# 歧口凹陷深凹区东三段重力流沉积体系及分布模式

张佼杨[1]，朱华汇[1]，石倩茹[1]，张明振[1]，董越崎[1]，任仕超[1]，葛卫双[2*]

1. 中国石油大港油田公司，天津 300280；
2. 中国地质大学（武汉）资源学院，武汉 430074

第一作者，E-mail：kt_zhangjiaoyang@petrochina.com.cn

* 通信作者，E-mail：673601019@qq.com

2024-11-02 收稿；2025-04-28 修回；2025-05-06 接受

中图分类号：P618.13　　文章编号：2096-8523(2025)03-0057-13　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240653

**摘　要：**歧口凹陷深凹区东三段主要发育半深湖–深湖亚相，重力流砂体连片发育，厘清其沉积特征及成因机制可为油气勘探提供理论支撑。以歧口凹陷深凹区东三段为研究对象，基于高精度地震、测–录井、岩心及薄片等资料，分析了深湖背景下重力流成因机制，总结了歧口凹陷深凹区沉积体系及分布模式。结果表明：东三段沉积时期，受盆缘边界断层及盆内沉积坡折控制，自北东向南浅水区辫状河三角洲前缘砂体发生垮塌，在深凹区形成多期重力流沉积叠置连片。区内重力流沉积可细分为 6 种岩相，解释为砂质碎屑流、泥质碎屑流、浊流 3 类成因，砂体整体分选较好，杂基含量低，具有液化构造、撕裂状泥砾、漂砾等典型滑塌型重力流沉积特征，根据不同类型岩相组合分布特征，平面上重力流呈现砂质碎屑流–浊流–泥质碎屑流的展布特征。其中砂质碎屑流水道微相储层物性条件最好，是深凹区的有利储集相带；浊流沉积的砂岩储层物性较差。歧口凹陷深凹区受古气候、古水深和古地貌的共同控制，具有源远–沟长–坡宜的时空匹配关系的沉积模式，具备形成大规模重力流沉积砂体的潜力。研究成果可为深凹区油气勘探提供参考。

**关键词：**歧口凹陷；深凹区；重力流；砂质碎屑流；沉积模式；东三段

重力流作为一种将陆源碎屑物质向盆地深水区搬运的重要沉积机制，可在盆地深水区沉积优质的储集砂体，形成大规模砂岩油气藏。因此，重力流沉积对于深层油气勘探开发领域都具有重要的理论价值和现实意义[1-13]。近年来，在陆相沉积盆地的油气勘探与开发研究领域，我国已取得显著进展，特别是在渤海湾盆地古近系沙河街组及东营组等典型湖盆沉积地层中，发现了大量由重力流作用形成的砂岩油气藏[1-2]。其中，渤海湾盆地黄骅坳陷的勘探实践成果尤为突出，已探明亿吨级规模的油气资源储量，充分表明深水重力流沉积环境下的湖相油气藏展现出巨大的勘探开发潜力[14-23]。然而，早期的勘探开发实践表明，深水重力流沉积过程具有显著的复杂性，前人的研究证实，重力流的沉积特征受控于水动力条件、物源供给和湖盆地形等因素[3]，优质储层的预测已成为制约湖相重力流砂岩储层油气勘探开发效益的关键因素。因此，亟需进一步深化对重力流沉积岩相类型、展布规律、储层微观结构特征等研究，系统揭示储层发育规律，为重力流沉积中优质储层的有效预测提供理论支持。

歧口凹陷古近系东三段深凹区位于歧口凹陷中部，长期以来认为其远离物源区，主要以半深湖相–湖相为主，砂体欠发育，加之地面条件受限，一直未开展勘探工作。随着对渤海湾盆地歧口凹陷深凹区东三段深入勘探，钻井资料揭示歧口凹陷东三段沉积期，盆外物源供给充足、砂体沉积范围广，一直延伸到深凹区，目前在深凹区发育来自燕山物源供给的大型重力流沉积砂体，打破了深凹区砂体不发育的旧观念，证实了歧口深凹区仍具备油气成藏的潜力。为进一步拓展歧口深凹区油气资源规模，基于

**著录信息：**张佼杨，朱华汇，石倩茹，等. 歧口凹陷深凹区东三段重力流沉积体系及分布模式［J］. 地质科技通报，2025，44(3)：57-69.
ZHANG Jiaoyang，ZHU Huahui，SHI Qianru，et al. Gravity-flow deposition system and distribution patterns in the Third Member of the Dongying Formation in the deep subsag area of the Qikou Sag[J]. Bulletin of Geological Science and Technology，2025，44(3)：57-69.

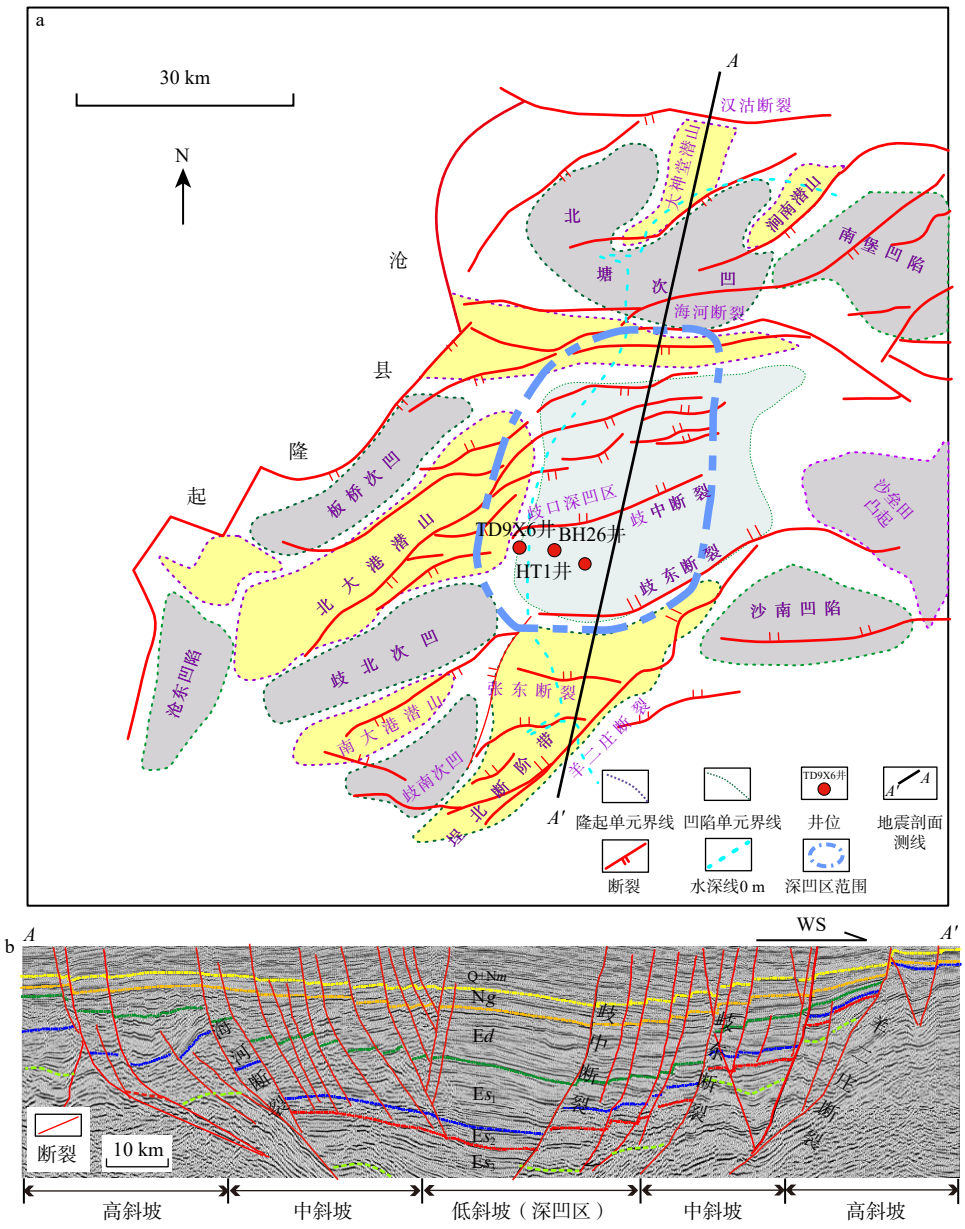
© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

陆相断陷盆地深凹区新钻探井资料、岩心以及各种化验资料，系统开展东三段物源–沉积体系、控砂机制研究，进一步梳理陆相深凹区重力流沉积特征，构建深凹区深水滑塌型重力流沉积模式，对全面预测歧口深凹区优质储层、评价深凹区常规–非常规油气藏勘探潜力具有重要的理论和现实意义。

## 1　研究区概况

黄骅坳陷是渤海湾盆地中部的一个重要构造单元，位于坳陷中东部的歧口凹陷是盆地富油凹陷之一，发育多套含油气层系（图 1）[4]。受盆内Ⅱ级断裂滨海断层、歧中断层、歧东断层控制，凹陷中部滩海区东营组发育大型斜坡[13-17]，斜坡整体呈多个阶梯状展布的多级挠曲坡折，坡折带分布面积广，油气资源潜力大，前期钻探证实，在上、中斜坡带的东营组发育地层–岩性油气藏，但低斜坡深凹区主要发育常规岩性油气藏或是非常规致密油气藏，且整体勘探程度低，尚处于持续探索阶段，因此，低斜坡带的深凹区东营组是歧口凹陷常规油气藏与非常规油气藏共同勘探的重要区带和目的层系。

研究区新生界自下而上为沙河街组、东营组、




Q+N*m*. 平原组+明化镇组；N*g*. 馆陶组；E*d*. 东营组；E*s*$_1$.沙一段；E*s*$_2$. 沙二段；E*s*$_3$. 沙三段

图 1　歧口凹陷区域图 (a) 及歧口深凹区南北向地震剖面图 (b)

Fig. 1　Geological setting of the Qikou Sag (a) and a north-south striking seismic profile across the deep subsag area of the Qikou Sag (b)

馆陶组和明化镇组，其中东营组至下而上可分为东三段、东二段和东一段。东三段岩性以深灰色泥岩、砂岩为主；东二段沉积时期水体加深，岩性偏细，以深灰色泥页岩为主，夹薄层砂岩；东一段水体变浅，岩性以块状灰色–深灰色砂泥岩互层为主。目前，斜坡带低斜坡的深凹区东三段为主要勘探目的层，根据沉积旋回和电性差别，又可进一步分为 3 个亚段，勘探证明东三下亚段和东三中亚段为含油主力层段。深凹区整体处于半深湖–深湖背景，发育大型深水重力流沉积[15-18]（图 2）。

## 2　沉积特征及沉积相类型

### 2.1　岩相及特征

基于研究区 4 口井取心观察，以深凹区重力流沉积物粒度、泥质含量及沉积构造的差异进行岩相划分，共划分出 6 种岩相类型（表 1），图 3 展示了深凹区岩心尺度中典型岩相的沉积构造特征。岩相Ⅰ块状层理砂岩相：多为厚层洁净块状中细砂岩（图 3a），内含漂浮泥质碎屑，块状内部无明显沉积构造，反映沉积物经由整体固结沉降形成。岩相Ⅱ变形构造砂岩相：岩性以中细砂岩为主，内部可见泥岩撕裂屑、液化变形现象（图 3f～h），主要为先存三角洲前缘沉积的砂体滑塌变形沉积形成，岩相Ⅰ、Ⅱ为典型砂质碎屑流成因的重要识别标志。岩相Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ对应鲍马序列的 Tb、Tc、Te 段，反映了浊流从底部到顶部的水动力条件变化，从高能到低能的过渡，是浊流典型相标志（图 3b～d）。岩相Ⅵ含碎屑泥质砂岩相：整体以泥岩为主，砂、泥、泥质碎屑混杂，内含不规则泥岩撕裂屑（图 3e），为由滑塌作用形成的泥质碎屑流整体冻结沉积而成，为泥质碎屑流的识别标识[19-22]。

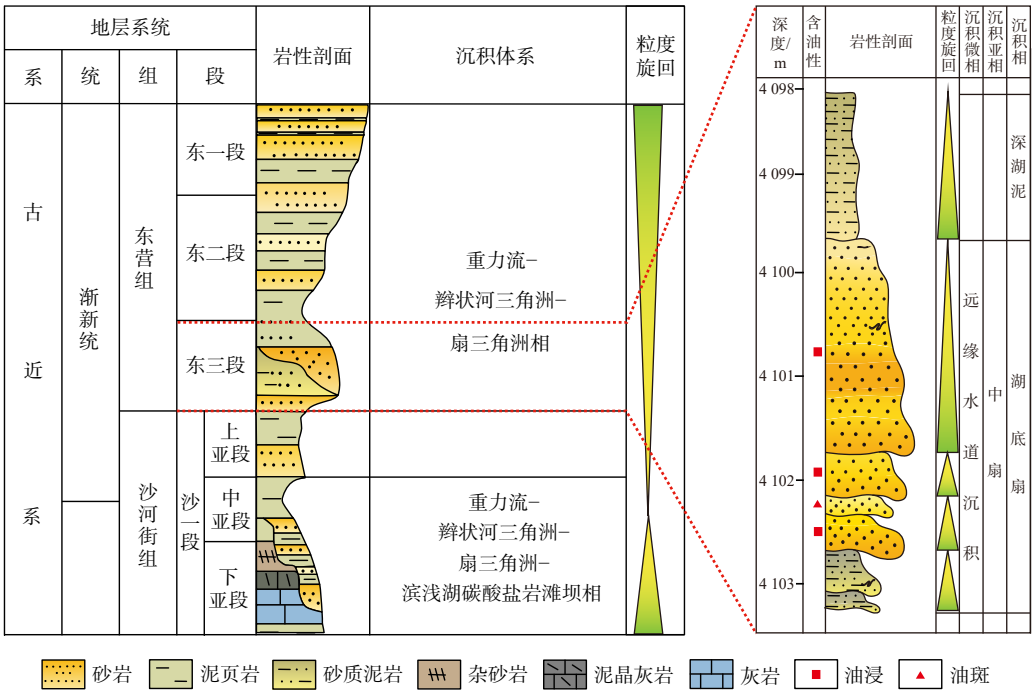



图 2　岐口凹陷东三段综合柱状图

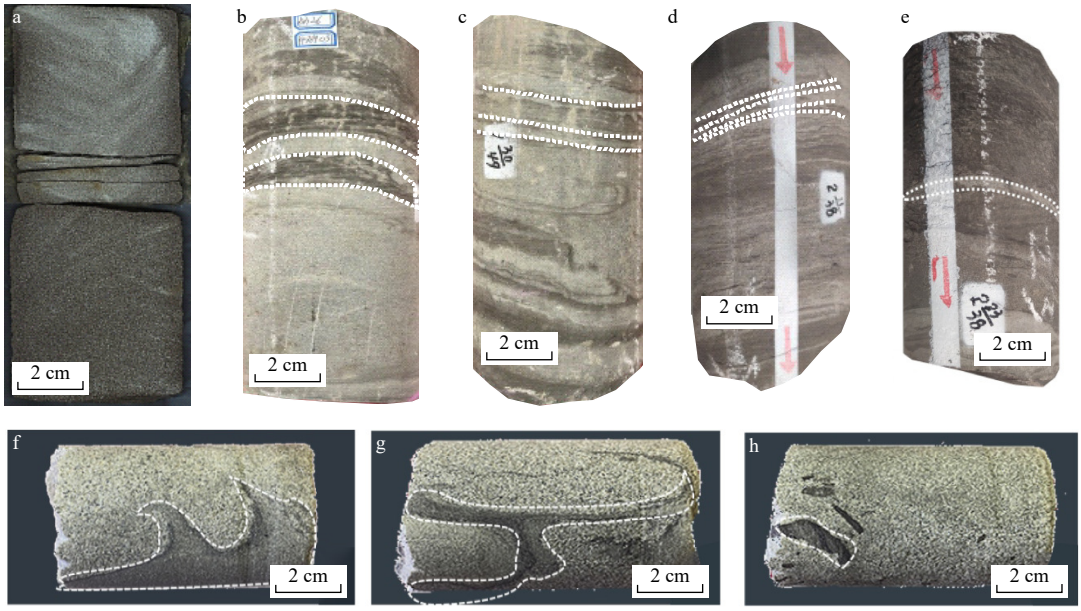
Fig. 2　Comprehensive stratigraphic histogram in the Third Member of the Dongying Formation in the Qikou Sag

**表 1　岐口凹陷深凹区东营组岩相特征**

Table 1　Lithofacies of the Dongying Formation in the deep subsag area of the Qikou Sag

| 编号 | 岩相类型 | 岩性特征 | 砂体成因 |
|---|---|---|---|
| Ⅰ | 块状层理砂岩相 | 中细砂岩，块状内部沉积构造少见 | 砂质碎屑流 |
| Ⅱ | 变形构造砂岩相 | 中细砂岩，无粒序，内部含泥岩撕裂屑 | 砂质碎屑流 |
| Ⅲ | 平行层理砂岩相 | 粉、细砂岩，平行层理，纹层较厚 | 浊流，鲍马序列Tb段 |
| Ⅳ | 波状层理砂岩相 | 细砂岩，波状层理，薄泥纹层与砂纹层呈波状互层 | 浊流，鲍马序列Tc段 |
| Ⅴ | 透镜状层理层 | 粉砂岩及泥岩薄互层，内含砂质透镜体 | 浊流沉积体边缘Te段 |
| Ⅵ | 含碎屑泥质砂岩相 | 泥质含量高，砂、泥、泥质碎屑混杂，内含不规则泥岩撕裂屑 | 泥质碎屑流 |

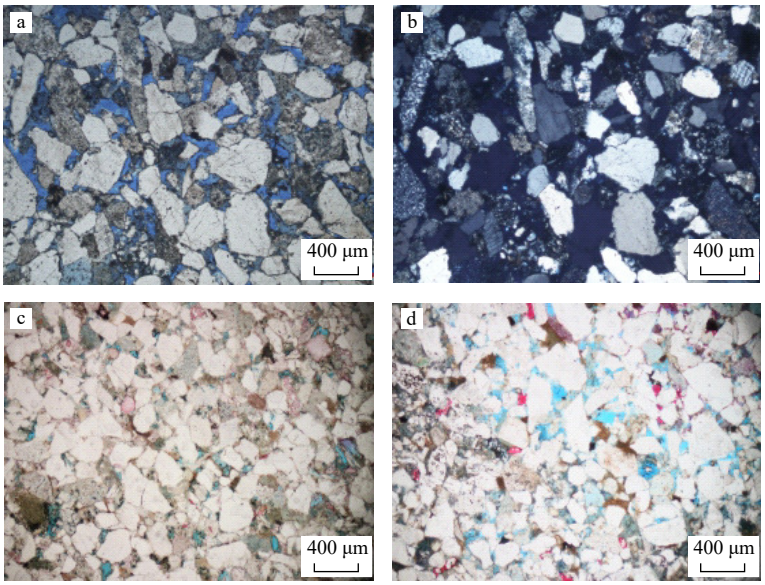
岩心沉积构造现象表明深凹区发育重力流砂体，针对研究区重点井岩相及其组合特征，开展了深凹区重力流砂体的成因分析，共识别出砂质碎屑流、浊流和泥质碎屑流 3 种成因类型。歧口深凹区受物源持续供给及断层活动的影响，辫状河三角洲前缘砂体发生液化垮塌，垮塌后沉积物被再次搬运，沿深凹区形成多期扇体叠置的舌型扇沉积，近端沉积以砂质碎屑流沉积为主，是良好的储集相带。薄片鉴定结果显示：岩石类型主要为粉砂岩、细砂岩、含砾不等粒砂岩、中砂质细粒砂岩等；长石含量占比高（体




a. TD9X6 井，4 100.85 m，块状构造；b. BH26 井，4 869.03 m，平行层理砂岩；c. BH26 井，4 870.88 m，波状层理砂岩相；d. BH26 井，4 925.27 m，透镜状层理层；e. BH26 井，4 928.22 m，含碎屑泥质砂岩；f. HT1 井，4 214 m，液化变形及泥砾；g. HT1 井，4 211 m，液化变形；h. HT1 井，4 209 m，泥岩漂砾

图 3　歧口深凹区东三段重点井岩心特征

Fig. 3　Sand core characteristics of key wells in the Third Member of the Dongying Formation in the deep subsag area of the Qikou Sag




a. TD9X6 井，4101.62 m(−)，中砂质细粒岩屑长石砂岩，铸体薄片；b. TD9X6 井，4 101.62 m(+)，粒内溶孔（粒间孔隙）发育，铸体薄片；c. HT1 井，4 323 m(−)，中细粒长石岩屑砂岩，粒内溶孔（粒间孔隙）发育，铸体薄片；d. HT1 井，4 030 m(+)，粒内溶孔（粒间孔隙）发育，铸体薄片

图 4　歧口深凹区东三段重点井铸体薄片特征

Fig. 4　Casting slice characteristics of key wells in the Third Member of the Dongying Formation in the deep subsag area of the Qikou Sag

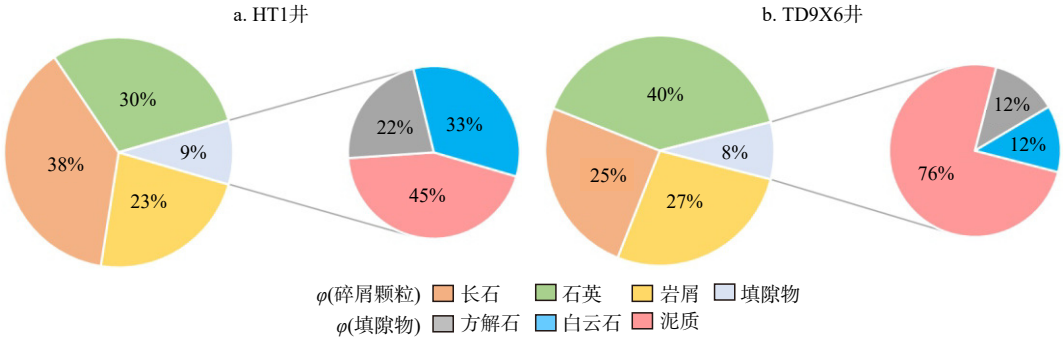



图 5　歧口深凹区扇体岩石组分特征

Fig. 5　Features of the fan-body rock composition in the deep subsag area of the Qikou Sag

积分数在 25% ~ 38% 之间)(图 4, 5), 成分主要为钾长石、石英, 见高岭土化及见云母化现象, 岩屑含量相对较少; 填隙物主要为泥质杂基、方解石胶结物。岩石薄片整体呈现出风化程度中等, 分选中等偏差, 沉积物继承了三角洲前缘较高的结构成熟度, 颗粒分选好, 杂基含量低, 镜下薄片观察结果表明(图 4a ~ c), 孔隙主要以次生粒间孔隙及粒内溶孔为主, 溶蚀作用利于次生孔隙发育, 有效改善了储层物性, 是深凹区较好的储集相带。而浊积和泥质碎屑流沉积, 矿物成分主要为泥质基质支撑, 砂泥混杂沉积, 储层物性较差。

## 2.2　测井相特征

根据测井曲线形态特征, 将测井曲线划分为齿形、锯齿形、微齿形、箱形、漏斗形、钟形和指形(图 6)。不同的测井曲线组合特征代表了不同的沉积环境[21-23]。在歧口主凹区普遍具齿化箱形、高幅箱形、钟形特征, 反映深水环境下滑塌型重力流沉积, 其中, 在 TD9X6 井和 HT1 井测井响应上, 识别出碎屑流水道和席状砂典型重力流沉积微相, 碎屑流水道重力流砂体沉积中重要的沉积类型, TD9X6 井测井响应以高幅箱形、钟形为主, 反映水动力强的砂质碎屑流沉积; HT1 井测井响应以齿化箱形叠置为主, 反映水动力仍然较强, 且呈频繁动荡性变化的特征。随流动能力逐渐减弱, 在 BH6 井测井响应上, 指形、齿化特征明显, 单层厚度一般小于 2 m, 反映向半深湖过渡的席状砂沉积, 发生在重力流沉积体系的最前端, 以低密度浊流向前搬运, 最终卸载于朵体前方, 形成席状砂沉积。

## 2.3　地震相特征

根据前人研究, 歧口深凹区深水重力流扇体物源方向来自燕山物源[2], 利用地震和重力资料, 在顺物源剖面上呈自斜坡向深凹区的楔形侵蚀坡折带, 盆内一系列同沉积断层发育, 它对沉积地层表现出明显的控制作用(图 7)。

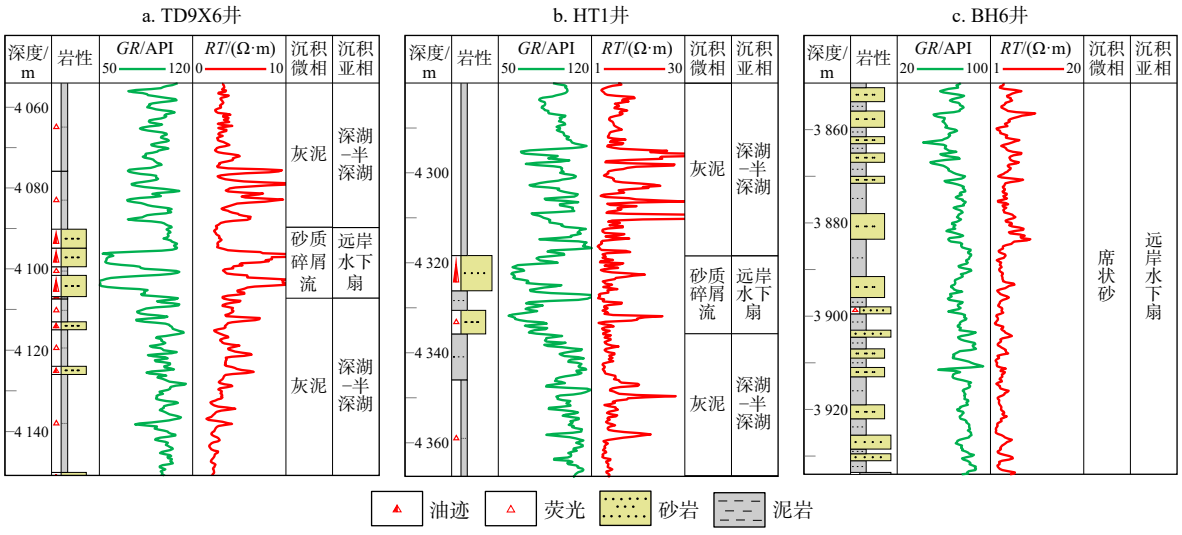



图 6　歧口深凹区东三段扇体测井相特征

Fig. 6　Logging facies characteristics of fan-body in the Third Member of the Dongying Formation in the deep subsag area of the Qikou Sag

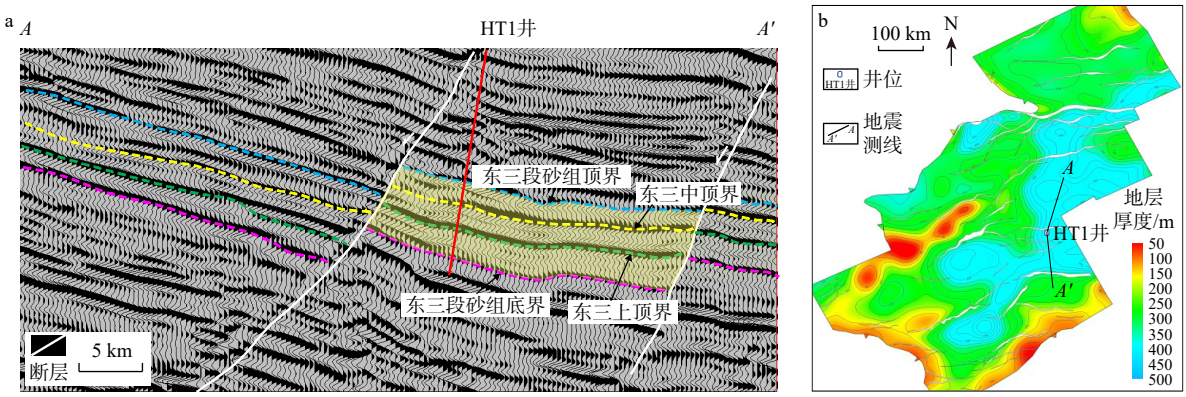



图 7　岐口深凹区顺物源方向地震剖面图 (a) 和岐口凹陷东三段地层厚度图 (b)

Fig. 7　Seismic profile aligning with the sediment input direction in the deep subsag area of the Qikou Sag (a) and strata thickness in the Third Member of the Dongying Formation in the Qikou Sag (b)

研究区主要发育 3 类地震相: ①杂乱空白反射地震相(图 8a), 具有弱振幅、差连续性特征, 测井曲线呈齿状箱形, 在地震反射剖面上呈杂乱反射和近空白反射结构, 主要为分布于坡折以下的滑塌体, 是三角洲前缘沉积物失稳后滑塌形成的沉积。②透镜体地震相, 有强振幅、中连续性特征, 代表砂质碎屑流水道沉积, 在地震剖面上, 水道可呈近于顶平底凸状反射(图 8b), 也可多期侧向摆动复合形成一条强震幅反射轴。测井曲线呈变形箱形、钟形或漏斗形复合反射特征。③席状地震相, 具有弱振幅、差连续性特征, 代表浊积席状砂沉积, 在地震剖面上, 呈席状, 内部近似空白反射结构(图 8c), 测井曲线指状和齿状反射特征明显。

## 3　沉积体系特征及沉积模式

针对上述重点井岩心精细观察分析, 结合岐口深凹区东三段古地貌和砂地比等资料显示, 对岐口

| 地震相 | 反射属性 | 沉积相 | 测井相 | 地震相图示 |
|---|---|---|---|---|
| 杂乱空白反射地震相 | 弱振幅连续性差 | 滑塌体 | SP齿状箱形、杂乱反射及内部近空白反射 | a |
| 透镜体地震相 | 强振幅中连续 | 砂质碎屑流水道 | SP变形箱形、钟形与漏斗形复合反射特征 | b TD9X6井 |
| 席状地震相 | 弱振幅连续性差 | 浊积席状砂 | SP指形、齿形近空白反射席状特征 | c BH6井 |

图 8　岐口深凹区地震相类型及地震相剖面图

Fig. 8　Seismic phase types and seismic facies profile in the deep subsag area of the Qikou Sag

深凹区重力流沉积的展布特征进行详细研究。根据前人研究[24-27], 岐口深凹区东营组沉积时期, 物源主要来自于北部燕山物源区。在东北部高斜坡区来自燕山物源的碎屑物质直接冲出谷口发育冲积扇沉积, 中斜坡区发育辫状河三角洲, 由于距离深凹区物源较远, 延伸直线距离为 60 km$^2$, 且地形坡度较陡, 从高–中斜坡区深入到低斜坡(深凹区)发育重力流沉积, 砂体厚度向南逐渐增厚, 砂体呈条带状成片展布。

基于地震属性分析技术, 确定各层序时期砂体宏观平面展布特征, 为平面相的分析奠定了基础。东三段沉积时期砂体发育, 水域范围较窄, 从东三段层序的波阻抗振幅属性切片来看, 强振幅区主要分布在滨海斜坡带低斜坡以下, 沉积物来源于北部燕山物源, 多期砂体呈条带状展布, 扇体在切物源方向为沉积于凹槽挠曲坡折带, 向东西两侧延伸尖灭, 扇体在三维空间中表现为末端分叉的扇状(图 9)。

岐口深凹区受古地貌与古气候气候共同控制, 综合岩心相、测录井、砂地比、地震属性等特征, 对东三段沉积时岐口深凹区重力流平面展布特征进行研究[28-32]。岐口深凹区东三段沉积时期, 湖盆内南倾斜坡发育一系列同沉积断层(图 1), 可远距离搬运大规模砂体, 沉积物经长距离的搬运堆积在辫状河三角洲前缘, 受坡折带的控制, 岐口凹陷深凹区形成大规模的滑塌型重力流沉积, 沉积物主体以砂质碎屑流沉积, 表现为多期滑塌型重力流砂体叠置, 水道为多期次舌型扇砂体沿深凹区叠置分布, 横向展布范围广, 纵向延伸距离远, 在沉积远端则以浊流和泥质碎屑流沉积为主, 整体岐口深凹区沿 NE–SW 向自物源供应区依次形成冲积扇–辫状河三角洲–远岸水下扇沉积相带有序分布的沉积格局(图 10)。

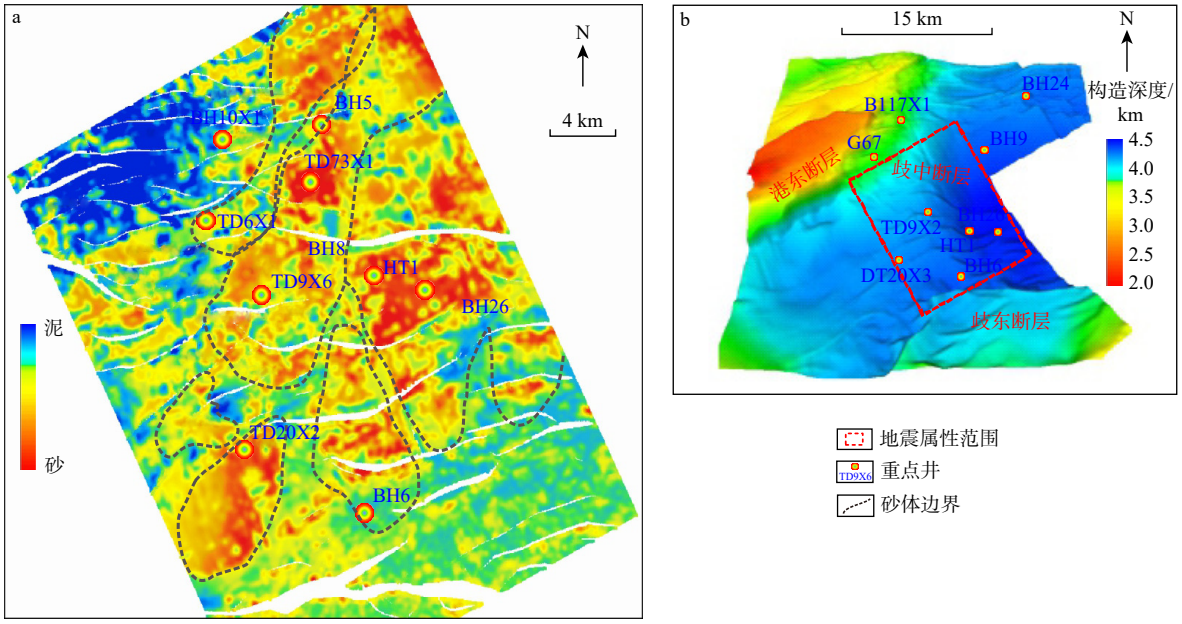



图 9　歧口深凹区东三段波阻抗振幅属性图 (a) 和底界构造图 (b)

Fig. 9　Impedance amplitude attribute (a) and bottom structure (b) in the Third Member of the Dongying Formation in the deep subsag area of the Qikou Sag

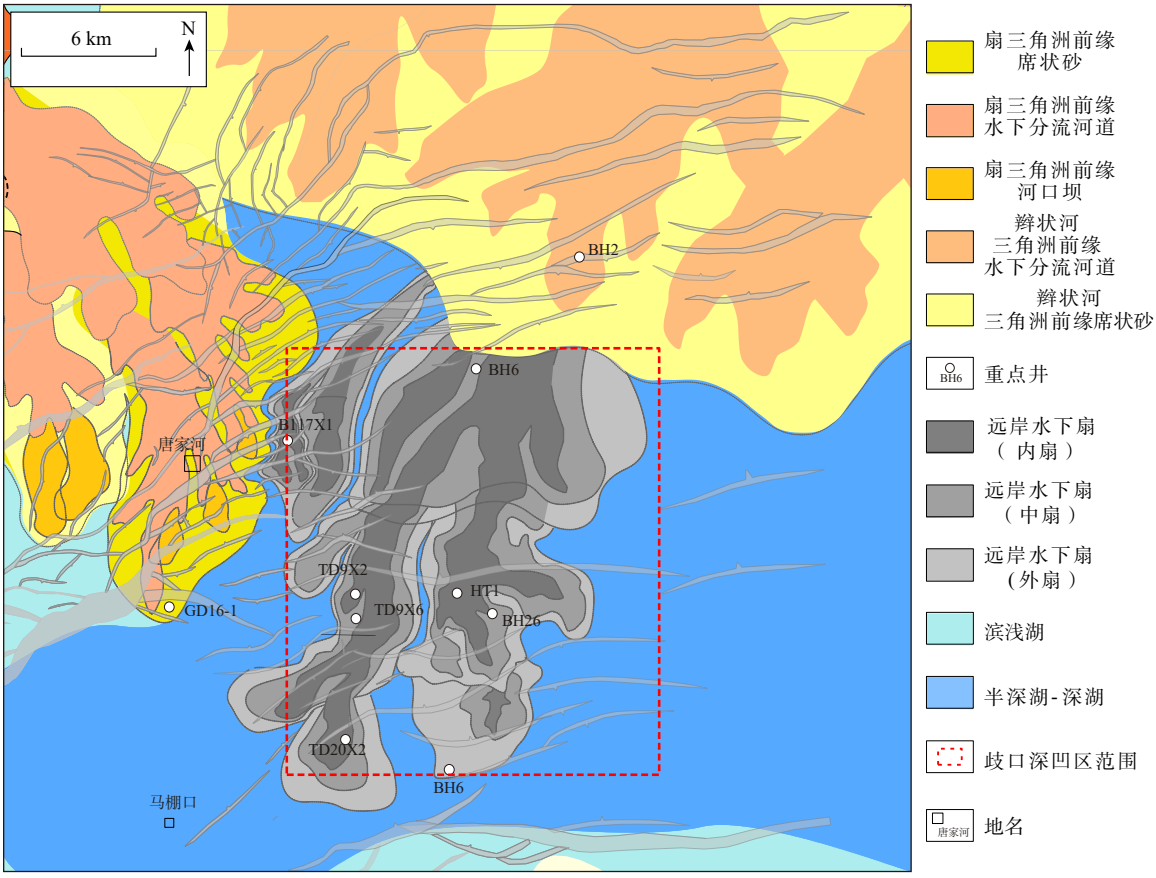



图 10　歧口深凹区东三段沉积相图

Fig. 10　Sedimentary facies in the Third Member of the Dongying Formation in the deep subsag area of the Qikou Sag

通过对研究区重力流沉积特征及砂体展布规律分析，总结东营组深凹区重力流沉积模式，明确东营组深凹区控砂机制。受湖盆内断裂坡折带控制，斜坡带失衡点是重力流形成和发育的动力机制，转换斜坡是影响重力流主体扇体展布的因素，确定研究区东三段沉积体系源远–沟长–坡宜的时空匹配关系

(图 11)。由地层厚度图可知,从东北向西南方向,深凹区沉积厚度逐渐增大,燕山物源提供的碎屑物质在浅水区辫状河三角洲前缘砂体发生垮塌向深水区搬运,随着构造运动的加强,同沉积断层下降盘的地层加厚,砂体顺斜坡向低部位沉积,在深凹区利于形成大规模滑塌型重力流沉积,沉积物继承浅水区辫状河三角洲前缘砂体结构特征,砂质碎屑流水道微相储层物性条件好(HT1 井、TD9X6 井)(图 4),是深凹区的有利储集相带。

## 4　重力流形成的主控因素

### 4.1　古气候与古水深

北部燕山在东营组东三段沉积时期,断裂活动微弱,气候干旱、炎热,湖盆蒸发量大于供给量,沉积物中多夹有红层沉积,东三段泥岩颜色为棕红色,指示东营组沉积早期为一持续湖盆萎缩时期,北塘次凹整体暴露,湖退的波动使研究区的可容空间减小,物源区发育冲积扇、辫状河等厚层砾岩沉积(砂砾岩厚度为 50 ~ 100 m),自研究区东北部向南部歧口深凹区的砂地比逐渐降低(10% ~ 60%)(图 12),指示发育来自燕山褶皱带方向物源。

同时,将 Zr/Al 值参数作为辅助 Fe/Mn 值判断古水深的指标。通常 Fe/Mn<100 指示深水环境,100≤Fe/Mn<150 指示半深水环境,Fe/Mn≥150 指示浅水环境,Zr 元素是典型的亲陆性元素,沉积在离岸较近的地区,Al 元素的含量随着水深增加而显著增加,因此 Zr/Al 比值越小表示水体越深,离岸越远[33-36]。歧口凹陷深凹区东营组整体处于深水−半深水区,东营组沉积时期 Fe/Mn 分布于 12.25 ~ 151.4,均值 42.16(样本数 $n$=678 个),Zr/Al 分布于 0.001 ~ 0.014,均值为 0.003(样本数 $n$=678 个),总体上研究区处于深水沉积环境。但自东三段沉积早期开始,Zr/Al 均值逐渐减小,沉积早期水体较浅,指示东营组沉积早期为一持续湖盆萎缩时期,随后,东三段整体湖平面经历了缓慢上升的一个阶段。至东二段沉积时期,Fe/Mn 为东营组最低值,指示深水沉积环境。进入东一段沉积时期,Fe/Mn 为东营组明显增加,其水深低于其他层位,对应于深水−半深水沉积环境(图 13)。

### 4.2　沉积古地貌

构造活动是控制盆地形成与发育演化的主导因素,它控制了物源区的隆升[37-38]、盆地的沉降[39]、可容纳空间的变化[40] 等。因此,构造特征与构造活动控制了重力流形成的基本条件,从根本上影响古地形地貌、物源供给与沉积充填演化,活跃的构造运动有利于重力流的发生[38]。在沙河街组−东营组沉积时期,歧口深凹区成为歧口凹陷的沉降中心,发育厚地层,在此条件下通常利于形成大型扇三角洲以及具有重力流成因的水下扇。海河断裂为歧口凹陷北侧边界,东营组沉积时期南北两侧地层厚度差异显著,从地震剖面上,以滨海断裂为主及派生出的一系列次级断裂在滨海地区,自盆缘向湖盆中心表现为由多条断层平行排列组合的形态,向南倾斜,SN 向剖面上呈现出阶梯状构造样式(图 1),使得研究区斜坡整体呈多个阶梯状展布的多级挠曲坡折,在各级断裂带坡折下也容易形成由再次搬运形成的重力流

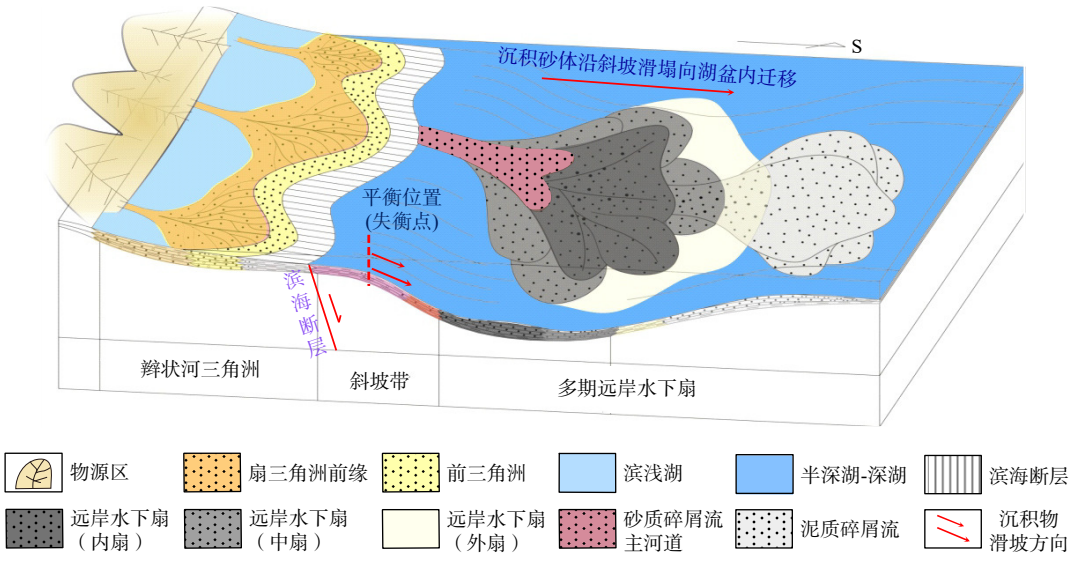



图 11　歧口深凹区东三段沉积模式图

Fig. 11　Sedimentary pattern in the Third Member of the Dongying Formation in the deep subsag area of the Qikou Sag

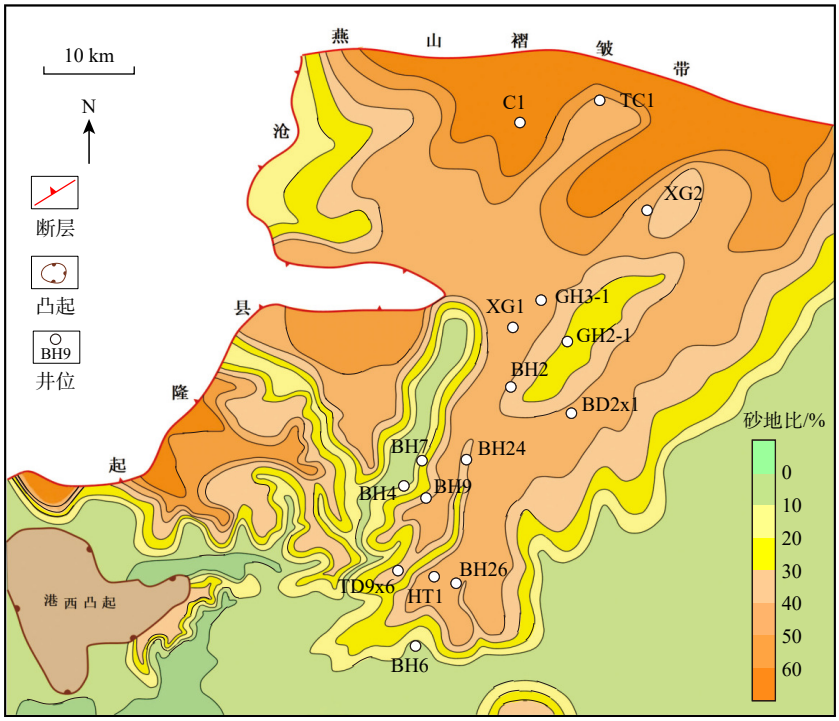



图 12　歧口深凹区东三段砂地比图

Fig. 12　Sand ratio in the Third Member of the Dongying Formation in the deep subsag area of the Qikou Sag

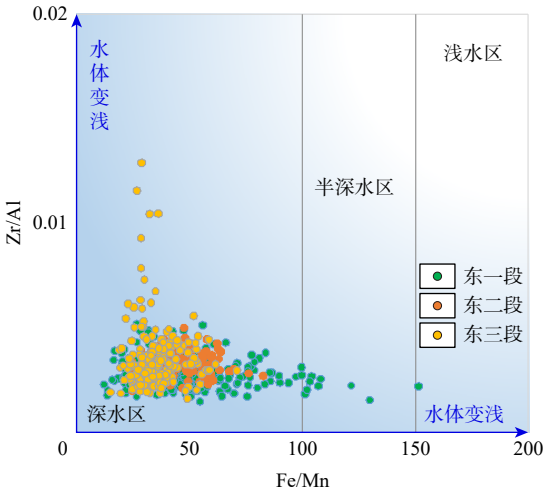



图 13　歧口深凹区东营组烃源岩 Zr/Al−Fe/Mn 交汇图

Fig. 13　Cross plot of Zr/Al−Fe/Mn of source rocks in the Third Member of the Dongying Formation in the deep subsag area of the Qikou Sag

沉积扇体，为深水重力流的发育提供了地质条件。此外，主断裂滨海断层在沙一段−东营组时期断裂活动强烈，并控制地层沉积，总体呈 NEE 走向，具有明显分段性，在连接处的古落差出现低值，是砂体输送主要通道，向东侧深凹区迁移，活动性相对减弱，形成一系列小断裂，控制砂体沉积的展布延伸，至明化镇组−馆陶组断裂活动性逐渐减弱(图 14)。

歧口凹陷呈北高南低的古构造格局，北部的燕山物源是歧口深凹区的持续发育的物源区，为砂体沉积提供了充足的物源供给，物源充足及主凹区的发育为滨海斜坡发育受燕山物源控制的大型重力流水道沉积提供了有利条件，以原始沉积的垮塌再搬运为主，沉积物滑塌入湖而分散形成砂质碎屑流沉积。

## 5　结　论

(1)歧口凹陷沿 NE−SW 向自物源供应区从高斜坡区向低斜坡深凹区依次形成冲积扇−辫状河三角洲−重力流沉积相带有序分布的沉积格局，其中，在深凹区东三段发育大型深水滑塌型重力流沉积砂体。

(2)通过对歧口深凹区东营组重点井岩心观察，东三段沉积时期识别出碎屑流水道和席状砂沉积微相，沉积物继承浅水区辫状河三角洲前缘砂体结构特征，砂质碎屑流水道微相储层物性条件好，是深凹区良好的储集相带。

(3)研究区受古气候、古水深和古地貌的共同控制，在歧口凹陷深凹区具有源远−沟长−坡宜的时空匹配关系的沉积模式，具备形成大规模重力流沉积砂体的潜力。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

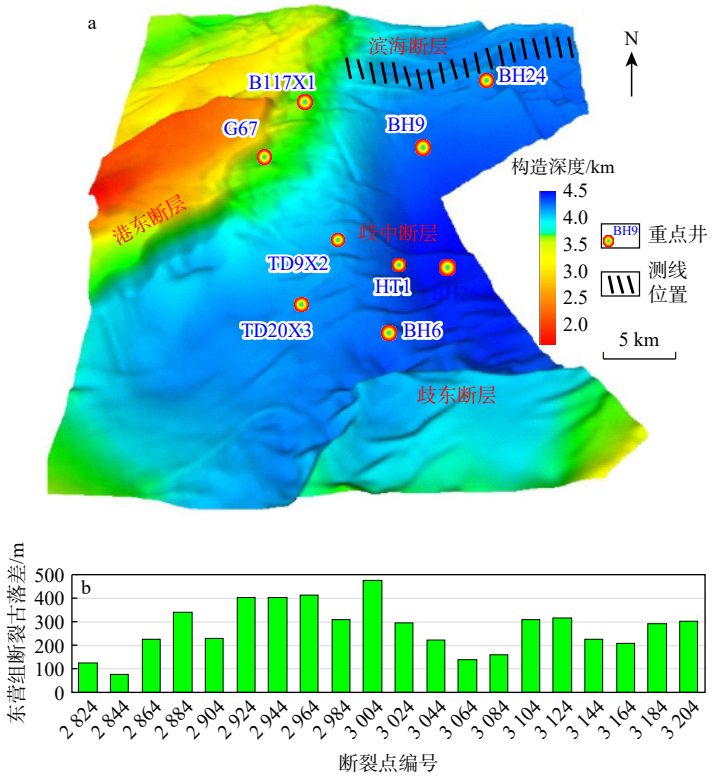



图 14　歧口深凹区口东三段底界构造图 (a) 和主断裂滨海断裂活动性分析 (b)

Fig. 14　Bottom structure (a) and activity analysis of the main fault in the Binhai fault (b) in the Third Member of the Dongying Formation in the deep subsag area of the Qikou Sag

## 参考文献：


[1] 鲜本忠, 万锦峰, 姜在兴, 等. 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 [J]. 地学前缘, 2012, 19(1): 121-135.
XIAN B Z, WAN J F, JIANG Z X, et al. Sedimentary characteristics and model of gravity flow deposition in the depressed belt of rift lacustrine basin: A case study from Dongying Formation in Nanpu Depression[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(1): 121-135. (in Chinese with English abstract)

[2] 周立宏, 何海清, 陈长伟, 等. 歧口凹陷滨海斜坡深凹区海探 1 井东营组勘探突破与启示 [J]. 中国石油勘探, 2023, 28(6): 78-89.
ZHOU L H, HE H Q, CHEN C W, et al. Exploration breakthrough and enlightenment of Dongying Formation in Well Haitan 1 in the deep subsag area in Binhai slope, Qikou Sag[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(6): 78-89. (in Chinese with English abstract)

[3] 杨田, 操应长, 王艳忠, 等. 深水重力流类型、沉积特征及成因机制: 以济阳坳陷沙河街组三段中亚段为例 [J]. 石油学报, 2015, 36(9): 1048-1059.
YANG T, CAO Y C, WANG Y Z, et al. Types, sedimentary characteristics and genetic mechanisms of deep-water gravity flows: A case study of the middle submember in Member 3 of Shahejie Formation in Jiyang Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(9): 1048-1059. (in Chinese with English abstract)

[4] 蒲秀刚, 周立宏, 韩文中, 等. 歧口凹陷沙一下亚段斜坡区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 X G, ZHOU L H, HAN W Z, 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. (in Chinese with English abstract)

[5] CAO Y C, WANG Y Z, GLUYAS J G, et al. Depositional model for lacustrine nearshore subaqueous fans in a rift basin: The Eocene Shahejie Formation, Dongying Sag, Bohai Bay Basin, China[J]. Sedimentology, 2018, 65(6): 2117-2148.

[6] XIAN B Z, WANG J H, GONG C L, et al. Classification and sedimentary characteristics of lacustrine hyperpycnal channels: Triassic outcrops in the South Ordos Basin, central China[J]. Sedimentary Geology, 2018, 368: 68-82.

[7] 宋岩, 李卓, 姜振学, 等. 非常规油气地质研究进展与发展趋势 [J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(4): 638-648.
SONG Y, LI Z, JIANG Z X, et al. Progress and development trend of unconventional oil and gas geological research[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(4): 638-648. (in Chinese with English abstract)

[8] 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 X Z, PU X G, ZHOU L H, et al. 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[J]. Petroleum

Exploration and Development, 2017, 44(2): 165-176. (in Chinese with English abstract)

[9] 周立宏, 陈长伟, 崔宇, 等. 渤海湾盆地黄骅坳陷油气勘探新领域、新类型及资源潜力 [J]. 石油学报, 2023, 44(12): 2160-2178.
ZHOU L H, CHEN C W, CUI Y, et al. New fields, new types and resource potentials of oil-gas exploration in Huanghua Depression of Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12): 2160-2178.(in Chinese with English abstract)

[10] 操应长, 杨田, 王艳忠, 等. 深水碎屑流与浊流混合事件层类型及成因机制 [J]. 地学前缘, 2017, 24(3): 234-248.
CAO Y C, YANG T, WANG Y Z, et al. Types and genesis of deep-water hybrid event beds comprising debris flow and turbidity current[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(3): 234-248. (in Chinese with English abstract)

[11] 朱筱敏, 钟大康, 袁选俊, 等. 中国含油气盆地沉积地质学进展 [J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(5): 820-829.
ZHU X M, ZHONG D K, YUAN X J, et al. Development of sedimentary geology of petroliferous basins in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(5): 820-829. (in Chinese with English abstract)

[12] 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 X B, LIU H Q, PAN S X, 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. (in Chinese with English abstract)

[13] JIA H, LIU T, JI H, et al. Fan-delta facies architecture, morphological evolution and sediment delivery in the Oligocene Dongying Formation of the Nanpu Sag, Bohai Bay Basin, China[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 2021, 68(8): 1201-1214.

[14] ZHANG J K, GAO J, WU J Z, et al. Sedimentary characteristics and seismic geomorphology of the Upper Third Member of Eocene Dongying Formation in double slope systems of Laoyemiao transverse anticline, Nanpu Sag, Bohai Bay Basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 109: 36-55.

[15] ZOU C N, WANG L, LI Y, et al. Deep-lacustrine transformation of sandy debrites into turbidites, Upper Triassic, central China[J]. Sedimentary Geology, 2012, 265: 143-155.

[16] PU X G, ZHAO X Z, WANG J H, 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): 977-989.

[17] 金凤鸣, 李宝刚, 崔周旗, 等. 箕状断陷缓坡带油气富集的主要地质因素 [J]. 断块油气田, 2011, 18(6): 726-729.
JIN F M, LI B G, CUI Z Q, et al. Main geological factors of controlling accumulation and distribution of oil and gas in gentle slope of half graben basin[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(6): 726-729. (in Chinese with English abstract)

[18] 国建英, 齐雪宁, 侯连华, 等. 渤海湾盆地特低渗–致密砂(砾)岩天然气成因及成藏模式 [J]. 天然气地球科学, 2022, 33(2): 181-194.
GUO J Y, QI X N, HOU L H, et al. Origin and accumulation model of ultra-low permeability-tight sandstone(gravel) gas in Bohai Bay Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(2): 181-194. (in Chinese with English abstract)

[19] 韩国猛, 陈冬霞, 马建英, 等. 黄骅坳陷歧北斜坡油气成藏机制与成藏模式 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(6): 1636-1653.
HAN G M, CHEN D X, MA J Y, et al. Hydrocarbon accumulation mechanism and accumulation model of Qibei slope in Huanghua Depression[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(6): 1636-1653. (in Chinese with English abstract)

[20] 杨田, 操应长, 田景春. 浅谈陆相湖盆深水重力流沉积研究中的几点认识 [J]. 沉积学报, 2021, 39(1): 88-111.
YANG T, CAO Y C, TIAN J C. Discussion on research of deep-water gravity flow deposition in lacustrine basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(1): 88-111. (in Chinese with English abstract)

[21] 王恩泽, 刘国勇, 庞雄奇, 等. 南堡凹陷中深层碎屑岩储集层成岩演化特征及成因机制 [J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(2): 321-333.
WANG E Z, LIU G Y, PANG X Q, et al. Diagenetic evolution and formation mechanisms of middle to deep clastic reservoirs in the Nanpu Sag, Bohai Bay Basin, East China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(2): 321-333. (in Chinese with English abstract)

[22] 李相博, 刘化清, 张忠义, 等. 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 [J]. 沉积学报, 2014, 32(4): 611-622.
LI X B, LIU H Q, ZHANG Z Y, et al. "Argillaceous parcel" Structure: A direct evidence of debris flow origin of deep-water massive sandstone of Yanchang Formation, Upper Triassic, the Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(4): 611-622. (in Chinese with English abstract)

[23] HAUGHTON P, DAVIS C, MCCAFFREY W, et al. Hybrid sediment gravity flow deposits: Classification, origin and significance[J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26(10): 1900-1918.

[24] 周立宏, 陈长伟, 韩国猛, 等. 渤海湾盆地歧口凹陷陆相湖盆页岩气富集条件及勘探潜力 [J]. 天然气工业, 2021, 41(5): 1-10.
ZHOU L H, CHEN C W, HAN G M, et al. Enrichment conditions and exploration potential of shale gas in continental lake basins in Qikou Sag, Bohai Bay Basin[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(5): 1-10. (in Chinese with English abstract)

[25] 赵贤正, 周立宏, 肖敦清, 等. 歧口凹陷斜坡区油气成藏与勘探实践 [J]. 石油学报, 2016, 37(增刊 2): 1-9.
ZHAO X Z, ZHOU L H, XIAO D Q, et al. Hydrocarbon accumulation and exploration practice of slope area in Qikou Sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(S2): 1-9. (in Chinese with English abstract)

[26] 赵贤正, 王权, 金凤鸣, 等. 渤海湾盆地富油凹陷二次勘探工程及其意义 [J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(6): 723-733.
ZHAO X Z, WANG Q, JIN F M, et al. Re-exploration program for petroleum-rich sags and its significance in Bohai Bay Basin, East China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(6): 723-733. (in Chinese with English abstract)

[27] 赵贤正, 蒲秀刚, 周立宏, 等. 深盆湖相区页岩油富集理论、勘探技术及前景: 以渤海湾盆地黄骅坳陷古近系为例 [J]. 石油学报, 2021, 42(2): 143-162.
ZHAO X Z, PU X G, ZHOU L H, et al. Enrichment theory, exploration technology and prospects of shale oil in lacustrine facies zone of deep basin: A case study of the Paleogene in Huanghua Depression, Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(2): 143-162. (in Chinese with English abstract)

[28] 李聪, 鲜本忠, 王鹏宇, 等. 南堡凹陷东北部东二段重力流砂岩储层发育规律 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(2): 159-169.
LI C, XIAN B Z, WANG P Y, et al. Development law of gravity flow sandstone reservoir in the Second Member of the Dongying Formation in the northeastern Nanpu Depression[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(2): 159-169. (in Chinese with English abstract)

[29] 舒婷, 刘桂珍, 郭健. 鄂尔多斯盆地华庆地区长 $6_3$ 重力流沉积特征 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(6): 140-150.
SHU T, LIU G Z, GUO J. Characteristics of gravity flow sedimentation of Chang $6_3$ in the Huaqing area, Ordos Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(6): 140-150. (in Chinese with English abstract)

[30] 巩天浩, 吴琳娜, 陈思, 等. 歧口凹陷中部沙一下亚段异重流沉积识别特征与控制因素分析 [J]. 地质科技通报, 2022, 41(4): 69-83.
GONG T H, WU L N, CHEN S, et al. Sedimentary characteristics and controlling factors of hyperpycnal flow in the Lower Shahejie Formation of Qikou Sag, Bohai Bay Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(4): 69-83. (in Chinese with English abstract)

[31] 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 Y, LI Z C, WAN P, 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. (in Chinese with English abstract)

[32] 周立宏, 陈长伟, 杨飞, 等. 陆相断陷盆地深凹区致密油气成藏模式与勘探实践: 以渤海湾盆地黄骅坳陷为例 [J]. 石油学报, 2024, 45(5): 755-770.
ZHOU L H, CHEN C W, YANG F, et al. Accumulation models and exploration practice of tight oil and gas in the deep sag areas of continental fault basins: A case study of Huanghua Depression in Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(5): 755-770. (in Chinese with English abstract)

[33] 潘文静, 刘士磊, 田德瑞, 等. 渤海海域新近纪湖盆萎缩期古水深恢复: 以渤东低凸起南端为例 [J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(4): 18-25.
PAN W J, LIU S L, TIAN D R, et al. Reconstruction of Palaeo-water depth of neocene shrinking lake: An example from the south of bodong low uplift, Bohai Sea[J]. Marine Geology Frontiers, 2019, 35(4): 18-25. (in Chinese with English abstract)

[34] ALEXANDER J, MULDER T. Experimental quasi-steady density currents[J]. Marine Geology, 2002, 186(3/4): 195-210.

[35] YANG R C, JIN Z J, VAN LOON A J, et al. Climatic and tectonic controls of lacustrine hyperpycnite origination in the Late Triassic Ordos Basin, Central China: Implications for unconventional petroleum development[J]. AAPG Bulletin, 2017, 101(1): 95-117.

[36] 熊小辉, 肖加飞. 沉积环境的地球化学示踪 [J]. 地球与环境, 2011, 39(3): 405-414.
XIONG X H, XIAO J F. Geochemical indicators of sedimentary environments: A summary[J]. Earth and Environment, 2011, 39(3): 405-414. (in Chinese with English abstract)

[37] 刘海涛, 于海涛, 孙雨, 等. 断陷盆地多类型斜坡形成与油气差异富集规律: 以渤海湾盆地为例 [J]. 岩石学报, 2022, 38(9): 2697-2708.
LIU H T, YU H T, SUN Y, et al. Formation and differential enrichment of oil and gas on multiple types of slopes in rifted basins: Taking the Bohai Bay Basin as an example, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2022, 38(9): 2697-2708. (in Chinese with English abstract)

[38] LAMB M P, MOHRIG D. Do hyperpycnal-flow deposits record river-flood dynamics?[J]. 2009, 37(12): 1067-1070.

[39] 刘鑫金, 刘惠民, 宋国奇, 等. 济阳坳陷东营三角洲前缘斜坡重力流成因砂体特征及形成条件 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(4): 36-45.
LIU X J, LIU H M, SONG G Q, et al. Characteristics and formation condition of gravity flow developing in low-lying slope zone of Dongying delta in Jiyang Depression[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017, 41(4): 36-45. (in Chinese with English abstract)

[40] PATTISON S A J, BRUCE AINSWORTH R, HOFFMAN T A. Evidence of across-shelf transport of fine-grained sediments: Turbidite-filled shelf channels in the Campanian Aberdeen Member, Book Cliffs, Utah, USA[J]. Sedimentology, 2007, 54(5): 1033-1064.

Summary for “歧口凹陷深凹区东三段重力流沉积体系及分布模式”

# Gravity-flow deposition system and distribution patterns in the Third Member of the Dongying Formation in the deep subsag area of the Qikou Sag

ZHANG Jiaoyang[1]，ZHU Huahui[1]，SHI Qianru[1]，ZHANG Mingzhen[1]，DONG Yueqi[1]，REN Shichao[1]，GE Weishuang[2*]

1. PetroChina Dagang Oilfield Company, Tianjin 300280, China；
2. School of Earth Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

First author，E-mail：kt_zhangjiaoyang@petrochina.com.cn

* Corresponding author， E-mail：673601019@qq.com

**Abstract**：[**Objective**] The Third Member of the Dongying Formation in the deep subsag area of the Qikou Sag is primarily characterized by semi-deep to deep lacustrine subfacies, with extensive development of gravity-flow sandbodies. Clarifying the sedimentary characteristics and formation mechanisms of these gravity-flow sandbodies can provide theoretical support for petroleum exploration. [**Methods**] By integrating the high-precision seismic, logging, core, and thin section data, we analyzed the genetic mechanism of gravity-flow sandbodies within the deep lake setting. Focusing on the Third Member of the Dongying Formation in the Qikou Sag, we also summarized the distribution pattern of the gravity-flow deposition system in the deep subsag area of the Qikou Sag. [**Results**] The results indicate that during the deposition of the Third Member of the Dongying Formation, the activities of basin boundary faults and internal sedimentary slope folds induced the occurrence of collapse in the sandbodies of the barided river delta front and the vertically superimposed gravity-flow deposits within the deep subsag. The gravity-flow deposits in this area were subdivided into six lithofacies, corresponding to three genetic types: Sandy debris flows, muddy debris flows, and turbidity currents. The sandbodies exhibit well-sorted grains, low matrix content, and typical characteristics of slump-type gravity-flow deposits. Spatial analysis of lithofacies assemblages revealed a planar distribution pattern characterized by proximal sandy debris flows transitioning to turbidity currents and distal muddy debris flows. Among these, the sandy debris channels have the best reservoir properties and represent the most favorable reservoir facies in the deep subsag area. In contrast, the turbidity sandstone reservoirs have relatively poor physical properties.The coastal slope demonstrates a spatial-temporal matching relationship of far-source-gully-long-slope-appropriate, which possesses the potential for forming large-scale gravity-flow-deposited sandbodies. [**Conclusion**] The research results can provide a reference for oil and gas exploration in the deep subsag.

**Key words:** Qikou Sag； deep subsag area； gravity-flow； sandy debris flow； sedimentary pattern； Third Member of the Dongying Formation

Received：2024-11-02；Revised：2025-04-28；Accepted：2025-05-06

doi：10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240653