

逆冲活动对淮南前陆盆地层序构成的影响及意义

纪友亮^{1,2}, 潘春孚¹, 高志勇³, 朱如凯³

(1. 中国石油大学 地球科学学院, 北京 102249; 2. 同济大学 海洋与地球科学学院, 上海 200092;
3. 中国石油天然气股份有限公司 石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要: 新近纪准噶尔盆地南缘是在北天山强烈逆冲构造背景下发育的前陆盆地. 其新近系沙湾组-塔西河组可划分为1个二级层序, 2个三级层序, 均由角度不整合、平行不整合或沉积环境转换面所分隔. 整个二级层序的沉积构成反映了从前陆逆冲挠曲沉降到回弹隆升的演化过程, 层序1沉积构成明显受逆冲构造活动控制, 而回弹隆起影响了构造相对宁静的层序2内部沉积构成. 新近纪逆冲构造活动阶段的内部演化, 制约了同期的冲积扇-扇三角洲沉积体系. 受逆冲构造活动影响, 层序1(沙湾组)扇三角洲砂体不断向盆地推进, 侧向连片, 垂向上相互叠置形成厚度可观的储集体, 其下伏前期深湖相烃源岩, 离生烃中心近, 上覆层序2(塔西河组)发育的大量细粒沉积物作为良好的盖层, 易形成大型油气田.

关键词: 逆冲构造活动; 前陆盆地; 层序; 回弹隆升; 沉积构成
中图分类号: P 542.2; P512.2 **文献标识码:** A

Influence of Thrust Tectonism on Sequence Contexture of Southern Junggar Foreland Basin and Its Significance

Ji Youliang^{1,2}, PAN Chunfu¹, GAO Zhiyong³, ZHU Rukai³

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. College of Ocean and Earth Sciences, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development of CNPC, Beijing 100083, China)

Abstract: The southern margin of Junggar Basin was the foreland basin at the tectonic underground of intense thrust of North Tianshan in the Neocene. The Shawan Formation-Taxihe Formation of Neocene was divided into one second-order sequence, two third-order sequences, which were separated by angle unconformity, parallel unconformity, and transformation surface of depositional environment. All the depositional contexture of the second-order sequence reflected

the evolutionary process which was from flexural subsidence caused by foreland thrust to rebounded uplift, the depositional contexture of Sequence 1 was obviously controlled by thrust tectonic activities, and rebounded uplift influenced the inner depositional contexture of Sequence 2 which was in the period of tectonic relative quiet. The inner evolution of thrust tectonic activities of Neocene restricted the synchronous depositional systems of alluvial fan-fan delta. Influenced by the thrust tectonic activities, the fan delta sand body of Sequence 1 (Shawan Formation) advanced continuously towards the basin, its lateral communicated, its vertical mutually superimposed to form considerable thick reservoir body, which was on the earlier deep lake oil source rock, and near to the oil source center, the overlying massive fine sediments of Sequence 2 (Taxihe Formation) may be favorable cap formation, large oil and gas field could easily be formed.

Key words: thrust tectonic activities; foreland basin; sequence; rebounded uplift; depositional contexture

多年勘探实践证明, 前陆盆地油气资源丰富, 特殊的构造背景使地层结构受逆冲构造活动控制和改造而变得非常复杂, 是中外地质学家们致力研究的科学前沿之一. 国内外不少专家对逆冲构造造山运动及其对沉积的控制进行过研究和探讨^[1-12], 认为逆冲构造活动控制前陆盆地的沉降和物源体系的变化, 进而影响前陆盆地发育的楔状或板状沉积地层形态、粗粒或细粒的岩相类型和沉积体系的空间配置样式及其迁移. 但对前陆盆地层序结构对逆冲构造活动的响应研究还很薄弱^[13-15], 目前主要集中在对二级层序构成对逆冲构造活动阶段和相对宁静阶段的响应, 对三级层序构成对逆冲构造活动阶段内部演化的响应研究还比较少. 笔者利用野外地质剖

收稿日期: 2010-05-03

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2006CB202302); 国家科技重大专项(2008ZX05003-001)

第一作者: 纪友亮(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为沉积学和层序地层. E-mail: jiyouliang@cup.edu.cn

通讯作者: 潘春孚(1983—), 男, 博士生, 主要研究方向为沉积学和层序地层. E-mail: panchunfu@sina.com

面、地震及钻测井、古生物等资料,综合分析准噶尔南缘新近系层序结构特征,揭示其层序内部结构及其沉积体系构成与前陆逆冲构造活动阶段演化的联系,分析其石油地质意义,丰富了前陆盆地构造-沉积响应理论,为准噶尔盆地南缘油气勘探提供依据。

1 区域地质背景

准噶尔盆地南缘位于北天山山前,东起木垒县,西到精河,北至车排子——阜康一线为界,南临依林黑比尔根山前和博格达山北麓山前。准噶尔盆地是经历了4个阶段演化的叠合盆地,即泥盆—石炭纪克拉通内部与边缘裂陷阶段、早二叠世周缘前陆盆地阶段、晚二叠世—白垩纪陆内拗陷阶段和古近纪—第四纪陆内前陆盆地阶段^[16]。准噶尔盆地南缘新近系地层为一套河湖相碎屑岩沉积,自下而上划分为沙湾组、塔西河组及独山子组^[17]。本研究的主要目标层为沙湾组和塔西河组。沙湾组地层主要为一套冲积扇-扇三角洲粗碎屑沉积体系,塔西河组地层为以湖泊相为主的细粒沉积体系,垂向上整体表现为水进的沉积旋回。

由于受喜山期构造运动的影响,古近纪—第四纪北天山向北强烈逆冲,使现今准噶尔南缘冲断带南北向发育出地表可见的清水河——齐古——喀拉扎、霍尔果斯——玛纳斯——吐谷鲁和独山子——安集海——呼图壁三排褶皱冲断带;东西向被南北走向的红车断裂、乌鲁木齐——米泉断裂分为西、中、东段。准噶尔盆地南缘新近纪前陆逆冲带内的逆冲断层,由山前向盆地、由南向北,按照一定的次序渐次扩展,地层逆冲堆叠、地壳缩短比例逐渐变小^[18]。见图1。

前陆盆地的构造演化具有逆冲构造活动期至宁静期的阶段性^[19]。逆冲构造活动期以粗粒碎屑沉积为主,构造相对宁静期则以细粒沉积为主^[20]。准噶尔南缘新近纪逆冲构造活动期与发育粗碎屑沉积的沙湾期相对应,构造相对宁静期与发育细粒沉积的塔西河期相对应。

2 层序构成特征

2.1 层序划分和界面特征

依据准噶尔南缘新近系地层中的各级不整合面或整合的岩性、岩相突变面等层序界面识别标志,可将沙湾组-塔西河组划分为1个二级层序,2个三级层序(表1)。

层序1(相当于沙湾组):据野外地质剖面观察及

钻、测井资料分析,底界与古近系沉积的灰色泥岩呈角度或平行不整合,属二级层序界面^[21]。由于层序1主要发育粗粒碎屑沉积,根据砂砾岩比率或砂泥岩比率变化和准层序组叠置方式的变化,将其内部划分为低位体系域、湖侵体系域和高位体系域。低位体系域一般砂砾岩比率较低或砂泥岩比率较高,为加积或弱退积准层序组;向上过渡为砂砾岩比率升高或砂泥岩比率降低的湖侵体系域,准层序组呈大幅退积;在层序的中下部,湖泛达到最大;高位体系域一般砂砾岩比率较低或砂泥岩比率较高,多为向盆地方向大幅进积的准层序组(表1)。

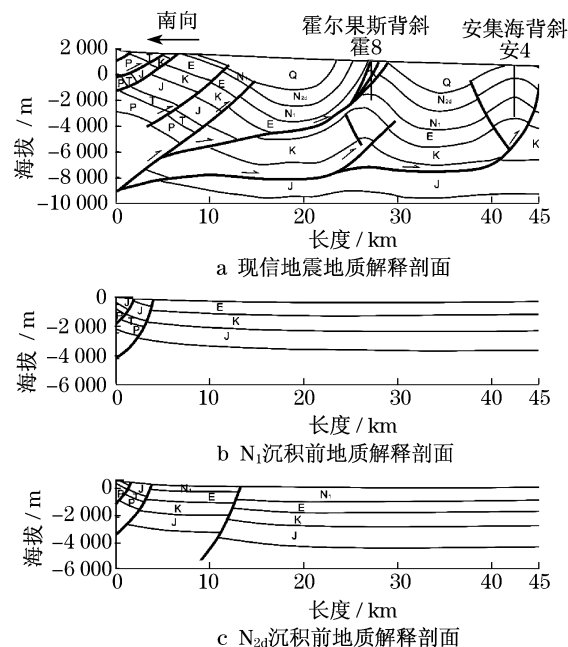















图1 准噶尔南缘霍尔果斯——安集海 E—N₁ 构造演化剖面
Fig.1 E—N₁ tectonic evolution profile of Huoerguosi-Anjihai at the southern margin of Junggar Basin

注:图中各字母代表各层位。

层序2(相当于塔西河组):底界面在钻井和野外露头上表现为界面之下以砂岩、泥质砂岩为主变为界面之上以灰色、灰绿色泥岩为主;在地震上表现为连续沉积,未见明显的上超和削截现象;属三级层序界面^[21]。顶界面在野外地质剖面与上覆独山子组存在明显的削蚀,呈角度不整合接触,地震剖面上可见到削截现象。界面之上广泛发育独山子组辫状河三角洲、冲积扇相底砾岩沉积,古生物化石较少。属二级层序界面^[21]。层序2主要发育细粒沉积,依据砂泥岩比率变化、泥岩颜色变化和准层序组叠置方式的变化,将其内部划分为低位体系域、湖侵体系域和高位体系域。低位体系域一般砂泥岩比率相对较高,泥岩多为浅氧化或半还原色,准层序组呈小幅加积或小幅退积;向上过渡为由大幅退积准层序组组成的

湖侵体系域,砂泥岩比率较低,泥岩颜色主要为还原色;最大湖泛面一般位于层序的中上部,高位体系域多为向盆地方向小幅进积的准层序组,砂泥岩比率较高,泥岩颜色向上逐渐变化为氧化色。

表 1 准噶尔盆地南缘新近系层序构成及构造演化图示意^[21]
Tab.1 Tectonic evolution and sequence contexture of Neocene at the southern margin of Junggar Basin

地层 系 组		厚度/ m	岩性 剖面	年龄 /Ma	相标志	古生物组合	沉积环境分析			层序地层分析				地震 层位	湖平面		构造演化
							微相	亚相	相	准层序组	体系域	三级层序	二级层序		升	降	
新近系	独山子组	294		5.3		介形类: 纯净小玻璃介											
	塔西河组	56.8		23.3	 塔西河组 泥质沉积	富产介形类化石: 聪明土星介、 多穴球星介等; 介形类: 反折河星介;	泥滩	浅湖	湖泊		HST			T _{SH}		逆冲构造活动微弱,早期初始回弹隆起,基底沉降较慢;中期快速回弹隆起,基底沉降快;晚期回弹隆起减弱,基底沉降变慢。	
		193.5				湖泥											
		45.3				河口坝	前缘	三角洲	TST + LST								
	沙湾组	105.1		28	 砂砾岩 沙湾组底砾岩	双壳类:近平行珠蚌 腹足类:田螺未定种; 介形类:反折河星介;	辫状河道	平原	扇三角洲		HST			T _{SH}		早期逆冲活动使基底沉降加快,中期逆冲活动强烈,快速基底沉降,晚期逆冲减弱,基底沉降减慢。	
		90				湖泥	滨浅湖	湖泊	TST								
		104.3				远砂坝 分流河道 远砂坝 辫状河道	前缘	扇三角洲			LST						
		古近系				安集海河组	110.9				介形类: 赛米诺夫天山真星介、 丰富真星介; 双壳类:厚壳珠蚌、 河球蚬相似种等; 少量腹足类; 鱼化石碎片						

2.2 沉积构成特征

新近系沙湾-塔西河期层序序列表现为区域性的湖进沉积旋回.构造强烈活动期间,层序1下部低位体系域发育粗粒的冲积扇、扇三角洲平原辫状河道砂砾岩与平原褐色泥岩交互沉积,河道砂体中可见交错层理、平行层理等沉积构造^[22],表明逆冲构造活动较强、沉降速度较快,水动力强;湖侵体系域主要以扇三角洲前缘和滨浅湖沉积为主,发育较薄,表明构造活动剧烈,沉降速度快,沉积物供给相对不足;高位体系域发育扇三角洲平原和前缘及滨浅湖沉积,表现为不断向盆地方向进积的趋势;呈向上变粗的反旋回沉积充填序列,表明逆冲构造活动减弱,构造沉降逐渐减慢,沉积物供给充足.层序1时期沉积粒度粗,湖岸线较先前安集海河期向盆地方向较大距离迁移^[22],表明层序1发育时期准噶尔盆地南缘处于逆冲活动强烈和基底快速沉降的沉积环境.层序2下部低位体系域以三角洲相砂岩和浅湖相灰绿色泥岩为主,含双壳类古生物;中部湖侵体系域主要由厚层的湖相泥岩夹泥灰岩组成,从下向上泥岩颜色逐渐加深,显示水体不断加深,表明沉降缓慢,沉积速率较低,沉积时间长;上部高位体系域以向盆地方向缓慢进积的三角洲相和滨浅湖相砂泥岩沉积为主,向上湖泊逐渐变浅,表明沉积物供给速率大于构造沉降产生的可容空间速

率,湖平面相对下降.层序2时期主要发育湖相细粒沉积,表明准噶尔盆地南缘处于逆冲活动相对宁静期,处于基底缓慢沉降的沉积环境.

2.3 沉积体系空间配置

通过层序地层沉积相系统编图,揭示了准噶尔盆地南缘前陆沉积体系的时空配置和演化.层序1时期由于快速沉降和大量物源供给,沿山前带发育巨厚、多个旋回叠置的冲积扇-扇三角洲沉积,湖岸线较古近纪安集海河期向盆地方向大幅迁移^[22].相比之下,层序2物源数量减少,山前带扇带的规模缩小,湖盆范围大幅扩展.在垂向上,层序1到2的冲积扇-扇三角洲体系向盆地方向经历了多次较大规模的进积、退积过程(图2,3),表明此沉积体系的配置样式与北天山逆冲构造活动的阶段性有关.

3 逆冲构造活动对层序发育的控制

通过对准噶尔盆地南缘新近纪构造活动演化与新近系各层序沉积体系展布的综合分析,认为整个二级层序的沉积构成反映了从前陆逆冲挠曲沉降到回弹隆升的演化过程;逆冲构造活动控制新近纪构造活动期的层序1内部沉积构成,而回弹隆起影响了新近纪构造相对宁静期的层序2内部沉积构成.

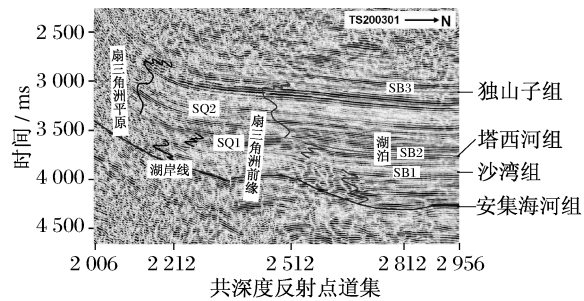


图2 准噶尔盆地南缘地震资料沉积相解释及湖岸线演变^[22]

Fig.2 Sedimentary facies interpretation and shore evolution of seismic data at the Southern Margin of Junggar Basin

注:横轴数据来自野外地震信息采集记录。

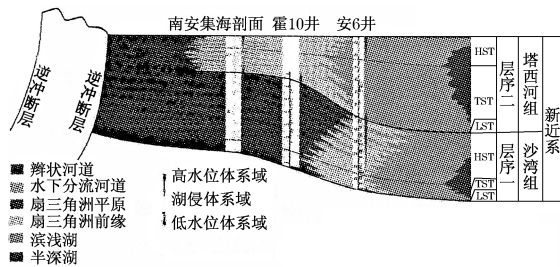


图3 准噶尔盆地南缘南北向新近系沉积层序剖面

Fig.3 S-N depositional sequence profile of Neocene at the Southern Margin of Junggar Basin

据前陆盆地弹性挠曲理论,逆冲加载导致盆地基底挠曲并快速沉降;随后逆冲变弱、停止,构造沉降趋缓,由于剥蚀和应力松弛等造成回弹隆起^[23]。

层序1形成早期,初始逆冲活动使前渊开始挠曲沉降,随着逆冲活动的逐渐增强,前渊沉降速率逐渐增大,盆地地貌反差加大,沉积物供给充分,在山前形成巨厚的扇砾岩带,对应低位体系域同逆冲构造期的冲积扇-扇三角洲沉积;逆冲推覆的继续强烈挤压作用和沉积物的重力加载引起前渊带快速挠曲沉降,导致发生区域性的大规模湖进,使得此时期湖相相对发育,在盆地边缘发育不断退积的冲积扇-扇三角洲沉积;随之,由于逆冲作用减弱至停止,前渊沉降变缓,沉积充填使得盆地高差逐渐减小,以扇三角洲平原辫状河道沉积为主的碎屑沉积体向盆地推进,形成层序上部湖退的高位体系域(图4a)。从准噶尔盆地南缘层序1内部构成来看,前陆盆地构造活动期层序的形成反映了从初始逆冲、强烈逆冲到逆冲减弱至停止的沉积充填。层序2时期,准噶尔盆地南缘进入了构造相对宁静阶段,构造应力松弛,受重力均衡作用,早期造山带回弹隆升速率较低,但逐渐增大,前渊带继续沉降,造成水体缓慢向造山带推进,使低位体系域由先加积后小幅退积的扇三角洲沉积组成;随着回弹隆升加快,前渊带较快沉降,沉积物供给不充分,湖侵体系域由大幅退积准层序组组成,盆地发育大量的湖相细粒沉积物;晚期回弹隆升速率降低,前渊带沉降减慢,高位体系域三角洲沉积向盆地内缓慢进积,且幅度不大(图4b)。从准噶尔盆地南缘层序2的内部构成来看,重力均衡回弹隆升成为其层序内部构成的主导因素。

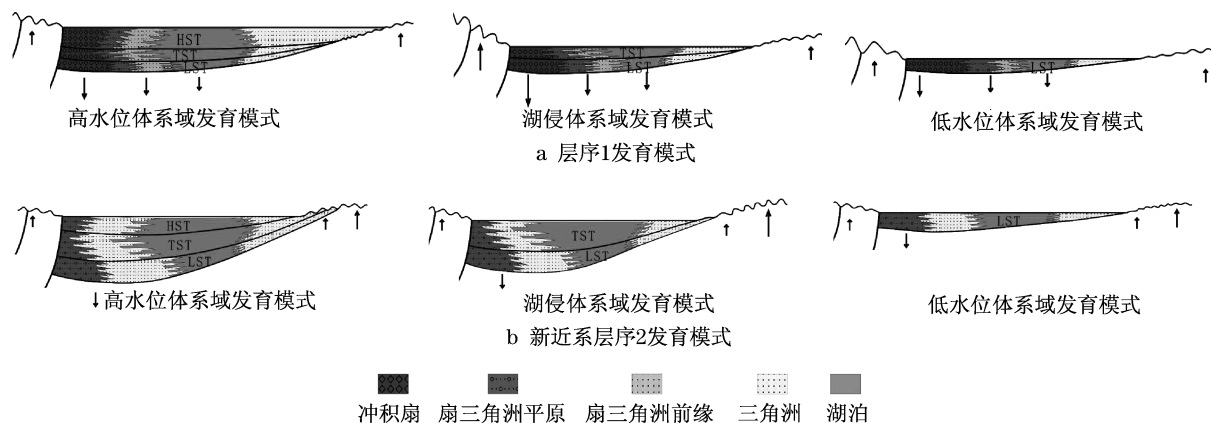


图4 准噶尔盆地南缘新近系各层序发育模式图

Fig.4 Development model of every Sequence of Neocene at the Southern Margin of Junggar Basin

上述层序构成及演化序列,揭示了前陆盆地逆冲构造活动阶段的内部演化明显制约了同期的冲积扇-扇三角洲沉积体系。初始逆冲活动形成低位域先加积后进积的冲积扇-扇三角洲沉积,强烈逆冲形成

盆地边缘不断退积的冲积扇-扇三角洲沉积,逆冲活动减弱至停止产生不断向盆地进积的扇三角洲平原辫状河流沉积。

4 石油地质意义分析

准噶尔南缘新近纪逆冲构造活动使扇三角洲沉积体不断向盆地前展推进,造成扇三角洲前缘砂体储层侧向连片,分布面积广,且上覆于古近纪安集海期的深湖相泥岩(烃源岩)之上,离生烃中心近,通过断层活动产生的输导作用,油气可直接进入扇三角洲砂体储集层;垂向上砂体相互叠置形成厚度可观的储集体^[20],其上覆逆冲构造活动相对宁静期沉积的大量细粒沉积物,可成为很好的盖层,易形成大型的油气田,如霍尔果斯。

5 结论

(1) 准噶尔盆地南缘新近纪沙湾组——塔西河组分为1个二级层序和2个三级层序,均由角度不整合、平行不整合或沉积环境转换面所分隔。

(2) 准噶尔盆地南缘2个三级层序的沉积构成,反映了从前陆逆冲挠曲沉降到回弹隆升的演化过程;层序1沉积构成明显受近南北向逆冲构造活动控制;而回弹隆起影响了新近纪构造相对宁静期的沉积层序2内部沉积构成。准噶尔盆地南缘新近纪逆冲构造活动阶段的内部演化,制约了同期的冲积扇-扇三角洲沉积体系。

(3) 在准噶尔南缘新近纪逆冲构造活动期,层序1扇三角洲沉积不断向盆地推进,造成扇三角洲前缘砂体侧向连片,垂向上相互叠置形成厚度可观的储集体,且上覆于古近纪安集海期的深湖相烃源岩之上,离生烃中心近,其上覆构造相对宁静期层序2发育的大量细粒沉积物作为良好的盖层,易形成大型油气田。

参考文献:

- [1] Beaumont C, Quinlan G, Hamilton J. Orogeny and stratigraphy: Numerical models of the Paleozoic in the eastern interior of North America[J]. *Tectonics*, 1988(7): 389.
- [2] Catuneanu O, Haneox P J, Rubidge B S. Reciprocal flexural behaviour and contrasting stratigraphies: a new basin development model for the Karoo retroarc foreland system, South Africa[J]. *Basin Research*, 1998(10): 417.
- [3] Benjamin Guillaume, Damien Dhont, Stéphane Brusset. Three-dimensional geologic imaging and tectonic control on stratigraphic architecture: upper cretaceous of the Tremp Basin (South-central Pyrenees, Spain)[J]. *AAPG Bulletin*, 2008, 92(2): 249.
- [4] Miguel López-Blanco. Sedimentary response to thrusting and fold growing on the SE margin of the Ebro basin (Paleogene, NE Spain)[J]. *Sedimentary Geology*, 2002(146): 133.
- [5] William S Elliott Jr, Lee J Suttner, Lisa M Pratt. Tectonically induced climate and its control on the distribution of depositional systems in a continental foreland basin, Cloverly and Lakota Formations (Lower Cretaceous) of Wyoming, U S A [J]. *Sedimentary Geology*, 2007(202): 730.
- [6] 李勇, 曾允孚. 试论龙门山逆冲推覆作用的沉积响应: 以成都盆地为例[J]. *矿物岩石*, 1994, 14(1): 59.
LI Yong, ZENG Yunfu. On the sedimentary response to thrusting of Longmenshan thrust belt in Chengdu Basin [J]. *J Mineral Petrol*, 1994, 14(1): 59.
- [7] 李勇, 王成善, 曾允孚. 造山作用与沉积响应[J]. *矿物岩石*, 2000, 20(2): 49.
LI Yong, WANG Chengshan, ZENG Yunfu. Orogeny and sedimentary response[J]. *J Mineral Petrol*, 2000, 20(2): 49.
- [8] 刘亢, 曲国胜, 许华明. 前陆盆地构造作用的沉积响应[J]. *新疆石油地质*, 2008, 29(6): 778.
LIU Kang, QU Guosheng, XU Huaming. The sedimentary response to the tectonism in foreland basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2008, 29(6): 778.
- [9] 李斌, 孟自芳, 宋岩, 等. 鄂尔多斯盆地西缘前陆盆地构造-沉积响应[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2007, 37(4): 703.
LI Bin, MENG Zifang, SONG Yan, et al. Tectonic-sedimentary response of foreland basin in Western margin of Ordos Basin [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2007, 37(4): 703.
- [10] 王家豪, 王华, 陈红汉, 等. 前陆盆地的构造演化及其沉积、地层响应: 以库车坳陷下白垩统为例[J]. *地学前缘*, 2007, 14(4): 114.
WANG Jiahao, WANG Hua, CHEN Honghan, et al. Research on the tectonic evolution of foreland basins and their responses to deposition and stratigraphy: an example from the Lower Cretaceous in Kuqa Depression [J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(4): 114.
- [11] 冯建伟, 戴俊生, 鄢继华, 等. 准噶尔盆地乌夏前陆冲断带构造活动: 沉积响应[J]. *沉积学报*, 2009, 27(3): 494.
FENG Jianwei, DAI Junsheng, YAN Jihua, et al. Sedimentary response to permian structural movements in Wuxia foreland thrust belt of Junggar Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(3): 494.
- [12] 尹海生, 王成善, 李亚林, 等. 构造事件的沉积响应: 建立青藏高原大陆碰撞、隆升过程时空坐标的设想和方法[J]. *沉积与特提斯地质*, 2001, 21(2): 1.
YIN Haisheng, WANG Chengshan, LI Yalin, et al. Sedimentary response to tectonic events: reconstructed spatio-temporal scale of the Indo-Asian continental collision and Qinghai-Xizang Plateau uplift[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2001, 21(2): 1.
- [13] 林畅松, 刘景彦, 张燕梅, 等. 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[J]. *中国科学: D 辑*, 2002, 32(3): 177.
LIN Changsong, LIU Jingyan, ZHANG Yanmei, et al. The characteristic of tectonic sequence contexture of Tertiary in the Kuqa Depression and its response to foreland tectonism[J].

- Science China: Series D, 2002, 32(3): 177.
- [14] 刘景彦, 林畅松. 前陆盆地构造活动的层序地层响应[J]. 地学前缘, 2000, 7(3): 265.
LIU Jingyan, LIN Changsong. The sequence stratigraphic response of tectonic activities in foreland basin [J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(3): 265.
- [15] 杨明慧, 刘池洋, 郑孟林, 等. 鄂尔多斯盆地中晚三叠世两种不同类型边缘层序构成及对构造活动响应[J]. 中国科学: D 辑, 2007, 37(增刊 I): 173.
YANG Minghui, LIU Chiyang, ZHENG Menglin, et al. The sequence contexture of two different kind of margins in the Middle-Late Triassic in Ordos Basin and their response to tectonic activities [J]. Science China: Series D, 2007, 37 (supplement I): 173.
- [16] 况军, 贾希玉. 喜马拉雅运动与准噶尔盆地南缘油气成藏[J]. 新疆石油地质, 2005, 26(2): 129.
KUANG Jun, JIA Xiyu. Relationship between Himalayan Movement and hydrocarbon accumulation in Southern Margin of Junggar Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2005, 26(2): 129 - 133.
- [17] 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 新疆维吾尔自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 244 - 247.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Regional geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993, 244 - 247.
- [18] 方世虎, 贾承造, 宋岩, 等. 淮南地区前陆冲断带晚新生代构造变形特征与油气成藏[J]. 石油学报, 2007, 28(6): 1.
FANG Shihu, JIA Chengzao, SONG Yan, et al. Late Cenozoic structural deformation and its implication for petroleum accumulation in the southern Junggar thrust belt [J]. Acta Petrol Sinica, 2007, 28(6): 1.
- [19] 王家豪, 王华, 陈红汉, 等. 一幕完整的前陆盆地构造演化的地层记录: 库车坳陷下白垩统[J]. 地质科技情报, 2006, 25(6): 31.
WANG Jiahao, WANG Hua, CHEN Honghan, et al. Stratigraphic record in a whole episode of foreland basin tectonic evolution: the Lower Cretaceous in Kuqa Depression [J]. Geological Science and Technology Information, 2006, 25(6): 31.
- [20] 顾家裕, 张兴阳. 中国西部陆内前陆盆地沉积特征与层序格架[J]. 沉积学报, 2005, 23(2): 187.
GU Jiayu, ZHANG Xingyang. Sedimentary characteristics and squence framework of intracontinental foreland basin in the Western China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23(2): 187.
- [21] 纪友亮, 安爱琴, 朱如凯. 陆相前陆盆地层序结构特征研究: 以准噶尔南缘晚期前陆盆地为例[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(2): 237.
JI Youliang, AN Aiqin, ZHU Rukai. Research on sequence architectures of continental foreland basins: a case study of the late stage of the southern Junggar foreland basin [J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(2): 237.
- [22] 高志勇, 韩国猛, 朱如凯, 等. 准噶尔盆地南缘古近纪: 新近纪前陆盆地沉积格局与演变[J]. 古地学报, 2009, 11(5): 491.
GAO Zhiyong, HAN Guomeng, ZHU Rukai, et al. Depositional setting and evolution of the Paleogene-Neogene foreland basin of southern margin of Junggar Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2009, 11(5): 491.
- [23] 温德顺, 苏龙, 孙国强, 等. 前陆盆地的沉降和抬升机制研究进展[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(3): 385.
WEN Deshun, SU Long, SUN Guoqiang, et al. Natural advance in the study of the subsidence and uplift mechanism of foreland basins [J]. Gas Geoscience, 2006, 17(3): 385.

(上接第 594 页)

- ZHOU Yuanquan, ZHU Xinwei. Research on accelerated reliability growth testing (Ⅵ) step stress test schemes [J]. Propulsion Technology, 2003, 24(4): 289.
- [8] 周源泉, 安维廉, 朱新伟. 论加速可靠性增长试验(Ⅶ): 步进应力试验方案的统计分析[J]. 推进技术, 2003, 24(5): 393.
ZHOU Yuanquan, ZHU Xinwei, ZHU Xinwei. Research on accelerated reliability growth testing (Ⅶ) statistical analysis of step stress test schemes [J]. Propulsion Technology, 2003, 24(5): 393.
- [9] 吉国明, 喻天翔, 宋笔锋, 等. 加速可靠性增长模型研究[J]. 机械科学与技术, 2007, 26(2): 156.
JI Guoming, YU Tianxiang, SONG Bifeng, et al. Study of accelerated reliability growth model [J]. Mechanical Science and Technology, 2007, 26(2): 156.
- [10] 陈家鼎. 生存分析与可靠性[M]. 北京: 北京大学出版社. 2005.
CHEN Jiading. Survival analysis and reliability [M]. Beijing: Peking University Press. 2005.
- [11] Waseem Q. Mohammed assessment of a proportional intensity model for repairable system reliability[D]. [S. l.]: University Of Arkansas, 1991.
- [12] Jiang S T, Landers T L. Assessment of repairable system reliability using proportional intensity models : a review[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2006, V55(2): 328.
- [13] Guida M, Giorgio M. Reliability analysis of accelerated life-test data from a repairable system [J]. IEEE Transactions on Reliability, 1995, V44(2): 337.
- [14] Won Youngyun, Eun Sukkim, Ji Hwancha. Accelerated life test data analysis for repairable systems [J]. Communications in Statistics—Theory and Methods, 2006, 35(10): 1803.
- [15] 杨为民, 盛一兴. 系统可靠性数字仿真[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社. 1990.
YANG Weimin, SHENG Yixing. System reliability digital simulation [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1990.
- [16] 曹晋华, 程侃. 可靠性数学引论[M]. 修订版. 北京: 高等教育出版社. 2006.
CAO Jinhua, CHENG Kan. Introduction of reliability mathematic [M]. Beijing: Higher Education Press. 2006.