unstably. Lithofacies are identified and divided by investigating the classical sandy braided river outcrops in Datong, Shanxi Province, and eight modes of lithofacies assemblages are summarized, which correspond to eight types of architectural elements. The modes of lithologic complexes near architectural bounding surfaces in study outcrops are divided and measured quantitatively based on photographic

mosaics and interpretation of the outcrop sections. The genetic mechanisms of lithologic variation of different orders and different types are analyzed, the architectural models of braided fluvial deposits are summarized, and the sandy braided river depositional process is remodeled. The fifth order architectural bounding surface is defined as the surface of a braided channel. Therefore, the lithology near the fifth order bounding surface is the floodplain mudstone which is relatively thick and develops stably between different periods of braided channels. The fourth order architectural bounding surface is considered as the surface of mid-channel bars or single channel-fills. So the lithologies near the fourth order surfaces can be divided into three types: covering mudstone on the flank of bars, erosional muddy gravels on the bottom of bars, and abandoned channel-fill mudstone. The third order architectural bounding surface is defined as the surface of a single accretion inside mid-channel bars. Thus, the lithologies near the third order surfaces can be divided into four types. The first type is muddy siltstone, also known as fall-silt seam, which deposits during the last phase of a single period of vertical accretion due to the weakened hydrodynamics. The second one is the thin-layer erosional muddy gravel, which generally locates at the bottom of an accretion. The third one is the muddy gully-fill deposit, and the fourth type is the diagenetic cementation belt. The lithologies near the third order architectural bounding surfaces develop unstably, due to its thin thickness and lateral discontinuities.

Keywords sandy braided river; architectural elements; architectural bounding surface; lithofacies assemblage; Jurassic outcrop in the Datong basin

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2018.03.023

(编辑 付娟娟)