石油与天然气地质
OIL & GAS GEOLOGY

文章编号:0253－9985(XXXX)XX－0001－20　　doi:10.11743/oggXXXXXX01

鄂尔多斯盆地环县地区延长组中段三角洲前积体地震沉积学研究

周雅妮[1,2,3],张文选[4,5],官　伟[5,6],张　三[4],徐一鸣[1,2],丁　勇[4,5],杨喜博[1,2],朱筱敏[1,2]

[1. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249;2. 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室,北京 102249;3. 中国石油勘探开发研究院西北分院,甘肃 兰州 730020;4. 中国石油 长庆油田分公司 勘探事业部,陕西 西安 710018;5. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室,陕西 西安 710018;6. 中国石油 长庆油田分公司 勘探开发研究院,陕西 西安 710018]

摘要:地震前积体的地层切片沉积解释一直是地质学与地球物理学交叉领域的研究热点。以鄂尔多斯盆地环县地区延长组中段为对象,基于新采集的三维地震、测井及大量岩心资料,综合运用层序地层学与地震沉积学方法,系统开展了以典型前积体为核心的地震沉积学研究。利用INPEFA曲线与最大熵频谱分析(MESA)技术,建立了具有等时意义的高精度层序地层格架(SQ1—SQ3),揭示了缓慢湖退与快速湖侵交替的基准面变化过程。通过90°相位转换、地层切片及地震波形指示反演等关键技术,精细刻画了辫状河三角洲、滨浅湖和深水重力流三大类沉积体系的时-空演化。研究表明,早期(SQ1)湖平面缓慢下降,形成底平-顶凸型前积体,可容空间相对过剩(可容空间体积/物源供给量比值$A/S>1$),砂体分布受物源供给控制,呈西厚、东薄特征;中期(SQ2)湖平面快速下降,发育透镜状前积体及完整重力流序列,物源供给仍占主导,形成“两端富砂、中部富泥”的格局;晚期(SQ3)湖盆萎缩,形成顶平-底凸型前积体,可容空间不足($A/S<1$),可容空间转化为主控因素,砂体展布逆转为东厚、西薄。该演化模式不仅为鄂尔多斯盆地延长组提供了新的沉积模型,也为其他相似湖盆的前积体成因机制研究与岩性圈闭预测提供了可类比的方法参考。

关键词:前积反射;岩相分析;地震波形指示反演;地震沉积学;三叠系延长组;环县地区;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE121.3　　**文献标识码**:A

Seismic sedimentology of deltaic clinothems in the middle Yanchang Formation, Huanxian area, Ordos Basin

ZHOU Yani[1,2,3], ZHANG Wenxuan[4,5], GUAN Wei[5,6], ZHANG San[4], XU Yiming[1,2], DING Yong[4,5], YANG Xibo[1,2], ZHU Xiaomin[1,2]

[1. *College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing* 102249, *China*; 2. *State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing* 102249, *China*; 3. *PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development Northwest, Lanzhou* 730020, *China*; 4. *Exploration Division, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an, Shaanxi* 710018, *China*; 5. *National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-Permeability Oil & Gas Fields, Xi'an, Shaanxi* 710018, *China*; 6. *Exploration and Development Research Institute, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an, Shaanxi* 710018, *China*]

Abstract: Sedimentological interpretation of stratigraphic slices of seismic clinothems has long been a research focus in integrated geology-geophysics study. Focusing on the middle Yanchang Formation in the Huanxian area, Ordos Basin, this study systematically investigated representative clinothems using sequence-stratigraphic and seismic-sedimentological methods, while integrating newly acquired three-dimensional (3D) seismic data, well logs, and extensive core data. Integrated prediction error filter analysis (INPEFA) curves and maximum entropy spectral analysis (MESA) were used to establish a high-resolution chronostratigraphic framework (SQ1–SQ3), revealing base-level changes characterized by alternating slow lacustrine regression and rapid lacustrine transgression. Key techniques,

收稿日期:2026-01-20;**修回日期**:2026-03-22。
第一作者简介:周雅妮(2000—),女,硕士研究生,层序地层学与地震沉积学。**E-mail**: ynzhou@student.cup.edu.cn。
通信作者简介:朱筱敏(1960—)男,博士、教授,沉积地质学与层序地层学。**E-mail**: xmzhu@cup.edu.cn。
基金项目:国家自然科学基金项目(42272110)。

including 90°-phase shift, stratigraphic slicing, and seismic waveform indication inversion, were applied to finely depict the spatiotemporal evolution of three major depositional systems: braided-river delta, shore-shallow-lacustrine, and deep-water gravity-flow systems. As indicated by the research results, during the early stage (SQ1), lake level fell slowly, forming flat-bottomed, convex-topped clinothems. Accommodation exceeded sediment supply (A/S > 1), and sand-body distribution was controlled by sediment supply (S), with sand bodies thicker in the west and thinner in the east. During the middle stage (SQ2), lake level fell rapidly, and lenticular clinothems and a complete gravity-flow succession developed. Sediment supply remained dominant, resulting in a pattern of sand enrichment at both ends and mud enrichment in the middle. During the late stage (SQ3), the lacustrine basin contracted, forming flat-topped, convex-bottomed clinothems. Accommodation was insufficient relative to sediment supply (A/S < 1), and accommodation (A) became the main controlling factor, reversing the sand-body distribution pattern, with thicker sand bodies in the east and thinner ones in the west. This evolutionary model not only provides a new depositional model for the Yanchang Formation in the Ordos Basin but also provides a methodological reference for investigating the genetic mechanisms of clinothems and predicting lithologic traps in similar lacustrine basins.

Key words: progradational reflection, lithofacies analysis, seismic waveform indication inversion, seismic sedimentology, Triassic Yanchang Formation, Huanxian area, Ordos Basin

引用格式:周雅妮,张文选,官伟等. 鄂尔多斯盆地环县地区延长组中段三角洲前积体地震沉积学研究[J]. 石油与天然气地质,DOI:10.11743/oggXXXXXX01.

ZHOU Yani, ZHANG Wenxuan, GUAN Wei, et al. Seismic sedimentology of deltaic clinothems in the middle Yanchang Formation, Huanxian area, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, DOI:10.11743/oggXXXXXX01.

地震沉积学是在地震地层学和层序地层学基础上发展起来的地质学与地球物理学交叉学科,在薄层砂体刻画、储层表征及岩性圈闭预测等方面发挥着重要作用[1]。自20世纪90年代由曾洪流教授[2]提出以来,其理论体系与技术方法不断丰富和完善。通过90°相位调整、地层切片和分频处理等核心技术,地震沉积学能够充分利用三维地震资料的横向高分辨率优势,有效识别薄层砂体,精细刻画其平面展布形态、沉积过程及演化历史,在盆地古地貌恢复、沉积体系分析和储层预测中展现出显著优势[3],已成为当前沉积学研究的前沿领域,并广泛应用于国内外多个盆地的油气勘探实践中[4-10]。

鄂尔多斯盆地是中国重要的油气富集区,三叠系延长组作为主力油层发育多套生-储-盖组合。然而,长期以来受"整体升降、平起平落"传统地质认识的影响,地层划分主要采用"标志层约束、大体等厚"的方案[11-12],将不同沉积相带和底形背景下的地层均视为近似等厚,严重制约了对沉积体系分布规律的认识。尽管前人基于二维地震资料开展了大量层序地层学研究,但因黄土塬区地震资料品质较差、井间对比多解性强,原有地层格架仍未突破等厚分层思路的局限。近年来,随着三维地震采集技术的突破,覆盖环县地区约1 000 km^{2}的高品质地震数据揭示出延长组广泛发育"S"形及斜交型前积反射结构,呈现出与传统模式显著不同的沉积特征。尤其在陇东地区延长组中、上段,砂-泥岩薄互层十分发育,常规手段的高精度砂体预测面临较大挑战。为此,本文基于最新三维地震、测井及大量岩心资料,以前积结构较为典型的环县地区延长组中段为研究对象,运用地震沉积学方法,结合INPEFA与MESA技术开展高精度层序格架构建与前积体沉积规律研究,旨在揭示砂体时-空展布规律和盆地充填历史,为类似盆地的沉积体系研究提供新的依据。

1 区域地质背景

鄂尔多斯盆地位于华北地台西缘,地跨陕、甘、宁、蒙、晋5省区,面积约25 × 10^4 km^2,是中国重要的含油气盆地和能源生产基地[13-14]。盆地内发育4套主力含油层系,其中三叠系延长组为主要勘探开发层系,以河流-三角洲-湖泊沉积体系为主,发育多套生-储-盖组合。在构造活动较弱的背景下,盆地以"整体升降、平起平落"为特征[15-16]。鄂尔多斯盆地是典型的克拉通边缘叠合盆地,其形成与演化受周缘板块相互作用控制,主要经历了8个阶段[17-18]。盆地可划分为6个一级构造带,自西向东依次为西缘冲断带、天环坳陷、伊陕斜坡和晋西挠褶带,北部为伊盟隆起,南面为渭北隆起[19-20]。研究区环县地区位于鄂尔多斯盆地西南部,横跨天环坳陷与伊陕斜坡2个构造单元(图1a)。前人

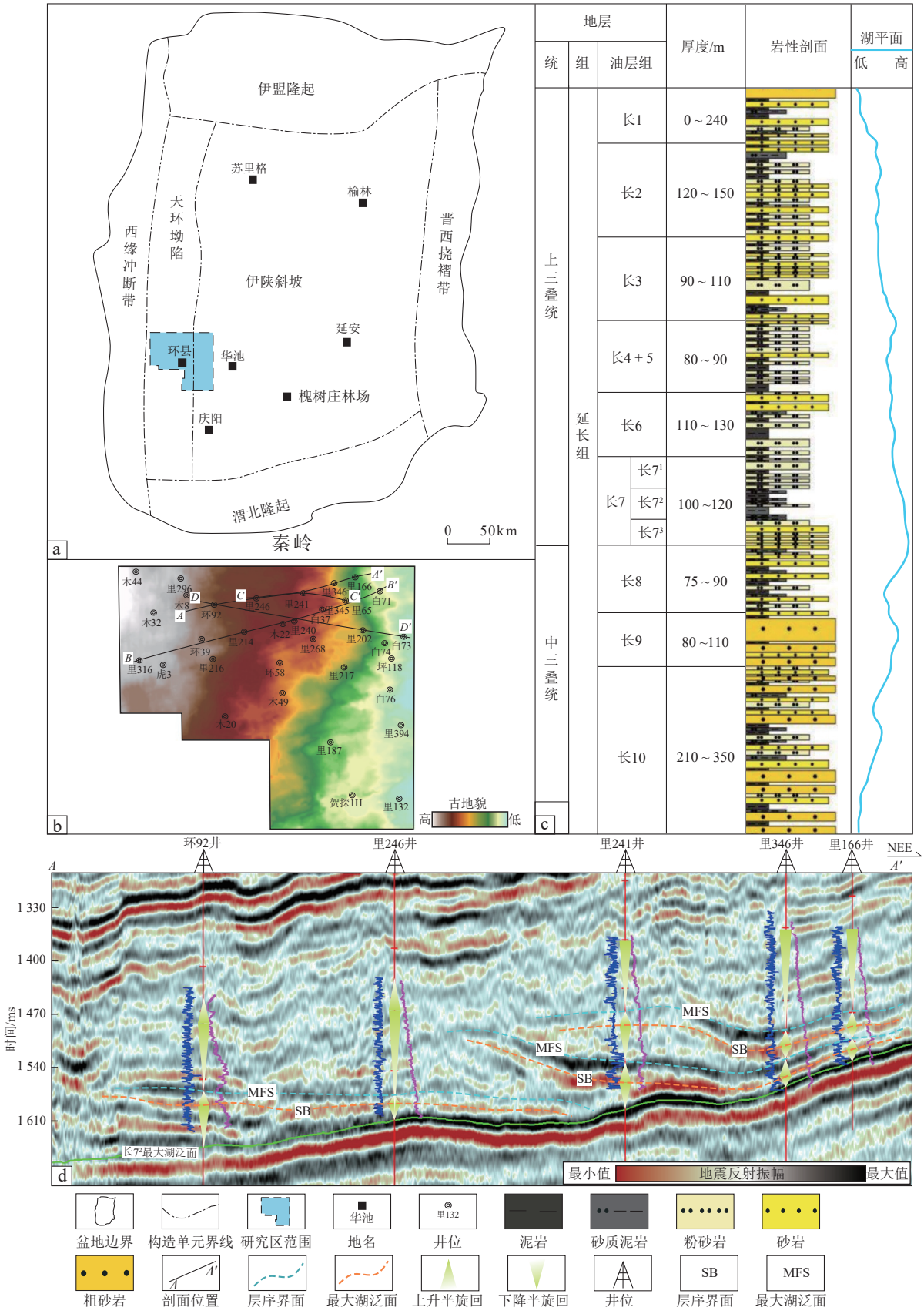


图1 鄂尔多斯盆地环县地区构造位置(a)、湖盆底形(b)、延长组综合柱状图(c)及延长组中段层序格架剖面(d)

Fig. 1 Location map of the Huanxian area (a), lacustrine-basin floor morphology (b), composite stratigraphic column of the Yanchang Formation (c), and sequence-stratigraphic framework section of the middle Yanchang Formation (d), Ordos Basin

(图1d中蓝色为GR测井曲线,紫色为INPEFA测井曲线。)

根据凝灰岩、煤层等标志层将延长组自上而下划分为长1—长10共10个油层组。其中,长10—长8油层组对应湖盆扩张期,以河流-三角洲中粗砂岩为主;长7油层组沉积期为最大湖泛期,发育了盆地内最主要的一套烃源岩层系——张家滩页岩;长6-长4+5油层组沉积期为稳定发育期,发育三角洲-湖泊相沉积;长3—长1油层组沉积期为湖盆萎缩期,后期遭受剥蚀[21-22]。延长组沉积时期,湖盆中心位于盆地中、南部,由西南和东北两大物源体系供给沉积物,东北方向缓坡远物源供给,发育曲流河三角洲。研究区主要接受来自古秦岭的物源供给,以辫状河三角洲沉积为主[23]。晚三叠世,鄂尔多斯盆地表现为东缓、西陡的不对称坳陷盆地,环县地区湖盆底形亦呈现东缓、西陡的特征(图1b)。后期燕山运动导致盆地整体西倾,湖盆底形变为西低、东高,即发生"构造反转"。

本文的研究目的层段为环县地区延长组中段(对应于传统分层的长7^2油层亚组—长3油层组)(图1c),总厚度360~450 m。长7油层组主要发育块状暗黑色泥页岩,长6-长4+5油层组主要发育互层的浅灰色粉-细砂岩与泥岩,长3油层组主要发育细砂岩夹杂泥岩[24]。该层段大规模发育典型的前积反射结构,记录了湖盆从鼎盛到萎缩的完整沉积演化序列。长7油层组沉积期,盆地受全球性卡尼期梅雨事件(CPE)影响,达到最大湖泛并沉积了优质烃源岩[25];此后湖盆持续退却,来自西南方向物源的三角洲及重力流沉积体不断向湖盆中心(华池方向)进积充填;该过程一直持续至长3油层组沉积期,随后湖盆基本萎缩,转为河流相沉积[24]。这一持续的进积过程在研究区三维地震资料中留下了清晰的前积反射记录,为运用地震沉积学方法精细刻画砂体时-空展布与沉积演化提供了理想载体。

2 层序地层格架

高分辨率层序地层格架的建立是地震沉积学研究的基础。本研究采用基于测井曲线的频谱属性趋势分析(INPEFA)与最大熵频谱分析(MESA)技术,识别了不同级次的层序界面和最大湖泛面。INPEFA曲线可有效识别沉积旋回变化,并揭示常规测井曲线中隐藏的地层界面[25]。该曲线的趋势特征及拐点是关键解释要素:地层自下而上INPEFA数值增大为正趋势,泥岩含量增高,对应基准面上升半旋回(水进阶段),指示可容空间体积与沉积物供给量比值(A/S)增大;数值减小为负趋势,砂质含量增高,对应基准面下降半旋回(水退阶段),指示(A/S)减小。拐点可用于识别关键界面:负向拐点(曲线极大值)多指示(最大)湖泛面,正向拐点(曲线极小值)多对应层序界面(图2)。此外,曲线变化的幅度可反映不同级次的基准面旋回[26]。

为进一步验证层序划分的可靠性,本研究同步开展了MESA最大熵谱分析。MESA能够对测井信号进行滑动窗口频谱估计,将一维测井序列转换为深度-频率域的时-频剖面,通过识别不同尺度旋回的周期性能量变化,有效揭示多级次基准面旋回界面[27-28]。以研究区中部的木22井为例,对自然伽马曲线进行MESA处理(图2)。结果显示,MESA频谱分析图中存在多个明显的频谱变化带,其旋回结构与INPEFA曲线所揭示的基准面变化趋势具有良好的对应关系。在INPEFA曲线的关键拐点处,MESA均呈现相应的频谱转换特征,两种方法在层序界面的识别上相互印证,有效增强了层序划分的客观性与可靠性。

综合INPEFA曲线与MESA分析,自下而上可将延长组中段划分为SQ1,SQ2和SQ3三个三级层序(图2)。INPEFA曲线的正趋势对应基准面上升半旋回,趋势结束位置为最大湖泛面,对应低位与湖侵体系域;负趋势对应基准面下降半旋回,代表高位体系域。据此各层序可进一步划分低位(LST)、湖侵(TST)及高位体系域(HST)。其中SQ1在研究层段仅发育高位体系域,湖平面于长7^2油层亚组沉积期达到最大湖泛面,SQ2与SQ3则具备完整的体系域组合。

为进一步建立全区统一的层序格架,在单井层序分析基础上,选取5口关键井组成东西向对比剖面,各井左侧为自然伽马曲线,右侧为对应的INPEFA曲线(图1d中剖面A—A',剖面位置见图1b)。剖面分析表明,研究区东部各井的延长组中段层序保存完整,沉积旋回数量较西部更多。地震反射特征方面,层序界面(SB)大致对应波谷,最大湖泛面(MFS)对应波峰。在旋回组合类型上,下降半旋回长于上升半旋回的不对称旋回中,前积体更为发育。

综合井-震资料,在岩性突变面、INPEFA曲线趋势及MESA频谱分析低频旋回等特征的约束下,建立了全区可对比的层序地层格架(图3)。整体以长下降半旋回与短上升半旋回组合为主,反映出长期缓慢湖退与短期快速湖侵的基准面变化特征。相较于传统地层模式,新建格架呈现明显的"穿层"现象,更符合实际湖盆演化规律(图3a)。

从连井地震剖面(图3b中剖面B—B',剖面位置见图1b)上看,各层序前积反射特征存在显著差异。①SQ1沉积期,前积体整体呈底平顶凸特征,内部以斜坡段与顶积层为主,底积层不发育,由一系列中-强振

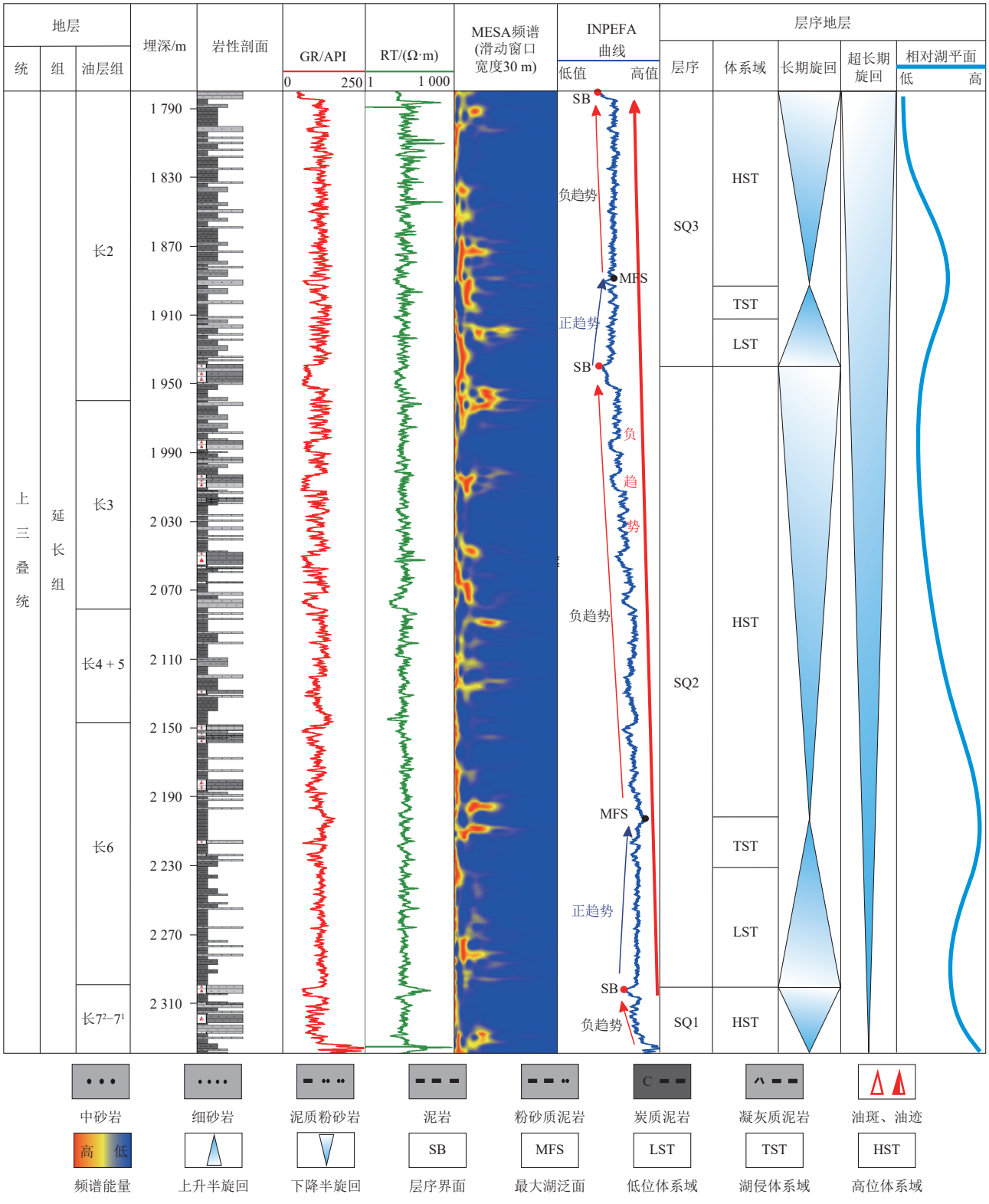


图2 鄂尔多斯盆地环县地区木22井延长组中段层序划分方案示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the sequence-stratigraphic division scheme for the middle Yanchang Formation in well Mu 22, Huanxian area, Ordos Basin

幅、中等连续性、近平行的地震反射同相轴组成，主要分布于研究区西南部。该期前积体多形成于下降半旋回，沉积物供给速率略大于可容空间增长速率，顶积层发育较弱，斜坡倾角较大，指示三角洲前缘向盆地方向缓慢进积的过程。②SQ2沉积期，前积体呈透镜状，由较强振幅、中等连续性的近S形地震反射同相轴组成，

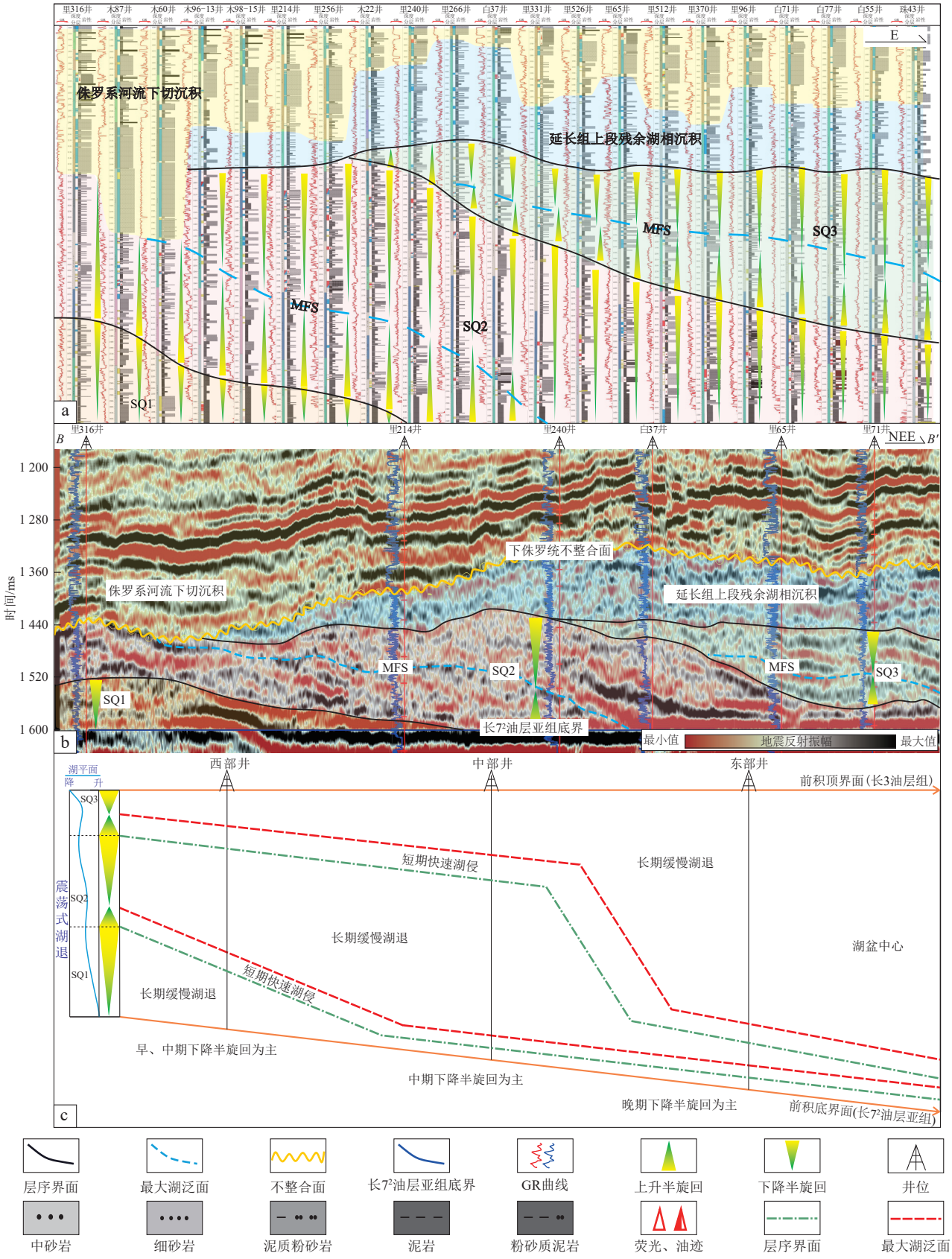


图3 鄂尔多斯盆地环县地区延长组中段层序地层划分方案(a)、连井地震剖面(b)及层序格架模式(c)

Fig. 3 Sequence-stratigraphic division scheme (a), well-tie seismic section (b), and conceptual model of the sequence framework (c) for the middle Yanchang Formation in the Huanxian area, Ordos Basin

(b图中剖面位置见图1b。)

指示在湖平面快速下降、物源供给充分条件下，前积体快速向湖盆中心推进的沉积过程。充足的沉积物供给使得顶积层、前积层和底积层均较发育，沉积体向湖盆方向延伸较远，整体规模大，主要分布在研究区中部。该期前积体反映了水体相对较深的斜坡环境，记录了三角洲前缘粗碎屑向湖盆搬运过程中形成的滑塌或浊流沉积。③SQ3沉积期，前积体整体呈顶平底凸特征，内部结构以斜坡段与底积层为主，顶积层缺失或不发育，由中等振幅、中–强连续性、相互平行的地震反射同相轴组成，底部地层常收敛相切，主要发育于研究区东北部。该期前积体常出现在下降半旋回，形成于湖平面缓慢下降、沉积物供给充足的条件下，沉积体向湖盆方向延伸较远，底积层发育，标志着湖盆萎缩期的充填过程。

通过对环县地区单井及连井层序格架的系统分析，总结了前积模式控制下的层序地层格架发育特征。延长组中段整体处于震荡式湖退背景，以长期下降半旋回与短期上升半旋回组合为特征，表现为长期缓慢湖退与短期快速湖侵交替的基准面变化规律。顺物源方向，层序格架对前积体系的响应更为明显：尽管全区均以下降半旋回为主，但下降半旋回的主要发育时期存在显著的空间分异——西部各井普遍在早期和中期发育2个长期下降半旋回，中部各井普遍在中期发育1个长期下降半旋回，东部各井则普遍在晚期发育1个长期下降半旋回（图3c）。这一规律揭示了前积体自西向东的迁移过程，反映了湖盆萎缩过程中沉积中心的逐步东移。

综上所述，基于INPEFA与MESA建立的层序格架有效揭示了研究区“缓慢湖退、快速湖侵”的基准面变化过程。SQ1—SQ3沉积期，前积体在形态、结构、反射特征及空间分布上的系统性差异，直观记录了湖盆从初始进积、强烈进积到最终萎缩的完整演化序列，以及砂体主控因素由物源供给主导向可容空间主导的逐步转换。下面将结合岩相分析与地震反演结果，对各期前积体的形成过程与沉积响应展开具体讨论。

3 岩相特征

岩相是沉积物岩性、结构及沉积构造的综合体，直接反映了沉积物形成时的水动力条件、搬运过程与沉积机理，是识别沉积微相和分析沉积过程的基础[29]。本次研究基于对环县地区63口取心井、累计约1 200 m岩心的系统观察，对延长组中段进行岩相划分与成因分析，旨在揭示其沉积过程与空间分布规律。

3.1 岩相类型

根据岩性、粒度和沉积构造的差异，将研究区延长组中段沉积物划分为4大类17亚类岩相（图4）。岩相整体呈现“西粗东细、北粗南细、上粗下细”的分布特征：西北部以砂岩和粗粉砂岩为主，粒度较粗；东南部则以细粉砂岩和泥岩为主，粒度较细。

泥岩相主要包括水平层理泥岩相（M1）、块状泥岩相（M2）、含砂质透镜体泥岩相（SSM1）及含层状粉砂屑与粉砂注入构造的泥岩相（SSM2）。其中，M1与M2相对少见，而SSM1与SSM2两类粉砂质泥岩相则广泛发育，指示低能静水环境中混入弱动荡或同生变形作用的沉积过程。

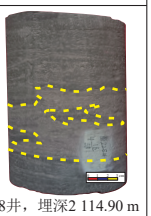
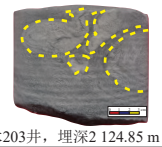
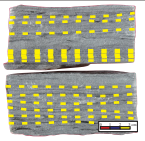
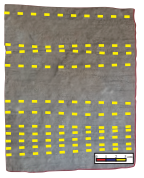
粉砂岩相是研究区内最为发育的岩相类型，沉积构造复杂，可按粒度和构造进一步划分为细粉砂岩相与粗粉砂岩相。细粉砂岩相包括包卷层理（FSS1）、波状层理（FSS2）和水平层理（FSS3）等类型，主要分布于研究区东南部，反映低–中等能量的沉积环境。粗粉砂岩相类型多样，包括平行层理（CSS1）、块状层理（CSS2）、递变层理（CSS3）、火焰状构造（CSS4）及含泥岩撕裂屑（CSS5）等类型，主要出现在西北部，是较强水动力或重力流作用的产物。

砂岩相以中细砂岩为主，主要包括平行层理砂岩相（S1）、板状交错层理砂岩相（S2）、槽状交错层理砂岩相（S3）、楔状交错层理砂岩相（S4）和含砾砂岩相（S5）。该组合指示了较强的水动力环境，主要发育于三角洲前缘水下分流河道中。

3.2 岩相组合与沉积体系

单一的岩相类型可对应多种沉积成因，因此通常以不同的岩相组合关系来反映不同微相的沉积过程。每种岩相组合类型或沉积序列通常代表一次沉积事件或一定环境连续演变的产物，利用岩相组合特征可以准确指示垂向沉积序列并判别沉积环境[30–31]。

通过岩相组合分析，在研究区识别出3类主要的沉积体系（图5）。①辫状河三角洲体系（对应岩相组合1和2）。以发育完整的水下分流河道序列为特征，通常表现为含砾砂岩或槽状交错层理砂岩向上渐变为板状交错层理砂岩或平行层理粉砂岩，最终以波状层理细粉砂岩或泥岩结束，是研究区最重要的储集砂体类型。②滨浅湖体系（岩相组合3）。以波状或水平层理细粉砂岩与块状泥岩频繁互层为标志。③深水重力流体系（岩相组合4—7）包含多种类型：浊流沉积发育ABC型和AE型等不完整的鲍马序列组合；碎屑流以

岩相类型		基本特征	岩心照片
大类	亚类		
泥岩相	水平泥岩相层理（M1）	岩性以黑色、黑灰色泥岩为主，水平较为发育层理	 贺探1H井，埋深2 085.00 m
	块状泥岩相构造（M2）	岩性以黑色、黑灰色粉砂质泥岩或泥岩为主，呈块状构造，不含其他沉积构造，顶、底界面相对平坦	 贺探1H井，埋深2 076.30 m
	含砂质透镜泥岩相（SSM1）	岩性以灰黑色粉砂质泥岩为主，夹杂粉砂质条带和泥团，条带多呈中间厚、两边薄的透镜状	 贺探1H井，埋深2 074.46 m
	含层状粉砂屑和粉砂注入构造的泥岩相（SSM2）	岩性以灰黑色粉砂质泥岩为主，含呈层状分布的粉砂屑和压力不均导致的粉砂注入构造	 里228井，埋深2 114.90 m
细粉砂岩相	包卷层理细粉砂岩相（FSS1）	岩性以灰色泥质粉砂岩为主，发育包卷层理	 木203井，埋深2 124.85 m
	波状层理细粉砂岩相（FSS2）	岩性以灰色细粉砂岩为主，见小型波状纹层发育	 木8井，埋深2 207.50 m
	水平层理细粉砂岩相（FSS3）	岩性以灰色细粉砂岩为主，水平层理较为发育	 木159井，埋深2 239.00 m
粗粉砂岩相	平行层理粗粉砂岩相（CSS1）	岩性以灰色粗粉砂岩为主，平行层理较为发育	 里215井，埋深1 959.70 m
	块状粗粉砂构造岩相（CSS2）	岩性以灰色粗粉砂岩为主，呈块状构造，不含其他沉积构造	 木119井，埋深2 024.30 m

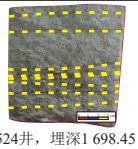
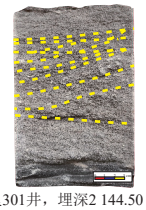
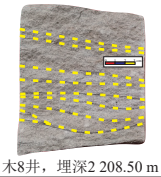
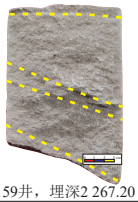
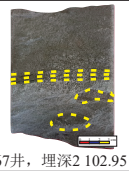
岩相类型		基本特征	岩心照片
大类	亚类		
粗粉砂岩相	递变层理粗粉砂岩相（CSS3）	岩性以灰色粉砂岩为主，递变层理较为发育	 里313井，埋深1 827.50 m
	火焰状构造粗粉砂岩相（CSS4）	岩性以灰色粗粉砂岩为主，底部发育火焰状构造	 木99井，埋深2 190.05 m
	含撕裂屑粗粉砂岩相（CSS5）	岩性以灰色粗粉砂岩为主，含泥质撕裂屑，长度约2～5 cm	 里67井，埋深2 102.00 m
	平行层理砂岩相（S1）	岩性以灰色中-细砂岩为主，发育平行层理，为高流态下砂体沉积和水上河漫砂细粒沉积	 镇524井，埋深1 698.45 m
中细砂岩相	板状交错层理砂岩相（S2）	岩性以磨圆、分选中等的中-细砂岩为主，发育多组低角度板状交错层理，由垂向侧向加积形成	 里301井，埋深2 144.50 m
	槽状交错层理砂岩相（S3）	岩性以磨圆、分选较好的中-细砂岩为主，发育小型槽状交错层理，为河道下切、迁移、充填沉积	 木8井，埋深2 208.50 m
	楔状交错层理砂岩相（S4）	岩性以分选、磨圆较好的中-细砂岩为主，由垂向侧向加积形成	 木159井，埋深2 267.20 m
	含砾砂岩相（S5）	岩性以分选、磨圆较差的中-细砂岩为主，底部可见滞留砾石，砾石最大粒径为3 cm左右	 里67井，埋深2 102.95 m

图4 鄂尔多斯盆地环县地区延长组中段不同类型典型岩相特征

Fig. 4 Photographs of typical lithofacies of diverse types in the middle Yanchang Formation, Huanxian area, Ordos Basin

（图中岩心照片内黄色虚线用以勾勒地层沉积层理、沉积构造边界与变形界面，直观标示层理产状、透镜体、火焰构造、撕裂屑等沉积构造发育范围。）

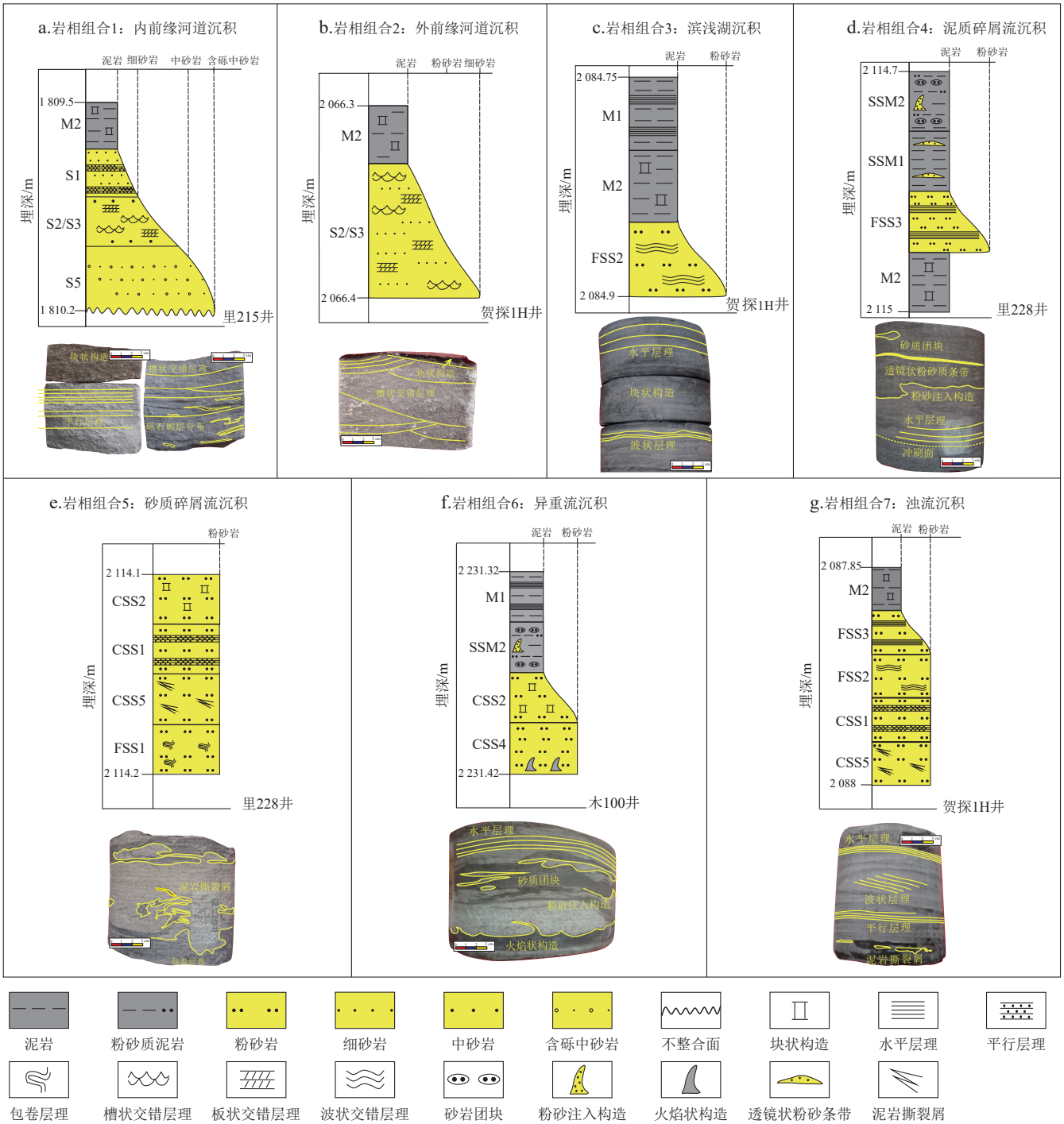


图5 鄂尔多斯盆地环县地区延长组中段岩相组合和沉积相类型汇总

Fig. 5 Summary of lithofacies associations and depositional facies types in the middle Yanchang Formation, Huanxian area, Ordos Basin

M1. 水平层理泥岩相;M2. 块状构造泥岩相;SSM1. 含砂质透镜体泥岩相;SSM2. 含层状粉砂屑和粉砂注入构造泥岩相;FSS1. 包卷层理细粉砂岩相;FSS2. 波状层理细粉砂岩相;FSS3. 水平层理细粉砂岩相;CSS1. 平行层理粗粉砂岩相;CSS2. 块状构造粗粉砂岩相;CSS4. 火焰状构造粗粉砂岩相;CSS5. 含撕裂屑粗粉砂岩相;S1. 平行层理砂岩相;S2. 板状交错层理砂岩相;S3. 槽状交错层理砂岩相;S5. 含砾砂岩相

(岩心照片内黄色虚线用以勾勒地层沉积层理、沉积构造边界与变形界面。)

块状、富含泥岩撕裂屑的粗粉砂岩为特征;而发育包卷层理、火焰状构造或砂岩透镜体的组合则指示斜坡区的滑塌或泥质碎屑流作用。

3.3 岩相时-空分布规律

岩相的时-空展布受物源供给、古地貌及基准面

变化的综合控制。环县地区延长组中段岩相分布在平面上具有明显的分带性，在垂向上则响应于湖盆的持续进积，呈上粗下细的演化序列。在平面上，受自西向东物源方向及沉积坡折的影响，西部坡折带上段为三角洲前缘水下分流河道沉积，岩相主要为各类交错层理和平行层理粉砂岩相；中部为沉积坡折带环境，整体粒度较细，岩相以细粉砂岩相和泥岩相为主，同时发育大量包卷层理和砂岩透镜体，系泥岩受塑性变形作用形成；东部为坡折带下段沉积环境，物源供给整体较为匮乏，处于饥饿沉积状态，发育大量块状泥岩和水平层理泥岩，同时可见含泥岩撕裂屑的砂岩相，属块状搬运的重力流成因（图6）。在纵向上，受持续的“震荡式湖退”控制，整个延长组中段表现出上粗下细的岩性-岩相演化特点，这一规律在SQ1—SQ3的层序演化中表现尤为清晰。

SQ1沉积期（延长组沉积早期），前积体主要发育在研究区西部，岩相整体以泥岩相和细粉砂岩相为主。西部发育以板状和槽状交错层理细粉砂岩相为主的三角洲前缘河道沉积，向东过渡为以块状泥岩和水平层理泥岩相为主的静水湖泥沉积，局部可能发育小规模鲍马序列岩性组合。

SQ2沉积期（延长组沉积中期），前积体主要发育在研究区中部。随着基准面不断下降，陆源碎屑供给作用加强，相较于SQ1沉积期，岩相粒度明显变粗。特别是在顶积层和底积层位置，分别发育了以板状和槽状交错层理细粉砂岩相为主的三角洲前缘河道砂体和以含撕裂屑粉砂岩相为主的碎屑流砂体。泥质斜坡段因坡折角度较大，在外界扰动触发下，发育以含砂岩透镜体泥岩相为标志的泥质碎屑流。

SQ3沉积期（延长组沉积晚期），前积体主要发育在于研究区东部。随着基准面进一步下降，河口不断向湖盆中央推进。该阶段前积体的顶积层较前期粒度明显变粗，表现为以槽状交错层理和平行层理砂岩相为主的内前缘河道特征；三角洲外前缘持续向湖盆中央推进至沉积坡折以下，使得此阶段底积层发育以板状和槽状交错层理细粉砂岩相为主的外前缘河道砂体。

4 地震沉积学响应

研究区虽已覆盖三维地震资料，但钻井资料仍相对有限，仅凭钻井资料难以在平面和垂向演化序列中可靠地确定沉积类型及其时-空展布规律。因此，有必要充分利用地震资料的横向连续性优势，通过地震沉积学方法进行综合阐释。地震沉积学是通过90°相位调整、地层切片及地震属性分析等关键技术，建立地震反射与沉积体系之间成因联系的研究方法[3,32-34]，其核心在于将地震数据转换为岩性数据体和沉积相图，从而实现对薄层砂体及沉积体系时-空演化的精细刻画。本节将依次阐述90°相移、地层切片及地震波形指

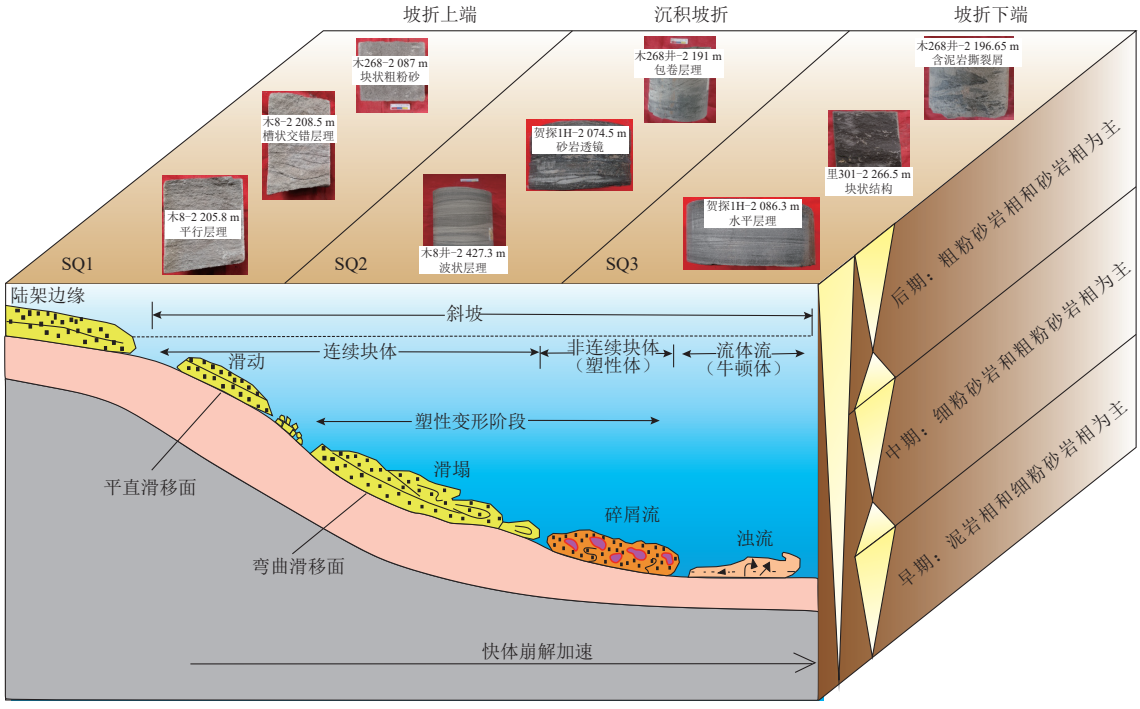


图6 鄂尔多斯盆地环县地区延长组中段主要岩相发育模式示意图

Fig. 6 Conceptual model of major lithofacies developed in the middle Yanchang Formation, Huanxian area, Ordos Basin

示反演在本研究中的具体应用。

4.1　90°相移

针对薄互层储层，传统零相位地震数据的分辨率存在固有局限。研究表明，零相位子波的分辨率极限约为四分之一主波长（$\lambda/4$），当层厚小于该阈值时，顶、底界面反射发生干涉，难以准确识别薄层几何形态[35-39]。为解决这一问题，Zeng 和 Backus（2005a，2005b）提出了90°相位子波调整技术，旨在建立地震反射与薄层砂体之间的直接对应关系[40-41]。90°相位地震数据不仅更适用于砂泥岩薄互层成像，还能提升振幅预测岩性的精度[42-45]。

基于此，本研究采用90°相移技术，将地震反射的主波瓣调整至薄层中心，以建立地震同相轴与薄层砂体的对应关系。从连井地震剖面（图7中剖面 C—C'，剖面位置见图1b）来看：在零相位地震剖面（图7a）中，测井曲线识别的砂体与地震同相轴对应关系较差；经90°相位转换后（图7b），地震同相轴与测井曲线的吻合程度显著提高，钻遇砂体基本对应地震波谷（红色同相轴），而自然伽马高值泥岩段则对应地震波峰（黑色同相轴）。在相位转换后的地震数据体中，同相轴振幅能够直接反映岩性变化，地层分辨能力明显提升。在此基础上，采用地震属性分析和地层切片等技术开展地震地貌学研究，能够更合理地刻画沉积相及砂体展布特征。

4.2　地层切片及综合解释

目前，常用的反映沉积体平面地震属性的切片技术主要包括时间切片、沿层切片和地层切片[46-47]（或按比例切片[46]）。为充分利用地震地貌信息，必须沿着沉积面（地质等时面）拾取地震属性，使其能够代表岩石成因沉积单元，这些面被称为地层切片[2]。该方法通过追踪等时地质界面提取地震属性，可有效减小横向沉积速率差异及地层厚度变化带来的影响，真实反映沉积体系的地貌特征[40-41]。

为确定优选岩性预测的地震属性，开展了系统的井-震标定分析。在研究区内选取分布均匀、取心资料齐全的12口关键井，在目的层段时窗范围内，以2 ms为采样间隔提取井旁道多种地震属性，包括均方根振幅、平均振幅、瞬时频率、瞬时相位和弧长属性等。同时，利用各井的测井解释成果，计算对应时窗内的砂/地比值，共获得236个井的时窗样本。

采用皮尔逊相关系数定量评价各属性与砂/地比的相关性[公式（1）]：

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left[(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})\right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \tag{1}$$

式中：r 为皮尔逊相关系数，无量纲；x_i 为第 i 个井-时窗样本的属性值，无量纲；y_i 为对应样本的砂/地比，无量纲；$\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别为 x 和 y 的平均值；n 为参与分析的样本总个数（$n=236$）。计算结果表明，均方根振幅属性值与砂/地比的相关系数最高（$r=0.78$），其次为平均振幅（$r=0.65$），而瞬时频率（$r=0.32$）、瞬时相位（$r=0.21$）和弧长属性值（$r=0.44$）与砂/地比的相关性相对较低。这表明均方根振幅属性对砂岩发育程度具有最佳的敏感性。进一步分析表明，均方根振幅属性对砂、泥岩互层具有较好的敏感性，砂岩段通常对应均方根振幅属性高值区，泥岩段对应低值区，而薄互层或含泥砂岩则表现为中等振幅属性值。因此，本研究选用均方根振幅属性开展地层切片分析与沉积相解释。

在此基础上，提取了延长组中段共201张均方根

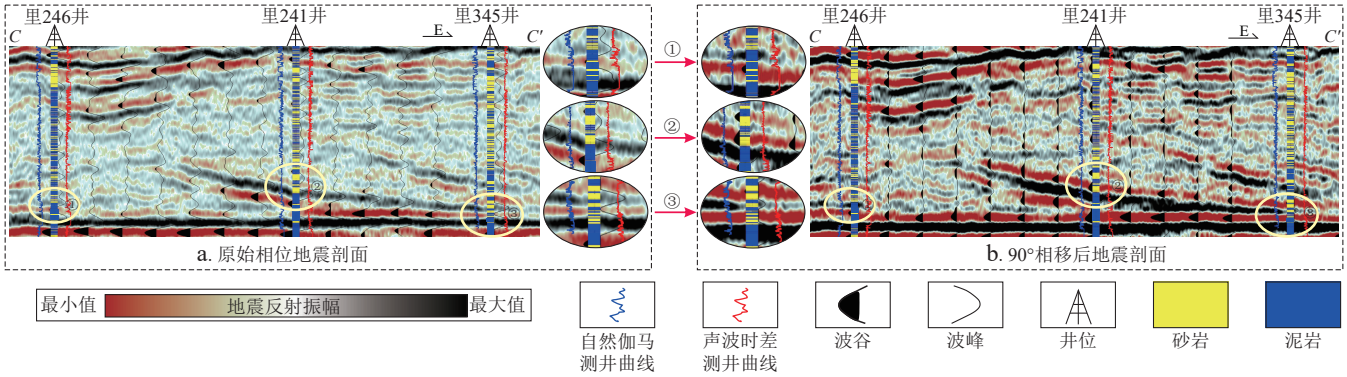


图7　鄂尔多斯盆地环县地区延长组中段地震剖面90°相位调整示意图

Fig. 7　Schematic diagram of 90°-phase shift of a seismic section through the middle Yanchang Formation, Huanxian area, Ordos Basin

（剖面位置见图1b。）

振幅地层切片，分别选取SQ1—SQ3层序内的6张典型切片进行分析（图8）。在切片解释过程中，每一张切片均通过多口井的测井与岩心资料进行标定，确保振幅-岩性转换的可靠性。

SQ1沉积期，前积体主要分布于研究区西北部和西南部，共发育4期朵叶，延伸7～8 km，物源主要来自西部和西南方向（图8a—b′）。切片中可见分支树杈状水下分流河道与分流间湾频繁间互，宽度介于6～10 km，形成于长7^2油层亚组最大湖泛面后的第一次缓慢湖退时期。以SQ1层序切片Slice50为例，里296井（深度2 011.8 m）经钻井标定为细砂岩和粉砂岩为主的三角洲前缘砂体，对应的黄-红色较强振幅区解释为水下分流河道沉积；木49井（深度2 067.8 m）的蓝色弱振幅区经标定解释为水下分流河道间湾或滨浅湖沉积。

SQ2沉积期，物源仍以西部和西南为主，延伸距离可达14 km，处于第二次快速湖退阶段（图8c—d′）。切片整体呈现“两端富砂、中部富泥”的格局。以切片Slice110为例，左侧黄-红色较强振幅区经钻井标定（如虎3井，深度2 123.8 m）为三角洲前缘水下分流河道；右侧红色强振幅区经钻井标定（如里132井，深度2 193.6 m）为重力流砂体；中部蓝色弱振幅区经钻井标定（如白73井，深度2 263.0 m）为滨浅湖-半深湖-深湖相泥岩沉积。尽管中部泥质斜坡带因薄互层发育导致局部振幅变化较为复杂，但整体沉积格局在振幅切片上仍有清晰体现。

SQ3沉积期，研究区处于第三次快速湖退阶段，物源来自西部、西南及东北部，分流河道及水下分流河道发育（图8e—f′）。以切片Slice190为例，里296井（深

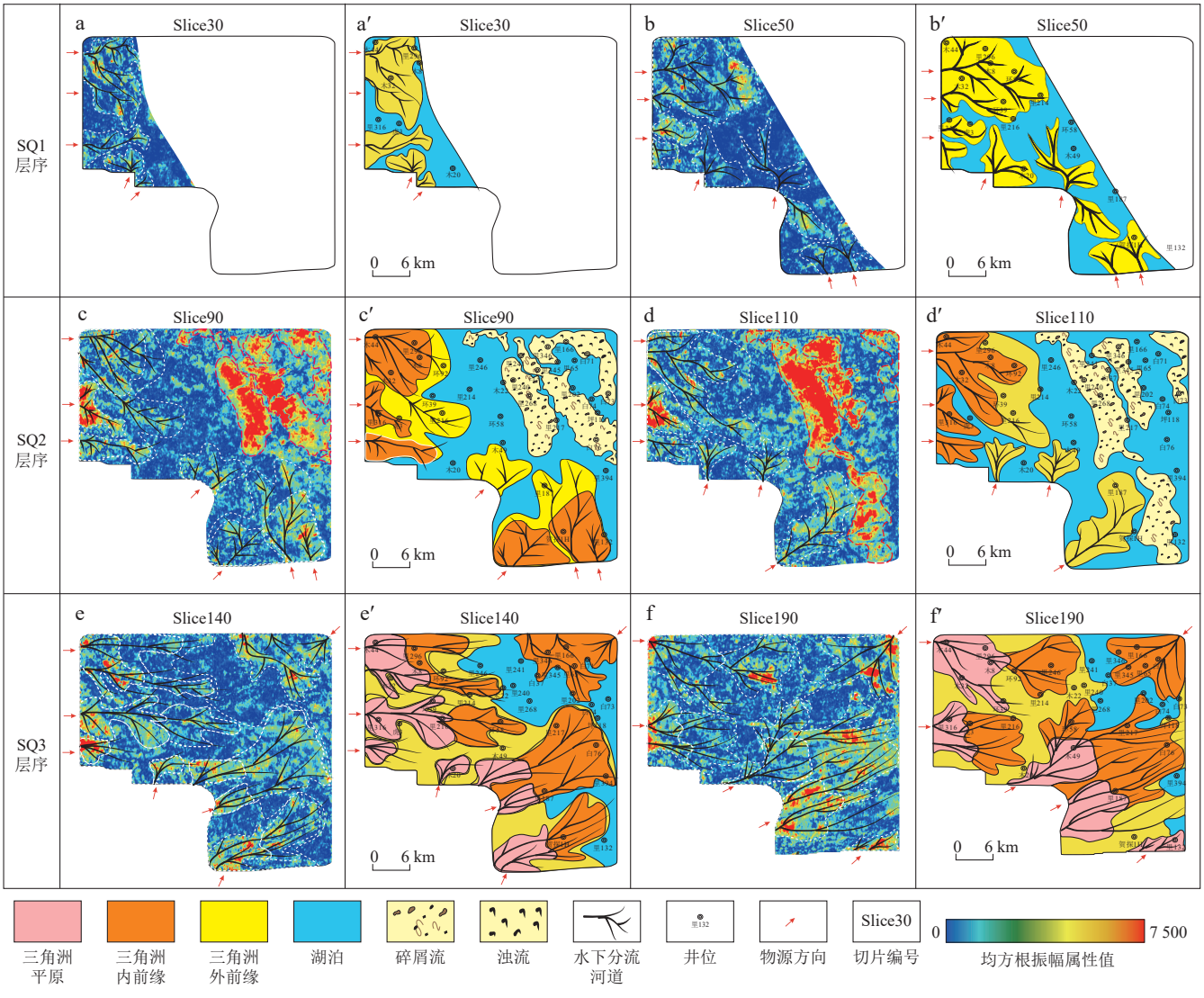


图8 鄂尔多斯盆地环县地区延长组中段典型地层切片（a—f）及相应沉积相图（a′—f′）

Fig. 8 Representative stratigraphic slices and corresponding depositional facies maps of the middle Yanchang Formation, Huanxian area, Ordos Basin

度1 901.9 m）经钻井标定为中-细砂岩为主的分流河道砂体，对应的红色强振幅区解释为三角洲平原沉积；白74井（深度2 036.3 m）的黄色较强振幅区经标定解释为三角洲前缘沉积；蓝色弱振幅区解释为分流间湾或浅湖-半深湖-深湖相泥岩沉积。

4.3　地震波形指示反演

基于前文地震地貌学与地震岩性学分析，研究区沉积相类型与宏观演化规律已得到初步确定。然而，要精细刻画砂体的三维空间分布、叠置关系及定量属性，还需借助地球物理反演技术。研究区延长组中段广泛发育厚度为5～10 m的薄互层储层，传统稀疏脉冲反演和地质统计学反演等方法难以满足其精度要求[48-49]。地震波形指示模拟反演是一种针对薄层的高精度反演方法[50]，其核心在于利用地震波形的横向变化反映储层相变特征，以此替代传统基于变差函数的统计样本筛选方式，更好地体现相控约束，可有效提升薄互层储层的预测精度[49,51]。

反演前，需首先开展岩石物理分析，为波阻抗反演提供理论依据。研究区目的层段发育的岩性包括泥岩、细粉砂岩、粗粉砂岩及（含砾）中-细砂岩。自然伽马-波阻抗交会图表明（图9a），不同岩性的数据点在不同波阻抗值域范围内具有可分性，砂岩多表现为高波阻抗，泥岩多表现为低波阻抗。该分析明确了波阻抗对岩性的区分能力，为后续反演中的岩性识别奠定了基础。在此基础上，可通过曲线重构进一步提升岩性识别能力。对多条测井曲线的交会分析表明，自然伽马曲线对砂、泥岩的区分效果最佳。将含有低频信息的声波曲线与反映高频信息的自然伽马曲线进行重构，重构后曲线的砂、泥岩波阻抗区分度显著提高（图9b），据此确定用于反演解释的砂、泥岩波阻抗门槛值为105 700 kg/(m²·s)。

基于研究区薄互层发育特征，本次研究利用SMI软件开展地震波形指示模拟反演。反演剖面清晰揭示了研究区延长组中段的沉积韵律（图10中剖面*D*—*D*′，剖面位置见图1b）：早期整体富泥（蓝色），对应辫状河三角洲前缘和浅湖沉积；中期呈现“砂-泥-砂”三段式组合，分别对应辫状河三角洲前缘-浅湖-深水重力流沉积；晚期整体富砂（红色），对应辫状河三角洲平原沉积。反演结果与环92井、里202井和白73井的实际钻遇岩性组合高度吻合，井间砂体连通性清晰可辨，

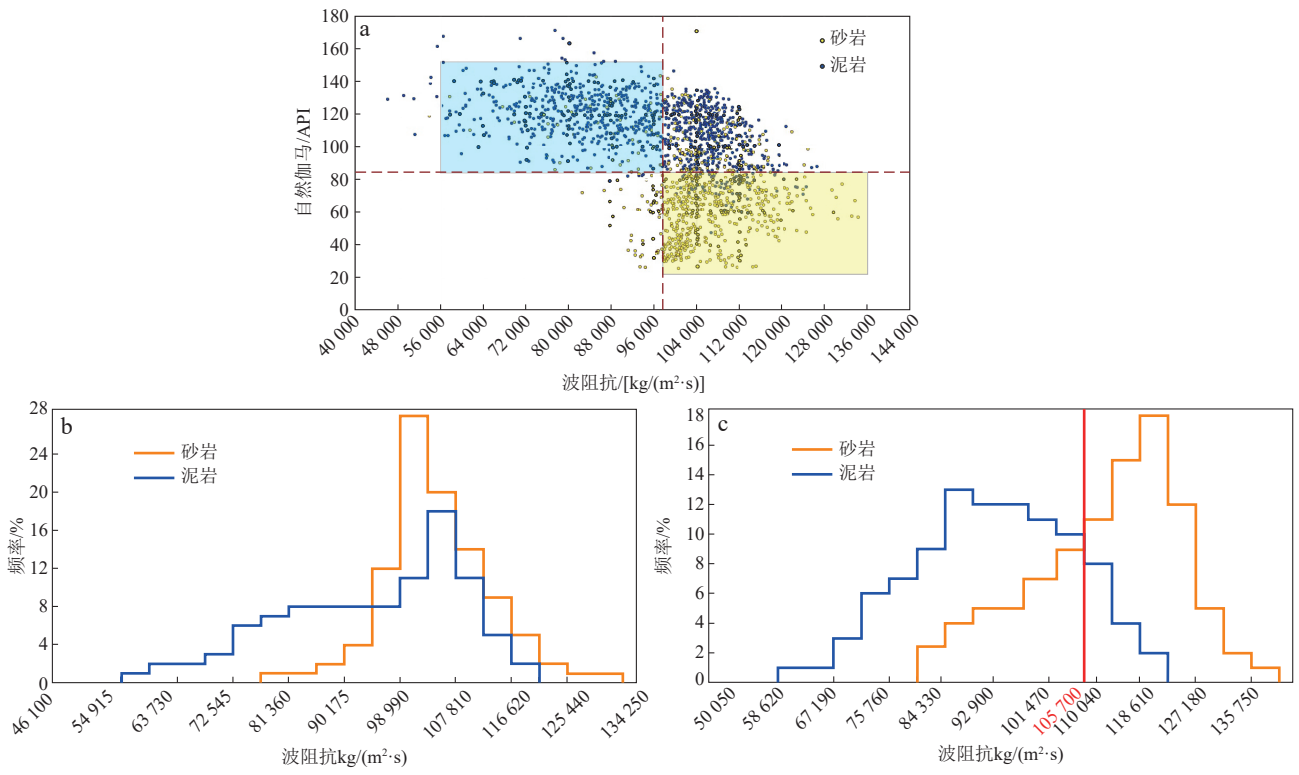


图9　鄂尔多斯盆地环县地区延长组中段岩石物理分析

Fig. 9　Petrophysical analysis of the middle Yanchang Formation, Huanxian area, Ordos Basin

a. 自然伽马-波阻抗交会图；b. 砂岩和泥岩波阻抗重构前频率分布直方图；c. 砂岩和泥岩波阻抗重构后频率分布直方图

（a图中蓝色区域代表泥岩，呈低波阻抗、高自然伽马特征；黄色区域代表砂岩，呈高波阻抗、低自然伽马特征。c图中红色线为砂、泥岩波阻抗门槛值分界线，对应波阻抗值为105700 kg/(m²·s)。）

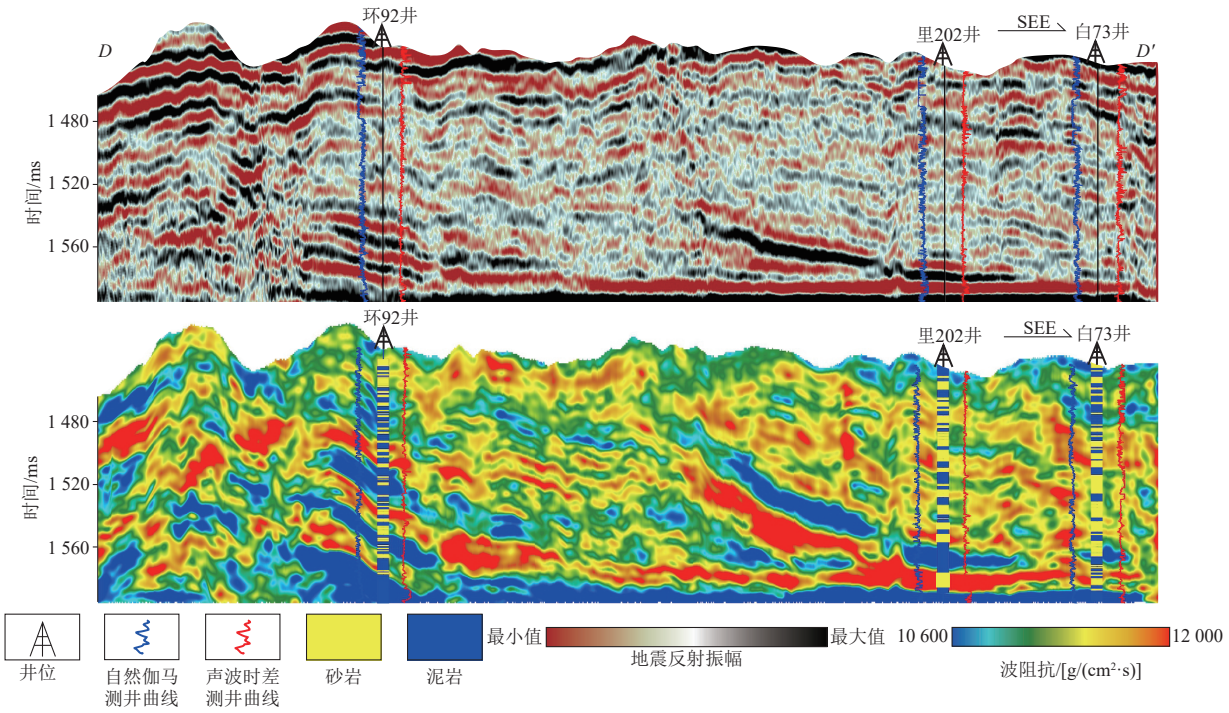


图10 鄂尔多斯盆地环县地区延长组中段波形指示反演剖面(剖面位置见图1b)

Fig. 10 Seismic waveform indication inversion section of the middle Yanchang Formation, Huanxian area, Ordos Basin

纵向分辨率显著提升,预测精度达到2 m,精细刻画了以往地震资料难以识别的薄层砂体。

基于反演结果,分层序求取岩性厚度平面分布,揭示了不同阶段的砂体分布富集规律(图11)。①早期湖平面较高,可容空间相对过剩($A/S>1$),沉积物供给为限制砂体向东扩展的主控因素。前积体岩性以细砂岩和粉砂岩为主,属辫状河三角洲前缘亚相,主要分布于西北部和西南部,砂体厚度为20~28 m,呈西厚、东薄特征,延伸仅7~8 km,面积约110 km^2,表明物源供给量有限,砂体难以向盆地方向大规模推进。②中期湖平面仍覆盖大部分区域,砂体发育的主控因素仍为物源供给($A/S>1$),但三角洲整体向东推进,砂体厚度与砂/地比较早期显著增大。受早期形成的较陡坡折控制,浅水三角洲前方发育薄层重力流砂体,形成"三角洲前缘砂-滨浅湖泥-底部重力流砂"的剖面结构。三角洲前缘砂体厚度为25~30 m(延伸14 km,面积200 km^2),重力流砂体厚度为30~35 m(延伸16 km,面积106 km^2),平面呈"两端富砂、中部富泥"格局。③晚期受震荡式湖退影响,湖盆逐渐萎缩,可容空间急剧减小($A/S<1$),前积体进入消亡阶段。在大量物源持续供给的背景下,可容空间取代物源供给,成为砂体富集的主控因素。砂体厚度普遍较大(40~60 m),延伸约17 km,面积约230 km^2。湖平面以上的西部区域(如木44井和木32井附近)可容空间小,以辫状河沉积为主,砂体较薄;湖平面以下的东部地区(如里166井和白76井附近),自坡折向湖盆中心可容空间增大,在物源供给充足的背景下砂体大规模富集,砂体分布特征由早期的西厚、东薄转变为东厚、西薄。有利砂体主要分布于里246—里199一线东侧,总体岩性厚度平面分布与均方根属性图吻合良好(图11)。

综上所述,相对湖平面升降控制着前积体的发育演化:早期湖平面整体较高且下降速率较慢;中期随着前积体不断发育,湖平面持续下降,沉积物向湖盆中心依次推进,并在斜坡上经历了滑动-滑塌阶段;晚期相对基准面发生大规模下降,湖盆快速萎缩,前积体随之逐渐消亡。

5 沉积模式

基于前文对地震反射特征、地层切片及反演结果的系统分析,结合层序地层格架与沉积体系研究,本文建立了环县地区延长组中段以可容空间与沉积物供给相对变化为核心控制因素的前积体演化模式(图12),即层序SQ1—SQ3对应3个阶段的A/S比值差异,决定了沉积特征、主控因素及空间展布的不同。

5.1 斜坡发育阶段(SQ1沉积期)

该阶段形成于长7^{2}最大湖泛期后的首次湖退。湖

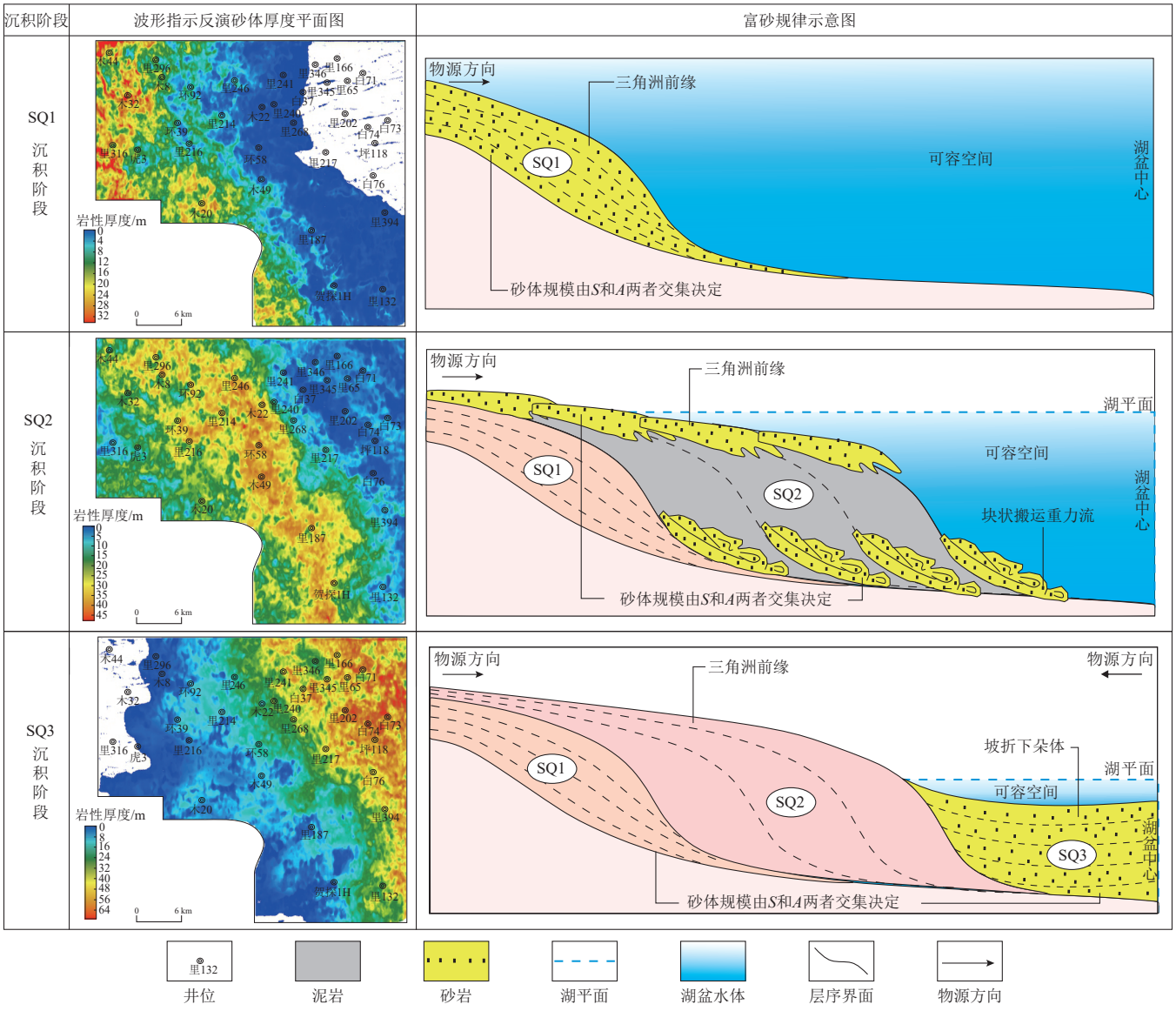


图 11 鄂尔多斯盆地环县地区延长组中段各沉积阶段岩性厚度平面图与富砂规律示意图

Fig. 11 Lithologic thickness maps and schematic diagrams of sand enrichment patterns at different stages of the middle Yanchang Formation, Huanxian area, Ordos Basin

平面整体较高且下降缓慢，可容空间相对过剩（$A/S>1$），陆源碎屑供给相对较弱。在此背景下，有限的物源供给成为限制砂体向东扩展的主控因素，导致砂体仅局限于物源入口附近的西部和西南部，形成西厚、东薄的分布格局。地震剖面上前积体呈底平顶凸外形，顶积层发育弱，斜坡倾角较大（图 3b）；反演剖面整体以低波阻抗（泥岩）为主（图 11），构成辫状河三角洲前缘沉积体系。

5.2 斜坡成熟阶段（SQ2沉积期）

该阶段湖平面下降速率加快，前期形成的陡坡折（古地貌）成为控制砂体再分配的关键因素。充足的物源供给促使三角洲向东推进，同时高坡度斜坡触发重力流沉积，形成“两端富砂、中部富泥”的格局。地震剖面上，前积体演变为近S形反射的透镜状结构，顶积层、前积层和底积层完整发育（图 3b）；反演剖面呈现“砂–泥–砂”三段式结构，底积层高波阻抗砂体为重力流成因（图 11）。此阶段斜坡角度达到最大，分布范围最广，并在坡折点前方因高坡度而触发“滑动–滑塌–碎屑流–浊流”的完整重力流沉积序列。

5.3 斜坡填平阶段（SQ3沉积期）

该阶段基准面大规模下降，湖盆快速萎缩，可容空间急剧减小（$A/S<1$），而物源供给持续充足。在此背景下，可容空间的分布成为限制砂体最终富集位置的主控因素。西部湖平面以上区域可容空间小，砂体较薄；

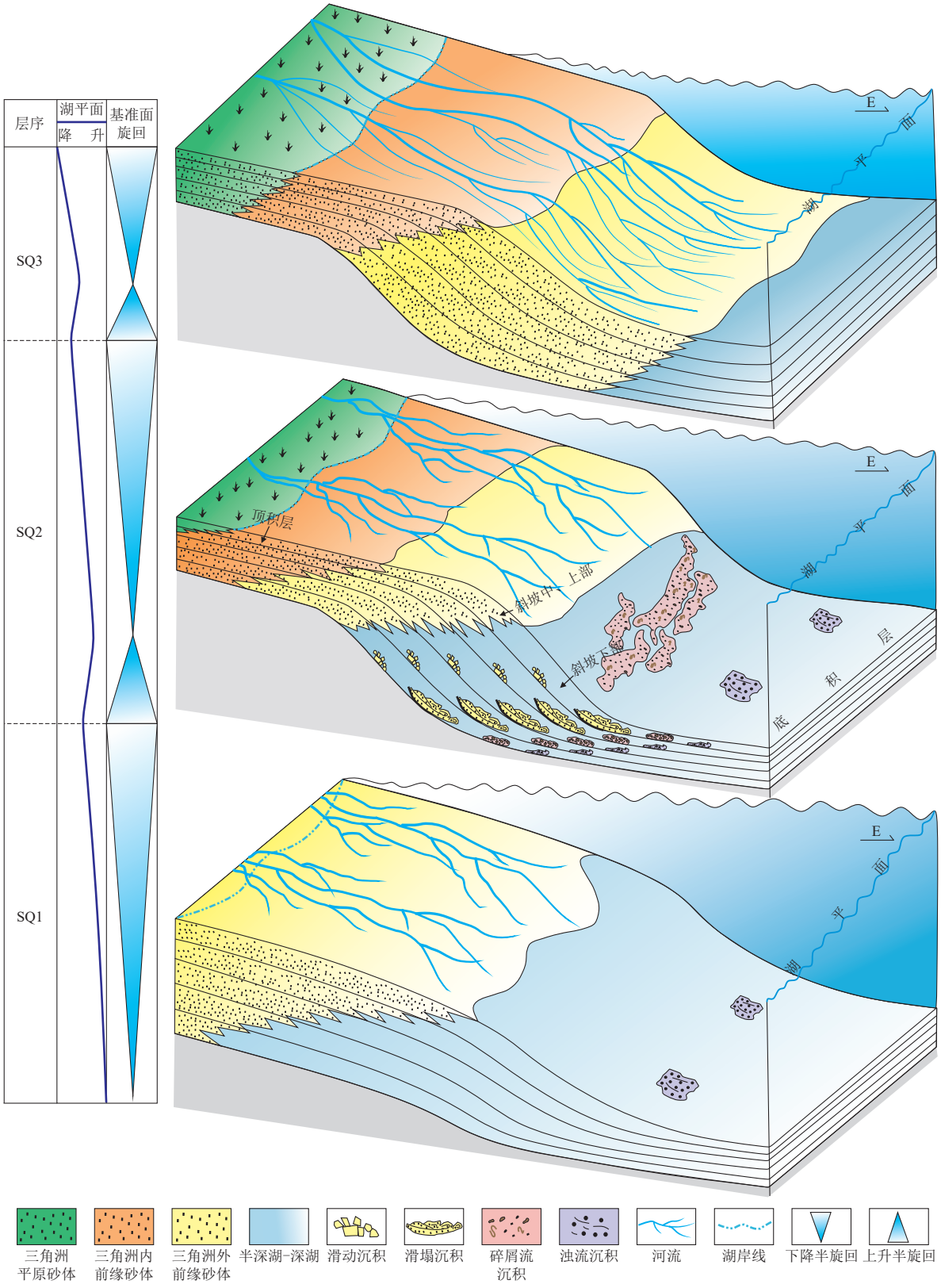


图12 鄂尔多斯盆地环县地区延长组中段沉积演化模式示意图

Fig. 12 Conceptual model of depositional evolution of the middle Yanchang Formation, Huanxian area, Ordos Basin

东部湖平面以下区域自坡折向湖盆中心可容空间增大,砂体大规模富集,形成东厚、西薄的分布格局。地震剖面上前积体转变为顶平、底凸的充填型结构,顶积层缺失,以底积层为主体(图3b);反演剖面显示该时期整体以高波阻抗(砂岩)为主,砂/地比极高(图11),大量沉积物沿斜坡向湖盆中心充填,使得底积层最为

发育。随着湖盆中心持续被底积层充填，湖盆底形渐趋平缓并相对抬升，最终导致沉积体系消亡。

6 讨论与启示

环县地区延长组中段前积体的演化模式并非孤例，在鄂尔多斯盆地内部乃至全球其他盆地中均具有可类比性。在盆地内部，陇东地区庆城和合水等地的三维地震资料同样揭示出多期前积体的发育。庆城油田延长组被划分为CF1—CF7共7套斜坡地层单元[52]，庆城北地区识别出11个前积地质体[53]，其沉积特征与环县地区具有高度一致性，均以长期缓慢湖退与短期快速湖侵的基准面变化为背景，发育“三角洲前缘-重力流”复合沉积体系，且砂体富集受*A/S*比值动态控制。这表明，本文所建立的*A/S*主控因素转换机制在鄂尔多斯盆地西南部具有区域普适性。从全球视角看，陆相湖盆与海相盆地在沉积动力学机制上具有相似性。例如，希腊爱琴海地区末次冰期以来的三角洲前积作用同样受海平面变化（可容空间）与沉积物供给的联合控制[54]。尽管海相与陆相的边界条件存在差异（海平面全球统一 vs. 湖平面局部变化），但*A/S*比值主导砂体分布格局的核心规律具有跨盆地的适用性。因此，本文提出的*A/S*主控因素转换模式不仅深化了对鄂尔多斯盆地延长组湖盆充填过程的认识，也为类似盆地的前积体研究与岩性油气藏勘探提供了可借鉴的理论依据与方法范式。

7 结论

1）环县地区延长组中段在长7^2最大湖泛期后进入湖退阶段。综合岩性界面、INPEFA曲线趋势及MESA频谱分析，识别出SQ1—SQ3三个三级层序，建立了具有“穿层”特征的高精度层序格架。长期下降半旋回与短期上升半旋回的组合，反映了该时期的长期缓慢湖退与短期快速湖侵的基准面变化过程。

2）延长组中段主要发育泥岩、粉砂岩及中-细砂岩，岩相分布呈现“西粗东细、北粗南细、上粗下细”的规律，据此建立了辫状河三角洲、滨浅湖和深水重力流3类沉积体系。在三级层序格架约束下，识别出包含多个朵叶体的3期前积体，物源主要来自西南方向，前积体整体向东北推进。SQ1沉积期主要发育辫状河三角洲前缘沉积，以细砂岩和粉砂岩为主；SQ2沉积期形成完整的前积结构，呈现“两端富砂、中部富泥”的三角洲-重力流组合特征；SQ3沉积期发育辫状河三角洲平原沉积，以中-粗砂岩为主。

3）前积体结构受湖平面变化可容空间与物源供给的相对变化（*A/S*比值）共同控制。SQ1沉积期湖平面高、下降缓慢，形成砂-泥互层、低砂/地比的底平、顶凸型前积体；SQ2沉积期湖平面快速下降，物源供给增强，发育近S形反射的透镜状前积体，斜坡角度最大，并伴生“滑动-滑塌-浊流”重力流沉积序列；SQ3沉积期基准面大幅下降，湖盆萎缩，形成以底积层为主、顶平、底凸的充填型前积体。

4）砂体富集的主控因素随*A/S*比值演化发生系统性转换。早期（SQ1沉积期）$A/S > 1$，可容空间过剩，物源供给成为限制砂体分布的主控因素，形成西厚、东薄的砂体分布样式；中期（SQ2沉积期）物源供给持续主导，在坡折带控制下形成“两端富砂、中部富泥”的三角洲-重力流沉积；晚期（SQ3沉积期）$A/S < 1$，可容空间不足，在物源供给充足的背景下，可容空间成为砂体富集的主控因素，沉积中心东移，砂体展布逆转为东厚、西薄。该模式揭示了陆相坳陷湖盆萎缩期沉积充填的动力学机制，明确了*A/S*比值主控因素的转换规律，对同类盆地岩性油气藏勘探具有重要启示。

参 考 文 献

[1] 朱筱敏，董艳蕾，曾洪流，等. 中国地震沉积学研究现状和发展思考[J]. 古地理学报，2020，22(3)：397-411.
Zhu Xiaomin，Dong Yanlei，Zeng Hongliu，et al. Research status and thoughts on the development of seismic sedimentology in China [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)，2020，22(3)：397-411.

[2] Zeng H L. Facies-guided 3-dimensional seismic modeling and reservoir characterization[D]. Austin：The University of Texas at Austin，1994.

[3] 朱筱敏，董艳蕾，曾洪流，等. 沉积地质学发展新航程：地震沉积学[J]. 古地理学报，2019，21(2)：189-201.
Zhu Xiaomin，Dong Yanlei，Zeng Hongliu，et al. New development trend of sedimentary geology：Seismic sedimentology [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)，2019，21(2)：189-201.

[4] Wood L J. Quantitative seismic geomorphology of Pliocene and Miocene fluvial systems in the northern Gulf of Mexico，U. S. A. [J]. Journal of Sedimentary Research，2007，77(9)：713-730.

[5] Yue Dali，Li Wei，Wang Wurong，et al. Fused spectral-decomposition seismic attributes and forward seismic modelling to predict sand bodies in meandering fluvial reservoirs[J]. Marine and Petroleum Geology，2019，99：27-44.

[6] Janocko M，Nemec W，Henriksen S，et al. The diversity of deep-water sinuous channel belts and slope valley-fill complexes[J]. Marine and Petroleum Geology，2013，41：7-34.

[7] 董艳蕾，朱筱敏，曾洪流，等. 黄骅坳陷歧南凹陷古近系沙一

层序地震沉积学研究[J]. 沉积学报, 2008, 26(2): 234-240.
Dong Yanlei, Zhu Xiaomin, Zeng Hongliu, et al. Seismic sedimentology study on Shayi sequence in Qinan Sag, Huanghua Depression [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26 (2): 234-240.

[8] 毕海龙, 李斌, 聂万才, 等. 地震沉积学在下石盒子组河流相层序界面识别中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(增刊1): 191-195.
Bi Hailong, Li Bin, Nie Wancai, et al. Application of seismic sedimentology in recognition of fluvial facies stratigraphic sequence interface for Lower Shihezi Formation [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(S1): 191-195.

[9] 张宪国, 林承焰, 张涛, 等. 大港滩海地区地震沉积学研究[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(1): 40-46.
Zhang Xianguo, Lin Chengyan, Zhang Tao, et al. Seismic sedimentologic research in shallow sea areas, Dagang [J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(1): 40-46.

[10] 刘书会, 宋国奇, 杨培杰. 地震沉积学在陆相盆地中的应用: 东营三角洲勘探实例[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(2): 360-368, 222-223.
Liu Shuhui, Song Guoqi, Yang Peijie. Seismic sedimentology in the exploration of a continental basin: a case history of Dongying delta[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014, 49(2): 360-368, 222-223.

[11] 李胜利, 张亚雄, 于兴河, 等. 含煤层系相控型致密气储层非均质性评价的沉积要素与甜点预测策略: 以鄂尔多斯盆地为例[J]. 地学前缘, 2025, 32(5): 389-403.
Li Shengli, Zhang Yaxiong, Yu Xinghe, et al. Sedimentary elements of heterogeneity evaluation and sweet spot prediction strategies on sedimentary facies controlled tight gas reservoirs in coal-bearing intervals: examples from the Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2025, 32(5): 389-403.

[12] 惠潇, 侯云超, 喻建, 等. 大型陆相坳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.

[13] 刘池洋, 王建强, 张东东, 等. 鄂尔多斯盆地油气资源丰富的成因与赋存-成藏特点[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(5): 1011-1029.
Liu Chiyang, Wang Jianqiang, Zhang Dongdong, et al. Genesis of rich hydrocarbon resources and their occurrence and accumulation characteristics in the Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(5): 1011-1029.

[14] 肖文华, 陈晓冬, 马国福, 等. 鄂尔多斯盆地宁庆区块二叠系盒8段煤系地层沉积环境判别[J]. 现代地质, 2025, 39(6): 1583-1594.
Xiao Wenhua, Chen Xiaodong, Ma Guofu, et al. Identification of sedimentary environment of coal-bearing strata of the He-8 member of the Permian system in the Ningqing Block, Ordos Basin [J]. Geoscience, 2025, 39(6): 1583-1594.

[15] 陈贺贺, 朱筱敏, 陈纯芳, 等. 鄂尔多斯盆地彬长区块延长组生储盖组合与油气富集特征[J]. 岩性油气藏, 2016, 28(2): 56-63.
Chen Hehe, Zhu Xiaomin, Chen Chunfang, et al. Characteristics of source-reservoir-caprock assemblage and hydrocarbon accumulation of Yanchang Formation in Binchang block, Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2016, 28(2): 56-63.

[16] 李凤杰, 王多云, 张庆龙, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组沉积相特征与层序地层分析[J]. 沉积学报, 2006, 24(4): 549-554.
Li Fengjie, Wang Duoyun, Zhang Qinglong, et al. Sedimentary facies characteristic and sequence stratigraphy analysis of Yanchang Formation in Longdong area, Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(4): 549-554.

[17] 赵振宇, 郭彦如, 王艳, 等. 鄂尔多斯盆地构造演化及古地理特征研究进展[J]. 特种油气藏, 2012, 19(5): 15-20.
Zhao Zhenyu, Guo Yanru, Wang Yan, et al. Study progress in tectonic evolution and paleogeography of Ordos Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2012, 19(5): 15-20.

[18] 龙盛芳, 侯云超, 赵玉华, 等. 鄂尔多斯盆地演武地区断裂特征及其对侏罗系油藏的影响[J]. 新疆石油地质, 2025, 46(3): 329-337.
Long Shengfang, Hou Yunchao, Zhao Yuhua, et al. Fault characteristics and influences on Jurassic reservoirs in the Yanwu area, Ordos Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2025, 46(3): 329-337.

[19] 孙乐, 齐宇, 王波, 等. 康宁气田盒四段浅水三角洲砂体刻画及沉积演化[J]. 中国海上油气, 2022, 34(4): 132-143.
Sun Le, Qi Yu, Wang Bo, et al. Sandbody characterization and sedimentary system evolution of shallow water delta in the H4 Member of Kangning Gas Field[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(4): 132-143.

[20] 职天佑, 吕奇奇, 刘伟伟, 等. 鄂尔多斯盆地中—新元古界碳酸盐岩储层特征及主控因素[J]. 断块油气田, 2025, 32(6): 930-940.
Zhi Tianyou, Lyu Qiqi, Liu Weiwei, et al. Characteristics and main controlling factors of carbonate reservoirs of Meso-Neoproterozoic, Ordos Basin [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2025, 32(6): 930-940.

[21] 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.

[22] 徐红艳, 王霆, 张建伍, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区长9段原油混源解析[J]. 断块油气田, 2025, 32(6): 967-975.

Xu Hongyan, Wang Ting, Zhang Jianwu, et al. Mixed-source analysis of crude oil from Chang 9 Member in Longdong area, Ordos Basin[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2025, 32(6): 967-975.

[23] 张杰, 李青阳, 王永刚, 等. 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[J]. 沉积学报, 2026, 44(3): 1132-1147.
Zhang Jie, Li Qingyang, Wang Yonggang, et al. Seismic progradational reflection and shale oil reservoir distribution patterns of the Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2026, 44(3): 1132-1147.

[24] 肖文华, 彭晓勇, 王建国, 等. 鄂尔多斯盆地环庆地区延长组中段沉积环境及有机质富集机制[J]. 现代地质, 2026, 40(1): 220-235.
Xiao Wenhua, Peng Xiaoyong, Wang Jianguo, et al. Sedimentary environment and organic matter enrichment mechanism of the middle Yanchang Formation in the Huanqing area, Ordos Basin[J]. Geoscience, 2026, 40(1): 220-235.

[25] 薛欢欢, 李景哲, 李恕军, 等. INPEFA在高分辨率层序地层研究中的应用: 以鄂尔多斯盆地油房庄地区长4+5油组为例[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2015, 45(7): 101-106.
Xue Huanhuan, Li Jingzhe, Li Shujun, et al. Application of INPEFA technique to research high resolution sequence stratigraphy: as an example of Youfangzhuang area Chang 4+5 in Ordos Basin[J]. Periodical of Ocean University of China, 2015, 45(7): 101-106.

[26] 闾伟, 董艳蕾, 葛家旺, 等. 基于频谱属性趋势分析和小波变换的层序界面识别方法: 以珠三坳陷中新统珠江组—韩江组为例[J]. 断块油气田, 2023, 30(3): 448-457.
Lyu Wei, Dong Yanlei, Ge Jiawang, et al. Identification method of sequence boundary based on INPEFA and wavelet transform: a case study of Miocene Zhujiang to Hanjiang Formation in Zhu-3 Depression[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2023, 30(3): 448-457.

[27] 侯献华, 王伟, 郑绵平, 等. 基于连续小波变换的黑北凹地砂砾储卤层沉积特征研究[J]. 地质学报, 2024, 98(10): 2956-2967.
Hou Xianhua, Wang Wei, Zheng Mianping, et al. Research of sedimentary characteristics on gravel brine reservoir in Heibei concave based on continuous wavelet transform [J]. Acta Geologica Sinica, 2024, 98(10): 2956-2967.

[28] 周亚伟, 杜玉洪, 谢俊, 等. INPEFA技术与小波变换在层序地层划分中的应用与对比: 以饶阳凹陷大王庄地区东营组三段为例[J]. 中国科技论文, 2021, 16(5): 494-501.
Zhou Yawei, Du Yuhong, Xie Jun, et al. Application and comparison of INPEFA technique and wavelet transform in sequence stratigraphic division: a case study in the third member of Dongying Formation in Dawangzhuang area, Raoyang sag[J]. China Sciencepaper, 2021, 16(5): 494-501.

[29] 谭程鹏, 于兴河, 李胜利, 等. 辫状河—曲流河转换模式探讨: 以准噶尔盆地南缘头屯河组露头为例[J]. 沉积学报, 2014, 32(3): 450-458.
Tan Chengpeng, Yu Xinghe, Li Shengli, et al. Discussion on the model of braided river transform to meandering river: as an example of Toutunhe Formation in southern Junggar Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(3): 450-458.

[30] 张志杰, 李伟, 杨家静, 等. 川中广安地区上三叠统须家河组岩相组合与沉积特征[J]. 地学前缘, 2009, 16(1): 296-305.
Zhang Zhijie, Li Wei, Yang Jiajing, et al. Lithofacies association and depositional characteristics of the Upper Triassic Xujiahe Formation in Guang'an area, Central Sichuan Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(1): 296-305.

[31] 袁钰轩, 李一凡, 樊太亮, 等. 川西南地区下寒武统细粒沉积岩高精度层序地层特征及其充填演化模式[J]. 地学前缘, 2023, 30(6): 162-180.
Yuan Yuxuan, Li Yifan, Fan Tailiang, et al. High-resolution sequence-stratigraphic characteristics and filling evolution model of Lower Cambrian fine-grained sedimentary rocks in southwestern Sichuan[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(6): 162-180.

[32] 林承焰, 张宪国, 董春梅. 地震沉积学及其初步应用[J]. 石油学报, 2007, 28(2): 69-72.
Lin Chengyan, Zhang Xianguo, Dong Chunmei. Concept of seismic sedimentology and its preliminary application[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(2): 69-72.

[33] 董春梅, 张宪国, 林承焰. 地震沉积学的概念、方法和技术[J]. 沉积学报, 2006, 24(5): 698-704.
Dong Chunmei, Zhang Xianguo, Lin Chengyan. Conception, method and technology of the seismic sedimentology[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(5): 698-704.

[34] 王俊, 赵家宏, 腾军, 等. 浅水三角洲前缘砂体地震沉积学研究: 以松南乾安地区上白垩统青三段为例[J]. 沉积学报, 2018, 36(3): 570-583.
Wang Jun, Zhao Jiahong, Teng Jun, et al. Seismic sedimentology research on shallow water delta front sandbodies: a case study on member 3 of upper Cretaceous Qingshankou Formation in Qian'an area, south Songliao Basin, NE China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2018, 36(3): 570-583.

[35] Jain K C, De Figueiredo R J P. Concepts and techniques in oil and gas exploration [M]. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 1982: 45-90.

[36] Brown A R. Interpretation of three-dimensional seismic data[M]. 3rd ed. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1991: 130-261.

[37] Sengbush R L, Lawrence P L, McDonal F J. Interpretation of synthetic seismograms[J]. Geophysics, 1961, 26(2): 138-157.

[38] Widess M B. How thin is a thin bed?[J]. Geophysics, 1973, 38(6): 1176-1180.

[39] Meckel L D Jr, Nath A K. Geologic considerations for stratigraphic modeling and interpretation [M]//Payton C E. Seismic stratigraphy—applications to hydrocarbon exploration. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1977: 417-438.

[40] Zeng Hongliu, Backus M M. Interpretive advantages of 90°-phase wavelets: part 1—modeling[J]. Geophysics, 2005, 70(3): C7-C15.

[41] Zeng Hongliu, Backus M M. Interpretive advantages of 90°-phase wavelets: part 2—seismic applications[J]. Geophysics, 2005, 70(3): C17-C24.

[42] Zeng Hongliu, Backus M M, Barrow K T, et al. Facies mapping from three-dimensional seismic data: potential and guidelines from a Tertiary sandstone-shale sequence model, Powderhorn field, Calhoun County, Texas[J]. AAPG Bulletin, 1996, 80(1): 16-45.

[43] Zeng H L. Significance of seismic phase in interpretation of stratigraphy and sedimentology: convention abstracts [C]. Canadian Society of Petroleum Geologists/Canadian Society of Exploration Geophysicists, 2003: 266S0131.

[44] Zeng Hongliu, Hentz T F. High-frequency sequence stratigraphy from seismic sedimentology: applied to Miocene, Vermilion Block 50, Tiger Shoal area, offshore Louisiana[J]. AAPG Bulletin, 2004, 88(2): 153-174.

[45] Sicking C J. Windowing and estimation variance in deconvolution[J]. Geophysics, 1982, 47(7): 1022-1034.

[46] Posamentier H W. Seismic geomorphology and depositional systems of deep water environments; observations from offshore Nigeria, Gulf of Mexico, and Indonesia [C]//64th EAGE Conference & Exhibition, 2001: cp-5-00075.

[47] 曾洪流, 朱筱敏, 朱如凯, 等. 陆相坳陷型盆地地震沉积学研究规范[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(3): 275-284.
Zeng Hongliu, Zhu Xiaomin, Zhu Rukai, et al. Guidelines for seismic sedimentologic study in non-marine postrift basins[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 275-284.

[48] Backus G E, Gilbert J F. Numerical applications of a formalism for geophysical inverse problems [J]. Geophysical Journal International, 1967, 13(1/3): 247-276.

[49] 姜忠正, 陈井瑞, 沙旭光, 等. 基于主成分分析的地震波形指示模拟反演方法(PCA-SMI)[J]. 地球物理学进展, 2026, 41(2): 660-672.
Jiang Zhongzheng, Chen Jingrui, Sha Xuguang, et al. Principal component analysis-based seismic waveform indication inversion method (PCA-SMI)[J]. Progress in Geophysics, 2026, 41(2): 660-672.

[50] 苗贺, 雷晗煜. 四级层序格架约束下的波形指示反演及其在砂泥岩薄互层中的应用[J]. 新疆石油地质, 2026, 47(3): 279-287.
Miao He, Lei Hanyu. Waveform indication inversion constrained by a fourth-order sequence frame-work and its application in thin sandstone-mudstone interbeds[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2026, 47(3): 279-287.

[51] 高君, 毕建军, 赵海山, 等. 地震波形指示反演薄储层预测技术及其应用[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(1): 142-145.
Gao Jun, Bi Jianjun, Zhao Haishan, et al. Seismic waveform inversion technology and application of thinner reservoir prediction[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(1): 142-145.

[52] 惠潇, 侯云超, 屈童, 等. 鄂尔多斯盆地延长组前积型层序地层结构及庆城油田实例分析[J]. 石油勘探与开发, 2025, 52(5): 1028-1040.
Hui Xiao, Hou Yunchao, Qu Tong, et al. Progradational sequence stratigraphic architecture of the Triassic Yanchang Formation and a case study of Qingcheng Oilfield, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2025, 52(5): 1028-1040.

[53] 崔景伟, 朱如凯, 徐旺林, 等. 鄂尔多斯盆地延长组等时地层对比方案与沉积新认识[J]. 古地理学报, 2023, 25(1): 93-104.
Cui Jingwei, Zhu Rukai, Xu Wanglin, et al. New cognition and isochronous stratigraphic division scheme of the Yanchang Formation sedimentation in Ordos Basin [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2023, 25(1): 93-104.

[54] Lykousis V, Karageorgis P A, Chronis T G. Delta progradation and sediment fluxes since the last glacial in the Thermaikos Gulf and the Sporades Basin, NW Aegean Sea, Greece[J]. Marine Geology, 2005, 222/223: 381-397.

(编辑 肖彦君)