

文章编号: 1671-1505(2022)03-0493-19 DOI: 10.7605/gdlxb.2022.03.038

蒙古国塔木察格盆地塔南凹陷早白垩世 构造古地貌控砂机制*

周 勇^{1,2} 纪友亮^{1,2} 蒙启安³ 万宏峰^{1,2} 张 革³ 任钰涛^{1,2}
严可欣^{1,2} 梁 涛^{1,2} 陈富瑜^{1,2} 强志成^{1,2}

1 中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249

2 中国石油大学(北京) 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

3 中国石油大庆油田有限责任公司, 黑龙江大庆 163000

摘要 构造活动是源-汇系统中形成古地貌和砂分散体系的重要影响因素。塔木察格盆地塔南凹陷在早白垩世是一个典型的断陷湖盆, 经历了多期幕式断陷活动, 但同沉积构造活动及其配置所产生的古地貌对层序结构特征、沉积体系及砂体分布的控制作用仍不明确。文中以地震、测井、岩心资料为基础, 以层序地层学理论和古地貌控砂理论为指导, 建立了塔南凹陷下白垩统层序地层格架; 结合断层活动性分析, 阐明了不同类型古地貌对沉积体系和砂体分布的控制作用和规律。构造演化和沉积充填的综合研究表明: 受控盆主断裂的幕式断陷活动及同沉积断裂的差异断陷活动影响, 塔南凹陷发育横向凸起和走向斜坡 2 种类型的构造调节带, 这些构造调节带是水系入盆的通道, 控制着盆地的主体物源方向、沉积体系类型与分布特征; 根据断层的几何形态及发育部位, 共识别出 4 种类型构造坡折带, 分别是陡坡断崖型坡折带、陡坡断阶型坡折带、缓坡反向断阶型坡折带和盆内坡折带, 它们各自控制了不同类型沉积体系的形成与分布; 沉积物入盆后, 沉积物分散体系和砂体的分布特征受同沉积断裂的组合样式控制, 研究区共发育梳状断裂系、叉状断裂系和平行断裂系 3 种同沉积断裂平面组合; 与构造调节带相对应的断裂坡折带低部位是大型储层砂体, 特别是低位扇三角洲或盆底扇砂体发育的有利部位, 是寻找砂岩油气藏的有利区带。研究成果对于深化断陷湖盆源-汇系统理论、指导断陷湖盆砂体分布预测具有重要的理论意义和实际价值。

关键词 同沉积构造活动 构造调节带 构造坡折带 控砂机制 下白垩统 塔南凹陷

第一作者简介 周勇, 男, 1984 年生, 中国石油大学(北京)副教授, 博士生导师, 主要从事层序地层学、沉积学及储层地质学方面的研究。E-mail: zhousyong@cup.edu.cn。

中图分类号: P548

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标志码(OSID)



Control mechanisms of tectonic paleogeomorphology on the Early Cretaceous sedimentary basin fills in Ta'nan sag, Tamtsag Basin, Mongolia

Zhou Yong^{1,2} Ji You-Liang^{1,2} Meng Qi-An³ Wan Hong-Feng^{1,2} Zhang Ge³ Ren Yu-Tao^{1,2}
Yan Ke-Xin^{1,2} Liang Tao^{1,2} Chen Fu-Yu^{1,2} Qiang Zhi-Cheng^{1,2}

* 国家自然科学基金项目(编号: 42072115)、中国石油天然气集团有限公司—中国石油大学(北京)战略合作科技专项(编号: ZLZX2020-02) 联合资助。[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China (No. 42072115) and the Strategic Cooperation Technology Projects of CNPC and CUPB (No. ZLZX2020-02)]

收稿日期: 2021-12-01 改回日期: 2022-01-27

1 College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

2 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

3 Daqing Oilfield Limited Company, Heilongjiang Daqing 163000, China

Abstract The Ta'nan sag is a typical faulted lacustrine basin formed during the Early Cretaceous, which experienced multi-stage episodic faulting activities. Tectonic activities are an important factor for the formation of paleogeomorphology and sand distribution. However, the controls of paleogeomorphologies generated by synsedimentary tectonic activities on sequence architectures, sedimentary system and sand body distribution are still unclear. Based on seismic, well logging and core data, under the guidance of sequence stratigraphy theory and paleogeomorphic sand control theory, the sequence-stratigraphic frameworks of the Lower Cretaceous in the Ta'nan sag are established. Combined with the analysis of the major fault activity during different rifting stages, the controlling effects of different paleogeomorphologies on sedimentary system and sand body distribution are clarified. The investigation of the tectonic evolution and sediment fill of the Ta'nan sag during the Early Cretaceous suggests that the episodic rifting and various activities of major faults created complex paleogeomorphologies including transfer zones and structural slope-break zones, which significantly controlled the development and distribution of both depositional systems and sand bodies. The transfer zones including transverse uplift and relay ramp were the sites for drainage catchment, and controlled the locations of sedimentary provenances, entry points of sedimentary material into the basin, and the resultant development of depositional systems. According to fault geometry and the location of the slope-break zones, the structural slope-break zones of the Ta'nan sag during the climax rifting stage were subdivided into four types: fault scarp zone, fault terrace zone, gentle slope zone and intrabasinal fault break zone, which played significant roles in controlling the changes in accommodation and the distribution of depositional systems and sand bodies. Three syndepositional fault arrangement patterns were identified according to their distribution on the structural map, which are “comb-like”, “fork-like” and “parallel” faults. Areas where the structural slope-break zone overlapped with transfer zones are sites for major drainage systems and the optimum locations of fan deltas and sublacustrine fans. The sand bodies deposited here are favorable targets for the exploration of litho-stratigraphic traps in the Ta'nan sag. The results have important theoretical significance and practical value for deepening the theory of source-to-sink system and guiding the prediction of sand body distribution in faulted lacustrine basins.

Key words syndepositional faulting movement, transfer zones, structural slope-break zones, control mechanism of sand distribution, Lower Cretaceous, Ta'nan sag

About the first author Zhou Yong, born in 1984, is an associate professor at China University of Petroleum (Beijing). He is engaged in researches on sedimentology, reservoir geology and sequence stratigraphy. E-mail: zhouyong@cup.edu.cn.

“源-汇”系统是目前国际沉积学领域的研究热点，而对盆地演化过程中构造作用与沉积作用耦合分析的“构造地层学”或“构造沉积学”是“源-汇”系统研究的主要内容之一(Gawthorpe, 2000; 林畅松等, 2003; 林畅松, 2006; 庞雄等, 2007; Allen, 2008, 2017; 徐长贵, 2013; Liu et al., 2016; Du et al., 2017; Xu et al., 2017; 徐长

贵等, 2017; 胡贺伟等, 2020)。构造层序地层研究表明, 断陷盆地的形成与沉积充填主要受盆缘断裂的控制, 盆缘同生断裂活动通过控制基底的升降运动直接制约着盆地可容空间的变化, 进而形成不同的层序结构(林畅松等, 2003; 杨永华等, 2009; Zhou et al., 2014)。同沉积断裂活动的幕式特征控制着不同级次层序界面的形成与沉积充填的

旋回性, 包括层序界面性质、沉积充填特征、沉积物输入位置、沉积体系成因类型以及砂体分布等。尽管盆地构造活动与沉积作用的结合分析一直受到人们的重视, 但结合层序地层分析, 从同沉积构造的活动及其配置所产生的古地貌对沉积物分散体系和沉积体系域发育分布控制的角度开展研究, 却是近年来构造地层学研究的一个新亮点(林畅松等, 2003, 2015; 蒙启安和纪友亮, 2009; 徐长贵和杜晓峰, 2017; 曾智伟等, 2017; 朱红涛等, 2017)。

塔南凹陷是蒙古国塔木察格盆地一个重要的含油气区, 目前处于勘探初期阶段。勘探实践和前人研究成果表明, 塔南凹陷构造活动对层序结构特征、沉积体系分布具有重要的控制作用(纪友亮等, 2009a; 蒙启安和纪友亮, 2009; 杨永华等, 2009), 但从同沉积构造活动及其配置所产生的古地貌对沉积体系和砂体分布控制的角度开展的系统研究还不够深入。在前人研究成果的基础上, 笔者以层序地层学理论为指导, 综合利用地震、测井、岩心资料, 结合不整合接触关系, 对塔南凹陷下白垩统层序地层进行划分和对比。在层序地层格架建立的基础上, 系统总结了同沉积构造活动形成的古地貌类型(构造调节带、坡折带), 重点探讨不同古地貌对层序结构特征、沉积体系及砂体分布的控制作用和规律, 以期为指导中国陆相断陷盆地油气勘探提供依据。

1 区域地质背景

塔木察格盆地位于蒙古国东部, 向北延伸进入中国境内, 与中国的海拉尔盆地同属一个盆地, 统称海拉尔—塔木察格盆地, 总面积 79 610 km²。塔南凹陷位于塔木察格盆地南部, 面积 3500 km², 受不稳定基底隆升及北东向、北北东向张性及张扭性大断裂活动的影响, 整体表现为一个大型宽缓的“东断西超”复式箕状断陷。塔南凹陷内部可进一步划分出 5 个北北东向展布的次级构造单元, 即东部陡坡带、东部次凹、中央低凸起、西部次凹和西部斜坡带(图 1)(蒙启安和纪友亮, 2009)。

塔南凹陷下白垩统最大厚度可达 4000 m, 是该凹陷最主要的生油、含油层系, 自下而上由粗、细、粗 3 套地层构成一个完整的巨型沉积旋回, 内部又可分成多个次一级旋回。下白垩统从下到上依次为铜钵庙组、南屯组和大磨拐河组, 其中铜钵庙组和

南屯组均可分别进一步细分为 2 段。铜钵庙组以冲积扇和扇三角洲砾岩、粗砂岩沉积为主; 南屯组主要发育扇三角洲—深湖—湖底扇沉积体系, 以灰色、灰黑色泥岩与砂砾岩、灰色粉砂岩、细砂岩不等厚互层沉积为主; 大磨拐河组主要发育辫状河—辫状河三角洲—滨浅湖沉积体系, 以灰色粉砂岩、砂岩夹灰色泥岩沉积为主(图 2)。上白垩统伊敏组为拗陷期沉积, 主要为河流相和三角洲—滨浅湖相, 以砂岩、泥岩互层沉积为主, 地层厚度 1200~1700 m。

2 塔南凹陷同沉积断裂活动及构造演化

2.1 断裂活动性分析

塔南凹陷发育一系列 NE/NNE 向展布的正断层, 构成 3 条向西倾斜的基底断裂带, 分别是东部陡坡断裂带(F1 和 F2)、中央隆起断裂带(F4)和西部缓坡断裂带(F5、F6 和 F7)(图 3), 其中 F1 和 F2 控制着东部次凹的形成与演化, F4 控制着西部次凹的形成和演化。在研究断层活动性时, 前人通常采用断层生长指数法和断层活动速率法(陈刚等, 2007; 陈玮常等, 2013), 但生长指数法有一定的局限性, 一是受地层剥蚀的影响, 计算得到的生长指数不能反映真实的断层活动强度, 二是没有考虑凹陷内不同部位沉积速率差异对生长指数计算的影响, 造成计算的结果通常与实际情况不符; 同时, 由于断陷盆地边界控凹断裂长期活动, 上升盘一侧可能长期没有接受沉积, 因此不能用生长指数来研究断层活动性。反之, 利用断层活动速率计算断层活动性的主要优势是其不受地层剥蚀的影响, 更能直观、有效地反映生长断层的相对活动强度和活动历史。因此, 笔者通过统计不同构造时期主要控凹主干断裂(F1、F2 和 F4)的断层活动速率和净沉降量来分析断层的活动性(图 4)。

F1 断层为塔南凹陷北部东侧的一条控凹断层, 长期活动, 延伸长度约 35 km。铜钵庙组沉积期, 该断层表现为中部活动强和南、北活动弱的特征, 中部最大断层活动速率达 225 m/Ma, 最大净沉降量达 1800 m, 而南部断层活动性最弱, 断层净沉降量平均约 200 m。南屯组沉积期, 断层继承性发育, 活动强度进一步增强, 最大断层活动速率达 137.5 m/Ma; 该时期断层分段生长特征明显, 从

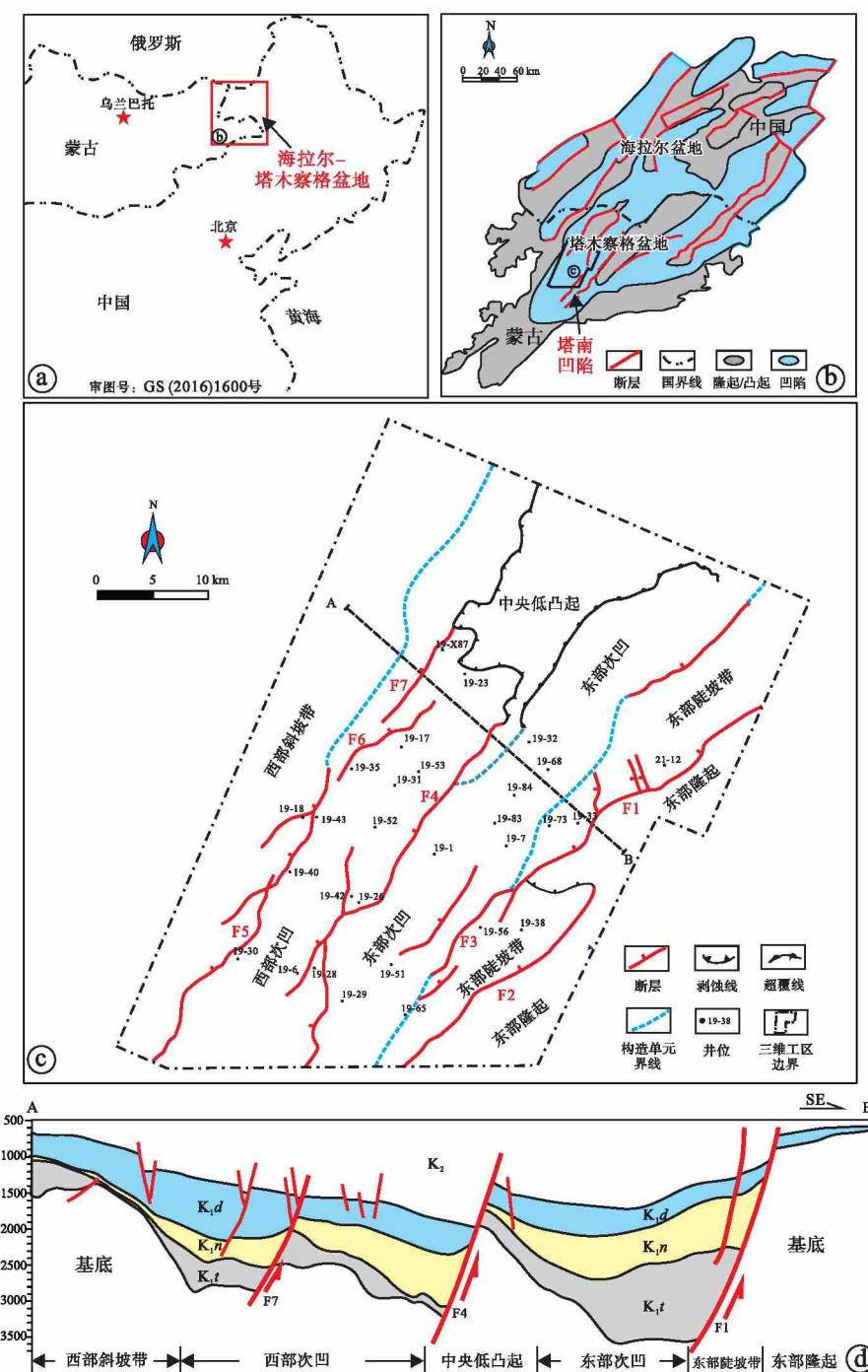


图 1 塔木察格盆地塔南凹陷位置及构造单元划分
Fig. 1 Location and tectonic units of Ta'nan sag, Tamtsag Basin

南向北依次发育了 3 个次级沉降中心, 沉降量最大依次可达 1050 m、1100 m 和 750 m。大磨拐河组沉积期, 断层活动强度整体减弱, 但北部断层活动强度较前一期逐渐增强, 北部断层净沉降量平均约 800 m (图 4-a)。

F2 断层为塔南凹陷南部东侧的一条控凹断层,

与 F1 断层大致平行, 长期活动, 延伸长度约 25 km。铜钵庙组沉积期, 表现为南强北弱的特征, 南部最大断层活动速率达 175 m/Ma, 最大净沉降量可达 1400 m, 平均约 1000 m, 而北部断层活动速率较小, 断层净沉降量平均约 200 m。南屯组沉积期, 断层继承性发育, 活动性进一步增强, 最大断层活动速率

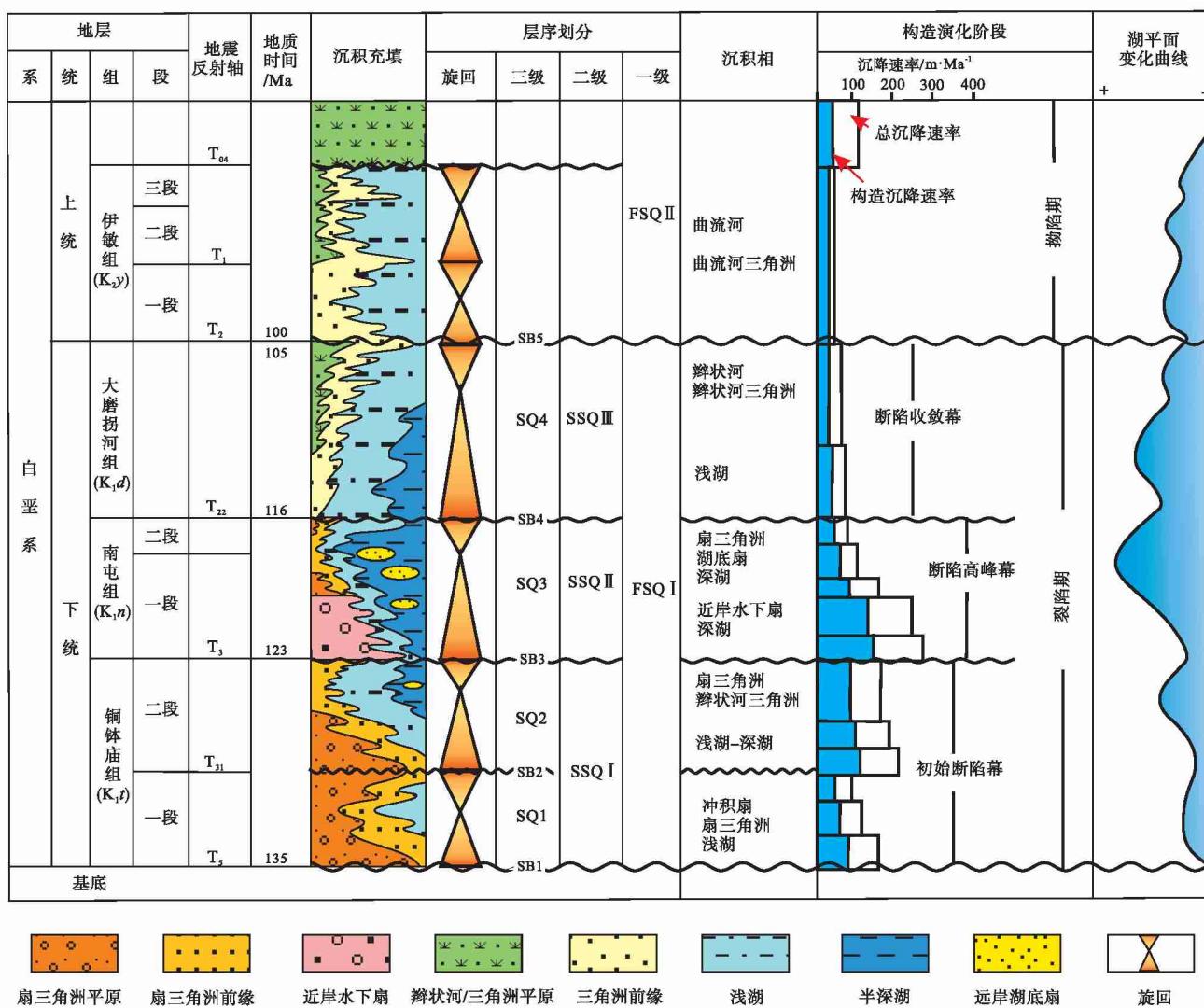


图 2 塔木察格盆地塔南凹陷白垩纪沉积充填序列及构造演化

Fig. 2 Lithostratigraphy, sequence stratigraphic framework and tectonic evolution of the Cretaceous in Ta'nan sag, Tamtsag Basin

可达300 m/Ma; 断层分段生长特征明显, 从南向北依次发育了3个次级沉降中心, 沉降量最大依次可达1750 m、1800 m和1200 m。大磨拐河组沉积期, 断层活动强度整体减弱, 整体断层净沉降量较小, 均小于200 m(图4-b)。

F4断层位于塔南凹陷中部, 长期活动, 延伸长度约40 km。该断层主要控制西部次凹的形成与演化, 其东部为塔南凹陷中部潜山带。铜钵庙组沉积期, 表现为中部活动强、南北活动弱的特征, 中部最大断层活动速率达100 m/Ma, 最大净沉降量可达800 m, 平均550 m。南屯组沉积期, 断层活动强度达到最大, 最大断层活动速率达125 m/Ma, 从南向北依次发育了3个次级沉降中心, 沉降量最大依次可达450 m、750 m和400 m。大磨拐河组沉

积期, 断层活动强度整体减弱, 最大沉降量均小于400 m, 平均200 m(图4-c)。

2.2 构造—层序演化特征

受主干控凹断裂(F1、F2和F4)幕式活动特征的影响(图4), 塔南凹陷经历了早白垩世裂陷、晚白垩世裂后拗陷的演化过程, 具有明显的裂陷—坳陷双层结构(图2; 图5-b)。结合断层差异性活动特征和不整合接触关系, 将塔南凹陷下白垩统划分为1个一级层序、3个二级层序和4个三级层序(图2)。下白垩统整体表现为1个粗—细—粗的完整旋回, 构成1个一级层序地层单元, 顶、底分别对应T2和T5反射界面, 且这2个界面均为盆地范围的构造不整合面, 其中顶界面T2为分割断陷期

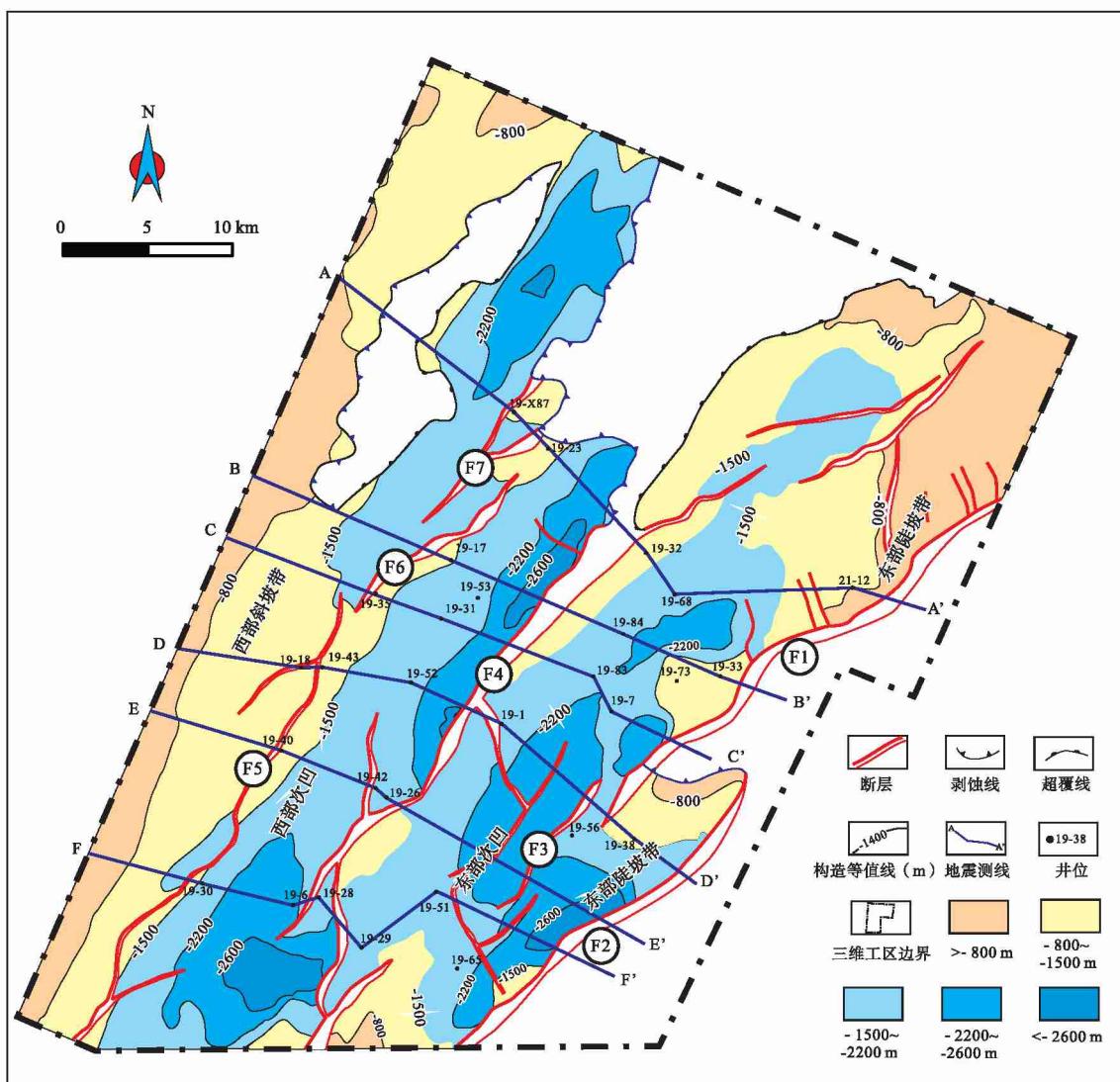


图 3 塔木察格盆地塔南凹陷南屯组底面 (T3 地震反射界面) 构造图

Fig. 3 Structural contour map of T3 seismic reflector (corresponding with the basal Nantun Formation) in Ta'an sag, Tamtsag Basin

与拗陷期的裂后不整合面(图 5-a, 5-b)。早白垩世裂陷期可进一步划分为 3 个裂陷幕, 即初始断陷幕(铜钵庙组沉积期, 135~123 Ma)、断陷高峰期幕(南屯组沉积期, 123~116 Ma)和断陷收敛幕(大磨拐河组沉积期, 116~105 Ma), 这 3 个裂陷幕的沉降平均速率分别为 160 m/Ma、205 m/Ma、120 m/Ma(单敬福等, 2010)(图 2)。每个二级层序对应着一个幕式的断陷构造活动, 代表了一个断陷构造幕的沉积充填, 是盆地初始沉降、快速沉降、减弱停滞的结果(严德天等, 2008; Hou *et al.*, 2012)。

1) 断陷初始期层序。对应铜钵庙组沉积, 包括 SQ1 和 SQ2 共 2 个三级层序。此时边界断层开

始强烈活动, 盆地内部形成凸凹相间的构造格局, 各洼槽互不连通, 内部凸起提供物源, 存在多个沉积中心。层序 SQ1 和 SQ2 在盆地分布相对零散, 整体表现为从陡坡向缓坡一侧呈楔状减薄的特征, 陡坡带一侧物源延伸距离短, 发育的扇三角洲规模较小但厚度较大。

2) 断陷高峰期层序。对应南屯组沉积(SQ3), 边界断层活动最为强烈, 断层面呈铲状, 断层断距大、持续时间长。在该时期, 早期形成的各个孤立的小凹陷开始连为一体, 沉积中心开始慢慢统一, 湖盆范围达到最大, 水体最深。盆地不同构造部位沉降速率差别很大(图 4), 在盆内中央低凸起区, 受断块掀斜旋转作用的影响,

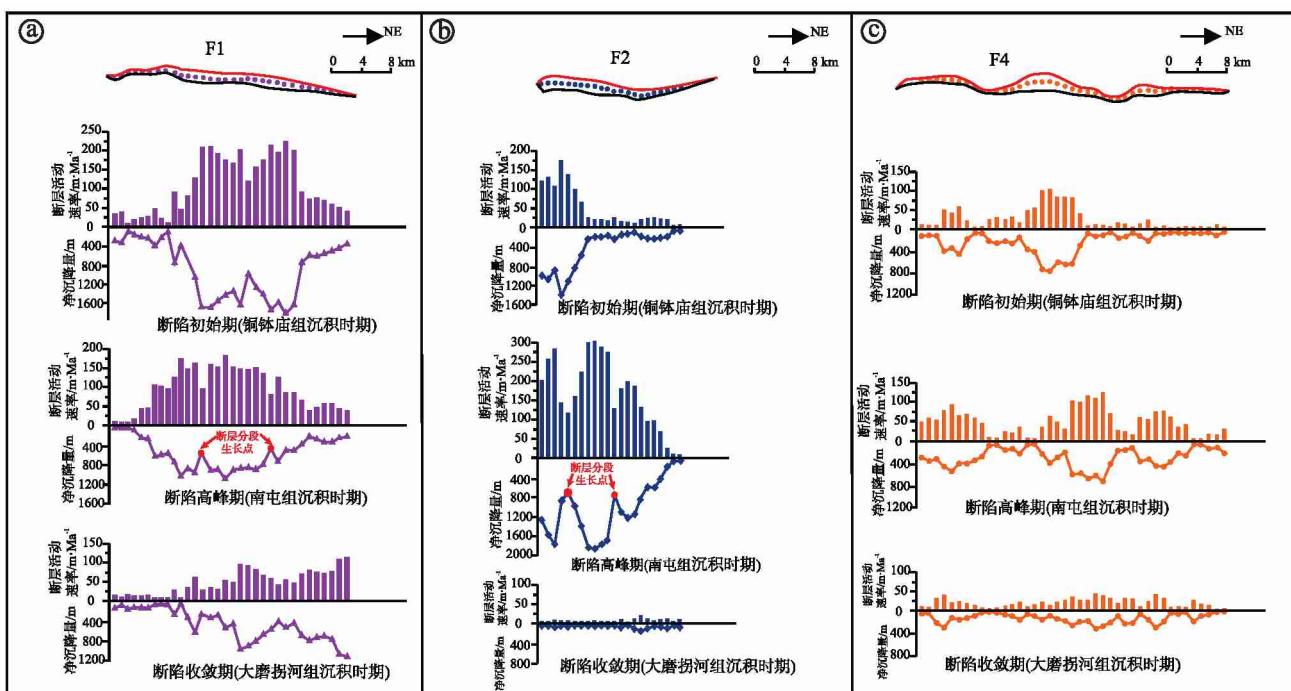


图4 塔木察格盆地塔南凹陷早白垩世主要控凹断裂活动性分析

Fig. 4 Tectonic activity analysis of major faults in different rifting stages of the Early Cretaceous in Ta'nán sag, Tamtsag Basin

部分SQ3地层抬升至地表遭受剥蚀，形成SQ3顶部的削蚀不整合面，在中央低凸起两侧的东部次凹与西部次凹内，削截不整合过渡为与之相对应的整合面。SQ3整体表现为1个大规模的楔状沉积，最大沉积厚度位于盆地边界断层下降盘靠近断层面一侧。

3) 断陷收敛期层序。对应大磨拐河组沉积(SQ4)，伴随着同生断裂活动的缓慢减弱，断层上盘的倾斜旋转活动停止，塔南凹陷进入缓慢沉降阶段，湖盆地形开始变得平坦，湖盆演化进入断坳转换期。该时期水体变浅，早期的多物源演变成单一长轴物源体系，物源供给充足，塔南凹陷以沉积充填为主，发育补偿到过补偿沉积，以大型河流—三角洲、滨浅湖沉积为主(图5-c; 图6)。在地震剖面上，可见到大型的反映三角洲沉积体的“S”型和斜交型前积反射结构(图5-a, 5-b)。

3 塔南凹陷古地貌类型及特征

同沉积断层的时空活动及组合样式会形成不同类型的古地貌，这对沉积体系演化和砂体分布具有重要的控制作用(林畅松，2006；林畅松等，2015；Allen, 2017；Du *et al.*, 2017；Xu *et al.*,

2017；徐长贵等，2017a；徐长贵和杜晓峰，2017；曾智伟等，2017；朱红涛等，2017；胡贺伟等，2020)。在断陷高峰期(南屯组沉积期)，塔南凹陷控凹断裂活动最为强烈(图4)，形成的古地貌特征也最为复杂，古地貌对沉积体系和砂体分布的控制作用最为明显(纪友亮等，2009a, 2009b；蒙启安和纪友亮，2009；杨永华等，2009；Zhou *et al.*, 2014)。以密集的钻井资料和网络状高分辨率连片三维地震资料为基础，结合断层活动性分析(图4)，通过剥蚀厚度恢复得到原始沉积地层厚度(图7)，并采用“印模法”结合古水深校正(隋立伟，2020)对南屯组沉积前古地貌进行了恢复(图8)。塔南凹陷断陷高峰期主要发育构造调节带和构造坡折带2种类型古地貌。

3.1 构造调节带

大量研究表明，断陷盆地主干边界断裂大多具有分段生长机制，断层的分段生长经历了“孤立成核—软连接—硬连接”3个阶段(Morley *et al.*, 1990；Gawthorpe and Hurst, 1993；刘哲等，2012；付晓飞等，2015)，断层分段生长过程伴随着不同类型构造调节带的形成。在伸展构造中，构造调节带被定义为构造变形中在区域上保持缩短量或伸展

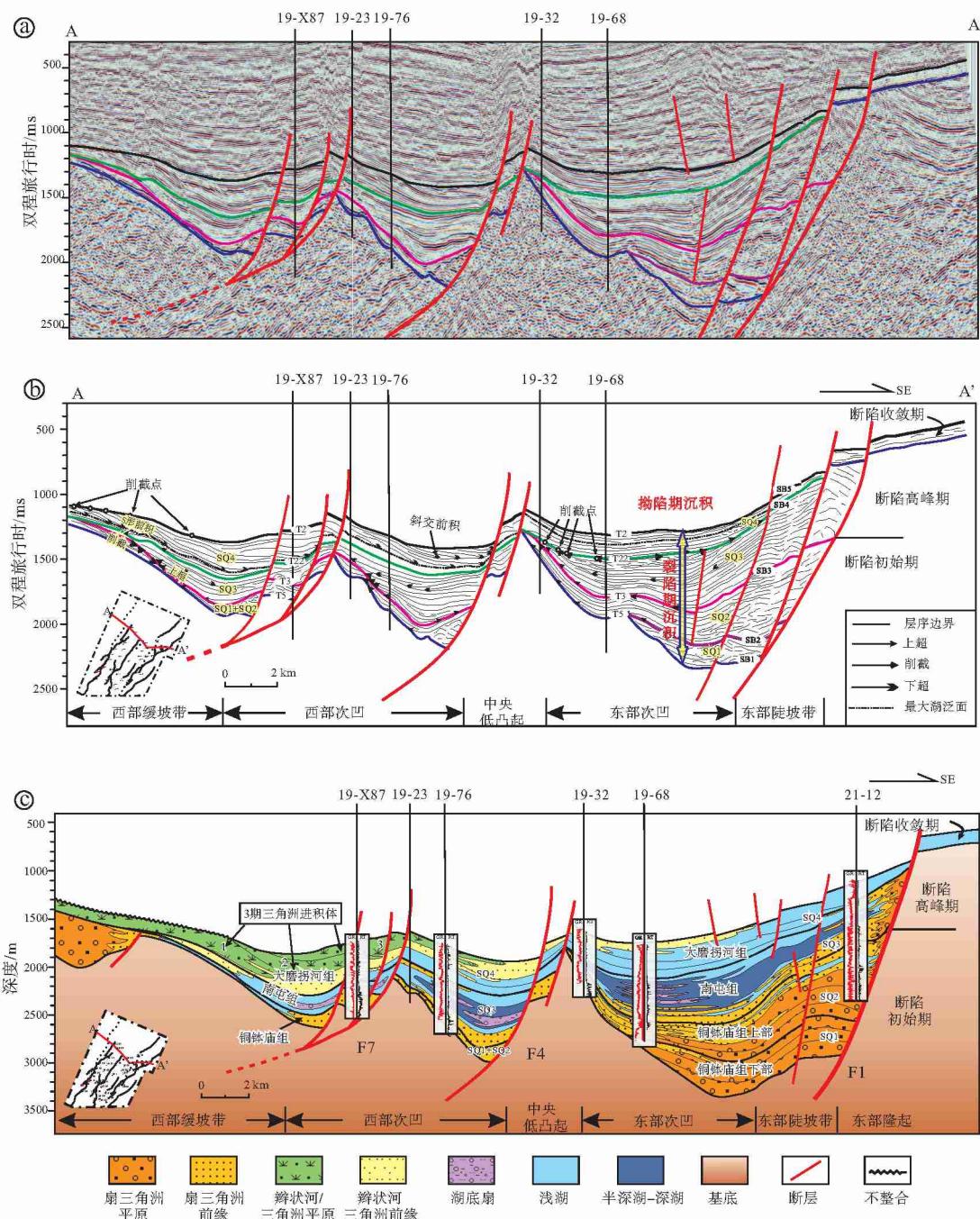


图 5 塔木察格盆地塔南凹陷北部过 19-X87—19-68 井地震地质剖面解释及层序沉积充填

Fig. 5 Seismic profiles, interpretative line-drawing of seismic section and sequence stratigraphic framework of well-seismic correlation crossing Wells 19-X87 to 19-68 in the north part of Ta'nán sag, Tamtsag Basin

量守恒而产生的调节构造 (Morley *et al.*, 1990; Nelson *et al.*, 1992; Hou *et al.*, 2012)。构造调节带的形成与断层位移沿走向的变化密切相关, 控凹主断裂沿走向可以通过其他形式 (如分支正断层、凸起、走向斜坡或撕裂断层) 传递或转换为另一条控凹正断层 (Morley *et al.*, 1990; 王纪祥等,

2003)。

塔南凹陷东部的控凹陷断裂为 F1 和 F2, 呈 NE 向雁列式伸展, 分别控制着凹陷北部和南部陡坡边界的形态 (图 7; 图 8)。付晓飞等 (2015) 利用“断距回剥”技术对塔南凹陷控凹断裂 F1 和 F2 分段生长演化过程进行了定量恢

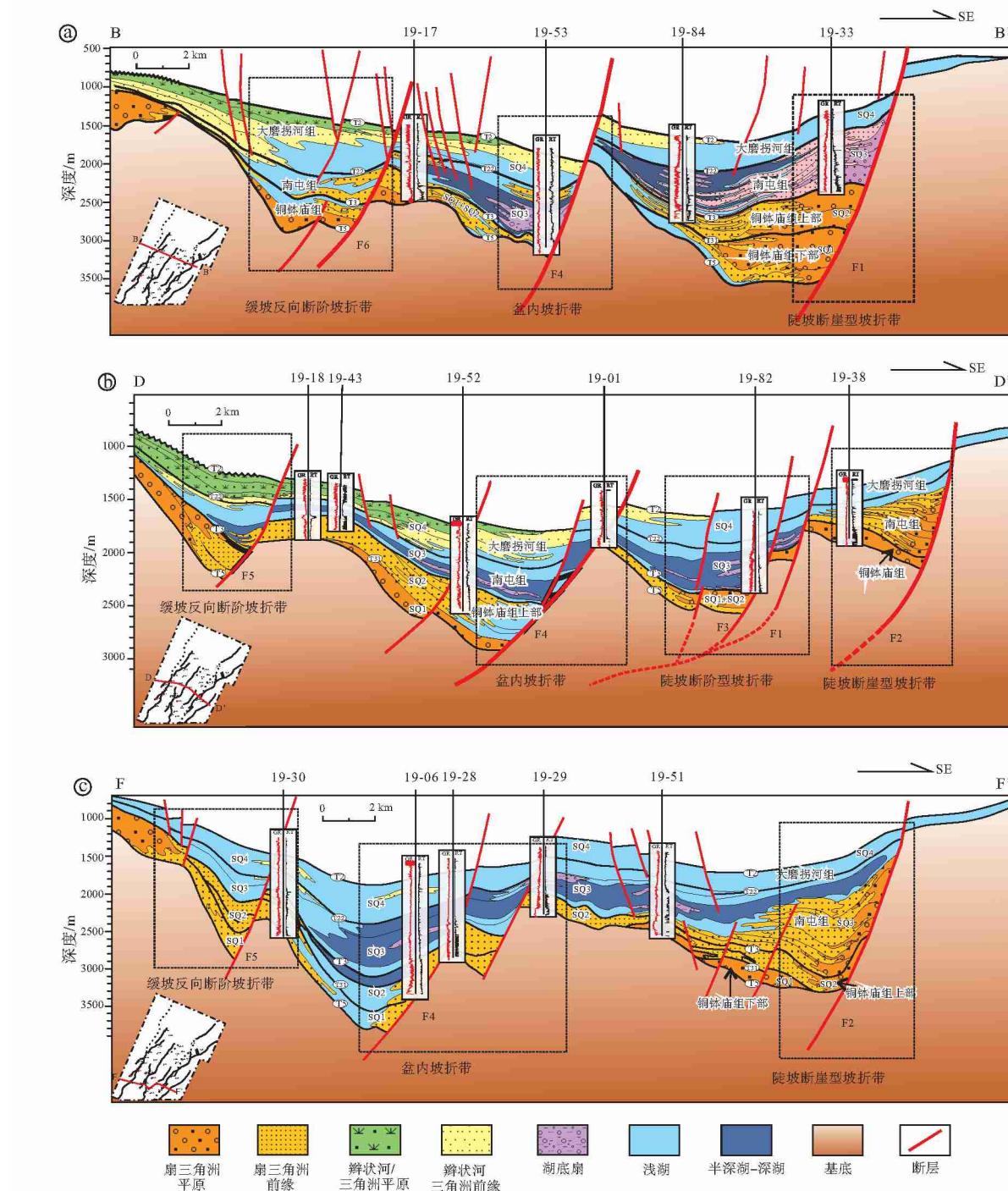


图 6 塔木察格盆地南凹陷不同构造位置层序地层格架内沉积充填样式

Fig. 6 Sequence stratigraphic framework of well-seismic correlation in different locations of Ta'nan sag, Tamtsag Basin

复。由于控凹断裂的分段性和差异断陷活动(图4)，塔南凹陷东部陡坡带发育了多种类型的构造调节带。参照 Morley 等 (1990) 对伸展断层构造调节带的分类，将塔南凹陷裂陷期发育的构造调节带划分为2类：同向倾斜未叠置型构造调节带和同向倾斜叠置型构造调节带(图9)。

3.1.1 同向倾斜未叠置型调节带——横向凸起地貌

同向倾斜未叠置调节带的形成与盆缘主干断层位移沿走向发生变化(差异性活动)有关。受差异沉降作用影响，断层强烈活动段上盘沉降量大，下盘均衡抬升量也大；而分段生长部位上盘沉降量较小，其下盘均衡上升量也较小，在上盘形成横向

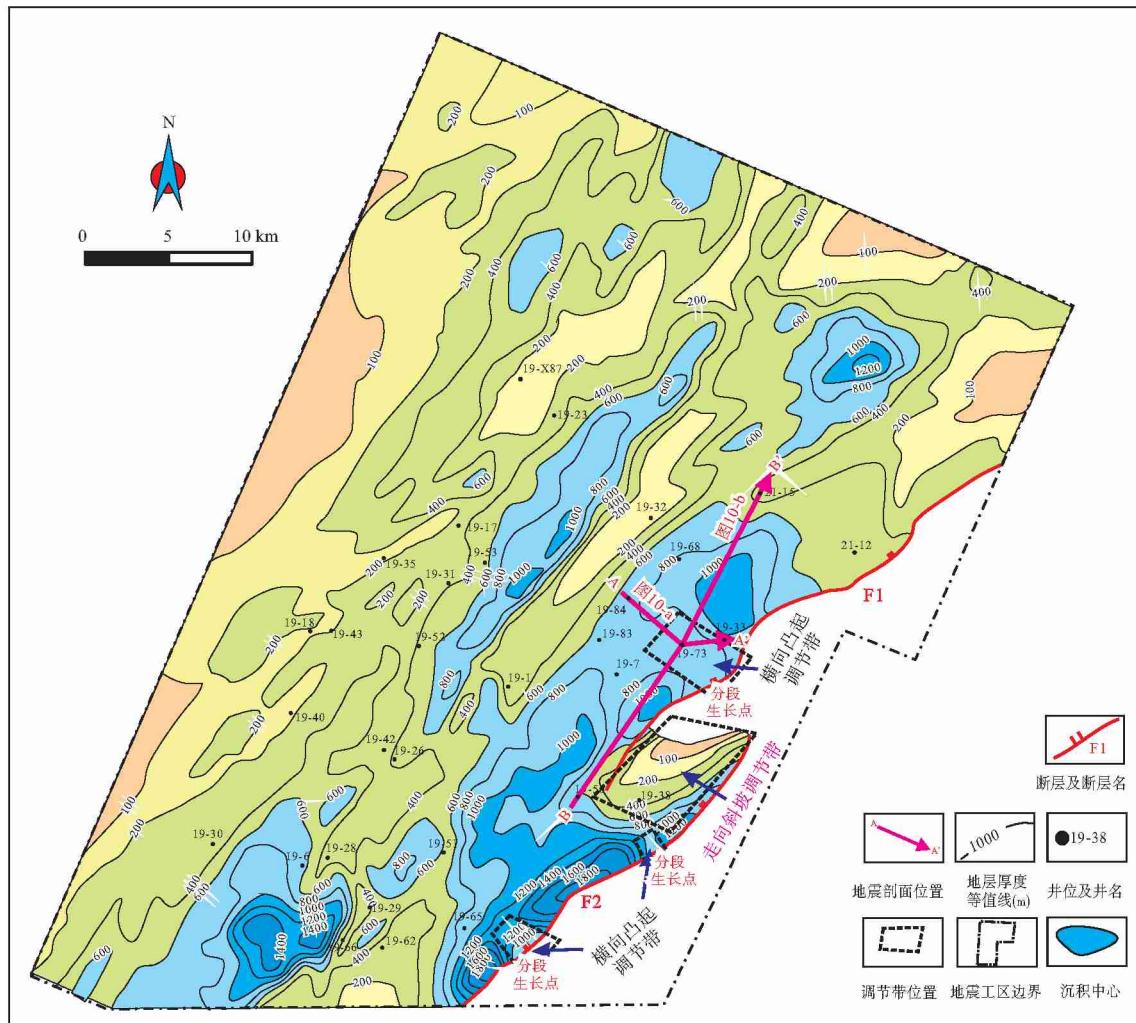


图 7 塔木察格盆地塔南凹陷南屯组一段 (SQ3-LST+TST) 地层厚度图

Fig. 7 Strata thickness map of the First Member of Nantun Formation (SQ3-LST+TST) in Ta'nán sag, Tamtsag Basin

隆起(断鼻构造)来调节断层沿走向上断距的变化(图8; 图9)。横向凸起调节带通常沿主干断层走向形成多个古地貌的高点(图3; 图8),作为正向地貌单元可将塔南凹陷沿走向分割为若干直接对应于半地堑的独立沉积中心,这种控制作用会一直持续到裂陷期结束。

研究区横向凸起调节带主要分布在凹陷东部F1断层南部19-73井区及F2断层南部19-65井区,对应断层分段生长部位(图8)。垂直断层F1断面方向的地震剖面显示,在断层上盘一侧,自断面向凹陷中心,地层厚度呈楔状减薄(图10-a);平行断面方向的地震剖面显示,在断距较小位置,形成一个凸起构造(横向凸起)(图10-b)。自横向凸起向两侧断层的主要沉降区,地势起伏不断减小,调节带对应于地层厚度较小的部位,而其两侧

断层位移最大处对应的地层厚度也最大,如19-73井区横向调节带地层厚度为700 m,两侧主要沉降区地层厚度可达1000 m;19-65井区横向凸起调节带地层厚度为1000 m,两侧主要沉降区地层厚度可达1800 m(图7),这表明主干断层F1和F2的断距在调节带附近减小。

3.1.2 同向倾斜叠置型调节带——走向斜坡地貌

同向倾斜叠置型调节带主要发育在塔南凹陷东部2条同倾向侧列断层(F1和F2)的叠置处(19-38井区)(图7;图8),在2条断层的倾末端会形成1个走向斜坡来调节2条断层断距沿走向的变化。走向斜坡连接着1条断层的下盘与另1条断层的上盘,斜坡走向通常与边界断层走向近垂直(Peacock, 1994)。从地层厚度来看,走向斜坡对应于地层厚度较小的部位,如19-38井区地层厚

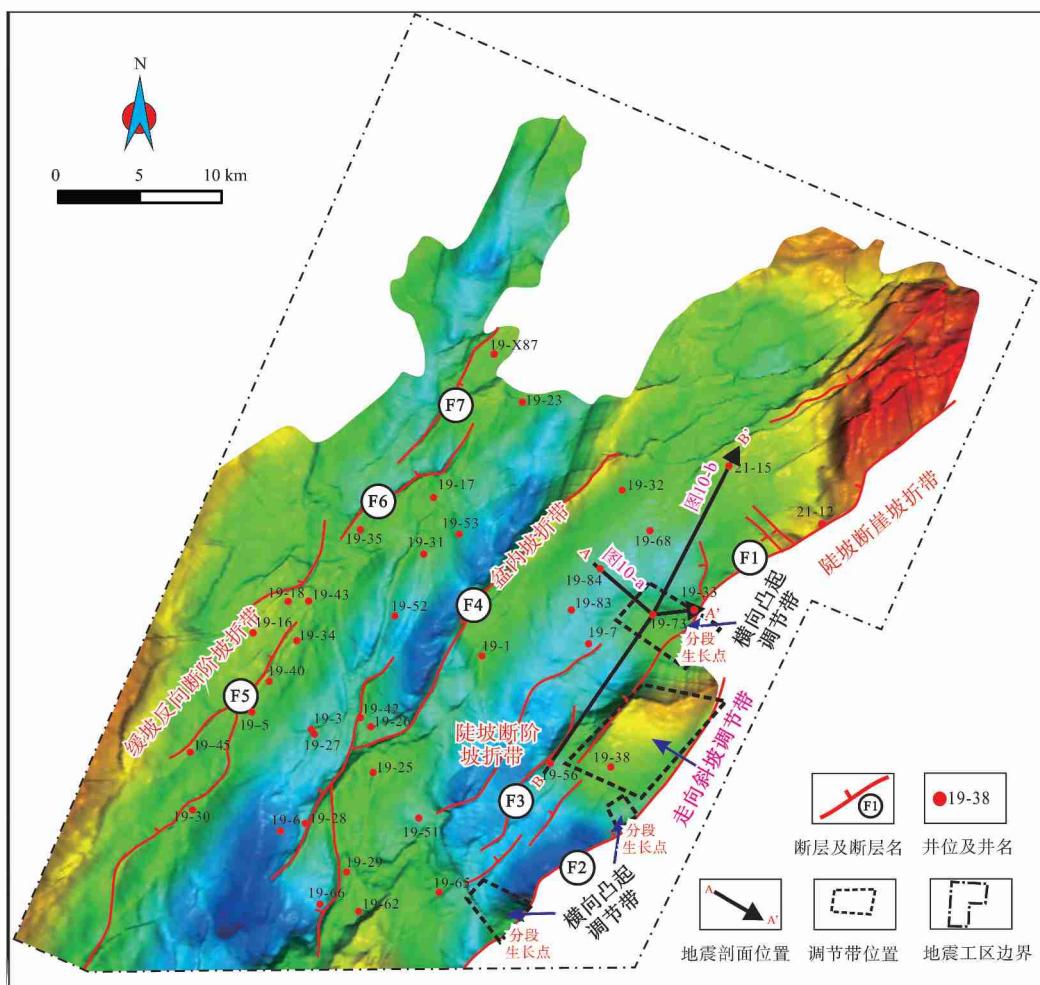


图8 塔木察格盆地塔南凹陷南屯组沉积前古地貌特征

Fig. 8 Characteristics of paleogeomorphology formed before the deposition of Nantun Formation in Tantan sag, Tamtsag Basin

度约为300 m，而其两侧随着断层位移的增大，地层厚度也逐渐增大，可达1200 m（图7）。

3.2 构造坡折带

“构造坡折带”定义为由同沉积构造长期活动引起的沉积斜坡明显突变的地带（林畅松等，2003；王英民等，2003；冯有良，2006；冯有良等，2010；侯宇光等，2010）。塔南凹陷经过多期的幕式构造运动，除了形成多种构造调节带外，在盆地不同构造部位，不同级别的同沉积断裂还可形成多级构造坡折带，形成复杂的构造古地貌，尤其是在强烈裂陷期，构造坡折带最为发育。根据断层的几何形态及发育部位，在塔南凹陷断陷高峰期可识别出4种构造坡折带类型，即陡坡断崖型坡折带、陡坡断阶型坡折带、缓坡反向断阶型坡折带和盆内坡折带（图6）。

陡坡断崖型坡折带主要分布于塔南凹陷东部陡坡带，是塔南凹陷最常见的一种坡折带类型（图6）。该类型坡折带的发育主要受益于盆地边界控凹大断裂（F1、F2）控制，断层形成时间早、持续时间长、规模大。由于断面较陡，断层与湖区构成断崖地貌，凸起前缘直接过渡为深湖区，为湖盆最大可容空间发育区。

陡坡断阶型坡折带分布于塔南凹陷东部次凹南部靠陡坡一侧，主要受边界控凹断裂（F2）及其所派生的次一级断裂（F3）活动控制形成，次一级断裂走向与边界断裂走向一致（图7）。F2和F3断层在凹陷南部的活动强度都较大，且2个断层之间的断块发生了明显的旋转，从陡坡边缘向盆地内部形成多个阶梯状台阶（图6-b）。

缓坡反向断阶型坡折带发育在塔南凹陷西部缓坡

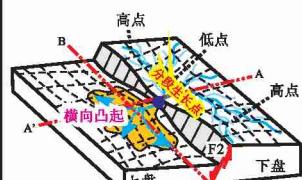
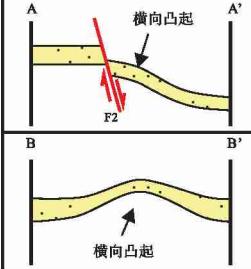
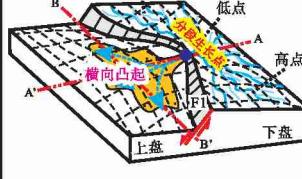
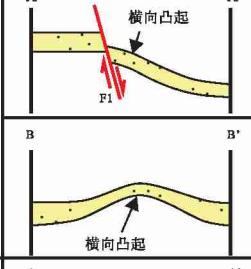
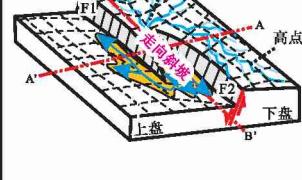
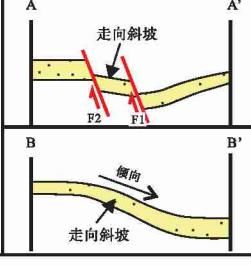
类型	几何形态	沉积体系	实例	立体模式图	剖面特征
同向倾斜未叠置调节带	横向凸起	线状断层 扇三角洲 近岸水下扇	19-65井区		
					
同向倾斜叠置调节带	走向斜坡	扇三角洲	19-38井区		

图 9 塔木察格盆地塔南凹陷南屯组构造调节带类型及发育模式

Fig. 9 Types and development models of transfer zones of the Nantun Formation in Ta'nán sag, Tamtsag Basin

带，断裂带自南向北由 F5、F6、F7 构成，使得西部斜坡复杂化，早期为分散的小断洼，后期成为具反向断阶的斜坡(图 6)。从南到北，由于断裂活动强度的差异，盆地不同部位的结构也有很大差别。

盆内坡折带的形成与塔南凹陷中央断裂 (F4) 的活动有关。受断块构造掀斜活动影响，F4 断层两盘构造沉降速率的显著差异造成盆地内部地形坡度突变而形成盆内坡折，最大可容空间位于断层下降盘靠近断层一侧。由于 F4 断层南、北段的活动强度不同(图 4)，在盆地不同构造部位所形成的盆内坡折带特征也差别较大(图 6)。在塔南凹陷北部 SQ3 沉积早期，盆地地貌形态为水下盆内坡折；后期断层活动强度加大，上升盘抬升速度加快，发生强烈反转；至 SQ3 沉积晚期，上升盘出露地表，发育局部削蚀不整合，此时盆内坡折转化为中央低凸起，把凹陷分隔成了东部次凹和西部次凹(图 5)。在塔南凹陷南部，F4 断层活动强度较小，其地貌形态一直都是水下盆内坡折带。

4 塔南凹陷构造古地貌控砂机制

在对同沉积构造差异性活动及其配置所产生的古地貌研究的基础上，结合塔南凹陷不同构造位置层序地层格架内沉积充填样式(图 6)，阐明了塔南凹陷断陷高峰期不同类型古地貌的控砂机制。

4.1 构造调节带控制水系入湖通道

在断陷盆地中，构造调节带常是水流携带碎屑物质注入盆地的通道，进而控制着盆地强烈沉降期层序地层形成的主体物源方向、沉积体系类型与分布特征 (Morley *et al.*, 1990; Nelson *et al.*, 1992; 邓宏文等, 2001, 2008)。

1) 横向凸起调节带。由于主断层中心地带断层位移量大而分段生长部位 (调节带) 断层位移量减小，在调节带处其下盘会形成漏斗状的相对低地或缓坡，主水系会从横向调节带相对较低的地形进入凹陷中，之后在上盘横向凸起上向四周分散，

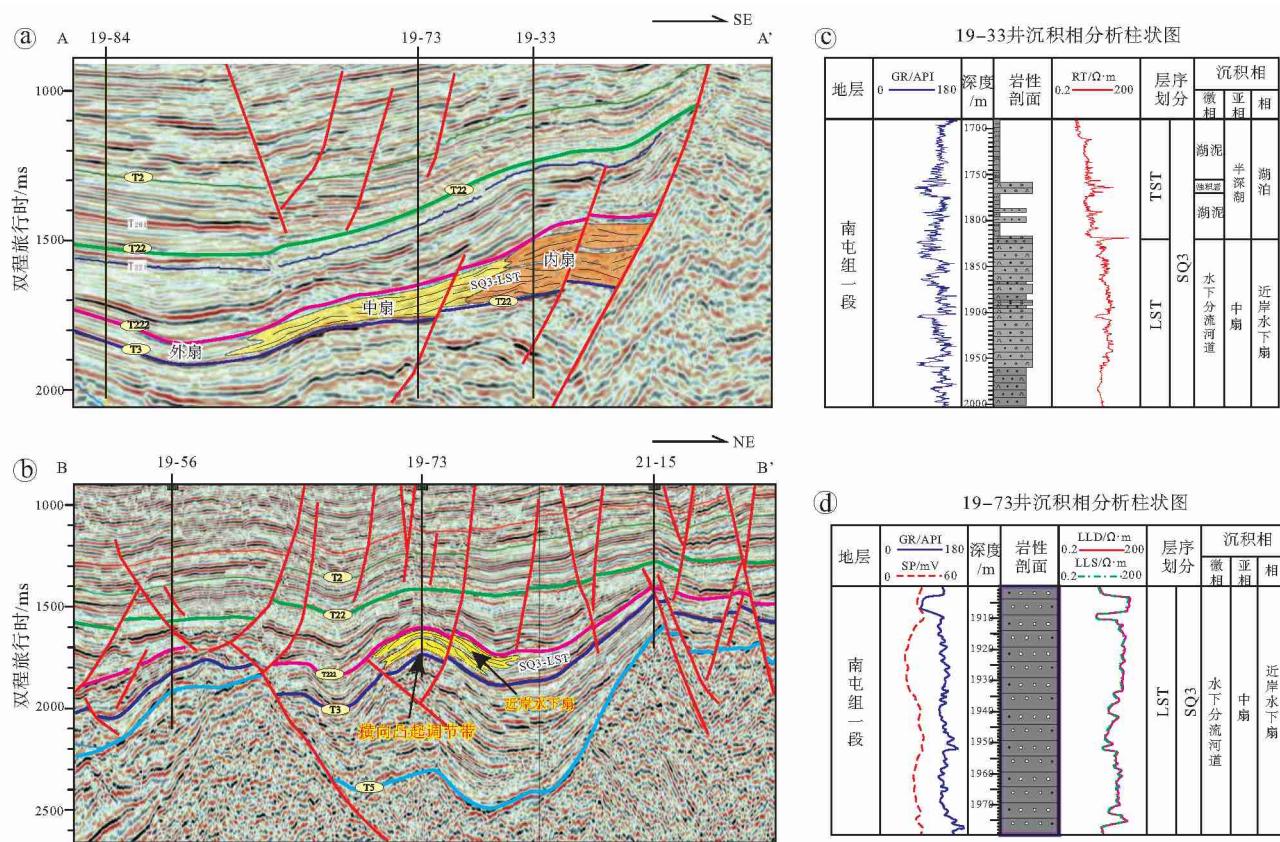


图 10 塔木察格盆地塔南凹陷南屯组横向凸起调节带地震剖面特征

Fig. 10 Seismic profiles showing characteristics of transverse uplift of the Nantun Formation in Ta'nan sag, Tamtsag Basin

形成富砂扇三角洲或近岸水下扇沉积体系(图9)。如19-33和19-73井,发育厚层近岸水下扇砂砾岩沉积(图10-c, 10-d),平行物源方向的地震剖面显示多期前积结构(图10-a),垂直物源方向的地震剖面呈透镜状(图10-b)。大量勘探实践也证明,在同一条控凹断层的下降盘,不同部位的扇三角洲或水下扇砂体的规模差别悬殊,以粗碎屑为主的大型扇三角洲或水下扇砂体往往只在构造调节带处发育,而其他部位仅发育由粉—细砂岩组成的小型砂体(邓宏文等, 2001; 王纪祥等, 2003; 王家豪等, 2008)。

2) 走向斜坡调节带。走向斜坡的形成与边界控凹断层F1和F2的侧接有关,在主断层断距较大的部位,其下盘相对隆起而阻碍了物源的导入,下盘的水系会向主断层断距较小的部位(调节带)汇聚,然后沿走向斜坡注入盆地,沉积物在斜坡坡脚沉积,以扇三角洲沉积为主。南屯组中下部(SQ3 LST+TST)均方根振幅地震属性图(图11)显示,部分沉积物会继续沿F1断层的倾末端向其

断距最大处搬运,并沿其走向分散,向东北方向迁移至19-7井区横向凸起处。整个裂陷期,东部隆起物源供应充足,沉积物沿走向斜坡持续注入到凹陷中,在走向斜坡调节带两侧的沉降中心沉积了大套的扇三角洲砂体,地层最大厚度可达1000 m(图7)。

4.2 构造坡折带控制沉积体系类型及砂体分布特征

1) 陡坡断崖型坡折带与扇三角洲。在塔南凹陷东部陡坡带,受控凹断裂及派生断裂的影响,主要发育陡坡断崖型和陡坡断阶型2种构造坡折带。东部隆起是主要的物源补给区,沉积物主要沿盆缘沟谷或横向凸起调节带注入湖盆,形成扇三角洲或近岸水下扇沉积体系。在陡坡断崖型坡折带,凹陷的沉降中心、沉积中心位于断层下降盘靠近凸起一侧,所沉积的地层厚度也最大。从不同位置沉积剖面来看(图5-c; 图6),在控陷断层(F1)下降盘发育的扇三角洲砂体在剖面上呈楔形展布,靠近边界断层一侧厚度最大,单层厚度可达30 m,向

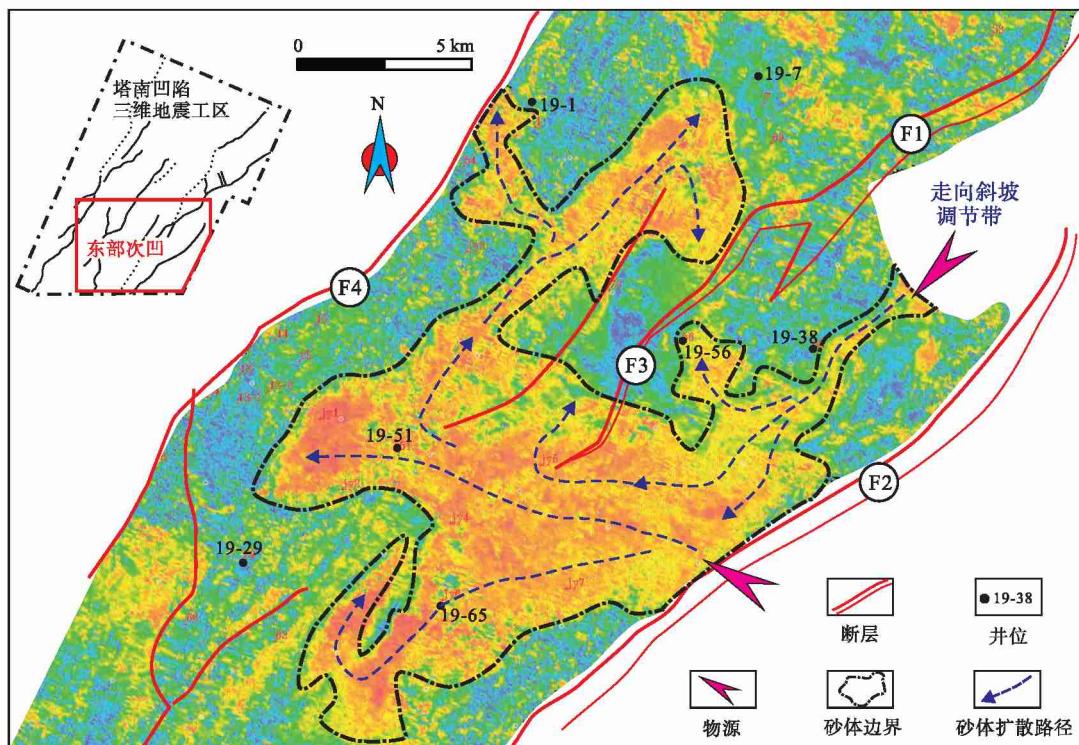


图 11 塔木察格盆地塔南凹陷东部次凹南部南屯组中下部均方根振幅属性图

Fig. 11 RMS attribute map showing distribution of sandbodies of the lower-middle Nantun Formation in southeast part of Ta'an sag, Tamtsag Basin

凹陷方向, 厚度明显减薄。

2) 陡坡断阶型坡折带与扇三角洲和远岸湖底扇。在陡坡断阶型断裂坡折带, 由于近岸断阶的不断旋转, 靠近边界断层一侧可容空间不断增大, 发育多期退积型扇三角洲沉积, 该扇三角洲在剖面上表现为明显的退积型楔状体, 如 19-38 井区。在离岸较远、由次级断裂形成的远岸断阶处, 由于距物源区较远, 沉积物以远岸水下扇、滑塌浊积体沉积为主, 如 19-82 井钻遇远岸湖底扇, 剖面呈透镜状, 电测曲线上与泥岩基线呈指状交互(图 6-b)。

3) 缓坡反向断阶型坡折带与辫状河三角洲。在塔南凹陷西部缓坡带主要发育反向断阶型坡折带。由于基底整体沉降幅度不大, 沉积可容空间相对较小, 易发育斜坡背景下的辫状河三角洲沉积体系。由西部凸起提供物源的辫状河三角洲体系沿斜坡向下进入湖区, 阶梯状分布的反向断裂阻碍了三角洲扇体向盆内继续迁移, 使沉积物沿斜坡向下搬运一定的距离后便沿断裂走向分布。从沉积剖面看, 靠近缓坡一侧发育辫状河三角洲前缘相, 而反向断阶向盆地一侧由于物源供应较少, 以滨浅湖—

半深湖泥岩沉积为主(图 5-c; 图 6)。

4) 盆内坡折带与轴向近岸湖底扇。在塔南凹陷中部, 受中央断裂构造掀斜活动影响, 主要发育盆内坡折带。南屯组沉积早期, 地貌形态为水下盆内坡折, 后期随断层活动强度加大, 盆内坡折转化为水下低凸起, 把凹陷分隔成了东部次凹和西部次凹(图 5)。由于东次凹古地貌呈箕状断陷, 因此来自东部物源的扇体难以越过箕状断陷到盆内坡折带下降盘沉积。但是盆内坡折带下降盘的西部次凹地貌上表现为沿 NE 向伸展的断槽, 来自北部中央低凸起的沉积物可沿断槽向 SW 方向输运沉积物, 形成近岸水下扇沉积, 如 19-53 井和 19-76 井(图 6-a; 图 12-c)。

4.3 断裂平面组合样式控制盆内砂体展布

盆地内的同沉积断裂在规模和组合样式上具多样化, 其受控于构造应力场、先存断裂系再活动及重力调节作用(林畅松等, 2003; 冯有良, 2006)。1条断裂带通常是由几条断层构成, 或由1条主断层与多条低级序断层构成(张宗檩, 2004)。低级序断层多为主干断裂的伴生断层或

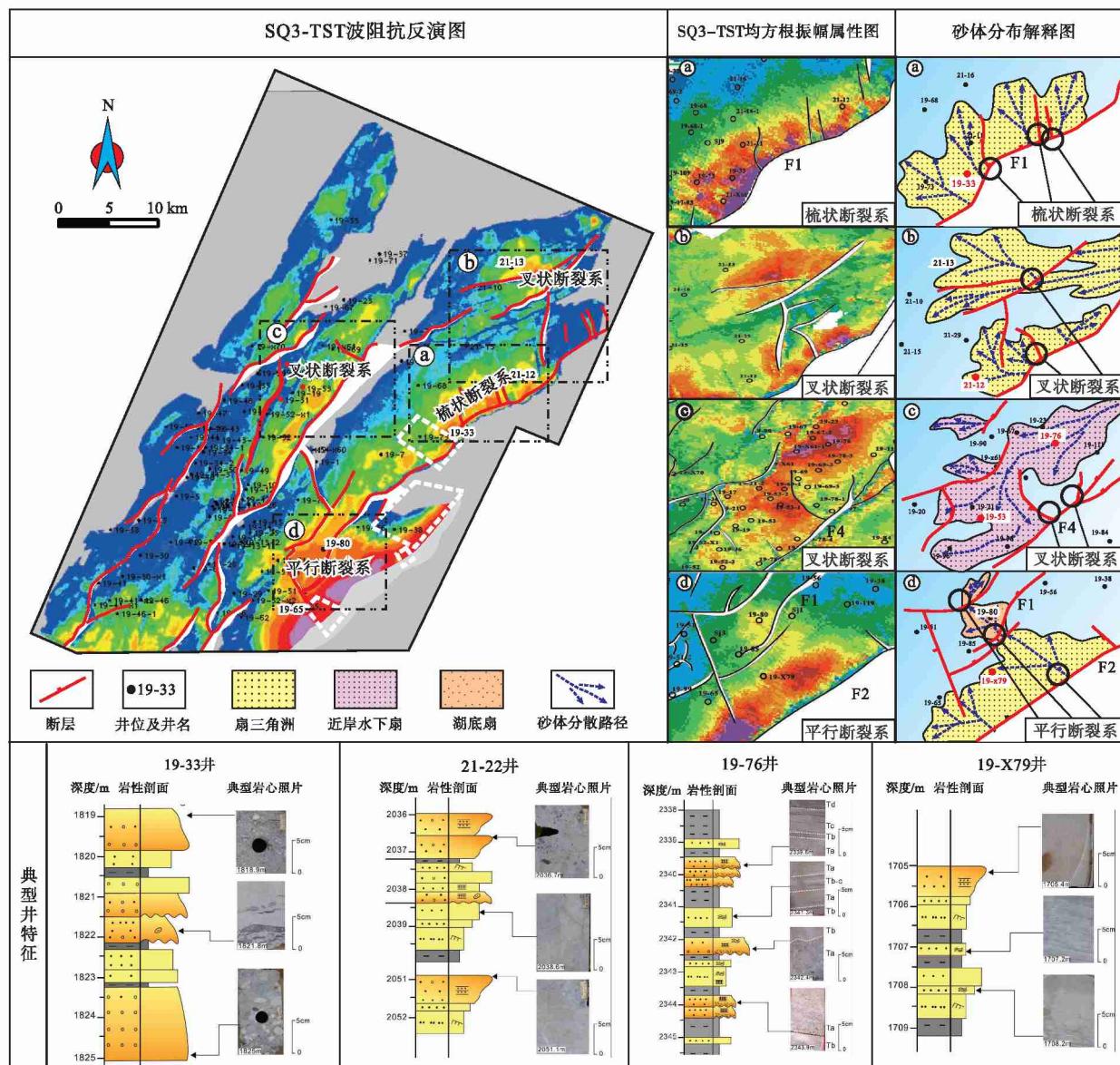


图 12 塔木察格盆地塔南凹陷同沉积断裂平面组合样式及砂体分布

Fig. 12 Faults arrangement patterns and their controls on distribution of sandbodies in Ta'nan sag, Tamtsag Basin

调节断层，与主干断层属于同一应力场背景。塔南凹陷共发育了3种同沉积断裂平面组合样式，分别是梳状断裂系、叉状断裂系和平行断裂系（图12），不同的同沉积断裂组合样式形成了特定的构造古地貌。结合波阻抗反演及地震属性分析成果，对塔南凹陷同沉积断裂组合样式对沉积物分散体系和砂体分布的控制作用进行了分析。

4.3.1 梳状断裂系与砂体分布

梳状断裂系的形成与边界断层的张扭性活动有关，在右旋剪切作用下或边界断层两盘的相对运动中，会形成一系列雁列式排列的低级序断层，与边

界大断层呈高角度斜交。梳状断裂系主要发育在塔南凹陷东部次凹北洼槽，由主干同沉积断裂F1和发育于下降盘并与之高角度相交的一组伴生次级断裂组成，次级断裂呈NW-SE走向。

梳状断裂系常常产生特定的构造古地貌，控制着一个“沉积相域”的总体分布（林畅松等，2003）。如19-33井区发育的扇三角洲的分布特征主要受梳状断裂系所控制，盆地规模较大的调节断裂或盆缘沟谷控制着水道的发育部位，砂体一般沿这些次级同沉积断裂向盆地方向延伸，平面上在断脚底部发育较厚的砂体，又称为“断脚砂体”（图12-a）。

4.3.2 叉状断裂系与砂体分布

叉状断裂系是由主干断层及其一侧或两侧派生的低级序分支断层构成，主干断层与分支断层呈锐角相交，其内叉角是构造低部位，水系沿主断裂与次级断裂的交角处注入凹陷，2条断裂的交角处多发育较厚砂体，砂体的展布形态受2条断裂共同控制（林畅松等，2003），如21-13井区（图12-b）。叉状断裂系也常常与其他类型同生断裂组合配合共同控制砂体横向展布，如塔21-12井区东北侧，沿叉状断裂系注入盆地的砂体在向凹陷内迁移的过程中，会沿另一条调节断层的倾末端注入凹陷，继而沿调节断层走向分散（图12-b）。叉状断裂系在塔南凹陷也比较常见，如盆地中央断层F4也可与其伴生的次级断层相交构成叉状断裂系，控制凹陷内部来自北部中央凸起区湖底扇砂体的分布，如19-53与19-76井

区砂体（图12-c）。

4.3.3 平行断裂系与砂体分布

阶梯状平行断裂系的形成往往与区域拉张拆离作用机制有关，主要发育在塔南凹陷东部次凹南洼槽带沿陡坡带一侧，由边界控凹断裂F2及其所派生的次一级断裂所组成，次一级断裂走向与边界断裂走向一致，从盆地边缘向盆地内部形成多个阶梯状台阶，在剖面上与陡坡断阶型坡折带相对应。受不同断块差异构造沉降的影响，平行断裂系可形成特定的多级台阶古地貌，控制着沉积体系和砂体的分布特征。在19-X79井区，主干断层下降盘一侧发育的扇三角洲砂体可沿着台阶断层向盆内迁移，在离岸较远的多级坡折台阶之下的19-80井区，可发育陡坡带扇三角洲前缘滑塌形成的远岸湖底扇（图12-d）。

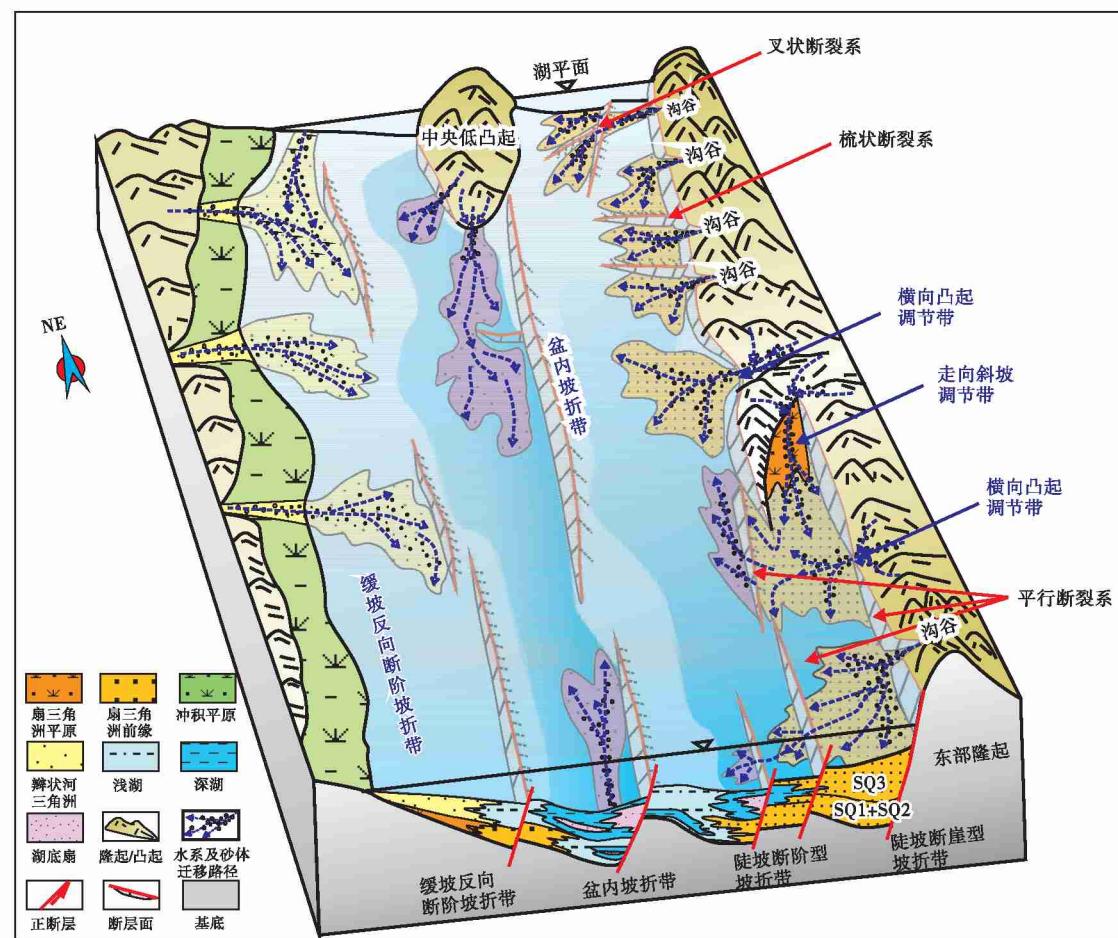


图13 塔木察格盆地塔南凹陷断陷高峰期（南屯组）构造-沉积响应综合模式

Fig. 13 Schematic block diagram showing sand bodies distribution model in rift climax stage (Nantun Formation) of Ta'nán sag, Tamtsag Basin

5 构造-沉积响应综合模式

在综合分析层序地层格架、沉积体系和构造古地貌的基础上,建立起塔南凹陷断陷高峰期(南屯组沉积期)的构造-沉积响应综合模式(图13)。塔南凹陷在控凹主干断层F1、F2和F4的控制下发生断陷活动,构造活动强烈,物源区地形起伏高差大、盆缘陡,来自东部隆起的物源丰富。在陡坡一侧,边界主干断层F1和F2分段生长导致沿断层走向断距的变化,在断层分段生长部位形成横向凸起调节带; F1和F2断层侧接,导致了走向斜坡调节带的形成。来自东部隆起的碎屑物质沿横向凸起型调节带、走向斜坡型调节带及盆缘沟谷形成的物源通道进入塔南凹陷,持续发育扇三角洲或近岸水下扇沉积。

沉积物入湖后,构造坡折带和同沉积断裂平面组合样式控制了沉积体系和砂体的展布特征。在陡坡断崖坡折带,来自凸起上的水系所携带的沉积物主要沿盆缘沟谷注入湖盆,形成扇三角洲沉积体系,沉积相带窄、砂体规模较小; 砂体的分布特征主要受梳状断裂系所控制,一般沿这些次级同沉积断裂向盆地方向延伸。在塔南凹陷南部陡坡断阶型坡折带,砂体的分散受平行断裂系控制,近岸的高台阶常发育水下扇或扇三角洲沉积体系,在离岸较远的低台阶常发育远岸湖底扇沉积体系。在塔南凹陷中央盆内坡折带,受中央断裂F4构造掀斜活动影响,后期演化为水下低凸起,把凹陷分隔成了东部次凹和西部次凹,来自东部物源的扇体无法越过东部次凹箕状断陷到盆内坡折带下降盘沉积,但是盆内坡折带下降盘的西部次凹地貌上表现为NE向伸展的断槽,来自北部中央低凸起的沉积物可沿断槽向SW方向输运砂体,形成近岸水下扇沉积。在塔南凹陷西部缓坡一侧,来自西部隆起的碎屑物质主要堆积在缓坡反向断阶带之下,物源体系较单一,可形成辫状河三角洲沉积体系,砂体的展布明显受坡折带的走向控制。与构造调节带相对应的断裂坡折带低部位是大型储层砂体,特别是低位扇三角洲或盆底扇砂体发育的有利部位,是寻找砂岩油气藏的有利区带。

6 结论

1) 塔木察格盆地塔南凹陷裂陷期构造演化分

为3幕: 初始断陷幕、断陷高峰幕和断陷收敛幕。下白垩统可划分为1个一级层序、3个二级层序、4个三级层序,每个二级层序对应着一个幕式的断陷构造活动,代表了一个断陷构造幕的沉积充填。

2) 受控盆主断裂的幕式断陷活动及同沉积断裂的差异断陷活动影响,塔南凹陷发育2种类型的构造调节带: 横向凸起调节带和走向斜坡调节带。构造调节带是水系入盆的通道,控制着盆地的主体物源方向、沉积体系类型与分布特征。

3) 塔南凹陷断陷高峰期发育4种类型坡折带,控制着不同沉积体系的分布特征。在陡坡断崖坡折带,主要发育扇三角洲沉积体系; 在陡坡断阶型坡折带,近岸的高台阶常发育水下扇或扇三角洲沉积体系,在离岸较远的低台阶常发育远岸湖底扇沉积体系; 在盆内坡折带,东部物源扇体难以越过箕状断陷到盆内坡折带下降盘沉积,来自北部中央低凸起的沉积物可沿断槽向SW方向输运砂体,形成近岸水下扇沉积; 在西部缓坡反向断阶坡折带,主要发育辫状河三角洲沉积体系。

4) 塔南凹陷共发育3种同沉积断裂平面组合样式: 梳状断裂系、叉状断裂系和平行断裂系。这些断裂的平面组合样式控制盆内砂体分散体系展布。

致谢 在文章的审阅及修改过程中,审稿专家提出了建设性的修改意见,在此表示衷心的感谢!

参考文献(References)

- 陈刚,戴俊生,叶兴树,荣磊,梁颖. 2007. 生长指数与断层落差的对比研究. 西南石油大学学报, 29(3): 20-23. [Chen G,Dai J S, Ye X S,Rong L,Liang Y. 2007. A comparison of fault growth index with fault throw. Journal of Southwest Petroleum University, 29(3): 20-23]
- 陈玮常,漆家福,姜洪福,刘学,孙加华,辛世伟. 2013. 蒙古国东方省海塔盆地塔南凹陷断裂特征及其油气意义. 古地理学报, 15(4): 539-550. [Chen W C,Qi J F,Jiang H F,liu X,Sun J H, Xin S W. 2013. Characteristics of fault structure in Tanan sag,Haita Basin in Dornod Aymag, Mongolia and its hydrocarbon significance. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition) , 15(4): 539-550]
- 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. 石油与天然气地质, 22(4): 293-296. [Deng H W,Wang H L,Wang D Z. 2001. Control of paleomorphology to stratigraphic sequence in continental rift basins: take Lower Tertiary of western slope in Bohai Sag as an example. Oil & Gas Geology, 22(4): 293-296]

- 邓宏文, 郭建宇, 王瑞菊, 谢小军. 2008. 陆相断陷盆地的构造层序地层分析. 地学前缘, 15(2): 1-7. [Deng H W, Guo J Y, Wang R J, Xie X J. 2008. Tectono-sequence stratigraphic analysis in continental faulted basins. *Earth Science Frontiers*, 15(2): 1-7]
- 冯有良. 2006. 断陷湖盆沟谷及构造坡折对砂体的控制作用. 石油学报, 27(1): 13-16. [Feng Y L. 2006. Control of valley and tectonic slope-break zone on sand bodies in rift-subsidence basin. *Acta Petrolei Sinica*, 27(1): 13-16]
- 冯有良, 徐秀生. 2006. 同沉积构造坡折带对岩性油气藏富集带的控制作用: 以渤海湾盆地古近系为例. 石油勘探与开发, 33(1): 22-31. [Feng Y L, Xu X S. 2006. Syndepositional structural slope-break zone controls on lithologic reservoirs: a case from Paleogene Bohai Bay Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 33(1): 22-31]
- 冯有良, 周海民, 任建业, 郑和荣, 苗顺德. 2010. 渤海湾盆地东部古近系层序地层及其对构造活动的响应. 中国科学: 地球科学, 40(10): 1356-1376. [Feng Y L, Zhou H M, Ren J Y, Zheng H R, Miao S D. 2010. Paleogene sequence stratigraphy in the east of the Bohai Bay Basin and its response to structural movement. *Science China: Earth Science*, 40(10): 1356-1376]
- 侯宇光, 何生, 王冰洁, 倪军娥, 廖远涛. 2010. 板桥凹陷构造坡折带对层序和沉积体系的控制. 石油学报, 31(5): 754-761. [Hou Y G, He S, Wang B J, Ni J E, Liao Y T. 2010. Constraints by tectonic slope-break zones on sequences and depositional systems in the Banqiao Sag. *Acta Petrolei Sinica*, 31(5): 754-761]
- 付晓飞, 孙兵, 王海学, 孟令东. 2015. 断层分段生长定量表征及在油气成藏研究中的应用. 中国矿业大学学报, 44(2): 271-281. [Fu X F, Sun B, Wang H X, Meng L D. 2015. Fault segmentation growth quantitative characterization and its application on sag hydrocarbon accumulation research. *Journal of China University of Mining & Technology*, 44(2): 271-281]
- 胡贺伟, 李慧勇, 于海波, 肖述光, 徐伟. 2020. 渤海湾盆地埕北低凸起及周围古近系“源-汇”系统控砂原理定量分析. 古地理学报, 22(2): 266-277. [Hu H W, Li H Y, Yu H B, Xiao S G, Xu W. 2020. Quantitative analysis of source-to-sink system controls on sand-body distribution of the Paleogene in Chengbei low uplift and surrounding areas, Bohai Bay Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 22(2): 266-277]
- 纪友亮, 曹瑞成, 蒙启安, 张革, 渠永红. 2009a. 塔木察格盆地塔南凹陷下白垩统层序结构特征及控制因素分析. 地质学报, 83(6): 827-835. [Ji Y L, Cao R C, Meng Q A, Zhang G, Qu Y H. 2009a. Analysis of sequence structure and its controlling factors in Lower Cretaceous in Tanan Sag, Tamuchage Basin. *Acta Geologica Sinica*, 83(6): 827-835]
- 纪友亮, 蒙启安, 曹瑞成, 张革. 2009b. 贝南凹陷古地形对层序结构及沉积充填的控制. 同济大学学报: 自然科学版, 37(11): 1541-1545. [Ji Y L, Meng Q A, Cao R C, Zhang G. 2009b. Control of paleomorphology to sequence and sedimentary system in south Beir Sag. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 37(11): 1541-1545]
- 林畅松. 2006. 沉积盆地的构造地层分析: 以中国构造活动盆地研究为例. 现代地质, 20(2): 185-194. [Lin C S. 2006. Tectono-stratigraphic analysis of sedimentary basins: a case study on the inland tectonically active basins in China. *Geoscience*, 20(2): 185-194]
- 林畅松, 郑和荣, 任建业, 刘景彦, 邱以刚. 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. 中国科学: D辑, 33(11): 1025-1036. [Lin C S, Zheng H R, Ren J Y, Liu J Y, Qiu Y G. 2003. The control of syndepositional faulting on the Eogene sedimentary basin fills of Dongying and Zhanhua sags, Bohaiwan Rift Basin. *Science China (D)*, 33(11): 1025-1036]
- 林畅松, 夏庆龙, 施和生, 周心怀. 2015. 地貌演化、源-汇过程与盆地分析. 地学前缘, 22(1): 9-20. [Lin C S, Xia Q L, Shi H S, Zhou X H. 2015. Geomorphological evolution, source to sink system and basin analysis. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 9-20]
- 刘哲, 吕延防, 孙永河, 李彦彬, 张东伟. 2012. 同生断裂分段生长特征及其石油地质意义: 以辽河西部凹陷鸳鸯沟断裂为例. 中国矿业大学学报, 41(5): 793-799. [Liu Z, Lu Y F, Sun Y H, Li Y B, Zhang D W. 2012. Characteristics and significance of syngenetic fault segmentation in hydrocarbon accumulation: an example of Yuanyanggou fault in western sag, Liaohe Sag. *Journal of China University of Mining & Technology*, 41(5): 793-799]
- 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. 石油学报, 30(6): 843-848. [Meng Q A, Ji Y L. 2009. Controlling of paleo geomorphology to distribution of sedimentary system in the Cretaceous of Tanan Sag. *Acta Petrolei Sinica*, 30(6): 843-848]
- 庞雄, 彭大钧, 陈长民, 朱明, 何敏, 申俊, 柳保军. 2007. 三级“源-渠-汇”耦合研究珠江深水扇系统. 地质学报, 81(6): 857-864. [Pang X, Peng D J, Chen C M, Zhu M, He M, Shen J, Liu B J. 2007. Three hierarchies “source-conduit-sink” coupling analysis of the Pearl River deep-water fan system. *Acta Geologica Sinica*, 81(6): 857-864]
- 单敬福, 王峰, 孙海雷, 孙继刚, 蒙启安. 2010. 蒙古国境内贝尔湖凹陷早白垩世沉积充填演化与同沉积断裂的响应. 吉林大学学报(地球科学版), 40(3): 509-518. [Shan J F, Wang F, Sun H L, Sun J G, Meng Q A. 2010. The responding to syn-sedimentary fault system for sediment filling evolvement in the Early Cretaceous, Bel-Lake Sag of Mongolia. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 40(3): 509-518]
- 隋立伟. 2020. 塔南凹陷古地貌特征对沉积体系和油气分布的影响. 岩性油气藏, 32(4): 48-58. [Sui L W. 2020. Influence of paleogeomorphic characteristics on sedimentary system and hydrocarbon distribution in Tanan Sag. *Lithologic Reservoirs*, 32(4): 48-58]
- 王家豪, 王华, 肖敦清, 韦阿娟, 廖远涛. 2008. 伸展构造体系中传递带的控砂作用: 储层预测的新思路. 石油与天然气地质, 29(1): 19-25. [Wang J H, Wang H, Xiao D Q, Wei A J, Liao Y T. 2008. Control of transfer zone on sandbodies in the extensional structure system: a new approach to reservoir prediction. *Oil & Gas Geology*, 29(1): 19-25]
- 王英民, 金武弟, 刘书会, 邱桂强, 李群, 刘豪, 辛仁臣, 杨飞. 2003. 断陷湖盆多级坡折带的成因类型、展布及其勘探意义. 石油与天然气地质, 24(3): 199-214. [Wang Y M, Jin W D, Liu S H, Qiu G Q, Li Q, Liu H, Xin R C, Yang F. 2003. Genetic types, distribution and exploration significance of multistage slope breaks in rift la-

- eustatic basin. *Oil & Gas Geology*, 24(3): 199–214.]
- 王纪祥,陈发景,李趁义. 2003. 山东惠民凹陷伸展构造及调节带特征. *现代地质*, 17(2): 203–209. [Wang J X, Chen F J, Li C Y. 2003. Character of the extensional structures and accommodation zones in the Huimin Sag, Shandong Province. *Geoscience*, 7(2): 203–209.]
- 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. [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.]
- 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. [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.]
- 徐长贵,杜晓峰,徐伟,赵梦. 2017. 沉积盆地“源–汇”系统研究新进展. *石油与天然气地质*, 38(1): 1–11. [Xu C G, Du X F, Xu W, Zhao M. 2017. New advances of the “Source-to-Sink” system research in sedimentary basin. *Oil & Gas Geology*, 38(1): 1–11.]
- 严德天,王华,王清晨. 2008. 中国东部第三系典型断陷盆地幕式构造旋回及层序地层特征. *石油学报*, 29(2): 185–190. [Yan D T, Wang H, Wang Q C. 2008. Episodic tectonic cycles and sequence pattern of the Tertiary rifted basins of East China. *Acta Petrolei Sinica*, 29(2): 185–190.]
- 杨永华,纪友亮,曹瑞成,蒙启安. 2009. 蒙古塔木察格盆地塔南凹陷下白垩统层序结构类型控制因素与层序发育模式. *现代地质*, 23(4): 655–666. [Yang Y H, Ji Y L, Cao R C, Meng Q A. 2009. Types of sequences, controlling factors and sequence models for Lower Cretaceous of Tanan Sag in Tamtsag Basin, Mongolia. *Geoscience*, 23(4): 655–666.]
- 曾智伟,朱红涛,杨香华,夏晨晨,陈莹,韩银学. 2017. 珠江口盆地白云凹陷恩平组物源转换及沉积充填演化. *地球科学*, 42(11): 1936–1954. [Zeng Z W, Zhu H T, Yang X H, Xia C C, Chen Y, Han Y X. 2017. Provenance transformation and sedimentary evolution of Enping Formation Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin. *Earth Science*, 42(11): 1936–1954.]
- 张宗檩. 2004. 济阳坳陷低级序断层组合样式及成因机制. *石油大学报(自然科学版)*, 28(3): 1–3, 12. [Zhang Z L. 2004. Mechanism and patterns of the lower-order faults in Jiyang Sag. *Journal of the University of Petroleum(Natural Science Edition)*, 28(3): 1–3, 12.]
- 朱红涛,徐长贵,朱筱敏,曾洪流,姜在兴,刘可禹. 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. [Zhu H T, Xu C G, Zhu X M, Zeng H L, Jiang Z X, Liu K Y. 2017. Advances of the source-to-sink units and coupling model research in continental basin. *Earth Science*, 42(11): 1851–1870.]
- Allen P A. 2008. From landscapes into geological history. *Nature*, 451(7176): 274–276.
- Allen P A. 2017. *Sediment Routing Systems: The Fate of Sediment from Source to Sink*. Cambridge University Press.
- Du X F, Xu C G, Pang X J, Wang Q B, Wang Q M, Zhao M. 2017. Quantitative reconstruction of source-to-sink systems of the first and second members of the Shahejie Formation of the eastern Shijituo uplift, Bohai Bay Basin, China. *Interpretation*, 5(4): 85–102.
- Gawthorpe R L. 2000. Tectono-sedimentary evolution of active extensional basins. *Basin Research*, 12: 195–218.
- Gawthorpe R L, Hurst J M. 1993. Transfer zones in extensional basins: their structural style and influence on drainage development and stratigraphy. *Journal of the Geological Society*, 150: 1137–1152.
- Hou Y, He S, Ni J, Wang B. 2012. Tectono-sequence stratigraphic analysis on Paleogene Shahejie Formation in the Banqiao sub-basin, Eastern China. *Marine and Petroleum Geology*, 36(1): 100–117.
- Liu Z, Zhao Y, Colin C, Stattegger K, Wiesner M G, Huh C, Zhang Y, Li X, Sompongchayakul P, You C, Huang C, Liu J T, Sirisan F P, Le K P, Sathiamurthy E, Hantoro W S, Liu J, Tuo S, Zhao S, Zhou S, He Z, Wang Y, Bunsomboonsakul S, Li Y. 2016. Source-to-sink transport processes of fluvial sediments in the South China Sea. *Earth-Science Reviews*, 153: 238–273.
- Morley C K, Nelson R A, Patton T L, Mun S G. 1990. Transfer zone in the east African rift system and their relevance to hydrocarbon exploration in rifts. *AAPG Bulletin*, 74: 1234–1253.
- Nelson R A, Patton T L, Morley C K. 1992. Rift-segment interaction and its relation to hydrocarbon exploration in continental rift systems. *AAPG Bulletin*, 76: 1153–1169.
- Peacock D C P. 1994. Geometry and development of relay ramps in normal fault systems. *AAPG Bulletin*, 78: 147–165.
- Xu C G, Du X F, Zhu H T, Jia D H, Xu W, Lu H. 2017. Source-to-sink system and its sedimentary records in the continental rift basins: an example from the Paleogene in the Bohai Sea area, China. *Interpretation*, 5(4): 35–51.
- Zhou Y, Ji Y L, Pigott J D, Meng Q A, Wan L. 2014. Tectono-stratigraphy of Lower Cretaceous Tanan sub-basin, Tamtsag Basin, Mongolia: sequence architecture, depositional systems and controls on sediment infill. *Marine and Petroleum Geology*, 49: 176–202.

(责任编辑 张西娟; 英文审校 陈吉涛)