

渤海西部沙东南构造带东营组古地貌特征及对沉积的控制作用

康海亮¹, 林畅松², 牛成民³

KANG Hailiang¹, LIN Changsong², NIU Chengmin³

1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083;
2. 中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 100083;
3. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459

1. *Petrochina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China;*
2. *School of Ocean Sciences, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;*
3. *Tianjin Branch, CNOOC China Limited, Tianjin 300459, China*

KANG H L, LIN C S, NIU C M, 2021. Ancient landform of the Dongying formation in the Shadongnan structural zone, western Bohai Sea area and its control on the sedimentation [J]. Journal of Geomechanics, 27 (1): 19–30. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.01.003

Abstract: The Shadongnan structural zone in the western Bohai Sea area is located in the transitional position from the Shaleitian uplift to the Sha'nang sag. Due to the influence of various factors such as inherited uplift, syn-depositional faults and ancient valleys in different periods, the development of sedimentary facies is relatively complex, restricting the further oil and gas exploration and development. We restored the ancient landform of each three-level sequence in the Dongying formation in the sedimentary period using the strata thickness method, identifying uplifts, slopes, ancient valleys, fault troughs, and shallow and deep sub-sags in the study area. Meanwhile, there are two kinds of ancient landform in the Shadongnan structural zone bounded by the NNE-trending transform fault, with the valley-paleoslope-fault slope-break in the west and the valley-multistage fault slope-break in the east. The former is composed of eroded valleys, buried hill slopes and early syn-depositional faults, while the latter eroded valleys and two or three syn-depositional faults with the same direction and different periods. Our study showed that the valleys located at the edge of the uplifts were the source channels in the early stage and filled with sediments in the late stage. The distribution and filling of the sedimentary system of the valley-paleoslope-fault slope-break were mainly controlled by the ancient slope-fault slopes, and the syn-depositional faults controlling the fault slopes were relatively active in the Shahejie formation and controlled the deposition and filling of the lowstand fans and turbidite fans. By the SQ-Ed₃ period, the fault activities gradually weakened, and the fault slope-break distinct the fan delta plain and front in SQ-Ed₃ from the deposition of the braided river delta front and shallow lake in SQ-Ed₂^d and SQ-Ed₂ⁿ. The Shadongnan No.1 syn-depositional fault with the valley-multistage fault slope-break, which was developed and activated in SQ-Ed₃, controlled the formation of the deep sub-sags and the development of the small fan deltas under the first slope break. The Sha'nang syn-depositional fault both formed and activated in SQ-Ed₂^d was acted as the second slope break separating the bulges and slopes, and controlled the depositional filling of the small fan delta in SQ-Ed₂^d.

Key words: depositional filling; fault combination; ancient landform; Dongying formation; Shadongnan structural zone; western Bohai Sea area

基金项目: 国家科技重大专项 (2016ZX05029-005)

第一作者简介: 康海亮 (1981-), 男, 博士, 工程师, 主要从事沉积学与油气地质综合研究。E-mail: khl@petrochina.com.cn

收稿日期: 2019-11-29; 修回日期: 2020-08-11; 责任编辑: 范二平

引用格式: 康海亮, 林畅松, 牛成民, 2021. 渤海西部沙东南构造带东营组古地貌特征及对沉积的控制作用 [J]. 地质力学学报, 27 (1): 19–30. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.01.003

摘要:渤海西部海域沙东南构造带处于沙垒田凸起向沙南凹陷的过渡部位,受继承性凸起、不同时期同沉积断裂和古沟谷多种因素影响,沉积相的发育较为复杂,制约了下一步油气勘探。为此,通过分析由地层厚度法恢复的沙东南构造带东营组各三级层序沉积时期的古地貌,明确了研究区发育凸起区、斜坡区、古沟谷、断槽、浅洼和深洼陷区等多种地貌单元。同时,以北北东向转换断裂为界,划分出两种不同的地貌组合分区:西区为由侵蚀沟谷、古潜山斜坡和早期同沉积断裂组成的沟谷-斜坡-断坡地貌,东区为由侵蚀沟谷、2~3条同向不同期同沉积断层组成的沟谷-多级断坡地貌。研究表明两种构造地貌中位于凸起边缘的沟谷早期均为物源通道,晚期接受沉积充填,对沉积相类型、分布以及充填控制的差异主要受斜坡-断坡和多级断坡的影响:在沟谷-斜坡-断坡地貌中,沉积体系的分布和沉积充填过程主要受古斜坡-断坡控制,控制断坡的同沉积断裂在沙河街组活动较强,控制了沙河街组低位扇、浊积扇的沉积和充填, SQ-Ed₃ 时期断裂活动逐渐减弱,继承性断坡地貌成为 SQ-Ed₃ 层序扇三角洲平原和前缘以及 SQ-Ed₂^d, SQ-Ed₂^a 时期辫状河三角洲前缘和滨浅湖沉积的大致界限;在沟谷-多级断坡地貌中,形成于 SQ-Ed₃ 时期的沙东南 1 号断裂仅在 SQ-Ed₃ 时期活动,控制了深洼陷的形成和一级坡折之下小型扇三角洲的发育,形成于 SQ-Ed₂^d 时期的沙南断裂主要活动时期也在 SQ-Ed₂^d, 形成了分隔凸起与斜坡间的二级坡折,控制了 SQ-Ed₂^d 小型扇三角洲的沉积充填。

关键词: 沉积充填; 断裂组合; 古地貌; 东营组; 沙东南构造带; 渤海西部

中图分类号: TE122.2 **文献标识码:** A

0 引言

构造作用特别是构造运动形成的古地貌控制了沉积体系的类型和分布、烃源岩的发育、有利储层的形成以及油气成藏(徐长贵等, 2004; 郭正权等, 2008; 蒙启安和纪友亮, 2009; 赵虹等, 2012; 杨华等, 2015; 蒋代琴等, 2018; 侯林君等, 2019; 陈磊等, 2019)。国内学者在盆山分布、盆内隆拗格局等相对宏观的构造古地貌分析以及凸起、斜坡、沟谷等相对微观的地貌及形态研究方面均取得了一系列的成果(林畅松等, 2015; 邵东波等, 2019)。研究表明同沉积断裂及其组合形成的古地貌在中国东部新生代含油气盆地广泛发育, 国内学者对此研究的最早, 并且一直持续至今。渤海湾盆地东营、沾化古近纪发育雁行状、梳状和帚状断裂组合, 形成了特定的古地貌, 控制了沉积砂体的展布(林畅松等, 2003); 同沉积断裂及其相关古地貌影响了物源方向、沉积相类型及其发育充填(郭涛等, 2008; 廖计华等, 2016; 夏世强等, 2020); 不同的同沉积断裂及其组合还影响层序的发育样式和岩性圈闭的分布(宋广增等, 2014; 陈宇航等, 2016; 康海亮等, 2016; 段金宝等, 2019)。除同沉积断裂形成的相关古地貌外, 古隆起边缘、凸起斜坡的沟谷地貌也受到越来越多的关注, 这是由于沟

谷本身就是古地貌的重要组成部分, 也是由剥蚀区向沉积卸载区输送物源的重要通道(朱红涛等, 2013), 还是分析源-汇系统时空演化过程中不可或缺的内容(林畅松等, 2015)。

文中通过恢复渤海西部沙东南构造带东营组各层序发育时期古地貌及其演化特征, 对比不同分区地貌差异与控制因素, 总结出沟谷-斜坡-断坡和沟谷-多级断坡两种地貌组合对区内沉积相发育的控制, 为下一步砂体预测和油气勘探提供了基础。

1 地质概况

渤海海域是在前中生代基底上发育起来的中新生带陆相盆地。西部海域部分位于黄骅拗陷中北部, 包含沙垒田凸起、歧口凹陷东部海域部分、沙南凹陷、石臼坨凸起西部、渤中凹陷西斜坡和南堡凹陷南部斜坡等地区。受北东走向的黄骅-东明断裂和北西走向的张家口-蓬莱断裂的双重影响, 发育北东、北西和近东西向三组断裂体系, 控制了渤海西部的构造格局(黄雷等, 2013; 张正涛等, 2019a)。沙东南构造带位于渤海西部海域沙垒田凸起东南部, 为受沙南断裂和沙东南 1 号断裂控制的断裂构造带, 此次研究区主要包括沙垒田东凸起南部和沙南凹陷东部(图 1)。

沙垒田凸起为一个继承性的古凸起(彭文绪等, 2012), 钻井揭示凸起区前古近系基底主要为



图1 渤海西部构造单元划分及研究区位置 (深度为古近系基底埋深)

Fig. 1 Structural units of the western Bohai Sea area and location of the study area (The depth is the buried depth of the Paleogene Basement)

太古界变质花岗岩, 沉积盖层主要为新近系。在沙河街组沉积之前, 沙垒田凸起一直处于水体之上, 为长期的剥蚀物源区, 东营组沉积时期, 凸起逐渐沉没并接受沉积。南部紧邻的沙南凹陷基底为中生界, 基底之上沉积了较厚的新生代地层, 整体上东营组由沙南凹陷向沙垒田凸起逐渐超覆 (张正涛等, 2019b), 东二段沉积之前, 凸起之上的沟谷为沉积物的输送通道, 东营组晚期随着沉积范围扩大和区域物源的输入, 沟谷逐渐被充填 (石文龙等, 2013)。

东营组沉积时期, 渤海西部地区处于盆地裂陷Ⅳ幕阶段, 也就是经历沙二—沙一段热沉降后又一次较为强烈的断陷时期 (黄雷等, 2013)。总体来看, 东营组构造活动强烈, 地层沉积厚度大, 发育了一套扇三角洲、辫状河三角洲和湖泊体系 (李建平等, 2011; 赖维成等, 2012)。研究区内沙南凹陷在东营组东三段和东二段时期, 表现为较强的断陷作用, 在东营组晚期逐步进入裂陷后期 (李新琦等, 2019)。

综合已有研究, 将东营组划分为3个3级层序: $SQ-Ed_3$, $SQ-Ed_2^d$ 和 $SQ-Ed_2^u$, 分别大致对应东三段、东二下亚段、东二上亚段和东一段 (图2)。钻井揭示沙东南地区 $SQ-Ed_3$ 层序为一套扇三角洲—湖泊沉积, 岩性主要为灰色、灰白色砂岩夹灰色泥岩, 整体上粒度向上变细, 砂岩变薄, 泥岩厚度增大, 如 CFD16-3-1 井 $SQ-Ed_3$ 层序下部为扇三角洲前缘水下分流河道砂岩、泥质砂岩, GR 曲

线为高幅赤化箱形, 厚度 100 m 左右, 中上部为前三三角洲灰质泥岩夹少量薄层灰质砂岩, 反映水体向上变深。 $SQ-Ed_2^d$ 层序为一套水进和水退背景下的湖相和辫状河三角洲沉积, 整体上泥多砂少, 下部以砂泥岩互层为主, 中部一般发育较厚的泥岩, 向上砂岩增多。 $SQ-Ed_2^u$ 层序主要为一套高位辫状河三角洲—滨浅湖沉积, 岩性表现为灰色厚层砂岩夹泥岩, 且单个砂体向上变厚, GR 曲线为多个高幅齿化箱形组合, 反映多期分流河道的叠加。

2 构造古地貌特征

2.1 古地貌恢复

古地貌的控制因素很多, 包括古地形、沉积作用、古气候、湖盆水体变化及构造活动等。这些因素无时不在发生变化, 因此古地貌恢复是一项系统工程, 定量的恢复较为困难, 大多是根据研究对象的地质特征和实际资料情况采取合适的方法进行定性或半定量的恢复。目前常用的古地貌恢复方法主要有沉积学分析法、层序地层学分析法、地层厚度法、印模法、回剥和填平补齐法 (姜华等, 2009; 王晨杰等, 2017; 乔博等, 2018; 何文军等, 2019)。

其中, 地层厚度法是利用沉积学原理恢复古地貌常用的方法。一般而言, 古地貌形态控制了地层的充填过程, 古地貌低的地方可容纳空间较大, 不仅率先接受沉积而且充填的地层较厚; 古

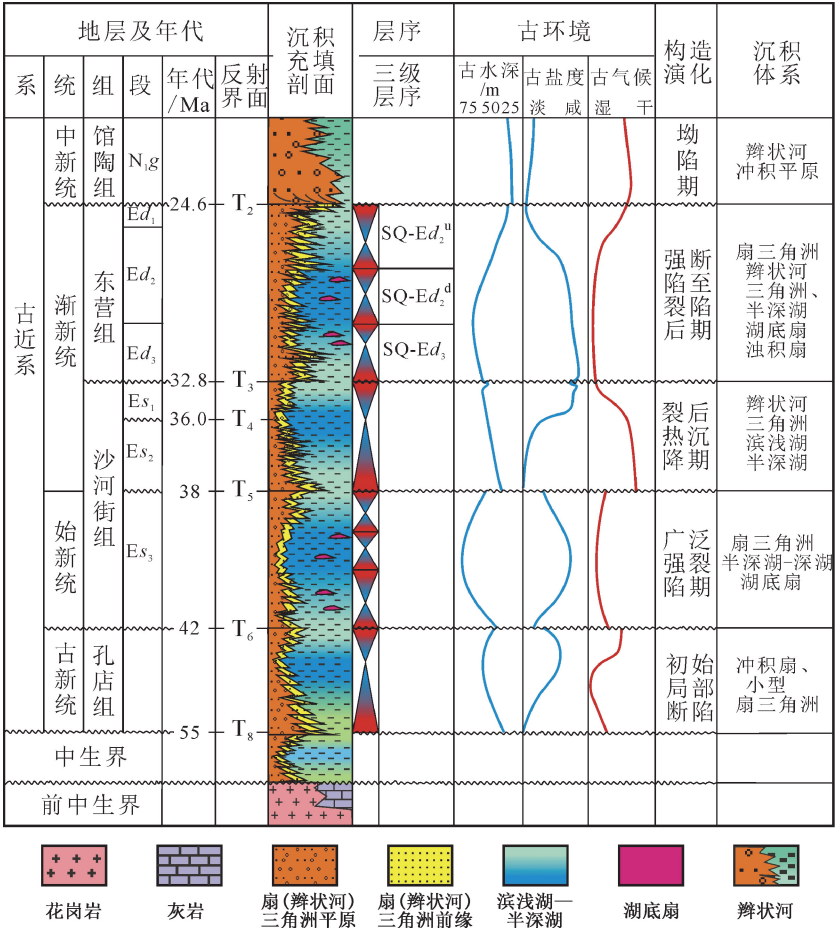


图 2 渤海西部地区构造-沉积演化与层序划分

Fig. 2 Tectonic-sedimentary evolution and sequence division of the western Bohai Sea area

地貌高的地方可容纳空间小，沉积较晚，沉积地层也较薄。因此通过分析等时界面内现今的地层厚度可以恢复沉积时期的古地貌形态（鲜本忠等，2017；厚刚福等，2018；朱茂等，2018；何文军等，2019）。该方法适用于所研究的目的层段无较大的地层剥蚀，同时为提高古地貌恢复的精度，还需进行去压实校正和古水深分析。沉降史分析表明东三段开始沙南凹陷总沉降速率超过 200 m/Ma（图 3），整个东营组沉积时期处于基准面上升、区域不断发生沉降的过程，东营组沉积范围不断扩大，并由沙南凹陷向沙垒田凸起超覆，期间并未发生明显的构造抬升和沉积间断，因此文中利用地层厚度法对东营组沉积区内各层序发育期的古地貌进行了恢复。

首先选取目的层段之上和之下的标志层，文中将东营组内各三级层序的顶底界面作为标志层，这些界面不仅等时，而且岩电特征明显，地震上易于追踪；接着求取各层序现今地层厚度，考虑

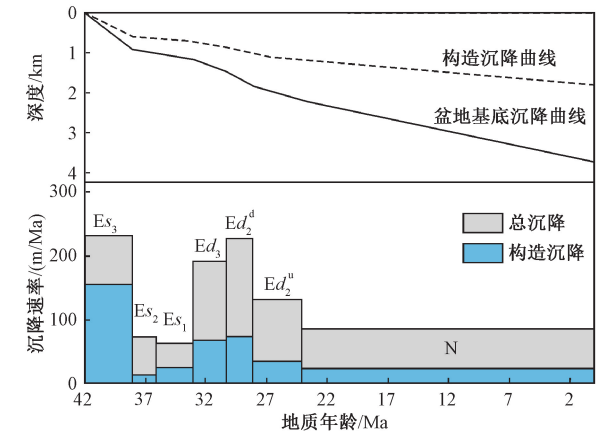


图 3 沙南凹陷构造沉降史

Fig. 3 Tectonic subsidence history of the Sha'nang sag

到研究区钻井主要位于凸起之上及边缘地区，且钻遇下部东三段的井数量较少，单纯利用钻井难以获得研究区各三级层序的地层厚度，主要利用三维地震数据对各层序界面进行区域追踪闭合后

得到各层序界面的等时间构造图，通过时深关系将等时间构造图转换为等深度构造图，利用各层序顶底界面等深度构造图相减获得各层序的地层厚度。利用上述方法得到的 SQ-Ed₃ 层序现今的地层厚度图如图 4 所示，该层序沉积厚度整体上北薄南厚，北部主要为无沉积区，向南过渡为沉积区，沙南凹陷沉积厚度一般在 200~400 m，沉积中心位于研究区东南部，最厚可达 1400 m，但范围较为局限。

对古地貌的恢复还需考虑去压实校正和古水深分析，对不同岩性孔隙度与深度之间的关系分析表明渤海地区东营组地层的压实系数约为 1.9（周连德等，2016），利用模拟软件进行了压实厚度恢复。通过沉积相、碎屑岩粒度、三角洲前积结构综合分析，研究区发育扇三角洲、辫状河三角洲-湖泊体系，三角洲前缘古水深一般在 0~30 m，半深湖-深湖古水深最大可达 60 m，整个东营组经历了水体由浅变深再变浅的过程（图 2），这一过程与研究区的沉降史相一致（图 3）。最终

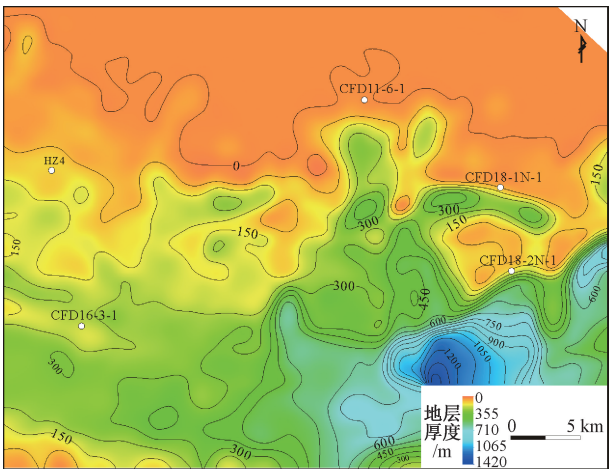


图 4 沙东南构造带 SQ-Ed₃ 层序地层厚度等值线图

Fig.4 Contour map of the stratum thickness in SQ-Ed₃ sequence in the Shadongnan structural zone

恢复的东营组各层序沉积时的古地貌如图 5 所示。

2.2 古地貌单元划分

古地貌单元一般包括隆起区或古凸起、古沟

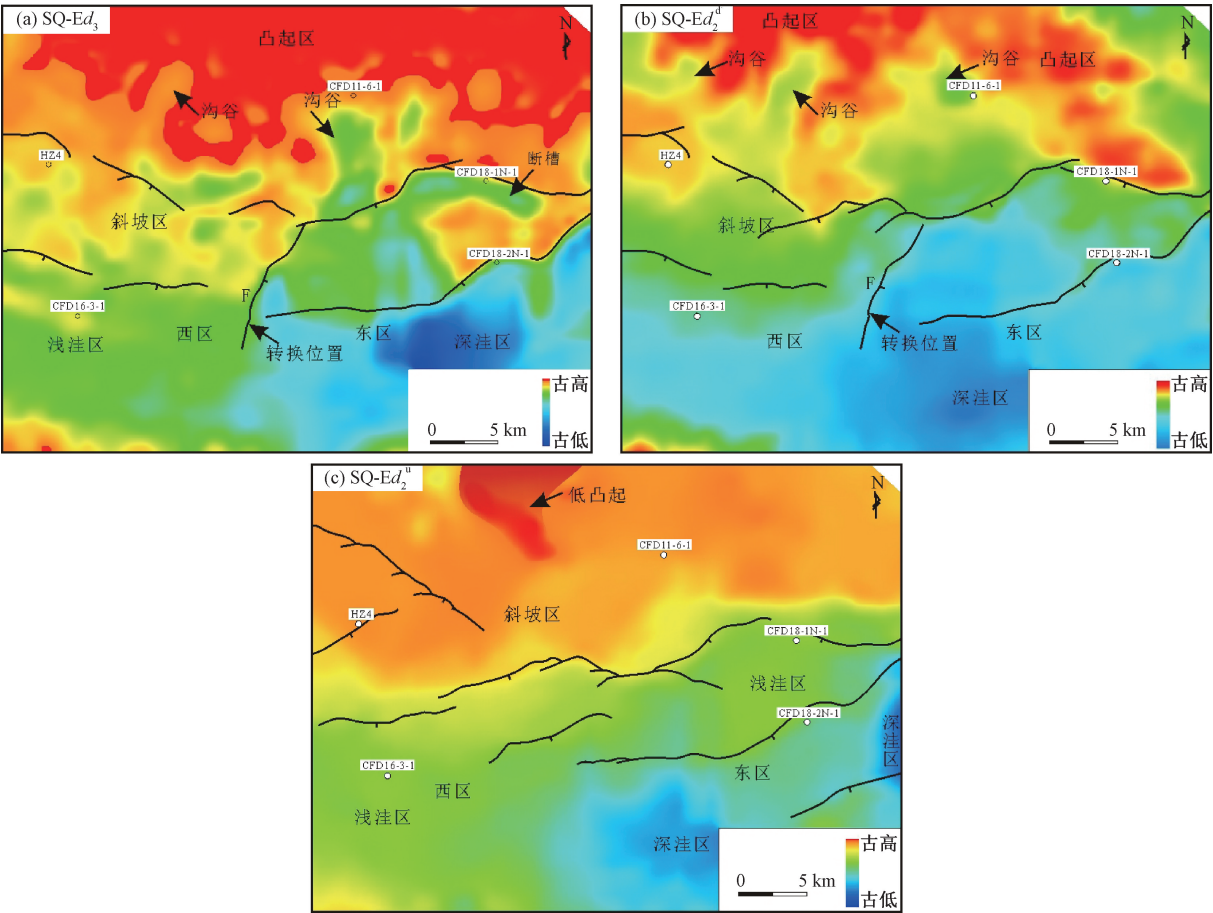


图 5 沙东南构造带东营组各层序沉积时期古地貌

Fig.5 Ancient landform of each sequence of the Dongying formation in the Shadongnan structural zone

谷、古斜坡、古断坡、水下低凸起、洼陷边缘、深凹或深洼区等(吴贤顺和樊太亮, 2002; 姜华等, 2009)。研究区古地貌单元主要由凸起区、斜坡区、古沟谷、断槽、浅洼和洼陷区组成(图 5)。凸起区主要分布在沙垒田东凸起南部, 分布范围由 SQ-Ed₃ 到 SQ-Ed₂ 层序逐渐缩小; 斜坡区主要分布在沙垒田凸起向沙南凹陷的过渡部位, 为古潜山面基础上发育的继承性斜坡; 古沟谷主要发育在沙垒田凸起边缘之上, 包括“U”型谷、“V”

型谷、“W”型谷和复合型沟谷等多种类型(图 6)。东营组时期研究区整体上西高东低, 浅洼陷区主要分布在西南部, 深洼区始终位于东南部沙东南 1 号断裂控制的断裂坡折之下。研究区发育由主控断裂及同一时期形成的同沉积断裂共同组成的多种断裂组合, 这些断裂组合形成了不同的构造古地貌, 控制了凹陷内的砂分散体系和沉积充填(邓宏文等, 2001; 邢凤存等, 2008; 张敏强等, 2011; 辛云路等, 2013; 刘若涵等, 2019)。

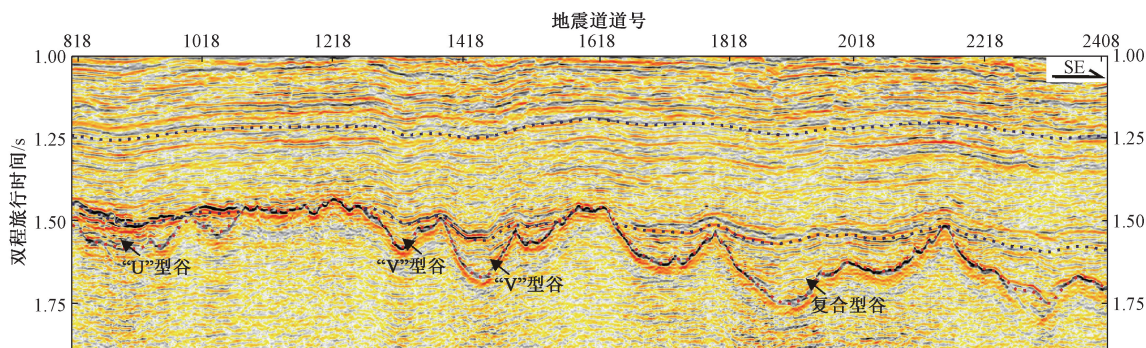


图 6 沙东南构造带沟谷类型及剖面特征(剖面位置见图 1 中①)

Fig. 6 Valley types and their characteristics in profile in the Shadongnan structural zone (Profile location is shown as ① in Fig. 1)

2.3 古地貌演化特征

SQ-Ed₃ 时期凸起区主要位于研究区北部, 位于基准面之上的凸起区遭受剥蚀成为重要的物源区。以北北东向转换断裂 F 为界, 受边界断裂活动影响及基底地貌控制, 沉积区古地貌可以划分为两个区域: 西部为由数条沟谷体系、古斜坡和早期断裂坡折形成的沟谷-斜坡-断坡地貌(图 5a), 其中沟谷成为重要的物源输送通道, 古斜坡整体由西北向东南方向变低, 局部存在地形差异, 对砂体的分散起到一定的控制作用, 断裂坡折控制了早期地层充填; 东部地区主要为由沟谷和同沉积断裂组成的沟谷-多级断坡地貌, 沟谷数量和规模相对较小, 多级断坡是由 2 条同向的同沉积断裂组成的顺向断阶, 组成同沉积断裂坡折和单断槽。

SQ-Ed₂ 时期整体上继承了 SQ-Ed₃ 时期的古地貌格局, 凸起区依然发育在研究区北部, 但范围有所减小。由于边界断裂活动有所减弱, 沉积充填范围逐步扩大, 沉积物逐渐向凸起区超覆, 部分低洼地区被充填, 地形高差变小, 低部位沟谷逐渐接受沉积, 沟谷规模变小(图 5b)。

SQ-Ed₁ 时期, 研究区处于裂陷晚期, 区域整体上处于填平补齐阶段, 凸起区范围基本被覆盖, 区域古地貌差异进一步减小, 沟谷以及断槽等物

源输送通道已被沉积物充填。整体表现为西北高、东南低, 西部区域主要表现为单一的斜坡地貌, 东部区域受同沉积断裂控制, 还存在一定的断裂坡折(图 5c)。

3 古地貌对沉积体系的控制

3.1 古地貌影响下的沉积体系展布特征

古地貌对沉积充填的控制作用表现在不同的古地貌单元在沉积物由源到汇的搬运沉积过程中所起的作用是不同的: 隆起区或古凸起一般为长期剥蚀地貌, 提供物源; 古沟谷或河道、古斜坡在沉积早期主要作为输送物源的通道, 晚期接受沉积充填; 古断坡、水下低凸起对物源起到分散作用, 凹陷或洼陷区为沉积物卸载区, 洼陷边缘及浅洼区主要为各类扇体、三角洲和滨浅湖, 深洼区多为半湖相沉积(林畅松等, 2003; 林畅松等, 2009; 蒙启安和纪友亮, 2009; 石开波等, 2017)。

SQ-Ed₃ 层序时期, 受同沉积断裂及古凸起控制, 以北北东向横向调节断裂 F 为界, 西部地区物源主要通过古沟谷输送到沙南凹陷, 形成沟谷控源、斜坡控砂的缓坡扇三角洲体系, 沟扇对应关系良好, 三角洲规模大、延伸距离较远, 扇三

角洲平原主要发育在沙南断裂上升盘, 下降盘发育扇三角洲前缘, 沙中断裂带下降盘发育湖底扇。东部受沟谷-多级断坡地貌控制, 沙南及沙东南 1

号断裂下降盘发育小型扇三角洲。研究区西南部主要受埕北低凸起北斜坡控制, 发育缓坡辫状河三角洲 (图 7a)。

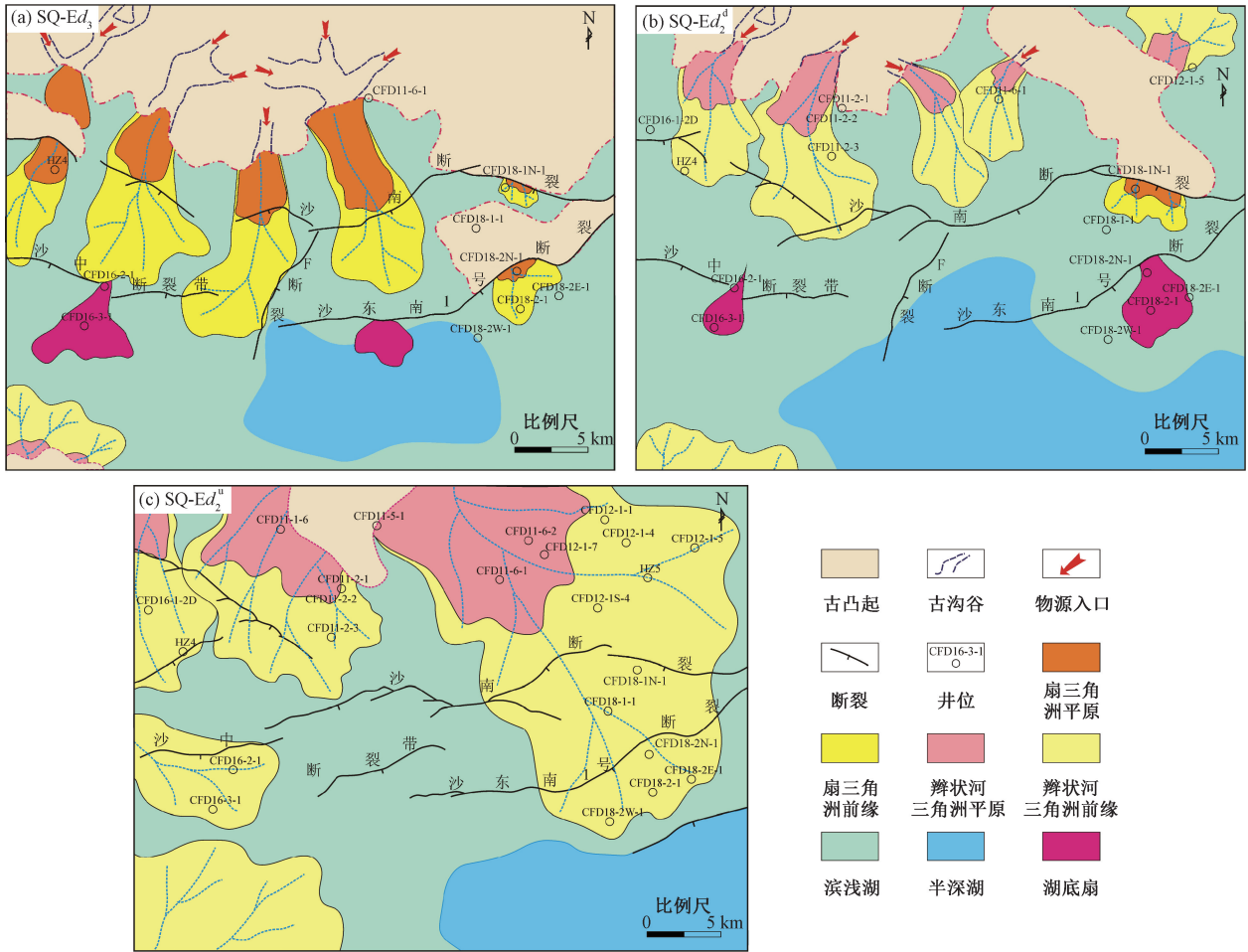


图 7 沙东南构造带东营组各层序沉积体系分布
Fig. 7 Distribution of the sedimentary system in each sequence of the Dongying formation

SQ-Ed^d₂ 层序时期, 凸起区范围进一步缩小, 北部形成两个独立的凸起, CFD18-1N-1 井南部的古凸起已被淹没, 形成水下高地, 该时期基准面快速上升, 可容纳空间扩大, 物源供给减弱, 研究区主要发育小型辫状河三角洲体系, 来自北部沙垒田凸起的物源依然主要通过古沟谷输送到沙南凹陷。辫状河三角洲前缘推进至沙南断裂附近, 沙南断裂构成大致为辫状河三角洲前缘与滨浅湖的分界。沙中断裂带下降盘发育湖底扇。东部受凸起及同沉积断裂控制, 沙南断裂下降盘发育小型扇三角洲, 沙东南 1 号断裂发育湖底扇。在研究区西南部, 来自埕北低凸起的物源减弱, 辫状河三角洲沉积范围缩小 (图 7b)。

SQ-Ed^e₂ 层序时期, 研究区处于填平补齐阶段, 构造活动较弱, 残留的凸起区范围很小, 分布在

工区北部, 地貌差异进一步减小, 东部和西部区域地貌差异已基本消除, 主要为斜坡和浅洼区, 凸起区和深洼区范围有限。受此影响研究区发育大型辫状河三角洲沉积体系, 由于地貌变缓, 三角洲沉积规模大、延伸距离远, 不再发育湖底扇 (图 7c)。

3.2 古地貌对沉积充填的控制作用

沙东南地区主要发育沟谷-斜坡-断坡地貌和沟谷-多级断坡地貌组合, 不同的地貌组合及演变对沉积充填的控制存在差异。

3.2.1 沟谷-斜坡-断坡地貌沉积充填特征

侵蚀沟谷、古潜山斜坡和早期同沉积断裂共同组成了沟谷-斜坡-断坡地貌, 发育在转换断层 F 西侧 (图 5)。侵蚀沟谷发育在古凸起之上, 主控断裂——沙南断裂中段表现为卷入基底的大型低

角度正断层，与多条切割古潜山斜坡之上沉积盖层的南倾断层在剖面上组成马尾状，南倾断裂中，沙中断裂主要在沙河街组活动（图8）。

低角度断层之上发育的同沉积正断层——沙中断裂构成了重要的断裂坡折，主要控制了沙河街组的沉积，在断裂坡折之下发育巨厚的低位扇三角洲、浊积扇。到了 SQ-Ed₃ 时期该断裂活

动减弱，断裂坡折之下逐渐被充填，地貌差异变小，SQ-Ed₃ 早期在弯折带之下发育湖底扇，古潜山斜坡上发育辫状河三角洲。随着沉积充填的进行，到了 SQ-Ed₂^d 和 SQ-Ed₂^a 时期，沉积相带逐渐扩大到凸起之上，早期作为物源输送通道的沟谷也被充填，凸起-斜坡区沉积了一套高位辫状河三角洲（图9）。

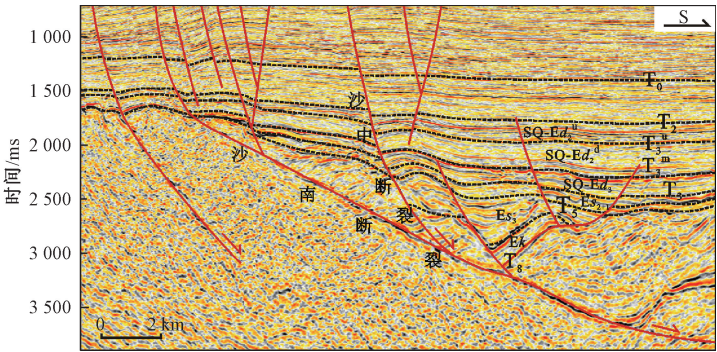


图8 沟谷-斜坡-断坡地貌组合地震特征（剖面位置见图1中②）

Fig. 8 Seismic characteristics of the valley-paleoslope-fault slope-break (Profile location is shown as ② in Fig. 1)

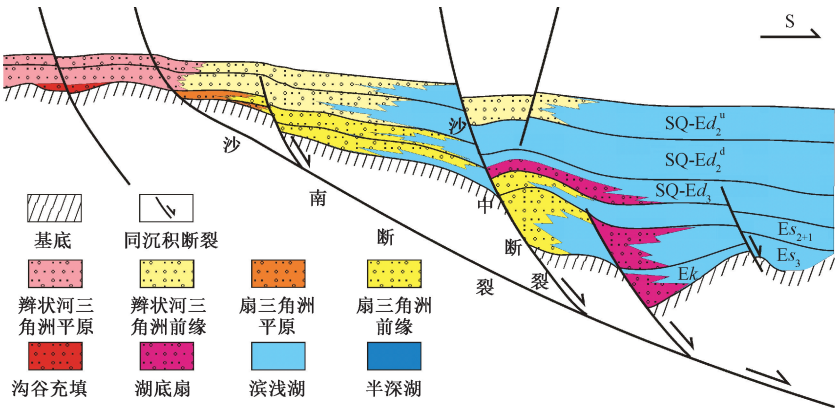


图9 沟谷-斜坡-断坡地貌对沉积充填的控制（剖面位置见图1中②）

Fig. 9 Depositional filling characteristics controlled by the valley-paleoslope-fault slope-break (Profile location is shown as ② in Fig. 1)

3.2.2 沟谷-多级断坡地貌沉积充填特征

侵蚀沟谷、多级断裂组成了沟谷-多级断坡地貌，发育在转换断层 F 东侧的沙东南断阶带（图5）。断阶主要由沙南断裂东段、沙东南1号断裂及同期断裂组成，沙南断裂东段为上陡下缓的铲式正断层，断层形成时间早，均切割基底，持续时间长。断裂组合样式平面上为平行式或斜交式，剖面上为同向断阶状，形成2~3个断裂坡折，沟谷主要发育在沙南断裂上升盘的沙垒田凸起之上（图10）。

控制沙东南断阶带的沙东南1号断裂形成时间

和主要活动时期均为 SQ-Ed₃，为该时期的控凹断裂，形成的一级断裂坡折控制了 SQ-Ed₃ 的沉积充填，在断裂坡折之下洼陷较深，发育低位扇三角洲和湖底扇，平面规模较小，但在剖面上沉积较厚，为相带突然增厚的位置。沙南断裂形成时间晚于沙东南1号断裂，主要活动时期为 SQ-Ed₂^d，成为分隔凸起与斜坡间的二级坡折，控制了 SQ-Ed₂^d 小型扇三角洲的沉积，到了 SQ-Ed₂^a 层序时期，断裂已基本停止活动，辫状河三角洲沉积扩大到凸起之上，并充填了 SQ-Ed₂^a 之前一直作为物源输送通道的沟谷（图11）。

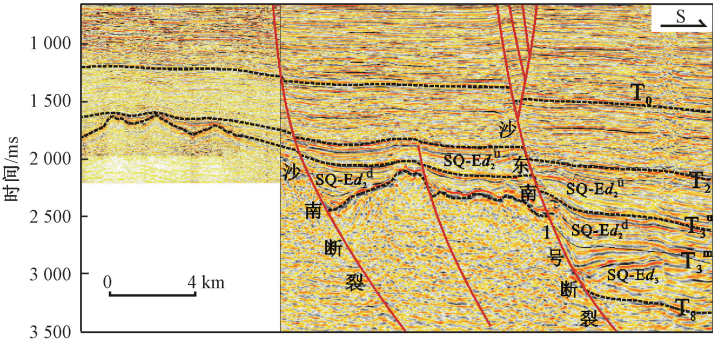


图 10 沟谷-多级断坡地貌组合地震特征 (剖面位置见图 1 中③)

Fig. 10 Seismic characteristics of the valley-multistage fault slope-break (Profile location is shown as ③ in Fig. 1)

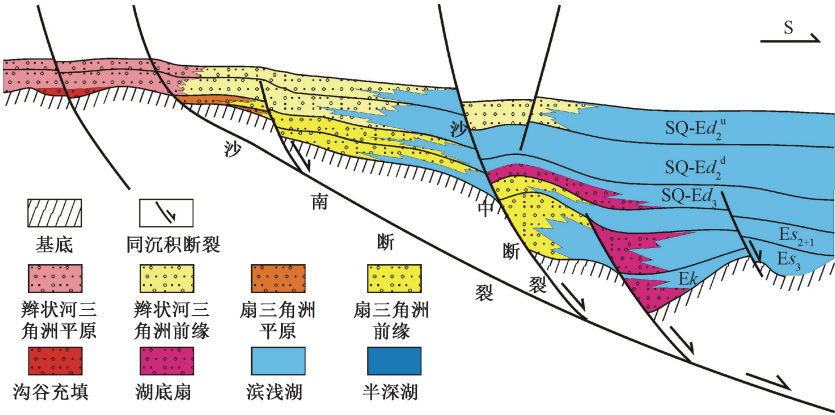


图 11 沟谷-多级断坡地貌对沉积充填的控制 (剖面位置见图 1 中③)

Fig. 11 Depositional filling characteristics controlled by the valley-multistage fault slope-break (Profile location is shown as ③ in Fig. 1)

4 结论

(1) 沙东南地区东营组时期主要发育凸起区、斜坡区、古沟谷、断槽、浅洼和深陷区等多个古地貌单元, 凸起区为重要的物源区, 古沟谷是物源输送的重要通道, 古斜坡和水下低隆起对物源的分散起到一定的作用。

(2) 沙东南地区主要发育两种古地貌, 以北北东向转换断层 F 为界, 西部主要发育沟谷-斜坡-断坡地貌, 东部发育沟谷-多级断坡地貌。沟谷-斜坡-断坡地貌控制了 SQ-Ed₃ 层序时期发育的远源扇三角洲-湖底扇体系, SQ-Ed₂^d 时期的小型辫状河三角洲-湖底扇和 SQ-Ed₂ⁿ 时期的大型辫状河三角洲体系的发育。沟谷-多级断坡地貌控制了 SQ-Ed₃ 和 SQ-Ed₂^d 层序时期的小型扇三角洲-湖底扇体系以及 SQ-Ed₂ⁿ 时期的大型辫状河三角洲体系的发育。

(3) 在沟谷-斜坡-断坡地貌组合中, 古沟谷在 SQ-Ed₂^d 沉积前作为物源输送通道, 之后接受沉积, 控制断坡的同沉积断裂主要在 SQ-Ed₃ 之前活动, 控制了沙河街组低位扇、浊积扇的沉积充填; SQ-Ed₃ 之后, 活动减弱, 断坡地貌构成了扇三角洲平原和前缘沉积充填的分界, 在 SQ-Ed₂^d 和 SQ-Ed₂ⁿ 时期, 基本演变为辫状河三角洲前缘和滨浅湖的界限。在沟谷-多级断坡地貌组合中, 多期同沉积断裂形成的古地貌造成沉积充填的差异, SQ-Ed₃ 时期的同沉积断裂控制了深洼的形成和坡折之下小型扇三角洲的沉积, SQ-Ed₂^d 时期的同沉积断裂为分隔凸起与斜坡间的坡折, 控制了 SQ-Ed₂^d 小型扇三角洲的充填。

致谢: 感谢中海石油 (中国) 有限公司天津分公司提供了部分研究资料, 同时也感谢评审老师提出的宝贵修改意见。

References

CHEN L, NIU C M, WU K, et al, 2019. The characteristics of Liaoxi

- No.1 fault system and its control on reservoir in Liaoxi sag [J]. Journal of Geomechanics, 25 (6): 1082-1090. (in Chinese with English abstract)
- CHEN Y H, YAO G S, LÜ F L, et al., 2016. Tectonic-sedimentary evolution and petroleum geology characteristics in deepwater area in Rovuma basin, East Africa [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 21 (2): 39-46. (in Chinese with English abstract)
- DENG H W, WANG H L, WANG D Z, 2001. Control of paleo-morphology to stratigraphic sequence in continental rift basins: take lower tertiary of western slope in Bozhong depression as an example [J]. Oil & Gas Geology, 22 (4): 293-296, 303. (in Chinese with English abstract)
- DUAN J B, MEI Q H, LI B S, et al., 2019. Sinian-Early Cambrian tectonic-sedimentary evolution in Sichuan basin [J]. Earth Science, 44 (3): 738-755. (in Chinese with English abstract)
- GUO T, XIN R C, LIU H, et al., 2008. Syndepositional fault controls on the distribution of sedimentary facies: An example from the sedimentary facies in the middle sub-member of the third member of the Shahejie Formation in the Huanghekou depression, Shandong [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 28 (1): 14-19. (in Chinese with English abstract)
- GUO Z Q, ZHANG L R, CHU M J, et al., 2008. Pre-Jurassic palaeogeomorphic control on the hydrocarbon accumulation in the lower Yan'an Formation in southern Ordos Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 10 (1): 63-71. (in Chinese with English abstract)
- HE W J, ZHENG M L, FEI L Y, et al., 2019. Ancient landform restoration of marginal sedimentary area in the continental depression basin: A case study of the Triassic Baikouquan Formation in Mahu area of Junggar Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 21 (5): 803-816. (in Chinese with English abstract)
- HOU G F, QU J H, ZHU F, et al., 2018. Controlling effect of paleogeomorphology on sedimentary system and sedimentary microfacies: A case study of Cretaceous Qingshuihe formation in the hinterland of Junggar basin [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 47 (5): 1038-1045. (in Chinese with English abstract)
- HOU L J, CHEN H D, LUO L J, et al., 2019. Reconstruction of late Precambrian Palaeogeomorphology in Ordos basin, China and its control on source rocks [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 41 (4): 475-490. (in Chinese with English abstract)
- HUANG L, ZHOU X H, WANG Y B, et al., 2013. Cenozoic tectonic evolution and its control on the hydrocarbon accumulation of the western Bohai Sea [J]. Chinese Journal of Geology, 48 (2): 275-290. (in Chinese with English abstract)
- JIANG D Q, WEN Z G, TANG R W, et al., 2018. Analysis on the formation and enrichment control mechanism of the lower Jurassic reservoirs by paleo-geomorphology of Wuqi area in the Ordos Basin [J]. Journal of Geomechanics, 24 (5): 627-634. (in Chinese with English abstract)
- JIANG H, WANG H, XIAO J, et al., 2009. Palaeogeomorphologic prediction of favorable zones: Take Fault ② of Qiongdongnan basin as an example [J]. Petroleum Exploration and Development, 36 (4): 436-441. (in Chinese with English abstract)
- KANG H L, LIN C S, LIU X, et al., 2016. Syndepositional fault control on types and distribution of depositional system and lithologic trap of Dongying formation in the North of Nanpu Sag [J]. Geoscience, 2016, 30 (2): 286-293. (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 [J]. Journal of Stratigraphy, 36 (4): 801-814. (in Chinese with English abstract)
- LI J P, ZHOU X H, LÜ D Y, 2011. Distribution and evolution of Paleogene delta systems in Bohai Sea [J]. China Offshore Oil and Gas, 23 (5): 293-298. (in Chinese with English abstract)
- LI X Q, GAO L, HUANG Z, et al., 2019. Structural characteristics and evolution of the Shanan sag of Bohai gulf basin [J]. Marine Geology Frontiers, 35 (11): 19-27. (in Chinese with English abstract)
- LIAO J H, WANG H, LV M, et al., 2016. Evolution of syndepositional faulting and its controlling effect on sedimentary filling in Songnan-Baodao sag of Qiongdongnan Basin, South China Sea [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 45 (2): 336-346. (in Chinese with English abstract)
- LIN C S, ZHENG H R, REN J Y, et al., 2004. The control of syndepositional faulting on the Eogene sedimentary basin fills of the Dongying and Zhanhua sags, Bohai Bay Basin [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 47 (9): 769-782.
- LIN C S, YANG H J, LIU J Y, et al., 2009. Paleostuctural geomorphology of the Paleozoic central uplift belt and its constraint on the development of depositional facies in the Tarim Basin [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 52 (6): 823-834.
- LIN C S, XIA Q L, SHI H S, et al., 2015. Geomorphological evolution, source to sink system and basin analysis [J]. Earth Science Frontiers, 22 (1): 9-20. (in Chinese with English abstract)
- LIU R H, HE B Z, ZHENG M L, et al., 2019. Tectonic-sedimentary evolution during Late Triassic-Jurassic period in the eastern part of the Qiangtang basin, Tibet [J]. Acta Petrologica Sinica, 35 (6): 1857-1874. (in Chinese with English abstract)
- MENG Q A, JI Y L, 2009. Controlling of paleo geomorphology to distribution of sedimentary system in the Cretaceous of Tanan Depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 30 (6): 843-848, 855. (in Chinese with English abstract)
- PENG W X, ZHANG Z Q, JIANG L Q, et al., 2012. Evolution of strike-slip faults in the Shaleitian bulge of the western Bohai offshore and their control on hydrocarbons [J]. Acta Petrolei Sinica, 33 (2): 204-212. (in Chinese with English abstract)
- QIAO B, LIU H F, HE L, et al., 2018. A new method to quantitatively rebuild palaeogeomorphology and its application to Jingbian gasfield Ordos Basin [J]. Natural Gas Exploration and Development, 41 (4): 32-37. (in Chinese with English abstract)
- SHAO D B, BAO H P, WEI L B, et al., 2019. Tectonic palaeogeography evolution and sedimentary filling characteristics of the

Ordovician in the Ordos area [J]. *Journal of Palaeogeography*, 21 (4): 537-556. (in Chinese with English abstract)

SHI K B, LIU B, LIU H G, et al., 2017. Neoproterozoic tectono-sedimentary evolution in Quruqtagh area, NE Tarim Basin, Xinjiang, China [J]. *Earth Science Frontiers*, 24 (1): 297-307. (in Chinese with English abstract)

SHI W L, ZHANG Z Q, PENG W X, et al., 2013. Tectonic evolution and hydrocarbon accumulation in the east part of Shaleitian Saitent, western Bohai Sea [J]. *Oil & Gas Geology*, 34 (2): 242-247. (in Chinese with English abstract)

SONG G Z, WANG H, SUN Z P, et al., 2014. Paleogene sydepositional fault and its control on sequence architecture of Lingshui sag, deepwater area of Qiongdongnan Basin, South China Sea [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 38 (4): 9-18. (in Chinese with English abstract)

WANG C J, HANG X B, GUO T, et al., 2017. High precision paleotopography restoration technology and its application: taking the second member of Dongying Strata in the South of Liaoxi Uplift as an example [J]. *Geoscience*, 31 (6): 1214-1221, 1240. (in Chinese English abs with tract)

WU X S, FAN T L, 2002. The relationship between Palaeotopography and Reservoir prediction in sequence stratigraphic research [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 23 (3): 259-262. (in Chinese with English abstract)

XIA S Q, LIN C S, DU X F, et al., 2020. Control of the Syndepositional fault on depositional fillings of the Dongying formation in Northern Liaodong bay [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 42 (1): 19-32. (in Chinese with English abstract)

XIAN B Z, WANG Z, MA L C, et al, 2017. Paleao-drainage system and integrated Paleo-geomorphology restoration in depositional and erosional areas: Guantao formation in east Liaodong area, Bohai bay basin, China [J]. *Earth Science*, 42 (11): 1922-1935. (in Chinese with English abstract)

XIN Y L, REN J Y, LI J P, 2013. Control of tectonic-paleogeomorphology on deposition: A case from the Shahejie Formation Sha 3 member, Laizhouwan sag, southern Bohai Sea [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 40 (3): 302-308. (in Chinese with English abstract)

XING F C, LU Y C, Liu C H, et al., 2008. Structural-paleogeomorphologic features of Chepaizi area and mechanism of their control on sandbodies [J]. *Oil & Gas Geology*, 29 (1): 78-83, 106. (in Chinese with English abstract)

XU C G, LAI W C, XUE Y A, et al., 2004. Palaeo-geomorphology analysis for the Paleogene reservoir prediction in Bohai Sea area [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 31 (5): 53-56. (in Chinese with English abstract)

YANG H, LIU X S, YAN X X, 2015. The relationship between tectonic-sedimentary evolution and tight sandstone gas reservoir since the late Paleozoic in Ordos Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 22 (3): 174-183. (in Chinese with English abstract)

ZHANG M Q, XU F, ZHANG J P, et al., 2011. Structural pattern during the rifting stage of the Xihu Sag and its control of sediment infilling [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 31 (5): 67-72. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Z T, LIN C S, LI H Y, et al., 2019a. The characteristics and evolution of the Cenozoic fault systems in the western Bohai sea area [J]. *Science Technology and Engineering*, 19 (27): 55-65. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Z T, LIN C S, LI H Y, et al, 2019b. Characteristics of the Cenozoic cap rock and its control on hydrocarbon in the western Bohai sea area [J]. *Journal of Geomechanics*, 25 (3): 357-369. (in Chinese with English abstract)

ZHAO H, DANG B, ZHENG X J, et al, 2012. Pre-Jurassic palaeogeomorphology and the relations with oil and gas accumulation in Ansai Oilfield [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 42 (2): 270-275. (in Chinese with English abstract)

ZHOU L D, ZHANG J M, MU P F, et al., 2016. Geomorphology and thin beach-bar sandbody distribution law of Paleogene Dongying formation in A oilfield, Bohai bay, China [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science)*, 31 (6): 32-38. (in Chinese with English abstract)

ZHU H T, YANG X H, ZHOU X H, et al, 2013. Sediment transport pathway characteristics of continental lacustrine basins based on 3-D seismic data: an example from Dongying formation of Western slope of Bozhong sag [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 38 (1): 121-129. (in Chinese with English abstract)

ZHU M, SHEN A J, ZENG H L, et al., 2018. The application of paleogeomorphy restoration to the study of karst weathering crust reservoir: a case from the fourth member of Dengying Formation in Moxi area, Sichuan Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 23 (4): 87-95. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

陈磊, 牛成民, 吴奎, 等, 2019. 辽西凹陷辽西 1 号断裂体系特征及其控藏作用 [J]. *地质力学学报*, 25 (6): 1082-1090.

陈宇航, 姚根顺, 吕福亮, 等, 2016. 东非鲁伍马盆地深水区构造: 沉积演化过程及油气地质特征 [J]. *海相油气地质*, 21 (2): 39-46.

邓宏文, 王红亮, 王敦则, 2001. 古地貌对陆相裂谷盆地层序充填特征的控制: 以渤中凹陷西斜坡区下第三系为例 [J]. *石油与天然气地质*, 22 (4): 293-296, 303.

段金宝, 梅庆华, 李毕松, 等, 2019. 四川盆地震旦纪—早寒武世构造—沉积演化过程 [J]. *地球科学*, 44 (3): 738-755.

郭涛, 辛仁臣, 刘豪, 等, 2008. 同沉积断裂构造对沉积相展布的控制: 以黄河口凹陷沙三中亚段沉积相研究为例 [J]. *沉积与特提斯地质*, (1): 14-19.

郭正权, 张立荣, 楚美娟, 等, 2008. 鄂尔多斯盆地南部前侏罗纪古地貌对延安组下部油藏的控制作用 [J]. *古地理学报*, 10 (1): 63-71.

何文军, 郑孟林, 费李莹, 等, 2019. 陆相拗陷盆地边缘沉积区古地貌恢复: 以准噶尔盆地玛湖地区三叠系百口泉组为例 [J]. *古地理学报*, 21 (5): 803-816.

厚刚福, 瞿建华, 朱峰, 等, 2018. 古地貌对沉积体系和沉积微相的控制作用分析: 以准噶尔盆地腹部白垩系清水河组为例 [J]. 中国矿业大学学报, 47 (5): 1038-1045.

侯林君, 陈洪德, 罗林军, 等, 2019. 鄂尔多斯盆地前寒武纪末期古地貌恢复及其对烃源岩的控制作用 [J]. 地球科学与环境学报, 41 (4): 475-490.

黄雷, 周心怀, 王应斌, 等, 2013. 渤海西部海域新生代构造与演化及对油气聚集的控制 [J]. 地质科学, 48 (2): 275-290.

蒋代琴, 文志刚, 汤仁文, 等, 2018. 鄂尔多斯盆地吴起地区古地貌对侏罗系下部油藏形成和富集控制机制分析 [J]. 地质力学学报, 24 (5): 627-634.

姜华, 王华, 肖军, 等, 2009. 应用古地貌分析方法进行有利区带预测: 以琼东南盆地②号断裂带为例 [J]. 石油勘探与开发, 36 (4): 436-441.

康海亮, 林畅松, 刘晓, 等, 2016. 南堡凹陷北部东营组同沉积断裂对沉积体系及岩性圈闭的控制作用 [J]. 现代地质, 30 (2): 286-293.

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 [J]. 地层学杂志, 36 (4): 801-814.

李建平, 周心怀, 吕丁友, 2011. 渤海海域古近系三角洲沉积体系分布与演化规律 [J]. 中国海上油气, 23 (5): 293-298.

李新琦, 高磊, 黄志, 等, 2019. 渤海湾盆地沙南凹陷构造发育与演化特征 [J]. 海洋地质前沿, 35 (11): 19-27.

廖计华, 王华, 吕明, 等, 2016. 琼东南盆地深水松南-宝岛凹陷同沉积断裂活动及其对沉积充填的控制 [J]. 中国矿业大学学报, 45 (2): 336-346.

林畅松, 郑和荣, 任建业, 等, 2003. 渤海湾盆地东营、沾化凹陷早第三纪同沉积断裂作用对沉积充填的控制 [J]. 中国科学 (D 辑), 33 (11): 1025-1036.

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 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 39 (3): 306-316.

林畅松, 夏庆龙, 施和生, 等, 2015. 地貌演化、源-汇过程与盆地分析 [J]. 地学前缘, 22 (1): 9-20.

刘若涵, 何碧竹, 郑孟林, 等, 2019. 羌塘盆地东部晚三叠世—侏罗纪构造-沉积演化 [J]. 岩石学报, 35 (6): 1857-1874.

蒙启安, 纪友亮, 2009. 塔南凹陷白垩纪古地貌对沉积体系分布的控制作用 [J]. 石油学报, 30 (6): 843-848, 855.

彭文绪, 张志强, 姜利群, 等, 2012. 渤海西部沙垒田凸起区走滑断层演化及其对油气的控制作用 [J]. 石油学报, 33 (2): 204-212.

乔博, 刘海锋, 何鏊, 等, 2018. 鄂尔多斯盆地靖边气田的古地貌定量恢复新方法 [J]. 天然气勘探与开发, 41 (4): 32-37.

邵东波, 包洪平, 魏柳斌, 等, 2019. 鄂尔多斯地区奥陶纪构造古地理演化与沉积充填特征 [J]. 古地理论, 21 (4): 537-556.

石开波, 刘波, 刘红光, 等, 2017. 塔里木盆地东北缘库鲁克塔格地

区新元古代构造-沉积演化 [J]. 地学前缘, 24 (1): 297-307.

石文龙, 张志强, 彭文绪, 等, 2013. 渤海西部沙垒田凸起东段构造演化特征与油气成藏 [J]. 石油与天然气地质, 34 (2): 242-247.

宋广增, 王华, 孙志鹏, 等, 2014. 琼东南盆地深水陵水凹陷古近纪同沉积断裂对层序构成样式的控制 [J]. 中国石油大学学报 (自然科学版), 38 (4): 9-18.

王晨杰, 黄晓波, 郭涛, 等, 2017. 高精度古地貌恢复技术及应用: 以辽西凸起南段东营组二段下段为例 [J]. 现代地质, 31 (6): 1214-1221, 1240.

吴贤顺, 樊太亮, 2002. 从古地貌谈层序格架中储层的发育规律 [J]. 地球学报, 23 (3): 259-262.

夏世强, 林畅松, 杜晓峰, 等, 2020. 辽东湾北部东营组同沉积断裂对沉积充填控制 [J]. 西南石油大学学报 (自然科学版), 42 (1): 19-32.

鲜本忠, 王震, 马立驰, 等, 2017. 沉积区-剥蚀区古地貌一体化恢复及古水系研究: 以渤海湾盆地辽东地区馆陶组为例 [J]. 地球科学, 42 (11): 1922-1935.

辛云路, 任建业, 李建平, 2013. 构造-古地貌对沉积的控制作用: 以渤海南部莱州湾凹陷沙三段为例 [J]. 石油勘探与开发, 40 (3): 302-308.

邢风存, 陆永潮, 刘传虎, 等, 2008. 车排子地区构造: 古地貌特征及其控砂机制 [J]. 石油与天然气地质, 29 (1): 78-83, 106.

徐长贵, 赖维成, 薛永安, 等, 2004. 古地貌分析在渤海古近系储集层预测中的应用 [J]. 石油勘探与开发, 31 (5): 53-56.

杨华, 刘新社, 闫小雄, 2015. 鄂尔多斯盆地晚古生代以来构造-沉积演化与致密砂岩气成藏 [J]. 地学前缘, 22 (3): 174-183.

张敏强, 徐发, 张建培, 等, 2011. 西湖凹陷裂陷期构造样式及其对沉积充填的控制作用 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 31 (5): 67-72.

张正涛, 林畅松, 李慧勇, 等, 2019a. 渤西地区新生代断裂体系特征及形成演化 [J]. 科学技术与工程, 19 (27): 55-65.

张正涛, 林畅松, 李慧勇, 等, 2019b. 渤海西部海域新生代盖层特征及对油气的控制作用 [J]. 地质力学学报, 25 (3): 357-369.

赵虹, 党彝, 郑小杰, 等, 2012. 安塞油田前侏罗纪古地貌特征及其与油气富集关系 [J]. 西北大学学报 (自然科学版), 42 (2): 270-275.

周连德, 张建民, 穆朋飞, 等, 2016. 渤海 A 油田东营组古地貌及薄层滩坝发育规律 [J]. 西安石油大学学报 (自然科学版), 31 (6): 32-38.

朱红涛, 杨香华, 周心怀, 等, 2013. 基于地震资料的陆相湖盆物源通道特征分析: 以渤中凹陷西斜坡东营组为例 [J]. 地球科学—中国地质大学学报, 38 (1): 121-129.

朱茂, 沈安江, 曾洪流, 等, 2018. 古地貌恢复在岩溶风化壳储层研究中的应用: 以川中磨溪地区灯影组四段为例 [J]. 海相油气地质, 23 (4): 87-95.

