

文章编号: 1000-0550(2013)05-0824-10

青藏高原北部新生代构造演化在柴达木盆地 中的沉积记录^①

关平 简星

(北京大学地球与空间科学学院 造山带与地壳演化教育部重点实验室 北京 100871)

摘要 青藏高原形成和演化过程中经历的构造活动在高原的盆地中均有相应的沉积记录。柴达木盆地位于青藏高原北部,盆地新生界地层详细地记录了这些构造—沉积响应。对野外剖面和钻井岩心的新生界沉积物进行了多方面研究,其结果显示,柴达木盆地保存了青藏高原北部三个阶段的构造活动信息:①E₁₊₂的红色粗碎屑沉积物指示了始新世早期的强烈活动构造背景,沉积记录具有低ZTR指数和低重矿物稳定指数的特征,记录了全盆地范围内的造山活动和构造隆升事件,是印度—欧亚板块碰撞所致的远程响应。在这次广泛的大面积的造山活动后,区内迅速遭受剥蚀、夷平,自中一晚始新世时期起,接受沉积。因而此时柴达木盆地与可可西里盆地、乃至塔里木盆地为连通的湖盆体系。②阿尔金山前N₁和N₂的粗碎屑沉积物记录了渐新世一早中新世阿尔金山的构造隆升事件,而柴北缘和柴西南的大范围三角洲—湖泊细粒沉积物,具有较高的重矿物稳定指数,反映了平静的构造背景,与阿尔金山断裂快速走滑以及盆地总体稳定向北推移的时间相对应。大量的侧向走滑活动消减了来自印度板块的挤压应力,使得柴北缘和柴西南的沉积源区(即祁连山和东昆仑造山带)处于构造平静期。③中中新世以来全盆地向上变粗的粗碎屑沉积物,具有较低的重矿物稳定指数,记录了青藏高原北部整体强烈的地壳缩短、加厚和快速构造隆升事件。此外,综合物源分析显示,柴达木盆地新生代沉积源区性质随时间并没有发生明显的改变。

关键词 青藏高原 柴达木盆地 构造隆升 沉积记录 盆山耦合

第一作者简介 关平 1960年出生 男 教授 沉积地球化学、成藏动力学与油气聚集 E-mail: pguan@pku.edu.cn

中国分类号 P536 **文献标志码** A

0 引言

新生代早期新特提斯洋消亡,欧亚—印度板块碰撞,青藏高原自此形成^[1,2],随后发生了相应的地壳缩短、加厚、汇聚变形、构造隆升以及向东北侧向挤压推移等构造运动^[3-9],最后在新生代晚期整体强烈、快速地隆升,形成目前的盆—山格局和高原地貌^[3,10,11]。青藏高原的隆升等构造活动能强烈地影响到高原各沉积盆地的沉积作用和气候环境^[12-14],并在相应地层中保存相关的沉积记录。柴达木盆地作为青藏高原北部最大的沉积盆地,是板块汇聚和碰撞远程变形效应的直接结果^[4],盆地中的新生界沉积物很好地记录了青藏高原北部的构造活动历史。

国内外学者对柴达木盆地的新生界地层和沉积记录做过大量的研究,探讨青藏高原北部的构造、气候演化和盆—山特征^[15-24]。然而,青藏高原的隆升具有多阶段、不均匀、非等速等特征^[1,5],并表现出强

烈的时空差异性,高原北部的构造演化史还不清楚。刘永江等^[25,26]通过低温年代学热史、砂岩岩石学和地震剖面的研究认为,中—新生代阿尔金山断裂发生了多次脉冲式走滑活动,自渐新世起阿尔金山发生了多次隆升事件。Yue *et al.*基于阿尔金山相关的构造—沉积学研究,将青藏高原北部的构造活动分为两个阶段^[6-8]:早中新世之前的侧向挤压,早中新世之后的地壳加厚和高原隆升。Yin *et al.*对柴达木盆地西部的第三系沉积物进行了碎屑磷灰石裂变径迹、磁性地层学和砂岩岩石学的研究^[15],认为印度—欧亚板块碰撞后的10~5 Ma内,地壳变形已经到达青藏高原的北部,阿尔金山断裂自49 Ma起开始活动,阿尔金山于晚始新世—早渐新世开始隆升,并成为移动的物源区,向两侧盆地提供碎屑物质。随后他们完成了柴达木盆地的骨干地震剖面解释,认为柴达木盆地和可可西里盆地在古近纪时期处于连为一体的湖盆体系,30~20 Ma之后东昆仑的隆升将两者分开,进而变成现

^①国家科技重大专项(2011ZX05009-002-403)、国家科技重大专项(2011ZX05004-004-005)、国家重点基础研究发展计划项目(2012CB214801)联合资助

收稿日期:2013-07-31

今的盆—山格局^[17]。Zhuang *et al.* 对柴达木盆地、肃北盆地和河西走廊的 11 个新生界野外剖面进行了沉积学、地层学和物源研究^[18]，将青藏高原北部的构造演化分为 4 个阶段，不同阶段的沉积记录和沉积响应具有明显的不同。由此可见，青藏高原北部的构造演化存在不同的认识，需要全面对比柴达木盆地各个区块的沉积记录。同时，前人的研究多是根据盆地周缘的野外露头剖面所得，通过盆地内的钻井所获得的信息甚少，因此需要充分结合露头剖面与钻井取芯进行分析比较研究。

近年来，我们课题组对柴达木盆地的野外露头剖面和重点钻井岩心的新生界沉积物进行了一系列的沉积学、岩石学、重矿物组合、重矿物化学、全岩地球化学和碎屑矿物热年代学和年代学的研究，结合前人的研究成果，从沉积的角度，剖析了青藏高原北部的构造活动历史。本文将集中概括介绍这些成果^[27-30]。

1 区域地质背景

柴达木盆地是印支运动之后发展起来的中、新生界山间含油气盆地，位于青藏高原的东北缘（图 1a），盆地面积约 $1.2 \times 10^5 \text{ km}^2$ ，海拔约为 2 700 ~ 3 000 m，发育并保存了完整、巨厚（平均厚度约 6 km）的新生界沉积物。北侧和南侧分别以祁连山和昆仑山为界，阿尔金断裂处于盆地西侧，将柴达木盆地与塔里木盆地分隔开，因而青藏高原北部具有特殊的盆—山构造格局（如图 1a 所示）。柴达木盆地新生界与中

生界地层或基岩成角度不整合接触，具有陆相沉积的特征，发育冲积扇相、河流相、三角洲相和湖泊相沉积物。

柴达木盆地新生界地层从下到上可以分为 7 个地层单元：路乐河组（ E_{1+2} ）、下干柴沟组（ E_3 ）、上干柴沟组（ N_1 ）、下油砂山组（ N_2^1 ）、上油砂山组（ N_2^2 ）、狮子沟组（ N_2^3 ）和七个泉组（Q），具体的对应时代和年龄界线如图 2 所示。在柴达木盆地石油勘探的地层对比中，又将 E_3 地层分为下干柴沟组下段（ E_3^1 ）和下干柴沟组上段（ E_3^2 ）。图 2 还显示了柴达木盆地及其周缘三大造山带所经历的主要构造事件。

我们的研究内容包括：（1）野外露头 and 钻井的地层对比，（2）沉积相分析，（3）野外露头 and 岩芯样品（包括砾岩、砂岩和泥岩等）的岩石学分析，（4）典型砂岩样品的重矿物分析，（5）典型砂岩碎屑石榴石的矿物化学研究，（6）典型细粒沉积物（包括泥岩和粉砂岩）样品的全岩主量元素和微量元素地球化学分析，（7）典型砂岩样品的碎屑矿物年代学分析。

2 柴达木盆地新生代沉积演化研究

根据柴达木盆地新生界的地层对比和沉积相分析，可以将柴达木盆地新生代沉积演化可以分为三个阶段，分别叙述如下。

2.1 始新世

始新世柴达木盆地 E_{1+2} 地层分布了大面积的红色粗碎屑沉积物（最厚达近 1 000 m），包括砾岩、砂砾岩和含砾砂岩等，具有典型的快速堆积形成特征，

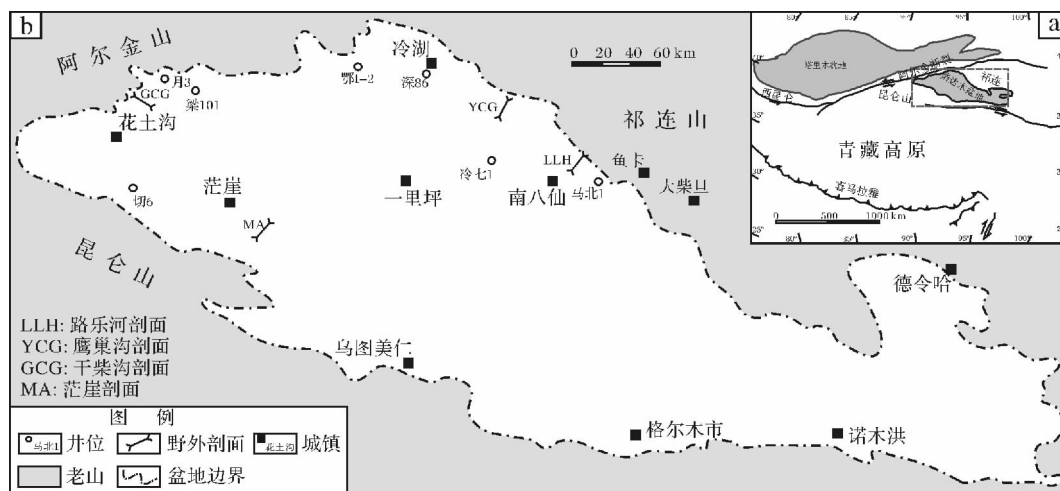


图 1 柴达木盆地所处构造位置 (a) 及地质背景 (b)

(干柴沟剖面 and 茫崖剖面引自 Zhuang *et al.* ^[18])

Fig. 1 The tectonic location of Qaidam Basin in the Tibetan plateau (a) and the geological setting of the northern Qaidam Basin

(the Ganchaigou Section and Mangai Section are cited from Zhuang *et al.* ^[18])

时代	年龄/Ma	地层(组)	厚度/m	岩性柱	构造事件	参考文献
全新世			~100		- 柴达木盆地内部背斜遭受剥蚀	
更新世	2.8	七个泉组(Q) T0	0~>900		- 晚喜马拉雅造山运动(阶段2和阶段3) - 柴达木盆地内部褶皱发育及湖盆拆分	Sun <i>et al.</i> , 1999
上新世	5.3	狮子沟组(N ₂ ³)	600~1800		- 柴达木盆地湖盆萎缩, 向东迁移 - 青藏高原整体快速隆升	Wang <i>et al.</i> , 2006 Molnar <i>et al.</i> , 1993
中新世	~8	T1			- 周缘山脉(祁连山等)显著隆升 - 青藏高原整体强烈地壳缩短和加厚	Wang <i>et al.</i> , 1999 Tapponnier <i>et al.</i> , 2001
		上油砂山组(N ₂ ²)	500~2100			
	~15	T2'			- 阿尔金断裂左行走滑活动(阶段2)	Yue and Liou, 1999
		下油砂山组(N ₂ ¹)	400~2500		- 柴达木盆地显著稳定沉降 - 阿尔金山强烈隆升 - 东昆仑山隆升	Hanson <i>et al.</i> , 2001 Sobel <i>et al.</i> , 2001 刘永江等, 2007 Yin <i>et al.</i> , 2008b
渐新世	~22	T2				
	23				- 阿尔金山初始隆升	Yin <i>et al.</i> , 2002 刘永江等, 2007
渐新世	33.9	上干柴沟组(N ₁)	400~1300		- 阿尔金断裂初始左行走滑活动(阶段1) - 柴西南地壳缩短	Yue and Liou, 1999 Yue <i>et al.</i> , 2001 Wang <i>et al.</i> , 2006
始新世	~35.5	T3				
		下干柴沟组(E ₃)	800~2800		- 柴北缘和南祁连造山带逆冲断裂发育, 地壳大量缩短	Zhou <i>et al.</i> , 2006 Yin <i>et al.</i> , 2008a; 2008b
始新世	~45	T5				
		路乐河组(E ₁₊₂)	700~1400		- 青藏高原地区汇聚收敛 - 印度-欧亚板块碰撞	Molnar and Tapponnier, 1975 Molnar and Tapponnier, 1975
古新世	55.3				- 新特提斯洋闭合	Harrison <i>et al.</i> , 1992

图2 柴达木盆地新生代地层格架及主要构造事件

Fig. 2 The Cenozoic stratigraphic framework and tectonic events of Qaidam Basin and its surrounding mountains

是近源冲积扇体系下的沉积产物(图3)。

前人对柴达木盆地北缘地区的多个野外露头(如路乐河剖面) E₁₊₂ 地层进行了古水流方向的测量,显示了非常一致的西南方向^[18],以变质岩、花岗岩和碳酸岩为主的砾石组成显示了与柴北缘和南祁连山相似的岩石组合特征^[33],这套红色粗碎屑沉积物记录了在柴北缘和南祁连区域内的一次强烈造山活动和构造隆升。从图3还可以看出,始新世早期(E₁₊₂)的沉积中心在西北部地区,如月牙山(月3井)、鄂博梁(鄂1-2井)、冷湖四号(深86井)等,而东部地区 E₁₊₂ 地层较薄,甚至缺失(如马北地区),表明早始新世柴达木盆地仍处于填平补齐的阶段,具有自西向东迁移的特征。柴达木盆地西南部地区 E₁₊₂ 地层也同样地发育了类似的红色粗碎屑沉积物,如昆北地区等(图3),说明本次构造活动为一次全盆地范围内的造山活动。

值得注意的是,上覆的 E₃ 地层主要由一套红色向上变细的中细粒沉积物组成(图3),沉积相分析认为该套沉积物下部为河流—冲积平原相,向上演变成滨浅湖—三角洲相(图3),路乐河剖面的 E₃ 地层也

具有西南方向古水流的特征^[18]。此时造山活动迅速减弱,山体隆起迅速遭受剥蚀、夷平,盆地边界后退,沉积范围扩大。E₃ 上部广泛发育湖泊相沉积物(图3),如柴北缘赛什腾山前发育砂泥互层的滨浅湖相,而昆北地区发育大量灰岩,表明远离陆源碎屑的供给。

2.2 渐新世—早中新世

阿尔金山南缘的野外露头 and 钻井分析显示, N₁ 地层由多套泥岩、灰岩和砂砾岩叠置组成,如红三旱一号三高点剖面^[25, 32]、西岔沟剖面^[33]、干柴沟剖面^[18],月牙山月3井(图3)等,其中泥岩和灰岩等为湖相沉积物,而砂砾岩为浊流相沉积物(图3)。

与阿尔金山前区域不同,柴北缘和柴西南地区, N₁ 和 N₂¹ 地层主要为湖泊—三角洲相细粒沉积物为主。以柴北缘为例,野外剖面和钻井岩心调查显示, N₁ 和 N₂¹ 地层以棕红色、褐色、黄绿色、灰白色、灰色等多种颜色的细粒薄互层沉积物为典型特征(图3)。层理、泥裂、生物扰动和砂体分布等各种沉积构造特征指示其主体为滨浅湖相类型,夹有少量的三角洲相。大面积的具有氧化色(或弱氧化色弱还原色)的薄互层砂泥岩为典型特征,表明此时湖水较浅,湖底

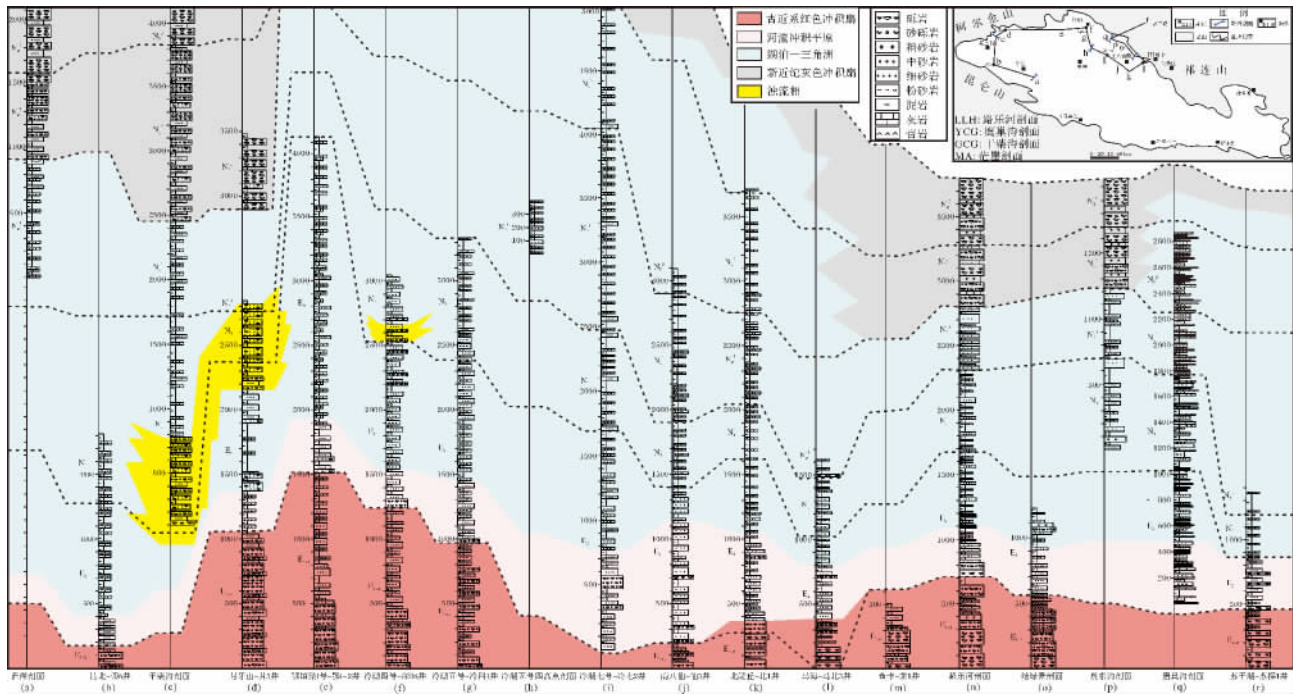


图 3 柴达木盆地钻井和露头剖面地层对比和沉积相演化

Fig. 3 The stratigraphic correlation and facies evolution of drilling wells and outcrop sections in Qaidam Basin

平坦,边缘斜坡宽缓,当盆地发生微小的沉降,或者发生季节性雨水供给,平面上湖水的展布面积会发生巨大的变化,具有伸展拗陷湖盆的特征。柴西南地区的 N_1 和 N_2^1 地层也同样由一套薄互层砂泥岩、泥岩和灰岩组成,如昆北的切 6 井、茫崖剖面等(图 3),延续了 E_3 地层的沉积特性,表明湖相沉积广泛发育。

2.3 中中新世—第四纪

中中新世以来,柴达木盆地的沉积记录发生了明显的变化,柴北缘和柴西南地区由 N_1 和 N_2^1 的砂泥岩薄互层沉积物转变为 N_2^2 和 N_3^3 的以向上变粗为特征的粗碎屑沉积物(图 3)。沉积相分析结果显示由湖泊—三角洲相演化为近源的冲积扇相(图 3),前人对路乐河剖面 N_2^2 和 N_2^3 古流向的研究结果显示了一致的西南方向^[18]。因此,柴达木盆地中中新世至第四纪总体表现为近源的、活动构造背景下的沉积特征。

3 物源分析

3.1 源区构造属性及母岩岩石组成

根据沉积岩石学、重矿物和地球化学特征,可以了解沉积源区的构造属性及母岩组成^[27]。砾岩和砂岩岩石学研究结果显示,新生界沉积物的母岩主要由

变质岩组成,也包括少量的中酸性火成岩和沉积岩等,较低的结构成熟度表明不受沉积再循环的影响。岩石学分析结果在 Dickinson 图解(如图 4a)中显示,柴北缘新生界砂岩源区均具有旋回造山带的构造属性。全岩地球化学分析的结果显示沉积物的稀土元素与大陆上地壳(UCC)和澳大利亚后太古代页岩(PAAS)具有相似的配分模式(如图 4b),球粒陨石标准化后具有轻稀土富集、重稀土平坦、Eu 负异常的一致特征,表明其母岩以长英质岩石为主,详细的地球化学分析结果可见文献^①。

砂岩重矿物组合分析结果同样得到了以变质岩为主、火成岩和沉积岩为辅的母岩类型(图 5),石榴石矿物化学研究表明这些沉积物中的碎屑石榴石主要来自于中低级变沉积岩和中酸性火成岩,少量来自高级麻粒岩相和高级基性变质岩(图 5),与全岩地球化学研究结果相一致。详细的重矿物分析及矿物地球化学研究结果可见文献^[30]。

3.2 源区母岩年龄组成及热历史

沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄组成代表了沉积源区母岩的年龄组成,而碎屑白云母的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄和碎屑磷灰石裂变径迹年龄可以显示源区母岩的热历

① 张富东,关平,简星.柴达木盆地北缘地区,第三纪湖泊沉积特征:干化湖盆模式[J].天然气地球科学,2013,待刊

史及相关冷却事件的年龄信息。柴北缘新生界典型砂岩样品分析结果如图6所示。

碎屑锆石 U-Pb 年龄谱显示源区母岩具有 5 个年

龄段的锆石,分别为: 230 ~ 300 Ma(二叠纪—三叠纪,以二叠纪年龄为主); 400 ~ 480 Ma(奥陶纪—早泥盆世); 800 ~ 1 000 Ma(新元古代); 1 750 ~ 2 000 Ma

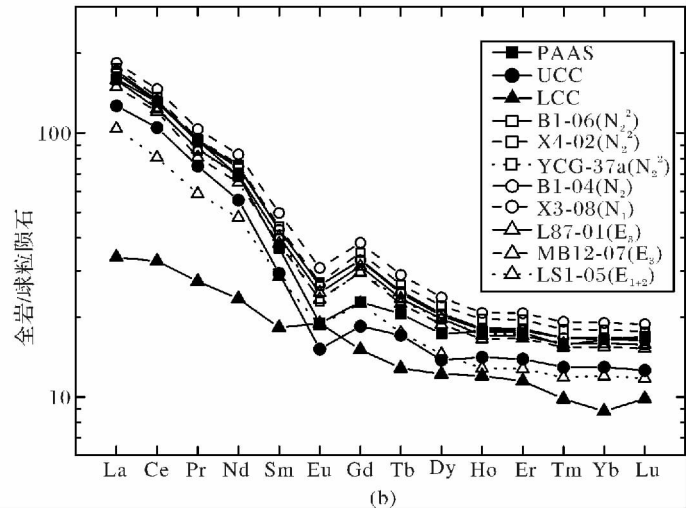
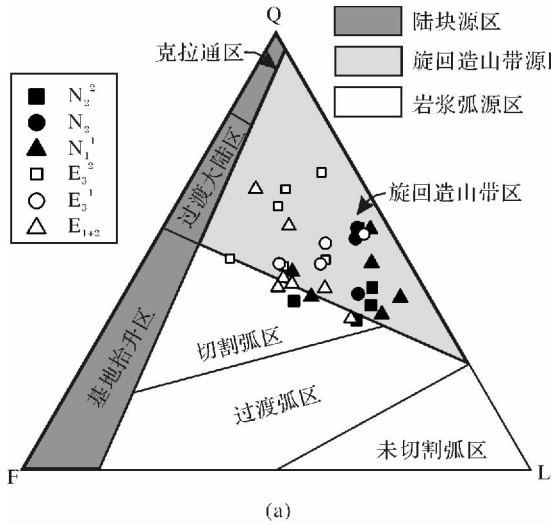


图4 岩石学和全岩地球化学物源分析结果(数据引自 Jian et al. [30, 2])

a. Q-F-L 图解^[34, 35], Q: 石英(包括单晶石英和多晶石英), F: 长石, L: 岩屑; b. 球粒陨石标准化的稀土元素配分模式^[36] 图中同时显示了澳大利亚后太古代页岩(PAAS)、平均大陆上地壳(UCC)和大陆下地壳(LCC)的标准化数据^[37]

Fig. 4 Provenance analysis results of sandstone petrography and whole-rock geochemistry (for data, see Jian et al. [30, 2])

a. The ternary Q-F-L diagram^[34, 35], Q: quartz (including monocrystalline quartz and polycrystalline quartz), F: feldspar, L: lithic fragments; b. Patterns for the rare earth elements (REE) normalized against chondrite^[36], including PAAS, UCC and LCC^[37]

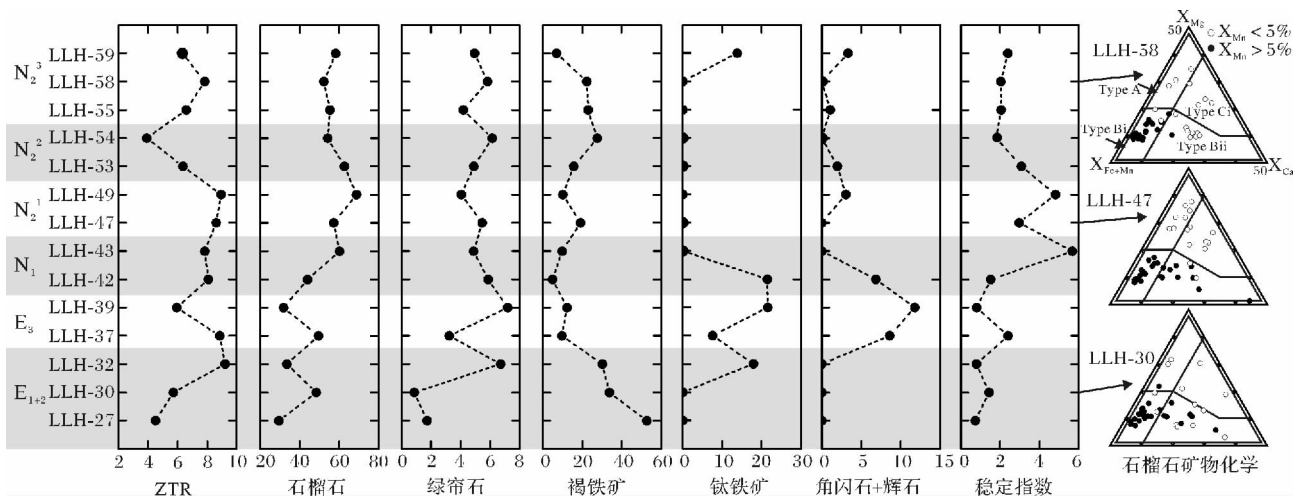


图5 路乐河剖面砂岩重矿物分布特征和石榴石矿物化学(数据引自 Jian et al. [30])

ZTR: 锆石、电气石和金红石三种碎屑重矿物的总和 稳定指数 = (锆石 + 电气石 + 金红石 + 白钛石 + 石榴石 + 锐钛矿 + 磷灰石 + 榍石) / (绿帘石 + 绿泥石 + 辉石 + 角闪石 + 褐铁矿 + 钛铁矿 + 磁铁矿), 右侧为碎屑石榴石 Mg - Fe + Mn - Ca 判别图解^[40], 样品分别为 LLH-30 (E₁₊₂)、砂岩 LLH-47(N₂)、砂岩 LLH-58(N₂)

Fig. 5 The heavy mineral assemblages and detrital garnet mineral chemistry of sandstones from Lulehe section

(for data, see Jian et al. [30]).

ZTR = total of zircon, tourmaline and rutile; Stability Index = (zircon + tourmaline + rutile + leucocoxene + garnet + anatase + apatite + titanite) / (epidote + chlorite + pyroxene + hornblende + limonite + ilmenite + magnetite); The Mg - Fe + Mn - Ca ternary discrimination diagram proposed by Mange and Morton^[40]; Sandstone samples: LLH-30 from Lulehe Formation; LLH-47 from Xia Youshashan Formation; LLH-58 from Shizigou Formation.

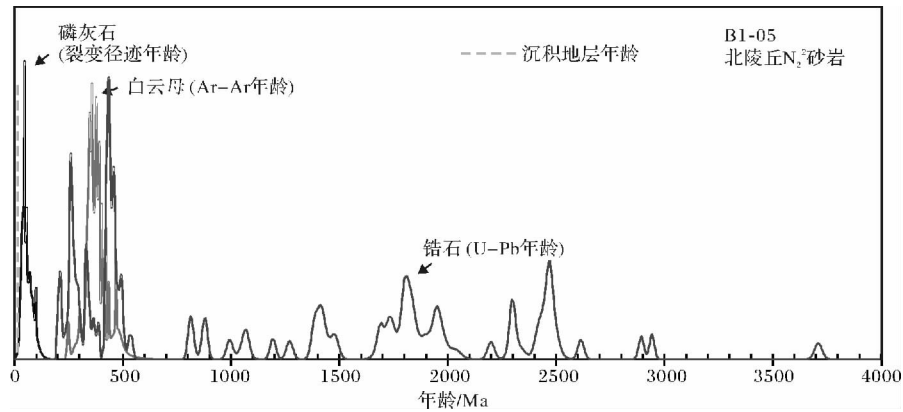


图6 柴北缘北陵丘地区典型新生界砂岩碎屑锆石 U-Pb 年龄、碎屑白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄和碎屑磷灰石裂变径迹年龄分析结果

Fig. 6 Detrital zircon U-Pb age, detrital mica ⁴⁰Ar-³⁹Ar age and detrital apatite fission track age of the Cenozoic sandstone of Beilingqiu area in the northern Qaidam Basin

(古元古代中—晚期); 2 350 ~ 2 500 Ma(古元古代早期)。其中前两个锆石群(即二叠纪—三叠纪和奥陶纪—早泥盆世)占主体。早古生界的岩石在祁连山造山带广泛分布,可以作为柴北缘地区的沉积源区。尽管现今晚古生界的岩石在阿尔金山东段有分布^[33, 41]。根据新生代柴达木盆地岩相古地理的特征,这些晚古生代的锆石不可能来源于这个源区,因此推断祁连山造山带在第三纪时期有大量的晚古生界岩石出露,作为物源为柴北缘地区提供碎屑物质,至今剥蚀殆尽。此外,前寒武锆石的来源也是值得讨论的问题。新元古代碎屑锆石(800 ~ 1 000 Ma)来源于祁连山造山带无疑^[31, 39, 40],而古元古代的两个碎屑锆石群(峰期年龄约为~1.8 Ga和~2.5 Ga)则可能来源于南祁连的全吉地块^[41]。

碎屑白云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄主要分布在 330 ~ 410 Ma(图6),反映了柴北缘的沉积源区在泥盆纪—早石炭纪发生了构造冷却事件。与祁连洋消亡、陆陆碰撞之后造山带垮塌相对应。而碎屑磷灰石裂变径迹年龄均大于其沉积地层的年龄,说明这些年龄数据反映的是源区冷却事件的时限,其中值年龄为 53.7 Ma(图6)指示了祁连山造山带在第三纪早期的构造隆升冷却史,与欧亚—印度板块碰撞的时间相一致,推测为该地质事件在青藏高原东北缘的远程响应,盆地内的路乐河组粗碎屑沉积物也证实了这一结果^[29]。

4 构造—沉积耦合关系

根据前文对沉积演化和物源分析研究的总结,本文将柴达木盆地构造—沉积耦合关系总结为如下三个阶段,详细叙述如下。

4.1 始新世全盆范围内造山活动及构造隆升——印度—欧亚板块碰撞的远程效应

柴达木全盆地路乐河组的粗碎屑沉积物反映了盆地在新生代早期处于强烈造山活动的构造背景。碎屑磷灰石裂变径迹分析也显示了沉积源区祁连山造山带在古—始新世时期发生了构造隆升冷却事件。结合前人对柴北缘构造演化的研究^[16, 42],我们认为这次强烈的造山活动和构造隆升可以归因于区域内的逆冲断裂活动和相应的地壳加厚缩短。实际上,与周边的沉积盆地对比可以发现,青藏高原东北部近 20 个古近纪盆地内均广泛发育了一套厚度较大的粗碎屑沉积物^[18, 43],如河西走廊盆地、临夏盆地等,因此这次隆升是区域性的一次构造活动。同时,地层的年代约束显示,这些盆地的粗碎屑沉积物主要发育于晚始新世—早渐新世,主要为约 38 ~ 29 Ma^[18, 43],比柴达木盆地略晚,因而这套粗碎屑沉积记录在空间分布上也具有随时间自西向东、从南向北迁移的特征。结合青藏高原的形成和演化历史^[3-5],可以认为,本次柴达木盆地范围内的造山活动和构造隆升是印度—欧亚板块碰撞的远程效应,相应的沉积响应于早—中始新世就已抵达柴达木盆地区域,而在晚始新世—早渐新世到达青藏高原的东北缘(如河西走廊盆地和临夏盆地)。

4.2 渐新世—早中新世阿尔金山初次隆升及大幅左行走滑运动

正如前文所述,柴达木盆地 N₁、N₂ 地层沉积物总体以细粒的湖泊—三角洲相为特征,反映了渐新世—早中新世盆地处于构造相对平静期,沉积源区盆—山分异减弱。同样的,碎屑磷灰石并没有记录该时期源

区的冷却事件。柴西南地区的细粒沉积物也反映了柴西南的源区此时并没有发生强烈的构造隆升。因此可以推断祁连山和昆仑山造山带在渐新世—早中新世处于相对平静的构造背景。

然而,值得注意的是,阿尔金山前发育浊流相沉积物,反映了相对强烈的构造活动背景。此外,红三旱一号三高点剖面 N_1 和 E_3 的砂岩结构和骨架矿物颗粒组成显示具有明显的不同,也表明了阿尔金山在渐新世时期发生了明显的隆升^[25],自此柴达木盆地与塔里木盆地被分隔开,阿尔金山作为一个移动的物源向南北两侧提供碎屑沉积物。

对于阿尔金山断裂的构造演化时间的限定,目前还存在一定的争议。主要存在两种观点:Yue 和 Liou 提出阿尔金山断裂的两阶段构造演化模式^[44]:第一阶段为渐新世—早中新世时期受印度板块的挤压而侧向迁移,阿尔金山断裂左行走滑运动;第二阶段为中中新世以来,青藏高原北部地区整体的地壳缩短、加厚,导致构造隆升,阿尔金山也属于其中的一部分。而 Wu *et al.* 提出了正好相反的模式^[45],认为 36~15 Ma 时期阿尔金山先构造隆升,再在 15 Ma 至今的这时期,左行走滑移动。

本文取得的祁连山和昆仑山平静构造背景的结论支持阿尔金山断裂大量左行走滑构造活动时间为渐新世—早中新世^[6-8]。也正是此时阿尔金山断裂大幅度的左行走滑移动消减了来自印度板块持续的挤压应力,使得柴北缘、柴南地区地壳缩短速率急剧降低^[16,42],盆—山分异活动减弱,因而在相应的沉积区 N_1 和 N_2^1 地层保存了以湖泊相和三角洲相细粒沉积物为主的沉积记录。这种横向大幅走滑活动及祁连山、昆仑山构造平静很好的解释了从始新世到渐新世—早中新世的沉积记录突变。

4.3 中中新世—第四纪青藏高原北部整体强烈、快速地构造隆升

自中中新世开始,柴达木盆地的沉积记录又发生了明显的转变,暗示了此时构造背景的转变。阿尔金山前新生界的地震剖面研究结果显示 N_2^1 和 N_2^2 地层之间发育了明显的角度不整合面^[23,25,46],下伏 N_2^1 地层曾经遭受过剥蚀,如月牙山月 3 井(图 3), N_2^1 地层被剥蚀仅剩不到 100 m,指示中中新世时期阿尔金山经历了一次强烈的隆升。干柴沟剖面的 N_2^1 和 N_2^2 地层由一套向上变粗的砂砾岩组成^[18],具有近物源的冲积扇沉积特征,也反映了强烈的盆—山分异作用。地层对比研究显示中中新世以来柴达木盆地的沉积中心向

东南方向迁移^[20,22],也表明阿尔金山和祁连山的整体隆升,使得柴达木盆地西北区域整体海拔的提高。来自印度板块强烈的挤压应力使得柴达木盆地内的地壳缩短、加厚,沉积地层也遭受挤压形成了西北—东南方向的一系列褶皱,生长背斜发育,如油砂山构造^[20]。

以上结果均表明,中中新世柴达木盆地发生了明显的构造转变,再次强烈的盆—山分异作用使得柴达木盆地的沉积序列发生了明显的变化,沉积速率明显加快,本文将此转变归因于中中新世以来的强烈地壳缩短和柴达木盆地周缘造山带的强烈构造隆升。Zhou *et al.* 通过对柴达木盆地的地震剖面进行解释,认为自中中新世以来,柴达木盆地范围内地壳缩短了一半以上^[44]。

前人大量的研究认为,中中新世是青藏地区从侧向挤压迁移到地壳缩短,垂向加的转变时^[6-8],已有的热年代学研究报道了青藏高原北部具有大量的中中新世以来的冷却年龄数据^[20,48]。此外,青藏高原北部和东缘周边的盆地,如塔里木盆地、酒泉盆地和河西走廊盆地等^[18,47,49,50],也有与柴达木盆地类似的中中新世以来的沉积记录。因此,中中新世以来的强烈、快速的地壳缩短、加厚和构造隆升事件应该是一次青藏高原区域性的构造活动。

5 结论

通过对柴达木盆地北缘地区新生界沉积物的研究,可以得到如下结论:

(1) 柴达木盆地具有全盆造山活动和构造隆升(始新世)—构造平静期(渐新世—早中新世)—强烈构造隆升(中中新世以来)的构造演化规律。其中,始新世的造山活动和构造隆升是印度—欧亚板块碰撞所致的远程响应,渐新世—早中新世阿尔金山断裂的大量左行走滑运动消减了来自印度板块的挤压应力,使得柴北缘地区处于构造平静期,而中中新世以来,青藏高原北部总体强烈的地壳缩短加厚造成了第二阶段的强烈构造隆升。

(2) 多种方法的沉积物源分析表明,柴达木盆地新生界的物源具有旋回造山带的构造属性。以柴北缘地区为例,祁连山造山带为其主要源区,在新生代构造演化过程中,源区性质随时间并没有发生明显改变。两期构造隆升使得原本存在的晚古生界母岩剥蚀殆尽,早古生代变质带中的岩石组合大量暴露地表,成为现今主要的母岩类型。

参考文献(References)

- 1 潘裕生. 青藏高原的形成与隆升[J]. 地学前缘, 1999, 6(3): 153-163 [Pan Yusheng. Formation and uplifting of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Earth Science Frontier, 1999, 6(3): 153-163]
- 2 莫宣学, 潘桂棠. 从特提斯到青藏高原形成: 构造-岩浆事件的约束[J]. 地学前缘, 2006, 13(6): 43-51 [Mo Xuanxue, Pan Guitang. From the Tethys to the formation of the Qinghai-Tibet Plateau: constrained by tectono-magmatic events [J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(6): 43-51]
- 3 Harrison T M, Copeland P, Kidd W S F, et al. Raising Tibet [J]. Science, 1992, 255(5052): 1663-1670
- 4 Tapponnier P, Xu Z, Roger F, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau [J]. Science, 2001, 294(5547): 1671-1677
- 5 钟大赉, 丁林. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 1996, 26(4): 289-295 [Zhong Dalai, Ding Lin. Rising process of the Qinghai-Xizang(Tibet) Plateau and its mechanism [J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 1996, 26(4): 289-295]
- 6 Yue Y, Ritts B D, Graham S A. Initiation and long-term slip history of the Altyn Tagh Fault [J]. International Geology Review, 2001, 43(12): 1067-1093
- 7 Yue Y, Ritts B D, Graham S A, et al. Slowing extrusion tectonics: lowered estimate of post-Early Miocene slip rate for the Altyn Tagh fault [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 217(1-2): 111-122
- 8 Yue Y, Graham S A, Ritts B D, et al. Detrital zircon provenance evidence for large-scale extrusion along the Altyn Tagh fault [J]. Tectonophysics, 2005, 406(3-4): 165-178
- 9 Royden L H, Burchfiel B C, van der Hilst R D. The geological evolution of the Tibetan plateau [J]. Science, 2008, 321(5892): 1054-1058
- 10 Molnar P, England P, Joseph M. Mantle dynamics, uplift of the Tibetan plateau and the Indian monsoon [J]. Reviews of Geophysics, 1993, 31(4): 357-396
- 11 张克信, 王国灿, 曹凯, 等. 青藏高原新生代主要隆升事件: 沉积响应与热年代学记录[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2008, 38(12): 1575-1588 [Zhang Kexin, Wang Guocan, Cao Kai, et al. Cenozoic sedimentary records and geochronological constraints of differential uplift of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2008, 38(12): 1575-1588]
- 12 An Z, Kutzbach J E, Prell W L, et al. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya Tibetan plateau since late Miocene times [J]. Nature, 2001, 411, 62-66
- 13 李吉均, 方小敏. 青藏高原隆起与环境变化研究[J]. 科学通报, 1998, 43(15): 1569-1574 [Li Jijun, Fang Xiaomin. Uplift of the Tibetan Plateau and environmental changes [J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 43(15): 1569-1574]
- 14 葛肖虹, 任收麦, 马立祥, 等. 青藏高原多期次隆升的环境效应[J]. 地学前缘, 2006, 13(6): 118-130 [Ge Xiaohong, Ren Shoumai, Ma Lixiang, et al. Multi-stage uplifts of the Qinghai-Tibet plateau and their environmental effects [J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(6): 118-130]
- 15 Yin A, Rumelhart P E, Cowgill E, et al. Tectonic history of the Altyn Tagh fault in northern Tibet inferred from Cenozoic sedimentation [J]. Geological Society of America Bulletin, 2002, 114(10): 1257-1295
- 16 Yin A, Dang Y, Wang L, et al. Cenozoic tectonic evolution of Qaidam basin and its surrounding regions (Part 1): The southern Qilian Shan-Nan Shan thrust belt and northern Qaidam basin [J]. Geological Society of America Bulletin, 2008, 120(7-8): 813-846
- 17 Yin A, Dang Y, Zhang M, et al. Cenozoic tectonic evolution of the Qaidam basin and its surrounding regions (Part 3): Structural geology, sedimentation, and regional tectonic reconstruction [J]. Geological Society of America Bulletin, 2008, 120(7-8): 847-876
- 18 Zhuang G, Hourigan J K, Ritts B D, et al. Cenozoic multiple-phase tectonic evolution of the northern Tibetan Plateau: Constraints from sedimentary records from Qaidam basin, Hexi Corridor, and Subei basin, northwest China [J]. American Journal of Science, 2011, 311(2): 116-152
- 19 Wang J, Wang J Y, Liu Z C, et al. Cenozoic environmental evolution of the Qaidam Basin and its implications for the uplift of the Tibetan Plateau and the drying of central Asia [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1999, 152(1-2): 37-47
- 20 Wang E, Xu F-Y, Zhou J-X, et al. 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
- 21 Rieser A B, Neubauer F, Liu Y, et al. Sandstone provenance of north-western sectors of the intracontinental Cenozoic Qaidam Basin, western China: tectonic vs. climatic control [J]. Sedimentary Geology, 2005, 177(1-2): 1-18
- 22 Zhu L, Wang C, Zheng H, et al. Tectonic and sedimentary evolution of basins in the northeast of Qinghai-Tibet Plateau and their implication for the northward growth of the Plateau [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2006, 241(1): 49-60
- 23 袁四化, 刘永江, 葛肖虹, 等. 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[J]. 岩石矿物学杂志, 2008, 27(5): 413-421 [Yuan Sihua, Liu Yongjiang, Ge Xiaohong, et al. Uplift period of the northern margin of the Qinghai-Tibet Plateau: evidences from the Altyn Mountains and Qaidam Basin [J]. Acta Petrologica Et Mineralogica, 2008, 27(5): 413-421]
- 24 张克信, 王国灿, 骆满生, 等. 青藏高原新生代构造岩相古地理演化及其对构造隆升的响应[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2010, 35(5): 697-712 [Zhang Kexin, Wang Guocan, Luo Mansheng, et al. Evolution of Tectonic Lithofacies Paleogeography of Cenozoic of Qinghai-Tibet Plateau and Its Response to Uplift of the Plateau [J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2010, 35(5): 697-712]
- 25 刘永江, Neubauer F, 葛肖虹, 等. 阿尔金断裂带年代学和阿尔金山隆升[J]. 地质科学, 2007, 42(1): 134-146 [Liu Yongjiang, Franz Neubauer, Ge Xiaohong, et al. Geochronology of the Altun Fault zone and rising of the Altun mountains [J]. Chinese Journal of

- Geology, 2007, 42(1): 134-146]
- 26 刘永江, 葛肖虹, 叶慧文, 等. 晚中生代以来阿尔金断裂的走滑模式[J]. 地球学报, 2001, 22(1): 23-28 [Liu Yongjiang, Ge Xiaohong, Ye Huiwen, *et al.* Strike-slip model for Altyn Tagh Fault developed since Late Mesozoic[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2001, 22(1): 23-28]
- 27 简星, 关平, 张巍. 碎屑金红石: 沉积物源的一种指针[J]. 地球科学进展, 2012, 27(8): 828-846 [Jian Xing, Guan Ping, Zhang Wei. Detrital rutile: A sediment provenance indicator[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(8): 828-846]
- 28 付玲, 关平, 赵为永, 等. 柴达木盆地路乐河组重矿物特征与物源分析[J]. 岩石学报, 2013, 29(8): 2867-2875 [Fu Ling, Guan Ping, Zhao Weiyong, *et al.* Heavy mineral feature and provenance analysis of Paleogene Lulehe Formation in Qaidam Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(8): 2867-2875]
- 29 付玲, 关平, 简星, 等. 柴达木盆地路乐河组粗碎屑沉积成因与青藏高原隆升的时限[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(5): 833-840 [Fu Ling, Guan Ping, Jian Xing, *et al.* Sedimentary genetic types of coarse fragment of Paleogene Lulehe Formation in Qaidam basin and time limit of the Tibetan Plateau Uplift[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(5): 833-840]
- 30 Jian X, Guan P, Zhang D W, *et al.* Provenance of Tertiary sandstone in the northern Qaidam basin, northeastern Tibetan plateau: Integration of framework petrography, heavy mineral analysis and mineral chemistry[J]. Sedimentary Geology, 2013, 290: 109-125
- 31 Gehrels G E, Yin A and Wang X F. Magmatic history of the northeastern Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(B9): 2423
- 32 Rieser A B, Bojar A V, Neubauer F, *et al.* Monitoring Cenozoic climate evolution of northeastern Tibet: stable isotope constraints from the western Qaidam Basin, China[J]. International Journal of Earth Sciences, 2009, 98(5): 1063-1075
- 33 宋华颖, 伊海生, 范爱春, 等. 柴达木盆地西部西岔沟剖面湖相碳酸盐岩岩石学特征与沉积环境分析[J]. 中国地质, 2010, 37(1): 117-126 [Song Huaying, Yi Haisheng, Fan Aichun, *et al.* Petrology and sedimentary environments of lacustrine carbonate rocks in the Xichagou Section, western Qaidam Basin [J]. Geology in China, 2010, 37(1): 117-126]
- 34 Dickinson W R, Suczek C A. Plate tectonics and sandstone compositions[J]. AAPG Bulletin, 1979, 63(12): 2164-2182
- 35 Dickinson W R. Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones[J]. In: Zuffa G G. (Ed.), Provenance of Arenites. Reidel, Dordrecht, 1985, 333-336
- 36 McDonough W F, Sun S S. The composition of the earth[J]. Chemical Geology, 1995, 120(3-4): 223-253
- 37 Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution[M]. Blackwell, Oxford, 1985, 312
- 38 Mange M A, Morton A C. Geochemistry of heavy minerals[J]. In: Mange M A, Wright D T. (Ed.), Heavy Minerals In Use: Developments in Sedimentology, 2007, 58, 345-391
- 39 Gehrels G, Yin A, Wang X. Detrital-zircon geochronology of the northeastern Tibetan Plateau[J]. Geological Society of America Bulletin, 2003, 115(7): 881-896
- 40 Song S, Niu Y, Su L, *et al.* Tectonics of the North Qilian orogen, NW China[J]. Gondwana Research, 2013, 23(4): 1378-1401
- 41 Chen N S, Gong S L, Sun M, *et al.* Precambrian evolution of the Quanjia Block, northeastern margin of Tibet: insights from zircon U Pb and Lu Hf isotope compositions[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 35, 367-376
- 42 Zhou J, Xu F, Wang T, *et al.* 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(1-2): 195-210
- 43 周江羽, 王江海, Yin A, 等. 青藏高原东缘古近纪粗碎屑岩沉积学及其构造意义[J]. 地质学报, 2003, 77(2): 262-272 [Zhou Jiangyu, Wang Jianghai, Yin A, *et al.* Sedimentology and tectonic significance of Paleogene coarse clastic rocks in eastern Tibet [J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77(2): 262-272]
- 44 Yue Y, Liou J G. Two-stage evolution model for the Altyn Tagh fault, China[J]. Geology, 1999, 27(3): 227-230
- 45 Wu L, Xiao A, Yang S, *et al.* Two-stage evolution of the Altyn Tagh Fault during the Cenozoic: new insight from provenance analysis of a geological section in NW Qaidam Basin, NW China[J]. Terra Nova, 2012, 24, 387-395
- 46 王亮, 肖安成, 巩庆霖, 等. 柴达木盆地西部中新统内部的角度不整合及其大地构造意义[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2010, 40(11): 1582-1590 [Wang Liang, Xiao Ancheng, Gong Qinglin, *et al.* The unconformity in Miocene sequence of western Qaidam Basin and its tectonic significance[J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2010, 40(11): 1582-1590]
- 47 Me tivier F, Gaudemer Y, Tapponnier P, *et al.* 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(6): 823-842
- 48 Jolivet M, Brunel M, Seward D, *et al.* Mesozoic and Cenozoic tectonics of the northern edge of the Tibetan plateau: fission-track constraints[J]. Tectonophysics, 2001, 343(1-2): 111-134
- 49 Zhang H, Powell C M, An Z, *et al.* Pliocene uplift of the northern Tibetan Plateau[J]. Geology, 2000, 28(8): 715-718
- 50 方小敏, 赵志军, 李吉均, 等. 祁连山北缘老君庙背斜晚新生代磁性地层与高原北部隆升[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2004, 34(2): 97-106 [Fang Xiaomin, Zhao Zhijun, Li Jijun, *et al.* Magnetostratigraphy of the late Cenozoic Laojunmiao anticline in the northern Qilian Mountains and its implications for the northern Tibetan Plateau uplift[J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2004, 34(2): 97-106]

The Cenozoic Sedimentary Record in Qaidam Basin and Its Implications for Tectonic Evolution of the Northern Tibetan Plateau

GUAN Ping JIAN Xing

(MOE Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871)

Abstract: The tectonic events and climatic changes during the formation and evolution of the Tibetan Plateau could be recorded in the sedimentary succession in adjacent basins. Qaidam Basin, which is located in the northern sector of Tibetan Plateau, preserves a set of thick and continuous Cenozoic sediments. These sediments are the reliable materials for investigation on tectonic evolution of the Tibetan Plateau. Here, we present an integrated study of the Cenozoic sediments from outcrops and drilling well cores. The results indicate that Qaidam Basin has recorded three phases of tectonic evolution. The details can be described as follows. (1) The red coarse detrital sediments of Lulehe Formation which are characterized by low abundances of (Zircon, Tourmaline Rutile) minerals and low heavy mineral stability index. These sediments recorded an event of orogenic movement and tectonic uplift in the whole basin scale, which can be explained as the far-field effects of India-Eurasia collision. Furthermore, after this orogenic event, the region of Altyn and East Kunlun areas was rapidly denudated and flattened, and then became to depositional areas since Middle-Late Eocene. Therefore, it is concluded that Qaidam, Tarim and Hoh Xil Basins may have been parts of a single topographic depression at that time. (2) The Shang Ganchaigou Formation and Xia Youshashan Formation coarse sediments in front of the Altyn Mountains formed in response to the uplift of the Altyn area, whereas the dominated fine-grain sediments with high heavy mineral stability index of other regions of the Qaidam Basin can be interpreted as delta-lake facies, suggesting a stage of quiet tectonic background. This quiet setting can be caused by the large-amplitude lateral extrusion along the sinistral strike-slip Altyn Tagh Fault which accommodated the continuing indentation of India into Eurasia. (3) The Shang Youshashan Formation and Shizigou Formation upward-coarsening sediments with low heavy mineral stability index were deposited in high-gradient depositional systems. These sediments recorded the event of crustal shortening and thickening and the intense, rapid uplift of the whole northern Tibetan Plateau. Furthermore, the integrated provenance analysis results indicate the Cenozoic source compositions for the Northern Qaidam Basin did not have significant changes over time.

Key words: Tibetan Plateau; Qaidam Basin; tectonic uplift; sedimentary record; basin-range coupling