

doi:10.3799/dqkx.2012.00

松辽盆地北部裂后反转期层序地层 格架及其形成机制

史双双^{1,2},任建业^{1,2},张顺³,付秀丽³,唐圣明^{1,2}

1. 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

2. 中国地质大学资源学院,湖北武汉 430074

3. 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院,黑龙江大庆 163712

摘要:应用高精度层序地层学分析的原理和方法,通过对研究区新处理的区域性地震反射剖面、测井和岩心等资料的综合分析,建立了松辽盆地北部裂后反转期层序地层格架。通过盆地的充填记录、湖平面变化和区域演化等信息,论证了松辽盆地裂后反转期各级界面的地质属性,分析了其形成机制,建立了盆地的沉积演化过程模型。研究表明,盆地裂后反转期发育的一级界面SB02和二级界面SB03、SB11均是区域构造挤压事件的响应界面;而湖平面的变化和物源供给导致了三级层序体系域构成样式的多样化;嫩江组二、三段识别出的7个四级层序则是在三级湖平面旋回的高位稳定期盆地物源充足、沉降速率较低的条件下形成的。本研究为松辽盆地中浅层隐蔽油气勘探提供了重要的等时地层对比格架。

关键词:松辽盆地;裂后反转;层序地层;四级层序;形成机制;石油地质。

中图分类号:P618

文章编号:1000-2383(2012)03-0000-11

收稿日期:2011-05-28

Sequence Stratigraphic Framework and Its Formation Mechanism of Post-Rift Inversion Successions in North of Songliao Basin, China

SHI Shuang-shuang^{1,2}, REN Jian-ye^{1,2}, ZHANG Shun³, FU Xiu-li³, TANG Sheng-min^{1,2}

1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Institute of Exploration and Development, Daqing Oilfield Company Ltd., Daqing 163712, China

Abstract: The principle and method of high resolution sequence stratigraphy are employed to deal with seismic reflection profiles, well logs and core data. The sequence stratigraphic framework of post-rift inversion successions has been reconstructed in North of Songliao basin. According to the information of basin fillings, lacustrine level changes and regional tectonic evolution, the geological property and formation mechanism of sequence boundaries are analyzed. The sedimentary filling evolution model is built in post-rift inversion successions. The study indicates that both the 1st-order unconformity SB02 and the 2nd-order ones SB03/SB11 in post-rift inversion successions are responding surfaces to regional compression tectonic events. The styles of systems tracts in the 3rd-order sequences are controlled by lacustrine level changes and provenance supply. The 7 4th-order sequences identified in the second and third members of Nenjiang Formation formed under the conditions of enough provenance and low tectonic subsidence rate during the highstand system tract of 3rd-order lacustrine level cycle. An important isochronous stratigraphic architecture has been provided for exploration of subtle reservoir in the middle-shallow layers in North of Songliao basin.

Key words: Songliao basin; post-rift inversion; sequence stratigraphy; fourth-order sequence; formation mechanism; petroleum geology.

建立高精度层序地层格架,开展精细的沉积体系分析是目前松辽盆地中浅层隐蔽油气勘探迫切需

要解决的问题之一。前人对松辽盆地层序划分做过大量工作(解习农,1994;魏魁生等,1997;黄清华等,

基金项目:国家科技重大专项(No. 2011ZX05009-001);中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室开放基金项目(No. TPR-2010-06);国家海洋局海底科学重点实验室开放基金(No. KLSG0903)联合资助。

作者简介:史双双(1984—),女,博士研究生,主要从事石油地质和沉积学方面的研究。E-mail: shishsh@126.com

1999; 辛仁臣等, 2004; Feng *et al.*, 2010; 吴怀春等, 2011), 但由于二维地震资料精度不高, 三维地震剖面覆盖面积有限, 加之人们对盆地反转、物源体系和界面性质等基本地质认识的差异, 造成了盆地中浅层层序地层划分方案长期得不到统一。本文试图运用构造—地层分析和高精度层序地层分析理论和技术(Brown Jr and Fisher, 1980; Van Wagoner, 1990; Mitchum Jr and Van Wanoner, 1991), 依据新处理的高精度三维地震连片资料和跨越整个盆地的二维地震剖面资料, 结合钻井、测井分析以及前人的研究成果对松辽盆地姚家组—明水组进行界面追踪、划分和对比, 建立盆地等时地层格架, 总结层序界面地质属性, 分析层序形成机制, 为松辽盆地北部中浅层隐蔽油气勘探提供地质依据。

1 区域地质概况

松辽盆地位于中国东北地区,呈北北东向展布,面积约为 $26 \times 10^4 \text{ km}^2$. 盆地北部可划分为西部斜坡区、北部倾没区、中央坳陷区、东北隆起区和东南隆起区 5 个一级构造单元和若干二级构造单元(图 1). 该盆地是世界上最典型的白垩纪陆相湖盆之一,白垩系是松辽盆地最主要的成藏组合发育层系和油气勘探目的层系,积累了丰富的地质和地球物理资料(杨万里, 1985; 方大钧, 1989; 谢汉生等, 2003; Xie et al., 2003; 蔡希源和辛仁臣, 2004; 向才富等, 2007; 侯启军等, 2009).

根据盆地形成机制及其大地构造背景,将松辽盆地白垩纪划分为2个构造演化阶段:火石岭组—登娄库组沉积期为引张裂陷构造阶段,该时期整个

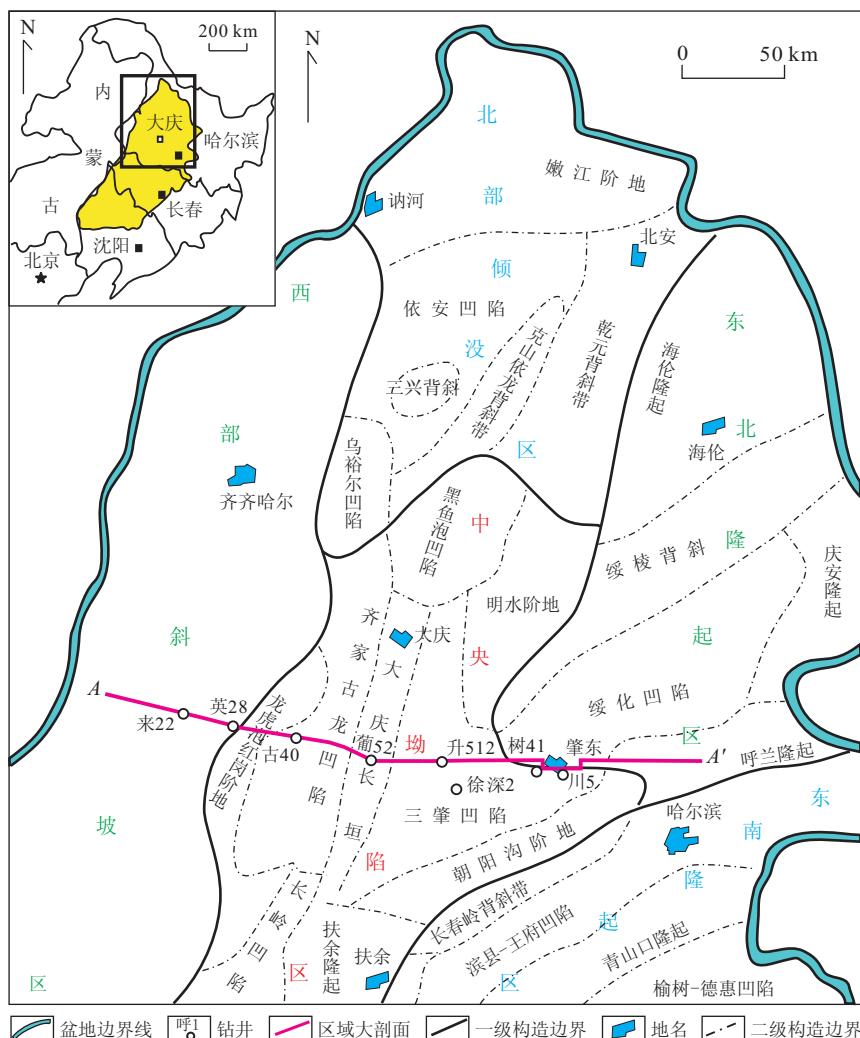


图 1 松辽盆地北部地理位置和构造单元

Fig. 1 Geographical position and tectonic units in North of Songliao basin

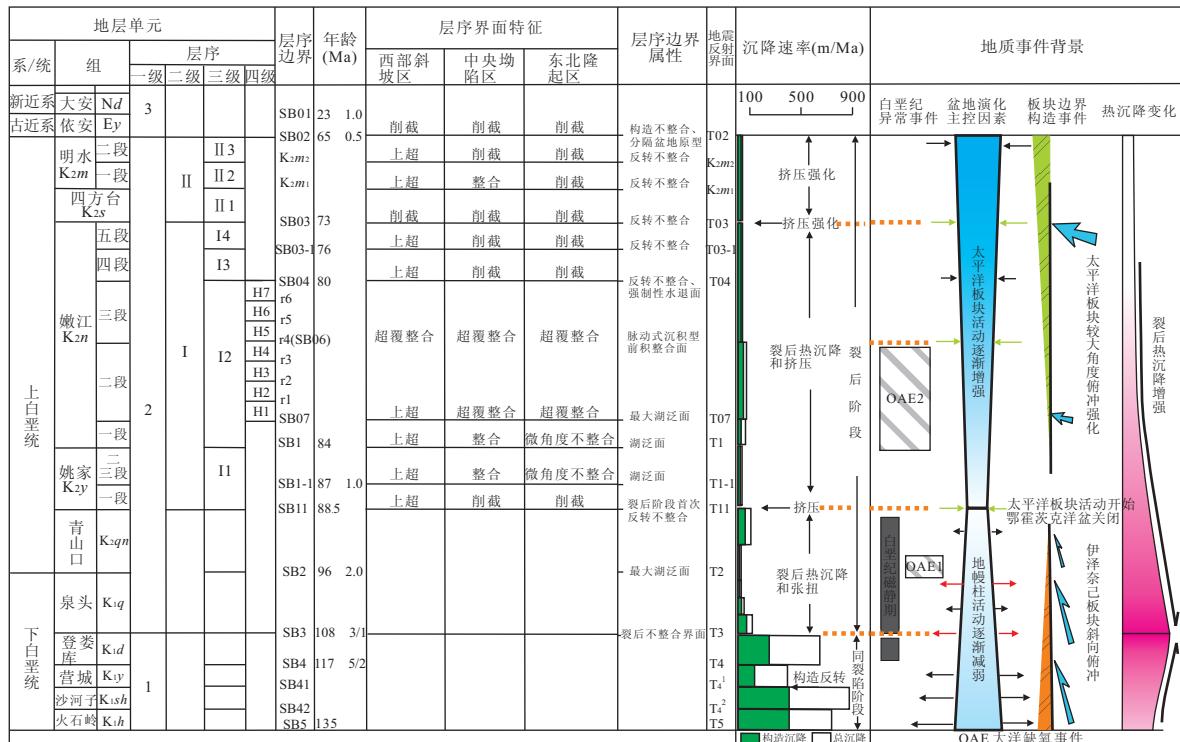


图 2 松辽盆地北部地层充填序列、界面属性和地质背景

Fig. 2 Stratigraphic Successions, geological property and tectonic background in North of Songliao basin

中国东北地区进入以裂陷作用为主导的构造运动时期,形成断陷盆地群;泉头组—明水组沉积期为裂后热沉降阶段,形成了统一的大型坳陷型盆地。由此在松辽盆地充填序列中可识别出断陷型和坳陷型2个构造层序(图2)。

松辽盆地裂后阶段自下而上充填了泉头组(K_1q)、青山口组(K_2qn)、姚家组(K_2y)、嫩江组(K_2n)、四方台组(K_2s)、明水组(K_2m)(图2).近期的研究表明(宋鹰等,2010),姚家组底界面很可能是晚白垩世太平洋板块与欧亚板块运动学(Hilde *et al.*, 1977; Faure and Natlin, 1992; Ren *et al.*, 2002)重组事件在松辽盆地内的构造—地层响应界面,盆地自上白垩统姚家组开始进入裂后阶段的挤压反转期,这个阶段盆地地层的最大埋深超过2 000 m,为本文的研究层段.

2 层序类型和层序地层格架

根据松辽盆地同裂陷构造阶段和裂后阶段的盆地原型,将松辽盆地白垩纪地层划分为两个一级构造层序1、2;在一级层序内部根据盆地次级构造演化——裂后张扭、裂后挤压和裂后挤压强化将整个裂后阶段(泉头组—明水组)一级层序2划分3个二

级层序：泉头—青山口组、姚家—嫩江组(I)和四方台—明水组(II)；裂后反转期二级层序I和II内部根据地震资料，结合钻、测井数据识别出三级不整合面，划分三级层序；三级层序内部结合沉积组合特征将湖泊相层序划分为低位体系域、湖泊扩展体系域和高位体系域，将河流相层序划分为基准面上升半旋回和下降半旋回；进而在体系域内部划分准层序组或者四级层序组。

在裂后阶段一级层序内,界面SB11(姚家组底界面)是一个重要的构造变革界面,为盆地内比较明显的剥蚀不整合界面。该界面在地震剖面上表现为中-低振幅中连续特征的反射同相轴,各类测井曲线在界面上下显示突变。在盆地的背斜、阶地部位的微幅隆起带与下伏地层成明显的削截关系,上覆姚家组超覆于界面之上。宋鹰等(2010)论证了该界面是代表松辽盆地裂后阶段反转挤压作用开始的界面。SB03(四方台组底界面)则是传统认为的反转构造进一步强化的界面(图2),在地震剖面上表现为中-低振幅中连续反射同相轴,在盆地边部和背斜靠近顶端处可见低角度削截,在盆地中部与下伏地层成整合接触,局部可见较强的下切侵蚀痕迹(图3b),上覆前积层底超于界面之上。两者均显示出上超下削的特征(图3)。

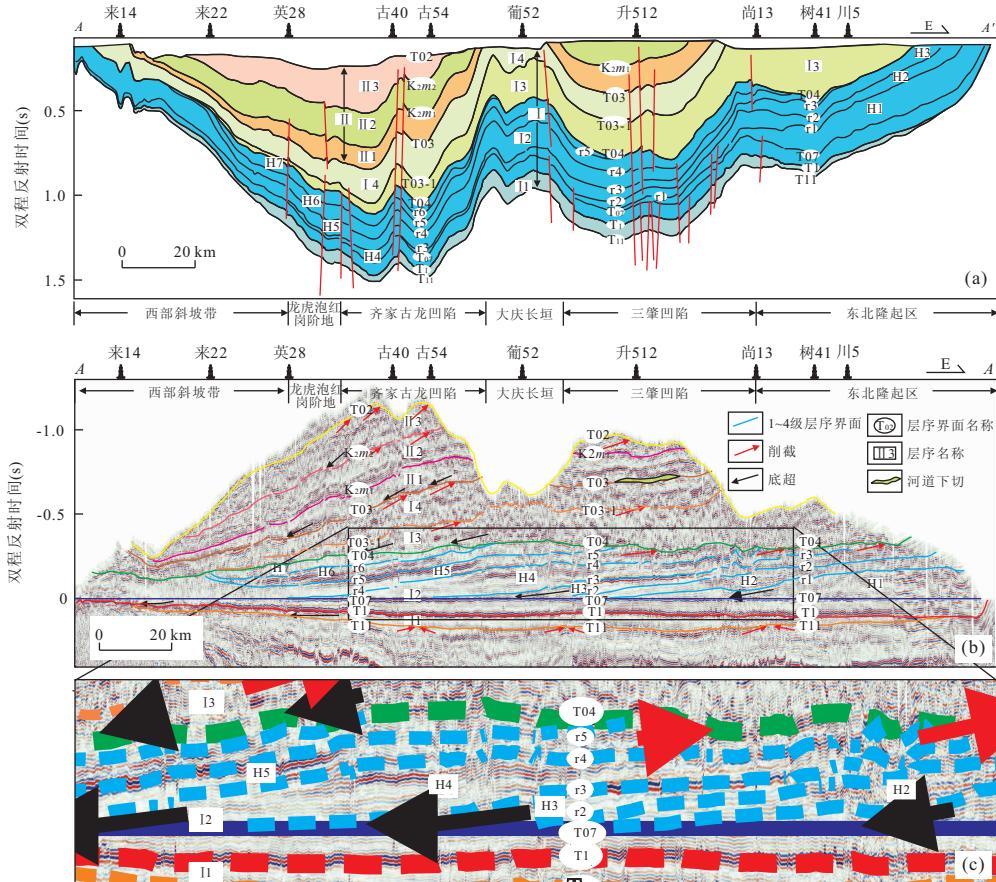


图 3 典型层序样式及地震反射特征(位置图见图 1)

Fig. 3 Typical stratigraphic styles and characters of seismic reflection

a. 层序样式; b. SB07 层拉平地震剖面; c. 四级层序地震反射特征

上述两个界面是盆地裂后阶段构造反转期发育的二级层序界面,分别是盆地裂后阶段挤压反转作用开始和构造反转作用强化的响应界面,两者将裂后阶段构造反转期的地层划分为2个二级层序姚家—嫩江组Ⅰ和四方台—明水组Ⅱ(图2)。

2.1 姚家—嫩江组(I)

二级层序 I 被不整合面 SB11 和 SB03 所限, 时间跨度 15.5 Ma。整体呈现东厚西薄的特征(图 3a), 厚度最大达 1200 余 m, 包含 4 个三级层序(姚家组 I 1、嫩江组一、二、三段 I 2、嫩江组四段 I 3、嫩江组五段 I 4), 由下至上分别被三级界面 SB1、SB04 和 SB03-1 分隔。以跨越盆地东西向的大剖面 AA' 为例, SB1 整体上与上下地层呈平行接触, 仅在西部斜坡区上覆地层上超于界面之上, 表明该时期发生自东向西的湖扩事件; SB04 是反转期以来第一个强不整合界面, 尤其在大庆长垣及其以东地区下伏地层抬升遭受强烈剥蚀, 而在大庆长垣以西地区界面之上表现为多套前积地层向西推覆(图 3c), 西部斜坡区上超下削, 剥蚀程度较东部弱; SB03-1 界面反射

特征与 SB04 相似,不同的是上覆前积层向西推覆角度较大(图 3b).

已有的钻孔岩心(图4)及测井曲线(图5)均显示,层序Ⅰ1底部发育了一套在研究区内广泛分布的红色古土壤层,反映了SB11界面发育时期曾长期暴露遭受剥蚀,是裂后阶段盆地由伸展沉降转为挤压抬升的构造反转变革面。层序Ⅰ1厚0~228 m,时间跨度4.5 Ma,划分为3个体系域:下部是以三角洲平原、辫状河、分流河道沉积为主的低位体系域;在盆地中心部位向上过渡为滨浅湖亚相,代表了湖泊扩展体系域;顶部为高位体系域的向上变粗的三角洲前缘亚相,测井曲线表现为进积/退积/进积型叠加特征。

层序 I 2 代表嫩江组一、二和三段,发育一套深湖一半深湖亚相沉积序列,厚 160~605 m,时间跨度约 4 Ma。嫩江组一段为湖泊扩张期,全盆大范围沉积一套暗色泥岩,局部发育深水滑塌浊积体(图 5)。SB07 界面为一套全盆可追踪的油页岩,生物化石较丰富,地震剖面上为一套连续性好的双轴强反

深度(m)	颜色	岩心剖面	岩心照片	岩性描述
1 292			网结状红层断面图 	紫红色泥岩, 含钙
	8			
	3			灰绿色泥岩, 含少量介形虫, 生物化石, 底部颜色突变
1 294	8+3			紫红色泥岩, 含钙
	3		灰绿色夹紫红色泥岩, 网结状 紫红色泥岩充填物, 含钙 灰绿色夹紫红色泥岩含钙底部颜色突变	
	3		紫红色泥岩, 大量钙质结核, 平均 粒径1 cm, 最大粒径4 cm	
1 296	3+8		底部灰绿夹紫红色泥, 顶部网纹红层 	紫红色泥岩, 含钙
	3+8			紫红色夹灰绿色泥岩, 顶部见虫孔
	3+8			紫红色夹灰绿色泥岩, 含钙
	8		紫红色夹灰绿色泥岩, 中部夹 2~3层厚约0.5 cm介形虫层 	紫红色夹灰绿色泥岩, 含少量介形虫
1 298	3+8		灰绿色泥质介形虫层 	灰绿色夹紫红色泥岩, 含介形虫, 含钙
		比例尺1:25		

图4 姚家组底部红色古土壤层(敖16-2井)(据解习农,2007内部报告;宋鹰等,2010)

Fig. 4 Red paleosol layers developed at the bottom of Yaojia Formation

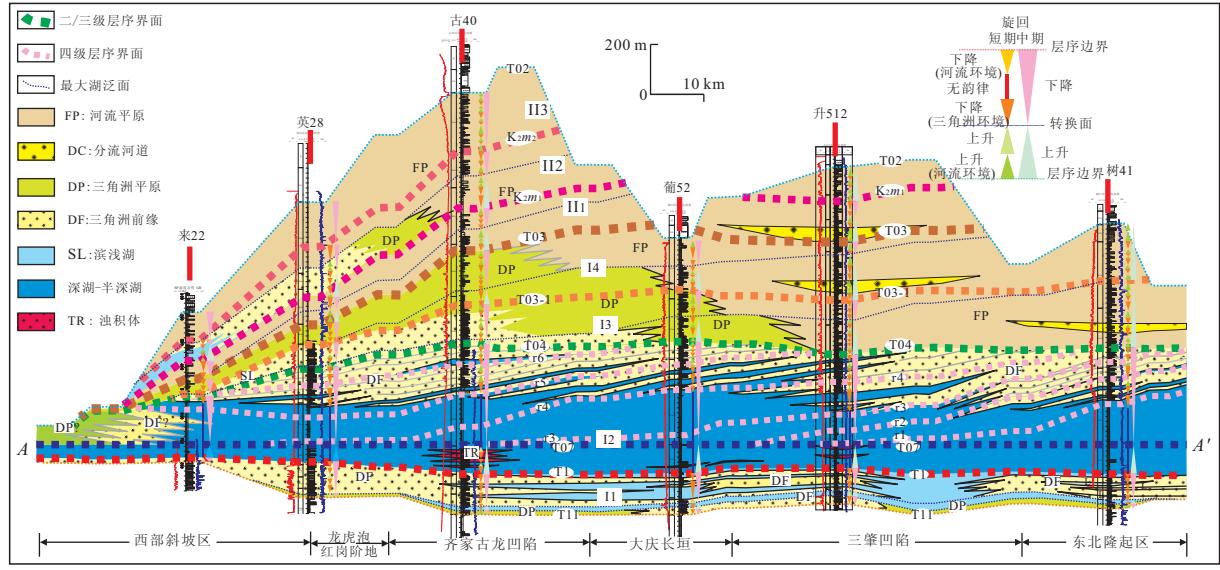


图 5 AA'测线层序和沉积相解释

Fig. 5 Sequense stratigraphic and depositional system interpretation of cross section AA'

射,代表盆地发育深水湖泊的最广时期,为最大湖泛面。嫩二、三段为层序Ⅰ2的高位体系域,由下至上表现出前三角洲—三角洲前缘亚相的连续沉积特征,由于丰富快速的物源供给和较低的构造沉降速率,在高品质的地震资料上识别出7套由东向西低

角度延伸的前积层(H1~H7),分别被6个四级不整合面r1~r6分隔,其中r1~r4底超于SB07界面之上,r5、r6向西被SB04界面削截,6个四级不整合面向上均被SB04界面包络,每一套层序由顶端强反射过渡至底超面附近的弱反射。在该剖面上对

应为 7 个四级层序由浅水相三角洲前缘砂体逐渐向盆地中心前三角洲—深湖亚相带延伸的沉积系统(图 5),每一个四级层序代表一次等时的物源供应,揭示了该时期东部远端物源供给极为丰富。与层序 I1 不同的是,层序 I2 由于沉积物供给速率极快,其高位域由 7 个四级层序而非准层序组组成,因此,层序 I2 是有别于三级基本层序 I1 的三级复合层序。

层序 I3 和 I4 分别为嫩江组四段和五段,厚度分别为 0~300 m 和 0~355 m,跨越时间分别为 4 Ma、3 Ma。两者均为陆上暴露沉积,以三角洲平原亚相和河流相为主,均由基准面上升半旋回和下降半旋回组成。随着层序 I2 后期基准面下降,湖岸线向盆地西部迁移,湖区面积大幅度缩小。两套层序东部均抬升遭受大范围剥蚀,盆地东部 SB04 之下为三角洲前缘亚相,之上发育河流冲积平原亚相,出现相跃迁,盆地西部垂向上则表现为相连续的特征。两套层序平面展布特征相似:由盆地东部的河流冲积平原亚相向西部过渡为三角洲平原亚相,东部物源向西推覆,底超在层序底界面之上,且在层序内部由东向西上升半旋回幅度逐渐减小,下降半旋回幅度逐渐增大(图 5),符合基准面旋回过程中沉积物的体积分配原则(Cross, 1991; Cross and Lessenger, 1998)。

2.2 四方台—明水组(Ⅱ)

二级层序 II 处于盆地挤压强化构造幕,介于不整合面 SB02 和 SB03 之间,时间跨度 8 Ma,最大厚度达 700 余 m。在大庆长垣和盆地两侧的斜坡隆起区遭受剥蚀。包含 3 个三级层序(四方台组 II1、明水组一段 II2、明水组二段 II3),由下至上被三级界面 K_2m_1 和 K_2m_2 隔开。SB02 是区域性一级不整合面,大多数隆起构造均被该界面削顶,地层遭受剥蚀,特别是在东部,这种削截作用更为明显(图 3a)。钻井和测井资料也显示该界面为一个区域性的突变界面:以齐家古龙凹陷古 40 井为例,明水组二段湖相泥岩与新近系泰康组冲积扇相粗砾岩呈突变接触;测井曲线在该界面处一般表现为较大的坎值(图 6)。由于松辽盆地的挤压强化, K_2m_1 与 K_2m_2 界面遭受大规模剥蚀, K_2m_2 界面在盆地内分布范围十分局限,只分布在齐家古龙凹陷—龙虎泡红岗阶地一带,局部出现上超下削特征,在地震剖面上表现为低振幅弱连续的反射特征; K_2m_1 界面分布的范围稍大,三肇凹陷局部也有出露,但在盆地东部也遭受强烈剥蚀(图 3b)。

层序 II1、II2 和 II3 分布于盆地凹陷区内,剖面 AA' 中 II3 仅分布在西侧的齐家古龙凹陷,东部完

全遭受剥蚀。同层序 I3 和 I4 一样,在 SB07 拉平地震剖面上,层序内部均显示一系列高角度前积层向西推进,反映了东部靠近物源;测井曲线和岩心显示三者均发育退积/进积型沉积序列,由上升半旋回和下降半旋回构成。每个层序内部以河流相沉积为主,局部出现湖相灰色泥岩,相带分异不明显。其中 II1 以河流相沉积为主,东部升 512 井附近发育分流河道充填,可识别出完整的基准面旋回系统; II2 层序内部岩心数据显示发育大套灰色、灰黑色泥岩夹厚层粉砂岩,以滨浅湖亚相为主,局部为三角洲平原亚相,同样识别出基准面上升半旋回和下降半旋回; II3 分布范围局限,以河流相为主,仅识别出基准面下降半旋回为主的非对称旋回(图 3)。

2.3 层序地层格架的建立

上述分析将盆地裂后反转期主要层序界面分为 1 个一级层序界面 SB02、2 个二级层序界面 SB03、SB11 和 5 个三级层序界面 K_2m_2 、 K_2m_1 、SB03-1、SB04 和 SB1 以及 6 个四级层序界面 r1~r6(图 2)。结合对松辽盆地裂后反转期各级层序的划分和对三级层序体系域特征的解剖,可以看出松辽盆地北部裂后反转期不同级别地层序列在空间展布和时间演化上均具有规律性。

三级层序的总体展布特征表现为:姚家组呈两侧薄中间厚的碟形。自嫩江组一段湖泛开始,来自东边的物源逐渐强化,横向显示东厚西薄的特征,并且发育一系列自东向西推覆的前积层,东部遭受剥蚀,西部底超在层序底界面之上。在 SB07 层拉平格架剖面上,前积层由下至上角度逐渐变陡,揭示物源由东部远端向近端的过渡。

各三级层序体系域空间上展布特征各异。层序 I1 以河流—三角洲平原亚相和滨浅湖亚相为主,属低位域、高位域和湖扩域齐全的三元结构型基本层序;层序 I2 发生全面湖泛作用,以湖相和三角洲前缘亚相为主,SB07 为最大湖泛面,识别出湖扩域和高位域,高位域又再分为 7 个四级层序,每个四级层序代表一次浅水相三角洲前缘向深水湖相过渡的等时沉积,层序 I2 定义为二元结构型复合三级层序。从嫩江组四段开始,基准面下降,各三级层序以暴露沉积为主,仅层序 II2 内部出现滨浅湖亚相,东部地区局部发育下切河道充填。SB04 之上泥岩颜色发生突变,在每个三级层序内部体系域均是由基准面上升半旋回和下降半旋回组成的对称旋回,定义为二元结构型基本层序,横向展布样式符合沉积物体积分配原则。总之,垂向上,在盆地西部的西部

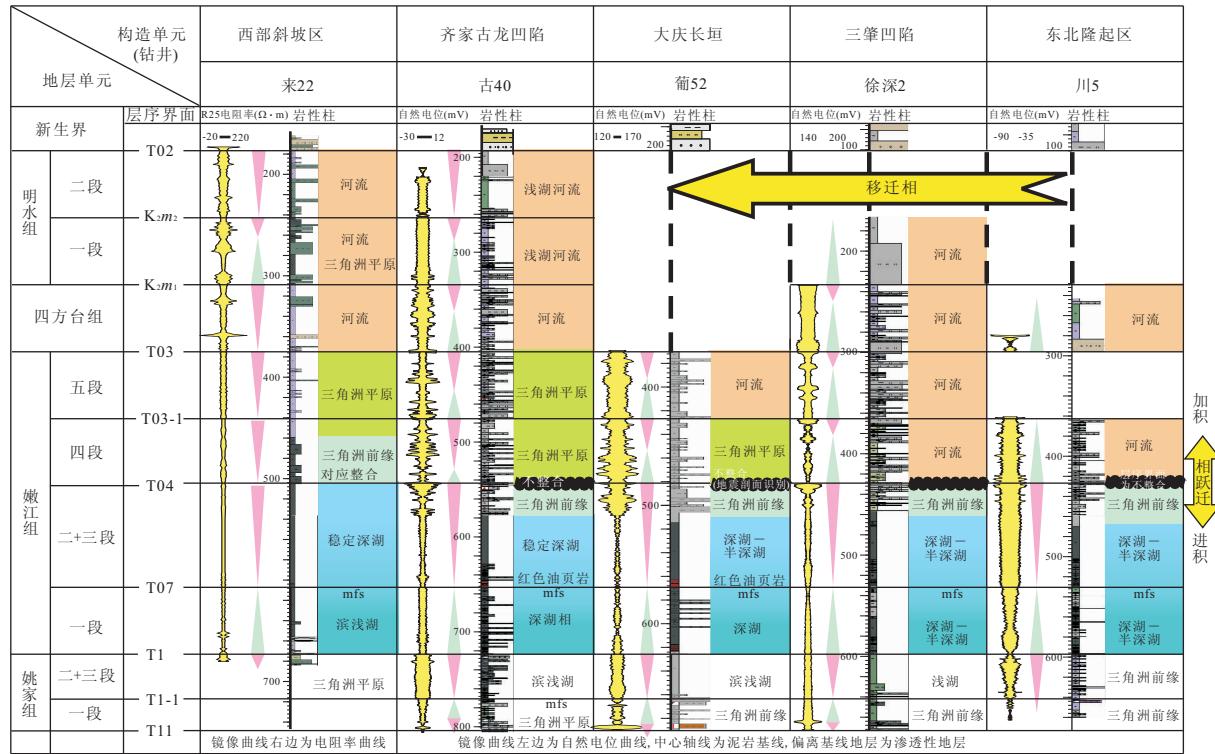


图 6 松辽盆地裂后反转期沉积充填规律

Fig. 6 Regulation of sedimentary filling in post-rifted inversion successions of Songliao basin

斜坡区和中部地区齐家古龙凹陷、大庆长垣一带,由下至上表现出深湖半深湖亚相—三角洲前缘亚相—三角洲平原亚相—河流相的相连续特征,而在盆地东部的三肇凹陷和朝阳沟阶地由下至上则发育深湖半深湖亚相—三角洲前缘亚相—河流相的沉积组合,缺失过渡相,表现出相跃迁的特征;横向,由东至西呈现出河流相—三角洲平原亚相—三角洲前缘亚相—深湖半深湖亚相的相迁移特征(图 6),正确识别和对比层序内部这种等时的相迁移现象,才能准确划分盆地的等时地层格架,而不至于出现穿时的混乱现象。

四级层序界面 H1~H7 由层序 I 2 内部四级的不整合面控制,在地震剖面上表现为一系列自东向西低角度进积的前积层,对于三角洲前缘较粗粒沉积向深湖细粒沉积的过渡。其中四级界面 r4 全区大部分均有分布,横向变化相对稳定,相当于前人定义的 SB06 界面。本文通过全盆地对比研究发现,该界面和其他四级层序界面一样,是由于东部远端物源供给充分,沉积速率较大而形成的四级不整合。

综上所述,盆地发育了以 I 2 为代表的三级复合层序和其他 6 个三级基本层序(I 1、I 3、I 4 和 II 1~II 3);并在嫩二、三段内(复合层序的高位域)识别出 7 个四级层序(H1~H7);识别出多个体系

域边界(大的体系域界面如 SB07),并根据体系域发育特征,进一步将三级层序划分为二元结构型(I 2、I 3、I 4 和 II 1~II 3)和以姚家组(I 1)为代表的三元结构,由此建立了松辽盆地北部裂后反转期层序地层格架(图 7)。

3 层序形成机制分析

层序地层单元的几何形态和岩相组合主要受构造沉降、相对湖(海)平面变化、沉积物供给和气候 4 大参数的控制(Mitchum *et al.*, 1977; Vail *et al.*, 1977; Embry, 1995)。构造沉降、湖平面变化和沉积物供给 3 个参数控制沉积盆地的几何形态,构造沉降和湖平面变化两个参数决定了沉积物可容纳空间的大小(图 8a)。对闭流湖盆而言,气候因素也可对可容纳空间产生较大影响,进而控制三级层序体系域发育样式(图 8b)。显然,松辽盆地裂后反转期层序的发育主要受控于挤压应力的幕式活动(王燮培等,1996)以及湖平面变化和物源供给 3 个主要因素的影响(图 8),局部层序样式受控气候因素。

SB02 界面是中、新生界的分界面,年龄为 65 Ma,持续时间约 12 Ma。该界面与 SB3 界面一起控制了松辽晚白垩世大型坳陷盆地。此时,欧亚板块

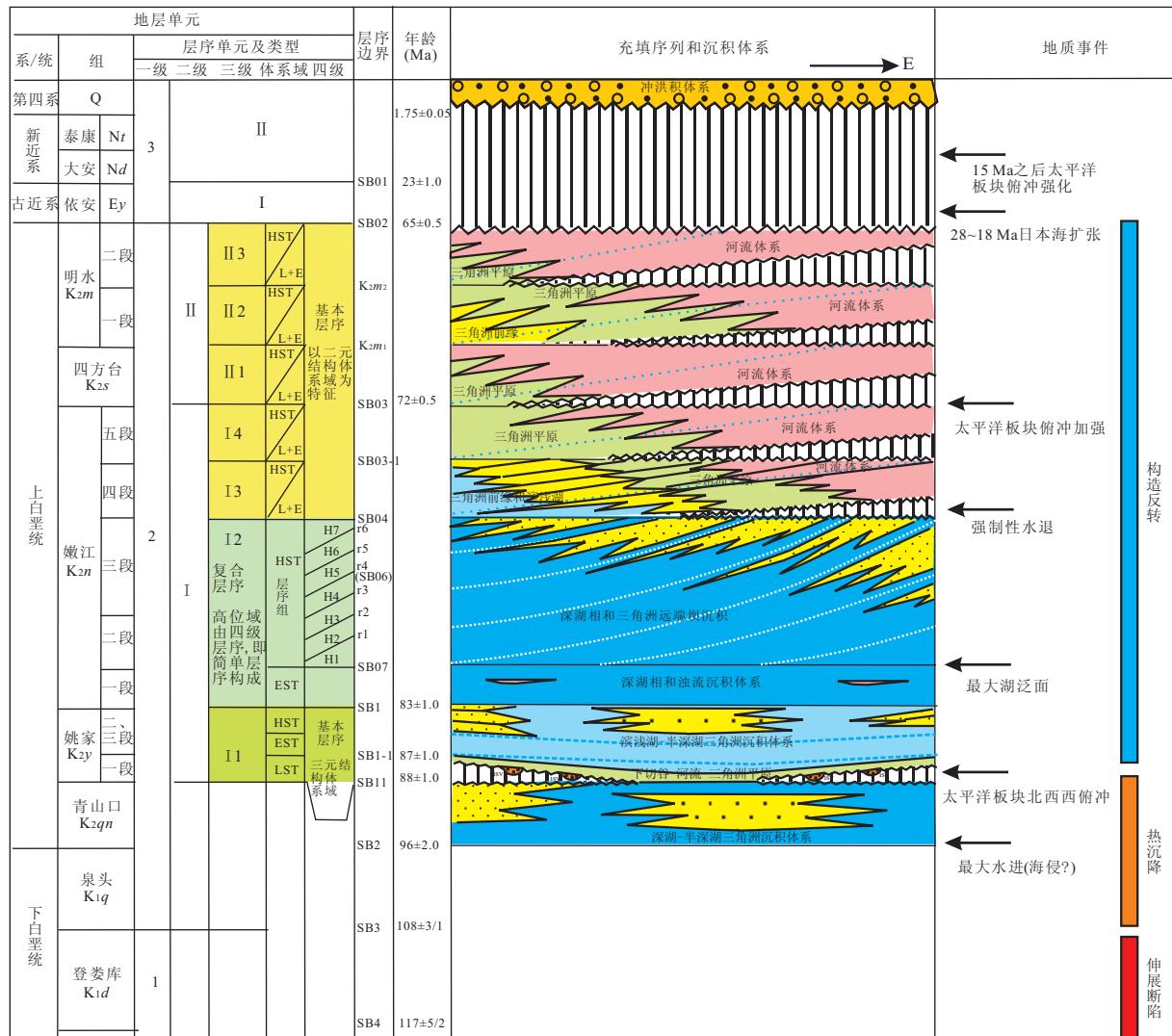


图 7 松辽盆地裂后反转期层序格架及沉积充填模式

Fig. 7 Stratigraphic architecture and model of sedimentary filling in post-rifted inversion successions of Songliao basin

绝对运动和太平洋板块俯冲同时加强,也是中国东部燕山运动晚期的主幕,白垩纪末期挤压导致全盆抬升遭受大规模剥蚀。88.5 Ma 时期,板块运动学重组事件导致太平洋板块运动方向发生改变(Stepashko, 2006, 2008; Soloviev, 2006),太平洋板块运动方向由 NNW 向 NWW 转折,导致板块边界强大的由东向西的汇聚挤压应力传递到盆地内部,造成盆地大规模反转抬升,同时白垩纪末期发生全球性大海退事件(Haq *et al.*, 1987),两者叠加造成盆内湖平面大幅下降,下部青山口组抬升、暴露、剥蚀而形成 SB11 界面(宋鹰等,2010)。SB03 界面形成于 73 Ma 时的盆地挤压强化期,此时太平洋板块俯冲加强,盆地出现造陆运动,东西差异隆升,盆地东部翘起,嫩五段被剥蚀。此外,SB04、SB03-1、K2m1、K2m2 等也具有东部不整合,西部整合的特点,是较

低级别挤压幕的响应,其中嫩江组三段沉积末,基准面下降,沉积了一套以河流相和三角洲平原亚相为主的、伴随河道下切作用的退覆沉积,强制性水退作用叠加低级别挤压构造作用形成了 SB04 界面(图 7)。

构造活动间歇期湖平面的变化和物源供给控制了层序及体系域的展布形式(图 8). 松辽盆地姚家组沉积时期, 湖平面的下降与上升分别对应了低位体系域和湖扩—高位体系域, 同时, 该时期物源方向来自盆地周边的所有隆起区, 方向多元化, 导致形成了盆地中间厚、边缘薄的碟形层序. 松辽盆地嫩一和二段沉积期对应全球范围的海侵期, 同时也是松辽盆地湖盆发育范围最大、湖水最深的一个沉积时期. 嫩江组一段, 湖平面上升, 至 SB07 界面时形成盆地最大的一个湖泛面, 对应于一套几乎覆盖全盆的油页岩, 是研究区内最为重要的一个优质烃源岩层段.

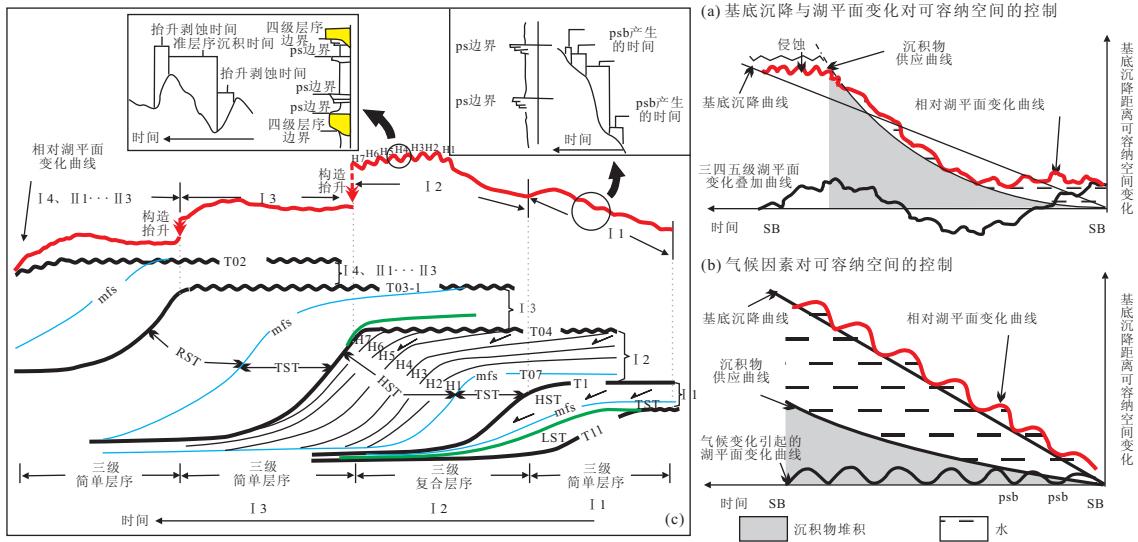


图8 松辽盆地北部裂后反转期层序界面形成机制

Fig. 8 Formation mechanism of post-rift inversion successions in North of Songliao basin

嫩二段开始,盆地形成深湖一半深湖沉积环境,沉积了大套泥岩,盆地中心发育浊积扇。嫩三段末期,湖平面稳定或开始下降,东部物源占主导地位,在该段中发育了一系列反映物源方向的由东向西进积的前积层,即前述已述及的嫩江组二、三段中划分的7个四级层序,该时期盆地东部沉积物供应大于产生的可容纳空间,地层遭受剥蚀(图8a)。嫩四段开始到明水组,除了明一段小幅度的水进之外,每个三级层序的发育都经历了基准面上升到下降的变化,形成了具有二元结构的层序构成样式。基准面上升,形成退积式堆积模式的正旋回;基准面下降,形成进积式堆积模式的反旋回。

另外,气候因素对层序内部构成样式也有影响。比如姚家组沉积初期气候干燥,在此期间湖泊一直处于封闭条件之下,气候因素较大地影响了闭流湖盆内可容纳空间大小(图8b)。姚家组底部的红色古土壤层就是青山口沉积末期,在干旱气候下发育河流相和三角洲平原相沉积,并抬升暴露长时间遭受氧化作用而形成的(宋鹰等,2010)。

在三级海平面变化曲线下降段,如果沉降速率较低,而且有充足的物源供给和较高的沉积速率,就可能导致陆架冲刷形成四级不整合边界而被记录下来(图8)(Van Wagoner *et al.*, 1988; Brink *et al.*, 1993; Graham, 2001; Catuneanu, 2002)。这种条件同样也适应于湖相盆地,松辽盆地I2的高位域沉积时期,湖平面下降,加上该时期丰富快速的物源供给及较小的构造沉降速率,当沉积物供给量大于可容纳空间时,在嫩江组二、三段形成了可追踪的四级层序H1~H7。

4 结论

(1) 松辽盆地裂后反转期发育一级层序界面1个(SB02),二级层序界面2个(SB03和SB11),三级界面5个(SB1、SB04、SB03-1、K₂m₁和K₂m₂),体系域界面若干及四级层序界面6个(r1~r6)。对应于两个二级层序Ⅰ和Ⅱ,高位域由四级层序H1~H7组成的三级复合层序Ⅰ2和体系域由准层序组组成的6个三级基本层序Ⅰ1、Ⅰ3、Ⅰ4、Ⅱ1~Ⅱ3。三级层序根据体系域类型分为二元结构和三元结构两类。

(2) 姚家组以后,沉积充填特征横向自东向西具有相迁移特征,垂向上盆地东部SB04界面由下至上出现相跃迁,西部则表现出相连续特征。

(3) SB11、SB03和SB02是区域构造挤压事件导致盆地自东向西隆升遭受剥蚀而形成的沉积间断面;次级构造挤压幕控制三级层序界面的形成,其中SB04是次级挤压事件叠加基准面下降而形成的强制性水退面;湖平面的变化和物源因素控制了层序体系域发育样式,形成了最大湖泛面SB07等体系域界面,最终构成了盆地二元结构和三元结构的多元化层序格架;四级界面的形成受控于四级湖平面旋回叠加物源因素。

(4) 浅水湖泊三角洲沉积是岩性圈闭发育的基础,三角洲前缘分流河道、河口砂坝、前缘席状砂能形成各种岩性圈闭。本文在嫩江组二、三段首次提出的四级层序的划分是多套三角洲前缘砂体向湖盆推进的表现,对岩性地层圈闭油气勘探具有指导意义。

References

- Brink, G. J., Keenan, J. H. G., Brown Jr, L. F., 1993. Deposition of fourth-order, post-rift sequences and sequence sets, Lower Cretaceous (Lower Valanginian to Lower Aptian), Pletmos basin, South Africa; Chapter 3: recent applications of siliciclastic sequence stratigraphy. In: Weimer, P., Posamentier, H. W., eds, Siliciclastic sequence stratigraphy: recent developments and applications. *AAPG Special Volumes*, 58: 43–69.
- Brown Jr, L. F., Fisher, W. L., 1980. Seismic stratigraphic interpretation and petroleum exploration, Aapg continuing education course notes series 16. American Association of Petroleum Geologists, USA.
- Cai, X. Y., Xin, R. C., 2004. Architectural model of sequence stratigraphy controlling the distribution of litho-trap in deep-water lake of Songliao depressive basin. *Acta Petrolei Sinica*, 25(5): 6–10 (in Chinese with English abstract).
- Catuneanu, O., 2002. Sequence stratigraphy of clastic systems: concepts, merits and pitfalls. *Journal of African Earth Sciences*, 35(1): 1–43. doi: 10.1016/S0899-5362(02)00004-0
- Cross, T. A., 1991. High-resolution stratigraphic correlation from the perspectives of base-level cycles and sediment accommodation. In: Dolson, J., ed., Unconformity related hydrocarbon exploration and accumulation in clastic and carbonate settings; short course notes, *Rocky Mountain Association of Geologists*, 28–41.
- Cross, T. A., Lessenger, M. A., 1998. Sediment volume partitioning: rationale for stratigraphic model evaluation and high-resolution stratigraphic correlation. In: Gradstein, F. M., Sandvik, K. O., Milton, N. J., eds., Sequence stratigraphy—concepts and applications. *Norwegian Petroleum Society Special Publication*, (8): 171–195.
- Embry, A. F., 1995. Sequence boundaries and sequence hierarchies: problems and proposals. In: Sequence stratigraphy on the Northwest European margin. *Norwegian Petroleum Society Special Publications*, 5: 1–11. doi: 10.1016/S0928-8937(06)80059-7
- Fang, D. J., Wang, Z. L., Jin, G. H., et al., 1989. Cretaceous magnetostratigraphy in the Songliao basin, China. *Science in China (Ser. B)*, 8(10): 1084–1091 (in Chinese).
- Faure, M., Natlin, B., 1992. The geodynamic evolution of the eastern Eurasian margin in Mesozoic times. *Tectonophysics*, 208(4): 397–411. doi: 10.1016/0040-1951(92)90437-B
- Feng, Z. Q., Jia, C. Z., Xie, X. N., et al., 2010. Tectono-stratigraphic units and stratigraphic sequences of the nonmarine Songliao basin, Northeast China. *Basin Research*, 22(1): 79–95. doi: 10.1111/j.1365-2117.2009.00445.x
- Graham, S. A., Hendrix, M. S., Johnson, C. L., et al., 2001. Sedimentary record and tectonic implications of Mesozoic rifting in Southeast Mongolia. *GSA Bulletin*, 113(12): 1560–1579. doi: 10.1130/0016-7606(2001)113<1560:SRATIO>2.0.CO;2
- Haq, B. U., Hardenbol, J., Vail, P. R., 1987. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic. *Sciences*, 235(4793): 1156–1167. doi: 10.1126/science.235.4793.1156
- Hilde, T. W. C., Uyeda, S., Kroenke, L., 1977. Evolution of the western Pacific and its margins. *Tectonophysics*, 38(1–2): 145–165. doi: 10.1016/0040-1951(77)90205-0
- Hou, Q. J., Feng, Z. Q., Feng, Z. H., et al., 2009. Continental Petroleum geology of Songliao basin. Petroleum Industry Press, Beijing, 1–9 (in Chinese).
- Huang, Q. H., Tan, W., Yang, H. C., 1999. Stratigraphic succession and chronostrata of Cretaceous in Songliao basin. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 18(6): 15–17, 28 (in Chinese with English abstract).
- Mitchum Jr, R. M., Vail, P. R., 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea-level: Part 7: seismic stratigraphic interpretation procedure; section 2: application of seismic reflection configuration to stratigraphic interpretation. In: Payton, C. E., ed., Seismic stratigraphy—applications to hydrocarbon exploration. *AAPG Special Volumes*, 26: 135–143.
- Mitchum Jr, R. M., Van Wanrooy, J. C., 1991. High-frequency sequences and their stacking patterns: sequence-stratigraphic evidence of high-frequency eustatic cycles. *Sedimentary Geology*, 70(2–4): 131–160. doi: 10.1016/0037-0738(91)90139-5
- Qiao, H. S., Fang, C. L., Niu, J. Y., 2003. Deep petroleum geology series in East China. Volume 2, Deep petroleum geology in Northeast China. Petroleum Industry Press, Beijing, 67 (in Chinese).
- Ren, J. Y., Tamaki, K., Li, S. T., et al., 2002. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in eastern China and adjacent areas. *Tectonophysics*, 344(3–4): 175–205. doi: 10.1016/S0040-1951(01)00271-2
- Soloviev, A., Garver, J., Ledneva, G., 2006. Cretaceous accretionary complex related to Okhotsk-Chukotka subduction, Omgon range, western Kamchatka, Russian Far East. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27(4): 437–453. doi: 10.1016/j.jseaes.2005.04.009
- Song, Y., Ren, J. Y., Yang, H. Z., et al., 2010. Characteristics and dynamic background of bottom boundary in

- Yaojia Formation of the northern Songliao basin. *Acta Petrol. Ei Sinica*, 31(2): 187—195 (in Chinese with English abstract).
- Stepashko, A. A., 2006. The Cretaceous dynamics of the Pacific plate and stages of magmatic activity in northeastern Asia. *Geotectonics*, 40(3): 225—235. doi: 10.1134/S001685210603006X
- Stepashko, A. A., 2008. Spreading cycles in the Pacific Ocean. *Oceanology*, 48(3): 401—408. doi: 10.1134/S0001437008030120
- Vail, P. R., Mitchum Jr, R. M., Thompson III, S., 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level: Part 3: Relative changes of sea level from coastal onlap. In: Payton, C. E., ed., Seismic stratigraphy—applications to hydrocarbon exploration. *AAPG Special Volumes*, 26: 63—81.
- Van Wagoner, J. C., Mittchum Jr, R. M., Campion, K. M., et al., 1990. Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores and outcrops: concepts for high resolution correlation of time and facies. *AAPG Special Volumes*, 7: 55.
- Van Wagoner, J. C., Posamentier, H. W., Mitchum, R. M., et al., 1988. An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions. In: Wilgus, C. K., Hastings, B. S., Kendall, C. G. St. C., et al., eds., Sea level changes: an integrated approach. *SEPM Special Publication*, 42: 39—45. doi: 10.2110/pec.88.01.0039
- Wang, X. P., Song, T. G., 1996. Formation of structural traps in basins of eastern China; discussions based on structural inversion in Songliao basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 21(4): 373—382 (in Chinese with English abstract).
- Wei, K. S., Xu, H. D., Ye, S. F., et al., 1997. High resolution sequence stritigraphic framework in Cretaceous, Songliao basin. *Oil & Gas Geology*, 18(1): 7—13 (in Chinese with English abstract).
- Wu, H. C., Zhang, S. H., Feng, Q. L., 2011. Theoretical basis, research advancement and prospects of cyclostratigraphy. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 36(3): 409—428 (in Chinese with English abstract).
- Xiang, C. F., Feng, Z. Q., Pang, X. Q., et al., 2007. Late stage thermal history of the Songliao basin and its tectonic implications: evidence from apatite fission track (AFT) analyses. *Science in China (Ser. D)*, 37(8): 1024—1031 (in Chinese).
- Xie, X. N., 1994. The characters of the depositional systems and sequence stratigraphy of the deep faultdown depression in the Lishu depression of the Songliao basin. *Experimental Petroleum Geology*, 16(2): 144—151 (in Chinese with English abstract).
- Xie, X. N., Jiao, J. J., Tang, Z. H., et al., 2003. Evolution of abnormally low pressure and its implications for the hydrocarbon system in the Southeast Uplift zone of Songliao basin, China. *AAPG Bulletin*, 87(1): 99—119. doi: 10.1306/080602870099
- Xin, R. C., Cai, X. Y., Wang, Y. M., 2004. Depositional model of lowstand and characteristics of sequence boundary in deep water Lake, Songliao depression basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 22(3): 387—392 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W. L., 1985. Petroleum geology of Songliao continental basin. Petroleum Industry Press, Beijing, 1—20 (in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 蔡希源,辛仁臣,2004.松辽坳陷深水湖盆层序构成模式对岩性圈闭分布的控制.石油学报,25(5): 6—10.
- 方大钧,王兆樑,金国海,等,1989.中国松辽盆地白垩系磁性地层.中国科学(B辑),8(10): 1084—1091.
- 侯启军,冯志强,冯子辉,等,2009.松辽盆地陆相石油地质学.北京:石油工业出版社,1—9.
- 黄清华,谭伟,杨会臣,1999.松辽盆地白垩纪地层序列与年代地层.大庆石油地质与开发,18(6): 15—17, 28.
- 谯汉生,方朝亮,牛嘉玉,2003.中国东部深层石油地质学丛书(第二卷),东北地区深层石油地质.北京:石油工业出版社,67.
- 宋鹰,任建业,阳怀忠,等,2010.松辽盆地北部姚家组底界面特征及其动力学背景.石油学报,31(2): 187—195.
- 王燮培,宋廷光,1996.从松辽盆地的构造反转看中国东部盆地构造圈闭的形成.地球科学——中国地质大学学报,21(4): 373—382.
- 魏魁生,徐怀大,叶淑芬,等,1997.松辽盆地白垩系高分辨率层序地层格架.石油与天然气地质,18(1): 7—13.
- 吴怀春,张世红,冯庆来,等,2011.旋回地层学理论基础、研究进展和展望.地球科学——中国地质大学学报,36(3): 409—428.
- 向才富,冯志强,庞雄奇,等,2007.松辽盆地晚期热历史及其构造意义:磷灰石裂变径迹(AFT)证据.中国科学(D辑),37(8): 1024—1031.
- 解习农,1994.松辽盆地梨树凹陷深部断陷沉积体系及层序地层特征.石油实验地质,16(2): 144—151.
- 辛仁臣,蔡希源,王英民,2004.松辽坳陷深水湖盆层序界面特征及低位域沉积模式.沉积学报,22(3): 387—392.
- 杨万里,1985.松辽陆相盆地石油地质.北京:石油工业出版社,1—20.