



地球科学

Earth Science

ISSN 1000-2383, CN 42-1874/P

《地球科学》网络首发论文

题目: 基准面旋回控制的河流相储层差异构型模式--以山西大同侏罗系露头为例
作者: 岳大力, 李伟, 李健, 刘瑞璟, 郭长春, 王文枫, 张海娜
收稿日期: 2022-03-01
网络首发日期: 2022-04-20
引用格式: 岳大力, 李伟, 李健, 刘瑞璟, 郭长春, 王文枫, 张海娜. 基准面旋回控制的河流相储层差异构型模式--以山西大同侏罗系露头为例[J/OL]. 地球科学. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20220418.1201.008.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

doi:10.3799/dqkx.2022.132

基准面旋回控制的河流相储层差异构型模式 ——以山西大同侏罗系露头为例

岳大力^{1,2} 李伟^{1,2*} 李健³ 刘瑞璟^{1,2} 郭长春³ 王文枫⁴ 张海娜³

1 中国石油大学（北京）油气资源与探测国家重点实验室，北京 102249

2 中国石油大学（北京）地球科学学院，北京 102249

3 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司勘探开发研究院，山东东营 257015

4 昆仑数智科技有限责任公司 北京 100040

摘要：我国河流相储层大多已进入开发后期，急需表征内部复杂构型分布，但目前河流相差异构型模式及控制因素研究还很薄弱，油田区构型表征模式指导不够。因此，本文以山西大同露头为研究对象，采用露头精细描述与测量、GR测定、粒度分析等方法建立了河流相储层差异构型模式。研究认为：基于砂地比、古水深将露头区划分为9个短期、2个中期基准面旋回，中期基准面旋回不同位置河型差异明显；随着基准面升高与河型的转化，由狭长状心滩坝转变为正常的心滩坝，再过渡窄带状心滩坝或点坝的组合样式，最后演变为马蹄状点坝；三种河型砂坝（心滩坝或点坝）厚度与宽度、砂坝宽度与河道宽度均具有较好的正相关关系。研究成果可为相似露头构型分析提供借鉴，亦可为相似油田区构型精细表征提供模式指导。

关键词：基准面旋回；构型模式；河流相储层；野外露头；大同盆地

中图分类号：P587 **收稿日期：**2022-03-01

Variable Architecture Models of Fluvial Reservoir Controlled by base-Level Cycle -- A Case Study of Jurassic Outcrop in Datong Basin

Yue Dali^{1,2} Li Wei^{1,2*} Li Jian³ Liu Ruijing^{1,2} Guo Changchun³ Wang Wenfeng⁴ Zhang Haina³

1 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, Beijing, 102249, China

2 College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China

3 Research Institute of Exploration & Development, SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying, Shandong, 257015, China

4 Kunlun Digital Technology Co., Ltd, Beijing, 100040

Abstract: Most of the fluvial reservoirs have entered the late stage of oilfield development in China, and it is urgent to characterize the internal, complex distribution of sedimentary architectures. However, there is few published research documents related to differential architecture models and controlling factors, and the prediction models for oilfield reservoir architecture characterization are not enough. Therefore, taking the outcrop in Datong, Shanxi as the study area, the variable architecture models of fluvial reservoir are established by using the methods of outcrop description and measurement, GR measurement and particle size analysis. The research result shows that the outcrop area is divided into 9 short-term and 2 medium-term base-level cycles based on sandstone percent and ancient river depth, and the fluvial patterns at different

*基金项目：国家自然科学基金项目高频基准面旋回控制的砂质辫状河储层内部构型模式及形成机理（编号：41872107）；

作者简介：岳大力（1974-），男，教授，从事油气田开发地质相关教学工作，主要从事储层构型、储层质量表征与建模研究。E-mail: yuedali@cup.edu.cn; ORCID: 0000-0001-8918-9513

通讯作者：李伟（1990-），男，博士后，主要从事河流沉积学研究。E-mail: wei_li_geologist@qq.com; Tel: 15117975024.

locations of medium-term base-level cycle are obviously different; With the rising of the base level and the transition of fluvial type, architecture distribution changes from narrow and long braided bar to normal braided bar, then transition to the combination style of narrow band braided bar or point bar, and finally evolve into horseshoe point bar; There is a good positive relationship between the thickness and width of sandy bars (braided bar or point bar), and between the width of sandy bar and the width of channel. The research results can provide guidances for similar outcrop architecture analysis and provide prediction models for the fine architecture characterization of similar oilfield.

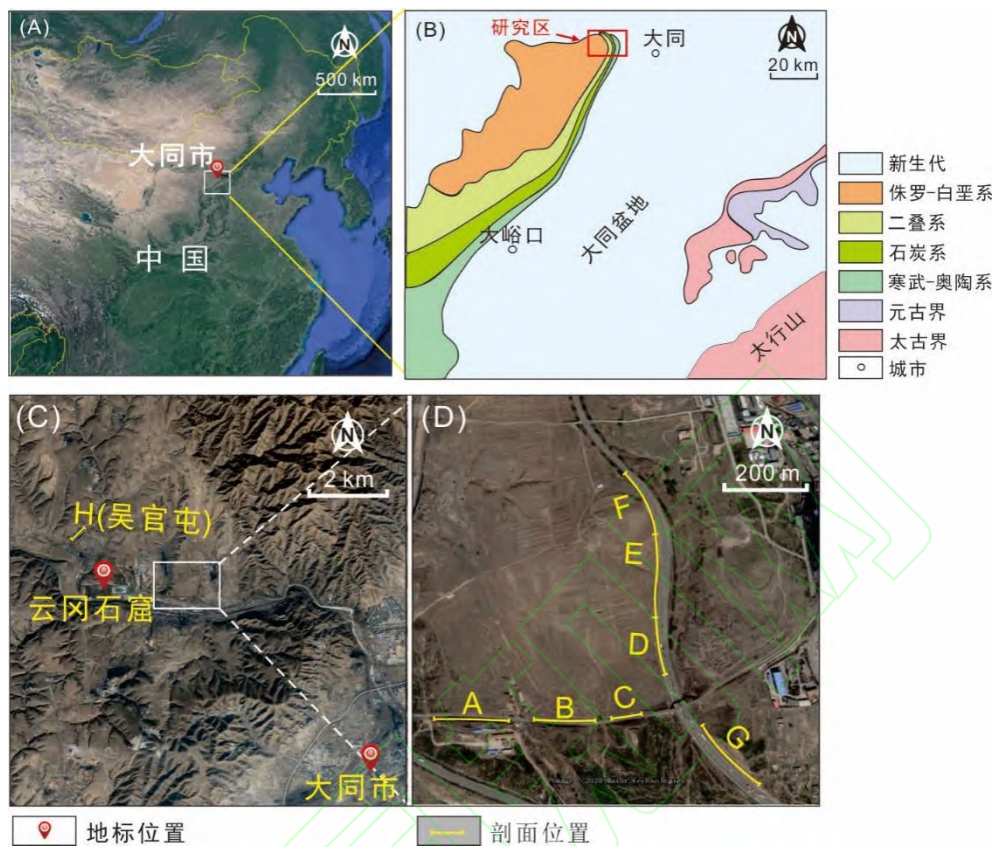
Key words: Base-level Cycle; Architecture Pattern; Fluvial Reservoir; Outcrop; Datong Basin

河流相作为重要的油气储层类型，在全球范围内广泛分布，如美国德州 Oakville 河流沉积 (Sullivan et al., 1991)、苏丹的迈鲁特盆地白垩系 (Dou et al., 2008)、马来西亚盆地更新系 (Miall, 2002)、巴基斯坦 Miano 气田 (Naseer and Asim, 2017) 等均发育大量河流相储层。和国外相比，我国河流相储层占比更高，占总开发储量的 42.6% (裘亦楠, 1992; 徐安娜等, 1998)。然而，河流的持续性迁移与频繁改道，导致储层内部结构复杂 (Best et al., 2003; 岳大力等, 2007; Ghazi and Mountney, 2009; 孟玉净等, 2021; 姚光庆和姜平, 2021)，表征难度大、采收率低，剩余资源潜力巨大 (岳大力等, 2008)。已有研究表明，基准面的升降与河道砂体几何形态、叠置样式密切相关 (Cross, 2000; Li et al., 2015)，也对河流类型的转变 (辫状河-曲流河) 有一定的控制作用 (Ghinassi et al., 2016; Yao et al., 2018; 李胜利等, 2022)。尽管已有学者探讨了基准面与河道叠置样式、河流类型的关系 (Miall, 1985, 1988; 邓宏文等, 1997; 梁宏伟等, 2013)，但基准面不同位置的构型模式差异巨大，已建立的构型模式 (尤其是定量构型模式) 往往忽略其特定的沉积条件，缺少系统的、针对基准面不同位置的差异化构型模式 (Bridge and Lunt, 2006; 陈玉琨等, 2012, 2015)。野外露头剖面便于系统描述与取样分析，是开展构型模式研究的首选对象。因此，本文选取山西大同侏罗系河流相露头，建立了基准面旋回控制的河流相储层差异构型模式，以期为地下的河流相储层表征提供了模式指导与方法借鉴。

1. 露头区概况

山西大同侏罗系河流相露头位于山西省大同市西北方的山区、大同盆地北部云冈石窟附近 (图 1A, B)。大同盆地地层保存相对齐全，从太古界到新生代，除志留系、泥盆系、三叠系地层缺失外，皆有沉积与出露 (白桦, 2011)。露头区侏罗系地层与下伏二叠系为平行不整合接触，与上覆白垩系为角度不整合接触，侏罗系自下而上分为永定庄组 (下侏罗统)、大同组 (中侏罗统) 与云冈组 (中侏罗统)，上侏罗统地层遭受剥蚀 (陈庸勋和戴东林, 1962; 王随继, 2001; 白桦, 2011)。本文研究的河流相露头均位于中侏罗统云冈组，共包括四个露头剖面 (图 1C, D)：晋华宫铁路桥桥剖面分为 A、B、C 三段，总长度约 400 m，高度 10-20 m；晋华宫铁路桥下-公路北剖面分为 D、E、F 三段，长度约 480 m，厚度约 30 m；晋华宫铁路桥下-公路南剖面 (G 段) 长度约 160，高度约 35 m；吴官屯剖面 (H 段) 长约 330m，高 30 米。四个剖面的出露条件良好，岩相与构型单元特征清晰，彼此邻

近，可对比性强，涵盖基准面旋回的不同阶段，是研究河流相差异构型模式的理想对象。



(A) 大同市地理位置；(B) 露头区位置及地层出露状况；(C) 吴官屯露头剖面 H；
(D) 晋华宫铁路桥剖面 A-C、铁路桥下-公路北侧剖面 D-F、铁路桥下-公路南侧剖面 G

图 1 河流相露头区地理位置及地貌特征

Fig. 1 Location of the fluvial outcrops and geomorphology of the outcrop area

中侏罗统云冈组碎屑岩沉积以砂岩为主，自下而上，粒度由粗变细。根据岩相组成可细分为三段：下部砾岩段、中部石窟段、上部泥岩段（陈彬滔等，2015）。下部砾岩段以灰白色砾岩、灰白色含砾粗砂岩为主，弱还原环境，大型槽状交错层理非常发育；中部石窟段以中粗砂岩为主，上部发育细砂岩，槽状交错层理、平行层理、斜层理发育，冲刷面上可见细砾沉积，弱还原向弱氧化环境转变；上部泥岩段，紫红色泥岩与细砂岩为主，呈泥包砂的岩性组合，氧化环境（Li et al., 2015；陈彬滔等，2015； Li et al., 2020）。

本文研究的露头剖面仅出露中部石窟段与上部泥岩段，中下部为典型的砂质辫状河沉积，上部逐渐过渡为辫-曲过渡沉积和曲流河沉积（图 2）。露头区发育两条宽带状河道砂体（晋华宫砂体与云岗石窟砂体），呈近南北向由北向南展布（于兴河等，2004）。综合各剖面出露的地层，建立了露头区的垂向沉积序列（图 2）。其中，铁路桥下-公路南剖面（G 段）位于下部石窟段（石窟段 I），为辫状河沉积，与古水流方向斜交，夹角在 45° ~ 65° 之间；铁路桥剖面（A-C 段）位于石窟段（II）

下部，亦为辫状河沉积，与古水流方向近似垂直，夹角在 $65^{\circ} \sim 85^{\circ}$ 之间；吴官屯剖面（H 段）位于石窟段（II）中上部，与古水流方向夹角约 47° ，该剖面中下部为辫状河沉积，上部为“辫-曲”转换的过渡沉积与曲流河沉积；铁路桥下-公路北剖面 D、E 段位于石窟段（II），与古水流方向近平行，夹角小于 25° ，F 段为石窟段（II）顶部与上部泥岩段，与古水流方向夹角在 $30^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 之间，呈现典型的曲流河沉积特征。

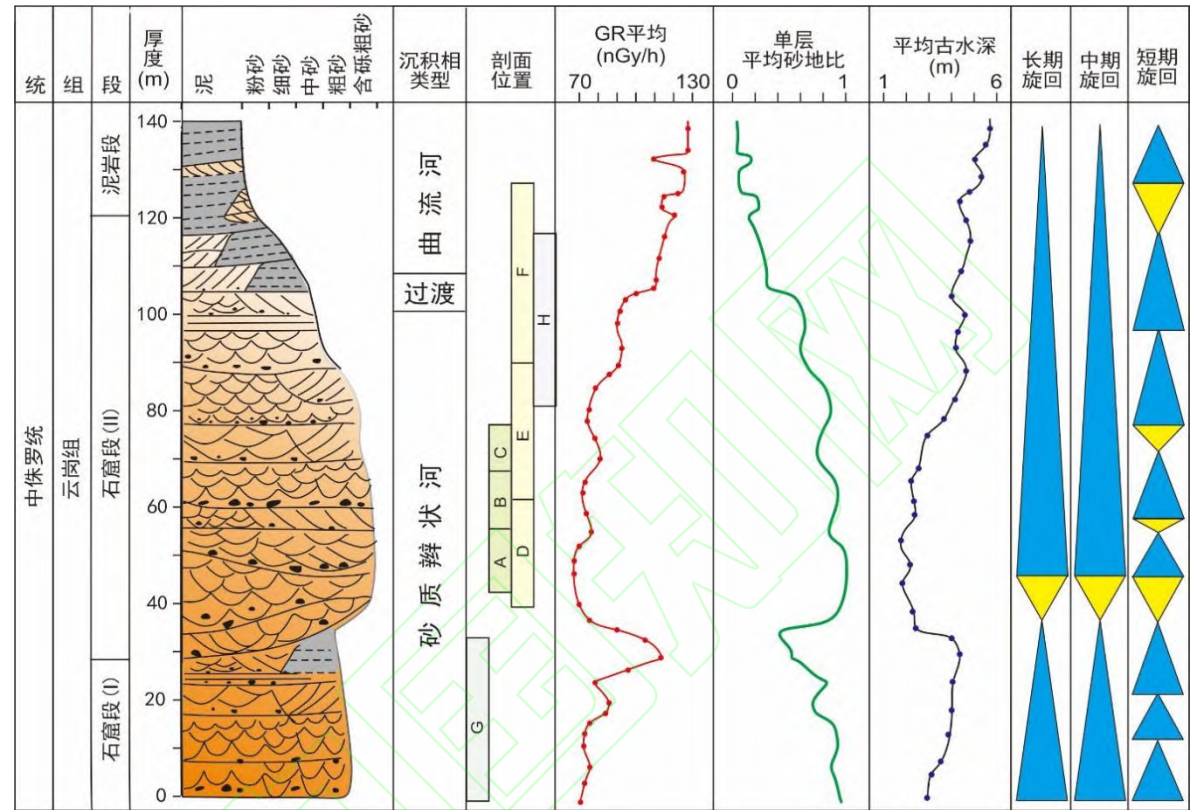


图2 研究区露头剖面基准面旋回划分及特征

Fig. 2 Characteristics of base level of the outcrops in study area

单一成因级次的构型单元主要包括心滩坝、点坝（边滩）、河道、溢岸砂体和泛滥平原。心滩坝是构成辫状河储层最主要的沉积单元，外形多呈“底平顶凸”状，以中-粗砂岩为主，粒度相对均匀，垂向上基本呈均质韵律；心滩坝主体部分发育典型的板状交错层理，由多期垂积体组成，表现为顺流加积特征，边部亦可发育少量侧向加积（图3）。点坝主要发育在露头剖面 F 段及 H 段上部，由侧向加积而成，边部常与泥质、半泥质充填废弃河道相邻，为曲流河沉积的主体构型单元，少量发育在辫-曲过渡沉积边部；点坝以细砂岩为主，底部可见少量中砂岩，呈明显正韵律（图3）。河道充填在辫状河与曲流河沉积体系均十分常见，是河流沉积的重要组成部分，在辫状河沉积体系通常称作辫状河道；根据沉积物粒度，可将河道充填分为砂质充填、泥质充填和泥质半充填。砂质充填河道多见于辫状河沉积，粒度呈明显正韵律，一般略小于相邻的心滩坝。泥质充填河道以细粒沉积为主，但泥岩一般不纯净，在曲流沉积十分常见，又称废弃河道，在辫状河沉积中偶有发育。泥

质半充填河道也极为常见，即在河道充填了一定粗粒沉积后废弃，上部充填细粒沉积，就露头区而言，辫状河中河道沉积的粒度通常大于曲流河沉积（图 3）。

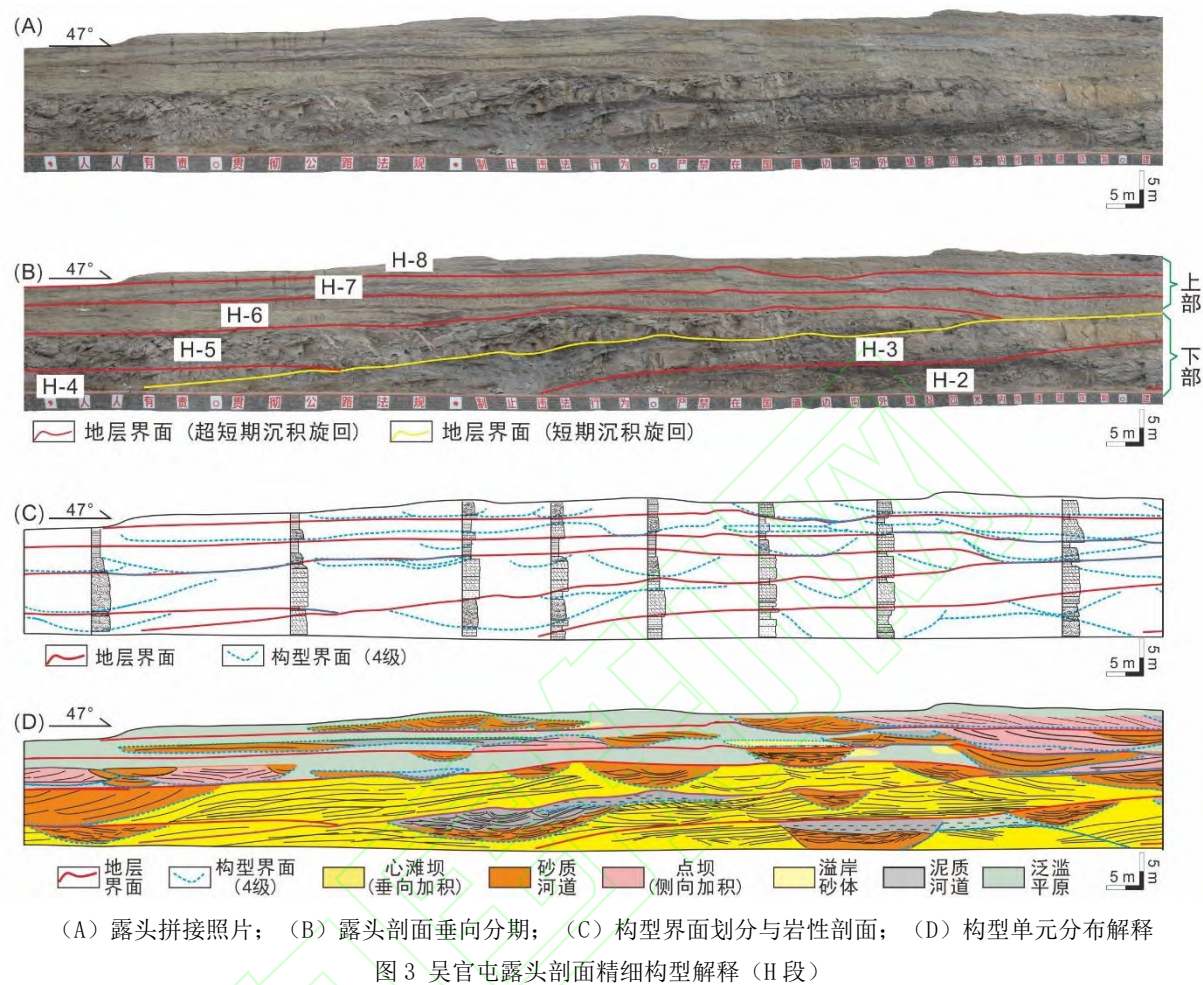


图 3 吴官屯露头剖面精细构型解释（H 段）

Fig. 3 Architecture interpretation of Wuguantun outcrop section (Section H)

2. 野外露头基准面旋回划分

2.1 基准面升降判识依据

可容空间与沉积物供给的比值 (A/S) 是分析基准面上升、下降重要的依据, A/S 增大代表基准面相对上升, A/S 减小则代表基准面相对下降。Cross (1988) 将基准面定义为“势能面”, 并将河流沉积体系中的可容空间描述为河床表面到基准面之间的空间, 显然, 在 Cross 高分辨率层序地层学中, “可容空间” 也是一个抽象的概念, 与水深存在一定差异。对于古代的河流沉积体系而言, 可容空间与物源供给均难以直接获得, 可以从砂地比、古水深等方面进行综合分析。

(1) 砂地比

在河流沉积体系中, 砂地比反映了沉积物的保存程度。同一河流体系, 假设河流负载的沉积物沙泥比例变化不大的情况下, 砂地比增大代表沉积物保存能力下降, 即反映可容空间相对不足, 基

准面下降；反之，砂地比减小反映可容空间相对充足，基准面上升（Mueller et al., 2014）。砂地比信息可以根据露头岩性解释及粒度分析化验结果直接计算，露头剖面的砂地比由大到小依次为剖面 A-C 段（多大于 0.85）、剖面 G 段（0.7-0.85 之间），剖面 H 段（0.7 左右）、剖面 F 段上部（0.1 左右），详见图 2。

（2）古水深

尽管在河流沉积体系中，水深不能直接代表可容空间，但通常情况下，在同一河流沉积体系中，尤其是洪泛时期，水深越大可容空间越大；因此，古水深增大表明基准面相对升高（Cross, 1988; Cross, 2000; Mueller et al., 2014）。

现代河流的研究表明，古水深（洪泛期河道满岸深度）与河道沉积的沙丘高度密切相关（Leclair and Bridge, 2001; Bradley and Venditti, 2017）。Bradley and Venditti (2017) 对沙丘（dune）与河水深度的关系进行了系统的梳理与总结，认为为单一沙丘的高度与水深近似呈正比关系（公式 1）；但是不同河流的比例系数具有较大的差别，在 3.5 - 7.5 之间，绝大多数河流在 5 - 7 之间，需要针对各个剖面的实际情况确定比例系数 x 。

$$H = x * h_m \quad (1)$$

其中 h_m 为相邻沙丘的高度，m； H 为河流古水深，m； x 为比例系数。针对露头剖面，选择保存完好的河道直接测量该河道沉积的厚度（图 4），经过压实校正得到河道满岸深度（Li et al., 2020），并测量该河道相邻砂坝内部单一沙丘的高度，求取平均值（图 4A）；将满岸深度与沙丘高度，带入公式 1，求取该河道的比例系数 x ，视为该层（或该剖面）的单一沙丘与古水深的比例系数（图 4 中求取的比例系数 $x = 5.5$ ）。

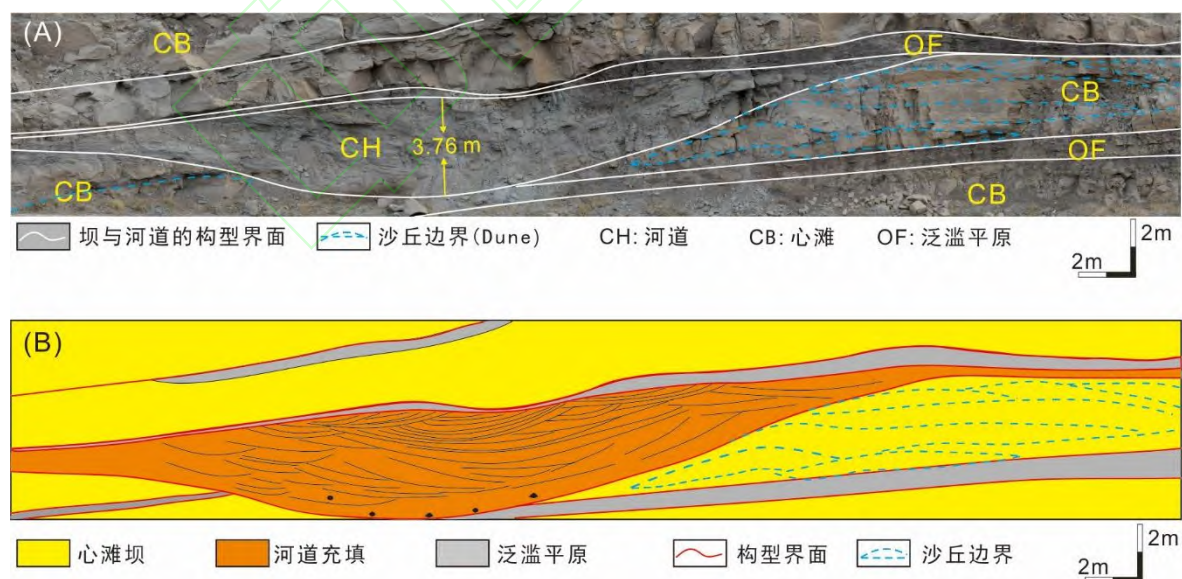


图 4 吴官屯剖面河道满岸深度与单一沙丘厚度

Fig. 4 Bankfull channel depth and thickness of related dunes in Wuguantun outcrop

计算结果表明,铁路桥剖面的沙丘高度分布范围是 10-55cm;河道深度分布在 0.55-3.1 m 之间,主要集中在 1.3-2.0m 之间,平均古水深 1.6m,水深最浅。铁路桥下-公路南剖面(即剖面 G 段)古水深分布在 0.8-3.6m 之间,主要集中在 1.6-2.8m 之间,平均古水深 2.2m,水深居中。吴官屯剖面古水深分布在 0.8-6.8m 之间,主要集中在 2.0-3.2m 之间,平均古水深 2.8m,水深较大。剖面 F 段水深计算结果在 1-6.9m 之间,主要集中在 2.0-3.5 m 之间,平均约 2.8m,与剖面 H 段相近。总之,各个剖面的平均古水深由大到小依次为剖面 F 与剖面 H 段、剖面 G 段、铁路桥剖面 A-C 段。

2.2 基准面旋回划分与特征

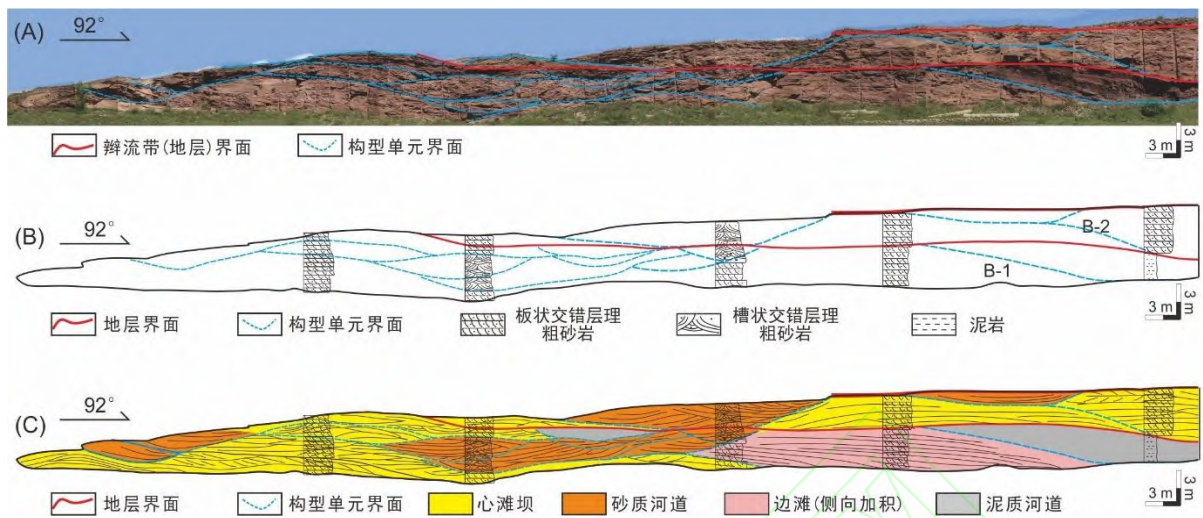
一期河道及其伴生的溢岸沉积形成的地层通常对应一个超短期旋回(图 3),故相邻期次河道沉积之间的基准面升降变化,构成了短期旋回。由此,根据砂地比、古水深的变化特征,结合测得的露头 GR 值大小,将出露的 140m 地层划分为 9 个短期旋回、2 个中期旋回和 1 个长期上升半旋回(图 2)。短期旋回内部基准面升降幅度小,相邻期次河道沉积的特征相似,但中期旋回内部不同位置的河道沉积特征差异明显,故本文着重讨论中期基准面升降对河流类型及内部构型模式的控制作用。

就中期基准面而言,自下而上,基准面先升高后短暂下降,最后持续升高;A-F 段形成了一个完整的上升半旋回。其中铁路桥剖面 A-B 段砂地比最高,古坡度最大,相对古水深最浅(图 2),故该地层为基准面低位。C 段 A/S 有所增大,但仍处于基准面相对较低的位置。吴官屯剖面(H 剖面)下部砂地比、古地形坡度明显的降低,平均古水深、GR 值明显增大,基准面上升,处于基准面相对较低的位置,剖面上部逐渐过渡为基准面中位时期。剖面 F 段以泥岩沉积为主,沉积物粒度最细,古地形坡度最小,水体相对深(可见灰黑色、灰绿色泥岩),故该地层基准面最高(图 4)。剖面 G 段处于另一个中期旋回,沉积旋回不完整,基准面先缓慢上升,在过渡到剖面 A 段时,基准面短暂下降。此外,剖面 D-F 段地层覆盖了该基准面上升的整个过程,其中 D-E 段与河道沉积方向(古水流方向)近似平行,且与 A-C 段、H 段出露地层相同,故该地层段主要以 A-C、H 段为例进行阐述。

3. 基准面旋回不同位置的构型特征

3.1 基准面低位构型特征

在基准面上升过程中,剖面 A-C 位于基准面低位时期(图 2)。辫流带区域内几乎全部为砂质沉积,砂泥比大于 9:1,仅在局部区域的河道带顶部沉积少量泥岩;沉积物以粗砂岩、含砾粗砂岩为主,少量中砂岩,平均粒径约 0.7 mm;顺流加积形成的心滩坝内部沙丘彼此交错、紧密堆叠,不发育典型的垂积体与落淤层;河道下切作用强,频繁改道,沟道与冲刷面极为发育,辫状河道与心滩坝之间彼此紧密切叠形成‘泛连通体’,不发育溢岸沉积;河道形态近似对称,反映横向环流作用弱(图 5)。推测为典型的游荡型辫状河沉积。



(A) 露头拼接照片；(B) 构型界面划分与岩性剖面；(C) 构型单元精细解释与分布特征

图 5 铁路桥剖面 B 段精细构型解释

Fig. 5 Architecture interpretation of section B in Tieluqiao outcrop.

3.2 基准面相对低位-中位构型特征

基准面相对低位-中位时期代表露头为吴官屯剖面 H 段，该剖面根据沉积特征可分为上下两部分（图 2）。剖面中下部（H1-H5）辫流带区域内以砂质沉积物为主，砂泥比约 8:2，各单期河道带顶部发育稳定的泛滥平原泥岩沉积，厚度在 20-70cm 之间；沉积物以中砂岩为主，可见少量粗砂岩与细砂岩；心滩坝中部为顺流加积，两侧可见少量侧向加积产物，内部发育典型的垂积体与落淤层（图 6A）；河道较为稳定，冲刷面相对较少，辫状河道与心滩坝边界清楚，基本不发育溢岸沉积；部分河道形态明显不对称（图 6B），反映河道内古水流存在一定的横向环流，辫状河道有一定的弯曲度。推测该层为相对稳定的（心滩型、分叉型）辫状河沉积。

剖面上部（H6-H8）砂泥比明显降低，大约 3:7。发育厚层泛滥平原沉积，垂向加积为主的心滩坝与侧向加积为主的点坝共存，心滩坝边部发育一定的侧积产物，点坝的侧积体数量较少，且侧积层不稳定。因此，该地层呈现明显的辫-曲过渡型河流沉积特征（图 2）。

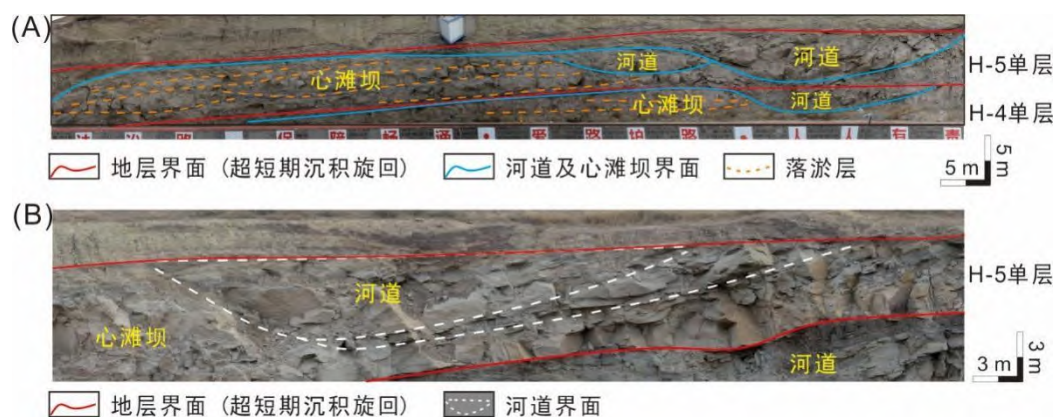
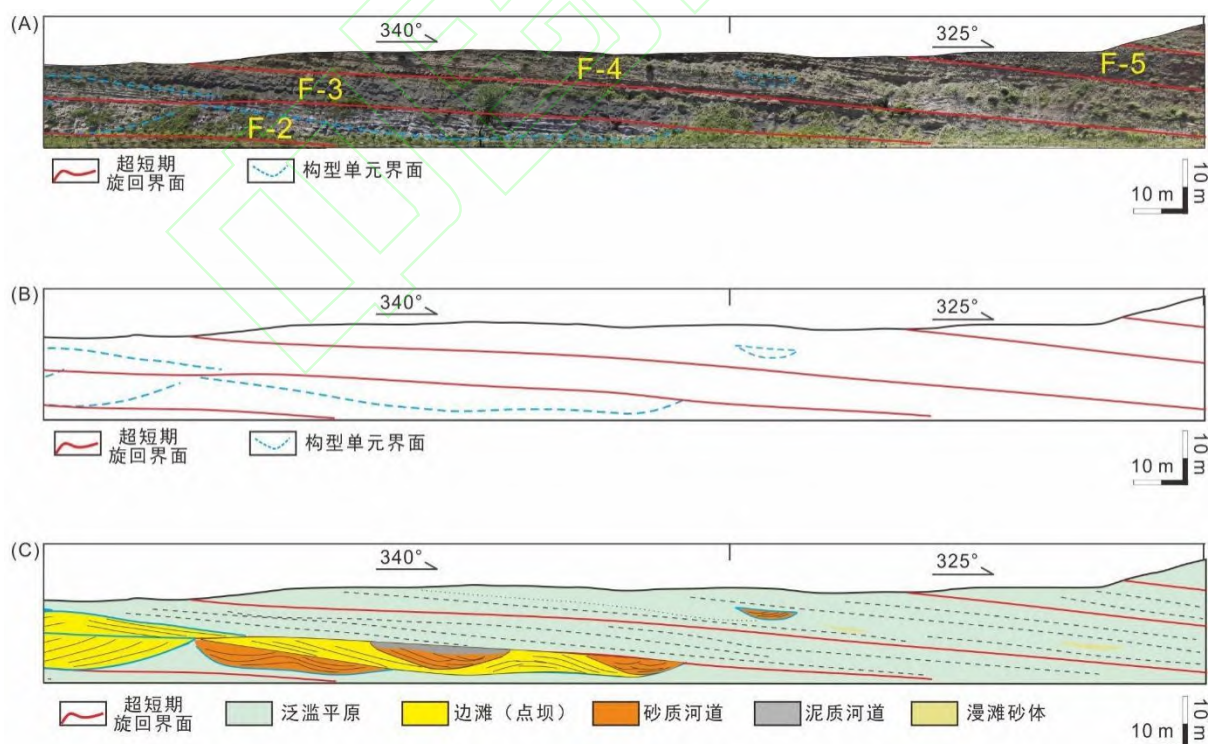


图6 吴官屯剖面H段稳定型心滩坝与非对称辫状河道

Fig. 6 Classic braided bar and asymmetric channels of H section in Wuguantun outcrop

3.3 基准面相对高位构型特征

基准面相对高位置代表地层为剖面F段（图7），沉积物以泛滥平原泥岩为主，其中F段泥岩比例大于85%；砂体以细砂岩为主，河道底部可见少量中砂岩；砂坝以侧向加积为主，内部由多期倾斜的侧积砂体与侧积泥岩组成，垂向呈典型复合正韵律河道与点坝界面清晰，发育溢岸沉积，冲刷面明显减少，主要分布在河道底部，反映河道稳定；多数河道的形态明显不对称，部分河道深泓线靠近左侧河岸、部分靠近右侧河岸，反映河道流向变化大；古水流横向环流作用强，河道弯曲度大，为典型的曲流河沉积。



(A) 露头拼接照片；(B) 构型划分与分布特征；(C) 构型单元精细解释与分布特征

图7 铁路桥下-公路北露头剖面精细构型解释（剖面F段）

Fig. 7 Architecture interpretation of section F in Tieluqiao-North side of road outcrop.

4. 基准面旋回控制的差异构型模式

4.1 辫状河心滩坝-曲流河点坝的沉积演化及构型分布模式

根据露头描述的构型特征，建立了基准面旋回控制的辫状河-曲流河的沉积演化与差异化构型模式。前文已述，本文根据河流类型与基准面位置，将理想的中期基准面旋回由低到高分为4个阶段：基准面低位II、基准面低位-I、基准面中位、基准面高位，分别发育游荡型辫状河、相对稳定的辫状河、“辫-曲”过渡型河流、高弯度曲流河沉积（图8）。

基准面旋回对辫状河心滩坝、曲流河点坝的组合模式与演化规律具有重要的控制作用。基准面低位（II），游荡型辫状河内部通常发育多个辫状河道与心滩坝，多个心滩坝与辫状河道组合形成宽带状；单个心滩坝形态狭长，内部沟道极为发育，不发育侧向加积，心滩坝内部不发育典型的垂积体与落淤层（图8D）。伴随着基准面升高（基准面低位-I），过渡为稳定型辫状河，多个心滩坝与辫状河道的组合样式依旧为宽带状分布；辫状河道弯曲度增大，心滩坝边部出现少量侧积产物，心滩坝内部可发育多期落淤层与垂积体（图8B）。基准面继续升高（基准面中位），形成辫-曲过渡型河流，此时辫状河与曲流河交替出现或共存，心滩坝或点坝的组合样式多为窄带状分布（图8C）。伴随着基准面继续升高，转化为曲流河，以侧积作用为主，形成点坝复合体，单一点坝呈马蹄状（图8A）。在曲流河沉积体系，基准面再继续升高，活动河道的弯曲度先增大后降低，点坝的组合关系相应地依次由宽带状向鳞片状、再向宽带状、最后向窄带状过渡（Harbor et al., 1994; Crosato and Mosselman, 2009; Mueller et al., 2014; Ghinassi et al., 2016; Colombero and Mountney, 2020）。

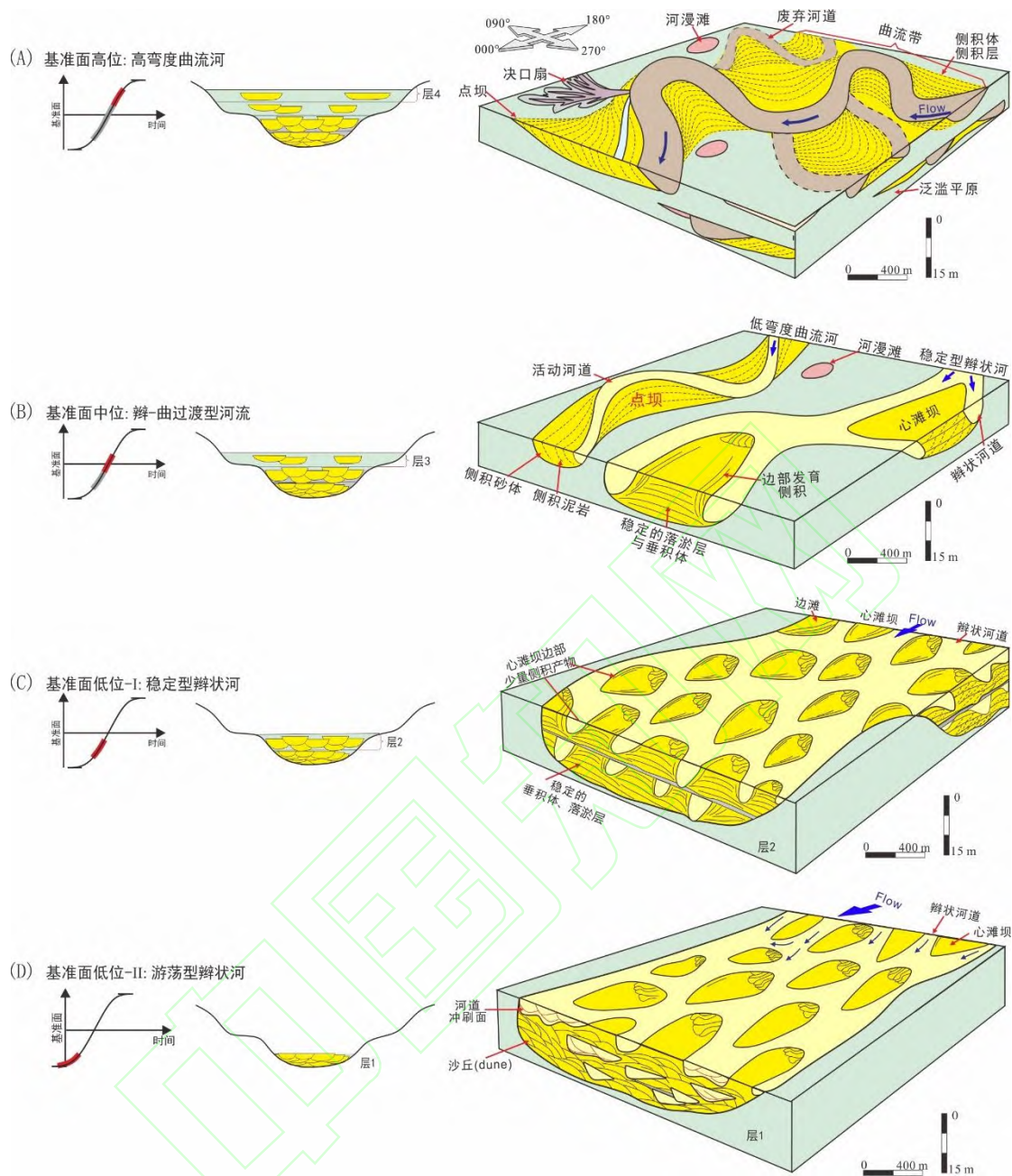


图8 基准面旋回不同位置河流类型及内部构型模式

Fig. 8 Types of fluvial systems and their inner architecture models at different base-level location

4.2 不同类型河流的定量构型模式

“辫-曲”过渡型河流的砂坝形态处于快速演变过程中，难以建立良好的定量关系，故本文重点探讨游荡型辫状河、相对稳定的辫状河、高弯曲曲流河的定量构型模式。

各剖面构型单元几何参数统计表明，基准面不同位置，构型单元定量关系存在明显差异。对于辫状河而言，随着基准面升高，游荡型辫状河过渡为稳定型辫状河，心滩坝规模随之增大（露头测量的心滩坝宽度为平水期宽度，陈玉琨等，2012），心滩坝的厚度与宽度之比也略有增大（图 9A）。当基准面升至高位，为曲流河沉积，点坝的厚度与宽度呈良好的正相关性，且砂坝厚度与宽度之比

大于辫状河心滩坝（图 9B 斜率）。辫状河心滩坝与辫状河道宽度之比多在 2-4.5 之间，呈“宽坝窄河道”的样式。其中，基准面低位游荡型辫状河的比值较大，斜率为 2.9（图 10A,）基准面相对低位稳定型辫状河的比值相对较小，斜率约 2.2（图 10A）。相比于辫状河，曲流河点坝与河道宽度之比较高，在 4 左右（图 10B）。综上，随着基准面上升，砂坝（心滩坝或点坝）与河道宽度之比呈先减小后增大的规律。不同类型河流的定量构型模式可有效指导相似油田的构型表征。

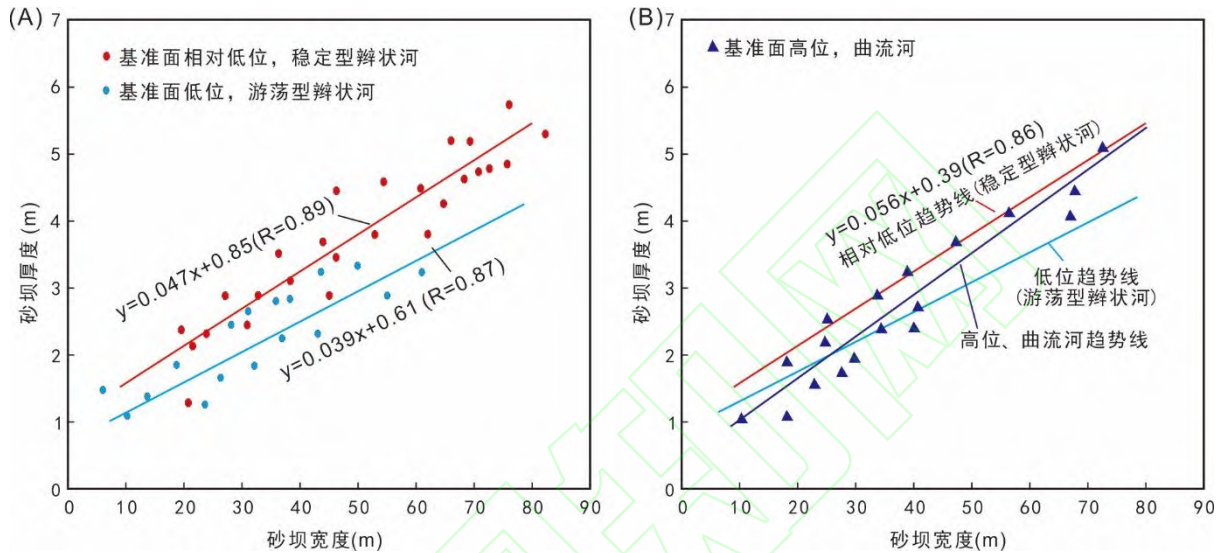


图 9 基准面不同位置砂坝（辫状河心滩坝、曲流河点坝）厚度与宽度相关关系

Fig. 9 The relationship between bar thickness and bar width at different base-level location

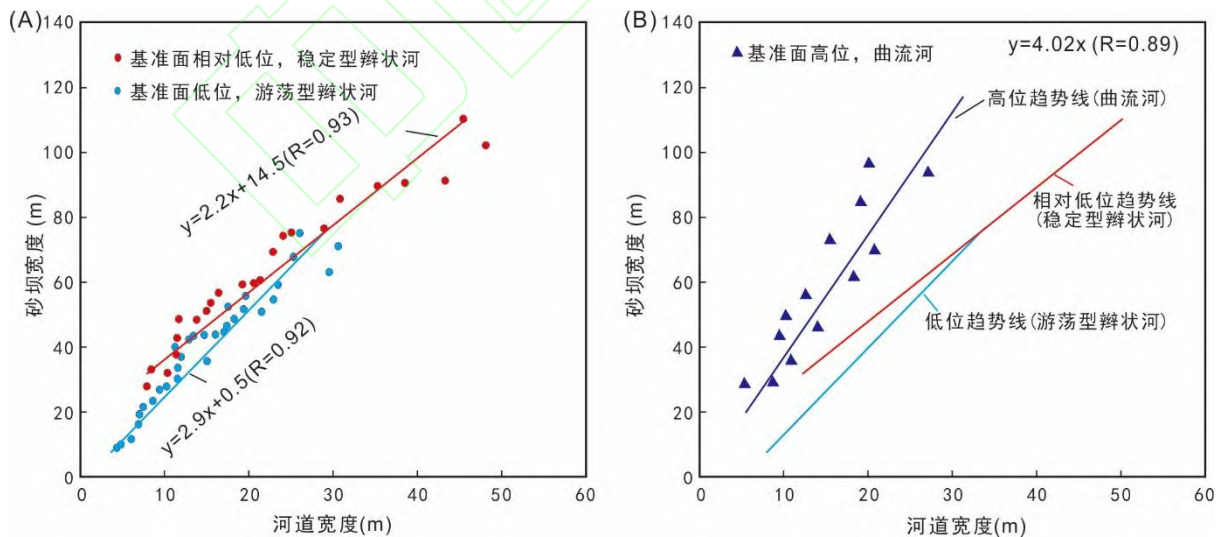


图 10 基准面不同位置砂坝（辫状河心滩坝、曲流河点坝）宽度与河道宽度相关关系

Fig. 10 The relationship between bar width and channel width at different base-level location

5. 结论

(1) 露头区基准面由低到高发育了四种河流类型游荡型辫状河、稳定型辫状河、“辫-曲”过渡型河流、高弯度曲流河,建立了基准面旋回控制的河流相内部差异构型模式,阐明了其内部砂坝具有明显的沉积特征差异。随着基准面升高,砂坝由狭长的梭状心滩坝逐渐过渡为形态饱满的马蹄状点坝。

(2) 针对典型的游荡型辫状河、稳定型辫状河与高弯度曲流河,建立了定量构型模式,三种河流砂坝(心滩坝或点坝)厚度与宽度、砂坝宽度与河道宽度均具有较好的正相关关系,不同河型定量关系差异明显。

References

- Best, J. L., Ashworth, P. J., Bristow, C. S., et al., 2003. Three-Dimensional Sedimentary Architecture of a Large, Mid-Channel Sand Braid Bar, Jamuna River, Bangladesh. *Journal of Sedimentary Research*, 73(4): 516-530. doi: <https://doi.org/10.1306/010603730516>.
- Bradley, R. W., Venditti, J. G., 2017. Reevaluating Dune Scaling Relations. *Earth-Science Reviews*, 165: 356-376. doi: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.11.004>.
- Bridge, J. S., Lunt I. A., 2006. Depositional Models of Braided Rivers. In: Smith, G. H. S., Best, J. L., Bristow, C. S., et al., Braided Rivers: Process, Deposits, Ecology and Management. 1st ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2006: 11-50. doi: <https://doi.org/10.1002/9781444304374.ch2>.
- Chen, B. T., Yu, X. H., Wang, T. Q., et al., 2015. 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. *Oil & Gas Geology*, 36(1): 111-117(in Chinese with English Abstract).
- Chen, Y. K., Wu, S. H., Mao, P., et al., 2012. Characterization of Sandy Braided River Reservoir Configuration—An Example from Guantao Formation in Yangsanmu Oilfield, Dagang Oil Ration. *Xinjiang Petroleum Geology*, 33(5): 523-526(in Chinese with English Abstract).
- Chen, Y. K., Wu, S. H., Wang, Y. J., et al., 2015. Distribution Patterns of the Fall-siltseams in the Channel Bar of the Perennial Sandy Braided River: An Approach. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 35(1): 96-101(in Chinese with English Abstract).
- Chen, Y. X., Dai D. L., 1962. Sedimentary Facies of Jurassic in Datong area, Shanxi Province. *Acta Geologica Sinica*, 42(3): 321-336(in Chinese).
- Colomera, L., Mountney, N. P., 2020. Accommodation and Sediment-supply Controls on Clastic Parasequences: A Meta-analysis. *Sedimentology*, 67: 1667-1709. doi: <http://doi.org/10.1111/set.12728>.
- Crosato, A., Mosselman, E., 2009. Simple Physics-based Predictor for the Number of River Bars and the Transition Between Meandering and Braiding. *Water Resources Research*, 45(3): 1-14. doi: <http://doi.org/10.1029/2008WR007242>.
- Cross, T. A., 1988. Controls on Coal Distribution in Transgressive-regressive Cycles, Upper Cretaceous, Western Interior, U. S. A. In: Wilgus C. K., Hastings B. S., Kendall C., et al., Sea Level Changes: an Integrated Approach. 1st ed., *SEPM Special Publication*, Texas: 371-380. doi: 10.2110/pec.88.01.0371.

- Cross, T.A., 2000. Stratigraphic Controls on Reservoir Attributes in Continental Strata. *Earth Science Frontiers*, 7(4): 322–350.
- Deng, H.W., Wang, H.L., Li, X.M., 1997. Application of High-resolution Sequence Stratigraphic Correlation to Fluvial Facies. *Oil & Gas Geology*, 18 (2) : 10–15(in Chinese with English Abstract).
- Dou, L.R., Cheng, D.S., Li, M.W., et al., 2008. Unusual High Acidity Oils from the Great Palogue Field, Melut Basin, Sudan. *Organic Geochemistry*, 39(2): 210–231. doi: 10.1016/j.orggeochem.2007.09.001.
- Ghazi, S., Mountney, N.P., 2009. Facies and Architectural Element Analysis of a Meandering Fluvial Succession: The Permian Warchha Sandstone, Salt Range, Pakistan. *Sedimentary Geology*, 221: 99–126. doi: 10.1016/j.sedgeo.2009.08.002.
- Ghinassi, M., Ielpi, A., Aldinucci, M., et al., 2016. Downstream-migrating Fluvial Point Bars in the Rock Record. *Sedimentary Geology*, 334: 66–96. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2016.01.005>.
- Harbor, D.J., Schumm, S.A., Harvey, M.D., 1994. Tectonic Control of the Indus River in Sindh, Pakistan. In: Schumm S.S., Winkley B.R., The Variability of Large Alluvial Rivers. 2nd ed. *New York: American Association of Civil Engineers Press*, 161–176.
- Leclair, S.F., Bridge, J.S., 2001. Quantitative Interpretation of Sedimentary Structures Formed by River Dunes. *Journal of Sedimentary Research*, 71(5): 713–716. doi: 10.1306/2DC40962-0E47-11D7-8643000102C1865D.
- Li, S.L., Ma, S.P., Zhou, L.W., et al., Main Influencing Factors of Braided-meander Transition and Coexistence Characteristics and Implications of Ancient Fluvial *Sedimentary Environment Reconstruction*, *Earth Science*. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20220221.2010.017.html> (in Chinese with English Abstract).
- Li, S.L., Yu, X.H., Chen, B.T., et al., 2015. Quantitative Characterization of Architecture Elements and Their Response to Base-Level Change in a Sandy Braided Fluvial System At a Mountain Front. *Journal of Sedimentary Research*, 85: 1258–1274. doi: <http://dx.doi.org/10.2110/jsr.2015.82>.
- Li, W., Yue, D.L., Colomera, L., et al., 2020. A Novel Method for Estimating Sandbody Compaction in Fluvial Successions. *Sedimentary Geology*, 404: 105675. doi: 10.1016/j.sedgeo.2020.105675.
- Liang, H.W., Wu, S.H., Mu, L.X., et al., 2013, Base Level Cyclic Controls on the Fluvial Reservoir Physical Properties and Sonic Logging Response. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 38 (5) : 1135–1142(in Chinese with English Abstract).
- Meng, Y.J., Zhao, Y.C., Xiong, S. et al., 2021. Study on Reservoir Architecture and Reservoir Units of Fluvial Deposits of Dongying Formation in Yuke Oilfield. *Earth Science*, 46 (7): 2481–2493(in Chinese with English Abstract).
- Miall, A.D., 1985. Architectural-element Analysis: a New Method of Facies Analysis Applied to Fluvial Deposits. *Earth-Science Reviews*, 22: 261–308. doi: [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(85\)90001-7](https://doi.org/10.1016/0012-8252(85)90001-7).
- Miall, A.D., 1988. Reservoir Heterogeneities in Fluvial Sandstones: Lesson from Outcrop Studies. *AAPG Bulletin*, 72(6): 682–697. doi: 10.1306/703C8F01-1707-11D7-8645000102C1865D.
- Miall, A.D., 2002. Architecture and Sequence Stratigraphy of Pleistocene Fluvial Systems in the Malay Basin, Based on Seismic Time-slice Analysis. *AAPG Bulletin*, 86(7): 1201–1216. doi: 10.1306/61EEDC56-173E-11D7-8645000102C1865D.
- Mueller, E.R., Pitlick, J., Pratt, M.J., 2014. Sediment Supply and Channel Morphology in Mountain River Systems: Single Thread to Braided Transitions. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 119: 1–26. doi: 10.1002/2013JF003045.
- Naseer, M.T., Asim, S., 2017. Detection of Cretaceous Incised-valley Shale for Resource Play, Miano Gas Field, SW Pakistan: Spectral Decomposition Using Continuous Wavelet Transform. *Journal of Asian*

- Earth Sciences*, 147: 358-377. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.07.031>.
- Qiu, Y. N., 1992. Development in Reservoir Sedimentology of Continental Clastic Rocks in China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 10(3): 16-24 (in Chinese with English Abstract).
- Sullivan, K. B., Mcbridge, E. F., Elfenbein, C., 1991. Diagenesis of Sandstones at Shale Contacts and Diagenetic Heterogeneity, Frio Formation, Texas. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 75(1): 121-138.
- Wang, S. J., 2011. Fluvial Depositional Systems and River Pattern Evolution of Middle Jurassic Series, Datong Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 19(4): 501-505 (in Chinese with English Abstract).
- Xu, A. N., Mu, L. X., Qiu, Y. N., 1998. Distribution Pattern of OOIP and Remaining Mobile Oil in Different Types of Sedimentary Reservoir of China. *Petroleum Exploration and Development*, 25(5): 41-44 (in Chinese with English Abstract).
- Yao, G. Q., Jiang, P., 2021. Method and Application of Reservoir "Source-Route-Sink-Rock" System Analysis. *Earth Science*, 46 (8): 2934-2943 (in Chinese with English Abstract).
- Yao, Z. Q., Yu, X. H., Shan, X., et al., 2018. Braided-meandering System Evolution in the Rock Record: Implications for Climate Control on the Middle-Upper Jurassic in the Southern Junggar Basin, North-west China. *Geological Journal*, 53(6): 1-22. doi: 10.1002/gj.3105.
- Yu, X. H., Ma, X. X., Mu, L. X., et al., 2004. Geological Model and Hierarchical Bounding Surface Analysis of Braided River Reservoir. *Beijing: Petroleum Industry Press*, 64-66 (in Chinese).
- Yue, D. L., Wu S. H., Liu J. M., 2007. An Accurate Method for Anatomizing Architecture of Subsurface Reservoir in Point Bar of Meandering River. *Acta Petrolei Sinica*, 28(4): 99-103 (in Chinese with English Abstract).
- Yue, D. L., Wu S. H., Cheng H. M., et al., 2008. Numerical Reservoir Simulation and Remaining Oil Distribution Patterns Based on 3D Reservoir Architecture Model. *Journal of China University of Petroleum*, 32(2): 21-27 (in Chinese with English Abstract).

附中文参考文献

- 白桦, 2011. 大同盆地中生代原型盆地恢复 (硕士学位论文). 北京: 中国石油大学(北京).
- 陈彬滔, 于兴河, 王天奇, 等, 2015. 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. *石油与天然气地质*, 36(1): 111-117.
- 陈玉琨, 吴胜和, 毛平, 等, 2012. 砂质辫状河储集层构型表征——以大港油区羊三木油田馆陶组为例. *新疆石油地质*, 33(5): 523-526.
- 陈玉琨, 吴胜和, 王延杰, 等, 2015. 常年流水型砂质辫状河心滩坝内部落淤层展布样式探讨. *沉积与特提斯地质*, 35(1): 96-101.
- 陈庸勋, 戴东林, 1962. 山西省大同地区侏罗系的沉积相. *地质学报*, 42 (3): 321-336.
- 邓宏文, 王洪亮, 李小孟, 1997. 高分辨率层序地层对比在河流相中的应用. *石油与天然气地质*, 18 (2): 10-15.
- 李胜利, 马水平, 周练武, 等, 辫曲转换与共存的主要影响因素及对古代河流沉积环境恢复的启示. *地球科学*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20220221.2010.017.html>
- 梁宏伟, 吴胜和, 穆龙新, 等, 2013. 基准面旋回对河流相储层物性差异及声波测井影响. *地球科学--中国地质大学学报*, 38 (5): 1135-1142.
- 孟玉净, 赵彦超, 熊山, 等, 2021. 榆科油田东营组河流相储层构型与油藏单元研究. *地球科学*, 46 (7): 2481-2493.
- 裴亦楠, 1992. 中国陆相碎屑岩储层沉积学的进展. *沉积学报*, 10(3): 16-24.
- 王随继, 2011. 大同盆地中侏罗世河流沉积体系及古河型演化. *沉积学报*, 19(4): 501-505.
- 徐安娜, 穆龙新, 裴亦楠, 1998. 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. *石油勘探与开发*,

25(5): 41-44.

姚光庆, 姜平, 2021. 储层“源-径-汇-岩”系统分析的思路方法与应用. 地球科学, 46(8): 2934-2943.

于兴河, 马兴祥, 穆龙新, 等, 2004. 辫状河储层地质模式及层次界面分析. 北京: 石油工业出版社, 64-66.

岳大力, 吴胜和, 刘建民, 2007. 曲流河点坝地下储层构型精细解剖方法. 石油学报, 28(4): 99-103.

岳大力, 吴胜和, 程会明, 等, 2008. 基于三维储层构型模型的油藏数值模拟及剩余油分布模式. 中国石油大学学报(自然科学版), 32(2): 21-27.

