

多断湖盆构造控砂与沉积充填过程 ——以渤海湾盆地济阳坳陷沾化凹陷东部始新统为例

董道涛^{1,2}, 邱隆伟^{1,2}, 马永达³, 杨勇强^{1,2}, 邹毓⁴, 代莉³, 滕宝刚³, 张在鹏³

[1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 2. 海洋国家实验室 海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛 266071; 3. 中国石化胜利油田分公司 桩西采油厂, 山东 东营 257000; 4. 长江大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430100]

摘要:构造控砂一直为断陷盆地分析调查工作的重点和难点。综合井-震、岩心和镜下鉴定资料,以渤海湾盆地济阳坳陷沾化凹陷东部始新统沙四上亚段—沙三段(SQ1—SQ3)为例,探讨构造主导下的控砂机制和沉积充填过程,取得认识如下:1) I级构造转换带奠定盆地宏观构造—沉积格局,多阶构造坡折叠合湖平面升降控制三级层序内部体系域之间的砂体加积与沉积体系旋回性变化,II级构造坡折和次级断层控制体系域内局部输砂系统和砂体展布,陡坡带往往不利于碎屑物质注入湖盆;2) SQ1—SQ2存在孤北和孤南两个独立输砂系统,SQ3两个输砂系统合二为一,SQ1主要发育进退积不明显的、小而多的扇三角洲,SQ2开始发育三角洲、(半)深湖和滑塌砂体,SQ3主要发育大型三角洲、(半)深湖区广泛发育滑塌砂体;3)构造活动通过构造转换带、坡折带、次级断层和陡坡带等主导多断湖盆控砂机制和沉积充填过程,气候仅可强化或弱化前者的控制作用,但不会改变盆地充填过程。

关键词:构造转换带;构造坡折带;控砂机制;沉积充填;断陷盆地;沙河街组;济阳坳陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE121

文献标识码:A

Control of tectonics on sedimentation of sandstone and process of sediment filling in multi-fault lacustrine basins: A case study on the Eocene in eastern Zhanhua Sag, Jiyang Depression in Bohai Bay Basin

Dong Daotao^{1,2}, Qiu Longwei^{1,2}, MA Yongda³, Yang Yongqiang^{1,2}, Zou Yu⁴, Dai Li³, Teng Baogang³, Zhang Zaipeng³

[1. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China; 2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao, Shandong 266071, China; 3. Zhuangxi Oil Production Plant of Shengli Oilfield Company Ltd., SINOPEC, Dongying, Shandong 257000, China; 4. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China]

Abstract: Extensive research has been carried out on the control of tectonics on sedimentation of sandstone in rift basins. The tectonic-dominated mechanism controlling sandstone development and the process of sediment filling for the upper 4th-3rd member of the Eocene Shahejie Formation (the Es⁴ and the Es³) in eastern Zhanhua Sag, Jiyang Depression in Bohai Bay Basin, were investigated through well-seismic correlation, core description and thin section observation. The results show that (1) level-I tectonic transition zones lay down the macroscopic tectonic-sedimentary framework, and multi-stage tectonic slope breaks and eustatic lake level control the sand body accretion of different system tracts in the third-order sequences and the cyclicity of sedimentary systems; while level-II tectonic slope break zones and secondary faults control the local sand transport systems and sand body distribution within the system tracts, and steep slope zones are often unfavorable for input of clastics into lake basins; (2) SQ1 and SQ2 have two isolated sand transport systems (Gubei and Gunan), while SQ3 has a single sand transport system with the Gubei and Gunan being combined into one, so small but numerous fan deltas without significant progradation or retrogradation are mainly developed in SQ1, while deltas, (semi-) deep lake and gravity flow sand bodies occur in SQ2, and large-scale deltas are dominant in SQ3, with gravity flow sand bodies being common in the (semi-) deep lake area; (3) Tectonic activities control, via tectonic transition zones, slope breaks, secondary faults

收稿日期:2017-03-21; 修订日期:2018-06-19。

第一作者简介:董道涛(1989—),男,博士研究生,沉积学及储层地质学。E-mail: dongdaotao@qq.com。

通讯作者简介:邱隆伟(1967—),男,教授,沉积学及储层地质学。E-mail: qiuwlsd@163.com。

基金项目:“十二五”国家油气重大专项(2011ZX05009-002);山东省自然科学基金联合基金项目(ZR2016DL05)。

and steep slopes, sandstone development and sediment filling process in multi-fault lacustrine basins, whereas paleoclimate can only function to strengthen or weaken the controlling effect of tectonic activities, but will not change the sediment filling process in the basin.

Key words: tectonic transition zone, tectonic slope break zone, mechanism controlling sandstone development, sediment filling, fault basin, Shahejie Formation, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

断陷盆地演化中构造和沉积耦合关系是近年来国内外学者们研究工作的重点^[1]。王华^[2]、蒋恕^[3]等从宏观的角度将华东典型断陷盆地构造地层格架分为犁式和陡倾式两种基本层序地层格架,以及断坡带、弯折带和斜坡带3种典型层序样式,为隐蔽油气藏勘探^[4-5]提供了一套新的思维框架。其他国内外学者们则提出如古沟谷^[6]、断槽、断坡带^[7]、断阶带^[8-9]、构造调节带^[10-11]、构造坡折带(同构造调节带)^[12-15]、构造转换带^[16-19]等一系列概念,从现代沉积^[20]到井下^[18-19,21-22],从断陷湖盆^[19,23]到被动大陆边缘^[24],来描述碎屑物质进入汇水盆地后的分散过程及砂体堆积与构造活动的联系,为中国东部断陷盆地隐蔽油气藏勘探提供了一套全新的思维框架。

沾化凹陷^[12-13,25-27]位于济阳拗陷东部(图1a),其演化过程受多条、多期分段活动的断层控制(图1b—d),构造与沉积的耦合关系既紧密又复杂,诸如物源体系、沙(沙河街组)三段重力流砂体物质来源、东次洼南坡和长堤东地区砂体展布及沉积充填格局等问题一直悬而未决。前期研究工作表明,沾化凹陷古近系始新统发育 T_7 (沙四上亚段底)和 T_2 (沙一段下部)2个区域不整合界面(图1c,e),其间沉积沙四上亚段—沙三段,为时间跨度约8 Ma的完整二级层序(SSQ);进一步可细分为3个三级层序(SQ1, SQ2和SQ3),每个三级层序由湖侵域(TST)和高位域(HST)组成^[28-31](图1c,e),发育三角洲相、扇三角洲相、湖相及滑塌砂体(图2)。

本文选取沾化凹陷东部始新统为研究对象,基于覆盖全区的井—震资料和分析测试资料(330 km²高精度三维地震数据,96口探井的钻、测井数据,13口关键井876 m岩心,452份铸体薄片岩屑组份鉴定报告),从构造演化入手,在明确构造转换带、构造坡折、次级断层和陡坡带的控砂机制下,通过古地貌恢复和物源分析,来探讨构造主导下多断型湖盆的沉积充填过程。

1 构造主导下的控砂机制

1.1 沾化凹陷东部古近纪构造发育史

晚白垩世燕山运动末期,济阳拗陷所在华北地块

区域表现为明显挤压和抬升剥蚀,形成中—新生界一级角度不整合界面 T_1 。进入古近纪,济阳拗陷区域在喜马拉雅运动早期经历负反转,整体拉张并进入初始裂陷期,对应地在沾化凹陷东部发育NW向负反转同生五号桩正断层和活动速率稍慢的NE向同生埕东正断层(表1),使得地形西高东低,沉积西薄东厚的孔店组—沙四下亚段(T_1 与 T_7 间)红层。古新世—始新世之交(沙四下亚段—沙四上亚段之交),沾化凹陷东部经历短暂弱正反转,形成长堤、孤东等多条近SN向雁列式压扭性断层,这种弱挤压变形与抬升形成沙四下亚段与沙四上亚段之间的区域不整合界面 T_7 。早始新世开始(沙四上亚段),沾化凹陷再次经历强负反转,济阳拗陷进入裂陷伸展期,五号桩、埕东、长堤和孤东断层转化为剧烈活动的正断层,同时一批新生NE向及NEE向正断层(桩南、孤北、孤南断层)开始剧烈活动,它们一道控制该时期沾化凹陷东部“两洼四隆,多面断陷”的复杂沉积构造格局。始新世末(沙一段),沾化凹陷地区各条断层发生最后一幕剧烈活动,至古近纪末(东营组)除埕东断层继续剧烈活动外,其他断层逐渐“偃旗息鼓”,为盆地演化的裂陷收敛期^[14-15,25,32-34](图1b,c,e;表1)。在沾化凹陷东部古近纪裂陷伸展期,构造对沉积格局的控制作用最为复杂和典型,本文分构造转换带、构造坡折带、次级断阶断槽和陡坡带4个类别阐述之。

1.2 构造转换带的控砂作用

构造转换带发育于相邻的、分段活动的断层之间,它伴随断层活动形成,为保持区域地层缩短或伸展守恒而产生的一类构造调节区^[16-18],地貌上往往表现为连接物源区和洼陷区的斜坡或断槽。沾化凹陷东部发育多个规模不等的同向叠覆型构造转换带(图3a),据构成转换带的断层级别分Ⅰ级和Ⅱ级两类。

Ⅰ级构造转换带系主干断层之间应力变换形成,往往决定二级构造单元宏观沉积构造格局,如洼陷和(低)凸起的空间配置,实例如长堤—孤东构造转换带(图3b)和长堤—孤北构造转换带(图3c)。

长堤和孤东这两条孪生断层(图1d)近SN走向,一致西倾,同步活动,得以在各自下降盘区域形成孤北

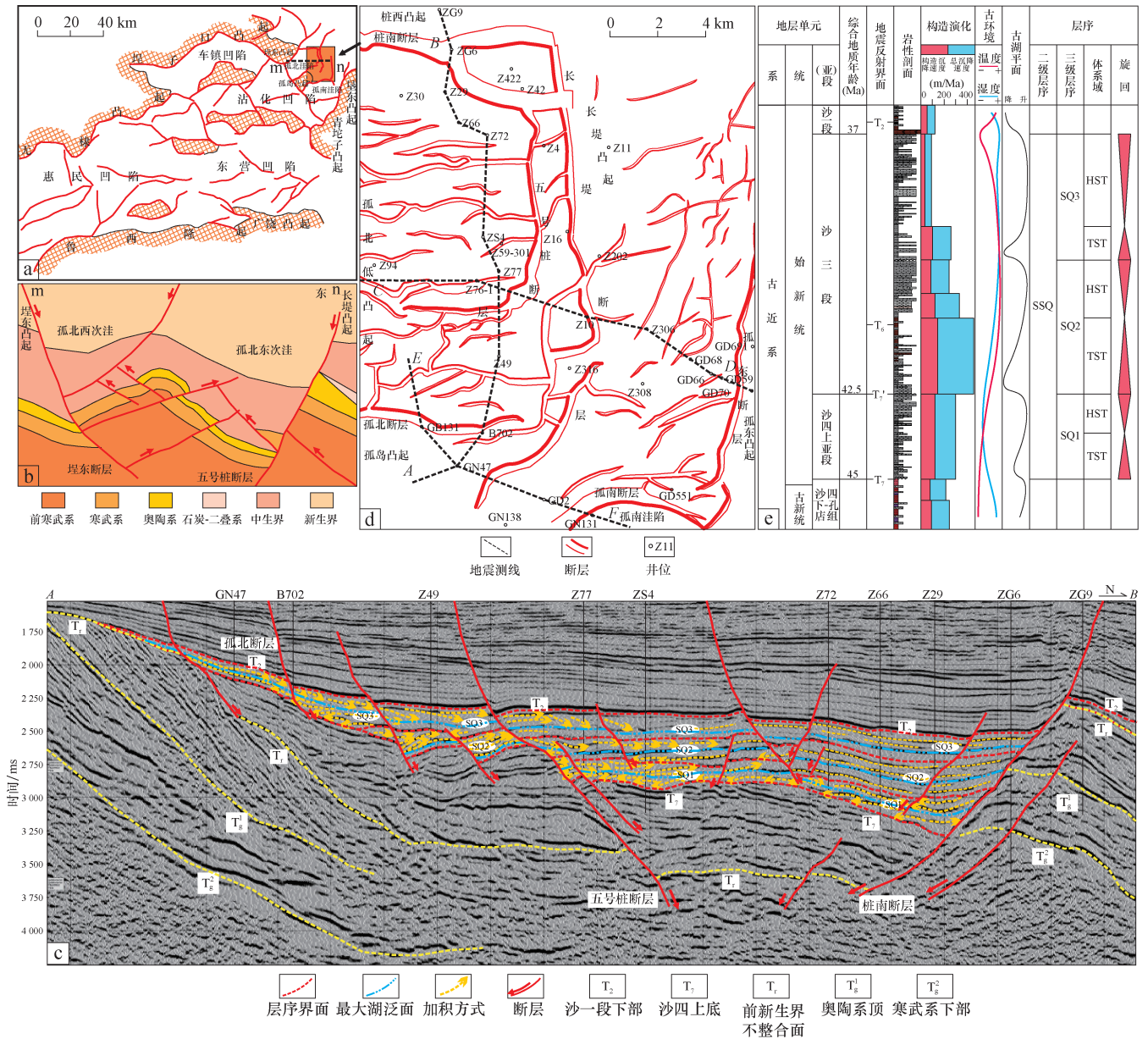


图1 沾化凹陷东部地质概况
Fig. 1 Geology of the eastern Zhanhua Sag

a. 济阳拗陷地质概况; b. 沾化凹陷东部 EW 走向地层剖面^[32]; c. 沾化凹陷东部 SN 向地震-地层剖面; d. 沾化凹陷东部始新统断层分布; e. 沾化凹陷东部始新统层序地层格架^[34]

洼陷和孤南洼陷, 对应上升盘隆升为区域性 NE 倾单面山^[28]的长堤凸起和孤东凸起。近 NEE 向桩南、孤南断层活动^[25,33,35]强化了这种构造单元的配置, 两个洼陷间为长堤断层南支和孤南断层的共同上升盘隔开; 而长堤和孤东断层间的叠覆和相对较远的空间距离促进长堤转换斜坡形成^[36] (图 1d, 图 3a, 图 3b, 图 3f)。斜坡北高南低, 将长堤凸起、孤东凸起和孤南洼陷连接起来, 并将源自长堤凸起南部的大量碎屑物质和源自孤东凸起的碎屑物质导入孤南洼陷^[37]。

孤岛凸起是由孤北、孤南断层夹持的地垒^[28], 长

堤断层南支楔入其中, 与孤北断层构成长堤-孤北构造转换带 (图 1d, 图 3a, 图 3c, 图 3g), 因两条断层斜交, 故在地貌上表现为“喇叭口”型断槽, 其喇叭口深入孤岛凸起, 为东次洼汇聚了大量源自孤岛凸起的碎屑物质。正因为此, 孤南洼陷北带源自孤岛凸起的碎屑物质体量非常有限^[37]。

Ⅱ级构造转换带多因断层形成过程中的分段性^[38-39]产生, 一般控制局部输砂通道和砂体展布 (图 3a)。如孤北断层内部 (图 3a 中 m 处) 和五号桩断层内部 (图 3a 中 n 处) 的构造转换带, 分别在盆地演

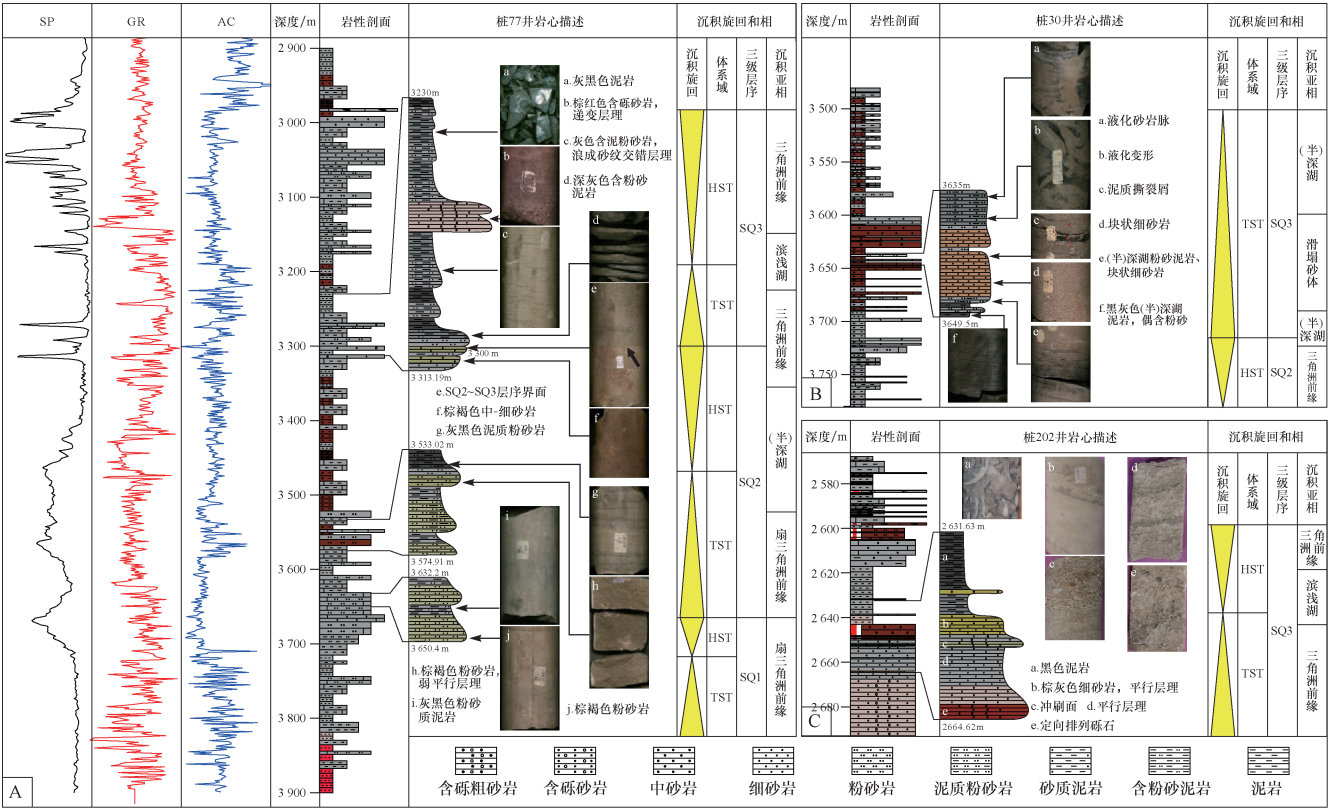


图 2 沾化凹陷孤北东次洼始新统岩心沉积特征

Fig. 2 Sedimentary characteristics of cores from the Eocene in the eastern sub-sag of Gubei, Zhanhua Sag

A. 桩 77 井; B. 桩 30 井; C. 桩 202 井

表 1 沾化凹陷孤北东次洼始新世主要断层活动速率 (m/Ma)
Table 1 Activity rate of main faults during the Eocene in the eastern sub-sag of Gubei, Zhanhua Sag (m/Ma)

沉积时期	埕东	五号桩	长堤	孤东	桩南	孤北	孤南
东营组	61.1		11.8	29.6	15.1	10.1	18.4
沙一段	97.4		3.2	12.7	24.6	37.1	36.3
沙三段中-上亚段	32.6	7.4	20.0	16.0	20.1	16.8	13.4
沙三下亚段	63.0	23.8	46.6	30.6	28.2	31.8	22.7
沙四上亚段	49.8	16.2	29.1	19.3	27.1	25.3	9.8
孔店组-沙四下亚段	38.4	55.9	15.6	17.8	26.7		8.7

化某一阶段作为物源区碎屑物质输入通道及局部砂体展布。

1.3 二阶构造坡折的控砂作用

构造坡折指由同沉积断层长期活动引起的沉积斜坡明显突变^[12-13]。进入沙四上亚段沉积时期,由于区域构造应力场方向改变,东次洼及邻区构造格局由近 SN 向断层主导转由 NEE 向断层主导^[25,33,35],早期的五号桩和长堤断层南端派生出近 NE 走向次级断层,它们在孤北洼陷南部与 NEE 向孤北断层一道,构成规模巨大的二阶构造坡折(图 1c,图 1d,图 3a,图 3f),地

貌上表现为二阶阶地(图 4a),北部最深处为孤北洼陷,往南经五号桩断层上升到阶地地区,再经孤北-长堤断层过渡到孤岛凸起。

构造坡折对砂体展布的控制作用是结合湖平面的升降变化实现的。断陷湖盆演化过程中的幕式构造活动会导致湖平面频繁的升降,而二阶构造坡折的存在造成滨线大规模“幕式”迁移,进而控制入湖砂体的加积类型和空间展布。对于一个三级层序(沉积旋回)而言,在湖侵体系域早期,湖平面的上升主要导致湖水加深,滨线横向迁移缓慢,在坡折带深水侧形成一系列弱退积-加积砂体;至湖侵域末,湖水漫过构造坡折,滨线迅速外扩形成大面积的浅水区,这些浅水区在湖侵域发育退积十分明显的砂体;在进入高位域之后,大量入湖碎屑物质堆积于此,形成规模巨大的进积砂体。如果物源充足,多余的碎屑物质还会越过构造坡折,向深水区搬运堆积,形成重力流砂体。

1.4 次级断层的控砂作用

研究区广泛发育的次级断层影响着盆内局部输砂系统及砂体的堆积和展布。考虑到断层走向与主流向

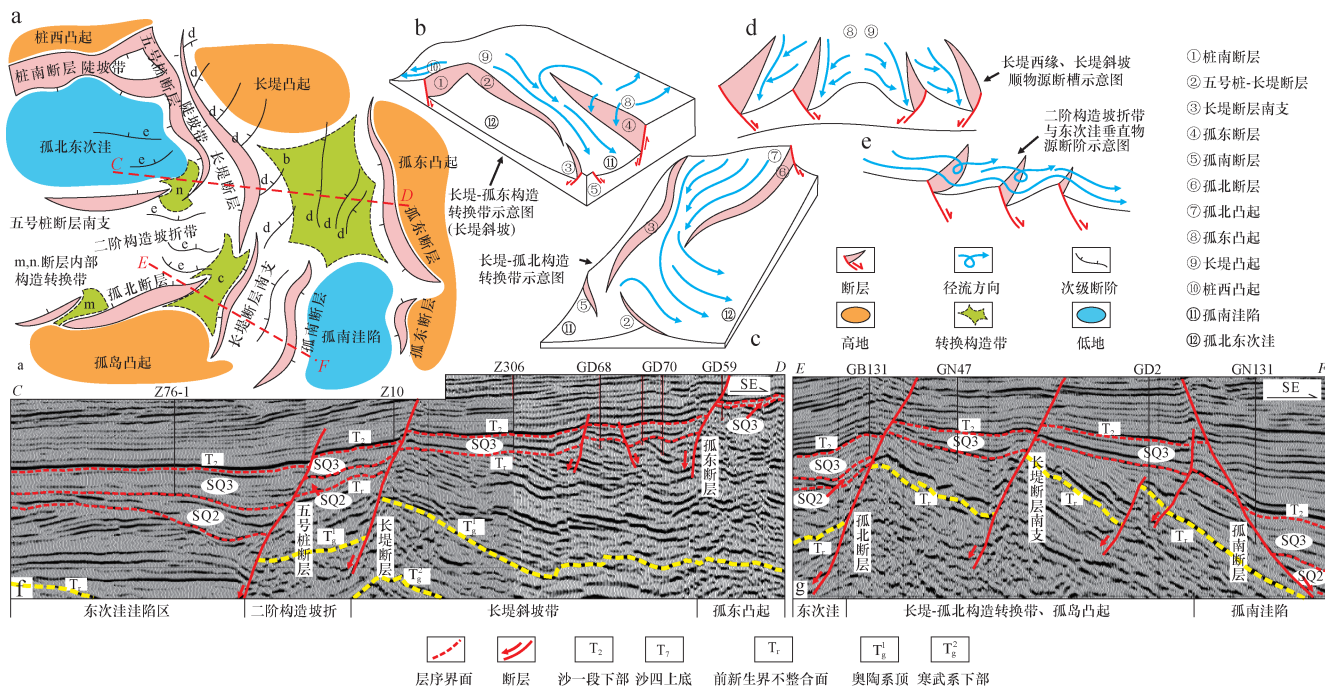


图3 沾化凹陷东部构造转换带、构造坡折、陡坡带和次级断阶形态及展布

Fig. 3 Shapes and distribution of tectonic transition zones, tectonic slope breaks, steep slopes and secondary fault terraces in the eastern Zhanhua Sag

a. 沾化凹陷东部构造形态分布; b-e. 几种构造形态控砂机制示意图; f, g. 横穿不同构造形态的地震-地层剖面

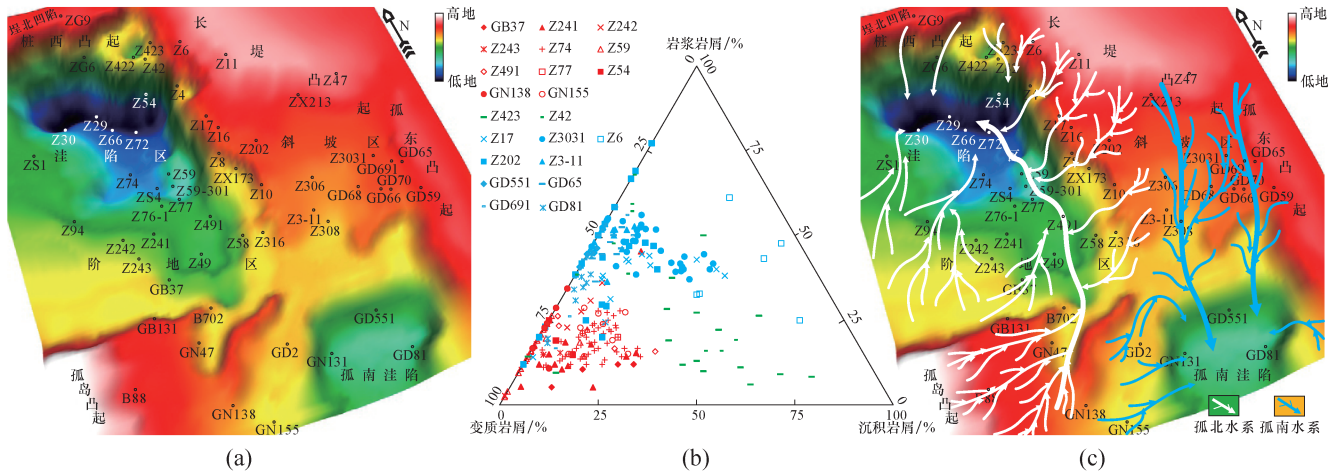


图4 沾化凹陷东部始新统古地貌(a)、岩屑组分特征(b)和输砂系统(c)

Fig. 4 Eocene paleogeomorphology(a), clastic composition characteristics(b), and sand transport systems(c) in the eastern Zhanhua Sag

的关系,分顺流断槽和垂直-斜交断阶两类来讨论研究区次级断层的控砂作用。

顺流断槽集中分布在长堤构造转换斜坡和长堤凸起西缘(图1c,图1d,图3a,图3d)。在长堤转换斜坡发育3条规模较大的断槽;在盆地充填早期(SQ1-SQ2),这些断槽作为输砂通道,大量碎屑物质经此注入孤南洼陷,断槽末端即是入湖碎屑堆积位置。长堤凸起西缘发育的6条断槽规模小,虽汇水面积局限,仍将少量碎屑导入孤北东次洼;伴随湖平面上升(SQ3-

TST),这些断槽逐渐没入水下,成为湖侵域退积砂体的有利堆积位置。

孤北洼陷内部广泛发育垂直-斜交断阶。在其南部阶地区发育多米诺式断阶,截住入湖碎屑物质,填平一个断阶洼地,再充填下一个断阶,直至阶地区被填满铺平,形成东次洼SQ2高位时期规模最大的三角洲(图2,图5b)。SQ1时期,在孤北洼陷深处发育多级“Y”字型近NEE向断阶,使深水区大部分重力流砂体顺断阶呈条形展布,南北方向彼此隔开。

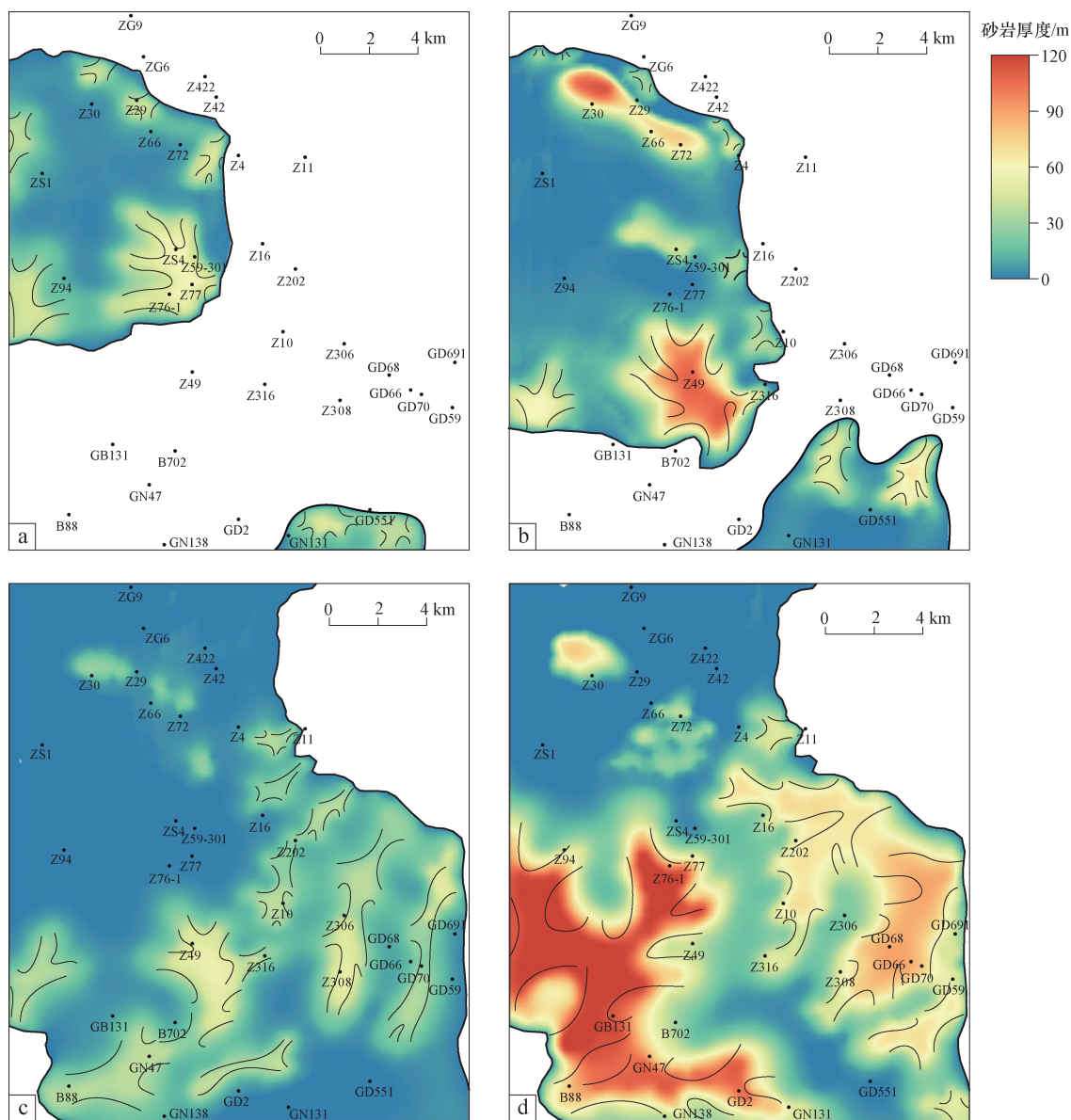


图5 沾化凹陷东部始新统典型三级层序体系域内部砂岩厚度分布特征

Fig. 5 Sandstone thickness distribution in typical third-order sequence system tracts of the Eocene in the eastern Zhanhua Sag

a. SQ1-HST; b. SQ2-HST; c. SQ3-TST; d. SQ3-HST

1.5 陡坡带的控砂作用

在沾化凹陷东部盆缘还发育多处陡坡带。除孤岛凸起外,桩西凸起、长堤凸起和孤东凸起均为半地堑性质断块山,缓坡一侧向外倾斜,靠近沾化凹陷一侧高峻陡直,源自凸起的碎屑物质向外沿缓坡输出十分容易(图1c,图1d,图3a,图3b),向里沿陡坡带输入沾化凹陷碎屑十分有限;而陡坡带根部地震反射特征表现为代表稳定深湖沉积的强振幅连续平行状,钻井揭示证实为大套深湖泥岩夹薄层砂的贫砂地层(图1c)。可见,在沾化凹陷东部,陡坡带并不是一种有利于碎屑物质注入的构造类型。

2 古地貌及物源体系恢复

2.1 沙四上亚段沉积前古地貌重建

沾化凹陷东部始新统整体以沉降为主,只在南部二阶坡折带存在三级层序间和对下伏孔店组—沙四下亚段地层的局部剥蚀,断裂活动继承性强,古近纪后的整体热沉降使构造变形简单。因此,本文基于沙四上亚段—沙三段整体地层厚度,结合声波时差和相邻层厚度比值恢复剥蚀厚度^[40],以三角洲前积层高度代替古水深^[41],恢复压实^[42]后得到东次洼始新统沉积前古地貌(图4a)。自沉积中心向物源区可分为洼陷区

(孤北东次洼、孤南洼陷)、孤北洼陷南部阶地区、斜坡区(长堤斜坡、环孤岛凸起斜坡)和凸起区(孤岛、孤东、长堤和桩西凸起)4个单元。可见,沙四上亚段—沙三段沉积时期,沾化凹陷东部地貌格局完全受构造活动主导。

2.2 沾化凹陷东部物源体系恢复

在沾化凹陷东部,孤岛凸起剥蚀古近系依次出露前古生界变质岩基底、古生界及少量富火山岩的中—下侏罗统和下白垩统,长堤、孤东凸起主要出露富火山岩的中—下侏罗统和下白垩统^[35],北部桩南断层附近出露下古生界和中生界(图1c)。可以判断,源自孤岛凸起的碎屑物质形成的岩石,其变质岩屑含量较高;源自长堤和孤东凸起的碎屑物质形成的岩石,其岩浆岩屑含量较高;而源自桩西凸起的碎屑物质形成的岩石,其沉积岩屑(碳酸盐岩)含量较高。由此,可依据研究区丰富的铸体薄片鉴定报告中岩屑组分的分布来判断东次洼及邻区的砂体物质来源,以及各物源在供源规模和波及范围的差异。

统计发现,东次洼内部各井和孤南洼陷西北缘各井(GN138井、GN155井),即图4b左下角红色点群,其碎屑岩表现为高变质岩屑特征;而位于长堤凸起西缘、长堤斜坡和孤南洼陷腹地各井,即图4b中上部蓝色点群,表现为高岩浆岩屑特征;东次洼北部Z423和Z42井除表现为高沉积岩屑特征外,部分点与蓝色点群重合。

可见,孤北东次洼碎屑物质最主要的来源是南部孤岛凸起,源自孤岛凸起的碎屑物质由南往北长驱直入,深入孤北东次洼深湖区;长堤凸起西缘和桩西凸起有少量碎屑注入东次洼,但波及范围十分局限。孤南洼陷碎屑物质主要由长堤和孤东凸起供给,与此同时西北缘有少量孤岛碎屑物质注入(图4c)。

综上所述,结合SQ1—SQ3典型体系域砂厚展布特征(图5)认为,在SQ1—SQ2沉积时期,桩西凸起紧邻孤北东次洼,但因本身单面山的特性,汇水面积局限,不能成为东次洼碎屑物质主要来源。与前者类似,长堤凸起以其单面山的性质,但因为长堤构造转换斜坡的存在,仍有相当体量的碎屑物质汇入孤南洼陷,孤东凸起亦然。得益于长堤—孤岛断层构造转换带对碎屑物质的汇聚作用,南部距离东次洼较远的孤岛凸起反而成为东次洼最主要的物源区。就是说,存在孤北(桩西凸起小部—长堤凸起小部—孤岛凸起—孤北—长堤构造转换带—东次洼)和孤南(孤岛凸起小部—长堤—孤东凸起—长堤斜坡—孤南

洼陷)两个物源区有交集、但输砂通道和汇水区完全独立的输砂系统(图4c,图5a,图5b)。SQ3湖侵域沉积时期,由于湖平面进一步上涨,除孤岛、孤东和长堤凸起高部位外,如桩西凸起、长堤斜坡、东次洼和孤南洼陷间分水岭等逐渐没入水中,东次洼、孤南洼陷及其他相邻汇水区域开始连片,孤北与孤南输砂系统不再独立,合二为一(图5c)。随着湖侵域入湖碎屑在先期输砂通道中的堆积,到SQ3高位域沉积时期(图5d),东次洼、孤南洼陷及相邻凸起间不再存在深沟高垒,宽缓坦荡的斜坡取而代之,进入汇水区的碎屑物质展布不再受控于古地貌,主要受控于温湿气候下物源区的供源能力。

3 多断湖盆沉积充填过程

3.1 构造主导下沾化凹陷东部沉积充填过程

SQ1时期,气候由干热开始向温湿转化^[14-15,34],发源于南部凸起的小股径流携带源自孤岛凸起的碎屑,并剥蚀下伏孔店组—沙四下亚段地层,沿五号桩断层南支内部的几个小型构造转换带注入五号桩断层以西、以北的东次洼。同时,在孤北洼陷也有数支小规模水系入湖形成扇三角洲砂体,由于湖水浅,干热气候下湖平面会频繁波动,在洼陷区形成一套退积和进积均不明显的砂、泥互层(扇)三角洲—滨浅湖沉积。孤南洼陷沉积环境与孤北类似,主要发育小规模扇三角洲砂体,物源来自长堤和孤岛凸起,少量碎屑源自孤岛凸起南部(图6a,b)。

SQ2湖侵域时期,构造活动剧烈,洼陷区发育退积型扇三角洲砂体;湖侵域末期,湖水淹没南部阶地区,高位域入湖碎屑首先在断阶横布的南部阶地区堆积形成大规模三角洲砂体,直至阶地填满,富余碎屑注入(半)深湖区形成大量深水重力流砂体。由于凸起区的持续抬升,孤北洼陷北部桩西凸起和长堤凸起北部内幕地层向外倾斜幅度增加,减小了注入孤北洼陷水系汇水面积,使得北部扇三角洲砂体规模锐减,南部孤岛凸起的供源作用占据绝对主导地位。与此同时,孤南洼陷沉积范围同步扩大,主要发育数个小规模三角洲砂体,物源构成与SQ1一致(图6a,c)。

SQ3湖侵域时期,湖平面迅速扩张,东次洼、孤南洼陷水域开始连成一片,入湖碎屑沿斜坡区先期沟谷和断槽堆积,形成一套厚度不大、规模中等的退积型三角洲砂体。湖侵域末期,先期高差悬殊的古地貌基本被填平补齐(图6a,d)。高位域时期,构造稳定,气候

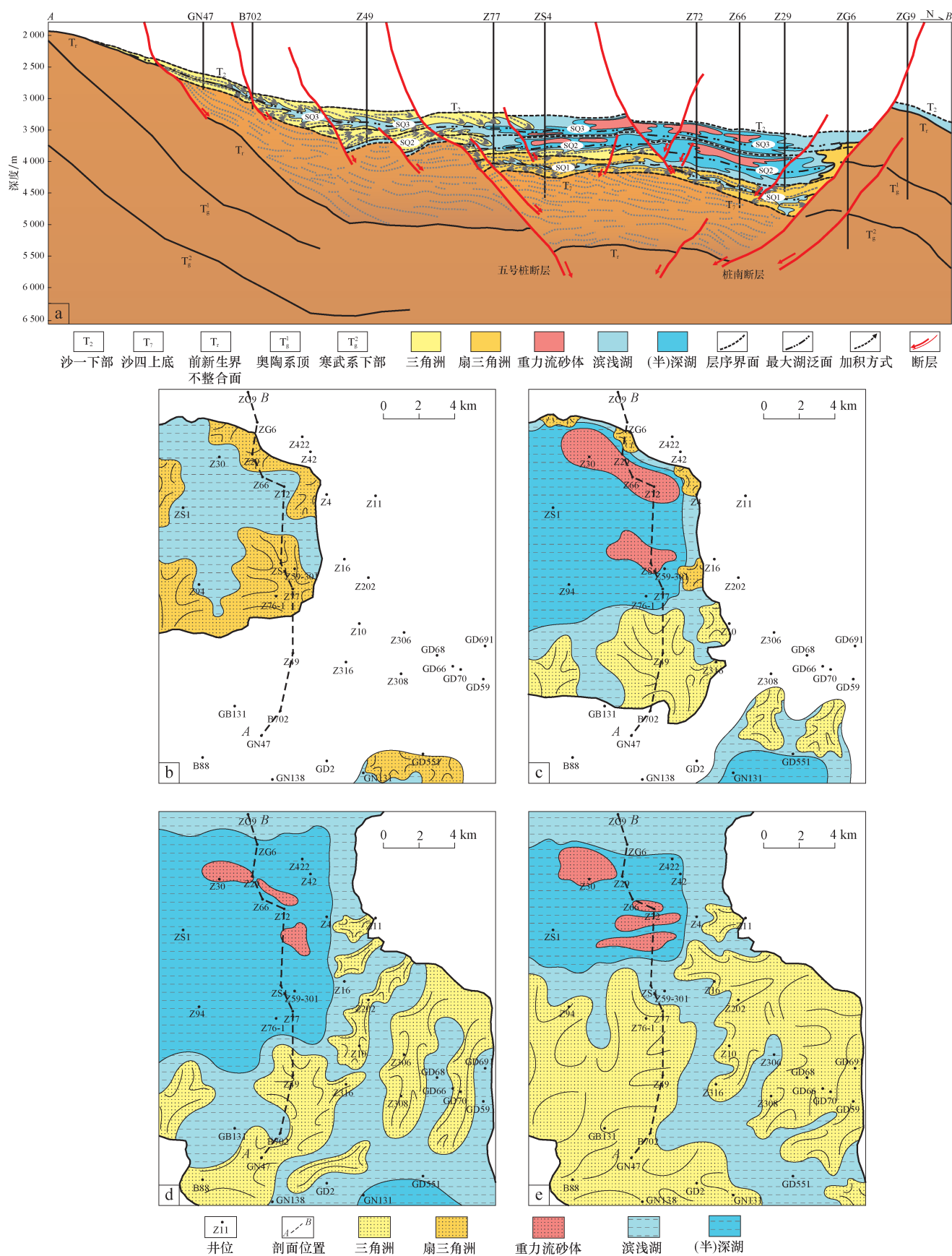


图6 沾化凹陷东部始新统沉积充填过程

Fig. 6 Sediment filling process of the Eocene in the eastern Zhanhua Sag

a. 沉积剖面特征; b. SQ1-HST 平面沉积展布特征; c. SQ2-HST 平面沉积展布特征; d. SQ3-TST 平面沉积展布特征; e. SQ3-HST 平面沉积展布特征

温湿^[10-11,26],源自周缘高地的地表径流量大、供源充足,东次洼及邻区进入全面充填阶段,源自孤岛凸起的大量碎屑物质分别在东次洼南坡和孤南洼陷西北缘堆积形成大面积展布的放射状进积型三角洲砂体,源自长堤和孤东凸起的碎屑物质在长堤斜坡和孤南洼陷北缘堆积形成近南北向大型三角洲砂体,同时受湖水顶托作用影响长堤潜山中上部注入东次洼碎屑物质增加。在东次洼北部(半)深湖区,还发育大量形态受断阶控制的深水重力流砂体,其岩屑组分与孤岛物源的岩屑组分一致(图5a)。可见,这些砂体或源自东次洼南部三角洲前端滑塌,或由南部孤岛径流阵发性洪水带入(图6a,e)

3.2 多断型湖盆沉积充填过程思考

多断,指控盆断层数量多、多期活动、走向多样,这样的盆地往往多面断陷、一方超覆,发育众多规模不等的构造转换带、构造坡折、次级断阶和陡坡带。其中,I级构造转换带奠定盆地宏观格局,如一个二级层序内洼陷和凸起间的空间配置关系;多阶构造坡折叠合湖平面升降,造成滨线“幕式”迁移,控制三级层序体系域间进-退积、空间规模和沉积体系的旋回性变化。II级构造坡折和遍布盆地的次级断阶(断槽)控制着体系域内部输砂系统和砂体堆积展布的具体情形;断陷湖盆陡坡带凸起侧往往为外倾半地堑性质单断山,往往不利于碎屑物质注入湖盆。

古气候的变化在盆地沉积充填过程中也起着较重要作用。干热气候下,物源区风化速率和搬运能力较低,同时湖平面波动非常频繁,盆内砂体横向规模小,垂向见不到明显的退积和进积;而在温湿的气候下,物源区风化速率高,提供大量的原始母质,同时潮湿气候下地表径流搬运能力提高,巨量的碎屑物质注入盆地形成规模庞大的三角洲砂体,这在我国东部断陷盆地古近系沙三段中、上部(SQ3)高位域十分常见。

无论如何,在多断型盆地控砂机制和沉积充填过程中,构造无疑占据着绝对主导地位。它通过构造转换带、坡折带、次级断层和陡坡带等具体形式,控制盆地的宏观地貌格局、砂体加积类型、沉积旋回性变化及体系域内部具体的输砂机制和砂体展布。气候作为一个独立于构造的因素,强化或者弱化前者的控制作用,但不会改变盆地的沉积充填过程。

4 结论

1) 多断湖盆发育众多规模不等的构造转换带、构

造坡折、次级断阶和陡坡带,它们主导着碎屑注入盆地后的分散过程和砂体堆积。其中,I级构造转换带奠定盆地宏观格局,如洼陷和凸起间的空间配置;多阶构造坡折叠合湖平面升降,造成滨线“幕式”迁移,控制三级层序体系域间砂体加积与沉积体系的旋回性变化。II级构造坡折和遍布盆地的次级断阶(断槽)控制着体系域内部具体输砂系统和砂体展布。陡坡带往往不利于碎屑物质注入湖盆。

2) 在沾化凹陷东部始新统,SQ1—SQ2时期存在孤北和孤南两个独立输砂系统,至SQ3时期随湖平面上升合二为一。SQ1时期,在孤北东次洼和孤南洼陷分别发育扇三角洲-滨浅湖沉积体系,扇三角洲砂体小而多,进积-退积不明显。SQ2时期湖域扩张,发育(扇)三角洲-湖相-重力流砂体沉积体系,扇三角洲集中分布在湖侵域,高位域以三角洲为主。SQ3时期,孤北东次洼与孤南洼陷连片,发育三角洲-湖相-重力流砂体沉积体系,湖侵域三角洲以退积型为主,高位域进积三角洲规模巨大,滑塌砂体十分发育。

3) 在多断型盆地控砂机制和沉积充填过程中,构造无疑占据着绝对主导地位。它通过构造转换带、坡折带、次级断层和陡坡带等具体形式,控制盆地的宏观地貌格局、砂体加积类型、沉积旋回性变化及体系域内部具体的输砂机制和砂体展布。干湿温热变化的气候作为一个独立于构造的因素,通过改变物源风化产能和搬运能力来强化或者弱化前者的控砂作用,但不会改变盆地的沉积充填过程。

参 考 文 献

- [1] 徐长贵,杜晓峰,徐伟,等.沉积盆地“源-汇”系统研究新进展[J].石油与天然气地质,2017,38(1):1-11.
Xu Changgui, Du Xiaofeng, Xu Wei, et al. New advances of the “source-to-sink” system research in sedimentary basins[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(1): 1-11.
- [2] 王华,廖远涛,陆永潮,等.中国东部新生代陆相断陷盆地层序的构成样式[J].中南大学学报(自然科学版),2010,41(1):277-285.
Wang H, Liao Y T, Lu Y C, et al. Sequence architecture styles of Cenozoic continental rift basins in East China[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, 41(1): 277-285.
- [3] Jiang S, Henriksen S, Wang H, et al. Sequence-stratigraphic architectures and sand-body distribution in Cenozoic rifted lacustrine basins, East China[J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(9): 1447-1475.
- [4] 张伟忠,查明,张云银,等.东营凹陷新生代扭张构造样式及控藏规律[J].石油与天然气地质,2017,38(6):1052-1058.
Zhang Weizhong, Zha Ming, Zhang Yunyin, et al. Cenozoic transten-

- sional structural styles and their controls over hydrocarbon accumulation in Dongying Depression[J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(6): 1052–1058.
- [5] 曹铮, 林承焰, 董春梅, 等. 构造活动及层序格架约束下的沉积、成岩作用对储层质量的影响——以松辽盆地南部大情字井地区葡萄花油层为例[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(2): 279–290.
- Cao Zheng, Lin Chengyan, Dong Chunmei, et al. Impact of sedimentation and diagenesis upon reservoir quality under constraint of tectonic activities and sequence stratigraphic framework—A case study of Putaohua oil layer in Daqingzijing area of southern Songliao Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(2): 279–290.
- [6] 冯有良. 断陷湖盆谷沟及构造坡折对砂体的控制作用[J]. *石油学报*, 2006, 27(1): 13–16.
- Feng Youliang. Control of valley and tectonic slope-break zone on sand bodies in rift-subsidence basin[J]. *Acta Petroli Sinica*, 2006, 27(1): 13–16.
- [7] 徐长贵. 渤海古近系坡折带成因类型及其对沉积体系的控制作用[J]. *中国海上油气*, 2006, 18(6): 365–371.
- Xu Changgui. Genetic types of Paleogene slope break zones and their controls on depositional system in Bohai off shore[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2006, 18(6): 365–371.
- [8] 董月霞, 王建伟, 刁帆, 等. 陆相断陷湖盆层序构成样式及砂体预测模式——以南堡凹陷东营组为例[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(1): 96–102.
- Dong Yuexia, Wang Jianwei, Diao Fan, et al. Sequence stratigraphic patterns and sand body prediction models of fault-depressed lacustrine basins: A case study from the Dongying formation in Nanpu Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(1): 96–102.
- [9] 邱隆伟, 贾继成, 马立驰, 等. 孤北洼陷长堤断裂带扇三角洲砂砾岩体沉积特征及空间展布规律[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(1): 175–182.
- Qiu Longwei, Jia Jicheng, Ma Lichi, et al. Sedimentary characteristics and spatial distribution of coarse clastic rocks of fan delta in Changdi fault zone in Gubei sub-sag, Jiyang Depression[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(1): 175–182.
- [10] 侯宇光, 何生, 王冰洁, 等. 板桥凹陷构造坡折带对层序和沉积体系的控制[J]. *石油学报*, 2010, 31(5): 754–761.
- Hou Yuguang, He Sheng, Wang Bingjie, et al. Constraints by tectonic slope-break zones on sequences and depositional systems in the Banqiao Sag[J]. *Acta Petroli Sinica*, 2010, 31(5): 754–761.
- [11] Hou Y, He S, Ni J, et al. Tectono-sequence stratigraphic analysis on Paleogene Shahejie Formation in the Banqiao sub-basin, eastern China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 36(1): 100–117.
- [12] 林畅松, 潘元林, 肖建新, 等. “构造坡折带”——断陷盆地层序分析和油气预测的重要概念[J]. *中国科学: 地球科学*, 2000, 25(3): 260–266.
- Lin Changsong, Pan Yuanlin, Xiao Jianxin, et al. Structural slope-break zone: Key concept for stratigraphic sequence analysis and petroleum forecasting in fault subsidence basins[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2000, 25(3): 260–266.
- [13] Lin C, Zheng H, Ren J, et al. The control of syndepositional faulting on the Eocene sedimentary basin fills of the Dongying and Zhanhua sags, Bohai Bay Basin[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2004, 47(9): 769–782.
- [14] 冯有良, 周海民, 任建业, 等. 渤海湾盆地东部古近系层序地层及其对构造活动的响应[J]. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40(10): 1356–1376.
- Feng Youliang, Zhou Haimin, Ren Jianye, et al. Paleogene sequence stratigraphy in the east of the Bohai Bay Basin and its response to structural movement[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2010, 40(10): 1356–1376.
- [15] Feng Y, Jiang S, Hu S, et al. Sequence stratigraphy and importance of syndepositional structural slope-break for architecture of Paleogene syn-rift lacustrine strata, Bohai Bay Basin, East China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 69: 183–204.
- [16] Morley C K, Nelson R A, Patton T L, et al. Transfer zones in the East African rift system and their relevance to hydrocarbon exploration in rifts (1)[J]. *AAPG Bulletin*, 1990, 74(8): 1234–1253.
- [17] Gawthorpe R L, Leeder M R. Tectono-sedimentary evolution of active extensional basins[J]. *Basin Research*, 2000, 12(3–4): 195–218.
- [18] 鲍志东, 赵艳军, 祁利祺, 等. 构造转换带储集体发育的主控因素——以准噶尔盆地腹部侏罗系为例[J]. *岩石学报*, 2011, 27(3): 867–877.
- Bao Zhiding, Zhao Yanjun, Qi Liqi, et al. Controlling factors of reservoir development in structural transfer zones: A case study of the Inner Junggar Basin in Jurassic[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(3): 867–877.
- [19] 宋爽, 朱筱敏, 于福生, 等. 珠江口盆地长昌—鹤山凹陷古近系沉积—构造耦合关系[J]. *沉积学报*, 2016, 34(2): 222–235.
- Song Shuang, Zhu Xiaomin, Yu Fusheng, et al. Sedimentary system evolution and its response to tectonic movement in Changchang-Heshan Depression, deep water area of Pearl River Mouth Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34(2): 222–235.
- [20] Hemelsdæl R, Ford M. Relay zone evolution: A history of repeated fault propagation and linkage, central Corinth Rift, Greece[J]. *Basin Research*, 2016, 28(1): 34–56.
- [21] 杨晓利, 张自力, 孙明, 等. 同沉积断层控砂模式——以南堡凹陷南部地区 Es¹ 段为例[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(4): 526–533.
- Yang Xiaoli, Zhang Zili, Sun Ming, et al. Models of contemporaneous fault controlling sandstone deposition: A case study of Es¹ in southern Nanpu Sag[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(4): 526–533.
- [22] 蔡全升, 胡明毅, 胡忠贵, 等. 退积型浅水三角洲沉积演化特征及砂体展布规律——以松辽盆地北部临江地区下白垩统泉头组四段为例[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(6): 903–914.
- Cai Quansheng, Hu Mingyi, Hu Zhonggui, et al. Sedimentary evolution and distribution of sand bodies of retrogradational shallow-water delta: A case study from 4th member of the Cretaceous Quantou Formation in the Lingjiang area, Songliao Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(6): 903–914.
- [23] 吴林, 陈清华, 刘寅, 等. 裂陷盆地伸展方位与构造作用及对构造样式的控制——以苏北盆地高邮凹陷南部断阶带为例[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(1): 29–38.

- Wu Lin, Chen Qinghua, Liu Yin, et al. Extension direction and tectonism in rift basins and their control on structural style: A case study on the south fault terrace in the Gaoyou Sag, Subei Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(1): 29–38.
- [24] Henstra G A, Gawthorpe R L, Helland-Hansen W, et al. Depositional systems in multiphase rifts: Seismic case study from the Lofoten margin, Norway [J]. *Basin Research*, 2017, 29(4): 447–469.
- [25] 吴智平, 李伟, 郑德顺, 等. 沾化凹陷中、新生代断裂发育及其形成机制分析 [J]. *高校地质学报*, 2004, 10(3): 405–417.
- Wu Zhiping, Li Wei, Zheng Deshun, et al. Analysis on features and origins of the Mesozoic and Cenozoic faults in Zhanhua Sag [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2004, 10(3): 405–417.
- [26] 张阳, 邱隆伟, 李际, 等. 基于模糊 C 均值地震属性聚类的沉积相分析 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2015, 39(4): 53–61.
- Zhang Yang, Qiu Longwei, Li Ji, et al. Sedimentary facies analysis based on cluster of seismic attributes by fuzzy C means algorithm [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2015, 39(4): 53–61.
- [27] 张阳, 回宇婷, 邱隆伟, 等. 双断湖盆沉积特征及其控制因素研究——以孤北洼陷沙四上亚段为例 [J]. *中国矿业大学学报*, 2015, 44(5): 868–876, 892.
- Zhang Yang, Hui Yuting, Qiu Longwei, et al. Sedimentary characteristics and its controlling factors of double-fault lacustrine basin: A case study of the upper 4th member of Shahejie Formation in Gubei Depression [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2015, 44(5): 868–876.
- [28] 冯有良, 李思田, 解习农. 陆相断陷盆地层序形成动力学及层序地层模式 [J]. *地质学前沿*, 2000, 7(3): 119–132.
- Feng Youliang, Li Sitian, Xie Xinong. Dynamics of sequence generation and sequence stratigraphic model in continental rift-subsidence basins [J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(3): 119–132.
- [29] 操应长, 姜在兴, 夏斌, 等. 陆相断陷湖盆 T-R 层序的特点及其控制因素——以东营凹陷古近系沙河街组三段层序地层为例 [J]. *地质科学*, 2004, 39(1): 111–122.
- Cao Yingchang, Jiang Zaixing, Xia Bin, et al. Characters and controlling factors of T-R sequence in lacustrine deposits of rift basin: An example from the Dongying Depression, eastern China [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2004, 39(1): 111–122.
- [30] 郭建华, 朱美衡, 刘辰生, 等. 陆相断陷盆地湖平面变化曲线与层序地层学框架模式讨论 [J]. *矿物岩石*, 2005, 25(2): 87–92.
- Guo Jianhua, Zhumeiheng, Liu Chensheng, et al. The curve of lacustrine level change in continental rift-subsidence basin and the sequence stratigraphy framework model [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2005, 25(2): 87–92.
- [31] Zhang C, Zhang S, Wei W, et al. Sedimentary filling and sequence structure dominated by T-R cycles of the Nenjiang Formation in the Songliao Basin [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2014, 57(2): 278–296.
- [32] Wu S, Yu Z, Zhang R, et al. Mesozoic-Cenozoic tectonic evolution of the Zhuanghai area, Bohai Bay Basin, East China: The application of balanced cross-sections [J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2005, 2(2): 158–168.
- [33] 任建业, 于建国, 张俊霞. 济阳坳陷深层构造及其对中新世盆地发育的控制作用 [J]. *地质学前沿*, 2009, 16(4): 117–137.
- Ren Jianye, Yu Jianguo, Zhang Junxia. Structures of deep bed in Jiyang Sag and their control over the development of Mesozoic and Cenozoic basins [J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(4): 117–137.
- [34] 宋国奇, 王永诗, 程付启, 等. 济阳坳陷古近系二级层序界面厘定及其石油地质意义 [J]. *油气地质与采收率*, 2014, 21(5): 1–7.
- Song Guoqi, Wang Yongshi, Cheng Fuqi, et al. Ascertaining secondary-order sequence of Palaeogene in Jiyang Depression and its petroleum geological significance [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2014, 21(5): 1–7.
- [35] 刘传虎, 任建业. 济阳坳陷非碳酸盐岩潜山油气藏 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2006: 70–77.
- Liu Chuanhu, Ren Jianye. Non-carbonate buried-hill reservoirs in Jiyang Depression [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006: 70–77.
- [36] Hus R. Structure and evolution of transfer zones in extensional tectonic basins—A study based on examples from Lake Baikal and analogue sandbox models [D]. Belgium: University of Gent, 2004: 31–86.
- [37] 郑宁, 姜在兴, 张乐, 等. 渤海湾盆地孤南洼陷沙河街组三段中、下亚段沉积特征 [J]. *石油与天然气地质*, 2011, 32(6): 823–831.
- Zheng Ning, Jiang Zaixing, Zhang Le, et al. Sedimentary characteristics of the middle and lower 3rd member of Shahejie Formation in Gubei Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32(6): 823–831.
- [38] Su J, Zhu W, Wei J, et al. Fault growth and linkage: Implications for tectonosedimentary evolution in the Chechen Basin of Bohai Bay, eastern China [J]. *AAPG Bulletin*, 2011, 95(1): 1–26.
- [39] Liu Y, Chen Q, Wang X, et al. Influence of normal fault growth and linkage on the evolution of a rift basin: A case from the Gaoyou Depression of the Subei Basin, eastern China [J]. *AAPG Bulletin*, 2017, 101(2): 265–288.
- [40] 牟中海, 唐勇, 崔炳富, 等. 塔西南地区地层剥蚀厚度恢复研究 [J]. *石油学报*, 2002, 23(1): 40–44.
- Mu Zhonghai, Tang Yong, Cui Bingfu, et al. Erosion thickness restoration in southwest Tarim Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2002, 23(1): 40–44.
- [41] Glørstad-Clark E, Birkeland E P, Nystuen J P, et al. Triassic platform-margin deltas in the western Barents Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(7): 1294–1314.
- [42] 姜正龙, 邓宏文, 林会喜, 等. 古地貌恢复方法及应用——以济阳坳陷桩西地区沙二段为例 [J]. *现代地质*, 2009, 23(5): 865–871.
- Jiang Zhenglong, Deng Hongwen, Lin Huixi, et al. Methods and application of paleo-geomorphologies rebuilding: An example of the second member of Shahejie Formation, Zhuangxi area, Jiyang Depression [J]. *Geoscience*, 2009, 23(5): 865–871.