

中国断陷和拗陷湖盆高可容纳空间层序 细粒重力流沉积及其页岩油意义*

冯有良¹ 邹才能¹ 杨 智¹ 蒋文琦² 张天舒¹
张 洪¹ 刘 畅¹ 王小妮¹

1 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

2 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

摘 要 重力流包括粗粒和细粒重力流, 是深湖环境最重要的沉积类型之一, 其中, 细粒重力流能成为非常规页岩油的“甜点段”。研究该沉积在陆相湖盆层序格架中的分布规律, 对页岩油“甜点段”的预测具有重要意义。作者通过对中国主要湖盆重力流发育与层序格架的系统对比研究发现, 重力流沉积体系主要发育在高可容纳空间沉积层序中。断陷湖盆的低位域 (LST) 湖底扇近端发育粗粒重力流沉积, 远端发育薄层细粒重力流沉积, 其分布受沟谷和同沉积构造坡折的控制。水进体系域 (TST) 发育细粒水道—堤—朵叶体系。高位体系域 (HST) 发育非限定水道湖底扇, 细粒重力流沉积分布在扇的远端。拗陷湖盆的水进体系域 (TST) 主要发育受洪泛影响的大型细粒水道—堤—朵叶体系, 而在湖盆挠曲坡折的较陡斜坡发育细粒湖底扇体系。高位域 (HST) 及低位域 (LST) 既可形成细粒湖底扇体系, 也可发育细粒的水道—堤—朵叶体系。分布在湖底扇远端和水道—堤—朵叶体系的细粒重力流沉积能形成页岩油的“甜点段”。泥流沉积形成页理型“甜点段”, 细粒碎屑流、细粒油流、细粒异重流和细粒过渡流沉积形成纹层型、层理型“甜点段”, 细粒浓缩密度流沉积只形成层理型“甜点段”。细粒重力流沉积是页岩油勘探开发的有利“甜点段”。

关键词 高可容纳空间层序 细粒重力流沉积 陆相盆地 页岩油 “甜点段”

第一作者简介 冯有良, 男, 1963 年生, 博士 (后), 高级工程师, 长期从事层序地层学、沉积学和石油地质学研究。E-mail: fyoliang@petroChina.com.cn。

中图分类号: P512.32 文献标志码: A

Fine-grained gravity flow deposits and their significance for shale oil within high-accommodation sequences in faulted and down-warped lacustrine basins of China

FENG Youliang¹ ZOU Caineng¹ YANG Zhi¹ JIANG Wenqi² ZHANG Tianshu¹
ZHANG Hong¹ LIU Chang¹ WANG Xiaoni¹

1 Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China

2 College of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

* 中国石油天然气股份有限公司科技部项目 (编号: 2021DJ18, 2021DJ1802) 资助。[Financially supported by PetroChina Science and Technology Projects (Nos. 2021DJ18, 2021DJ1802)]

收稿日期: 2023-06-30 改回日期: 2024-01-18

Abstract Gravity flows, including coarse-grained and fine-grained gravity flows, are the most important sedimentation processes in deep-lake environments. Fine-grained gravity flow sediments hold significant potential as unconventional shale oil “sweet spot intervals”. The distribution characteristics of fine-grained gravity flow sediments within sequence stratigraphic frameworks in lacustrine basins are of great significance to the prediction of shale oil “sweet spot intervals”. Through systematic comparative study of gravity flow deposits and sequence frameworks in major lacustrine basins in China, it is found that gravity flow sedimentary systems are mainly deposited in high accommodation sequences. In the lowstand systems tracts (LST) of the faulted/rifted lacustrine basins, coarse-grained gravity flow deposits are developed at proximal sublacustrine fans and thin fine-grained gravity flow sediments are deposited at distal sublacustrine fans. The distribution of sublacustrine fans is controlled by valley and syn-sedimentary structural slope breaks. Fine-grained channel-levee-lobe systems are developed in transgressive systems tracts (TST). Unconfined-channel sublacustrine fans are developed in highstand systems tracts (HST), and fine gravity flow deposits are distributed in distal sublacustrine fans. Large fine-grained channel-levee-lobe systems influenced by flooding occurred in transgressive systems tracts (TST) of down-warped lacustrine basins. On the steeper slope of syn-depositional flexural breaks, fine-grain sublacustrine fan systems are present. Both fine-grained sublacustrine fan systems and fine-grained channel-levee-lobe systems can be deposited in highstand systems tracts (HST) and lowstand systems tracts (LST). Fine-grained gravity flow deposits at distal sublacustrine fans and channel-levee-lobe systems can form “sweet spot intervals” of shale oil. Mudflow deposits form “sweet spot intervals” of foliation type, fine-grained debris flow, fine-grained turbidity current, fine-grained hyperpycnal flow and fine-grained transition flow deposits form “sweet spot intervals” of lamination type and bedding type, while fine-grained concentrated density flow deposits only form “sweet spot intervals” of bedding type. Fine-grained gravity flow deposits are favorable “sweet spot intervals” for shale oil exploration and development.

Key words high-accommodation sequence, fine-grained gravity flow deposits, continental basin, shale oil, “sweet spot interval”

About the first author FENG Youliang, born in 1963, holds a Ph.D. in geosciences and is a senior engineer at the Department of Petroleum Geology, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and development. He is mainly engaged in research on sequence stratigraphy, sedimentology, and petroleum geology in lacustrine basins. E-mail: fyouliang@petroChina.com.cn.

20 世纪 90 年代经典层序地层学的概念和研究方法 (van Wagoner *et al.*, 1990; Vail *et al.*, 1991) 引入中国。中国学者根据中国中、新生代含油气盆地以陆相盆地为主, 盆地构造活动性强, 湖盆面积与海洋相比较小且湖盆对气候变化更为敏感, 湖盆具有多向沉积物源供给体系, 湖平面的变化受沉积物供给速率、构造沉降、气候等多因素共同作用的特点 (李思田等, 2002), 建立了一套适合陆相构造活动型盆地特征的层序等级体系和层序界面识别标志 (冯有良, 1999; 冯有良等, 2000, 2010; 蔡希源和李思田, 2003; Feng *et al.*, 2013, 2016)。根据陆相湖盆

底床坡度梯度受隐伏构造、同沉积断裂、断层转换带和同生断裂相关褶皱控制的特征提出了同沉积构造坡折带的概念 (冯有良, 1999; 林畅松等, 2000, 2003; 冯有良和徐秀生, 2006), 认为同沉积构造坡折带控制了层序建造、低位域湖底扇和水进体系域烃源岩的展布, 进一步控制了岩性油气藏富集带的展布。该成果和认识被成功地应用于中国渤海湾、海拉尔—塔姆察格、松辽及准噶尔盆地岩性、地层油气藏勘探, 并取得了良好的效果 (冯有良和邱以刚, 2003; 林畅松等, 2003; 蒙启安和纪友亮, 2009; 冯有良等, 2018a, 2018b)。然而该成果和认识主要是针对

作为岩性油气藏主要储集层的粗粒的湖底扇砂体的预测，对于那些作为页岩油“甜点段”的以粉砂和泥质沉积为主的粒径小于0.0625 mm的细粒重力流沉积物在层序格架中的分布规律，几乎没有做过深入的分析研究。近期的研究表明细粒重力流是深湖重要的细粒沉积作用过程，它不但能把长英质等脆性矿物带入深湖，还能把有机质从浅湖带入深湖形成富有机质层，构成页岩油气的甜点段（邹才能等，2023）。传统观点认为细粒沉积物主要是通过悬浮沉积的形式沉积于安静水体。但是近期研究表明生物化学作用形成的细粒絮凝颗粒和粉砂可以以底流的形式（细粒重力流体系）向深水盆地搬运数千千米（Talling *et al.*, 2012; Schieber, 2016），粉砂和泥质等细粒沉积物可在深水以细粒重力流、等深流的形式搬运和沉积（Schieber and Southard, 2009）。因此重力流是形成深水粉砂质和泥质沉积物的重要沉积作用和搬运方式之一（Boulestex *et al.*, 2019）。细粒重力流，由于其富含黏土矿物和有机质，其搬运演化过程、沉积物特征及分布规律都与传统的粗粒重力流之间存在明显差异。低密度浊流、细粒异重流、细粒过渡流、细粒碎屑流和泥流沉积共存是深水（湖）细粒重力流沉积物的重要表现形式（Stow *et al.*, 2001; Sumner *et al.*, 2009; Baker *et al.*, 2017; Mutti, 2019; Craig *et al.*, 2020）。这些与传统细粒沉积作用不同的细粒重力流沉积过程是控制细粒沉积物非均质性及把有机质快速输送到深水并保存和富集的重要原因（Baas *et al.*, 2016a, 2016b; Craig *et al.*, 2020），对页岩油“甜点”评价和预测有重要意义。与深水海盆一样，湖盆深水区也存在多种重力流变学类型，存在重力流变学性质的转化，并形成细粒混合事件层（Dodd *et al.*, 2022）。这些重力流沉积物是页岩油气的甜点层段。本研究以渤海湾断陷盆地济阳拗陷古近系沙河街组三段（ E_2s_3 ），准噶尔断陷盆地玛湖凹陷下二叠统风城组（ P_1f ），松辽后裂谷拗陷盆地北部上白垩统青山口组一段（ K_2qn_1 ）、嫩江组一段（ K_2n_1 ），鄂尔多斯挠曲拗陷盆地三叠系延长组7段3亚段（ $T_3yc_7^3$ ）为例研究断陷、拗陷盆地高可容纳空间沉积层序内发育的细粒重力流沉积分布规律及其对页岩油的意义。

1 地质概况

1.1 渤海湾盆地济阳拗陷沙河街组三段

济阳拗陷位于渤海湾盆地的东南隅，是一个古近纪大型裂陷盆地，其周边被凸起及隆起所围限，拗陷内部被北东向、北西向展布的凸起分割为东营、沾化、惠民、车镇4大凹陷（图1-A）。凹陷总体具有北断、南超的构造特征（图1-D）。沙三段是在盆地基底构造沉降速率达到最大、气候温暖湿润条件下，发育的1套以深湖—湖底扇—三角洲沉积为主的地层（图1-B, 1-C），是该拗陷最为主要的生油、储油层段。根据其层序界面的发育特征，该套地层可划分3个三级层序（冯有良等，2010）。

1.2 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组

准噶尔盆地是一个晚石炭世—第四纪的陆相叠合盆地。它的西北部、东北部和南部与山系为邻（图2-A）。玛湖凹陷位于中央拗陷带西侧，西接西部隆起，东北部与英西凹陷相连，东部及西南部隔夏盐凸起、达巴松凸起等与盆1井西凹陷、沙湾凹陷为邻（图2-A）。玛湖凹陷上石炭统一二叠统属于裂谷盆地或后造山伸展盆地沉积（Feng *et al.*, 2015; Tang *et al.*, 2020, 2021）（图2-B）。其中风城组是在强烈裂陷伸展构造幕沉积的1套咸水湖盆深湖—湖底扇—扇三角洲为主的地层，也是该凹陷主要的生油层段。该套地层根据其层序界面的发育特征，也可划分3个三级层序，分别包括1个水进体系域（TST）和1个水退体系域（RST）（图2-B；冯有良等，2023）。

1.3 松辽盆地青山口组一段、嫩江组一段

松辽盆地是欧亚大陆东缘白垩纪板内裂谷盆地。它西接大兴安岭、北邻小兴安岭，东南部为张广才岭。早白垩世该盆地处于同裂谷发展阶段，晚白垩世为后裂谷拗陷盆地发展阶段。晚白垩世根据其构造和沉积特征可划分为西南隆起、东南隆起、东北隆起、北部倾没带、西斜坡带和中央拗陷带6个二级构造单元（图3-A）。青山口组一段和嫩江组一段是在盆地基底构造沉降速率最大，气候温暖、湿润的条件下，发育的2套在深湖环境沉积的以黑灰色含有机质泥岩、油页岩，以及黑灰色粉砂质泥岩夹粉砂岩为主的地层（图3-A），也是松辽

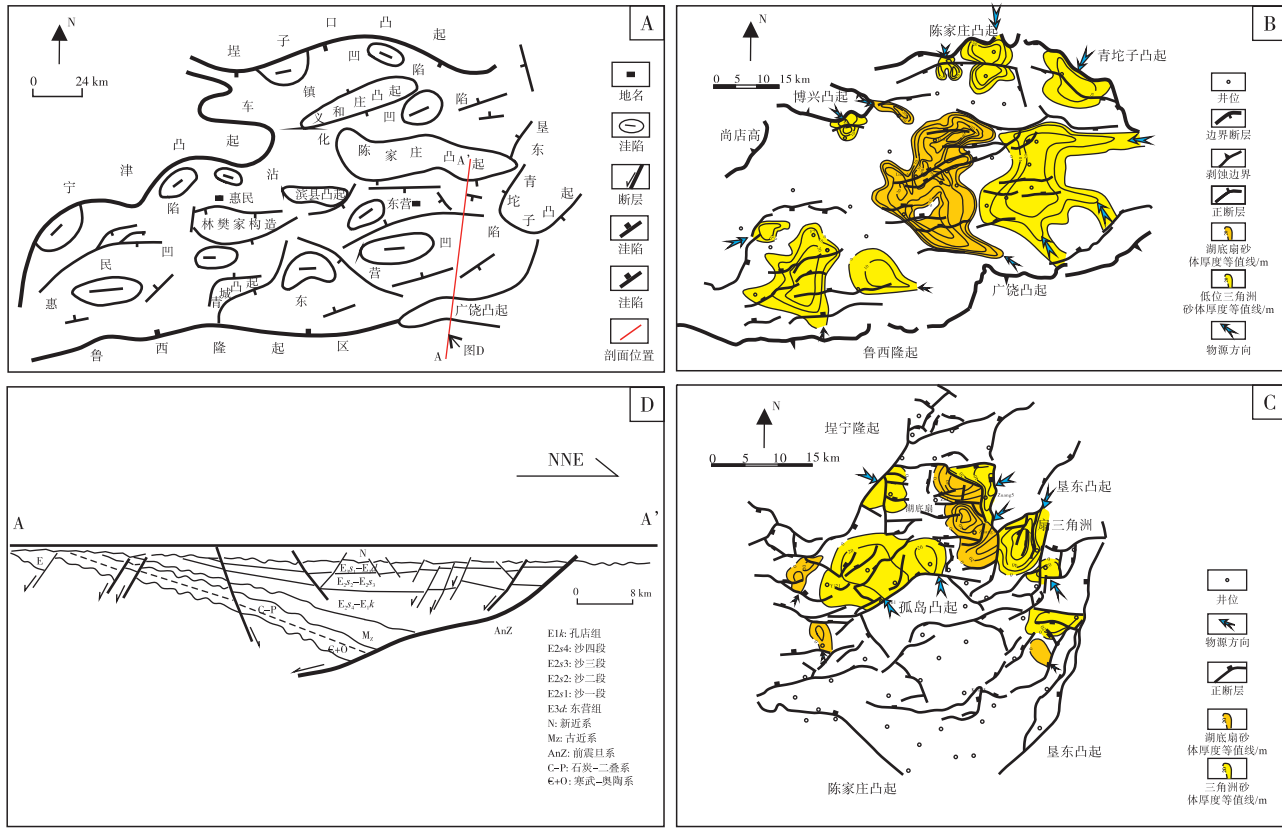


图 1 济阳拗陷构造纲要 (A), 东营凹陷沙河街组三段上亚段 (B)、沾化凹陷沙河街组三段下亚段 (C) 层序低位域湖底扇和三角洲砂体分布 (据 Feng *et al.*, 2013, 2016), 以及东营凹陷构造剖面 (D)

Fig. 1 Tectonic outline map of Jiyang depression, Bohai Bay Basin (A), the sandstone distribution map of sub-lacustrine fans and deltas within lowstand systems tract in sequences of the sub-upper member of Third Member of Shahejie Formation ($E_2s_3^u$) in Dongying sag (B), the lower sub-member of Third Member of Shahejie Formation ($E_2s_3^l$) in Zhanhua sag (C) (after Feng *et al.*, 2013, 2016) and structural profile of Dongying sag (D)

盆地主要的源岩层段, 分属于 2 个沉积层序 (Feng *et al.*, 2021a)。

1.4 鄂尔多斯盆地延长组 7 段 3 亚段

鄂尔多斯盆地是中晚三叠世华北板块与华南板块缝合, 导致华北克拉通南缘沉降形成的挠曲拗陷盆地(图 3-B)。盆地北部为大青山, 西部为贺兰山、六盘山, 东部为中条-吕梁山(图 3-B)。盆地内可划分为渭北隆起、伊盟隆起、西部逆冲带、天环拗陷、晋西挠曲带和伊陕斜坡 6 个构造单元(图 3-B)。延长组 7 段 3 亚段沉积于盆地主挠曲沉降期。该时期盆地基底构造沉降速率大于沉积物供给速率, 气候温暖湿润, 并发生了拉丁期至卡尼期全球洪水事件 (Dal Corso *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2021; Zou *et al.*, 2022)。深湖区长 7 段 3 亚段层序

发育了与洪水事件和三角洲前缘滑塌相关的黑灰色泥岩夹粉砂岩细粒重力流沉积物, 以及因陆源有机质输入和火山喷发诱发的藻类等浮游生物大量繁殖而形成的富有机质泥岩和油页岩 (Chen *et al.*, 2021; Zou *et al.*, 2022; 吕奇奇等, 2022; Niu *et al.*, 2023)

2 高可容纳空间层序内细粒重力流沉积发育特征

当盆地构造沉降速率较高、气候温暖湿润, 盆地的可容纳空间增长速率也较高, 此时如果盆地的可容纳空间增长速率大于沉积物供给速率, 可形成欠补偿深湖环境, 发育厚层的以深湖泥岩和油页岩为主的沉积层序。如果沉积物供给速率也足够大,

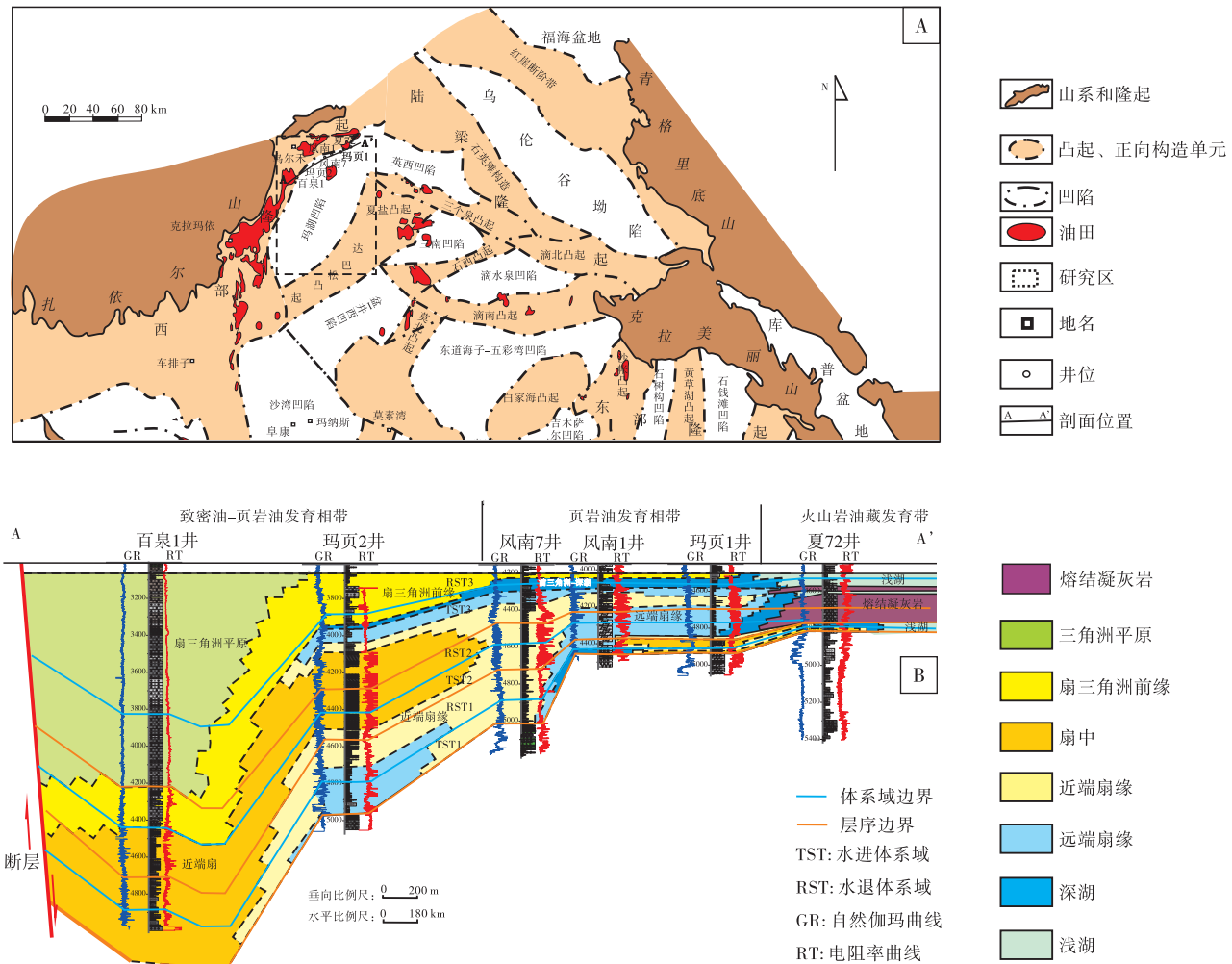


图 2 准噶尔盆地玛湖凹陷构造位置 (A) 和风城组沉积剖面 (B) (据冯有良等, 2023)

Fig. 2 Tectonic location of Mahu sag, Junggar Basin (A), and sedimentary section of the Fengcheng Formation (B) (after Feng *et al.*, 2023)

且大于或等于可容纳空间增长速率, 盆地就会发育厚层的以深湖、河流三角洲为主的层序。盆地的这种构造和气候条件形成的沉积背景就可称之为高可容纳空间盆地背景 (Bowman and Johnson, 2014)。这些在高可容纳空间盆地背景下发育的三级沉积层序可称之为高可容纳空间层序 (冯有良等, 2018a, 2018b; Feng *et al.*, 2021a)。按照这样的定义, 渤海湾盆地济阳坳陷沙三段 3 个三级沉积层序 (冯有良, 1999)、准噶尔盆地风城组 3 个三级层序均属于断陷盆地高可容纳空间沉积层序 (冯有良等, 2023)。松辽盆地的青山口组一段沉积层序、嫩江组一沉积层序 (冯有良等, 2018a)、鄂尔多斯盆地延长组 7 段 3 亚段沉积层序 (吕奇奇等, 2022) 属于典型的坳陷湖盆高可容纳空间层序。无论是断

陷还是坳陷湖盆, 高可容纳空间背景意味着构造活动性强、盆地构造沉降速率高、气候温暖湿润, 发育以深湖重力流和三角洲沉积体系为主的高可容纳空间沉积层序。高可容纳空间层序的发育条件, 决定了其内更容易发育重力流沉积体系, 特别是细粒重力流体系。下面分别以渤海湾盆地济阳坳陷沙三段、准噶尔盆地玛湖凹陷风城组断陷湖盆沉积, 松辽盆地青一段、嫩一段和鄂尔多斯盆地长 7 段 3 亚段坳陷湖盆沉积为例, 归纳总结断陷和坳陷盆地高可容纳空间层序内细粒重力流发育特征。

2.1 断陷盆地高可容纳空间层序内细粒重力流沉积发育特征及模式

2.1.1 渤海湾盆地济阳坳陷沙三段层序

渤海湾断陷盆地济阳坳陷东营、沾化凹陷古近

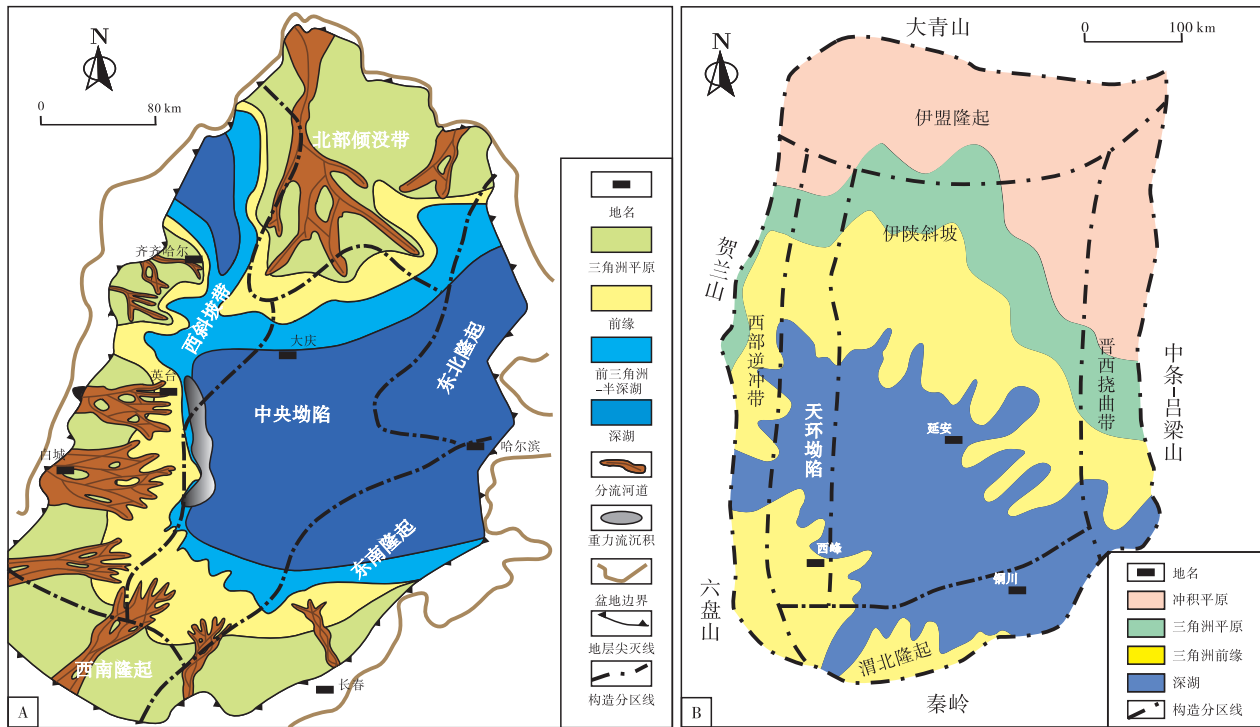


图 3 松辽盆地青一段 (A)、鄂尔多斯盆地长 7 段 (B) 构造纲要和沉积相图

(A 图据 Meng *et al.*, 2016, 有修改; B 图据 Chen *et al.*, 2021, 有修改)

Fig. 3 Structural schematic and sedimentary facies maps of the First Member of Qingshankou Formation in Songliao Basin (A), and the Seventh Member of Yanchang Formation in Ordos Basin (B) (Fig. A is modified from Meng *et al.*, 2016; Fig. B is modified from Chen *et al.*, 2021)

纪沙三段沉积期, 盆地气候温暖湿润, 此时盆地基底沉降速率高, 可达 264~600 m/Ma (冯有良等, 2010), 深湖区沉积速率仅为 79~198 m/Ma, 湖盆发育成欠补偿的深湖环境, 湖水深度可达百米 (姚益民, 1994), 沉积了厚度 300~800 m 的以深湖泥岩、油页岩、重力流和河流三角洲沉积为主的沉积层序 (Feng *et al.*, 2013; 吴千然等, 2023)。这套沉积层序属于高可容纳空间沉积层序 (Feng *et al.*, 2021a)。层序低位域发育的湖底扇是当湖平面快速下降时, 沉积物被搬运到深湖区形成的。东营凹陷沙三上层序的低位域在湖盆的缓坡同沉积断裂坡折带之下, 发育了大型的限定水道—湖底扇沉积体系, 砂体厚 20~40 m, 呈扇形, 延伸约 30 km。该湖底扇的近端 (扇根和扇中) 主要发育的是粗粒重力流沉积, 而在其远端 (扇缘) 可发育以粉砂岩和泥质沉积为主的细粒重力流沉积 (图 1-B)。沾化凹陷陡坡沙三下层序低位域在第 2 坡折之下发育由于低位扇三角洲滑塌而引起的陡坡非限定水道

湖底扇, 扇体厚度可达 10~30 m, 沿坡折断裂分布, 延伸 5~10 km (图 1-C)。在湖底扇的远端也可发育细粒重力流沉积。层序水进体系域 (TST) 沉积时期, 湖平面快速上升, 湖域范围扩大, 发育与洪泛相关的以粉砂岩为主的异重流体系 (Zavala and Arcuri, 2016)。该异重流体系发育以正反递变为特征的薄层粉砂质异重流沉积, 厚度约 0.2~1.0 m, 分布范围小。高位域 (HST) 沉积期湖平面达到最高并开始缓慢湖退, 沉积物供给速率高加之地震等诱发因素, 可在陡坡、缓坡前三角洲斜坡发育因滑塌引起的由粗粒和细粒重力流沉积组成的非限定水道湖底扇, 厚度约 5~20 m, 呈舌形分布, 延伸 1~5 km。其中细粒重力流沉积发育在非限定水道湖底扇的远端。与此同时, 在坡折之下的远端平坦湖床区也可以发育洪泛引起的以异重流沉积作用为主的细粒水道—堤一朵叶体系, 厚度较小, 为 0.5~2.0 m, 延伸 2~3 km (Yang *et al.*, 2019)。

2.1.2 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组层序

准噶尔盆地风城组沉积期, 玛湖凹陷处于主伸

展裂陷沉降期并伴随着火山喷发。湖盆构造沉降速率大于沉积速率，盆地发育成受火山喷发和干热气候影响的咸化的深湖—半深湖环境，沉积了风城组具有高可容纳空间特征的 3 个 3 级层序(图 2-B)。在湖盆的陡坡发育了扇三角洲体系，缓坡发了滨浅湖体系，洼陷带发育了由于扇三角洲滑塌形成的湖底扇(冯有良等, 2023)。据对钻穿风城组湖底扇缘的玛页 1 井岩心的观察，在湖底扇缘发育了 8 个以白云质粉砂岩、泥岩为主的细粒重力流沉积岩相组合(图 4)(冯有良等, 2023)。它们分别是细粒浓缩密度流—细粒过渡流—细粒碎屑流(或泥流)沉积岩相组合(LA1)，细粒异重流沉积岩相组合

(LA2)，细粒浓缩密度流—细粒碎屑流沉积岩相组合(LA3)，细粒浓缩密度流—泥流—深湖安静水体沉积岩相组合(LA4)，细粒过渡流沉积—细粒碎屑流沉积岩相组合(LA5)，细粒碎屑流沉积—泥流沉积岩相组合(LA6)，细粒碎屑流沉积—湍流尾流沉积岩相组合(LA7)，细粒下部过渡流—细粒上部过渡流—准层状泥流(塞流)沉积岩相组合(LA8)(图 4)。这些细粒重力流沉积岩相组合分布在湖底扇的扇缘部位。在三级层序的水退体系域(RST/HST+LST)和水进体系域(TST)均有分布(图 2-B)。

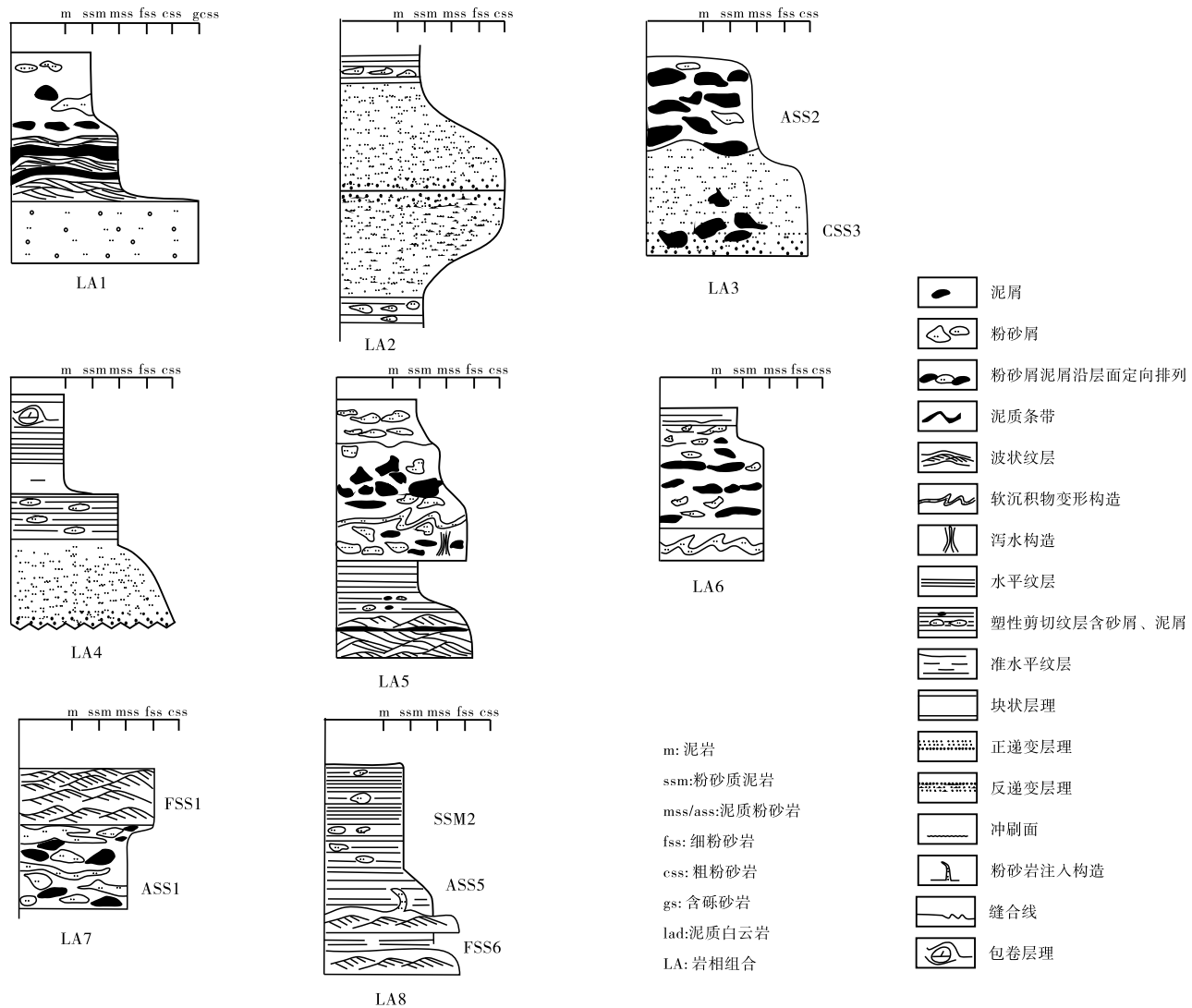


图 4 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组湖底扇缘细粒重力流沉积岩相组合 (据冯有良等, 2023; LA1-LA8: 细粒重力流沉积岩相组合)

Fig. 4 Lithofacies association of fine-grained gravity flow deposits within the Fengcheng Formation in Mahu sag, Junggar Basin (after Feng et al., 2023; LA1 to LA8: Lithofacies association of fine-grained gravity flow deposits)

2.1.3 细粒重力流沉积模式

基于渤海湾盆地济阳拗陷沙三段、准噶尔盆地玛湖凹陷风城组断陷湖盆层序陡坡、缓坡、洼陷带粗粒及细粒重力流的分布特征，本研究构建了断陷湖盆高可容纳空间层序细粒重力流沉积的模式(图 5)。

断陷湖盆高可容纳空间背景的总体特征是，盆地断陷伸展作用强烈、湖底古地貌坡折发育、气候温暖湿润，湖盆发育成欠补偿的深水湖盆。发育以深湖重力流沉积、深湖泥岩、油页岩和河流三角洲沉积为主的高可容纳空间层序。这种高可容纳背景湖盆距离物源近、同沉积构造坡折发育、湖底坡度梯度变化大、构造活跃，高可容纳空间层序的低位域和高位域(水退体系域)，在三角洲前缘的深湖区发育因构造活动以及高的沉积物供给速率造成的三角洲滑塌形成的湖底扇体系。其陡坡带发育非限定水道的砂质湖底扇，缓坡带可发育限定水道的砂质湖底扇和非限定水道的砂质湖底扇，也可发育泥质湖底扇。这些砂质

湖底扇的近端包括水道充填、扇根和扇中则发育粗粒重力流沉积，如以砂砾岩和砂岩为主的高浓缩密度流、浓缩密度流、碎屑流沉积。其远端则是以粉砂和泥质沉积为主的细粒重力流沉积，包括了粉砂质和泥质的细粒浓缩密度流、浊流、细粒碎屑流、过渡流、泥流以及细粒的混合事件层(图 5)。泥质湖底扇是由前三角洲斜坡粉砂质泥岩滑塌而形成，其沉积物主要是泥质滑塌沉积和碎屑流、泥流沉积，属于细粒重力流沉积。在平坦深湖区，可发育与洪泛相关的水道—堤—朵叶沉积体系，其朵叶、堤、水道沉积单元发育细粒重力流沉积，主要是粉砂质浪涌状浊流、粉砂质异重流沉积和泥流沉积。该水道—堤—朵叶沉积体系主要发育在水进体系域的深湖区，也可发育在低位域和高位域湖底扇的前端深湖区。在水道间和扇间的安静深湖区，也可发育深湖静水沉积形成的富含有机质的泥岩。细粒重力流沉积物分布在深湖优质源岩之内能形成页岩油的“甜点段”(图 5)。

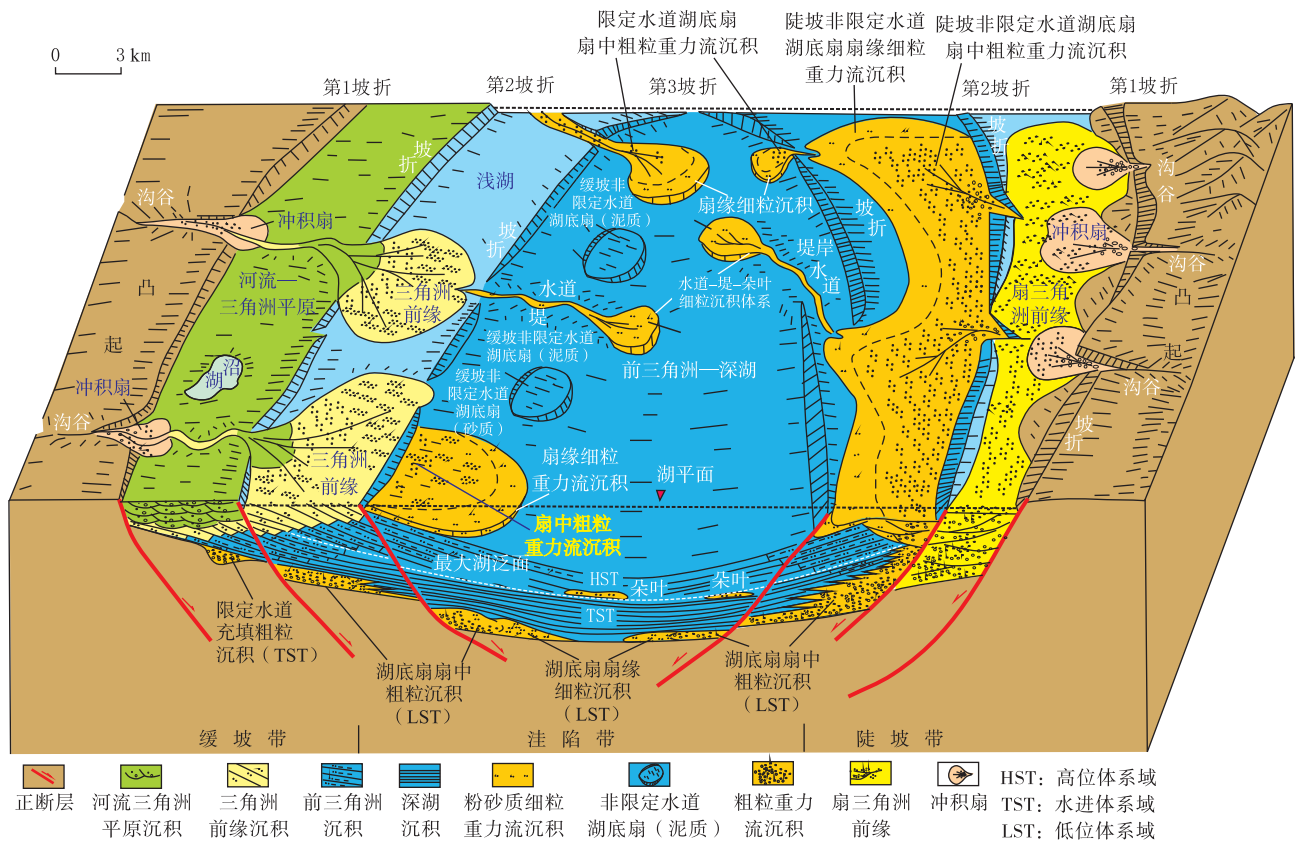


图 5 断陷湖盆高可容纳空间层序格架内重力流沉积模式 (据邹才能等, 2023)

Fig. 5 Gravity flow sedimentary pattern within high-accommodation sequence framework of faulted lacustrine basin (after Zou et al., 2023)

2.2 坳陷盆地高可容纳空间层序内细粒重力流沉积特征及模式

2.2.1 松辽盆地青一段和嫩一段层序

松辽盆地位于中国东北部，属于晚白垩世后裂谷坳陷盆地。构造和古气候资料研究表明，晚白垩世青一段、嫩一段层序沉积期，盆地构造沉降速率达到最大，气候持续温暖湿润，沉积物供给速率中等到低，能持续创造可容纳空间，形成欠补偿型湖盆 (Feng *et al.*, 2021a)。该地质背景与 Ryge 和 Gibling (2006)、Veiga 等 (2013) 以及 Bowman 和 Johnson (2014) 定义的高可容纳空间盆地背景的概念一致。因此，青一段、嫩一段层序属于高可容纳空间层序。这 2 个高可容纳空间层序与断陷湖盆的高可容纳空间层序沉积背景相比，松辽坳陷湖盆以总体的构造沉降为主，湖盆底床总体宽阔、平坦，局部见平缓挠曲坡折，发育细砂岩和粉砂岩为主的大型曲流河三角洲和深湖重力流沉积。深湖区可发育大型的以粉砂岩为主的重力流水道—堤—朵叶体系。

松辽盆地青一段、嫩一段分别对应着 2 次洪泛。高的构造沉降速率、温湿气候条件和洪泛导致了湖盆缺氧、浮游藻类等微生物繁盛，沉积了全盆地广泛分布的 2 套优质源岩 (Jia *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2013; Xi *et al.*, 2016; Xu *et al.*, 2021)，并伴随着以粉砂岩、泥岩为主的细粒重力流沉积体系的发育 (Feng *et al.*, 2010b; Tian *et al.*, 2021; Feng *et al.*, 2021b)。研究表明，三角洲水下分流河道在洪泛期可发展成重力流水道，形成以细粒异重流为主的水道—堤—朵叶体系 (Feng *et al.*, 2021b)。三角洲前缘可因地震诱发和高的沉积速率引起滑塌，形成非限定水道湖底扇 (Feng *et al.*, 2021b)。据钻穿水道的取心井岩心观察，底部见冲刷面，由发育正递变层理的含砾砂岩和含砾粗砂岩与块状中砂岩、细砂岩构成的向上变细沉积序列 LA1 (图 6)，代表了浓缩密度流沉积，厚度 0.5~1.2 m，发育在近源直型水道轴部。由波状层理粉砂岩和正反递变含砾砂岩组成的沉积序列 LA2 (图 4)，代表了砂质异重流沉积，厚 0.5~1.0 m，同样发育在近源直型水道的轴部，它们可延伸几千米。由波状层理、波状交错层理、平行纹层细粉砂岩和块状、正反递变纹层粗粉砂岩构成的向上变粗

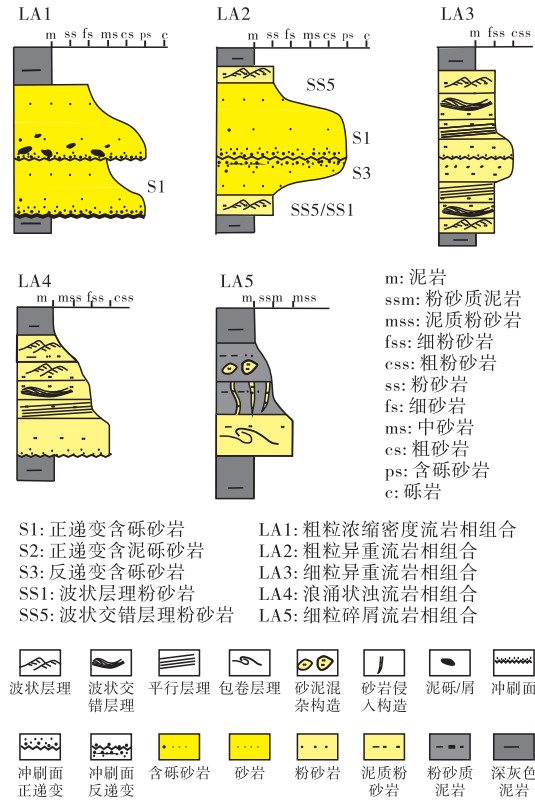


图 6 松辽盆地青一段和嫩一段层序重力流沉积序列 (据邹才能等, 2023)

Fig. 6 Gravity flow sedimentary sequences within the First Member of Qinshakou Formation and the First Member of Nengjiang Formation sequences in Songliao Basin (after Zou *et al.*, 2023)

和向上变细沉积序列 LA3 (图 6)，属于粉砂质细粒异重流沉积，厚 0.3~0.8 m，发育在水道的边缘。可延伸 30~70 km (Feng *et al.*, 2021b)。由发育冲刷面的粗粉砂岩，平行纹层、交错层理、波状层理的细粉砂岩，波状层理的泥质粉砂岩构成的向上变细沉积序列 LA4 (图 6)，厚度小、能量弱，为细粒浪涌状浊流沉积 (Mulder and Alexander, 2001)，厚 0.1~0.5 m，发育在水道边缘、堤和水道末端的朵叶体内。对英台坡折带发育的由三角洲滑塌引起的非限定水道湖底扇取心井岩心观察发现，由发育包卷层理、粉砂注入构造的泥质粉砂岩，粉砂质、泥质团块混杂的粉砂质泥岩组成的沉积序列 LA5 (图 6) 代表了细粒的黏性流 (细粒碎屑流、泥流) 沉积，厚 3~10 m，舌形延伸 0.5~1.0 km (Feng *et al.*, 2021b)。

根据松辽盆地青一段和嫩一段 2 个高可容纳空间层序沉积期重力流沉积体系的发育特征与湖盆古

地貌、层序体系域和湖平面变化之间的关系，本研究建立了该盆地细粒重力流沉积发育模式(图 7)。

研究发现，松辽盆地青一段沉积期只在松辽盆地西部龙虎泡一大安阶地及盆地内部因 NNE、NWW 向隐伏断裂活动而形成了同沉积挠曲坡折带。这些坡折带控制了细粒重力流沉积体系的分布和形态(图 7)。嫩一段沉积期为一平坦拗陷湖盆，坡折不发育。与洪泛相关的水道—堤—朵叶体系分布在层序的水进体系域 (TST)，可延伸 15~70 km (Feng *et al.*, 2010a)，在平面上呈直的或曲流形态。直型水道发育在较陡的湖底坡度带，而平坦湖底发育曲流水道。水道的两侧还发育堤岸，水道的末端发育朵叶体(图 7)。高位体系域 (HST) 的早期，三角洲前缘因地震、高沉积物供给速率而引发滑塌形成的无限定水道的粉砂质细粒湖底扇发育在前三角洲斜坡到深湖区。由于松辽盆地总体湖盆底床平坦，其低位体系域 (LST) 常发育低位浅水三角洲体系而不发育重力流体系(图 7)。这 2 个层序水进 (TST) 和高位域 (HST) 早期都发育湖底扇和水

道—堤—朵叶，总体属于细粒重力流体系。这些细粒湖底扇、水道—堤—朵叶沉积体系以薄层粉砂岩夹黑灰色泥岩为主，分布在优质源岩之中，具有好的孔渗性和含油性 (Feng *et al.*, 2021b)，它们是油田页岩油开发的主要“甜点段”。

2.2.2 鄂尔多斯盆地长 7 段 3 亚段层序

鄂尔多斯盆地是由于扬子板块与华北板块在中一晚三叠世碰撞缝合，导致华北克拉通南缘挠曲沉降形成的拗陷盆地。该盆地在中一晚三叠世的沉降中心位于盆地的西南部，湖盆总体呈现西南陡、东北缓的构造格局(图 3-B; Meng *et al.*, 2019; Xu and He, 2022; Niu *et al.*, 2023)。延长组长 7 段 3 亚段层序沉积期，全球正处于拉丁 (Ladinian)-卡尼 (Carnian) 洪泛事件期 (Chen *et al.*, 2021; Zou *et al.*, 2022)，盆地构造沉降速率大于沉积物供给速率，气候温暖湿润，并伴随火山喷发，湖盆发育成大型的欠补偿型盆地。与松辽盆地青一段、嫩一段层序沉积背景一样，也属于高可容纳空间层序。其盆地构造、沉积背景也具有与松辽拗陷湖盆地类

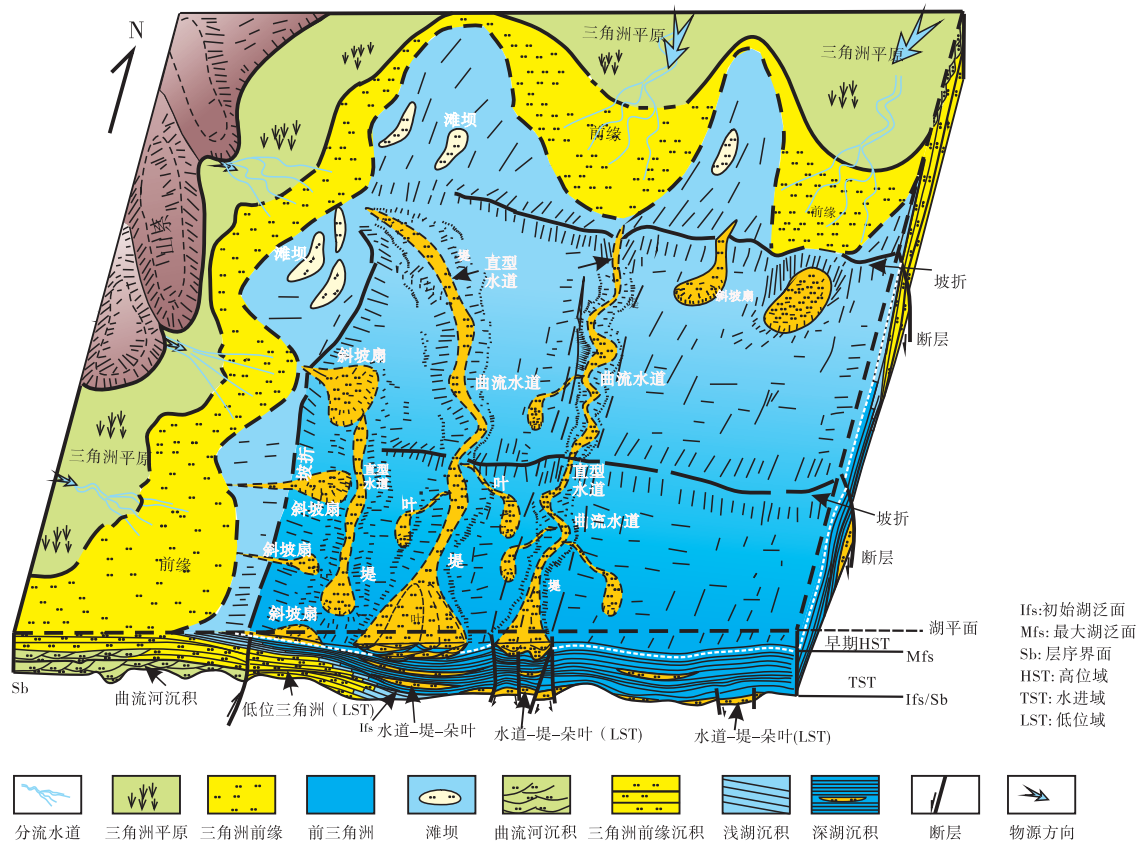


图 7 松辽盆地青一段和嫩一段层序重力流沉积模式 (据 Feng *et al.*, 2021b)

Fig. 7 Gravity flow sedimentary model within the First Member of Qinshakou Formation and the First Member of Nengjiang Formation sequences in Songliao Basin (after Feng *et al.*, 2021b)

似的特征。只是鄂尔多斯盆地长 7 段 3 亚段层序沉积期，湖盆构造较活跃，湖底古构造挠曲坡折较发育。这一时期发育了与洪泛、滑塌作用相关的细粒重力流沉积以及因陆源有机质带入和藻类等浮游生物繁盛所形成的富有机质泥岩、页岩夹薄层粉砂岩。这时期发育的长 7 段 3 亚段层序为典型的高可容纳空间沉积层序 (Chen *et al.*, 2021; Zou *et al.*, 2022; 吕奇奇等, 2022; Sun *et al.*, 2022; Zheng *et al.*, 2022; Niu *et al.*, 2023)。该层序特殊的沉积条件决定了，在湖盆的缓坡—平坦湖床发育了与洪泛相关的细粒水道—堤一朵叶沉积体系，而在盆地的坡折部位发育了与滑塌相关的以粉砂岩为主的非限定水道湖底扇(吕奇奇等, 2022; Niu *et al.*, 2023)。

通过对钻穿长 7 段 3 亚段层序的 13 口系统取心井的岩心观察，构建了 7 个细粒沉积岩相组合序列。由纹层状黑灰色泥岩 (M1)、含凝灰质条带的纹层状黑灰色泥岩 (M2) 组成的岩相组合 LA1 (图 8)，厚 2~3 m，可解释为静水悬浮沉降沉积，发育在深湖的水道间或朵叶间，分布面积广。由块状黑灰色泥岩 (M3)、含植物碎片黑灰色泥岩 (M4)、含泥砾黑灰色泥岩 (M5)、水平纹层状粉砂质泥岩 (SSM1)、黑色含砂屑、泥屑粉砂质泥岩

(SSM2, SSM3) 组成的岩相组合 LA2 (图 8)，厚 1~2 m，代表了泥质湍流的快速沉淀和泥流沉积，发育在非限定水道湖底扇、朵叶的远端，舌形延伸 1~2 km。由软沉积物变形构造细粉砂岩 (FSS8)、滑塌构造泥质粉砂岩 (ASS4)、包卷纹层泥质粉砂岩 (ASS2)、泥屑和粉砂屑顺层分布的泥质粉砂岩 (ASS1)、粉砂屑顺层分布的粉砂质泥岩 (SSM4)、水平纹层状粉砂质泥岩 (SSM1)、黑色含砂屑、泥屑粉砂质泥岩 (SSM2, SSM3) 组成的岩相组合 LA3 (图 8)，厚 3~5 m，为细粒滑塌、细粒碎屑流和泥流的沉积。它代表了滑塌引起的非限定水道湖底扇的沉积序列，呈舌形分布，延伸 2~3 km。由波状层理细粉砂岩 (FSS2)、水平纹层粉砂质泥岩 (SSM1)、含粉砂屑的粉砂质泥岩 (SSM3)、平行纹层泥质粉砂岩 (ASS3)、粉砂屑、泥屑和水平纹层粉砂质泥岩 (SSM1、SSM2、SSM3) 组成的岩相组合 LA4 (图 8)，可以解释为湍流由于黏土矿物的混入而形成的下部过渡流、上部过渡流沉积 (Baas *et al.*, 2009, 2011)，厚 0.2~0.5 m，分布在湖底扇的远端、朵叶、堤岸等建造单元。由递变层理细粉砂岩 (FSS1)、块状层理细粉砂岩 (FSS6)、平行纹层细粉砂岩 (FSS3)、波状纹层细粉砂岩

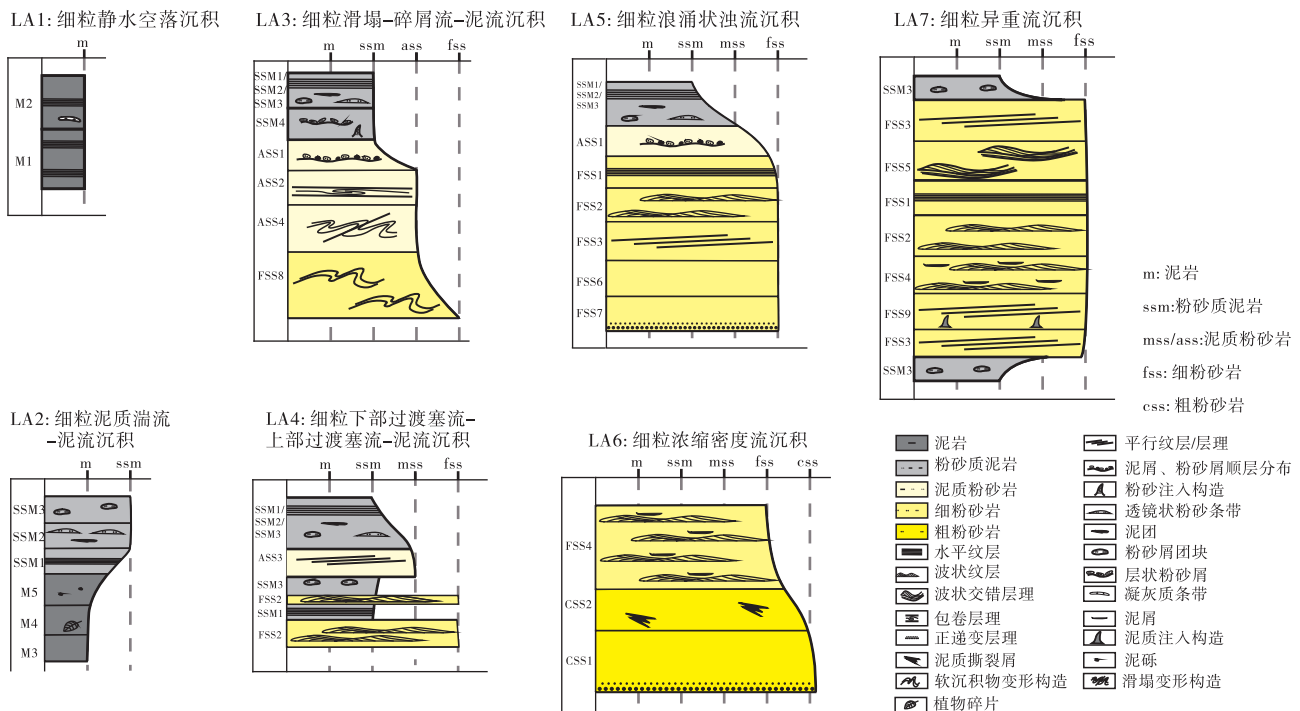


图 8 鄂尔多斯盆地长 7 段 3 亚段深湖细粒沉积序列

Fig. 8 Fined grained sedimentary sequences within the Third Sub-member of Member 7 of Yanchang Formation in Ordos Basin

(FSS2)、水平纹层细粉砂岩 (FSS1)、泥屑、粉砂屑顺层分布的泥质粉砂岩 (ASS1)、粉砂屑、泥屑和水平纹层粉砂质泥岩 (SSM1、SSM2、SSM3) 组成的岩相组合序列 (LA5) (图 8), 可以解释为细粒浪涌状浊流沉积 (Mulder and Alexander, 2001)。厚 0.2~1.0 m, 延伸长度约几千米, 分布在水道—堤—朵叶体系的水道边缘、堤和朵叶的近端, (Feng *et al.*, 2021b)。由递变层理粗粉砂岩 (CSS1)、含泥屑的粗粉砂岩 (CSS2)、含泥屑波状层理细粉砂岩组成的岩相组合 LA6 (图 8), 代表了重力流对底床的侵蚀、牵引以及泥屑的混入, 可解释为细粒浓缩密度流沉积 (Mulder and Alexander, 2001), 厚 0.2~0.8 m, 它发育在水道轴的底部, 延伸长度约 2~5 km (Feng *et al.*, 2021b; Chen *et al.*, 2022)。由含粉砂屑的粉砂质泥岩 (SSM3)、平行层理细粉砂岩 (FSS3)、平行纹层见注入构造的细粉砂岩 (FSS9)、含泥屑波状层理细粉砂岩 (FSS4)、波状层理细粉砂岩 (FSS2)、平行纹层细粉砂岩 (FSS1)、波状交错纹层细粉砂岩 (FSS3)、平行纹层细粉砂岩 (FSS3)、含粉屑粉砂质泥岩 (SSM3), 组成的岩相组合 LA7 (图 8), 以发育小型底床牵引构造为特征, 并具有向上变粗和向上变细的对称结构, 中间缺乏侵蚀面, 代表了与低强度洪水相关的细粒异重流的沉积序列。其厚度约 0.5~1.5 m, 分布在水道的边缘, 延伸长度约 5~10 km。当颗粒粒度很细时, 这种异重流沉积序列内不发育因异重流由强到弱、由弱到强转换而产生的侵蚀界面 (Mulder *et al.*, 2003)。

岩心观察发现鄂尔多斯盆地东部伊陕缓斜坡 (坡角小于 0.88°) 长 7 段 3 亚段沉积层序, 其沉积构造以发育波状层理、波状交错层理、透镜状纹层、平行纹层、泄水沟造等为特征, 常见植物叶片, 代表了与洪泛相关的水道—堤—朵叶体系沉积。湖盆西南较陡斜坡 (坡角约为 1.24°) (吕奇奇等, 2022) 主要发育滑塌构造、软沉积物变形构造、粉砂注入构造、粉砂团、泥团混杂构造等, 代表了地震引起的前三角洲沉积滑塌而形成的非限定水道的湖底扇沉积。

上述分析表明, 鄂尔多斯盆地长 7 段 3 亚段层序沉积期, 坡折发育带构造活跃, 沉积非限定水道的细粒湖底扇。缓坡带构造稳定发育与洪泛相关的水道—堤—朵叶体系。该特征与松辽盆地青一段和

嫩一段沉积层序相同 (图 7)。不同之处是鄂尔多斯盆地长 7 段 3 亚段层序沉积期, 受秦岭造山带构造活动和火山喷发的影响, 湖盆西南部挠曲坡折发育, 导致湖盆西南部受挠曲坡折控制的湖底扇更为发育并夹多个凝灰岩夹层。

3 细粒重力流沉积作用形成的页岩油“甜点段”类型及特征

通过对渤海湾盆地济阳坳陷沙三段、准噶尔盆地玛湖凹陷风城组、松辽盆地青一段、嫩一段以及鄂尔多斯盆地长 7 段 3 亚段层序发育的高可容纳空间层序深湖沉积岩相序列的分析, 发现其沉积岩相序列除深湖悬浮沉积岩相序列以外, 主要为细粒重力流沉积序列 (图 4; 图 6; 图 8)。该沉积序列根据层理类型可划分出页岩油“甜点段”类型。

3.1 页岩油“甜点段”类型

据岩心观察和综合分析, 作者发现其细粒重力流沉积序列发育了显微 (薄) 纹层、厚纹层、小型层理这 3 类层理类型。每一类层理根据层系或细层的形态, 又可以细分为不同的层理。这 3 类层理对应着深湖区发育的“页理型”、“纹层型”和“层理型”3 种页岩油“甜点段” (表 1)。研究表明, 每一类层理类型及其对应的页岩油“甜点段”都与特定的深湖细粒沉积作用过程有相关 (表 1)。深湖细粒沉积细层厚度介于 0~1.0 mm, 为显微或薄纹层, 当细层厚度介于 1~10 mm 时, 构成厚纹层 (Potter *et al.*, 1980)。除深湖静水沉淀外 (图 9-A, 9-B), 薄纹层和厚纹层主要为细粒黏性流沉积, 本研究把由显微纹层或薄纹层岩相构成的页岩油“甜点段”称为页理型“甜点段”。由厚纹层岩相构成的页岩油“甜点段”称为纹层型页岩油“甜点段”。当细粒沉积层系厚度介于 10~30 mm 时, 可构成小型层理, 它们通常由湍流的牵引形成。这些由发育小型层理岩相形成的页岩油“甜点段”称为层理型页岩油“甜点段” (表 1; 图 9)。

3.2 不同细粒重力流沉积作用形成的页岩油“甜点段”

3.2.1 细粒黏性流

细粒黏性流包括泥流和细粒碎屑流, 它们属于层流。在流动过程中存在着顺层的剪切 (Talling

表 1 深湖细粒沉积岩层理与页岩油“甜点段”类型
Table 1 Beddings and “sweet spot interval” types of deep lacustrine fine-grained sedimentary rock

层理类型	层系/层理形态								“甜点段”类型	
	水平	平行	互层	透镜状	脉状	波状	波状交错	粉砂屑(团)、泥屑(团)		
小型层理 (层系厚度 1~3 cm)	水平层理	平行层理	交互层理 (粉砂岩和泥岩)	透镜状层理	脉状层理	波状层理	波状交错层理	粉砂屑/团、泥屑/团 顺层排列小型层理 粉砂屑/团、泥屑团 混杂小型层理 粉砂团、泥团小型包卷层理	递变层理 (湍流/浓缩密度流)	层理型
厚纹层(细层 厚度1~10 mm)	水平厚纹层	—	交互厚纹层(粉砂岩和泥岩)	透镜状厚纹层	脉状厚纹层	波状厚纹层	波状交错厚纹层	粉砂屑/泥屑厚纹层	递变纹层	纹层型
显微(薄)纹层(细层厚度 小于1 mm)	显微(薄)水平纹层	—	—	—	—	—	—	显微(薄)粉砂屑/泥屑纹层	显微(薄)递变纹层	页理型
可能成因	静水沉淀	湍流的牵引	细粒过渡流	—	—	—	湍流的牵引作用	黏性流(细粒碎屑流、泥流)	湍流	—

et al., 2012)。泥流可形成细层厚度小于 1 mm 的粉砂屑/泥屑薄纹层页理型页岩油“甜点段”。其特征是粉砂屑/泥屑沿薄纹层分布，沉积物富含长英质脆性矿物(图 9-C)。泥流也能形成细层厚度 1~10 mm 的粉砂屑、泥屑厚纹层型页岩油“甜点段”，其特征与泥流形成的薄纹层页岩油“甜点段”相同。

细粒碎屑流由于较高的粉砂质含量，能形成层系厚度 1~3 cm 的包卷层理(图 9-E)、粉砂屑、泥屑混杂的小型层理(图 9-F)、泥屑、粉砂屑顺层排列的厚纹层(图 9-G)，形成层理型及纹层型页岩油“甜点段”(表 1)。细粒黏性流形成的页岩油“甜点段”，表现为有机质丰度低、长英质脆性矿物含量高的特点(邹才能等, 2023)。以鄂尔多斯盆地长 7 段 3 亚段层序为例，该类页岩油“甜点段”长英质矿物含量在 50%~75%，厚度一般 0.1~1 m，孔隙度 2%~6%(表 2)。

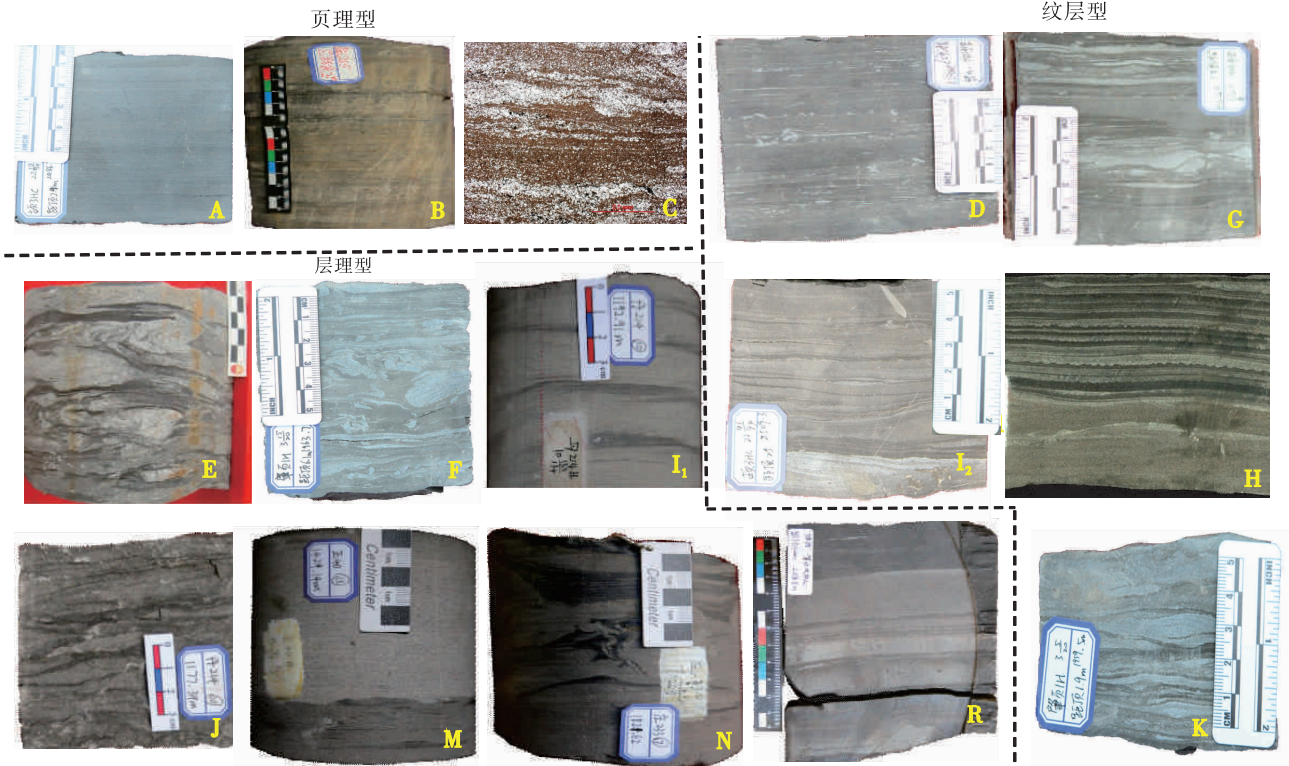
3.2.2 细粒浊流和异重流

细粒浊流和异重流属于体积浓度较低的非黏性的湍流(Mulder and Alexander, 2001)。浊流的缓慢沉降能形成可以观察到的细粉砂和黏土之间存在的正递变(图 9-H)。异重流强弱变化能发育反正递变厚纹层(Mulder et al., 2003; Tian et al., 2021)，形成纹层型“甜点段”(表 1)。细粒异重流能量增强，对底床的牵引则形成波状纹层(图 9-I₁)及层理(图 9-I₂)、交错层理(图 9-J)、透镜状纹层(图 9-K)、反递变层理细粉砂岩(图 6,

LA3; 图 8, LA7)。细粒浊流和异重流能量减弱能形成正递变厚纹层(图 9-H)和层理的泥质粉砂岩和粉砂岩，以及细粒异重流沉积序列(图 6, LA3, LA4; 图 8, LA5, LA7)。厚纹层状泥质粉砂岩形成纹层状页岩油“甜点段”，以鄂尔多斯盆地长 7 段 3 亚段层序为例，该“甜点段”主要为厚度在 0.1~1.0 m 的粉砂岩，长英质矿物含量 50%~75%，孔隙度 2%~6%(表 2)。层理型粉砂岩形成层理型页岩油“甜点段”，以鄂尔多斯盆地长 7 段 3 亚段层序为例，该层理型页岩油“甜点段”为发育波状层理、波状交错层理的厚度在 0.2~1.5 m 之间的粉砂岩，长石、石英矿物含量大于 75%，孔隙度 3%~10%，含油性最好，是主要产层(表 2)。据研究，细粒浊流和异重流沉积的纹层型和层理型页岩油“甜点段”主要发育在高可容纳空间层序的水进体系域(TST)最大湖泛面附近，被夹在优质源岩之中能构成好的储盖组合(Feng et al., 2013, 2021a, 2021b; 吕奇奇等, 2022)。由细粒浊流和异重流形成的纹层型和层理型页岩油“甜点段”，可构成厚度较大的页岩油“甜点段”，是湖盆页岩油勘探开发的优质“甜点层段”。

3.2.3 细粒浓缩密度流

细粒浓密度流是体积浓度较高的非黏性流(Mulder and Alexander, 2001)。它通常有较强的侵蚀能力，常形成递变层理粗粉砂岩(图 9-M)和含泥屑粗粉砂岩(图 9-N)，上覆波状层理的细粉砂岩沉积序列(图 6; LA1; 图 8, LA6)。该沉积序



A—水平显微纹层页岩, 2486.2 m, 青一段, Gy3 井; B—显纹层凝灰质页岩, 2854.2 m, 长 7 段 3 亚段, Y285 井; C—显微粉砂屑纹层泥岩, 2492.05 m, 青一段, Gy3 井; D—粉砂屑纹层泥岩, 2407.8 m, 青一段, Gy3 井; E—包卷层理泥质粉砂岩, 1827.9 m, 青一段, L242-1 井; F—粉砂团和泥团混杂和顺层分布泥质粉砂岩, 1963.7 m, 青一段, Zylh 井; G—粉砂屑(团)、泥屑纹层泥质粉砂岩, 2515.5 m, 青一段, Gy3 井; I₁: 波状层理粉砂岩, 1192.91 m, 长 7 段 3 亚段, D214 井; I₂: 波状纹层含泥质粉砂岩, 2509.3 m, 青一段, Gy3 井; H—递变纹层泥质粉砂岩, 1660.0 m, 长 7 段 3 亚段, N228 井; J—波状交错层理细粉砂岩, 1177.39 m, 长 7 段 3 亚段, D214 井; K—透镜状纹层粉砂岩, 1959.5 m, 青一段, ZY1 井; M—递变层理粉砂岩, 1429.14 m, 长 7 段 3 亚段, Z40 井; N—含泥屑粉砂岩, 1821.62 m, 长 7 段 3 亚段, Zhuang233 井; R—交互层理泥质粉砂岩, 2266.8 m, 长 7 段 3 亚段, Zhu80 井

图 9 拗陷湖盆高可容纳空间层序细粒沉积岩及“甜点段”类型

Fig. 9 Fine-grained sedimentary rocks and “sweet spot interval” types in sequence with high-accommodation space in down-warped lacustrine basins

表 2 鄂尔多斯盆地长 7 段 3 亚段细粒沉积页岩油“甜点段”类型、矿物成分、物性和成因解释

Table 2 Shale oil “sweet spot interval” types, mineral ingredient, physical property and genetic interpretations of fine-grained deposits in the Third Sub-member of Member 7 of Yanchang Formation, Ordos Basin

序 号	甜点段 类型	岩性	矿物组成		“甜点段” 厚度/m	主要孔隙 类型	孔喉、孔隙 直径	总孔隙度 /%	成因
			长英质 矿物/%	黏土矿物+ 其他矿物/%					
1	页理型	黑灰色 含长英质黏土岩	50~25	50~75	0.2~2	微裂隙溶孔、 页理缝	0.5~1.3 nm (微裂隙孔) 20~50 nm (溶孔)	<2	深湖静水 沉淀、泥流 沉积
2	纹层型	黑灰色含黏土长 英质细粒岩(含黏 土粉砂岩)	50~75	<50~25	0.1~1.0	溶孔、微裂隙	2~6 μm (孔隙)	2~6	细粒黏性 流、过渡流 沉积、湍流 细粒浓缩 密度流、浪 涌状浊流、 细粒异重 流
3	层理型	长英质细粒岩 (粉砂岩)	>75	<25	0.2~1.5	粒间孔、溶孔、 微裂隙	2~8 μm (孔隙) 20~120 nm (喉道)	3~10	

列能形成层理型“甜点段”。根据对松辽盆地青一段、嫩一段，鄂尔多斯盆地长 7 段 3 亚段层序岩心观测，细粒浓缩密度流沉积形成的层理型页岩油“甜点段”，厚 1~2.0 m，为块状或递变层理粗粉砂岩，主要由长英质矿物组成，孔隙度在松辽盆地可达 15%~23% (Feng *et al.*, 2021b)，在鄂尔多斯盆地孔隙度较小，约 5%~10%。该“甜点层”储集层物性好，是优质“甜点层”。

3.2.4 细粒过渡流

细粒过渡流是指湍流（浊流）由于黏土矿物的混入增强了流体黏性力，使细粒浊流的湍动受到调制而产生的介于湍流和泥流之间的过渡性流体，主要分布在水道—堤—朵叶体系的堤岸、朵叶的远端和粉砂质湖底扇的远端。细粒过渡流能形成波状厚纹层或波状层理粉砂岩与含粉砂屑泥岩的交互层（图 9-R）。其中粉砂层比泥岩层厚者为下部过渡流沉积，反之为上部过渡流沉积 (Baas *et al.*, 2009, 2011; 冯有良等, 2023; 邹才能等, 2023)，可形成纹层型和层理型页岩油“甜点段”。由于该细粒过渡流由湍流（浊流）沉积的粉砂岩段和泥流沉积的泥质岩段构成，其储集层物性介于细粒浊流和异重流沉积形成的纹层型和层理型页岩油“甜点段”与黏性流形成的纹层型页岩油“甜点段”之间。

3.3 混合事件层与页岩油“甜点层”

通过对渤海湾断陷盆地济阳拗陷沙三段、准噶尔盆地风城组湖底扇缘和松辽盆地青一段水道—朵叶体系细粒重力流沉积的研究发现，在扇缘和朵叶体的远端存在着由于非黏性重力流向黏性重力流转化，或者黏性重力流向非黏性重力流转化时产生的重力流沉积序列，被称为混合事件层，包括浓缩密度流、过渡流、碎屑流、湍流和泥流沉积序列 (Haughton *et al.*, 2009; Feng *et al.*, 2021b; 冯有良等, 2023)。根据作者对玛页 1 井钻遇风城组层序 2 和层序 3 湖底扇缘发育的细粒重力流沉积序列分析（图 2-B），8 个细粒重力流沉积岩相组合 LA1-LA8（图 4），构成一个完整的湖底扇缘混合事件层，每个岩相组合是混合事件层的组成部分（图 10）。H1 层为浓缩密度流沉积，以厚层含泥砾砂岩和粗粉砂岩为特征。该沉积层粒间孔和白云质胶结物间孔发育，孔隙度 3.0%~5.0%，渗透率小

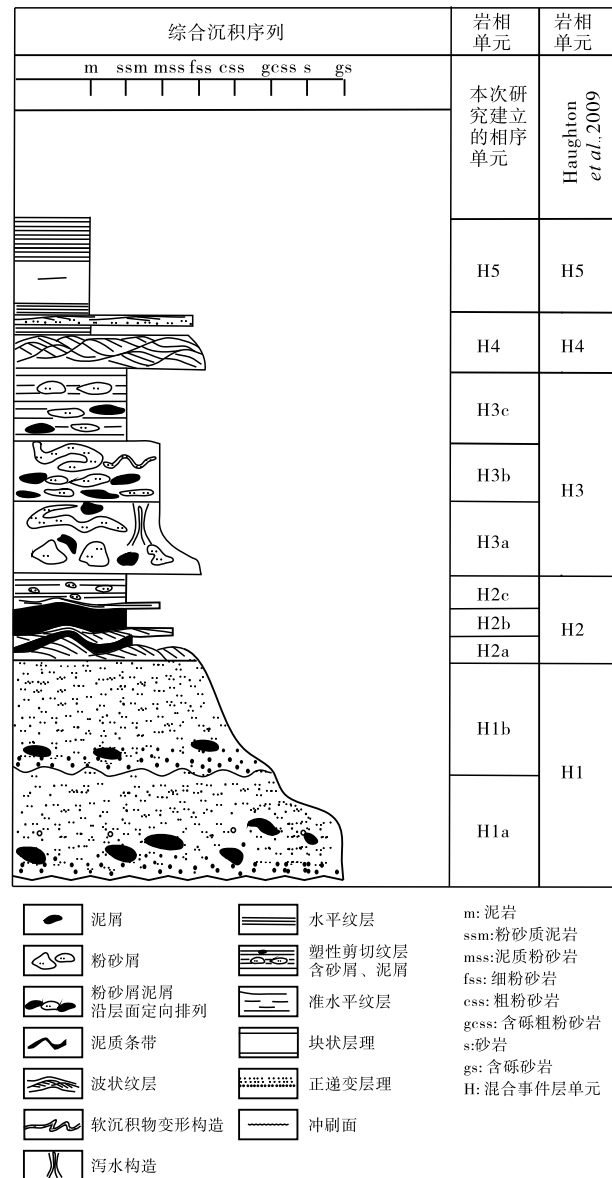


图 10 玛湖凹陷风城组湖底扇缘混合事件层沉积序列（据冯有良等，2023；有修改）

Fig. 10 Sedimentary sequence of hybrid event bed of sub-lacustrine fan fringe within the Fengcheng Formation in Mahu sag (modified from Feng *et al.*, 2023)

于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，是致密油的“甜点段”。H2 层为细粒过渡流沉积、H3 层为细粒碎屑流沉积、H4 为细粒湍流尾流沉积、H5 为细粒湍流至泥流沉积，它们以纹层状含灰/云泥质粉砂岩、纹层状含云/灰粉砂屑、泥屑粉砂质泥岩为特征。其沉积物长英质矿物和碳酸盐矿物含量大于 90%，脆性矿物含量高，TOC 含量介于 0.5%~1.5% 之间，粒间孔、裂隙发育，孔隙度介于 0.4%~1.5% 之间，渗透率小于 0.1

$\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, H2 至 H5 可形成纹层型和页理型“页岩油”甜点段(冯有良等, 2023)(图 10)。

3.4 页理型、纹层型和层理型页岩油“甜点段”矿物组成和储集层物性特征

3.4.1 页岩油“甜点段”矿物组成

根据对松辽盆地青一段、鄂尔多斯盆地长 7 段 3 亚段层序细粒沉积 X 衍射全岩矿物分析数据, 松辽盆地青一段大多为含黏土长英质细粒岩, 少部分细粒混积岩和碳酸盐岩不属于本研究探讨的内容(图 11-A)。含黏土长英质细粒岩(含黏土粉砂岩或长英质泥岩)在青一段属于深湖细粒重力流和静水沉淀沉积物, 其矿物成分主要由 50%~75% 的长石、石英矿物, 小于 50%~25% 的黏土矿物和极少量碳酸盐矿物组成。该岩石类型构成了青一段长英质细粒岩的主体。可发育显微(薄)纹层(图 9-A, 9-C)、厚纹层(图 9-D, 9-G, 9-I₂) 和小型层理(图 9-E, 9-F), 3 大类沉积构造分别对应“页理型”、“纹层型”和“层理型”3 种页岩油“甜点段”。

鄂尔多斯盆地长 7 段 3 亚段层序细粒沉积主要为长英质细粒岩、黏土岩, 少量细粒混积岩(图 11-B)。前 2 大类细粒岩, 属于深湖静水悬浮沉淀和细粒重力流沉积。其中长英质细粒岩, 长石、石英矿物含量 50%~90%, 黏土矿物含量 10%~50%, 含极少量的碳酸盐矿物。该细粒岩根据矿物成分可进一步划分为, 石英、长石矿物含量 50%~75%, 黏土矿物含量 50%~25% 的含黏土长英质细粒岩(含黏土粉砂岩)和石英、长石矿物含量大于 75% 的长英质细粒岩(粉砂岩)(图 11-B)。这 2 种细粒岩主要与细粒重力流沉积作用相关, 发育小型层理(图 9-I₁, 9-J, 9-M, 9-N, 9-R), 能形成层理型页岩油“甜点段”。黏土岩大类中只包含了黏土矿物含量 50%~75%, 长石、石英矿物含量 25%~50% 的含长英质黏土岩(图 11-B)。主要发育显微(薄)纹层(图 9-B), 形成“页理型”页岩油“甜点段”; 厚纹层(图 9-H)形成“纹层型”页岩油“甜点段”。

3.4.2 页岩油“甜点段”储集特征

上述分析表明高可容纳空间层序湖盆深水环境细粒重力流沉积能形成页理型、纹层型、层理型三类页岩油“甜点段”。在这里以鄂尔多斯盆地长 7

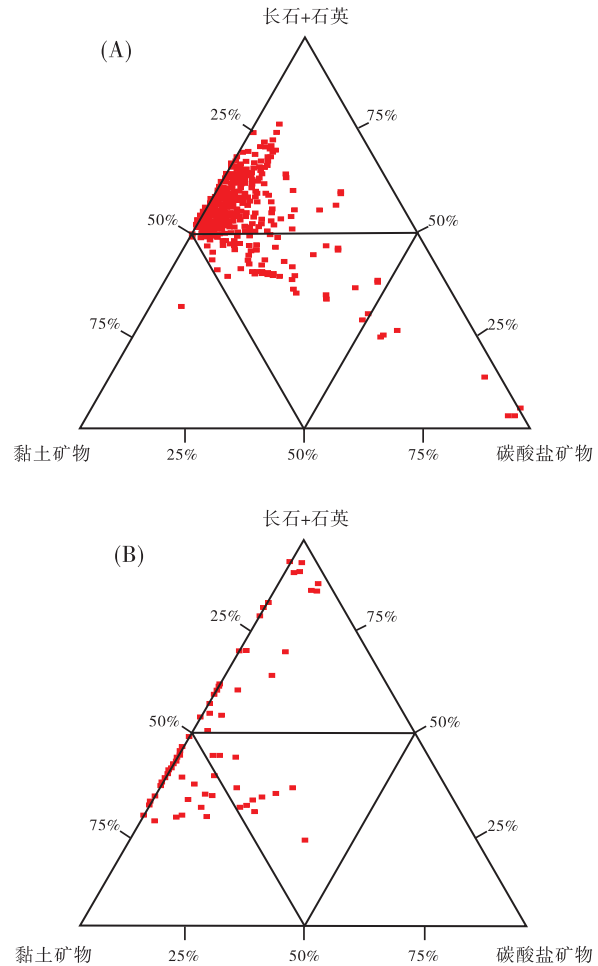


图 11 松辽盆地青一段 (A)、鄂尔多斯盆地长 7 段 3 亚段 (B) 细粒沉积 X 衍射全岩矿物分析数据三角图
Fig. 11 Triangular chart of fine-grained sediment X-ray diffraction whole-rock mineral analysis data from the First Member of Qingshankou Formation in Songliao Basin (A) and the Third Sub-member of Seventh Member of Yanchang Formation in Ordos Basin (B)

段 3 亚段为例, 介绍这 3 种页岩油“甜点段”储集层物性特征。

页理型“甜点段”以发育黑灰色具有显微(薄)纹层的长英质黏土岩为特征, 该“甜点段”厚度一般 0.2~2.0 m, 其储集空间以微裂隙、溶孔、层理缝为主, 微裂隙直径 0.5~1.3 nm、溶孔直径 20~50 nm, 总孔隙度小于 2%。该“甜点段”分布在深湖安静悬浮环境如重力流水道间、朵叶体间或扇间, 主要为静水沉淀和泥流沉积。

纹层型“甜点段”, 以发育黑灰色具有各种厚纹层的含黏土长英质细粒岩(含黏土粉砂岩)为特征, 该“甜点段”厚度一般 0.1~1.0 m, 其储

集空间以溶孔和微裂隙为主，孔隙直径 2~6 μm ，总孔隙度 2%~6%。该“甜点段”分布在深湖朵叶体或湖底扇的远端、堤等沉积单元。主要为细粒黏性泥流、碎屑流和过渡流沉积。

层理型“甜点段”，以发育具有小型层理构造的长英质细粒岩（粉砂岩）为特征，该“甜点段”厚度一般 0.2~1.5 m，其储集空间主要为粒间孔、溶孔、微裂隙，孔隙直径 2~8 μm ，喉道直径 20~120 nm，孔隙度 3%~10%。该“甜点段”分布在深湖细粒重力流水道、堤岸、朵叶体和湖底扇远端等沉积单元，为细粒的浓密度流、浪涌状浊流和异重流沉积。

鄂尔多斯盆地长 7 段 3 亚段页岩油勘探实践表明，上述 3 类页岩油“甜点层”分布在高 TOC 优质源岩中。由于沉积条件、细粒岩石矿物成分的差异，这 3 类“甜点段”物性和含油性在其他盆地也可存在较大的差异。其中层理型“甜点段”储集性能和含油性最好，纹层型“甜点段”次之，页理型“甜点段”最差。

4 湖盆重力流发育的主要影响因素

4 个沉积湖盆的实例分析表明重力流沉积主要发育在半深湖—深湖环境。能导致这些环境大量发育重力流的主要影响因素包括构造活动和温暖湿润的气候条件、高的沉积物供给速率、洪泛事件和湖平面的升降。

4.1 构造活动和温暖湿润的气候条件

强烈构造沉降伴随火山活动是盆地主构造沉降期最主要的构造活动方式之一。如渤海湾盆地古近纪沙三段沉积期是盆地主伸展沉降期，同沉积断裂发育并伴随强烈的基性火山喷发，形成高可容纳空间盆地，此时气候湿润，发育了河流三角洲、深湖、重力流沉积体系。深湖区发育了大量的分布在湖盆陡坡、缓坡和洼陷带的受同沉积断裂坡折控制的重力流沉积。其内大量发育的砂岩注入构造、大型滑塌构造就是构造活动的直接证据（冯有良等，1991，2010；Feng *et al.*, 2013）。准噶尔盆地玛湖凹陷风城组沉积期是盆地最主要的裂陷沉降期，盆地发展成高可容纳空间盆地，气候相对湿润，发育了咸水深湖、湖底扇和扇三角洲沉积体系并伴随多个凝灰质层。湖底扇内的大量软沉积物变形构造、

凝灰质层就是构造、火山作用导致重力流发育的直接证据（图 4，LA5，LA6，LA7；Tang *et al.*, 2020；冯有良等，2023）。强烈的构造沉降及温暖湿润的气候条件，能创造高的可容纳空间增长速率并形成深湖环境，为重力流的发育创造了条件。鄂尔多斯盆地长 7 段沉积期是盆地主挠曲沉降期，盆底基底构造沉降速率最大，形成了高可容纳空间盆地背景。此时湖盆气候温暖湿润，发育了大面积分布的深湖、三角洲体系。在盆地西南挠曲坡折带发育了大型的滑动、滑塌沉积夹多个凝灰岩层，可见大型滑塌构造和软沉积物变形构造（图 8，LA3）。表明这个时期盆地存在强烈的构造活动和火山作用，是导致发育重力流的主要因素之一（刘全有等，2022；Zou *et al.*, 2022）。松辽盆地青一段沉积期也是松辽盆地主要构造沉降期，盆底发育成高可容纳空间盆地，这个时期气候温暖湿润，发育大面积深湖、三角洲沉积体系。同时盆地北东向断裂挠曲活动导致在英台地区形成挠曲坡折带，发育了受坡折控制的湖底扇。湖底扇沉积物见粉砂注入构造、滑塌构造，表明该期存在地震等构造活动，它是引发重力流的主要原因之一（Feng *et al.*, 2010a, 2010b, 2021a, 2021b）。

4.2 高的沉积物供给速率

高的沉积物供给速率是除构造活动外能引起沉积物滑塌形成重力流的又一个重要因素。当沉积物供给速率大于可容空间增长速率，使沉积斜坡坡角大于休止角，导致三角洲前缘及斜坡失稳、滑塌，形成湖底扇。这种沉积作用主要发生在坡度较陡、有坡折发育的扇三角洲前缘和前三三角洲斜坡（图 3，图 7；冯有良等，2023），亦可发育在湖盆缓坡或轴向前三角洲斜坡部位。如东营凹陷沙三段 3 个层序沉积期，沿湖盆走向由东向西的三角洲快速推进，形成了较陡坡度的前三三角洲斜坡和下降的滨线轨迹（湖平面快速升降），其上发育了大量的滑塌导致的发育非限定水道的舌状分布的湖底扇群（冯有良等，1991）。甚至在松辽盆地嫩一段层序沉积期由于较高的三角洲进积速率，形成了下降的沉积滨线轨迹，导致在前三三角洲泥质斜坡上发生了滑塌，形成泥质的块体搬运沉积（Pan *et al.*, 2019）。位于断陷湖盆陡坡带的扇三角洲，除了构造活动导致滑塌形成重力流沉积外，高的沉积速率

也是引起滑塌而形成湖底扇的另外一个主要原因。如东营凹陷北部陡坡带沙三、沙四段层序发育的重力流沉积和准噶尔盆地玛湖凹陷风城组沉积期陡坡带发育的湖底扇(图 2)。

4.3 洪泛事件和湖平面升降

洪泛事件和湖平面升降是引起异重流发育的主要原因。由于湖泊水的密度比海水小,湖泊更容易发育因洪泛引发的异重流事件(Mulder and Alexander, 2001; Mulder *et al.*, 2003)。大型湖盆中与洪泛相关的异重流沉积的研究实例表明,在层序洪泛面上下、也就是层序的水进体系域(TST)和高位域沉积早期,普遍发育由洪泛引起的以异重流为主的大型水道—堤—朵叶体系(Chen *et al.*, 2021; Feng *et al.*, 2021a; Tian *et al.*, 2021)。例如松辽盆地青一段、嫩一段对应着晚白垩世 Turonian 早期和 Santonian 期 2 次最大的洪泛事件(Chanberlain *et al.*, 2013; Xi *et al.*, 2016),导致青一段层序和嫩一段层序发育了大规模的以异重流为主的细粒的水道—堤—朵叶体系(Feng *et al.*, 2010b, 2021b)。鄂尔多斯盆地中晚三叠世 Ladinian-Canian 期是湖盆的最大洪泛期,加之温湿的气候条件和火山喷发物的加入,使长 7 段在发育高有机质源岩的同时,还发育了多套分布广泛的以异重流为主的水道—堤—朵叶体系(Chen *et al.*, 2021; 吕奇奇等, 2022; Sun *et al.*, 2022; Zheng *et al.*, 2022; Zou *et al.*, 2022; Niu *et al.*, 2023)。渤海湾盆地东营凹陷在沙三中层序的最大湖泛面上下发育了与洪泛相关的水道—湖底扇体系(Feng *et al.*, 2013)。

在三级层序的高位和低位体系域,湖平面总体是下降的。湖平面的下降,能导致三角洲失稳,产生滑塌形成湖底扇如低位扇和高位滑塌扇等(Feng *et al.*, 2013)。

四级层序发育主要受控于气候旋回(Feng *et al.*, 2013, 2016),在气候相对干旱、湖平面下降期,滑塌形成小型湖底扇;在气候相对湿润、湖平面上升期,在形成薄层富有机质页岩层的同时,可形成洪泛引起的异重流沉积。在三级层序层高位和低位体系域内发育的四级层序以气候相对干旱、湖平面下降期有利于重力流沉积的发育,主要表现为发育滑塌形成的湖底扇,但也可以发育湖平面上升洪泛引起的小型异重流沉积。如东营凹陷沙三上上层序的低位域发育由于小型洪泛而因起的异重流沉

积(吴千然等, 2023)。而在三级层序的水进体系域(TST)内发育的四级层序以气候相对湿润、湖平面上升期有利于重力流沉积的发育,主要发育洪泛相关的异重流沉积体系。

5 结论

1) 重力流沉积体系主要发育在温暖湿润气候条件下的欠补偿型湖盆发展阶段形成的高可容纳空间沉积层序中。

2) 以粉砂岩、泥岩为主的水道—堤—朵叶体系主要发育在断陷或坳陷湖盆高可容纳沉积层序的水进体系域。湖底扇主要发育在湖盆高可容纳空间沉积层序的高位体系域发育的早期。

3) 细粒重力流发育在湖底扇的远端和水道—堤—朵叶沉积体系的水道建造的侧翼、堤、朵叶单元内。细粒重力流作用能形成页岩油的“甜点段”。泥石流、细粒碎屑流、细粒过渡流、细粒浊流和细粒异重流形成页理型、纹层型和层理型“甜点段”;浓密度流能形成层理型“甜点段”。细粒重力流沉积的“甜点段”是页岩油勘探开发的有利目标。

致谢 中国石油长庆油田有限公司勘探开发研究院、中国石油大庆油田有限公司勘探开发研究院、中国石油新疆油田有限公司勘探开发研究院,协助作者进行岩心观察、取样以便开展本项研究,作者表示衷心的感谢!作者特别感谢审稿人对文章提出的建设性的建议,使文章得到了进一步的完善。

参考文献(References)

- 蔡希源,李思田. 2003. 陆相盆地高精度层序地层学: 隐蔽油气藏勘探基础、方法与实践: 基础理论篇. 北京: 地质出版社, 33-62. [Cai X Y, Li S T. 2003. High Resolution Sequence Stratigraphy of Continental Basins: Basic Ideas, Methodology and Practice for Exploring Subtle Oil Pools. Beijing: Geological Publishing House, 33-62]
- 冯有良. 1999. 东营凹陷下第三系层序地层格架及盆地充填模式. 地球科学, 24(6): 635-642. [Feng Y L. 1999. Lower tertiary sequence stratigraphic framework and basin filling model in Dongying depression. Earth Science, 24(6): 635-642]
- 冯有良,邱以刚. 2003. 高精度层序地层学在济阳坳陷下第三系隐蔽油气藏勘探中的应用. 石油学报, 24(1): 49-57. [Feng Y L, Qiu Y G. 2003. Application of high resolution sequence stratigraphy to exploration of Lower Tertiary subtle reservoirs in Jiyang Subbasin.

- Acta Petrolei Sinica, 24(1): 49-57]
- 冯有良,徐秀生. 2006. 同沉积构造坡折带对岩性油气藏富集带的控制作用:以渤海湾盆地古近系为例. 石油勘探与开发, 33(1): 22-25,31. [Feng Y L, Xu X S. 2006. Syndepositional structural slope-break zone controls on lithologic reservoirs: a case from Paleogene Bohai Bay Basin. Petroleum Exploration and Development, 33(1): 22-25, 31]
- 冯有良,何立琨,郑和荣,王宁,江秀芳. 1991. 山东牛庄洼陷沙河街组三段前三角洲斜坡重力流沉积. 石油与天然气地质, 11(3): 313-319. [Feng Y L, He L K, Zheng H R, Wang N, Jiang X F. 1991. Gravity flow deposits of prodelta slope from 3rd member of Shahejie Formation, Niuzhuang region Shandong. Oil Gas Geology, 11(3): 313-319]
- 冯有良,李思田,解习农. 2000. 陆相断陷盆地层序形成动力学及层序地层模式. 地学前缘, 7(3): 119-132. [Feng Y L, Li S T, Xie X N. 2000. Dynamics of sequence generation and sequence stratigraphic model in continental rift subsidence basin. Earth Science Frontiers, 7(3): 119-132]
- 冯有良,周海民,任建业,郑和荣,苗顺德. 2010. 渤海湾盆地东部古近系层序地层及其对构造活动的响应. 中国科学: 地球科学, 40(10): 1356-1376. [Feng Y L, Zhou H M, Ren J Y, Zheng H R, Miao S D. 2010. Sequence stratigraphy of Paleogene in the eastern Bohai Bay Basin and its response to tectonic activities. Scientia Sinica(Terrae), 40(10): 1356-1376]
- 冯有良,邹才能,蒙启安,吴卫安,鲁卫华,朱吉昌. 2018a. 构造及气候对后裂谷盆地层序建造的影响:以松辽盆地西斜坡晚白垩世为例. 地球科学, 43(10): 3445-3461. [Feng Y L, Zou C N, Meng Q A, Wu W A, Lu W H, Zhu J C. 2018a. Tectonic and climatic influences on architecture of sequences and sedimentary systems in a post-rift basin: insight from Late Cretaceous northern Songliao Basin. Earth Science, 43(10): 3445-3461]
- 冯有良,胡素云,李建忠,曹正林,吴卫安,赵长义,崔化娟,袁苗. 2018b. 准噶尔盆地西北缘同沉积构造坡折对层序建造和岩性油气藏富集带的控制. 岩性油气藏, 30(4): 14-25. [Feng Y L, Hu S Y, Li J Z, Cao Z L, Wu W A, Zhao C Y, Cui H J, Yuan M. 2018b. Controls of syndepositional structural slope-break zones on sequence architecture and enrichment zones of lithologic reservoirs in northwestern margin of Junggar Basin. Lithologic Reservoirs, 30(4): 14-25]
- 冯有良,杨智,张洪,张天舒,李攀,侯鸣秋,蒋文琦,王小妮,朱吉昌,李嘉蕊. 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. [Feng Y L, Yang Z, Zhang H, Zhang T S, Li P, Hou M Q, Jiang W Q, Wang X N, Zhu J C, Li J R. 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]
- 李思田,潘元林,陆永潮,任建业,解习农,王华. 2002. 断陷湖盆隐蔽油藏预测及勘探的关键技术:高精度地震探测基础上的层序地层学研究. 地球科学, 27(5): 592-598. [Li S T, Pan Y L, Lu Y C, Ren J Y, Xie X N, Wang H. 2002. Key technology of prospecting and exploration of subtle traps in lacustrine fault basins: sequence stratigraphic researches on the basis of high resolution seismic survey. Earth Science, 27(5): 592-598]
- 林畅松,潘元林,肖建新,孔凡仙,刘景彦,郑和荣. 2000. “构造坡折带”:断陷盆地层序分析和油气预测的重要概念. 地球科学, 25(3): 260-266. [Lin C S, Pan Y L, Xiao J X, Kong F X, Liu J Y, Zheng H R. 2000. Structural slope-break zone: key concept for stratigraphic sequence analysis and petroleum forecasting in fault subsidence basins. Earth Science, 25(3): 260-266]
- 林畅松,郑和荣,任建业,刘景彦,邱以刚. 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), (11): 1025-1036. [Lin C S, Zheng H R, Ren J Y, Liu J Y, Qiu Y G. 2003. The control of syndepositional faulting on the Eogene sedimentary basin fills of the Dongying and Zhanhua sags, Bohai Bay Basin. Science in China(Series D), 33(11): 1025-1036]
- 刘全有,李鹏,金之钧,孙跃武,胡广,朱东亚,黄振凯,梁新平,张瑞,刘佳宜. 2022. 湖相泥页岩层系富有机质形成与烃类富集:以长7为例. 中国科学(地球科学), 52(2): 270-290 [Liu Q Y, Li P, Jin Z J, Sun Y W, Hu G, Zhu D Y, Huang Z K, Liang X P, Zhang R, Liu J Y. 2022. Organic-rich formation and hydrocarbon enrichment of lacustrine shale strata: a case study of Chang 7 Member. Scientia Sinica(Terrae), 52(2): 270-290].
- 吕奇奇,付金华,罗顺社,李士祥,周新平,蒲宇新,闫红果. 2022. 坳陷湖盆重力流水道一朵叶复合体沉积特征及模式:以鄂尔多斯盆地西南部三叠系延长组长7段为例. 石油勘探与开发, 49(6): 1143-1156. [Lyu Q Q, Fu J H, Luo S S, Li S X, Zhou X P, Pu Y X, Yan H G. 2022. Sedimentary characteristics and model of gravity flow channel-lobe complex in a depression lake basin: a case study of Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in southwestern Ordos Basin, NW China. Petroleum Exploration and Development, 49(6): 1143-1156]
- 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. [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]
- 吴千然,鲜本忠,高先志,田荣恒,张浩哲,刘建平,高钰坤,王鹏宇. 2023. 强制湖退期湖底扇沉积构型的多样性与砂体分布特征:以渤海湾盆地东营凹陷沙三段中亚段为例. 石油勘探与开发, 50(4): 782-794. [Wu Q R, Xian B Z, Gao X Z, Tian R H, Zhang H Z, Liu J P, Gao Y K, Wang P Y. 2023. Diversity of depositional architecture and sandbody distribution of sublacustrine fans during forced regression: a case study of Paleogene Middle Sha 3 Member in Dongying Sag, Bohai Bay Basin, East China. Petroleum Exploration and Development, 50(4): 782-794]
- 姚益民. 1994. 中国含油气区的古近系. 北京:石油工业出版社, 1-76. [Yao Y M. 1994. Paleogene of Hydrocarbon-Bearing Districts in China. Beijing: Petroleum Industry Press, 1-76]

- 邹才能,冯有良,杨智,蒋文琦,张天舒,张洪,王小妮,朱吉昌,魏琪钊. 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. [Zou C N, Feng Y L, Yang Z, Jiang W Q, Zhang T S, Zhang H, Wang X N, Zhu J C, Wei Q Z. 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]
- Baas J H, Best J L, Peakall J, Wang M. 2009. A phase diagram for turbulent, transitional, and laminar clay suspension flows. *Journal of Sedimentary Research*, 79: 162-183.
- 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: 1953-1987.
- Baas J H, Best J L, Peakall J. 2016a. Predicting bedforms and primary current stratification in cohesive mixtures of mud and sand. *Journal of the Geological Society*, 173: 12-45.
- Baas J H, Best J L, Peakall J. 2016b. Comparing the transitional behaviour of kaolinite and bentonite suspension flows. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41: 1911-1921.
- Baker M L, Baas J H, Malarkey J, Jacinto R S, Craig M J, Kane I A, Barker S. 2017. The effect of clay type on the properties of cohesive sediment gravity flows and their deposits. *Journal of Sedimentary Research*, 87: 1176-1195.
- Boulestex K, Poyatos-More M, Flint S S, Taylor K G, Hodgson D M, Hasiotis S T. 2019. Transport and deposition of mud in deep-water environments: processes and stratigraphic implications. *Sedimentology*, 66(7): 2894-2925.
- Bowman A P, Johnson H D. 2014. Storm-dominated shelf-edge delta successions in a high accommodation setting: the palaeo-Orinoco Delta (Mayaro Formation), Columbus Basin, South-East Trinidad. *Sedimentology*, 61: 792-835.
- Chamberlain C P, Wan X Q, Graham S A, Carroll A R, Doebbert A C, Sageman B B, Blisniuk P, Kent-Corson M L, Wang Z, Wang C S. 2013. Stable isotopic evidence for climate and basin evolution of the Late Cretaceous Songliao Basin, China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 385: 106-124.
- Chen P, Xian B Z, Li M J, Liang X W, Wu Q R, Zhang W M, Wang J H, Wang Z, Liu J P. 2021. A giant lacustrine flood-related turbidite system in the Triassic Ordos Basin, China: sedimentary processes and depositional architecture. *Sedimentology*, 68: 3279-3306.
- Craig M J, Baas J H, Amos K J, Strachan L J, Manning A J, Paterson D M, Hope J A, Nodder S D, Baker M L. 2020. Biomediation of submarine sediment gravity flow dynamics. *Geology*, 48: 72-76.
- Dal Corso J, Gianolla P, Rigo M, Franceschi M, Roghi G, Mietto P, Manfrin S, Raucsik B, Budai T, Jenkyns H C, Raymond C E, Caggiati M, Gattolin G, Breda A, Merico A, Preto N. 2018. Multiple negative carbon-isotope excursions during the Carnian Pluvial Episode (Late Triassic). *Earth-Science Reviews*, 185: 732-750.
- Dodd T J H, McCarthy D J, Amy L, Plenderleith G E, Clarke S M. 2022. Hybrid event bed character and distribution in the context of ancient deep-lacustrine fan models. *Sedimentology*, 69: 1891-1926.
- 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.
- Feng Y L, Jiang S, Wang C F. 2015. Sequence stratigraphy, sedimentary systems and petroleum plays in a low-accommodation basin: middle to upper members of the Lower Jurassic Sangonghe Formation, Central Junggar Basin, Northwestern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 105: 85-103.
- Feng Y L, Jiang S, Hu S Y, Li S T, Lin C S, Xie X N. 2016. Sequence stratigraphy and importance of syndepositional structural slope-break for architecture of Paleogene syn-rift lacustrine strata, Bohai Bay Basin, E. China. *Marine and Petroleum Geology*, 69: 183-204.
- Feng Y L, Yang Z, Zhu J C, Zhang S, Fu X L. 2021a. Sequence stratigraphy in post-rift river-dominated lacustrine delta deposits: a case study from the Upper Cretaceous Qingshankou Formation, northern Songliao Basin, northeastern China. *Geological Journal*, 56: 316-336.
- Feng Y L, Zou C N, Li J Z, Lin C S, Wang H J, Jiang S, Yang Z, Zhang S, Fu X L. 2021b. Sediment gravity-flow deposits in Late Cretaceous Songliao postrift downwarped lacustrine basin, northeastern China. *Marine and Petroleum Geology*, 134: 105378.
- Feng Z Q, Zhang S, Cross T A, Feng Z H, Xie X N, Zhao B, Fu X L, Wang C S. 2010a. Lacustrine turbidite channels and fans in the Mesozoic Songliao Basin, China. *Basin Research*, 22: 96-107.
- Feng Z Q, Jia C Z, Xie X N, Zhang S, Feng Z H, Cross T A. 2010b. Tectonostratigraphic units and stratigraphic sequences of the nonmarine Songliao Basin, Northeast China. *Basin Research*, 22: 79-95.
- Haughton P, Davis C, McCaffrey W, Barker S. 2009. Hybrid sediment gravity flow deposits-Classification, origin and significance. *Marine and Petroleum Geology*, 26: 1900-1918.
- Jia J L, Liu Z J, Bechtel A, Strobl S A I, Sun P C. 2013. Tectonic and climate control of oil shale deposition in the Upper Cretaceous Qingshankou Formation (Songliao Basin, NE China). *International Journal of Earth Sciences*, 102: 1717-1734.
- Meng Q A, Zhang S, Sun G X, Fu X L, Wang C, Shang Y. 2016. A seismic geomorphology study of the fluvial and lacustrine-delta facies of the Cretaceous Quantou - Nenjiang Formations in Songliao Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 78: 836-847.
- Meng Q R, Wu G L, Fan L G, Wei H H. 2019. Tectonic evolution of early Mesozoic sedimentary basins in the North China Block. *Earth-Science Reviews*, 190: 416-438.
- Mulder T, Alexander J. 2001. The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits. *Sedimentology*, 48: 269-299.
- Mulder T, Syvitski J P M, Migeon S, Faugères J C, Savoye B. 2003. Marine hyperpycnal flows: initiation, behavior and related deposits: a review. *Marine and Petroleum Geology*, 20: 861-882.

- Mutti E. 2019. Thin-bedded plumites: an overlooked deep-water deposit. *Journal of Mediterranean Earth Sciences*, 11: 1–20.
- Niu X B, Yang T, Cao Y C, Li S X, Zhou X P, Xi K L, Dodd T J H. 2023. Characteristics and formation mechanisms of gravity-flow deposits in a lacustrine depression basin: examples from the Late Triassic Chang 7 oil member of the Yanchang Formation, Ordos Basin, Central China. *Marine and Petroleum Geology*, 148: 106048.
- Pan S X, Liu C Y, Li X B, Liang S J, Chen Q L, Zhang W T, Zhang S C. 2019. Giant sublacustrine landslide in the Cretaceous Songliao Basin, NE China. *Basin Research*, 31: 1066–1082.
- Potter P E, Maynard J B, Pryor W A. 1980. *Sedimentology of Shale: Study Guide and Reference Source*. New York: Springer-Verlag, 1–60.
- Ryge M C, Gibling M R. 2006. Natural geomorphic variability recorded in a high-accommodation setting: fluvial architecture of the Pennsylvanian Joggins Formation of Atlantic Canada. *Journal of Sedimentary Research*, 76(11): 1230–1251.
- Schieber J, Southard J B. 2009. Bedload transport of mud by floccule ripples: direct observation of ripple migration processes and their implications. *Geology*, 37: 483–486.
- Schieber J. 2016. Mud re-distribution in epicontinental basins: exploring likely processes. *Marine and Petroleum Geology*, 71: 119–133.
- Stow D A V, Huc A Y, Bertrand P. 2001. Depositional processes of black shales in deep water. *Marine and Petroleum Geology*, 18: 491–498.
- Sumner E J, Talling P J, Amy L A. 2009. Deposits of flows transitional between turbidity current and debris flow. *Geology*, 37: 991–994.
- Sun N L, Chen T Y, Zhong J H, Gao J B, Shi X Y, Xue C Q, Swennen R. 2022. Petrographic and geochemical characteristics of deep-lacustrine organic-rich mudstone and shale of the Upper Triassic Chang 7 member in the southern Ordos Basin, Northern China: implications for shale oil exploration. *Journal of Asian Earth Sciences*, 227: 105118.
- Talling P J, Masson D G, Sumner E J, Malgesini G. 2012. Subaqueous sediment density flows: depositional processes and deposit types. *Sedimentology*, 59: 1937–2003.
- Tang W B, Zhang Y Y, Pe-Piper G, Piper D J W, Guo Z J, Li W. 2020. Soft-sediment deformation structures in alkaline lake deposits of Lower Permian Fengcheng Formation, Junggar Basin, NW China: implications for syn-sedimentary tectonic activity. *Sedimentary Geology*, 406: 105719.
- Tang W B, Zhang Y Y, Pe-Piper G, Piper D J W, Guo Z J, Li W. 2021. Permian to early Triassic tectono-sedimentary evolution of the Mahu Sag, Junggar Basin, Western China: sedimentological implications of the transition from rifting to tectonic inversion. *Marine and Petroleum Geology*, 123: 104730.
- Tian X, Gao Y, Li Z Y, Carlos Z, Chen Z Y, Huang Y J, Yu E X, Wang C S. 2021. Fine-grained gravity flow deposits and their depositional processes: a case study from the Cretaceous Nenjiang Formation, Songliao Basin, NE China. *Geological Journal*, 56: 1496–1509.
- Vail P R, Audemard F, Bowman S A, Einser P N, Perez-Cruz C. 1991. The stratigraphic signatures of tectonics, eustasy and sedimentology: an overview. In: Einsele G, Ricken W, Seilacher A (eds). *Cycles and Events in Stratigraphy*. Berlin: Springer-verlag, 617–659.
- van Wagoner J C, Mitchum R M, Campion K M, Rahmanian V D. 1990. Siliciclastic sequence stratigraphy in well, core and outcrops and outcrops: concepts for high-resolution correlation of times and facies. *AAPG Methods in Exploration Series*, 7: 1–55.
- Veiga G D, Schwarz E, Spalletti L A, Massafiero J L. 2013. Anatomy and sequence architecture of the early post-rift in the Neuquén Basin (Argentina): a response to physiography and relative sea-level changes. *Journal of Sedimentary Research*, 83(8): 746–765.
- Wang C S, Feng Z Q, Zhang L M, Huang Y J, Cao K, Wang P J, Zhao B. 2013. Cretaceous paleogeography and paleoclimate and the setting of SKI borehole sites in Songliao Basin, Northeast China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 385: 17–30.
- Xi D P, Cao W X, Huang Q H, Do Carmo D A, Li S, Jing X, Tu Y J, Jia J Z, Qu H Y, Zhao J, Wan X Q. 2016. Late Cretaceous marine fossils and seawater incursion events in the Songliao Basin, NE China. *Cretaceous Research*, 62: 172–182.
- Xu C, Shan X L, He W T, Zhang K, Rexiti Y, Su S Y, Liang C, Zou X T. 2021. The influence of paleoclimate and a marine transgression event on organic matter accumulation in lacustrine black shales from the Late Cretaceous, southern Songliao Basin, Northeast China. *International Journal of Coal Geology*, 246: 103842.
- Xu Y H, He D F. 2022. Triassic provenance shifts and tectonic evolution of southeast Ordos Basin, Central China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 598: 111002.
- Yang T, Cao Y C, Liu K Y, Wang Y Z, Zavala C, Friis H, Song M S, Yuan G H, Liang C, Xi K L, Wang J. 2019. Genesis and depositional model of subaqueous sediment gravity-flow deposits in a lacustrine rift basin as exemplified by the Eocene Shahejie Formation in the Jiyang Depression, Eastern China. *Marine and Petroleum Geology*, 102: 231–257.
- Zavala C, Arcuri M. 2016. Intrabasinal and extrabasinal turbidites: origin and distinctive characteristics. *Sedimentary Geology*, 337: 36–54.
- Zheng R H, Zeng W R, Li Z P, Chen X, Man K X, Zhang Z H, Wang G L, Shi S. 2022. Differential enrichment mechanisms of organic matter in the Chang 7 Member mudstone and shale in Ordos Basin, China: constraints from organic geochemistry and element geochemistry. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 601: 111126.
- Zou C N, Qiu Z, Zhang J Q, Li Z Y, Wei H Y, Liu B, Zhao J H, Yang T, Zhu S F, Tao H F, Zhang F Y, Wang Y M, Zhang Q, Liu W, Liu H L, Feng Z Q, Liu D, Gao J L, Liu R, Li Y F. 2022. Unconventional petroleum Sedimentology: a key to understanding unconventional hydrocarbon accumulation. *Engineering*, 18: 62–78.

(责任编辑 李新坡; 英文审校 李攀)