



移动阅读

李宏涛, 陈笛, 张占杨, 等, 2024. 基于井震结合-层序界面逐级约束的小层划分与对比: 以杭锦旗十里加汗太原组一下石盒子组为例[J]. 沉积与特提斯地质, 44(2): 369–383. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2024.05003](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2024.05003)

LI H T, CHEN D, ZHANG Z Y, et al., 2024. Sub-layer division and correlation based on well-seismic combination and step-by-step interface constraint: A case study of the Taiyuan-Lower Shihezi Formation in the Shilijiahan of the Hangjinqi area[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 44(2): 369–383. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2024.05003](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2024.05003)

基于井震结合-层序界面逐级约束的小层划分与对比: 以杭锦旗十里加汗太原组一下石盒子组为例

李宏涛¹, 陈 笛², 张占杨², 刘庆彬¹, 荀小全², 归平军², 曹桐生², 郝 廷², 温立峰¹

(1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石化华北油气分公司勘探开发研究院, 河南 郑州 450006)

摘要: 为了实现鄂尔多斯盆地北部杭锦旗十里加汗太原组一下石盒子组小层精细对比, 通过详细的岩心观察, 岩心-测井-地震紧密结合, 利用岩心标定测井曲线, 总结不同级次标志层序界面特征, 利用逐级标志层序约束, 井震结合进行高频层序划分, 结合开发实际, 进行小层划分对比。结果表明, 研究区太原组一下石盒子组地层厚度在 230 m 左右, 自下而上, 由海陆过渡环境的潮坪相—三角洲相沉积, 逐渐演变为山西组的辫状河三角洲相沉积, 至下石盒子组则主要发育辫状河沉积。依据层序界面类型, 将目的层识别出 II 级界面 1 个, III 级界面 3 个, IV 级界面 4 个。将 II-IV 级层序界面按照岩心-测井曲线-地震响应特征的难易识别程度, 划分了 4 个级次, 进一步通过岩心-测井详细标定, 识别 V 级界面 25 个。在地震剖面约束和沉积认识指导下, 开展不同级别标志界面井间对比, 进而逐级约束, 实现高频层序对比, 结合现场开发实际, 将目的层划分为 13 个小层, 各小层厚度较为稳定, 主要反映了平原三角洲—辫状河沉积特征。高频层序一定程度上控制着沉积储层的发育与分布。通过井震结合、逐级约束的方法, 可提高小层划分对比的准确度和精细度, 为该区进一步的气藏地质研究与评价提供基础。

关键词: 杭锦旗; 十里加汗; 井震结合; 逐级约束; 高频层序; 小层对比

中图分类号: P631

文献标识码: A

Sub-layer division and correlation based on well-seismic combination and step-by-step interface constraint: A case study of the Taiyuan-Lower Shihezi Formation in the Shilijiahan of the Hangjinqi area

LI Hongtao¹, CHEN Di², ZHANG Zhanyang², LIU Qingbin¹, XUN Xiaoquan²,
GUI Pingjun², CAO Tongsheng², HAO Ting², WEN Lifeng¹

(1. Sinopec Petroleum Exploration and Development Research Institute, Beijing 100083, China; 2. Exploration and Development Research Institute of North China Branch Company, SINOPEC, Zhengzhou 450006, China)

收稿日期: 2022-06-29; 改回日期: 2022-10-18; 责任编辑: 周小琳; 科学编辑: 杨平

作者简介: 李宏涛 (1977—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事气藏描述、致密气田开发。E-mail: liht.syky@sinopec.com

资助项目: 中石化科技部项目“东胜气田致密高含水气藏开发潜力研究”(P23133), “杭锦旗十里加汗复杂气藏定量表征及开发对策”(P19019-1), “东胜气田精细表征及有效开发技术”(P20065-2); 国家重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2016ZX05002-006); 贵州省科技重大专项“贵州省页岩气效益开发关键技术及工程技术试验”(黔科合战略找矿[2022]ZD005)

Abstract: This study aims to achieve fine correlation of sub-layers between wells in the Taiyuan-Lower Shihezi Formations in the Shilijiahan of the Hangjinqi area. Based on detailed core observations and core-log-seismic integration, calibrated logging curves are used to summarize the interface characteristics of different levels of marker beds, and high-frequency sequence division is performed by using step-by-step marker bed constraints and well-seismic combination. In combination with development practice, sub-layers division and comparison are carried out. The results indicate that the stratum thickness from the Taiyuan Formation to the Lower Shihezi Formation in the study area is about 230 meters. From bottom to top, the tidal flat facies and delta facies in the transitional environment between sea and land gradually evolved into the braided river delta facies of the Shanxi Formation, and the braided river deposits are mainly developed in the Lower Shihezi Formation. According to the sequence interface types, the target layer is identified as one second-order interface, three third-order interfaces and four fourth-order interfaces. Based on core, logging curve, and seismic response characteristics, the second-fourth order sequence interfaces are divided into four levels. Through detailed core-log calibration, 17-18 fifth-order interfaces are further identified. Under the constraint of seismic profile and the guidance of sedimentary characteristics, the inter-well correlation of different marker interface levels is conducted, and then the high-frequency sequence correlation is achieved by level-by-level constraint. In combination with the actual field development, the Taiyuan Formation to the Lower Shihezi Formation can be further divided into 13 sub-layers. The thickness of each sub-layer is relatively stable, primarily reflecting the sedimentary characteristics of plain braided rivers. High-frequency sequences control the development and distribution of sedimentary reservoirs to a certain extent. The well-seismic combination and step-by-step constraint method enhance the accuracy and fineness of sub-layer division and correlation, providing a foundation for further gas reservoir geological research and evaluation in this area.

Key words: Hangjinqi area; Shilijiahan; well-seismic combination; step-by-step constraint; high-frequency sequence; sub-layer correlation

0 引言

鄂尔多斯盆地天然气资源丰富,含气层系多,特别是上古生界碎屑砂岩全盆地广覆式分布,砂体纵向相互叠置,含气层位多,横向复合连片,叠置砂体单层最大厚度可达 50 m 以上,形成了“大面积富砂,多层位含气”的沉积成藏特征(赵靖舟等, 2012; 朱宗良等, 2010; 张倚安等, 2021)。杭锦旗十里加汗地区为潜力开发目标区之一,已成为气藏描述与评价以及增储上产的重点对象之一(何发岐等, 2020; 张威等, 2016, 2021; 齐荣等, 2019; 罗开平等, 2021; 曹桐生等, 2021; 薛会等, 2009)。研究区上古生界气藏主要属于低渗致密砂岩气藏(曹桐生等, 2021),生产实践表明,以直井进行开发部署的井位产量低,多难以实现经济效益。并且由于储层强烈的非均质性,该区以地层层段(如盒 1 段)为单元的多套砂体发育的气藏描述与评价,难以满足现场以小层及单砂体为单元的水平井部署生产或评价的需要,因此,目前研究对象逐渐转向小层单元。然而,由于该区目的层河道频繁摆动、交叉汇合和迁移,砂体沉积结构复杂,侧向相变快,对比连续性差,小层细分难度大,常规的对比如在该地区的应用

效果较差(韩兴刚等, 2018)。对于低渗致密气藏来说,精细划分开发小层不仅是气藏地质分析的基础,而且,基于小层格架约束的地球物理属性提取可客观地反映地质信息,更有效、更可靠地预测气藏的沉积相和储集体(卫延召等, 2002; Fu et al., 2019),结合地质统计学反演等方法手段,还可大大提高储层预测的精度(刘晓晨等, 2020; Nunes et al., 2017),同时也是开发层系划分、开发技术政策制定的基础。

前人对碎屑岩地层划分对比主要采用层序地层学理论,首先进行构造层序划分,确定不同级别的层序,利用测井曲线研究沉积旋回性,从而划分对比小层。目前常用的小层等时对比技术主要有如下几种:以区域标志层为等时对比依据的韵律层逐层对比法(裘亦楠等, 1987);相控旋回等时对比技术(赵翰卿, 1988, 2005; 王西文等, 2003);高分辨率层序地层等时对比法(邓宏文等, 1995, 2000; 郑荣才等, 2000; 杨云等, 2010)等,这些方法都在生产实践中得到了很好的应用。然而无论何种方法,地层对比都是基于地层层序旋回性特征完成。“标志层控制,分级控制,旋回对比”是对上述这些方法的深刻表述(杨云等, 2010; 刘波等, 2000)。对比

的原则是基于地层沉积的周期性特征所表现的旋回性,尤其强调的是特殊沉积过程或沉积作用所造就的具有标识性的沉积层段,即标志层的作用(杨云等, 2010)。一般情况下,若标志层清晰、识别准确,地层对比质量就高,而复杂岩性油气藏受岩性突变、地层尖灭,以及河道侵蚀下切作用等的影响,对比中往往发现有些层段缺乏标志层或在测井曲线上难以识别。更加关键的是,仅仅利用单井资料进行小层对比无法客观反映井间变化,从而使得对比难度增大,可靠性降低(杨云等, 2010)。也有学者提出了层序地层学与沉积学相结合的层位细分方法,该方法的前提是搞清砂体的成因,并考虑砂体的沉积过程及地层等时性,在一定程度上提高了细分层的精度,但对于砂体横向变化快的地层来说,细分层仍然面临较大的困难(李军等, 2010; 韩兴刚等, 2018)。以上技术往往依托密井网,在稀疏井网条件下对比效果更加难以保证。

Vail(1977)提出主要地震反射具有年代地层意义,地震资料在横向上具有连续性,可以很好地反映地层的横向分布(Vail et al., 1977)。主要地震反射代表层理面和不整合面这两种地质界面是一个时间分界面。地震信息具有覆盖面广,可提供大井距井间地质信息的优势,因而成为(油)气藏描述中不可缺少的技术。然而,由于地震分辨率有限,一般认为不能利用地震资料进行陆相薄互层结构油气藏小层等时对比(刘震等, 2008)。由于河流相储层的复杂性,在进行小层对比时也有着地层划分精度的问题。如果划分太粗,忽略了地层沉积单元内砂体结构特征的变化;如果划分太细,一方面增大了小层对比的不确定性,另一方面则可能将具有相似沉积特征的砂体划归为不同的单元。因此,在小层对比的实际工作中,亟需一种简单高效、适用性强的实用方法,可以在主要地震反射约束下,发挥地震资料横向连续性好的优势,探讨相对等时原则,进行小层对比,应对上述复杂情况。

经典层序地层学理论的运用在油气勘探中已经取得很大成功,但用于开发阶段的储层划分与对比,其精度还远远不够,而高频层序地层学为解决这个问题提供了新的理论依据与技术手段。高频层序的概念是由 Mitchum 提出的,是指由四级或四级以上高频旋回形成的地层记录序列(郑荣才等, 2000, 2004; Mitchum et al., 1991)。高频层序的发

育受海(湖)平面变化、构造沉降、物源和气候等因素控制,尽管这几种因素的配置是偶然的,但根本原因可能在于受不同规模和级别的天文周期的控制,即与米兰科维奇天文周期有关(Brett et al., 1990; Vail et al., 1991; 梅冥相等, 2000, 2011; 陈留勤, 2008)。

本文利用地质、测井、地震等多种资料,在对钻井取心详细观察和分析的基础上,井震紧密结合,多学科联合攻关,通过不同级别标志层序界面的岩心-测井-地震识别,总结不同级别标志(层)界面的测井曲线和地震响应特征,并在地震剖面约束和沉积认识指导下,开展不同级别标志界面井间对比,逐级约束,实现高频层序划分,依据油气田现场开发实际,最终完成小层对比,为沉积储层研究提供地质框架,因而具有一定的理论和现实的意义。

1 区域地质背景

在地理位置上,杭锦旗位于鄂尔多斯高原西北部,东与达拉特旗、东胜区接壤,南与伊金霍洛旗、乌审旗为邻,西与鄂托克旗毗连,北与巴彦津尔市隔黄河相望;在构造位置上,其现今位于鄂尔多斯盆地北部伊盟隆起区及其与伊陕斜坡的过渡区,长期处于盆地构造的高部位,是天然气运移的有利指向区,整体上呈现出北高南低、东高西低的特征,向西倾斜的单斜构造,平均坡降为 5 m/km。杭锦旗地区主要发育 3 条大断裂,自西向东分别为三眼井断裂、乌兰吉林庙断裂、泊尔江海子断裂,走向基本呈近东西向。十里加汗区块位于杭锦旗泊尔江海子断裂以南,公卡汉凸起东侧的锦 58 井区以东,工区面积可达 1 600 km²(图 1 蓝色方框)。

由于加里东期构造运动的作用,古阴山褶皱造山带形成,波及鄂尔多斯地区北缘,使其隆升,并形成新的增生造山带。杭锦旗地区下古生界马家沟组碳酸盐岩沉积在加里东构造抬升作用下,出露地表,经历了长达 1.4 亿年的风化剥蚀后,研究区呈北高南低向南倾的缓坡,坡降平均 6~7 m/km,南北向沟谷地貌发育,一定程度上控制了上古生界碎屑岩地层的沉积。晚石炭世,区内南部的鄂托克旗—伊金霍洛旗以南一带开始接受沉积,海侵逐渐达到高潮,沉积范围逐渐扩大到了泊尔江海子断裂一带,沉积了石炭系太原组海陆过渡相碎屑岩(段治有等, 2019)。早二叠世,鄂尔多斯台地逐渐抬升为陆,

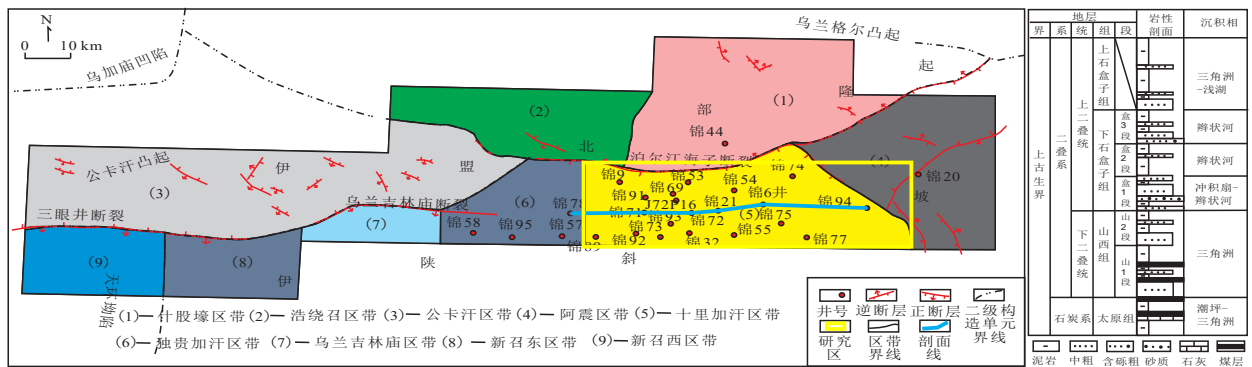


图1 杭锦旗地区区域构造划分及研究区位置 (据曹桐生等, 2021 修改)

Fig. 1 Map of regional tectonic unit division of the Hangjinqi and location of the study area (modified from Cao et al., 2021)

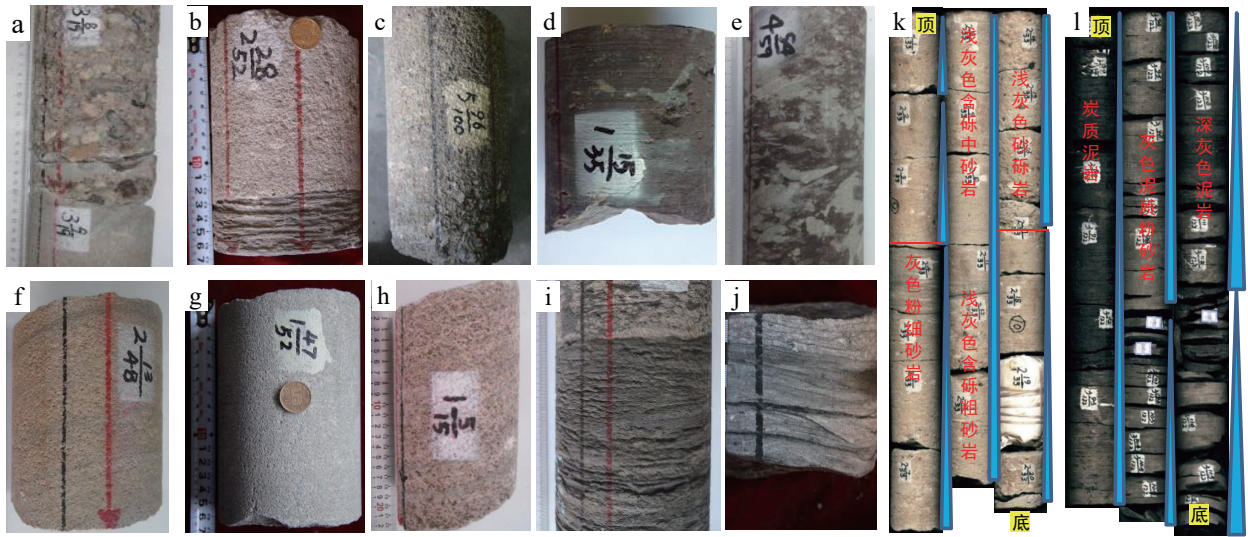
海水逐渐退出, 由海陆过渡相逐渐转变为陆相辫状河三角洲—辫状河沉积, 陆续沉积了山西组, 下石盒子组、上石盒子组及石千峰组(段治有等, 2019)。

太原组和山西组是主要的烃源岩系, 山西组和下石盒子组是重要的储集岩系, 上石盒子组和石千峰组为区域盖层, 共同构成了下生、上储、顶封的上古生界含油气系统(沈玉林等, 2006)。受古地貌影响, 太原组、山西组为局部、小型低凹地区的填平补齐沉积。

2 地层与沉积特征

杭锦旗太原组一下石盒子组目的层厚约 220~250 m, 对取心段岩心、薄片岩性特征进行详细观察。结果显示, 太原组地层岩性包括灰白色石英砂岩、粉砂岩、灰黑色泥岩、黑色炭质泥岩、煤层等, 局部夹少量灰岩, 工区内厚度在 20~60 m 之间, 平均厚度 35 m, 主要为有障壁海岸环境的潟湖—潮坪相和海陆过渡环境的三角洲相沉积(郭顺等, 2009; 郭军等, 2012, 牟传龙, 2022), 即发育海相滩坝石英砂岩, 潟湖—潮坪相的灰黑色、褐黑色泥岩, 以及三角洲平原相煤层等相标志沉积物。山西组岩性主要由灰白、浅灰色块状石英砂岩、岩屑石英砂岩及灰黑、深灰色泥岩、炭质泥岩组成, 中下部夹煤层及煤线(图 2c, 2i, 2j, 2l), 地层厚度介于 60~80 m, 平均厚度约 75 m, 早期发育海陆过渡环境和陆地环境的三角洲相沉积, 三角洲平原亚相是其主体, 主要发育辫状分流河道、河道间、天然堤、决口扇、沼泽等沉积。三角洲前缘亚相特征不明显, 相带展布较窄, 主要发育水下分流河道微相砂

体。河道间以灰色或灰绿色粉—细砂岩和暗色泥岩互层为主。晚期则逐渐向陆地环境的辫状河流相转变, 沉积物粒级较粗, 砂、砾含量较高, 略显正旋回。下石盒子组的岩性主要由浅灰绿、灰白、灰黄色块状含砾粗—中砂岩、细砂岩, 夹棕褐色、灰绿色泥岩、粉砂质泥岩和少量炭质泥岩, 偶见煤线, 地层厚度约 115~135 m, 平均为 125 m 左右(图 2)。详细的岩心观察显示, 下石盒子组砂体岩性以含砾粗砂岩、粗砂岩、中砂岩为主, 层理类型多样, 高能河道典型岩相发育(图 2a, 2b, 2f, 2g, 2h), 河道类型以向上变浅的米级沉积旋回为主, 下部河床沉积厚度远大于上部堤岸、河漫滩沉积, 砂体由多期 0.5~1 m 厚的河床亚相叠置构成(图 2k), 反映河流水体宽浅、水流急, 河道不固定、易迁移的特征, 为典型的辫状河沉积。辫状河往往携沙量大, 以推移质为主, 多由砂岩构成了巨厚的层系。砂岩段的厚度在 10~40 m, 而泥岩段大都小于 10 m, 滞留沉积发育。河道砂体多由一系列不完整的沉积旋回反复切割叠置而成, 每个旋回都具有自下而上由粗变细的趋势, 并依次发育粒序层、槽状或板状交错层理、平行层理, 以及一些砂纹交错层理。泛滥平原一般不发育, 仅在河道间沉积了薄层的深灰色和灰绿色泥岩、粉砂质泥岩。下石盒子组下部泥岩总体呈灰色、褐色或杂色的(弱)还原—弱氧化色, 上部褐色等氧化色逐渐增多, 反映了沉积环境、气候的变化, 即早期处于温暖湿润的气候环境, 水体充沛, 水动力能量强, 河道不固定, 河道间时常水流泛滥, 晚期则气候干旱, 水动力条件逐渐变弱, 河道相对固定, 河道间泥岩多暴露于空气中(图 2d, 2e)。上石盒子组、石千峰组以泥质岩为主, 夹少量砂岩,



a. 河道冲刷面, 之上为河道滞留沉积的杂色砾岩, 2 704.96 m, 锦 94 井, 盒 1 段; b. 下部泥质粉砂岩, 上部粗砂岩, 岩性-岩相转换面, 锦 69 井, 2 969.4 m, 盒 1 段; c. 粒序层理灰色含砾粗砂岩, 锦 72 井, 3 013.2 m, 山 1 段; d. 褐色泥岩, 锦 107 井, 3 136.23 m, 盒 3 段; e. 花斑状泥岩, 锦 111 井, 3 009.81 m, 盒 1 段; f. 粗砂岩, 槽状交错层理, 锦 75 井, 2 774.59 m, 山 2 段; g. 粗砂岩, 块状层理, 锦 21 井, 2 841.36 m, 盒 1 段; h. 含砾粗砂岩, 板状交错层理, 锦 93 井, 3 020.67 m, 盒 2 段; i. 浅灰绿色泥岩, 锦 75 井, 2 804.30 m, 山 1 段; j. 泥质粉砂岩, 见透镜状层理, 锦 116 井, 3 041.3 m, 山 1 段; k. 辫状河道非典型二元结构, 下部河床沉积厚度远大于上部堤岸、河漫, 锦 21 井, 2 871.37~2 874.3 m, 盒 1 段; l. 河漫浅灰色粉砂岩与灰绿色、灰色泥岩交互沉积, 锦 21 井, 2 921.5~2 924.5 m, 山 1 段, 岩心直径均为 10 cm

图 2 十里加汗地区山西组一下石盒子组岩心的岩性、沉积构造特征

Fig. 2 Characteristics of lithology and sedimentary structure of cores from the Shanxi Formation to Lower Shihezi Formation in the Shilijiahan area

由棕褐、紫灰色厚层块状泥岩、粉砂质泥岩及黏土岩, 夹少量灰白或灰绿色中一厚层砂岩和数层凝灰质薄层砂岩组成, 可作为气藏的区域性盖层。综上所述, 研究区自下而上, 上古生界太原组一下石盒子组由海陆过渡环境的潮坪相—三角洲相沉积, 逐渐演变为山西组的辫状河三角洲相沉积, 至下石盒子组则主要发育辫状河相。

3 不同级次标志界面的识别与对比

3.1 不同级次标志界面的识别

结合区域地层、钻井岩性资料, 利用研究区分布稳定、特征明显且易于识别的地层, 即标志层与上覆地层或下伏地层的岩性突变所形成的容易识别的地层界面或层序界面(简称标志层序界面), 在岩心和测井曲线上通常具有明显的突变特征, 对研究区目的层已有钻井的标志界面进行测井识别。按照标志界面在岩心-测井的难易识别程度, 划分为四个不同的级次。

(1)全区分布稳定的明显层序界面: 太原组(T)/下古生界奥陶系(O)界面, 奥陶系碳酸盐岩地层可作为本区的重要标志层, 地层顶部为区域构造抬升形成的岩溶风化壳不整合面, 其上与碎屑岩地层呈不整合接触, 为典型的Ⅱ级层序界面。该层序界面上下岩性与测井曲线突变特征明显(图 3a)。石千峰组(P_2sh)/上石盒子组(P_2s)界面, 为石千峰组底部高阻中厚层状河流相砂岩与上石盒子组低阻湖相泥岩的岩性分界面, 为一Ⅲ级层序界面, 电阻率、自然电位等岩性特征曲线特征明显, 易于识别该界面。这两区域标志层序界面地震响应特征明显, 分别为强波峰(T9bc)和强波谷(T9 g)地震反射, 易于横向追踪对比(图 3b)。

(2)全区分布较稳定、易识别的层序界面: 山西组(S)/太原组(T)和山 2 段(S_2)/山 1 段(S_1)地层界面。太原组顶部煤层和山 1 段顶部煤层为研究区分布较稳定的标志层, 为一Ⅲ级层序界面。山西组(S)/太原组(T)标志层序界面为山西组河流—三

级次	地层界面	岩石界面	测井界面				界面地震响应	对应地震反射界面	代表井
			GR	SP	AC	LLD			
第一级次	a. 太原组/下古生界奥陶系							T9bc	锦93
	b. 石千峰组/上石盒子组界面							T9g	锦72
第二级次	c. 山西组/太原组								锦109
	d. 山2段/山1段							T9c1	锦72
第三级次	e. 下石盒子组/山西组界面							T9d	锦72
	f. 山1段内部界面								锦53
第四级次	g. 上石盒子组/下石盒子组							T9f	锦77
	h. 盒2段/盒1段界面							T9e	锦104
	i. 盒1段内部界面								锦93

图3 杭锦旗地区十里加汗太原组—上石盒子组各级标志层及其界面划分

Fig. 3 Marker beds at all levels and their interface division from the Taiyuan Formation to the Upper Shihezi Formation in Well Jin 72 of the Hangjinqi area

角洲相碎屑岩(底部以砂岩为主)与太原组顶部三角洲沼泽相煤层的界面。电测曲线上,煤层呈高阻、高声波时差、高中子、低密度“三高一低”的测井曲线响应特征,与上覆碎屑岩地层电性差异明显,为易识别区域标志层(图 3c)。由于本区太原组厚度相对较薄,山西组(S)/太原组(T)的界面在井震标定的地震剖面上,通常为强波峰之上的位置,地震界面难以识别和横向追踪(图 3c)。山 2 段(S_2)/山 1 段(S_1)界面在地震剖面上局部对应于短轴波峰反射,研究区内总体连续性较差,呈断续分布的特征(图 3d),为Ⅲ级层序体系域转换界面或Ⅳ级层序界面。

(3)大部分地区分布较稳定、较易识别的层序界面:下石盒子组(H)/山西组(S)地层界面。通常为下石盒子组底部中—厚层状中粗粒砂岩(俗称骆驼脖子砂岩)与山西组顶平原沼泽微相灰黑色泥岩的界面,该界面具有沉积间断面或局部不整合面的性质,为一典型Ⅲ级层序界面(张满郎等, 2009)。界面上下,自然伽马(GR),深侧向电阻率(LLD)和三孔隙度曲线突变特征也较明显,为较易识别的标

志层序界面。在地震剖面上,该界面为连续的强振幅波峰地震反射(T9 d),全区域可以追踪对比(图 3e)。山 1 段内部界面:该界面为下部河流—三角洲相碎屑岩(底部以砂岩为主)与顶部沼泽相煤层的界面。电测曲线上,三孔隙度、深侧向电阻率(LLD)曲线突变特征也较明显,为较易识别的标志层序界面。山 1 段内部界面在地震剖面上,由于地震分辨率的原因,难以识别(图 3f)。

(4)局部分布较稳定、可识别的层序界面:上石盒子组(P_2s)/下石盒子组(H)界面,上石盒子组底部岩性主要为灰紫色湖相泥岩夹杂色砂岩,为Ⅲ级层序界面。测井曲线上,自然电位(SP)明显偏正,电阻率偏低,与下伏下石盒子组 H3 段泥岩或砂岩具有一定区别,但在部分地区,岩性或测井曲线界面差异特征不明显。在地震剖面上可以标定和追踪,呈较连续的中等强度的波峰反射(T9f),对于地震波峰反射特征不明显的地区,在前述稳定标志层序界面的约束下,可以采取近似等厚、按照地层趋势的对比方法进行识别与追踪(图 3g)。盒 2 段/盒 1 段界面:研究区大部分地区盒 1 段顶部通常发

育低阻泥岩层,与上覆盒2段相对高阻的砂岩层,可形成较明显的岩性界面,在多数地震剖面上可以标定和追踪,呈断续的中等强度的波峰反射(T9e),为较好的可识别局部标志层序界面(图3h),为一Ⅲ级层序体系域转换界面或Ⅳ级层序界面。盒1段内部界面:主要发育于盒1段中部,界面之下通常发育低阻泥岩层,与上覆相对高阻的砂岩层具有较明显的区别,为可识别的局部标志层序界面,但在地震剖面上,无法识别(图3i),为一Ⅳ级层序界面。

利用上述层序界面划分结果,通过地震合成记录详细标定地震剖面,建立层序界面的岩性界面-测井界面-地震界面的综合响应特征模式,在地震响应特征约束下,开展标志层序界面的井间横向对

比(李宏涛等,2016,2020)。研究区有三个标志层序界面在地震剖面上可以很好地进行识别和区域追踪,分别是太原组/奥陶系、石千峰组/上石盒子组和下石盒子组/山西组的标志层序界面。分别对应的地震解释层位为 T9bc、T9g、T9d。有两个局部分布较稳定的标志层序界面在地震剖面上大致可以追踪,分别对应的地震解释层位为 T9e、T9f(图3,图4)。一个在地震剖面上可局部追踪,对应的地震解释层位为 T9c1(图3,图4)。

3.2 不同级次标志界面对比

在以上不同级别的标志层序界面岩性-测井-地震识别结果的逐级约束下,开展标志界面井间对比,为高频层序和小层的进一步精细划分对比提供层序格架。

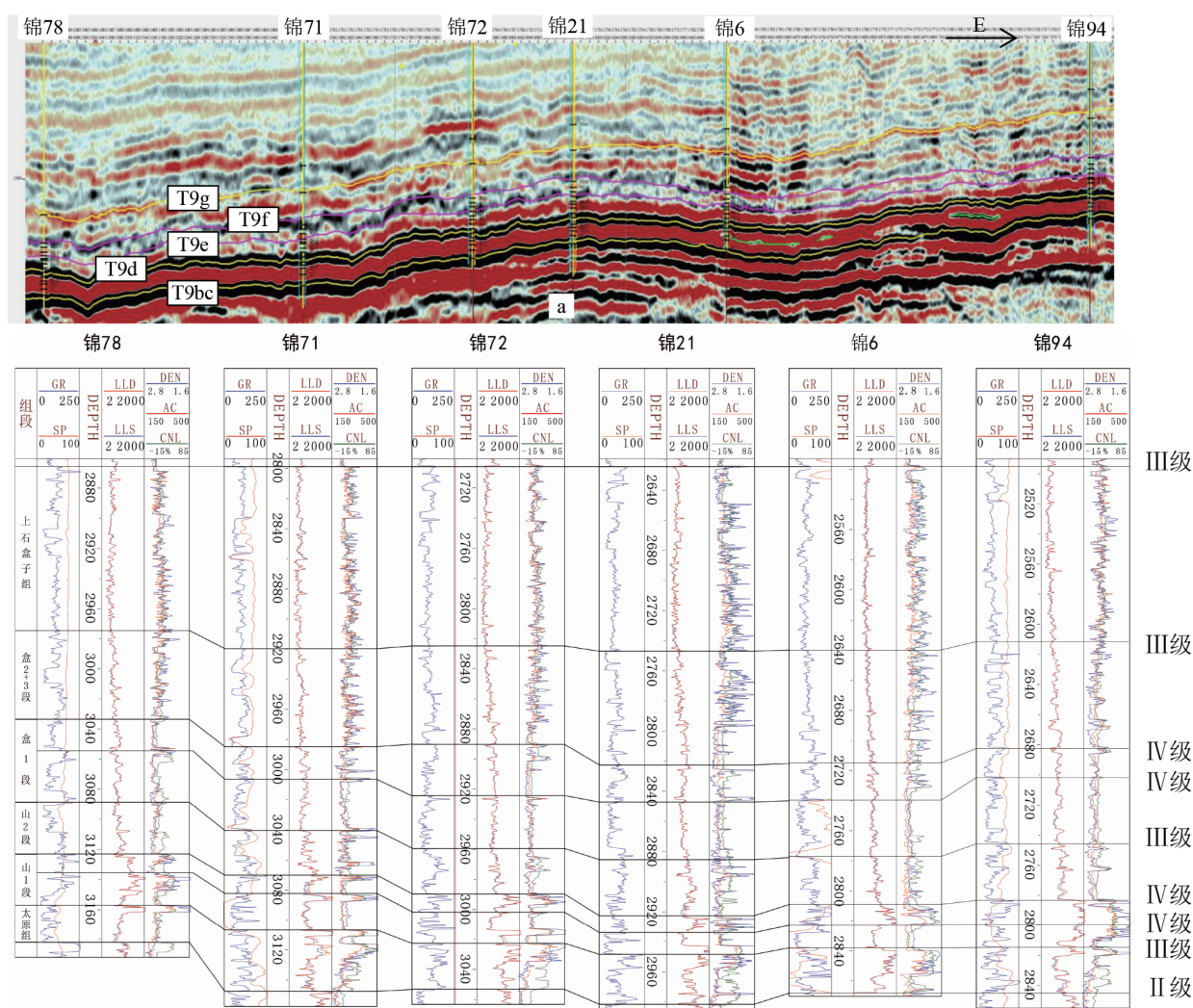


图4 基于连井地震剖面(a)约束的不同级次标志层序界面的对比(b)

Fig. 4 Comparison of different-level sequence interfaces (b) based on well-seismic combination section (a)

首先将第一级次区域稳定分布的标志层序界面在连井剖面上进行对比, 然后进行第二级次全区较稳定易识别的标志层开展连井对比, 以此类推, 采用标志层界面逐级约束的方法开展对比。然后, 在以上两级标志层岩性-测井界面对比格架的约束下, 以井震标定结果的界面地震反射特征, 作为井间标志界面横向对比重要的参考依据, 开展下一级别标志层的井间对比, 避免对比串层(李宏涛等, 2016, 2020)。即在对比过程中, 利用地震剖面横向上厚度变化的趋势, 对测井曲线标志层相对不明显的下石盒子组/山西组、山1段内部标志层界面, 和上石盒子组/下石盒子组、盒3段/盒2段、盒1段内部界面进行约束。

从主要标志界面的连井对比结果来看, 研究区地层厚度变化总体稳定, 顺物源方向, 太原组—上

石盒子组总体略呈南厚北薄的特征; 垂直物源方向, 略呈东厚西薄(图4), 这主要受研究区西侧公卡汉凸起和沉积物源来自盆地北部的影响(陈安清等, 2011)。

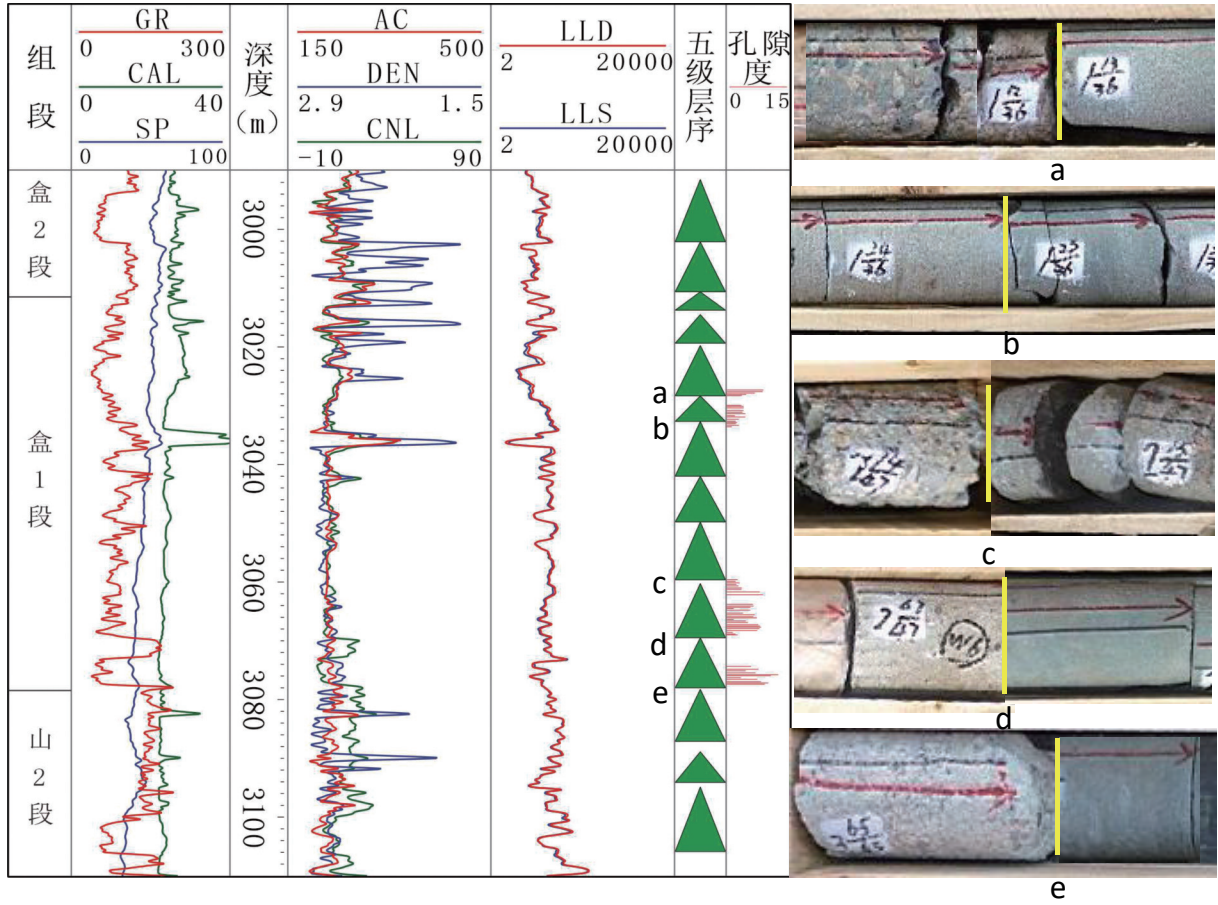
4 高频层序界面的划分与小层对比

以标志层序界面井间对比作为约束, 分析不同高频沉积层序界面上下的岩性突变差异, 进一步标定岩性敏感测井曲线, 总结高频层序界面测井响应特征, 进而完成全井段高频层序界面识别。

4.1 高频层序界面的识别

详细的岩心观察结果显示, 高频层序界面基本为河道冲刷面、岩性-岩相转换面、煤层界面等。

(1)河道冲刷面: 为河流强烈的侵蚀、下切作用, 与下伏的泥岩或砂岩形成的界面(图2a, 5a, 5c,



a. 冲刷面滞留砾岩与粉细砂岩的界面; b. 砂岩与粉砂质泥岩的界面; c. 河道冲刷面砂砾岩与下伏泥岩的分界面; d. 粗砂岩与粉砂质泥岩的界面; e. 河道冲刷面含砾砂岩与下伏泥岩的界面

图5 锦92井基于岩心与测井曲线相互标定的高频层序界面识别与划分

Fig. 5 Identification and division of high-frequency sequence interfaces based on mutual calibration of cores and logging curves in Well Jin 72

5e), 通常是河道形成初期的产物。本区盒1段底部的冲刷面分布比较稳定、清楚、对比性好, 是高频层序划分的重要界面及典型标志。该界面类型在研究区较为普遍, 为本区最重要的高频层序界面类型。

(2)岩性-岩相转换面: 研究区内岩性-岩相转换面较为发育, 该界面的形成条件为沉积基准面下降速率大于或小于盆地沉降速率, 造成的岩性突变。主要包括浅水沉积物直接覆盖于深水沉积物之上, 或者相反, 深水沉积物直接覆盖于浅水沉积物之上, 为突变接触关系。岩性-岩相的转换可以是粒度上的转换: 由细到粗的逆向结构或由粗到细的正向结构的转化, 如盒1段内部的由粗到细的正向结构的转化形成的岩性-岩相转换面(图2b, 5b, 5d)。

(3)洪泛面及煤层界面等: 在研究区通常为基准面旋回上升至最大时, 开始下降或转换的位置所形成的沉积。包括盒1段中部和顶部的泥岩, 山1段和太原组顶部煤层等沉积等。

通过对研究区主要的(高频)层序界面的识别, 对高频层序类型进行了划分。总体上, 高频层序界面的电测曲线响应突变特征较明显(如伽马曲线等), 表现为由高伽马突变为低伽马, 三孔隙度测井曲线组合、电阻率曲线往往呈突变特征。在每个高频层序内, 测井伽马曲线随着岩石中泥质含量增加逐渐升高, 由此构成一个明显粒度向上变细的正旋回沉积高频层序, 即主要由辫状河道滞留沉积、心滩、河道充填及泛滥平原沉积构成了向上变浅的沉积序列的高频层序。取心段实测孔隙度结果在V级高频层序的分布特征中可以看出, 这种高频层序类型与实测的岩心孔隙度具有很好的相关关系, 即在V级高频层序的中下部储层物性较好, 上部则物性相对较差, 构成了随高频层序向上而物性逐渐变差的旋回(图5)。

4.2 基于高频层序的小层划分与对比

在沉积规律的指导下, 在地震剖面 and 标志层对比剖面的约束下, 开展高频层序界面井间对比, 建立高频层序格架, 划分小层。

综合以上层序界面和高频层序界面的识别划分, 依据上述区域地层界面特征、展布范围, 结合前人研究结果, 太原组、山西组、下石盒子组和上石盒子组底界面的形成受区域构造运动、区域沉积基准面下降(如湖退等)的影响, 一定程度上具有

Ⅲ级层序界面的性质(张满郎等, 2009)。同时考虑到层序的完整性, 将主要目的层太原组一下石盒子组划分为三个完整的Ⅲ级层序(图6)。在Ⅲ级层序内部, 依据河道冲刷面、岩性-岩相转换面、洪泛面及煤层等高频层序界面的识别结果, 进一步划分为7个Ⅳ级层序(图6)。

研究区山西组一下石盒子组主要为辫状河—泛滥平原沉积, 地层厚度介于160~190 m, 平原化特征明显, 各高频旋回或各小层厚度变化小, 因此, 高频层序间厚度在横向上具有一定的稳定性。依据Ⅳ级层序中高频层序界面的分布, 将主要目的层太原组一下石盒子组划分25个V级高频层序。进一步将层序界面测井特征明显, 且与地震波组特征吻合性较好的取心井, 作为地层对比标准井(图6), 在地震剖面的约束下, 开展高频层序及小层对比, 建立连井的高频层序格架(图7)。最终, 根据开发需求, 将山西组划分为山1段、山2段两个岩性段, 其中每个岩性段各划分为2个小层; 将下石盒子组划分为盒1、盒2、盒3三个岩性段共8个小层, 其中盒1段划分为4个小层, 盒2段划分为2个小层, 盒3段划分为2个小层, 每个小层厚度为10~20 m左右(图7)。

5 高频层序对储层发育的控制及研究意义

(1)高频层序对储层发育的控制探讨

不同级次的层序叠加, 在很大程度上控制沉积分异及其堆积方式, 从而控制了沉积微相与储层展布。按照SY/T 6285—1997《油气储层评价方法》, 一类储层通常孔隙度>12%; 二类储层孔隙度介于9%~12%; 三类储层孔隙度介于5%~9%; 干层通常孔隙度<5%。十里加汗地区山西组一下石盒子组储层在层序中分布显示, 一、二类优质储层一般发育于Ⅳ、V级高频层序中下部(图6, 图7), 这些位置为层序发育的早中期, 水动力相对较强, 在一定程度上控制了辫状河心滩沉积作用发生, 其中的盒1段含砾粗砂岩是储层发育的有利岩相(图4, 图6), 砂岩粒度粗, 原始孔隙度高(袁志祥, 2001)。在这种条件下形成厚层的粗碎屑河道心滩砂体沉积, 砂体侧向叠置, 分布范围广, 连通性好, 其分割性表现为砂体间的非均质性变化和薄的泥质夹层的作用。随Ⅳ、V级高频层序沉积基准面

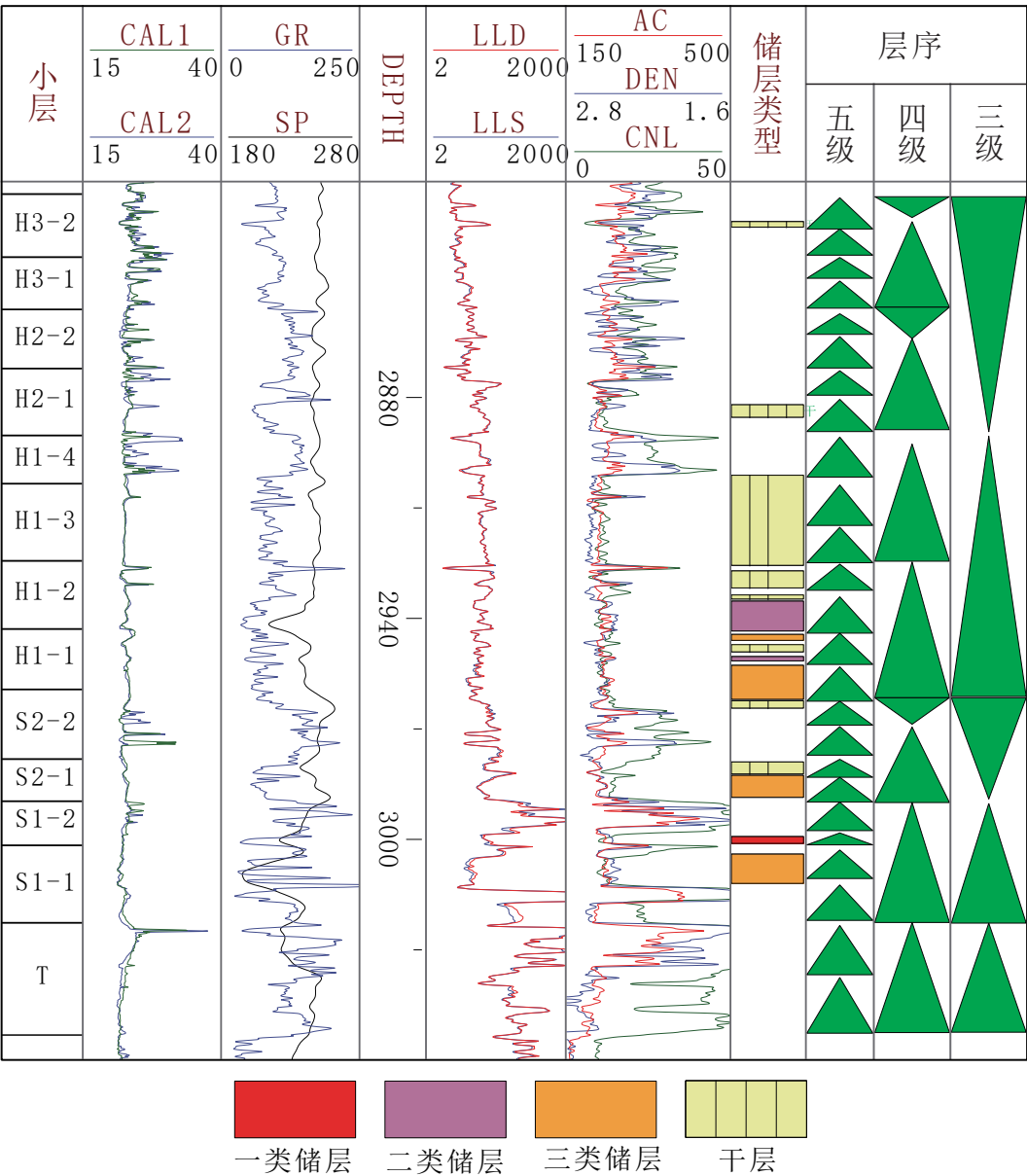


图 6 锦 72 井太原组一下石盒子组单井（高频）层序划分与储层类型分布

Fig. 6 Single-well (high-frequency) sequence division and reservoir distribution from the Taiyuan Formation to the Lower Shihezi Formation of Well Jin 72

的上升,水动力条件进一步减弱,沉积了河道充填微相的中细砂岩,由于粒度较细,导致孔隙度、渗透率较低,储层含气性差,主要为三类储层或干层。随着高频层序沉积基准面进一步上升,河流易泛滥,形成泛滥平原泥质沉积,可作为气藏的直接盖层。Ⅳ级层序晚期,砂泥比值进一步降低,作为主要储层的河道砂体彼此独立,相互连通几率较小,河间薄层砂比例增大,以泛滥平原为主。

(2)高频层序研究意义

在油气田开发过程中,利用Ⅳ级、Ⅴ级高频层

序等时格架,可为各类成因砂体分布规律和几何形态特征提供依据(张广权, 2013)。因此,对于致密—低渗气藏来说,精细划分开发小层是进行沉积微相、砂体储层评价、气藏精细地质建模及数值模拟的基础,其划分与对比的可靠程度和精细度直接关系到油气藏描述的成败(韩兴刚等, 2018)。杭锦旗十里加汗地区钻井井网密度较低,储层分布复杂,该区的油气藏描述、预测与评价中,三维地震资料的应用起到了至关重要的作用。而地震属性切片是目前该区较流行的沉积、储层平面分析方法,连

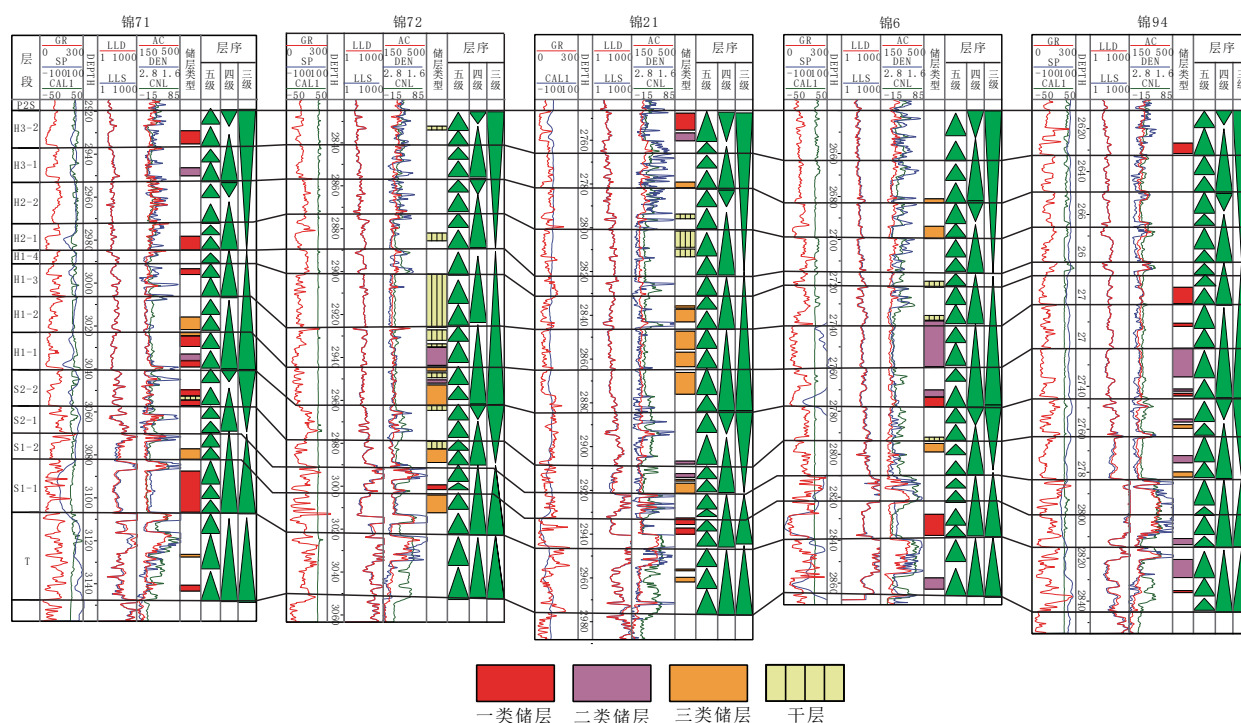


图7 研究区东西向太原组—山西组高频层序对比剖面与储层类型分布

Fig. 7 High frequency sequence correlation and reservoir distribution of the Taiyuan Formation to the Shanxi Formation from east to west in the study area

续的属性切片可以更直观、更生动地展现研究区目标层段岩性、岩相、储层在时间和空间的演化,因此是确定沉积边界、储层规模等的有效方法(凌云等 2006; 魏华芝, 2018; 朱筱敏等, 2019)。以高频层序地层格架为基础的多层拉平技术大大提高了属性切片的等时性,使属性切片反映的地质信息更加客观真实(卫延召等, 2002)。如十里加汗锦72井区 H3-1 小层、H3-2 小层内部的地震属性切片显示(图 8), H3-1 小层在研究区西北角和东南角

均发育窄条带状辫状河道,到了 H3-2 小层,这些河道逐渐消亡,而在研究区中东部清晰可见南北向弯曲河道,具有继承性发育的特征。

6 结论

(1)十里加汗地区太原组—上石盒子组由太原组海陆过渡环境的潮坪相—三角洲相沉积,逐渐演变为山西组的辫状河三角洲相沉积,至下石盒子组则主要发育辫状河相。依据层序界面类型,将目的

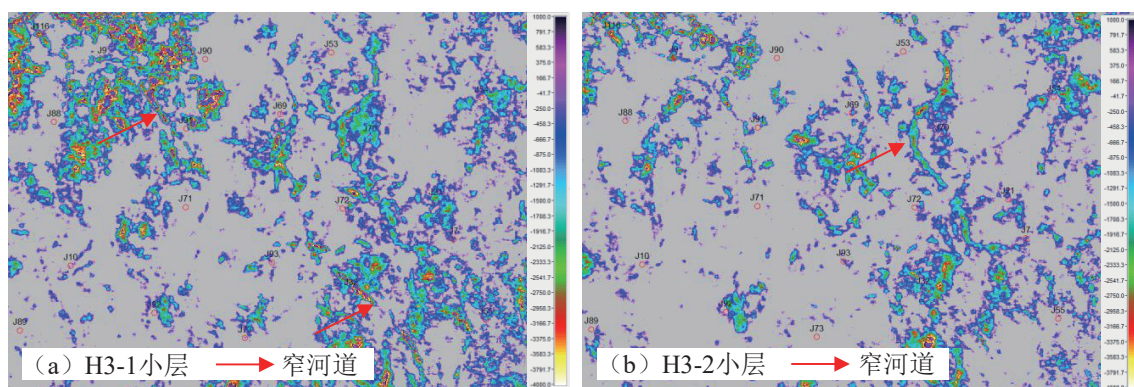


图8 十里加汗锦72井区 H3-1 (a) 小层与 H3-2 小层 (b) 内部地震属性切片

Fig. 8 Seismic attribute slices of sub-layer H3-1 (a) and sub-layer H3-2 (b) around Well Jin 72, Shilijiahan

层识别出Ⅱ级界面1个,Ⅲ级界面3个,Ⅳ级界面4个,将Ⅱ-Ⅳ级层序界面按照岩心-测井曲线-地震响应特征的难易识别程度,划分了4个级次标志界面。4个级次标志界面的连井对比结果表明,顺物源方向略呈南厚北薄的特征,垂物源方向,略呈东厚西薄,主要受物源方向和沉积古地貌影响。

(2)以标志层序界面井间对比作为约束,分析不同高频沉积层序界面上下的岩性突变差异,进一步标定岩性敏感测井曲线,识别Ⅴ级层序界面25个。在地震剖面约束和沉积认识指导下,开展不同级别标志界面井间对比,逐级约束,实现高频层序对比,依据现场生产实际,将研究区太原组—上石盒子组地层划分为13个小层,各小层厚度层间变化较小,主要反映平原三角洲—辫状河沉积的特征。

(3)通过不同级别标志层界面的岩心-测井-地震相互标定,总结不同级别标志(层)界面的测井曲线和地震响应特征,在沉积认识指导和地震剖面约束下,井震联合开展不同级别标志界面井间对比,逐级约束,进而在其内部开展高频层序识别与划分,是实现高频层序划分和小层精细对比的有效途径。不同级次的层序叠加,在很大程度上控制沉积分异及其堆积方式。因此,高频层序一定程度上也控制着沉积储层的发育与分布;高频层序格架的建立,可为研究区下一步的沉积微相展布、单砂体对比、储层地球物理预测、气水分布等研究提供了精细地层格架。

References

- Brett C E, Goodman W M, Loduca S T. 1990. Sequences, cycles and basin dynamics in the Silurian of the Appalachian foreland basin [J]. *Sedimentary Geology*, 69: 191–224.
- China National Petroleum Corporation. 1997. SY/T 6285-1997 Evaluating methods of oil and gas reservoirs[S]. The People Republic of China petroleum natural gas profession standard, .
- Fu S, Liu Z, Guo Y R, et al., 2019. Lacustrine paleoshoreline determination under established sequence stratigraphic framework and its controls on sand bodies and hydrocarbon accumulations[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 110: 497–51.
- Mitchum R M, Van Wagoner J C, 1991. High-frequency sequences and their stacking patterns: sequence-stratigraphic evidences of high-frequency eustatic cycles[J]. *Sedimentary Geology*, 70 (2): 131–160.
- Nunes R, Soares A, Azevedo L, et al., 2017. Geostatistical seismic inversion with direct sequential simulation and co-simulation with multi-local distribution functions[J]. *Mathematical geosciences*, 49 (5): 583–601.
- Vail P R, Audemard F, Bowman S A, et al., 1991. The stratigraphic signatures of tectonics, eustasy and sedimentology—an overview [C]. In: Einsele G, Ricken W, Seilacher A eds. *Cycles and event s in stratigraphy*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. 617–659.
- Vail P R, Todd R G, Sangree J B, 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part5: chronostratigraphic significance of seismic reflections[C]//Payton C E. *Seismic stratigraphy—applications to hydrocarbon exploration*. AAPG Memoir, 26: 99–116.
- Cao T S, Luo L, Tan X F, et al., 2021. Genesis and pore evolution of tight sandstone reservoir: taking Lower Shihezi Formation in the Shilijiahan block of Hangjinqi area as an example[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 28 (5): 598–603 (in Chinese with English abstract) .
- Chen A Q, Chen H D, Xu S L, et al., 2011. Provenance and sandy accumulation regularity of Neopaleozoic in North Ordos Basin[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 35 (6): 1–7 (in Chinese with English abstract) .
- Chen L Q, 2008. From parasequences to meter-scale cycles: the connection between sequence stratigraphy and cyclostratigraphy[J]. *Journal of Stratigraphy*, 32 (4): 447–454 (in Chinese with English abstract) .
- Deng H W, 1995. A new school of thought in sequence stratigraphic studies in U. S. : high-resolution sequence stratigraphy[J]. *Oil & Gas Geology*, 16 (2): 89–97 (in Chinese with English abstract) .
- Deng H W, Wang H L, Ning N, 2000. Sediment volume partition principle: theory basis for high-resolution sequence stratigraphy[J]. *Earth Science Frontiers*, 7 (4): 305–313 (in Chinese with English abstract) .
- Duan Z Y, Li X Q, Chen C F, et al, 2019. Gas and water distribution and its controlling factors of Xiashihezi Formation in J58 well area, Hangjinqi area[J]. *Lithologic Reservoirs*, 31 (3): 45–54 (in Chinese with English abstract) .
- Guo J, Chen H D, Wang F, et al., 2012. Main controlling factors of Taiyuan Formation sand body distribution in Ordos Basin[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 19 (5): 568–571 (in Chinese with English abstract) .
- Guo S, Yan J F, Guo L, et al., 2009. The sedimentary microfacies of Taiyuan formation in the Hangjinqi area, the north of Ordos Basin[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 39 (2): 283–287 (in Chinese with English abstract) .
- Han X G, Xiao F, Zhang W, et al., 2018. Stratigraphic division and correlation of braid river reservoir—An example from SuX dense well area, Sulige Gas Filed[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 48 (1): 76–84 (in Chinese with English abstract) .
- He F Q, Wang F B, Zhang W, et al., 2020. Transformation of

- exploration ideas and major breakthrough in natural gas discovery in the northern margin of the Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 25, (6): 39 - 49 (in Chinese with English abstract) .
- Li H T, Ma L Y, Shi Y Q, et al., 2020. Distribution and evaluation of underwater distributary channel sandstone reservoir based on well-seismic combination: A case study of JP₃⁵ sand group in Shifang gas reservoir[J]. Lithologic Reservoirs, 32 (2): 78 - 89 (in Chinese with English abstract) .
- Li H T, Shi Y Q, Xiao K H, et al., 2016. Sequence, sedimentary and reservoir characteristics of Xu 3 gas reservoir in the Yuanba Gasfield, NE Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 36 (9): 20 - 34 (in Chinese with English abstract) .
- Li J, Song X M, Xue P H, et al., 2010. Hierarchical subdivision and origin of single sandbody in the reservoirs of meandering river facies in the Yangdachengzi Formation of Fuyu oilfield[J]. Oil & gas geology, 31 (1): 119 - 125 (in Chinese with English abstract) .
- Lin Y, Sun D S, Gao J, et al., 2006. Interpretation research into continental microfacies of superposed thin reservoirs[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 45 (4): 329 - 34 (in Chinese with English abstract) .
- Liu B, Zhao H Q, Yu H Y, 2000. Discussion on the two methods of detailed reservoir correlation[J]. Petroleum Exploration and Development, 27 (6): 94 - 96 (in Chinese with English abstract) .
- Liu X C, Lu Y C, Du X B, et al., 2020. Application of geostatistical inversion constrained by sequence framework in thin-bedded sandbody prediction[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 39 (3): 99 - 109 (in Chinese with English abstract) .
- Liu Z, Wang D W, Wu H, et al., 2008. Research on isochronic subzone correlation of non-marine reservoir by seismic data: a case study in SZ36-1 oil-field, Bohai Bay Basin[J]. Earth Science Frontiers, 15 (1): 133 - 139 (in Chinese with English abstract) .
- Luo K P, Yang F, Lu Y D, et al., 2021. Key structural periods and Permian tight gas accumulation response in Hangjinqi area, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 43 (4): 557 - 568 (in Chinese with English abstract) .
- Mei M X, 2011. From vertical stacking pattern of cycles to discerning and division of sequences: The third advance in sequence stratigraphy[J]. Journal of palaeogeography, 13 (1): 37 - 54 (in Chinese with English abstract) .
- Mei M X, Xu D B, Zhou H R, 2000. Genetic Types of Meter—Scale Cyclic Sequences and Their Fabric Features of Facies—Succession[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 18 (1): 43 - 49 (in Chinese with English abstract) .
- MOU C L, 2022. Suggested naming and classification of the word facies [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 42 (3): 331 - 339 (in Chinese with English abstract) .
- Qi R, Li L, Qin X F, 2019. 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, 41 (5): 682 - 690 (in Chinese with English abstract) .
- Qiu Y N, Zhang Z S, Tang M F, et al., 1987. The detailed correlation of fluvial sandbody reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 14 (2): 46 - 52 (in Chinese with English abstract) .
- Sheng Y L, Guo Y H, Li Z, 2006. Sedimentary facies of the Shanxi Formation and Member 8 of Xiashihezi Formation of Permian in Suligemiao area, Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 8 (1): 53 - 62 (in Chinese with English abstract) .
- Wang X W, Su M J, Wang D X, et al., 2003. Method and application of facies controlling isochrones oil-layer[J]. Petroleum Exploration and Development, 30 (6): 78 - 80 (in Chinese with English abstract) .
- Wei Y Z, Xue L Q, Chi Y L, et al., 2002. Seismic lithology inversion and reservoir prediction under high-frequency sequence framework constraints [J]. Summary of 2002 Low Permeability Oil and Gas Reservoir Symposium Papers, 47 (in Chinese with English abstract) .
- Wei H Z, 2018. Characterization of the underwater distributary channel sandbodies by integrating the well log and seismology[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 37 (6): 132 - 139 (in Chinese with English abstract) .
- Xue H, Wang Y, Mao X P, et al., 2009. The timing of gas pooling in the Upper Paleozoic in the northern Ordos Basin: a case study of the Hangjinqi block[J]. Natural Gas Industry, 29 (12): 9 - 12 (in Chinese with English abstract) .
- Yang Y, Yu Y F, Mao P, et al., 2010. Fine stratigraphic correlation and its application in complicated formation- a case study of gas N1-N12 reservoir[J]. Petroleum Geology and Engineering, 24 (4): 22 - 25 (in Chinese with English abstract) .
- Yuan Z X, 2001. An analysis of the natural gas exploration potential of Paleozoic at Tabamiao and Hangjin banner regions in north Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 21 (Suppl 1): 5 - 9 (in Chinese with English abstract) .
- Zhang G Q, 2013. Study on the high-resolution sequences stratigraphy of Benxi Formation to Taiyuan Formation in Daniudi Gasfield, Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 24 (5): 915 - 922 (in Chinese with English abstract) .
- Zhang M L, Li X Z, Gu J R, et al., 2009. Sequence division and evolution of Upper Paleozoic in the Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 27 (2): 289 - 298 (in Chinese with English abstract) .

English abstract) .

- Zhang W, He F Q, Yan X B, et al., 2021. Study and application of identification and description methods for lithologic traps in large braided river sheet composite channels[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 43 (3): 432 - 442 (in Chinese with English abstract) .
- Zhang W, Li L, Jia H C, 2016. Reservoir-forming dynamics and gas-water distribution characteristics of lithologic traps in the first member of Xiashihezi Formation in the Shilijiahan zone, Hangjinqi area, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 37 (2): 189 - 196 (in Chinese with English abstract) .
- Zhang Y A, Tian J C, Zhang X, et al., 2021. The sand body distribution law controlled by tectonic-sedimentary pattern: a case study of Permian in Hangjinqi area [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 28 (2): 187 - 193, 229 (in Chinese with English abstract) .
- Zhao H Q, 1988. Formation correlation of fluvial-deltaic deposition in Daqing oil field[J]. *Petroleum Geology & Oil field Development in Daqing*, 7 (4): 25 - 31 (in Chinese with English abstract) .
- Zhao H Q, 2005. High-resolution sequential stratigraphy correlation and Chinese subzone correlation[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 24 (1): 5 - 9 (in Chinese with English abstract) .
- Zhao J Z, Fu J H, Yao J L, et al., 2012. Reservoir formation model for large gas fields of quasi-continuous compact sandstone in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 33 (Suppl 1): 37 - 52 (in Chinese with English abstract) .
- Zheng R C, Ke G M, Wen H G, et al., 2004. Isochronic correlation of fluvial sandbodies by high-resolution sequence technique[J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 31 (6): 641 - 647 (in Chinese with English abstract) .
- Zheng R C, Wu C R, Ye M C, 2000. Research thinking of high-resolution sequence stratigraphy about a terrigenous basin[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 27 (3): 241 - 244 (in Chinese with English abstract) .
- Zhu X M, Dong Y L, Zeng H L, et al., 2019. New development trend of sedimentary geology: Seismic Sedimentology[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 21 (2): 189 - 201 (in Chinese with English abstract) .
- Zhu Z L, Li W H, Li K Y, Et al., 2010. The characteristic of sequence stratigraphy and sedimentary systems of Taiyuan—Xiashihezi formation in Hangjinqi area[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 40 (6): 1050 - 1054 (in Chinese with English abstract).
- 田, 28 (5): 598 - 603.
- 陈安清, 陈洪德, 徐胜林, 等, 2011. 鄂尔多斯盆地北部晚古生代物源体系及聚砂规律[J]. *中国石油大学学报 (自然科学版)*, 35 (6): 1 - 7.
- 陈留勤, 2008. 准层序到米级旋回——层序地层学与旋回地层学相互交融的纽带[J]. *地层学杂志*, 32 (4): 447 - 454.
- 邓宏文, 1995. 美国层序地层研究中的新学派——高分辨率层序地层学[J]. *石油天然气地质*, 16 (2): 89 - 97.
- 邓宏文, 王红亮, 宁宁, 2000. 沉积物体积分配原理——高分辨率层序地层学的理论基础[J]. *地学前缘*, 7 (4): 305 - 313.
- 段治有, 李贤庆, 陈纯芳, 等, 2019. 杭锦旗地区 J58 井区下石盒子组气水分布及其控制因素[J]. *岩性油气藏*, 31 (3): 45 - 54.
- 郭军, 陈洪德, 王峰, 等, 2012. 鄂尔多斯盆地太原组砂体展布主控因素[J]. *断块油气田*, 19 (5): 568 - 571.
- 郭顺, 闫继福, 郭兰, 等, 2009. 鄂北杭锦旗地区太原组沉积微相分析[J]. *西北大学学报 (自然科学版)*, 39 (2): 283 - 287.
- 韩兴刚, 肖峰, 张伟, 等, 2018. 辫状河沉积储层小层精细划分对比——以苏里格气田苏 X 加密井区为例[J]. *中国海洋大学学报 (自然科学版)*, 48 (1): 76 - 84.
- 何发岐, 王付斌, 张威, 等, 2020. 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*, 25, (6): 39 - 49.
- 李宏涛, 马立元, 史云清, 等, 2020. 基于井-震结合的水下分流河道砂岩储层展布分析与评价: 以什邡气藏 JP₃⁵砂组为例[J]. *岩性油气藏*, 32 (2): 78 - 89.
- 李宏涛, 史云清, 肖开华, 等, 2016. 元坝气田须三段气藏层序沉积与储层特征[J]. *天然气工业*, 36 (9): 20 - 34.
- 李军, 宋新民, 薛培华, 等, 2010. 扶余油田杨大城子组曲流河相油藏单砂体层次细分及成因[J]. *石油与天然气地质*, 31 (1): 119 - 125.
- 凌云, 孙德胜, 高军, 等, 2006. 叠置薄储层的沉积微相解释研究[J]. *石油物探*, 45 (4): 329 - 341.
- 刘波, 赵翰卿, 于会宇, 2000. 储集层的两种精细对比方法讨论[J]. *石油勘探与开发*, 27 (6): 94 - 96.
- 刘晓晨, 陆永潮, 杜学斌, 等, 2020. 层序格架约束下的地质统计学反演在薄砂体预测中的应用[J]. *地质科技通报*, 39 (3): 99 - 109.
- 刘震, 王大伟, 吴辉, 等, 2008. 利用地震资料进行陆相储层小层等时对比的方法研究——以绥中 36-1 油田为例[J]. *地学前缘 (中国地质大学 (北京); 北京大学)*, 15 (1): 133 - 139.
- 罗开平, 杨帆, 陆永德, 等, 2021. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区关键构造期与二叠系致密气成藏响应[J]. *石油实验地质*, 43 (4): 557 - 568.
- 梅冥相, 2011. 从旋回的有序叠加形式到层序的识别和划分: 层序地层学进展之三[J]. *古地学报*, 13 (1): 37 - 54.
- 梅冥相, 徐德斌, 周洪瑞, 2000. 米级旋回层序的成因类型及其相序结构特征[J]. *沉积学报*, 18 (1): 43 - 49.

附中文参考文献

- 曹桐生, 罗龙, 谭先锋, 等, 2021. 致密砂岩储层成因及其孔隙演化过程: 以杭锦旗十里加汗地区下石盒子组为例[J]. *断块油气*

- 牟传龙, 2022. 关于相的命名及其分类的建议[J]. 沉积与特提斯地质, DOI: 10.19826/j.cnki.1009.3850.03001.
- 齐荣, 李良, 秦雪霏, 2019. 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, 41(5): 682-690.
- 裘亦楠, 张志松, 唐美芳, 等, 1987. 河流砂岩储层的小层对比问题[J]. 石油勘探与开发, 14(2): 46-52.
- 沈玉林, 郭英海, 李壮, 2006. 鄂尔多斯盆地苏里格庙地区二叠系山西组及下石盒子组盒八段沉积相[J]. 古地理学报, 8(1): 53-62.
- 王西文, 苏明军, 王大兴, 等, 2003. 相控-等时小层对比方法及应用[J]. 石油勘探与开发, 30(6): 78-80.
- 卫延召, 薛良清, 池英柳, 等, 2002. 在高频层序格架约束下的地震岩性反演及储层预测[C]. 2002 低渗透油气储层研讨会论文集摘要, 47.
- 魏华芝, 2018. 井震结合刻画水下分流河道砂体[J]. 大庆石油地质与开发, 37(6): 132-139.
- 薛会, 王毅, 毛小平, 等, 2009. 鄂尔多斯盆地北部上古生界天然气成藏期次: 以杭锦旗探区为例[J]. 天然气工业, 29(12): 9-12.
- 杨云, 余逸凡, 毛平, 等, 2010. 复杂地层精细对比方法——以奈斯 N1-N21 油藏为例[J]. 石油地质与工程, 24(4): 22-25.
- 袁志祥, 2001. 鄂北塔巴庙、杭锦旗地区古生界天然气勘探前景分析[J]. 天然气工业, 21(增刊1): 5-9.
- 张广权, 2013. 鄂尔多斯盆地大牛地气田本溪组—太原组高分辨率层序地层学研究[J]. 天然气地球科学, 24(5): 915-922.
- 张满郎, 李熙喆, 谷江锐, 等, 2009. 鄂尔多斯盆地上古生界层序地层划分及演化[J]. 沉积学报, 27(2): 289-298.
- 张威, 何发岐, 闫相宾, 等, 2021. 大型辫状河席状复合河道岩性圈闭识别描述方法及应用[J]. 石油实验地质, 43(3): 432-442.
- 张威, 李良, 贾会冲, 等, 2016. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区十里加汗区带下石盒子组 1 段岩性圈闭成藏动力及气水分布特征[J]. 石油与天然气地质, 37(2): 189-196.
- 张倚安, 田景春, 张翔, 等. 构造-沉积格局控制下的砂体展布规律: 以杭锦旗地区二叠系为例[J]. 断块油气田, 2021, 28(2): 187-193, 229.
- 赵翰卿, 1988. 大庆油田河流-三角洲沉积的油层对比方法[J]. 大庆石油地质与开发, 7(4): 25-31.
- 赵翰卿, 2005. 高分辨率层序地层对比与我国的小层对比[J]. 大庆石油地质与开发, 24(1): 5-9.
- 赵靖舟, 付金华, 姚泾利, 等, 2012. 鄂尔多斯盆地准连续型致密砂岩大气田成藏模式[J]. 石油学报, 33(增刊1): 37-52.
- 郑荣才, 柯光明, 文华国, 等, 2004. 高分辨率层序分析在河流相砂体等时对比中的应用[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 31(6): 641-647.
- 郑荣才, 吴朝容, 叶茂才, 2000. 浅谈陆相盆地高分辨率层序地层研究思路[J]. 成都理工学院学报, 27(3): 241-244.
- 中国石油天然气总公司, 1997. SY/T 6285-1997 油气储层评价方法. 中华人民共和国石油天然气行业标准.
- 朱筱敏, 董艳蕾, 曾洪流, 等, 2019. 沉积地质学发展新航程——地震沉积学[J]. 古地理学报, 21(2): 189-201.
- 朱宗良, 李文厚, 李克永, 等, 2010. 杭锦旗地区上古生界层序及沉积体系发育特征[J]. 西北大学学报(自然科学版), 40(6): 1050-1054.