

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.139>



歧口凹陷南斜坡源-汇系统构成与岩性圈闭成因模式

加东辉¹, 徐长贵², 彭文绪³, 杜晓峰⁴, 茆利¹

1. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459
2. 中国海洋石油集团有限公司, 北京 100010
3. 中国海洋石油国际有限公司, 北京 100010
4. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028

摘要: 陆相盆地源-汇系统在沉积过程恢复、宏观控砂作用及砂体富集预测上均取得积极进展, 但对多物源-多构造坡折带条件下, 边缘相带砂体尖灭与岩性圈闭的形成机制尚不明确。以歧口凹陷南斜坡为例, 通过大量的钻井、分析化验资料 and 全覆盖的三维地震资料, 综合开展了物源体系的划分和对比, 剖析了构造坡折体系的内在构成及共生关系, 探讨了共生构造坡折带在源-汇系统中的有机配置作用, 明确了砂体的富集区和尖灭带, 在斜坡带新发现或落实了 15 个岩性圈闭, 总面积 21.5 km²。斜坡带岩性圈闭主要受构造坡折带和沉积相类型控制, 远岸斜坡下段半遮挡区和孤台区是最有利的赋存位置, 侧向遮挡砂岩尖灭岩性圈闭、前端遮挡砂岩尖灭岩性圈闭和孤立尖灭岩性圈闭广泛分布。源-汇系统下的控砂控圈作用研究, 能有效解决斜坡带岩性圈闭预测难题, 在复杂斜坡带岩性油气藏勘探中具有广阔的应用前景。

关键词: 物源体系; 沉积体系; 沙河街组; 构造转换带; 岩性油气藏; 预测流程; 石油地质学。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2026)07-2703-13

收稿日期: 2025-06-20

Source-to-Sink System Architecture and Lithologic Traps Model in the Southern Slope Belt of Qikou Sag

Jia Donghui¹, Xu Changgui², Peng Wenxu³, Du Xiaofeng⁴, Mao Li¹

1. Tianjin Branch of China National Offshore Oil Corporation, Tianjin 300459, China
2. China National Offshore Oil Corporation, Beijing 100010, China
3. China National Offshore Oil International Limited, Beijing 100010, China
4. Research Institute Company Limited of China National Offshore Oil Corporation, Beijing 100028, China

Abstract: Significant progress has been made in applying the source-to-sink system to depositional process restoration, sand distribution control, and sandbody enrichment prediction in continental basins. However, in settings with multiple source areas and multiple structural slope breaks, research of the marginal depositional facies belts, sandbody pinch-outs, and the development of lithologic traps remains scarce. Taking the southern slope belt of Qikou Sag as an example, based on drilling data, laboratory data, and full-coverage 3D seismic data, we comprehensively analyze source-to-sink system architecture and genetic model of lithologic traps. Firstly, division and correlation of provenance systems are carried out. Then, the internal architecture and syndepositional relationships of tectonic slope-break zones are analyzed. Finally, the configuration of symbiotic structural slope-break zones is

基金项目: 国家科技“十三五”重大专项(No.2016ZX05024-003); 中国海洋石油有限公司“十四五”重大科技项目(No.KJGG2022-0303)。

作者简介: 加东辉(1978-), 男, 高级工程师, 主要从事沉积地质学、储层预测与岩性油气藏勘探研究。ORCID: 0009-0007-1149-0489。

E-mail: jiadh@cnooc.com.cn

引用格式: 加东辉, 徐长贵, 彭文绪, 杜晓峰, 茆利, 2026. 歧口凹陷南斜坡源-汇系统构成与岩性圈闭成因模式. 地球科学, 51(7): 2703-2715.

Citation: Jia Donghui, Xu Changgui, Peng Wenxu, Du Xiaofeng, Mao Li, 2026. Source-to-Sink System Architecture and Lithologic Traps Model in the Southern Slope Belt of Qikou Sag. *Earth Science*, 51(7): 2703-2715.

discussed from source to sink, and sandbody enrichment zone and pinch-out zone are identified. A total of 15 lithologic traps have been newly discovered or confirmed in the slope zone, covering a total area of 21.5 km². The research indicates that lithologic traps within the slope belt are controlled by structural slope-break zones and depositional facies types, the most favorable locations occur in the semi-sheltered zone and isolated platform areas, where three main trap types develop: laterally-sealed sandstone pinch-outs, frontally-sealed sandstone pinch-outs, and isolated pinch-out traps. Research on sand control and trap development under the source-to-sink system framework can effectively predict lithologic traps within slope belts. This methodology shows significant potential for lithologic reservoirs exploration in complex slope belts.

Key words: provenance system; depositional system; Shahejie Formation; transfer zone; lithologic reservoirs; predictive workflow; petroleum geology.

0 引言

斜坡带是陆相断陷盆地源-汇系统最活跃的地带,也是岩性油气藏发育的重要场所(户昶昊等, 2023). 长期以来,岩性油气藏勘探主要在层序地层学和坡折带控砂理论等指导下,采用高精度三维地震资料及其配套的技术方法开展研究(李思田等, 2002). 上世纪末以来,“源-汇”理论在业界逐步萌芽、发展并在海相被动大陆边缘盆地得到较好应用(Anthony and Julian, 1999; Allen, 2008; Walsh *et al.*, 2016; Sklar *et al.*, 2017; Pechlivanidou *et al.*, 2018; Blum *et al.*, 2019; Bouton *et al.*, 2020; Cullen *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2021). 进入 21 世纪初,“源-汇”理论在国内陆相断陷盆地陆续得到推广应用,在陆相碎屑岩沉积机理和中深部储层预测方法上均取得重大进展(徐长贵, 2006, 2013; 加东辉等, 2007; 朱红涛等, 2017; Zhu *et al.*, 2017; 蔡华等, 2019; 姚光庆等, 2021; Lin *et al.*, 2025; Peng *et al.*, 2025). “源-汇”理论能抓住陆相断陷盆地独特的地

质特点,在凸显物源体系研究的同时,进一步强化汇聚体系和砂分散体系(尤其是构造坡折带)研究,能更全面准确地预测砂体的富集与分布. 然而,陆相断陷盆地源-汇系统具有物源多、输砂通道隐蔽、相带分异快和时空叠加改造等特点,源-汇沉积过程重塑和供给通量定量恢复仍面临巨大挑战(王海芹等, 2025). 目前的研究多集中于源-汇系统控砂富砂作用,即以宏观的、局部的和统一的构造坡折带分析为载体,开展源-汇系统富砂位置和优势相带预测. 而在复杂斜坡带多物源-多构造坡折带条件下,国内外对砂体尖灭和控圈作用研究很少,对边缘相带砂体尖灭与岩性圈闭的形成机理尚不明确(林畅松等, 2009; 杨希冰等, 2020; 许强等, 2025),即对不同构造坡折带之间的成因关联、共生组合及对源-汇系统的有机配置作用缺乏重视,对边缘相带、砂体尖灭位置及与岩性圈闭的关系缺乏系统性研究,亟须建立起一套有效的研究方法来指导岩性圈闭预测,拓展源-汇理论的应用范畴和研究价值. 因此,在高精度层序框架下,由

物源体系													
物源区特征							物源分析						
构造类别		母岩类型		搬运距离		物源供给能力		岩石学	重矿物	沉积学	地球物理学	地质年代学	区域构造
输砂体系													
沟谷			构造坡折体系							沟谷、坡折带与沉积区倾向配置			
类别	几何参数	输砂能力	类别	产状	形态	共生关系	贯通区	遮挡区	孤台区	斜向	逆向	同向	
沉积体系													
宏观特征					沉积模式				沉积相特征				
面积	厚度	体积	期次	个数	沉积类型	相带构成	发育机制	岩石相	厚度	含砂率	沉积旋回	叠加样式	
砂体边缘区													
沉积砂体				富砂相带					边缘相带				
期次	相带构成	砂体特征	空间展布	相带构成	主体砂体特征	精细刻画	砂体富集模式	相带构成	边缘砂体特征	精细刻画	砂体限制模式		
岩性尖灭带													
构造产状				边缘区岩性尖灭样式					岩性尖灭带识别与描述				
倾向	倾角	走向	高点	走向砂体边缘区	轴向砂体边缘区	岩性尖灭综合特征	岩性尖灭形成机制	构造、沉积与岩性尖灭配置关系			岩性圈闭发育模式	岩性圈闭精细描述	

图1 “物源体系-输砂体系-沉积体系-砂体边缘区-岩性尖灭带”主线渐进式岩性圈闭预测流程

Fig. 1 Stepwise predictive workflow for lithologic traps from provenance system, sediment transport system, depositional system, sandbody lateral termination to lithologic pinchout

简单模式的单一构造坡折带宏观控砂控圈模式研究,发展到源-汇系统内多种类型共生构造坡折带的联合精细控砂控圈作用研究,是拓展构造坡折带控砂控圈研究和深化“源-汇”理论的重要方向。

本文以渤海海域歧口凹陷南斜坡为例,通过二十余口钻井、测井、化验资料和全覆盖的三维地震资料分析,采用“物源体系-输砂体系-沉积体系-砂体边缘区-岩性尖灭带”主线渐进式岩性圈闭预测流程(图1),以源-汇系统为出发点,在物源体系、输砂体系和沉积体系分析的基础上,通过精细的共生构造坡折带研究,首先剖析了斜坡带构造坡折体系的内在构成及共生关系,分析了不同构造坡折带的产状、连接方式及与物源指向的关系,厘清了斜坡带地势场内的贯通区、半遮挡区和孤台区;接着探讨了共生构造坡折带在源-汇系统中的有机配置作用,主要包括对物源的供给与遮挡作用、沉积相带的构成与分异关系、砂体的富集与尖灭等,明确了斜坡带大型砂体的富集区和边缘相带的发育位置;最后,结合源-汇系统、构造产状及与砂体展布的关系,落实了不同条件下的岩性尖灭带,预测了斜坡带岩性圈闭的成因类型和空间分布。共生构造坡折带及源-汇系统下的控砂控圈作用研究,能进一步提高断陷盆地中深部储层预测的准确性和研究精度,对复杂斜

坡带岩性油气藏的勘探也具有较好的借鉴意义。

1 区域地质背景

歧口凹陷是渤海湾盆地最大最深的凹陷之一,位于黄骅坳陷的东部,西临沧县隆起,南接埕宁隆起,东靠沙垒田凸起,是在华北地台基础上发育起来的中新生代断陷盆地(图2a)。歧口凹陷古近纪构造演化经历了4个阶段,即孔店组沉积期的裂陷Ⅰ幕(65~50.5 Ma)、沙四段沉积期的裂陷Ⅱ幕(50.5~42 Ma)、沙三段沉积期的裂陷Ⅲ幕(42~38 Ma)、沙二段-东营组沉积期裂陷Ⅳ幕(32.8~24.6 Ma)(赖维成等,2012)。其中,沙三段发育区域厚层烃源岩,沙一、二段是主要的储层发育段和含油气层系。歧口凹陷南斜坡属于埕宁隆起和沙垒田凸起向歧口主洼的过渡,是重要的油气田产区。自20世纪70年代以来,该区已发现W17-A、W17-B、W18-A、W18-B、ZD和Z13-A等多个构造油田及含油构造(图2c),是油气运移和富集的有利区带。目前,该斜坡带构造勘探程度高,岩性勘探尚未取得突破。与传统箕状断陷的单物源、单倾向斜坡不同,该斜坡带紧邻埕宁隆起和沙垒田凸起两大物源区,多个方向均处于优势输砂通道上,物源供给和砂体发育模式更加丰富。同时,受多组不同性质的断裂活动影响,该斜坡带古地貌变化快,砂分散体

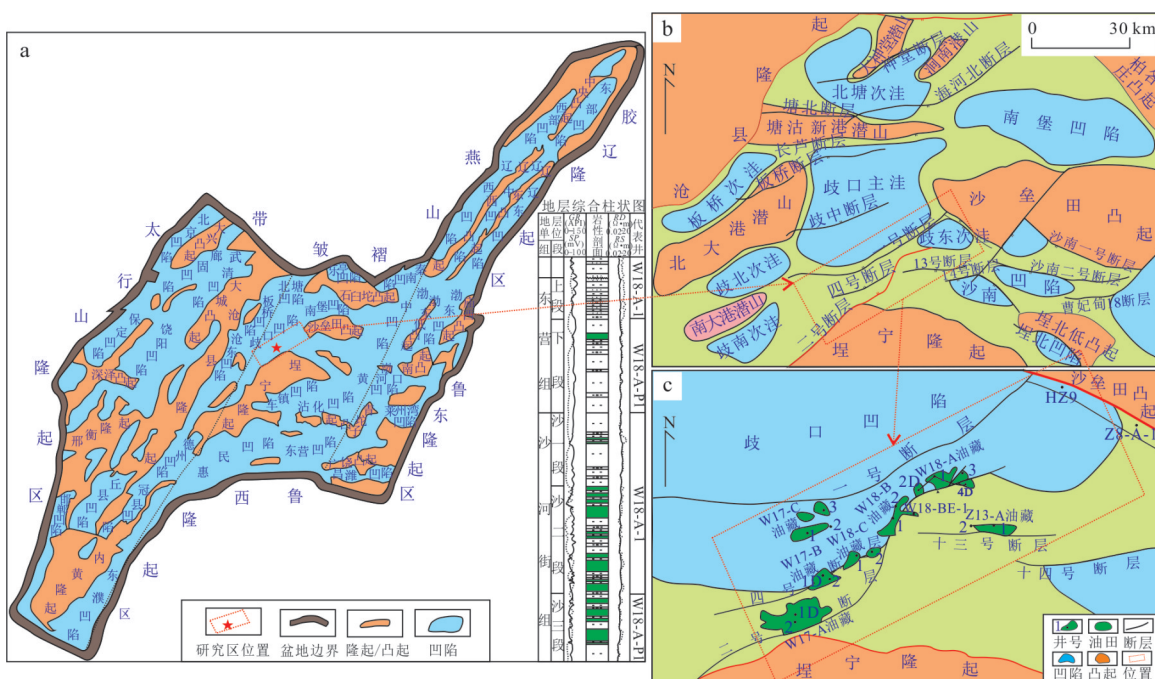


图2 歧口凹陷区域构造格架与研究区油气地质概况

Fig.2 Regional structural framework of Qikou Sag and petroleum geology overview in the study area

系十分复杂(图 2b).上述地质条件决定了该斜坡带源-汇系统构成复杂,沉积体系类型多样,储层发育程度变化快,具备形成岩性圈闭的有利条件.

2 物源体系的划分与特征

物源体系是砂体形成和富集的先决条件.物源分析能确定物源区的地理位置、母岩性质及其组合特征、沉积物搬运路径与距离等,为盆-山耦合作用研究提供了有效的切入点,是沉积体系分析与砂体预测的基础和关键(阙晓铭等,2024).常见的物源分析方法主要有区域构造方法、沉积学方法、岩石学方法、重矿物方法、地质年代学方法和地球物理学方法等(袁晓蕾等,2017).本文以区域构造方法为框架,以岩石学方法、重矿物方法、沉积学方法和地球物理学方法为重点,对歧口凹陷南斜坡沙河街组物源体系进行了综合划分和识别对比.

根据钻井、地震和伊利石测年等资料分析,埕

宁隆起自第三纪以来长期大面积暴露,自南向北出露基岩依次为:太古界花岗岩、花岗片麻岩和蚀变角闪斜长片麻岩,古生界石炭系+二叠系泥岩、砂岩与煤层互层,奥陶系+寒武系灰岩、白云岩、泥灰岩及页岩,中生界泥岩、火山碎屑岩与凝灰岩,或玄武岩和安山岩互层.沙垒田凸起基岩与埕宁隆起基本一致,只是缺失石炭系+二叠系(图 3).在岩石学特征和重矿物组分上,斜坡带钻井指示的母岩性质与上述物源区基岩十分吻合.从石英消光类型看,波状消失和无波状消失或弱波状消失都普遍存在,前者指示片麻岩型或片岩型母岩,后者为单晶,具裂纹,主要来自火山喷出岩.在长石标型特征上,正长石具不同程度的高岭土化,少量绢云母化,指示主要来自花岗岩;微斜长石大部分新鲜,具网格化双晶,可能来自老花岗岩或高级变质岩;斜长石以中酸性为主,属火山岩型.此外,在W18-A-2D井阴极发光特征中,石英发棕色光,长石发蓝色、天蓝色光,也指示母岩中存在变质岩.在岩屑成分上,主要

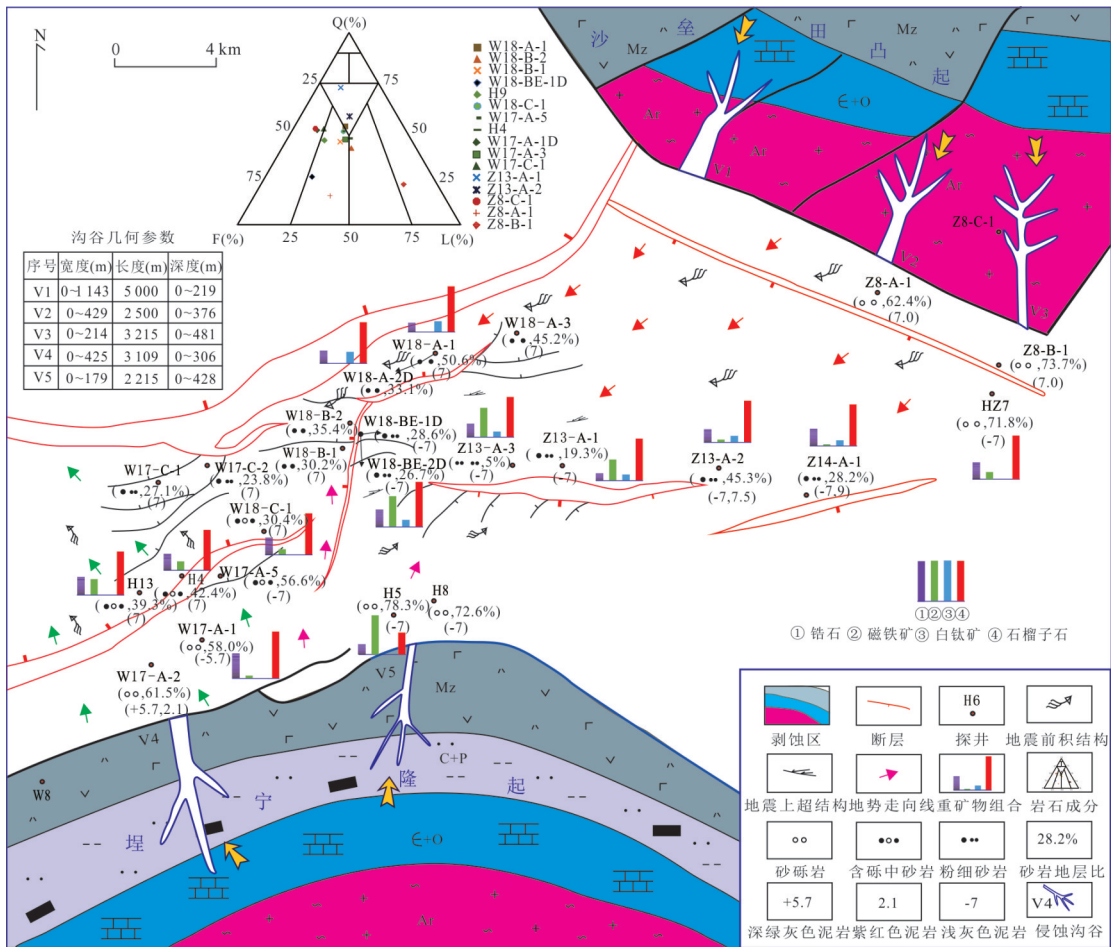


图 3 歧口凹陷南斜坡周缘物源体系分布及主要特征

Fig.3 Distribution and key characteristics of provenance systems in the southern slope zone of Qikou Sag

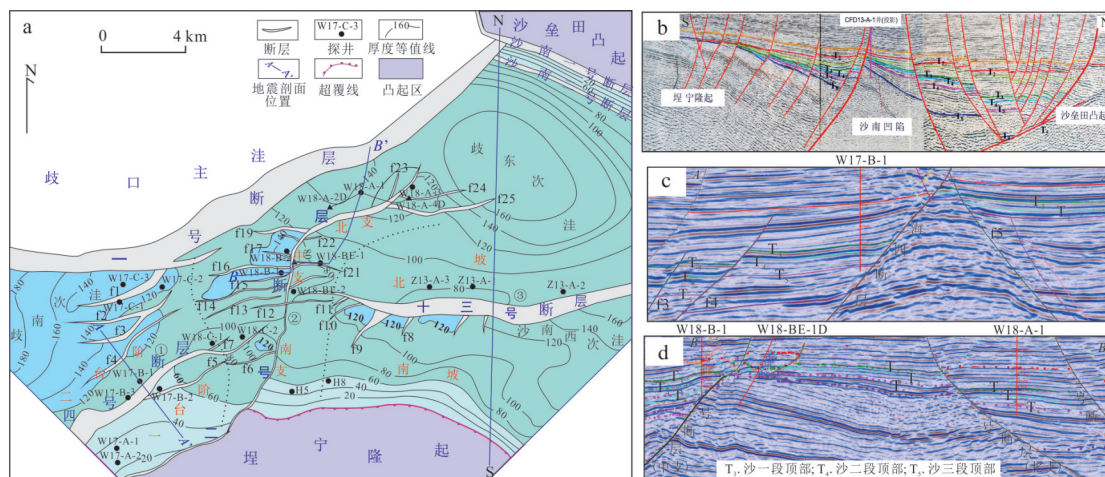


图4 南斜坡沙二段地层厚度及过井地震剖面

Fig.4 Thickness of Member 2, Shahejie Formation and seismic profiles across wells in the southern slope zone

①西侧同向断阶带;②中间主转换坡折带;③东侧反向断坡带

是酸性喷出岩、变质岩和砂泥岩,以及少量中基性喷出岩、白云岩和灰岩岩屑.在重矿物组成上,全区含量最高、分布最广的重矿物类型是石榴子石,十余口井中占比为45%~67%,平均达55%,表明变质岩和沉积岩是重要的母岩类型.此外,还见少量的赤铁矿、褐铁矿、锐钛矿、角闪石和金红石等,说明母岩也有中基性岩浆岩和花岗岩的贡献.从重矿物颜色看,研究区大部分井中的锆石均以无色为主,见少量粉红色,指示物源以较新的花岗岩和沉积岩为主,少量有太古界片麻岩或花岗岩的贡献.在晶形上,以短柱状、椭圆柱状为主,部分为双锥或单锥柱状,磨蚀程度中-深,反映母岩中存在花岗质岩石及沉积岩.因此,本区沙河街组沉积期母岩类型主要是片麻岩、酸性喷出岩和中基性喷出岩、花岗质侵入岩、砂岩和泥岩.

在沟谷分布上,埕宁隆起和沙垒田凸起共发育5条规模较大的侵蚀沟谷,最大宽度分别为179~1 143 m,最大深度为219~481 m,长度为2 215~5 000 m,指示了埕宁隆起物源和沙垒田凸起物源分别对斜坡带西南部和东北部的物质供给作用(图3).此外,根据岩石学、重矿物和沉积学特征等的变化规律,研究区西南部物源主要来自埕宁隆起的贡献,东北部主要受沙垒田凸起的影响,中间部位受上述双物源的共同作用.主要依据如下:(1)岩石学特征:十余口钻井岩石薄片统计表明,砂岩以岩屑质长石砂岩和长石砂岩为主,长石含量高,平均33.3%,最大54%,指示近源短距离搬运的特点.砂岩成分成熟度指数(石英/长石+岩屑):沿W17-A-

W17-B-W17-C方向,数值由0.21、0.78增加到1.01;沿Z8-A-W18-A-W18-B方向,由0.27、0.62增加到1.08;中部Z13-A构造最高,达1.92.(2)重矿物组合:含量最高的石榴子石全区差别不大,含量次之的锆石、磁铁矿和白钛矿具有规律性的变化.西南部主要为锆石(20%~30%)和磁铁矿(7%~16%)组合,东北部为锆石(13%~18%)和白钛矿(9%~16%)组合,中部为磁铁矿(16%~30%)、锆石(9%~18%)和白钛矿(4%~9%)组合.(3)沉积学和地球物理学:自埕宁隆起向歧口主洼方向,钻井揭示储层粒度由粗变细,由砂砾岩、含砾中细砂岩逐渐变为细砂岩、粉砂岩,储层与地层厚度比值也逐步下降,由超过50%、30%~40%逐渐减少到20%~30%(图4);泥岩颜色也由绿灰色、浅灰色向灰色变化;储层测井相由齿化高幅箱形、低幅箱形-漏斗形组合变为舌形-指形组合;在地震反射结构上,由弱振幅平行反射、发散-前积结构的楔状反射,变为强弱振幅相间的平行反射.上述变化代表了优势相带由多期水下分流河道叠加、分流河道-河口坝组合,逐渐变为远沙坝-席状砂-前三角洲泥岩组合,亚相由沿断裂边缘发育的扇三角洲平原、扇三角洲前缘近端过渡到前缘远端的沉积.自沙垒田凸起向W18-A和Z13-A方向,也有相似的变化特征,均指示了物源供给由强到弱、由近及远的变化过程.

3 构造坡折体系的发育与构成

由于成盆背景和成盆作用的差异,按构造线主体走向,渤海湾盆地可划分为三大构造区(图2a):

以北北东向为主的西部走滑构造区(太行山山前断裂与沧东断裂之间),以北东、北西向和近东西向为主的中部断陷构造区(包括黄骅拗陷和济阳拗陷)和以北北东、北东向为主的东部走滑构造区(郯庐断裂带的营口潍坊段)(侯贵廷等,1998).在区域位置上,歧口凹陷处于西部走滑构造区与中部断陷构造区的交接部位,叠加了北北东向的张剪性应力和北东、北西与近东西向的拉张应力.受其影响,歧口凹陷西部边界断裂为北北东走向的沧东断裂带,南部边界断裂为北东走向的二号断裂带,北部边界断裂为近东西走向的汉沽—海河断裂带.在强烈的多幕次、多旋回和多成因断陷作用下,歧口凹陷围区古近纪发育多序次的箕状半地堑与基底掀斜断块,构成复杂的“盆—岭”结构.歧口凹陷西侧构造线主体走向主要为北东向或北北东向,包括西南侧自南向北依次发育的歧南次洼—南大港潜山—歧北次洼—北大港潜山—板桥次洼,西北侧的大神堂潜山和涧南潜山.而在歧口凹陷东侧围区则发生显著变化,构造线主体走向主要为近东西或北西向,如柏各庄凸起、南堡凹陷、沙垒田凸起、沙南凹陷和埕北低凸起等(图 2b).

歧口凹陷南斜坡位于上述两类构造线的交接处(图 2a),东、西两翼分别继承叠加了上述两组不同的区域应力作用.受区域不同伸展应变和调节变形作用的共同影响,斜坡带西南部表现出由主断裂区和转换断裂区组成的复杂构造转换体系,内部构成具有横向(走向)分带、纵向(倾向)分段的特征.在横向(走向)上,以二号断层为中轴,自西向东可依次划分为西侧同向断阶带、中间主转换坡折带和东侧反向断坡带.西侧同向断阶带主要以三条长期活动的深大断裂(二号断层南段、四号断层和一号断层)为界,自南向北细分为一台阶和二台阶.二台阶又被多条次级断层复杂化,构成次一级同向断阶带(图 4c).中间主转换坡折带主要受二号断层控制,由南支、中支和北支构成.南支仅发育一条近南北走向的平直断层,主要调节掉向相反的四号断层和十三号断层之间的构造形变,表现为背斜型反向调节带(徐长贵,2006).中支由主断层和两侧多条派生断层组成,表现为羽状断裂坡折带(图 4a);北支由主断层与末梢多条分支断层组成,表现为帚状断裂坡折带.东侧反向断坡带包括北倾的南坡和北坡、以及受十三号断层控制的南掉反向断槽,断槽内派生断层组成梳状断裂坡折带(图 4b).在纵向(倾向)上,按照距离物源的远近和水体深浅的变

化,可划分为近岸斜坡上段、远岸斜坡下段和孤台区.近岸斜坡上段为西侧同向断阶带一台阶、中间主转换坡折带南支和东侧反向断坡带南坡相互连接,表现为产状基本一致的宽缓斜坡.远岸斜坡下段分布于西侧同向断阶带二台阶、中间主转换坡折带中支、北支和东侧反向断坡带北坡,该区域斜坡走向和倾向变化大,地形分割性强.孤台区主要沿十三号断层和二号断层中北段上升盘分布.斜坡带东北部构造结构比较简单,以一号断层为界,以同向缓坡断阶带与沙垒田凸起相连.沙南一号断层与沙南二号断层之间发育近岸斜坡上段,沙南二号断层以南为远岸斜坡下段(图 4a).

斜坡带不同构造坡折带的产状变化和形态组合是地势场高低转换的主要枢纽,控制着物源的输送方向和沉积体系的展布.根据物源指向和相互连接的关系,斜坡带可划分为贯通区、半遮挡区和孤台区.贯通区为沿物源方向地势由高指向低的连续区域,多由同向断裂坡折带或者同向缓坡带构成,主要发育在埕宁隆起北侧同向断阶带和沙垒田凸起西南侧同向断阶带.半遮挡区包括侧向遮挡区和前端遮挡区.侧向遮挡区为翼部遭受断层或者高地貌遮挡的低地势区域,由顺向断裂坡折带、走向相似或斜交的多组构造坡折带的软连接处、或者同一组断裂系结构发生变化的位置等组成,主要分布在中间主转换坡折带、西侧同向断阶带二台阶与中间主转换坡折带中支之间过渡的部位、四号断层及二号断层北部末梢帚状断裂系.前端遮挡区为低势区前方发育倾向相反的沉积斜坡或断裂斜坡,主要分布在东侧反向断坡带北坡以及中间主转换坡折带南支.孤台区为发育于远岸斜坡下段的局限水下高地,受反向断裂或顺向断裂控制,主要发育在中间主转换坡折带中支上升盘和东侧反向断坡带北坡高部位.

4 源—汇系统的配置作用

一个完整的源—汇系统包括从剥蚀、搬运到堆积的整个沉积动力学过程,是物源体系、输砂通道体系和砂分散体系相互配置作用的结果(Allen, 2005;徐长贵等,2017).歧口凹陷南斜坡围区沙河街组时期源—汇系统以近源沉积为主,具有多物源供给、多方向分配、多类沉积体系共生和相带变化快等显著特征.在源—汇系统的配置作用中,斜坡带砂分散体系(主要是构造坡折带)对源—汇系统起着最

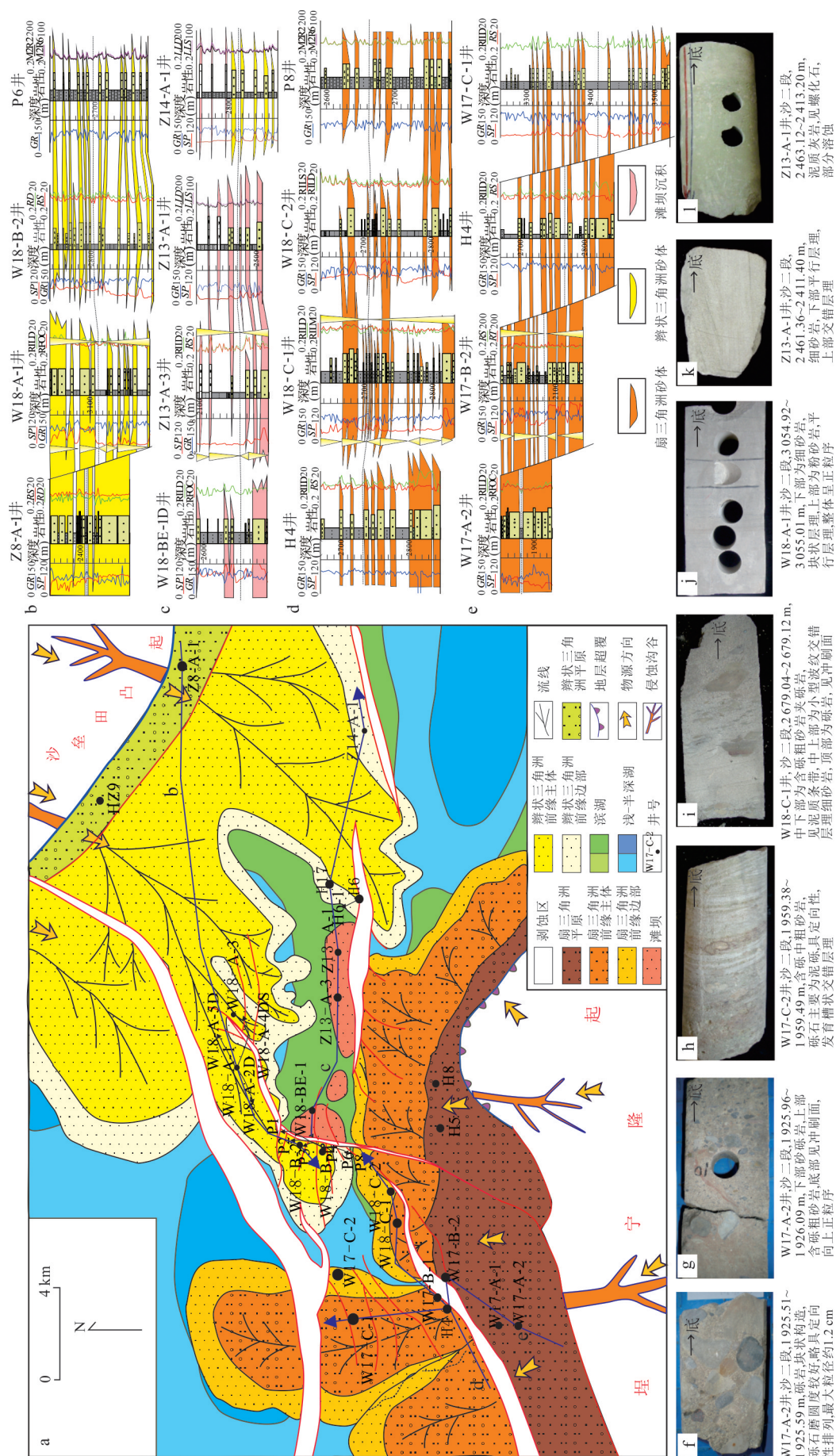


图5 南斜坡沙二段沉积体系展布与连井沉积对比剖面

Fig.5 Distribution of sedimentary systems and well-tie depositional correlation profiles of Member 2, Shahejie Formation in the southern slope zone of Qikou Sag

*S*_{SP}单位为mV; *G*_R单位为API; *R*_S、*R*_D、*R*_{ILD}、*R*_{FOC}、*M*_{2R2}、*M*_{2R6}、*L*_{LD}、*L*_{LS}单位均为Ω·m

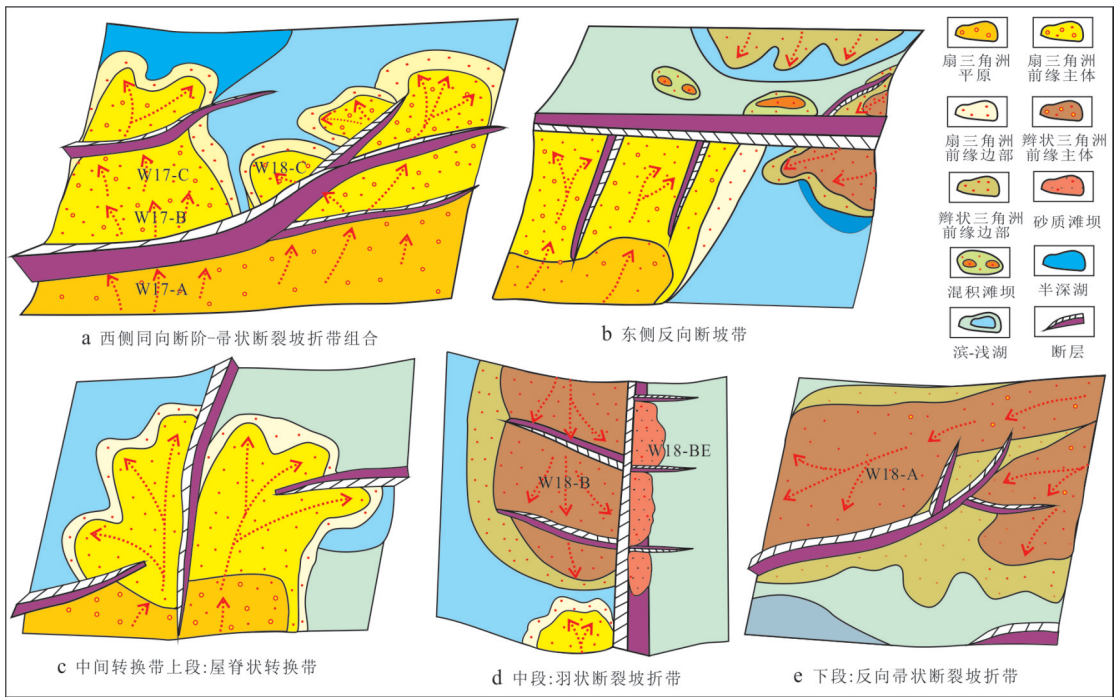


图6 歧口凹陷南斜坡不同共生构造坡折带砂体发育模式

Fig.6 Sandbody development patterns of different co-occurring tectonic slope-break zones in the southern slope zone of Qikou Sag

重要的控制作用,主要表现在物源供给的方向与范围、沉积相带的构成与分异、砂体的富集与尖灭等.

“源-坡”的宏观组合决定了源-汇系统的划分及主要构成特征.物源体系是源-汇系统的根源和出发点,斜坡带是最重要的沉积路径和卸载区,两者的宏观组合决定了源-汇系统的划分及主要构成特征.歧口凹陷南斜坡围区主要发育埕宁隆起和沙垒田凸起两大物源体系,以它们为中心,依托多支侵蚀沟谷以及与之配置良好的斜坡带古地貌低势区,分别形成西南侧埕宁隆起-扇三角洲和东北侧沙垒田凸起-辫状三角洲两大源-汇系统.此外,在波浪和浅水蒸发作用下,孤台区也发育砂质滩坝和碳酸盐岩滩坝沉积.由于物源供给能力的不同和斜坡带内部结构的差异,上述源-汇系统的构成特征存在较大的不同.埕宁隆起地势高,剥蚀面积大,基岩类型好,物源供给充足,紧邻的斜坡低势区西侧贯通,扇三角洲长距离推进至歧南主洼,前缘相带分布广泛;东侧发育前端遮挡区,扇三角洲延伸不远,为过充填沉积,以平原和前缘亚相多期叠加为主.沙垒田凸起物源供给也十分充足,紧邻的斜坡区受侧向遮挡分割,对应的辫状三角洲沿顺向延伸,前缘相带十分发育.而孤台区滩坝储层薄,分布局限,横向变化快(图5).

共生构造坡折带的倾向组合支配着沉积相带的纵向分异及延伸范围.共生构造坡折带的倾向组合表现为同向、反向、顺向和斜向等不同样式的连接,将斜坡带分配成地势高低转换的不同空间,影响着水体深度显著变化、可容纳空间赋存位置和物源供给分配指向,控制着沉积相带的纵向分异及延伸范围.按照与物源供给方向的关系,歧口凹陷南斜坡倾向组合主要受北东东、北西和近东西向断裂控制,发育同向断阶带-深洼、斜向转换带-反向缓坡带、顺向转换带-反向缓坡带、同向缓坡带-反向断裂带、同向断阶带-顺向断裂带、同向断阶带-反向缓坡带、同向断阶带-斜向转换带等组合样式.近岸斜坡上段倾向结构简单,为同向断阶带-台阶、顺向转换带和同向缓坡带高部位,均发育扇/辫状三角洲平原亚相沉积,岩性组合以厚层的砂砾岩或含砾中粗砂岩夹薄层泥岩为主(图5),是源-汇系统中砂体最富集、最稳定的区域.远岸斜坡下段倾向组合比较复杂,表现为同向斜坡带与反向断裂带、顺向断槽和斜向转换带等不同倾向结构的组合.同向斜坡带和顺向断槽发育大面积的扇/辫状三角洲前缘和前扇/辫状三角洲亚相沉积,岩性组合为含砾中粗砂岩、细砂岩与泥岩不等厚互层,砂体整体较富集.反向断裂带遮挡着物源推进,在下降盘发育厚层的扇三角洲前缘沉积.反向缓坡带则表现

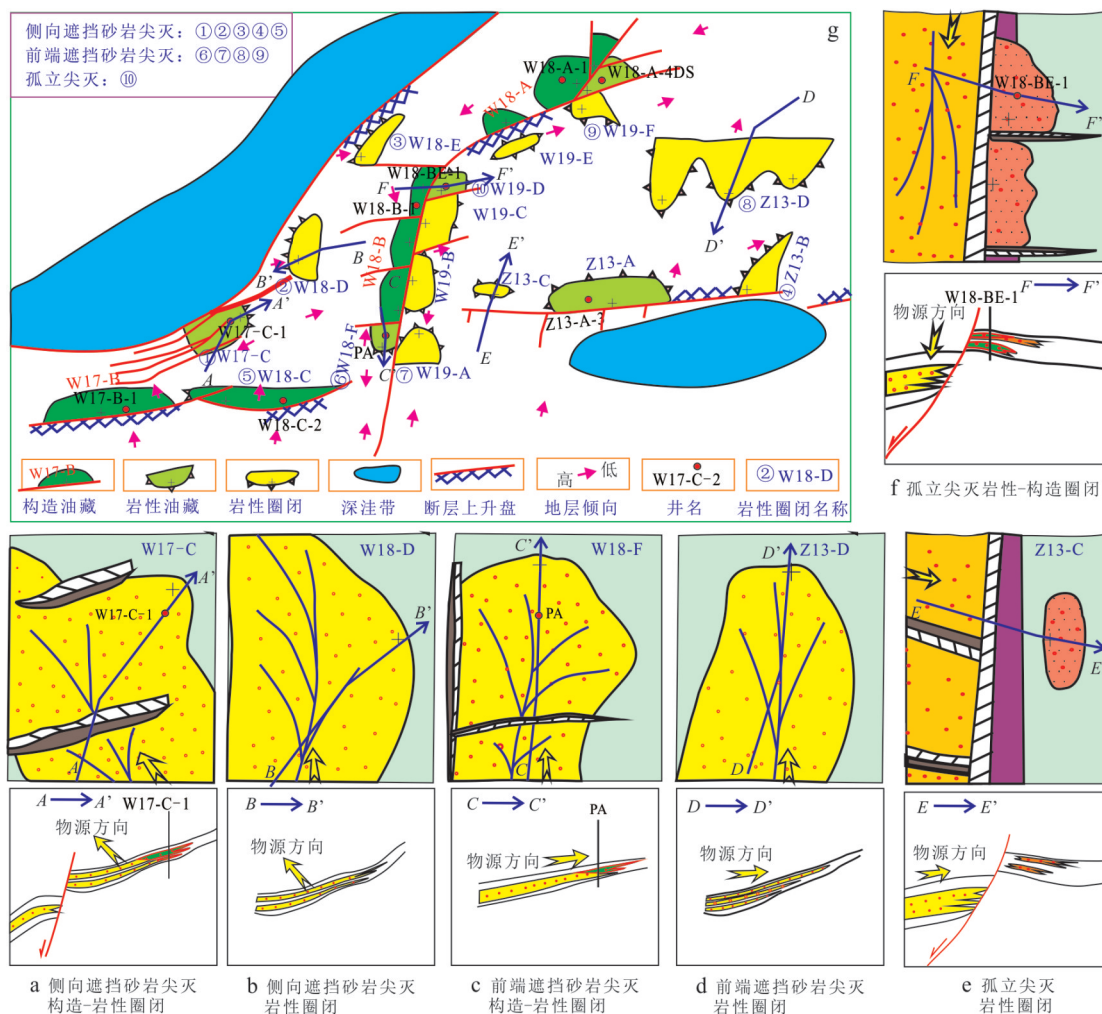


图7 歧口凹陷南斜坡岩性圈闭分布及发育模式

Fig.7 Distribution and development model of lithologic traps in the southern slope zone of Qikou Sag

为辫状三角洲前缘远端的不断上超. 反向断裂带和顺向断裂带的上升盘限制了陆源供给, 以湖相沉积为主, 局部发育滩坝沉积, 岩性组合为厚层泥岩夹薄层细砂岩或生物灰岩与白云岩 (图5).

共生构造坡折带的走向结构控制着主要汇水方向、分水岭及沉积体尖灭带. 共生构造坡折带走向上表现为断裂区、缓坡区和转换区等不同单元的组合, 呈现出“槽-坡-脊”间互的地貌特征, 决定着斜坡带横向有效可容纳空间的连接与变化, 构建的贯通区、半遮挡区和孤台区分别控制着主要的汇水方向、分水岭及沉积尖灭带. 贯通区控制着歧口凹陷南斜坡最主要的汇水方向和富砂相带, 如W17-A、W17-B和W17-C构造处于埕宁隆起西支贯通区, 均发育扇三角洲沉积主体, 砂层厚且含砂率高 (图6a); Z8-A-1井及其西南部亦如此. 侧向半遮挡区控制着扇体侧翼边界或者不同扇体之间的分界,

如二号断层中支下降盘W18-A和W18-B油田发育辫状三角洲前缘沉积, 顺向断槽控制着输砂方向和侧向边界, W17-C和W18-B断层系之间的转换脊限定着砂体推进 (图6d); Z8-A-1井前方辫状三角洲的侧向边界受东侧反向断坡带北坡控制; 中间转换带上段屋脊状转换带分割两支不同扇体 (图6c); 四号断层主体下降盘H4井与末梢帚状断裂系W18-C-2井为不同扇体, 砂体对比与油水关系存在明显的差异 (图6a). 前端遮挡区控制着沉积体前部边缘相带和沉积尖灭带, 如辫状三角洲多期上超于东侧反向断坡带北坡, 超覆点就是沉积尖灭线 (图6b); W18-A-4DS井附近反向帚状断坡折带控制着沉积体前部边缘相带 (图6e); H5井前方扇三角洲前缘受反向斜坡控制等. 此外, 孤台区对水系的分配起到较强的屏障作用, 发育的局部滩坝沉积有利于形成岩性尖灭带 (图6b、6d).

5 岩性圈闭的成因模式与分布规律

陆相断陷盆地岩性圈闭的发育受层序界面、沉积相类型和古地貌(构造坡折带)等因素共同控制(冯有良等,2004).歧口凹陷南斜坡沙河街组沉积期沿主断裂发育断背斜、断鼻和断块等多种类型构造圈闭,岩性圈闭也广泛分布,发育在源-汇系统半遮挡区的边缘相带和孤台区的岩性尖灭带,主要受构造坡折带和沉积相类型控制,多与构造转换带和反向断裂带息息相关,整体具有“成串沿带,多类满坡”的分布规律.按照源-汇系统内砂体走向及与构造产状的关系,并结合沉积相类型,歧口凹陷南斜坡主要发育三种岩性圈闭成因模式:侧向遮挡砂岩尖灭岩性圈闭、前端遮挡砂岩尖灭岩性圈闭和孤立尖灭岩性圈闭.结合有无断层影响,可以细分为侧向遮挡砂岩尖灭构造-岩性圈闭、侧向遮挡砂岩尖灭岩性圈闭、前端遮挡砂岩尖灭构造-岩性圈闭、前端遮挡砂岩尖灭岩性圈闭、孤立尖灭岩性-构造圈闭和孤立尖灭岩性圈闭(图 7,图 8).

5.1 侧向遮挡砂岩尖灭岩性圈闭

侧向遮挡砂岩尖灭岩性圈闭为三角洲体系翼部砂体因受挠曲变形遮挡尖灭而形成的圈闭,沿侧向遮挡区分布,主要发育在一号断层、四号断层和二号断层中北段之间走向相似或斜交的构造转换带之间的软连接处,共发育三种成因模式.第一种是由于应力作用变换,同向断阶带断层尾部走向和

结构均发生变化,地貌突然变高遮挡砂体而侧向尖灭,如 W17-C(图 7a)和 W18-C 构造-岩性圈闭;第二种是梳状断裂坡折带走向与物源方向一致,顺向推进的三角洲砂体在坡折带侧翼尖灭而形成侧向遮挡砂岩尖灭岩性圈闭,如 W18-D(图 7b)和 W18-E 岩性圈闭;第三种发育于反向斜坡带的翼部,砂体侧向受斜坡遮挡尖灭形成岩性圈闭,如 Z13-B 构造-岩性圈闭.上述三种侧向遮挡砂岩尖灭岩性圈闭总面积为 8.2 km².W17-C 和 W18-C 构造-岩性圈闭部署钻探 W17-C-2 井和 W18-C-2 井,其中 W17-C-1 井获得油层 15.4 m, W18-C-2 井获得油层 23.6 m.

5.2 前端遮挡砂岩尖灭岩性圈闭

前端遮挡砂岩尖灭岩性圈闭为三角洲体系前端砂体因反向斜坡遮挡尖灭而形成的圈闭,沿前端遮挡区分布,主要发育在东侧反向断坡带北坡和二号断层南段,共发育两种成因模式.第一种发育于背斜型反向转换带,由顺向推进的三角洲砂体前端在转换带倾向突变区上倾尖灭,如 W18-F(图 7c)和 W19-A 构造-岩性圈闭(图 8d);第二种发育于反向断裂坡折带的坡脚位置附近,三角洲砂体前端受反向斜坡遮挡而上倾尖灭,如 W13-D 岩性圈闭(图 7d)和 W19-F 构造-岩性圈闭(图 8b).上述两种前端遮挡砂岩尖灭岩性圈闭总面积为 7.6 km².其中 W18-F 构造-岩性圈闭部署钻探 PA 井,获得油层 8.6 m.

5.3 孤立尖灭岩性圈闭

孤立尖灭岩性圈闭主要受沉积相类型控制,为

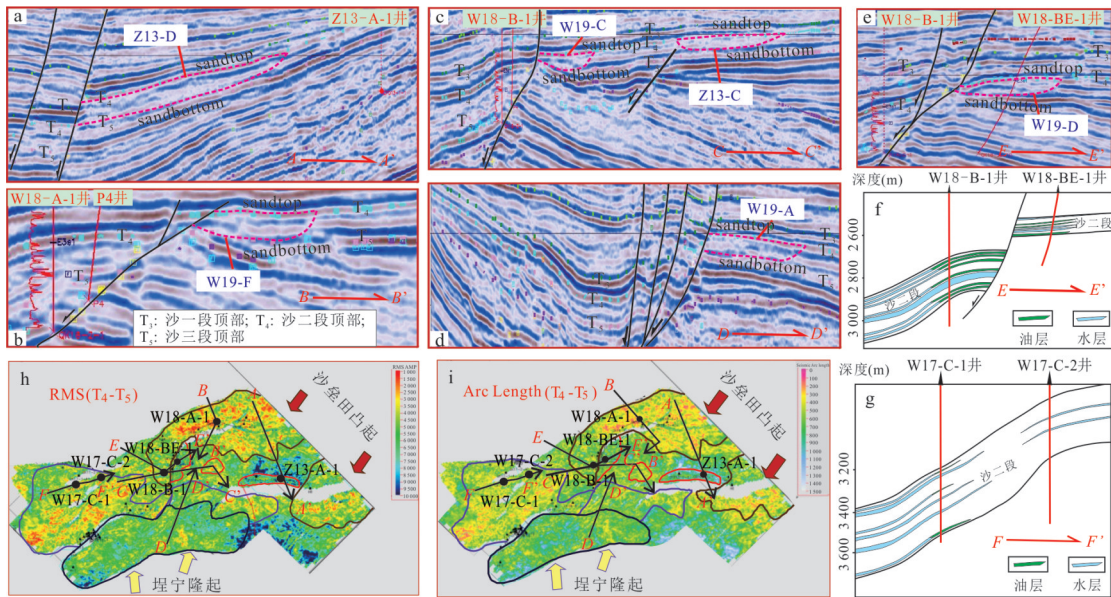


图 8 典型岩性体尖灭的地震剖面 and 连井油藏剖面

Fig.8 The seismic and drilling profiles of typical lithologic pinch-outs

储集体局限性分布尖灭而形成的圈闭。在研究区与滩坝密切相关,主要发育在孤台区,即中间主转换坡折带中支上升盘和十三号断层上升盘,共发育两种成因模式。第一种成因是砂质滩坝尖灭,W18-BE-1井证实这种成因模式(图7f、8f),钻探发现10.8 m油层。W19-B、W19-C和W19-E岩性圈闭与之类似;第二种是混积滩坝,早期为砂质滩坝,晚期为碳酸盐岩滩坝。Z13-A-1井和Z13-A-3井钻探证实,Z13-A-1井获得油层10.2 m,Z13-C岩性圈闭(图7e、8c)也属于这种类型。上述两种孤立尖灭岩性圈闭总面积为5.7 km²。

研究区沙二段岩性圈闭属于源内成藏,上覆东三段和沙一段厚层泥岩形成区域盖层,整体成藏条件优越。针对上述三种岩性圈闭实施钻探,W18-F-PA井、W18-BE-1井和Z13-A-1井等都获得了良好的油气发现,展示了该区可观的岩性油气藏勘探潜力,也证实了源-汇理论指导下的岩性圈闭预测方法是可靠可行的。

6 结论与认识

(1)歧口凹陷南斜坡发育沙垒田凸起与埕宁隆起两大物源体系,母岩类型比较接近,为片麻岩、酸性喷出岩、中基性喷出岩和花岗质侵入岩等。西南部物源主要来自埕宁隆起的贡献,东北部主要受沙垒田凸起的影响,中间部位受上述双物源的共同作用。斜坡带西南部表现出由主断裂区和转换断裂区组成的复杂构造转换体系,内部构成具有横向分带、纵向分段的特征;东北部发育受顺向断层切割的同向缓坡断阶带。根据与物源指向和相互连接的关系,斜坡带可划分为贯通区、半遮挡区和孤台区。

(2)该区源-汇系统以近源沉积为主,具有多物源供给、多方向分配、多类沉积体系共生和相带变化快等显著特征。构造坡折带对源-汇系统起着最重要的控制作用,主要表现在物源供给的方向与范围、沉积相带的构成与分异、砂体的富集与尖灭等。

(3)斜坡带岩性圈闭主要受构造坡折带和沉积相类型控制,分布在远岸斜坡下段和孤台区,成因类型有侧向遮挡砂岩尖灭岩性圈闭、前端遮挡砂岩尖灭岩性圈闭和孤立尖灭岩性圈闭,整体具有“成串沿带,多类满坡”的分布规律。针对上述三种岩性圈闭实施钻探获得了良好的油气发现,证实了源-汇理论指导下的岩性圈闭预测方法是可靠可行的。

(4)采用“物源体系-输砂体系-沉积体系-砂体边

缘区-岩性尖灭带”主线渐进式岩性圈闭预测流程,综合开展源-汇系统下的控砂控圈作用研究,为斜坡带岩性圈闭全面预测提供了一种新的思路和方法,在复杂斜坡带岩性油气藏勘探中具有广阔的应用前景。

致谢:感谢审稿专家及编委给予的指导、建议!

References

- Allen, P. A., 2008. From Landscapes into Geological History. *Nature*, 451(7176): 274—276. <https://doi.org/10.1038/nature06586>
- Allen, P., 2005. Striking a Chord. *Nature*, 434(7036): 961. <https://doi.org/10.1038/434961a>
- Anthony, E. J., Julian, M., 1999. Source-to-Sink Sediment Transfers, Environmental Engineering and Hazard Mitigation in the Steep Var River Catchment, French Riviera, Southeastern France. *Geomorphology*, 31(1—4): 337—354. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00088-4](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00088-4)
- Blum, M., 2019. Organization and Reorganization of Drainage and Sediment Routing through Time: The Mississippi River System. *Geological Society, London, Special Publications*, 488(1): 15—45. <https://doi.org/10.1144/sp488-2018-166>
- Bouton, A., Vennin, E., Amiotte-Suchet, P., et al., 2020. Prediction of the Calcium Carbonate Budget in a Sedimentary Basin: A “Source-to-Sink” Approach Applied to Great Salt Lake, Utah, USA. *Basin Research*, 32(5): 1005—1034. <https://doi.org/10.1111/bre.12412>
- Cai, H., Qin, L. Z., Liu, Y. H., 2019. Differentiation and Coupling Model of Source-to-Sink Systems with Transitional Facies in Pingbei Slope of Xihu Sag. *Earth Science*, 44(3): 880—897 (in Chinese with English abstract).
- Chen, H. H., Wood, L. J., Gawthorpe, R. L., 2021. Sediment Dispersal and Redistributive Processes in Axial and Transverse Deep-Time Source-to-Sink Systems of Marine Rift Basins: Dampier Sub-Basin, Northwest Shelf, Australia. *Basin Research*, 33(1): 227—249. <https://doi.org/10.1111/bre.12462>
- Cullen, T. M., Collier, R. E. L., Gawthorpe, R. L., et al., 2020. Axial and Transverse Deep-Water Sediment Supply to Syn-Rift Fault Terraces: Insights from the West Xylokastro Fault Block, Gulf of Corinth, Greece. *Basin Research*, 32(5): 1105—1139. <https://doi.org/10.1111/bre.12416>
- Feng, Y. L., Zhou, H. M., Li, S. T., et al., 2004. Sequence Types and Subtle Trap Exploration in Continental Rift Basin: A Case Study of Lower Tertiary of the

- Nanpu Depression. *Earth Science*, 29(5): 603–608 (in Chinese with English abstract).
- Hou, G. T., Qian, X. L., Song, X. M., 1998. The Origin of the Bohai Bay Basin. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 34(4): 503–509 (in Chinese with English abstract).
- Hu, C. H., Guo, Q., Han, H. W., et al., 2023. Exploration Breakthrough of Lithologic Reservoirs of Shahejie Formation in Taoyuan Area of the Eastern Sag of Liaohe Depression and Its Significance. *Acta Petrolei Sinica*, 44(3): 447–457 (in Chinese with English abstract).
- Jia, D. H., Xu, C. G., Yang, B., et al., 2007. Paleogene Palaeogeomorphology Reconstruction and Evolution and Its Control on Sedimentary Systems in Central-Southern Liaodong Zone, Liaodongwan Bay. *Journal of Palaeogeography*, 9(2): 155–166 (in Chinese with English abstract).
- Lai, W. C., Xu, C. G., Jia, D. H., et al., 2012. Characteristics of Paleogene Sequence Boundary and Sequences of Different Tectonic Units in the Bohai Area. *Journal of Stratigraphy*, 36(4): 807–814 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. T., Pan, Y. L., Lu, Y. C., et al., 2002. Key Technology of Prospecting and Exploration of Subtle Traps in Lacustrine Fault Basins: Sequence Stratigraphic Researches on the Basis of High Resolution Seismic Survey. *Earth Science*, 27(5): 592–598 (in Chinese with English abstract).
- Lin, C. S., Yang, H. J., Liu, J. Y., et al., 2009. Palaeotectonic Geomorphology in Paleozoic Central Uplift Belt of Tarim Basin and Its Constraints on the Development and Distribution of Sedimentary Facies. *Scientia Sinica Terrae*, 39(3): 306–316 (in Chinese).
- Lin, X., Pang, Y. X., Li, C. A., et al., 2025. Detrital Zircon U-Pb Age Analysis of Late Pliocene Deposits from the Lower Yangtze River, South China: Implications for Sedimentary Provenance and Evolution of the Yangtze River. *Journal of Earth Science*, 36(4): 1425–1443. <https://doi.org/10.1007/s12583-023-1961-9>
- Pechlivanidou, S., Cowie, P. A., Hannisdal, B., et al., 2018. Source-to-Sink Analysis in an Active Extensional Setting: Holocene Erosion and Deposition in the Sperchios Rift, Central Greece. *Basin Research*, 30(3): 522–543. <https://doi.org/10.1111/bre.12263>
- Peng, J. Z., Cheng, F., Zhang, D. H., et al., 2025. Early Cenozoic Source to Sink Relation between the Tula Basin and the Surrounding Ranges: Insights for the Tibetan Plateau Growth. *Science China Earth Sciences*, 68(12): 4062–4082. <https://doi.org/10.1007/s11430-024-1624-5>
- Que, X. M., Shu, Y., Wang, X. D., et al., 2024. Provenance Characteristics and Sedimentary Evolution of Zhu I Depression in Paleogene: Indications from Detrital Zircon Ages. *Earth Science*, 49(7): 2373–2387 (in Chinese with English abstract).
- Sklar, L. S., Riebe, C. S., Marshall, J. A., et al., 2017. The Problem of Predicting the Size Distribution of Sediment Supplied by Hillslopes to Rivers. *Geomorphology*, 277: 31–49. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.05.005>
- Walsh, J. P., Wiberg, P. L., Aalto, R., et al., 2016. Source-to-Sink Research: Economy of the Earth's Surface and Its Strata. *Earth-Science Reviews*, 153: 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.11.010>
- Wang, H. Q., Ding, W. W., Wang, F., 2025. Evolution and Controlling Factors of Sedimentary Flux of East Asian Continental Margin since the Cenozoic. *Earth Science*, 50(9): 3559–3580 (in Chinese with English abstract).
- Xu, C. G., 2006. Genetic Types of Paleogene Slope-Break Zones and Their Controls on Depositional System in Bohai Offshore. *China Offshore Oil and Gas*, 18(6): 365–371 (in Chinese with English abstract).
- Xu, C. G., 2013. Controlling Sand Principle of Source-Sink Coupling in Time and Space in Continental Rift Basins: Basic Idea, Conceptual Systems and Controlling Sand Models. *China Offshore Oil and Gas*, 25(4): 1–11 (in Chinese with English abstract).
- Xu, C. G., Du, X. F., 2017. Industrial Application of Source-to-Sink Theory in Continental Rift Basin: A Case Study of Bohai Sea Area. *China Offshore Oil and Gas*, 29(4): 9–18 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Q., Yang, W. J., Wen, L., et al., 2025. Controlling Effects of the Mid-Permian Multistage Slope-Break Zones on Paleogeomorphology and Large-Scale Shoals in the Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 52(4): 842–856 (in Chinese with English abstract).
- Yang, X. B., Chang, L., Xu, R., et al., 2020. Types and Sand Control Effect of Terrestrial Slope Breaks of Wenchang Sag Inside the Pearl River Mouth Basin. *Earth Science*, 45(3): 989–997 (in Chinese with English abstract).
- Yao, G. Q., Jiang, P., 2021. Method and Application of Reservoir “Source-Route-Sink-Rock” System Analysis. *Earth Science*, 46(8): 2934–2943 (in Chinese with English abstract).

English abstract).

- Yuan, X. Q., Yao, G. Q., Jiang, P., et al., 2017. Provenance Analysis for Liushagang Formation of Wushi Depression, Beibuwan Basin, the South China Sea. *Earth Science*, 42(11): 2040—2054 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, H. T., Xu, C. G., Zhu, X. M., et al., 2017. Advances of the Source-to-Sink Units and Coupling Model Research in Continental Basin. *Earth Science*, 42(11): 1851—1870 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, X. M., Li, S. L., Liu, Q. H., et al., 2017. Source to Sink Studies between the Shaleitian Uplift and Surrounding Sags: Perspectives on the Importance of Hinterland Relief and Catchment Area for Sediment Budget, Western Bohai Bay Basin, China. *Interpretation*, 5(4): ST65—ST84. <https://doi.org/10.1190/int-2017-0027.1>

中文参考文献

- 蔡华, 秦兰芝, 刘英辉, 2019. 西湖凹陷平北斜坡带海陆过渡相源-汇系统差异性及其耦合模式. *地球科学*, 44(3): 880—897.
- 冯有良, 周海民, 李思田, 等, 2004. 陆相断陷盆地类型与隐蔽油气藏勘探——以南堡凹陷古近系为例. *地球科学*, 29(5): 603—608.
- 侯贵廷, 钱祥麟, 宋新民, 1998. 渤海湾盆地形成机制研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 34(4): 503—509.
- 户昶昊, 郭强, 韩宏伟, 等, 2023. 辽河坳陷东部凹陷桃园地区沙河街组岩性油气藏勘探突破及意义. *石油学报*, 44(3): 447—457.
- 加东辉, 徐长贵, 杨波, 等, 2007. 辽东湾辽东带中南部古近纪古地貌恢复和演化及其对沉积体系的控制. *古地理学报*, 9(2): 155—166.
- 赖维成, 徐长贵, 加东辉, 等, 2012. 渤海海域古近系层序界

面特征及不同构造带的层序构成. *地层学杂志*, 36(4): 807—814.

- 李思田, 潘元林, 陆永潮, 等, 2002. 断陷湖盆隐蔽油藏预测及勘探的关键技术——高精度地震探测基础上的层序地层学研究. *地球科学*, 27(5): 592—598.
- 林畅松, 杨海军, 刘景彦, 等, 2009. 塔里木盆地古生代中央隆起带古构造地貌及其对沉积相发育分布的制约. *中国科学: 地球科学*, 39(3): 306—316.
- 阙晓铭, 舒誉, 汪旭东, 等, 2024. 珠一坳陷古近纪物源特征及其沉积演化: 来自碎屑锆石年龄的指示. *地球科学*, 49(7): 2373—2387.
- 王海芹, 丁巍伟, 王菲, 2025. 东亚陆缘盆地新生代沉积通量演化及控制因素. *地球科学*, 50(9): 3559—3580.
- 徐长贵, 2006. 渤海古近系坡折带成因类型及其对沉积体系的控制作用. *中国海上油气*, 18(6): 365—371.
- 徐长贵, 2013. 陆相断陷盆地源-汇时空耦合控砂原理: 基本思想、概念体系及控砂模式. *中国海上油气*, 25(4): 1—11.
- 徐长贵, 杜晓峰, 2017. 陆相断陷盆地源-汇理论工业化应用初探——以渤海海域为例. *中国海上油气*, 29(4): 9—18.
- 许强, 杨文杰, 文龙, 等, 2025. 四川盆地中二叠世多期坡折带对古地貌和规模滩体的控制作用. *石油勘探与开发*, 52(4): 842—856.
- 杨希冰, 常露, 徐睿, 等, 2020. 珠江口盆地文昌凹陷陆相坡折带类型及其控砂作用. *地球科学*, 45(3): 989—997.
- 姚光庆, 姜平, 2021. 储层“源-径-汇-岩”系统分析的思路方法与应用. *地球科学*, 46(8): 2934—2943.
- 袁晓蕾, 姚光庆, 姜平, 等, 2017. 北部湾盆地乌石凹陷东部流沙港组物源分析. *地球科学*, 42(11): 2040—2054.
- 朱红涛, 徐长贵, 朱筱敏, 等, 2017. 陆相盆地源-汇系统要素耦合研究进展. *地球科学*, 42(11): 1851—1870.