

陆相湖盆细粒浊流沉积序列及对页岩油类型划分的意义: 以松辽盆地白垩系青山口组为例^{*}

刘招君^{1,2} 王 旭³ 杨 亮⁴ 胡 菲^{1,2}
邢济麟⁴ 孟庆涛^{1,2} 刘红超⁴ 孙平昌^{1,2}

- 1 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061
2 吉林省页岩油与共生能源矿产重点实验室, 吉林长春 130061
3 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037
4 中国石油吉林油田分公司勘探开发研究院, 吉林松原 138000

摘 要 细粒浊流沉积作为陆相湖盆深水环境细粒沉积物输送的核心动力机制之一, 其沉积序列的精细刻画和成因解析, 是揭示陆相页岩油成藏机制、完善页岩油类型划分体系的关键切入点。以松辽盆地长岭凹陷上白垩统青山口组一段为研究对象, 基于 3 口全取心井资料共识别出 9 种沉积单元, 采用马尔科夫链方法分析浊流沉积序列, 揭示了前三三角洲—半深湖—深湖环境中浊流事件从启动、高能搬运到末端衰减的转移规律。依托本研究区实际资料刻画了陆相湖盆细粒浊流沉积特征, 并建立了陆相湖盆细粒浊流沉积序列模式, 其中细粒浊流沉积包括 T₁—T₇ 单元, 清晰反映浊流从高能到低能沉积演化规律。综合岩性组合、沉积构造、砂地比等参数, 提出了研究区页岩油类型划分方案。不同类型页岩油特征受细粒浊流沉积控制显著: 夹层型受控于近源浊流沉积, 砂岩和粉砂岩夹层为页岩油提供优质储集空间; 纹层型与远源浊流沉积有关, 以高频薄层粉砂质泥岩和页岩为主, 具有较好的储集层物性和脆性; 块状型和末端浊流沉积与湖盆静水沉积复合作用有关, 储集层物性和脆性较差。

关键词 陆相湖盆 细粒浊流 沉积序列 页岩油分类 青山口组 松辽盆地

第一作者简介 刘招君, 男, 1951 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事沉积学、盆地分析、层序地层学、页岩油成藏机制和油页岩成矿机制等方面研究。E-mail: liuzj@jlu.edu.cn。

中图分类号: P618.13 文献标志码: A

Sedimentary sequence of fine-grained turbidites in continental lacustrine basins and its significance for shale oil classification: a case study of the Cretaceous Qingshankou Formation, Songliao Basin

LIU Zhaojun^{1,2} WANG Xu³ YANG Liang⁴ HU Fei^{1,2}
XING Jilin⁴ MENG Qingtao^{1,2} LIU hongchao⁴ SUN Pingchang^{1,2}

- 1 College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China
2 Key Laboratory of Oil Shale and Coexisting Energy Minerals of Jilin Province, Changchun 130061, China
3 Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China
4 Exploration and Development Research Institute, Jilin Oilfield Company, PetroChina, Jilin Songyuan 138000, China

^{*} 谨以此文纪念冯增昭先生 100 周年诞辰。

收稿日期: 2026-01-08 改回日期: 2026-02-09

Abstract As one of the core dynamic mechanisms for the transport of fine-grained sediments in the deep-water environment of continental lacustrine basins, the meticulous characterization and genetic analysis of the sedimentary sequences of fine-grained turbidite deposits constitute a key entry point for revealing the shale oil accumulation mechanism and improving the classification system of shale oil types. Taking the Member 1 of the Upper Cretaceous Qingshankou Formation in the Changling sag of the Songliao Basin as the research object, a total of nine sedimentary units have been identified based on the data from three full-core drilling wells, and the Markov chain method was adopted to analyze the turbidite sedimentary sequences, which reveals the transition laws of turbidite events from initiation, high-energy transportation to terminal attenuation in the prodelta-semi-deep lake-deep lake sedimentary environments. Based on the actual geological data of the study area, the sedimentary characteristics of fine-grained turbidite currents in continental lacustrine basins were characterized, and a sedimentary sequence model for fine-grained turbidite deposits in continental lacustrine basins is established, among which the fine-grained turbidite deposits are composed of Units T_1 to T_7 that clearly reflect the high-energy to low-energy sedimentary evolution laws of turbidites. Synthesizing such parameters as lithologic assemblages, sedimentary structures and sand-to-shale ratio, a classification scheme for shale oil types in the study area is proposed. The characteristics of different shale oil types are significantly controlled by the fine-grained turbidite deposits: the interbedded type is governed by proximal turbidite deposits, with sandstone and siltstone interbeds providing high-quality reservoir spaces for shale oil; the laminated type is associated with distal turbidite deposits, dominated by high-frequency thin-bedded silty mudstones and shales and possessing favorable reservoir physical properties and brittleness; the massive type is related to the combined effects of terminal turbidite deposits and lacustrine still-water deposits in the lacustrine basin, with relatively poor reservoir physical properties and brittleness.

Key words continental lacustrine basin, fine-grained turbidity, sedimentary sequence, shale oil classification, Qingshankou Formation, Songliao Basin

About the first author LIU Zhaojun, born in 1951, is a professor and doctoral supervisor in Jilin University. He is primarily specializes in sedimentology, basin analysis, sequence stratigraphy, shale oil accumulation mechanism, oil shale mineralization mechanism, etc. E-mail: liuzj@jlu.edu.cn.

0 引言

页岩油作为陆相湖盆非常规油气藏的重要构成部分,在松辽盆地、渤海湾盆地、鄂尔多斯盆地等典型陆相含油气盆地实现多点规模化突破。相较于海相页岩油沉积体系,陆相湖盆受构造活动、古气候波动及物源供给的多重控制,而浊流作为陆源物质向盆地深水区搬运沉积的关键载体,在塑造陆相湖盆沉积格局,调控沉积物展布规律中发挥着不可替代的作用,其沉积过程与特征直接影响着陆相页岩油富集特征(邹才能等,2023)。长期以来,学界围绕浊流体系的研究多聚焦于较粗粒浊积岩领域(刘招君等,1985),但针对细粒浊积岩尤其是深湖富有机质细粒浊积岩沉积体系的研究,仍面临诸多科学瓶颈与认知局限,研究深度与广度远不及粗

粒浊积岩领域。细粒浊积岩沉积物粒径极细,且常伴随黏土矿物、有机质及自生矿物的混杂堆积,这使得其内部岩性特征、沉积构造、纹层组合及沉积序列难以观测(吕奇奇等,2025)。更为突出的是,作为基于粗粒浊流沉积建立的经典 Bouma 序列,无法精准刻画细粒浊流沉积的微观差异与精细演化过程,导致其在解释细粒浊流沉积机理时存在明显局限性。在这一背景下,Stow 和 Shanmugam (1980) 提出了细粒浊流沉积划分方案,国内一些学者也开展了这方面的研究:例如龚峤林等(2018)采用 Stow 和 Shanmugam (1980) 提出的经典细粒浊积岩序列对四川盆地寒武系郭家坝组细粒浊积岩进行划分,根据岩性构造组合特征将 T_{0-9} 沉积单元划分为 3 种组合;杨田等(2021)聚焦鄂尔

多斯盆地延长组细粒浊流沉积,建立了砂质碎屑流沉积、低密度浊流沉积及混合事件层 3 种沉积类型。显然,至今远未形成一个广为接受的有关陆相湖盆细粒浊流沉积的划分方案,这制约了不同盆地细粒浊积岩研究成果的对比分析。

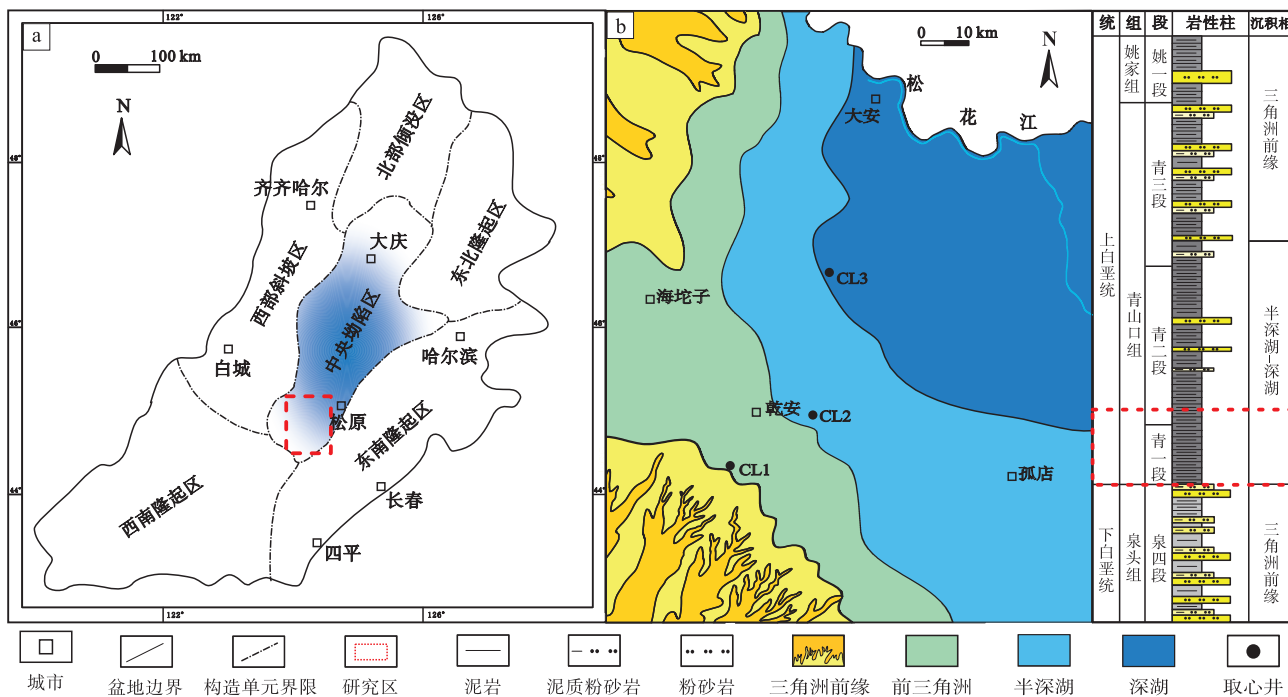
近年来的研究发现,细粒沉积物中富含黏土矿物和有机质,在深水环境中发育的细粒沉积物很多是浊流沉积的结果,其搬运演化过程、沉积物特征及分布规律都与传统的粗粒浊流之间存在明显差异,这种差异最终会影响到非常规油气成藏 (Stow *et al.*, 2001; 冯有良等, 2024)。多数研究表明湖盆中细粒浊流形成的粉砂质及长英质纹层可以有效改善储集层的非均质性,是潜在的页岩油气甜点发育区 (杨田等, 2023; 邹才能等, 2023)。孙龙德等 (2024) 指出细粒沉积重力流影响的深湖相泥页岩区有机碳含量高,受重力流影响显著,是良好的页岩油气储集层。由于不同盆地因构造背景、物源供给差异,细粒浊流对页岩油储集层及成藏过程的调控机理存在显著差异性,但相同的是,细粒浊流沉积对于页岩油成藏的作用不可忽视 (邹才能等, 2023; 孙龙德等, 2024; Yang and Liu, 2025)。因此,系统梳理细粒浊流沉积体系,阐释其对页岩油储集层非均质性的调控机制及页岩油类

型的作用是目前重点的科学问题。这不仅能够完善陆相湖盆细粒浊流沉积理论体系,优化页岩油成藏模式认知,更能为页岩油资源的精准勘探、高效开发提供重要的理论价值与实践意义。

1 区域地质概况

松辽盆地作为中国东部最大的中生代陆相盆地,处于欧亚大陆东缘与太平洋板块边界构造带的交汇部位,其地质背景极为复杂且具有鲜明的区域性和多期动力学演化特征 (刘招君等, 2002)。盆地内部分为西部斜坡区、北部倾没区、东北隆起区、东南隆起区、西南隆起区和中央坳陷区 6 个一级构造单元 (图 1-a) (葛荣峰等, 2010), 呈现出断陷—拗陷多结构格局, 其形成与古亚洲板块—太平洋板块之间的持续俯冲、碰撞以及陆内张裂作用密切相关 (胡望水等, 2005)。其中,长岭凹陷是中央坳陷区南部的次级构造单元,是松辽盆地重要的生烃凹陷之一 (刘招君等, 1992; 孟庆涛等, 2024)。

松辽盆地上白垩统的沉积充填体系极为发育,自下而上依次发育有泉头组、青山口组、姚家组、嫩江组等巨厚的陆相地层,尤其是在白垩纪晚期松



a—松辽盆地位置与构造单元划分; b—研究区沉积相与地层柱状图

图 1 松辽盆地构造单元及研究区沉积相与地层柱状图

Fig. 1 Column chart of sedimentary facies and strata in structural units and study area of Songliao Basin

辽盆地经历了区域性的最大湖侵，湖泊面积与水体深度同时达到顶峰，湖盆动力过程、沉积环境与物源系统发生了深刻转型(图 1-b) (胡望水等, 2005; 刘招君等, 2009; 贾承造等, 2012)。文中研究区则位于中央坳陷区的长岭凹陷内，该凹陷在青山口组沉积时期处于盆地南部的沉积中心之一，受西南及南部主物源控制，沉积环境稳定且水体深度适宜，为富有机质泥页岩的发育提供了有利条件(柳波等, 2021)。研究区目的层为青山口组一段，该地层为大套富有机质暗色泥页岩，其中含部分砂岩、粉砂岩及薄层白云岩等，因此青一段也是长岭凹陷乃至松辽盆地页岩油赋存的重点层位。选取研究区内 3 口钻井资料完整的全取心井作为研究对象。3 口钻井分别对应研究区关键沉积相带及细粒浊流沉积发育区，其中 CL1 井位于前三角洲区域，CL2 井位于半深湖区域，CL3 井位于深湖区域(图 1-b)。3 口钻井的取样岩心均限定于青山口组一段，且统一聚焦 Q1-Q4 油层组，确保对同一时

期细粒浊流沉积演化特征的连续对比分析，为后续揭示浊流作用对页岩油富集的控制机制奠定可靠基础。

2 细粒浊流沉积单元特征及划分

细粒浊流沉积单元划分是解析陆相湖盆页岩油成藏机制的关键。Stow 和 Shanmugam (1980) 提出的海相细粒浊积岩划分方案，因精准阐释细粒沉积构造与沉积过程成为经典理论(图 2)，但该方案源于海相环境，与松辽盆地长岭凹陷陆相湖盆的构造背景、物源供给及水动力条件差异显著。以此方案为基础，结合研究区 3 口代表性全取心井的精细观察划分细粒浊流沉积单元；针对区内存在以砂岩为主的浊流沉积，引入 Bouma 序列 T_{A-B}段作为补充，兼顾细、粗粒浊流沉积的关联。通过对 3 类典型沉积环境浊流特征的系统观测，最终归纳 9 种浊流相关沉积单元，其中细粒浊流沉积单元 7 种。

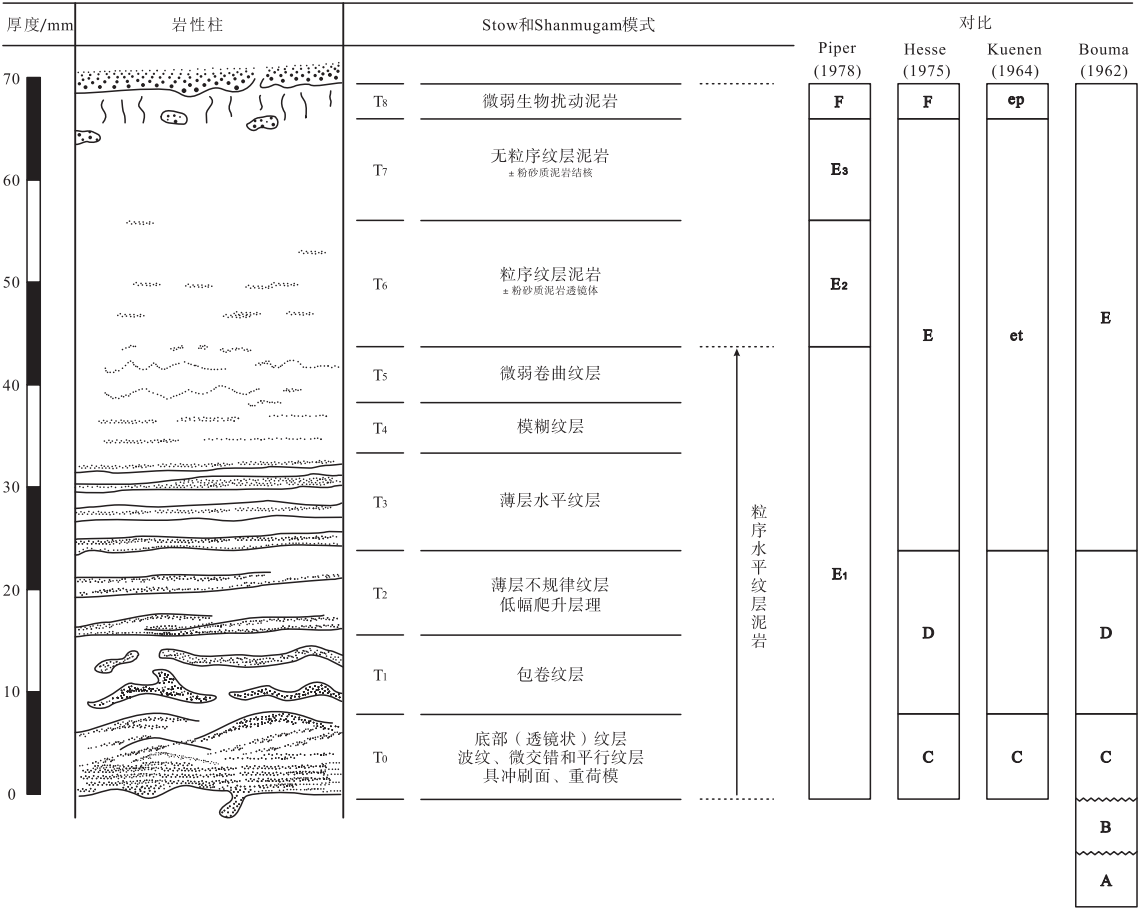


图 2 Stow 和 Shanmugam (1980) 提出的细粒浊积岩沉积单元划分模式
Fig. 2 Division model of fine-grained turbidite sedimentary units proposed by Stow and Shanmugam (1980)

2.1 块状层理砂岩段 (T_A 单元)

T_A 单元对应 Bouma 序列的底部单元, 通常表现为厚度较大的灰色至灰白色砂岩, 内部以块状层理或递变层理为主(图 3)。其形成归因于高密度浊流事件, 如季节性洪水或构造扰动引发的高密度浊流在湖底迅速移动 (Bouma, 1962)。 T_A 单元的平均厚度一般在 10 cm 左右, 部分单层厚度可达 1 m 以上, 底部可见明显冲刷面和泥岩撕裂屑, 指示强烈的底流侵蚀, 其下部往往和 T_6 或 T_7 单元突变接触, 上部一般为 T_B 单元, 主要发育于前三角洲环境。

2.2 平行层理砂岩段 (T_B 单元)

T_B 单元则表现为灰白色至灰色砂岩, 层内粒度均一, 发育良好的平行层理。其形成源于浊流能级进一步减弱, 颗粒沉降速率分异显著, 流体浓度梯度促进了有序分层 (Bouma, 1962; Stevenson *et al.*, 2020)。 T_B 单元的纹层平直、分选性好, 厚度一般为 10~20 cm, 与下部 T_A 段递变过渡, 也可与 T_6 或 T_7 单元突变接触, 其上部一般为 T_1 单元, 体现较高的沉积能量, 主要发育于前三角洲环境(图 3)。

2.3 波纹层理粉砂岩段 (T_1 单元)

T_1 单元在松辽盆地长岭凹陷青山口组浊流沉

积体系中, 主要由粉砂质沉积物组成, 层位上处于细粒浊流沉积序列的底部, 广泛分布于前三角洲与半深湖等环境。本研究区 T_1 单元以波纹层理粉砂岩为主(图 3)。其形成与高密度浊流衰减至低密度阶段的动力条件密切相关, 此时浊流在重力影响下受惯性力影响有了一定的牵引流特征, 形成单向的波纹层理 (Shanmugam, 1997; Talling *et al.*, 2012), T_1 单元厚度普遍介于 5~10 cm 之间, 空间上呈现明显的环境分异特征, 前三角洲环境和半深湖环境因物源供给相对充足, 单元厚度普遍较大, 深湖环境受物源搬运距离及水体深度影响, 厚度偏薄, 反映了浊流事件强度、物源供给速率及沉积场所水动力条件的协同控制作用。 T_1 单元上部一般为 T_2 单元, 下部为 T_B 单元或 T_6 或 T_7 单元, 当底部为 T_6 或 T_7 单元时可见冲刷面。

2.4 滑塌变形层理粉砂岩段 (T_2 单元)

T_2 单元以粉砂岩为主, 呈现出滑塌变形层理等复杂构造。滑塌变形构造首先是由坡度的变化或沉积物堆积的迅速加厚引起的, 当半固结沉积物的剪切应力超过了沉积物的抗剪强度, 沉积物发生滑动或变形, 因此 T_2 单元常与边缘沉积物滑塌有关, 是识别浊流沉积的重要标志之一。 T_2 单元厚度普遍小于 10 cm, 内部沉积物表现出扭曲或微小断

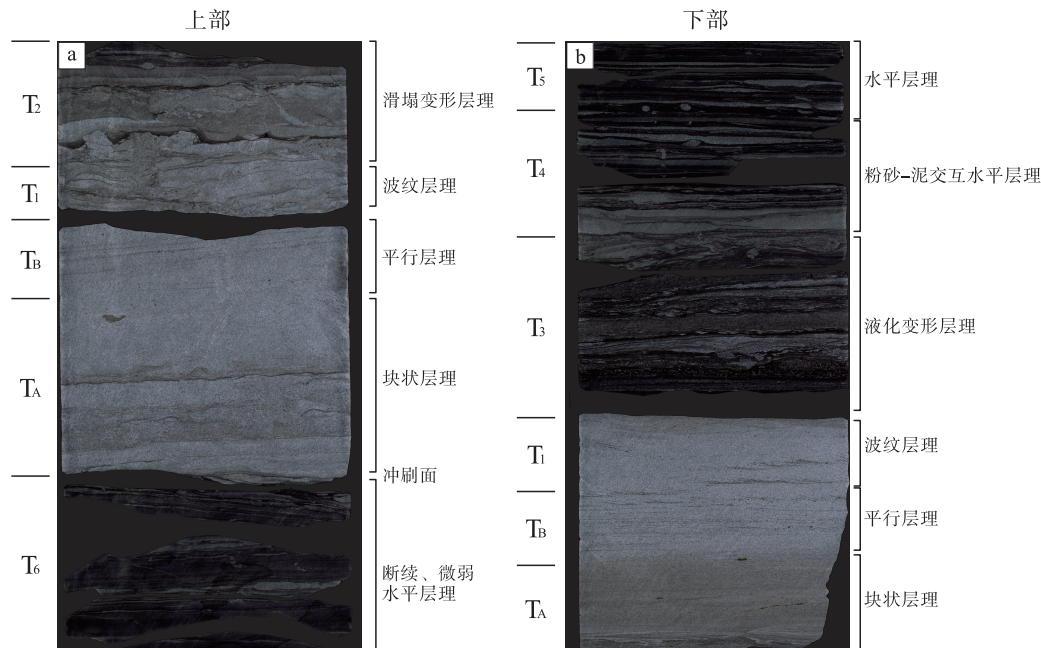


图 3 浊流沉积 T_A - T_6 单元沉积特征 (CL1 井, 井深 2488.72~2489.22 m)

Fig. 3 Sedimentary characteristics of turbidite deposits in unit T_A - T_6 (Well CL1, depth 2488.72~2489.22 m)

层。该单元主要在前三角洲中发育，由于受沉积物滑塌距离的限制，在半深湖、深湖环境中可能存在缺失(图 3-a; 图 4-a)。T₂ 单元与上下单元关系比较复杂，一般来说其上部为 T₃ 或 T₆ 单元，下部为 T₁ 或 T₆ 单元。

2.5 液化变形层理泥质粉砂岩段 (T₃ 单元)

T₃ 单元岩性以泥质粉砂岩、粉砂岩为主，广泛发育砂球、砂枕、砂岩脉及负荷构造等液化变形层理(图 3-b; 图 4-b)。浊流携带的泥质粉砂快速卸载，孔隙水难以排出，孔隙水压力超有效应力引发沉积物液化，粉砂质组分在差异压实与流体扰动下形成上述构造(Owen, 1996)。砂球呈椭圆或不规则状，直径 0.5~2.0 cm，核心为分选中等粉砂岩，外围泥质镶边发育揉皱液化构造；砂枕透镜状，长轴 3~5 cm，内部液化构造平缓、边缘变陡与泥岩相切；砂岩脉不规则状向上穿插泥岩，与围岩突变接触。液化较弱处可见变形前波纹构造，保留 T₁ 单元特征。T₃ 单元厚 5~10 cm，上覆 T₂ 单元，下伏 T₄ 单元。

2.6 粉砂—泥交互水平层理粉砂质泥岩段 (T₄ 单元)

T₄ 单元岩性以粉砂质泥岩、泥质粉砂岩为主，核心识别标志为粉砂泥交互的韵律水平层理(图 3-b; 图 4-b; 图 5; 图 6-a)。其中浅色粉砂岩与暗色泥岩纹层规则交替，界面平直清晰，单层厚 1~5 mm；粉砂纹层厚度或向上减薄或均一，部分具弱正粒序，部分发育低角度爬升纹层，为弱底流影响下沙波缓慢迁移形成(Stow and Shanmugam,

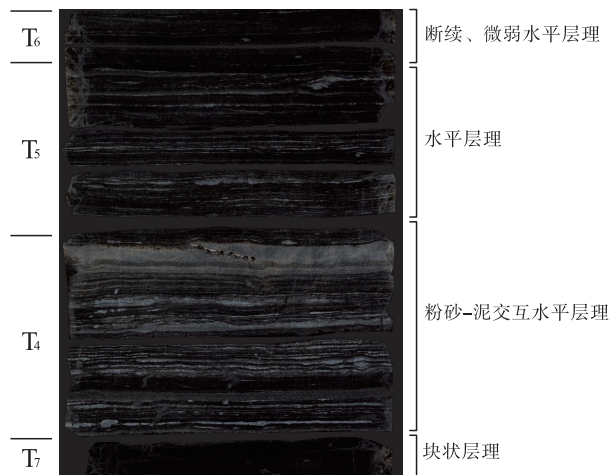


图 5 细粒浊流沉积 T₄-T₇ 单元沉积特征

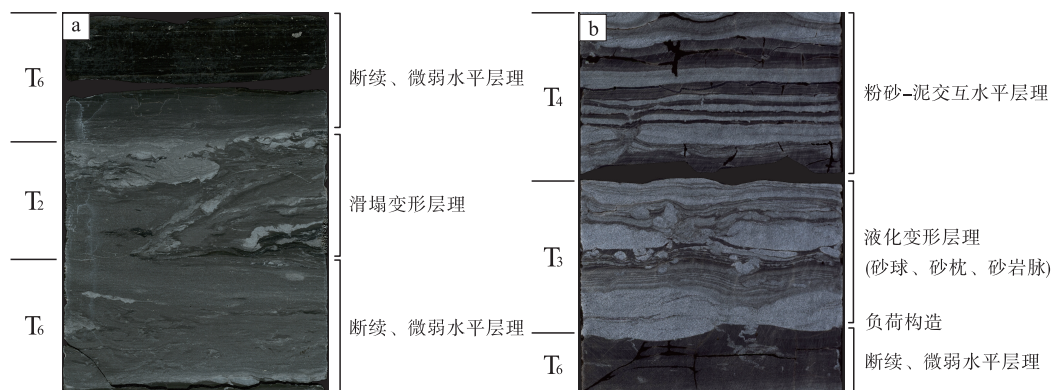
(CL3 井, 井深 2384.40~2384.60 m)

Fig. 5 Sedimentary characteristics of fine-grained turbidity current T₄-T₇ units (Well CL3, depth 2384.40~2384.60 m)

1980)。该层理由低密度浊流衰减期周期性流体剪切应力形成，反映浊流非均匀流动特性(Al-Mufti and Arnott, 2024; 施振生等, 2025)，指示浊流能量较低的稳定沉积阶段。T₄ 单元主要发育于半深湖、前三角洲及深湖局部发育，与上下 T₃、T₅ 单元呈过渡接触。

2.7 水平层理页岩段 (T₅ 单元)

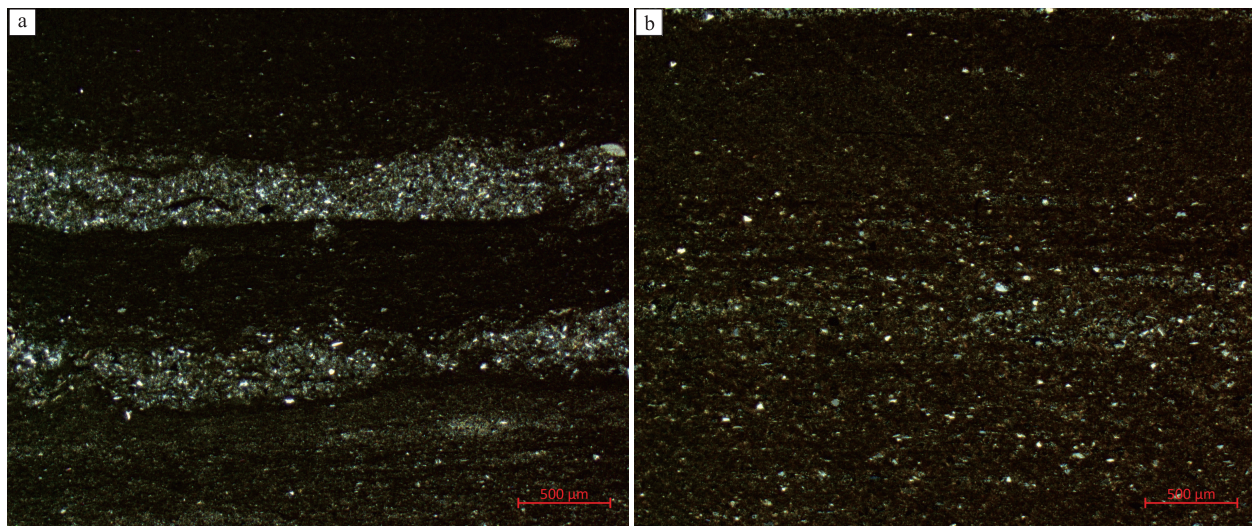
T₅ 单元岩性以水平层理页岩为主，泥质含量大于 50%，发育清晰水平层理(图 5)，由长英质与黏土质纹层交替叠置(图 6-b)。该层理形成于低能静水环境，是浊流后期能量耗散后，悬浮黏土、长英质等细粒组分缓慢沉降、分层沉积的结果



a—CL2 井, 井深 2069.38~2069.48 m; b—CL1 井, 井深 2510.09~2510.19 m

图 4 细粒浊流沉积 T₂-T₆ 单元沉积特征

Fig. 4 Sedimentary characteristics of fine-grained turbidite deposits in units T₂-T₆



a—CL2 井, 井深 2023.30 m, 薄层粉砂质条带, 粉砂—泥交互水平层理, 正交偏光, 500 $\times$; b—CL2 井, 井深 2047.20 m, 富长英质矿物泥质岩, 水平层理, 正交偏光, 500 $\times$

图 6 细粒浊流沉积粉砂—泥交互水平层理和水平层理镜下特征

Fig. 6 Characteristics of fine-grained turbidity current sedimentary silt-mud horizontal lamination and horizontal bedding under the microscope

(Dott, 1963; Piper, 1978), 指示深水区远离物源、弱流体扰动的沉积背景, 不排除存在与浊积岩不共生的季节性纹层。 T_5 单元主要分布于半深湖—深湖区, 深湖环境发育最完整, 厚度较大, 与下伏 T_4 、上覆 T_6 单元均呈过渡接触。

2.8 断续、微弱水平层理页岩段 (T_6 单元)

T_6 单元为断续、微弱水平层理泥页岩, 对应 Stow 和 Shanmugam (1980) 细粒浊流方案中的 T_4 — T_6 单元, 反映浊流不同衰减阶段的沉积差异。松辽盆地长岭凹陷青山口组岩心中, 上述单元划分特征不明显, 主要受湖相沉积快速过渡及泥岩内部构造连续性控制, 单元边界模糊, 与原方案指出的细粒浊流单元快速过渡、局部缺失特征相符。 T_6 单元岩性为深灰—灰黑色页岩、泥岩, 以黏土矿物和长英质为主, 有机碳含量较高, 发育断续、微弱水平层理(图 7), 为浊流末期能量极度衰减下细粒组分层沉降的产物, 层理不连续性或与后期生物扰动、弱水动力作用相关。该单元为末端浊流影响的半深湖沉积, 与下伏 T_5 、上覆 T_7 单元呈渐变过渡, 边界模糊。

2.9 块状层理泥岩段 (T_7 单元)

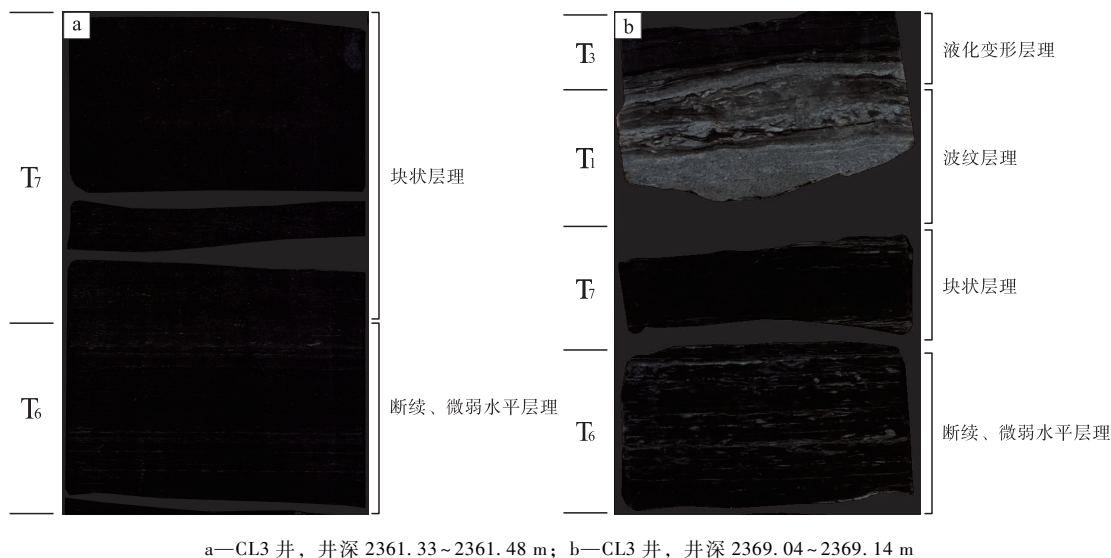
T_7 单元岩性特征以块状层理深黑色泥岩为主,

富含有机质和黏土矿物, TOC 普遍较高。该单元沉积特征反映深湖静水环境下的动力学过程(图 7)。其内部结构极为模糊, 这主要归因于深湖区长期稳定、低能量的静水条件。大量有机质与黏土物质在水体中长时间悬浮, 并在水化学条件调控下发生胶体絮凝, 从而形成均质、无明显层理的富有机质块状泥岩。该类沉积多与悬浮沉降作用密切相关, 块状层理反映了静水环境下细粒物质持续均匀沉降, 也往往与生物扰动作用有关 (Mulder and Alexander, 2001)。该单元广泛见于半深湖至深湖区, 代表典型的深湖静水沉积产物, 其高有机质含量反映湖盆水体稳定的还原条件, 为有机质保存提供了理想的物理化学环境。该单元之下往往发育 T_6 单元, 上部发育 T_A 单元、 T_B 单元或者 T_1 单元, 并具有显著冲刷面。

3 细粒浊流沉积演化特征与相模式

3.1 马尔科夫链基本原理与应用

研究区内各类沉积单元的纵向序列往往不严格遵循理想化的经典浊积岩序列, 体现为多期次事件叠加、多种沉积单元交替发育的复杂格局, 使人们无法一眼就看出其沉积特征究竟可以用何种一般性模型来解释。在诸多定量分析路径中, 马尔科夫链



a—CL3 井, 井深 2361.33~2361.48 m; b—CL3 井, 井深 2369.04~2369.14 m

图 7 细粒浊流沉积 T_6 – T_7 单元沉积特征Fig. 7 Sedimentary characteristics of T_6 – T_7 units in fine-grained turbidity current sedimentation

方法凭借其在状态转移概率上的独特优势,能够处理序列中的随机与有序成分,从而提供更客观的沉积序列解读(何起祥, 1978; Staňová *et al.*, 2009; He *et al.*, 2019)。

基于研究区含浊流层位的高精度劈心井的精细观察和部分薄片鉴定识别出 9 种与浊流成因直接相关的沉积单元,包括块状层理或递变层理砂岩段(T_A)、平行层理砂岩段(T_B)、波纹层理粉砂岩段(T_1)、滑塌变形层理粉砂岩段(T_2)、液化变形层理泥质粉砂岩段(T_3)、粉砂—泥交互水平层理粉砂质泥岩段(T_4)、水平层理页岩段(T_5)、断续、微弱水平层理页岩段(T_6)及块状层理泥岩段(T_7)。上述各沉积单元因其岩性和沉积构造特征的差异性,构成了马尔科夫链分析中的 9 种独立沉积单元。考虑到冲刷面(SS)作为浊流事件启动阶段的典型沉积标志,其形成过程与后续沉积单元的叠置关系直接反映了浊流动力条件的突变特征,故将其单独界定为一种沉积状态纳入模型体系,从而实现了从浊流沉积从事件触发到能量衰减全过程沉积响应的完整状态覆盖。本次研究以 3 口高精度全取心井为对象,完成累计长度 150.64 m 岩心的全段系统解析与统计,精准识别并划分出 1563 个浊流沉积单元,采用马尔科夫链方法处理该浊流沉积单元序列,通过标准化界定沉积单元类型、构建相邻沉积单元转移序列数据集,建立频数矩阵与转移概率矩阵以定量表征沉积过程转移倾向性,经卡

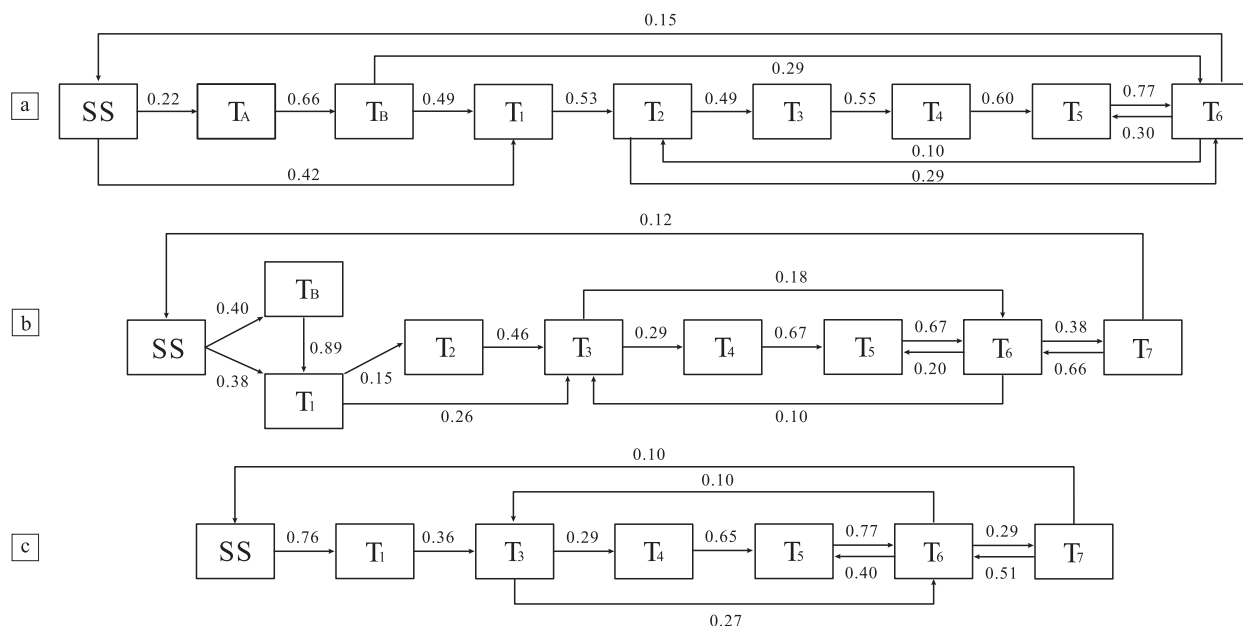
方检验证实研究区浊流沉积单元序列具备显著马尔科夫性,随后通过实际转移概率矩阵与随机概率矩阵的差值运算构建转移差值矩阵,明确沉积过程中的优先转移路径与抑制转移路径(图 8)。

3.2 不同沉积环境的细粒浊流沉积序列

研究区不同沉积环境中浊流沉积单元的组样本质记录了浊流演化的动力机制转换、物源供给的时空分配格局、湖盆古地貌的演化轨迹及流体输运—沉积过程的阶段性分异特征(操应长等, 2021; 范洪军等, 2024)。通过 3 口井浊流沉积单元马尔科夫链处理表明,浊流沉积体系呈现由高能向低能的横向连续递变规律,这种递变规律印证了湖相浊流沉积的相带分异模式(图 9)。

3.2.1 前三三角洲环境

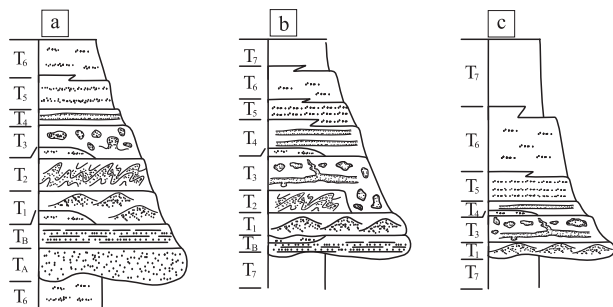
前三三角洲为三角洲前缘与半深湖的沉积过渡带,受三角洲前缘物源供给和半深湖水动力条件共同控制。CL1 井前三三角洲段发育近源高能浊流沉积组合,涵盖 T_A 至 T_6 单元共 8 个沉积单元,缺失 T_7 单元(图 9-a; 表 1)。厚度上, T_6 单元累计厚度最大(4.32 m), T_A 单元次之(3.44 m),整体 T_1 – T_3 累积厚度减小。该环境浊流沉积单元主转移路径为 $SS \rightarrow T_A$ 单元(0.22) $\rightarrow T_B$ 单元(0.66) $\rightarrow T_1$ 单元(0.49) $\rightarrow T_2$ 单元(0.53) $\rightarrow T_3$ 单元(0.49) $\rightarrow T_4$ 单元(0.55) $\rightarrow T_5$ 单元(0.60) $\rightarrow T_6$ 单元(0.77)(图 8-a),反映浊流能量渐进衰减



a—前三角洲 CL1 井; b—半深湖 CL2 井; c—深湖 CL3 井

图 8 基于马尔科夫链建立的研究区各井浊流沉积单元演化概率图

Fig. 8 Probability diagram of turbidity current sedimentation unit evolution in each well of the study area based on Markov chain



a—前三角洲环境; b—半深湖环境; c—深湖环境

图 9 长岭凹陷青山口组一段不同沉积环境细粒浊流沉积序列

Fig. 9 Fine grained turbidity current sedimentary sequence in different sedimentary environments of the Qingyi Member of Changling Depression

的连续沉积响应。

3.2.2 半深湖特征

半深湖 CL2 井发育远源低能浊积岩组合, 含 T_B 至 T_7 共 8 个沉积单元, 缺失近源 T_A 单元(图 9-b; 表 1)。沉积厚度与频率均以细粒为主的 T_5 、 T_6 、 T_7 单元占优, 其中 T_6 单元累计厚度最大 (7.52 m), 底部 T_B 单元厚度最小 (1.18 m), 整体自下而上递增; T_5 、 T_6 单元沉积频率最高 (均为 0.21), 厚度与频率分布对应良好。其浊流沉积单元主转移路径为 $SS \rightarrow T_B$ 单元 (0.40) $\rightarrow T_1$ 单元

表 1 长岭凹陷浊流沉积单元累计沉积厚度及沉积频率

Table 1 Accumulated sedimentary thickness and sedimentary frequency of turbidity current sedimentary units in Changling Depression

沉积单元	CL1 井		CL2 井		CL3 井	
	沉积厚度 / m	沉积频率	沉积厚度 / m	沉积频率	沉积厚度 / m	沉积频率
T_7	0.00	0.00	6.31	0.18	10.98	0.38
T_6	4.32	0.23	7.52	0.21	9.57	0.33
T_5	2.54	0.13	7.29	0.21	6.76	0.23
T_4	3.34	0.18	5.23	0.15	0.30	0.01
T_3	0.51	0.03	3.53	0.10	0.44	0.02
T_2	1.45	0.08	1.25	0.04	0.00	0.00
T_1	1.33	0.07	2.24	0.09	0.81	0.03
T_B	1.93	0.10	1.18	0.03	0.00	0.00
T_A	3.44	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00

(0.89) $\rightarrow T_2$ 单元 (0.15) $\rightarrow T_3$ 单元 (0.46) $\rightarrow T_4$ 单元 (0.29) $\rightarrow T_5$ 单元 (0.67) $\rightarrow T_6$ 单元 (0.67) $\rightarrow T_7$ 单元 (0.38) (图 8-b), 构成核心链式路径, 反映远源浊流在坡度减缓区输运时动能持续耗散, 侵蚀与颗粒支撑能力渐进衰减的连续沉积响应。

3.2.3 深湖特征

深湖区为湖盆中心沉积区, 沉积过程受远源末端浊流动能急剧衰减控制。CL3 井深湖区段发育 T_1 – T_7 远源细粒浊流沉积组合, T_A 、 T_B 、 T_2 等高能

单元完全缺失，序列以 T_5 、 T_6 、 T_7 低密度细粒单元为主(图 9-c；表 1)。 T_5 - T_7 呈高厚度、高频率耦合： T_7 累计厚度 10.98 m、频率 0.38， T_6 厚度 9.57 m、频率 0.33，为区内最主要单元； T_5 厚度 6.76 m、频率 0.23，略低于前两者。 T_1 、 T_3 、 T_4 构成底部低厚度—低频率带，厚度分别仅 0.81 m、0.44 m、0.30 m，表明远源浊流仅能在湖盆中心卸载细粒物质，粗粒单元难以有效沉积。深湖区浊流沉积单元主转移路径为 $SS \rightarrow T_1$ 单元 (0.76) $\rightarrow T_3$ 单元 (0.36) $\rightarrow T_4$ 单元 (0.29) $\rightarrow T_5$ 单元 (0.65) $\rightarrow T_6$ 单元 (0.77) $\rightarrow T_7$ 单元 (0.29) (图 8-c)，与其他环境一致，体现浊流动能衰减及深湖稳定环境的约束作用。

综合来看，松辽盆地长岭凹陷青山口组一段浊流沉积单元的组合特征并非具有随机性，而是严格受沉积环境的宏观调控(图 10)。不同沉积环境的地形坡度、物源供给强度及水动力条件存在的显著差异，会进一步导致浊流流体的动能、运移距离及沉积方式呈现系统性变化，最终形成各具特色的浊流沉积单元组合特征；其中前三角洲区作为浊流流体的初始卸载区，因紧邻物源区且地形坡度相对较缓，为高动能浊流流体的持续注入和多期堆积提供了有利条件，普遍发育 T_A 至 T_3 等浊流沉积单元，且厚度普遍较大；而半深湖区地形坡度逐渐变缓，

浊流经过前三角洲区的初步卸载后动能大幅衰减，进而形成复杂细粒的沉积单元组合，该区域沉积单元以粉砂岩、泥质粉砂岩及粉砂质泥岩为主， T_4 至 T_5 等浊流沉积单元显著发育；随着浊流运移至深湖区，此处地形平坦、水体深度大，且湖盆水体处于相对静水状态，浊流流体经过长距离运移后动能已衰减至极限，大部分较粗粒碎屑物质已在前三三角洲区和半深湖区完成卸载，剩余的细粒悬浮物质在静水环境中缓慢沉降，因此该区域浊流沉积单元以 T_6 和 T_7 浊流沉积单元为主。整体而言，从近物源的前三角洲区到远物源的深湖区，浊流沉积单元的组合特征呈现规律性转变，完整记录了浊流沉积体系从高能到低能、从粗粒到细粒、从连续到断续的动力衰减序列。

3.3 陆相湖盆细粒浊流沉积序列模式

在沉积学领域，相序列模式方法长期以来被视为一种有力工具，用于在复杂的地质记录中提炼环境演化的内在逻辑（何起祥，1978）。在 3 口不同沉积环境井的马尔科夫链沉积单元序列关系基础上，总结出陆相湖盆细粒浊积岩序列模式(图 11)。该模式自下至上共分为 9 个沉积单元，除了底部包含 Bouma 序列 T_A 、 T_B 粗粒沉积单元外，细粒浊流沉积共包括 7 个沉积单元 (T_1 至 T_7 单元)。该模式自下而上具有粒度逐渐变细的特征，整体展示了

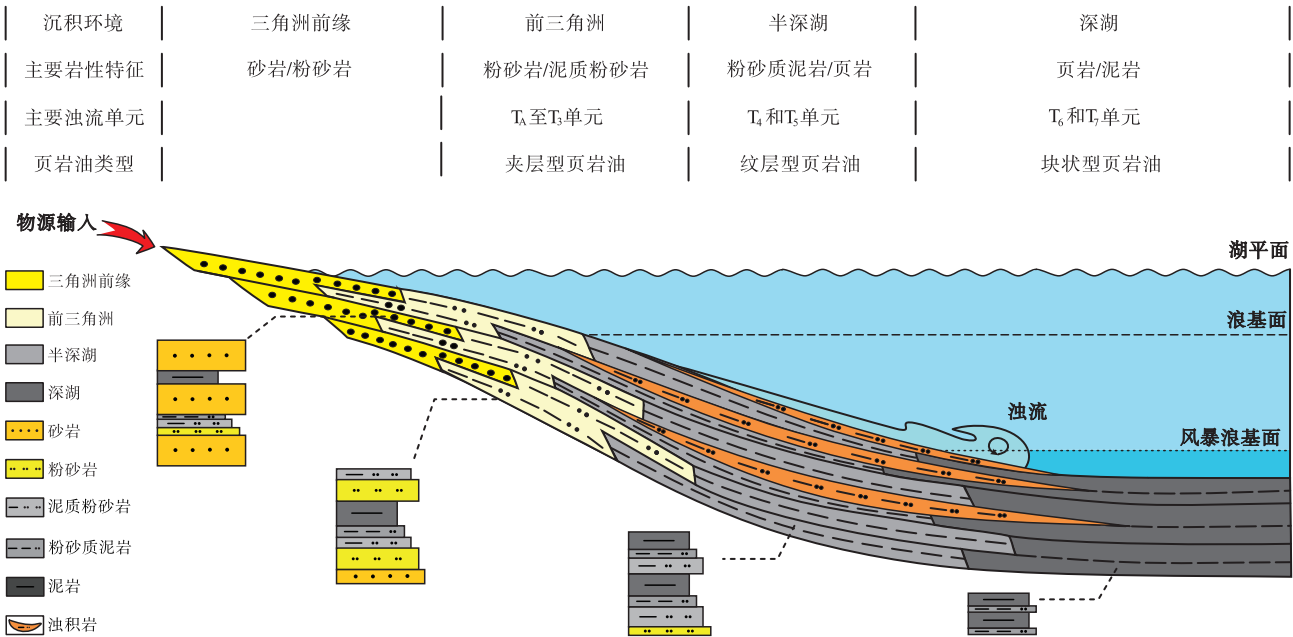


图 10 不同沉积环境浊流沉积特征与页岩油类型

Fig. 10 Characteristics of turbidity current sediments and types of shale oil in different sedimentary environments

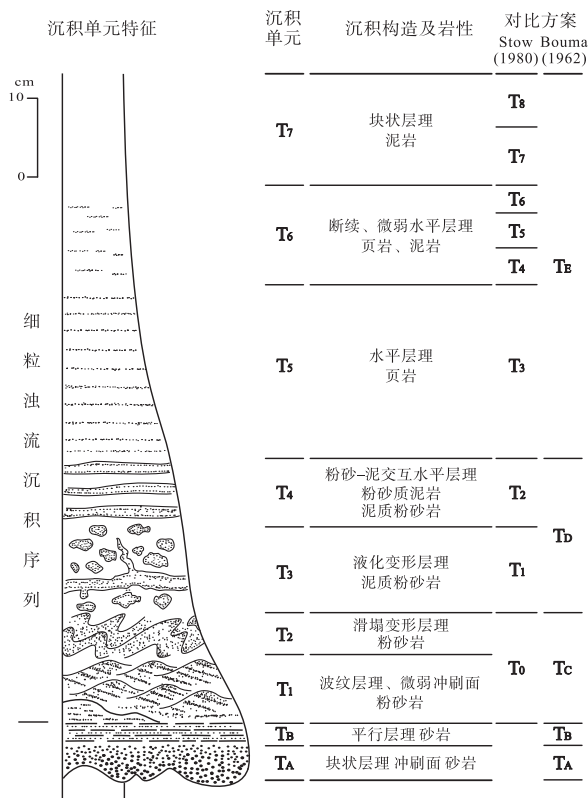


图 11 长岭凹陷青山口组细粒浊流沉积序列模式

Fig. 11 Fine grained turbidity current sedimentary sequence model of the Qingshankou Formation in Changling sag

反映单次浊流由能量较高的粗粒高密度流 (T_A 和 T_B 单元) 向低密度流 (T_1 至 T_7 单元) 连续转化能量消散的完整沉积过程 (图 11)。细粒浊流沉积底部可以是粗粒浊流沉积, 但也可以单独存在, 它往往形成于较深水地区, 有关粗粒浊积岩成因解释已有很多, 文中则主要讨论细粒浊流沉积演化序列的成因机制。

T_1 单元是细粒浊积岩序列中最底部的沉积单元, 且当底部为 T_6 或 T_7 单元时常具有冲刷面, 底部冲刷面表明即使是细粒浊流其依然存在部分侵蚀能力, 而波纹层理粉砂岩沉积特征所记录的水动力条件显示, 此阶段的浊流已从高能状态演化为低密度浊流, 且受惯性作用的影响还兼具部分牵引流特征。当浊流流速降至临界牵引速度区间内时, 粉砂级颗粒随床面波纹的迁移发生分选与堆积, 进而在床面形成单向波纹构造 (Stow and Shanmugam, 1980)。 T_2 单元滑塌变形层理粉砂岩的形成则与滑塌成因浊流的剪切变形过程直接相关, 在地震或沉积物超负载等触发机制作用

下, 斜坡上未固结的不稳定沉积物易发生整体移动, 使沉积物内部发生滑塌褶皱变形, 有时还伴随微小断层, 因研究区滑塌事件具有一定的随机性, 因此其与上下沉积单元关系比较复杂。 T_3 单元液化变形层理泥质粉砂岩段的形成源于后沉积流变响应过程, 当高含水、低密度的细粒浊流物质快速堆积负载于未固结的软泥基底之上时, 沉积物自重与负载压力诱发粉砂质层发生液化 (Owen, 1996), 可形成复杂的液化变形层理与负载构造。 T_3 单元液化变形构造的形成机制常与古地震活动密切相关, 强地震的震颤作用为软沉积物液化及后续的注入变形提供了动力。与滑塌变形层理相比, 该类液化变形构造具有显著的原地性特征, 无明显的侧向位移, 这也是区分两者成因的关键标志之一。从 T_4 单元的粉砂-泥交互水平层理粉砂质泥岩段开始, 序列进入细粒浊流尾部低能量阶段, 薄互层粉砂质与泥质纹层的互层反映了低密度浊流的沉积特征 (Al-Mufti and Arnott, 2024)。 T_5 单元的水平层理页岩段对应于极低床层剪切力环境下细粒物质的连续悬浮沉降过程, 层理由定向排列的长英质与黏土质矿物形成, 不排除有季节性纹层的存在, 但前者与浊积岩共生。 T_6 单元断续、微弱水平层理页岩反映的是静水环境下间歇性悬浮沉降的水动力过程, 此时浊流能量极低, 仅存在间歇性的低密度悬浮体补给, 泥质颗粒的沉降过程被周期性的水体平静期中断, 形成断续、微弱水平层理, 该构造也可能与生物扰动作用有关。最顶部的 T_7 单元块状层理泥岩则对应静水环境下的均匀悬浮沉降过程, 此时水体中仅残留极细粒的黏土级颗粒, 无明显的水动力扰动, 形成致密均一的块状构造, 有时发育有机质纹层。该单元通常构成浊积岩序列的顶部, 标志着单次事件能量耗散的终结, 属于正常深湖环境的产物。

总体而言, 该模式较好地揭示了陆相湖盆环境中浊流沉积动力学机制, 进一步验证了细粒浊流沉积单元演化规律, 可适用于其他相似湖泊环境细粒浊流沉积研究。

4 细粒浊流沉积与页岩油类型

4.1 页岩油分类方案

页岩油是指蕴含在泥页岩层系中 (包括泥页

岩、致密砂岩以及碳酸盐岩) 源内以及近源聚集的石油资源 (金之钧等, 2023)。国内页岩油分类体系长久以来经过了不断讨论和完善, 但并未取得广泛的认识, 其原因与陆相页岩油复杂地质背景、研究视角差异及技术发展阶段密切相关 (赵文智等, 2020; 金之钧等, 2023; 孙龙德等, 2023)。Jarvie (2012) 根据页岩油的形成机制、赋存状态及储集层特征, 提出致密页岩 (Tight shale)、复合页岩 (Hybird shale) 以及裂缝页岩 (Fractured shale) 的分类方案, 并深刻影响了以陆相页岩油为主的中国页岩油分类体系的演化进程。赵文智等 (2023) 引入砂地比 (源储比) 进一步将页岩油划分为致密油型、过渡型、纯正型; 金之钧等 (2023) 根据页岩油赋存空间、储集岩石类型, 沉积构造及有机质丰度等将页岩油类型划分为夹层型、裂缝型和纯页岩型, 并进一步把纯页岩型进一步划分为纹层型、层状型和块状型; 孙龙德等 (2024) 把页岩油划分为互层型、夹层型和纯页岩型, 同时把纯页岩型进一步划分为页理型和纹层型; 蒙启安等 (2024) 按照岩性组合将页岩油类型划分夹层型、混合型和泥纹型。

砂地比是页岩油类型划分的关键参数之一, 但受研究区地质背景差异与学者划分视角不同的影响, 目前学界尚未形成统一且公认的划分方案。付金华等 (2019) 基于陆相湖盆页岩油储集层的岩性组合特征, 提出以砂地比区间界定页岩油类型, 将砂地比处于 15%~30% 之间的归为多期叠置砂岩发育型页岩油, 砂地比 5%~15% 的储集层划为页岩夹薄砂岩型页岩油, 砂地比小于 5% 则定义为纯页岩型页岩油。孙龙德等 (2021) 对页岩油类型进行划分中其提出的夹层型页岩油对应泥岩占比 80%~95% (相当于砂地比 20%~5%), 而纯页岩型页岩油的泥岩占比需大于 95% (相当于砂地比小于 5%)。在行业标准层面, 国标 GB/T 43126-2023 明确规定夹层型页岩油砂地比需小于 30%, 页岩型页岩油砂地比小于 10%; 地标 DB61/T

1723-2023 同样将夹层型页岩油砂地比阈值设定为小于 30%, 但将页岩型页岩油的砂地比上限调整为小于 15%。综合上述研究观点, 并结合研究区目的层青一段 Q1—Q4 油层组的实际, 本文提出页岩油类型划分需以岩性组合、沉积构造、砂地比等 为关键参数, 据此将研究区页岩油划分为夹层型、纹层型及块状型 3 大类 (图 12; 表 2), 需要说明的是, 上述 3 类页岩油之间可存在过渡类型。夹层型页岩油的夹层岩性以砂岩、粉砂岩或碳酸盐岩为夹层的组合为特征, 砂地比大于 15%~30%; 纹层型页岩油以粉砂质泥岩和页岩为主, 以粉砂质、黏土质与长英质纹层为特征, 砂地比 5%~15%; 块状型页岩油岩性以泥岩和页岩为主, 且以块状构造为主, 砂地比小于 5%。

4.2 细粒浊流对页岩油类型及甜点参数的影响

细粒浊流沉积作为湖盆动力体系中的重要组成部分, 其对页岩油成藏与页岩油类型的深刻影响已成为近年来非常规油气地质研究的前沿方向 (孙龙德等, 2024; Yang and Liu, 2025)。针对页岩油类型的评价相关研究, 本研究区选取了岩性类型、沉积构造、砂地比、TOC (有机碳含量)、S₁ (游离烃含量)、孔隙度、脆性矿物指数等多项甜点评价关键参数, 对研究区中受浊流影响的重点页岩油层位相关参数进行统计分析 (表 2; 表 3)。

夹层型页岩油主要发育于前三三角洲沉积环境 (图 10), 夹层岩性以砂岩、粉砂岩为主, 砂地比可达 24.61%。其中主要包括浊流沉积序列中的 T_A 至 T₃ 等沉积单元, 其沉积过程受控于近物源区的持续沉积物供给及能量输入, 因此诸如块状层理砂岩 (T_A 单元)、平行层理砂岩 (T_B 单元)、波纹层理粉砂岩 (T₁ 单元)、滑塌变形层理粉砂岩 (T₂ 单元) 和液化变形层理泥质粉砂岩 (T₃ 单元) 在此环境内尤为突出。三角洲前缘至前三三角洲的沉积背景为浊流的触发与推进提供了物质基础和动力

表 2 页岩油类型和分类指标
Table 2 Types and classification indicators of shale oil

页岩油类型	岩性	沉积构造	纹层或夹层类型	砂地比/%
夹层型页岩油	夹层为砂岩、粉砂岩或碳酸盐岩	夹层	砂岩、粉砂岩或碳酸盐岩夹层	> 15~30
纹层型页岩油	粉砂质泥岩、页岩	纹层	粉砂质、黏土质、长英质纹层	5~15
块状型页岩油	页岩、泥岩	块状	无明显纹层或含有机质纹层	< 5

表 3 松辽盆地青山口组页岩油类型与主要甜点参数特征

Table 3 Characteristics of shale oil types and main sweet spot parameters of the Qingshankou Formation in Songliao Basin

页岩油类型	沉积环境	岩性	主要浊流单元	砂地比 /%	储集层物性		有机质特征		
					孔隙度 /%	脆性矿物指数 /%	TOC /%	S ₁ /mg HC·g ⁻¹	有机质类型
夹层型	三角洲前缘—前三角洲	砂岩、粉砂岩	T ₄ 至 T ₃ 单元	24.61	5.63	65.67	1.23	2.15	Ⅱ ₁ 型
纹层型	半深湖—深湖	粉砂质泥岩、页岩	T ₄ 至 T ₅ 单元	13.35	4.58	58.60	2.99	3.59	Ⅱ ₁ 型和 I 型
块状型	深湖	泥岩、页岩	T ₆ 至 T ₇ 单元	2.73	1.53	47.45	4.05	2.78	I 型

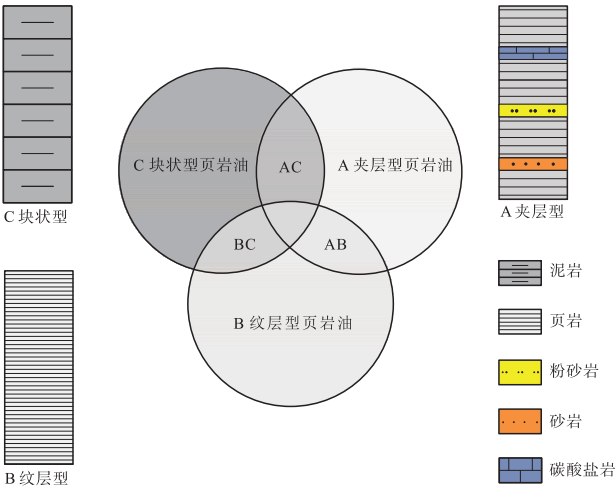


图 12 页岩油分类方案

Fig. 12 Classification scheme for shale oil

条件，前缘斜坡为浊流启动提供了必要的地貌环境，携带大量陆源砂质碎屑的浊流沿斜坡向前三角洲及深水区域推进，形成周期性的砂岩和粉砂岩夹层。储集层物性方面，孔隙度均值 5.63%、脆性矿物指数可达 65.67% 的参数特征，本质上受控于浊流沉积的分选性，浊流搬运的砂质碎屑颗粒分选中等，最终形成较高孔隙度特征。同时较高的脆性矿物指数与浊流携带的陆源长英质矿物（石英、长石）输入相关。有机质特征上，TOC 均值 1.23%、S₁ 均值 2.15 mg HC/g 及Ⅱ₁ 型有机质的组合，反映了陆源输入与湖相原地沉积有机质的混合因素，而相对较低的 TOC 与 S₁ 值，一方面源于砂质夹层对有机质的稀释效应，另一方面与浊流沉积过程中水体氧化还原条件的短暂波动相关，浊流带入的氧化性水体在局部破坏了有机质的保存环境，导致有机质丰度与生烃潜力略低于半深湖及深湖相页岩。

纹层型页岩油主要发育于半深湖—深湖沉积环境（图 10），砂地比为 13.35%，根据单位厚度内的纹层数目可计算出单条纹层厚度约为 2 mm，

其形成与 T₄ 和 T₅ 单元细粒浊流单元的弱—中等强度浊流活动紧密相关，该单元组合为浊流能量衰减阶段的产物，携带的细粒陆源碎屑与湖盆沉积的泥质组分周期性叠加，形成典型的粉砂—泥交互水平层理和水平层理。半深湖的低能背景为细粒物质的有序沉积提供了保障，而细粒浊流的沉积则打破了单一湖相沉积的均质性，导致粉砂质、长英质、黏土质纹层交替形成。在压实和成岩过程中，黏土矿物会定向排列，这种结构和构造特征使得纹层间的结合较为薄弱，有利于形成页理缝，从而改善了储集层物性（孔隙度和渗透率）。纹层型页岩油孔隙度可达 4.58%、脆性矿物指数平均 58.60%，浊流携带的细粒长英质矿物（石英、长石）为脆性矿物的主要来源，但相较于夹层型砂质单元，其陆源粗碎屑输入量减少，导致脆性矿物指数低于夹层型；纹层型页岩油孔隙度依然具有较高值，源于纹层间残余原生孔隙与有机质演化形成的次生孔隙叠加。有机质特征上，TOC 均值 2.99%、S₁ 均值 3.59 mg HC/g 及Ⅱ₁ 型与 I 型混合的有机质类型，直观反映了陆源输入与湖相内源有机质的双重贡献，细粒浊流虽可以携带少量陆源高等植物碎屑，但半深湖的还原环境更利于湖相水生生物（藻类、浮游生物）的大量繁殖与保存，进而主导了 I 型有机质的富集。相较于夹层型页岩油更高的有机质丰度与生烃潜力，一方面得益于细粒泥质沉积对有机质的吸附与保护作用，另一方面源于浊流注入未显著破坏湖盆的还原环境，避免了有机质的氧化降解。

块状型页岩油主要发育于深湖环境（图 10），岩性上以块状层理泥岩和断续、微弱水平层理的页岩为主，镜下可观察到有机质纹层，砂地比为 2.73%，其形成与 T₆ 和 T₇ 浊流单元对应的极低强度浊流末端沉积过程紧密关联，其本质成因是浊流能量衰减极致化和深湖强还原环境的耦合产物。细

粒浊流沉积序列中 T_6 和 T_7 单元的极细粒沉积单元，区别于夹层型高能浊流与纹层型低能浊流。该单元组合为浊流能量完全衰减后，携带的极细粒陆源碎屑沉积的结果。深湖极端低能环境消除了物质沉积的周期性差异，加之成分单一、粒度极细，最终形成块状层理。储集层物性方面，孔隙度均值 1.53%、脆性矿物指数均值 47.45% 的特征为 3 类页岩油中最低，这主要源于 T_6 和 T_7 单元弱浊流携带的陆源长英质矿物（石英、长石）输入量极少，岩石物质组成以黏土矿物为主，陆源脆性矿物的显著缺少直接导致岩石脆性指数降低。有机质特征上，TOC 均值可达 4.05%、 S_1 均值 2.78 mg HC/g，有机质类型以 I 型有机质为主，凸显了深湖强还原环境的优质保存效应与内源有机质的主导贡献，弱浊流的远端沉积特征决定了陆源碎屑的稀释作用最弱，深湖水体的强还原条件则为湖相水生生物（藻类、浮游生物）的大量繁殖与有机质的完整保存提供了有利环境，最终形成以 I 型有机质为主的高丰度有机质聚集。

综上所述，研究区各种不同类型的页岩油类型与浊流沉积密切相关（图 10），夹层型页岩油主要由形成在前三角洲环境中，由高能粗粒浊流沉积（ T_A 至 T_3 单元为主）控制（表 3），这类流体具备强大物质搬运和高能沉积能力，能够形成较厚层砂岩和粉砂岩夹层，为油气聚集与运移提供优越储集空间。纹层型页岩油受以细粒浊流沉积（ T_4 和 T_5 单元为主）影响（表 3），特征为高频、薄层、层理明显的粉砂质泥岩或页岩层，细粒浊流广泛将长英质组分输送至半深湖区域，形成粉砂质纹层和长英质纹层，有效提高储集层非均质性，有利于后期开发。块状型页岩油则源于细粒浊流末端沉积与湖盆静水正常沉积的复合作用（ T_6 和 T_7 单元为主）（表 3），表现为断续、微弱水平层理页岩和块状泥岩层。此类环境能量极低，有机质保存依赖于还原条件和高效埋藏，储集层孔隙度和脆性矿物指数差，开发难度较大。值得强调的是，细粒浊流在各类页岩油的形成过程中，既是“造层者”也是“控质者”，其沉积能量、频率直接对页岩油的发育类型起到深远的影响。

5 结论

基于松辽盆地长岭凹陷上白垩统青山口组一段

3 口全取心井资料，系统开展细粒浊流沉积特征、沉积序列及其与页岩油类型关联研究，主要取得以下认识：

1) 开展了细粒浊流沉积单元划分方案及特征研究。基于 Stow 和 Shanmugam (1980) 划分方案的基础上，结合研究区实际特征，精准识别并划分出 9 种沉积单元，系统刻画了各沉积单元的岩性与沉积构造特征，自下至上分别为块状层理砂岩（ T_A 单元）、平行层理砂岩（ T_B 单元）、波纹层理粉砂岩（ T_1 单元）、滑塌变形层理粉砂岩（ T_2 单元）、液化变形层理泥质粉砂岩（ T_3 单元）、粉砂—泥交互水平层理粉砂质泥岩（ T_4 单元）、水平层理页岩（ T_5 单元）、断续、微弱水平层理页岩（ T_6 单元）、块状层理泥岩（ T_7 单元），其中 T_1 至 T_7 单元归属于细粒浊积岩范畴。

2) 基于马尔科夫链方法建立了细粒浊流沉积序列模式。将划分的各沉积单元及冲刷面作为独立状态，完成细粒浊流沉积序列（ T_1 至 T_7 单元）的定量解析，明确了前三角洲—半深湖—深湖连续沉积环境中浊流沉积单元组合空间上的差异性，揭示了细粒浊流沉积从近源到远源再到末端的空间分布，阐明了各沉积单元纵向有序叠置的成因机制及其与浊流能量演化的耦合关系。

3) 划分了页岩油类型并明确其识别特征。综合岩性组合、沉积构造、砂地比等指标，将研究区页岩油划分为夹层型、纹层型及块状型 3 类，厘清了各类页岩油的核心识别标志、分布规律及成因差异。

4) 揭示了细粒浊流沉积单元对页岩油类型的影响作用。夹层型页岩油受控于 T_A 至 T_3 单元为主的浊流沉积，其形成的砂岩和粉砂岩夹层为油气聚集提供了优质储集空间和渗流通道。纹层型页岩油受 T_4 和 T_5 单元细粒浊流沉积主导，形成的粉砂质纹层和长英质纹层不仅增强了储集层的物性和脆性，为后期高效开发提供了有利条件。块状型页岩油主要与 T_6 和 T_7 单元有关，即细粒浊流末端沉积与湖盆静水沉积的复合作用，其形成的厚层泥岩和页岩具有较高的有机质丰度，但由于储集层物性和脆性较差，为页岩油开发带来挑战。

参考文献 (References)

- 操应长, 金杰华, 刘海宁, 杨田, 刘可禹, 王艳忠, 王健, 梁超. 2021. 中国东部断陷湖盆深水重力流沉积及其油气地质意义. 石油勘探与开发, 48(2): 247-257. [Cao Y C, Jin J H, Liu H N, Yang T,

- Liu K Y, Wang Y Z, Wang J, Liang C. 2021. Deep-water gravity flow deposits in a lacustrine rift basin and their oil and gas geological significance in eastern China. *Petroleum Exploration & Development*, 48(2): 247-257]
- 范洪军, 王夏斌, 陈飞, 詹盛云, 岳大力, 刘警阳, 李伟, 任柯宇, 张妹琪. 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. [Fan H J, Wang X B, Chen F, Zhan S Y, Yue D L, Liu J Y, Li W, Ren K Y, Zhang S Q. 2024. Research progress on main controlling factors and classification schemes of lacustrine gravity flow deposits. *Petroleum Science Bulletin*, 9(2): 167-182]
- 冯有良, 邹才能, 杨智, 蒋文琦, 张天舒, 张洪, 刘畅, 王小妮. 2024. 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. *古地理学报*, 26(4): 941-961. [Feng Y L, Zou C N, Yang Z, Jiang W Q, Zhang T S, Zhang H, Liu C, Wang X N. 2024. Fine-grained gravity flow deposits and their significance for shale oil within high-accommodation sequences in faulted and down-warped lacustrine basins of China. *Journal of Palaeogeography*(Chinese Edition), 26(4): 941-961]
- 付金华, 牛小兵, 淡卫东, 冯胜斌, 梁晓伟, 辛红刚, 尤源. 2019. 鄂尔多斯盆地中生界延长组长 7 段页岩油地质特征及勘探开发进展. *中国石油勘探*, 24(5): 601-614. [Fu J H, Niu X B, Dan W D, Feng S B, Liang X W, Xin H G, You Y. 2019. Geological characteristics and exploration-development progress of shale oil of Member 7 of Yanchang Formation, Mesozoic in Ordos Basin. *China Petroleum Exploration*, 24(5): 601-614]
- 葛荣峰, 张庆龙, 王良书, 解国爱, 徐士银, 陈娟, 王锡勇. 2010. 松辽盆地构造演化与中国东部构造体制转换. *地质论评*, 56(2): 180-195. [Ge R F, Zhang Q L, Wang L S, Xie G A, Xu S Y, Chen J, Wang X Y. 2010. Tectonic evolution of the Songliao Basin and tectonic regime transition in eastern China. *Geological Review*, 56(2): 180-195]
- 龚峤林, 李飞, 苏成鹏, 曾楷, 唐浩, 谭秀成. 2018. 细粒浊积岩特征、分布及发育机制: 以川北唐家河剖面寒武系郭家坝组为例. *古地理学报*, 20(3): 349-364. [Gong Q L, Li F, Su C P, Zeng K, Tang H, Tan X C. 2018. Characteristics, distribution and mechanisms of fine-grained turbidite: a case study from the Cambrian Guojiahe Formation in Tangjiahe Section, northern Sichuan Basin. *Journal of Palaeogeography*(Chinese Edition), 20(3): 349-364]
- 何起祥. 1978. 沉积岩和沉积矿床. 北京: 地质出版社. [He Q X, 1978. *Sedimentary Rocks and Sedimentary Ore Deposits*. Beijing: Geological Publishing House]
- 胡望水, 吕炳全, 张文军, 毛治国, 冷军, 官大勇. 2005. 松辽盆地构造演化及成盆动力学探讨. *地质科学*, 40(1): 16-31. [Hu W S, Lyu B Q, Zhang W J, Mao Z G, Leng J, Guan D Y. 2005. Discussion on tectonic evolution and basin-forming dynamics of the Songliao Basin. *Chinese Journal of Geology*, 40(1): 16-31]
- 贾承造, 邹才能, 李建忠, 李登华, 郑民. 2012. 中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景. *石油学报*, 33(3): 343-350. [Jia C Z, Zou C N, Li J Z, Li D H, Zheng M. 2012. Assessment criteria, main types, basic features and resource prospects of tight oil in China. *Acta Petrolei Sinica*, 33(3): 343-350]
- 贾承造, 郑民, 张永峰. 2014. 非常规油气地质学重要理论问题. *石油学报*, 35(1): 1-10. [Jia C Z, Zheng M, Zhang Y F. 2014. Key theoretical issues of unconventional petroleum geology. *Acta Petrolei Sinica*, 35(1): 1-10]
- 金之钧, 张谦, 朱如凯, 董琳, 付金华, 刘惠民, 云露, 刘国勇, 黎茂稳, 赵贤正, 王小军, 胡素云, 唐勇, 白振瑞, 孙冬胜, 李晓光. 2023. 中国陆相页岩油分类及其意义. *石油与天然气地质*, 44(4): 801-819. [Jin Z J, Zhang Q, Zhu R K, Dong L, Fu J H, Liu H M, Yun L, Liu G Y, Li M W, Zhao X Z, Wang X J, Hu S Y, Tang Y, Bai Z R, Sun D S, Li X G. 2023. Classification of continental shale oil in China and its significance. *Oil & Gas Geology*, 44(4): 801-819]
- 刘招君, 王东坡, 何起祥, 胡振国, 刘万洙, 薛康成, 彭国清, 杨顺, 王德典, 林俭. 1985. 攀西地区上三叠统湖相浊积岩的沉积特征及其地质意义. *中国攀西裂谷文集*: 190-306. [Liu Z J, Wang D P, He Q X, Hu Z G, Liu W Z, Xue K C, Peng G Q, Yang S, Wang D D, Lin J. 1985. Sedimentary characteristics and geological significance of lacustrine turbidites in the Upper Triassic of Panxi Area. *Proceedings of the Panxi Rift in China*: 190-306]
- 刘招君, 王东坡, 刘立, 刘万洙, 王璞君, 杜晓弟, 杨光. 1992. 松辽盆地白垩纪沉积特征. *地质学报*, 66(4): 327-338. [Liu Z J, Wang D P, Liu L, Liu W Z, Wang P J, Du X D, Yang G. 1992. Sedimentary characteristics of the Cretaceous in the Songliao Basin. *Acta Geologica Sinica*, 66(4): 327-338]
- 刘招君, 杨虎林, 董清水, 朱建伟, 郭巍, 叶松青, 柳蓉, 孟庆涛, 张海龙, 甘树才. 2009. 中国油页岩. 北京: 石油工业出版社. [Liu Z J, Yang H L, Dong Q S, Zhu J W, Guo W, Ye S Q, Liu R, Meng Q T, Zhang H L, Gan S C. 2009. *Oil Shale in China*. Beijing: Petroleum Industry Press]
- 刘招君, 董清水, 王嗣敏, 朱建伟, 郭巍. 2002. 陆相层序地层学导论与应用. 北京: 石油工业出版社. [Liu Z J, Dong Q S, Wang S M, Zhu J W, Guo W. 2002. *Introduction and Application of Continental Sequence Stratigraphy*. Beijing: Petroleum Industry Press]
- 柳波, 孙嘉慧, 张永清, 贺君玲, 付晓飞, 杨亮, 邢济麟, 赵小青. 2021. 松辽盆地长岭凹陷白垩系青山口组一段页岩油储集空间类型与富集模式. *石油勘探与开发*, 48(3): 521-535. [Liu B, Sun J H, Zhang Y Q, He J L, Fu X F, Yang L, Xing J L, Zhao X Q. 2021. Types of reservoir spaces and enrichment models of shale oil of Member 1 of Qingshankou Formation, Cretaceous in Changling sag, Songliao Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 48(3): 521-535]
- 吕奇奇, 王林, 罗顺社, 刘江艳, 尤源, 闫红果, 蒲宇新, 孙学虎, 张蕾. 2025. 湖相细粒浊流沉积动力学机制初探: 基于水槽沉积模拟实验. *沉积学报*, 43(3): 769-781. [Lü Q Q, Wang L, Luo S S, Liu J Y, You Y, Yan H G, Pu Y X, Sun X H, Zhang L. 2025. Preliminary study of the dynamic mechanism of lacustrine fine-grained turbidity deposits: based on a flume sedimentary simulation. *Acta Sedimentologica Sinica*, 43(3): 769-781]
- 蒙启安, 张金友, 吴伟, 康德江, 王金伟, 于丹, 孙祖宇, 刘丽娟, 刘帅, 刘金凤, 张智聪, 于婷婷. 2024. 松辽盆地北部青山口组夹层型页岩油形成地质条件及勘探潜力. *大庆石油地质与开发*, 43(3): 38-48. [Meng Q A, Zhang J Y, Wu W, Kang D J, Wang J W, Yu D, Sun Z Y, Liu L J, Liu S, Liu J F, Zhang Z C, Yu T T. 2024. Geological conditions and exploration potential of interbedded shale oil in the Qingshankou Formation, northern Songliao Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 43(3): 38-48]

- troleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 43(3): 38-48]
- 孟庆涛, 胡菲, 刘招君, 孙平昌, 柳蓉. 2024. 陆相坳陷湖盆细粒沉积岩岩相类型及成因：以松辽盆地晚白垩世青山口组为例. 吉林大学学报(地球科学版), 54(1): 20-37. [Meng Q T, Hu F, Liu Z J, Sun P C, Liu R. 2024. Lithofacies types and genesis of fine-grained sediments in terrestrial depression lake basin: taking Upper Cretaceous Qingshankou Formation in Songliao Basin as an example. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 54(1): 20-37]
- 施振生, 张亚雄, 曾番惠, 周天琪, 郭伟, 黄浩勇. 2025. 海相细粒陆源碎屑岩主要沉积构造类型及页岩气意义. 古地学报, 27(1): 32-54. [Shi Z S, Zhang Y X, Zeng F H, Zhou T Q, Guo W, Huang H Y. 2025. Main sedimentary structure types of marine fine-grained terrigenous clastic rocks and their significance for shale gas. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 27(1): 32-54]
- 孙龙德, 刘合, 何文渊, 李国欣, 张水昌, 朱如凯, 金旭, 孟思伟, 江航. 2021. 大庆古龙页岩油重大科学问题与研究路径探析. 石油勘探与开发, 48(3): 453-463. [Sun L D, Liu H, He W Y, Li G X, Zhang S C, Zhu R K, Jin X, Meng S W, Jiang H. 2021. An analysis of major scientific problems and research paths of Gulong Shale Oil in Daqing Oilfield, NE China. Petroleum Exploration and Development, 48(3): 453-463]
- 孙龙德, 赵文智, 刘合, 朱如凯, 白斌, 康缘, 张婧雅, 吴松涛. 2023. 页岩油“甜点”概念及其应用讨论. 石油学报, 44(1): 1-13. [Sun L D, Zhao W Z, Liu H, Zhu R K, Bai B, Kang Y, Zhang J Y, Wu S T. 2023. Discussion on the concept and application of shale oil “sweet spot”. Acta Petrolei Sinica, 44(1): 1-13]
- 孙龙德, 朱如凯, 张天舒, 蔡毅, 冯子辉, 白斌, 江航, 王淳. 2024. 陆相页岩沉积学研究进展与发展方向：以大庆古龙页岩为例. 石油勘探与开发, 51(6): 1183-1198. [Sun L D, Zhu R K, Zhang T S, Cai Y, Feng Z H, Bai B, Jiang H, Wang B. 2024. Advances and trends of non-marine shale sedimentology: a case study from Gulong Shale of Daqing Oilfield, Songliao Basin, NE China. Petroleum Exploration and Development, 51(6): 1183-1198]
- 杨田, 操应长, 田景春. 2021. 浅谈陆相湖盆深水重力流沉积研究中的几点认识. 沉积学报, 39(1): 88-111. [Yang T, Cao Y C, Tian J C. 2021. Discussion on research of deep-water gravity flow deposition in lacustrine basin. Acta Sedimentologica Sinica, 39(1): 88-111]
- 杨田, 操应长, 王健, 田景春, 蔡来星, 余文强. 2023. 陆相湖盆深水浊流与泥质碎屑流间过渡流沉积与沉积学意义. 沉积学报, 41(5): 1295-1310. [Yang T, Cao Y C, Wang J, Tian J C, Cai L X, Yu W Q. 2023. Deep-water deposition for transitional flow from turbidity current to muddy debris flow in lacustrine basins and its sedimentological significance. Acta Sedimentologica Sinica, 41(5): 1295-1310]
- 赵文智, 胡素云, 侯连华, 杨涛, 李欣, 郭彬程, 杨智. 2020. 中国陆相页岩油类型、资源潜力及与致密油的边界. 石油勘探与开发, 47(1): 1-10. [Zhao W Z, Hu S Y, Hou L H, Yang T, Li X, Guo B C, Yang Z. 2020. Types and resource potential of continental shale oil in China and its boundary with tight oil. Petroleum Exploration and Development, 47(1): 1-10]
- 赵文智, 朱如凯, 张婧雅, 杨静儒. 2023. 中国陆相页岩油类型、勘探发现现状与发展趋势. 中国石油勘探, 28(4): 1-13. [Zhao W Z, Zhu R K, Zhang J Y, Yang J R. 2023. Classification and exploration and development status and development trend of continental shale oil in China. China Petroleum Exploration, 28(4): 1-13]
- 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]
- Al-Mufti O N, Arnott R W C. 2024. The origin of planar lamination in fine-grained sediment deposited by subaqueous sediment gravity flows. The Depositional Record, 10(5): 496-514.
- Bouma A H. 1962. Sedimentology of Some Flysch Deposits: a Graphic Approach to Facies Interpretation. Amsterdam, Netherland: Elsevier.
- Dott R H. 1963. Dynamics of subaqueous gravity depositional processes. AAPG Bulletin, 47(1): 104-128.
- He J, La C A D, Wang J, Ding W L, Underschlutz J R. 2019. Using neural networks and the Markov Chain approach for facies analysis and prediction from well logs in the Precipice Sandstone and Evergreen Formation, Surat Basin, Australia. Marine and Petroleum Geology, 101: 410-427.
- Jarvie D M. 2012. Shale resource systems for oil and gas: part 2—Shale-oil resource systems. In: Breyer J A (ed). Shale reservoirs: Giant resources for the 21st century. AAPG Memoir, 97: 89-119.
- Mulder T, Alexander J. 2001. The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits. Sedimentology, 48(2): 269-299.
- Owen G. 1996. Experimental soft-sediment deformation: structures formed by the liquefaction of unconsolidated sands and some ancient examples. Sedimentology, 43: 279-293.
- Piper D J W. 1978. Turbidite muds and silts on deep sea fans and abyssal plains. In: Stanley D J, Kelling G (eds). Sedimentation in Submarine Canyons, Fans, and Trenches. Dowden, Hutchinson and Ross, Stroudsburg, Penn: 163-176.
- Shanmugam G. 1997. The Bouma Sequence and the turbidite mind set. Earth-Science Review, 42: 201-229.
- Staňová S, Šoták J, Hudec N. 2009. Markov Chain analysis of turbiditic facies and flow dynamics (Magura Zone, Outer Western Carpathians, NW Slovakia). Geologica Carpathica, 60(4): 295-305.
- Stevenson C J, Peakall J, Hodgson D M, Bell D, Privat A. 2020. TB or not TB: banding in turbidite sandstones. Journal of Sedimentary Research, 90(8): 821-842.
- Stow D A V, Shanmugam G. 1980. Sequence of structures in fine-grained turbidites: comparison of recent deep-sea and ancient flysch sediments. Sedimentary, 25(1-2): 23-42.
- Stow D A V, Huc A Y, Bertrand P. 2001. Depositional processes of black shales in deep water. Marine and Petroleum Geology, 18(4): 491-498.
- 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.
- Yang T, Liu Y L. 2025. New progresses of fine-grained sediment gravity-flow deposits and their importance for unconventional shale oil and gas plays. Petroleum Science, 22(1): 1-15.