

# 走滑断裂、“挤压性盆—山构造” 与油气资源关系的探讨

许志琴<sup>1</sup>, 曾令森<sup>1</sup>, 杨经绥<sup>1</sup>, 李海兵<sup>1</sup>, 姜 枚<sup>1</sup>, 金之钧<sup>2</sup>, 郑和荣<sup>2</sup>, 郭齐军<sup>2</sup>

1. 中国地质科学院地质研究所大陆动力学部重点实验室, 北京 100037

2. 中国石油化工股份有限公司, 北京 100083

**摘要:** 了解含油气盆地的形成及其演化的影响因素对于含油气盆地的勘探和开发是至关重要的。以美国西部的圣安德烈斯断裂带及伴生的南加州油气盆地作为参考, 对中国青藏高原北部与阿尔金走滑断裂系相关的盆—山构造进行了剖析。探讨阿尔金走滑断裂系在其演化过程中, 怎样控制区域应力场、变形构造及盆地的形成, 进而制约油气的迁移和圈闭。分析结果表明与圣安德烈斯断裂带在美国南加州的盆—山构造体系所起的作用相比较, 阿尔金走滑断裂系在青藏高原北部的盆—山构造体系的形成和演化中起相似的作用。青藏高原相对于塔里木盆地的斜向运动导致在阿尔金走滑断裂的东南形成走滑—挤压构造域, 形成一系列的走滑和推覆构造, 在地形上表现为包括柴达木盆地在内的有序的盆—山相间的构造体系。与南加州富含油气的盆地相似, 阿尔金走滑断裂及相配套的走滑—逆冲推覆构造促使在这些盆地中形成富集油气的构造。

**关键词:** 走滑断裂; 挤压型盆—山构造; 油气资源。

中图分类号: P544

文章编号: 1000-2383(2004)06-0631-13

收稿日期: 2004-08-01

## Role of Large-Scale Strike-Slip Faults in the Formation of Petroleum-Bearing Compressional Basin-Mountain Range Systems

XU Zhi-qin<sup>1</sup>, ZENG Ling-sen<sup>1</sup>, YANG Jing-sui<sup>1</sup>, LI Hai-bing<sup>1</sup>, JIANG Mei<sup>1</sup>, JIN Zhi-jun<sup>2</sup>, ZHENG He-rong<sup>2</sup>, GUO Qi-jun<sup>2</sup>

1. Key Laboratory for Continental Dynamics, MLR, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. China Petroleum and Chemical Corporation, Beijing 100083, China

**Abstract:** Understanding the factors that affect the formation and evolution of petroleum-bearing sedimentary basins plays a critical role in the prospecting and exploitation of oil fields. The formation and evolution of the highly-order coastal and on-land petroleum-bearing Cenozoic basins and their bounding mountain ranges in southern California, USA were initiated and controlled by the San Andreas fault system, a large-scale plate boundary transform fault that separates the Pacific plate from the North American plate. The northeast oblique movement of the Pacific plate relative to the North American plate in conjunction with the big bend of the San Andreas fault in southern California produces intense contractional strain across the Transverse Ranges and leads to the formation of a series of fault and fold structures that shape the salient landscape of southern California. For comparison, we have conducted detailed structural analyses on the basin-mountain range systems in the northern Qinghai-Tibet plateau to discuss the role of the Altyn Tagh fault in (1) development of regional contractional stress field; (2) formation of structures and sedimentary basins; (3) generation of structures that facilitate the migration and capture of oil and gas. Results show that the Altyn Tagh fault has played a similar role in the formation of the spectacular basin-

**基金项目:** 国土资源部重点基础项目“东昆仑造山带的构造演化”、“祁连山—阿尔金山地质演化及岩石圈剪切作用”(No. 9501106); 国土资源部科技专项“青藏高原演化与资源”的课题“地体边界和岩石圈断裂对青藏高原形成的贡献”(No. 2001010201); 国家自然科学基金重点项目“祁连造山带的组成及造山过程”(No. 49732070)。

**作者简介:** 许志琴(1941—), 女, 留法博士, 研究员, 中国科学院院士, 长期从事大地构造学和构造地质学研究。

mountain systems to that of the San Andreas fault. The oblique convergence of the Qinghai-Tibet terrane relative to the Tarim basin resulted in the formation of transpressional tectonic regime to the southeastern of the Altyn Tagh fault. Such oblique convergence resulted in a series of strike-slip and thrust faults. As a consequence, the areas from the Kunlun Mountains to the Qilian Mountains form spectacular landforms characterized by alternations of basins and mountain ranges. For both cases of the southern California and the northern Qinghai-Tibet plateau, thrust faulting not only provides a viable mechanism for the migration of oil or gas, but also resulted in fault-propagation folds which serve as the favorable capture structure for oil and gas. One of the key factors that generate such a highly organized petroleum-bearing basin-mountain system is oblique convergence induced slip partitioning which results in the dextral horizontal slip along a major strike slip fault and vertical slip along numerous blind or exposed thrust faults.

**Key words:** strike-slip fault; compressional basin-mountain range system; petroleum resources.

## 0 引言

大型走滑断裂以其规模大、地震活动性强以及沿断裂带有有序的地貌(有序的起伏、伸长的隆起和盆地)吸引了众多地质及地球物理学家的注意力。自从 Sylvester 在 1988 年美国地质学会成立 100 周年之际全面详细评述走滑断裂在过去 100 年的研究历史和进展之后,又过去了 15 年。在这 15 年中,观测及实验技术(GPS、地震层析、深部地震反射和震中的定位)的进步,走滑断裂的研究在以下方面取得长足的进展:(1)走滑断裂的深部构造特征(Zhu, 2000);(2)走滑断裂与深部流(气)体的关系(Kennedy *et al.*, 1997);(3)走滑断裂的应变承载及分解机制(Kranzh, 1995; Jones, 2003);(4)走滑断裂的活动特征与地震活动的关系(Liu *et al.*, 2003; Liu *et al.*, 2004);(5)走滑断裂与其两侧的地形地貌的关系(Spotila *et al.*, 1998; Yule and Sieh, 2003)。在这些进展的基础上,很有必要重新审视大型走滑断裂与其两侧盆—山构造的关系,探讨它们在油气勘探中的意义。

走滑断裂在不同的构造环境下有以下几种产生:(1)板块或地体边界的走滑断层:如美国的圣安德烈斯断裂带、新西兰的 Alpine 断裂带(King, 2000)、土耳其的 North Anatolian 断裂带及我国阿尔金断裂带等;(2)斜向俯冲或碰撞造成的板内走滑断裂:如印度尼西亚的 Sumatra 断层;(3)不均一的俯冲作用导致的走滑断层:如中美洲的加勒比海和南美洲南端的 Scotia 海的南北两侧的走滑断层;(4)板内伸展或挤压作用导致的走滑断层:如美国西部的盆岭省(basin and range Province)中一系列北西向的连接低角度正断层的走滑断裂带。

根据走滑断裂与周缘的断裂带的关系,可区分

两种类型的走滑断裂:主动型走滑断裂和被动型走滑断裂。主动型走滑断裂是指主断裂两侧伸展或挤压构造受走滑断裂控制,这些断裂往往是板块或地体的边界断层,切穿岩石圈,可能为来自地幔或下地壳的深部流体提供有效的迁移通道;而被动型走滑断裂是指那些由于大规模的伸展或挤压作用,所形成的连接一系列正断层或逆冲断层的走滑断裂,其变形和运动特征受伸展或挤压作用控制。被动型走滑断裂实际上是伸展作用或挤压作用的应变承接带(accommodation zone),其作用是承载由伸展或挤压应变所造成的不同地块之间几何学上不相容的剪切应变。

最近的研究表明,由于复杂的板块边界及断裂带的相互作用,板块边界的变形往往表现为被滑移分解(slip partitioning)所控制,具体表现为一条或多条直立断裂为水平的走滑运动,而在这些断裂之间发育逆冲推覆断裂带(Jones, 2003)。同时,由于断裂带几何形态的不协调(如大拐弯)、板块的斜向运动促使大型板块边界走滑断裂带在区域上形成局部压扭性应力场。在这种压力场中,区域构造主要表现为以推覆构造所制约的盆—山构造体系,在区域上表现为盆地与高山相间的有序的盆—山体系。在逆冲推覆构造的上盘生成的一系列断层扩展褶皱,这些褶皱不但成为褶皱山,而且成为油气储存的有利构造。同时以频繁的地震活动为特征的活动断裂运动不但作为地幔或下地壳的流体和气体的通道(Kennedy *et al.*, 1997; Fuis *et al.*, 2001),而且为油气提供有利的迁移空间和动力。

本文首先简要地评述圣安德烈斯断裂带与南加州地区的含油气盆地的关系,进而详细的解剖我国西部阿尔金断裂南侧从昆仑山到祁连山之间的盆—山构造体系特征,强调走滑作用与挤压性盆—山构造的关系及油气的远景。

# 1 圣安德烈斯断裂带与挤压型盆—山构造

作为世界上研究程度最高的一条板块边界的走滑断裂带,圣安德烈斯断裂带在美国加利福尼亚州含油气盆地的形成及演化中起着举足轻重的作用.以位于圣安德烈斯断裂带西南的洛杉矶盆地为例,探讨走滑断层对含油气盆地的制约作用.

南加州的陆上及海岸地带分布着一系列构造相似的富含油气的新生代沉积盆地,其中规模较大的自南往北依次为:洛杉矶盆地、Santa Barbara-Ventura 盆地和 Santa Maria 盆地.洛杉矶盆地长约 300 km,宽约 110 km, Santa Maria 盆地长约 200 km,宽约 20~80 km, Santa Barbara-Ventura 盆地长约 240 km,宽约 90 km,后两个盆地的构造演化历史和洛杉矶盆地相似,并且这些盆地都具有丰富的陆上和近海油气藏.位于南加州的横向山脉(Transverse Range)和半岛山脉(Peninsular Range)之间洛杉矶盆地最大,储油量最丰,是世界上最富集石油天然气的区域之一,美国的第二大城市洛杉矶市就坐落于这个盆地之上.这个盆地在新近世形成,和圣安德烈斯断裂带的形成紧密相关,盆

地的中心沉积了高达 10 km 的海相及河流冲积相沉积物.自盆地形成以来,盆地经历了复杂的多旋回构造变形,表现为:(1)在渐新世和中新世期间,主要为伸展及走滑构造变形;(2)在晚新世和第四纪,圣安德烈斯断层在南加州地区的南北 2 个大转弯和太平洋板块的北东向的运动导致在南加州地区形成挤压构造变形域(图 1),大地变形表现为推覆和走滑断裂作用相结合的斜向缩短.这种变形在南加州的横向山脉区域及洛杉矶盆地内形成大量的地震活动频繁的低角度盲逆冲断层,在断层的上盘形成与盲逆冲断层相配套的断层扩展皱褶(Shaw and Shearer, 1999; Dolan *et al.*, 2003; Oskin *et al.*, 2000).这些部位成为美国石油公司(如 Conoco、Chevron、Union和 Exxon)竞相争取的油气勘探目标(图 2a).

从数字化地形图看,圣安德烈斯断裂带以西的南加州地区主要表现为错落有致的盆地与山脉相间分布.山脉的前沿往往为出露的或盲逆冲断层.自 20 世纪 70 年代以来,南加州地区频繁、高强度地震活动引起地质学家及地震学家研究盆地中蕴藏构造的兴趣.高精度地震定位、古地震、钻孔、详细的地质填图及深地震反射(南加州地震中心的 LARSE 研究项目)的研究(Fuis *et al.*, 2001; Shaw and Shearer, 1999)揭示出一系列盲逆冲推覆构造(图2).为简单

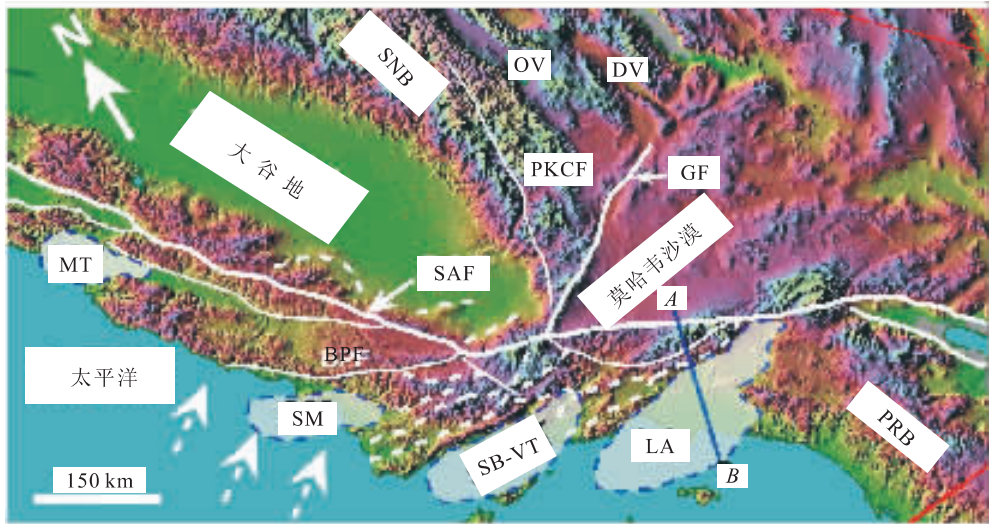


图 1 圣安德烈斯断裂带与南加州近海和陆上的含油气盆地及地貌简化示意图

Fig. 1 Simplified map showing the San Andreas fault and its adjacent costal and in-land petroleum-bearing Cenozoic basins in southern California, USA

SNB. Sierra Nevada 花岗岩岩基; PRB. 半岛山脉花岗岩岩基; SAF. 圣安德烈斯断裂; GF. Garlock 断裂; PKCF. 古 Kern Canyon 断裂; BPF. Big Pine 断裂; SM. Santa Maria 盆地; LA. 洛杉矶盆地; SB-VT. Santa Barbara-Ventura 盆地; MT. Monterey 湾盆地; A—B. 为相应于图 2 中的横穿洛杉矶盆地和 San Gabriel 山脉的剖面线. 实线为走滑断裂, 虚线为逆冲推覆断层, 带箭头的虚线为太平洋板块相对于北美板块的现今运动方向. 图中的大谷地为中生代的弧前盆地, 也是美国主要的油区之一

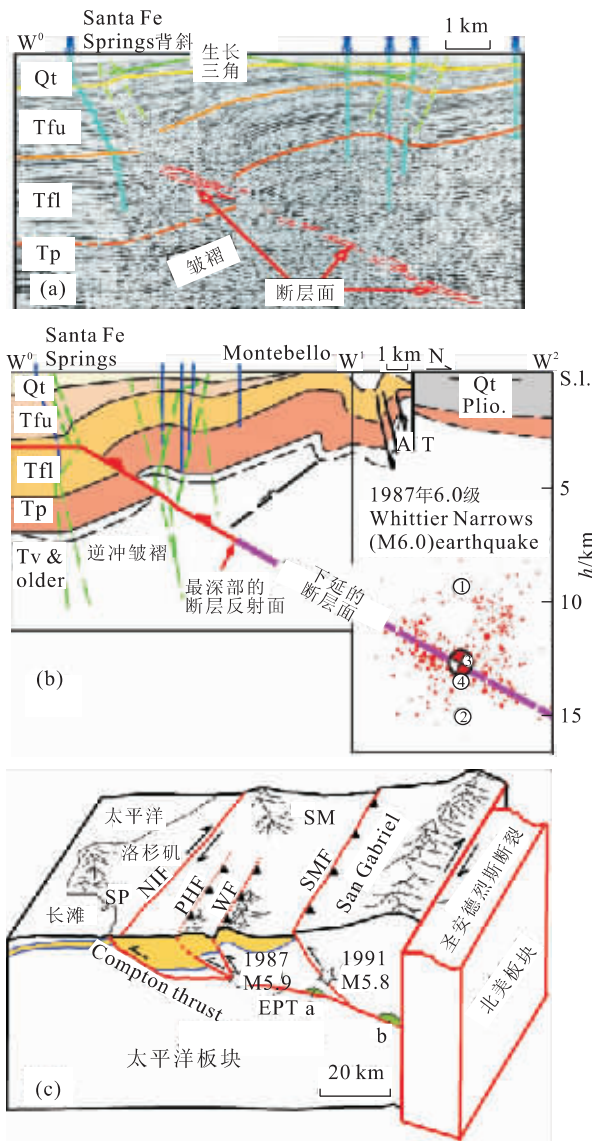


图 2 地震反射剖面、石油勘探及地震定位所揭示的洛杉矶盆地中一系列的盲逆冲推覆构造

Fig. 2 Blind and exposed thrust fault and fold structures revealed by seismic reflection profiling, oil-drilling and relocation of earthquake focus in the Los Angeles basin

a. 地震反射剖面及石油钻探揭示的盲逆冲推覆构造及断层生长褶皱(据 Shaw and Shreaer, 2000); b. 图 2a 中所揭示的逆冲断层向深部延伸和 1987 年 Whittier Narrows 地震发生所在的断面相吻合(据 Dolan *et al.*, 2003); c. LARSE 综合研究项目所确定的从南加州海岸线到 Mojave 沙漠的简化构造剖面(据 Fuis *et al.*, 2001 修改). NIF, Newport-Inglewood 走滑断层; EPT, Elysian Park 逆冲断层; WF, Whittier 逆冲断层; PHF, Puente Hills 逆冲断层; SMF, Sierra Madre 逆冲断层; SP, San Pedro 山脉; SM, Santa Monica 山脉; a 和 b 为地震反射所揭示的可能为液态物质的亮点, Qt, 第四纪沉积; Tfu, Tfl, Tp 和 Tv 为第三纪含油气沉积地层; Plio, 上新世; S. L. 为海平面

起见,我们在图中仅列出了规模较大的逆冲推覆构造. 图 2c 为从南加州海岸线到 Mojave 沙漠的简化构造剖面图,图中显示了 4 条分支逆冲断层(Compton, Puente Hills, Whittier 和 Sierra Madre)在深部汇聚于 Elysian Park 主逆冲断层(EPT)上,其中 1991 年和 1987 年的地震分别发生在 Whittier 和 Sierra Madre 逆冲断层上. 而 1994 年的 Northridge 6.7 级大地震也发生在位于洛杉矶北部的另一条盲逆冲断层上. 这些频繁的地震活动有可能造成局部应力场和断裂的开闭,为流体的迁移提供动力和空间. a 和 b 为地震反射所揭示的亮点,它们可能代表着沿逆冲断层迁移的流(气)体. 这些综合研究结果说明在走滑—挤压构造域中,油气田形成和演化、流(气)体的沿断裂带的分布和迁移、地震活动性与大型走滑断裂相关的挤压构造之间存在紧密关系.

概括地说,圣安德烈斯断裂带和太平洋板块的共同作用导致洛杉矶盆地的强烈缩短作用,发育一系列的盲逆冲断层,在这些断裂的上盘发育断层生长褶皱,在这些褶皱的核部形成褶皱山. 这种有序的挤压型盆—山构造体系是南加州主要的地形地貌特征,成为油气开发的主要目标.

## 2 青藏高原北部的走滑断裂与新生代挤压型“盆—山”构造

位于阿尔金走滑断裂、东昆仑走滑断裂及阿拉善地体之间的青藏高原的北部地区,出现一系列新生代盆地与山脉相间的地貌格局(图 3),类似于美国西部的盆岭省(basin and range province),但它们的构造背景却不同,美国西部的盆岭省是拉伸构造作用的产物,而青藏高原的北部的盆—山构造体系是挤压和走滑共同作用的结果. 在形成机制上青藏高原的北部的盆—山构造体系却与上述的美国南加州盆—山构造系相似,并且位于走滑断裂一旁的挤压盆地均为富含油气的盆地.

### 2.1 青藏高原北部的走滑断裂系

制约青藏高原的北部新生代盆—山体系发育的 3 条大型(上千 km 延伸)走滑断裂是: NEE—SWW 向阿尔金走滑断裂、近 EW 向的东昆仑走滑断裂及近 EW 向的海源断裂. 阿尔金走滑断裂与东昆仑走滑断裂和海源断裂斜交,它们均为左行走滑断裂. 这些大型左行走滑断裂的浅部及深部结构显示了如下

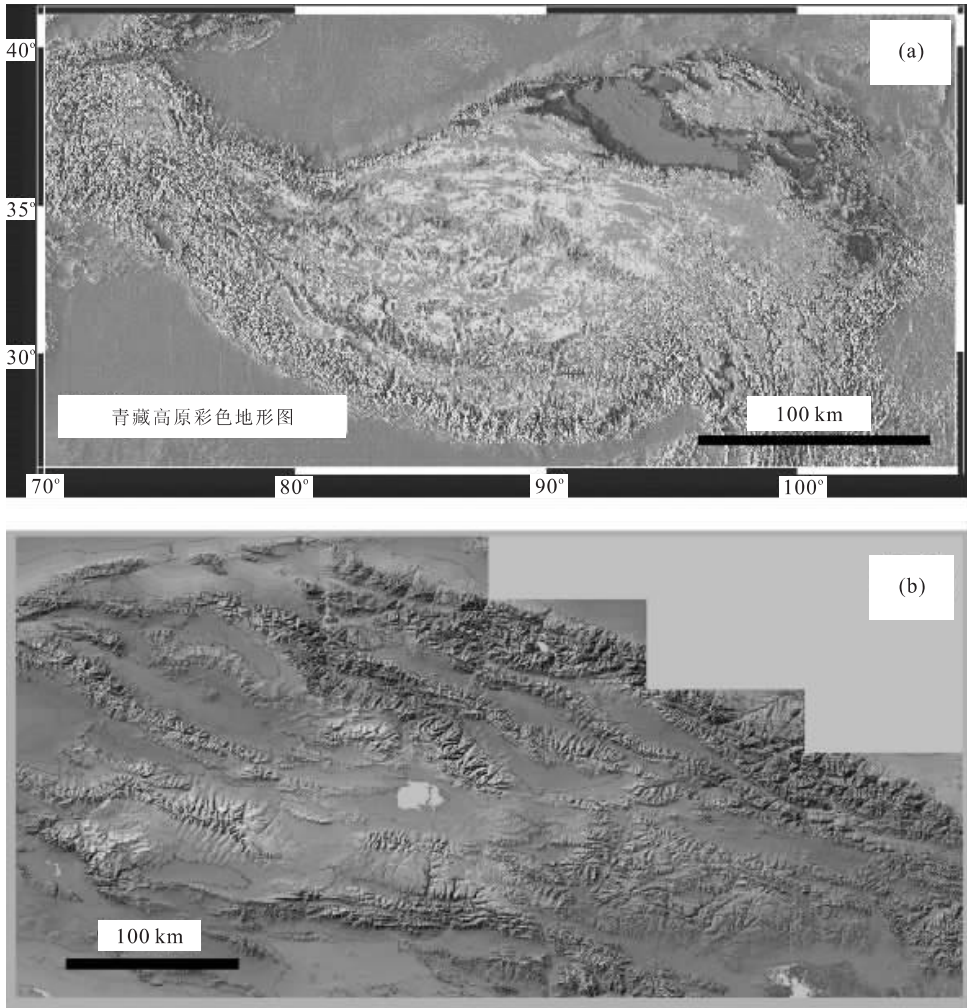


图 3 青藏高原(a)及柴达木盆地北缘到祁连山地区(b)的彩色数字地形图

Fig. 3 Color shade relief map of the Qinghai-Tibet plateau (a) and the areas from the northern margin of the Qaidam basin to the Qilian Mountain (b)

的特征:

**2.1.1 阿尔金左行走滑断裂的特征** 阿尔金断裂带位于青藏高原西北边界,祁连山、柴达木盆地和东昆仑山的西侧,在平面上由一系列 NEE—SWW 向平行断裂组成,主断裂位于阿尔金山的南侧,全长 1 800 km,自西藏北部的郭扎错、拉竹龙,经新疆硝尔库勒、阿羌、吐拉、索尔库里、老阿克赛县城延至甘肃玉门的宽滩山,地表宽度 6~15 km. 研究表明阿尔金主断裂为韧—脆性走滑剪切带,形成于印支期(李海兵等,2001),经历多期活动,是一条至今仍在活动的走滑断裂,沿阿尔金主断裂最大左行走滑位移达 400 km(许志琴等,1999). 阿尔金断裂带的基本构造样式表现为:以走滑断裂为中心的两侧反向逆冲断裂系、北西侧的阿尔金逆冲断裂及其后部发育的同倾向正断层(李海兵等,2001).

**2.1.2 东昆仑左行走滑断裂的特征** 近东西向的东昆仑断裂为东昆仑地体与巴颜喀拉—松甘地体之间的界线,往东与阿尼玛卿缝合带相连. 东昆仑断裂为一条韧—脆性左行走滑剪切带,其基本构造样式表现为以走滑断裂为中心的两侧反向逆冲断裂系,形成于印支期,150 Ma 以来又有多次强烈活动,至今还具有左行走滑活动性质,并伴随地震活动(Li *et al.*, 1996). 2001 年 11 月 14 日在东昆仑断裂西段可可西里地区发生了  $M=8.1$  极大地震,并形成了约 430 km 长的地表破裂带. 格尔木—唐古拉山口剖面揭示东昆仑断裂为垂向低速异常带组成的延伸达 250 km 深度的地幔剪切带(许志琴等,2001).

**2.1.3 海源左行走滑断裂的特征** 海源断裂位于青藏高原北缘及东北缘,是一条巨型的弧形构造带,全长达 1 000 多 km. 自西向东从疏勒南山的哈拉湖

北部向东经青海的门源北部,过甘肃天祝、古浪、景泰及宁夏海源,向东南至固原与六盘山相连及渭河地堑西端(Peltzer *et al.*, 1985),至陇县、宝鸡与西秦岭北缘断裂相连(Zhang *et al.*, 1995; 刘锁旺等, 1997). 它是我国西部的一条重要活动断裂,晚第四纪以来以左行活动为特征(刘锁旺等, 1997; Lasserre, 1999; Tapponnier and Molnar, 1977; Zhang *et al.*, 1988; 国家地震局地质研究所和宁夏地震局, 1990),最大左行走滑位移达 110 km(刘锁旺等, 1997),滑动速率达  $(12 \pm 4)$  mm/a(刘锁旺等, 1997). 上世纪的 2 次极大地震(1920 年  $M=8.7$  以及 1927 年  $M=8.3$ )就发生在海源断裂带上,1920 年的极大地震( $M=8.7$ )形成了长达 230 km 长的地表破裂带(Burchfiel *et al.*, 1991; Deng, 1986). 海源断裂西段以小角度斜切了祁连山,它是将祁连山与秦岭相连的主要断裂.

## 2.2 青藏高原北部的挤压型“盆—山”构造域

青藏高原的北部新生代大型左行走滑断裂系之间的盆—山构造系由 3 个构造域组成(图 4):位于阿尔金断裂东段与海源断裂之间的祁连盆—山构造域、位于阿尔金断裂中段、海源断裂与东昆仑断裂之间的柴达木盆—山构造域和位于东昆仑断裂与鲜水河断裂之间的巴颜喀拉—松甘盆—山构造域.

### 2.2.1 祁连盆—山构造域

自北而南祁连盆—山构造地貌域的展布依次为酒泉盆地、祁连山、昌马—黑河盆地、大雪山、野马河—哈拉湖盆地、野马山、党河盆地及党河南山. 呈 NWW—SEE 走向的盆—山体系与上述两条走滑断裂均以  $30^\circ$  角度相交,盆—山之间的界限为逆冲断层(图 5).

酒泉盆地是祁连山山前的新生代前陆盆地,长 1 000 km,宽 20~80 km,是该域最大的盆地. 西以阿尔金走滑断裂为界,南以北祁连北缘逆冲推覆带与祁连山连接,东为六盘山褶皱带,北以双塔逆冲断层与阿拉善沙漠相隔. 自西往东分布了酒泉盆地、武威盆地及张掖盆地,其中酒泉盆地是已发现的含油气盆地.

酒泉盆地的基底为北祁连加里东褶皱带及后造山的泥盆纪—三叠纪陆相—海陆交互相间盆沉积,其上被侏罗纪—上新统的近 6 000 m 的沉积地层不整合覆盖. 侏罗—白垩纪陆相沉积地层厚度 4 000 m,沉积速率为  $5.7 \sim 6.2$  mm/100 a; 新生代时期,酒泉盆地接受了渐新—全新统碎屑堆积,总厚度达 2 500 m 以上,估计沉积速率的变化为:渐新世

7.5 mm/100 a, 中新世 3.1 mm/100 a, 上新世 20.8 mm/100 a, 更新世 51 mm/100 a, 全新世 0.1 mm/100 a(何登发等, 1996).

分隔酒泉盆地与祁连山的北祁连北缘逆冲推覆带为一系列南倾的铲式逆冲断裂及逆冲推覆岩片组成的薄皮构造,祁连山逐步向北逆冲推覆在酒泉盆地之上,逆冲断裂的活动始于中生代,白垩纪—第三纪地层不整合在逆冲断裂之上,在新生代继续活动,并使山体不断朝北推进,自中新世后期以来可能至少水平推移了 18 km(Peltzer *et al.*, 1985). 地震反射剖面资料揭示了阿拉善地块沿河西盆地以北的双塔逆冲断裂带以  $30^\circ$  角度插入河西盆地及祁连山下 30 km 的深度(吴宣志等, 1995). 据近年研究表明,晚第四纪期间北祁连的上升速率为  $0.9 \sim 3.1$  mm/a(Tapponnier *et al.*, 1990),如果以这样的速率在早期也保持不变的话,北祁连山脉应是在第四纪期间隆起的.

### 2.2.2 柴达木盆—山构造域

柴达木盆—山构造域位于阿尔金走滑断裂中段、海源走滑断裂及东昆仑走滑断裂之间,面积约 640 000 km<sup>2</sup>. 柴达木盆—岭构造域是以柴达木盆地为中心,柴达木盆地北侧为柴北缘盆—山构造系:以党河南山为北界,由苏海盆地、宗务隆山、柴北缘盆地(包括塞什腾—海马凹陷、欧北凹陷、埃北凹陷等)(姜洪川和高焕章, 1989)及柴北缘山(包括塞什腾山、锡铁山、欧龙布鲁克山、埃姆尼克山)组成,柴北缘山东段以北发育菱形的青海湖盆地、共和盆地、西宁盆地和贵德盆地,明显受 NWW—SEE 向温泉右行走滑断裂及海晏右行走滑断裂的控制. 柴达木盆地南侧为柴南缘盆—山构造系:由祁曼塔克山、阿牙库木克盆地、阿奇克库都克盆地、东昆仑山及阿奇克库洛湖盆地组成,沿东昆仑走滑断裂带的中段发育东西大滩拉分盆地.

柴达木盆地是青藏高原中最大的一个中生代陆相沉积盆地,盆地内的中生界厚达 5 000~6 000 m 至 10 000 m,最厚达 16 000 m. 柴达木盆地是在柴达木地块的基础上发育的,中生界盆地的前新生代基底主要由前震旦纪变质岩系及部分震旦纪—古生代褶皱盖层和加里东花岗岩组成,古生代—三叠纪可能一直处于相对隆起的地块状态. 自印支运动以来,柴达木地块由于东昆仑地体与南面的巴颜喀拉—松潘—甘孜地体、羌塘地体、冈底斯地体不断会聚、碰撞与拼贴,形成印支和中生代造山带,而柴达木地块则相对沉降. 新生代以来,接受了

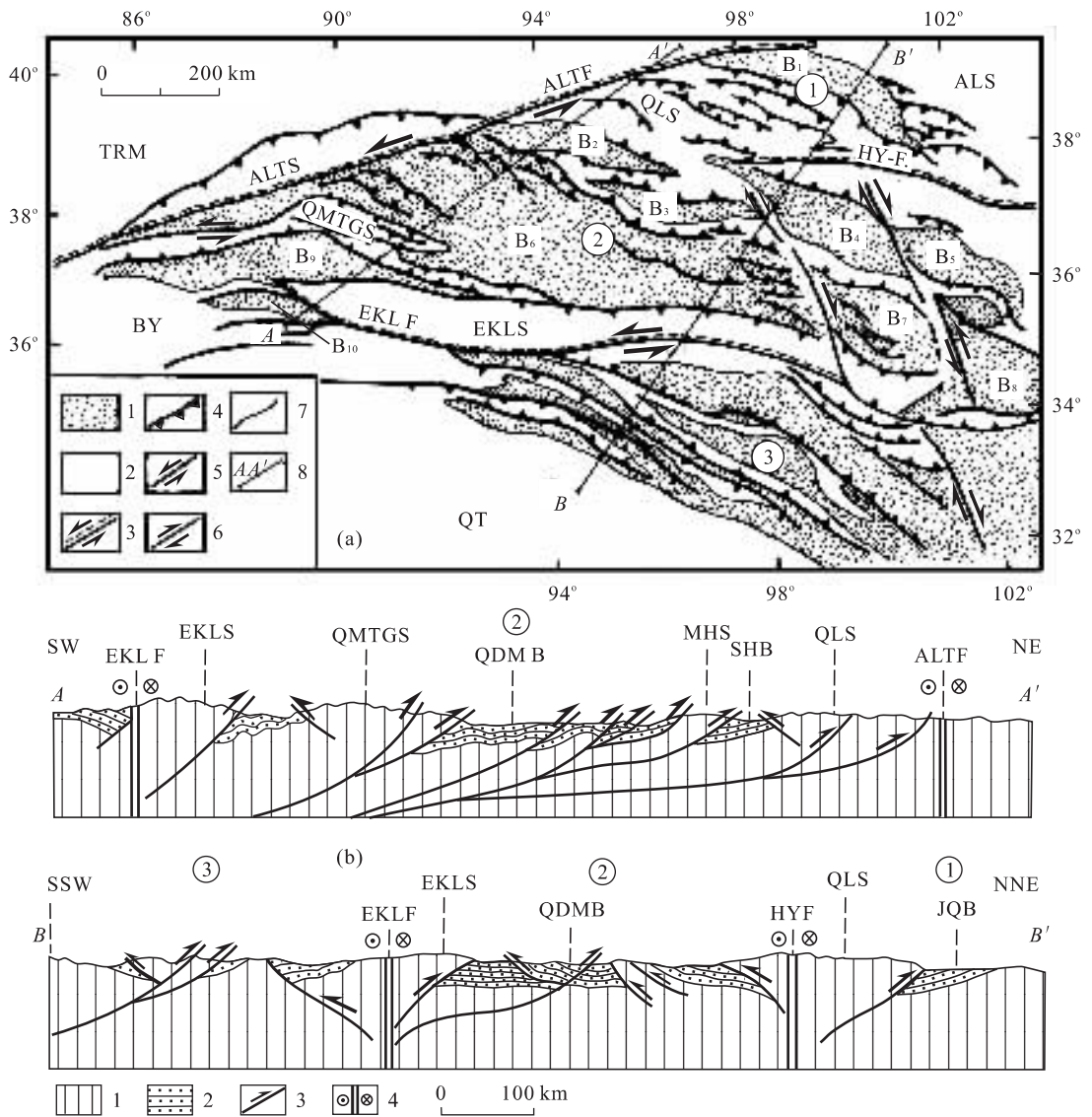


图 4 青藏高原北部的新生代构造平面及构造剖面

Fig. 4 Simplified geologic map showing the Cenozoic structures and cross-sections showing the characteristic structures in the northern Qinghai-Tibet plateau

a. 青藏高原北部的新生代构造平面图: 1. 盆地; 2. 山脉; 3. 大型左型走滑断裂; 4. 逆冲断裂; 5. 左行走滑断裂; 6. 右行走滑断裂; 7. 地质界线; 8. 剖面位置。b. 青藏高原北部构造剖面图: 1. 山体; 2. 盆地; 3. 逆冲断裂; 4. 左行走滑断裂。①. 祁连盆—山构造域; ②. 柴达木盆—山构造域; ③. 巴颜喀拉—松甘盆—山构造域。盆地: B<sub>1</sub>. 酒泉盆地; B<sub>2</sub>. 苏海盆地; B<sub>3</sub>. 柴北缘盆地; B<sub>4</sub>. 青海湖盆地; B<sub>5</sub>. 西宁盆地; B<sub>6</sub>. 柴达木盆地; B<sub>7</sub>. 共和盆地; B<sub>8</sub>. 贵德盆地; B<sub>9</sub>. 阿牙库木克盆地; B<sub>10</sub>. 阿奇克库都克盆地; QDMB. 柴达木盆地; SHB. 苏海盆地; JQB. 酒泉盆地。山脉: QLS. 祁连山; ALTS. 阿尔金山; QMTGS. 祁漫塔格山; EKLS. 东昆仑山; ALS. 阿拉善地体; TRM. 塔里木地体; BY. 巴颜喀拉地体; QT. 羌塘地体; MHS. 马海山。走滑断裂: ALTF. 阿尔金左行走滑断裂; HYF. 海源左行走滑断裂; EKL F. 东昆仑左行走滑断裂

来自周边的大量剥蚀物质,形成巨厚陆相沉积。

在柴达木盆地的北缘及南缘分别发育了柴北缘及柴南缘大型逆冲推覆断裂带,它们均向山脉方向(祁连山和东昆仑山)倾斜,向盆地方向逆冲。柴达木盆地内沉积层发生轻微变形,形成宽缓的弯滑直立褶皱,无劈理,轴向 NW—SE,伴随逆冲断层,反映了挤压盆地的特征。盆地向东收缩,宽度缩小近一倍。

东昆仑山—阿牙库木克盆地—祁曼塔克山—柴达木盆地—马海山—苏海盆地—党河南山的构造示意剖面(图 4)显示了柴达木盆地浅部逆冲叠覆的薄皮构造,推测柴达木盆地表层的褶皱—逆冲挤压体系与发育在盆地沉积层与前中生代基底之间及前中生代基底内部的深部滑脱断裂构造有关,滑脱断裂以 5°~10°向南倾伏,伸入祁曼塔克山和东昆仑山之

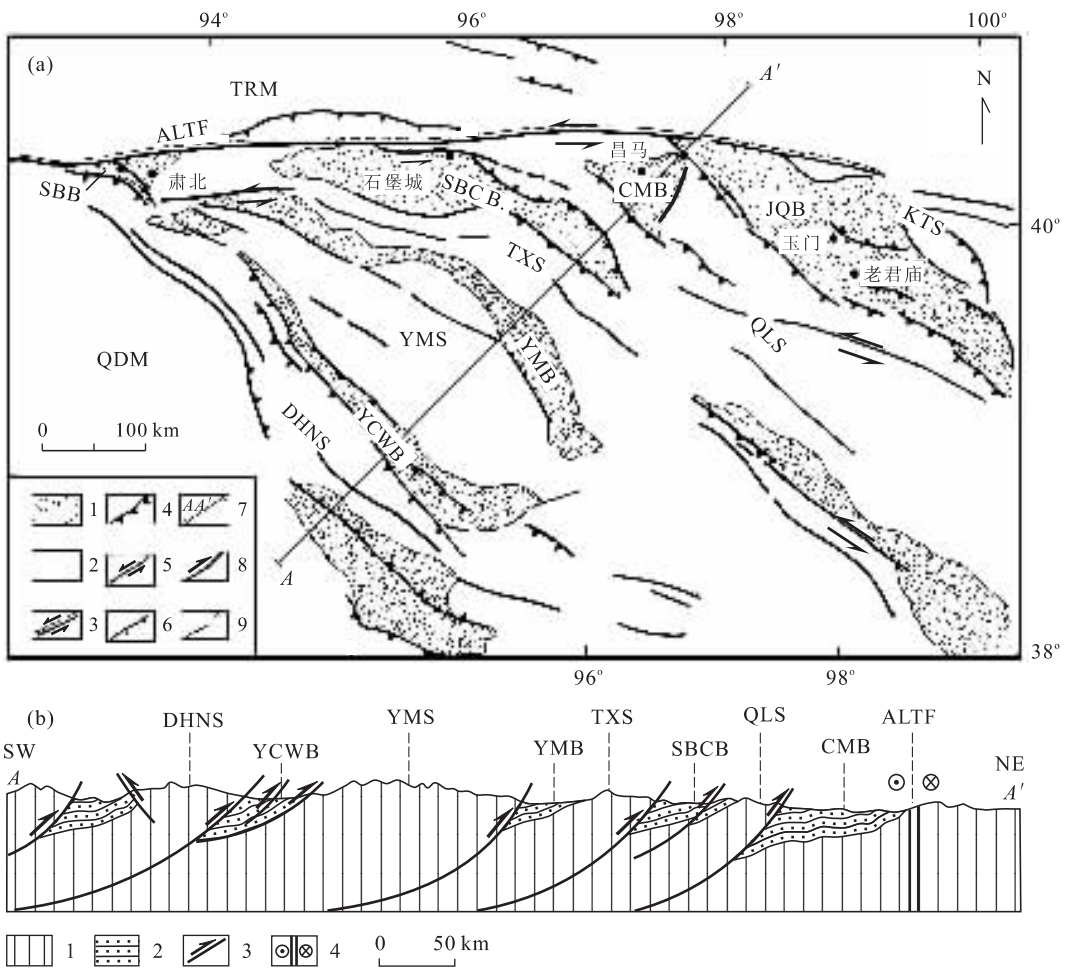


图 5 祁连山新生代构造平面及构造剖面

Fig. 5 Simplified geologic map showing the Cenozoic structures and cross-sections showing the characteristic structures in the Qilian Mountains

a. 祁连山新生代构造平面图: 1. 盆地; 2. 山脉; 3. 大型左型走滑断裂; 4. 逆冲断裂; 5. 左行走滑断裂; 6. 正断裂; 7. 剖面位置; 8. 逆冲断裂; 9. 地质界线。b. 祁连山新生代构造剖面图: 1. 山体; 2. 盆地; 3. 逆冲断裂; 4. 左行走滑断裂。KTS. 宽堂山; QLS. 祁连山; TXS. 大雪山; YMS. 野马山; DHNS. 党河南山; ALTS. 阿尔金山; ALTF. 阿尔金断裂; TRM. 塔里木地体; QDM. 柴达木地体; JQB. 酒泉盆地; CMB. 昌马盆地; SBCB. 石堡城盆地; SBB. 肃北盆地; YMB. 野马盆地; YCWB. 盐池湾盆地

下,向北滑脱断裂前缘的马海山一带隆起,出露基底变质岩石,把柴达木盆地与苏海盆地隔开。

在柴北缘盆—山构造系中,向 NWW 缓倾的宗务隆山南缘逆冲断层使宗务隆山压在中新生代的欧北盆地之上,中新生代沉积褶皱并伴随外缘逆冲断层系构成薄皮构造,在靠近断层一侧的背形构造部位利于油藏的富集(姜洪川和高焕章,1989)(图 6)。

在柴达木南缘盆—岭构造系中,盆地主要发育在靠近阿尔金断裂一侧,平面呈透镜状,阿牙库木克盆地南北两侧发育反向逆冲断层,盆地内新生代地层变形形成轴向近 EW 的宽缓褶皱。

2.2.3 巴颜喀拉—松甘盆—山构造域 巴颜喀拉—松甘盆—山构造域位于巴颜喀拉—松甘地体东

北部的近 EW 向的东昆仑断裂与 NW—SE 向的鲜水河断裂之间的三角形地区,盆—岭展布呈 NW—SE 方向,与东昆仑断裂相交约 30°。山体岩石为三叠纪复理石,盆地中主要堆积中—上新统的红色陆相沉积,厚度可达 3 000 m。盆—岭之间以逆冲断层为界,NE 部以向 NE 倾斜的逆冲断层为主,SW 部主要发育向 SW 倾斜的逆冲断层。

2.3 青藏高原北部的新生代盆—山省与走滑作用的关系

青藏高原北部的新生代盆—山域是在青藏高原隆升中形成的,并构成青藏高原特殊的构造—地貌景观,三大盆—山域的提出是对青藏高原北部新生代构造格架认识的深化。“盆—山”只是一种地貌的



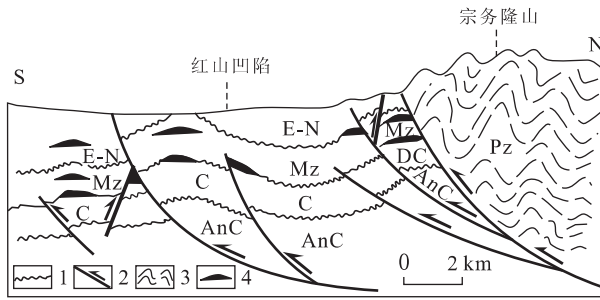


图 6 柴达木北缘欧北凹陷红山地区逆冲推覆构造(姜洪川等,1989)

Fig. 6 Cross-section showing the thrust fault and associated structures in the Hongshan area of Oubei depression, North Qaidam

1. 不整合;2. 逆冲断裂;3. 早古生代褶皱;4. 有利的含油气构造部位。AnC. 前石炭纪;C. 石炭纪;DC. 泥盆纪—石炭纪;Mz. 中生代;Pz. 古生代;E-N. 老第三纪—新第三纪

概念,关键在于成因。青藏高原北部的新生代盆—山挤压构造与走滑构造带究竟有没有成因联系?走滑构造带如何制约挤压型含油气盆地的发育?下面将要讨论两个问题:(1)新生代盆—岭省与走滑构造的组构关系;(2)盆—岭省的地壳缩短及与高原地貌的形成。

青藏高原北部新生代盆—山构造域的地壳变形一方面表现了盆地内部的挤压变形(褶皱与逆冲断层)特征,同时构造线的方向显示了与走滑断裂斜交的组构特征,并且在靠近走滑断裂处出现构造的转折与绕曲,表现为盆地的不对称透镜形态、褶皱轴和逆冲断裂的转弯等。盆—山构造域与走滑断裂的组构关系均表明了 3 条走滑断裂的左行平移性质,盆—山构造域中的盆地,除沿断裂带的拉分盆地外,其他均为挤压型盆地,并且与走滑构造有成因联系。

以阿尔金断裂东段肃北地区的党河南山和肃海盆地为例,解析走滑作用与盆—山关系,选择在芦苇湾和西水沟(河)地区研究阿尔金走滑作用与其南侧逆冲作用的成因联系(李海兵,2001;李海兵等,2001)。

(1)肃北地区西水沟的走滑速率约为 22 mm/a 和 17 mm/a,而在东侧仅相距 7~8 km 左右的芦苇湾的走滑速率为 17~13 mm/a,这两地的走滑速率存在 4~5 mm/a 之差,说明阿尔金断裂的走滑速率向东减少;(2)在阿尔金断裂东段南侧西水沟东南,由于逆冲构造使得 T1、T2、T3 均被抬升 16~18 m、35 m± 及 50~55 m,成为党河南山的前缘,逆冲断裂逆冲方向由 SW 到 NE,估算 T2 阶地形成以来的

抬升速率为(4.2±0.3)mm/a,党河南山北侧的缩短速率至少为 4 mm/a。

估算表明 4~5 mm/a 的走滑速率差恰好与通过阶地抬升已估算的抬升速率 4 mm/a 相近。这是因为走滑的一部分的能量转化到阿尔金断裂南侧,形成了南侧的逆冲断裂。上述表明走滑与逆冲可以相互调节和转化。走滑变形过程中伴随有逆冲作用形成山脉,同时逆冲作用使上隆的山体物质剥蚀,堆积在逆冲断裂之下盘,形成盆地。

## 2.4 新生代盆—山省与地壳缩短及高原地貌的形成

### 2.4.1 新生代盆—山省与地壳缩短

Tapponnier (2000)以美国国防制图局 1992 年提供的 30 弧秒分辨率(约 900 m)的数字高程模型作为地形学基础,计算出位于阿拉善、塔里木和东昆仑之间的青藏高原北部的面积大约  $5.4 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,其中在盆地第三纪沉积体中保存下来的地下物质埋藏量大约等于  $0.44 \times 10^6 \text{ km}^3$ ,表明第三纪盆地周围地壳加厚造成的区内岩石体积在 1500 m 基准面之上增加了  $1 \times 10^6 \text{ km}^3$ 。假定青藏高原东北部为均衡补偿区域,地壳与地幔的密度分别为  $2750 \text{ kg/m}^3$  和  $3300 \text{ kg/m}^3$ ,并且将沉积物质考虑在的话,位于西藏东北部的地壳岩石体积应为  $6.8 \times 10^6 \text{ km}^3$ 。如果这个体积是由于地壳缩短造成的,那么未变形时原始地壳厚度应相当于未变形的阿拉善地台的地壳厚度  $(47.5 \pm 5) \text{ km}$ ,并获得  $1.4 \times 10^5 \text{ km}^2$  的地表面积减少量。晚新生代时缩短量大约相当于目前西藏东北部面积的 26%,也相当于区内海拔 2000 m 以上的山区面积的 40%(约  $3.5 \times 10^5 \text{ km}^2$ ),这可以解释为什么沿  $N30^\circ E$  的地壳缩短。根据区域质量平衡法获得的沿  $N30^\circ E$  方向大多数剖面缩短大于 100 km,在靠近阿尔金断裂处可达 200 km。考虑到区外沉积物的大量流失,黄河将大量携带到东部,疏勒河和党河在地史上的气候润湿期向西流向罗布泊,因此区外加厚的地壳物质可能损失百分之几,故地壳缩短量应比估计的还大。估算的缩短量的其中一部分被转换到柴达木地块往南俯冲到昆仑山之下。上述表明青藏高原北部的新生代盆—山省是在地壳缩短的挤压背景下形成的,是与美国西部盆岭省完全不同性质的“盆—山省”,尽管它们在地貌上表现出相似特征。

### 2.4.2 新生代挤压型盆地的封闭及高原地貌的形成

一系列宽阔、平坦且高海拔的新第三纪盆地构

成了青藏东北部的显著景观。由于受各种方向的晚新生代断层所限,许多盆地呈菱形或三角形,并且大部分盆地没有现在的河流出口,分别形成局部的基准面。典型的例子如共和盆地、青海湖盆地、哈拉湖盆地、苏海盆地、柴达木盆地、阿牙库木克盆地和阿奇克库都克盆地等。少数盆地虽然四周被山脉包围,但仍有大河通向外界(党河、疏勒河及黄河),这些河流的切割能力与山体的增长速率相同。然而这些河流的输出速率却受气候变化的影响,流向周围低地的出水口很难保持稳定,例如黄河在共和及贵德盆地堆积了千米厚的第四纪沉积物,向上游方向横切青海南山和大石山,形成了数百米深的峡谷(Tapponnier, 2000)。

特别指出的是,逆断层上盘的构造快速抬升像水坝一样切割了汇水盆地的出口,随着山脉的增高和断裂的加大,使盆地处于隔离的状态,变成向内部排泄的封闭“水库”或“浴盆”。走滑断裂对此起至关重要的作用,因为走滑断裂与逆冲断层有一定的角度,水系与山脉平行,形成较高而且与附近低地不相连的局部基准面。随着来自周围山脉的碎屑物的流入,基准面继续升高,直到侵蚀残留高度,众多盆地的基准面共同形成高的、平滑的表面。

柴达木盆地的四周完全被新生代断层及 5 000~6 000 m 的高山包围,它的基准面的平均海拔为 2 800 m,面积 103 000 km<sup>2</sup>。盆地内的上新世—第四纪沉积物快速充填(等于或大于现在平原和冲积扇的充填速率),说明构造作用切断了盆地流向黄河的出口,使大量的沉积物堆积在盆地内部。这种“坝式”沉积作用及“浴盆”式的填充方式使盆地高程抬升,表面平整。随着相对高差的减少,沿盆地周围山脉边缘的侵蚀速率降低,沉积物充填减慢,从而没有沉积物的溢出(Tapponnier, 2000)(图 7)。

## 2.5 青藏高原北部的深部构造与油气通道的探索

中法地球物理合作在青藏高原北部进行的乌图美仁—茫崖—若羌和格尔木—唐古拉天然地震探测剖面揭示了如下深部构造特征(Wittinger *et al.*, 1996; Wittinger *et al.*, 1998; 许志琴等, 2001): (1) 乌图美仁—茫崖—若羌天然地震探测剖面揭示了阿尔金山主断层的深部存在宽度为 60~80 km 延伸超过 400 km 的地震波低速异常带,是一条近直立的地幔(或超岩石圈)剪切带。低速异常带由低速度、低密度的高热物质组成,推测与大规模韧性剪切产生局部熔融有关。代表上地幔物质剪切流动矢量的

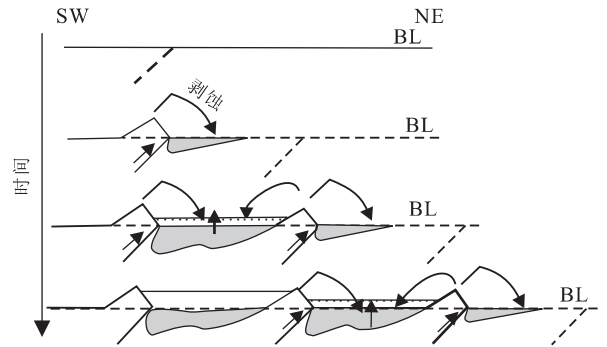


图 7 青藏高原北部盆—山构造域中盆地封闭及快速堆积(Tapponnier, 2000)

Fig. 7 Schematic diagram showing closure of the basins and rapid deposition within the basin-mountain system in the northern Qinghai-Tibet plateau

BL. 基准面

SKS 波各向异性强度大,各向异性方向与断裂带一致,也反映了该断裂带在上地幔深部发生了剪切位移(许志琴等, 1996; Xu *et al.*, 1999; 许志琴等, 2001)。 (2) 格尔木—唐古拉天然地震探测剖面及根据其与世界资料重新处理获得的阿克塞—花石峡天然地震探测剖面(图 8)所显示的地幔图像,不仅揭示了东昆仑断裂为由低速异常带组成的深入 250 km 的地幔剪切带(许志琴等, 2001),以及昆仑山口—花石峡为中心的由大型低速异常体组成深部地幔羽结构(深度 150~400 km 以下)的存在(许志琴等, 1996; Xu *et al.*, 1999),而且在柴达木盆地下部发现宽度 300 km、厚度达 80 km 的地震波低速异常层,该地震波低速异常层又与昆仑山口—花石峡为中心的深部大型低速异常体组成地幔羽相连。

上述深部构造特征表明,柴达木盆地的周缘存在由高热低密度物质组成的地幔剪切带,盆地下部为高热低密度物质组成的底垫,为盆地的油气资源提供了有利的通道和背景。

## 3 讨论与结论

以上讨论表明青藏高原北部走滑断裂/盆—山体系与美国加州南部的圣安德烈斯走滑断裂/盆—山体系具有相似的特征。阿尔金山断裂新生代以来的运动和印度板块与欧亚板块的碰撞紧密相关,是青藏高原地块与塔里木地块之间的边界断层。而圣安德烈斯断裂带是太平洋板块和北美板块之间的转换断层,其形成与三联点的上陆、向两侧的移动相关。

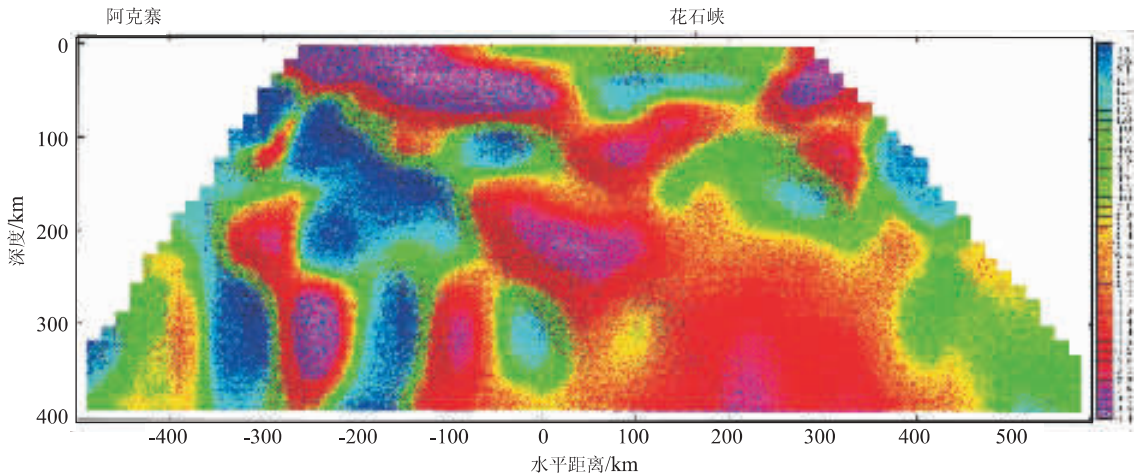


图8 阿克塞—花石峡天然地震探测剖面

Fig. 8 Natural seismic tomographic profile from Akesai to Huashixia

虽然它们的现今大地构造背景不同,但两者之间在构造地质、地形地貌及含油气盆地等方面存在许多相似的特征:(1)青藏高原相对于塔里木地块与太平洋相对于北美板块的斜向运动相似,分别在青藏高原的东北部和美国南加州横向山脉地区形成区域挤压缩短应变区。(2)与走滑运动相伴生的挤压缩短应变导致在青藏高原北部的昆仑山—祁连山地区形成有序的盆—山构造体系。相似地,太平洋板块和圣安德烈斯断裂相互作用也导致在南加州形成有序的盆—山构造体系。(3)与走滑运动有关的强烈的挤压缩短应变导致一系列出露地表或盲逆冲推覆构造的产生,并在逆冲断层的上盘形成断层生长褶皱和褶皱山,这些部位为油气圈闭、成藏的有利构造位置。(4)阿尔金断裂和圣安德烈斯断裂作为板块或地体边界走滑断裂,具有地幔剪切带的特征,与其相配套的高度地震活动性的逆冲推覆断裂带为深部流体或气体向上的迁移提供有利的通道,促使油气在与推覆构造相伴生的褶皱核部聚集和圈闭。(5)逆冲断层的褶皱核部为油气圈闭的有利部位和油气勘探的主要目标。

基于大型走滑断裂在挤压型盆—山构造体系中重要作用(刘和甫等,2004;许志琴等,2004)和上述的特点,我们认为应该利用新技术和实验手段来详细研究与大型走滑断裂带相关的盆—山构造体系的地质地貌特征,重新审视和评价其油气资源的前景。

## References

Burchfiel, C., Zhang, P., Wang, Y., et al., 1991. Geology of the Haiyuan fault zone, Ningxia-hui autonomous region, China, and its relation to the evolution of the

northeastern margin of the Tibetan plateau. *Tectonics*, 10:1091—1110.

Deng, Q., 1986. Variations in the geometry and amount of slip on the Haiyuan (Naxi-Haushan) fault zone, China, and the surface rupture of the 1920 Haiyuan earthquake. *Geophys. Monogr. Ser.*, 37:169—182.

Dolan, J. F., Christofferson, S. A., Shaw, J. H., 2003. Recognition of paleoearthquakes on the Puente Hills blind thrust fault, California. *Science*, 300:115—118.

Fuis, G. S., Ryberg, T., Godfrey, N. J., et al., 2001. Crustal structure and tectonics from the Los Angeles basin to the Mojave desert, southern California. *Geology*, 29: 15—18.

He, D. F., Lü, X. X., Lin, Y. H., et al., 1996. Foreland basin analysis. Petroleum Industry Press, Beijing, 212 (in Chinese).

Institute of Geology and Ningxia Institute of Seismology, SSB, 1990. Active tectonics of the Haiyuan fault. Seismology Press, Beijing (in Chinese).

Jiang, H. C., Gao, H. Z., 1989. A study on the thrust and nappe structure in the north margin of Chaidamu basin and its oil and gas prospect. Northwestern University Press, Xi'an, China, 79 (in Chinese).

Jones, C. H., 2003. How faults accommodate plate motion. *Science*, 300:1105—1106.

Kennedy, B. M., Kharaka, Y. K., Evans, W. C., et al., 1997. Mantle fluids in the San Andreas fault system, California. *Science*, 278:1278—1281.

King, P. R., 2000. New Zealand's changing configuration in the last 100 million years; Plate tectonics, basin development, and depositional setting. 2000 New Zealand Petro-

- leum Conference Proceedings, 15.
- Kranzh, R. W. , 1995. The transpressional strain model applied to strike-slip, oblique-convergent and oblique-divergent deformation. *Journal of Structural Geology*, 17 (8): 1125—1137.
- Lasserre, C. , 1999. Postglacial left slip-rate and past occurrence of  $M \geq 8$  earthquakes on the western Haiyuan fault, Gansu, China. *J. Geophys. Res.* , 104 (17): 633 — 17, 651.
- Li, H. B. , 2001. Timing of the initiation of the Altyn Tagh fault and its contribution to the uplift of the Northern Tibetan plateau. Ph. D. Thesis, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (in Chinese).
- Li, H. B. , Xu, Z. Q. , Chen, W. , 1996. Deformational features and tectonic evolution of the south Kunlun strike-slip shear zone, East Kunlun Mountains. *Acta Geoscientia Sinica* , *Special Issue* : 16—21.
- Li, H. B. , Yang, J. S. , Shi, R. D. , et al. , 2001. The relationship between faulted basin and mountain ranges along the Altyn Tagh Fault. *Chinese Science Bulletin*, 47(1): 63—67 (in Chinese).
- Li, H. B. , Yang, J. S. , Xu, Z. Q. , et al. , 2001. Geological and geochronology evidences of Indosinian strike-slipping for the Altyn Tagh fault. *Chinese Science Bulletin*, 46(16): 1333—1338 (in Chinese).
- Liu, S. W. , Gan, J. S. , Yao, Y. S. , et al. , 1997. Strike-transform deformation of the northern margin fault of the West Qinling and the Haiyuan fault and their relation with the Longshan massif. *Crustal Deformation and Earthquake*, 17 (3): 73 — 83 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H. F. , Li, X. Q. , Liu, L. Q. , et al. , 2004. Petroleum play analysis and strike-slip system basin-mountain coupling. *Geoscience*, 18: 139 — 150 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. , Klinger, Y. , Sieh, K. , et al. , 2004. Six similar, sequential ruptures of the San Andreas fault, Carrizo plain, California. *Geology*, 32(8): 649—652.
- Liu, J. , Sieh, K. , Hauksson, E. , 2003. A structural interpretation of the aftershock “cloud” of the 1992 Mw7. 3 Landers earthquake. *Bull. Seism. Soc. Am.* , 93(3): 1333 — 1344.
- Oskin, M. , Sieh, K. , Rockwell, T. , et al. , 2000. Active parasitic folds on the Elysian Park anticline: Implications for seismic hazard in central Los Angeles, California. *Geological Society of America Bulletin*, 112: 693—707.
- Peltzer, G. , Tapponnier, P. , Zhang, Z. , et al. , 1985. Neogene and Quaternary faulting in and along the Qinling Shan. *Nature*, 317: 500—505.
- Shaw, J. H. , Shearer, P. M. , 1999. An elusive blind-thrust fault beneath metropolitan Los Angeles. *Science*, 283: 1516—1518.
- Spotila, J. , Farley, K. , Sieh, K. , 1998. Uplift and erosion of the San Bernardino Mountains associated with transpression along the San Andreas fault, California, as constrained by radiogenic helium thermochronometry. *Tectonics*, 17: 360—378.
- Sylvester, A. G. , 1988. Strike-slip faults. *Geological Society America Bulletin*, 100: 1666—1703.
- Tapponnier, P. , 2000. Neotectonics. In: Xu, Z. Q. , Yang, J. S. , Tapponnier, P. , et al. , eds. , Field trip guide, international symposium on geoscience of the northern Qinghai-Tibet plateau—Marking the 20th Anniversary of the Sino-French cooperative research on geoscience. Dunhuang, China.
- Tapponnier, P. , Meyer, B. , Avouac, J. P. , 1990. Active thrusting and folding in the Qilian Shan and decoupling between upper crust and crust and mantle in northeastern Tibet. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 97: 382—403.
- Tapponnier, P. , Molnar, P. , 1977. Active faulting and tectonics in China. *J. Geophys. Res.* , 82: 2905—2930.
- Wittinger, G. F. , Tapponnier, P. , Poupinet, G. , et al. , 1998. Tomographic evidence for localized lithospheric shear along the Altyn Tagh fault. *Science*, 74—76.
- Wittinger, G. , Masson, F. , Poupinet, G. , 1996. Seismic tomography of northern Tibet and Kunlun; Evidence for crustal blocks and mantle velocity contrasts. *EPSL*, 139: 263—279.
- Wu, X. Z. , Wu, C. L. , Lu, J. , 1995. Research on the fine crustal structure of the northern Qilian-Hexi corridor by deep seismic reflection. *Acta Geophysica Sinica*, 38 (suppl. II): 29 — 35 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. Q. , Li, H. B. , Yang, J. S. , et al. , 2001. A large transpression zone at the south margin of the east Kunlun Mountains and oblique subduction. *Acta Geologica Sinica*, 75(2): 156—164 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. Q. , Jiang, M. , Yang, J. S. , 1996. Tectonophysical process at depth for the uplift of the northern part of the Qinghai-Tibet plateau; Illustrated by the geological and geophysical comprehensive profile from Golmud to the Tanggula mountains, Qinghai Province, China. *Acta*

- Geologica Sinica*, 70: 195—206 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. Q., Jiang, M., Yang, J. S., et al., 1999. Mantle diapir inward intracontinental subduction: A discuss on the mechanism of uplift of the Qinghai-Tibet plateau. *Geological Society of America, Special Paper*, 328: 19—31.
- Xu, Z. Q., Yang, J. S., Jiang, M., 2001. Deep structure and lithospheric shear faults in the East Kunlun-Qiangtang region, northern Tibetan plateau. *Science in China (Series D)*, 31(Suppl.): 1—7 (in Chinese).
- Xu, Z. Q., Yang, J. S., Li, H. B., et al., 2004. The assembly of the Qinghai-Tibet plateau by amalgamation of terranes and its collisional dynamics. Geological Publication House, Beijing (in Press, in Chinese).
- Xu, Z. Q., Yang, J. S., Zhang, J. X., et al., 1999. A comparison between the tectonic units on the two sides of the Altun sinistral strike-slip fault and the mechanism of lithospheric shearing. *Acta Geologica Sinica*, 73(3): 193—205 (in Chinese with English abstract).
- Yule, D., Sieh, K., 2003. Complexities of the San Andreas fault near San Gorgonio pass: Implications for large earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 109, B11, 2548, ETG 9, doi: 10. 1029/2001JB000451.
- Zhang, P., Molnar, P., Barchfiel, B. C., et al., 1988. Bounds on the Holocene slip rate of the Haiyuan fault, north-central China. *Quat. Res.*, 30: 151—164.
- Zhang, W., Jiao, D., Zhang, P., et al., 1987. Displacement along the Haiyuan fault associated with the great 1920 Haiyuan, China, earthquake. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 77: 117—131.
- Zhang, Y. Q., Vergely, P., Mercier, J., 1995. Active faulting in and along the Qinling Range (China) inferred from SPOT imagery analysis and extrusion tectonics of South China. *Tectonophysics*, 243: 69—95.
- Zhu, L., 2000. Crustal structure across the San Andreas fault, southern California from teleseismic converted waves. *Earth and Planetary Sci. Lett.*, 179: 183—190.
- ### 附中文参考文献
- 何登发, 吕修祥, 林永汉, 等, 1996. 前陆盆地分析. 北京: 石油工业出版社, 212.
- 国家地震局地质研究所, 宁夏地震局, 1990. 海原活动断裂带. 北京: 地震出版社.
- 姜洪川, 高焕章, 1989. 柴达木盆地北缘逆冲推覆构造及其含油气性研究. 西安: 西北大学出版社, 79.
- 李海兵, 2001. 阿尔金断裂的形成时代及其走滑作用对青藏高原北部隆升的贡献. 中国地质科学院研究生院博士学位论文.
- 李海兵, 杨经绥, 史仁灯, 等, 2001. 阿尔金走滑断陷盆地的确定及其与山脉的关系. *科学通报*, 47(1): 63—67.
- 李海兵, 杨经绥, 许志琴, 等, 2001. 阿尔金断裂带印支期走滑活动的地质及年代学证据. *科学通报*, 46(16): 1333—1338.
- 刘锁旺, 甘家思, 姚运生, 等, 1997. 西秦岭北缘断裂与海原断裂的走滑转换变形及其与陇山地块的相互作用. *地壳变形与地震*, 17(3): 73—83.
- 刘和甫, 李晓清, 刘立群, 等, 2004. 走滑构造体系盆山耦合与区带分析. *现代地质*, 18(2): 139—150.
- 吴宣志, 吴春玲, 卢杰, 1995. 利用深地震反射研究北祁连—河西走廊地壳细结构. *地球物理学报*, 38(增刊 II): 29—35.
- 许志琴, 李海兵, 杨经绥, 等, 2001. 东昆仑山南缘大型转换挤压构造带和斜向俯冲作用. *地质学报*, 75(2): 156—164.
- 许志琴, 姜枚, 杨经绥, 1996. 青藏高原北部隆升的深部构造物理作用. *地质学报*, 70(3): 195—206.
- 许志琴, 杨经绥, 姜枚, 等, 2001. 青藏高原北部东昆仑—羌塘地区的岩石圈结构及岩石圈剪切断层. *中国科学(D 辑)*, 31(增刊): 1—7.
- 许志琴, 杨经绥, 张建新, 等, 1999. 阿尔金断裂两侧构造单元的对比及岩石圈剪切机制. *地质学报*, 73(3): 193—205.
- 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等, 2004. 青藏高原的地体拼合及碰撞动力学. 北京: 地质出版社(待刊).