

准噶尔盆地车排子凸起构造演化特征及其成因

胡秋媛¹,董大伟²,赵利³,李理⁴,李萧¹,孔雪¹

[1. 中国石油大学 胜利学院 油气工程学院, 山东 东营 257000; 2. 中国石油大学 胜利学院 高等教育研究与评价中心, 山东 东营 257000; 3. 中国石化 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214122; 4. 中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580]

摘要:准噶尔盆地车排子凸起油气资源丰富,其构造演化特征比较独特。基于车排子地区最新的勘探进展,利用平衡剖面技术,对车排子凸起的基本构造特征及活动参数进行定量研究,同时结合构造物理模拟实验再现了研究区的构造演化过程,在时间与空间上进一步系统地探讨了车排子凸起的构造演化特征及其成因。研究认为,车排子凸起自晚石炭世已开始发育,依次经历了强挤压—弱挤压—较弱挤压—弱伸展的演化过程,可分为初始发育(C_3 — P)、持续隆升(T — J)、稳定埋深(K — E)和局部伸展掀斜(N — Q)4个演化阶段,其构造演化主要受控于晚石炭世以来车排子凸起及邻区构造应力场的重大转变。 C_3 — P 时期,受EW向的挤压应力场控制,车排子凸起发生自西向东的“构造逃逸挤压”,凸起东侧发育近SN向的红车断裂带,并在凸起主体部位发育大量近SN向次级逆断层; T — J 时期,车排子凸起被置于挤压逆冲楔顶部的NW—SE向挤压应力场中,持续发生隆升,先期逆断层部分继承性活动; K — E 时期,整体缓慢下沉,稳定埋深;至 N — Q 时期,转为NNE向的伸展应力场,局部发生伸展掀斜,发育大量NNW向正断层的同时,先期逆断层部分发生构造负反转。受构造应力场控制,区域构造线则经历了由近SN向到NE—SW向,再到近EW向的重要转变。

关键词:平衡剖面;断层系统;构造逃逸;构造演化;车排子凸起;准噶尔盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Tectonic evolutionary characteristics and their causes of Chepaizi Uplift in Junggar Basin

Hu Qiuyuan¹, Dong Dawei², Zhao Li³, Li Li⁴, Li Xiao¹, Kong Xue¹

(1. Department of Oil & Gas Engineering, Shengli College of China University of Petroleum, Dongying, Shandong 257000, China;
2. Higher Education Research and Evaluation Center, Shengli College of China University of Petroleum, Dongying,
Shandong 257000, China; 3. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214122, China;
4. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China)

Abstract: Chepaizi Uplift in Junggar Basin is abundant in oil and gas resources and has unique tectonic evolution history. New understanding of the history was made possible recently with the latest exploration progress in the area. By combining balanced section technique with quantitative analyses of basic tectonic characteristics and activity parameters and physical structure modeling experiments, we discussed systematically in this paper the tectonic evolutionary characteristics and genesis from a spatial and temporal perspective. The result shows that the evolutionary history of the Uplift can be divided into four stages: the initial development stage (C_3 — P), continuously uplifting stage (T — J), stably burying stage (K — E) and local stretching tilting stage (N — Q), since it was initiated during Late Carboniferous and then went through successively strong-weak-weaker compression and a weak extension. The tectonic evolution was mainly controlled by major changes in the tectonic stress field in the Uplift and its adjacent areas since the Late Carboniferous. During the C_3 — P period, an eastward “escaping tectonic compression” developed in the Uplift under the control of the E-W compression stress field, leading to the development of the nearly SN-trending Hongche fault belt in the east of the Uplift and large amounts of SN-trending secondary reverse faults in the major part of the Uplift. During the T — J period, the Uplift was in the NW-SE compression stress field on the top of the thrust wedge, and went through continuous uplifting, leading to the inheritance activities of some early reserve faults. During the K — E period, the Uplift experienced integral and slow sub-

收稿日期:2016-03-02;修订日期:2016-06-06。

第一作者简介:胡秋媛(1984—),女,硕士、讲师,地质学。E-mail:huqiuyuan_1984@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(40772132);中国石油大学胜利学院春晖计划项目(KY2015006);中国石油大学胜利学院重点科研计划项目(KY2015013)。

sidence and got stably buried. And during the N—Q period, the stress field turned to be NNE-trending extensional stress field, leading to local stretching and tilting. Large amounts of NWW-trending normal faults were developed while some early reverse faults experienced negative structural inversion. Controlled by the tectonic stress field, the regional tectonic line had turned from near SN direction to NE-SW trend and then to EW direction.

Key words: balanced section, fault system, tectonic escape, tectonic evolution, Chepaizi Uplift, Junggar Basin

车排子凸起是准噶尔盆地西北缘的一个重要构造单元,断层发育,保存了多期构造运动叠加的构造格局,且油气源条件优越,成为盆地内重要的油气聚集区。迄今为止,国内部分学者已对车排子凸起的构造演化进行过一系列针对性研究,认为车排子凸起是车—莫古隆起的重要组成部分,其构造演化开始于早侏罗世,经历了初始发育阶段(J_1s)、逐渐隆升阶段(J_2x)、强烈隆升阶段(J_2t)、剥蚀改造阶段(J_3)、隐伏埋藏阶段(K—E)和定位调整阶段(N—Q)^[1-5],但对其在侏罗纪之前的构造演化未作系统研究。作为准噶尔盆地内的重要构造单元,这个“三角形凸起”既继承了盆地的整体特征,又具有其自身的独特性。笔者在充分利用近年来在车排子地区获取的最新勘探资料,消化前人研究成果的基础上,利用平衡剖面技术,对车排子凸起的基本构造特征及活动参数进行定量研究,并结合构造物理模拟实验恢复了研究区的构造演化过程,进一步探讨其动力学机制。两种方法相互印证,从时间与空间上系统地研究了车排子凸起的构造演化特征及其成因,取得了新的认识。

1 区域地质背景

车排子凸起位于准噶尔盆地西北缘南部,属于准噶尔盆地西部隆起的一部分。其北抵扎伊尔山与克—夏断褶带相邻,南邻四棵树凹陷,东部以红车断裂带为界与昌吉凹陷、中拐凸起相接,平面上构成“倒三角”形态,面积约 $1.08 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图1)。车排子地区构造线近南北向,在凸起内部,自北向南隆升极不平衡,扎伊尔山前隆起处最高,向东南隆起幅度逐渐降低。

车排子凸起具有典型的西准噶尔型地层,以广泛分布岛弧火山岩、花岗质侵入岩、古生代蛇绿混杂岩和洋底沉积物为特征^[6-8]。凸起的主体部位在石炭系基底上,自下而上发育下侏罗统(J_1)、下白垩统吐谷鲁群(K_1tg)、古近系(E)、新近系(N)及第四系(Q)。其中,下侏罗统(J_1)为灰褐色砂砾岩、灰色砾状砂岩,在车排子凸起主体大面积缺失,仅分布在极少数地区及部分沟谷内。下白垩统吐谷鲁群(K_1tg)为灰绿、棕红色泥岩夹薄层泥质粉砂—细砂岩不等厚互层,在车排子凸起东部广泛发育。而古近系(E)在凸起北部大面积缺失,仅在车浅1—7、车浅1—8、车浅1—9和排606井

钻遇。新近系(N)则沉积较厚,自下而上发育沙湾组(N_1s)、塔西河组(N_1t)和独山子组(N_2d),其中沙湾组在区内广泛发育,东南部厚度可达400 m以上,向西北逐渐减薄直至尖灭,自下而上依次以褐灰色泥质粉砂岩、灰色细砂岩和灰色砂砾岩为主,塔西河组为红色、灰色泥岩与泥质粉砂岩互层,均与下伏地层呈角度不整合接触。

2 车排子凸起基本构造特征

车排子凸起断层较为发育,但无较大规模的断层存在,延伸与断距均较小。依据断层规模,可将研究区内断层分为4个级别:一级断层为红车断裂,呈NNE向延伸,是车排子凸起边界断层,断距大;二级断层沿NNE向延伸5~10 km,如 F_1 和 F_2 (图1),切穿整个层系,断距25 m以下,为研究区内主要的控藏断层;三级断层发育于石炭系,终止于侏罗系—白垩系,为NNE和NNW向延伸1~5 km的逆断层;四级断层为发育于新近系—第四系的正断层,沿EW向延伸不到1 km,切穿层位各有不同,断距在10 m左右。总体而言,车排子凸起可划分出深、浅两套断层系统,且发育大量负反转断层。

2.1 深部断层系统

深部断层系统主要在海西晚期形成,为一系列逆冲及逆掩断层,在车排子凸起主体部位,平面上沿NE和NW向展布,在研究区内延伸相对较长,常呈网格状或斜交式组合(图2a,2b),剖面上断层倾角小,断面多呈铲式,自石炭系断至白垩系底部,多为区内的三级断层(图2c)。

2.2 浅部断层系统

浅部断层系统形成较晚,在喜马拉雅期形成,主要发育大量张性正断层。浅部断层系统规模较小,平面上沿NNE,NW和近EW向延伸,呈平行式或雁列式组合(图2d,e),剖面上断层倾角大($65^\circ \sim 85^\circ$),断面一般呈板式、铲式,小规模断层以板式为主,主要发育在白垩系至新近系,常呈花状构造组合型式(图2c,h),多为区内的四级断层。

此外,由于部分压性断裂的构造负反转,使研究区

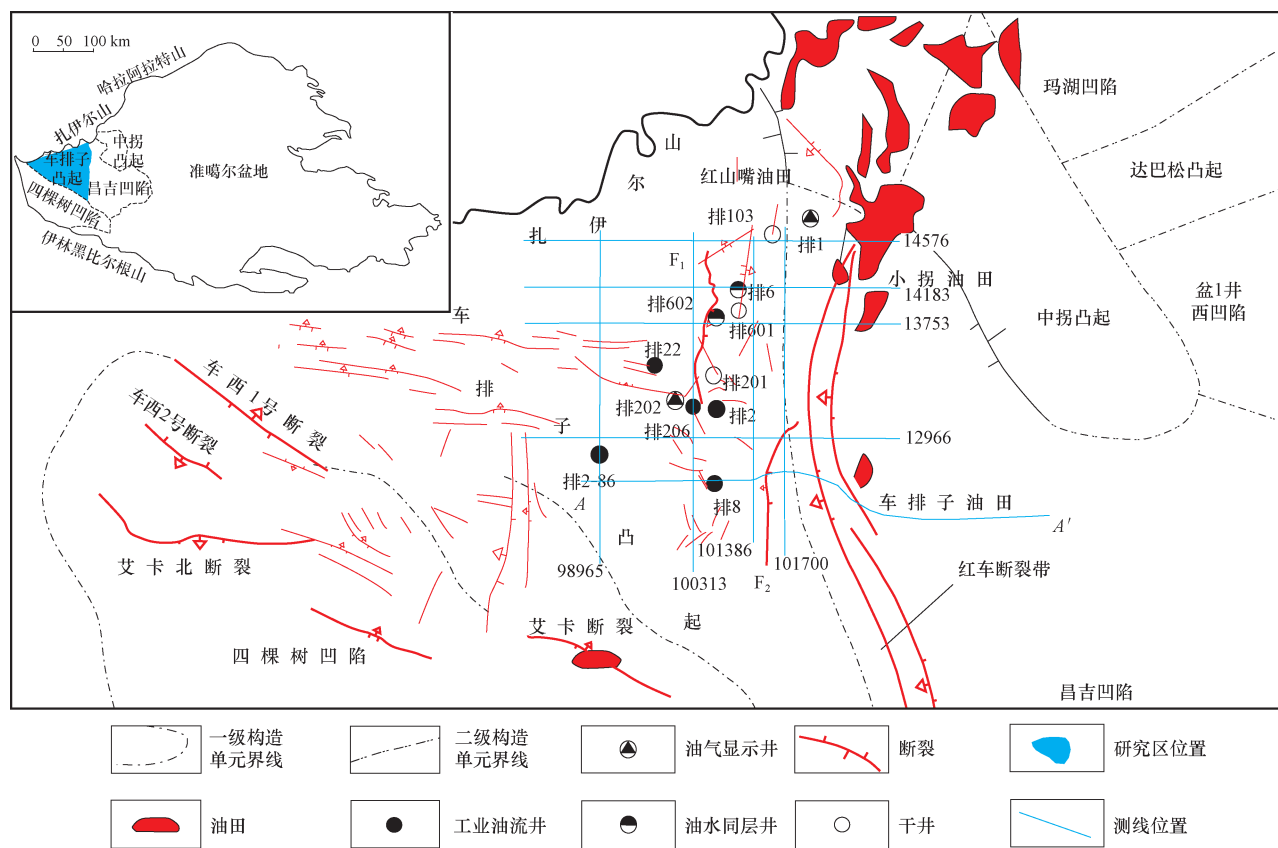


图1 准噶尔盆地车排子凸起构造位置

Fig. 1 Regional tectonic locations of Chepaizi Uplift

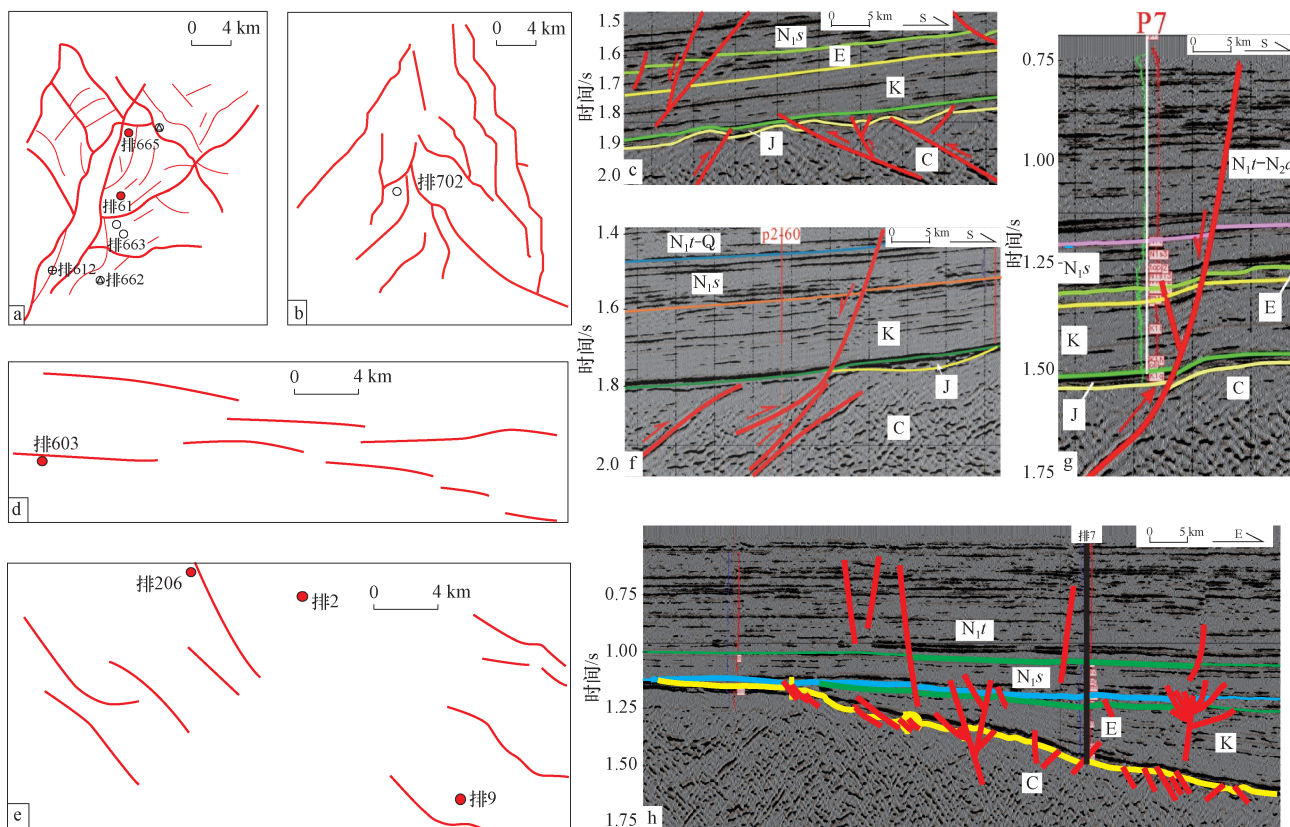


图2 车排子凸起断层基本特征

Fig. 2 Basic characteristics of faults in Chepaizi Uplift

- a. 网格式组合; b. 斜交式组合; c. 深部逆冲断层与浅部张性正断层(测线 100313); d. 雁列式组合; e. 平行式组合;
f. 负反转断层(测线 101700 中部); g. 负反转断层(测线 101386); h. 浅层断层系统

内发育大量负反转断层。负反转断层为继承性发育断层,自石炭系一直断至新近系,剖面上常表现出“上正下逆”的断层特征(图2f,g)。为进一步明确负反转断层的特征及其沿走向的变化规律,通过截取大量垂直于断层走向的地震剖面,详细剖析了区内两条典型负反转断层 F_1 和 F_2 的剖面特征(图3)。研究发现, F_1 和 F_2 为两条继承性断层,均发生了先逆后正的构造负反转。其中, F_1 断面整体呈上陡下缓,断面形态沿走向发生变化,北部偏铲式,南部偏板式,断距呈上正下逆,各处断距不一。 F_2 断面形态沿走向变化明显,NE段偏铲式,倾角上陡下缓,NNE段偏板式,倾角上下变化不大,各部位断距均呈现出上正下逆,但中间大、两头小。由此初步推断,研究区深、浅断层系统发育过程中经历了由挤压到伸展的构造负反转,但各处反转程度不一,有些断层反转程度小,呈现“上正下逆”特征,有些反转程度大,整体呈现为正断层形态。

3 车排子凸起构造演化特征

3.1 车排子凸起活动量分析

断层的活动特征可反映于研究区的伸展量与压缩量。平衡剖面技术是研究断层活动特征的重要手段,其基本原则是地层层长在变形过程中始终守恒。通过逐层回剥可以恢复各构造演化阶段的地质剖面,以明确各时期区内断层的活动与演化特征。

截取研究区内典型东西向测线 13753,经地震追层、断层解释和时深转换后,采用平衡剖面技术,得到其构造平衡演化剖面(图4)。基于此,将研究区内南北向和东西向各4条剖面(图1)逐层回剥,统计出各

时期的伸展量,并绘制成柱状图(图5)。图中显示,车排子凸起经历了强挤压—弱挤压—较弱挤压—弱伸展的演化过程,且各剖面中压缩量大于伸展量。二叠纪时,研究区剖面整体发生压缩,且南部压缩量大,表明此时期受强烈挤压作用,构造活动最为强烈。三叠纪开始,继承了前期的区域挤压作用,但强度明显减弱,尤其是白垩纪—古近纪,构造挤压大幅度减弱。至新近纪—第四纪,由区域挤压转为区域伸展,且南北向伸展强度明显大于东西向,但与前期的挤压相比,构造活动强度相对较弱。

3.2 车排子凸起构造演化阶段划分

前人一般认为车排子凸起是车—莫古隆起的一部分,继承了二叠纪的隆坳演化构造格局,始发于早侏罗世^[3-4,9],此次笔者根据区域典型地震剖面的精细解释成果,结合几何学特征、运动学特征及构造演化史剖面等综合分析,对车排子凸起的构造演化取得了新认识,认为车排子凸自晚石炭世开始发育,并将其构造演化划分为4个阶段。

3.2.1 初始发育阶段(C_3 —P)

研究区近东西向地震剖面解释结果显示,车排子凸起向东部强烈挤压并开始隆升,构造压缩量大,导致区内红车断裂带高角度逆冲,处于断裂下降盘的昌吉凹陷沉积厚度超过8 km且强烈褶皱,西部四棵树凹陷则无沉积(图4d)。上述现象反映晚石炭世—二叠纪,车排子凸起已初见雏形。同时,准噶尔盆地西北缘的年代学数据也为该演化阶段提供了重要依据。盆地西北缘达尔布特带中的镁铁—超镁铁岩被古生代后碰撞

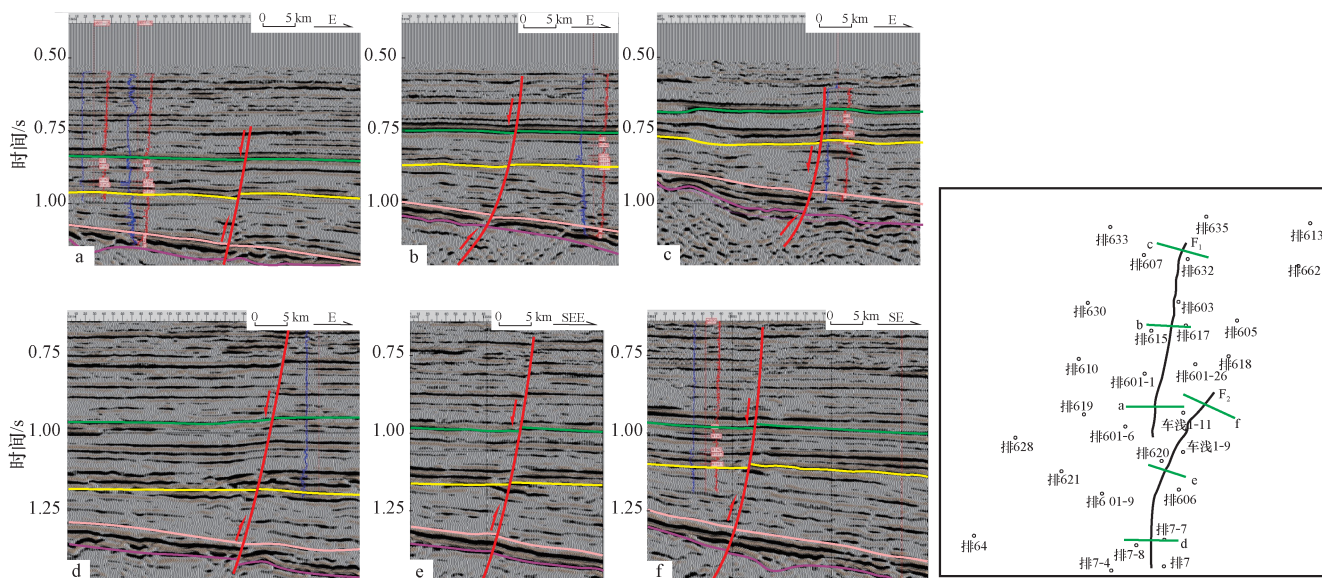


图3 车排子凸起典型负反转断层剖面特征

Fig. 3 Profile characteristics of typical negatively reversed faults in Chepaizi Uplift

a, b, c. F_1 断层沿走向的剖面变化; d, e, f. F_2 断层沿走向的剖面变化

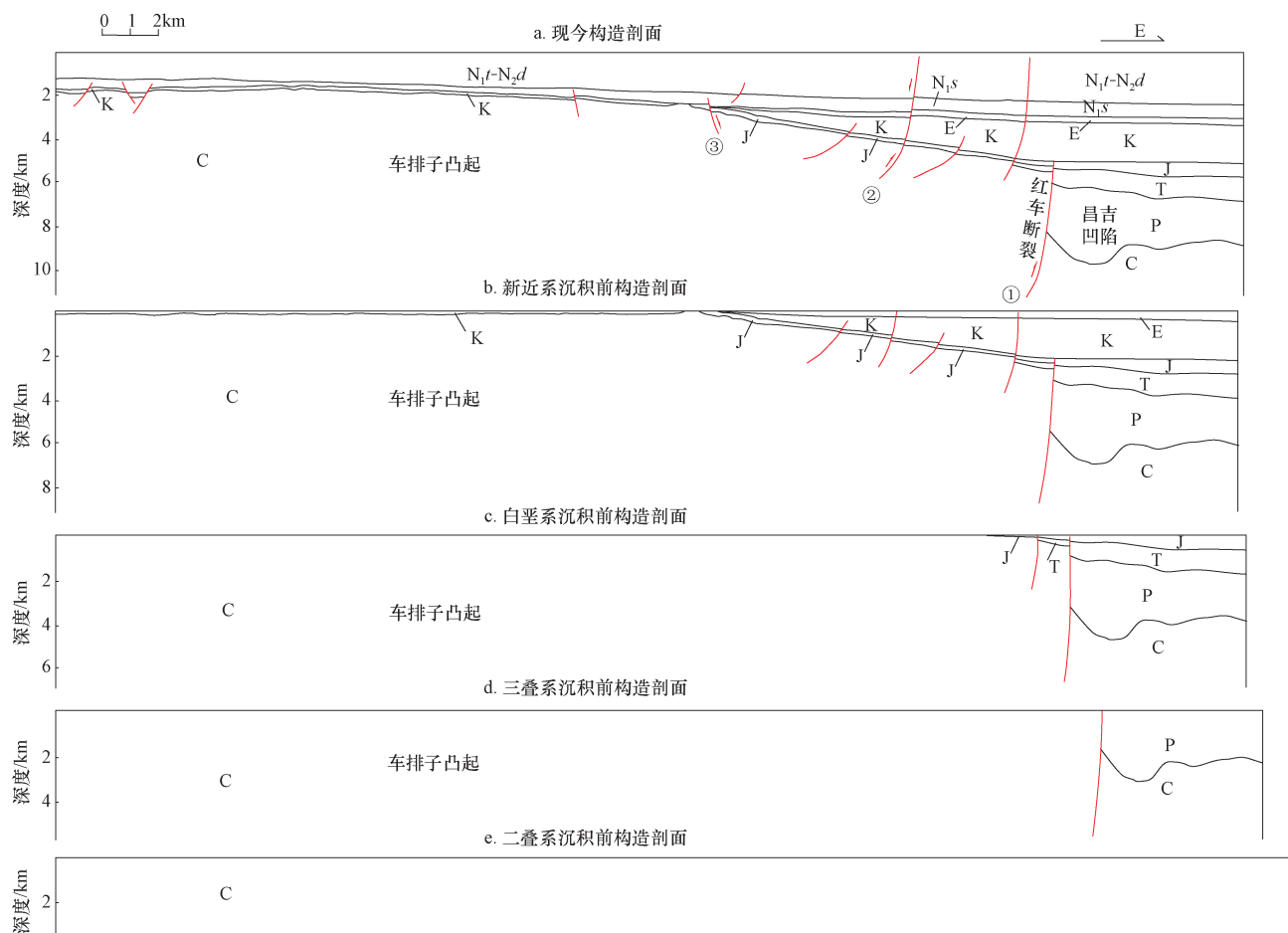


图4 车排子地区 13753 测线构造平衡剖面(剖面位置见图1)

Fig. 4 Structural balanced profile of 13753 line in Chepaizi Uplift (see Fig. 1 for the locations)

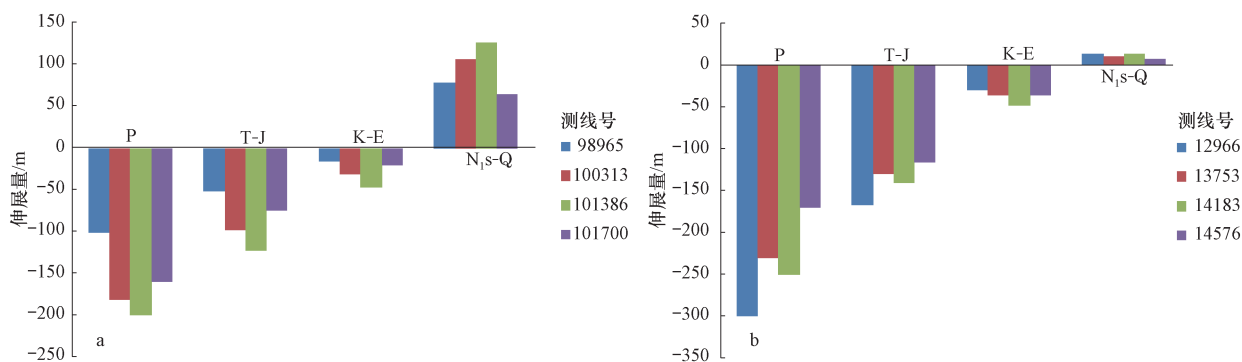


图5 车排子凸起典型剖面伸展量

Fig. 5 Extensional estimate of typical profiles in Chepaizi Uplift

a. 南北向剖面伸展量; b. 东西向剖面伸展量

花岗岩切穿形成“钉合岩体”, 镁铁-超镁铁岩带 332 Ma 的年龄限定早石炭世西北缘有洋壳存在, 花岗岩的定年结果(327 ~ 276 Ma)限定了其洋盆的闭合发生在晚石炭世^[10]。巴音沟蛇绿岩是北天山地区晚古生代蛇绿岩带的重要组成部分和典型代表, 其形成时代为(344 ± 3.4) Ma(辉长岩)^[11], 表明早石炭世准噶尔盆地南缘有洋壳存在, 多个花岗岩体侵入巴音沟蛇绿岩, 其中规模最大的一个侵入体是四棵树岩体, 具有“钉合岩体”的构造意义, 花岗闪长岩(316 ± 3) Ma、二

长花岗岩(314.9 ± 4.1) Ma 和钾长花岗岩(311.5 ± 3.9) Ma 的锆石 U-Pb 定年^[12]表明, 北天山的碰撞造山作用在 316 ~ 311 Ma(二叠纪中期)结束, 至晚二叠世一直处于后碰撞断陷阶段。由此判断, 晚石炭世之前车排子地区处于残留洋阶段, 为岛弧或地体, 并沉积大量的火山物质, 晚石炭世一二叠纪车排子凸起初始发育。

3.2.2 持续隆升阶段(T-J)

三叠纪时期, 研究区继承了晚二叠世的构造特征,

在强烈挤压逆冲的基础上,构造活动强度有所减弱,但隆升活动持续进行,使二叠纪末期的构造格局进一步强化。红车断裂此阶段继续逆冲活动,并在其上升盘陆续出现新的逆冲断层,进而控制了车排子凸起的持续性隆升。从地层展布来看,昌吉凹陷内三叠系—侏罗系稳定分布,而车排子凸起仅在冲沟内发育下侏罗统,指示车排子凸起在此阶段持续隆升(图4c)。

3.2.3 稳定埋深阶段(K—E)

到白垩纪时,整个准噶尔盆地西北缘的时空演化具有典型相似性。受燕山运动晚期的影响,白垩纪时,整个准噶尔盆地基本夷平,研究区缓慢而连续地接受沉积,白垩纪地层岩性、厚度稳定,覆盖了下伏各层系(图4b)。至古近纪,研究区保持了整体缓慢下沉的趋势^[13],构造线继承了前期的NE—SW向,仅岩性、厚度上略有差异。

3.2.4 局部伸展掀斜阶段(N—Q)

新近纪以来,受喜马拉雅运动影响,来自新特提斯构造域的强大挤压使北天山快速、大幅隆升,并向准噶尔盆地内冲断,产生巨大的构造载荷^[14-16]。此背景下,盆地南缘发生挠曲—下沉,使车排子凸起处于北天山—四棵树凹陷限定的再生前陆盆地斜坡上。受重力影响四棵树凹陷下陷,而车排子凸起局部发生伸展掀斜。将车排子凸起典型剖面局部放大分析可知,二叠纪—古近纪,地层平均掀斜角度为 2.7° ,掀斜速率为 $9.82 \times 10^{-3} (^{\circ})/\text{Ma}$;新近纪—第四纪,地层平均掀斜角度为 1.7° ,掀斜速率为 $7.14 \times 10^{-2} (^{\circ})/\text{Ma}$,是前一阶段的7.3倍(图4a)。

4 车排子凸起成因探讨

4.1 车排子凸起构造物理模拟实验

为更好地证实车排子凸起构造负反转的演化过程,并深入探讨其成因机制,笔者利用构造物理模拟实验进行正演模拟。构造物理模拟实验是短时间、小规模内再现自然界构造变形过程的一种方法,遵循相似性原则^[17-18]。如前所述,车排子凸起构造演化的地质要素包括:时间——晚石炭世至今;地点——车排子凸起;作用双方——车排子凸起与昌吉凹陷;动力来源——扎伊尔山和北天山相对运动产生的挤压和伸展应力场;演化过程——第一阶段(C_3 —E)为不同速率的持续冲断、隆升,第二阶段(N—Q)为伸展、沉降。因此,本文依据动力学相似性,结合研究区近东西向剖面A—A'(剖面位置见图1),设计如下实验。时间及演化阶段划分——依据物理模拟仪器参数将实验时间设定

为70 min,其中0~65 min模拟第一阶段的挤压构造环境,65~70 min模拟第二阶段的伸展构造环境。地点及作用双方——实验装置左侧铺设20cm厚的石英砂以模拟车排子凸起,右侧自下而上设置10cm厚的聚苯乙烯泡沫和10cm厚的石英砂以模拟昌吉凹陷(图6a)。岩石圈流变特征研究表明,盆地区的地壳“上弱下强”,而隆起区或造山带的地壳“上强下弱”^[19]。故当两侧砂体相互挤压碰撞时,能完成相似度较好的第一阶段挤压过程,即车排子凸起向昌吉凹陷的冲断作用。装置底部铺设弹性布带,当实验运行至第二阶段时,可用于带动左侧砂体整体拉伸,以实现第二阶段伸展过程,即车排子凸起的负反转变形。

实验砂体的整体尺寸为120 cm(长)×30 cm(宽)×20 cm(高),相似系数为 4.3×10^{-6} 。为便于观察实验过程中砂体的构造变形,实验模型采用黄色天然石英砂模拟地层,深色石英砂模拟地质界线,石英砂粒度 $\varphi = 0.3 \sim 0.4 \text{ mm}$,基底摩擦系数小于3。实验过程中,力源通过平流泵推动挡板加以实现,其中,第一阶段挡板推进的速度依次为 0.81 cm/min (0~17 min,相当于地质原型缩短位移率 2.91 m/Ma), 0.35 cm/min (17~39 min,相当于地质原型缩短位移率 1.20 m/Ma), 0.15 cm/min (39~65 min,相当于地质原型缩短位移率 0.29 m/Ma)。第二阶段挡板的后撤速度为 0.59 cm/min (65~70 min,相当于地质原型伸展位移率 0.43 m/Ma)。

实验历时70 min,再现了晚石炭世以来(327 Ma至今)车排子地区的构造演化过程,时间相似比为 4.67 Ma/min (图6b—f)。图6b为初始状态,实验进行至17 min时,对应晚石炭世—二叠纪(327~248 Ma),模型受挤压作用发育第一条逆冲断层①,倾向向西,倾角较陡(图6c)。39 min时,即三叠纪—侏罗纪(248~144 Ma),断层①西侧开始出现第二条逆冲断层②,产状与断层①基本一致;同时,逆冲断层西侧地层发生大幅度强烈隆升,车排子凸起的雏形已初步显现(图6d)。实验持续进行至65 min,对应古近纪末(23 Ma),剖面基本保持了前一阶段的构造特征(图6e)。自65 min开始,模型由双向挤压转为双向伸展,实验进行至70 min,剖面西部发育一条正断层③,断层规模较小,倾向与断层①、断层②相反,同时断层②开始发生构造负反转,上部由逆断距转为正断距,整体呈现“上正下逆”的构造特征(图6f),突出再现了研究区冲断—隆升后的构造负反转过程。实验至此结束,模拟结果较好地再现了车排子凸起晚石炭世以来的构造演化过程,断层①、②、③的演化序列及特征(图6b'—f')与前述构造演化分析结果(图4)极为吻合,从而为研究区成因机制的探讨提供了重要依据。

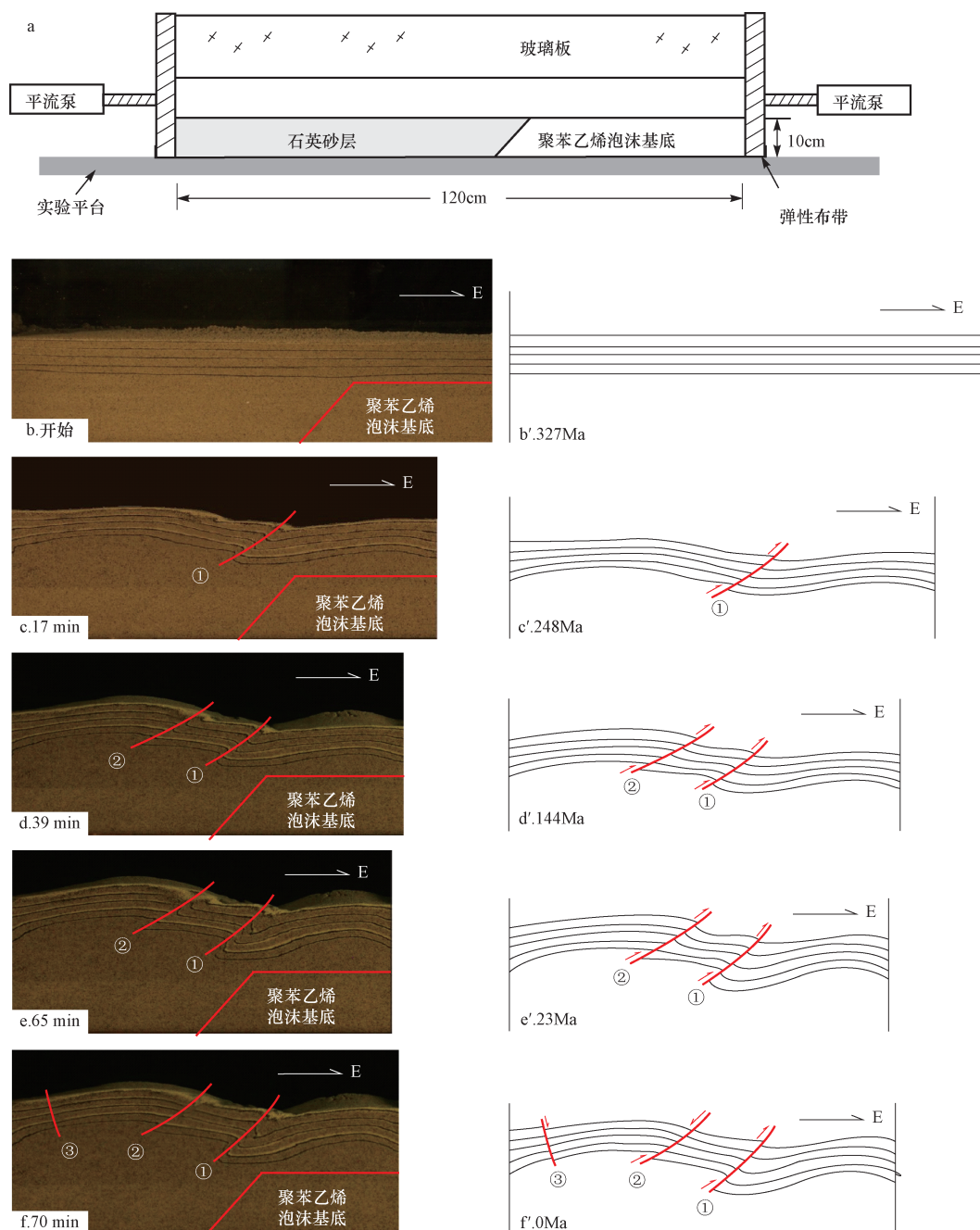


图 6 车排子凸起构造物理模拟实验

Fig. 6 Physical simulation of tectonics in Chepaizi Uplift

a. 实验条件示意图; b—f. 实验过程; b'—f'. 实验解释

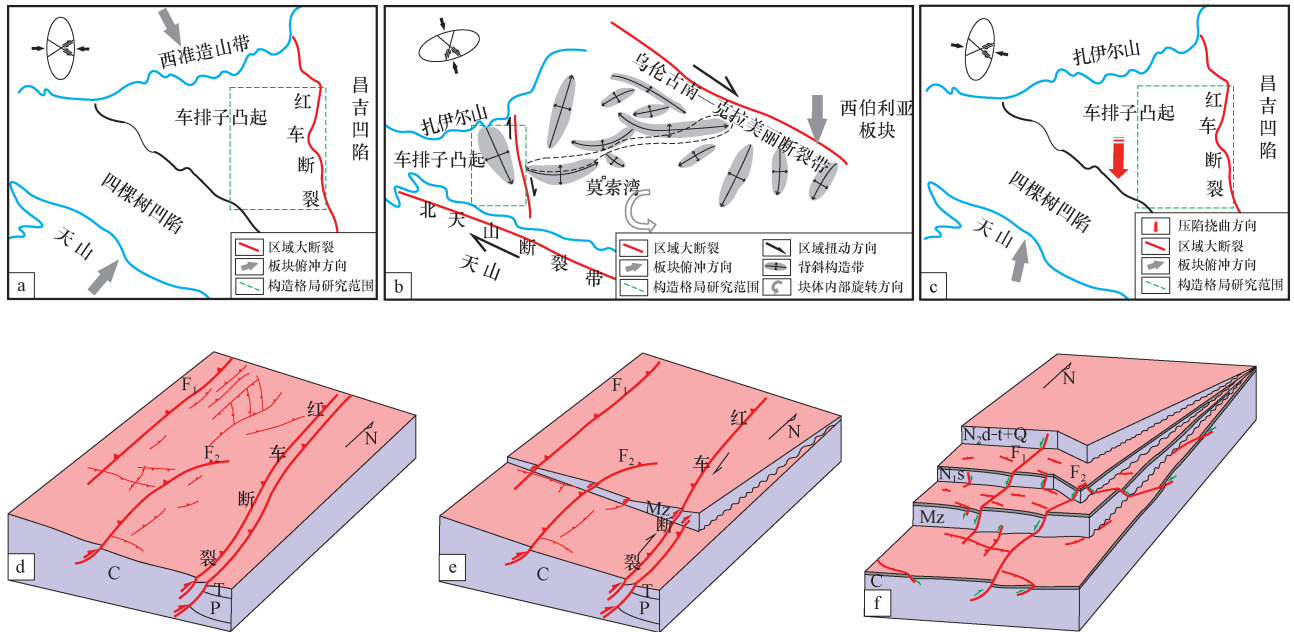
4.2 车排子凸起成因

依据前述的地震剖面解释成果及构造物理模拟实验分析,结合前人研究积累的资料,认为车排子凸起的形成与晚石炭世以来研究区及其邻区构造应力场的重大转变有着密切的成因关系。

早石炭世末,哈萨克斯坦板块与准噶尔地体在准西缘发生的陆—陆碰撞结束了洋—陆转换的板块构造机制,标志着陆内演化阶段的开始。其塑造扎伊尔山的同时,不断向南东挤压推覆。至晚石炭世,准噶尔南缘北天山—准噶尔洋的闭合使北天山向北东推覆,受

扎伊尔山与北天山的共同夹持,车排子地区发生自西向东的“构造逃逸挤压”(图 7a),并在其东部塑造一系列逆冲推覆断裂带。至此,深层断裂系统的雏形已基本形成,研究区构造线近 SN 向延伸(图 7d)。加之西准造山带强烈褶皱挤压的影响,车排子地区强烈隆升,并在昌吉凹陷形成前陆盆地。

受燕山运动中期的影响,至中侏罗世,车排子凸起及其邻区均进入压扭应力场环境。究其成因,NWW 向的北天山断裂、乌伦古南—克拉美丽断裂在这一时期发生右旋走滑活动,并兼具挤压性质^[2,20],从而产生大型的右行压扭应力场。车排子凸起伴生的背斜轴向

图7 车排子凸起 C_3 — Q 成因模式与构造格局变化Fig. 7 Genetic model and tectonic pattern changes of Chepaizi Uplift during C_3 - Q a—c. 车排子凸起 C_3 — Q 成因模式; d—f. 车排子凸起 C_3 — Q 构造格局

与红车断裂所成的锐夹角指示红车断裂具有典型的右旋走滑特征,控制车排子凸起不断隆升。其东侧邻区内一系列背斜轴向呈“S”型展布,与压性结构面一致(图7b)。压扭活动中,研究区“屈服”于前期的基底凸起,以其为“砥柱”继承性隆升发育。同时,受红车断裂右行压扭活动的影响,车排子凸起处于挤压逆冲楔顶部,受NW—SE向挤压,先期逆断层有的继承性持续发育(F_1, F_2),有的则发育一段时间停止发育,成为盲冲断层,地层从SE向NW发生沉积尖灭,区域构造线由近SN向开始向NE—SW向转变(图7e)。

白垩纪—古近纪,受燕山运动晚期的影响,研究区整体缓慢下沉,连续接受沉积,使白垩系—古近系岩性、厚度稳定,覆盖下伏各层系。进入新近纪,受喜马拉雅运动影响,新特提斯构造域的强烈挤压使北天山NNE向强烈隆升逆冲,将研究区整体置于北天山—四棵树凹陷前陆盆地的斜坡带上。巨大的构造负荷一方面使处于前缘的车排子凸起发生NNE向的局部伸展掀斜(图7c),同时诱发中—新生代地层中发育一系列NNW向正断层,并使前期逆冲活动的部分断层发生构造负反转(图7f)。至此,浅层断裂系统也发育完全,研究区内深、浅两套断层系统及其间的负反转断层已清晰可见。

5 结论

1) 准噶尔盆地车排子凸起自晚石炭世已开始发育,依次经历了强挤压—弱挤压—较弱挤压—弱伸展

的演化过程,其构造演化可划分为初始发育(C_3 — P)、持续隆升(T — J)、稳定埋深(K — E)和局部伸展掀斜(N — Q)4个阶段。

2) 构造物理模拟实验结果与车排子凸起的实际地质构造间具有良好的相似性,再现了研究区晚石炭世以来的构造演化及断层发育过程。深部断层系统在初始发育阶段(C_3 — P)产生,多为逆断层,且部分在持续隆升阶段(T — J)继承性活动;浅部断层系统则在局部伸展掀斜阶段(N — Q)大量发育,多为小规模正断层;同时先期逆断层部分发生负反转作用,发育一系列负反转断层。

3) 车排子凸起的构造演化与晚石炭世以来研究区构造应力场的重大转变有着密切的成因关系。 C_3 — P 时期,车排子地区受控于近EW向的挤压应力场,发生自西向东的“构造逃逸挤压”。 T — J 时期,受红车断裂右行压扭的影响,车排子凸起被置于挤压逆冲楔顶部的NW—SE向挤压应力场中,持续发生隆升。 K — E 时期,整体缓慢下沉,稳定埋深。至 N — Q 时期,车排子凸起处于北天山—四棵树凹陷前陆盆地的斜坡带上,巨大的构造负荷使其转为NNE向的伸展应力场环境中,发生局部伸展掀斜。受构造应力场控制,区域构造线经历了由近SN向到NE—SW向,再到近EW向的重要转变。

参考文献

- [1] 李晓君. 准噶尔盆地车—莫古隆起的发育演化特征及其对沉积的控制作用[J]. 油气地球物理, 2013, 11(1): 65—67.

Li Xiaojun. Features of the development and evolution of the Chemo

- palaeohigh of Zhunger Basin and its control on the sedimentation [J]. *Petroleum Geophysics*, 2013, 11(1): 65–67.
- [2] 何登发, 陈新发, 况军, 等. 准噶尔盆地车排子—莫索湾古隆起的形成演化与成因机制[J]. *地质学前沿*, 2008, 15(4): 42–55.
He Dengfa, Chen Xinfu, Kuang Jun, et al. Development and genetic mechanism of Chepaizi-mosuowan uplift in Junggar Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(4): 42–55.
- [3] 于福生, 阿木古冷, 杨光达, 等. 准噶尔盆地车—莫古隆起的构造演化特征及其成因模拟[J]. *地球学报*, 2008, 29(1): 39–44.
Yu Fusheng, Amu Guleng, Yang Guangda, et al. Tectonic evolution and mechanism analysis of Che-Mo Palaeo-uplift in Junggar Basin [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2008, 29(1): 39–44.
- [4] 纪友亮, 周勇, 况军, 等. 准噶尔盆地车—莫古隆起形成演化及其对沉积相的控制作用[J]. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40(10): 1342–1355.
Ji Youliang, Zhou Yong, Kuang Jun, et al. The formation and evolution of Chepaizi-mosuowan paleo-uplift and its control on the distributions of sedimentary facies in the Junggar Basin [J]. *Science in China (Earth Science)*, 2010, 40(10): 1342–1355.
- [5] 隋凤贵. 准噶尔盆地西北缘构造演化及其与油气成藏的关系[J]. *地质学报*, 2015, 89(4): 779–793.
Sui Fenggui. Tectonic evolution and its relationship with hydrocarbon accumulation in the northwest margin of Junggar Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(4): 779–793.
- [6] Buckman S, Aitchison J C. Tectonic evolution of Palaeozoic terranes in West Junggar, Xinjiang, NW China [J]. *Geological Society, London: Special Publications*, 2004, 22: 101–129.
- [7] 陈石, 郭召杰. 达拉布特蛇绿岩带的时限和属性以及对西准噶尔晚古生代构造演化的讨论[J]. *岩石学报*, 2010, 26(8): 2336–2344.
Chen Shi, Guo Zhaojie. Time constraints, tectonic setting of Dalabute ophiolitic complex and its significance for Late Paleozoic tectonic evolution in West Junggar [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(8): 2336–2344.
- [8] 辜平阳, 李永军, 张兵, 等. 西准达拉布特蛇绿岩中辉长岩 LA–CP–MS 锆石 U–Pb 测年[J]. *岩石学报*, 2009, 25(6): 1364–1372.
Gu Pingyang, Li Yongjun, Zhang Bing, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of gabbro in the Darbut ophiolite western Junggar, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(6): 1364–1372.
- [9] 佟殿军, 任建业, 任亚平. 准噶尔盆地车莫古隆起的演化及其对油气成藏的控制[J]. *油气地质与采收率*, 2006, 13(3): 39–42.
Tong Dianjun, Ren Jianye, Ren Yaping. Evolution of the Che-Mo palaeo-uplift in Junggar Basin and its control on the oil and gas reservoir. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2006, 13(3): 39–42.
- [10] 韩宝福, 季建清, 宋彪, 等. 新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长(I)——后碰撞深成岩浆活动的时限[J]. *岩石学报*, 2006, 22(5): 1077–1086.
Han Baofu, Ji Jianqing, Song Biao, et al. Late Paleozoic vertical growth of continental crust around the Junggar Basin, Xinjiang, China (Part I): timing of post-collisional plutonism. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(5): 1077–1086.
- [11] 徐学义, 李向民, 马中平, 等. 北天山巴音沟蛇绿岩形成于早石炭世: 来自辉长岩 LA–ICPMS 锆石 U–Pb 年龄的证据[J]. *地质学报*, 2006, 80(8): 1168–1176.
Xu Xueyi, Li Xiangmin, Ma Zhongping, et al. LA-ICPMS Zircon U-Pb dating of Gabbro from the Bayingou Ophiolite in the Northern Tianshan Mountains [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(8): 1168–1176.
- [12] 杨光华, 张炜波, 郭永峰, 等. 北天山四棵树人岗岩体锆石 U–Pb 年代学及地质意义[J]. *西北地质*, 2014, 44(5): 84–97.
Yang Guanghua, Zhang Weibo, Guo Yongfeng, et al. LA-ICP-MS Zircon U-Pb chronology and geological implications of Sikeshe stitching pluton in the North Tianshan Suture Zone, Xinjiang [J]. *Northwestern Geology*, 2014, 44(5): 84–97.
- [13] 金鑫, 陆永潮, 卢林. 准噶尔盆地车排子地区中、新生界沉降史分析[J]. *海洋石油*, 2007, 27(3): 51–56.
Jin Xin, Lu Yongchao, Lu Lin. Analysis of the Mesozoic-cenozoic subsidence history in Chepaizi Area, Junggar Basin [J]. *Offshore Oil*, 2007, 27(3): 51–56.
- [14] Allen M B, Windley B F, Zhang C. Cenozoic tectonics in the Urumqi-Korla-region of the Chinese Tian Shan [J]. *Geologische Rundschau*, 1994, 83: 406–416.
- [15] Bullen M E. Late Cenozoic tectonic evolution of the northwestern Tianshan: new age estimates for the initiation of mountain building [J]. *GSA Bulletin*, 2001, 113(12): 1544–1559.
- [16] Burchfiel B C, Brown E T, Deng O. Crustal shortening on the margins of the Tianshan, Xinjiang, China [J]. *International Geology Review*, 1999, 41: 665–700.
- [17] Ramberg H. Gravity, Deformation and earth's crust in theory, experiments and geological application [M]. London: academic press, 1981: 1–452.
- [18] 戈红星, Vendeville BC, Jackson MPA. 前陆褶皱冲断带厚皮缩短盐构造运动的物理模拟[J]. *高校地质学报*, 2004, 10(1): 39–49.
Ge Hongxing, Vendeville BC, Jackson MPA. Physical models of thick-skinned contractional salt tectonics in a foreland fold-and-thrust belt [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2004, 10(1): 39–49.
- [19] 刘绍文, 王良书, 贾承造, 等. 中国中西部盆地岩石圈热一流变学结构及其对前陆盆地成因演化的意义[J]. *地质学前沿* (中国地质大学(北京); 北京大学), 2008, 15(3): 113–122.
Liu Shaowen, Wang Liangshu, Jia Chengzao, et al. Thermo-rheological structure of continental lithosphere beneath major basins in central-western China: implications for foreland basin formation [J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(3): 113–122.
- [20] 何登发, 翟光明, 况军, 等. 准噶尔盆地古隆起的分布与基本特征[J]. *地质科学*, 2005, 40(2): 248–261.
He Dengfa, Zhai Guangming, Kuang Jun, et al. Distribution and tectonic features of Paleozoic-Uplifts in the Junggar Basin [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2005, 40(2): 248–261.

(编辑 董立)