



引文格式: 师学耀, 高超利, 孟旺才, 等. 鄂尔多斯盆地东缘成家庄地区二叠系山西组三角洲前缘露头构型分析[J]. 西北地质, 2025, 58(1): 135–149. DOI: 10.12401/j.nwg.2023039

Citation: SHI Xueyao, GAO Chaoli, MENG Wangcai, et al. Delta Front Outcrop Architecture Analysis of Permian Shanxi Formation in Chengjiazhuang, Liulin, East Ordos Basin[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(1): 135–149. DOI: 10.12401/j.nwg.2023039

鄂尔多斯盆地东缘成家庄地区二叠系山西组 三角洲前缘露头构型分析

师学耀¹, 高超利^{1,2}, 孟旺才¹, 赵逸¹, 陈立军¹, 王彩霞¹,
冷丹凤¹, 马洪志¹, 马裕武¹, 孙宁亮³

(1. 延长油田股份有限公司勘探开发技术研究中心, 陕西 延安 716000; 2. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249;
3. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 通过野外露头精细解剖, 基于露头的岩性、沉积构造、颜色及沉积环境, 开展了鄂尔多斯盆地东缘山西柳林成家庄地区二叠系山西组三角洲前缘砂体构型研究。结果表明: 研究区共有 10 种岩相类型及 7 种沉积单元, 根据沉积旋回特征及岩相组合类型, 识别出了分流河道、分流砂坝、潮汐砂坝、河口坝、远砂坝、席状砂 6 种 4 级构型单元, 它们又以复杂的组合方式构成三角洲前缘 5 级构型单元。构型单元的组合样式可分为垂向叠置、侧向拼接及孤立式 3 种。通过实地测量对构型单元进行了定量表征, 分流河道、分流砂坝、河口坝、远砂坝砂体厚度和宽度之间存在线性关系, 且具有较高的相关性, 能够为地下构型单元建模提供一定的地质依据。

关键词: 二叠系山西组; 三角洲前缘; 岩相类型; 露头构型; 组合样式; 定量表征

中图分类号: P535; TE122.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)01-0135-15

Delta Front Outcrop Architecture Analysis of Permian Shanxi Formation in Chengjiazhuang, Liulin, East Ordos Basin

SHI Xueyao¹, GAO Chaoli^{1,2}, MENG Wangcai¹, ZHAO Yi¹, CHEN Lijun¹, WANG Caixia¹,
LENG Danfeng¹, MA Hongzhi¹, MA Yuwu¹, SUN Ningliang³

(1. Research Center for Exploration and Development Technology, Yanchang Oilfield Co., Ltd., Yan'an 716000, Shaanxi, China;
2. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. School of Resources
and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China)

Abstract: Through detailed analysis of outcrop sections, based on lithology, sedimentary structures, colors and sedimentary environment, sand body architecture of delta front is researched in Chengjiazhuang district, east Or-

收稿日期: 2022-04-08; 修回日期: 2022-05-25; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 国家科技重大专项项目“大型油气田及煤层气开发-砂页岩储层特征及有利区带评价(2016ZX05066001-003)”, 延长油田股份有限公司科技项目基金“志丹油田爬子洼区石油地质评价及勘探建议(yesh2021ky-B-15-1-3)”联合资助。

作者简介: 师学耀(1987-), 男, 工程师, 从事石油勘探工作。E-mail: 44421381@qq.com。

dos basin of Permian Shanxi formation. Results show that there are ten kinds of lithofacies and seven sedimentary units in the study area. According to sedimentary cycle and lithofacies assemblage characteristics, six types of fourth level architectural units, i.e., distributary channel, distributary bar, tide sand-dam, estuarine dam, distal bar and sheet sands are identified. They also formed fifth level architectural units in delta front in a complicated assemblage style. Assemble patterns of architectural units are divided into vertical stacking type, lateral joining type and isolated type. Through field measurement, architectural units are quantitative characterized. Result show that there is a linear relationship with a high relativity between thickness and width of distributary channel, distributary bar, estuarine dam and distal bar, which can provide a geological basis for modeling of subsurface architectural units.

Keywords: Permian Shanxi Formation; delta front; type of lithofacies; outcrop architecture; assemble pattern; quantitative characterization

砂体构型研究是分析储层沉积体非均质性的一种非常有效的方法,它不仅反映沉积体外部几何形态和规律,而且强调沉积体内部构成,对于储层精细表征和剩余油挖潜具有重要的理论和现实意义(李阳等, 2007; 孙天建等, 2014; 蒋天昊等, 2020)。对于构型的概念,最早是由 Allen 在 1977 年的第一届国际河流沉积学研讨会上提出的,并将这一概念应用到沉积地质体的研究中,随后又有众多学者对沉积体内的构型界面进行研究,并提出了相应的构型界面分级划分方案(Allen, 1983; Miall, 1985, 1988, 1996),其中 Miall 的构型界面划分方案较详细,层次清楚(Miall, 1985, 1988),应用广泛,国内的很多学者也把它应用到中国沉积体构型分析当中(岳大力等, 2007; 王越等, 2016; 朱卫红等, 2016)。河流、三角洲砂体是陆相含油气盆地主要的储集类型,由于沉积物的搬运方式、沉积水动力条件的不同,砂体内部不同级次构成单元的形态、方向、规模及叠置关系也不同,这直接导致注水开发中水驱波及剩余油的分布模式的不同(赵伦等, 2016; 罗旭东等, 2024)。因此,砂体构型的研究是非常必要的。山西柳林成家庄山西组属于辫状河三角洲沉积,但三角洲前缘沉积受到海相潮汐影响(叶黎明等, 2008; 陈安清等, 2010; 陈洪德等, 2011),分布具有潮汐层理的砂体,其储层构型又有其特殊性。笔者通过对成家庄地区山西组典型露头实测分析,以 Miall 的构型理论为指导,分级精细解剖,识别出了三角洲前缘砂体内部构型单元,建立露头构型分布样式,同时对不同级别的构型单元进行实测,建立各构型单元参数之间的定量关系,为鄂尔多斯盆地东部地区山西组储层构型精细解剖及剩余油挖潜提供地质依据。

1 研究区概况

研究剖面位于山西省柳林县成家庄周边,在大地构造位置上属于鄂尔多斯盆地晋西挠褶带(图 1)(马晓军等, 2019; 孙宁亮等, 2019)。成家庄剖面是华北地区石炭系—二叠系典型露头,地层发育齐全且连续,为华北地区石炭系—二叠系沉积演化及储层构型分析提供了良好条件。本次研究的主要目的层段是二叠系下统山西组,按照岩性组合及沉积旋回山西组自下而上又可分为山 2 段和山 1 段,山 2 段以灰白色、灰色中细砂岩为主,中间夹深灰色泥岩、页岩及煤层,地层厚度约为 40 m,山 1 段主要为灰色、灰白色含砾中细砂岩与深灰色泥岩互层,砂岩底部可见煤线,地层厚度约 45 m(图 2)。鄂尔多斯盆地在晚古生代发生了巨大的海陆变迁。其中,本溪组—太原组为陆表海沉积环境,很多学者已经研究证实(沈玉林等, 2009; 张敬霞等, 2011),但山西组沉积环境却存在争议,主要有海陆过渡环境,陆源近海湖盆及陆相湖盆 3 种解释(叶黎明等, 2008; 陈安清等, 2010)。通过文献调研(刘家铎等, 2006; 田雯, 2016)及野外剖面实测分析,认为研究区成家庄山西组为一套海陆过渡的三角洲沉积体系,山 2 段发育辫状河三角洲前缘沉积,但整体水体较浅,且三角洲前缘沉积砂体受到潮汐的影响,具脉状层理、透镜状层理及羽状交错层理等潮汐层理,主要发育分流河道、河口坝、潮汐砂坝、远砂坝及分流间湾等微相;山 1 段发育三角洲平原沉积,三角洲平原上的分流河道早期具有辫状河性质,晚期具有曲流河性质,主要发育分流河道、天然堤、决口扇和沼泽等微相。

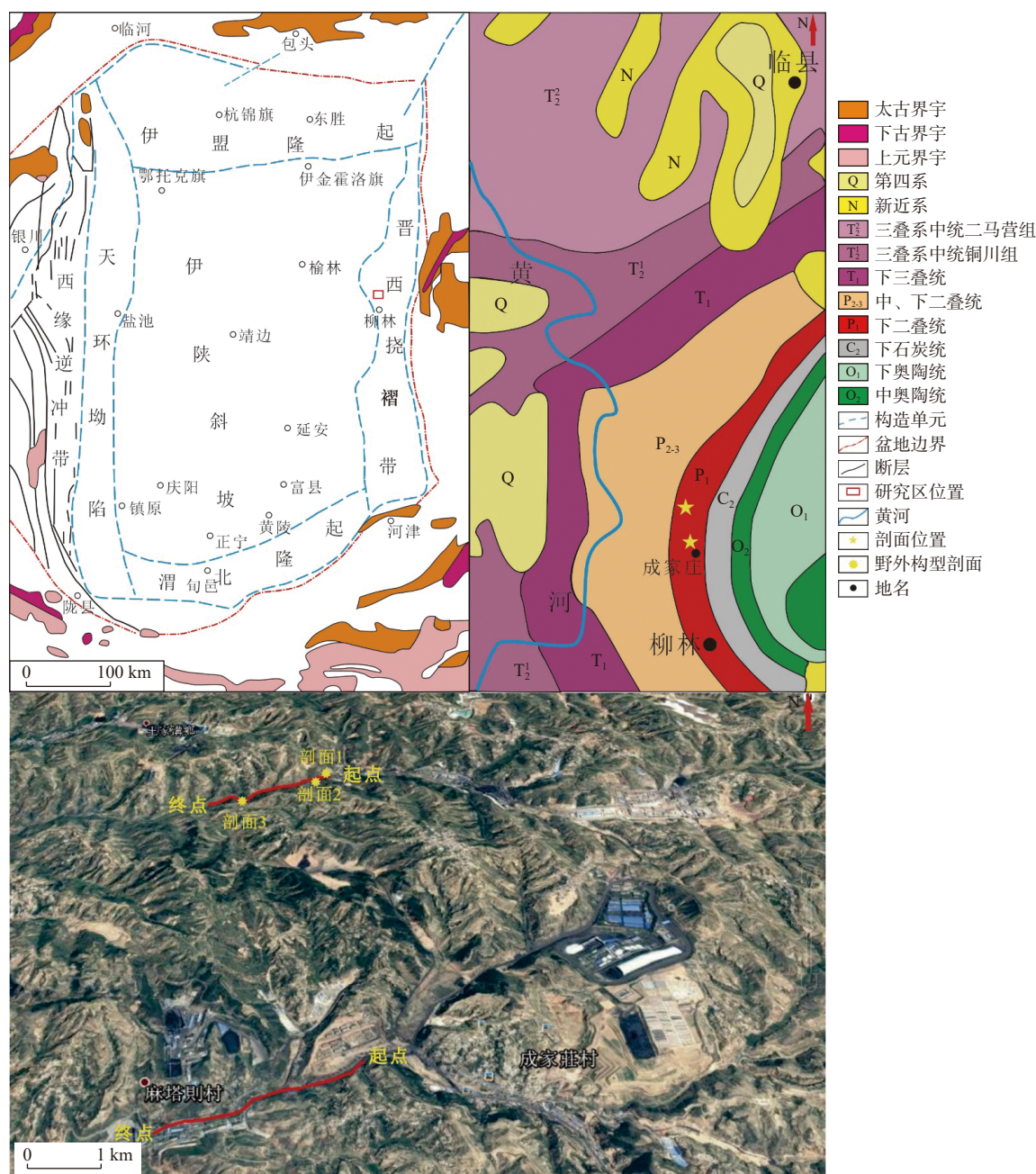


图1 山西柳林成家莊山西组露头位置示意图

Fig. 1 Location of Permian Shanxi Formation outcrop in Chengjiazhuang, Liulin, Shanxi Province

2 岩相类型

岩相是一定的沉积环境中形成的岩石或岩石组合,主要由岩石类型和沉积构造来表征(Miall, 1985),对于反映沉积岩的形成环境具有特定意义。通过对成家莊地区山西组典型剖面观测,结合颜色、粒度、岩性和沉积构造等标志,识别出了以下 10 种岩相类型。

2.1 块状层理含砾中粗砂岩相(Gm)

砾石分选中等,磨圆度为次棱角状-次圆状,呈叠

瓦状排列,厚度一般为 0.5~2 m,底部砾石层整体为块状,向上过渡为具交错层理的中砂岩(图 3a),一般为河道底部充填沉积。

2.2 块状层理中细砂岩相(Sm)

整体为块状,不显任何层理(图 3b),厚度约为 0.5~3 m,岩性为灰白色中细砂岩,分选较好,成熟度较高,一般分布在分流河道及分流砂坝的下部。

2.3 槽状交错层理中细砂岩相(St)

中细砂岩中发育小型-中型槽状交错层理,纹层与层系平行,具有下凹的方向(图 3c),反映了牵引流

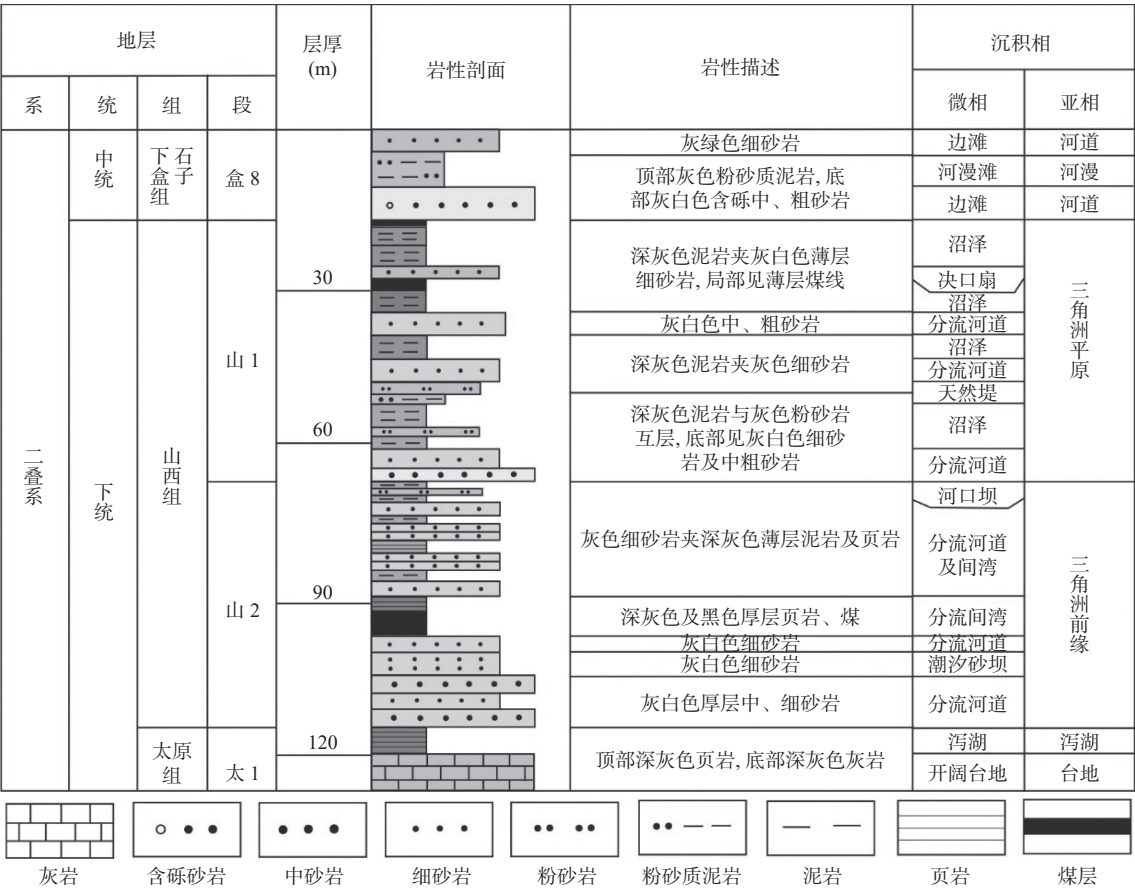


图2 柳林成家庄山西组露头岩性剖面及其沉积微相解释

Fig. 2 Lithological profile and sedimentary microfacies interpretation of Shanxi Formation in Chengjiazhuang, Liulin

的沉积特征,为河道迁移、充填的结果。一般在河道砂体的下部见小型槽状交错层理,厚度约为0.4~1.0 m,上部见中型-大型槽状交错层理,厚度约为1~3 m。

2.4 板状交错层理中细砂岩相(Sp)

发育在中细砂岩中,纹层的下部与层系界面斜交(图3d),为水下波浪底形迁移的结果。一般发育在较高能的水动力条件下,为河道沉积的产物,厚度约为0.4~1.5 m。

2.5 平行层理中细砂岩相(Sh)

岩性一般为中细砂岩,各纹层之间彼此平行(图3e),一般为水浅、急流状态下的产物,反映了高流态的上部流动体态,在河道边部水浅环境中常见,厚度为0.3~2 m。

2.6 羽状交错层理细砂岩相(Spc)

岩性一般为细砂岩,是由涨潮流形成的前积层与退潮流形成的前积层交互而成,相邻层系的纹层倾向正好相反,形似羽毛状(图3f),一般在潮汐通道或潮汐砂坝中出现,厚度为1~3 m。

2.7 透镜状层理细砂岩相(Sf)

透镜状层理是潮汐层理的一种,是由砂、泥交互沉积形成的。当有较强的水流或波浪作用时,砂呈波浪状态被搬运沉积,泥则呈悬浮状态沉积在波谷里或沉积在波状起伏的砂层之上,砂质的沉积比泥好保存,就形成的透镜状层理(图3g),岩性以细砂岩、粉砂岩或泥质粉砂岩为主,厚度约为0.3~1.5 m。

2.8 流水沙纹层理粉细砂岩相(Fr)

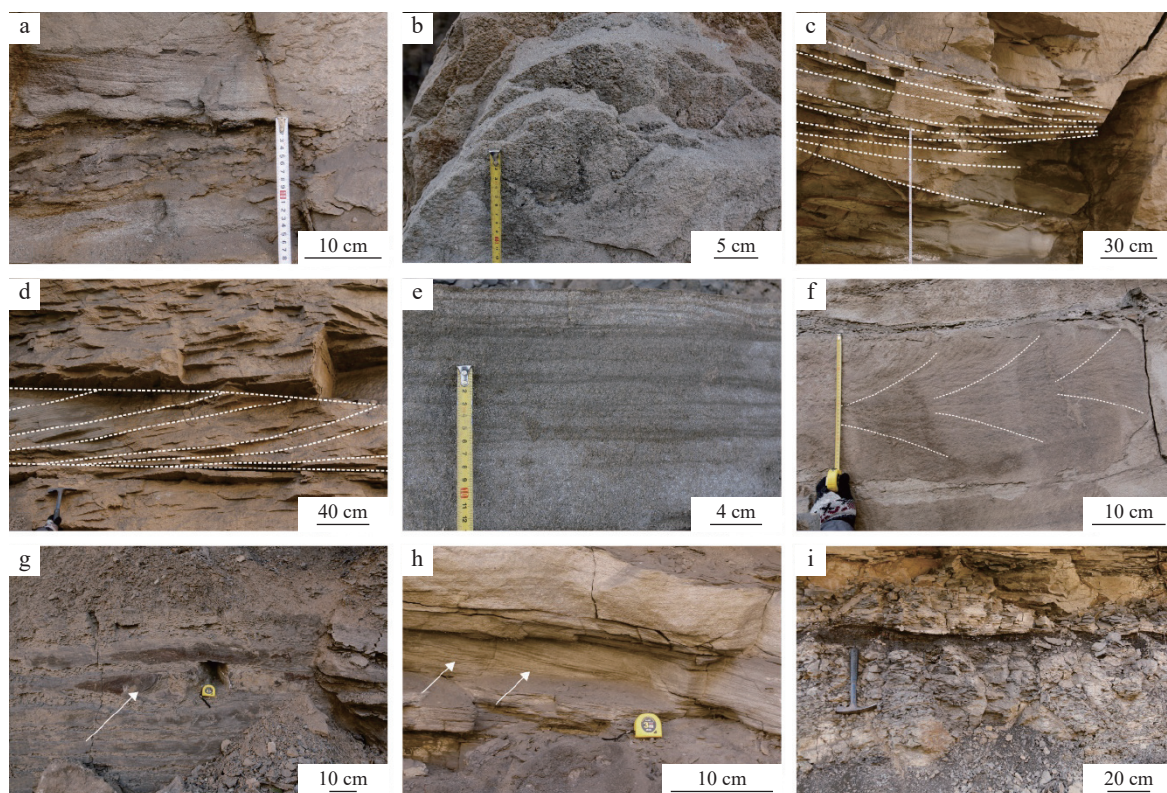
岩性主要为粉细砂岩,主要是由流水波痕向前迁移形成的(图3h),发育在水动力较弱的环境中,河道两侧的漫溢沉积及堤岸沉积中常见,厚度约为0.3~0.8 m。

2.9 块状泥岩相(Mm)

灰黑色泥页岩整体呈块状,主要为细粒悬浮沉积物在低能静水环境中形成的,纹层呈薄层状,有时显水平层理,主要分布于水下分流间湾或河漫滩中,厚度为0.5~2 m。

2.10 煤层(C)

黑色煤层呈带状分布,主要形成于泥碳沼泽环境



a. 底部块状层理含砾中粗砂岩相, 顶部槽状交错层理中细砂岩相; b. 块状层理中细砂岩相; c. 槽状交错层理中细砂岩相; d. 板状交错层理中细砂岩相; e. 平行层理中砂岩相; f. 羽状交错层理细砂岩相; g. 透镜状层理细砂岩相; h. 流水沙纹层理细砂岩相; i. 薄煤层及深灰色泥岩

图3 柳林成家庄山西组主要的岩相类型

Fig. 3 Main lithofacies types of Shanxi Formation in Chengjiashuang, Liulin

(图3i), 厚度不等, 为0.2~1.5 m, 垂向上煤层与深灰色页岩、块状泥岩及粉砂质泥岩互层叠置, 并可见到水平层理、波纹层理。

3 构型要素综合分析

3.1 沉积单元及岩相类型组合

根据三角洲沉积特征, 结合 Miall 提出的河流、三角洲构型单元(Miall, 1985, 1988, 1996), 同时根据已经较为成熟的三角洲沉积微相的划分方案, 将研究区的沉积单元分为以下7种。

3.1.1 水下分流河道

分流河道砂体是研究区主要的沉积单元之一, 岩性以灰色、灰白色中细砂岩为主, 底部可见细砾, 灰黑色泥砾(图3a), 下部以块状层理为主, 向上逐渐过渡为槽状交错层理、板状交错层理及平行层理, 在底部可见冲刷充填构造, 整体上显示为向上逐渐变细的正旋回, 单个的分流河道砂体在剖面上呈“顶平底凸”

的形态, 并向两端逐渐变薄, 单一厚度一般为1~10 m, 宽度为10~100 m。岩相组合自下而上表现为 Gm-St/Sp-Sh-Mm 的组合(图4、图5)。

3.1.2 分流砂坝

分流砂坝是指河流入湖(海)后, 由于流速骤减和潮流的顶托作用, 河流砂体负载沉积形成水下浅滩, 浅滩逐渐增大, 露出水面, 形成了砂坝(张昌民等, 2010; 朱卫红等, 2016)。岩性以灰白色中细砂岩为主, 底部块状砂岩中可见细小的砾石, 向上粒度逐渐变细, 见槽状交错层理及平行层理, 整体表现为正旋回的特性, 剖面形态分为“底平底凸”和“底平底平”两种, 其“底平底平”的形态可能是砂体的顶部受到潮汐的改造作用形成。单一砂体厚度为1~8 m, 宽度为10~90 m。岩相类型组合自下而上表现为 Gm-St/Sp-Sh(图4a、图5b)。

3.1.3 潮汐砂坝

位于三角洲前缘的水下分流河道砂体和河口坝砂体受到潮汐水流作用的改造后逐渐沉积下来而形

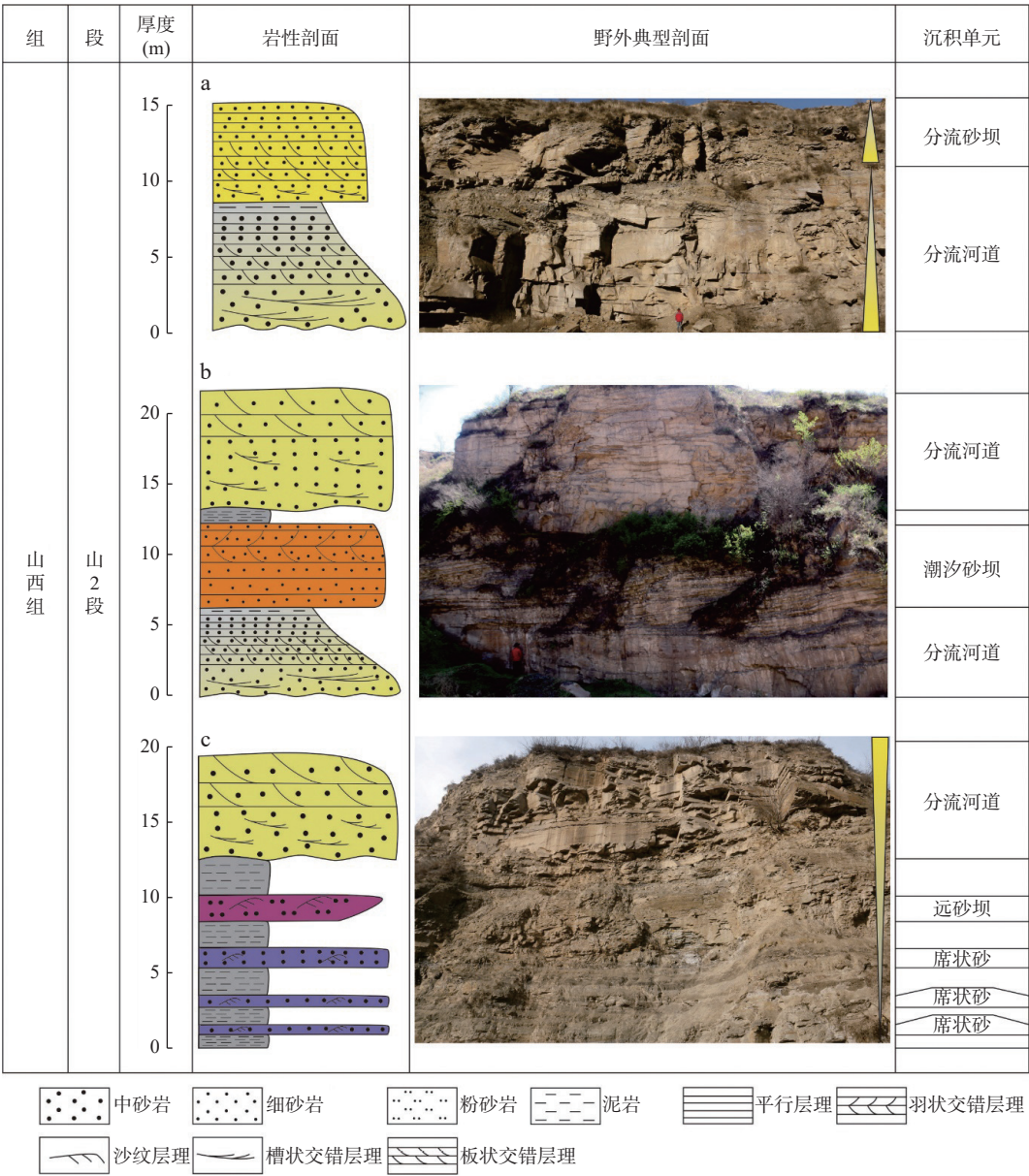


图4 柳林成家庄山西组露头剖面基本沉积单元

Fig. 4 Basic sedimentary units of Shanxi Formation in Chengjiazhuang, Liulin

成的砂体,其明显的标志是具有双向楔形的斜层理(图4b、图5a)。此外,某些潮汐砂坝也具脉状、透镜状等潮汐层理。潮汐砂坝砂体一般粒度较细,成熟度较高,分布与海岸方向垂直,规模一般较小。

3.1.4 河口坝

当河流入海以后,由于海水抑制作用,使流速骤减,河流所携带的泥砂物质在河口处堆积下来形成河口坝。其粒度较细,分选磨圆较好,可见楔状斜层理、平行层理及流水沙纹层理。研究区河口坝砂体由于潮汐水流的改造作用,分布较少,其在剖面上呈透镜体状。单一河口坝砂体厚度较薄,厚度为0.3~1.5 m,

宽度为5~30 m之间,可见Fr-Sh的岩相类型组合(图5c)。

3.1.5 远砂坝

位于河口坝砂体的前端位置,其粒度较细,主要为粉砂岩,可见波状层理、水平层理、递变层理及一些变形层理,砂体中可见植物碳屑。其厚度较薄,一般为0.1~1 m,但其横向延伸较远(图4c)。

3.1.6 前缘席状砂

为河口坝砂体被海浪或湖浪冲刷后再次搬运、分选而沉积的砂体,其粒度较细,主要为粉砂岩、泥质粉砂岩,分选较好,可见水平层理及波状层理。厚度较

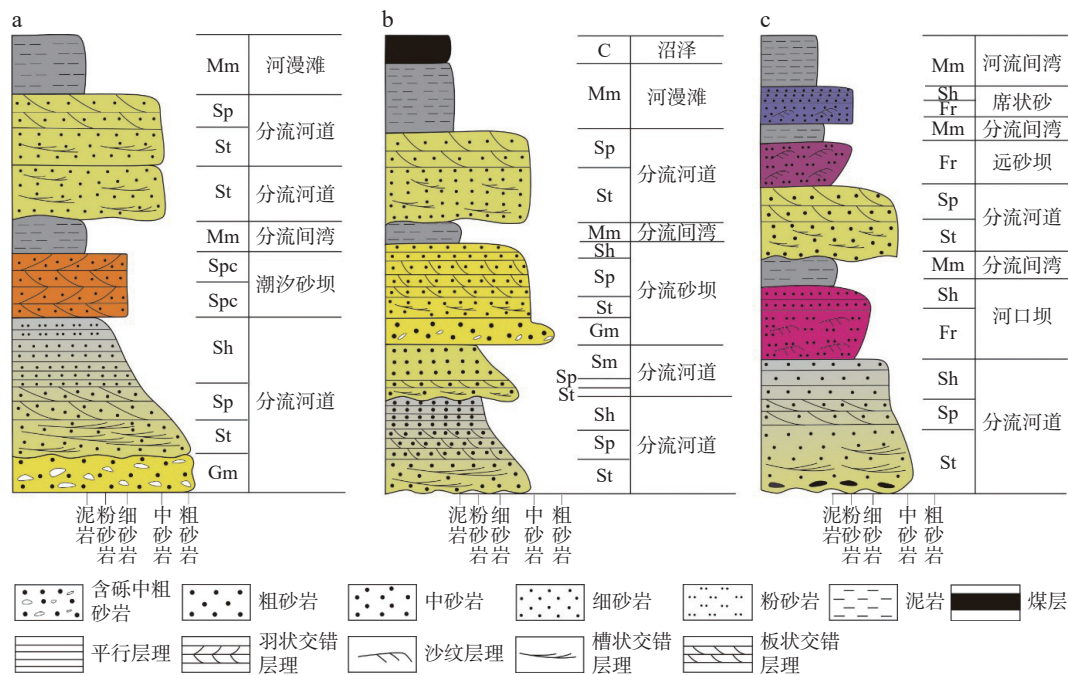


图5 柳林成家庄山西组典型岩相组合

Fig. 5 Typical lithofacies associations of Shanxi Formation in Chengjiazhuang, Liulin

薄,一般为0.05~0.8 m,在剖面中主要孤立 in 较厚层的泥岩中,延伸较远(图 4c)。

3.1.7 水下分流间湾

为水下分流河道之间的相对低洼地方的沉积,也可延伸到河口坝及远砂坝。岩性以灰色、深灰色泥岩为主,也可见灰色粉砂质泥岩及泥质粉砂岩(图 3h),主要发育水平层理及透镜状层理。

3.2 构型界面级次划分

为进一步揭示三角洲沉积单元的内部结构及构型特征,借鉴 Mill 的河流构型分级划分方案(Miall, 1985, 1996),对研究区露头沉积体进行了构型界面识

别及划分,由小到大可以分为 5 个等级(表 1)。1 级构型界面为交错层系界面,即因流体底形迁移形成的相同纹层组构成的界面,界面没有明显的侵蚀性。2 级构型界面为交错层系组成的层系组界面,反映了流体动力或流动方向的变化,其表现为单一岩相,界面也不具侵蚀性,在剖面中表现为槽状交错层理、板状交错层理及平行层理之间的分界(图 5b)。3 级构型界面是大型底形增生体的顶、底界面,增生体的岩相组合基本相似,是由流体顺流加积或者侧向加积形成的沉积单元,界面的底部可见泥砾或薄层泥质夹层,并可见微弱的侵蚀作用,在剖面上主要表现为分流河道、

表 1 研究区三角洲前缘露头沉积单元及构型界面级次划分

Tab. 1 Sedimentary units and architecture boundary level division of delta front in the study area

构型界面级别	构型沉积单元	沉积成因及特征	界面特征
1	层系	流体底形迁移	无明显侵蚀
2	层系组	流体底形迁移	无明显侵蚀
3	大型底形内部的增生体,如分流河道、分流砂坝及潮汐砂坝内的侧积体,三角洲前缘河口坝的前积体	流体顺流加积或者侧向加积	微弱侵蚀面
4	大型沉积底形,如分流河道、分流砂坝、潮汐砂坝、单一河口坝、单一远砂坝、单一席状砂等	由多个增生体在垂向或侧向加积形成的沉积单元	具明显侵蚀,可见侵蚀面
5	单一河道复合沉积体、潮汐砂坝复合沉积体、河口坝复合体、远砂坝复合体、席状砂复合体	具侵蚀界面的连续沉积体,表现为垂向加积、侧向加积及填积形成的复合沉积单元	具侵蚀的基底,底部滞留沉积,重要的岩性及物性界面

分流砂坝及潮汐砂坝内的增生体,三角洲前缘河口坝内部的前积层。4级构型界面为较大型构型界面的上、下边界,即由多个增生体叠合形成的单成因沉积体界面,如单一的分流河道、单一的分流砂坝,界面上、下单元类型具明显变化,也具明显的侵蚀作用,但规模相对较小。5级构型界面为单一河道复合沉积体、潮汐砂坝复合沉积体及河口坝复合沉积体等的顶、底界面,表现为具有侵蚀界面的连续沉积体。界面底部为侵蚀面或洪泛面,可见滞留沉积,也是岩性和物性的分界面(图5a)。

3.3 剖面构型要素综合解释成果

通过对研究区沉积单元及构型界面级次的详细分析,根据旋回特性和岩性组合特征对成家地区山西组较为典型的3个剖面进行了构型要素综合解释,对剖面中存在5级、4级、3级、2级构型界面进行了精细刻画,并对各个沉积单元的特征进行了分析。

剖面1近于垂直物源方向。因此,横切分流河道、分流砂坝及潮汐砂坝,剖面长度约为50 m,厚度为6~15 m。岩性主要为灰白色、土黄色块状中细砂岩及粉砂岩、灰色薄层泥岩。在垂向上可识别出3个5级构型界面,每期的5级构型单元由次一级构型沉积体复合而成(图6)。第1期5级构型单元由4期分流河道充填体复合而成,每期分流河道表现为自下而上

由粗变细的正旋回,分流河道砂体内可见板状、槽状交错层理,总体呈近“顶平底凸”的剖面形态,5级构型界面的底部可见厚度不均但分布稳定的灰色薄层泥岩,厚度为5~10 cm,成为砂体之间的非渗透层,增加了储层的非均质性。第2期5级构型单元为2期潮汐砂坝复合形成的沉积单元,每期潮汐砂坝由方向相反的楔状增生体组成的3级构型单元复合而成,在3级增生体内可见槽状、楔状层系组构成的2级构型单元,底部可见微弱的侵蚀面,并没有非渗透性的泥质隔层。第3期5级构型单元由2期分流河道砂体复合构成,分流河道砂体整体为块状,不显层理,表现为由粗变细的正旋回,在5级构型界面的底部可见明显的底冲刷,整体呈“顶平底凸”的形态。剖面1在垂向上表现为由潮汐砂坝和分流河道相互叠置形成的2期正旋回组合,构型等级明确,界线清晰。

剖面2与古物源方向也近于垂直,剖面长度约为80 m,厚度为8~16 m。岩性主要为灰白色、土黄色中细砂岩、深灰色薄层泥岩。整个剖面在垂向上由2个5级构型单元组成,自上而下分别为单一复合河道沉积体和潮汐砂坝组成的复合沉积体(图7)。第1期5级构型单元为分流砂坝与分流河道组成的复合河道,河道的底界面为5级构型单元的界线,可见明显的底冲刷,并见深灰色泥岩隔层,成为分隔砂体

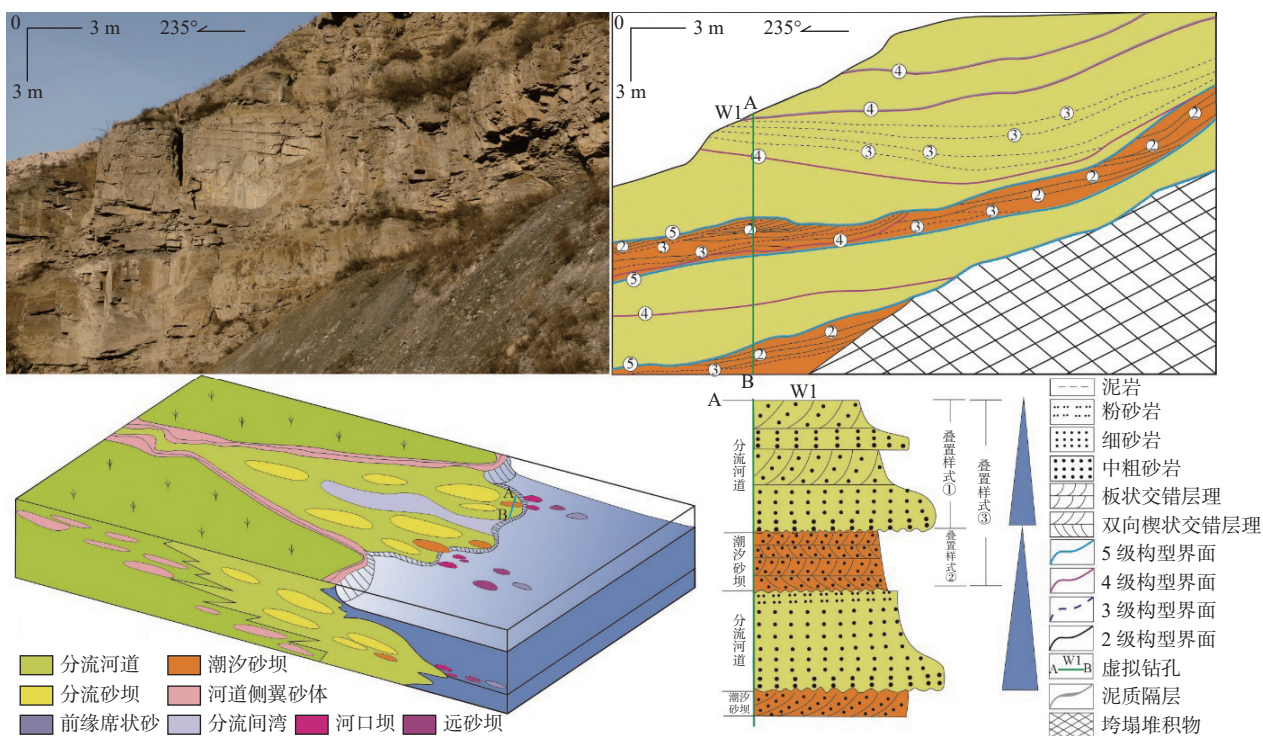


图6 剖面1构型要素综合解释成果及W1构型单元垂向叠置关系

Fig. 6 Comprehensive interpretation results of field profile 1 and vertical stacking relationships of W1

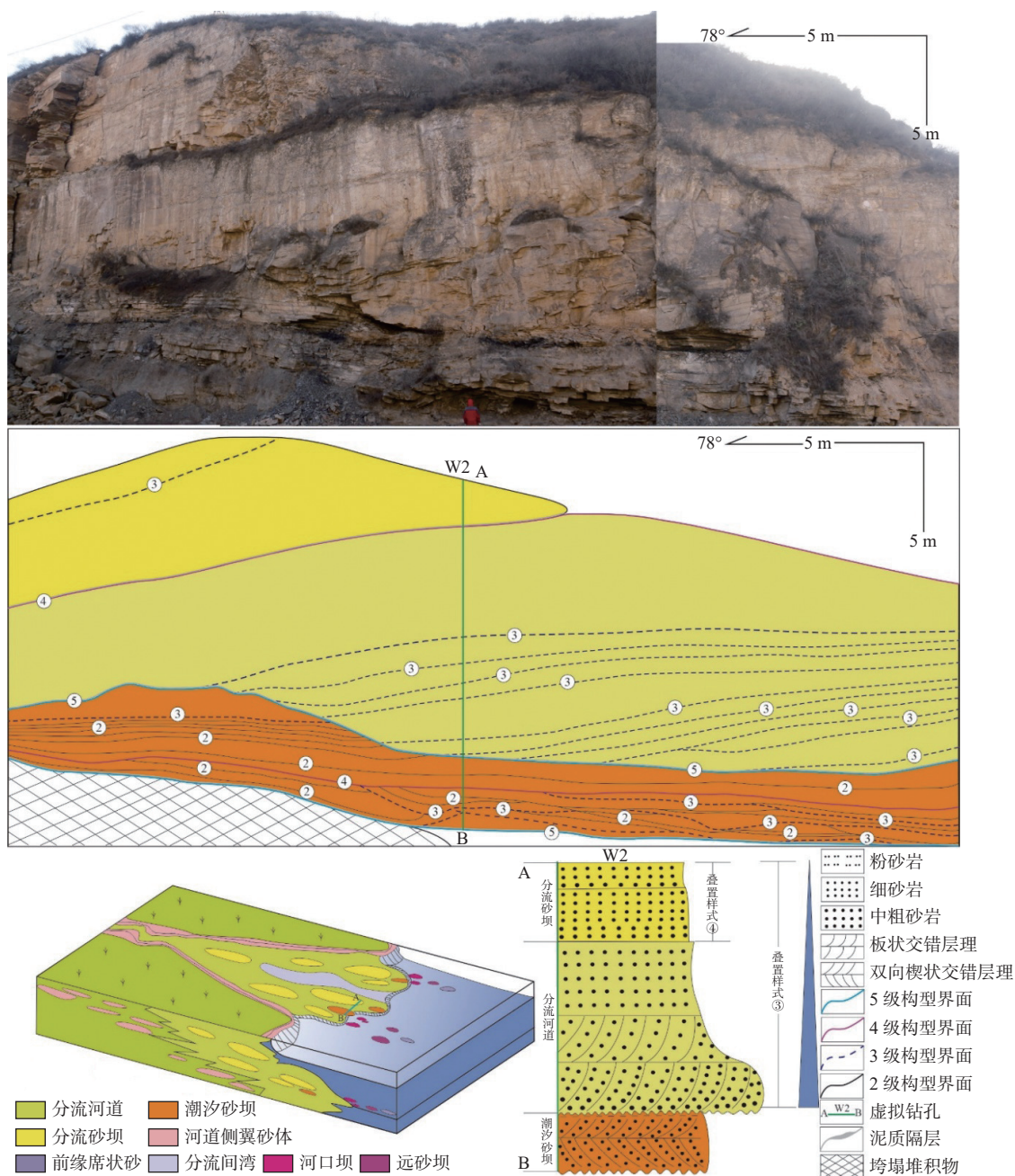


图7 剖面2构型要素综合解释成果及W2构型单元垂向叠置关系

Fig. 7 Comprehensive interpretation results of field profile 2 and vertical stacking relationships of W2

之间的非渗流层。分流砂坝垂向叠置于分流河道之上,厚度约为8 m,整体为块状,其底界面为4级构型单元的界线,可见厚度较薄的泥岩隔层,内部识别出3级分流砂坝增生体,在垂向剖面上表现为“顶平底平”的形态。分流河道由多个3级河道增生体复合而成,见槽状交错层理,自下而上显正旋回,最厚可达15 m,河道增生体是由主河道侧向迁移形成的,内部界线较清晰,但没有明显的侵蚀界面。分流河道的底部见明显的冲刷面,与分流砂坝相区别,整体上呈“

顶平底凸”的形态。第2期5级构型单元为2期潮汐砂坝复合而形成,潮汐砂坝内可见方向相反的3级构型楔状增生体,楔状增生体内又可识别出次一级的2级构型层系组,界线清晰。剖面2在垂向上体现出分流砂坝、分流河道及潮汐砂坝之间的相互叠置关系,内部5级、4级、3级、2级构型界面清晰,较好的体现了不同等级的构型单元特征。

剖面3近于顺物源方向,长度约为50 m,厚度近25 m。岩性主要为灰色、深灰色泥岩,灰色细砂岩、粉

砂岩。在垂向上由 2 个 5 级构型单元及多个 4 级构型单元组成,自上而下分别为单一复合河道沉积体和三角洲前缘河口坝、远砂坝和席状砂复合体(图 8)。顶部的 5 级构型单元为分流河道及分流砂坝组成的单一复合河道,分流河道和分流砂坝的界线为 4 级构型界面,分流河道的底界面见侵蚀面,并有泥质隔层,成为分流河道和分流砂坝之间的非渗流层,增加了储层的宏观非均质性。分流河道砂体内部可识别出由河道侧向迁移形成的 3 级增生体,界面清晰,分流砂坝整体为块状,剖

面形态表现为“顶平底平”。分流河道前端为河口坝,单一河口坝构成 1 个 4 级构型单元,河口坝内可见次一级增生体,河口坝前端为多套条带状的远砂坝沉积体,每 1 个远砂坝沉积体构成 1 个 4 级构型单元,远砂坝沉积体前端为席状砂沉积体,呈条带状,粒度比远砂坝砂体细,厚度较薄,每 1 期席状砂砂体也构成 1 个 4 级构型单元,其内部可见次一级的席状砂增生体,多个席状砂构成 5 级席状砂复合体。剖面 3 在垂向整体表现为一反旋回,构型界线清晰,各个沉积体特征明显。

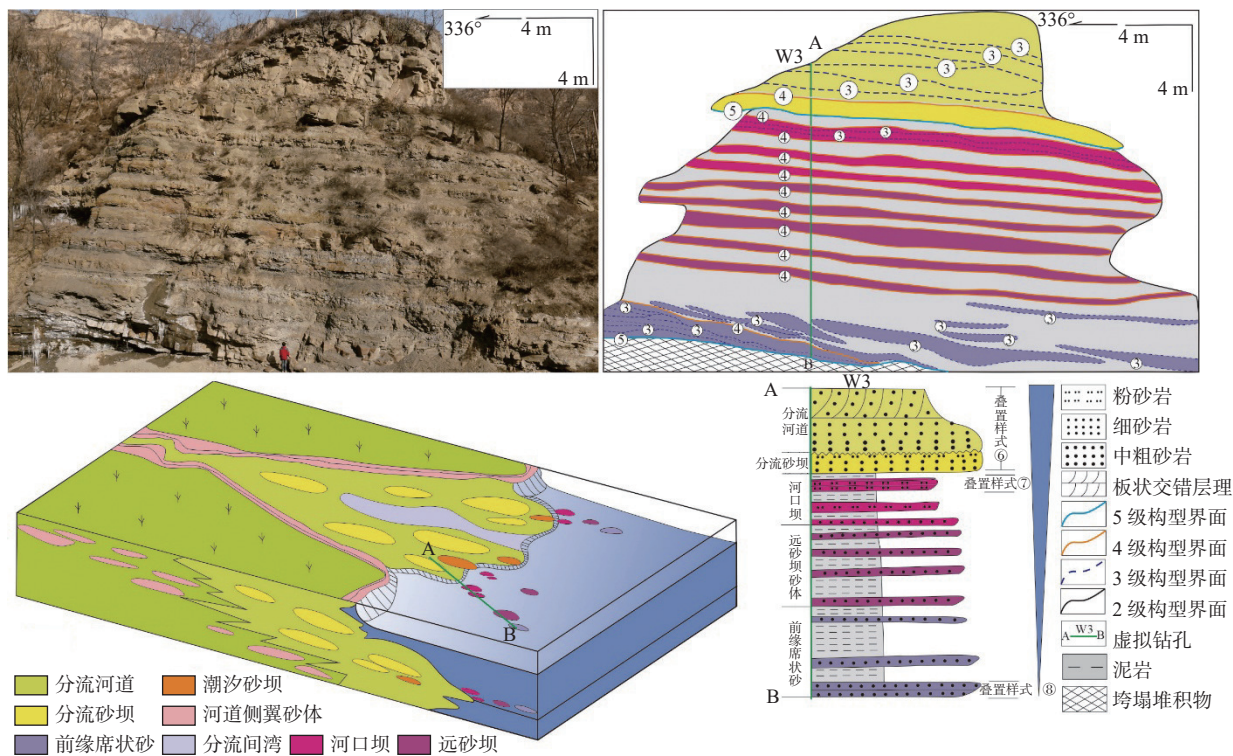


图 8 剖面 3 构型要素综合解释成果及 W3 构型单元垂向叠置关系

Fig. 8 Comprehensive interpretation results of field profile 3 and vertical stacking relationships of W3

4 构型单元组合样式

构型单元的组样式是沉积环境、水动力特征及垂向演化的综合反映,它对储层的非均质性研究及剩余油分布有着重要影响(金振奎等, 2014; 封从军等, 2015)。通过对山西柳林成家庄地区山西组野外剖面的精细观察,总结出了各沉积单元的组样式,主要有垂向叠置、侧向拼接及孤立式分布 3 种(图 9、图 10)。

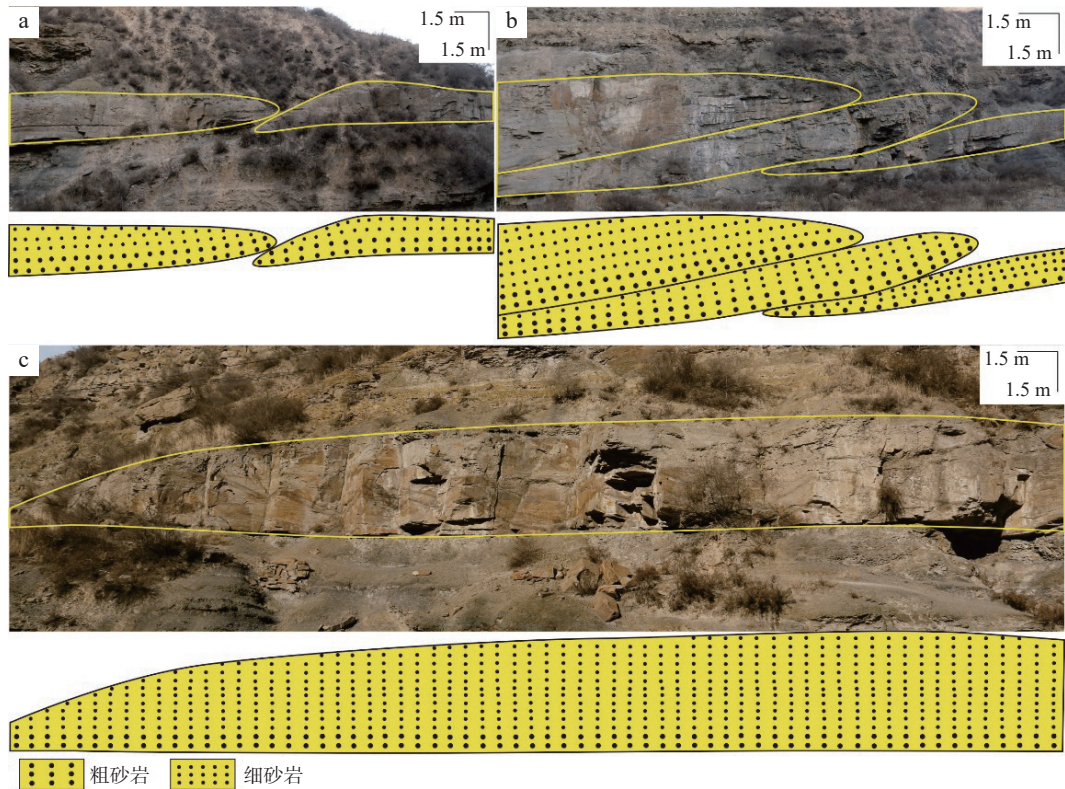
4.1 垂向叠置

垂向叠置是指各沉积单元在垂向上的相互叠置关系,主要是指单一复合河道内沉积体的叠置,单一复合河道沉积体与潮汐砂坝复合体之间的叠置,多期

潮汐砂坝之间的叠置、多期河口坝砂体之间的叠置及多期席状砂之间的叠置。

4.1.1 单一复合河道内沉积体的叠置

在研究区单一复合河道内沉积体的叠置关系可分为 3 种类型。分流河道与分流河道之间的叠置,或者是多期分流河道之间的叠置,如叠置样式①(图 6),两期分流河道基本上向同一方向延伸,但是后期河道切割叠置在早期河道之上,可见两期河道的下切侵蚀面,一般早期形成的河道顶部的粉砂或泥质部分会被后期河道剥蚀掉,层序不完整,后期形成的河道保持了较完整的沉积序列,显示正旋回层序。分流砂坝和分流砂坝之间的叠置,或者是多期分流砂坝之间的叠置,如叠置样式④(图 7),两期分流砂坝在垂向上相互



a. 构型单元的侧拼接型细砂岩 1.5 m; b. 构型单元的似侧拼接型; c. 构型单元的孤立式分布

图9 柳林成家庄地区山西组露头剖面构型单元侧向拼接及孤立式分布样式

Fig. 9 Lateral joining type and isolated type patterns of architecture units of Shanxi Formation in Chengjiazhuang, Liulin

叠置,分流砂坝底部没有明显的侵蚀面,但界线清晰,岩相组合也基本相似,显示两期正旋回的沉积韵律。分流砂坝与分流河道之间的叠置,可分为两种类型。①分流砂坝叠置于分流河道之上,如叠置样式⑤(图7),分流砂坝在垂向剖面上显示“顶平底平”的形态,而分流河道则显示“顶平底凸”的形态,其延伸方向基本一致,界线清晰,延伸较长,产状较缓,在界线之上可见泥质隔层。②分流河道切叠于分流砂坝之上,如叠置样式⑥(图8),上部分流河道下切较明显,底部粒度较粗,显示正旋回的沉积韵律,底部先形成的分流砂坝砂体粒度相对较细,显示“顶平底平”的形态,两个沉积单元之间界面清晰,延伸方向一致。

4.1.2 单一复合河道沉积体与潮汐砂坝复合体之间的叠置

单一复合河道沉积体与潮汐砂坝复合体之间的叠置是指分流砂坝与分流河道或者是分流河道与分流河道组成的5级构型单元与多期潮汐砂坝之间的垂向叠置,如叠置样式③(图6),分流河道底部下切侵蚀面明显,界限清晰,潮汐砂坝顶部的细粒沉积部分被分流河道下切剥蚀掉,顶部显示河道的下切底形,此种类型在研究区分布较少。

4.1.3 多期潮汐砂坝之间的叠置

多期潮汐砂坝之间的叠置是指由多个单一潮汐砂坝组成的复合体在垂向上的叠置关系,每一期之间的界线是4级构型界面的分界线,如叠置样式②(图6),两期潮汐砂坝在垂向上相互叠置,岩相类型基本一致,每期潮汐砂坝都发育方向相反的楔状沉积体,其之间的界线清晰,分割明显,上部后形成的潮汐砂坝对下部先形成的潮汐砂坝有一定的侵蚀作用,多期潮汐砂坝在垂向上的叠置在研究区也较常见。

4.1.4 多期河口坝之间的叠置

多期河口坝叠置是指多个单一的河口坝沉积体在垂向上的相互叠置,如叠置样式⑦(图8),多个透镜状的河口坝砂体在垂向上叠置,每个河口坝砂体都向同一方向延伸,岩性也基本一致,其之间的界线清晰。

4.1.5 多期席状砂之间的叠置

多期席状砂之间的叠置是指多期席状砂在垂向上的叠置关系,如叠置样式⑧(图8),多个席状砂砂体向同一个方向延伸,总体厚度较薄,粒度很细,也可见后形成的席状砂对先形成的席状砂的切割作用。

4.2 侧向拼接

侧向拼接是指各个构型单元在侧向上的拼接关

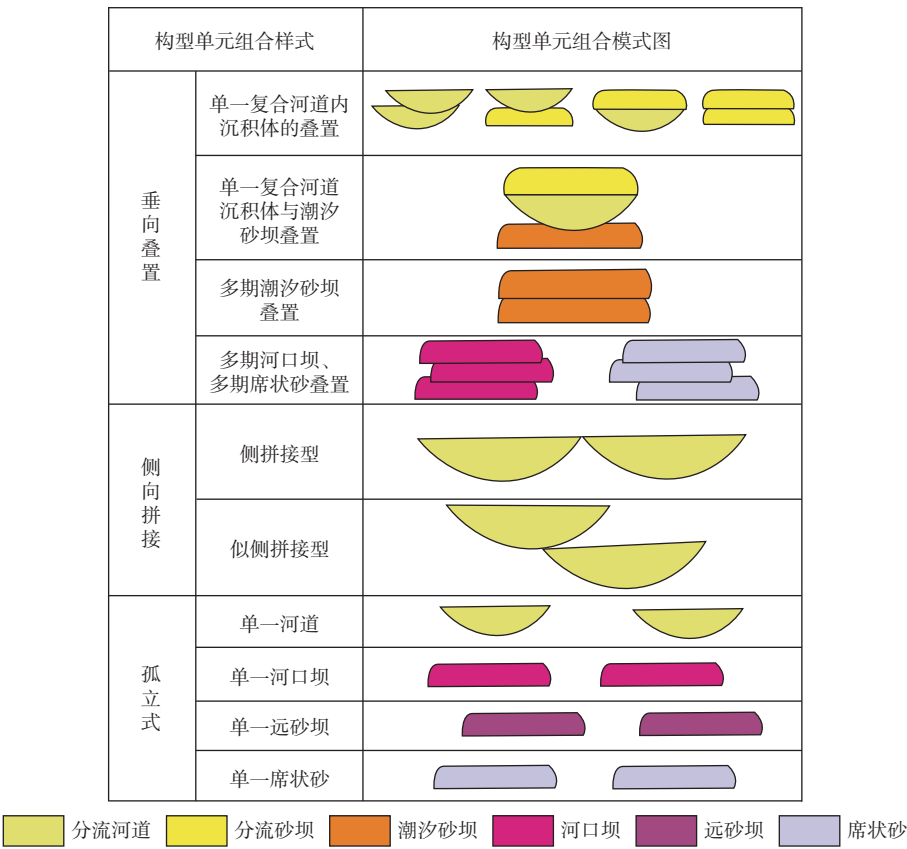


图10 柳林成家庄地区山西组露头剖面构型单元组合模式图

Fig. 10 Assemble patterns of architectural units of Shanxi Formation in Chengjiazhuang, Liulin

系,各个构型砂体之间并没有明显的切割,通常侧向拼接构型砂体厚度不大,但宽度很大,可达几十米到几百米。根据构型单元之间的拼接程度,可分为侧拼接型和似侧拼接型两种。侧拼接型在研究区主要表现为相邻单河道砂体在侧向上的相互拼接,各个河道砂体之间的形态保持完整,侧向上紧密相邻(图 9a),其间有较薄的泥岩阻隔,砂体之间不连通。似侧拼接型是指两条相邻单河道砂体之间距离很近,在侧向上相邻,甚至是有重叠,但是垂向上不相互切割,在两条单河道之间有泥岩阻隔,相互不连通(图 9b)。这种形式的拼接样式是非常需要注意的形式,它们很容易认为是完全连通的同一层砂体,这样会在油藏开发过程中造成错误的导向。

4.3 孤立式分布

孤立式分布是指各构型单元砂体之间孤立出现,没有接触,四周常被泥岩阻隔。单河道砂体、河口坝砂体、远砂坝砂体及席状砂砂体均可出现(图 8、图 9c、图 10)。孤立的单河道砂体厚度通常较薄,一般小于 3 m,宽度可达数十米到百米,在三角洲前缘沉积中,河口坝、远砂坝及前缘席状砂沉积单元也常见孤立式

分布,其周围被三角洲前缘泥包围,不连通,具有很强的非均质性。

5 储层构型单元的定量表征

对野外露头剖面构型单元的精细定量表征能够有效指导地下相似储层构型体的解析,进而对储层非均质性及剩余油挖潜提供指导。结合野外剖面沉积构型单元的综合解释成果,对各类构型单元的规模进行了测量,包括构型单元砂体的厚度及宽度数据(表 2),并对各参数之际的关系进行拟合,得到储层构型单元的定量表征公式。

对分流河道砂体采集数据 9 组,厚度为 1.2~11 m,平均为 5.7 m;宽度为 17~87 m,平均为 46.6 m;宽厚比平均值为 9,其宽度和厚度存在线性关系,相关系数为 0.611 5(图 11a)。分流砂坝采集数据 6 组,厚度为 1.4~6 m,平均为 3.4 m;宽度为 12~26 m,平均为 17.5 m,宽厚比平均值为 6.4,其宽度和厚度也存在线性关系,相关系数较高,达 0.751 1(图 11b)。潮汐砂坝采集数据较少,只有 5 组,厚度平均值为 1.6 m,宽度平均值

表 2 柳林成家庄地区山西组露头剖面构型单元参数表

Tab. 2 Architecture unit parameters of Shanxi Formation in Chengjiazhuang, Liulin

剖面 编号	分流河道			分流砂坝			潮汐砂坝			河口坝			远砂坝			席状砂		
	宽 (m)	厚 (m)	宽/ 厚	宽 (m)	厚 (m)	宽/ 厚	宽 (m)	厚 (m)	宽/ 厚	宽 (m)	厚 (m)	宽/ 厚	宽 (m)	厚 (m)	宽/ 厚	宽 (m)	厚 (m)	宽/ 厚
剖面 1	35	6	5.8				10	1.5	6.7									
	24.5	5	4.9				9	1.2	7.5									
剖面 2	87	11	7.9	26	6	4.3	13	2	6.5									
				12	1.5	8.0												
剖面 3										28	1.1	25.5	28	0.8	35.0	13	0.2	65.0
										30	1.3	23.1	21	0.6	35.0	15.7	0.3	52.3
										26	0.9	28.9	23	0.7	32.9	27.5	0.4	68.8
													26	0.7	37.1	16	0.3	53.3
													30	1	30.0	23	0.5	46.0
																21	0.4	52.5
其他 剖面	36	5.5	6.5	19	6.0	3.2	12	1.6	7.5	15	0.8	18.8	26	0.5	52.0			
	74	7.3	10.1	14	1.6	8.8	10	1.2	8.3	22	1.1	20.0	21	0.3	70.0			
	51	3.5	14.6	12	1.4	8.6				17	0.5	34.0						
	34	6.0	5.7	22	3.8	5.8				32	1.5	21.3						
	17	1.2	14.2															
	61	5.5	11.1															

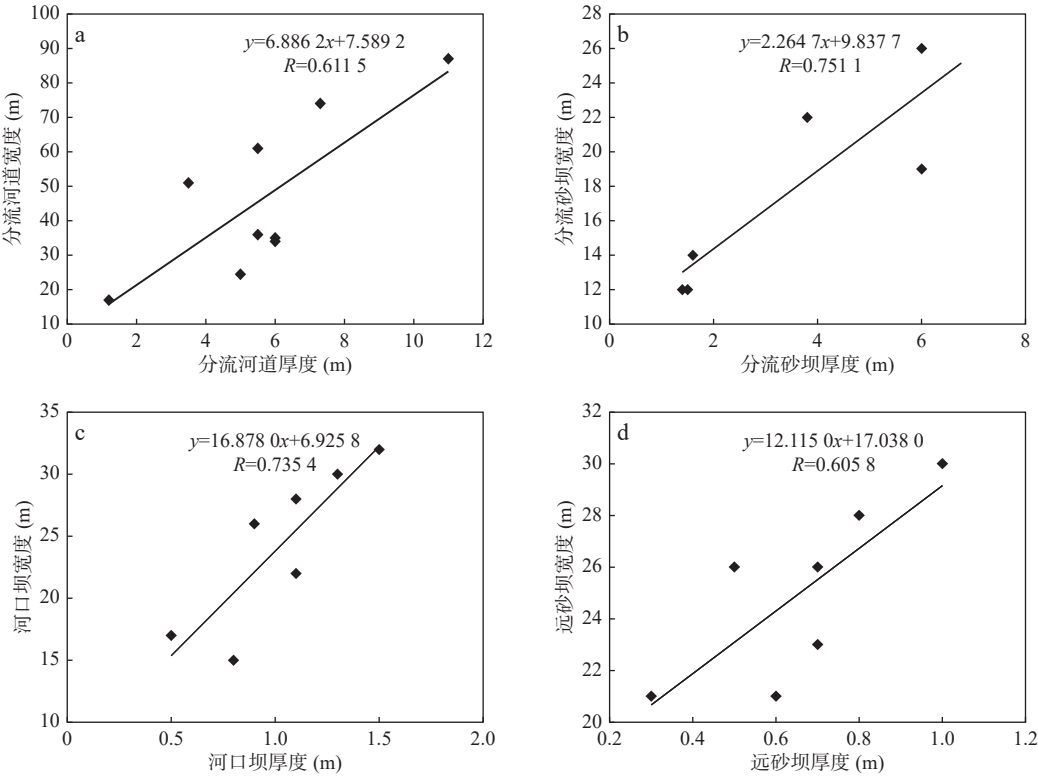


图 11 柳林成家庄地区山西组露头剖面构型单元参数相关性分析

Fig. 11 Correlation of architecture unit parameters of Shanxi Formation in Chengjiazhuang, Liulin

为 10.7 m, 宽厚比平均值为 7.3; 河口坝采集数据 7 组, 厚度平均值为 1.02 m, 宽度平均值为 24.3m, 宽厚比平均值达 24.5, 其宽度和厚度存在线性关系, 相关系数为 0.735 4(图 11c); 远砂坝采集数据 7 组, 厚度平均值为 0.65 m, 宽度平均值为 25 m, 宽厚比值较大, 为 41.7, 其宽度和厚度也存在线性关系, 相关系数为 0.605 8(图 11d)。席状砂采集数据 6 组, 厚度平均值为 0.35 m, 宽度平均值为 19.4 m, 宽厚比平均值达 56.3。

通过对山西柳林成家庄地区山西组露头剖面构型单元定量分析表明, 分流河道、分流砂坝、河口坝、远砂坝, 砂体厚度和宽度之间存在线性关系, 且具有较高的相关性, 能够为地下构型单元的建模提供一定的依据。

6 结论

(1)通过对山西柳林成家庄地区山西组三角洲前缘露头剖面的精细解析, 识别出了 10 种岩相类型及 7 种沉积单元。对研究区露头沉积体构型界面进行识别和划分, 根据沉积旋回及岩性组合特征, 识别出分流河道、分流砂坝、潮汐砂坝、河口坝、远砂坝、席状砂 6 种 4 级构型单元, 它们又以复杂的组合方式构成三角洲前缘 5 级构型单元。

(2)对研究区构型单元样式进行研究, 主要有垂向叠置、侧向拼接及孤立式分布 3 种类型。垂向叠置又可进一步分为单一复合河道内沉积体的叠置, 单一复合河道沉积体与潮汐砂坝的叠置, 多期潮汐砂坝的叠置以及多期河口坝砂体及多期席状砂之间的叠置。垂向叠置构型单元一般在垂向上相互切割叠置, 砂体厚度大, 是良好的储集体。侧向拼接可分为侧拼接型和似侧拼接型。沉积构型单元之间一般有泥岩阻隔, 砂体不连通, 增强了储层的非均质性, 孤立式分布一般为单河道砂体、河口坝砂体、远砂坝砂体及席状砂砂体的孤立出现, 砂体之间不连通, 中间有泥岩成为阻止流体之间的渗流屏障。

(3)通过对构型单元定量分析表明, 分流河道、分流砂坝、河口坝、远砂坝, 砂体厚度和宽度之间存在线性关系, 且具有较高的相关性, 能够为地下构型单元的建模提供一定的地质依据。

参考文献(References):

陈安清, 陈洪德, 向芳, 等. 鄂尔多斯盆地东北部山西组—上石

盒子组三角洲沉积及演化[J]. 地层学杂志, 2010, 34(1): 97–105.

CHEN Anqing, CHEN Hongde, XIANG Fang, et al. Delta deposits in the Shanxi and Shangshihezi Formations in the Northeastern Ordos Basin[J]. Journal of Stratigraphy, 2010, 34(1): 97–105.

陈洪德, 李洁, 张成弓, 等. 鄂尔多斯盆地山西组沉积环境讨论及其地质启示[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2213–2229.

CHEN Hongde, LI Ji, ZHANG Chenggong, et al. Discussion of sedimentary environment and its geological enlightenment of Shanxi Formation in Ordos Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(8): 2213–2229.

封从军, 鲍志东, 代春明, 等. 三角洲前缘水下分流河道单砂体叠置机理及对剩余油的控制: 以扶余油田 J19 区块泉头组四段为例[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(1): 128–135.

FENG Congjun, BAO Zhidong, DAI Chunming, et al. Superimposition patterns of underwater distributary channel sands in deltaic front and its control on remaining oil distribution: A case study from K1q4 in J19 block, Fuyu oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(1): 128–135.

蒋天昊, 宋方新, 邓宝康, 等. 鄂尔多斯盆地吴起油田长 6 油层组沉积微相特征及其对储层的控制[J]. 西北地质, 2020, 53(4): 130–139.

JIANG Tianhao, SONG Fangxin, DENG Baokang, et al. Sedimentary microfacies of Chang 6 oil-bearing formation and its control on reservoir in Wuqi Oilfield, Ordos Basin[J]. Northwestern geology, 2020, 53(4): 130–139.

金振奎, 杨友星, 尚建林, 等. 辫状河砂体构型及定量参数研究—以阜康、柳林和延安地区辫状河露头为例[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(3): 311–317.

JIN Zhenkui, YANG Youxing, SHANG Jianlin, et al. Sandbody architecture and quantitative parameters of single channel sandbodies of Braided river: case from outcrops of braided river in Fukang, Liulin and Yanan Areas[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(3): 311–317.

李阳. 我国油藏地质开发研究进展[J]. 石油学报, 2007, 28(3): 75–79.

LI Yang. Progress of research on reservoir development geology in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(3): 75–79.

刘家铎, 田景春, 张翔, 等. 鄂尔多斯盆地北部塔巴庙地区山西组一段海相、过渡相沉积标志研究及环境分析[J]. 沉积学报, 2006, 24(1): 36–42.

LIU Jiaduo, TIAN Jingchun, ZHANG Xiang, et al. Depositional markers of marine transition facies and its evolution of member 1 of Shanxi formation Tabamiao area North Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(1): 36–42.

罗旭东, 韩东威, 张方贵, 等. 玛湖 446 井区克拉玛依组储层特征及有利区预测[J]. 西北地质, 2024, 57(5): 166–180.

LUO Xudong, HAN Dongwei, ZHANG Fanggui, et al. Reservoir

- Characteristics and Favorable Areas of the Karamay Formation in the Mahu 446 Well District[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(5): 166–180.
- 马晓军, 梁积伟, 李建星, 等. 鄂尔多斯盆地中西部中生代构造抬升及演化[J]. *西北地质*, 2019, 52(4): 127–136.
- MA Xiaojun, LIANG Jiwei, LI Jianxing, et al. Meso-cenozoic tectonic uplift and evolution of central and western Ordos Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(4): 127–136.
- 沈玉林, 郭海英, 李壮福, 等. 鄂尔多斯盆地东缘本溪组-太原组层序地层特征[J]. *地球学报*, 2009, 30(2): 187–193.
- SHEN Yulin, GUO Haiying, LI Zhuangfu, et al. Sequence stratigraphy of Benxi-Taiyuan Formation in eastern Ordos Basin[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2009, 30(2): 187–193.
- 孙宁亮, 钟建华, 倪良田, 等. 鄂尔多斯盆地南部上三叠统延长组物源分析及热演化[J]. *中国地质*, 2019, 46(3): 537–556.
- SUN Ningliang, ZHONG Jianhua, NI Liangtian, et al. Provenance analysis and thermal evolution of upper Triassic Yanchang formation in the southern Ordos Basin[J]. *Geology in China*, 2019, 46(3): 537–556.
- 孙天建, 穆龙新, 吴向红, 等. 砂质辫状河储层构型表征方法——以苏丹穆格莱特盆地 Hegli 油田为例[J]. *石油学报*, 2014, 35(4): 715–724.
- SUN Tianjian, MU Longxin, WU Xianghong, et al. A quantitative method for architectural characterization of sandy braided-river reservoirs: taking Hegli oilfield of Muglad Basin in Sudan as an example[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(4): 715–724.
- 田雯. 鄂尔多斯盆地东南部二叠系山西组沉积体系研究[D]. 西安: 西北大学, 2016, 1–94.
- TIAN Wen. Sedimentary system study of Permian Shanxi Formation in south-eastern of Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2016, 1–94.
- 王越, 陈世悦. 曲流河砂体构型及非均质性特征——以山西保德扒楼沟剖面二叠系曲流河砂体为例[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(2): 208–218.
- WANG Yue, CHEN Shiyue. Meandering river sand body architecture and heterogeneity: A case study of Permian meandering river outcrop in Palougou, Baode, Shanxi province[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(2): 208–218.
- 叶黎明, 齐天俊, 彭海燕. 鄂尔多斯盆地东部山西组海相沉积环境分析[J]. *沉积学报*, 2008, 26(2): 202–210.
- YE Liming, QI Tianjun, PENG Haiyan. Depositional environment analysis of Shanxi Formation in Eastern Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(2): 202–210.
- 岳大力, 吴胜和, 刘建民. 曲流河点坝地下储层构型精细解剖方法[J]. *石油学报*, 2007, 28(4): 99–103.
- YUE Dali, WU Shenghe, LIU Jianmin. An accurate method for anatomizing architecture of subsurface reservoir in point bar of meandering river[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(4): 99–103.
- 张昌民, 尹太举, 朱永进, 等. 浅水三角洲沉积模式[J]. *沉积学报*, 2010, 28(5): 933–944.
- ZHANG Changmin, YIN Taiju, ZHU Yongjin, et al. Shallow-water deltas and models[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(5): 933–944.
- 张敬霞, 郭海英, 沈玉林. 成家庄剖面本溪-太原组层序地层与元素地球化学特征分析[J]. *中国煤炭地质*, 2011, 23(3): 1–4.
- ZHANG Jingxia, GUO Haiying, SHEN Yulin. Chengjiazhuang section Benxi-Taiyuan Formations sequence stratigraphy and geochemistry of element analysis in Liulin, Shanxi[J]. *Coal Geology of China*, 2011, 23(3): 1–4.
- 赵伦, 梁宏伟, 张祥忠, 等. 砂体构型特征与剩余油分布模式——以哈萨克斯坦图尔盖盆地 Kumkol South 油田为例[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(3): 433–441.
- ZHAO Lun, LIANG Hongwei, ZHANG Xiangzhong, et al. Relationship between sandstone architecture and remaining oil distribution pattern: A case of the Kumkol South oilfield in South Turgay Basin, Kazakstan[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(3): 433–441.
- 朱卫红, 吴胜和, 尹志军. 辫状河三角洲露头构型——以塔里木盆地库车坳陷三叠系黄山街组为例[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(3): 1–8.
- ZHU Weihong, WU Shenghe, YIN Zhijun. Braided river delta outcrop architecture: A case study of Triassic Huangshanjie Formation in Kuche depression, Tarim Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(3): 1–8.
- Allen J R L. Studies in fluvial sedimentation: bars, bar complexes and sandstone sheets (lower-sinuosity braided streams) in the Brownstones (L. Devonian), Welsh Borders[J]. *Sedimentary Geology*, 1983, 33(4): 237–293.
- Miall A D. Architectural elements analysis: A new method of facies analysis applied to fluvial deposits[J]. *Earth Science Reviews*, 1985, 22(4): 261–308.
- Miall A D. Architectural elements and bounding surfaces in fluvial deposits: anatomy of the Kayenta Formation (Lower Jurassic), Southwest Colorado[J]. *Sedimentary Geology*, 1988, 55(3–4): 233–262.
- Miall A D. The geology of fluvial deposits[M]. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1996: 75–178.