

祁连山东南缘第四纪以来的隆升作用及动力学分析

樊光明, 张智勇, 顾延生, 张海峰, 冯光胜

(中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074)

摘要: 祁连山东南缘隆升是来自印度板块挤压的远程效应与该区周边地块的存在及其活动的相互制约作用而产生的挤压隆升、伸展隆升和左旋走滑隆升共同作用的结果。标志性构造及主应力分析表明, 自早更新世以来, 隆升动力机制不断发生转换, 在早更新世早期以北东—南西向挤压为主, 中更新世早期至全新世早期以北东—南西向拉张、近东—西向的拉张为主, 全新世晚期以北西—南东向左旋扭动为主。根据湟水河阶地有关数据估算出的不同时段河谷下切速率为: $1.41 \times 10^3 \sim 36.4$ ka 间平均速率较慢 (0.11 mm/a), 36.4 ka 至今较快 (1.54 mm/a), 其中 $10.5 \sim 3$ ka 间最快 ($2.27 \sim 2.80$ mm/a), 显示该区自 1.41 Ma 至今构造隆升具有越来越强烈的变化趋势。

关键词: 祁连山东南缘; 第四纪; 下切速率; 隆升机制。

中图分类号: P54

文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2003)04-0389-06

作者简介: 樊光明(1952—), 男, 教授, 长期从事构造地质学的教学和科研工作。

0 引言

研究青藏高原隆升的关键问题是引起高原隆起的驱动力机制和第四纪以来隆升速度的快慢变化规律。这不仅可以为窥测其地球动力学提供信息, 而且对进一步探讨该区乃至更大范围与人类活动密切相关的气候、环境变化及河流演化等重要科学问题都具有重要的实际意义。为此, 一些学者对高原的隆升机制^[1~5]、3 Ma 以来的高原隆升的地貌演化^[6]和水系演化^[7]进行过研究。但是, 青藏高原隆升机制、青藏高原隆升对气候环境的影响等重大问题仍在探索之中。笔者根据民和县幅 1:25 万区域地质调查及前人有关资料, 利用构造解析方法, 对位于青藏高原东北部的祁连山东南缘的隆升动力机制和隆升速度快慢变化进行了初步探讨。

1 对隆升动力机制的思考与分析

印度板块与欧亚板块碰撞作为青藏高原抬升的

主要的驱动力机制已被广泛接受。近几年也有一些学者注意到地幔的拆沉作用^[3]或对流作用^[4]对青藏高原崛起的贡献。许志琴等^[4]则提出多因素驱动力的高原隆升模式。青藏高原的隆升机制仅仅束缚于来自高原南部的俯冲显然是不够全面的, 在这一广大区域里, 必须考虑其内部不同地块组成的岩石圈不均一性及其周边地块间的边界条件的复杂性。当然, 祁连山东南缘也不例外。

印度板块向北东俯冲于欧亚板块之下, 自南向北所产生的陆内构造变形远程效应在 Tapponnier 等^[8]东南亚挤出构造和大断层纲要图上可一目了然。马宗晋等^[9]根据 1998—2000 年间 81 个 GPS 测站的观测资料获得了中国大陆及周边地区现今地壳水平运动的统一速度场; 王琪等^[10]根据包括周边国家在内的 229 个 GPS 观测站的原始观测资料获得了中国大陆地壳运动速度图; 张培震等^[11]根据 GPS 观测资料获得了中国大陆现今构造运动的 GPS 速率场; 这些成果都为中国大陆地壳受印度次大陆向北推挤的动力学研究提供了基础性的运动学约束条件。由此可知, 印度板块沿 NE 方向的向欧亚板块的碰撞作用是祁连山东南缘的隆升构造变形的背景构造应力场来源。

从更大区域看, 北有阿拉善地块, 东有鄂尔多斯

收稿日期: 2003-04-18

基金项目: 中国地质调查局“民和县幅 1:25 万数字地质填图项目”(No. 200213000016); “数字填图过程、多元数据整合及成果表达方式研究”(No. 基[2003]009-02)。

地块,北西越过阿尔金断裂为塔里木地块,这些地块及其之间的边界断裂构成了该区的动力学分析的边界条件。

在东北向区域应力和该区周边地块的存在及其活动所产生的应力的联合作用下,必然构成该区多级多次的复杂叠加应力场体系。周边地块和其边界断裂的活动都会改变其应力状态,向东北推挤的水平作用力不仅受到塔里木地块和阿拉善地块的阻挡,而且还会受到阿尔金断裂和祁连山两侧断裂的走向滑动的调整,致使应力方向朝东南东偏转(图 1),同时又受位于研究区东侧的鄂尔多斯地块的左旋扭动的阻挡,使水平应力偏转加大。在这种复杂应力的作用下,不仅造成该区的纵向挤出构造,而且会出现向南东方向的挤出构造。这仅是水平应力体系的简单分析,如果考虑三维空间、不同时间段以及各自的活动差异,其应力体系的变化可能会更加复杂。由此可知,这些边界地质条件在本区隆升构造变形和成山作用的过程中起着直接的控制作用。这些地块、边界断层的存在及其活动是导致本区运动体制转变的直接因素。

从地质历史的演变进程来看,第四纪以来该地区的构造体制并非一成不变,该区的隆升也不可能始终只受控于一种机制。因受周边地质条件影响而可能产生不同时段主应力方向的改变,由此导致第四纪以来的不同时段可能出现不同的应力状态和构造体制,但它们对该地区的隆升都有着重要贡献,所以应该是多种机制的共同作用。就其隆升的速度而言也应该是不均衡的。

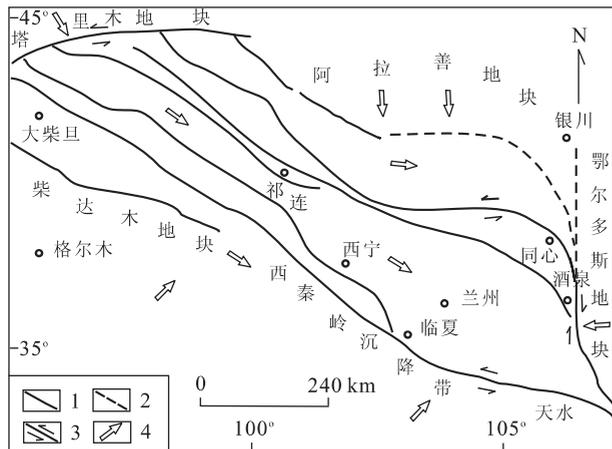


图 1 青藏高原东北缘应力体系分析

Fig. 1 Stress system analysis of northeastern Tibet plateau
1. 断裂; 2. 隐伏断裂; 3. 平移断裂; 4. 应力作用方向

2 第四系构造变形特征

研究区在地质构造单元上属秦祁昆仑地槽系的祁连山地槽(造山带),区内自北而南又分北祁连山加里东褶皱带、中祁连山隆起带和南祁连山加里东褶皱带。该区主体构造格局形成于加里东期,此期形成的主体构造对后期构造有一定影响,故此后的构造变形不同程度地带有继承性。

2.1 收缩构造系统

该区加里东期及其以后形成的构造主体为北西向,尤其是中生代以前的构造线方向更为明显(图 2),在该区的新近纪和古近纪地层中广泛发育有北西—南东向的褶皱及逆冲断层,而且部分地段的第四纪地层也出现弯曲,如在盐锅峡柏林子隧道西口,中更新统的冲洪积砾石、石质黄土层形成倾角 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 的宽缓褶皱^①。这种现象在东昆仑东段的布青山北坡表现明显^[12]。

在永登地区发育的向南陡倾的逆断层^②(多期活动)不同程度地影响到了下更新统砾石层,造成砾石层倾角陡达 40° ,在黄河以南兰州附近发育走向近南南东—北北西向、倾角 60° 的逆断层,局部可见下白垩统河口群逆冲于 V 级阶地的砾石层之上^③。据中岭幅 1:5 万区调资料显示,在桃红营附近,古近—新近纪红层逆掩于第四纪 I 级阶地之上。这些标志性构造反映了该区北东—南西向的挤压收缩体制。应该指出的是在通远地区第三纪地层中发育有与整体构造线方向极不协调的轴向呈北东—南西的宽缓褶皱,显示新近纪末期以来,局部区段曾经有北西—南东向的挤压应力场存在。

2.2 伸展构造系统

在盐锅峡地区发育的向南西倾斜的正断层切割了中更新统冲积层。红古城地区发育的一些切割第四系的北北西—南南东向、北西—南东向正断层,如塔拉断裂倾向北西西、倾角 70° ,切割了中更新统;十八湾断裂倾向北东东、倾角 50° ,切割了中更新统,剖面上构成地堑式断层组合;白崖柯断裂向南西中等倾斜,切割下更新统,剖面呈阶梯状^④,显示第

①甘肃省地质矿产局. 盐锅峡幅 1:5 万地质图说明书, 1992.

②甘肃省地质矿产局. 永登幅 1:20 万区域地质测量报告, 1967.

③甘肃省地质矿产局. 兰州幅 1:20 万区域地质测量报告, 1964.

④黄长生. 兰州地区新构造运动及其环境效应[D]. 中国地质大学, 1998.

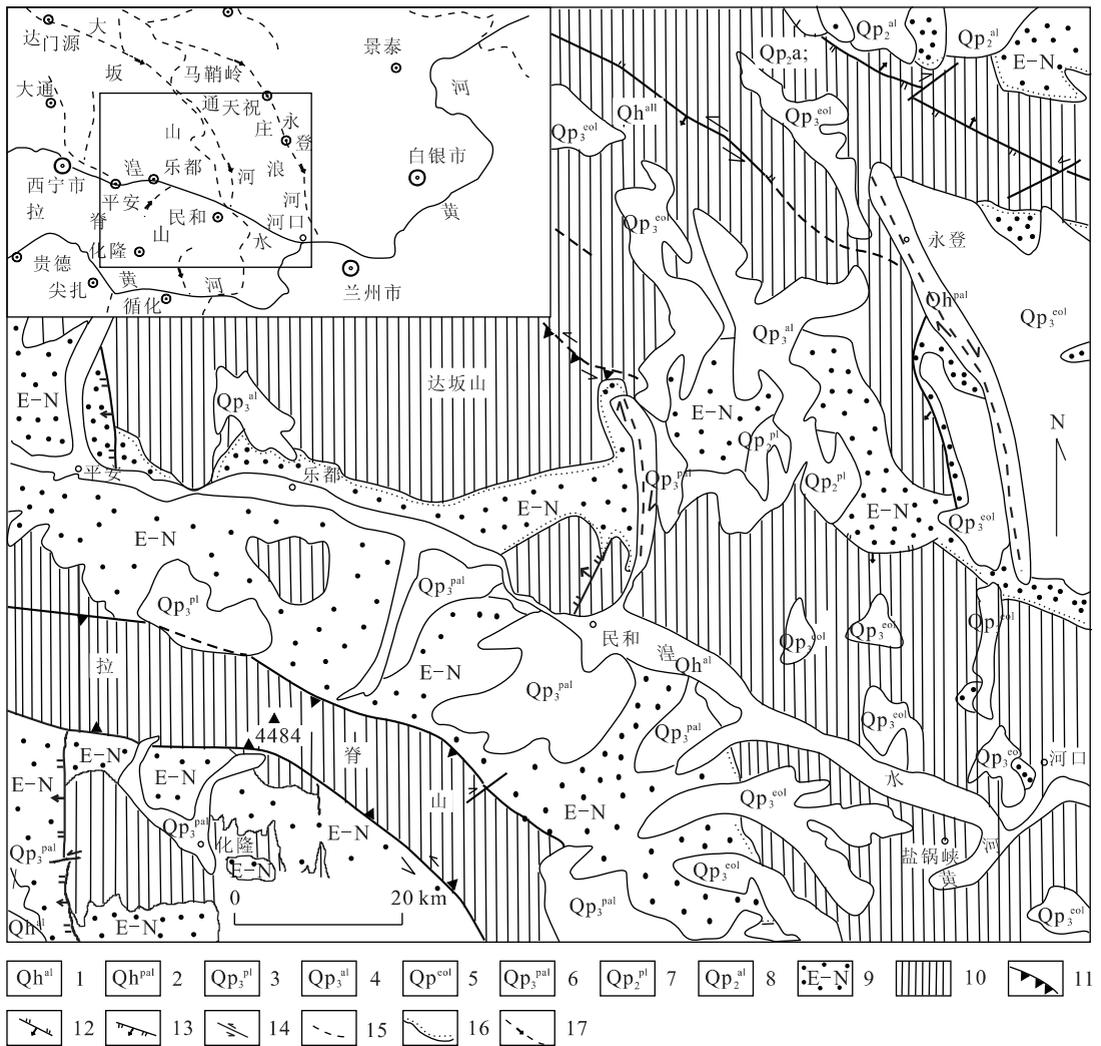


图 2 祁连山东南缘民河地区主要断裂及第四系地质简图(左上角为研究区位置及主要水系分布)

Fig. 2 Simple geological map of major faults and Quaternary strata in Minhe area, southeastern Qilian Mountains

- 1. 全新统冲积物; 2. 全新统冲洪积物; 3. 上更新统洪积物; 4. 上更新统冲积物; 5. 上更新统风积物; 6. 上更新统冲洪物; 7. 中更新统洪积物;
- 8. 中更新统冲积物; 9. 新近系—古近系红层; 10. 前新生代基底; 11. 构造单元主断裂; 12. 逆断层 13. 正断层; 14. 平移断层; 15. 隐伏断层;
- 16. 角度不整合界线; 17. 主要水系及其流向

四纪以来的近东—西向和北东—南西向拉张应力场。

2.3 左旋走滑系统

研究区的部分北西—南东向断裂,不同程度地兼有走滑断层性质,尤其是控制本区的南北两侧的区域性主干断裂,表现明显。由于这 2 条左旋走滑断层的活动,造成测区内古—新近纪红盆呈反“S”型,并形成 NE—SW 向宽缓褶皱及北北西向右旋压扭性断裂(大通河断裂和庄浪河断裂),并控制了沟谷的形态,致使近断层处沟谷发生有规律的弯曲,它们不仅对该区地貌格局有一定的影响,而且也是发生地震的主要活动断裂。如 1927 年 6 月在古浪发生了

8 级地震^⑤(N37°6', E102°6'); 1990 年 10 月 20 日果泰(N37°12', E103°6')发生 6.2 级地震,断层走向 94°,倾角 70°,滑动角 21.4°,震源深度 3 km; 1995 年 7 月 22 日永登(N37°37', E103°17')发生 5.8 级地震^[13],断层走向 111°,倾角 87°,滑动角 135.92°,震源 10 km。说明了该区现今左旋压扭性活动断裂的强烈活动性。这些活动断层以南东东向左旋走滑和北北西向右旋走滑 2 组为主,而地震的发生与现代区域构造应力场有着密切的关系,即背景构造应力场来源于印度板块对欧亚板块的北东向碰撞挤压作用^[14]。位于邻区的兰州北北东走廊过渡带南侧边界的中卫—同心左旋走滑断裂,早更新世以来左旋走

⑤甘肃省地质矿产局. 天祝幅 1:20 万区域测量报告, 1971.

表 1 红古城地区湟水河阶地特征及下切速率

Table 1 Terrace characteristics and trenching rates in Huangshui River

阶地	海拔高程/m	基座高差/m	形成年代/ka	活动时限/ka	不同时段下切速率/(mm·a ⁻¹)
T ₆	210~220	40	1 410 (ESR)	140	0.29
T ₅	170~180	30	1 270 (ESR)	910	0.033
T ₄	140~150	40~50	360 (TL)	210	0.19~0.24
T ₃	90~110	30~45	150 (TL)	113	0.27~0.398
T ₂	60~65	40	36.4 (C ¹⁴)	25.9	1.54
T ₁	20~25	17~21	10.5 (C ¹⁴)	7.5	2.27~2.8
T ₀	3~4		3 (C ¹⁴)	3.0	1.0~1.33

测年数据引自参考文献[18].

滑明显,造成山脊、阶地、冲积扇及水系的明显错移^[15]. GPS 观测资料研究结果表明,现今祁连山体在 NW300°—SE120°方向上的左旋走滑分量在 10.00~14.00 mm/a 之间;河西走廊为 7.00~10.00 mm/a,祁连山和阿拉善之间的左旋走滑速率为(7.5±1.5) mm/a^[11].可以看出新近左旋走滑速度变大的趋势.

3 隆升速度变化

王菲等^[16]根据溶洞古潜水面抬升的时间差、古潜水面之间的高差求得了中秦岭更新世以来的河谷下切速率.尹功名等^[17]根据锆石和磷灰石裂变径迹热年代学并用高差法和矿物求得了华山的抬升速率.第四纪以来的垂直运动造成黄河、湟水及庄浪河两岸发育多级阶地,如在长流水沟口黄河发育的 7 级阶地^[15].在湟水发育的 6 级阶地^[18]及其特征见表 1,笔者根据阶地基座的高差及其形成的年代对不同时期下切速率进行了估算(表 1).1.41 Ma 至今平均为 0.15~0.17 mm/a,而 1 410~36.4 ka 间较慢(0.11 mm/a),36.4 ka 至今较快(1.54 mm/a),其中 10.5~3 ka 间最快(2.27~2.80 mm/a).360~150 ka 间为 0.19~0.24 mm/a,这一期间的下切速率与秦岭^[16]358 ka 以来的下切速率相当;1 410 ka 至今的平均下切速率与华山^[17]1 780 ka 以来的平均抬升速率 0.19 mm/a 接近,与兰州盆地黄河下切速率^[6]相当.这些数据显示出下切速率越来越大、构造隆升越来越强烈的变化趋势(图 3).

应该指出的是,因受局部地质条件的影响,其隆升(或抬升)的速度存在一定差异,如拉脊山南北两侧的不均衡掀斜就是一个例证.尤其该区位于青藏高原边缘,地质条件复杂,更应注意隆升的差异及其原因.

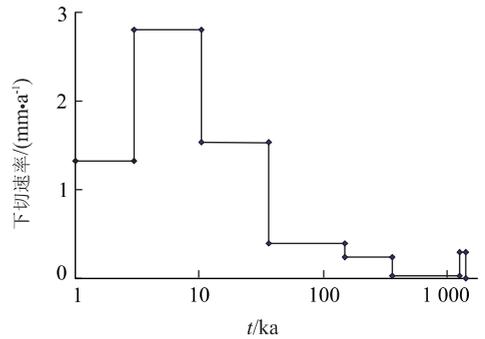


图 3 1.41 Ma 以来不同时段的下切速率

Fig. 3 Downcutting rate of stream valley in different time zones since 1.41 Ma

4 构造运动体制的转换

在研究区的第四纪地层中不同程度发育有节理,通过对这些节理的研究分析,可为分析第四纪以来的构造应力场及其变化规律提供依据.笔者对黄长生^④在红古城地区第四纪地层中测量的 239 个节理数据统计分析显示,该区第四纪以来,最大主应力轴倾斜方向及其倾角在不同时段是变化的,它进一步反映了该区进入第四纪以来应力场是变化的.

上述第四系构造变形特征、标志性构造及节理分析表明,该区构造运动体制也是不断转换的.根据节理分析,在早更新世早期以北东—南西向挤压为主,最大主应力轴为南西向;早更新世晚期至中更新世早期以拉张为主,由北东—南西向拉张转为北西—南东向拉张;中更新世晚期转为压扭性;晚更新世早期为北东东—南西西向拉伸,最大主应力倾角近直立,后转为以近南北向扭动为主;全新世早期以近东—西向的拉张为主、兼有扭动,晚期转为北东—南西向的挤压和北西以南东向左旋扭动.考虑部分节理可能与局部构造应力场有关,所反映的应力场可能有偏差,为此,笔者结合上述标志性构造进行综合

分析,初步认为:在早更新世早期以北东—南西向挤压为主;中更新世早期至全新世早期以北东—南西向拉张、近东—西向的拉张为主,全新世晚期以北西—南东向左旋扭动为主。有关应力场的细划及应力场变化的具体原因还有待今后野外的详细调查和室内的深入研究。就目前所获资料及其分析结果,可以认为该区第四纪以来的隆升构造变形、山脉崛起是经过不同时间段的挤压隆升、伸展隆升和左旋走滑隆升的多种构造体制联合作用的结果。

5 结语

(1)隆升构造变形和山系崛起,是印度板块和欧亚板块碰撞的远程效应与周边地块的相互制约作用而产生的挤压隆升、伸展隆升和左旋滑动隆升多种动力机制联合作用的结果。(2)第四纪期间的隆升构造变形体制(或动力机制)转换过程主体表现为:在早更新世早期以北东—南西向挤压为主,最大主应力轴为南西向;中更新世早期至全新世早期以北东—南西向拉张、近东—西向的拉张为主,全新世晚期以北西—南东向左旋扭动为主。(3)湟水河谷下切速率 1.41 Ma 至今平均为 0.15~0.17 mm/a,而 1.41×10³~36.4 ka 间较慢(0.11 mm/a),36.4 ka 至今较快(1.54 mm/a),其中 10.5~3 ka 间为最快(2.27~2.80 mm/a),显示了该区 1.41 Ma 以来构造隆升具有越来越强烈的变化趋势。

参考文献:

- [1] Molnar P, Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision [J]. *Science*, 1975, (189): 419-462.
- [2] 钟大赉,丁林. 青藏高原的隆升过程及其机制探讨[J]. *中国科学(D辑)*, 1996, 26(4): 289-295.
ZHONG D L, DING L. Rising process of the Qinghai-Xizang (Tibet) plateau and its mechanism [J]. *Science in China (Series D)*, 1996, 26(4): 289-295.
- [3] Owens T J, Zandt G. Implications of crustal property variations for model of Tibetan plateau evolution [J]. *Nature*, 1997, 387(1): 37-43.
- [4] 许志琴,杨经绥,姜枚,等. 大陆俯冲作用及青藏高原周缘造山带的崛起[J]. *地学前缘*, 1999, 6(3): 139-150.
XU Z Q, YANG J S, JIANG M, et al. Continental subduction and uplifting of the orogenic belts at the margin of the Qinghai-Tibet plateau [J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, 6(3): 139-150.
- [5] Platt J P, England P C. Convective removal of lithosphere beneath mountain belts: thermal and mechanical consequences [J]. *American Journal of Science*, 1994, 294(3): 307-336.
- [6] 李吉均,方小敏,马德州,等. 晚新生代黄河上游地貌演化与青藏高原隆起[J]. *中国科学(D辑)*, 1996, 26(4): 316-322.
LI J J, FANG X M, MA D Z, et al. Geomorphological and environmental evolution in the upper reach of the Yellow River during the Late Cenozoic uplift of Qinghai-Xizang plateau [J]. *Science in China (Series D)*, 1996, 26(4): 316-322.
- [7] 李长安,殷鸿福,于庆文. 东昆仑山构造隆升与水系演化及其发展趋势[J]. *科学通报*, 1999, 44(2): 211-213.
LI C A, YIN H F, YU Q W. Evolution of drainage systems and its developing trend in connection with tectonic uplift of eastern Kulun Mt [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(2): 211-213.
- [8] Tapponnier P, Peltzer G, Dain A Y, et al. Propagating extrusion tectonics in Asia: new insights from simple experiments with plasticine [J]. *Geology*, 1982, 10: 611-616.
- [9] 马宗晋,陈鑫连,叶叔华,等. 中国大陆现今地壳运动的GPS研究[J]. *科学通报*, 2001, 46(13): 1118-1120.
MA Z J, CHEN X L, YE S H, et al. Contemporary crustal movement of continental China obtained by global positioning system (GPS) measurements [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(13): 1118-1120.
- [10] 王琪,张培震,马宗晋. 中国大陆现今构造变形GPS观测数据与速度场[J]. *地学前缘*, 2002, 9(2): 415-429.
WANG Q, ZHANG P Z, MA Z J. GPS database and velocity field of contemporary tectonic deformation in continental China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(2): 415-429.
- [11] 张培震,王琪,马宗晋. 中国大陆现今构造运动的GPS速度场与活动地块[J]. *地学前缘*, 2002, 9(2): 430-441.
ZHANG P Z, WANG Q, MA Z J. GPS velocity field and active crustal blocks of contemporary tectonic deformation in continental China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(2): 430-441.
- [12] 王国灿,侯光久,张克信,等. 东昆仑东段中更新世以来的成山作用及其动力转换[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2002, 27(1): 4-12.
WANG G C, HOU G J, ZHANG K X, et al. Moun-

- tain building and its dynamic transition since Middle Pleistocene in east of eastern Kunlun, Northeast Tibet plateau [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2002, 27(1): 4—12.
- [13] 李佐唐, 何少林, 许健业, 等. 祁连山地震带两次中强地震前的加卸载响应比异常[J]. *地震研究*, 2001, 24(3): 197—201.
- LI Z T, HE S L, XU J Y, et al. Anomaly of the load unload response ratio before the two medium-strong earthquakes in Mt. Qilian seismic zone [J]. *Journal of Seismological Research*, 2001, 24 (3): 197—201.
- [14] 张希, 江在森, 王双绪, 等. 我国西部近期应变强度比动态演化特征[J]. *地震研究*, 2001, 24(2): 115—120.
- ZHANG X, JIANG Z S, WANG S X, et al. Dynamic evolution characteristics of strain strength ratio in the west of China [J]. *Seismological Research*, 2001, 24 (2): 115—120.
- [15] 彭建兵, 毛彦龙, 范文, 等. 区域稳定动力学研究——黄河黑山峡大型水电工程例析[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 127—136.
- PENG J B, MAO Y L, FAN W, et al. Regional stability research of dynamics—on Heishanxia large-scale hydropower station, the Yellow River [M]. Beijing: Science Press, 2001. 127—136.
- [16] 王菲, 李江春, 朱日祥. 晚第四纪中秦岭下切速率与构造抬升[J]. *科学通报*, 2002, 47(13): 1032—1036.
- WANG F, LI J C, ZHU R X. Downcutting and uplifting in the middle part of Qinling orogenic belt during the Late Quaternary [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47 (13): 1032—1036.
- [17] 尹功明, 卢滨涛, 赵华, 等. 华山新生代构造抬升[J]. *科学通报*, 2001, 46(13): 1121—1123.
- YIN G M, LU Y C, ZHAO H, et al. Tectonic uplift of the Huashan in the Cenozoic [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(13): 1121—1123.
- [18] 顾延生, 李长安, 谢远云, 等. 兰州—民和盆地第四纪地层学研究[J]. *中国区域地质*, 2001, 20(4): 384—391.
- GU Y S, LI C A, XIE Y Y, et al. Quaternary stratigraphy and palaeoenvironment of the Lanzhou-Minhe basin [J]. *Regional Geology of China*, 2001, 20(4): 384—391.

Uplifting since Quaternary in Southeastern Qilian Mountains and Its Dynamic Analysis

FAN Guang-ming, ZHANG Zhi-yong, GU Yan-sheng, ZHANG Hai-feng, FENG Guang-sheng
(Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Quaternary structures and those multiple stress changes reveal that the uplifting in southeastern Qilian Mountains results from the long-distance effect of the Indian plate compression and multiplex uplift mechanism on the adjacent massifs, producing the compression-uplifting, extension-uplifting and sinistral strike-slip uplifting in the area. The analysis of the stress and marker structures indicates that the uplift dynamic mechanism changes have occurred since Early Pleistocene epoch. The early Early Pleistocene is mainly NE-SW direction compression, the Middle Pleistocene to Early Holocene, mainly NE-SW and approaching E-W direction extension, while the Late Holocene is mainly NW-SE sinistral strike-slip. The stream valley downcutting rate since 1.41 Ma is estimated according to relative date of terrace from Huangshui River. The average rate from 1.41 Ma to 36.4 ka is slower, 0.11 mm/a, from 36.4 ka to the present, it is 1.54 mm/a and from 10.5 ka to 3 ka is 2.27—2.80 mm/a, the most rapid. It is shown that the tectonic uplifting in the area tends to be more and more intense since 1.41 Ma.

Key words: southeastern Qilian Mountains; Quaternary; stream downcutting rate; uplift mechanism.