

地震沉积学在中国中西部盆地沉积储层研究中的应用

徐兆辉¹, 曾洪流², 赵文智¹, 朱筱敏³, 胡素云¹

1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

2. 美国德克萨斯大学奥斯汀分校, 奥斯汀 78757

3. 中国石油大学(北京), 北京 102249

摘要: 随着油气勘探向深层、薄层、复杂非常规领域推进, 深度挖掘地震数据中的地质信息, 厘清沉积相和储层特征与分布, 成为提升勘探开发效率的关键, 地震沉积学是有效手段。地震沉积学基于地震数据研究沉积岩和沉积过程, 是继地震地层学和层序地层学之后的一门新兴学科。模式驱动的地震地貌学(定性)和数据驱动的地震岩性学(定量)是组成地震沉积学的两个分支。常用技术包括相位旋转、地层切片、属性提取、频谱分解、RGB 融合、主因子分析和随机拟合等。其中, 地震地貌学的技术组合包括相位旋转、地层切片、频谱分解和 RGB 融合; 地震岩性学的技术组合包括相位旋转、属性提取、主因子分析和随机拟合。将地震沉积学应用于中国中西部的四川、塔里木、准噶尔和柴达木盆地不同层系(寒武系、奥陶系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系、新近系和第四系), 模式、数据双驱动, 恢复沉积相、预测储层。应用结果表明, 地震沉积学能够满足勘探对象向深层、薄层、隐蔽型转变的技术需求, 是复杂油气藏勘探开发有效解决方案。

关键词: 地震沉积学; 地震地貌学; 模式驱动; 地震岩性学; 数据驱动; 应用实例

中图分类号: P624

收稿日期: 2025-11-12

Application of seismic sedimentology in the study of facies and reservoirs in basins of Central and Western China

Xu Zhaohui¹, Zeng Hongliu², Zhao Wenzhi¹, Zhu Xiaomin³, Hu Suyun¹

1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China

2. Bureau of Economic Geology, Jackson School of Geosciences, The University of Texas at Austin, Austin 78757, USA

3. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

Abstract: With the advancement of hydrocarbon exploration toward deeper, thinner, and more geologically complex unconventional reservoirs, extracting geological information from seismic data and elucidating the characteristics and spatial distribution of facies and reservoirs have become key factors in enhancing exploration and development efficiency. Seismic sedimentology provides an effective technical approach to achieve these goals. Seismic sedimentology, which investigates sedimentary rocks and depositional processes based on seismic data, has emerged as a new discipline following seismic stratigraphy and sequence stratigraphy. It consists of two complementary branches: the model-driven seismic geomorphology (qualitative) and the data-driven seismic lithology (quantitative). Commonly employed techniques include phase rotation, stratal slicing, seismic attribute

基金项目: 国家科技重大专项“柴达木盆地盆地山体系油气成藏机制与新领域勘探技术”(2025ZD1400600); 中国石油勘探开发研究院与美国德克萨斯大学奥斯汀分校国际合作项目“四川盆地蒸发岩相关碳酸盐岩储层研究”

(15HT10500000010)、“海相碳酸盐岩地震沉积学综合研究技术及其在塔里木盆地的应用”(19HTY5000008)

第一作者: 徐兆辉(1981—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事地震沉积学与油气成藏研究及教学工作. ORCID: 0000-0002-5685-4908. Email: tadxu@126.com

extraction, spectral decomposition, RGB blending, principal component analysis (PCA), and stochastic inversion. Specifically, seismic geomorphology typically integrates phase rotation, stratal slicing, spectral decomposition, and RGB blending; whereas seismic lithology combines phase rotation, attribute extraction, PCA, and stochastic inversion. By applying seismic sedimentology to different stratigraphic intervals in the Sichuan, Tarim, Junggar, and Qaidam basins central-western China—including the Cambrian, Ordovician, Triassic, Jurassic, Cretaceous, Paleogene, Neogene, and Quaternary systems—both model-driven and data-driven approaches have been used to reconstruct depositional facies, predict reservoir architecture, and infer fluid properties. Application results demonstrate that seismic sedimentology effectively addresses the technical challenges associated with the transition of exploration targets toward deep, thin, and subtle reservoirs, making it a powerful and efficient solution for the exploration and development of complex hydrocarbon accumulations.

Keywords: seismic sedimentology; seismic geomorphology; model driven; seismic lithology; data driven; application example

0 引言

地震地层学是基于地层学原理,通过地震数据研究等时界面内地层产状、尖灭/侵蚀关系、沉积相及地质演化史的一门学科(Fisher et al., 1973; Vail et al., 1977),引发了地质学领域的一次变革(Wilson, 1965)。层序地层学研究等时地层格架内具成因联系的沉积相(Posamentier and Vail, 1988; Van Wagoner et al., 1988),在储层、岩性地层和隐蔽圈闭预测方面展现出显著优势(Brown et al., 2004)。随着计算机运算能力不断提升,地震数据采集和处理技术持续进步,尤其是勘探对象逐渐从简单的构造圈闭转向隐蔽的岩性地层圈闭,三维地震资料的空间信息挖掘引起关注。三维地震资料开始被用于提取切片,表征曲流河地貌和储层分布(Dahm and Graebner, 1979; Brown, 1985)。1998年,地震沉积学被正式提出(Zeng et al., 1998a; Zeng et al., 1998b),经过不断探索实践,相关技术日益成熟(林承焰等, 2007; 朱筱敏等, 2009; 朱红涛等, 2011; 刘化清等, 2012; 林承焰等, 2017),目前已经由纵波地震拓展到横波地震(徐兆辉等, 2024)。

中国中西部盆地(四川、塔里木、准噶尔、柴达木)地质条件复杂,油气资源丰富,含油气层系从寒武系至第四系均有分布。近年来,油气勘探逐渐向深层、薄层、复杂岩性拓展,亟需解决沉积储层预测难题。本文基于地震、钻井和分析测试等资料,结合露头及现代沉积,针对不同层系和岩性组合,解释地震资料所反映的地质现象,采用“将今论古”方法,分析沉积储层特征与分布,为油气勘探开发提供支撑。

1 地震沉积学内涵概述

地震沉积学利用地震数据,从岩性和地貌两个角度,刻画沉积相、沉积结构和沉积过程。它包括两个相互耦合的分支学科:数据驱动的地震岩性学和模式驱动的地震地貌学(Zhao et al., 2024)。实际上,地震地貌学和地震岩性学分别有着相对独立的发展历程,在应用过程中逐步完善并取得成效。地震地貌学主要利用三维地震解释地貌特征、沉积构造及演化,尤其关注深水沉积体系中的水道、海底扇、滑塌及浊积体系等地貌单元在三维地震中的响应(Posamentier, 2001; Posamentier and Venkatarathnan, 2003),对钻井资料依赖程度较低。地震岩性学通过分析地震波形和属性(如振幅、频率、相位等),预测岩性、孔隙度和孔隙流体

成分(John, 1991)。地震岩性分析作为常用手段, 能够将单一地震道或相邻地震道的波形特征与岩石属性建立联系(Cross and Lesenger, 1988), 因此, 地震岩性学对钻井资料要求较高, 分析结果精度取决于高质量的井震标定。

实际上, 地震地貌学和地震岩性学受限于其各自提出时期的资料品质、技术方法、计算机运算能力等, 均存在一定的适用条件(表 1)。地震沉积学将地震岩性学和地震地貌学融合成互为补充的有机整体, 大幅降低了从地震数据解释地质信息过程中的多解性。

表 1 地震地貌学、地震岩性学、地震沉积学异同及适用条件

Table 1 Comparison of differences and applicable conditions in seismic geomorphology, seismic lithology, and seismic sedimentology

学科	驱动类型	优势	劣势	适用条件
地震地貌学	模式驱动	依据地质模式和 Walther 相序(Walther, 1894), 将今论古, 解释沉积环境	只能定性预测沉积相, 不能定量计算岩性、物性及流体性质	对钻井依赖程度低
地震岩性学	数据驱动	依据地震、测井、测试等数据, 定量计算岩性和储层, 亦称储层地球物理	定量地震属性(如波阻抗)无法对应岩性或储层。例如, 高波阻抗可对应砾岩, 也可对应砂岩	钻井较多的勘探中后期地区
地震沉积学	模式、数据双驱动	地震地貌学和地震岩性学耦合, 取长补短, 利用地质模式和井震分析测试数据, 在相控约束下, 定量计算储层物性和流体性质。例如, 高波阻抗在冲积扇地貌环境中倾向于砾岩, 在曲流河地貌环境中则倾向于砂岩		不同勘探程度地区

以冲积扇-曲流河体系中的岩性预测为例, 地震地貌学将地震资料所反映的地貌特征与地质模式相结合, 定性判识冲积扇和曲流河沉积环境, 明确扇根、扇中、扇端、点坝、河道等亚相分布, 但亚相中的岩性信息难以准确预测; 而地震岩性学则通过地震属性, 定量计算不同位置的属性信息(如波阻抗), 但其所处沉积环境难确定。在碎屑岩沉积环境中, 砾岩和砂岩的波阻抗接近, 仅靠波阻抗难以区分两种岩性。为解决这一问题, 地震沉积学融合地震地貌学和地震岩性学, 提供有效解决方案: 首先, 地震地貌学可以恢复沉积相, 区分曲流河与冲积扇平面范围。其次, 地震岩性学计算波阻抗大小, 在曲流河范围内, 砾岩出现概率较小, 因而高波阻抗应解释为砂岩; 而在冲积扇范围内, 高波阻抗则应解释为砾岩, 因为冲积扇中砂岩出现概率较小。

地震沉积学常用关键技术包括相位旋转、地层切片、频谱分解、地震属性提取、RGB 融合、主因子分析、随机拟合等, 在实际应用过程中, 地震地貌学和地震岩性学所采用的技术组合有所差异。地震地貌学技术组合为相位旋转、地层切片、频谱分解和 RGB 融合; 地震岩性学技术组合为相位旋转、地震属性提取、主因子分析和随机拟合。本文重点讨论地震沉积学在不同沉积环境中的应用效果, 具体技术原理可参见相关文献(Xu et al., 2019; 朱筱敏等, 2019)。

2 四川盆地应用实例

2.1 川中地区寒武系龙王庙组

(1) 地质背景

川中地区位于四川盆地川中古隆起之上，构造稳定且具继承性，区内寒武系龙王庙组发现安岳大气田。龙王庙组在川中地区埋深超过 4 500 m，形成于浅水碳酸盐岩缓坡环境，岩性为白云岩（杨伟强等，2024），其下伏沧浪铺组 and 上覆高台组均是以粉砂岩和泥页岩为主的碎屑岩，这种岩性组合导致龙王庙组与上、下地层存在明显的波阻抗差异。因此，龙王庙组虽然埋深较大，但其对应的地震反射能量强，为开展地震沉积学研究奠定基础(曾洪流等，2018; Zhao et al., 2024)。

(2) 关键问题

川中地区龙王庙组是安岳气田主力产层，虽然宏观构造背景和沉积古环境相对明确，但是在勘探开发过程中仍面临诸多挑战。其中，高石梯地区和磨溪地区的气藏特征差异显著，精细刻画沉积环境、精确厘定储层特征与分布成为关键地质问题。目的层总体白云岩化程度高，排除了岩性差异对地震属性预测储层物性的干扰，为精确计算储层提供条件。

(3) 资料基础

本文所用三维地震数据面积 2 500 km²，采集于 2011 年，面元 20 m×20 m，目的层频宽 10-60 Hz、主频 30 Hz。根据层速度测算，地震垂向分辨率约 50 m。优选 35 口资料齐全的钻井，用于井震标定和地震岩性学研究。

(4) 应用效果

北美 San Andreas 断裂构造应力环境与川中地区类似，具备右行走滑特征，因此，可以将其作为现代实例，“将今论古”与川中龙王庙组类比分析。结果发现，古（川中龙王庙组）今（San Andreas）两者环境相似，走滑断裂对地貌具有控制作用。具体而言，San Andreas 走滑断裂控制洛杉矶陆上至海底地貌，川中帚状断裂对龙王庙组的古地貌也有明显控制作用（图 1）。

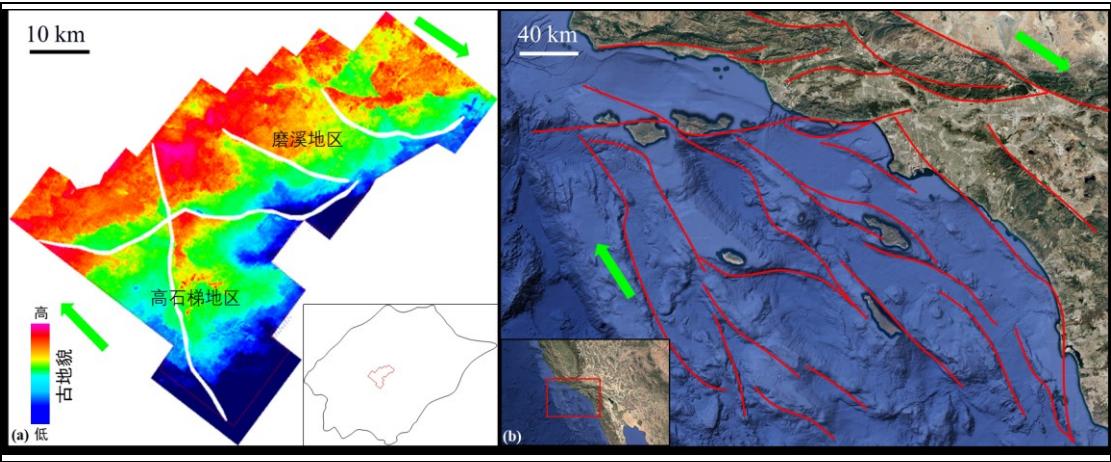


图 1 川中龙王庙组古地貌 (a) 与北美 San Andreas 断裂 (b)

Fig. 1 Paleogeomorphology of the Longwangmiao Formation in Central Sichuan (a) and the San Andreas Fault in North America (b)

川中地区帚状走滑断裂不仅控制古地貌，还影响沉积相和储层分布。地震地貌图（图 2a）显示走滑断裂两侧特征迥异：北侧磨溪地区以红色（低频）为主，平面呈块状；南侧高石梯地区以蓝色（高频）为主，平面呈环带状。结合区域沉积环境判断，磨溪古地貌高，属台地至上斜坡，为岩溶高地-斜坡；高石梯古地貌低，受潮汐影响发育潮控颗粒滩。地震岩性学定量计算储层厚度（0-65 m），与地震地貌学耦合，发现地处高地至斜坡的磨溪地区储层厚且连片；位于下斜坡低部位的高石梯地区储层薄，因受海水改造而呈环带状（图 2b）。

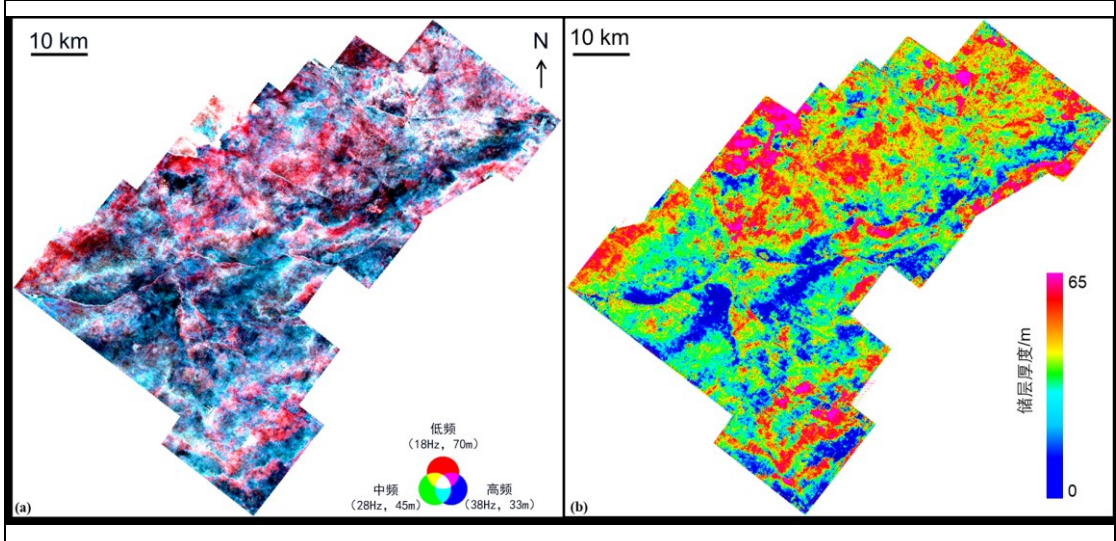


图 2 川中龙王庙组地震地貌图 (a) 和地震岩性学储层分布图 (b)

Fig. 2 Seismic geomorphology map (a) and seismic lithology reservoir distribution map (b) of the Longwangmiao Formation in Central Sichuan Basin

2.2 川中地区三叠系嘉陵江组

(1) 地质背景

川中地区嘉陵江组沉积时期属于低纬度半干旱至干旱气候，周缘可见深海、古陆、局限台地及开阔台地。嘉陵江组自下而上分 5 段（嘉一段至嘉五段），现今埋深超过 2 500 m。早三叠世，研究区周边隆升，环境转为半局限，西南部存在季节性河流；嘉二段沉积时期，河流携带来自康滇古陆的碎屑物质进入研究区，形成海相碳酸盐岩、陆相碎屑岩和局限蒸发岩三元混积环境。嘉陵江组其他段沉积时期，总体属于海相局限-半局限环境，岩性以灰岩、白云岩、膏岩和盐岩为主（Hu et al., 2017; Zhao et al., 2018）。

(2) 关键问题

嘉陵江组勘探历程久，但至今未获规模油气发现，主要原因是海陆过渡环境形成的碎屑岩（泥岩和粉砂岩）、蒸发岩（膏岩和盐岩）和碳酸盐岩（灰岩和白云岩）三元混积复杂体系中，难以准确落实岩性，更无法精确预测有利储层分布。因此，准确识别混积环境岩相分布成为预测储层的先决条件，而三种岩相的混积也为 RGB 融合技术提供应用场景。

(3) 资料基础

三维地震测网面积 2 500 km²，面元 20 m×20 m，频宽 0-60 Hz，目的层嘉陵江组地震主频 30 Hz。测井结合取心分析，计算地震垂向分辨率约 50 m。三维地震范围内共有 31 口

井钻穿嘉陵江组，测井曲线和其中 3 口井的 500 余块岩心分析测试资料，为井震标定和地震岩性学研究奠定扎实资料基础。

(4) 应用效果

利用地震岩性学，井震结合分别计算了嘉二段膏岩、碳酸盐岩和碎屑岩的平面分布。创新利用 RGB 融合技术分析岩相，即将膏岩赋予红色、碳酸盐岩赋予绿色、碎屑岩赋予蓝色，三者融合得到三元混积岩相展布（图 3）。预测结果与井数据吻合，更为关键的是有效计算了无井区的岩相。图中可以看出，西南侧以蓝色为主，中部以红色和绿色为主，东北侧绿色和红色占优。

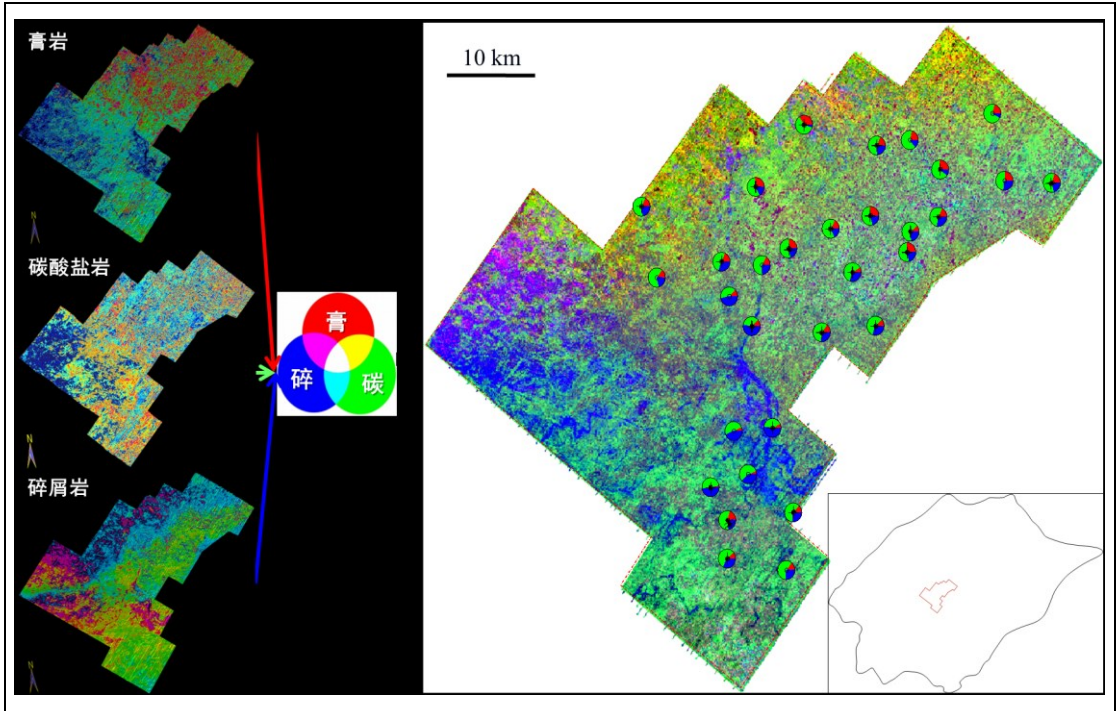


图 3 川中嘉陵江组地震岩性学预测岩相过程图

Fig. 3 Seismic lithology prediction of lithofacies process diagram of the Jialingjiang Formation in Central Sichuan Basin

实钻井岩性标定结合区域沉积背景，对岩相分布作如下解释：西南侧以碎屑岩为主（A），可见红色箭头所指的曲流河（河道内蓝色代表高 GR 碎屑岩）；中部以海陆过渡相蒸发岩、碎屑岩和碳酸盐岩为主（B）；东北侧转变为海相碳酸盐岩（C）（图 4a）。这一沉积规律可见于现代圣诞岛（图 4b），该岛南侧存在碎屑注入，中部潟湖析出蒸发岩，西北侧潮道口沟通太平洋，水体盐度趋于正常(Trichet et al., 2001)。

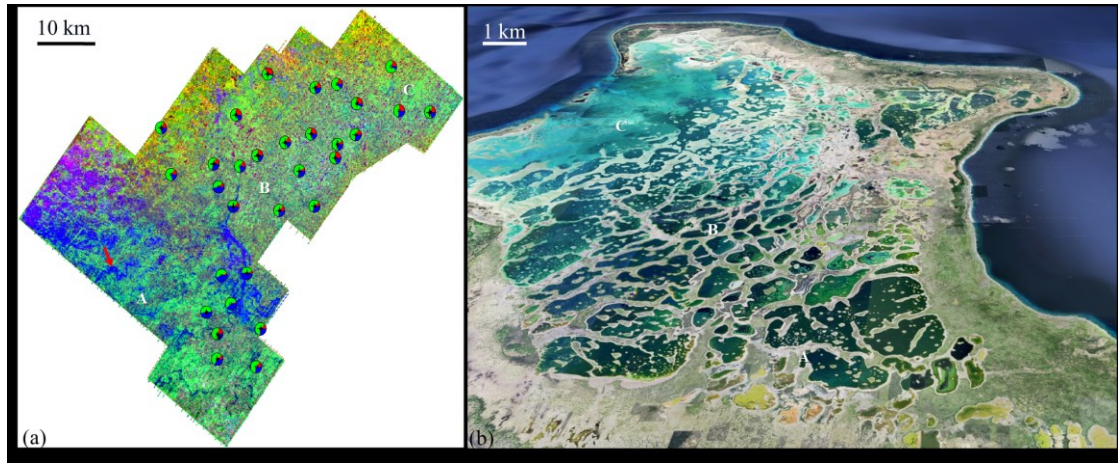


图 4 川中嘉二段地震岩性学岩相分布 (a) 和圣诞岛现代混积环境 (b)

Fig. 4 Seismic lithologic lithofacies distribution of the Jialingjiang Formation in Central Sichuan Basin (a) and modern mixed sediments of Christmas Island (b)

3 塔里木盆地应用实例

3.1 古城地区寒武系肖尔布拉克组

(1) 地质背景

古城地区位于塔里木盆地塔东南古隆起，构造相对稳定。该区寒武系肖尔布拉克组现今埋深超过 8 000 m，形成于浅水碳酸盐岩缓坡环境(徐兆辉等，2024)。古城地区南部的塔南古陆间歇性提供碎屑物质，东北侧则是沿满加尔凹陷展布的轮南-古城台缘带；古城地区北部为海相沉积，基本不受陆源碎屑影响，岩性以白云岩为主(Xu et al., 2024)。

(2) 关键问题

轮南地区针对台缘带钻探的轮探 1 井在肖尔布拉克组发现油气，预示位于同一台缘带南段的古城地区同样具备勘探潜力。与轮南地区相比，古城地区肖尔布拉克组缺乏钻井资料，超深层沉积古环境、有效源岩及储层是困扰勘探决策的关键问题。

(3) 资料基础

两块三维地震 (GCB2 和 GCLP) 覆盖面积分别为 630 km² 和 3 020 km²，面元大小 25 m × 12.5 m，目的层频宽 5-45 Hz、主频 20 Hz。古城地区无井钻揭肖尔布拉克组，鉴于早寒武世相似的构造背景和沉积古环境，故借用川中地区寒武系龙王庙组井震关系，开展古城地区肖尔布拉克组地震岩性学研究，结果证实研究流程的适用性，为无井区开展定量研究提供借鉴(徐兆辉等，2025)。

(4) 应用效果

地震地貌学分析表明 (图 5a)，古城地区 GCB2 范围内受南部塔南古陆和北部满加尔凹陷控制，自南向北发育海陆过渡相 (I 区) 和海相 (II 区)。其中，海相又分为西部 3 个近南北走向的带状和东部的席状两大相区。西部 3 个带状相区中的第 2 个可见线状特征，近北东-南西向成排展布；东部相区发育走滑断裂。前人解剖现代 Florida Keys 潮汐改造型颗粒滩 (图 5b)，考虑到其类似的沉积背景，可类比分析古城地区沉积古环境。结合区域沉积

环境和地震地貌特征，开展古城北部海相区的沉积相解释：西部为 3 期台内礁滩体系、东部为斜坡至盆地。受与洋流相关的潮汐影响，第 2 期礁滩体系被改造，形成潮汐改造型颗粒滩。

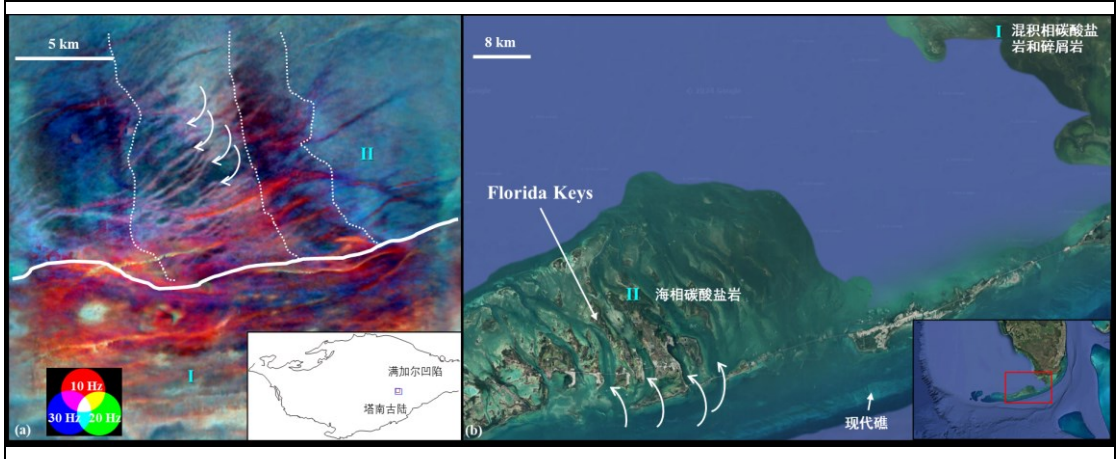


图 5 古城 GCB2 范围内肖尔布拉克组地震地貌图 (a) 和北美 Florida Keys 卫星影像 (b)

Fig. 5 Seismic geomorphology map of the Xiaorbulak Formation in GCB2 of Gucheng (a) and satellite image of the Florida Keys in North America (b)

利用地震沉积学预测了更大的 GCLP 范围内的地貌特征和储层分布 (图 6)，发现台内、斜坡至盆地均发育储层，厚度 10-50 m。其中，台内 3 期礁滩体范围内发育 3 类储层：一是早期碳酸盐岩颗粒滩储层、二是潮道间颗粒滩遭风化淋滤形成的岩溶储层、三是潮道口潮汐三角洲储层。台缘斜坡至盆地发育 2 类储层：一是斜坡坡脚的线物源斜坡扇储层、二是盆地内点物源盆底扇储层。扇体物源均来自台缘礁，其中，同沉积走滑断裂作为通道携带碎屑物至盆地形成盆底扇。地震地貌图结合横切斜坡扇和盆底扇的剖面，可清晰观察到重力流相关储层的特征（平面朵叶形、剖面透镜状）。值得指出的是，模式驱动的地震地貌学未预测出盆底存在厚度异常，说明盆底扇与周围沉积厚度差异不大；但数据驱动的地震岩性学表明储层在同沉积断裂末端散开，形成地震可分辨的扇体储层，断裂内部为过路不沉积，储层不发育。

除了多类型储层之外，通过地震、钻井和野外露头，在肖上段的台内前积体坡角处发现泥灰岩烃源岩，具备生烃条件，为玉尔吐斯组烃源岩缺失区的油气勘探提供新思路（徐兆辉等，2024）。

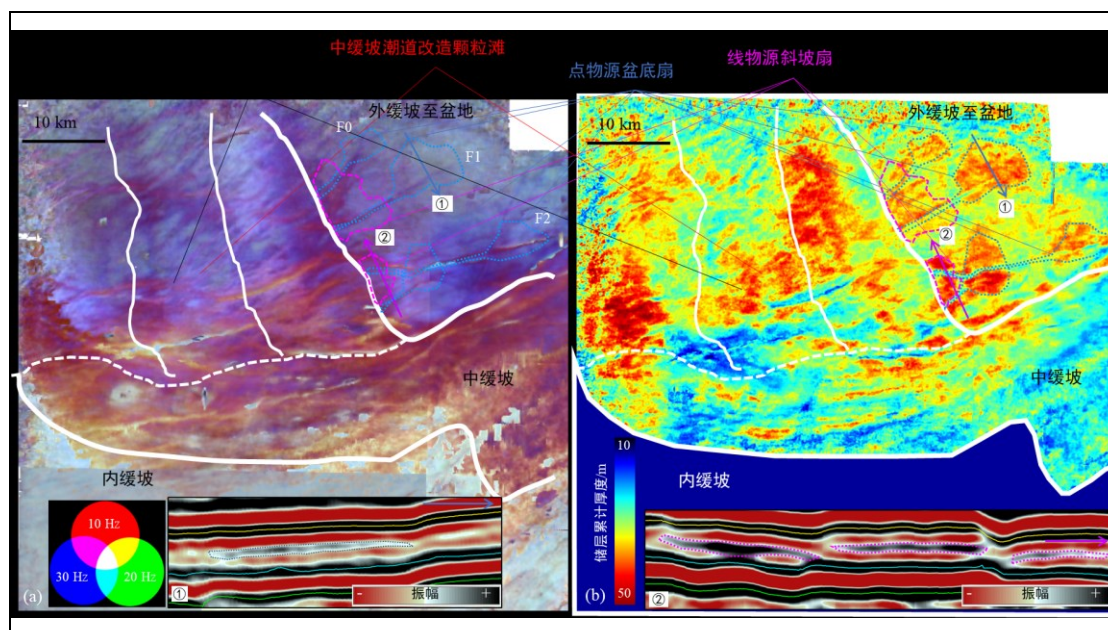


图 6 古城 GCLP 范围内肖尔布拉克组地震地貌图 (a) 和地震岩性学储层分布图 (b)

Fig. 6 Seismic geomorphology map (a) and seismic lithology reservoir distribution map (b) of the Xiaorbulak Formation in GCLP of Gucheng

3.2 秋里塔格地区白垩系巴什基奇克组

(1) 地质背景

秋里塔格地区位于塔里木盆地北部库车坳陷, 该区白垩系主力产层为巴什基奇克组, 现今埋深超过 5 000 m。巴什基奇克组沉积古气候逐渐从潮湿转为干燥, 形成辫状河三角洲和扇三角洲。岩性以砂砾岩、砂岩和泥岩为主, 储层主要发育在砂岩中。本文研究的秋里塔格构造带中部 (简称中秋) 地区以辫状河三角洲至滨浅湖环境为主, 砂体广布, 储层非均质性 (徐兆辉等, 2022)。

(2) 关键问题

中秋地区钻探的中秋 1 井在白垩系揭示千亿方规模凝析气藏, 展现油气勘探潜力, 但是后续部署的预探井效果未达预期, 表明储层具有空间非均质性。中秋地区地表高山陡立、地下构造复杂, 造成地震资料品质不高, 地质认识不深入, 严重制约了勘探拓展。在这种地表、地下双复杂条件下, 超深层 ($>6\,000\text{ m}$) 砂岩有效储层预测成为关键问题。本文利用构造分区、精细解释的方法, 在等时格架下最大限度挖掘地震资料中的地质信息。

(3) 资料基础

三维地震资料面积 790 km^2 , 面元 $30\text{ m}\times 10\text{ m}$, 目的层主频 25 Hz, 采样间隔 4 ms。利用三维测网范围内的 6 口井测井资料和孔隙度解释数据, 开展储层预测。同时, 基于区域实钻井统计计算了砂地比, 用于辅助地震沉积学解释。

(4) 应用效果

虽然中秋地区仍处勘探早期, 但是精细井震标定保证了地震沉积学在该区的有效应用。通过地震地貌学与井震标定后的实钻井分析, 验证了 RGB 分频融合色所代表的地质意义 (图 7)。其中, 将低频赋予红色, 代表单位厚度内波阻抗界面较少的地层结构, 在中秋地区为块状砂岩 (如中秋 1 井 6140-6160 m 段); 将高频赋予蓝色, 代表单位厚度内波阻抗界面较

多的地层结构，为高频间互的薄层砂泥岩（如中秋 1 井 6085-6090 m 段或中秋 101 井 6250-6270 m 段）；将中频赋予绿色，代表单位厚度内波阻抗界面中等的地层结构，在中秋地区可以是砂岩（如中秋 2 井 6330-6340 m 段），也可以是泥岩（如中秋 1 井 6040-6060 m 段）。

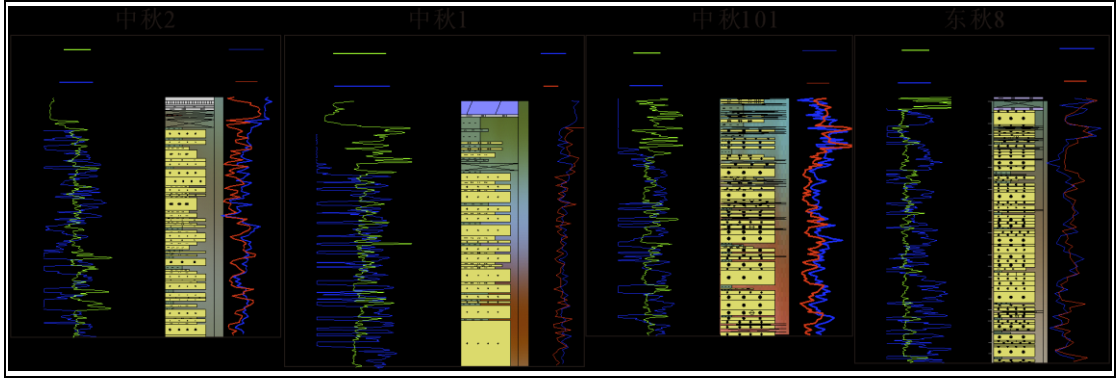


图 7 中秋地区巴什基奇克组地震地貌学与实钻井标定

Fig. 7 Seismic geomorphology of the Bashkikek Formation in the Zhongqiu Area and calibration with drilled wells

地震地貌学研究结果（图 8a）表明，中秋地区发育中-厚层砂岩。其中，厚层（低频、红色）砂岩散布于中部的断层中盘和南部的断层下盘；中等厚度（中频、绿色）砂岩广布于北部的断层上盘和南部的断层下盘；薄层（高频、蓝色）砂岩则主要位于断层中盘的北侧。地震岩性学计算的储层厚度与砂体具有对应关系，砂体厚的地区储层也较发育（图 8b）。另外，辫状河三角洲前缘远端的砂体和储层呈北东-南西走向，与下平原砂体和储层走向存在明显差异，应该是滨浅湖水流改造作用所致，总体与区域砂地比趋势相符（图 8c）。

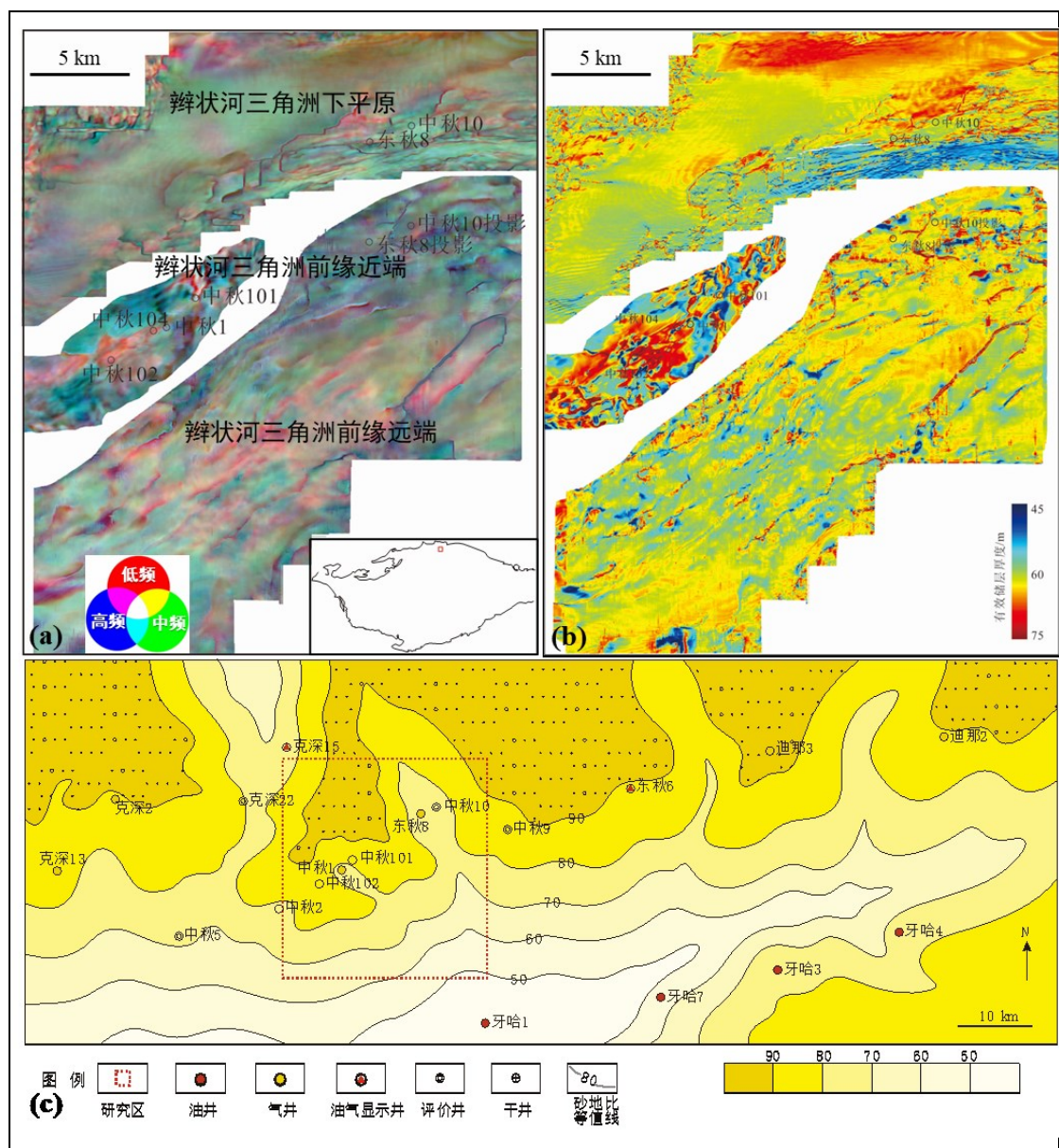


图 8 中秋地区巴什基奇克组地震地貌学结构 (a)、地震岩性学储层 (b) 和区域砂地比图 (c)

Fig. 8 Seismic geomorphology predicted structure (a), seismic lithology predicted reservoirs (b), and regional sandbody/strata ratio distribution (c) of the Bashkikek Formation in Zhongqiu Area

4 准噶尔盆地应用实例

(1) 地质背景

玛湖地区位于准噶尔盆地西北缘的中央坳陷，三叠纪发育冲积扇、扇三角洲、河流三角洲和湖泊等。本文目的层所在的克拉玛依组是三叠系重要的含油气层系，钻井揭示的砂砾岩、砂岩、粉砂岩及泥岩主要形成于冲积扇、辫状河三角洲及湖泊环境。目的层克拉玛依组顶部 S_1 砂层组上部被白碱滩组厚层泥岩封盖，区域分布稳定（厚度 30-50 m），是主力产层之一。

(2) 关键问题

玛湖油田储层大多发育在砂砾岩中，钻井证实油层纵向叠置、横向连片。油田开发实践表明：单井产量受储层物性控制，开发效果与储层渗透率密切相关。因此，准确辨识沉积相，预测优质储层分布是油田高效开发的关键。

(3) 资料基础

高密度三维地震面积 600 km²，面元 12.5 m×12.5 m，有效频宽 10-70 Hz，主频 30 Hz，垂向采样间隔 2 ms。声波时差曲线测算平均层速度 4 300 m/s，相应的地震分辨率约 30 m。35 口井常规测井资料，18 口井孔隙度测井解释数据，14 口井岩心资料用于本文研究。

(4) 应用效果

高分辨率地震资料和丰富的钻井数据，为研究冲积扇-河流环境的沉积储层分布提供基础。利用地层厚度法恢复 S₁ 砂层组古地貌，发现区内隆凹相间（图 9a）。受古地貌控制，沉积物在地貌低部位（可容纳空间较大）卸载，具备“沟谷控砂”特征。地震地貌学结果表明，地貌低部位的卸载区形成两类沉积相：曲流河（A）和冲积扇（上扇（B）和下扇（C））。其中，冲积扇相区单层厚度大于曲流河相区（图 9b），两个相区内实钻井也分别表现出典型的冲积扇粒序（X93 井）和曲流河二元结构（FN401 井）。

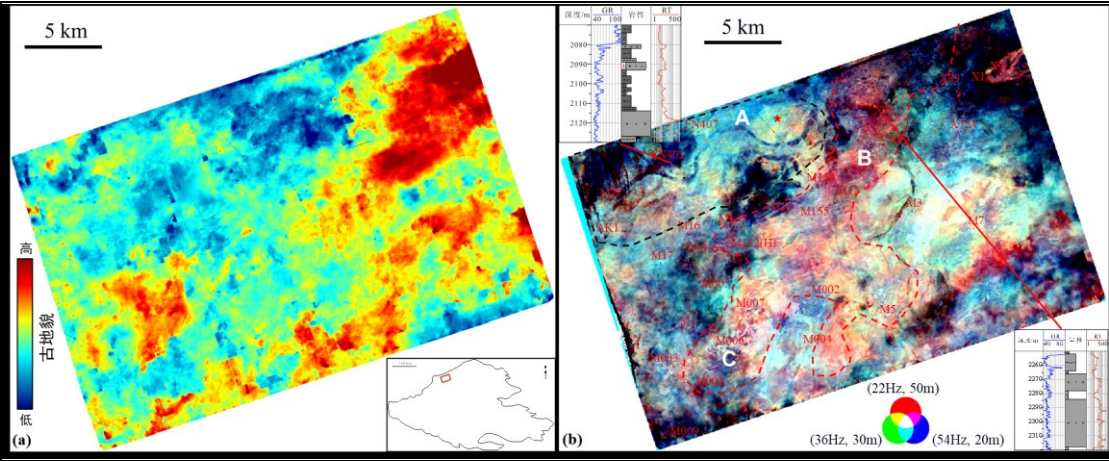


图 9 玛湖地区克拉玛依组 S₁ 砂层组沉积古地貌 (a) 和地震地貌特征 (b)

Fig. 9 Paleogeomorphology (a) and seismic geomorphological features (b) of the S₁ sandstone of Karamay Formation in Mahu Area

利用地震岩性学，井震数据驱动，恢复了储层分布：曲流河边滩和冲积扇下扇两个亚相内储层较厚，介于 5-9 m（图 10a）。将单井产油气水情况投到储层分布图上，发现两个相区差异明显：边滩相区单井产能明显更好，这反映了更高的结构成熟度和成分成熟度。此外，研究区内冲积扇与曲流河相邻，似乎有悖于 Walther 相序，但高精度井震深入分析发现：冲积扇沉积较早，曲流河形成稍晚，S₁ 砂层组是由早晚两种沉积体系叠置而成(Xu et al., 2019)。实际上，来自不同物源的冲积扇与曲流河可以并存，现代博斯腾湖就是典型代表，来自南部的冲积扇形成之后，与自西向东流经其北侧的曲流河相交（图 10b）。因此，等时性的判定需要考虑时间单位，地质上的等时性通常是以百万年作为时间单位，在这一时间单位内，上述 S₁ 砂层组和现代博斯腾湖两种并存的沉积体系，均可视为同期产物。

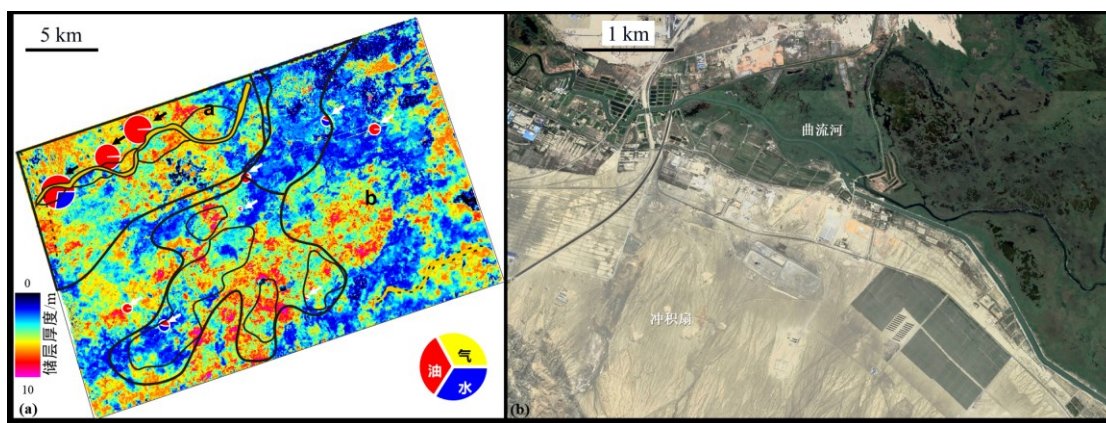


图 10 玛湖克拉玛依组地震岩性学预测储层与单井产能 (a) 和博斯腾湖卫星影像 (b)

Fig. 10 Seismic lithology prediction of reservoirs and single well productivity of the Mahu Karamay Formation (a) and satellite image of Bosten Lake (b)

5 柴达木盆地应用实例

5.1 马仙地区侏罗系

(1) 地质背景

马仙地区位于柴达木盆地北缘（柴北缘）马海-大红沟凸起北部，由马北和南八仙构造组成，区内已发现南八仙等油气藏。钻井多集中于马仙构造高部位，揭示中侏罗统，而下侏罗统尚无井钻遇。高部位侏罗系遭受强烈剥蚀，少量井揭示侏罗系发育砂岩、泥岩、煤等。地处马仙地区南部的伊北凹陷埋深超过 4 500 m，是侏罗系主力生烃凹陷，其上中浅层油气显示活跃。

(2) 关键问题

经过多年生产实践，构造高部位的油气成藏规律基本清楚，油气增储上产难度增大，勘探亟需向外围及深层拓展。其中，马仙地区南侧的伊北凹陷是深层战略拓展主方向。前期认为马仙隆起阻碍祁连山物源通过，难以向仙南地区卸载；北 1 井在马仙地区以南钻遇棕红色侏罗系，判断缺乏有效烃源岩，因此，烃源岩和储层是制约勘探决策的关键。

(3) 资料基础

2024 年连片处理的马仙三维地震面积 880 km²，面元 30 m×15 m，有效频宽 0-60 Hz，主频 33 Hz，采样间隔 4 ms。研究区内仙 3、仙 12、仙北 2 等井钻遇侏罗系，测井曲线和少量取心资料用于标定沉积相、岩性和物性。通过精细解释新处理的三维地震资料，发现典型的沟谷体系，表明物源可以通过马仙隆起为洼陷区提供碎屑物质。同时，老井复查发现马仙西斜坡中侏罗统暗色泥岩和煤，指示围斜区发育有效烃源岩，为风险勘探提供关键决策依据。

(4) 应用效果

利用地层等厚法恢复了侏罗系残余古地貌，整体表现为自东向西依次降低的 3 级阶地（图 11a）。其中，第二阶地为马仙主体区，侵蚀沟谷形态清晰，钻井证实老山基岩以花岗岩为主，还有片麻岩、板岩等，推测沟谷内充填碎屑岩沉积。利用地震地貌学恢复了研究区内地层垂向结构（图 11b），发现沟谷内为蓝色（高频、薄层），老山偏红色（低频、厚层），

仅少量老山顶部表现为蓝色。在西南部沟谷体系终止的位置，可见朵叶状卸载区，地震地貌学揭示其颜色偏红，表明砂体较厚。

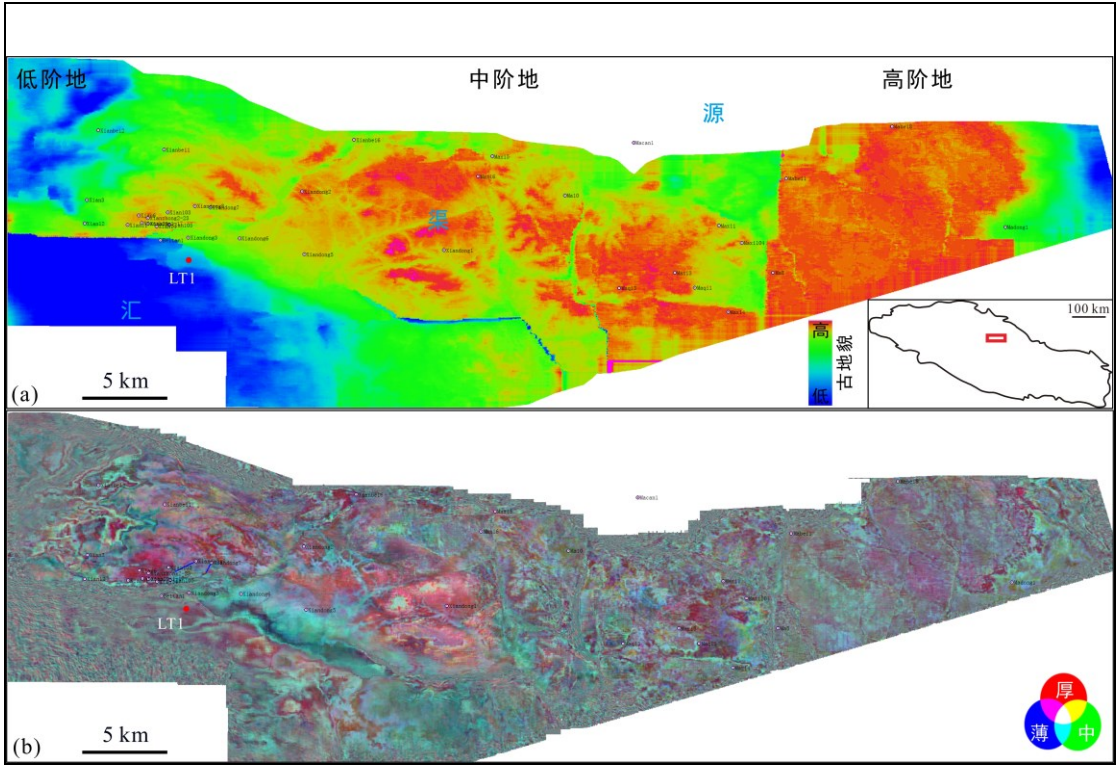


图 11 马仙地区侏罗系沉积古地貌 (a) 和地震地貌图 (b)

Fig. 11 Paleogeomorphology (a) and seismic geomorphology map (b) of Jurassic in the Maxian Area

为了详细分析地貌对源汇体系的控制作用，利用三维地震精细刻画了沟谷构成的“渠”。在顺“渠”的剖面 A-A’上，可以看到黑色波峰呈断续透镜状，表现出幕式充填而非一次形成的沟谷携砂特征（图 12a 和 c）。在垂直“渠”的剖面 B-B’上，能够看到隆（U）凹（S）相间地貌，其中，主力沟谷对应 S3。多数隆起表现为低频块状地层结构，但 U3 所指隆起因遭受强烈风化导致垂向高频层状岩溶结构（垂直渗流带、水平潜流带、原状地层），是其表现为高频蓝色的主因（图 12b 和 d）。利用源汇体系理论和地震地貌学技术，构建“源渠汇砂储藏”勘探理念，部署路探 1（LT1）风险探井在侏罗系和古近系路乐河组气测显示丰富，侏罗系压裂试气日产 $6 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，揭开勘探新领域。

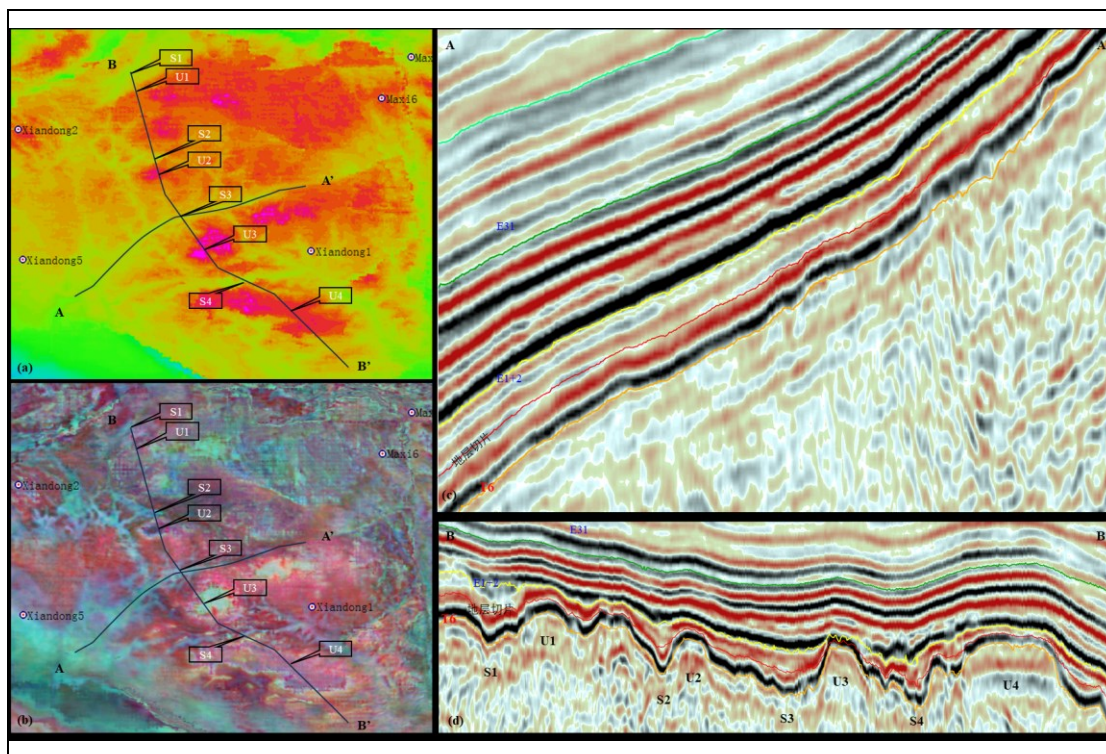


图 12 马仙地区侏罗系古地貌 (a)、地震地貌 (b) 和顺渠 (c) 与切渠 (d) 地震剖面

Fig. 12 Paleogeomorphology (a), seismic geomorphology (b), seismic profile along canal (c) and seismic profile perpendicular to channel (d) of Jurassic in Maxian Area

5.2 冷湖地区古近系

(1) 地质背景

冷湖构造带位于柴北缘，构造轴线北西-南东走向，长 100 km，宽 10-15 km，勘探面积 1 200 km²，目前已在冷湖构造带三、四、五和七号发现多个油气田。本文研究区位于冷湖四-五号，目的层为古-新近系。古近系下干柴沟组上段 (E_3^2) 岩性以灰绿色粗砂岩、中-细砂岩夹棕红色泥岩为主，形成于扇三角洲、辫状河三角洲及湖泊环境(薛闻，2015)。

(2) 关键问题

冷湖地区前期勘探围绕构造高点，虽有油气发现，但因构造高陡，断层破坏导致规模有限。跳出构造高点，走向广阔的斜坡区是大势所趋。但是斜坡区是否发育优质砂岩储层，能否在斜坡背景上形成有效圈闭，是首当其冲需要解决的难题。前期认为物源来自北东方向，物源流向与斜坡倾向一致，难以构成有效圈闭，固有认识长期制约勘探向斜坡区拓展。

(3) 资料基础

本文采用的冷湖三维地震面积 1 018 km²，面元 20 m×10 m，覆盖次数 990，目的层 E_3^2 的频宽 0-60 Hz、主频 30 Hz，采样间隔 2 ms。已有钻井大多位于构造高部位，地层因断裂导致破碎，井震资料匹配性较差。斜坡区仅有一口老井 (T1) 和一口 2023 年部署的风险探井 (NT1) 的井旁地震可靠，被用于标定和解释。值得指出的是，斜坡稳定背景为层序格架建立和地震精细解释提供有利条件。

(4) 应用效果

地震地貌学揭示研究区西南侧广泛发育多类型河道，大致北西流向。单支河道宽度介于 30-500 m，平均 70 m（图 13a）。切片揭示 T1 井位于构造轴线以东的“几”字形河道，对应深度的录井岩性和 GR 测井曲线表现为典型的曲流河特征。依据地震沉积学部署的 NT1 风险探井钻遇古近系分支河道，其中充填厚 4 m 的粉砂岩，薄片显示分选较好、磨圆中等，物性分析孔隙度 5.72%、渗透率 $0.13 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

研究区西北侧展现出由北向南的辫状河特征，与南部的北西向曲流河交汇，这种来自不同物源方向的辫状河与曲流河并存的情况，亦见于现代巴音布鲁克地区（图 13b）。该区源自西南方的辫状河在东北方下游地区演化为曲流河，与来自西部的曲流河体系交汇。

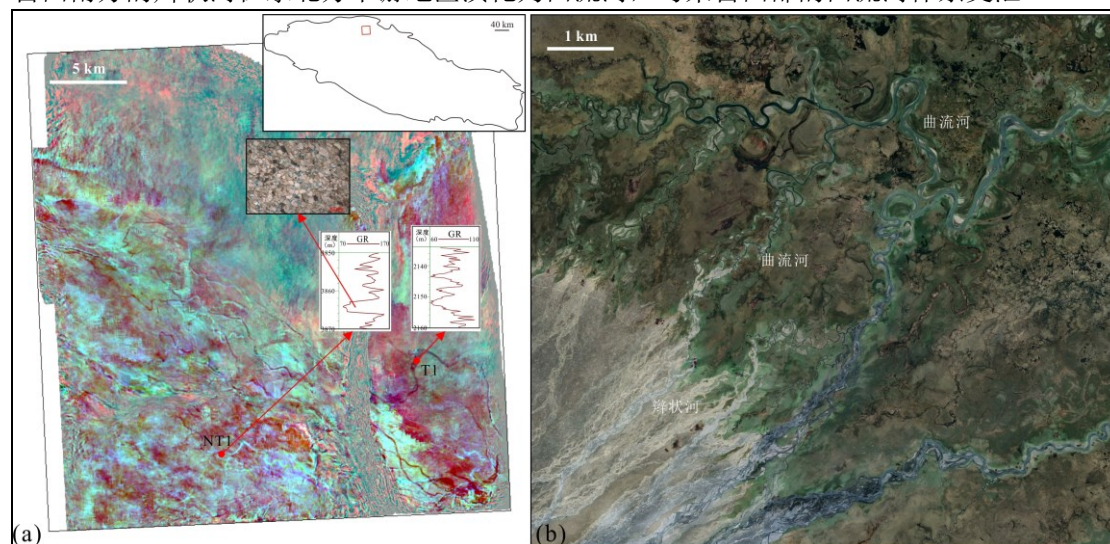


图 13 冷湖地区古近系地震地貌 (a) 和巴音布鲁克现代沉积卫星影像 (b)

Fig. 13 Paleogene seismic geomorphology in the Lenghu area (a) and modern sedimentary satellite image of Bayinbuluke (b)

5.3 冷湖地区新近系

(1) 地质背景

冷湖地区新近系上干柴沟组 (N_1) 的构造及沉积环境与 E_3^2 具继承性，但岩石颗粒变细，泥地比升高。勘探发现研究区新近系发育砾岩、中粗砂岩、细砂岩、粉砂岩和泥岩，岩性变化反映沉积环境（冲积扇、扇三角洲和滨浅湖）变迁(薛闻，2015)。

(2) 关键问题

新近系的地质研究和油气勘探面临与 E_3^2 相似的难题，因为冷湖构造西斜坡没有钻井，对应的 N_1 和下油砂山组 (N_2^1) 沉积环境不清楚，储盖组合及油气勘探潜力亟待探索。构造高部位钻井揭示，新近系泥地比高于古近系，砂岩与泥岩波阻抗差异更明显，有利于地震沉积学刻画富砂河道。另外，新近系呈现细粒沉积特征，且埋深较小，垂向电性差异不大，需要强化地质体横向展布规律的挖掘利用。

(3) 资料基础

冷湖三维地震在 N_1 和 N_2^1 对应段的频宽为 0-60 Hz、主频 25 Hz。NT1 风险探井在对应深度段开展了系统测井和取心，相关数据被用于本次地震沉积学分析。

(4) 应用效果

针对 N_1 段 4 个砂组 (VIII、VI、IV 和 I) 和 N_2^1 开展地震地貌学研究, 揭示不同形态的河道, 部分砂组特征被 NT1 井钻探证实(Xu et al., 2023)。 N_1 _VIII 砂组切片 (图 14a) 揭示自东南向西北由低弯度曲流河经高弯度曲流河, 最终演变为网状河。 NT1 井部署在中下游高弯度曲流河的边滩, 其对应段测井曲线为“钟形”, 铸体薄片显示分选较好、磨圆中等, 实测储层孔隙度 15.94%、渗透率 $13.41 \times 10^{-3} \mu m^2$ 。 N_1 _VI 砂组切片 (图 14b) 揭示众多流向不一、相互交织的曲流河, 其中, 位于东南部的一条偏红融合色 (单层较厚) 的河道形态清晰、结构完整。 它自东部由顺直河向西北部变为中弯度至高弯度曲流河, 再向西则变为 2 条分支网状河, 清晰的河型变化结合成像测井解释的古水流方向证实水流大致自东向西。

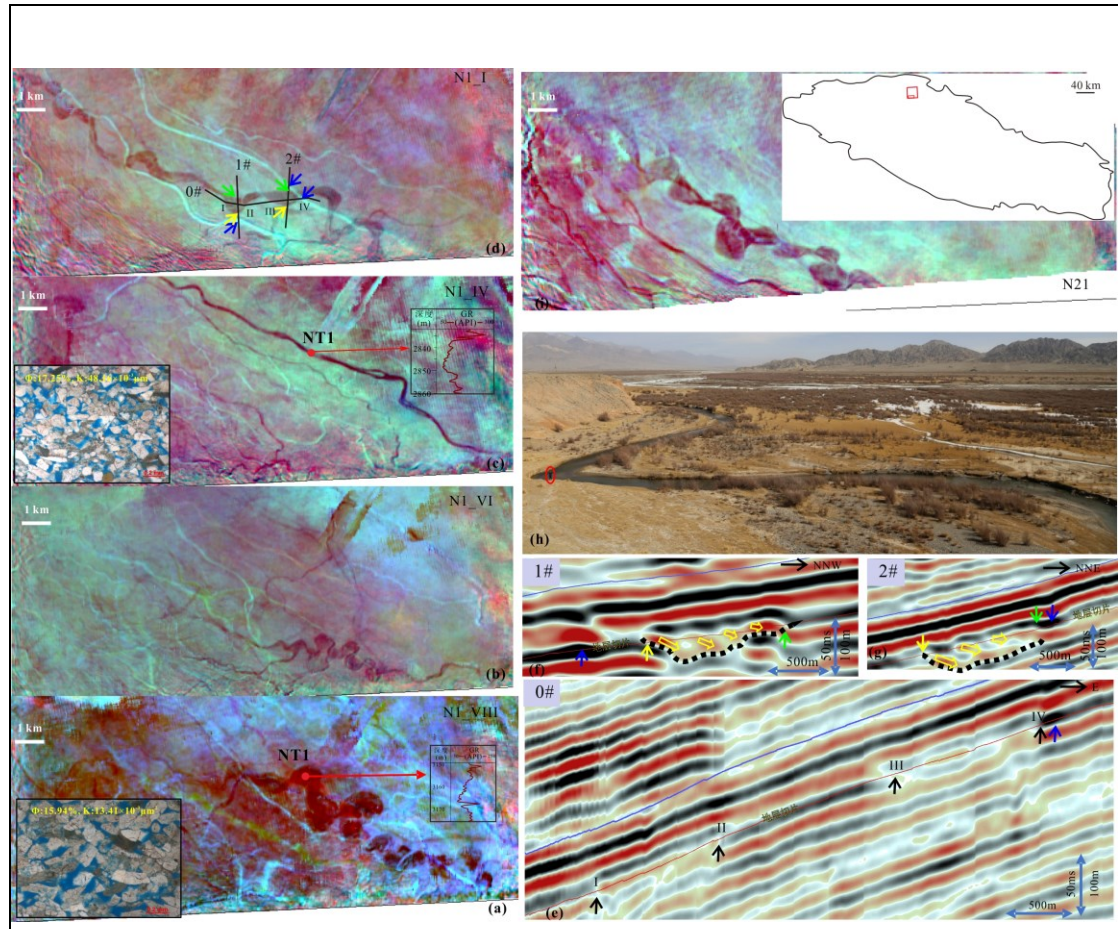


图 14 冷湖地区新近系不同河型 (a-d, i) 切片、平行 (e) 及垂直 (f-g) 点坝的地震剖面 and 鱼卡河照片 (h)

Fig. 14 Neogene seismic geomorphology in the Lenghu area for different channels (a-d, i), seismic profiles parallel (e), and vertical to (f-g) point bars, and an image of the Yuqia River (h)

埋深更小的 N_1 _IV 砂组切片展示一条深红融合色的顺直河, 其规模大于同期其他河道, 自东南向西北几乎贯穿整个研究区 (图 14c)。 NT1 井测井曲线对应段为箱型, 岩心铸体薄片显示分选中等偏差、磨圆中等, 实测孔隙度 17.25%, 渗透率 $48.16 \times 10^{-3} \mu m^2$ 。埋深最小的 N_1 _I 砂层组切片 (图 14d) 揭示一条中高弯度曲流河与其南北侧的两条顺直河交切, 三者流向相同。除平面地貌差异之外, 笔者又选择了 3 条地震剖面 (0#、1#和 2#), 详细分析河道结构特征。在顺流向的 0#剖面 (图 14e) 上, I-II 和 III-IV 平行流向切过 2 个边滩, 地震剖面对应 2 个弱波谷 (红色), 有下切现象; II-III 之间为河道间, 表现为强波峰 (黑

色),无下切现象。在东侧 III-IV 之间边滩以东的剖面上,北侧的顺直河对应强振幅亮点(蓝箭头)。在垂直流向切过西侧 I-II 之间边滩的 1#剖面(图 14f)上,黄箭头和绿箭头分别指示该边滩的南北两岸,2 个箭头之间有“顶平底凸”下切现象,下切谷内波峰和波谷组合出侧积特征(黄色空心箭头指示砂岩);蓝箭头标注的南侧顺直河在 1#剖面上对应亮点。2#剖面切过东侧 III-IV 之间的边滩(图 14g),边滩(黄、绿箭头之间)轮廓“顶平底凸”、内部同样侧积,对应北侧顺直河的位置(蓝箭头)亦为亮点。

在现代鱼卡河(图 14h)可以观察到中-高弯度曲流河与顺直河同期共生,局部发生交切(红圈内人作比例尺)。在下油砂山组(N_2^1)的地震地貌学切片上,可以识别出典型的高弯度曲流河,边滩内的河道迁移轨迹依稀可见,局部存在截弯取直现象(图 14i)。

5.4 三湖地区第四系

(1) 地质背景

三湖坳陷位于柴达木盆地中部,构造总体平缓,厚逾 3 000 m 的第四系富含生物气。第四系七个泉组岩性以灰色至棕黄色泥岩、粉砂质泥岩和泥质粉砂岩为主,夹有粉砂岩,浅层发育咸化湖相蒸发岩。因成岩作用较弱,沉积物粒度总体向上变细,疏松高孔,为生物气富集提供储集空间。七个泉组(K13 至 K1)及浅层(K0 至 K0')随着气候变化和湖平面振荡,沉积环境在河流、三角洲和湖泊之间交替变化,浅层呈现蒸发特征(徐兆辉等, 2024)。

(2) 关键问题

三湖生物气构造控藏,构造主体区气藏开发进入中后期,含水率上升,稳产压力大,亟需勘探拓展。由于地层普遍含气,导致纵波地震资料降频下拉,难以开展井震(纵波)标定,无法建立等时地层格架。尽管钻井密度较大,但横向非均质性强,井间地质条件仍难以落实。因此,建立等时地层格架,落实构造细节,明确沉积微相演化及盖层分布,成为增储上产的关键。横波九分量三维地震数据首次在本区工业化应用,为弱成岩气云区开展地震沉积学研究提供绝佳机会。

(3) 资料基础

本文采用的三湖坳陷台东地区九分量横波三维地震面积 82.5 km²,面元 20 m×10 m,采样间隔 2 ms,有效频宽 5-60 Hz,目的层主频 26 Hz(Xu et al, 2023)。区内 4 口钻井的测井曲线数据用来标定解释地震地貌学识别的地质现象。

(4) 应用效果

利用横波三维地震,在 K13 至 K0'标准层识别出丰富的地质现象,因篇幅所限,仅选取 K12、K10 和 K0'标准层的地震地貌学结果,分析曲流河和盐沼的地质特征。

K12 地震地貌图(图 15a)展示了 4 条(①至④)不同流向的中低弯度曲流河,其中①-③号大致东西流向、④号南西流向。根据 RGB 融合颜色判断,其充填地层单层厚度有明显差异:①号最厚(S4-115 井揭示厚 6 m 单砂体)、③号最薄(S1-37 井揭示厚 1.8 m 单砂体)。类比鄱阳湖现代浅水三角洲沉积,可见与 K12 相似的中低弯度曲流河(图 15b)。依据该预测结果,针对河道砂体部署的 S4-115 井初期日产 1.2×10^5 m³,展示了砂体良好的储集能力。

K10 地震地貌图(图 15c)清晰展现规模不同的 2 套(①和②)河流体系,两者均从东向西流动,下游存在分支现象。其中,南侧的①号河道更宽、流域更广、充填砂体更厚(融

合色为紫红色)。位于①号主河道上的 S31 井对应段 GR 曲线呈箱型, 揭示厚 11 m 砂岩; 位于②号主河道的 SS2 井对应段 GR 曲线介于箱型和钟形之间, 揭示厚 6 m 砂岩; 位于两套河流体系之间的 S4-1 井对应段 GR 曲线呈齿化箱型, 单砂体较薄, 融合色为黄绿色。三湖地区地表台吉乃尔湖周缘发育形态类似的河流体系(图 15d), 但流向近南北, 与 K10 融合切片形态相似但流向存在差异。

K0'地震地貌图(图 15e)展示独特的环状特征, 区域气候和沉积环境联合分析, 将其解释为蒸发盐沼(Liu et al., 2025)。根据地貌特征和发育规模, 认为该盐沼是在干旱环境下形成的, 据此认识钻探的湖浅 1 井实测地层水氯离子浓度超过 45000 mg/L, 为典型盐湖环境, 与现代乍得湖东北部具可比性(图 15f)。依据盐沼分布优选老井 SH0-6 在极浅层(398.8-431.5 m)开展试气, 获日产生物气 $3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。近期在构造主体区开展极浅层老井试气, 涩北一号、二号气田极浅层已累计产气超 $2 \times 10^8 \text{ m}^3$, 展现极浅层新领域资源潜力。

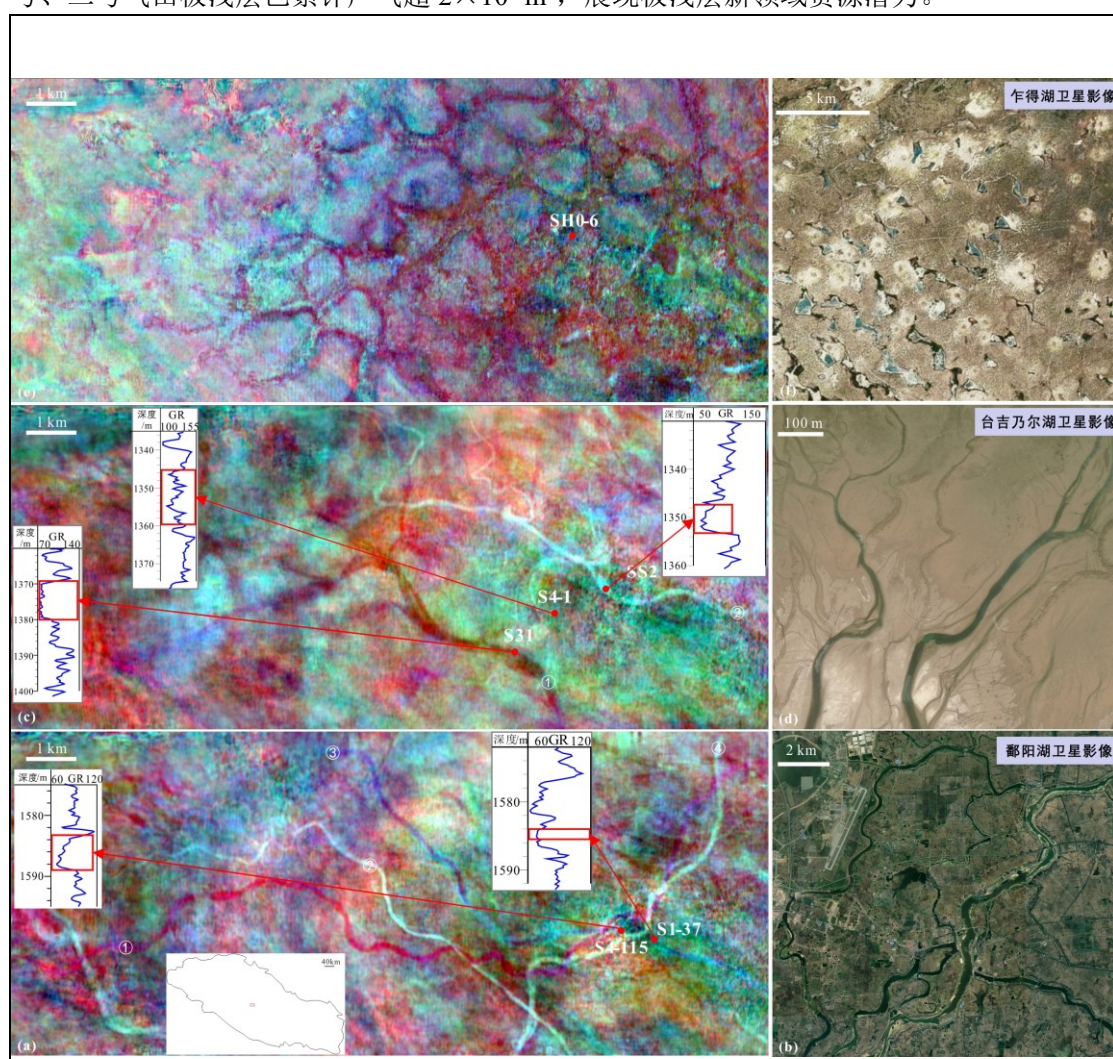


图 15 三湖地区第四系地震地貌示曲流河 (a、c)、盐沼 (e) 及现代类比实例 (b、d、f)

Fig. 15 Quaternary seismic geomorphology showing meandering rivers (a, c) and saline flats (e) in Sanhu Area, and modern analogous examples (b, d, f)

6 结论

(1) 地震沉积学利用地震资料研究沉积岩和沉积过程, 包括地震地貌学和地震岩性学两大分支, 是继地震地层学和层序地层学之后发展起来的新兴学科, 特别适用于刻画薄且隐蔽的地质现象。

(2) 地震沉积学关键技术涵盖相位旋转、地层切片、频谱分解、地震属性提取、RGB融合、主因子分析、随机拟合等。根据不同地质条件和研究目标, 可将上述单项技术组合成地震地貌学和地震岩性学技术序列, 地震地貌学(模式驱动)与地震岩性学(数据驱动)相耦合可以定性和定量解决地质问题。

(3) 将地震沉积学广泛应用于中国中西部的四川、塔里木、准噶尔和柴达木盆地的寒武系、奥陶系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系、新近系和第四系, 结果证实该学科能够解决不同环境中的沉积相刻画、储层表征等难题, 研究认识推动油气生产取得实效。

References

- Brown, A. R., 1985. The Role of Horizontal Seismic Sections in Stratigraphic Interpretation. in Seismic Stratigraphy II-An Integrated Approach. *AAPG Memoir*, 39: 37–47. <https://doi.org/10.1306/M39449C3>
- Brown, L. F., Loucks, R. G., Treviño, R. H., et al., 2004. Understanding Growth-Faulted, Intraslope Sub-Basins by Applying Sequence-Stratigraphic Principles: Examples from the South Texas Oligocene Frio Formation. *AAPG Bulletin*, 88(11): 1501–1552. <https://doi.org/10.1306/07010404023>
- Cross, T. A., Lesenger, M. A., 1988. Seismic Stratigraphy. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 16: 319–354. <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.16.050188.001535>
- Dahm, C. G., Graebner, R. J., 1979. Field Development with Three-Dimensional Seismic Methods in Gulf of Thailand—A Case History. Offshore Technology Conference Paper, 3657: 2591–2595. <https://doi.org/10.4043/3657-ms>
- Fisher, W. L., Gama, E., Ojeda, H. A., 1973. Estratigrafia Sísmica e Sistemas Depositionais da Formação Piaçabuçu. Sociedade Brasileira de Geologia, Anais do XXVII Congresso, 3: 123–133.
- Hu, S. Y., Zhao, W. Z., Xu, Z. H., et al., 2017. Applying PCA to Seismic Attributes for Interpretation of Evaporite Facies: Lower Triassic Jialingjiang Formation, Sichuan Basin, China. *Interpretation*, 5(4): 461–475. <https://doi.org/10.1190/int-2017-0004.1>
- John, P. C., 1991. Seismic Lithology Overview. SEG Technical Program Expanded Abstracts: 1051–1053. <https://doi.org/10.1190/1.1888727>
- Lin, C. Y., Zhang, X. G., Dong, C. M., 2007. Concept of Seismic Sedimentology and Its Preliminary Application. *Acta Petrolei Sinica*, 28(2): 69–72 (in Chinese with English abstract).
- Lin, C. Y., Zhang, X. G., Dong, C. M., et al., 2017. Seismic Sedimentology and Its Application Examples. Dongying: China University of Petroleum (East China) Press (in Chinese).
- Liu, G. Y., Xu, Z. H., Li, J. T., et al., 2025. Quaternary Evaporative Facies Interpretation by Seismic Sedimentology in Biogas-Bearing Sanhu Depression, Qaidam Basin, NW China. *Applied Sciences*, 15: 2288. <https://doi.org/10.3390/app15052288>
- Liu, H. Q., Wei, P. S., Li, X. B., et al., 2012. Discussion on Theoretical Innovation of Seismic Sedimentology. *Lithologic Reservoirs*, 24(1): 7–12+19 (in Chinese with English abstract).
- Posamentier, H. W., Vail, P. R., 1988. Eustatic Control on Clastic Deposition II—Sequence and Systems Tracts

- Models. In: Wilgus, C. K., Hastings, B. S., Kendall, C. G. St. C., et al. (eds.), *Sea Level Changes: An Integrated Approach*. SEPM Special Publication, 42: 125–154. <https://doi.org/10.2110/pec.88.01.0125>
- Posamentier, H. W., Venkatarathnan, K., 2003. Seismic Geomorphology and Stratigraphy of Depositional Elements in Deep-Water Settings. *Journal of Sedimentary Research*, 73(3): 367–388. <https://doi.org/10.1306/111302730367>
- Posamentier, H. W., 2001. Seismic Geomorphology and Depositional Systems of Deep-Water Environments; Observations from Offshore Nigeria, Gulf of Mexico, and Indonesia (Abstract). *AAPG Annual Convention Program*, 10: 160. <https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.5.1009>
- Trichet, J., Christian, D., Tribble, J., et al., 2001. Christmas Island Lagoonal Lakes, Models for the Deposition of Carbonate–Evaporite–Organic Laminated Sediments. *Sedimentary Geology*, 140(1): 177–189. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(00\)00177-9](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(00)00177-9)
- Vail, P. R., Mitchum, R. M., Thompson, S., 1977. Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Part 4: Global Cycles of Relative Changes of Sea Level. In: Payton, C. E. (ed.), *Seismic Stratigraphy—Applications to Hydrocarbon Exploration*. *AAPG Memoir*, 26: 83–97. <https://doi.org/10.1306/m26490c6>
- Van Wagoner, J. C., Posamentier, H. W., Mitchum, R. M., 1988. An Overview of the Fundamentals of Sequence Stratigraphy and Key Definitions. In: Wilgus, C. K., Hastings, B. S., Kendall, C. G., et al. (eds.), *Sea Level Changes: An Integrated Approach*. *SEPM Special Publication*, 42: 39–45. <https://doi.org/10.2110/pec.88.01.0039>
- Walther, J., 1894. *Einleitung in die Geologie als Historische Wissenschaft*. Verlag von Gustav Fischer, 3: 1055. <https://doi.org/10.1086/607091>
- Wilson, J., 1965. A New Class of Faults and Their Bearing on Continental Drift. *Nature*, 207: 343–347. <https://doi.org/10.1038/207343a0>
- Xu, Z. H., Hu, S. Y., Wang, L., et al., 2019. Seismic Sedimentologic Study of Facies and Reservoir in Middle Triassic Karamay Formation of the Mahu Sag, Junggar Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 107: 222–236. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.05.012>
- Xu, Z. H., Hu, S. Y., Zeng, H. L., et al., 2024. Distribution and Hydrocarbon Significance of Source Rock in the Upper Xiaoberulake Formation, Tarim Basin, NW China. *Earth Science Frontiers*, 31(2): 343–358 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2023.2.54>
- Xu, Z. H., Li, J. T., Li, J., et al., 2024. Application of 9-Component S-Wave 3D Seismic Data to Study Sedimentary Facies and Reservoirs in a Biogas-Bearing Area: A Case Study on the Pleistocene Qiqequan Formation in Taidong Area, Sanhu Depression, Qaidam Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 51(3): 565–577. [https://doi.org/10.1016/s1876-3804\(24\)60494-5](https://doi.org/10.1016/s1876-3804(24)60494-5)
- Xu, Z. H., Long, G. H., Wang, Y. S., et al., 2023. Applying Seismic Sedimentology to Restore Neogene Lenghu and Quaternary Sanhu Sedimentary Facies in Qaidam Basin, NW China. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*: 777–781. <https://doi.org/10.1190/image2023-3909743.1>
- Xu, Z. H., Xu, Z. P., Zhang, R. H., et al., 2022. Quantitative Prediction of Deep Effective Sandstone Reservoir in Geomorphologic and Tectonic Complicated Area: An Example from Bashenjiqike Formation of Middle Qiluitage Area in Tarim Basin. *Oil Geophysical Prospecting*, 57(1): 194–205 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2022.01.021>
- Xu, Z. H., Zeng, H. L., Hu, S. Y., et al., 2025. Application of Seismic Sedimentology in Predicting the Lower Cambrian Sedimentary Structure and Reservoir Rocks in Gucheng Area, Tarim Basin. *Lithologic Reservoirs*, 37(2): 153–165 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.12108/xyq.20250214>
- Xu, Z. H., Zeng, H. L., Hu, S. Y., et al., 2024. Seismic Sedimentology Study of Facies and Reservoir in a Cambrian Carbonate Platform-to-Basin Area, Tarim Basin, China: Inspiration from the Florida Keys. *SEG*

- Global Meeting Abstracts*: 129–132. <https://doi.org/10.1190/ultra-deep2024-034.1>
- Xue, W., 2015. Paleogene–Neogene Sedimentary Facies Types and Evolution in Lenghu Area (Dissertation). Chang'an University, Xi'an, 35–60 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W. Q., Li, T., Lan, C. J., et al., 2024. Distribution and Controlling Factors of Dolostone in Lower Cambrian Longwangmiao Formation, Sichuan Basin. *Earth Science*, 49(7): 2388–2406 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.438>
- Zeng, H. L., Backus, M. M., Barrow, K. T., et al., 1998a. Stratal Slicing: Part I: Realistic 3-D Seismic Model. *Geophysics*, 63(2): 502–513. <https://doi.org/10.1190/1.1444351>
- Zeng, H. L., Henry, S. C., Riola, J. P., 1998b. Stratal Slicing, Part II: Real Seismic Data. *Geophysics*, 63(2): 514–522. <https://doi.org/10.1190/1.1444352>
- Zeng, H. L., Zhao, W. Z., Xu, Z. H., et al., 2018. Carbonate Seismic Sedimentology: A Case Study of Cambrian Longwangmiao Formation, Gaoshiti-Moxi Area, Sichuan Basin, China. *Petroleum Exploration and Development*, 45(5): 775–784. [https://doi.org/10.1016/s1876-3804\(18\)30086-7](https://doi.org/10.1016/s1876-3804(18)30086-7)
- Zhao, W. Z., Hu, S. Y., Xu, Z. H., et al., 2018. Lithology Mapping of a Mixed Siliciclastic-Carbonate Evaporite System Using 3D Seismic and Well Data: Lower Triassic Jialingjiang Formation, Sichuan Basin, Southwestern China. *Marine and Petroleum Geology*, 93: 422–436. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.03.005>
- Zhao, W. Z., Zeng, H. L., Xu, Z. H., et al., 2024. Seismic Sedimentology of a Broad, Low-Relief Carbonate Platform: The Cambrian Longwangmiao Formation, Moxi-Gaoshiti Area, Sichuan Basin, China. *AAPG Bulletin*, 108(3): 547–575. <https://doi.org/10.1306/02242318016>
- Zhu, H. T., Yang, X. H., Zhou, X. H., et al., 2011. High Resolution Three-Dimensional Facies Architecture Delineation Using Sequence Stratigraphy and Seismic Sedimentology: Example from Dongying Formation in BZ 3-1 Block of Western Slope of Bozhong Sag, Bohai Bay Basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 36(6): 1073–1084 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2011.113>
- Zhu, X. M., Dong, Y. L., Zeng, H. L., et al., 2019. New Development Trend of Sedimentary Geology: Seismic Sedimentology. *Journal of Palaeogeography*, 21(2): 189–201 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.7605/gdxb.2019.02.011>
- Zhu, X. M., Liu, C. L., Zhang, Y. N., et al., 2009. On Seismic Sedimentology of Lacustrine Deltaic Depositional Systems. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(5): 915–921 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 林承焰, 张宪国, 董春梅, 2007. 地震沉积学及其初步应用. 石油学报, 28(2): 69–72.
- 林承焰, 张宪国, 董春梅, 等, 2017. 地震沉积学及其应用实例. 东营: 中国石油大学出版社.
- 刘化清, 卫平生, 李相博, 等, 2012. 对地震沉积学理论创新的认识. 岩性油气藏, 24(1): 7–12+19.
- 徐兆辉, 胡素云, 曾洪流, 等, 2024. 塔里木盆地肖尔布拉克组上段烃源岩分布预测及油气勘探意义. 地学前缘, 31(2): 343–358.
- 徐兆辉, 李江涛, 李剑, 等, 2024. 九分量横波三维地震在生物气区沉积储层研究中的应用: 以柴达木盆地三湖坳陷台东地区更新统七个泉组为例. 石油勘探与开发, 51(3): 565–577.
- 徐兆辉, 徐振平, 张荣虎, 等, 2022. 表腹双复杂构造区深层砂岩有效储层定量预测——以塔里木盆地中秋里塔格地区巴什基奇克组为例. 石油地球物理勘探, 57(1): 194–205.
- 徐兆辉, 曾洪流, 胡素云, 等, 2025. 地震沉积学在塔里木盆地古城地区下寒武统沉积结构与储层预测中的应用. 岩性油气藏, 37(2): 153–165.

- 薛闻, 2015. 青海冷湖地区古近系新近系沉积相、沉积环境类型及演化(硕士学位论文). 西安: 长安大学, 35–60.
- 杨伟强, 黎霆, 兰才俊, 等, 2024. 四川盆地下寒武统龙王庙组白云岩分布与控制因素. 地球科学, 49(7): 2388–2406.
- 曾洪流, 赵文智, 徐兆辉, 等, 2018. 地震沉积学在碳酸盐岩中的应用: 以四川盆地高石梯—磨溪地区寒武系龙王庙组为例. 石油勘探与开发, 45(5): 775–784.
- 朱红涛, 杨香华, 周心怀, 等, 2011. 基于层序地层学和地震沉积学的高精度三维沉积体系: 以渤中凹陷西斜坡 BZ3-1 区块东营组为例. 地球科学(中国地质大学学报), 36(6): 1073–1084.
- 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. 古地理学报, 21(2): 189–201.
- 朱筱敏, 刘长利, 张义娜, 等, 2009. 地震沉积学在陆相湖盆三角洲砂体预测中的应用. 沉积学报, 27(5): 915–921.