

湖平面变化对浅水三角洲前缘砂体构型的控制

——来自数字露头的启示

李强强¹, 王喜鑫¹, 许月明², 薛婷³, 李少华¹, 严春景¹

1. 长江大学地球科学学院, 武汉 430100

2. 中海油湛江分公司, 广东湛江 524057

3. 中石油长庆油田勘探开发研究院, 西安 710018

摘要【目的】油气田开发中后期, 储层构型研究是剩余油挖潜和提高采收率的关键, 相似露头的精细解释可为地下储层构型预测提供可对比的原型模型。【方法】以鄂尔多斯盆地考考乌素沟、海湾矿业延安组浅水三角洲剖面为研究对象, 采用无人机倾斜摄影获取海量露头影像数据进而建立三维数字露头, 结合现场考察与室内分析对数字露头进行精细的构型解释。【结果】明确了湖平面上升过程中浅水三角洲前缘构型发育特征及演化模式, 在湖平面较低时, 主要发育主体型分流河道构型单元, 宽度 23.30~48.40 m、厚度 0.89~1.81 m、宽厚比 26.74, 砂体叠置样式以切叠式为主; 随湖平面升高, 逐渐发育叉道型分流河道、河口坝、席状砂以及分流间湾, 河口坝宽度 53.90 m、厚度 2.21 m、宽厚比 24.39, 叠置样式以侧向拼接为主; 湖平面较高时, 主要发育末端型分流河道和席状砂构型单元, 末端分流河道宽度 4.70~25.30 m、宽度 0.40~1.03 m, 宽厚比为 11.75~24.56, 呈孤立状镶嵌在泥质沉积中。【结论】当物源供给较稳定时, 湖平面升高导致可容纳空间增大, 构型单元由主体型分流河道向末端型分流河道演化, 逐渐沉积河口坝和席状砂构型单元, 砂体规模减小但宽厚比有所增加, 总体上砂地比降低, 空间连通性减弱, 储层非均质性增强。

关键词 鄂尔多斯盆地; 无人机倾斜摄影; 数字露头; 三角洲前缘; 构型模式; 湖平面变化

第一作者 李强强, 男, 1999 年出生, 硕士研究生, 储层沉积学, E-mail: lqq0447@163.com

通信作者 王喜鑫, 男, 副教授, E-mail: wangxixin86@hotmail.com

中图分类号 P512.2 文献标志码 A

0 引言

浅水三角洲是一类发育于水体较浅和构造相对稳定的台地、陆表海或地形平缓、整体沉降缓慢的拗陷湖盆中以分流河道砂体为主的三角洲^[1-3]。浅水三角洲不仅是沉积学研究的热点, 而且是油气勘探的重点目标。1954 年 Fisk 提出“浅水三角洲”的概念^[4]。此后, 国内外学者对浅水三角洲主要研究方向主要集中在沉积成因、结构类型、沉积体系演化、几何形态、沉积特征和沉积模式等方面^[5-10], 为浅水三角洲油气储层的勘探开发提供了丰富的理论基础。

与钻井资料相比, 露头剖面能够从二维或三维的角度, 较连续、完整地记录沉积过程及沉积特征等丰富信息, 可以清楚地观察并描述各构型单元叠置关系, 同时定量表征构型单元

收稿日期: 2024-01-31; 收修改稿日期: 2024-04-15

基金项目: 中国石油科技创新基金(2021DQ02-0106); 国家自然科学基金项目(42172172); 甘肃省油气资源研究重点实验室开放基金(20221227)
[Foundation: CNPC Innovation Foundation, No. 2021DQ02-0106; National Natural Science Foundation of China, No. 42172172; Open Fund for Gansu Provincial Key Laboratory of Oil and Gas Resources Research, No. 20221227]

的规模,能够有效弥补钻井和地震等资料的不足,是当下研究地下储层构型最直接有效的方法之一^[11-13]。传统的露头地质研究具有误差大、效率低、危险性强等方面的局限性。对此,诸多学者将一些新技术融入野外露头研究中,如全站仪^[14]、Google Earth^[15]、三维激光扫描^[16-17]、探地雷达^[18]、无人机摄影^[19]等,不同方法具有各自的优势但也有一定的局限性。无人机倾斜摄影在砂体构型解释方面优势明显,所获取的扫描模型具有三维坐标信息(经纬度、海拔),可以准确地获取任意地质体的坐标位置,进一步提高沉积构型量化程度^[20]。

浅水三角洲前缘砂体是最重要的油气储集单元之一,其内部各级次砂体构型特征及演化模式控制着油气,尤其是剩余油气的分布,然而湖平面变化过程中浅水三角洲前缘砂体定量构型模式认识不清,制约了高含水油田的进一步高效开发^[13,21]。本文在实地考察的基础上,借助无人机敏捷、多维视角、高精度和模型化的特性,对鄂尔多斯盆地延安组典型的浅水三角洲沉积剖面进行精细扫描、测量、建模和分析,总结构型发育特征,建立定量构型模式,为浅水三角洲地下储层构型预测提供理论基础。

1 野外露头概况与研究方法

1.1 区域地质概况

考考乌素沟、海湾矿业剖面位于陕西省神木市境内,其构造位置位于鄂尔多斯盆地东北缘(图1)。区内侏罗系陆相沉积是矿产能源的主要富集场所,且地层广泛发育,自上而下出露富县组、延安组、直罗组、安定组^[22-23]。延安组是本次研究的目的层段,厚度约为200 m,与下伏富县组接触,延安组主要发育中粗粒石英砂岩、粉砂质泥岩、灰色黏土岩,含植物化石以及砂质泥岩夹薄煤层或碳质页岩^[24]。在该沉积时期大型敞流湖盆背景下,发育远源—分支河道型浅水湖泊三角洲沉积体系,物源供给持续稳定,主要来自北东向^[25],三角洲前缘沉积广泛发育,内部以分流河道和分流砂坝为主,相变较快,但地层、煤层和成因地层单元的厚度都较为稳定(图2)。

前人将研究区地层划分为5个地层成因单元^[25],其中考考乌素沟剖面地层形成时期早于海湾矿业剖面地层,分别对应低位体系域和湖侵体系域^[22],本文重点研究考考乌素沟剖面和海湾矿业的4个剖面,分别为剖面I、II和剖面III、IV,其中剖面I位于湖平面较低时期,剖面II、III位于湖平面升高时期,剖面IV位于湖平面较高时期,4个剖面均出露完整、现象明显、交通便利,是露头研究的良好对象(图2)。

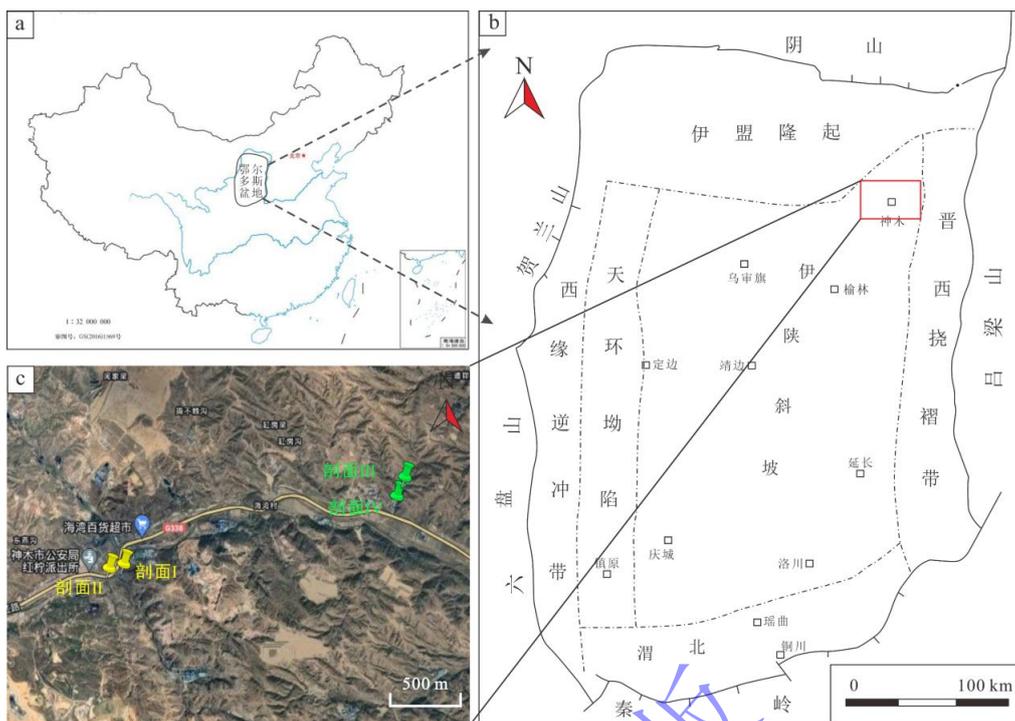


图1 研究区位置图

Fig.1 Location map of study area

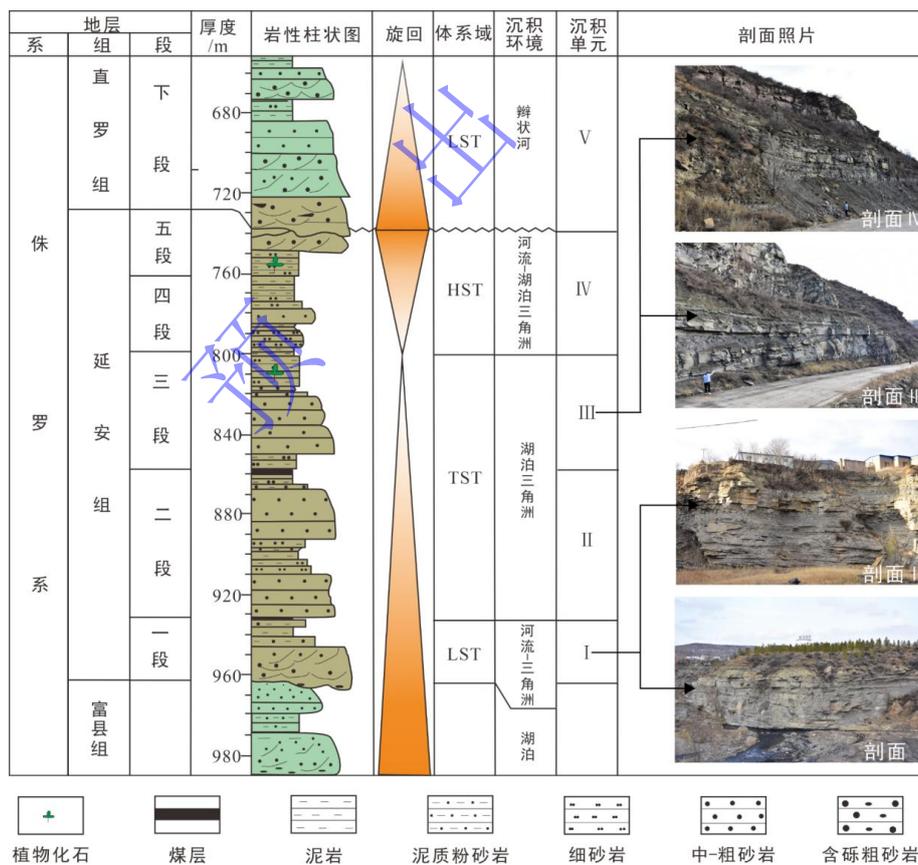


图2 鄂尔多斯盆地神木地区延安组岩性柱状图 (据文献[24]修改)

Fig.2 Lithologic histogram of the Yan'an Formation in the Shennu area, Ordos Basin (modified from reference [24])

1.2 研究方法

通过人工踏勘对典型剖面进行描述采样、岩相识别,针对典型剖面实际情况,合理规划无人机飞行航线,本次采用平行折返式覆盖测区的方式,无人机按照路线自动巡航对露头进行图像信息以及 POS (Positioning and Orientating System) 信息实时获取,最后将无人机所获取的海量数据导入自主研发 GocRover 软件,建立三维数字露头,进而开展露头构型精细解剖。

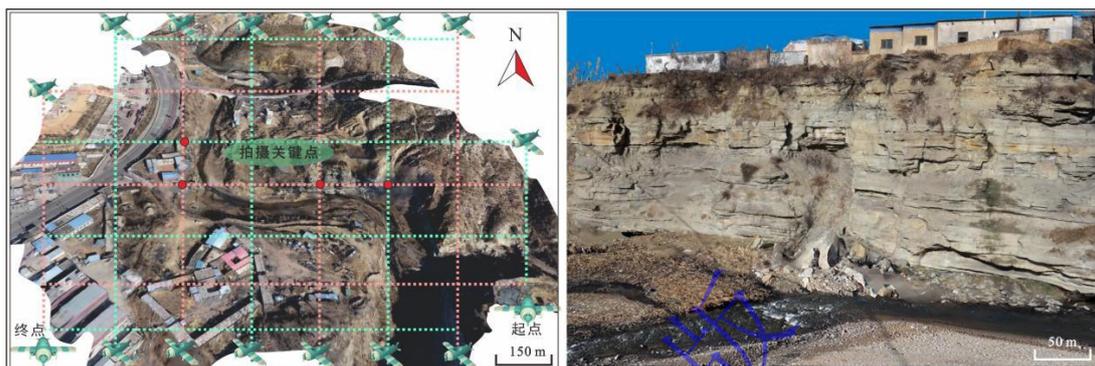


图3 无人机巡航路线及三维数字露头模型

Fig.3 Drone cruise routes and 3D digital outcrop modeling

2 露头区砂体类型

2.1 岩相类型

通过对延安组三角洲前缘露头的岩性、颜色、沉积构造等进行特征分析和描述,根据 Miall 提出的岩相划分标准总结出该地区主要发育 6 种岩相类型^[26],即:槽状交错层理砂岩相 (St)、块状层理砂岩相 (Sm)、板状交错层理砂岩相 (Sp)、平行层理砂岩相 (Sh)、砂纹层理粉砂岩相 (Fr)、水平层理泥岩相 (Mh),具体内容见表 1。

2.2 砂体构型基本特征

通过对考考乌素沟和海湾矿业剖面的详细观察和实测,结合前人对该区沉积环境的研究^[22,25],可以在露头上识别出分流河道、席状砂和河口坝 3 种主要的构型单元。分流河道是浅水三角洲最典型的构型单元,具有“顶平底凸”的外部几何形态。根据前人研究以及河道发育的样式和规模,进一步划分为主体型、叉道型以及末端型分流河道。

主体型分流河道是浅水三角洲前缘最重要的分流体系,规模较大,河道内部以垂向加积充填为主,包括水平状垂向加积充填和同心状加积充填^[27],岩性以灰色粗砂岩、中砂岩和细砂岩为主,发育大中型槽状交错层理、块状层理以及平行层理等强水动力沉积构造特征,

主体型分流河道砂体厚度为 2~3 m (图 4a); 叉道型分流河道是三角洲向前推进过程中分流河道不断改道, 在菱形或“人”字形分叉处形成的次一级河道, 规模介于主体型与末端型分流河道之间, 岩性主要为灰色中砂岩和细砂岩, 发育中小型槽状交错层理、板状层理和平行层理等沉积构造, 河道规模较主体型分流河道小, 厚度为 1~2 m^[28]; 末端型分流河道通常分布在三角洲前缘的远端, 是浅水三角洲分流河道最后一次分叉所形成的分流河道^[27], 规模较小通常与河口坝、席状砂、分流间湾相伴生, 呈孤立状分布, 岩性为中砂岩以及细砂岩, 发育砂纹层理、平行层理等沉积构造, 反映出河流与湖泊的共同作用, 末端型分流河道的厚度为 0.40~1.50 m (图 4b)。

河口坝是当满载泥砂的水流以最大流量进入静止水体时, 由于水流减速, 沿射流中心线的泥砂输移率向盆地方向减小。平面紊流在河口处受到横向和底床摩擦, 使其减速并迅速膨胀, 该紊流的输运能力降低, 沉积物在分流口沉积为宽阔的放射状的砂坝^[29]。在剖面上表现出“底平顶凸”的几何形态。岩性主要以灰色中砂、细砂岩为主, 垂向上岩性逐渐变粗, 发育块状层理、水平层理等沉积构造。厚度为 1.50~4.50 m (图 4c)。

席状砂是河口沉积物遭受湖浪冲刷的产物, 主要表现为“泥包砂”的结构, 即厚层泥岩中夹不等厚薄层砂岩。岩性以灰色、灰绿色细砂、粉砂岩为主, 主要发育平行层理。厚度为 0.10~0.70 m (图 4d)。

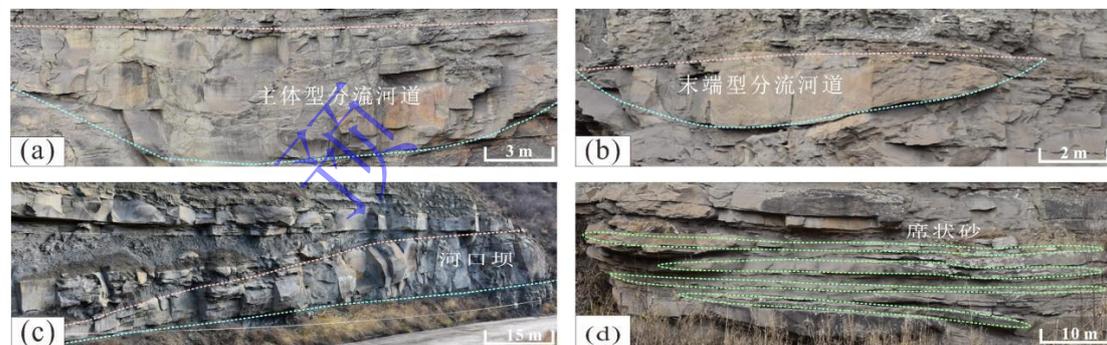


图 4 野外露头构型单元典型照片

(a) 主体型分流河道; (b) 末端型分流河道; (c) 河口坝; (d) 席状砂

Fig.4 Typical photographs of outcrop architectural elements (a) trunk-type distributary channels; (b) terminal-type distributary channels; (c) mouth bars; (d) sheet sand

表 1 研究区典型岩相特征

Table 1 Properties of typical lithofacies in the study area

岩相类型	代码	岩性	沉积构造	描述	典型照片	岩相类型	代码	岩性	沉积构造	描述	典型照片
槽状交错层理砂岩相	St	灰色含砾粗砂岩	槽状交错层理	层理界面明显, 倾角介于 15~30°, 纹层界面有红色砾石分布, 强水动力条件下碎屑物质迁移形成		平行层理砂岩相	Sh	灰色、深灰色细砂岩	平行层理	层理明显呈平直状, 高能、稳定水动力条件下悬浮物卸载形成。	
块状层理砂岩相	Sm	灰色、灰绿色细砂岩	块状层理	厚度 80~150cm, 强水动力条件下, 碎屑物质快速卸载、堆积形成		砂纹层理粉砂岩相	Fr	灰色粉砂岩	砂纹层理	纹层横向连续性差, 水流波痕向前运动同时向上延伸呈缓波状。	
板状交错层理砂岩相	Sp	灰色中粗砂岩	板状交错层理	纹层下部斜向纹层系界面, 较高能量条件下沉积物加积或前积形成		水平层理泥岩相	Mh	灰绿色泥岩	水平层理	单层厚度较薄, 约 1~15cm, 悬浮细粒沉积物在低能静水条件下沉积形成。	

3 露头剖面构型解释

根据现场踏勘采集的剖面照片，结合无人机倾斜摄影处理后建立的数字模型，对 4 个剖面进行精细解剖。

3.1 考考乌素沟剖面

3.2.1 剖面I

该剖面总体上砂体较为发育，岩性主要为粗砂岩、中砂岩、细砂岩及泥岩，发育槽状交错层理、块状层理、小型板状交错层理。剖面上主要发育主体型分流河道及少量席状砂构型单元（图 5）。主体型分流河道规模较大，内部充填以垂向加积为主，表现明显的强水动力特征，发育大型槽状交错层理、板状交错层理和块状层理。河道下切作用较强，河道间泥质沉积保存不完整，多期单一河道相互叠置。单一流河道侧向延伸距离较大，厚度为 1.81~3.38 m。席状砂与分流间湾构型单元少量发育，内部水平层理为主，以侧向拼接和孤立分布的形式存在，厚度为 0.20~0.60 m，砂体连通性较差。

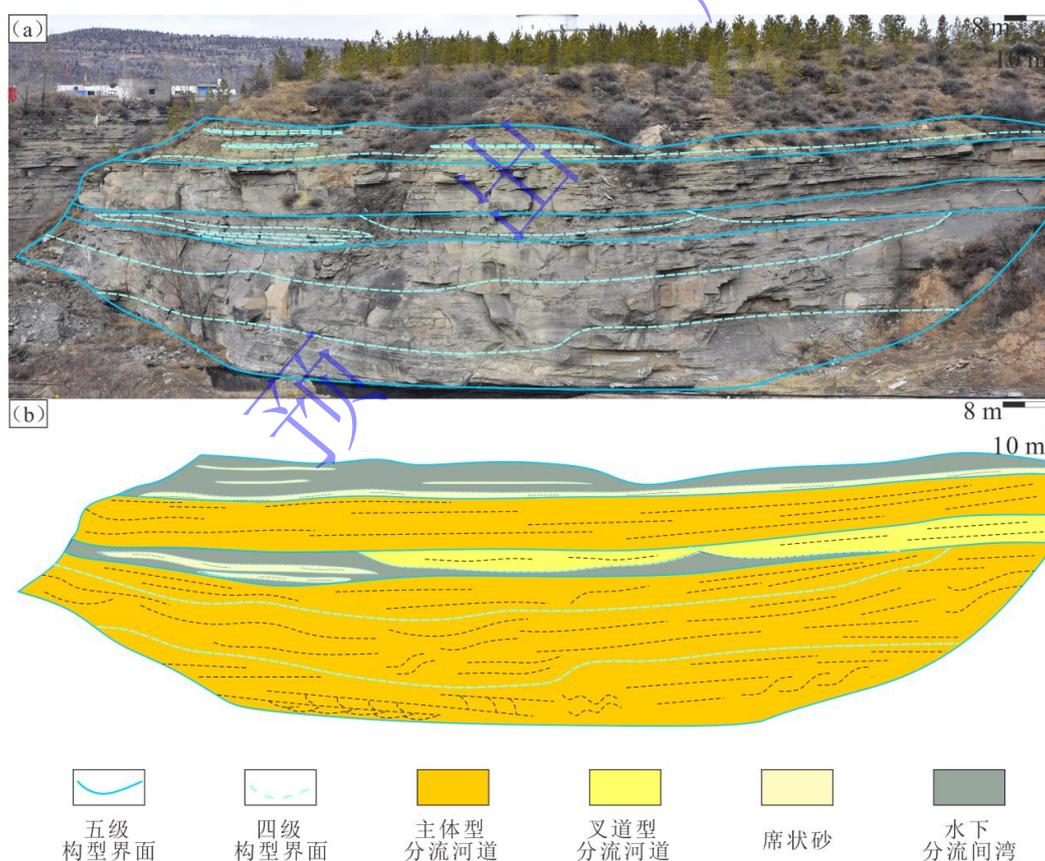


图 5 考考乌素沟剖面构型解释（剖面I）

(a) 构型界面划分；(b) 构型单元解释与分布特征

Fig.5 Architecture interpretation of Kaokaowusugou outcrop (Section I)

(a) architecture interface partition; (b) architecture element interpretation and distribution

3.1.2 剖面II

该剖面整体出露情况较好，剖面砂体形态清晰，岩性以粗砂岩、中砂岩、细砂岩、粉砂岩以及泥岩为主，发育块状层理、板状交错层理和水平层理。剖面主要沉积叉道型分流河道、少量末端型分流河道、河口坝和席状砂构型单元（图6）。叉道型分流河道规模较小，砂体内部以侧向加积为主，发育中小型槽状交错层理、块状层理以及板状交错层理。砂体叠置样式主要为切叠型和拼接型。单一流河道砂体厚度为0.40~1.76 m；河口坝砂体内部发育块状层理、板状交错层理和平行层理，单一河口坝砂体垂向上与叉道型分流河道相互叠置，侧向与席状砂砂体、叉道型分流河道相互切叠或拼接，砂体规模较大，单一河口坝砂体厚度约为3.21 m；席状砂砂体主要与水下分流间湾相伴生，发育水平层理，砂体横向展布较大，以孤立型为主，少量拼接型。砂体厚度为0.07~0.38 m，砂体连通性差，非均质性强。

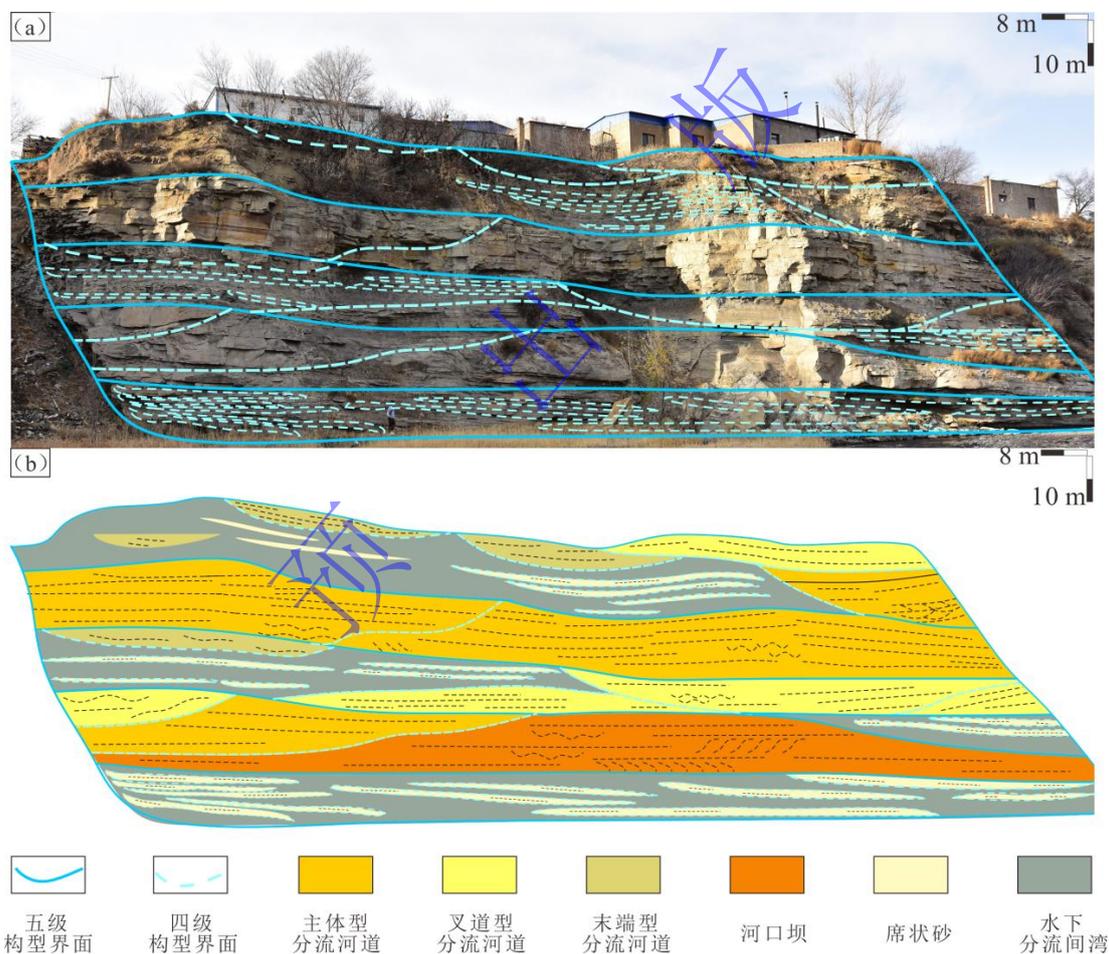


图6 考考乌素沟剖面构型解释（剖面II）

(a) 构型界面划分；(b) 构型单元解释与分布特征

Fig.6 Architecture interpretation of Kaokaowusugou outcrop (Section II)

(a) architecture interface partition; (b) architecture element interpretation and distribution

3.2 海湾矿业剖面

3.2.1 剖面III

剖面III砂体特征明显，岩性以中砂岩、细砂岩、粉砂岩和泥岩为主，发育板状交错层理、块状层理、平行层理和水平层理。发育叉道型分流河道、末端型分流河道、河口坝和席状砂构型单元（图7）。

叉道型分流河道，发育块状层理、板状交错层理和平行层理，河道砂体能量较弱逐渐向末端型分流河道转换，单一河道规模较小，厚度为0.73~1.15 m；河口坝主要发育小型槽状交错层理、块状层理和平行层理，砂体规模较大，厚度为1.26~2.81 m。分流河道与河口坝内部以侧向加积为主，垂向上末端型分流河道下切早期形成的河口坝或与早期河口坝相互叠置，侧向上叉道型分流河道砂体与河口坝砂体相互切叠。层间灰色泥质隔层发育，厚度约为1.50 m，垂向连通性较差。

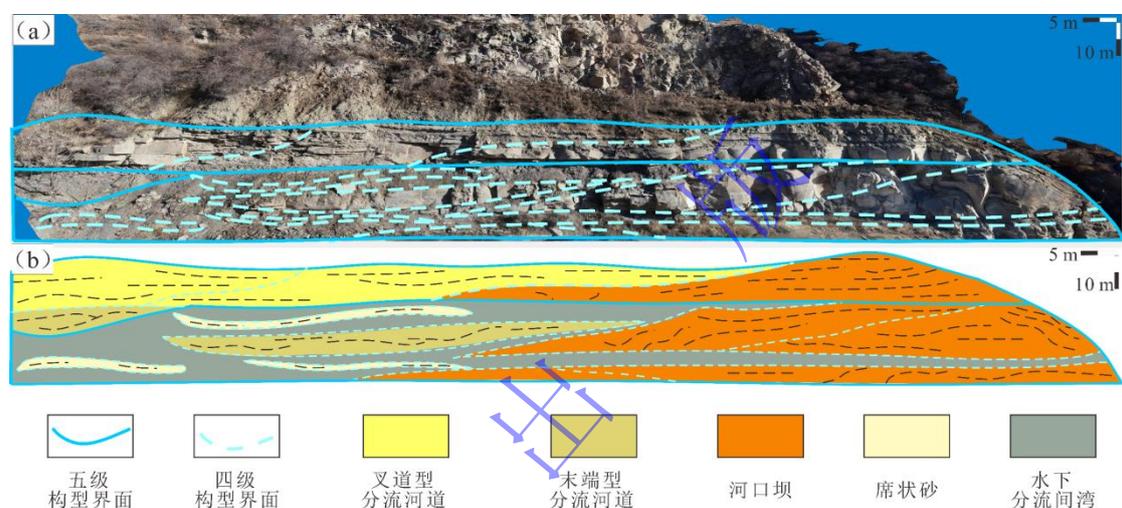


图7 海湾矿业剖面构型解释（剖面III）

(a) 构型界面划分；(b) 构型单元解释与分布特征

Fig.7 Architecture interpretation of Gulf Mining Industry outcrop (Section III)

(a) architecture interface partition; (b) architecture element interpretation and distribution

3.2.1 剖面IV

剖面砂体发育较差，整体上砂体粒度较细，岩性以中—细砂岩、粉砂岩和泥岩为主，发育平行层理、砂纹层理以及水平层理。剖面上主要沉积末端型分流河道、河口坝以及席状砂构型单元（图8）。

末端分流河道以侧向、向心状加积充填为主，发育平行层理、砂纹层理，在空间上分流河道呈对接式或者孤立式分布。单一的分流河道砂体规模较小，厚度为0.59 m。河口坝砂体，发育块状层理、平行层理和砂纹层理，内部以侧向加积充填为主，单一河口坝以侧向拼接为主，少数以孤立状存在，横向展布较大，厚度为1.04~1.31 m。单一的席状砂砂体厚度为0.10~0.33 m。规模较小，在空间上呈孤立式分布，整体垂向连通性差。

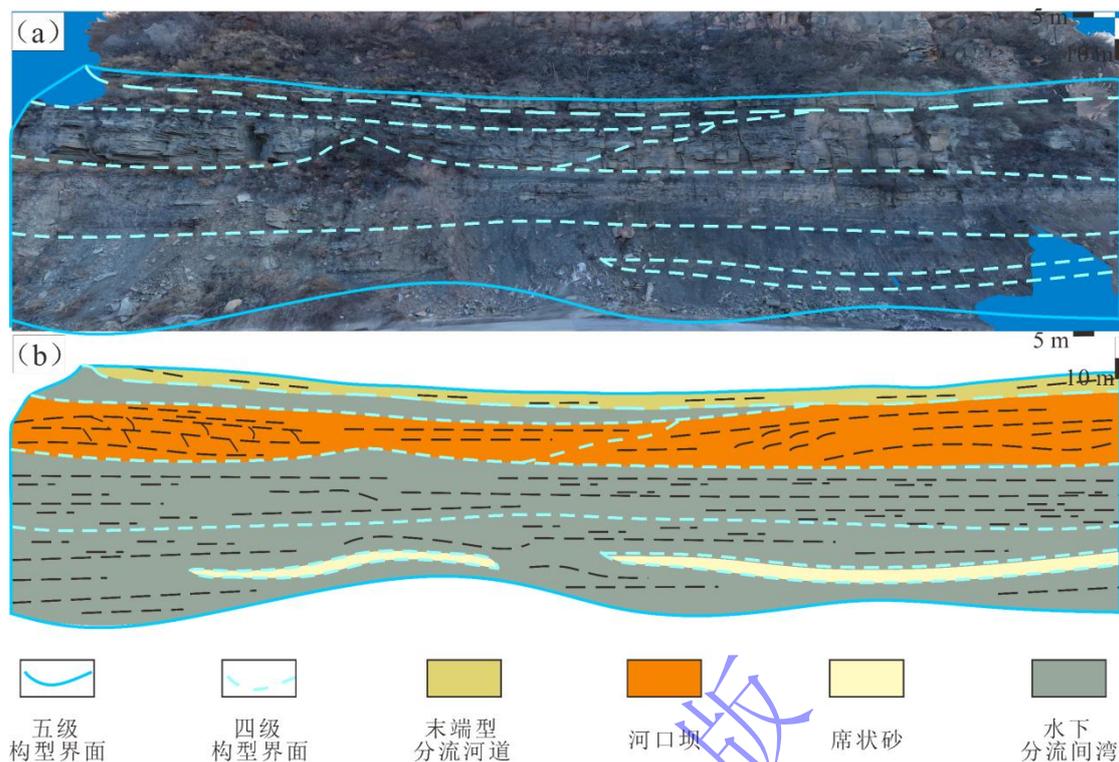


图 8 海湾矿业剖面构型解释 (剖面IV)

(a) 构型界面划分; (b) 构型单元解释与分布特征

Fig.8 Architecture interpretation of Gulf Mining Industry outcrop (Section IV)

(a) architecture interface partition; (b) architecture element interpretation and distribution

4 湖平面升高过程中浅水三角洲前缘砂体构型演化特征

湖平面升降实际上反映了沉积物供给与可容纳空间的相对平衡,即可容纳空间(A)与沉积物供给值(S)的比值(A/S)决定了沉积物的堆积速度、保存程度、叠加样式及内部结构,从而控制着三角洲前缘砂体构型发育和演化过程,是浅水三角洲前缘砂体发育的主控因素^[12,30-33]。

研究区构造稳定,沉积物源供给充足,三角洲前缘砂体的发育主要受可容纳空间及湖平面高低的影响^[22,25]。延安组第I、IV单元为湖盆萎缩期,第II、III单元为湖盆扩张期^[25](图2),考考乌素沟剖面对应湖盆萎缩期,海湾矿业剖面对应湖盆扩张期,即剖面I处于湖平面较低时期,剖面II、III处于湖平面升高时期;剖面IV处于湖平面较高时期。

4.1 主要构型要素规模特征

在构型单元定量研究方面,无人机倾斜摄影技术具有明显的优势,可直接从所建立的三维数字露头剖面进行测量,误差较小。基于无人机倾斜摄影所建立的数字露头,在GocRover软件中对不同构型单元进行测量,并做角度校正,获取砂体真实宽度,本研究主要针对横向出露完整的分流河道、河口坝以及席状砂构型单元的宽厚进行测量(表2)。

由 4 个剖面不同类型单砂体特征看出,剖面I中,分流河道构型单元平均宽厚比为 26.46,席状砂构型单元平均宽厚比为 64.50,夹层厚度在 0.30~0.50 m;剖面II中,分流河道构型单元平均宽厚比为 22.89,河口坝构型单元平均宽厚比为 24.30,席状砂构型单元平均宽厚比为 89.03,泥质隔夹层厚度在 0.50~1.10 m;剖面III中,分流河道构型单元平均宽厚比为 27.08,席状砂构型单元平均宽厚比为 87.24,河口坝构型单元平均宽厚比为 18.65,隔层厚度 0.20~1.28 m;剖面IV中,席状砂构型单元平均宽厚比为 133.84,隔夹层厚在 0.15~1.63 m(图 9)。

表 2 研究区 3 种主要构型单元规模统计

Table 2 Statistics of three main architectural elements scale in the research area

剖面	分流河道			河口坝			席状砂		
	宽/m	厚/m	宽厚比/m	宽/m	厚/m	宽厚比/m	宽/m	厚/m	宽厚比/m
剖面 I	48.40	1.81	26.74				27.10	0.42	64.52
	23.30	0.89	26.18				14.50	0.19	76.32
							29.30	0.44	66.59
							13.50	0.25	54.00
							23.20	0.38	61.05
考考乌素沟剖面 剖面 II	12.50	0.41	30.49	53.9	2.21	24.39	6.80	0.1	68.00
	24.30	0.89	27.30				13.40	0.19	70.53
	20.30	0.98	20.71				11.10	0.21	52.86
	19.10	0.79	24.18				12.70	0.16	79.38
	4.70	0.40	11.75				5.80	0.07	82.86
海湾矿业剖面 剖面 III							14.80	0.21	70.48
							22.90	0.26	88.08
							12.80	0.23	55.65
	25.30	1.03	24.56	19.40	1.04	18.65	21.90	0.38	57.63
	21.60	0.73	29.59				10.60	0.14	75.71
剖面 IV							5.60	0.07	80.00
							5.30	0.05	106.00
							17.40	0.13	133.65

总体来说,当沉积物源供给变化不大时,随着湖平面的升高,可容纳空间增大,分流河道、河口坝和席状砂等构型单元受湖泊改造作用逐渐增强,砂体更易进行迁移、改道,规模减小的同时宽厚比增大。

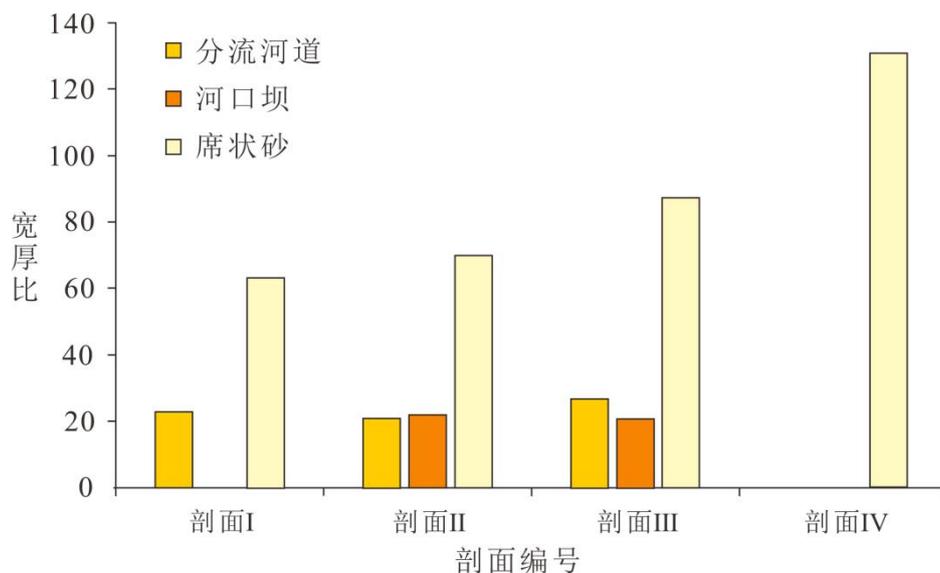


图9 研究区各剖面构型单元宽厚比

Fig.9 Width-thickness ratios of all architectural elements in research area

4.2 构型单元空间叠置样式

不同类型构型单元空间叠置样式亦受沉积物供给与可容纳空间的综合控制,主要表现在构型单元的垂向和侧向接触关系上。通过对露头剖面的研究,一共总结出三种构型单元的复合叠置样式,分别为切叠式、拼接式和孤立式。

在沉积环境中受水动力作用和物源供给所表现出不同特征,可以反映沉积演化过程。湖平面变化反映了沉积物+水输入与潜在容纳的相对平衡,也就是 A/S 的关系。湖平面水位变化影响着不同构型单元的空间叠置样式上。

切叠式包括垂向切叠式和侧向切叠式,其叠置样式为多期分流河道,垂向上相互叠加或侧向上相互切叠,该种样式主要发育在考考乌素沟剖面(剖面I和II),即在低水位条件下,沉积物的可容空间小, $A/S < 1$ 。水体能量较强,河道冲刷强烈,主要表现在分流河道构型单元的相互叠置、侧向迁移以及分流河道对早期形成的河口坝砂体的切割,单一的构型单元保存不完整,其中构型单元之间泥质隔夹层不发育,砂体连通性最好。

拼接式包含叉道型分流河道和河口坝、席状砂和末端分流河道的横向接触关系,主要发育在海湾矿业剖面(剖面III),即在平均水位条件下, $A/S \approx 1$,沉积物供给速率几乎等于可容纳空间的增长速率,泥质隔夹层稳定发育厚度较小,砂体横向连通性较好,垂向连通性较差。

孤立式体现在海湾矿业剖面(剖面IV),即在高水位条件下,沉积物可容纳空间最大, $A/S > 1$ 。构型单元的空间几何关系表现为末端型分流河道和席状砂孤立分布于三角洲前缘泥质中,边界完整规模较小,一般厚度小于 2 m,主要为“泥包砂”的特征,泥质隔夹层大量发育,砂体连通性差。

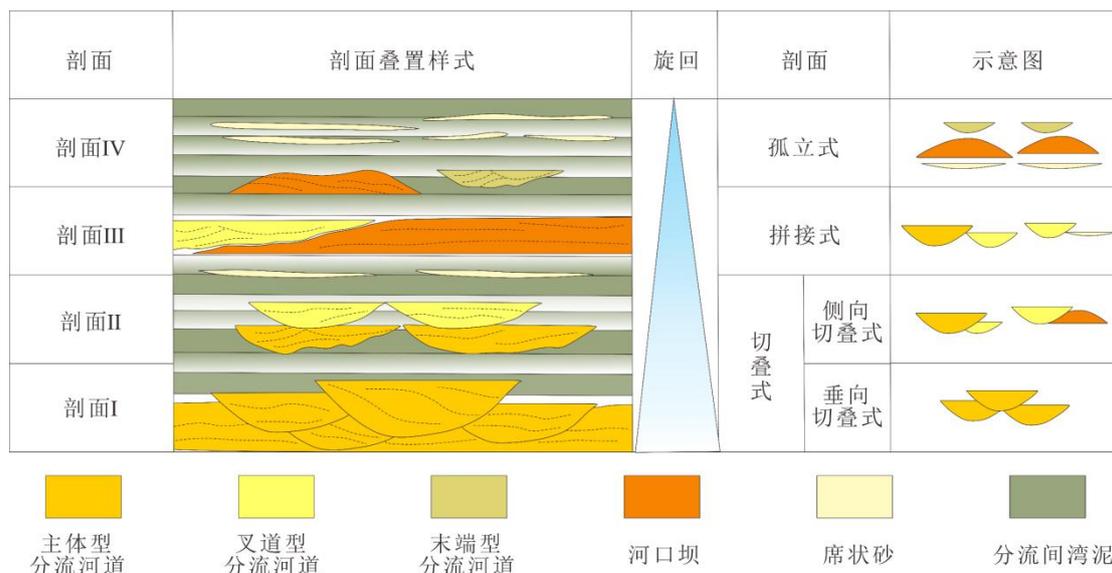


图 10 研究区构型单元空间叠置样式

Fig.10 Spatial stacking pattern of architectural elements in research area

5 不同水位条件下的构型模式

考考乌素沟剖面对应湖盆萎缩期，海湾矿业剖面对应湖盆扩张期，即剖面I处于湖平面较低时期，剖面II、III处于湖平面升高时期，剖面IV处于湖平面较高时期（图2）。根据不同水位条件对构型单元的影响，结合露头识别的各构型单元的发育特征、规模及相互搭接关系，将研究区浅水三角洲前缘构型演化划分为三个阶段，总结了浅水三角洲湖平面升高过程中砂体构型模式（图11）。

在湖平面较低时，呈半氧化半还原环境，泥岩呈浅灰色，可容纳空间小，主要沉积分流河道砂体，席状砂与河口坝发育较少。河道冲刷、侵蚀早期沉积，多期河道相互叠置，发育槽状交错层理、块状层理和平行层理，以中粗粒砂体充填为主，分流间湾面积较小。三角洲前缘的构型组合特征表现为分流河道的相互叠置，多期分流河道砂体呈厚层板状快速向前延伸，水体能量较强，构型单元垂向连通性高。

随着湖平面升高，可容纳空间增加，主要发育叉道型分流河道、河口坝、席状砂和下水分流间湾细粒沉积，后期河口坝会因为没有剩余可容纳空间而停止发育，甚至发生侵蚀破坏。5级复合砂体为河流和波浪作用改造为主的中粗砂岩和波浪作用改造为主的薄层泥质粉砂岩，垂向侵蚀相对较弱，泥岩层多保留在河道顶部。三角洲前缘的构型组合特征表现为多种构型单元混合拼接，叉道型分流河道与河口坝共存。分流河道规模有所减少，逐渐向叉道型分流河道转换，后期形成的末端型分流河道下切早期形成的河口坝，砂体连通性降低。

在湖平面较高时，具有充足的可容纳空间，河口坝砂体大量发育，末端型分流河道和席

状砂镶嵌在前缘泥质沉积中。由于河流下切能力减弱，没有进一步向下侵蚀。与正常水位条件相比，河道沉积物粒度更细，规模更小。不同期次河道被湖侵泥层分隔，河口坝和波浪改造的席状砂增多，受湖泊影响，席状砂被进一步改造重组。三角洲前缘的构型单元多呈孤立状，垂向上连通性低，相互叠置关系以孤立型和拼接型为主。

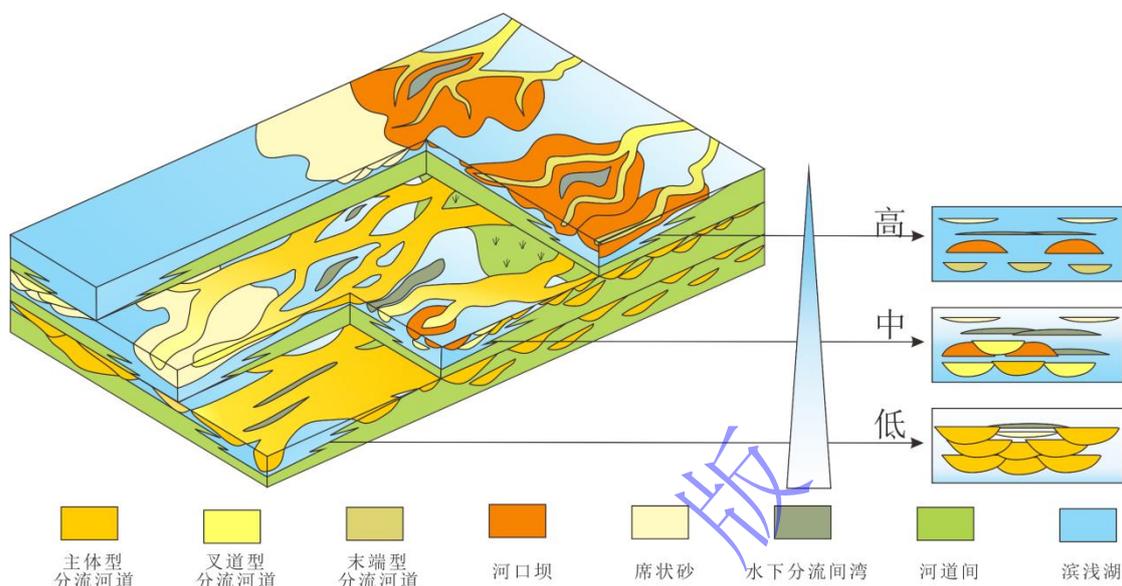


图 11 湖平面变化下的浅水三角洲前缘构型演化模式

Fig.10 Patterns of architectural evolution of shallow delta fronts due to lake level fluctuation

6 结论

(1) 传统的人工露头考察结合无人机倾斜摄影技术，通过对露头上各沉积单元的定量规模信息获取，有助于推测物源方向，反演沉积过程，明确砂体构型演化模式等，为地下储层构型研究提供原型约束。

(2) 海湾矿业剖面和考考乌素沟剖面露头区识别出分流河道（主体型、叉道型和末端型）、河口坝和席状砂等 4 级构型单元。单一分流河道宽度为 4.70~48.40 m，厚度为 0.40~1.81 m；河口坝宽度为 19.40~53.90 m，厚度为 1.04~2.21 m；席状砂宽度为 5.30~29.30 m，厚度为 0.05~0.44 m。砂体叠置主要包括切叠式、拼接式、孤立式三种不同样式。

(3) 在物源供给变化较小时，湖平面升高过程中，可容纳空间增大导致构型单元由主体型分流河道向末端型分流河道演化，逐渐沉积席状砂和河口坝构型单元，总体上砂体规模减小但宽厚比增加，储层连通性降低，非均质性增强。

致谢 感谢审稿专家和编辑部老师提出的宝贵意见。

参考文献 (References)

- [1] Fisk H N. Bar-finger sands of the Mississippi delta[C]//Geometry of Sandstone Bodies. Tulsa: AAPG, 1961: 29-52.

- [2] Donaldson A C. Pennsylvanian sedimentation of central Appalachians[M]/Briggs G. Carboniferous of the Southeastern United States. Geological Society of America, 1974: 47-48.
- [3] Postma G. An analysis of the variation in delta architecture[J]. Terra Nova, 1990, 2(2): 124-130.
- [4] Fisk H N, Kolb C R, McFarlan E, et al. Sedimentary framework of the modern Mississippi delta [Louisiana][J]. Journal of Sedimentary Research, 1954, 24(2): 76-99.
- [5] 李元昊, 刘池洋, 独育国, 等. 鄂尔多斯盆地西北部上三叠统延长组长 8 油层组浅水三角洲沉积特征及湖岸线控砂[J]. 古地理学报, 2009, 11 (3): 265-274. [Li Yuanhao, Liu Chiyang, Du Yuguo, et al. Sedimentary characteristics of shallow water delta and lake shoreline control on sandbodies of Chang 8 oil-bearing interval of the Upper Triassic Yanchang Formation in northwestern Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2009, 11(3): 265-274.]
- [6] 韩永林, 王成玉, 王海红, 等. 姬塬地区长 8 油层组浅水三角洲沉积特征[J]. 沉积学报, 2009, 27 (6): 1057-1064. [Han Yonglin, Wang Chengyu, Wang Haihong, et al. Sedimentary characteristics of shallow-water deltas in Chang-8 subsection of Yanchang Formation, Jiyuan area[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(6): 1057-1064.]
- [7] Zhu X M, Li S L, Wu D, et al. Sedimentary characteristics of shallow-water braided delta of the Jurassic, Junggar Basin, western China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 149: 591-602.
- [8] 张莉, 鲍志东, 林艳波, 等. 浅水三角洲砂体类型及沉积模式: 以松辽盆地南部乾安地区白垩系姚家组一段为例[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44 (5): 727-736. [Zhang Li, Bao Zhidong, Lin Yanbo, et al. Genetic types and sedimentary model of sandbodies in a shallow-water delta: A case study of the first member of Cretaceous Yaojia Formation in Qian'an area, South of Songliao Basin, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(5): 727-736.]
- [9] 朱筱敏, 刘媛, 方庆, 等. 大型坳陷湖盆浅水三角洲形成条件和沉积模式: 以松辽盆地三肇凹陷扶余油层为例[J]. 地学前缘, 2012, 19 (1): 89-99. [Zhu Xiaomin, Liu Yuan, Fang Qing, et al. Formation and sedimentary model of shallow delta in large-scale lake. Example from Cretaceous Quantou Formation in Sanzhao Sag, Songliao Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(1): 89-99.]
- [10] 邹才能, 赵文智, 张兴阳, 等. 大型敞流坳陷湖盆浅水三角洲与湖盆中心砂体的形成与分布[J]. 地质学报, 2008, 82 (6): 813-825. [ZOU Caineng, ZHAO Wenzhi, ZHANG Xingyang, et al. Formation and distribution of shallow-water deltas and central-basin sandbodies in large open Depression lake basins[J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(6): 813-825.]
- [11] 陈飞, 胡光义, 胡宇霆, 等. 储层构型研究发展历程与趋势思考[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2018, 40 (5): 1-14. [Chen Fei, Hu Guangyi, Hu Yuting, et al. Development history and future trends in reservoir architecture research[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2018, 40(5): 1-14.]
- [12] 赵俊峰, 屈红军, 林晋炎, 等. 湖泊三角洲沉积露头精细解剖: 以鄂尔多斯盆地裴庄剖面为例[J]. 沉积学报, 2014, 32 (6): 1026-1034. [Zhao Junfeng, Qu Hongjun, Lin Jinyan, et al. Outcrop-based anatomy of a lacustrine delta succession: A case study from Peizhuang Section, Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(6): 1026-1034.]
- [13] 吴胜和, 翟瑞, 李宇鹏. 地下储层构型表征: 现状与展望[J]. 地学前缘, 2012, 19 (2): 15-23. [Wu Shenghe, Zhai Rui, Li Yupeng. Subsurface reservoir architecture characterization: Current status and prospects[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(2): 15-23.]
- [14] 任凯珍, 王斌强, 柴智, 等. GPS 与全站仪在地质剖面测量中的应用[J]. 城市地质, 2010, 5 (1): 40-41. [Ren Kaizhen, Wang Binqiang, Chai Zhi, et al. Elementary discussions on the application of GPS and electronic total station in geological profile survey[J]. Urban Geology, 2010, 5(1): 40-41.]
- [15] 石书缘, 胡素云, 冯文杰, 等. 基于 Google Earth 软件建立曲流河地质知识库[J]. 沉积学报, 2012, 30(5): 869-878. [Shi Shuyuan, Hu Suyun, Feng Wenjie, et al. Building geological knowledge database based on Google Earth software[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(5): 869-878.]
- [16] 朱如凯, 白斌, 袁选俊, 等. 利用数字露头模型技术对曲流河三角洲沉积储层特征的研究[J]. 沉积学报, 2013, 31 (5): 867-877. [Zhu Rukai, Bai Bin, Yuan Xuanjun, et al. A new approach for outcrop characterization and geostatistical analysis of meandering channels sandbodies within a delta plain setting using digital outcrop models: Upper Triassic Yanchang tight sandstone Formation, Yanhe outcrop, Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(5): 867-877.]
- [17] 曾庆鲁, 张荣虎, 卢文忠, 等. 基于数字露头技术的扇三角洲前缘砂体构型特征: 以库车坳陷前陆区索罕村剖面为例[J]. 油气地质与采收率, 2017, 24 (2): 30-37. [Zeng Qinglu, Zhang Ronghu, Lu Wenzhong, et al. Analysis on sandbody architecture of fan

- delta front based on the digital outcrop technology: A case study of Suohan village outcrop in Kuqa foreland area[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2017, 24(2): 30-37.]
- [18] 余为维, 冯磊, 杜艳艳. 旬邑地区野外露头岩性组合地震反射特征研究[J]. *特种油气藏*, 2018, 25(5): 24-29. [Yu Weiwei, Feng Lei, Du Yanyan. Seismic reflection characterization of field outcrop lithology association in Xunyi[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2018, 25(5): 24-29.]
- [19] 印森林, 高阳, 胡张明, 等. 基于无人机倾斜摄影的露头多点地质统计模拟: 以山西吕梁坪头乡石盒子组为例[J]. *石油学报*, 2021, 42(2): 198-216. [Yin Senlin, Gao Yang, Hu Zhangming, et al. Multiple-point geostatistical simulation of outcrop based on UAV oblique photographic data: A case study of Shihezi Formation in Pingtou township, Lvliang city, Shanxi[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(2): 198-216.]
- [20] 印森林, 陈恭洋, 刘兆良, 等. 基于无人机倾斜摄影的三维数字露头表征技术[J]. *沉积学报*, 2018, 36(1): 72-80. [Yin Senlin, Chen Gongyang, Liu Zhaoliang, et al. 3D digital outcrop characterization technology based on unmanned aerial vehicle oblique photography[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018, 36(1): 72-80.]
- [21] 吴胜和, 徐振华, 刘钊. 河控浅水三角洲沉积构型[J]. *古地理学报*, 2019, 21(2): 202-215. [Wu Shenghe, Xu Zhenhua, Liu Zhao. Depositional architecture of fluvial-dominated shoal water delta[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2019, 21(2): 202-215.]
- [22] 邱隆伟, 杨保良, 张阳, 等. 湖泊水位对三角洲前缘主要砂体类型的影响: 以鄂尔多斯盆地神木地区侏罗系延安组剖面为例[J]. *古地理学报*, 2016, 18(6): 939-950. [Qiu Longwei, Yang Baoliang, Zhang Yang, et al. Lake level effect on main sandbodies of delta front: A case study from outcrops of the Jurassic Yan'an Formation in Shenmu area, Ordos Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2016, 18(6): 939-950.]
- [23] 张天福, 张云, 金若时, 等. 鄂尔多斯盆地东北缘侏罗系层序界面特征对砂岩型铀矿成矿环境的制约[J]. *中国地质*, 2020, 47(2): 278-299. [Zhang Tianfu, Zhang Yun, Jin Ruoshi, et al. Characteristics of Jurassic sequence boundary surfaces on the northeastern margin of Ordos Basin and their constraints on the spatial-temporal properties of sandstone uranium mineralization[J]. *Geology in China*, 47(2): 278-299.]
- [24] 葛玉辉, 孙春林, 刘茂修. 鄂尔多斯盆地东北缘延安组划分与对比[J]. *地层学杂志*, 2007, 31(2): 151-156. [Ge Yuhui, Sun Chunlin, Liu Maoxiu. Stratigraphic division and correlation of the Yan'an Formation in the northeastern margin of the Ordos Basin, China[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2007, 31(2): 151-156.]
- [25] 胡元现, 李思田, 杨士恭. 鄂尔多斯盆地东北缘神木地区浅湖三角洲沉积作用及煤聚集[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 1989, 14(4): 379-390. [Hu Yuanxian, Li Sitian, Yang Shigong. Sedimentation of shallow lacustrine deltas and coal accumulation of Jurassic Yan'an Formation, northeastern Ordos Basin, China[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 1989, 14(4): 379-390.]
- [26] 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.
- [27] 付晶, 吴胜和, 王哲, 等. 湖盆浅水三角洲分流河道储层构型模式: 以鄂尔多斯盆地东缘延长组长组野外露头为例[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(11): 4174-4182. [Fu Jing, Wu Shenghe, Wang Zhe, et al. Architecture model of shallow-water delta distributary channel in lake Basin: A case study of the Yanchang Formation outcrops in the eastern margin of Ordos Basin[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2015, 46(11): 4174-4182.]
- [28] 贺婷婷, 李胜利, 高兴军, 等. 浅水湖泊三角洲平原分流河道类型与叠置模式[J]. *古地理学报*, 2014, 16(5): 597-604. [He Tingting, Li Shengli, Gao Xingjun, et al. Types and superposed patterns of distributary channels in a shallow lacustrine delta plain[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2014, 16(5): 597-604.]
- [29] Edmonds D A, Slingerland R L. Mechanics of river mouth bar Formation: Implications for the morphodynamics of delta distributary networks[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2007, 112(F2): F02034.
- [30] 范璎宁, 李胜利, 梁星如, 等. 浅水湖泊河口坝型三角洲前缘沉积特征与模式: 以文安斜坡西5井区沙河街组三段为例[J]. *东北石油大学学报*, 2017, 41(4): 43-52, 98. [Fan Yingning, Li Shengli, Liang Xingru, et al. Sedimentary characteristics and pattern of mouth-bar delta front in the shallow lacustrine: A case of the 3rd member of Shahejie Formation in well X5 area in Wen'an slope of Baxian[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2017, 41(4): 43-52, 98.]

- [31] Zhang Y, Qiu L W, Yang B L, et al. Effects of water level fluctuation on sedimentary characteristics and reservoir architecture of a lake, river dominated delta[J]. Journal of Central South University, 2016, 23(11): 2958-2971.
- [32] Tong Q, Jiao T, Qi Z, et al. Spatiotemporal evolution of single sandbodies controlled by allocyclic and autocyclic in the shallow-water braided river delta front of an open lacustrine Basin[J]. Open Geosciences, 2021, 13(1): 98-121.
- [33] 李媛, 张元福, 王桐, 等. 鄂尔多斯盆地子洲地区上三叠统延长组长 1 段沉积相和浅水三角洲河口坝发育规律[J]. 古地理学报, 2019, 21 (5): 757-766. [Li Yuan, Zhang Yuanfu, Wang Tong, et al. Sedimentary facies of the member 1 of the Upper Triassic Yanchang Formation in Zizhou area of Ordos Basin and the development of mouth bar in shallow-water delta[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2019, 21(5): 757-766.]

Influence of Rising Lake Level on Shallow-water Delta Front Sandbody Architecture: Insights from Digital Outcrops

LI QiangQiang¹, WANG XiXin¹, XU YueMing², XUE Ting³, LI ShaoHua¹, YAN ChunJing¹

1. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China

2. CNOOC (China) Zhanjiang Branch, Zhanjiang 524057, China

3. Exploration & Development Research Institute of PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China

Abstract: [Objective] In the middle and late stages of oil and gas field development, studying sand architecture is the key to accessing residual oil and enhancing recovery. Precise interpretation of similar outcrops provides a comparable prototype model for predicting underground reservoir architecture. [Methods] The shallow-water delta profiles of the Yan'an Formation in the Kaokaowusu Gully and Gulf Mining Industry in the Ordos Basin were the research objects. UAV oblique photography was used to obtain images of massive outcrops from which 3D digital outcrop models were established. Detailed interpretation of digital outcrop architecture was then carried out by combined field observation and indoor analysis. [Results] Developmental characteristics and evolutionary models of shallow-water delta front architecture during a time of rising lake levels were defined. When the lake level is low, mainly trunk-type distributary channels are developed, measuring 23.30-48.40 m wide × 0.89-1.81 m thick, with an average width-to-thickness ratio of 26.74. The sandbody superposition patterns are mainly overlay type. As the lake level rises, fork-type distributary channels, mouth bars, sand sheets and subaqueous distributary bays gradually develop. The width of the mouth bar is 53.90 m, thickness is 2.21 m, width-to-thickness ratio is 24.39, and the sandbody superposition patterns is mainly lateral splicing type. When the lake level is higher, mainly terminal-type distributary channels, mouth bars and sheet sand architectural units are developed. Terminal-type underwater distributary channels, which are isolated in muddy deposits, have widths ranging from 4.70 to 25.30 m, thickness from 0.40 to 1.03 m, and the width-to-thickness ratio from 11.75 to 24.56. [Conclusions] When the source supply of material is relatively stable, an increase in lake level enlarges the accommodation space. The architectural units evolve from trunk-type to terminal-type distributary channels, depositing mouth bars and sand sheets. The size of the sandbody decreases, but its width-to-thickness ratio increases. Overall, the ratio between sandstone and stratum thickness decreases, spatial connectivity decreases, and reservoir heterogeneity is enhanced.

Keywords: Ordos Basin; drone oblique photography; digital outcrop; delta front; architecture model; lake level fluctuation