

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.519



济阳拗陷义和庄凸起东部燕山期构造负反转及层序地层样式响应

宋广增^{1,2}, 徐蒙³, 李磊⁴, 孙迪⁵, 刘辉⁶

1. 济南大学资源与环境学院, 山东济南 250022
2. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074
3. 山东省第一地质矿产勘查院, 山东济南 250014
4. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东湛江 524057
5. 中国石化胜利油田石油开发中心有限公司, 山东东营 257000
6. 山东省物化探勘查院, 山东济南 250013

摘要:通过钻井、测井与地震数据,依据不整合面分析、断层活动速率分析与地层的“负向结构”分析,在义和庄凸起东部燕山期内识别出一期发生于中晚侏罗世之交的构造负反转,并据此将义和庄凸起燕山期划分为早期与晚期两个阶段。通过单井与连井层序地层分析,分别建立了燕山早期与晚期的层序地层样式,两者在层序结构及内部沉积充填等方面表现出巨大差异。早期层序地层不具有显著的沉积厚度分异,且格架内部充填河流相沉积;晚期因构造负反转而形成小型拉张断陷盆地,沉积厚度分异明显,内部以扇三角洲沉积充填为主,呈现出对构造负反转的显著响应。燕山期构造—层序地层学的研究可为中国东部其他具有相似构造背景盆地前新生代的油气勘探提供借鉴。

关键词:燕山期;构造不整合面;构造负反转;层序地层。

中图分类号: P539.2

文章编号: 1000-2383(2019)02-0000-15

收稿日期: 2018-10-13

Yanshanian Tectonic Inversion and the Response of Sequence Stratigraphic Patterns in Eastern Yihezhuang Salient, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

Song Guangzeng^{1,2}, Xu Meng³, Li Lei⁴, Sun Di⁵, Liu Hui⁶

1. School of Resources and Environment, University of Jinan, Jinan 250022, China
2. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
3. No.1 Institute of Geology and Mineral Resources of Shandong Province, Jinan 250014, China
4. China National Offshore Oil Corporation Ltd. Zhanjiang, Zhanjiang 524057, China
5. Petroleum Development centre, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying 257000, China
6. Shandong Institute of Geophysical & Geochemical Exploration, Jinan 250013, China

Abstract: Through boreholes, well logs and seismic profiles, one tectonic inversion happening between Middle Jurassic and Late Jurassic is recognized in Yanshanian eastern Yihezhuang salient based on analyzing unconformity surfaces, faulting activity and the negative structure of strata, which divides the Yanshanian of eastern Yihezhuang salient into Early Yanshanian and Late Yanshanian in this study. The sequence stratigraphic patterns of Early Yanshanian and Late Yanshanian are respectively established with analysis of single-well sequence stratigraphy and connecting-well sequence stratigraphy, which shows great differ-

基金项目:山东省自然科学基金(No.ZR2016DB29);国家自然科学基金(No.51409121);构造与油气资源教育部重点实验室开放课题(No.TPR-2016-13).
作者简介:宋广增(1987—),男,讲师,博士,从事盆地分析研究及相关教学工作,主要从事构造—层序地层研究。ORCID:0000-0002-5975-8209.
E-mail: songguangzeng2006@163.com

引用格式:宋广增,徐蒙,李磊,等,2019.济阳拗陷义和庄凸起东部燕山期构造负反转及层序地层样式响应.地球科学,44(2):xxx-xxx.

ence in sequence structure and internal makeup with each other. During early Yanshanian, the sequence stratigraphy showed unobvious thickness differentiation and the sequence-infill were fluvial facies. Differently, the sequence stratigraphy presented obvious thickness differentiation and was infilled mainly with fan deltas, as the tectonic inversion led to development of small rifted-basin, which showed obvious response to the recognized tectonic inversion. Applying tectonic-sequence stratigraphy to Yanshanian succession could contribute to the pre-Cenezoic hydrocarbon exploration of the basins with similar tectonic background in eastern China.

Key words: Yanshanian; tectonic unconformity; tectonic inversion; sequence stratigraphy.

在盆地分析领域,层序地层受构造、气候、环境等诸多因素的影响,学者对其主控因素的探讨一直是经久不衰的话题(Hans *et al.*, 2002; 林畅松等, 2005; Heydari, 2008; Song *et al.*, 2014; Feng *et al.*, 2016).但在构造活跃的沉积盆地中,构造可以影响沉积基准面变化、物源供给,甚至气候变化等,是主控因素,层序地层对构造活动具有显著响应(林畅松等, 2002; Allen and Allen, 2005; 邓宏文等, 2008; Yang *et al.*, 2010; Lin *et al.*, 2011).尤其

近年来,构造-层序地层研究一直为含油气盆地分析的前沿性热点(Cope *et al.*, 2010; Leleu and Hartley, 2010; Chen *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2014; 李思田等, 2015).然而在我国断陷盆地群发育的东部地区,构造-层序地层研究主要集中于新生代盆地,尤其是古近纪断陷盆地中(冯有良等, 2010; 王华等, 2010; 宋广增等, 2014; 王东东等, 2016; Lü *et al.*, 2016),而前新生代盆地则鲜有涉及。

在中国东部以来的历次地质事件中,燕山运动

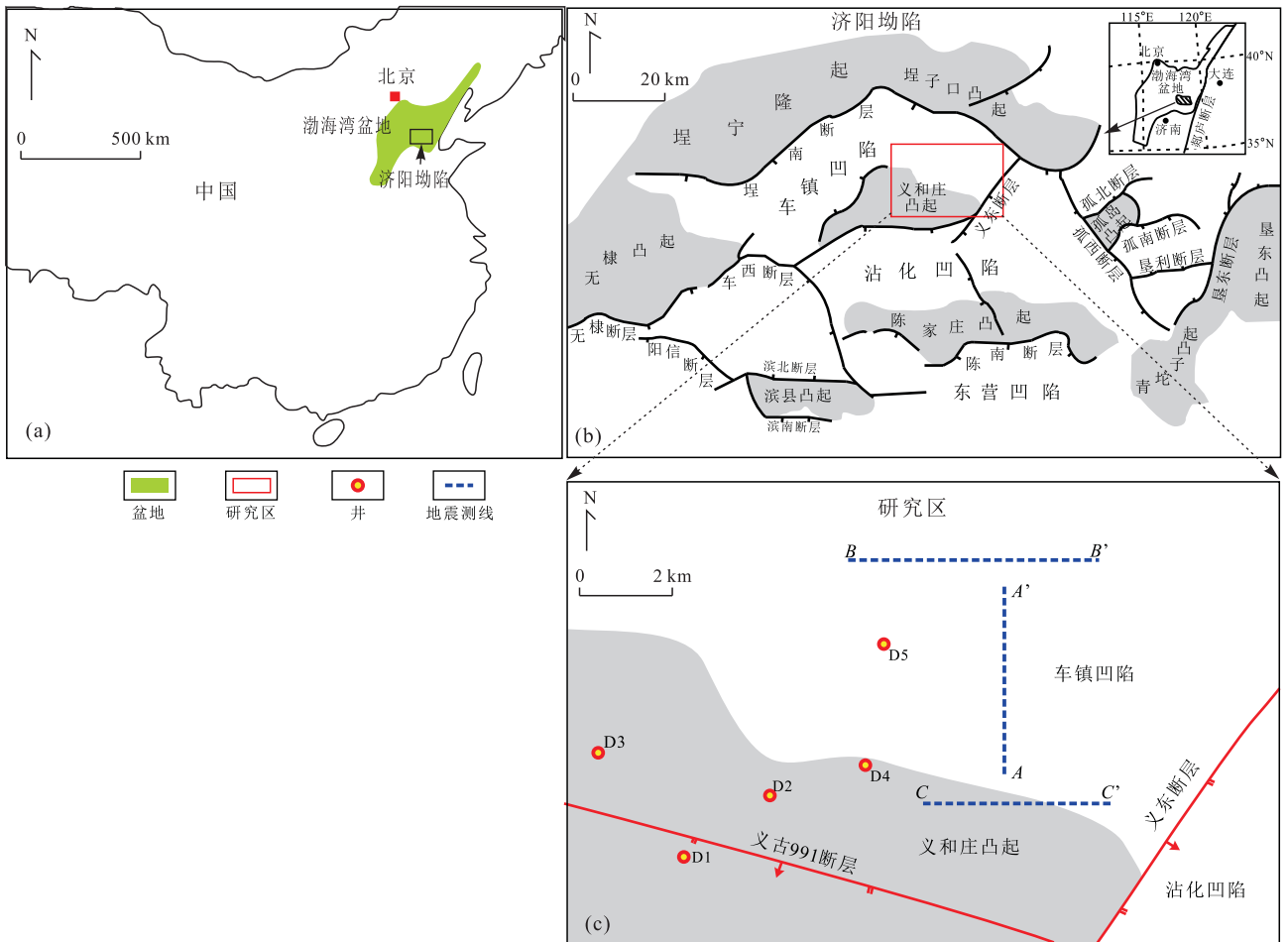


图 1 义和庄凸起东部构造位置与区域地质背景

Fig.1 Location and regional geologic background of eastern Yiehezhuang salient

a. 渤海湾盆地位置; b. 济阳拗陷在渤海湾盆地中位置; c. 研究区位置

都是一次最重要的、压倒一切的构造运动(张宏仁等,2013)。但从目前的研究来看,燕山运动大量的相关成果主要集中在华北东部的燕山—太行山等山脉带中(任建业等,2009),在盆地分析领域通过层序地层学的研究来揭示这一岩石圈动力学事件则鲜有涉及。济阳拗陷是中国东部油气含量最丰富的地区之一,数十年油气勘探的历程主要集中在新生代沉积盆地中。近年来,随着新生代盆地资源发现率的提高,勘探对象已逐步转向同样富含油气资源的中生代地层。但经燕山运动的强烈改造,济阳拗陷燕山期地层基础地质特征认识不足,导致中生界勘探难度较大而成为增加油气产量的瓶颈。

以义和庄凸起东部燕山期沉积地层为研究对象,开展燕山期构造变革及其层序地层样式的响应研究,可为济阳拗陷,甚至中国东部其他具有相似构造背景的断陷盆地油气资源的勘探提供借鉴,并有助于从层序地层学的角度开展燕山运动沉积记录的研究。

1 区域地质概况

义和庄凸起位于济阳拗陷北部、渤海湾盆地西南部,是一个发育在华北古生界基底之上的中、新生代断陷盆地内的次级正向构造单元,南部与东部分别以近EW向义南断层、NE-SW向义东断层为界与沾化凹陷分隔,北部以过渡性斜坡与车镇凹陷为邻。车镇凹陷北部为埕南断层,对义和庄凸起的形成与演化等具有重要的影响。义和庄凸起构造位置属于义南断层下盘、埕南断层上盘,从古到新一共经历了五期重大的构造运动,分别为:前寒武纪运动、加里东—海西运动、印支运动、燕山运动和喜山运动(侯贵廷等,2000;夏斌等,2006)。

受印支运动、燕山运动与喜山运动的影响,义和庄凸起东部燕山期地层仅残余侏罗系,以Tg不整合面为界直接上覆于古生代地层之上,以Tr不整合面为界直接下伏于新生代地层之下。侏罗系自下而上依次沉积了下侏罗统坊子组下段(Tg-Tmz3),中侏罗统坊子组上段(Tmz3-Tmz2)与三台组(Tmz2-Tgm)以及上侏罗统蒙阴组(Tgm-Tr)(图2)。

研究区一直为济阳拗陷油气勘探与开发的重点区域。多年的油气勘探和开发积累了大量的地质与地球物理资料和研究成果,尤其是高密度的钻井数据与高分辨率三维地震资料为研究义和庄凸起东部燕山期构造变革与层序地层样式等提供了优良条件。

2 层序格架搭建

结合钻井、测井与地震剖面(图3,图4),依据钻井中测井相突变、岩相突变与地震数据体中不整合面的识别,在覆盖研究区的三维地震数据体中识别出Tg、Tmz3、Tmz2、Tgm与Tr层序地层界面,进而搭建了覆盖研究区的燕山期层序地层格架(图5)。

图5表明,燕山期地层在研究区发育较为局限,为受构造抬升剥蚀而形成的残余地层。地层分别以大型构造不整合面Tr、Tg为界与上覆新生界、下伏古生界接触,且燕山期地层内部发育一构造不整合面——Tgm,该界面将燕山期层序地层划分为上下两个构造层序。

3 构造负反转

3.1 不整合面分析

不整合面意味着界面之下地层形成之后和界面之上地层沉积开始之前经历了长时间的沉积间断,

地质年代	地层	层序界面	层序划分	层序级别	构造阶段		
新生代	裂陷盆地,与下伏地层以不整合面Tr为界						
中生代	晚侏罗世(J ₃)	蒙阴组	Tr	SQ-J ₃ My	III	I	燕山晚期
	中侏罗世(J ₂)	三台组	Tgm	SQ-J ₂ St	III		
		坊子组上段	Tmz2	SQ-J ₂ Fz ₂	III		
	早侏罗世(J ₁)	坊子组下段	Tmz3	SQ-J ₁ Fz ₁	III	I	燕山早期
古生代	克拉通,与上覆地层以不整合面Tg为界						

图2 渤海湾盆地济阳拗陷义和庄凸起东部地层划分与盆地充填演化

Fig.2 The stratigraphic division and basin filling evolution of the eastern Yihezhuang salient, Jiyang depression, Bohai Bay basin
据张善文等(2009)修改

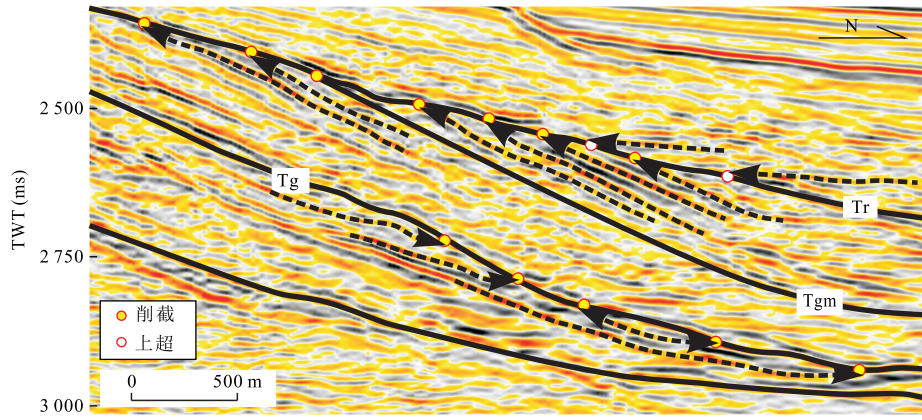


图 3 义和庄凸起东部三维地震剖面层序界面识别

Fig.3 Recognition of sequence boundaries (sb) on the 3D seismic profile across eastern Yihezhuang salient 地震测线 A-A', 位置见图 1

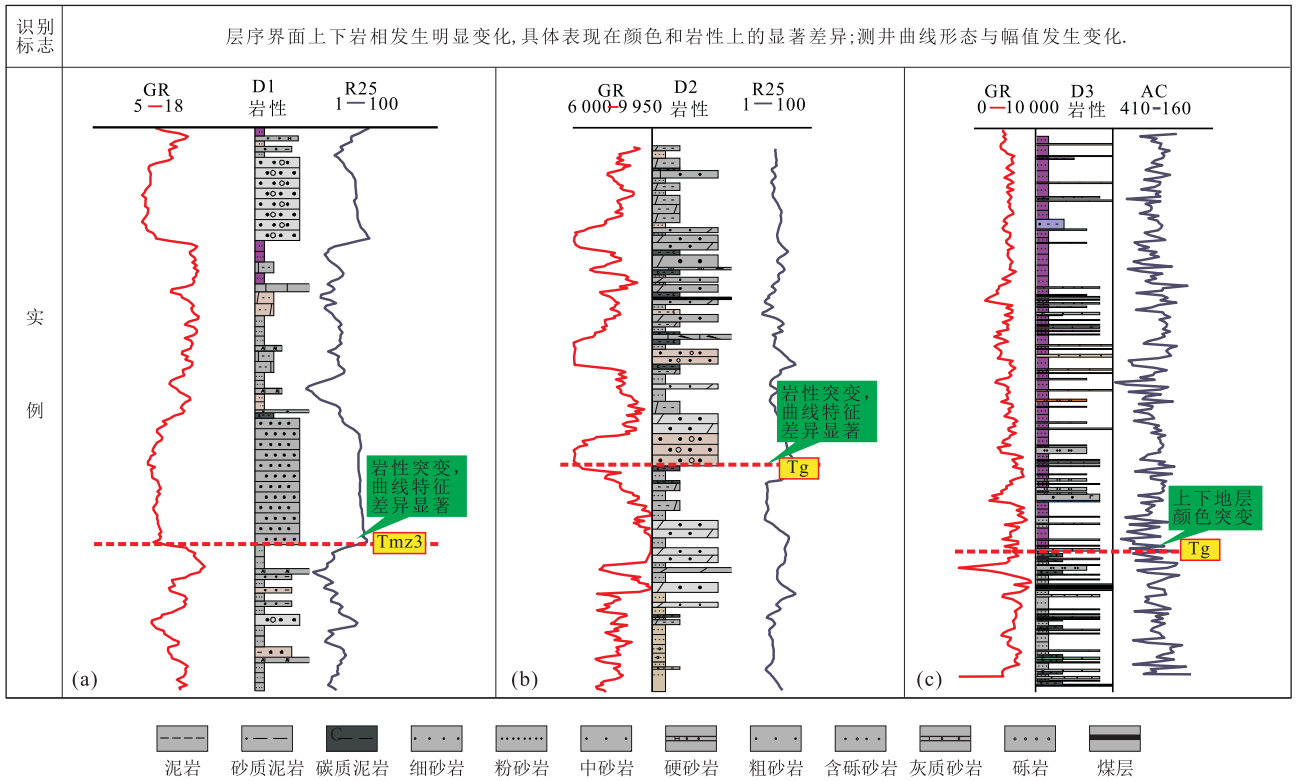


图 4 钻井层序地层界面识别

Fig.4 Recognition of sequence boundaries (sb) on boreholes

a. Tmz3 界面上下岩性、测井曲线等发生显著变化。界面以下为厚层泥岩夹薄层粉砂质沉积, 测井曲线呈齿型, 岩性变化较快; 界面之上为厚层砂岩沉积, 测井曲线为箱型—钟型, 为河道边滩沉积, 对下伏地层造成冲刷; b. Tg 界面之上为厚层含砾砂岩沉积, 测井曲线呈漏斗型—钟型, 为河道边滩沉积; 界面之下为泥岩与砂岩的薄互层, 测井曲线呈低幅齿型。Tg 界面上下岩性、测井曲线形态发生显著变化。Tg 为河道冲刷面, 可构成层序界面; c. Tg 界面上下最显著的差异是沉积物颜色发生明显变化, Tg 界面之下为泥岩与砂岩薄互层沉积, 并夹煤层, 沉积物颜色为灰色, 指示还原环境; 界面之上为厚层泥岩夹薄层砂岩沉积, 沉积物颜色为紫红色, 指示氧化环境; 井位置见图 1

下伏地层因受构造运动的影响而发生褶皱、变质、抬升、遭受剥蚀等, 尤其大型构造不整合表明了地层记录的重要间断或缺失, 是对区域构造运动的响应, 反映了一次显著的水平挤压运动及伴随的升降运动

(Lin *et al.*, 2012). 研究区, Tgm 界面为燕山期地层内的大型构造不整合界面, 其对下伏下中侏罗统的下倾方向造成强烈削截作用, 其上倾方向被 Tr 削截, 发育下倾削截与复合削截, 指示 Tgm 为一构造

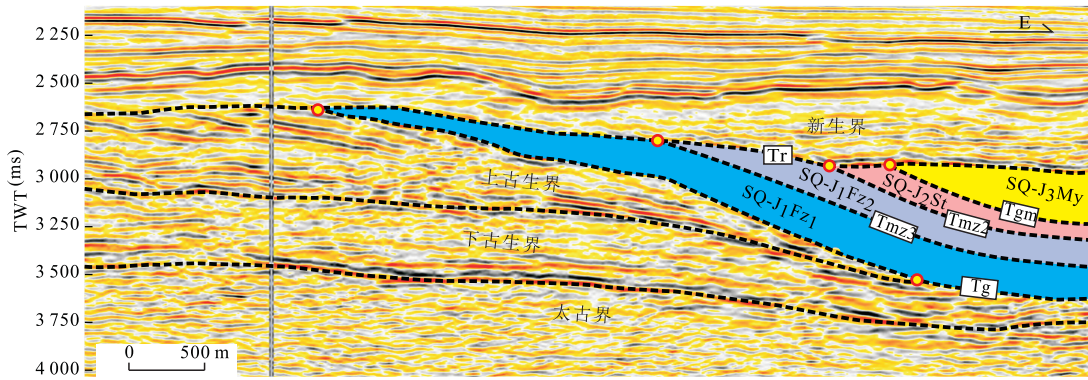


图 5 济阳拗陷义和庄凸起东部燕山期层序地层格架

Fig.5 Yanshanian sequence stratigraphic framework of eastern Yihezhuang salient, Jiyang depression
地震测线 B-B', 位置见图 1

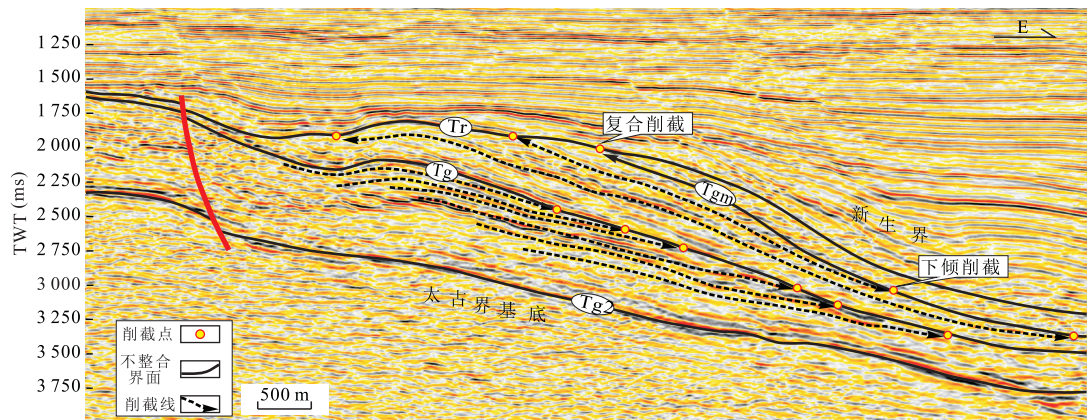


图 6 义和庄凸起东部各构造不整合面的地震反射特征

Fig.6 Characteristics of seismic reflections of tectonic unconformities in eastern Yihezhuang salient
地震测线 C-C', 位置见图 1; Tg2.沉积基底; Tg.中生界底界面; Tgm.上侏罗统底界面; Tr.新生界底界面

变革界面.且经前人研究, Tgm 界面前后构造应力场发生改变,为燕山期构造变革形成的沉积间断(吴智平等,2003).

3.2 断层分析

断层活动速率是指某一地层单元在一定时期内,断层活动形成的落差与相应沉积时间的比值(图 4),代表单位时间内断层的落差(宋广增等,2014).断层为构造运动的直接表现形势,分析断层的活动速率及演化,有助于分析断层性质、构造应力场性质与盆地构造变革等.

断层活动速率的计算采用下列公式:

$$F_x = (H_{x1} - H_{x2}) / T_x \quad (1)$$

式中: F_x 为 x 地层同沉积期断层活动速率; H_{x1} 为断层上盘 x 地层残余厚度; H_{x2} 为断层下盘 x 地层残余厚度; T_x 为该地层沉积时间.

选取义和庄凸起东部 6 条横切 YG991 断层的典型测线,基于地震解释数据,以各构造地层为研究

对象,计算 YG991 断层在各测线处的断层活动速率及演化(图 7).

图 7 表明:在早中侏罗世, YG991 断层活动速率为负值,说明在 J_{1+2} 时期,断层为逆断层,此时研究区处于挤压应力场,为挤压型盆地;在晚侏罗世, YG991 断层活动速率变为正值,说明在 J_3 时期, YG991 断层转变为正断层,进而表明此时研究区处于拉张应力场,发生了构造负反转.由早中侏罗世进入晚侏罗世,同沉积断层 YG991 断层性质发生转变,盆地性质发生转变,说明 Tgm 界面揭示的构造变革为一期构造负反转,该期构造负反转将义和庄凸起东部燕山期划分为燕山早期(J_{1+2})与燕山晚期(J_3).

3.3 地层结构分析

在义和庄凸起东部,燕山早期(J_{1+2})强烈的挤压作用形成具有逆冲性质的 YG991 断层与研究区东北部的埕南断层,使得逆冲断层上盘靠近断层部位的同沉积地层发生抬升、剥蚀,形成构造不整合界

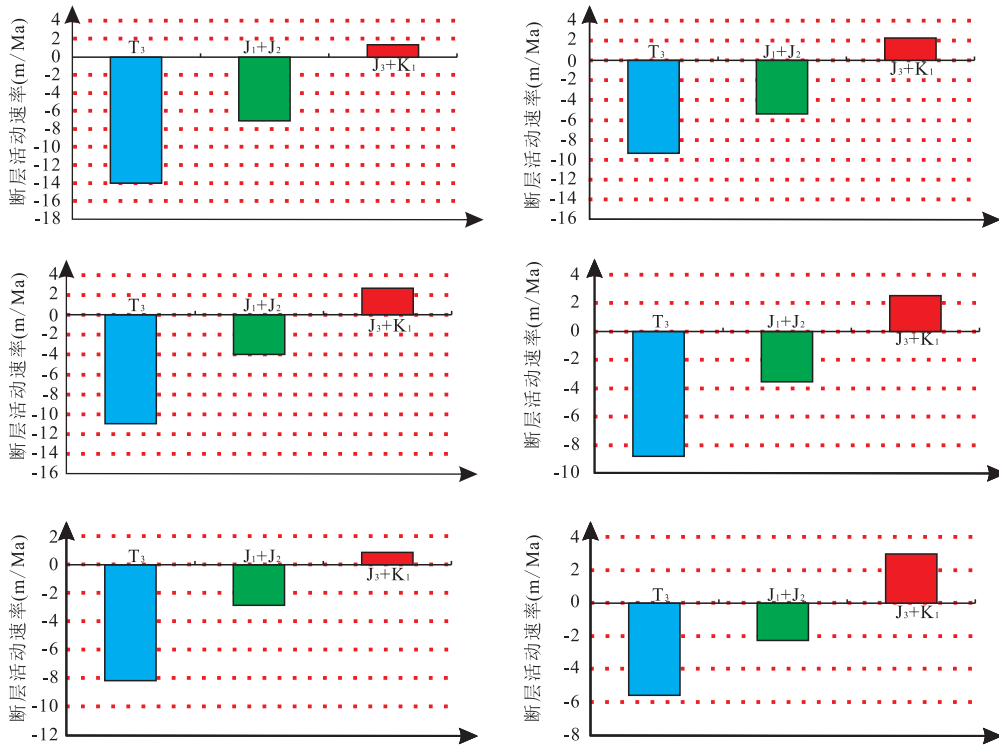


图 7 YG991 断层活动速率及演化

Fig.7 The evolution and active rate of Fault YG991

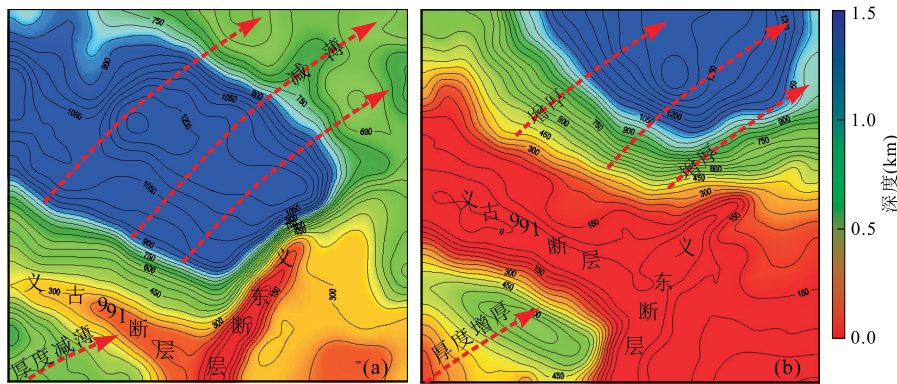


图 8 义和庄凸起东部燕山期地层负向结构

Fig.8 The negative structure of Yanshanian strata in eastern Yihezhuang salient

a. 坊子组与三台组(J₁+J₂)残余地层厚度; b. 蒙阴组(J₃)残余地层厚度

面 Tgm,造成断层上盘的下中侏罗统在由远离断层向断层根部靠近的方向(由 SW 向 NE)呈现厚度逐渐减薄的趋势(图 8a).在燕山期构造负反转之后(J₃)的引张应力作用下, YG991 断层与埕南断层利用原来的逆断层面发生负反转,成为控制沉积的正断层,并在上盘沉积了较厚的蒙阴组.由于反转后的正断层控制沉积中心,因此上侏罗统地层厚度在靠近断层根部达到最大,即由远离断层向断层根部靠近的方向(由 SW 向 NE)地层厚度逐渐增厚(图 8b),变化趋势与下

伏下中侏罗统厚度变化趋势相反,表现为地层结构上的“负向结构”特征(任建业等,2009).

4 层序地层分析

根据钻井、测井数据,结合地震剖面,对单井(点)与连井(线)进行层序地层分析.

4.1 单井(点)层序地层分析

单井可为高精度层序地层样式分析提供丰富而

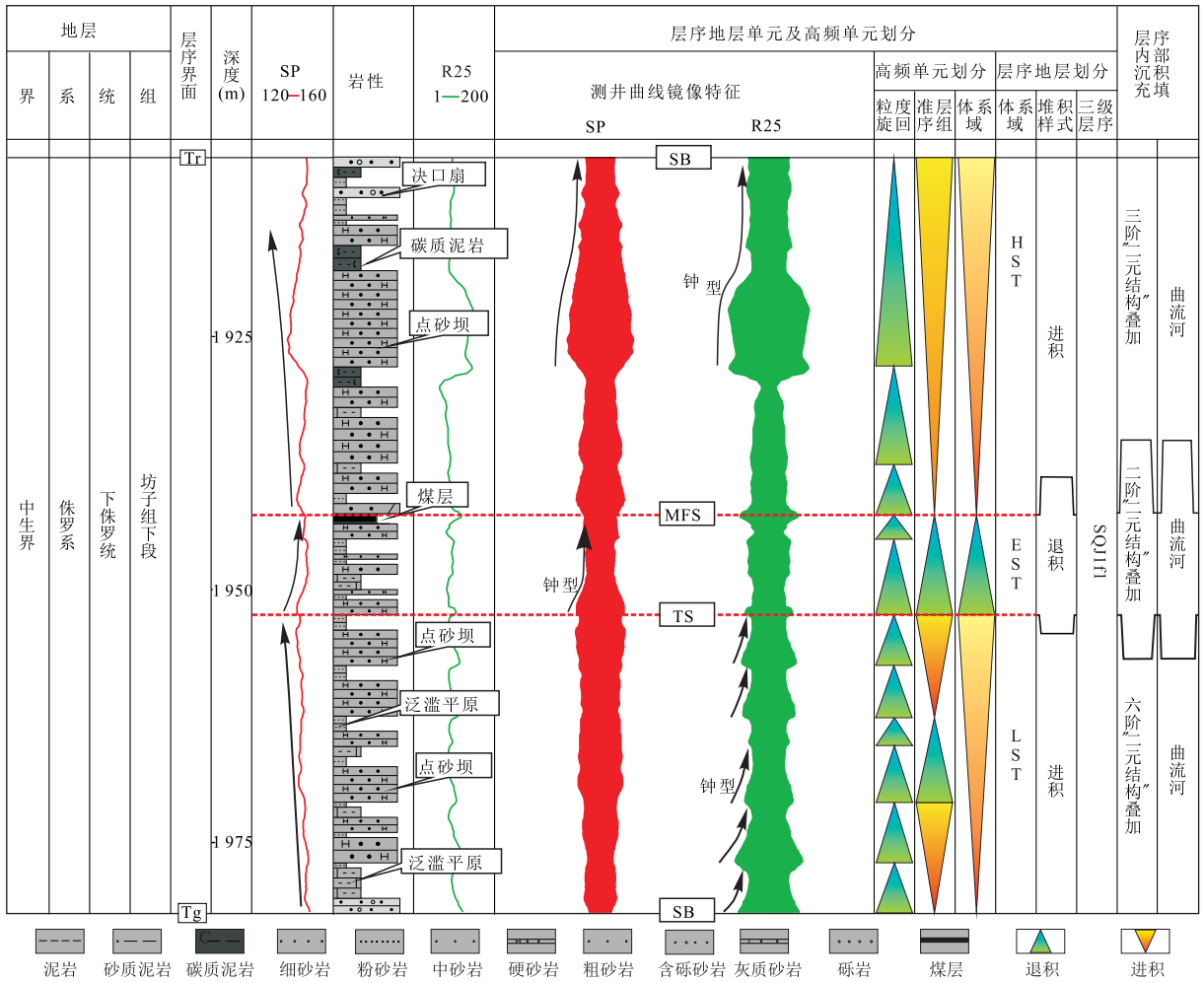


图 9 D4 单井层序地层分析

Fig.9 Sequence stratigraphic analysis of Well D4

MFS,最大洪泛面; TS,初始洪泛面; SB,层序界面; LST,低位体系域; EST,扩展体系域; HST,高位体系域,井位置见图 1

具有可靠性的岩性数据与测井数据,并可通过分析单期沉积体粒度旋回准层序组与体系域的演化和内部沉积充填等,分析层序地层垂向上的演化规律,建立高精度的垂向层序地层样式。

通过 D7 井燕山早期坊子组下段层序地层分析,可知层序可被划分为三期规模较大的沉积旋回,自下而上分别为低位体系域(LST)、扩展体系域(EST)与高位体系域(HST)。曲流河沉积的“二元结构”组成了每个体系域的基本组成部分,且每个“二元结构”对应一期准层序,使准层序呈现进积。

低位体系域中,6 期曲流河“二元结构”在垂向上相互叠置,且由下向上,每期“二元结构”中含砂量与底部边滩砂体厚度呈现增加趋势,为进积的叠置样式,反应了曲流河的高建造性。扩展体系域中,沉积物粒度整体变细,为厚层泥岩夹单层的薄层砂岩,以河漫滩沉积为主,边滩很薄,甚至不发育,纵向上

为退积的叠置样式。高位体系域中,发育 3 期曲流河“二元结构”,每期“二元结构”中的砂体厚度在整个三级层序中达到最大,在垂向上与低位体系域表现出相似的沉积体叠置规律,呈现出进积叠置,且在顶部发育决口扇沉积,为可容空间减小的结果。

D8 井发育燕山晚期蒙阴组三级层序,因受后期构造抬升剥蚀,该三级层序仅发育低位体系域(LST)与较薄的扩展体系域(EST)。低位域中,由底部向上部,砂体含量增多,砂体厚度增大,且沉积物颜色氧化色增强,表明水深变浅、可容空间减小,进而表明沉积物进积式的堆积样式。扩展体系域因剥蚀作用,而仅残留部分地层,砂体较薄,泥质沉积相对较多,在垂向上总体呈现为退积的堆积样式。

4.3 连井(线)层序地层分析

为分析层序地层格架内沉积体的横向特征以及沉积体展布规模的演化,以对研究区内钻遇中生界

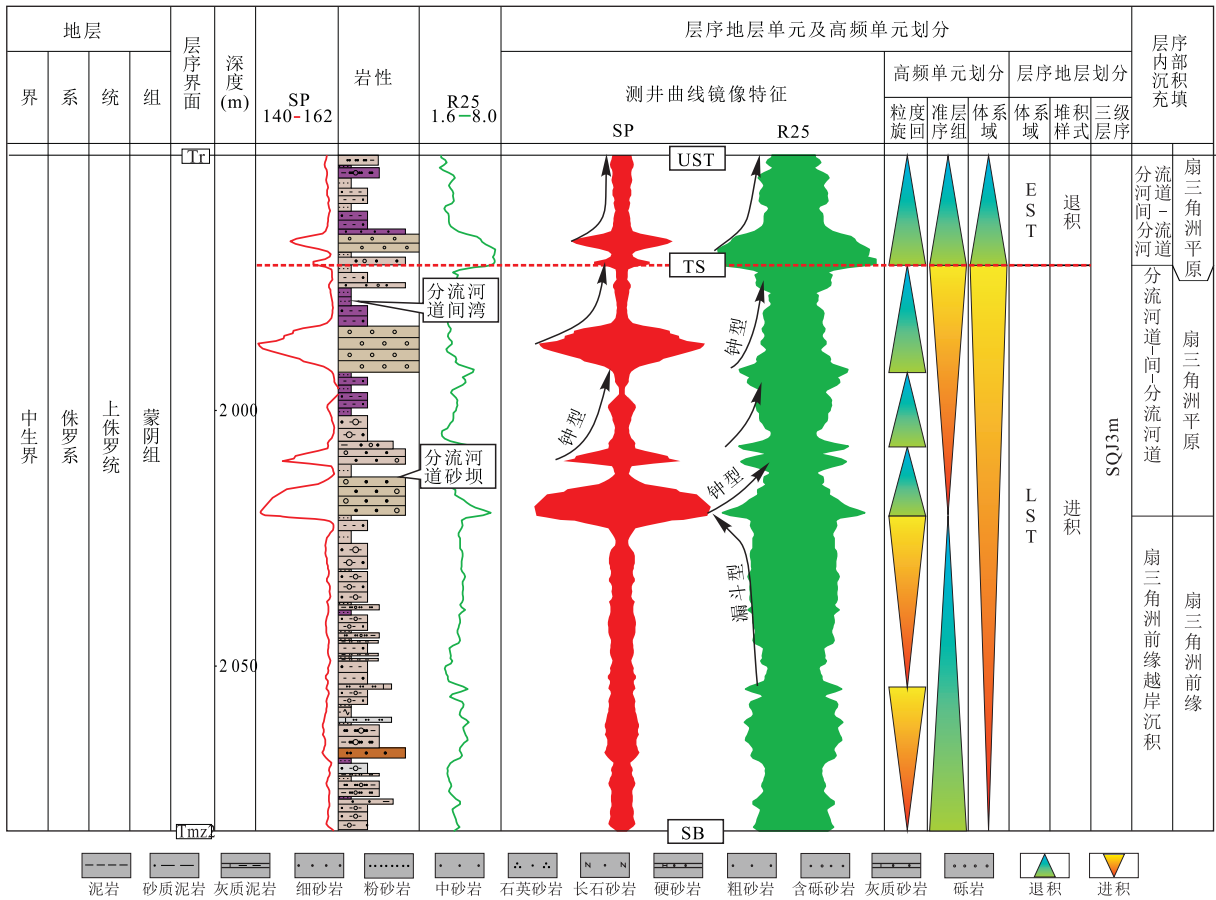


图 10 D5 单井层序地层分析

Fig.10 Sequence stratigraphic analysis of Well D5

UST. 削截型不整合面; TS. 初始洪泛面; SB. 层序界面; LST. 低位体系域; EST. 扩展体系域. 井位置见图 1

的各单井进行层序地层分析为基础,开展了燕山早期与燕山晚期连井层序地层分析(图 11,图 12).

图 11 为义和庄凸起东部燕山早期连井层序地层格架及内部沉积充填特征, a 与 b 两个剖面中均发育坊子组下段与坊子组上段两个三级层序. a 中每个三级层序中均发育低位体系域(LST)、扩展体系域(EST)与高位体系域(HST), 由于抬升削截, 层序厚度具有由北向南减薄、体系域具有由北向南削截尖灭的趋势. b 中坊子组下段发育低位体系域(LST)、扩展体系域(EST)与高位体系域(HST); 坊子组上段因构造运动的抬升剥蚀而缺失, 仅局部发育低位体系域(LST)与扩展体系域(EST). 在两个剖面中, 层序格架内部沉积充填具有相似特征: 低位体系域(LST)砂体分布面积广泛, 砂体相互叠置, 具有较强连通性; 扩展体系域(EST)因为沉积基准面上升较快, 可容空间较大, 河道孤立分布在泛滥平原之中, 侧向连通性较差, 且沉积物供给速率较小, 河道砂体厚度较薄, 随着可容空间的不断增加, 泛滥平

原相的泥质沉积逐渐增多; 高位体系域(HST)因沉积物供给速率大于可容空间增加速率, 所以由下而上, 呈进积的堆积样式, 下部以泥质沉积为主, 上部逐渐过渡为河道砂岩沉积, 且砂体具有向上增厚的趋势.

图 12 为义和庄凸起东部燕山晚期连井层序地层格架及内部沉积充填特征. 该图中广泛发育低位体系域(LST)与扩展体系域(EST), 高位体系域(HST)仅在 Y2、Y3、Y4 与 Y5 井中有发育, 而且厚度较薄, 为后期抬升剥蚀所致. 由西向东, 低位体系域在义古 991 断层根部具有增厚的趋势, 说明义古 991 断层在蒙阴组同沉积期的正断活动以及对沉积中心的控制, 形成了局部小型洼陷; 扩展体系域由西向东具有厚度减薄的趋势, 反应了向小型洼陷中心的饥饿性沉积; 高位体系域由东向西削截减薄, 反应了义古 991 断层的正断活动使上盘发生旋转掀斜, 掀斜抬升部位被剥蚀削截. 由于可容空间增加速率与沉积物供给速率比值的变化, 在 3 个不同的体系

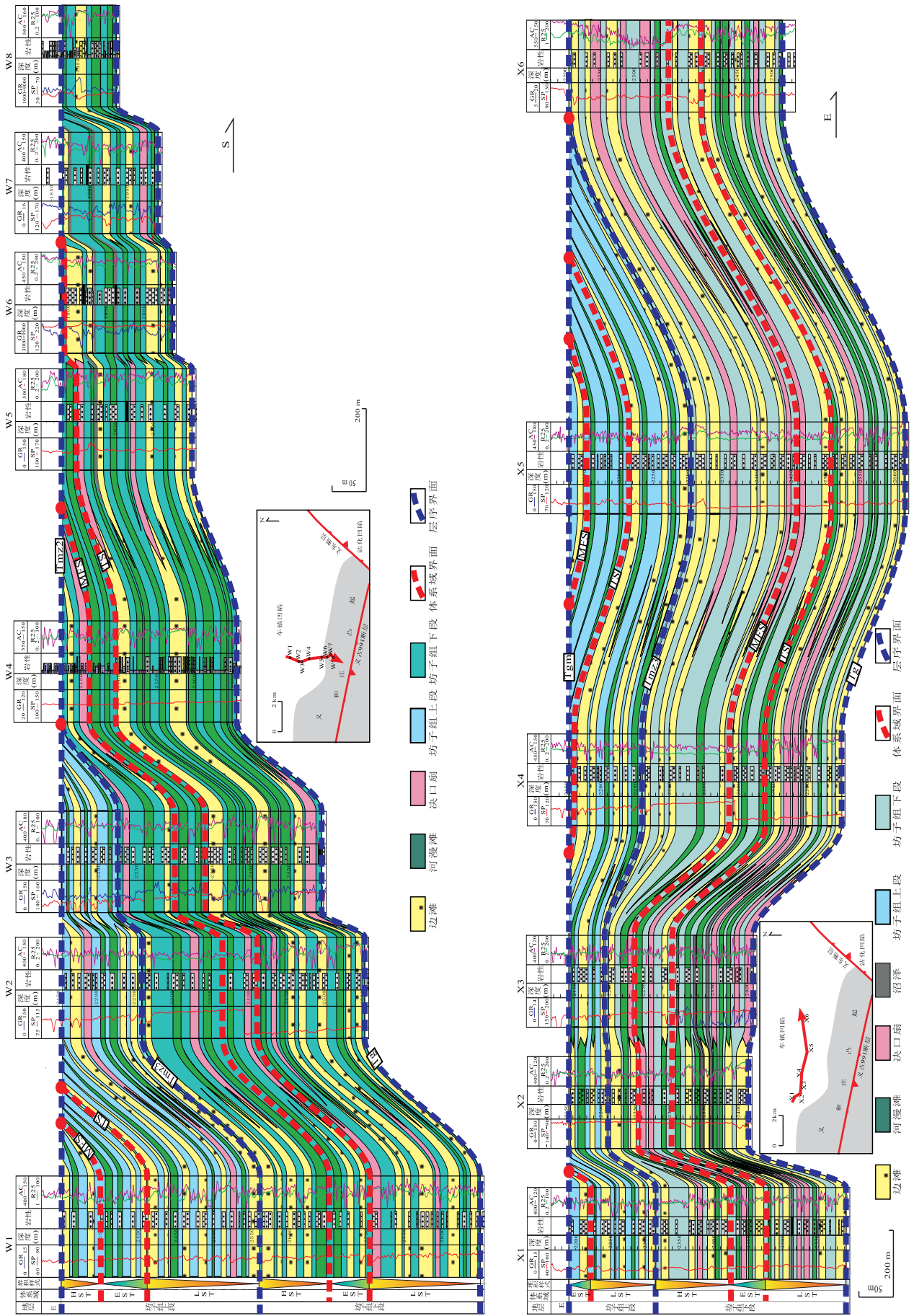


图 11 义和庄凸起东部燕山早期连井层序地层分析(岩性图例同图 10)

Fig. 11 Early Yanshanian sequence stratigraphic analysis of connecting-wells in eastern Yihetzhuang salient

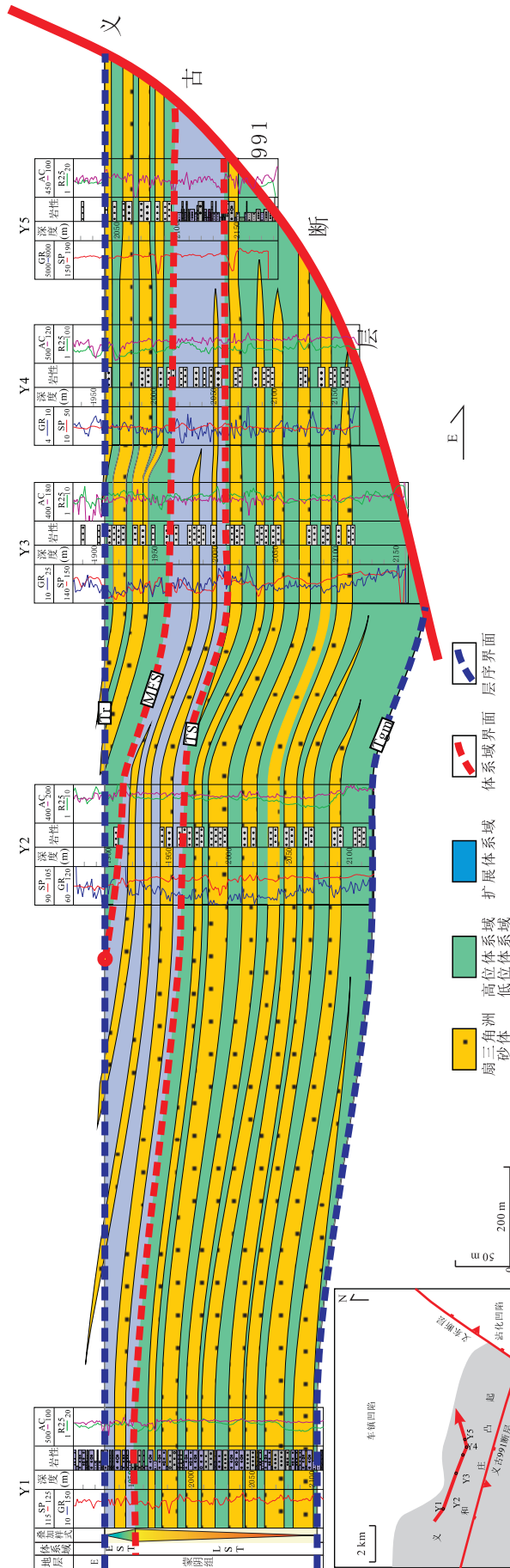


图12 义和庄凸起东部燕山晚期连井层序地层分析(岩性图例同图10)

Fig.12 Late Yanshanian sequence stratigraphic analysis of connecting-wells in eastern Yihezhuang salient

域中扇三角洲砂体构成不同的叠置样式.低位体系域砂体形成明显的由西向东的进积,且砂体厚度由下向上呈增厚的趋势;扩展体系域为由东向西的退积的叠置样式,且砂体厚度整体较薄,规模由下向上逐渐变小,甚至在晚期会出现湖相沉积;高位体系域表现为与扩展体系域不同的叠置样式,底部为背景沉积,向上则以砂体沉积为主,为进积的堆积样式.

5 层序地层样式及演化

以单井层序地层分析与连井层序地层分析为基础,建立了构造负反转前后燕山早期与燕山晚期垂向与横向的层序地层样式.

5.1 单井层序地层样式及演化

在单井层序地层分析的基础上,依据层序内部沉积体充填特征及垂向演化规律,分别建立了燕山早期(J_1+J_2)与燕山晚期(J_3)的垂向层序地层样式(图 13,图 14),可发现两者存在巨大差异,表现出对燕山期构造负反转的响应.

在义和庄凸起东部燕山早期,沉积坊子组(坊子组下段与坊子组上段)、三台组 3 个三级层序,每个三级层序均有低位体系域(LST)、扩展体系域(EST)与高位体系域(HST)组成.每个体系域内部,均有河流相沉积体充填其中.

在低位体系域初期,即低位体系域强制性水退期(LFR, lowstand forced regression)(图 13a),沉积基准面下降,由于底部三级层序高位域的补偿沉积(进积叠置),此时沉积基准面低于地层表面,所以可容空间为负值,河流对下伏地层产生冲刷削截,形成冲刷不整合界面,构成层序界面,此时因冲刷作用而缺乏沉积物的堆积;在低位域正常性水退期(LNR, lowstand normal regression)(图 13b),沉积基准面开始缓慢上升,位于地表上部,可容空间转为正值,但是可容空间增加速率小于沉积物供给速率,由于充分的沉积物供给,河道沉积垂向加积作用较强,纵向上表现为曲流河的多阶“二元结构”的叠加、砂体的相互叠置,且由于上部河道砂体的叠置与冲刷,下部河道的“二元结构”现象不明显,甚至缺失顶部泥质沉积而表现为弱瓣状化.河道中单个砂体较

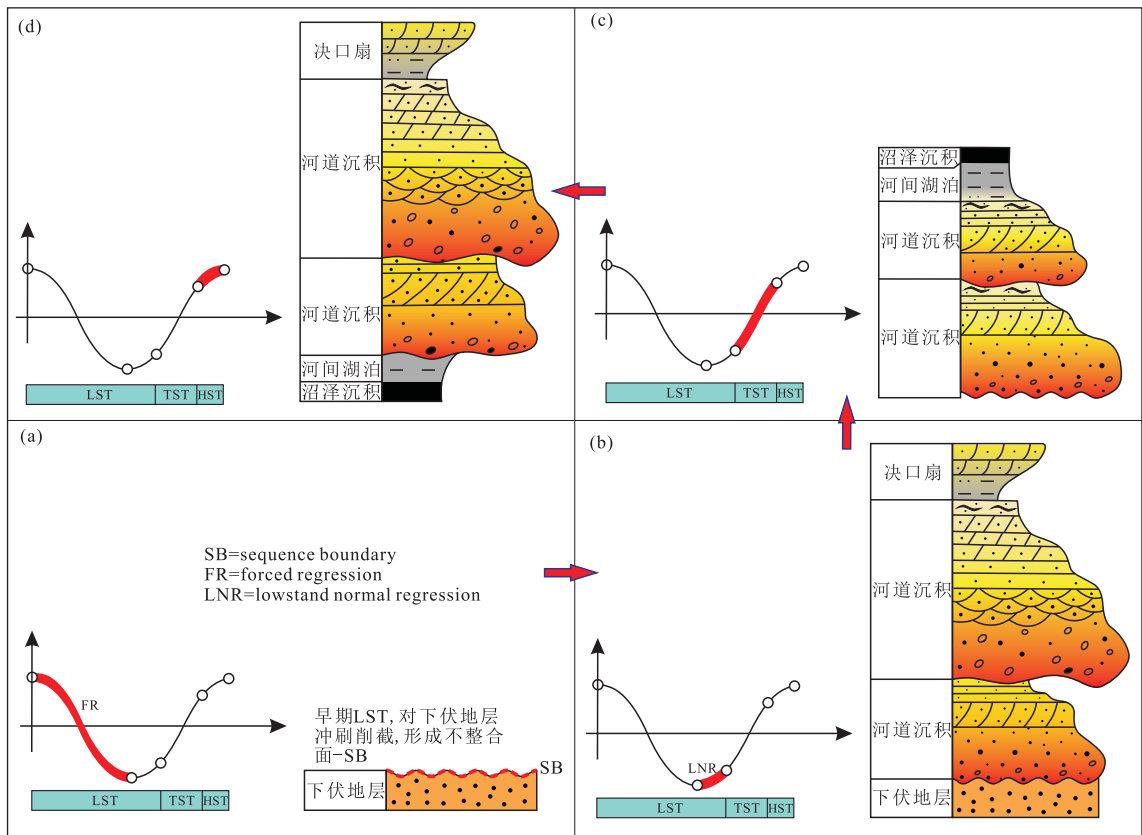


图 13 义和庄凸起东部燕山早期(坊子组与三台组同沉积期)垂向层序地层样式(岩性图例同图 10)

Fig.13 Early Yanshanian (syndepositional period of Fangzi Formation and Santai Formation) vertical sequence stratigraphic patterns in eastern Yihezhuang salient

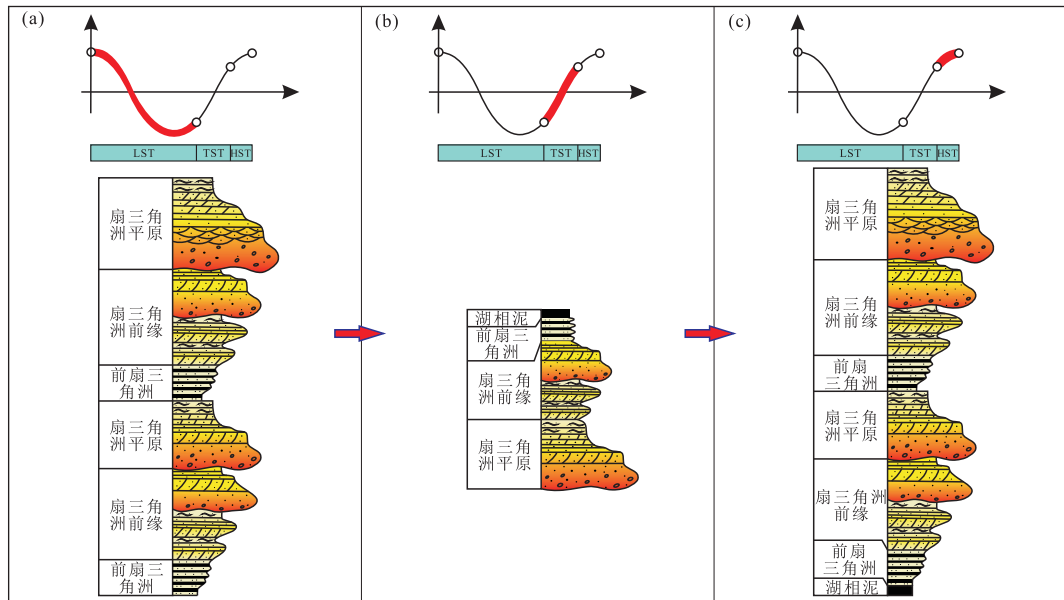


图 14 义和庄凸起东部燕山晚期(蒙阴组同沉积期)垂向层序地层样式(岩性图例同图 10)

Fig.14 Late Yanshanian (syndepositional period of Mengyin Formation) vertical sequence stratigraphic patterns in eastern Yihezhuang salient

厚,且由底部向上部,河道沉积、砂体厚度均呈现明显的增厚趋势。低位体系域晚期,由于沉积物的补偿沉积,河道中可供沉积物堆积的剩余可容空间较小,充足的沉积物供给很容易冲破河道而发育决口扇沉积。

在扩展体系域(EST)(图 13c),沉积基准面快速上升,导致可容空间增加速率大于沉积物供给速率,沉积体垂向叠置方式以退积为主。沉积基准面的上升伴随地下水面的上升,此时易于形成河间湖泊、湖沼或沼泽。在这一位置,泛滥平原相的垂向加积作用明显,暗色泥岩等发育,所以在该体系域中,河道砂岩厚度较小,泥岩厚度较大,导致河道“二元结构”中以上部泥质沉积物为主。扩展体系域晚期,由于可容空间增加的速率趋于减小,与沉积物供给速率趋于平衡,所以易于沉积泥炭沼泽,此沉积体分布面积广泛,具有等时性,可作为最大水泛面(MFS)。

在高位体系域(HST)(图 13d),仍以河道多阶的“二元结构”垂向叠置为主,且由于沉积基准面上升速度减慢,可容空间增加速率小于沉积物供给速率,叠置方式表现为进积。由下向上,单个沉积旋回中,河道砂体厚度增大,砂体含量增加,具有与低位域相似的构成样式。高位域晚期,同样由于补偿沉积,剩余可容空间的减小,导致发生决口扇沉积。

在义和庄凸起东部燕山晚期,沉积晚侏罗世蒙阴组地层,且由于后期的抬升剥蚀,仅残留低位体系域(LST)与扩展体系域(EST),而缺乏高位体系域

(HST)。但依据沉积基准面的旋回变化与下伏低位体系域和扩展体系域的内部沉积特征,可对高位体系域内部沉积充填及演化进行推测。各体系域内部由扇三角洲相与湖泊相沉积充填。

在低位体系域(LST)(图 14a),初期沉积基准面下降,晚期沉积物供给速率大于沉积基准面上升速率,体系域内部垂向上以进积的叠置方式为主。垂向上,早期扇三角洲以前扇三角洲泥岩沉积为主,扇三角洲前缘与扇三角洲平原等则较薄,晚期扇三角洲沉积以扇三角洲前缘与扇三角洲平原为主,且扇三角洲砂体厚度比下部较大。

在扩展体系域(EST)(图 14b),沉积物供给速率小于沉积基准面上升速率,层序内部沉积体以明显的快速退积为特征。层序下部以扇三角洲平原、前缘沉积为主,上部则过渡为前扇三角洲泥质沉积。由于沉积基准面的不断上升与沉积体的不断退积,在扩展体系域晚期会出现湖相沉积。

在高位体系域(HST)(图 14c),初期出现湖相沉积。由于沉积基准面上升速率小于沉积物供给速率,沉积物不断向湖盆内部进积,所以向上过渡为扇三角洲沉积。且下部扇三角洲平原与前缘砂体较薄、砂体含量较低,沉积物粒度偏细,上部扇三角洲平原与前缘砂体较厚、砂体含量较高。

5.2 连井(线)层序地层样式及演化

在连井层序地层分析的基础上,依据层序沉积

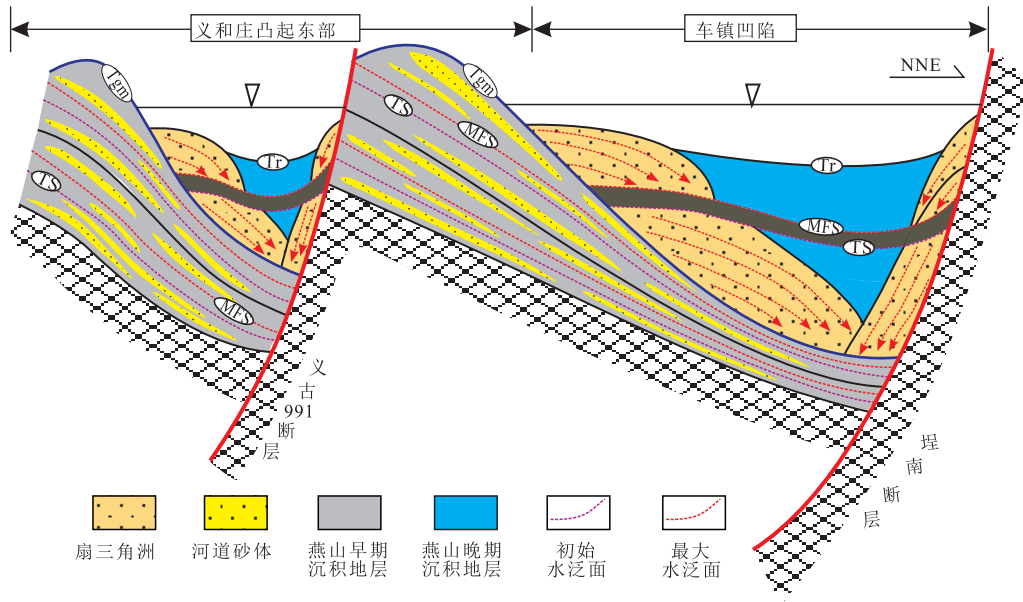


图 15 义和庄凸起东部燕山早期与燕山晚期横向层序地层样式

Fig.15 Early and late Yanshanian horizontal sequence stratigraphic patterns in eastern Yihezhuang salient

厚度的变化趋势与层序内部沉积体横向展布,分别建立了燕山早期与燕山晚期的横向层序地层样式(图 15),可发现两者存在巨大差异,表现出对燕山期构造负反转的响应。

在燕山早期,盆地以挤压挠曲沉降为主,层序沉积厚度由盆缘向断层呈现减薄趋势,但趋势不明显,不具有显著的沉积厚度分异,层序格架内部为曲流河沉积充填,低位体系域(LST)中,底部层序界面表现为对下伏地层的冲刷削截,底部河道砂体较薄,向上河道砂体变厚,且横向展布面积广,连通性较好;扩展体系域(EST)中,沉积充填体以泛滥平原泥质为主,河道砂体呈孤立分布其中,横向展布规模在三个体系域中达到最小,连通性较差,呈现退积叠置;高位体系域(HST)中,底部以泛滥平原泥质沉积为主,甚至出现湖相地层,向上则逐渐过渡为以河道砂岩沉积为主,且砂体厚度逐渐变厚,展布面积逐渐变大。

在燕山晚期,盆地以拉张断陷沉降为主,层序沉积厚度由盆缘向断层呈现明显增厚趋势,具有显著的厚度分异,层序格架内部为扇三角洲沉积充填,低位体系域(LST),砂体呈现向前进积的堆积样式;在扩展体系域(EST),底部发育砂体,但砂体厚度较薄,规模较小,且向上逐渐过渡为湖相泥岩沉积;高位体系域(HST)底部对扩展体系域顶部的沉积具有一定继承性,以泥质沉积为主,但向上逐渐过渡为砂质沉积,呈现进积叠置。

6 结论

(1)济阳拗陷义和庄凸起东部燕山期内发育一期构造负反转,对应 Tgm 构造不整合面的形成,该期构造负反转将燕山期划分为燕山早期与燕山晚期两大阶段,燕山早期,研究区处于挤压应力场,形成挠曲型盆地;燕山晚期,研究区处于拉张应力场,形成断陷盆地,在燕山早期沉积坊子组下段、坊子组上段与三台组,燕山晚期因受后期抬升剥蚀的影响而仅残留蒙阴组。

(2)在燕山早期与燕山晚期,分别发育不同的层序地层样式,层序地层格架及内部沉积充填在垂向与横向上均呈现出不同特征,表现出对燕山期构造负反转的响应。

(3)在燕山早期,层序地层厚度由盆缘向断层呈现减薄趋势,层序格架内部为曲流河沉积充填,河道砂体厚度、横向连通性等呈现旋回性变化;在燕山晚期,层序地层厚度由盆缘向断层呈现增厚趋势,层序格架内部为扇三角洲沉积充填,砂体厚度、横向展布规模等呈现旋回性变化。

References

Allen, P. A., Allen, J. R., 2005. Basin Analysis: Principle and Applications. Blackwell, Oxford, 1-493.
Chen, S., Wang, H., Wei, J., et al., 2013. Sedimentation of the Lower Cretaceous Xiagou Formation and Its Response

- to Regional Tectonics in the Qingxi Sag, Jiuquan Basin, NW China. *Cretaceous Research*, 47: 72–86. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2013.11.006>
- Cope, T., Luo, P., Zhang, X. Y., et al., 2010. Structural Controls on Facies Distribution in a Small Half-Graben Basin: Luanping Basin, Northeast China. *Basin Research*, 22(1): 33–44. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2009.00417.x>
- Deng, H. W., Guo, J. Y., Wang, R. J. et al., 2008. Tectono-Sequence Stratigraphic Analysis in Continental Faulted Basins. *Earth Science Frontiers*, 15(2): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- Feng, Y. L., Jiang, S., Hu, S. Y., et al., 2016. Sequence Stratigraphy and Importance of Syndepositional Structural Slope-Break for Architecture of Paleogene Syn-Rift Lacustrine Strata, Bohai Bay Basin, E. China. *Marine and Petroleum Geology*, 69: 183–204. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.10.013>
- Feng, Y. L., Zhou, H. M., Ren, J. Y., et al., 2010. Paleogene Sequence Stratigraphy in the East of Bohai Bay Basin and Its Response to Structural Movement. *Sci. Sin. Terrae*, 40(10): 1356–1376 (in Chinese with English abstract).
- Hans, E., Mandana, H., Woligang, S., 2002. Tectonic and Climatic Control of Paleogene Sedimentation in Rhenodanubian Flysch Basin (Eastern Alps, Austria). *Sedimentary Geology*, 152(3–4): 247–262.
- Heydari, E., 2008. Tectonics Versus Eustatic Control on Supersequences of the Zagros Mountains of Iran. *Tectonophysics*, 451(1–4): 56–70. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.11.046>
- Hou, G. T., Qian, X. L., Cai, D. S., 2000. Space–Time Relationship between Tectonics and Sedimentation of Mesozoic Bohai Basin. *Oil & Gas Geology*, 21(3): 201–206 (in Chinese with English abstract).
- Leleu, S., Hartley, A. J., 2010. Controls on the Stratigraphic Development of the Triassic Fundy Basin, Nova Scotia: Implications for the Tectonostratigraphic Evolution of Triassic Atlantic Rift Basins. *Journal of the Geological Society*, 167(3): 437–454. <https://doi.org/10.1144/0016-76492009-092>
- Li, S. T., 2015. Advancement, Trend and New Challenges in Basin Geodynamics. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- Lin, C. S., Li, S. T., Liu, J. Y., et al., 2011. Tectonic Framework and Paleogeographic Evolution of the Tarim Basin during the Paleozoic Major Evolutionary Stages. *Acta Petrologica Sinica*, 27(1): 210–218. <https://doi.org/10.1134/S002449021101007X>
- Lin, C. S., Liu, J. Y., Zhang, Y. M., et al., 2002. Depositional Architecture of the Tertiary Tectonic Sequences and Their Response to the Foreland Tectonism in the Kuqa Depression, Tarim Basin. *Science in China (Ser. D)*, 32(3): 177–183 (in Chinese with English abstract).
- Lin, C. S., Liu, J. Y., Zhang, Y. Z., et al., 2005. Sequence Stratigraphy and Tectono-Stratigraphic Analysis of Tectonically Active Basins: A Case Study on the Cenozoic-Mesozoic Lacustrine Basins in China. *Earth Science Frontiers*, 12(4): 365–374 (in Chinese with English abstract).
- Lin, C. S., Yang, H. J., Liu, J. Y., et al., 2012. Distribution and Erosion of the Paleozoic Tectonic Unconformities in the Tarim Basin, Northwest China: Significance for the Evolution of Paleo-Uplifts and Tectonic Geography during Deformation. *Journal of Asian Earth Sciences*, 46(6): 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2011.10.004>
- Liu, E. T., Wang, H., Li, Y., et al., 2014. Sedimentary Characteristics and Tectonic Setting of Sublacustrine Fans in a Half-Graben Rift Depression, Beibuwan Basin, South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 52: 9–21. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.01.008>
- Lü, D. W., Wang, D. D., Li, Z. X., et al., 2016. Depositional Environment, Sequence Stratigraphy and Sedimentary Mineralization Mechanism in the Coal Bed- And Oil Shale-Bearing Succession: A Case from the Paleogene Huangxian Basin of China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 148: 32–51. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.09.028>
- Ren, J. Y., Yu, J. G., Zhang, J. X., 2009. Structures of Deep Bed in Jiyang Sag and Their Control over the Development of Mesozoic and Cenozoic Basins. *Earth Science Frontiers*, 16(4): 117–137 (in Chinese with English abstract).
- Song, G. Z., Wang, H., Gan, H. J., et al., 2014. Paleogene Tectonic Evolution Controls on Sequence Stratigraphic Patterns in the Central Part of Deepwater Area of Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea. *Journal of Earth Science*, 25(2): 275–288. <https://doi.org/10.1007/s12583-014-0433-7>
- Song, G. Z., Wang, H., Sun, Z. P., et al., 2014. Paleogene Syndepositional Fault and Its control on Sequence Architecture of Lingshui Sag, Deepwater Area of Qiongdongnan Basin, South China Sea. *Journal of China University of Petroleum*, 38(4): 9–18 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D. D., Li, Z. X., Lv, D. W., et al., 2016. Coal and Oil Shale Paragenetic Assemblage and Sequence Stratigraphic Features in Continental Faulted Basin. *Earth Science*, 41(3): 508–523 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H., Liao, Y. T., Lu, Y. C., et al., 2010. Sequence Archi-

- ture Styles of Cenozoic Continental Rift Basins in East China. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 41(1): 277—285 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Z. P., Li, W., Ren, Y. J., et al., 2003. Basin Evolution in the Mesozoic and Superposition of Cenozoic Basin in the Area of the Jiyang Depression. *Acta Geologica Sinica*, 77(2): 280—28 (in Chinese with English abstract).
- Xia, B., Liu, C. L., Chen, G. W., 2006. Meso-Cenozoic Tectonic Evolution and Tectonic Styles in the Bohai Bay Basin. *Natural Gas Industry*, 26(12): 57—60 (in Chinese with English abstract).
- Yang, M. H., Jin, Z. J., Lü, X. X., et al., 2010. Tectono-Sedimentary Evolution of Piggy-Back Basin: Example from Kuqa Fold and Thrust Belt, Northern Tarim Basin, Northwest China. *Journal of Earth Science*, 21(4): 412—422. <https://doi.org/10.1007/s12583-010-0104-2>
- Zhang, H. R., Zhang, Y. K., Cai, X. M., et al., 2013. The Triggering of Yanshan Movement: Yanshan Event. *Acta Geologica Sinica*, 87(12): 1779—1790 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. W., Sui, F. G., Lin, H. X., et al., 2009. Petroleum Geology and Perspective Evaluation on Pre-Paleogene System in Bohai Bay Basin. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- 附中文参考文献**
- 邓宏文, 郭建宇, 王瑞菊, 等, 2008. 陆相断陷盆地的构造层序地层分析. *地学前缘*, 15(2): 1—7.
- 冯有良, 周海民, 任建业, 等, 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.
- 侯贵廷, 钱祥麟, 蔡东升, 2000. 渤海中、新生代盆地构造活动与沉积作用的时空关系. *石油与天然气地质*, 21(3): 201—206.
- 李思田, 2015. 沉积盆地动力学研究的进展、发展趋向与面临的挑战. *地学前缘*, 22(1): 1—8.
- 林畅松, 刘景彦, 张燕梅, 等, 2002. 库车坳陷第三系构造层序的构成特征及其对前陆构造作用的响应. *中国科学(D辑)*, 32(3): 177—183.
- 林畅松, 刘景彦, 张英志, 等, 2005. 构造活动盆地的层序地层与构造地层分析——以中国中、新生代构造活动湖盆分析为例. *地学前缘*, 12(4): 365—374.
- 任建业, 于建国, 张俊霞, 2009. 济阳拗陷深层构造及其对中新世盆地发育的控制作用. *地学前缘*, 16(4): 117—137.
- 宋广增, 王华, 孙志鹏, 等, 2014. 琼东南盆地深水陵区水凹陷古近纪同沉积断裂对层序构成样式的控制. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 38(4): 9—18.
- 王东东, 李增学, 吕大伟, 等, 2016. 陆相断陷盆地煤与油页岩共生组合及其层序地层特征. *地球科学*, 41(3): 508—523.
- 王华, 廖远涛, 陆永潮, 等, 2010. 中国东部新生代陆相断陷盆地层序的构成样式. *中南大学学报(自然科学版)*, 41(1): 277—285.
- 吴智平, 李伟, 任拥军, 等, 2003. 济阳拗陷中生代盆地演化及其与新生代盆地叠合关系探讨. *地质学报*, 77(2): 280—28.
- 夏斌, 刘朝露, 陈根文, 2006. 渤海湾盆地中新世构造演化与构造样式. *天然气工业*, 26(12): 57—60.
- 张宏仁, 张永康, 蔡向民, 等, 2013. 燕山运动的“绪动”——燕山事件. *地质学报*, 87(12): 1779—1790.
- 张善文, 隋风贵, 林会喜, 等, 2009. 渤海湾盆地前古近系油气地质与远景评价. 北京: 地质出版社.