

湖盆扇三角洲河口坝发育程度及粒度韵律特征: 以滦平盆地桑园剖面下白垩统西瓜园组为例*

张 可 吴胜和 许允杰 熊绮聪 高子杰 余季陶

中国石油大学(北京) 地球科学学院, 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

摘要 扇三角洲作为重要的油气储集场所, 其成因单元类型及分布特征控制着油气的差异分布及采出效率。关于扇三角洲分流河道沉积特征已有共识, 但河口坝沉积特征尤其是韵律特征尚存在争议。以滦平盆地桑园剖面下白垩统西瓜园组湖盆扇三角洲沉积体为例, 通过人工实测及无人机观测相结合的方法, 对河口坝沉积特征、尤其是韵律特征进行研究, 利用水槽模拟实验阐明河口坝韵律特征的形成机理。结果表明, 河口坝在整个剖面中占砂(砾)岩体的45.27%, 分流河道和席状砂分别占53.42%和1.31%。河口坝在剖面上呈底平顶凸状, 通常由多期增生体组成。当增生体主要由砂岩组成时, 呈粒度反韵律特征; 而当增生体主要由砾岩组成时, 呈粒度正韵律特征。河口坝整体韵律受控于增生体的垂向叠置样式, 既可呈反韵律特征又可呈正韵律特征。当流量、沉积底形坡度等地质条件一定时, 河口坝内部增生体韵律性主要受沉积物粒度控制。当沉积物粒度较细时, 河口水流扩散模式为底床摩擦力主控, 增生体呈现反韵律特征; 而当沉积物粒度较粗时, 河口水流扩散模式为惯性力主控, 河口坝增生体则呈现正韵律特征。

关键词 扇三角洲 河口坝增生体 韵律特征 西瓜园组 下白垩统 桑园剖面 滦平盆地

第一作者简介 张可, 女, 1994年生, 中国石油大学(北京)博士研究生, 主要从事沉积学、油藏表征与建模研究工作。E-mail: zhangke19940902@126.com。

通讯作者简介 吴胜和, 男, 1964年生, 中国石油大学(北京)教授、博士生导师, 主要从事沉积学、储层表征与建模研究。E-mail: reser@cup.edu.cn。

中图分类号: P588.2 文献标志码: A

开放科学(资源服务)标志码(OSID)



Sedimentary characteristics of mouth bar within lacustrine fan delta: insights from the Lower Cretaceous Xiguayuan Formation of Sangyuan outcrop, Luanping Basin

Zhang Ke Wu Sheng-He Xu Yun-Jie Xiong Qi-Cong Gao Zi-Jie Yu Ji-Tao

College of Geosciences, State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting,
China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

Abstract Fan delta is an important hydrocarbon reservoir and its genetic unit type and distribution strongly influence the hydrocarbon distribution and recovery efficiency. Although there is a consensus on the sedimentary characteristics of distributary channels, the sedimentary characteristics of mouth bar, es-

* 国家自然科学基金项目(编号: 42002112)资助。[Financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42002112)]

收稿日期: 2021-12-31 改回日期: 2022-02-23

pecially the vertical grain-size trend, are still controversial. Field survey and unmanned aerial vehicle (UAV) observation were used to investigate the lacustrine fan delta of the Xiguayuan Formation of Lower Cretaceous in Sangyuan outcrop, Luanping Basin, and flume simulation experiment was done aiming to analyze the sedimentary characteristics of mouth bar and reveal the formation mechanism of vertical grain-size trend. The mouth bars account for 45.27% of glutinite bodies, while the distributary channels and sheet sand account for 53.42% and 1.31% of glutinite bodies, respectively. The mouth bar with a flat bottom and convex top mainly consists of sandy and gravelly accretions. The sandy accretion shows an overall coarsening upward trend, and gravelly accretion shows the fining upward trend. The vertical grain-size trend of mouth bar is controlled by superposition patterns of the accretion bodies, which shows either coarsening upward trend or fining upward trend. Under constant discharge and slope of depositional bed-form conditions, finer sediment induces a coarsening upward trend of accretion within the mouth bar dominated by the friction-dominated effluent, while the accretion with coarser sediment results in the coarsening upward accretion controlled by the inertia-dominated effluent diffusion.

Key words fan delta, accretion sand bodies within mouth bar, rhythmic character, Xiguayuan Formation, Lower Cretaceous, Sangyuan outcrop, Luanping Basin

About the first author Zhang Ke, born in 1994, is a Ph.D. candidate of China University of Petroleum (Beijing). She is mainly engaged in sedimentology, reservoir characterization and modelling. E-mail: zhangke19940902@126.com.

About the corresponding author Wu Sheng-He, born in 1964, is a professor and Ph.D. supervisor of China University of Petroleum (Beijing). He is mainly engaged in sedimentology, reservoir characterization and modelling. E-mail: reser@cup.edu.cn.

湖盆扇三角洲作为沉积盆地边缘重要的沉积类型,是石油、天然气等地质矿产资源富集的重要场所,其沉积特征对于油气精细勘探与有效开发具有至关重要的意义,受到学者们的广泛关注(裘亦楠等,1982;吴胜和等,1994;鲜本忠等,2007;林煜等,2013;操应长等,2019)。

扇三角洲沉积特征复杂,其平原沉积特征类似于冲积扇,已有大量学者开展过相关研究(焦养泉等,1998;唐勇等,2014;于兴河等,2014)。冲积扇入湖后,受湖盆水体的影响,沉积物扩散方式发生改变,前缘沉积与水上沉积体有较大差异,主要体现在成因单元类型及其构型特征2个方面。虽然学者们对扇三角洲前缘沉积进行过大量研究,但河口坝发育程度及垂向粒度韵律特征尚存在争议:(1)扇三角洲前缘分流河道及河口坝的相对发育程度存在争议。大部分学者认为扇三角洲前缘以分流河道砂体为主,而河口坝不发育或者规模较小(贾爱林等,2000;张春生等,2000;谭程鹏等,2014;张昌民等,2015),部分学者认为扇三角洲前缘分流河道及河口坝同时发育,甚至以河口坝为主

(Billi *et al.*, 1991; Wagoner Dijk *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2015; 杨延强和吴胜和,2015);(2)河口坝粒度韵律特征存在争议。前人研究多认为河口坝砂体呈反韵律(于兴河等,1999; García-García *et al.*, 2006; Jia *et al.*, 2018; 李胜利等,2018),但部分学者认为河口坝砂体可呈正韵律(Billi *et al.*, 1991; Benvenuti, 2003; Fabbricatore *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2015)或正反复合韵律(杨延强和吴胜和,2015)。

河北滦平盆地桑园剖面下白垩统西瓜园组露头是开展湖盆扇三角洲前缘河口坝沉积特征研究的良好地区,前人已针对该露头进行了大量的沉积学研究(贾爱林等,2004;郭建林等,2007;项华和张乐,2007;耳闯等,2010;刘策等,2017),且多认为河口坝岩性较细(以细砂岩为主),反韵律特征明显(贾爱林等,2004;贾珍臻,2016)。以该露头为例,以前人研究为基础,通过人工实测及无人机观测相结合的方法,分析桑园剖面扇三角洲河口坝发育程度及粒度韵律特征,探讨其韵律特征的形成机理,以期为湖盆扇三角洲沉积特征研究提供新的思路,为该类油气藏精细勘探和开发方案的制定及调整奠定必要的地质基础。

1 地质背景

滦平盆地位于河北省滦平县, 构造上位于燕山台褶带的北缘, 处于尚义—平泉深断裂与丰宁—隆化深断裂间的楔形地带中, 盆地北缘发育红旗—岗子断裂, 西侧发育小白旗—付家店断裂, 2个边界断裂均为正断层 (武法东等, 2000; Davis *et al.*, 2001; Ren *et al.*, 2002; 李寅, 2003; Meng *et al.*, 2003; Cope and Graham, 2007) (图 1)。滦平盆地沉积基底为太古代变质岩及元古代侵入岩, 之上依次出露的地层为侏罗系、下白垩统及第四系 (田树刚等, 2004; 武法东等, 2004)。滦平盆地自中生代经历了裂陷—萎缩期, 在白垩纪西瓜园组沉积时期, 北部的红旗—岗子断裂活动强度大于西部的小白旗—付家店断裂, 在断裂活动的背景下, 湖盆整体上呈现出北陡南缓、沿北东—南西向展布的构造特征, 为典型的半地堑盆地, 大套厚层砂 (砾)

岩体沿湖盆周缘分布。

桑园剖面位于滦平盆地西部，沿北西—南东向出露，剖面上发育1套砾岩、砂岩、粉砂岩及泥岩沉积，其中以中砾岩、细砾岩、小砾岩及粗砂岩为主，沉积厚度约为500 m。物源来自北西西方向，沿长轴方向展布，为缓坡扇三角洲沉积（Cope *et al.*, 2010; Wei *et al.*, 2012）（剖面位置见图1中的AA'）。剖面与物源方向呈一定角度斜交，沉积砂岩及砾岩侧向延伸距离长，侧向变化丰富，岩石学及沉积构型特征明显。剖面发育1个完整的四级基准面旋回（罗平，2007），从下至上沉积物粒度先变细后变粗，沉积物厚度先变薄再变厚，由厚层砾岩（厚度多大于3 m）逐渐转变为薄层砂岩—泥岩层（厚度多小于2 m），后又转变为厚层砾岩（厚度多大于8 m），本次研究的重点为该四级基准面旋回内部的沉积体。

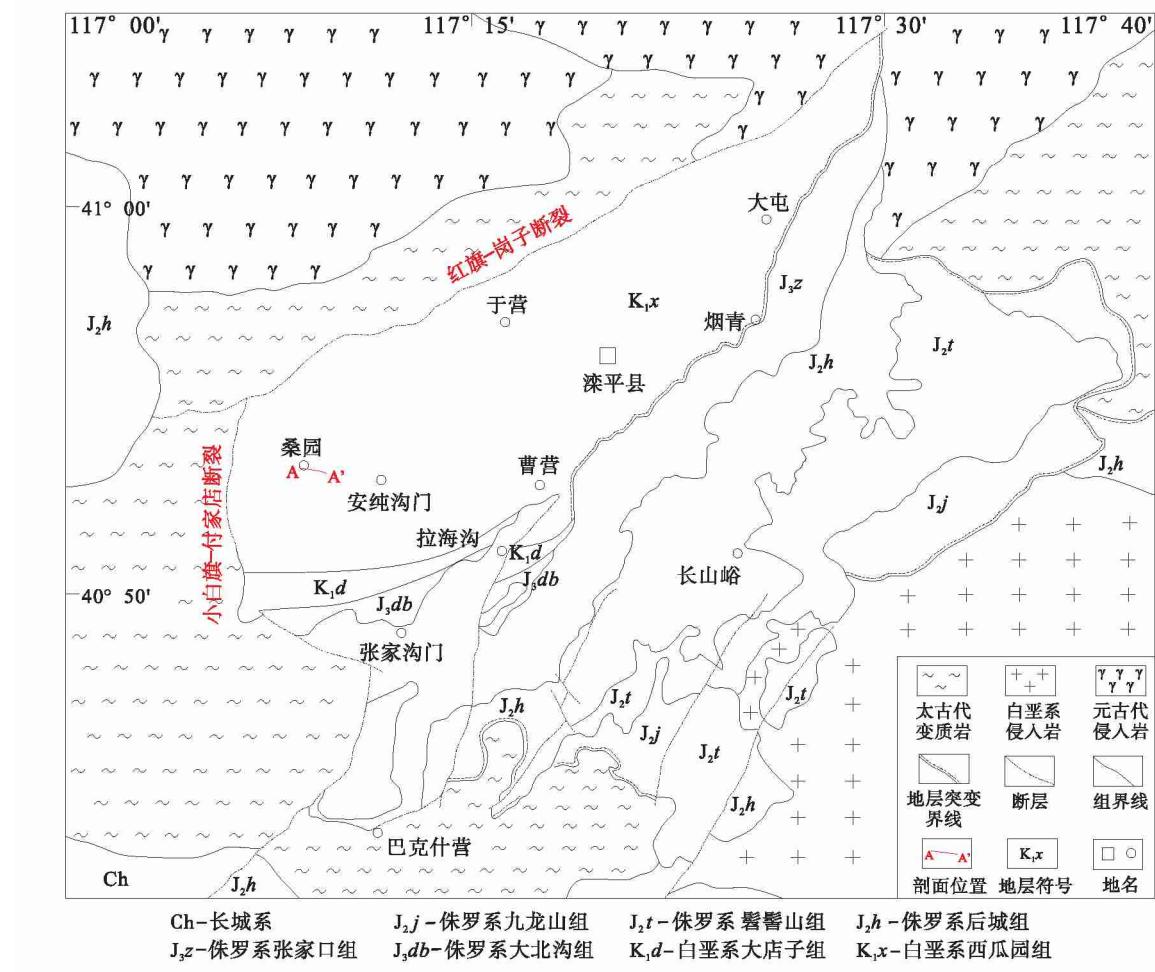


图 1 涪平盆地地质简图 (据李寅, 2003; Wei *et al.*, 2012; 有修改)

Fig. 1 Schematic geological map of the Lu'anping Basin (modified from Li, 2003; Wei *et al.*, 2012)

目前, 关于下白垩统西瓜园组桑园剖面沉积砂(砾)岩体的沉积相类型存在分歧, 一种观点认为桑园剖面为扇三角洲前缘沉积体系(罗平, 2007; Cope *et al.*, 2010; Wei *et al.*, 2012; 杨保良等, 2021), 但水体深度存在争议; 另一种观点认为桑园剖面发育深水沉积(异重流沉积)(Yan *et al.*, 2020)或近岸水下扇沉积(白立科等, 2020)。作者认为桑园剖面西瓜园组沉积相类型为扇三角洲, 下文将进行具体阐述。

2 研究方法及数据

采用人工实测及无人机观测分析相结合的方法对桑园剖面进行研究。人工实测是在近处进行精细观察及描述, 识别不同岩性、沉积构造(层面构造、层理等)及粒度韵律等特征。拍摄高清照片超过400张, 典型层面构造照片分布位置见图2中的L1-L8, 典型岩性及层理照片分布位置见图2中的F1-F8; 同时, 绘制桑园剖面沉积柱状图17张, 共计420m, 绘制精度为1:20。另外, 取样18块, 在中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室进行粒度分析。

无人机观测分析方法是利用从不同方位采集到的数据, 建立野外露头三维数据体来进行定量研究的方法。该方法不仅可弥补野外高、陡部位人工测量难的不足, 还可得到三维测量的数据体, 有利于进行地质体几何形态及分布的定量分析(印森林等, 2018)。本次研究采用集成五镜头倾斜相机的六旋翼无人机, 设置巡航高度300m, 巡航航线垂直于剖面展布方向, 共计28条, 拍摄带坐标照片超过5500张, 建立了带三维坐标的定量模型(图2), 分辨率为0.2m。三维定量模型用于开展桑园

剖面扇三角洲沉积体的宏观展布特征研究及成因单元的定量规模研究。

在桑园剖面扇三角洲沉积特征研究的基础上, 开展水槽模拟实验阐明桑园剖面河口坝粒度韵律特征的形成机理。水槽模拟实验是在长江大学水槽模拟实验室进行的, 水槽长2.25m, 宽2.16m, 深30cm, 作为沉积盆地接受沉积, 在沉积盆地内部可人工铺设具有不同坡度的沉积底形。沉积盆地前部设有长度为0.8m、宽度为0.05m的通道, 作为为沉积盆地提供流体与沉积物的供给通道, 供给流量可通过调节进水量来控制。供给通道最前端设置有沉积物供给装置, 由给料漏斗与震动盘组成, 实验过程中可通过改变震动盘的震动频率调节沉积物供给速率。沉积物与水流在供给通道最前端进行混合, 保证流体以稳定射流的形式进入沉积盆地。沉积盆地后部设有排水池, 水泵可将沉积盆地内的水体排入排水池, 调节沉积盆地内湖平面变化(图3)。实验完成后, 分别在近、中、远切物源剖面及顺物源剖面河口坝内部取样进行粒度分析, 共计样品78份。

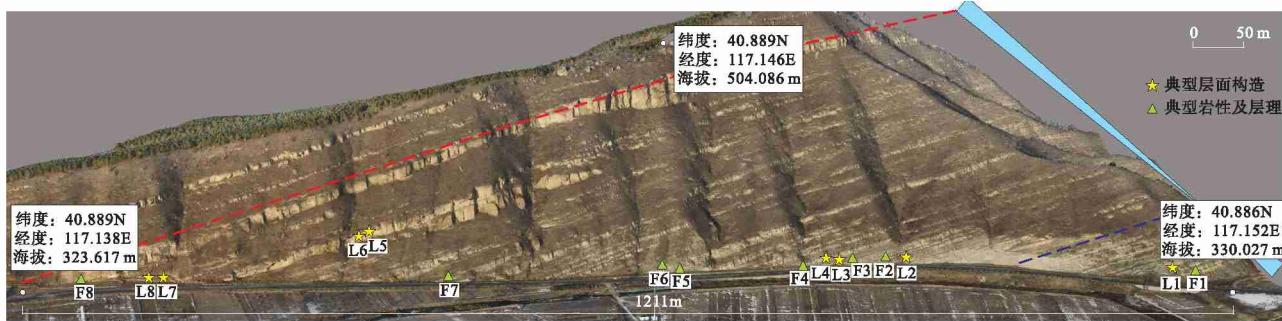
3 扇三角洲沉积相的厘定及成因单元类型

3.1 沉积相的厘定

桑园剖面西瓜园组的沉积相类型为扇三角洲, 主要依据如下。

3.1.1 湖盆水体较浅, 水下沉积与水上沉积并存

桑园剖面发育反映浅水环境的波痕及反映水上沉积环境的泥裂层面构造(图4)。波痕类型包括流水波痕及浪成波痕。流水波痕呈不对称状, 指示单



经纬度及海拔数据均来自无人机测量结果(蓝色的虚线为湖泛面, 红色的虚线为基准面旋回界面)

图2 利用无人机扫描数据建立的桑园剖面三维量化数据体

Fig. 2 3D quantitative model of Sangyuan outcrop established by UAV scanning data

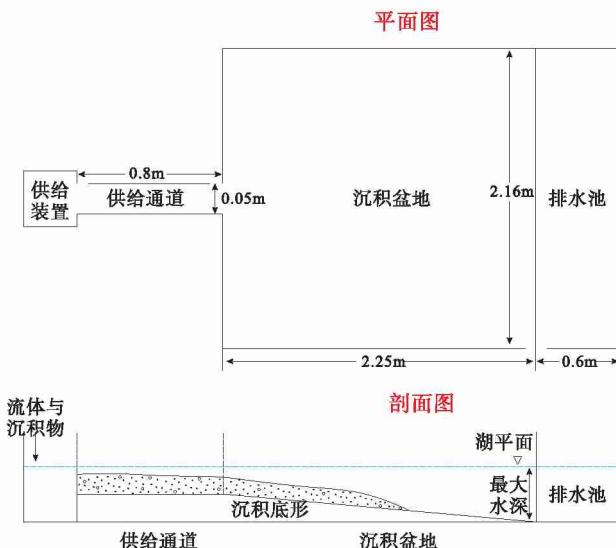


图 3 水槽模拟实验装置

Fig. 3 Flume simulation experiment device

向水流, 波长约为 5.5 cm, 波高约为 3 mm, 波痕指数(波长/波高)大于 15(图 4-H); 浪成波痕指示沉积环境为浅水环境(位于湖盆浪基面之上), 其可呈对称状(图 4-B, 4-E, 4-F, 4-G)或不对称状(图 4-D), 波峰尖锐、波谷圆滑, 不对称浪成波痕平面呈分支状, 常见分而复合的现象。浪成波痕在桑园剖面上多处出现(图 2 中的 L2、L4、L5、L6、L7), 分布在整个基准面旋回内部, 且在湖泛面附近(图 2 中的蓝色虚线)的深灰—灰黑色泥岩中发现对称状浪成波痕(图 4-B), 表明西瓜园组沉积时沉积主体处于浅水沉积环境。

泥裂在层面上呈网格状龟裂纹, 将岩石切割成多边形, 可见于灰色粉砂—泥岩层面(图 4-A); 泥裂铸模形状呈“V”字形, 上部宽度小于 2 cm, 可见于部分砂(砾)岩体底部(图 4-C, 4-F), 指示沉积物沉积时经历了短期浅水暴露环境, 属于水上沉积环境。泥裂层面构造在桑园剖面多处出现(图 2 中的 L1、L3、L6), 表明西瓜园组沉积时期整体水体较浅, 多次水退出现短期暴露环境。

3.1.2 具重力流与牵引流并存的沉积物搬运机制

桑园剖面西瓜园组发育反映重力流沉积的块状构造(图 5-A)、正粒序层理(图 5-D)、滑塌构造(图 5-C)及泥岩撕裂屑(图 5-G)等典型标志(发育位置见图 2 中的 F1、F3、F4、F7)。其中, 块状砾岩整体分选差, 砾石颗粒无定向, 沉积物以整体冻结的方式卸载, 沉积物搬运机制为碎屑流;

正粒序层理砾岩反映沉积流体在失去外力推动的情况下, 沉积颗粒逐一沉降形成, 为浊流沉积。此外, 还可见一种特殊类型的分选极差的叠瓦状砾岩(图 5-H, 发育位置见图 2 中的 F8), 沉积物在弱黏性碎屑流流体中搬运, 内聚力较弱, 大的碎屑颗粒可以移动及转动, 导致扁平状砾石颗粒定向性明显, 沉积物搬运机制为弱黏性碎屑流。

除了发育典型的重力流沉积构造之外, 桑园剖面广泛发育反映牵引流成因的沉积构造, 包括槽状交错层理(图 5-B)、楔状交错层理(图 5-F)、平行层理(图 5-E)等(发育位置见图 2 中的 F2、F5、F6)。

3.1.3 发育顶平底凸的水道型及底平顶凸的堆积型砂(砾)岩体

桑园剖面西瓜园组既发育顶平底凸的水道型砂(砾)岩体, 又发育底平顶凸的堆积型砂(砾)岩体。前者在剖面上常下切下伏地层, 后者与两侧岩层呈上超关系(图 6)。

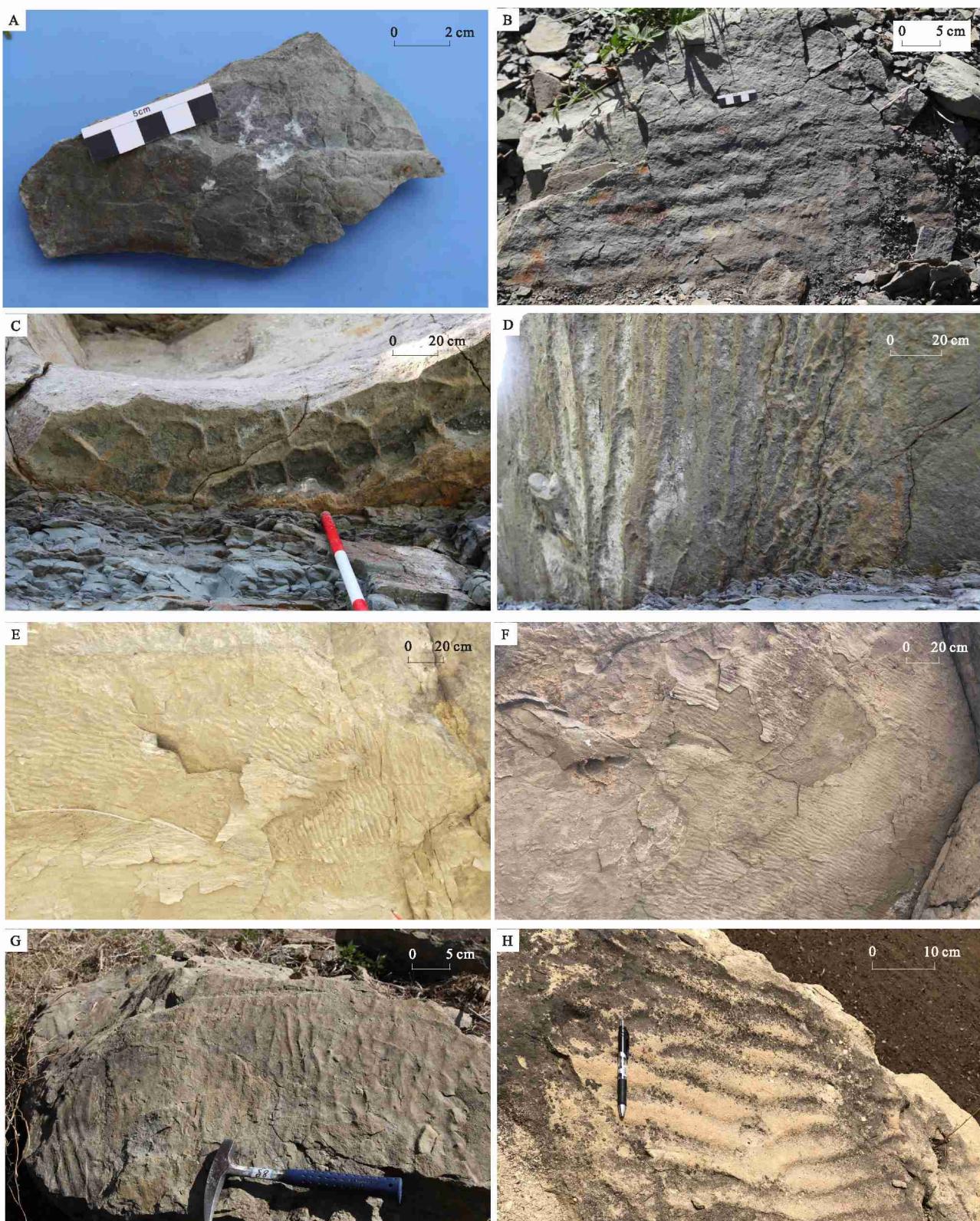
综上所述, 研究区湖盆水体较浅, 同时发育水上及水下沉积, 具有重力流与牵引流共存的沉积物搬运机制, 发育顶平底凸的水道型及底平顶凸的堆积型砂(砾)岩体, 结合区域地质沉积背景(Cope *et al.*, 2010; Wei *et al.*, 2012), 判断桑园剖面西瓜园组为扇三角洲沉积相类型。

3.2 成因单元类型及特征

西瓜园组沉积时期, 湖平面不断变化, 研究区整体处于浅水环境, 偶尔暴露地表, 因此桑园剖面主要发育扇三角洲前缘沉积, 少量层段发育扇三角洲平原沉积。在砂(砾)岩体中, 主要的成因单元类型包括分流河道、河口坝及席状砂。

1) 分流河道。在剖面上呈顶平底凸状, 底部可见冲刷面(图 6-A)。岩性以砾岩为主, 含少量砂岩, 发育块状构造、粒序层理、叠瓦状构造、交错层理等, 垂向上呈正韵律特征。分流河道砾岩体厚度一般为 2~11 m, 最厚可达 28 m; 宽度一般为 9~244 m, 宽厚比为 6~40。

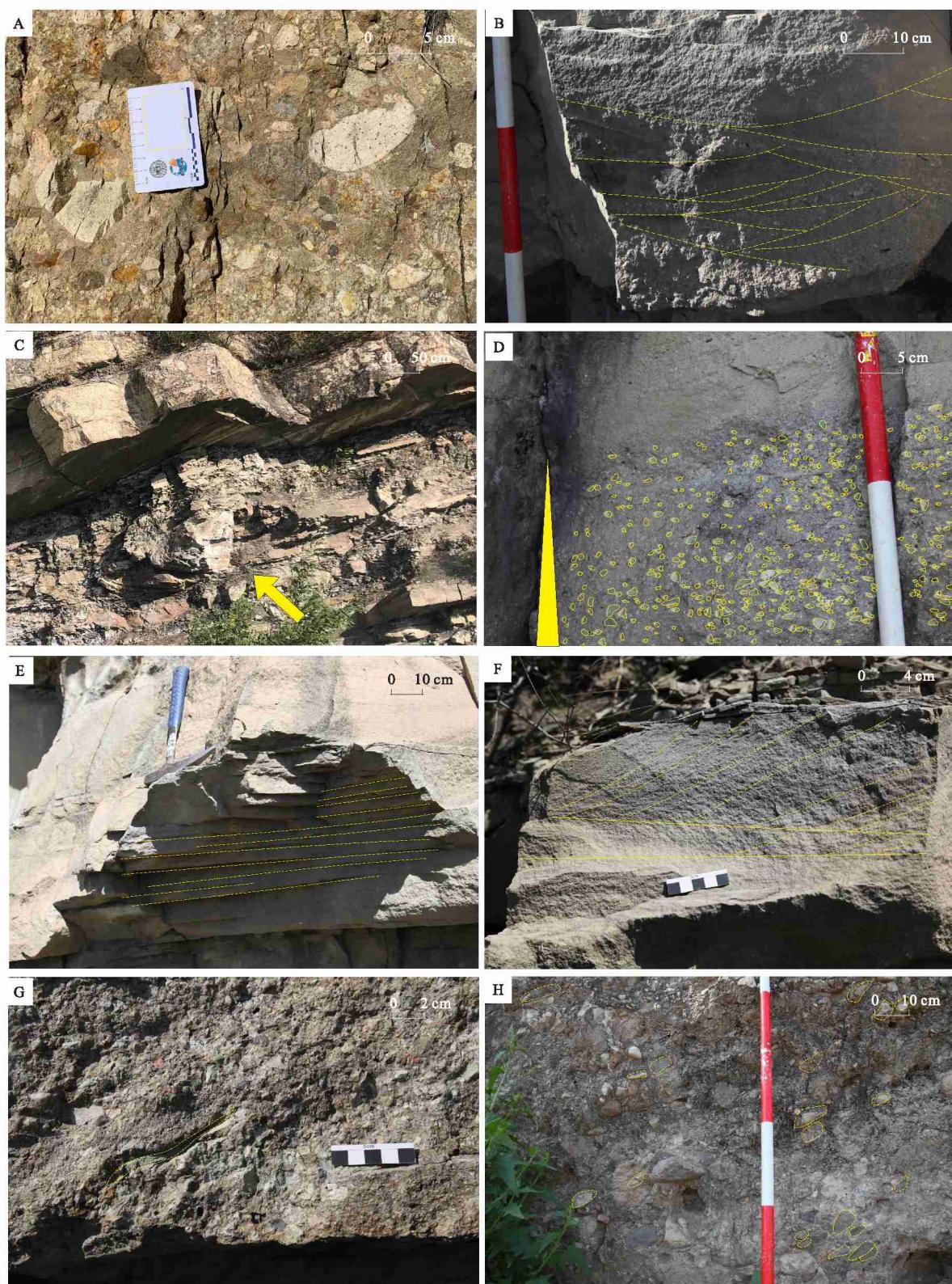
2) 河口坝。本文所称的河口坝为广义的河口坝, 包括水上分流河道携带沉积物在河口处卸载形成的河口坝沉积以及水下分流河道前端的朵叶体沉积。在剖面上呈底平顶凸状(图 6-B)。厚度一般为 1~8 m, 最厚可达 15 m; 宽度为 94~282 m, 宽厚比为 13~121。岩性以砾岩、砂岩为主, 发育块



A—灰色泥岩顶面泥裂构造; B—对称波痕; C—中砾岩底部泥裂铸模; D—不对称波痕; E—对称波痕 (4 组, 波峰走向不一致); F—对称波痕及泥裂铸模; G—对称波痕; H—不对称波痕。A-H 分布位置依次对应图 2 中的 L1-L8

图 4 涞平盆地桑园剖面西瓜园组层面构造特征

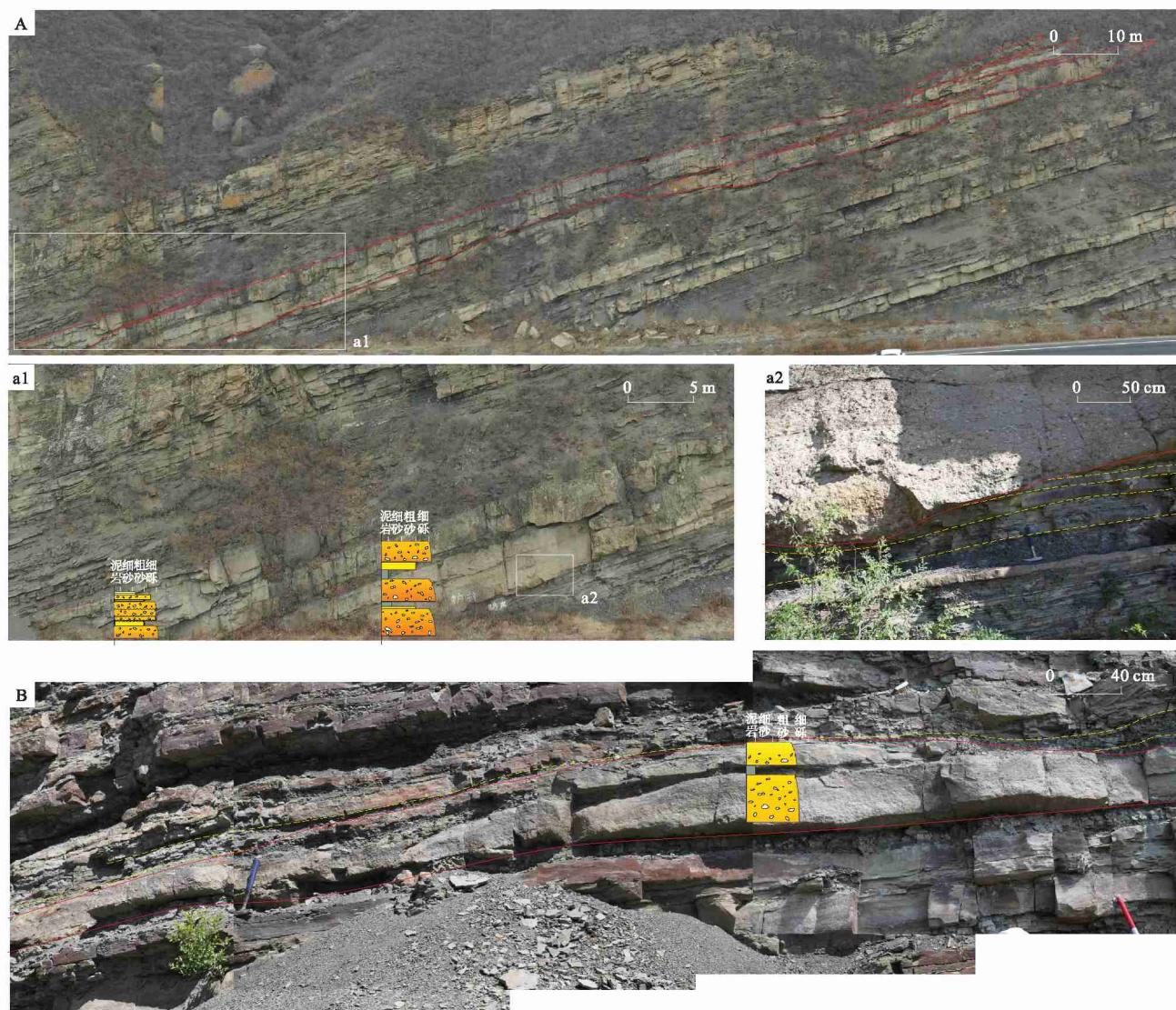
Fig. 4 Bedding plane structures in Sangyuan outcrop of the Xiguayan Formation, Luanping Basin



A—块状构造, 分选差; B—槽状交错层理; C—滑塌构造; D—正粒序层理; E—平行层理; F—楔状交错层理; G—块状, 泥岩撕裂屑; H—砾石具有明显定向性, 分选极差。A-H 分布位置依次对应图2中的F1-F8

图5 滦平盆地桑园剖面西瓜园组典型重力流与牵引流沉积标志

Fig. 5 Typical signs of gravity flow and traction flow deposition in Sangyuan outcrop of the Xiguayuan Formation, Lu'anping Basin



A—水道型砂体下切下伏地层; B—堆积型砂体顶界与两侧地层呈上超关系

图 6 漆平盆地桑园剖面西瓜园组砂体剖面形态及相邻地层充填样式

Fig. 6 Profile characteristics of sandbodies and filling patterns of adjacent strata in Sangyuan outcrop of the Xiguayuan Formation, Luanping Basin

状构造、交错层理及平行层理等, 韵律特征复杂, 垂向上呈正韵律或反韵律。

3) 席状砂。在剖面上呈薄层板状, 侧向厚度变化小, 常与灰绿色、灰黑色泥岩相邻(图 7)。岩性以粉砂岩为主, 含少量砂岩, 发育平行层理、波状交错层理等, 垂向上呈均质韵律或反韵律特征。席状砂厚度一般为 0.34~0.83 m, 宽度为 100~124 m, 宽厚比为 121~354。

3 种成因单元在剖面上最重要的识别标志为剖面形态差异, 即分流河道的顶平底凸状、河口坝的底平顶凸状以及席状砂的薄层板状。应用无人机测

量的数字露头模型, 根据成因单元的剖面形态识别标志, 绘制了桑园剖面成因单元剖面分布图, 对剖面中各成因单元的比例进行了统计分析。在整个剖面中, 砂 (砾) 岩体占比为 31.67%。在砂 (砾) 岩体中, 分流河道与河口坝发育程度高, 占比分别为 53.42% 及 45.27%。席状砂发育程度低, 占比仅为 1.31% (图 8)。

垂向上, 研究区扇三角洲平原—前缘砂 (砾) 岩体与前三角洲—浅湖泥岩互层, 多期砂 (砾) 岩体之间发育较为稳定的泥质层, 部分分流河道会切穿下伏泥质隔层导致 2 期砂砾岩体垂向连通。侧向



图 7 滦平盆地桑园剖面西瓜园组席状砂剖面形态及岩性特征

Fig. 7 Profile characteristics and lithofacies of sheet sand in Sangyuan outcrop of the Xiguayuan Formation, Luanping Basin

上, 部分砂(砾)岩体侧向切叠或叠置, 砂(砾)岩体侧向连通, 另一部分砂(砾)岩体两侧发育较为稳定的粉砂—泥质沉积。砂(砾)岩体的空间叠置样式多样, 包括分流河道侧向—垂向切叠型、分流河道深切河口坝型、分流河道与河口坝侧向叠置型、河口坝侧向叠置型、河口坝孤立型及席状砂孤立型(图9)。在分流河道深切河口坝型中, 分流河道下切能力强, 分流河道下部易发育残余反韵律河口坝, 河口坝厚度与分流河道相比明显较薄。在分流河道与河口坝侧向叠置型中, 当分流河道规模较小时(宽度小于20 m, 厚度小于1.5 m), 分流河道边部易发育反韵律河口坝, 河口坝厚度较薄; 当分流河道规模较大时, 其边部易发育正韵律河口坝。而图8-B中用红色箭头指示的发育在规模较大的分流河道附近的厚层反韵律河口坝砂砾岩体, 其内部结构与上述厚度较薄的反韵律河口坝不同, 为特殊类型的反韵律河口坝砂砾岩体。

4 河口坝粒度韵律特征及形成机理探讨

本节以典型的具有底平顶凸剖面形态的河口坝为对象, 研究河口坝内部垂向粒度韵律特征, 并开展水槽模拟实验, 探讨桑园剖面河口坝不同韵律特征的形成机理。

4.1 河口坝粒度韵律特征

4.1.1 河口坝增生体韵律特征

河口坝通常由多期增生体组成, 增生体为河口坝内部的单一韵律层, 其顶部及底部可见粒度突变界面, 厚度规模差异大, 多介于0.2~4 m之间(图10), 可根据岩性变化将该河口坝划分为5个增生体(红色虚线为岩性突变界面)。自下而上对5个增生体进行编号, ①号增生体岩性以粗砂岩为主; ②号增生体底部为细砾岩, 向上逐渐过渡为粗砂

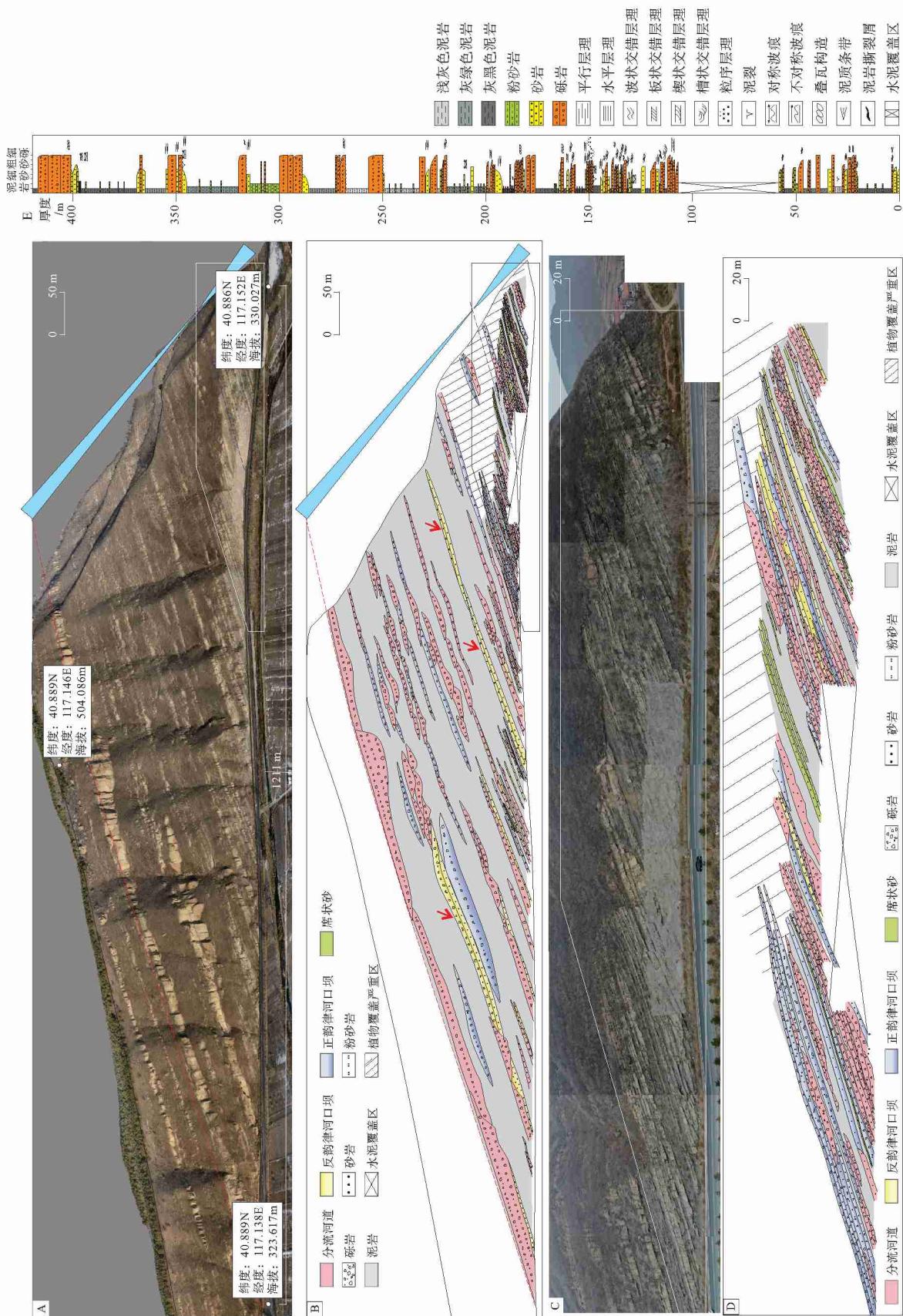


图 8 淩平盆地桑园剖面三角洲成因单元剖面分布图 (C-D 为 A 中白框处局部放大图, E 为桑园剖面柱状图)
 Fig. 8 Profile distribution of genetic units within fan delta in Sangyuan outcrop, Luanning Basin (Figs. C-D are images of the white rectangle in Fig. A, and Fig. E is the column of Sangyuan section)

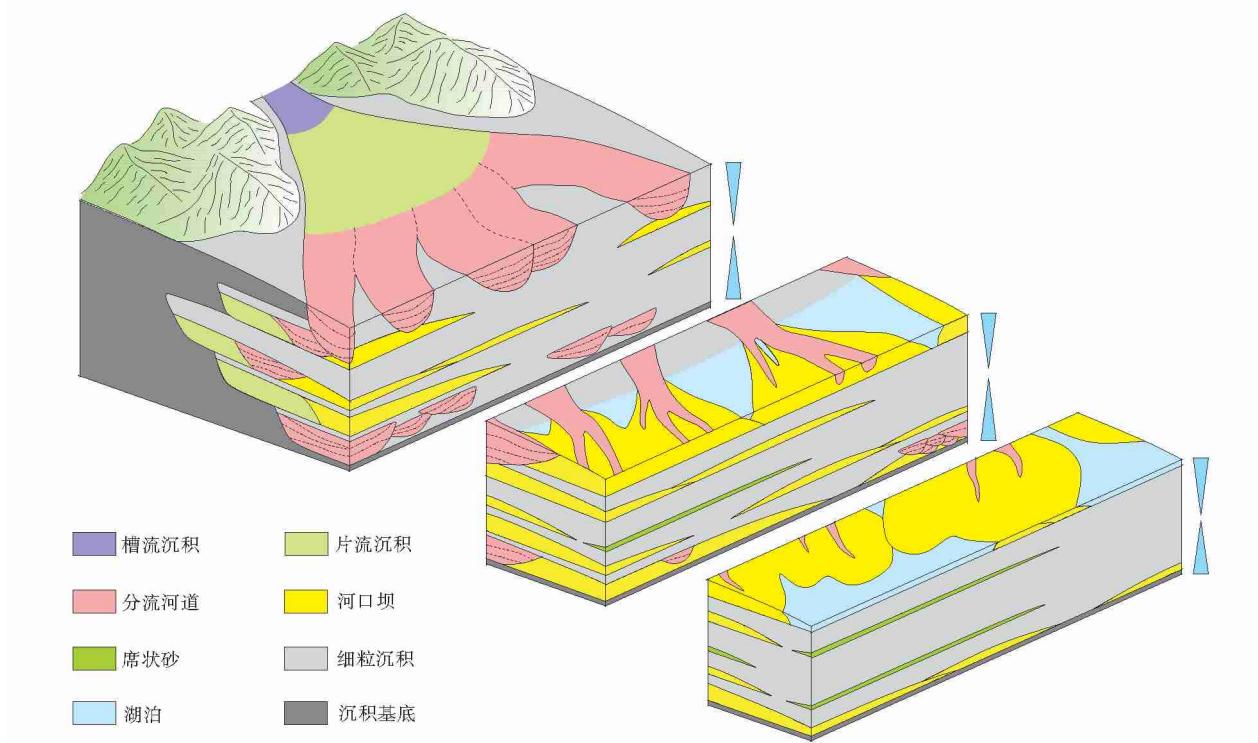


图 9 滦平盆地桑园剖面扇三角洲沉积构型模式图

Fig. 9 Architecture pattern of fan delta of Sangyuan outcrop, Lu'anping Basin

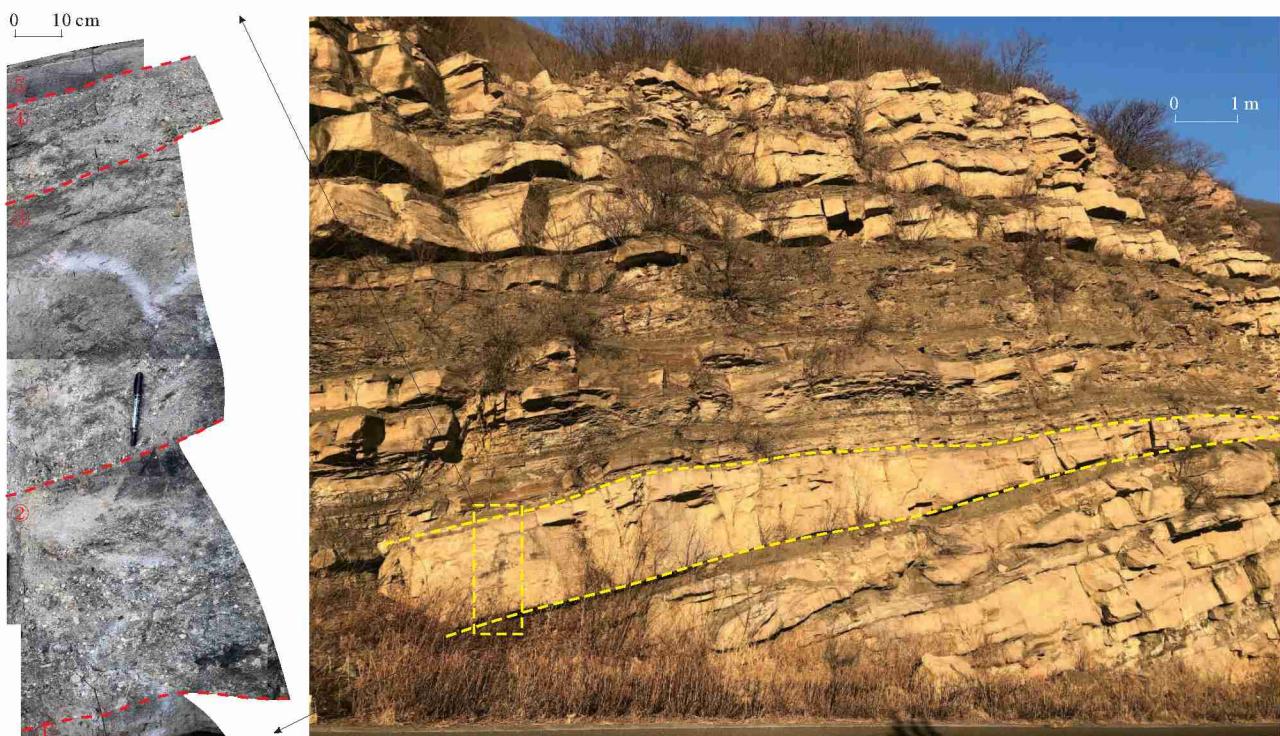


图 10 滦平盆地桑园剖面西瓜园组河口坝增生体沉积特征

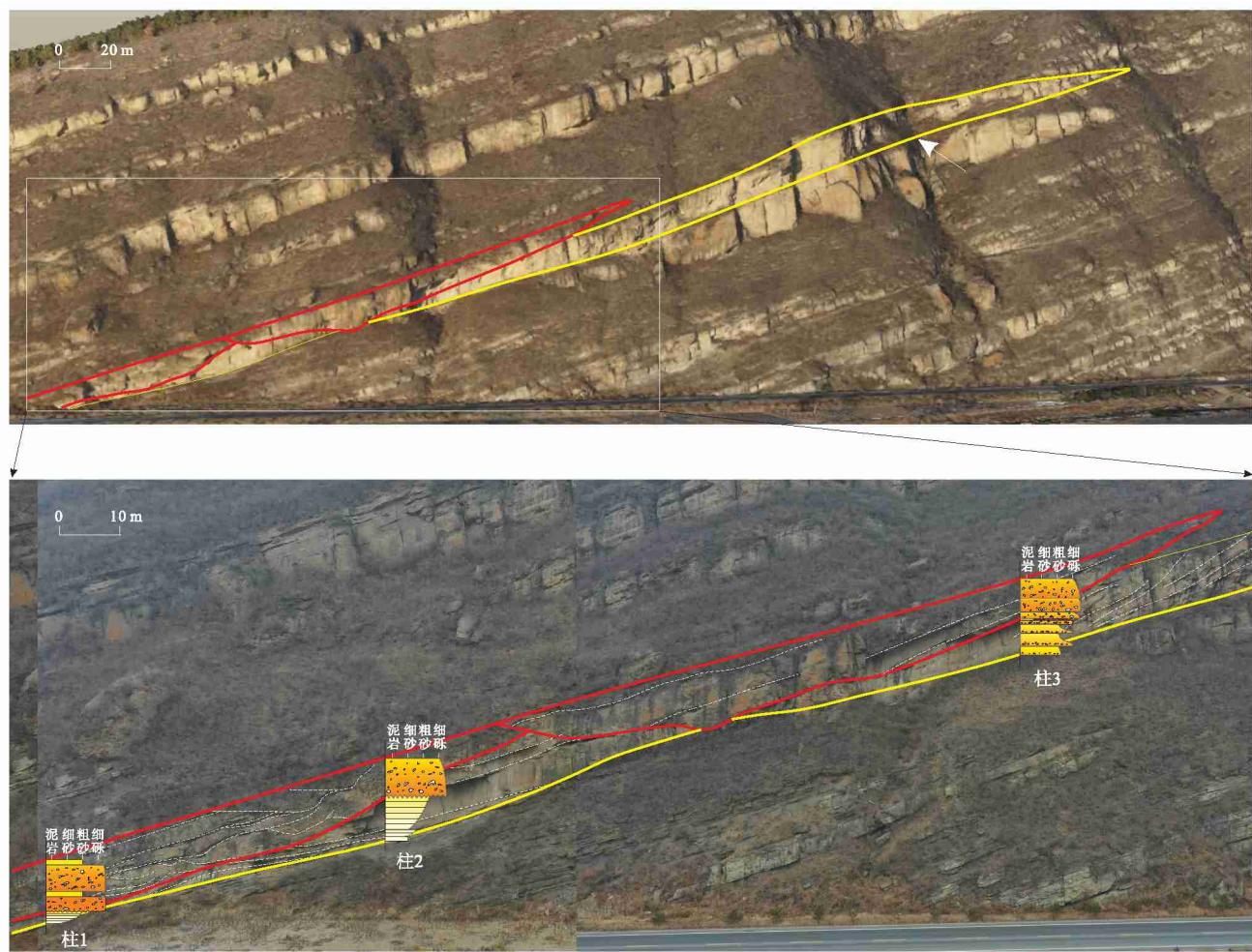
Fig. 10 Sedimentary characteristics of accretions within mouth bar in Sangyuan outcrop of the Xiguayuan Formation, Lu'anping Basin

岩; ③号增生体底部为小砾岩, 向上逐渐过渡为粗砂岩; ④号增生体岩性为小砾岩; ⑤号增生体岩性为中、粗砂岩。

测量分析表明, 增生体的粒度韵律与岩性密切相关。当增生体主要由砂岩组成时, 呈粒度反韵律特征, 底部主要发育平行层理、交错层理中细砂岩, 向上逐渐变为平行层理粗砂岩。如图 11 柱 1 及柱 2 所示, 分流河道砂体下伏的河口坝由多个砂质增生体组成, 每个增生体均呈反韵律特征。下部增生体规模小、厚度薄 (约为 0.7 m), 岩性以中细砂岩为主, 向上增生体规模变大、厚度变厚 (约为 5.5 m), 且沉积物粒度变粗, 发育平行层理中细砂岩—粗砂岩。增生体顶部被分流河道侵蚀, 其间发育冲刷面。

当增生体主要由砾岩组成 (砾岩厚度大于 30%) 时, 呈粒度正韵律特征, 底部以块状砾岩为主, 向上逐渐变为块状粗砂岩、交错层理粗砂岩等。如图 11 柱 3 所示, 分流河道砂体下伏的河口坝由多个砾质增生体组成, 每个增生体均呈正韵律特征, 增生体底部发育块状小砾岩或块状细砾岩, 顶部发育块状粗砂岩。增生体顶部被分流河道侵蚀, 其间发育冲刷面。

笔者在具有不同韵律特征的河口坝增生体内部取样并进行粒度分析。统计表明, 沉积物粒度中值小于 $1000 \mu\text{m}$ 时, 河口坝内部增生体呈现出反韵律的特征; 沉积物粒度中值大于 $1000 \mu\text{m}$ 时, 河口坝内部增生体多呈现出正韵律特征 (图 12)。沉积物粒度差异为影响河口坝内部增生体



分流河道下切河口坝, 白色箭头处由于山谷造成河口坝底部出现视觉上的轻微上凸

图 11 涞平盆地桑园剖面西瓜园组河口坝内部不同岩性增生体韵律特征

Fig. 11 Vertical grain-size trend of sandy and gravelly accretions within mouth bar in Sangyuan outcrop of the Xiguayuan Formation, Lu'anping Basin

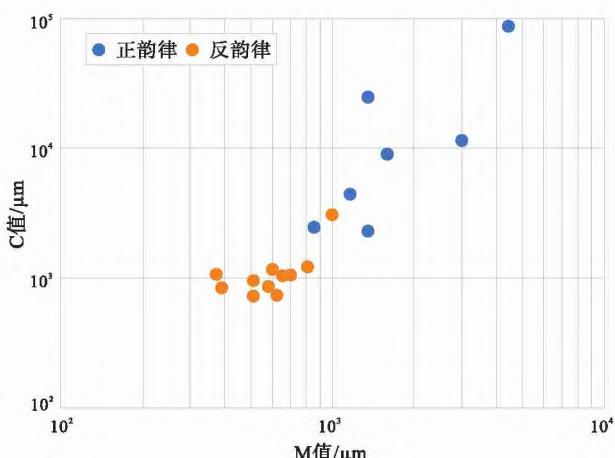


图 12 漳平盆地桑园剖面西瓜园组扇三角洲河口坝内部增生体韵律性与沉积物粒度的关系

Fig. 12 Relationship between vertical grain-size trend of accretion bodies and grain size of sediment within mouth bar in Sangyuan outcrop of the Xiguayuan Formation, Lu'anping Basin

韵律性的重要因素。

4.1.2 河口坝整体韵律特征

由多期增生体叠置而成的河口坝，既可呈反韵律特征又可呈正韵律特征。

反韵律河口坝：整体呈粒度反韵律，可呈现多期反韵律增生体叠置、正韵律增生体叠置及正反韵律增生体叠置。图 11 展示了多期反韵律增生体叠置及多期正韵律增生体叠置的反韵律河口坝特征，多期反韵律增生体叠置的河口坝底部主要发育平行层理细砂岩，向上逐渐变为平行层理中砂岩及平行层理粗砂岩；多期正韵律增生体叠置的河口坝底部以块状砂岩为主，向上逐渐变粗，以块状砾岩为主。图 13 则为正反韵律增生体叠置而成的反韵律河口坝，底部以平行层理中细砂岩、槽状交错层理砂岩为主，向上逐渐变粗，以块状砾岩为主。砂（砾）岩体整体呈现出底平顶凸的剖面形态特征，

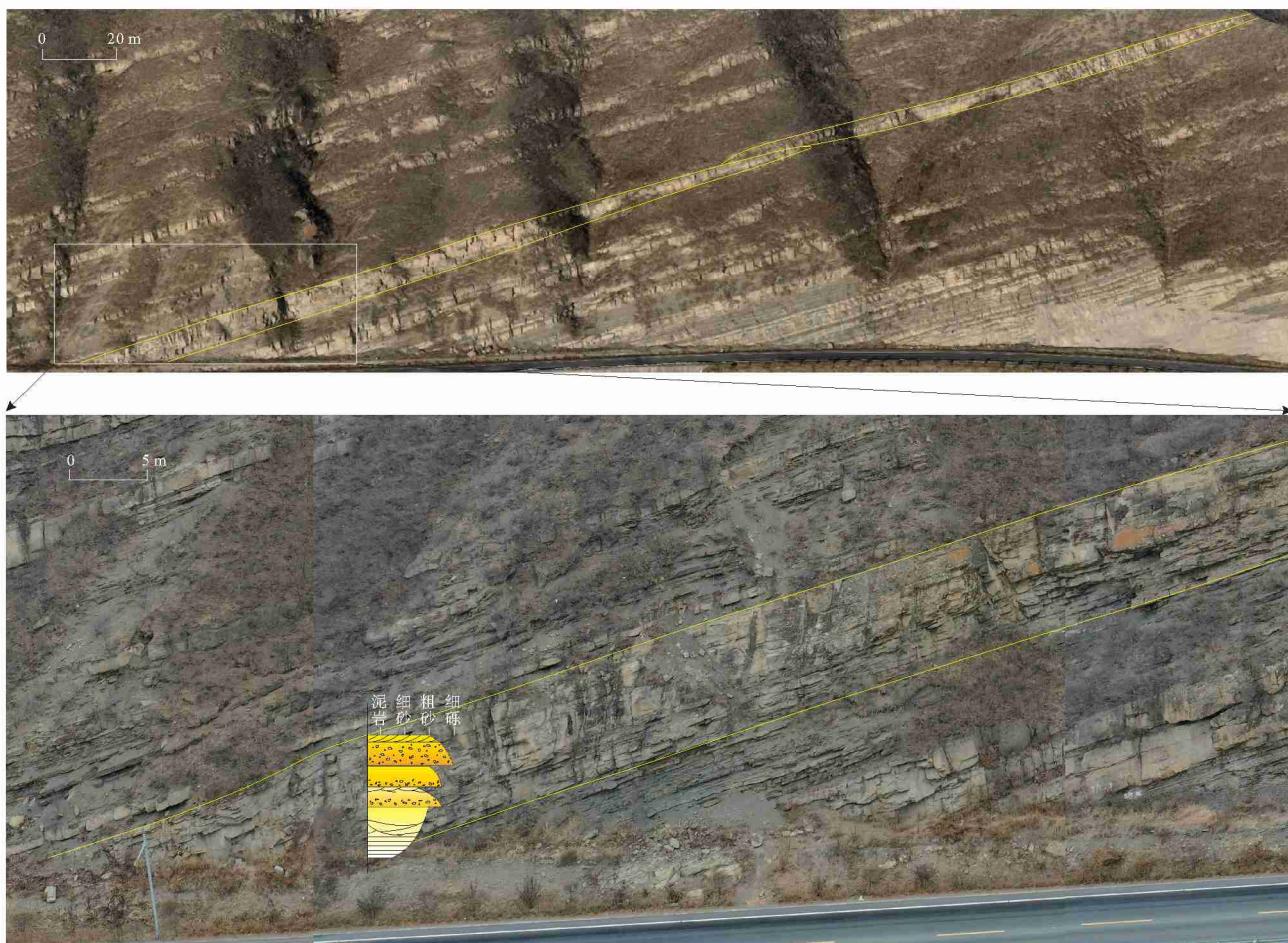


图 13 涪平盆地桑园剖面西瓜园组多期正反韵律增生体叠置而成的反韵律河口坝沉积特征

Fig. 13 Sedimentary characteristics of coarsening-upward mouth bar which is characterized by fining-up successions coupled with coarsening-up successions in Sangyuan outcrop of the Xiguayuan Formation, Luoping Basin

其内部未见分流河道下切及顶平底凸的分流河道标志性剖面特征(图 13)。因此,该砂(砾)岩体为完整的河口坝沉积,下部发育反韵律增生体,岩性为砂岩;中上部发育多期正韵律增生体,岩性以砾岩及粗砂岩为主。其中,由正韵律增生体叠置及正反韵律增生体叠置而成的反韵律河口坝为图 8-B 中特征类型的反韵律河口坝砂砾岩体,其内部河口坝增生体仍多呈现正韵律特征。在桑园剖面河口坝砂(砾)岩体中,反韵律河口坝占比为 43.05%。

正韵律河口坝:整体呈粒度正韵律,内部呈现多期正韵律增生体叠置。岩性以砾岩为主,砂岩含量相对较少,发育平行层理及块状构造。如图 14 所示,正韵律河口坝底部以块状砾岩为主,向上逐渐转变为

块状砂岩及平行层理砂岩。据统计,在桑园剖面河口坝砂(砾)岩体中,正韵律河口坝占比为 56.95%。

4.2 河口坝粒度韵律特征的形成机理探讨

沉积物由河道搬运至湖盆时,河口处沉积物的沉积主要受底床摩擦力及惯性力的共同影响(Wright, 1977; Postma, 1990; Wang *et al.*, 2015)。在摩擦力主控的水流扩散模式下,沉积物粒度沿前积层面逐渐减小,增生体易显示出反韵律特征;而在惯性力主控的水流扩散模式下,沉积物粒度沿前积层面逐渐增大,增生体易显示出正韵律特征。河口处的水流扩散模式取决于河口处的反映流体流态的弗劳德数(Fr)与雷诺数(Re)的大小(Wright, 1977),



图 14 漣平盆地桑园剖面西瓜园组多期正韵律增生体叠置而成的正韵律河口坝沉积特征

Fig. 14 Sedimentary characteristics of fining-upward mouth bar which is characterized by repeating fining-upward packages in Sangyuan outcrop of the Xiguayuan Formation, Lu'anping Basin

$$Fr = v / \sqrt{gh_0} \quad (1)$$

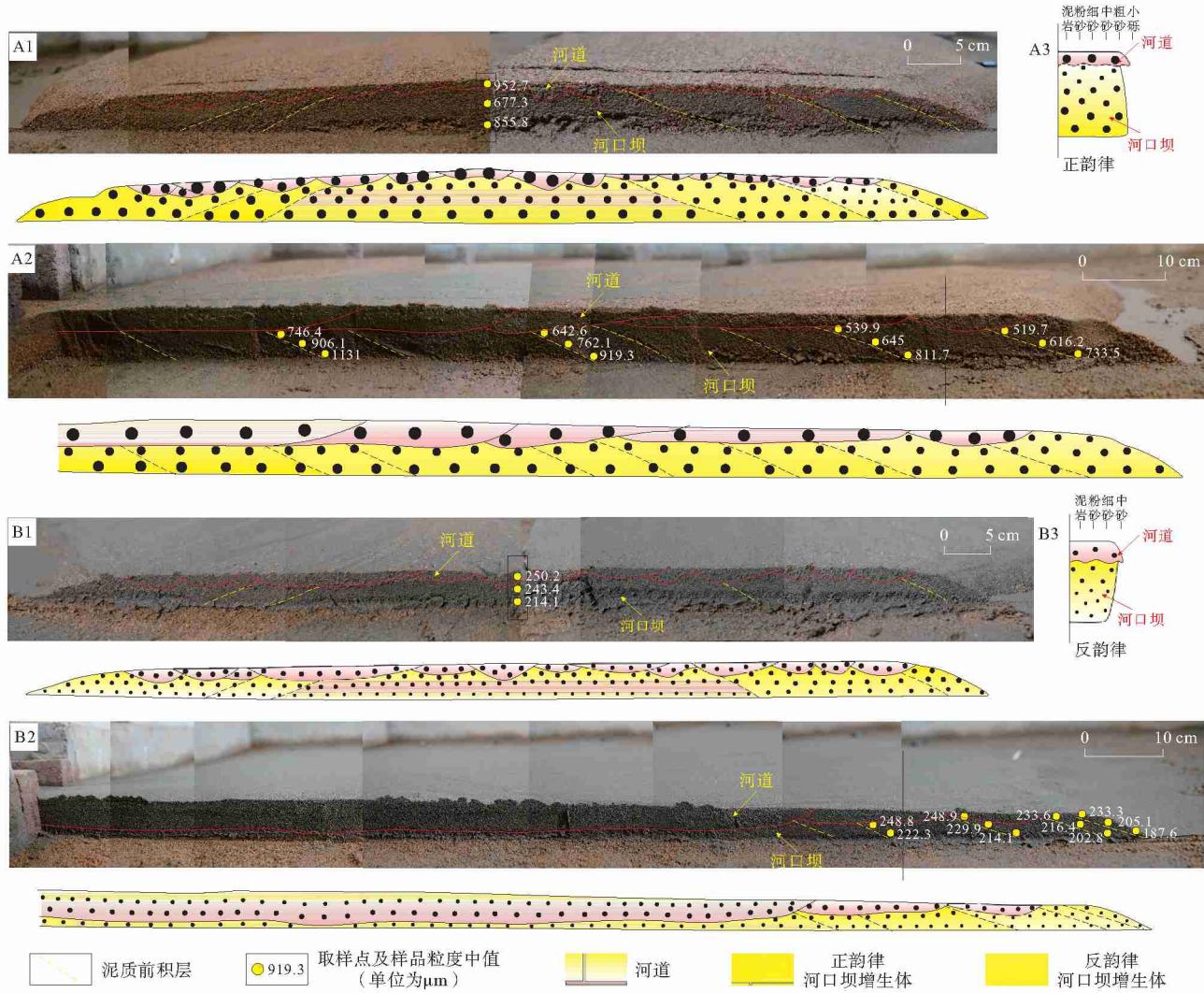
$$Re = v \left(h_0 \frac{b_0}{2} \right)^{\frac{1}{2}} / \mu \quad (2)$$

其中, v 为河口处平均流速, h_0 与 b_0 分别为河口河道深度及宽度, μ 为流体黏度。前人研究表明, 当 Fr 大于 16.1 或者 Re 大于 2300 时, 流体表现为完全湍流状态, 河口处水流扩散模式为惯性力主导 (Hayashi *et al.*, 1967; Barkley *et al.*, 2015)。当 Fr 小于 16.1 或 Re 小于 2300 时, 水流扩散模式逐渐转变为摩擦力主控。

从弗劳德数与雷诺数的计算公式可以看出, 在同一河口系统下, 影响两者的主要参数为流体流速及黏度。与流速相关的地质因素包括流量、沉积物

底形坡度等; 与黏度相关的地质因素包括沉积物粒度、泥质含量等。由于野外露头上仅能观察到沉积物粒度差异, 因此这里重点探讨沉积物粒度对河口坝增生体韵律性的影响。

笔者分别对粗粒和细粒河口坝增生体在河口处的沉积过程进行了水槽模拟, 观察不同粒度沉积物沿前积层面的排列方式。沉积物粒度的设置参考桑园剖面扇三角洲河口坝增生体韵律差异的粒度临界值 (1000 μm), 同时考虑到水槽模拟实验规模较野外露头沉积小, 设置粗粒沉积物粒度中值为 712 μm , 细粒沉积物粒度中值为 228 μm 。在沉积过程中, 流量、初始流速、湖平面及沉积底形坡度始终保持一致。



A 为粗粒河口坝: A1 为切物源剖面, A2 为顺物源剖面, A3 为柱状图 (展示 A1 黑框处及 A2 黑色实线处沉积物垂向分布情况)

B 为细粒河口坝: B1 为切物源剖面, B2 为顺物源剖面, B3 为柱状图 (展示 B1 黑框处及 B2 黑色实线处沉积物垂向分布情况)

图 15 水槽模拟实验的粗粒河口坝与细粒河口坝增生体内部沉积物分布情况

Fig. 15 Sediment distribution in accretion bodies of coarse-grained and fine-grained mouth bars in flume experiments

研究发现, 在细粒河口坝增生体水槽模拟实验中, 粒度较粗的沉积物沉积在前积层近端, 粒度较细的沉积物搬运距离较远, 在远端沉积(图 15-A2); 而在粗粒河口坝增生体水槽模拟实验中, 沉积物沿前积层面沉积时, 粒度较粗的沉积物沉积在远端, 较细粒沉积物在近端沉积(图 15-B2)。这是由于沉积物粒度越细, 流体黏度随细粒物质含量增高而增大, 导致河口处 Re 降低, 水流扩散模式为摩擦力主控, 沉积物沿前积层面沉积时, 相对粗粒物质受到较大底床摩擦力的阻碍, 沉积在前积层近端。而在粗粒实验中, 沉积物在河口处的沉积过程主要受惯性力影响, 相对粗粒物质在较大惯性力的控制下沉积在远端。

沉积物在湖盆水体内向前搬运并不断沉积, 沉积物粒度随搬运距离增加而减小, 但对于同一个增生体来说, 沉积物粒度减小的幅度很小, 几乎可以忽略不计, 因此在底床摩擦力主控的沉积模式下河口坝内部细粒增生体呈反韵律特征, 在惯性力主控的沉积模式下河口坝内部粗粒增生体呈正韵律特征(图 15)。

河口坝的整体韵律性受控于增生体的垂向叠置样式。当向上叠置的增生体变粗时, 河口坝呈反韵律特征; 而当向上叠置的增生体变细时, 河口坝呈正韵律特征。

5 结论

1) 漾平盆地桑园剖面西瓜园组扇三角洲前缘既发育分流河道, 又发育河口坝, 前者在整个剖面中占砂(砾)岩体的 53.42%, 后者占 45.27%, 另外还包含 1.31% 的席状砂。河口坝在剖面上呈底平顶凸状, 厚度一般为 1~8 m, 最大厚度可达 15 m; 宽度为 94~282 m, 宽厚比为 13~121; 岩性以砾岩、砂岩为主, 发育块状构造、交错层理及平行层理等, 垂向粒度韵律复杂, 即可呈正韵律又可呈反韵律。

2) 沉积物粒度对扇三角洲河口坝内部增生体的韵律具有较大的影响。当河口坝增生体主要由砂岩组成时, 主要呈反韵律特征, 其河口水流扩散模式为摩擦力主控, 粒度较粗的沉积物受到较大底床摩擦力的阻碍, 沉积在前积层近端, 粒度较细的沉积物搬运距离较远而在远端沉积, 从而形成反韵律增生体; 而当河口坝增生体主要由砾岩组成时, 主

要呈正韵律特征, 其河口水流扩散模式为惯性力主控, 粒度较粗的沉积物在较大惯性力的控制下沉积在远端, 较细粒沉积物则在近端沉积, 从而形成正韵律河口坝增生体。河口坝整体韵律受控于增生体的垂向叠置样式, 既可呈反韵律特征又可呈正韵律特征。

致谢 中国石油大学(北京)朱筱敏教授、纪友亮教授在文章撰写阶段提供了宝贵意见, 在此表示衷心感谢。感谢 3 位稿件评审专家给稿件修改提出的很好的意见和建议。

参考文献(References)

- 白立科, 邱隆伟, 杨勇强, 杜玉山, 王军, 韩晓彤, 董道涛, 杨保良, 汪丽芳. 2020. 近岸水下扇微相划分研究及意义初探: 以滦平盆地下白垩统西瓜园组为例. 地质学报, 94(8): 2446~2459. [Bai L K, Qiu L W, Yang Y Q, Du Y S, Wang J, Han X T, Dong D T, Yang B L, Wang L F. 2020. Preliminary microfacies division and significance study of nearshore subaqueous fan: a case study from the Lower Cretaceous Xiguayuan Formation, Lu'anping Basin. Acta Geologica Sinica, 94(8): 2446~2459]
- 操应长, 燕苗苗, 蔡克来, 吴松涛, 朱宁, 朱如凯. 2019. 玛湖凹陷夏子街地区三叠系百口泉组砂砾岩储层特征及控制因素. 沉积学报, 37(5): 945~956. [Cao Y C, Yan M M, Xi K L, Wu S T, Zhu N, Zhu R K. 2019. The characteristics and controlling factors of gluttenite reservoir in the Triassic Baikouquan Formation, Xiaojie area, Mahu depression. Acta Sedimentologica Sinica, 37(5): 945~956]
- 耳闯, 顾家裕, 牛嘉玉, 程妮, 韩少飞. 2010. 重力驱动作用: 滦平盆地下白垩统西瓜园组沉积时期主要的搬运机制. 地质论评, 56(3): 312~320. [Er C, Gu J Y, Niu J Y, Cheng N, Han S F. 2010. Gravity-driven processes: a more important transport mechanism of deposits in Xiguayuan Formation of Lower Cretaceous in Lu'anping Basin, Northern Hebei. Geological Review, 56(3): 312~320]
- 郭建林, 贾爱林, 何东博, 唐俊伟, 纪友亮. 2007. 滦平上侏罗统下白垩统扇三角洲露头层序地层学研究. 中国地质, 34(4): 628~635. [Guo J L, Jia A L, He D B, Tang J W, Ji Y L. 2007. Sequence stratigraphy of Upper Jurassic-Lower Cretaceous fan-delta outcrops in Lu'anping. Geology in China, 34(4): 628~635]
- 贾爱林, 陈亮, 穆龙新, 黄岩石. 2000. 扇三角洲露头区沉积模拟研究. 石油学报, 21(6): 107~110, 133. [Jia A L, Chen L, Mu L X, Huang Y S. 2000. A study on sedimentary simulation of fan delta outcrop. Acta Petrolei Sinica, 21(6): 107~110, 133]
- 贾爱林, 何东博, 郭建林, 黄石岩, 陈亮. 2004. 扇三角洲露头层序演化特征及其对砂岩储集层的控制作用. 石油勘探与开发, 31(5): 103~105. [Jia A L, He D B, Guo J L, Huang S Y, Chen L. 2004. Sequence evolution of fan-delta outcrops and its controlling on

- the sandstone reservoirs. *Petroleum Exploration and Development*, 31(S1): 103-105]
- 贾珍臻. 2016. 扇三角洲储层构型及数值模拟研究. 中国石油大学(华东)博士论文: 20-31. [Jia Z Z. 2016. Study on fan delta reservoir architecture and numerical simulation. Doctoral dissertation of China University of Petroleum(East China): 20-31]
- 焦养泉,周海民,庄新国,刘少风,杨正科,马美媛. 1998. 扇三角洲沉积体系及其与油气聚集关系. *沉积学报*, 16(1): 70-71. [Jiao Y Q, Zhou H M, Zhuang X G, Liu S F, Yang Z K, Ma M Y. 1998. Fan deltaic depositional systems and their relationship to oil and gas accumulation. *Acta Sedimentologica Sinica*, 16(1): 70-71]
- 李胜利,李贤兵,晋剑利,崔刚,刘圣,吕俊平,曹睿,刘腾国. 2018. 断陷湖泊水下扇类型与分布模式. *古地理学报*, 20(6): 963-972. [Li S L, Li X B, Jin J L, Cui G, Liu S, Lü J P, Cao R, Liu T G. 2018. Classification and sedimentary distribution pattern of subaqueous fan in fault lacustrine environment. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 20(6): 963-972]
- 李寅. 2003. 滦平盆地西瓜园组扇三角洲沉积体系构成及其特征. *地球学报*, 24(4): 353-356. [Li Y. 2003. Fan-deltaic depositional systems of the Xiguayuan Formation in Luoping Basin. *Acta Geoscientia Sinica*, 24(4): 353-356]
- 林煜,吴胜和,岳大力,闫军生,李斌,王丽琼. 2013. 扇三角洲前缘储层构型精细解剖: 以辽河油田曙2-6-6区块杜家台油层为例. *天然气地球科学*, 24(2): 335-344. [Lin Y, Wu S H, Yue D L, Yan J S, Li B, Wang L Q. 2013. Fine anatomizing reservoir architecture of fan-delta front: a case study on Dujitai reservoir in Shu 2-6-6 Block, Liaohe, Oilfield. *Natural Gas Geoscience*, 24(2): 335-344]
- 刘策,于炳松,蒋锐,谭聪,罗忠,刘润达. 2017. 湖盆重力流沉积特征及模式: 以鄂尔多斯盆地及滦平盆地为例. *地质科技情报*, 36(5): 133-142. [Liu C, Yu B S, Jiang R, Tan C, Luo Z, Liu R D. 2017. Sedimentary feature and mode of gravity flow in lacustrine basin: example from Ordos Basin and Luoping Basin. *Geological Science and Technology Information*, 36(5): 133-142]
- 罗平. 2007. 油气储层重点实验室论文集 2004-2005. 北京: 石油工业出版社, 142-154. [Luo P. 2007. Proceedings of Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir in 2004-2005. Beijing: Petroleum Industry Press, 142-154]
- 裘亦楠,肖敬修,薛培华. 1982. 湖盆三角洲分类的探讨. *石油勘探与开发*, 9(1): 1-11. [Qiu Y N, Xiao J X, Xue P H. 1982. Discussion on category of lake deltas. *Petroleum Exploration and Development*, 9(1): 1-11]
- 谭程鹏,于兴河,李胜利,许磊,陈彬滔,李顺利,单新. 2014. 淮噶尔盆地南缘四棵树剖面八道湾组扇三角洲沉积特征. *现代地质*, 28(1): 181-189. [Tan C P, Yu X H, Li S L, Xu L, Chen B T, Li S L, Shan X. 2014. Sedimentary characteristics of fan delta of the Baodaowan Formation, Sikeshu Section, Southern Junggar Basin. *Geoscience*, 28(1): 181-189]
- 唐勇,徐洋,瞿建华,孟祥超,邹志文. 2014. 玛湖凹陷百口泉组扇三角洲群特征及分布. *新疆石油地质*, 35(6): 628-635. [Tang Y, Xu Y, Qu J H, Meng X C, Zou Z W. 2014. Fan-delta group characteristics and its distribution of the Triassic Baikouquan reservoirs in Mahu sag of Junggar Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 35(6): 628-635]
- 田树刚,庞其清,牛绍武,李佩贤,柳永清. 2004. 冀北滦平盆地侏罗系—白垩系界线候选层型剖面初步研究. *地质通报*, 23(12): 1170-1179. [Tian S G, Pang Q Q, Niu S W, Li P X, Liu Y Q. 2004. Terrestrial Jurassic-Cretaceous boundary stratotype candidate in Luoping Basin, northern Hebei. *Geological Bulletin of China*, 23(12): 1170-1179]
- 吴胜和,熊绮华,龚姚进,柏森林,崔麟典. 1994. 陡坡型和缓坡型扇三角洲及其油气储层意义. *石油学报*, 15(S1): 52-59. [Wu S H, Xiong Q H, Gong Y J, Bai S L, Cui L D. 1994. Steep and gentle slope-pattern fan deltas and their potential as hydrocarbon reservoir. *Acta Petrolei Sinica*, 15(S1): 52-59]
- 武法东,陈永进,侯宇安,张峰,李寅. 2004. 滦平盆地沉积-构造演化及高精度层序地层特征. *地球科学*, 29(5): 625-630. [Wu F D, Chen Y J, Hou Y A, Zhang F, Li Y. 2004. Characteristics of sedimentary-tectonic evolution and high-resolution sequence stratigraphy in Luoping Basin. *Earth Science*, 29(5): 625-630]
- 武法东,陈永进,李寅,焦养泉. 2000. 河北滦平盆地构造演化及对扇三角洲发育的控制作用. *现代地质*, 14(2): 179-184. [Wu F D, Chen Y J, Li Y, Jiao Y Q. 2000. Tectonic evolutions and their control on development of fan-deltaic depositional system in the Luoping Basin. *Geoscience*, 14(2): 179-184]
- 鲜本忠,王永诗,周廷全,孙立东. 2007. 断陷湖盆陡坡带砂砾岩体分布规律及控制因素: 以渤海湾盆地济阳坳陷车镇凹陷为例. *石油勘探与开发*, 34(4): 429-436. [Xian B Z, Wang Y S, Zhou T Q, Sun L D. 2007. Distribution and controlling factors of glutinite bodies in the active region of a rift basin: an example from Chezhen sag, Bohai Bay Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 34(4): 429-436]
- 项华,张乐. 2007. 滦平盆地西瓜园组扇三角洲露头层序特征. *油气地质与采收率*, 14(6): 20-22,112. [Xiang H, Zhang L. 2007. Sequence characters of the fan delta outcrop of Xiguayuan Formation in Luoping Basin. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 14(6): 20-22,112]
- 杨保良,邱隆伟,杨勇强,董道涛,周士博,刘兆雯,白立科. 2021. 滦平盆地陡坡带下白垩统西瓜园组水下粗碎屑岩沉积特征及搬运机制. *地球科学*, 49(9): 3258-3277. [Yang B L, Qiu L W, Yang Y Q, Dong D T, Zhou S B, Liu Z W, Bai L K. 2021. Sedimentary characteristics and transport mechanism of subaqueous coarse clastic rocks in the Lower Cretaceous Xiguayuan Formation in the steep slope zone of Luoping Basin. *Earth Science*, 49(9): 3258-3277]
- 杨延强,吴胜和. 2015. 陡坡型扇三角洲上一类特殊类型河口坝的研究. *中国矿业大学学报*, 44(1): 97-103. [Yan Y Q, Wu S H. 2015. Study of a unique type of mouth bar deposition in steep slope-type fan deltas. *Journal of China University of Mining & Technology*, 44(1): 97-103]
- 印森林,谭媛元,张磊,冯伟,刘善勇,晋静. 2018. 基于无人机倾斜摄影

- 影的三维露头地质建模: 以山西吕梁市坪头乡剖面为例. 古地理学报, 20(5) : 909–924. [Yin S L, Tan Y Y, Zhang L, Feng W, Liu S Y, Jin J. 2018. 3D outcrop geological modeling based on UAV oblique photography data: a case study of Pingtouxiang section in Lüliang City, Shanxi Province. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition) , 20(5) : 909–924]
- 于兴河, 瞿建华, 谭程鹏, 张磊, 李晓路, 高照普. 2014. 玛湖凹陷百口泉组扇三角洲砾岩岩相及成因模式. 新疆石油地质, 35(6) : 619–627. [Yu X H, Qu J H, Tan C P, Zhang L, Li X L, Gao Z P. 2014. Conglomerate lithofacies and origin models of fan deltas of Baikouquan Formation in Mahu sag, Junggar Basin. *Xinjiang Petroleum Geology* , 35(6) : 619–627]
- 于兴河, 张道建, 鄢建军, 雷明, 吴乃苓, 孟卫工, 孙洪斌. 1999. 辽河油田东、西部凹陷深层沙河街组沉积相模式. 古地理学报, 1(3) : 40–49. [Yu X H, Zhang D J, Gao J J, Lei M, Wu N L, Meng W G, Sun H B. 1999. Depositional facies and models of deep burial strata of the Shahejie Formation in the eastern and western depressions of Liaohe oil field. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition) , 1(3) : 40–49]
- 张昌民, 朱锐, 尹太举, 尹艳树. 2015. 扇三角洲沉积学研究进展. 新疆石油地质, 36(3) : 362–368. [Zhang C M, Zhu R, Yin T J, Yin Y S. 2015. Advances in fan deltaic sedimentology. *Xinjiang Petroleum Geology* , 36(3) : 362–368]
- 张春生, 刘忠保, 施东, 贾爱林. 2000. 扇三角洲形成过程及演变规律. 沉积学报, 18(4) : 521–526. [Zhang C S, Liu Z B, Shi D, Jia A L. 2000. Formed proceeding and evolution disciplinarian of fan delta. *Acta Sedimentologica Sinica* , 18(4) : 521–526]
- Barkley D, Song B F, Mukund V, Lemoult G, Avila M, Hof B. 2015. The rise of fully turbulent flow. *Nature* , 526: 550–553.
- Benvenuti M. 2003. Facies analysis and tectonic significance of lacustrine fan-deltaic successions in the Pliocene-Pleistocene Mugello Basin, Central Italy. *Sedimentary Geology* , 157(3–4) : 197–234.
- Billi P, Magi M, Sagri M. 1991. Pleistocene lacustrine fan delta deposits of the Valdarno Basin, Italy. *Journal of Sedimentary Petrology* , 61(2) : 280–290.
- Cope T D, Graham S A. 2007. Upper crustal response to Mesozoic tectonism in western Liaoning, North China, and implications for lithospheric delamination. *Geological Society London Special Publications* , 280(1) : 201–222.
- Cope T, Luo P, Zhang X Y, Zhang X J, Song J M, Zhou G, Shultz M R. 2010. Structural controls on facies distribution in a small half-graben basin: Luanping Basin, north China. *Basin Research* , 22(1) : 33–44.
- Davis G A, Zheng Y D, Wang C, Darby B J, Zhang C H, Gehrels G. 2001. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and Liaoning Provinces, northern China. *Memoir of the Geological Society of America* , 194: 171–197.
- Fabbricatore D, Robustelli G, Muto F. 2014. Facies analysis and depositional architecture of shelf-type deltas in the Crati Basin (Calabrian arc, south Italy) . *Italian Journal of Geoscience* , 133(1) : 131–148.
- García-García F, Fernández J, Viseras U, Soria J M. 2006. Architecture and sedimentary facies evolution in a delta stack controlled by fault growth (Betic Cordillera, southern Spain, late Tortonian) . *Sedimentary Geology* , 185(1–2) : 79–92.
- Hayashi J, Shuto N, Kawakami K. 1967. Basic study on the diffusion of warm water jets discharged from power plants into bays. *Coastal Engineering in Japan* , 10(1) : 129–142.
- Jia H B, Ji H C, Wang L S, Gao Y, Wang Z K, Tyrrell S. 2018. Controls of a Triassic fan-delta system, Junggar Basin, NW China. *Geological Journal* , 53(6) : 3093–3109.
- Meng Q R, Hu J M, Jin J Q, Zhang Y, Xu D F. 2003. Tectonics of the late Mesozoic wide extensional basin system in the China–Mongolia border region. *Basin Research* , 15(3) : 397–415.
- Postma G. 1990. An analysis of the variation in delta architecture. *Terra Review* , 2(2) : 124–130.
- Ren J, Tamaki K, Li S, Zhang J. 2002. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in eastern China and adjacent areas. *Tectonophysics* , 344(3) : 175–205.
- Wagoner Dijk M, Postma G, Kleinhans M G. 2009. Autocyclic behaviour of fan deltas: an analogue experimental study. *Sedimentology* , 56(5) : 1569–1589.
- Wang J H, Jiang Z X, Zhang Y F, Gao L M, Wei X J, Zhang W Z, Liang Y, Zhang H Y. 2015. Flume tank study of surface morphology and stratigraphy of a fan delta. *Terra Nova* , 27(1) : 42–53.
- Wei H H, Meng Q R, Wu G L, Li L. 2012. Multiple controls on rift basin sedimentation in volcanic settings: Insights from the anatomy of a small Early Cretaceous basin in the Yanshan belt, northern North China. *GSA Bulletin* , 124(3–4) : 380–399.
- Wright L D. 1977. Sediment transport and deposition at river mouths: a synthesis. *Geological Society of America Bulletin* , 88(6) : 857–868.
- Yan D Z, Xu H M, Xu Z H, Lei Z C, Tian M, Cheng L, Ma Y H, Wang Z L, Ostadhassan M. 2020. Sedimentary architecture of hyperpycnal flow deposits: Cretaceous Sangyuan outcrop, from the Luanping Basin, North East China. *Marine and Petroleum Geology* , 121: 104593.

(责任编辑 郑秀娟; 英文审校 徐杰)