

陡倾逆断层形成机制——以塔里木盆地色力布亚断层为例

李伟^{1,2}, 陈书平^{1,2}, 云金表³, 刘志娜^{1,2}, 刘士林³, 季弘莹^{1,2}

(1. 中国石油大学(北京)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. 中国石化石油勘探开发研究院西北勘探研究中心, 北京 100083)

摘要: 中国西部盆地多发育陡倾逆冲断层, 但对其成因仍未取得统一认识。色力布亚断裂带位于塔里木盆地的西部, 是一条典型的陡倾逆冲断层, 为研究陡倾断层的成因提供了很好的实例。根据最新地震剖面与地层分析认为, 色力布亚断裂上部倾角约为 65° , 经两期构造运动形成, 第一期是加里东晚期运动—海西早期运动 (362 ~ 439 Ma), 第二期为喜马拉雅中期运动 (5.3 ~ 23.3 Ma); 正是断层的多期活动形成了上部的陡倾断层, 即先存缓倾逆断层的活动改变了局部应力场, 使最大主应力轴由水平变倾斜, 随之产生的库伦断裂倾角变陡, 并伴生反冲逆断层。同时利用数字砂箱模拟结果验证了上述推断。

关键词: 色力布亚断裂; 塔里木盆地; 陡倾逆断层; 数字砂箱; 成因机制

中图分类号: P542

文献标识码: A

FORMATION MECHANISM OF STEEPLY INCLINED REVERSE FAULT: TAKE THE SERIKBUYA FAULT IN TARIM BASIN AS AN EXAMPLE

LI Wei^{1,2}, CHEN Shuping^{1,2}, YUN Jinbiao³, LIU Zhina^{1,2}, LIU Shilin³, JI Hongying^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

3. Institute of Exploration and development, Sinopec, Beijing 100083, China)

Abstract: Many steeply inclined reverse faults have developed in basins of western China, but we have not yet gained an unified understanding of their formation mechanism. The Serikbuya fault is located in the western Tarim Basin and it is a typical steeply inclined reverse fault, which provides a good example to study the formation mechanism of steeply inclined reverse fault. According to the latest seismic profiles and stratigraphic analysis, the inclination of the upper part of the Serikbuya fault is about 65° . The Serikbuya fault formed through two-staged tectonic movement. The first period ranged from Late Caledonian movement to early Hercynian movement (439 ~ 362 Ma), and the second period was during the Medium Himalayan movement (23.3 ~ 5.3 Ma). It is the multi-stage movements of the fault that formed the upper steeply inclined fault. That is, the movement of the previous gently inclined reverse fault changed the local stress field and promoted the maximum stress spindle from horizontal to tilt. Then

the Coulomb fault inclination occurred steep and back thrusts appeared. At the same time, the results of digital sandbox simulation are used to confirm the above inferences.

Key words: the Serikbuya fault; Tarim Basin; steeply inclined reverse fault; digital sandbox; formation mechanism

陡倾逆断层在西部盆地广泛发育^[1-4]，这里的陡倾逆断层是指断面倾角大于 45° 的逆断层。影响逆冲断层倾角的原因可能是压扁作用或者是页理发育^[5-6]，但对于碎屑岩中发育的陡倾逆断层，仍没有很好的解释。色力布亚断裂带位于塔里木盆地巴楚隆起南缘，断面倾角较陡，断裂带构造特征得到过深入研究^[7]。相关学者曾对色力布亚陡倾逆断层的成因提出了以下认识：（1）沉积层深部的先存正断层的复活，会影响上覆层后生断面的倾角^[8]；（2）色力布亚陡倾逆断层在北段为压扭性断裂，南段为逆冲断裂^[7]；（3）色力布亚断裂带伴生的同岗断裂逐渐向北东冲断，呈上陡下缓的特征，与主干断裂构成“Y”型^[9]；（4）色力布亚断裂由多条切入基底的北西向断裂构成，具有走滑逆冲性质^[10]；（5）色力布亚断裂北段为逆冲、走滑叠加作用，南段为逆冲、走滑、逆冲叠加作用^[11]。陡倾逆断层的形成机理由多方面因素控制，目前对于其成因的认识并没有统一。而断层活动在一定程度上影响着油气圈闭的形成，对出现的陡倾逆断层的成因机制的认识不足可能会制约相关区域油气资源的勘探工作。基于色力布亚断层的相关地质资料，循着先存断面复活的思路，利用数字砂箱模拟技术，进一步阐述论证陡倾逆冲断层的形成机制，以丰富对陡倾逆断层成因机理的认识。

1 地质背景

塔里木盆地作为一大型复合叠加式含油气盆地^[12-13]，受其西缘和北缘的天山造山带与其南缘的西昆仑造山带和阿尔金造山带所围限，受到了多期构造活动的影响，形成了不同级别和规模的断裂。巴楚隆起是塔里木盆地的次级构造单元，位于中央隆起带西端（见图1），自奥陶纪以来经历多次抬升剥蚀和下降沉积^[14]，除了受益内构造活动的影响，还受边缘造山带活动的控制，形成多期次、复杂的断裂体系。总体上为西北高向东南倾的大型鼻状隆起^[15]。色力布亚断裂带位于巴楚隆起西缘（见图1），分隔了西南部的麦盖提斜

坡和东北部的巴楚隆起^[16]。

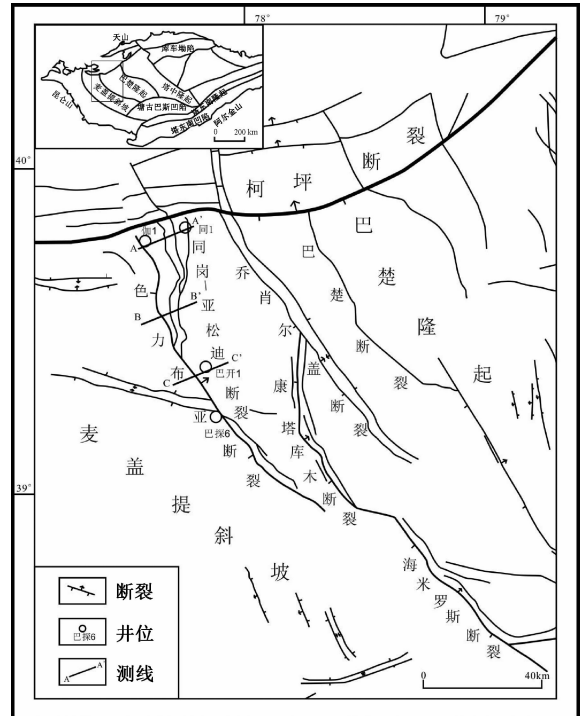


图1 色力布亚断裂位置图

Fig. 1 Location map of the Serikbuya fault

从盆地沉积组成上看，塔里木盆地沉积体系包括震旦系一下二叠统海相—海陆交互相沉积和上二叠统一第四系陆相沉积，盆地沉积层最大残余厚度约15000 m，是我国最大的沉积盆地^[17]。色力布亚断裂带所在的巴楚地区中生界地层大面积缺失，仅在和田1井、和田4井、玛参1井等井处钻遇三叠系地层。

2 断裂特征

色力布亚断裂带为基底卷入型冲断层，是由主干断裂与不同级别的反冲逆断层构成的复杂的断裂带^[9]。平面上，断裂走向近北西向，北段伴生同岗次级构造带，走向近南北向，中段亚松迪次级构造带，走向近北西向。从地震剖面上看，色力布亚深部的构造变形为基底卷入式构造，相对呈刚性的太古宙—早元古代的结晶基底和中、晚元古代中浅变质基底受挤压形成逆冲断层，从

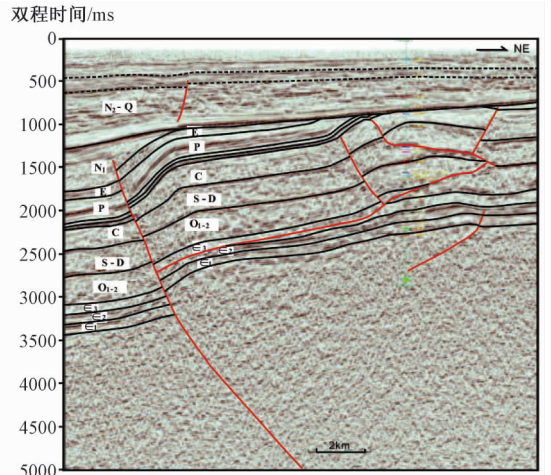
而制约上覆的前震旦系直到中新统的地层发生隆起,地层上盘发生褶皱,上覆上新统一第四系地层与下伏地层呈角度不整合接触。

AA'、BB'、CC'三条剖面测线主要分布于色力布亚断裂的中西段(见图1),平面走向由北向南近平行分布。色力布亚断裂中部为一条主断裂,向南北两端发散为多条次级断裂。在色力布亚断裂的北部,AA'剖面上主断裂主要为倾向北东的逆断层,断层倾角向上逐渐变陡,从底部基底向上切穿地层终止于中新统;在主断层的上盘伴生次一级的反冲断层,即同岗断裂,沿中寒武统顶、上寒武统底部向上冲断,切穿上寒武统一石炭统地层,伴生的南西向同岗断层倾角相对较缓,在这条同岗断层主断面上还伴生两条次级反冲断层;同岗断层与主断裂带构成“Y”字形,上下两盘的地层均发生不同程度的褶皱变形,上盘地层相对明显,形成轴面向西倾斜的斜歪背斜,且地层向东逐渐抬升,上盘地层从石炭系到中新统局部均发生了不同程度的剥蚀现象,其中中生代的地层缺失,上新统到第四系地层与下部地层呈角度不整合接触(见图2a)。BB'剖面上主断裂也为倾向北东的逆断层,与上述断裂相比,伴生的反冲断层倾角比北部的同岗断裂较陡,上盘的褶皱翼间角相对变大,上盘地层从二叠系到中新统向上抬升剥蚀,伴生同岗断层与主断裂带构成“Y”字形(见图2b)。CC'剖面位于色力布亚断裂的中部,主断裂同样为一条倾向北东的逆断层,向上切穿地层至中新统,上盘褶皱翼间角相比上述两条剖面上的褶皱较大,褶皱在靠近主断裂一翼陡倾,上盘地层从二叠系到中新统发生局部的剥蚀现象,同时也伴生形成南西向反冲断层—亚松迪断裂(见图2c)。

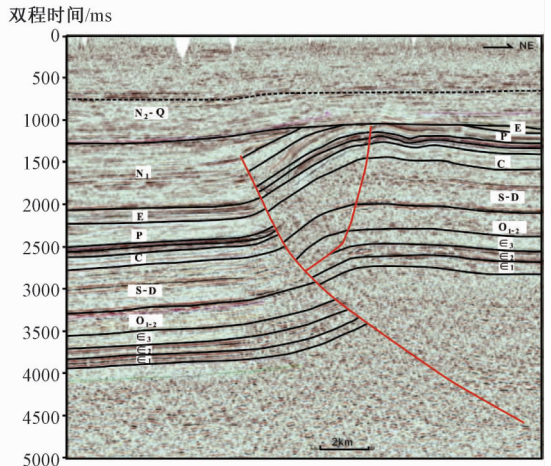
通过对平面图和地震剖面资料的分析,色力布亚断裂北部伴生多条走向平行的次级反冲断层—同岗断层,向东南反冲断层的数量减少;色力布亚断裂西部的地震剖面中,上盘地层剥蚀的地层的年代老于中部的剖面,可以推断色力布亚断裂北部地层抬升更为明显。上盘形成的褶皱为断展褶皱,受主断层与逆冲断层控制。

3 断裂演化与形成机理

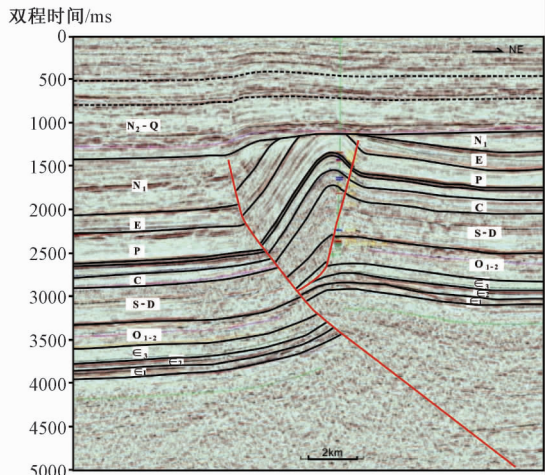
在典型地震剖面解释的基础上,结合塔里木盆地构造背景以及地层展布,制作了剖面BB'的平



(a) 剖面AA'



(b) 剖面BB'



(c) 剖面CC'

图2 色力布亚断层时间剖面

Fig. 2 Time profiles of the Serikbuya fault

衡剖面复原图,确定色力布亚断裂在加里东晚期—海西早期(439~362 Ma)和喜马拉雅中期(23.3~5.3 Ma)发生了较为明显的逆断层活动。

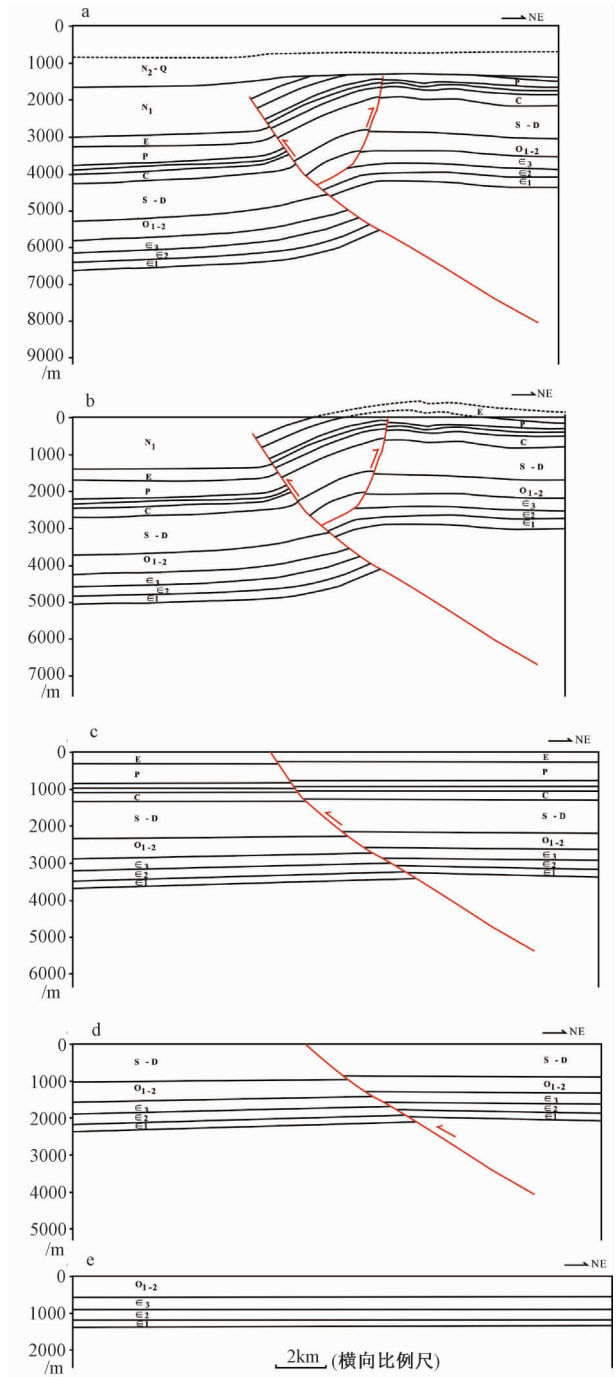
中新统沉积后地层发生了明显的剥蚀现象,说明在喜马拉雅中期发生强烈的挤压作用,逆断

层强烈活动,上新统角度不整合上覆于下伏地层(见图3a),中生界缺失,反映了海西末期构造运动造成的不整合面(见图3b)。石炭系沉积后至中新统沉积前断层断距较小,断层活动不明显(见图3c),而在志留系—泥盆系断距较大,说明构造活动相对强烈(见图3d、3e)。因此确定了色力布亚断裂带的构造运动始于加里东晚期—海西早期构造运动时期,之后断层相对稳定,在喜马拉雅中期断层再次复活。

塔里木盆地内断裂带是在压扭作用显著的构造背景下形成,因此不可忽视走滑作用对色力布亚断层活动的影响^[18]。在中新世时期(23.3~5.3 Ma),南端强烈的碰撞挤压作用影响着盆内的构造格局^[12]。色力布亚断裂带与康塔库木—海米罗斯断裂带在平面上呈左行左阶式雁列状排列(见图1)。两断裂带之间在地表形成拉分盆地,这种兼具拉伸的走滑断层在近地表的地震反射剖面上可能表现为负花状构造,而现有色力布亚断裂的地震资料并未观察到明显的负花状构造现象(见图2)。据此推测色力布亚断裂带在此时期主要发生逆冲活动,并未发生明显的走滑活动。对色力布亚断裂带走滑现象的正确认识有助于陡倾逆断层形成规律的研究,但限于相关勘探程度等原因,走滑作用对色力布亚上部的陡倾逆断层的影响仍然有待进一步分析论证。

在安德森断裂模式下,当最大主应力为水平、最小主应力垂直方向时,势断层为两组逆冲断层,倾角约 30° (见图4a)。在实际地层中,如果存在先存断层复活的情况,虽然区域应力的 σ_1 处于水平状态,但由于先存断层上盘的抬升作用,沿断层面上盘的主应力方向会趋于上偏,大致与断层面平行(见图4b);当主应力向上倾斜时,其方向与水平面有一定夹角,沿着先存断层向前断裂的势断层相对发育,势断层与水平面夹角增大,形成更陡的逆冲断层(见图4c)。假如岩石内摩擦角为 30° ,则二次断裂倾角为 60° 。

首先在加里东晚期—海西运动早期(439~362 Ma)形成缓倾逆断层,这一时期塔里木板块与哈萨克斯坦板块的碰撞作用使得塔里木盆地整体处在挤压环境,所处构造应力场为向北东方向挤压^[19],这是色力布亚断裂活动的主要动力来源,因此早期形成的缓倾逆断层走向为北西向,倾向为北东向,基底与上覆地层沿断层逆冲。之后喜



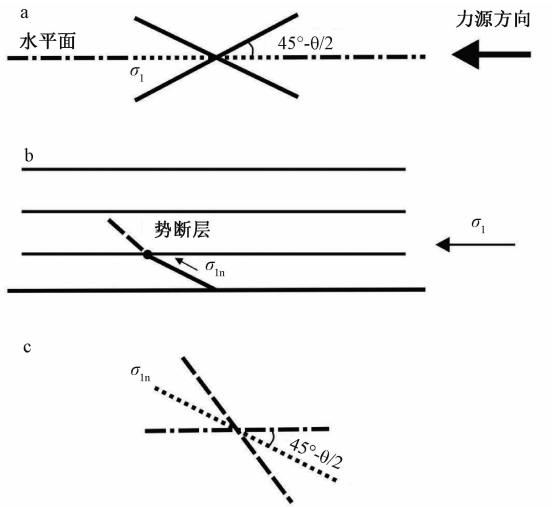
a—现今剖面; b—第四系沉积前; c—中新统沉积前;
d—石炭系沉积前; e—志留系沉积前

图3 剖面BB'构造演化剖面(纵向长度拉伸1.5倍)

Fig. 3 Tectonic evolution of section BB'

(Note: The vertical length stretched 1.5 times)

马拉雅中期(23.3~5.3 Ma)断层逆冲活动强烈,在断层向上变陡的过程中,伴生反冲断层,同时在主断层与反冲断层之间地层发生褶皱,这条反冲断层的形成与主断层的阻挡有关,也受中、下寒武统膏岩层的影响。



θ —岩石内摩擦角; σ_1 —区域挤压应力;
 σ_{1n} —先存断层活动引起的主压应力

a—安德森断裂模式; b—先存断层复活; c—二次断裂倾角

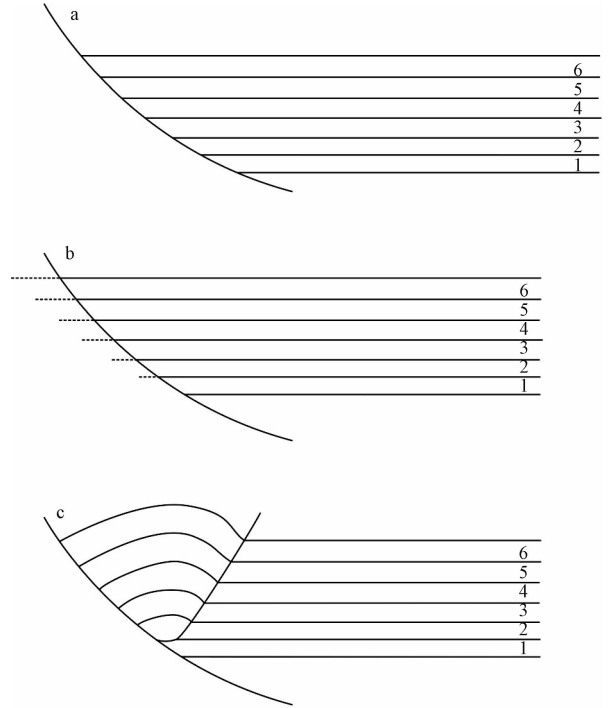
图 4 断层沿先存断裂复活力学分析图

Fig. 4 Mechanical analysis of the fault re-activating along the pre-existing fault

基于上文对陡倾逆断层力学模式的分析, 在实际的挤压过程中, 势断层倾角沿先存断层向上逐渐扩大, 根据地震剖面资料, 建立一个简单的二维模型进行演示。假设一段下部缓, 上部陡的弧形断层边界, 上盘地层产状水平, 岩性均一, 1 层为塑性层, 2—6 层为脆性层 (见图 5a); 假设地层受到来自右侧水平挤压力沿向上变陡的断层边界移动的瞬间, 若没有边界阻挡条件下, 在 1 层底部沿断面向上产生位移后, 地层形态不变, 左端有部分地层“超出”假设的断层边界 (见图 5b), 假定挤压前后在垂向剖面上地层的长度与面积保持平衡, 则上盘地层会受到断层边界的阻碍, 向右侧冲断, 形成与边界断层倾向相对的反冲断层, 且反冲断层底部沿塑性层滑脱, 同时在两个断层之间形成背形褶皱 (见图 5c)。

4 数字砂箱模拟验证

Cundall 在 1979 年提出了颗粒流离散元模拟 (Particle Flow Code), 作为离散元的一种, 主要应用于模拟岩石类材料基本特性、颗粒物质动力响应、岩石类介质内断层、节理及其他地质构造的发展等基础性问题的科学研究中^[20]。PFC 数值模拟在地质领域内有较为广泛的应用, 刘顺桂等采



a—未挤压时地层形态; b—受挤压后瞬时地层形态 (超出部分用虚线表示); c—最终地层形态

图 5 色力布亚反冲断层形成模式图

Fig. 5 Formation model of Serikbuya back thrusts

用 PFC 对断续节理模型进行了全真数值模拟^[21]; 刘志娜等运用 PFC 模拟了边坡的滑塌^[22-27]; 此外, 在基底卷入断冲构造、背冲楔构造、断层传播褶皱与伸展断层传播褶皱模拟等均有应用^[28-31]。离散元数值模拟与物理模拟相结合来研究构造变形, 已成为盆地构造研究的发展趋势。因此, 文章利用数字砂箱模拟技术对上述色力布亚断层形成机制的推断进行验证。

数字砂箱模拟运用颗粒流离散元模拟方法, 借助绑定颗粒模型 (bonded-particle model) 来代表自然岩石模型^[32], 运用 PFC 程序进行运算。PFC 程序中的基本单元分为实体和组元, 所有的模型由实体和组元以不同形式组合在一起。通过 Fish 语言生成一定大小、质量和密度的颗粒 (ball) 与墙 (wall), 结合实际地层参数对颗粒的刚度、摩擦力、粘结力参数赋值, 设置模型变量 (应力), 输入参数自动控制, 模拟结果保存和分析。

PFC 程序模拟的是颗粒在墙体 (边界) 围限内的运动和相互作用, 颗粒是平动和转动的刚体, 颗粒间的力与运动通过接触力学来实现。在整个计算循环过程中, 交替应用力一位移定律和牛顿运动定律, 通过力一位移定律更新接触部分的接

触力, 通过运动定律更新颗粒与墙体(边界)的位置, 构成颗粒之间的新接触(见图6)。

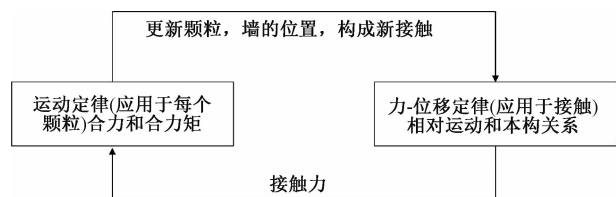


图6 PFC 计算循环模式图

Fig. 6 PFC calculation cycle pattern

首先需要验证断层沿先存缓倾断层复活时, 沿先存断层向前断裂的势断层更易发育, 且形成更陡的逆冲断层。运用数字砂箱模拟断层倾角为 30° 的断展褶皱。设计断展褶皱模型, 初始模型长度200 m, 高度20 m; 颗粒半径为0.15~0.249 m, 服从高斯分布; 脆性层岩石力学参数: 弹性模量80 Gpa, 泊松比0.3, 摩擦系数0.57; 塑性层岩石力学参数: 弹性模量1 Gpa, 泊松比0.3, 摩擦系数0.34。施力通过程序定义的墙体(wall)实现, 并设定墙体挤压速率为0.002 m/s。初始状态岩层水平, 岩层1—4、7—10层为脆性层, 4—5层为塑性层(见图7), 从右侧开始施加水平推力, 随着挤压的进行, 地层沿着初始断层向前推进。预设的断层可以视为色力布亚第一期构造挤压产生的逆冲断层, 之后的挤压作用可以视作第二期构造运动作用。压缩量为2.8 m时, 保存模型, 再调取模型的速度矢量图, 观察上盘地层的速度矢量, 发现沿断面向上颗粒速度发生了明显的两次突变, 且越来越陡(见图7), 这可以作为沿先存断层向前断裂的势断层出现的一个证据, 同时也说明了沿势断层向上断层角度会增大, 印证了实际剖面中断层倾角向上变陡的现象。

然后需要验证陡倾断层形成的过程中会伴生反冲断层, 运用数字砂箱模拟一条色力布亚陡倾断层, 0层为基底, 3—7层为脆性层, 1—2层为塑性层(见图8), 从右侧施加水平推力对模型进行挤压实验, 模型中的地层受前缘地层的反冲作用, 形成反冲断层。该模型证明了在断层倾角向上变陡的过程中会形成一条反冲断层, 与主断层构成“Y”字型。反冲断层底部沿塑性层滑脱, 断层的上盘形成背形褶皱, 与地震剖面中现象一致。

基于力学分析, 结合色力布亚断裂形成时所处的北东向挤压的构造应力场条件, 利用数字砂箱模拟结果的佐证, 可以得出色力布亚陡倾逆断

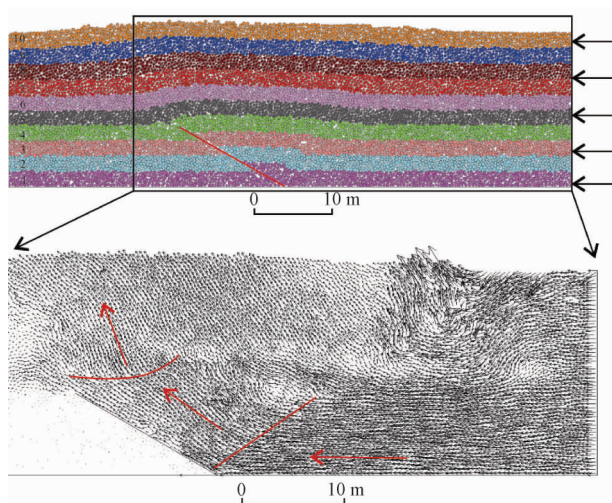


图7 数字砂箱模拟断展褶皱及速度矢量图

Fig. 7 Fault-propagation folds and the velocity vectors simulated by digital sandbox

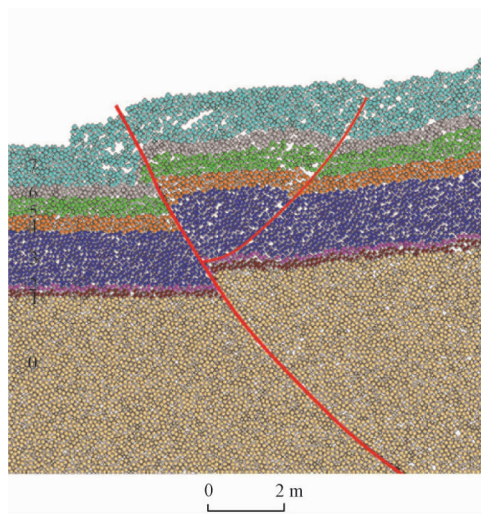


图8 数字砂箱模拟色力布亚陡倾逆断层

Fig. 8 The Serikbuya steep reverse fault simulated by digital sandbox

层的形成机制: (1) 在志留纪—泥盆纪时期, 塔里木板块北缘为活动陆缘, 色力布亚处于区域性挤压背景, 在盆地周缘挤压应力的作用下, 色力布亚断裂带开始形成逆冲断层; (2) 在中新世时期, 印度板块与欧亚大陆的碰撞, 盆内大面积受到挤压抬升^[33], 同时随着挤压活动的进行, 断层沿早期的逆断层发生继承性活动, 断层活动受到先存断层的影响, 随着上盘地层逐渐地向上抬升, 新形成的断层倾角向上逐渐变大至陡倾, 同时伴生倾向对的反冲逆断层; (3) 由于寒武系膏岩层的发育, 伴生的反冲断层底部顺中寒武统顶部的膏岩层滑脱, 并向北东向反冲。

5 结论

(1) 色力布亚断裂带走向为北西向,断裂自中部向南北两端发散为多条次级断裂,伴生多条走向平行的次级反冲断层—同岗断层,中部伴生亚松迪次级断裂。北部反冲断层较为发育,地层抬升更显著。剖面上具有典型双重结构,由深部的逆冲断裂和浅层的角度不整合组成,深部构造变形样式为基底卷入式构造,上盘震旦系—中新统地层向上逆冲,形成断展褶皱,上新统一第四系地层在顶部与下伏地层呈角度不整合接触。

(2) 色力布亚断裂带主要受两期构造运动的影响,始于加里东晚期运动—海西早期运动(439~362 Ma),由于塔里木板块与哈萨克斯坦板块的碰撞作用,塔里木盆地整体处于挤压环境,基底与上覆地层沿断层逆冲,形成走向为北西向、倾向为北东向的缓倾逆断层;喜马拉雅中期(23.3~5.3 Ma)活动较为强烈,在印度板块与欧亚板块的碰撞作用的背景下,断裂断层面上盘逆冲活动明显,断面上部陡倾,并伴生反冲断层。

(3) 色力布亚断裂带中的陡倾逆断层的形成机制:断层沿着先存缓倾断面向上发生位移并在向上扩展中断面倾角逐渐增大,数字砂箱模拟断展褶皱的结果显示与色力布亚断裂带实际剖面中断层倾角向上变陡的现象相符;在断层倾角向上变陡的过程中,会伴生反冲断层,反冲断层的形成受到主断层的阻挡作用,以及中、下寒武统膏岩层的影响,底部顺中寒武统顶部的膏岩层滑脱;上盘地层形成背形褶皱,褶皱形态受主断层与逆冲断层控制,且反冲断层倾向南西,在剖面上与色力布亚主断层构成“Y”字型,数字砂箱模拟色力布亚陡倾逆断层的结果中出现了反冲断层,并且底部顺塑性层滑脱,与推断一致。

参考文献/References

- [1] 胡素云, 蔚远江, 董大忠, 等. 准噶尔盆地腹部断裂活动对油气聚集的控制作用 [J]. 石油学报, 2006, 27 (1): 1~7.
HU Suyun, YU Yuanjiang, DONG Dazhong, et al. Control of fault activity on hydrocarbon accumulation in central Junggar Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 27 (1): 1~7. (in Chinese with English abstract)
- [2] 曲国胜, 马宗晋, 张宁, 等. 准噶尔盆地及周缘断裂构造特征 [J]. 新疆石油地质, 2008, 29 (3): 290~295.
QU Guosheng, MA Zongjin, ZHANG Ning, et al. Fault structures in and around Junggar Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2008, 29 (3): 290~295. (in Chinese with English abstract)
- [3] 李曰俊, 吴根耀, 孟庆龙, 等. 塔里木盆地中央地区的断裂系统: 几何学、运动学和动力学背景 [J]. 地质科学, 2008, 43 (1): 82~118.
LI Yuejun, WU Genyao, MENG Qinglong, et al. Fault systems in central area of the Tarim Basin: Geometry, kinematics and dynamic settings [J]. Chinese Journal of Geology, 2008, 43 (1): 82~118. (in Chinese with English abstract)
- [4] 汤良杰, 漆立新, 邱海峻, 等. 塔里木盆地断裂构造分期差异活动及其变形机理 [J]. 岩石学报, 2012, 28 (8): 2569~2583.
TANG Liangjie, QI Lixin, QIU Haijun, et al. Poly-phase differential fault movement and hydrocarbon accumulation of the Tarim Basin, NW China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28 (8): 2569~2583. (in Chinese with English abstract)
- [5] 朱志澄. 构造地质学 [M]. 2版. 武汉: 中国地质大学出版社, 2006, 181~194.
ZHU Zhicheng. Structural geology [M]. 2nd ed. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2006, 181~194. (in Chinese)
- [6] Zheng Y D, Wang T, Ma M B, et al. Maximum effective moment criterion and the origin of low-angle normal faults [J]. Journal of Structural Geology, 2004, 26 (2): 271~285.
- [7] 杨勇, 汤良杰, 蒋华山, 等. 塔里木盆地巴楚隆起断裂分期差异活动特征及其变形机理 [J]. 石油实验地质, 2014, 36 (3): 275~284.
YANG Yong, TANG Liangjie, JIANG Huashan, et al. Characteristics and deformation mechanism of staging differential fault activities in Bachu Uplift, Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36 (3): 275~284. (in Chinese with English abstract)
- [8] Mandl G. Mechanics of tectonic faulting: Models and basic concepts. Development in structural geology [M]. Amsterdam: Elsevier, 1988.
- [9] 孟庆龙, 李曰俊, 师骏, 等. 塔里木盆地西部色力布亚断裂和康西断裂的主要特征及活动时代 [J]. 地质科学, 2008, 43 (2): 282~293.
MENG Qinglong, LI Yuejun, SHI Jun, et al. Main characters and active ages of the Serikbuya and Kangxi faults in the western Tarim Basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2008, 43 (2): 282~293. (in Chinese with English abstract)
- [10] 肖安成, 李景义, 张春生. 塔里木盆地色力布亚断裂系的走滑双重构造特征 [J]. 江汉石油学院学报, 1998, 20 (2): 6~12.
XIAO Ancheng, LI Jingyi, ZHANG Chunsheng. Structure and kinematic genesis of the Selibuya strike-slip duplex in the Tarim Basin [J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 1998, 20 (2): 6~12. (in Chinese with English abstract)
- [11] 姚文倩, 汤良杰, 谢大庆, 等. 塔里木盆地色力布亚断裂带变形特征和演化史 [J]. 石油与天然气地质, 2013, 34 (4): 522~527.
YAO Wenqian, TANG Liangjie, XIE Daqing, et al. Deformation and tectonic evolution of the Selibuya fault zone in Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34 (4): 522~

527. (in Chinese with English abstract)
- [12] 何登发, 贾承造, 李德生, 等. 塔里木多旋回叠合盆地的形成与演化 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26 (1): 64 ~ 77.
HE Dengfa, JIA Chengzao, LI Desheng, et al. Formation and evolution of polycyclic superimposed Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26 (1): 64 ~ 77. (in Chinese with English abstract)
- [13] 孙岩, 贾承造. 塔里木地区油气构造的复合关系 [J]. 地质力学学报, 1996, 2 (3): 63 ~ 64.
SUN Yan, JIA Chengzao. The complex relation of oil and gas construction in Tarim Area [J]. Journal of Geomechanics, 1996, 2 (3): 63 ~ 64. (in Chinese)
- [14] 吕修祥, 周新源, 皮学军, 等. 塔里木盆地巴楚凸起油气聚集及分布规律 [J]. 新疆石油地质, 2002, 23 (6): 489 ~ 492.
LÜ Xiuxiang, ZHOU Xinyuan, PI Xuejun, et al. Accumulation and distribution patterns of hydrocarbon in Bachu Arch of Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2002, 23 (6): 489 ~ 492. (in Chinese with English abstract)
- [15] 余晓宇, 施泽进, 刘高波, 等. 巴楚-麦盖提地区油气动态成藏的运移通道 [J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2004, 31 (3): 291 ~ 296.
SHE Xiaoyu, SHI Zejin, LIU Gaobo, et al. Migration pathway of hydrocarbon dynamic accumulation in Bachu-Markit area, Xinjiang, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2004, 31 (3): 291 ~ 296. (in Chinese with English abstract)
- [16] 罗廷辉, 赵锡奎, 李坤, 等. 巴楚隆起色力布亚断裂演化及其油气意义 [J]. 重庆科技学院学报 (自然科学版), 2010, 12 (6): 5 ~ 8.
LUO Tinghui, ZHAO Xikui, LI Kun, et al. Evolution and its oil-gas sense of Serikbuya fault in Bachu Uplift [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2010, 12 (6): 5 ~ 8. (in Chinese with English abstract)
- [17] Chen S P, Wang Y, Jin Z J. Controls of tectonics on both sedimentary sequences and petroleum systems in Tarim basin, Northwest China [J]. Petroleum Science, 2007, 4 (2): 1 ~ 9.
- [18] 汤良杰. 塔里木盆地走滑断裂带与油气聚集关系的探讨 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1992, 17 (4): 403 ~ 410.
TANG Liangjie. A discussion on the relation between strike-slip fault belts and hydrocarbon accumulation in Tarim Basin [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1992, 17 (4): 403 ~ 410. (in Chinese with English abstract)
- [19] 崔军文, 唐哲民. 塔里木盆地构造格架和构造应力场分析 [J]. 岩石学报, 2011, 27 (1): 231 ~ 242.
CUI Junwen, TANG Zhemín. Tectonic framework of the Tarim basin and its tectonic stress field analysis [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27 (1): 231 ~ 242. (in Chinese with English abstract)
- [20] Cundall P A, Strack O D L. A discrete numerical model for granular assemblies [J]. Géotechnique, 1979, 29 (1): 47 ~ 65.
- [21] 刘顺桂, 刘海宁, 王思敬, 等. 断续节理直剪试验与 PFC^{2D} 数值模拟分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27 (9): 1828 ~ 1836.
LIU Shungui, LIU Haining, WANG Sijing, et al. Direct shear tests and PFC^{2D} numerical simulation of intermittent joints [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (9): 1828 ~ 1836. (in Chinese with English abstract)
- [22] 刘志娜, 梅林芳, 宋卫东. 基于 PFC 数值模拟的无底柱采场结构参数优化研究 [J]. 矿业研究与开发, 2008, 28 (1): 3 ~ 5.
LIU Zhina, MEI Linfang, SONG Weidong. Study on stope structure parameter optimization of sublevel caving without sill pillar based on numeral simulation with PFC [J]. Mining Research and Development, 2008, 28 (1): 3 ~ 5. (in Chinese with English abstract)
- [23] Liu Z N, Koyi H A. Analogue modeling of the collapse of non-homogeneous granular slopes along weak horizons [J]. Tectonophysics, 2014, 632: 76 ~ 95.
- [24] Liu Z N, Koyi H A. The impact of a weak horizon on kinematics and internal deformation of a failure mass using discrete element method [J]. Tectonophysics, 2013, 586: 95 ~ 111.
- [25] Liu Z N, Koyi H A. Kinematics and internal deformation of granular slopes: Insights from discrete element modeling [J]. Landslides, 2013, 10 (2): 139 ~ 160.
- [26] Liu Z N, Koyi H A, Swantesson J O H, et al. Kinematics and 3 ~ D internal deformation of granular slopes: Analogue models and natural landslides [J]. Journal of Structural Geology, 2013, 53: 27 ~ 42.
- [27] Cheng Y M, Liu Z N, Song W D, et al. Laboratory test and Particle Flow Simulation of silos problem with nonhomogeneous materials [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135 (11): 1754 ~ 1761.
- [28] Zhang J, Morgan J K, Gray G G, et al. Comparative FEM and DEM modeling of basement-involved thrust structures, with application to Sheep Mountain, Greybull area, Wyoming [J]. Tectonophysics, 2013, 608: 408 ~ 417.
- [29] Hardy S, McClay K, Muñoz J A. Deformation and fault activity in space and time in high-resolution numerical models of doubly vergent thrust wedges [J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26 (2): 232 ~ 248.
- [30] Strayer L M, Suppe J. Out-of-plane motion of a thrust sheet during along-strike propagation of a thrust ramp: A distinct-element approach [J]. Journal of Structural Geology, 2002, 24 (4): 637 ~ 650.
- [31] Finch E, Hardy S, Gawthorpe R. Discrete-element modelling of extensional fault-propagation folding above rigid basement fault blocks [J]. Basin Research, 2004, 16 (4): 467 ~ 488.
- [32] Potyondy D O, Cundall P A. A bonded-particle model for rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41 (8): 1329 ~ 1364.
- [33] 李乐, 侯贵廷, 潘文庆, 等. 塔里木盆地巴楚地区二叠纪以来构造应力场解析 [J]. 地质力学学报, 2011, 17 (3): 262 ~ 273.
LI Le, HOU Guiting, PAN Wenqing, et al. Study on structural stress fields since Permian, Bachu Area, Tarim Basin [J]. Journal of Geomechanics, 2011, 17 (3): 262 ~ 273. (in Chinese with English abstract)