

徐家围子断陷火山岩充填的层序地层

程日辉¹, 王璞¹, 刘万洙¹, 单玄龙¹, 陈树民², 曲永保²

(1. 吉林大学 地球科学学院, 吉林 长春 130061; 2. 大庆油田股份有限公司, 黑龙江 大庆 163712)

摘要: 松辽盆地徐家围子断陷晚侏罗世-早白垩世期间火山岩十分发育, 火山喷发岩的盆地充填样式与其在盆地中喷发的构造位置和构造断阶样式有关。根据火山岩的喷发构造位置和赋存情况, 徐家围子断陷火山岩的盆地充填样式可以分为三种类型: 沿断裂喷发-赋存样式、在上升盘喷发-赋存样式和在下降盘喷发-赋存样式。这些火山岩的充填样式具有不同的几何学特征。在层序发育过程中火山的喷发与火山岩的充填分别出现在低水位早期、低水位晚期和水进期。在层序地层格架中不同火山岩的充填样式影响或控制了盆地的地形、沉积作用类型、沉积体几何学和层序结构。这种构造-火山活动背景下的层序地层模式可以作为油气勘探的地质模型, 进行储集层预测。

关键词: 火山岩; 充填样式; 构造断阶; 层序地层模式

中图分类号: P539.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-5888(2005)04-0469-06

Sequence Stratigraphy with Fills of Volcanic Rocks in Xujiaweizi Faulted Depression of Songliao Basin, Northeast China

CHENG Ri hui¹, WANG Pu jun¹, LIU Wan zhu¹,

SHAN Xuan long¹, CHEN Shu min², QU Yong bao²

(1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China; 2. Daqing Oil Field Co. Lt. of CNPC, Daqing 163712, China)

Abstract: Volcanic rocks widely developed during late Jurassic Early Cretaceous in Xujiaweizi faulted depression of Songliao basin, Northeast China. The basin filling geometric pattern of volcanic eruptive rocks depends on both of the eruptive locations in a basin and structural styles of fault terraces. It is divided into three types by eruptive locations and occurrences of eruptive rocks, including the pattern of eruption along fault and occurrence (PEAFO), the pattern of eruption on footwall of a fault and occurrence (PEOFO) and the pattern of eruption on hangingwall of fault and occurrence (PEOHO) in Xujiaweizi fault depression. Those basin filling patterns of volcanic eruptive rocks are with specific geometric characteristics, occurred at different stages of early lowstand, late lowstand and transgressive, controlling or affecting basin topography, sedimentation, the geometry of sedimentary body and sequence architecture during a sequence evolution. The sequence stratigraphic models may be used in oil and gas exploration to predict reservoirs.

Key words: volcanic rock; filling pattern; fault terrace; sequence stratigraphic model

收稿日期: 2004-12-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(40372066); 高等学校博士学科点专项科研项目(20030183042)

作者简介: 程日辉(1963-), 男, 吉林德惠人, 教授, 博士, 主要从事油气地质与勘探研究, E-mail: chengrh@email.jlu.edu.cn.

0 引言

层序地层分析是研究盆地充填的有效手段。由于各种类型盆地的控制因素存在差异,尤其是在陆相断陷盆地,因此所形成的盆地充填结构是不同的。这导致了层序地层学不能发挥应有的效用。在沉积地层中运用不整合和相应整合的概念厘定层序级别和划分层序以后,对于层序结构和层序地层模式的研究是十分必要的。Vail 等^[1]的被动大陆边缘层序类型划分及其体系域、层序构成模式对陆相层序地层分析是具重要指导意义的,但由于陆相地层过于复杂,因此需要对陆相层序类型进行精细划分,并讨论层序发育的控制因素。程日辉等^[2]曾对陆相盆地充填层序类型做过划分,讨论了辽西地区中生代的冲积层序、沙漠层序、湖盆层序和火山层序。虽然以单一环境的地层记录所构成的层序确实存在,如冲积层序、沙漠层序和火山层序,但多数情况它们是湖盆层序的组成部分——准层序或准层序组,成为层序结构中的重要组成部分。

松辽盆地徐家围子断陷的晚侏罗世—早白垩世火山岩在层序中是一个特殊的盆地充填体,具有有别于正常沉积物的充填样式。不同火山岩的充填样式具有不同的几何学特征,受到构造断阶的控制。在层序发育过程中火山的喷发与火山岩的充填出现在低水位和水进阶段,因此在层序地层格架中不同火山岩的充填样式影响或控制了不同的沉积作用类型、沉积体几何学和层序结构。本文主要讨论徐家围子断陷火山岩充填的层序地层特征与模式。

1 火山岩充填的层序地层特征

地震资料在油气勘探中可以反映丰富的地下地质信息。重要的问题是如何“破译”间接的地震信息,使之转为可信度较高的地质特征。由地震资料解释出的地质特征具有多解性,而约束因素的分析可以减少多解,其中构造是一个重要的约束因素。构造不仅控制影响古地形、古水流和古水深,而且控制影响物质供给和古地理格局。在地震剖面上分析盆地构造几何学,利用其约束鉴别和区分不同的地震相,解释盆地的充填特征。

徐家围子断陷是松辽盆地的一个次级盆地单元,晚侏罗世—早白垩世期间充填巨厚的火山岩—含煤碎屑岩沉积^[3,4],包括火石岭组、沙河子组和营城组。火石岭组和营城组火山岩十分发育,构成了

火山岩充填的一系列层序。根据徐家围子断陷三维地震资料,可以识别多种与火山岩和砂质沉积有关的地震相,特征如下:

斜交前积相:前积同相轴具有明显的下超和上超终止现象,连续性较好,中—强振幅。其常为楔状,也呈透镜状,可解释为三角洲和辫状河三角洲相,也可以解释为与火山岩有关的楔状堆积。

楔形杂乱相:外形呈楔形,由不连续、不规则的反射结构组成,内部缺少有序排列的波阻抗界面。可解释为冲积扇相和下水重力流沉积相。

楔形杂乱前积相:外形呈楔形,也呈透镜状。连续性较差,中—弱振幅。总体具有向前积斜坡倾斜的趋势。可解释为冲积扇和扇三角洲相,也可以解释为火山碎屑堆积。

斜交杂乱前积相:外形呈楔形或呈透镜状,由斜交前积和杂乱前积交替组成。一般杂乱反射位于近物源一侧,可解释为扇三角洲或辫状河三角洲相。

席状平行—亚平行相:外形席状,连续性较好,中—弱振幅。可解释为湖—沼相。

图 1 为穿越 Fs7 井和 Ss7 井的三维地震反射剖面,展示了徐家围子断陷升平凸起西侧的构造断阶带和火石岭组上部的层序地层发育。这个构造断阶带是由 4 条倾向一致的正断层 F₁、F₂、F₃、F₄ 和相应断块组成,从凸起到凹陷形成了三个断阶。在断阶带上和凹陷中的堆积体的反射地震相均为强反射前积型,呈现楔状。根据位于升平凸起东侧的 Ss7 井火山岩的岩性、岩相和火山机构的特征分析,火山口发育在升平凸起之上,即位于 F₁ 断层的上升盘。根据地地震相特征解释出断阶带上的堆积为火山熔岩与火山碎屑岩互层。

详细的地震地层结构分析表明,该断阶带的形成与火山活动有关,即随着火山的多次喷发,断层系列是自火山口至凹陷方向依次形成发育的。根据地地震反射结构和同相轴对比可以识别出三个火山喷发旋回。第一旋回火山喷发的级别较小, F₁ 断层和 F₂ 断层形成并开始活动,形成第一断阶。该旋回由层 1 和层 2 构成,分别代表火山熔岩和火山碎屑岩。第二旋回火山喷发的级别最大,在 F₁ 断层和 F₂ 断层继续活动的情况下, F₂ 断层和 F₃ 断层开始发育,形成第二断阶和第三断阶。该旋回由层 3 和层 4 构成,分别代表火山熔岩和火山碎屑岩。第三旋回火山喷发的级别稍小,由层 5 和层 6 构成,也分别代表火山熔岩和火山碎屑岩。在此旋回火山物质充填的

过程中, 4 个断层继续活动。层 6 的充填过程中可能已对其下伏岩层进行了剥蚀, 具有沉积火山碎屑岩性质, 属于火山碎屑冲积扇。断阶带的发育控制了火山岩在盆地中的赋存型式, 使其具有特殊的几何形态, 同时也控制了断阶带上的地层结构。

断阶带的发育与凹陷另一侧的主控断层活动是同时的, 因此也可以认为该缓坡断阶带的形成与主断层下降盘沉降时调节机制有关。在主断层活动同时在凹陷的另一侧充填了巨厚的陆源粗碎屑楔形体, 与火山岩相比地震反射弱, 振幅小, 也为前积型, 亦呈楔状, 属于冲积扇沉积。在该冲积扇体和火山岩堆积体之间解释为扇前平原沉积。在这套火山岩和冲积扇-扇前平原沉积之上, 地震反射特征表现为低振幅, 弱反射, 向盆缘两侧具有上超现象, 可以解释为主要以湖-沼相沉积为主。最上部地震相的几何形态呈现拉长的透镜状, 对下伏反射具有削截现象, 可以解释为以河流沉积为主, 对火山岩具有明显的侵蚀作用。

升平凸起西侧凹陷火石岭组上部的地震地层结构揭示了一个有火山岩充填的地震层序地层结构。层序的低水位体系域主要由火山岩堆积体和冲积扇体构成。火山岩堆积体发育在构造断阶带上, 而冲

积扇体发育在主断层一侧, 它们之间以扇前平原沉积相互过渡。这一时期的构造活动很强烈, 不仅断阶带不断发育, 而且整个凹陷也处于扩展状态。水进体系域主要由湖沼相沉积构成, 其分布面积较大。高水位体系域主要由河流沉积构成, 此时的构造断阶已不起明显的控制作用了。然而这种断裂-火山活动背景下的层序与传统的湖盆地层序相比较, 明显地具有特殊性。表现在: (1) 火山物质作为低水位体系域充填的主体, 其厚度大但形成的时间短, 可以迅速改变断陷地形和形态, 充填的几何形态响应于构造断阶带样式的发育; (2) 与经典的模式相比, 水进最大期不代表盆地范围的最大期, 因为火山岩的充填一方面使断陷沉降加大, 水深加大, 一方面又使盆地汇水面积变小; (3) 低水位期的火山物质成为水进期和高水位期的沉积物源, 这与盆地汇水面积变小有关。

上述的层序特征反映火山岩充填的层序地层特点, 这是火山在上升盘喷发, 火山岩在低水位早期充填的情况。根据对徐家围子断陷火石岭组和营城组发育的火山岩的研究, 火山岩的喷发与赋存样式可归纳为沿断裂喷发-赋存样式、在上盘喷发-赋存样式和在下降盘喷发-赋存样式^[5]。火山喷发和火山岩

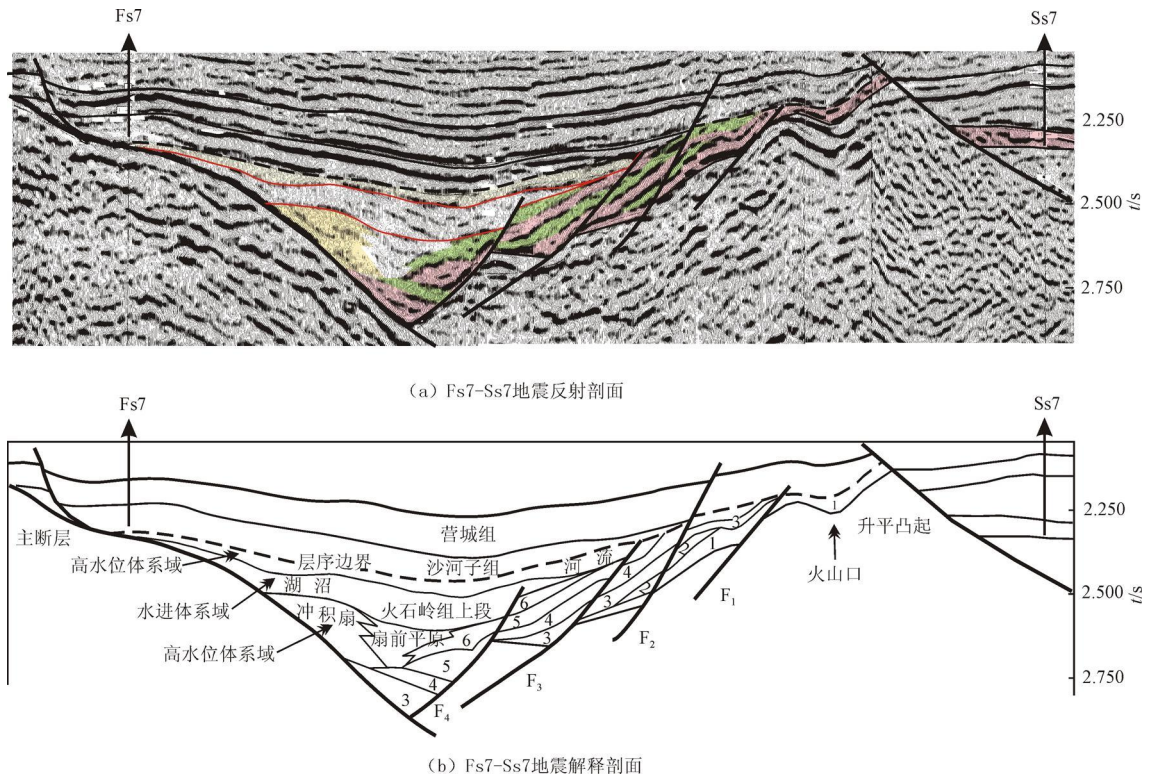


图 1 构造断阶带与火山岩发育的层序地层结构

Fig. 1 The fault terraces and sequence stratigraphic architecture with volcanic rocks developed

充填的时间可归纳为低水位早期、低水位晚期和水进期。在徐家围子断陷幕式断裂的活动控制了断阶带的发育,因而也控制了火山岩喷发-赋存样式。这些火山岩的充填样式对于层序地层的结构和模式具有重要的影响。

2 构造断阶带、火山岩喷发 - 赋存样式与层序地层模式

2.1 幕式断裂活动与构造断阶带的形成

断裂的幕式运动(episodic tectonism)^[6]控制了断陷盆地的形成。幕式断裂活动表现为断裂的形成以及伴随着伸展作用的上盘垮塌在短时间内完成,是地应力缓慢聚集和快速释放以及上盘重力不稳定的结果。上盘的垮塌往往造成缓坡断阶的形成,塑造断阶的系列正断层是由内向外形成的。下盘上先存的与主断裂伴生系列次级断层或裂隙因调整作用往往形成陡坡断阶,这些断阶可以同时形成,也可以由外向内依次形成。另外的情况是伸展作用范围扩大,如同多米诺效应在盆缘断裂以外形成新的系列断裂,形成陡坡断阶和新的盆缘断裂,这些断阶是由内向外形成的。随后进行的沉积作用与断裂活动和盆地断阶带的发育相比是缓慢的。断阶带的构造样式控制了沉积作用的类型^[7],同时沉积作用或盆地充填的不断进行使得断阶带的控制意义逐渐减小以至消失。这反映断裂活动的停止和地层中应力达到了新的平衡,同时也开始了新的应力的聚集。在地形坡度变得平缓时沉积作用也趋于缓慢。在深部和区域因素的诱导下断裂再次活动,断阶带又一次形成,或继承性发展或形成新的断阶。这种断裂活动具有幕式性质,也称为脉冲式断裂活动。伴随着断裂活动常常发生火山作用。徐家围子断陷火山作用一般发育在沉积层序的底部和下部,即层序发育的低水位阶段和水进阶段。

2.2 火山岩沿断裂喷发样式与层序发育

火山物质沿断裂面在地层中形成的通道喷发。火山物质包括熔岩和火山碎屑首先堆积在断裂的下降盘,并可以通过断阶带在下一个断裂的下降盘堆积。随后的火山喷发物质堆积在主断层的两盘之上,而且也通过断阶带被带到下一个下降盘上堆积。在断裂面上端发育的火山锥或被剥蚀在下一个下降盘以火山碎屑沉积物的形式堆积,或随断层继续活动而部分保留,或随盆地整体沉降而全部保留。

在层序发育过程的低位早期出现火山物质沿盆

缘主断裂喷发,并以如图 2a 所示的样式赋存,整个火山岩体占据了层序充填的最底部的位置,以楔形体产出,称为火山岩楔。由于断阶的存在,火山岩楔可能被分割为两个或两个以上的部分。火山物质的快速充填往往使低位冲积扇(盆底扇)和低位进积体(斜坡扇)的发育相对滞后,向盆地中心相带过渡为扇三角洲、湖底扇或浊积扇以及湖泊沉积。这些沉积体均部分或全部以火山物质为物源。

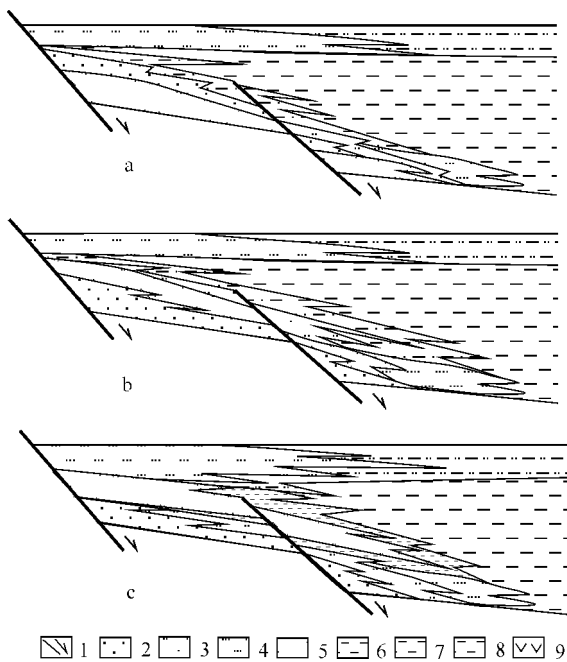


图 2 火山岩充填的层序地层模式(1)

Fig. 2 Model of sequence stratigraphy with fills of volcanic rocks (1)

1. 断层; 2. 冲积扇; 3. 扇三角洲; 4. 河流 - 三角洲; 5. 浊积扇; 6. 上超滨浅湖; 7. 滨浅湖 - 沼泽; 8. 半深湖 - 深湖; 9. 火山熔岩 - 火山碎屑岩

在低位晚期出现火山物质沿盆缘断裂喷发,往往发育在低位扇和斜坡扇之上(图 2b),使之遭到侵蚀破坏以至终止发育。这种火山岩体也以火山岩楔存在。伴随火山喷发的断裂活动使盆地强烈拉张,盆地发生迅速的水体注入,发生湖侵。同时由于位于盆缘火山口高地的阻挡,其它物源减少,通常在盆缘形成以火山物质为物源的扇三角洲,由于断阶的发育,向盆内相带过渡湖底扇 - 浊积扇和湖泊沉积。

在水进期沿断裂喷发的火山物质常常发育在扇三角洲和湖泊沉积之上(图 2c)。如果规模较小,往

往以火山岩楔存在于湖相沉积之中,伴随火山物质的充填在火山体的前缘,尤其是在断阶存在的区域形成火山浊积扇。如果规模较大或断陷区域较小,火山物质的快速充填会使断陷迅速变浅,沉积环境发生突变形成浅湖-沼泽。

2.3 火山岩在上升盘喷发样式与层序发育

火山物质在断裂的上升盘并靠近断裂面处喷发。火山物质包括熔岩和火山碎屑首先通过上升盘一段距离顺断裂面而下堆积在断裂的下降盘。随后的火山喷发物质可以直接进入下降盘堆积,而且通过断阶带被带到下一个下降盘上堆积。最后上升盘上发育的火山锥或被剥蚀,在第二个下降盘以火山碎屑沉积物的形式堆积,或随断裂继续活动或盆地整体沉降而部分保留。

火山物质在断裂上升盘喷发,反映出火山活动与断裂形成的因果关系可能与上述火山沿断裂面喷发的情况不同,前者伴随断裂活动而火山喷发,后者伴随火山喷发而在火山两侧形成断裂。

这种情况的层序特点与上述火山岩沿断裂喷发的层序特点相似,不同的是:(1)低位早期的火山物质比例较大;(2)水流和沉积作用的因素增加;(3)沉积岩与火山岩互层分布广泛。

2.4 火山岩在下降盘喷发样式与层序发育

火山物质在断裂下降盘上喷发。火山物质包括熔岩和火山碎屑原地堆积在断裂的下降盘。随后为正常沉积物覆盖得以保存。

火山物质在断裂下降盘喷发,可能是主体火山(系)的分支作用所为,相比规模较小。由于属于盆内喷发,火山岩体以透镜状赋存,成为盆内凸起,向盆地内部方向如果有断阶发育的情况下,充填的样式与火山沿上升盘喷发的一致。但由于其后的火山岩主体的阻断作用,同时又处于盆地内部,碎屑供应不足,火山岩常与泥岩互层。而向盆缘的方向的火山岩常与粗粒沉积物互层。如果火山岩发育在低位期,其往往被水进期沉积覆盖(图3a)。如果发育在湖侵期,火山岩充填可以是湖盆变浅,沼泽化或发育河流沉积(图3b)。

3 讨论

火山岩充填的层序地层模式,反映出特殊条件下伸展盆地地层发育特征。对于伸展盆地特殊条件下的特殊地质模型的建立是目前研究的一种趋势和要求^[8],不仅可以揭示层序发育的驱动过程,而且具

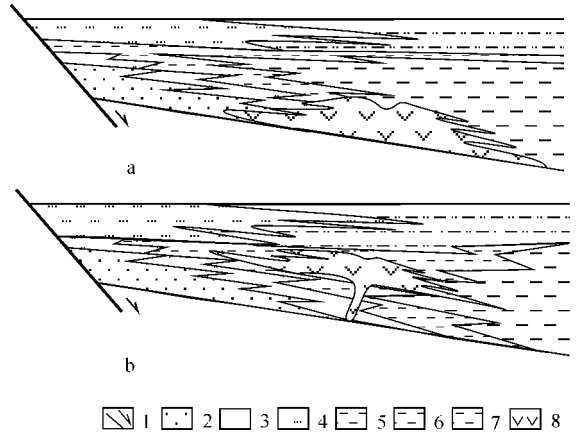


图3 火山岩充填的层序地层模式(2)

Fig. 3 Model of sequence stratigraphy with fills of volcanic rocks (2)

1. 断层; 2. 冲积扇; 3. 扇三角洲; 4. 河流-三角洲; 5. 浅湖; 6. 滨浅湖-沼泽; 7. 半深湖-深湖; 8. 火山熔岩-火山碎屑岩

有预测功能——尤其是储积层的预测,包括火山岩储层和碎屑岩储层。徐家围子断陷晚侏罗世-早白垩世的层序地层发育无疑是构造驱动的,其受到古太平洋域板块对欧亚大陆俯冲^[9]或西伯利亚古板块俯冲和蒙古-鄂霍茨克洋闭合^[10-12]引发的伸展作用的控制。对于具体的小型凹陷或断块的层序发育则是具体的幕式断裂活动(断层的产生、传播、相互作用、连接和死亡)及其形成的构造断阶带的样式控制的。徐家围子断陷升平凸起西侧凹陷的构造样式和层序结构反映了幕式断裂活动-构造断阶带发育-构造地形-盆地充填-层序发育的控制过程。伴随断裂活动的火山作用也是徐家围子断陷层序发育的控制或影响因素。火山岩的充填使得层序内部沉积体系和火山岩堆积体的时空配置具有特色,具有与一般湖盆地层序模式不同的层序结构。这种综合的由火山岩充填的层序地层模式是具有预测功能的,可以作为油气勘探的地质模型。王璞珺等^[13,14]在徐家围子断陷火山岩储层研究中运用这种综合模式,结合火山岩微相的精细分析预测了一套火山岩储层。这已为Zs-VIII井钻探证实。虽然一单层日产水300 m³,而且天然气产能未达到工业要求,但预测的成功为日后勘探积累了经验。

4 结论

根据松辽盆地徐家围子断陷火山岩的喷发位置

和赋存情况,可将火山岩充填样式分为三种类型:沿断裂喷发-赋存样式、在上升盘喷发-赋存样式和在下降盘喷发-赋存样式。这些火山岩的充填样式有不同的几何特征,在层序发育过程中火山的喷发与火山岩的充填出现在低水位早期、低水位晚期和水进期,因此在层序地层格架中不同火山岩的充填样式影响或控制了不同的沉积作用类型、沉积体几何学和层序结构,具有特殊的层序地层模式。这些可以作为油气勘探的地质模型,进行储集层预测。

参考文献 (References):

[1] Vail P R. Seismic stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy, part I: Seismic sequence stratigraphy interpretation procedure[A] . In: Bally A W, ed. Atlas of seismic stratigraphy[C] . AAPG Studies in Geology, 1987, **2**: 1 - 10.

[2] 程日辉, 刘招君, 王东坡. 陆相盆地充填的层序类型[J] . 沉积学报, 1997, **15**(3): 166 - 170.
CHENG Ri hui, LIU Zhao jun, WANG Dong po. Types of filling sequences in the continental basins—Examples from Mesozoic basins, Western Liaoning Province [J] . Acta Sedimentologica Sinica, 1997, **15**(3): 166 - 170.

[3] WANG Pu jun, LIU Wan zhu, WANG Shu xue, et al. ⁴⁰Ar / ³⁹Ar and K / Ar dating on the volcanic rocks in the Songliao basin, NE China: constraints on stratigraphy and basin dynamics[J] . International Journal of Earth Sciences 2002, **91**(2): 331 - 340.

[4] WANG Pu jun, REN Yan guang, SHAN Xuan long, et al. The Cretaceous volcanic succession around the Songliao basin, NE China: relationship between volcanism and sedimentation[J] . Geological Journal, 2002, **37**(2): 1 - 19.

[5] 程日辉, 刘万洙, 王璞君, 等. 徐家围子断陷火山岩赋存型式及意义[J] . 石油与天然气地质, 2003, **24**(1): 24 - 27.
CHENG Ri hui, LIU Wan zhu, WANG Pu jun, et al. Occurrence of the volcanic rocks in Xujiaw eizi fault depression and their significance[J] . Oil & Gas Geology, 2003, **24**(1): 24 - 27.

[6] Blair T C, Bilodeau W L. Development of tectonic cyclothem in rift, pull apart, and foreland basins: sedimentary response to episodic tectonism[J] . Geology, 1988, **16**: 517 - 520.

[7] 程日辉, 郑和荣, 林畅松. 构造断阶与砂体预测: 以沾化凹陷富林地区为例[J] . 石油与天然气地质, 1999, **20**(3): 203 - 206.
CHENG Ri hui, ZHENG He rong, LIN Chang song. Structural fault terrace and sand body prediction: an example from Fulin area, Zhanhua Sag[J] . Oil & Gas Geology, 1999, **20**(3): 203 - 206.

[8] Gupta S, Cowie P. Processes and controls in the stratigraphic development of extensional basins[J] . Basin Research, 2000, **12**(3/4): 185 - 194.

[9] 吴福元, 叶茂, 张世红. 中国满洲里 - 绥芬河地学断面域地球动力学模型[J] . 地球科学, 1995, **20**(5): 535 - 539.
WU Fu yuan, YE Mao, ZHANG Shi hong. Geodynamic model of Manzhouli - Suifenhe Geoscience Transect[J] . Earth Science — Journal of China University of Geosciences, 1995, **20**(5): 535 - 539.

[10] Zhao X X, Coe R S, Zhou Y X, et al. New paleomagnetic results from north China: Collision and suturing with Siberia and Kazakhstan[J] . Tectonophysics, 1990, **181**: 43 - 81.

[11] EnKin R J, Yang Z Y, Chen Y, et al. Paleomagnetic constrains on the geodynamic history of the major block of China from Permian to the Present[J] . J Geophys Res, 1992, **97**: 475 - 488.

[12] Zorin Y A. Geodynamics of western part of the Mongolia - Okhotsk collisional belt, Trans Baikal region (Russia) and Mongolia[J] . Tectonophysics, 1999, **306**: 33 - 56.

[13] 王璞君, 陈树民, 刘万洙, 等. 松辽盆地火山岩相与火山岩储层的关系[J] . 石油与天然气地质, 2003, **24**(1): 18 - 23.
WANG Pu jun, CHEN Shu min, LIU Wan zhu, et al. Relationship between volcanic facies and volcanic reservoirs in Songliao basin[J] . Oil & Gas Geology, 2003, **24**(1): 18 - 23.

[14] 王璞君, 迟元林, 刘万洙, 等. 松辽盆地火山岩相: 类型、特征和储层意义[J] . 吉林大学学报(地球科学版), 2003, **33**(4): 449 - 456.
WANG Pu jun, CHI Yuan lin, LIU Wan zhu, et al. Volcanic facies of the Songliao basin: classification, characteristics and reservoir significance[J] . Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2003, **33**(4): 449 - 456.