

文章编号: 1006-6616 (2007) 03-0193-19

柴达木盆地新生代演化及其构造重建 ——基于地震剖面的解释

尹安¹, 党玉琪², 陈宣华³, 汪立群², 蒋武明²
蒋荣宝³, 王小凤³, 周苏平², 刘明德², 马立协²

(1. Department of Earth and Space Sciences, University of California, Los Angeles, California 90095-1567, USA;
2. 中国石油青海油田公司, 甘肃 敦煌 736202; 3. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

摘要: 柴达木盆地是青藏高原内部最大的拗陷。柴达木盆地构造成因的研究, 可以揭示青藏高原形成机制和生长历史。本文分析了柴达木盆地区域地震勘探剖面, 得到如下认识: 柴达木盆地一级构造为新生代宽缓复向斜, 其振幅和半波长分别从柴西的 $> 16\text{km}$ 和 $\sim 170\text{km}$ 变化为柴东的 $< 4\text{km}$ 和 $\sim 50\text{km}$ 。褶皱首先在柴西贴近阿尔金断裂附近形成 ($65 \sim 50.5\text{Ma}$), 并向柴东扩展 (23.3Ma)。复向斜的形成与较老的柴北缘逆冲断层系 ($65 \sim 50.5\text{Ma}$) 和较年轻的柴南缘逆冲断层系 ($35.5 \sim 23.3\text{Ma}$) 有关。盆地内部新生代上地壳缩短作用, 由柴西的 $> 48\%$, 向柴东减小到 $< 1\%$, 说明在柴西和柴东之间, 存在地壳加厚机制的渐进转换: 柴西主要为上地壳缩短, 柴东主要为下地壳缩短。

关键词: 地震反射剖面; 构造重建; 新生代; 柴达木盆地

中图分类号: TE121.1⁺1

文献标识码: A

0 引言

柴达木盆地构造变形与印度 - 欧亚板块碰撞作用具有密切的联系。有关柴达木盆地成因与新生代构造演化的构造模型, 主要包括新生代复向斜模式^[1]、跳跃式与澡盆充填模式^[2-5]、推拉门模式^[6]和自帕米尔向东挤出模式^[7]。为了检验这些模型, 本文系统分析了6条横穿柴达木盆地的地震反射剖面, 对柴达木盆地新生代变形与构造演化进行了分析与总结, 并对柴达木盆地新生代构造重建及其与青藏高原整体发育的关系进行了讨论。

近年来, 地质力学研究所在柴达木盆地进行了一系列天然地震层析成像和构造应力场研究^[8-10]。本文根据野外地质调查, 利用穿盆地地震剖面和柴北缘骨干地震剖面, 结合钻井资料, 编制了区域性地震 - 地质剖面, 探讨了盆地的结构特征和构造演化过程, 以期为盆地的油气勘探服务。本文共选取了6条穿柴达木盆地的剖面, 自西而东分别为 CDM-7、CDM-160、

收稿日期: 2007-08-27

基金项目: 国土资源大调查全国油气资源战略评价专项 (1212010633601) 和青海油田公司项目资助。

作者简介: 尹安 (1959-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事构造地质学和地质力学教学与研究工作。E-mail: yin @ess. ucla. edu。

CDM-200、CDM-246、CDM-330、CDM-392 (图 1)。

柴达木盆地新生代沉积地层主要分为 8 个地层单位。根据近年来古地磁和地层学研究的有关结果^[11]，本文给出柴达木盆地地层年代的综合配置方案为：路乐河组为古新世至早始新世 (65 ~ 50.5Ma)，下干柴沟组为中始新世 (50.5 ~ 35.5Ma；其中下干柴沟下段与上段的界线为约 43Ma)，上干柴沟组为晚始新世 - 渐新世 (35.5 ~ 23.3Ma)，下油砂山组为早中新世 (23.3 ~ 15.9Ma)，上油砂山组为晚中新世 (15.9 ~ 5.3Ma)，狮子沟组为上新世 (5.3 ~ 2.6Ma)，七个泉组为更新世 (2.6 ~ 0.01Ma)，达布逊盐桥组为全新世 (0.01Ma ~ 现在)。

前人认为，新生代以来柴达木盆地经历了连续的缩短变形，并具有两个相对快速变形阶段：42.8 ~ 40.5Ma 和 2.8Ma ~ 现在^[12]。本文研究显示，柴达木盆地新生代沉积作用自古新世 - 早始新世 (65 ~ 50.5Ma) 在全盆地同时开始，而盆地内部的变形作用是穿时的，自 65 ~ 50.5Ma 从盆地的西北部位开始，在 35.5 ~ 23.3Ma 的时候逐渐向盆地的南部和东部边缘扩展。

1 穿盆地地震剖面的构造解释

1.1 CDM-7 剖面 (柴西)

剖面位于盆地西部 (柴西)，剖面长约 48km (图 1)。剖面穿过尕斯库勒湖和油砂山复背斜的西南部。主要发育两套逆冲断层：1) 剖面南部发育南倾的逆冲断层系，将前侏罗纪基底逆冲到新近纪地层之上；2) 剖面北部发育北倾的逆冲断层系，将前侏罗纪基底逆冲到古近纪地层之上，在构造上处于南倾的逆冲断层系之下 (图 2a)。这两套断层均向下归并到深部发育的向南逆冲的北倾主逆冲断层之上，后者构成了主柴达木拆离断层。向南逆冲的北倾逆冲断层构成了主柴达木拆离断层的次级逆冲断层系，而一系列向北逆冲的南倾逆冲断层构成了主柴达木拆离断层的背冲断层系。主柴达木拆离断层向南延伸，在祁漫塔格形成一些向南逆冲的北倾逆冲断层。

剖面新生界变形总体上表现了具有后翼突破特征的基底卷入断弯褶皱，发育一系列断弯褶皱和断展褶皱。油砂山背斜是其中一个主要的断弯褶皱。尕斯库勒湖地区构成了油砂山背斜及其下部逆冲断层的前陆盆地。

1.2 CDM-160 剖面

剖面位于盆地北缘西段，穿过弯梁构造 (油砂山复背斜的东延)、斧头山构造、土疙瘩构造、红三旱四号构造、鄂博梁号构造、葫芦山构造和冷湖四号构造 (分别为图 2c 中至) 等，长约 173km，较好地反映了柴北缘西段地区新生代的构造变形特征和侏罗纪断陷盆地的特征 (图 1)。

整个剖面结构为一个在北东 - 南西方向上跨度超过 173km (即褶皱半波长) 的大规模复向斜 (即柴达木复向斜)，褶皱振幅为 > 16km (图 2c)。复向斜上部为宽广褶皱的上新世和第四纪地层，其下为古新世至中新世地层中发育的复杂收缩构造：剖面南段为向南逆冲的断弯褶皱系统，北段为被动顶板双重构造 (图 2c)。

南段的断弯褶皱系统中，主要发育弯梁构造，是一个典型的断弯褶皱，具有断坡背斜形态。斧头山构造为一个较为典型的断展褶皱，其相关的逆冲断层为一个背冲断层。土疙瘩构

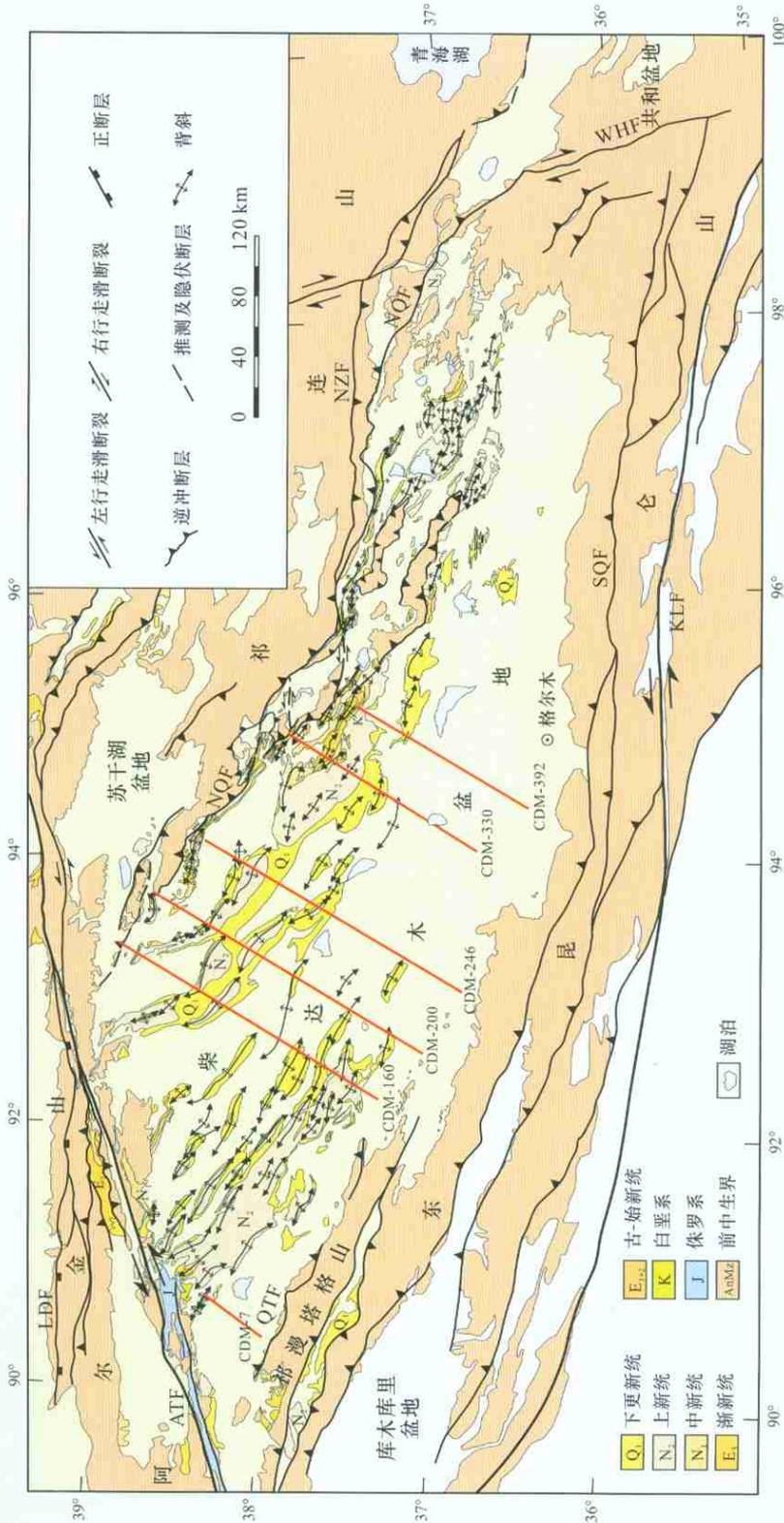
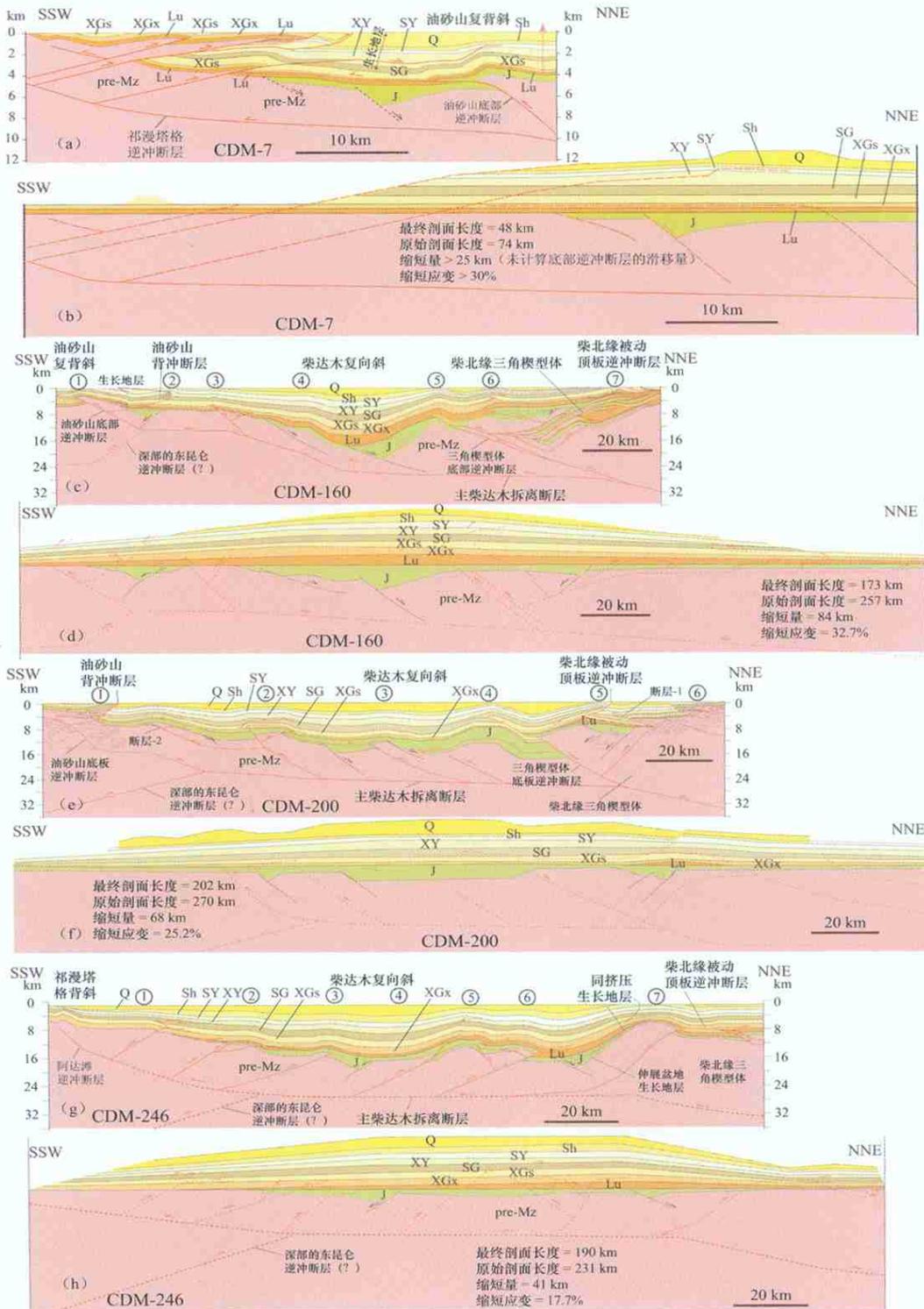


图1 柴达木盆地地质构造简图与6条穿盆地地震剖面分布

Fig.1 Geological sketch map of the Qaidam Basin and locations of six transect seismic lines

NZF-北宗务崆山断裂带; NOF-柴北缘断裂带; QTF-祁漫塔格北缘断裂带; SQF-柴达木南缘断裂带; KLF-昆仑断裂带; ATF-阿尔金山断裂带; WHF-哇洪山断裂带(温泉断裂带); LDF-拉配泉拆离断层。



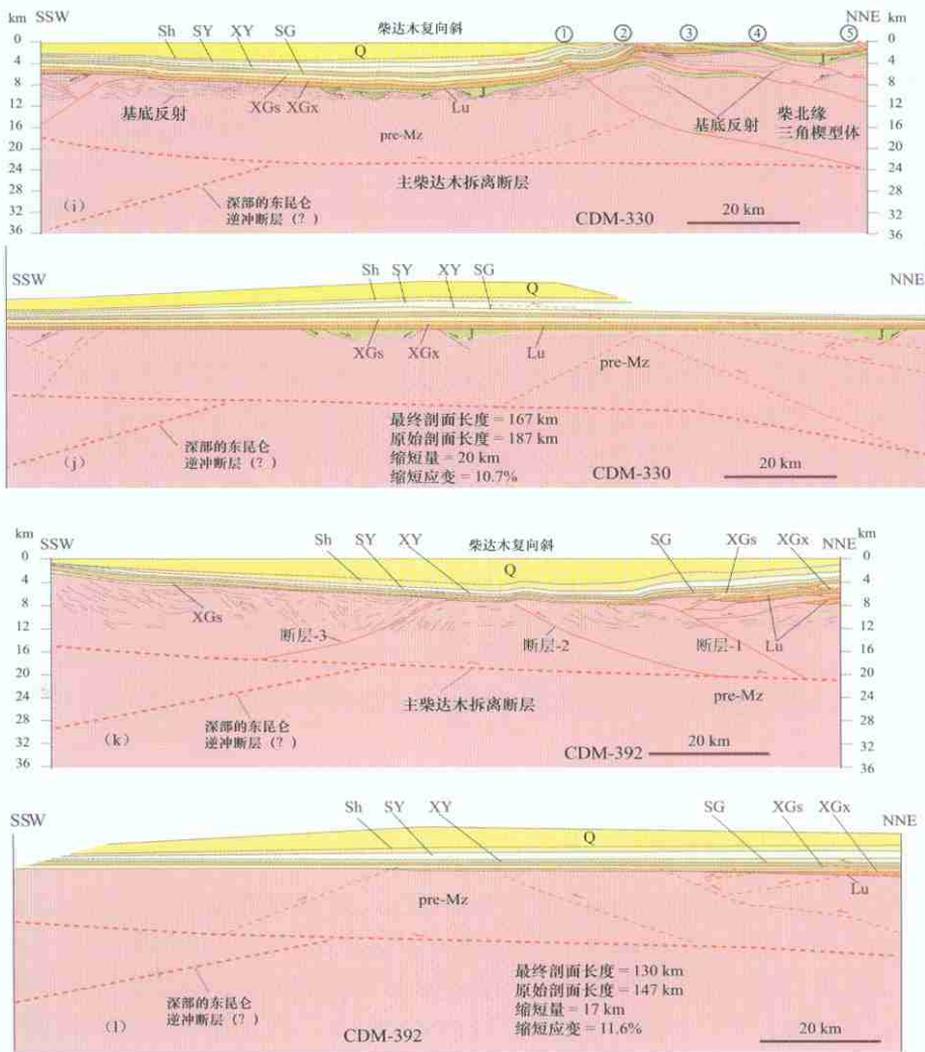


图 2 地震测线地质平衡剖面与恢复剖面

Fig. 2 Balanced geo-sections and restored sections of transect seismic lines

(a)、(c)、(e)、(g)、(i)、(k) 分别为 CDM7、CDM160、CDM200、CDM246、CDM330、CDM392 地震测线的地质平衡剖面；(b)、(d)、(f)、(h)、(j)、(l) 分别为 CDM7、CDM160、CDM200、CDM246、CDM330、CDM392 地震测线的地质恢复剖面。地层代号：Q-第四系；Sh-狮子沟组；SY-上油砂山组；XY-下油砂山组；SG-上干柴沟组；XGs-下干柴沟组上段；XGx-下干柴沟组下段；XG-下干柴沟组；Lu-路乐河组；J-侏罗系；pre-Mz-前中生界

造是一个发育程度不高的断展褶皱。油砂山背冲断层为一条盲断层，在一个断展褶皱的前翼之下尖灭（图 2c）；其最大滑移量为 2.5km。鄂博梁 号构造、葫芦山构造均为断展褶皱，鄂博梁 号构造下部发育向斜断弯褶皱。葫芦山背斜构造和斧头山背斜构造之下可能存在盐构造（图 2c）。剖面南段向南为祁漫塔格逆冲断层系，主要为向南仰冲的逆冲断层，构成柴达木盆地南界。

柴达木复向斜的南翼为北倾，可能是沿一个北倾南冲的逆冲断层的断坡发生运动的结果，也可以是深部的一个南倾逆冲断层（即推测的东昆仑逆冲断层）作用的结果（图 2c）。

剖面北段的柴北缘地区发育具有三角楔型体形态的构造楔（即柴北缘三角楔型体）和被动顶板双重构造。柴达木复向斜北翼的倾斜，正是柴北缘三角楔型体发育和演化的结果。冷湖四号构造为柴北三角楔型体的一部分，侏罗系 - 古近系被双重构造所重复，并在中生界与新生界之间发育拆离断层面，其上总体上发育拆离褶皱。柴北缘双重构造的逆冲断层前锋出露在柴北缘逆冲断层系之中。

考虑到剖面的平衡，可以用主要处在前中生界基底之中的基底逆冲断层（即主柴达木拆离断层；图 2c）来解释剖面上的新生代褶皱和逆冲断层。该剖面上，主柴达木拆离断层由三个断坡和两个断坪组成，南、北两个断坪分别处在约 12km 和 28km 深处。中地壳主柴达木拆离断层与前人给出的柴达木盆地收缩变形型式概念性模式^[13]非常一致。不同之处在于，本文提出的主柴达木拆离断层在基底中的几何形态比较复杂，而前人推测的拆离断层是一个简单的近水平滑脱面^[13]。

根据湿石英流变律^[14]，基底卷入的柴达木盆地逆冲断层可以向下归并到强度最弱的下地壳。或者，柴达木盆地可以是基性组分组成的，或者其下地壳缺乏流体活动，使得其具有足够的强度产生逆冲断层。

1.3 CDM-200 剖面

剖面位于研究区的西部、CDM-160 剖面以东约 40km，南起昆仑山前，北抵小赛什腾山，自南向北经过弯梁、船形丘、红三旱四号、鄂博梁 号、冷湖六号和驼南（分别为图 2e 中 至 ）等构造，呈北北东向延伸，长约 202km，是盆地西部的一条非常重要的剖面（图 1）。

剖面表现为一个大型的复向斜。与 CDM-160 剖面相比，CDM-200 显示的复向斜振幅较小（12km）、波长较宽。同时，柴北缘三角楔形体的特征也有所改变，北段主要为北倾南冲的逆冲断层系（图 2e）。

CDM-200 剖面油砂山背冲断层（也即塔尔丁断层）垂直视滑移量为 ~7km。与 CDM-160 相比，滑移量明显增长了 4.5km。CDM-200 剖面上，油砂山背冲断层出露地表，切过了整个新生代层序，而在 CDM-160 剖面上，它是一条盲断层。油砂山背冲断层也许可以向南追溯到东昆仑山之下，是主柴达木拆离断层之上的一个基底卷入的背冲断层（图 2e）。

剖面中部新生界近于水平；剖面南部地层为北倾，倾角较缓（图 2e）。与 CDM-160 剖面相似，本剖面上地壳变形与基底卷入的逆冲断层作用有关。这些逆冲断层均向下归并到一条具有两个断坪和三个断坡的基底拆离断层（即主柴达木拆离断层）中，其主要断坪处在 24 ~ 26km 深处。本剖面上显示的断坪明显地比 CDM-160 剖面上的长，说明柴达木盆地基底中逆冲断层断坡的延伸方向与逆冲断层运动方向之间为斜交关系。在东昆仑山和柴达木盆地南缘之下，可能存在一条位置较深的南倾逆冲断层（即东昆仑逆冲断层；图 2e）。

本剖面柴达木盆地南缘地区发育断弯褶皱。如，船形丘构造是一个由主柴达木拆离断层之上的前冲断层和背冲断层构成的箱状背斜。鄂博梁 号总体上表现为一个断滑褶皱（也称之为拆离褶皱）的形态，后期（第四纪）发育断展褶皱。柴北缘发育三角楔形体构造，冷湖六号被一个背冲断层所突破，其下部存在一个较大的三角形构造楔。驼南地区由一系列的向南逆冲断层构成叠瓦状构造。

1.4 CDM-246 剖面

剖面位于 CDM-200 以东，南起昆仑山前，自南向北主要穿过塔尔丁、那北、船形丘、一里坪凹陷、鸭湖、伊克雅乌汝、冷湖七号（分别为图 2g 中 至 ）等构造，呈北北东向

延伸,长约190km,是盆地中部非常重要的一条剖面(图1)。

与 CDM-200 截然不同,本剖面占主导的是向北冲的逆冲断层,而不是南冲的逆冲断层。其中一条最显著的向南冲的逆冲断层就是柴北缘被动顶板逆冲断层,向下切过了基底,向上进入到下干柴沟组下段,其最大视位移为 $<2\text{km}$ (图2g)。其它向南逆冲的逆冲断层,有的消失在断展褶皱^[15]之中,有的消失在断弯褶皱^[16]之中。

与 CDM-160、CDM-200 类似,本剖面一级构造为一个大的复向斜,褶皱振幅为 $\sim 10\text{km}$,稍小于 CDM-200 上的 $\sim 12\text{km}$,而比 CDM-160 上的振幅($>16\text{km}$)要小很多。穿过新生代地层底部的单个断层的垂直视滑移量一般为 $<2\text{km}$,不可能用来解释振幅达 10km 的柴达木复向斜的成因。因此,只有用柴达木盆地南部中、下地壳的深部逆冲断层或者透入性的收缩作用来解释柴达木复向斜构造高差的成因。在柴北缘,可能存在一个北倾的中地壳逆冲断层断坡,它相当于 CDM-160、CDM-200 剖面上柴北缘三角楔形体的底板逆冲断层(图2g)。

其它南倾的逆冲断层,可能会归并到向南冲的基底逆冲断层(主柴达木拆离断层)之上。一种解释是,东昆仑逆冲断层可能处在主柴达木拆离断层的下盘,主柴达木拆离断层和与其逆冲方向一致的向南前冲断层系的位置总体上比较深,是基底卷入型构造。另一种解释,则是将其它一些南倾的逆冲断层归并到东昆仑山之下的南倾北冲的逆冲断层(即东昆仑逆冲断层)之中,这时,柴达木盆地地壳向东昆仑山之下俯冲(在北缘也向祁连山之下俯冲),主柴达木拆离断层的剪切运动方向为上盘指向北。这两种情况都需要一个深度为 $\sim 26\text{km}$ 的近水平拆离断层的存在,但不需要在柴达木盆地的南缘出露一条南倾的盆地边界逆冲断层。

自西南而东北,本剖面断展褶皱和断弯褶皱越来越发育。柴北缘发育的褶皱构造型式主要为断展褶皱,如冷湖七号构造。断展褶皱的发育与主柴达木拆离断层之上的向北逆冲的背冲断层有关。

柴北缘发育有较大规模的推覆构造。沿着整个赛什腾山的南缘带,可以发现一系列的由古生界和元古宇构成的角度比较大的推覆构造。在 CDM-246 的延长线(大赛什腾山部分)上,赛什腾山南缘的上奥陶统滩间山群直接掩覆到新生界和中生界之上,有较大距离的南北向缩短。深部有逐渐向赛什腾山北部加厚的侏罗系存在。该逆冲断层有可能为赛什腾山南缘的油气提供了较好的遮挡条件。

1.5 CDM-330 剖面

剖面位于 CDM-246 以东,经过驼峰山、东陵丘、无柴沟、北极星和尕丘(分别为图2i中至)等构造,呈北北东向延伸,长约 167km (图1)。本剖面显示的柴达木复向斜,具有更小的褶皱振幅($<5\text{km}$),显得更为宽缓(图2i)。

在剖面北段,柴北缘以基底卷入构造为特征,叠瓦状逆冲断层系以向南逆冲为主,发育一些小的背冲断层。而在剖面南段,柴达木复向斜轴部以南的侏罗系和新生界基本上没有变形。柴南缘北倾的昆北斜坡带的发育,可能是中地壳缓倾的逆冲断坡作用的结果。这一逆冲断坡,可能是与 24km 深处一个近水平的拆离断层(主柴达木拆离断层)相连的。

该剖面发育断弯褶皱和断展褶皱。东陵丘和无柴沟出露两个突破断展褶皱的正向突破断层,具有前缘突破特点。

1.6 CDM-392 剖面

剖面位于 CDM-330 以东,呈北北东向延伸,长约 130km (图1)。剖面上柴达木复向斜的振幅继续减小,变为 $3\sim 4\text{km}$ (图2k)。同时,该剖面也发育一些规模较小的断展褶皱。

剖面北段的柴北缘以基底卷入构造为特征, 逆冲断层系以向南逆冲为主, 发育一些小的背冲断层。如, 在柴达木复向斜的北翼之下, 发育两条向南逆冲的逆冲断层: 南边的逆冲断层 2 形成了一个断展褶皱, 而北边的逆冲断层 1 构成了一个小的三角带的底板逆冲断层 (图 2k)。从该剖面来看, 柴北缘逆冲断层系的发育可能具有后退式特征。

除了一条小的南倾的逆冲断层 (具有 100 ms 的垂直视滑移量) 之外, 剖面南段基本上未变形。柴达木盆地南部基底向北缓倾斜, 倾角在 $4^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 左右, 不能用南倾逆冲断层 (图 2k 中断层 3) 的活动来解释。正是基于这个考虑, 我们推断这里存在一个北倾的断坡, 其根部与 $\sim 21\text{km}$ 的主柴达木拆离断层相连接。如果柴南缘深部存在南倾的逆冲断层, 那么, 它将向上归并到主柴达木逆冲拆离断层之中 (图 2k)。

2 生长地层与变形时间的确定

2.1 CDM-7 剖面 (柴西)

本剖面在油砂山背斜的前翼发育了一套与逆冲断层有关的生长地层层序 (图 2a), 其形成开始于晚始新世 - 渐新世 ($35.5 \sim 23.3\text{Ma}$) 上干柴沟组沉积时, 在第四纪表现得更为明显。这说明油砂山背斜的形成开始于渐新世, 并一直持续到现在。

根据同褶皱生长地层沉积的时间, 尕斯库勒湖下部发育的北倾南冲逆冲断层开始活动的时间为晚始新世 - 渐新世, 逆冲断层活动持续到第四纪和现今。

2.2 CDM-160 剖面

本剖面整个柴达木盆地都有路乐河组沉积, 构成了柴北缘三角楔形体之上的生长地层 (图 2c)。这说明剖面北段的变形开始于 $65 \sim 50.5\text{Ma}$ 路乐河组沉积时。根据剖面南段的断弯褶皱和上干柴沟组生长地层发育的关系 (图 2c), 柴南缘的南冲逆冲断层开始活动的时间非常晚, 为 $\sim 35.5\text{Ma}$ 。

2.3 CDM-200 剖面

路乐河组只出现在本剖面北部一个背斜的顶部 (图 2e), 说明路乐河组沉积先于该背斜的形成。路乐河组在侧向上变薄并尖灭, 可能是早期向斜褶皱作用 (现已转变为背斜) 的结果。这说明, 剖面北部的变形可能开始于路乐河组沉积时 ($65 \sim 50.5\text{Ma}$)。或者, 路乐河组的变薄和尖灭也可以是路乐河组沉积之后的向斜褶皱作用和随后剥蚀作用 (将翼部剥蚀掉) 的结果。如果是后者, 那么, 柴北缘变形作用开始的时间就要晚得多了。

剖面中部下干柴沟组下段厚度, 要稍微大于剖面的南、北两侧, 说明在下干柴沟组沉积时发育一个宽缓向斜, 其褶皱振幅为 $< 1\text{km}$ 。沿着柴北缘三角楔形体基底逆冲断层的上盘倾向方向, 由于下干柴沟组厚度没有改变, 因此, 柴北缘三角楔形体构造的启动应该晚于下干柴沟组下段沉积时间, 即晚于始新世中期 (约 43Ma)。

下干柴沟组上段厚度变化更为明显, 在柴达木复向斜的核部增厚, 而在复向斜的两翼部位变薄, 说明在下干柴沟组上段沉积时期 (约 $43 \sim 35.5\text{Ma}$), 复向斜的褶皱作用还在活动。剖面北部, 柴北缘三角楔形体基底逆冲断层的上盘, 下干柴沟组上段的厚度变化尤其明显 (图 2e), 说明柴北缘三角楔形体在下干柴沟组上段沉积时期 (约 $43 \sim 35.5\text{Ma}$) 开始形成。与 CDM-160 相比, CDM-200 剖面上主要变形作用的时间明显要晚得多。

柴北缘三角楔形体被动顶板逆冲断层启动的时间为上干柴沟组 ($35.5 \sim 23.3\text{Ma}$) 沉积时期。上干柴沟组地层厚度的显著变化说明了这一点: 在逆冲断层上盘, 地层厚度变薄, 而下

盘地层厚度显著增厚(图2e)。

被动顶板断层启动的时间,与归并到被动顶板断层的一个小的北倾逆冲断层(图2e中断层1)上发育的生长地层关系相一致。该断层下盘的上干柴沟组地层厚度大于其上盘的同一地层。这说明,图2e中断层1的活动与上干柴沟组沉积作用同时,因此,与之具有运动学联系的被动顶板断层的活动时间也是如此。

在油砂山背冲断层的两侧,没有发现下干柴沟组下段和上段地层厚度的变化,说明背冲断层的启动时间要晚于下干柴沟组下段和上段的沉积时间。

图2e中断层2的活动,开始于上干柴沟组(35.5~23.3Ma)沉积的时候,而且一直在活动。因此,油砂山背冲断层启动的确切时间,也应该是上干柴沟组(35.5~23.3Ma)开始沉积的时间,也即35.5Ma。

CDM-200剖面揭示,柴达木盆地新生代以来一直发育生长地层。而第四纪以来的构造变形最为剧烈,生长地层也最为发育。鄂博梁号、冷湖六号等一些主要构造,均主要形成于第四纪以来,或是在第四纪以来定形的。

2.4 CDM-246剖面

在柴达木盆地南缘的东昆仑山前,典型生长地层的发育是本剖面主要特征(图2g)。该剖面发育两套生长地层:一是路乐河组至下干柴沟组,另一是下油砂山组至第四系。第四纪以来存在构造运动的加速发展。

路乐河组在柴达木复向斜的核部最厚,在向南及向北方向上均变薄,还没到东昆仑山前就已经尖灭(图2g)。在柴北缘,由于柴北缘逆冲断层系的作用,在路乐河组之下发育柴北缘三角楔形体的被动顶板逆冲断层。这说明,柴达木复向斜和柴北缘三角楔形体的形成和发育均开始于路乐河组沉积时期(65~50.5Ma),与CDM-160相一致。阿达滩逆冲断层之上发育的背斜以及上干柴沟组(35.5~23.3)生长地层,说明本剖面南段变形开始的时间为35.5Ma,与CDM-160类似,较为年轻。

柴南缘上干柴沟组以来生长地层的发育说明,自上干柴沟组沉积时期以来,东昆仑山北部柴达木盆地基底向南逆冲运动所造成的地壳抬升运动的结果,形成了上干柴沟组以来的柴达木盆地南缘沉积,因此,渐新世或新近纪以来的柴达木盆地是东昆仑山内部存在的向南逆冲断层(即柴达木南缘断裂)之上的背驮式盆地。昆北斜坡带是柴达木南缘断裂向南逆冲作用的结果,而柴达木南缘断裂是主柴达木拆离断层在东昆仑山地区的出露。

2.5 CDM-330剖面

柴达木复向斜南、北两侧的生长地层具有不对称的箕状形态(图2i),反映了柴达木盆地是东昆仑山(柴达木南缘断裂)的背驮式盆地,也是柴北缘逆冲断层系的前陆盆地。

剖面上,路乐河组到上干柴沟组地层厚度在空间上的变化不明显。但是,从下油砂山组开始,一直到更年轻的地层,其地层厚度有向柴达木复向斜轴部增厚的趋势。这说明柴达木复向斜的褶皱作用可能开始于下油砂山组(23.3~15.9Ma)沉积以来(23.3Ma)。本剖面柴达木复向斜开始褶皱的这一年龄,明显地晚于由CDM-160和CDM-246得到的时间(65~50.5Ma),说明柴达木复向斜一直在向东扩展,可能在~23.3Ma到达本剖面所处位置。

本剖面也发育第四系生长地层,反映柴北缘第四纪抬升速率较高,柴南缘抬升速率较低。驼峰山一带是柴北缘逆冲断层系的前缘,第四纪以来发育较典型的生长地层层序。

2.6 CDM-392剖面

CDM-392剖面(图2k)上,年轻的新生代地层逐渐向南超覆较老的下伏地层。剖面最

北端, 路乐河组被下干柴沟组下段所超覆, 后者又被下干柴沟组上段所超覆。这说明, 柴达木盆地的沉积作用具有向南扩展的趋势。路乐河组、下干柴沟组下段和下干柴沟组上段的地层厚度向北逐渐增厚, 说明柴达木盆地是以北倾的柴北缘逆冲断层系为边界的前陆盆地。其中, 剖面附近出露地表的是北倾的锡铁山逆冲断层。

上干柴沟组 (35.5 ~ 23.3Ma) 向盆地的南、北两侧均有稍微增厚的趋势, 说明在其沉积过程中, 柴达木盆地发生了中间向上的挠曲变形。下油砂山组 (23.3 ~ 15.9Ma) 厚度没有明显的空间变化, 而上油砂山组 (15.9 ~ 5.3Ma) 和狮子沟组 (5.3 ~ 2.6Ma) 的地层厚度表现为向北增厚。这说明, 在上油砂山组和狮子沟组沉积过程 (15.9 ~ 2.6Ma) 中, 柴达木盆地在垂向上逐渐发生了向北的倾斜。

此外, 本剖面一个显著的特征是发育巨厚的第四系生长地层。柴达木复向斜的核部, 第四系厚度最大, 向南、北两侧有变薄的趋势。这说明, 在过去 2.6Ma 以来, 柴达木复向斜仍在继续活动和发育, 并可能一直持续到现今。

柴达木复向斜南、北两翼第四纪地层 (包括七个泉组及其上部地层) 的厚度具有非常不同的变化趋势。在南部, 第四系厚度的变化非常缓慢。而在北部的柴北缘, 剖面上第四系厚度的变化非常迅速。这反映柴北缘第四纪山系的抬升速率较高 (柴北缘逆冲断层系作用的结果), 而柴南缘山系的抬升速率较低 (与东昆仑山驮着柴南缘盆地向南逆冲有关)。驼峰山一带是柴北缘逆冲断层系隐伏逆冲断层的前缘, 第四纪以来发育较典型的与断展褶皱有关的同构造生长地层层序。

根据柴达木复向斜生长地层具有的箕状不对称形态特征, 本文推断, 从上油砂山组沉积开始, 柴达木盆地 (柴达木复向斜) 是东昆仑山 (柴达木南缘断裂) 的背驮式盆地, 也是柴北缘逆冲断层系的前陆盆地。柴北缘第四纪构造运动比较剧烈, 是一个快速隆升时期。

在柴北缘, 除了第四纪地层, 所有其它的新生代地层在柴北缘三角楔形体之上的变化都比较小。因此, 柴北缘三角带和三角楔形体的最后定型应该在第四纪, 与柴达木复向斜的形成和定型同时。

总之, 本剖面反映的生长地层关系, 说明了柴达木盆地发育和演化具有 5 个阶段: 1) 古新世 - 始新世中期 (65 ~ 35.5Ma), 长时期的向北倾斜; 2) 始新世晚期 - 渐新世 (35.5 ~ 23.3Ma), 上拱挠曲; 3) 中新世早期 (23.3 ~ 15.9Ma), 构造运动相对平稳期, 盆地的倾斜和变形较弱; 4) 中新世晚期 - 上新世 (15.9 ~ 2.6Ma), 盆地再一次向北倾斜; 5) 更新世以来 (2.6Ma 至今), 柴达木复向斜和柴北缘三角楔形体最终形成。

3 应变与应变速率

平衡剖面恢复 (图 2b) 得到 CDM-7 剖面地壳缩短的总缩短量 > 25km, 由此计算的地壳缩短应变为 > 30%。该计算结果没有考虑推测的基底逆冲断层上的滑移量。由于 CDM-7 剖面还没有真正到达油砂山背斜, 因此, 柴达木盆地西部南北向穿过盆地的应变要远远大于 CDM-7 剖面所得到的应变, 估计为 > 48%。由此估算, 上干柴沟组开始沉积 (35.5Ma) 以来, 柴西地壳缩短的平均应变速率为 $4.3 \times 10^{-16} \text{ s}^{-1}$ 。

根据路乐河组的线平衡, 得到 CDM-160 剖面上的地壳缩短量为 84km (图 2d), 缩短应变为 32.7%。根据应变开始时间的跨度 (65 ~ 50.5Ma), 计算得到平均应变速率为 $1.6 \sim 2.05 \times 10^{-16} \text{ s}^{-1}$ 。

CDM-200剖面(图2f)总的地壳缩短量为68km,由此计算的总缩短应变为25.2%。由于变形的大部分集中在35.5Ma以来,由此计算的平均应变速率为 $2.25 \times 10^{-16} \text{ s}^{-1}$ 。

根据下干柴沟组下段地层进行线平衡,计算得到CDM-246剖面(图2h)地壳总缩短量为41km。由此计算的总缩短应变为17.7%。由于应变的形成是从65~50.5Ma开始的,据此估算,平均应变速率为 $0.87 \sim 1.1 \times 10^{-16} \text{ s}^{-1}$ 。

CDM-330剖面(图2j)总的地壳缩短量为20km,由此计算的地壳缩短应变为10.7%。根据23.3Ma的时间跨度,估算得到平均应变速率为 $1.46 \times 10^{-16} \text{ s}^{-1}$ 。

CDM-392剖面(图2l)总的地壳缩短量为17km,总的地壳缩短应变为11.6%。与剖面CDM-160及CDM-330相比,该缩短量相对较小。不过,由于变形的时间主要集中在大约2.6Ma以来,因此,计算得到的平均应变速率相对较大,为 $1.41 \times 10^{-15} \text{ s}^{-1}$ 。

4 中生代构造与变形

CDM-7剖面(柴西)侏罗系只局限地出现在该剖面北部(图2a)。剖面上给出了两条北倾的正断层。南边的一条具有>1.5km的正滑移量,北边的正断层具有约2km的正滑移量。与这两条正断层相伴,形成了两个“半地堑”构造。

CDM-160剖面 侏罗纪沉积地层十分不连续,厚度变化较大,半地堑生长地层特征明显,盆地的边界为一些伸展断层,断层正滑移量在2km到9km不等。由于在某些伸展断层上,侏罗纪地层直接沉积在前侏罗纪基底之上,因此,以上估计的正滑移量可能仅仅是最小值(图2c)。

CDM-200剖面 侏罗纪构造表现为一个对称的地堑,侏罗系在地堑内部具有最厚的厚度,在地堑之外为最薄。由于侏罗纪伸展断层一般地与后来的逆冲断层倾向相反,早期的伸展断层没有被后来的逆冲断层活化而反转(图2e)。

CDM-246剖面 中部发育一个地垒构造,其边界为铲状正断层(图2g),说明中生代发育侏罗纪断陷盆地。铲状正断层的正滑移量为3~4km。伸展断层之上呈扇形分布的生长地层非常明显。

CDM-330剖面 侏罗纪地层的分布局限在剖面北半段,不连续地分布在几个小的地堑之中(图2i)。伸展断层正滑移量在1km到4km之间。由于一些伸展断层将侏罗系直接覆盖在前侏罗纪基底之上,因此,伸展断层正滑移量的实际值可能会更大一些。

CDM-392剖面 由于始新统下干柴沟组在剖面北段尖灭(图2k),因此,北段可能存在过侏罗纪地层,但在后来构造运动中被剥蚀了。

5 柴达木盆地成因与新生代构造演化的再造

5.1 中生代、新生代变形特征与盆地性质

中生代变形特征 有的研究认为,柴达木盆地自侏罗纪开始发育至现在,一直处于挤压环境,是一个典型的压性盆地,中生代没有造成南北拉张的构造环境,不存在先张后压的演化历史^[17,18]。也有的研究表明,侏罗纪和白垩纪时,青藏高原南部和北部经历了多期伸展作用^[19~27]。

根据穿盆地震剖面的分析,本文认为柴达木盆地普遍发育中生代伸展构造。一般来说,

伸展构造表现为拆离断层, 切过侏罗纪地层的下部层位, 但是又被侏罗纪地层的上部层位所超覆。这说明, 伸展断层作用发生在早侏罗世。在各个穿盆地地震剖面上, 柴达木盆地的中生代伸展断层没有很好的对应关系, 说明伸展断层的走向延伸一般不会超过 40~50km。因此, 也不能仅靠几条穿盆剖面来确定侏罗纪伸展断层在平面上的走向。这也使得关于柴达木盆地中生代构造与新生代构造之间关系的讨论显得有些困难。

新生代变形特征 柴达木盆地南、北边界变形的穿时性, 以及走滑断层的不存在, 排除了柴达木盆地是从西边挤出到现今位置^[7]的可能性。在盆地北部边界上, 变形作用开始时间处在路乐河组 (65~50.5Ma) 沉积期间, 远远老于盆地南部边界上的开始时间 (即上干柴沟组开始沉积时, 约 35.5Ma), 不符合跳跃式高原生长模型^[2]的要求。本文分析说明, 柴达木盆地下部存在基底卷入的逆冲断层带^[13], 同时, 柴达木复向斜^[1]是盆地的一级构造特征。

柴达木盆地是如何从最初的构造型式演化到现今, 关系到整个青藏高原的演化。前人在所有关于柴达木盆地演化的模型中, 均推测柴达木盆地自最初形成以来, 一直保持着不变的边界构造^[1,2,7]。本文研究表明, 柴达木盆地南、北各部分变形作用的启动是穿时的。整个柴西盆地在 65~50.5Ma 开始的沉积作用, 是与柴北缘边界构造的启动同时发生的。但是, 盆地南界构造出现在 35.5Ma 之后。

前陆盆地与轴心盆地 前人注意到, 美国落基山中部的一些拉拉米盆地, 发育在一个大型的基底卷入逆冲断层带的上盘, 他们将这些盆地称为轴心盆地^[28]。这些盆地一般均处在两个对冲断层带之上的向形沟槽内^[29]。柴达木盆地的构造环境和等厚线型式与拉拉米轴心盆地类似, 而与典型的前陆盆地^[30]不同。在典型的前陆盆地中, 主要的沉积中心总是处在边界逆冲断层的前缘。而在柴达木盆地, 主要的沉积中心总是恒定地处在盆地的轴心, 远离盆地的边界逆冲断层带。

另外, 柴达木盆地也可以归入楔顶盆地^[31]之列, 因为它处在东昆仑山和祁连山逆冲断层带之上。由于东昆仑山与祁连山逆冲断层带开始活动的时间以及构造型式均有显著的不同, 这样一个简单的盆地分类可能会混淆盆地演化历史的复杂性。

5.2 柴达木盆地新生代构造再造

本文以地震测线 CDM-160 为例, 给出柴达木盆地新生代演化历史的再造结果 (图 3)。为简化起见, 本文假定侏罗纪 - 白垩纪地层厚度保持不变。古新世和早始新世 (65~50.5Ma), 柴北缘发育三角楔形体或三角带, 形成向南逐渐变小的楔形生长地层层序。中始新世 (50.5~35.5Ma), 通过被动顶板逆冲双重构造的发育, 三角楔形体继续生长, 生长地层层序进一步向南加厚。晚始新世 (35.5Ma) 之后, 由于向南逆冲的主柴达木拆离断层的发育, 柴达木复向斜开始发育, 并在柴南缘形成一个断弯褶皱。本文认为, 柴达木复向斜的形成不是地壳挠曲作用的结果, 而是褶皱两翼之下逆冲断层系发育的结果。在世界其它地区, 也有类似的盆地发育过程^[32,33]。

5.3 柴达木盆地变形作用与阿尔金断裂活动之间的关系

本文地震剖面构造解释与平衡的结果说明, 柴达木盆地地壳缩短应变与缩短量向东逐渐减小: 西端为约 35%, 中部为约 11%, 东部为 <1% (根据其它资料综合的结果) (图 4A)。应用这一结果, 本文再造了盆地南部边界相对于北部边界的原始位置。盆地南界的再造要求在盆地西北边界上产生大约 140km 的地壳缩短, 也即, 在切过盆地边界段, 阿尔金断裂滑移量要减少大约 140km (图 4B), 即从阿尔金断裂与盆地南界交汇点的大约 470km^[34], 减少到与盆地北界交汇点的大约 330km。

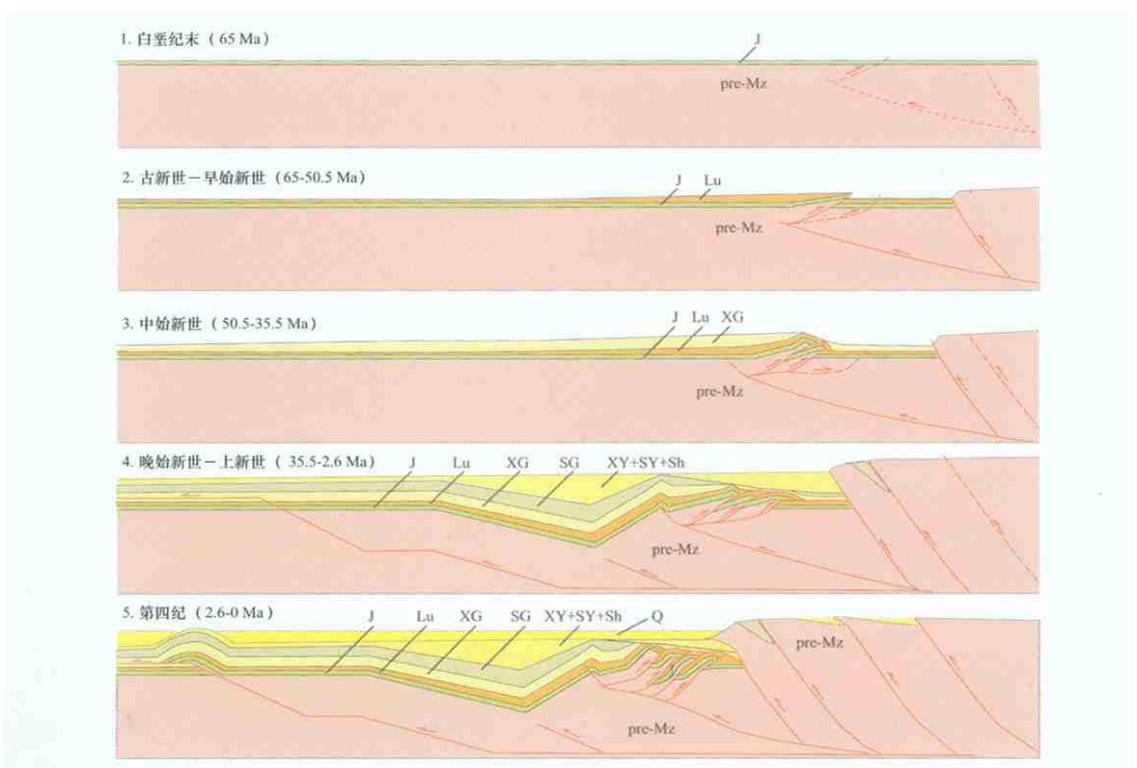


图 3 地震测线 CDM-160 平衡剖面的构造重建

Fig. 3 Restoration of balanced cross section CDM-160 showing 5-stage evolution

阶段 1, 白垩纪末 (65Ma); 阶段 2, 古新世 - 早始新世 (65 ~ 50.5Ma); 阶段 3, 中始新世 (50.5 ~ 35.5Ma); 阶段 4, 晚始新世 - 上新世 (35.5 ~ 2.6Ma); 阶段 5, 第四纪 (2.6 ~ 0Ma)。地层代号同图 2

柴达木盆地地壳缩短量的向东递减，也说明盆地南界相对北界发生顺时针旋转。假定东昆仑山脉为一个刚性块体，地壳缩短量的走向变化，要求其发生 > 12° 的顺时针旋转，而在盆地最西端要求有 > 170km 的地壳缩短。也即，阿尔金断裂与柴达木盆地北界交汇处的滑移量为 < 300km (图 4C)。

阿尔金断裂的活动，导致柴达木盆地新生代变形和沉积作用。变形和沉积作用首先发生在盆地西端，并逐渐向东传播。这说明阿尔金断裂在路乐河组沉积时 (65 ~ 50.5Ma) 开始活动^[3,6]。

5.4 上地壳变形与下地壳变形之间的关系

由于地形非常平坦，柴达木盆地 45 ~ 55km 厚的地壳厚度对空气重力均衡的影响可能会非常的小。由于晚白垩世地层为陆相沉积^[19]，因此，在印亚碰撞开始时，柴达木盆地地壳厚度可能为 > 32km。根据起始 (> 32km) 和最终地壳厚度 (按 45km 计算) 这两个边界条件，可以讨论柴达木盆地新生代演化过程中上地壳与下地壳变形作用之间的可能关系。

在柴西，> 48% 的上地壳缩短应变已经足以解释其地壳增厚。变形型式 (图 5A) 预示盆地西部的下地壳和地幔岩石圈在近南北方向上的延伸范围非常宽，可能部分俯冲在周边逆冲断层带之下。在柴东，上地壳缩短应变 (< 1%) 几乎可忽略不计，不足以解释现今地壳厚度和盆地演化。因此，盆地地壳增厚机制可能具有系统的变化：1) 柴西主要为上地壳缩短 (图 5A)；2) 中部为混合机制的上地壳和下地壳增厚 (图 5B)；3) 柴东主要为下地壳增

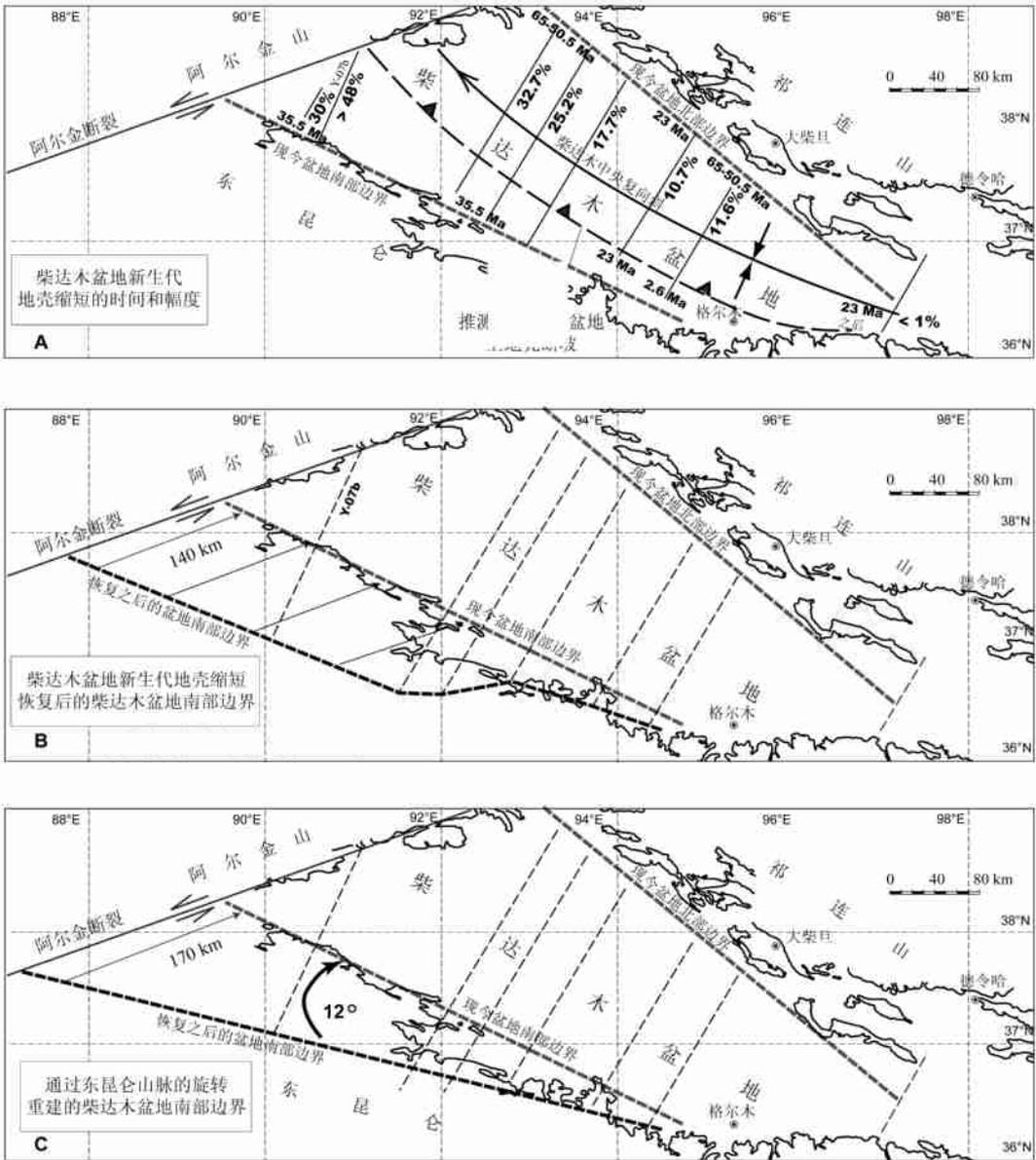


图 4 柴达木盆地缩短应变的分布与盆地南界的重建

Fig. 4 Summary of timing and shortening strain across the Qaidam basin and reconstruction of the southern Qaidam margin

(A) 柴达木盆地变形时间与缩短应变的分布; (B) 根据地壳缩短量进行的柴达木盆地南界的重建; (C) 根据东昆仑山的旋转进行的柴达木盆地南界的重建。

厚 (图 5C)。由于不存在上地壳变形, 柴东的下地壳增厚作用可以通过通道流^[35]或韧性逆冲断层作用来实现 (图 5D)。

地层厚度关系可以用来检验通道流变形机制。假如下地壳通道流导致的地表抬升速率大于沉积速率, 盆地边界将向盆地中心迁移, 产生盆退地层序列 (图 6A)。反之, 如果地表抬升速率小于沉积速率, 盆地边界将向外扩展, 产生盆进地层序列 (图 6B)。在整个新生代, 柴达木盆地南界可能经历了盆进过程, 说明其地表抬升速率要小于沉积速率。自 50Ma 以

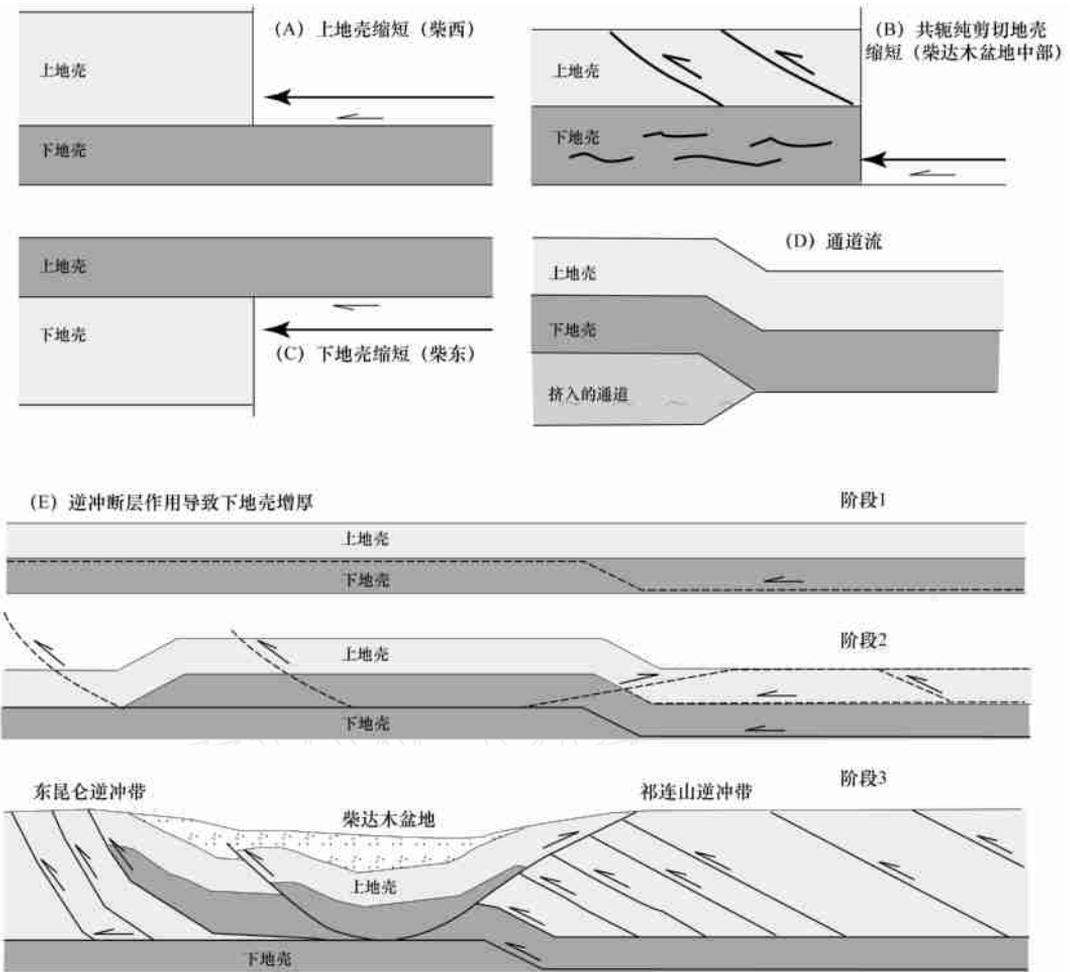


图 5 柴达木盆地上地壳变形与下地壳变形之间的关系

Fig. 5 Relationship between upper-crustal and lower-crustal deformations across the Qaidam basin

(A) 上地壳缩短、下地壳和地幔岩石圈俯冲形成的地壳增厚；(B) 下地壳纯剪切收缩形成的地壳增厚；(C) 下地壳缩短形成地壳增厚；(D) 通道流地壳增厚模式；(E) 下地壳逆冲重复导致的地壳增厚。

来，柴南缘新生代地层的总沉积厚度小于 5km，因此，地表抬升速率为 < 0.1 mm/yr。

前人注意到柴达木盆地岩石圈非常之刚性^[36]。如果由于缺乏流体，岩石圈强度主要集中在下地壳^[37]，那么，柴达木盆地可能不存在青藏高原普遍存在的下地壳流体。因此，柴东地区的地壳增厚作用更应该是下地壳逆冲重复的结果（图 5E）。根据主柴达木拆离断层几何形态，本文推测，柴东地区存在两个主要的逆冲断坡：北逆冲断坡切过了祁连山的下地壳；南逆冲断坡切过了东昆仑山的上地壳。为了解释地壳增厚作用的走向变化，那么，上地壳断坡还应该出现在柴达木盆地的对角（柴西北）方向上，使得柴东的下地壳缩短作用逐渐过渡到柴西的上地壳缩短作用。

6 结论

根据以上柴达木盆地穿盆地地震反射剖面的构造分析与平衡计算，得到如下结论：

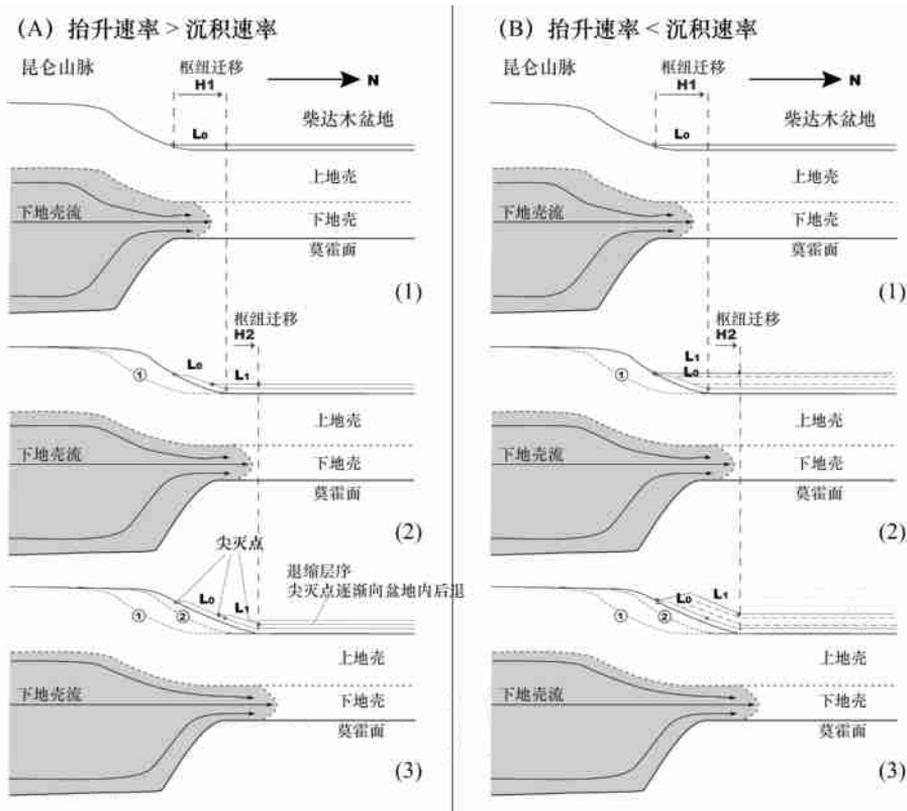


图 6 青藏高原北缘下地壳通道流导致的生长地层可能型式

Fig. 6 Possible growth strata patterns along the northern plateau margin due to lower-crustal channel flow

(A) 沉积速率小于抬升速率的盆退序列; (B) 沉积速率大于抬升速率的盆进序列。

1. 柴达木盆地一级构造特征为一个大型的新生代复向斜（即柴达木复向斜），其褶皱振幅向东逐渐减小：从西部的 > 16km，变为东部的 < 4km。同时，复向斜褶皱半波长也随之减小：从大约 170km 减小为大约 50km。伴随着褶皱振幅和半波长的减小，盆地南北跨度也向东减小：从西部的大约 400km 变为东部的大约 100km，说明了盆地的形成及地貌形态，与柴达木复向斜的发育具有非常密切的关系。生长地层关系说明，柴达木复向斜的轴线发生了向东的扩展：在路乐河组沉积（65 ~ 50.5Ma）期间，轴线主要处在柴西；而在新近纪（23.3Ma）之后，复向斜的轴线扩展到盆地的最东部。

2. 柴达木盆地新生代上地壳缩短应变和缩短量向东逐渐减小：从西部的 > 48%，变化为中部的 17.7%，以及东部的 < 1%。新生代应变速率变化范围为： $8.7 \times 10^{-17} \text{ s}^{-1}$ 至 $1.41 \times 10^{-15} \text{ s}^{-1}$ 。上地壳缩短应变的向东递减，说明地壳增厚机制的渐进过渡，从西部的上地壳缩短为主，逐渐变化为东部的下地壳缩短为主。

3. 柴北缘以被动顶板双重构造所形成的三角楔形体构造为主，柴达木盆地南缘以向南逆冲断层为主，它们通过一个沿地壳中部的拆离断层（即主柴达木拆离断层）连接起来。拆离断层的深度，从西部的大约 28km，向东逐渐减小为东部的大约 16km。上地壳断坡沿柴达木盆地的对角方向产出，与盆地主要构造线走向方向斜交。这一特定的断坡形态，使得柴达木盆地东西方向上地壳缩短机制的渐进变化成为可能。

4. 虽然古新世 - 始新世沉积同时出现在整个柴达木盆地, 盆地边界构造的开始形成却是穿时的。柴达木盆地的北界构造与路乐河组 (65 ~ 50.5Ma) 沉积作用同时, 而柴达木盆地南界构造的开始形成是在后来的上干柴沟组沉积 (35.5 ~ 23.3Ma) 期间。

5. 新生代柴达木盆地的开始形成和演化, 与新生代阿尔金断裂的活动之间具有非常密切的联系。盆地西部与阿尔金断裂交汇处的沉积和变形作用说明了这一点。盆地的变形和沉积作用逐渐向东扩展。

致谢: 感谢中国地质科学院地质力学研究所的长期合作和支持。中国石油青海油田公司提供经费支持、野外工作条件和后勤保障, Michael W. McRivette 和申玉山等参加部分野外和室内工作, 邓乃恭教授审阅并提出修改意见, 在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Bally AW, Chou FM, Clayton R, Eugster HP, Kidwell S, Meckel LD, Ryder RT, Watts AB, Wilson AA. Notes on sedimentary basins in China —Report of the American Sedimentary Basins Delegation to the People's Republic of China: U. S. G. S Open File Report 86 ~ 327, 1986, 108 pp.
- [2] Mévier F, Gaudemer Y, Tapponnier P, Meyer B. Northeastward growth of the Tibet plateau deduced from balanced reconstruction of two depositional areas: The Qaidam and Hexi Corridor basins, China [J]. *Tectonics*, 1998, 17: 823 ~ 842.
- [3] Meyer B, Tapponnier P, Bourjot L, Mévier F, Gaudemer Y, Peltzer G, Shunmin G, Zhitai C. Crustal thickening in Gansu-Qinghai, lithospheric mantle subduction, and oblique, strike-slip controlled growth of the Tibet plateau [J]. *Geophysical Journal of International*, 1998, 135: 1 ~ 47.
- [4] Tapponnier P, Xu Z, Roger F, Meyer B, Arnaud N, Wittlinger G, Yang J. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau [J]. *Science*, 2001, 294: 1671 ~ 1677.
- [5] Sobel ER, Hilley GE, Strecker MR. Formation of internally drained contractional basins by aridity-limited bedrock incision [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108, 2344, doi: 10. 1029/2002JB001883.
- [6] Yin A, Rumelhart P E, Butler R, Cowgill E, Harrison TM, Foster D A, Ingersoll R V, Zhang Q, Zhou X-Q, Wang X-F, Hanson A, Raza A. Tectonic history of the Altyn Tagh fault system in northern Tibet inferred from Cenozoic sedimentation [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2002, 114 (10): 1257 ~ 1295.
- [7] Wang E, Xu F-Y, Zhou J-X, Wan J, Burchfiel BC. Eastward migration of the Qaidam basin and its implications for Cenozoic evolution of the Altyn Tagh fault and associated river systems [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2006, 118 (3/4): 349 ~ 365.
- [8] 操成杰, 王小凤. 柴达木盆地近 SN 向构造形成机制与油气成藏意义 [J]. *地质力学学报*, 2005, 11 (1): 74 ~ 80.
- [9] 马寅生, 史大年, 安美建, 王小凤, 霍光辉, 李国歧, 尹成明, 张西娟, 施炜, 杜建军. 苏门答腊地震对柴达木地方震的触发作用 [J]. *地质力学学报*, 2005, 11 (2): 110 ~ 116.
- [10] 冯梅, 安美建, 王小凤, 马寅生, 蒋荣宝, 李丽. 青海狮子沟油田天然微地震活动及其地质意义 [J]. *地质力学学报*, 2007, 13 (2): 172 ~ 178.
- [11] Sun ZM, Yang Z, Pei J, Ge X, Wang X, Yang T, Li W, Yuan S. Magneto-stratigraphy of Paleogene sediments from northern Qaidam Basin, China: Implications for tectonic uplift and block rotation in northern Tibetan plateau [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 237: 635 ~ 646.
- [12] Zhou J, Xu F, Wang T, Cao A, Yin C. Cenozoic deformation history of the Qaidam Basin, NW China: Results from cross-section restoration and implications for Qinghai-Tibet Plateau tectonics [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 243: 195 ~ 210.
- [13] Burchfiel B C, Deng Q, Molnar P, Royden L H, Wang Y, Zhang P, Zhang W. Intracrustal detachment within zones of continental deformation [J]. *Geology*, 1989, 17: 448 ~ 452.
- [14] Chen WP, Molnar P. Focal depths of intracontinental and intraplate earthquakes and their implications for the thermal and

- mechanical properties of the lithosphere [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1983, 88: 4183 ~ 4214.
- [15] Suppe J, Medwedeff DA. Geometry and kinematics of fault-propagation folding [J]. *Eclogae Geologicae Helveticae*, 1990, 83: 409 ~ 454.
- [16] Suppe J. Geometry and kinematics of fault-bend folding [J]. *American Journal of Science*, 1983, 283: 684 ~ 721.
- [17] 姜洪训, 高焕章. 柴达木盆地北缘逆冲推覆构造及其含油气性研究 [M]. 西安: 西北大学出版社, 1989. 1 ~ 79.
- [18] Ritts BD, Biffi U. Magnitude of post-Middle Jurassic Baojocian displacement on the central Altyn Tagh fault system, northwest China [J]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 2000, 112 (1): 61 ~ 74.
- [19] 黄汉纯, 黄庆华, 马寅生. 柴达木盆地地质与油气预测 [M]. 北京: 地质出版社, 1996. 1 ~ 146.
- [20] Sobel ER. Basin analysis of the Jurassic-Lower Cretaceous southwest Tarim basin, NW China [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1999, 111: 709 ~ 724.
- [21] Vincent SJ, Allen MB. Evolution of the Minle and Chaoshui Basins, China: Implications for Mesozoic strike-slip basin formation in Central Asia [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1999, 111: 725 ~ 742.
- [22] Kapp PA, Yin A, Manning C, Murphy MA, Harrison TM, Ding L, Deng XG, Wu CM. Blueschist-bearing metamorphic core complexes in the Qiangtang block reveal deep crustal structure of northern Tibet [J]. *Geology*, 2000, 28: 19 ~ 22.
- [23] Kapp P, Yin A, Manning CE, Harrison TM, Taylor MH, Ding L. Tectonic evolution of the early Mesozoic blueschist-bearing Qiangtang metamorphic belt, central Tibet [J]. *Tectonics*, 2003, 22 (4): 1043.
- [24] Xia W, Zhang N, Yuan X, Fan L, Zhang B. Cenozoic Qaidam basin, China: A stronger tectonic inverted, extensional rifted basin [J]. *AAPG Bulletin*, 2001, 85 (4): 715 ~ 736.
- [25] Chen X, Yin A, Gehrels GE, Cowgill ES, Grove M, Harrison TM, Wang X. Two phases of Mesozoic north-south extension in the eastern Altyn Tagh range, northern Tibetan Plateau [J]. *Tectonics*, 2003, 22 (5), 1053, doi: 10. 1029/2001 TC001336.
- [26] 陈宣华, An Yin, George E. Gehrels, Eric S. Cowgill, Marty Grove, T. Mark Harrison, 王小凤, 杨农, 刘健. 青藏高原北缘阿尔金东段中生代南北向伸展作用 [J]. *地质力学学报*, 2004, 10 (3): 193 ~ 212.
- [27] Horton BK, Dupont-Nivet G, Zhou J, Waanders CL, Butler RF, Wang J. Mesozoic-Cenozoic evolution of the Xining-Minhe and Dangchang basins, northeastern Tibetan Plateau: Magnetostratigraphic and biostratigraphic results [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109, B04402, doi: 10. 1029/2003JB002913.
- [28] Dickinson WR, Klute MA, Hayes MF, Janecke SU, Lundin ER, McKittrick MA, Olivares MD. Paleogeographic and paleotectonic setting of Laramide sedimentary basins in the central Rocky Mountain region [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1988, 100: 1023 ~ 1039.
- [29] Yin A, Ingersoll RV. A model for evolution of Laramide axial basins in the southern Rocky Mountains, USA [J]. *International Geology Review*, 1997, 39: 1113 ~ 1123.
- [30] Jordan TE. Thrust loads and foreland basin evolution, Cretaceous, western United States [J]. *Bulletin of American Association of Petroleum Geologists*, 1981, 65: 2506 ~ 2520.
- [31] DeCelles PG, Giles KA. Foreland basin systems [J]. *Basin Research*, 1996, 8: 105 ~ 123.
- [32] Price RA. The Cordilleran foreland thrust and fold belt in the southern Canadian Rocky Mountains. In: *Thrust and Nappe Tectonics*, MP Coward, KR McClay (ed.), *Geol. Soc. Lond Special Publication*, 1981, 9: 427 ~ 448.
- [33] Yin A, Kelty TK. Structural evolution of the Lewis thrust system, southern Glacier National Park: Implications for the regional tectonic development [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1991, 103: 1073 ~ 1089.
- [34] Cowgill E, Yin A, Harrison TM, Wang X. Reconstruction of the Altyn Tagh fault based on U-Pb geochronology: Role of back thrusts, mantle sutures, and heterogeneous crustal strength in forming the Tibetan Plateau [J]. *J. Geophys. Res.*, 2003, 108 (B7), 2346, doi: 10. 1029/2002 JB002080.
- [35] Clark MK, Royden LH. Topographic ooze: Building the eastern margin of Tibet by lower crustal flow [J]. *Geology*, 2000, 28: 703 ~ 706.
- [36] Braitenberg C, Wang Y, Fang J, Hsu HT. Spatial variations of flexure parameters over the Tibet-Quinghai plateau [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 205: 211 ~ 224.
- [37] Jackson JA, Austrheim H, McKenzie D, Priestley K. Metastability, mechanical strength, and the support of mountain belts [J]. *Geology*, 2004, 32 (7): 625 ~ 628.

CENOZOIC EVOLUTION AND TECTONIC RECONSTRUCTION OF THE QIADAM BASIN: EVIDENCE FROM SEISMIC PROFILES

YIN An¹, DANG Yu-qi², CHEN Xuan-hua³, WANG Li-qun², JIANG Wu-ming²,
JIANG Rong-bao³, WANG Xiao-feng³, ZHOU Su-ping², LIU Ming-de², MA Li-xie²

(1. Department of Earth and Space Sciences and Institute of Geophysics and Planetary Physics,
University of California, Los Angeles, CA 90095-1567, USA;

2. Petroleum Research Institute of Qinghai Oilfield Company, PetroChina, Dunhuang, Gansu 736202, China;

3. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The Qaidam basin is the largest topographic depression inside the Tibetan plateau. Understanding the tectonic origin of the Qaidam basin has important implications for unraveling the formation mechanism and growth history of the Tibetan plateau. In this paper, the authors analyze regional seismic-reflection profiles across the basin. The first-order structure of the basin is a broad Cenozoic synclinorium, with an amplitude ranging from > 16 km in the west to < 4 km in the east. The fold axis propagated from the western Qaidam basin against the Altyn Tagh fault at 65-50.5Ma to the eastern basin at 23.3Ma; its half-wavelength changes from ~ 170 km in the west to ~ 50 km in the east. The formation of the synclinorium was induced by an older thrust system initiated at ~ 65-50.5Ma at the northern margin and a younger thrust system initiated at 35.5-23.3Ma at the southern margin. Cenozoic upper-crustal shortening decreases across the basin from > 48% in the west to < 1% in the east, suggesting a progressive shift in crustal thickening mechanisms across the Qaidam basin, from dominantly upper-crustal shortening in the west to dominantly lower-crustal shortening in the east.

Key words: seismic reflection profile; tectonic reconstruction; Cenozoic; Qaidam basin

(上接第 254 页)

change of vertical stress, (σ_v) of the mid-leading wall with construction are studied systemtically. The study indicates that: 1) asymmetrical excavation is the key cause of partial pressure in the mid-leading wall and the construction of the first and second lining can not ameliorate the conditions greatly; 2) under conditions of shallow embedment, vault displacement increases with embedment depth and displacement mainly happens during excavation of tunnel before lining construction; 3) after excavation of the up-bench tunnel, pulling stress concentrates around the top arch and lining should be constructed promptly or beforehand; 4) as a result of partial pressure, when plastic zones around the side-wall and mid-leading wall heel, which are near the mountain ridge, are better developed; and 5) when construction finished, compressive stresses at tunnel side-walls disappear and are transferred to the inverse arch and second lining, making them concentrated by shear stress and normal stress and improving the stability of the tunnel.

Key words: 3D numerical simulation; partial pressure; vault displacement; plastic zone; stress concentration