

文章编号 1001-8166(2004)增-0041-05

青藏高原的递进式隆升机制

马润勇 彭建兵 席先武 邵铁全 卢全中
(长安大学地质工程与测绘工程学院 陕西 西安 710054)

摘要 根据青藏高原现代构造变形的 GPS 速度场、高原区喜马拉雅山等五大山脉之间的几何关系及其在地貌构造上的褶皱结构特点、岩石圈的分层特征,作者提出在印度板块的推挤作用下,青藏高原具有递进式隆升的特征的观点。利用 FLAC 有限差分法数值模拟软件,近似采用平面应变条件,模拟了在水平推力作用下,地壳层递进式挤压弯曲隆升的过程。根据数值模拟结果认为,青藏高原隆升的主要动力源是印度板块 NNE 方向的推挤力,地壳层依照自南而北的次序逐步产生一系列褶皱隆起,从平面、剖面上均具有密切的时序因果关系,高原隆升与活动构造的发育、分布具有密切关系,断裂活动强度自南向北递进式扩展,因此,祁连山脉是高原最年轻的新生活活动山链。

关键词 青藏高原 递进式隆升 数值模拟 逆冲带

中图分类号 P54.2 **文献标识码** A

关于青藏高原隆升的机制问题,出于不同目的,始终成为广大地质工作者们探讨和研究的热点,并形成各种观点或建立了许多隆升模式。所有这些模式的建立都有一定依据,各有千秋,均有其可取之处,作者在此不作评述。由于高原隆升机制的复杂性和多因素性,各模式都还有一定局限性。因此还需要根据一些新资料,不断探索、丰富和深化对高原隆升过程动力学机制问题的研究。

1 青藏高原递进式隆升的一些证据

笔者对高原隆升问题有关资料和文献的研究中发现,以下一些基本事实说明,在印度板块的推挤作用下,青藏高原具有自南而北的递进式隆升特征:高原区现代垂直形变速率场的整体变化具有如下特点:异常等值线在平面上呈北西西走向的条带状,并与高原山链主体走向近于平行,沿变形梯度带又往往对应的是活动断裂带(图 1 上),剖面上自南而北呈波浪状衰减(图 1 下),且波动的特点,在历史构造变动记录中同样可以发现,如在昆仑构造带挤压隆起的时候,柴达木盆地却出现拗陷沉降^[2];最新 GPS 观测结果表明,从南起印度恒河平原到北至

阿拉善地块的横跨高原、沿 NE20° 方向的地壳水平运动速率场由南至北逐步降低^[3](图 2)。该特征在高原形成初期发生的地壳缩短以及向北推移过程中同样存在^[1];高原区条数规模宏大而连续的山链在平面上从南到北近平行排列、同步弯曲、遥相呼应,地貌上各山系由南到北的海拔高度总体上呈逐步降低、山系间距则呈逐步变宽的趋势(图 3);高原区各山系构造剖面除了喜马拉雅山脉、龙门山脉为单冲式不对称结构之外,祁连山脉、东昆仑山脉、横断山脉、念青唐古拉山等都表现为褶皱、对冲隆起山脉^[2,4,5];从高原南北两个磨拉石剖面的对比结果看,高原内部各地体间在同一隆升阶段的开始时代,南部早于北部 1.0~1.4 Ma^[6];高原岩石圈分层特征明显,地壳可分出上、中、下 3 个构造层,甚至可细分出 6~8 层。其中存在 4 个拆离层^[7~11],上部岩层沿这些拆离层会发生运动、位移,形成褶皱或断裂,尤其值得注意的是,上拆离层是一低速高导层^[8],高原浅源地震主要出现在该拆离层之上,说明高原地壳在平面上具有整体性,垂向上具有分层性的特点。

收稿日期:2004-04-09.

作者简介:马润勇(1961-)男,博士,高级工程师,主要从事地质工程领域研究。E-mail:mary_1234@sina.com

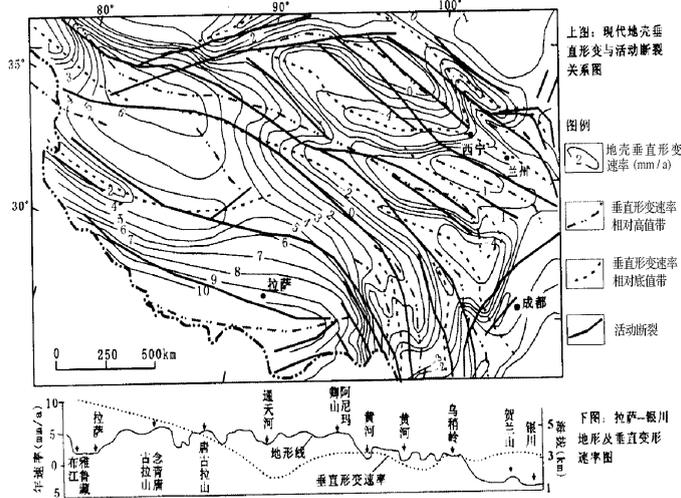


图 1 青藏高原现今地壳垂直形变速率图(据文献[1]修改,1992)

Fig.1 Vertical velocity of present-day crustal deformation in Qinghai-Tibet (modified from literature [1], 1992)

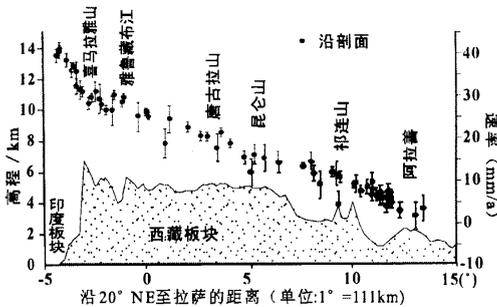


图 2 沿 20° NE 方向横跨青藏高原的 GPS 观测站的速度剖面(据张培震等 2001)

Fig.2 GPS velocity profile across Tibetan plateau along 20° NE direction (after Zhang Peizhen et al 2001)

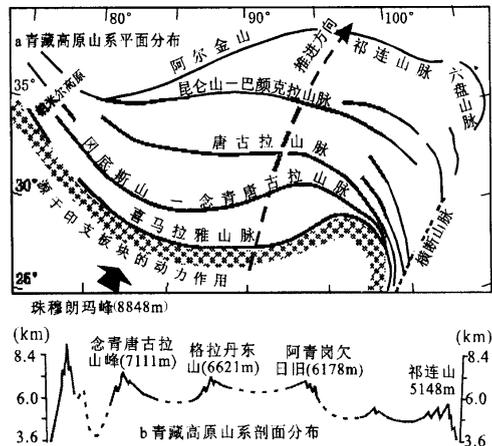


图 3 青藏高原山系分布示意图

Fig.3 Distribution of mountain system in Qinghai-Tibet plateau

作者根据以上这些基本事实归结出以下几条主要认识:高原内地形变水平运动速率远大于其垂直运动速率,且是自南而北逐步下降的,因此高原隆升的主要原动力是印度板块北东方向的水平推挤力;高原内部垂直形变速率的此起彼伏现象可能反映了高原区地壳在印度板块的推挤作用下的褶皱形变;垂直形变速率的波动衰减特征(图 1 下)与水平运动速率的递减特征(图 2),反映了由于壳层底部滑脱面的摩擦、粘滞阻尼作用,导致水平挤压力沿东北方向传递中的逐步减损效应以及转换为由南到北的渐次隆升效应;除喜马拉雅山脉和龙门山脉之外,高原内其他绝大多数山脉基本上都与地壳

或地层的褶皱隆起有密切关系^[12,13];从力学角度分析,山脉两侧逆冲构造的发育与褶皱隆起过程中两翼的剪切作用有关。

2 挤压弯曲隆升的有限差分数值模拟

2.1 基本模型

正是基于以上认识,笔者利用 FLAC 有限差分法数值模拟软件,近似采用平面应变条件,模拟了在

水平推力作用下,地壳层递进式挤压弯曲隆升的过程。所取模型总长度 500 km,厚度以及其它参数如表 1 所示。模拟的主要目的只是为了从力学角度验证作者所建立模型是否合理,以及地壳层在受到水平推挤作用下是否具有递进式弯曲隆升特点,因此模型长度(图 4a)较并不代表高原实际长度,各壳层物理力学参数也并非完全按照高原真实地壳层参数

设定。模型网格剖分数为 100(水平) \times 60(垂直)m。边界条件及初始条件为:一端(南部)施加水平速度载荷,载荷量设置为从上部的 1.0 线性递减到底部 0.6,考虑到模型长度有限,因此在另一端(北部)施加了 10 GPa 的被动阻挡力;模型底部 y 方向约束,总共执行了 190 000 时步。

表 1 参数取值表

地壳层	E (GPa)	ρ (kg/m^3)	C (MPa)	F ($^\circ$)	厚度(m)	τ_{en} (MPa)	说明
上地壳	8.3	0.25	2 700	25	15 000	9	E 弹性模量; ρ 为泊松比
滑脱面	K _n / K _s : 100 / 0.1 (MPa/m)			30	0		为密度; ζ 为内聚力
低速层	8.0	0.32	2 630	15	9 000	7	F 为摩擦角; τ_{en} 为抗剪强度
滑脱面	K _n / K _s : 100 / 0.1 (MPa/m)			30	0		
中地壳	9.0	0.29	2 800	10	10 000	8	
下地壳	13	0.3	3 400	30	15 000	20	K _n / K _s 为法向/切向刚度系数
地幔	7	0.35	3 500	10	25	9	

2.2 数值模拟结果

从数值模拟结果(图 4)清楚地看到,水平推挤作用下地壳层具有递进式弯曲隆升特点:褶皱隆起具有时序性,且靠近主动力源处先产生;逆冲带的产生也具有时序性,即靠近主动力源处先产生;褶皱隆起部位的两翼均出现逆冲带,且早先形成的逆冲带倾角相对较陡;靠近力源区段隆升幅度高、变形程度大、破坏严重,随距力源的距离增大,变形与破坏程度逐步减弱。据此结果可以类比在平面上,印度板块推挤作用下由南到北逐步产生图 3 所示的五大褶皱山脉,并沿山脉两侧发育大规模逆冲断层。

图 4 中 1、29、41、62、74 标志点代表模型从南到北 5 个区段,所反映的隆升时步幅度总体特点是(图 5):自南而北由大到小,各跟踪点隆升速率并不均匀,表现了隆升过程具有阶段性,且这种阶段性是高原内部自身的变形调整所致;相邻褶皱间的快速隆升具有次序性和交替性,自南而北依次出现,褶皱区处于快速隆升时期,“盆地区”呈现相对稳定期,个别地段甚至出现过短暂的轻微下降趋势,随时间的推移,隆升速度整体上体现出一种加速的趋势,受力边界区(1 号追踪点)后期阶段出现反转倾滑。

图 6 中的地表位移动速度呈自南而北逐步下降的(但并非呈线性)趋势,且水平位移动速度明显大于垂直位移动速度,这些特征与图 1、2 的实际观测结果不谋而合,并具有极好的类比性,地表最终垂直位移动幅度表现为从南到北跌宕起伏逐步下降的特征。

从数值模拟结果中所表现的地壳层位移动、弯曲

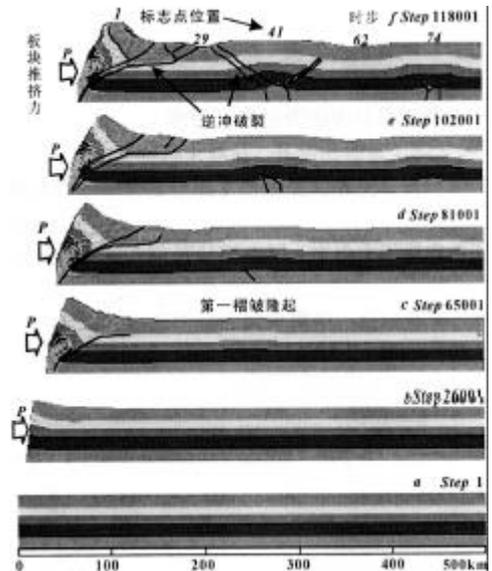


图 4 地壳层递进式弯曲隆升数值模拟结果

Fig.4 Numerical modeling result showing sequential compressing and uplifting of crust

变形、断裂发育规律同青藏高原实际观测到的现今地壳运动与构造变形特征基本一致^[3, 24, 25]。较好地反映出在青藏高原复杂的隆升过程中,褶皱变形机制在其中扮演着重要角色。

3 结论

综上所述,可以得到以下基本认识:

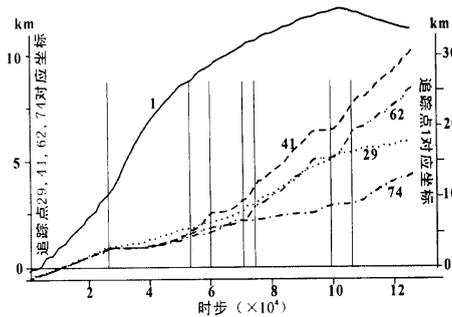


图5 地面追踪点隆升时步曲线

Fig.5 Time step curves showing uplift of ground track - points

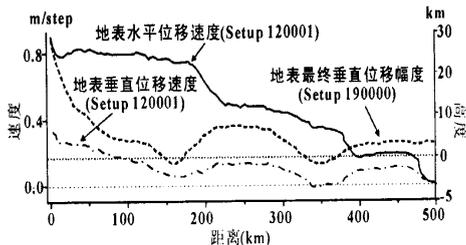


图6 地面位移速率与隆升高度

Fig.6 Velocities of ground displacement and its uplift height

(1) 印度板块的北东向水平连续推挤作用构成高原隆升的主要动力来源。

(2) 印度板块作用下,地壳层依照自南而北的次序逐步产生一系列褶皱隆起,表现出在同一构造变动系统内,从平面、剖面上均具有密切的时序因果关系。由于底部滑脱面对力的摩擦削减作用,使变形强度、隆升幅度自南而北逐步降低。

(3) 高原隆升与活动构造的发育、分布具有密切关系。随着作用力的持续增加以及变形的不断加大,褶皱的一些应力易集中的地段如褶皱两翼发育大规模冲断层。因此,将宽度达200~300km的祁连山脉两侧逆冲断裂系仅仅解释为俯冲造山、会聚造山过程中的产物^[2,16,17]显然不全面,还应当与褶皱造山过程中翼部的剪切逆冲等因素相联系。

(4) 褶皱发育变形的时序性,使先形成的褶皱所受作用力较大,随板块推挤作用的持续必然先产生失稳破裂。此后随推挤作用的持续,先存断裂的倾角产状又会变得越来越陡,甚至出现倾向的反转。高原地震活动自板块碰撞带,有逐步往北部推移的发展趋势^[18],恰恰体现了断裂活动强度自南向北递

进式扩展的特征,同时也表明,祁连山脉是高原最年轻的新生活活动山链。

(5) 离主动力源距离越远,所受推挤作用启动时间越晚,作用力持续时间愈短,挤压作用强度由南至北也逐步减弱。

当然,高原隆升的原因是多方面的,隆升机制也非常复杂,作者所做的数值模拟,仅仅反映了高原复杂的隆升过程中的一个方面。

参考文献(References):

- [1] Editorial board for lithospheric Dynamics Atlas of China, SSB (《中国岩石圈动力学地图集》编委会). Lithospheric dynamics of China [M]. Beijing: Seismological Press, 1991. 91-270 (in Chinese).
- [2] Pan Guitang (潘桂棠), Wang Peisheng (王培生), Xu Yaorong (徐耀荣), et al. Cenozoic Tectonic Evolution of Qinghai-Tibet Plateau [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990. 32-70 (in Chinese).
- [3] Zang Peizhen (张培震), Wang Qi (王琪). Present-day crustal movement and tectonic deformation in continental China GPS velocity field and active tectonic blocks [A]. In Ma Zongjin, et al. Study on the Recent Deformation and Dynamics of the Lithosphere of Qinghai-Tibet Plateau [C]. Beijing: Seismological Press, 2001. 21-35 (in Chinese).
- [4] Wang Genhou (王根厚), Zhou Xiang (周详), Zeng Qinggao (曾庆高) et al. Tectonic evolution of Nyaingantanghla chain since Mesozoic in Tibet [J]. Geoscience (现代地质), 1997, 11(3): 298-304 (in Chinese).
- [5] Peng Jianbin (彭建兵), Mao Yanlong (毛彦龙), Fan Wen (范文). Study of dynamics of the regional stability [M]. Beijing: Science Press, 2001. 39-222 (in Chinese).
- [6] Li Xiaozhe (李孝泽), Dong Guangrong (董光荣), Chen Huizhong (陈惠忠) et al. Uplift processes of the Qinghai-Tibet Plateau interpreted from the Comparison of Yecheng section and Siwalik Group [J]. Journal of Desert Research (中国沙漠), 2001, 21(4): 354-360 (in Chinese).
- [7] Cui Junwen (崔军文), Li Pengwu (李朋武), Li Li (李莉). Uplift of the Qinghai-Tibet Plateau: Tectonic geomorphology and lithospheric structure of the Qinghai-Tibet plateau [J]. Geological Review (地质论评), 2001, 47(2): 157-163 (in Chinese).
- [8] Cui Zuozhou (崔作舟), Zhu Hong (朱红), Wu Changde (武长得) et al. Deformation and Dynamics of the Lithosphere in Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992 (in Chinese).
- [9] Cui Zuozhou (崔作舟), Li Qiusheng (李秋生), Meng Lingshun (孟令顺) et al. Goumd-Ejin Qi Lithospheric Structure & Deep Tectonic [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999 (in Chinese).
- [10] Cui Zuozhou (崔作舟), Yi Zhouxun (尹周勋), Gao Enyuan (高恩元) et al. Velocity Structure and Deep-seated Structure of

- Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992 (in Chinese).
- [11] Zeng Rongsheng (曾融生), Ding Zhifeng (丁志峰), Wu Qingju (吴庆举). A review on the lithospheric structures in Tibetan Plateau and constraints for dynamics [J]. Acta Geophysica Sinica (地球物理学报), 1994, 37 (supp. II): 99-116 (in Chinese).
- [12] Zhang Yifu (张以弗). Knowledge of several basic characteristics of the geological structure in Qinghai [A]. In: Li Tingdong (李廷栋) et al. Contribution to the Geology of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau (Tectonic Geology and Geomechanics, 1) [C]. Beijing: Geological Publishing House, 1983. 17-27 (in Chinese).
- [13] Li Guangcen (李光岑), Lao Xiong (劳雄). Some geological characteristics of Wenquan region in Mt. Tanggula, China [A]. In: Li Tingdong (李廷栋) et al. Contribution to the Geology of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau (Tectonic Geology and Geomechanics, 1) [C]. Beijing: Geological Publishing House, 1983. 80-95 (in Chinese).
- [14] Ma Zongjin (马宗晋), Zhang Jiasheng (张家声), Wang Yipeng (汪一鹏). The 3-d deformational movement episodes and tectonic domains in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Acta Geologica Sinica (地质学报), 1998, 72(3): 211-227 (in Chinese).
- [15] Liu Jingnan (刘经南), Xu Caijun (许才军), Song Chengye (宋成晔), et al. Strain and present crustal movement of Tibetan Plateau obtained by accurate Global Positioning System measurements [J]. Science Bulletin (科学通报), 2000, 45 (24): 658-2663 (in Chinese).
- [16] Feng Yimin, He Shiping. Orogenic process of the Qilian Mountains [J]. Acta Geoscientia Sinica, 1996 (Special Issue): 1-5 (in Chinese).
- [17] Xu Zhiqin (许志琴), Yang Jingsui (杨经绥), Jiang Meixiang (姜枚), et al. Continental subduction and uplift of the orogenic belts at the margin of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Earth Science Frontiers (地学前缘), 1999, 5(3): 139-151 (in Chinese).
- [18] "Altun Active Fault Zone" Team, SSB (国家地震局《阿尔金活动断裂带》课题组). Altun Active Fault Zone [M]. Beijing: Seismological Publishing House, 1992 (in Chinese).

MECHANISM OF PROGRESSIVE UPLIFT OF QINGHAI-TIBET PLATEAU

MA Run-yong, PENG Jian-bing, XI Xian-wu, SHAO Tie-quan, LU Quan-zhong
(College of Geological Engineering and Geometry, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: On the basis of GPS velocity field of contemporary tectonic deformation geometric correlation between Mountains Himalayas, Gangdese-Nyainqentanglha Range, Tanggula mountains, Kunlun mountains and Qilian mountains, morphostructure feature of these mountains, layer structure of lithosphere in Qinghai-Tibet plateau, the authors put forward a new point of view that the uplift of Qinghai-Tibet plateau is progressive under the India plate pushes and forces Qinghai-Tibet plate northwards. Utilising numerical simulation software by finite difference method 2D-FLAC, approximate plane strain condition, simulated the process of sequential compressing, bending, folding and uplifting of crust under horizontal force. Based on the result of numerical modeling, thought that main power-source of the plateau uplift is driving and compressing of Indian plate toward NNE, a series of folding and uplifting of the crust successively appeared from the south to the north, and these folds and uplifts possessed a sequence and consequence on the plane and section. Uplift of Qinghai-Tibet plateau is related with development and distribution of active structure zones, the intensity of fault activity progressively is expanded from the south to the north; therefore, mountains Qilian is youngest active mountain.

Key words: Qinghai-Tibet plateau; Progressive uplift; Numerical modeling; Thrust zone.