

川南大安龙马溪组电成像测井资料中 大型滑塌体的发现及地质意义*

潘 峰^{1,2} 蒋裕强¹ 蒋立伟^{3,4,5} 王 玥²

1 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川成都 610500

2 斯伦贝谢科技服务(成都)有限公司, 四川成都 610500

3 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

4 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

5 中国石油浙江油田公司, 浙江杭州 310023

摘要 应用高分辨率电成像测井资料, 首次在川南大安地区下志留统龙马溪组泥页岩中发现了大型滑塌体。滑塌体分布在龙一₂亚段—龙二段内, 岩性主要为灰黑色泥页岩, 在常规测井曲线和岩心上与正常页岩特征一致、难以区分, 但在电成像图像上可见滑塌构造和滑动构造, 与正常页岩呈现的水平层理特征迥异、界面截然。大安地区 1000 km² 范围内的 6 口钻井中均发现有多层滑塌体, 滑塌体层之间为正常的页岩, 不同井中滑塌体的层数、厚度明显不同, 在横向上缺乏对比性, 总体表现为北厚南薄、北强南弱的趋势。单井中最多发育有 35 层滑塌体, 最少为 9 层; 单层滑塌体厚度最大为 32.4 m, 最小为 0.5 m; 单井滑塌体层累计厚度最大为 194.5 m, 最小为 41 m。分析认为滑塌体分布范围广、发育层数多、单层厚度大, 具有地震成因的特点, 其分布受乐山—龙女寺古隆起东南斜坡控制, 是近距离搬运、快速堆积沉积作用的产物, 不同井区对同一地震事件的沉积响应不同, 单层滑塌体可能是对 1 次地震事件的响应, 也可能是多次地震事件叠加的结果。滑塌体的发现为川南龙马溪组的地层对比提供了新的沉积学信息, 同时滑塌体厚度大、裂缝发育程度高、具有良好的储盖条件, 可成为下一步页岩气勘探的备用层系。

关键词 龙马溪组 滑塌体 高分辨率电成像测井资料 页岩气

第一作者简介 潘峰, 男, 1987 年生, 博士研究生、高级工程师, 从事沉积学和测井地质学研究。E-mail: essencepan@163.com。

通讯作者简介 蒋裕强, 男, 1963 年生, 教授、博士生导师, 从事沉积储层地质及非常规油气地质研究。E-mail: xnsyjyq3055@126.com。

中图分类号: P512.32 文献标志码: A

Discovery and geological significance of large landslide bodies using borehole image logs in the Longmaxi Formation of Da'an area, southern Sichuan Basin, China

PAN Feng^{1,2} JIANG Yuqiang¹ JIANG Liwei^{3,4,5} WANG Yue²

* 中国石油天然气集团有限公司重大科技专项“深层页岩气有效开采关键技术攻关与试验”(编号: 2019-F31)资助。[Financially supported by the Science and Technology Project of China National Petroleum Corporation “Research and Testing of Key Technologies for Effective Deep Shale Gas Development” (No. 2019-F31)]

收稿日期: 2023-12-16 改回日期: 2024-05-08

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

2 SLB Chengdu, Chengdu 610500, China

3 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

4 College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

5 PetroChina Zhejiang Oilfield Company, Hangzhou 310023, China

Abstract Large landslide bodies are discovered for the first time in the Longmaxi Formation from the Da'an area, southern Sichuan basin, based on high-resolution borehole image well logs. Landslide bodies are distributed in the Long₁ Sub-member and Long₂ Member. They are both composed of black shales, and thus display similar features to background shale deposits on conventional logs. On borehole image logs, however, the landslide bodies can be identified by slide and slump structures, which have sharp contrasts with normal shale. Multi-layered landslide bodies are found in 6 drilling wells distributed in the Da'an area (~1000 km²). The landslide bodies are layered and separated by normal shales. The number of layers and thickness of landslide bodies in different wells are markedly different, making it challenging to correlate between wells. The landslide bodies are overall thick in the north and thin in the south. A single landslide body varies in thickness from 0.5 to 32.4 m, while composite landslide bodies in a single well can reach a thickness of 41 to 194.5 m. It is believed that landslide bodies are widely distributed, occur at multiple stratigraphic levels with large bed thickness, and have the characteristics of earthquake origin. They were the product of short distance transportation and rapid deposition, which was controlled by the southeast slope of the Leshan-Longnvisi palaeo-uplift. Different areas have different sedimentary responses to the same earthquake event. A single landslide body may be a response to one earthquake event, or it may be the result of the superposition of multiple earthquake events. The discovery of the landslide bodies provides a new perspective on stratigraphic correlation of the Longmaxi Formation in the southern Sichuan Basin. At the same time, the landslide bodies are thick with well-developed fracture networks, and feature favorable reservoir and seal conditions. These landslide bodies may thus represent potentially important prospects for the future shale gas exploration.

Key words Longmaxi Formation, landslide body, borehole image logs, shale gas

About the first author PAN Feng, born in 1987, is a Ph.D. candidate in School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, with main research interest in sedimentology and petroleum geology. E-mail: essencepan@163.com.

About the corresponding author JIANG Yuqiang, born in 1963, professor, doctoral supervisor, is engaged in sedimentology, reservoir geology and unconventional petroleum geology research. E-mail: xnsyjq3055@126.com.

1 概述

滑塌体是斜坡带附近失稳的地质体在重力作用下,沿滑动面以整体“冻结”的方式向下搬运而形成的沉积体(Shanmugam, 2013; 宋晓帅等, 2022; 张云山等, 2023),地质体在下滑过程中可以产生滑动、滑塌等多种沉积构造,其中滑动构造的滑动面平直,在下滑过程中伴生的褶皱变形构造较少,而滑塌构造的滑动面凹凸不平,在下滑过程

中会发生不同程度的褶皱、旋转和断裂等(Varnes, 1978)。滑塌和滑动构造是识别滑塌体的重要标志,对判断沉积盆地的古地貌起伏状态和古构造活动性质具有重要的意义(袁效奇等, 2014)。近几十年来,在阿尔及利亚,墨西哥湾、几内亚湾、中国南海等大陆边缘地区,和死海盆地、鄂尔多斯盆地、松辽盆地等陆相湖盆中都发现了大型的滑塌体沉积(李磊等, 2010; 李相博等, 2015; Kneller *et al.*, 2016; 崔明明等, 2023),这些滑塌体内部

均含有丰富的沉积构造,并且岩石物理性质多变,在物源供应、储集层、盖层、地层温压等多方面都会对油气藏产生影响(Weimer *et al.*, 2006; 潘树新等, 2013; Alsop *et al.*, 2016; Cardona *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2022)。

但前人的发现和研究多聚焦于与砂质沉积物相关的滑塌体,与泥质沉积物相关的滑塌体却较少报道,特别是针对厚层灰黑色页岩内部发育的滑塌体还鲜有涉及,主要原因是缺乏合适的手段对厚层灰黑色页岩的沉积结构和构造进行系统表征,造成对该类信息的忽视,缺少滑塌体的识别标志,具体表现在:(1)这些岩石在野外露头和钻井岩心上的颜色十分单调,呈均匀的灰黑色,页岩纹层之间基本没有色差,因此难以通过肉眼分辨页岩中纹层形态的变化,进而判断页岩沉积构造的类型,常易误判成单一的块状构造;(2)岩石薄片虽然可以反映页岩纹层的形态,但其视域较窄,最大只能在厘米尺度范围内对水平层理、交错层理等的纹层结构进行观察描述,无法在宏观尺度上对滑动、滑塌构造进行呈现(施振生, 2020);(3)常规测井和地震资料包含的沉积构造信息十分有限,且常具有较强的多解性,难以对页岩的沉积特征进行精细刻画。电成像测井利用井壁附近地层微电阻率的变化进行配色成图,通过图像特征来清晰直观地表征岩石地质现象,在识别地下岩石沉积构造方面具有独特的优势(钟广法和马在田, 2001; 周伦先, 2008; 钟广法和游倩, 2012)。

本研究以川南大安地区龙马溪组龙一₂亚段—龙二段厚层灰黑色页岩为研究对象,采用电成像直接解释→常规测井与岩性扫描测井约束解释→岩心标定解释→综合解释的研究思路,旨在利用高分辨率电成像测井资料来研究页岩中滑塌体的识别特征、沉积展布规律、滑塌体与上覆和下伏地层的接触关系,并对滑塌体的成因机制和地质意义进行了讨论。本区为页岩气勘探新区,前人对本区的综合地质研究成果较少,仅开展了钻录测井、地震解释及盆地模拟工作,明确了龙马溪组矿物组成、有机地球化学特征和页岩含气性特征(舒红林等, 2023),对页岩沉积体系的研究相对不足,滑塌体的发现为了解该区龙马溪组厚层灰黑色页岩的沉积过程和大地构造背景提供关键的沉积学信息,同时为在页岩中获得天然气勘探突破提供了新的思路。

2 地质背景

大安地区位于四川盆地南部,西起重庆大足,东至重庆璧山,北接重庆铜梁,南到四川泸州(图 1-A)。在早志留世龙马溪组沉积时期,因受扬子陆块与华夏陆块汇聚作用的影响,该地区处于“多隆围一凹”的闭塞滞留环境,北部为乐山—龙女寺古隆起,南部为雪峰和黔中古隆起,施振生等(2020, 2022)和王红岩等(2023)通过地震资料和沉积相分析认为乐山—龙女寺古隆起发育有东南水下斜坡,斜坡总体倾向南东向,地形坡降较缓,为 0~1 m/km,但斜坡带存在多处地形坡折,地貌单元复杂多变(图 1-B)。早志留世龙马溪组沉积时期,大安地区在该斜坡背景上持续接受水循环受限的泥页岩沉积,随着时间推移,来自南东方向的华夏陆块对该地区的挤压作用不断增强,地壳不断抬升,海侵范围逐渐缩小,沉积水体逐渐变浅(郑和荣等, 2013; 牟传龙等, 2016; 赵迪斐等, 2016)。自下而上,大安地区下志留统龙马溪组可分为 2 段:龙马溪组一段(简称龙一段)以厚层灰黑色含碳质放射虫笔石页岩及灰黑色含粉砂碳质笔石页岩为主,笔石化石丰富;龙马溪组二段(简称龙二段)下部为厚层灰黑色含笔石碳质页岩与灰黑色含粉砂碳质页岩,中上部为中—厚层深灰色或灰黄色粉砂质页岩和泥质粉砂岩。龙一段可进一步划分为龙一₁和龙一₂ 2 个亚段,其中龙一₁亚段为深水陆棚相,厚度为 35~55 m,是当前页岩气勘探开发的主要层段,龙一₂亚段—龙二段是半深水—浅水陆棚相(赵文智等, 2016; 舒红林等, 2023),总厚度为 180~200 m。龙一₁亚段在常规测井曲线上整体表现为高自然伽马、高 TOC 含量的特征,电阻率、声波时差和密度曲线均有明显的起伏,波阻抗曲线在龙一₁亚段顶界和底界附近存在较大的变化,对应地震剖面上具有清晰连续的同相轴反射;而龙一₂亚段—龙二段自然伽马值相对较低,声波时差和密度曲线变化较小,波阻抗曲线总体平直(图 1-B),对应地震剖面同相轴反射较弱或无反射。

前人已从多方面对龙一₁亚段页岩的沉积和储集层特征进行了深入的讨论,但对龙一₂亚段—龙二段页岩的研究则相对较少。本研究选取大安地区 6 口钻井(A-F 井)中的高分辨率电成像测井资料

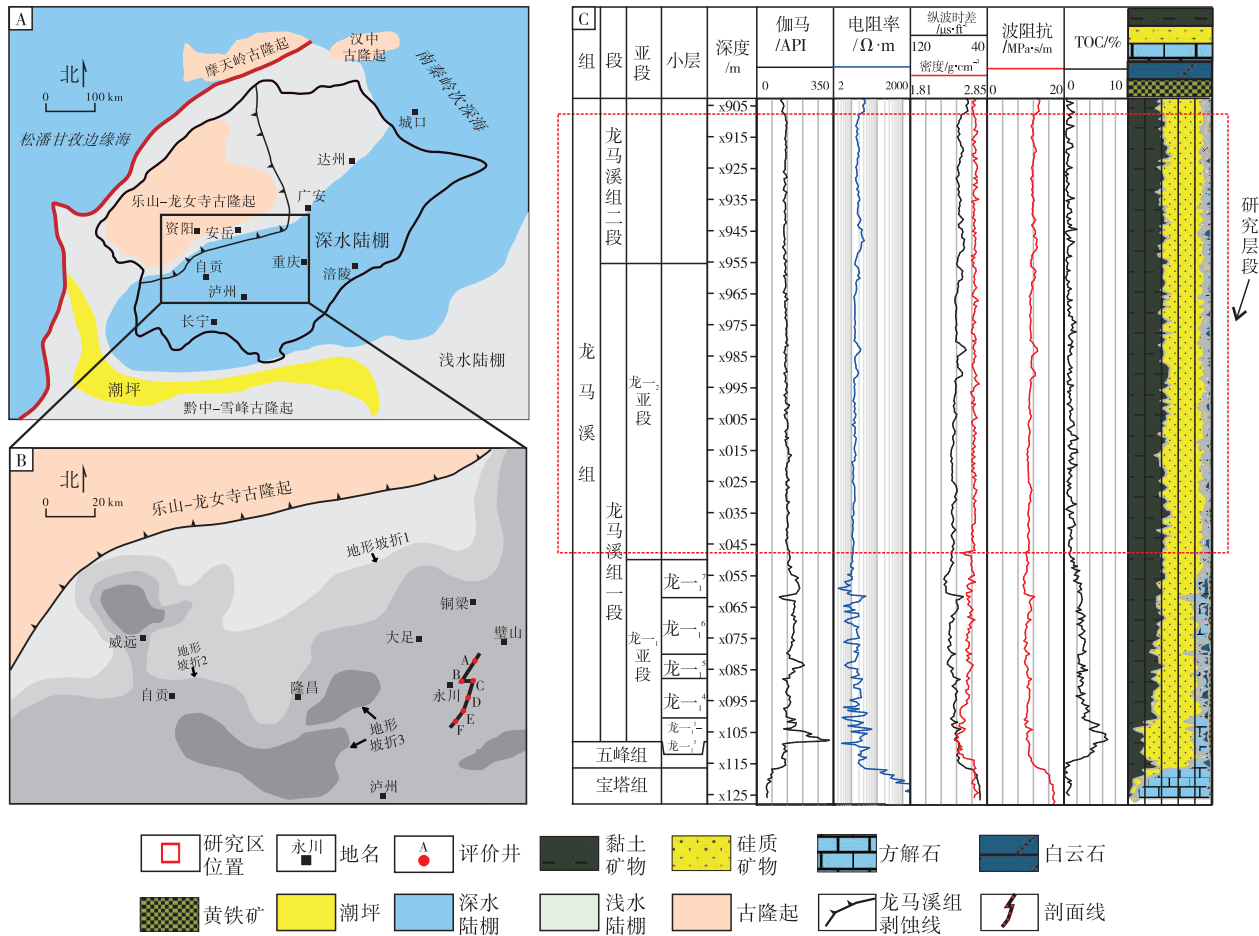


图 1 大安地区位置、川南龙马溪组沉积背景和地层综合柱状图 (据赵文智等, 2016; 施振生等, 2022; 有修改)

Fig. 1 Location of Da'an area, sedimentary background and comprehensive stratigraphic column of the Longmaxi Formation in southern Sichuan basin (modified from Zhao *et al.*, 2016; Shi *et al.*, 2022)

对龙一₂亚段—龙二段厚层灰黑色页岩的沉积特征进行了分析, 6口钻井选自不同构造带内的不同构造位置, 分布范围近 1000 km², 南北最大井距为 35 km, 东西最大井距为 11 km (图 1-B)。

3 高分辨率电成像测井资料的处理与解释

3.1 资料采集与处理方法

本次研究中的 6 口井均由斯伦贝谢公司的高分辨率电成像测井仪 (简称 FMI-HD) 采集完成, 资料的处理与解释工作是在交互式解释工作站上利用斯伦贝谢公司的 Techlog 软件完成的。FMI-HD 仪器通过 192 个微电极对井壁深度 1~1.4 cm 范围内的地层进行测量得到 192 条微电阻率曲

线, 通过对微电阻率曲线的图像处理, 可把井壁附近各点之间电阻率的差别转变为彩色图像, 图像颜色越深表示电阻率越低, 反之, 则越高。FMI-HD 图像的纵向分辨率为 5 mm, 在 8.5 英寸的井眼中覆盖率为 75% (钟光法和马在田, 2001; Rider, 2002), 通过图像观察和解释可以揭示岩石内部结构和构造特征, 如纹层形态、裂缝、断层等 (赖锦等, 2023)。

3.2 滑塌体的电成像测井解释

通过电成像测井资料的直接解释, 可以了解地层沉积构造特征的概貌。常规测井、岩性扫描测井解释和电成像测井资料的结合可以确定沉积构造对应的地层矿物组分特征, 通过岩心标定可以建立沉积构造与电成像测井响应之间的关系。大安地区龙马溪组滑塌体主要发育在龙一₂亚段—龙二段厚层

灰黑色页岩地层内,在 FMI-HD 电成像图像上与正常页岩有明显区别,正常页岩段内纹层的形态单一、厚度稳定、相互平行、倾角平缓、倾向一致,且与顶底层面的产状相同,呈水平层理的特征,而滑塌体内常见变形层理、裂缝特征,纹层形态多变、倾角较高、倾向杂乱,并多见纹层被裂缝切割、错断或终止的现象。滑塌体被夹持在正常页岩内,呈层状特征,与上覆和下伏正常页岩界线截然,以沉积侵蚀界面与下伏页岩相接触。滑塌体对应层段及其上下的自然伽马等常规测井曲线起伏较弱,由斯伦贝谢公司岩性扫描测井计算得到的矿物剖面指示该段矿物组成与含量与上覆和下伏正常页岩无明显差异:硅质矿物(石英+长石)平均含量为 49.3%,钙质矿物(方解石+白云石)平均含量 6.5%,黏土矿物平均含量 44.2%(图 2-A)。通过岩心深度归位到 FMI-HD 资料后发现,滑塌体页岩和正常页岩在岩心上无明显差异,两者颜色一致,均呈单一的灰黑色,纹层之间无色差,难以通过肉眼分辨纹层和沉积构造(图 2-B),但在偏光显微镜下滑塌体页岩纹层特征清晰,硅质矿物和钙质矿物含量较高的纹层颜色较亮,黏土矿物含量较高的纹层颜色较暗(图 2-C)。与之相似,在 FMI-HD 图像上也表现出明显的纹层结构特征,并呈书页状高频亮暗互层变化,图像上亮色纹层的电阻率较高,暗色纹层的电阻率较低,由于硅质矿物和钙质矿物的电阻率远高于黏土矿物的电阻率(吴庆岩和张爱军,1998),不难判断亮色纹层应与富硅纹层或富钙纹层相对应,暗色纹层则与富黏土矿物纹层对应,FMI-HD 图像上的变形层理为纹层同生卷曲变形的表现。

基于 FMI-HD 图像特征,可进一步在滑塌体页岩内识别出滑塌构造和滑动构造。其图像结构特征和成因简述如下:

1) 滑塌构造:滑塌构造是大安地区龙一₂亚段一龙二段内最为典型的沉积构造类型,发育段内岩性为灰黑色含笔石碳质页岩或含粉砂碳质页岩,单层厚度 0.5~20 m,在 FMI-HD 图像上纹层连续变化,无错动和终止,构成卷曲、横卧、倒转、微褶皱等复杂的形态特征,但纹层的形态变化只局限在 1 个层内,不影响到上下层,以沉积侵蚀界面或断层与下伏正常页岩之间呈突变接触关系(图 3-A),指示了其原生水平层理在同生期受

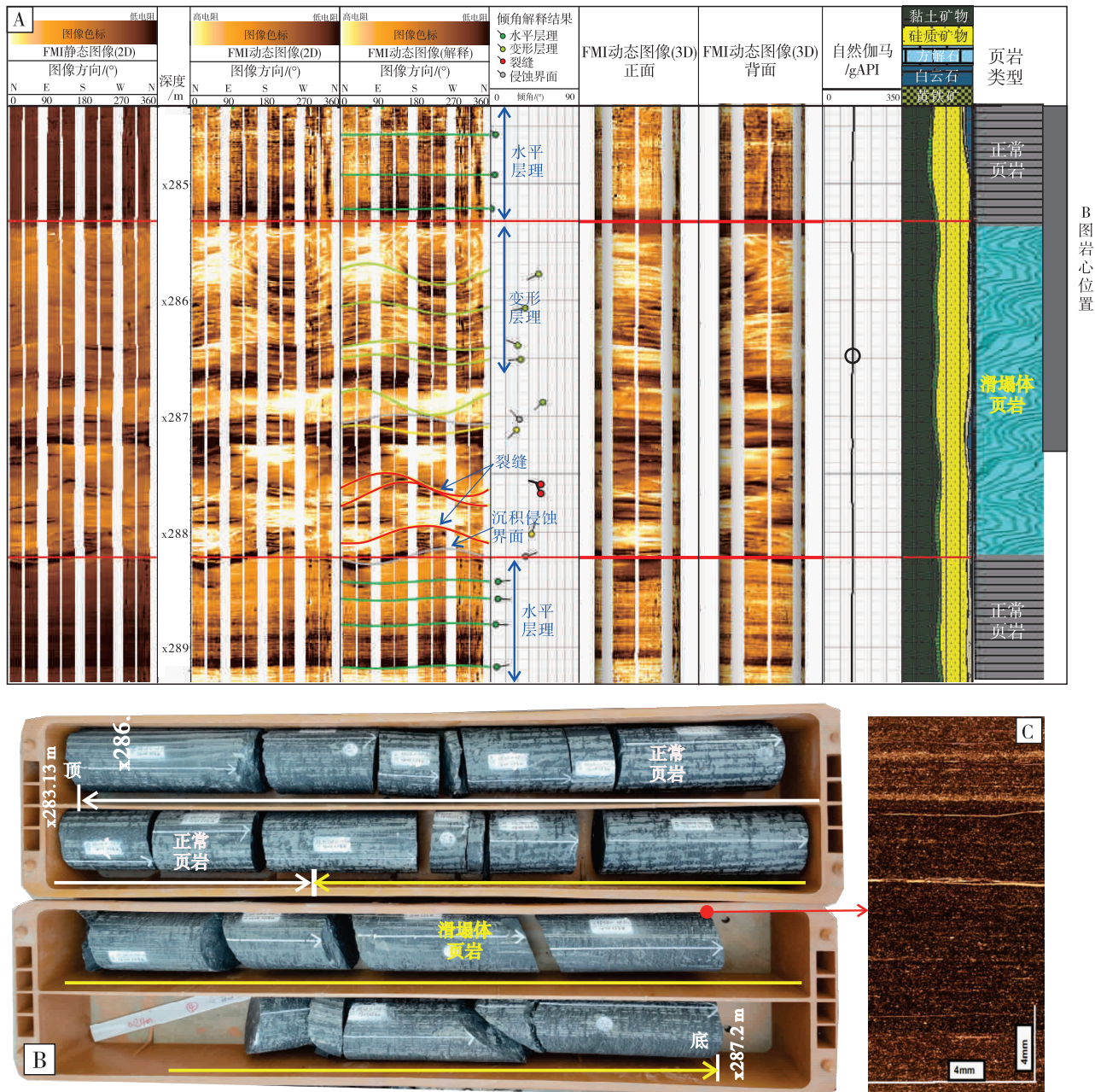
到强烈揉皱、变形作用的产物,在力学性质上主要为弹性—塑性形变。

2) 滑动构造:滑动构造发育段岩性与滑塌构造一致,单层厚度 2~35 m,仅局限在 1 个层内,可单独出现,也可与滑塌构造组合出现,常紧邻于滑塌构造发育段之下,在 FMI-HD 图像上与正常页岩之间的图像特征迥异、界面截然,与下伏的正常页岩之间存在明显的剪切滑移面,表现为发育大量的低角度裂缝和断层,将地层分割为大小不一的碎块(图 3-B)。滑动构造发育段的页岩纹层无卷曲、揉皱等同生变形现象,但常为中高角度地层倾角,表现出厚层异地搬运岩块的沉积特征。这些现象指示了滑动构造是成岩期后固结或弱固结的页岩块体受到顺层剪切滑移作用后的产物,在力学性质上主要为弹性形变。

大安地区 6 口钻井中的 FMI-HD 图像显示滑塌体出现的层位稳定,均发育在龙一₂亚段一龙二段内,但首层滑塌体出现的位置在不同井中并不相同,距龙一₂亚段底界最小为 18 m,最大为 41 m,滑塌体页岩层被正常页岩层相隔,岩性与正常页岩层基本一致,矿物组成与含量在纵向上无明显变化。这 6 口钻井的井间距较小,为 5~11 km,不同井中滑塌体的层数也有明显不同,单井中最多可达 35 层,最少为 9 层。这些现象说明大安地区龙一₂亚段一龙二段页岩内滑塌体是事件性沉积作用的结果,单层滑塌体的分布面积较局限,具有被搬运距离近、堆积沉积速度快的特点,不同井区对同一滑塌作用的沉积响应区别较大,单层滑塌体可能是对 1 次滑塌作用的沉积响应,也可能是多次滑塌作用堆积的结果,缺乏横向对比性(图 4)。

纵向上,单层滑塌体的平均厚度一般为 4.5~10 m,最厚为 32.4 m,单井中滑塌体累计厚度最大可达 194.45 m,自下而上滑塌体的发育程度有先增强后减弱的趋势,在龙一₂亚段中上部发育程度最高,单层厚度最大,至龙二段单层厚度变小,滑塌强度变弱。此外,在滑塌体内,特别是滑动构造内发育有大量的裂缝与断层,不同滑塌体层内的裂缝和断层特征在纵向上相似程度较高,倾角均为中低角度,走向均为北东—南西向。

横向上,自北向南,滑塌体的单层厚度和累计厚度有减小趋势,滑塌体之间的隔层厚度有增大趋势,北部的 A 井中滑塌体多为滑动构造与滑塌构



A—滑塌体页岩与正常页岩的 FMI-HD 电成像测井特征；B—滑塌体页岩与正常页岩的岩心特征；B—滑塌体页岩的岩石薄片特征；
图 2 川南大安地区 E 井中龙一₂ 亚段—龙二段滑塌体页岩与正常页岩特征

Fig. 2 Characteristics of landslides shale and normal shale in the Long1₂ Sub-member and Long2 Member in well E in Da'an area of southern Sichuan Basin

造的组合，单层滑塌体的平均厚度为 10 m，滑塌体层的累计厚度为 194.45 m，隔层的平均厚度为 2.6 m，而至南部的 F 井中的滑塌体则主要表现为滑塌构造，单层滑塌体的平均厚度为 4.5 m，滑塌体层的累计厚度为 44.7 m，隔层的平均厚度为 9.4 m (图 5)。单井滑塌体中裂缝、断层的产状以及发育强度与该井所处构造带内的断层产状、该井

距离断层的远近没有明显关系，在横向上不同构造位置上的井中的滑塌体都发育有大量的裂缝和断层，并且倾角均为中低角度，平均为 18°~35°，走向也基本一致，都为北东—南西向(图 6)。

综上所述，大安地区龙一₂ 亚段—龙二段页岩滑塌体是事件性沉积作用的产物，其分布特征与沉积期研究区内北高南低的斜坡背景相耦合，各井中滑塌体

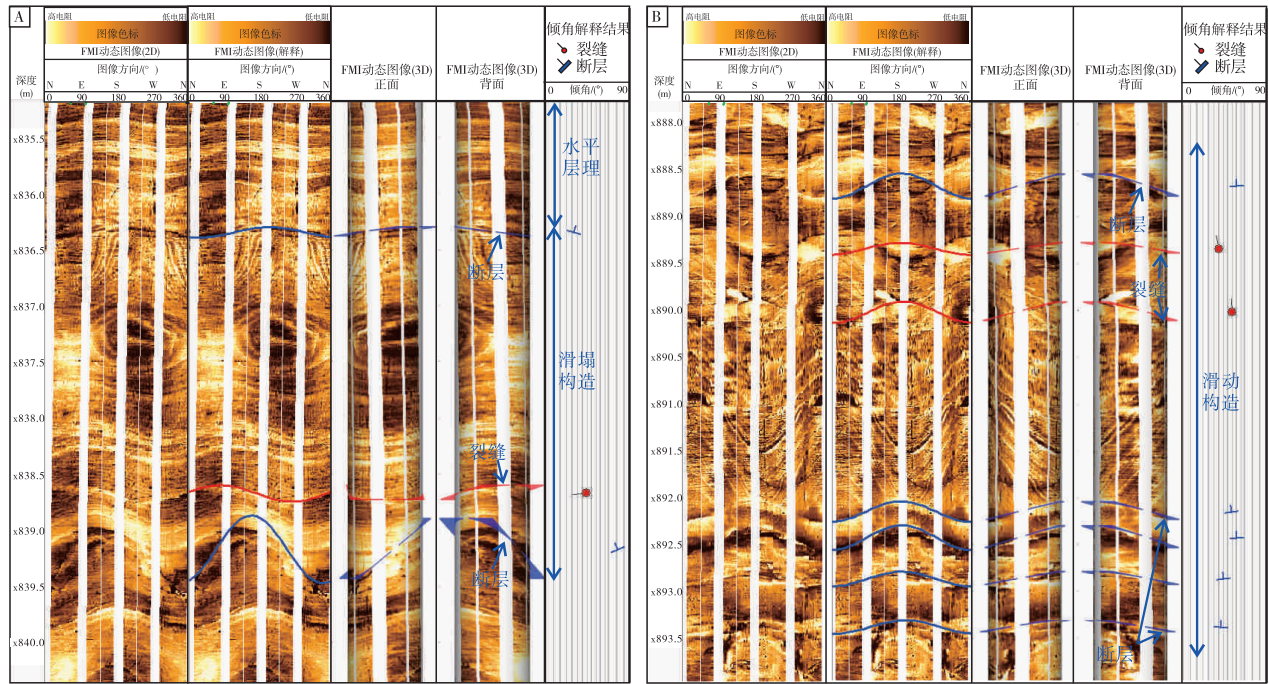


Figure 3 Borehole image log characteristics of slump structure and slide structure in the Long₁₂ Sub-member and Long₂ Member in Well A in Da'an area of southern Sichuan Basin

Figure 3 Borehole image log characteristics of slump structure and slide structure in the Long₁₂ Sub-member and Long₂ Member in Well A in Da'an area of southern Sichuan Basin

在纵向和横向上具有相似的变形和裂缝、断层特征，裂缝与断层的优势走向可能代表反映了沉积期斜坡的走向(Alsop *et al.*, 2011)，即北东—南西向。

4 讨论

4.1 成因机制

前人的研究表明充沛的物源和足够的斜坡坡度是大型滑塌体形成的基础(秦雁群等, 2018; 秦磊等, 2020)，川南大安地区龙一₂亚段—龙二段沉积时期，沉积物源充沛，水下斜坡发育，具备大型滑塌体形成的基本条件。但大型滑塌体的形成具有多种触发机制(Elger *et al.*, 2018; Minisini *et al.*, 2020; 于吉星等, 2023)，通常归纳为2类：一类为盆地的内动力因素，包括快速沉积作用、天然气水合物分解、强大的风暴流、潮汐作用等；另一类为盆地外动力因素，主要与构造活动有关，如地震和断层活动、火山爆发等。

根据大安地区龙一₂亚段—龙二段滑塌体的形成环境、形态特征以及其他构造或岩相标志对其成

因做简要分析如下：

1) 大安地区龙一₂亚段—龙二段页岩多为灰黑色，普遍发育有水平层理，反映了其形成于安静低能的沉积环境，区域地质研究认为该段沉积期沉积水体深度为60~100 m，最大水深可能超过100 m(蒲泊伶等, 2020)，而风暴作用的平均风暴浪基面水深为40 m，最大风暴浪基面为85 m，只有异常强大的风暴才能越过水深65 m的界限(Bose *et al.*, 1988)。大安地区龙一₂亚段—龙二段滑塌体发育处是风暴、潮汐作用所不能及的水深环境。加之单层滑塌体层厚较大，平均厚度一般为4.5~10 m，最厚为32.4 m，基本可以排除风暴和潮汐作用的因素。

2) 滑塌体在6口钻井中均有发现，具有良好的成层性，单井中最多发现有35层，累计厚度最大可达194.45 m，具有分布范围广、发育层数多、地层厚度大的特点，滑塌体内的岩石发育有大量的同生变形构造，正常页岩内发育水平层理，两者岩性一致，但沉积构造差异巨大，界线清晰，因此无法简单地用顺层滑脱变形的构造作用来解释。

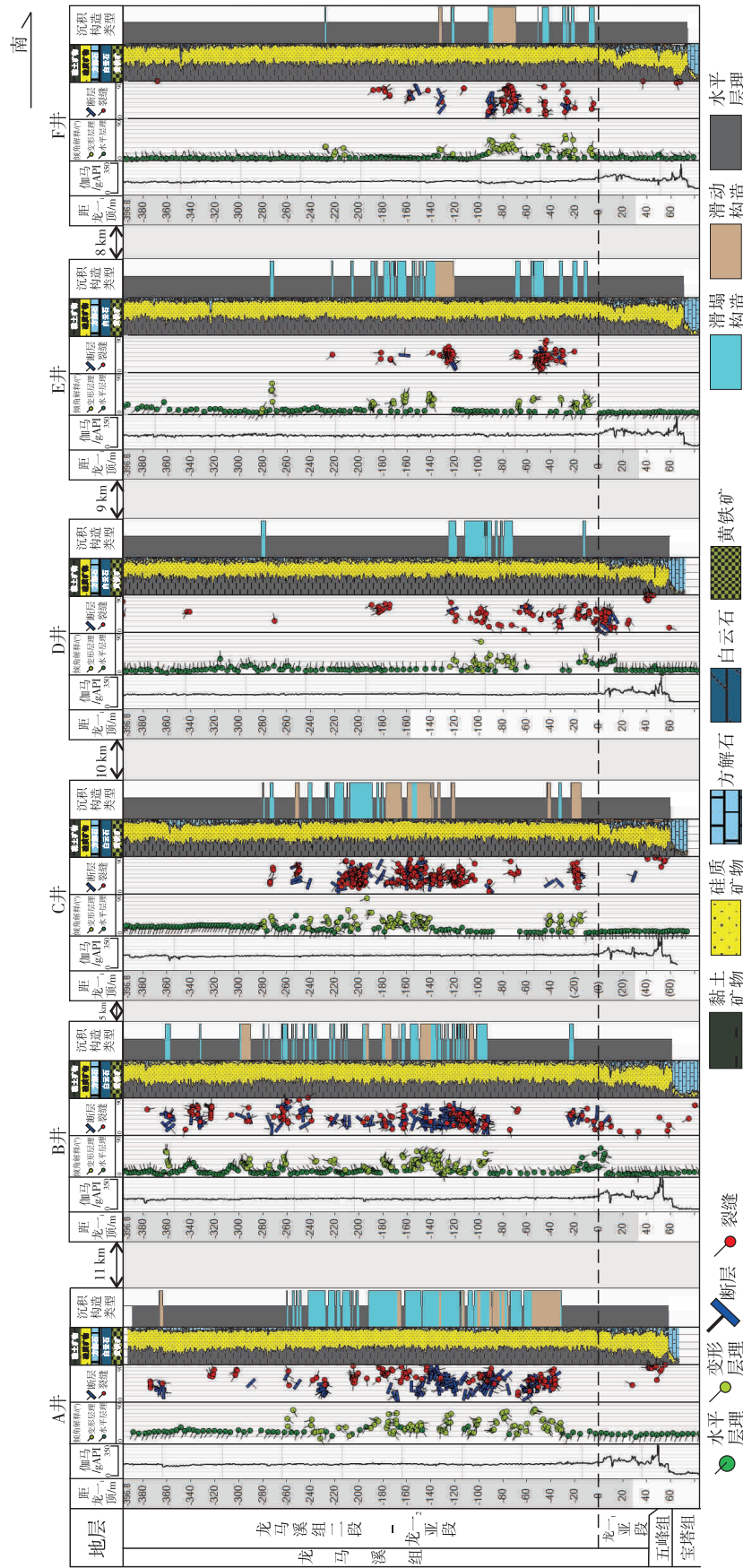


图 4 川南大安地区龙一₂亚段—龙二段滑塌体对比剖面图(剖面位置见图 1)
 Fig. 4 Multi-well correlation profile for landslides in the Long₁₂ Sub-member and Long₂ Member in Da'an area of southern Sichuan Basin
 (Profile location is show in Fig. 1)

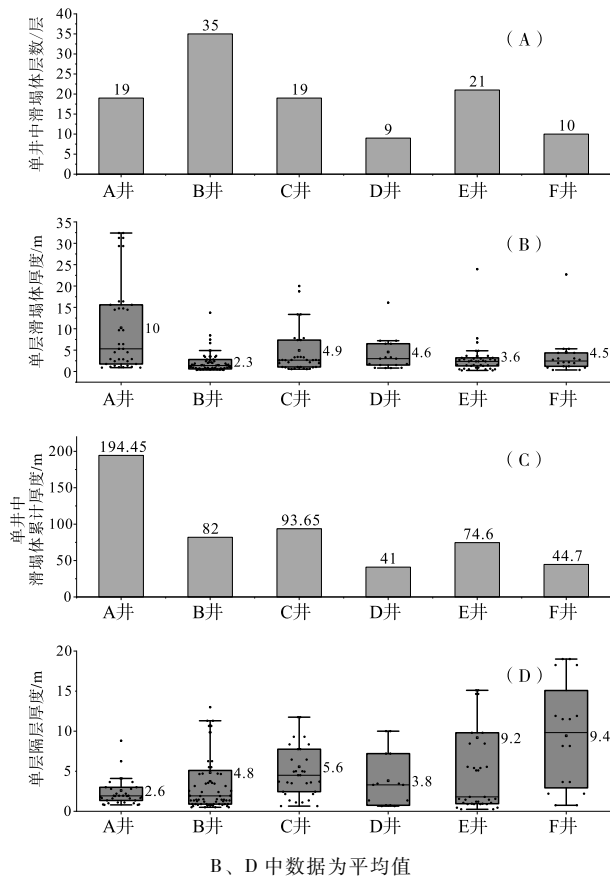


图 5 川南大安地区龙一₂亚段—龙二段滑塌体层数、厚度与隔层统计

Fig. 5 Statistics for number of layers, thickness of landslide bodies and compartment shale in the Long1₂ Sub-member and Long2 Member in Da'an area of southern Sichuan Basin

3) 不同井中首层滑塌体出现的位置差异较大, 滑塌体的层数也有明显不同, 缺乏横向对比性, 说明单层滑塌体控制面积局限、被搬运距离近、堆积沉积速度快, 用天然气水合物分解作用等因素来解释滑塌体的成因也存在不妥之处。

4) 滑塌体层在纵向上重复多次出现, 之间以正常页岩相隔, 表明从时间上讲, 滑塌体层的形成是由周期性、彼此独立的事件所触发。滑塌体中存在大量的低角度裂缝和断层, 其发育密度受控于滑塌体的厚度和发育强度, 与该井附近的构造断层产状以及该井离断层的距离远近没有明显关系, 因此难以将滑塌体简单地归因于断层直接作用的产物。

根据上述分析, 笔者认为大安地区龙一₂亚段—龙二段中的滑塌体层分布层位稳定、成层特征明显、展布范围广泛、周期性重复夹持在正常页岩内, 具有地震作用触发的滑塌体特征。在地震作用

期内, 固结或弱固结的沉积物在斜坡地带发生破裂, 在重力和水流的作用下向斜坡下方滑动堆积, 形成龙一₂亚段—龙二段的滑塌堆积, 在地震作用间歇期形成正常页岩沉积。滑塌体中的裂缝和断层产状在纵向和横向上均具有较高的相似度, 走向均为北东—南西向, 反映了滑塌体沉积期内斜坡的走向, 这与施振生等 (2020, 2022) 和王红岩等 (2023) 通过地震资料和沉积相分析认为的斜坡走向基本一致, 但斜坡带存在多处地形坡折, 地貌单元复杂多变, 造成不同斜坡部位滑塌体的沉积构造、层数和厚度等特征存在较大差异 (图 7)。

4.2 地质意义

川南龙马溪组龙一₂亚段—龙二段页岩与上下地层在测录井资料上易于区分, 但龙一₂亚段—龙二段内部测井曲线形态平直, 波阻抗差异较小, 地震剖面同相轴反射较弱或无反射, 加之录井岩性、颜色单一, 地层划分、对比、追踪难度较大, 当在横向上短距离内出现地层厚度突变时, 往往因地震和测井资料上缺乏足够的信息, 导致对地层厚度变化的成因造成误判, 影响地质综合认识。滑塌体是典型的异地搬运沉积, 可以造成地层在平面上减薄或增厚。FMI-HD 电成像测井揭示, 与大安地区同处于乐山—龙女寺古隆起东南水下斜坡带的威远、自贡、隆昌、涪陵地区在龙马溪组同层位中均发育有大型滑塌体, 这可能是该地区龙一₂亚段—龙二段厚度在横向上短距离内出现突变现象的原因之一。如包汉勇等 (2023) 基于地震和常规测录井资料认为涪陵焦石坝地区龙马溪组在平面上厚度的变化是海底微古地貌起伏叠加内潮汐作用导致的, 但从该地区 FMI-HD 电成像测井观察到, 具有地层厚度突变的井中滑塌构造层厚可达百米以上, 其内部裂缝和断层明显, 且均为中低角度, 这是内潮汐沉积作用难以解释的, 滑塌体的存在可能为分析该地区地层厚度变化的原因提供新的视角。

此外, 川南龙马溪组页岩气勘探开发已取得巨大成功, 但随着各气田开发进入递减期, 单井产量逐年递减, 因此需寻找新的增产阵地。大量地质和工程实践表明天然裂缝是页岩储集层的重要储集空间和主要渗流通道, 影响页岩气的富集、保存、单井产能及开发效果, 特别是离断裂远、横向延伸差的低角度裂缝对页岩气富集和产出具有积极的意义

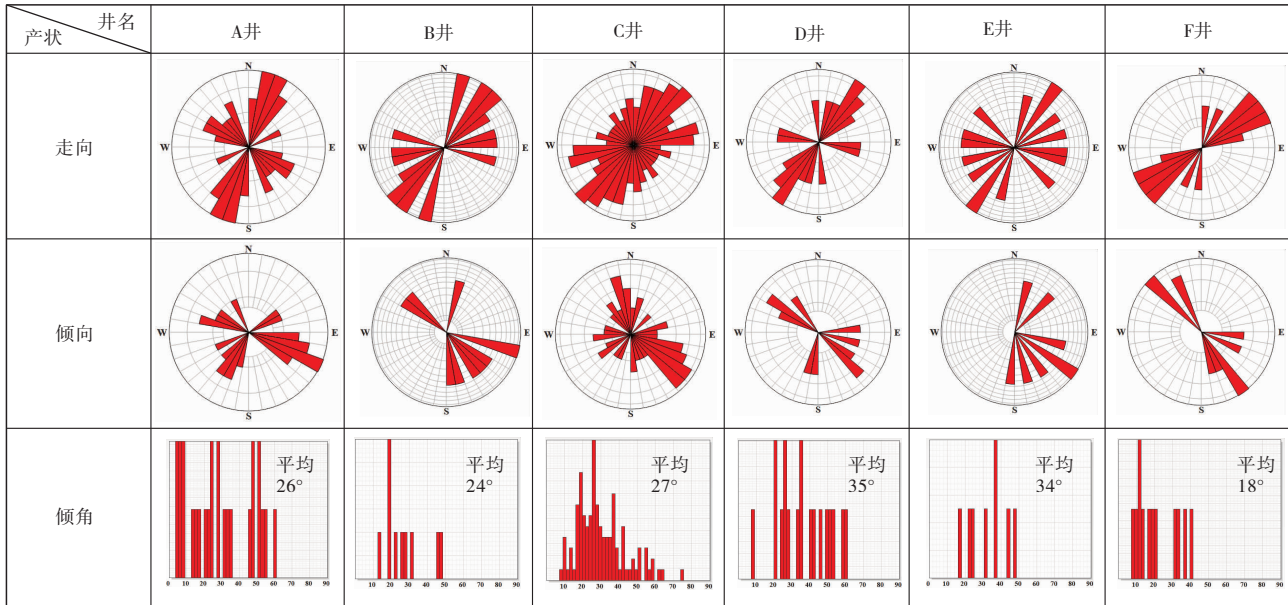


图 6 川南大安地区龙一₂ 亚段—龙二段滑塌体内裂缝与断层的产状统计

Fig. 6 Statistics for fractures and faults in landslide bodies of Long₁₂ Sub-member and Long₂ Member in Da'an area of southern Sichuan Basin

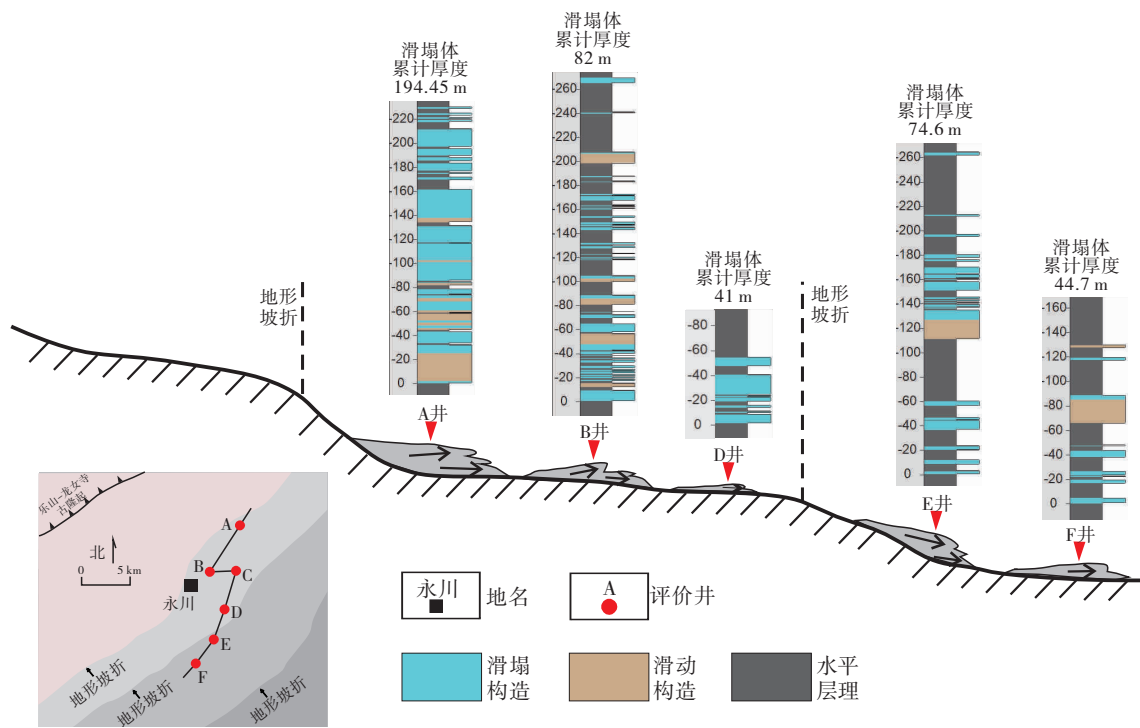


图 7 川南大安地区龙一₂ 亚段—龙二段不同地貌单元滑塌体分布特征 (据施振生等, 2022; 舒红林等, 2023; 王红岩等, 2023, 修改)

Fig. 7 Distribution characteristic of landslide body on different paleo-landscape of the Long₁₂ Sub-member and Long₂ Member in Da'an area of southern Sichuan Basin (modified from Shi *et al.*, 2022; Shu *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2023;)

(郭旭升等, 2016; 曾联波等, 2023)。龙一₂ 亚段一龙二段中的滑塌体在龙一₂ 亚段中上部发育程度最高, 具有厚度大、分布广, 低角度裂缝发育程度高的特点, 滑塌体下伏地层为龙一₁ 亚段页岩, 是优质的烃源岩, 上覆地层为龙二段厚层泥页岩, 具有良好的盖层条件, 当存在天然气的纵向运移时, 可导致滑塌体内具有较高天然气富集程度, 成为下一步天然气勘探的备用层系, 对提高整个含气页岩段储量动用率及采收率具有重要的意义。

5 结论

1) 川南大安地区龙马溪组滑塌体发育在龙一₂ 亚段一龙二段, 岩性主要为厚层灰黑色含笔石碳质页岩与含粉砂碳质页岩, 在常规测井曲线上与正常页岩表现一致, 均呈单调平直的曲线形态; 通过 FMI-HD 电成像测井资料反映的沉积构造对滑塌体和正常页岩进行区分, 单个滑塌体只局限在 1 个层内, 发育有滑动构造和滑塌构造, 正常页岩发育水平层理, 两者图像形态差异明显、界面截然。

2) 在大安地区 6 口钻井的龙一₂ 亚段一龙二段内均发现有多层滑塌体, 单井中滑塌体层累计厚度最大为 194.5 m, 不同层的滑塌体在纵向上被正常页岩相隔, 滑塌体层数和发育位置在不同井中差别较大, 缺乏横向对比性, 但总体表现为北强南弱的趋势。滑动体内的裂缝与断层在纵横向上优势走向基本一致, 为北东—南西向, 反映了滑塌体形成时所在斜坡的走向。

3) 大安地区龙马溪组滑塌体在川南具有较强的代表意义, 在受乐山—龙女寺古隆起东南斜坡影响的威远、自贡、隆昌、涪陵地区同层位中也有发育, 滑塌体可能为地震成因。滑塌体的发现为解释川南普遍存在的龙一₂ 亚段一龙二段地层厚度横向变化大、平面非均质性强提供了新的沉积学信息, 同时滑塌体厚度大、裂缝发育程度高、具有良好的储盖条件, 可以成为下一步天然气勘探的备用层系。

参考文献 (References)

包汉勇, 孟志勇, 李凯, 常振, 郁飞, 易雨昊, 赵天逸. 2023. 四川盆地涪陵地区龙马溪组含气页岩段上部气层平面非均质性特征及其发育主控因素. 地球科学, 48(7): 2750-2763. [Bao H Y, Meng Z Y, Li K, Chang Z, Yu F, Yi Y H, Zhao T Y. 2023. Plane heteroge-

neity characteristics and main controlling factors of development of upper gas layer in gas-bearing shale of longmaxi formation in Fuling Area, Sichuan Basin. Earth Science, 48(7): 2750-2763]

崔明明, 彭楠, 柳永清, 王宗秀, 旷红伟, 许克民, 李春麟. 2023. 陆相湖盆沉积物滑塌变形研究进展. 地质论评, 69(2): 701-718. [Cui M M, Peng N, Liu Y Q, Wang Z X, Kuang H W, Xu K M, Li C L. 2023. Research progress on deformation structures of slump deposits in continental lacustrine basin. Geological Review, 69(2): 701-718]

郭旭升, 胡东风, 魏祥峰, 李宇平. 2016. 四川盆地焦石坝地区页岩裂缝发育主控因素及对产能的影响. 石油与天然气地质, 37(6): 799-808. [Guo X S, Hu D F, Wei X F, Li Y P. 2016. Main controlling factors on shale fractures and their influences on production capacity in Jiaoshiba Area, the Sichuan Basin. Oil & Gas Geology, 37(6): 799-808]

赖锦, 李红斌, 张梅, 白梅梅, 赵仪迪, 范旗轩, 庞小娇, 王贵文. 2023. 非常规油气时代测井地质学研究进展. 古地理学报, 25(5): 1118-1138. [Lai J, Li H B, Zhang M, Bai M M, Zhao Y D, Fan Q X, Pang X J, Wang G W. 2023. Advances in well logging geology in the era of unconventional hydrocarbon resources. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 25(5): 1118-1138]

李磊, 王英民, 张莲美, 白广臣, 王小刚. 2010. 块体搬运复合体的识别、演化及其油气勘探意义. 沉积学报, 28(1): 76-82. [Li L, Wang Y M, Zhang L M, Bai G C, Wang X G. 2010. Identification and evolution of mass transport complexes and its significance for oil and gas exploration. Acta Sedimentologica Sinica, 28(1): 76-82]

李相博, 王菁, 廖建波, 龙礼文, 潘树新, 李智勇, 完颜容. 2015. 陆相盆地深水沉积中的块体搬运作用与搬运机理研究: 以鄂尔多斯盆地延长组为例. 天然气地球科学, 26(4): 625-633. [Li X B, Wang J, Liao J B, Long L W, Pan S X, Li Z Y, Wanyan R. 2015. The Mechanism of Transport of Deep-water Sedimentation in Lacustrine Basin: A Case Study of Deep-water Sandstone in Yanchang Formation, Ordos Basin. Natural Gas Geoscience, 26(4): 625-633]

牟传龙, 王秀平, 王启宇, 周昱昱, 梁薇, 葛祥英, 陈小炜. 2016. 川南及邻区下志留统龙马溪组下段沉积相与页岩气地质条件的关系. 古地理学报, 18(3): 457-472. [Mou C L, Wang X P, Wang Q Y, Zhou K K, Liang W, Ge X Y, Chen X W. 2016. Relationship between sedimentary facies and shale gas geological conditions of the Lower Silurian Longmaxi Formation in southern Sichuan Basin and its adjacent areas. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 18(3): 457-472]

潘树新, 郑荣才, 卫平生, 王天奇, 陈彬滔, 梁苏娟. 2013. 陆相湖盆块体搬运体的沉积特征、识别标志与形成机制. 岩性油气藏, 25(2): 9-18. [Pan S X, Zheng R C, Wei P S, Wang T Q, Chen B T, Liang S J. 2013. Deposition characteristics, recognition mark and form mechanism of mass transport deposits in terrestrial lake Basin. Lithologic Reservoirs, 25(2): 9-18]

蒲泊伶, 董大忠, 王凤琴, 王玉满, 黄金亮. 2020. 沉积相带对川南龙马溪组页岩气富集的影响. 中国地质, 47(1): 111-120. [Pu B

- L, Dong D Z, Wang F Q, Wang Y M, Huang J L. 2020. The effect of sedimentary facies on Longmaxi shale gas in southern Sichuan Basin. *Geology in China*, 47(1): 111-120]
- 秦磊, 毛金昕, 倪凤玲, 徐少华, 李小刚, 蔡长娥, 尚文亮, 刘家恺. 2020. 浅谈深水块体搬运复合体的结构、成因分类以及识别方法. *地球科学进展*, 35(6): 632-642. [Qin L, Mao J X, Ni F L, Xu S H, Li X G, Cai C E, Shang W L, Liu J K. 2020. A brief introduction to deep-water mass-transport complexes: Structures, genetic classifications and identification methods. *Advances in Earth Science*, 35(6): 632-642]
- 秦雁群, 万仑坤, 计智锋, 李富恒, 徐海龙, 巴丹. 2018. 深水块体搬运沉积体系研究进展. *石油与天然气地质*, 39(1): 140-152. [Qin Y Q, Wan L K, Ji Z F, Li F H, Xu H L, Badan. 2018. Progress of research on deep-water mass-transport deposits. *Oil & Gas Geology*, 39(1): 140-152]
- Shanmugam G. 2013. 深水砂体成因研究新进展. *石油勘探与开发*, 40(3): 294-301. [Shanmugam G. 2013. New perspectives on deep-water sandstones: implications. *Petroleum Exploration and Development*, 40(3): 294-301]
- 施振生, 王红岩, 林长木, 孙莎莎, 金惠, 郝翠果, 陈胜, 张蓉. 2020. 威远—自贡地区五峰期—龙马溪期古地形及其对页岩储层品质的控制. *地层学杂志*, 44(2): 163-173. [Shi Z S, Wang H Y, Lin C M, Sun S S, Jin H, Hao C G, Chen S, Zhang R. 2020. Paleotopography of Weiyan-Zigong area in Wufengian-Lungmachiian stages (Ordovician-Silurian transition) and its effect on the quality of shale gas reservoir. *Journal of Stratigraphy*, 44(2): 163-173]
- 施振生, 袁渊, 赵群, 孙莎莎, 周天琪, 程峰. 2022. 川南地区五峰组—龙马溪组沉积期古地貌及含气页岩特征. *天然气地球科学*, 33(12): 1969-1985. [Shi Z S, Yuan Y, Zhao Q, Sun S S, Zhou T Q, Chen F. 2022. Paleogeomorphology and oil-bearing shale characteristics of the Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin, China. *Natural Gas Geoscience*, 33(12): 1969-1985]
- 舒红林, 何方雨, 李季林, 张介辉, 李明隆, 芮昀, 邹辰, 姚秋昌, 梅珏, 李延钧. 2023. 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. *天然气工业*, 43(6): 30-43. [Shu H L, He F Y, Li J L, Zhang J H, Li M L, Rui Y, Zou C, Yao Q C, Mei J, Li Y J. 2023. Geological characteristics and favorable exploration areas of Wufeng Formation-Longmaxi Formation deep shale in the Da'an Block, Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 43(6): 30-43]
- 宋晓帅, 孙志文, 朱超祁, 范智涵, 朱娜, 贾永刚, 于开宁. 2022. 深海滑塌研究进展. *海洋地质与第四纪地质*, 42(1): 222-235. [Song X S, Sun Z W, Zhu C Q, Fan Z H, Zhu N, Jia Y G, Yu K N. 2022. A review on deepwater landslide. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 42(1): 222-235]
- 王红岩, 施振生, 孙莎莎, 赵群, 周天琪, 程峰, 拜文华. 2023. 陆表海页岩沉积微相类型及微相分布模式: 以川南地区五峰组—龙马溪组为例. *石油勘探与开发*, 50(1): 51-64. [Wang H Y, Shi Z S, Sun S S, Zhao Q, Zhou T Q, Cheng F, Bai W H. 2023. Microfacies types and distribution of epicontinental shale: a case study of the Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin, China. *Petroleum Exploration and Development*, 50(1): 51-64]
- 吴庆岩, 张爱军(译). 1998. 测井解释常用岩石矿物手册. 北京: 石油工业出版社, 37-43. [Wu Q Y, Zhang A J(Translating). 1998. *Handbook for Well Log Interpretation*. Beijing: Petroleum Industry Press, 37-43]
- 于吉星, 杨田, 田景春, 蔡来星, 任启强, 郭为雪. 2023. 深水重力流沉积油气勘探中的几个基础沉积学问题与研究展望. *古地理学报*, 25(6): 1299-1314. [Yu J X, Yang T, Tian J C, Cai L X, Ren Q Q, Guo W X. 2023. Some basic sedimentological problems and research prospects of deep-water gravity-flow sediment in oil and gas exploration. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 25(6): 1299-1314]
- 袁效奇, 苏德辰, 贺静, 孙爱萍, 吕洪波, 李海兵, 乔秀夫. 2014. 鄂尔多斯南缘中奥陶统中的滑塌构造及其地震成因. *地质论评*, 60(3): 529-540. [Yuan X Q, Su D C, He J, Lü H B, Li H B, Qiao X F. 2014. The Slump Structures in the Middle Ordovician on the Southern Margin of Ordos Basin and Their Seismic Origin. *Geological Review*, 60(3): 529-540]
- 曾联波, 马诗杰, 田鹤, 薛萌, 刘国平, 吕文雅. 2023. 富有机质页岩天然裂缝研究进展. *地球科学*, 48(7): 2427-2442. [Zeng L B, Ma S J, Tian H, Xue M, Liu G P, Lü W Y. 2023. Research progress of natural fractures in organic rich shale. *Earth Science*, 48(7): 2427-2442]
- 张云山, 吴南, 贾永刚, 尉建功. 2023. 海底滑坡典型特征及石油地质学意义. *海洋地质与第四纪地质*, 43(1): 94-104. [Zhang Y S, Wu N, Jia Y G, Wei J G. 2023. Characteristics of submarine landslides and their implications for petroleum geology. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 43(1): 94-104]
- 赵迪斐, 郭英海, 杨玉娟, 王守玉, 毛潇潇, 李咪. 2016. 渝东南下志留统龙马溪组页岩储集层成岩作用及其对孔隙发育的影响. *古地理学报*, 18(5): 843-856. [Zhao D F, Guo Y H, Yang Y J, Wang S Y, Mao X X, Li M. 2016. Shale reservoir diagenesis and its impacts on pores of the Lower Silurian Longmaxi Formation in southeastern Chongqing. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 18(5): 843-856]
- 赵文智, 李建忠, 杨涛, 王淑芳, 黄金亮. 2016. 中国南方海相页岩气成藏差异性比较与意义. *石油勘探与开发*, 43(4): 499-510. [Zhao W Z, Li J Z, Yang T, Wang S F, Huang J L. 2016. Geological difference and its significance of marine shale gases in South China. *Petroleum Exploration and Development*, 43(4): 499-510]
- 郑和荣, 高波, 彭勇民, 聂海宽, 杨斐然. 2013. 中上扬子地区下志留统沉积演化与页岩气勘探方向. *古地理学报*, 15(5): 645-656. [Zheng H R, Gao B, Peng Y M, Nie H K, Yang F R. 2013. Sedimentary evolution and shale gas exploration direction of the Lower Silurian in Middle-Upper Yangtze area. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 15(5): 645-656]
- 钟广法, 马在田. 2001. 利用高分辨率成像测井技术识别沉积构造. *同济大学学报(自然科学版)*, 29(5): 576-580. [Zhong G F, Ma Z T. 2001. Sedimentary structures identified from high-resolution borehole micro-resistivity image logs. *Journal of Tongji University*

- (Natura Science), 29(5): 576-580]
- 钟广法,游倩. 2012. 高分辨率 FMS 成像测井资料在科学大洋钻探中的应用. 地球科学进展, 27(3): 347-358. [Zhong G F, You Q. 2012. Applications of high-resolution formation microscanner image logs to scientific ocean drilling. *Advances in Earth Science*, 27(3): 347-358]
- 周伦先. 2008. 成像测井技术在研究砂砾岩沉积构造中的应用. 新疆石油地质, 29(5): 654-656,667. [Zhou L X. 2008. Application of fullbore formation MicroImager(FMI) to study of glutenite sedimentary structures in Jiyang depression. *Xinjiang Petroleum Geology*, 29(5): 654-656,667]
- Alsop G I, Marco S, Weinberger R, Levi T. 2016. Sedimentary and structural controls on seismogenic slumping within mass transport deposits from the Dead Sea Basin. *Sedimentary Geology*, 344: 71-90.
- Alsop G I, Marco S. 2011. Soft-sediment deformation within seismogenic slumps of the Dead Sea Basin. *Journal of Structural Geology*, 33(4): 433-457.
- Bose P K, Chaudhuri A K, Seth A. 1988. Facies, flow and bedform patterns across a storm-dominated inner continental shelf: Proterozoic Kaimur Formation, Rajasthan, India. *Sedimentary Geology*, 59(3-4): 275-293.
- Cardona S, Wood L J, Dugan B, Jobe Z, Strachan L J. 2020. Characterization of the Rapanui mass-transport deposit and the basal shear zone: Mount Messenger Formation, Taranaki Basin, New Zealand. *Sedimentology*, 67(4): 2111-2148.
- Elger J, Berndt C, Rüpke L, Krastel S, Gross F, Geissler W H. 2018. Submarine slope failures due to pipe structure formation. *Nature Communications*, 9(1): 1-6.
- Kneller B, Dykstra M, Fairweather L, Milana J P. 2016. Mass-transport and slope accommodation: implications for turbidite sandstone reservoirs. *AAPG Bulletin*, 100(2): 213-235.
- Li W J, Chen J T, Hakim A J, Myrow P M. 2022. Middle Ordovician mass-transport deposits from western Inner Mongolia, China: mechanisms and implications for basin evolution. *Sedimentology*, 69(3): 1301-1338.
- Minisini D, Desjardins P, Otharan G, Paz M, Kietzmann D A, Eberli G, Zavala C, Simo T, MacQuaker J H, Heine C, Minisini D, Fantin M, Noguera I L, Leanza H A. 2020. *Sedimentology, depositional model, and implications for reservoir quality. AAPG Memoir*, 121: 201-236.
- Rider M. 2002. *The Geological Interpretation of Well Logs*. Schlumberger, 199-223.
- Varnes D J. 1978. Slope movement types and processes. In: Schuster R L, Krizek R J(eds). *Landslides: Analysis and Control*. National Academy Sciences, 11-33.
- Weimer P, Slatt R M, Bouroulec R, Fillon R, Pettingill H, Pranter M, Tari G. 2006. Introduction to the petroleum geology of deepwater setting. *AAPG Studies in Geology*, 57: 149-170.

(责任编辑 李新坡; 英文审校 李攀)