

# 塔里木盆地库车坳陷收缩构造变形模型 若干问题的讨论

漆家福<sup>1,2</sup> 李勇<sup>3</sup> 吴超<sup>3</sup> 杨书江<sup>4</sup>

(1. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 3. 中国石油塔里木油田公司研究院, 新疆 库尔勒, 841000; 4. 东方地球物理勘探公司物化探事业部(五处), 河北 涿州 0272751)

**摘要:**塔里木盆地库车坳陷中、新生界表现出以逆冲断层、纵弯褶皱为基本结构要素的收缩构造变形特征。本文依据地质-地球物理勘探资料,建立了“薄皮收缩构造”和“分层收缩构造”两种模型,讨论了不同构造变形模型的几何结构、收缩变形量、构造动力学机制等方面的差异,并认为“分层收缩构造模型”更为合理。“分层收缩构造模型”强调塔里木克拉通与南天山之间的侧向挤压,中、新生界受岩层能干性影响而发生分层收缩构造变形,新生界以伴生有破冲断层的滑脱褶皱变形为主,中生界以逆冲断层及相关褶皱变形为主,深层发育基底卷入的逆冲断层和断块构造,但是不同层次的收缩变形量基本保持一致。按照平衡剖面原理测算库车坳陷新生界的收缩量为12~15 km,卷入收缩构造变形的深度在山前应该为20~26 km,因此部分逆冲断层应该切割到盆地基底中。尽管变形强度总体上是自深而浅、自造山带向前陆逐渐减弱,作为浅层强变形的秋里塔格构造带的深层也可能发育一定程度的收缩构造变形,构成深层的油气圈闭。

**关键词:**构造模型,薄皮收缩变形,分层收缩变形,构造样式,库车坳陷

**中图分类号:** P544<sup>+</sup>.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3657(2013)01-0106-15

天山山脉是一个多旋回造山带。按照板块构造理论,中国北方的古亚洲洋盆在古生代经过多期开合后最终在晚古生代末期海西运动中完全关闭,实现了塔里木、华北等陆块最终与西伯利亚陆块的拼贴成为同一的大陆,洋盆关闭形成了海西期造山带并相伴在山前地区形成前陆盆地和发育前陆冲断褶皱带。但是,那些在古生代末期或中生代初期形成的前陆盆地和前陆冲断褶皱带受到中、新生代时期相继发生的不同性质的地壳构造变形和地表地质作用的影响,特别是在塔里木、华北等陆块南侧的特提斯洋的关闭过程和印度—澳大利亚板块向北运动与欧亚板块碰撞过程的影响。国内外学者早已注意到中国西部山前坳陷不同于典型的前陆盆地<sup>[1-4]</sup>。陈发景<sup>[2]</sup>将那些与碰撞造山带不相邻、但也是大陆地壳压陷—

挠曲作用形成的盆地称为“挠曲类前陆盆地”或“类前陆盆地”。刘和甫<sup>[4]</sup>根据中国西北部山前坳陷的构造位置、构造变形特征提出再生前陆盆地和分割前陆盆地概念,并明确定义“再生前陆盆地”的形成机制主要与再旋回造山作用所产生的地壳缩短和构造负荷有关,而“分割前陆盆地”是前陆环境中基底在挤压体制下发生破裂(或早期基底断裂再活动)导致基底隆起将前陆盆地分割为孤立的小型盆地。塔里木克拉通与中天山岩浆弧(陆块?)之间在古生代的南天山洋于古生代末期“海西运动”中关闭形成南天山造山带<sup>[5,6]</sup>,而新生代晚期印度—澳大利亚板块与欧亚板块碰撞引起的远程区域挤压力作用导致“海西运动”形成的南天山造山带再次发生造山隆起,并相应地在天山山前发育山前坳陷和冲断褶皱带,因

收稿日期:2013-01-08;改回日期:2013-01-18

基金项目:国家科技重大专项课题(2011ZX05009-001)资助。

作者简介:漆家福,男,1957年生,教授,长期从事含油气盆地分析与油区构造解析教研工作;E-mail: qjjiafu@cup.edu.cn。

而塔里木盆地库车坳陷被认为是南天山山前新生代晚期发育的再生前陆盆地<sup>[4,7-8]</sup>。犹如周缘前陆盆地与碰撞造山带或弧后前陆盆地与陆缘岩浆弧造山带的耦合类似,再生前陆盆地与板内造山带在时空演化上也是密切相关的,需要在综合分析各种资料基础上建立一个构造模型来解释库车坳陷与南天山造山带在盆山结构、构造运动学和动力学等方面的耦合关系。近 20 年来,关于库车坳陷构造变形模型的论著颇多<sup>[7-18]</sup>,这些模型无论是在解释盆山关系还是解释盆地内部构造变形特征方面均有较大分歧。本文结合油气勘探资料对库车坳陷收缩构造变形模型的相关问题进行讨论。

## 1 基础地质资料

库车坳陷充填的主要沉积层为中、新生界。其中,侏罗系中下部发育有一套区域性含煤岩层,古近系底部(库姆格列木群,主要分布在库车坳陷中、西部)和新近系底部(吉迪克组,主要分布在东部)发育有厚度不等的膏盐岩和含膏盐泥岩岩层,其他地层为以砂泥岩互层为主的碎屑岩层。这些沉积岩层不仅岩性和厚度的横向变化明显,还包含多个区域性、局部的不整合面。在地面地质图中,南天山由强烈变形、变质的古生界和震旦系组成,局部有中生界沉积层不整合在古生界之上。由南天山山脚向库车坳陷内部地面依次出露变质基底岩层、石炭—二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系、新近系和第四系等地层,内部虽有小型褶皱,总体上则构成一个向盆地倾斜的单斜构造带(图 1)。进入盆地后,地面地质露头显示一系列中、新生界表现为 NEE 向—近 EW 向的褶皱构造。其中,背斜相对紧闭,核部或陡翼发育逆冲断层,向斜相对宽缓。与山前单斜带褶皱过渡的强变形带称为克拉苏—依奇克里克构造带,有两排紧闭背斜和 2~3 条逆冲断层构成(图 2-a)。地面出露的背斜核部地层由北向南分别为白垩系、古近系,背斜翼部地层倾向普遍在 60°以上。向南的构造变形明显减弱,也是库车坳陷新近系、第四系的沉积中心,称为拜城凹陷。在地面地质图上,拜城凹陷也是一个宽缓的近 EW 向向斜构造,其南部还发育有一个近 EW 向—NEE 向复式背斜构造带,称为秋里塔格构造带(图 2-b)。秋里塔格构造带在地面出露并卷入褶皱和逆冲断层变形的主要是新近系和第四系,背斜翼部岩层产状普遍可以高达 70°以上,局部

甚至发生倒转。在平面上,秋里塔格构造带呈向南凸出的弧形弯曲,向东延伸与克拉苏—依奇克里克构造带合并在一起,包裹着拜城凹陷并将拜城凹陷与库车坳陷东段的阳霞凹陷分隔开来。

地震勘探表明地表出露的中、新生界沉积岩层在构造变形相对弱的情况下可以获得较好的层状反射,但是受地表地形、岩性横向变化和复杂构造变形的影响,复杂构造带的地震资料品质相对较低。如图 3 所示,在二维区域地震剖面上可以清楚地解释出新生界沉积岩层构成宽缓向斜的拜城凹陷,但是拜城凹陷南北两侧褶皱冲断构造带的反射信息杂乱,依据反射信息难以解释岩层构造变形,特别是构造带的深层结构特征。近年在克拉苏构造带完成了三维地震勘探,虽然地震资料品质有所改善(图 4),也只能解释中生界构造变形的轮廓,构造带的深层结构依然需要综合多方面地质信息来建立解释模型。

横穿山前单斜带及克拉苏构造带的 CEMP(连续电磁剖面法)剖面(图 5)显示浅表层中、新生界之下的盆地基底有明显的起伏,高电阻率的基底与低电阻率的沉积盖层在山前构成近直立的接触带。

## 2 关于库车坳陷收缩构造解释模型

库车坳陷地面露头资料和油气勘探获得的地下构造要素的信息都是零散的,构造带的变形又异常复杂,构造解释具有多解性。依据野外地质露头和地震反射特征,多数学者认同南天山山前和库车坳陷内部以收缩构造变形为主要特征<sup>[1-18]</sup>,对盆山结构、各构造带的构造样式及其相互关系的解释大致有两种模型。一种是薄皮构造模型<sup>[9-10,12-14]</sup>,认为库车坳陷主要发育盖层滑脱的冲断褶皱构造,浅表层新生界的变形主要是滑脱褶皱或逆冲断层及相关褶皱,深层中生界的变形为薄皮逆冲断层构成的叠瓦构造、双重构造及其相关褶皱,它们通过沿着沉积岩层底面、侏罗系和古近系底部等软弱岩层中发育的顺层断层(或低角度断层)连锁在一起,构成从南天山山前向库车坳陷内部的薄皮冲断褶皱带<sup>[12-14]</sup>。另一种是厚皮构造模型,认为库车坳陷的收缩构造变形至少影响到盆地基底,拆离断层位于中地壳深层<sup>[16-18]</sup>。厚皮构造模型可以从基底到盖层之间协调的收缩构造变形,也可以是盖层和基底之间不协调、甚至盖层内部各构造层之间不协调的分层收缩构造变形<sup>[17,19]</sup>。

图 6 是以库车坳陷中段的地面地质资料、地震

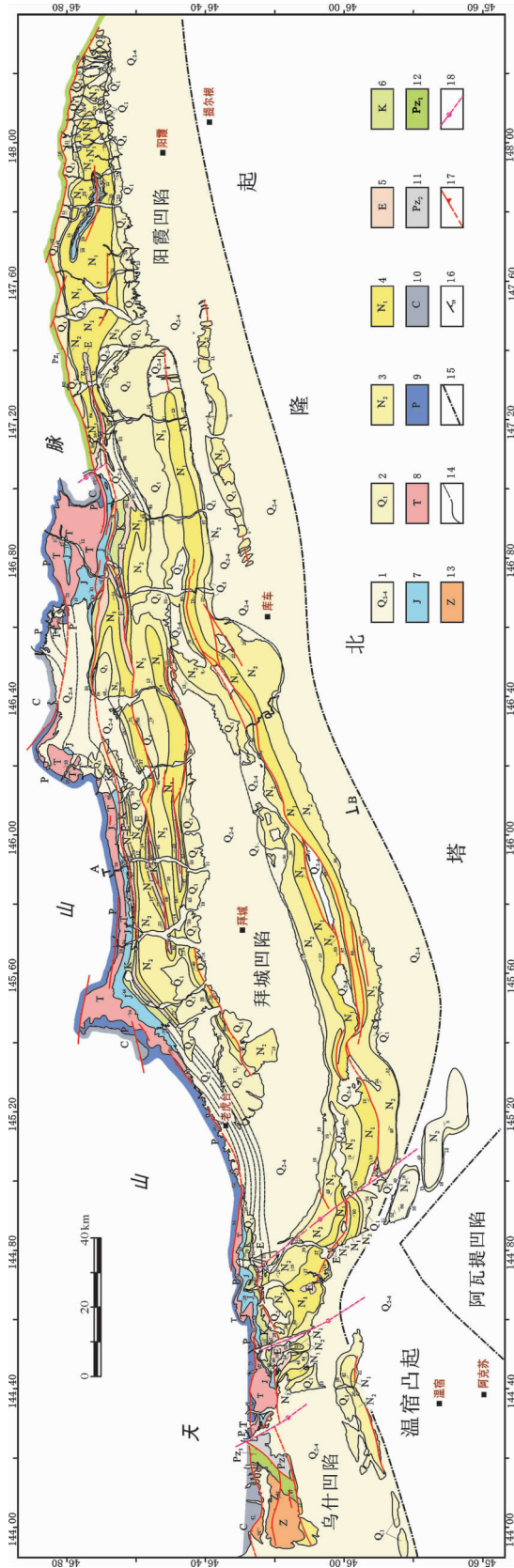


图 1 库车拗陷地面地质略图 (据塔里木油田资料简编)

1—第四系上、中、下组；2—第四系下部，西域组；3—上新统；4—中新统；5—古近系；6—白垩系；7—侏罗系；8—三叠系；9—二叠系；10—石炭系；11—上古生界；12—下古生界；13—震旦系；14—地质界线，虚线为隐伏在表层沉积层之下的地质界线；15—构造单元边界线，大致圈定库车拗陷范围；16—岩层产状，短杠表示倾向，数字表示倾角；17—逆冲断层，三角指向断层面，实线为地面出露的断层迹线，虚线表示隐伏在表层沉积层之下的断层迹线；18—走滑断层，箭头指示断层走向，实线为地面出露的断层迹线，虚线表示隐伏在表层沉积层之下的断层迹线

Fig.1 Sketch geological map showing outcrops in Kuqa Depression (simplified after the data of Tarim Oil Company)

1—Upper and middle sedimentary layer of Quaternary; 2—Lower sedimentary layer of Quaternary, Xiyu Formation; 3—Pliocene, mainly Kuche Formation; 4—Miocene, mainly Kangcun Formation; 5—Eocene; 6—Cretaceous; 7—Jurassic; 8—Triassic; 9—Permian; 10—Carboniferous; 11—Upper Paleozoic; 12—Lower Paleozoic; 13—Sinian; 14—Stratigraphic boundary; 15—Boundary of tectonic units; 16—Strike-slip fault; 17—Thrust fault; 18—Strike-slip fault; arrow tip shows the direction of fault displacement



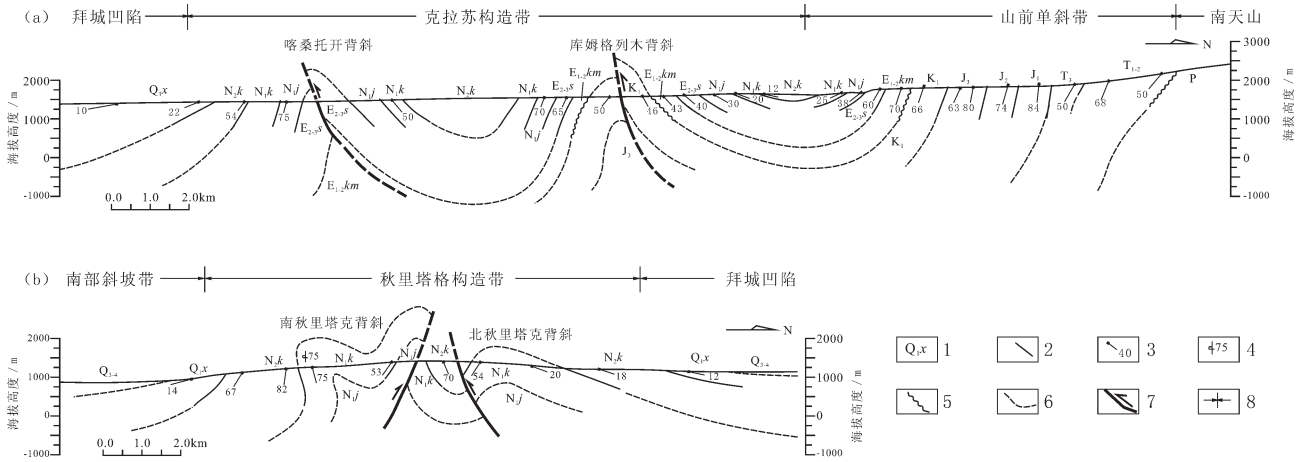


图 2 库车坳陷横穿克拉苏构造带和秋里塔格构造带的地面地质剖面

(剖面位置大致沿图 1 中 A—B 线)

- 1—地层代号,  $Q_{3-4}$ —全新统, 疏松沉积层;  $Q_{1x}$ —西域组;  $N_{2k}$ —库车组;  $N_{1k}$ —康村组;  $N_{1j}$ —吉迪克组;  $E_{2-3s}$ —苏维依组;  $E_{1-2km}$ —库姆格列木群;  $K_1$ —下白垩统;  $J_3$ —上侏罗统;  $J_2$ —中侏罗统;  $J_1$ —下侏罗统;  $T_3$ —上三叠统;  $T_{1-2}$ —中、下三叠统; P—二叠系;
- 2—地层界线; 3—地面地层倾向与倾角; 4—倒转的地层产状; 5—不整合面; 6—推测地质界线及构成的构造形态;
- 7—逆冲断层, 虚线为推测的逆冲断层延伸迹线; 8—构造单元大致分界线

Fig.2 Outcrop section across the Kelasu structural zone (a) and Qiulitag structural zone (b)

The location of section is approximately along A—B in Fig.1 1—Symbols of stratigraphic units,  $Q_{3-4}$ —Upper sedimentary layer of Quaternary,  $Q_{1x}$ —Xiyu Formation;  $N_{2k}$ —Kuche Formation;  $N_{1k}$ —Kangcun Formation;  $N_{1j}$ —Jidike Formation;  $E_{2-3s}$ —Suweiyi Formation,  $E_{1-2km}$ —Kumgliemu Group;  $K_1$ —Lower Cretaceous;  $J_3$ —Upper Jurassic;  $J_2$ —Middle Jurassic;  $J_1$ —Lower Jurassic;  $T_3$ —Upper Triassic;  $T_{1-2}$ —Middle—Lower Triassic, P—Permian; 2—Stratigraphic boundary; 3—dip direction and dip angle of stratigraphic unit; 4—Reverse dip of stratigraphic unit; 5—Unconformity; 6—Inferred geological boundary from outcrop; 7—Thrust fault; dashed line represents the inferred fault trace; 8—Boundary of tectonic units

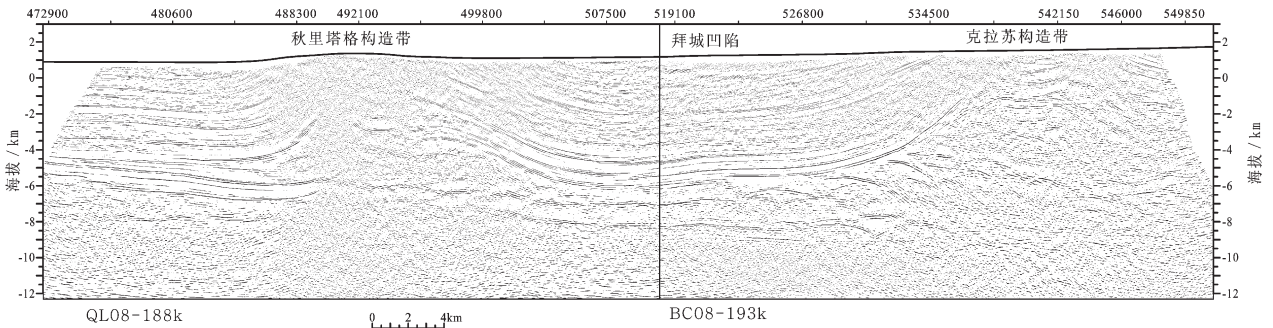


图 3 库车坳陷二维区域地震剖面图

Fig.3 2D seismic section across Kuqa Depression

剖面和 CEMP 资料为依据建立的两个解释模型。图 6-b 所示模型属于薄皮收缩构造模型, 强调从南天山山脚向南 50~80 km 宽度范围内的构造变形是沿着区域性拆离断层之上的冲断褶皱变形楔, 盆地内部主要是盖层滑脱的收缩构造变形。拆离断层在盆地边缘进入基底, 在克拉苏构造带主要沿着侏罗系含煤地层发育, 在克拉苏构造带南侧大致沿着库姆格列木群盐岩层顺层滑动, 向南一直影响到拜城凹陷之南的秋里塔格构造带在库姆格列木群膏盐岩层

之上发生收缩变形, 而盐下层基本不变形。图 6-c 所示模型可称为基底卷入的分层收缩构造模型, 强调盖层滑脱的浅表层褶皱冲断变形与深层基底卷入冲断褶皱变形的分层叠置, 认为库车坳陷的收缩变形是地壳或者岩石圈尺度整体挤压作用下发生分层不协调收缩的结果。两个解释模型都认为膏盐岩层等软弱岩层可能导致发育滑脱断层, 但是薄皮收缩构造模型强调区域拆离断层之下的沉积岩层或盆地基底基本没有卷入收缩构造变形, 而基底卷入的分

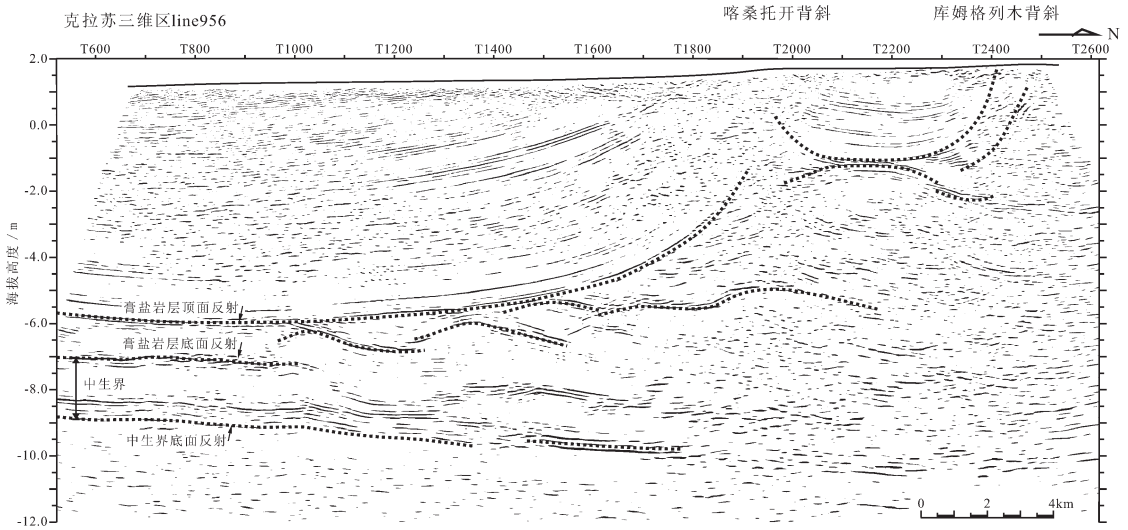


图4 库车坳陷克拉苏构造带三维地震剖面图

Fig.4 3D seismic section across Kelasu structural zone of Kuqa Depression

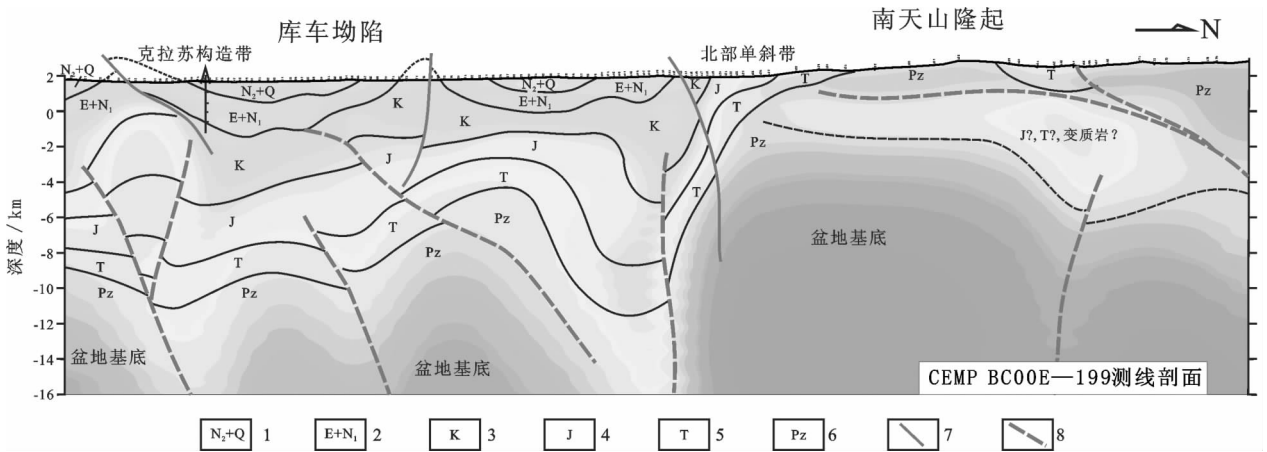


图5 库车坳陷北部山前构造带 CEMP 剖面及其构造解释图(据中国石油物探局五处 2001 年勘探资料<sup>①</sup>,略修改)  
1—上新统(库车组)和第四系(主要是西域组);2—中新统和古近系(包括康村组、吉迪克组、苏维依组和库姆格列木群);3—白垩系;4—侏罗系;5—三叠系;6—古生界;7—地表有出露的断层;8—根据电性特征解释的断层,深层的基底卷入断层;充填颜色谱冷色至暖色表示电阻率由低至高的变化

Fig.5 Structure interpretation section from CEMP (Continuous Electromagnetic Profile) along the northern boundary of Kuqa Depression ( modified after BGP 5th Division of CNPC, 2001)

1—Pliocene ( $N_2k$ ) and Quaternary (mainly  $Q_{1,x}$ ); 2—Miocene and Eocene (composed of  $N_1k$ ,  $N_{1j}$ ,  $E_{2-3s}$  and  $E_{1-2km}$ ); 3—Cretaceous; 4—Jurassic; 5—Triassic; 6—Palaeozoic; 7—Fault exposed at the surface; 8— Fault interpreted according to electric property feature, deep basement-involved fault; color spectrum from cool color to warm color indicates the resistivity change from low to high

层收缩构造模型强调沿着软弱岩层发育的滑脱断层只是导致构造变形分层,引起盖层变形与基底变形不协调,并不存在区域性的拆离断层。

受软弱岩层顺层滑脱的影响,库车坳陷以新生界为主的浅表层构造与以中生界为主的深层构造的变形样式有明显的差异。浅表层的新生界以褶皱变

形为主,并在岩层强烈褶皱部位发育逆冲断层;深层的中生界以逆冲断层为主,并发育断层相关褶皱(图6)。因此,可以将以新生界为主的浅表层构造称为褶皱冲断构造变形层,以中生界为主的深层构造称为冲断褶皱构造变形层。图6所示的两个模型对浅层次褶皱冲断构造变形的解释基本上是一致的,但是

① 中国石油地球物理勘探公司第五地质调查处.2001年北部单斜带 CEMP 勘探成果.塔里木油田公司内部科研报告,2001.

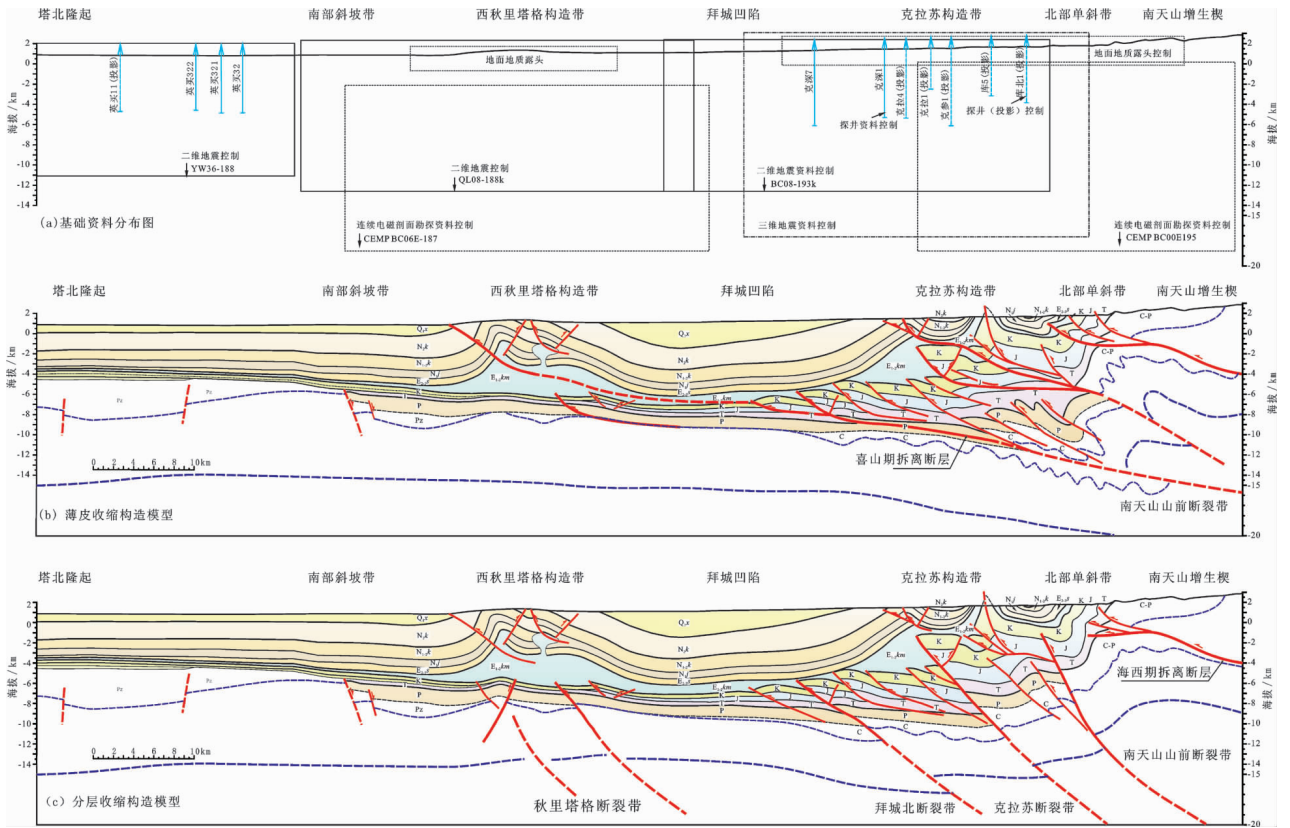


图 6 库车坳陷中段区域构造解释模型

a—剖面解释模型利用的地质—地球物理资料分布;b—薄皮收缩构造模型;c—分层收缩构造模型;剖面中各地层代号的名称同图 2

Fig.6 Interpretation models of regional tectonic section for middle segment of Kuqa Depression

a- Distribution of geological and geophysical data; b- "Skin-contractional deformation"; c- "Delaminate contractional deformation"; legends as for Fig.2

对深层冲断褶皱变形的解释存在较大分歧。分歧之一，薄皮收缩构造模型认为库车坳陷沉积地层的变形是受自山前向盆地逆冲的拆离断层控制，拆离断层上盘系统发生较强烈的冲断褶皱，而拆离断层的下盘系统基本上不变形或仅为弱变形；基底卷入分层收缩构造模型认为库车坳陷多条基底卷入的高角度逆冲断层，基底逆冲断层的位移不仅导致基底收缩，也影响上覆沉积地层的变形，沉积盖层的强变形带叠置在基底卷入冲断褶皱变形带之上。分歧之二，薄皮收缩构造变形模型山前地带的中生界发生薄皮冲断褶皱导致构造加厚，有较大的收缩量，盆地基底可能沿着拆离断层发生“A型”俯冲到南天山之下；基底卷入分层收缩构造模型认为膏盐岩层之下的中生界并没有因为收缩而加厚，只是基底卷入的高角度逆冲断层使其抬升，且盆地基底没有大规模向南天山之下发生“A型”俯冲。

### 3 库车坳陷收缩构造样式

受构造变形、岩性变化和地表起伏等因素影响库车坳陷一些强变形构造带的地震反射品质很低(图 2~3)，不同研究者对同一构造带的解释得出的构造变形样式模型可能相差甚远<sup>[19-27]</sup>，而这些构造带又往往是油气勘探的重要区带，对构造样式模型的理解直接关系到油气勘探目标评价。库车坳陷充填的中、新生界的岩性在横向上和纵向上都有明显的差异<sup>[28]</sup>，特别是库车坳陷中段古近系底部发育有较厚的膏盐岩层，对构造变形有显著的影响<sup>[23-27,29]</sup>。在侧向挤压作用过程中，能干性岩层(构造层)可以传递应力，并主导岩层的收缩构造变形方式(纵弯褶皱或逆冲断层)，相对软弱岩层成为构造滑脱层(面)，岩层能干性的差异最终导致收缩构造变形表现出分层性特征。近几年在克拉苏构造带的油气勘



探表明,克拉苏构造带浅表层表现为滑脱褶皱,含膏盐岩层的中生界既发育有在沉积层底面或侏罗系煤系地层中的滑脱薄皮逆冲断层及相关褶皱,也发育有切割到盆地基底的正冲断层<sup>[9]</sup>。构造变形受岩层能干性影响,不同岩性的岩层在挤压作用下形成的收缩构造变形样式会有所差异。图7是在图6所示构造模型基础上概念性地表现了库车坳陷中段岩层能干性及其构造变形样式的关系。

库车坳陷沉积岩层自下而上至少包含3个软弱岩层(面),其一是沉积层与盆地基底之间的界面,其二是侏罗系的煤系地层(也包括三叠系内部的泥岩层),其三是古近系底部库姆格列木群膏盐岩层(也包括新近系底部吉迪克组膏盐岩层)。地壳在区域挤压作用下结晶基底和上覆沉积岩层会同时发生收缩构造变形,但是受岩层能干性差异的影响不同构造层的岩层变形行为有所不同。由于软弱岩层的存在,

库车坳陷浅层的沉积岩层表现出以褶皱构造为主,深层的沉积岩层表现出以冲断褶皱构造为主,盆地基底表现出以冲断断块构造为主。库车坳陷沉积岩层形成的滑脱褶皱变形总体上表现为紧闭的背斜和宽缓的向斜,软弱岩层在背斜核部加厚、在向斜槽部减薄。根据地面地质资料不难判断地面的背斜构造向深层会发生滑脱<sup>[30]</sup>,而且背斜核部岩层及滑脱深度有所差异(图2)。在南天山山前,背斜核部为沉积岩层底部岩层或二叠系(图7-b中的Fd3),向库车坳陷内部逐渐变为侏罗系煤系岩层(图7b中的Fd2)、库姆格列木群膏盐岩层(图7-b中的Fd1),滑脱深度也逐渐减小(图6-b,图7b)。多数紧闭的背斜翼部还发育有破冲断层(图7-b中的Ft1和Ft2)。这些断层斜切倾斜的背斜翼部,属于褶皱相关断层<sup>[31,32]</sup>。除浅层发育与褶皱相关的逆冲断层外,在深层中生界沉积层中还发育有大量薄皮逆冲断层(图7-b中的Ft3),并

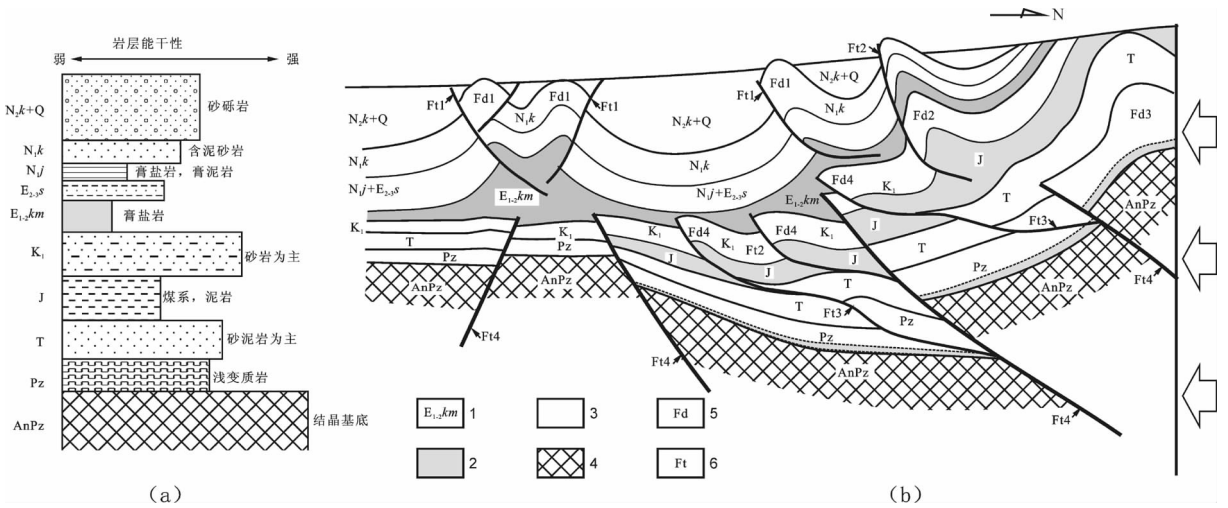


图7 库车坳陷岩层能干性与分层收缩构造样式示意图

a—库车坳陷岩层能干性差异示意图; b—库车坳陷中段构造变形样式及其分布模式图(参照图6模型); 1—地层代号,  $N_{2k+Q}$ —库车组 and 第四系;  $N_{2k}$ —康村组;  $N_{1j}$ —吉迪克组;  $E_{2-3s}$ —苏维依组;  $E_{1-2km}$ —库姆格列木群;  $K_1$ —下白垩统;  $J$ —侏罗系;  $T$ —三叠系;  $Pz$ —古生界;  $AnPz$ —前古生界; 2—软弱岩层, 易滑脱层(面); 3—相对能干沉积岩层; 4—结晶岩基底或变质岩基底; 5—褶皱类型;  $Fd_1$ —以库姆格列木群膏盐岩层为核的滑脱背斜,  $Fd_2$ —以侏罗系煤系岩层为核的滑脱背斜,  $Fd_3$ —以古生界变质沉积岩层为核的滑脱背斜;  $Fd_4$ —与薄皮逆冲断层形态变形或位移变化相关的沉积岩层褶皱; 6—断层类型;  $Ft_1$ —滑脱背斜相关、在库姆格列木群膏盐岩层中消减的破冲断层;  $Ft_2$ —滑脱背斜相关、在侏罗系中消减的破冲断层,  $Ft_3$ —在沉积层滑脱、消减的薄皮逆冲断层,  $Ft_4$ —基底卷入逆冲断层或正反转基底断层

Fig.7 Schematic drawing for bed capability and structural style of delaminate contractive deformation in Kuqa Depression  
a—Schematic drawing for bed capability; b—Structural styles and distribution in the middle segment of Kuqa Depression (established from Fig. 6). 1—Symbols of stratigraphic units,  $N_{2k+Q}$ —Quaternary and Kuche Formation,  $N_{2k}$ —Kangcun Formation,  $N_{1j}$ —Jidike Formation,  $E_{2-3s}$ —Suweiyi Formation,  $E_{1-2km}$ —Kumgliemu Group,  $K_1$ —Lower Cretaceous;  $J$ —Jurassic,  $T$ —Triassic,  $Pz$ —Paleozoic;  $AnPz$ —Basement older than Paleozoic; 2— Soft stratigraphic units; 3— Stratigraphic units with capability; 4— Basement of crystalline or metamorphic rock; 5— Styles of fold,  $Fd_1$ —Detachment anticline on the gypsum salt of Kumgliemu Group,  $Fd_2$ —Detachment anticline on the coal-bearing strata of Jurassic,  $Fd_3$ —Detachment anticline on the basement or anticline core as metamorphic rock,  $Fd_4$ —Fold related to thin-skin fault in sedimentary strata; 6— Styles of faults;  $Ft_1$ —Broke thrust related to detachment fold on the gypsum salt of Kumgliemu Group,  $Ft_2$ —Broke thrust related to detachment fold on coal-bearing strata of Jurassic,  $Ft_3$ —Thin-skin thrust fault in sedimentary strata,  $Ft_4$ —Basement thrust fault or basement-involved inverted normal fault

可以导致沉积岩层形成断层相关褶皱(图7-b中的Fd4)。更重要的是发育有一些切割到结晶岩基底或变形-变质岩基底中的逆冲断层(图7-b中的Ft4)。薄皮收缩构造模型将在库车坳陷观测到的褶皱变形视为断层位移消减的结果,背斜滑脱深度自山前向盆地逐渐减小是沿着区域性拆离断层滑脱深度减小的表现,并由此推断库车坳陷沉积岩层发育一系列与区域性拆离断层连锁的薄皮逆冲断层,而且发育断层相关褶皱变形。基底卷入的逆冲断层仅发育在盆地边缘的山前地带,进入盆地内部仅发育薄皮逆冲断层和滑脱褶皱。分层收缩构造模型强调软弱岩层导致其上下岩层出现差异变形,由于不同构造部位软弱岩层厚度变化导致紧闭背斜滑脱地层差异和滑脱深部的不同。库车坳陷的软弱岩层(面)的分布是不均匀的,而且受南天山隆升、盆地基底在中生代或前中生代发育的基底断层的影响,即使是同一岩层在不同区域表现的收缩构造变形样式也会有差异。在库姆格列木群膏盐岩不发育或较薄的地区,浅层沉积岩层发生的褶皱可以一直影响到侏罗系甚至沉积岩层基底。在山前地带,甚至发育以石炭-二叠系浅变质岩为核的背斜。

库车坳陷的收缩构造变形强度总体上有从造山带向前陆方向减弱的趋势,并表现出构造倒向前陆的基本特征。这可能受两个因素影响,其一是受前新生代多期区域构造作用的影响,位于塔里木克拉通边缘的库车坳陷的地壳强度总体上是向南天山造山带逐渐减弱的,其二是南天山造山带受挤压作用发生“压扁”而隆升导致在盆山过渡带在挤压收缩变形基础上叠加了垂直的或斜向的剪切作用,而前陆地区克拉通地壳向造山带挤入也会产生水平剪切作用(基底摩擦)<sup>[9]</sup>。但是不同的区域构造解释模型对各种样式构造的分布是有差异的。薄皮收缩构造模型将库姆格列木膏盐岩层作为盆地区的主要拆离滑脱层,在秋里塔格构造带可能仅仅是盐上层发生收缩变形,在克拉苏构造带卷入变形的也主要是中、新生界沉积岩层。分层收缩变形模型不仅强调构造变形的分层,还强调不同层次强变形带的叠加和相互影响。盆山过渡带可能会由于造山带的强烈收缩变形而隆升并诱导垂向的或斜向的剪切变形,发育一些高角度逆冲断层,一直切割到盆地盖层中或影响到盆地盖层的收缩构造变形样式。盆地区内部也可能会由于软弱岩层厚度较薄而不表现出构造分层

性。另一方面,构造变形首先是发育在构造薄弱带和软弱层,一些先存构造薄弱带的构造变形强度更大,并将收缩变形产生的应变自盆地基底向盆地盖层不同层次传递,紧闭的盖层褶皱叠置在基底逆冲断层之上形成强变形带。

库车坳陷在地面地质图上环绕拜城凹陷有两个主要由新生界组成的背斜构造带,即北部的克拉苏-依奇克里克构造带和南部的秋里塔格构造带。按照薄皮收缩构造模型(图6-b),拆离断层在拜城凹陷位于库姆格列木群膏盐岩层中,中生界的构造变形主要集中在克拉苏构造带,秋里塔格构造带深层的中生界及基底都没有卷入收缩构造变形<sup>[14,21,33]</sup>。在分层收缩构造模型中(图6-c),膏盐岩层等软弱岩层和沿着先存基底构造薄弱带发育的基底逆冲断层是发生强烈剪切变形和收缩变形的构造部位。其中,一些高角度的基底逆冲断层成为分隔不同构造单元的主干断层,它们可能是先存的基底卷入高角度正断层在区域挤压过程中发生反转或逆冲走滑位移的结果。高角度逆冲断层上升盘和下降盘的构造样式有明显差异,断层上盘的沉积岩层多形成披覆背斜,下盘则发育一系列同向倾斜的低角度逆冲断层和相关褶皱。因此,深层的构造变形可能影响到前陆地区更大的范围。即使在秋里塔格构造带,膏盐岩层之下也可能发育有冲断褶皱等收缩构造变形,它们可以形成不同样式的构造圈闭,是深层天然气勘探的重要目标。

#### 4 关于库车坳陷收缩构造变形量

分析图2所示的地面露头剖面不难判断,库车坳陷浅表层的褶皱变形向深层会滑脱消失。克拉苏构造带的两排紧闭背斜构造中,北部的背斜应该在侏罗系滑脱,南部的背斜或在古近系底部滑脱。秋里塔格构造带的紧闭背斜也会在古近系的滑脱。图3和图4所示地震剖面显示的新生界底部库姆格列木群膏盐岩层有明显的局部加厚、减薄现象,拜城凹陷轴部相对减薄,其南北两侧明显加厚,拜城凹陷的向斜也在库姆格列木群膏盐岩层中滑脱。考虑到岩层能干性对构造变形的影响,库姆格列木群膏盐岩层或侏罗系煤系地层成为浅表层褶皱冲断构造变形层的滑脱层是可能的。因此,地面露头与地震资料的约束使图6所示构造解释模型中对浅表层构造变形的解释应该是合理的和可靠的。



库车坳陷的两种构造解释模型深层的构造变形样式不同,收缩构造变形量有明显的差异(图 6)。库车坳陷的库车组、西域组表现为同构造变形期生长地层结构特征,由此判断收缩构造变形是在上新世以来发育的。因此,至少新生界底部库姆格列木群顶面和底面的收缩量应该大致相等。库车坳陷不同部位的收缩变形量可能存在差异,以新生界库姆格列木群膏盐岩层之上的岩层长度计算出的库车坳陷中段新生界褶皱冲断构造的收缩量多为 12~15 km<sup>①</sup>。按照薄皮收缩构造模型(图 6-b),克拉苏—依奇克里克构造带深层中生界发育大量薄皮逆冲断层导致中生界多次重复叠置在一起,依据岩层长度平衡测算的库车坳陷库姆格列木群底面及中生界的收缩量显然要大于与浅层新生界的滑脱褶皱和逆冲断层形成的收缩量<sup>[9]</sup>。同一剖面上测算出的中生界、新生界的收缩量存在差异有两种可能的解释。一种解释是浅表层褶皱冲断构造与深层冲断褶皱构造之间存在巨大的滑脱,在山前单斜带发育大致顺层的反冲断层,并构成中生界楔状双冲构造的被动顶板断层,上盘部分新生界被剥蚀而导致测算的新生界(或库姆格列木群顶面)收缩量较小,反向顺层滑脱的逆冲断层的收缩变形量并没有计算在浅表层褶皱冲断构造的收缩量变形中。另一种可能的解释是深层中生界收缩变形量包含有中生代时期的收缩变形,中生代的收缩变形与新生代晚期的收缩变形的叠加使依据中生界岩层长度计算的收缩变形量明显大于依据新生界岩层长度计算的收缩变形量。在分层收缩构造模型中(图 6-c)克拉苏—依奇克里克构造带深层的逆冲断层部分是基底卷入的,中生界的逆冲重复造成的收缩变形量与浅表层新生界褶皱冲断造成的收缩变形量基本相当,只是不同构造带收缩变形量在不同构造带的分配不一致,膏盐岩层的顺层流变传递和协调不同构造层的应变分配。

库车坳陷北部单斜带的地面地质露头并没有发现有大型反冲断层或顺层断层发育,区域地质资料也不支持在库车坳陷在中生代发生过大规模收缩构造变形。因此,库车坳陷浅层褶皱冲断构造变形层收缩量可以用来约束深层冲断褶皱变形层的构造模型。利用图 6 中的库姆格列木群( $E_{1-2}km$ )顶面层长计算出的浅层褶皱冲断构造的收缩量为 12.5 km,

如果用这一收缩量约束库姆格列木群( $E_{1-2}km$ )之下中生界的收缩变形,按照变形前后剖面面积平衡原理可以推算深层冲断褶皱构造的拆离面深度。库车坳陷中生界厚度总体上是自南向北增厚的。在山前的北部单斜带根据地面露头宽度和地层产状测算的中生界累计地层厚度可达到 4 800~5 400 m,而在构造变形相对弱的拜城凹陷地震剖面上解释的中生界厚度仅 1 000~2 000 m。按收缩量 12.5 km 计算,仅中生界收缩造成的剖面溢出面积(约 62.5 km<sup>2</sup>)不足以平衡基准线之上溢出的剖面面积,因此,在克拉苏构造带以北的收缩构造变形应该影响到中生界之下,部分在中生界发育的逆冲断层应该切割到盆地基底中。如图 8 所示,如果变形前的区域基准面为水平状态,则卷入收缩变形的深度理论上应该位于 C-D 连线的深度(溢出面积为 170 km<sup>2</sup>),如果变形前的区域基准面为倾斜状态,则卷入收缩变形的深度理论上应该位于 C'-D'连线的深度(溢出面积为 204 km<sup>2</sup>)。按照图 8 所示剖面面积平衡推算,在山前地带收缩构造变形卷入的深度应该达到海拔之下 20~26 km,因此图 6-c 的解释模型更为合理。反之,按照“薄皮收缩构造模型”山前带倾斜基准面之上的溢出面积全为中生界,拆离断层位于基准面之下 5 km,那么中生界的收缩量应该为 34~41 km,这与依据浅层褶皱冲断构造的收缩量(12.5 km)相差甚远。

## 5 关于库车坳陷收缩构造的动力学

图 6 中的两种解释模型不仅在构造几何学上存在差异,对库车坳陷构造变形的动力学过程的理解也相差甚至。薄皮收缩构造模型(图 6-b)强调区域性拆离断层对库车坳陷沉积层构造变形的控制,认为在晚新生代区域挤压作用下塔里木板块发生“A型”俯冲,隆升的南天山造山带的侧向扩展对库车坳陷沉积盖层施加水平挤压力。薄皮收缩构造变形主要发生在拆离断层之上的岩层中,拆离断层之下基本不发生收缩构造变形,而是受造山楔构造的垂向负荷作用而发生挠曲变形。分层收缩构造模型(图 6-c)强调造山带对库车坳陷地壳、甚至整个岩石圈的侧向挤压作用,盆地区的收缩构造变形从山前带向盆地内部、从地表向深层逐渐减弱。分层收缩构造模型中的滑脱断层或滑脱层并不是区域性拆离

①郭卫星.库车坳陷中段—南天山盆山过渡带的构造变形及其主控因素.中国石油大学(北京)博士学位论文,2010.

断层,而是导致构造分层释的软弱层,收缩变形过程也不是前陆地区地壳向造山带之下发生“A型”俯冲,山前拗陷或再生前陆盆地的形成与造山楔的垂向负荷作用没有直接关系。

库车坳陷新生代收缩构造变形模型实际上包含有对再生前陆盆地动力学机制的不同理解。薄皮收缩构造变形模型是按照典型前陆盆地的动力学过程理解再生前陆盆地与板内造山带的盆山耦合,在动力学上强调库车坳陷地壳向南天山造山带之下发生“A型”俯冲,南天山相对于库车坳陷沿着低角度拆离断层发生剪切变形,导致库车坳陷沉积盖层发生收缩构造变形,南天山以及拆离断层之上盖层收缩构造变形楔状体的负荷作用致使库车坳陷挠曲下陷,控制库车再生前陆盆地的形成。然而,从现今地貌和库车坳陷上新世以来的沉积充填上看,南天山隆起与库车坳陷的沉降没有直接关系,南天山相对高的部位对应于库车坳陷西段,而且库车坳陷沿着盆地轴向的结构有明显差异,上新世以来的沉积充填相对厚的部位位于库车坳陷中段的拜城凹陷。分层收缩构造变形模型认为库车坳陷的收缩构造变形是塔里木克拉通与南天山水平挤压作用的结果。相对软弱的南天山(包括海西期增生楔)在晚新生代受区域挤压作用发生收缩变形而隆升,并诱导盆山过渡带发育基底卷入的高角度逆冲断层。受岩层能干性等因素影响,库车前陆地区受区域挤压作用发生分层收缩构造变形,沉积层中的盐岩层等软弱岩层在挤压收缩变形中起重要的分层滑脱,基底和沉积盖层构成不协调的收缩构造变形。在分层收缩构造变形模型中,由于前陆地壳并没有向造山带发生“A

型”俯冲,造山带山体的垂向负荷作用与再生前陆盆地在成因上没有直接关系。

周缘前陆盆地是在大洋板块俯冲导致洋壳消减后发生陆-陆碰撞过程中形成的,先前和俯冲的大洋岩石圈连接在一起的被动大陆边缘、甚至克拉通板块向增生楔和先前仰冲的大陆板块之下发生“A型”俯冲,压在“A型”俯冲带之上的仰冲板块及增生楔的负荷作用使俯冲的大陆板块发生挠曲变形形成了周缘前陆盆地<sup>[5]</sup>。板块从“B型”俯冲逐渐演化到“A型”俯冲形成周缘前陆盆地过程中的构造动力包括岩石圈底部软流圈热流动的拖曳力、(由板块扩张引起)板块运动产生的后推力和俯冲板块的重力等,其中软流圈热流动的拖曳力可能占主导地位<sup>[5]</sup>。但是,再生前陆盆地形成过程中,岩石圈底部软流圈热流动的拖曳力不再是主要动力,也没有俯冲板块的重力。驱动板内造山作用及再生前陆盆地形成的主要是板块运动从板块边缘传递到板块内部的远程挤压作用力。远程挤压作用力本身是通过克拉通岩石圈传递到板块内部,使早期的造山带发生再造山,因此,克拉通板块就不一定要向造山带发生“A型”俯冲。

南天山是一个多旋回造山带,在山前地带相应可以发育多旋回的前陆盆地。但是,海西期南天山洋关闭过程中形成的造山带和前陆盆地(晚二叠世—三叠纪?)后,在侏罗纪—白垩纪还发育了相对稳定或具有伸展特征的沉积盆地<sup>[6]</sup>,白垩纪末期还发生过区域性隆升<sup>[7]</sup>。因此,喜马拉雅期形成的南天山板内造山带和再生前陆盆地在动力学过程上并不是继承性的区域构造活动。如图 9-a 所示,海西期前陆盆地形成过程中大陆岩石圈的“A型”俯冲主要驱动

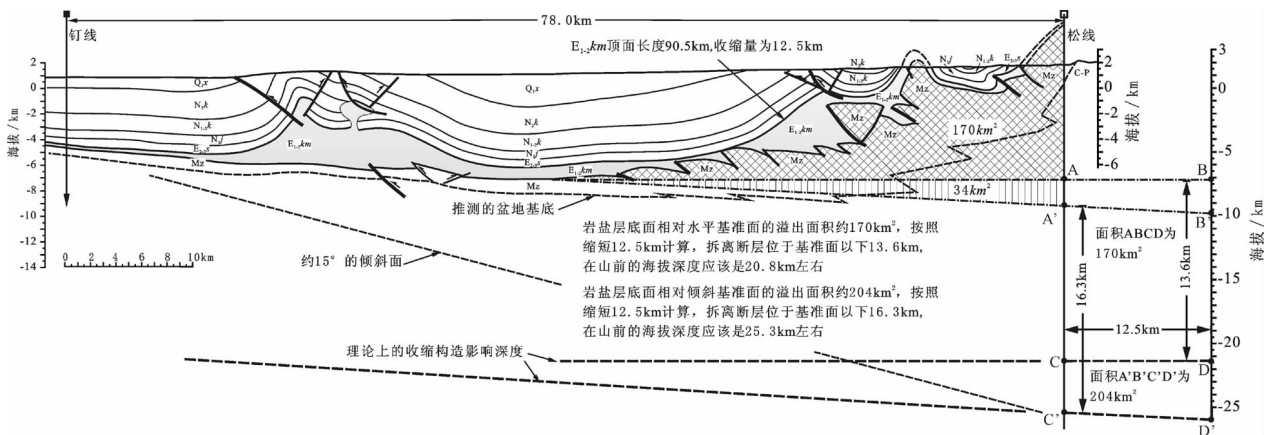


图 8 库车坳陷区域构造剖面面积平衡图解

Fig.8 Illustration of sectional area-balance for regional structure of Kuqa Depression

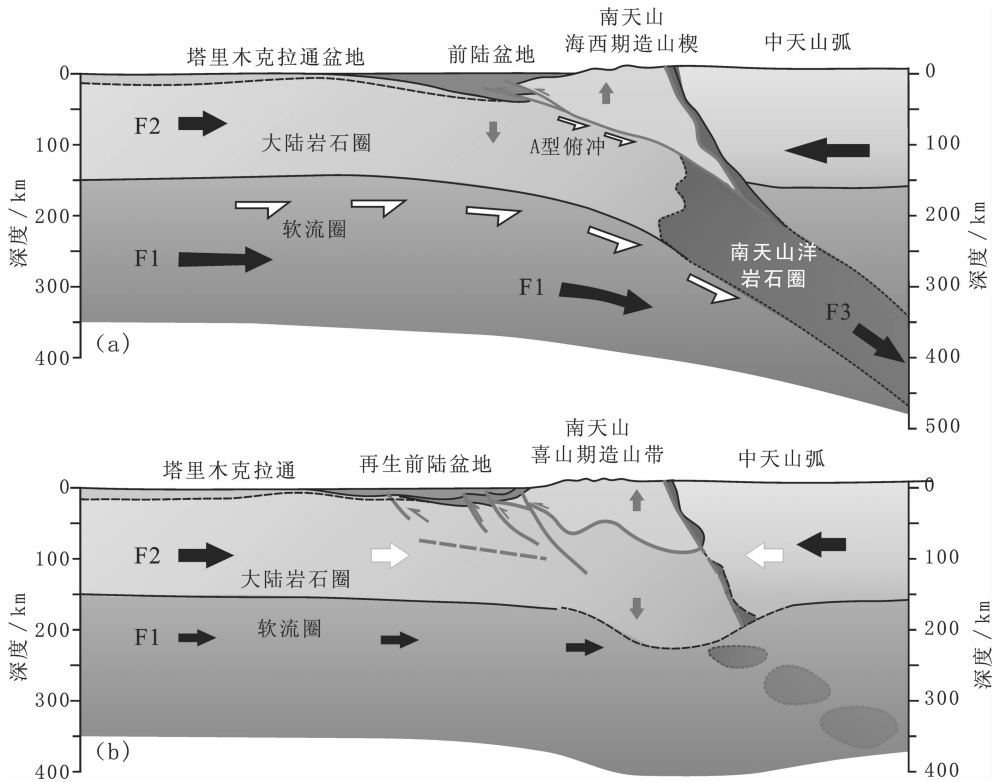


图9 南天山山前海西期前陆盆地(a)与喜马拉雅期再生前陆盆地(b)动力学模型

Fig.9 Dynamic models for foreland basin during Hercynian (a) and rejuvenation foreland basin during Himalayan (b) in foreland of South Tianshan Mountains

力包括软流圈流动对上覆岩石圈的拖曳力(F1)、已经俯冲到软流圈中的大洋岩石圈的牵引力(F3)以及板块运动过程中产生的对俯冲大陆岩石圈的推力(F2)。正是这样的动力系统才可能导致增生楔的形成并仰冲到克拉通之上(即所谓的A型俯冲)形成前陆盆地。喜马拉雅期再生前陆盆地的动力系统要简单得多,它主要是板块边缘板块相互作用(例如俯冲、碰撞、抑或扩张)产生的板块运动对岩石圈板块的侧向挤压力,传递到板内引起先存的造山带发生再造山作用,也可能存在岩石圈内部的热活动或软流圈下降流产生的对岩石圈的动力作用(图9-b)。印度板块与欧亚板块碰撞产生向北的推挤力主要是通过刚性的塔里木板块传递到天山地区(图9-b中的F2),也可能引起软流圈向北流动(图9-b中的F1),但是软流圈流动对岩石圈的拖曳力显然不可能导致塔里木板块向北运动的主要动力。另一方面,天山地区经过中生代和古近纪长期的岩石圈再造,塔里木与南天山、中天山已经称为统一的板块,只是南天山的岩石圈刚度相对较小。也正是由于南天山的

岩石圈刚度相对较小才导致受印度板块向北与欧亚板块碰撞过程中发生陆内再造山作用。

南天山造山带以水平收缩应变为主,从盆山过渡带向库车坳陷内部收缩构造倒向前陆方向,表明收缩构造变形的卷入深度从造山带向前陆逐渐减小,但并非一定要发育向造山带倾斜的拆离断层。南天山山前地区并不发育大型逆冲断层,甚至可观测到近直立的剪切带<sup>[38]</sup>。同时,不同构造部位的构造变形样式也会有差异。现今地震活动也表明山前带存在陡倾的地震断层<sup>[39]</sup>。正是在挤压作用背景下南天山地壳相对于库车坳陷的隆升使盆山过渡带有利于发育向造山带倾斜的高角度逆冲断层,而在前陆盆地区也以倾向造山带的逆冲断层或倒向前陆的褶皱为主。

图9中(a)与(b)在盆山过渡带的应力场特征有根本差异。海西期前陆盆地的盆山过渡带是沿着拆离断层的斜向剪切力主导的应力场,喜马拉雅期再生前陆盆地是近水平挤压力和再造山带隆升在盆山过渡带的高角度倾斜的斜向剪切作用主导的应力场。前者有利于发育盖层滑脱的薄皮收缩构造,后者



可能导致发育基底卷入的厚皮收缩构造变形。海西运动中关闭和形成的南天山造山楔在印支—燕山运动中还发生过多次不同性质地壳变形的改造,在晚新生代印度板块向北推挤欧亚板块引起区域挤压作用中总体上表现为一个区域性软弱构造带发生强烈的收缩构造变形。其中,盆山结合面是一个陡倾斜或近直立的挤压性构造面,来源于喜马拉雅碰撞造山作用的区域挤压力通过塔里木克拉通传递到库车坳陷与南天山地区,南天山造山带与库车前陆地壳或岩石圈之间受侧向挤压力而发生收缩构造变形。按照这一动力学模型,库车坳陷在晚新生代的区域构造变形现象更适合采用图6-c所示的几何结构来解释,即库车坳陷在喜马拉雅期形成的收缩构造变形包含有大量基底卷入逆冲断层,而不仅仅是盖层滑脱逆冲断层和滑脱褶皱。

## 6 结论

任何山前带的复杂构造变形都难以用一些简单的构造模型加以解释,甚至应用平衡地质剖面概念得出的结论也只能说在理论上是成立的<sup>[40]</sup>。本文依据地面地质图和地球物理勘探资料建立了塔里木盆地库车坳陷收缩构造的两种构造模型同样不能解释这一区域构造变形的复杂性。但是,讨论这两种模型在几何学、运动学和动力学等方面的差异无疑有益于对该地区构造复杂性的理性认识。概括前文可以得出以下几点结论:

(1)依据现有观测资料,至少可以建立“薄皮收缩构造”和“分层收缩构造”两种模型解释库车坳陷收缩构造变形特征。两种模型在浅层的结构类似,但是对于深层构造的解释相差甚远。

(2)按照平衡地质概念测算,库车坳陷新生界的收缩量为12~15 km,但是不同解释模型包含的中生界的收缩量有较大差异。“薄皮收缩构造模型”包含的中生界的收缩量至少为30 km以上,中、新生界收缩量的差异意味着在山前带中、新生界之间发育有巨大的反向滑脱断层,或中生界经历了多期收缩构造变形;而“分层收缩构造模型”包含的中生界的收缩量大致可以与新生界的收缩量相当,相应地,“分层收缩构造模型”卷入收缩构造变形的深度在山前应该为20~26 km,部分逆冲断层应该切割到盆地基底中。

(3)在动力学上,“薄皮收缩构造模型”强调塔里

木克拉通向南山天造山带之下发生“A型”俯冲,库车前陆发育倾向南天山的拆离断层,而且收缩构造变形主要发生在拆离断层之上,南天山造山带的构造负荷作用使库车前陆发生挠曲变形;“分层收缩构造模型”强调塔里木克拉通与南天山之间的侧向挤压,库车前陆内部不发育倾向造山带的拆离断层,南天山造山带的构造负荷也不是前陆发生挠曲的主要动力。

(4)无论在库车坳陷现有地质—地球物理观测资料上,还是在理论上“分层收缩构造模型”更加合理。按照这一模型,库车坳陷不同构造部位的收缩构造样式有明显差异,新生界以褶皱冲断变形为主,中生界以冲断褶皱变形为主,深层发育基底卷入的逆冲断层和断块构造。先存基底构造薄弱带和软弱岩层的构造变形强度更大,而深浅层不同样式的收缩构造依附先存基底构造薄弱带发育形成强变形带,变形强度总体上是自深而浅、自造山带向前陆逐渐减弱,作为浅层强变形的秋里塔格构造带深层也可能发育一定程度的收缩构造变形,构成深层的油气圈闭。

## 参考文献(References):

- [1] Graham S A, Hendrix M S, Wang L B, et al. Collisional Successor Basins of Western China: Impact of Tectonic Inheritance on Sand Composition [J]. Geological Society of America Bulletin, 1993, 105 (3): 323-344.
- [2] 陈发景, 汪新文, 张光亚, 等. 中国中、新生代含油气盆地构造和动力学背景[J]. 现代地质, 1992, 4(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, 4 (3): 317-327 (in Chinese with English abstract).
- [3] 贾承造. 塔里木板块构造演化 [C]//李清波, 戴金星, 刘如琦, 等. 现代地质学研究文集(上). 南京: 南京大学出版社, 1992, 22-31.  
Jia Chengzao. Plate Tectonic Evolution of the Tarim Basin [C]//Li Qingbo, Dai Jinxing, Liu Ruqi, et al (eds). Symposium of the Researches on Modern Geology (volume1). Nanjing: Nanjing University Press, 1992, 22-31 (in Chinese).
- [4] 刘和甫. 前陆盆地类型及褶皱—冲断层样式[J]. 地学前缘, 1995, 2 (3-4): 59-68.  
Liu Hefu. Classification of foreland basins and fold thrust style [J]. Earth Science Frontiers, 1995, 2 (3/4): 59-68 (in Chinese with English abstract).
- [5] 贾承造, 魏国齐, 姚慧君, 等. 塔里木盆地油气勘探丛书: 盆地构造演化与区域构造地质[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995: 1-174.  
Jia Chengzao, Wei Guoqi, Yao Huijun, et al. Book Series on

- Petroleum Exploration in the Tarim Basin: Tectonic Evolution and Regional Structural Geology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995: 1-174(in Chinese).
- [6] 任纪舜, 王作勋, 陈炳蔚, 等. 从全球看中国大地构造—中国及邻区大地构造图简要说明书[M]. 北京: 地质出版社, 1999: 1-50.  
Ren Jishun, Wang Zuoxun, Chen Bingwei, et al. Geotectonic Brief Map of China and its Neighbourhood—See Chinese Geostucture from Whole World[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999: 1-50(in Chinese with English abstract).
- [7] 卢华复, 陈楚铭, 刘志宏, 等. 库车再生前陆逆冲带的构造特征与成因[J]. 石油学报, 2000, 46(3): 234-235.  
Lu Huaifu, Chen Chuming, Liu Zhihong, et al. The structural features and origin of Kuqa rejuvenation foreland thrust belt[J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 46 (3): 234-235 (in Chinese with English abstract).
- [8] 刘和甫, 梁慧社, 蔡立国, 等. 天山两侧前陆冲断系构造样式与前陆盆地演化[J]. 地球科学, 1994, 6(19): 727-741.  
Liu Hefu, Liang Huishe, Cai Ligu, et al. Evolution and Structural Style of Tianshan and Adjacent Basins, Northwestern China [J]. Earth Science, 1994, 6(19): 727-741.
- [9] 孙家振, 李兰斌, 周新源, 等. 塔里木盆地库车凹陷克拉苏构造带典型构造样式与变形机理分析 [J]. 石油实验地质, 2003, 25(3): 247-251.  
Sun Jiazhen, Li Lanbin, Zhou Xinyuan, et al. Analysis on the typical structural styles and deformation mechanism of the Kelasu tectonic zone in the Kuqa Depression of the Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003, 25 (3): 247-251 (in Chinese with English abstract).
- [10] Jia Dong, Lu Huaifu, Cai Dongsheng, et al. Structural features of northern Tarim Basin: implications for regional tectonics and petroleum traps[J]. AAPG Bulletin, 1998, 82(1): 147-159.
- [11] Allen M B, Vincent S J. Structural features of northern Tarim Basin: implications for regional tectonics and petroleum traps, discussion[J]. AAPG Bulletin, 1999, 83(8): 1279-1283.
- [12] 卢华复, 贾承造, 贾东, 等. 库车再生前陆盆地冲断构造楔特征[J]. 高校地质学报, 2001, 7(3): 257-271.  
Lu Huaifu, Jia Chengzao, Jia Dong, et al. Features of the thrust wedge of deformation belt in Kuqa rejuvenation foreland basin[J]. Geological Journal of China Universities, 2001, 7 (3): 257-271(in Chinese with English abstract).
- [13] 刘志宏, 卢华复, 李西建, 等. 库车再生前陆盆地的构造演化[J]. 地质科学, 2000, 35(4): 482-492.  
Liu Zhihong, Lu Huaifu, Li Xijian, et al. Tectonic evolution of Kuqa rejuvenated foreland basin[J]. Scientia Geologica Sinica, 2000, 35(4): 482-492(in Chinese with English abstract).
- [14] 汪新, 贾承造, 杨树锋, 等. 南天山库车褶皱冲断带构造几何学和运动学[J]. 地质科学, 2002, 37(3): 372-384.  
Wang Xin, Jia Chengzao, Yang Shufeng, et al. Geometry and kinematics of the Kuqa fold and thrust belt in the Southern Tianshan [J]. Chinese Journal of Geology, 2002, 37(3): 372-384(in Chinese with English abstract).
- [15] 魏国齐, 贾承造, 施央申, 等. 塔里木新生代复合再生前陆盆地构造特征与油气[J]. 地质学报, 2000, 74(2): 123-133.  
Wei Guoqi, Jia Chengzao, Shi Yangshen, et al. Tectonic characteristics and petroleum prospects of Cenozoic Compound rejuvenated foreland basins in Tarim [J]. Acta Geologica Sinica, 2000, 74(2): 123-133 (in Chinese with English abstract).
- [16] 陈正乐, 鲁克改, 王果, 等. 天山两侧山前新生代构造变形特征及其成因刍议[J]. 地学前缘, 2009, 16(3): 149-159.  
Chen Zhengle, Lu Kegai, Wang Guo, et al. Characteristics of the Cenozoic deformation in basin/range coupling regions on both sides of Tianshan Mountains and its geodynamics [J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(3): 149-159(in Chinese with English abstract).
- [17] 漆家福, 雷刚林, 李明刚, 等. 库车坳陷—南天山盆山过渡带的收缩构造变形模式[J]. 地学前缘, 2009, 16(3): 120-128.  
Qi Jiafu, Lei Ganglin, Li Minggang, et al. Contractional structure model of the transition belt between Kuche depression and south Tianshan uplift. Earth Science Frontiers, 2009, 16 (3): 120-128(in Chinese with English abstract).
- [18] 曲国胜, 张宁, 刘洁, 等. 塔北隆起—库车坳陷区中新世盖层—盖层构造变形机理[J]. 地质通报, 2004, 23(2): 113-119.  
Qu Guosheng, Zhang Ning, Liu Jie, et al. Structural deformation mechanism of the Meso-Cenozoic basement and cover in the north Tarim uplift—Kuqa depression [J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23(2): 113-119(in Chinese with English abstract).
- [19] 漆家福, 雷刚林, 李明刚, 等. 库车坳陷克拉苏构造带的结构模型及其形成机制[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(1): 51-58.  
Qi Jiafu, Lei Ganglin, Li Minggang, et al. Analysis of structure model and formation mechanism of Kelasu play zone, Kuqa depression[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2009, 33(1): 51-58(in Chinese with English abstract).
- [20] 汤良杰, 余一欣, 杨文静, 等. 库车前陆褶皱冲断带前缘滑脱层内部变形特征[J]. 中国地质, 2006, 33(5): 944-951.  
Tang Liangjie, Yu Yixin, Yang Wenjing, et al. Internal deformation features of detachment layers in the front of the Kuqa foreland fold-thrust belt [J]. Geology in China, 2006, 33(5): 944-951(in Chinese with English abstract).
- [21] 管树巍, 陈宁华, 徐峰, 等. 库车坳陷秋里塔格褶皱带几何学和运动学特征与油气圈闭[J]. 石油学报, 2003, 24(6): 30-34.  
Guan Shuwei, Chen Ninghua, Xu Feng, et al. Properties of geometry and kinematics related to hydrocarbon trap in Qiulitag anticline zone of Kuqa Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24 (6): 30-34(in Chinese with English abstract).
- [22] 管树巍, 陈竹新, 李本亮, 等. 再论库车克拉苏深部构造的性质与解释模型[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(5): 531-551.  
Guan Shuwei, Chen Zhuxin, Li Benliang, et al. Discussions on the character and interpretation model of Kelasu deep structures in the Kuqaarea [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37 (5): 531-551(in Chinese with English abstract).
- [23] Xu C M, Zhou X Y. Seismic interpretation of the Kelasu triangle

- zone in the southern Tian Shan foothills, northwestern China [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(2):161-171.
- [24] Jin Zhijun, Yang Minghui, Lu Xiuxiang, et al. The tectonics and petroleum system of the Qiulitag fold and thrust belt, northern Tarim basin, NW China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2008, 25(8):767-777.
- [25] Chen Shuping, Tang Liangjie, Jin Zhijun, et al. Thrust and fold tectonics and the role of evaporites in deformation in the Western Kuqa Foreland of Tarim Basin, Northwest China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2004, 21(8):1027-1042.
- [26] 张仲培, 林伟, 王清晨, 等. 库车坳陷克拉苏-依奇克里克构造带的构造演化 [J]. 大地构造与成矿学, 2003, 27(4):326-337.
- Zhang Zhongpei, Lin Wei, Wang Qingchen, et al. Progressive structural evolution of Kelasu-Yiqikelike structural belt in Kuqa Depression [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2003, 27(4):326-337 (in Chinese with English abstract).
- [27] 余一欣, 汤良杰, 李京昌, 等. 库车前陆褶皱-冲断带基底断裂对盐构造形成的影响 [J]. 地质学报, 2006, 80(3):331-336.
- Yu Yixin, Tang Liangjie, Li Jingchang, et al. Influence of basement faults on the development of salt structures in the Kuqa foreland fold and thrust belt in the northern Tarim basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(3):331-336 (in Chinese with English abstract).
- [28] 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):177-183.
- Lin Changsong, Liu Jingyan, Zhang Yanmei, et al. Depositional architecture of the Tertiary tectonic sequences and their response to foreland tectonism in the Kuqa depression, the Tarim Basin [J]. Science in China (Series D), 2002, 32(3):177-183 (in Chinese).
- [29] 张振生, 张明山, 吴奇之, 等. 库车坳陷西部特殊塑性沉积体对构造变形和圈闭形成的影响 [J]. 石油地球物理勘探, 2001, 36(1):60-71.
- Zhang Zhensheng, Zhang Mingshan, Wu Qizhi, et al. Effect of special plastic deposition body on structural deformation and trap forming in western of Kuche Depression [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2001, 36(1):60-71 (in Chinese with English abstract).
- [30] Schärer K M, Burbank D W, Chen J, et al. Detachment folding in the Southwestern Tian Shan-Tarim foreland, China: shortening estimates and rates [J]. Journal of Structural Geology, 2004, 26:2119-2137.
- [31] 郭光辉, 罗春树, 胡太平, 等. 褶皱相关断层—以库车坳陷新生代盐上构造层为例 [J]. 地质科学, 2007, 42(3):496-505.
- Wu Guanghui, Luo Chunshu, Hu Taiping, et al. Fold-related faulting: an example from the Cenozoic salt-overlying beds in the Kuqa Depression [J]. Chinese Journal of Geology, 2007, 42(3):496-505 (in Chinese with English abstract).
- [32] Mitra S. Fold-accommodation faults [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2002, 86:671-693.
- [33] 杨明慧, 金之钧, 吕修祥, 等. 库车褶皱冲断带东秋里塔格位转移转换构造及其演化—兼论侧断相关背斜构造圈闭的形成 [J]. 地质学报, 2006, 80(3):321-329.
- Yang Minghui, Jin Zhijun, LV Xiuxiang, et al. Eastern Qiulitag displacement transfer structure and its evolution in the kuqa fold-thrust belt, Tarim basin: discussing concurrently the trap-forming of lateral ramp-related anticline [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(3):321-329 (in Chinese with English abstract).
- [34] 施泽进, 曾庆, 苟量, 等. 库车前陆盆地构造特征及缩短量研究——以 BC952230 剖面为例 [J]. 成都理工大学学报, 1999, 26(4):402-406.
- Shi Zejin, Zeng Qing, Gou Liang, et al. Study on structural characteristics and amount of cross-section shortening in Kuqa foreland basin; taking BC95-230 profile as an example [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1999, 26(4):402-406 (in Chinese with English abstract).
- [35] Dickinson W R. Plate tectonic evolution of sedimentation basins [M]. American Association of Petroleum Geologists Continuing Education Course Notes Series 1, 1976:1-62.
- [36] Li Zhong, Song Wenjie, Peng Shoutao, et al. Mesozoic-Cenozoic tectonic relationships between the Kuqa subbasin and Tian Shan, northwest China: constrains from depositional records [J]. Sedimentary Geology, 2004, 172:223-249.
- [37] 贾承造, 陈汉林, 杨树锋, 等. 库车坳陷晚白垩世隆升过程及其地质响应 [J]. 石油学报, 2003, 24(3):1-5.
- Jia Chengzao, Chen Hanglin, Yang Shufeng, et al. Late Cretaceous uplifting process and its geological response in Kuqa depression [J]. Acta Petroli Sinica, 2003, 24(3):1-5 (in Chinese with English abstract).
- [38] 王清晨, 张仲培, 林伟, 等. 库车-天山盆山系统新近纪变形特征 [J]. 中国科学(D辑), 2004, 34(增刊 I):45-55.
- Wang Qingchen, Zhang Zhongpei, Lin Wei, et al. The feature of Cenozoic deformation of Kuqa-Tianshan system [J]. Science in China (Series D), 2004, 34(supple I):45-55 (in Chinese).
- [39] 赵瑞斌, 杨主恩, 周伟新, 等. 天山南北两侧山前坳陷带新生代构造特征与地震 [J]. 地震地质, 2000, 22(3):295-304.
- Zhao Ruibin, Yang Zhu'en, Zhou Weixin, et al. Mesozoic-Cenozoic structural characteristics and seismicity of the depressions on the south and north sides of the Tianshan Mountain [J]. Seismology and Geology, 2000, 22(3):295-304 (in Chinese with English abstract).
- [40] Moretti I, and Callot J P. Area, length and thickness conservation: dogma or reality [J]. J. Struct. Geol., 2012, 41:64-75.



## The interpretation models and discussion on the contractive structure deformation of Kuqa Depression, Tarim Basin

QI Jia-fu<sup>1,2</sup>, LI Yong<sup>3</sup>, WU Chao<sup>3</sup>, YANG Shu-jiang<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Department of Geology, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. Tarim Oil Company of PetroChina, Korla 841000, Xinjiang, China; 4.5th Division of BGP, CNPC, Zhuozhou 0272751, Hebei, China)

**Abstract:** The basic characteristics of structural deformation in Kuqa Depression of Tarim Basin is contractive structural deformation, owing to the development of a lot of thrusts and buckling folds in Mesozoic and Cenozoic strata. This paper establishes two types of model for interpreting the contractive structural deformation in Kuqa Depression based on the structural features interpreted from geological outcrop, seismic data, well-log and CEMP (Continuous Electromagnetic Profile) data, and discusses their differences in geometry, shortening extent and dynamics. One model is the “skin-contractive deformation”, a typical “A-type” subduction model. The other is the “delaminate contractive deformation”, in which both the sedimentary cover and the basement of the depression are involved in contractive deformation in respective styles, with no real regional detachment fault developed. The “delaminate contractive deformation” is considered to be more reasonable so far as the data and theoretical concepts are concerned. The model emphasizes that Cenozoic, Mesozoic and basement decoupled under lateral pressure between Tarim craton and South Tianshan Mountain affected by the capability of the strata, Cenozoic was dominated by detachment folds with break thrusts, Mesozoic was dominated by thrusts with related folds, and the basement was dominated by thrusts and faulted blocks. The shortening extents at the bottom of Cenozoic, the upper of Mesozoic and the basement of the depression are basically identical. The shortening extent ranges from 12km to 15km according to length balance of Cenozoic bottom, and the depth involved in contractive deformation ranges from 20km to 26km in the front of South Tianshan Mountain according to excess area of Mesozoic in sectional plane. Therefore, the basement of the depression is uplifted in the north and is involved in the thrust. Although the intensity of contractive deformation gradually decreases from mountain to foreland and from the shallow part to the depth in theory, the Mesozoic and basement under the salt rock of Eocene in Qiulitag structural zone might still be involved in contractive structure deformation owing to a tight-closed anticline at the shallower level. The structure is trapped at the deeper level.

**Key words:** structural model; skin-contractive deformation; delaminate contractive deformation; structural style; Kuqa Depression

---

**About the first author:** QI Jia-fu, male, born in 1957, professor, engages in petroliferous basin analysis and structural analysis; E-mail: qijiafu@cup.edu.cn.