第 28 卷 第 4 期
2026 年 8 月

古 地 理 学 报
JOURNAL OF PALAEOGEOGRAPHY (Chinese Edition)

Vol. 28 No. 4
Aug. 2026

文章编号：1671-1505(2026)04-1440-21 DOI:10.7605/gdlxb.2026.066

鄂尔多斯盆地吴起地区三叠系延长组长 7—长 9 段重力流沉积及其勘探意义*

艾克然木·吾斯曼江[1,2] 赵靖舟[1,2] 高振东[3] 王世雄[1,2]
孙兵华[3] 孟选刚[3] 闫新智[3] 薛 宁[3]

1 西安石油大学地球科学与工程学院，陕西西安 710065
2 陕西省油气成藏地质学重点实验室，陕西西安 710065
3 延长油田股份有限公司，陕西延安 716000

摘 要 鄂尔多斯盆地陕北吴起地区长 7 段重力流沉积已有发现，但长 8、长 9 段尚未有重力流沉积的报道。本次研究旨在全面揭示吴起地区长 7—长 9 段重力流沉积的存在及其类型和对储集层的物性与含油性的控制作用。基于吴起地区长 7—长 9 段厘米级岩心观察分析、粒度资料及测井解释，综合解析研究区砂岩的重力流成因及其类型。吴起地区长 7—长 9 段重力流沉积十分广泛，并以浊流沉积为主，其次为砂质碎屑流沉积，另有重力沉积物滑动—滑塌沉积。建立了长 7—长 9 段重力流沉积的多参数识别标志：(1) 岩心构造特征：滑动—滑塌沉积以变形和包卷层理为主；砂质碎屑流沉积发育厚层块状层理及泥岩撕裂屑；浊流沉积呈多期不完整鲍马序列叠加；(2) 粒度特征：砂质碎屑流沉积多呈“短尾”两段式，跳跃次总体占 95%以上，斜率较陡，而悬浮次总体通常小于 5%，且斜率平缓；浊流沉积多呈典型的一段式；(3) C-M 图：研究区长 7—长 9 段 C-M 值平行于 C=M基线，符合重力流沉积特征。对 2 类重力流沉积的储集层、含油性及试油结果对比表明，砂质碎屑流沉积明显优于浊流沉积。吴起地区长 7—长 9 段重力流沉积广布，其发现具有十分重要的勘探意义，其中砂质碎屑流沉积应作为研究区延长组下组合致密油勘探的优先靶区，其次为浊流沉积。

关键词 重力流沉积 砂质碎屑流沉积 浊流沉积 滑动—滑塌沉积 延长组 鄂尔多斯盆地

第一作者简介 艾克然木·吾斯曼江，男，2000 年生，研究生，地质资源与地质工程专业。E-mail：1943564374@qq.com。

通讯作者简介 赵靖舟，男，1962 年生，教授，主要从事油气成藏与非常规油气地质学研究。E-mail：jzzhao@xsyu.edu.cn。

中图分类号：P588.21 **文献标志码**：A

Gravity flow deposits and their significance on exploration in the Chang 7 to Chang 9 members of Triassic Yanchang Formation in Wuqi area, Ordos Basin

AIKERANMU·Wusimanjiang[1,2] ZHAO Jingzhou[1,2] GAO Zhendong[3] WANG Shixiong[1,2]
SUN Binghua[3] MENG Xuangang[3] YAN Xinzhi[3] XUE Ning[3]

1 *School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an* 710065, *China*

* 国家科技重大专项(编号：2016ZX05050)资助。[Financially supported by the National Science and Technology Project of China(No. 2016ZX05050)]
收稿日期：2025-08-07 改回日期：2025-10-19

2 *Shaanxi Provincial Key Laboratory of Petroleum Accumulation Geology*, *Xi'an* 710065, *China*
3 *Yanchang Oilfield Co.*, *Ltd.*, *Shaanxi Yan'an* 716000, *China*

Abstract　While gravity flow deposits have been identified in the Chang 7 member of the Yanchang Formation in the Wuqi area, northern Shaanxi Province, Ordos Basin, no such deposits have been reported in the Chang 8 and Chang 9 members. This study aims to comprehensively reveal the presence, types, and controlling effects of gravity flow deposits in the Chang 7 – Chang 9 members on reservoir properties and oil-bearing potential. Through centimeter-scale core observations, grain-size analysis, and well-log interpretation of the Chang 7 – Chang 9 members in the Wuqi area, an integrated analysis was conducted to determine the genetic types and characteristics of gravity flow sandstones. Gravity flow deposits are widely distributed in the Chang 7–Chang 9 members of the Wuqi area, dominated by turbidity current deposits, followed by sandy debris flow deposits, with additional gravity-driven slide-slip deposits. Multi-parameter identification criteria for gravity flow deposits in the Chang 7–Chang 9 members have been established: (1) Core structures: slide-slump deposits exhibit deformed and convolute bedding; sandy debris flows show thick massive bedding and mudstone clasts; turbidites display stacked, incomplete Bouma sequences. (2) Grain-size characteristics: sandy debris flows typically show "short-tailed" bimodal distributions (>95% saltation sub-population, steep slope; <5% suspension sub-population, gentle slope). Turbidites generally exhibit unimodal distributions. (3) C-M diagrams: C-M values parallel the C = M baseline, consistent with gravity flow deposition. Comparative analysis of reservoir properties, oil saturation, and well testing results demonstrates that sandy debris flow deposits significantly outper form turbidites. The widespread distribution of gravity flow deposits in the Chang 7 – Chang 9 members holds substantial exploration significance. Sandy debris flows should be prioritized as prospective targets for tight oil exploration in the lower petroleum assemblage of the Yanchang Formation, followed by turbidite deposits.

Key words　gravity flow deposits, sandy debris flow, turbidity current, sliding-slump, Yanchang Formation, Ordos Basin

About the first author　AIKERANMU · Wusimanjiang, born in 2000, is a postgraduate student. He majors in geological resources and geological engineering. E-mail: 1943564374@qq.com.

About the corresponding author　ZHAO Jingzhou, born in 1962, is a professor. He is focusing on hydrocarbon accumulation and unconventional petroleum geology. E-mail: jzzhao@xsyu.edu.cn.

深水重力流沉积作为重要的油气储集类型，近年来在全球沉积地质学与能源勘探领域受到广泛关注。随着对重力流沉积成因机制、沉积模式及主控因素研究的深入，国内外学者在重力流沉积方面取得了显著成果。20 世纪早期 Kuenen 和 Migliorini (1950) 用浊流沉积解释了粒序层理的成因，Bouma (1962) 提出了经典的“鲍马序列”，Normark (1970) 首次提出了湖底扇模型，Lowe (1976) 提出了“高密度浊流”，Hampton (1975) 提出了“细粒碎屑流”的概念。90 年代以来，Shanmugam (1996, 2000, 2013) 提出了砂质碎屑流概念及重力流沉积演化模式。邹才能等 (2009) 认为鄂尔多斯盆地吴起白豹地区长 6 段发育砂质碎屑流沉积。同年，李相博等 (2009) 也认为鄂尔多斯盆地长 6 段存在砂质碎屑流沉积，其分布区位于湖盆中心的吴起白豹、合水等地，大体在环县山城以东、马家砭—桥镇以南、庆阳—宁县以北的广大区域内。此后，李相博等 (2010, 2014) 又进一步总结了砂质碎屑流的沉积特征与判识标志，认为砂质碎屑流沉积以块状砂岩为典型标准，无粒序层理，底面平坦，内部含悬浮泥砾。近些年来，鄂尔多斯盆地已在长 6、长 7 段广泛发现了重力流沉

积。付锁堂等（2010）、杨华和邓秀芹（2013）、刘芬等（2015）、庞军刚等（2022）均认为鄂尔多斯盆地长 6、长 7 段发育多种重力流类型，并认为砂质碎屑流因较厚的砂体覆盖在烃源岩之上而形成较好的含油目的层，是重要的勘探对象。杨仁超等（2014，2015）还在长 6、长 7 段发现了异重流沉积，称为异重岩。廖纪佳等（2013）、吕奇奇等（2022）、蒋文琦等（2025）等提出鄂尔多斯西南部陇东地区长 7 段重力流沉积以滑塌岩、砂质碎屑流沉积和浊积岩为主，并建立了湖底扇与滑塌体共存的沉积模式。

就吴起地区而言，除前述在白豹地区长 6 段报道有砂质碎屑流沉积发现外，最近张龙飞等（2025）在陕北定边—吴起地区长 7 段也发现了砂质碎屑流、浊流等重力流沉积。然而，目前包括吴起地区在内的鄂尔多斯盆地三叠系延长组重力流沉积多发现于陇东等盆地西南部地区，且在层位上多集中于长 7 段和长 6 段，而有关长 8、长 9 段的重力流沉积则还很少见有报道。

基于对吴起地区长 7—长 9 段 15 口井 300 余米岩心的厘米级观察，结合 71 口井、200 余个粒度样品的分析等，首次系统揭示了该区长 7—长 9 段各油层组的重力流沉积类型，建立了不同类型重力流（砂质碎屑流、浊流）沉积的粒度概率累积曲线的判识标准。在此基础上，根据 80 口井 83 个储集层物性和含油饱和度资料以及 35 口井 36 个试油数据，分析了吴起地区长 7—长 9 段各类重力流沉积的储集层和含油性特征，为延长组下组合致密油勘探开发和甜点预测提供了依据。

1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地位于中国中西部地区，是华北克拉通上发育起来的一个多旋回叠合型盆地。盆地内部可划分为 6 个一级构造单元：伊盟隆起、渭北隆起、西缘逆冲带、天环坳陷、晋西挠褶带和陕北斜

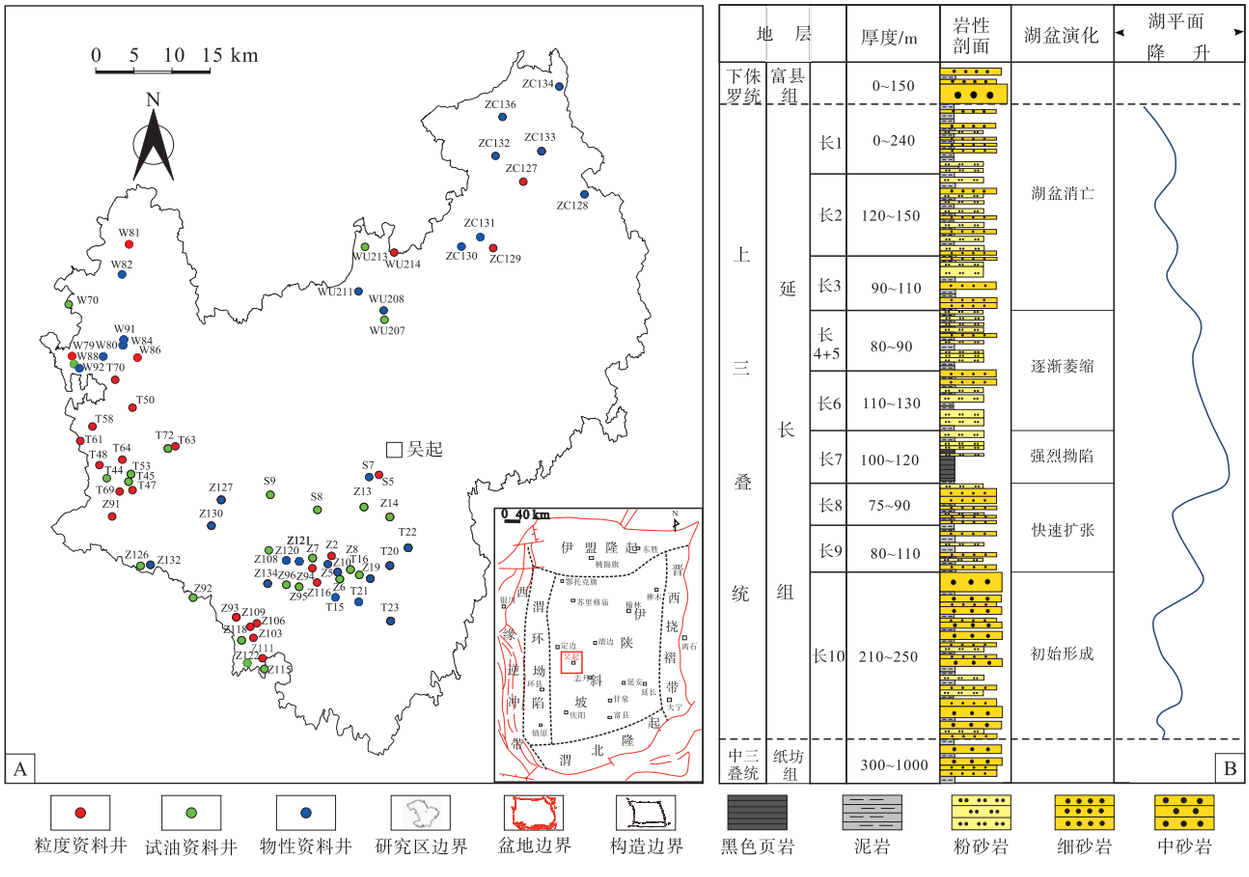


图 1 吴起地区区域位置、长 7—长 9 取样井分布及地层柱状图（图 1-B 据邓秀芹等，2024；有修改）

Fig. 1 Location of Wuqi Area and sampling wells for the Chang 7-Chang 9 members and stratigraphic column in Wuqi area (Fig. 1-B modified from Deng *et al.*, 2024)

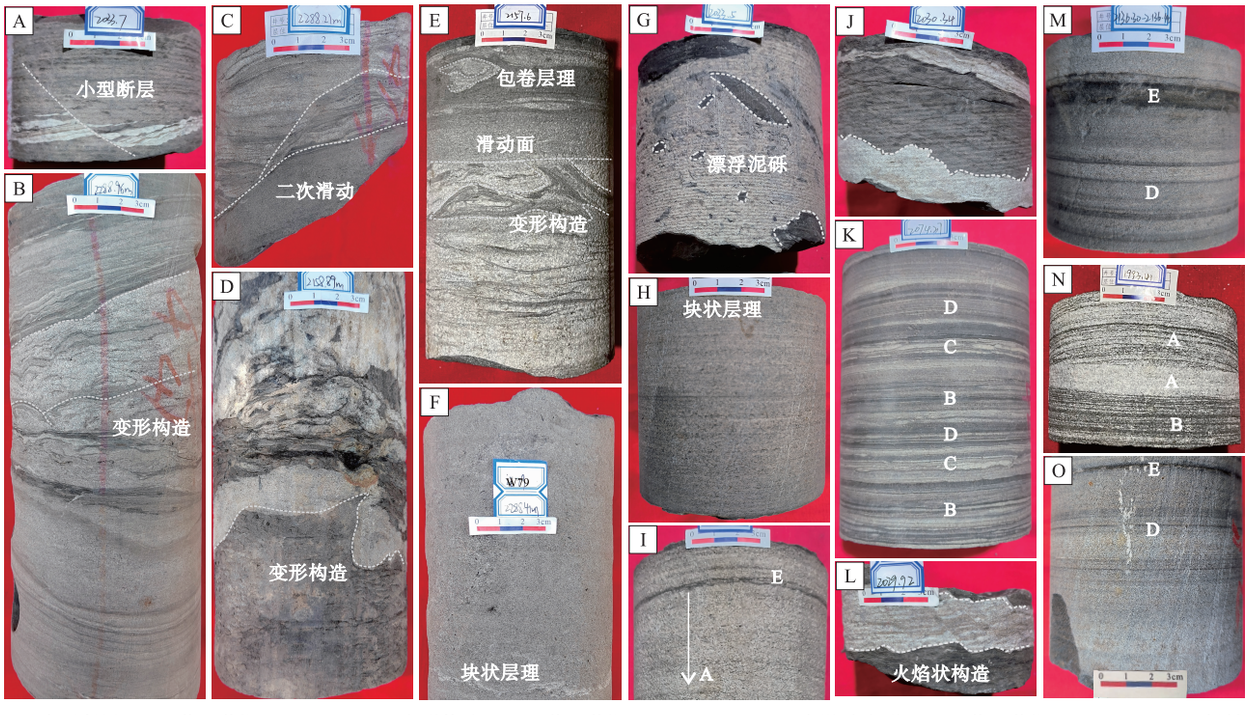
坡，面积 25×10^4 km^2（何自新，2003）。陕北斜坡是盆地的主体，整体呈向西平缓倾斜的单斜，地层倾角不足 1°，局部构造不发育。其中晚三叠世为一大型不对称内陆拗陷盆地，断裂褶皱不发育，发育多个沉积沉降中心，主沉积沉降中心总体偏南。

三叠纪延长期发育大型拗陷型湖盆，其中延长组划为了 10 个油层组。长 10 沉积时期湖盆开始发育，湖盆规模较小，湖水较浅，主要发育冲积平原、三角洲平原和滨浅湖沉积。进入长 9 期后，湖盆开始扩张，湖侵规模较大，以浅湖和三角洲沉积为主，局部发育半深湖沉积；至长 9 末期，湖侵规模达到最大，湖盆中形成了规模较大的深湖—半深湖环境，形成了典型的深湖—半深湖油页岩——李家畔页岩沉积。至长 8 期湖盆有所萎缩，三角洲沉积比较发育。到长 7 沉积期，湖盆再次发生大规模扩张，盆地大范围被湖水淹没，深湖区面积显著扩大，形成了一长轴为北西—南东向巨型湖盆。进入长 6 后，湖盆进入了萎缩期，深湖区范围开始变小（邓秀芹等，2011；朱筱敏等，2013）。

吴起县位于陕北斜坡西段中部（图 1），县域面积 3791.5 km^2，吴起油田勘探区面积 2522 km^2，已发现 16 套油层，主力油层为长 4+5、长 6 和长 9 段。截至 2022 年底，吴起地区已探明储量中，长 4+5 和长 6 段占比最高，达 58%；其次为侏罗系延安组和三叠系延长组下组合，分别占 20%和 17%。原油年产量超过 240×10^4 t，其中下组合产量占 15%。近 10 年来，长 6 段以上层位增储上产和稳产难度加大，但延长组下组合勘探开发不断取得新突破。资源评价结果表明，吴起地区延长组下组合勘探潜力大，为该油田主要的接替资源（赵靖舟等，2025）。

2　长 7—长 9 段重力流类型和特征

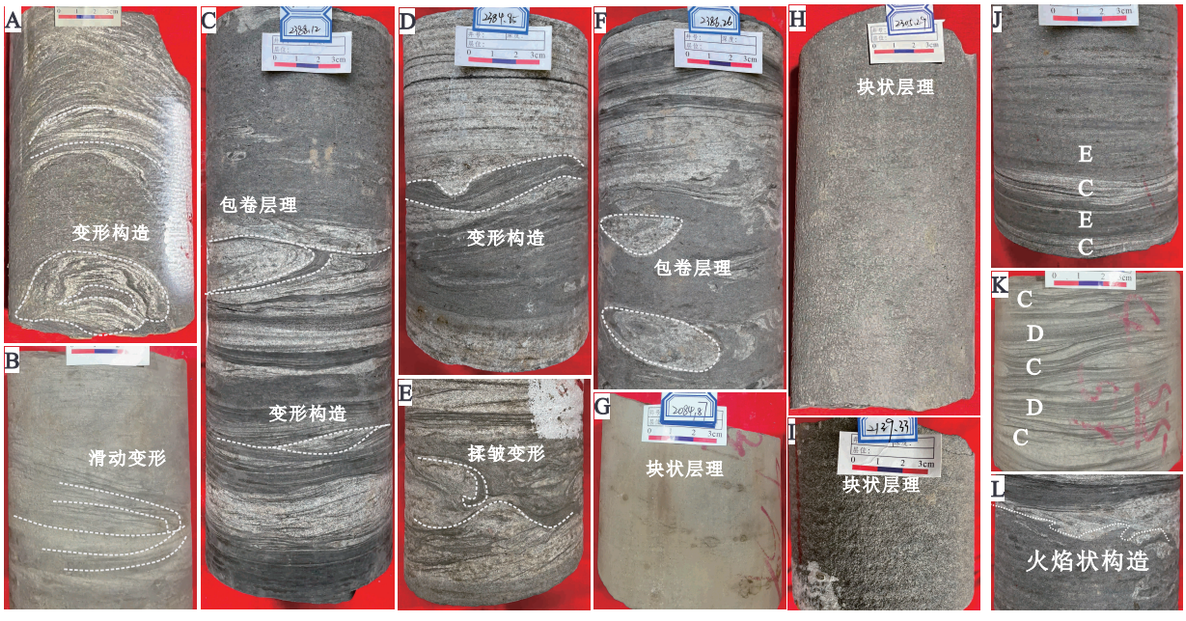
根据岩心观察和粒度资料综合分析结果，吴起地区长 7—长 9 各段均主要发育 3 种沉积：滑动—滑塌沉积、砂质碎屑流沉积和浊流沉积。



A—小型断层，T23 井，井深 2033.7 m；B—变形构造，W79 井，井深 2288.96 m；C—二次滑动变形，W79 井，井深 2288.21 m；D—揉皱变形构造，W213 井，井深 2158.89 m；E—变形构造，W215 井，井深 2153.89 m；F—块状层理，W79 井，井深 2288.41 m；G—漂浮泥砾，T23 井，井深 2033.50 m；H—块状层理，Z119 井，井深 2142.85 m；I—平行层理，ZC130 井，井深 2077.28 m；J—火焰状构造，T23 井，井深 2030.34 m；K—鲍马序列，ZC130 井，井深 2074.37 m；L—火焰状构造，T23 井，井深 2029.92 m；M—平行层理，Z119 井，井深 2136.30 m；N—平行层理，ZC136 井，井深 1933.41 m；O—上部见平行层理，W215 井，井深 2157.77 m

图 2　吴起地区延长组长 7 段重力流沉积典型岩心照片

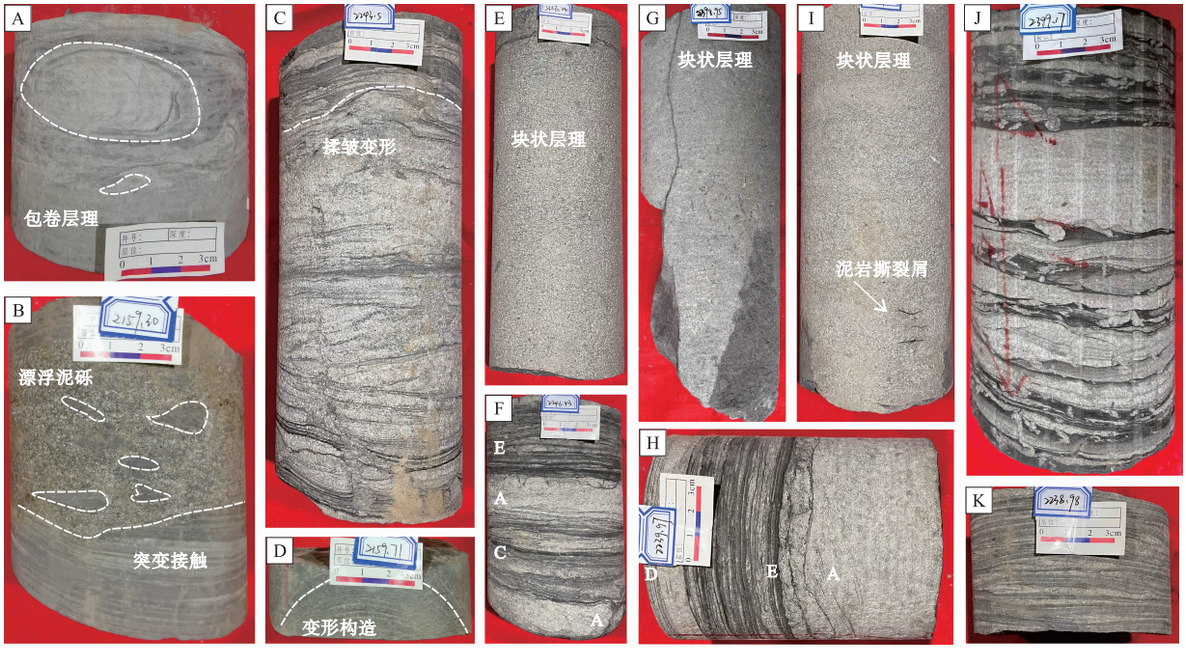
Fig. 2　Core photographs demonstrating gravity flow deposits for the Chang 7 member of Yanchang Formation in Wuqi area



A—变形构造，Z128 井，井深 2304.59 m；B—滑动变形，T22 井，井深 1990.40 m；C—包卷层理，W84 井，井深 2388.12 m；D—变形构造，W84 井，井深 2384.65 m；E—揉皱变形构造，W84 井，井深 2384.65 m；F—包卷层理，W84 井，井深 2386.26 m；G—块状层理，T20 井，井深 2084.87 m；H—块状层理，Z128 井，井深 2305.29 m；I—块状层理，S5 井，井深 2139.33 m；J—平行层理，W84 井，井深 2384.50 m；K—鲍马序列，T20 井，井深 2085.43 m；L—火焰状构造，W84 井，井深 2386.23 m

图 3 吴起地区延长组长 8 段重力流沉积典型岩心照片

Fig. 3 Core photographs demonstrating gravity flow deposits for the Chang 8 member of Yanchang Formation in Wuqi area



A—包卷层理，Z12 井，井深 2169.75 m；B—漂浮泥砾，T20 井，井深 2159.30 m；C—揉皱变形构造，ZC131 井，井深 2243.5 m；D—变形构造，T20 井，井深 2159.30 m；E—块状层理，Z128 井，井深 2356.24 m；F—鲍马序列，ZC131 井，井深 2246.43 m；G—块状层理，Z9 井，井深 2398.95 m；H—鲍马序列，ZC131 井，井深 2239.97 m；I—块状层理，ZC131 井，井深 2239.21 m；J—火焰状构造，Z9 井，井深 2399.17 m；K—槽模构造，Z134 井，井深 2049.18 m

图 4 吴起地区延长组长 9 段重力流沉积典型岩心照片

Fig. 4 Core photographs demonstrating gravity flow deposits for the Chang 9 member of Yanchang Formation in Wuqi area

2.1　重力流岩心观察

2.1.1　长 7 岩心观察

1）滑动—滑塌沉积。滑动—滑塌块体搬运沉积是受重力驱动沉积（操应长等，2021）。其中滑动沉积是前缘相带（坡折带等）的沉积物由于重力作用或外部原因（地震或洪水等）发生搬运，其发生搬运的位置靠近物源，在力学上属于塑性变形（陈广坡等，2018）。吴起地区长 7 段滑动沉积主要以细砂岩、粉砂岩为主。其典型特征如下：岩层发生滑动，产生断层，但其内部构造未发生较为明显的变化（图 2-A）；砂岩滑动面清晰可见（图 2-E）。滑塌沉积是斜坡上的半固结沉积物在重力作用下，沿破裂面向下短距离顺坡滑动形成的变形构造和内部具有滚动、揉褶等特征的块体沉积（邓秀芹等，2024）。吴起地区长 7 滑塌沉积主要有以下典型特征：砂体内部发生二次滑动（图 2-C）；中间泥砂接触面突变（图 2-D）；发育揉皱变形构造（图 2-B，2-D），内部构造发生较为明显的变化。

2）砂质碎屑流为非牛顿流体（宾汉体），其沉积物以黏塑性体形式向前移动，常表现为块体搬运、整体冻结沉积特征（鲜本忠等，2012；Shanmugam，2013；王岚等，2024）。吴起地区长 7 砂质碎屑流有以下特征：块状细砂岩，颗粒无粒序变化和交错层理，并常见厚层块状砂岩叠置（图 2-F，2-H）；含有磨圆较好的漂浮泥砾（图 2-G）。

3）浊流沉积。浊流是属于牛顿流体性质的沉积物流，主要特征是高密度和悬浮搬运沉积物（吕奇奇等，2025）。其重要标志为浊积岩粒序呈正递变层理。吴起地区长 7 浊流分布广泛，其典型特征为：发育正粒序，单期厚度小于 0.5 m，最小可小于 0.1 m，但发育期次较多，呈多期叠覆（图 2-I，2-K，2-M，2-N，2-O）；常见不完整的鲍马序列，以 AE 段、BCD 段为主（图 2-I，2-K）；发育火焰状构造（图 2-J，2-L）。

2.1.2　长 8 岩心观察

1）滑动—滑塌沉积。吴起地区长 8 滑动—滑塌沉积特征主要以变形构造为主，岩层由于滑动、滑塌作用形成各种揉皱变形、包卷层理。其典型特征有：砂岩底部发育滑动面，界面上下岩性不一且砂层有明显的变形构造（图 3-B）；受重力作用沉积物发生滑动滑塌，使同一砂体内部原层理构造变形，形成包卷层理和揉皱变形构造（图 3-A，3-C，3-D，3-E，3-F）。

2）砂质碎屑流沉积。吴起地区长 8 的岩心观察中，砂质碎屑流沉积的主要特征有：块状层理，无粒序层理，通常表现为连续性较好的厚层砂岩（图 3-G，3-H，3-I）。

3）浊流沉积。岩性主要为细砂岩和粉砂岩。吴起地区长 8 浊积岩的典型特征为：粒序层理段之上可见到平行层理、交错层理、水平层理发育段，构成了不完整的鲍马序列，主要有 AE 段、ACE 段（图 3-J，3-K）。发育火焰状构造（图 3-L）。

2.1.3　长 9 岩心观察

1）滑动—滑塌沉积。吴起地区长 9 滑动—滑塌沉积的主要特征为：层内原始层理发生改变，发育包卷层理（图 4-A），且大部分滑动—滑塌沉积发育揉皱变形构造（图 4-B，4-C，4-J）。

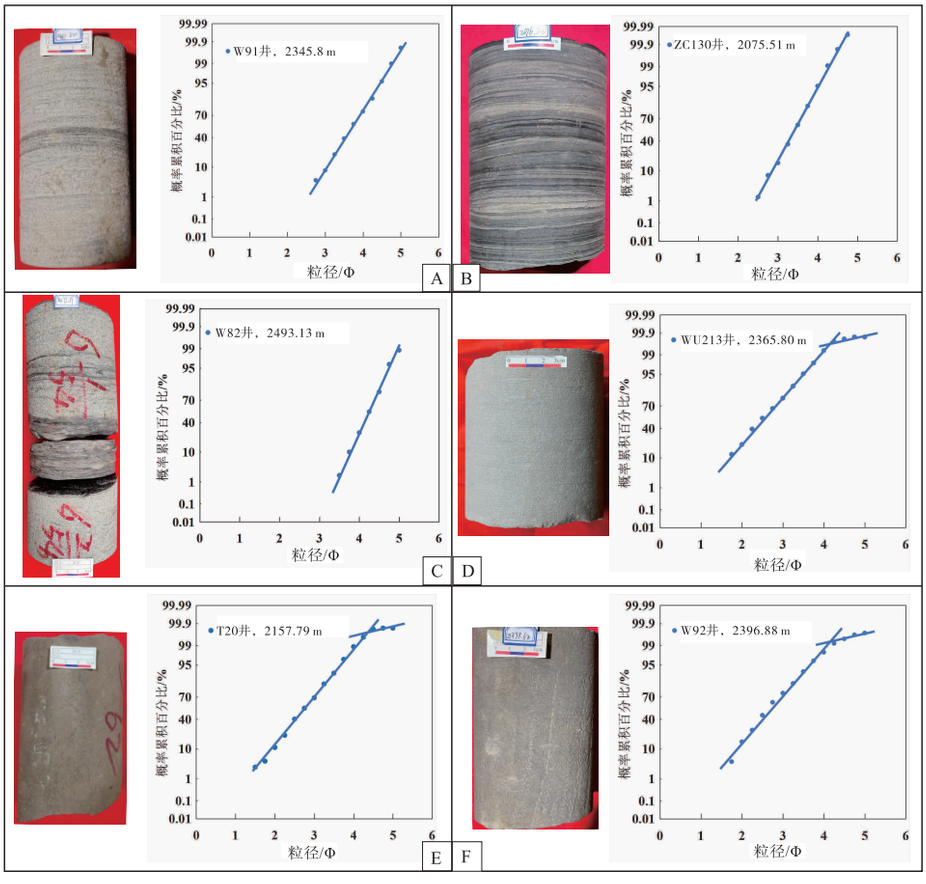
2）砂质碎屑流沉积。吴起地区长 9 砂质碎屑流较为发育，其典型沉积特征为：岩性以细砂岩为主，粉砂岩少量，块状层理发育（图 4-E，4-G、4-I）；灰色砂岩中可见颗粒较大（颗粒直径达 3 cm）、磨圆度较差的暗黑色泥砾颗粒漂浮（图 4-B）。此外还见槽模构造（图 4-K），多出现在砂质碎屑流沉积底界（王振等，2018）。

3）浊流沉积。吴起地区长 9 浊流沉积的典型沉积特征为发育鲍马序列，以泥岩与薄层细砂、粉砂岩互层为主，可见平行层理，顶部见泥岩段，主要发育 ACE 段（图 4-F，4-H）。

2.2　重力流沉积粒度特征

2.2.1　粒度概率累积曲线特征

吴起地区长 7—长 9 重力流粒度概率累积曲线主要为一段式和“短尾”两段式。Visher（1969）认为一段式和作者所称的“短尾”两段式属于浊流沉积，但当时的浊流沉积概念包括砂质碎屑流沉积在内。按照目前流行的砂质碎屑流沉积与浊流沉积概念，根据岩心观察及与其相对应的粒度样品对比分析（图 5），发现吴起地区的一段式和“短尾”两段式粒度概率累积曲线均可分为偏粗和偏细 2 种类型（赵靖舟等，2025），二者的界限大致在起始端粒径为 2.5ϕ 左右，其中偏粗的短尾两段式和偏粗的一段式指示砂质碎屑流沉积，偏细的一段式和



A—W91 井，岩心取样井深 2345.84 m，平行层理，浊流沉积，粒度概率累积曲线取样井深 2345.8 m，一段式；B—ZC130 井，岩心取样井深 2076.20 m，鲍马序列，浊流沉积，粒度概率累积曲线取样井深 2075.51 m，一段式；C—W82 井，岩心取样井深 2472.89 m，鲍马序列，浊流沉积，粒度概率累积曲线取样井深 2493.13 m，一段式；D—WU213 井，岩心取样井深 2366.2 m，块状层理，砂质碎屑流沉积，粒度概率累积曲线井深 2365.8 m，“短尾”两段式；E—T20 井，岩心取样井深 2158.82 m，块状层理，砂质碎屑流沉积，粒度概率累积曲线取样井深 2157.79 m，“短尾”两段式；F—W92 井，岩心取样井深 2398.02 m，块状层理，砂质碎屑流沉积，粒度概率累积曲线取样井深 2396.88 m，“短尾”两段式

图 5 吴起地区延长组长 7—长 9 段砂质碎屑流沉积、浊流沉积岩心与对应的概率累积曲线特征

Fig. 5 Features of sandy debris flow, turbidite cores and corresponding probability cumulative curves for the Chang 7 – Chang 9 members of Yanchang Formation in Wuqi area

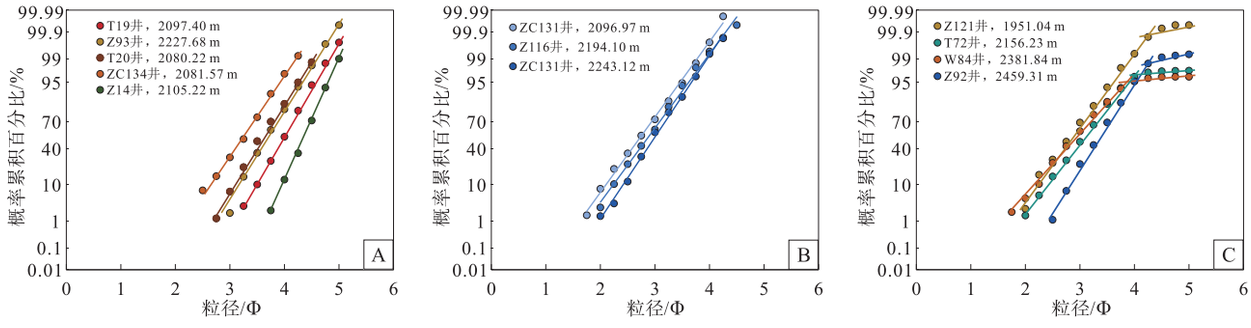
偏细的短尾两段式指示浊流沉积。短尾两段式的特征是，跳跃组分与悬浮组分在截点 4ϕ 前后差异较大，跳跃组分占比很高（>95%）、斜率陡，而悬浮组分占比很小（通常<5%），斜率平缓，即比较平短，故名“短尾”。

吴起地区长 7—长 9 油层组大量粒度资料分析表明：浊流沉积以偏细的一段式为主（图 6-A），粒度区间在 2.5~5ϕ 之间，斜率在 57°~67°之间；另有少量偏细的短尾两段式。

砂质碎屑流沉积主要为偏粗的一段式和偏粗的“短尾”两段式。其中偏粗的一段式（图 6-B）粒度区间在 1.75~4.25ϕ 之间，相对于浊流的一段式，其粒度起始 ϕ 值较小，最大起始 ϕ 值为 2.25ϕ；而浊流沉积的一段式最低起始 ϕ 值为 2.5ϕ，斜率在 53°~56°之间。偏粗的“短尾”两段式（图 6-C）粒度区间在 1.5~5ϕ 之间，起始 ϕ 值不超过 2.5ϕ，概率累积曲线以跳跃组分占主体，占 95%以上，斜率在 48°~55°之间；悬浮组分占比小于 5%，斜率在 4°~13°之间。

2.2.2 C-M 图特征

将前述已分类的粒度资料 C 和 M 值进行做图分析（图 7），吴起地区粒度数据总体呈平行 C=M



A—浊流沉积一段式；B—砂质碎屑流沉积一段式；C—砂质碎屑流沉积“短尾”两段式

图 6　吴起地区延长组长 7—长 9 段不同重力流类型概率累积曲线

Fig. 6　Probability cumulative curves of different gravity flow types for the Chang 7-Chang 9 members of Yanchang Formation in Wuqi area

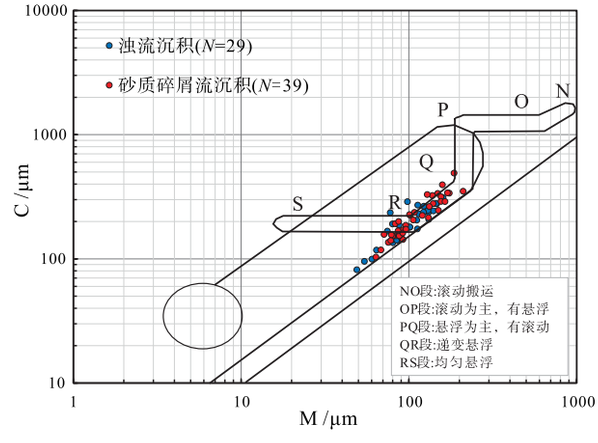


图 7　吴起地区延长组长 7—长 9 段不同重力流类型 C-M 图

Fig. 7　C-M diagram for different types of gravity flows for the Chang 7-Chang 9 members of Yanchang Formation in Wuqi area

基线分布，反映为重力流沉积。其中砂质碎屑流沉积的 C 值和 M 值的平均值分别为 227.68 μm 和 114.44 μm，浊流沉积的 C 值和 M 值的平均值分别为 198.45 μm 和 101.39 μm，均小于砂质碎屑流沉积的 C 值和 M 值,与前述粒度平均值差异一致。表现在 C-M 图上，浊流沉积较砂质碎屑流沉积略偏向图的左下方。

2.2.3　不同重力流沉积类型粒度参数对比

综合对比吴起地区长 7—长 9 段浊流沉积与砂质碎屑流沉积的主要粒度参数(表 1)，可以看出：吴起地区砂质碎屑流沉积的平均粒径为 3.19ϕ，浊流沉积的平均粒径为 3.45ϕ，反映砂质碎屑流沉积较浊流沉积略粗，凸显了砂质碎屑流沉积搬运携砂能力较浊流沉积强的特征。

标准偏差（σ_1）是表示沉积物分选程度的参数。根据标准偏差划分沉积物分选级别的标准为：$\sigma_1<0.35$，分选极好；$\sigma_1=0.35\sim0.50$，分选好；$\sigma_1=0.50\sim0.71$，分选较好；$\sigma_1=0.71\sim1.00$，分选中等；$\sigma_1=1.00\sim2.00$，分选较差；$\sigma_1=2.00\sim4.00$，分选差；$\sigma_1>4.00$，分选极差（朱筱敏，2020）。吴起地区砂质碎屑流沉积的平均标准偏差 σ_1 为 0.47，略高于浊流沉积的平均标准偏差 0.42，说明浊流沉积的分选性稍优于砂质碎屑流沉积。但二者都属于分选好级别，且均以细砂岩为主。

偏度(SK_1)被用来判别粒度分布的不对称程度，尾部位于细粒一端的曲线具有正偏度值，位于粗粒一端的曲线具有负偏度值(Folk and Ward，1957；朱筱敏，2020)。吴起地区 2 种重力流沉积偏度都为正，反映其粒度总体偏细。但砂质碎屑流沉积的平均偏度(0.24)略大于浊流沉积的平均偏度(0.20)，说明砂质碎屑流沉积较浊流沉积略微偏粗。

尖度（即峰度 K_G）用来衡量粒度频率曲线的尖锐程度(Folk and Ward，1957；朱筱敏，2020)。

表 1　吴起地区延长组长 7—长 9 段粒度参数平均值

Table 1　Average values of grain size parameters for the Chang 7-Chang 9 members of Yanchang Formation in Wuqi area

沉积类型	平均粒径/ϕ	标准偏差(σ_1)	偏度(SK_1)	尖度(K_G)	C 值/μm	M 值/μm
浊流沉积	3.45	0.42	0.20	3.21	198.45	101.39
砂质碎屑流沉积	3.19	0.47	0.24	3.27	227.68	114.44

吴起地区 2 种重力流沉积的尖度差异不大，都属于 $K_C>3$ 的非常尖锐类型。

3 长 7—长 9 重力流沉积的分布

就重力流沉积在吴起地区的分布特别是平面分布而言，能够最有效反映砂体沉积环境的无疑是岩心观察资料和粒度分析资料。但岩心观察资料通常十分有限，而吴起地区粒度分析资料比较丰富。故以下结合岩心观察、单井相分析及粒度概率累积曲线类型平面分布图，分析长 7—长 9 各层段重力流沉积的分布特征。

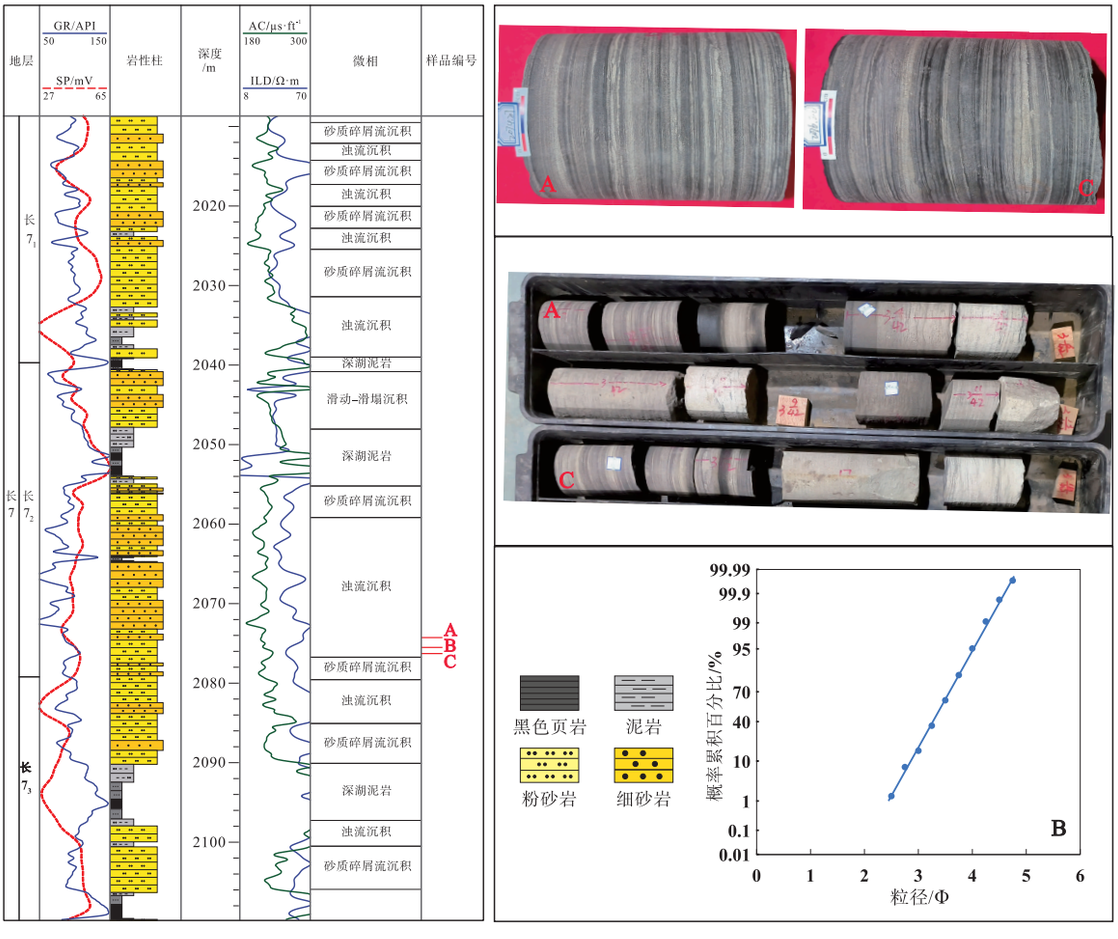
3.1 长 7 段重力流沉积

根据单井相分析，吴起地区长 7 砂质碎屑流沉积和浊流沉积均比较发育，并以浊流沉积为主。如 ZC130 井(图 8)，井深 2074.27 m、2076.28 m 处 A、C 岩心照片显示为典型的鲍马序列，粒度概率曲线为偏细的一段式，反映为浊流沉积，其测井曲线形态一般表现为中低幅度的多齿状钟型和指型相结合。

由 24 口井长 7 段粒度概率累积曲线的分布来看(图 9)，重力流沉积几乎遍及吴起全区，且浊流沉积较砂质碎屑流沉积发育。其中东北部除 ZC128 和 ZC131 井粒度概率累积曲线表现为偏粗的一段式，属砂质碎屑流沉积外，其余均为偏细的一段式，反映该区以浊流沉积为主。西部除 T72 井、南部除 Z121 和 T23 井等少数井外，亦主要为浊流沉积，粒度概率累积曲线表现为偏细的一段式为主，少数为偏细的“短尾”两段式。

3.2 长 8 段重力流沉积

单井相分析表明，吴起地区长 8 段也发育砂质碎屑流沉积和浊流沉积，并同样可能以浊流沉



A—井深 2074.37 m，鲍马序列；B—井深 2075.51 m，粒度概率累积曲线，一段式；C—井深 2076.20 m，平行层理，鲍马序列

图 8 吴起地区 ZC130 井长 7 段单井相分析

Fig. 8 Single-well facies analysis for the Chang 7 member of Well ZC130 in Wuqi area

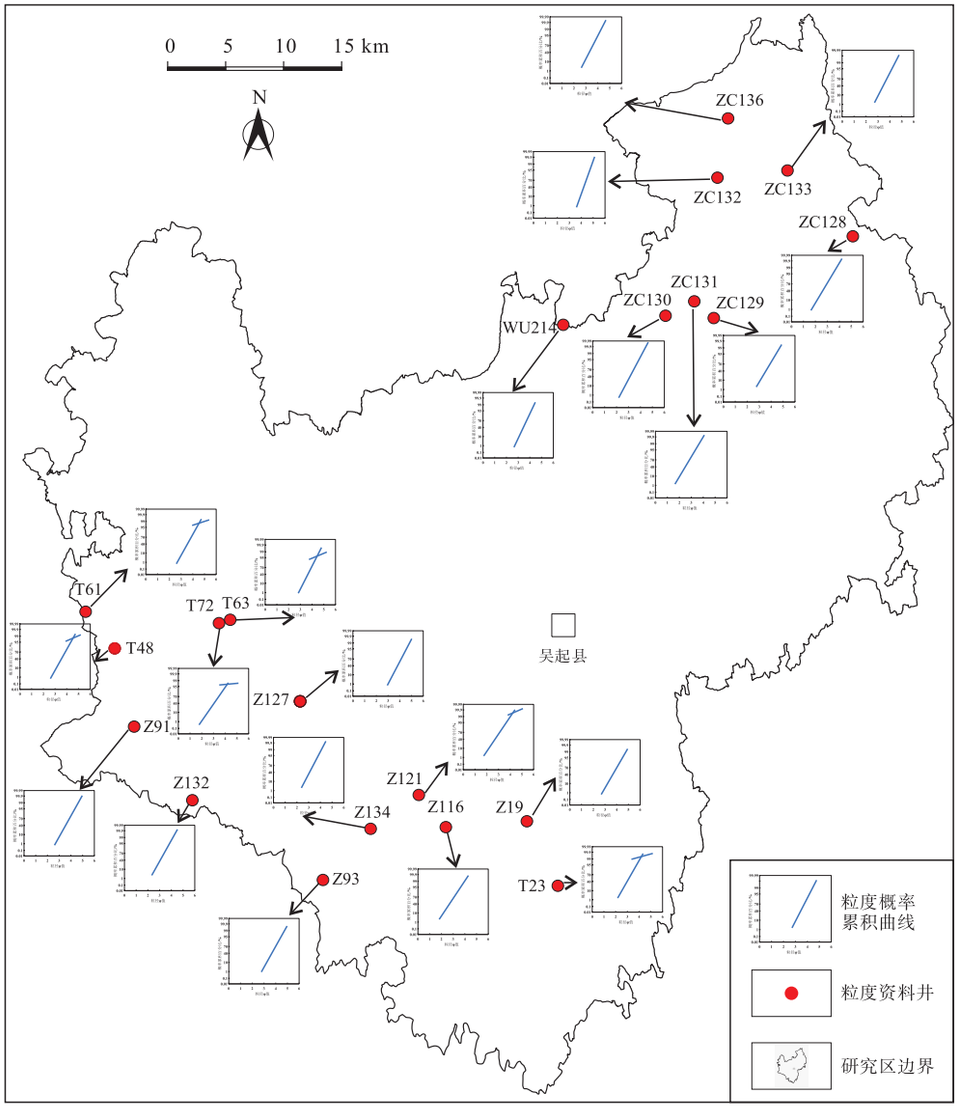


图 9　吴起地区长 7 粒度累积概率曲线分布图

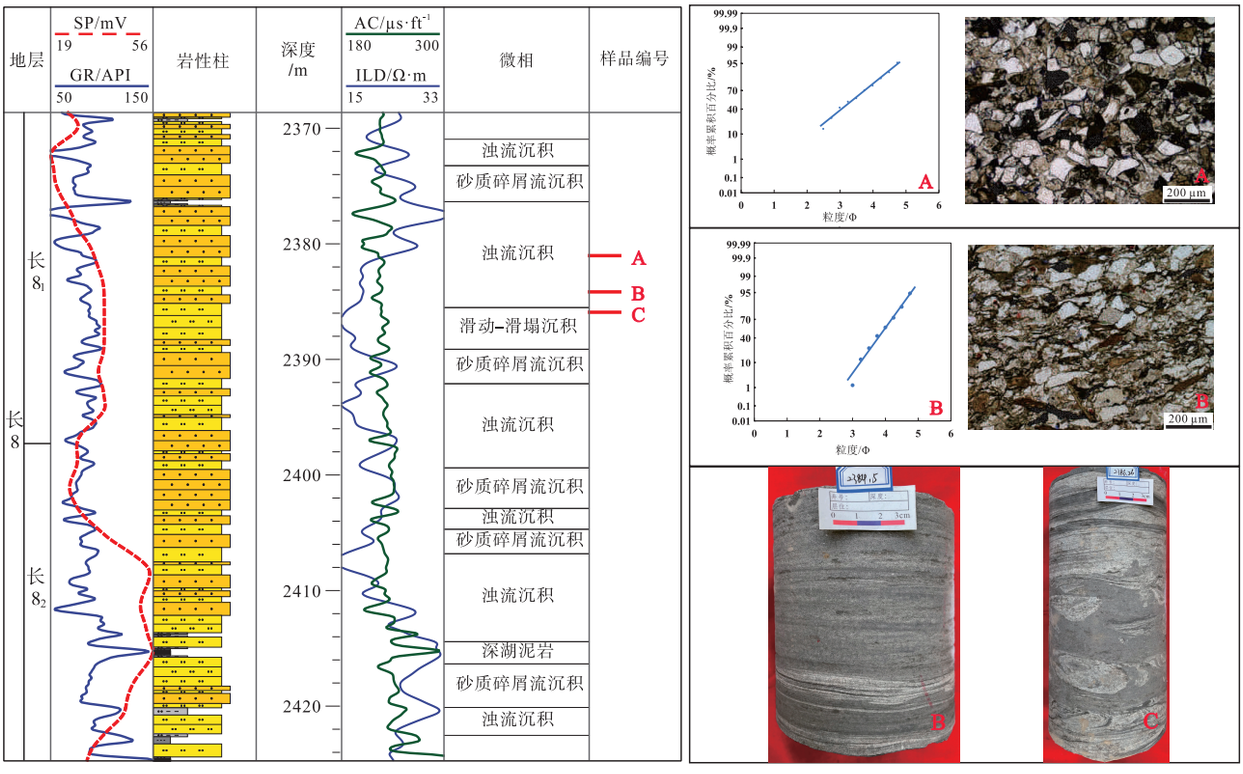
Fig. 9　Distribution of grain size cumulative probability curves for the Chang 7 member in Wuqi area

积为主。如 W84 井(图 10)样品 A 粒度概率累积曲线呈现斜率较低的偏细一段式，镜下薄片呈现基底式胶结，主要为方解石胶结，粒度分选较差，颗粒呈次棱角状，符合浊流悬浮搬运沉积的特征；样品 B 在岩心照片上可见平行层理，粒度概率累计曲线为偏细一段式，为浊流沉积，其镜下特征与 A 样品的相似，都属于悬浮搬运沉积；样品 C 岩心可见包卷层理，为典型的滑动—滑塌沉积。

平面上，根据 14 口井粒度概率累积曲线分布特征(图 11)，重力流沉积在研究区长 8 段也十分广泛，且亦以浊流沉积为主，仅在西部边缘部分井(如 W84、W86、T50 井)见有砂质碎屑流沉积，其粒度概率累积曲线表现为偏粗的短尾两段式。另外，东部个别井(T20 井)粒度概率累积曲线为偏粗的一段式，反映为砂质碎屑流沉积。需要说明的是，由于长 8 段岩心观察和粒度分析资料相对较少，其重力流沉积究竟以何者为主尚有待证实。

3.3　长 9 段重力流沉积

根据单井相分析结果，吴起地区长 9 段以砂质碎屑流沉积为主，浊流沉积分布局限。如 W92 井(图 12)，样品 A 粒度概率累积曲线呈现偏粗的“短尾”两段式，反映为砂质碎屑流沉积；岩心样



A—井深 2381.36 m，粒度概率累积曲线一段式，薄片方解石胶结；B—井深 2384.45 m，粒度概率累积曲线一段式，薄片方解石胶结，鲍马序列；C—井深 2386.26 m，包卷层理

图 10 吴起地区 W84 井长 8 段单井相分析

Fig. 10 Single-well facies analysis for the Chang 8 member of Well W84 in Wuqi area

品 B、C、D 为块状砂岩，测井曲线形态为锯齿状箱型，为砂质碎屑流沉积；样品 E 顶部为块状砂岩，底部见与粉砂质泥岩突变接触，其 GR 测井曲线从低值突变上升，可明显看到砂质碎屑流到浊流沉积的转变。

根据长 9 段 33 口井粒度资料分析(图 13)，该段重力流沉积分布同样十分广泛，且主要为砂质碎屑流沉积。其粒度概率累积曲线在区块西北部、西部和南部以偏粗的短尾两段式为主，其次为偏粗的一段式，另有 1 口井见高悬浮组分两段式（T70 井），均反映为砂质碎屑流沉积，仅有少数井区（如 W91、T69、T47、T53、S5、Z14、Z10 井）为偏细的一段式，指示为浊流沉积。而东北部则表现为浊流沉积与砂质碎屑流沉积几乎同样重要。

3.4 长 7—长 9 重力流沉积平面分布模式

根据前文各类重力流沉积物特征，建立了吴起地区沉积模式(图 14)。来自东北部物源区搬运来的碎屑沉积物在三角洲前缘的沉积，受地震等因素影响在前缘地带发生滑塌，形成砂质碎屑的块体沿水道进行搬运，而砂质碎屑流在运输过程中能与浊流在时空上进行转换（Shanmugam，2013），随着搬运距离的进一步增加，浊流开始形成并沉积。三角洲前缘由于砂体的大量堆积，容易受外部因素影响（地震、波浪）发生滑动—滑塌，在三角洲前缘台缘带斜坡及深湖区形成大面积的砂质碎屑流舌状体，在其形成过程中，砂质碎屑流携带大量沉积物在水道中运输，随着坡度的减缓而开始卸载（吕奇奇等，2022）。其中的中砂质碎屑流和浊流在进入湖底后形成了湖底扇，包括以砂质碎屑流沉积为主的扇中和以浊流沉积为主的扇翼。

3.5 重力流平面分布规律

综合岩心照片、粒度资料和大量测井资料，发现吴起地区长 7—长 9 各油层组重力流沉积砂体发育均不相同。

1）长 7。长 7_1 和长 7_2 砂体整体较为发育（图 15-A，15-B），长 7_3 则以张家滩页岩为主，

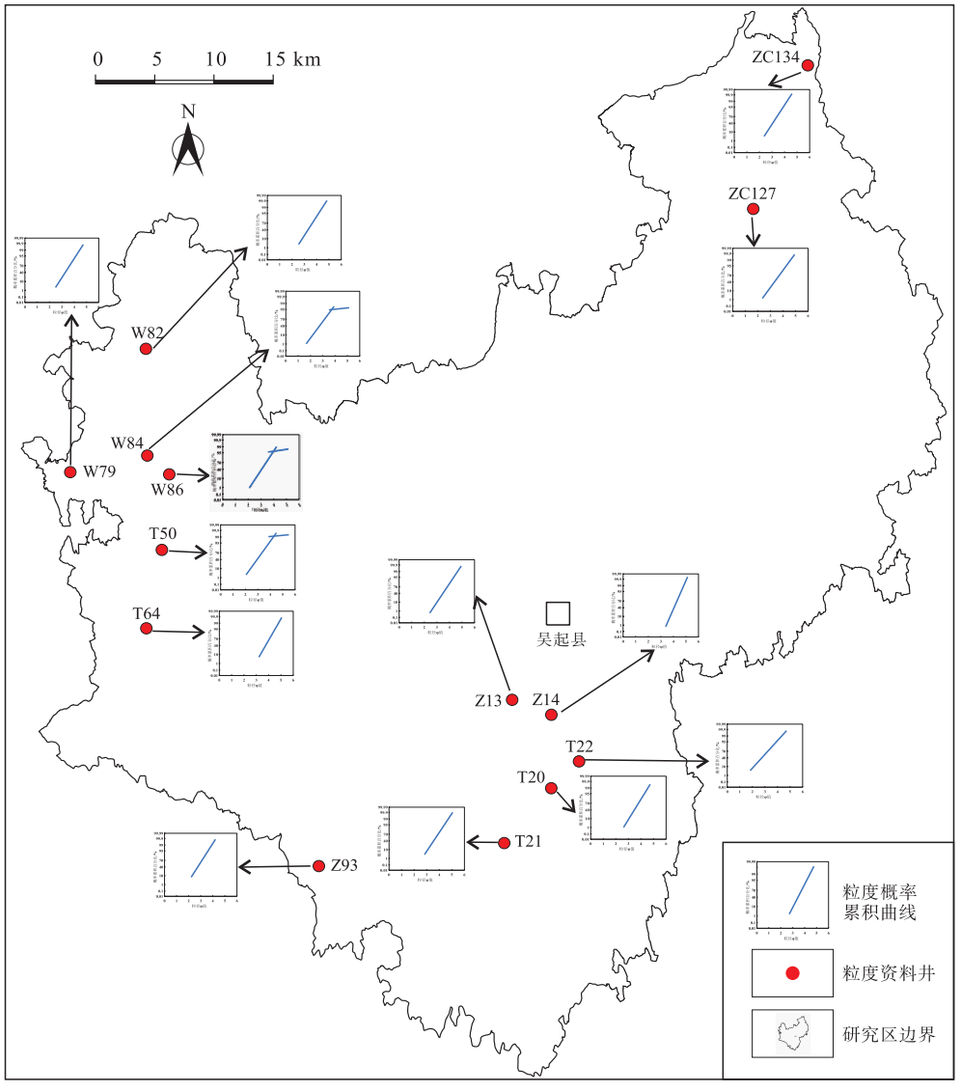


图 11　吴起地区长 8 粒度累积概率曲线分布图

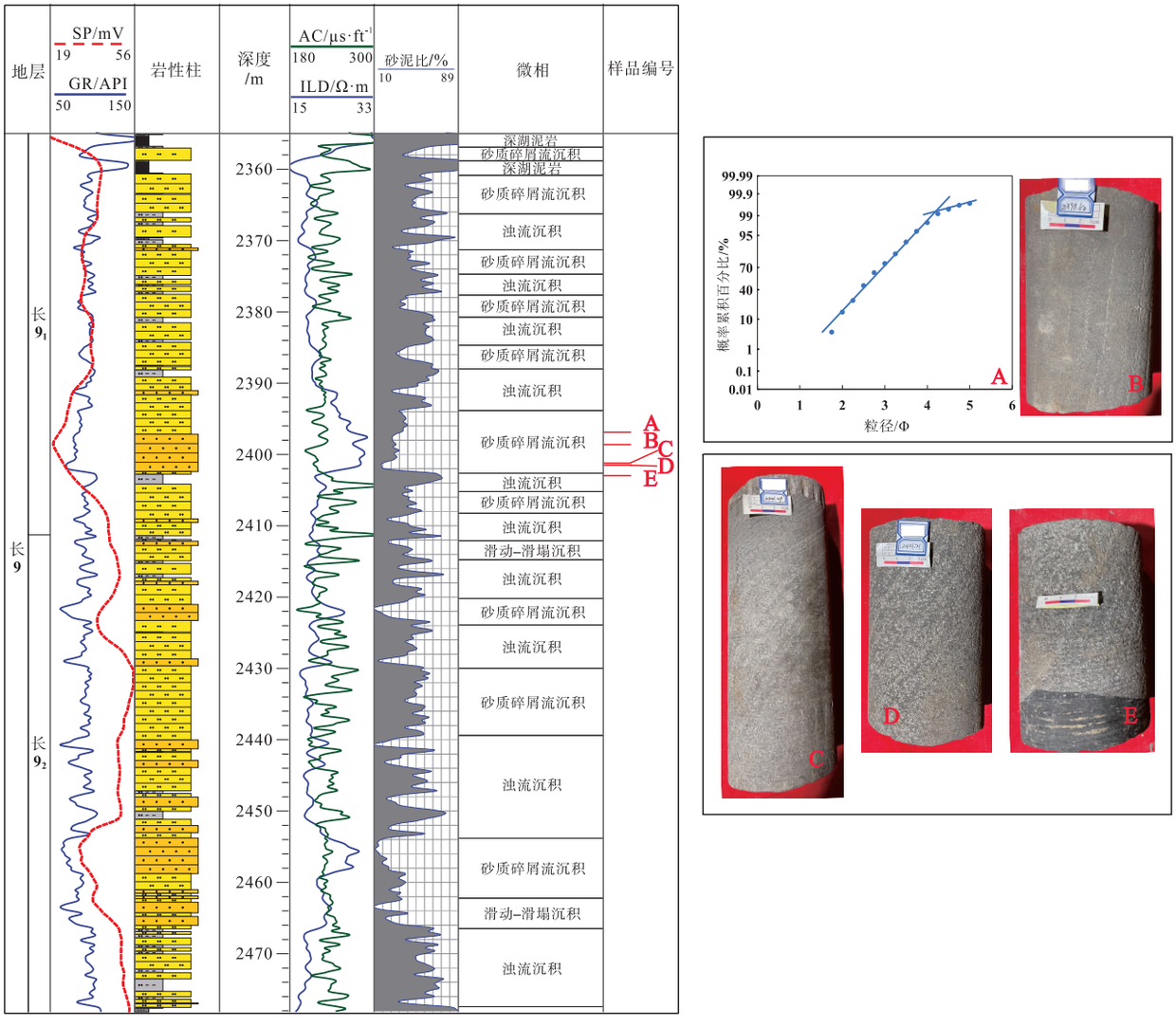
Fig. 11　Distribution of grain size cumulative probability curves for the Chang 8 member in Wuqi area

大部分为深湖泥沉积，砂体发育较差；长 7_1 和长 7_2 东北部和南部砂体较为发育，其中东北部发育的原因主要为靠近物源，有大量陆源碎屑沉积物供应，因其靠近三角洲前缘和坡折带过渡带，有着较为明显的深水沉积特征。西北部和南部发育的较厚砂体来源于定边地区、志丹地区东北—西南向的大面积砂体，呈现出一定的东南—西北向的趋势，因此西南部的铁边城等区域和南部的白豹等区域受东北物源控制，但其物源来源方向可能为东南—西北方向。吴起地区西南部分布面积较小的孤立的砂体。

2）长 8。长 8_1 砂体发育(图 15-C)，且大面积分布，可能是三角洲前缘砂体发生大规模滑动—滑塌，通过水道大量运输，形成成片湖底扇，东北部较大的砂体还有三角洲前缘沉积的可能。研究区南部砂体长 8_1，与长 7_1、长 7_2 南部砂体来源相同；长 8_2 砂体较发育(图 15-D)，除临近物源区域有连片砂体外基本以小型湖底扇的形式存在。

3）长 9。长 9_1 和长 9_2 虽无大面积连片砂体(图 15-E，15-F)，但在整个区域以中大型的湖底扇的形式分布，此外与研究区长 9_1 油层组发现的李家畔页岩生油岩系相结合，长 9 油层组砂体具有较好的储集空间的潜力。

总之，吴起地区长 7—长 9 段重力流沉积砂体



A—井深 2396.88 m，粒度概率累积曲线，“短尾”两段式；B—井深 2398.62 m，块状砂岩；C—井深 2401.21 m，块状砂岩；D—井深 2401.49 m，块状砂岩；E—井深 2402.97 m，砂岩和粉砂质泥岩突变接触

图 12 吴起地区 W92 井长 9 段单井相分析

Fig. 12 Single-well facies analysis for the Chang 9 member of Well W92 in Wuqi area

东北部和南部发育，西南部以小—中型湖底扇的形式发育，扇中和扇翼的含砂高，其形成的重力流砂体有望成为研究区较好的储集体。

4 重力流沉积储集层与含油性特征及其勘探意义

4.1 储集层特征

吴起地区长 7—长 9 重力流沉积砂岩的岩性均以长石砂岩为主，少量岩屑长石砂岩(图 16)。

根据对吴起地区长 7—长 9 重力流沉积的铸体薄片观察分析可知，长 7 段石英等刚性颗粒总体含量平均值为 27.15%，含量较少，抗压实能力较弱，导致储集层经历了显著的压实作用，石英等刚性颗粒间呈现凹凸接触和镶嵌接触，局部出现长石被压溶的现象(图 17-A)；颗粒间孔隙被方解石和铁方解石胶结充填(图 17-B)，通过颗粒间的切割交代关系初步判定其生成的前后顺序：紫红色铁方解石围绕暗红色方解石，说明铁方解石形成晚于方解石(图 17-C)。

长 8 段的刚性颗粒总体含量平均值为 26.9%，压实作用更为强烈，颗粒呈现定向排列(图 17-D，

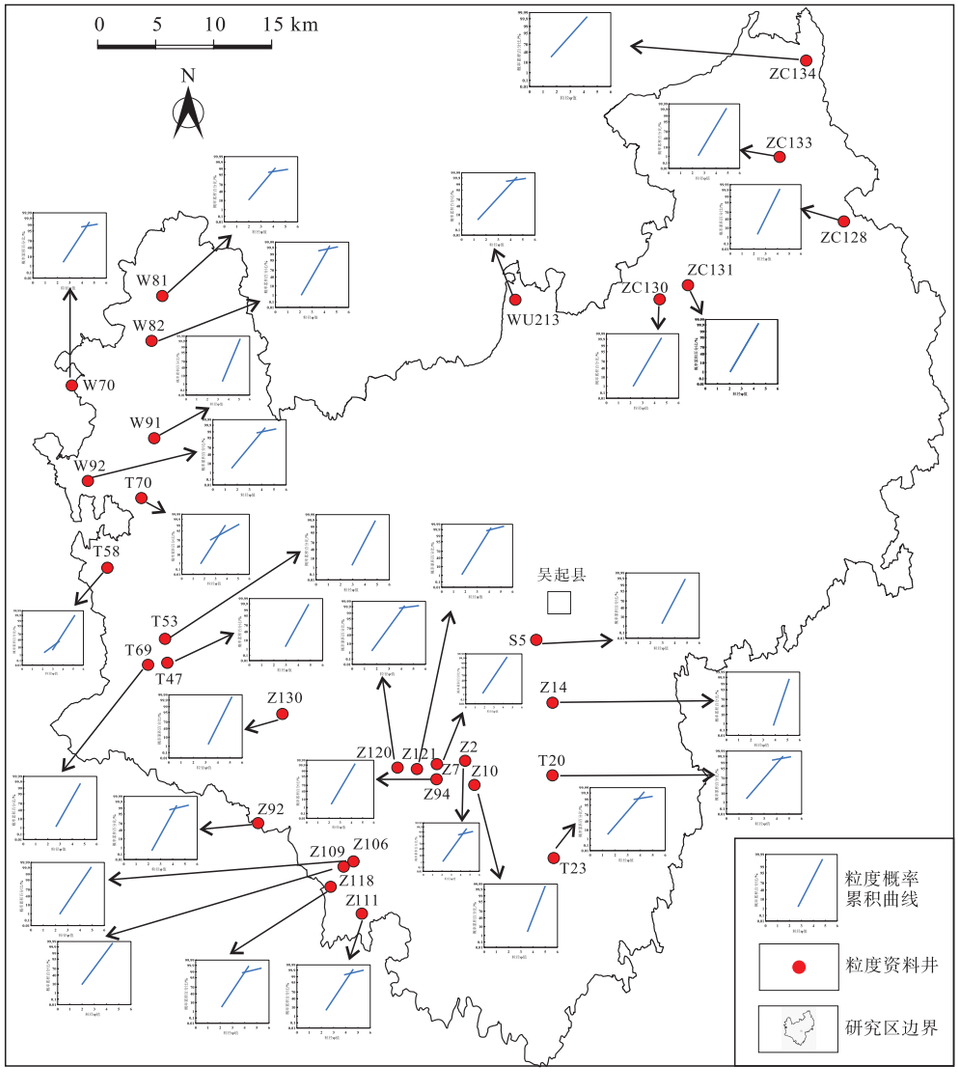


图 13　吴起地区长 9 粒度累积概率曲线分布图

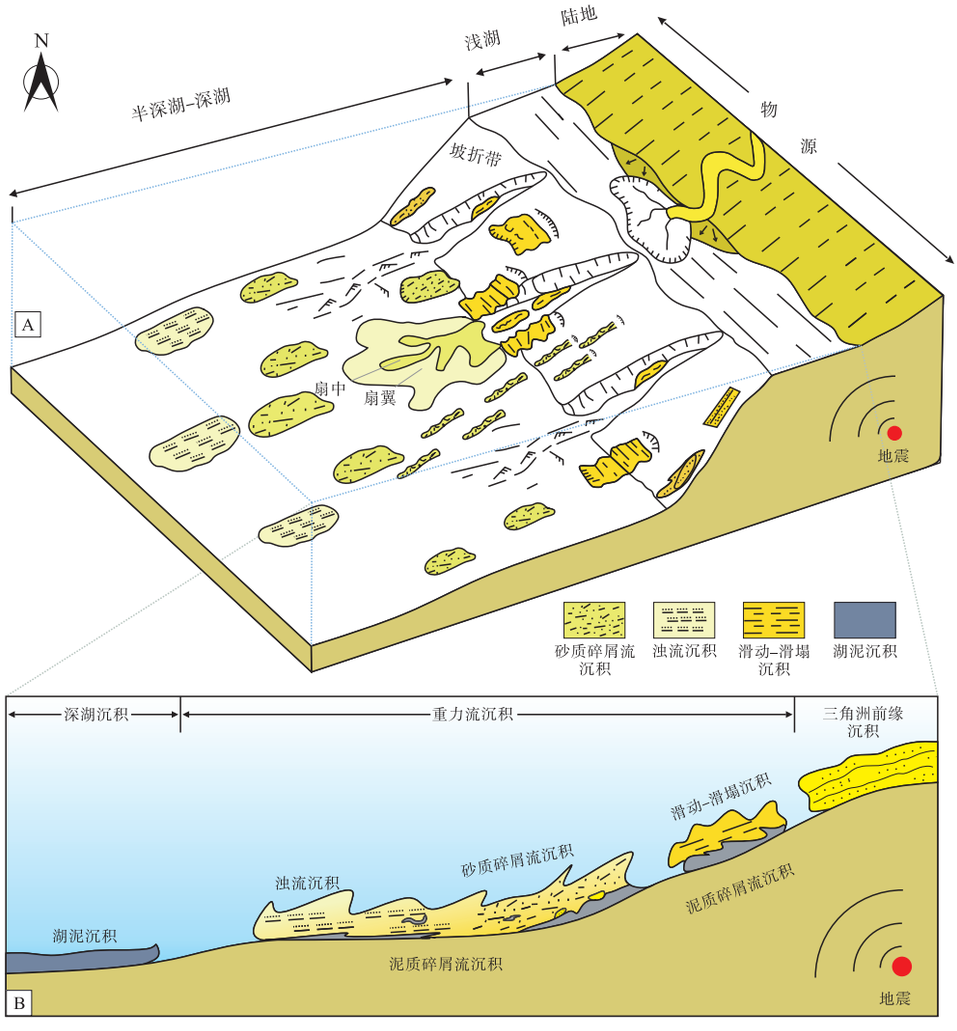
Fig. 13　Distribution of grain size cumulative probability curves for the Chang 9 member in Wuqi area

17-E)，可见云母颗粒被挤压变形(图 17-E)后经历压溶作用而发生溶蚀，产生沿裂隙发育的孔隙，长石和岩屑也受到了压实溶蚀作用的影响，产生较好的次生孔隙；此外还出现了方解石胶结(图 17-F)，强烈的胶结作用导致颗粒呈点接触，孔隙度进一步降低。

长 9 段砂岩碎屑颗粒呈次棱—次圆状，颗粒间呈点线接触(图 17-G)，云母颗粒被挤压变形(图 17-H)。此外还出现了方解石胶结(图 17-G)和部分方解石交代长石和岩屑的情况(图 17-I)。

4.2　储集层物性特征

根据对吴起地区长 7—长 9 段共 83 个常规物性资料（砂质碎屑流沉积共 45 个样品，浊流沉积共 38 个样品）的统计分析结果(表 2；图 18-A)，砂质碎屑流和浊流沉积砂岩均为典型的致密砂岩，但砂质碎屑流沉积较浊流沉积砂岩的物性明显要好一些。前者孔隙度区间为 4.4%~16.5%，平均值为 9.22%，中位数 9.00%；渗透率区间为 0.11×10^{-3} μm² ~ 3.84×10^{-3} μm²，平均值为 1.016×10^{-3} μm²，中位数为 0.83×10^{-3} μm²。而浊流孔隙度区间为 2.5%~11.1%，平均值为 6.18%，中位数 6.05%；渗透率区间为 0.02×10^{-3} μm² ~ 1.16×10^{-3} μm²，平均值 0.395×10^{-3} μm²，中位数 0.26×10^{-3} μm²。这除了可能与浊流沉积砂岩粒度较砂质碎屑流沉积砂岩细、导致压实作用较强有关外，还



A—重力流沉积模式图；B—重力流沉积剖面（据 Shanmugam，2013；有修改）

图 14 吴起地区延长组长 7—长 9 段重力流沉积模式及形成过程示意图

Fig. 14 Schematic diagram of gravity flow depositional models and forming processes in Chang 7-Chang 9 members, Wuqi area

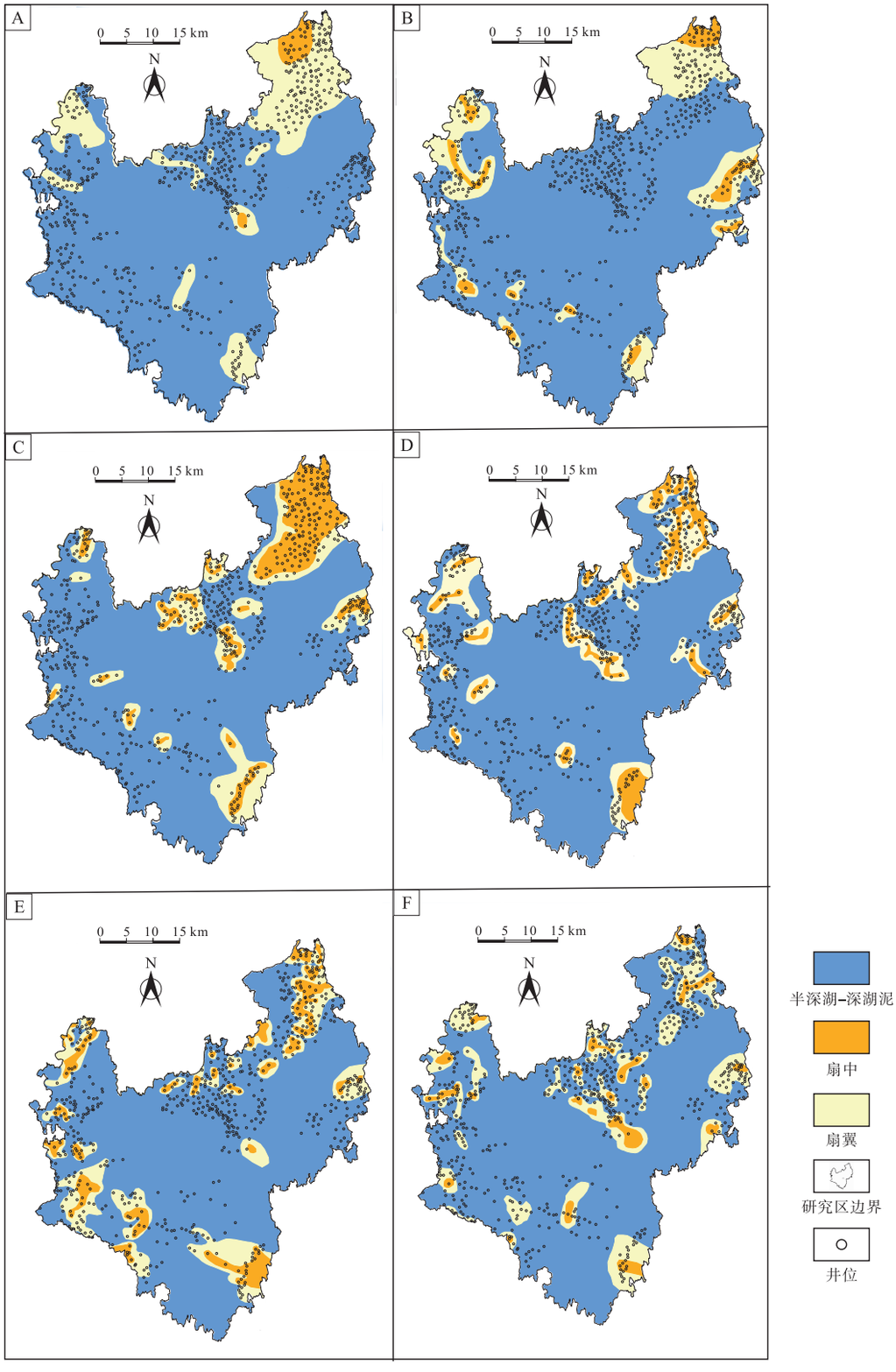
可能与浊流沉积的碳酸盐胶结物含量明显高于砂质碎屑流沉积有很大关系(表 2；图 18-B)。

4.3 重力流储集层的含油性

吴起地区 8 口井荧光薄片样品的观察发现(图 19)，砂质碎屑流沉积和浊流沉积均存在油质沥青、胶质沥青和沥青质沥青 3 种类型，但砂质碎屑流沉积砂岩的沥青分布较多，反映砂质碎屑流沉积的含油性好于浊流沉积。另外，砂质碎屑流沉积中的沥青质沥青含量较浊流沉积似乎更多。由于沥青质沥青的成熟度较高（Ma *et al.*，2024)，因此砂质碎屑流沉积中充注的较高成熟度的油气可能多于浊流沉积，这是其含油性优于浊流沉积的原因之一。

根据吴起地区 83 个含油饱和度分析资料，浊流沉积的含油饱和度区间为 12.25%~82.75%，平均值为 48.871%，中位数为 44.03%；砂质碎屑流沉积的含油饱和度区间为 18.08%~84.34%，平均值 55.612%，中位数 52.36%(表 3)，表明砂质碎屑流沉积含油性明显优于浊流沉积砂岩，其原因主要在于前者的储集层物性好于后者(图 20-A)。

另据研究区 35 口探井的试油资料，浊流沉积砂岩的试油产量平均值为 1.99 t/d，砂质碎屑流沉积砂岩的试油产量平均值为 3.44 t/d (表 3；图 20-B)，反映砂质碎屑流沉积砂岩不仅含油性好于浊流沉积，而且产油能力也明显优于后者。因此，砂



A—长 7_1；B—长 7_2；C—长 8_1；D—长 8_2；E—长 9_1；F—长 9_2

图 15　吴起地区延长组长 7—长 9 段各亚层组沉积相平面展布

Fig. 15　Facies distribution for the Chang 7–Chang 9 members in Wuqi area

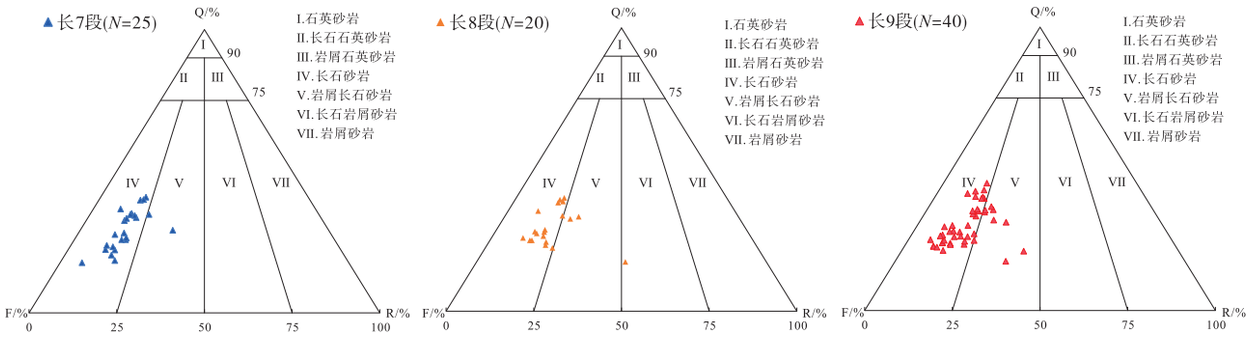
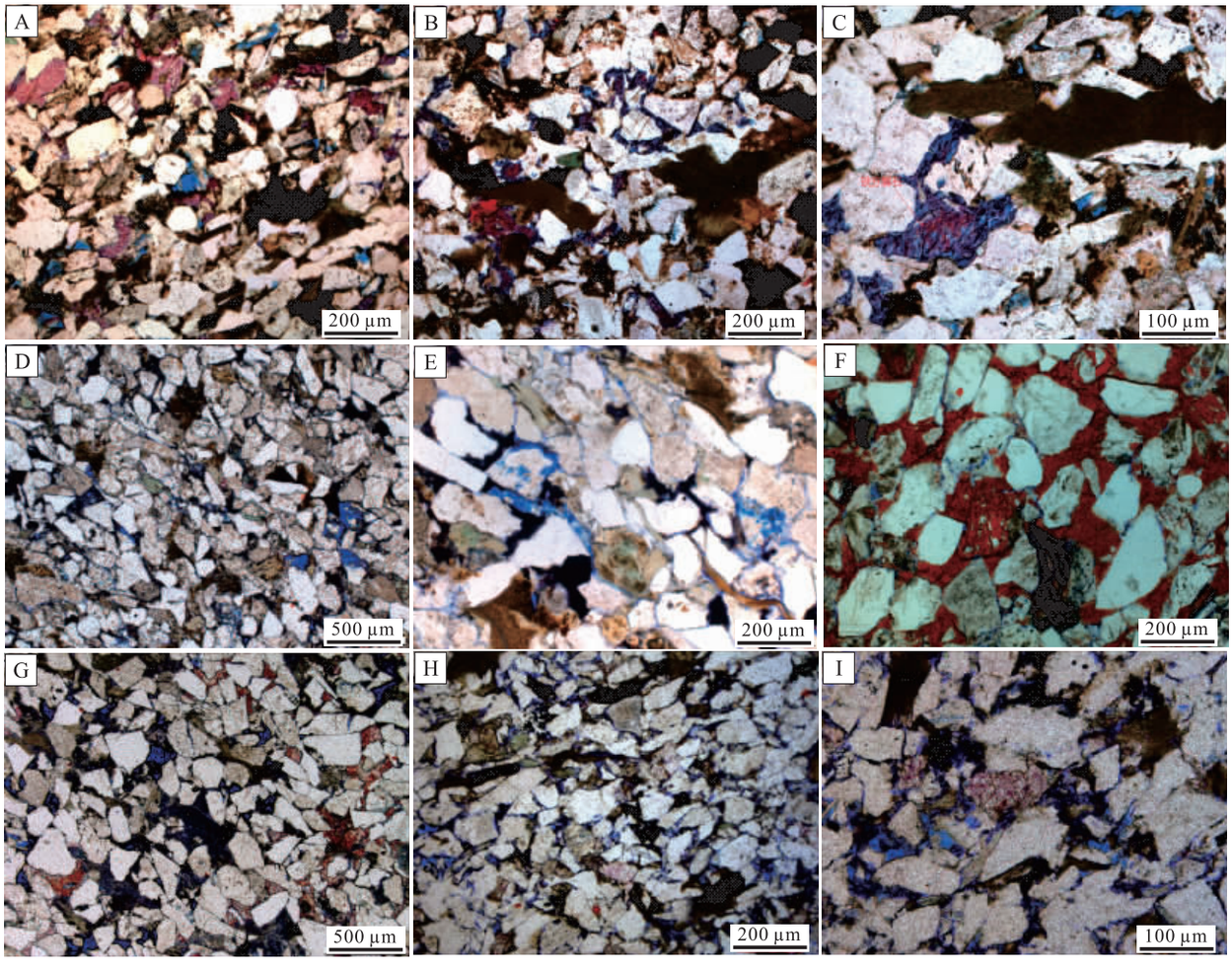


图 16 吴起地区延长组长 7—长 9 段重力流沉积岩性三角图

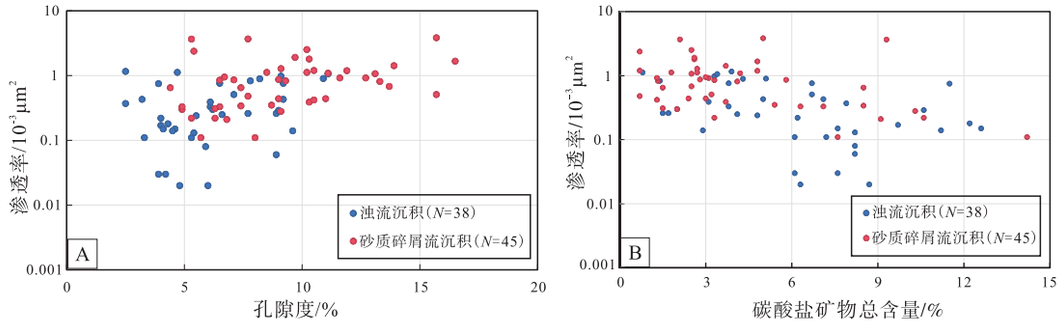
Fig. 16 Lithologic ternary diagram of gravity flow deposits for the Chang 7–Chang 9 members of Yanchang Formation in Wuqi area



A—T72 井，井深 2148.53 m，长 7，颗粒呈凹凸接触；B—T72 井，井深 2149.43 m，长 7，方解石胶结；C—T72 井，井深 2152.75 m，长 7，铁方解石胶结；D—T20 井，井深 2082.40 m，长 8，颗粒定向排列；E—T20 井，井深 2082.40 m，长 8，长石、云母颗粒被溶蚀；F—T20 井，井深 2083.23 m，长 8，方解石胶结；G—Z9 井，井深 2400.40 m，长 9，颗粒呈点—线接触；H—Z12 井，井深 2065.70 m，长 9，云母吸附沥青；I—Z12 井，井深 2065.70 m，长 9，方解石交代

图 17 吴起地区延长组长 7—长 9 段重力流沉积薄片照片

Fig. 17 Photomicrographs of gravity flow deposits for the Chang 7–Chang 9 members of Yanchang Formation in Wuqi area



A—孔隙度—渗透率交会图；B—碳酸盐矿物总含量—渗透率交会图

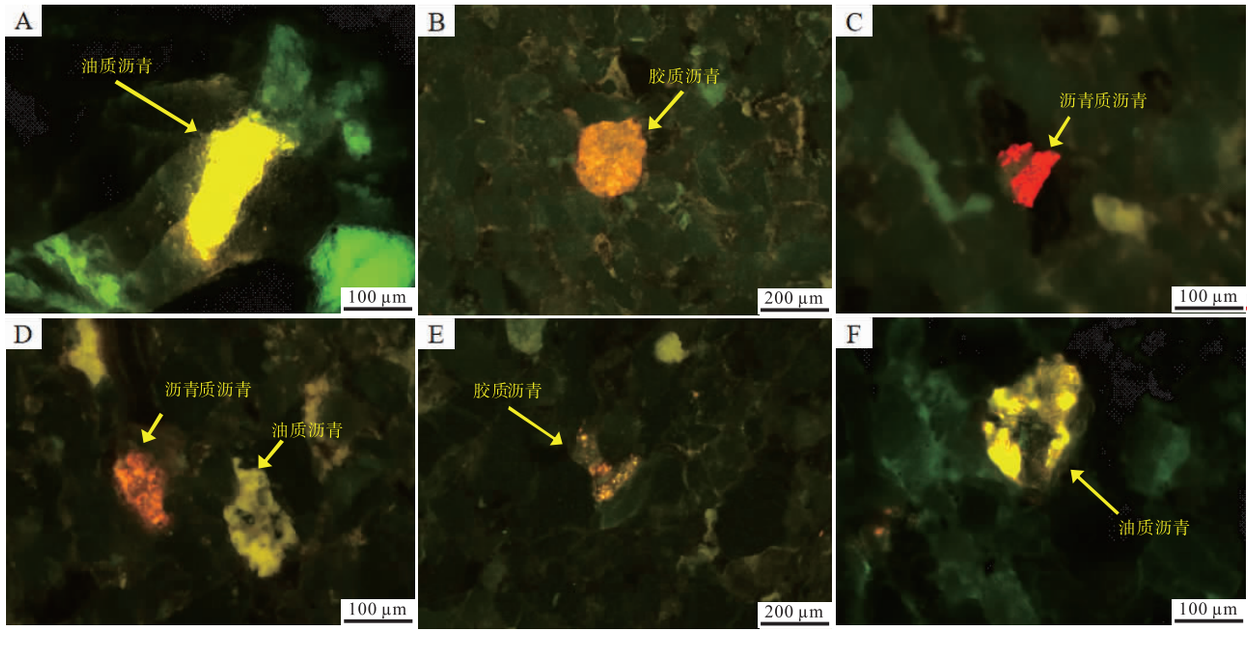
图 18　吴起地区延长组长 7—长 9 段不同重力流类型孔—渗、碳酸盐含量—渗透率交会图

Fig. 18　Porosity vs. permeability and carbonate content vs. permeability cross-plots for different sediment gravity flow deposits types for the Chang 7–Chang 9 members of Yanchang Formation in Wuqi area

表 2　吴起地区延长组长 7—长 9 储集层不同重力流类型储集层物性统计

Table 2　Porosity-permeability statistics for different sediment gravity flow deposits types for the Chang 7–Chang 9 members of Yanchang Formation in Wuqi area

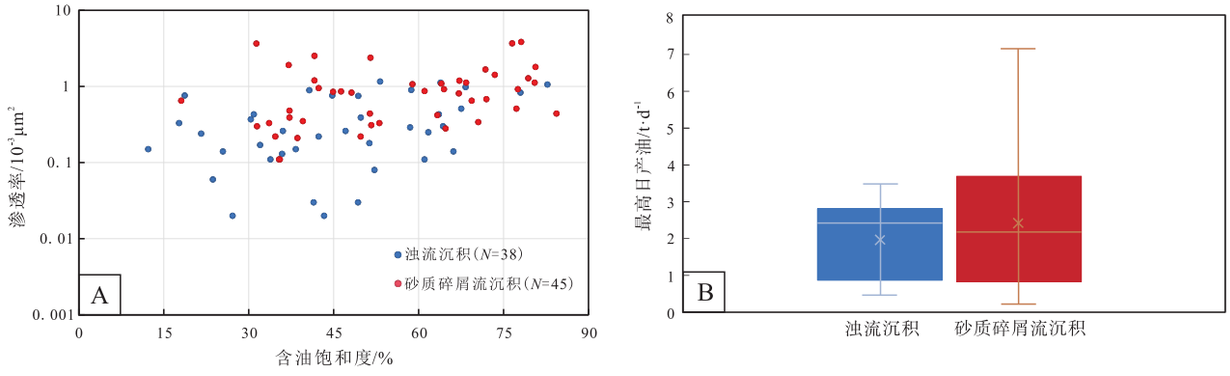
沉积类型	渗透率/10^{-3} μm²				孔隙度/%				碳酸盐含量/%			
	最大值	最小值	平均值	中位值	最大值	最小值	平均值	中位值	最大值	最小值	平均值	中位值
浊流沉积	1.16	0.02	0.395	0.26	11.1	2.5	6.18	6.05	12.6	0.8	6.09	6.15
砂质碎屑流沉积	3.84	0.11	1.016	0.83	16.5	4.4	9.22	9.00	14.2	0.7	4.15	3.05



A—T20 井，井深 2083.23 m，长 8，油质沥青，砂质碎屑流沉积；B—T22 井，井深 1933.07 m，长 8，胶质沥青，砂质碎屑流沉积；C—T22 井，井深 1933.07 m，长 8，沥青质沥青，砂质碎屑流沉积；D—Z12 井，井深 2065.7 m，长 9，油质沥青和沥青质沥青，砂质碎屑流沉积；E—W79 井，井深 2435.5 m，长 9，胶质沥青，浊流沉积；F—T19 井，井深 2211.56 m，长 9，油质沥青，浊流沉积

图 19　吴起地区不同重力流类型荧光薄片照片

Fig. 19　Fluorescence thin-section photographs of different gravity flow deposits types in Wuqi area



A—含油饱和度与渗透率交会图；B—不同重力流类型最高日产油

图 20 吴起地区长 7—长 9 段储集层不同重力流类型含油性

Fig. 20 Hydrocarbon potential distribution for different gravity flow deposits types for the Chang 7-Chang 9 members reservoirs in Wuqi area

表 3 吴起地区长 7—长 9 段储集层不同重力流类型含油饱和度、试油统计

Table 3 Oil saturation versus initial production tests statistics for different gravity flow deposits types for the Chang 7-Chang 9 members reservoirs in Wuqi area

沉积类型	含油饱和度/%				试油产量/t·d⁻¹			
	最大值	最小值	平均值	中位数	最大值	最小值	平均值	中位数
浊流沉积	82.75	12.25	48.871	44.03	3.49	0.46	1.99	2.44
砂质碎屑流沉积	84.34	18.08	55.612	52.36	8.79	0.24	3.44	2.70

质碎屑流沉积应是吴起地区长 7—长 9 层系石油勘探的最有利目标，其次为浊流沉积。

5 结论

1）本研究首次系统揭示了鄂尔多斯盆地吴起地区三叠系延长组长 8 和长 9 段重力流沉积的广泛存在及其沉积特征，并进一步论证了长 7 重力流在研究区的广泛分布。吴起地区长 7—长 9 油层组主要发育滑动—滑塌沉积、浊流沉积、砂质碎屑流沉积 3 类重力流沉积，其中长 7 油层组以浊流沉积为主，长 9 和长 8 油层组以砂质碎屑流沉积为主。

2）建立了吴起地区长 7—长 9 段重力流沉积的多参数识别标志：岩心构造特征，粒度特征和 C-M图特征。

3）长 7—长 9 段重力流储集层中，砂质碎屑流因厚层块状构造及低碳酸盐胶结物含量，展现出优于浊流沉积的储集层物性特征、含油性特征及产油能力，因而具有重要的勘探开发意义，应作为吴起地区延长组致密油勘探的首选目标。浊流沉积因在研究区分布较广，也应作为重要的勘探目标之一。

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 and Development，48(2)：247-257]

陈广坡，李娟，吴海波，彭威，李敬生，谢明贤，张斌，石小茜. 2018. 陆相断陷湖盆滑塌型深水重力流沉积特征、识别标志及形成机制：来自海拉尔盆地东明凹陷明 D2 井全井段连续取心的证据. 石油学报，39(10)：1119-1129. [Chen G P，Li J，Wu H B，Peng W，Li J S，Xie M X，Zhang B，Shi X Q. 2018. Sedimentary characteristics，identification mark and formation mechanism of slumping deep-water gravity flow in fault locustrine basin：a case a study on the consecutive coring Well of Ming D2 in Dongming sag，Hailar Basin. Acta Petrolei Sinica，39(10)：1119-1129]

邓秀芹，付金华，姚泾利，庞锦莲，孙勃. 2011. 鄂尔多斯盆地中及上三叠统延长组沉积相与油气勘探的突破. 古地理学报，13(4)：443-455. [Deng X Q，Fu J H，Yao J L，Pang J L，Sun B. 2011. Sedimentary facies of the Middle-Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin and breakthrough in petroleum exploration. Jour-

nal of Palaeogeography(Chinese Edition),13(4): 443-455]

邓秀芹,楚美娟,王龙,陈修,王妍心. 2024. 中晚三叠世鄂尔多斯盆地两期沉降及其形成机制. 石油勘探与开发,51(3): 501-512. [Deng X Q,Chu M J,Wang L,Chen X,Wang Y X. 2024. Two stages of subsidence and mechanisms in Mid-Late Triassic Ordos Basin,NW China. Petroleum Exploration and Development,51(3): 501-512]

付锁堂,邓秀芹,庞锦莲. 2010. 晚三叠世鄂尔多斯盆地湖盆沉积中心厚层砂体特征及形成机制分析. 沉积学报,28(6): 1081-1089. [Fu S T,Deng X Q,Pang J L. 2010. Characteristics of Yanchang Formation at the mechanism of thick sandbody in center of Ordos Basin. Acta Sedimentologica Sinica,28(6): 1081-1089]

何自新. 2003. 鄂尔多斯盆地演化与油气. 北京: 石油工业出版社,95-105. [He Z X. 2003. Evolution of the Ordos Basin and Hydrocarbons. Beijing: Petroleum Industry Press,95-105]

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 7^3 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. [Jiang W Q,Feng Y L,Zou C N,Dong L,Yang Z,Zhang H,Wang X N, You Y, Zhang T S, Wei Q Z, Fan Y C. 2025. Depositional character and influencing factors of fine-grained gravity flow of 7^3 submember in Longdong area of Ordos Basin. Earth Science,50(6): 2209-2226]

李相博,刘化清,完颜容,魏立花,廖建波,马玉虎. 2009. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组砂质碎屑流储集体的首次发现. 岩性油气藏,21(4): 19-21. [Li X B,Liu H Q,Wan Y R,Wei L H,Liao J B,Ma Y H. 2009. First discovery of the sandy debris flow from the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin. Lithologic Reservoirs,21(4): 19-21]

李相博,陈启林,刘化清,完颜容,慕敬魁,廖建波,魏立花. 2010. 鄂尔多斯盆地延长组 3 种沉积物重力流及其含油气性. 岩性油气藏,22(3): 16-21. [Li X B,Chen Q L,Liu H Q,Wan Y R,Mu J K,Liao J B,Wei L H. 2010. Three types of sediment gravity flows and their petroliferous features of Yanchang Formation in Ordos Basin. Lithologic Reservoirs,22(3): 16-21]

李相博,刘化清,张忠义,袁效奇,完颜容,牛海青,廖建波,王菁. 2014. 深水块状砂岩碎屑流成因的直接证据:“泥包砾”结构:以鄂尔多斯盆地上三叠统延长组研究为例. 沉积学报,32(4): 611-622. [Li X B,Liu H Q,Zhang Z Y,Yuan X Q,Wan Y R,Niu H Q,Liao J B, Wang J. 2014. “Argillaceous peroel” structure: direct evidence of debris flow of deep-water massive sandy stone of Yanchang Formation, Upper Triassic, the Ordos Basin. Acta Sedimentologica Sinica,32(4): 611-622]

廖纪佳,朱筱敏,邓秀芹,孙勃,惠潇. 2013. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组重力流沉积特征及其模式. 地学前缘,20(2): 29-39. [Liao J J,Zhu X M,Deng X Q,Sun B,Hui X. 2013. Sedimentary characteristics and model of gravity flow deposits in Triassic Yanchang Formation of Longdong area in Ordos Basin. Earth Science Frontiers,20(2): 29-39]

刘芬,朱筱敏,李洋,徐黎明,牛小兵,朱世发,梁晓伟,薛梦龙,贺敬聪. 2015. 鄂尔多斯盆地西南部延长组重力流沉积特征及相模式. 石油勘探与开发,42(5): 577-588. [Liu F,Zhu X M,Li Y,Xu L M,Niu X B,Zhu S F,Liang X W, Xue M L,He J C. 2015. Sedimentary characteristics and facies models of gravity flow deposits of Late Triassic Yanchang Formation in the southwestern Ordos Basin. Petroleum Exploration and Development,42(5): 577-588]

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—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. [Lü 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 complexe 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]

吕奇奇,王林,罗顺社,刘江艳,尤源,闫红果,浦宇新,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 dynamic mechanisms of lacustrine fine-grained turbidite deposits based on a flume sediment simulation. Acta Sedimentologica Sinica,43(3): 769-781]

庞军刚,常梁杰,国吉安,楚美娟,马治国,王梓萱,王欣月. 2022. 鄂尔多斯盆地南部延长组湖相水道—朵状体浊积扇沉积模式. 西北大学学报(自然科学版),52(1): 144-158. [Pang J G,Chang L J,Guo J A,Chu M J,Ma Z G,Wang Z X,Wang X Y. 2022. Sedimentary model of deep lacustrine sediment gravity flow deposits with well developed channels and lobes in Yanchang Formation, southern Ordos Basin. Journal of Northwest University(Natural Science Edition),52(1): 144-158]

王岚,王秀娟,李文厚,惠萧,刘羽汐,杨文敬,夏晓敏,白斌. 2024. 陆相坳陷湖盆深水重力流沉积类型、模式及控制因素分析:以鄂尔多斯盆地延长组长 7 段为例. 西北大学学报(自然科学版),54(6): 1091-1103. [Wang L,Wang X J,Li W H,Hui X,Liu Y X,Yang W J,Xia X M, Bai B. 2024. Analysis of types,patterns,and controlling factors of deep-water gravity flow sedimentary in terrestrial depression lake basins: a case study of the 7th member of the Yanchang Formation in the Ordos Basin as a example. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 54(6): 1091-1103]

王振,张元福,张娜,高勇,焦朝维,白一鸣,张博文,魏康强. 2018. 鄂尔多斯盆地南部地区延长组深水沉积构造特征及地质意义. 现代地质,32(1): 121-132. [Wang Z,Zhang Y F,Zhang N,Gao Y,Jiao C W,Bai Y M,Zhang B W,Wei K Q. 2018. Deep-water sedimentary structures of Yanchang Formation in southern Ordos Basin and geological significance. Geoscience,32(1): 121-132]

鲜本忠,万锦峰,姜在兴,张建国,李振鹏,余源琦. 2012. 断陷湖盆洼陷带重力流沉积特征与模式:以南堡凹陷东部东营组为例. 地学前缘,19(1): 121-135. [Xian B Z,Wan J F,Jiang Z X,Zhang J G, Li Z P, She Y Q. 2012. Sedimentary characteristics and model of

gravity flow deposition in the depressed belt of rift lacustrine basin: a case study from the Dongying Formation in Nanpu Depression. Earth Science Frontiers,19(1): 121-135]

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.[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]

杨仁超,何治亮,邱桂强,金之钧,孙冬胜,金晓辉. 2014. 鄂尔多斯盆地南部晚三叠世重力流沉积体系. 石油勘探与开发,41(6): 661-670. [Yang R C,He Z L,Qiu G Q,Jin Z J,Sun D S,Jin X H. 2014. Late Triassic gravity flow depositional systems in the southern Ordos Basin. Petroleum Exploration and Development,41(6): 661-670]

杨仁超,金之钧,孙冬胜,樊爱萍. 2015. 鄂尔多斯晚三叠世湖盆异重流沉积新发现. 沉积学报,33(1): 10-20. [Yang R C,Jin Z J,Sun D S,Fan A P. 2015. Discovery of hyperpycnal flow deposits in the Late Triassic lacustrine Ordos Basin. Acta Sedimentologica Sinica,33(1): 10-20]

张龙飞,白玉彬,闫新智,薛宁,李鹏程,赵靖舟,张宇轩. 2025. 吴起—定边地区延长组长 7 段深水沉积特征及沉积模式. 西安石油大学学报(自然科学版),40(3): 12-25. [Zhang L F,Bai Y B,Yan X Z,Xue N,Li P C,Zhao J Z,Zhang Y X. 2025. Deep-water sedimentary characteristics and sedimentary model of Chang 7 Member of Yanchang Formation in Wuqi-Dingbian Area. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition),40(3): 12-25]

赵靖舟,高振东,孟选刚,吴伟涛,白玉彬,曹磊,赵子龙. 2025. 鄂尔多斯盆地陕北地区延长组长 7-长 9 重力流沉积致密油富集条件与勘探潜力: 兼论拗陷型湖盆的石油勘探范式. 石油与天然气地质,46(5): 1367-1391. [Zhao J Z,Gao Z D,Meng X G,Wu W T,Bai Y B,Cao L,Zhao Z L. 2025. Geological conditions for tight oil enrichment and its exploration potential of gravity flow deposits from the 7th to 9th oil groups of the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin: discussion on the petroleum exploration paradigms of daonwarped lacustrine basins. Oil & Gas Geology, 46(5): 1367-1391]

朱筱敏,邓秀芹,刘自亮,孙勃,廖纪佳,惠潇. 2013. 大型坳陷湖盆浅水辫状河三角洲沉积特征及模式: 以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组为例. 地学前缘,20(2): 19-28. [Zhu X M,Deng X Q,Liu Z L,Sun B,Liao J J,Hui X. 2013. Sedimentary characteristics and model of shallow braided delta in large-scale lacustrine: an example from Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin. Earth Science Frontiers,20(2): 19-28]

朱筱敏. 2020. 沉积岩石学(第 5 版). 北京: 石油工业出版社,1-479. [Zhu X M. 2020. Sedimentary Petrology(5th edition). Beijing: Petroleum Industry Press,1-479]

邹才能,赵政璋,杨华,付金华,朱如凯,袁选俊,王岚. 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. [Zou C N,Zhao Z Z,Yang H,Fu J H,Zhu R K,Yuan X J,Wang L. 2009. Genetic mechanism and distribution of sandy debris flows in terrestrial lacustrine basin. Acta Sedimentologica Sinica,27(6): 1065-1075]

Bouma A H. 1962. Sedimentology of Some Flysch Deposits: A Graphic Approach to Facies Interpretation. Amsterdam: Elsevier, 168.

Folk R L,Ward W C. 1957. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. Journal of Sedimentary Research,27(1): 3-26.

Hampton M. 1975. Competence of fine-grained debris flows. Journal of Sedimentary Research,45(4): 834-844.

Kuenen P H,Migliorini C I. 1950. Turbidity currents as a cause of graded bedding. The Journal of Geology,58(2): 91-127.

Lowe D R. 1976. Grain flow and grain flow deposits. Journal of Sedimentary Research,46(1): 188-199.

Ma L,Huang Y,Wan H,Gong S L,Shi C L,Li Y B,Liu C,Chen Y Q,Duan M,Xiong Y. 2024. Insights into Asphaltene adsorption on sandstone surface by experiment and simulation: performance and mechanism investigation. Energy & Fuels,38(4): 3002-3019.

Normark W R. 1970. Growth patterns of deep sea fans. AAPG Bulletin, 54: 2170-2195.

Shanmugam G. 1996. High-density turbidity currents;are they sandy debris flows? Journal of Sedimentary Research,66(1): 2-10.

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(2): 285-342.

Shanmugam G. 2013. New perspectives on deep-water sandstones: implications. Petroleum Exploration and Development,40(3): 316-324.

Visher G S. 1969. Grain size distributions and depositional processes. Journal of Sedimentary Research,39(3): 1074-1106.

(责任编辑 郑秀娟 李新坡)