

文章编号: 1671-1505(2025)01-0072-13 DOI:10.7605/gdxb.2025.012

# 川北震旦系灯影组软沉积物变形构造及成因分析

尚俊鑫<sup>1</sup> 冯明友<sup>1</sup> 夏茂龙<sup>2</sup> 张本健<sup>2</sup> 王兴志<sup>1</sup>  
贾松<sup>2</sup> 李勇<sup>2</sup> 曾乙洋<sup>2</sup> 韦明洋<sup>1</sup>1 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川成都 610500  
2 中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院, 四川成都 610041

**摘要** 四川盆地北缘震旦系灯影组发育软沉积变形构造, 其成因机制尚不明确。结合野外露头对川北广元地区灯影组软沉积变形构造发育特征、分布及成因进行系统分析。研究表明, 广元地区震旦系灯影组三段软沉积变形构造主要分布于中下部灰白色薄层灰岩及灰绿色—紫红色薄层泥岩中, 可见液化脉、液化卷曲变形、液化角砾岩及层内断层 4 种典型构造。灯三段早期浅水、较安静水体沉积物受同期循环剪切应力及地层应力复合作用, 为持续性古地震诱发的液化变形所致。垂向上可识别出 2 期不完整振动液化序列, 表明灯三段至少存在 2 次持续的古地震活动。综合分析指示上扬子克拉通北部灯三段沉积期构造活动强烈, 地震活动应与桐湾运动 I 幕晚期裂隙槽的拉张活动相关。

**关键词** 四川盆地 灯影组 软沉积变形 触发机制 古地震

**第一作者简介** 尚俊鑫, 男, 1994 年生, 博士研究生, 研究方向为碳酸盐岩沉积学及储层地质学。E-mail: shangjunxin1994@163.com。

**通讯作者简介** 冯明友, 男, 1981 年生, 博士, 副教授, 主要从事储集层地质学及非常规油气地质研究。E-mail: fmyswpu@163.com。

中图分类号: P531 文献标志码: A

## Characteristics and origins of soft-sediment deformation structures in the Sinian Dengying Formation, northern Sichuan Basin

SHANG Junxin<sup>1</sup> FENG Mingyou<sup>1</sup> XIA Maolong<sup>2</sup> ZHANG Benjian<sup>2</sup> WANG Xingzhi<sup>1</sup>  
JIA Song<sup>2</sup> LI Yong<sup>2</sup> ZENG Yiyang<sup>2</sup> WEI Mingyang<sup>1</sup>

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

2 Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Southwest Oil &amp; Gas Field Company, Chengdu 610041, China

**Abstract** The mechanisms of soft-sediment deformation structures (SSDS) in the Precambrian Dengying Formation in the northern Sichuan Basin remain poorly understood. This study presents a comprehensive analysis of these structures in the Guangyuan area, examining their characteristics, distribution, and origins through field outcrop studies. The results indicate that these deformation structures, which are predominantly located in the middle to lower strata of the third member of the Dengying Formation, are composed of grey-white thin-layered limestone and purplish-red to grey-green thin-layered mudstone. The identified structures include liquefaction veins, convolute folds, breccias, and intrastratal faults, which

are primarily observed in sediments from shallow, low-energy, aquatic environments. These deformations are closely linked to a combination of cyclic shear stress and stratigraphic pressure, suggesting recurrent ancient seismic activity as a key contributor. The finding of two distinct seismic liquefaction sequences suggests a minimum of two significant seismic events within the Member 3 of the Dengying Formation. It is further inferred that there was a period of intensive tectonic activity during the deposition of the member 3 of the Dengying Formation in the northern Yangtze Craton, and the seismic activity seemed to be related to the extension of the Late-Tongwan Movement in the rift.

**Key words** Sichuan Basin, Dengying Formation, soft-sediment deformation structure, trigger mechanism, paleoearthquake

**About the first author** SHANG Junxin, born in 1994, is a Ph.D. candidate. He is mainly engaged in carbonate sedimentology and reservoir geology. E-mail: shangjunxin1994@163.com.

**About the corresponding author** FENG Mingyou, born in 1981, is a Ph.D. and an associate professor. He is mainly engaged in reservoir geology and unconventional oil and gas geology. E-mail: fmyswpu@163.com.

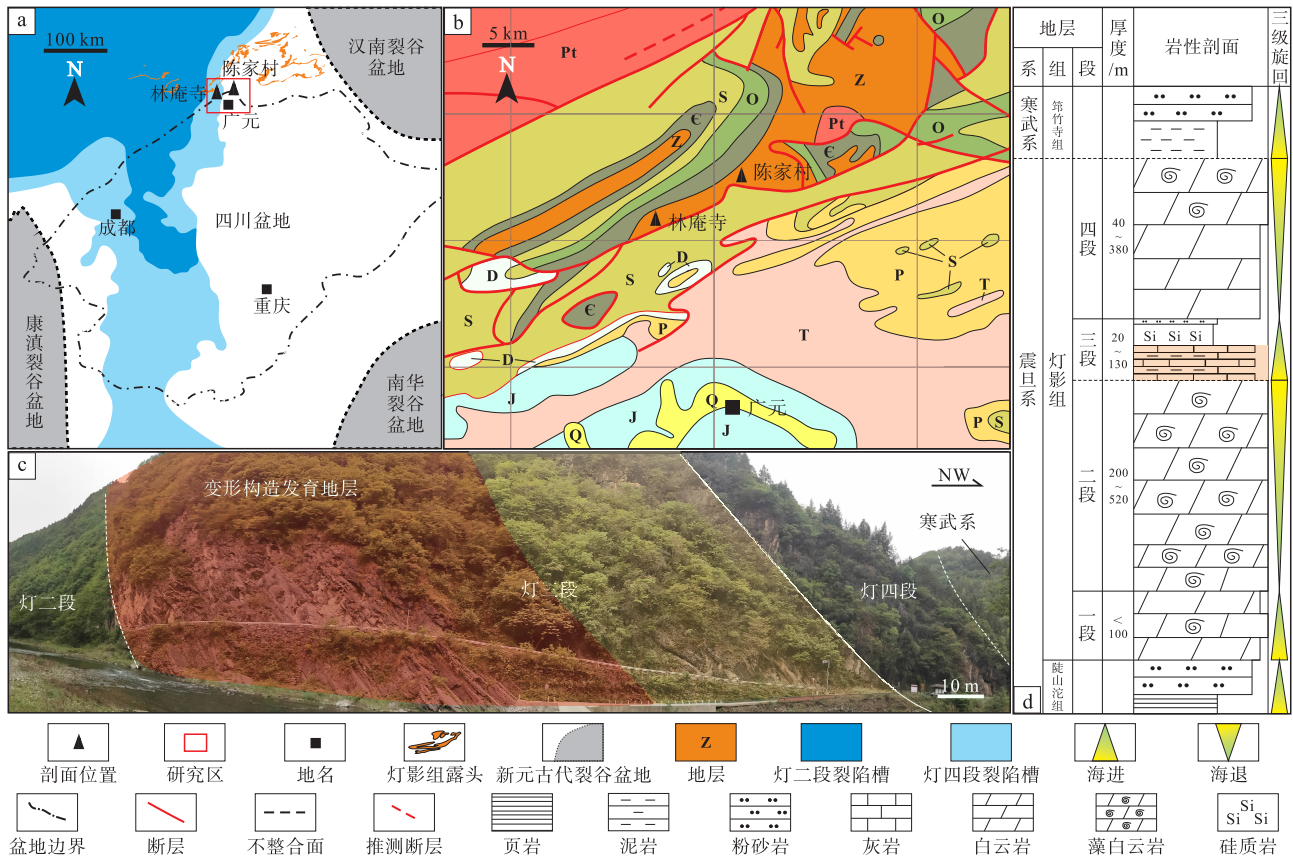
软沉积变形构造 (SSDS) 因其在沉积环境解释、盆地分析及油气勘探开发等领域具有重要指导意义而受到国内外学者的广泛关注 (Allen, 1986; 宋天锐, 1988; 乔秀夫等, 1994; Moretti *et al.*, 2011; 冯增昭等, 2017)。然而, 软沉积变形构造的形成受驱动力、变形机制及触发机制复合约束 (Owen *et al.*, 2011), 沉积物快速堆积 (Moretti *et al.*, 2001)、风暴波浪 (Chen and Lee, 2013)、潮汐 (Greb and Archer, 2007)、冻土融化 (钟建华等, 2022) 等触发机制均可通过不同驱动力 (如不稳定密度梯度、侧向剪切应力等) 导致液化作用发生, 促使软沉积变形构造 (如液化脉) 形成, 但也有部分学者认为典型脉体构造形成机制尚不明晰 (旷红伟等, 2004; 柳永清等, 2005; 刘燕学等, 2005), 复杂的成因叠加后期构造影响导致软沉积变形构造难以有效甄别。地震解释、室内实验以及野外露头等多方面研究为揭示软沉积变形构造的成因机制提供了重要支撑 (Jones and Omoto, 2000; Dasgupta, 2008; Waldron and Gagnon, 2011; 王龙樟等, 2018; Alsop *et al.*, 2019)。由地震引起的碳酸盐岩软沉积变形构造在亚洲范围内广泛分布, 如印度 Cuddapah 盆地古元古代 Vempalle 组 (Panja *et al.*, 2019)、华北地区中元古代雾迷山组 (Dechen and Aiping, 2012)、河南嵩山地区新元古代何家窑组 (高林志和柳永清, 2005) 及华东地区新元古代郯庐断裂带周缘 (张邦花等,

2017) 等, 并根据其结构形态、地理位置分布及元素地球化学特征等推测古沉积盆地的演化过程 (Jayanta and Anuj, 2023; Zhong *et al.*, 2023)。然而, 四川盆地震旦系古老碳酸盐岩地层软沉积变形的研究鲜有报道。

在对四川盆地北部广元地区震旦系灯影组野外露头踏勘中, 发现该区灯三段见不同规模的软沉积变形构造, 通过对 2 条露头剖面的详细测量, 并记录了其岩性、产状、垂向分布规律等特征。鉴于四川盆地震旦系灯影组沉积期间处于“兴凯旋回”初期 (刘树根等, 2013), 灯影组整体隆升及其所伴随的古构造事件多与大陆驱动的壳—幔活动相关 (凌文黎等, 2002; Wang and Li, 2003; Zhang *et al.*, 2016), 大规模的构造隆升 (桐湾运动) 不仅对四川盆地油气成储/成藏起到关键作用 (武赛军等, 2016), 也会产生特定的沉积构造响应。古构造事件所引起原始沉积过程的变化往往会被沉积物所记录并形成特定的沉积构造 (其中软沉积物变形构造最为常见), 识别与解释软沉积物变形构造对于分析含油气盆地构造演化、古地质事件及古沉积环境研究具有重要意义。因此, 针对川北广元地区震旦系灯影组软沉积物变形构造开展系统研究, 可为完善灯影组沉积格局、剖析盆地构造动力学机制提供部分指导。

## 1 区域地质概况

川北地区位于四川盆地西北部广元市朝天区 (图 1-a), 属于上扬子克拉通北缘。扬子克拉通



a—四川盆地北部灯影组露头及裂陷槽范围 (陈明思等, 2023); b—研究区域地质背景图; c—广元朝天区陈家村剖面野外露头照片; d—四川盆地北部灯影组岩性综合柱状图

图 1 川北地区地理位置与地质概况图

Fig. 1 Geographic location and geological setting of the northern Sichuan Basin

自 Rodinia 超大陆裂解开始进入伸展构造环境, 克拉通内以陆内裂谷作用为主 (Li *et al.*, 2008; 陈建书等, 2020), 在上扬子克拉通周缘分别形成汉南裂谷盆地、南华裂谷盆地及康滇裂谷盆地 (图 1-a) (卓皆文等, 2013)。普遍认为, 区域性大陆裂谷作用持续到成冰纪 (~700 Ma), 并在此之后进入拗陷期 (700 - 545 Ma) (Wang *et al.*, 2003), 于克拉通内部发育 1 条贯通南北、东陡西缓的克拉通内裂陷槽, 并持续接受海相碳酸盐沉积 (图 1-a) (杜金虎等, 2016)。受后期印支运动影响, 区内早期拉张性林庵寺基底大断裂被逆冲挤压推覆至志留系地层之上, 强烈的构造运动导致区内部分地层发生较强程度的变质。

川北地区震旦系至寒武系出露完整 (图 1-b, 1-c), 其中震旦系及寒武系自下而上发育陡山沱组、灯影组及第竹寺组 (图 1-d)。陡山沱组是成冰纪结束后的第 1 次海侵沉积, 主要为泥岩、硅质

岩和磷块岩, 夹泥晶白云岩 (汪泽成等, 2019)。灯影组为继陡山沱组之后发育的 1 套海侵体系域与高位体系域沉积 (汪泽成等, 2020), 由下至上划分为灯一段、灯二段、灯三段和灯四段。灯一段沉积期, 上扬子克拉通进一步发生较大规模海侵, 海平面升高, 但四川盆地基底相对平缓, 构造分异不明显, 形成陆表海环境, 区内沉积了 1 套泥晶白云岩夹薄层藻白云岩。灯二段沉积期海平面震荡性变化, 由海侵转变为区域性海退, 海平面降低, 受基底断裂活动导致的差异升降影响, 上扬子克拉通出现台内裂陷及洼地, 整体环境向台地—盆地体系演化, 研究区以 1 套厚层藻白云岩为主; 灯二段沉积末期, 桐湾运动 I 幕导致灯二段地层整体抬升并遭受剥蚀, 形成灯二段与灯三段的不整合面。灯三段沉积期开始快速海侵, 伴随大量陆源物质输入 (邓双林等, 2020), 区内灯三段下一中部主要发育灰白色—灰色碳酸盐岩及紫红—灰绿色泥岩

(变质作用明显), 该段亦为软沉积变形构造发育的主要层段(图 1-d 橙色), 根据软沉积变形构造的形态及类型特征, 识别出液化脉、液化卷曲变形、液化角砾岩和层内断层 4 种类型(表 1); 灯三段上部为深灰—灰黑色薄层硅质页岩及硅质岩, 顶部见薄层粉砂岩及泥质粉砂岩。灯四段沉积期持续性海退导致海平面下降, 然区内仍属深水沉积期, 灯四段以薄—中层硅质岩及硅质白云岩为主; 灯四段沉积末期, 桐湾运动 II 幕导致灯四段地层遭受抬升剥蚀, 与上覆寒武系筇竹寺组(邱家河组)之间呈不整合接触。筇竹寺组主要为深灰—灰黑色页岩(板岩)、粉砂质泥岩及硅质岩。

## 2 软沉积变形构造类型及特征

### 2.1 液化脉

川北地区灯三段下部至中部灰白色薄层石灰岩夹紫红色泥岩中发育液化脉构造, 多呈板状, 少数未见与液化母源层存在任何联系的“盲脉”(乔秀夫等, 1994), 发育为“中间宽—两端细”的纺锤状。液化脉形态较为规则但大小不一, 长度介于 1.5~10 cm 之间, 宽度约 0.6 cm, 倾角由 20°~90°不等, 与下伏地层呈近平行(图 2-a)或近垂直(图 2-b, 2-e)关系。区内液化脉构造多属层内液化脉, 未刺穿上覆及下伏地层。在较厚的紫红色泥岩夹层中, 普遍发育较长(>5 cm)的液化脉(图 2-c, 2-d); 而在较薄的紫红色泥岩夹层中, 液化脉则较短(<5 cm)(图 2-b 至 2-e)。灯三段中上部紫红色泥岩地层中未见液化脉(图 2-f), 主要发育劈理构造及次生脉体。劈理具明显方向性, 且脉体偏细(<0.5 cm), 沿走向宽度无明显变化, 长度介于 2~5 cm 之间。次生脉体多贯穿紫红色泥岩夹层, 脉体狭长, 宽度约 0.5 cm, 长度由 5 cm 到 10 cm 不等, 多垂直或近垂直于层面。

需注意的是, 灯三段中多发育劈理构造及次生

脉体叠加于液化脉之上的现象, 这些脉体在形态上虽然类似, 但其形成机理却有本质区别。劈理及次生脉体多受后期构造影响, 持续性的构造挤压背景导致岩层内发育构造缝并作为晚期富钙流体的运移通道、多充填晚期方解石; 而液化脉多形成于同生—早成岩阶段, 为突发性地质事件在软沉积物中的记录。且受后期构造影响形成的脉体色白、近垂直、具明显方向性、脉体边缘平直、穿层现象明显并切穿早期液化脉, 基于以上特征可将劈理、次生脉体与液化脉有效区分。

### 2.2 液化卷曲变形

灯三段底部及部分液化脉上部的紫红色薄层泥岩夹灰白色石灰岩中, 顺层发育 1 种结肠状的不规则褶皱—液化卷曲褶皱(图 3-a 至 3-e)。液化卷曲褶皱的上部岩层或下伏岩层多受卷曲褶皱部分影响, 褶皱向上或向下突出导致岩层弯曲(未穿层)。卷曲褶皱幅度变化较大且规律性不明显, 总体显示受层间空间大小制约。灯三段底部液化卷曲褶皱单层厚度为 0.5~1.5 cm, 整体呈倾伏状近平行于地层展布、延伸距离较长(>10 cm), 褶皱末端厚度逐渐变薄直至消失(图 3-a)。灯三段中下部变形层单层厚度为 0.4~2.0 cm, 形态主要呈波浪状、长/高比近于 1/2, 近平行于地层展布, 无明显破裂(图 3-b, 3-c)。此外, 剖面中局部低幅褶皱(图 3-e)在层面上显示出大幅卷曲变形且未发生明显破裂, 背斜核部显著加厚(图 3-d), 属塑性变形特征, 应排除由后期构造挤压诱发的可能。

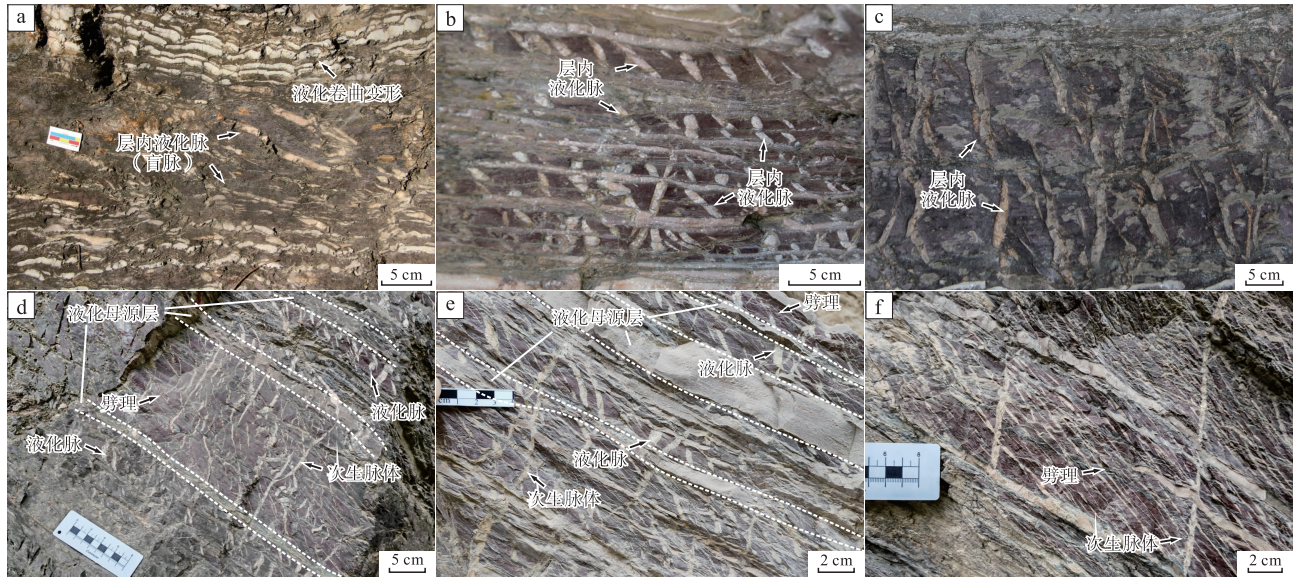
### 2.3 液化角砾岩

液化角砾岩主要发育于灯三段中部紫红色泥岩中, 泥岩单层厚度 0.2~2.0 cm, 属灰岩地层液化作用形成的液化脉切穿、扰动泥岩层所致, 于原地破碎形成角砾, 角砾本身具有可拼合性(乔秀夫等, 2001)。液化角砾岩的角砾大小不一, 长 0.5~3.0 cm、宽 0.2~2.0 cm; 多呈不规则四边形, 棱

表 1 川北地区灯三段典型变形构造类型及分布

Table 1 Typical deformation structures and distribution in the Member 3 of Dengying Formation in northern Sichuan Basin

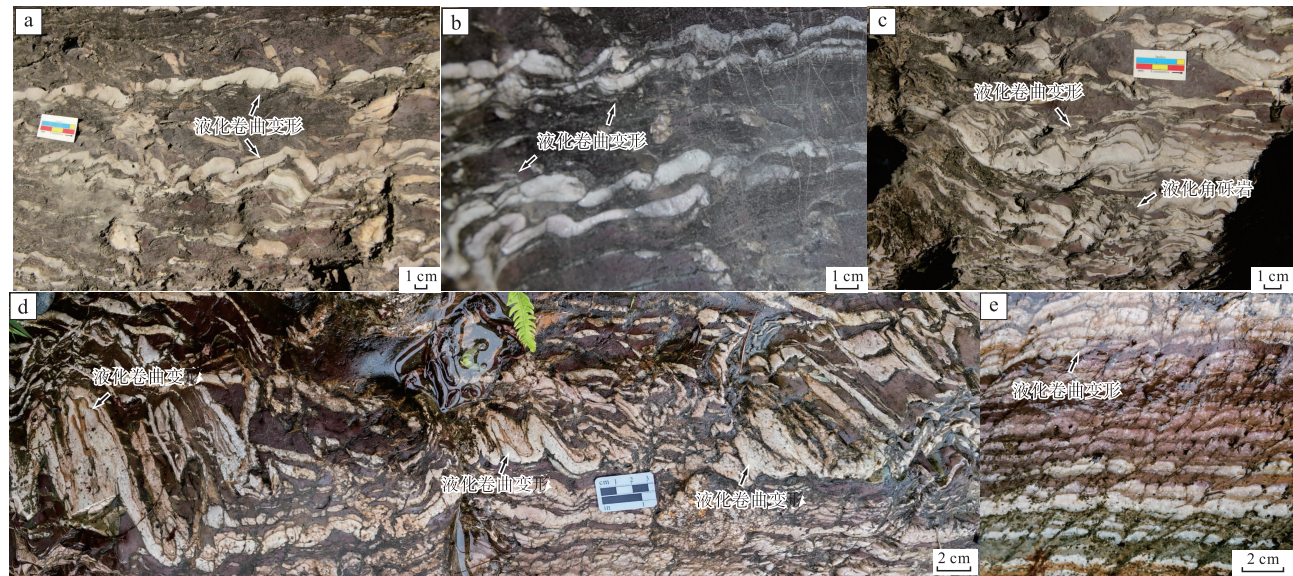
| 变形构造类型 | 岩性特征          | 变形构造形态特征   | 变形构造规模  | 分布层位       |
|--------|---------------|------------|---------|------------|
| 液化脉    | 灰白色灰岩夹紫红色泥岩   | 板状, 纺锤状    | 毫米级—厘米级 | 灯影组三段下部、中部 |
| 液化卷曲变形 | 紫红色泥岩夹灰白色粉晶灰岩 | 平卧变形, 核部增厚 | 毫米级—米级  | 灯影组三段底部、中部 |
| 液化角砾岩  | 紫红色泥岩         | 板状         | 厘米级     | 灯影组三段中上部   |
| 层内断层   | 灰白色粉晶灰岩       | 阶梯状        | 厘米级     | 灯影组三段上部    |



a—灰白色石灰岩夹紫红色泥岩薄互层，泥岩层内发育液化脉（盲脉），灰岩层见液化卷曲变形，林庵寺剖面；b—紫红色泥岩，板状层内液化脉，林庵寺剖面；c—紫红色泥岩，上覆灰白色石灰岩层发生液化侵位，林庵寺剖面；d—灰绿色石灰岩夹紫红色泥岩，液化母源层下发育透镜状液化脉，被劈理及次生脉体切穿，陈家村剖面；e—灰绿色石灰岩夹紫红色泥岩，弯曲液化脉与母源层相连，次生脉体切穿液化母源层，陈家村剖面；f—灰绿色石灰岩夹紫红色泥岩，含硅质岩，灯三段上部，见劈理和次生脉体，不发育液化脉，陈家村剖面

图 2 川北地区灯三段液化脉变形构造

Fig. 2 Liquefied veins deformation structures in the Member 3 of Dengying Formation in northern Sichuan Basin



a—紫红色泥岩夹灰白色石灰岩，灰岩层发育结肠状液化卷曲变形，林庵寺剖面；b—紫红色泥岩，见液化卷曲变形，林庵寺剖面；c—紫红色泥岩夹灰白色石灰岩，灰岩层液化变形作用强烈，变形呈穹顶状，林庵寺剖面；d—紫红色泥岩夹灰白色石灰岩，高幅液化卷曲变形，平面照片，林庵寺剖面；e—紫红色泥岩夹灰白色石灰岩，低幅液化卷曲变形，图 3-d 位置对应垂向照片，林庵寺剖面

图 3 川北地区灯三段液化卷曲变形构造

Fig. 3 Liquefied crinkled deformation structures in the Member 3 of Dengying Formation in northern Sichuan Basin

角较明显，分选及磨圆差(图 4-a, 4-b)。此外，泥岩地层中可见震碎角砾（或称震裂岩），多出现于液化卷曲变形构造的上方，属卷曲变形构造进一

步破碎的产物，具脆性变形特征，沿卷曲变形构造走向迅速破碎为砾屑，砾屑大小不一，多呈条带状或透镜状，与地层层面平行或近平行分布(图 4-c，

4-d)。上述 2 种角砾均属液化作用高潮阶段至衰落阶段的产物 (乔秀夫, 2002)。

## 2.4 层内断层

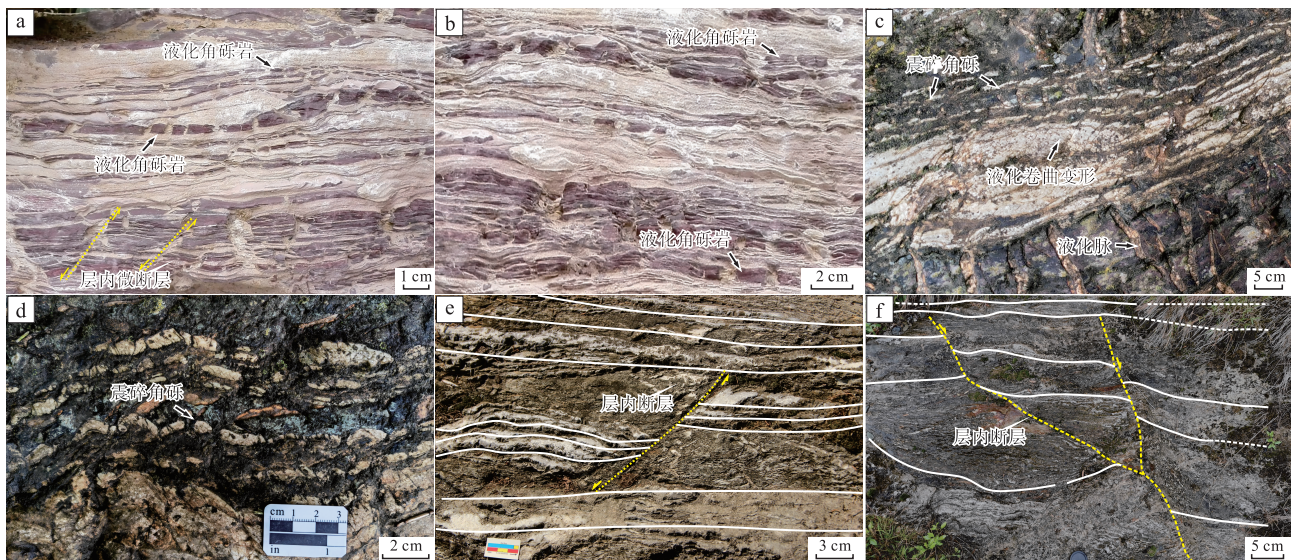
灯三段中部紫红色泥岩地层及其上覆的灰岩地层中可见层内断层, 断层发育层段的上、下岩层均未发生明显的变形, 该类断层多是由于液化作用停止, 沉积物重新遭受压实作用并下沉所致。断层发育地层厚度 3~5 cm, 断距不明显, 断层面与下伏地层夹角为 40°~80°不等 (图 4-a, 4-e, 4-f)。

## 3 成因分析

### 3.1 沉积环境

原地系统的软沉积变形构造由于与周围沉积物多具有相同的成分, 因此可通过原岩的岩石学特征来确定变形构造发生的沉积环境, 并为软沉积变形构造诱发机制判识提供指示。上扬子克拉通自成冰纪结束后表现为海平面快速上升 (汪泽成等, 2019, 2020), 并于陡山沱组下部形成盖帽白云岩, 超覆于 Marinoan 冰期冰碛岩之上 (Jiang *et al.*, 2003), 代表全球气候迅速变暖、沉积环境向清澈浅水转变。灯影组沉积在陡山沱组沉积古地貌之上, 具有一定继承性; 灯一段及灯二段为四川盆地

内宽缓古隆起上填平补齐的结果 (李英强等, 2013); 灯三段属于构造活动活跃期沉积, 四川盆地周缘于成冰纪形成的汉南裂谷盆地、康滇裂谷盆地 (卓皆文等, 2013) 经持续的沉积充填形成古陆并发生构造抬升, 为灯三段沉积提供了充足的陆源碎屑, 在盆地内发育混积陆棚相、混积台地、滨岸相等沉积相带 (邓双林等, 2020; 谭磊等, 2022; 何若玮等, 2023)。川北地区位于裂陷槽东北部边缘, 裂陷槽内由于强烈的构造分异作用多发育盆地相, 而裂陷槽边缘两侧依次发育台地边缘相、台缘后潟湖相及开阔一半局限台地相等沉积相带 (杜金虎等, 2016), 林庵寺灯三段中下部主要发育紫红色薄—中层泥岩夹灰白色薄层石灰岩互层, 水平层理发育; 中部发育浅灰色粉晶灰岩及泥晶白云岩, 见波状层理; 上部发育灰黑色硅质页岩及硅质岩; 顶部见薄层粉砂岩及泥质粉砂岩。典型的沉积学标志指示了研究区处于气候温暖、水体较浅、水动力条件较弱的清水沉积环境, 总体属局限台地相。局限台地为水体运动受限的低洼区域, 其成因或受灯影组二段沉积古地貌及区域性海平面变化的影响 (Yang *et al.*, 2022), 古地貌高部位持续的微生物建隆及多个退积式准层序组构成的海侵体系是阻止沉积水体与广海沟通的关键。在这种浅



a—紫红色泥岩夹灰白色石灰岩, 见液化角砾及层内微断层 (黄色虚线), 林庵寺剖面; b—紫红色泥岩夹灰白色石灰岩, 见液化角砾, 林庵寺剖面; c—紫红色泥岩夹灰白色石灰岩, 液化卷曲变形向上过渡为震碎角砾, 卷曲变形幅度较小, 林庵寺剖面; d—紫红色泥岩夹灰白色石灰岩, 震碎角砾, 林庵寺剖面; e—灰白色薄层石灰岩, 层内断层 (黄色虚线), 图 4-a 上方 3.0 m 处, 林庵寺剖面; f—紫红色泥岩与灰绿色石灰岩互层, 发育层内断层 (黄色虚线), 图 4-a 上方 2.5 m 处, 林庵寺剖面

图 4 川北地区灯三段液化角砾岩及层内断层

Fig. 4 Liquefied breccia and intralayer fault in the Member 3 of Dengying Formation in northern Sichuan Basin

水、低能的沉积环境下(图 5), 排除了由风暴波浪 (Chen and Lee, 2013)、潮汐 (Greb and Archer, 2007)、冻土融化 (钟建华等, 2022) 导致软沉积物变形的可能。区内软沉积物变形构造可能为古地震或沉积负载 (Shanmugam, 2016) 诱发的。

### 3.2 驱动力及变形机制

软沉积变形的驱动力较为复杂, 主要有密度梯度倒置、不均匀负载、孔隙水或其他流体所产生的剪切力、斜坡重力等 (李勇等, 2012)。软沉积变形构造的形成可能受多种驱动力的影响, 这种特征在全球范围内多有体现。如 Alaska 东南部的 Turnagain 海湾潮汐成因的软沉积变形构造除了受潮水的剪切应力外, 还可能受到斜坡重力的影响 (Greb and Archer, 2007)。液化脉作为川北地区灯影组主要的软沉积变形构造, 通过驱动力及变形机制的讨论进而揭示其形成机制, 可有效诠释软沉积变形的发生过程。对研究区灯影组液化脉产状统计并结合球面立体投影分析表明, 液化脉方向大多近平行 (图 6-a) 或垂直 (图 6-b) 于地层面, 指示脉体最大主应力方向来自于近平行或垂直于地层面的方向。理想状态下, 原始沉积状态的地层 (图 7-a) 受应力影响, 产生一系列构造微裂缝 (图 7-b), 此时地层受原始地层应力 ( $\sigma$ ) 及震源施加的剪切应力 ( $\tau$ )。原始地层应力多来源于地层间不稳定的密度梯度或不均匀负载; 而侧向剪切应力多由外部因素施加, 方向并不固定, 但会循环地施加在地层上 (即循环载荷), 是后期不规则分布的液化脉的基础。其次, 受持续循环的剪切应力影响, 可液化层松散堆积的沉积物 (图 7-b<sub>1</sub>) 孔隙

水压力升高, 导致沉积物发生液化, 屈服强度降低, 沉积物由固态向液态转变并逐渐充填构造微裂缝 (图 7-c), 同时颗粒间孔隙水排出 (图 7-c<sub>1</sub>), 沉积物颗粒之间以更加紧密的方式排列 (图 7-c<sub>2</sub>)。随着振动的持续发生, 液化脉在循环载荷及原始地层应力的作用下, 原本直立的脉体发生扭曲 (图 7-d, 7-e), 液化过程的发生取决于震源产生的循环剪切应力与沉积物液化所需的应力间的关系 (Obermeier, 1996), 直至埋深增加或振动减弱, 上覆地层施加的应力远超剪切应力, 导致沉积物抵抗剪切应力带来的形变 (图 7-f), 整个变形过程结束。实际上, 液化作用的发生仅与孔隙流体压力的升高有关, 沉积物液化是颗粒间的支撑向孔隙流体转移的结果 (Owen and Moretti, 2011), 凡是能以一定方式导致孔隙流体压力升高的因素均可诱发液化作用。因此, 川北地区灯三段液化脉的变形机制指示其主要受循环剪切应力及地层应力驱动, 古地震活动及沉积负载均可施加上述 2 种类型的作用力。此外, 受沉积环境限制, 液化卷曲变形、液化角砾岩及层内断层应为剪切力、密度梯度倒置带来的重力及不均匀负载等驱动力复合作用所致, 导致其形成过程及变形机制更为复杂。总体看来, 研究区主要驱动力仍为循环剪切应力及地层应力, 其核心变形机制为液化作用。

### 4 振动液化序列及地质意义

沉积学特征指示软沉积物变形可能由古地震或沉积负载诱发。川北地区灯三段沉积早期桐湾运动 I 幕构造活跃, 区内变形地层厚度近 50 m、振动

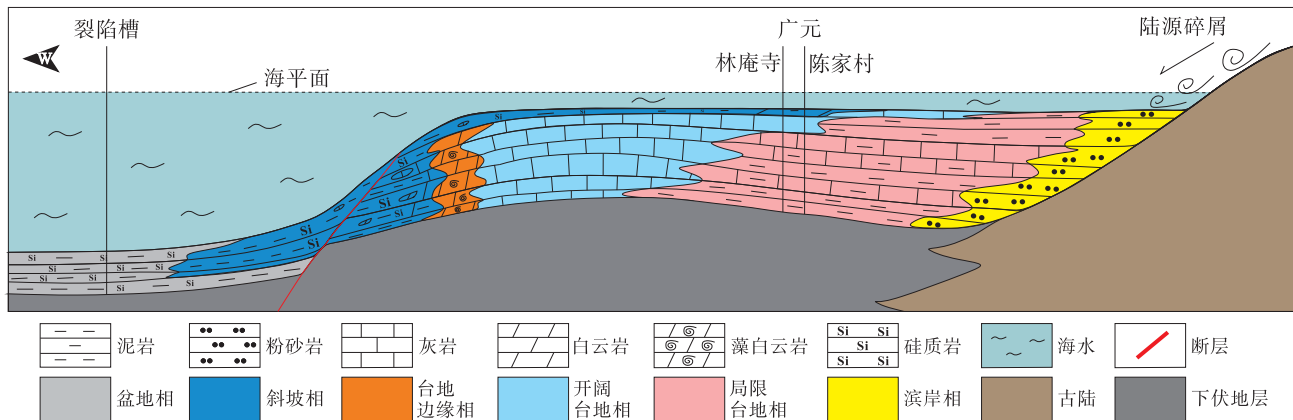
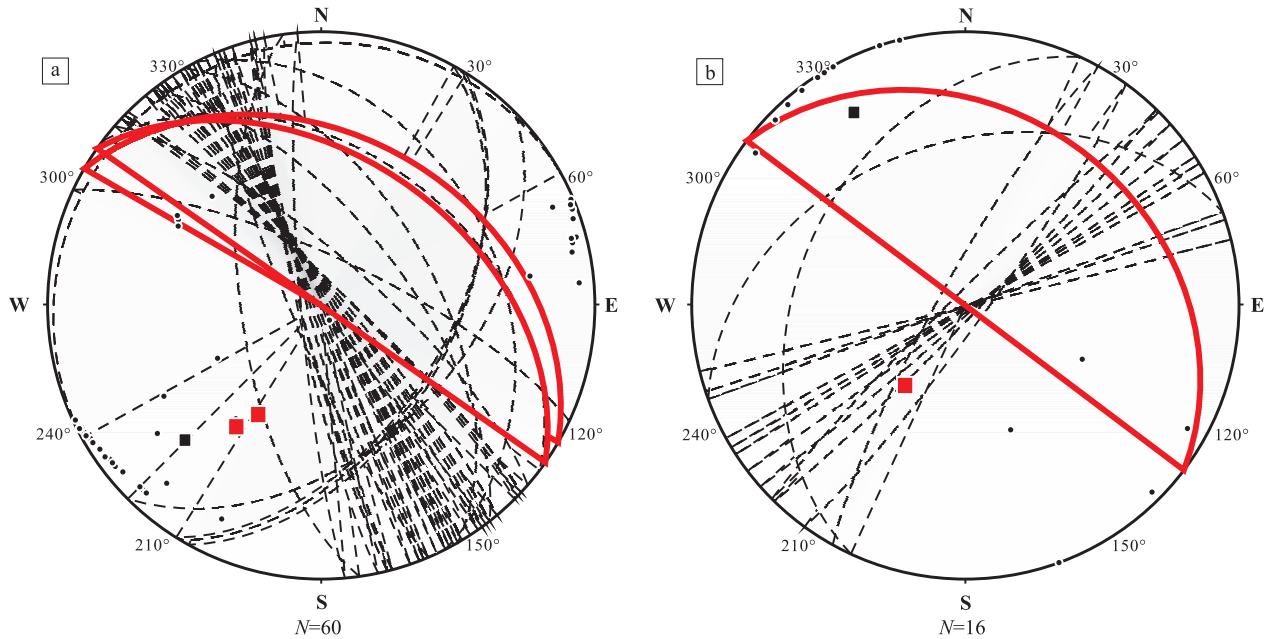


图 5 川北地区灯影组三段沉积模式

Fig. 5 Depositional model of the Member 3 of Dengying Formation in northern Sichuan Basin

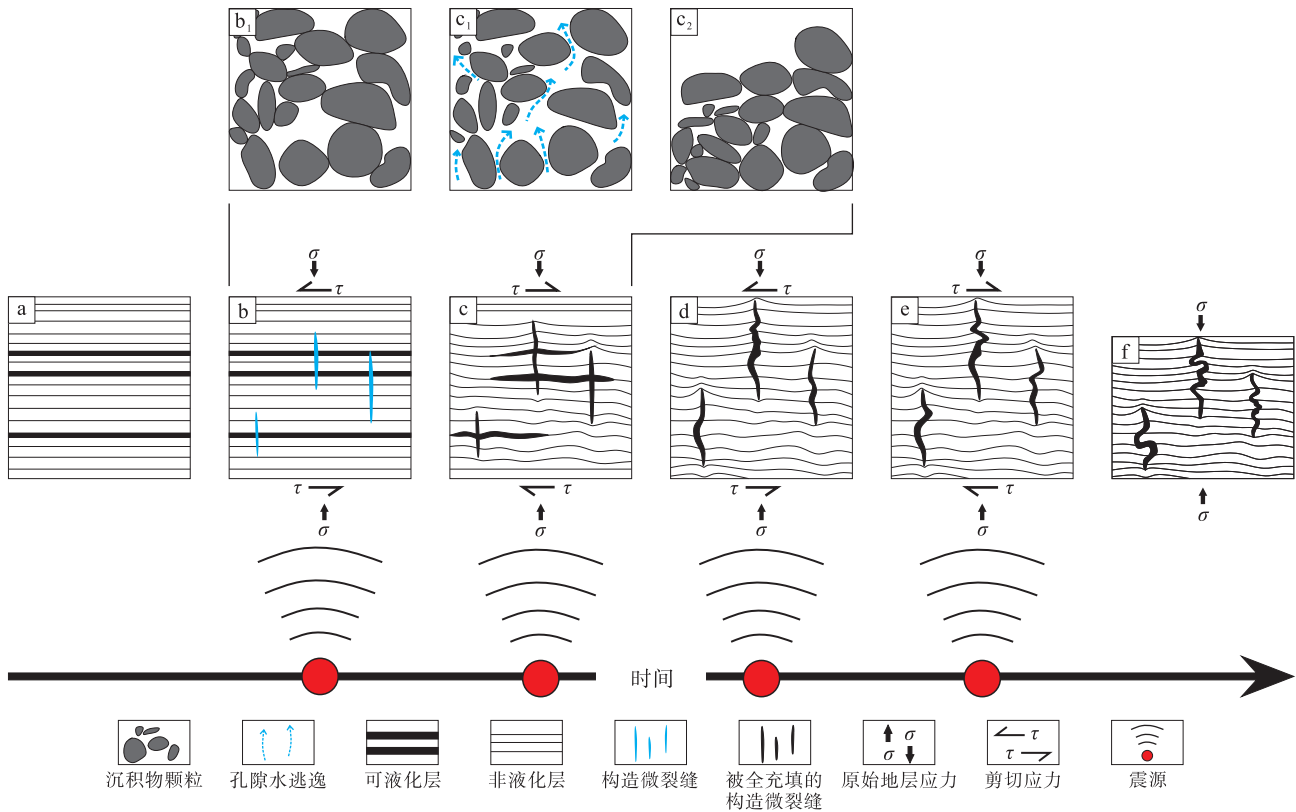


倾角圆心为 90°，圆周为 0°；黑色虚线代表液化脉走向；红色实线代表取样地层层面走向；黑线圆点代表液化脉倾向及倾角；黑色方块代表液化脉倾向矢量平均值；红色方块代表取样地层层面倾向及倾角

a—林庵寺剖面露头位置一，液化脉与地层层面近平行；b—林庵寺剖面露头位置二，液化脉与地层层面近垂直

图 6 川北地区液化脉球面立体投影模式图

Fig. 6 Liquefied vein pattern in polar stereonet in the northern Sichuan Basin



a, b, c, d, e, f—震源能量影响下碳酸盐岩地层发生液化作用的宏观过程；b<sub>1</sub>, c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>—液化作用导致颗粒堆积方式改变（据 Obermeier, 1996）

图 7 液化作用宏—微观过程及理想状态下荷载条件随时间变化示意图

Fig. 7 Macroscopic and microscopic processes of liquefaction and idealized field loading conditions changing with time

影响范围大，且变形构造在纵向序列上具有重复性。这些特征在一定程度上满足地震诱发液化作用的识别标准 (Owen and Moretti, 2011)。此外，区内变形构造还受不均匀负载或不稳定密度梯度施加的纵向应力影响，沉积负载作为液化作用的触发机制也当考虑在内，但陨石撞击或沉积负载诱发液化所形成的变形构造与地震诱发液化形成的变形构造在岩石学特征上并无区别 (Shanmugam, 2016)。沉积环境因素在诱因识别上可提供一定帮助，如液化卷曲变形在构造及成因上更接近火焰或枕状构造，这种负载构造的形成归因于沉积物的机械不稳定性 (Owen, 1987)，多用地震诱导液化作用解释 (Yasuda and Sumita, 2014; Rana *et al.*, 2016)，但同样多见于深水浊流沉积系统，系准同期水流拖曳力、不稳定密度梯度及不均匀负载引起的沉积负载所致 (Sanders, 1965; Oliveira *et al.*, 2009)，与地震活动无关。鉴于区内未发现浊积岩，沉积环境分析指示灯三段应处局限台地内，且灯三段沉积期

相对海平面上升，但过深的水体 (深度超过 20 m) 基本不会诱发地震液化作用 (乔秀夫等, 1994)，所以沉积水体应以相对浅水为主。因此，较浅的水体及尚未固结松散堆积的沉积物使得液化作用成为灯三段沉积物主要的变形机制，而古地震则为区内液化作用主要触发机制。

川北地区灯三段由下至上共识别出 2 期振动液化垂向序列 (序列 I、序列 II)，指示至少 2 次持续的古地震活动事件 (图 8)。软沉积变形构造发育于灯三段中下部紫红色泥岩与灰白色石灰岩中，中上部灰黑色硅质岩及砂岩段不明显，指示构造活动主要发生于灯三段沉积早期，且硅质岩沉积前构造活动基本停止。

其中，序列 I 发育液化卷曲变形、变形强度较高，岩性主要为紫红色薄—中层泥岩夹薄层灰白色石灰岩 (图 8)。序列 I 在剖面中缺失了大量振动特征单元，其典型的液化卷曲变形指示了地震液化阶段的高潮期。在原地系统的碳酸盐岩振动液化地震

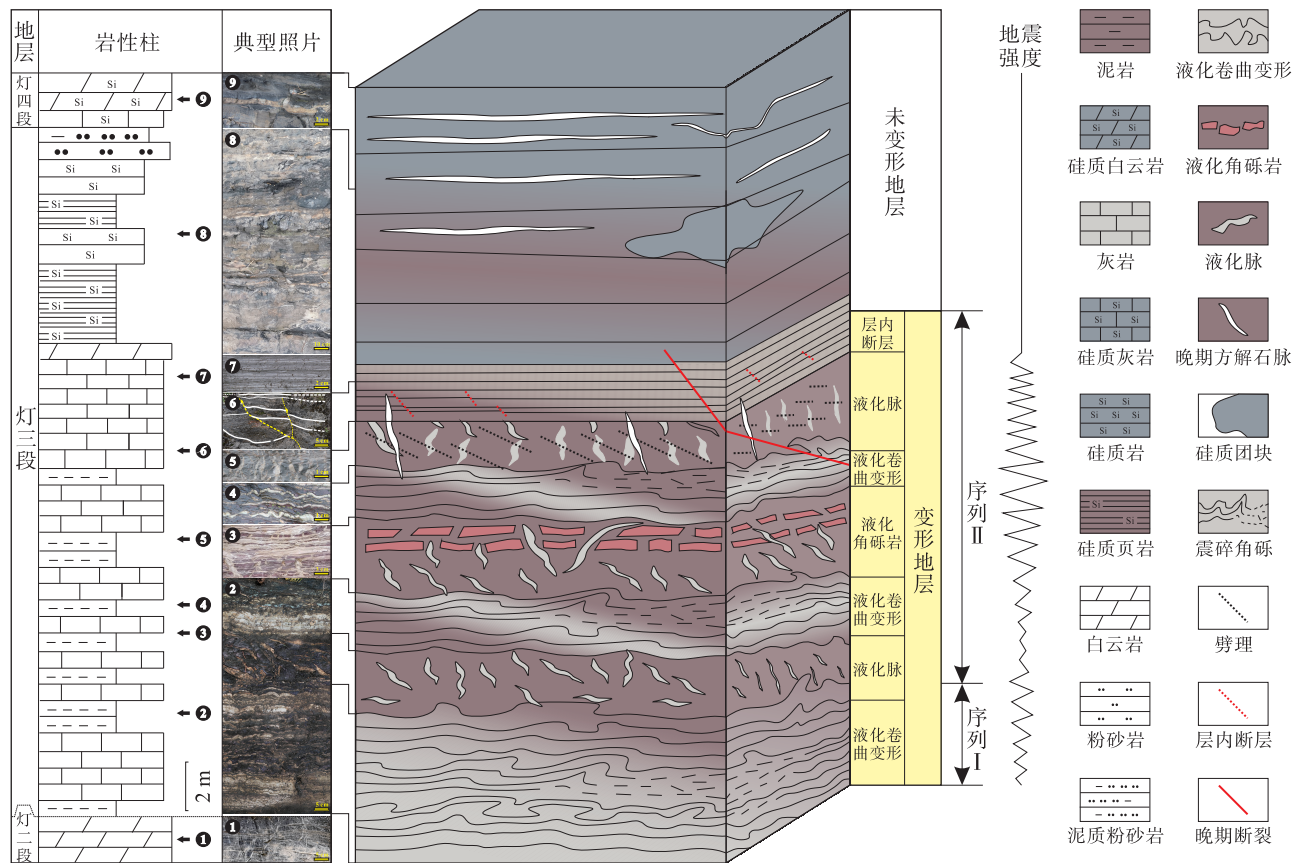


图 8 川北地区灯三段震积序列及结构剖面

Fig. 8 Vertical sequence and architecture model of seismites in the Member 3 of Dengying Formation in northern Sichuan Basin

序列中 (乔秀夫等, 1994), 液化脉应当作为整个地震初期最重要的振动特征单元, 是地震发生数分钟内、近地表 (~ 10 m) 沉积物液化的产物 (Obermeier, 1996), 应当位于振动液化序列的底部。因此, 区内序列 I 中缺失液化脉特征单元, 可能指示桐湾运动 I 幕所引起的地震活动开始于灯二段沉积末期, 并于灯三段沉积初期达到活动高峰期。据已有的微生物岩及碳同位素对桐湾运动 I 幕的响应结果来看, 桐湾运动 I 幕应始于灯二段沉积末期富藻层与贫藻层之间 (杨帅等, 2017)。但现有露头剖面中未发现灯二段存在软沉积变形构造, 不排除构造抬升导致地层缺失的可能性。

序列 II 发育近完整的振动液化序列, 自下而上分别发育液化脉—液化卷曲变化—液化角砾岩—液化卷曲变形—液化脉—层内断层。其中, 液化脉主要属层内液化脉并被上下碳酸盐岩层所限, 未表现出明显穿层性, 总体呈一定的方向性, 应为循环载荷影响的结果; 液化角砾岩主要岩性为紫红色泥岩, 角砾多呈不规则状、棱角较为明显, 局部角砾呈弯曲变形, 该层段底部还发育明显的微型正断层, 表明其受到强烈的拉张作用 (图 3-d; 图 8), 该阶段振动液化作用应为最强; 发育在液化角砾岩上部的液化卷曲变形及液化脉指示了变形强度逐渐减弱, 岩性主要为紫红色薄层泥岩夹灰白色粉晶灰岩 (图 8); 层内断层发育在灰白色薄层粉晶灰岩中、位于整个振动液化序列的顶部 (图 8), 上覆地层及下伏地层的灰岩并没有发生明显变形, 上覆灰岩地层与硅质页岩地层近乎平行, 表明振动液化作用在该阶段继续减弱直至消失, 区域构造活动到达平稳期。

总体看来, 川北地区剖面位置紧邻裂陷槽东侧 (图 1-a), 新元古代裂陷作用可能诱发区内强烈的构造活动。构造活动历程的重塑是区域构造研究中的关键, 通过建立构造活动与地震事件层之间的因果关系, 推测地震事件层发育的时空位置可为构造活动的时间特征提供重要依据, 而软沉积物变形构造的研究是推测地震事件层的关键。广元林庵寺剖面灯影组三段 2 个振动液化地震序列的发现表明, 川北地区在灯三段沉积时存在 2 个地震重要活动期, 指示该时期上扬子克拉通构造活动强烈。此外, 震旦纪 Rodinia 超大陆裂解使许多盆地格局发生根本性改变。如古庐断裂地震带的产生被解释

为中朝板块对 Rodinia 超大陆裂解的响应, 并将统一的中朝板块裂解为华北块体和胶辽朝块体 (乔秀夫, 2002)。胶辽徐淮地区多个碳酸盐岩地层中识别出液化脉构造, 解释为地震成因, 指示沿古庐带强地震事件频发, 标志着板内裂解的发生 (乔秀夫和高林志, 1999)。川北地区所在的扬子克拉通属华南地块, 与华北地块长期处于冈瓦纳大陆与劳亚大陆之间的过渡转换带, 表现出强烈的构造活动性 (何登发等, 2011)。超级地幔柱及裂谷作用从 860 Ma 至 570 Ma 持续影响华南板块 (Li *et al.*, 2008), 且四川盆地震旦系灯影组灯三段沉积火山岩记录也时有报道 (邓胜徽等, 2015; 资金平等, 2017)。桐湾运动 I 幕发育于四川盆地中, 盆地中地震事件与晚震旦世地壳整体抬升、岩浆活动及克拉通内裂谷作用有关, 岩浆活动引起的区域地幔上涌及克拉通内裂谷作用或导致克拉通内部遭受强烈改造, 造成克拉通内裂陷槽 (德阳—安岳裂陷槽) 的形成, 同时盆地北缘诱发频繁地震。

## 5 结论

1) 四川盆地北部广元地区震旦系灯影组三段沉积保存了不同类型的软沉积变形构造组合, 主要有液化脉、液化卷曲变形、液化角砾岩及层内断层, 其变形构造组合特征综合指示属地震成因。

2) 灯三段沉积作用发生在邻近灯二段裂陷槽区域, 属区域伸展大背景下叠合桐湾运动 I 幕的构造活动期, 区域构造运动导致地震活动反复发生, 并在垂向沉积序列中识别出 2 套连续的震积序列, 指示灯二段沉积后地震活动的频繁性与持续性。四川盆地内震旦系克拉通内裂陷槽的发育受区域地壳整体抬升、岩浆活动及克拉通内裂谷作用复合控制, 地震诱发的软沉积物变形构造研究有助于揭示盆地演化过程。

## 参考文献 (References)

- 陈建书, 代雅然, 唐烽, 彭成龙, 张嘉玮, 朱和书, 陈兴, 王文明, 龚桂源. 2020. 扬子地块周缘中元古代末—新元古代主要构造运动梳理与探讨. 地质论评, 66(3): 533-554. [Chen J S, Dai Y R, Tang F, Peng C L, Zhang J W, Zhu H S, Chen X, Wang W M, Gong G Y. 2020. Discussion on the Mesoproterozoic and Neoproterozoic major tectonic events in marginal area of the Yangtze Block. *Geolo-*

- gical Review, 66(3): 533-554]
- 陈明思, 张本健, 李智武, 刘树根, 李勇, 宋金民, 王瀚, 蒋航, 王林康, 徐少立, 丁一. 2023. 四川盆地及周缘震旦系灯影组岩性—碳同位素地层划分及意义. 古地理学报, 25(6): 1347-1363. [Chen M S, Zhang B J, Li Z W, Liu S G, Li Y, Song J M, Wang H, Jiang H, Wang L K, Xu S L, Ding Y. 2023. Lithol and carbon isotopic stratigraphic division and its significance of the Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin and surrounding area. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 25(6): 1347-1363]
- 邓胜徽, 樊茹, 李鑫, 张师本, 张宝民, 卢远征. 2015. 四川盆地及周缘地区震旦(埃迪卡拉)系划分与对比. 地层学杂志, 39(3): 239-254. [Deng S H, Fan R, Li X, Zhang S B, Zhang B M, Lu Y Z. 2015. Subdivision and correlation of the Sinian (Ediacaran) System in the Sichuan Basin and its adjacent area. Journal of Stratigraphy, 39(3): 239-254]
- 邓双林, 宋金民, 刘树根, 罗平, 李智武, 杨迪, 孙玮, 李金玺, 余晶洁, 李立基. 2020. 四川盆地灯影组三段混积特征及其地质意义. 沉积学报, 38(3): 598-609. [Deng S L, Song J M, Liu S G, Luo P, Li Z W, Yang D, Sun W, Li J X, Yu J J, Li L J. 2020. Mixed sedimentary characteristics of the third member of Dengying Formation, Sichuan Basin, and its geological significance. Acta Sedimentologica Sinica, 38(3): 598-609]
- 杜金虎, 汪泽成, 邹才能, 徐春春, 沈平, 张宝民, 姜华, 黄士鹏. 2016. 上扬子克拉通内裂陷的发现及对安岳特大型气田形成的控制作用. 石油学报, 37(1): 1-16. [Du J H, Wang Z C, Zou C N, Xu C C, Shen P, Zhang B M, Jiang H, Huang S P. 2016. Discovery of intra-cratonic rift in the Upper Yangtze and its control effect on the formation of Anyue giant gas field. Acta Petrolei Sinica, 37(1): 1-16]
- 冯增昭, 鲍志东, 郑秀娟, 王媛. 2017. 中国软沉积物变形构造及地震岩研究简评. 古地理学报, 19(1): 7-12. [Feng Z Z, Bao Z D, Zheng X J, Wang Y. 2017. Researches of soft-sediment deformation structures and seismites in China: a brief review. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 19(1): 7-12]
- 高林志, 柳永清. 2005. 河南嵩山地区新元古界何家窑组微亮晶脉特征、成因及地质意义探讨. 地质论评, 51(4): 373-381. [Gao L Z, Liu Y Q. 2005. Microspar Veins in the Neoproterozoic Hejiayao Formation in the Songshan area, Henan Province. Geological Review, 51(4): 373-381]
- 何登发, 李德生, 张国伟, 赵路子, 樊春, 鲁人齐, 文竹. 2011. 四川多旋回叠合盆地的形成与演化. 地质科学, 46(3): 589-606. [He D F, Li D S, Zhang G W, Zhao L Z, Fan C, Lu R Q, Wen Z. 2011. Formation and evolution of multi-cycle superposed Sichuan Basin, China. Chinese Journal of Geology, 46(3): 589-606]
- 何若玮, 孙玮, 李泽奇, 邓宾, 苗如霖, 张长俊, 田腾振, 鲁鹏达. 2023. 川北柳湾乡震旦系灯影组第三段沉积特征及其地质意义. 成都理工大学学报(自然科学版), 50(1): 50-64. [He R W, Sun W, Li Z Q, Deng B, Miao R L, Zhang C J, Tian T Z, Lu P D. 2023. Sedimentary characteristics and geological significance of the third member of Sinian Dengying Formation in Liwanxiang area, northern Sichuan. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 50(1): 50-64]
- 旷红伟, 刘燕学, 孟祥化, 葛铭, 蔡国印. 2004. 吉辽地区新元古代白齿碳酸盐岩岩相的若干岩石学特征研究. 地球学报, 25(6): 647-652. [Kuang H W, Liu Y X, Meng X H, Ge M, Cai G Y. 2004. Sedimentary lithofacies and petrological features of neoproterozoic MT structures-bearing carbonates in Jilin-Liaoning Area. Acta Geoscientica Sinica, 25(6): 647-652]
- 李英强, 何登发, 文竹. 2013. 四川盆地及邻区晚震旦世古地理与构造—沉积环境演化. 古地理学报, 15(2): 231-245. [Li Y Q, He D F, Wen Z. 2013. Late Sinian palaeogeography and tectono-sedimentary environment evolution in Sichuan Basin and adjacent areas. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 15(2): 231-245]
- 李勇, 钟建华, 邵珠福, 毛鑫. 2012. 软沉积变形构造的分类和形成机制研究. 地质论评, 58(5): 829-838. [Li Y, Zhong J H, Shao Z F, Mao C. 2012. An overview on the classification and genesis of soft-sediment deformation structure. Geological Review, 58(5): 829-838]
- 凌文黎, 程建萍, 王歆华, 周汉文. 2002. 武当地区新元古代岩浆岩地球化学特征及其对南秦岭晋宁期区域构造性质的指示. 岩石学报, 18(1): 25-36. [Ling W L, Cheng J P, Wang X H, Zhou H W. 2002. Geochemical features of the Neoproterozoic igneous rocks from the Wudang region and their implications for the reconstruction of the Jinning tectonic evolution along the south Qinling orogenic belt. Acta Petrologica Sinica, 18(1): 25-36]
- 刘树根, 孙玮, 罗志立, 宋金民, 钟勇, 田艳红, 彭瀚霖. 2013. 兴凯地裂运动与四川盆地地下组合油气勘探. 成都理工大学学报(自然科学版), 40(5): 511-520. [Liu S G, Sun W, Luo Z L, Song J M, Zhong Y, Tian Y H, Peng H L. 2013. Xingkai taphrogenesis and petroleum exploration from Upper Sinian to Cambrian Strata in Sichuan Basin, China. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 40(5): 511-520]
- 刘燕学, 柳永清, 旷红伟. 2005. 一种严格受控于环境和时间的特殊碳酸盐岩—白齿构造碳酸盐岩. 地球科学进展, 20(7): 710-716. [Liu Y X, Liu Y Q, Kuang H W. 2005. Molar-tooth carbonate constrained by depositional environment and geological history. Advances in Earth Science, 20(7): 710-716]
- 柳永清, 高林志, 刘燕学. 2005. 苏皖辽地区新元古代微亮晶构造碳酸盐岩的沉积岩相与环境约束. 沉积学报, 23(1): 49-59. [Liu Y Q, Gao L Z, Liu Y X. 2005. Microspar structure carbonate and constrain of sedimentary facies and environments in Jiangsu, Anhui and Liaoning Provinces of the Northern China. Acta Sedimentologica Sinica, 23(1): 49-59]
- 乔秀夫, 高林志, 彭阳, 李海兵. 2001. 古庐带沧浪铺阶段地震事件、层序及构造意义. 中国科学 D 辑, 31(11): 911-918. [Qiao X F, Gao L Z, Peng Y, Li H B. 2001. Seismic events, sequence and tectonic significance of Canglangpu stage in the ancient Tanlu belt. Science China Earth Sciences, 31(11): 911-918]
- 乔秀夫, 高林志. 1999. 华北中新元古代及早古生代地震灾变事件及与 Rodinia 的关系. 科学通报, 44(16): 1753-1758. [Qiao X F,

- Gao L Z. 1999. Neoproterozoic and Early Paleozoic seismic disaster events in the North China Platform and their relationship with Rodinia. *Chinese Science Bulletin*, 44(16): 1753-1758]
- 乔秀夫, 宋天锐, 高林志, 彭阳, 李海兵, 高劼, 宋彪, 张巧大. 1994. 碳酸盐岩振动液化地震序列. *地质学报*, 68(1): 16-34, 101-102. [Qiao X F, Song T R, Gao L Z, Peng Y, Li H B, Gao M, Song B, Zhang Q D. 1994. Seismic sequence in carbonate rocks by vibrational liquefaction. *Acta Geologica Sinica*, 68(1): 16-34, 101-102]
- 乔秀夫. 2002. 中朝板块元古宙板内地震带与盆地格局. *地学前缘*, 9(3): 141-149. [Qiao X F. 2002. Intraplate seismic belt and basin framework of Sino-Korean Plate in Proterozoic. *Earth Science Frontiers*, 9(3): 141-149]
- 宋天锐. 1988. 北京十三陵前寒武纪碳酸盐岩地层中的一套可能的地震—海啸序列. *科学通报*, 33(8): 609-611. [Song T R. 1988. A possible seismic-tsunami sequence in the Precambrian carbonate strata of the Ming Tombs in Beijing. *Chinese Science Bulletin*, 33(8): 609-611]
- 谭磊, 刘宏, 陈康, 倪华玲, 钟原, 谭秀成, 严威, 张旋, 吕文正, 张坤. 2022. 四川盆地高磨地区震旦系灯影组三段+四段镶边台地层序地层、沉积演化与储集层分布预测. *石油勘探与开发*, 49(5): 871-883. [Tan L, Liu H, Chen K, Ni H L, Zhong Y, Tan X C, Yan W, Zhang X, Lü W Z, Zhang K. 2022. Sequence stratigraphy, sedimentary evolution, and reservoir distribution prediction of the third and fourth segments of the Dengying Formation in the Gaomo area of the Sichuan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 49(5): 871-883]
- 汪泽成, 刘静江, 姜华, 黄士鹏, 王坤, 徐政语, 江青春, 石书缘, 任梦怡, 王天宇. 2019. 中—上扬子地区震旦纪陡山沱组沉积期岩相古地理及勘探意义. *石油勘探与开发*, 46(1): 39-51. [Wang Z C, Liu J J, Jiang H, Huang S P, Wang K, Xu Z Y, Jiang Q C, Shi S Y, Ren M Y, Wang T Y. 2019. Lithofacies paleogeography and exploration significance of Sinian Doushantuo depositional stage in the middle-upper Yangtze region, Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 46(1): 39-51]
- 汪泽成, 姜华, 陈志勇, 刘静江, 马奎, 李文正, 谢武仁, 江青春, 翟秀芬, 石书缘, 李琦. 2020. 中上扬子地区晚震旦世构造古地理及油气地质意义. *石油勘探与开发*, 47(5): 884-897. [Wang Z C, Jiang H, Chen Z Y, Liu J J, Ma K, Li W Z, Xie W R, Jiang Q C, Zhai X F, Shi S Y, Li Q. 2020. Tectonic paleogeography of Late Sinian and its significances for petroleum exploration in the middle-upper Yangtze region, South China. *Petroleum Exploration and Development*, 47(5): 884-897]
- 王龙樟, 姚永坚, 林卫兵, 徐行, 肖妍静, 沈奥, 徐乔. 2018. 南海南部沉积物波: 软变形及其触发机制. *地球科学*, 43(10): 3462-3470. [Wang L Z, Yao Y J, Lin W B, Xu X, Xiao J J, Shen A, Xu Q. 2018. Sediment waves in the south of south china sea: soft sediment deformation and its triggering mechanism. *Earth Science*, 43(10): 3462-3470]
- 武赛军, 魏国齐, 杨威, 谢武仁, 曾富英. 2016. 四川盆地桐湾运动及其油气地质意义. *天然气地球科学*, 27(1): 60-70. [Wu S J, Wei G Q, Yang W, Xie W R, Zeng F Y. 2016. Tongwan Movement and its geologic significances in Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 27(1): 60-70]
- 杨帅, 陈洪德, 钟怡江, 朱筱敏, 陈安清, 文华国, 徐胜林, 吴朝盛. 2017. 川西南地区晚震旦世微生物岩及其对桐湾运动 I 幕的响应. *岩石学报*, 33(4): 1148-1158. [Yang S, Chen H D, Zhong Y J, Zhu X M, Chen A Q, Wen H G, Xu S L, Wu Z S. 2017. Microbomite of Late Sinian and its response for Tongwan Movement episode I in Southwest Sichuan, China. *Acta Petrologica Sinica*, 33(4): 1148-1158]
- 张邦花, 田洪水, van Loon A J T. 2017. 新元古代沂沭海峡地震引发的软沉积物变形及其微量元素信息. *古地理学报*, 19(1): 99-116. [Zhang B H, Tian H S, van Loon A J T. 2017. Earthquake-induced soft sediment deformations and their trace-element information in the Neoproterozoic Yishu Strait. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 19(1): 99-116]
- 钟建华, 王冠民, 王夕宾, 吴孔友, 洪梅, 李勇, 倪晋仁. 2002. 黄河下游冰成滑塌与塌陷构造的研究. *沉积学报*, 20(2): 261-266. [Zhong J H, Wang G M, Wang X B, Wu K Y, Hong M, Li Y, Ni J R. 2002. Study on the ice-induced slump and subsidence structures in the lower course of Yellow River. *Acta Sedimentologica Sinica*, 20(2): 261-266]
- 卓皆文, 江新胜, 王剑, 崔晓庄, 熊国庆, 陆俊泽, 刘建辉, 马铭珠. 2013. 华南扬子古大陆西缘新元古代康滇裂谷盆地的开启时间与充填样式. *中国科学: 地球科学*, 43(12): 1952-1963. [Zhuo J W, Jiang X S, Wang J, Cui X Z, Xiong G Q, Lu J Z, Liu J H, Ma M Z. 2013. The opening time and filling pattern of the Neoproterozoic Kangdian Rift basin in the western margin of the Yangtze ancient continent, South China. *Science China Earth Sciences*, 43(12): 1952-1963]
- 资金平, 贾东, 魏国齐, 杨振宇, 张勇, 胡晶, 沈淑鑫. 2017. 四川乐山震旦系灯影组火山碎屑岩锆石 LA-ICP-MSU-Pb 定年及盆地裂陷演化讨论. *地质论评*, 63(4): 1040-1049. [Zi J P, Jia D, Wei G Q, Yang Z Y, Zhang Y, Hu J, Shen S X. 2017. LA-ICP-MS U-Pb Zircon ages of volcanoclastic beds of the third member of the Sinian (Ediacaran) Dengying Formation in Leshan, Sichuan, and a discussion on the rift evolution in the Basin. *Geological Review*, 63(4): 1040-1049]
- Allen J. 1986. Earthquake magnitude-frequency, epicentral distance, and soft-sediment deformation in sedimentary basins. *Sedimentary Geology*, 46(1-2): 67-75.
- Alsop G I, Weinberger R, Marco S, Levi T. 2019. Identifying soft-sediment deformation in rocks. *Journal of Structural Geology*, 125: 248-255.
- Chen J, Lee H S. 2013. Soft-sediment deformation structures in Cambrian siliciclastic and carbonate storm deposits (Shandong Province, China): differential liquefaction and fluidization triggered by storm-wave loading. *Sedimentary Geology*, 288: 81-94.
- Dasgupta P. 2008. Experimental decipherment of the soft-sediment de-

- formation observed in the upper part of the Talchir Formation (Lower Permian), Jharia Basin, India. *Sedimentary Geology*, 205 (3-4): 100-110.
- Greb S F, Archer A W. 2007. Soft-sediment deformation produced by tides in a meizoseismic area, Turnagain Arm, Alaska. *Geology*, 35(5): 435-438.
- Jayanta K P, Anuj K S. 2023. Soft-sediment deformation structures in the mesoproterozoic kaimur sandstone, vindhyan supergroup (central india), and their seismotectonic implications. *Journal of Palaeogeography*, 12(3): 463-486.
- Jiang G, Kennedy M J, Christie-Blick N. 2003. Stable isotopic evidence for methane seeps in Neoproterozoic postglacial cap carbonates. *Nature*, 426(6968): 822-826.
- Jones A P, Omoto K. 2000. Towards establishing criteria for identifying trigger mechanisms for soft-sediment deformation: a case study of Late Pleistocene lacustrine sands and clays, Onikobe and Nakayamadaira Basins, northeastern Japan. *Sedimentology*, 47(6): 1211-1226.
- Li Z X, Bogdanova S, Collins A, Davidson A, De Waele B, Ernst R, Fitzsimons I, Fuck R, Gladkochub D, Jacobs J, Karlstrom K E, Lu S, Natapov L M, Pease V, Pisarevsky S A, Thrane K, Vernikovsky V. 2008. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: a synthesis. *Precambrian Research*, 160(1-2): 179-210.
- Moretti M, Owen G, Tropeano M. 2011. Soft-sediment deformation induced by sinkhole activity in shallow marine environments: a fossil example in the Apulian Foreland (Southern Italy). *Sedimentary Geology*, 235(3-4): 331-342.
- Moretti M, Soria J M, Alfaro P, Walsh N. 2001. Asymmetrical soft-sediment deformation structures triggered by rapid sedimentation in turbiditic deposits (Late Miocene, Guadix Basin, Southern Spain). *Facies*, 44: 283-294.
- Obermeier S F. 1996. Use of liquefaction-induced features for paleoseismic analysis: an overview of how seismic liquefaction features can be distinguished from other features and how their regional distribution and properties of source sediment can be used to infer the location and strength of Holocene paleo-earthquakes. *Engineering Geology*, 44(1-4): 1-76.
- Oliveira C M, Hodgson D M, Flint S S. 2009. Aseismic controls on in situ soft-sediment deformation processes and products in submarine slope deposits of the Karoo Basin, South Africa. *Sedimentology*, 56(5): 1201-1225.
- Owen G. 1987. Deformation processes in unconsolidated sands. *Geological Society, London, Special Publications*, 29(1): 11-24.
- Owen G, Moretti M. 2011. Identifying triggers for liquefaction-induced soft-sediment deformation in sands. *Sedimentary Geology*, 235(3-4): 141-147.
- Owen G, Moretti M, Alfaro P. 2011. Recognising triggers for soft-sediment deformation: current understanding and future directions. *Sedimentary Geology*, 235(3-4): 133-140.
- Panja M, Chakrabarti G, Shome D. 2019. Earthquake induced soft sediment deformation structures in the Paleoproterozoic Vempalle Formation (Cuddapah basin, India). *Carbonates and Evaporites*, 34(3): 491-505.
- Rana N, Sati S P, Sundriyal Y, Juyal N. 2016. Genesis and implication of soft-sediment deformation structures in high-energy fluvial deposits of the Alaknanda Valley, Garhwal Himalaya, India. *Sedimentary Geology*, 344: 263-276.
- Sanders J E. 1965. Primary sedimentary structures formed by turbidity currents and related re-sedimentation mechanisms. In: Middleton G V (ed). *Primary Sedimentary Structures and Their Hydrodynamic Interpretation*, Gerard V. Middleton. Tulsa, OK: Society for Sedimentary Geology.
- Shanmugam G. 2016. The seismite problem. *Journal of Palaeogeography*, 5(4): 318-362.
- Wang J, Li Z X. 2003. History of Neoproterozoic rift basins in South China: implications for Rodinia break-up. *Precambrian Research*, 122(1-4): 141-158.
- Waldron J W F, Gagnon J F. 2011. Recognizing soft-sediment structures in deformed rocks of orogens. *Journal of Structural Geology*, 33(3): 271-279.
- Yasuda N, Sumita I. 2014. Shaking conditions required for flame structure formation in a water-immersed granular medium. *Progress in Earth and Planetary Science*, 1(1): 13.
- Yang Y, Wang Z C, Wen L, Xie W R, Fu X D, Li W Z. 2022. Sinian hydrocarbon accumulation conditions and exploration potential at the northwest margin of the Yangtze region, China. *Petroleum Exploration and Development*, 49(2): 272-284.
- Zhang R, Sun Y, Zhang X, Ao W, Santosh M. 2016. Neoproterozoic magmatic events in the South Qinling Belt, China: implications for amalgamation and breakup of the Rodinia supercontinent. *Gondwana Research*, 30: 6-23.
- Zhong N, Jiang H C, Li H B, Zhang X B, Yang Z, Yu H. 2023. A continuous 18-10.2 ka paleo-earthquake events revealed by the Luobozhai lacustrine sediments, eastern Tibetan Plateau. *Quaternary International*, 673: 40-52.

(责任编辑 王绍华; 英文审校 龚承林)