

https://doi.org/10.3799/dqkx.2024.143



鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长₇亚段细粒重力流沉积特征及其主要影响因素

蒋文琦¹, 冯有良^{2*}, 邹才能^{2,3}, 董琳¹, 杨智², 张洪², 王小妮², 尤源⁴,
张天舒², 魏琪钊², 范雨辰²

1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100091
2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083
3. 中国石油深圳新能源研究院, 广东深圳 518052
4. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西西安 710018

摘要: 为研究鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长₇亚段细粒重力流沉积特征, 通过岩心描述、显微薄片观察、X射线衍射分析、微量元素分析等实验方法, 揭示了研究区域主要发育 7 种细粒沉积岩相组合: 细粒静水沉淀、细粒泥质湍流—泥流、细粒过渡流—泥流、细粒滑塌—碎屑流—泥流、浪涌状浊流、细粒异重流和细粒浓缩密度流。细粒重力流沉积的发育主要受到构造运动、古气候变化以及湖盆古地貌展布等因素的控制。构造运动的活跃性是诱发滑塌型重力流发育的关键因素, 气候控制的洪泛事件促进了洪水型细粒重力流的发育, 湖床古地貌对细粒重力流沉积的展布具有显著的控制作用, 坡折角的高低可影响滑塌型细粒重力流沉积的发育。

关键词: 细粒重力流沉积; 鄂尔多斯盆地; 延长组长₇亚段; 沉积特征; 影响因素; 石油地质。

中图分类号: P618

文章编号: 1000—2383(2025)06—2209—18

收稿日期: 2024-07-12

Depositional Character and Influencing Factors of Fine-Grained Gravity Flow of Chang 7₃ Submember in Longdong Area of Ordos Basin

Jiang Wenqi¹, Feng Youliang^{2*}, Zou Caineng^{2,3}, Dong Lin¹, Yang Zhi², Zhang Hong², Wang Xiaoni²,
You Yuan⁴, Zhang Tianshu², Wei Qizhao², Fan Yuchen²

1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100091, China
2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China
3. PetroChina Shenzhen New Energy Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518052, China
4. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina Changqing Oilfield Branch, Xi'an 710018, China

基金项目: 中国石油“十四五”前瞻性基础性重大科技项目(No.2021DJ18); 页岩油富集机理与储层地质力学评价技术研究项目(No.2024DJ87); 国家重点研发计划(No.3023YFF0804303)。

作者简介: 蒋文琦(1996—), 博士研究生, 主要从事细粒重力流沉积研究。E-mail: jiangwenqi@stu.pku.edu.cn

*** 通讯作者:** 冯有良, 高级工程师, 主要从事湖盆细粒沉积学及页岩油气地质评价研究工作。E-mail: fyliang@petrochina.com.cn

引用格式: 蒋文琦, 冯有良, 邹才能, 董琳, 杨智, 张洪, 王小妮, 尤源, 张天舒, 魏琪钊, 范雨辰, 2025. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长₇亚段细粒重力流沉积特征及其主要影响因素. 地球科学, 50(6): 2209—2226.

Citation: Jiang Wenqi, Feng Youliang, Zou Caineng, Dong Lin, Yang Zhi, Zhang Hong, Wang Xiaoni, You Yuan, Zhang Tianshu, Wei Qizhao, Fan Yuchen, 2025. Depositional Character and Influencing Factors of Fine-Grained Gravity Flow of Chang 7₃ Submember in Longdong Area of Ordos Basin. *Earth Science*, 50(6): 2209—2226.

Abstract: To examine the fine-grained gravity flow sedimentation of the Chang 7₃ submember in the Longdong area, Ordos basin, through observation of core and thin sections, XRD analysis, and trace elements analysis, the sedimentary characteristics and influencing factors of fine-grained gravity flow sedimentation were studied. 7 lithofacies assemblages were formed due to different depositional processes: the shale with lamina tuffaceous assemblage, the fine-grained turbidity currents to mud flow assemblage, the transitional flow to mud flow assemblage, the slump to debris flow to mud flow assemblage, the surge-like turbidity flow assemblage, the quasi-steady turbidity current assemblage, and the concentrated density flow assemblage. The development of fine-grained gravity flow is mostly controlled by tectonic activities, paleo-climate change, and paleo-topography of the lacustrine basin. Tectonic activities are the key factors in inducing the development of slump-triggered fine-grained gravity flow sedimentation, while flood events promote the development of flood-triggered fine-grained gravity flow sedimentation. The characteristics of the paleogeomorphology have a significant control effect on the distribution of fine-grained gravity flow sedimentation, the gradient of the slope significantly influences the depositional characteristics of slump-triggered fine-grained gravity flows.

Key words: fine-grained gravity flow sedimentation; Ordos basin; Yanchang Formation Chang 7₃ submember; depositional characteristics; influencing factor; petroleum geology.

0 引言

深水重力流沉积是沉积学和古地理学的重点研究方向之一。重力流沉积物作为岩性油气藏的主要储层,在深水湖盆油气勘探中获得了突破(林畅松等, 2003; 蒙启安和纪友亮, 2009; Feng *et al.*, 2013; 朱如凯等, 2022)。研究表明,深水重力流沉积的作用机理主要是滑动、滑塌和洪水作用,形成砂质碎屑流、泥质碎屑流、浊流等重力流体(Shanmugam, 1996)。与深海环境下发育的细粒重力流沉积相比,陆相深湖—半深湖湖盆细粒重力流沉积具有更丰富的物源,湖盆古地貌更复杂,对古气候变化和构造活动也更敏感,多重因素导致细粒重力流沉积在湖盆的发育更为复杂。近年来,研究者们对湖相重力流沉积的主控因素和分类方案进行了系统的研究,提出了基于沉积成因和主控因素的湖相重力流沉积分类方案,将湖相重力流沉积分为洪水型、滑塌型和洪水—滑塌共存型 3 大类(杨田等, 2015; 操应长等, 2017; 范洪军等, 2024)。目前广泛讨论的湖盆内部细粒重力流体系的基本科学问题集中在细粒重力流搬运和沉积作用过程,以及细粒重力流体系与页岩油气甜点层发育之间的关系(邹才能等, 2022, 2023),对于湖盆细粒重力流沉积特征、沉积作用过程及其控制因素的研究仍略欠缺。湖相细粒重力流沉积的控制因素还需更深入地讨论和研究。开展细粒重力流体系岩相、岩相组合的识别,解释其沉积过程,构建沉积模式,分析细粒重力流体系在湖盆中发育的控制因素,对深入理解细粒重力流体系沉积作用过程、进一步预测、评价页岩的

甜点段具有重要的意义。

前人对于鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长 7 段重力流的研究多集中于长 7₁₋₂段的中—粗粒沉积物,认为长 7₃亚段多为深湖静水环境下沉积的富有机质泥岩(邹才能等, 2009)。近年的研究发现,长 7₃亚段大量发育以黑灰色泥岩夹粉砂岩为主的沉积,沉积物粒度多为粉砂级及以下,其中,粉砂质和泥质等细粒沉积物除深湖悬浮沉积外,其余大多为重力流沉积(杨田等, 2021; 李宗霖等, 2023; 吕奇奇等, 2023)。细粒重力流沉积物指由重力流导致的、沉积物颗粒粒径小于 0.062 5 mm 且含量大于 50% 的沉积物(Picard, 1971; Schieber *et al.*, 2007; Aplin *et al.*, 2011; 邹才能等, 2023)。本研究选取陇东地区 13 口井(图 1)的长 7₃亚段进行了厘米级的岩心描述,采集了 95 块样品,通过薄片观察、矿物组分分析和相关地球化学测试手段,对长 7₃亚段细粒重力流沉积特征及其影响因素开展了研究。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地位于华北克拉通西部,是我国第二大含油气盆地,其构造区可划分为西缘冲断带、天环坳陷、伊陕斜坡、晋西挠褶带、伊盟隆起和渭北隆起 6 个二级构造单元(图 1)。晚三叠世延长期,祁连—秦岭在印支运动的作用下发生强烈抬升(陈安清等, 2011),盆地南部快速沉降,形成了西南低、北东高的古地理地貌(田景春等, 2011)。受南部造山带影响,盆地发育了一套大型凹陷盆地背景下的河流—三角洲—湖泊相碎屑岩沉积(操应长等, 2017)。延长组可划分为 10 段,长 7 段沉积期间湖盆强烈坳

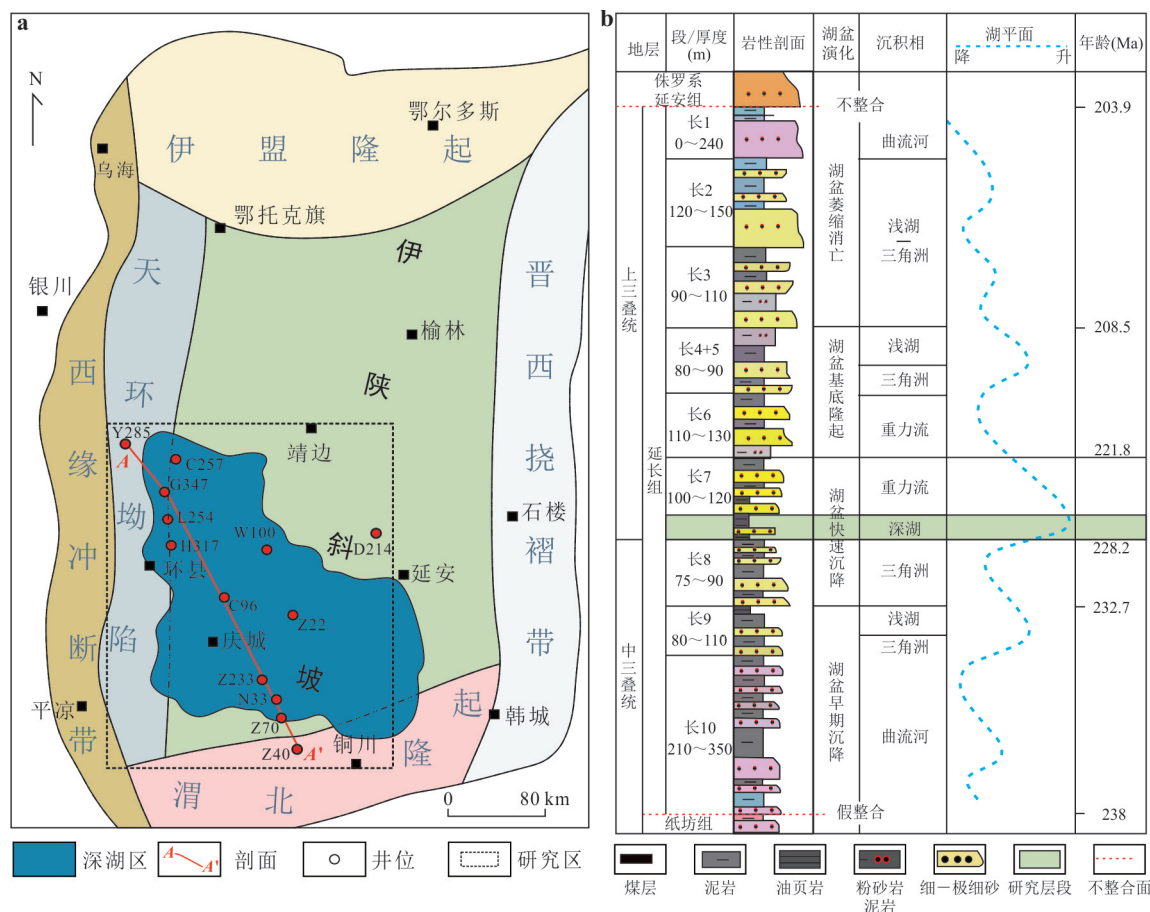


图1 鄂尔多斯盆地构造单元划分及延长组综合柱状图(修改自操应长等,2017)

Fig.1 The structural division map and comprehensive diagram of Yanchang Formation in Ordos basin (modified from Cao et al., 2017)

陷,发生快速沉降,湖盆体积达到鼎盛,古水深介于36.25~129.08 m,半深湖—深湖的湖域面积达到了 $6.5 \times 10^4 \text{ km}^2$.盆地西南部发育多级水下坡折带和陡窄的斜坡,有利于大型重力流的形成(张晓辉等,2020).长7段内部自下而上被分为三个亚段(长_{7₃}、长_{7₂}、长_{7₁}),下部(长_{7₃}亚段)主要发育一套以富含有机质泥岩和粉砂岩为主的细粒沉积,中上部(长_{7₂}至长_{7₁}亚段)主要为一套夹暗色泥岩的细粒砂岩(王岚等,2023).

2 岩性划分与岩相组合

本次研究针对不同岩性和沉积构造特征的岩心进行了拍照和取样,通过岩心观察描述、薄片观察、全岩和黏土矿物X射线衍射含量测定(XRD)等方法对研究层段的岩相和岩相组合开展了研究.

2.1 岩性划分

将采集的95块样品的X射线衍射分析数据投

射到“粉砂质—黏土矿物—碳酸盐矿物”三端元图(Shepard, 1954)上显示(图2),研究区长_{7₃}层段的岩性主要集中在4个区域:泥质粉砂岩(I₁)、粉砂质泥岩(II₂)、含灰/云质的泥质粉砂岩(I₂)和含灰/云质的粉砂质泥岩(II₂).结合总有机碳含量,发现高TOC(>6)样品岩性多为粉砂质泥岩(II₁),含灰/云质泥质粉砂岩(I₂)的TOC相对较低,粉砂质泥岩(I₁)的TOC含量较不稳定,大致呈现随黏土矿物含量增加而上升的趋势.

2.2 岩相类型

细粒沉积岩相的划分对于分析沉积过程和沉积作用特征具有重要意义,根据研究目的差异及研究资料的优劣性,可选择不同的岩相划分依据和标准(赵建华等,2016).本文选取矿物成分、粒度大小和岩心尺度下的沉积构造作为岩相划分的依据,首先根据岩性将细粒沉积物划分为5大类,即泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、细粉砂岩和粗粉砂岩,在此基础上根据沉积构造和沉积组分将其细化为了26

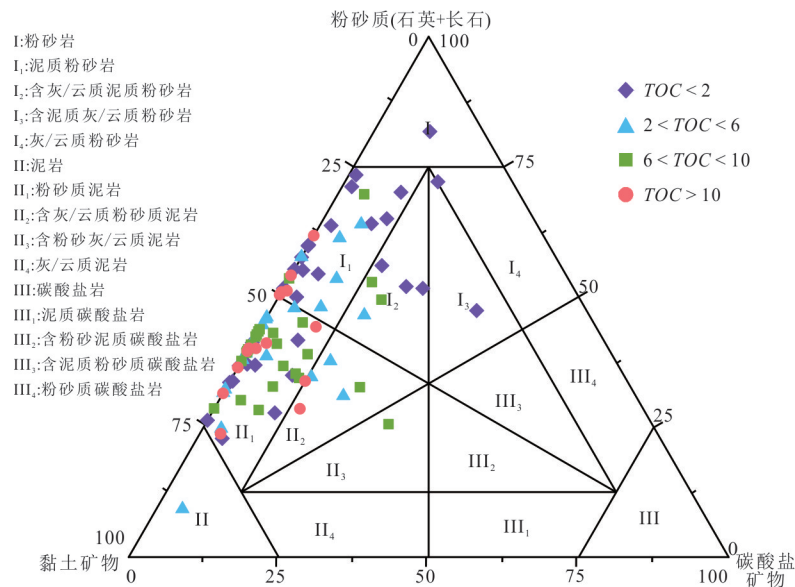


图2 陇东地区长₇₃亚段“粉砂质—黏土矿物—碳酸盐矿物”三角图中样品的岩性分布(修改自 Shepard, 1954)

Fig.2 Lithology distribution on “silt-clay-carbonate” ternary diagram of Chang ₇₃ submember in Longdong area (modified from Shepard, 1954)

种反映不同沉积作用的岩相(图3).

2.3 岩相组合

在综合对比了 Middleton and Hampton(1973)、Lowe(1982)、Shanmugam(2000)、Mulder and Alexande(2001)和 Talling(2013)的重力流分类方案后, 本文认为 Mulder and Alexander(2001)的重力流划分方案考虑到了重力流中流体的运动形态、细粒颗粒物体积浓度和颗粒间相互关系, 更适合作为细粒重力流沉积研究的分类方案. 该划分方案根据沉积物体积浓度百分比范围由低到高将重力流划分为浊流(turbidity current)、浓缩密度流(concentrated density flow)、高浓缩密度流(hyperconcentrated density flow)和黏性流(cohesive flow), 其中黏性流中包括碎屑流(debris flow)和泥流(mud flow). 在此基础上, 根据沉积作用持续时间, 从长到短将浊流细分为准稳态浊流/异重流(quasi-steady turbidity current/hyperpycnal flow)、浪涌状浊流(surge-like turbidity flow)和浊流—脉冲(turbidity flow-surge)3类(Mulder and Alexander, 2001; 冯有良等, 2023). 在重力流体流动过程中, 流体中的沉积物组分会不断变化, 泥质和砂质的占比也随之改变. 为了更好地区分这类变化的流体, 本文采用了 Baas *et al.*(2011)提出的过渡流概念, 根据黏土矿物和砂质含量的相对关系, 对介于浊流和泥流(黏性流)之间的过渡型流体进行了精细划分. 黏土矿物的混入增强了流体黏性力, 湍动被调制, 产生了介于浊流(湍流)和泥

流的过渡性流体(Baas *et al.*, 2011)(图4).

通过对 Y285、L254、Z40 等 13 口井进行厘米级岩心观察和描述, 结合岩相在纵向上的叠置关系和细粒沉积作用过程特征, 在延长组长₇₃亚段识别出了 7 类岩相组合(图 5).

2.3.1 岩相组合 1——细粒静水沉淀组合 细粒静水沉淀组合(shale with lamina tuffaceous assemblage)如图 5a 所示, 由下部的水平纹层泥岩相(M1)和上部的水平层状泥岩夹凝灰质薄层岩相(M2)组成. 岩相 M1 和 M2 均为富有机质泥岩, 岩心颜色呈黑色或黑灰色, 样品 TOC 值大于 5%. M1 岩相发育厚度小于 1 mm 的纹层, 为静水沉淀而成. 岩相 M2 以发育凝灰质薄层为特征, 层厚均匀, 是凝灰质空落沉降形成的静水沉淀. 研究区长₇₃亚段沉积期火山活动较活跃, 来自西秦岭造山带的火山灰飘落到湖盆中心, 形成了一系列厚度由 0.5 mm 到 10 mm 的均匀凝灰质薄层, 夹在静水沉淀的泥质沉积物中, 形成了大套的纹层状泥岩和凝灰质沉积的叠置. 该类岩相组合通常在远离物源的深湖静水区域悬浮沉淀而成, 在研究区也可观察到大套水平纹层的泥岩中均匀分布粉砂质, 由于其纹层发育细密均匀, 且纵向上并没有明显的粒序变化, 整体指向静水环境沉积, 因此将这类均质的发育水平纹层的粉砂质泥岩也视做细粒静水沉淀组合(LA1).

2.3.2 岩相组合 2——细粒泥质湍流—泥流组合 细粒泥质湍流—泥流组合(fine-grained turbidity cur-

岩相	岩相名称	基本特征	岩心照片	岩相	岩相名称	基本特征	岩心照片
泥岩	M1	水平纹层泥岩相	岩性以黑色、黑灰色泥岩为主,水平纹层较为发育	泥质粉砂岩	ASS4	滑塌构造泥质粉砂岩相	岩性以灰色泥质粉砂岩为主,可见粉砂质和泥质强烈变形的滑塌构造
	M2	水平层状泥岩夹凝灰质薄层岩相	岩性以黑色、黑灰色泥岩为主,夹薄层状凝灰质,水平纹层较为发育		ASS5	含凝灰质泥质粉砂岩相	岩性以灰黑色泥质粉砂岩为主,可见大量凝灰质薄层顺层分布,常发育波状层理,见透镜状泥屑
	M3	块状泥岩相	岩性以黑色、黑灰色泥岩为主,呈块状构造,不含其他沉积构造,顶底界面相对平坦	细粉砂岩	FSS1	水平纹层细粉砂岩相	岩性以灰色细粉砂岩为主,水平纹层较为发育
	M4	含植物碎片块状泥岩相	岩性以黑色泥岩为主,呈块状构造,夹杂植物碎片		FSS2	波状纹层细粉砂岩相	岩性以灰色细粉砂岩为主,见小型波状纹层发育
	M5	含泥砾泥岩相	岩性以黑色泥岩为主,局部夹椭圆状泥砾		FSS3	平行纹层细粉砂岩相	岩性以灰色细粉砂岩为主,平行纹层较为发育
粉砂质泥岩	SSM1	水平纹层粉砂质泥岩相	岩性以灰黑色粉砂质泥岩为主,水平纹层较为发育		FSS4	含泥屑波状层理细粉砂岩相	岩性以灰色细粉砂岩为主,波状层理较为发育,局部可见泥屑
	SSM2	含透镜状粉砂质条带和泥团的粉砂质泥岩相	岩性以灰黑色粉砂质泥岩为主,夹杂粉砂质条带和泥团,条带多呈中间厚两边薄的透镜状		FSS5	波状交错层理细粉砂岩相	岩性以灰色细粉砂岩为主,波状交错层理较为发育
	SSM3	含粉砂屑(团块)的粉砂质泥岩相	岩性以灰黑色粉砂质泥岩为主,含大小不一的粉砂质砂屑和砂质团块		FSS6	块状细粉砂岩相	岩性以灰色细粉砂岩为主,呈块状构造,厚度较厚
	SSM4	含层状粉砂屑和粉砂注入构造的粉砂质泥岩相	岩性以灰黑色粉砂质泥岩为主,含呈层状分布的粉砂屑和压力不均导致的粉砂注入构造		FSS7	递变层理细粉砂岩相	岩性以灰色细粉砂岩为主,递变层理较为发育
	SSM5	含凝灰质粉砂质泥岩相	岩性以灰黑色粉砂质泥岩为主,见凝灰质薄层顺层分布		FSS8	软沉积变形构造细粉砂岩相	岩性以灰色细粉砂岩为主,可见大量粉砂质软沉积变形
泥质粉砂岩	ASS1	泥屑、粉砂屑顺层分布的泥质粉砂岩相	岩性以深灰色泥质粉砂岩为主,发育顺层分布的粉砂屑和泥屑	粗粉砂岩	FSS9	泥质注入构造细粉砂岩相	岩性以灰色细粉砂岩为主,发育泥质注入构造
	ASS2	包卷层理泥质粉砂岩相	岩性以灰色泥质粉砂岩为主,包卷层理较为发育		CSS1	火焰状构造粗粉砂岩相	岩性以灰色粗粉砂岩为主,底部发育火焰状构造
	ASS3	平行层理泥质粉砂岩相	岩性以灰色泥质粉砂岩为主,平行层理较为发育	砂岩	CSS2	含撕裂屑粗粉砂岩相	岩性以灰色粗粉砂岩为主,含泥质撕裂屑,长度约2~5 cm

图 3 陇东地区长7₃亚段不同类型典型岩相样品照片

Fig.3 Photos of different lithology facies of Chang 7₃ submember in Longdong area

rents to mud flow assemblage)由下到上可观察到块状泥岩相(M3)、含植物碎片块状泥岩相(M4)、含泥砾泥岩相(M5)、水平纹层粉砂质泥岩相(SSM1)、含透镜状粉砂质条带和泥团的粉砂质泥岩相(SSM2)以及含粉砂屑(团块)的粉砂质泥岩相(SSM3)(图 5b,图 5b)。岩相 M3 和 M4 均呈块状构造,在 M4 中可观察到植物碎片,两者可被解释为细粒泥质湍流沉积。泥质湍流黏土矿物含量较高,可以在短时间内携带大量泥质沉积物搬运,并快速沉降,因此泥质湍流沉积通常发育块状构造(Mulder and Alexander, 2001; Mulder *et al.*, 2003; Talling *et al.*, 2012)。岩相 M5 含有泥砾,是流体侵蚀泥质底

床,导致泥质剥离形成(图 5b)。

SSM1 为水平纹层粉砂质泥岩相,见泥屑、粉砂屑顺层分布的水平纹层,代表了粘性泥流的顺层剪切(Talling *et al.*, 2012)。SSM2 内部发育透镜状粉砂质条带和泥团,SSM3 发育粉砂屑和粉砂质团块,这两种岩相可被解释为泥流沉积。泥流是一种粘性流,其流体中砾石体积占比含量小于 5%,泥砂体积占比大于 1:1(Mulder *et al.*, 2003)。在研究区长 7₃亚段发现的泥质沉积物多为发育粉砂质泥岩为主的泥流沉积。该岩相组合代表了泥质湍流沉积被泥流沉积覆盖的沉积作用过程。

2.3.3 岩相组合 3——细粒过渡流-泥流组合

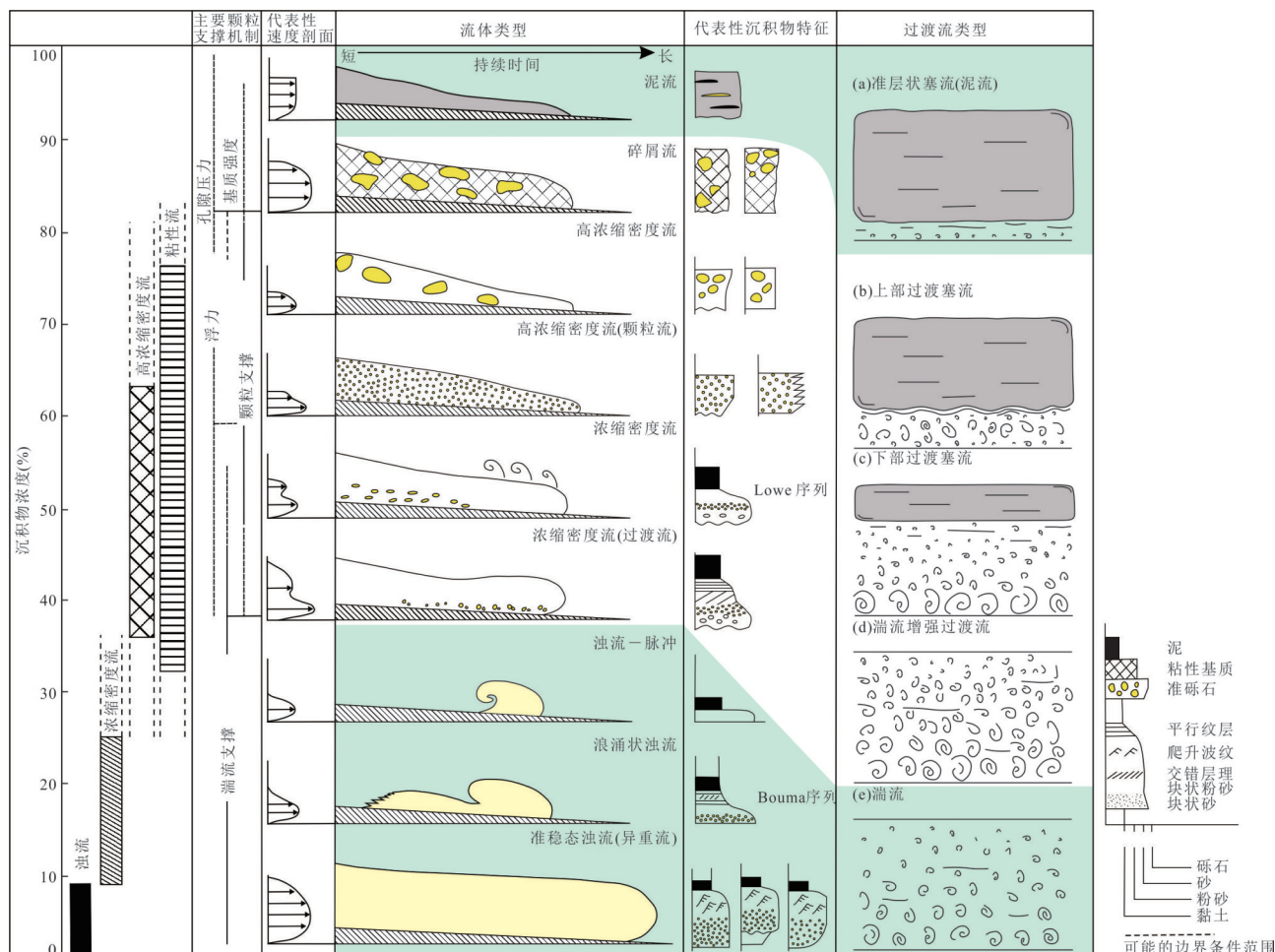


图4 细粒重力流划分方案

Fig.4 Classification of fine-grained gravity flow sedimentation

修改自 Mulder and Alexander (2001) 和 Baas *et al.* (2011)

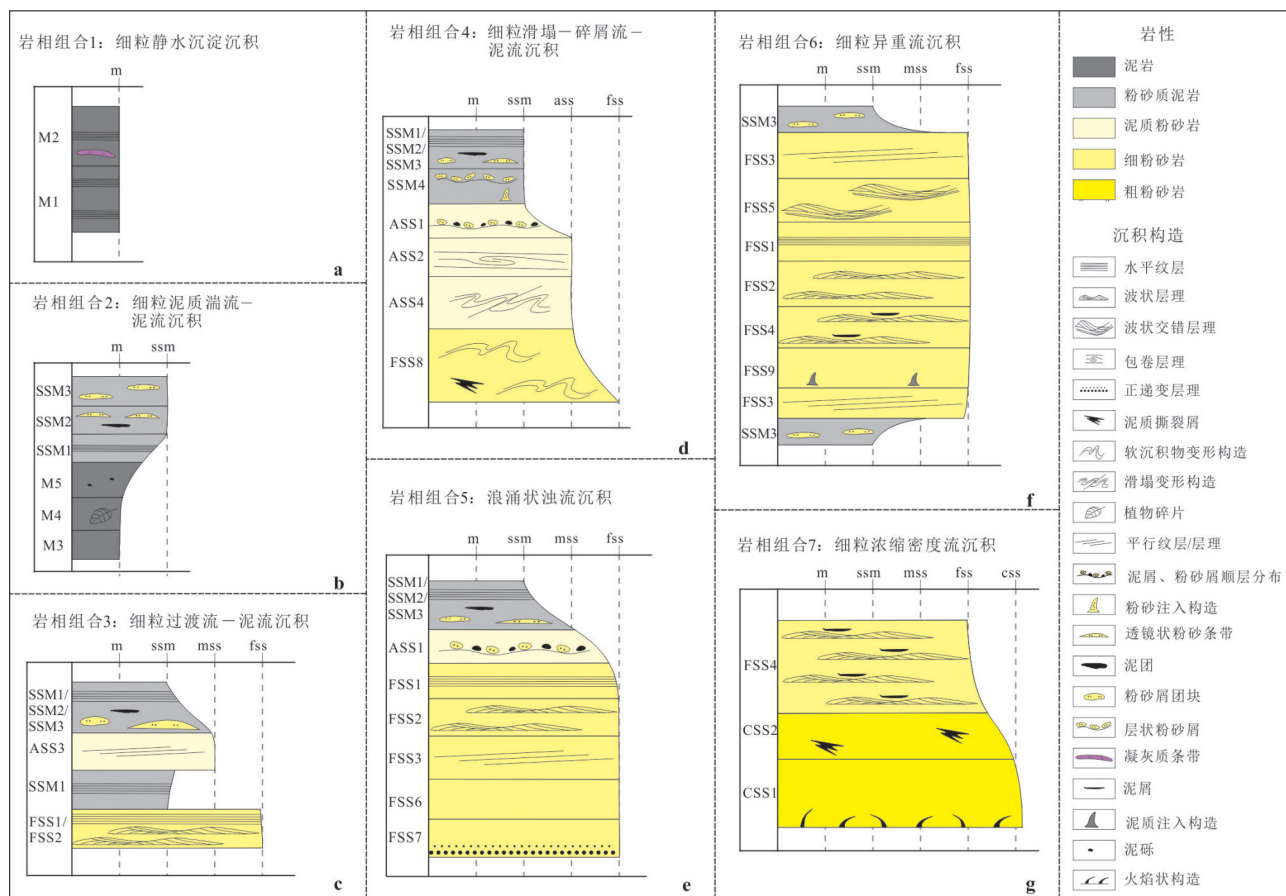
细粒过渡流—泥流组合 (transitional flow to mud flow assemblage) 由波状纹层细粉砂岩相 (FSS2)、水平纹层细粉砂岩相 (FSS1)、水平纹层粉砂质泥岩相 (SSM1)、平行层理泥质粉砂岩相 (ASS3)、含粉砂屑 (团块) 的粉砂质泥岩相 (SSM3)、含透镜状粉砂质条带和泥团的粉砂质泥岩相 (SSM2) 以及水平纹层粉砂质泥岩相 (SSM1) 组成 (图 5c, 图 5c)。

岩相 FSS1 和 FSS2 均为细粉砂岩, 前者发育水平纹层, 后者发育波状层理; 岩相 SSM1 发育水平纹层, 部分含泥屑; 岩相 ASS3 是发育平行层理的泥质粉砂岩, 这三者均属于湍流沉积。上部发育含透镜状粉砂质条带和泥团的粉砂质泥岩相 (SSM2)、含粉砂屑 (团块) 的粉砂质泥岩相 (SSM3) 和水平纹层粉砂质泥岩相 (SSM1), 可以被解释为泥流沉积 (Talling, 2013)。细粒过渡流沉积下部细粉砂岩层厚小于上覆的粉砂质泥岩 (图 5c), 可被解释为上部过渡塞流沉积。当一定浓度的黏土矿物汇入湍流时,

湍流的湍动会受到调制, 发育上部过渡塞流 (upper transitional plug flow)、下部过渡塞流 (lower transitional plug flow) 和湍流增强过渡流 (turbulence-enhanced transitional flow) (Baas *et al.*, 2011)。岩相组合 3 体现了下部过渡塞流转变为上部过渡塞流, 并最终随着黏土矿物浓度的增加转化为泥流的过程。

2.3.4 岩相组合 4——细粒滑塌—碎屑流—泥流组合

细粒滑塌—碎屑流—泥流组合 (slump to debris flow to mud flow assemblage) 下部为软沉积物变形构造细粉砂岩相 (FSS8) 和滑塌构造泥质粉砂岩相 (ASS4), 中部发育包卷层理泥质粉砂岩相 (ASS2)、泥屑 (粉砂屑) 顺层分布的泥质粉砂岩相 (ASS1) 和含层状粉砂屑和粉砂注入构造的粉砂质泥岩相 (SSM4), 最上部发育含粉砂屑 (团块) 的粉砂质泥岩相 (SSM3)、含透镜状粉砂质条带和泥团的粉砂质泥岩相 (SSM2) 以及水平纹层粉砂质泥岩相 (SSM1) (图 5d, 图 6a) 等。

图5 陇东地区长₇亚段不同类型岩相组合示意Fig.5 Diagrams of different lithology facies assemblage of Chang ₇₃ submember in Longdong area

岩相 FSS8 的特点是发育软沉积物变形构造,部分岩心中会夹杂泥质撕裂屑,岩相 ASS4 发育滑塌构造,岩相 ASS2 发育包卷层理,这 3 种岩相均有不同程度的沉积构造变形,是边坡失稳形成的滑塌沉积。岩相 ASS1 和 SSM4 均发育顺层分布的粉砂屑,SSM4 还发育粉砂注入构造(图 10a),是滑塌导致的碎屑流沉积。岩相 SSM3、SSM2 和 SSM1 则是泥流沉积。地震活动使湖盆边坡失稳发生滑塌,进一步演化为细粒碎屑流和泥流,向深湖搬运沉积(Shanmugam, 1996; Shanmugam, 2000)。细粒碎屑流和泥流都是粘性基质支撑的粘性流,但细粒碎屑流的颗粒分选较差,砾石含量通常大于 5%,还含有砂质、粉砂质和泥质组分(Mulder, Alexander, 2001; Talling *et al.*, 2012)。细粒碎屑流沉积物常发育大量的粉砂屑,快速沉积使下部地层的水无法及时排出,只能向上挤入,生成粉砂质注入构造。岩相组合 4 代表了由滑塌引发碎屑流,继而转变为泥流的沉积过程。

2.3.5 岩相组合 5——浪涌状浊流组合 浪涌状浊

流组合(surge-like turbidity flow assemblage)下部为大套的细粉砂岩相,上部逐渐过渡为泥质粉砂岩相和粉砂质泥岩相。该岩相组合从下到上分别为:递变层理细粉砂岩相(FSS7)、块状细粉砂岩相(FSS6)、平行纹层细粉砂岩相(FSS3)、波状纹层细粉砂岩相(FSS2)、水平纹层细粉砂岩相(FSS1)、泥屑(粉砂屑)顺层分布的泥质粉砂岩相(ASS1)、含粉砂屑(团块)的粉砂质泥岩相(SSM3)、含透镜状粉砂质条带和泥团的粉砂质泥岩相(SSM2)以及水平纹层粉砂质泥岩相(SSM1)(图 5e,图 6b)。岩相 FSS7 发育正粒序的递变层理,岩相 FSS6 发育块状构造,岩相 FSS3 发育平行层理,岩相 FSS2 发育波状纹层,岩相 FSS1 发育水平纹层,岩相 ASS1 发育顺层分布的泥屑和粉砂屑,岩相 SSM3、SSM2,均发育粉砂屑和泥质屑,岩相 SSM1 则发育含狭长粉砂屑顺层分布的水平纹层。该岩相组合可被解释为浪涌状浊流沉积。浪涌状浊流属于浊流的一种,通常流体可持续几个小时,发育类似鲍马序列 b~d 段的沉积,但整体粒度比鲍马序列沉积物更细(Mulder

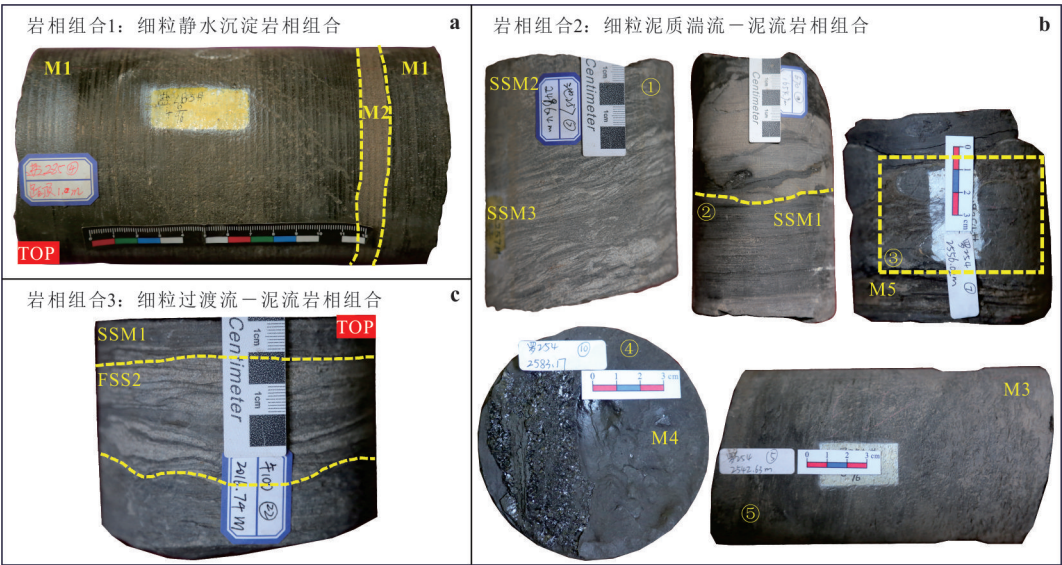


图 6 陇东地区长₇亚段岩相组合 1、2 和 3

Fig.6 Lithofacies assemblages 1, 2 and 3 of Chang ₇₃ submember in Longdong area

a. 细粒静水沉积岩相组合, Y285, 长₇₃, 2 826.4 m. b. 细粒泥质湍流—泥流沉积岩相组合, ①C257, 长₇₃, 1 654.9 m; ③L254, 长₇₃, 2 556.02 m; ④L254, 长₇₃, 2 583.17 m; ⑤L254, 长₇₃, 2 542.63 m. c. 细粒过渡流—泥流沉积岩相组合, W100, 长₇₃, 2 016.74 m

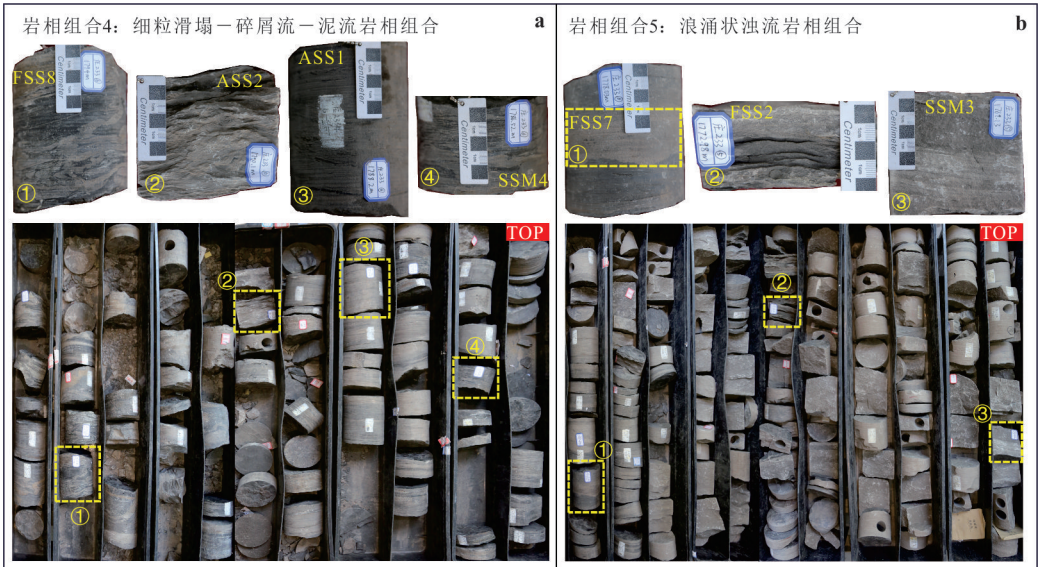


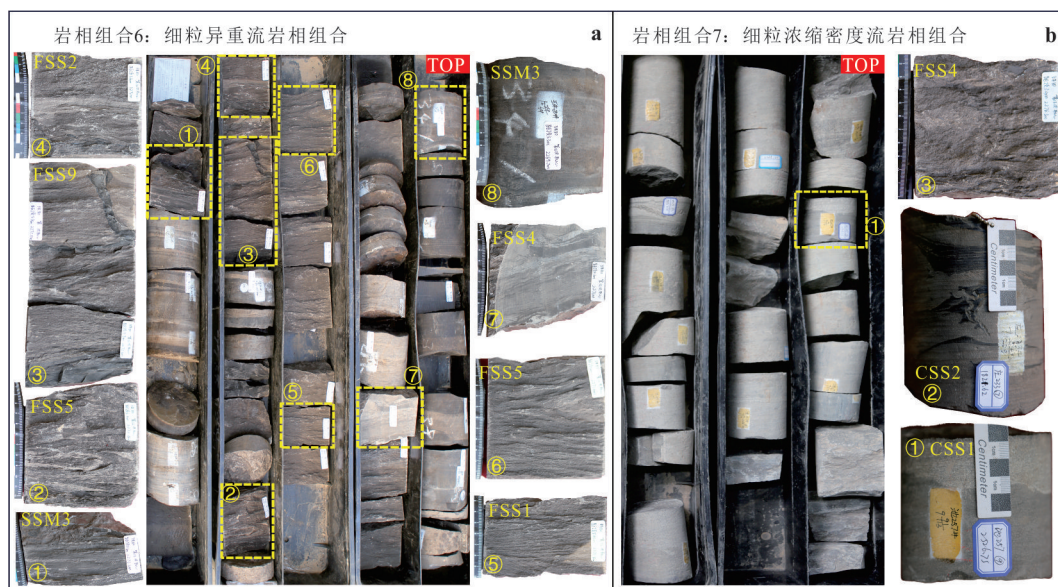
图 7 陇东地区长₇亚段岩相组合 4 和 5

Fig.7 Lithofacies assemblages 4 and 5 of Chang ₇₃ submember in Longdong area

a. 细粒滑塌—碎屑流—泥流沉积岩相组合, ①Z233, 长₇₃, 1 794 m; ②Z233, 长₇₃, 1 790.1 m; ③Z233, 长₇₃, 1 788.2 m; ④Z233, 长₇₃, 1 786.52 m. b. 浪涌状浊流沉积岩相组合, ①Z233, 长₇₃, 1 778.03 m; ②Z233, 长₇₃, 1 772.98 m; ③Z233, 长₇₃, 1 769.13 m

and Alexander, 2001). 岩相 FSS7、FSS6、FSS3、FSS2、FSS1 等细粉砂沉积类似鲍马序列的 b、c 段, 岩相 ASS1、SSM3、SSM2、SSM1 等粉砂和泥质沉积类似鲍马序列的 d 段, 整体呈正粒序发育。
2.3.6 岩相组合 6——细粒异重流组合 细粒异重流组合 (quasi-steady turbidity current assemblage) 由下到上发育: 含粉砂屑 (团块) 的粉砂质泥岩相

(SSM3)、平行纹层细粉砂岩相 (FSS3)、泥质注入构造细粉砂岩相 (FSS9)、含泥屑波状层理细粉砂岩相 (FSS4)、波状纹层细粉砂岩相 (FSS2)、水平纹层细粉砂岩相 (FSS1)、波状交错层理细粉砂岩相 (FSS5)、平行纹层细粉砂岩相 (FSS3) 和含粉砂屑 (团块) 的粉砂质泥岩相 (SSM3) (图 5f, 图 7a)。该岩相组合由下到上粒度呈反正旋回, 是水体能量由弱

图8 陇东地区长 7_3 亚段岩相组合6和7Fig.8 Lithofacies assemblages 6 and 7 of Chang 7_3 submember in Longdong area

a. 细粒异重流沉积岩相组合, ①Z80, 长 7_3 , 2 273.2 m; ②Z80, 长 7_3 , 2 272.8 m; ③Z80, 长 7_3 , 2 272.3 m; ④Z80, 长 7_3 , 2 272 m; ⑤Z80, 长 7_3 , 2 271.85 m; ⑥Z80, 长 7_3 , 2 271.4 m; ⑦Z80, 长 7_3 , 2 271 m; ⑧Z80, 长 7_3 , 2 269.7 m. b. 细粒浓缩密度流沉积岩相组合, ①C257, 长 7_3 , 2 526.75 m; ②Z233, 长 7_3 , 1 821.62 m; ③Z80, 长 7_3 , 2 276.3 m

变强再变弱特征. 异重流是洪水事件导致的深水重力流, 属于浊流的一种, 持续时间较长, 从几天至一周不等, 因此可以形成较厚且沉积构造变化较复杂的沉积. 细粒异重流沉积物的粒度在纵向上大致呈一个“细—粗—细”的旋回, 在垂向上可呈韵律性重复出现 (Mulder *et al.*, 2003). 如图 5f 所示, 该岩相组合下部为粒度较细的粉砂质泥岩, 含有较多的粉砂屑或粉砂质团块, 随着洪水能量增强, 上部沉积物颗粒逐渐变粗, 发育细粉砂岩相. 岩相组合下部的细粉砂岩发育平行纹层, 洪水搬运沉积物快速沉积, 部分泥质受地层压差影响, 向上挤入, 在紧邻的细粉砂岩段中发育泥质注入构造 (FSS9). 中部细粉砂岩段大多发育波状层理, 并在靠近下段处发育泥屑. 由于异重流持续时间较长, 水体不会一直保持稳定高能, 因此异重流内部也可能存在多个小型的“细—粗—细”粒序旋回. 在研究区细粒异重流沉积岩相组合中, 普遍存在发育平行层理、波状层理、波状交错层理的细粉砂岩, 是洪水期异重流对未固结底床产生的小型牵引作用所致.

2.3.7 岩相组合7——细粒浓缩密度流组合 细粒浓缩密度流组合 (concentrated density flow assemblage) 下部发育火焰状构造粗粉砂岩 (CSS1), 中部为含撕裂屑粗粉砂岩相 (CSS2), 上部为发育波状层理细含泥屑粉砂岩相 (FSS4) (图 5g, 图 7b), 3 种岩

相都具有较为明显的沉积特征. 该岩相组合是细粒浓缩密度流对泥质底床侵蚀后沉积的结果. 细粒浓缩密度流是由颗粒、湍流和浮力三者共同作用形成的流体, 其浓度大能量高, 可携带大量粒度相对较大的沉积物 (介于细粉砂和细砂). 沉积时流体会快速减速, 颗粒随着水体能量降低而沉降, 形成较干净的粗粉砂岩段. 底部对底床具有一定的侵蚀作用, 压迫下部未固结完全的泥质沉积物, 使其变形, 形成火焰状构造. 同时, 细粒浓缩密度流体会对底床进行侵蚀, 产生泥质撕裂屑混入流体, 形成含泥质撕裂屑粗粉砂岩相 (Mulder and Alexander, 2001). 随着时间的推移, 流体能量逐渐下降, 裹挟的沉积物粒度也变小, 在岩心上可观察到该岩相组合上部通常为含泥屑波状层理细粉砂岩相, 其中的泥屑通常显示出一种定向排列的构造.

3 细粒重力流沉积特征

鄂尔多斯盆地陇东地区发育多种典型的细粒重力流沉积, 沉积物内部发育各种类型的沉积构造. 与粗粒重力流相比, 细粒重力流中发育的沉积构造规模相对较小, 多为岩心尺度沉积. 研究区细粒重力流的触发机制可分为滑塌和洪水两类, 分别具有典型的沉积构造特征. 这些沉积构造对于细粒重力

流的识别及沉积过程的研究具有重要意义。

3.1 滑塌型细粒重力流沉积构造

滑塌成因的重力流通常具有较强的爆发能量,持续时长较短,涉及多种流体转换。岩心观察发现,细粒泥质湍流—泥流中的泥质块状沉积、细粒滑塌—碎屑流—泥流中的软沉积物变形构造和细粒浓缩密度流中的泥质撕裂屑是典型滑塌沉积构造。泥质块状沉积整体较均质,内部夹杂少量泥砾或植物碎片(图 6b);软沉积物变形构造与滑塌作用直接相关,岩性非均质性较强,通常形成卷曲的粉砂质条带(图 10b);泥质撕裂屑整体为均匀泥质,形状不规则,大小为 5~8 cm,边缘尖灭,呈撕裂状(图 10c)。此外,滑塌作用也可诱发浪涌状浊流,其特征为粒度向上变细,由细粉砂岩变为粉砂质泥岩,其间夹杂泥屑和砂屑颗粒。

基于岩心观察数据,本文选取 Y285、G347、C96、Z233 和 Z40 井,绘制了西北—东南方向延伸的岩相组合剖面(图 9)。该剖面跨越半深湖—深湖区域,细粒沉积类型非常丰富。滑塌成因的细粒重力流沉积在剖面上大量发育。位于西北部的 Y285 井和 G347 井均发育细粒滑塌—碎屑流—泥流沉积和细粒泥质湍流—泥流沉积,可观察到大量软沉积物变形构造。相比而言,Y285 中的滑塌型细粒重力流厚度更薄,沉积规模更小,G347 中则存在多期连续的滑塌型细粒重力流沉积,在岩心上可看到明显的粉砂变形构造和混杂分布的砂团泥团,非均质性较强。南部的 Z233 和 Z40 井中也多发育细粒滑塌—碎屑流—泥流沉积,与北部相比,南部两口井的软沉积物变形构造中常伴生大量狭长的泥质碎屑,砂质多呈向上挤入的砂墙状(砂质注入构造),砂质和泥质的分界较为清晰。南部 Z233 井发育多期浪涌状浊流沉积,上部可观察到几段正粒序岩相组合的叠置,是数期浪涌状浊流接连沉积的结果。研究区细粒浓缩密度流沉积发育较少,在平面上并未连片分布,在 Z233 的下部可见一期发育。细粒浓缩密度流沉积砂体粒度相对较粗,其下部发育的火焰状构造,上部细粉砂体中可见小型泥质撕裂屑。

3.2 洪水型细粒重力流沉积构造

洪水成因的细粒重力流沉积通常发育流动性较强的沉积构造,例如波状层理、波状交错层理和平行层理等。岩心观察显示,细粒过渡流—泥流和细粒异重流沉积中均可见到波状层理和顺层分布的泥屑砂屑等构造。波状层理单层为 1~2 mm,呈波

浪状,波长为 4~6 mm。顺层分布的泥屑和砂屑在搬运中受到流体的改造,可形成不同形状。岩心中观察到的常见泥屑砂屑形状有团状、透镜状、扁平屑状和长条状,反映了流体间剪切力的高低。此外,完整的细粒异重流沉积上可观察到“细—粗—细”的粒度旋回,是流体差异分布的结果。

洪水成因的细粒重力流沉积分布较广泛,西北部大量发育细粒过渡流—泥流沉积,细粒异重流沉积在南北部均有发育(图 9)。岩心显示,Y285 井在长 7₃时期约发育了 5~7 期细粒过渡流—泥流沉积,平均厚度为 1~2 m,包含了过渡流到泥流的转化。异重流沉积发育较独立,沉积厚度为 3~4 m。与其他洪水型细粒重力流沉积相比,细粒异重流沉积搬运距离较远,在位于深湖中心的 Z80 井上也可观察到完整的沉积序列(图 8a)。

4 细粒重力流沉积发育的主控因素

通过分析不同岩相组合的沉积构造和主微量元素响应,对不同类型细粒重力流沉积发育的影响因素展开了研究。研究表明,研究区长 7₃细粒重力流沉积的发育及其展布主要受构造活动、气候变化和古地貌因素的影响。

4.1 构造活动

中晚三叠世,扬子板块与华北板块缝合,导致华北板块南缘挠曲沉降形成了克拉通内挠曲拗陷盆地—鄂尔多斯盆地。长 7₃沉积期,湖盆构造活跃、周边火山活动频繁,湖盆水体深,面积大,发育了一套以深湖—重力流—退积型三角洲为主的沉积(吕奇奇等,2023)。

构造活动是重力流发育的重要触发因素。通过对长 7 底部凝灰岩夹层进行锆石原位 U-Pb 定年测试,结合碎屑粒度、沉积速率、地层厚度等证据,推算长 7 重力流形成时间距今 215~224 Ma,与秦岭印支运动第 II 期时间接近(杨华和邓秀芹,2013)。研究区西北部分布在坡折带附近的 C257、G347 长 7₃亚段沉积物发育大量的软沉积物变形构造(图 10b)和泥质撕裂屑(图 10c),是构造活动导致三角洲前缘坡发生滑塌作用的证据。滑塌引起的细粒重力流可携带大量沉积物和含有物进入深湖。在搬运过程中,粉砂质逐渐沉降,泥质不断混入,细粒碎屑流逐渐转变为泥流,最终在湖底扇远端形成黏性碎屑流沉积和上覆的泥流沉积。

火山活动产生的火山灰经季风搬运后差异沉

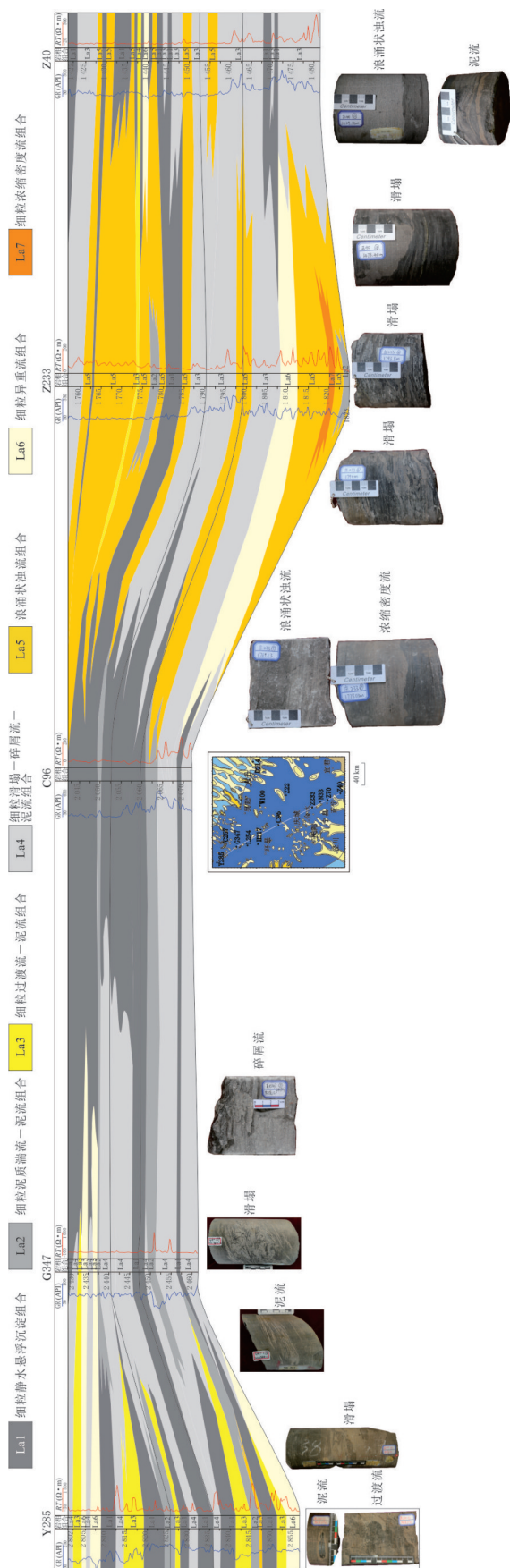


图 9 陇东地区区长₇亚段岩相组合展布
Fig.9 The cross section of lithofacies assemblages of Chang 7₃ submember in Longdong area

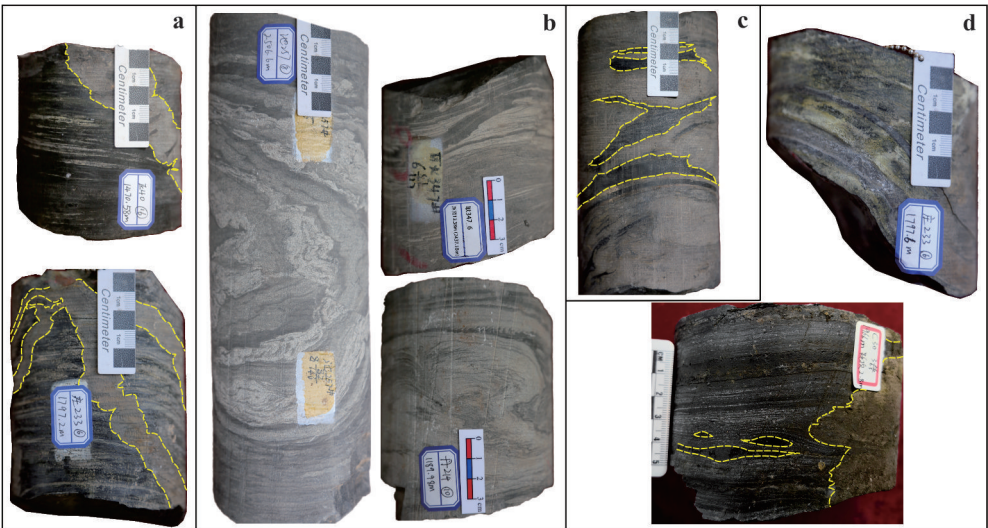


图 10 陇东地区长 7₃亚段受构造活动影响的沉积构造特征

Fig.10 Depositional characteristics caused by tectonic activities of Chang 7₃ submember in Longdong area

a. 砂质注入构造, Z40, 长 7₃, 1 470.58 m, Z233, 长 7₃, 1 797.2 m; b. 发育软沉积物变形构造的细粉砂岩, C257, 长 7₃, 2 506.6 m, G347, 长 7₃, 2 437.18 m, D214, 长 7₃, 1 189.98 m; c. 发育泥质撕裂屑的细粉砂岩, Z70, 长 7₃, 1 645.4 m; d. 含凝灰质泥岩, Z233, 长 7₃, 1 797.6 m; C30, 长 7₃, 1 966 m

降,最终沉降在水体中沉积成岩.研究区的岩心中观察到大量凝灰质薄层,偶见 5~7 cm 厚度.研究区长 7₃亚段的凝灰质在泥岩和泥质粉砂岩中均有存在,根据其伴生的沉积构造,推断可能沉积于两类沉积过程中.在水平纹层泥岩中多形成较平直的凝灰质夹层或条带,反映了一个较安静的沉积水体环境;泥质粉砂岩中的凝灰质则多为狭长的凝灰质薄层,可观察到变形砂墙和波状层理,部分与透镜状泥团伴生,反映了重力流驱使的沉积环境(图 10d).

4.2 气候变化

气候变化导致的温度和降水模式的变化会影响重力流的形成和发展,同时影响湖平面升降,进而改变细粒沉积物的沉积空间.晚三叠世的气候特征以半湿润一半干旱和明显的季节性变化为主要标志.这一时期的气候普遍呈现出炎热与干燥的特点,然而,也有证据显示在此期间全球范围内发生了多次湿润气候事件,如卡尼湿润事件(CPE)和拉丁-卡尼湿润期,这些事件对全球碳库造成了显著扰动(柳蓉等, 2021).长 7₃亚段沉积于拉丁期(Ladinian),气候温暖湿润,降雨量大且降雨频繁,使得湖盆水体扩张,可容纳空间增大.同时,降水为河流提供了更多的动力,使其可以携带更多细碎屑沉积物进入湖盆,在深湖区沉降(操应长等, 2017; 李相博等, 2023).

Y285井长 7₃亚段发育多种细粒沉积(图 11),其

下部和上部发育大套连贯的细粉砂岩,中部发育多期细粒静水沉淀沉积,中间夹杂不同类型的细粒重力流沉积.研究区 V/(V+Ni)值介于 0.67~0.86,平均值为 0.79, V/Cr 值介于 0.34~4.38,平均值为 1.99,根据(付金华等, 2018)的划分方案,指示为弱还原至还原环境. Sr/Cu 值大部分低于 10,指示为湿润气候. Rb/Sr 值介于 0.1~0.9,推测为湿润气候. Sr/Ba 值差异较大,介于 0.26~1.24,平均值为 0.45,大部分数值低于 0.6,推测为淡水—微咸水环境.因此,研究区在长 7₃亚段沉积期间整体为弱还原的湿润气候,水体整体为淡水—微咸水环境.微量元素比值在深度上存在升降变化,根据变化趋势,研究区的沉积环境在沉积期间存在多次次的干湿变化.

通过对比沉积相和微量元素地球化学数据的综合响应分析,发现在湿润气候条件下,洪水触发的细粒重力流沉积(细粒异重流沉积和细粒过渡流—泥流沉积)显著发育. Sr/Cu>10 处(2 832 m、2 837 m),出现两段较短的相对干旱的气候,岩心上显示滑塌型细粒重力流沉积明显发育.原生沉积岩中 Rb/Sr 升高可以指示古气候由相对干旱向相对湿润的气候演化(王琳霖等, 2018),洪水型细粒重力流沉积段可见 Rb/Sr 值先升高后降低的趋势,推测气候湿润可促使洪水型细粒重力流的发育.

CIA 指数是源区风化程度判别指标,被广泛应用于古气候条件的反演.高 CIA 指数指示较强的化

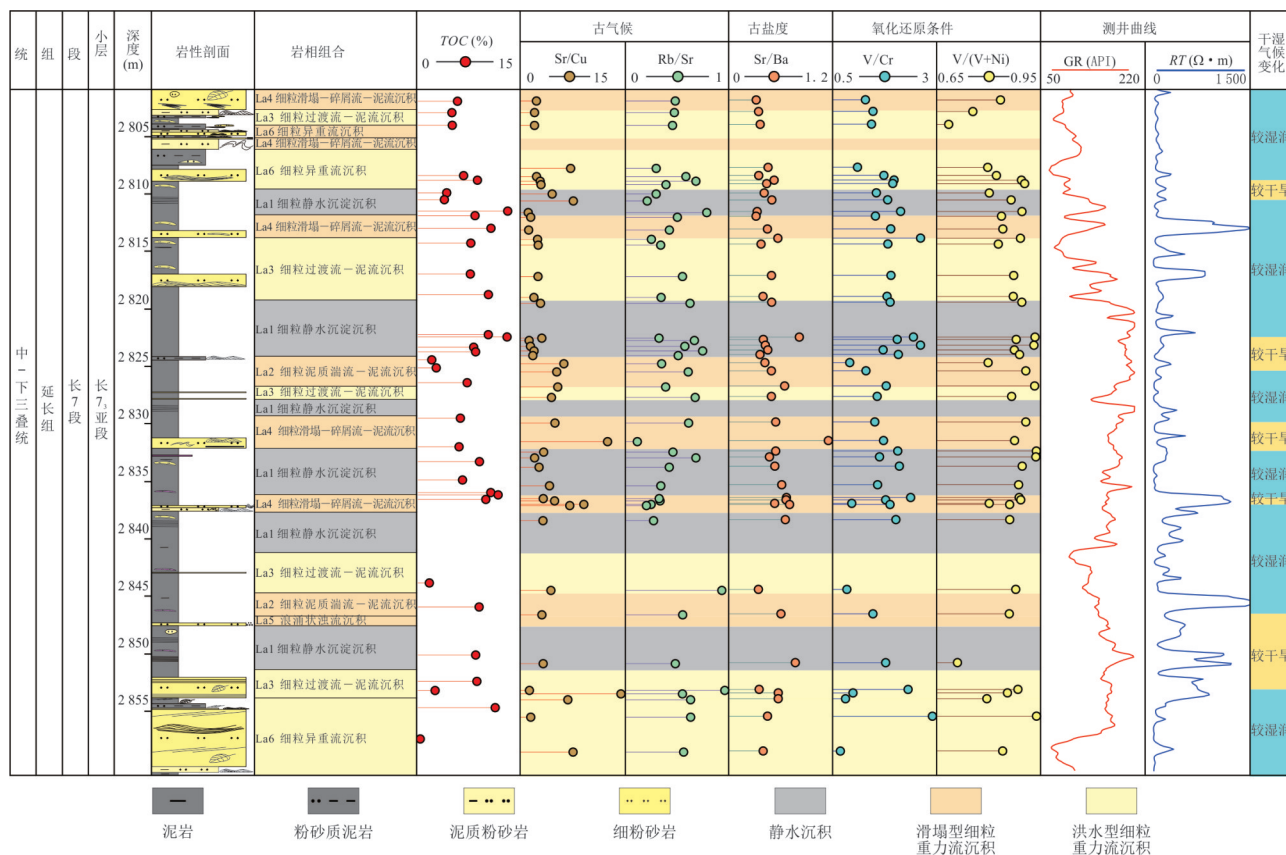


图11 Y285井岩相组合和元素地球化学综合柱状图

Fig.11 The comprehensive column map of lithofacies assemblages and element geochemical index of well Y285

学风化程度,可反映温暖潮湿的气候条件;低CIA指数则代表较弱的化学风化作用,是寒冷干燥的古气候条件 (Selvaraj and Chen, 2006; Bai *et al.*, 2015). 研究层段的CIA值大部分介于60~85,为中等风化作用下的湿热型气候,局部CIA值略高于85,为湿热型气候(图12). 气候指数 C_{value} 则用于表征气候湿度变化,数值越大指示气候越潮湿(关有志,1992).C值显示长₇中部和下部存在多期正偏,可能为湿润事件.位于研究区南部的Z40井发育大量滑塌成因的细粒重力流沉积,CIA值和C值的正偏发育与静水泥岩和泥流沉积的发育一致.温暖湿热气候下,大量的降水增加了湖盆水体体积,增大了沉积空间,利于深湖区静水泥岩的发育.

研究区的岩心上也可观察到明显的粒度变化旋回和流体流动形成的沉积构造.Z80井位于深湖中心区域,在其长₇亚段的下部发育一套明显的泥质粉砂岩—细粉砂岩—泥质粉砂岩旋回,细粉砂岩部分发育大量平行层理、波状层理和波状交错层理(图8a),是典型的洪水成因的细粒异重流沉积特征.这些沉积特征和岩相组合表明,长₇亚段发育

大量与洪泛事件相关的细粒异重流沉积(图5f,图8).典型的细粒异重流沉积常发育在水道的边缘和上部沉积单元,长₇在晚三叠世拉丁期(Ladinian)频繁发生的湿润事件是导致湖盆深湖区细粒异重流沉积的重要原因.

4.3 古地貌

古地貌显著影响了沉积体系的形成和砂体的展布特征.鄂尔多斯盆地长₇亚段沉积时期存在西北、东北和南部3个方向的沉积物源,东北方向的物源主要来自盆地东北—北向的大青山和阴山古陆,西北区域的物源则主要来源于盆地西北方向的阿拉善古陆,南部区域的物源则主要来自盆地西南方向的陇西古陆(张才利等,2013).鄂尔多斯盆地地层平缓,地层连贯且保存完整,前人通过印模法和沉积学方法恢复了长₇亚段的古地貌,认为存在高地、坡折带、湖底平原、湖底深洼、古沟道、湖底古脊和湖底古隆等多个微地貌单元(杨哲翰等,2023).长₇时期鄂尔多斯盆地的古地貌整体呈东缓西陡、北缓南陡的不对称拗陷形态(图13),结合不同单井岩相组合的纵向分布(图9)发现,研究区细粒重力流沉

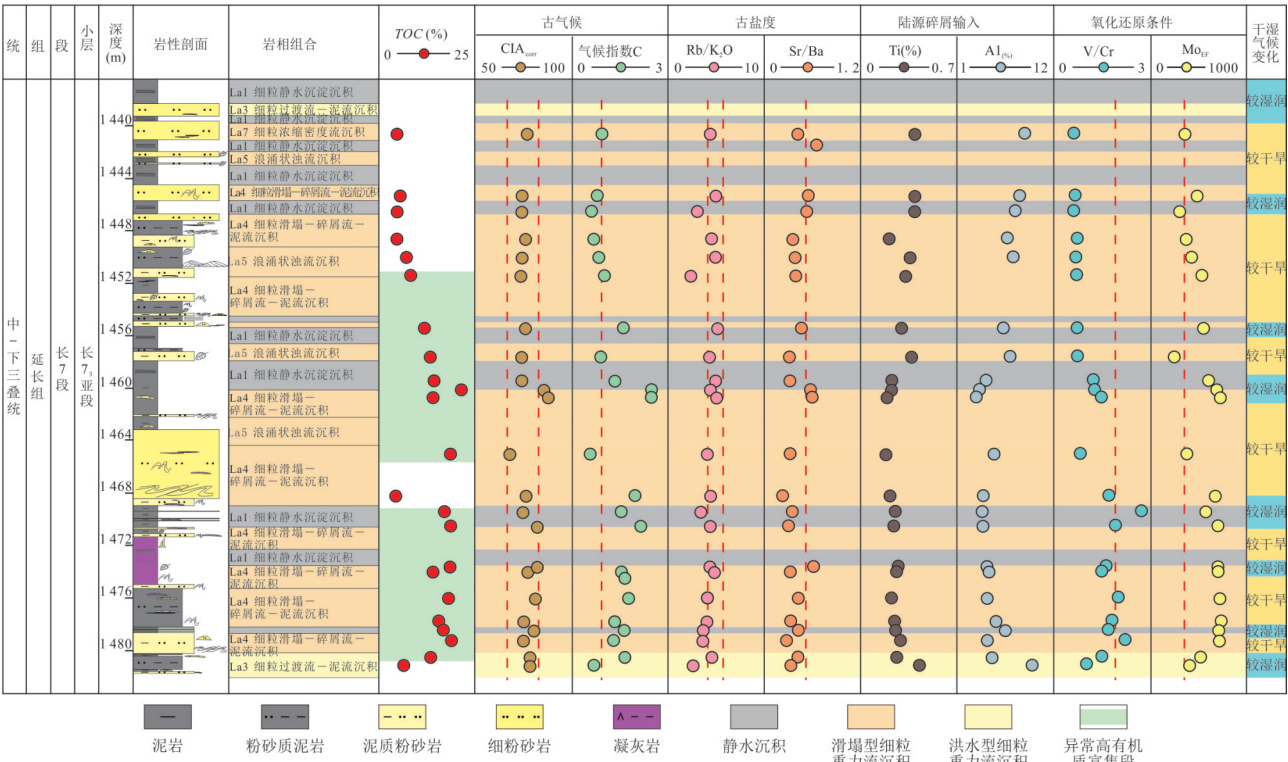


图 12 Z40井岩相组合和元素地球化学综合柱状图(修改自刘翰林等, 2023)

Fig.12 The comprehensive column map of lithofacies assemblages and element geochemical index of well Z40 (modified from Liu *et al.*, 2023)

积的发育主要受高地、坡折带、古沟道和湖底古隆的影响.位于西北部缓坡的Y285井中部发育极厚的细粒静水沉淀沉积层,中间夹杂多期滑塌型和洪水型细粒重力流沉积物,包括细粒泥质湍流—泥流沉积、细粒滑塌—碎屑流—泥流沉积、细粒过渡流—泥流沉积、浪涌状浊流沉积和细粒异重流沉积.坡折之下深湖区深洼部位的G347和C96井主要发育滑塌型细粒重力流向深湖搬运时裹挟黏土矿物形成的碎屑流和泥流,不具有明显的变形构造,此外可见细粒静水沉淀沉积发育.东南部的坡折下古沟道中的Z233井主要发育细粒滑塌—碎屑流—泥流沉积和浪涌状浊流沉积等滑塌型细粒重力流沉积,夹杂少量细粒异重流沉积和细粒静水沉淀沉积.位于坡折南部坡折带低部位的Z40井与Z233类似,发育大量滑塌型细粒重力流沉积,细粒静水沉淀沉积发育较少,可见几期较厚的洪水型细粒重力流沉积.

长₇时期陇东地区的深湖区域边缘发育坡折带,北部和东北部坡折带较缓,西部和南部较陡.分

布于定边—志丹一带的东北部发育较宽缓的I级坡折带,坡角为0.39°~0.88°;位于庆城西南方向的II级坡折带坡角为0.51°~0.94°;位于西南部崇信一带的I级坡折带较为陡峭,坡角为0.72°~1.24°(杨哲翰等, 2023).坡折带上的高地和湖底古隆等高部位沉积了大量均质的泥质细粒沉积物,发育极薄的水平纹层.结合砂体展布发现,北部宽缓坡折带的砂体多呈朵叶状展布,朵叶分叉不明显.南部陡峭坡折带上可见明显水道,水道底部的深湖朵叶中发育大量粉砂质变形构造,是典型的滑塌沉积特征.在北部低角度坡折的控制下,Y285井发育的滑塌型细粒重力流沉积层厚度较薄,单期规模较小,且发育期次与静水沉淀沉积及洪水型细粒重力流沉积持平.在南部高角度坡折的控制下,Z40井和Z233井发育多期不同类型的滑塌型细粒重力流沉积,单期层厚相对较厚,且发育连续.与位于坡折带低部位的Z40井相比,位于坡折带之下的Z233井中滑塌型细粒重力流沉积发育更为频繁(图13).因此,坡折角度的高低对滑塌型细粒重力流沉积的发育具有控制作用.

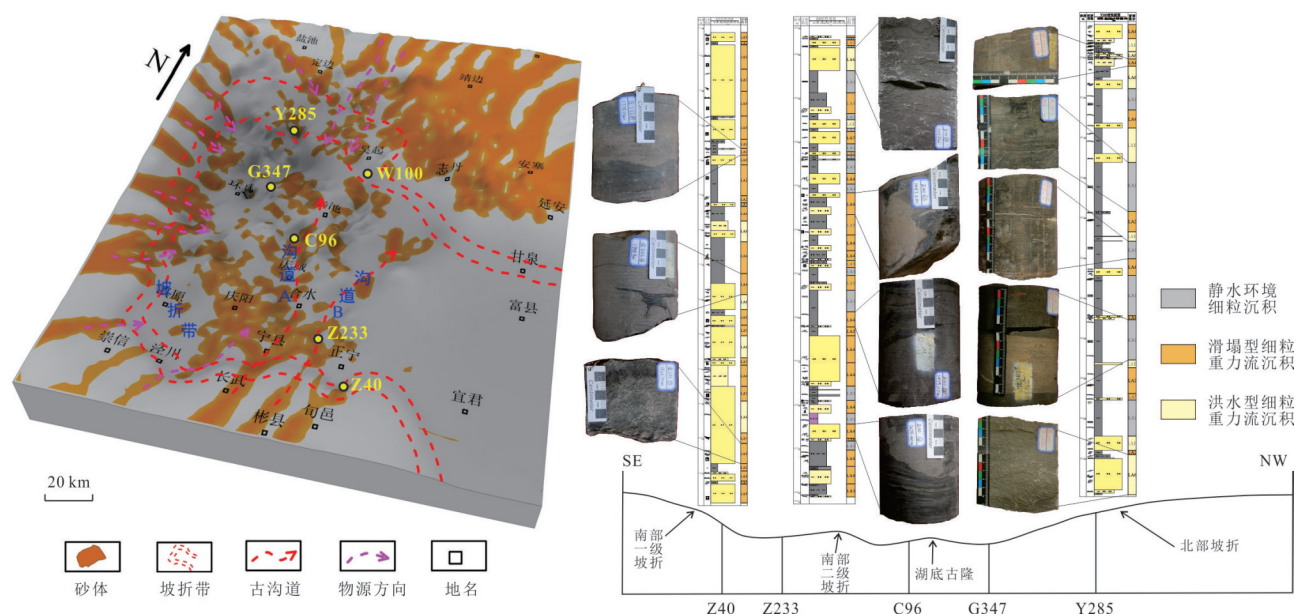


图13 鄂尔多斯盆地长₇沉积期古地貌控砂示意图(修改自杨哲翰,2023)

Fig.13 Sand control diagram of paleogeomorphology in Chang ₇₃ sedimentary period in Ordos basin (modified from Yang, 2023)

5 结论

(1) 陇东地区延长组长₇亚段沉积时期为半深湖—深湖环境,沉积物以泥质、粉砂质等细粒物质为主,根据岩性和沉积特征可划分为26种岩相.根据岩相纵向叠置关系和不同类型细粒重力流沉积的性质,可为7种岩相组合,分别为:细粒静水沉积组合、细粒泥质湍流—泥流组合、细粒过渡流—泥流组合、细粒滑塌—碎屑流—泥流组合、浪涌状浊流组合、细粒异重流组合和细粒浓缩密度流组合.

(2) 研究区细粒重力流沉积存在滑塌和洪水两类触发机制,分别具有典型的沉积特征.滑塌成因的细粒重力流沉积通常形成块状泥质构造、软沉积物变形构造或泥质撕裂屑.洪水成因的细粒重力流沉积常发育波状层理、波状交错层理或顺层分布的泥屑和砂屑.两者的典型特征可以用于区分细粒重力流沉积的形成机制.

(3) 研究区细粒重力流沉积的发育主要受构造活动、气候变化和古地貌的控制.构造活动诱发地震作用,促使滑塌型细粒重力流沉积的产生;气候旋回和洪水事件可影响沉积可容空间和重力流流体规模,并影响洪水型细粒重力流沉积的发育;古地貌可控制细粒重力流沉积的发育和展布,坡折带附近发育大量细粒重力流沉积,坡折角度对滑塌型细粒重力流沉积的沉积规模具有控制作用.

References

- Aplin, A. C., MacQuaker, J. H. S., 2011. Mudstone Diversity: Origin and Implications for Source, Seal, and Reservoir Properties in Petroleum Systems. *AAPG Bulletin*, 95 (12):2031—2059. <https://doi.org/10.1306/03281110162>
- Baas, J. H., Best, J. L., Peakall, J., 2011. Depositional Processes, Bedform Development and Hybrid Bed Formation in Rapidly Decelerated Cohesive (Mud - Sand) Sediment Flows. *Sedimentology*, 58(7): 1953—1987. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2011.01247.x>
- Bai, Y. Y., Liu, Z. J., Sun, P. C., et al., 2015. Rare Earth and Major Element Geochemistry of Eocene Fine-Grained Sediments in Oil Shale- and Coal-Bearing Layers of the Meihe Basin, Northeast China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 97: 89—101. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2014.10.008>
- Cao, Y. C., Yang, T., Wang, Y. Z., et al., 2017. Types and Genesis of Deep-Water Hybrid Event Beds Comprising Debris Flow and Turbidity Current. *Earth Science Frontiers*, 24(3):234—248(in Chinese with English abstract).
- Chen, A. Q., Chen, H. D., Hou, M. C., et al., 2011. The Middle-Late Triassic Event Sediments in Ordos Basin: Indicators for Episode I of the Indosinian Movement. *Acta Geologica Sinica*, 85(10): 1681—1690(in Chinese with English abstract).
- Fan, H. J., Wang, X. B., Chen, F., et al., 2024. Research Progress on Main Controlling Factors and Classification Schemes of Lacustrine Gravity Flow Deposits. *Petro-*

- leum Science Bulletin*, 9(2): 167–182(in Chinese with English abstract).
- Feng, Y.L., Li, S.T., Lu, Y.C., 2013. Sequence Stratigraphy and Architectural Variability in Late Eocene Lacustrine Strata of the Dongying Depression, Bohai Bay Basin, Eastern China. *Sedimentary Geology*, 295:1–26. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2013.07.004>
- Feng, Y.L., Yang, Z., Zhang, H., et al., 2023. Fine-Grained Gravity Flow Sedimentary Features and Their Petroleum Significance within Saline Lacustrine basins: A Case Study of the Fengcheng Formation in Mahu Depression, Junggar Basin, China. *Acta Geologica Sinica*, 97(3):839–863(in Chinese with English abstract).
- Fu, J.H., Li, S.X., Xu, L.M., et al., 2018. Paleo-Sedimentary Environmental Restoration and Its Significance of Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 45(6):936–946(in Chinese with English abstract).
- Guan, Y.Z., 1992. The Element, Clay Mineral and Depositional Environment in Horqin Sand Land. *Journal of Desert Research*, 12(1):9–15(in Chinese with English abstract).
- Li, X.B., Zhu, R.K., Hui, X., et al., 2023. Sedimentological Response of a Lacustrine Basin to the Late Triassic Carnian Pluvial Episode(CPE): Case Study from the Yanchang Formation, Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 41(2):511–526(in Chinese with English abstract).
- Li, Z.L., Li, H., Li, W.H., 2023. Sedimentary Characteristics of Late Triassic Deep Water Gravity Flow in Weibei Area. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 43(1):135–142(in Chinese with English abstract).
- Lin, C.S., Zheng, H.R., Ren, J.Y., et al., 2003. The Control of Early Tertiary Syndepositional Faults on Sedimentary Fill in the Dongying and Zhanhua Depressions of the Bohai Bay Basin. *Science in China (Series D)*, 33(11): 1025–1036(in Chinese).
- Liu, H.L., Zou, C.N., Qiu, Z., et al., 2023. Sedimentary Depositional Environment and Organic Matter Enrichment Mechanism of Lacustrine Black Shales: A Case Study of the Chang 7 Member in the Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 41(6):1810–1829(in Chinese with English abstract).
- Liu, R., Zhang, K., Liu, Q.Z.J., et al., 2021. Oil Shale Mineralization and Geological Events in China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(1):10–28(in Chinese with English abstract).
- Lowe, D.R., 1982. Sediment Gravity Flows: II Depositional Models with Special Reference to the Deposits of High-Density Turbidity Currents. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, (52). <https://doi.org/10.1306/212f7f31-2b24-11d7-8648000102c1865d>
- Lyu, Q.Q., Xin, H.G., Wang, L., et al., 2023. Sedimentary Types, Characteristics and Model of Lacustrine Fine-Grained Gravity Flow in the Member 7 of Triassic Yanchang Formation in Ningxian Area, Ordos Basin. *Journal of Palaeogeography*, 25(4):823–840(in Chinese with English abstract).
- Meng, Q.A., Ji, Y.L., 2009. Controlling of Paleo Geomorphology to Distribution of Sedimentary System in the Cretaceous of Tanan Depression. *Acta Petrolei Sinica*, 30(6): 843–848, 855(in Chinese with English abstract).
- Middleton, G.V., Hampton, M.A., 1973. Sediment Gravity Flows: Mechanics of Flow and Deposition. In: Middleton, G.V., Bouma, A.H., eds., *Turbidites and Deep Water Sedimentation*. SEPM Pacific Section Short Course, McMaster University, Hamilton, Ontario and University of Rhode Island, Kingston, R.I..
- Mulder, T., Alexander, J., 2001. The Physical Character of Subaqueous Sedimentary Density Flows and Their Deposits. *Sedimentology*, (48): 269–299. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.2001.00360.x>
- Mulder, T., Syvitski, J.P., Migeon, S., et al., 2003. Marine Hyperpycnal Flows: Initiation, Behavior and Related Deposits: A Review. *Marine and Petroleum Geology*, (20):861–882. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2003.01.003>
- Picard, M.D., 1971. Classification of Fine-Grained Sedimentary Rocks. *Journal of Sedimentary Research*, 41(1):179–195. <https://doi.org/10.1306/74d7221b-2b21-11d7-8648000102c1865d>
- Schieber, J., Southard, J., Thaisen, K., 2007. Accretion of Mudstone Beds from Migrating Floccule Ripples. *Science*, 318(5857): 1760–1763. <https://doi.org/10.1126/science.1147001>
- Selvaraj, K., Chen, C. 2006. Moderate Chemical Weathering of Subtropical Taiwan: Constraints from Solid-Phase Geochemistry of Sediments and Sedimentary Rocks. *The Journal of Geology*, 114(1): 101–116. <https://doi.org/10.1086/498102>
- Shanmugam, G., 1996. High-Density Turbidity Currents; Are They Sandy Debris Flows? *Journal of Sedimentary Research*, 66(1):2–10. <https://doi.org/10.1306/d426828e-2b26-11d7-8648000102c1865d>
- Shanmugam, G., 2000. 50 Years of the Turbidite Paradigm (1950s–1990s): Deep-Water Processes and Facies Models: A Critical Perspective. *Marine and Petroleum Geology*, (17): 285–342. [https://doi.org/10.1016/S0264-8172\(99\)00011-2](https://doi.org/10.1016/S0264-8172(99)00011-2)

- Shepard, F.P., 1954. Nomenclature Based on Sand-Silt-Clay Ratios. *Journal of Sedimentary Research*, 24 (3): 151—158.
- Talling, P.J., 2013. Hybrid Submarine Flows Comprising Turbidity Current and Cohesive Debris Flow: Deposits, Theoretical and Experimental Analyses, and Generalized Models. *Geosphere*, 9(3): 460—488. <https://doi.org/10.1130/ges00793.1>
- Talling, P.J., Masson, D.G., Sumner, E.J., et al., 2012. Subaqueous Sediment Density Flows: Depositional Processes and Deposit Types. *Sedimentology*, (59): 1937—2003. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2012.01353.x>
- Tian, J.C., Wu, Q., Wang, F., et al., 2011. Research on Development Factors and the Deposition Model of Large Area Reservoir Sandstones of He8 Section of Xiashihezi Formation of Permian in Ordos Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 27(8): 2403—2412 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L., Li, W.H., Liu, Q., et al., 2023. Lithofacies Characteristics and Sedimentary Environment of Chang 7 Black Shale in the Yanchang Formation, Ordos Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 25(3): 598—613 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L.L., Fu, Y., Fang, S.J., 2018. Elemental Geochemical Characteristics and Geological Significance of Majiagou Formation, Eastern Ordos Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 40(4): 519—525 (in Chinese with English abstract).
- Yang, H., Deng, X.Q., 2013. Deposition of Yanchang Formation Deep-Water Sandstone under the Control of Tectonic Events, Ordos Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 40(5): 513—520 (in Chinese with English abstract).
- Yang, T., Cao, Y.C., Tian, J.C., et al., 2021. Deposition of Deep-Water Gravity-Flow Hybrid Event Beds in Lacustrine Basins and Their Sedimentological Significance. *Acta Geologica Sinica*, 95(12): 3842—3857 (in Chinese with English abstract).
- Yang, T., Cao, Y.C., Wang, Y.Z., et al., 2015. Types, Sedimentary Characteristics and Genetic Mechanisms of Deep-Water Gravity Flows: A Case Study of the Middle Submember in Member 3 of Shahejie Formation in Jiyang Depression. *Acta Petrologica Sinica*, 36(9): 1048—1059 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z.H., Liu, J.Y., Lü, Q.Q., et al., 2023. Paleogeomorphological Restoration and Its Control on Gravity Flow Sand bodies: A Case Study of the Chang 7₃ Submember of the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 42(2): 146—158 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C.L., Zhang, L., Chen, T.S., et al., 2013. Provenance and Parent-Rock Types of Member 7 of Yanchang Formation (Triassic), Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(3): 430—439 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X.H., Feng, S.Y., Liang, X.W., et al., 2020. Sedimentary Microfacies Identification and Inferred Evolution of the Chang 7 Member of Yanchang Formation in the Longdong Area, Ordos Basin. *Acta Geologica Sinica*, 94(3): 957—967 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J.H., Jin, Z.J., Jin, Z.K., et al., 2016. Lithofacies Types and Sedimentary Environment of Shale in Wufeng-Longmaxi Formation, Sichuan Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 37(5): 572—586 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, R.K., Li, M.Y., Yang, J.R., et al., 2022. Advances and Trends of Fine-Grained Sedimentology. *Oil & Gas Geology*, 43(2): 251—264 (in Chinese with English abstract).
- Zou, C.N., Feng, Y.L., Yang, Z., et al., 2022. What Are the Lacustrine Fine-Grained Gravity Flow Sedimentation Process and the Genetic Mechanism of Sweet Sections for Shale Oil? *Earth Science*, 47(10): 3864—3866 (in Chinese with English abstract).
- Zou, C.N., Feng, Y.L., Yang, Z., et al., 2023. Fine-Grained Gravity Flow Sedimentation and Its Influence on Development of Shale Oil Sweet Spot Intervals in Lacustrine Basins in China. *Petroleum Exploration and Development*, 50(5): 883—897 (in Chinese with English abstract).
- Zou, C.N., Zhao, Z.Z., Yang, H., et al., 2009. Genetic Mechanism and Distribution of Sandy Debris Flows in Terrestrial Lacustrine Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(6): 1065—1075 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 操应长, 杨田, 王艳忠, 等, 2017. 深水碎屑流与浊流混合事件层类型及成因机制. *地学前缘*, 24(3): 234—248.
- 陈安清, 陈洪德, 侯明才, 等, 2011. 鄂尔多斯盆地中—晚三叠世事件沉积对印支运动 I 幕的指示. *地质学报*, 85(10): 1681—1690.
- 范洪军, 王夏斌, 陈飞, 等, 2024. 湖相重力流沉积主控因素与分类方案研究进展. *石油科学通报*, 9(2): 167—182.
- 冯有良, 杨智, 张洪, 等, 2023. 咸化湖盆细粒重力流沉积特征及其页岩油勘探意义: 以准噶尔盆地玛湖凹陷风城组为例. *地质学报*, 97(3): 839—863.
- 付金华, 李士祥, 徐黎明, 等, 2018. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 段古沉积环境恢复及意义. *石油勘探与开发*, 45(6): 936—946.
- 关有志, 1992. 科尔沁沙地的元素、粘土矿物与沉积环境. *中国沙漠*, 12(1): 9—15.

- 李相博,朱如凯,惠潇,等,2023.晚三叠世卡尼期梅雨事件(CPE)在陆相盆地中的沉积学响应:以鄂尔多斯盆地延长组为例.沉积学报,41(2):511—526.
- 李宗霖,李红,李文厚,2023.渭北地区晚三叠世深水重力流沉积特征.西安科技大学学报,43(1):135—142.
- 林畅松,郑和荣,任建业,等,2003.渤海湾盆地东营、沾化凹陷早第三纪同沉积断裂作用对沉积充填的控制.中国科学(D辑:地球科学),33(11):1025—1036.
- 刘翰林,邹才能,邱振,等,2023.陆相黑色页岩沉积环境及有机质富集机制:以鄂尔多斯盆地长7段为例.沉积学报,27(6):1810—1829.
- 柳蓉,张坤,刘招君,等,2021.中国油页岩富集与地质事件研究.沉积学报,39(1):10—28.
- 吕奇奇,辛红刚,王林,等,2023.鄂尔多斯盆地宁县地区三叠系延长组7段湖盆细粒重力流沉积类型、特征及模式.古地理学报,25(4):823—840.
- 蒙启安,纪友亮,2009.塔南凹陷白垩纪古地貌对沉积体系分布的控制作用.石油学报,30(6):843—848,855.
- 田景春,吴琦,王峰,等,2011.鄂尔多斯盆地地下石盒子组盒8段储集砂体发育控制因素及沉积模式研究.岩石学报,27(8):2403—2412.
- 王岚,李文厚,刘群,等,2023.鄂尔多斯盆地延长组长7黑色页岩岩相分类与沉积环境恢复.古地理学报,25(3):598—613.
- 王琳霖,浮昀,方诗杰,2018.鄂尔多斯盆地东缘马家沟组元素地球化学特征及古沉积环境.石油实验地质,40(4):519—525.
- 杨华,邓秀芹,2013.构造事件对鄂尔多斯盆地延长组深水砂岩沉积的影响.石油勘探与开发,40(5):513—520.
- 杨田,操应长,田景春,等,2021.陆相湖盆深水重力流混合事件层沉积及沉积学意义.地质学报,95(12):3842—3857.
- 杨田,操应长,王艳忠,等,2015.深水重力流类型、沉积特征及成因机制:以济阳坳陷沙河街组三段中亚段为例.石油学报,36(9):1048—1059.
- 杨哲翰,刘江艳,吕奇奇,等,2023.古地貌恢复及其对重力流沉积砂体的控制作用:以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7₃亚段为例.地质科技通报,42(2):146—158.
- 张才利,张雷,陈调胜,等,2013.鄂尔多斯盆地延长组长7沉积期物源分析及母岩类型研究.沉积学报,31(3):430—439.
- 张晓辉,冯顺彦,梁晓伟,等,2020.鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长7段沉积微相及沉积演化特征.地质学报,94(3):957—967.
- 赵建华,金之钧,金振奎,等,2016.四川盆地五峰组—龙马溪组页岩岩相类型与沉积环境.石油学报,37(5):572—586.
- 朱如凯,李梦莹,杨静儒,等,2022.细粒沉积学研究进展与发展方向.石油与天然气地质,43(2):251—264.
- 邹才能,冯有良,杨智,等,2022.湖盆细粒重力流沉积作用过程及甜点层发育机制是什么?地球科学,47(10):3864—3866.
- 邹才能,冯有良,杨智,等,2023.中国湖盆细粒重力流沉积作用及其对页岩油“甜点段”发育的影响.石油勘探与开发,50(5):883—897.
- 邹才能,赵政璋,杨华,等,2009.陆相湖盆深水砂质碎屑流成因机制与分布特征:以鄂尔多斯盆地为例.沉积学报,27(6):1065—1075.