

河控浅水三角洲平原亚相沉积模式探讨 ——以鄂尔多斯盆地 S59 区块山西组一段为例

欧阳诚¹, 段新国², 方健³, 刘金库¹, 吴婷²,
彭宇³, 李洲¹, 宋荣彩²

(1. 中国石油川庆钻探工程公司 地质勘探开发研究院, 成都 610051;

2. 成都理工大学 能源学院, 成都 610059;

3. 中国石油川庆钻探工程公司 苏里格项目经理部, 成都 610051)

[摘要] 鄂尔多斯盆地 S59 区块山一段, 整体具有构造稳定、地势平坦、古水深较浅、湖平面频繁升降、物源充足等特点, 发育浅水三角洲沉积体系。本文在前人研究的基础上, 通过对取心井岩心分析及侧井相分析, 探讨了浅水三角洲的沉积特征, 建立了浅水三角洲平原亚相沉积模式。研究结果表明, 山西组山一段为河控浅水三角洲沉积, 浅水三角洲的陆上部分沉积过程与曲流河沉积具有一致性, 发育边滩、“渐弃型”废弃河道、决口扇和洪泛平原等微相, 平面上河道在凹岸不断侵蚀, 凸岸不断堆积形成边滩微相。此外在凹岸发育一定规模的废弃河道, 河道砂体呈南北向分布, 发育少量的决口扇沉积, 在河道间发育细粒沉积洪泛平原亚相。三角洲平原亚相沉积模式的建立为预测优质砂体发育位置提供地质依据。

[关键词] 鄂尔多斯盆地; 山一段; 河控浅水三角洲; 三角洲平原亚相; 沉积模式

[分类号] P618.13

[文献标志码] A

Discussion on a sedimentary model of river-controlled shallow-water delta plain subfacies: Taking the Shanxi Formation of the S59 Block Gas Field in Ordos Basin as an example

OUYANG Cheng¹, DUAN Xinguo², FANG Jian³, LIU Jinku¹, WU Ting²,
PENG Yu³, LI Zhou¹, SONG Rongcai²

1. Geological Exploration and Development Research Institute of CNPC Chuanqing Drilling Engineering Company Limited, Chengdu 610051, China;

2. College of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

3. Sulige Project Management Department of CNPC Chuanqing Drilling Engineering Company Limited, Chengdu 610051, China

[收稿日期] 2022-11-16。

[基金项目] 国家自然科学基金项目(41672105)。

[第一作者] 欧阳诚(1982—), 男, 高级工程师, 研究方向: 石油天然气地质, E-mail: ouyang4056@sina.com。

[通信作者] 段新国(1978—), 男, 博士, 教授, 研究方向: 油气田开发地质学, E-mail: duanxinguo07@cduet.edu.cn。

[引用格式] 欧阳诚, 段新国, 方健, 等, 2024. 河控浅水三角洲平原亚相沉积模式探讨——以鄂尔多斯盆地 S59 区块山西组一段为例[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 51(1):102-116+129.

Ouyang C, Duan X G, Fang J, et al., 2024. Discussion on a sedimentary model of river-controlled shallow-water delta plain subfacies: Taking the Shanxi Formation of the S59 Block Gas Field in Ordos Basin as an example[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 51(1):102-116+129.

Abstract: The Shan-1 member of the S59 Block in Ordos Basin is characterized by a stable structure, flat terrain, shallow ancient water depth, frequent rising and falling lake plane, sufficient provenance, and the development of a triangular, shallow-water deposition. On the basis of previous studies, the sedimentary characteristics of this shallow-water delta were discussed in terms of core samples from the well and well-logging facies analysis. Based on these, a sedimentary model of shallow-water delta plain subfacies was established. The results showed that the Shanxi Formation, Shan-1 Formation, represents the sedimentation of a river-controlled shallow-water delta. The sedimentary processes in the terrestrial portion of this shallow-water delta are consistent with meandering river deposition. Various microfacies are developed, including floodplain, “abandoned-type” abandoned river channels, mouth bars, and alluvial plains. On the map view, the river channels continuously erode on the concave banks and deposit sediments on the convex banks, forming microfacies of floodplains. Additionally, abandoned river channels of a certain scale are developed on the concave banks. The channel sands are distributed in a north-south direction, with a minor amount of mouth bar deposition. Fine-grained floodplain subfacies develop between the river channels. By clarifying the sedimentary characteristics of the first member of the Shanxi Formation, the establishment of the sedimentary model for deltaic plain subfacies provides geological evidence for predicting the development location of high-quality sand bodies.

Key words: Ordos Basin; Shan-1 Formation; river-controlled shallow water delta; sedimentary model of delta plain subfacies

Fisk 将河控三角洲分为浅水三角洲和深水三角洲 (Fish et al., 1954)。Postma 将深水三角洲和浅水三角洲分为 12 种三角洲,地势较为平缓的浅海区、浅水湖盆区或湖盆浅水区发育浅水三角洲 (Postma, 1990)。三角洲基于水体类型可划分为湖泊三角洲和海洋三角洲;基于水动力特征,划为河控、浪控和潮汐三角洲;基于三角洲的粒度特征又划分为细粒和粗粒三角洲 (张昌民等, 2010)。

浅水三角洲是陆相沉积常见的一种沉积相类型,其特征是:沉积时水体较浅,发育位置在构造相对稳定的台地、陆表海,地形平缓、基底缓慢沉降的大型湖盆内,物源供给充足,以分流河道砂体为主的三角洲 (张昌民等, 2010; 朱筱敏等, 2013)。与其他三角洲相比,浅水三角洲有以下特点:①发育时构造背景较为稳定;②湖盆周边地形比较平缓、坡度较小,坡降一般小于 1 度、古水深较浅;③湖平面频繁升降旋回变化;④物源供给较充分;⑤分流河道砂体为骨架砂,河口坝发育程度较低;⑥岩性较细,以细砂岩和粉砂岩为主 (张昌民等, 2010; 朱筱敏等, 2012, 2013; 蔡东梅, 2014)。

鄂尔多斯盆地、四川盆地、准噶尔盆地均展示了浅水三角洲的良好勘探前景,其中鄂尔多斯

盆地是中国大型的含油气盆地之一 (白奋飞等, 2023; 葛稳稳等, 2023; 谭文娟等, 2023),属于坳陷湖盆,构造较为稳定、地形平缓 (孙靖等, 2020)。鄂尔多斯盆地山西组山一段沉积相标志、沉积特征和沉积模式一直都是大家关注的热点,在山西组沉积时期,盆地具有坡度较小、水体较浅等特点,同时鄂尔多斯盆地山西组处于一个海陆过渡时期,盆地东南部 S₂³ 段确实有海相存在或者在一定程度上海水作用有较强影响,为典型的浅水三角洲沉积 (彭海艳等, 2006)。浅水三角洲有平原、前缘和前三角洲亚相。其中,平原亚相以河流为主控作用,主要发育以侧向加积的边滩以及废弃河道、决口扇等沉积微相,受潮湿气候影响,含煤沼泽微相也广泛沉积发育。

另外,前人对于浅水三角洲平原亚相中分流河道微相与曲流河河床亚相沉积是否具有一致性的研究较少。鉴于此,本文以鄂尔多斯盆地 S59 区块山一段为例,在密井网砂体解剖的基础上,对浅水三角洲的平原亚相中分流河道微相的沉积特征、分布规律及模式进行分析,并深入剖析边滩沉积在横向以及平面的分布特征,旨在深化对浅水三角洲分流河道微相的沉积认识,明确优质砂体的分布规律,为气田开发服务。

1 地质背景

苏里格气田位于长庆靖边苏里格庙地区,构造上位于鄂尔多斯盆地陕北斜坡北部的中带位置(图 1)。研究区 S59 区块位于苏里格气田西区(图 1)。鄂尔多斯盆地(晚古生代)先后经历了陆表海盆地、近海大型湖泊盆地和大型板内坳陷盆地 3 个时期(杨勇等,2013)。早石炭世,由晚古生代时期发生海西运动伴随着的海水侵入继续进行,沉积环境由陆地向海洋过渡形成海陆交互环境(田震,2018)。晚石炭系本溪组至早二叠系太原组时期,主要沉积了一套浅滨海相深灰色/灰黑色泥岩、局限海相深灰色灰岩、泥质灰岩及泥灰岩、少量三角洲相砂泥岩。早二叠世山西组初期,受到华北板块隆升的影响,从鄂尔多斯盆地东西两侧,海水逐渐

退出,沉积背景发生变化,由陆表海盆地变为近残余陆表海和近海湖盆,盆地的东、西部差异逐渐消失,而同时南、北部差异沉降逐渐增强。在盆地沉降中心位置发育湖泊相,在盆缘及斜坡带发育大型三角洲相(赵时久等,1988;郭英海等,2000)(图 1)。到中二叠世下石盒子组初期,区域构造活动加剧,北部地区逐渐抬升,湖泊萎缩,北部物源供给丰富,河流沉积体系快速南移,冲积平原向南增大,主要特征为多河道的辫状河与曲流河交替发育,心滩、边滩沉积广泛发育,河道相互叠置。

苏里格地区主体位于杭锦旗—乌审旗古水系形成的三角洲体系中,研究区 S59 区块山西组山一段沉积时期,水体较浅,地形较为平缓,构造相对稳定,形成浅水三角洲沉积体系(图 2)。其地层特征见图 1。

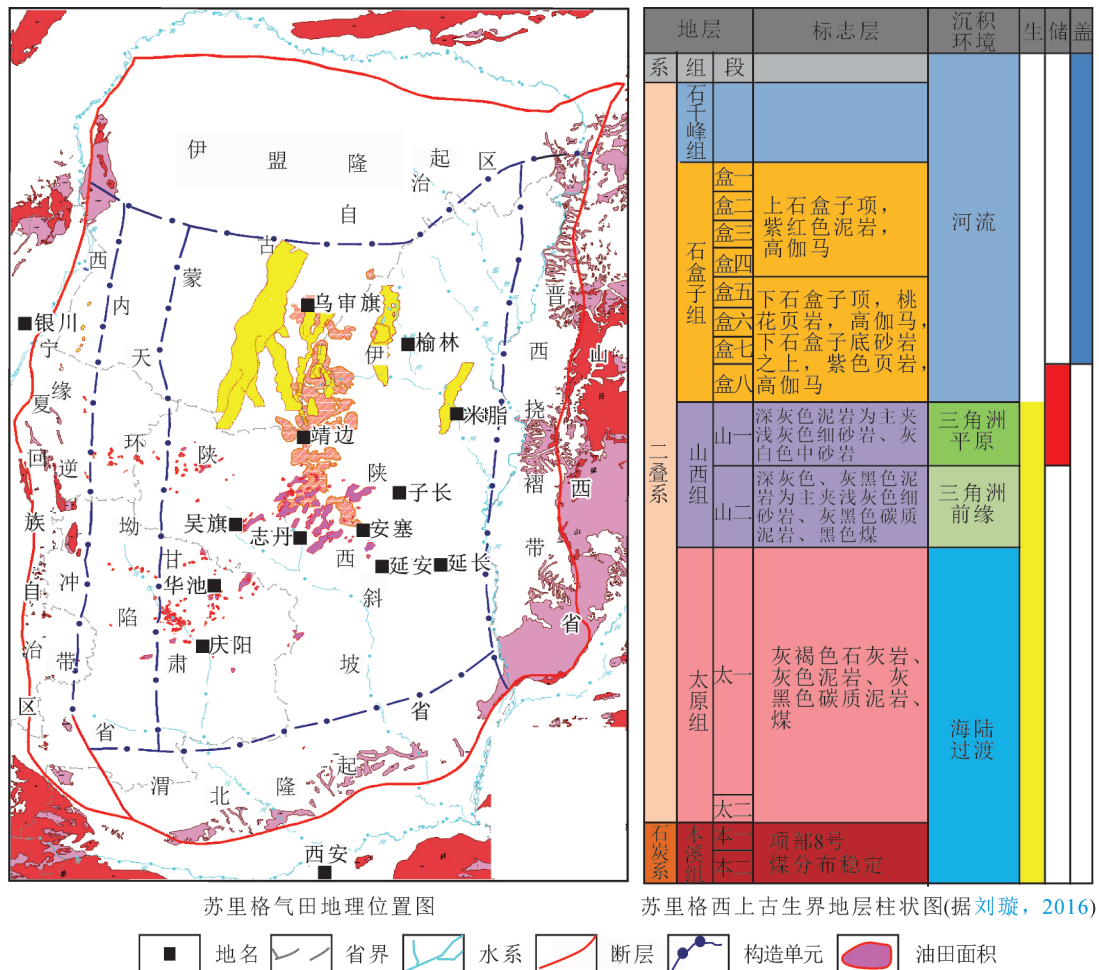


图 1 鄂尔多斯及山西组综合柱状图
Fig. 1 Comprehensive column chart of the Ordos and Shanxi Formations

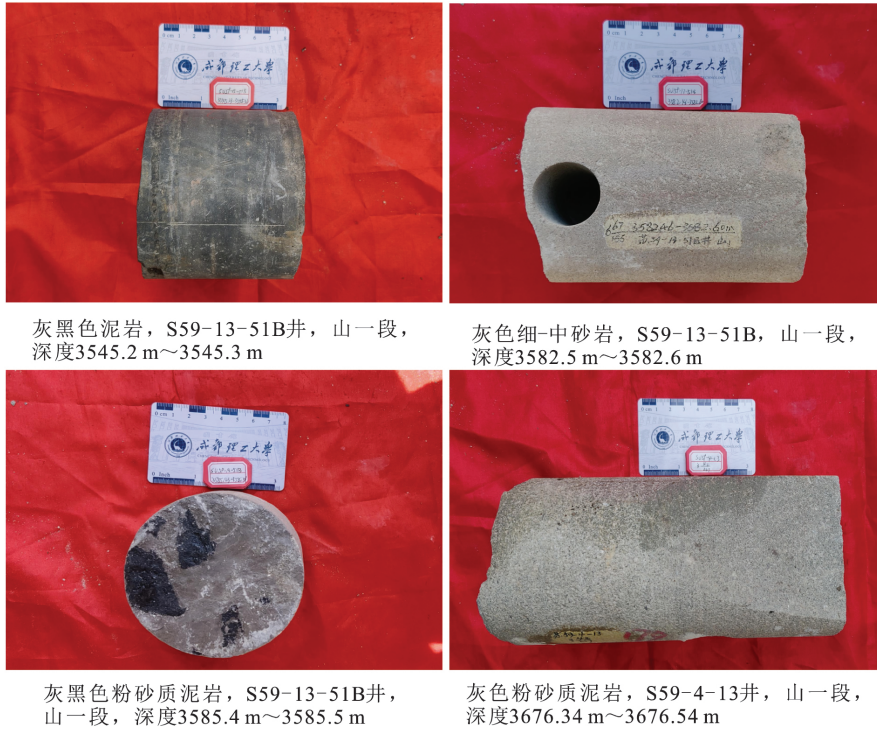


图 3 典型沉积岩颜色
Fig. 3 Colors of typical sedimentary rocks

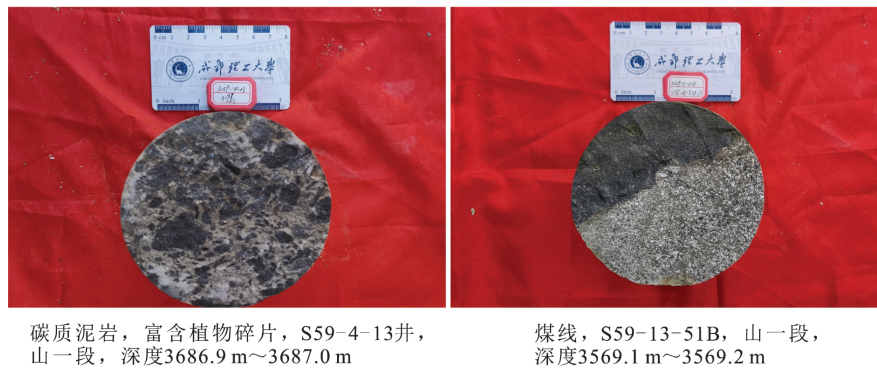


图 4 研究区含植物碎屑的岩心图版
Fig. 4 The core illustration with plant debris in the study area

2.4 沉积相组合

研究区中东部的 S59-13-51B 井整个山一段取心,岩性主要为黑色泥岩、浅灰—灰黑色粉砂质泥岩、灰白色中—粗砂岩、灰白色粉—细砂岩和浅灰色细—中砂岩,沉积构造有平行层理、水平层理、交错层理和透镜状层理等,存在植物碎屑。灰白色中—粗砂岩为中高频齿化钟形或光滑的指形自然伽马曲线,浅灰色细—中砂岩,灰白色粉—细砂岩自然伽马曲线为中幅齿化钟形,黑色泥岩与浅灰—灰黑色泥质粉砂岩为低幅微齿化泥岩基线。从沉积相组合看,下部发育灰白色中—粗砂

岩、浅灰色细—中砂岩和灰白色粉—细砂岩,属于边滩沉积的产物;上部发育黑色泥岩与浅灰—灰黑色泥质粉砂岩,属于泛滥平原沉积下的产物。二者形成典型的曲流河型“二元”结构明显(图 6)。

3 曲流河三角洲平原亚相沉积特征探讨

中国传统的曲流河三角洲相可以划分为平原、前缘和前三角洲亚相,沉积微相的划分方案见表 1。曲流河相可以划分为河床、堤岸、河漫、牛轭湖 4 个亚相(朱筱敏,2008)。



图 5 山西组山一段沉积构造

Fig. 5 Sedimentary structure of Shan-1 Formation

表 1 中国典型三角洲和曲流河沉积相划分(据朱筱敏,2008)

Table 1 Classification of typical delta and meandering river sedimentary facies in China

| 相类型 | 亚相类型 | 微相类型 |
|---------|-------|---------------------------|
| 曲流河三角洲相 | 三角洲平原 | 分支河道、天然堤、决口扇、沼泽、淡水湖泊 |
| | 三角洲前缘 | 水下分支河道、水下天然堤、支流间湾、河口坝、远砂坝 |
| | 前三角洲 | 前三角洲泥、滑塌浊积扇 |
| 曲流河相 | 河床 | 河床滞留沉积、边滩 |
| | 堤岸 | 天然堤、决口扇 |
| | 河漫 | 河漫滩、河漫湖泊、河漫沼泽 |
| | 牛轭湖 | |

S59-13-51B综合柱状图

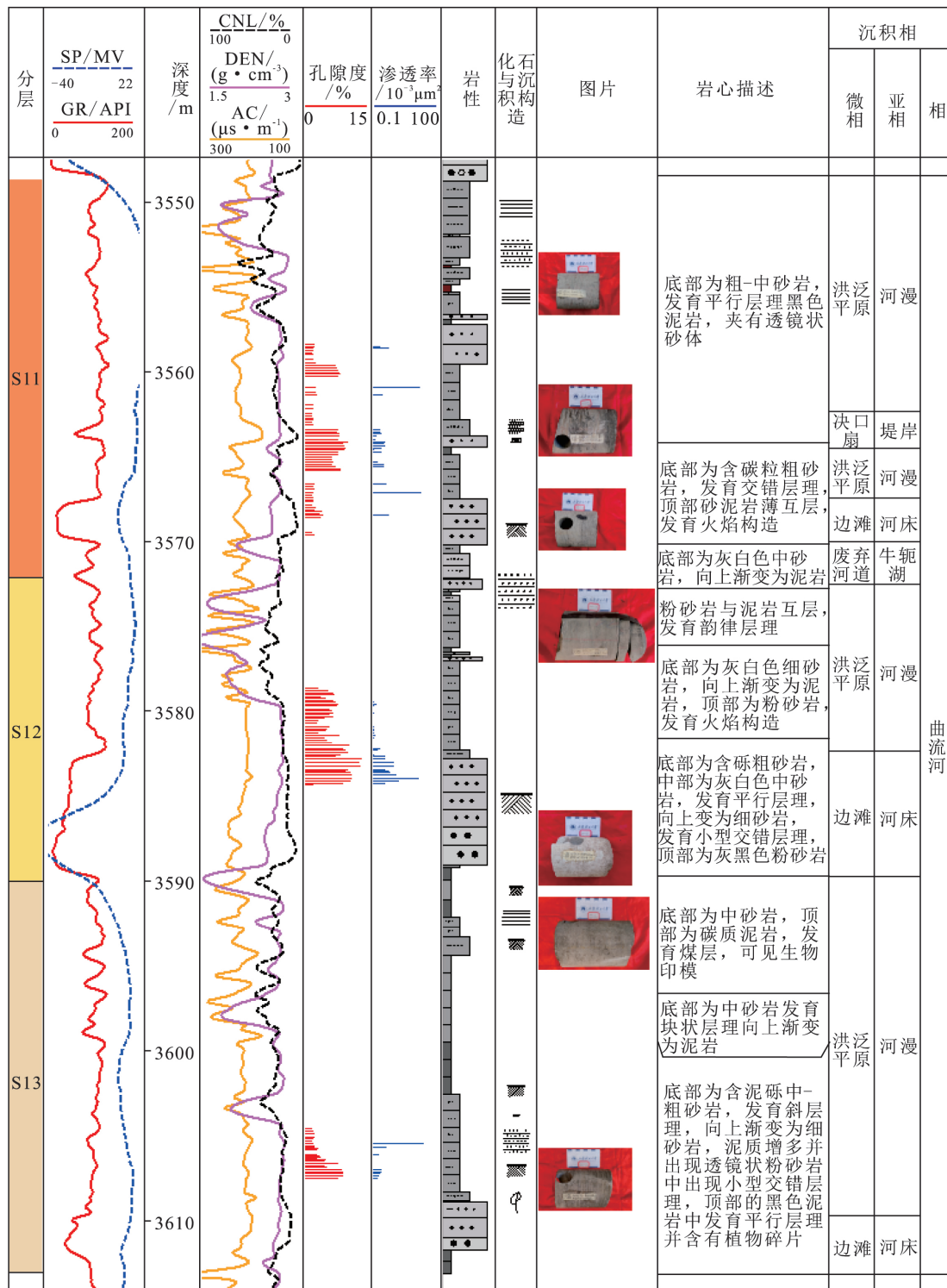


图 6 S59-13-51B 井单井沉积相分布图

Fig. 6 Single well sedimentary facies distribution of Well S59-13-51B

从曲流河三角洲相的微相划分是以水流的上、中、下游关系进行亚相划分的, 而曲流河相则以平面的变化进行亚相划分的。在沉积体系研究

时, 以相—亚相—微相作为研究序列, 也无相序之间的对比, 因此可以将这两类沉积相作为独立的并行的研究体系。

但是若从沉积相宏观体系构架看,曲流河相是曲流河三角洲相的上游体系,二者是上下承接的关系,其演变的分界点不明确,因此曲流河三角洲平原亚相中的分支河道沉积模式和曲流河河床亚相的沉积模式基本一致。通过现代沉积考察和地下储层构型解剖,浅水湖盆三角洲主要发育三角洲平原上部的曲流型分流河道、三角洲平原下部的顺直型分流河道和三角洲前缘顺直型水下分流河道 3 种砂体类型,曲流型分流河道主要为点坝侧积的沉积构型模式(封从军等,2013)(图 7)。以四川盆地中江地区沙溪庙为例,建立曲流河入湖的浅水三角洲平原分流河道的构型模式,其主要发育以侧向加积边滩为主的曲流型分流河道、低弯度分流河道和垂向加积为主的顺直型分流河道(衡勇等,2022)。

和三角洲前缘顺直型水下分流河道 3 种砂体类型,曲流型分流河道主要为点坝侧积的沉积构型模式(封从军等,2013)(图 7)。以四川盆地中江地区沙溪庙为例,建立曲流河入湖的浅水三角洲平原分流河道的构型模式,其主要发育以侧向加积边滩为主的曲流型分流河道、低弯度分流河道和垂向加积为主的顺直型分流河道(衡勇等,2022)。

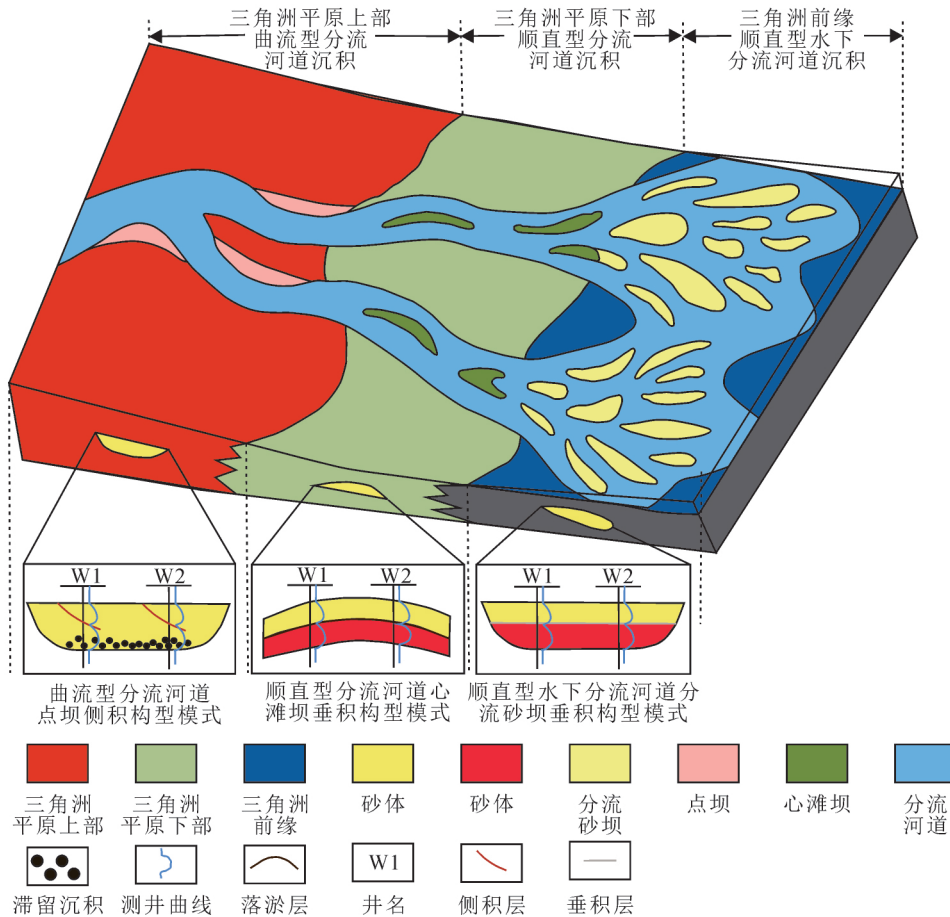


图 7 浅水湖盆三角洲储层构型模式图(封从军等,2013)
Fig. 7 Reservoir configuration model of shallow lake basin delta

鉴于此,认为研究区山一段虽然主要为浅水三角洲沉积体系的三角洲平原亚相部分,但其沉积模式可以按照曲流河沉积相的沉积模式开展分析,即以曲流河相的框架体系构建三角洲平原亚相的相序框架(表 1),主要有边滩微相等几种微相。

3.1 边滩微相

由于“蚀凹增凸”的侧积作用,常常在凹岸不断侵蚀,凸岸不断堆积形成边滩(点砂坝)。曲流型分流河道主要岩石类型以含砾粗砂岩、粗中粒

或中细粒岩屑石英砂岩、岩屑砂岩为主,层理类型主要以大、中型板状斜层理为主,平行层理和楔状层理也较为发育,在底部冲刷面之上可见河床滞留沉积,滞留沉积之上为边滩沉积,最后演变为天然堤微相沉积级洪泛平原沉积。二元结构清楚。电性特征在自然伽马曲线上常呈钟状,在自然伽马及电阻率曲线上以反映较高水动力沉积条件的中—高幅钟形,砂体形态特征剖面上多呈透镜状;平面上呈连续的透镜状、带状。边滩微相测井相特征见表 2。

表 2 S59 区块山西组沉积微相测井相统计表
Table 2 Statistical table of sedimentary microfacies of the Shanxi Formation in Block S59

| 微相类型 | 测井相 | 测井曲线形状 | 幅度 | 接触方式 | 韵律 |
|------|-----|-----------|-------------|------------|--------------|
| 边滩 | | 光滑或者锯齿状钟型 | 上部低幅, 下部中高幅 | 顶部渐变, 底部突变 | 正韵律 |
| 决口扇 | | 指型或微齿指型 | 上部低幅度, 下部中幅 | 顶、底部均突变 | 正韵律 |
| 废弃河道 | | 小型锯齿状钟型 | 上部中幅, 下部低幅 | 顶部渐变, 底部突变 | 上部正韵律, 下部反韵律 |
| 洪泛平原 | | 微齿型线形 | 低幅, 靠近泥岩基线 | 底部多为突变 | 无韵律 |

3.2 废弃河道微相

废弃河道是在河道发生截弯取直或发生改道等事件时,原有河道水流无法流动,演变为废弃河道(李宗奇等,2017)。在 S59 区块识别出的废弃河道有“突弃型”和“渐弃型”两种(图 8),而且以“突弃型”为主。“突弃型”废弃河道是在静水环境下,发生突发事件,新河道与原有河道分隔开来,上部接受细粒沉积而形成,如牛轭湖沉积,自然伽马(GR)曲线形态上表现为小型锯齿状,顶部和底部均突变(周新茂等,2010)。“渐弃型”废弃河道在上部水体与主河道始终相连,可持续接受细粒沉积,自然伽马(GR)曲线形

态上呈塔松状的正韵律相应,上部中幅,下部低幅,顶部渐变,底部突变。S59 区块主要废弃河道微相测井相特征(突弃型)见表 2。

3.3 决口扇微相

决口扇微相在 S59 区块发育程度低,主要形成于洪水期。其沉积过程是河水冲断凹岸天然堤坝,在河道外发生垂向快速加积,从而形成决口扇沉积体。一般情况下,天然堤微相大多数直接覆盖在分流河道之上,也有可能覆盖在泛滥平原微相之上,而决口扇微相一般分布在河道两侧,呈扇状分布。决口扇微相测井相特征见表 2。

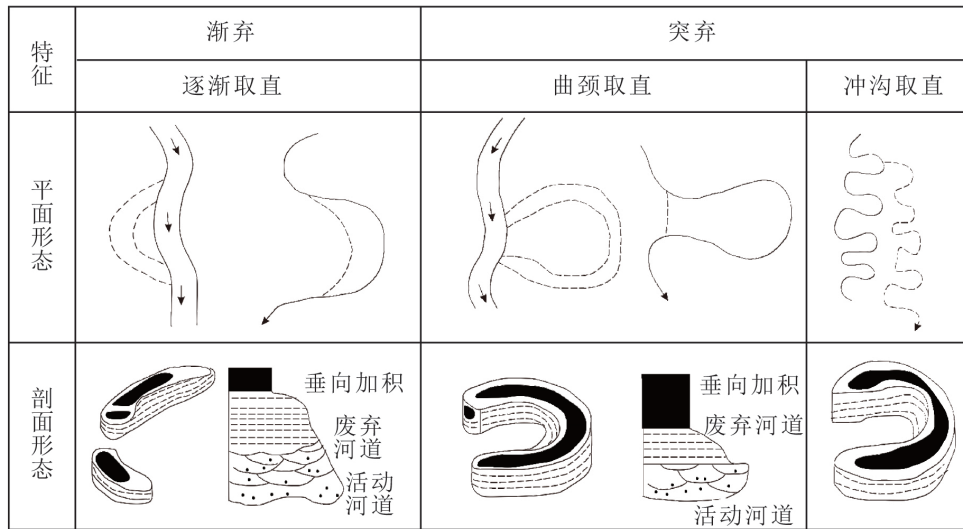


图 8 废弃河道成因图(据刘波等,2001)

Fig. 8 Genetic diagram of abandoned river channels

3.4 洪泛平原微相

在分流河道间的局限沉积环境中由洪水期在低洼处形成的以泥质岩为主的沉积偶见纹层状粉砂岩,其厚度小、以波状和微波状层理为主,有时根土岩发育(向芳等,2008)。在潮湿气候条件下植物大量生长出现沼泽环境形成黑色泥岩、灰质泥岩及煤层沉积。洪泛平原微相测井相特征见表 2。

4 沉积相带展布与沉积模式

4.1 剖面相特征

在对沉积特征研究的基础上,分别从垂直物源和顺着物源方向绘制剖面图,东西向为垂直物源方向剖面(图 9),南北向为顺物源方向剖面(图 10)。垂直物源方向,山⁻¹小层的边滩发育较差,横向上边滩的连续性较差(图 9)。顺物源方向剖面位于工区的中部,属于研究整体并较密的地方,与古水流方向一致。纵向上,山⁻²和山⁻³小层的砂体发育较好,横向上,中部和南部的边滩的连续性较好(图 10)。

4.2 沉积平面相展布特征

山一段沉积时期,研究区属于浅水三角洲沉积,浅水三角洲陆上分流河道与曲流河河道沉积一致,主要发育边滩和废弃河道沉积。根据砂体的横向和纵向对比,将山⁻²小层分为三期砂体(山⁻²⁻¹、山⁻²⁻²和山⁻²⁻³),河道主要发育在研

究区的中部和东部,主要有 6 支,受河道改造作用,常见分叉形象,形成多个分叉河道。边滩广泛发育,近南北方向展布,一般顺沿着物源方向或水流方向,具有明显的方向性。洪泛平原微相主要分布在河道之间,呈面状或者条带状分布,分布面积较大,决口扇微相发育较少,在平面图中零星分布(图 11)。

山⁻²小层沉积相平面叠置图显示,研究区的河道在这一时期具有继承性发育,整体共有 6 条河道从北部进入,其中东北部的河道叠置较为复杂,西南部的河道基本为单一河道叠置较为简单。河道面积约占研究区面积的 40%(图 12)。

4.3 河控浅水三角洲平原亚相沉积模式

研究区由于地形较缓,水体较浅,是发育浅水三角洲的有利场所。通过研究发现,S59 区块浅水三角洲发育陆上分流河道,陆上分流河道与曲流河沉积具有一致性,浅水三角洲平原亚相沉积相模式可以用曲流河沉积相模式替代,即将边滩、废弃河道、决口扇作为主要的四级构型单元(微相)。根据工区的特征,建立研究区山一段沉积模式(图 13)。山一段多为多河道叠置的曲流河沉积环境,在凹岸不断侵蚀,凸岸不断堆积,从而形成边滩,废弃河道在凹岸也有一定的规模发育。河道分叉为常态,会出现河道的横向叠加。

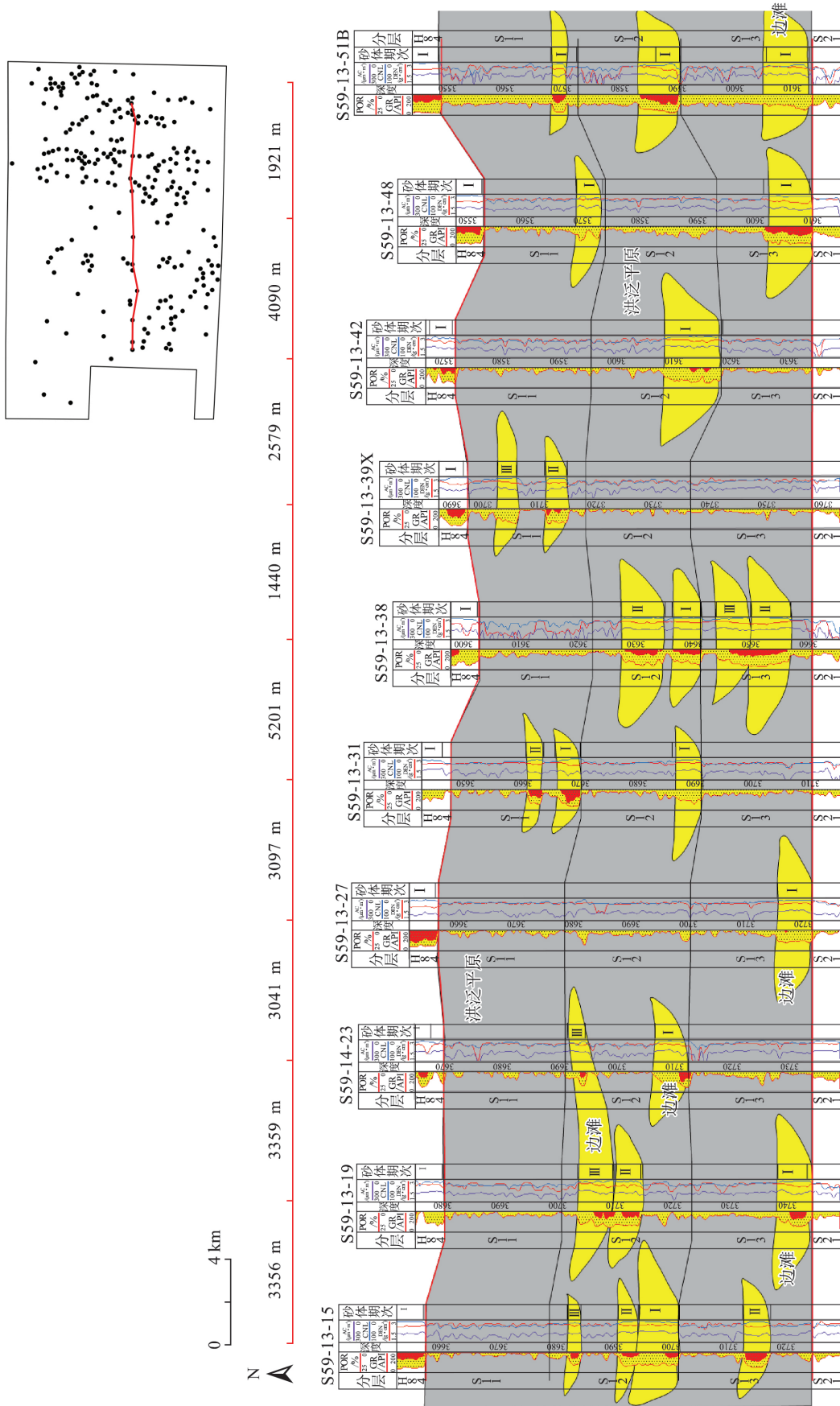


图9 东西向山一段沉积相连井剖面图
Fig.9 Section view of connecting well in the first section of the east-west Shan Section

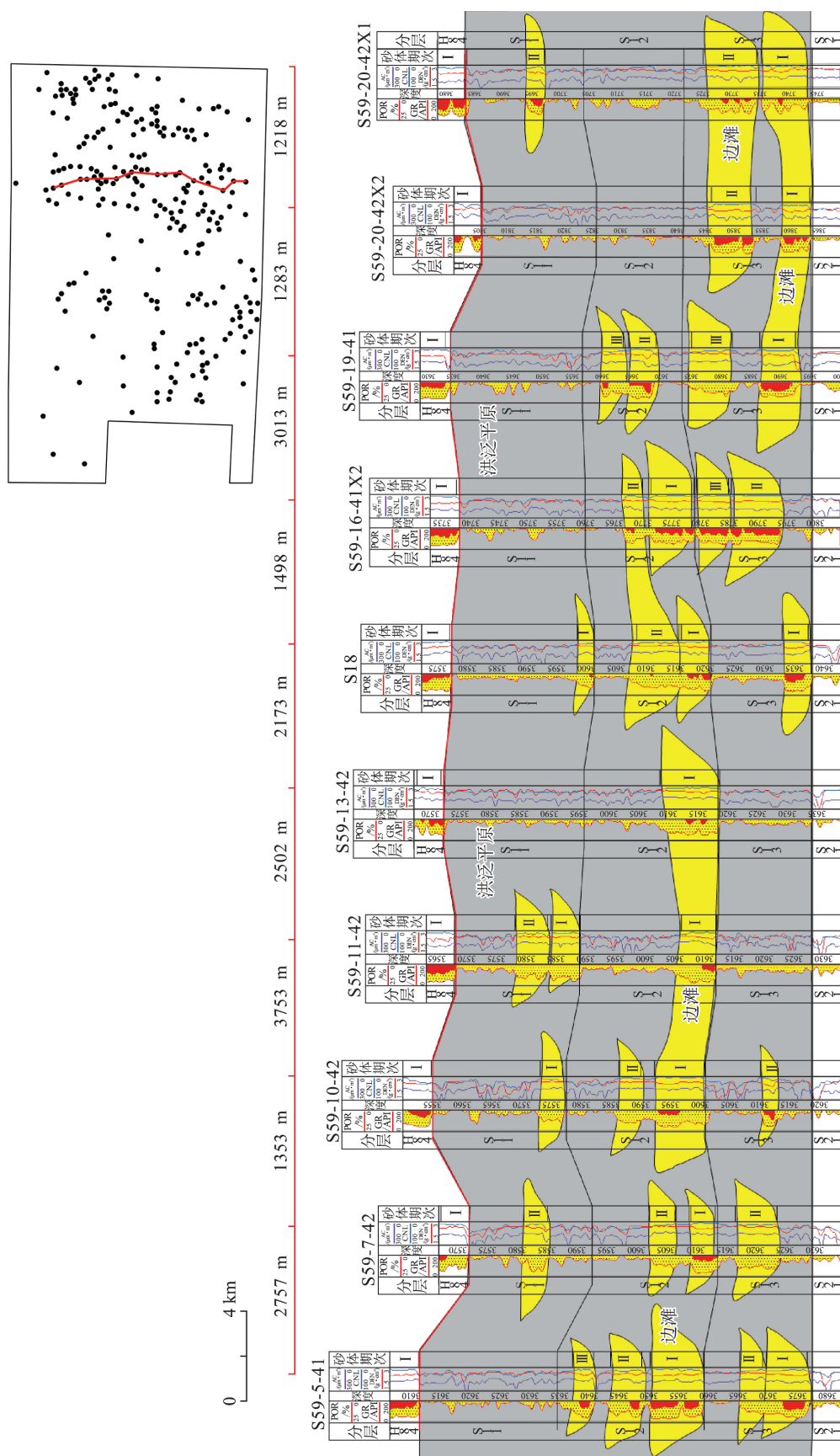


图10 南北向山一段沉积相连接井剖面图
Fig.10 South-North section of the first section of Shan sedimentation connecting well

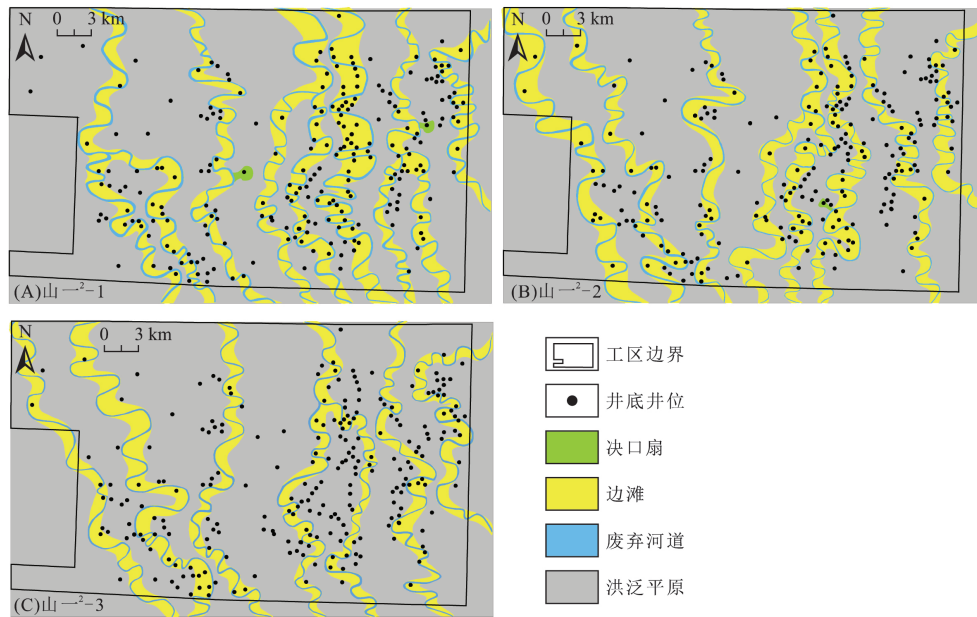


图 11 山一² 段砂体沉积微相平面分布图

Fig. 11 Planar distribution of sand body microfacies in Shan-1² Formation

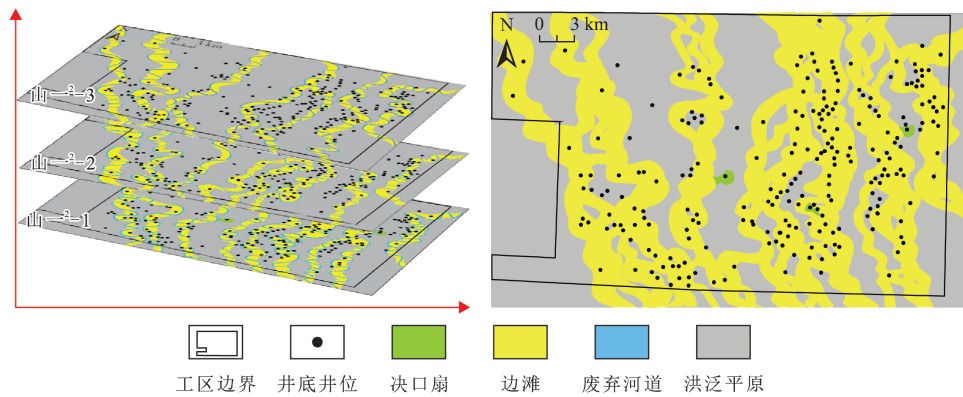


图 12 山一² 段砂体沉积相平面叠置图

Fig. 12 Planar overlay of sand facies in Shan-1² Formation

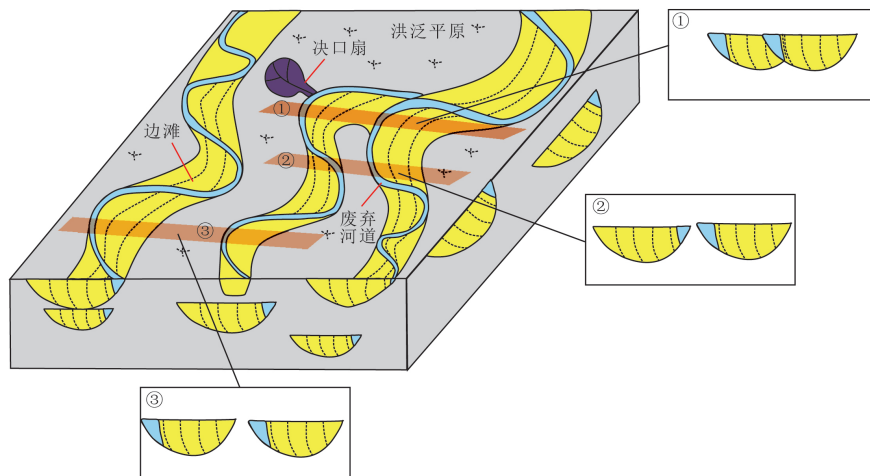


图 13 山一段浅水三角洲平原亚相砂体沉积模式图

Fig. 13 Sedimentary model of subfacies sand bodies in the shallow-water delta plain of Shan-1 Formation

5 结论

a. S59 区块山一段沉积时期地形较平缓,不发育大型断层,物源供应充足,存在典型的侧积体,测井曲线呈现正韵律的钟型形态,反韵律较少,不发育河口坝,为河控浅水三角洲平原亚相沉积环境。

b. 河控浅水三角洲沉积体系的平原亚相部分和曲流河沉积类似,即以曲流河相的框架体系构建三角洲平原亚相的相序框架。山一段研究结果表明,其主体沉积微相主要为边滩微相、“渐弃型”废弃河道微相、决口扇微相和洪泛平原微相,主要的储集砂体形成于侧向加积的边滩微相。

c. 建立了浅水三角洲平原亚相砂体沉积模式,在该沉积环境下,凹岸不断侵蚀,凸岸不断堆积,从而形成边滩,废弃河道在凹岸有一定的规模发育。河道分叉为常态,会出现河道的横向叠加。

[参 考 文 献]

白奋飞,魏登峰,韩伟,等,2023. 鄂尔多斯盆地延长油气区地热资源赋存特征及开发利用建议[J]. 西北地质, 56(6):329-339.

Bai F F, Wei D F, Han W, *et al.*, 2023. Occurrence Characteristics and Exploitation of Geothermal Resources in Yanchang Oil and Gas Area of Ordos Basin[J]. *Northwestern Geology*, 56(6):329-339. (in Chinese)

蔡东梅,2014. 松辽盆地扶余油田泉四段沉积微相研究[J]. 岩性油气藏, 26(5):57-63.

Cai D M, 2014. Sedimentary microfacies of the fourth member of Quantou Formation in Fuyu Oilfield, southern Songliao Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 26(5):57-63. (in Chinese)

封从军,赵逸,贾鹏,等,2013. 浅水湖盆三角洲储层构型模式探讨[J]. 地质科学, 48(4):1234-1245.

Feng C J, Zhao Y, Jia P, *et al.*, 2013. Reservoir architecture model of shallow lacustrine delta[J]. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 48(4):1234-1245. (in Chinese)

葛稳稳,李华,谈梦婷,等,2023. 鄂尔多斯盆地西南缘上奥陶统平凉组岩石特征及沉积环境[J]. 西北地质, 56(2):119-132.

Ge W W, Li H, Tan M T, *et al.*, 2023. Petrological Characteristics and Sedimentary Environment of the Upper Ordovician Pingliang Formation in the Southwestern Margin of Ordos Basin[J]. *Northwestern Geology*, 56(2):119-132. (in Chinese)

贡一鸣,2016. 苏里格气田苏 59 井区山西组致密砂岩储层特征[D]. 成都:成都理工大学档案馆.

Gong Y M, 2016. Tight Sandstone Reservoir Characteristics of Shanxi Formation in Su 59 Well block, Sulige Gas Field[D]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese)

郭英海,刘焕杰,2000. 陕甘宁地区晚古生代沉积体系[J]. 古地理学报, 2(1):19-30.

Guo Y H, Liu H J, 2000. The Late Paleozoic depositional systems of Shaanxi-Gansu-Ningxia area[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2(1):19-30. (in Chinese)

衡勇,段新国,王勇飞,等,2022. 浅水三角洲分流河道砂体内部结构及其对气水分布的影响——以四川盆地中江气田沙溪庙组为例[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 49(1):1-11.

Heng Y, Duan X G, Wang Y F, *et al.*, 2022. Internal structure of distributary channel sand body and its effect on gas-water distribution in shallow-water delta: A case study of Shaximiao Formation in Zhongjiang Gas Field, Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 49(1):1-11. (in Chinese)

李宗奇,林承焰,张宪国,等,2017. 孤东油田七区西 Ng5²⁺³ 层曲流河储层构型表征[J]. 东北石油大学学报, 41(5):70-80.

Li Z Q, Lin C Y, Zhang X G, *et al.*, 2017. Architectural characterization of meandering river reservoir of the unit Ng5²⁺³ in the west 7th block of Gudong oilfield [J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 41(5):70-80. (in Chinese)

刘波,赵翰卿,王良书,等,2001. 古河流废弃河道微相的精细描述[J]. 沉积学报, 19(3):394-398.

Liu B, Zhao H Q, Wang L S, *et al.*, 2001. The detailed description of ancient fluvial abandoned channel microfacies[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 19(3):394-398. (in Chinese)

刘君龙,纪友亮,杨克明,等,2015. 浅水湖盆三角洲岸线控砂机理与油气勘探意义——以川西拗陷中段蓬莱镇组为例[J]. 石油学报, 36(9):1060-1073.

Liu J L, Ji Y L, Yang K M, *et al.*, 2015. Mechanism of lake shoreline control on shoal water deltaic sandbodies and its significance for petroleum exploration: A case study of Penglaizhen Formation in the middle part of western Sichuan depression[J]. *Acta Petroli Sinica*, 36(9):1060-1073. (in Chinese)

刘璇,2016. 苏里格气田 59 区盒 8 段致密砂岩气水分布规律[D]. 成都:成都理工大学档案馆.

Liu X, 2016. Gas-water Distribution of Tight Sandstone Gas Reservoir in He8 Formation in the Fifty-nine Block of Sulige Gas-area[D]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese)

彭海艳,陈洪德,向芳,等,2006. 微量元素分析在沉积环

- 境识别中的应用——以鄂尔多斯盆地东部二叠系山西组为例[J]. 新疆地质, 24(2): 202—205.
- Peng H Y, Chen H D, Xiang F, *et al.*, 2006. Application of trace elements analysis on sedimentary environment identification—An example from the Permian Shanxi Formation in eastern Ordos Basin[J]. Xinjiang Geology, 24(2): 202—205. (in Chinese)
- 任奕霖, 赵俊峰, 陈佳宇, 等, 2022. 鄂尔多斯盆地浅水三角洲前缘沉积特征与砂体构型——以宜川仕望剖面长 9 油层组为例[J]. 新疆石油地质, 43(3): 310—319.
- Ren Y L, Zhao J F, Chen J Y, *et al.*, 2022. Sedimentary characteristics and sand body architecture of the shallow delta front in Ordos Basin: A case study of Chang 9 member in Shiwanghe section of Yichuan[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 43(3): 310—319. (in Chinese)
- 孙婧, 薛晶晶, 厚刚福, 等, 2020. 莫北区块三工河组浅水三角洲储层特征及勘探前景[J]. 特种油气藏, 27(3): 34—39.
- Sun J, Xue J J, Hou G F, *et al.*, 2020. Shallow-water delta reservoir characterization and exploration prospect in the Sangonghe Formation of Mobei block[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 27(3): 34—39. (in Chinese)
- 谭文娟, 赵国斌, 魏建设, 等, 2023. 黄河流域矿产资源禀赋、分布规律及开发利用潜力[J]. 西北地质, 56(2): 163—174.
- Tan W J, Zhao G B, Wei J S, *et al.*, 2023. Characteristics, Distribution and Utilization Potential of Mineral Resources in the Yellow River Basin[J]. Northwestern Geology, 56(2): 163—174. (in Chinese)
- 田震, 2018. 鄂尔多斯盆地苏 59 井区盒 8 段致密砂岩储层分布规律[D]. 成都: 成都理工大学档案馆.
- Tian Z, 2018. Distribution of Tight Sandstone Reservoirs in He8 formation, Su 59 gas field, Ordos Basin[D]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese)
- 王德英, 于海波, 王启明, 等, 2018. 渤海海域湖盆萎缩期浅水三角洲岩性油气藏差异成藏模式[J]. 东北石油大学学报, 42(3): 16—25.
- Wang D Y, Yu H B, Wang Q M, *et al.*, 2018. Differences of hydrocarbon accumulation models of extremely shallow water delta in lacustrine basin shrinking period, Bohai sea[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 42(3): 16—25. (in Chinese)
- 王加强, 2020. 浅水三角洲沉积亚相划分方法研究[J]. 石油化工高等学校学报, 33(1): 75—80.
- Wang J Q, 2020. The division method of sedimentary sub-facies in shallow water delta[J]. Journal of Petrochemical Universities, 33(1): 75—80. (in Chinese)
- 向芳, 陈洪德, 李志宏, 等, 2008. 鄂尔多斯盆地东北部山西组三角洲相沉积演化特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 35(6): 693—699.
- Xiang F, Chen H D, Li Z H, *et al.*, 2008. Sedimentary and evolution characters of the delta in the Lower Permian Shanxi Formation in the northeast of Ordos Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 35(6): 693—699. (in Chinese)
- 杨勇, 雷卜军, 冯永玖, 等, 2013. 鄂尔多斯盆地子洲及邻区山西组二段高分辨率层序地层和煤沉积模式[J]. 石油与天然气地质, 34(1): 58—67.
- Yang Y, Lei B J, Feng Y J, *et al.*, 2013. High-resolution sequence stratigraphic and coal sedimentary modes of member 2 of Shanxi Formation in Zizhou and its adjacent areas, the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 34(1): 58—67. (in Chinese)
- 姚光庆, 马正, 赵彦超, 等, 1995. 浅水三角洲分流河道砂体储层特征[J]. 石油学报, 16(1): 24—31.
- Yao G Q, Ma Z, Zhao Y C, *et al.*, 1995. Reservoir characteristics of distributary channel sand bodies of shallow water delta[J]. Acta Petrolei Sinica, 16(1): 24—31. (in Chinese)
- 张昌民, 尹太举, 朱永进, 等, 2010. 浅水三角洲沉积模式[J]. 沉积学报, 28(5): 933—944.
- Zhang C M, Yin T J, Zhu Y J, *et al.*, 2010. Shallow-water deltas and models[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 28(5): 933—944. (in Chinese)
- 赵时久, 陈家怀, 陈善庆, 1988. 滇东田坝黔西土城晚二叠世煤系上段沉积相及含煤性[J]. 沉积学报, 6(4): 62—71.
- Zhao S J, Chen J H, Chen S Q, 1988. Facies and coal-bearing characters of the upper member of the Late Permian coal measures in Tranba (Easern Yunna) and Tucheng(western Guizhou)[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 6(4): 62—71. (in Chinese)
- 周新茂, 高兴军, 季丽丹, 等, 2010. 曲流河废弃河道的废弃类型及机理分析[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 25(1): 19—23.
- Zhou X M, Gao X J, Ji L D, *et al.*, 2010. Analysis on the types and the sedimentation mechanism of the abandoned channel in meandering river[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural science Edition), 25(1): 19—23. (in Chinese)
- 朱筱敏, 邓秀芹, 刘自亮, 等, 2013. 大型拗陷湖盆浅水辫状河三角洲沉积模式及模式: 以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组为例[J]. 地学前缘, 20(2): 19—28.
- Zhu X M, Deng X Q, Liu Z L, *et al.*, 2013. Sedimentary characteristics and model of shallow braided delta in large-scale lacustrine: An example from Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 20(2): 19—28. (in Chinese)

- sion rates in the northern Chinese Tian Shan[J]. *Catena*, 210.
- Koi T, Hotta N, Ishigaki I, *et al.*, 2008. Prolonged impact of earthquake-induced landslides on sediment yield in a mountain watershed: The Tanzawa region, Japan [J]. *Geomorphology*, 101(4): 692–702.
- Liu B Y, Zang K L, Xie Y, 2002. An empirical soil loss equation[C]// Proceedings of the 12th International Soil Conservation Organization Conference, Beijing, China.
- Liu Y, Metivier F, Gaillardet J, *et al.*, 2011. Erosion rates deduced from seasonal mass balance along the upper Urumqi River in Tianshan[J]. *Solid Earth*, 2(2): 283–301.
- Pimentel D, Harvey C, Resosudarmo P, *et al.*, 1995. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits [J]. *Science*, 267(5201): 1117–1123.
- Prasannakumar V, Vijith H, Abinod S, *et al.*, 2012. Estimation of soil erosion risk within a small mountainous sub-watershed in Kerala, India, using revised universal soil loss equation (RUSLE) and geo-information technology[J]. *Geoscience Frontiers*, 3(2): 209–215.
- Romero-Díaz A, Alonso-Sarriá F, Martínez-Lloris M, 2007. Erosion rates obtained from check-dam sedimentation (SE Spain). A multi-method comparison [J]. *Catena*, 71(1): 172–178.
- Shen P, Zhang L M, Chen H X, *et al.*, 2017. Role of vegetation restoration in mitigating hillslope erosion and debris flows [J]. *Engineering Geology*, 216: 122–133.
- Wang Z, Chen Z, Yu S, *et al.*, 2021. Erosion-control mechanism of sediment check dams on the Loess Plateau [J]. *International Journal of Sediment Research*, 36(5): 668–677.
- Wei X L, Xiao F P, Chen N S, *et al.*, 2012. The preliminary study on the effect of debris flow on the Tianchi Lake [J]. *Advanced Materials Research*, 599: 757–761.
- Wirth S B, Giraidelos S, Rellstab C, *et al.*, 2011. The sedimentary response to a pioneer geo-engineering project: Tracking the Kander River deviation in the sediments of Lake Thun (Switzerland) [J]. *Sedimentology*, 58(7): 1737–1761.
- Xu L, Zheng C, Ma Y, 2021. Variations in precipitation extremes in the arid and semi-arid regions of China [J]. *International Journal of Climatology*, 41(3): 1542–1554.
- Zheng X, Tang Y, Du J, *et al.*, 2022. Enhanced soil erosion threatens fluvial tufa landscapes after an Ms 7.0 earthquake in the Jiuzhaigou world heritage site, southwestern China [J]. *Science of The Total Environment*, 848: 157632.

(责任编辑:魏 巍)

(上接第 116 页)

- 朱筱敏,刘媛,方庆,等,2012.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*,19(1):89–99.
- Zhu X M, Liu Y, Fang Q, *et al.*, 2012. 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*, 19(1): 89–99. (in Chinese)
- 朱筱敏,潘荣,赵东娜,等,2013.湖盆浅水三角洲形成发育与实例分析[J].*中国石油大学学报(自然科学版)*,37(5):7–14.
- Zhu X M, Pan R, Zhao D N, *et al.*, 2013. Formation and development of shallow-water deltas in lacustrine basin and typical case analyses [J]. *Journal of China University of Petroleum*, 37(5): 7–14. (in Chinese)
- 朱筱敏,2008.沉积岩石学(第四版) [M].北京:石油工业出版社.
- Zhu X M, 2008. *Sedimentary Petrology (Forth Edition)* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press. (in Chinese)
- 朱兆群,林承焰,张宪国,等,2017.断陷湖盆早期浅水三角洲沉积——以高邮凹陷永安地区戴一段为例[J].*吉林大学学报(地球科学版)*,47(3):659–673.
- Zhu Z Q, Lin C Y, Zhang X G, *et al.*, 2017. Shallow-water delta deposits in a rifting lacustrine basin during early stage: A case study of the first member of Dain an Formation at Yong'an area, Gaoyou sag [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 47(3): 659–673. (in Chinese)
- Fish H N, Kolb C R, McFarlan E J, *et al.*, 1954. Sedimentary framework of the modern Mississippi delta [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 24(2): 76–99.
- Postma G, 1990. An analysis of the variation in delta architecture [J]. *Terra Nova*, 2(2): 124–130.

(责任编辑:黄维婷)