

川西坳陷须家河组二段风暴沉积特征*

廖哲渊 吕正祥 罗 鑫 邱志强 谢 诚 程炳杰 浩成娃

成都理工大学能源学院(页岩气现代产业学院), 四川成都 610059

摘 要 川西坳陷东坡三叠系须家河组二段(须二段)沉积环境的认识长期存在争议,本研究以新识别的风暴沉积为关键证据,旨在厘清该区须二段沉积环境及风暴沉积发育特征。通过岩心观察、薄片鉴定、粒度分析及地球化学测试等手段,取得了以下认识:(1)川西坳陷东坡须二段广泛发育双向交错层理、浪成交错层理和潮汐束等沉积构造,粒度及地化数据显示该区为能量周期性波动的高能环境,水体性质为半咸水—淡水,指示该区为海相滨岸沉积环境,可进一步划分为前滨、上临滨、中临滨、下临滨 4 种沉积亚相;(2)前滨至中临滨亚相中发育泥砾层、渠模和丘状交错层理等典型风暴沉积构造,在垂向上识别出至少 9 期风暴沉积,其序列以不完整的 A-B-C 型为主,反映了高能、高频的近源风暴沉积特征;(3)在海退背景下,风暴沉积发育带逐渐由临滨向前滨迁移,风暴层厚度表现为早期西南部较厚、晚期东部增厚,指示沉积中心向北东迁移。本研究明确了川西坳陷东坡须二段为风暴扰动的海相滨岸沉积环境,与“西深东浅”的古地理格局共同揭示了“西坳供源、东坡富砂、东部封堵”的成藏要素组合,为该区致密砂岩勘探区优选提供了地质依据。

关键词 古地理环境 风暴沉积 滨岸环境 须家河组二段 三叠系 川西坳陷

第一作者简介 廖哲渊,男,1999 年生,博士研究生,主要从事储集层地质方向的研究工作。E-mail: 352929250@qq.com。

通讯作者简介 吕正祥,男,1965 年生,教授,主要从事储集层地质教学和科研工作。E-mail: lvzhengxiang13@cdut.edu.cn。

中图分类号: P512.32 文献标志码: A

Characteristics of storm deposits in the Member 2 of Triassic
Xujiahe Formation in Western Sichuan Depression

LIAO Zheyuan LÜ Zhengxiang LUO Xin QIU Zhiqiang XIE Cheng CHENG Bingjie HAO Chengwa

College of Energy, Chengdu University of Technology (College of Modern Shale Gas Industry), Chengdu 610059, China

Abstract The depositional environment in the Member 2 of Xujiahe Formation on eastern slope of Western Sichuan Depression has long been controversial. Using newly identified storm deposits as key evidence, this study aims to clarify the depositional environment of the in the Member 2 of Xujiahe Formation and the development characteristics of storm deposits in this area. Based on core observation, thin-section identification, grain-size analysis, and geochemical testing, the following conclusions are obtained: (1) Sedimentary structures such as bidirectional cross-bedding, wave-generated cross-bedding, and tidal bundles are widely developed in the in the Member 2 of Xujiahe Formation on the eastern slope of the western Sichuan Depression. Grain-size and geochemical data indicate that the study area was a high-

* 国家自然科学基金项目(编号: 42472180)资助。[Financially supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 42472180)]

收稿日期: 2025-04-24 改回日期: 2025-08-17

energy environment characterized by periodic energy fluctuations, and that the water body was brackish to freshwater in nature. These features suggest a marine shoreline depositional environment, which can be further subdivided into four sedimentary subfacies: foreshore, upper shoreface, middle shoreface, and lower shoreface. (2) Typical storm-related sedimentary structures, including mud-clast layers, gutter casts, and hummocky cross-stratification, are developed in the foreshore to middle shoreface subfacies. At least nine episodes of storm deposition are vertically identified, and the sequences are dominated by incomplete A - B - C types, reflecting high-energy, high-frequency, and proximal storm depositional characteristics. (3) Against a regressive background, the storm-deposit development belt gradually migrated from shoreface to foreshore. The thickness of storm layers was relatively greater in the southwestern part during the early stage, but became thicker in the eastern part during the late stage, indicating a northeastward migration of the depositional center. The results demonstrate that the Xu 2 Member on the eastern slope of the western Sichuan Depression represents a storm-influenced marine shoreline depositional environment. Together with the paleogeographic framework of “deep in the west and shallow in the east,” these findings reveal a hydrocarbon accumulation element assemblage characterized by “provenance supply from the western depression, sand enrichment on the eastern slope, and sealing in the east,” thereby providing a geological basis for the selection of favorable exploration targets for tight sandstone in the area.

Key words palaeogeographic environment, storm deposits, shoreline environment, the Member 2 of Xujiahe Formation, Triassic, Western Sichuan Depression

About the first author LIAO Zheyuan, born in 1999, is a Ph.D. candidate. He is mainly engaged in reservoir geology. E-mail: 352929250@qq.com.

About the corresponding author LÜ Zhengxiang, born in 1965, is a professor. He is mainly engaged in teaching and scientific research on reservoir geology. E-mail: lvzhengxiang13@cdut.edu.cn.

风暴沉积 (Storm deposits) 是由风暴浪、风暴流及其后续改造形成的事件沉积单元, 常以丘状交错层理、渠模和风暴泥砾层等构造为识别标志, 其垂向序列记录了古风暴强度、频率及沉积动力演化过程, 是恢复古气候、古地理格局和沉积环境的重要载体 (Kelling and Mullin, 1975; Aigner, 1979; Duke, 1985)。目前针对海相和陆相风暴沉积研究已较为成熟, 但海陆过渡相因受潮汐、波浪及物源混合等多重动力共同控制, 其原始沉积构造易被破坏, 导致对该环境中风暴沉积的识别尚未有统一认识 (曾建理等, 2024)。

晚三叠世时期四川盆地处于扬子板块西缘与古特提斯洋演化带交汇部位, 沉积环境受构造活动、物源供给及海陆过渡动力过程共同控制, 因此对须家河组沉积体系的认识长期存在分歧 (Jiang *et al.*, 2023)。传统观点多将须家河组解释为辫状河—湖泊三角洲沉积体系, 并认为川西坳陷须家河组二段 (须二段) 主要发育辫状河三角洲前缘河口坝或滨

浅湖滩坝 (王兴龙, 2021; Gou *et al.*, 2024); 但也有研究依据潮汐韵律层、双向交错层理及双黏土层等构造, 提出该区可能属于潮控河口湾、潮控三角洲甚至海湾环境 (罗启后, 1983; 赵霞飞和张闻林, 2011; 赵霞飞等, 2013; Shi *et al.*, 2022; 朱思成等, 2025)。可见, 须二段沉积环境争议的关键在于其是否持续受海洋动力影响, 而风暴沉积的发现可为这一问题提供重要的沉积学证据。

尽管在四川盆地须家河组已发现较多风暴沉积记录, 但相关研究主要集中于川北、川中和川东等地区, 针对川西坳陷须二段风暴沉积的系统研究仍较少, 仅在坳陷西侧局部地区见少量风暴层 (赵霞飞等, 2013; 曾建理等, 2024)。川西坳陷东坡作为四川盆地上三叠统须家河组油气资源最富集的地区之一, 厘清该区须二段是否发育稳定的风暴沉积序列, 其形成是否受潮汐—波浪混合动力控制, 不仅有助于揭示海陆过渡环境下风暴沉积的形成机制与发育模式, 也对恢复该区须二段古地理格局和

指导致密砂岩气勘探具有重要意义。基于此，本研究综合岩心观察、薄片鉴定、粒度分析及地球化学资料，系统识别川西坳陷东坡须二段风暴沉积构造与序列类型，重新厘定其沉积环境，并探讨风暴沉积的时空展布特征，为四川盆地须家河组二段古地理格局恢复及油气勘探提供依据。

1 区域地质概况

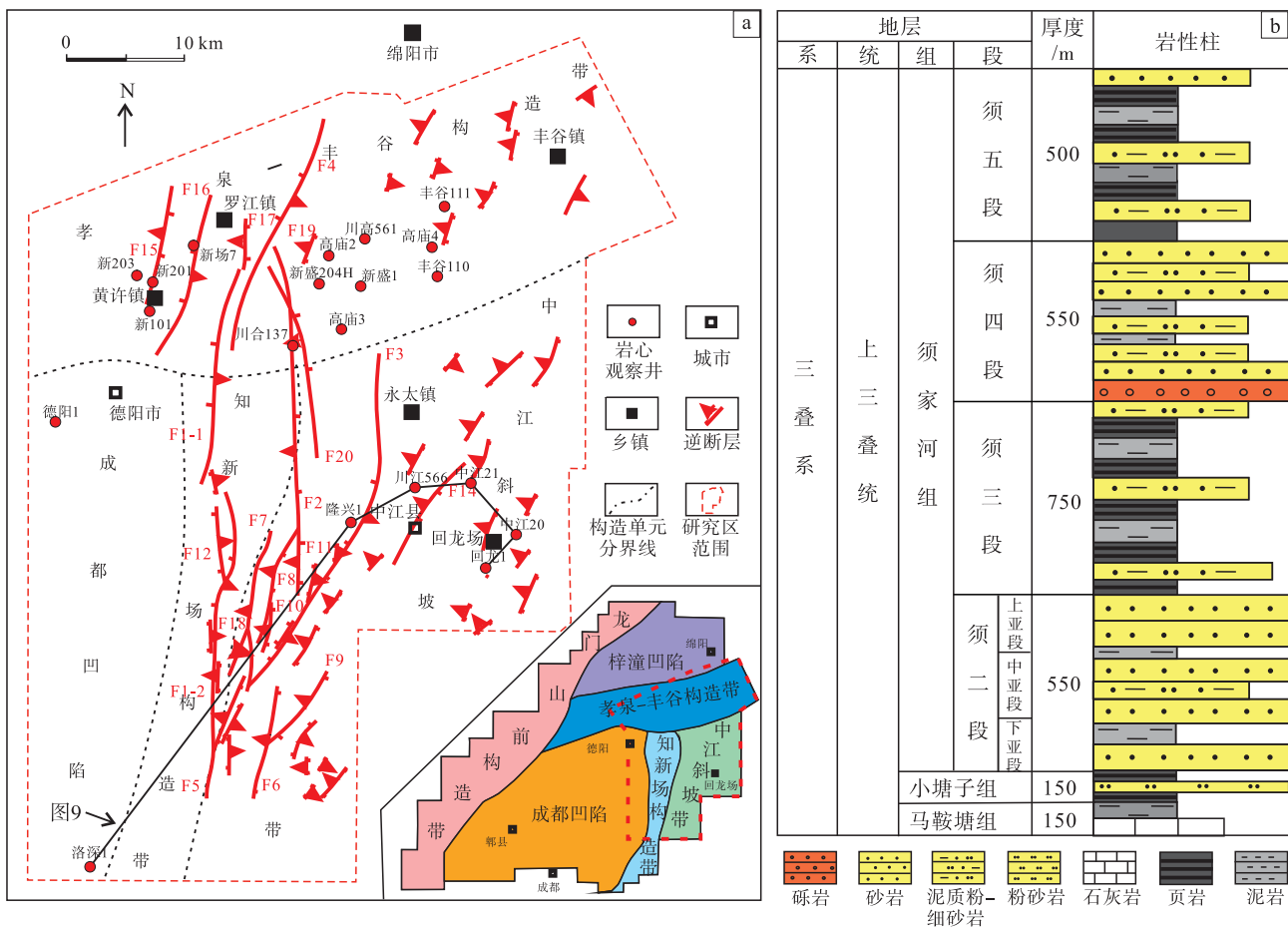
晚三叠世卡尼期至诺利期，四川盆地位于扬子板块的西北缘（Jin *et al.*, 2019; Tian *et al.*, 2025），受印支期构造挤压与龙门山造山带逆冲推覆影响，盆地西缘持续挠曲沉降，形成以川西坳陷为主的沉降中心（Burchfiel *et al.*, 1995），沉积了巨厚的须家河组。川西坳陷位于四川盆地西部，内部可划分成 6 个次级构造单元（Huang *et al.*, 2020），研究

区选取川西坳陷东部斜坡（图 1-a），构造相对稳定，沉积构造特征丰富。本研究采用区内常用的五段划分方案，将须家河组自下而上划分为须一段至须五段（图 1-b），其中研究目的层位须二段以灰色中—厚层块状细—粗粒砂岩为主，夹黑色、深灰薄层泥岩及粉砂岩（Liu *et al.*, 2019），根据基准面旋回变化可进一步细分为上亚段、中亚段、下亚段 3 个亚段。

2 岩心观察与室内实验分析

2.1 岩心观察与样品采集

研究观察了中江斜坡带 5 口井、孝泉—丰谷构造带 13 口井，以及成都坳陷西部的德阳 1 井和洛深 1 井，共 20 口井，覆盖研究区大部分构造单元及须二段 3 个亚段，能代表研究区的整体情况



a—区域构造图；b—地层柱状图

图 1 川西坳陷东坡须家河组二段区域构造、地层与岩心观察井分布图

Fig. 1 Regional structure, stratigraphy, and core observation well distribution map in the Member 2 of Xujiache Formation, eastern slope of Western Sichuan Depression

(图 1)。对 20 口井须二段岩心进行了详细描述、拍照和采样,重点记录岩石组合、颜色、沉积构造组合及岩性相变界面等特征,以明确沉积相类型及其分布,并采集 188 块岩心样品开展测试分析。

2.2 实验方法及技术流程

1) 岩石薄片显微分析

为重建研究区须二段沉积时水动力强度、搬运距离及沉积环境特征,选取 45 块代表性样品制备茜素红染色薄片,使用 Axio Scope A1 pol 偏光显微镜系统观察矿物成分、结构特征、自生矿物类型等,为沉积环境分析提供了可靠的岩石学依据。

2) 薄片粒度分析

为解析该区沉积环境能量及沉积物搬运机制,识别高能事件性搬运作用对沉积物的改造特征,选取 26 块典型薄片展开粒度参数研究,使用 Axio Scope A1 偏光显微镜结合 Image-Pro Plus 9.0 图像分析系统,通过显微图像采集代表性视域,基于等效圆直径法精准测量单颗粒粒径,计算平均粒径 M_z 、分选系数 σ_1 、偏度 S_{k1} 及峰态 K_G ,绘制累积频率曲线及 C-M 图(冯增昭, 1993)。

3) 原位激光碳氧同位素分析

为重建该区古盐度,揭示沉积时水体来源,选取了 5 块偏光下见连晶方解石胶结且颗粒为点一漂浮接触的 30 μm 薄片样品进行原位激光碳氧同位素分析(Liu *et al.*, 2021),采用 Thermo Scientific MAT253 稳定同位素质谱仪搭载 ESI NWR 激光剥蚀系统,使用 193 nm ArF 激光微区取样,剥蚀产物经 O_2 反应池氧化为 CO_2 气体并纯化后,引入 MAT253 质谱仪,在离子源电子能量 70 eV 加速电压 10 kV 下测定 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值,共获得 8 组点位数据。

4) 微区元素分析

为示踪该区沉积时期水体的地球化学特征,使用激光剥蚀—电感耦合等离子体质谱仪对 8 块样品的 30 μm 抛光薄片进行微区元素分析(Lü *et al.*, 2015)。以 NIST 610/612 标样校准仪器,氦气载流传输气溶胶,ICP-MS 跳峰模式采集 B-U 同位素信号,内标法实时校正基体效应,数据经 Glitter 软件处理,计算元素均值 Mean、两倍标准误差 2SE 及 Pettke 法检出限 LOD,共获得 48 组元素分析数据。

5) 扫描电镜分析

为明确该区自生矿物类型及特征,分析自生矿

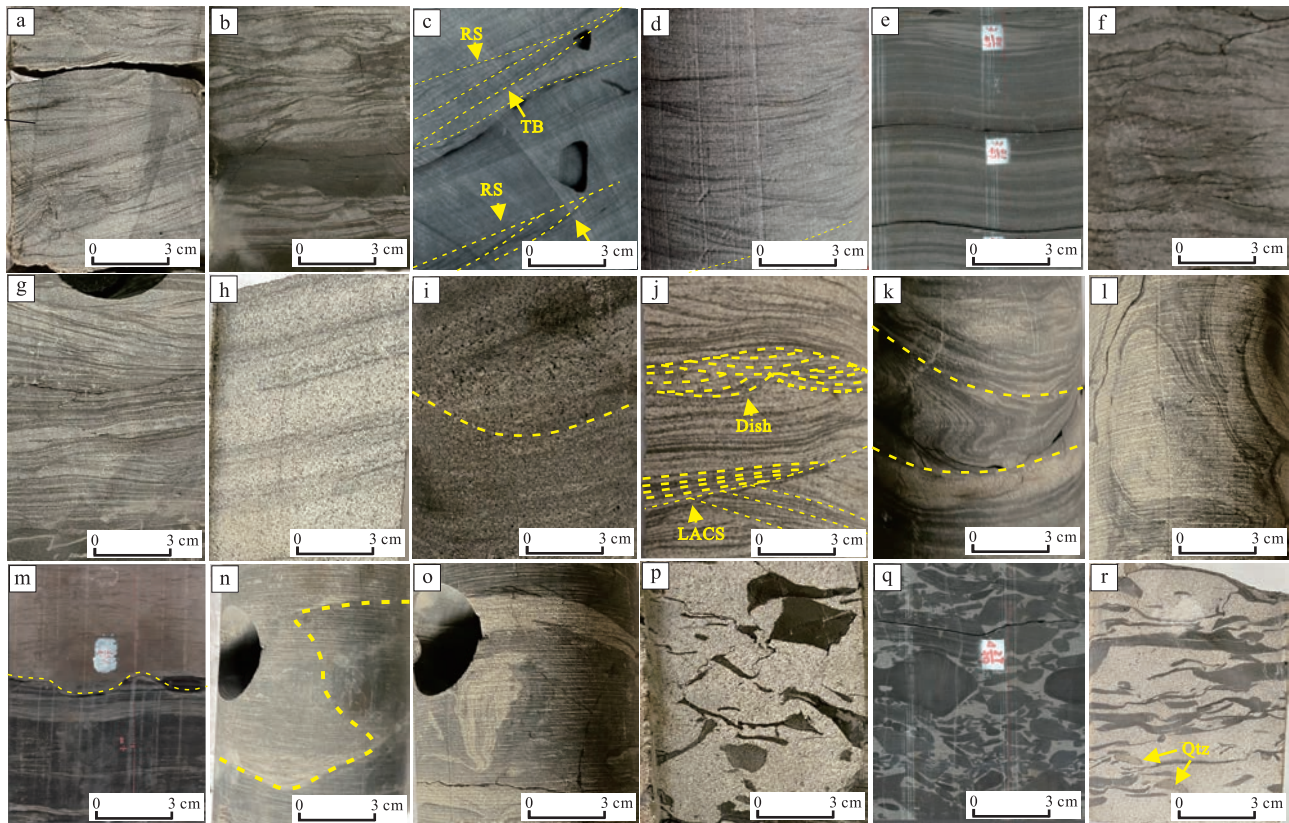
物形成时期,支撑沉积环境的重建,选取 6 块岩石样品经乙醇清洗喷镀 5 nm 金膜,采用 CARL ZEISS EVO MA15/LS15 扫描电子显微镜进行分析,识别如黄铁矿、绿泥石、伊利石等自生矿物的形态特征。

3 沉积学证据及环境指示

3.1 典型沉积构造及成因分析

川西拗陷东坡须二段岩心中识别出多种与潮汐—波浪作用有关的典型沉积构造。双向交错层理发育于上亚段、中亚段中—细砂岩中(图 2-a),上下相邻纹层倾向相反,反映潮流方向的周期性反转,常见于潮间带环境。透镜状—脉状层理见于中亚段泥质粉—细砂岩中(图 2-b),表现为砂、泥岩薄层交互出现,反映潮流能量周期性变化。潮汐束及再作用面发育于粉—细砂岩中(图 2-c),其中潮汐束记录了砂质纹层的阶段性加积,再作用面则指示不同期次潮流作用下对沉积物的反复改造。双黏土层和潮汐韵律层见于中亚段、下亚段泥质粉—细砂岩中(图 2-d, 2-e),表现为砂泥薄层韵律性叠置,反映潮流强弱交替及泥质的周期性沉降,是典型的潮汐作用沉积响应(朱思成等, 2025)。波浪作用方面,浪成交错层理发育于上亚段、中亚段中—细砂岩中(图 2-f),纹层呈波状起伏并具较对称形态,为波浪往复振荡流作用的产物。此外还可见沙纹层理、平行层理和槽状交错层理,分别发育于须二中亚段、上亚段细—粉砂岩及中—细砂岩中(图 2-g, 2-h, 2-i),反映研究区砂体在沉积过程中持续受到较强牵引流改造。

川西拗陷东坡同时广泛发育一系列与风暴事件有关的沉积构造。中亚段上部粉—细砂岩中发育丘状交错层理(图 2-j),岩心尺度下表现为宽缓起伏的纹层组合,内部可见低角度削切面(LACS)及局部碟状构造(Dish),反映沉积期流体能量在侵蚀与堆积之间频繁摆动,并指示局部存在旋涡式回流,是风暴作用形成的典型沉积构造(李向东, 2020)。变形层理和包卷层理发育于中亚段下部(图 2-k, 2-l),为未固结细粒沉积物在高频事件振荡作用下发生液化和塑性变形的结果(张廷山等, 2017; 尚俊鑫等, 2025)。冲刷面为高能水流或波浪侵蚀形成的突变界面(图 2-m),箱型渠模



a—双向交错层理, 中江 20 井, 4280.05 m; b—透镜状和脉状层理, 中江 20 井, 4275.81 m; c—潮汐束 (TB) 及再作用面 (RS), 新场 7 井, 4278.69 m; d—双黏土层, 中江 21 井, 4205.10 m; e—潮汐韵律层, 中江 21 井, 4205.78 m; f—浪成交错层理, 中江 20 井, 4295.28 m; g—沙纹层理, 中江 20 井, 4273.33 m; h—平行层理, 中江 20 井, 4159.53 m; i—槽状交错层理, 川江 566 井, 4309.88 m; j—丘状交错层理 (HCS/SCS), 内部可见低角度削切面 (LACS) 及碟状构造 (Dish), 中江 20 井, 4279.92 m; k—变形层理, 高庙 3 井, 4921.8 m; l—包卷层理, 川江 566 井, 4314.2 m; m—冲刷面, 中江 20 井, 4294.07 m; n—箱型渠模, 川江 566 井, 4317.88 m; o—生物潜穴, 川江 566 井, 4457.86 m; p—撕裂状泥砾, 中江 20 井, 4298.3 m; q—分选差的泥砾层, 中江 21 井, 4212.1 m; r—顺层分布泥砾, 中江 20 井, 4197.27 m

图 2 川西坳陷东坡须家河组二段沉积构造特征

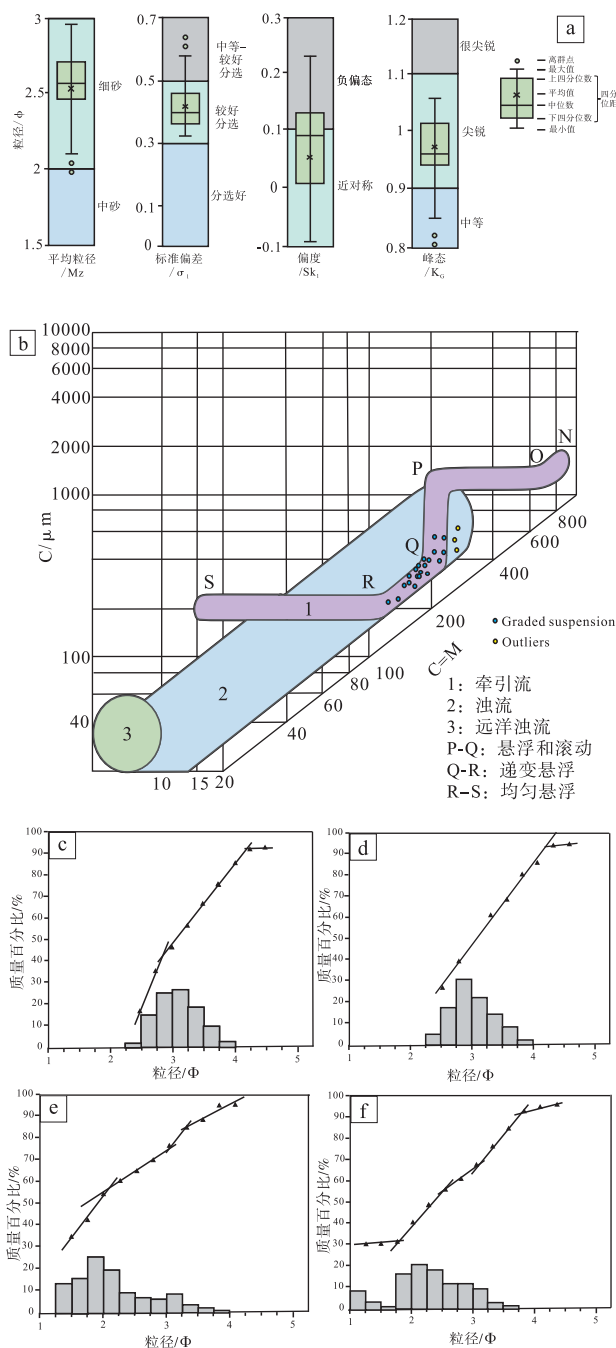
Fig. 2 Sedimentary structural characteristics in the Member 2 of Xujiahe Formation, eastern slope of Western Sichuan Depression

呈近箱形或口袋状 (图 2-n), 为高流态条件下风暴涡流强烈侵蚀底床的产物 (汪俊伟等, 2018)。此外, 中亚段上部及下亚段上部可见直立—近直立潜穴 (图 2-o), 反映底栖生物活动。17 口钻井中普遍发育泥砾富集层, 可分为 2 类: 一类为撕裂状、不定向分布的泥砾层 (图 2-p, 2-q), 泥砾成分以黑色页岩为主, 形态多呈弯曲片状或漩涡状, 分选差且不定向分布, 指示风暴高峰期对底部泥质沉积物的强烈侵蚀、撕裂与快速再沉积, 为典型风暴泥砾层 (曾建理等, 2024); 另一类泥砾呈定向平行分布 (图 2-r), 分选相对较好, 反映其在事件沉积后期又经历了单向流改造。综上, 须二段沉积过程中以持续的潮汐—波浪改造为主, 并受风暴事

件影响, 表现出明显的复合水动力特征。

3.2 粒度分析特征及环境指示

粒度参数表明, 研究区砂岩样品平均粒径 M_z 主体分布在细粒区间, 分选系数 σ_1 为“好”, 偏度 S_{K1} 以近对称分布为主, 峰态 K_G 中等 (图 3-a), 说明沉积物经历了较充分的反复搬运和再分选作用, 但少量样点偏离主体分布范围, 反映研究区存在两种不同的沉积环境。C-M 中样点主体分布于 P-Q 段和 Q-R 段 (图 3-b), 指示同时存在底负载搬运和递变悬浮为主的牵引流沉积, 该类搬运特征常见于能量存在周期性变化的滨岸浅水环境, 仅少数样点落入浊流区, 可能为风暴诱发的重力流或碎屑流沉积。累积概率曲线以“高斜一段式”、“高



a—粒度参数判别箱型图; b—C-M 分布特征图; c—平行、块状层理砂岩, “高斜两段式”, 潮汐一波浪改造滨岸砂体, 中江 20 井, 4195.56 m; d—板状层理中砂岩, “高斜一段式”, 滨岸沉积, 中江 20 井, 4162.96 m; e—含泥砾中砂岩, “低斜多跳一悬式”, 强风暴沉积, 中江 20 井, 4198.75 m; f—含泥砾中砂岩, “低斜多跳多悬式”, 强风暴沉积, 中江 20 井, 4083 m

图 3 川西坳陷东坡须家河组二段粒度特征及判别图

Fig. 3 Grain-size characteristics and discriminant plots in the Member 2 of Xujiahe Formation, eastern slope of Western Sichuan Depression

斜二段式”为主, 直方图尖锐单峰, 主峰 Φ 均值 2.73~2.84, 无尾部延伸且分选极佳(图 3-c, 3-d), 反映跳跃总体占优势、悬浮组分较少, 常见于滨岸带受波浪持续冲洗及潮汐往复作用下形成强重分选沉积。而粒度参数中异常值样点为“低斜多跳一悬式”或“低斜多跳多悬式”(图 3-e, 3-f), 反映非稳态事件如风暴带来的粗砾沉积或细粒物质悬浮特征。粒度特征表明须二段为潮汐一波浪控制下的高能滨岸沉积, 局部受风暴事件影响。

3.3 镜下岩石薄片证据及指示

川西坳陷东坡须二段岩石薄片观察、碎屑组定量表征结果显示石英含量均值达 70% 以上, 如果扣除须二段砂岩中所含的内源泥岩岩屑, 碎屑石英含量接近 90%, 石英含量极高(图 4-a), 砂岩整体以中粒为主, 颗粒次圆, 分选较好, 指示为高能沉积环境(图 4-b, 4-c; 图 5-a, 5-b)。黏土矿物以绿泥石为主, 特别是发育埋藏早期的包壳状和衬垫状绿泥石(图 5-c, 5-d), 这种绿泥石形成时间早, 基本可以反映同沉积时期的水体性质, 绿泥石形成于弱碱性弱还原环境。在东坡的中江 20 井、川江 566 井等须二段砂岩中见颗粒状海绿石, 其原生环境为潮下带浅部, 发育成熟后被波浪、潮汐或风暴作用短距离搬运至滨岸环境, 与陆源石英碎屑混合形成含海绿石细砂岩(张涛, 2018), 指示该区为临近潮下带的滨岸沉积(图 5-e)。须二段砂岩中虽然黄铁矿含量总体不高, 但镜下较为常见, 扫描电镜下呈草莓状特征, 粒径 1~2 μm , 通常于准同生期或成岩作用早期在氧化还原界面附近形成, 反映其沉积时存在暴露—淹没界面(王天顺等, 2025), 该区为受潮汐一波浪影响下的滨岸沉积环境(图 5-f)。

3.4 微量元素特征及指示

选取川西坳陷东坡须二段 8 块具连晶方解石胶结物的薄片进行微量元素分析, 样品颗粒均呈点—漂浮接触(图 5-b), 指示方解石形成于同生期或浅埋藏期。微量元素分析结果显示样品 Mn/Sr 均值 0.9, 说明样品中 Sr 受后期改造有限, 可用于辅助判别沉积环境。水体中元素的含量与盐度具有密切关系, 可根据元素含量和比值判别其古盐度信息(熊小辉和肖加飞, 2011; Wei and Algeo, 2020), 研究区须二段砂岩样品的 B 含量均值 76.8 $\mu g/g$,

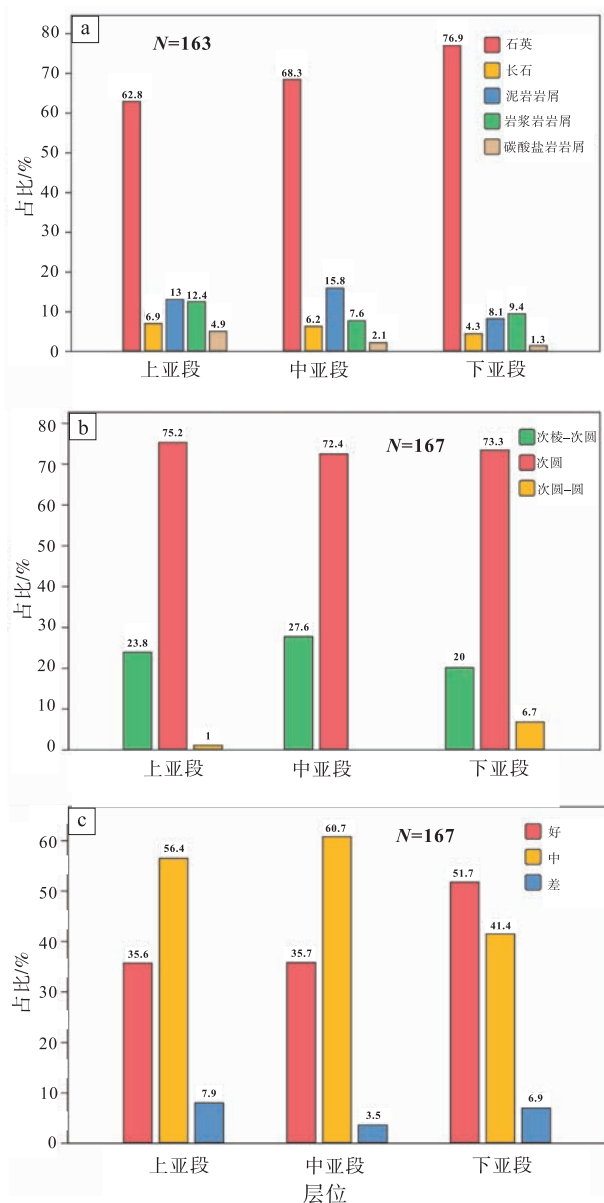


图 4 川西坳陷东坡须家河组二段岩矿组分特征

Fig. 4 Characteristics of petrological and mineralogical compositions in the Member 2 of Xujiahe Formation, eastern slope of Western Sichuan Depression

介于淡水与半咸水之间；Zr/Rb 均值为 4.07，反映高能环境下强水动力分选特征。氧化还原敏感元素比值法可用于判别沉积环境的氧化还原特征 (McManus *et al.*, 2006)，Th/U 均值为 2.37，接近 Th/U > 3 的强氧化阈值，指示沉积界面存在间歇性暴露或氧化—还原波动 (王旭影和姜在兴, 2021)，Co/Ni 均值为 1.8，Fe/Mn 均值为 11.2，V/Cr 均值为 0.2，V/(V+Ni) 均值为 0.5，Cu/Zn 均值为 1.1，指示为氧化环境及受陆源环境输入影响

(表 1)，微量元素分析结果指示为淡水—咸水混合环境、强水动力、具氧化—还原界面的沉积环境。

后太古宙澳大利亚页岩 (Post-Archean Australian Shale) 可反映上地壳稀土元素的平均丰度，故采用 PAAS 标准化方法分析研究区样品的稀土元素配分模式 (Taylor and McLennan, 1985)。结果表明，样品 ΣREE 为 25.73~26.91 $\mu\text{g/g}$ ，均值 26.19 $\mu\text{g/g}$ ，稀土元素总体含量较低，结合前述强水动力的分选作用，可能为高能环境下的石英稀释效应。PAAS 标准化结果显示，Ce/Ce* 为 1.13~1.18，均值 1.16，表现为弱正 Ce 异常；Eu/Eu* 为 0.72~1.13，均值 0.93，无明显 Eu 异常。其标准化配分模式曲线整体呈低幅平坦型 (图 6)，表明沉积物未受强烈海水蚀变或热液流体改造，为陆源碎屑经强水动力分选后快速埋藏的产物。综合微量元素和稀土元素分析 (表 2)，该区为陆源主控下，水体低盐度，以氧化环境为主，局部见氧化—还原界面的高能沉积环境为主，与滨岸带高能环境、潮间带的周期暴露与淹没及海陆过渡带受淡水影响的环境相契合，指示该区为潮汐—波浪控制下的滨岸沉积环境。

3.5 碳氧同位素特征及指示

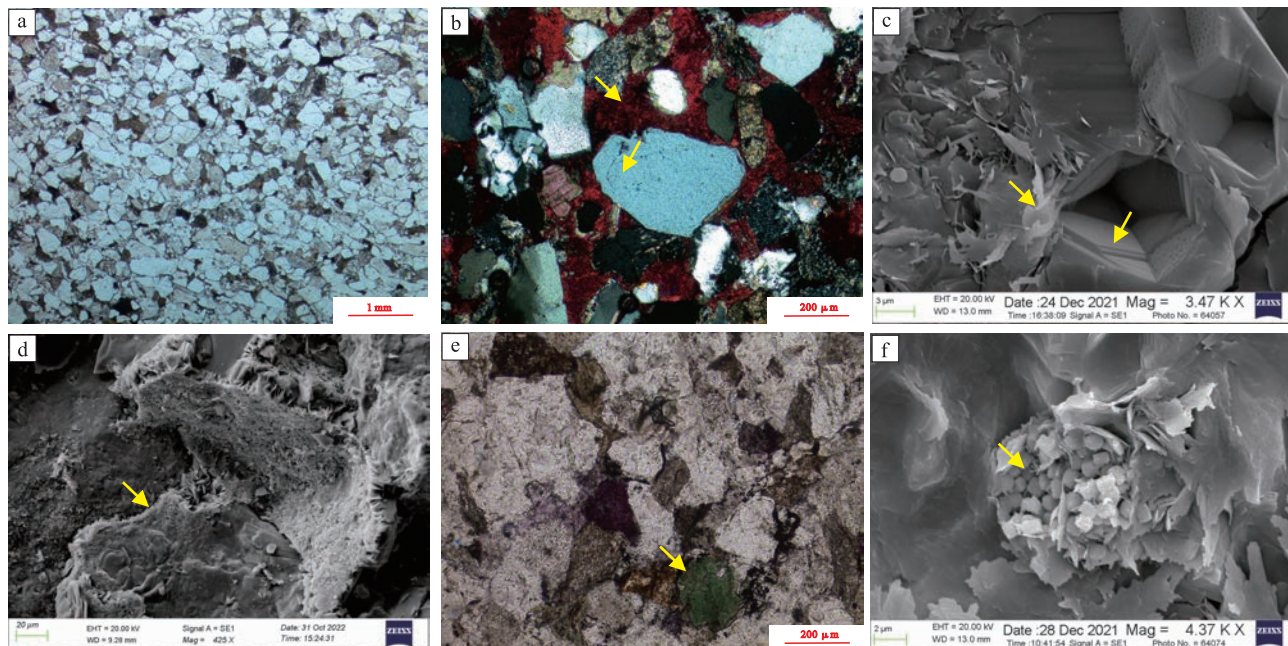
碳氧同位素在沉积环境研究中具有重要的指示作用， $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 主要反映有机碳的来源、古生产力以及碳循环过程，而 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 则主要受控于古温度和古盐度的变化，二者结合可识别古环境 (Kolodny, 1980)。通过对原位激光碳氧同位素测定的结果显示，中江斜坡带中江 20 井样品呈 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 弱正偏 (0.29‰ ~ 2.16‰) 与 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 负偏 (-4.52‰ ~ -7.25‰) 特征 (表 3)，采用 Keith 和 Weber (1964) 的经验公式计算古盐度 (3-1)：

$$Z = 2.048 \times (\delta^{13}\text{C} + 50) + 0.498 \times (\delta^{18}\text{O} + 50) \quad (3-1)$$

式中 Z 为计算的古盐度，Z > 120 为咸水，Z < 120 为淡水，Z 值接近 120 时说明其古流体为咸水—淡水共同作用 (Keith and Weber, 1964)。并通过 Friedman 和 O'Neil (1977) 的 $\delta^{18}\text{O}$ 方解石—水分馏方程计算方解石的形成温度 (3-2)：

$$1000 \ln \alpha_{(\text{方解石-水})} = 2.78 \times 10^6 \times T^{-2} - 2.89 \quad (3-2)$$

式中 $\alpha_{(\text{方解石-水})} = (1 + (\delta^{18}\text{O}_{\text{方解石}}/1000)) / (1 + (\delta^{18}\text{O}_{\text{流体}}/1000))$ ；T 为绝对温度； $\delta^{18}\text{O}_{\text{流体}}$ 值参考邻区同期地层参数估算 (刘四兵等, 2014)。古温度和古盐度的恢复结果显示，中江斜坡带样品 Z 值大于 120，古地温



a—岩屑石英砂岩, 川江 566 井, 4509.6 m, 下亚段, (-); b—颗粒次圆、石英加大及碳酸盐胶结, 中江 20 井, 4072.53 m, (+); c—石英加大及片状伊利石, 中江 20 井, 4196.67 m, SEM; d—颗粒间衬垫状绿泥石, 德阳 1 井, 5595.08 m, SEM; e—颗粒状海绿石, 川江 566 井, 4075.72 m, (-); f—草莓状黄铁矿, 中江 20 井, 4196.67 m, SEM

图 5 川西坳陷东坡须家河组二段岩矿微观特征

Fig. 5 Microscopic characteristics of rocks and minerals in the Member 2 of Xujiahe Formation, eastern slope of Western Sichuan Depression

分布在 3.1~34.6 °C, 孝泉—丰谷构造带样品 Z 值小于 120, 古地温主体分布在 25.8~34.7 °C, 样品 Z 值分布在 120 临界值附近及两侧, 指示其为咸水—淡水过渡环境, 因上三叠统须家河组不具备发育咸化湖盆条件 (刘金华等, 2007), 因此, 研究区 Z 值接近 120 的碳酸盐胶结物指示其形成于受海水影响的过渡环境, 这也说明早期碳酸盐胶结物沉淀水体为淡水—海水混合 (Walker and Surge, 2006)。对于超过 80 °C 的丰谷 110 井样品, 因研究区烃源岩在 80 °C 左右普遍已进入生烃门限 (沈忠民等, 2009), 有机质生烃过程中有机成因的低 $\delta^{13}\text{C}$ 值进入碳酸盐矿物, 导致 Z 值计算值偏低, 其指示的淡水环境并不可靠。碳氧同位素分析结果说明该区沉积时水体主要为海水—淡水混合环境, 指示为海陆过渡带的沉积环境, 可支撑该区为潮汐—波浪控制下的海相滨岸沉积环境解释。

4 风暴沉积纵横向演化特征

4.1 沉积演化特征

基于上述沉积环境认识, 并参考经典碎屑岩滨

岸沉积模式 (Walker and Plint, 1992), 将研究区须二段划分为 4 类亚相: 前滨亚相受波浪持续淘洗, 发育平行、块状层理的中砂岩, 粒度曲线呈“高斜一段式”, 自然伽马 (GR) 曲线呈低幅平直箱型; 上临滨亚相位于碎浪带, 以中—细砂岩为主, 见双向交错层理, GR 曲线呈微齿化箱型—漏斗型; 中临滨亚相见浪成交错层理、沙纹层理、潮汐束, 反映潮汐与波浪的复合作用, GR 曲线呈齿化钟型或漏斗型; 下临滨亚相水体能量弱, 以粉砂岩、泥岩为主, 见透镜状层理、水平层理及生物潜穴, 粒度悬浮组分占比高, GR 曲线呈高幅锯齿型或指型。此外, 建立了风暴岩微相识别图版, 其底部为含泥砾中砂岩, GR 曲线呈齿化中值钟型特征, 粒度曲线呈“低斜多段式”, 向上过渡为具丘状层理的风暴砂岩 (图 7), 记录了风暴由高峰期到衰减期的过程。

根据沉积相识别及测井解释结果, 研究区须二段滨岸沉积体系在垂向上构成 1 套完整的向上变粗序列, 并叠置多期风暴事件沉积。以中江 20 井为例, 须二段下亚段以砂泥岩薄互层为特征, 发育浪

表 1 川西坳陷东坡须家河组二段砂岩中连晶方解石胶结物微量元素测量及计算数据

Table 1	Measured and calculated trace element data of poikilotopic calcite cements in sandstones in the Member 2 of Xujiahe Formation, eastern slope of Western Sichuan Depression																												
	样品号	B	Al	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Zr	Ba	Th	U	Mn/Sr	Zr/Rb	Sr/Ba	Fe/Mn	Ti/Al	Th/U	Co/Ni	V/Cr	V/(V+Ni)	Cu/Zn	
		/μg·g ⁻¹																											
	CJ-1	69.2	8081.8	226.7	3.4	21.4	65.7	713.0	5.7	3.1	40.4	38.5	34.2	70.3	140.8	342.7	1.6	0.7	0.9	4.1	0.2	10.9	0.028	2.4	1.9	0.2	0.5	1.0	
	CJ-2	76.3	7755.9	224.2	3.3	22.2	65.3	756.0	5.3	3.2	40.0	34.5	33.0	67.4	138.9	333.8	1.5	0.6	1.0	4.2	0.2	11.6	0.0289	2.5	1.7	0.2	0.5	1.2	
	CJ-3	78.0	7920.2	221.9	3.5	21.5	63.8	717.3	5.7	3.2	40.4	37.2	35.2	71.5	139.9	339.3	1.5	0.7	0.9	4.0	0.2	11.2	0.0280	2.3	1.8	0.2	0.5	1.1	
	CJ-4	79.0	7833.6	228.0	3.3	19.7	64.4	722.2	5.7	3.6	38.3	34.2	34.2	65.0	139.8	333.9	1.6	0.6	1.0	4.1	0.2	11.2	0.0291	2.6	1.6	0.2	0.5	1.1	
	CJ-5	74.2	7659.8	223.3	3.6	18.4	64.0	723.8	6.2	3.2	38.6	35.4	33.8	71.3	138.0	329.3	1.5	0.6	0.9	4.1	0.2	11.3	0.0292	2.4	1.9	0.2	0.5	1.1	
	CJ-6	76.1	7693.4	222.9	3.4	24.2	63.2	704.4	6.1	4.2	39.3	37.2	34.6	71.1	137.1	336.4	1.6	0.7	0.9	4.0	0.2	11.1	0.029	2.2	1.5	0.1	0.5	1.1	
	CJ-7	78.0	8006.3	227.1	3.4	21.1	64.9	719.5	5.9	2.5	38.2	38.1	34.4	68.5	143.1	331.6	1.7	0.7	0.9	4.2	0.2	11.1	0.028	2.5	2.3	0.2	0.6	1.0	
	CJ-8	83.5	7804.2	226.7	3.4	22.0	62.9	690.7	5.3	3.2	41.3	37.8	34.3	69.0	136.0	330.0	1.6	0.7	0.9	4.0	0.2	11.0	0.029	2.1	1.7	0.2	0.5	1.1	
	均值	76.8	7844.4	225.1	3.4	21.3	64.3	718.4	5.7	3.3	39.6	36.6	34.2	69.3	139.2	334.6	1.6	0.7	0.9	4.1	0.2	11.2	0.029	2.4	1.8	0.2	0.5	1.1	

注：微量元素数据来源于实测结果，未经过标准化。

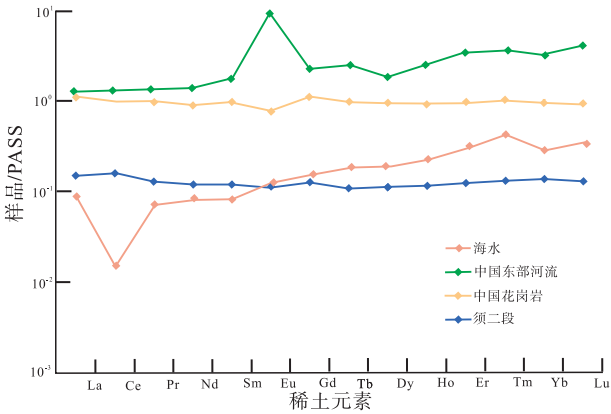


图 6 川西坳陷东坡须家河组二段稀土元素配分模式
Fig. 6 REE (rare earth element) distribution patterns in the Member 2 of Xujiahe Formation, eastern slope of Western Sichuan Depression

成交错层理、潮汐束等构造，其上部出现以丘状交错层理、粒序层理及风暴泥砾层为代表的风暴沉积；中亚段由下部富泥的下临滨沉积过渡为上部中临滨块状砂岩；须二段上亚段则以低幅箱型 GR 为特征，发育厚层块状、波状层理的前滨沙坝（图 8）。这一垂向演化特征表明，须二段沉积期研究区整体经历了由相对较深水的临滨环境向更近岸高能前滨环境的持续转化。SW-NE 向连井剖面进一步显示，须二段下亚段临滨沙坝横向连续性一般，而中亚段上部至上亚段前滨沙坝厚度明显增大、横向连续性增强（图 9），反映海退过程中高能砂体逐步向盆地方向进积并扩展。与之对应，剖面上多期风暴层的发育部位亦随高能滨岸带迁移。

4.2 风暴沉积序列

基于川西坳陷东坡须二段岩心观察及测井解释结果，并参考梁桂香（1994）提出的五段式理想风暴沉积序列（A-B-C-D-E），共识别出 A-B-C、A-B-C-D、A-B-E 和 A-E 共 4 类主要风暴沉积垂向组合，其垂向序列普遍不完整。其中，A-B-C 型（占比 45%）及 A-B-C-D 型（占比 10%）为渐进衰减序列（图 10-a），以中江 20 井、洛深 1 井为代表，A 段为含泥砾粗砂岩，底部发育大型冲刷面，泥砾多呈撕裂状、不定向分布；B 段为正粒序砂岩；C 段为发育平行层理及小型波状交错层理的细砂岩—粉砂岩互层；D 段可见丘状交错层理，代表风暴能量相对缓慢衰减。A-B-E 型（占比 25%）和 A-E 型（占比 20%）则为突变型序列

表 2 川西坳陷东坡须家河组二段砂岩中连晶方解石胶结物稀土元素测量及计算数据
Table 2 Measured and calculated rare earth element (REE) data of poikilotopic calcite cements in sandstones
in the Member 2 of Xujiache Formation, eastern slope of Western Sichuan Depression

样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	ΣLREE	Ce/Ce*	Eu/Eu*
/μg·g ⁻¹																		
CJ-1	5.83	12.86	1.17	4.17	0.65	0.14	0.53	0.11	0.49	0.12	0.32	0.05	0.41	0.06	26.91	24.82	1.14	1.13
CJ-2	5.49	12.74	1.12	4.04	0.63	0.09	0.55	0.09	0.51	0.11	0.35	0.06	0.38	0.05	26.21	24.11	1.18	0.72
CJ-3	5.68	12.68	1.09	3.95	0.55	0.11	0.52	0.06	0.48	0.10	0.37	0.06	0.43	0.06	26.14	24.06	1.17	0.97
CJ-4	5.46	12.36	1.12	4.06	0.68	0.13	0.61	0.07	0.52	0.12	0.38	0.05	0.41	0.06	26.03	23.81	1.15	0.95
CJ-5	5.52	12.23	1.03	4.04	0.60	0.14	0.61	0.08	0.53	0.11	0.37	0.05	0.36	0.06	25.73	23.56	1.18	1.09
CJ-6	5.79	12.51	1.12	3.83	0.75	0.11	0.67	0.10	0.58	0.11	0.35	0.05	0.34	0.06	26.37	24.11	1.13	0.73
CJ-7	5.64	12.52	1.11	3.64	0.60	0.11	0.59	0.08	0.54	0.12	0.35	0.06	0.38	0.06	25.8	23.62	1.15	0.87
CJ-8	5.50	12.53	1.12	4.25	0.76	0.14	0.64	0.08	0.54	0.12	0.35	0.05	0.38	0.06	26.52	24.3	1.16	0.95
均值	5.61	12.55	1.11	4.00	0.65	0.12	0.59	0.08	0.52	0.11	0.35	0.05	0.39	0.06	26.19	24.05	1.16	0.93

注：稀土元素数据为实测数据，ΣREE、ΣLREE 分别为实测的所有稀土元素总量和轻稀土元素（La-Eu）总量，Eu/Eu*、Ce/Ce* 均基于 PAAS 标准化后数据计算，Eu/Eu* 异常计算公式： $[Eu/Eu]^* = \frac{Eu_N}{\sqrt{Sm_N \times Gd_N}}$ 及 Ce/Ce* 异常计算公式： $Ce/Ce^* = \frac{Ce_N}{\sqrt{La_N \times Pr_N}}$ ，其中 PAAS 标准化参考值（μg/g）：La=38.2，Ce=79.6，Pr=8.83，Nd=33.9，Sm=5.55，Eu=1.08，Gd=4.66，Tb=0.774，Dy=4.68，Ho=0.991，Er=2.85，Tm=0.405，Yb=2.82，Lu=0.433（Taylor and McLennan, 1985），下标 N 表示 PAAS 标准化值，计算方法为 REE_{sample}/REE_{PAAS} 。

表 3 川西坳陷东坡须家河组二段方解石微区碳氧同位素数据
Table 3 Carbon and Oxygen isotope data of calcite microzones in the Member 2 of Xujiache Formation,
eastern slope of Western Sichuan Depression

样品号	井号	构造分区	亚段	深度/m	δ ¹⁸ O _{PDB} /‰	δ ¹³ C _{PDB} /‰	Z	T/℃
ZJ-1	中江 20	中江斜坡带	须二上亚段	4069.96	-4.523	2.163	129.4	3.1
ZJ-4	中江 20	中江斜坡带	须二上亚段	4070.12	-7.251	0.293	124.2	10.4
ZJ-2	中江 20	中江斜坡带	须二上亚段	4078.97	-5.77	0.888	126.2	34.6
ZJ-3	中江 20	中江斜坡带	须二上亚段	4079.01	-7.214	0.772	125.2	8.4
FG-1	丰谷 110	孝泉—丰谷构造带	须二上亚段	4629.84	-6.093	-4.948	114.1	34.7
FG-2	丰谷 110	孝泉—丰谷构造带	须二上亚段	4629.62	-9.356	-8.063	106.1	86.1
GM-1	高庙 3	孝泉—丰谷构造带	须二上亚段	4881	-7.964	-3.166	116.8	25.8
GM-2	高庙 2	孝泉—丰谷构造带	须二上亚段	4713.86	-8.104	-4.301	114.4	31.4

（图 10-b），前者以中江 21 井为代表，后者见于中江 21 井、新盛 204H 井、川江 566 井等井。其共同特征是 A 段明显增厚，且 A 段或 B 段顶部被 E 段深灰色泥岩突变覆盖，缺乏过渡岩性。A 段普遍发育分选差的泥砾、陡峭冲刷面及快速堆积形成的粗碎屑层，反映风暴高峰期强底床侵蚀及粗颗粒快速卸载，而 A 段增厚可能与底床强烈下切形成局部冲刷空间并促使粗碎屑快速集中堆积有关，其后水动力迅速由高能牵引流转为静水悬浮沉降，使 C、D 段未及发育或未被保存。总体上，研究区未见完整五段式风暴序列，A 段普遍发育的冲刷面和不定向泥砾层反映强侵蚀与快速沉积，而 A-B-E、

A-E 型序列中 A 段的明显增厚及中上部层段的突变缺失，则说明其沉积过程更为突发、侵蚀性更强、能量衰减更快，结合多期不完整序列的反复叠置特征，表明研究区风暴沉积具有近源、高能和高频发育的特点。

4.3 风暴层时空发育特征

川西坳陷须二段风暴层的发育特征在时空上表现出显著的规律性，为解析沉积环境演化提供了关键证据。通过系统识别沉积构造、沉积相类型、风暴层厚度及最大泥砾面积，综合刻画研究区基于测井解释的须二段沉积相平面图，为高能风暴沉积区

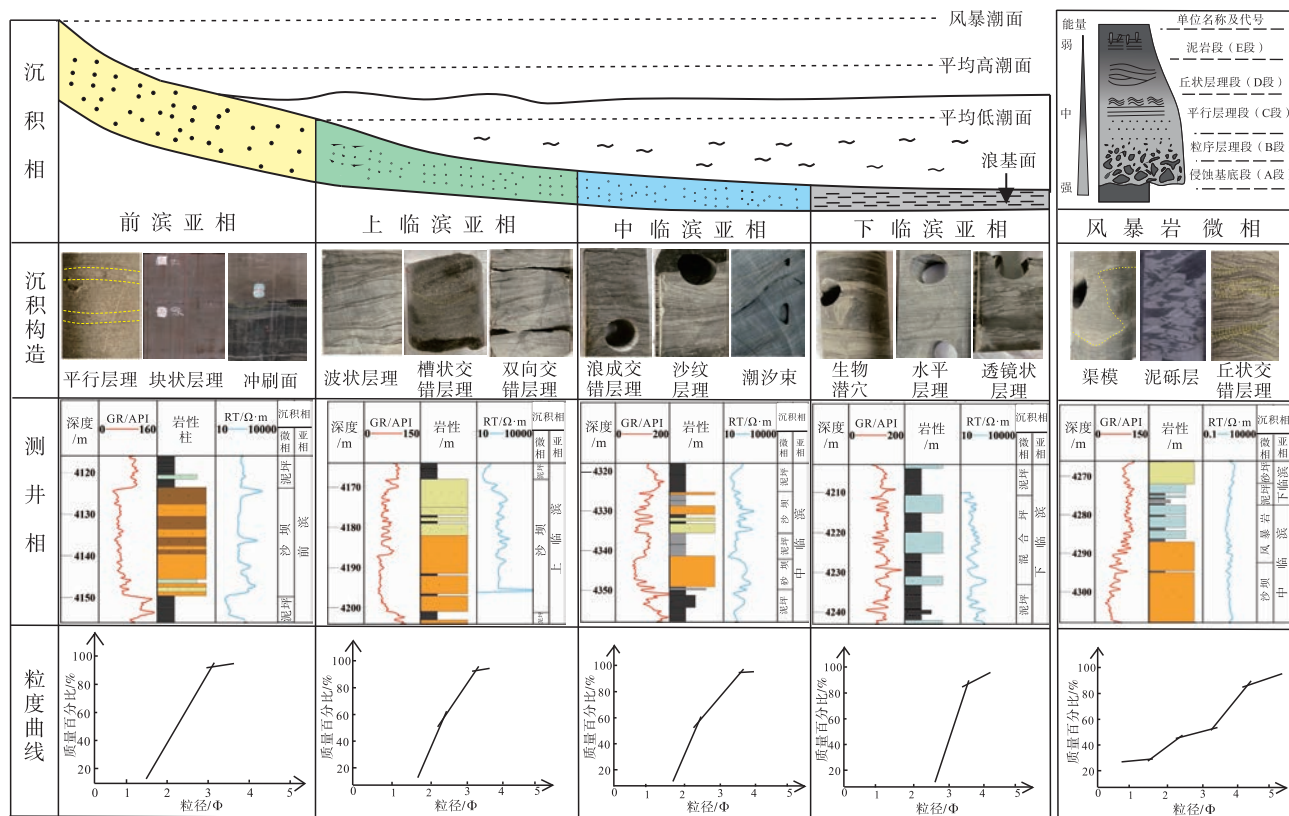


图 7 川西坳陷东坡须家河组二段滨岸沉积相识别图版

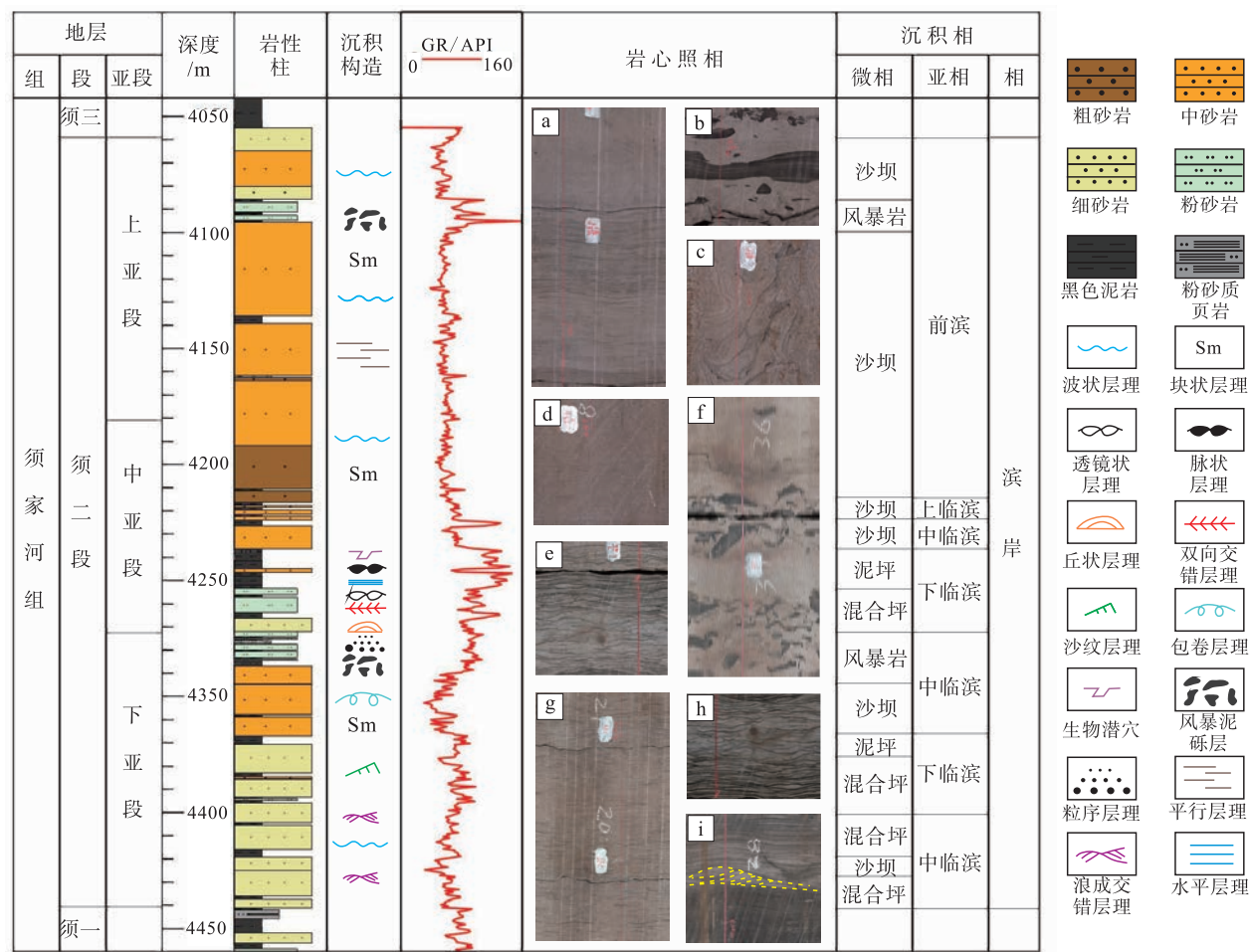
Fig. 7 Shoreline depositional facies identification chart in the Member 2 of Xujiahe Formation, eastern slope of Western Sichuan Depression

展布提供支撑。研究将风暴层厚度大于 100 cm 或最大泥砾面积大于 50 cm^2 的井区定义为高能风暴发育区，以表征风暴沉积中心的迁移特征。须二段下亚段沉积期，风暴层厚度及最大砾石面积较大，风暴活动强烈，此时沉积相自南西往北东从成都坳陷的下临滨亚相、中江斜坡带的中临滨亚相过渡到北东部的上临滨亚相，水体深度逐渐变浅，其高能风暴发育区沿成都坳陷的下临滨亚相延伸至中江斜坡带中段并深入中江 20 井区，风暴层主要发育在中临滨亚相。须二段中亚段沉积期发生明显海退，下临滨亚相消失，前滨沉积在研究区北东部开始出现，高能风暴发育在成都坳陷南侧的洛深 1 井—川江 566 井一带，风暴层的沉积环境转变为上临滨亚相。至须二段上亚段沉积期继续发生海退，北东部开始出现后滨沉积，此时前滨亚相向南西推进至洛深 1 井，风暴沉积中心向北东迁移至川江 566—中江 21 井一带，为前滨亚相靠近临滨亚相一侧的交界处，推测此时地形较为平缓，使得前滨与临滨亚相交界处容易形成并保存风暴沉积。总体上，沉积相展布特征揭示了研究区西深东浅的古地理格局，

风暴时空演化特征表现为随着下亚段到上亚段的持续海退，风暴层发育沉积环境由临滨亚相向前滨亚相转变，风暴层厚度早期西南厚、北部薄或不发育，晚期西部变薄、东部增厚，指示风暴沉积中心逐渐向北东迁移的特征(图 11)。

4.4 风暴沉积的发现对油气勘探的意义

川西坳陷东坡风暴沉积的发现为须二段滨岸相沉积环境提供了关键证据，滨岸沉积受沿岸流及风暴浪作用，发育厚度大、展布范围广的临滨和前滨沙坝，与三角洲的河口坝砂体相比，滨岸沙坝具更大的砂体厚度及侧向连续性，是优质储集层发育的理想场所，具备形成规模有效储集层的地质条件。而风暴泥砾层中普遍含有的以黑色泥页岩为主的泥砾，指示其原始物源为富含有机质的细粒沉积物。基于西深东浅的古地理格局，风暴沉积将东坡西部更深水的下临滨亚相中未固结或半固结的富有机质沉积物剥蚀、搬运并最终于东坡滨岸带沉积，揭示了东坡西部发育品质较好的烃源岩，可为东坡厚层滨岸沙坝提供潜在天然气源。并且东坡的北东部及



a—波状层理, 4070.2 m; b—风暴泥砾层, 4075.2 m; c—包卷层理, 4074.1 m; d—块状层理, 4272.0 m; e—透镜状层理, 4272.0 m; f—撕裂状泥砾, 4291.0 m; g—微波状层理, 4305.0 m; h—浪成交错层理, 4310.0 m; i—潮汐束, 4318.0 m

图 8 川西坳陷东坡须家河组二段中江 20 井沉积相综合柱状图

Fig. 8 Comprehensive sedimentary facies column of Well Zhongjiang 20 in the Member 2 of Xujiahe Formation, eastern slope of Western Sichuan Depression

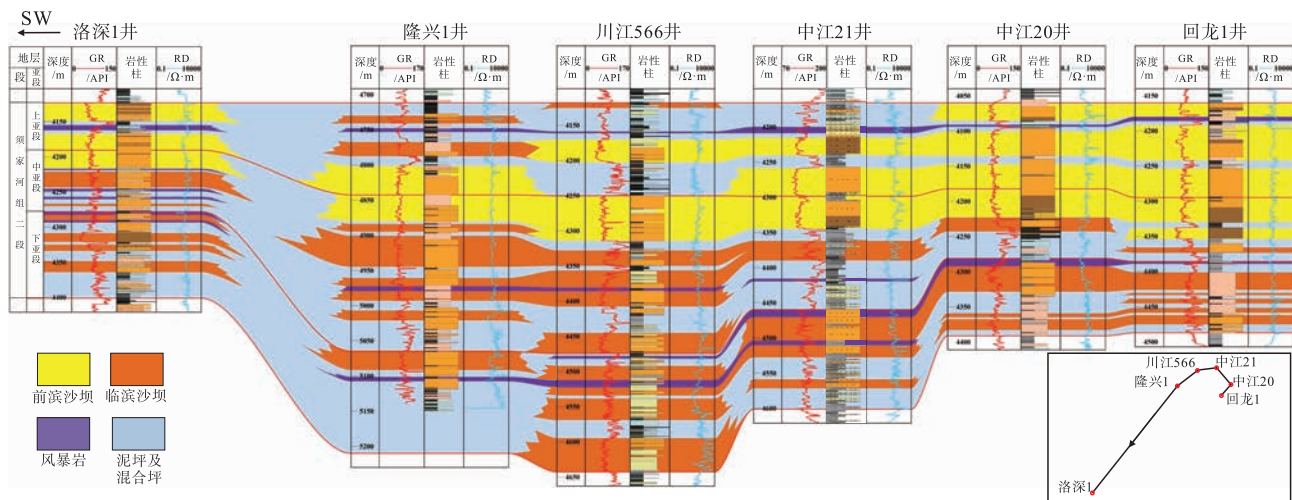


图 9 川西坳陷东坡须家河组二段沉积微相连井剖面图

Fig. 9 Sedimentary microfacies correlation well profile in the Member 2 of Xujiahe Formation, eastern slope of Western Sichuan Depression

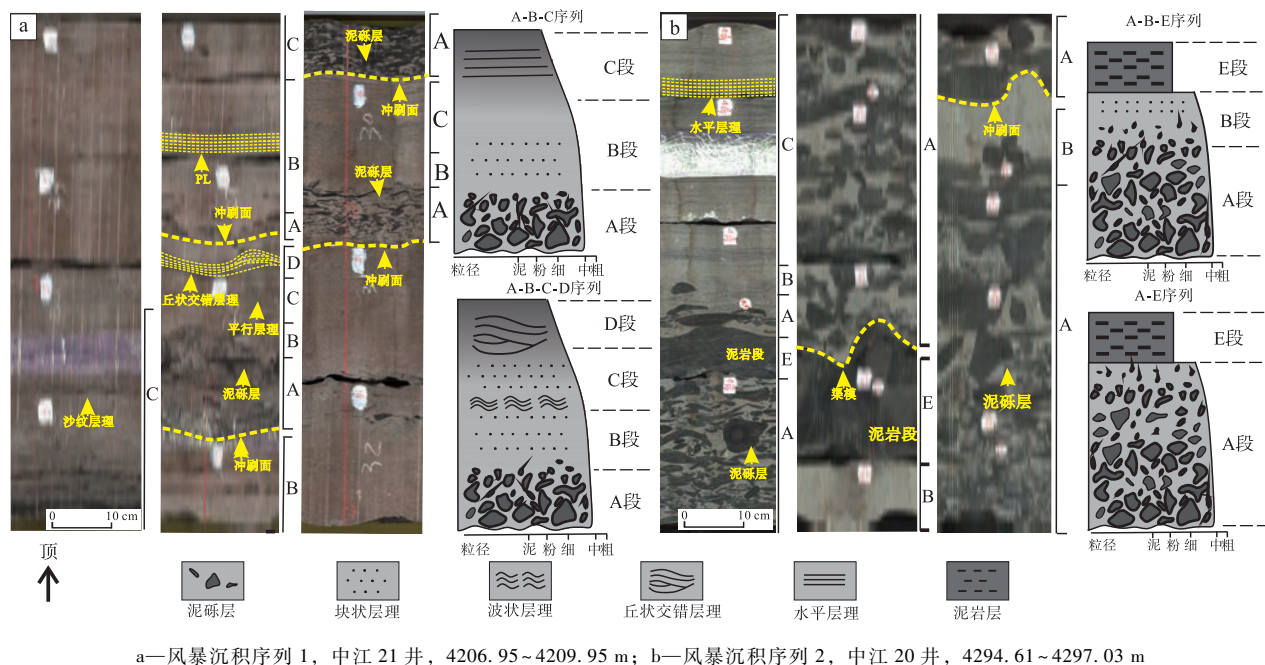


Fig. 10 Characteristics of different tempestite depositional sequences assemblages in the Member 2 of Xujiahe Formation, eastern slope of Western Sichuan Depression

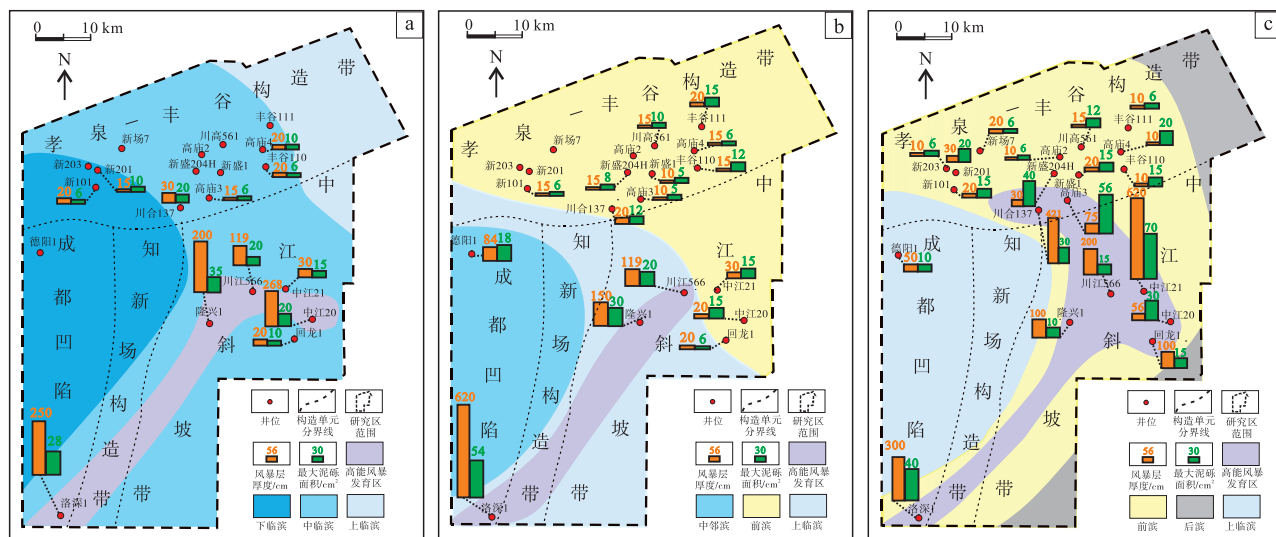


Fig. 11 Sedimentary facies distribution and plane migration characteristics of storm deposits in the Member 2 of Xujiahe Formation, eastern slope of Western Sichuan Depression

东部发育后滨泥岩, 位于储集层的上倾方向, 可形成有效的岩性圈闭, 同时风暴沉积序列顶部及内部的泥岩层也可作为有效的局部盖层, 垂向封闭条件好, 形成了“西坳供源、东坡富砂、东部封堵”的优越成藏要素组合。这一认识突破传统辫状河三角洲沉积相认识的勘探思路, 为该区油气勘探新靶

区提供了新的地质依据。

5 结论

1) 川西坳陷东坡须二段为潮汐一波浪影响下的海相滨岸沉积, 局部受风暴事件影响, 发育前

滨、上临滨、中临滨、下临滨沉积亚相, 沉积演化特征揭示自下往上持续海退, 沉积环境由临滨亚相过渡到前滨亚相为主, 同时, 沉积相展布特征揭示了研究区西深东浅的古地理格局。

2) 川西坳陷东坡风暴沉积在须二上亚段、中亚段、下亚段均发育, 共识别出 9 期风暴沉积, 广泛发育于前滨、上临滨和中临滨亚相, 垂向上以不完整的风暴沉积序列为主, 指示高能、高频的近源风暴沉积特征。风暴沉积的时空演化特征揭示了须二段自下往上风暴层沉积环境由临滨亚相向前滨亚相转变, 风暴层厚度西南厚、北部薄, 晚期西部减薄、东部增厚的演变规律, 指示风暴沉积中心逐渐向北东迁移特征。

3) 沉积环境及古地理格局的重建揭示了川西坳陷东坡西部深水烃源岩、东坡的滨岸富砂储集层以及东坡东部上倾方向的泥岩盖层共同构成 1 套“西坳供源、东坡富砂、东部封堵”的成藏要素组合。

参考文献 (References)

- 冯增昭. 1993. 沉积岩石学 (第二版). 北京: 石油工业出版社. [Feng Z Z. 1993. Sedimentary Petrology (2nd Ed.). Beijing: Petroleum Industry Press]
- 罗启后. 1983. 水进河床充填砂体在古代沉积中的发现: 四川盆地中西部上三叠统某些砂体的成因探讨并试论水进型三角洲. 沉积学报, 1(3): 59-68. [Luo Q H. 1983. Discovery of water-transgression cauce filling sand-bodies in ancient sediments: an approach to the genesis of certain Upper Triassic sand-bodies in the middle-western part of the Sichuan Basin and discussion on water-transgression delta. Acta Sedimentologica Sinica, 1(3): 59-68]
- 李向东. 2020. 丘状和似丘状交错层理成因机制研究进展. 古地理学报, 22(6): 1065-1080. [Li X D. 2020. Advances in genetic mechanism research on hummocky and hummocky-like cross-stratifications. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 22(6): 1065-1080]
- 梁桂香. 1994. 风暴沉积及其构造背景. 世界地质, 13(3): 131-143. [Liang G X. 1994. Storm deposit and its tectonic setting. Global Geology, 13(3): 131-143]
- 刘金华, 张世奇, 孙耀庭, 魏垂高. 2007. 川西前陆盆地上三叠统须家河组地层的划分对比及沉积演化. 地层学杂志, 31(2): 190-196. [Liu J H, Zhang S Q, Sun Y T, Wei C G. 2007. Correlation and evolution of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the west Sichuan foreland Basin. Journal of Stratigraphy, 31(2): 190-196]
- 刘四兵, 黄思静, 沈忠民, 吕正祥, 宋荣彩. 2014. 砂岩中碳酸盐胶结物成岩流体演化和水岩作用模式: 以川西孝泉—丰谷地区上三叠统须四段致密砂岩为例. 中国科学 (地球科学), 44(7): 1403-1417. [Liu S B, Huang S J, Shen Z M, Lu Z X, Song R C. 2014. Evolution of diagenetic fluid and water-rock interaction model of carbonate cements in sandstone: a case study of tight sandstone in the Fourth Member of Upper Triassic in Xiaquan-Fenggu area, western Sichuan. Scientia Sinica (Terrae), 44(7): 1403-1417]
- 尚俊鑫, 冯明友, 夏茂龙, 张本健, 王兴志, 贾松, 李勇, 曾乙洋, 韦明洋. 2025. 川北震旦系灯影组软沉积物变形构造及成因分析. 古地理学报, 27(1): 72-84. [Shang J X, Feng M Y, Xia M L, Zhang B J, Wang X Z, Jia S, Li Y, Zeng Y Y, Wei M Y. 2025. Characteristics and origins of soft-sediment deformation structures in the Sinian Dengying Formation, northern Sichuan Basin. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 27(1): 72-84]
- 沈忠民, 潘中亮, 吕正祥, 刘四兵, 王玲辉. 2009. 川西坳陷中段须家河组天然气地球化学特征与气源追踪. 成都理工大学学报 (自然科学版), 36(3): 225-230. [Shen Z M, Pan Z L, Lü Z X, Liu S B, Wang L H. 2009. The geochemical characteristics of natural gas and the gas-sources tracing of Xujiahe Formation in the middle Member of West Sichuan Depression. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 36(3): 225-230]
- 汪俊伟, 刘江艳, 侯国伟, 何苗. 2018. 西湖凹陷古近系花港组风暴沉积研究. 地质与资源, 27(4): 360-365, 395. [Wang J W, Liu J Y, Hou G W, He M. 2018. Study on the storm deposits of Paleogene Huagang Formation in Xihu sag. Geology and Resources, 27(4): 360-365, 395]
- 王兴龙. 2021. 川西坳陷新场地区上三叠统须家河组沉积砂体展布及主控因素. 成都理工大学硕士学位论文. [Wang X L. 2021. Sedimentary sand body distribution and main controlling factors of the Upper Triassic Xujiahe Formation in Xinchang area, western Sichuan Depression. Masteral dissertation of Chengdu University of Technology]
- 王旭影, 姜在兴. 2021. 苏北东台坳陷古新统阜宁组三段微量、稀土元素地球化学特征及其地质意义. 地质论评, 67(2): 355-366. [Wang X Y, Jiang Z X. 2021. Geochemical characteristics of trace and rare earth elements in the 3rd Member of Paleocene Funing Formation in Dongtai Depression, North Jiangsu Basin, and their geological significance. Geological Review, 67(2): 355-366]
- 王天顺, 付勇, 杨镇, 魏帅超, 袁顺达, 罗淦. 2025. 扬子地块早寒武世 Ni-Mo 多金属层的岩相学和 S 同位素组成: 对沉积环境与成矿作用的启示. 地质学报, 99(6): 2083-2095. [Wang T S, Fu Y, Yang Z, Wei S C, Yuan S D, Luo G. 2025. Petrography and sulfur isotopic compositions of the Early Cambrian Ni-Mo polymetallic layer in the Yangtze block: insights into sedimentary environment and mineralization. Acta Geologica Sinica, 99(6): 2083-2095]
- 熊小辉, 肖加飞. 2011. 沉积环境的地球化学示踪. 地球与环境, 39(3): 405-414. [Xiong X H, Xiao J F. 2011. Geochemical indicators of sedimentary environments: a summary. Earth and Environment, 39(3): 405-414]
- 曾建理, 张廷山, Popa M E, 王永栋, 张喜. 2024. 三叠纪末期四川盆地湖泊风暴记录及其驱动机制. 中国科学 (地球科学), 54(7): 2419-2436. [Zeng J L, Zhang T S, Popa M E, Wang Y D, Zhang X. 2024. Late Triassic lake storm records and their driving mechanisms in the Sichuan Basin. Scientia Sinica (Terrae), 54(7): 2419-2436]
- 赵霞飞, 张闻林. 2011. 四川盆地须家河组潮汐沉积成因再讨论: 补

- 充证据和层序分析. 天然气工业, 31(8): 29–33. [Zhao X F, Zhang W L. 2011. A re-discussion on the origins of tidal deposits in the Xujiahe Formation of the Sichuan Basin: further evidences and sequence analysis. *Natural Gas Industry*, 31(8): 29–33]
- 赵霞飞, 胡东风, 张闻林, 张银德, 唐波, 林杭杰. 2013. 四川盆地元坝地区上三叠统须家河组的潮控河口湾与潮控三角洲沉积. 地质学报, 87(11): 1748–1762. [Zhao X F, Hu D F, Zhang W L, Zhang Y D, Tang B, Lin H J. 2013. Tide-dominated estuarine and deltaic deposition of the Upper-Triassic Xujiahe Formation in the Yuanba area, Sichuan Basin. *Acta Geologica Sinica*, 87(11): 1748–1762]
- 张涛. 2018. 徐州大北望剖面寒武系海绿石成因及地质意义探讨. 中国矿业大学硕士学位论文. [Zhang T. 2018. Genesis and geological significance discussion of the Cambrian glauconite in the Dabeiwang Profile, Xuzhou. Masteral dissertation of China University of Mining and Technology]
- 张廷山, 杜翔, 杨巍, 陈晓慧. 2017. 米仓山前缘早志留世软沉积物变形构造及其触发机制. 沉积学报, 35(2): 253–263. [Zhang T S, Du X, Yang W, Chen X H. 2017. A discussion on deformation structures of Early Silurian soft sediment and its trigger mechanism in the front of Micangshan mountain. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(2): 253–263]
- 朱思成, 孙盼科, 张超, 田堃, 梁智, 李哲兴, 李振宇, 王焯, 陈掌星, 徐怀民. 2025. 潮控河口湾沉积构型表征及成因机制研究: 以 Oriente 盆地 M1 砂岩段和 Hebrides 盆地 Berreraig 砂岩段为例. 古地理学报, 27(6): 1368–1399. [Zhu S C, Sun P K, Zhang C, Tian G, Liang Z, Li Z X, Li Z Y, Wang C, Chen Z X, Xu H M. 2025. Research on the sedimentary architecture characterization and genetic mechanisms of tide-dominated estuaries: case studies of M1 Sandstone in Oriente Basin and Berreraig Sandstone in Hebrides Basin. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 27(6): 1368–1399]
- Aigner T. 1979. Tempestite sedimentation in shallow marine environments. *Sedimentology*, 26(3): 329–344.
- Burchfiel B C, Chen Z, Liu Y, Royden L H. 1995. Tectonics of the Longmen Shan and adjacent regions, central China. *International Geology Review*, 37(8): 661–735.
- Duke W L. 1985. Hummocky cross-stratification, tropical hurricanes, and intense winter storms. *Sedimentology*, 32(2): 167–194.
- Friedman I, O'Neil J R. 1977. Compilation of stable isotope fractionation factors of geochemical interest. U.S. Geological Survey Professional Paper, 440–KK: 1–12.
- Gou M, Lu G, Deng B. 2024. Tectonic-paleogeographic evolution of the Late Triassic in the Sichuan Basin, SW China: constraints from sedimentary facies and provenance analysis of the Xujiahe Formation. *Marine and Petroleum Geology*, 160: 106649.
- Huang Y, Liu Z, Li P, Liu J, Liao C, Xu S. 2020. Analysis of lithofacies and evaluation of effective reservoirs of Member 2 of Xujiahe Formation in the Xinchang area in Western Sichuan. *Petroleum Research*, 5(3): 244–253.
- Jiang Z, Ran B, Li Z, Liu S, Wang Z, Han Y, Lü F, Jiang X. 2023. A Late Triassic depositional age for the Xujiahe Formation, Sichuan Basin: implications for the closure of the Paleo-Tethys Ocean. *Marine and Petroleum Geology*, 155: 106346.
- Jin X, McRoberts C A, Shi Z, Wang Y, Wang C. 2019. The aftermath of the CPE and the Carnian/Norian transition in northwestern Sichuan Basin, South China. *Journal of the Geological Society*, 176: 179–196.
- Keith M L, Weber J N. 1964. Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestones and fossils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 28: 1787–1816.
- Kelling G, Mullin P R. 1975. Graded limestones and limestone-quartzite couplets: possible storm-deposits from the Moroccan Carboniferous. *Sedimentary Geology*, 13(3): 161–176.
- Kolodny Y. 1980. Carbon isotopes and depositional environment of a high productivity sedimentary sequence: the case of the Mishash-Ghareb formations, Israel. *Israel Journal of Earth Sciences*, 29(4): 147–156.
- Liu S, Ren X, Yao S, Liu H, Song J, Ma W. 2019. Relationship between gas reservoir distribution and structural system of Upper Triassic Xujiahe Formation in the Sichuan Basin, China. *Petroleum Science*, 16(4): 777–790.
- Liu B, Zhao L, Tan C, Bian H Y, Huai Y C, Lin Y P, Qiu X L. 2021. The carbon and oxygen isotope characteristics and paleoenvironmental significance of lower-middle Cambrian microbial carbonates in the eastern Tarim Basin, Northwest China. *Carbonates and Evaporites*, 36(3): 95.
- Lü D W, Li Z X, Chen J T, Liu Y, Zhang Z Q, Liang J P, Liu H Y. 2015. Depositional environments of the Upper Permian quartzose sandstone (Shandong Province, North China): implications for provenance and tectonic setting. *Journal of Asian Earth Sciences*, 114: 106–119.
- McManus J, Berelson W M, Severmann S, Poulson R L, Hammond D E, Klinkhammer G P, Holm C. 2006. Molybdenum and uranium geochemistry in continental margin sediments: paleoproxy potential. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(18): 4643–4662.
- Shi Z, Zhou T, Guo C. 2022. Clastic sedimentary records of the Upper Triassic Sichuan Basin, China: implications for the transition from marine to transitional environments and the paleogeography of South China. *Geological Journal*, 57: 4393–4411.
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Oxford: Blackwell Scientific Publications.
- Tian Y J, DeCelles P G, Wei G Q, Yang W, Jin H, Zhou G X. 2025. Sedimentary provenance change during Late Triassic in northwestern South China Block and its implications for Sichuan Foreland Basin evolution and closure of the Paleo-Tethys Ocean. *Tectonics*, 44: e2025TC008876.
- Walker K J, Surge D M. 2006. Developing oxygen isotope proxies from lacustrine ostracodes: implications for high-resolution paleoclimate reconstruction. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(14): 3737–3747.
- Walker R G, Plint A G. 1992. Wave and storm-dominated shallow marine systems. In: Walker R G, James N P (eds). *Facies Models-response to Sea Level Change*. Geological Association of Canada, 219–238.
- Wei W, Algeo T J. 2020. Elemental proxies for paleosalinity analysis of ancient shales and mudrocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 287: 341–366.

(责任编辑 王绍华)