

基于米兰科维奇理论页岩岩相组合研究

——以四川盆地南部龙马溪组一段为例

黄璞¹, 熊亮², 詹国卫¹, 程洪亮¹, 赵勇¹, 张世华¹

1. 中国石化西南油气分公司勘探开发研究院, 成都 610095

2. 中国石化西南油气分公司, 成都 610095

摘要 【目的】基于米兰科维奇理论为地层科学搭建等时页岩岩相组合框架, 设计一种精确页岩岩相表征方法, 对评价页岩岩相组合纵、横向非均质变化、研究区域沉积模式具有重要意义。【方法】通过 Lithoscanner 元素扫描测井、多矿物模型准确计算出页岩矿物成分并以此划分岩相, 同时采用 Ipsom 督导神经网络算法开展无 Lithoscanner 元素扫描测井资料的气页岩相识别工作; 通过频谱分析、最优沉积速率估算、高斯滤波等时间序列分析方法提取地层米兰科维奇旋回。【结果】威荣地区龙马溪组一段地层包含 12 类岩相; 以观音桥段顶面为锚点可划分出 8 个四级层序与 24~26 个五级层序。将四级层序上下边界作为岩相组合框架, 分析组合内岩相占比百分数发现, 龙一段中下部 E1 至 E4 岩相组合呈现出岩相类型多、主力岩相占比变化快的特点, E5 至 E8 岩相组合纵、横向变化相对较小。【结论】基于岩相组合变化及其所对应的三类页岩沉积模式, 揭示了该地区岩相组合纵横向差异主要受气候影响的海洋生产力、气候影响的川中古陆陆源供给以及岩相古地理三方面影响。页岩岩相组合量化研究结果及其所反映的局部沉积模式可为区域内预测有利岩相位置、更精准预判油气勘探有利区提供新思路。

关键词 四川盆地; 页岩; 龙马溪组一段; 时间序列分析; 岩相划分; 岩相特征; 岩相组合; 沉积模式

第一作者简介 黄璞, 女, 1992 年出生, 硕士研究生, 工程师, 非常规油气地质、测井, E-mail: 527210948@qq.com

通信作者 熊亮, 男, 教授级高级工程师, 天然气勘探生产及相关技术管理, E-mail: xiongliang.xnyq@xinopec.com

中图分类号 P618.63 文献标志码 A

0 引言

针对页岩岩相研究过往学者大多采用岩心观察法和 XRD 矿物衍射分析实验数据分析法, 前者因页岩高 TOC 导致颜色相变特征而难以观察, 后者因采样密度较低难以发现岩相在更小尺度下的频繁变化, 一直以来学者均认为深水陆棚下的页岩岩相种类相对单一, 纵横向变化不明显^[1-2]。通过对四川盆地南部威荣地区龙马溪组一段地层开展 Lithoscanner 元素扫描测井研究发现其具有 10 余类岩相, 特别在目前勘探开发主力地层即龙一段中下部岩相具有多层叠置特征, 如何真实、量化表征此类复杂岩相组合成为新难点。

收稿日期: 2023-09-07; 收修改稿日期: 2023-11-09

基金项目: 中石化科技部课题 (P22041); 中国石化西南油气分公司科技项目 (KJ-700-2218) [Foundation: Project of the Ministry of Science and Technology of SINOPEC, No. P22041; SINOPEC Southwest Oil and Gas Branch Technology Project, No. KJ-700-2218]

岩相组合指按照一定叠置次序构成的能反映环境条件规律性演化并存在一定成因联系的岩相组合体^[3]。若能建立客观岩相组合框架将地层划分为若干岩相组合,分析组合内岩相空间展布特征、量化岩相占比,可大幅增强岩相研究与油气勘探开发之间的联系。目前,尚未有学者提出客观划分页岩岩相组合界面的方法。本文以具有客观性、组合划分应一定程度体现沉积环境为基本要求,寻找全新页岩岩相组合划分方法。

米兰科维奇理论地层信号特征被广泛地运用于陆相泥页岩分析^[4-6],近年来不少学者开展了海相页岩米兰科维奇旋回分析^[7-11],基于米兰科维奇理论下的时间序列分析方法可以科学提取地层中气候周期性变化信号,划分出地层高分辨层序即四级、与五级层序^[12-13]。同时也有部分学者将米兰科维奇旋回与地层岩性、岩相^[14]、生物特征^[15]、沉积速率、有机碳含量等信息开展联合分析,以上说明米兰科维奇理论与岩相、岩相组合应具有较强相关性。因此,本文尝试通过米兰科维奇理论为地层搭建页岩岩相组合框架结合岩相分类,识别出地层若干岩相组合,量化组合内部差异、对比井间组合差异,进而明确页岩地层非均质性特征及其变化趋势,为区域内预测有利岩相位置、精准判断油气勘探有利区提供可靠依据。

1 区域地质概况

威荣页岩气田地处长扬子板块四川盆地南部川西低褶构造带白马向斜内,研究区在加里东晚期、印支早期构造变化相对微弱,在印支晚期—燕山早期形成过五峰组—龙一段地层的大千断裂与白沙断裂,分别位于白马地区东西两侧,形成白马现今构造,在燕山晚期—喜山期—现今白马地区不再受大型断裂构造影响,白马向斜特征得以保持^[6]。因此,威荣地区古构造特征与现今构造特征基本一致,总体发育向斜局部构造自西向东依次为西部次凹、中部凸起和东部次凹,呈“两凹一凸”的特征^[17](图 1b)。

上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组富有机质页岩埋深大于 3 000 m,地层厚度 30~120 m,发育四个三级层序,分别对应五峰组、龙马溪组一段(龙一段)、龙马溪组二段(龙二段)以及龙马溪组三段(龙三段)。沉积微相以硅质深水陆棚、富灰硅质深水陆棚、富硅泥质深水陆棚等岩相为主^[17],岩性上五峰组主要发育灰黑—黑色含生屑碳质页岩,可见大量笔石,观音桥段见赫兰特贝;龙一段主要发育黑色碳质笔石页岩、碳质放射虫笔石页岩。

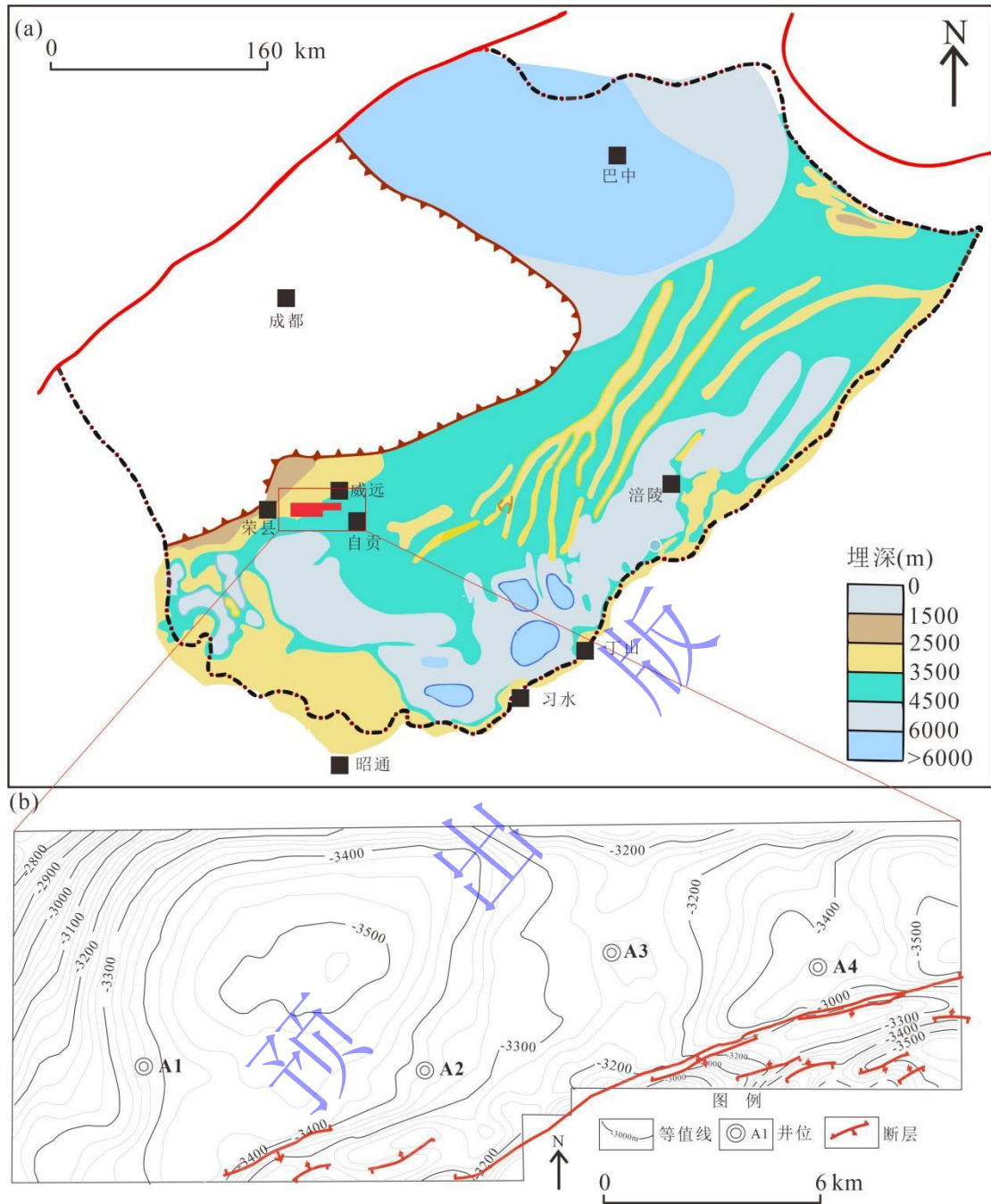


图1 研究区位置及龙马溪组底面构造图

(a) 四川盆地龙马溪组底界埋深与研究区位置^[17]; (b) 威荣页岩气田龙马溪组地层底面构造图

Fig.1 Bottom structure map of the Longmaxi Formation in the Weirong shale gas field

2 资料和方法

2.1 资料收集与测试分析

收集威荣地区 A1 井、A2 井、A3 井、A4 井 4 口井测井资料与岩心柱样开展测井解释与测试分析 (表 1): (1) 综合、能谱测井资料由 ECLIPS-5700 测井仪测定; (2) 岩性扫描测井由脉冲中子发射仪器测量; (3) 电成像测井 FMI 微电阻率成像测井仪与 XRMI 成像

测井仪器测量；(4)有机碳含量依据标准 GB/T 19145—2003《沉积岩中有机碳的测定》CS-400 碳硫测定仪进行测试分析；(5)矿物衍射实验根据 SY/T 5163—2010《沉积岩中的黏土矿物和常见非黏土矿物 X 射线衍射分析方法》X'Pert Powder 仪器测试分析。Techlog 软件进行测井处理与解释。

表 1 研究区测井与岩心实验分析资料收集情况表

Table 1 Collection of logging and core experiment analysis data in the study area

资料分类	项目	井号			
		A1 井	A2 井	A3 井	A4 井
测井资料	综合测井	GR、AC、CNL、DEN、双侧向电阻率			
	能谱测井	U、TH、K	U、TH、K	/	U、TH、K
	Lithoscanner	√			
	电成像测井	FMI	XRMI	XRMI	XRMI
实验分析	XRD 矿物衍射实验 (件次)	60	51	138	52
	有机碳分析 (件次)	137	51	87	78

2.2 时间序列分析方法

2.2.1 志留纪地球轨道要素理论周期

通过米兰科维奇理论中轨道要素可以为页岩建立高分辨率层序地层格架^[18-19], 理论认为偏心率变化对地球公转轨道产生影响, 影响日照量分布进而影响全球气候变化, 当偏心率较大时, 地球整体接受日照量多, 为间冰期, 气候暖湿, 季节性增强, 奥陶系—志留系时期理论中的长、短偏心率比值分别为 405:125:95^[20-21]。地层中可能存在多个古气候记录的信号, 也可能包含各种环境噪音, 因此要对信号中特定波段频率进行去除, 滤波将有效信号提取出来^[22]。

2.2.2 频谱分析

频谱分析是将时间序列的信号强度按频率顺序展开为其频率的函数 (式 1), 其目的就是众多信号与杂音中识别出代表天文规律的周期性信号^[23-24]。

$$F(w) = F[f(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-iwt} dt \quad (\text{式 1})$$

在划分页岩高频层序过程中, 由于测井 GR 曲线有效记录了地层沉积信息, 在时间序列研究中被广泛作为分析的基础数据^[8,14]。天文旋回数量受到原始 GR 曲线长短、形态的严格控制, 因此截取五峰组—龙一段地层 GR 曲线开展频谱分析是保证旋回准确性的基础。对各井 GR 曲线在 Matlab 平台中进行去趋势化处理。窗口采用大小为 28~32 m 用于保留天文轨道中长偏心率周期, 依次采用 LOWESS、rLOWESS、LOESS 以及 rLOWESS 算法, 对比去

趋势化曲线形态优选 rLOWESS 结果进行频谱分析。频谱分析同时采用 Multi-Taper Method (MTM) 算法和滑动频谱分析开展运算, MTM 频谱分析中设置平滑窗口 0.2, 提取置信度高于 90% 的谱峰对应的沉积厚度与谱峰进行比例分析, 确定各井 405 kyr 长偏心率周期、125 kyr 短偏心率周期以及 95 kyr 短偏心率周期对应的沉积厚度以及频率 (图 2), A1 井对应三个偏心率厚度分别为 11.3 m、3.72 m、2.39 m; A2 井为 11.4 m、3.65 m、2.74 m; A3 井为 9.82 m、3.19 m、2.38 m; A4 井为 10.1 m、2.96 m、2.61 m。

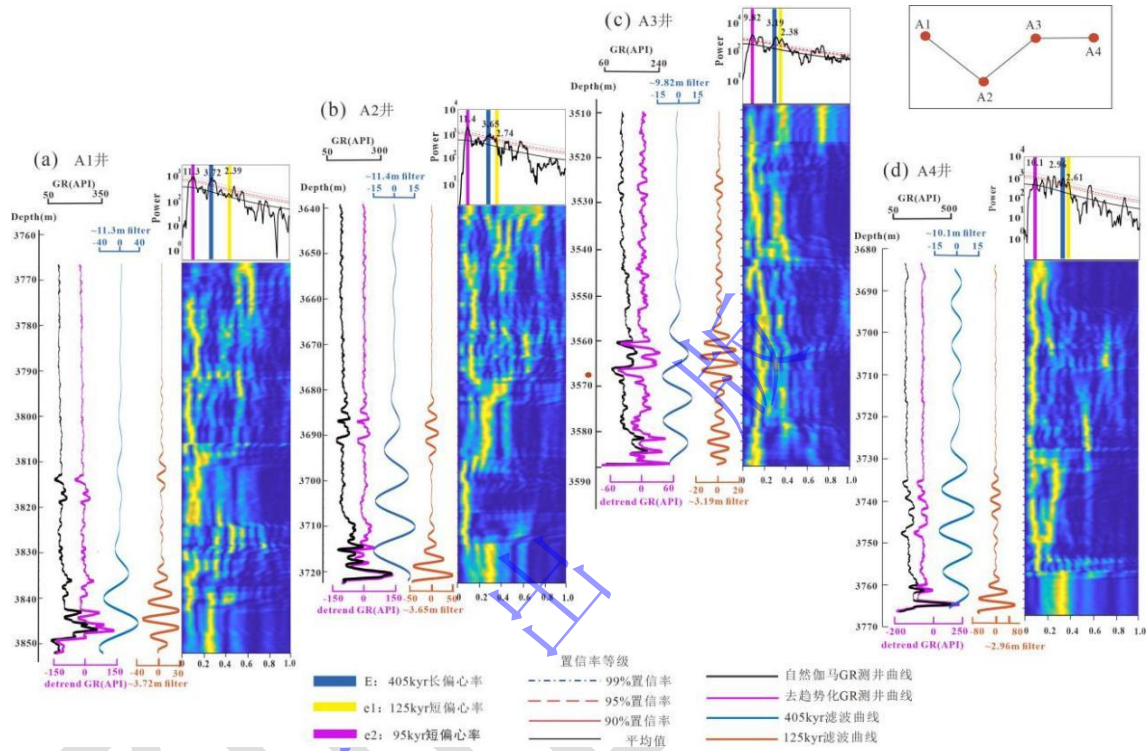


图 2 威荣地区五峰组—龙一段 GR 曲线、MTM 频谱分析、长短偏心率滤波、滑动频谱分析图

Fig.2 Gamma ray (GR) curve, Multi-taper method(MTM) spectrum analysis, long short eccentricity filtering, and sliding spectrum analysis of the Wufeng Formation-1st member of Longmaxi Formation in the Weirong area

2.2.3 最优沉积速率估算

沉积厚度转化时间开展最优沉积速率估算利用相关系数 (Correlation Coefficient, 简称 COCO) 以及进化相关系数 (evolution Correlation Coefficiente, 简称 eCOCO) 算法将深度序列替代指标转换为时间序列^[25], 进而计算 COCO、eCOCO 和频谱分析对应的沉积速率是否一致, 从而提高旋回识别的准确性。

COCO 方法计算出地层沉积速率在 2.2~3.1 cm/kyr 处的 H0 显著水平都低于 0.001 (图 3), 且参与计算的天文轨道参数分量多于 6 个。eCOCO 分析选取 1.3~10 cm/kyr 的沉积速率区间, 滑动步长为 0.1cm/kyr、蒙特卡洛模拟 2 000 次得到图 3 所示结果, 其中红色对应深度最优沉积速率 (图 3)。根据频谱分析对不同深度段速率进行平均计算显示五峰组—龙一段平均沉积速率为 2.26~2.90 cm/kyr 与检验法 COCO、eCOCO 对最优沉积速率的评价结果基本一

致，充分证明了频谱分析符合天文轨道驱动条件，研究区龙一段沉积时间长为 2.874~3.717 Myr。

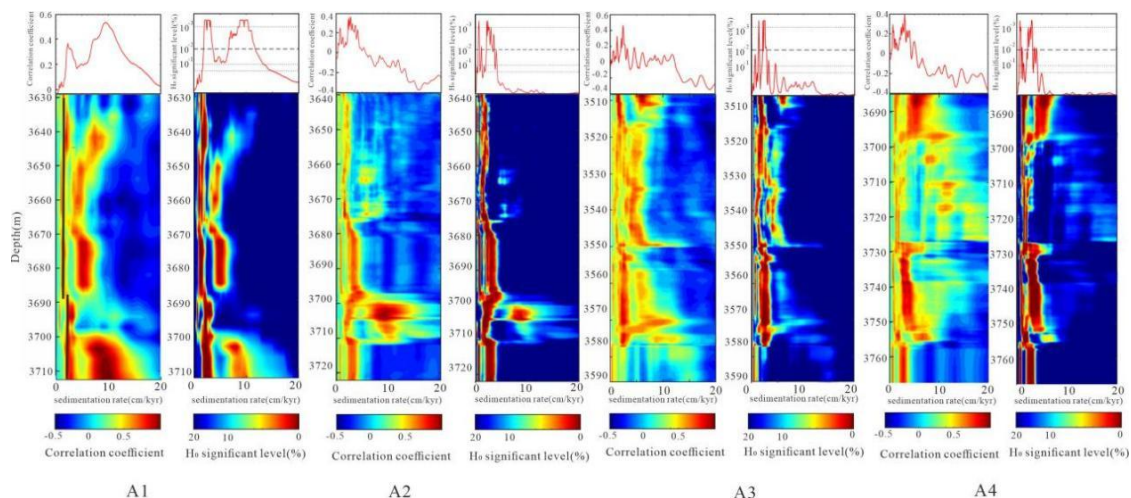


图3 威荣地区五峰组—龙一段地层 COCO 与 eCOCO 分析结果

Fig.3 Analysis results of COCO and eCOCO of the Wufeng Formation-1st member of Longmaxi Formation in the Weirong area

2.2.4 滤波

将频谱分析所获地层信号用高斯滤波，即可获得 405 kyr（长偏心率）周期、125 kyr 和 95 kyr 短偏心率旋回曲线。五峰组—龙一段地层的长偏心率滤波频率为 0.06~0.12 cycles/m，滤波曲线记录五峰组—龙一段地层的长偏心率旋回周期为 9 个。基于 405 kyr 为周期的长偏心率旋回建立固定的时间模型，将长偏心率曲线由深度域转化至时间域，同时获得沉积速率曲线，龙一段地层沉积速率为 2~3 cm/kyr，沉积持续时间为 3.3~4.0 Myr。

2.2.5 “浮动”天文年代标尺的建立

四川盆地龙马溪组页岩沉积于奥陶纪冰期结束后的早志留世鲁丹期—埃隆期（距今约 439~444 Ma），因此以龙马溪组一段底部地层年龄约 440 Ma 作为天文年代调谐的初始锚点，界定本次研究时间范围，建立“浮动天文年代标尺”。基于天文调谐后的时间域旋回数据开展频谱分析，可以验证滤波以及调谐数据的准确性，结果显示置信度较高的频率与天文周期对应，证明了天文调谐结果为可靠数据。

2.3 岩相划分方案与岩相表征方法

2.3.1 岩相划分方案

以硅质、黏土质、钙质三类在页岩中最为常见的矿物分类作为页岩岩相划分标准，按照硅质含量=石英含量+钾长石含量+钠长石含量、钙质含量=白云石含量+方解石含量、黏土质含量=伊利石含量+蒙脱石含量，对多种矿物进行分类并计算黏土质、钙质和硅质矿物含量，依据页岩“三端元”岩相划分图版，确定页岩岩相类型。为实现岩相的快速准确划分，本文以

“三端元”岩相划分标准，对各类岩相的三端元数值范围进行记录并编写 Python 程序实现岩相快速划分（图 4）。

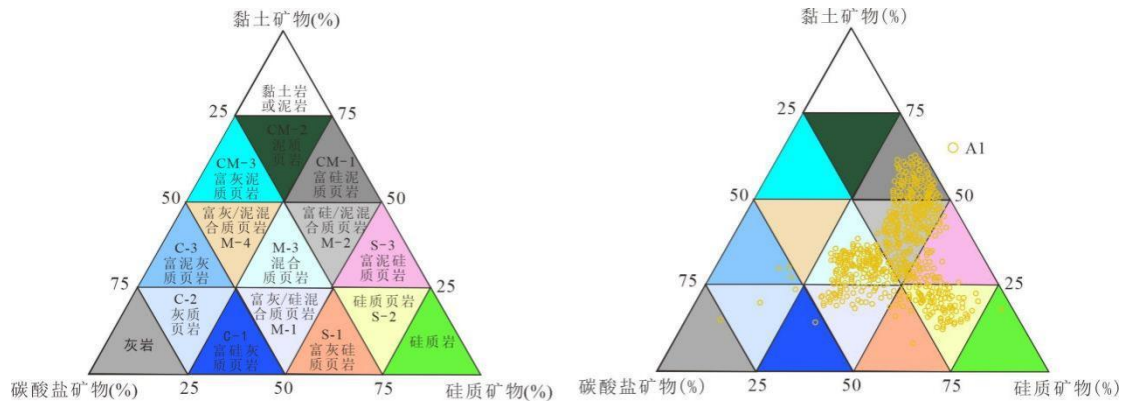


图 4 页岩三端元的命名方案与威荣地区五峰组—龙一段地层岩相类型

Fig.4 Naming scheme of three terminal elements of shale and lithofacies types of the Wufeng Formation-1st member of Longmaxi Formation in the Weirong area

2.3.2 岩相精细表征方法

精准度高、连续性强的矿物成分剖面是页岩岩相精细保证的重要基础。本文主要采用 Lithoscanner 元素扫描测井综合解释技术，该技术基于斯伦贝谢公司脉冲中子发射仪器对地层发出快中子，通过两种相互作用诱发地层释放伽马射线，分析仪依次记录每个伽马射线的脉冲幅度（与能量成正比）、对比计数和脉冲幅度的累积脉冲幅度分布直方图（能谱），通过识别中子释放能量期间以及之后的能谱分离出非弹性和俘获伽马射线。每个频谱分解成由独立元素线性组合的标准能谱。标准能谱的线性组合系数通过修正的地球化学氧化物闭合模型或一种反演方法转换成元素重量百分比^[26]。上述方法可从地层中获得间隔仅为 0.153 m 的连续地层元素数据，其数据密度远高于岩心矿物实验密度。

导入 Lithoscanner 元素扫描测井综合解释技术获得的 K、Ca、Fe、Si、Al 等元素曲线至 Techlog 测井软件，并作为联立方程组中自变量 X_n ，选择页岩主要矿物：伊利石、石英、钾长石、钠长石、方解石、白云石、黄铁矿、干酪根作为联立方程式因变量 Y_n ，基于 Techlog 软件 Quanti-Elan 模块优化求解联立测井响应方程组可计算出伊利石、石英、钾长石、钠长石、方解石、白云石、黄铁矿、干酪根等矿物含量。

本文同时尝试对未使用 Lithoscanner 元素扫描测井技术的直井开展矿物成分建模。以 A1 井为例，利用 Lithoscanner 元素扫描测井技术解释得到伊利石、石英、钾长石、钠长石、方解石、白云石、黄铁矿、干酪根等矿物含量，开展“三端元”页岩岩相分类，3550 个岩相结果作为机器学习样本，在 Ipsom 岩相识别模块导入常规测井曲线自然伽马(GR)、声波时

差(AC)、中子(CNL)、补偿密度(DEN)、自然伽马能谱铀、钍、钾(U、Th、K)基于测井响应特征差异开展模糊聚类分析,如图5a所示获得若干节点集,导入学习样本进行机器督导学习,将节点集与督导岩相开展配对(图5b),以形成有序的聚类结果(图5c)。计算有序聚类中各岩相随对应测井曲线数值大小即可快速实现岩相识别。对机器学习成果应用在威荣地区A1井进行建模,结果显示 Ipsom 岩相结果(图5d右1列)与基于 lithoscanner 元素扫描得到的岩相(图5d左2列)结果匹配度较高,岩相是被准确率为83%,对比XRD矿物衍射实验分类结果准确率为92%(图5d)。

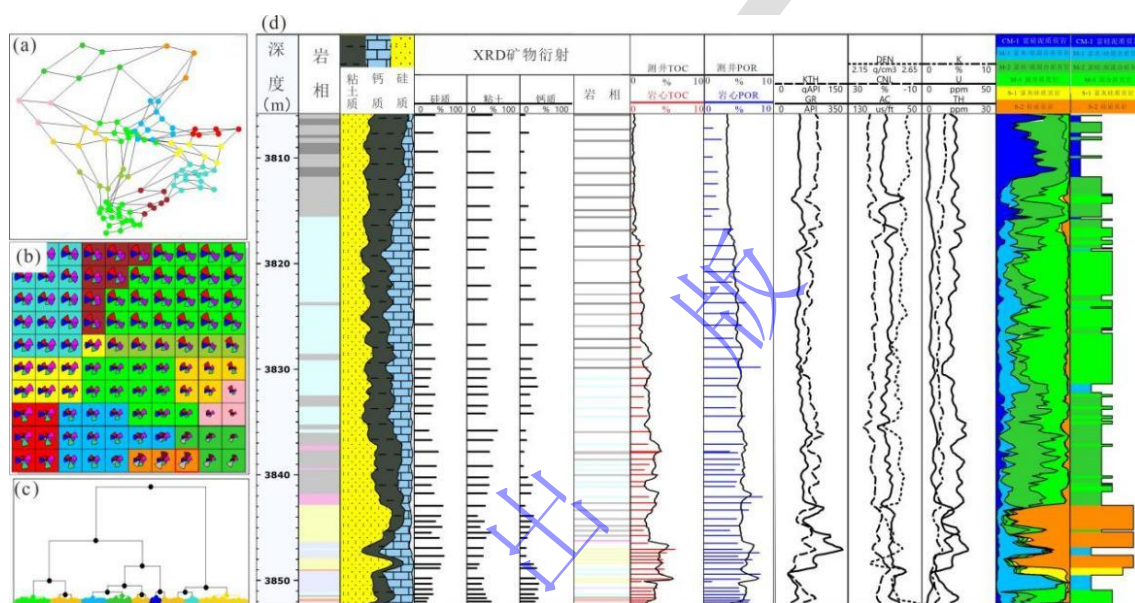


图5 A1岩性扫描测井岩相与Ipsom机器建模岩相对比图

Fig.5 Comparison between lithology scanning logging lithofacies and Ipsom machine modeling lithofacies

3 结果

3.1 高频层序划分

沉积层序级别一般可划分为七级,其中四至六级层序被称作高频层序,其形成与太阳对地球辐射量的周期性变化所引起的冰川消长型全球海平面变化有关^[27-28]。依据米兰科维奇理论可将一个405 kyr长偏心率周期沉积地层对应一个四级层序,短偏心率周期125 kyr沉积地层对应五级层序^[29],相同层序具有等时特性因此层序起点应为等时界面。五峰组观音桥段沉积时期发生过一次大规模海退事件,在上扬子渝西、川南、黔北、黔中等地均可见^[30-33],因此可将观音桥段顶部作为“锚点”建立等时层序界面。四级、五级层序均由五峰组观音桥段顶面为界向上划分(图6),威荣地区4口井均可划分为8个四级层序以及24至26个五级层序,四级层序对应相同沉积时间即405 kyr^[34],五级层序对应125 kyr沉积时间。

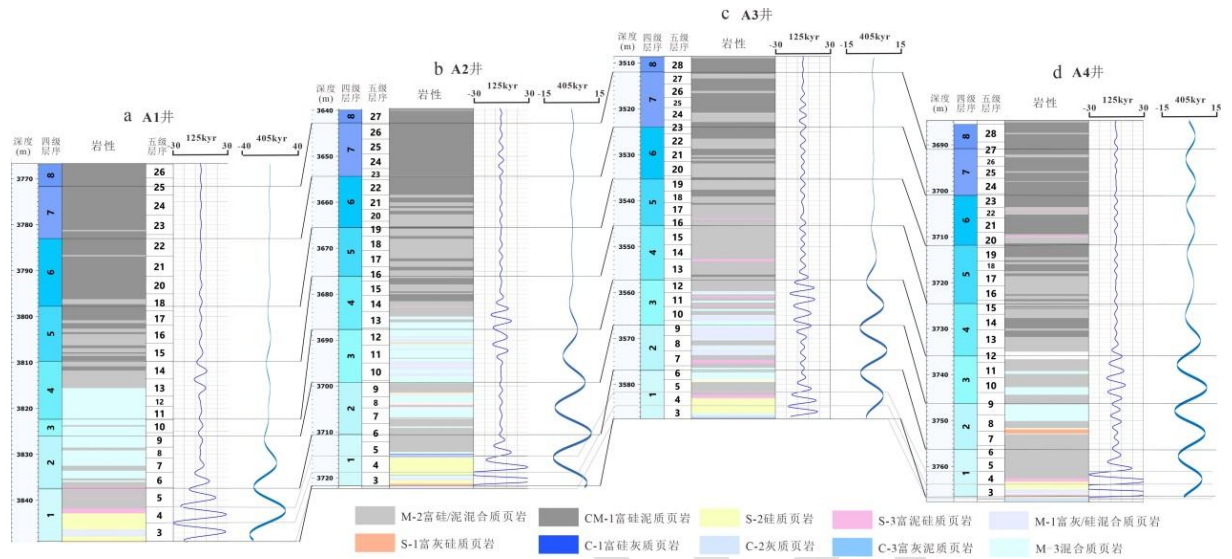


图6 威荣地区龙一段地层四级层序、五级层序与岩性连井剖面图

Fig.6 Fourth order sequence, fifth order sequence, and lithological well connection profile of the 1st member of Longmaxi Formation in Weirong area

3.2 岩相表征结果与岩相特征

3.2.1 岩相表征结果

岩相建模结果显示威荣地区五峰组—龙马溪组一段地层发育 12 类页岩岩相，主要岩相有 6 种：硅质页岩（S-2）、富硅/泥混合质页岩（M-2）、混合质页岩（M-3）、富硅泥质页岩（S-3）、富硅泥质页岩（CM-1）、富灰/硅混合质页岩（M-1）（图 4）。

3.2.2 岩相特征

(1) CM-1 富硅泥质页岩：灰黑色—灰色，黏土矿物含量 50%~75%，硅质含量 25%~50%，TOC<1.0%，岩心极少见生物碎屑，可见明显暗条纹，暗色条纹多为直径小于 1 mm 黑色水平状泥质纹层（图 7g）；由静态电成像图像观察岩性基底相对呈暗色低电阻特征，泥质含量较高，少量发育水平状亮色高阻硅质纹层（图 7a）；薄片观察页岩由纳米粒径黏土质纹层、硅质颗粒与钙质颗粒组成，其中黏土质纹层较发育（图 7m）。页岩粒径极细且纹层呈水平状，仅可在极低水动力条件下沉积，指示水体较深的强还原环境。

(2) M-2 富硅/泥混合质页岩：灰黑色—黑色页岩，黏土矿物 25%~50%，硅质矿物 25%~50%，钙质 0~25%，TOC1.0%~2.0%，岩心可见少量泥质团块（粒径小于 5 cm）（图 7h）；电成像图片显示基底岩性与 CM-1 富硅泥质页岩相似呈低阻暗色，表明泥质含量较多，可见部分边界不清晰条纹，反映纹层之间沉积环境为缓慢过渡（图 7b）；薄片见较多泥质纹层（图 7n）。纳米粒径的泥质与硅质矿物主要沉积于深水环境。

(3) M-3 混合质页岩：页岩中硅质、钙质与黏土质矿物含量占比均介于 25%~50%，

TOC2.0%~2.5%。黑色页岩，由于 TOC 较高岩心观察条带特征不明显，仔细观察可见极细纹层，偶见泥质团块或极细浅色硅质或钙质纹层（图 7i）；由于硅质与钙质等高电阻矿物成分居多因此静态电成像图片颜色稍亮，明显可见低阻暗色泥质纹层或泥质团块（图 7c）；薄片下可见纳米粒径硅质或钙质碎屑聚集成纹层状分布（图 7o）。钙质含量较多且以纳米级粒径钙质为主，钙质与硅质纹层、条带等仅在显微镜下可观察，表征沉积时水体相对较浅，未见较宽钙质条带表明该时期海平面波动幅度较小。

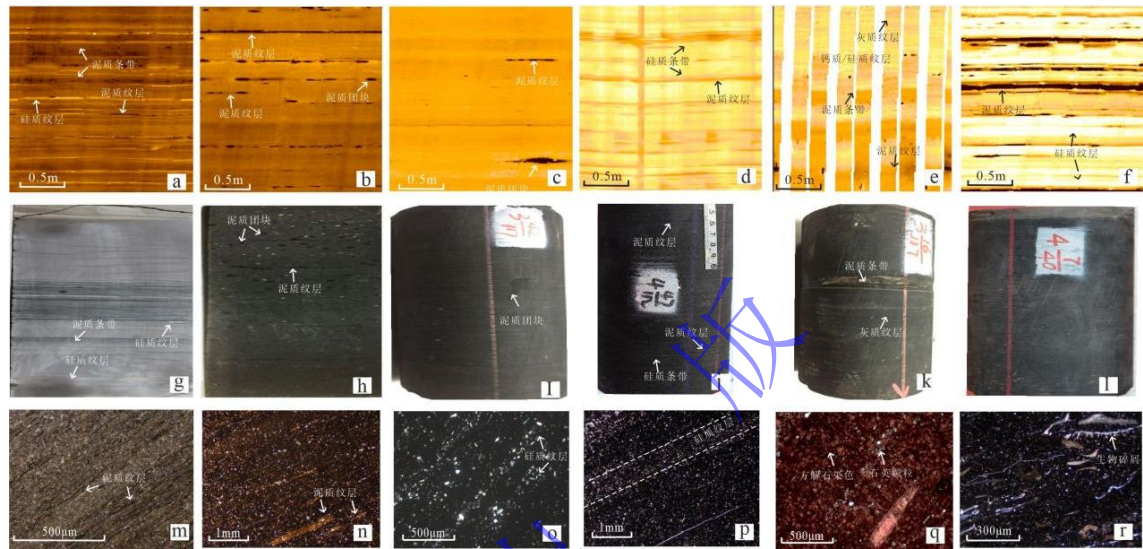


图 7 威荣地区龙马溪组一段主要岩相岩心、电成像、薄片图

Fig.7 Core, electrical imaging, and thin section images of the main lithofacies of the 1st member of Longmaxi Formation in the Weirong area

(4) S-3 富泥硅质页岩：硅质 50%~75%，黏土 25~50%，钙质 0~25%，TOC>3.5%，TOC 较高页岩呈黑色、污手，可见大量极细纹层（图 7d）；静态电成像显示页岩基质呈高阻亮色，其中夹大量泥质纹层或条带呈水平状与硅质条带呈互层状（图 7j）；薄片下大量极细粒径硅质矿物发育且由于硅质含量变化呈现纹层状差异（图 7p）。岩相中不同类型纹层互层特征明显显示水体不稳定，此时期偏心率具有较大振幅全球气候四季差异显著变化，在温暖时期海平面快速上升有利于生物硅生长发育和保存，为页岩提供大量有机质和硅质因此硅质条带与纹层极为发育，页岩有机质含量高，在气候寒冷时期沉积泥质纹层，上述两种极端气候交替发育形成较多纹层结构。

(5) M-1 富灰/硅混合质页岩：黑色页岩，钙质 25%~50%，硅质 25%~50%，黏土 0~25%，TOC>3.0%。由于 TOC 较高岩心纹层、条带等不易辨识（图 7k），仅可见少量黄铁矿纹层和浅色硅质或灰质纹层；静态电成像图片颜色与 M-3 岩相较相似，可见较多泥质纹层或泥质条带（图 7e），可观察到边界不清晰颜色稍亮硅质或钙质纹层以及少量亮色灰质纹层；

在染色薄片下观察此类岩相呈暗红色表明方解石大量发育，同时可观察到部分石英颗粒组成有序条纹结构（图 7q）。方解石大量沉积说明此时期水体较浅，有利于钙质生物生长，但由钙质仍呈纳米级粒径、钙质条带不发育可知气候波动不大，水深总体稳定。

（6）S-2 硅质页岩：硅质 50%~75%，黏土 0~25%，钙质 0~25%，TOC>4%，黑色有机质将岩心染色，纹层、条带等特征被掩盖（图 7l），岩心中可见大量笔石化石；由于高电阻率矿物占比较高，静态电成像呈高阻浅色与低阻泥质纹层形成特征明显的明暗条纹，其中以硅质纹层和条带为主呈高阻亮白色（图 7f）；薄片可见生物化石，纳米级粒径硅质碎屑含量大于 75%，可见大量硅质纹层（图 7r）。该时期偏心率振幅最大，在波峰位置全球气候温暖海升最有利于生物繁殖，受海平面快速上升形成的还原环境有利于有机质保存，有机质含量达龙马溪组峰值，同时生物硅广泛生长为页岩提供大量硅质，偏心率波谷时期全球气候寒冷，沉积为泥质纹层。由于岩相对应沉积环境变化显著，在海平面快速上涨大背景下存在周期性水体震荡，导致页岩沉积纹层特征明显，边界清晰。

4 讨论

4.1 岩相表征结果与岩相特征

建立客观、统一岩相组合划分标准才能对岩相组合差异开展量化分析，以米兰科维奇理论指导下的时间序列分析方法获得的四级层序或五级层序为绝对客观结果而非人为主观判断，可以体现岩相组合划分标准的统一性。同时四级层序具有等时性质，相同层序编号反映等时沉积特性，一般同一时间段内的岩相差异较小，也符合岩相组合最初研究需求。

岩相组合框架过小划分出几十个岩相组合，信息量分散则不利于学者讨论组合的纵向与横向差异；而框架过大例如厚度几十米也不适宜分析其差对页岩油气勘探开发的影响。认为与现今页岩压裂缝高 10~30 m 成倍数比例的岩相组合框架较适宜，根据龙一段地层平均沉积速率为 2~3 cm/kyr 推算，四级层序地层厚度 8.10~12.15 m，五级层序厚度 2.50~3.75 m，在页岩油气地质分析中若研究对象为四级层序仅需分析 3~4 个组合，五级层序应描述 10 个组合，因此四级层序作为页岩岩相组合更适合开展地质—工程一体化讨论。建立四级层序为框架等时沉积岩相组合划分方案，单个完整四级层序为一个岩相组合工区龙一段地层划分出岩相组合 E1 至 E8。

4.2 岩相表征结果与岩相特征

E1 岩相组合包含 6 种岩相（图 6，8）主要发育硅质页岩岩相（S-2）占比 20%~41%、富硅/泥混合质页岩岩相（M-2）占比 28%~62%，发育少量 S-1 富灰硅质页岩、S-3 富泥硅质

页岩、C-1 富硅灰质页岩、C-2 灰质页岩、M-1 富灰/硅混合质页岩。在 E1 组合内岩相之间叠置发育，从表 2 可知 A1 井岩相组合发生 10 次岩相变化，A2 井记录相变 13 次，A3 井 14 次，A4 井 8 次，均表现出多层叠置特征。此外，E1 组合中页岩油气勘探有利岩相（S-2、S-3、S-1）占比，A1、A2、A3 井均为 S-2 岩相占比高于 M-2 岩相，占比 35%~41%，A4 井 M-2 岩相为主要岩相（图 7）。

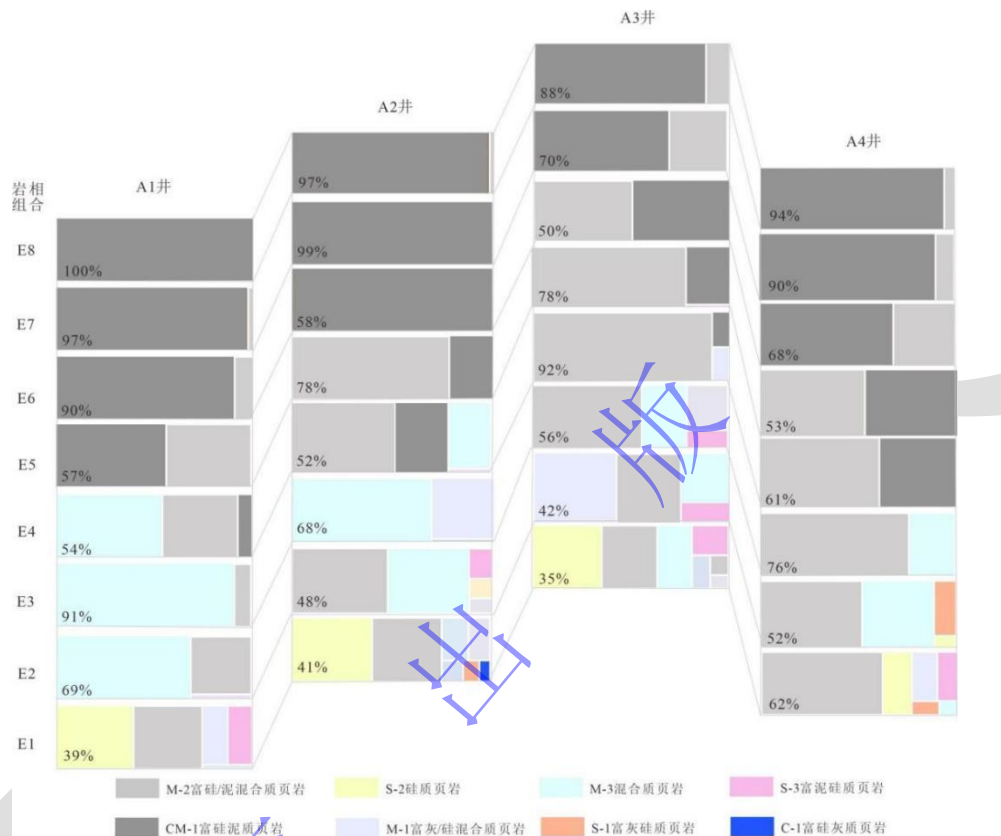


图 8 威荣地区龙一段地层岩相组合连井剖面

Fig.8 Well connection profile of stratigraphic lithofacies combination of the 1st member of Longmaxi Formation in the Weirong area

E2 岩相组合包含 5 种岩相：主要为混合质页岩岩相（M-3）、富硅/泥混合质页岩岩相（M-2）和富灰/硅混合质页岩岩相（M-1），A1 井至 A3 井均以 M-3 和 M-2 岩相为主，A3 井主要岩相与其余三井不同为 M-1 岩相，占比 42%。

E3 岩相组合包含 5 类岩相，主要发育混合质页岩岩相（M-3）占比 20%~91%、富硅/泥混合质页岩岩相（M-2）占比 3%~76%，和富灰/硅混合质页岩岩相（M-1）占比 0%~42%，A1 井 M-3 岩相占比 91%，A2 井占比 68%，A3 井 M-2 岩相占比 56%，A4 井占比 76%为其在 E3 的主要岩相。

E4 岩相组合包含 4 类岩相，主要发育混合质页岩岩相（M-3）、富硅/泥混合质页岩岩相（M-2），A1 井 M-3 岩相占比 54%，不同于 A2、A3、A4 井以 M-2 岩相为主，占比分别

为 52%、92%、76%。

表 2 岩相变化次数统计表

Table 2 Statistics for the number of changes in lithofacies

岩相组合 井号 岩相种类	A1 井	岩相种类	A2 井	岩相种类	A3 井	岩相种类	A4 井	岩相种类
	(次)	(种)	(次)	(种)	(次)	(种)	(次)	(种)
E1	10	5	13	6	14	5	8	6
E2	8	3	16	5	12	4	7	4
E3	2	2	16	4	15	4	5	2
E4	3	3	11	4	4	3	9	2
E5	11	2	7	2	7	3	11	2
E6	4	2	9	2	8	2	8	3
E7	2	2	1	2	7	3	6	2
E8	0	1	2	2	1	2	2	2

E5 至 E8 岩相组合均只发育两类岩相，富硅/泥混合质页岩岩相 (M-2) 和富硅泥质页岩 (CM-1)，其中 E5 岩相组合主要发育 M-2 岩相占比 40%~78%，与 CM-1 岩相呈互层状态，由 E6 至 E8 岩相组合逐渐过渡至以 CM-1 岩相为主且不与 M-2 岩相互层 (图 6)。

4.3 岩相组合变化与沉积模式

4.3.1 E1 岩相组合沉积时期

该时期偏心率振幅较大，季节性增强^[35-36]夏季气候暖湿，冬季寒冷干燥 (图 6)。大量冰川融化海平面上升，四季更迭致使海平面上下波动对陆源冲刷频率增大。夏季生物繁殖生物硅贡献大量有机质与硅质矿物 (图 9a)，海平面快速大幅上涨提供了还原环境。雨水增多和生物、物理风化频繁致使川中古陆持续贡献硅质矿物^[37]。海平面快速上升在川中古陆斜坡一侧形成较大范围浅海地带发育潮坪相带，较多浅海生物有利于钙的富集沉积。此时威荣地区海洋生产力与陆源供给均较充足，因此岩相以硅质类占比最高，硅质矿物为页岩岩相主要成分，由靠近古陆至远离古陆地区，陆源供给作用逐渐减弱而生物硅供给不变。因此 A1 至 A4 井在该时期均可见硅质类岩相发育，但越靠近古陆斜坡一侧，S-2、S-1 等硅质类岩相占比越多。

从偏心率振幅可知，E1 沉积时期沉积环境波动明显。在暖湿气候下深水陆棚相沉积 S-2 硅质页岩、M-2 富硅/泥混合质页岩、S-3 富泥硅质页岩等岩相；极少数情况下冬季干冷气候导致海平面下降浅水陆棚环境下钙质沉积上升，为 C-1 富硅灰质页岩、M-1 富灰/硅混合质页岩等富钙质岩相沉积提供了充足钙质供给。E1 时期海平面总体较高，岩相组合中以深水陆棚岩相为主导，浅水陆棚相沉积时间较短因此富钙质岩相相比于硅质岩相往往以隔夹层形式出现厚度较薄。A3 井位于“两凹一凸”的凸起部位相对其他井距离海平面较近，受海平面

控制较多，因此岩相变化次数最多（表2）。

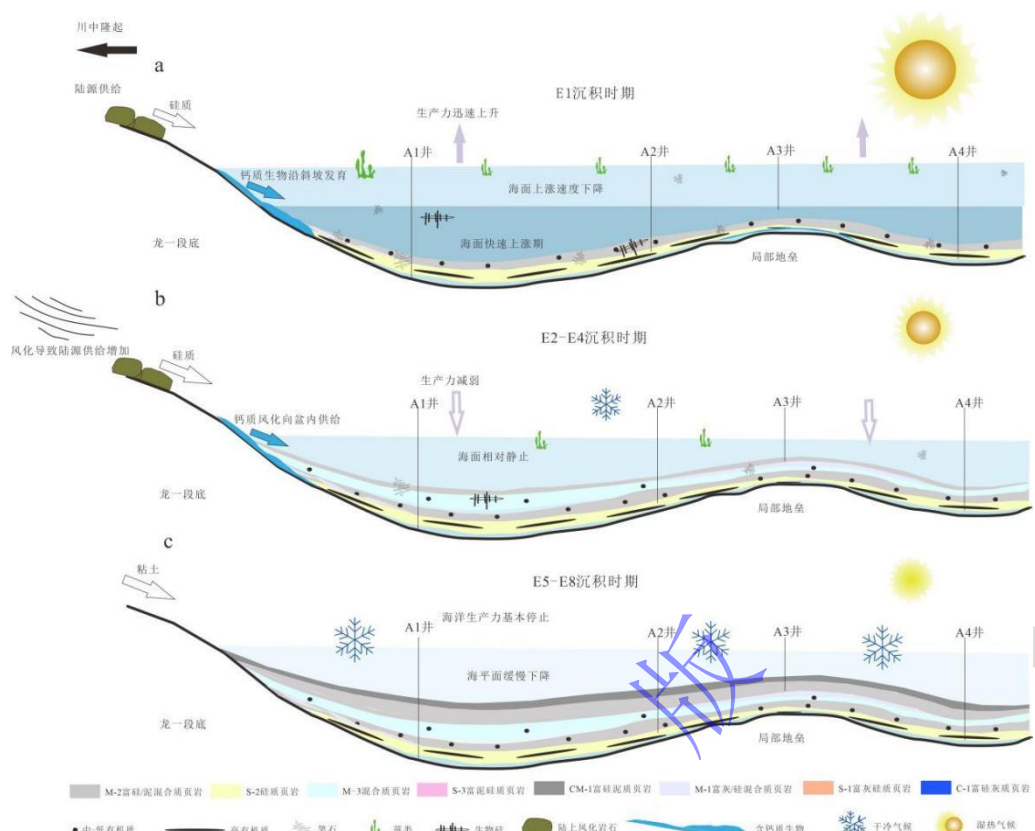


图9 威荣地区龙马溪组一段页岩形成环境及沉积模式示意图

Fig.9 Schematic diagram of the shale formation environment and sedimentary mode of the 1st member of Longmaxi Formation in the Weirong area

4.3.2 E2-E4 岩相组合沉积时期

相比 E1 时期气候干冷，海平面相对下降。温度下降导致深海生物硅生产力下降(图 9b)，自供给硅质降低。威荣西侧川中古陆斜坡低处保持潮坪相发育，或因海平面下降此前潮坪带产物开始接受风化剥蚀，不断向东侧威荣供给。该时期海洋生产力稍降，陆源供给作用提升，此前 E1 时期浅海钙质矿物风化后流入导致 E2-E4 时期岩相中钙质含量增加明显，主力岩相演化为钙质较多的 M-3 混合质页岩岩相、M-1 富灰/硅混合质页岩，受陆源供给控制靠近斜坡一侧 A1 井在该时期 M-3、M-1 等岩相明显多于东侧（图 8）。

4.3.3 E5-E8 岩相组合沉积时期

气候更加干冷，极端冰冷气候条件下冰盖生成全球海平面开始下降。川中古陆斜坡区水动力减弱、生物难以生存均导致物理、化学以及生物风化作用削弱。威荣地区沉积从川中古陆获得陆源供给机会大幅减少，依靠海底火山、地下水系统循环等提供黏土矿物。此时沉积岩相以黏土含量高达 50% 以上的 CM-1 岩相和 M-2 岩相成为岩相组合中的主力岩相类型(图 9c)。

5 结论

(1) 通过 Lithoscanner 元素扫描测井、Ipsom 督导神经网络算法组成一套页岩精细岩相表征技术, 在研究区龙一段识别出 10 种岩相, 龙一段上部岩相稳定, 龙一段中、下部呈多种岩相多层叠置特征。

(2) 基于米兰科维奇理论时间序列分析方法建立等时岩相组合框架, 确定了四川盆地威荣地区龙马溪组一段页岩可划分为 8 个岩相组合并计算组合内岩相占比, 发现龙一段页岩呈三段式特征, 其中 E1 组合内岩相种类较多且以硅质主导岩相为主, E2-E4 组合内钙质类岩相占比较多且区域内各井之间差异较大, E5-E8 组合岩相类型简单。

(3) 横向对比发现, 同一沉积时期组合内主力岩相占比在横向变化趋势明显, 基于米兰科维奇理论所反映的沉积环境变化信息结合威荣地区古地理与构造特征分析威荣地区龙一段地层沉积模式, 证实岩相组合纵横向差异主要受气候影响的海洋生产力与气候控制的川中古陆物源供给以及古地理特征三方面共同作用影响。

致谢 感谢成都理工大学金思丁副教授在米兰科维奇理论时间序列分析方法方面的指导, 金教授对作者疑问均一一答疑解惑并给予很多启发, 也推荐了大量参考文献, 您的指导和帮助对本文的研究至关重要。

参考文献 (References)

- [1] 周昕, 陈克勇, 李宜真, 等. 页岩气水平井地质建模中几个关键问题处理技术[J/OL]. 成都理工大学学报(自然科学版). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1634.N.20230924.1125.004.html>. [Zhou Xin, Chen Keyong, Li Yizhen, et al. Discussion on several key problems in shale gas reservoir modeling based on horizontal wells[J/OL]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1634.N.20230924.1125.004.html>.]
- [2] 舒红林, 何方雨, 李季林, 等. 四川盆地大安区块五峰组: 龙马溪组深层页岩地质特征与勘探有利区[J]. 天然气工业, 2023, 43(6): 30-43. [Shu Honglin, He Fangyu, Li Jilin, et al. Geological characteristics and favorable exploration areas of Wufeng Formation - Longmaxi Formation deep shale in the Da'an Block, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(6): 30-43.]
- [3] 邹才能, 张国生, 杨智, 等. 非常规油气概念、特征、潜力及技术: 兼论非常规油气地质学[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(4): 385-399, 454. [Zou Caineng, Zhang Guosheng, Yang Zhi, et al. Geological concepts, characteristics, resource potential and key techniques of unconventional hydrocarbon: On unconventional petroleum geology[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(4): 385-399, 454.]
- [4] 彭军, 于乐丹, 许天宇, 等. 湖相泥页岩地层米氏旋回测井识别及环境响应特征: 以渤海湾盆地济阳坳陷东营凹陷樊页 1 井 E₅^{4scs} 为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 957-969. [Peng Jun, Yu Ledan, Xu Tianyu, et al. Logging identification of Milankovitch cycle and environmental response characteristics of lacustrine shale: A case study on E₅^{4scs} in well Fanye 1, Dongying Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum and Natural Gas Geology, 2022, 43(4): 957-969.]
- [5] 言语. 湖相泥页岩天文地层周期测井识别及应用研究: 以沾化凹陷沙河街组为例[D]. 成都: 西南石油大学, 2017. [Yan Yu. Research on the identification and application of astronomical periodic logging in lacustrine shale formations[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.]
- [6] 任传真. 华南宜昌地区一晚奥陶世地层旋回地层学研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020. [Ren Chuanzhen. Cyclostratigraphy study of the Middle-Late Ordovician in Yichang, South China[D]. Beijing: China University of Geosciences

- (Beijing), 2020.]
- [7] 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]. 武汉: 中国地质大学, 2020. [Lu Yangbo. Quantitative characterization of lithofacies and reconstruction of the sedimentary process for Upper Yangtze Wufeng and Longmaxi organic-rich shales[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2020.]
- [8] 郎君. 滇黔北探区五峰—龙马溪期米兰科维奇旋回及其对有机质聚集的影响[D]. 成都: 西南石油大学, 2018. [Lang Jun. Milankovitch cycle of Wufeng-Longmaxi Period and its influence on organic aggregation in the northern Yunnan and Guizhou area[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.]
- [9] 马坤元. 中国早—中奥陶世和晚泥盆世天文年代学及古气候变化的天文驱动力研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2021. [Ma Kunyuan. Astrochronology of the Early-Middle Ordovician and Late Devonian in China and astronomical forced Paleoclimate change[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2021.]
- [10] 高祥宇, 邵龙义, 王学天, 等. 乐平统含煤岩系旋回地层的天文周期驱动: 以黔西北毕节地区为例[J]. 矿业科学学报, 2022, 7(1): 89-100. [Gao Xiangyu, Shao Longyi, Wang Xuetian, et al. Astronomical forcing in Lopingian coal-bearing cycles: A case study of Bijie area in northwestern Guizhou[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2022, 7(1): 89-100.]
- [11] 杜威, 纪友亮, 季梦瑶, 等. 渤海湾盆地饶阳凹陷早渐新世高精度年代地层格架建立及意义[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2020, 44(4): 142-151. [Du Wei, Ji Youliang, Ji Mengyao, et al. Establishment and significance of high-resolution Early Oligocene chronostratigraphic framework in Raoyang Sag, Bohai Bay Basin[J]. Journal of China University of Petroleum, 2020, 44(4): 142-151.]
- [12] 贾悦锐, 刘强虎, 朱红涛, 等. 陆相浅水湖盆米氏沉积速率制约下的高频层序—时间单元定量拾取: 以西湖凹陷黄岩区花港组为例[J]. 地球科学, 2022, 47(11): 4020-4032. [Jia Yuerui, Liu Qianghu, Zhu Hongtao, et al. Quantitative pickup of high frequency sequence-time units under restriction of Milankovitch Sedimentary Rate in Continental Shallow Lake Basin: A case study of Huangang Formation in Huangyan area, Xihu Sag[J]. Earth Science, 2022, 47(11): 4020-4032.]
- [13] 周杨, 金思丁, 刘岩, 等. 川西南下寒武统筇竹寺组页岩旋回地层学研究[J/OL]. 沉积学报, doi: 10.14027/j.issn.1000-0550.2022.013. [Zhou Yang, Jin Siding, Liu Yan, et al. Cyclostratigraphy research on well-logging of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in southwestern Sichuan Basin[J/OL]. Journal of Sedimentology, doi: 10.14027/j.issn.1000-0550.2022.013.]
- [14] 赵迪斐, 郭英海, Wang G, 等. 层序地层格架及其对页岩储层发育特征的影响: 以四川盆地龙马溪组页岩为例[J]. 沉积学报, 2020, 38(2): 379-397. [Zhao Difei, Guo Yinghai, Wang G, et al. Sequence stratigraphic framework and its influence on the development characteristics of shale reservoirs: Taking the Longmaxi Formation shale in the Sichuan Basin as an example[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2020, 38(2): 379-397.]
- [15] 冯动军, 李王鹏. 川东盆缘带武隆—白马地区构造对志留系龙马溪组页岩气的控制作用[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2022, 24(1): 7-14. [Feng Dongjun, Li Wangpeng. Controlling effect of structure on shale gas of the Silurian Longmaxi Formation in Wulong—Baima area, eastern Marginal Zone of Sichuan Basin[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2022, 24(1): 7-14.]
- [16] 郭彤楼, 熊亮, 雷炜, 等. 四川盆地南部威荣、永川地区深层页岩气勘探开发进展、挑战与思考[J]. 天然气工业, 2022, 42(8): 45-59. [Guo Tonglou, Xiong Liang, Lei Wei, et al. Deep shale gas exploration and development in the Weirong and Yongchuan areas, South Sichuan Basin: Progress, challenges and prospect[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(8): 45-59.]
- [17] 郭彤楼. 深层页岩气勘探开发进展与攻关方向[J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(1): 1-6. [Guo Tonglou. Progress and research direction of deep shale gas exploration and development[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(1): 1-6.]
- [18] 董欣君. 辽中凹陷东营组米兰科维奇旋回及沉积响应[D]. 焦作: 河南理工大学, 2021. [Dong Xinjun. Milankovitch cycle and sedimentary response of Dongying Formation in the Liaozhong Depression[D]. Jiaozuo: Henan University of Technology, 2021.]
- [19] 姜玥晗. 滇黔北地区五峰组—龙马溪组下段米兰科维奇旋回研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2019. [Jiang Yuehan. Study on the Milankovitch cycle of Wufeng-lower Longmaxi Formation in North Yunnan Guizhou region[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2019.]
- [20] 张瑞, 金之钧, GILLMAN M, 等. 太阳系长期旋回在中生代沉积盆地中的记录[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2023,

- 53 (2) : 345-362. [Zhang Rui, Jin Zhijun, Gillman M, et al. Long-term cycles of the Solar System concealed in the Mesozoic Sedimentary Basin record[J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2023, 53(2): 345-362.]
- [21] 彭军, 于乐丹, 许天宇, 等. 天文地层学研究程序及其在渤海湾盆地东营凹陷的应用实例分析[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43 (6) : 1292-1308. [Peng Jun, Yu Ledan, Xu Tianyu, et al. Research procedure of astrostratigraphy and case study of Dongying Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(6): 1292-1308.]
- [22] 石巨业, 金之钧, 刘全有, 等. 天文旋回在页岩油勘探及富有机质页岩地层等时对比中的应用[J]. 地质前缘, 2023, 30 (4) : 142-151. [Shi Juye, Jin Zhijun, Liu Quanyou, et al. Application of astronomical cycles in shale oil exploration and in high-precision stratigraphic isochronous comparison of organic-rich fine-grain sedimentary rocks[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(4): 142-151.]
- [23] 肖强, 张廷山, 张喜, 等. 川南五峰组—龙马溪组有机质富集规律: 基于旋回地层学的研究[J]. 海相油气地质, 2021, 26 (2) : 105-112. [Xiao Qiang, Zhang Tingshan, Zhang Xi, et al. Organic matter enrichment in Wufeng Formation-Longmaxi Formation in southern Sichuan: Based on cyclostratigraphy[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2021, 26(2): 105-112.]
- [24] 贾东力, 田景春, 林小兵, 等. 塔里木盆地顺托果勒地区志留系柯坪塔格组米兰科维奇旋回沉积记录[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39 (4) : 749-758. [Jia Dongli, Tian Jingchun, Lin Xiaobing, et al. Milankovitch cycles in the Silurian Kepingtage Formation in Shuntuoguole area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(4): 749-758.]
- [25] 石巨业, 金之钧, 刘全有. 基于旋回地层学方法的湖相泥页岩高频层序划分[C]//中国古生物学会第十二次全国会员代表大会暨第29届学术年会论文摘要集. 郑州: 中国古生物学会, 2018: 172. [Shi Juye, Jin Zhijun, Liu Quanyou. High frequency sequence division of lacustrine shale based on cyclic stratigraphy[C]//Summary of papers from the 12th national congress of the Chinese paleontological society and the 29th academic annual conference. Zhengzhou: Palaeontological Society of China, 2018: 172.]
- [26] 魏国, 张审琴, 侯淞译. 岩性扫描测井技术在青海油田的应用[J]. 测井技术, 2015, 39(2): 213-216. [Wei Guo, Zhang Shenqin, Hou Songyi. Application of LithoScanner logging technology in Qinghai oilfield[J]. Well Logging Technology, 2015, 39(2): 213-216.]
- [27] Huang H, Gao Y, Jones M M, et al. Astronomical forcing of Middle Permian terrestrial climate recorded in a large paleolake in northwestern China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2020, 550: 109735.
- [28] Chen G, Gang W Z, Tang H Z, et al. Astronomical cycles and variations in sediment accumulation rate of the terrestrial Lower Cretaceous Xiagou Formation from the Jiuquan Basin, NW China[J]. Cretaceous Research, 2020, 109: 104156.
- [29] 冯路尧, 张建国, 姜在兴, 等. 松辽盆地青山口组高精度沉积旋回格架及有机质富集响应[J]. 石油学报, 2023, 44 (2) : 299-311. [Feng Luyao, Zhang Jianguo, Jiang Zaixing, et al. High-precision sedimentary cycle framework and organic matter enrichment response of Qingshankou Formation in Songliao Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(2): 299-311.]
- [30] 杨雪, 石学文, 朱逸青, 等. 四川盆地南部泸州地区凯迪阶—埃隆阶深水页岩沉积演化与有机质富集[J]. 石油学报, 2022, 43 (4) : 469-482. [Yang Xue, Shi Xuewen, Zhu Yiqing, et al. Sedimentary evolution and organic matter enrichment of Katian-Aeronian deep-water shale in Luzhou area, southern Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(4): 469-482.]
- [31] [33]梁萍萍, 郭伟, 王南, 等. 川南威远—泸州页岩气井区奥陶系顶部观音桥组岩相和沉积环境[J]. 地质科学, 2022, 57 (1) : 115-126. [Liang Pingping, Guo Wei, Wang Nan, et al. Lithofacies and sedimentary environments of the uppermost Ordovician Kuanyinchiao Formation from the wells in Weiyuan-Luzhou, southern Sichuan[J]. Chinese Journal of Geology, 2022, 57(1): 115-126.]
- [32] 聂海宽, 金之钧, 马鑫, 等. 四川盆地及邻区上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组底部笔石带及沉积特征[J]. 石油学报, 2017, 38 (2) : 160-174. [Nie Haikuan, Jin Zhijun, Ma Xin, et al. Graptolites zone and sedimentary characteristics of Upper Ordovician Wufeng Formation-Lower Silurian Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its adjacent areas[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(2): 160-174.]
- [33] 苏文博, 李志明, Ettensohn F R, 等. 华南五峰组—龙马溪组黑色岩系时空展布的主控因素及其启示[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2007, 32 (6) : 819-827. [Su Wenbo, Li Zhiming, Ettensohn F R, et al. Distribution of black shale in the Wufeng-Longmaxi Formations (Ordovician-Silurian), South China: Major controlling factors and implications[J]. Earth Science:

Journal of China University of Geosciences, 2007, 32(6): 819-827.]

- [34] 贺萍. 珠江口盆地新近系年代地层格架及沉积体系演化[D]. 荆州: 长江大学, 2023. [He Ping. Chronostratigraphic framework and sedimentary system evolution of Neogene in the Pearl River Mouth Basin[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2023.]
- [35] Li M S, Hinnov L, Kump L. *Acycle*: Time-series analysis software for paleoclimate research and education[J]. Computers & Geosciences, 2019, 127: 12-22.
- [36] 戎嘉余, 王怿, 詹仁斌, 等. 中国志留纪综合地层和时间框架[J]. 中国科学 (D辑): 地球科学, 2019, 49 (1) : 93-114. [Rong Jiayu, Wang Yi, Zhan Renbin, et al. Silurian integrative stratigraphy and timescale of China[J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2019, 49(1): 93-114.]
- [37] 孙莎莎, 芮昀, 董大忠, 等. 中、上扬子地区晚奥陶世—早志留世古地理演化及页岩沉积模式[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39 (6) : 1087-1106. [Sun Shasha, Rui Yun, Dong Dazhong, et al. Paleogeographic evolution of the Late Ordovician-Early Silurian in Upper and Middle Yangtze regions and depositional model of shale[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(6): 1087-1106.]

Research on Shale Facies Combination Based on Milankovitch Theory: A case study from the 1st member of Longmaxi Formation in the southern Sichuan Basin

HUANG Pu¹, XIONG Liang², ZHAN GuoWei¹, CHENG HongLiang¹, ZHAO Yong¹, ZHANG ShiHua¹

1. Exploration and Development Research Institute of SINOPEC Southwest Oil and Gas Branch, Chengdu 610095, China

2. SINOPEC Southwest Oil and Gas Branch, Chengdu 610095, China

Abstract: [Objective] Building an isochronous shale facies combination framework for stratigraphic science based on Milankovitch theory and designing an accurate shale facies characterization method are important for evaluating the vertical and horizontal heterogeneity changes of shale facies combinations. This is achieved by studying regional sedimentary patterns. [Methods] We accurately calculated the composition of shale minerals through Lithoscanner elemental scanning logging and multi mineral models, classifying the lithofacies. Additionally, the Ipsom supervised neural network algorithm was used to conduct gas well lithofacies identification without Lithoscanner elemental scanning logging data. We extract the Milankovitch cycles from the strata through time series analysis methods such as spectral analysis, optimal sedimentation rate estimation, and Gaussian filtering. [Results and Discussions] The 1st member of Longmaxi Formation in the Weirong area contains 12 lithofacies. Using the top surface of the Guanyinqiao section as an anchor point, eight fourth order sequences and 24-26 fifth order sequences can be identified. Using the upper and lower boundaries of the fourth order sequence as the framework for lithofacies assemblages, the E1 to E4 lithofacies assemblages in the middle and lower parts of the Longyi member were shown to exhibit multiple lithofacies types and rapid changes in the proportion of the main lithofacies. The vertical and horizontal changes of the E5 to E8 lithofacies assemblages are relatively small. [Conclusions] By studying the differences and changes in lithofacies assemblages to determine the sedimentary pattern of shale in the Weirong Long Formation, we determined that the vertical and horizontal differences in lithofacies assemblages are primarily influenced by marine productivity and land source supply in central Sichuan. Overall, the quantitative research results of shale facies combinations and the local sedimentary patterns provide new ideas for predicting favorable lithofacies locations within the region and more accurately predicting favorable areas for oil and gas exploration.

Key words: Sichuan Basin; shale; the 1st member of Longmaxi Formation; time series analysis; lithofacies classification; lithofacies characteristics; lithofacies combination; sedimentary pattern