

鄂尔多斯盆地志丹地区延长组长7—长9油层组深水重力流沉积特征及含油性

陈伟涛^{1,2}, 赵靖舟^{1,2}, 高振东³, 李哲^{1,2}, 孟选刚³, 闫新智³, 董旭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:基于鄂尔多斯盆地志丹地区15口取心井的厘米级岩心精细描述、117口取样井的粒度分析数据、11口井的薄片鉴定结果以及23口试油井的日产油资料,系统论证了该地区三叠系延长组长7—长9油层组(长7—长9)的深水重力流沉积特征及其对油气分布的控制作用。研究结果表明:①研究区主要发育砂质碎屑流、浊流和滑动-滑塌3种深水重力流沉积类型,并以砂质碎屑流沉积为主。②砂质碎屑流沉积发育厚层块状砂岩,可见泥岩撕裂屑和泥包砾构造,分选与磨圆较好,粒度累积概率曲线表现为偏粗态的短尾两段式或一段式,粒径略粗于浊流沉积砂岩;浊流沉积发育不完整的鲍马序列,可见火焰状构造和底模构造,单砂层厚度小,砂岩粒度累积概率曲线主要为偏细的一段式;滑动-滑塌沉积以包卷层理、变形构造和同沉积阶梯状断层为典型特征。③储层物性与含油性分析表明,砂质碎屑流沉积砂体的物性总体优于浊流沉积,含油级别以油斑-油浸为主,含油饱和度较高,试油井日产油量也更大;而浊流沉积砂体含油性相对较差,以油斑-油迹为主,表明砂质碎屑流沉积砂体比浊流沉积砂体更有利于油气富集和产出。综合认为,鄂尔多斯盆地志丹地区三叠系延长组长7—长9普遍发育的砂质碎屑流沉积是研究区最有利的含油砂体沉积类型,应作为下一步油气勘探的重要靶区。

关键词:砂质碎屑流沉积;浊流沉积;深水重力流沉积;控油性;沉积砂体;延长组;志丹地区;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Characteristics and oil-bearing properties of deep-water gravity-flow deposits in the 7th-9th oil groups of the Yanchang Formation, Zhidan area, Ordos Basin

CHEN Weitao^{1,2}, ZHAO Jingzhou^{1,2}, GAO Zhendong³, LI Zhe^{1,2}, MENG Xuangang³, YAN Xinzhi³, Dong Xu³

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 3. Yanchang Oil Field Co., Ltd., Yan'an, Shaanxi 716000, China)

Abstract: Based on the centimeter-scale characterization of cores from 15 cored wells, grain size analyses of 117 sampled wells, observations of thin sections from 11 wells, and production test data from 23 wells, we systematically investigate the characteristics of deep-water gravity-flow deposits in the 7th–9th oil groups of the Triassic Yanchang Formation (also referred to as the Chang 7–9 oil groups) in the Zhidan area, Ordos Basin, as well as their controlling effects on hydrocarbon distribution. The results indicate that the study area primarily exhibits three types of deep-water gravity-flow deposits: sandy debris-flow deposits, turbidity current deposits, and slide-slump deposits, with the first type predominating. The sandy debris-flow deposits contain thick-bedded massive sandstones, with rip-up clasts and mud-coated intraclasts observed. They are generally well sorted and rounded, and their grain-size cumulative probability curves show short-tailed two-segment or one-segment patterns with a coarse-skewed distribution, exhibiting slightly coarser grains than those observed in the turbiditic sandstones. The turbidity current deposits feature incomplete Bouma sequences, displaying flame structures, sole marks, and small single-layer sand thicknesses. Their grain-size cumulative probability curves primarily show a fine-skewed one-segment pattern. The slide-slump deposits are typically

收稿日期:2025-06-11;修回日期:2025-08-06。

第一作者简介:陈伟涛(2002—),男,硕士研究生,地质资源与地质工程。E-mail: 3218828010@qq.com。

通信作者简介:赵靖舟(1962—),男,教授,油气成藏与非常规油气地质学。E-mail: jzzhao@xsyu.edu.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05050)。

characterized by the presence of convolute beddings, deformation structures, and syndimentary stepped faults. Analyses of reservoir properties reveal that the sandy debris-flow deposits generally possess better physical properties than the turbidity current deposits. Furthermore, the oil-bearing grades of the sandy debris-flow deposits are dominated by oil stains to oil immersion, resulting in relatively high oil saturation and high daily oil production during production tests. In contrast, the turbidity current deposits exhibit poorer oil-bearing properties, primarily limited to oil stains to oil traces. These findings suggest that the sandy debris-flow deposits are more favorable to hydrocarbon enrichment and production than the turbidite-flow counterparts. Overall, the comprehensive analysis indicates that within the Chang 7–9 oil groups, Zhidan area, Ordos Basin, the widely distributed sandy debris-flow deposits represent the most favorable oil-bearing sand body type and should therefore be prioritized as significant targets for future hydrocarbon exploration.

Key words: sandy debris-flow deposits, turbidity current deposits, deep-water gravity-flow deposits, control on oil-bearing property, Sedimentary Sandbody, Yanchang Formation, Zhidan area, Ordos Basin

引用格式:陈伟涛,赵靖舟,高振东,等. 鄂尔多斯盆地志丹地区延长组长7—长9油层组深水重力流沉积特征及含油性[J]. 石油与天然气地质, 2025,46(5):1466–1484. DOI:10.11743/ogg20250506.

CHEN Weitao, ZHAO Jingzhou, GAO Zhendong, et al. Characteristics and oil-bearing properties of deep-water gravity-flow deposits in the 7th-9th oil groups of the Yanchang Formation, Zhidan area, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2025,46(5):1466–1484. DOI:10.11743/ogg20250506.

深水重力流沉积是指发育于深湖或深海环境中,受重力驱动、富含沉积物的高密度流体沿斜坡向下运动的流体动力学过程^[1]。Dott^[2]于1936年基于流变学特征将重力流划分为弹性流、塑性流和黏性流; Middleton^[3]和 Hampton^[4]于1973年根据流体支撑机制进一步将其划分为碎屑流、颗粒流、浊流和液化流4类; Normark^[5]于1978年依据浊流的形态和沉积特征,将其划分为高密度浊流和低密度浊流;李相博等^[6]则根据重力流的形成机制将其分为砂质碎屑流、浊流和滑塌沉积3种类型。砂质碎屑流的概念最早由 Shanmugam 于20世纪90年代提出^[7-8],并在2003年通过水槽实验进一步指出,碎屑颗粒由紊流支撑,碎屑流为具塑性特征的层状流,并认为高密度浊流所形成的沉积应该为砂质碎屑流^[9]。砂质碎屑流是一种具有塑性行为的层状流^[10],沉积物以连续性的块体状态被流体搬运,岩性主要为砂岩和粉砂岩,单砂体厚度一般大于0.5 m,最大可达十余米,平面展布呈不规则舌状体,剖面上多表现为块状构造^[11-12]。浊流是一种呈湍流状态、具有牛顿流体特性的沉积物重力流^[13],其水、泥和砂等组分近于均匀混合,是由湍流支撑的水体底部的浑浊流^[14]。在重力作用下,浊流沉积物沿水下斜坡或峡谷流动,是一种含大量悬浮固体颗粒的高密度流,其单砂层厚度一般小于0.5 m^[15]。滑动-滑塌沉积是一种连续的半固结团块状沉积物沿上凹的滑动面移动并引发内部结构变形的过程。其中,滑动沉积是沉积物沿着不连续剪切面发生崩塌,内部很少发生形变或转动,沉积物层理连续,基本上未变形,底部可见塑性变形;而滑塌沉积是沉积物沿着不连续剪切面崩塌的产物,伴

有转动,内部发生形变,沉积物具有流动构造^[16]。

鄂尔多斯盆地三叠系延长组深水重力流沉积最早发现于20世纪80年代初,吴崇筠和刘宝珺等1980年在陕西铜川炭沟露头剖面长(延长组)7油层组(长7)油页岩上覆层段中识别出一套浊积岩,可见厚度达36 m^[17](由此判断该套浊积岩属于长7)。随后,文应初^[17]在盆地内部陇东地区钻井岩心的上三叠统延长组三段(T_3y^3)[长4+5油层组(长4+5)—长7]中也发现了浊积岩。进入21世纪以来,延长组重力流沉积的发现不断增多,陈全红等^[18]在盆地西南合水地区长6油层组(长6)和长7中发现了浊积岩;李相博等^[6]在合水地区长6识别出3种类型的沉积物重力流,并讨论了砂质碎屑流沉积的含油性;付金华等^[19]指出鄂尔多斯盆地重力流砂体主要发育在盆地陡坡带,叠置砂体构成有利的甜点区,具备显著的勘探潜力;王岚等^[20]系统讨论了鄂尔多斯盆地白豹和合水地区长7的深水重力流沉积类型与模式,并对其控制因素进行了讨论分析;尹虎等^[21]对盆地东南部长7的深水沉积特征及演化规律进行了研究,认为该区湖底扇包括浊流沉积和砂质碎屑流沉积2种重力流类型;刘显阳等^[22]、杨仁超等^[23]与张国栋等^[24]提出,在鄂尔多斯盆地西南部长7³油层亚组发育异重流等多种深水重力流类型,并建立了相应的沉积模式与成因机制;近期,张军等^[25]在富县地区长7识别出砂质碎屑流、浊流和滑动-滑塌沉积3类深水重力流沉积,并对其储层控油性进行了研究。

然而,总体来看,鄂尔多斯盆地以往发现的重力流沉积主要分布于西南物源控制的陇东地区,层位以长7

为主,长6次之。相比之下,东北物源影响的陕北地区重力流沉积则发现较少,传统观点认为该区域(包括本文研究区志丹地区)延长组以三角洲沉积为主^[26-27]。此外,以往对志丹地区延长组沉积环境与沉积相的研究主要集中在主力油层组长6及以上层位;由于勘探程度较低,针对长7—长9油层组(长9)沉积环境与沉积相的研究相对薄弱,且认识存在分歧。在为数不多的公开发表文献中,张家强等^[28]指出志丹地区长8油层亚组以三角洲前缘沉积为主,而张译丹等^[29]基于多口井岩心观察,认为志丹—富县地区长8油层组(长8)发育半深湖相风暴沉积。近期,李哲^[30]提出研究区长8—长9存在深水重力流沉积,但其分布主要集中在志丹地区西南部,东北部仍以三角洲沉积为主。

近年来,随着研究区延长组下组合长7—长9致密油与页岩油勘探开发日益受到重视,钻井取心等基础资料日益增多。基于此,笔者对研究区延长组下组合开展了系统的沉积特征研究,首次在志丹地区三叠系延长组长7—长9发现了广泛分布的深水重力流沉积。本文以15口取心井厘米级精度的岩心观察与描述、117口取样井粒度分析资料以及11口井薄片鉴定

结果为基础,对志丹地区长7—长9深水重力流沉积进行了全面论证,并分析了其对油气富集与产出的控制作用。

1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地是中国陆上第二大沉积盆地,横跨陕西、甘肃、宁夏、内蒙古和山西5个省区,总面积约为 $37 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。盆地北跨乌兰格爾基岩凸起,与河套盆地为邻;南越渭北挠褶带,与渭河盆地接壤;东部与晋西挠褶带和吕梁隆起相连;西经掩冲构造带,与六盘山和银川盆地对峙。盆地内可划分为6个主要构造单元:伊盟隆起、天环坳陷、伊陕斜坡、渭北隆起、西缘冲断带和晋西挠褶带(图1a)。

鄂尔多斯盆地在三叠系延长组沉积时期发育为一个大型坳陷型湖盆,长7—长10沉积期为湖盆形成与扩张阶段,整体表现为基准面上升的沉积旋回。长9地层厚度为90~120 m,该时期发生了晚三叠世第一次湖侵,形成了延长组第一套生油层系——李家畔页岩。长8地层厚度为70~85 m,岩性以细砂岩为主,局

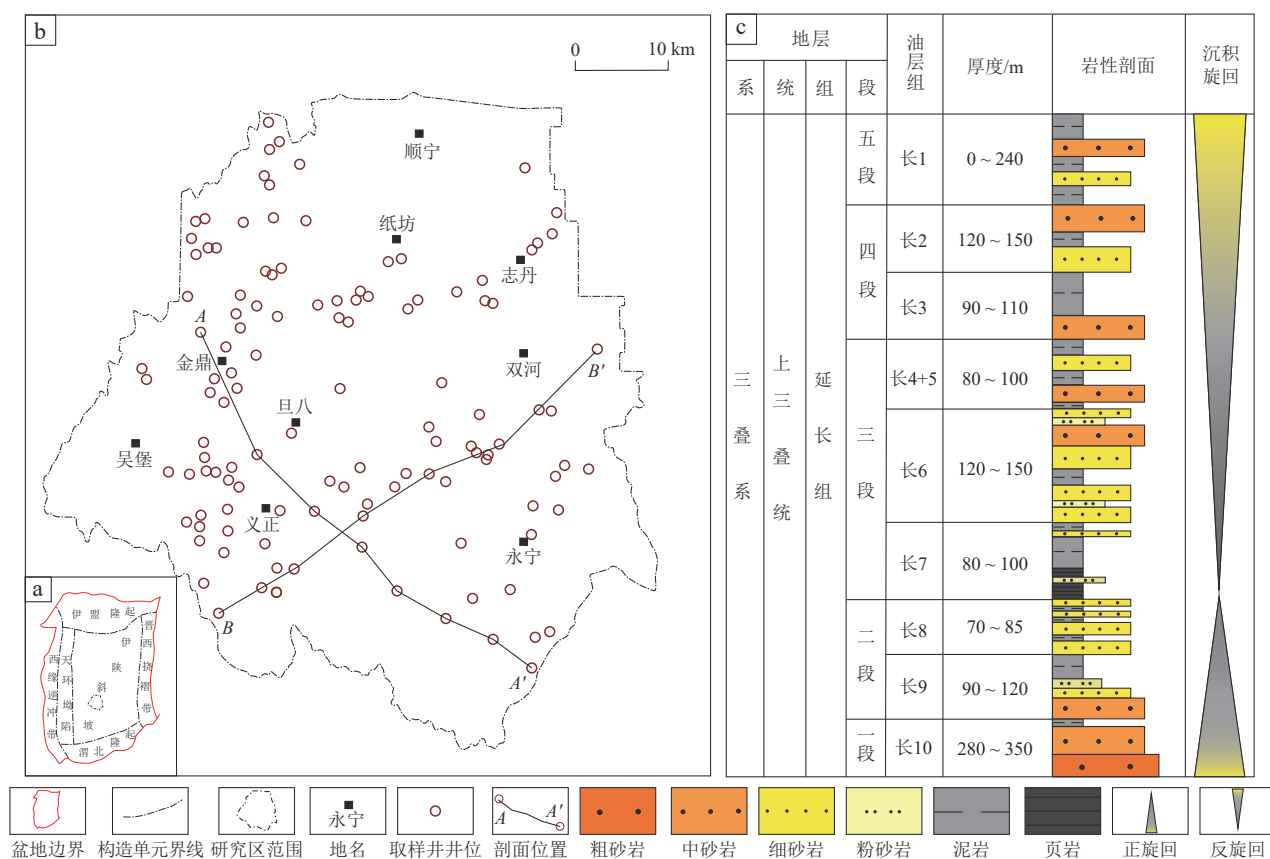


图1 鄂尔多斯盆地志丹地区地理位置图(a)、井位分布(b)和延长组综合柱状图(c)^[31]

Fig. 1 Geographic location (a) and well distribution (b) maps and composite stratigraphic column of the Yanchang Formation (c), Zhidan area, Ordos Basin^[31]

部发育暗色泥页岩沉积(图1c)。长7地层厚度为80~100 m,该沉积时期湖盆面积最广,沉积了一套广泛分布的黑色泥页岩——张家滩页岩,是鄂尔多斯盆地最重要的生油岩。

志丹地区地处鄂尔多斯盆地伊陕斜坡西南部(图1a),东部与安塞县交界,西北部与吴起县和靖边县接壤,东南部与甘泉县和富县相连,县域总面积3 781 km²,其中延长油田所辖志丹采油厂的资源面积为2 642 km²。研究区地势总体由西北向东南倾斜,平均海拔介于1 000~1 600 m。截至2022年底,该区已探明含油面积974.81 km²,探明石油地质储量5.09×10⁸ t,年产油量超过230×10⁴ t。含油层系包括侏罗系延安组和三叠系延长组,共包括11个含油层系。主力油层为长4+5和长6,其储量占总探明储量的77%,产量占比达71%。近年来,在延长组下组合的长7、长8以及长9等层系不断取得勘探突破,展示了下组合良好的勘探潜力。

2 重力流沉积主要类型及其特征

本次研究基于15口取心井的厘米级岩心观察、117口取样井的粒度分析资料以及11口井的薄片观察分析,在志丹地区延长组长7—长9共识别出3种深水重力流沉积:砂质碎屑流沉积、浊流沉积和滑动—滑塌沉积。

2.1 砂质碎屑流沉积及其特征

研究区长7—长9砂质碎屑流沉积的主要识别证据包括:①广泛发育的块状层理,单砂层厚度普遍大于0.5 m,常见厚度可达数米,最大厚度超过10 m,是典型的砂质碎屑流沉积指示标志(图2a—f);②发育泥砾及泥砾结构(图2g,h)。

沉积物的粒度特征可以指示其沉积环境与水动力条件,其中粒度累积概率曲线和C-M图(C代表粗颗粒尾端粒径,通常指粒度累积概率曲线上对应1%的粒径 Φ 值;M代表中值粒径,指粒度累积概率曲线上对应50%的粒径 Φ 值。)特征是判断沉积环境的重要依据^[32]。以往研究认为,砂质碎屑流沉积的累积概率曲线具有明显的两段式,浊流沉积多表现为一段式,两者在斜率及粒径范围上具有不同特征^[33-35]。本文在岩心观察及对应粒度资料对比分析的基础上,系统总结了不同类型重力流沉积的粒度特征,包括累积概率曲线形态。结果表明,砂质碎屑流沉积在粒度累积概率曲线上多呈偏粗的短尾两段式或偏粗的一段式(图3a₁,b₁),其粗端起点粒径 Φ 值分布于1.00~3.00,平均值为3.28;而浊流沉积则主要表现为偏细的一段式(图3c₁,d₁),粗端起点粒径 Φ 值多大于3.00,平均值为3.87。

研究区长7—长9砂质碎屑流沉积具有如下粒度特征(图4):累积概率曲线主要呈两段式,跳跃次总体含量占绝对优势,占比在99%以上,悬浮次总体占比极低,通



图2 鄂尔多斯盆地志丹地区长8—长9油层组砂质碎屑流沉积典型井岩心照片

Fig. 2 Core photos of sandy debris-flow deposits in the Chang 8-9 oil groups from representative wells in the Zhidan area, Ordos Basin
a. S909井,埋深1 639.56 m,长8,细砂岩,块状层理;b. YJ603井,埋深1 869.78 m,长8,细砂岩,块状层理;c. ZT277井,埋深1 884.75 m,长8,细砂岩,块状层理;d. YJ603井,埋深2 023.86 m,长9,细砂岩,块状层理;e. Z4005井,埋深1 890.49 m,长8,粉砂岩,块状层理;f. Z198井,埋深1 681.03 m,长8,细砂岩,块状层理;g. Z4005井,埋深1 891.47 m,长8,粉砂岩,泥砾发育;h. Z4005井,埋深1 891.36 m,长8,粉砂岩,泥砾发育

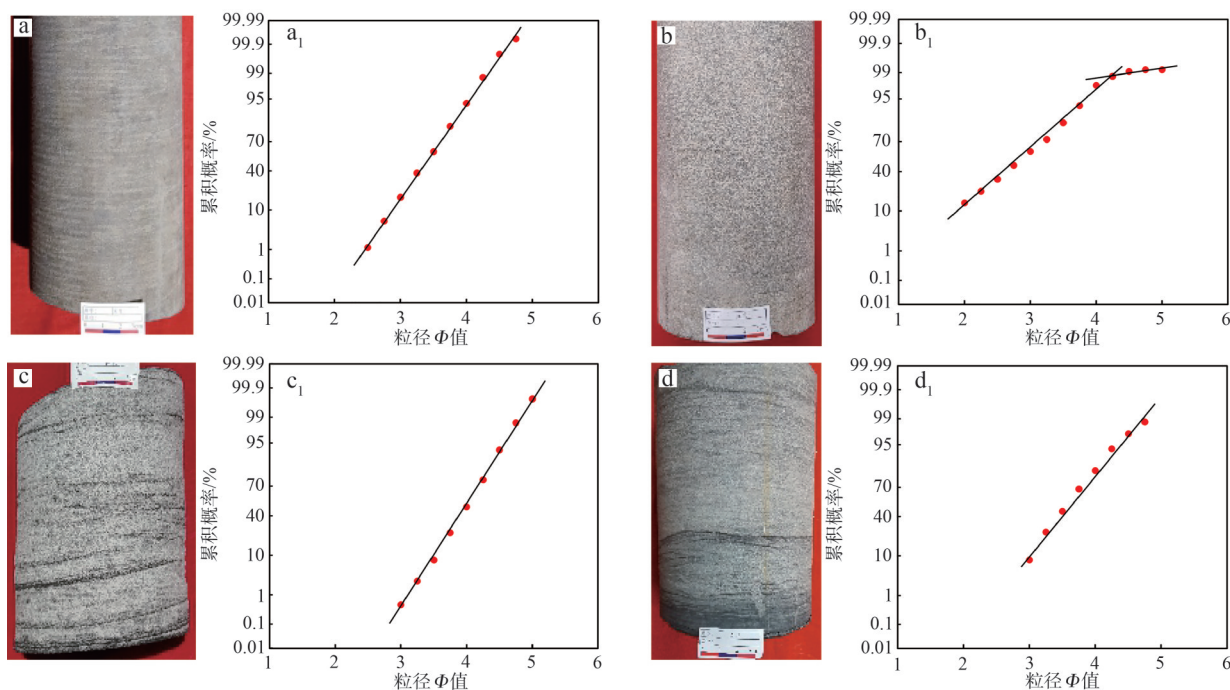


图3 鄂尔多斯盆地志丹地区长8—长9油层组砂质碎屑流沉积和浊流沉积岩心照片与对应累积概率曲线特征

Fig. 3 Core photos and grain-size cumulative probability curves of sandy debris-flow deposits and turbidity current deposits in the Yanchang Formation, Zhidan area, Ordos Basin

a. ZT277井,埋深1 883.73 m,长8,砂质碎屑流沉积,块状层理,岩心照片;a₁. a图样品对应累积概率曲线;b. Z198井,埋深1 680.73 m,长8,砂质碎屑流沉积,块状层理,岩心照片;b₁. b图样品对应累积概率曲线;c. F672井,埋深2 181.54 m,长9,浊流沉积,鲍马序列,岩心照片;c₁. c图样品对应累积概率曲线;d. S909井,埋深1 710.42 m,长9,浊流沉积,鲍马序列,岩心照片;d₁. d图样品对应累积概率曲线

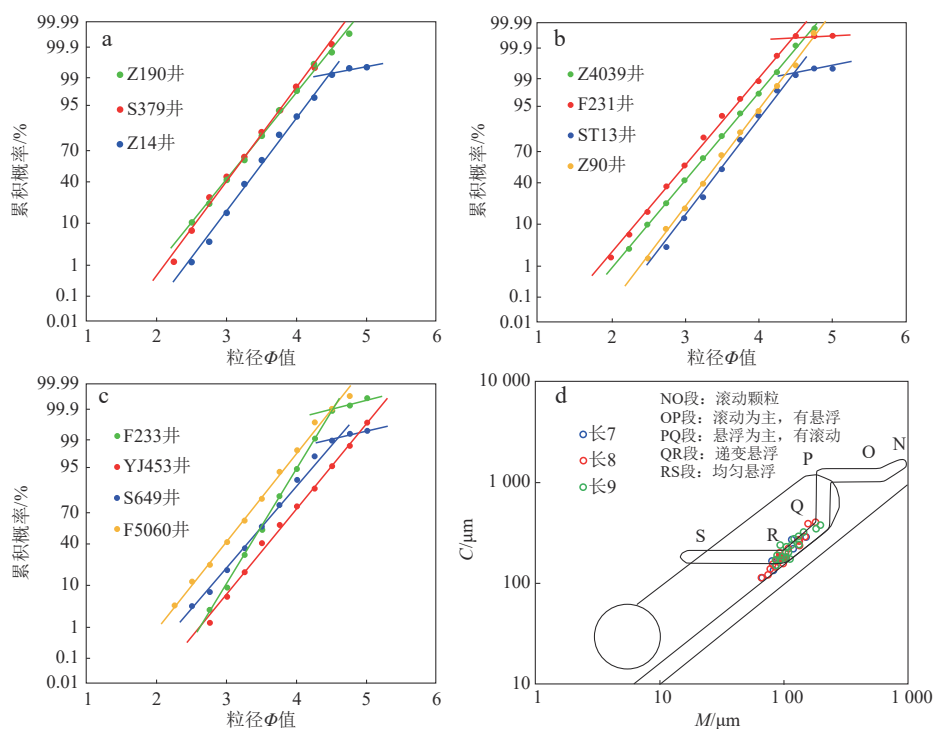


图4 鄂尔多斯盆地志丹地区长7—长9油层组砂质碎屑流沉积典型井累积概率曲线及C-M图

Fig. 4 Grain-size cumulative probability curves of representative wells and C-M diagram for sandy debris-flow deposits in the Chang 7–9 oil groups, Zhidan area, Ordos Basin

a. 长7累积概率曲线;b. 长8累积概率曲线;c. 长9累积概率曲线;d. 长7—长9C-M图

(C-M图中C代表粗颗粒尾端粒径,通常指粒度累积概率曲线上对应1%的粒径 ϕ 值;M代表中值粒径,指粒度累积概率曲线上对应50%的粒径 ϕ 值。)

常不足1%,且其线段具有短而平的特征,粒径 Φ 值多在4~5,故称此类型为“短尾两段式”;一段式曲线粒径 Φ 值区间范围较大,整体位于1~5,斜率分布在 $50^{\circ} \sim 60^{\circ}$,以粒径范围大和粒径略偏粗而有别于浊流沉积的一段式。对砂质碎屑流沉积的C-M图分析发现:样品的M值介于 $65.7 \sim 196.6 \mu\text{m}$,平均值为 $109.6 \mu\text{m}$;C值介于 $112.3 \sim 403.4 \mu\text{m}$,平均值为 $202.2 \mu\text{m}$ 。该C-M图样式反映出研究区砂质碎屑流沉积具有递变悬浮搬运沉积的特点。

2.2 浊流沉积及其特征

研究区浊流沉积在岩心尺度上主要表现为:①具有不完整的鲍马序列(图5a—c,e);②砂岩厚度薄,单砂层厚度小于0.5 m,叠置砂体厚度可达几米;③可见火焰状构造(图5d,g);④局部可见垂直虫孔(图5f)。

就浊流沉积而言(图6),研究区长7—长9浊流沉积的累积概率曲线表现为一段式,反映以悬浮总体为主。其粒度区间较砂质碎屑流沉积小,粒径 Φ 值主要介于3~5,起始端约为3,较砂质碎屑流粒度偏细;斜率介于 $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$,分选性优于砂质碎屑流沉积。浊流沉积的样品C值在 $83.5 \sim 194.6 \mu\text{m}$,平均值为 $123.53 \mu\text{m}$;M值在 $49.7 \sim 80.2 \mu\text{m}$,平均值为 $67.5 \mu\text{m}$ 。其C值和

M值均小于砂质碎屑流沉积,说明浊流沉积的粒度较细。样品的C-M数据点大致平行于 $C=M$ 基线,为典型浊流沉积特征^[36]。

碎屑岩的结构是重建古沉积环境的关键指标。沉积物分选性反映沉积物的水动力环境,磨圆度反映沉积物的搬运距离^[16]。以往研究认为深水重力流沉积因快速搬运与堆积,通常表现为分选差和磨圆度低(棱角状—次棱角状)^[21]。砂质碎屑流以黏性基质裹挟颗粒碎屑搬运沉积,因此分选差、磨圆度低;浊流沉积具正粒序层理^[3],头部分选差且磨圆不好,尾部细粒稍均一但整体仍弱于水成沉积。但镜下薄片分析显示,研究区深水重力流沉积具有分选好、磨圆程度为棱角状—次圆状的特点(图7)。

沉积物的标准偏差(σ_1 ,无量纲)是表示沉积物分选程度的参数,反映了颗粒大小的均匀程度。其表征函数通常使用福克和沃德提出的标准偏差公式^[32]:

$$\sigma_1 = \frac{\Phi_{84} - \Phi_{16}}{4.0} + \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{6.6} \quad (1)$$

式中: Φ_{84} , Φ_{16} , Φ_{95} 和 Φ_5 分别表示累积概率曲线上颗粒累积概率为84%,16%,95%和5%处所对应的粒径 Φ 值,无量纲。

根据 σ_1 的计算结果,分选性可划分为以下等级:

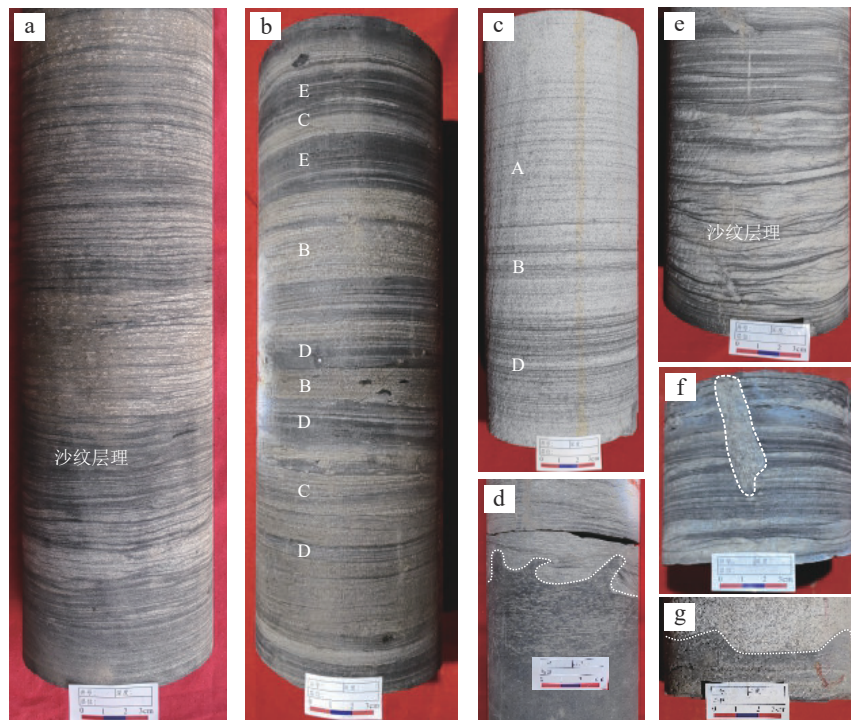


图5 鄂尔多斯盆地志丹地区长8油层组浊流沉积典型井岩心照片

Fig. 5 Core photos of turbidity current deposits in the Chang 8 oil groups from representative wells in the Zhidan area, Ordos Basin

a. S1099井,埋深1 706.32~1 706.55 m,沙纹层理;b. ZT277井,埋深1 877.47~1 877.78 m,鲍马序列;c. S380井,埋深1 792.00 m,鲍马序列;d. S1099井,埋深1 702.23 m,火焰状构造;e. F861井,埋深2 041.67 m,沙纹层理;f. F861井,埋深2 041.9 m,垂直虫孔;g. F861井,埋深2 041.62 m,火焰状构造

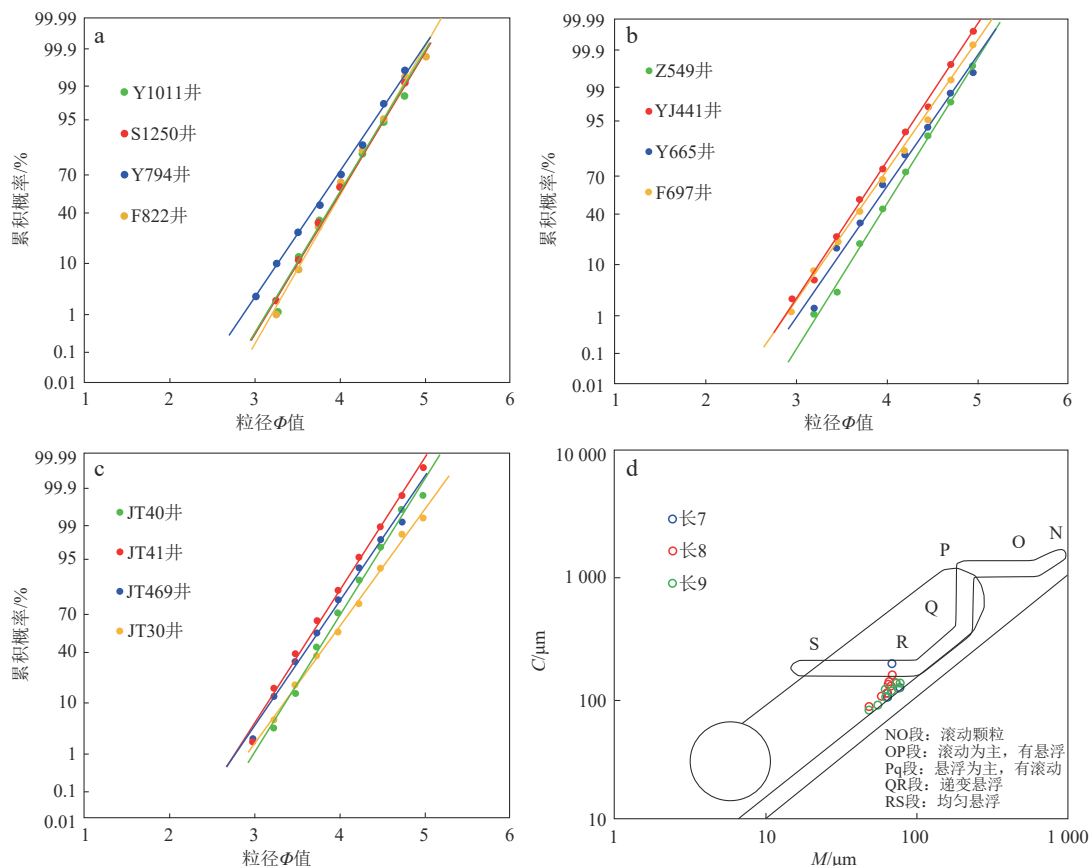


图6 鄂尔多斯盆地志丹地区长7—长9油层组浊流沉积典型井累积概率曲线及C—M图

Fig. 6 Grain-size cumulative probability curves of representative wells and C—M diagram for turbidity current deposits in the Chang 7—9 oil groups, Zhidan area, Ordos Basin

a. 长7累积概率曲线; b. 长8累积概率曲线; c. 长9累积概率曲线; d. 长7—长9 C—M图

(C—M图中的C代表粗颗粒尾端粒径,通常指粒度累积概率曲线上对应1%的粒径 ϕ 值;M代表中值粒径,指粒度累积概率曲线上对应50%的粒径 ϕ 值。)

① $\sigma_1 < 0.35$,分选极好;② $\sigma_1 = 0.35 \sim 0.50$,分选好;③ $\sigma_1 = 0.50 \sim 0.71$,分选较好;④ $\sigma_1 = 0.71 \sim 1.00$,分选中等;⑤ $\sigma_1 = 1.00 \sim 2.00$,分选较差;⑥ $\sigma_1 = 2.00 \sim 4.00$,分选差;⑦ $\sigma_1 \geq 4.00$,分选极差。

对研究区粒度资料统计发现(图8),砂质碎屑流沉积平均粒径 ϕ 值为3.28,浊流沉积的粒径更细,平均粒径 ϕ 值为3.87。砂质碎屑流沉积与浊流沉积的标准偏差分别为0.48和0.36,表明浊流沉积分选性好于砂质碎屑流沉积,偏度反映了粒度分布的对称性^[32],砂质碎屑流与浊流沉积的平均偏度分别为0.31和0.14,二者均属于正偏度。砂质碎屑流沉积与浊流沉积的砂体尖度均大于3,属于非常尖锐。

2.3 滑动—滑塌沉积及其特征

研究区长7—长9滑动—滑塌沉积岩性以粉砂质泥岩和泥质粉砂岩为主,沉积厚度多小于0.5 m。岩心观察可见:①变形构造发育,主要有揉皱层理、滑塌构造、球枕构造和液化变形构造,为滑动—滑塌沉积主要判识

标志(图9a—f,j);②发育砂质注入体,指示沉积物处于半固结状态,在一定的触发机制下沿着滑动面做平移剪切运动(图9g,h);③局部可见阶梯状断层(图9b,d)。

3 深水重力流沉积分布特征

综合研究区岩心观察与粒度分析等资料,认为长7—长9各层段在研究区均广泛发育重力流沉积,但不同层段重力流沉积类型和空间分布等存在一定差异。

3.1 单井相与连井剖面对比分析

根据单井相分析结果,研究区长7—长9发育砂质碎屑流沉积、浊流沉积以及滑动—滑塌沉积(图10)。结合单井相分析以及垂合物源(YJ453井—YT205井)和顺物源(Z550井—ST278井)的两条连井剖面沉积相对比图可见(图11),研究区各层段重力流沉积砂体普遍具有多期叠置特征,且砂质碎屑流沉积较浊流沉积更为发育,具体表现为砂质碎屑流沉积砂体厚度多大

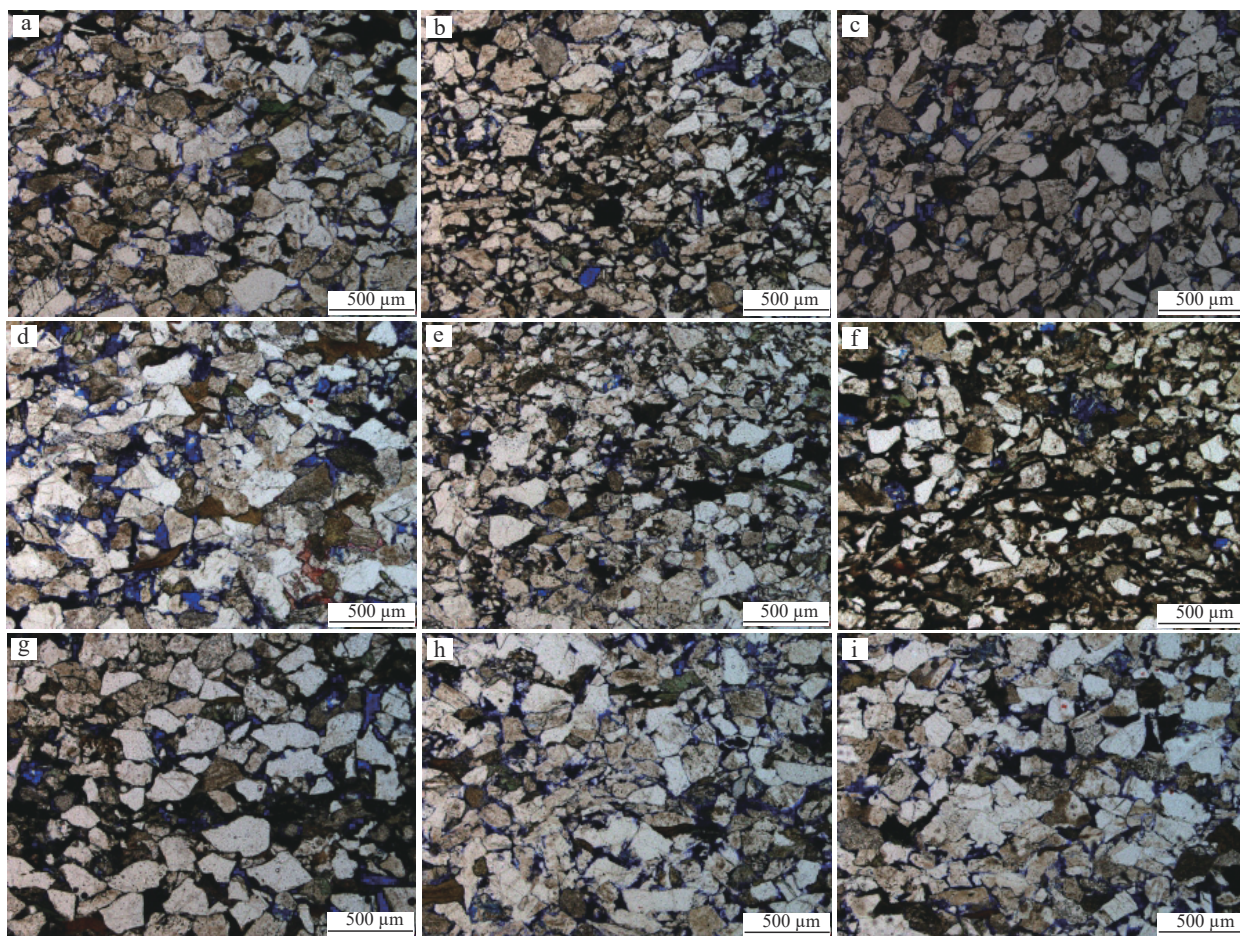


图7 鄂尔多斯盆地志丹地区长7—长8油层组深水重力流沉积普通薄片镜下照片

Fig. 7 Microscopic images of thin sections of deep-water gravity-flow deposits in the Chang 7–8 oil groups, Zhidan area, Ordos Basin
a. YJ603井,埋深1 810.01 m,长7,细砂岩;b. Z4005井,埋深1 892.58 m,长7,细砂岩;c. Z4005井,埋深1 890.19 m,长7,细砂岩;d. F228井,埋深1 692.90 m,长8,细砂岩;e. YT245井,埋深1 504.74 m,长8,细砂岩;f. YT245井,埋深1 504.87 m,长8,细砂岩;g. Z198井,埋深1 608.01 m,长7,细砂岩;h. F861井,埋深2 047.65 m,长7,细砂岩;i. F861井,埋深2 043.56 m,长7,细砂岩

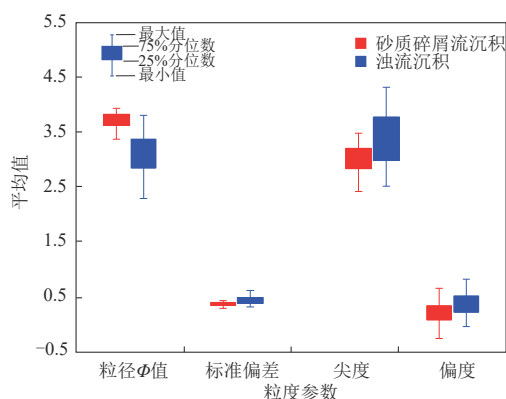


图8 鄂尔多斯盆地志丹地区长7—长9油层组砂质碎屑流沉积与浊流沉积粒度参数对比

Fig. 8 Comparison of grain size parameters between sandy debris-flow deposits and turbidity current deposits in the Chang 7–9 oil groups, Zhidan area, Ordos Basin

于浊流沉积,最大连续厚度可超过10 m,并表现出更好的连通性。

3.2 深水重力流沉积平面分布特征

在沉积相平面分布研究中,通常需编制目的层的沉积相平面分布图,而该图的绘制是以沉积环境或沉积相类型为前提,然而,本研究目前面临的问题是研究区究竟是重力流沉积还是传统认为的三角洲沉积。在各类相标志中,最能够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,而研究区粒度资料比较丰富,且正如上述,粒度资料能够区别重力流沉积的类型。故本文以粒度累积概率曲线类型平面分布图为主,结合岩心观察,对研究区长7—长9重力流沉积的分布特征进行了分析。

3.2.1 长7重力流沉积分布特征

从取样井粒度累积概率曲线的类型和平面分布可以看出(图12),重力流沉积在研究区普遍发育。其累积概率曲线多以一段式为主,其次为短尾两段式,未见三

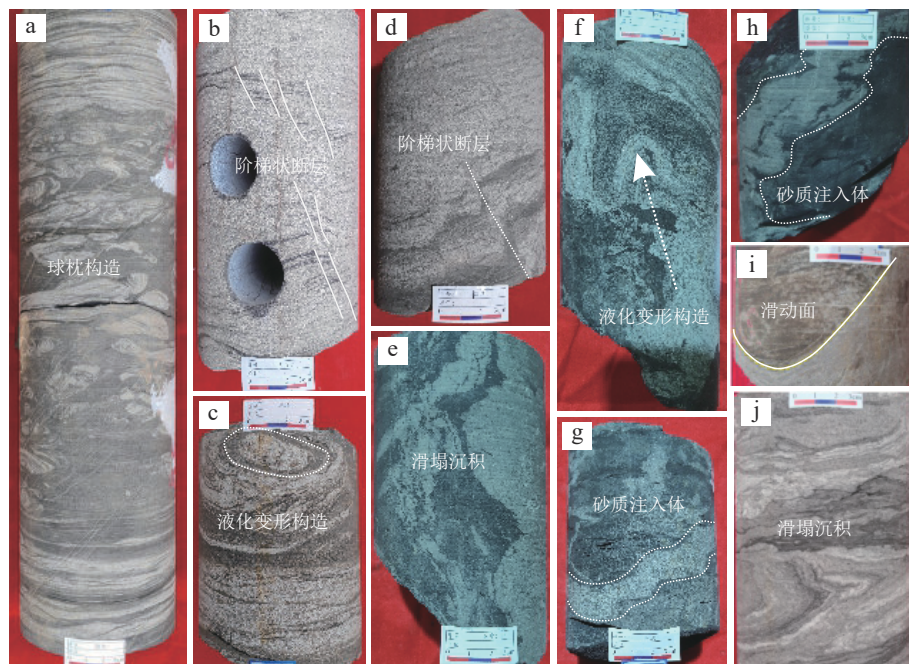


图9 鄂尔多斯盆地志丹地区长7—长9油层组滑动-滑塌沉积典型井岩心照片(i图和j图引自参考文献[37])

Fig. 9 Core photos of slide-slump deposits in the Chang 7-9 oil groups from representative wells in the Zhidan area, Ordos Basin

(Figs. i and j from reference [37])

a. S1099井,埋深1 667.25 m,长8,泥质粉砂岩,球枕构造;b. S380井,埋深1 878.21 m,长9,粉砂岩,阶梯状断层;c. S909井,埋深1 643.64 m,长8,粉砂质泥岩,液化变形构造;d. F5419井,埋深2 005.81 m,长8,粉砂质泥岩,阶梯状断层;e. F5419井,埋深2 076.37 m,长9,粉砂质泥岩,滑塌沉积;f. F5419井,埋深2 072.33 m,长9,粉砂质泥岩,液化变形构造;g. Z4005井,埋深1 955.41 m,长9,粉砂质泥岩,砂质注入体;h. F5419井,埋深2 077.77 m,长9,粉砂质泥岩,砂质注入体;i. YJ358井,埋深1 725.85 m,长7,粉砂岩,滑动面;j. YJ491井,埋深1 867.41 m,长7,粉砂岩,滑塌沉积

角洲沉积所具有的典型两段式曲线。而且,除北部F822井和南部Y1011井等少数井为浊流沉积的一段式外,研究区广大地区砂岩的粒度累积概率曲线均表现为粒径范围大、粗端起点粒径 Φ 值在2~3之间的一段式和短尾两段式等砂质碎屑流沉积特征,反映研究区长7砂岩主要为砂质碎屑流沉积,局部发育浊流沉积。

3.2.2 长8重力流沉积分布特征

研究区长8砂岩的粒度累积概率曲线也普遍为短尾两段式和一段式两种形态(图13),同样未见三角洲沉积那种典型的两段式曲线,反映重力流沉积在研究区长8也十分普遍。由累积概率曲线及岩心平面分布图来看(图13),除西南部的ZT287井和Z509井等个别井表现为浊流沉积的一段式外,研究区广大地区的粒度累积概率曲线均表现为粒径范围大、粗端起点粒径 Φ 值在2~3之间的一段式和短尾两段式等砂质碎屑流沉积曲线特征,且发育块状层理,反映研究区长8砂岩主要为砂质碎屑流沉积,局部发育浊流沉积。

3.2.3 长9重力流沉积分布特征

研究区长9砂岩累积概率曲线具有短尾两段式和

一段式两种形态(图14),亦未见三角洲沉积典型的两段式,反映重力流沉积在研究区长9同样十分普遍。由累积概率曲线和岩心平面分布图来看(图14),长9砂质碎屑流沉积远较浊流沉积发育。

3.2.4 沉积相平面分布

研究区沉积相平面展布图显示(图15),志丹地区沉积砂体展布有别于传统三角洲沉积,砂体形状不规则,无明显边界,表现为深水重力流沉积特征。

志丹地区长7¹油层亚组西北部与南部发育大面积的湖底扇沉积,研究区中部砂体不发育,主要发育半深湖-深湖泥(图15a);长7²和长7³油层亚组砂体规模有所减小,半深湖-深湖泥面积增加。长8¹和长8²油层亚组砂体更为发育,湖底扇规模也有所增加(图15c,d)。长9¹与长9²油层亚组湖底扇沉积主要分布在研究区中部,分布范围广(图15e,f)。

4 深水重力流沉积控储及控油作用

深水重力流沉积砂体因其往往紧邻烃源岩发育,具有较好的成藏条件,因而常作为常规和非常规油气

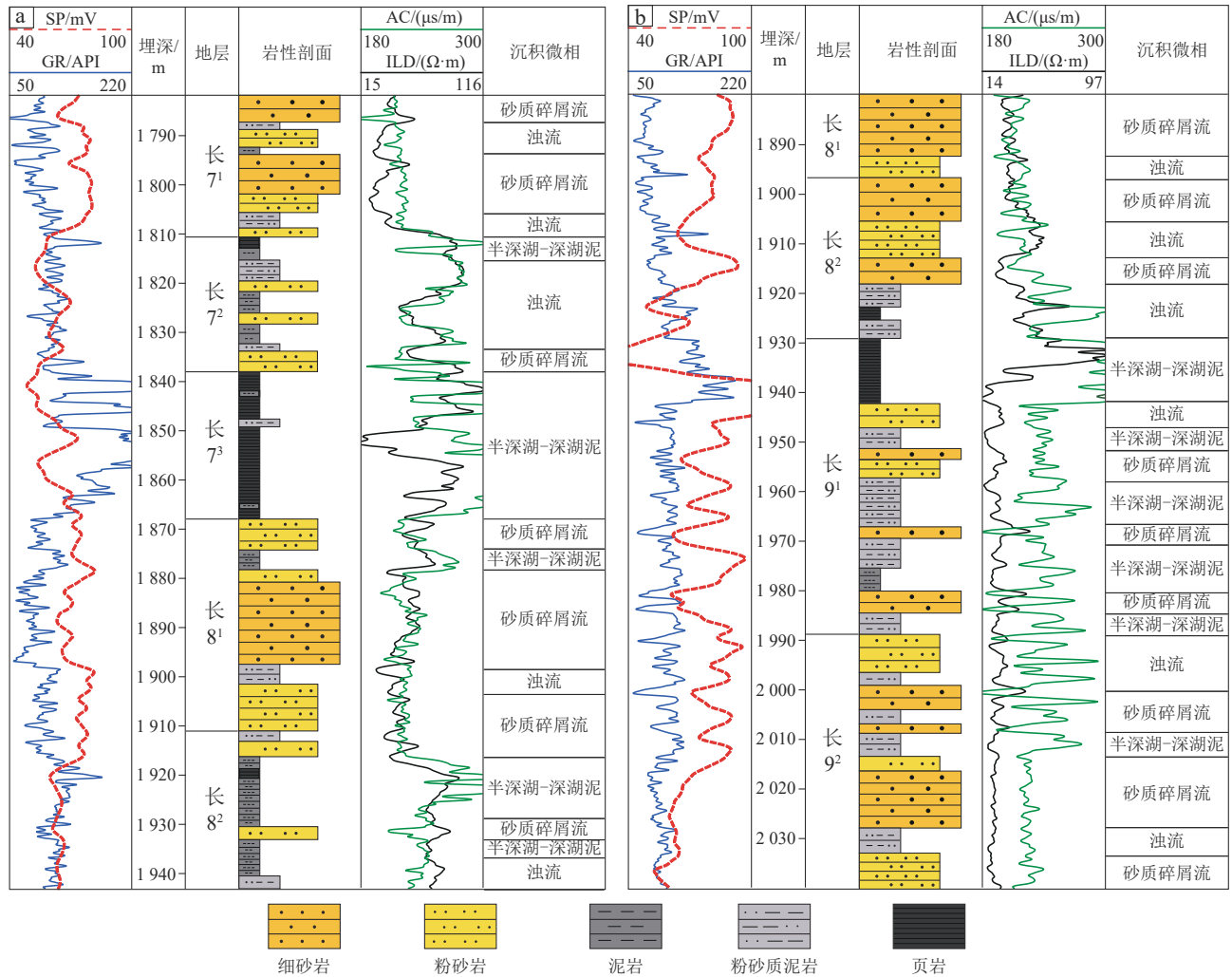


图10 鄂尔多斯盆地志丹地区长7—长9油层组典型单井相解释剖面

Fig. 10 Typical single-well interpretations of deep-water gravity-flow deposits in the Chang 7-9 oil groups, Zhidan area, Ordos Basin
a. Z4005井; b. YJ603井

勘探的重要对象之一^[38-40]。目前,鄂尔多斯^[25, 41]、松辽^[42]、准噶尔^[43]、渤海湾^[44-45]和四川盆地^[46]等均在深水重力流沉积形成的砂体中发现了储量可观的油气藏,展示了深水重力流沉积良好的勘探前景。下面就研究区深水重力流沉积对储层和成藏的控制作用加以分析。

4.1 深水重力流沉积对储层的控制作用

不同类型的深水重力流沉积其物性具有显著差异。根据研究区92个物性样品(砂质碎屑流沉积51个、浊流沉积41个)统计结果,砂质碎屑流沉积砂体的物性明显优于浊流砂体(图16a)。具体而言,砂质碎屑流沉积的砂体孔隙度分布在3.80%~15.50%、平均值为9.64%,渗透率分布在 $(0.07 \sim 1.69) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、平均值为 $0.56 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;浊流沉积砂体孔

隙度分布在3.80%~8.10%、平均值为5.68%,渗透率分布在 $(0.09 \sim 1.60) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、平均值为 $0.33 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

4.2 深水重力流沉积对含油性的控制作用

研究区15口取样井岩心观察结果表明,长7—长9含油性整体以干层—油浸级别为主,但不同深水重力流沉积砂体含油性不同(图17,图18a)。其中砂质碎屑流沉积的砂体含油级别多为油浸(图17a, f)、油斑(图17b),而浊流沉积的砂体以油斑(图17d)和油迹(图17c)为主。荧光薄片的荧光显示强度也可以反映其含油性,研究区荧光薄片分析反映砂质碎屑流沉积荧光强度较强、含油性较好(图17i—k),而浊流沉积的砂体其荧光强度显示较弱,含油性不及砂质碎屑流沉积。

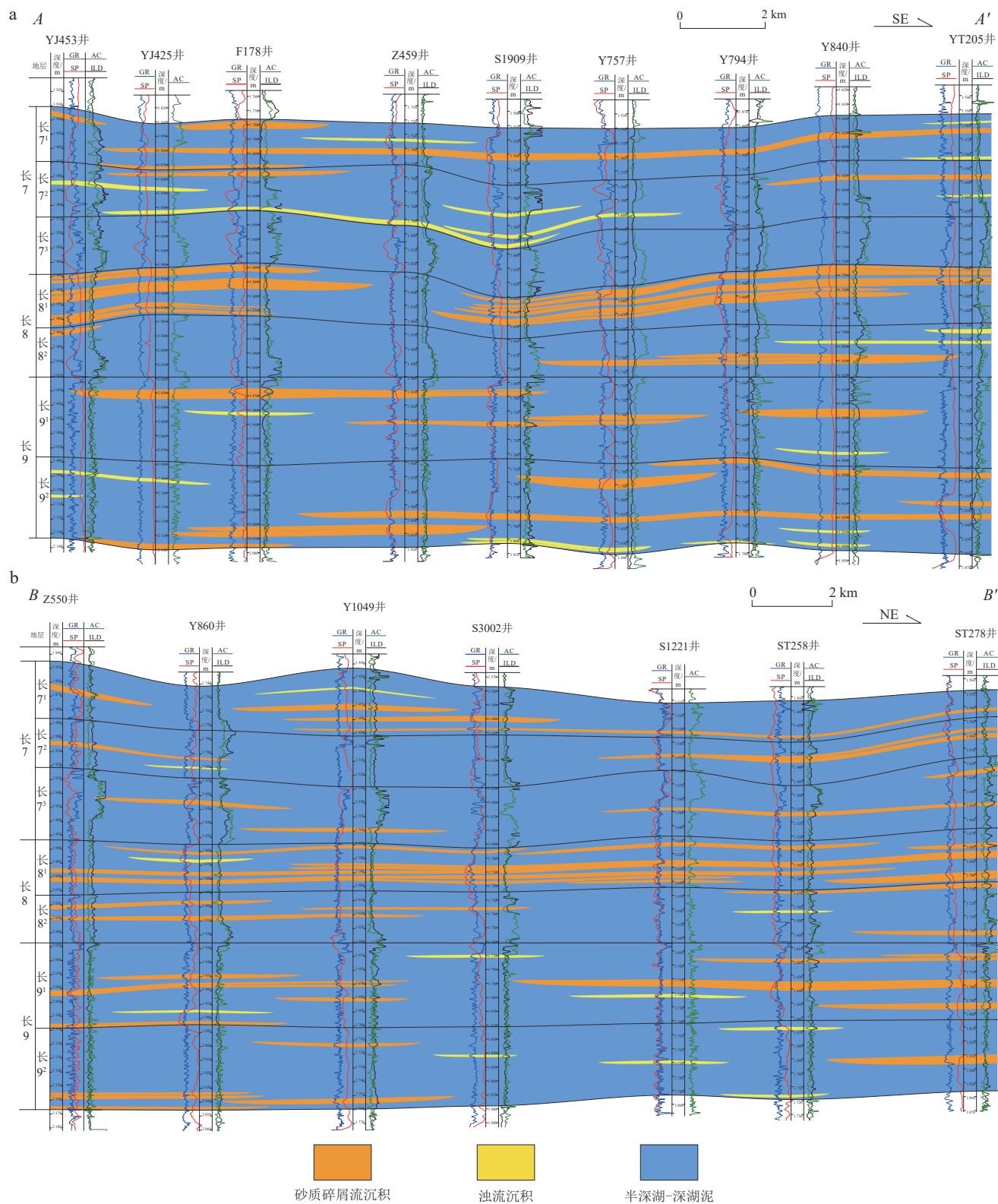


图11 鄂尔多斯盆地志丹地区长7—长9油层组深水重力流沉积连井对比剖面(剖面位置见图1b)

Fig. 11 Well-correlation sections showing the sedimentary facies of deep-water gravity-flow deposits in the Chang 7-9 oil groups, Zhidan area, Ordos Basin (see Fig. 1b for the section locations)

a. YJ453井—YT205井; b. Z550井—ST278井

对研究区不同类型重力流沉积砂体含油饱和度的统计分析表明,砂质碎屑流沉积砂体的含油饱和度明

显高于浊流沉积砂体(图16b),前者含油饱和度平均值为59.67%,后者平均值为38.58%。

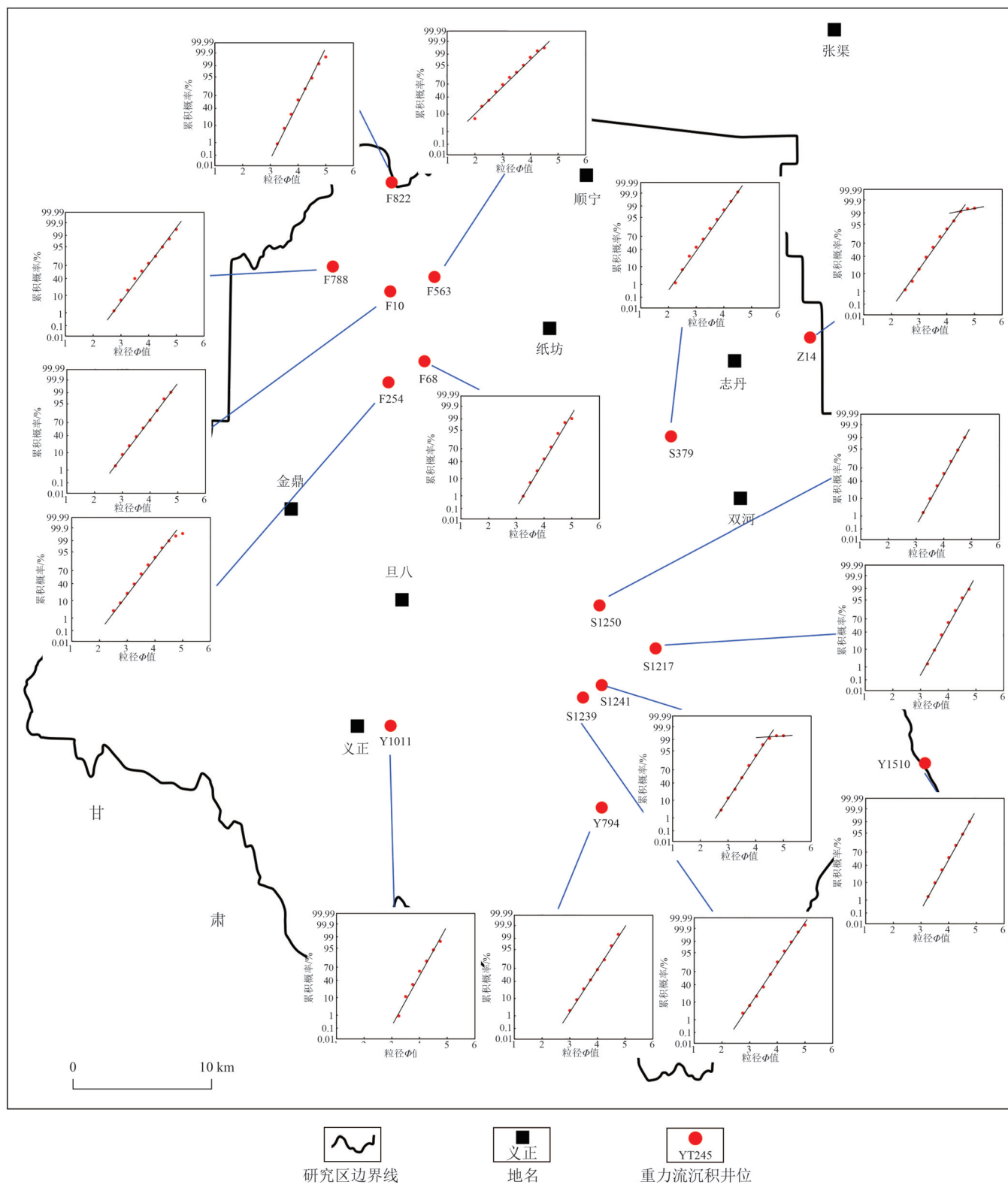


图12 鄂尔多斯盆地志丹地区长7油层组深水重力流沉积累积概率曲线平面分布

Fig. 12 Maps of grain-size cumulative probability curves for deep-water gravity-flow deposits in the Chang 7 oil groups, Zhidan area, Ordos Basin

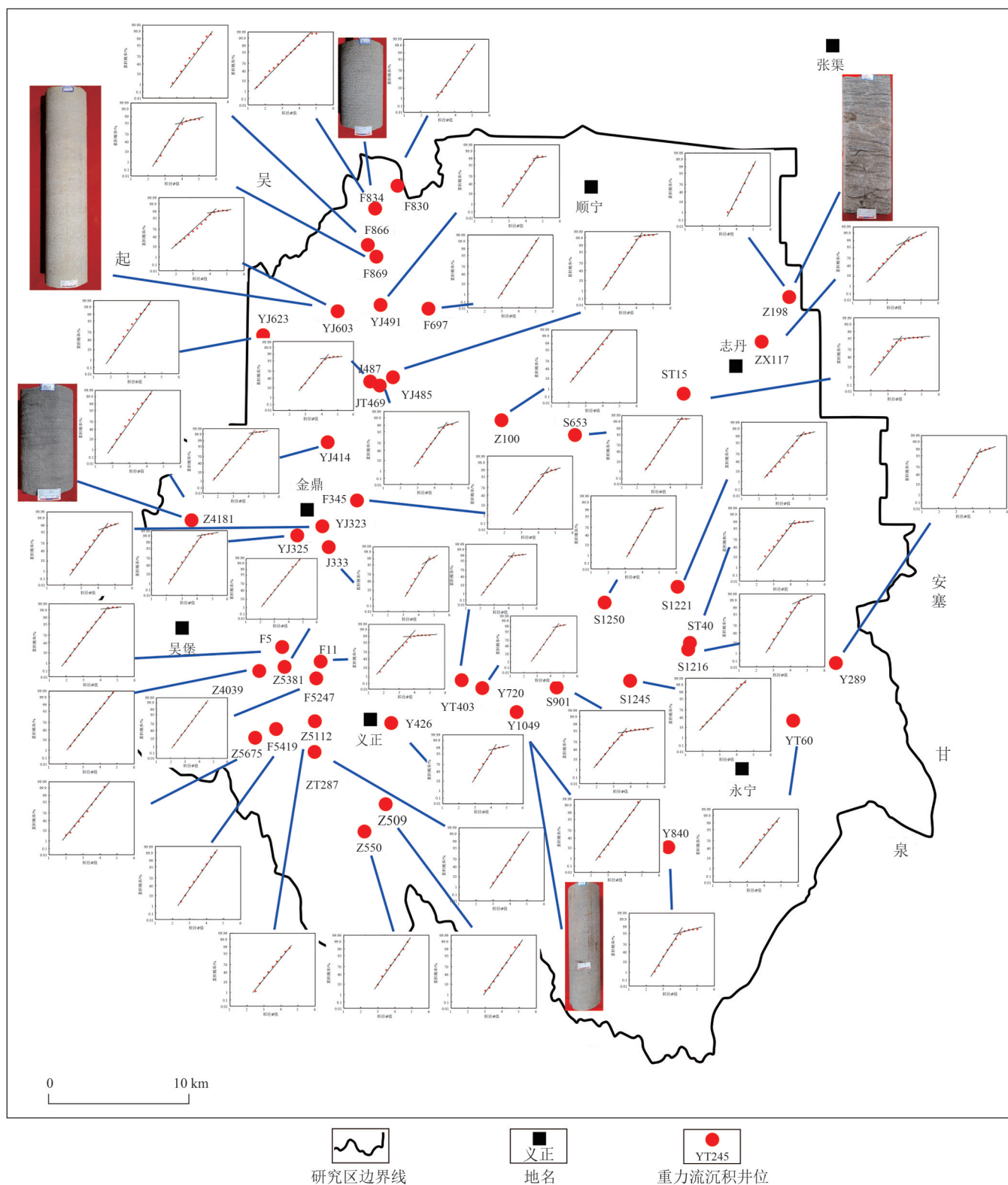


图13 鄂尔多斯盆地志丹地区长8油层组深水重力流沉积累积概率曲线平面分布

Fig. 13 Maps of grain-size cumulative probability curves for deep-water gravity-flow deposits in the Chang 8 oil groups, Zhidan area, Ordos Basin

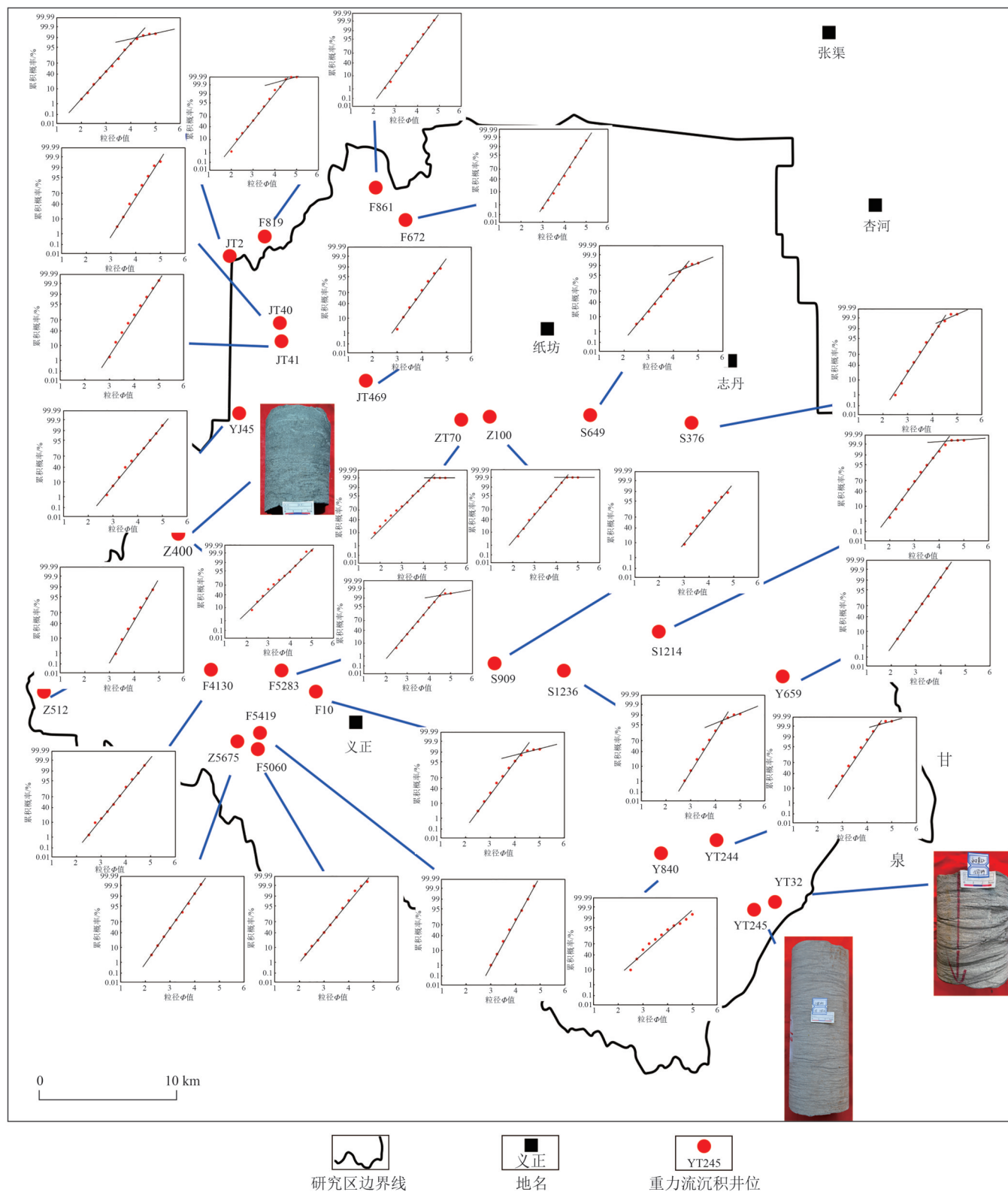


图 14 鄂尔多斯盆地志丹地区长9油层组深水重力流沉积概率曲线平面分布

Fig. 14 Maps of grain-size cumulative probability curves for deep-water gravity-flow deposits in the Chang 9 oil groups, Zhidan area, Ordos Basin

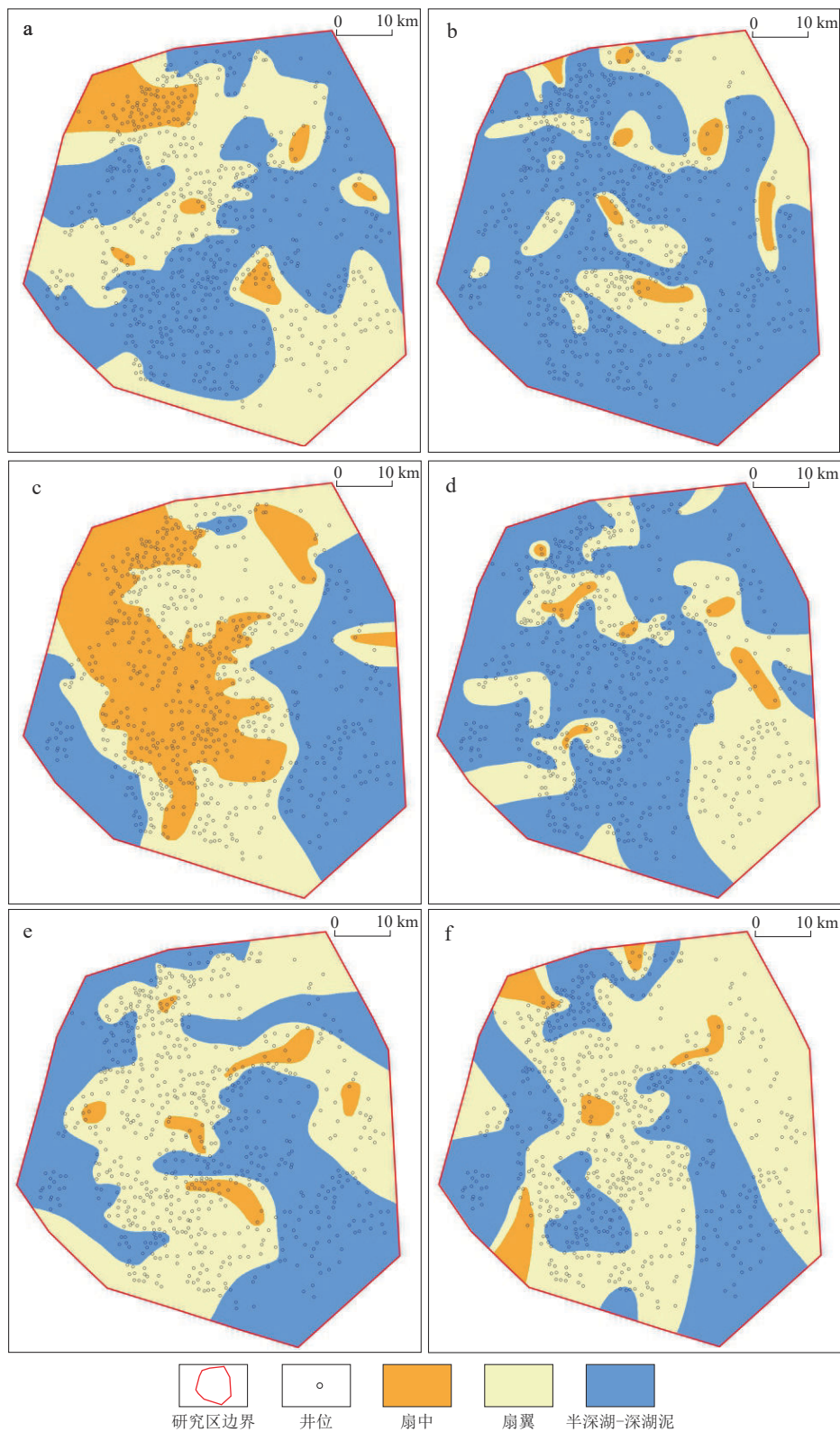


图15 鄂尔多斯盆地志丹地区长7—长9油层组深水重力流沉积平面展布

Fig. 15 Maps showing the distribution of deep-water gravity-flow deposits in the Chang 7-9 oil groups, Zhidan area, Ordos Basin
a. 长7¹; b. 长7²; c. 长8¹; d. 长8²; e. 长9¹; f. 长9²

据研究区试油资料分析(图18b),长7—长9砂质碎屑流砂体日产油量分布在0.25~6.63 t,各层位平均日

产油量分别为1.36,2.02和1.99 t;而长7—长9浊流沉积砂体日产油量分布在0.02~1.96 t,各层位平均日产

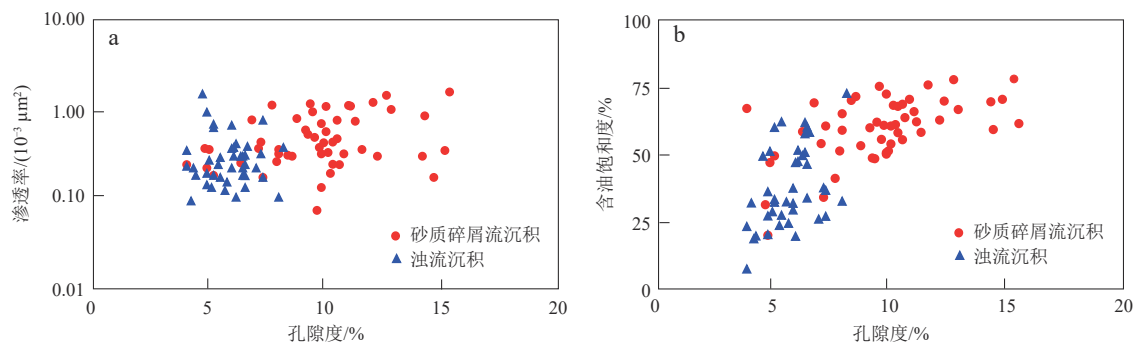


图16 鄂尔多斯盆地志丹地区长7—长9油层组不同类型深水重力流沉积砂体物性交汇图

Fig. 16 Cross plots showing the relationships of porosity with permeability and oil saturation for different types of deep-water gravity-flow deposits in the Chang 7-9 oil groups, Zhidan area, Ordos Basin

a. 孔隙度与渗透率交汇图; b. 孔隙度与含油饱和度交汇图

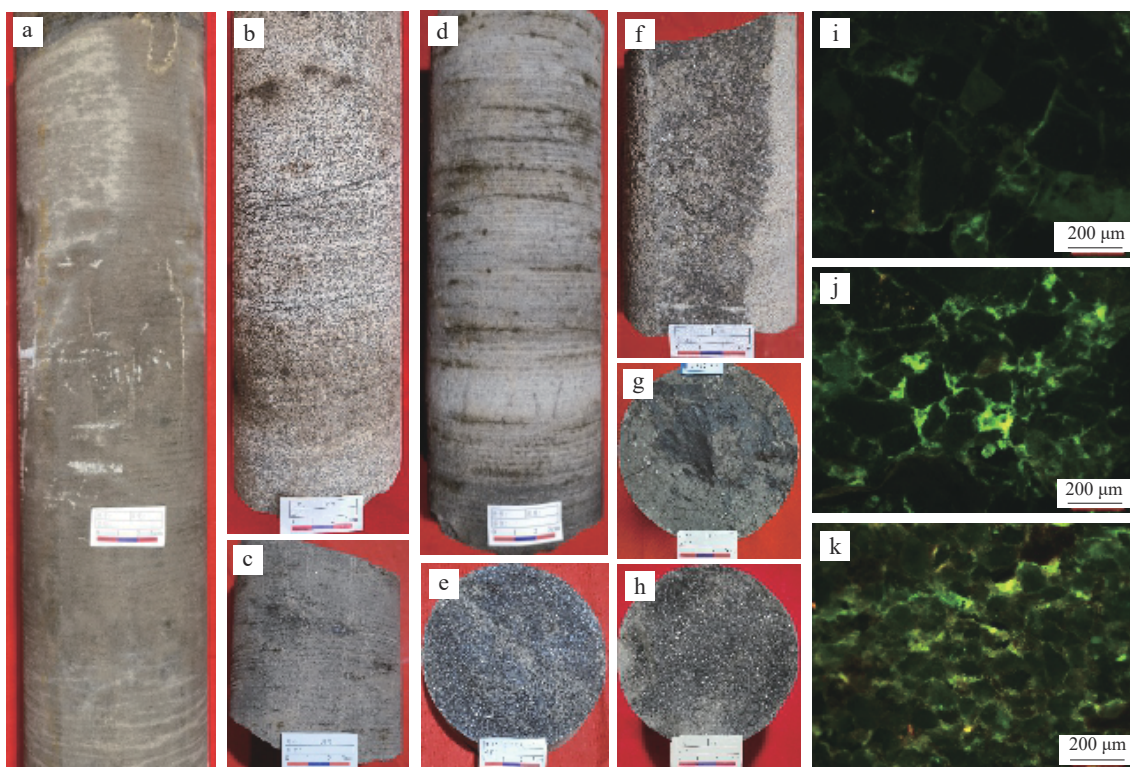


图17 鄂尔多斯盆地志丹地区长8—长9油层组不同深水重力流沉积含油性显微照片

Fig. 17 Core photos and fluorescence thin section images showing the oil-bearing properties of different types of deep-water gravity-flow deposits in the Chang 8-9 oil groups, Zhidan area, Ordos Basin

a. ZT277井,埋深1 939.38 m,长9,油浸,砂质碎屑流沉积,岩心; b. F819井,埋深2 107.68 m,长9,油斑,砂质碎屑流沉积,岩心; c. Z5井,埋深2 211.85 m,长9,油迹,浊流沉积,岩心; d. S380井,埋深1 766.12 m,长8,油斑,浊流沉积,岩心; e. F861井,埋深2 044.71 m,长8,油迹,浊流沉积,岩心; f. YJ603井,1 868.47 m,长8,油浸,砂质碎屑流沉积,岩心; g. S909井,埋深1 712.62 m,长9,油迹,浊流沉积,岩心; h. F672井,埋深2 183.29 m,长9,油迹,砂质碎屑流沉积,岩心; i. Z198井,埋深1 756.3 m,长9,浊流沉积,微弱荧光显示,荧光薄片; j. F861井,埋深2 043.56 m,长8,砂质碎屑流沉积,较强荧光显示,荧光薄片; k. S909井,埋深1 643.06 m,长8,砂质碎屑流沉积,较强荧光显示,荧光薄片

油量分别为0.75、0.70和0.76 t,反映砂质碎屑流砂体的产油能力明显优于浊流沉积砂体。这是由于研究区砂质碎屑流沉积发育大规模的块状砂体,沉积厚度大且连通性好,而浊流沉积的砂体薄且连续性差,非均质性强,砂-泥岩频繁互层,只有“鲍马序列”A段有一定含油性。

5 结论

1) 鄂尔多斯盆地志丹地区延长组三叠系长7—长9广泛发育砂质碎屑流、浊流和滑动-滑塌3种深水

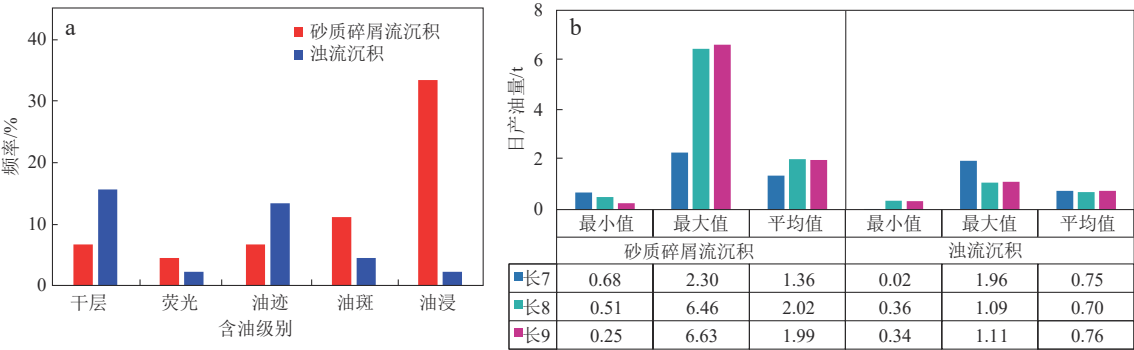


图18 鄂尔多斯盆地志丹地区长7—长9油层组不同深水重力流沉积含油性对比柱状图

Fig. 18 Comparison of the oil-bearing properties of different types of deep-water gravity-flow deposits in the Chang 7-9 oil groups, Zhidan area, Ordos Basin

a. 岩心观察及薄片统计;b. 油井试油产量统计

重力流沉积,以砂质碎屑流沉积最为普遍,浊流沉积仅局部发育。

2) 研究区长7—长9砂质碎屑流沉积发育块状层理、泥岩撕裂屑和泥包砾结构,单砂层厚度较大,粒度累积概率曲线为偏粗的短尾两段式和偏粗的一段式,粒径较浊流沉积偏粗;浊流沉积具有典型的不完整鲍马序列,单砂层厚度小,粒度累积概率曲线主要为粒度偏细的一段式;滑动-滑塌沉积发育包卷层理、变形构造以及同沉积阶梯状断层和滑动面。

3) 与浊流沉积相比,砂质碎屑流沉积砂体物性较好,含油饱和度和试油单井产量较高,且砂质碎屑流沉积厚度大、分布广、连续性好,故而应成为今后研究区延长组致密油勘探开发的主要目标。

参 考 文 献

[1] 耿军阳, 鲜本忠, 刘振献, 等. 深水重力流沉积模拟研究进展与展望[J]. 沉积学报, 2025, 43(3): 827-845.
GENG Junyang, XIAN Benzong, LIU Zhenxian, et al. Progress and prospects for simulating deep-water gravity flow sedimentation [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2025, 43(3): 827-845.

[2] DOTT R H. Dynamics of subaqueous gravity depositional processes[J]. AAPG Bulletin, 1963, 47(1): 104-128.

[3] MIDDLETON G V, HAMPTON M A. Sediment gravity flows: Mechanics of flow and deposition [M]//MIDDLETON G V, BOUMA A H. Turbidites and Deep-Water Sedimentation. Los Angeles: Pacific Section of S. E. P. M., 1973.

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

[5] NORMARK W R. Fan valleys, channels, and depositional lobes on modern submarine fans: Characters for recognition of sandy turbidite environments[J]. AAPG Bulletin, 1978, 62(6): 912-931.

[6] 李相博, 陈启林, 刘化清, 等. 鄂尔多斯盆地延长组3种沉积物重力流及其含油性[J]. 岩性油气藏, 2010, 22(3): 16-21.

LI Xiangbo, CHEN Qilin, LIU Huaqing, et al. Three types of sediment gravity flows and their petroliferous features of Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2010, 22 (3): 16-21.

[7] SHANMUGAM G. 50 Years of the turbidite paradigm (1950s—1990s): Deep-water processes and facies models—a critical perspective [J]. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17(2): 285-342.

[8] SHANMUGAM G. New perspectives on deep-water sandstones: Origin, recognition, initiation, and reservoir quality [M]. Amsterdam: Elsevier, 2012: 1-423.

[9] SHANMUGAM G. A preliminary experimental study of turbidite fan deposits: Discussion [J]. Journal of Sedimentary Research, 2003, 73(5): 838-839.

[10] LIU Junlong, ZHANG Xiangchun. Quantitative characterization of permeability heterogeneity of tight-sand reservoirs using nano-CT technology: A case study of the Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Energy Geoscience, 2025, 6(2): 100388.

[11] 李相博, 刘化清, 完颜容, 等. 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[J]. 岩性油气藏, 2009, 21(4): 19-21.
LI Xiangbo, LIU Huaqing, WANYAN Rong, et al. First discovery of the sandy debris flow from the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2009, 21(4): 19-21.

[12] 邹才能, 赵政璋, 杨华, 等. 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[J]. 沉积学报, 2009, 27(6): 1065-1075.
ZOU Caineng, ZHAO Zhengzhang, YANG Hua, et al. Genetic mechanism and distribution of sandy debris flows in terrestrial lacustrine basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(6): 1065-1075.

[13] KUENEN P H, MIGLIORINI C I. Turbidity currents as a cause of graded bedding [J]. The Journal of Geology, 1950, 58(2): 91-127.

[14] WANG Mingqian, LI Zhiyang, ZHANG Yuanyuan. Transport and depositional processes of mud in lacustrine environments: From sediment plumes to hyperpycnal flows [J]. Marine and Petroleum Geology, 2024, 170: 107150.

- [15] 张家强, 李士祥, 李宏伟, 等. 鄂尔多斯盆地延长组7油层组湖盆远端重力流沉积与深水油气勘探——以城页水平井区长7₃小层为例[J]. 石油学报, 2021, 42(5): 570–587.
ZHANG Jiaqiang, LI Shixiang, LI Hongwei, et al. Gravity flow deposits in the distal lacustrine basin of the 7th reservoir group of Yanchang Formation and deepwater oil and gas exploration in Ordos Basin: A case study of Chang 7₃ sublayer of Chengye horizontal well region[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(5): 570–587.
- [16] 高嘉洪, 金之钧, 梁新平, 等. 火山活动对鄂尔多斯盆地三叠系长7段淡水湖盆富营养化与沉积水体介质环境的影响[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 887–898.
GAO Jiahong, JIN Zhijun, LIANG Xinping, et al. The impact of volcanism on eutrophication and water column in a freshwater lacustrine basin: A case study of Triassic Chang 7 Member in Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 887–898.
- [17] 文应初. 陕甘宁盆地晚三叠世的湖相重力流沉积及其含油性[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 1983, 5(2): 1–21.
WEN Yingchu. Late Triassic lacustrine gravity flow deposits and their hydrocarbon potential in the Shaanxi-Gansu-Ningxia Basin [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 1983, 5(2): 1–21.
- [18] 陈全红, 李文厚, 郭艳琴, 等. 鄂尔多斯盆地南部延长组浊积岩体系及油气勘探意义[J]. 地质学报, 2006, 80(5): 656–663.
CHEN Quanhong, LI Wenhong, GUO Yanqin, et al. Turbidite systems and the significance of petroleum exploration of Yanchang Formation in the southern Ordos Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(5): 656–663.
- [19] 付金华, 董国栋, 周新平, 等. 鄂尔多斯盆地油气地质研究进展与勘探技术[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(3): 19–40.
FU Jinhua, DONG Guodong, ZHOU Xinping, et al. Research progress of petroleum geology and exploration technology in Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(3): 19–40.
- [20] 王岚, 王秀娟, 李文厚, 等. 陆相拗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[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2024, 54(6): 1091–1103.
WANG Lan, WANG Xiujuan, LI Wenhong, et al. Analysis of sedimentary types, patterns, and controlling factors of deep-water gravity flow in terrestrial depression lake basins: Takeing Chang 7 member of Yanchang Formation of Ordos Basin as an example[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2024, 54(6): 1091–1103.
- [21] 尹虎, 屈红军, 孙晓哈, 等. 鄂尔多斯盆地东南部三叠系长7油层组深水沉积特征及演化规律[J]. 岩性油气藏, 2024, 36(5): 145–155.
YIN Hu, QU Hongjun, SUN Xiaohan, et al. Characteristics of deep-water deposits and evolution law of Triassic Chang 7 reservoir in southeastern Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2024, 36(5): 145–155.
- [22] 许璟, 葛云锦, 贺永红, 等. 鄂尔多斯盆地延长探区长7油层组泥页岩孔隙结构定量表征与动态演化过程[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 292–307.
XU Jing, GE Yunjin, HE Yonghong, et al. Quantitative characterization and dynamic evolution of pore structure in shale reservoirs of Chang 7 oil layer group in Yanchang area, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 292–307.
- [23] 张国栋, 鲜本忠, 晁储志, 等. 鄂尔多斯盆地三水河剖面上三叠统块状砂岩的异重流成因——来自岩石结构的证据[J]. 沉积学报, 2019, 37(5): 934–944.
ZHANG Guodong, XIAN Benzong, CHAO Chuzhi, et al. Flood-generated Massive Sandstones of the Sanshuihe Outcrop in the Triassic Ordos Basin: Evidence from sedimentary textural characteristics [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(5): 934–944.
- [24] 杨仁超, 金之钧, 孙冬胜, 等. 鄂尔多斯晚三叠世湖盆异重流沉积新发现[J]. 沉积学报, 2015, 33(1): 10–20.
YANG Renchao, JIN Zhijun, SUN Dongsheng, et al. New discovery of hyperpycnal flow deposits in the Late Triassic lacustrine Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(1): 10–20.
- [25] 张军, 白玉彬, 闫新智, 等. 鄂尔多斯盆地富县地区长7段深水重力流沉积及勘探意义[J/OL]. 沉积学报: 1–21 [2025-02-27]. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2024.059>.
ZHANG Jun, BAI Yubin, YAN Xinzh, et al. Deep-water gravity flow deposits and exploration significance of the Chang 7 member in Fuxian area, Ordos Basin [J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica: 1–21 [2025-02-27]. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2024.059>.
- [26] 何自新. 鄂尔多斯盆地演化与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 95–105.
HE Zixin. Evolution and hydrocarbon in Ordos Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 95–105.
- [27] 付金华. 鄂尔多斯盆地致密油勘探理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 43–81.
FU Jinhua. Theory and technology of tight oil exploration in the Ordos Basin[M]. Beijing: Science Press, 2018: 43–81.
- [28] 张家强, 李士祥, 周新平, 等. 志丹地区长8₂砂层组缓坡浅水三角洲前缘砂体发育模式及成因[J]. 岩性油气藏, 2020, 32(1): 36–50.
ZHANG Jiaqiang, LI Shixiang, ZHOU Xinping, et al. Development pattern and genesis of gentle slope shallow water delta front sand bodies of Chang 8₂ sand set in Zhidan area, Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2020, 32(1): 36–50.
- [29] 张译丹, 姜在兴, 杜克峰, 等. 鄂尔多斯盆地志丹—富县地区三叠系延长组长8油层组风暴沉积特征及意义[J]. 石油学报, 2019, 40(7): 813–822.
ZHANG Yidan, JIANG Zaixing, DU Kefeng, et al. Storm deposition characteristics and significance of the Triassic Chang 8 oil layer in Zhidan-Fuxian area, Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(7): 813–822.
- [30] 李哲. 陕北志丹地区长8—长9储盖层评价及其控油性研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2024.
LI Zhe. Study on the evaluation of Chang 8- Chang 9 reservoir-cap and its oil control in Zhidan area of northern Shaanxi [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2024.
- [31] 曹江骏, 王继平, 张道锋, 等. 深层致密砂岩储层成岩演化对含气性的影响——以鄂尔多斯盆地西南部庆阳气田二叠系山1段为例[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(1): 169–184.
CAO Jiangjun, WANG Jiping, ZHANG Daofeng, et al. Effects of

- diagenetic evolution on gas-bearing properties of deep tight sandstone reservoirs: A case study of reservoirs in the 1st member of the Permian Shanxi Formation in the Qingyang gas field, southwestern Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(1): 169–184.
- [32] 朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 4版. 北京: 石油工业出版社, 2008: 65–70.
- ZHU Xiaomin. *Sedimentary petrology* [M]. 4th ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 65–70.
- [33] 胡英杰, 李晓光, 单俊峰, 等. 鄂尔多斯盆地南缘宁县—正宁地区延长组地层结构重建及页岩油富集模式探讨[J]. *中国石油勘探*, 2024, 29(5): 91–106.
- HU Yingjie, LI Xiaoguang, SHAN Junfeng, et al. Reconstruction of stratigraphic structure and shale oil enrichment pattern in Yanchang Formation in Ningxian-Zhengning area, southern margin of Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2024, 29(5): 91–106.
- [34] 解馨慧, 邓虎成, 胡蓝霄, 等. 湖相细粒沉积岩颗粒微观力学特征及类型划分——以鄂尔多斯盆地上三叠统延长组7段页岩为例[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(4): 1079–1088.
- XIE Xinhui, DENG Hucheng, HU Lanxiao, et al. Micromechanical characteristics and classification of the grains of lacustrine fine grained sedimentary rocks: A case study of shales in the 7th member of the Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(4): 1079–1088.
- [35] 李相博, 刘化清, 潘树新, 等. 中国湖相沉积物重力流研究的过去、现在与未来[J]. *沉积学报*, 2019, 37(5): 904–921.
- LI Xiangbo, LIU Huaqing, PAN Shuxin, et al. The past, present and future of research on deep-water sedimentary gravity flow in lake basins of China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37(5): 904–921.
- [36] 赵俊兴, 李凤杰, 申晓莉, 等. 鄂尔多斯盆地南部长6和长7油层浊流事件的沉积特征及发育模式[J]. *石油学报*, 2008, 29(3): 389–394.
- ZHAO Junxing, LI Fengjie, SHEN Xiaoli, et al. Sedimentary characteristics and development pattern of turbidity event of Chang 6 and Chang 7 oil reservoirs in the southern Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(3): 389–394.
- [37] 陈珊珊. 鄂尔多斯盆地定边—富县地区长7段沉积相及其控油性研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2024.
- CHEN Shanshan. *Sedimentary facies and their hydrocarbon control in the Chang 7 Member of Dingbian-Fuxian area, Ordos Basin* [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2024.
- [38] Fan A, Yang R, Loon V, et al. Classification of gravity-flow deposits and their significance for unconventional petroleum exploration, with a case study from the Triassic Yanchang Formation (southern Ordos Basin, China) [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018: 16157–73.
- [39] 付金华, 王龙, 陈修, 等. 鄂尔多斯盆地长7页岩油勘探开发新进展及前景展望[J]. *中国石油勘探*, 2023, 28(5): 1–14.
- FU Jinhua, WANG Long, CHEN Xiu, et al. Progress and prospects of shale oil exploration and development in the seventh member of Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2023, 28(5): 1–14.
- [40] 朱如凯, 邹才能, 吴松涛, 等. 中国陆相致密油形成机理与富集规律[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(6): 1168–1184.
- ZHU Rukai, ZOU Caineng, WU Songtao, et al. Mechanism for generation and accumulation of continental tight oil in China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(6): 1168–1184.
- [41] 王秀娟, 辛红刚, 程党性, 等. 鄂尔多斯盆地华池地区长7₃亚段深水重力流砂体发育规模定量表征——以Y1-1、Y2-1水平井钻遇砂体为例[J]. *天然气地球科学*, 2024, 35(12): 2142–2154.
- WANG Xiujuan, XIN Honggang, CHENG Dangxing, et al. Quantitative characterization of deep-water gravity flow sand body in the Chang 7₃ submember in Huachi area, Ordos Basin: A case study of sandbodies encountered drilling of Y1-1 and Y2-1 horizontal wells [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2024, 35(12): 2142–2154.
- [42] 符勇, 李忠诚, 万谱, 等. 三角洲前缘滑塌型重力流沉积特征及控制因素——以松辽盆地大安地区青一段为例[J]. *岩性油气藏*, 2021, 33(1): 198–208.
- FU Yong, LI Zhongcheng, WAN Pu, et al. Sedimentary characteristics and controlling factors of slump gravity flow in delta front: A case study of Qing 1 member in Da'an area, Songliao Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2021, 33(1): 198–208.
- [43] 冯有良, 杨智, 张洪, 等. 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[J]. *地质学报*, 2023, 97(3): 839–863.
- FENG Youliang, YANG Zhi, ZHANG Hong, et al. Sedimentary characteristics of fine-grained gravity flow deposits in saline lacustrine basins and their implications for shale oil exploration: A case study of the Fengcheng Formation in the Mahu Sag, Junggar Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(3): 839–863.
- [44] 王冠民, 庞小军, 黄晓波, 等. 渤海海域辽中凹陷南部古近系东营组三段重力流砂岩优质储层特征及成因[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(1): 81–95.
- WANG Guanmin, PANG Xiaojun, HUANG Xiaobo, et al. Characteristics and origin of high-quality gravity-flow sandstone reservoirs in the 3rd member of the Dongying Formation, southern Liaozhong Sag, Bohai Sea [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(1): 81–95.
- [45] 蒲秀刚, 赵贤正, 王家豪, 等. 渤海湾盆地滨海地区古近系沙河街组一段滑塌型湖底扇储集层特征及主控因素[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(5): 913–924.
- PU Xiugang, ZHAO Xianzheng, WANG Jiahao, et al. Reservoirs properties of slump-type sub-lacustrine fans and their main control factors in first member of Paleogene Shahejie Formation in Binhai area, Bohai Bay Basin, China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(5): 913–924.
- [46] 熊亮, 邓虎成, 吴冬, 等. 四川盆地及其周缘下寒武统筇竹寺组细粒沉积特征与影响因素[J]. *石油实验地质*, 2023, 45(5): 857–871.
- XIONG Liang, DENG Hucheng, WU Dong, et al. Fine-grained sedimentary characteristics and influencing factors of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in Sichuan Basin and on its periphery [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2023, 45(5): 857–871.