

文章编号: 1000-0550(2010) 03-0412-07

# 库车前陆盆地早白垩世岩石圈粘弹性变形的地层记录<sup>1</sup>

王家豪<sup>1,2</sup> 王 华<sup>1</sup> 云 露<sup>3</sup> 马慧明<sup>3</sup> 尚亚乐<sup>1</sup>

(1 中国地质大学资源学院 武汉 430074; 2 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室 武汉 430074;

3 中国石油化工股份有限公司西北油田分公司勘探开发研究院 乌鲁木齐 830011)

**摘 要** 基于前陆盆地岩石圈弹性与粘弹性挠曲变形的不同特点, 提出应用前隆斜坡带地层结构获取岩石圈力学性质及变形过程信息的思路。对库车前陆盆地的实例分析表明, 研究区早白垩世历经了两个逆冲期至宁静期的构造演化, 卡普沙良群、巴什基奇克组分别为逆冲期和宁静期的地层记录。在单个逆冲期, 随着逆冲加载和岩石圈挠曲变形, 岩石圈性质从弹性转化为粘弹性, 盆地由向克拉通方向扩展变宽转变为向逆冲带变窄加深。相应地, 前隆斜坡带的地层记录为: 逆冲早期, 地层向克拉通方向渐进超覆和退积; 逆冲晚期, 地层向逆冲带收缩和前积, 形成底面上超 削截和顶面削截一顶超两个重大不整合面。宁静期盆地宽浅, 地层平行连续, 临近冲断带因岩石圈回弹产生少量削截不整合。

**关键词** 库车前陆盆地 早白垩世 岩石圈 弹性 粘弹性

**第一作者简介** 王家豪 男 1968 年出生 副教授 博士 沉积、层序地层学 E-mail: cugwangjiahao@163.com

**中图分类号** P534.53 **文献标识码** A

## 0 前言

关于前陆盆地挠曲变形的动力学过程, 前人提出了弹性流变和粘弹性流变两种模型。弹性流变模型以岩石圈变形过程中挠曲刚度保持不变为假设<sup>[1,2]</sup>; 粘弹性流变模型则认为, 岩石圈在挠曲沉降过程中受温度影响而发生粘弹性流变, 挠曲刚度逐渐减小, 有效弹性厚度变薄, 因此即使在负载不变的情况下挠曲变形的形态和幅度也随之改变<sup>[3,4]</sup>。对于两种模型的适用性, 目前一致认为弹性模型能很好地模拟洋壳的挠曲过程, 但对大陆岩石圈还存在较大分歧。大多认为复杂结构的大陆岩石圈与粘弹性更加接近, 也有一些学者提出, 陆内前陆盆地地温梯度低, 地壳有效弹性厚度大, 构造负载下的挠曲变形更趋向于弹性挠曲变形<sup>[5]</sup>; 或认为大陆岩石圈在负载作用下粘弹性流变的时间短暂, 用弹性模型是有效的。

挠曲沉降的数值模拟是近年来检验模型适用性的常用方法<sup>[5-10]</sup>。但由于数值模拟的时间跨度大, 且普遍未考虑地层内部结构, 并包含了多参数(如岩石圈的厚度)的反复调试过程, 因此即使模拟出的盆地几何形态(盆地宽度和沉降幅度)与实例吻合, 也不能充分证实岩石圈的力学性质。基于两种模型中前隆隆升和迁移的过程不同, 形成的地层结构存在明

显差异<sup>[2,11]</sup>, 笔者提出了依据前隆斜坡带地层结构获取岩石圈力学性质信息的思路。

研究区库车前陆盆地位于塔里木盆地北部, 北临南天山造山带, 南部是塔北隆起, 呈北东东向展布, 面积 42 700 km<sup>2</sup>, 为伴随南天山海西褶皱带的隆升发展起来的中、新生代前陆盆地(图 1)。研究区白垩系上统缺失, 下统由卡普沙良群(K<sub>1</sub>hp)和巴什基奇克组(K<sub>1</sub>bs)组成, 卡普沙良群自下而上又划分为亚格列木组(K<sub>1</sub>y)、舒善河组(K<sub>1</sub>s)、巴西盖组(K<sub>1</sub>b)。研究区北部露头、南部大量钻井以及新近完成的较高分辨率的三维地震为本研究提供了翔实的资料条件。陈发景等<sup>[6]</sup>、曹守连等<sup>[7]</sup>、刘光祥等<sup>[10]</sup>、张燕梅等<sup>[5]</sup>研究认为, 弹性模型可以很好地解释库车盆地三叠纪以来的演化过程, 本文对此提出了不同观点。

## 1 弹性、粘弹性模型中前隆斜坡带地层结构比较

在前陆盆地系统内, 对于载荷质量和位置的变化、盆地沉降中心的不断调整过程, 最为敏感的反应是前隆的隆升和迁移, 并引起前隆(向前渊的)斜坡带地层的超覆和剥蚀<sup>[12]</sup>。一幕前陆盆地的构造演化分为逆冲期和构造宁静期, 弹性、粘弹性流变模型对于两个时期岩石圈的挠曲变形、前隆的隆升一迁移过

<sup>1</sup> 国家自然科学基金项目(批准号: 40872077)资助。

收稿日期: 2009-05-31; 收修修改稿日期: 2009-06-27

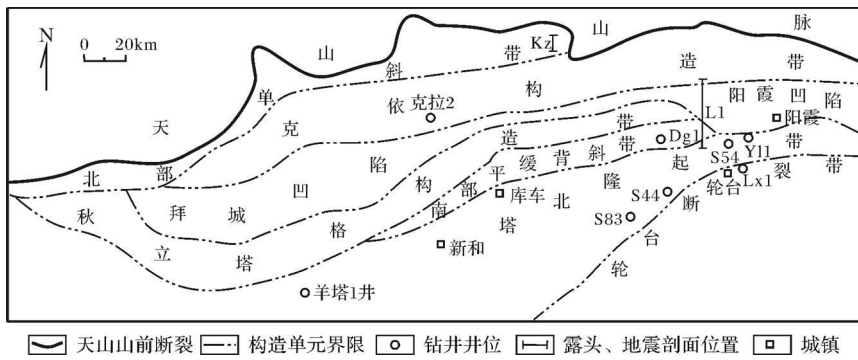


图 1 库车前陆盆地构造单元划分

Fig 1 Tectonic unit division of Kuqa foreland basin

程以及形成的地层结构特点有着不同认识。

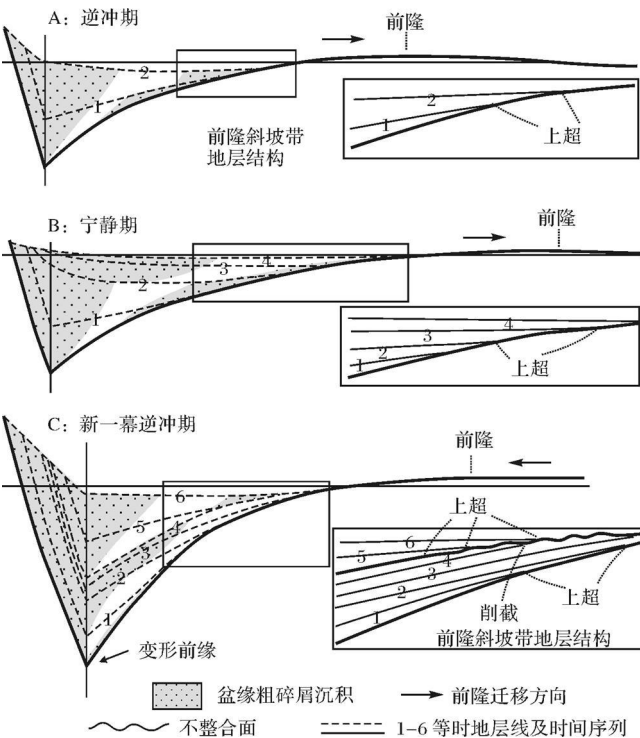


图 2 岩石圈弹性挠曲变形及前隆斜坡带地层结构样式 (据 Flemings 和 Jordan 1990)

Fig 2 Flexural deformation of elastic lithosphere and stratigraphic framework pattern at forebulge slope (after Flemings and Jordan 1990)

在弹性流变模型中,岩石圈挠曲过程表现为<sup>[2]</sup>: 冲断活动初期,盆地较窄;随着逆冲加载增强并向克拉通方向扩展,盆地向克拉通方向扩张;逆冲停止后(宁静期),构造作用居于次要地位,此时的沉降主要与沉积负载有关,由于造山带遭受剥蚀和地壳深部均衡补偿,临近逆冲带的岩石圈回弹抬升,盆地变宽变浅,前隆进一步远离冲断带移动。在新一幕冲断活动之初,盆地再次变窄,前隆向冲断带迁移……。结果,

在前隆向前渊斜坡带,单个构造幕的地层结构总体表现为向克拉通方向超覆;相邻构造幕之间则以上超/下削不整合面分隔(图 2)。

粘弹性流变模型中岩石圈挠曲过程表现为<sup>[4]</sup>(图 3):冲断活动初期,盆地宽阔;随着逆冲加载增强

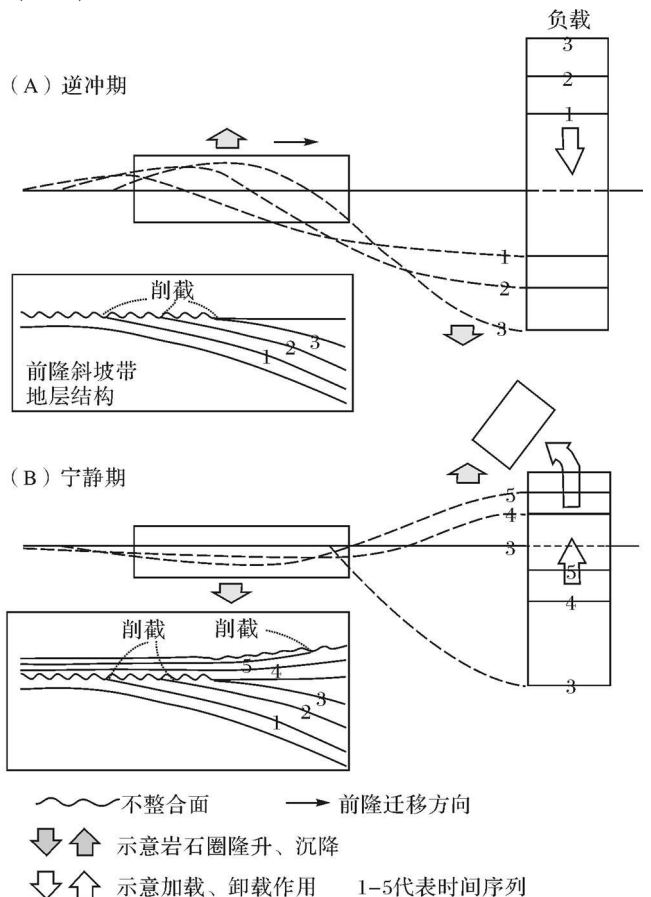


图 3 岩石圈粘弹性挠曲变形及前隆斜坡带地层结构样式 (据 Beaumont 等, 1988 修改)

Fig 3 Flexural deformation of viscoelastic lithosphere and stratigraphic framework pattern at forebulge slope (after Beaumont et al., 1988)

以及地壳深部作用,岩石圈发生粘弹性变形,前隆向逆冲带迁移,盆地变窄变深(曲线 1 至 3),前隆带地层遭抬升和大量剥蚀,形成广泛的削截不整合;冲断负载之后,侵蚀卸载作用导致临近逆冲带岩石圈回弹上升(曲线 4 至 5),地层遭剥蚀,挠曲变形与逆冲期呈镜像关系。

总体看来,两种模型中,宁静期的岩石圈变形、盆地形态及地层结构特点类似,但在逆冲期存在明显不同,表现在前隆斜坡带地层结构上的差别为:弹性流变模型中,底部地层分布局限,之上向克拉通方向渐进超覆,逆冲期与宁静期之间连续发育;粘弹性流变模型中,底部地层分布广泛,之上向逆冲带收缩,逆冲期与宁静期之间为一个广泛的削截不整合。

## 2 库车前陆盆地下白垩统地层格架及岩石圈挠曲变形分析

库车前陆盆地下白垩统为一幕完整的前陆盆地演化的地层记录,卡普沙良群、巴什基奇克组分别发育于逆冲期和构造宁静期<sup>[13~15]</sup>。在盆地东部,从北向南,卡普沙良群呈巨厚—薄—厚分布,与前陆盆地前渊—前隆—隆后盆地的地层分布特点一致;呈 NEE 向、串珠状展布的低厚度带即为该时期前隆单元——塔北隆起(图 4B)。巴什基奇克组北薄南厚,反映该时期向克拉通倾伏、宽缓斜坡式的盆地形态特征(图 4A)。

三维地震剖面 L1 位于塔北隆起以北,显示了前隆斜坡带下白垩统一侏罗系的地层结构特点(图 5)。其中, T3Q T3L T32 T33 T34 T4Q T4L T50 为一列不整合界面,界面之下普遍见削截反射。尤其是 T34 T4Q T50 之下削截现象突出,地层缺失严重。通过钻井标定, T30—T32 T32—T33 T33—T40 分别对应于巴什基奇克组 ( $K_1bs$ )、巴西盖组 ( $K_1b$ )、舒善河组—亚格列木组 ( $K_{1y}-K_{1s}$ )。T40—T50 内部见强振幅连续反射,为侏罗系煤系地层的反射特点。

根据地震反射的外部几何形态和内部结构,结合露头、钻井资料研究表明,在逆冲期和宁静期划分的基础上,卡普沙良群可进一步细分为 2 个逆冲幕,且早白垩世岩石圈挠曲变形为粘弹性性质。

### 2.1 逆冲期与宁静期划分

除了以上地层分布所反映的盆地形态特征之外,依据还包括:

(1) 地层内幕结构上,卡普沙良群南部遭大量削截剥蚀,并发育大量向北的前积反射(图 5 结构单元

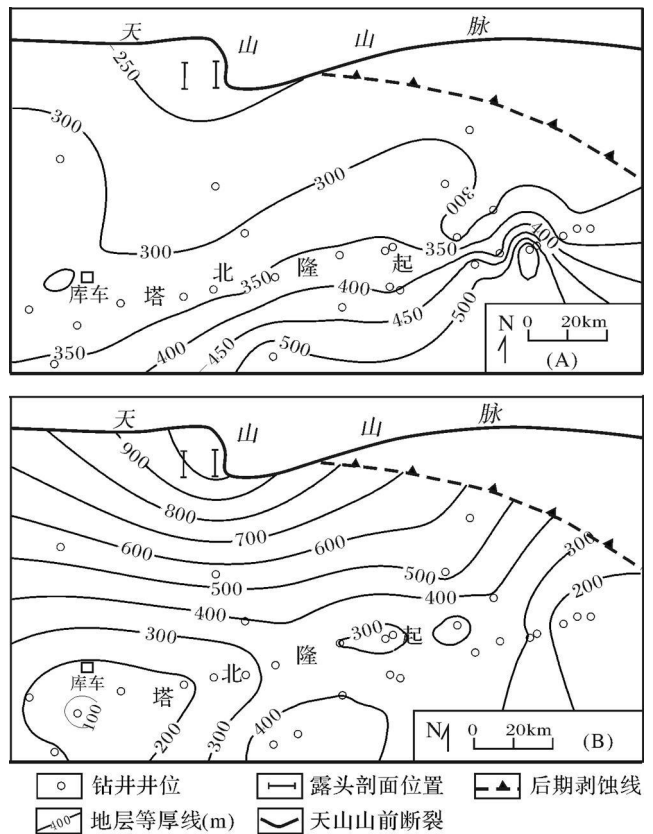


图 4 库车前陆盆地东部巴什基奇克组 (A)、卡普沙良群 (B) 地层等厚图

Fig 4 Isoch maps of Bashenjiqike Formation (A) and Kapushaliang Group (B) in the eastern Kuqa Foreland Basin

2.4.5), 反映了前渊带强烈沉降、前隆带隆升的构造变形;相反,巴什基奇克组北薄南厚,北部遭少量削截(图 5 结构单元 6.7),反映前隆带沉降、而临近冲断带的前渊区回弹抬升—遭受剥蚀。以上两个时期的岩石圈变形分别与前陆盆地逆冲期、宁静期的变形特点耦合一致。

(2) 沉积充填上,卡普沙良群以细粒沉积为主,除亚格列木组、巴西盖组分别发育扇三角洲和三角洲沉积之外,舒善河组由大套滨—浅湖相泥岩、粉砂岩组成,为逆冲期深陷盆地充填特征<sup>[14]</sup>。据天山山前克孜勒鲁尔沟 (Kz) 露头实测,卡普沙良群厚 1 078.09 m,其中舒善河组厚达 847.62 m<sup>[15]</sup>。相反,巴什基奇克组时期,扇三角洲、辫状河三角洲广泛发育,两类三角洲的前缘甚至越过塔北隆起,形成了一套厚 250~500 m 的富砂沉积,主要由中—粗砂岩、砂砾岩、砾岩夹薄层泥岩组成,地层含砂率高达 70%~90%<sup>[16]</sup>,总体表现为磨拉石盆地的沉积充填特征(图 6)。

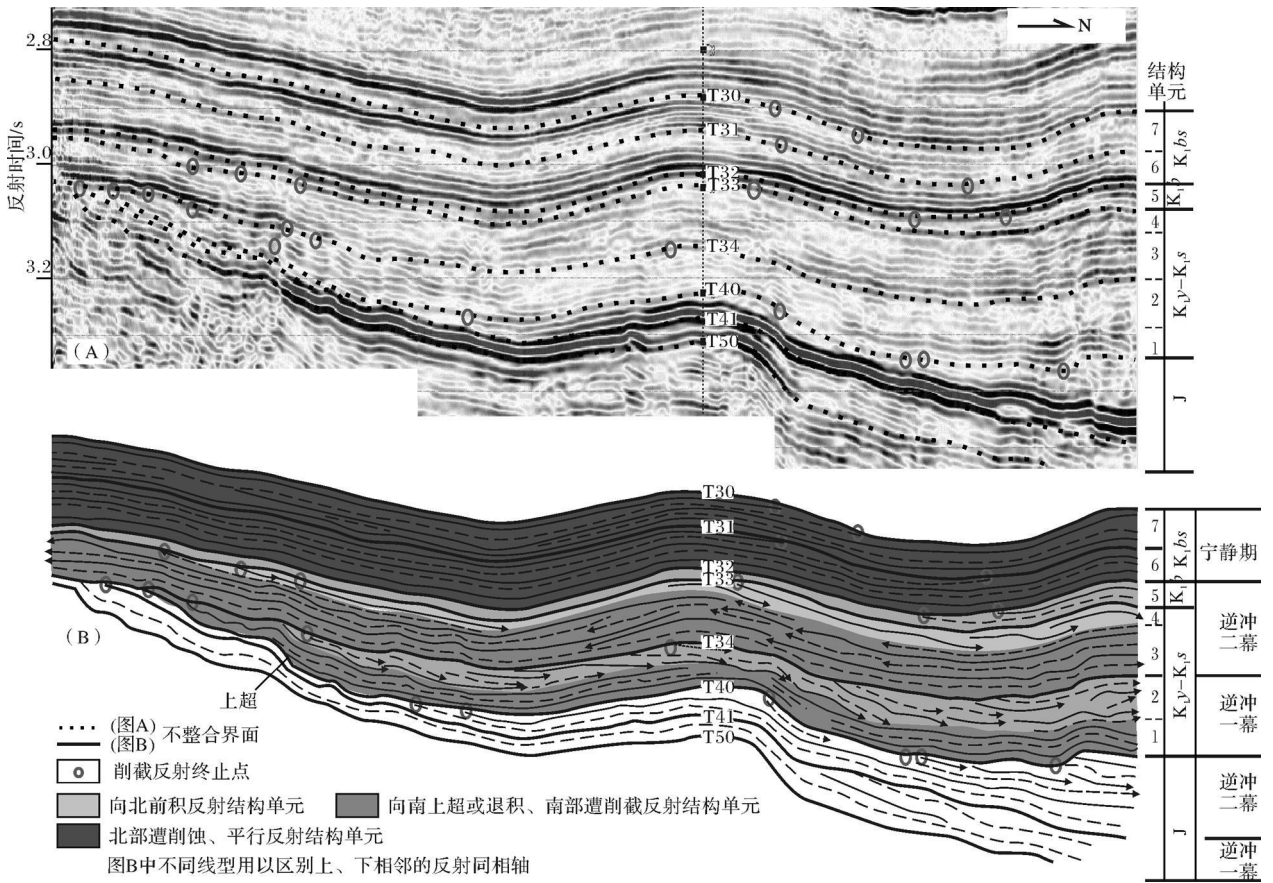


图 5 塔北隆起北斜坡带 L1 剖面地震反射结构解释 (剖面位置见图 1)

Fig 5 Reflection configuration interpretation on seismic profile L1 at the north slope of Tabei Uplift

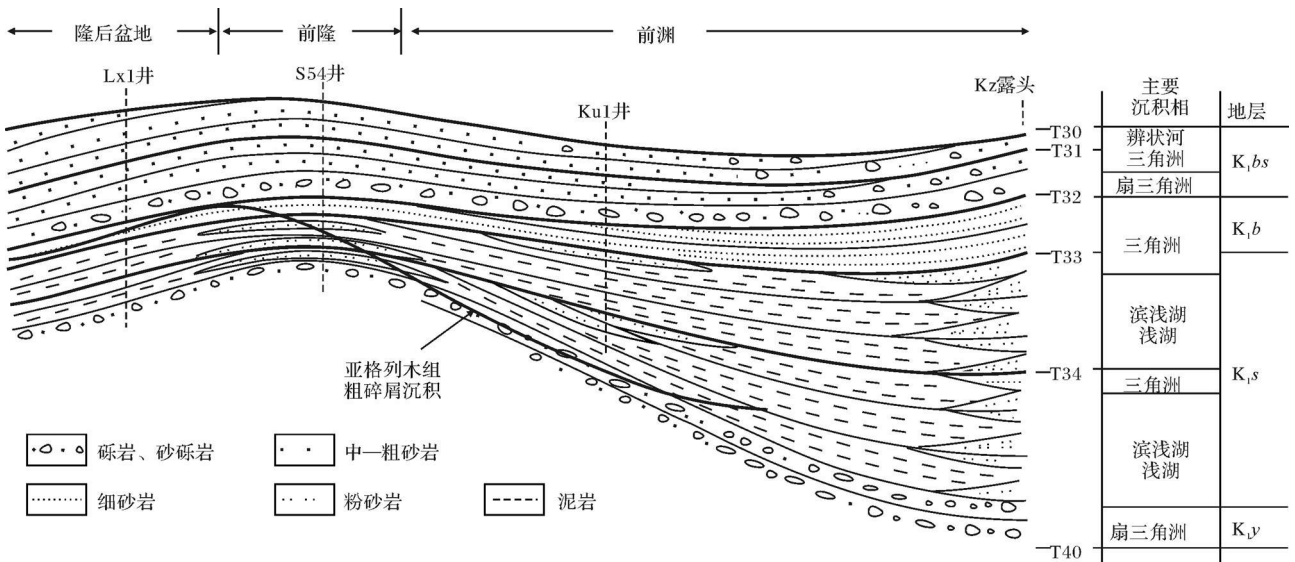


图 6 库车前陆盆地东部下白垩统地层格架、沉积充填示意图

Fig 6 Sketch map showing the stratigraphic framework and depositional filling of Lower Cretaceous in eastern Kuqa Foreland Basin

## 2.2 两个逆冲幕划分

卡普沙良群内,以 T34 重大不整合面为界, T32—T34 T34—T40 均表现为下部地层相对连续整合,并向前隆超覆或退积;上部地层向逆冲带前积,顶部遭削截,记录了两幕盆地扩张—萎缩的演化历程,也是研究区历经两幕逆冲的有力佐证。

## 2.3 岩石圈粘弹性挠曲变形特征

拟合弹性、粘弹性变形的前隆斜坡带地层结构样式(图 2.3),可以看出,研究区岩石圈发生了由逆冲早期弹性至晚期粘弹性的转变<sup>[17,18]</sup>,其地层记录为:单个逆冲幕内,下部地层向克拉通大步幅超覆或退积(图 5 结构单元 1.3),反映盆地宽浅且向克拉通方向迅速扩张;上部地层向冲断带方向前积,顶面为广泛的削截—顶超不整合(T34 T32和 T33),与图 3A 所示结构特点吻合一致,反映盆地变窄加深、前隆向冲断带方向迁移的过程。

此外,北部露头 and 南部钻井揭示,卡普沙良群底部亚格列木组为一套厚 20~60 m 的粗碎屑沉积,在全区分布广泛,是研究区下白垩统与下伏地层划分、以及亚格列木组识别的重要标志层(图 6)。在克孜勒鲁尔沟露头,亚格列木组由混杂块状细—粗砾岩夹粗砂岩透镜体组成;塔北隆起上 S54 井、Y11 井揭示为千枚岩岩屑砾岩;塔北隆起北斜坡区 Dg1 井揭示由细砾岩、含砾细砂岩和粉砂岩组成;隆后区 S44 井、S83 井等揭示为细砾岩、含砾中—粗砂岩。亚格列木组粗碎屑沉积广泛分布的特点,杨庚和钱祥麟<sup>[19]</sup>已指出,在付清平<sup>[20]</sup>进行的层序地层对比中也已体现,反映了逆冲初期宽浅型的盆地面貌,与弹性模型中逆冲初期盆地狭窄、地层分布局限的特点完全不同。

以此类推,根据 L1 剖面所示的地层格架样式,研究区侏罗纪也体现为粘弹性挠曲变形,并可识别为 T40—T41、T41—T50 两幕逆冲作用过程,单个逆冲幕的地层结构同样具有下部连续整合、上部向逆冲带前积—收缩的特点。在天山山前露头,侏罗系地层发育保存完整;在研究区南部钻井揭示仅发育保存了下统阿合组和杨霞组,而中、上统克孜勒鲁尔组、恰克马克组、齐古组、卡拉扎组等大套地层缺失,总体上不同于弹性模型中前隆带下部地层缺失、上部地层完整的结构特征。

综上所述,陆内前陆盆地前隆斜坡带地层结构可归结为图 7 所示,特征包括:(1)3 个重要不整合面。分别为逆冲早期弹性变形产生的底界面(上/下)上超、削截不整合、逆冲期与宁静期之间广泛削截—顶

超不整合、宁静期临近冲断带基底回弹形成的少量削截不整合。(2)逆冲期双层格架样式。下部地层向克拉通方向上超和退积;上部地层向逆冲带收缩和前积。(3)地层几何形态。逆冲期向冲断带增厚的强烈不对称楔形,宁静期呈向冲断带减薄的弱不对称楔形。

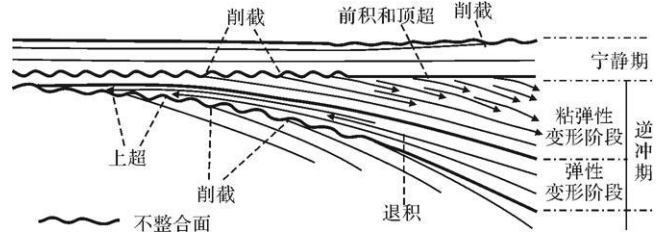


图 7 陆内前陆盆地前隆斜坡带地层格架样式

Fig 7 Stratigraphic framework pattern at forebulge slope of intra-continental foreland basin

## 3 结论及意义

通过对弹性流变模型、粘弹性流变模型中前隆斜坡带地层结构比较,并拟合库车前陆盆地塔北隆起北斜坡带下白垩统地层格架,得出了以下认识:

(1) 库车前陆盆地早白垩世历经了两期逆冲至宁静期的构造演化过程。卡普沙良群、巴什基奇克组分别为逆冲期和宁静期的地层记录。

(2) 在单个逆冲幕,随着逆冲加载和岩石圈挠曲变形加剧,库车前陆盆地岩石圈性质从弹性转化为粘弹性,盆地演化表现为由向克拉通方向扩展变宽转变为向逆冲带变窄加深。

(3) 在前隆斜坡带,逆冲期的地层记录为:下部向克拉通方向渐进超覆和退积,底面为超覆/削截不整合;上部向逆冲带收缩和前积,顶面为广泛削截—顶超不整合。宁静期地层平行连续,临近冲断带因基底回弹产生少量削截不整合。

我国西部中、新生代陆内前陆盆地发育广泛,历经多期叠加改造,盆地原貌已难以恢复,应用前隆斜坡带地层结构获取岩石圈力学性质及变形过程信息,是一种简明有效的方法。陆内前陆盆地挠曲变形的动力学模型的厘定,为盆地地层精细对比和等时地层格架的建立提供了理论依据。

## 参考文献 (References)

- Jordan T E. Thrust beds and foreland basin evolution, Cretaceous western United States[J]. AAPG Bulletin 1981, 6: 2506-2520

- 2 Fleming P B, Jordan T E. Stratigraphic modeling of foreland basins interpreting thrust deformation and lithospheric rheology [ J]. *Geology*, 1990, 18: 430-434
- 3 Quinlan G M, Beaumont C. Appalachian thrusting lithospheric flexure and Paleozoic stratigraphy of eastern interior of North America [ J]. *Canadian Journal Earth Sciences*, 1984, 21: 973-996
- 4 Beaumont C, Quinlan G M, Hamilton J. Orogeny and stratigraphy: Numerical model of the Paleozoic in the Eastern interior of North America [ J]. *Tectonics*, 1988, 7(3): 389-416
- 5 张燕梅, 刘景彦, 陈清清, 等. 前陆盆地挠曲沉降正演模型的设计与实现——以库车古近纪陆内前陆拗陷沉降分析为例 [ J]. *地球学报*, 2007, 28(1): 92-96 [ Zhang Yanmei, Liu Jingyan, Chen Qingqing *et al.*. The design and realization of the forward model for the simulation of the foreland basin flexure subsidence process: a case study of design and realization of the Tertiary Kuqa Foreland Depression [ J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2007, 28(1): 92-96 ]
- 6 陈发景, 汪新文, 张光亚, 等. 中国中生代含油气盆地构造和动力学背景 [ J]. *现代地质*, 1992, 6(3): 317-327 [ Chen Fajing, Wang Xinwen, Zhang Guangya *et al.*. Structure and geodynamic setting of oil and gas basins in the People's Republic of China [ J]. *Geoscience*, 1992, 6(3): 317-327 ]
- 7 曹守连, 陈发景, 罗传容. 塔北中、新生代前陆盆地沉降机制的数值模拟 [ J]. *石油与天然气地质*, 1994, 15(2): 113-120 [ Cao Shoulian, Chen Fajing, Luo Chuanrong. Numerical modeling of subsidence mechanism of a Mesozoic-Cenozoic foreland basin in north Tarim [ J]. *Oil & Gas Geology*, 1994, 15(2): 113-120 ]
- 8 艾伦 P A, 艾伦 J R. 盆地分析原理与应用 [ M]. 陈全茂, 张学预, 李大成, 等译. 北京: 石油工业出版社, 1995: 1-384 [ Allen P A, Allen J R. *Basin Analysis Principles and Applications* [ M]. Translated by Chen Quanmao, Zhang Xueyu, Li Dacheng *et al.* Beijing: Petroleum Industry Press, 1995: 1-384 ]
- 9 刘少峰. 前陆盆地挠曲过程模拟的理论模型 [ J]. *地学前缘*, 1995, 2(3): 69-77 [ Liu Shaofeng. The theoretical models for simulating the flexural process of foreland basin [ J]. *Earth Science Frontiers*, 1995, 2(3): 69-77 ]
- 10 刘光祥, 钱一雄, 潘文蕾. 库车中生代前陆盆地沉降沉积分析 [ J]. *石油实验地质*, 2000, 22(4): 313-318 [ Liu Guangxiang, Qian Yixiong, Pan Wenlei. Research of subsidence and sedimentation of the Kuqa Mesozoic foreland basin [ J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2000, 22(4): 313-318 ]
- 11 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): 49-56 [ Li Yong, Wang Chengshan, Zeng Yunfu. Orogeny and sedimentary response [ J]. *Journal of Mineral Petrology*, 2000, 20(2): 49-56 ]
- 12 Crampton S L, Allen P A. Recognition of foreland unconformities associated with early stage foreland basin development: example from the north Alpine foreland [ J]. *AAPG Bulletin*, 1995, 79: 1495-1514
- 13 贾进华. 库车拗陷白垩纪巴什基奇克组沉积层序与储层研究 [ J]. *地学前缘*, 2000, 7(3): 133-143 [ Jia Jinhua. Depositional sequence and reservoir of Cretaceous Bashijike formation in Kuqa foreland basin [ J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(3): 133-143 ]
- 14 肖建新, 林畅松, 刘景颜. 塔里木盆地北部库车拗陷白垩系层序地层与体系域特征 [ J]. *地球学报*, 2002, 23(5): 453-458 [ Xiao Jianxin, Lin Changsong, Liu Jingyan. Characteristics of Cretaceous sequence stratigraphy and systems tract in Kuqa depression northern Tarim Basin [ J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2002, 23(5): 453-458 ]
- 15 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: 库车拗陷下白垩统 [ J]. *地质科技情报*, 2006, 25(6): 31-36 [ Wang Jiahao, Wang Hua, Chen Honghan, *et al.*. The stratigraphic record on a whole episode of foreland basin tectonic evolution: the Lower Cretaceous in Kuqa Depression [ J]. *Geological Science and Technology Information*, 2006, 25(6): 31-36 ]
- 16 贾进华, 顾家裕, 郭庆银, 等. 塔里木盆地克拉2气田白垩系储层沉积相 [ J]. *古地理学报*, 2001, 3(3): 67-75 [ Jia Jinhua, Gu Jiayu, Guo Qingyin *et al.*. Sedimentary facies of Cretaceous reservoir in Kal-2 gas field of Tarim Basin [ J]. *Journal of Palaeogeography*, 2001, 3(3): 67-75 ]
- 17 Tankard A J. On the depositional response to the thrusting and lithospheric flexure and Paleozoic stratigraphy of Eastern interior of North America [ J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1984, 21: 973-996
- 18 林畅松, 王钦书, 肖 Jianxin *et al.*. Depositional sequence architecture and filling response model of the Cretaceous in the Kuqa Depression, the Tarim Basin [ J]. *Science in China Series D*, 2004, 47(2): 86-96
- 19 杨庚, 钱祥麟. 库车拗陷沉降与天山中生代构造活动 [ J]. *新疆地质*, 1995, 13(3): 264-274 [ Yang Geng, Qian Xianglin. Subsidence of the Kuqa Depression and Mesozoic-Cenozoic structural reactivations in Tianshan [ J]. *Xinjiang Geology*, 1995, 13(3): 264-274 ]
- 20 付清平. 陆相前陆盆地层序地层学研究——以塔里木盆地北部下白垩统地层为例 [ J]. *岩相古地理*, 1997, 17(2): 1-10 [ Fu Qingping. Approaches to sequence stratigraphy of continental foreland basins: an example from the Early Cretaceous northern Tarim Basin [ J]. *Journal of Palaeogeography*, 1997, 17(2): 1-10 ]

# Stratigraphic Records on Lithospheric Viscoelastic Deformation in Early Cretaceous, Kuqa Foreland Basin

WANG Jia-hao<sup>1,2</sup> WANG Hua<sup>1</sup> YUN Lu<sup>3</sup> MA Hui-ming<sup>3</sup> SHANG Ya-le<sup>1</sup>

(1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074;

2 Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources (China University of Geosciences), Ministry of Education, Wuhan 430074;

3 Research Institute of Exploration and Development, Northwest Oilfield Company, SINOPEC, Umuqi 830011)

**Abstract** Based on the flexural process of elastic lithosphere different from that of viscoelastic lithosphere in foreland basins, this paper provides a solution to acquire the information about lithospheric dynamic property and deformation process by virtue of stratigraphic configurations at the forebulge slope belt. The Kuqa foreland basin, as an example, had gone through tectonic evolution of two thrust period and a quiescence period in the Early Cretaceous. The Kapushaliang Group and Bashenjiqike Formation had respectively developed during thrust and during quiescence. In a single thrust period, accompanied with thrust loading and lithospheric flexural deformation, lithosphere had transformed from elastic property to viscoelastic; and the basin had widened forward to craton and then had narrowed and deepened forward to thrust-fault belt. Accordingly, the stratigraphic records at the forebulge slope dipping forward to the foredeep were as follows: during early thrust, the strata gradually onlapped and retrograded forward to craton so as to form a great onlap/truncation bottom unconformity; during the late thrust, the strata gradually shrank and prograded forward to thrust-fault belt so as to form a great truncation-toplap top unconformity. During quiescence, the basin was wide and shallow, and the strata appeared parallel and continuous with a few slight truncation unconformities adjacent to thrust-fault belt due to lithosphere rebounding.

**Key words** Kuqa foreland basin; Early Cretaceous; lithosphere; elastic; viscoelastic