

鄂尔多斯盆地延长组地震前积反射与页岩油储层展布规律研究

张杰^{1,2}, 李青阳¹, 王永刚^{1,2}, 葛炳好¹, 丁骞¹, 杨超¹, 段沛然¹

1. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 西安 710018

2. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 西安 710018

摘要 【目的】鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段沉积了一套全盆地可连续追踪的泥页岩, 是目前非常规石油勘探开发的主力层系。但下部发育的长7₃亚段纹层型页岩油储层横向变化快, 实际勘探中仍存在储层展布不明、成因不清、钻遇率低等问题, 亟需明确纹层型页岩油储层分布规律。【方法】根据最新三维地震资料, 采用地层倾角翻转法恢复沉积期古地形。综合地质和测井信息, 以泥页岩地震反射同相轴为标志开展地震地层对比划分, 并结合古地形划分了四期前积斜坡期次, 分析了页岩油储层的展布规律。【结果与结论】结合地震进积序列与湖盆古地形, 厘清了长7₃纹层型页岩油储层分布于古隆起带及其前端的部位展布规律与重力流沉积的成因。长7₃亚段页岩油储层为湖底古隆起部位发育的重力流沉积, 位于前积斜坡末端, 连通性差且叠置关系复杂, 实际生产中应作为“箱体”进行勘探。新认识助力了纹层型页岩油风险井位部署及勘探新发现, 为夹层型页岩油规模效益开发提供了技术保障。

关键词 三维地震; 前积反射; 页岩油; 储层展布; 重力流; 鄂尔多斯盆地

第一作者简介 张杰, 女, 1977年出生, 硕士, 高级工程师, 储层地球物理, E-mail: zhangjie_cq@petrochina.com.cn

通信作者 李青阳, 男, 博士, 储层地球物理, E-mail: 986132055@qq.com

中图分类号 P618.13 文献标志码 A

0 引言

鄂尔多斯盆地在中生界三叠系延长组长7段时期受印支构造运动影响, 华北板块和扬子板块挤压形成了以陇东地区华池为中心的大型陆相坳陷湖盆, 并在此期间沉积了一套面积6万多平方公里的半深湖—深湖相泥页岩^[1]。截至2010年, 该套泥页岩主要作为烃源岩进行研究, 近年来通过持续技术攻关, 长7段泥页岩勘探开发陆续取得突破, 现已成为该盆地页岩油主力产油层段, 其中发现的探明地质储量超10亿吨级页岩油大油田—庆城油田, 标志着鄂尔多斯盆地迈入了页岩油非常规勘探开发新阶段^[2]。

过去较长时期, 地质学家认为延长组湖盆演化过程中沉积物沉降遵循“平起平落, 稳定沉积”的规律^[3], 传统地层划分方法倾向于将地层视为基本水平且等厚, 并将长7段地层自上而下划分为长7₁、长7₂和长7₃三个亚段, 其中长7_{1,2}亚段页岩油为夹层型, 长7₃亚段页岩油进一步区分为纹层型和泥纹型^[4]。长7_{1,2}亚段夹层型为整装泥质粉砂与泥页岩交替发育, 砂岩储层物性和横向连续性较好, 是过去几年陇东页岩油优先勘探开发的主力层系^[5]。长7₃

收稿日期: 2024-08-07; 收修改稿日期: 2024-10-10

基金项目: 中石油长庆分公司科技专项(2021DJ1806, 2023ZZ15YJ02) [Foundation: Science and Technology Special Project of Changqing Oilfield Company, CNPC, No. 2021DJ1806, 2023ZZ15YJ02]

亚段主要为深水环境下形成的泥页岩沉积,发育区域性纹层型储层,即泥页岩、粉砂质泥岩、凝灰岩和少量细粒砂岩以频繁的薄互层形式出现,在平面上与泥纹型呈现交替分布特点,且横向难以连续追踪^[6]。泥页岩页理纹层分为连续性和非连续性两种,其中连续性纹层发育平直型、波纹型、粒序型沉积构造,非连续性纹层发育透镜体型、斑状、弱纹层沉积构造^[7]。刘显阳等^[8]指出长7段三个亚段成因机制、沉积类型和分布范围不完全一致,其中长7₃亚段砂体多为孤立型或长宽厚较小的叠置型,水平井追踪极为困难,在实践中普遍存在储层展布不明,勘探难度较大,钻遇率低等问题。开发区高密度(小井距)钻井地层对比与传统分层也存在较大矛盾,传统等厚沉积理论难以适用的矛盾随着页岩油走向成熟开发日益凸显,亟需明确延长组地层沉积模式与页岩油储层分布的关系。

近年来,鄂尔多斯盆地三维地震采集—处理—解释技术快速发展,得益于宽方位、宽频和高分辨率三维地震成像能力,通过三维地震剖面精细解释地下介质构造特征,进而发现鄂尔多斯盆地陇东地区延长组地层横向变化快、纵向叠置,并不遵循传统“切面包片”的沉积规律^[3]。2009年,李相博等^[9]首次发现长6段砂岩主要发育由深水坡折带控制重力流沉积的砂质碎屑流,在打破了传统三角洲前缘水道砂体沉积成因说的同时,揭示了满盆砂形成主要受深水沉积坡折控制,但受限于地震资料并未对坡折带进行深入研究。李慧琼等^[10]通过地震资料发现延长组(长7—长4+5段)存在大量地震前积反射,前积反射区普遍存在地层对比穿时现象,否定了延长组地层岩性界面的“切片面包”形态。在此基础上,冯雪等^[11-12]在地震剖面上识别了内部形态S型—外部形态呈透镜状反射(I类)、内部形态S型—外部形态呈楔状反射(II类)、内部形态平行斜交型—外部形态呈楔状反射(III类)、和内部形态切线斜交型—外部形态呈板状反射(IV类)的四类前积反射地震相。同时指出I类和IV类为三角洲平原亚相与三角洲前缘亚相,II类对应浊积扇与前三角洲,III类对应三角洲—浊积扇系统,首次系统性对地震相赋予了地质含义。随着2017年陇东地区三维地震成网布设,惠潇等^[3]首次对鄂尔多斯盆地庆城西地区延长组前积地层进行划分并建立新的地层格架,通过井震结合以湖泛泥页岩的地震反射作为地层界面,划分了7个层序组(层序组划分目前尚未形成统一标准,夏勇等^[13]研究时划分4个层序组),指出湖盆填充过程经历了多次震荡湖退,沉积单元依次向湖心叠置。砂体沿斜坡主要分布在三角洲前缘和坡脚,斜坡富泥。物源供给和湖盆可容纳空间是影响斜坡生长的主要因素,通过斜坡发育形态可将湖盆演化依次分为早期的加积、中期强进积和后期加积与进积混合三个过程^[13]。惠潇等^[14]在原有的烃源岩标志层、湖盆范围和砂体分布研究基础上提出的新观点,改变了以往人们在“等厚分层”观点下对湖盆演化过程、砂体连通性与单井间对应关系的固有认识。

综上所述,前积斜坡发育改变了传统鄂尔多斯延长组地层划分方式和湖盆充填演化认识,也为长7段页岩油储层展布规律研究提供了一种不同以往基于等厚分层研究的新思路。然而,长7₃亚段页岩油储层横向变化快、沉积成因和展布规律仍然不明,目前仍未有合理观点可供借鉴,因此,长7₃亚段纹层型储层的展布规律研究已成为继夹层型储层之后,油

田勘探与开发亟待解决的首要问题。开展系统性地震—地质综合研究,完善长7段页岩油储层沉积理论、明确页岩油储层成因、掌握长7₃亚段页岩油储层展布规律,形成一套健全的页岩油研究体系,有利于为后续新区勘探与开发提供理论指导和科学依据。本文研究核心为鄂尔多斯盆地中生界延长组长7段页岩油储层展布规律,考虑到燕山运动造成盆地整体西倾,而湖盆底形呈西低东高,不利于前积斜坡识别和研究,首先提出地层倾角翻转法恢复沉积期湖盆古地形;然后通过井震对比调整井间对应关系,结合古地形将能够完整识别的前积斜坡划分为四期,划分地层包括了传统分层中延长组中段穿时现象最为明显的长7段至长3段,所划分的地层段也符合卡尼期梅雨事件^[15]造成全球气候突变后长7段底与长8段之间、长3段与长4+5段之间存在异整合面的观点^[16];最后分析了古地形隆、缓组合分区控储的规律,并借助岩心描述分析页岩油储层深水重力流沉积成因。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地横跨陕西、甘肃、宁夏、内蒙古和山西五省(区),北起阴山,南抵陇山、黄龙山、桥山,西至贺兰—六盘山,东达吕梁—太行山(图1),总面积达370 000 km²,是我国第二大沉积盆地。鄂尔多斯盆地是以太古界及下元古界变质岩系为基底的一个整体升降、拗陷迁移、构造简单的大型多旋回克拉通盆地,其孕育了国内最大的油气田—长庆油田。

鄂尔多斯盆地在古生代属于华北盆地的一部分,到中生代受印支运动影响,形成独立的陆相拗陷盆地,在上三叠统延长组时期湖盆经历了扩张、萎缩直至完全消亡^[4]。延长组共划分10个层段(长1—长10),其中长7段时期遭遇卡尼期梅雨事件,达到最大规模湖泛并沉积了一套优质黑色泥岩^[15],湖盆中心为盆地中南部,由西南和东北两大物源体系供给沉积,东北方向离物源较远呈缓坡构造,以曲流河三角洲沉积为主;西南方向物源来自秦岭,坡度比东北更陡,以辫状河三角洲沉积为主^[13]。长7段之后经历持续性湖退,三角洲—重力流沉积体逐步由湖盆西南和东北两侧向湖心华池充填,该过程持续至长3沉积时期,而后湖盆基本萎缩转为河流相沉积。根据最新的地震、测井和地质综合研究,目前对整个湖盆充填重新认识为环带状顺物源方向多期前积体侧向进积充填的过程。

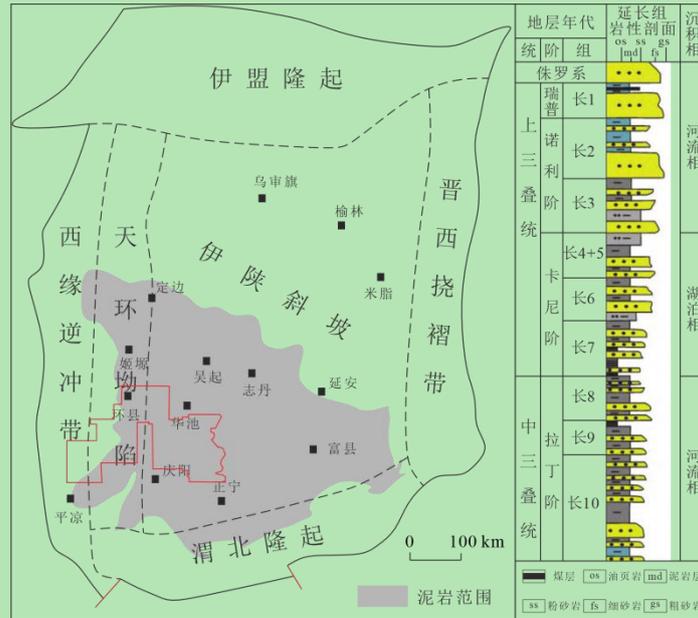


图1 鄂尔多斯盆地延长组古地理位置与延长组地层发育情况

Fig.1 Paleogeographical location and stratigraphic column of the Yanchang Formation in the Ordos Basin

2 地震前积期次划分与页岩油储层展布研究

中生界延长组湖盆大体上被分为初期、中期和末期三个阶段^[14-16]，湖盆充填整体为前积环带状震荡进积的过程，呈斜坡坡顶和坡脚富砂，斜坡富泥的规律^[14]。这一地质认识的新突破对鄂尔多斯盆地非常规油气勘探开发思路带来巨大革新，但目前斜坡区的页岩油分布规律尚不清晰，亟需对斜坡区的长_{7₁}、长_{7₂}夹层型与长_{7₃}纹层型页岩油分布规律展开研究。地震前积反射区沉积期受湖盆底形、水体深度、沉积物堆积速率等差异影响，其中古地形对于砂体运聚至关重要。需结合古地形与前积斜坡接触关系及古地形控砂规律，研究地震前积反射与页岩油储层展布关系。

前积是一类存在于大陆架边缘、湖盆边缘典型的斜坡沉积（clinoforms），其结构分为S型、切线斜交型、平行斜交型、S斜交型和叠瓦状五类，形态常见的有丘状、板状、透镜状和楔状^[10]。分析前积结构、形态和平面展布能够有效恢复沉积期地层进积和水体深度变化过程，揭示该时期水体平面变化、气候因素、物源方向等，对于油气勘探有重要指导意义。

借助地震资料是研究湖盆演化中斜坡前积过程的有利手段，其中有两个关键问题需要解决：（1）建立前积反射与前积体之间对应关系，通过地震数据识别的前积地震反射同相轴，需要结合测井+岩石取心共同分析，明确反射同相轴代表的地震含义。（2）恢复沉积期古地形，由于燕山运动造成盆地整体西倾，湖盆底形现今构造为西低东高形态，基于现今构造识别的前积反射形态特征信息（坡折点迁移轨迹、斜坡角度等）严重失真，无法开展湖盆的

沉积演化研究。因此，首先分析地震前积反射的识别与地质含义，然后恢复湖盆古地形，对斜坡期次进行划分，最后分析地震前积反射与页岩油储层展布关系。

2.1 地震前积反射的识别与地质含义

地震资料中的反射同相轴是地震波在地表激发向地下传播，在岩性差异界面发生反射回传至地表的综合响应，其本质上反映的是地下介质的岩性差异。例如，常见的煤层顶、底与围岩界面产生强反射，以及鄂尔多斯盆地长7烃源岩与砂岩围岩界面之间产生强反射。以上两个岩性界面在地质上有明确的地质意义，代表了差异沉积环境下的地层界面。利用地震反射同相轴识别出岩性差异界面位置和几何形态，能辅助地层界面划分和沉积演化过程分析。

鄂尔多斯盆地中生界延长组三维地震剖面上存在大量前积反射同相轴（图2），通过大量井震对比标定，地震前积反射是高阻抗、高速砂岩和低阻抗、低速、高伽马的泥岩分界面的地震响应。2021年，通过LY14验证井在地震剖面波峰反射轴处（1474~1521 m）进行45 m验证性连续取心，结果显示主要以粉砂质泥岩和含凝灰质夹层的暗色泥岩为主（图2），验证了地震反射轴与泥岩界面的联系，代表了一次湖泛的泥页岩沉积。结合地震前积反射可识别多个湖泛泥页岩界面，进而对长7段重新进行层序分层^[3,13]。

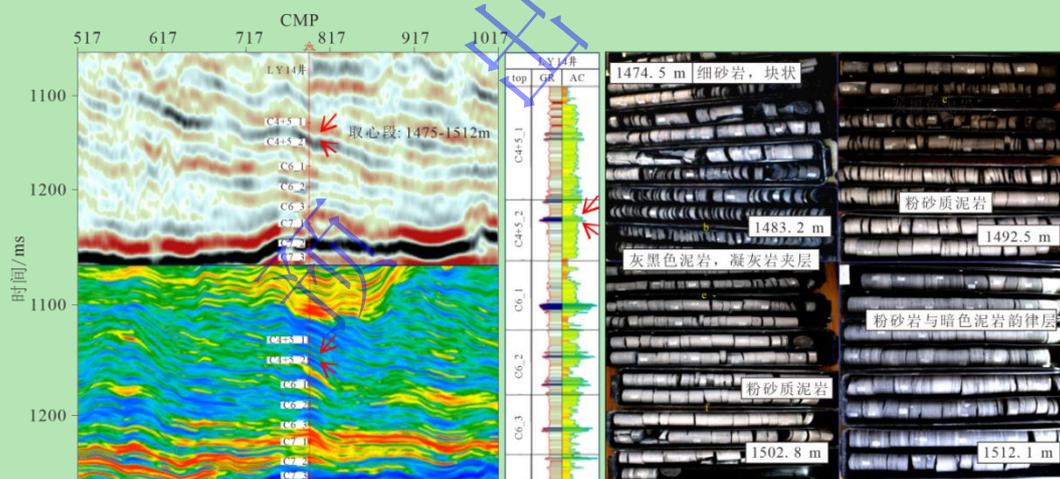


图2 LY14井过井剖面与取心照片

Fig.2 Through-well seismograms of well LY14 and its core photos

图2 中长7段黑色波峰强轴是长7₃亚段的泥质烃源岩（纹层型页岩油储层也在其中），长7₁和长7₂亚段分别对应了长7₃上部的波谷反射（红色代表波谷）和波峰反射（黑色代表波峰），其中夹层型储层横向发育稳定，区域可追踪性强，目前已得到效益规模开发。长7₃段大部分区域在测井伽马曲线显示为高值厚层泥纹型泥页岩，地震剖面为强波峰振幅响应（即长7₃亚段顶界面的砂泥反射），纹层段则在测井伽马曲线上为高度震荡形状^[17]，其单层厚度厘米级，地震无法预测，但整体可视为“箱体”特征，综合地震响应为子波主瓣加宽，

振幅减弱现象。据此,笔者发现沉积期古地形对长7₃亚段纹层型储层展布具有重要控制作用,故而有必要首先开展针对沉积期湖盆古地形的恢复方法研究。

2.2 湖盆古地形地震恢复方法

为开展湖盆前积充填过程与层序划分研究,首先通过地震方法恢复湖盆古地形,在地震剖面上真实反映沉积期前积反射信息(坡折点迁移轨迹、斜坡角度等)。利用三维地震数据体横向连续性强、分辨率高的优势对鄂尔多斯延长组长7段古地形进行恢复。古地形恢复主要分为等时基准面标定、压实恢复和差异构造校正三个步骤^[18]。长7底凝灰岩层全区可追踪,地震响应为全区强波谷特征,所提取的地层沿层切片直接反映湖盆现今构造。受印支运动影响,三叠系顶部地层抬升遭受剥蚀,长1—长2段普遍缺失,部分地区甚至剥蚀到长4+5段。因此,长7之上没有一个稳定的标志层,且晚侏罗—早白垩期燕山运动导致盆地由东倾反转为西倾,残厚法(印模法)、回剥法及沉积学分析等古地形恢复方法适用性较低。地震通常选择延安组延8亚段煤层顶 T_{17} 或者白垩系底 T_k 作为等时基准面,然后进行层拉平恢复长7沉积期古地形,其效果同样欠佳。针对这一难题及盆地构造运动特点,笔者提出了基于地震地层学的沉积古地形恢复方法,对长7古地形进行恢复,为页岩油储层成因、分布规律及甜点分布规律研究提供依据。古地形恢复方法分为三步:(1)精细刻画现今地形特征;(2)确定盆地翻转角度;(3)现今地形逆向翻转恢复古地形。

2.2.1 精细刻画现今地形特征

首先利用三维地震及完钻井资料,精细刻画现在目标层的地形特征。鄂尔多斯盆地中生界延长组长7发育一套暗色泥岩,在盆地内广泛发育,是主要的生油层系,在地震剖面上表现为强反射特征,是主要的标志层,可全盆地对比追踪。通过井震对比合成记录标定,以长7暗色泥岩顶部强波峰反射为标志层,对长7的底精细解释,得到长7底的 T_0 图(图3)。 T_k 是白垩系底部的砂岩反射, T_{17} 是侏罗系延8顶煤反射, T_1 为三叠系顶部与侏罗系底部的不整合面反射,反射特征不明显; T_{17} 是三叠系长7底部凝灰岩层的反射,是盆地级的标志层,横向稳定,在地震剖面上可连续追踪。通过合成记录标定,得到完钻井深度和地震时间关系曲线并计算长7底部的平均层速度 v ,进而获得长7底的现今地形图($0.5vT_0$),陇东地区长7底部地形整体为一平缓西倾单斜,地层倾角0.2~0.6度,无大规模断层发育,小断层断距均在10 m以内(图4)。

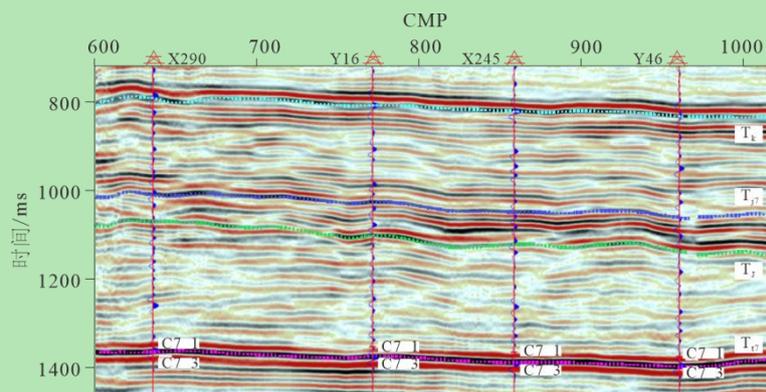


图3 X290-Y46地震地质综合标定剖面

Fig.3 Through-well seismograms from wells X290 to Y46 with geological calibration

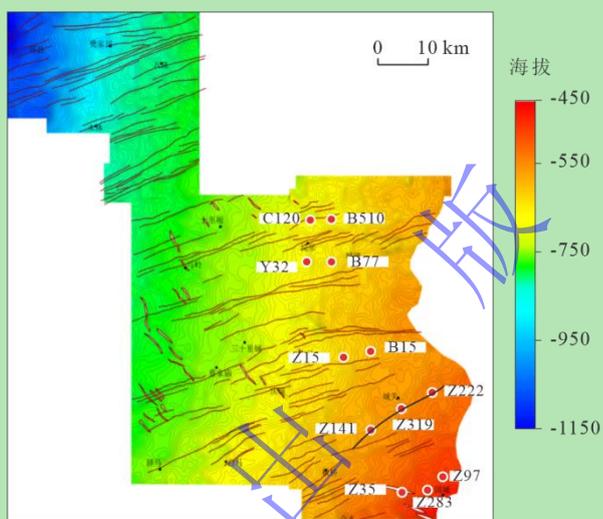


图4 陇东地区长₇底现今构造图

Fig.4 Current structural map of the Chang ₇ member in the Longdong area

2.2.2 确定盆地翻转角度

通过分析长₇底部现今的地形特征，可以明确在长₇沉积期之后，盆地构造演化对长₇地形细节特征影响颇为有限，而最关键影响在于盆地后期经过一次构造翻转，导致地层构造由东倾变为西倾。因此，只需要精确计算出地层的翻转角度，并据此对现今地形进行逆翻转，即可恢复长₇沉积期的古地形。本研究选择长₇亚段至长₃亚段之间的湖盆中心平原水平沉积地层，计算该区域的地层翻转角度（图5），图4区域沿长₇段地层最大倾角方向选择五对直井（图4红色标点），表1详细列出基于这10口钻井资料所计算的现今地层倾角值。结果显示，五个区域的现今地层倾角均在0.4°左右，假设沉积期湖盆中心平原为水平，即估算地层翻转角度为0.4°。

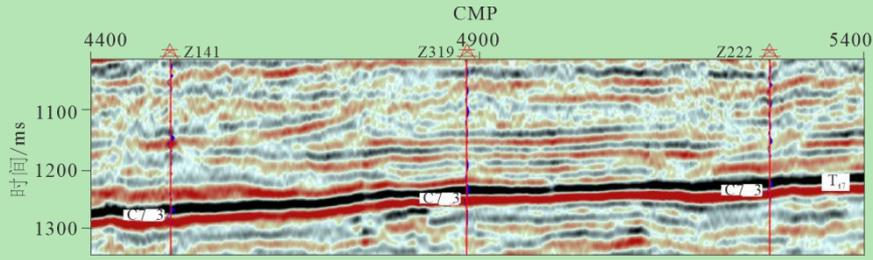


图5 陇东地区地震剖面

Fig.5 Seismograms in the Longdong area

表1 不同位置 T₇ 以上反射轴平行区计算的现今地层倾角表
Table 1 Stratigraphic dip angle calculation using different T₇ reflections in the parallel region

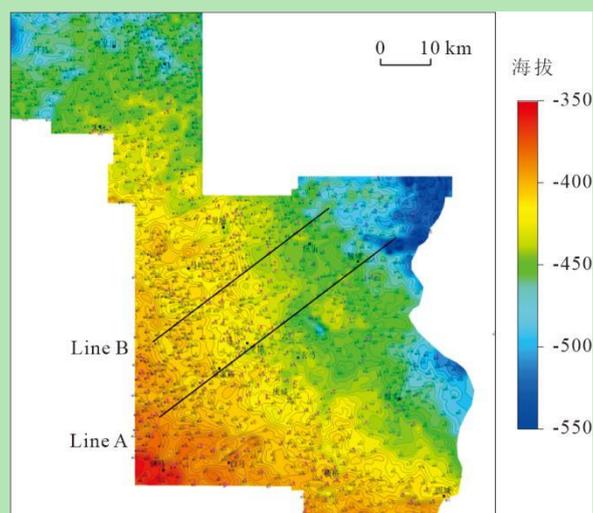
东部井名	西部井名	长7底构造差/m	井间距离/m	现今地层倾角°
C120 井	B510 井	12.58	1705	0.42
Y32 井	B77 井	28.092	3 945.5	0.41
Z15 井	B15 井	18.65	2 760.2	0.39
Z141 井	Z319 井	9.06	1 352.3	0.38
Z35 井	Z283 井	21.06	3011	0.40
平均				0.40

2.2.3 现今地形逆向翻转恢复古地形

以现今长7地形图(图4)东边界垂直最大倾角方向为轴,算出地层翻转0.4度后每个点的深度变化量 $h(x,y)$,利用现今的长7底每个点的深度值 z 减去变化量 $h(x,y)$ 。为进一步精确计算古地形起伏变化,需考虑不同埋深地层压实因素,对最大埋藏进行压实恢复。根据公式(1)可进行压实恢复:

$$h = \frac{v \times (t_f - t_i) \times (1 + k)}{2} \quad (1)$$

式中: v 表示地震反射波的平均速度, t_f 表示某一期前积反射面在地震剖面时间值, t_i 表示某一期前积反射的顶积层在地震剖面时间值, k 为地层压实系数。研究区三角洲前缘的前积体中砂岩占30%~60%,泥岩占40%~70%,所以最终压实系数 k 取值为0.3^[10]。利用上式即恢复延长组长7沉积期古地形真实深度值(图6)。

图 6 陇东地区长 7₃ 沉积期地形图Fig.6 Structural map in depositional period of the Chang 7₃ member in the Longdong area.

鄂尔多斯盆地为典型的克拉通盆地，其构造平缓、盆地本部断层断距较小，长 7 沉积后期没有大的构造运动，因此该方法恢复长 7 底部的古地形时采用一个平均角度。此外，对于沉积后期构造运动形成断距大于 20 m 的断层（断距大于 20 m），还应将断层做拉平处理，研究区域断距较小未作特殊处理。

2.3 前积斜坡期次划分

过去对于前积斜坡研究多为大陆边缘的海相沉积环境，例如阿拉斯加北坡布鲁金斯 Nabushuk 组和 Torok 组大型陆架台地^[19]和罗马尼亚的达契亚盆地^[20]中新世深盆地的 S 型前积斜坡研究。相较而言，鄂尔多斯盆地这类陆相坳陷湖盆前积斜坡发育生长及期次划分并不多见，究其原因在于鄂尔多斯盆地演化过程存在以下特点：（1）对比海相沉积随全球海平面周期性升降稳定沉积且可连续观测 T-R 旋回的特点，延长组长 7 段之后，整体为超长湖退旋回所构成的二级层序^[21]，湖盆填充时间短；（2）晚三叠卡尼期梅雨季沉积物供应充足，短暂湖侵时期仍以进积为主，无湖进砂退的现象，层序边界难以标定^[15]；（3）印支运动导致西南延长组上部遭受剥蚀，地震剖面湖岸线新老地层接触关系不明显，从地层上超接触关系判断识别层序界面困难。目前，研究区将斜坡暗色泥岩作为湖泛泥页岩层序划分依据，同时结合井震标定确定，且存在多种分法^[3,13,14]。基于湖盆古地形分布特征，本文采用一种实用性更强的前积斜坡期次划分方式。

研究区顺物源方向测线 A、B 的剖面（图 7，8，古地形已按照沉积期恢复处理）可见明显的地震前积相，强振幅地震同相轴指示泥页岩层（井震标定+多井取心验证结果），其中西南方向前积下超于长 7 烃源岩上，东北方向靠近湖盆中心为完整的 S 型前积。

第 2.1 节指出长 7₃ 亚段在地震剖面显示为地震波主瓣加宽，振幅减弱的特征，多井剖面

对比发现（图 7，沿长 7₃ 段底部拉平），X213 井、C38 井、X312 井和 Y40 井为四段长 7₃ 亚段纹层型储层发育区，底部黑色泥页岩减薄，为砂泥频繁互层特征，且每段储层横向变化极快，与厚层泥页岩交互发育。以上四井均对应地震剖面上四期前积的底超点，四个纹层段储层同时位于湖盆古地形的局部构造隆起部位。根据以上规律，本文将湖盆古地形的隆—缓组合划分四期前积（图 7），每期均开始于隆起带，结束于缓坡带。顺物源方向另外选取一条地震测线（图 8），这一剖面中 Z501 井、Y30 井、B510 井和 B523 井为四段长 7₃ 亚段纹层型储层发育区，多井对比结果与地震剖面前积底超点完全吻合，且均位于隆起部位，证实上述结论的普适性。从平面角度选取地震最大振幅的均方根属性沿 T₇ 层切片（图 9），蓝色代表振幅较大区域，红色代表振幅较小区域（色标），分别对应富含泥质和砂质的储层。由图可见坡脚末段（长 7₃）纹层型储层在平面上垂物源呈条带状展布，连续性非常好。

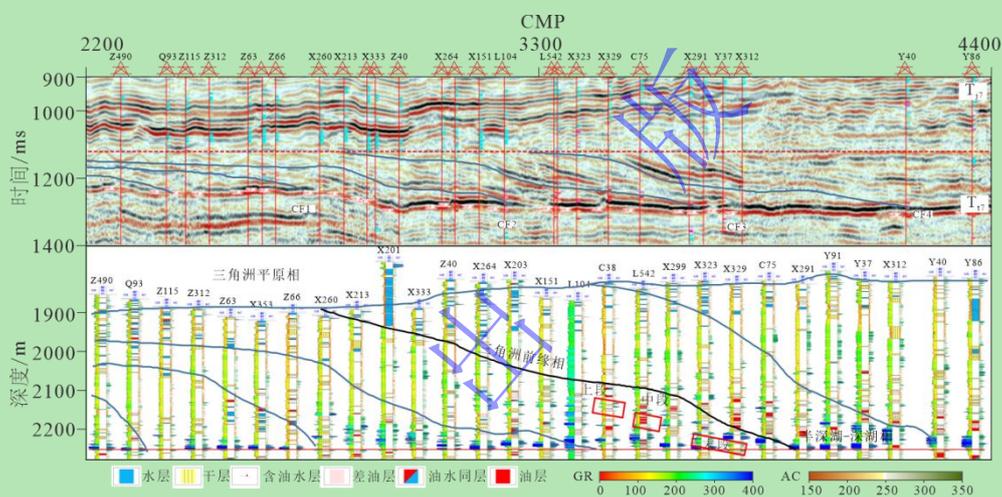


图 7 测线 A 地震剖面及过测线的多井对比

Fig.7 Seismic profile of Line A and multiple well comparison through Line A

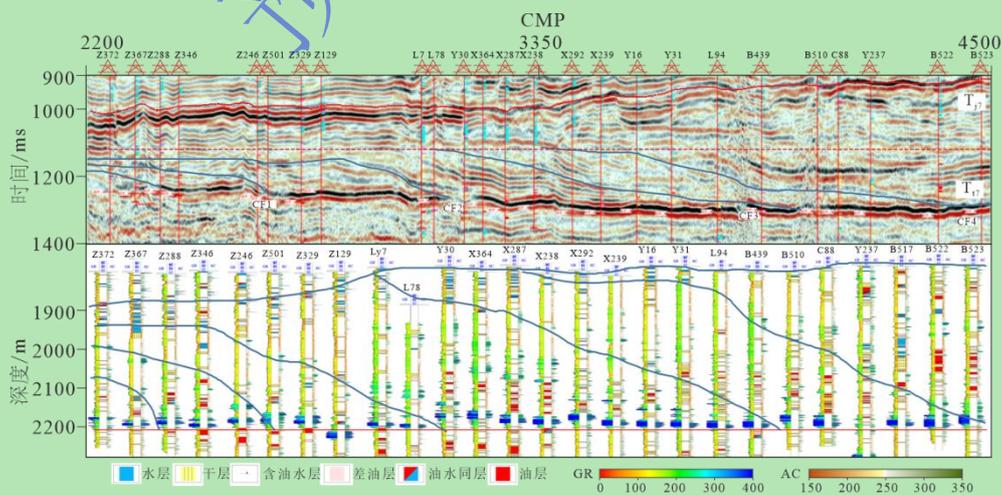
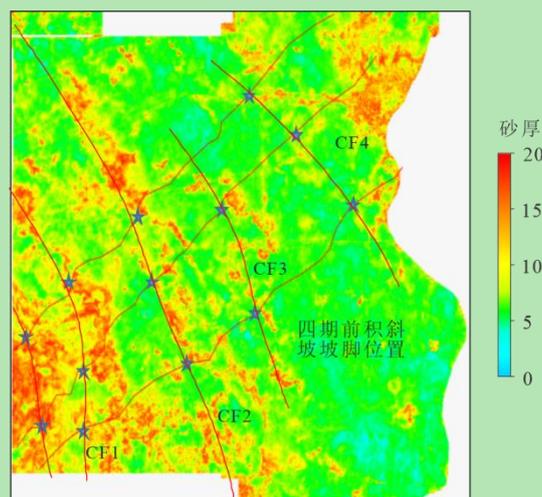


图 8 测线 B 地震剖面及过测线的多井对比

Fig.8 Seismic profile of Line B and multiple well comparison through Line B

图9 长₇₃亚段纹层型储层砂厚图Fig.9 Sand thickness map of the Chang 7₃ sub-member laminated-type reservoir

根据新的分层标准，后续不再沿用传统等厚分层名称（长4+5段和长6段），统一使用CF1~CF4段替换（CF：斜坡Clinoform）。传统分层长3段至长7段之间等厚分层模式在顺物源方向必然会穿过多期三角洲前缘斜坡，每一期前积体均由高部位三角洲水下平原相、中部位三角洲前缘斜坡和低部位前三角洲/深湖相组成，传统长7段三个分层位于前积斜坡的坡脚部位，而长6段大量砂质碎屑流沉积成因^[9]的巨厚砂体则位于坡脚上部，长4+5段位于泥质斜坡，以泥岩为主。长3段则对应于斜坡上部平缓区域，为三角洲平原相富砂沉积。传统等厚分层观点下，长7—长6—长4+5三段组合被认为是一个完整的生储盖^[11]，结合本文研究内容可知，传统等厚分层中原本认为同期沉积地层本质上是同相异期的沉积结果。例如，长4+5段泥岩被认为是在同一时期大规模湖泛的沉积物，其实是进积过程中不同期三角洲前缘斜坡泥质沉积。为统一书写规范且便于与传统分层对应，笔者将长7₃亚段纹层型储层改为斜坡坡脚末段纹层型储层，而原长7₁亚段和长7₂亚段的夹层型储层改为斜坡坡脚上段和中段夹层型储层，对应关系严格按照传统分层投影定义（图7，红色方框所示）。

CF1~CF2期前积体沉积前的湖盆主要以垂向加积为主，这一时期三角洲前缘斜坡滑塌的沉积物还没有进入湖盆中心，属于湖盆演化初始时期；CF3~CF4期前积顶积层相对于CF2期有明显加积，说明此时物源供应充足，湖盆绝对水深增大，三角洲前缘斜坡角度变陡，沉积物滑坡延伸至湖心区域，这一时期处于三角洲快速进积的湖盆演化鼎盛时期；CF4期前积斜坡沉积完成后，湖盆中心开始转为前积与加积混合沉积，这一时期湖水深度在逐渐减小，湖盆随之进入了萎缩期。

2.4 古地形与斜坡控制下的页岩油储层展布规律

延长组前积斜坡的上段控制了三角洲前缘砂体的展布，下段控制了重力流砂体的分布，

而中段过渡带三角洲前缘—重力流成因砂体的转换,主要受湖盆古地形控制。随着三角洲前缘砂体的堆积,上段的稳定性较差,常常形成重力流滑塌,使三角洲前缘沉积物发生两次搬运滑向湖底。因此,湖底主要分布重力流沉积,具有 Shanmugam^[22-23]提出的深水非水道沉积体系的特征,剖面上由滑动、滑塌、砂质碎屑流和浊流组成。由三角洲前缘沉积时期湖盆古地形(图 7, 8)推测,陇东环县、庆城地区,延长组长 7 时期的古水深大于 200 米,属于深水沉积^[21],重力流(滑坡,坍塌,泥石流和浊流)是该区域主要的沉积机制。

选取局部三维(城探 3—盘客地区)地震资料进行精细解释+井约束叠后地震反演^[24-26],采用地层格架约束相控叠前储层反演,结果(图 10,测线位置为图 12a 黑色实线)显示坡脚富砂区为前积斜坡体逐期侧向湖盆中心推进,纵向叠置的结果,斜坡末段(长 7₃亚段)纹层型页岩油储层呈“箱体”形态。鄂尔多斯盆地南部长 7 段砂体叠合图显示庆城三维区湖盆演化经历了“填海造田”式推进,深湖坡脚重力流砂岩富集,斜坡主要以泥质沉积为主,三角洲前缘为河道、河坝砂体,整体呈现“顶底富砂、斜坡富泥”特征。地震可识别的延长组前积反射存在于三角洲和重力流湖底扇(水下扇、浊积扇)。研究区域西南沉积体系长时期存在且沉积物供应充足,在河流平水期,沉积物大量堆积在三角洲前缘致使斜坡坡度增加。延长组时期,受卡尼期梅雨事件影响,盆地经历多次大的洪水期,洪水引发三角洲前缘发生滑塌形成重力流,伴随着河流自携带的大量泥沙以高密度、高流速经过坡折带俯冲进入安静水体。由于砂体粒度较大,大量砂体在三角洲前缘坡折带附近迅速沉积,在坡脚堆积成不规则扇形的砂质沉积。洪水期流体与安静水体密度差,导致泥沙不与原来的水体混合,继续以碎屑流和浊流混合形式沿底部搬运较远距离沉积。洪水期后河流改道,后续沉积在安静水体环境下,泥质物质缓慢沉积覆盖在砂体上,形成了两端砂、中间泥的结构。

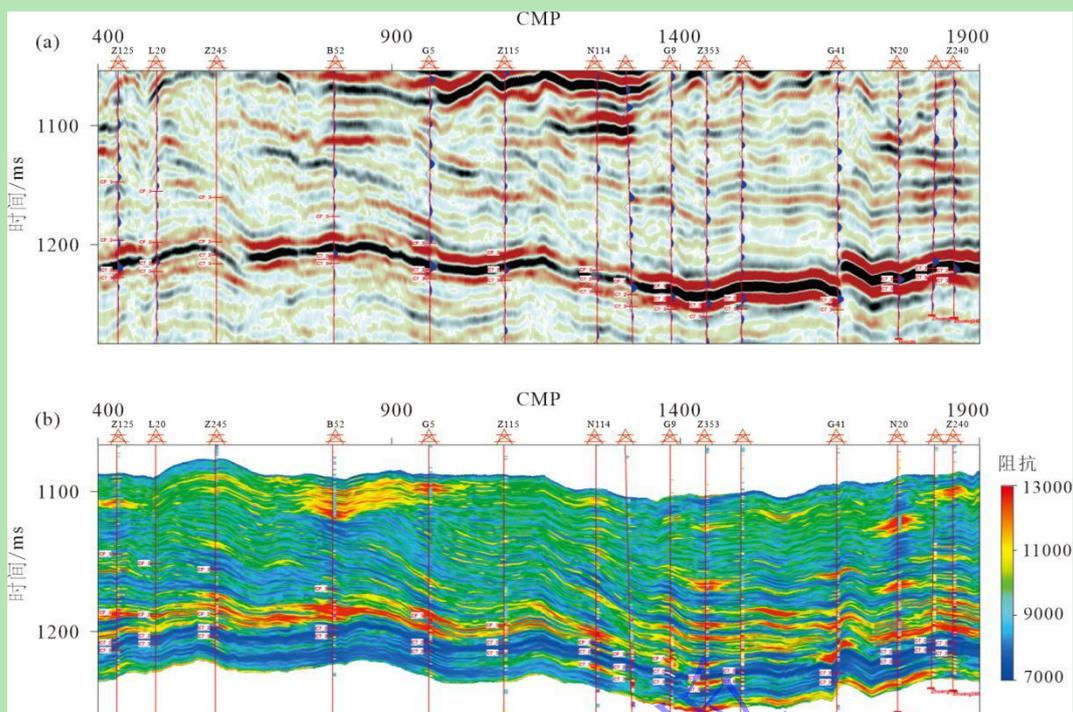


图 10 陇东地区地震剖面 (a) 及纵波阻抗反演结果 (b)

Fig.10 Seismic profile (a) and P-wave impedance inversion result (b) in the Longdong area.

平面上可验证上述观点,陇东三维地震区域主要位于湖盆西南部,古湖盆西南陡东北缓。为直观显示整个斜坡坡折带上的平面沉积特征,选取相邻两个前积斜坡(图 11 中 CF3_1 和 CF3_2 层界面,剖面位于图 12a 的虚线位置)的地震振幅均方根沿层属性开展研究(图 12),红色区域代表富砂,蓝色区域富泥。研究发现西南部前积斜坡坡脚延伸至深湖区方向的重力流沉积主要以非水道砂质碎屑流/浊流沉积为主,平面呈舌状,斜坡上部偶尔可见水道特征,总体为两端砂、中间泥的结构(图 12)。

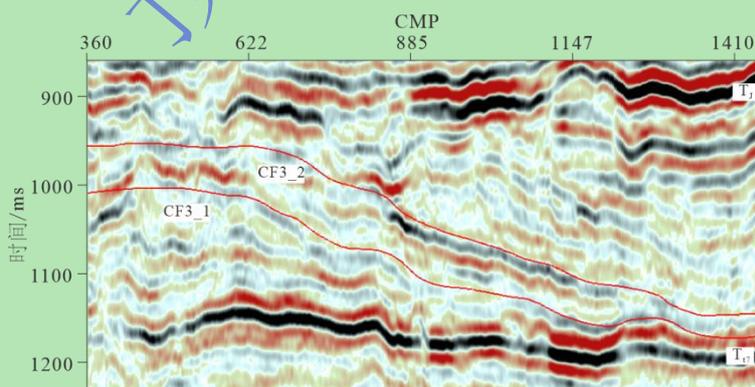


图 11 地震剖面: 红线为解释层位

Fig.11 Seismic profile; red line represents the horizon interpretation

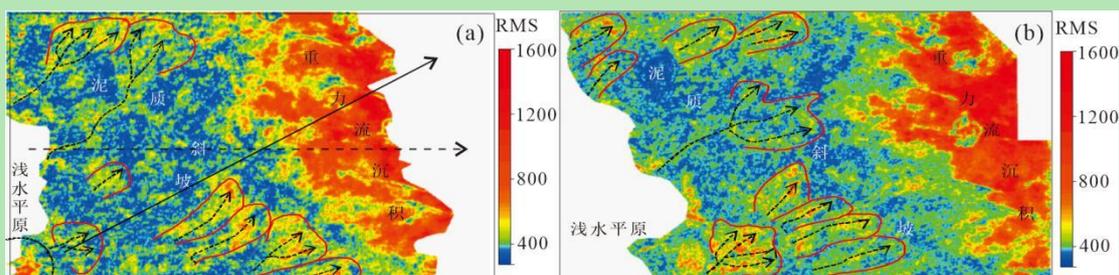


图 12 地震均方根属性:

(a) CF3_1 沿层切片; (b) CF3_2 沿层切片

Fig.12 Slice of root-mean-square amplitude attribute

(a) CF3_1; (b) CF3_2

斜坡是决定砂体分布规律的重要因素,除此之外,页岩油储层展布规律也受到古地形影响。为直观研究古地形对页岩油储层分布规律的影响,将陇东地区连片三维的长7湖盆古地形与斜坡坡脚末段纹层型储层(长7₃)厚度进行叠合显示(图13)。立体图中精细恢复了长7沉积期古地形,古湖盆底形整体西高东低。近物源方向存在一个0.42°~0.60°的陡坡带,湖盆中部存在四个隆起带,其中第二个隆起带规模较大,隆起幅度20~30 m,第三个隆起带规模较小。四个隆起带中间存在三个缓坡带,坡脚末段(长7₃亚段)纹层型储层在平面上分为四个区带,分布于四个隆起带及其前段部位。

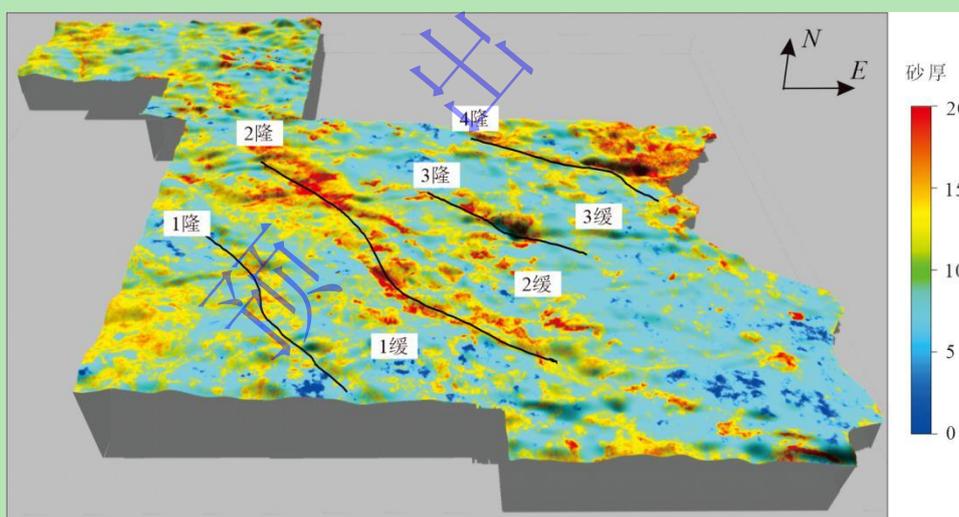


图 13 陇东地区沉积期湖盆构造与长7₃砂厚叠合图

Fig.13 Stacking map of the bottom shape of the lake basin during the sedimentary period and Chang 7₃ sand thickness in the Longdong area

长7中段(长7₁和长7₂亚段)夹层型页岩油储层厚度图(图14a和14b,红色线为古隆起带位置)表明,夹层型页岩油储层在缓坡区广泛沉积,而在隆起带几乎不发育。需要注意的是,第一个隆起带储层极不发育,大多沉积物过路后在第一个缓坡区沉积,储层发育呈条带状在垂物源方向分布;第二个和第三个缓坡区规模较大,长7同时发育页岩油储层,沉积了一个宽10~20 km,延伸长度近100 km的储层条带,也是庆城页岩油大油田主要甜点

区。综上所述，前积斜坡坡脚上段（长 7_1 亚段）、中段（长 7_2 亚段）砂体主要分布在湖盆构造古地形的缓坡带，与隆起带上的末段（长 7_3 亚段）砂体交替分布。夹层型储层呈不发育或者减薄现象（图 14a, b；黑色虚线圆圈指示位置），而相同的区域纹层型储层极为发育（图 14c）。

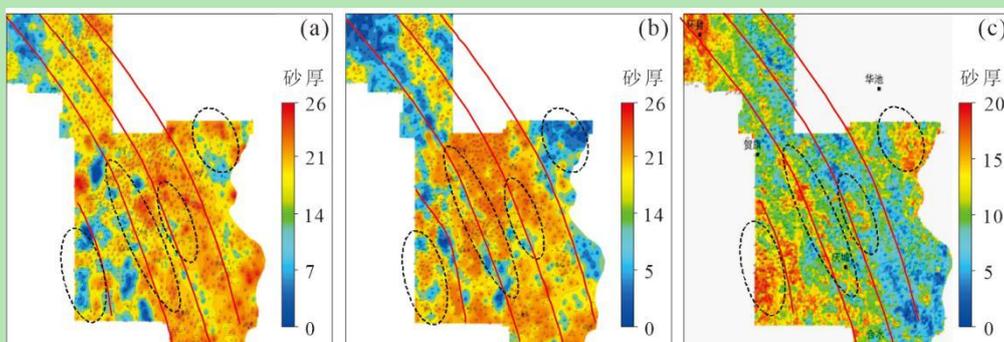


图 14 陇东地区页岩油储层砂厚图

(a) 坡脚上段（长 7_1 亚段）；(b) 坡脚中段（长 7_2 亚段）；(c) 坡脚末段（长 7_3 亚段）

Fig.14 Sand thickness map of the laminated-type reservoir in the Longdong area

3 深水重力流沉积成因与页岩油勘探启示

关于鄂尔多斯湖盆长 7 段页岩油储层成因，目前广泛认可的观点是以深水重力流沉积为主，其中连续性很好的长 7_1 和长 7_2 亚段夹层型储层几乎没有争议。但是长 7_3 纹层型页岩油储层认识仍然不足，主要原因是其横向变化非常快，邻井对比也完全没有相似连续性，难以给出恰当的结论来解释其成因。目前，学者普遍认为长 7_3 储层是等时沉积^[4-7]，即同期异相沉积。本次利用地震开展古地形恢复，结合三角洲前缘沉积底超点和古地形接触关系，以及长 7_3 储层发育于古隆起带和其前段部分规律，证实了长 7_3 储层是同相异期沉积，具体分析如下。

3.1 长 7 段储层沉积相特征与重力流成因分析

目前，学者广泛认可长 7 段页岩油储层主要为深水重力流成因沉积，尤其原长 6 段砂体和长 7_1 、长 7_2 亚段夹层段砂体是典型的坍塌型/洪水型产生的砂质碎屑流和浊流成因。而长 7_3 段储层仍属于深水重力流沉积，但其发育规模小、横向连续性差，具体沉积过程和展布规律尚未有清晰结论。刘显阳等^[8]分析陇东 8 口井岩心信息，总结了五种长 7_3 亚段纹层型储层沉积微相，即滑动—滑塌沉积、砂质碎屑流沉积、混合事件沉积、浊流沉积和异重流沉积。砂质碎屑流是一种介质黏度大、具塑性流变学特征的深水重力流，纵向无明显粒序特征。异重流属于洪水型高于潜入水体密度的稳定浊流^[27]。砂质碎屑流和浊流在斜坡下部存在相互转化关系^[28-29]，同一期重力流密度大，碎屑流在流体底部而浊流分布在顶部和前端^[30]，因此

混合事件本质是碎屑流和浊流转化阶段频繁互层^[31]。

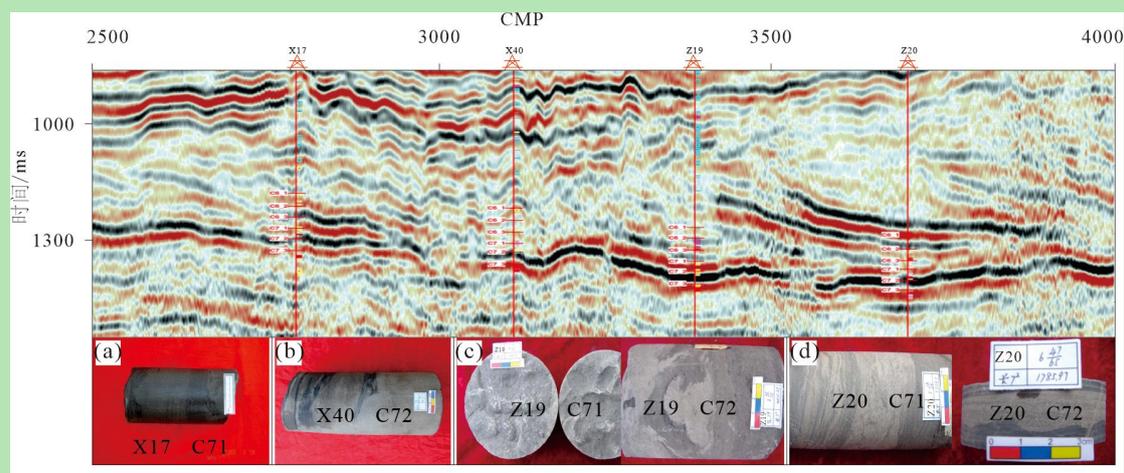


图 15 陇东地区过 X17—X41—Z19—Z20 井地震剖面及岩心照片

(a) 泥火焰；(b) 细砂岩夹泥岩撕裂屑；(c) 重荷模与滑塌沉积构造；(d) 滑塌变形构造与火焰构造

斜坡上、中段取心主要位于夹层型储层发育区，即古地形的缓坡区。斜坡上、中段大块状细砂岩夹杂泥砾和泥岩撕裂屑构造（图 15b、图 16a~c）是典型的砂质碎屑流沉积特征，而斜坡上、中段火焰构造、重荷模和滑塌变形构造是典型的浊流沉积（图 15a, c, d），尤其是火焰和荷模构造，还原了沉积期粘稠的浊流在斜坡底部受自身重力牵引从光滑富水泥质表面滑动沉积的过程。而斜坡末段（长₇亚段）纹层型储层位于局部隆起区，属于滑塌成因的稳态浊流沉积。参考地震剖面与多井对比图（图 7），可见地震剖面前积斜坡泥岩反射同相轴最终在底部与长₇段泥页岩相融合，由于地震垂向分辨率的限制，斜坡砂泥界面与底部泥页岩界面所对应的两个反射波形发生干涉，无法确认泥岩线是否连续。综合测井岩性解释结果可知，长₇段巨厚的泥页岩（测井统计约 10~15 m）底部被大幅入侵，如以 X201 井、Y40 井、C38 井等为代表的泥页岩被完全侵蚀，以及以 X323 井、L104 井等为代表泥页岩底部被入侵侵蚀而顶部保留，入侵段均为砂泥纹层发育的页岩油储层。由此可见，斜坡末段（长₇亚段）纹层型储层以“箱体”形态入侵并镶嵌于古湖底泥页岩之间。

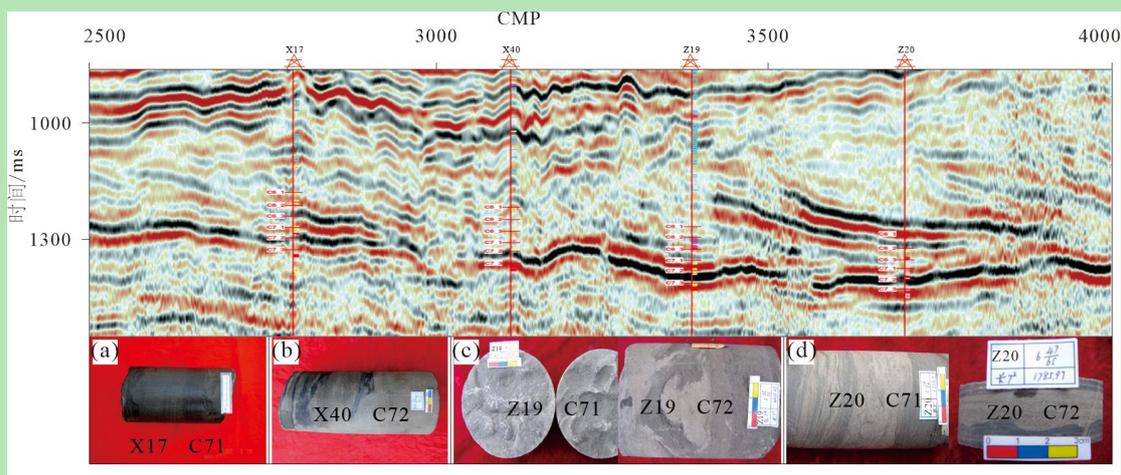


图 15 陇东地区过 X17—X41—Z19—Z20 井地震剖面及岩心照片

(a) 泥火焰；(b) 细砂岩夹泥岩撕裂屑；(c) 重荷模与滑塌沉积构造；(d) 滑塌变形构造与火焰构造

Fig.15 Through-well seismicograms of well X17-X41-Z19-Z20 and its core photos

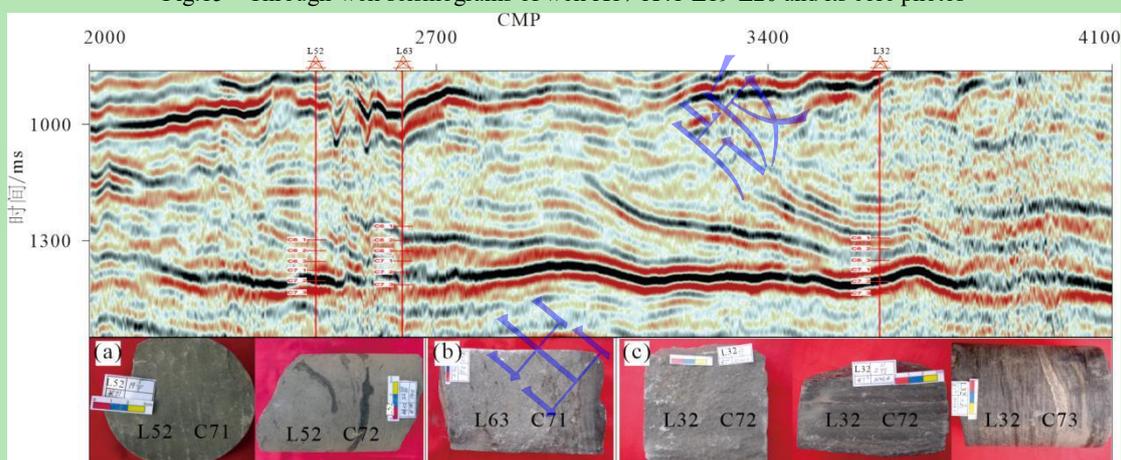


图 16 陇东地区过 L52-L63-L3 井地震剖面及岩心照片

(a) 沟模与细砂岩夹泥岩撕裂屑；(b) 块状砂岩含泥砾；(c) 块状砂岩、鲍马序列与泥岩夹变形砂团

Fig.16 Through-well seismicograms of well L52-L63-L32 and its core photos

基于刘显平等^[8]的沉积微相划分结果，通过地震、地质和测井资料综合分析，认为单一“箱体”长 7₃段纹层型页岩油储层与顺物源斜坡为同期沉积，坡脚上中段（原长 7₁和长 7₂亚段）页岩油储层段砂体为前缘斜坡重力流沉积，是斜坡中下段（原长 6 段）广泛发育的砂质碎屑流同期沉积的延伸，由碎屑流和浊流共同沉积。坡脚末段（原长 7₃亚段）的纹层型页岩油储层为泥页岩与稳态浊流频繁互层的混合层，砂岩主要来自浊流，泥质来自浊流和底部暗色泥岩，不同“箱体”储层是不同期前积斜坡的沉积结果。该结论阐释了长 7₃亚段纹层型页岩油储层岩性组合复杂，横向变化快、井间差异大的原因。

针对坡脚末段（长 7₃亚段）泥岩减薄，纹层段发育的特征，结合古地形构造，笔者认为隆起带长 7 黑色泥岩减薄成因是碎屑流/浊流在湖底流动遇到隆起带后发生了侵蚀。根据岩心显示的槽模、底荷模等泄水构造可知湖底泥岩富含水，隆起区遭到碎屑流/浊流侵蚀后

发生液化悬浮然后再沉降，最终形成黑色泥岩与砂质的频繁互层。鄂尔多斯盆地前积斜坡末端单期纹层型页岩油深水重力流沉积经历三个过程：I阶段，三角洲前缘堆积砂体发生滑动滑塌，顺着斜坡发生塑性形变形成砂质碎屑流（图 17a）。当流体路过隆起带时，早期深湖沉积的富水泥岩被冲散为悬浮态，发生碎屑流浊流混合沉积事件；II阶段，隆起带近斜坡区填平补齐后，下一期滑塌/洪水/地震诱导的重力流事件会越过隆起带向缓坡带发生沉积（图 17b）；III阶段，前两期沉积结束，形成现今的纹层型页岩油储层（图 17c）。泥页岩与碎屑流浊流混合沉积事件解释了夹层型页岩油水平井开发中经常钻遇薄泥页岩夹层的成因。此外，湖盆西南部位斜坡沉积的泥页岩规模小，且在湖盆另一侧无对称泥页岩沉积，由此推断斜坡的泥页岩沉积也是长 7 泥页岩被重力流砂体侵蚀再沉降形成的，而非短期湖侵沉积产物。对研究区 LY14 井长 4+5 段泥页岩取锆石进行 U-Pb 测年分析，发现其与长 7₃段野外露头的测年结果一致（长 4+5 段：1 479 m，241.07 Ma；长 7₃段：摩天沟露头，241.06 Ma），进一步验证了此结论。

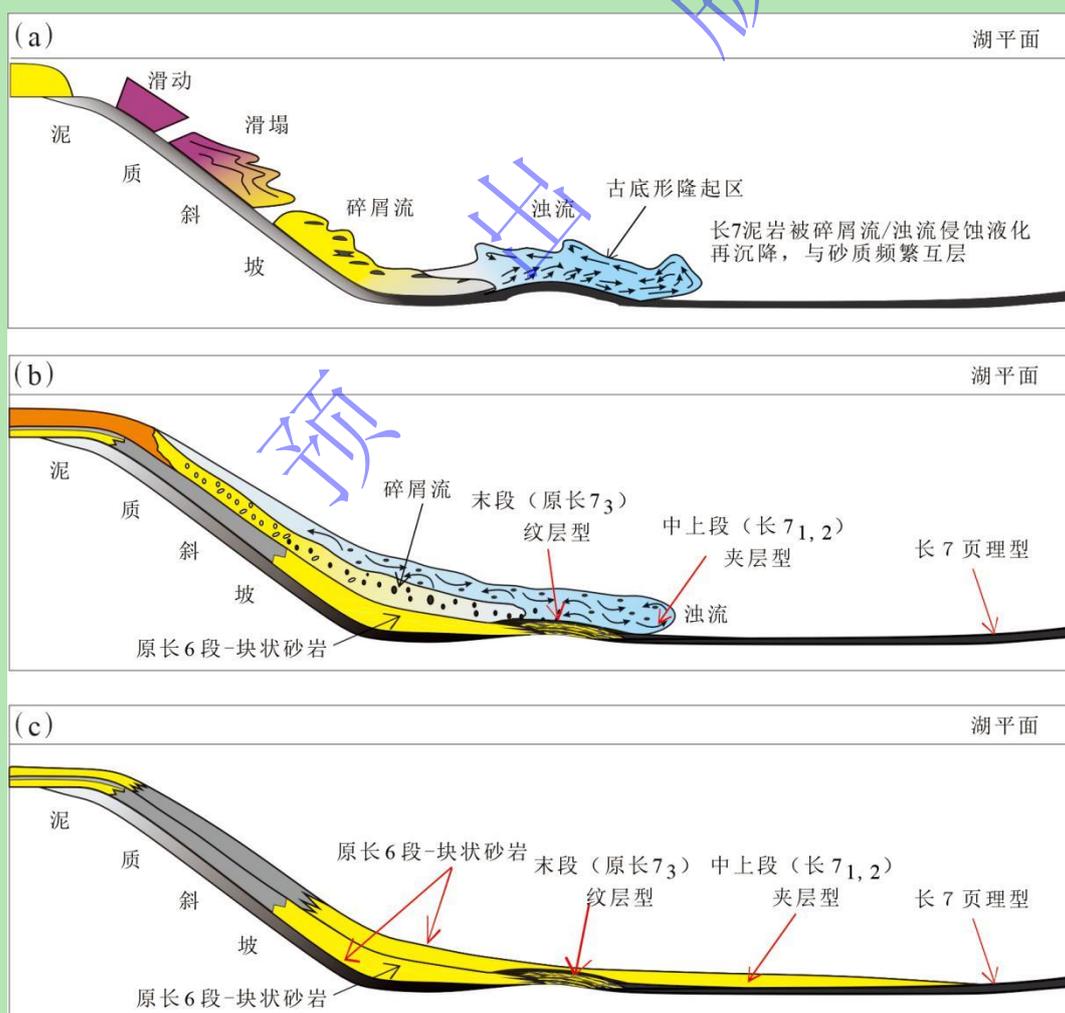


图 17 前积斜坡末端页岩油深水重力流沉积模式

(a) I阶段滑塌型碎屑流沉积侵蚀长7泥岩；(b) II阶段洪水型碎屑流沉积填平补齐；(c) III阶段形成页岩纹层

Fig.17 Deep-water gravity flow sedimentary mode of shale oil at the bottom of the clinoforms

3.2 勘探开发启示

本研究提供了一种新的古地形诱导的页岩油储层勘探思路。例如，陇东以北姬塬地区（湖盆西北部）长7₃亚段泥纹型储层是下一个勘探重点层系，相较于陇东地区纹层型储层，泥纹型储层泥质含量更高，其原因在于印支运动时期湖盆西北方向物源供给较弱，陆源碎屑较少。未来，可结合沉积期古地形划分隆、缓组合，首先在缓坡带寻找分布广、物性好的夹层型页岩油储层，继而在隆起带上的前积底超点处针对性研究泥纹型页岩油储层分布规律，并结合地质、测井综合评价储层类型。

研究区斜坡坡脚下段（长7₃亚段）纹层段为孤立散装含油“箱体”，而斜坡中下部（长6段）和坡脚上、中段（长7_{1,2}亚段）砂体为整装含油。这一认识指示坡脚前端及末端页岩油储层变化快，目前已在水平井开发中得到印证。下一步可考虑沿前积斜坡倾向钻探，探索地质—地震—测井三位一体多手段协作模式，形成页岩油勘探开发新思路。沿着前积倾向钻探，不仅能够实现传统分层中长6、长7_{1,2}和长7₃段立体勘探和开发，提高开发经济效益，还可实现不同层系的储量区相连，进一步扩大规模储量。此外，沿着前积走向水平钻探的方式可能会穿过多期三角洲前缘砂体，这无疑对斜坡区地质条件认识、水平井工程开发导向设定了更高的要求。因此，探索沿前积层砂岩含油储层的分布特征，具有科学研究和勘探实践两重意义。

4 结论

(1) 陇东地区延长组湖盆长7段后经历了多期前积体侧向进积填充到垂向加积填平补齐的过程。

(2) 斜坡坡脚末段（长7₃亚段）纹层型储层在平面上垂直物源方向呈条带状展布，烃源岩厚度相对减薄。主要发育于四期前积斜坡坡脚及延伸部位，与坡脚上中段（长7_{1,2}亚段）夹层型储层在平面上交替发育。

(3) 页岩油储层段砂体均为深水重力流成因，且受控于湖盆古地形。古隆起对应坡脚末段（长7₃）纹层型，古缓坡对应坡脚上中段（长7_{1,2}亚段）夹层型，由于浊流侵蚀液化再沉降，长7段纹层型储层内部结构、组分复杂，横向变化快，后续可作为“箱体”进行勘探开发。

致 谢 感谢审稿专家百忙之中对本文提出的宝贵意见，为提升论文水平和质量给予巨大的帮助。

参考文献 (References)

- [1] 刘化清, 袁剑英, 李相博, 等. 鄂尔多斯盆地延长期湖盆演化及其成因分析[J]. 岩性油气藏, 2007, 19(1): 52-56. [Liu Huaqing, Yuan Jianying, Li Xiangbo, et al. Lake Basin evolution of Ordos Basin during Middle-Late Triassic and its origin analysis[J]. Lithologic Reservoirs, 2007, 19(1): 52-56.]
- [2] 张才利, 刘新社, 杨亚娟, 等. 鄂尔多斯盆地长庆油田油气勘探历程与启示[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(3): 253-263. [Zhang Caili, Liu Xinshe, Yang Yajuan, et al. Petroleum exploration history and enlightenment of Changqing oilfield in Ordos Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(3): 253-263.]
- [3] 惠潇, 侯云超, 喻建, 等. 大型陆相拗陷湖盆深湖区前积型地震地层特征及砂体分布规律: 以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组中段为例[J]. 沉积学报, 2022, 40(3): 787-800. [Hui Xiao, Hou Yunchao, Yu Jian, et al. Progradational seismic strata features and distribution of sandstone in the deep-water area of a large-scale Lacustrine Depression Basin: A case study of the Middle Yanchang Formation in Longdong, Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(3): 787-800.]
- [4] 付金华, 王龙, 陈修, 等. 鄂尔多斯盆地长7页岩油勘探开发新进展及前景展望[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(5): 1-14. [Fu Jinhua, Wang Long, Chen Xiu, et al. Progress and prospects of shale oil exploration and development in the seventh member of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(5): 1-14.]
- [5] 李士祥, 郭芪恒, 周新平, 等. 鄂尔多斯盆地延长组7段3亚段页岩型页岩油储层特征及勘探方向[J]. 石油学报, 2022, 43(11): 1509-1519. [Li Shixiang, Guo Qiheng, Zhou Xinping, et al. Reservoir characteristics and exploration direction of pure shale-type shale oil in the 3rd sub-member, 7th member of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(11): 1509-1519.]
- [6] 付金华, 牛小兵, 李明瑞, 等. 鄂尔多斯盆地延长组7段3亚段页岩油风险勘探突破与意义[J]. 石油学报, 2022, 43(6): 760-769, 787. [Fu Jinhua, Niu Xiaobing, Li Mingrui, et al. 2022. Breakthrough and significance of risk exploration in the 3rd sub-member, 7th member of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(6): 760-769, 787.]
- [7] 安成, 柳广弟, 孙明亮, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7₃亚段页岩纹层发育特征及类型划分[J]. 石油科学通报, 2023, 8(2): 125-140. [An Cheng, Liu Guangdi, Sun Mingliang, et al. Development characteristics and classification of shale laminae in the Chang 7₃ sub-member of the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. Petroleum Science Bulletin, 2023, 8(2): 125-140.]
- [8] 刘显阳, 郭雯, 刘江艳, 等. 鄂尔多斯盆地湖盆中部长7₃亚段深水砂质沉积特征及勘探前景[J]. 地球科学, 2023, 48(1): 279-292. [Liu Xianyang, Guo Wen, Liu Jiangyan, et al. Characteristics and exploration prospects of deep-water sandstone reservoir of Chang 7₃ sub-member, Ordos Basin[J]. Earth Science, 2023, 48(1): 279-292.]
- [9] 李相博, 刘化清, 完颜容, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组砂质碎屑流储集体的首次发现[J]. 岩性油气藏, 2009, 21(4): 19-21. [Li Xiangbo, Liu Huaqing, Wanyan Rong, et al. First discovery of the sandy debris flow from the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2009, 21(4): 19-21.]
- [10] 李慧琼, 蒲仁海, 王大兴, 等. 鄂尔多斯盆地延长组地震前积反射的地质意义[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(5): 985-996. [Li Huiqiong, Pu Renhai, Wang Daxing, et al. Progradational reflection from lacustrine Yanchang Formation in Ordos Basin, China[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014, 49(5): 985-996.]
- [11] 冯雪, 高胜利, 刘永涛. 鄂尔多斯盆地延长组前积反射结构及地质意义[J]. 河北地质大学学报, 2021, 44(6): 25-32. [Feng Xue, Gao Shengli, Liu Yongtao. Progradational reflection structure of Yanchang Formation in Ordos Basin and its geological significance[J]. Journal of Hebei GEO University, 2021, 44(6): 25-32.]
- [12] 冯雪, 高胜利, 刘永涛, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组三角洲前缘前积结构特征[J]. 岩性油气藏, 2021, 33(6): 48-58. [Feng Xue, Gao Shengli, Liu Yongtao, et al. Characteristics of delta front progradation structure of Yanchang Formation in Longdong area, Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2021, 33(6): 48-58.]
- [13] 夏勇, 惠潇, 赵俊峰, 等. 鄂尔多斯盆地西南庆城地区延长组前积斜坡生长及其控砂规律[J/OL]. 沉积学报. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2022.150>. [Xia Yong, Hui Xiao, Zhao Junfeng, et al. Cliniform growth and its controls on the distribution of sandstone in the Yanchang Formation, Qingcheng area, southwestern Ordos Basin[J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2022.150>.]
- [14] 惠潇, 侯云超, 陈修, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组层序地层再认识及地质意义[J]. 沉积学报. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2023.064>. [Hui Xiao, Hou Yunchao, Chen Xiu, et al. New insight into sequence stratigraphy

and its geological significance of Yanchang Formation in Longdong area, Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2023.064>.]

[15] 李相博, 朱如凯, 惠潇, 等. 晚三叠世卡尼期梅雨事件(CPE)在陆相盆地中的沉积学响应: 以鄂尔多斯盆地延长组为例[J]. *沉积学报*, 2023, 41(2): 511-526. [Li Xiangbo, Zhu Rukai, Hui Xiao, et al. Sedimentological response of a Lacustrine Basin to the Late Triassic Carnian Pluvial Episode (CPE): Case study from the Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023, 41(2): 511-526.]

[16] Carroll A R. Xenocoformities and the stratigraphic record of paleoenvironmental change[J]. *Geology*, 2017, 45(7): 639-642.

[17] 张小莉, 冯乔, 孙佩, 等. 鄂尔多斯盆地延长组高自然伽马砂岩储层特征[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(1): 205-213. [Zhang Xiaoli, Feng Qiao, Sun Pei, et al. Characteristics of high gamma ray reservoir of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(1): 205-213.]

[18] 刘永涛, 刘池洋, 周义军, 等. 双界面地震层拉平的古地貌恢复技术及应用: 以鄂尔多斯盆地天环坳陷为例[J]. *石油地球物理勘探*, 2019, 54(3): 656-666. [Liu Yongtao, Liu Chiyang, Zhou Yijun, et al. Palaeo-geomorphology restoration with double-interface seismic layer leveling: An example of Tianhuan Depression in Ordos Basin[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2019, 54(3): 656-666.]

[19] Bhattacharya S, Verma S. Seismic attribute and petrophysics-assisted interpretation of the Nanushuk and Torok Formations on the North Slope, Alaska[J]. *Interpretation*, 2020, 8(2): SJ17-SJ34.

[20] Stoica, Lazăr I, Krijgsman W, et al. Paleoenvironmental evolution of the East Carpathian foredeep during the late Miocene-early Pliocene (Dacian Basin; Romania)[J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 103: 135-148.

[21] 熊林芳, 刘池洋, 王建强, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组沉积层序研究现状及问题[J]. *地层学杂志*, 2015, 39(3): 345-350. [Xiong Linfang, Liu Chiyang, Wang Jianqiang, et al. Depositional sequence of the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2015, 39(3): 345-350.]

[22] Shanmugam G. High-density turbidity currents: Are they sandy debris flows?[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1996, 66(1): 2-10.

[23] Shanmugam G. 50 years of the turbidite paradigm (1950s-1990s): Deep-water processes and facies models-a critical perspective[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2000, 17(2): 285-342.

[24] 王大兴, 高静怀, 李幼铭, 等. XF地区中生界砂岩储层预测技术及应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2004, 39(5): 559-564. [Wang Daxing, Gao Jinghuai, Li Youming, et al. Mesozoic sandstone reservoir prediction technique and application in XF area[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2004, 39(5): 559-564.]

[25] 张杰, 赵德勇, 赵玉华, 等. 致密薄储层预测技术及在马岭油田的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2013, 48(增刊1): 47-52. [Zhang Jie, Zhao Deyong, Zhao Yuhua, et al. Tight thin reservoir prediction in Maling oilfield[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2013, 48(Suppl.1): 47-52.]

[26] 李明瑞, 王学刚, 于波, 等. 针对目标的非地震解释技术在鄂尔多斯盆地西缘的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2023, 58(6): 1481-1488. [Li Mingrui, Wang Xuegang, Yu Bo, et al. Non-seismic target-oriented interpretation techniques and application in the western edge of Ordos Basin[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2023, 58(6): 1481-1488.]

[27] 杨仁超, 金之钧, 孙冬胜, 等. 鄂尔多斯晚三叠世湖盆异重流沉积新发现[J]. *沉积学报*, 2015, 33(1): 10-20. [Yang Renchao, Jin Zhijun, Sun Dongsheng, et al. Discovery of hyperpycnal flow deposits in the Late Triassic Lacustrine Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(1): 10-20.]

[28] Shanmugam G. The Bouma sequence and the turbidite mind set[J]. *Earth Science Reviews*, 1997, 42(4): 201-229.

[29] 李相博, 陈启林, 刘化清, 等. 鄂尔多斯盆地延长组3种沉积物重力流及其含油气性[J]. *岩性油气藏*, 2010, 22(3): 16-21. [Li Xiangbo, Chen Qilin, Liu Huaqing, et al. Three types of sediment gravity flows and their petroliferous features of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2010, 22(3): 16-21.]

[30] 邹才能, 赵政璋, 杨华, 等. 陆相湖盆深水砂质碎屑流成因机制与分布特征: 以鄂尔多斯盆地为例[J]. *沉积学报*, 2009, 27(6): 1065-1075. [Zou Caineng, Zhao Zhengzhang, Yang Hua, et al. Genetic mechanism and distribution of sandy debris flows in terrestrial Lacustrine Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(6): 1065-1075.]

[31] 操应长, 杨田, 王艳忠, 等. 深水碎屑流与浊流混合事件层类型及成因机制[J]. 地学前缘, 2017, 24 (3): 234-248. [Cao Yingchang, Yang Tian, Wang Yanzhong, et al. Types and genesis of deep-water hybrid event beds comprising debris flow and turbidity current[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(3): 234-248.]

Seismic Progradational Reflection and Shale Oil Reservoir Distribution Patterns of the Yanchang Formation in the Ordos Basin

ZHANG Jie^{1,2}, LI QingYang¹, WANG YongGang^{1,2}, GE BingYu¹, DING Qian¹, YANG Chao¹, DUAN PeiRan¹

1 Research Institute of Exploration and Development, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710018, China

2 National Engineering Laboratory for Low Permeability Oil & Gas Field Exploration and Development, Xi'an 710018, China

Abstract: [Objective] During the Late Triassic depositional period of the Chang 7 member of the Yanchang Formation in the Ordos Basin, a set of continuously traceable shales was deposited, and the shale is currently the main stratigraphic strata for unconventional oil exploration and development. The laminated-type shale oil reservoir at the Chang 7₃ sub-member features fast lateral changing, which introduces problems such as unclear reservoir distribution, high exploration difficulty, and low drilling rate. Therefore, it is urgent to study and clarify the distribution pattern of laminated-type shale oil reservoirs. [Methods] First, through the latest three-dimensional (3D) seismic data, the stratigraphic dip flipping method was used to recover sedimentary paleogeomorphology. Then, we marked the seismic reflection of lacustrine mudstones, identified seismic stratigraphic comparison and division, and proposed four-stage progradational clinoforms and distribution patterns of shale oil reservoirs based on sedimentary paleogeomorphology. [Results and Conclusions] Combining seismic progradational sequences with palaeotopography of the lake basin, the distribution pattern of the Chang 7₃ sub-member shale oil reservoir and the genesis of shale oil gravity flow sedimentation have been clarified. The laminated-type shale oil reservoir in the Chang 7₃ sub-member is a gravity flow deposit developed on the lake paleo-uplift, located at the end of the progradational clinoforms, with poor connectivity and complex stacking relationships. In actual production, it should be explored as a "box body". The above perspective has assisted in the deployment of risky well locations and exploration discoveries for laminated-type shale oil reservoirs. It provides technical support for the scale and efficiency development of interbedded-type shale oil reservoirs.

Key words: 3D Seismic Data; Progradational Reflection; Shale Oil; Reservoir Distribution; Gravity Flow; Ordos Basin