

文章编号: 1671-1505(2023)05-1032-17 DOI: 10.7605/gdlxb.2023.05.088

辫状河沉积构型研究进展: 沉积演化与构型特征^{*}

李 伟^{1,2} 岳大力^{1,2} 王武荣^{1,2} 高 建³
吴胜和^{1,2} 王南溯^{1,2} 刘警阳^{1,2} 张佳佳^{1,2}

1 油气资源与工程全国重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京 102249

2 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

3 中国石油天然气集团勘探开发研究院, 北京 100083

摘要 辩状河沉积是陆相沉积盆地的重要组成部分, 是油气、铀等矿产资源的重要载体。近 30 年来, 辩状河研究在沉积演化与构型特征等方面取得长足发展, 因此系统梳理现有研究成果并展望未来发展方向具有重要的理论意义与工业价值。综合辩状河研究进展并结合笔者及团队的多个研究实例, 根据辩状河沉积内部结构与地貌演化速率分为稳定型与游荡型辩状河, 两者地貌特征无显著区分标志, 形成与演化过程基本相似, 可划分为 4 个发育阶段: 水流扰动形成横向朵状(叶状)单元坝, 河流汇聚形成初始河道与坝尾沉积, 单元坝生长、拼接形成复合坝, 河流动态平衡阶段。但是两河型的内部构型存在显著区别, 稳定型辩状河心滩内部由一系列横向较为稳定的垂积体与落淤层组成; 游荡型辩状河心滩频繁被河道冲刷, 导致辩状河道沉积与心滩之间无明显界限、形成“泛连通体”。目前, 针对辩状河沉积构型的研究已十分丰富, 通过河流动力学与沉积学交叉学科研究辩状河沉积构型模式的主控因素、建立不同沉积条件下多样化的沉积模式, 并探究多样化沉积模式的演化过程与成因机理已成为当前的研究难点、热点与发展趋势。

关键词 辩状河 单元坝 复合坝 心滩 沉积构型 演化机理

第一作者简介 李伟, 男, 1990 年生, 博士, 讲师, 主要从事油气田开发地质、油气智能表征等教学与科研工作。E-mail: wei_li@cup.edu.cn。

通讯作者简介 岳大力, 男, 1974 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事油气田开发地质相关科研与教学工作。E-mail: yuedali@cup.edu.cn。

中图分类号: P512.2 文献标志码: A

Depositional models of braided rivers: characteristics of sedimentary evolution and architecture

LI Wei^{1,2} YUE Dali^{1,2} WANG Wurong^{1,2} GAO Jian³
WU Shenghe^{1,2} WANG Nansu^{1,2} LIU Jingyang^{1,2} ZHANG Jiajia^{1,2}

1 National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

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

* 国家自然科学基金项目(编号: 42202109, 42272186)、博士后创新人才支持计划(编号: BX20220351)、中石油勘探开发研究院委托课题(编号: 2021DJ1101)和北京市科协青年人才托举工程(编号: BYESS2023460)联合资助。[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42202109, 42272186), China National Postdoctoral Program for Innovative Talents (No. BX20220351), CNPC Research Institute of Petroleum Exploration and Development Commissioned Project (No. 2021DJ1101) and Beijing Science and Technology Association Youth Talent Lifting Project (No. BYESS2023460)]

收稿日期: 2023-03-08 改回日期: 2023-04-10

3 PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China

Abstract Braided river deposits are important components of continental sedimentary basins, and the important reservoirs for hydrocarbon, uranium and other mineral resources. In the past three decades, the study of braided rivers has made great progress in the deposit features, evolution and sedimentary architecture. It has high theoretical significance and industrial value to review previous researches and to forecast the development direction. Generally, braided rivers can be divided into relatively stable and classical ones, according to the variety of sedimentary architecture and the evolution rate of landform. There is no significant distinction between geomorphic features of the two kinds of braided rivers. Their formation and evolution processes are basically similar, mainly consisting of four developmental stages: (i) formation of transverse unit bars with limited relief from an initially featureless bed; (ii) channel development around bars and in some cases dissecting transverse unit bars; (iii) formation of relatively simpler compound bars; and (iv) amalgamation of these simpler compound bars into more complex compound bars. Nevertheless, characteristics of their inner architecture show significant differences. The mid-channel bars in relatively-stable braided rivers are usually composed of a set of vertically accretionary sandbodies and falling silt layers. In terms of the classical braided rivers, erosion/incision surfaces and chutes are in a heavy density. There are no clear boundaries between the bars and channels, and so the bars and channels are stacked on each other and forming a pan-connected sandbody. A large number of studies on the sedimentary architecture of braided rivers have been performed, which shows a growing trend of studying the various sedimentary models of braided rivers, and of exploring their major controls, evolution process and formation mechanism by integrating fluvial dynamics and sedimentology.

Key words braided river, unit bar, compound bar, braid bar, sedimentary architecture, evolutionary mechanism

About the first author LI Wei, born in 1990, Ph.D., assistant professor, engaged in teaching and researches on petroleum and gas field development geology, and petroleum and gas intelligent characterization. E-mail: wei_li@cup.edu.cn.

About the corresponding author YUE Dali, born in 1974, Ph. D., professor, doctoral supervisor, is engaged in research and teaching of petroleum and gas field development research. E-mail: yue-dali@cup.edu.cn.

1 概述

河流是塑造古今地貌形态的主要外力之一, 其沉积物是沉积盆地的重要组成部分 (Sambrook Smith *et al.*, 2006)。多个沉积盆地的系统研究表明, 辫状河沉积在河流相地层中占比最高, 即辫状河是河流体系中最常见的河流类型 (Galloway and Hobday, 1996; Gibling, 2006)。辫状河属于富砂型河流, 其沉积砂体是油气和铀等矿产资源聚集的良好场所, 在全球各大油田广泛发育, 如加拿大 Alberta 盆地 (李建平等, 2019)、苏丹 Melut 盆地 (孙天建等, 2014)、Malaysia 盆地 (Miall, 2002)、巴基斯坦 Indus 盆地 (Naseer and Asim, 2017)、美

国德克斯州 (Sullivan *et al.*, 1991) 等区域均钻遇辫状河储集层。中国油气资源以陆相碎屑岩储集层为主, 河流相储集层在开发油田中占比最高 (徐安娜等, 1998), 如渤海湾盆地、松辽盆地、塔里木盆地、四川盆地等均发育大量辫状河油气储集层 (束青林, 2006; 刘钰铭等, 2011; 关旭同等, 2019)。因此, 辫状河沉积演化与沉积构型研究具有重要的理论意义与工业价值。

辫状河的研究由来已久。早在 1992 年, 伦敦地质家协会首次召开以辫状河为主题的学术会议, 系统梳理了辫状河地貌学与沉积学特征, 为之后的辫状河研究奠定基础、指明方向 (Best and Bris-

tow, 1993)。在之后的 30 年时间里, 得益于高精度探地雷达、浅层地震、密井网等资料与技术在辫状河研究中的应用, 辩状河沉积(构型)研究由一维岩相组合模式(如探槽)、二维构型单元组合关系(如露头剖面)过渡到三维空间展布(如探地雷达)(Best *et al.*, 2003; 于兴河等, 2004; 李伟等, 2022); 得益于高清卫星照片的普及与应用, 河流空间观察尺度不断增大, 河流地貌特征研究亦从局部发展到整体(Sambrook Smith *et al.*, 2006; Temmerman, *et al.*, 2007; 张昌民等, 2017; Castelltort, 2018; Li *et al.*, 2023)。总体而言, 国内外学者已对辫状河沉积开展大量研究, 建立了多个辫状河实例的沉积构型样式(于兴河等, 2004; Jerolmack and Mohrig, 2007; 刘钰铭等, 2011; 金振奎等, 2014; 谭程鹏等, 2014; Li *et al.*, 2015; 李伟等, 2022)。然而, 众多研究实例表明辫状河沉积构型模式多样, 不同学者或基于不同实例建立的沉积构型模式存在显著差异, 缺少对差异沉积模式形成机理与适用条件的系统研究, 导致在地下辫状河储集层预测中难以选择适合的辫状河类型与相匹配的沉积构型模式(Sambrook Smith *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2015; Castelltort, 2018; 李伟等, 2022)。

鉴于辫状河沉积构型的复杂性与多样性, 众多学者采用水槽实验与数值模拟的方法, 结合现代沉积与古代露头, 尝试探究不同沉积条件下的辫状河构型样式, 从而更加客观地描述辫状河沉积构型的个性与共性(Ashworth *et al.*, 2004; Bridge and Lunt, 2006; Li *et al.*, 2015; Castelltort, 2018; Fielding *et al.*, 2018; 李胜利等, 2022; 李伟等, 2022)。尤其是近 10 年来, 随着河流数值模拟技术在沉积学领域的应用与探索, 有学者采用以河流动力学为基础的模拟方法, 再现了不同沉积条件下的辫状河形成过程与沉积演化机制, 极大推动了辫状河沉积构型主控因素分析与多样化沉积模式形成机理研究(Schuurman *et al.*, 2013; Schuurman and Kleinhans, 2015; Nicholas *et al.*, 2016, 2018; 张可等, 2018; 甘泉, 2021; Li *et al.*, 2022)。

总之, 近 30 年来在辫状河形成演化机理、多样化沉积构型模式方面均取得丰硕成果, 呈现出沉积学、地貌学与动力学多学科交叉的趋势(Nicholas *et al.*, 2018; 李伟, 2021; Li *et al.*, 2022)。因此, 作者对上述成果系统梳理, 阐明辫状河的形成

演化过程、建立辫状河多样化的沉积构型模式、探讨其主控因素与形成机理, 并预测未来发展趋势, 具有重要理论意义与推广价值。

2 辩状河形成过程与演化特征

2.1 辩状河沉积构型单元类型及内涵

辫状河指弯曲度较低的、河道不稳定的分汊型河流, 其河道弯曲度一般小于 1.5, 分叉系数通常大于 2(Crosato and Mosselman, 2009)。河道沉积分为多个级次, 沿用前人研究惯例(Miall, 1985; Sambrook Smith *et al.*, 2006; 于兴河等, 2004), 将辫状河形成的带状沉积定义为辫流带; 辩状河内部低水位被沙坝分隔的次一级河道定义为辫状河道(或辫状水道)(图 1-A, 1-B)。因此, 辩状河沉积主要包括辫状河道沉积、沙坝(复合坝、正在生长单元坝)、少量溢岸以及残余的泛滥平原, 其中辫状河道充填与沙坝为沉积主体(Cant and Walker, 1976, 1978; Miall, 1985; 于兴河等, 2004; Bridge and Lunt, 2006)。

2.1.1 辩状河道沉积

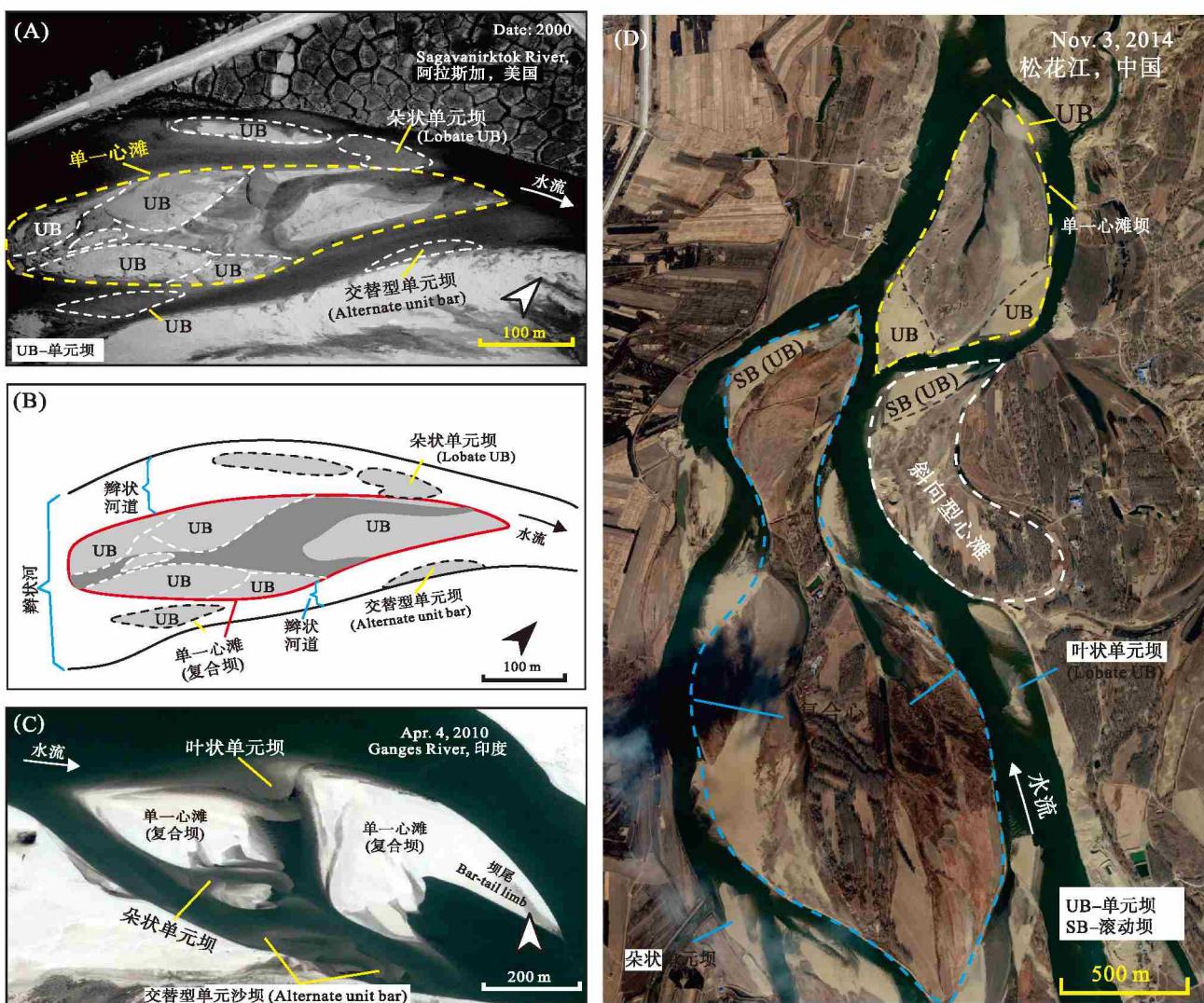
辫状河道充填形成的沉积体即为辫状河道沉积, 一般呈顶平底凹状或透镜状(Cant and Walker, 1976, 1978)。根据河道水流机制与充填样式分为迁移型辫状河道沉积、填积型辫状河道沉积、摆动型辫状河道沉积与废弃型河道(图 2)(于兴河等, 2004): 迁移型河道多位于辫流带内部辫状河道弯曲段, 摆动型与填积型河道一般位于辫状河道相对顺直段或低弯度段, 废弃型河道一般位于辫流带两侧。前 3 种河道多为砂质或砾质充填、水动力强, 是辫状河道沉积主体; 而废弃型河道为细粒充填, 常见泥质(或粉砂质)充填、泥质半充填, 反映水体能量较弱。

2.1.2 辩状河沙坝

辫状河沉积内部发育多种沙坝, 根据其形成过程与发育阶段划分为单元坝(unit bar)与复合坝(compound bar)(Bridge and Lunt, 2006; Li *et al.*, 2023)。

(1) 单元坝类型与内涵

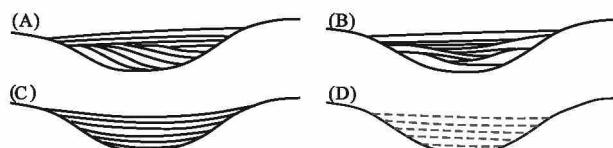
在辫状河沉积体系, 单元坝指由一种沉积成因紧密关联的、沉积过程未发生明显间断的沙坝(Ashmore, 1982; Sambrook Smith *et al.*, 2006); 根



A—美国 Sagavanirktok River 某河段典型心滩与单元坝卫星照片 (Bridge and Lunt, 2006)；B—辫状河、辫状河道与沙坝之间的关系, 对应图 (A), 沉积解释据 Bridge and Lunt (2006) 修改; C—印度 Ganges River 正在生长的复合坝与单元坝卫星照片 (据 Schuurman and Kleinhans, 2015)；D—中国松花江多种复合坝与单元坝卫星照片

图 1 辫状河典型沙坝类型与地貌特征

Fig. 1 Common types of bars in braided rivers and their bedforms from aerial photographs.



A—迁移型辫状河道沉积; B—摆动型辫状河道沉积;

C—填积型辫状河道沉积; D—废弃型河道沉积

图 2 辫状河道充填类型 (据于兴河, 2004)

Fig. 2 Common types of channel fills in braided rivers
(after Yu, 2004)

据其发育位置与形成机制划分为 3 种常见类型(图 1): 在辫状河道内部形成的、以垂向加积为主的朵

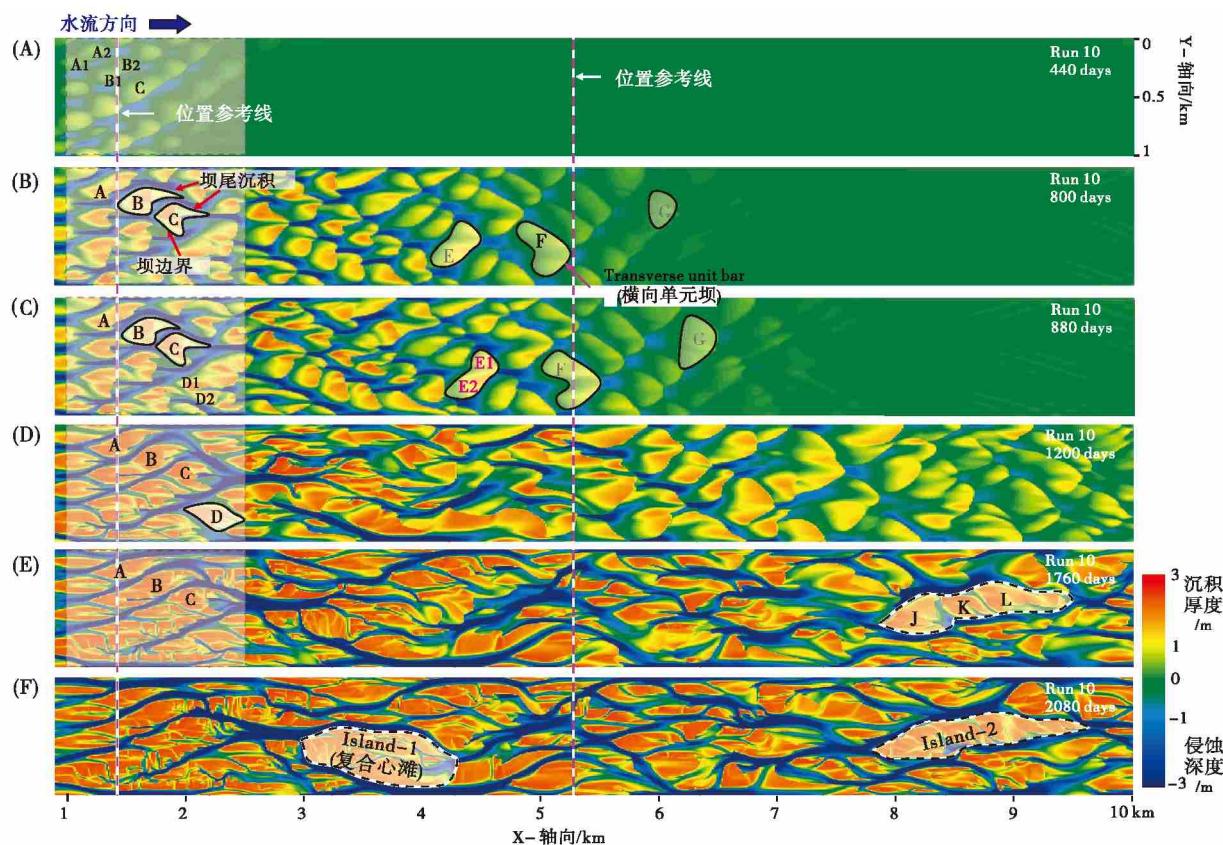
状单元坝 (lobate unit bar/lobate bar), 在辫状河道相对顺直段两侧形成的、垂向加积为主的交替型单元坝 (alternate unit bar/alternate bar), 在辫状河道相对弯曲段内侧形成的、以侧向加积为主的滚动型单元坝 (scroll unit bar/scroll bar) (图 1) (Smith, 1974; Ashmore, 1982; Lunt *et al.*, 2004; 李伟, 2021; Li *et al.*, 2023)。

(2) 复合坝类型及内涵

在辫状河沉积体系中, 复合坝指由多期单元坝、沙丘或小型河道充填形成的、沉积结构较为复杂的沙坝 (Ashmore, 1982; Sambrook Smith *et al.*,

2006)。国内大量从事地下储集层研究的学者通常将复合坝与“心滩”相对应,广义的心滩既包括位于河道中部的复合坝(mid-channel bar, 狹义的心滩),也包括位于河道两侧的横向沙坝(side bar)(于兴河等, 2004; Li *et al.*, 2015, 2023; 李胜利等, 2022; 李伟等, 2022)。

根据心滩(文中指广义的心滩)的形成过程、内部结构与复杂程度,结合前人研究成果,笔者将心滩细分为单一心滩(compound bar)与复合心滩(amalgamated compound bar/channel island)(图1)(Li *et al.*, 2023)。单一心滩指由一系列成因关联的单元坝叠加形成的复合坝(Smith, 1974; Ashmore, 1982; Lunt *et al.*, 2004; Bridge and Lunt *et al.*, 2006),根据其长轴方向与水流方向之间的关系,又可细分为纵向沙坝、斜向沙坝、横向沙坝(于兴河等, 2004)。由多个单一心滩、辫状河道沉积与单元坝拼叠形成的沙坝复合体称作复合心滩(amalgamated compound bar/channel island)(图1-D)(李伟, 2021; 李伟等, 2022; Li *et al.*, 2023)。



不同模拟时间的河床沉积与侵蚀厚度时间演化切片, 河床平均坡度 0.3 m/km , 流量 $1780 \text{ m}^3/\text{s}$, 平均水深 2.4 m .

图 3 基于 Delft3D 软件的辫状河形成过程沉积数值模拟结果(据 Li *et al.*, 2023)

Fig. 3 Development of braided rivers based on numerical simulations of software Delft3D (after Li *et al.*, 2023)

2.2 辩状河形成过程与演化机理

2.2.1 辩状河的形成与演化

综合现代沉积、水槽实验与沉积数值模拟,众多学者研究并总结了辩状河沉积形成过程与演化规律(何宇航等, 2012; Williams *et al.*, 2013; Schuurman and Kleinhans, 2015; 张可等, 2017; Nicholas *et al.*, 2018; 何维领等, 2019; Li *et al.*, 2023)。研究表明,不同沉积条件下辩状河形成与演化过程存在一定差异,但总体规律基本一致(Schuurman *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2023)。以平坦河床为经典的初始模型(恒定流量、沉积物供给动态平衡),辩状河形成与演化经历以下主要阶段(Schuurman *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2023):(1) 平坦河床形成水流扰动,底床开始出现明显起伏(图3-A),单元坝开始形成并向下游快速迁移(图3-B至3-C中坝F位置变化);(2) 水流汇聚作用促使单元坝周围侵蚀加剧形成水道(即河道化),坝体沉积厚度增大,头部(上游)侵蚀、尾部(下游)

沉积形成坝尾沉积 (Bar-tail limb) (图 3-B, 3-C; 坎 B-C); (3) 伴随着持续的坝尾与侧向沉积, 部分单元坝直接形成复合坝, 即单一心滩 (图 3-D, 坎 D), 部分单元坝拼叠形成复合坝 (图 3-E, 坎 B); (4) 一部分辫状河道充填, 导致多个相邻复合坝进一步拼叠, 形成更加复杂的复合心滩 (a-malgamated compound bar) (图 3-F, Island-1), 辫状河进入动态平衡阶段 (图 3-E, 3-F)。动态平衡阶段侵蚀与沉积仍在发生, 并伴随心滩的分割与合并、辫状河道的形成与废弃; 整个模拟河段的水动力及地貌特征基本稳定 (对比图 3-E, 3-F)。

综合前人研究成果, 笔者将辫状河形成与演化归为 4 个阶段 (图 4) (Schuurman and Kleinhans, 2015; 张可等, 2017; Nicholas *et al.*, 2018; 李伟, 2021; 李伟等, 2022; Li *et al.*, 2023): (1) 单元坝形成: 水流扰动形成朵状单元坝与横向单元坝 (横向宽度大于纵向长度) (图 4-A)。(2) 河道化与坝尾沉积: 水流汇聚作用促使坝体周围开始形成辫状河道, 同时在坝体尾部 (下游方向) 临近水道的位置形成坝尾沉积 (图 4-B)。(3) 复合坝形成: 伴随着单元坝生长和迁移, 单元坝生长或拼叠形成简单的复合坝, 即单一心滩; 部分相邻的单一心滩会进一步叠合, 形成更为复杂的复合心滩 (图 4-C)。(4) 动态平衡: 辫状河处于动态平衡过程, 伴随着心滩的生长、合并与分割, 辫状河道的形成与充填。不同沉积条件下的辫状河, 前 3 个发育阶段大致相似, 但在“动态平衡”阶段存在显著区别 (图 4-D, 4-E): 底床坡度小、单位流量小、携沙量相对较少, 心滩与辫状河道相对稳定, 地貌演化速率慢, 形成相对稳定的辫状河, 即洪水前后心滩与辫状河道具有明显继承性 (对比图 4-C, 4-D); 底床坡度大、单位流量大、携沙量相对充足, 心滩与辫状河道的演化非常快, 辫状河道频繁改道, 形成游荡型辫状河, 即洪水前后心滩与辫状河道发生显著变化 (对比图 4-C 至 4-E)。

2.2.2 单一心滩的形成与演化

单一心滩的形成过程属于辫状河形成与演化的重要组成部分, 大致划分为 4 个主要阶段 (图 5)。(1) 单元坝开始形成: 初始单元坝呈叶状或朵状, 横向宽度常大于纵向长度, 坎体上游一侧 (左侧) 坡度缓而下游一侧 (右侧) 坡度陡 (图 5-A, 5-B)。该阶段, 单元坝上游受水流冲刷, 以侵蚀为

主; 下游水流受沙坝阻挡作用, 流速降低、泥沙沉降, 以沉积为主; 故沙坝向下游方向迁移 (图 5-B 和 5-D 中坎 E 和 F 位置变化)。(2) 河道化: 随着单元坝厚度增大, 水流开始聚集, 围绕沙坝 (图 5-C, 坎 A) 或切割横向沙坝 (图 5-C, 坎 B; 图 5-D, 坎 F) 形成水道, 即初始辫状河道。(3) 坎尾沉积: 伴随着水道的形成, 单元坝下游一侧、临近水道的位置快速堆积形成坝尾沉积 (bar-tail limbs) (图 5-E, 坎 A-C; 现代沉积, 图 5-F, 坎 A-B)。此外, 水道的形成促使沙坝头部坡度变陡, 坎尾沉积促使沙坝尾部坡度变缓, 单一心滩初具形态 (图 5-E, 5-F)。(4) 单一心滩形成: 伴随着坝体两侧生长, 坎尾之间的洼地逐渐被沉积物充填 (图 5-H, 5-I; 区域 A), 心滩与辫状水道形成 (图 5-G 至 5-I), 此时心滩头部 (上游) 略高于尾部 (下游) (对比图 5-H 与 5-I)。基于以上分析, 建立了单一心滩形成与演化模式 (图 5-J)。

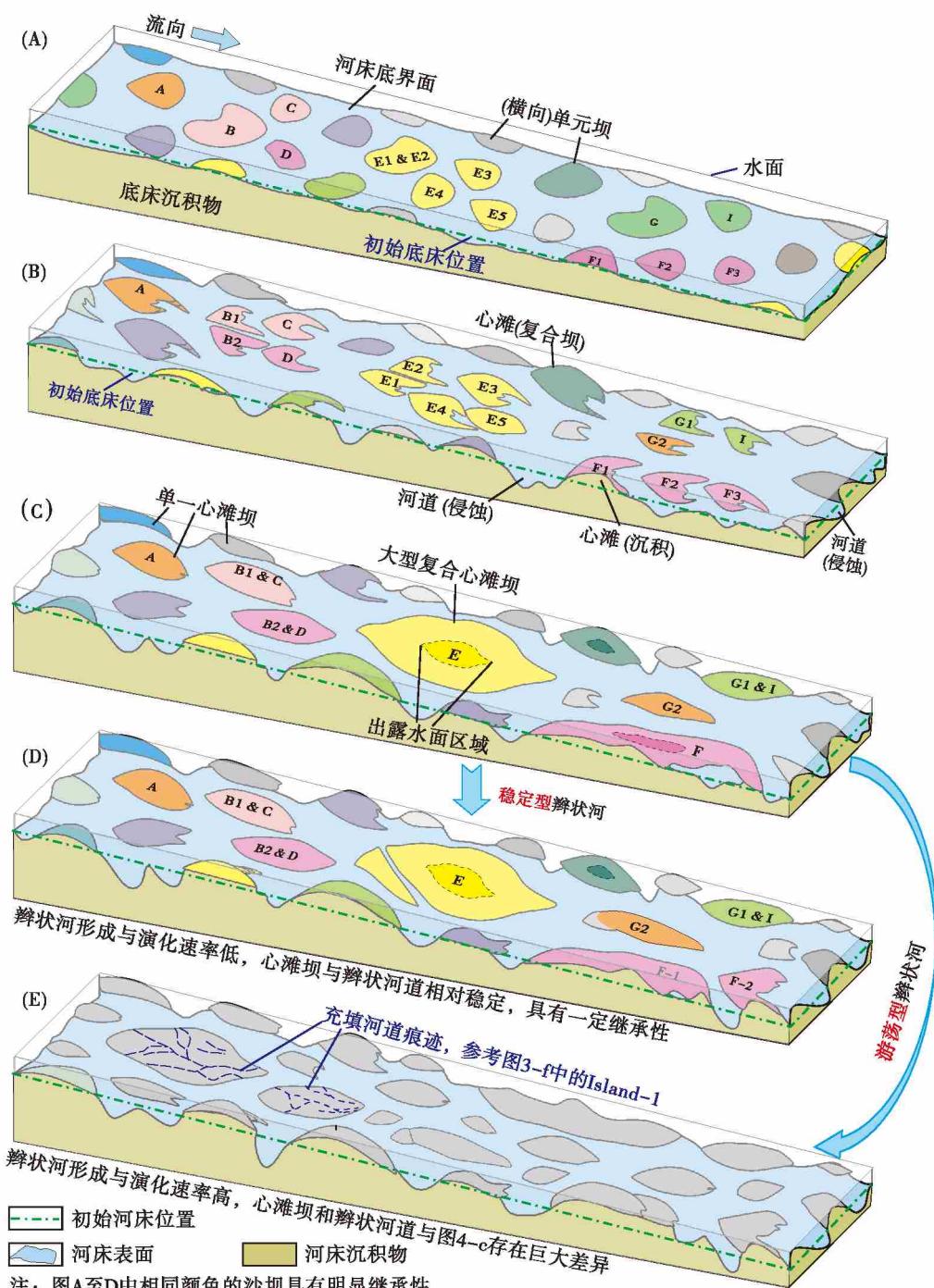
2.2.3 复合心滩的形成与演化

辫状河道的形成、合并与废弃, 促使多个单一心滩进一步拼叠形成大型复合心滩 (amalgamated compound bar/channel island) (Li *et al.*, 2023)。以数值模拟结果为例, 单一心滩对下游水流形成有效阻挡 (图 6-A 至 6-C), 导致水流流速分布不均, 继而导致心滩之间的部分河道流速降低、泥沙沉降 (图 6-D), 辫状河道被充填; 心滩外围的部分河道流量增大, 河道拓宽; 最终促使大型复合心滩形成 (图 6-E), 该现象在辫状河十分常见 (图 6-F 至 6-J), 在游荡型辫状河中尤为发育 (李伟等, 2021; Li *et al.*, 2023)。水流作用较强时, 复合心滩内部充填河道可能复活, 导致复合心滩被侵蚀、分割。

3 辫状河类型与成因分析

3.1 辫状河类型

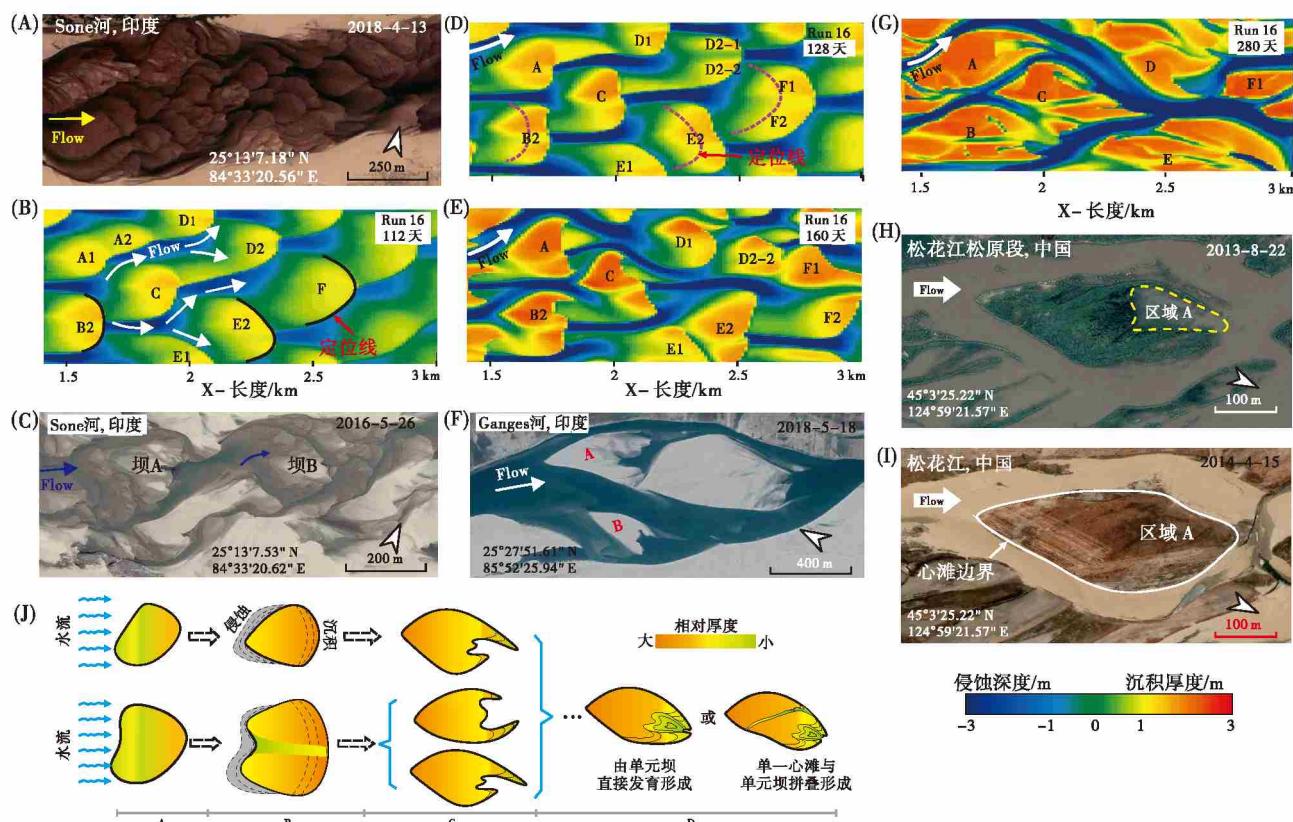
辫状河沉积体系复杂, 地貌特征相似但内部沉积构型存在显著差异 (Miall, 1985; Sambrook Smith *et al.*, 2006)。鉴于此, 根据辫状河沉积内部结构 (如心滩的完整性)、结合活动河道的稳定性, 分为游荡型辫状河与相对稳定的辫状河 (简称稳定型辫状河)。就地貌特征而言, 后者分叉系数一般比较大 (狭窄的限定性河谷除外, 该条件

图 4 辩状河形成与演化模式 (图 A-D 据 Li *et al.*, 2023)Fig. 4 Development and evolution model of braided rivers (Fig. A-D are after Li *et al.*, 2023)

也可导致辩流指数很小), 但 2 类辩状河之间并无明显的界定标志。在沉积构型特征方面, 两者存在显著区别, 前者辩状河道沉积与心滩相对稳定, 两者间边界清晰; 后者则频繁改道, 甚至季节性洪水前后辩状河道与心滩会发生显著变化, 内部沉积以河道充填为主、不发育典型心滩沉积, 辩状河道沉

积与残余心滩形成泛连通体 (邵学军与王兴奎, 2013; 任晓旭等, 2018; 李伟等, 2022; Li *et al.*, 2023)。

值得注意, 英文中 “braided river” 泛指辩状河沉积, 尤其多指游荡型辩状河 (Best and Brinstow, 1993; Sambrook Smith *et al.*, 2006; “wander-



A—印度 Sone 河某河段枯水期河床地貌卫星照片: 朵状单元坝形态特征; B, D, E, G—基于沉积数值模拟的辨状河地貌特征时间序列切片 (模拟参数见 Li *et al.*, 2023); C—印度 Sone 河某支流枯水期河床地貌卫星照片: 单一心滩的 2 种发育过程; F—印度 Ganges 河某河段卫星照片: 正在生长的、带有典型坝尾沉积的心滩; H, I—中国松花江松原段汛期与枯水期卫星照片: 单一心滩, 水位表明坝尾高程较低; J—单一心滩形成演化模式

图 5 辨状河单一心滩的形成与演化

Fig. 5 Development and evolution of simple compound bars in braided rivers

ing river”为蜿蜒的分汊型河流、或辨状河与曲流河交替出现的河段 (Brierley and Hickin, 1985; Brierley, 1989, 1991; Schumm, 2005; Carling, *et al.*, 2016; 李胜利等, 2017)。例如, Sichingabula (1986)、Brierley (1989) 和 van den Berg (1995) 等学者先后对加拿大 Squamish River 的河型转化进行研究(图 7-A), 定义该河段上游为辨状河 (braided river) (图 7-B)、下游为曲流河 (meandering river) (图 7-D)、中游为辨—曲过渡型河流或弯曲度较大的稳定型辨状河 (wandering river) (图 7-C)。

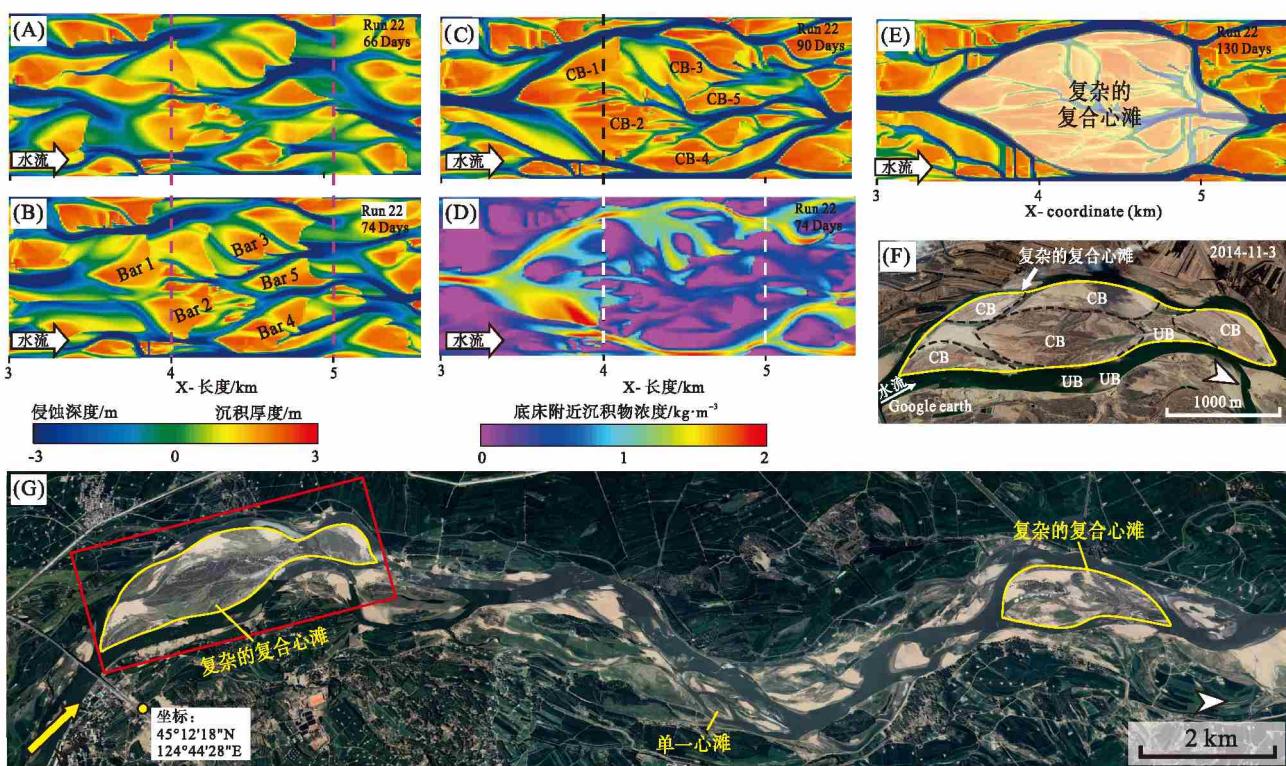
3.2 辨状河类型主控因素与成因分析

辨状河类型 (稳定型与游荡型) 影响因素众多, 各因素间存在不同程度的关联性, 如可容空间、物源供给、地形坡度、流量、河床及河岸沉积

物组成、输沙量、植被、气候、温度、纬度等 (肖毅等, 2012; 谭程鹏等, 2014; Li *et al.*, 2015)。众多学者尝试综合考虑多种因素, 探究直接控制河流类型及其转化的主要因素。由于研究对象与时间尺度的巨大区别, 地理与水利学家、沉积学家对河流类型主控因素研究存在显著差别 (邵学军与王兴奎, 2013; 王敏等, 2017; Yao *et al.*, 2018), 文中分别针对现代河流与古代河流沉积开展沉积机制分析。

3.2.1 现代河流

地理与水利学以现代河流为研究对象, 时间跨度在几年至几百年之间, 河流参数获取较为简单。研究人员将多种外界条件 (因素) 归纳为 3 个主要条件, 即来水条件、来沙条件与河床边界条件; 相应地, 将河流功率 (单位河流功率)、输沙量与河岸抗侵蚀强度作为直接控制辨状河类型的主控因



A~C, F—基于沉积数值模拟的辫状河地貌特征时间序列切片 (模拟参数见 Li *et al.*, 2022); D—模拟时间为 74 天时的底床沉积物浓度分布; F—松花江松原段复杂型复合心滩; G—松花江松原河段卫星照片

图 6 辩状河大型复合心滩的形成与演化

Fig. 6 Development and evolution of larger, amalgamated compound bars in braided rivers

素; 尽管不同学者的认识不尽相同, 但上述主控因素得到多数学者的认可 (钱宁, 1985; van den Berg, 1995; Eaton *et al.*, 2010)。就游荡型与稳定型辫状河而言, 单位河流功率增大, 河道稳定性减弱, 稳定型辫状河向游荡型辫状河转化; 输沙量增大, 河道淤积频率升高, 稳定型向游荡型辫状河转化; 河岸抗侵蚀强度减小, 河道稳定性减弱, 稳定型向游荡型辫状河转化 (钱宁, 1985; van den Berg, 1995; Eaton *et al.*, 2010)。

3.2.2 古代河流沉积

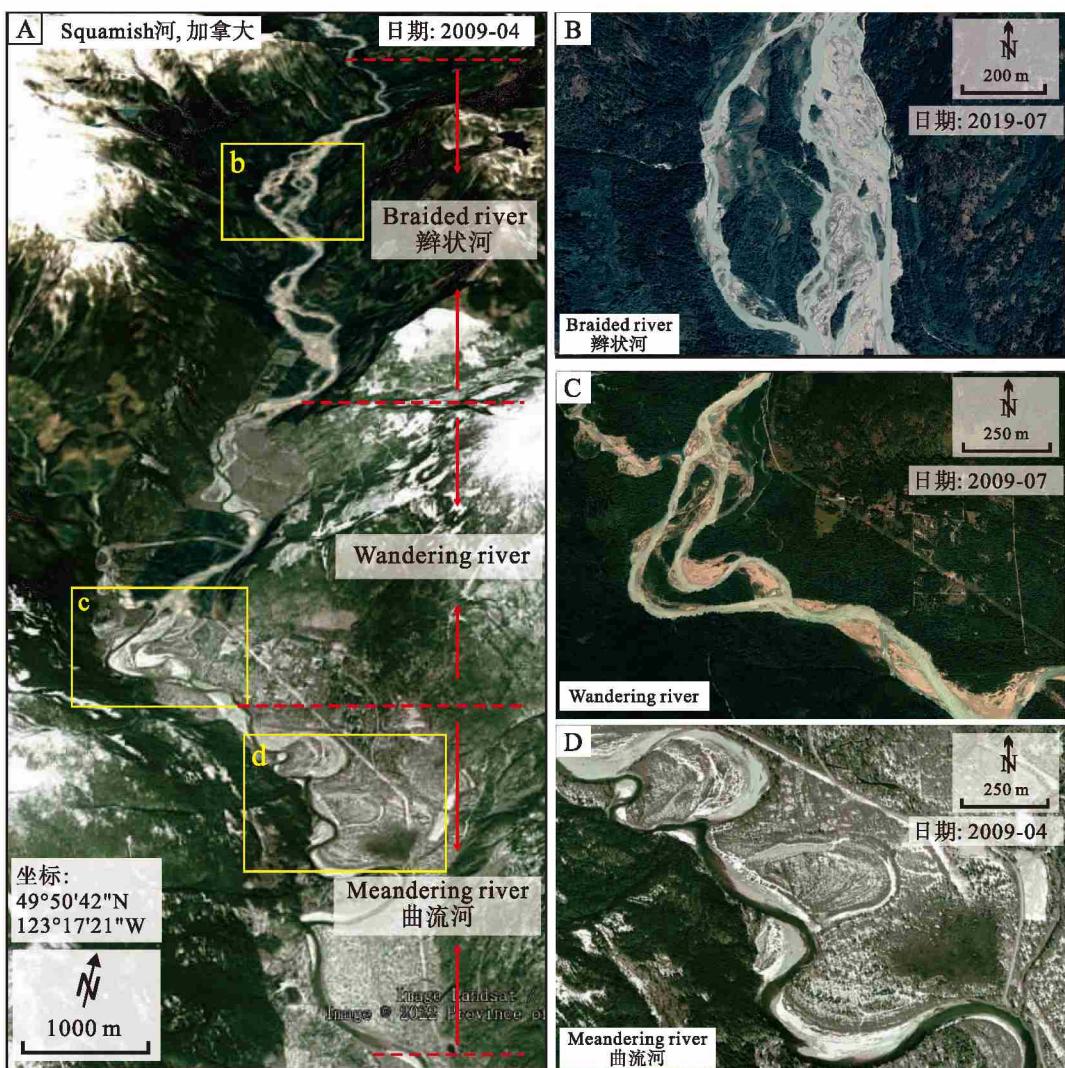
地质学家以古代河流为研究对象, 时间尺度常以百万年为衡量单位, 河流参数获取困难。因此, 通常针对物源供给、可容空间、古构造、古气候、物源、湖/海平面等因素开展河流类型成因研究, 其中可容空间与物源供给之比 (简称 A/S) 是多因素综合响应, 对辫状河类型及沉积特征具有显著控制作用 (谭程鹏等, 2014; Li *et al.*, 2015; 李胜利等, 2022; 李伟等, 2022)。下文对上述控制因素逐一分析。

(1) 构造/古构造

构造对沉积具有重要控制作用, 自山前到冲积平原, 常见陆相沉积环境依次为冲积扇、辫状河、曲流河 (Miall, 1985)。就辫状河类型转化, 古构造对河流类特征的影响直接表现为河床坡度变化, 如局部抬升导致河床坡度增大、河流功率增强, 稳定型辫状河向游荡型辫状河过渡; 反之, 坡度减小会导致河流功率减小, 游荡型向稳定型辫状河过渡。

(2) 气候/古气候

古气候对河流特征的影响主要体现在流量、输沙量、植被发育程度、气温等多个方面, 其中流量 (大小与变化) 是连接古气候与河流相地层的主要桥梁, 输沙量与植被均受流量直接控制 (Hansford and Plink-Björklund, 2020)。Langbein 和 Schumm 曾对气候因素开展深入研究, 将降雨 (流量)、输沙量、温度与植被综合考虑, 提出了著名的 Langbein-Schumm 定律, 认为伴随着降雨持续增大, 输沙量先增大后降低 (Langbein and Schumm, 1958)。



河流类型划分源于 Brierley, 1989 和 Sichingabula, 1986; 部分文献将 wandering river 直译为游荡型辫状河值得商榷

图 7 加拿大 Squamish 河的河流类型及转化卫星照片

Fig. 7 Aerial photographs of Squamish river in Canada showing transition between different river types

辫状河类型与气候具有类似关系。河流域的气候通常划分为湿润、半湿润、半干旱、干旱、极端干旱 5 种类型; 温暖湿润气候河流流量相对均衡、植被发育、水土保持能力强, 干旱寒冷气候恰好相反。就辫状河类型而言, 干旱、极端干旱地区, 降雨稀少, 河流流量很低, 河道相对稳定(实际上河流发育程度很低); 半干旱地区, 植被发育较少, 突发性大型洪水时有发生, 河道稳定性降低, 易发育游荡型辫状河; 半湿润地区, 流量适中, 植被发育, 河道稳定性升高, 易形成稳定型辫状河; 湿润地区, 流量充足, 河流功率升高, 河道稳定性降低 (Schumm, 2005; Sambrook Smith *et al.*, 2006; Eaton *et al.*, 2010)。总之, 综合多个

研究实例结合笔者及所在团队开展的相关研究 (李伟, 2021; 李伟等, 2022; Li *et al.*, 2023), 认为气候由干旱向湿润过渡, 河道在一定程度上呈现稳定型先减弱、后增强、最后再减弱的现象。

(3) 物源

物源对河流的影响主要体现在 2 个方面: 一是上游输沙量的变化、二是物源区的基底类型。一般而言, 距离物源越近、风化程度越高, 河流的输沙量越大, 对于辫状河沉积体系而言, 越易形成游荡型辫状河沉积; 反之, 则容易形成稳定型辫状河 (Schumm, 2005; 谭程鹏等, 2014; Yao *et al.*, 2018)。在物源区基岩方面, 母岩的抗风化能力、刚性等参数, 会影响沉积物的粒度。在水动力等其

他沉积条件一定时, 沉积物粒度大、抗侵蚀能力强 (Brierley and Hickin, 1985), 河流相对稳定, 即物源区的沉积物粒度越大, 河床沉积物粒度相对越粗, 河道越稳定, 亦形成稳定型辫状河。

(4) 海 (湖) 平面

与海 (湖) 相沉积环境不同, 海 (湖) 平面对河流特征的影响较小, 一般仅限于河流末端、入海前的几公里至几十公里的范围 (部分属于辫状河三角洲平原沉积) (Miall, 1991; Shanley and McCabe, 1994; Colombera *et al.*, 2015)。在河流末端, 下游湖/海平面升高, 受下游水流与潜水面等顶托作用的影响, 河流功率逐渐减弱, 尽管整个河道体系的稳定性减弱, 但单一河道的稳定性增强 (Shanley and McCabe, 1994)。

(5) 可容空间与物源供给

对于河流相储集层, 可容空间与物源供给难以量化, 多将 2 个因素综合考虑, 即可容空间与物源供给之比 (A/S), 该参数指示了河流相沉积的基准面升降, 是多因素综合响应, 是控制河流类型 (包括辫状河类型) 的重要因素 (Cross, 2000; 邓宏文等, 2007; Miall, 2010)。基准面低位、物源供给充足而可容空间相对不足, 河道稳定性减弱, 易形成游荡型辫状河; 基准面高位、物源供给相对不足而可容空间充足, 河道稳定性增强, 易形成稳

定型辫状河与曲流河。总之, 伴随着 A/S 升高, 河道稳定性增大, 辩状河由游荡型向稳定型辫状河过渡 (谭程鹏等, 2014; Li *et al.*, 2015; Yao *et al.*, 2018; 李伟, 2021; 李伟等, 2022)。

4 辩状河内部沉积构型

游荡型与稳定型辫状河在沉积构型及砂体连通性方面具有显著差异, 因此下文以 2 个典型的露头实例描述 2 种辫状河沉积的构型特征 (图 8; 图 9), 并建立基准面控制的辫状河类型与沉积构型模式 (图 10)。

4.1 游荡型辫状河

游荡型辫状河属于低弯度、高辫状化、河道极不稳定的河流, 常与限定性河谷伴生 (Best and Bristow, 1993; Bridge and Lunt, 2006; 李伟等, 2022)。平面上, 辩流带呈带状或宽带状分布, 宽度及地貌特征受限于河谷规模, 河谷较窄时辩流带可充填整个河谷; 河谷变宽时, 辩流带宽度显著增大且经常分汊形成 2 个相邻的辩流带 (图 7-A, 7-B)。剖面上, 以山西大同游荡型辫状河露头为例 (图 8-A), 该剖面沉积物以中一粗砂岩为主, 辩流带紧密堆叠, 几乎不发育泛滥平原与溢岸沉积;

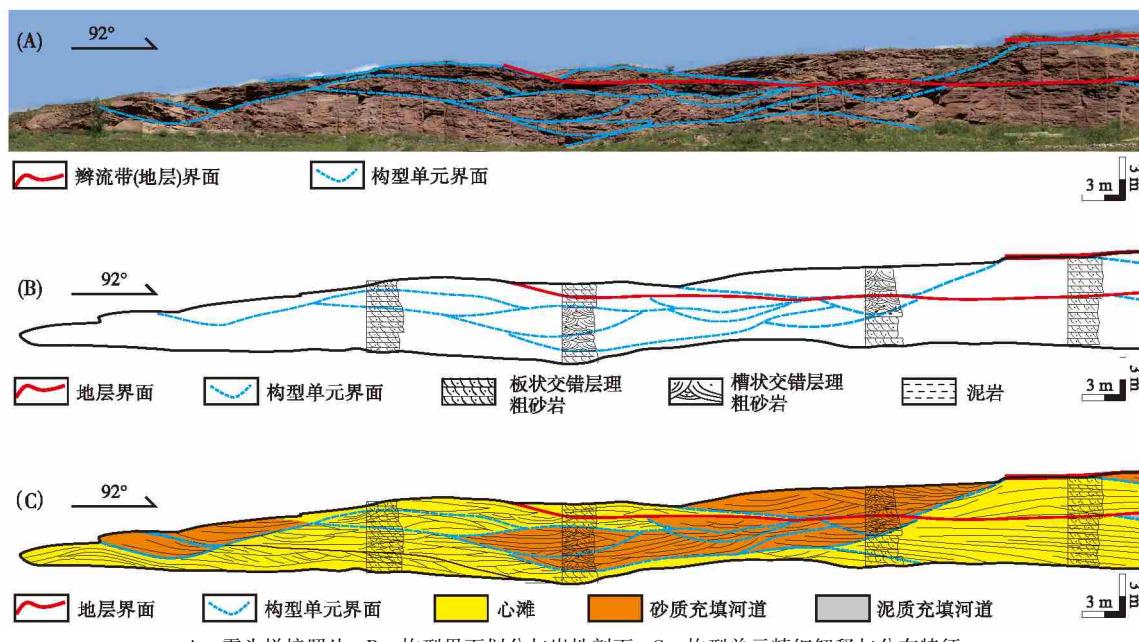


图 8 山西大同晋华宫铁路桥砂质辫状河露头剖面与精细构型解释 (据李伟等, 2022; 有修改)

Fig. 8 Outcropping sandy braided successions and their architecture interpretation along the Jinhuagong railway bridge, in Datong city, Shanxi Province (modified from Li *et al.*, 2022)

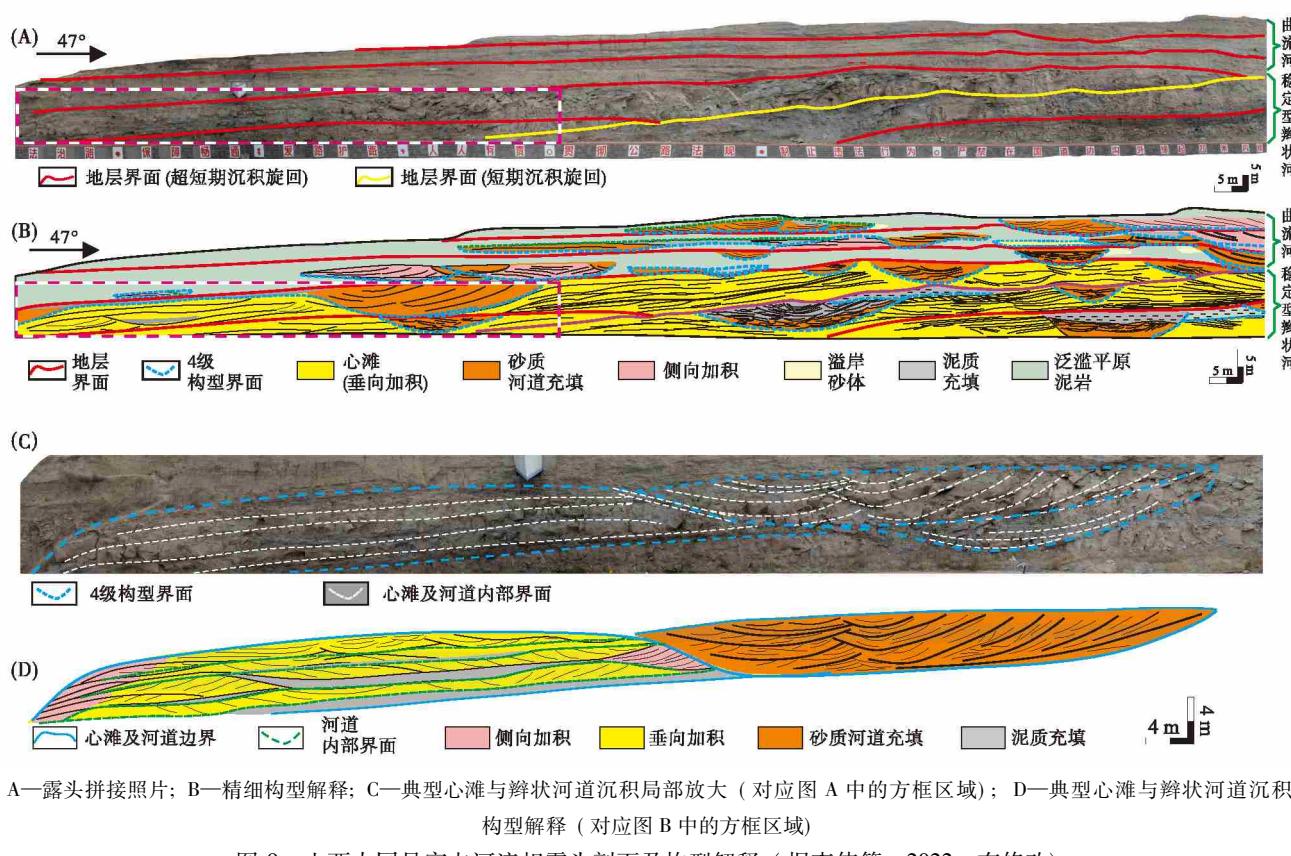


图 9 山西大同吴官屯河流相露头剖面及构型解释 (据李伟等, 2022; 有修改)

Fig. 9 Outcropping fluvial successions and their architecture interpretation in Wuguantun village, Datong city, Shanxi Province
(modified from Li *et al.*, 2022)

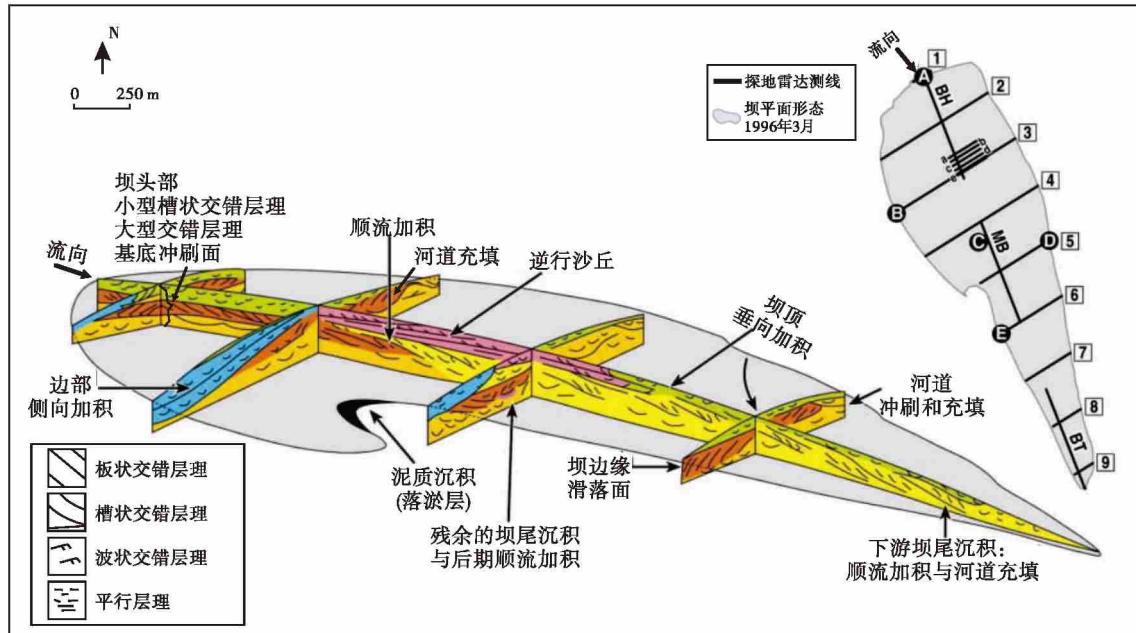


图 10 Jamuna 河内部典型心滩的探地雷达测线与三维构型原型模型 (据 Best *et al.*, 2003)

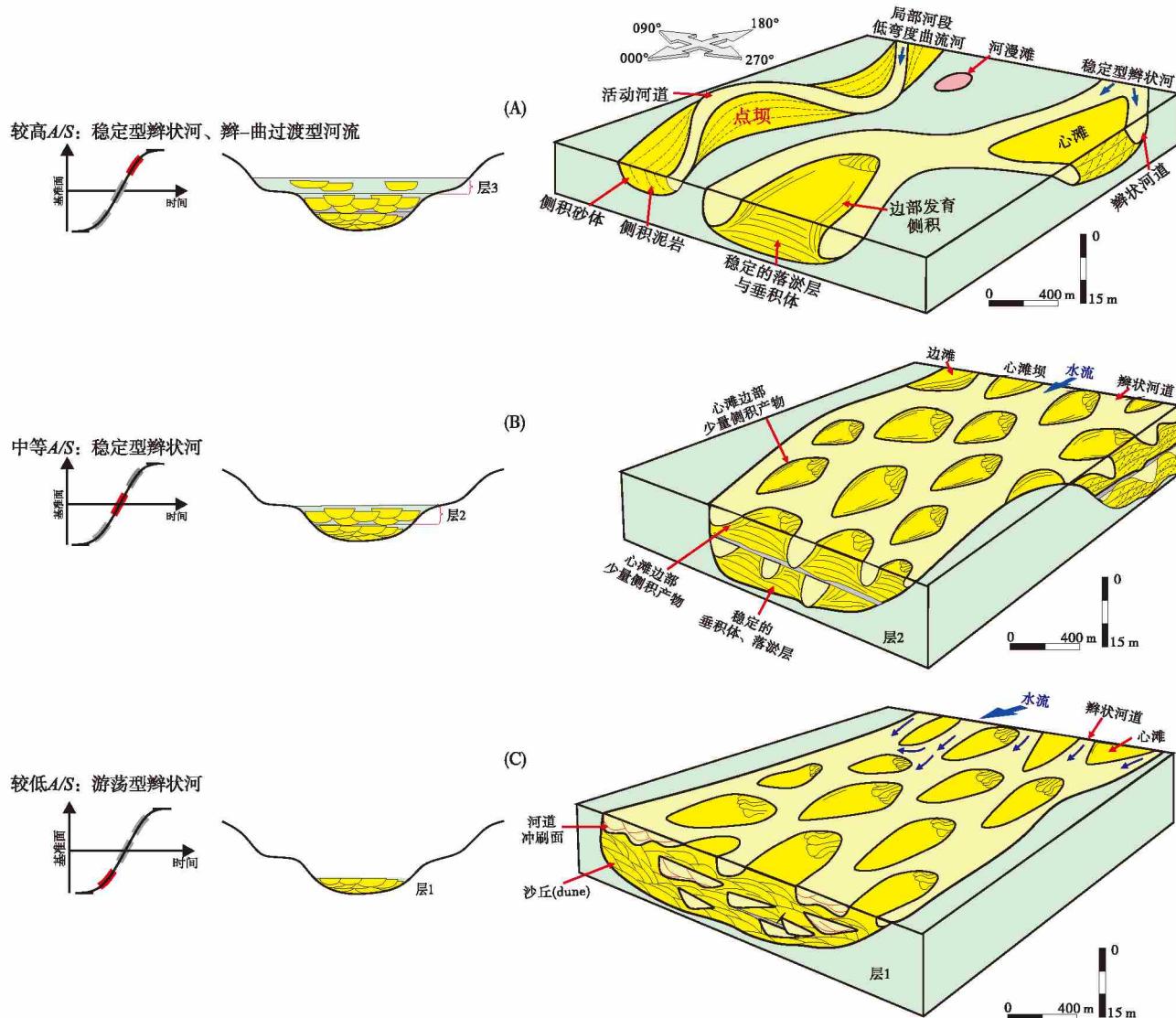
Fig. 10 Three-dimensional sedimentary architecture of a classic braid compound bar within Jamuna river
(after Best *et al.*, 2003)

辫流带内部, 沟道与冲刷面极为发育, 辫状河道沉积与心滩形成“泛连通体”; 心滩内部沙丘彼此交错、紧密叠合, 不发育典型的落淤层与垂积体; 辫状河道横截面近似对称, 表明横向环流作用很弱(图 8)。

4.2 稳定型辫状河

稳定型辫状河辫状河道的改道频率较高、地貌演化速率较快, 但其内部结构明显区别于游荡型辫状河。已有研究表明, 山西大同稳定型辫状河(图 9)露头剖面下部以稳定型辫状河沉积为主、上部

以曲流河沉积为主 (Li *et al.*, 2015; 李伟, 2021; 李伟等, 2022)。孟加拉国 Jamuna 河 (图 10) 为相对较为稳定的大型辫状河 (Best *et al.*, 2003), 沉积以中砂岩为主, 砂地比介于 8:10 到 9:10 之间, 辫流带顶部发育 0.2~0.6 cm 的泛滥平原泥岩。相比于游荡型辫状河, 稳定型辫状河内部发育较为稳定的辫状河道与心滩, 河道冲刷面明显减少; 沙坝以心滩为主, 可见少量边滩(图 9-A, 9-B); 心滩内部由多期落淤层与垂积体组成(图 9-C; 图 10), 心滩中部为顺流加积, 两侧可发育少量侧向加积(图 9-C, 9-D; 图 10)。



A—基准面相对高位, 辫—曲过渡型河流沉积; B—基准面相对中位, 稳定型辫状河沉积; C—基准面相对低位, 游荡型辫状河沉积

图 11 基准面旋回控制的辫状河沉积类型及内部构型模式 (据李伟, 2021; 李伟等, 2022; 有修改)

Fig. 11 Types of braided river systems and their inner sedimentary architecture in different conditions of base-level
(modified from Li, 2021; Li *et al.*, 2022)

4.3 辫状河主要类型与构型模式

可容空间与物源供给是多因素综合响应, 是控制辫状河类型的重要因素。就辫状河沉积体系而言, A/S 较小、即可容空间不足而物源供给相对充足时, 发育游荡型辫状河; A/S 较大、即可容空间充足而物源供给相对不足时, 发育稳定型辫状河; A/S 继续增大, 发育辫—曲过渡型河流(图 11)。

游荡型辫状河呈宽带状分布, 垂向上河道紧密切叠。辫流带内部以辫状河道沉积与心滩为主, 沟道与冲刷面极为发育; 心滩内部沙丘彼此交错、紧密叠合, 不发育典型的落淤层与垂积体; 心滩被河道频繁切割、保存不完整, 辫状河道沉积与心滩形成“泛连通体”(图 11-C)。

稳定型辫状河垂向上河道切叠程度降低, 辫流带内部以辫状河道沉积与心滩为主, 可见少量边滩, 河道带顶部发育少量泛滥平原沉积。部分心滩保存比较完整, 内部结构相对稳定, 由多期落淤层与垂积体组成, 心滩中部为顺流加积, 两侧可发育少量侧向加积(图 11-B)。

辫—曲过渡型河流, 辫状河与曲流河交替出现, 且以稳定型辫状河为主。过渡型河流的辫流指数较低, 以 2 为主(即河道的横截面仅发育 1 个心滩)。辫流段内部以辫状河道沉积与心滩为主, 可见少量边滩与溢岸沉积; 心滩内部发育横向比较稳定的落淤层与垂积体, 边部可见少量侧积产物。曲流段发育点坝, 内部侧积体数量较少, 侧积层稳定性较差、常被串沟侵蚀, 点坝中部可见垂向加积产物(图 11-A)。

5 结论与展望

1) 辫状河类型多样, 根据内部沉积构型与心滩稳定程度分为稳定型与游荡型辫状河。整体而言, 两者地貌特征无明显差异, 但内部构型结构存在显著区别: 稳定型辫状河心滩内部由一系列横向较为稳定的垂积体与落淤层组成; 游荡型辫状河心滩频繁被河道冲刷, 导致心滩保存程度低、辫状河道沉积与残余心滩之间无明显界限、形成“泛连通体”。此外, 辫—曲过渡型河流的分汊河段也可归为稳定型辫状河的一种, 该河型分汊指数低(通常在 2 左右), 其心滩内部结构与稳定型辫状河相似。

2) 辫状河形成与演化分为 4 个阶段: 水流扰动形成横向朵状单元坝, 河流汇聚形成初始河道与坝尾沉积, 单元坝生长、拼接形成复合坝, 河流动态平衡阶段。动态平衡阶段, 稳定型辫状河地貌演化速率较低, 季节性洪水前后地貌特征具有明显的继承性, 仅在局部发生显著变化; 游荡型辫状河洪水前后辫状河地貌特征整体可发生显著变化。

3) 辫状河内部沙坝类型多样, 根据形成过程与发育阶段划分为单元坝与复合坝, 常见单元坝包括辫状河道内部形成朵状单元坝、河道顺直段两侧形成的交替沙坝、弯曲河道内侧形成的滚动坝; 复合坝主要包括单一心滩坝与大型复合心滩。

辫状河作为一种十分复杂的河流, 在成因分类、沉积条件、形成演化过程与沉积响应方面尚存在一些问题有待深入研究。(1) 现有辫状河分类方案主要基于地貌特征或内部沉积结构, 缺少兼顾两者的分类方案;(2) 辫状河成因机理复杂, 开展河流动力学与沉积学交叉学科来探讨其形成条件、演化机理与沉积模式是当下及未来的重要发展方向;(3) 辫状河沉积构型多样, 明确其主控因素, 建立沉积条件主控的、具有实际指导意义的多样化沉积构型模式(定性与定量)是当前研究的重点与难点。

参考文献 (References)

- 邓宏文, 吴海波, 王宁, Timothy A Cross. 2007. 河流相层序地层划分方法: 以松辽盆地下白垩统扶余油层为例. 石油与天然气地质, 28(5): 621–627. [Deng H W, Wu H B, Wang N, Cross T A. 2007. Division of fluvial sequence stratigraphy: an example from the Lower Cretaceous Fuyu oil-bearing layer, the Songliao Basin. Oil & Gas Geology, 28(5): 621–627]
- 甘泉. 2021. 远源细粒辫状河心滩坝演化与河流分叉的交互沉积过程: 现代沉积启示与数值模拟分析. 地质科技通报, 40(1): 14–26. [Gan Q. 2021. Interaction and sedimentary process between the evolution of the bar and bifurcation of the river in the far-source fine-grained braided river: numerical simulation analysis inspired by modern deposition. Bulletin of Geological Science and Technology, 40(1): 14–26]
- 关旭同, 吴鉴, 魏凌云, 赵进雍, 冯庚, 李严. 2019. 准噶尔盆地南缘建功煤矿剖面齐古组河流沉积与砂体构型. 新疆石油地质, 40(3): 290–297. [Guan X T, Wu J, Wei L Y, Zhao J Y, Feng G, Li Y. 2019. Meandering river deposit and sand body architecture in Qigu Formation of Jiangong coal mine section in the southern margin of Junggar basin. Xinjiang Petroleum Geology, 40(3): 290–297]
- 何维领, 李少华, 王军, 张以根, 于金彪, 史敬华. 2019. 基于水槽沉积

- 模拟实验的不同类型辫状河心滩坝发育特征及主控因素分析. 东北石油大学学报, 43(6): 13-22, 82, 5-6. [He W L, Li S H, Wang J, Zhang Y G, Yu J B, Shi J H. 2019. Characteristics and key controlling factors of channel bar in different types of braided river based on flume tank experiments. Journal of Northeast Petroleum University, 43(6): 13-22, 82, 5-6]
- 何宇航, 宋保全, 张春生. 2012. 大庆长垣辫状河砂体物理模拟实验研究与认识. 地学前缘, 19(2): 41-48. [He Y H, Song B Q, Zhang C S. 2012. A study of braided river sand deposit in Changyuan, Daqing through physical simulation experiments. Earth Science Frontiers, 19(2): 41-48]
- 金振奎, 杨有星, 尚建林, 王林生. 2014. 辩状河砂体构型及定量参数研究: 以阜康、柳林和延安地区辩状河露头为例. 天然气地球科学, 25(3): 311-317. [Jin Z K, Yang Y X, Shang J L, Wang L S. 2014. Sandbody architecture and quantitative parameters of single channel sandbodies of braided river: cases from outcrops of braided river in Fukang, Liulin and Yanan areas. Natural Gas Geoscience, 25(3): 311-317]
- 李建平, 熊连桥, 黄涛, 刘子玉. 2019. 加拿大 Alberta 盆地下白垩统油砂沉积特征分析及隔夹层识别. 中国海上油气, 31(5): 30-41. [Li J P, Xiong L Q, Huang T, Liu Z Y. 2019. Sedimentary characteristics analysis and interlayer identification of the Lower Cretaceous oil sands in the Alberta basin, Canada. China Offshore Oil and Gas, 31(5): 30-41]
- 李胜利, 于兴河, 姜涛, 梁星如, 苏东旭. 2017. 河流辩—曲转换特点与废弃河道模式. 沉积学报, 35(1): 1-9. [Li S L, Yu X H, Jiang T, Liang X R, Su D X. 2017. Meander-braided transition features and abandoned channel patterns in fluvial environment. Acta Sedimentologica Sinica, 35(1): 1-9]
- 李胜利, 马水平, 周练武, 黄晓娣, 韩波, 李航. 2022. 辩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, 47(11): 3960-3976. [Li S L, Ma S P, Zhou L W, Huang X D, Han B, Li H. 2022. Main influencing factors of braided-meander transition and coexistence characteristics and implications of ancient fluvial sedimentary environment reconstruction. Earth Science, 47(11): 3960-3976]
- 李伟. 2021. 基准面旋回控制的河流相储层构型样式及形成机理. 中国石油大学(北京)博士论文, 1-148. [Li W. 2021. Architecture models and formation mechanism of fluvial reservoirs in responsible for the base-level cycle. Doctoral dissertation of China University of Petroleum(Beijing), 1-148]
- 李伟, 岳大力, 李健, 刘瑞璟, 郭长春, 王文枫, 张海娜. 2022. 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. 地球科学, 47(11): 3977-3988. [Li W, Yue D L, Li J, Liu R J, Guo C C, Wang W F, Zhang H N. 2022. Variable architecture models of fluvial reservoir controlled by base-level cycle: a case study of Jurassic outcrop in Datong basin. Earth Science, 47(11): 3977-3988]
- 刘钰铭, 侯加根, 宋保全, 周新茂, 陈宏魁, 张腊梅. 2011. 辩状河厚砂层内部夹层表征: 以大庆喇嘛甸油田为例. 石油学报, 32(5): 836-841. [Liu Y M, Hou J G, Song B Q, Zhou X M, Chen H K, Zhang L M. 2011. Characterization of interlayers within braided-river thick sandstones: a case study on the Lamadian Oilfield in Daqing. Acta Petrolei Sinica, 32(5): 836-841]
- 钱宁. 1985. 关于河流分类及成因问题的讨论. 地理学报, 40(1): 1-10. [Qian N. 1985. On the classification and causes of formation of different channel patterns. Acta Geographica Sinica, 40(1): 1-10]
- 任晓旭, 侯加根, 刘钰铭, 陈德坡, 张翔宇. 2018. 砂质辩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辩状河露头为例. 石油科学通报, 3(3): 245-261. [Ren X X, Hou J G, Liu Y M, Chen D P, Zhang X Y. 2018. 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, 3(3): 245-261]
- 邵学军, 王兴奎. 2013. 河流动力学概论. 北京: 清华大学出版社, 264. [Shao X J, Wang X K. 2012. Introduction to River Mechanics. Beijing: Tsinghua University Press, 264]
- 束青林. 2006. 孤岛油田馆陶组河流相储层隔夹层成因研究. 石油学报, 27(3): 100-103. [Shu Q L. 2006. Interlayer characterization of fluvial reservoir in Guantao Formation of Gudao Oilfield. Acta Petrolei Sinica, 27(3): 100-103]
- 孙天建, 穆龙新, 吴向红, 赵国良, 徐锋, 王振军, 覃志, 方子奇. 2014. 砂质辩状河储层构型表征方法: 以苏丹穆格莱特盆地 Hegli 油田为例. 石油学报, 35(4): 715-724. [Sun T J, Mu L X, Wu X H, Zhao G L, Xu F, Wang Z J, Tan Z, Fang Z Q. 2014. A quantitative method for architecture characterization of sandy braided-river reservoirs: taking Hegli oilfield of Muglad Basin in Sudan as an example. Acta Petrolei Sinica, 35(4): 715-724]
- 谭程鹏, 于兴河, 李胜利, 李顺利, 陈彬滔, 单新, 王志兴. 2014. 辩状河—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, 32(3): 450-458. [Tan C P, Yu X H, Li S L, Li S L, Chen B T, Shan X, Wang Z X. 2014. Discussion on the model of braided river transform to meandering river: as an example of Tou-tunhe formation in southern Junggar Basin. Acta Sedimentologica Sinica, 32(3): 450-458]
- 王敏, 穆龙新, 赵国良, 王喻雄. 2017. 分汊与游荡型辩状河储层构型研究: 以苏丹 FN 油田为例. 地学前缘, 24(2): 246-256. [Wang M, Mu L X, Zhao G L, Wang Y X. 2017. Architecture analysis of reservoirs in branching-and wandering-based braided rivers: taking FN field, Sudan as an example. Earth Science Frontiers, 24(2): 246-256]
- 肖毅, 杨研, 邵学军. 2012. 基于尖点突变模式的河型分类及转化判别. 清华大学学报(自然科学版), 52(6): 753-758. [Xiao Y, Yang Y, Shao X J. 2012. Cusp catastrophe model for alluvial channel regimes and classification of channel patterns. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 52(6): 753-758]
- 徐安娜, 穆龙新, 裴泽楠. 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): 57-60, 5-

- 6, 12–13. [Xun 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) : 57–60, 5–6, 12–13]
- 于兴河, 马兴祥, 穆龙新, 贾爱林. 2004. 辨状河储层地质模式及层次界面分析. 北京: 石油工业出版社, 1–207. [Yu X H, Ma X X, Mu L X, Jia A L. 2004. Geological Model and Hierarchical Interface Analysis of Braided River Reservoir. Beijing: Petroleum Industry Press, 1–207]
- 张昌民, 朱锐, 赵康, 胡威, 尹艳树, 李少华, 尹太举. 2017. 从端点走向连续: 河流沉积模式研究进展述评. *沉积学报*, 35(5) : 926–944. [Zhang C M, Zhu R, Zhao K, Hu W, Yin Y S, Li S H, Yin T J. 2017. From end member to continuum: review of fluvial facies model research. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(5) : 926–944]
- 张可, 吴胜和, 冯文杰, 郑定业, 喻宸, 刘照玮. 2018. 砂质辨状河心滩坝的发育演化过程探讨: 沉积数值模拟与现代沉积分析启示. *沉积学报*, 36(1) : 81–91. [Zhang K, Wu S H, Feng W J, Zheng D Y, Yu C, Liu Z W. 2018. Discussion on evolution of bar in sandy braided river: insights from sediment numerical simulation and modern bar. *Acta Sedimentologica Sinica*, 36(1) : 81–91]
- Ashmore P E. 1982. Laboratory modelling of gravel braided stream morphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, 7(3) : 201–225.
- Ashworth P J, Best J L, Jones M. 2004. Relationship between sediment supply and avulsion frequency in braided rivers. *Geology*, 32: 21–24.
- Best J L, Ashworth P J, Bristow C S, Roden J. 2003. Three-dimensional sedimentary architecture of a large, mid-channel sand braid bar, Jamuna River, Bangladesh. *Journal of Sedimentary Research*, 73(4) : 516–530.
- Best J L, Bristow C S. 1993. Braided Rivers. London: Geological Society Publishing House, Special Publication 75, 419.
- Bridge J S, Lunt I A. 2006. Depositional models of braided rivers, In: Sambrook Smith G H, Best J L, Bristow C S, Petts G E(eds) . Braided Rivers: Process, Deposits, Ecology and Management. Oxford: International Association of Sedimentologists Special Publication 36, 11–50.
- Brierley G J. 1989. River planform facies models: the sedimentology of braided, wandering and meandering reaches of the Squamish River, British Columbia. *Sedimentary Geology*, 61: 17–35.
- Brierley G J, Hickin E J. 1985. The downstream gradation of particle sizes in the Squamish River, British Columbia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 10: 597–606.
- Cant D J, Walker R G. 1976. Development of a braided fluvial facies model for the Devonian Battery Point Sandstone, Quebec. *Canadian Journal of Earth Science*, 13: 102–119.
- Cant D J, Walker R G. 1978. Fluvial processes and facies sequences in the sandy braided South Saskatchewan River. *Canadian Sedimentology*, 25: 625–648.
- Carling P A, Gupta N, Atkinson P M, He H Q. 2016. Criticality in the planform behavior of the Ganges River meanders. *Geology*, 44: 859–862.
- Castelltort S. 2018. Empirical relationship between river slope and the elongation of bars in braided rivers: a potential tool for paleoslope analysis from subsurface data. *Marine and Petroleum Geology*, 96: 544–550.
- Colombera L, Mountney N P, McCaffrey W D. 2015. A meta-study of relationships between fluvial channel-body stacking pattern and aggradation rate: implications for sequence stratigraphy. *Geology*, 43(4) : 283–286.
- 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: 1–14.
- Cross T A. 2000. Stratigraphic controls on reservoir attributes in continental strata. *Earth Science Frontiers*, 7(4) : 322–350.
- Eaton B C, Millar R G, Davidson S. 2010. Channel patterns: braided, anabranching, and single-thread. *Geomorphology*, 120(3–4) : 353–364.
- Fielding C R, Alexander J, Allen J P. 2018. The role of discharge variability in the formation and preservation of alluvial sediment bodies. *Sedimentary Geology*, 365: 1–20.
- Galloway W E, Hobday D K. 1996. Terrigenous clastic depositional systems: applications to fossil fuel and groundwater resources. Berlin: Springer-Verlag, 489.
- Gibling M R. 2006. Width and thickness of fluvial channel bodies and valley fills in the geological record: a literature compilation and classification. *Journal of Sedimentary Research*, 76: 731–770.
- Hansford M R, Plink-Björklund P. 2020. River discharge variability as the link between climate and fluvial fan formation. *Geology*, 48(10) : 952–6.
- Jerolmack D J, Mohrig D. 2007. Conditions for branching in depositional rivers. *Geology*, 35: 463–466.
- Langbein W B, Schumm S A. 1958. Yield of sediment in relation to mean annual precipitation. *Transactions-American Geophysical Union*, 39: 1076–1084.
- Li W, Colombera L, Yue D L, Mountney N P. 2023. Controls on the morphology of braided rivers and braid bars: an empirical characterization of numerical models. *Sedimentology*, 70: 259–279.
- Li S L, Yu X H, Chen B T, Li S L. 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(10) : 1258–1274.
- Lunt I A, Bridge J S, Tye R S. 2004. A quantitative, three-dimensional depositional model of gravelly braided rivers. *Sedimentology*, 51(3) : 377–414.
- Miall A D. 1985. Architectural-element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits. *Earth-Science Review*, 22: 261–308.
- Miall A D. 1991. Stratigraphic sequences and their chronostratigraphic correlation. *Journal of Sedimentary Petrology*, 61: 497–505.

- 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.
- Miall A D. 2010. *The Geology of Stratigraphic Sequences*, 2nd Ed. Berlin: Springer-Verlag, 522.
- 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.
- Nicholas A P, Sambrook Smith G H, Amsler M L, Ashworth P J, Best J L, Hardy R J, Lane S N, Orfeo O, Parsons D R, Reesink A J H, Sandbach S D, Simpson C J, Szupiany R N. 2016. The role of discharge variability in determining alluvial stratigraphy. *Geology*, 44(1) : 3–6.
- Nicholas A P, Aalto R E, Sambrook Smith G H, Schwendel A C. 2018. Hydrodynamic controls on alluvial ridge construction and avulsion likelihood in meandering river floodplains. *Geology*, 46(7) : 639–642.
- Sambrook Smith G H. 2006. *Braided Rivers: Process, Deposits, Ecology and Management*. International Association of Sedimentologists, Oxford: Blackwell, Special Publication 36, 390.
- Sambrook Smith G H, Best J L, Bristow C S, Petts G E. 2006. *Braided Rivers: Process, Deposits, Ecology and Management*. Oxford: Blackwell, 1–390.
- Schumm S A. 2005. *River Variability and Complexity*, 1st Ed. Cambridge University Press, New York.
- Schuurman F, Kleinhans M G. 2015. Bar dynamics and bifurcation evolution in a modelled braided sand-bed river. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(10) : 1318–1333.
- Schuurman F, Marra W A, Kleinhans M G. 2013. Physics-based modeling of large braided sand-bed rivers: bar pattern formation, dynamics, and sensitivity. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118(4) : 2509–2527.
- Shanley K W, McCabe P J. 1994. Perspectives on the Sequence Stratigraphy of Continental Strata. *AAPG Bulletin*, 78(4) : 544–68.
- Sichingabula H M. 1986. Character and causes of channel changes on the Squamish River, southwestern British Columbia. Thesis of Simon Fraser University, 156.
- Smith N D. 1974. Sedimentology and bar formation in the Upper Kicking Horse River, a braided outwash stream. *The Journal of Geology*, 82(2) : 205–223.
- Sullivan K B, McBride E F, Elfenbein C. 1991. Diagenesis of sandstones at shale contacts and diagenetic heterogeneity, Frio Formation, Texas. *AAPG Bulletin*, 75(1) : 121–138.
- Temmerman S, Bouma T J, Wagoner de Koppel J, Wagoner der Wal D, DeVries M B, Herman P M J. 2007. Vegetation causes channel erosion in a tidal landscape. *Geology*, 35(7) : 631–634.
- van den Berg J H. 1995. Prediction of alluvial channel pattern of perennial rivers. *Geomorphology*, 12: 259–279.
- Williams R D, Brasington J, Hicks M, Measures R, Rennie C D, Vericat D. 2013. Hydraulic validation of two-dimensional simulations of braided river flow with spatially continuous aDcp data. *Water Resources Research*, 49(9) : 5183–5205.
- Yao Z Q, Yu X H, Shan X, Li S L, Li S L, Li Y L, Tan C P, Chen H L. 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: 2710–2731.

(责任编辑 李新坡; 英文审校 陈吉涛)