

东胜气田锦72井区下石盒子组砾质辫状河沉积特征

刘钰铭^{1,2*}, 陈儒贤^{1,2}, 赵丁丁^{1,2}, 张占杨³, 王菁^{1,2}, 侯加根^{1,2}

1 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

3 中国石油化工股份有限公司华北油气分公司勘探开发研究院, 郑州 450006

* 通信作者, liuym@cup.edu.cn

收稿日期: 2022-10-25

国家自然科学基金项目(42172154 和 41872107)资助

摘要 辫状河砂体是我国油气田广泛分布的含油气储层, 其中砂质辫状河研究较为成熟, 而对砾质辫状河的沉积特征及沉积模式认识明显不足, 这给油气藏开发带来很多困难。本文以鄂尔多斯盆地北缘东胜气田锦72井区下石盒子组为研究对象, 综合利用岩心、录井、测井及地震等资料, 研究了不同类型砾质辫状河沉积的岩相组合、砂体分布样式及沉积模式。结果表明: 下石盒子组共发育3种类型砾质辫状河沉积, 沉积微相主要包括心滩、辫状河道、泛滥平原、边滩及溢岸。盒1段东侧发育间歇性、水深较浅的砾石床辫状河沉积, 以单个岩相厚度薄、纵向变化快、辫状河道及心滩规模大为特征, 砂体平面呈宽的连片状、纵向为切叠式配置为主、连通性好。盒1段西侧发育常年性、水深较深的砾石床辫状河沉积, 以单个岩相厚度较大、纵向变化较慢、辫状河道及心滩规模中等为特征, 砂体平面呈较宽的连片状、纵向为接触式或切叠式配置、连通性较好。盒2和盒3段发育水动力较弱的砾质游荡河沉积, 以细粒岩相厚度较大、河道及心滩规模较小为特征, 发育类似于曲流河的“二元结构”, 砂体平面呈窄条的带状、纵向以独立式配置为主、连通性较差。最终结合古地貌、物源供给、古气候等建立了3种类型砾质辫状河的沉积模式, 该研究不仅可以丰富粗粒致密砂岩储层沉积理论, 还能够为砾质辫状河储层的开发提供借鉴。

关键词 砾质辫状河; 沉积模式; 岩相; 下石盒子组; 东胜气田

Sedimentary characteristics of gravelly braided rivers of the Lower Shihezi Formation in the Jin 72 well area, Dongsheng gas field

LIU Yuming^{1,2}, CHEN Ruxian^{1,2}, ZHAO Dingding^{1,2}, ZHANG Zhanyang³, WANG Jing^{1,2}, HOU Jiagen^{1,2}

1 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, Beijing 102249, China

2 College of Geosciences, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

3 Research Institute of Exploration & Development, SINOPEC North China Company, Zhengzhou 450006, China

Abstract Braided river sandbodies are widely distributed oil and gas reservoirs in Chinese oil and gas fields, among which the study of sandy braided rivers is relatively mature, but the understanding of the sedimentary characteristics and sedimentary models

引用格式: 刘钰铭, 陈儒贤, 赵丁丁, 张占杨, 王菁, 侯加根. 东胜气田锦72井区下石盒子组砾质辫状河沉积特征. 石油科学通报, 2022, 04: 457-474

LIU Yuming, CHEN Ruxian, ZHAO Dingding, ZHANG Zhanyang, WANG Jing, HOU Jiagen. Sedimentary characteristics of gravelly braided rivers of the Lower Shihezi Formation in the Jin 72 well area, Dongsheng gas field. Petroleum Science Bulletin, 2022, 04: 457-474. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2022.04.040

of gravelly braided rivers is obviously insufficient, which brings many challenges to the effective development of oil and gas reservoirs. In this paper, the Lower Shihezi Formation in the Jin72 well area of the Dongsheng gas field, northern Ordos Basin is taken as the research object, and the lithofacies combination, sand body distribution pattern, and sedimentary model of different types of gravelly braided river sediments are studied by comprehensive use of core logging, well logging, and seismic data. Results show that there are three different types of gravel bed braided rivers that developed in the Lower Shihezi Formation reservoir. Sedimentary microfacies mainly include channel bars, braided channels, floodplains, point bars, and overflow banks. Intermittent and shallow gravel bed braided river deposits developed on the east side of the He 1 Member, characterized by thin single lithofacies, fast vertical change, large scale of braided channels and braided bars. The sand body is in the shape of wide, continuous sheets on the plane, and the longitudinal configuration is mainly cut and stacked with good connectivity. Perennial and deep-water gravel bed braided river deposits developed on the west side of the He 1 Member, characterized by thicker individual lithofacies, slower longitudinal changes, medium-scale braided channels and braided bars. The sand bodies are in the shape of wide, continuous sheets on the plane, contacted or cut and stacked in the vertical direction, and they have good connectivity. The He 2 and He 3 members developed conglomerate wandering river deposits in weak hydrodynamic conditions, characterized by thicker fine-grained lithofacies, small-scale braided channels and braided bars, and developed a "dual structure" similar to meandering rivers. The sand bodies are in the shape of narrow strips on the plane, mainly in independent configurations in the vertical direction, and they have poor connectivity. Finally, the sedimentary models of three different types of gravelly braided river were established by combining paleogeomorphology, provenance supply and paleoclimate, etc. This study can not only enrich the sedimentary theory of coarse-grained tight sandstone reservoirs but also provide effective guidance for the development of gravel bed braided river reservoirs around the world.

Keywords gravelly braided river; sedimentary model; lithofacies; Lower Shihezi Formation; Dongsheng gas field

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2022.04.040

0 引言

辫状河储层是陆相碎屑岩油气藏的一种重要储层类型,在全球范围内广泛分布,如埃及中东部沙漠努比亚组、伊朗中部 Shirgesht 地区 Lalun 组、准噶尔盆地侏罗系八道湾组、松辽盆地喇嘛甸油田^[1-4]。近年来,砂质辫状河沉积特征、储层构型、内部非均质性研究取得了较大进展^[5-8]。然而,国内外对砾石质辫状河研究较少,一些学者基于现代沉积、野外露头、地貌动力学研究了砾质辫状河的成因机制、沉积物的非均质性、岩相类型、储层构型等^[9-12],砾质辫状河的岩相类型复杂多样,且不同岩相物性差异明显。Miall 总结了四种不同类型砾质辫状河的岩相组合类型及沉积构型模式^[13]。虽然前人已经对砾质辫状河沉积特征进行了一些研究,但是对于油气田地下砾质辫状河储层沉积特征的研究较为笼统,对不同类型砾质辫状河的岩相、砂体分布及沉积模式的差异仍然认识不足。

鄂尔多斯盆地多个层系富含丰富的油气资源,是我国主要含油气沉积盆地之一^[14-16],其北部东胜气田下石盒子组致密砂岩气藏勘探潜力巨大^[17]。不同学者对鄂尔多斯盆地北缘下石盒子组沉积环境进行了大量研究,大多数学者认为东胜气田锦 72 井区下石盒子组为砾质辫状河沉积^[18-24],但未对砾质辫状河类型进行细分研究,不同类型砾质辫状河的沉积差异特征仍不

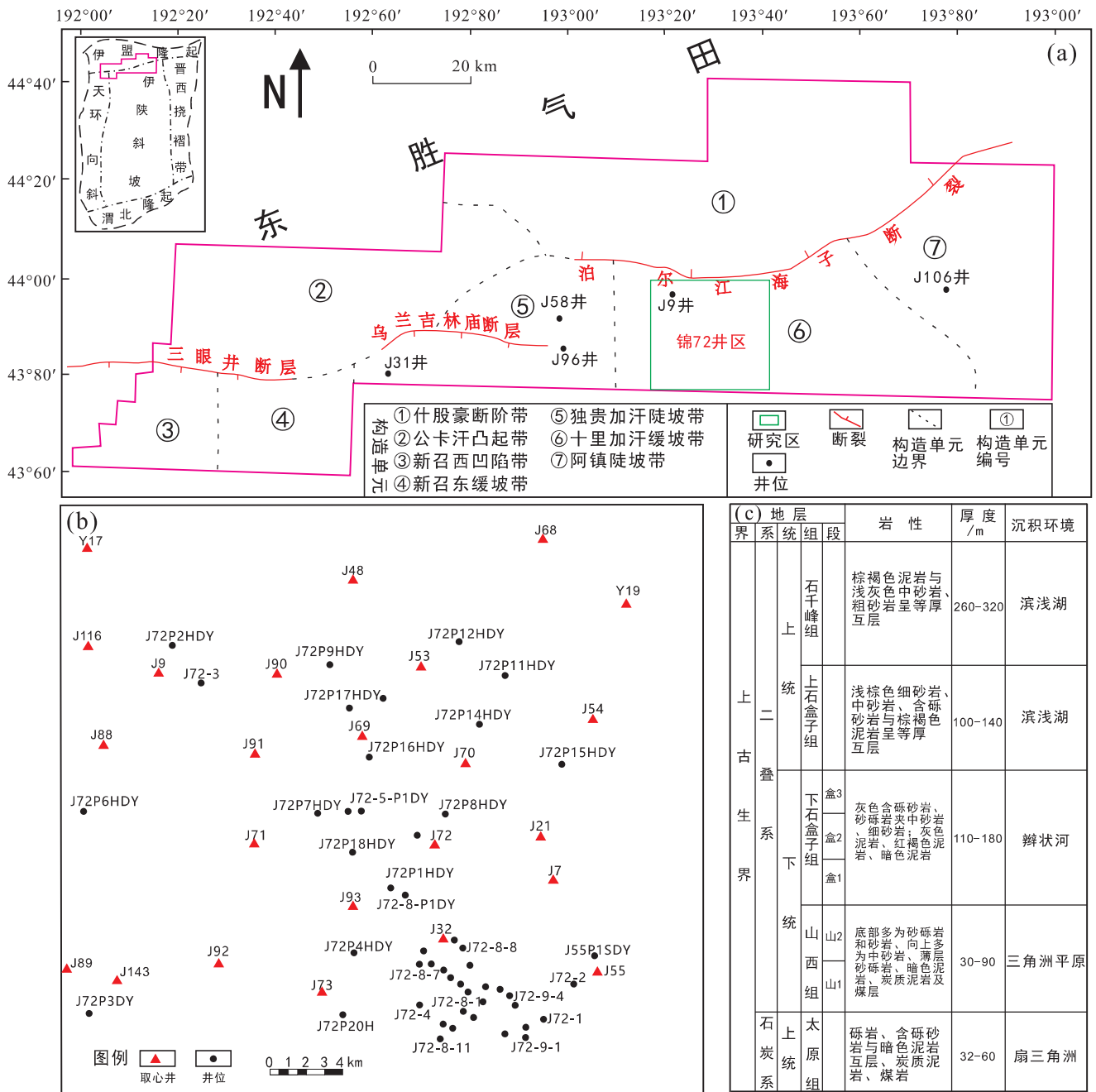
清晰。

本文以鄂尔多斯盆地北部东胜气田锦 72 井区下石盒子组为研究对象,基于岩心、测井、录井及地震等资料,阐明了不同类型砾质辫状河的岩相组合及砂体分布样式;依据研究区实际地质条件并结合已有研究成果,建立了不同类型砾质辫状河的沉积模式。该研究能够为相似沉积类型的储层预测提供参考。

1 研究区地质概况

鄂尔多斯盆地位于中国板块西北部,华北地台西部,可划分为天环凹陷、晋西挠褶带、伊盟隆起、伊陕斜坡、西缘逆冲带、渭北隆起 6 个一级构造单元^[25-27]。东胜气田位于鄂尔多斯盆地北缘,横跨伊陕斜坡、天环凹陷以及伊盟隆起构造单元^[28-29](图 1a)。锦 72 井区位于东胜气田十里加汗气区中部,北部为泊尔江海子断层(图 1b),面积约 1000 km²^[30]。在晚古生代,鄂尔多斯盆地经历了陆表海到陆内湖盆的演化,盆地北缘邻近活动大陆边缘受古亚洲洋板块向南俯冲碰撞影响,东-西向格局演变为北东-南西向,到下石盒子组晚期,南北坡降逐渐变小^[20, 31-32]。

东胜气田锦 72 井区地层自下而上发育了石炭系太原组、二叠系山西组、下石盒子组、上石盒子组、石千峰组(图 1c)。二叠系下石盒子组为本文研究的



(a) 锦72井区构造位置图; (b) 锦72井区井位图; (c) 地层柱状图

图1 锦72井区构造位置及井位分布图

Fig. 1 Structural location and well location distribution of the Jin72 well area

目标层位, 地层厚度介于110~180 m, 自下而上可分为盒1段(SQ1、SQ2)、盒2段(SQ3)、盒3段(SQ4)共3个亚段^[33](图2), 盒1段可分为盒1-1、盒1-2、盒1-3、盒1-4四个小层, 盒2段可分为盒2-1、盒2-2两个小层、盒3段可分为盒3-1、盒3-2两个小层。前人研究表明东胜气田下石盒子组的沉积环境为近物源的冲积扇-辫状河沉积体系, 物源主要来自于北部的阴山-阿拉善古陆^[22, 33]。锦72井区的沉积环境

为冲积平原背景下的砾质辫状河沉积, 盒1段沉积期物源供给充足, 砂体大面积叠置展布, 盒2及盒3段沉积期, 由于气候变化及构造运动等, 物源供应减少, 辫状河规模逐渐变小, 砂体发育规模减小^[34-37]。

2 砾质辫状河沉积特征

利用22口取心井共473.06 m岩心以及72口井的

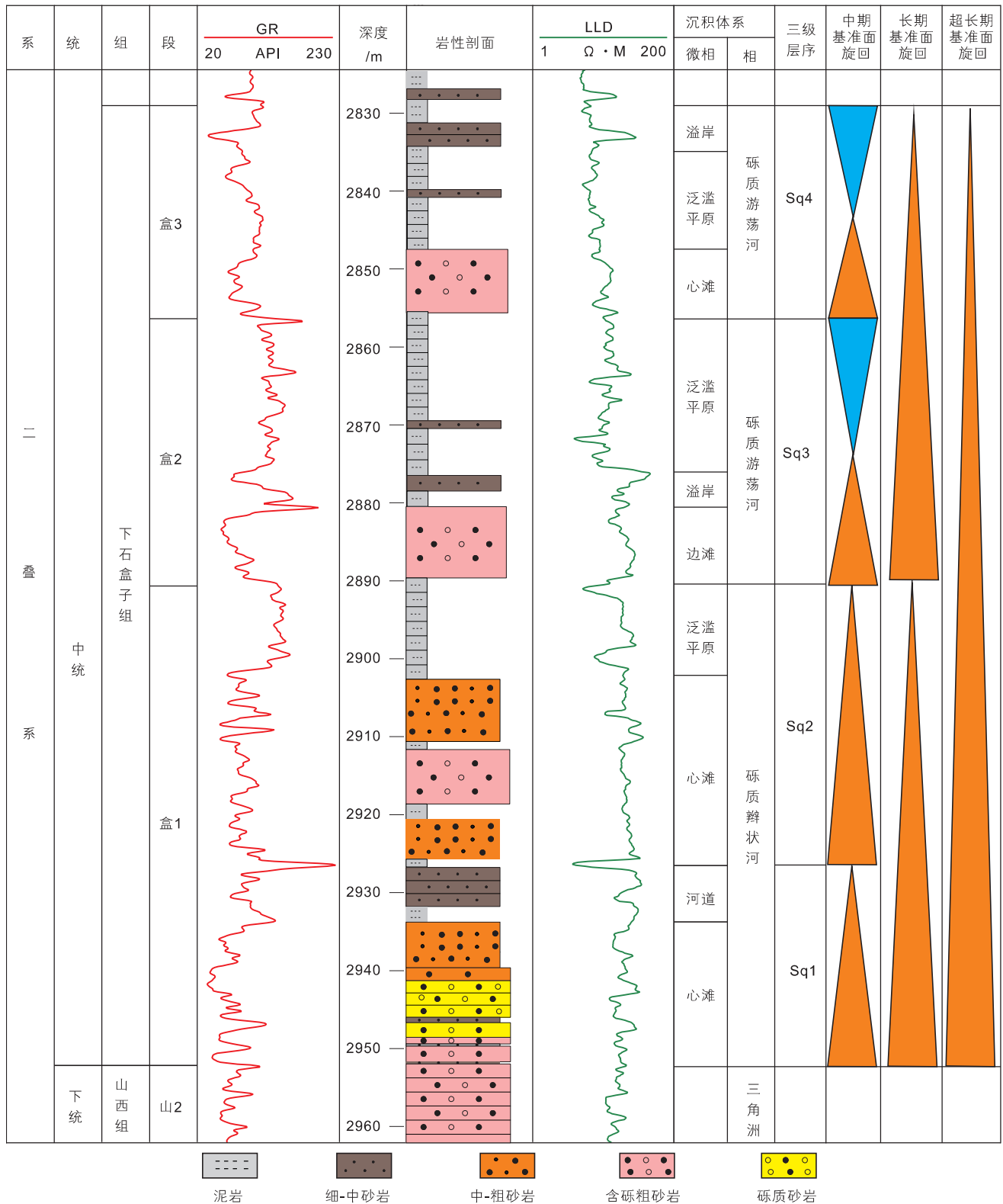


图2 东胜气田锦72井下石盒子组层序沉积相柱状图

Fig. 2 Sequence sedimentary facies column of the Lower Shihezi Formation in the Jin 72 well area, Dongsheng gas field

测井资料(图1b), 分析了研究区下石盒子组的岩石学特征、岩相类型及不同沉积微相的测井响应特征。综

合分析认为东胜气田锦72井区下石盒子组整体上为砾质辫状河沉积。

2.1 岩石学特征

2.1.1 岩石类型及矿物组分

基于 214 块铸体薄片及普通薄片分析结果, 锦 72 井区下石盒子组岩石类型主要为岩屑石英砂岩、岩屑砂岩, 含有少量岩屑长石砂岩和长石岩屑砂岩(图 3a)。石英体积百分含量为 56%~90%, 平均 71.3%; 长石含量较少, 最大 7%; 岩屑体积百分含量为 3%~44%, 平均 27.3%。岩屑以变质岩岩屑为主, 其次为沉积岩岩屑, 含少量火成岩岩屑; 杂基主要为泥质(6.8~25.8%), 胶结物主要为方解石、自生黏土矿物。成分成熟度指数 $Q/(F+R)$ 为 1.8~2.7, 平均为 2.33, 表明研究区下石盒子组砂体具有较高成分成熟度。

根据 68 块样品的铸体薄片鉴定及粒度分析结果, 锦 72 井区下石盒子组砂岩具有较高结构成熟度, 分选好的样品占 78%, 分选中等占 18%(图 3b); 磨圆以次棱角-次圆状为主(图 3c), 胶结类型主要为孔隙胶结和接触胶结(图 3d), 颗粒接触方式主要为点-线接

触, 表明研究区下石盒子组砂岩沉积物搬运距离较短, 而且在水动力较强的环境下沉积。

2.1.2 岩石粒度特征

研究区下石盒子组 6 口井 15 个样本点的粒度分析结果表明, 发育 2 种典型的粒度概率累积曲线类型, 分别为两段式、三段式, 具有沉积物粒度较粗, 粒径分布区间广的特点(图 4a), 以滚动组分、跳跃组分为主, 悬浮组分次之。在两段式曲线中发育明显的滚动次总体和跳跃次总体, S 截点大致位于 -2ϕ 处, 指示强水动力环境; 三段式曲线的滚动、跳跃、悬浮总体均发育, 以跳跃为主, 主要发育中粗砂岩。

岩心粒度 C-M 图表明研究区下石盒子组以牵引流沉积为主(图 4b), 结合岩石粒度的分布特征, 综合分析认为研究区沉积物为近物源的牵引流高能环境沉积。

2.2 岩相类型

通过对研究区 22 口取心井下石盒子组 473.06 m 岩心的精细描述, 发现岩心中发育冲刷面、块状层理、

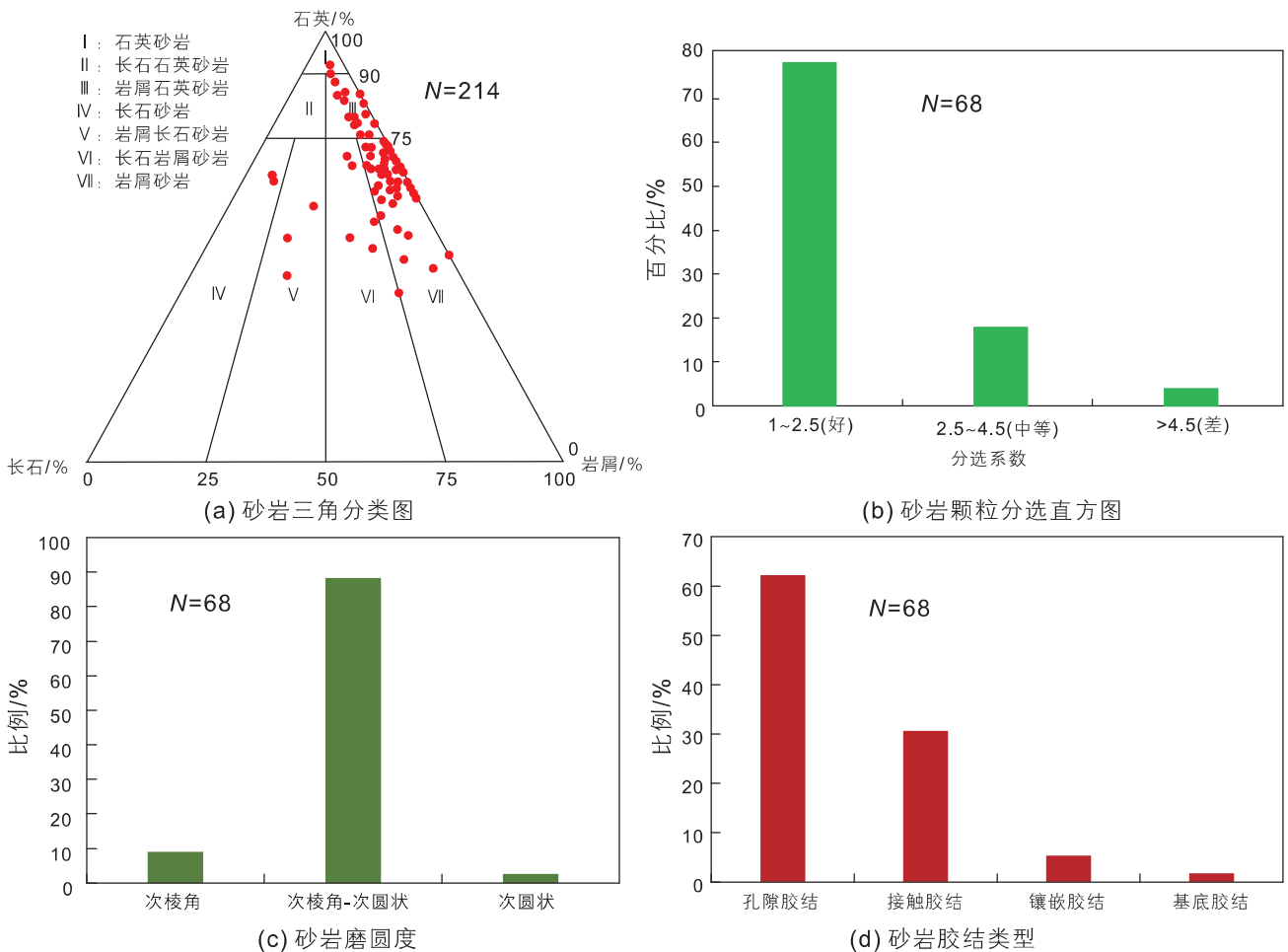


图 3 锦 72 井区下石盒子组岩石学特征

Fig. 3 Petrological characteristics of the Lower Shihezi Formation in the Jin72 well area

平行层理、大型槽状交错层理、小型槽状交错层理、板状交错层理以及泥质纹层等沉积构造(图5)。依据岩石粒度及沉积构造等可将下石盒子组储层划分为12

种岩相类型。

(1) 砾岩相(Gm)可细分为块状层理杂基支撑中粗砾岩相(Gmm)(图6a)、块状层理颗粒支撑细砾岩相

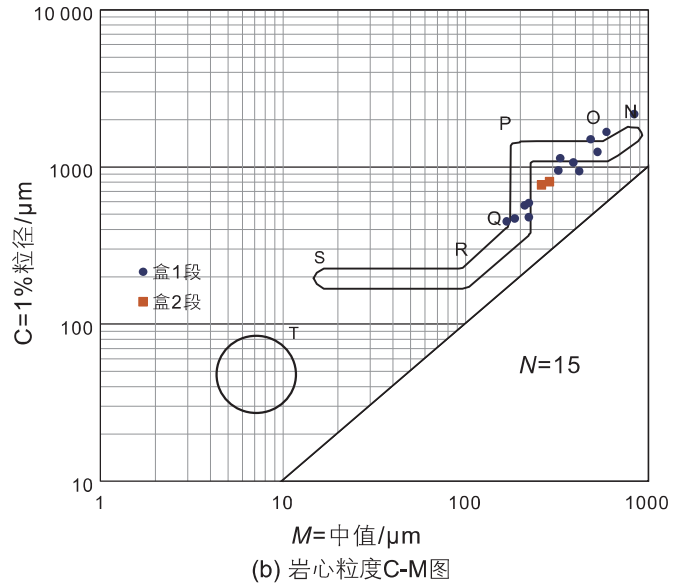
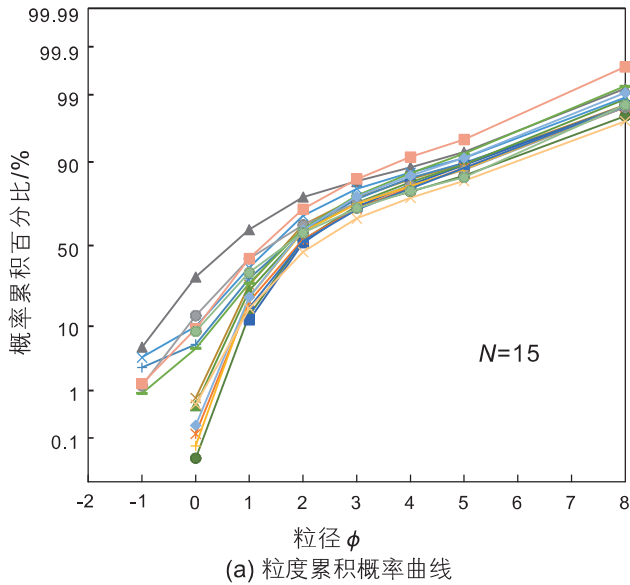


图4 锦72井区下石盒子组粒度特征

Fig. 4 Grain size characteristics of the Lower Shihezi Formation in the Jin 72 well area

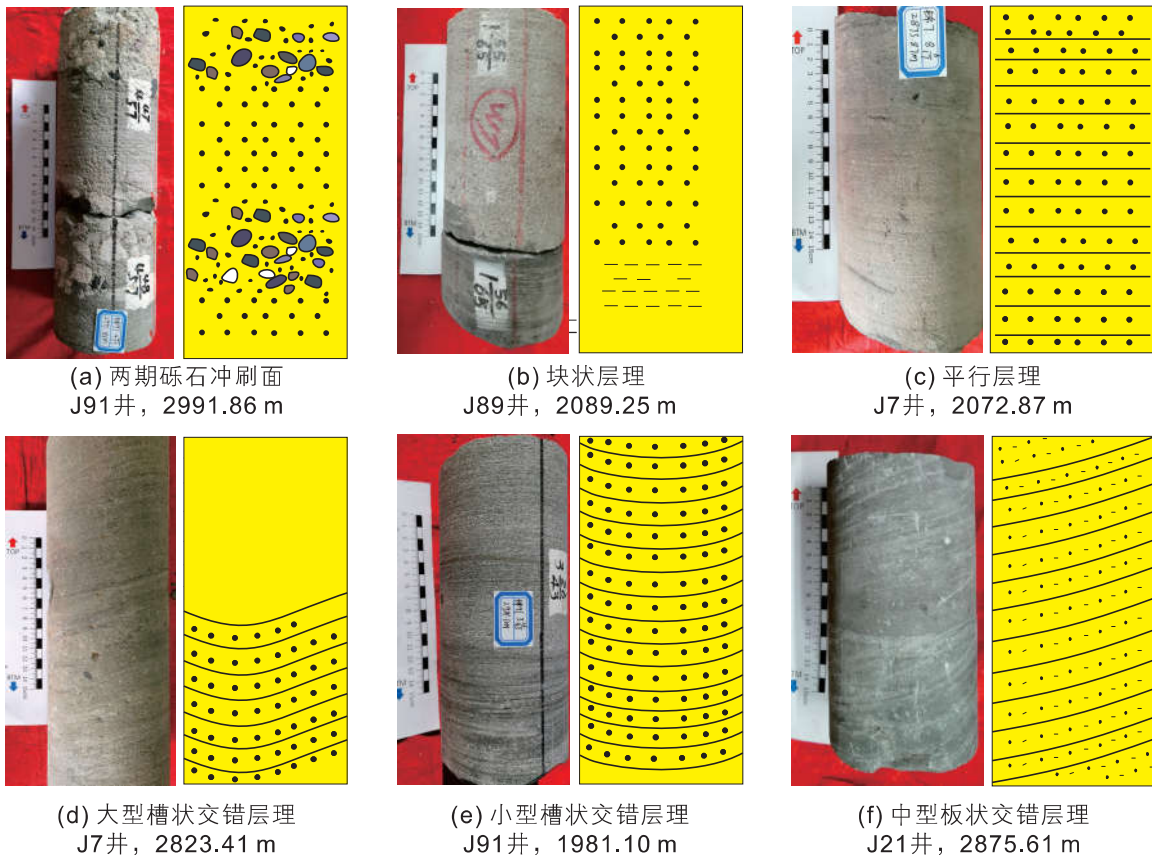


图5 锦72井区下石盒子组典型沉积构造及素描图

Fig. 5 Typical sedimentary structure and sketch map of the Lower Shihezi Formation in the Jin 72 well area

(Gfm)(图 6b)。砾岩相一般出现在河流冲刷面位置,反映新的洪水期开始,物源供应充足,颗粒大小变化大,分选差,表现为杂基支撑,可见砾石定向排列,冲刷面位置可见泥砾;在纵向上冲刷期短的才十几厘米,显示为叠覆冲刷。

(2)砂岩相中发育块状层理砾质砂岩相(Scm)、块状层理含砾粗砂岩相(Sgm)、块状层理中粗砂岩相(Smm)、槽状交错层理中粗砂岩相(Smt)、槽状交错层理中细砂岩相(Sft)、板状交错层理中细砂岩相(Sfp)、平行层理中细砂岩相(Sfh)(图 6c-i)。其中,块状层理砾质砂岩相一般发育在冲刷面位置,为新一期沉积的开始。块状层理含砾粗砂岩相是研究区最常见的岩石相,在纵向上几分米至几米,反映强的水动力沉积环境。交错层理砂岩相则是属较强水动力环境下河道迁移下切或充填的沉积产物,分选较好,平行层理砂岩粒度较细,物性较差。

(3)粉砂岩相中发育块状层理粉砂岩相(Sfvm)以及平行层理粉砂岩相(Sfvh)。在水动力条件较弱的情况下悬浮物堆积形成,发育于静水环境,仅在溢岸微相

中常见(图 6j、k)。

(4)块状泥岩相(Mm)(图 6l)中主要发育红褐色泥岩、浅灰色泥岩、以及粉砂质泥岩。泥岩层代表枯水期,处于低能安静水体环境,沉积物源没有供给,泥岩颜色主要为氧化色,代表水上沉积环境,岩心上偶见植物根茎,该岩相在辫状河的泛滥平原微相中广泛发育。

2.3 沉积微相及测井相

锦 72 井区下石盒子组的沉积微相主要包括心滩、辫状河道、泛滥平原、溢岸及边滩,其中心滩为优势沉积微相,在研究区广泛分布且频繁迁移叠置,辫状河道呈现为河床中的水道充填沉积。砂体中最常见的韵律类型为均质韵律,其是沉积物在较强的水体中快速沉积并且无明显分异作用而形成的,粒度特征基本一致,主要为河道滞留沉积或心滩形成;其次为正韵律,即沉积物在水体能量减弱或者较为稳定条件下因重力分异作用,粒度自下而上由粗变细,反映了河道或者溢岸沉积。测井相主要为箱型(光滑箱型、齿状



图 6 锦 72 井区下石盒子组典型岩相类型

Fig. 6 Typical lithofacies types of the Lower Shihezi Formation in the Jin 72 well area

箱型、复合箱型)、钟形以及指状三种基本测井曲线形态(图7)。心滩沉积的测井响应为箱型,一般对应均质韵律岩性特征,占比68.3%,泥质含量越少,光滑程度越高(图7a);辫状河道或边滩沉积的测井响应为钟形,一般对应正韵律岩性特征,占比21.9%;指状测井曲线对应的韵律特征不明显,指示窄河道沉积或溢岸沉积,占比9.8%(图7e)。

3 砾质辫状河类型细分

根据岩心及测井资料的分析结果,东胜气田锦72井区下石盒子组砾质辫状河沉积特征与Cant及Galloway的经典模式一定区别^[5-6],研究区不同区域不同时期条件下的沉积特征差异较大。因此借鉴前人研究成果,基于岩心及测井资料,综合研究了锦72井区砾质辫状河的河流深度、岩相纵向变化、沉积旋回长度以及测井曲线等特征,并结合Miall所划分的4种砾石质辫状河模式^[13],将锦72井区盒1段东侧划分为浅砾石床辫状河,西侧为深砾石床辫状河,盒2及盒3段全区为砾质游荡河(表1),下面将详细论述不同类

型砾质辫状河沉积特征的差异。

3.1 辫状河深度计算

经过多年研究,国内外学者普遍认为辫状河满岸深度控制其所形成的交错层组厚度^[38],因此通过统计锦72井区三种砾质辫状河的砂岩交错层组厚度,可以计算对应的河道满岸深度。

辫状河道满岸深度计算公式为:

$$\beta = \frac{h_s}{1.8} \tag{1}$$

$$h_m = 2.22\beta^{1.32} \tag{2}$$

$$h_a = 11.6h_m^{1.84} \tag{3}$$

式中, β 为系数; h_s 为交错层理系组平均厚度, m; h_m 为单河道满岸深度, m; h_a 为平均河道满岸深度, m。

研究区盒1段东侧浅砾石床辫状河共83.66m岩心(J7、J72、J53井)的统计结果表明,发育的交错层理系组平均厚度为0.27 m,计算得到的单河道平均满岸深度为2.43 m;研究区盒1段西侧深砾石床辫状河共70.5 m岩心(J88、J91井)的交错层理系组平均厚度

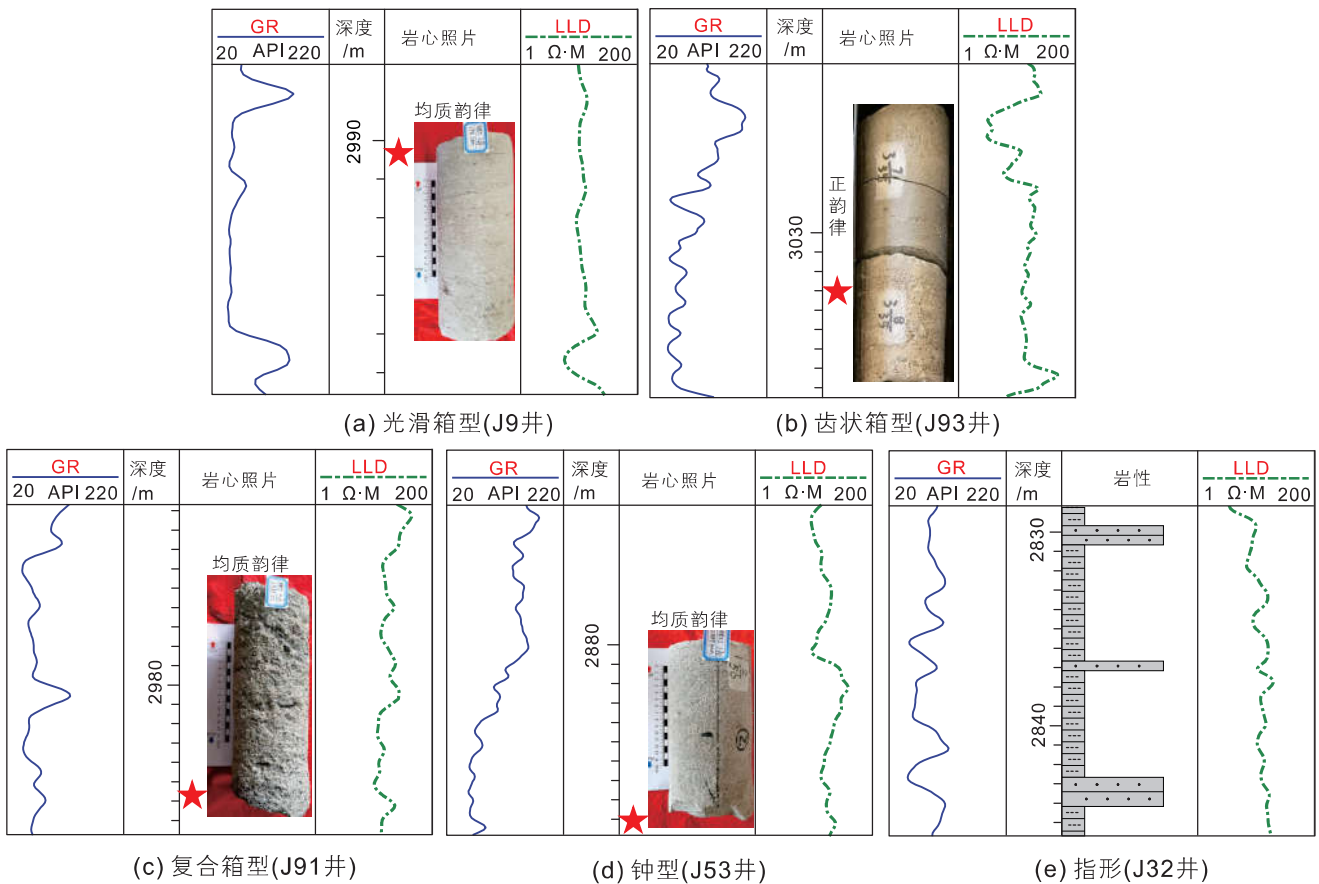


图7 锦72井区下石盒子组五种常见的测井曲线形态

Fig. 7 Five kinds of common log curve shapes in the Lower Shihezi Formation in the Jin72 well area

表 1 研究区下石盒子组河流类型划分及沉积特征参数表

Table 1 River type classification and sedimentary characteristic parameters of the Lower Shihezi Formation in the study area

河流类型	交错层理系 组厚度/m	单一河道 满岸深度/m	测井曲线 齿化程度	沉积旋回 长度	岩相组合 纵向变化	砾石含量 /%	沉积微相
浅砾石床 辫状河 (盒 1 段东侧)	0.27	2.43	齿化程度高	十几厘米 至几分米	突变	50~70	心滩、辫状河道、泛 滥平原
深砾石床 辫状河 (盒 1 段西侧)	0.45	4.87	较光滑	几分米 至几米	较渐变	35~56	
砾质游荡河 (盒 2、3 段全区)	0.18	1.76	一般	几米至 几十米	渐变“二元 结构”	20~43	心滩、辫状河道、泛 滥平原、溢岸及边滩

为 0.45 m, 单河道平均满岸深度为 4.87 m; 研究区盒 2 及盒 3 段砾质游荡河共 66.3 m 岩心(J7、J68 井)的交错层理系组平均厚度为 0.18 m, 单河道平均满岸深度为 1.76m。

3.2 浅砾石床辫状河

锦 72 井区东侧盒 1 段为浅砾石床辫状河沉积, J7、J72、J53 井共 83.66 m 的岩心观察结果表明, 砾石质段共 53.2 m, 泥岩较少见, 整体为砾包砂特征, 具有单个岩相厚度薄, 顶底突变明显, 纵向变化快(几厘米—几分米), 自然伽马测井曲线突变、齿化程度高, 非均质强的特点。这表明了河流较浅, 单一河道平均满岸深度为 2.43 m(表 1), 多为间歇性水流。进一步划分为辫状水道、心滩、泛滥平原三种沉积微相。

辫状水道与心滩微相的岩相组合序列由下至上分别为: 块状层理砾岩相(Gm)—块状层理砾质砂岩(Scm、Sgm)—交错层理中粗砂岩(Smt), 块状砾岩(Gm)—块状含砾粗砂岩(Sgm)—交错层理中细砂岩(Sft)—块状砾岩(Gm)。总体上岩性粒度粗, 砾石质含量高, 表现为正韵律, 下粗上细。单个正旋回底部为砾岩相或者砾质砂岩相, 并且旋回长度小, 一般介于几厘米至几十厘米。表明沉积时期水动力条件变化快, 河道多次切割叠置、冲刷下伏地层(图 8)。

在测井相上辫状水道自然伽马曲线呈中—高幅钟型, 对应正韵律沉积, 反应河道内水动力逐渐衰减的过程, 中—高幅箱型(齿状、复合型)对应心滩沉积的砂砾岩体, 两者 GR 值介于 20~90 API, 表明在水体能量强的环境下形成(图 8)。

泛滥平原微相为单期旋回末期, 能量较弱, 沉积物粒度细, 以红褐色泥岩相、灰色泥岩相、泥质粉砂

岩相为主, 偶见暗色泥岩相, 厚度小, 介于几厘米至几十厘米, 自然伽马曲线呈低幅齿形, GR 值一般大于 90 API, 表明在弱水动力条件的氧化环境中沉积形成(图 8)。

3.3 深砾石床辫状河

研究区西侧盒 1 段为深砾石床辫状河沉积, 发育辫状水道、心滩、泛滥平原三种沉积微相。J91、J88 井共 70.5 m 的岩心观察描述结果表明, 具有砾石含量高, 粒度整体稍细, 泥岩较少, 呈砾包砂特征。深砾石床辫状河沉积岩相突变少, 冲刷面粒序渐变, 自然伽马测井曲线较光滑的特征, 表示河流较深, 单一河道平均满岸深度 4.87 m, 多为常年性水流沉积环境。

辫状河道与心滩微相存在几种类型的旋回, 旋回长度相对于浅砾石床辫状河较长, 砾石层大约几十厘米至 2 米厚左右。岩相序列由下至上为: 块状砾岩(Gm)—块状砾质砂岩(Scm)—块状含砾粗砂岩(Sgm)—交错层理中粗砂岩(Smt)—中细砂岩(Sft、Sfh), 块状砾岩(Gm)—块状砾质砂岩(Scm)。在垂向上心滩微相岩相组合频繁切叠辫状河道岩相组合, 粒序为正韵律, 砾石质含量高, 岩相相对于浅砾石床辫状河较渐变, 在测井相上自然伽马曲线较光滑(图 9)。

3.4 砾质游荡河

研究区盒 2、3 段为砾质游荡河沉积环境, 单一河道平均满岸深度为 1.76 m(表 1), 该时期辫状河向曲流河转化, 发育类似曲流河的“二元结构”, 顶部泥岩较为稳定, 弯曲度较深、浅砾石床辫状河大, 但低于高弯度曲流河, 侧向加积作用明显, 既有心滩又发育边滩, 进一步划分为心滩、边滩、河道充填、溢岸、泛滥平原等沉积微相。

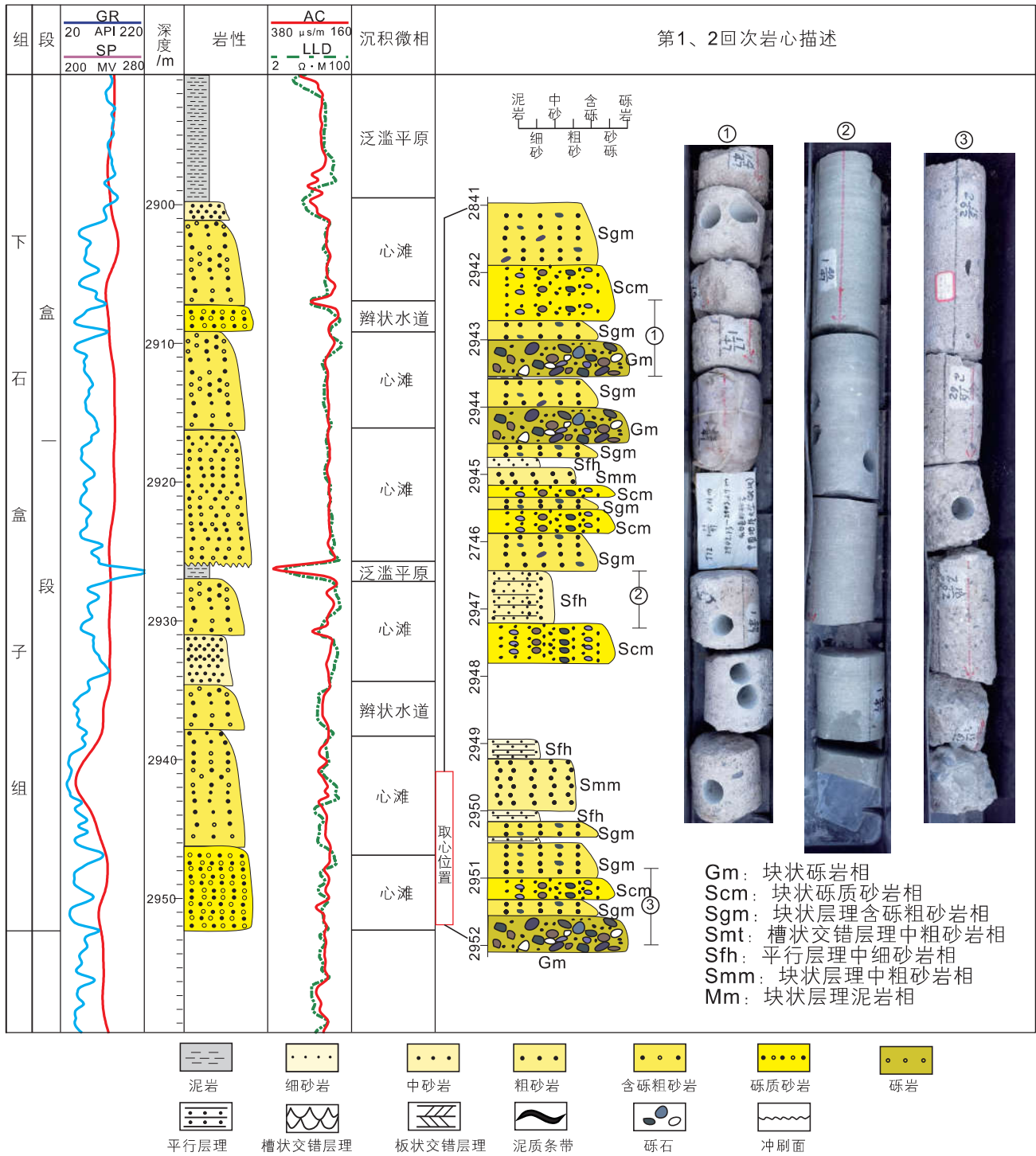


图8 研究区盒1段东侧浅砾石床辫状河岩心柱状图(J72井)

Fig. 8 Core column of braided river in shallow gravel bed on the east side of the He1 member in the study area (well J72)

河道充填、心滩以及边滩微相的岩性与岩相组合序列由下至上为：块状层理砾质砂岩(Gm)-块状层理含砾粗砂岩(Sgm)-交错层理中粗砂岩(Smt)-交错层理中细砂岩(Sft)-平行层理粉砂岩(Sfvm)-稳定泥岩(Mn)，岩相组合与深砾石床辫状河相似，岩相渐变，

纵向上为正韵律，区别在于单期沉积旋回较长，一般介于几米至几十米，泥岩稳定且厚度大，可达十几米，总体类似于曲流河的“二元结构”(图10)。溢岸沉积微相发育岩相序列为：平行层理中细砂岩(Sfh)以及泥质粉砂岩(Sfvm、Sfvh)。在测井相上心滩及边滩微相

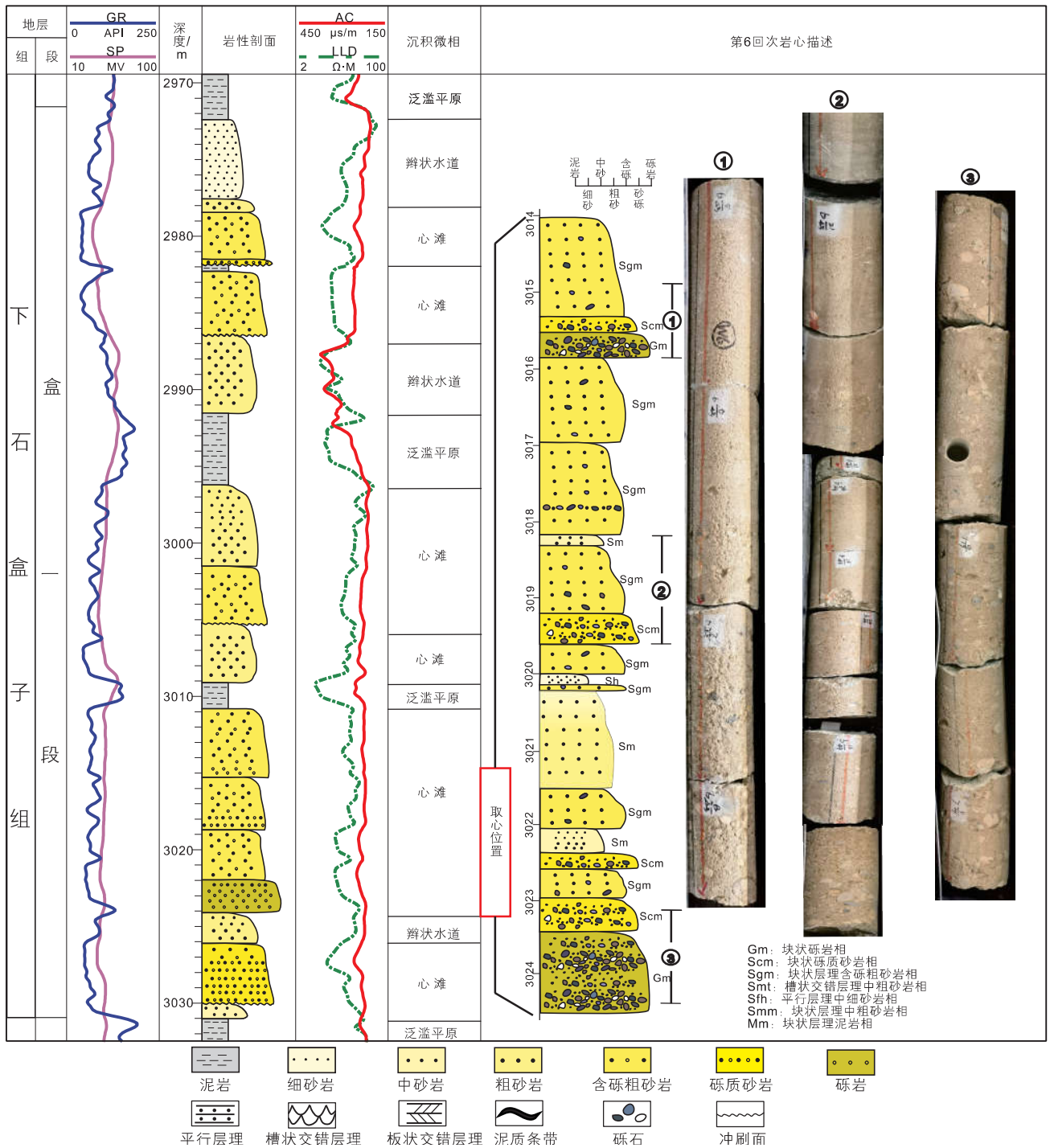


图 9 研究区西侧盒 1 段深砾石床辫状河心滩岩心柱状图 (J88 井)

Fig. 9 Core column of braided bar of braided river in deep gravel bed of the He 1 member in the west side of the study area (well J88)

的自然伽马曲线呈平滑箱型或者复合箱型，辫状水道的测井响应为钟型，溢岸的测井响应为指状，纵向上测井曲线特征总体上表现为典型的“二元结构”。

三种类型砾质辫状河的岩相分布特征具有一定的差异性，深、浅砾石床辫状河的块状砾质砂岩(Scm)

和块状含砾粗砂岩(Sgm)厚度较大，浅砾石床辫状河垂向上的岩相变化较快，砾质砂岩(Scm)和块状含砾粗砂岩(Sgm)频繁叠置；砾质游荡河的块状中粗砂岩(Smm)和块状中细砂岩(Sfm)厚度较大。再者，心滩及边滩微相中的粗粒岩相厚度比辫状河道大。

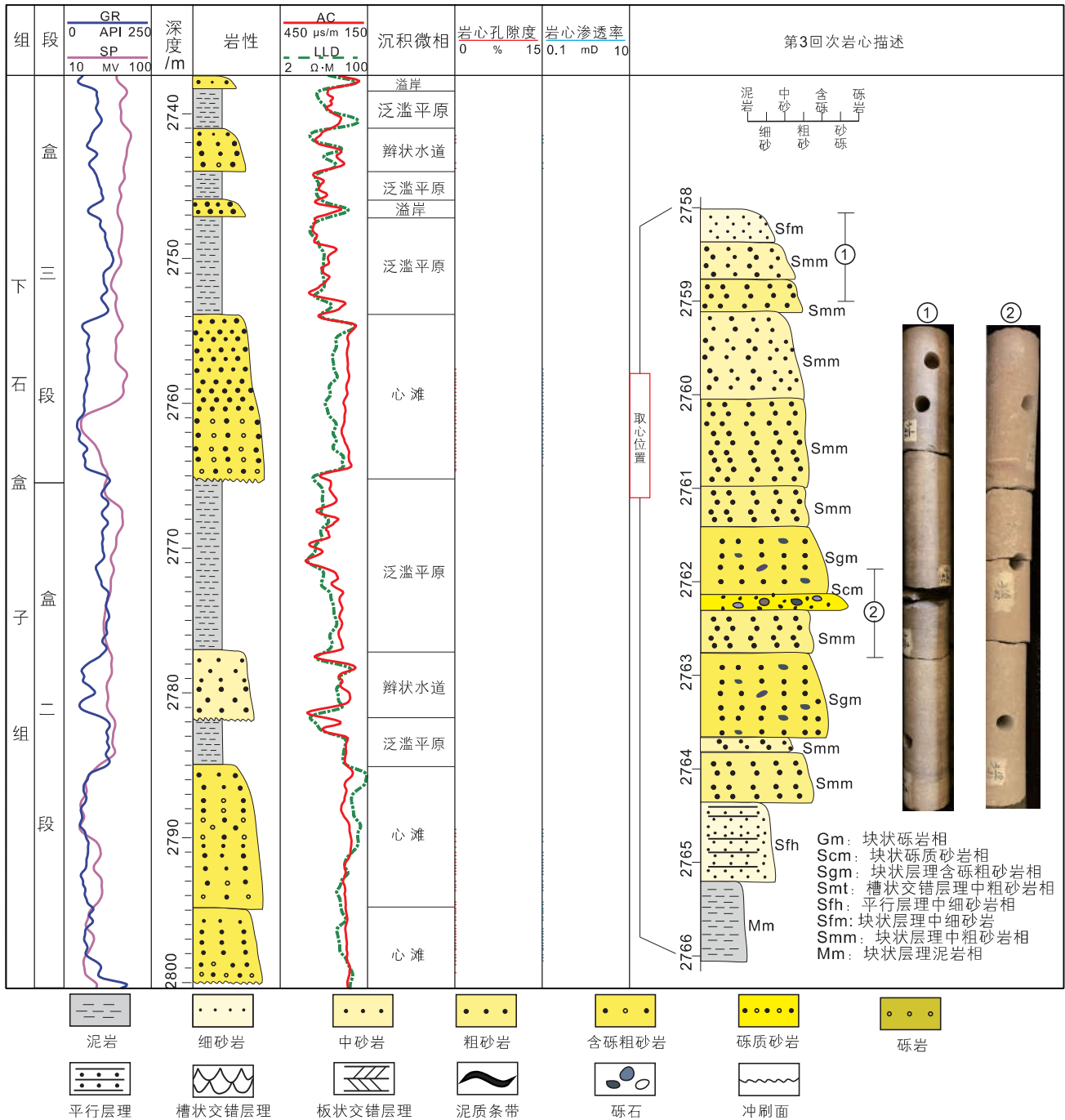


图 10 研究区盒 2 及盒 3 段砾质游荡岩心柱状图(J7 井)

Fig. 10 Core column of gravel wandering river in the He2 and He3 members of the study area (well J7)

4 砂体分布特征

以沉积模式为指导，基于井震结合方法预测了下石盒子组各小层的砂体厚度，揭示了不同河流类型的砂体展布特征。

4.1 砂体平面分布特征

锦 72 井区盒 1 段各小层砂体呈连片状南北向分布，砂体厚度及宽度大，总体上东侧砂体规模大于西侧砂体规模。以盒 1-3 小层为例，东侧浅砾石床辫状河砂体宽度介于 2.6~8.0 km，平均宽度为 4.6 km，砂体厚度平均为 12.3 m；西侧深砾石床辫状河砂体宽度

介于 2.8~5.6 km，平均宽度为 3.2 km，砂体厚度平均为 8.5 m(图 11a)。以盒 2-1 小层砂厚为例分析砾质游荡河砂体分布特征，砂体宽度介于 0.8~2.6 km，平均宽度为 1.2 km，砂体平均厚度为 5.26 m，砂体在平面上呈窄条带状交织分布，表明了盒 2 及盒 3 段沉积期，物源供应减少，水动力条件减弱，辫状河向曲流河过渡，河道规模变小，砂体宽度及厚度变小，泛滥平原泥岩增多(图 11b)。

4.2 砂体剖面分布特征

在砂体平面分布特征研究的基础上，进一步结合

古地貌、物源供给等，总结了研究区下石盒子组不同类型砾质辫状河沉积砂体的纵向叠置样式。

盒 1 段东侧浅砾石床辫状河河床较浅，可容纳空间/沉积物供给速率(A/S)比值较低，河道频繁迁移叠置，砂体侧向切叠程度高，砂地比大，砂体连通性好；盒 1 段西侧深砾石床辫状河河床较深， A/S 值较低，河道较为稳定，砂体以接触式为主，砂地比中等，砂体连通性较好；盒 2 及盒 3 段砾质游荡河的河道较窄且河床较浅， A/S 值较高，泛滥平原泥岩发育，砂体以独立式为主，砂体连通性差(图 12)。

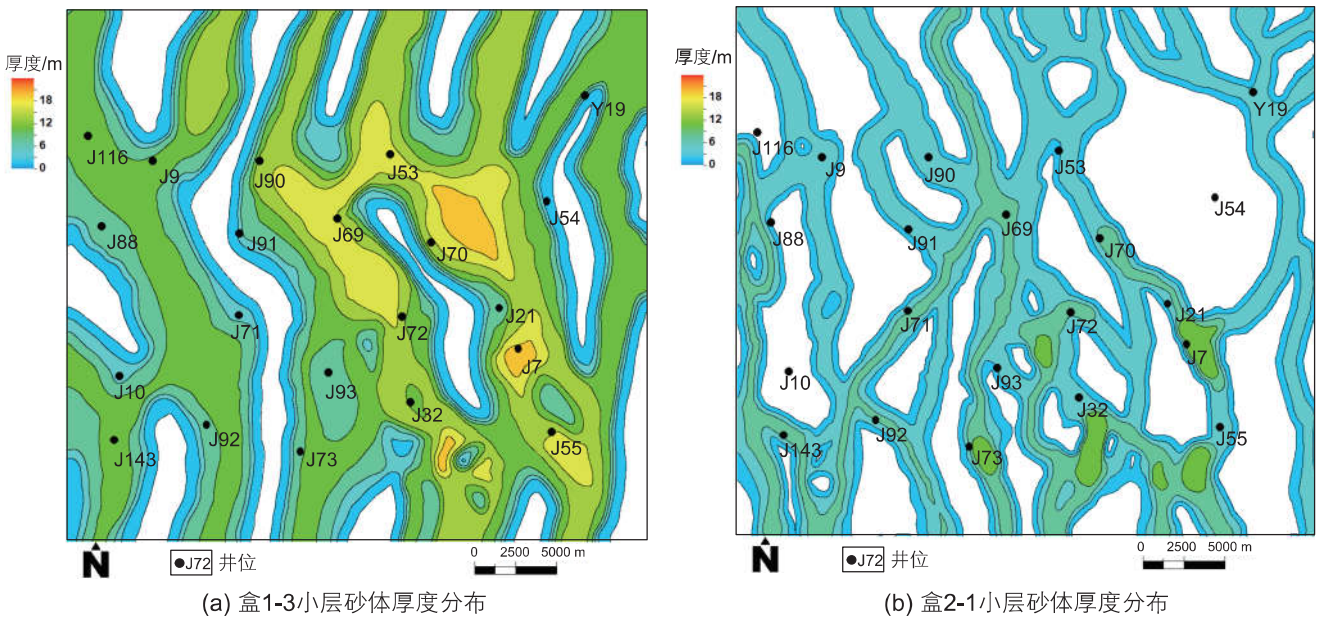


图 11 锦 72 井区典型层位砂体厚度分布

Fig. 11 Thickness distribution of sand bodies in typical horizons in the Jin72 well area

砾质辫状河类型	盒1段东侧 (浅砾石床辫状河)	盒1段西侧 (深砾石床辫状河)	盒2及盒3段 (砾质游荡河)
可容纳空间/沉积物供给速率(A/S)	低	低	高
砂体叠置样式	切叠式	接触式	独立式
剖面特征			

图 12 下石盒子组不同类型砾质辫状沉积河砂体叠置样式

Fig. 12 Superposition pattern of different types of gravelly braided river sand bodies in the Lower Shihezi Formation

5 沉积演化及砾质辫状河沉积模式

通过对东胜气田锦72井区下石盒子组不同类型砾质辫状河沉积特征的深入研究,明确了下石盒子组砾质辫状河沉积体系的沉积演化特征,建立了沉积模式。

5.1 沉积演化

山西组沉积期,鄂尔多斯盆地整体抬升,海水从盆地两侧逐渐退出,至下石盒子组盒1段沉积期(SQ1、SQ2),海水完全褪去,由海盆演变为湖盆,进入陆相沉积的全新演化阶段,处于微咸-淡水过渡环境,地形总体表现为北高南低^[26]。在此时期,发育砾质辫状河沉积体系,气候较为湿热,物源区的大青山-乌拉山、阴山古陆上升迅速,沉积坡降较大,强烈的剥蚀作用使得物源供给充足。由于盆地抬升导致基准面下降,可容纳空间减少,沉积物供给速率(S)远大于可容纳空间(A)增加速率,而沉积物供给速率与可容纳空间变化速率直接控制着砂体的叠加样式^[36,39-40],因此河道以进积方式沉积,河道砂体相互切叠,形成“泛连通体”。古地貌局部高地对水系的阻隔控制水道发育(图13),从而导致锦72井区东西两侧发育2条南北走向水系,东侧水系较浅,西侧水系较深,因此认为研究区东侧发育浅砾石床辫状河沉积,河流迁移改道频繁,河道及心滩规模较大,岩相突变,砂体叠置样式以切叠式为主;西侧发育深砾石床辫状河沉积,发育常年性水流,因此河道及心滩规模较浅砾石床辫状河小,岩相渐变,再者由于西侧可容纳空间比东侧大,砂体切叠程度也较东侧低,砂体叠置样式以切叠

式、接触式为主(图12)。

在下石盒子组盒2及盒3段沉积期(SQ3、SQ4),由于物源区构造活动减弱,沉积坡降减少,气候由湿热转化为干旱环境,物源供给减少,河流沉积作用减弱;与此同时盆地加速下降,基准面上升,可容纳空间增大^[41],沉积物供给速率远小于可容纳空间增加速率,河道以退积方式沉积,河道以侧向加积为主,河道之间合并现象减弱,砂岩厚度较薄,侧向连通性较差,砂体叠置样式以独立式为主(图12),河道规模以及心滩大小较SQ1、SQ2时期的减小。该时期的砾质辫状河向曲流河过渡,发育类似曲流河的“二元结构”,为砾质游荡河沉积体系。

5.2 砾质辫状河沉积模式

在分析锦72井区不同类型砾质辫状河沉积演化特征的基础上,结合国内外的沉积相模式,建立了研究区不同类型砾质辫状河的沉积模式。

(1) 盒1段深、浅砾石床辫状河沉积模式

锦72井区盒1段东侧浅砾石床辫状河的单一河道平均满岸深度为2.43 m,河道迁移摆动频繁,具有岩相突变快,伽马曲线齿化程度高的特点,沉积旋回长度介于几厘米至几分米,整体粒度粗且砾石质含量高,辫状河道与心滩规模较大,砂体叠置样式以切叠式为主(图14)。

锦72井区盒1段西侧深砾石床辫状河的单一河道平均满岸深度为4.87 m,发育长年河流,河道较为稳定,岩相较渐变,冲刷面粒序渐变,沉积旋回长度介于几分米至几米,伽马曲线较为平滑,辫状河道与心滩规模较浅砾石床辫状河小,砂体叠置样式以切叠式、

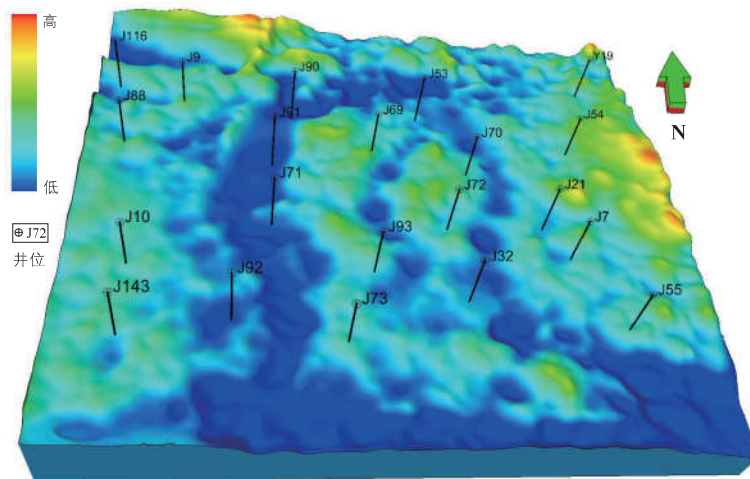


图13 锦72井区下石盒子组沉积期古地貌

Fig. 13 Paleogeomorphology of the depositional period of the Lower Shihezi Formation in the Jin 72 well area

接触式为主(图 14)。

(2) 盒 2 及盒 3 段砾质游荡河沉积模式

锦 72 井区盒 2、3 段砾质游荡河沉积的单一河道平均满岸深度为 1.76 m，自然伽马曲线较为光滑，岩相垂向组合渐变，沉积旋回长度介于几米至几十米，

发育类似曲流河的“二元结构”；河道间细粒沉积占比增大，砂体较薄且横向连通性差，砂体切叠程度弱，以孤立式为主，河道及心滩规模小，偶见边滩(图 15)。

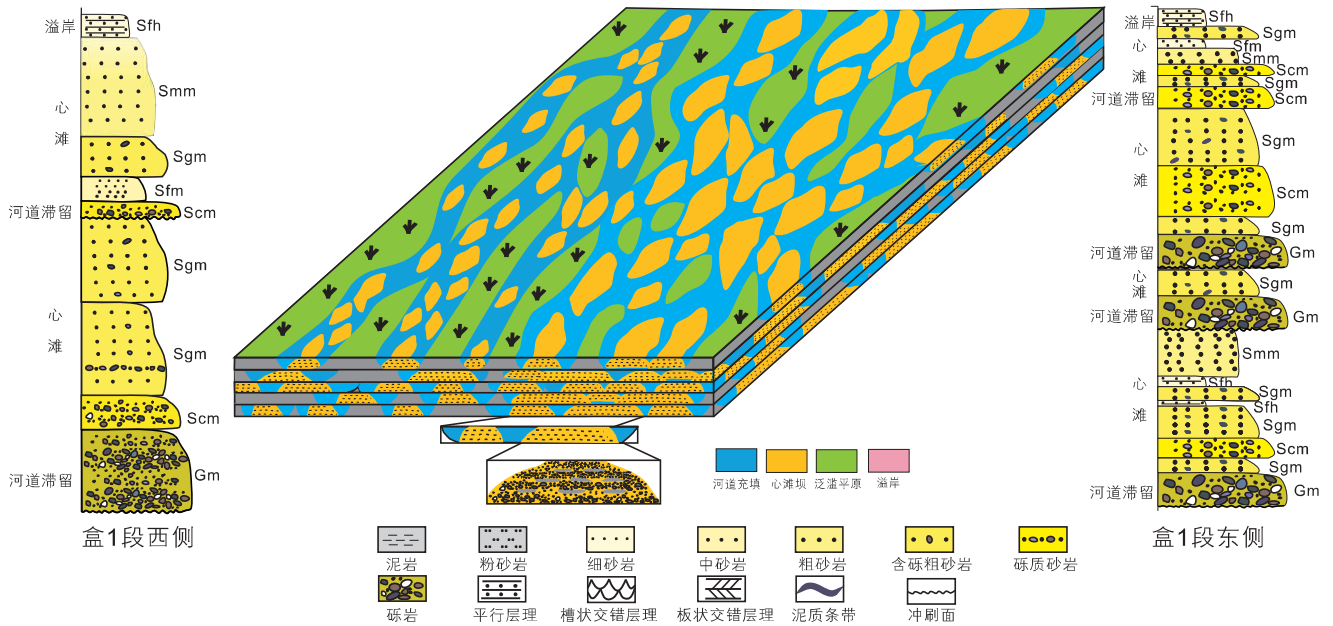


图 14 锦 72 井区盒 1 段沉积模式

Fig. 14 Sedimentary model of the He 1 member in the Jin 72 well area

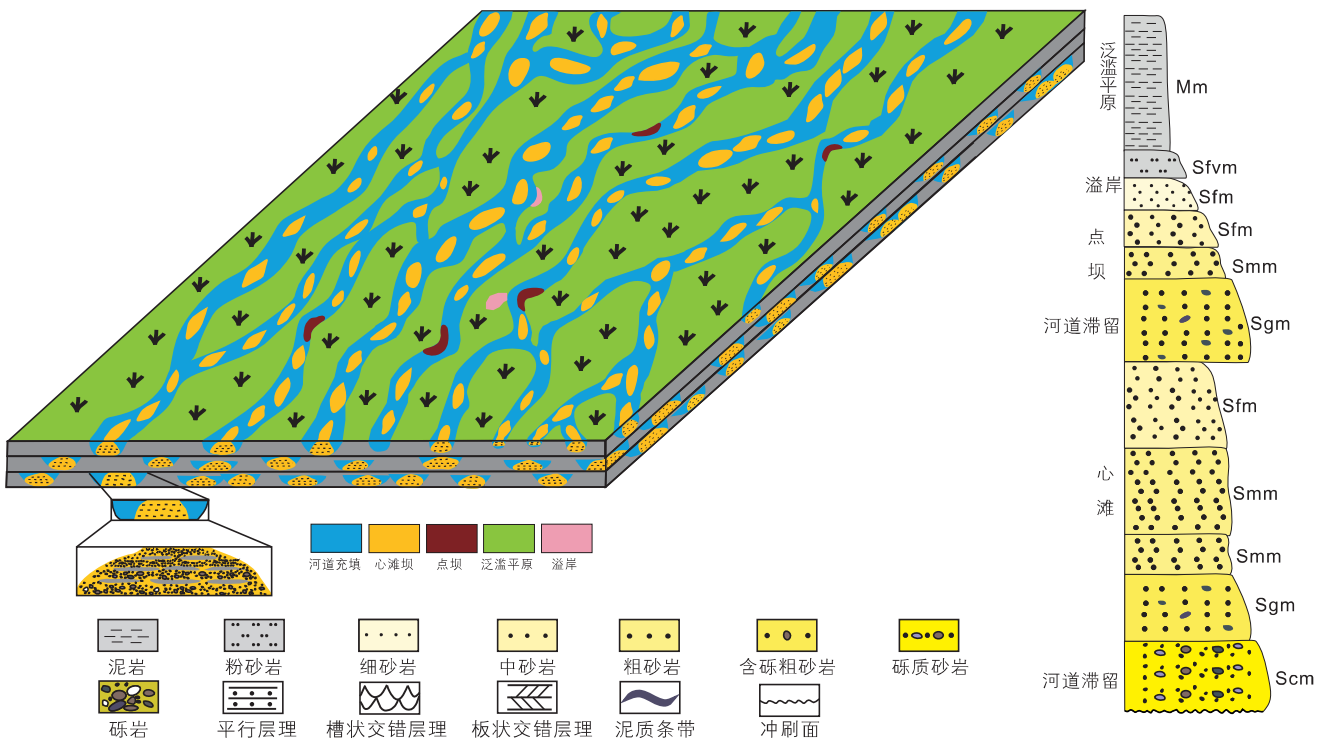


图 15 锦 72 井区盒 2 及盒 3 段沉积模式

Fig. 15 Sedimentary model of the He 2 and He 3 members in the Jin 72 well area

6 结论

(1)东胜气田锦72井区下石盒子组整体为砾质辫状河沉积体系,整体上岩石粒度粗、砾石含量高,可划分为砾岩相、砂岩相、粉砂岩相和泥岩相4大类共12种岩相;沉积微相类型主要包括心滩、辫状河道、泛滥平原、边滩及溢岸。

(2)研究区砾质辫状河沉积可以细分为三种类型。

盒1段东侧发育间歇性、水深较浅的砾石床辫状河沉积,盒1段西侧发育常年性、水深较深的砾石床辫状河沉积,盒2和盒3段发育水动力较弱的砾质游荡河沉积。

(3)砾质辫状河的沉积演化特征明显受构造、古地貌、物源供给以及古气候等因素控制。浅水和深水砾石床辫状河砂体的连通性较好,而水动力较弱的砾质游荡河砂体的连通性较差。

参考文献

- [1] ABDEL-FATTAH Z A. Fluvial architecture of the Upper Cretaceous Nubia Sandstones: An ancient example of sandy braided rivers in central Eastern Desert, Egypt[J]. *Sedimentary Geology*, 2021, 420: 105923.
- [2] POURSOLTANI M R. Architectural analysis of an Early Cambrian braided-river system on the north Gondwana margin: The lower sandstone of the Lalun Formation in the Shirgesht area, central Iran[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2020, 171: 103935.
- [3] SUN X, JIN Z, WANG Z, et al. Braided river and distribution patterns of sand bodies of Jurassic Badaowan formation in Block T13 of Junggar basin[J]. *Mining Science and Technology (China)*, 2010, 20(3): 446–452.
- [4] CHEN X, XU S, LI S, et al. Identification of architectural elements based on SVM with PCA: A case study of sandy braided river reservoir in the Lamadian Oilfield, Songliao Basin, NE China[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 198: 108247.
- [5] CANT D J, WALKER R G. Development of a braided-fluvial facies model for the Devonian battery point sandstone, Quebec[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1976, 13(1): 102–119.
- [6] GALLOWAY W E, HOBDDAY D K. Alluvial-fan systems[M]//Terrigenous clastic depositional systems. Springer, New York, NY, 1983: 25–50.
- [7] 侯东梅, 郭敬民, 全洪慧, 等. 基于分频RGB融合技术和水平井信息的辫状河储层构型研究——以C油田馆陶组为例[J]. *石油科学通报*, 2022, 01: 1–11. [HOU D M, GUO J M, QUAN H H, et al. Research into braided river reservoir architecture based on frequency-fused seismic attribute and horizontal wells — A case study of the Guantao Formation of C oilfield[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2022, 01: 1–11.]
- [8] 侯加根, 刘钰铭, 徐芳, 等. 黄骅坳陷孔店油田新近系馆陶组辫状河砂体构型及含油气性差异成因[J]. *古地理学报*, 2008, 10(5): 459–464. [HOU J G, LIU Y M, XU F, et al. Architecture of braided fluvial sandbody and origin for petroliferous difference of the Guantao Formation of Neogene in Kongdian oilfield of Huanghua Depression[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2008, 10(5): 459–464.]
- [9] LONG D G F, LOWEY G W. Wandering gravel-bed rivers and high-constructive stable channel sandy fluvial systems in the Ross River area, Yukon Territory, Canada[J]. *Geoscience Frontiers*, 2011, 2(3): 277–288.
- [10] DE VINCENZO A, BRANCATI F, PANNONE M. An experimental analysis of bed load transport in gravel-bed braided rivers with high grain Reynolds numbers[J]. *Advances in Water Resources*, 2016, 94: 160–173.
- [11] SINGHU, CROSATO A, GIRI S, et al. Sediment heterogeneity and mobility in the morphodynamic modelling of gravel-bed braided rivers[J]. *Advances in water resources*, 2017, 104: 127–144.
- [12] 印森林, 吴胜和, 许长福, 等. 砂砾质辫状河沉积露头渗流地质差异分析——以准噶尔盆地西北缘三叠系克上组露头为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2014, 43(2): 286–293. [YIN S L, WU S H, XU C F, et al. Percolation differences of sedimentary outcrop in sand-gravel braided river: A case study of Triassic upper Karamay formation outcrop in northwest edge of Junggar basin[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2014, 43(2): 286–293.]
- [13] MIALL A D. *The Geology of Fluvial Deposits*[J]. Springer Berlin Heidelberg, 1996, 206–211.
- [14] 姜福杰, 邵新荷, 李林涛, 等. 断裂调整型致密砂岩气藏成藏过程模拟与成藏模式[J]. *石油科学通报*, 2021, 04: 539–552. [JIANG F J, SHAO X H, LI L T, et al. Accumulation process simulation and an accumulation model of a fault-adjusted tight sandstone gas reservoir[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2021, 04: 539–552.]
- [15] 付金华, 范立勇, 刘新社, 等. 鄂尔多斯盆地天然气勘探新进展, 前景展望和对策措施[J]. *中国石油勘探*, 2019, 24(4): 418. [FU J H, FAN L Y, LIU X S, et al. New progresses, prospects and countermeasures of natural gas exploration in the Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(4): 418.]
- [16] 刘池洋, 赵红格, 桂小军, 等. 鄂尔多斯盆地演化—改造的时空坐标及其成藏(矿)响应[J]. *地质学报*, 2006, 80(5): 617–638. [LIU

- C Y, ZHAO H G, GUI X J, et al. Space-time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(5): 617–638.]
- [17] 何发岐, 王付斌, 张威, 等. 鄂尔多斯盆地北缘勘探思路转变与天然气领域重大突破[J]. *中国石油勘探*, 2020, 25(6): 39. [HE F Q, WANG F B, ZHANG W, et al. Transformation of exploration ideas and a major breakthrough in natural gas exploration in the northern margin of the Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(6): 39.]
- [18] 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 H D, LI J, ZHANG C G, 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.]
- [19] 李明瑞. 鄂尔多斯盆地北部上古生界主要含气砂体沉积特征及储层控制因素研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011. [LI M R. Depositional character and control factors of reservoir sandbody in major gas-bearing interval of upper Paleozoic in North Ordos basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.]
- [20] 严卫宏. 鄂尔多斯盆地西北部上古生界沉积体系与层序地层学研究[D]. 西安: 西北大学, 2002. [YAN W H. Research on Sedimentary Facies and Sequence Stratigraphy in the Upper Palaeozoic in the Northwestward of Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2002.]
- [21] 张广权, 胡向阳, 贾超, 等. 杭锦旗地区辫状河定量地质知识库建立及应用[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2018, 40(04): 79–89. [ZHANG G Q, HU X Y, JIA C, et al. Construction of a quantitative geological knowledge base for the braided river of Hanggin Banner and its application[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2018, 40(4): 79–89.]
- [22] 齐荣, 李良, 秦雪霏. 鄂尔多斯盆地北缘近源砂砾质辫状河砂体构型与含气性[J]. *石油实验地质*, 2019, 41(5): 682–690. [QI R, LI L, QIN X F, et al. Sand body configuration and gas-bearing properties of near source sand-gravel braided river on the northern margin of Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(5): 682–690.]
- [23] ANEES A, SHI W, ASHRAF U, et al. Channel identification using 3D seismic attributes and well logging in lower Shihezi Formation of Hangjinqi area, northern Ordos Basin, China[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2019, 163: 139–150.
- [24] LI J, ZHANG X, TIAN J, et al. Effects of deposition and diagenesis on sandstone reservoir quality: A case study of Permian sandstones formed in a braided river sedimentary system, northern Ordos Basin, Northern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2021, 213: 104745.
- [25] 曹青, 赵靖舟, 付金华, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界准连续型气藏气源条件[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(5): 584–591. [CAO Q, ZHAO J Z, FU J H, et al. Gas source conditions of quasi-continuous accumulation of the Upper Paleozoic in Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(5): 584–591.]
- [26] 李婕. 杭锦旗地区下石盒子组沉积相分析及对储层的影响[D]. 成都: 成都理工大学, 2013. [LI J. Sedimentary facies analysis and its influence on reservoirs in Hangjinqi area Lower Shihezi Formation[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.]
- [27] 杨华, 付金华, 刘新社, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界致密气成藏条件与勘探开发[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(3): 295–303. [YANG H, FU J H, LIU X S, et al. Accumulation conditions and exploration and development of tight gas in the Upper Paleozoic of the Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(3): 295–303.]
- [28] 彭威龙, 刘全有, 张英, 等. 中国首个特大致密砂岩型(烃类)富氦气田——鄂尔多斯盆地东胜气田特征[J]. *中国科学: 地球科学*, 2022, 52(06): 1078–1085. [PENG W L, LIU Q Y, ZHANG Y, et al. The first extra-large helium-rich gas field identified in a tight sandstone of the Dongsheng Gas Field, Ordos Basin, China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2022, 65(5): 1078–1085.]
- [29] 何发岐, 王付斌, 王杰, 等. 鄂尔多斯盆地东胜气田氦气分布规律及特大型富氦气田的发现[J]. *石油实验地质*, 2022, 44(1): 1–10. [HE F Q, WANG F B, WANG J, et al. Helium Distribution of Dongsheng Gas Field in Ordos Basin and Discovery of a Super Large Helium-rich Gas Field[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2022, 44(1): 1–10.]
- [30] 邓东. 鄂北杭锦旗地区锦 72 井区盒 1 段储层特征及综合评价研究[D]. 西安: 西北大学, 2019. [DENG D. Reservoir Characteristics and Comprehensive Evaluation of He1 Member of J72 Well Area in Hangjinqi, Northern Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2019.]
- [31] 赵重远, 刘池洋. 华北克拉通沉积盆地形成与演化及其油气赋存[M]. 西安: 西北大学出版社, 1990. [ZHAO C Y, LIU C Y. The formation and evolution of the sedimentary basins and their hydrocarbon occurrence in the North China Craton[M]. Xi'an: Northwest University Press, 1990.]
- [32] 乔建新, 邓辉, 刘池洋, 等. 鄂尔多斯盆地北部晚古生代沉积-构造格局及物源分析[J]. *西安石油大学学报: 自然科学版*, 2013, 28(1): 12–17. [QIAO J X, DENG H, LIU C Y, et al. Sedimentary-tectonic framework and provenance analysis of the late Paleozoic in the northern Ordos Basin[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition)*, 2013, 28(1): 12–17.]
- [33] 陈天一. 鄂尔多斯北部十里加汗地区下石盒子组致密砂岩储层特征及主控因素[D]. 成都: 成都理工大学, 2017. [CHEN T Y. Characteristics and main controlling factors of tight sandstone reservoir of Xiashihezi Formation in Shilijiahan area, north of Ordos basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017.]
- [34] 席胜利, 王怀厂, 秦伯平. 鄂尔多斯盆地北部山西组, 下石盒子组物源分析[J]. *天然气工业*, 2002, 22(2): 21–24. [XI S L, WANG

- H C, QIN B P, et al. Analysis of the material sources of Shanxi Formation and Shihezi Formation in north Ordos basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2002, 22(2): 21–24.]
- [35] 陈全红, 李文厚, 胡孝林, 等. 鄂尔多斯盆地晚古生代沉积岩源区构造背景及物源分析[J]. *地质学报*, 2012, 86(7): 1150–1162. [CHEN Q H, LI W H, HU X L, et al. Tectonic setting and provenance analysis of Late Paleozoic sedimentary rocks in the Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(7): 1150–1162.]
- [36] 刘凯, 王任, 石万忠, 等. 鄂尔多斯盆地北部杭锦旗地区下石盒子组多物源体系: 来自矿物学及碎屑锆石 U-Pb 年代学的证据[J]. *地球科学*, 2021, 46(2): 540–554. [LIU K, WANG R, SHI W Z, et al. Multiple Provenance System of Lower Shihezi Formation in Hangjinqi Area, Northern Ordos Basin: Evidence from Mineralogy and Detrital Zircon U–Pb Chronology[J]. *Earth Science*, 2021, 46(2): 540–554.]
- [37] 张拴宏, 赵越, 刘建民, 等. 华北地块北缘晚古生代–早中生代岩浆活动期次, 特征及构造背景[J]. *岩石矿物学杂志*, 2010, 29(6): 824–842. [ZHANG S H, ZHAO Y, LIU J M, et al. Geochronology, geochemistry and tectonic setting of the Late Paleozoic-Early Mesozoic magmatism in the northern margin of the North China Block: A preliminary review[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2010, 29(6): 824–842.]
- [38] BRIDGE J S, TYE R S. Interpreting the dimensions of ancient fluvial channel bars, channels, and channel belts from wireline-logs and cores[J]. *AAPG bulletin*, 2000, 84(8): 1205–1228.
- [39] CROSS T A. Stratigraphic controls on reservoir attributes in continental strata[J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(4): 322–350.
- [40] 于兴河, 王香增, 王念喜, 等. 鄂尔多斯盆地东南部上古生界层序地层格架及含气砂体沉积演化特征[J]. *古地理学报*, 2017, 19(6): 935–954. [YU X H, WANG X Z, WANG N X, et al. Sequence stratigraphic framework and sedimentary evolution characteristics of gas-bearing sandbody in the Upper Paleozoic in southeastern The Ordos Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2017, 19(6): 935–954.]
- [41] 徐清海. 鄂尔多斯盆地十里加汗地区致密砂岩气差异富集的主控因素及甜点区地质模型[D]. 武汉: 中国地质大学, 2017. [XU Q H. Main controlling factors of gas-water differential enrichment and the geological model of sweet zone, Shilijiahan area, Ordos Basin[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2017.]

(编辑 付娟娟)