

青藏高原北缘的隆升时期 ——来自阿尔金山和柴达木盆地的证据

袁四化^{1,2}, 刘永江², 葛肖虹², 吴光大³, 胡 勇³, 郭新转², 李伟民²

(1. 成都地质矿产研究所, 四川 成都 610082; 2. 吉林大学 地球科学学院, 吉林 长春 130061;
3. 中石油 青海油田分公司 勘探开发研究院, 甘肃 敦煌 736200)

摘 要: 根据柴达木盆地西部中新世上、下油砂山组的沉积特征及其地震反射界面的特征, 推断阿尔金山的主隆升时期为中晚中新世, 山体的隆升导致盆地沉积中心向东迁移。盆地周围山系的隆升年代学资料也表明, 青藏高原北缘在中晚中新世发生了快速抬升, 与青藏高原南部的同期区域构造事件一致, 表明中晚中新世是青藏高原向北生长的重要时期。阿尔金山此次隆升事件与塔里木板块向柴达木地块楔入有关, 整个高原的隆升动力源自印度板块与欧亚大陆拼合后持续向北的俯冲。

关键词: 柴达木盆地, 阿尔金山, 青藏高原北缘, 隆升

中图分类号: P542, P534

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2008)05-0413-09

Uplift period of the northern margin of the Qinghai-Tibet Plateau: evidences from the Altyn Mountains and Qaidam Basin

YUAN Si-hua^{1,2}, LIU Yong-jiang², GE Xiao-hong², WU Guang-da³, HU Yong³,
GUO Xin-zhuan² and LI Wei-min²

(1. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610082, China; 2. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130026, China; 3. Research Institute of Exploration and Development, Qinghai Oilfield Company, PetroChina, Dunhuang 736200, China)

Abstract: An analysis of sedimentary characteristics of Shangyoushashan and Xiayoushashan Formations and the features of seismic reflection in western Qaidam Basin suggest that the Altyn Mountains were uplifted during the Mid-Late Miocene, which resulted in an eastward migration of the basin depocenter. Uplifting chronological data from the surrounding mountains also indicate that the uplifting of the northern margin of the Qinghai-Tibet Plateau was coincident with the regional tectonic events of southern Qinghai-Tibet Plateau during the Mid-Late Miocene. It is also demonstrated that the Mid-Late Miocene is an important period for the northward growth of Qinghai-Tibet Plateau. The uplift event of the Altyn Mountains was directly related to the wedging of the Tarim Plate underneath the Qaidam Plate. The plateau uplifting dynamic source was derived from the continuous northward subduction of the India Plate after its collision with the Eurasia continent.

Key words: Qaidam Basin; Altyn Mountains; northern margin of the Qinghai-Tibet Plateau; uplift

青藏高原隆升的问题一直是地球科学众多分支学科的研究焦点, 但是关于隆升的时间、方式、机制至今仍未达成共识, 尤其是青藏高原北缘的隆升, 对于研究高原的整体隆升时

间和向北生长时间至关重要, 直接影响了隆升期次和隆升模式的建立。阿尔金断裂在中国西部大陆构造、高原隆升研究中扮演了重要的角色, 近年来许多学者在关注断裂的走滑时

收稿日期: 2008-01-25; 修订日期: 2008-07-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40572135), 国家教委高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20040183055)

作者简介: 袁四化(1980-)男, 在读博士生, 构造地质学专业, E-mail: yuansihua@yahoo.com.cn, 通讯作者: 刘永江(1964-)男, 教授, 主要从事区域构造和构造年代学研究工作, 电话: 0431-8502621, E-mail: yliu@vip.sina.com。

间、运动方式、走滑量的同时,也把它作为研究青藏高原北缘隆升的重要支柱(葛肖虹等,2002;李海兵等,2006;袁四化等,2006;陈正乐等,2006;刘永江等,2007),甚至有人认为它制约了高原北部的生长(李海兵等,2006)。本文从盆山耦合的思路,依据柴达木盆地西部中新世的沉积特征来反演山体的隆升,探讨盆山之间的耦合关系,结合区域构造事件和构造热事件,认为阿尔金山在中晚中新世存在一期重要的隆升事件,是青藏高原北缘重要的生长期,青藏高原北缘的隆升可能基于这次广泛的区域事件。

1 区域地质背景

阿尔金山构成了青藏高原的北部边界,分隔了塔里木和柴达木盆地。阿尔金断裂是亚洲最主要的内陆走滑断裂之一(图1)左旋走滑的累计水平错距大约为350~400 km(Cui,1997;葛肖虹等,1998;许志琴等,1999;Ritts and Biffi,2000;Meng *et al.*,2001;Sobel *et al.*,2001;Zhang *et al.*,2001;Gehrels *et al.*,2003)。阿尔金断裂在大规模走滑同时也引起了山体垂向上大幅度的抬升(李海兵等,2006;袁四化等,2006;陈正乐等,2006;刘永江等,2007),使阿尔金山

成为塔里木盆地和柴达木盆地新生界的重要物源区之一(Yin *et al.*,2002;Rieser *et al.*,2005)。

2 中晚中新世(15~8 Ma左右)隆升事件的确认

2.1 柴达木盆地西部中新世沉积特征与阿尔金山隆升关系

柴达木盆地主要是新生代形成的内陆盆地,新生代发育的地层自下而上为路乐河组、下干柴沟组、上干柴沟组、下油砂山组、上油砂山组、狮子沟组、七个泉组,其中下油砂山组和上油砂山组分别为中新世早期和晚期,根据古生物资料分界时间大约在10 Ma(王建等,1996),磁性地层把分界时间放在12 Ma(杨藩等,1992),最新磁性地层资料放在15.3 Ma(Fang *et al.*,2007)。由于下、上油砂山组之间存在不整合,而不同研究者选取的地层剖面位置不同,很难准确界定两个地层的时间界限。杨藩等(1992)是按照Harland 1982年的地质年表换算的,Sun等(2005)的剖面选在柴北缘的怀头他拉地区,所以本文仍采用柴西地区的资料,现按照修正后的古地磁极性表(Cande and Kent,1995),认为柴西地区上、下油山砂组地层分界为12.5 Ma。

下油砂山组(N_{1x})在柴达木西部地区近山地带岩性较

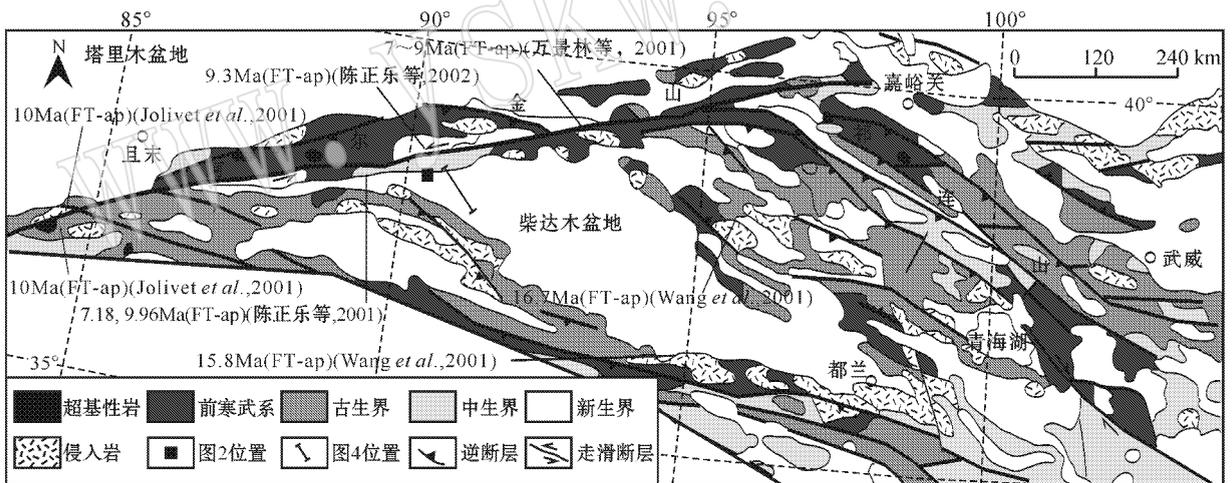


图1 青藏高原北缘地质简图和中新世年龄分布

Fig. 1 Sketch geological map of the northern margin of the Qinghai-Tibet Plateau and age distribution

粗,以棕灰色及灰色砾岩、砾状砂岩为主,这说明阿尔金在当时已有一定高度,可能是受早期隆升的影响,不过早期的隆升均不是区域上大幅度的隆升,因为油泉子、南翼山、大风山、红三旱四号等井下以灰色泥岩为主,山前向盆地中心岩性很快就变为以细碎屑岩为主,过渡为浅湖相沉积。从整个区域上看,下油砂山组一般与下伏上干柴沟组呈整合接触。

上油砂山组(N_{1s})在柴达木西部边缘地区岩性较粗,一般以灰色厚层状砾岩为主,夹浅绿黄色砂岩及浅棕红色泥岩,

向盆地中心部位岩性变细,在油泉子、大风山一带井下出现较多灰色、深灰色泥岩及泥质粉砂岩、砂质泥岩,并夹有泥灰岩。研究区一般分布厚度为224~2232 m。在阿拉、七个泉、红柳泉一带,上覆狮子沟组与下伏地层呈超覆不整合,在阿哈提-小红山以北超覆不整合到古老岩系之上(图2),并普遍超覆不整合在下油砂山组之上。

进入中新世下油砂山期,柴达木盆地由坳陷作用转变为以挤压作用为主^①,在下油砂山组残余厚度图(图3a)上(由

① 葛肖虹,胡勇,马立祥等,2005. 阿尔金断裂、昆仑山前推覆体对柴达木盆地构造形成的控制及柴西地区有利II级油气聚集带的预测(科研报告)。

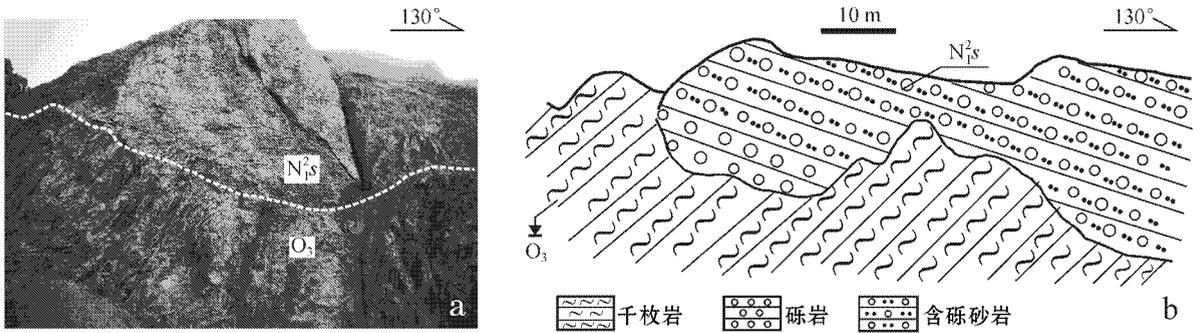


图 2 N_{7s} 与 O_{3t} 超覆不整合的野外照片(a)和素描图(b)

Fig. 2 Overlap unconformity of Upper Miocene and Upper Ordovician (a, photo in the field; b, sketch drawing)

N_{7s}—上油砂山组; O_{3t}—铁石达斯群

N_{7s}—Shangyoushashan Formation; O_{3t}—Tieshidasi Group

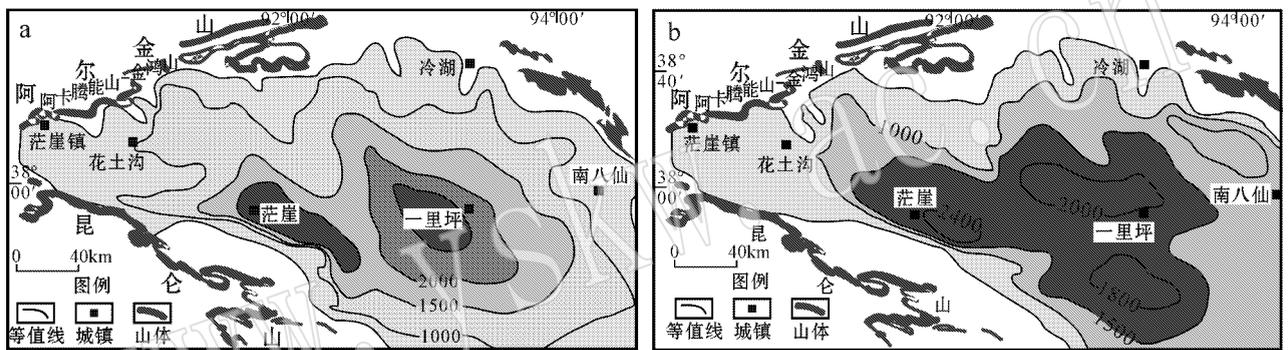


图 3 柴达木盆地中新世下油砂山组(a)和上油砂山组(b)残余厚度图(据资料①、②简化)

Fig. 3 Map showing residual thickness of Miocene Xiayoushashan Formation(a) and Shangyoushashan Formation(b) sediments in western Qaidam Basin

于后期抬升剥露,现在看到的地质厚度不是原来厚度,只是残留地质厚度)发育一近EW向展布的沉降中心(茫崖凹陷),面积2000 km²,最大沉积厚度为1400 m。这个凹陷的形成应该与昆仑山前的推覆作用有关(葛肖虹等,2006)。通过与上油砂山组的残留厚度图(图3b)对比,可发现阿尔金山中阿卡腾能山-金鸿山地区的隆起逐渐向盆地内扩展,导致茫崖凹陷向东南迁移,一里坪凹陷向东扩展,发育另一个沉降中心。上油砂组是在下油砂山组沉积末期经历了一次区域性的隆升,使下油砂山组及其下伏上干柴沟组和下干柴沟组上段遭受强烈剥蚀后的背景下再沉积的,早中新世末有过大规模全区性的隆升,但再次下沉接受沉积,由于受地壳伸展作用的影响,晚中新世拗陷范围却较下油砂山组沉积时有所扩大,在野外露头(图2)地震剖面(图4)上(上油砂山组的底界面在地震剖面上对应于T₂'反射层),都可以见到上油砂山组超覆到

下伏地层之上。

在靠近盆地边缘可以看到上油砂山组超覆到老山上,如在阿克提山南的清水沟看到上油砂山组一套粗碎屑岩系超覆到奥陶系的浅变质岩上(图2),表明高原快速隆升之后,经历了强烈剥蚀夷平作用。盆地边部该组沉积物都为成分成熟度很低的近源堆积物,形成巨厚的山麓洪积相磨拉石堆积,来自索尔库里盆地的研究同样表明上油砂组沉积相主要为山麓洪积相磨拉石(常宏等,2001),物源主要来自阿尔金山。盆地西部地震剖面(图4)清楚地表示出上、下油砂山组之间的关系,它们之间在柴达木盆地西部和阿尔金山附近明显为角度不整合。下油砂山组及其之前的沉积在阿尔金山前和盆地内厚度基本一致,不存在明显的构造事件,盆地内区域研究也表明在整个盆地内都表现为平行不整合。这次隆升事件不仅是山体的隆升,也伴随着柴达木盆地西部的抬升,使盆地沉积

① 葛肖虹,胡勇,马立祥,等. 2005. 阿尔金断裂、昆仑山前推覆体对柴达木盆地构造形成的控制及柴西地区有利Ⅱ级油气聚集带的预测(科研报告).

② 青海油田勘探开发研究院. 2005. 地震统层资料(内部报告).

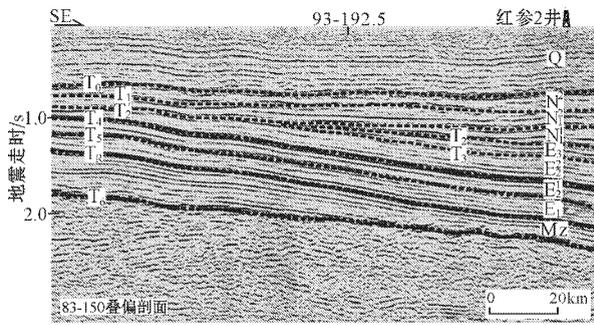


图 4 柴达木盆地西缘 83-1050 地震剖面(剖面位置见图 1 茫崖东 83-1050 测线)^①

Fig. 4 83-1050 seismic section on the western margin of Qaidam Basin (section location shown in Fig. 1)

中心向东迁移。

2.2 柴达木盆地周缘山系同期隆升的热年代学证据

阿尔金山内 10 Ma 左右的冷却事件被广泛报道(Jolivet *et al.*, 1999, 2001; 万景林等, 2001; 陈正乐等, 2001), Jolivet 等(1999)利用³⁹Ar/⁴⁰Ar FT 热年代学方法得出阿尔金山大部分地区自 10 Ma 左右冷却速率从 $0.8 \pm 0.3^\circ\text{C}/\text{Ma}$ 突然增至 $8 \pm 2^\circ\text{C}/\text{Ma}$ 和本文前面通过柴达木盆地西部地区的研究结论相一致。最近 Sun 等(2005)从阿尔金山北侧盆地的磨拉石的磁性地层学和沉积学推断青藏高原北缘在 13.7 Ma 左右有一期隆升事件, Wang 等(2003)在对肃北盆地的生物地层研究中也认为, 党河南山在中新世中期有一次比较强烈的抬升运动。东昆仑山(Jolivet *et al.*, 1999; Wang *et al.*, 2004)和南祁连山(Wang *et al.*, 2004)的花岗(闪长)岩体曾得到中新世的磷灰石裂变径迹年龄。北祁连山寒武纪—上新世不同时代沉积地层中的磷灰石也均保留了 20~10 Ma 左右的裂变径迹年龄(George *et al.*, 2001)。Zheng 等(2006)根据六盘山逆冲断裂上盘白垩系砂岩磷灰石 FT 年代学研究表明, 在 7.3~8.2 Ma 有一次快速冷却事件, 他们解释这是青藏高原向北生长隆升的标志。此外, Song 等(2001)根据酒泉盆地 13 Ma 以来地层的沉积环境分析, 结合磁性地层年龄, 发现约 8.2 Ma 时沉积速率由 0.16 mm/a 突然增至 0.3 mm/a, 认为是由于祁连山开始隆升造成的。通过对天水盆地晚新生代砂岩和含砾砂岩地层中碎屑颗粒磷灰石裂变径迹研究, 推断 14.1 Ma 左右天水盆地北部沉积物源区西秦岭发生了一次构造热事件, 估算 14.1 Ma 西秦岭北部快速抬升事件的平均剥蚀速率达 1.05 mm/a, 也认为与青藏高原隆升有关(王修喜等, 2006)。

上述证据表明, 青藏高原北缘的主要隆升时期应为中晚中新世。Rieser 等(2008)认为下油山组到上油砂山组 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 突然下降是中新世气候干旱引起的, 并进一步推断这是

阿尔金山最强烈的隆升期。An 等(2001)研究认为, 大约 9~8 Ma 前在巴基斯坦成壤碳酸盐岩中氧同位素成分的改变、植物从 C3 型植物到 C4 型植物的改变以及 8.5 Ma 前青藏高原东北边缘植被从针叶林和阔叶林混生到草地的转化、亚洲内部强烈干旱化、印度和东亚季候风的出现(8~9 Ma)等现象, 都是由青藏高原在 9~8 Ma 前隆升导致的。

一般认为高原南部昆仑山以南地区在始新世—渐新世隆升(李吉均, 1999; 施雅风等, 1999), 但主体隆升在中晚中新世(Harrison *et al.*, 1992; Molnar *et al.*, 1993), 也可能更晚(李吉均, 1999; 施雅风等, 1999), 但中晚中新世存在隆升事件确实是不争的事实, 如来自孟加拉海扇沉积物研究(Copeland and Harrison, 1990; Kazuo and Asaira, 1992)和高原内部大量钾质、超钾质火山岩研究(Arnaud *et al.*, 1992; Turner *et al.*, 1993, 1996; Yang *et al.*, 1997; Miller *et al.*, 1999)表明, 整个青藏高原在 13 Ma 左右有一次隆升(Turner *et al.*, 1993, 1996), 许多学者更强调高原东西向伸展是高原隆升到一定高度的重要标志, 南北向正断层的形成时间也多集中在 14 Ma 左右(Coleman and Hodges, 1995; Blisniuk *et al.*, 2001), 可见整个青藏高原在中晚中新世大范围同步隆升。当然近年来自高原南部大量资料表明可能在渐新世晚期或中新世早中期已隆升到海拔 4 000 m 高度(吴珍汉等, 2007), 伦坡拉盆地可能在 35 ± 5 Ma 已超过 4 000 m(Rowley and Currie, 2006), 这些隆升事件就归于高原的早期隆升, 已被许多学者认同(钟大赉等, 1996; 李吉均, 1999; 施雅风等, 1999), 争论的焦点问题是早期隆升海拔高度存在着多种观点(吴珍汉等, 2007)。这在研究区也有同期事件的响应(袁四化等, 2006), 如在柴西盆地~30 Ma 沉积速率的加快也是受高原隆升的影响(Sun *et al.*, 2005), 但是隆升幅度都不如南部。这也说明高原隆升存在时空的差异(李吉均等, 1979; 钟大赉等, 1996)。另外, 张培震等(2006)通过对高原东北缘祁连山、六盘山、积石山及邻区的盆地构造变形研究, 认为高原向北扩展隆升的时间为 10~5 Ma (~8 Ma), 宋友桂等(2001)通过对六盘山山麓剥蚀面上的红层和陇东盆地的红黏土磁性地层和地貌学研究认为, 它们均开始形成于 8.1 Ma, 表明夷平面发育终止, 六盘山开始隆升, 是青藏高原隆升的响应。

从上述利用不同方法和来自不同地区的证据都表明中晚中新世是大规模构造事件、热隆升事件、岩浆活动、沉积和气候变化等区域性变化的时期, 标志着青藏高原的快速隆升。所以中晚中新世(15~8 Ma)是高原垂向隆升和向北部扩展的重要时期, 高原才作为一个整体的雏型形成。渐新世末或中新世早期甚至更早的隆升主要体现在昆仑山以南的高原。正确认识高原何时作为一个整体是非常重要的, 是建立高原隆升机制重要的约束条件。

① 青海油田勘探开发研究院, 2005. 地震统层资料(内部报告).

3 阿尔金山的隆升机制初探

对于阿尔金山的隆升, Jolivet 等(1999)认为是由于塔里木盆地开始向青藏高原北部俯冲引起的, 塔里木盆地的俯冲事件形成了阿尔金山前的逆冲断裂, 人工地震折射、深反射地震也显示塔里木地块向阿尔金山下俯冲(许志琴等, 2001), 甚至已经俯冲到柴达木地块之下(Zhao *et al.*, 2006)。Yue 和 Liu(1999)认为阿尔金断裂在 13~6 Ma 有一次走滑事件, 陈正乐等(2002)认为阿尔金断裂带 8 Ma 左右存在一次快速走滑。也有学者认为阿尔金断裂起始于中中新世(Wang, 1997)。尽管走滑的起始时间有许多观点(Liu *et al.*, 2007), 但中晚中新世的走滑事件是确定的。从阿尔金山本身来看, 一些学者认为阿尔金山的隆升主要是在压扭性应力场作用下以走滑断裂为中心向两侧逆冲导致(李海兵等, 2001, 2006; 许志琴等, 2001, 2004), 无论在地表和深部都表现出同样的逆冲堆叠现象。目前对于高原北缘的隆升, 大多限于隆升时间的探讨, 而对于隆升机制研究相对薄弱, 远不及南部和东部, 许志琴等(1999)等综合地质与地球物理角度把阿尔金古老地质体抬升总结为阿尔金“逆冲-转换”型挤出, 我们的数据也支持这种模式, 并把这种以转换挤压引起的山脉隆升形象地称之为走滑花状挤出隆升(袁四化等, 2006)。不仅地壳浅部具有这种表现形式, 地壳中部层次的韧性变形组合也表现为类似的构造样式。地壳深部层次由于地震资料揭示, 塔里木地块是向柴达木盆地下向俯冲的(Wittlinger *et al.*, 1998; 姜枚等, 1999; Zhao *et al.*, 2006)。人工与天然地震结合的层析结果表明, 这种俯冲可能是岩石圈尺度的(Wittlinger *et al.*, 1998; 姜枚等, 1999)。

综上所述, 阿尔金断裂类似于板块间的斜向汇聚边界, 走滑剪切伴随地壳中上部的向两侧逆冲, 同时塔里木地块向柴达木地块下俯冲, 具有特殊的走滑花状剥露形式。

4 结论与讨论

经柴西地区的沉积特征、地震剖面资料的综合分析研究表明, 阿尔金山在中晚中新世发生一次重要的隆升事件, 这次隆升使得柴达木盆地周边上油砂山组和下油砂山组存在明显不整合, 在此之前(古近纪)没有明显的构造事件。这期构造对两侧原型盆地或同沉积盆地有一定改造。对阿尔金山两侧盆地的对比及其油气勘探具有重要的参考价值。中晚中新世不仅青藏高原北缘存在广泛的构造事件, 也存在明显的隆升热事件, 使高原北缘的山系全面整体大规模抬升。综合前人的研究成果(如 Molnar, Harrison), 高原南部也存在同期隆升, 在青藏高原的东南缘也有同期事件的记录, 如 Kirby 等(2002)报道了在龙门山也存在 12~5 Ma[黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar、钾长石 MDD、锆石和磷灰石(U-Th)/He]快速冷却事件, 是高原东缘快速剥露的结果。在高原的东南缘, Clark 等(2005)

用河流切割作为高原地表隆升的指标, 通过对长江上游、大渡河、雅龙江、安宁河等深切河谷的不同深度花岗岩中磷灰石(U-Th)/He 和 FT 热年代研究表明, 高原东南缘原来低海拔准平原化的地形快速抬升发生在 13~9 Ma 之间, 河流下切速率达 0.25~0.5 mm/a。

以上说明青藏高原此时内外表现为大幅度整体隆升, 高原已经向外扩展, 与现今的范围基本一至, 高原的雏形基本形成。高原早期的隆升可能仅限于冈底斯到昆仑山以南的地区, 当然最终高原的定型仍然可能是上新世以来(李吉均等, 1979; 潘桂棠等, 1990; 钟大赉等, 1996; 施雅风等, 1999), 我们的研究也支持这一认识, 因为虽然柴达木盆地西部大面积整体抬升, 沉积中心向东迁移, 柴达木盆地中东部仍然是以沉降接受沉积为主。尽管吴珍汉等(2007)根据湖相沉积碳同位素-年均气温-海拔高度建立的古海拔高度计测算出柴达木盆地当时高度与现在相差不大, 但同时他们也认为由于柴达木盆地碳同位素具有显著的低异常, 对此仍难以给出合理的解释, 所以古高程的研究越来越受到重视, 并取得了重要的进展(Rowley and Currie, 2006; 吴珍汉等, 2007a, 2007b)。现有资料表明高原南部在印度与欧亚大陆碰撞开始后不久, 约 35 Ma 已大规模地隆升(Rowley and Currie, 2006), 但是否能达到海拔 4 000 m 以上, 还需要进一步验证。从目前的研究进展来看, 青藏高原不但具有从南向北生长模式(Tapponnier *et al.*, 2001)还具有从中部向周围扩展的生长模式。

关于青藏高原隆升机制有许多种说法, 至今仍未有圆满的答案, 归纳起来其动力学机制受三大动力源的制约: 一是印度板块的挤压和周缘地块的阻力; 二是高原内部的热力作用、热效应; 三是均衡调整。但是印度板块的挤压和周缘地块的阻力被作为基本因素(肖序常等, 2000), 这一点一直受到广大地质学家的重视(潘桂棠等, 1990; 钟大赉等, 1996; 蔡学林等, 1999; 许志琴等, 1999; 肖序常等, 2000)。地球物理学家认为高原整体抬升与地壳缩短加厚的物理力学机制是印度与欧亚两大陆板块碰撞、挤压为主体, 重力的均衡补偿效应和热状态等则为主因导致的派生效应(滕吉文等, 1996a, 1996b), 我们同意把印度大陆向高原下的陆内汇聚作为高原隆升的主要因素, 大量证据表明喜马拉雅主边界逆冲断裂的出现(活动)时间(Meigs *et al.*, 1995; Arita *et al.*, 1997; DeCelles *et al.*, 1998)为 10 Ma 左右, 这期事件不但与中晚中新世阿尔金山的隆升和阿尔金断裂走滑时间相一致, 也与高原内部和周缘山脉的隆升时间也是一致的, INDEPTH 深反射地震剖面已经证实主中央断层和主边界断裂向下均延伸到主喜马拉雅断层, 印度地壳就是沿主喜马拉雅断层向西藏下俯冲的(Zhao *et al.*, 1993)。这表明印度次大陆沿主边界断裂向欧亚大陆下强烈的陆内汇聚为青藏高原中晚中新世的抬升提供了动力学源, 这个时间也是岩石圈的对流剥离(Molnar *et al.*, 1993)或拆沉(Turner *et al.*, 1993)的时期, 可能这对高原内部的隆升起到了很大的作用。

上述分析表明, 中晚中新世青藏高原隆升和印度板块与

欧亚大陆拼合后持续向北的挤压有关。在印度次大陆向北部欧亚大陆下强烈的俯冲作用的区域构造背景下,周边的刚性块体被动阻隔,被迫向高原下楔入,周边以走滑、逆冲推覆隆升为主,内部隆升较为复杂,岩石圈的对流剥离或拆沉引起高原内部的伸展隆升,大量幔源物质加入,使高原内部地壳加厚隆升。

对于高原隆升的时空模式和动力学机制,应该考虑以下几个方面:可能是印度大陆与欧亚大陆初始碰撞,引起碰撞带两侧先发生隆升,洋壳消减,洋陆转换是主要动力学因素;到渐新世末—早中新世初特提斯喜马拉雅到昆仑山以南的高原形成,高原周缘和内部各块体间发生逆冲推覆,走滑转换引起地壳缩短加厚,同时块体内部也发生地壳缩短,陆陆碰撞、主中央断裂形成,陆内强烈汇聚是主要动力源,中晚中新世高原向外扩展,高原周缘和内部各块体间表现的构造变形与上一期隆升效应差不多,但是高原中部的块体没有明显块体的缩短,表现为整体抬升,奠定高原轮廓,这个时期是动力机制最为复杂的时期,高原内外的隆升表现大不相同,同样是周边也不是相同,南缘和东北缘为可能为逆冲推覆隆升,北缘阿尔金为转换挤压隆升,东缘发育走滑层,以垂向抬升为主,并不发育逆冲推覆构造。内部较大程度上可能是受到热效应和均衡调整作用;上新世以来高原发生大规模的抬升,喜马拉雅山前主前锋断裂强烈活动,阿尔金继续走滑,同时向两侧盆地逆冲推覆,祁连山向河西走廊逆冲推覆,高原周缘出现大量磨拉石,普遍表现为下、中更新统之间的角度不整合,高原内部为整体隆升,不存在这种角度区域性角度不整合。诚然,高原隆升是一个极其复杂的问题,还要考虑很多问题,需要各个时期不同块体确切的古高程的配合,才能得出较为合理的解释,对高原前新生代的不同来源的块体的了解与研究新生代隆升同样具有重要意义。

致谢 野外工作和钻井、地震剖面资料收集得到青海油田勘探开发研究院的支持和帮助,文献收集得到中国科学院地质与地球物理研究所靳春胜博士的帮助,潘桂棠研究员、陈智梁研究员给予耐心指导,审稿人提出了有益的建议,使作者受益匪浅,在此一并表示衷心的感谢。

References

- An Zhisheng, Kutzbach J E, Prell W L, *et al.* 2001. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibet plateau since late Miocene times[J]. *Nature*, 411 : 62 ~ 66.
- Arita K, Dallmeyer R D and Takasu A. 1997. Tectonothermal evolution of the Lesser Himalaya, Nepal: Constraints from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages from the Kathmandu napp[J]. *The Island Arc*, 6 : 373 ~ 385.
- Arnaud N O, Vidal P, Tapponnier P, *et al.* 1992. The high- K_2O volcanism of northwestern Tibet: Geochemistry and tectonic implications[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 111 : 351 ~ 367.
- Blisniuk P M, Hacker B R, Glodny J, *et al.* 2001. Normal faulting in central Tibet since at least 13.5 Ma ago[J]. *Nature*, 412 : 628 ~ 832.
- Cai Xuelin, Cao Jiamin, Liu Yuanchao, *et al.* 1999. Geodynamic models of multidirectional collision-wedging uplift of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Earth Science Frontiers*, 6(3) : 181 ~ 189(in Chinese with English abstract).
- Cande S C and Kent D V. 1995. Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the Late Cretaceous and Cenozoic[J]. *Journal of Geophysical Research*, 100(B4): 6 093 ~ 6 095.
- Chang Hong, Fang Xiaomin, An Zhi sheng, *et al.* 2001. Miocene-Pliocene Strata Features in the Suerkal Basin and the Palaeo-environment Significance[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 21(3) : 11 ~ 16(in Chinese with English abstract).
- Chen Zhengle, Gong Hongliang, Li Li, *et al.* 2006. Cenozoic uplifting and exhumation process of the Altyn Tagh mountains[J]. *Earth Science Frontiers*, 13(4) : 91 ~ 102(in Chinese with English abstract).
- Chen Zhengle, Wan Jinglin, Wang Xiaofeng, *et al.* 2002. Rapid strike-slip of the Altyn Tagh Fault at 8 Ma and its geological implications[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(4) : 295 ~ 300(in Chinese with English abstract).
- Chen Zhengle, Zhang Yueqiao, Wang Xiaofeng, *et al.* 2001. Fission track dating of apatite constrains on the Cenozoic uplift of the Altyn Tagh Mountain[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(5) : 413 ~ 418(in Chinese with English abstract).
- Clark M K, House M A, Royden L H, *et al.* 2005. Late Cenozoic uplift of southeastern Tibet[J]. *Geology*, 33 : 525 ~ 528.
- Coleman R and Hodges K. 1995. Evidence for Tibetan plateau uplift before 14 Myr ago from a new minimum age for east-west extension[J]. *Nature*, 374 : 49 ~ 52.
- Copeland P and Harrison T M. 1990. Episodic rapid uplift in the Himalaya revealed by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analysis of detrital K-feldspar and muscovite, Begal far[J]. *Geology*, 18 : 354 ~ 357.
- Cui J, Tang Z, Deng J, *et al.* 1997. Early Paleozoic plate tectonic regime of the Altyn Tagh[A]. *Proceedings of the 30th International Geological Conference*[C] : 7 : 59 ~ 74.
- DeCelles P G, Gehrels G E, Quade J, *et al.* 1998. Neogene foreland basin deposits, erosional unroofing, and the kinematic history of the Himalayan fold-thrust belt, western Nepal[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 110 : 2 ~ 21.
- Fang Xiaomin, Zhang Weilin, Meng Qingquan, *et al.* 2007. High-resolution magnetostratigraphy of the Neogene Huaitoutala section in the eastern Qaidam Basin on the NE Tibetan Plateau, Qinghai Province, China and its implication on tectonic uplift of the NE Tibetan Plateau[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 258(1 ~ 2) : 293 ~ 306.
- Ge Xiaohong and Liu Jiulai. 1999. Formation and tectonic background of the Northern Qilian orogenic belt[J]. *Earth Science Frontiers*, 6(4) : 223 ~ 230.
- Ge Xiaohong, Liu Yongjiang and Ren Shoumai. 2002. Uplift dynamics of the Qinghai-Tibet Plateau and Altun fault[J]. *Geology in China*,

- 29(4): 346~350.
- Ge Xiaohong, Ren Shoumai, Ma Lixiang, *et al.* 2006. Multi-stage uplifts of the Qinghai-Tibet plateau and their environmental effects [J]. *Earth Science Frontiers*, 13(6): 118~130(in Chinese with English abstract).
- Gehrels G E, Yin A and Wang X F. 2003. Detrital-zircon geochronology of the northeastern Tibetan plateau [J]. *GSA Bulletin*, 115: 881~896.
- George A D, Marshallsea S J, Wyrwoll K H, *et al.* 2001. Miocene cooling in the northern Qilian Shan, northeastern margin of the Tibetan Plateau, revealed by apatite fission-track and vitrinite-reflectance analysis [J]. *Geology*, 29(10): 939~942.
- Harrison T M, Copeland P, W S F, *et al.* 1992. Raising Tibet [J]. *Science*, 255: 1663~1670.
- Jiang Mei, Xu Zhiqin, Xue Guangqi, *et al.* 1999. Seismic Profiling Between Mangnai Qinghai and Ruoqiang, Xinjiang and Infrastructure Study [J]. *Acta Geologica Sinica*, 73(2): 153~161(in Chinese with English abstract).
- Jolivet M, Brunel M, Seward D, *et al.* 2001. Mesozoic and Cenozoic tectonics of the northern edge of the Tibetan plateau: fission-track constraints [J]. *Tectonophysics*, 343(1~2): 111~134.
- Jolivet M, Roger F, Arnaud N, *et al.* 1999. Exhumation history of the Altyn shan with evidence for the timing of the subduction of the Tarim block beneath the Altyn Tagh system, North Tibet [J]. *C R Acad Sci Paris, Sciences de la terre et des planets*, 329: 749~755.
- Kazuo Amano and Asaira Taira. 1992. Two phase uplift of Higher Himalayas since 17 Ma [J]. *Geology*, 20: 391~394.
- Kirby E, Reiners P W, Kro M A, *et al.* 2002. Late Cenozoic evolution of the eastern margin of the Tibetan Plateau: inferences from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and (U-Th)/He thermochronology [J]. *Tectonics*, 21, DOI: 10.1029/2000TC001246.
- Li Haibing, Yang Jingsui, Shi Rendeng, *et al.* 2002. Determination of the Altyn Tagh strike-slip fault basin and its relationship with mountains [J]. *Chinese Science Bulletin*, 47(7): 572~577.
- Li Haibing, Yang Jingsu, Xu Zhiqin, *et al.* 2006. The constraint of the Altyn Tagh fault system to the growth and rise of the northern Tibetan plateau [J]. *Earth Science Frontiers*, 13(4): 59~79(in Chinese with English abstract).
- Li Jijun. 1979. A discussion on the period, amplitude and type of the uplift of the Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Scientia Sinica*, 22(11): 1314~1328.
- Li Jijun. 1999. Studies on the geomorphological evolution of the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and Asian monsoon [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 19(1): 1~11(in Chinese with English abstract).
- Liu Yongjiang, Neubauer Franz, Ge Xiaohong, *et al.* 2007. Geochronology of the Altun fault zone and rising of the Altun mountain [J]. *Chinese Journal of Geology*, 42(1): 134~146(in Chinese with English abstract).
- Liu Yongjiang, Neubauer Franz, Genser Johann, *et al.* 2007. Geochronology of the initiation and displacement of the Altyn Strike-Slip Fault, western China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29: 243~252.
- Meigs A J, Burbank D W and Beck R A. 1995. Middle-late Miocene (> 10Ma) formation of the Main Boundary thrust in the western Himalaya [J]. *Geology*, 23(5): 423~426.
- Meng Qingren, Hu Jianmin and Yang F Z. 2001. Timing and magnitude of displacement on the Altyn Tagh fault: constraints from stratigraphic correlation of adjoining Tarim and Qaidam basins, NW China [J]. *Terra Nova*, 13: 86~91.
- Miller C, Schuster R, Klotzli U, *et al.* 1999. Post-Collisional Potassic and Ultrapotassic Magmatism in SW Tibet: Geochemical and Sr-Nd-Pb-O Isotopic Constraints for Mantle Source Characteristics and Petrogenesis [J]. *Journal of Petrology*, 40(9): 1399~1424.
- Molnar P, England P and Martinod J. 1993. Mantle dynamics, uplift of the Tibetan plateau, and the Indian monsoon [J]. *Reviews of Geophysics*, 31: 357~396.
- Pan Guitang, Wang Peisheng, Xu Yaorong, *et al.* 1990. Cenozoic Tectonic Evolution of the Qinghai-Xizang Plateau [M]. Beijing, Geological Publishing House (in Chinese).
- Rieser A B, Neubauer F and Liu Y J. 2005. Sandstone provenance of north-western sectors of the intracontinental Cenozoic Qaidam Basin, western China: tectonic vs. climatic control [J]. *Sedimentary Geology*, 177: 1~18.
- Rieser A B, Bojar A V, Neubauer F, *et al.* 2008. Monitoring Cenozoic climate evolution of northeastern Tibet: stable isotope constraints from the western Qaidam Basin, China [J]. *International Journal of Earth Sciences* (in press), DOI 10.1007/s00531-008-0304-5.
- Ritts B D and Biffi U. 2000. Magnitude of post-Middle Jurassic (Bajocian) displacement on the central Altyn Tagh fault system, northwest China [J]. *GSA Bulletin*, 112(1): 61~74.
- Rowley D B and Currie B S. 2006. Palaeo-altimetry of the late Eocene to Miocene Lunpola basin, central Tibet [J]. *Nature*, 439: 677~681.
- Shi Yafeng, Li Jijun, Li Bingyuan, *et al.* 1999. Uplift of the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and East Asia Environmental Change during Late Cenozoic [J]. *Acta Geographica Sinica*, 51(4): 10~20(in Chinese with English abstract).
- Sobel E R, Arnaud N, Jolivet M, *et al.* 2001. Jurassic to Cenozoic exhumation history of the Altyn Tagh range, northwest China, constrained by $\text{Ar}^{-40}/\text{Ar}^{-39}$ and apatite fission track thermochronology [A]. *Paleozoic And Mesozoic Tectonic Evolution Of Central Asia: From Continental Assembly To Intracontinental Deformation* [C]. *Geological Society of America Memoir*, 194: 247~267.
- Song Chunhui, Fang Xiaomin, Li Jijun, *et al.* 2001. Tectonic uplift and sedimentary evolution of the Jiuxi Basin in the northern margin of the Tibetan Plateau since 13Ma BP [J]. *Science in China (D Series)*, 44(Supp.): 192~202.
- Song Yougui, Fang Xiaomin, Li Jijun, *et al.* 2001. The Late Cenozoic uplift of the Liupan Shan, China [J]. *Science in China, Ser. D*, 44(S1): 176~184.

- Sun Zhiming, Yang Zhenyu, Pei Junling, *et al.* 2005. Magnetostratigraphy 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*, 237: 635 ~ 646.
- Tapponnier P, Xu Zhiqin, Roger F, *et al.* 2001. Oblique Stepwise Rise and Growth of the Tibet Plateau [J]. *Science*, 294: 1 671~1 677.
- Teng Jiwen, Zhang Zhongjie, Hu Jiafu, *et al.* 1996a. Physical-mechanical mechanism for the whole uplifting of the Qinghai-Xizang Plateau and the Lateral shortening and vertical thickening of the crust (1) [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2(2): 121~133 (in Chinese with English abstract).
- Teng Jiwen, Zhang Zhongjie, Hu Jiafu, *et al.* 1996b. "Physical-mechanical mechanism for the whole uplifting of the Qinghai-Xizang Plateau and the Lateral shortening and vertical thickening of the crust (2) [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2(3): 307~319 (in Chinese with English abstract).
- Turner S, Arnaud N, Liu J, *et al.* 1996. Post-collision, Shoshonitic Volcanism on the Tibetan Plateau: Implications for Convective Thinning of the Lithosphere and the Source of Ocean Island Basalts [J]. *Journal of Petrology*, 37(1): 45~71.
- Turner S, C Hawkesworth, J Liu, *et al.* 1993. Timing of Tibetan uplift constrained by analysis of volcanic rocks [J]. *Nature*, 364: 50~54.
- Wan Jinglin, Wang Yu, Li Qi, *et al.* 2001. FT evidence of Northern Altyn uplift in Late-Cenozoic [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 20(4): 222~224 (in Chinese with English abstract).
- Wang Erchie. 1997. Displacement and timing along the northern strand of the Altyn Tagh fault zone, northern Tibet [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 150(1~2): 55~64.
- Wang Fei, Lo Ching-Hua, Li Qi, *et al.* 2004. Onset timing of significant unroofing around Qaidam basin, northern Tibet, China: constraints from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and FT thermochronology on granitoid [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 59~69.
- Wang Jian, Xi Ping and Liu Zechun. 1996. Cenozoic climatic and topographical changes in the western Qaidam basin [J]. *Geological Review*, 42(2): 166~173 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaoming, Wang Banyue, Qiu Zhanxiang, *et al.* 2003. Danhe area (Western Gansu, China) biostratigraphy and implications for depositional history and tectonics of northern Tibetan Plateau [J]. *Earth Planet Science Letters*, 208(3~4): 253~269.
- Wang Xiuxi, Li Jijun, Song Chunhui, *et al.* 2006. Cenozoic Uplift of West Qinling, Northeast Margin of Tibetan Plateau: The record of detrital apatite fission track data in Tianshui Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 24(6): 783~789 (in Chinese with English abstract).
- Wittlinger G, Tapponnier P, Poupinet G, *et al.* 1998. Tomographic Evidence for Localized Lithospheric Shear Along the Altyn Tagh Fault [J]. *Science*, 282: 74~76.
- Wu Zhenhan, Wu Zhonghai, Hu Daogong, *et al.* 2007. Geological Evidence for the Tibetan Plateau Uplifted in Late Oligocene [J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(5): 577~587 (in Chinese with English abstract).
- Wu Zhenhan, Zhao Xun, Ye Peisheng, *et al.* 2007. Paleo-Elevation of the Tibetan Plateau inferred from Carbon and Oxygen Isotopes of Lacustrine Deposits [J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(9): 1 277~1 288 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Xuchang and Li Tingdong. 2000. Tectonic Evolution and Uplift of Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau [M]. Guangdong: Guangdong Science & Technology Press (in Chinese).
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Zhang Jianxin, *et al.* 1999. A comparison between the tectonic units on the two sides of the Altyn sinistral strike-slip fault and the mechanism of lithospheric shearing [J]. *Acta Geologica Sinica*, 73(3): 193~205 (in Chinese).
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui and Jiang Mei. 2001. Collision-orogeny of the northern Qinghai-Tibet Plateau and its deep dynamics [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(1): 5~10 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Jiang Mei, *et al.* 1999. Continental subduction and uplifting of the orogenic belts at the margin of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Earth Science Frontiers*, 6(3): 139~151 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Zeng Lingsen, Yang Jingsui, *et al.* 2004. Role of Large-Scale Strike-Slip Faults in the Formation of Petroleum-Bearing Compressional Basin-Mountain Range Systems [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 29(6): 631~643 (in Chinese with English abstract).
- Yang Fan, Ma Zhiqiang and Xu Tongchun. 1992. A Tertiary Paleomagnetic Stratigraphic Profile in Qaidam Basin [J]. *Acta Petroli Sinica*, 13(2): 97~101 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Bai Wenji, *et al.* 1997. Characteristics and Zonation of the Cenozoic Volcanic Rocks on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Continental Dynamics*, 2(1): 1~11.
- Yin A, Rumelhart P E, Butler R, *et al.* 2002. Tectonic history of the Altyn Tagh fault system in northern Tibet inferred from Cenozoic sedimentation [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 114(10): 1 257~1 295.
- Yuan Sihua, Liu Yongjiang, Ge Xiaohong, *et al.* 2006. Advance in study of Mesozoic-Cenozoic uplift history of the Altyn Mountains [J]. *Global Geology*, 25(2): 164~171 (in Chinese with English abstract).
- Yue Yongjun and Liou J G. 1999. Two-stage evolution model for the Altyn Tagh fault, China [J]. *Geology*, 27(3): 227~230.
- Zhang Jianxin, Zhang L, Xu Zhiqin, *et al.* 2001. Petrology and geochronology of eclogites from the western segment of the Altyn Tagh, northwestern China [J]. *Lithos*, 56: 187~206.
- Zhang Peizhen, Zheng Dewen, Yin Gongming, *et al.* 2006. Discussion on Late Cenozoic growth and rise of northeastern margin of the Tibetan Plateau [J]. *Quaternary Sciences*, 26(1): 5~13 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Jungmeng, Mooney W D, Zhang Xiankang, *et al.* 2006. Crustal structure across the Altyn Tagh Range at the northern margin of the

- Tibetan plateau and tectonic implications[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 241:804~814.
- Zhao Wenjin, Nelson K D and Project-INDEPTH-Team. 1993. Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath southern Tibet[J]. *Nature*, 336:557~559.
- Zheng Dewen, Zhang Peizhen, Wan Jinglin, *et al.* 2006. Rapid exhumation at ~8 Ma on the Liupan Shan thrust fault from apatite fission-track thermochronology: Implications for growth of the northeastern Tibetan Plateau margin[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 248:198~208.
- Zhong Dalai and Ding Lin. 1996. Rising process of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau and its mechanism[J]. *Science in China, Ser. D*, 39(4):369~279.
- ### 附中文参考文献
- 蔡学林, 曹家敏, 刘援朝, 等. 1999. 青藏高原多向碰撞-楔入隆升地球动力学模式[J]. *地学前缘*, 6(3):181~189.
- 常宏, 方小敏, 安芷生, 等. 2001. 索尔库里盆地中—上新世地层特征及其环境意义[J]. *海洋地质与四纪地质*, 21(3):11~16.
- 陈正乐, 宫红良, 李丽, 等. 2006. 阿尔金山脉新生代隆升-剥露过程[J]. *地学前缘*, 13(4):91~102.
- 陈正乐, 万景林, 王小凤, 等. 2002. 阿尔金断裂带8 Ma左右的快速走滑及其地质意义[J]. *地球学报*, 23(4):295~300.
- 陈正乐, 张岳桥, 王小凤, 等. 2001. 新生代阿尔金山脉隆升历史的裂变径迹证据[J]. *地球学报*, 22(5):413~418.
- 葛肖虹, 刘永江, 任收麦. 2002. 青藏高原隆升动力学与阿尔金断裂[J]. *中国地质*, 29(4):346~350.
- 葛肖虹, 任收麦, 马立祥, 等. 2006. 青藏高原多期次隆升的环境效应[J]. *地学前缘*, 13(6):118~130.
- 葛肖虹, 张梅生, 刘永江, 等. 1998. 阿尔金断裂研究的科学问题与研究思路[J]. *现代地质*, 12(3):295~301.
- 姜枚, 许志琴, 薛光琦, 等. 1999. 青海茫崖—新疆若羌地震探测剖面及其深部构造的研究[J]. *地质学报*, 73(2):153~161.
- 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[J]. *科学通报*, 47(1):63~67.
- 李海兵, 杨经绥, 许志琴, 等. 2006. 阿尔金断裂带对青藏高原北部生长、隆升的制约[J]. *地学前缘*, 13(4):59~79.
- 李吉均. 1999. 青藏高原的地貌演化与亚洲季风[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 19(1):1~11.
- 李吉均, 文世宣, 张青松, 等. 1979. 青藏高原隆起的时代、幅度和形式探讨[J]. *中国科学*, 6:508~616.
- 刘永江, Neubauer Franz, 葛肖虹, 等. 2007. 阿尔金断裂带年代学和阿尔金山隆升[J]. *地质科学*, 42(1):134~146.
- 潘桂棠, 王培生, 徐耀荣, 等. 1990. 青藏高原新生代构造演化[M]. 北京:地质出版社.
- 施雅风, 李吉均, 李炳元, 等. 1999. 晚新生代青藏高原的隆升与东亚环境变化[J]. *地理学报*, 54(1):10~20.
- 宋友桂, 方小敏, 李吉均, 等. 2001. 晚新生代六盘山隆升过程初探[J]. *中国科学(D辑)*, 31(增刊):142~148.
- 滕吉文, 张中杰, 胡家富, 等. 1996a. 青藏高原整体隆升与地壳短缩增厚的物理-力学机制研究(上)[J]. *高校地质学报*, 2(2):121~133.
- 滕吉文, 张中杰, 胡家富, 等. 1996b. 青藏高原整体隆升与地壳短缩增厚的物理-力学机制研究(下)[J]. *高校地质学报*, 2(3):307~319.
- 万景林, 王瑜, 李齐, 等. 2001. 阿尔金山北段晚新生代山体抬升的裂变径迹证据[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 20(4):222~224.
- 王建, 席萍, 刘泽纯, 等. 1996. 柴达木盆地西部新生代气候与地形演变[J]. *地质论评*, 42(2):166~173.
- 王修喜, 李吉均, 宋春晖, 等. 2006. 青藏高原东北缘西秦岭新生代抬升——天水盆地碎屑颗粒磷灰石裂变径迹记录[J]. *沉积学报*, 24(6):783~789.
- 吴珍汉, 吴中海, 胡道功, 等. 2007a. 青藏高原渐新世晚期隆升的地质证据[J]. *地质学报*, 81(5):577~587.
- 吴珍汉, 赵逊, 叶培盛, 等. 2007b. 根据湖相沉积碳氧同位素估算青藏高原古海拔高度[J]. *地质学报*, 91(9):1277~1288.
- 肖序常, 李廷栋. 2000. 青藏高原的构造演化与隆升机制[M]. 广州:广东科学技术出版社.
- 许志琴, 姜枚, 杨经绥. 2001. 青藏高原北部隆升的深部构造物理作用——以格尔木—唐古拉山地质及地球物理综合剖面为例[J]. *地质学报*, 75(3):196~206.
- 许志琴, 杨经绥, 姜枚. 2001. 青藏高原北部的碰撞造山及深部动力学——中法地学合作研究新进展[J]. *地球学报*, 22(1):5~10.
- 许志琴, 杨经绥, 姜枚, 等. 1999. 大陆俯冲作用及青藏高原周缘造山带的崛起[J]. *地学前缘*, 6(3):139~151.
- 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[J]. *地质学报*, 73(3):193~205.
- 许志琴, 曾令森, 杨经绥, 等. 2004. 走滑断裂、“挤压性盆-山构造”与油气资源关系的探讨[J]. *地球科学*, 29(6):631~643.
- 杨藩, 马志强, 许同春, 等. 1992. 柴达木盆地第三纪古地磁地层柱[J]. *石油学报*, 13(2):97~101.
- 袁四化, 刘永江, 葛肖虹, 等. 2006. 阿尔金山中—新生代隆升历史研究进展[J]. *世界地质*, 25(2):164~171.
- 张培震, 郑德文, 尹功明, 等. 2006. 有关青藏高原东北缘晚新生代扩展与隆升的讨论[J]. *第四纪研究*, 26(1):5~13.
- 钟大赉, 丁林. 1996. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨[J]. *中国科学(D辑)*, 26(4):289~295.