

# 库车坳陷脆性构造序列及其对构造古应力的指示

张仲培<sup>1,2</sup>, 王清晨<sup>3</sup>, 王毅<sup>1</sup>, 李铁军<sup>1</sup>

1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083

2. 中国地质大学能源学院, 北京 100083

3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

**摘要:** 在对野外脆性构造(主要是节理和断层)大量观测的基础上, 根据它们与应力的关系, 讨论了库车坳陷白垩纪末期以来的古构造应力时空变化. 结果表明, 在库车坳陷脆性构造中, 早期隆升作用形成的主要发育在中生界的 NEE-SWW 向系统节理被晚期同构造期的在中生界与上第三系均发育的 NNW-SSE 向和 NW-SE 向节理切割并改造, 这是对区域上构造应力场在进入新近纪时从弱伸展变化到强烈挤压这一过程的响应. 基于断层滑动分析的古应力反演结果显示, 此时盆地边界处以近 N-S 向伸展应力状态占主导, 而坳陷内部则表现为近 N-S 向和 NW-SE 向挤压应力状态. 说明在进入新近纪后, 最大主应力( $\sigma_1$ )方向从垂向变成水平, 应力场发生了转变. 此后的天山快速垂向隆升是库车坳陷北缘和内部应力状态存在差异的原因.

**关键词:** 脆性构造; 节理; 断层; 古应力; 库车坳陷.

中图分类号: TE121

文章编号: 1000-2383(2006)03-0309-08

收稿日期: 2005-06-29

## Brittle Structure Sequence in the Kuqa Depression and Its Implications to the Tectonic Paleostress

ZHANG Zhong-pei<sup>1,2</sup>, WANG Qing-chen<sup>3</sup>, WANG Yi<sup>1</sup>, LI Tie-jun<sup>1</sup>

1. Institute of Petroleum Exploration and Development, SINOPEC, Beijing 100083, China

2. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

**Abstract:** In order to understand the time-space changes of the Cenozoic tectonic paleostress in the Kuqa depression, detailed field observations and measurements were carried out. Paleostress evolution history is discussed from the Late Cretaceous, according to the relationship between brittle structures and stresses. Their sequence relation is inferred from field investigations and the calculated results indicate that the early ENE-WSW systematic joints caused by regional uplifting were cut and reworked by late NNW-SSE and NW-SE systematic joints. This corresponds to the change of regional stresses from weak extension to strong compression since the beginning of the Neogene. Results of paleostress inversion based on large amounts of fault-slip data display a stress pattern with near N-S extension on the basin margin and NW-SE compression in the basin interior. So at the beginning of the Neogene, the stress field changed and the maximal principal stress  $\sigma_1$  switched from vertical to horizontal. The rapid vertical uplifting of the Tianshan Mountains might be responsible for the stress difference between the basin range and interior.

**Key words:** brittle structures; joint; fault; paleostress; Kuqa depression.

### 0 引言

该区构造变形的几何学与运动学, 以及构造特征与演化的研究一直倍受人们的关注(Yin *et al.*, 1998; 汪新等, 2002). 构造变形的样式与构造演化受构造

库车坳陷内大型油气田均为构造圈闭, 因此, 对

应力场的控制(Jamison, 1992),故研究构造应力场的时空变化对于认识和理解库车坳陷与南天山的盆山动力学和库车褶皱冲断带的构造变形过程有着重要的意义。

中小尺度的脆性构造,如节理、剪切破裂和断层等,都是构造应力场变化的敏感标志,已经广泛用于区域应力场的研究(Eyal *et al.*, 2001; Delvaux *et al.*, 1997). 本文正是从对发育在野外中、新生界的节理、剪切破裂和断层的实地观测入手,在详细分析其性质、方位、几何样式和序列关系的基础上,根据脆性构造对构造应力的指示关系,结合区域地质构造特征,探讨脆性构造对库车坳陷区域应力的指示意义和中、新生代应力场可能的转换过程。

### 1 区域构造背景

天山南缘的库车坳陷是位于塔里木盆地北部的一个近东西走向的次一级构造单元,多数学者们认为,新生代的库车坳陷属于前陆盆地或再生前陆盆地,自北向南可分为天山南缘带、北部单斜带、克一依背斜带、拜城—阳霞坳陷带、秋里塔格背斜带和塔北隆起带(图 1),构造变形以在挤压背景下发育的各种逆冲断层和褶皱为特征,在剖面上形成一个向南不断变薄尖灭的逆冲构造楔,滑脱面北深南浅(贾承造,1997;刘和甫等,2000);并认为这种挤压构造起因于印藏碰撞的远距离效应,导致天山产生大规模陆内 A 型俯冲,从而在塔里木盆地北缘形成一系列向盆地方向的逆掩冲断岩席。

### 2 库车坳陷脆性构造的序列关系

脆性构造时间序列关系的确定取决于大量的野外观察和测量. 通过野外观测,我们获得了来自 32 个观测点共 665 个节理与共轭剪切破裂的方位(图 2)、21 组 351 条断层滑动数据(图 3). 这些观测点集中分布在库车河地区,少量位于其东西两侧. 所观察到的断层分别发育在天山南缘带的古生界、盆山边界、克一依背斜带和秋里塔格背斜带中,观测的断层滑动数据包括断层的走向、倾向、倾角、断层面上擦痕线的方向和倾向角;节理数据在北部单斜带、克依构造带和秋里塔格构造带上均有分布,在层位上,中生界的三叠系、侏罗系和白垩系十分发育,而在较新层位,主要分布在新近系吉迪克组. 发育节理和剪切破裂的岩层,其岩性主要为含砾砂岩、粗砂岩、砂岩及细砂岩,个别点分布在泥岩中. 节理测量数据主要包括理面的走向和倾角,以及所在岩层的倾向和倾角. 本次分析的节理数据点多数来自倾斜和高陡的岩层,因此以下讨论的数据都是用软件 StereoNett(Version 2.46)进行过水平校正的。

张仲培(2004)通过大量野外观测与室内数据处理分析发现,上述的脆性构造的发育存在以下主要特征:(1)在本区的岩层中,所有的节理与剪切破裂经过岩层水平校正之后,破裂面的倾角都接近 90°,表明它们都是垂直于岩层面的。(2)依照惯例,这里也把那些发育较为连续平直,且相互平行性较好,节理间距较一致的节理称为系统节理,而那些相对不连续、平行性不好、延伸较短,且都分布在 2 条相邻

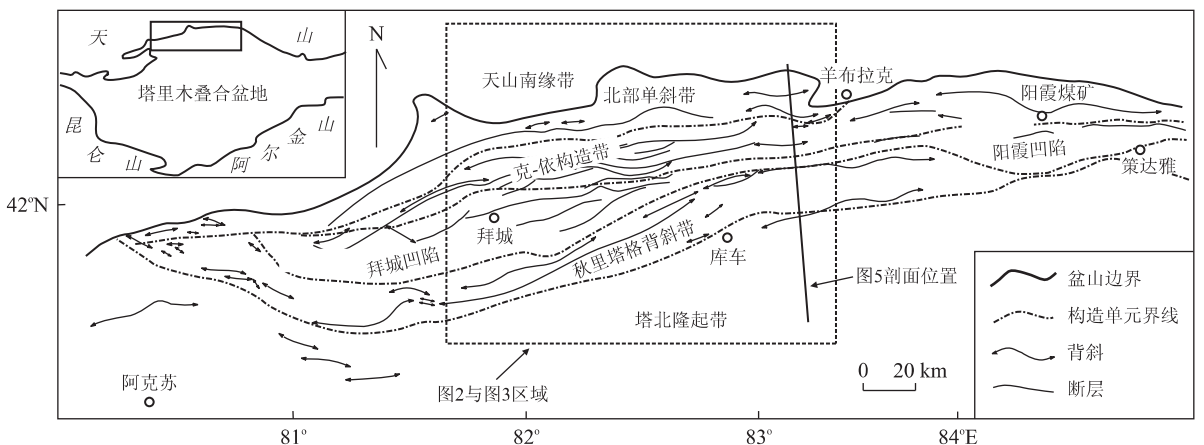


图 1 库车坳陷构造简图

Fig. 1 Simplified structural outline of the Kuqa depression, northern Tarim basin

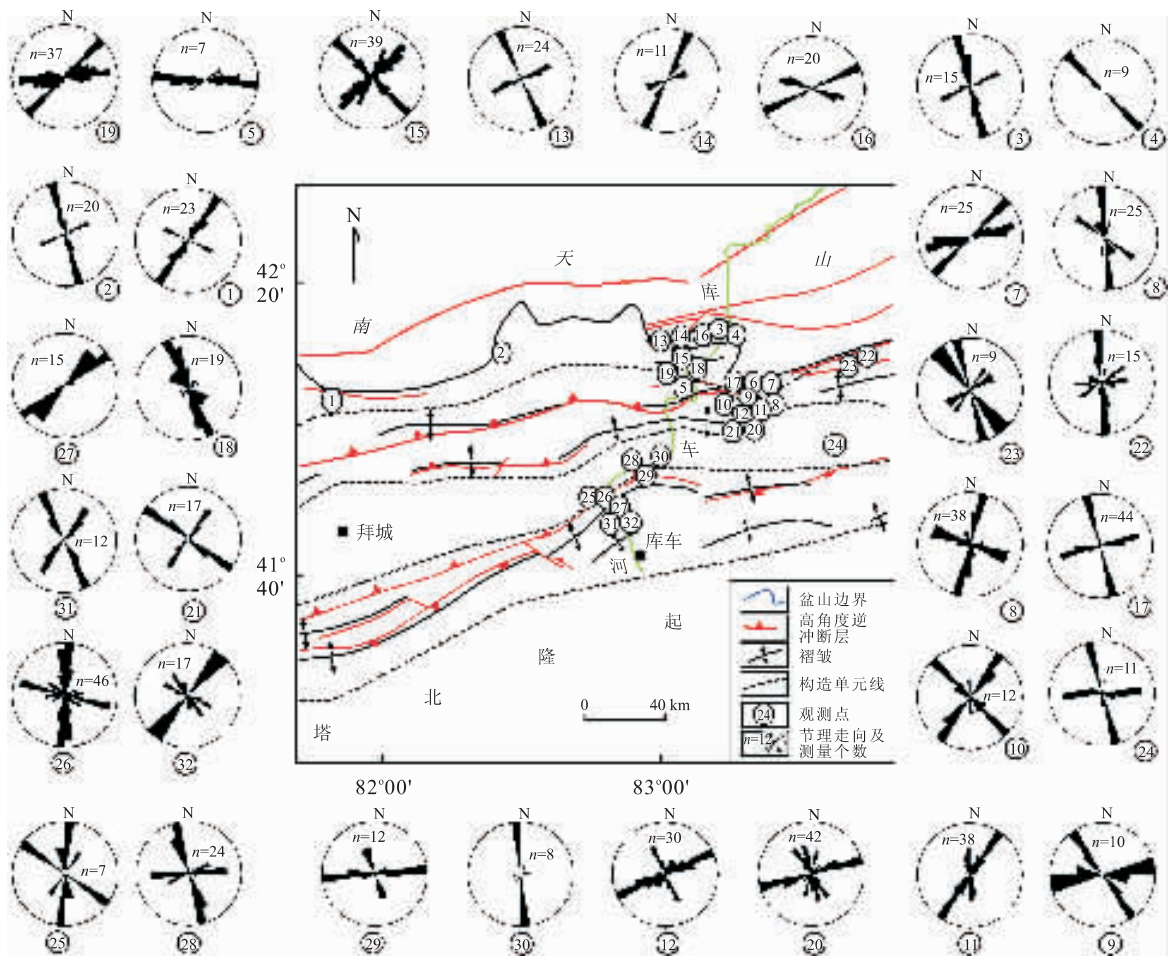


图 2 库车坳陷野外观测点上节理走向玫瑰花图

Fig. 2 Rose diagrams of joint and shear fracture orientation at each site on the structural map of Kuqa depression

的系统节理之间,但并不切割系统节理称为横节理 (Fabbri *et al.*, 2001)。本区节理有以下几种邻接关系:①NEE-SWW 向节理为系统节理,NNW-SSE 向节理为横节理,如观测点 1、2、3、9、12 等;②NNW-SSE 向的为系统节理,NEE-SWW 向的为横节理,如观测点 10、15、18、29、30 等;③NW-SE 向的为系统节理,NE-SW 向的为横节理,如 13、21 等(图 2)。在本区发育的剪切破裂,它们彼此互相交叉穿切,都具有系统节理的几何特征,呈锐角相交,如图 2 中的点 6、7、14、19 等,根据野外观察,都属于同时形成的共轭剪切破裂。从整个区域上看,具有 NEE-SWW 和 NNW-SSE 方向的系统节理在全区发育最普遍, NW-SE 方向的系统节理与剪切破裂次之。另外,在层位上,NEE-SWW 系统节理仅出现在中生界各层内,而其他节理在中、新生界各层位均有出现。(3)系统节理之间也存在邻接关系:①NEE-SWW 向系统节理被 NNW-SSE 向和 NW-SE 向系统节理切割,

后者较连续平直,而前者有被改造的迹象;②一组共轭剪切破裂(锐夹角平分线方向为近 N-S 向)叠加在 NEE-SWW 向系统节理之上,同时它们一端又与 NNW-SSE 向系统节理平行相连,有些地方表现为 NNW-SSE 向的系统节理出现弯曲并变成共轭剪切破裂的一组,多处观察分析,推断这一对共轭剪切破裂可能是晚于或与前者同时形成。因此,从区域上看,节理与剪切破裂的发育有以下的时间序列关系: NEE-SWW 向系统节理最早形成, NNW-SSE 向和 NW-SE 向系统节理较晚,而一些方向不统一的共轭剪切破裂可能同时或晚于 NNW-SSE 向和 NW-SE 向系统节理形成。(4)注意观察褶皱两翼和断层两盘上的节理的变化有助于分析节理发育时是否受断层或褶皱的影响。通过分析对比以拜城凹陷为界南、北 2 个褶皱冲断带上发育的节理与剪切破裂的方位和样式等特征,我们发现,具有相同性质且走向相近的系统节理和剪切破裂,它们在褶皱两翼或断层两盘

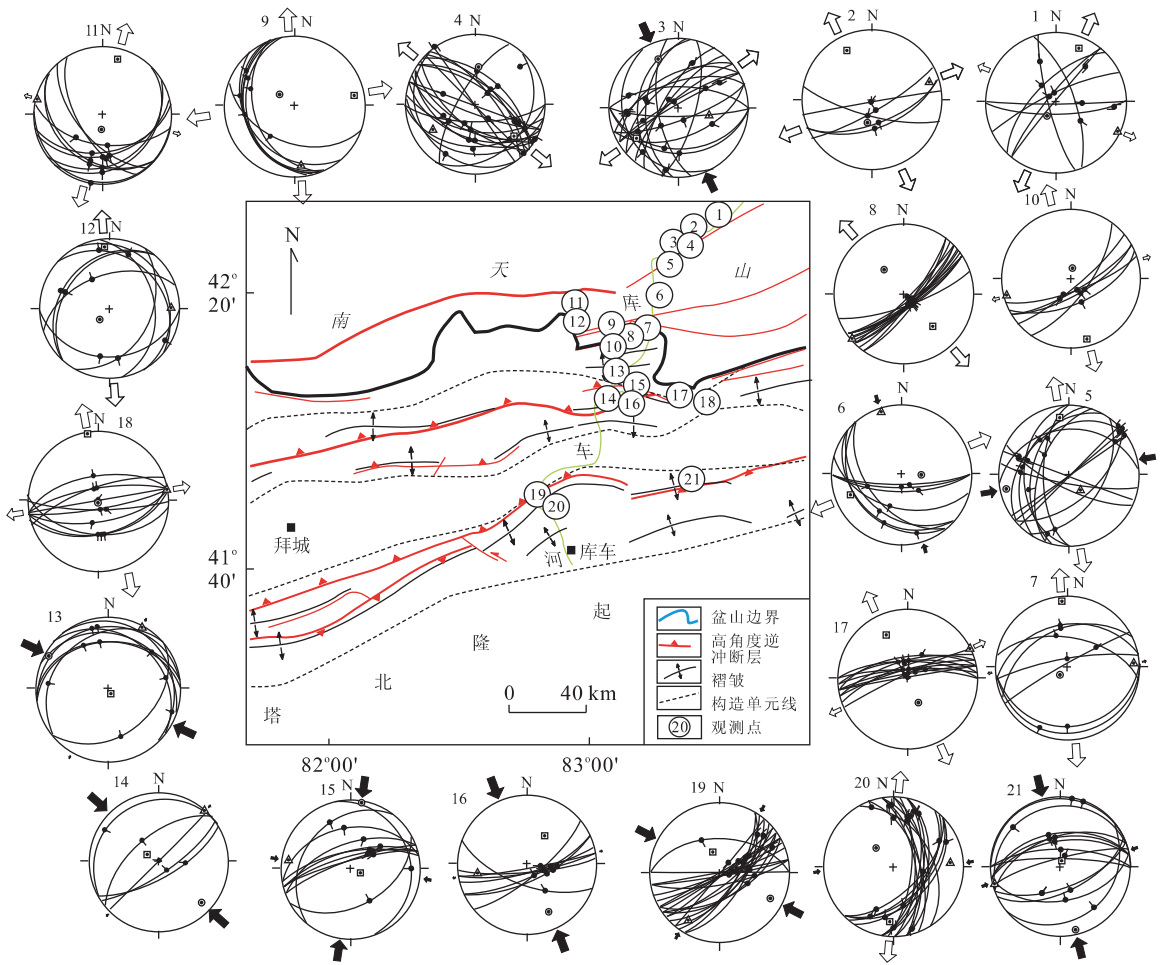


图 3 库车拗陷库车河地区脆性断层运动方向与古应力状态(断层滑动数据采用斯密特下半球投影)

Fig. 3 Fault-slip direction and calculated paleostress along the Kuqa river in Kuqa depression

表 1 系统节理与共轭剪切破裂的序列关系及其可能的应力场状态

Table 1 Sequence of systematic joints and shear fractures and possible paleostress state they correspond to

序次	破裂类型与方位	对应层位	古应力场状态	水平应力
1	NEE-SWW 向系统节理	仅出现在中生界	$\sigma_3$ 呈水平 NNW-SSE 向, $\sigma_1$ 与 $\sigma_2$ 尚不能确定	$S_h$ 平行 $\sigma_3$ ; $S_H$ 平行 $\sigma_2$ 或 $\sigma_1$
2	NNW-SSE 向系统节理	中生界、第三系均有出现	$\sigma_2$ 垂向分布, $\sigma_1$ 呈水平 NNW-SSE 向, $\sigma_3$ 呈水平 NEE-SWW 向	$S_h$ 平行 $\sigma_3$ ; $S_H$ 平行 $\sigma_1$
	NW-SE 向系统节理	中生界、第三系均有出现	$\sigma_2$ 垂向分布, $\sigma_1$ 呈水平 NW-SE 向, $\sigma_3$ 呈水平 NE-SW 向	$S_h$ 平行 $\sigma_3$ ; $S_H$ 平行 $\sigma_1$
3	共轭剪切破裂	中生界、第三系均有出现	$\sigma_2$ 垂向分布, $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$ 呈水平; $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$ 水平但方向不一	$S_h$ 平行 $\sigma_3$ ; $S_H$ 平行 $\sigma_1$

几乎没有什么变化,如图 2 中观测点 10、13、18 与观测点 28、30、32 具有很好的相似性。(5)在多处可见小型的逆冲断层切割了垂直岩层面的节理和剪切破裂。此外,在有些地方能够见到 NWW-SEE 向的节理被改造并转变成小型走滑断层。所有这些表明,这些节理都是在褶皱和断层发育之前形成,部分节理被后来的断层改造过。(6)根据对库车拗陷内断层的

相互切割关系和空间展布型式的观测分析,我们识别出运动学特征明显不同的 2 类断层。一类是发育在北部靠近盆山边界处古生界和中生界底的近 E-W 走向中低角度南倾正断层,有的甚至是发育在泥岩层面的顺层滑动断层;另一类是广泛发育在盆地内部背斜带的各种逆冲断层。对于第二类,有的断层面呈近 NEE-SWW 走向,断层面与岩层面大致平行的

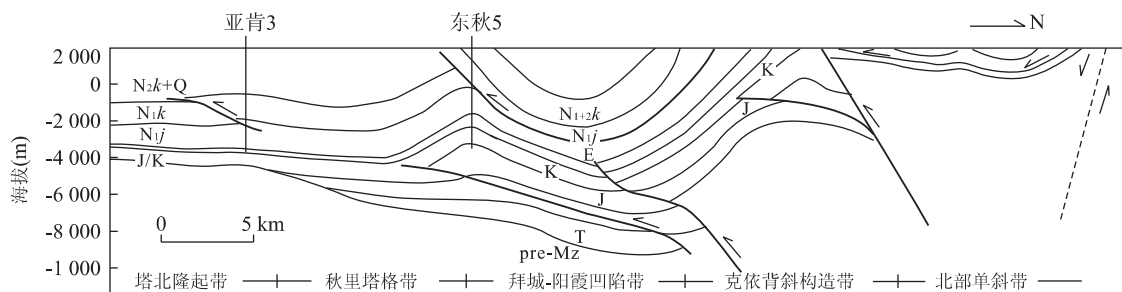


图 4 库车坳陷主干地震剖面 KC-Z90 构造地质解释剖面图

Fig. 4 Interpretation profile of the KC-Z90 seismic line in the Kuqa depression

中—高角度逆断层,既有向南的逆冲断层,又有向北的背冲断层,主要发育在褶皱的两翼;有的断层面呈 NE-SW 走向,断层面与岩层面呈一定角度相交的逆断层,有中—高角度的,也有低角度的,一般都切割岩层层理和褶皱轴面发育. 库车坳陷南北向主干地震剖面的地质解释结果也同样具有这种现象(图 4). 前期野外的几何学与运动学分析认为,盆山边界处的南倾正断层早于或同时于坳陷内部的逆冲断层(王清晨等,2004),坳陷内近 NEE-SWW 走向的逆冲断层相对于 NE-SW 走向的逆冲断层较早形成(张仲培等,2004).

### 3 库车坳陷脆性构造对古应力的指示

“脆性小构造学”(brittle microtectonics)可定义为用中尺度破裂(mesofracture)的分析技术来解决大尺度的构造问题. 中尺度断层(mesofault)、节理(包括剪切破裂)(joint and shear fracture)、剪切带等都可以认为是有用的脆性或半脆性变形的运动学指示标志. 人们正是通过这些指示标志建立它们与应力的关系. 节理作为形成于地壳脆性岩层的开放式破裂,已认为是古应力场的灵敏指示标志,能够用于推断区域应力场时、空演化过程中的区域应力场的方向(Engelder and Geiser, 1980). 通过断层滑动分析可恢复断层发生地点的古应力状态,这种方法主要依靠在野外露头对断层滑动指向的仔细观察和测量. 大量断层滑动数据的测量是进行精确古应力反演的基础(Angelier, 1994). 用来解决这一反演问题的数学方法有很多(Delvaux, 1993; Dupin et al., 1993). 本文对断层滑动数据的反演就采用了 Delvaux 的方法.

#### 3.1 节理与剪切破裂对古应力方向的指示

在本次研究中,我们已经对岩层做了水平校正,

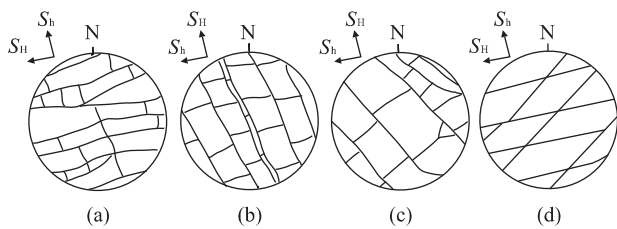


图 5 库车坳陷系统节理、剪切破裂方位与水平应力轴之间的关系

Fig. 5 Relationship between the orientation of systematic joint and shear fracture and horizontal principal stresses in the Kuqa depression

因此正如 Hancock(1991)分析一样,我们先讨论水平应力. 因为在岩层水平或近水平的情况下,对于节理,其走向总是垂直于最小( $S_h$ )水平应力而平行于最大( $S_H$ )水平应力方向,而且在这种情况下, $S_h$ 与 $\sigma_3$ 的方向是一致的,而 $S_H$ 有时与 $\sigma_1$ 方向一致,有时与 $\sigma_2$ 方向一致(Engelder, 1985);进一步的判断要根据其他标志. 对于共轭剪切破裂,锐夹角平分线方向总是垂直于最小( $S_h$ )水平应力而平行于最大( $S_H$ )水平应力方向,通常 $S_h$ 与 $\sigma_3$ 的方向是一致的,而 $S_H$ 与 $\sigma_1$ 方向一致. 因此,库车坳陷中、新生界发育的系统节理和剪切破裂与水平主应力之间的关系可以用图 5 来表示. 此外,在野外观察过程中,我们还在多个观测点上注意到,在 NNW-SSE 和 NW-SE 走向的节理破裂面上,发育有清晰的羽饰构造,呈 NNW-SSE 走向且近水平的中心轴线指示着节理发生时 $\sigma_1$ 的方向. 由此可推断,当时区域上最大水平主应力 $S_H$ 的方位就是 $\sigma_1$ 的方向.

所以,根据以上分析,图 5 中的(b)、(c)、(d)三种情况,应力场状态有相似之处,最大水平主应力 $S_H$ 的方向就是 $\sigma_1$ 的方向, $S_h$ 与 $\sigma_3$ 一致, $\sigma_2$ 则呈垂向分布;而(a)所代表的情形则不同,虽然 $S_h$ 的方向可由 $\sigma_3$ 的方向确定,但 $S_H$ 的方向是与 $\sigma_2$ 还是与 $\sigma_1$ 的

方向相平行,仍不能确定.因此,库车坳陷自这些破裂开始形成以来依次经历过的应力场状态如表 1 所示.

### 3.2 断层滑动分析与古应力恢复

断层面上各种运动学标志是进行断层滑动指向分析的重要工具(Petit, 1987).为了弄清研究区的断层运动学特征和古应力史,我们在这方面做了大量的工作.此次在研究区进行野外观测时常见和主要使用的标志有:(1)断层附近的拖曳褶皱;(2)标志层(物)的断错;(3)断面上发育的各种不对称特征构造,包括擦痕、增生矿物阶步和共轭剪切破裂等.在野外获得大量数据并完成对这些断层滑动数据进行分类之后,我们使用 Delvaux(1993)的 Tensor Program 程序进行反演计算,结果如图 3.

结果表明,发育在天山南缘带的古生界、盆山边界的古生界和中生界、克一依背斜带的中生界和第三系以及秋里塔格背斜带第三系中的断层记录了不同的古应力状态.天山南缘带古生界的脆性断层反映了 NW 或 NNW 向的伸展活动(如观测点 1、2、4 和 11),应力状态为  $\sigma_3$  呈水平 NW 或 NNW-SSE 向, $\sigma_1$  近垂直;局部地区记录了走滑活动(如观测点 3 和 5).盆山边界的古生界和中生界断层同样反映了近北向的伸展活动(如观测点 6~12).而克一依背斜带的中生界和第三系中发育的断层和秋里塔格背斜带第三系中的断层则记录了近 N-S 向(如观测点 15~16)和 NW-SE 向(如观测点 14~19)的挤压应力状态,应力状态为  $\sigma_3$  近垂向分布, $\sigma_1$  呈近水平状态.此外,在库车县西北方向的盐水沟还记录了 NNE 方向的左行走滑活动(观测点 20),秋里塔格背斜带的走向在该处发生了明显的弯转.

## 4 讨论与结论

### 4.1 关于库车坳陷节理的成因

关于节理的成因有多种说法.Engelder(1985)提出节理的形成有构造、水动力、隆升卸载和应力释放 4 种成因;Bahat(1991)也认为节理可能形成于埋藏作用、同构造时期、区域隆升和隆升之后的 4 种过程中.那么,库车坳陷的节理是哪种成因的,在什么应力场下形成的呢?这必然与区域上的构造活动有关.天山作为远离板块边界的陆内隆起山脉,位于其南缘的库车坳陷自中生代以来开始接受沉积.在晚白垩世该地区整体隆升并遭受剥蚀,到古近纪,库车坳陷遭受海侵并接受缓慢沉积,盆地处于近 N-S 向伸展应力

状态(贾承造,1997).进入新近纪以后开始遭受到了强烈的挤压和隆升等构造变形作用(Hendrix *et al.*, 1994;邓起东等,2000).这些强烈变形造成了大量的近 N-S 向地壳缩短和若干个近 E-W 向褶皱逆冲带的形成;而且从北向南,不同背斜带变形时间由老到新变化(卢华复等,1999);不同时间构造挤压方向略有差异并可能存在逆时针的旋转(张仲培等,2004).由此可见,在白垩纪末期,区域隆升占主导作用,到第三纪早期,沉积缓慢,总体上处于伸展应力状态下,而进入新近纪则遭受强挤压应力控制.

根据观察,NEE-SWW 系统节理仅出现在中生界,而 NNW-SSE 系统节理、NW-SE 系统节理和共轭剪切破裂在中、新生界均有出现.因此,把节理与共轭破裂的序列关系、层位分布差异与断层滑动分析结果相结合,再考虑区域上的构造活动与变形特征,我们认为,库车坳陷内中生界的 NEE-SWW 向系统节理和其正交横节理的形成是该地区在白垩纪晚期区域隆升引起的侧向弱伸展作用的结果,属于隆升之后形成的隆升节理(uplift joint)或卸载节理(unloading joint(Engelder, 1985));古近纪盆地近 N-S 向伸展作用则有利于这些节理的进一步扩展和再活动;在此阶段,重力一直作为最大的主应力( $\sigma_1$ ),呈垂向分布.而 NNW-SSE 向和 NW-SE 向的节理及其横节理则是同构造期形成的,属于地壳隆升之前由构造作用而形成的构造节理(tectonic joint)或同构造节理(syntectonic joint(Bahat, 1991)),与新近纪近 N-S 的强烈挤压变形造成的近 E-W 向伸展作用有关,此时水平的挤压应力为最大主应力( $\sigma_1$ ).方向不统一的共轭剪切破裂则可能是与 N-S 向强烈挤压变形同时或之后的左行走滑作用的产物.后期进一步挤压引起的断层活动对早先形成的 NNW-SSE 向和 NW-SE 向节理有改造作用.

### 4.2 关于库车坳陷新生代构造古应力场的演化

多组方位不一致的系统节理和断层在一个区域上的出现必然指示该区多期构造活动的叠加,同时也是区域上古应力场变化过程的反映.前述节理序列关系的观测以及与区域构造活动的关联可以从一个方面来反映研究区古应力场的变化,即从白垩纪晚期到古近纪,库车坳陷处于弱伸展阶段,最大的主应力( $\sigma_1$ ),呈垂向分布;而在进入新近纪后,最大主应力( $\sigma_1$ )方向从垂向变成水平,应力场发生了从弱伸展向挤压转变(Zhang and Wang, 2004).但是,与这些节理在同一个地区(甚至同一露头观测点)发育

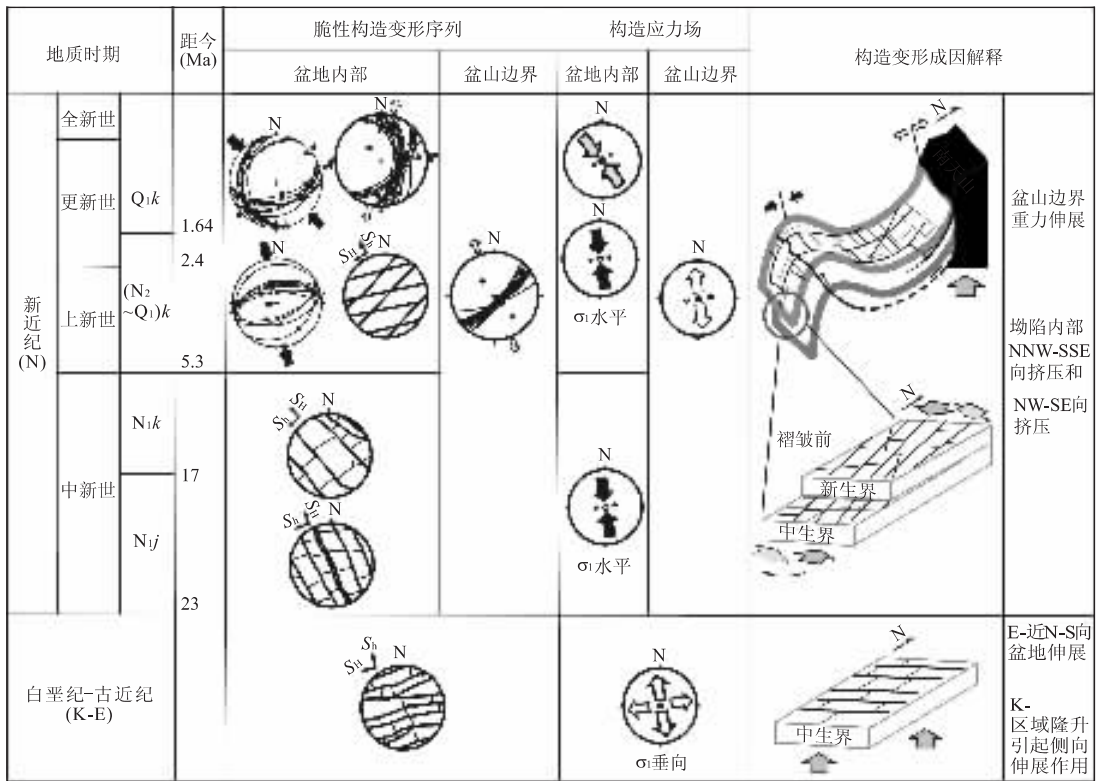


图 6 库车坳陷脆性构造变形序列及其对应的古应力方位

Fig. 6 Schematic illustration of sequence of brittle structures and the evolution of correspondent stress in the Kuqa depression

的断层可从另一个方面来反映古应力场的变化。前面基于断层滑动数据的古应力反演结果有一个很明显的特征,就是古应力状态在盆山边界处和盆地内部不同,在盆山边界处表现为 NW 或 NNW 向伸展活动,而在坳陷内部则表现为近 N-S 向和 NW-SE 向的挤压应力状态。区域上对盆山边界的更多详细的观测结果与分析也揭示出盆山边界处伸展的应力状态(王清晨等,2003)。这种应力状态存在差异的现象被认为是天山垂向隆升导致中新世盖层在盆山边界处发生重力伸展作用,从而导致在坳陷内发生强烈挤压作用的结果(王清晨等,2004),与很多前人认识略有不同,限于讨论范围,在此不再赘述。因此,根据上述脆性构造的序列关系和每一组脆性构造对古应力的指示,可以把库车坳陷的应力场演化历史用图 6 来表示。

### 4.3 结论

库车坳陷脆性构造的发育有以下的时间序列关系:NEE-SWW 向系统节理最早形成,NWW-SEE 向和 NW-SE 向系统节理较晚,而一些方向不统一的共轭剪切破裂可能同时或晚于 NWW-SEE 向和 NW-SE 向系统节理形成,可能与坳陷内部的逆冲断

层同期形成。盆山边界处的南倾正断层早于或同时于坳陷内部的逆冲断层,坳陷内近 NEE-SWW 走向的逆冲断层相对于 NE-SW 走向的逆冲断层较早形成。节理分析表明,库车坳陷在进入新近纪后,最大主应力( $\sigma_1$ )方向从垂向变成水平,应力场发生了转变。之后  $\sigma_1$  保持水平,但方向可能稍有变化。南天山和盆山边界处的构造变形以近 N-S 向伸展构造变形为主,而坳陷内部则以近 N-S 向和 NW-SE 向挤压变形为主。这说明在第三纪从盆山边界到盆地内部,应力场出现分异。天山快速垂向隆升是库车坳陷北缘和内部应力状态差异的原因。

### References

Angelier, J., 1994. Fault slip analysis and palaeostress reconstruction. In: Hancock, P. L., ed., Continental deformation. Oxford Press, London, 53-100.

Bahat, D., 1991. Tectonofractography. Springer-Verlag, Heidelberg, 1-354.

Delvaux, D., 1993. The TENSOR program for reconstruction; Examples from the East African and the Baikal rift zones. *Terra Abstracts, Abstract Supplement to Terra Nova*, 5: 216.

- Delvaux, D., Moeys, R., Stapel, G., 1997. Paleostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, Central Asia, Part 2. Cenozoic rifting. *Tectonophysics*, 282: 1–38.
- Deng, Q. D., Feng, X. Y., Zhang, P. Z., et al., 2000. Active tectonics in Tianshan mountains. Seismological Press, Beijing, 373–385 (in Chinese).
- Dupin, J., Sassi, W., Angelier, J., 1993. Homogeneous stress hypothesis and actual fault slip: A distinct element analysis. *Journal of Structural Geology*, 15(8): 1033–1043.
- Engelder, T., 1985. Loading paths to joint propagation during cycle and example of the Appalachian plateau, USA. *Journal of Structural Geology*, 7: 459–476.
- Engelder, T., Geiser, P., 1980. On the use of regional joint sets as trajectories of paleostress fields during the development of the Appalachian plateau, New York. *Journal of Geophysical Research*, 85(B11): 6319–6341.
- Eyal, Y., Gross, M. R., Engelder, T., et al., 2001. Joint development during fluctuation of the regional stress field in southern Israel. *Journal of Structural Geology*, 23: 279–296.
- Fabbri, O., Gaviglio, P., Gamond, J. F., 2001. Diachronous development of master joints of different orientations in different lithological units within the same forearc-basin deposits, Kyushu, Japan. *Journal of Structural Geology*, 23: 239–246.
- Hancock, P. L., 1991. Determining contemporary stress directions from neotectonic joint systems. *Philosophical Transactions of Royal Society of London*, A337: 29–40.
- Hendrix, M. S., Dumitru, T. A., Graham, S. A., 1994. Late Oligocene–Early Miocene unroofing in the Chinese Tian Shan: An early effect of the India-Asia collision. *Geology*, 22: 487–490.
- Jamison, W. R., 1992. Stress controls on fold thrust style. In: McClay, K. R., ed., Thrust tectonics. Chapman & Hall, London, 155–165.
- Jia, C. Z., 1997. Tectonics and petroleum of Tarim basin of China. Petroleum Industry Press, Beijing, 348–357 (in Chinese).
- Liu, H. F., Wang, Z. C., Xiong, B. X., et al., 2000. Coupling analysis of Mesozoic–Cenozoic foreland basin and mountains system in central and western China. *Earth Science Frontiers*, 7(3): 55–72 (in Chinese with English abstract).
- Lu, H. F., Jia, D., Chen, C. M., et al., 1999. Nature and timing of the Kuqa Cenozoic structures. *Earth Science Frontiers*, 6(4): 215–221 (in Chinese with English abstract).
- Petit, J. P., 1987. Criteria for the sense of movement on fault surfaces in brittle rocks. *Journal of Structural Geology*, 9(5/6): 597–608.
- Wang, Q. C., Zhang, Z. P., Lin, W., 2003. Tertiary fault active feature and stress state in the boundary of Kuqa basin and Tianshan. *Chinese Science Bulletin*, 48(24): 2553–2559 (in Chinese).
- Wang, Q. C., Zhang, Z. P., Lin, W., et al., 2004. Neogene deformation of the Kuqa–Tianshan basin-range system. *Science in China (Series D)*, 47(Suppl. 1): 53–65.
- Wang, X., Jia, C. Z., Yang, S. F., 2002. Geometry and kinematics of the Kuqa fold and thrust belt in the southern Tianshan. *Chinese Journal of Geology*, 37(3): 372–384 (in Chinese with English abstract).
- Yin, A., Nie, S., Craig, P., 1998. Late Cenozoic tectonic evolution of the southern Chinese Tian Shan. *Tectonics*, 17(1): 1–27.
- Zhang, Z. P., 2004. Study on Tertiary brittle microtectonics of the Kuqa depression–South Tianshan basin-range system (Dissertation). Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. P., Wang, Q. C., 2004. Development of joints and shear fractures in Kuqa depression and its implication to regional stress field switching. *Science in China (Series D)*, 47(Suppl. 2): 74–85.
- Zhang, Z. P., Wang, Q. C., Lin, W., et al., 2004. Tertiary fault-slip analysis and paleostress reconstruction in Kuqa depression. *Chinese Journal of Geology*, 39(4): 496–506 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 邓起东, 冯先岳, 张培震, 等, 2000. 天山活动构造. 北京: 地震出版社, 373–385.
- 贾承造, 1997. 中国塔里木盆地构造特征与油气. 北京: 石油工业出版社, 348–357.
- 刘和甫, 汪泽成, 熊宝贤, 等, 2000. 中国中西部中、新生代前陆盆地与挤压造山带耦合分析. *地学前缘*, 7(3): 55–72.
- 卢华复, 贾东, 陈楚铭, 等, 1999. 库车新生代构造性质和变形时间. *地学前缘*, 6(4): 215–221.
- 王清晨, 张仲培, 林伟, 2003. 库车盆地—天山边界的新近纪断层活动性质与应力状态. *科学通报*, 48(24): 2553–2559.
- 王清晨, 张仲培, 林伟, 等, 2004. 库车—南天山盆山体系新近纪变形特征. *中国科学(D辑)*, 34(增刊 1): 45–55.
- 汪新, 贾承造, 杨树锋, 2002. 南天山库车褶皱冲断带构造几何学和运动学. *地质科学*, 37(3): 372–384.
- 张仲培, 2004. 库车坳陷—南天山盆山系统第三纪脆性构造研究 (博士论文). 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所.
- 张仲培, 王清晨, 林伟, 等, 2004. 库车坳陷第三纪断层滑动分析 with 古构造应力恢复. *地质科学*, 39(4): 496–506.