

文章编号: 1000-0747(2017)02-0165-12 DOI: 10.11698/PED.2017.02.01

断陷湖盆深水沉积地质特征与斜坡区勘探发现 ——以渤海湾盆地歧口凹陷板桥—歧北斜坡区沙河街组为例

赵贤正¹, 蒲秀刚¹, 周立宏¹, 时战楠¹, 韩文中^{1,2}, 张伟¹

(1. 中国石油大港油田公司, 天津 300280; 2. 中国石油大学(华东), 山东青岛 266580)

基金项目: 中国石油重大科技专项“大港油区大油气田勘探开发关键技术研究”(2014E-06)

摘要: 基于地震、测录井、试油、岩心及分析化验资料, 以渤海湾盆地歧口凹陷板桥—歧北斜坡区古近系沙河街组一段下亚段滨 I 油层组为对象, 开展层序划分、深水沉积相特征及模式分析, 研究深水重力流规模性发育原因、储集层物性特征及主控因素, 提出深水区有利储集相带的划分标准和预测方法。研究表明沙一下亚段滨 I 油层组自下而上可划分为 3 个厚度在百米之内的五级层序; 斜坡深水区沉积了一套远岸水下扇型重力流沉积, 发育主水道、分支水道、水道侧缘、水道间泥及无水道区浊积席状砂等微相类型, 空间上具有区域性多期多级的继承性和建设性发育特征, 为扇三角洲—远岸水下扇—深湖相沉积序列, 每一次重力流事件形成的远岸水下扇都可以划分为内扇、中扇和外扇 3 个亚相类型。以含砂率较高的扇三角洲前缘主砂体作为供给物源的“跨相搬运”砂体可形成优质储集层, 孔隙度平均为 15.1%、渗透率几何平均值为 $5.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。明确了远岸水下扇主水道及分支水道分布区是最有利的勘探区域。图 11 表 2 参 43

关键词: 深水沉积; 斜坡区; 砂质碎屑流; 水下扇; 岩性油气藏; 沙河街组; 断陷湖盆; 歧口凹陷; 渤海湾盆地

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

Geologic characteristics of deep water deposits and exploration discoveries in slope zones of fault lake basin: A case study of Paleogene Shahejie Formation in Banqiao-Qibei slope, Qikou sag, Bohai Bay Basin

ZHAO Xianzheng¹, PU Xiugang¹, ZHOU Lihong¹, SHI Zhannan¹, HAN Wenzhong^{1,2}, ZHANG Wei¹

(1. PetroChina Dagang Oilfield Company, Tianjin 300280, China; 2. China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: Based on seismic, logging, formation testing, core and lab test data, this study analyzed the sequence division, facies features of deep water deposits and modes, development of large-scale gravity flow, reservoir physical properties and their main controlling factors, and proposed a classification standard and prediction method of favorable exploration areas in deep water area of the Bin1 oil layers of the lower sub-member of the first member of Paleogene Shahejie Formation in Banqiao-Qibei slope zone of Qikou sag, Bohai Bay Basin. The Bin1 oil layers can be divided into three fifth-order sequences, each less than 100 m thick; a set of gravity flow deposits were formed under deep water background in the slope zone, which contains sedimentary micro-facies such as main channel, distributary channel, channel margin, inter-channel mudstone, and turbidite sand sheet in areas without channels, and, in space, has inherited and constructive development features of multistages. It is a sedimentary sequence of fan delta - distal subaqueous fan - deep lake, and every distal subaqueous fan formed by gravity flow can be divided into inner-, middle- and outer fans. The cross-facies transported sands which are sourced from higher-sand-content major sands of delta front can form high quality reservoirs with an average porosity of 15.1% and geometric average permeability of $5.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$. The main channel and distributary channel of distal subaqueous fan are the most favorable exploration zones.

Key words: deep water deposit; slope zone; sandy debris flow; subaqueous fan; lithologic reservoir; Shahejie Formation; fault lake basin; Qikou sag; Bohai Bay Basin

引用: 赵贤正, 蒲秀刚, 周立宏, 等. 断陷湖盆深水沉积地质特征与斜坡区勘探发现: 以渤海湾盆地歧口凹陷板桥—歧北斜坡区沙河街组为例[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(2): 165-176.

ZHAO Xianzheng, PU Xiugang, ZHOU Lihong, et al. Geologic characteristics of deep water deposits and exploration discoveries in slope zones of fault lake basin: A case study of Shahejie Formation in Banqiao-Qibei slope, Qikou sag, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(2): 165-176.

0 引言

随着油气勘探开发及沉积学研究的深入,深水重力流沉积已成为地质学家和勘探家关注的重点。自20世纪50年代浊流理论建立以来,随着高精度三维地震的应用、典型露头剖面解剖、水槽试验、数值模拟以及大量钻井取心的观察,对重力流沉积的概念、类型细分、触发机制、沉积模式等有了更深入的研究^[1-14],同时也促进了深水沉积勘探成功率的大幅提高,但相对河流及三角洲沉积,重力流沉积砂体的勘探程度依然较低,剩余储量大,为 $(135\sim 200)\times 10^8\text{ t}$ ^[15],是油气储量增长的潜力领域。

渤海湾盆地黄骅拗陷歧口凹陷板桥—歧北斜坡区古近系沙河街组一段下亚段(沙一下亚段)碎屑岩区域性分布、发育块状砂体且埋藏较深(3 700~4 200 m)。随着该区 bs37 井滨 I 中砂层组获得日产油百余吨、日产气近 $2\times 10^4\text{ m}^3$ 的重大突破,该套中深层油气储集层正日益成为油气勘探的重点领域。前人对该区沙一下亚段已做过一些研究工作^[16-26],如黄传炎等^[19]建立了沙一下亚段断控重力流的沉积模式,蒲秀刚等^[20]认为沙一下亚段砂质碎屑流可形成大规模重力流型沉积致密油。但仍存在如重力流厚层砂体形成机制、油气高产原因及有利储集体分布特征等诸多问题亟待解决。本文基于 42 口井 700 m 岩心观察、430 口井钻井资料、247 口井 596 层试油资料及 206 口井 5 216 块普通薄片观察、39 口井 429 块铸体薄片、177 口井 2 835 个样品点物性资料及 4 口井 29 个样品点压汞数据等资料,以板桥—歧北斜坡区沙一下亚段滨 I 油层组为例,在五级层序划分的基础上,结合地质-地震资料,从古地貌、物源体系、沉积体系特征及有利储集相带预测等方面展开分析和讨论,以期对斜坡区岩性油气藏精细化勘探与井位部署提供认识支撑。

1 研究区地质背景与层序格架

1.1 地质背景

歧口凹陷位于黄骅拗陷中北部,是古近系开阔型陆内伸展断陷湖盆,具有多凹多坡的特点,斜坡是地层-岩性油气藏发育的主要场所^[20,27-28]。板桥—歧北斜坡区位于歧口凹陷中部,工区面积 1 400 km²,西部以板桥陡坡带紧邻沧县隆起,东部紧邻歧口主凹,北部毗邻北塘斜坡,向南逐渐过渡到歧北缓坡带(见图 1)。

沙一下亚段主要发育于裂陷 II 幕,该时期沧东断裂与滨海断裂系之间翘倾活动持续发育,同时叠加北

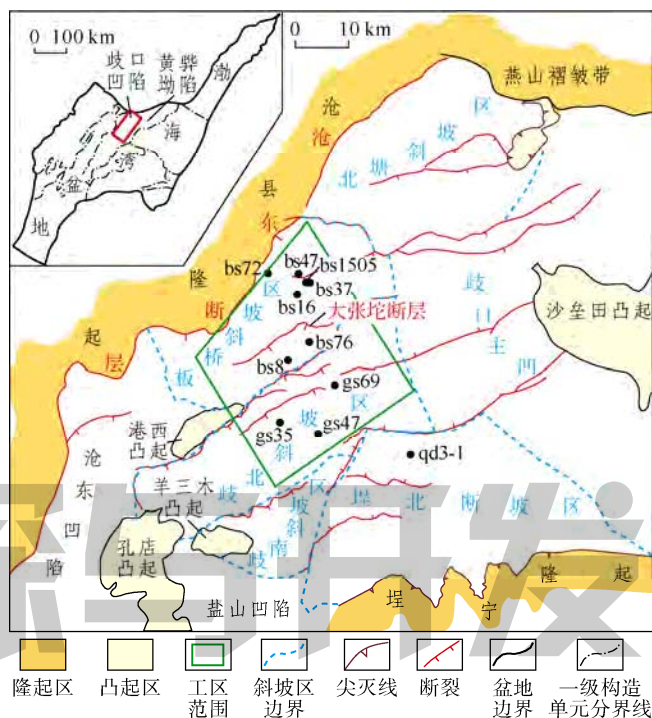


图 1 歧口凹陷斜坡构造示意图

部海河断裂强烈活动,造成该区斜坡变陡,湖盆进一步深陷扩张,水体也逐渐加深,成为沙河街组最大湖泛期的沉积,沉积厚度上千米,其中砂体累计厚度为 250~430 m^[20,23],与深水优质烃源岩大面积紧密接触,具备良好的先天成藏优势。

三维古地貌分析^[24,29-32]显示滨 I 油层组古地貌整体表现为西高东低、凹隆相间的构造格局,该时期板桥—歧北斜坡区整体属于深水区域,板桥低斜坡区深洼区最大水深 230 m,坡度最大为 5.5°, bs8—bs76 井区一带水深一般为 50 m,歧北斜坡区为相对浅水区, binsh22 井区水深仅为 10 m 左右(见图 2)。在前人研究的基础上,根据地震属性、砂岩平面分布规律及轻重矿物特征可知,板桥—歧北斜坡区滨 I 油层组物源供给主要来自西部沧县物源,其次为北部燕山物源和南部港西凸起物源,其中西部沧县物源又可以细分为葛沽、小站和增福台等 3 个子物源(见图 2),总体具有“多物源、强输入”的特征。

1.2 五级层序格架

应用经典层序地层学和高分辨率层序地层学的理论和方法,通过基准面识别和旋回划分,将沙一下亚段自下而上划分为滨 I、板 4、板 3 及板 2 共 4 个油层组,其中滨 I 油层组自下而上可细分 LSC3SQ⑥、LSC3SQ⑦、LSC3SQ⑧共 3 个五级层序。五级旋回厚度一般为 40~100 m,较四级旋回的研究精度提高了近

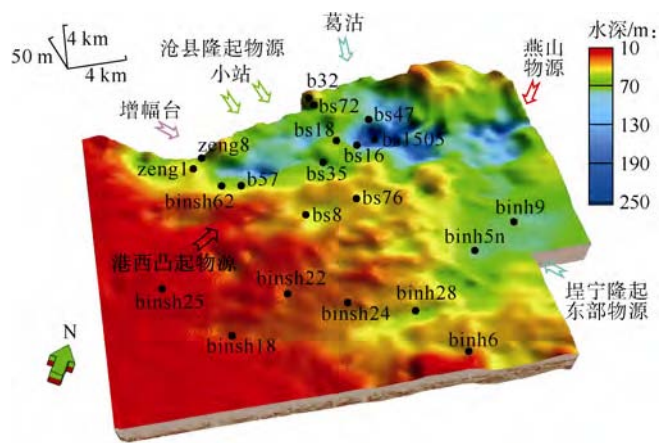


图2 板桥—歧北斜坡区滨 I 油层组模拟古地貌

一石,更利于沉积微相识别、砂层组追踪与岩性圈闭精细刻画。

2 深水沉积特征及模式

笔者曾于2012年针对歧口凹陷西南缘沙一下亚段开展了古地貌、沉积背景及10余口井岩心相、测井相及粒度分析,结果表明歧北斜坡大范围发育重力流沉积^[20]。中、低斜坡区水深一般大于50 m,gs30、gs35、gs69等井岩心多见水平层理暗色泥岩,指示了该区处于半深湖—深湖沉积环境;gs22、gs47、qd3-1等井取心段发育块状砂岩,夹持于大段暗色泥岩中,同时可见变形构造、砂岩侵入、泥岩碎片、泥岩漂砾等现象,为重力流沉积的典型特征。与此相似,板桥—歧北斜坡区滨 I 油层组是在物源供给充分、深水斜坡背景下沉积的一套岩性组合,水深一般大于70 m,坡度一般大于2°,具备形成重力流沉积的古地理背景。

在牵引流占主导的环境中可见重力流沉积,同样在重力流占主导的环境中存在牵引流沉积,如远岸水下扇发育多期水道,水道摆动叠加形成扇体形态,主水道砂体厚,若事件性能量偏弱且持续时间较长,往往具有牵引流的一些特征,会导致沉积特征与扇三角洲有相似之处,因此深水沉积需要综合区域沉积背景、测录井、岩心相、薄片相、沉积相序等信息进行判断。

2.1 岩石学特征

板桥—歧北斜坡区主要发育长石砂岩、岩屑长石砂岩及少量长石岩屑砂岩,总体具有成分成熟度低的特征,石英含量一般为17%~61%,平均为40.1%;长石含量一般为21.2%~59.4%,平均为45.5%;岩屑含量一般为8.2%~43.5%,平均为14.4%。

宏观的块状砂岩在薄片下常表现为较强的非均质

性,粒级上从粉细砂至粗砂均有分布,较粗的碎屑颗粒常呈斑状分布。bs1505井是工区一口重点取心井,该井沙一下亚段块状砂岩目测以细砂岩为主,但镜下岩石类型主要为岩屑长石不等粒砂岩。颗粒分选较差,磨圆主要为次圆—次尖,泥级杂基含量低,颗粒支撑(见图3)。粒度概率曲线则呈宽缓微上拱弧形,各点之间无明显分段,反映粒度分布比较分散、颗粒分选较差、呈快速沉降的重力流沉积典型特征^[20]。

2.2 深水沉积相标志

2.2.1 岩心沉积相标志

研究区滨 I 油层组42口取心井岩心的观察表明,滨 I 油层组岩心具有重力流沉积的典型特征^[33]:①具块状层理与泥岩漂砾,在块状砂岩中可见不规则圆形或棱角状悬浮泥砾,直径多为1~2 cm,部分呈撕裂状;②发育滑塌变形构造,可见因滑塌造成的阶梯状同沉积小断层,断距为0.5~2.0 cm,同时可见上部地层沿斜坡滑动滑塌而形成的滑塌面,滑塌面倾角为30°~50°,上下岩性呈突变接触;③常见具有底冲刷面或侵蚀模—槽模的粒序层理;④具岩性突变面,中细砂岩与下部暗色泥岩或粉砂质泥岩突变接触,接触面相对平直光滑;⑤准同生变形构造多样,可见重荷模构造、火焰状构造、砂球砂枕构造等(见图3)。

2.2.2 测井相标志

远岸水下扇是(扇)三角洲前缘或近岸水下扇沉积物在触发机制作用下经滑动、滑塌转化为碎屑流及浊流并顺斜坡搬运,最终在深水区卸载形成的不规则扇形及条带状堆积物的综合沉积体,主要为碎屑流和浊流共同作用的产物^[20]。识别出主水道、分支水道、水道侧缘、水道间泥及无水道区浊积席状砂等微相类型^[20],在岩性组合、砂体厚度、测录井特征上具有一定差异,整体表现为低砂岩百分比的“泥包砂”特点(见表1)。砂岩底界面常以突变方式与下部泥岩接触,测井曲线表现为近平直的泥岩基线夹砂岩箱形、钟形曲线(多齿化)的组合,泥岩为深灰色—灰黑色(见图3),是深水环境的良好指示标志,此类岩性组合中的砂岩往往是深水环境下的重力流沉积^[34-36]。

2.3 沉积体系及演化

2.3.1 沉积亚相特征

综合分析表明,板桥—歧北斜坡区滨 I 油层组为扇三角洲—远岸水下扇—深湖相沉积序列,远岸水下扇由扇三角洲衍生而来,在扇三角洲发育的向湖盆方向往往可以找到与其共生的远岸水下扇,同时远岸水下扇可衍生出次一级远岸水下扇,其侧缘为湖相泥岩

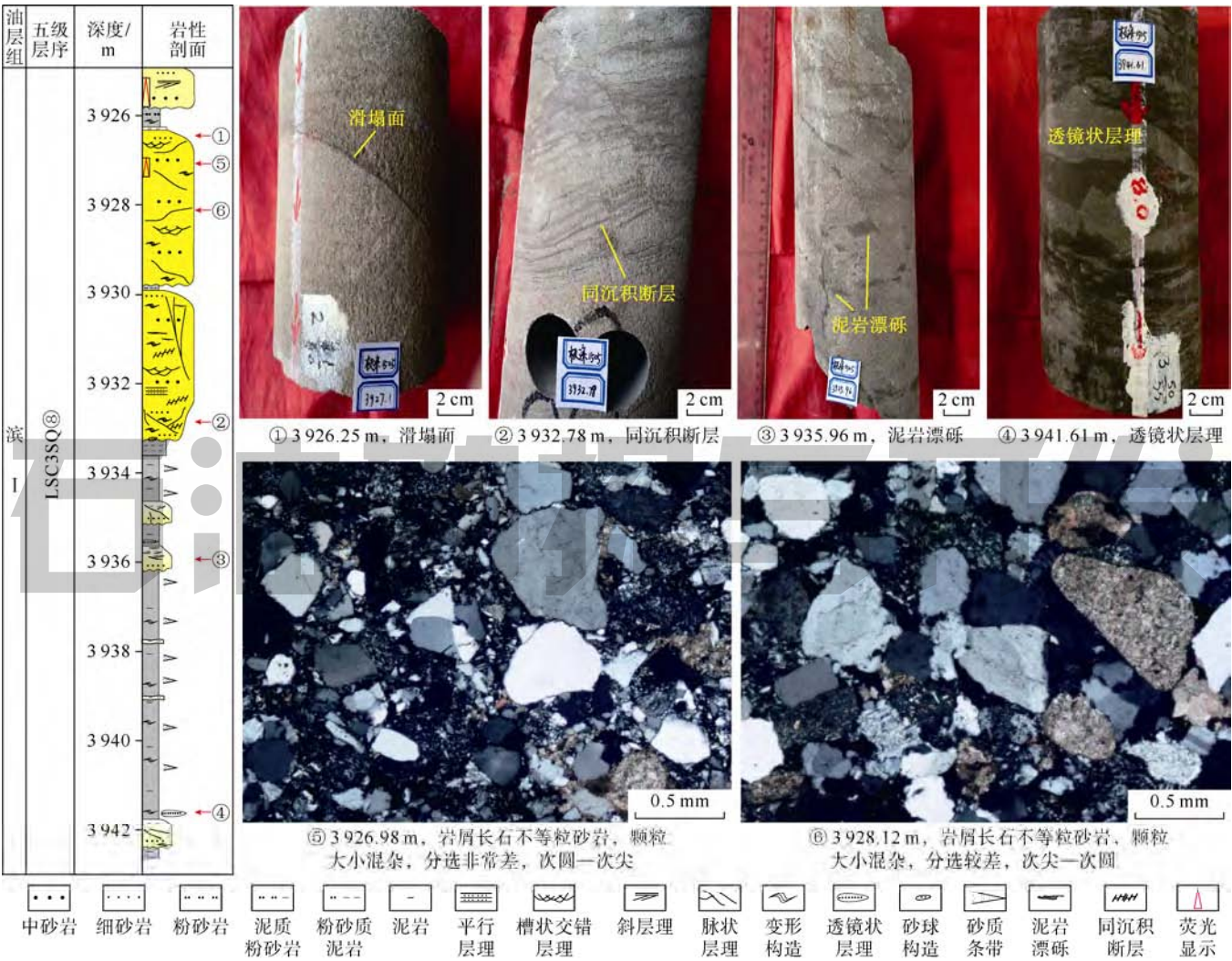


图3 板桥斜坡区 bs1505 井滨 I 油层组岩心及薄片沉积构造现象

表1 板桥—歧北斜坡区沙一下亚段滨 I 油层组远岸水下扇沉积微相、岩性与测井响应特征

微相	岩性	单砂层厚度/m	砂岩百分比/%	测井特征
主水道	中—厚层状中细砂岩	>10	>30	齿化钟形、箱形
分支水道	中层状细砂岩	5~10	15~30	齿化钟形、箱形
水道侧缘	薄层状细粉砂岩	2~5	5~15	低平齿化指状
水道间泥	中厚层粉砂质泥岩、泥岩			低平—微齿化
浊积席状砂	薄层细粉砂岩	<3	<5	指状

或泥质灰岩沉积（见图 4）。每一次重力流事件形成的远岸水下扇都可以划分为内扇、中扇和外扇 3 个亚相类型。

2.3.1.1 内扇亚相

内扇亚相是紧靠扇三角洲前缘物源区的根部单元，微相类型主要为主水道，其次为水道侧缘及水道间泥（见表 1）。主水道是远岸水下扇的沉积格架“叶脉”部分，是为中扇及外扇亚相输送碎屑物质的主干沟

道，偶见牵引流特征沉积构造（见图 5a）。内扇主水道以砂质碎屑流成因的块状砂岩为主（见图 5b），垂向上表现为多期块状砂岩叠置，累计砂体厚度多大于 10 m，叠覆砂岩内部可见泥岩漂砾、岩性突变面等沉积现象，岩性以中、厚层中细砂岩为主，测井相表现为（齿化）箱形或钟形；在块状砂岩的顶部或底部偶尔可见包卷构造、滑塌构造等重力流沉积构造现象。同时主水道砂岩中间常夹杂少量水道侧缘泥质粉砂岩、粉砂质泥岩及水道间泥岩等。

2.3.1.2 中扇亚相

中扇亚相主要是从主水道开始大量分叉到水道末梢之间的部分，微相类型主要为分支水道、水道侧缘，其次为主水道末端、无水道区浊积席状砂和水道间泥（见表 1）。分支水道是主水道的水下延伸，仍以砂质碎屑流成因的块状砂岩为主（见图 5c），垂向上呈现出叠覆性，单砂体规模相对变小，累计砂体厚度多为 5~

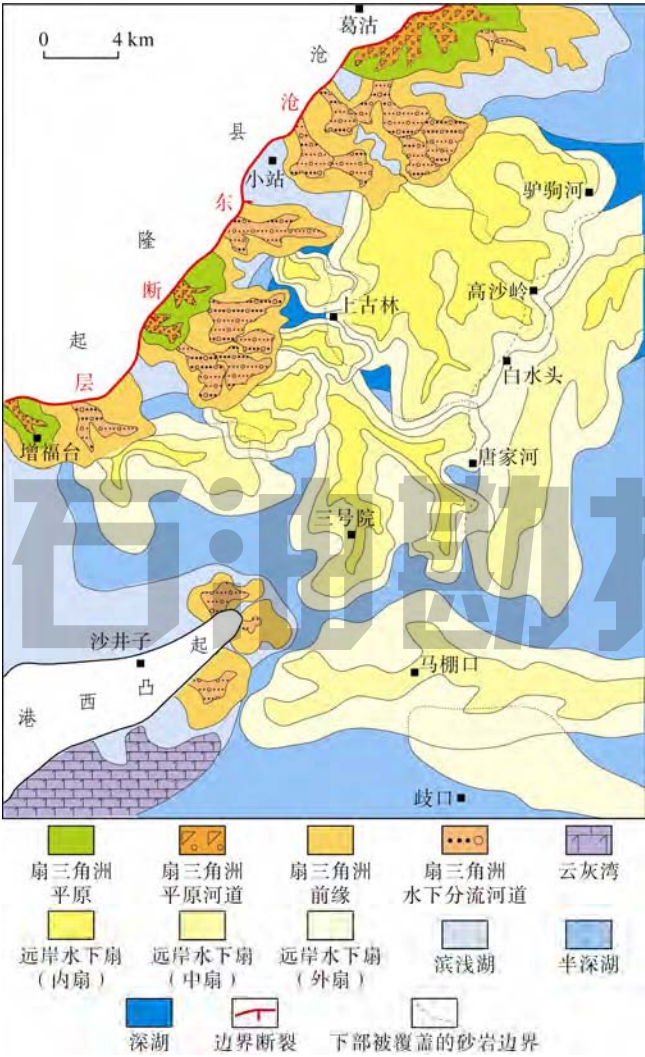


图 4 板桥—歧北斜坡区沙一下亚段滨 I 油层组中段 LSC3SQ7 沉积体系图

10 m，岩性以中层细砂岩为主，测井相以（齿化）钟形及箱形为主。水道侧缘主要为主水道或分支水道的溢堤沉积，叠置砂体厚度为 3~5 m，岩性主要为粉细砂岩，向上渐变为粉砂岩、泥质粉砂岩及泥岩等，测井相主要呈低平齿化指状，以浊流成因为主^[37]。无水道区浊积席状砂主要沉积于中扇分支水道间部分，地形相对平坦开阔，沉积物具有薄而广的分布特征，以浊流成因为主，由下部粉砂岩向上渐变为泥质粉砂岩，叠合砂体厚度一般小于 3 m，测井相多呈指状^[20]。水道间为分支水道之间的沉积部分，岩性主要为暗色泥岩、粉砂质泥岩等，是半深湖—深湖相悬浮沉积，测井相具低平—微齿化特征。

2.3.1.3 外扇亚相

外扇亚相是远岸水下扇水道末梢的外围沉积部分，包括分支水道的末梢、前缘和侧缘区域，该位置水下分支水道基本消失，微相主要为无水道区浊积席状砂（见表 1）。外扇亚相无水道区浊积席状砂是中扇亚相无水道区浊积席状砂的延伸，具有相似的沉积特征，是被进一步稀释的浊流沉积物，岩性以粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩为主，并呈现递变正粒序特征（见图 5d），该细粒砂体呈薄砂条形式被深水厚层泥岩包裹。

2.3.2 沉积体系演化

总体上，沿沧东断层下降盘湖盆边缘分布的扇三角洲具有“小范围、裙带状、渐萎缩”的发育演化特征，而远岸水下扇具有“大面积、多期次、多级别”的发育演化特征，扇三角洲—远岸水下扇继承性、建



图 5 板桥—歧北斜坡区沙一下亚段滨 I 油层组中段岩心典型沉积构造现象

设性发育,其中重力流扇体始终是该区的主要沉积体,西部葛沽、小站与增幅台多级朵叶体在继承中分异—集中发育。LSC3SQ⑥沉积期,西部物源沿沧东断层下降盘滨浅湖区发育裙带状分布的数个短轴扇三角洲,并衍生出多个远岸水下扇朵叶体,以北部葛沽物源形成的朵叶体面积最大,北部燕山物源扇三角洲朵叶体往南延伸距离远,波及至马棚口附近;LSC3SQ⑦沉积期,湖盆边缘扇三角洲裙带渐渐退化、分异—集中,其前缘往后退缩,逐步演变为半深湖—深湖区多期叠置的远岸水下扇扇体,同时扇体再次滑动、滑塌,形成了二级远岸水下扇扇体;LSC3SQ⑧沉积期,水体进一步加深,葛沽物源在深湖背景下发育了近岸的重力流扇体(近岸水下扇)以及往南推进的远岸水下扇扇体,并分化为东西两个二级朵叶体。西部小站扇三角洲—

远岸水下扇沉积体系为典型的建设性长轴物源体系,重力流砂体沿水下断槽能越过港西倾末端波及到歧北断层以南。沿现今海岸线分布的北部燕山远岸水下扇也为建设性水下扇,自北向南呈条带状延伸较远距离。马棚口地区发育源自埕宁隆起东部物源的远岸水下扇沉积,扇体呈东西向延伸,未波及到板桥斜坡区。围绕港西凸起北端发育多个以牵引流沉积为主体的小型三角洲,因物源供应能力较弱,没有形成规模性的重力流沉积。

2.4 深水沉积模式

根据滨 I 油层组物源体系平面展布规律与垂向沉积演化规律,重建了研究区“充沛物源供给、多级扇体衍生、多期扇体叠置”的远岸水下扇沉积模式(见图6)。

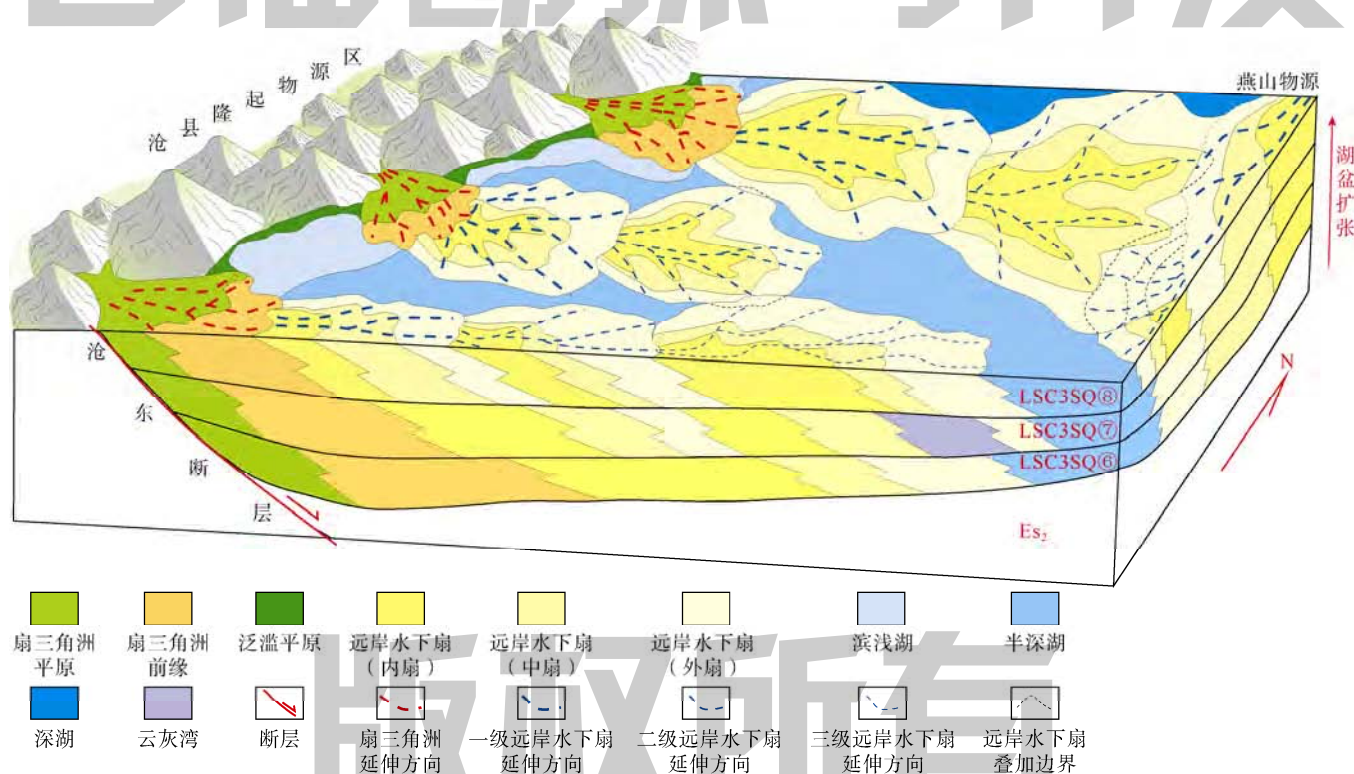


图6 板桥—歧北斜坡区沙一下亚段滨 I 油层组远岸水下扇沉积模式图 (Es₂—沙河街组二段)

物源分布及供给:来自西部沧县隆起和北部燕山的物源提供了充沛的陆源碎屑,是板桥—歧北斜坡区重力流沉积的主要贡献者,其中西部沧县隆起发育多个碎屑注入口,对工区影响最大,其次为北部燕山物源,波及范围在东侧区域,影响相对较小。

扇三角洲—远岸水下扇沉积体系平面展布样式和垂向叠置关系:在西部物源强力推进下,沿着沧东断层下降盘形成了数个裙带状分布的短轴扇三角洲朵

体,这些朵体因快速沉积达到了自然休止角或在其他外界触发机制(地震、洪水、海啸、火山喷发等)的作用下,快速滑塌形成一级远岸水下扇,一级远岸水下扇沉积物达到了自然休止角或在其他外界触发机制的诱发作用下,也会顺小角度斜坡滑塌,形成二级远岸水下扇,同理还可能形成三级远岸水下扇,在平面上,不同世代扇体逐级衍生出来,形成典型的高建设性远岸水下扇;纵向上,多期次远岸水下扇呈连续式

叠置发育,形成厚层叠覆扇体。

2.5 深水重力流规模性发育原因

传统观点认为,重力流沉积为事件性沉积,难以形成大规模发育的沉积格局,平面上多呈小面积透镜状孤立展布。通过本次研究认为,古气候条件、物源条件、触发机制、地形条件及构造演化特征等多因素耦合,形成了板桥—歧北斜坡区面积达 500 km²、砂体平均厚度近 300 m 的重力流沉积。其中“高强度物源供应、滑水机制支撑、有利深水地形坡度”是能够形成规模性重力流沉积的 3 大要素。

高强度物源供应是基础。在古近系温暖湿润的气候条件下,西部沧县隆起物源和北部燕山物源为板桥—歧北斜坡区提供了高强度、充沛的富砂陆源碎屑物质,为该地区大规模发育重力流奠定了坚实的物质基础。在沧东断层的持续活动下,西部湖盆边缘斜坡逐渐变陡,扇三角洲向前推进能力不断加强,丰富的陆源碎屑物质形成的厚层扇三角洲前缘沉积物将为深水重力流大规模发育提供非常有利的物质条件,随着前缘斜坡沉积物的不断堆积,产生向下滑动的重力势能逐渐积累,当达到了自然休止角或遇到外界触发机制(地震、洪水、海啸、火山喷发等)作用时,将导致这些快速堆积的未固结—半固结沉积物因重力失稳而突然滑塌。

滑水机制是保证^[5,13,38]。“滑水”现象最早由 Mohrig^[5,38]在水槽实验中发现,由于基质具有较强内聚力,从而阻止了水体对基质的稀释作用,其底部被限制的水体就如同一层起润滑作用的水膜一样,能够有效地减小重力流所受到的拖拽阻力,使得重力流能够以较小阻力进行长距离、弱侵蚀滑动,这为深水重力流能够长距离、低角度滑动提供了有力而合理的解释。因此“滑水”现象是西部沧县隆起及北部燕山褶皱带的重力流(主要是砂质碎屑流)能够沿水下斜坡滑动形成多期次、大范围、长距离远岸水下扇扇体的重要保证。国外曾经报道,砂质碎屑流可以沿低角度斜坡搬运几十甚至几百千米^[11,39]。

有利深水地形坡度是关键^[39-40]。持续的构造活动为重力流的发育提供了有利的深水地形坡度,沙一下亚段沉积时期,板桥斜坡具备向东倾斜的低角度缓坡,滨海地区的斜坡具有向南倾斜的低角度缓坡,适当的坡度既可以使沉积物产生不稳定性而易滑塌,又可以为重力流的持续、长距离搬运提供稳定的能量补给。有一定坡度且宽缓的深水地形,是重力流能够向前不

断推进、大面积展布的关键因素,控制着重力流沉积体系的空间分布格局。

3 深水沉积储集层特征

3.1 砂体分布特征

通过多井自然伽马与井旁道 90° 相位转换的地震振幅相关关系及砂岩厚度-相对地震振幅交会分析可知,砂岩厚度与地震振幅具有较好的正相关性,振幅越大砂体厚度相对越大(见图 7)。以 LSC3SQ⑦为例,砂体厚度较大的区域主要分布在葛沽物源一级远岸水下扇内扇和中扇带 z8—bins62 井区及小站物源一级远岸水下扇内扇和中扇带 bs18—b855—bs33 井区,其次为北部燕山远岸水下扇的内扇和中扇带的局部区域;而葛沽、小站扇三角洲及远岸水下扇外扇带砂体厚度较薄(见图 8)。

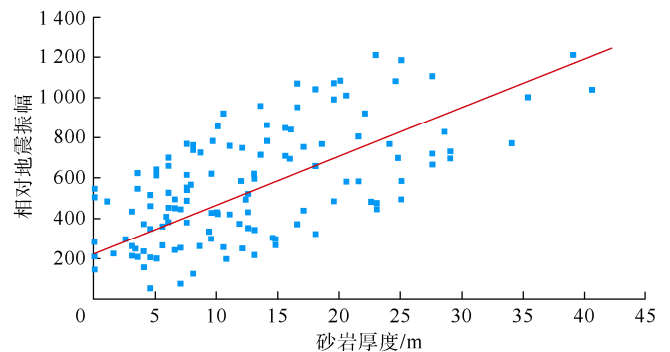


图7 砂岩厚度与地震振幅相关关系图

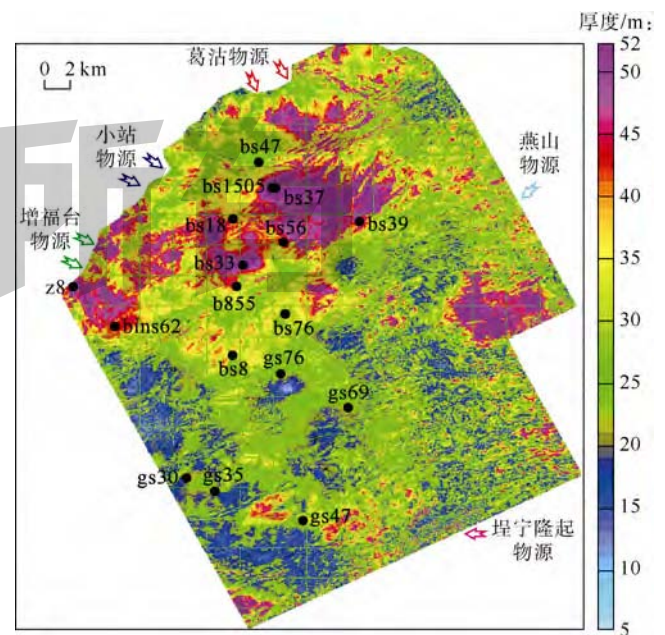


图8 板桥—歧北斜坡区 LSC3SQ⑦砂体厚度分布图

3.2 储集层物性特征及主控因素

3.2.1 储集层物性特征

板桥—歧北斜坡区滨 I 油层组远岸水下扇砂体虽然埋深普遍大于 3 500 m,但却具有相对较好的储集性能(见图 9),孔隙度最高可达 23.6%,平均值为 15.1%;渗透率几何平均值为 $5.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。但不同微相砂体的储集性能存在明显差异,主水道物性尤其是渗透性能较好,孔隙度平均值为 20.1%,渗透率几何平均值为 $120 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,其次为分支水道,孔隙度平均值为 15.2%,渗透率几何平均值为 $2.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;无水道区浊积席状砂物性相对较差,孔隙度平均值为 9.1%,渗透率几何平均值为 $0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。在构造、成岩等条件相似的环境中,沉积微相是控制砂体储集性能的内在因素,主水道主要为砂质碎屑流成因,砂岩呈厚层块状,泥质含量较低、粒度相对较粗,储集物性较好;分支水道仍是以砂质碎屑流成因为主,但浊流成因砂体的比例增加,造成砂体泥质含量升高、粒度变细、物性变差;而无水道区浊积席状砂主要是浊流成因,形成的砂体具有相对高的泥质含量、更细的粒度,故而物性较差,但亦可形成致密油气富集^[20]。

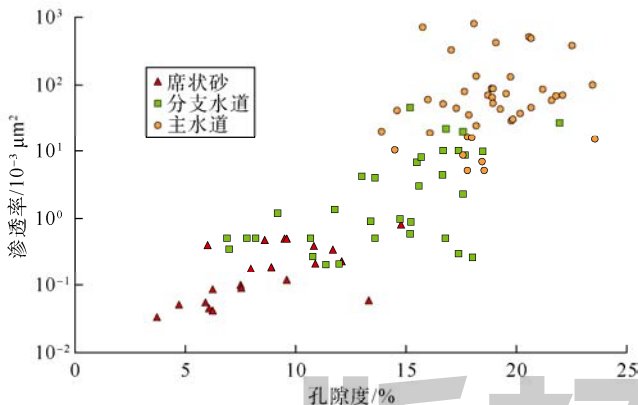


图 9 板桥—歧北斜坡区滨 I 油层组远岸水下扇不同沉积微相孔渗关系图

3.2.2 优质储集层主控因素

储集物性除了受到压实、胶结等成岩作用以及颗粒成分、粒度分布等沉积作用外,远岸水下扇砂体的来源及成因方式对深水优质砂体的形成起到了先天性决定作用。过去多认为深水重力流砂体因与深水泥岩混杂沉积而难以形成优质储集层,通过本次研究,认识到由于重力流砂体特殊的成因方式,使得在深层仍可形成优质储集层。

板桥—歧北斜坡区重力流砂体的输送特征主要有两种形式^[41]:一是按照正常相序滑塌搬运的“顺相搬

运”,以扇三角洲前缘远端远砂坝、席状砂部分作为扇体的直接物源,该类物源属于物性较差、含砂率较低的砂泥混合型,孔隙度主要为 5.8%~16.4%,平均为 9.1%,渗透率为 $(0.08 \sim 6.30) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均 $0.95 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,其在滑动滑塌过程中没有充足的机会进行砂泥分异,所以以这种方式滑塌而形成的远岸水下扇,多是粒度较细、泥质含量较高、物性较差的薄砂层,称之为 I 型远岸水下扇;二是超越牵引流相序滑塌搬运的“跨相搬运”,以储集物性较好、含砂率较高的扇三角洲前缘水下分流河道或者河口坝作为直接物源,这类砂体孔隙度主要为 8.2%~28.4%,平均 17.6%,渗透率为 $(0.16 \sim 635) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均 $9.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,所以无论是“整体固结”块体式直接滑动滑塌的早期阶段还是经过较长距离的滑动而局部转化为浊流的后阶段,都将会形成砂体较厚、粒度较粗、泥质含量较低且储集物性较好的优质储集层,以“跨相搬运”方式输送砂体所形成的扇体称之为 II 型远岸水下扇,该类远岸水下扇是深水环境优质储集层的主要发育区。

板桥—歧北地区主要发育砂质碎屑流和浊流两种重力流类型,其中砂质碎屑流以厚层块状砂体并呈层流形式进行搬运和沉积,在搬运过程中,这种砂质塑性块体内在的黏附力能够有效阻挡深水泥质杂基等物质的混入,同时其快速沉积特点还能够滞缓成岩演化而保留较好的储集性能。

因此,作为物源区的扇三角洲前缘沉积物物性及岩性特征、砂体输送特征及搬运方式是控制重力流砂体储集性能的关键因素^[42-43]。当物性较好的扇三角洲前缘水下分流河道或河口坝砂体“跨相搬运”且以砂质碎屑流塑性块体方式搬运并快速沉积到深水区时,即可形成深水优质储集层。

4 深水区有利储集相带评价预测

4.1 有利储集相带划分标准

评价砂体储集能力的参数主要有孔隙度、渗透率、砂岩有效厚度、砂岩分布面积等,4 个主要因素相互匹配、相互补偿,如相对较小的孔隙度可通过厚砂层进行补偿,孔隙度、砂岩有效厚度和砂岩分布面积反映了砂体储集空间的大小,渗透率反映了砂体的渗流能力,但平面预测存在一定难度,而埋深则反映了砂岩油藏在目前技术条件的是否经济可采,也是划分有利储集相带需要考虑的重要因素之一,故本文主要选择孔隙度、砂岩有效厚度、埋深 3 个评价参数(见表 2)。

表 2 板桥—歧北斜坡区滨 I 油层组有利储集相带划分标准

分类	孔隙度/%	砂岩有效厚度/m	埋深/km	综合评价指数
I	>20	>30	<3.5	>0.7
II ₁	16~20	20~30	3.5~4.0	0.5~0.7
II ₂	12~16	10~20	4.0~4.5	0.3~0.5
III	8~12	5~10	4.5~5.0	0.1~0.3
IV	<8	<5	>5.0	<0.1

为方便不同单位或量级的指标能够进行比较和加权，首先对数据进行无量纲标准化处理，本文选择离差标准化法对原始数据进行线性变换，使各数据落到区间[0,1]，设孔隙度、砂岩有效厚度、埋深的权重依次为 0.8、0.5、0.3，计算综合评价指数 EI：

$$EI = (0.8\phi' + 0.5H' - 0.3D') / 1.6$$

式中 EI——综合评价指数，无因次； ϕ' ——标准化孔隙度，无因次； H' ——标准化砂岩有效厚度，无因次； D' ——标准化埋深，无因次。

4.2 有利储集相带综合预测

本文通过上述 3 要素叠合评价预测了板桥—歧北斜坡区滨 I 油层组有利储集相带。以 LSC3SQ⑦为例（见图 10），其中 I 类储集相带是最有利的勘探区，主要分布在葛沽物源一级远岸水下扇内扇带，微相类型

主要为水道，有效面积约为 40 km²；II₁类主要分布在葛沽物源一级远岸水下扇内扇边缘、中扇带及小站物源二级远岸水下扇内扇、中扇带，微相类型主要为水道和分支水道，有效面积约为 60 km²；II₂类主要分布在增福台物源一级远岸水下扇内扇、中扇带，小站物源一级远岸水下扇内扇、中扇带以及北部燕山远岸水下扇的内扇和中扇带，微相类型主要为水道和分支水道，有效面积约为 65 km²；III类主要分布于埋深相对较大（大于 4 000 m）的远岸水下扇内扇、中扇带及部分外扇带，微相类型包括水道、分支水道及无水道区浊积席状砂等；IV类主要分布在远岸水下扇外扇带—湖相沉积区，以泥质粉砂岩、粉砂质泥岩为主。

5 深水斜坡区油气勘探实践

5.1 勘探发现

根据优势相及有利储集层评价认识，重点针对 I 类和 II 类有利储集相带区部署 20 余口探井，其中 bs37、bs41×1、bs1505 等 10 余口井获得工业油流，达到百吨以上的高产井有 5 口，最高自喷日产量达 150 余吨，日产气 15×10⁴ m³。经证实，板桥—歧北斜坡区滨 I 油层组存在多套含油气层系，多分布在远岸水下扇主水道和分支水道微相区，形成了大规模富集高产的上倾尖灭岩性油气藏，预计新增控制储量在千万吨以上，展示了该区滨 I 油层组以重力流沉积成因为主的岩性油气藏具有良好的勘探前景。勘探实践亦表明，远岸水下扇远端以物性相对较差的无水道区浊积席状砂为主的大片区域，形成了规模可观的致密油气^[20]。

5.2 油气成藏特征

研究区滨 I 油层组已发现油层为轻质油藏，地层压力系数 1.16~1.18，为正常压力系统，原油密度为 0.80~0.83 g/cm³，属于轻质油，原油黏度为 1.57~3.67 mPa·s，为低黏油。沙一下亚段主要发育下生上储型油气藏（见图 11），油气母源为下伏沙三段厚层优质烃源岩，沙一下亚段烃源岩为补充，纵向断层为油气输送有效通道，盖层为区域性分布的沙一段中厚层泥岩。沙一下亚段远岸水下扇砂体具有其独特的成藏优越性，一是重力流的大规模发育为形成大范围深水优质储集层奠定了基础，II 型远岸水下扇形成了多套厚度大、物性优的储集层；二是远岸水下扇砂体位于浪基面以下深水环境，该环境中水动力较弱，已形成的砂体不易被破坏，同时深水暗色泥岩厚度较大，封盖性能良好，优质储集层与暗色泥岩纵向上相互叠置，形成了多套配置良好的油气成藏组合。

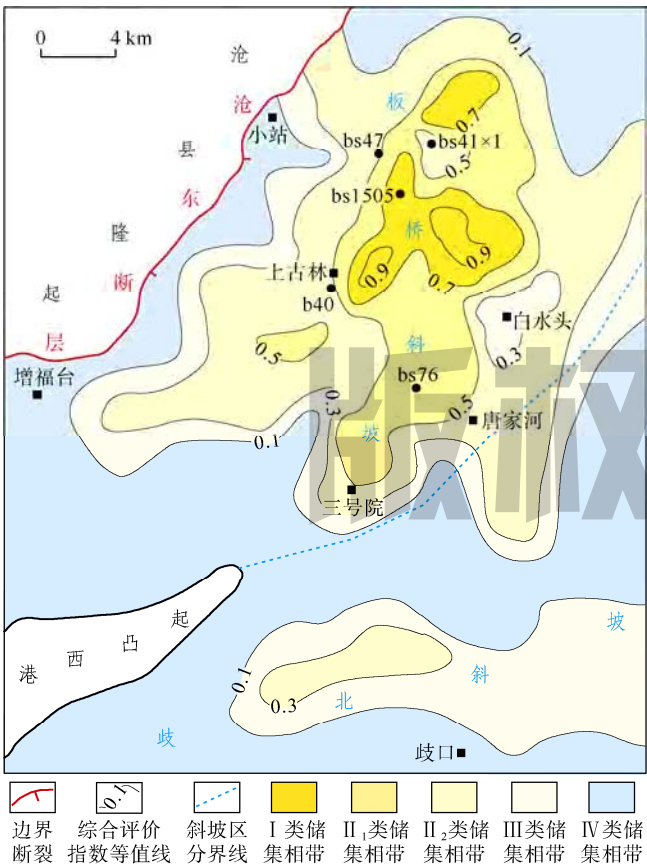


图 10 板桥—歧北斜坡区 LSC3SQ⑦有利储集相带评价图

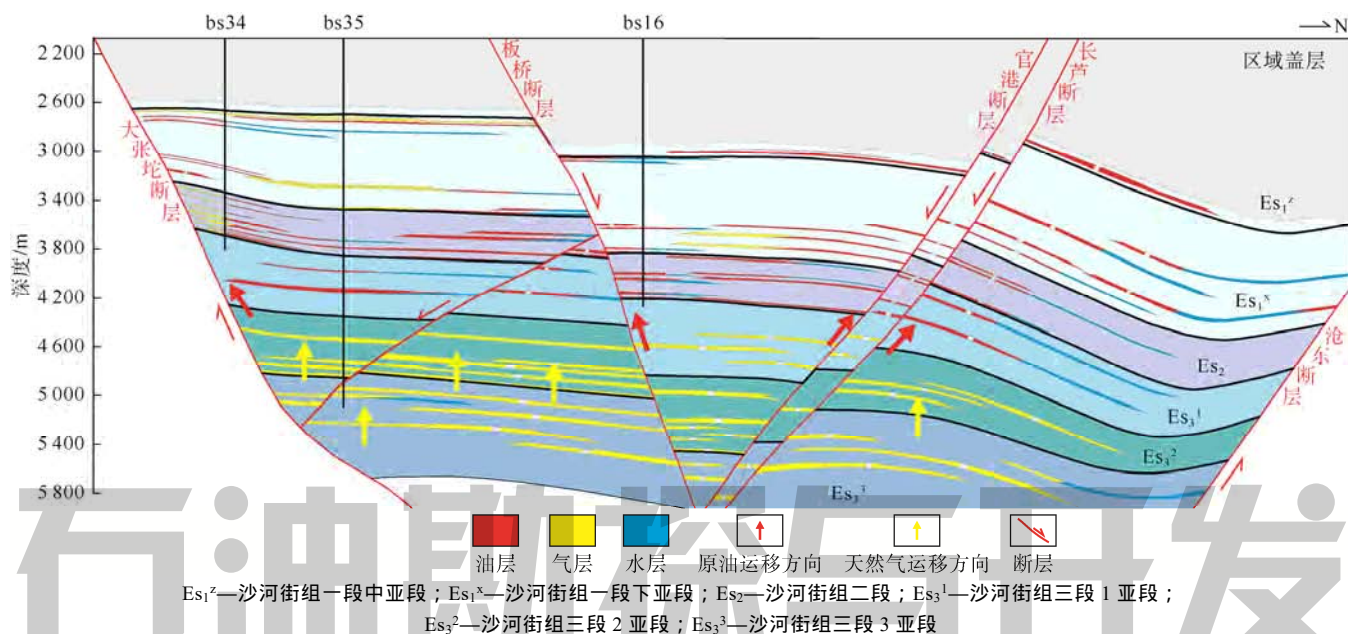


图 11 板桥斜坡区油气成藏模式图

6 结论

板桥—歧北斜坡区沙一下亚段滨 I 油层组具有西高东低、凹陷相间的构造格局,物源主要来自西部沧县隆起,空间上形成了大规模、多级别、多期次的扇三角洲—远岸水下扇沉积体系,远岸水下扇具有“充沛物源供给、多级扇体衍生、多期扇体叠置”的沉积特征;深层深水沉积砂体可形成优质储集层,“物源类型、输送机制、沉积微相”等要素耦合是控制深水优质储集层发育的关键,以含砂率较高的扇三角洲前缘水下分流河道或河口坝微相砂体作为二次物源,呈“跨相”方式输送并以厚层塑性块体形式搬运所形成的远岸水下扇内扇、中扇主水道或分支水道微相,是深水沉积有利的勘探区;根据孔隙度、砂岩有效厚度、埋深 3 个评价参数建立综合评价指数,减少了人为因素影响,评价 I—II 类有利勘探区 165 km²。勘探实践证明,沙一下亚段深水斜坡区远岸水下扇砂体具有独特的成藏优越性,深水远岸水下扇主水道和分支水道存在多套含油层系,在斜坡区形成了规模较大的上倾尖灭岩性油气藏,而远岸水下扇无水道区浊积席状砂可形成一定潜力的致密油气。

参考文献:

- [1] KUENEN PH H, MIGLIORINI C I. Turbidity currents as a cause of graded bedding[J]. Journal of Geology, 1950, 58(2): 97-127.
- [2] BOUMA A H. Sedimentology of some flysch deposits: A graphic approach to facies interpretation[R]. Amsterdam: Elsevier, 1962:

88-123.

- [3] NORMARK W R. Growth patterns of deep-sea fans[J]. AAPG Bulletin, 1970, 54(11): 2170-2195.
- [4] WALKER R G. Deep water sandstone facies and ancient submarine fans: Models for exploration for stratigraphic traps[J]. AAPG Bulletin, 1978, 62(5): 239-263.
- [5] MOHRIG D, ELVERHOI A, PARKER G. Experiments on the relative mobility of muddy subaqueous and subaerial debris flows, and their capacity to remobilize antecedent deposits[J]. Marine Geology, 1999, 154(1/2/3/4): 117-129.
- [6] SHANMUGAM G. Ten turbidite myths[J]. Earth-Science Reviews, 2002, 58(3): 311-341.
- [7] LAWRENCE A A, WILLIAM D M, PETER J T. Special issue introduction: Sediment gravity flows: Recent insights into their dynamic and stratified/composite nature[J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26(10): 1897-1899.
- [8] 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.
- [9] 李云, 郑荣才, 朱国金, 等. 沉积物重力流研究进展综述[J]. 地球科学进展, 2011, 26(2): 157-163.
LI Yun, ZHENG Rongcai, ZHU Guojin, et al. Reviews on sediment gravity flow[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(2): 157-163.
- [10] KHRIPOUNOFF P C A, BUE N L B. Different types of sediment gravity flows detected in the Var submarine canyon(northwestern Mediterranean Sea)[J]. Progress in Oceanography, 2012, 106(6): 138-153.
- [11] TALLING P J, CHARLES K P, DAVID J W P. How are subaqueous sediment density flows triggered, what is their internal structure and how does it evolve? Direct observations from monitoring of active

- flows[J]. *Earth Science Reviews*, 2013, 125(3): 247-287.
- [12] SHANMUGANM G. 深水砂体成因研究新进展[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(3): 294-301.
- SHANMUGANM G. New perspectives on deep-water sandstones: Implications[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(3): 294-301.
- [13] 鲜本忠, 安思奇, 施文华. 水下碎屑流沉积: 深水沉积研究热点与进展[J]. *地质论评*, 2014, 60(1): 39-49.
- XIAN Benzhong, AN Siqi, SHI Wenhua. Subaqueous debris flow: Hotspots and advances of deep-water sedimentation[J]. *Geological Review*, 2014, 60(1): 39-49.
- [14] PEAKALL J, SUMNER E J. Submarine channel flow processes and deposits: A process-product perspective[J]. *Geomorphology*, 2015, 244: 95-120.
- [15] PETTINGILL H S, WEIMER P. Deepwater remains immature frontier[J]. *Offshore*, 2002, 62(10): 48-51.
- [16] 张娣, 侯中健, 王亚辉, 等. 板桥—北大港地区沙河街组沙一段湖相碳酸盐岩沉积特征[J]. *岩性油气藏*, 2008, 20(4): 92-97.
- ZHANG Di, HOU Zhongjian, WANG Yahui, et al. Sedimentary characteristics of lacustrine carbonate rocks of the first member of Shahejie Formation in Banqiao-Beidagang area[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2008, 20(4): 92-97.
- [17] 石世革. 黄骅坳陷板桥凹陷古近系沙一段中部层序地层学研究及岩性油气藏勘探[J]. *石油与天然气地质*, 2008, 29(3): 320-325.
- SHI Shige. Study of sequence stratigraphy and exploration of lithologic reservoirs in the Paleogene Middle Sha-1 Member, the Banqiao Sag of the Huanghua Depression[J]. *Oil & Gas Geology*, 2008, 29(3): 320-325.
- [18] 崔勇, 赵澄林. 深层砂岩次生孔隙的成因及其与异常超压泄漏的关系: 以黄骅坳陷板桥凹陷板中地区滨IV油组为例[J]. *成都理工大学学报*, 2002, 29(1): 49-52.
- CUI Yong, ZHAO Chenglin. Secondary porosity generation and the relationship associated with overpressure leakage[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2002, 29(1): 49-52.
- [19] 黄传炎, 王华, 王家豪, 等. 板桥凹陷断控重力流沉积特征及沉积模式[J]. *油气地质与采收率*, 2007, 14(6): 14-16.
- HUANG Chuanyan, WANG Hua, WANG Jiahao, et al. Depositional character and model of fault-controlling gravity flow in Banqiao Depression[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2007, 14(6): 14-16.
- [20] 蒲秀刚, 周立宏, 韩文中, 等. 歧口凹陷沙一下亚段斜坡带重力流沉积与致密油勘探[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(2): 138-149.
- PU Xiugang, ZHOU Lihong, HAN Wenzhong, et al. Gravity flow sedimentation and tight oil exploration in lower first member of Shahejie Formation in slope area of Qikou Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(2): 138-149.
- [21] 高勇, 何婉茹, 汤戈, 等. 歧北地区古近系玄武岩储集空间的充填演化研究[J]. *断块油气田*, 2010, 17(6): 652-654, 725.
- GAO Yong, HE Wanru, TANG Ge, et al. Pore space packing and evolution of Paleogene basalt reservoir in Binhai District[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2010, 17(6): 652-654, 725.
- [22] 蒲秀刚, 周立宏, 肖敦清, 等. 黄骅坳陷歧口凹陷西南缘湖相碳酸盐岩地质特征[J]. *石油勘探与开发*, 2011, 38(2): 136-145.
- PU Xiugang, ZHOU Lihong, XIAO Dunqing, et al. Lacustrine carbonates in the southwest margin of Qikou Sag, Huanghua Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(2): 136-145.
- [23] 周立宏, 蒲秀刚, 肖敦清, 等. 箕状断陷斜坡带沉积储层与油气成藏: 以渤海湾盆地为例[M]. 北京: 石油工业出版社, 2013.
- ZHOU Lihong, PU Xiugang, XIAO Dunqing, et al. The depositional reservoirs and petroleum entrapment of halfgraben-like rift slope zone lake basin with example from Bohaiwan Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2013.
- [24] 朱筱敏, 李洋, 董艳蕾, 等. 地震沉积学研究方法和歧口凹陷沙河街组沙一段实例分析[J]. *中国地质*, 2013, 40(1): 152-162.
- ZHU Xiaomin, LI Yang, DONG Yanlei, et al. The program of seismic sedimentology and its application to Shahejie Formation in Qikou depression of North China[J]. *Geology in China*, 2013, 40(1): 152-162.
- [25] 张伟, 柳颀, 韩文中. 歧口凹陷滨海地区沙一下鲕粒发育特征与重力流沉积[J]. *地质学刊*, 2014, 38(4): 599-607.
- ZHANG Wei, LIU Sa, HAN Wenzhong. Features of ooids development and gravity flow sedimentation for SQEs₁ in Binhai area of Qikou sag[J]. *Journal of Geology*, 2014, 38(4): 599-607.
- [26] 黄传炎, 王华, 肖敦清, 等. 板桥凹陷断裂陡坡带沙一段层序样式和沉积体系特征及其成藏模式研究[J]. *沉积学报*, 2007, 25(3): 386-391.
- HUANG Chuanyan, WANG Hua, XIAO Dunqing, et al. Sequence patterns, characteristics of depositional systems and model of reservoirs of fault steep slope belt of the first member of Shahejie Formation in Banqiao Sag[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(3): 386-391.
- [27] 牛嘉玉, 李峰. 渤海湾盆地滩海地区油气富集规律与油气勘探[J]. *石油学报*, 2000, 21(2): 9-13.
- NIU Jiayu, LI Feng. Inshore oil-gas accumulation and exploration in Bohai Bay Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2000, 21(2): 9-13.
- [28] 吴元燕, 付建林, 周建生, 等. 歧口凹陷含油气系统及其评价[J]. *石油学报*, 2000, 21(6): 18-22.
- WU Yuanyan, FU Jianlin, ZHOU Jiansheng, et al. Evaluation of hydrocarbon system in Qikou sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2000, 21(6): 18-22.
- [29] 杨帅, 陈洪德, 侯明才, 等. 基于地震沉积学方法的沉积相研究: 以涪西南凹陷涪洲组三段为例[J]. *沉积学报*, 2014, 32(3): 568-575.
- YANG Shuai, CHEN Hongde, HOU Mingcai, et al. The research of sedimentary facies based on seismic sedimentology method: A case study of the three-section of Weizhou Formation in Weixi'nan depression[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(3): 568-575.
- [30] 曾洪流. 地震沉积学[M]. 朱筱敏, 曾洪流, 董艳蕾, 译. 北京: 石油工业出版社, 2011.
- ZENG Hongliu. Seismic sedimentology[M]. ZHU Xiaomin, ZENG Hongliu, DONG Yanlei, Trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [31] 朱筱敏, 刘长利, 张义娜, 等. 地震沉积学在陆相湖盆三角洲砂体预测中的应用[J]. *沉积学报*, 2009, 27(5): 915-921.
- ZHU Xiaomin, LIU Changli, ZHANG Yina, et al. On seismic sedimentology of lacustrine deltaic depositional systems[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(5): 915-921.
- [32] 曾洪流, 朱筱敏, 朱如凯, 等. 坳陷型陆相盆地地震沉积学研究规范探讨[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(3): 275-284.

- ZENG Hongliu, ZHU Xiaomin, ZHU Rukai, et al. Guidelines for seismic sedimentologic study in non-marine postrift basins[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 275-284.
- [33] 姜在兴. 沉积学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
JIANG Zaixing. Sedimentology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.
- [34] 蒲秀刚, 陈长伟, 周立宏, 等. 整体—局部—整体沉积体系分析在歧口凹陷沙三段的应用[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2011, 26(2): 8-12.
PU Xiugang, CHEN Changwei, ZHOU Lihong, et al. Application of a new sedimentary system analysis method in Es₃ of Qikou Sag[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition), 2011, 26(2): 8-12.
- [35] 庞雄, 柳保军, 颜承志, 等. 关于南海北部深水重力流沉积问题的讨论[J]. 海洋学报, 2012, 34(3): 114-119.
PANG Xiong, LIU Baojun, YAN Chengzhi, et al. Some reviews on deep-water gravity-flow deposition in the northern South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2012, 34(3): 114-119.
- [36] 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.
- [37] 郑荣才, 郑哲, 高博禹, 等. 珠江口盆地白云凹陷珠江组海底扇深水重力流沉积特征[J]. 岩性油气藏, 2013, 25(2): 1-8.
ZHENG Rongcai, ZHENG Zhe, GAO Boyu, et al. Sedimentary features of the gravity flows in submarine fan of Zhujiang Formation in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2013, 25(2): 1-8.
- [38] MOHRIG D, ELLIS C, PARKER G, et al. Hydroplaning of subaqueous debris flows[J]. GSA Bulletin, 1998, 110(3): 387-394.
- [39] TALLING P J, WYNN R B, MASSON D G, et al. Onset of submarine debris flow deposition far from original giant landslide[J]. Nature, 2007, 450(7169): 541-544.
- [40] 王海荣, 王英民, 邱燕, 等. 深水环境多级地貌坡折控制下的重力流动力学的演变[J]. 地质学报, 2009, 83(6): 812-819.
WANG Hairong, WANG Yingmin, QIU Yan, et al. The control of the multiple geomorphologic breaks on evolution of gravity flow dynamics in deep-water environment[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(6): 812-819.
- [41] 李磊, 王英民, 徐强, 等. 南海北部白云凹陷 21Ma 深水重力流沉积体系[J]. 石油学报, 2012, 33(5): 798-806.
LI Lei, WANG Yingmin, XU Qiang, et al. 21Ma deep water gravity flow depositional system in Baiyun sag, northern South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(5): 798-806.
- [42] 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.
- [43] WEIMER P, SLAT T R M. Introduction to the petroleum geology of deep water settings[C]. Tulsa: SEPM Special Publication, 2007.
- 第一作者简介: 赵贤正 (1962-), 男, 浙江义乌人, 博士, 中国石油大港油田公司教授级高级工程师, 主要从事油气勘探、煤层气勘探开发综合研究与生产管理工作。地址: 天津市大港油田公司三号院, 大港油田公司机关, 邮政编码: 300280。E-mail: xzzhao@petrochina.com.cn
- 收稿日期: 2016-06-08 修回日期: 2017-02-20
- (编辑 魏玮 王大锐)

《石油勘探与开发》2017 年第 3 期部分文章预告

- 松辽盆地南部致密油气烃源岩下限与分级评价标准 卢双舫, 黄文彪, 李文浩, 等
- 致密碳酸盐岩储集层特征与天然气勘探潜力——以鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东部奥陶系马家沟组为例 魏新善, 陈洪德, 张道锋, 等
- 走滑断裂带贯穿过程与发育模式的物理模拟 肖阳, 鄧光辉, 雷永良, 等
- 库车前陆冲断带多尺度裂缝成因及其储集意义 刘春, 张荣虎, 张惠良, 等
- 深层储集层长石溶蚀增孔的物理模拟与定量计算 高志勇, 冯佳睿, 崔京钢, 等
- 南海西部深水区大气田凝析油成因与油气成藏机制——以琼东南盆地陵水 17-2 气田为例 黄合庭, 黄保家, 黄义文, 等
- 安岳气田龙王庙组气藏地质特征与开发技术政策 李熙喆, 郭振华, 万玉金, 等
- 致密储集层跨尺度耦合渗流数值模拟模型 方文超, 姜汉桥, 李俊健, 等
- 三角洲砂体构型对水驱波及特征的影响——以南图尔盖盆地 Kumkol South 油田 J-II 层为例 赵伦, 王进财, 陈礼, 等
- 水力裂缝平面应变假设的适用条件与解析修正 赵金洲, 彭瑀, 李勇明, 等
- 碳酸盐岩储集层钻井井涌特征及井涌风险评价方法 郭艳利, 孙宝江, 高永海, 等
- 煤岩定向井压裂水力裂缝起裂及非平面扩展实验 谭鹏, 金衍, 侯冰, 等