

沉积环境对页岩储层弹性特征的影响

——以川南自贡地区龙马溪组页岩为例

刘棠煊^{1,2,3}, 陈雷^{1,2,3}, 白森⁴, 张金武⁴, 乔崇⁴, 程辉⁴, 谭秀成^{1,2,3},
秦何星^{1,2,3}

1.西南石油大学地球科学与技术学院, 成都 610500

2.天然气地质四川省重点实验室, 成都 610500

3.中国石油天然气集团有限公司碳酸盐岩储层重点实验室西南石油大学研究分室, 成都 610500

4.中国石油集团长城钻探工程有限公司四川页岩气项目部, 四川威远 642450

摘要 【目的】明确沉积环境与富有机质页岩的地震弹性响应之间的直接联系, 这对于非常规油气藏的储层质量评价和地质模型建立至关重要。【方法】通过对自贡地区龙马溪组页岩的沉积特征、岩相进行表征, 划分出四个沉积单元 (I-A、I-B、I-C 和 II), 结合测井数据与地震数据对其进行研究, 分析沉积环境对四川盆地自贡地区龙马溪组页岩弹性特征的影响。【结果】结果表明沉积环境对龙马溪组页岩弹性特征的控制主要体现在两个方面: (1) 由于水动力作用引起的岩石结构差异, 导致深水陆棚环境中的页岩与上覆浊积岩环境中的泥质粉砂岩的弹性特征差异明显; (2) 在深水陆棚环境中硅质页岩层内, 弹性特征的变化主要是受进积系统和水深的控制。此外, 分析发现石英和 TOC 含量在对影响储层的弹性特征方面具有的竞争关系。最后利用叠前 AVO 反演对地震弹性属性的预测能力来追踪沉积演化过程, 为使用地球物理属性直接表征非常规页岩储层的沉积相提供了见解。【结论】沉积环境通过控制岩石的结构与成分来影响页岩储层的弹性特征。通过分析石英和 TOC 含量对储层弹性特征的影响, 认为石英含量较低时由有机质引起的软化效果主导; 石英含量较高时由石英颗粒的硬化效果主导。

关键词 沉积环境; 弹性特征; 有机质页岩; 龙马溪组; 自贡地区; 四川盆地

第一作者简介 刘棠煊, 男, 1999 年出生, 硕士研究生, 非常规油气地质, E-mail: 1216718756@qq.com

通信作者 陈雷, 男, 博士, 副教授, 非常规油气地质, E-mail: cl211@126.com

中图分类号 P618.13 **文献标志码** A

0 引言

世界能源发展已经进入从传统化石能源向新能源转换的关键期, 天然气作为最清洁的化石能源, 是化石能源向新能源转换的“桥梁”或最佳“伙伴”, 其中页岩气作为一种重要的天然气资源逐渐登上了油气勘探开发的历史舞台^[1-3]。

沉积环境本质上控制着富有机质页岩的结构、孔隙度、矿物学成分和有机质丰度等特征, 对页岩储层质量和页岩气产量具有显著控制影响^[4-6]。然而, 目前关于有机质页岩储层沉积机制的研究大多集中在层序地层学、地球化学、岩石学或定性地震解释上^[7-12], 对于沉积环

境对页岩储层弹性特征的影响研究相对较少。部分学者根据实验数据系统地分析了有机质含量、孔隙度和矿物含量对有机质页岩弹性响应的影响^[13-15], 如 Earl *et al.*^[13]通过颗粒尺度模量测量结合场发射扫描电子显微镜分析了页岩中矿物与干酪根对杨氏模量的控制, Adam *et al.*^[14]结合多种实验方法分析了矿物基质与各向异性之间的关系, Zhao *et al.*^[15]基于全球岩心测量实验室数据库分析有机质体积分数和孔隙度之和与弹性参数之间的关系; 另外, 还有学者通过建立岩石物理模型来探索页岩特性对储层弹性的影响^[16-18], 如 Vasin *et al.*^[16]基于实测显微结构特征建立泥页岩弹性各向异性模型, 并将模型结果与实验确定的弹性特性进行比较, Carcione *et al.*^[17]建立 RPT 模型对页岩弹性进行分析, Zhao *et al.*^[18]通过岩石物理建模分析了不同成熟阶段页岩的弹性特征。此外, 地震弹性参数经常被学者们用于估计有机页岩的有机质含量和孔隙度^[19-22], 如 Suwannasri *et al.*^[19]通过无水热解实验评估和分析了弹性变化与 TOC 之间的关系, Kenneth *et al.*^[20]基于地震反演与岩石物理建模来预测 TOC 与硅质碎屑的体积分数, Ouadfeul *et al.*^[21]使用地震成因反演来预测储层 TOC 含量, Kumar *et al.*^[22]基于正交各向异性进行 AVOAz 反演来估计储层特性。然而, 很少有人关注使用地震属性来提供对有机质页岩系统中沉积环境演变和地质过程的预测见解^[23], 这对于地质模型的建立, 储层质量评估和非常规储层模拟具有重要价值。

针对上述问题, 本文以四川盆地南部自贡地区龙马溪组页岩为研究对象, 在井—震结合的基础上, 分析了沉积环境控制有机质页岩弹性特征变化的隐藏机制。通过叠前 AVO 反演来利用地震弹性属性了解沉积演化特征, 从而为页岩油气藏的储层质量评价、储层非均质性描绘和地质模型构建提供见解。

1 区域地质概况

四川盆地处于扬子准地台偏西北一侧, 包括川东南坳褶区、川中隆起区和川西北坳陷区^[24], 构造上受多期构造运动影响的多条陡峭断层为界^[7], 页岩气储层保存条件复杂。五峰组—龙马溪组沉积的大套黑色富含有机质页岩与晚奥陶世—早志留世发生的两次全球海侵事件有关^[25]。

研究区位于四川省自贡市北部(图 1), 属于川中隆起区的川西南低陡褶皱带, 构造整体上呈北东向展布大背斜, 北翼缓南翼陡, 呈一隆三凹构造格局。研究区西北部、东北部地层倾角较小, 一般介于 1°~5°, 东南部地层倾角较大, 介于 5°~30°, 埋深一般大于 3 500 m。研究区东南部发育多条北东走向逆断层, 延伸长度 2~18 km, 断距 20~200 m。

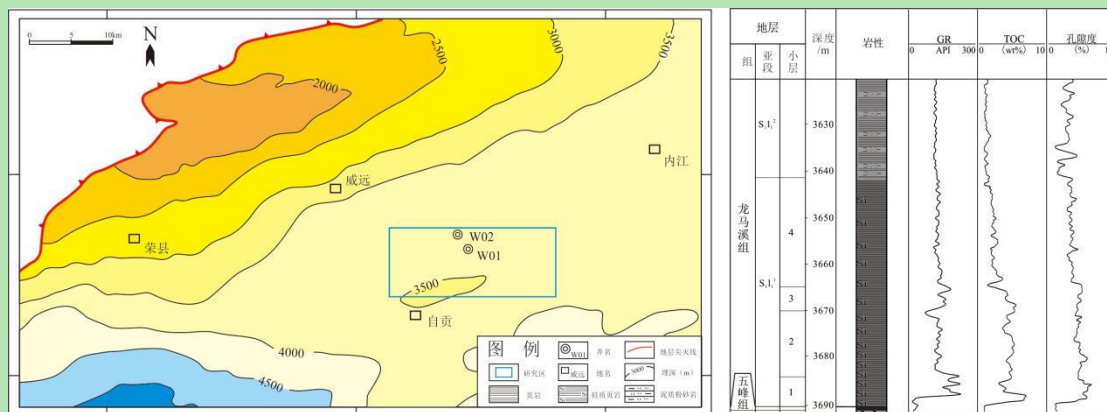


图1 研究区龙马溪组页岩埋深图及五峰组—龙马溪组地层综合柱状图

Fig.1 Shale burial depth of the Longmaxi Formation in the research area and comprehensive stratigraphic histogram of the Wufeng-Longmaxi Formation

2 沉积单元划分

根据对研究区龙马溪组页岩的沉积特征、矿物学含量以及岩相分析，主要将龙马溪组页岩段划分出四个沉积单元（图2，3）。

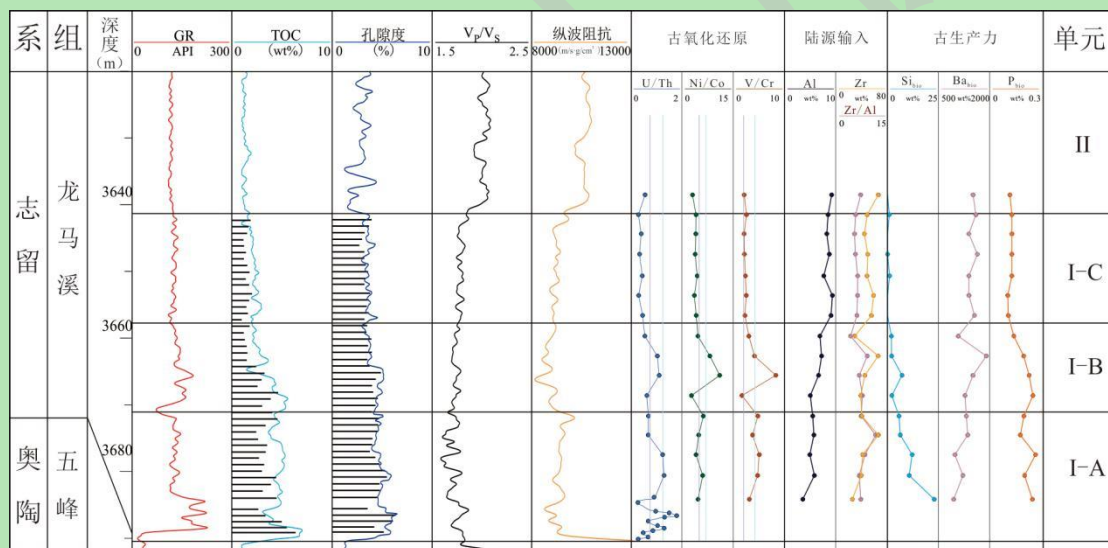


图2 W01井龙马溪页岩沉积单元综合柱状图

Fig.2 Comprehensive histogram of the Longmaxi Shale depositional unit in well W01

1) I-A 单元代表为富有机质硅质页岩，对应初级有机质产能（图2，3）。同时，该单元沉积时期，发生了全球性的海侵事件，海平面急剧上升，深水缺氧环境下古生产力较高，为有机质的积累富集和保存提供了有利条件。因此，该单元是龙马溪组的主要产气层段。

2) I-B 单元为含灰硅质页岩，主要分布在龙马溪组中部（图2，3）。在该单元内，沉积环境逐渐由深水陆棚向半深水陆棚转变。与沉积单元 I-A 相比，该单元的石英含量和 TOC 含量相对较低。

3) I-C 单元为含黏土硅质页岩（图2，3），由于海平面的降低和陆源输入的增加导致

黏土含量相对较高, 初级生产力降低, 黏土含量相对较高。由下向至上有机质含量减少, 表明了水体变浅以及氧化沉积环境的形成对有机质富集和保存存在一定的影响。

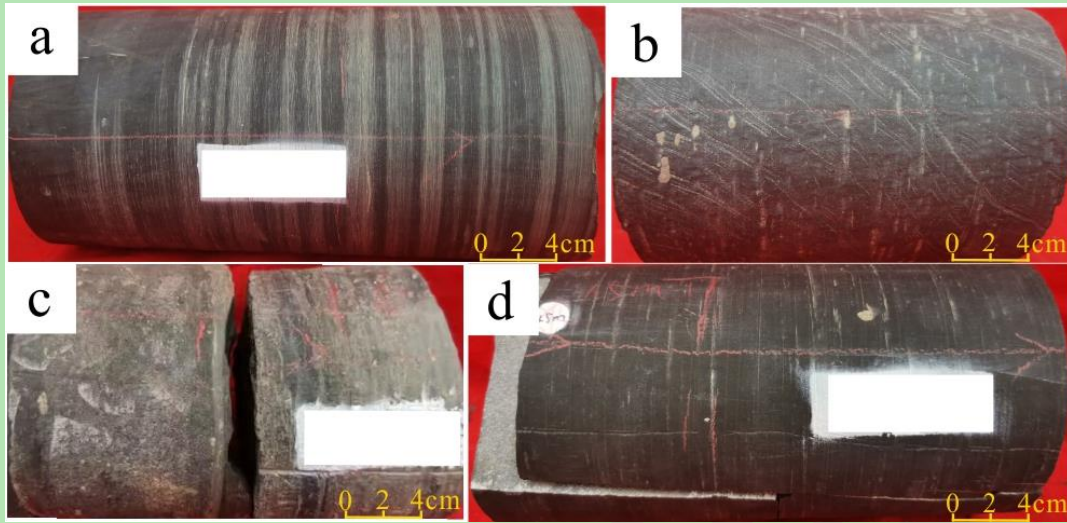


图3 W01井龙马溪组页岩岩心特征

(a) II单元中的泥质粉砂岩; (b) I-C单元中的含黏土硅质页岩; (c) I-B单元中的含灰硅质页岩; (d) I-A单元代表为中的富有有机质硅质页岩

Fig.3 Characterization of the Longmaxi Shale in well W01

(a) argillaceous siltstone in unit II; (b) clay-bearing siliceous shale in unit I-C; (c) lime-bearing siliceous shale in unit I-B; and (d) : organic-rich siliceous shale in unit I-A

4) II单元为浊流环境下沉积形成的泥质粉砂岩(图2, 3), 分布于龙马溪组上部。随着海平面的下降和相对丰富的陆源输入, 风暴能量的增加使浊积岩得以发展沉积, 导致该单元出现泥质粉砂岩。

3 沉积环境对页岩储层弹性特征的控制机理

研究沉积环境对页岩储层弹性特征的影响, 关键在于明确沉积环境如何控制岩石性质, 进而影响有机页岩储层的弹性特征。由于地震速度取决于几个关键性的沉积学参数(如矿物成分、结构和结构成熟度), 而地震波阻抗又取决于地震速度与岩石密度, 故本次研究在综合考虑各方面因素的基础上, 基于测井数据将地震波速度、波阻抗等地震数据与地质特征相结合, 开展沉积环境对页岩储层弹性特征的控制机理研究。

研究发现, 在给定的黏土含量下, 浊流沉积环境中的泥质粉砂岩(II单元)比深水陆棚沉积环境中的含黏土硅质页岩(I-C单元)具有更高的速度(图4)。II单元与I-C单元中孔隙度与TOC含量相差不大(图2), 说明有机质含量的微小差异不能解释如此明显的速度差异, 即速度差异可能与不同的沉积环境对岩石结构的影响密切相关。

对于海平面波动较弱的深水陆棚沉积环境, 由于细粒碎屑沉积物在远源位置更容易发生

运移，故石英与碳酸盐颗粒可能分散在黏土矿物中，形成黏土基质起支撑作用的杂基支撑结构（图 5a）；对于具有高能量和风暴流的浊流沉积环境，大颗粒碎屑沉积物倾向于积累并在近端形成颗粒接触，所以此时石英颗粒可能相互连接并起到支撑作用，形成颗粒支撑结构（图 5b）。因此，沉积环境可能从根本上控制页岩岩石结构，进而决定了浊流沉积环境中的泥质粉砂岩与深水陆棚沉积环境中的含黏土硅质页岩之间的弹性特征差异。

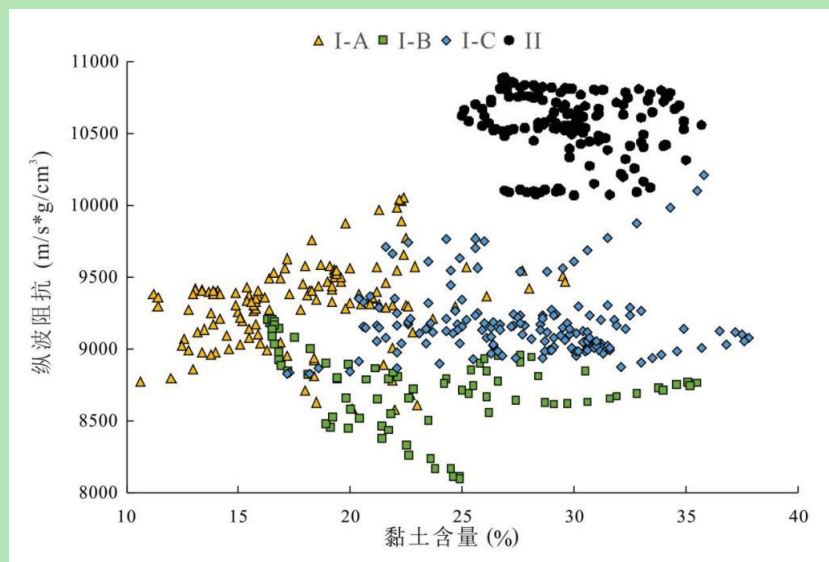


图 4 W01 井龙马溪组页岩纵波阻抗与黏土含量交会图（数据按沉积单元排列）

Fig.4 Cross-plot of P-wave impedance and clay content of the Longmaxi Formation shale in well W01(data arranged by sedimentary unit)

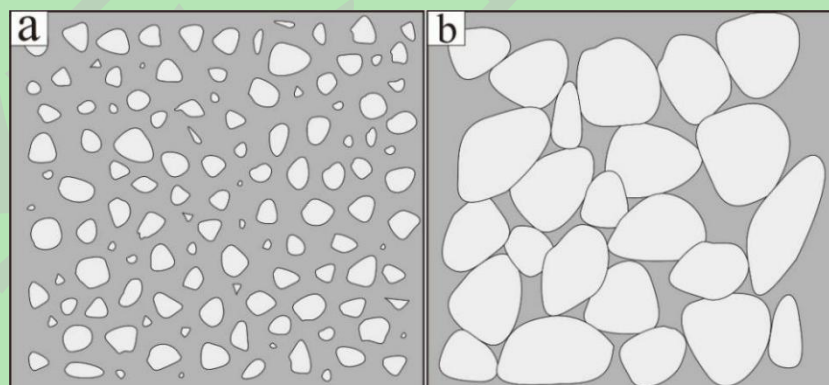


图 5 岩石结构模型^[23]

(a) 含黏土硅质页岩中杂基支撑；(b) 泥质粉砂岩中颗粒支撑（白色为石英和碳酸盐岩颗粒，灰色为黏土基质）

Fig.5 Rock structure model^[23]

(a) heterogenous support in clay-bearing siliceous shale; (b) grain support in argillaceous siltstone (White represents quartz and carbonate particles, gray represents clay matrix)

沉积环境与海平面变化密切相关，其中 TOC 含量由于海岸线向岸推进和水体变浅而逐渐降低（图 2）。从 I-B 单元到 II 单元，纵波阻抗和纵横波速度比整体呈明显的增长趋势（图 6），这种增长趋势主要归因于水体变浅导致的有机质丰度降低，以及水体中含氧量和风暴

能量的增加。具有高 TOC 的页岩通常含有丰富的有机孔和较高的气体饱和度，这些因素都可能导致纵波阻抗和纵横波速度比的降低。在 I-B 单元到 I-C 单元的过渡区域内大多数数据点的纵波阻抗呈下降趋势，主要由于黏土含量的增加所导致，也与沉积环境的过渡密切相关。在 I-A 单元中，虽然有机质含量仍对页岩的弹性特征有重大影响，但是由于石英含量的增加，纵波阻抗和纵横波速度比等弹性参数在此单元中并不能用单一的变化趋势来呈现，关于有机质和石英含量对岩石弹性的耦合作用将在下一章进行详细分析。

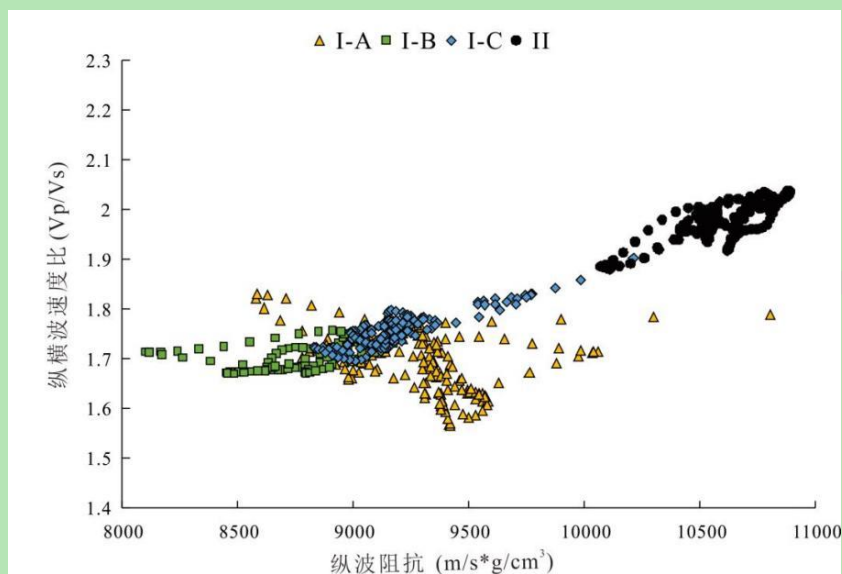


图6 W01井龙马溪组页岩纵波阻抗与纵横波速度比交会图(数据按沉积单元排列)

Fig.6 Cross plot of P-wave impedance and P-S-wave velocity ratio of the Longmaxi Formation shale in well W01 (data arranged by sedimentary unit)

4 石英和有机质含量对弹性的耦合效应

在有机页岩储层中，石英含量的增加有助于增强储层的地震弹性响应，而 TOC 含量的增加则起到相反的效果，即石英和 TOC 在对影响储层的弹性特征方面具有竞争关系^[26]。在具有高石英含量与高有机质的 I-A 单元中，这种效应更为明显。

关于龙马溪组有机质页岩中石英的成因，主要有碎屑石英来源和生物石英来源两种^[27]，而二者的形成都与沉积环境密切相关。其中碎屑石英主要来自河流提供的陆源碎屑；生物石英主要与硅质生物残骸有关，这些生物残骸在重力的作用下通过悬浮作用沉降到海底。图7展示了碎屑石英和生物石英含量在 W01 井的垂向变化，结果表明生物石英是龙马溪组底部尤其是 I-A 单元中的主要石英类型，其含量在垂向上逐渐降低，在 3 660 m 处降到最低。碎屑石英含量则显示出从下至上显著增加的趋势，因此研究区龙马溪组页岩层段中 I-B 单元与 I-C 单元的石英类型主要为碎屑石英。

以 W01 井数据为例来分析石英及有机质含量对页岩储层纵波阻抗的影响(图 8, 9)。

当石英含量较低时（小于 40%），纵波阻抗随石英含量的增加而减小、随 TOC 含量的增加而减小（图 8 与图 9 中黑色区域），表明此时由有机质引起的软化效果可能强于石英颗粒引起的硬化效果，即此时有机质对储层弹性特征的影响（减弱）占据了主导位置。当石英含量到达一定程度时（大于 40%），纵波阻抗开始随石英含量的增加而增加、随 TOC 含量的增加而增加（图 8 与图 9 中红色区域），表明此时由石英颗粒引起的硬化效果可能强于有机质引起的软化效果，即此时石英颗粒对储层弹性特征的影响（增强）占据了主导位置。故认为石英含量是否达到某一临界值（此次为 40%）是决定石英颗粒引起的硬化效果与有机质引起的软化效果孰能在对储层弹性特征的影响中占据主导位置的关键。在 Zhao *et al.*对涪陵地区龙马溪组页岩的研究中也得出了相似的结论（其石英含量临界值约为 37%）^[23]，通过对比分析认为石英颗粒的成分与结构的不同是其对储层弹性特征的影响具有差异性的原因。

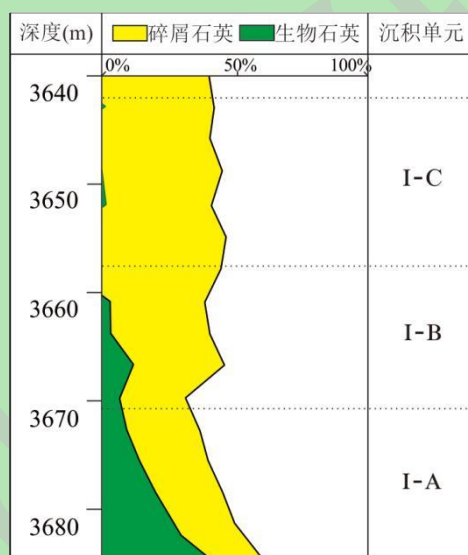


图 7 W01 井龙马溪组页岩石英成分和含量垂直变化图

Fig.7 Vertical variation diagram of quartz composition and content in the Longmaxi Formation shale in well W01

在 I-A 单元中，纵波阻抗并没有表现出随着石英含量的进一步增加而增加的趋势，即此时纵波阻抗几乎保持恒定（图 8 与图 9 中黄色区域）。这说明在 I-A 单元中，尽管石英含量的增加远大于 TOC 含量的增加（石英含量增加 20%左右时，TOC 含量增加 2%左右），纵波阻抗并没有发生明显的变化，即说明石英颗粒和有机物对页岩储层弹性特征的影响可能相互抵消，这可能是由于生物石英对页岩储层弹性方面的增强效应弱于碎屑石英。从岩石结构上来看，可能是由于龙马溪组中生物石英的粒径较小（1~10 μm ），且其通常与塑性有机质共存，而碎屑石英通常粒径较大（10~50 μm ），其倾向于更有效地加固岩石基质^[26]。

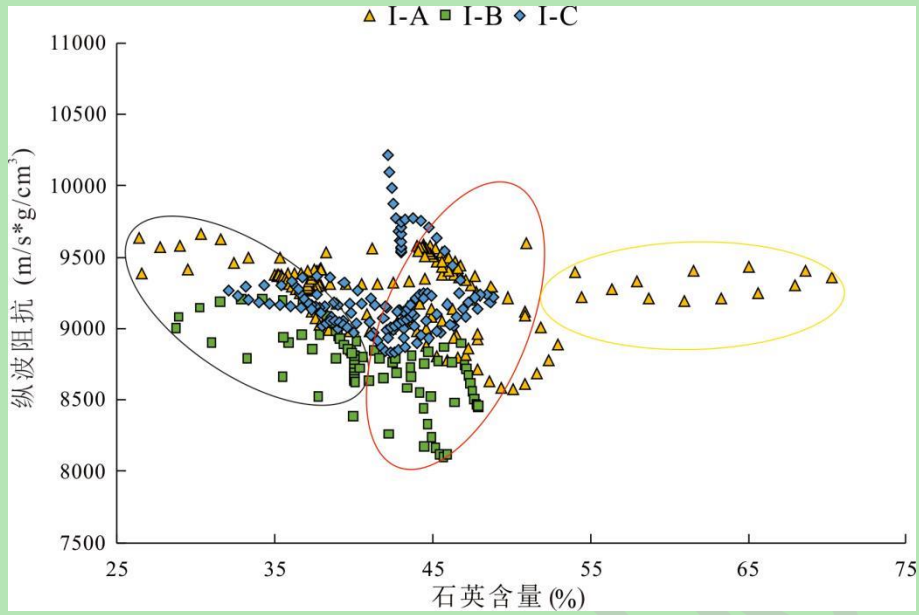


图8 W01井龙马溪组页岩石英含量与纵波阻抗交会图

Fig.8 Intersection diagram of quartz content and P-wave impedance of the Longmaxi Formation shale in well

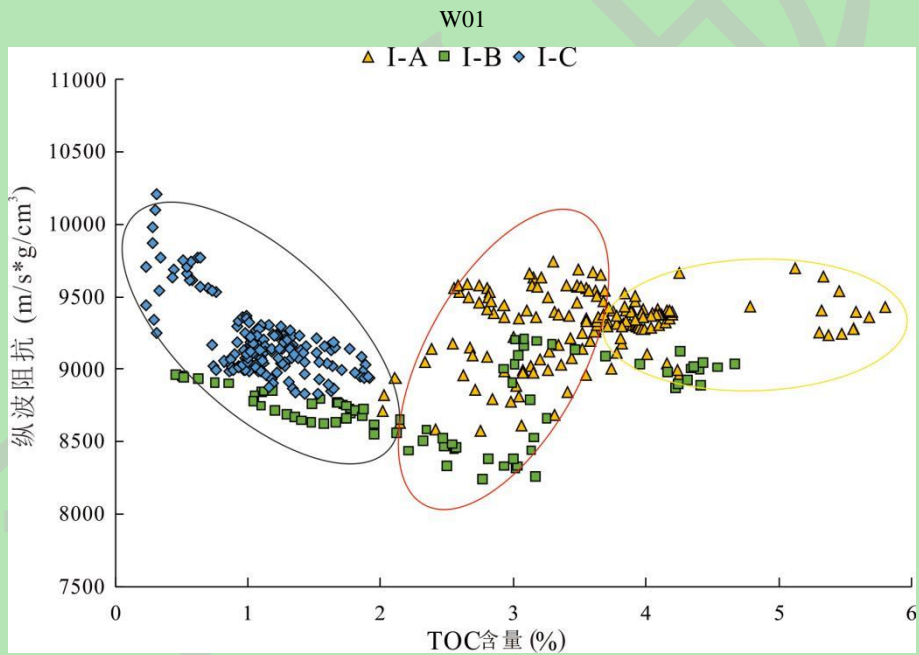


图9 W01井龙马溪组页岩 TOC 含量与纵波阻抗交会图

Fig.9 Cross plot of total organic carbon (TOC) content and P-wave impedance of the Longmaxi Formation shale in well W01

5 沉积演化分析

基于以上分析发现自贡地区龙马溪组页岩储层弹性响应与其所处的沉积环境密切相关，反之可通过分析其弹性特征的变化来追溯其沉积环境的变化。叠前 AVO 反演是从地震资料中获取弹性参数的有效途径^[28]，因此利用叠前 AVO 反演对地震弹性属性的预测能力来揭示其沉积演化。

沿着对应于 I-A 单元、I-B 单元、I-C 单元和 II 单元的不同层顶的所提取的纵波阻抗和纵横波速度比进行切片（图 10，11），发现随着沉积环境从深水陆棚向相对浅水陆棚的逐步过渡（I-A 单到 I-C 单元），纵波阻抗和纵横波速度比总体都呈现出增加趋势；最后随着沉积环境从低能陆棚向高能浊流沉积环境的转变（I-C 单到 II 单元），纵波阻抗和纵横波速度比有明显的增加。

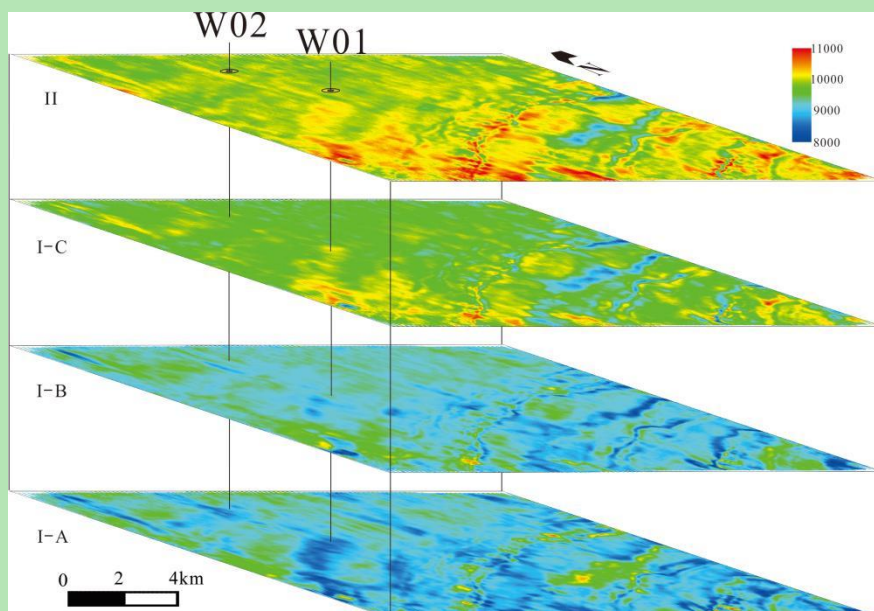


图 10 研究区龙马溪组不同沉积单元纵波阻抗反演切片

Fig.10 P-wave impedance inversion slice for different depositional units of the Longmaxi Formation in the study area

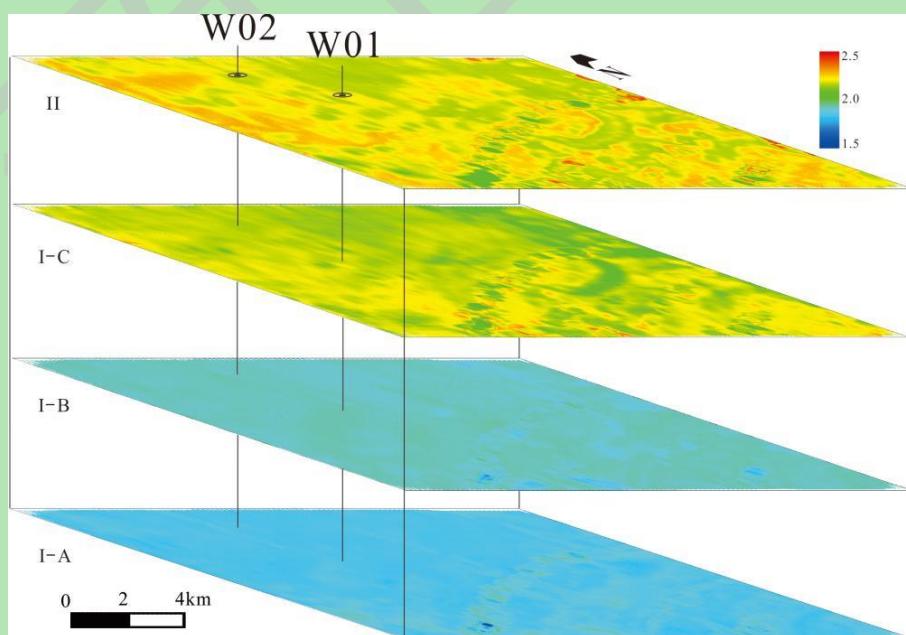


图 11 研究区龙马溪组不同沉积单元纵横波速度比反演切片

Fig.11 Inversion slice of P-S wave velocity ratio in different depositional units of the Longmaxi Formation

由于有机质富集，I-A 单元与 I-B 单元的地震反演切片显示出典型的较低的纵波阻抗和

纵横波速度比特性,且 I-A 单元与 I-B 单元的整个地层处于深水陆棚沉积环境中,应将其视为研究区页岩气储层的最佳位置。但是,即使在单位 I-A 内纵波阻抗仍然显示出不均匀的空间分布,W01 井与 W02 井的中心区域显示出相对较低的纵波阻抗特征,这可能表明该区域页岩储层质量更好;此外,研究区西南地区显示出相对较高的纵波阻抗特征,意味着该区域储层的质量可能较差。

在 I-C 单位内,地震切片显示东北区域的纵波阻抗和纵横波速度比低于西南区域。从地质角度来看,这可能说明西南区域更靠近物源近端,而东北区域更靠近物源远端,即东北区域的水体趋于更深,为有机质的保存提供了更有利的条件;反之表明西南区域可能存在更多的陆源输入,从而稀释了古生产力,促进了氧化环境的形成。因此,在 I-C 单元内,东北区域的页岩储层质量普遍高于西南区域。

6 结论

沉积环境影响着富有机质页岩储层中有机质的聚集和保存,以及有机质和无机组分的存在关系与相互作用方式。本文以川南自贡地区龙马溪组页岩为例,论证了沉积环境如何控制有机质页岩储层的地震弹性特征,得出以下结论。

(1) 沉积环境控制着岩石的结构,进而决定了深水陆棚沉积环境中的含黏土硅质页岩与浊流沉积环境中的泥质粉砂岩之间的弹性特征差异,即出现 II 单元中颗粒支撑的泥质粉砂岩较 I 单元中杂基支撑的含黏土硅质页岩具有更大的纵波阻抗等特征。

(2) 沉积环境的改变决定了 TOC 的含量,由于水体变浅,氧气含量和风暴能量增加,导致有机质丰度降低,从 I 单元到 II 单元,纵波阻抗与纵横波速度比等特征整体呈现明显的增长趋势。

(3) 石英和 TOC 含量在对影响页岩储层的弹性特征方面具有竞争关系。当石英含量较低时(小于 40%),由有机质引起的软化效果起主导作用;当石英含量较高时(大于 40%),由石英颗粒的硬化效果则起主导作用。此外,通过对 I-A 单元的研究表明生物石英对页岩储层弹性方面的增强效应弱于碎屑石英

(4) 利用叠前 AVO 反演对地震弹性属性的预测能力来追踪沉积演化过程,结果表明 I-A 单元与 I-B 单元内页岩气储层质量普遍较高,而 I-C 单元内页岩气储层质量一般且东北区域的页岩气储层质量高于西南区域。

参考文献 (References)

- [1] 邹才能, 赵群, 张国生, 等. 能源革命: 从化石能源到新能源[J]. 天然气工业, 2016, 36(1): 1-10. [Zou Caineng, Zhao Qun, Zhang Guosheng, et al. Energy revolution: From a fossil energy era to a new energy era[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(1): 1-10.]
- [2] 邱振, 邹才能. 非常规油气沉积学: 内涵与展望[J]. 沉积学报, 2020, 38(1): 1-29. [Qiu Zhen, Zou Caineng. Unconventional petroleum sedimentology: Connotation and prospect[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 38(1): 1-29.]
- [3] 邹才能, 赵群, 丛连铸, 等. 中国页岩气开发进展、潜力及前景[J]. 天然气工业, 2021, 41(1): 1-14. [Zou Caineng, Zhao Qun, Cong Lianzhu, et al. Development progress, potential and prospect of shale gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(1): 1-14.]
- [4] Hart B S, Macquaker J H S, Taylor K G. Mudstone ("shale") depositional and diagenetic processes: Implications for seismic analyses of source-rock reservoirs[J]. Interpretation, 2013, 1(1): B7-B26.
- [5] Li D L, Li R X, Tan C Q, et al. Depositional conditions and modeling of Triassic Oil shale in southern Ordos Basin using geochemical records[J]. Journal of Central South University, 2019, 26(12): 3436-3456.
- [6] 连梦利, 刘达东, 林瑞钦, 等. 黔北地区五峰组—龙马溪组页岩沉积环境及有机质富集机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(9): 3756-3772. [Lian Mengli, Liu Dadong, Lin Ruiqin, et al. Sedimentary environment and organic matter enrichment mechanism of Wufeng-Longmaxi shale in the northern Guizhou area[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(9): 3756-3772.]
- [7] Guo T L. The Fuling shale gas field: A highly productive Silurian gas shale with high thermal maturity and complex evolution history, southeastern Sichuan Basin, China[J]. Interpretation, 2015, 3(2): SJ25-SJ34.
- [8] Wang Y X, Xu S, Hao F, et al. Geochemical and petrographic characteristics of Wufeng-Longmaxi shales, Jiaoshiba area, southwest China: Implications for organic matter differential accumulation[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 10(2): 138-154.
- [9] Wu J, Liang C, Hu Z Q, et al. Sedimentation mechanisms and enrichment of organic matter in the Ordovician Wufeng Formation-Silurian Longmaxi Formation in the Sichuan Basin[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 101: 556-565.
- [10] 熊敏, 陈雷, 陈鑫, 等. 海相页岩纹层特征、成因机理及其页岩气意义[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(9): 3490-3508. [Xiong Min, Chen Lei, Chen Xin, et al. Characteristics, genetic mechanism of marine shale laminae and its significance of shale gas accumulation[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(9): 3490-3508.]
- [11] 张建国, 姜在兴, 刘鹏, 等. 陆相超细粒页岩油储层沉积机制与地质评价[J]. 石油学报, 2022, 43(2): 234-249. [Zhang Jianguo, Jiang Zaixing, Liu Peng, et al. Deposition mechanism and geological assessment of continental ultrafine-grained shale oil reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(2): 234-249.]
- [12] 李娟, 陈雷, 计玉冰, 等. 浅层海相页岩含气性特征及其主控因素: 以昭通太阳区块下志留统龙马溪组为例[J]. 石油实验地质, 2023, 45(2): 296-306. [Li Juan, Chen Lei, Ji Yubing, et al. Gas-bearing characteristics and major controlling factors of shallow marine shale: A case study of the Lower Silurian Longmaxi Formation in Taiyang block of Zhaotong area[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(2): 296-306.]
- [13] Zargari S, Prasad M, Mba K C, et al. Organic maturity, elastic properties, and textural characteristics of Self Resourcing reservoirs[J]. Geophysics, 2013, 78(4): D223-D235.
- [14] Allan A M, Kanitpanyacharoen W, Vanorio T. A multiscale methodology for the analysis of velocity anisotropy in organic-rich shale[J]. Geophysics, 2015, 80(4): C73-C88.
- [15] Zhao L X, Qin X, Zhang J Q, et al. An effective reservoir parameter for seismic characterization of organic shale reservoir[J]. Surveys in Geophysics, 2018, 39(3): 509-541.
- [16] Vasin R N, Wenk H R, Kanitpanyacharoen W, et al. Elastic anisotropy modeling of Kimmeridge shale[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2013, 118(8): 3931-3956.
- [17] Carcione J M, Avseth P. Rock-physics templates for clay-rich source rocks[J]. Geophysics, 2015, 80(5): D481-D500.

- [18] Zhao L X, Qin X, Han D H, et al. Rock-physics modeling for the elastic properties of organic shale at different maturity stages[J]. *Geophysics*, 2016, 81(5): D527-D541.
- [19] Suwannasri K, Vanorio T, Clark A. Monitoring the changes in the microstructure and the elastic and transport properties of Eagle Ford marl during maturation[J]. *Geophysics*, 2018, 83(5): MR263-MR281.
- [20] Bredezen K, Jensen E H, Johansen T A, et al. Seismic reservoir and source-rock analysis using inverse rock-physics modeling: A Norwegian Sea demonstration[J]. *The Leading Edge*, 2015, 34(11): 1350-1355.
- [21] Ouadfeul S A, Aliouane L. Total organic carbon estimation in shale-gas reservoirs using seismic genetic inversion with an example from the Barnett Shale[J]. *The Leading Edge*, 2016, 35(9): 790-794.
- [22] Kumar R, Bansal P, Al-Mal B S, et al. Seismic data conditioning and orthotropic rock-physics-based inversion of wide-azimuth P-wave seismic data for fracture and total organic carbon characterization in a north Kuwait unconventional reservoir[J]. *Geophysics*, 2018, 83(4): B229-B240.
- [23] Zhao L X, Wang Y, Liu X W, et al. Depositional impact on the elastic characteristics of the organic shale reservoir and its seismic application: A case study of the Longmaxi-Wufeng Shale in the Fuling gas field, Sichuan Basin[J]. *Geophysics*, 2020, 85(2): B23-B33.
- [24] 郭旭升, 李宇平, 腾格尔, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组深水陆棚相页岩生储机理探讨[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(1): 193-201. [Guo Xusheng, Li Yuping, Borjigen T, et al. Hydrocarbon generation and storage mechanisms of deep-water shelf shales of Ordovician Wufeng Formation—Silurian Longmaxi Formation in Sichuan Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(1): 193-201.]
- [25] Chen X, Rong J Y, Li Y, et al. Facies patterns and geography of the Yangtze region, South China, through the Ordovician and Silurian transition[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 204(3/4): 353-372.
- [26] 杨勤勇. 页岩气地球物理技术[M]. 北京: 中国石化出版社, 2018. [Yang Qinyong. *Geophysical technology of shale gas*[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2018.]
- [27] Zhang L C, Xiao D S, Lu S F, et al. Effect of sedimentary environment on the Formation of organic-rich marine shale: Insights from major/trace elements and shale composition[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2019, 204: 34-50.
- [28] 宗兆云, 印兴耀, 张峰, 等. 杨氏模量和泊松比反射系数近似方程及叠前地震反演[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(11): 3786-3794. [Zong Zhaoyun, Yin Xinyao, Zhang Feng, et al. Reflection coefficient equation and pre-stack seismic inversion with Young's modulus and Poisson ratio[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(11): 3786-3794.]

Influence of Sedimentary Environment on the Elastic Characteristics of Shale Reservoirs: A case study of the Longmaxi Formation in the Zigong area, southern Sichuan

LIU TangXuan^{1,2,3}, CHEN Lei^{1,2,3}, BAI Sen⁴, ZHANG JinWu⁴, QIAO Chong⁴, CHENG Hui⁴, TAN XiuCheng^{1,2,3}, QIN HeXing^{1,2,3}

1. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

2. Natural Gas Geology Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610500, China

3. Branch of Key Laboratory of Carbonate Reservoirs, Southwest Petroleum University, CNPC, Chengdu 610500, China

4. Sichuan Shale Gas Department, CNPC Greatwall Drilling Company, Weiyuan, Sichuan 642450, China

Abstract: [Objective] It is important for reservoir quality evaluation and geological modeling of unconventional oil and gas reservoirs to know the direct relationship between sedimentary environment and seismic elastic response of organic shales. [Methods] The sedimentary characteristics and lithofacies of the Longmaxi Shale in the Zigong area were characterized, four depositional units (I-A, I-B, I-C and II) were identified, and the influence of sedimentary environment on the elastic characteristics of shale of Longmaxi Formation in Zigong area, Sichuan Basin was analyzed. [Results] The results show that the sedimentary environment primarily controls the elastic characteristics of the shale in the Longmaxi Formation in two aspects: (1) owing to the difference of rock structure caused by hydrodynamic action, the elastic characteristics of shale in the deep water shelf environment are clearly different from those of argillaceous siltstone in the overlying turbidite environment; (2) in the deep water shelf environment, the variation of elastic characteristics is controlled by the precession system and water depth. In addition, quartz and total organic carbon (TOC) content have a competitive relationship in influencing the elastic characteristics of the reservoir. Finally, the prediction ability of pre-stack amplitude vs. offset (AVO) inversion to seismic elastic attributes is used to trace the sedimentary evolution process, which provides insight into directly characterizing sedimentary facies of unconventional shale reservoirs by geophysical attributes. [Conclusions] The sedimentary environment affects the elastic characteristics of shale reservoirs by controlling the structure and composition of rocks. By analyzing the influence of quartz and TOC content on the elastic characteristics of reservoir, the softening effect caused by organic matter was found to be dominant when the quartz content is low, and the hardening effect of quartz grains dominant when the quartz content is high.

Key words: sedimentary environment; elastic properties; organic shale; Longmaxi Formation; Zigong area; Sichuan Basin