

晚新生代青藏高原北缘构造变形和剥蚀变化及其与山脉隆升关系

马钦忠¹, 李吉均²

(1 上海市地震局, 上海 200062; 2 兰州大学 地理科学系, 兰州 730093)

摘要: 青藏高原的差异性隆升是一个涉及高原隆升过程和机理的重要科学问题。利用青藏高原北部塔里木盆地、柴达木盆地与河西走廊盆地的地层沉积序列推算了高原北缘西昆仑山、阿尔金山和祁连山系晚新生代以来的山脉剥蚀幅度变化特征, 得到了青藏高原北缘山系隆升运动差异的传播比, 它们基本上反映了晚新生代西昆仑山、阿尔金山和祁连山隆升运动的差异程度。高原北缘山系垂直运动速率的计算值与实测资料对比是相吻合的。进而研究了青藏高原北缘山系构造缩短变形、剥蚀变化与山脉隆升的关系。研究表明, 青藏高原二期隆升时祁连山的高度在 2400 ~ 3100m 的范围内。

关键词: 剥蚀变化; 构造变形; 山脉隆升; 传播比; 差异运动; 青藏高原北部

中图分类号: P931.1

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492 (2003) 01-0027-08

始新世中晚期 (约 40Ma), 印度板块经过长期漂移与欧亚大陆终于沿雅鲁藏布江缝合线发生印-欧板块碰撞后, 特提斯残海消失, 青藏地块完全形成, 青藏高原地壳不断缩短、加厚, 高原在周边塔里木-中朝地块、华南地块 (扬子板块) 和印度板块的相向陆内汇聚作用下, 通过本区自身的地壳和上地幔物质运动, 造就了全球构造上独特的地壳结构类型和统一的封闭构造系统。青藏高原的隆起有 3 个特征, 即高原隆起的整体性、差异性和阶段性^[1], 而青藏高原北缘独特的盆-岭构造结构就是在这样的背景下形成的。在高原北缘这种盆-岭构造结构不同阶段的整体形成过程中, 还存在着构造运动和山脉隆升的差异性。与青藏高原隆起的整体性、阶段性研究相比, 其隆起的差异性还有待于深入的研究。根据物质积累来重建沉积盆地历史演化的方法已有不少研究^[2,3], 而利用这种方法来反推山脉的高度及山脉高度变化的差异性则需进一步研究。本文的研究是对这种差异性特征进行的有益探索。

1 青藏高原北缘山系剥蚀率

新生代以来青藏高原的隆升使其与周边地区的地形差发生了巨大变化, 从而形成了其高峻的地形

地貌和巨厚的陆壳特征。青藏高原北部昆仑山、阿尔金山、祁连山等大型山脉与夹持其间的塔里木、柴达木和河西走廊盆地等, 构成了青藏高原北缘独特的盆-岭构造景观 (图 1), 其中一个重要特点是盆-山边界以大型冲断带和走滑断裂带为标志, 山脉和盆地受冲断系控制, 背冲断裂系夹持着山系和隆起带, 对冲断系夹持着盆地和拗陷区。在这些山系和隆起带中, 昆仑山和阿尔金山及祁连山的地质年龄很老, 都是古生代造山带, 它们都是回春性隆起山地。当青藏地体在新生代受到多种力的合成作用时, 这些古生代造山带并没有形成新的山地, 而是古老山地的重新复活, 山前凹陷带位置相对固定。在塔里木南部凹陷带、柴达木凹陷带及河西走廊凹陷带, 自渐新世以后就开始接受山地剥蚀带来的陆源碎屑沉积。它们的沉积往往与山地和高原内部的山间盆地是相通的, 沉积环境一致^[4]。高原北部这三大凹陷带中陆源碎屑沉积相演变的不同特征能够反映出高原北部东西向的造山运动的差异性特点。其中阿尔金山山地剥蚀物一部分流入了其北部的塔里木盆地东南凹陷带, 另一部分流入了其南部的柴达木盆地北部凹陷带。在封闭体系中, 根据盆地的沉积厚度、展布及时代估算相应时代山系的剥蚀幅度, 是一种简便易行且精度较高的方法。为了更好地探索高原北部山系的差异运动, 本文将这些凹陷带的陆源碎屑沉积物换算成山地物质剥蚀量来进行研究。

山脉剥蚀幅度的大小主要受构造运动和气候变化的控制。青藏高原北缘西昆仑山、阿尔金山和祁

基金项目: 国家重点基础研究发展计划青藏项目 (G1998040802)

作者简介: 马钦忠 (1959—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事地貌与环境、大地电磁学与地震预报研究, E-mail: qinzhma@yahoo.com.cn

收稿日期: 2002-08-26; 改回日期: 2002-12-30. 文凤英编辑

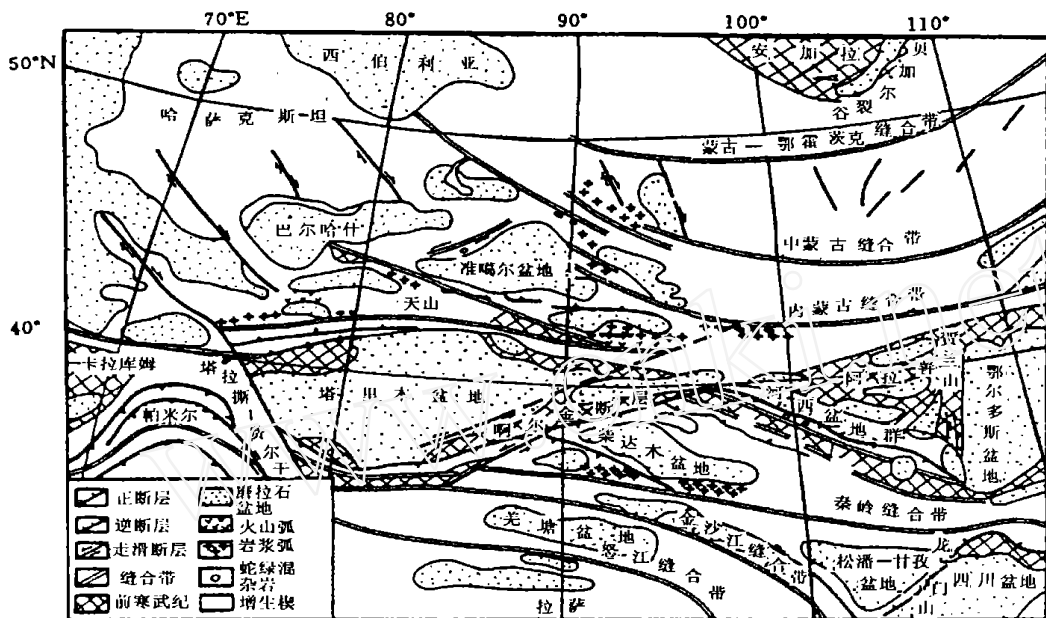


图1 中国西北地区构造略图

Fig.1 TectonicsketchofNorthwestChina

连山抬升运动的强弱程度的信息就必然地反映在其山脉剥蚀幅度随时间的变化过程中。统计分析也表明,侵蚀速率、沉积速率以及抬升速率等与地形起伏有着良好的对应关系。地形的高度越大,侵蚀速率等越大,特别是地形起伏越大,侵蚀越快。因此,在假设其他条件不变的情况下,侵蚀速率的变化可以反映地形高度和起伏的变化。由于自中新世以来,源于天山、昆仑山和阿尔金山的河流是内陆河,与外界没有沉积物交换,因此塔里木盆地属于一封闭体系。在塔里木盆地中,若将西昆仑山、阿尔金山和南天山山脉运入该盆地的沉积物分开的话,就可以根据计算相应时代沉积物的体积来估算西昆仑山和阿尔金山的剥蚀幅度;对阿尔金山剥蚀幅度的计算还应考虑到阿尔金山流入到柴达木盆地的沉积物,这一结果符合物质平衡法则。通过研究地震剖面 and 钻井资料揭示出来的地层上超现象和厚度变化,可以弄清沉积物来自哪个山系。在塔里木盆地,地震和钻井资料揭示,新生代地层由山前往中央隆起带方向上超,因此,塔里木中央隆起带是分别来自天山、西昆仑山和阿尔金山沉积物的分界线^[6]。

中新世以来,塔里木盆地接受来自西昆仑山碎屑物质的面积约为 $18 \times 10^4 \text{ km}^2$,主要分布于盆地西南坳陷全区和巴楚隆起带,上第三系—第四系厚度变化范围为 $500 \sim 10000 \text{ m}$,从山前往巴楚隆起方向迅速减薄。取平均厚度 5000 m ,则来自西昆仑山的沉积物总体积为 $9 \times 10^5 \text{ km}^3$ 。MetivierF 等

人^[3]计算的中新世以来塔里木盆地西南部的沉积物总体积为 $6.26 \times 10^5 \text{ km}^3$,误差量为 $2.21 \times 10^5 \text{ km}^3$,若将该误差量加上,则沉积物总体积为 $8.47 \times 10^5 \text{ km}^3$,这与上述估算基本上是吻合的。因此,将 MetivierF 等人计算的不同年代的沉积物体积加上相应的误差量可作为塔里木盆地沉积物体积的计算值,由此可推算出塔里木盆地东南部自中新世以来的沉积物总体积为 $3.03 \times 10^5 \text{ km}^3$ 。另一方面,塔里木盆地接受来自阿尔金山碎屑物质的面积约为 $11 \times 10^4 \text{ km}^2$,主要分布于盆地东南断隆带上,上第三系—第四系厚度为 $500 \sim 4500 \text{ m}$,山前地带厚度较大。取平均厚度值为 3000 m ,则由此估算自中新世以来的沉积物体积为 $3.3 \times 10^5 \text{ km}^3$,这与上述推算也基本吻合。自中新世以来阿尔金山流入柴达木盆地的碎屑物质约为 $7.5 \times 10^4 \text{ km}^3$ 。根据黄汉纯等^[5]对柴达木盆地西北部沉积物厚度变化的研究,我们可算得阿尔金山流入柴达木盆地一侧沉积地层厚度比例系数(见表1)。参考 MetivierF^[3]等对塔里木盆地沉积物的计算,并用表1所示的比例系数将自中新世以来阿尔金山流入柴达木盆地的碎屑物质(约为 $7.5 \times 10^4 \text{ km}^3$)和流入塔里木盆地的碎屑物质相加,则可算得自中新世以来西昆仑山和阿尔金山所剥蚀的陆源物质体积(见表2)。若以帕米尔-喀喇昆仑山主脊作为分水岭,则向塔里木供应碎屑物质的西昆仑山蚀源区面积约为 $10.5 \times 10^4 \text{ km}^2$;取阿尔金山蚀源区面积为 $10 \times 10^4 \text{ km}^2$ (含部分东昆仑

山蚀源区),则可算出中新世以来不同年代西昆仑山平均垂向剥蚀幅度和阿尔金山平均垂向剥蚀幅度。

表 1 阿尔金山流入柴达木盆地物质比例

Table1.Pro portionofmaterialsfromthe AltinMountaintotheQaidambasin					
年代/Ma	1. 6	5. 3	11. 2	16. 6	23. 7
比例系数	0. 176	0. 4014	0. 1056	0. 1194	0. 1972

表 2 西昆仑山和阿尔金山剥蚀物体积

Table2.VolumeofdenadationoftheWestKunlun MountainandAltinMountain			10 ³ km ³
年代/Ma	西昆仑山	阿尔金山	
1. 6	167	21. 2	
5. 3	308	139. 105	
11. 2	201	39. 92	
16. 6	122	130	
23. 7	49	47. 8	

对青藏高原东北缘的祁连山而言,新生代以来祁连山剥蚀物基本上流入河西走廊盆地。表 3 显示了河西走廊各盆地新生代以来的沉积厚度^[7],这里需要说明的是该表中第三系地层还存在着不少问题,故在表 4、5 中用问号表示。

河西走廊盆地中的酒西盆地沉积区面积为 2800km²^[8],其东侧的文殊山隆起为河西走廊盆地带内最小的一个横向隆起,其面积为 800km²,隆起区系上第三系,第四系组成了向北东突出的弧形背斜。据研究,文殊山背斜是在 0. 85 ~ 0. 73Ma 期间

形成的^[9]。所以将酒西盆地面积加上文殊山面积作为酒西盆地沉积区面积,为 3600km²。酒东盆地的面积为 4000km²,酒东盆地东侧的榆木山隆起区面积为 3200km²,据 Tapponiner 等人^[10]研究认为榆木山隆起于第四纪,其北部大部分被第四系所覆盖。因此,酒东盆地总沉积区面积约为 7200km²。榆木山东部的民乐盆地面积为 6000 km²。由于根据盆地中沉积厚度、展布及时代估算相应时代山系的抬升和剥蚀幅度时,必须在封闭体系中进行,而在河西走廊东端,以大黄山隆起为界将武威盆地隔开,而武威盆地以东与腾格里沙漠相连,其东界位置不清,无法估算其沉积区总面积,故武威盆地不符合封闭体系的条件。因此,在估算祁连山蚀源区的碎屑剥蚀量时,以大黄山为界将其以西的地区作为研究区。

由表 3 中的沉积物厚度数据以及上述各盆地的沉积区总面积可计算河西走廊盆地内不同时期的沉积物体积。考虑到祁连山向河西走廊供应碎屑物质的蚀源区总面积约为 38000km²^[11],由此可算出不同时期祁连山蚀源区的剥蚀幅度。

青藏高原北缘西昆仑山、阿尔金山和祁连山山脉蚀源区自中新世以来不同时期的剥蚀幅度及平均剥蚀厚度列于表 4 中。由表 4 可以看到西昆仑山自中新世以来山脉蚀源区的剥蚀速率一直呈上升态势,自 1. 6MaBP 以来平均剥蚀速率达到最大值;而阿尔金山自中新世以来山脉平均剥蚀率并不是直线上升,而是呈先上升、下降、再上升、再下降的波状变化态势。高原北缘最东端的祁连山在 5. 3Ma 以前山脉平均剥蚀速率很低,自上新世(5. 3Ma)以后才开始上升,到第四纪达到最大值。

表 3 河西走廊盆地新生代沉积厚度(据甘肃省地质局,1980—1985)

Table3.ThicknessofCenozoicsedimentsintheHexiCorridorbasin (GeologicalBureauofGansuProvince,1980 —1985)								
地层系统	酒西盆地		酒东盆地		民乐盆地		武威盆地	
	厚度/m	速率/(mm/ka)	厚度/m	速率/(mm/ka)	厚度/m	速率/(mm/ka)	厚度/m	速率/(mm/ka)
第四系	全新统	18	1 800	16	1 600	21. 5	2 150	17. 5
	上更新统	100	1 000	60	600	50	500	50
	中更新统	650	1 083	400	666	300	500	250
	下更新统	850	500	500	294	350	205	300
第三系	上新统	2 000	181	1 300	170	1 000	180	1 050
	中新统	478	80	400	76	300	70	450
	渐新统	700 ~ 1000	69	0				

表 4 高原北缘山系平均剥蚀幅度变化
Table4.Denudationvariationinthemountains

atthenorthed		geofthePlateau				
蚀源区	西昆仑山	阿尔金山及部分东昆仑山区		祁连山		
蚀源区面积/km ²	10.5 ×10 ⁴	10 ×10 ⁴		3.8 ×10 ⁴		
年代 /Ma	平均剥蚀率 / (mm/a)	平均剥蚀厚度 /km	平均剥蚀率 / (mm/a)	平均剥蚀厚度 /km	平均剥蚀率 / (mm/a)	平均剥蚀厚度 /km
1.6	0.99375	1.59	0.1325	0.212	0.282	0.45
5.3	0.7927	2.933	0.376	1.39	0.16	0.594
11.2	0.3245	1.915	0.0677	0.4	0.0092	0.17
16.6	0.215	1.161	0.24	1.296	?	?
23.7	0.073	0.518	0.0673	0.478		
总计		8.12		3.78		1.214

2 青藏高原北缘山系隆升运动差异的传播比

表 4 反映了青藏高原北缘山系西昆仑山、阿尔金山和祁连山中自中新世以来剥蚀程度的差异性,因此基本上反映了这 3 座山系构造运动强弱的差异性。根据表 4, 可得出西昆仑山、阿尔金山和祁连山中自中新世以来垂直运动差异性的比率表(见表 5)。该表反映了青藏高原北部山系在东西方向上自中新世以来不同时期构造运动强度变化的倍数关系,它基本上反映了高原北部山系运动差异的程度,因而也可作为高原北部东西方向构造抬升运动强弱程度的传播比。为了验证表 5 所示传播比的准确性,我们可以作如下对比。在 1989—1990 年中法合作喀喇昆仑—昆仑山考察期间,刘庆等^[12] 利用 SOPT 卫星影像,沿喀喇昆仑断裂东南段(班公山 34°N、78°E)到朗嘎错(31°N、81°E)和西北段(塔什库尔干到木吉盆地)进行了实地测量,测量结果表明,喀喇昆仑断裂西北段(塔什库尔干—木吉断裂谷地)全新世的垂向错断速率为 1~5mm/a, 而利用表 5 所示的传播比 7.5, 将该垂向错断速率换算到阿尔金断裂带,则可得到阿尔金断裂带全新世以来垂直错动速率为 0.133~0.667mm/a。根据阿尔金断裂沿线 230 个地点的观测资料,获得了上新世和第四纪多个时期垂直和水平运动的速率^[13],其中阿尔金南缘断裂和北缘断裂全新世的垂直错动速率为 0.17~0.53mm/a。这和利用传播比从喀喇昆仑断裂西北段全新世垂向错断速率所获得的阿尔金断裂垂向错动速率是不谋而合的。若将该垂直错动速率按表 5

中的传播比 3.5 (西昆仑山与祁连山的传播比)换算到祁连山断裂系,则可得到祁连山断裂带全新世以来垂直错动速率为 0.284~1.42mm/a; 根据研究^[8] 祁连山昌马—俄博—毛毛山断裂带晚第四纪以来的垂直错动速率为 0.6~1.2mm/a; 全新世以来祁连山北缘断裂带垂直位错的平均速率约为 1.1mm/a, 而 Tapponnier 等人^[10] 研究认为属祁连山系一部分的榆木山全新世以来的抬升速率约为 0.4~1.6 mm/a。由此可见,这与用传播比从喀喇昆仑断裂带全新世垂向错断速率所获得的祁连山断裂带全新世以来垂直错动速率也是一致的。

以上对比说明表 5 中的数据比率比较客观地反映了青藏高原北部山系东西方向构造抬升速率的差异程度。需要说明的是,由于表 5 中所示的传播比是以西昆仑山、阿尔金山(包含部分东昆仑山)和祁连山陆源剥蚀区的平均剥蚀率(剥蚀厚度)为基础所得到的,因此,它们只适用于高原北缘山系垂直运动速率差异性的比较,而不能用于比较高原北缘山系东西方向水平运动速率的差异性,实际计算也表明了这一点。

表 5 西昆仑山、阿尔金山和祁连山垂直运动差异性比率表(传播比)

Table5.Differenceratio (propagationratio) ofvertical movementsoftheWestKunlun,AltinandQilianMountains

年代/Ma	西昆仑山 / 阿尔金山	西昆仑山 / 祁连山	阿尔金山 / 祁连山
1.6	7.5	3.5	0.47
5.3	2.1	4.9	2.34
11.2	4.8	35 ?	7.36?
16.6	0.8958	23.37?	26 ?
23.7	1.08	7.9?	7.3?

3 高原北缘山系构造缩短变形和剥蚀变化与山脉隆升的关系

山系或高地受剥蚀程度的变化主要受风化条件(物理风化和化学风化)、侵蚀条件、板块构造及火山过程的影响。在风化条件较稳定的情况下,山系越高,碎屑蚀源区风化裂解的碎屑物质所获得的重力势能就越大,在侵蚀力的作用(如流水作用和风力作用)下山脉剥蚀率就越高;而山系越低,山脉风化裂解的碎屑物质所获得的重力势能就越小,则在侵蚀力的作用下山脉受剥蚀的速率也就越低。所以山脉剥蚀率的高低主要是由构造条件和气候条件所控制的。当气候条件相对比较稳定时,构造隆升变

化就成为山系剥蚀率高低变化的主控因素。另一方面,山体的隆升作用可以发生在不同的动力机制下,这主要包括板块构造运动所导致的构造隆升和由于地体总质量的变化所导致的地壳均衡隆升。这两种类型的隆升往往都不是相互孤立的,它们常常相伴而生,互有影响。

岩石圈上部构造隆升的具体表现是地体的褶皱和逆冲推覆及抬升,因此,山系整体中各部位岩石抬升的差异性是非常显著的。构造隆升可分为单侧造山抬升和双侧造山抬升,即造山带的物质由带内向带外单方向逆冲推覆和造山带的物质由中部轴带分别向两侧运移、褶皱及逆冲并形成扇形的堆叠造山形态。单侧造山带内抬升幅度大,而双侧造山带的中间轴部抬升的幅度较两侧大。

地体总质量的变化必然产生地壳均衡隆升。地体总质量的变化主要可归因于地壳缩短变形和山脉剥蚀。山脉剥蚀可导致山体均衡抬升,在山脉以剥蚀隆升为主的情况下,由于强烈的剥蚀作用,山体载荷减小,山根缩小,因而山侧的整个盆地会发生挠曲抬升,盆地沉积作用增强^[14],同时盆地沉积物的堆积使盆地受载部分也发生相应的均衡抬升。

山系的构造抬升与剥蚀隆升往往是同时存在的,在某种程度上它们互有影响。事实上由于软流圈内部存在着密度的侧向变化,而且软流圈作为物质流动的场,并非处于完全的流体静力学平衡的状态之下,因此,任何理想的地壳均衡补偿模式是不存在的,从这个意义上来说山脉的构造隆升与剥蚀隆升过程不会是相互独立的。山脉剥蚀量的变化与气候变化是紧密相连的,而自始新世以来青藏高原北部基本上一直处在干旱带气候条件下^[15]。

Molnar 等^[16]认为过去用来推论晚新生代山地上升的大多数证据是气候变化本身造成的。如晚新生代山地发生冰川气候寒冷时,山地侵蚀和下切会加快,而雨量增多时,侵蚀也会加强,这就会导致地貌上出现“青年期地形”,常被当作是山地上升的证据。同样,侵蚀加强必然使粗大的陆源碎屑增多,也会被看作是山地上升的结果。对于高寒山脉上发现的温带动植物化石,他们认为也是过去气候温暖而以后变冷的证据,而不是山地上升造成的。他们认为世界上很多晚新生代山脉的隆升指标是由全球气候变化引起的,而并非真正反映了构造隆升。

在山脉的构造隆升与剥蚀隆升共存的过程中,构造因素和气候因素常常难以分辨清楚,这主要归因于它们是山系整体活动中密切相关的两个方面。在构造挤压隆升的过程中山系碎屑蚀源区的剥蚀速

率也会随之增高,而剥蚀量的增加又会产生剥蚀隆升。在气候条件相对稳定的条件下,山系剥蚀率的变化就会直接反映出构造运动的强弱程度。当气候条件发生变化时也会使山脉剥蚀量发生变化,从而影响山脉剥蚀隆升。另外,在火山活动强烈时期,一方面构造活动剧烈,另一方面也会增加其影响范围内的沉积物厚度。Molnar 等^[16]根据均衡原理进行的计算认为在快速剥蚀厚度为 T 的地壳表层后,可以引起下部岩石的均衡抬升幅度为 $5T/6$,地表由于剥蚀而下降 $T/6$ 。这一计算的前提是山脉处于完全静力均衡的条件下。事实上地壳运动(包括水平运动和垂直运动)从来就没有停止过,印度板块的向北推移,岩石圈西向漂移的水平运动及不同地体强度和厚度的差异性就足以说明纯粹的静力均衡条件难以长期维持,因此,山脉构造运动和重力均衡作用是山系隆升演化的不可分割的综合要素。

YinA 等人^[17]研究后认为山系在质量守恒、岩石圈受挤压而均匀缩短及满足 Airy 地壳均衡条件模式的条件下,山脉古代高度 e_1 与剥蚀厚度 D ,构造缩短应变 S_V 及现代高度 e_2 的关系可用下式表述(原文推导有误,笔者注):

$$e_1 = \frac{m_L - m_a}{S_V} \left\{ D + T_c (1 - S_V) + \frac{e_2 - m_L}{m_L - c} + \frac{m_a - m_L}{m_L - c} [e_2 + D + T_L (1 - S_V)] \right\} \quad (1)$$

其中 c 是地壳密度, m_L 是地幔岩石圈密度, m_a 是地幔软流圈密度, T_c 是大陆表面在海平面高度时大陆壳的厚度 ($T_c = 35\text{km}$), T_L 是大陆岩石圈表面在海平面高度时的厚度 ($T_L = 100\text{km}$), S_V 是垂直方向的应变(最终长度比原始长度),它可由观测到的水平应变 S_h 确定,即 $S_V = 1/S_h$, $S_h = L_f/L_0$ (L_f 是最终长度, L_0 是原始长度)。这个公式虽然在必须满足上述条件时才能适用,然而这将构造隆升与剥蚀隆升进行了综合考虑,因而也将气候因素包括进来,所以比较客观地表述了山脉隆升与构造因素和气候因素的关系。

当印度板块继续向北挤压推进时,青藏高原北部由于塔里木地块和阿拉善地块向南的挤压作用,使高原北缘的西昆仑山、东昆仑山、阿尔金山和祁连山这些再生山链发生了挤压缩短作用。由祁连山、东昆仑山和阿尔金山三大再生山链及其所夹持的柴达木盆地组成的高原北部不均隆起区的构造变形特征突出表现在柴达木盆地内的雁列褶皱所呈现出的挤压性质,形成了一系列成排成带的褶曲构造。祁连山褶皱系南、北两侧分别被柴达木地块和阿拉

善地块所围限,整个褶皱系主体由新生代再生造山带及其相伴生的前陆盆地所组成,褶皱断裂特征主要表现出南北挤压的性质。在西昆仑山,由于羌塘地块和帕米尔地块同塔里木板块的挤压,在山前拗陷产生强烈的挤压逆冲,山前地带包括西域砾岩在内的新生代地层普遍褶皱,形成褶皱—冲断带。因此,公式(1)可用来对青藏高原北缘山系进行隆升高度与剥蚀厚度和构造缩短关系的计算。

在计算中,取 $T_c=35\text{km}$, $T_L=100\text{km}$, $c=2.8\text{ g/cm}^3$, $m_L=3.3\text{ g/cm}^3$, $m_a=3.2\text{ g/cm}^3$ 。而高原北缘山系西昆仑山、阿尔金山和祁连山的剥蚀厚度按表 4 中所示的数据进行计算。现今西昆仑山的平均海拔高度取 6000m , 阿尔金山的平均海拔高度取 3500m , 祁连山的平均海拔高度取 4000m 。利用公式(1)可以得到青藏高原北缘山系以前的高度与伸展应变 S_h 的关系曲线。例如, 1.6Ma 以前祁连山、阿尔金山和西昆仑山的高度随 S_h 变化的曲线如图 2 所示。该图所示的关系是在考虑到山脉剥蚀量及其引起的剥蚀隆升后山系高度与构造挤压关系曲线,它较好地反映了山脉隆升与构造挤压和山脉剥蚀的关系。例如,在祁连山,钻孔资料表明自晚第三纪以来,祁连山往河西走廊盆地推覆了约 10km ^[8],而走廊盆地北部的阿拉善地块向南推阻产生强烈约束作用,且盆地块体相对而言是一强度较大的刚性块体,因此,推测祁连山晚第三纪以来产生 10km 左右的缩短量是可接受的。现今祁连褶皱带的宽度约为 80km , 即 $L_f=80\text{km}$, $L_0=80\text{km}+10\text{km}=90\text{km}$, 所以可求得 $S_h=L_f/L_0=0.889$, 由图 3 可以得到 1.6MaBP 时祁连山的平均高度为 $e_1=3300\text{m}$ 。另一方面,据研究祁连山北缘断裂南北两侧早更新世地层的相对落差达 $800\sim$

1000m ^[8], 故将此认为是祁连山自早更新世以来的隆升量,则祁连山在早更新世时的高度为 $3000\sim 3200\text{m}$ 。可见上述计算结果与实测推算结果是不谋而合的。

我们现在可以讨论青藏高原二期隆升^[4]时祁连山的高度问题。河西走廊于 23Ma 前后受剥蚀, 21Ma 开始沉积源于祁连山区富含砾石的疏勒河组^[18],指示祁连山已经隆升,但隆升海拔高度为多少目前仍无确切资料。根据玉门石油管理局的钻孔资料揭示,玉门以南中生代地层向北逆冲到中新世至中更新世地层之上,逆冲断距达 10km 。在南北宽 80km 的褶皱带上,中新统及下、中更新统地层倾角为 $10^\circ\sim 50^\circ$,平均按 20° 计,并假设在挤压区以同等速率压缩变形,则中新世以来由地层褶皱引起的地壳缩短量约为 20km , 加上上述逆冲地层 10km 的倾向位错量(这是断层逆推量的下限值),研究区中新世以来的地壳缩短量不小于 30km 。因此,我们可以得出 $S_h=L_f/L_0=80/(80+30)=0.727$ 。图 3 是早中新世时期祁连山高度与伸展应变 S_h 的关系图,其中祁连山现今高度值 $e_2=4000\text{m}$ 是以祁连山东段最高的黑鄂博掌夷平面(山顶面)的海拔高度而计的;而 $e_2=5000\text{m}$ 是考虑到祁连山西段平均山顶面的海拔高度而计的,由表 4 可知中新世以来祁连山蚀源区的剥蚀厚度 $D=1.214\text{km}$, 因此,由该图可以得到早中新世时期祁连山的高度在 $2400\sim 3100\text{m}$ 的范围内。

图 4 是中新世初期和上新世初西昆仑山与阿尔金山的高度变化与伸展应变 S_h 的关系图。如果我们分别知道了中新世以来和上新世以来西昆仑山和阿尔金山褶皱带的缩短量,就可得到早中新世和上新世这两座山系的高度值。

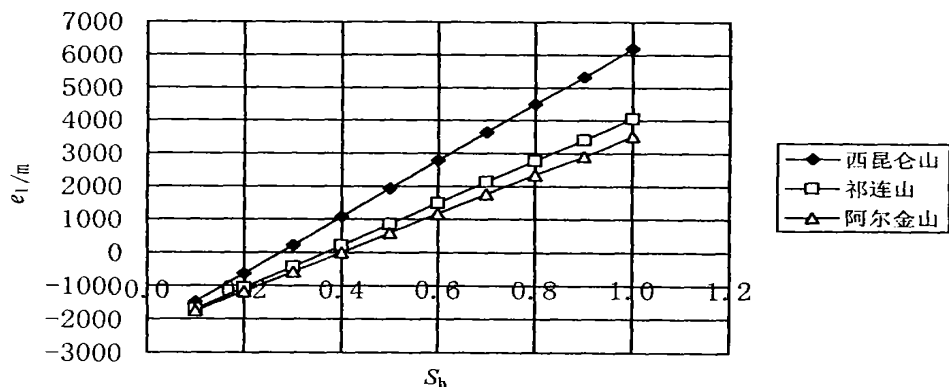


图 2 1.6Ma 以前祁连山、阿尔金山和西昆仑山的高度-应变曲线

Fig.2 Altitude-strain curves for the Qilian, Altin and West Kunlun Mountains before 1

. 6Ma

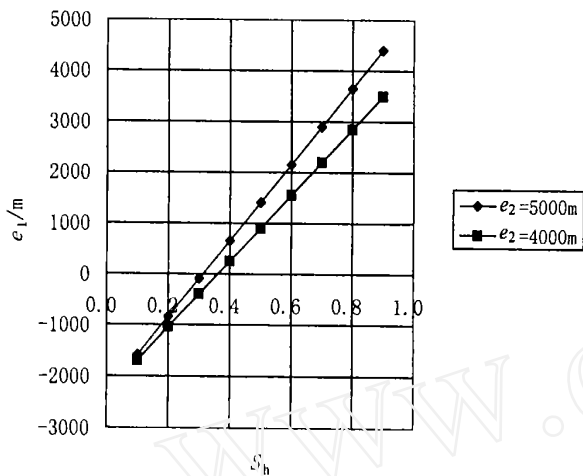


图 3 祁连山早中新世高度-应变关系

Fig.3 Altitude-strain relation of the Qilian Mountain in early Miocene

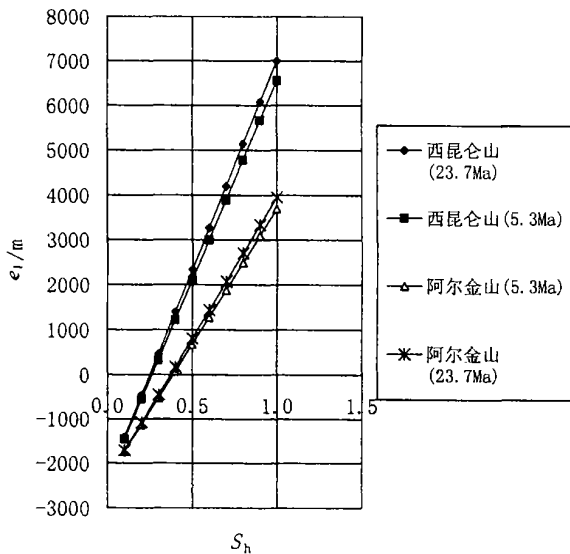


图 4 西昆仑山和阿尔金山 23.7 和 5.3Ma 时的高度变化

Fig.4 Altitude change of the West Kunlun and Altin Mountains during 23.7 and 5.3Ma

4 结语

本文从青藏高原北缘塔里木盆地、柴达木盆地和河西走廊盆地中沉积厚度、展布及时代出发来估算相应时代山系的剥蚀幅度变化过程和构造运动及山脉隆升的关系。通过在此基础上所进行的研究,可以初步得出以下结论:

(1) 西昆仑山自中新世以来山脉源区的剥蚀速率一直呈上升态势,自 1.6MaBP 以来平均剥蚀

速率达到最大值,而阿尔金山自中新世以来山脉平均剥蚀率并不是直线上升,而是呈上升、下降、再上升、再下降的波状变化态势。青藏高原北缘最东端的祁连山在 5.3Ma 以前山脉平均剥蚀速率很低,自上新世(5.3Ma)以后才开始上升,到第四纪达到最大值。自中新世以来青藏高原北缘西昆仑山、阿尔金山及祁连山脉平均剥蚀率及剥蚀厚度变化存在着较大的差别,这反映了高原北缘的构造运动和隆升幅度在东西方向上的差异性。

(2) 高原北缘山系隆升运动差异的传播比基本上反映了晚新生代西昆仑山、阿尔金山和祁连山隆升运动的差异程度,计算值与实测资料对比是相吻合的。

(3) 高原北缘山系高度变化与山脉剥蚀厚度和构造挤压缩短应变存在着线性关系,综合反映了高原北缘构造隆升与剥蚀隆升的两个方面。西昆仑山、阿尔金山和祁连山脉隆升与构造挤压缩短应变和山脉剥蚀的线性关系斜率是不同的,这从另一方面说明了高原北缘的构造运动和隆升幅度在东西方向上的差异性。

(4) 祁连山在青藏高原二期隆升时的高度范围在 2400 ~ 3100m 之间。

参 考 文 献

- [1] 李吉均,文世宣,张青松,等. 青藏高原隆起的时代、幅度和形式探讨[J]. 中国科学, 1979 (6): 608—616.
- [2] Hay W, Shaw C, Wold. Mass -balanced paleogeographic reconstructions[J]. Geologische Rundschau, 1989, 78: 207—242.
- [3] Metivier F, Gaudemer Y. Mass transfer between eastern Tien Shan and adjacent basins: Constraints on regional tectonics and topography[J]. Geophysical Journal International, 1997, 128: 1—18.
- [4] 李吉均. 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, 1999, 19 (1): 1—10.
- [5] 汤良杰. 塔里木盆地演化和构造样式[M]. 北京:地质出版社, 1996.
- [6] 黄汉纯,黄庆华,马寅生. 柴达木盆地地质与油气预测[M]. 北京:地质出版社, 1996.
- [7] 侯康明. 1927 年古浪 8 级大震的发震构造条件形成机制及区域动力学环境研究[D]. 国家地震局地质研究所博士论文, 1996.
- [8] 国家地震局地质研究所,兰州地震研究所. 祁连山—河西走廊活动断裂系[C]. 北京:地震出版社, 1993.
- [9] CHEN Jie, LU Yan -chou, DING Guo -yu. Quaternary tectonic deformation in Jiuxi Basin, West Qilian Mountain, Northwest China[J]. Journal of Earthquake Prediction Research, 1998, 7: 510—522.
- [10] Tapponnier P, et al. Active thrusting and folding in the Qilian Shan, and decoupling between upper crust and mantle in north -

- eastern Tibet[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1990, 97: 382—403.
- [11] Metivier F, Gaudemer Y, Tapponnier P, et al. Northeastward growth of the Tibetan Plateau deduced from balanced reconstruction of two positional areas: The Qaidam and Hexi Corridor basins[J]. China Tectonics, 1998, 17 (6): 823—842.
- [12] LIU Qing. Paleoclimatic constraints Chronological Surveys of Recent Movements in the Tibetan Plateau: A Case Study of the Karakoram and the Pamir Knot. In: The Tectonics of the Tibetan Plateau. Edited by G. Molnar and P. Molnar. Cambridge University Press, 1992, 11: 360.
- [13] 国家地震局. 阿尔金活动断裂带 [C]. 北京: 地震出版社, 1992.
- [14] Burbank DW. Causes of recent Himalayan uplift deduced from deposited patterns in the Ganges basin[J]. Nature, 1992, 357: 680—683.
- [15] 刘东生, 郑锦平, 郭正堂. 亚洲季风系统的起源和发展及其与两极冰盖和区域构造运动的时代耦合性[J]. 第四纪研究, 1998 (3): 194—204.
- [16] Molnar P, England P. Late Cenozoic uplift of mountain ranges and global climatic change: Chicken or egg?[J]. Nature, 1990, 346: 29—34.
- [17] Yin A, Nie S, Craig P, et al. Late Cenozoic tectonic evolution of the southern Chinese Tianshan[J]. Tectonics, 1998, 17 (1): 1—27.
- [18] 黄华芳, 彭作林, 卢伟, 等. 酒西盆地、酒东盆地第三纪磁性地层划分与对比[J]. 甘肃地质学报, 1993, 2 (1): 6—16.

TECTONIC DEFORMATION, DENUDATION VARIATION AND MOUNTAIN UPLIFT AT THE NORTH EDGE OF THE TIBETAN PLATEAU DURING THE CENOZOIC

MA Qin-zhong¹, LI Ji-jun²

(1 Seismological Bureau of Shan ghai, Shan ghai 200062; 2 Department of Geography, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The uplift difference of the Tibetan Plateau is very important to deal with the process of its uplift and formation mechanism. Based on the analysis and the mass budget of these sediments deposited in the Tarim, Qaidam and Hexi Corridor basins of the north Tibetan Plateau, we study the varying pattern of the denudations of the west Kunlun Mountain, Altin Mountain and Qilian Mountains since late Cenozoic. We get the propagation ratios of uplift differences among these mountains, which basically reflect the discrepancies of the mountains' uplift. It is shown that the agreement between the calculated values and the data from field measurements of the mountains' uplift rates is very good. Furthermore, we study the relationship among the tectonic deformation, denudation variation and mountains' uplift at the north edge of the Tibetan Plateau. There is a linear relationship among the mountain altitudes, denuded thicknesses of the mountains, and strain of the tectonic shortening by the squeezing action in the north mountains system of the Tibetan Plateau. Since the Miocene there have been more differences in the average rates of denudation and in the changes of denuded thicknesses along the mountain system of the West Kunlun, Altin and Qilian at the north margin of the Tibetan Plateau. These differences are caused by the tectonic differential movement and climate changes in the east-west direction, but the latter plays a less important role in it. The study shows that the altitude of the Qilian Mountain was 2400 ~ 3100 m during the second uplift of the Tibetan Plateau.

Keywords: denudation variation; mountain uplift; propagation coefficient; differential movement; north edge of the Tibetan Plateau