

川东二叠系龙潭组不同沉积环境下的页岩弹性波速度特征

王艳¹, 张兵¹, 姚永君², 林晓杨¹, 曹高权¹, 肖威¹

(1. 成都理工大学“地球勘探与信息技术”教育部重点实验室, 成都 610059;

2. 中国石油西南油气田分公司重庆气矿, 重庆 400000)

摘要: 笔者选取川东地区 FT1 井龙潭组页岩进行实验测试, 在岩相划分的背景下, 通过主微量元素研究川东龙潭组不同岩相的沉积环境, 结合沉积环境对石英成因、TOC 的影响, 探讨不同沉积环境下的弹性波速度变化特征。研究结果表明: ①混合质页岩和黏土质页岩处于低古生产力和富氧、陆源碎屑输入较高的沉积环境, 其石英以陆源碎屑石英为主, TOC 含量偏低; 硅质页岩处于高古生产力、缺氧、陆源碎屑输入较低的沉积环境, 其石英以生物成因石英为主, TOC 含量较高。②混合质页岩和黏土质页岩以黏土颗粒作为岩石骨架, 弹性波速度较低, 且弹性波速度随石英含量呈上升趋势; 硅质页岩以石英颗粒作为岩石骨架, 弹性波速度较高, 且弹性波速度随石英含量呈下降趋势。研究结果可为龙潭组页岩优势岩相勘探提供依据。

关键词: 龙潭组; 沉积环境; 石英成因; TOC; 弹性波速度

中图分类号: P618.13

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.02.07

0 引言

随着我国对能源需求的增加, 非常规油气资源页岩气已成为重点关注^[1]。为了增强我国油气资源基础, 对新区、新层系油气的勘探研究显得尤其重要^[2]。前期研究表明龙潭组页岩具有分布面积广、厚度大、生烃条件好、埋藏深度适中的特点, 是值得探索和研究的页岩气层系^[3]。

弹性波速度传播特征能较好地反映地层特性, 研究岩石的弹性波速度特征对于储层识别、岩石物理参数预测具有重要意义^[4], 被广泛用于非常规油气资源勘探。目前国内外学者对岩石弹性波传播特性进行了许多研究。Gardner 和 Castagna 等^[5-6]讨论了岩石纵、横波与密度的关系及其传播规律; Vernik 和 Nur^[7]在干燥条件下分析了 Bakken 页岩

的有机质含量、成熟度对岩石弹性波速度特征的影响; 熊健等^[4]研究了不同层理下的纵横波波速比, 并讨论了波速与弹性力学参数之间的关系; 康毅力等^[8]研究了有机质含量对页岩传播特性的影响, 并指出有机质含量的增加会导致纵、横波速度降低; 王世广等^[9]研究了岩石构造、孔隙度、弹性模量等不同物性对弹性波速度特征的影响。前人对弹性波速度特性的研究更多从压力、密度、有机质含量和层理等方面展开, 这些相应的认识并未考虑到从重建沉积古环境来分析弹性波速度变化特征, 缺乏实际的地质意义。

前人研究表明, 沉积环境控制着岩相的发育及特征, 不同岩相的矿物成分、沉积环境、有机质含量等存在差异^[10-13]。笔者旨在岩相划分的背景下, 通过岩石主微量元素, 重建沉积古环境, 结合不同岩相沉积环境的差异, 分析对石英成因和 TOC(有机质

收稿日期: 2022-09-04

基金项目: 国家自然科学基金(42272184)

第一作者: 王艳(1997—), 女, 硕士, 研究方向为储层沉积学, E-mail: 1768329656@qq.com。

通信作者: 张兵(1981—), 男, 博士后, 教授, 主要从事储层沉积学的教学和研究, E-mail: zb4819890@qq.com。

含量)的影响,探讨不同岩相在不同沉积环境下的弹性波速度变化特征,寻找最有利于弹性波传播的岩相,为岩石弹性波速度特征研究赋予实际的地质意义。

1 地质背景

川东地区主要包括川东高陡断褶带(图 1(a)),其东、西边界分别为齐岳山断裂和华蓥山断裂,构造特征表现为 NE、NNE 高陡背斜带和断裂带组成的

隔挡式褶皱,往南呈帚状撒开^[3]。川东地区由于加里东运动缺失泥盆系,中二叠世末期—晚二叠世初期,东吴运动导致上扬子地台区域发生了大规模的张裂运动,四川盆地整体抬升剥蚀,至晚二叠世初期,发生大规模海侵,沉积了龙潭组与吴家坪组 2 套等时异相地层^[14]。

FT1 井位于川东高峰场地区,其龙潭组埋深为 4 520.0 m~4 620.9 m,总厚度 100.9 m,其上部岩性以灰岩为主,中部发育大量页岩、碳质页岩,下部发育一套较厚的玄武岩(图 1(b))。

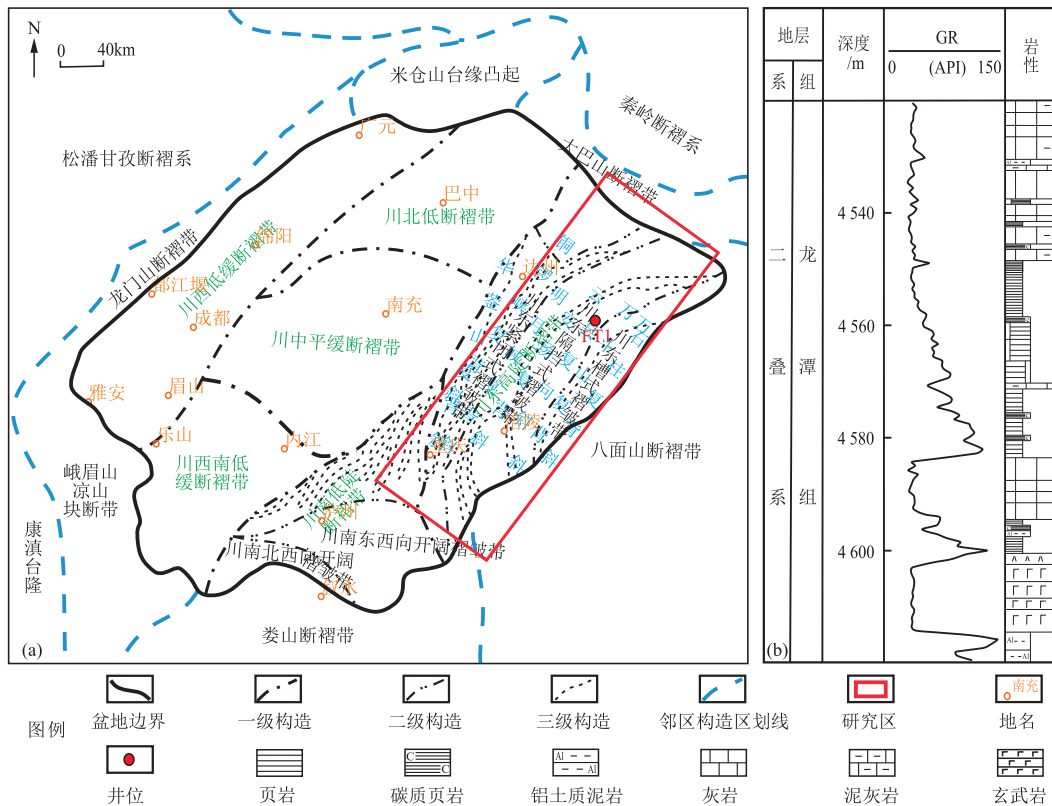


图 1 四川盆地构造图及 FT1 单井柱状图

Fig. 1 Structural diagram of Sichuan Basin and column diagram of FT1 single well

本次页岩样品选自川东地区龙潭组 FT1 井,通过仪器制备成直径为 25 mm、高度为 40 mm~50 mm 的圆柱体,通过超声波脉冲穿透法进行弹性波速度测试。

弹性波速度测试的工作原理如下:由脉冲发生器发出宽频带、高电压的尖脉冲电信号,该信号经由压电陶瓷转化为固有频率的机械震动,另一端的压电陶瓷换能器再将其转化为电信号传入系统,系统求取信号从发出到接收之间的时间,该传播时间包含探头对接时间和震动信号在样品中传播的时间,探头对接时间可以单独测出。通过对样品长度的测

量,可以求出样品弹性波速度,公式如下:

$$V = \frac{L}{T_1 - T_0} \quad (1)$$

式中, L 为岩石样品长度, T_1 为初至波到的时间, T_0 为探头对接时间。

2 岩相划分及沉积环境分析

2.1 岩相划分

对川东地区龙潭组 FT1 井 25 个页岩样品进行 X 衍射全岩分析(附表)。通过硅质矿物—碳酸盐矿

物—黏土矿物—三元图^[15-16](图 2),把研究区页岩样品划为黏土质页岩相、混合质页岩相、硅质页岩相。

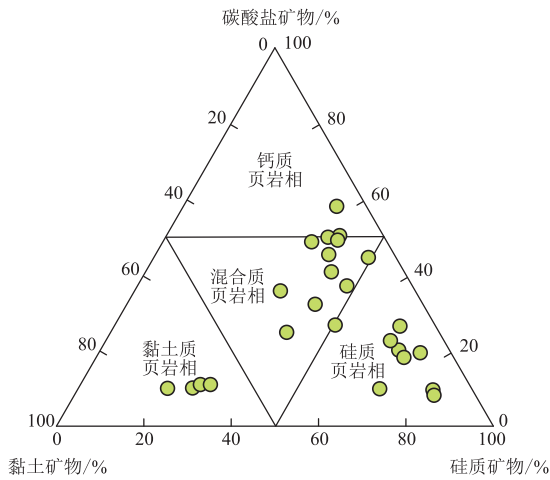


图 2 页岩样品岩相划分图

Fig. 2 The lithofacies division of shale samples

黏土质页岩:其黏土矿物、硅质矿物、碳酸盐矿物含量平均值分别为 61.99%、24.38%、13.63%。生物化石丰富,见有孔虫、放射虫等,且内部被石英填充(图 3(a))。其黏土矿物大量堆积,顺层分布(图 3(b)),石英分选性好、磨圆度大,呈椭圆形或菱形镶嵌于黏土矿物中(图 3(c))。

混合质页岩:其碳酸盐矿物、硅质矿物、黏土矿物含量平均值分别为 41.82%、40.93%、17.25%。混合质页岩的有机质不规则,呈碎块状和颗粒状,且石英和方解石分散在有机质中(图 3(d)、图 3(e))。其微裂缝较为发育,且被方解石填充(图 3(f))。

硅质页岩:其硅质矿物、碳酸盐矿物、黏土矿物含量平均值分别为 67.20%、18.12%、14.68%。硅质页岩的黄铁矿较发育(图 3(g)),石英水平纹理发育,分层性较好,且石英分选性和磨圆度较差(图 3(h))。见放射虫发育,且被硅化形成了生物石英(图 3(i))。

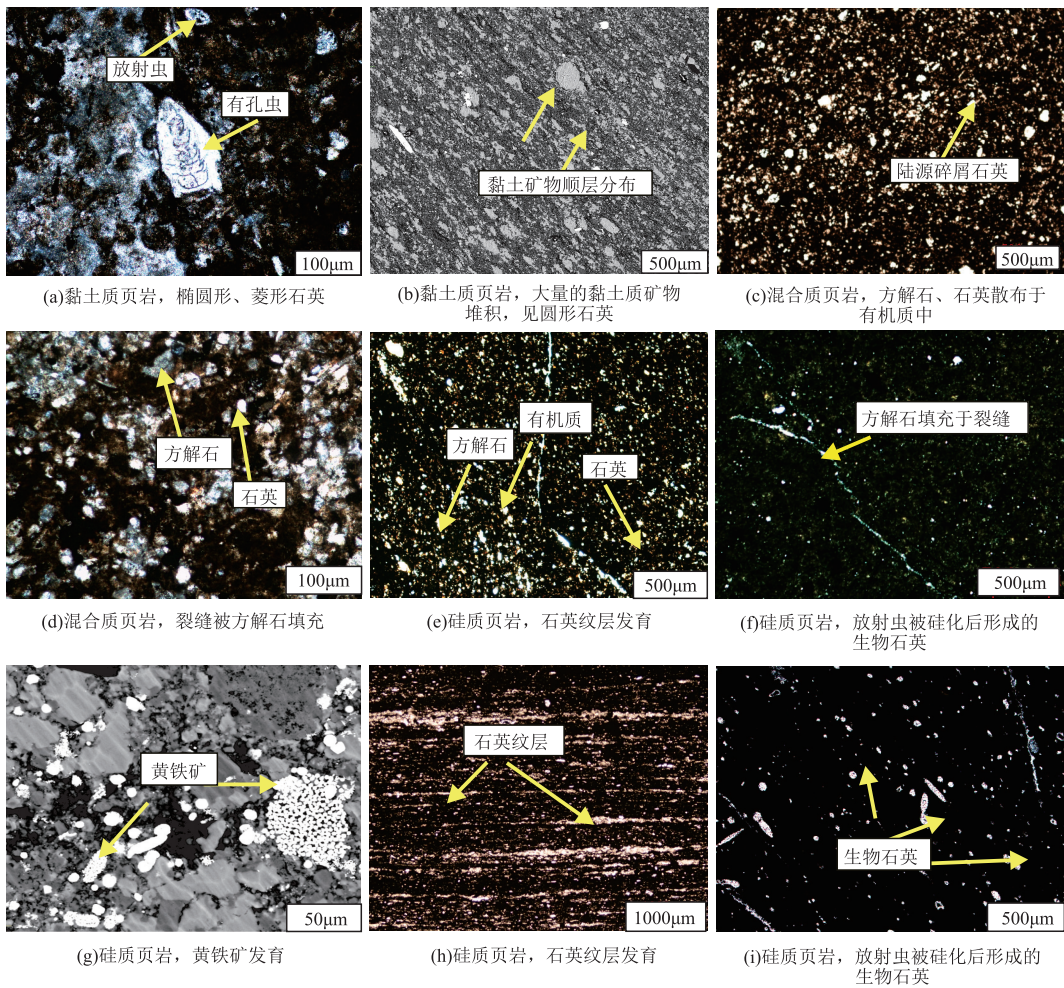


图 3 页岩样品微观结构特征

Fig. 3 Microstructure characteristics of shale samples

2.2 古生产力

页岩中有机质的富集需要环境提供充足的有机碳来源,即高古生产力意味着有机碳通量大^[17]。由于川东龙潭组受陆源物质输入影响,通常使用 P/Ti 值和生源钡 Ba_{bio} 反映古生产力大小。生源钡 Ba_{bio} 的计算公式如下^[18]:

$$Ba_{bio} = Ba_{sample} - Al_{sample} \times 0.0075 \quad (2)$$

FT1 井页岩样品计算结果显示(表 1):混合质页岩 P/Ti 值介于 0.02~0.06,均值为 0.03,生源钡 Ba_{bio} 值介于 39.53~169.95,均值为 81.00;硅质页岩 P/Ti 值介于 0.38~2.00,均值为 1.15,生源钡 Ba_{bio} 值介于 713.68~1459.99,均值为 1005.64;黏土质页岩 P/Ti 值介于 0.05~0.12,均值为 0.09,生源钡 Ba_{bio} 值介于 106.91~213.92,均值为 165.17,具体数据见附表。表明硅质页岩古生产力最高;黏土质页岩次之,混合质页岩古生产力最低(图 4)。

表 1 不同岩相的古生产力指标

Tab. 1 Ancient productivity index of different lithofacies

岩相	P/Ti		Ba_{bio}	
	范围	均值	范围	均值
混合质页岩	0.02~0.06	0.03	39.53~169.95	81.00
硅质页岩	0.38~2.00	1.15	713.68~1459.99	1005.64
黏土质页岩	0.05~0.12	0.09	106.91~213.92	165.17

2.3 氧化还原

水体的氧化还原状态通常划分为氧化—贫氧—缺氧—硫化静海^[19],缺氧还原环境是控制有机质富集的重要因素,可采用 Th/U、Ni/Co 值进行判别。在富氧条件下,Th/U 值大于 1.3, Ni/Co 值小于 5;在贫氧条件下,Th/U 值介于 0.8~1.3, Ni/Co 值介于 5~7;在缺氧条件下,Th/U 值小于 0.8, Ni/Co 值大于 7。

表 2 不同岩相的氧化还原指标

Tab. 2 The redox indexes of different lithofacies

岩相	Th/U		Ni/Co	
	范围	均值	范围	均值
混合质页岩	0.53~1.40	1.04	4.94~7.08	5.91
硅质页岩	0.19~0.78	0.47	9.84~18.43	13.60
黏土质页岩	2.24~4.32	3.14	1.92~3.20	2.57

川东龙潭组三种页岩岩相的氧化还原条件具有明显差异(表 2):混合质页岩 Th/U 值为 0.53~1.40,均值为 1.04, Ni/Co 值为 4.94~7.08,均值为 5.91;硅质页岩 Th/U 值为 0.19~0.78,均值为 0.47, Ni/Co 值为 9.84~18.43,均值为 13.60;黏土质页岩 Th/U 值为 2.24~4.32,均值为 3.14, Ni/Co

值为 1.92~3.20,均值为 2.57,具体数据见附表。由上可知,混合质页岩沉积于贫氧环境,硅质页岩沉积于缺氧环境,黏土质页岩沉积于富氧环境(图 4)。

2.4 陆源碎屑输入

一定程度的陆源碎屑流入,可以将大量的营养元素带入,促进了动植物生长发育,从而导致有机质富集,而过度输入可导致黏土矿物含量增加、有机质被破坏和稀释^[20]。目前常用于表征陆源碎屑来源的元素包括 Al、Ti、Th、Zr 等,这与其不受风化作用和成岩作用影响有关^[21-22]。Al、Th、Zr 通常出现在铝硅酸盐矿物, Ti 主要存在于粘土矿物、钛铁矿和金红石中^[23]。

笔者采用 Al、Zr 元素对陆源碎屑输入量进行判别(见附表),从图 4 可以得出,川东龙潭组黏土质页岩的陆源碎屑输入量最高,混合质页岩的陆源碎屑输入量较高,硅质页岩的陆源输入最低。

3 沉积环境对石英、TOC 的影响

3.1 石英成因

石英的来源除了陆源碎屑供给外,在成岩过程中形成的生物成因石英也是页岩储层重要的组成部分^[24],石英成因不同会导致岩石骨架存在差异。仅来源于生物作用的 Si 称为过量硅,其计算公式如下:

$$Si_{过量} = Si_{样品} - (Al_{样品} \times Si/Al_{背景}) \quad (3)$$

式中 $Si/Al_{背景}$ 采用平均页岩比值 3.11^[25]。结果显示(附表):黏土质页岩样品过量硅值为 -12.81~-11.06,均小于 0,表示其以陆源碎屑石英为主;混合页岩样品过量硅值为 -11.28~7.78,大部分均小于 0,表明其也以陆源碎屑石英为主,含少量生物成因石英;硅质页岩样品过量硅值为 13.57~38.64,均大于 0,表明其以生物成因石英为主。

微量元素锆(Zr)也能对页岩的石英来源进行判断,通过 SiO_2 含量与 Zr 含量的关系图,可以区分碎屑二氧化硅^[26]。 SiO_2 含量与 Zr 含量呈正相关性,反映石英呈碎屑化趋势; SiO_2 含量与 Zr 含量呈负相关性,暗示生物成因石英的存在。从图 5 可以看出,黏土质页岩和混合页岩 SiO_2 含量与 Zr 含量呈正相关;硅质页岩 SiO_2 含量与 Zr 含量呈负相关。

综上所述,可知混合质页岩和黏土质页岩的陆源碎屑输入量较多,其石英以陆源碎屑石英为主,而硅质页岩的陆源碎屑输入量较少,其石英以生物成

因石英为主。

3.2 沉积环境对 TOC 的影响

不同沉积环境下,有机质的生成与后期保存具有明显的差异,从而导致 TOC 含量存在差异。从图 4 可知,硅质页岩 TOC 含量最高,均值为 6.67%,黏土质页岩次之,均值为 4.19%,混合质页岩最低,均值为 1.39%。根据沉积环境指标与

TOC 关系可知:

硅质页岩的生源钡 Ba_{bio} 最高(图 6(a)),古生产力最大;Al 含量与 TOC 呈负相关, $R^2 = 0.52$ (图 6(b)),表明硅质页岩陆源碎屑输入对有机质有破坏作用,但在沉积时期高古生产力带来了丰富的烃来源,且在缺氧环境下有利于有机质的保存,从而导致硅质页岩的 TOC 含量最高。

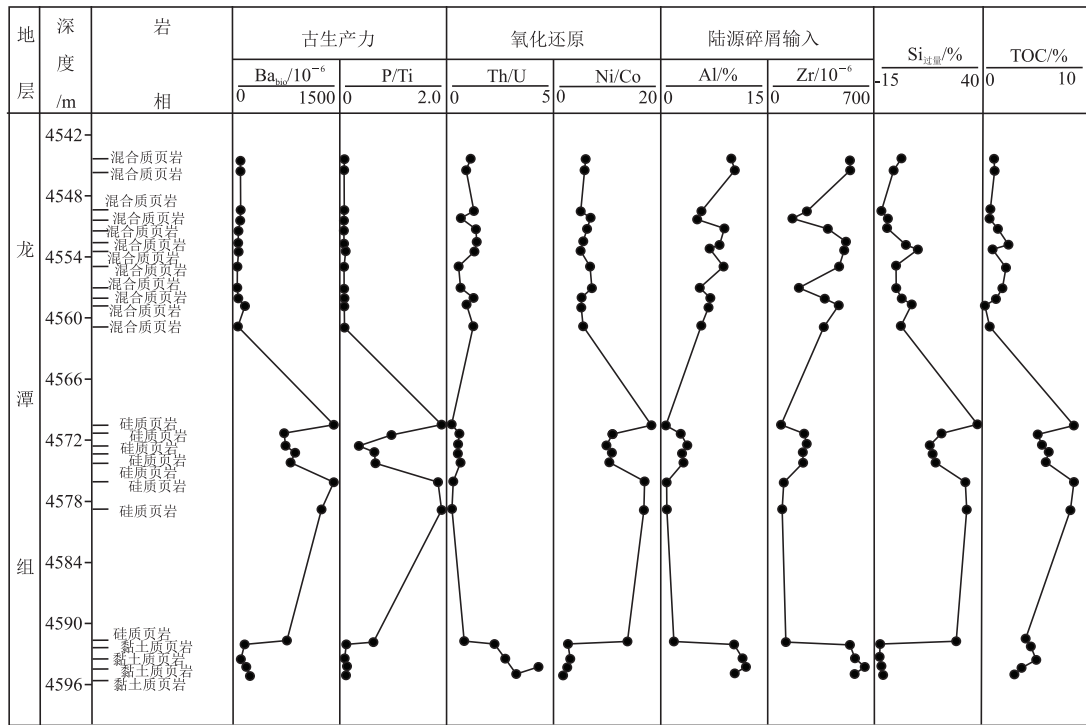


图 4 页岩样品元素比值分布及 TOC 含量

Fig. 4 Element ratio distribution and TOC content of shale samples

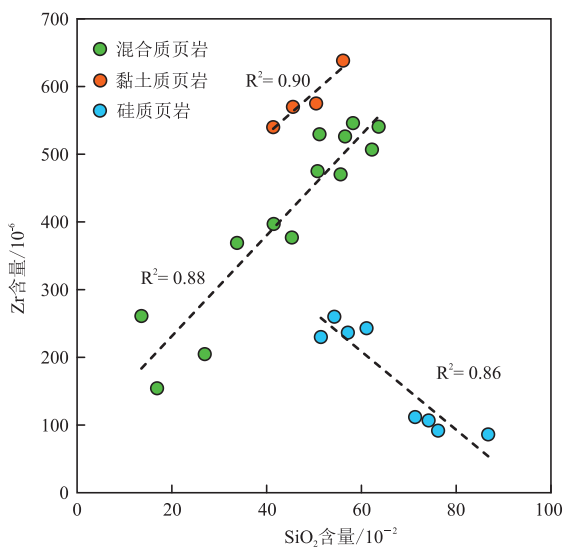


图 5 SiO₂ 含量与 Zr 含量关系图

Fig. 5 Relationship between SiO₂ content and Zr content

黏土质页岩的生源钡 Ba_{bio} 居中,混合质页岩生源钡 Ba_{bio} 最低(图 6(a)),说明黏土质页岩的古生产力高于混合质页岩;混合质页岩的 Al 含量与 TOC 成较弱的正相关, $R^2 = 0.19$ (图 6(b)),可知其陆源碎屑对有机质富集有促进作用;黏土质页岩的 Al 含量与 TOC 相关性不强, $R^2 = 0.06$ (图 6(b)),前人研究表明,黏土质页岩的陆源碎屑输入对有机质富集有促进作用^[10],而本文黏土质页岩的实验数据较少,导致相关性不明显。虽然黏土质页岩的富氧环境更不利于有机质的保存,但其古生产力高于混合质页岩,导致黏土质页岩的 TOC 含量高于混合质页岩,可知,古生产力是影响 TOC 含量的主要因素。

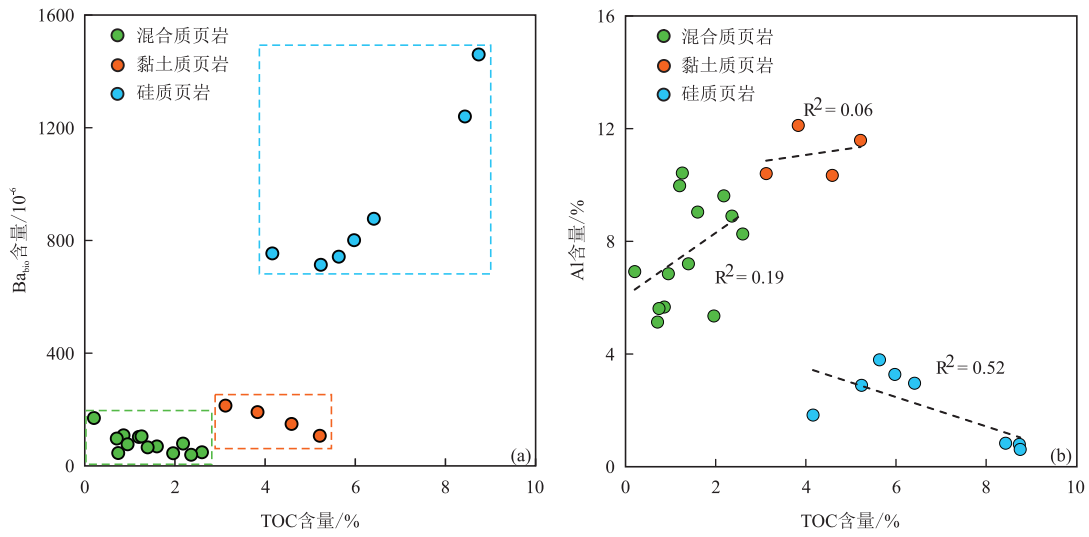


图 6 TOC 含量与 Ba_{bio} 含量(a)和 Al 含量(b)关系图

Fig. 6 Relationship between TOC content and Ba_{bio} content (a) and Al content (b)

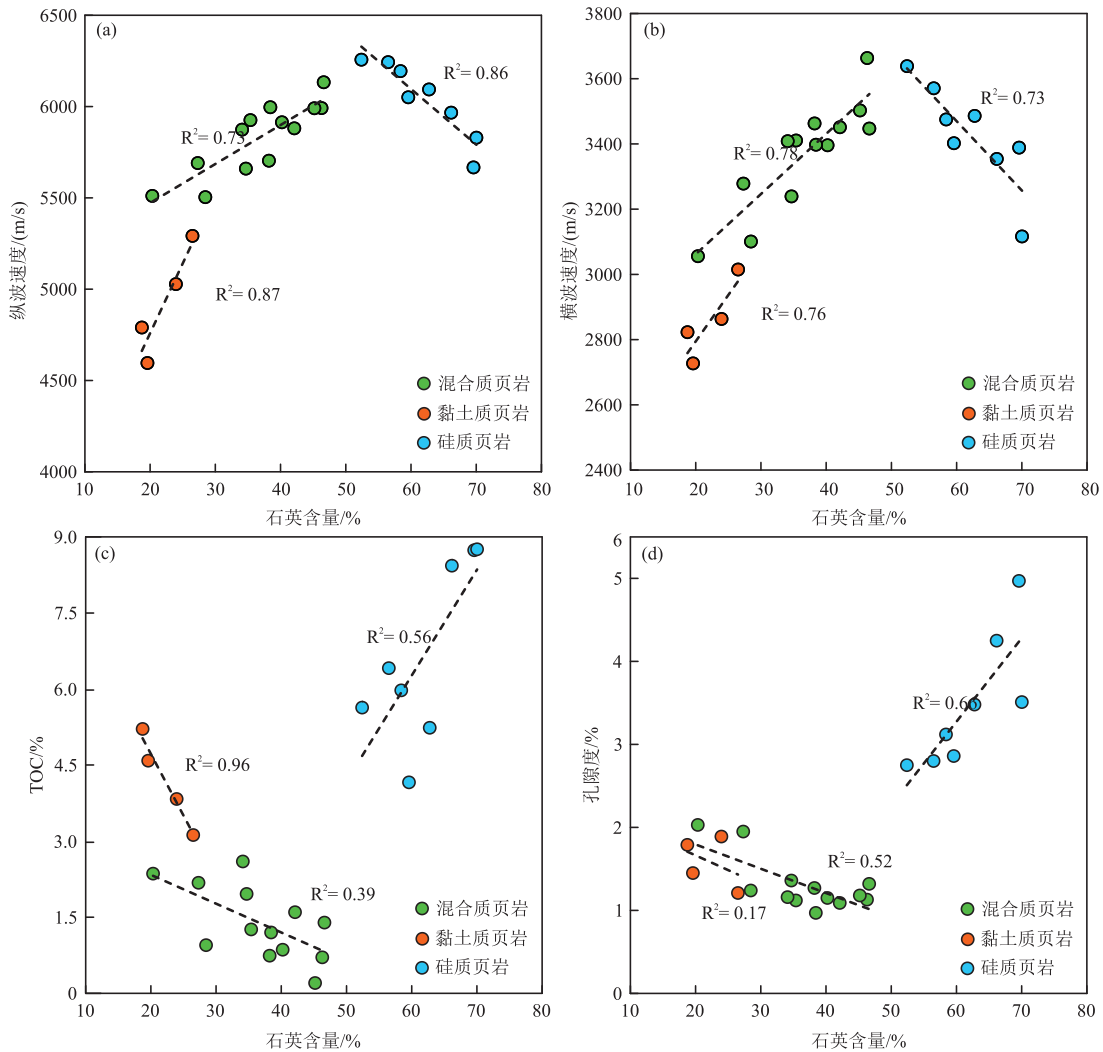


图 7 页岩样品弹性波速度变化特征

Fig. 7 Variation characteristics of elastic wave velocity of shale samples

4 弹性波速度变化特征

从图 7(a)和图 7(b)可以看出,硅质页岩的纵、横波速度最高,与石英含量表现出负相关性;混合质页岩纵、横波速度居中,黏土质页岩最低,这两种岩相的速度都与石英含量表现出正相关性。

由前面的沉积环境分析可知,混合质页岩和黏土质页岩的陆源碎屑输入量都较大,其石英以陆源碎屑石英为主,表现出石英颗粒嵌入黏土基质,岩石骨架由黏土颗粒构成的特征(图 8(a)和图 8(b)),此时弹性性质较软^[26],纵、横波速度低;硅质页岩的陆源碎屑输入量较低,其石英主要来源于生物成因石英,表现出石英颗粒作为岩石骨架的特征(图 8(c)),弹性性质较硬^[27],纵、横波速度高。

同时,TOC 含量的增加会导致岩石“变软”,从而导致速度下降^[8]。根据 Wyllie 等人^[28]提出的岩石速度与孔隙度的经验关系式(式 4),可知孔隙度的增大也会导致纵波速度下降。

$$\frac{1}{V_p} = \frac{1-\phi}{V_m} - \frac{\phi}{V_{f1}} \quad (4)$$

$$\text{推出: } V_p = \frac{V_m \times V_{f1}}{(V_m - V_{f1}) \times \phi + V_{f1}}$$

式中 V_p 为纵波速度, ϕ 为孔隙度, V_m 为岩石骨架部分的纵波速度, V_{f1} 为孔隙中液体的纵波速度。

由 3.2 可知,硅质页岩的 TOC 含量最高,黏土质页岩次之,混合质页岩最低。硅质页岩、混合质页岩、黏土质页岩的孔隙度平均值分别为 3.47%、1.31%、1.59%,也表现出硅质页岩最高,混合质页岩最低。黏土质页岩和混合质页岩都由黏土颗粒构成岩石骨架,而黏土质页岩的 TOC 和孔隙度都比混合质页岩高,导致其纵、横波速度低于混合质页岩。

硅质页岩的 TOC 含量、孔隙度随石英含量增加而增大;混合质页岩和黏土质页岩的 TOC 含量、孔隙度随石英含量的增加而减小(图 7(c)、图 7(d))。因而硅质页岩的纵、横波速度随石英含量的增加而下降,混合质页岩和黏土质页岩的纵、横波速度随石英含量的增加而升高。

综上所述,可知岩石骨架是影响纵、横波速度的主要因素,TOC 和孔隙度是次级因素。陆源碎屑输入影响石英成因,石英成因不同导致岩石骨架存在差异,因而陆源碎屑输入是影响纵、横波速度的主要因素。

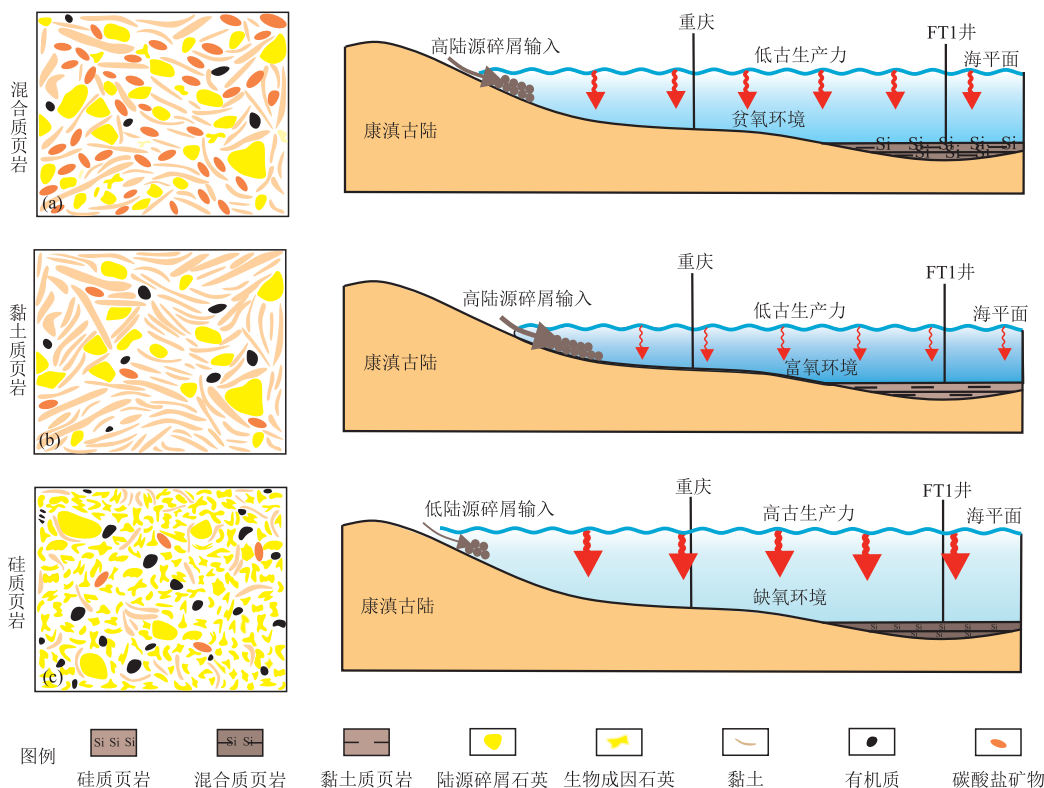


图 8 沉积环境对岩石骨架的控制作用图

Fig. 8 Control chart of sedimentary environment on rock skeleton

5 结论

1)川东地区 FT1 井龙潭组页岩可划分为黏土质页岩、混合质页岩、硅质页岩。混合质页岩和黏土质页岩沉积于低古生产力、氧化环境、陆源碎屑输入较高的环境下,表现出低 TOC、低速度的特征。

2)硅质页岩沉积于高古生产力、还原环境、陆源碎屑输入较低的环境下,表现出高 TOC、高速度的特征。

3)通过对川东地区龙潭组页岩的沉积古环境重建,可知陆源碎屑输入是影响弹性波速度的主要因素,处于高生产力、还原环境、陆源碎屑输入较低沉积环境下的硅质页岩更有利于页岩弹性波速度的传播,硅质页岩为优势岩相。

参考文献:

- [1] 贾承造,郑民,张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 129-136.
JIA C Z, ZHENG M, ZHANG Y F. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 129-136. (In Chinese)
- [2] 翟常博,邓模,曹清古,等. 川东地区上二叠统龙潭组泥页岩基本特征及页岩气勘探潜力[J]. 石油实验地质, 2021, 43(6): 921-932. (In Chinese)
ZHAI C B, DENG M, CAO Q G, et al. Basic characteristic and exploration potential of shale gas in Longtan formation of upper permian in eastern Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(6): 921-932. (In Chinese)
- [3] 刘光祥,金之钧,邓模,等. 川东地区上二叠统龙潭组页岩气勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(3): 481-487.
LIU G X, JIN Z J, DENG M, et al. Exploration potential for shale gas in the upper permian Longtan formation in eastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(3): 481-487. (In Chinese)
- [4] 熊健,梁利喜,刘向君,等. 川南地区龙马溪组页岩岩石声波透射实验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(5): 1071-1077.
XIONG J, LIANG L X, LIU X J, et al. Experimental study on acoustic penetration through the Longmaxi

formation shale rock in south region of Sichuan Basin [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(5): 1071-1077. (In Chinese)

- [5] GARDNER G H F, GARDNER L W, GREGORY A R. Formation velocity and density—The diagnostic basics for stratigraphic traps[J]. Geophysics, 1974, 39(6): 770-780.
- [6] CASTAGNA J P, BATZLE M L, EASTWOOD R L. Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks[J]. Geophysics, 1985, 50(4): 571-581.
- [7] VERNIK L, NUR A. Ultrasonic and anisotropy of hydrocarbon source rocks[J]. Geophysics, 1992, 57(5): 727-735.
- [8] 康毅力,白佳佳,游利军. 有机质含量对页岩声波传播特性的影响[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(9): 1341-1349.
KANG Y L, BAI J J, YOU L J. Influence of organic content on acoustic wave propagation characteristic of organic-rich shale[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(9): 1341-1349. (In Chinese)
- [9] 王世广,沈阳,何晗晗,等. 不同岩石物性对超声波传播的影响[J]. 物理实验, 2014, 34(8): 9-13.
WANG S G, SHEN Y, HE H H, et al. Effect of petrophysical property on the propagation of ultrasonic in rocks[J]. Physics Experimentation, 2014, 34(8): 9-13. (In Chinese)
- [10] 肖威,张兵,姚永君,等. 川东二叠系龙潭组页岩岩相特征与沉积环境[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(2): 152-162.
XIAO W, ZHANG B, YAO Y J, et al. Lithofacies and sedimentary environment of shale of Permian Longtan formation in eastern Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2022, 34(2): 152-162. (In Chinese)
- [11] 徐传正,李鑫,田继军等. 四川盆地南缘龙马溪组混合岩相页岩及其沉积环境[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(5): 208-217.
XU C Z, LI X, TIAN J J, et al. Mixed lithofacies shale and depositional environment of Longmaxi Formation in southern margin of Sichuan Basin[J]. Coal Science and Tecnology, 2021, 49(5): 208-217. (In Chinese)
- [12] 伍岳,樊太亮,丁怀宇. 上扬子区下寒武统海相页岩岩相类型及沉积模式[J]. 现代地质, 2017, 31(6): 1222-1232.
WU Y, FAN T L, DING H Y. Lithofacies and sedimentary model of the lower cambrian marine shale in

- the Upper Yangtze platform[J]. *Geoscience*, 2017, 31(6) : 1222-1232. (In Chinese)
- [13] 赵建华, 金之钧, 金振奎, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩岩相类型与沉积环境[J]. *石油学报*, 2016, 37(5) : 572-586.
ZHAO J H, JIN Z J, JIN Z K, et al. Lithofacies types and sedimentary environment of shale in Wufeng-Longmaxi formation, Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(5) : 572-586. (In Chinese)
- [14] 田景春, 张奇, 林小兵, 等. 四川盆地二叠系层序地层格架内的沉积与储层演化[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
TIAN J C, ZHANG Q, LIN X B, et al. Sedimentation and reservoir evolution in Permian sequence stratigraphic framework in Sichuan Basin[M]. Beijing : Science Press, 2018. (In Chinese)
- [15] HICKEY J J, HENK B. Lithofacies summary of the Mississippian Barnett shale, mitchell 2 TP Sims well, Wise county, Texas [J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(4): 437-443.
- [16] ABOUELRESH M O, SLATT R M. Lithofacies and sequence stratigraphy of the Barnett Shale in east-central Fort Worth Basin, Texas [J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(1): 1-22.
- [17] 何龙. 四川盆地东南缘五峰组—龙马溪组页岩有机质富集机制及沉积环境演化[D]. 广州: 中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所), 2020.
HE L. Organic matter enrichment and evolution of sedimentary environment of the Wufeng-Longmaxi shale in southeastern margins of the Sichuan Basin [D]. Guangzhou : University of Chinese Academy of Sciences (Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences), 2020. (In Chinese)
- [18] WEI H Y, TANG Z W, YAN D T, et al. Guadalupian (Middle Permian) ocean redox evolution in South China and its implications for mass extinction [J]. *Chemical Geology*, 2019, 530: 119318.
- [19] 赵宇. 串岭沟组沉积铁矿地球化学特征及其沉积环境意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
ZHAO Y. The geochemistry character of the Xuanlong iron deposit in Chuanlinggou Formation and its sedimentary environment significance [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020. (In Chinese)
- [20] ROSS D J K, BUSTIN R M. Investigating the use of sedimentary geochemical proxies for paleoenvironment interpretation of thermally mature organic-rich strata: examples from the Devonian - Mississippian shales, Western Canadian Sedimentary Basin [J]. *Chemical Geology*, 2009, 260(1-2) : 01-19.
- [21] RACHOLD V, BRUMSACK H J. Inorganic geochemistry of Albian sediments from the Lower Saxony Basin NW Germany: palaeoenvironmental constraints and orbital cycles [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2001, 174(1-3): 121-143.
- [22] YANG K, ZHANG B, YAO Y J, et al. Organic matter accumulation mechanism and characteristics in marine-continental transitional shale: A case study of the upper permian Longtan formation from the Well F5 in Sichuan Basin, China [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 208(Part C): 109604.
- [23] 陆扬博. 上扬子五峰组和龙马溪组富有机质页岩相定量表征及沉积过程恢复[D]. 北京: 中国地质大学, 2020.
LU Y B. Quantitative characterization of lithofacies and reconstruction of the sedimentary process for Upper Yangtze Wufeng and Longmaxi organic-rich shales [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020. (In Chinese)
- [24] 赵建华, 金之钧, 金振奎, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组含气页岩中石英成因研究[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(2) : 377-386.
ZHAO J H, JIN Z J, JIN Z K, et al. The genesis of quartz in Wufeng-Longmaxi gas shales, Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(2) : 377-386. (In Chinese)
- [25] ROSS D J K, BUSTIN R M. Characterizing the shale gas resource potential of Devonian - Mississippian strata in the Western Canada sedimentary basin: Application of an integrated formation evaluation [J]. *AAPG bulletin*, 2008, 92(1): 87-125.
- [26] YANG X R, YAN D T, WEI X S, et al. Different formation mechanism of quartz in siliceous and argillaceous shales: A case study of Longmaxi Formation in South China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 94: 80-94.
- [27] 徐中华, 郑马嘉, 刘忠华, 等. 四川盆地南部地区龙马溪组深层页岩岩石物理特征[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(6) : 1100-1110.
XU Z H, ZHENG M J, LIU Z H, et al. Petrophysical properties of deep Longmaxi formation shales in the southern Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(6) : 1100-1110. (In Chinese)
- [28] WYLLIE M R J, GREGORY A R, GARDNER L W.

Elastic wave velocities in heterogeneous and porous

media[J]. Geophysics, 1956, 21(129) : 41-70.

Elastic wave velocity characteristics of shale in different sedimentary environments of Permian Longtan Formation in Eastern Sichuan Basin

WANG Yan¹, ZHANG Bing¹, YAO Yongjun², LIN Xiaoyang¹, CAO Gaoquan¹, XIAO Wei¹

(1. Earth Exploration and Information Technology Key Laboratory of Ministry of Education,
Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Chongqing Gas Mine, PetroChina Southwest Oil and Gas Field Branch, Chongqing 400000, China)

Abstract: This paper selects the shale of Longtan Formation in Well FT1 in eastern Sichuan Basin for experimental test. Under the background of lithofacies division, the sedimentary environment of different lithofacies in the Longtan Formation in the eastern Sichuan Basin is analyzed using data from primary and trace elements. Combined with the influence of sedimentary environment on quartz genesis and TOC, the variation characteristics of elastic wave velocity in different sedimentary environments are discussed. The results show that : ①The mixed shale and clay shale are in a sedimentary environment with low paleoproductivity, rich oxygen, and high input of terrigenous debris. Siliceous shale is in a sedimentary environment with high paleoproductivity, poor oxygen, and low terrigenous debris input. Its quartz is mainly biogenic quartz with high TOC content. ②Mixed shale and argillaceous shale use clay particles as rock skeleton; the elastic wave velocity is low, and the elastic wave velocity increases with quartz content. The siliceous shale takes quartz particles as the rock skeleton, and the elastic wave velocity is high, and the elastic wave velocity decreases with the quartz content. The research results can provide a basis for exploring dominant lithofacies in Longtan Formation shale.

Keywords: Longtan formation; sedimentary environment; quartz genesis; TOC; elastic wave velocity