

青藏高原新生代火山活动的深部力学背景

熊 熊^{1,2}, 王继业^{1,3}, 滕吉文²

1. 中国科学院测量与地球物理研究所, 湖北武汉 430077

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100101

3. 中国科学院研究生院, 北京 100038

摘要: 为了研究火山形成基本要素——岩浆运移通道的形成, 基于重力异常反演的青藏高原下地壳底部的地幔对流应力场, 结合地壳破裂形成机理和对流应力场与青藏高原新生代火山分布的关系, 以及青藏高原下地幔对流演化的数值模拟结果, 分析了高原火山岩浆运移通道产生的深部力学机制。研究表明, 高原下地幔对流应力场存在两个大的拉张区, 高原中部和北部的火山岩均分布于拉张应力区。南部的林子宗火山区对应了印度板块与欧亚大陆碰撞前或碰撞早期高原下的地幔上升流。对流应力的量级为 ~ 100 Ma, 这与导致地壳破裂的应力量级相当。所有这些证据表明, 青藏高原下地幔对流应力场可能是导致高原地壳破裂, 并发展为岩浆物质通道的主要力学机制之一。

关键词: 地幔对流; 应力场; 青藏高原; 火山活动; 岩浆通道。

中图分类号: P317

文章编号: 1000-2383(2007)01-0001-06

收稿日期: 2006-03-28

Deep Mechanical Background for the Cenozoic Volcanism in the Tibetan Plateau

XIONG Xiong^{1,2}, WANG Ji-ye^{1,3}, TENG Ji-wen²

1. Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100038, China

Abstract: The principle prerequisite for the formation of a volcano is the generation of a channel for magma transportation. There is little research on the deep mechanical mechanism for the formation of a magma transportation channel in the Tibetan Plateau. Based on the subcrustal mantle convection-generated stress field inversed by gravity anomalies, together with its relationship to the Cenozoic volcanism in the plateau, and the mechanism of crustal fracture formation, as well as the numerical results of the evolution of mantle convection beneath the plateau, this paper investigates the deep mechanical mechanism for the formation of a magma transportation channel in the Tibetan Plateau. There are two significant extensional convection-generated stress zones beneath the plateau, in which the volcanic rocks in the central and northern parts of the plateau are distributed. The Linzizong volcanism in southern Tibet correlates the upwelling mantle flow prior to the India-Asia collision or during the early stage of the collision. The magnitude of the stress is ~ 100 MPa, which is the same order of force that causes crustal fractures. The evidence implies that the mantle convection-generated stress is one of the principle causes of crustal fractures, and furthermore, the formation of the magma transportation channel in the Tibetan Plateau.

Key words: mantle convection; stress field; Tibetan Plateau; volcanism; magma channel.

火山最常见于大洋中脊、热点和大陆裂谷地区过程, 因而倍受关注。
(洪汉净等, 2003), 大陆块体内部火山数目较少。但青藏高原是中国大陆新生代以来火山活动较强
是, 由于大陆内部火山难以归因于板块或块体边缘烈的地区之一, 火山岩分布极为广泛(潘桂棠等,

1990). 由于这些高原火山的形成、发展与青藏高原构造演化过程密切相关, 因此, 关于青藏高原火山的成因、发展以及火山岩成分的研究不仅为研究高原演化动力学过程提供了重要约束, 还为我们理解大陆动力学和深部过程开启了一扇认识的“窗口”(Molnar *et al.*, 1987; McKenna and Walker, 1990; 邓万明, 1991; Arnaud *et al.*, 1992; Turner *et al.*, 1993; 邓万明等, 1996; 李光明, 2000; 刘桑等, 2001; Ding *et al.*, 2003).

岩浆的形成是火山活动最基本的先决条件, 以往大家所关注的也多集中在岩浆形成条件的研究、火山岩成分的分析及其地球动力学意义的探讨。但是, 对火山形成的另一重要前提——岩浆物质运移至地表通道的形成, 其研究尚比较匮乏。刘桑等(2001)将高原火山活动的裂谷通道归因于高原内部各个块体南移速率和上升速率不同导致的各板块结合部位或某些块体内部形成的局部拉张应力场, 并认为高原内部存在的软弱结合带也为地幔热柱的上涌提供了很好的通道。这种推断显然过于定性化, 并且, 也未能解释是什么地球动力学机制来维持拉张应力场。另有一些学者认为岩浆运移通道的形成源于陆内俯冲过程。邓万明等(邓万明, 1991; 邓万明等, 1996)将青藏高原北部的新生代火山岩划分为南北两个亚带, 认为它们分别形成于不同的动力学背景。北亚带形成于挤压环境, 而南亚带形成于拉张环境, 由此提出两种不同的火山岩成因模式, 即“陆内俯冲”和“初始板内裂谷”, 认为青藏高原北部存在类似于藏南喜马拉雅陆内俯冲带那样的另一条巨大的陆内俯冲带。李光明(2000)也认为羌塘地区新生代火山岩的形成与沿羌塘北缘发育的陆内俯冲作用有关。不过, 尽管有研究(高锐等, 2000; 李秋生等, 2000)表明高原北部存在塔里木盆地向昆仑山的俯冲, 但俯冲的规模、发生的年代目前尚难以界定。

青藏高原火山岩的地幔成分暗示高原火山活动与地幔的动力学过程密切相关, 而青藏高原及邻区的地球物理学研究(Molnar, 1988; Molnar *et al.*, 1993; Curtis and Woodhouse, 1997; McNamara *et al.*, 1997; Owens and Zandt, 1997; Dricker and Roecker, 2002; Xu *et al.*, 2002)表明, 高原下地幔中存在一小尺度的对流体系(Molnar *et al.*, 1993; Molnar, 1988), 其上升流位于青藏高原中部和北部, 而下降流则位于高原最北缘、南缘缝合带及周边盆地(图 1)。从物理上分析, 该对流系统至少从两个

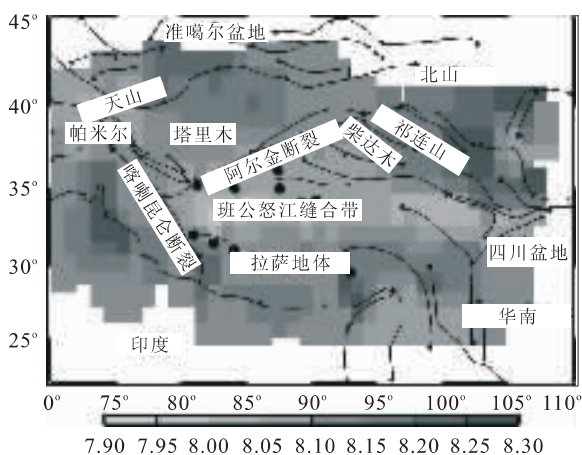


图 1 青藏高原地幔对流的地球物理学证据(灰度表示 Pn 波速度; 黑圆点表示火山岩分布)

Fig. 1 Geophysical evidence for mantle convection beneath the Tibetan Plateau

方面影响着高原岩石层的构造过程。一方面, 地幔上升流对岩石层底部的热冲击会影响到高原岩石层物质变形和组分变异。另一方面, 地幔对流在岩石层底部诱发对流拖曳力场, 影响高原岩石层的形变和动力学过程。因此, 地幔对流的存在促使我们从更深的层次思考高原火山形成的问题。

本文基于重力异常反演的青藏高原下地幔对流应力场, 根据对流应力场与青藏高原新生代火山分布的关系, 结合地壳破裂形成机理, 分析、研究高原火山岩浆运移通道产生的深部力学机理。

1 青藏高原下地幔对流应力场

地幔对流对岩石层的力学作用过程从物理上可定性描述为地幔对流在岩石层底部产生应力场, 通过岩石层—地幔边界的力学耦合作用将应力传输至岩石层, 并导致岩石层发生变形。关于地幔对流与地壳、岩石层构造运动关系的一项成功范例来自利用重力资料推求地幔对流应力场。

Runcorn(1964)提出了用重力位球谐函数计算岩石层下地幔对流状态的力学方程以后, Runcorn(1967)根据五颗卫星重力资料确定的 8 阶球谐函数进行了全球 $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ 地幔流模式的计算。基于 Runcorn 的思想和方法, Liu(1985)利用 13~25 阶卫星重力位系数确定了青藏高原下岩石层底部由地幔对流诱发的应力场, 结果表明在南北与东西方向上, 应力场均表现为张应力。黄培华和傅容珊(1983)也做

了类似的工作,取得了相近的结果.需要指出的是,Runcorn 模型一个严重的缺陷是虽然考虑了地幔对流的作用,但却忽略了岩石层对地幔对流的形变响应.另外,由于位系数的阶次与结果的分辨率存在一定的制约关系,因此,Liu(1985)、黄培华和傅容珊(1985)等所得到的应力场分布的分辨率并不高,主要体现大尺度特征,无法反映局部构造的细微特征.20 世纪 90 年代中期,傅容珊等(1994)和 Fu *et al.* (1996)发展了一套区域重力异常与上地幔小尺度对流的相关方程,直接利用重力异常研究上地幔小尺度对流的形态和岩石层底部的对流拖曳力场,并应用于青藏高原及天山地区(傅容珊等,1998),其结果的分辨率大为提高,并且提供了青藏高原中北部下存在地幔上升流的间接证据.

由 Runcorn 模型的改进形式(Xiong and Teng, 2002),地幔对流产生的南北向及东西向应力场可表示为:

$$\sigma_N(\zeta, \lambda) = \mu \frac{d}{d\zeta} \left(\frac{d^2 W_n}{dr^2} \right) \Big|_{r=a} = D \int_{\omega}^{\infty} \Delta g \frac{dQ_G}{d\psi} \cos \alpha d\omega, \quad (1)$$

$$\sigma_E(\zeta, \lambda) = \frac{\mu}{\sin \zeta} \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{d^2 W_n}{dr^2} \right) \Big|_{r=a} = D \int_{\omega}^{\infty} \Delta g \frac{dQ_G}{d\psi} \sin \alpha d\omega. \quad (2)$$

式中: μ 为地幔粘滞系数, ζ, λ 为余纬度和经度, W_n 为地幔流的 n 阶位函数, α 为对流层上边界球面半径, Δg 为地表重力异常,

$$Q_G = \frac{2}{\sin(\psi/2)} - 9 \sin \frac{\Psi}{2} - \frac{33}{4} \cos \Psi - \frac{1}{2} (1 + 9 \cos \Psi) \ln(1 + \sin \frac{\Psi}{2}) + \frac{1}{2} (1 - 9 \cos \Psi) \ln \sin \frac{\Psi}{2}. \quad (3)$$

其中: Ψ 为观测点与固定点间弧长, α 为方位角.

利用式(1)~(3)和地表重力异常,我们得到青藏高原及邻区的地幔对流应力场(图 2).比较显著的特征是高原中部存在一个规模巨大的拉张应力场,天山地区为另一拉张应力场,不过其规模小于高原中部.碰撞缝合带、高原西部及周边盆地为挤压应力区.另有一些局部区域显示为小尺度的拉张或挤压应力状态.应力的量级约为 ~ 100 Ma,这与导致岩石破裂的作用量级相当.

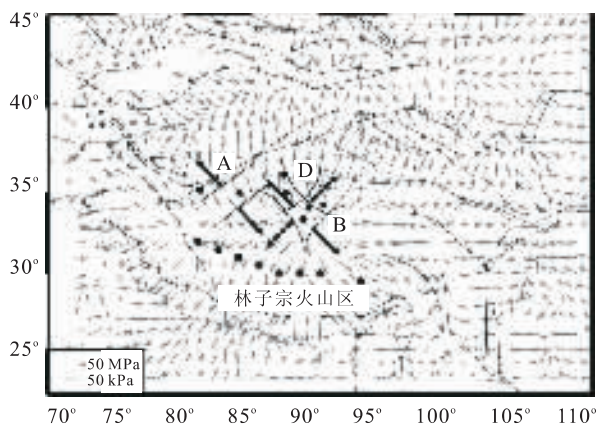


图 2 青藏高原及邻区地幔对流应力场(黑圆点表示火山岩分布;A、B 和 D 分别对应图 3a、3b、3d 所示的拉张形态)

Fig. 2 Mantle convection-generated stress field beneath the Tibetan Plateau and its adjacent areas

2 地幔对流应力场与地壳下部的张性破裂

地壳下玄武岩岩浆上升至地表喷发的前提之一是存在地壳破裂作为其运移通道,但是,如果没有外力作用,岩浆自身却难以打开此通道(Rittmann, 1962).对岩浆沿破裂喷发的研究(Rittmann, 1962)表明破裂源于地壳底部的张应力作用,当张应力大到足以克服地壳张性强度时,破裂就产生了,而岩浆几乎同时侵入.尽管岩浆物质的上侵使破裂有扩展的趋势,但岩浆本身难以克服地壳物质的张性强度,在没有外力的情况下,地壳物质高压下的塑性会使破裂很快闭合.因此,需要维持一种拉张应力,足以在岩浆或地壳物质约几千年松弛时间尺度下克服地壳物质张性强度以维持深部破裂,促使其由地壳下部向上发展,并最终形成直达地表的岩浆通道.

4 种应力形式会引起、并维持底部的张性破裂构造(Rittmann, 1962)(图 3).第 1 种(图 3a)因应力大小的差异在水平面上引起沿应力方向的张应力分布;第 2 种(图 3b)为典型的上升流产生的沿相对方向上的拉张应力场;第 3 种(图 3c)则是因在水平方向上应力的差异导致的地壳内扭转力场;第 4 种(图 3d)为发散力场导致的拉张应力.

为了便于讨论,我们将青藏高原火山活动区域叠加于应力场背景之上(图 2).由图可见,青藏高原中部和北部火山活动地区均是张性应力构造区.其中高原中部为第二、第四类张性破裂构造,北部羌塘

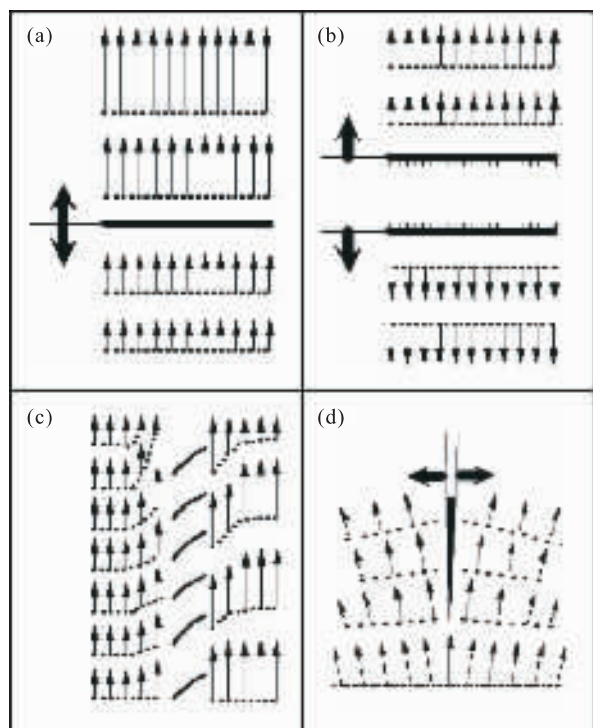


图 3 应力场与地壳张性破裂的 4 种形式

Fig. 3 Four types of stress field and crustal tensile fracture

地区为第一类张性构造. 火山活动区域张性构造区具有非常好的相关性. 高原南部广泛分布的林子宗火山是一个例外, 该区应力场呈现挤压或至少不明显的拉张状态, 似乎与拉张应力场无关.

需要说明的是, 我们反演得到的应力场是现今的应力状态, 而高原中北部火山活动大多发生于大约 30 Ma 以来, 藏北火山活动较新, 大约 ~10 Ma. 而林子宗火山的活跃期则是 60~50 Ma 左右. 因此, 探讨地幔对流应力场与火山活动的关系必须考虑各种作用和过程发生时代的问题.

数值模拟结果 (Fu *et al.*, 1997) 显示, 在印度板块与欧亚大陆碰撞前, 青藏高原下就已经存在稳定的地幔对流系统, 该对流系统由俯冲的特提斯海洋岩石圈诱发. 在欧亚大陆边缘, 即现今藏南地区首先诱发一股上升流, 时间约为距今 100~70 Ma; 此后, 上升流顶部向北迁移, 自距今约 40 Ma 起, 在特提斯海洋岩石圈和此后印度板块的俯冲与塔里木沉降共同作用下稳定在高原中部地区.

从对流演化历史和青藏高原火山岩的时序分布, 可以推断青藏高原下地幔对流应力场与高原新生代火山活动岩浆通道产生的关系. 在印度板块与

欧亚大陆碰撞前或碰撞的初期阶段 (~70 Ma), 高原下地幔对流的上升流位于现今高原南部地区, 在拉张应力场的作用下, 高原地壳底部发生破裂, 由于地幔对流的持续作用维持了区域性的拉张状态, 破裂得以发展, 并构成岩浆上升的物质通道, 岩浆出露, 形成规模巨大的林子宗火山. 而同时, 在高原中部和北部, 由于不存在可观的拉张应力场分布, 地壳底部难以形成并维持破裂, 最终并不导致岩浆通道的产生. 因此, 这一时期, 高原中部和北部不存在有规模的火山活动. 随着对流过程的发展, 上升流逐渐北移, 南部的应力场因物质流动形式变为下降流而逐渐转变为挤压应力场, 岩浆通道关闭, 火山活动终止. 而在中部和北部, 在上升流产生的拉张应力场作用下, 地壳内发生破裂, 并最终发展成岩浆通道. 尽管本文得到的是目前这一瞬间高原下地幔对流应力场的状态, 但由于自 ~40 Ma 至今高原下地幔对流处于稳定状态, 因此, 可以将其外推至高原 ~40 Ma 至今的应力状态, 并解释高原中北部火山活动的力学机制.

3 讨论

尽管我们无法排除其他可能的机制导致岩浆通道的产生, 但基于青藏高原现今地幔对流应力场和青藏高原火山岩分布的时序性与高原下地幔对流演化过程的一致性, 至少可以推断高原下地幔对流应力场可能是高原火山活动主要的力学机制之一. 但是, 由图 2 也不难发现, 拉张应力区并非必然伴随着岩浆出露和火山活动. 张应力的存在为地壳破裂提供了基本条件, 但并非所有的张应力区都能产生破裂. 由基于连续介质力学和热动力学的断裂理论 (Anderson and Grew, 1977) 可知, 只有当地幔对流应力场提供的能量足以克服地壳底面张力和塑性形变能, 才有可能在地壳内形成破裂, 并维持破裂的存在, 促进破裂的发展. 因此, 在高原有些地区, 尽管地幔对流呈现张应力状态分布, 但由于应力作用不足以克服该区地壳底面张力和塑性形变能, 因而无法产生破裂, 并进而发展为岩浆通道. 不过, 我们目前尚难以建立地幔对流应力场与岩浆通道产生的定量关系和相应的判断准则. 另外, 可能还存在其他重要因素控制, 制约着岩浆运移通道的产生, 这也增加了问题的复杂性和定量关系建立的难度. 要彻底明晰岩浆运移通道产生的条件、过程以及与地幔对流的关系, 综合

多种因素的岩浆—地壳相互作用的热—力学数值模拟可能是必不可少的手段和途径。

References

- Anderson, O. L., Grew, P. C., 1977. Stress corrosion theory of crack propagation with applications to geophysics. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 15(1): 77—104.
- Arnaud, N. O., Vidal, P., Tapponnier, P., et al., 1992. The high K₂O volcanism of northwestern Tibet: Geochemistry and tectonic implications. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 111: 351—367.
- Curtis, A., Woodhouse, J. H., 1997. Crust and upper mantle shear velocity structure beneath the Tibetan Plateau and surrounding regions from interevent surface wave velocity inversion. *J. Geophys. Res.*, 102(B6): 11789—11813.
- Deng, W. M., 1991. Geology geochemistry and age of shoshonitic lavas in the central Kunlun orogenic belt. *Scientia Geologica Sinica*, (3): 201—213 (in Chinese with English abstract).
- Deng, W. M., Zheng, X. L., Matsumoto, Y., 1996. Petrological characteristics and ages of Cenozoic volcanic rocks from the Hoh Xil Mts., Qinghai Province. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 15(4): 289—297 (in Chinese with English abstract).
- Ding, L., Kapp, P., Zhong, D. L., 2003. Cenozoic volcanism in Tibet: Evidence for a transition from oceanic to continental subduction. *J. Petrology*, 44(10): 1833—1865.
- Dricker, I. G., Roecker, S. W., 2002. Lateral heterogeneity in the upper mantle beneath the Tibetan Plateau and its surroundings from SS-S travel time residuals. *J. Geophys. Res.*, 107 (B11): 2305, doi: 10. 1029/2001JB000797.
- Fu, R. S., Huang, J. H., Liu, W. Z., 1994. Correlation equation between regional gravity isostatic anomalies and small scale convection in the upper mantle. *Chinese Journal of Geophysics*, 37: 638—646 (in Chinese with English abstract).
- Fu, R. S., Huang, J. H., Wei, Z. X., 1996. The upper mantle flow beneath the North China platform. *Pageoph.*, 146(4): 649—659.
- Fu, R. S., Huang, J. H., Xiong, X., 1997. Evolution of the upper mantle flow under the Tibetan Plateau. In: Hsu, H. T., Ning, J. S., Wang, J. H., et al., eds., *Proceedings of international symposium on current crustal movement and hazard reduction in East Asia and South-east Asia*. Seismological Press, Beijing, 405—417.
- Fu, R. S., Huang, J. H., Xu, Y. M., 1998. Study of the mantle dynamics of the lithosphere movements in the region from Qinghai-Xizang Plateau to Tianshan Mountain. *Chinese Journal of Geophysics*, 41: 658—668 (in Chinese with English abstract).
- Gao, R., Huang, D. D., Lu, D. Y., et al., 2000. Deep seismic reflection profile crossing western Kunlun-Tarim contacting belt. *Chinese Science Bulletin*, 45(17): 1874—1879 (in Chinese).
- Hong, H. J., Yu, Y., Zheng, X. Z., 2003. Global volcano distribution: Pattern and variation. *Earth Science Frontiers*, 10(special issue): 11—16 (in Chinese with English abstract).
- Huang, P. H., Fu, R. S., 1983. Investigation on mantle convection pattern at the lithospheric bottom in China. *Chinese Journal of Geophysics*, 26(1): 39—47 (in Chinese with English abstract).
- Li, G. M., 2000. Petrological features and genesis of Cenozoic volcanic rocks, Qiangtang area, northern Tibetan Plateau. *Geology Geochemistry*, 28(2): 38—44 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q. S., Lu, D. Y., Gao, R., et al., 2000. Exploration seismic sounding crossing western Kunlun-Tarim contacting belt. *Science in China (Series D)*, 30 (Suppl.): 16—21 (in Chinese).
- Liu, H. S., 1985. Geodynamical basis for crustal deformation under the Tibetan Plateau. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 40: 43—60.
- Liu, S., Chi, X. G., Li, C., et al., 2001. Geochemistry and origin of the Cenozoic volcanic rocks series in the northern Tibet. *J. Changchun Univ. of Science and Technology*, 31(3): 230—234 (in Chinese with English abstract).
- McKenna, L. W., Walker, J. D., 1990. Geochemistry of crustally derived leucocratic igneous rocks from the Ulugh Muztagh area, northern Tibet, and their implications for the formation of the Tibetan Plateau. *J. Geophys. Res.*, 95: 21483—21502.
- McNamara, D. E., Walter, W. R., Owens, T. J., et al., 1997. Upper mantle velocity structure beneath the Tibetan Plateau from P_n travel time tomography. *J. Geophys. Res.*, 102(B1): 493—505.
- Molnar, P., 1988. A review of geophysical constraints on the deep structure of the Tibetan Plateau, the Himalaya and the Karakoram, and their tectonic implication. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, A326: 33—88.
- Molnar, P., Burchfiel, B. C., Zhao, Z., et al., 1987. The geologic evolution of northern Tibet: Results of an expedition to Ulugh Muztagh. *Science*, 235: 299—305.

- Molnar, P., England, P., Martinod, J., 1993. Mantle dynamics, uplift of Tibetan Plateau and the Indian monsoon. *Rev. of Geophys.*, 37(4): 357—396.
- Owens, T. J., Zandt, G., 1997. Implications of crustal property variations for models of Tibetan Plateau evolution. *Nature*, 387: 37—43.
- Pan, G. T., Wang, P. S., Xu, Y. R., et al., 1990. Cenozoic tectonic evolution of the Tibetan Plateau. Geological Publishing House, Beijing, 32—70 (in Chinese).
- Rittmann, A., 1962. Volcanoes and their activity. Wiley, New York, 305.
- Runcorn, S. K., 1964. Satellite gravity measurements and laminar viscous flow model of the earth's mantle. *J. Geophys. Res.*, 69: 4389—4394.
- Runcorn, S. K., 1967. Flow in the mantle inferred from the low degree harmonics of the geopotential. *J. R. Astr. Soc.*, 14: 375—384.
- Turner, S., Hawkesworth, C., Liu, J., et al., 1993. Timing of Tibetan uplift constrained by analysis of volcanic rocks. *Nature*, 364: 50—54.
- Xiong, X., Teng, J. W., 2002. Study on crustal movement and deep process in eastern Qinghai-Xizang Plateau. *Chinese Journal of Geophysics*, 45(4): 507—515.
- Xu, Y., Liu, F. T., Liu, J. H., et al., 2002. Crust and upper mantle structure beneath western China from P wave travel time tomography. *J. Geophys. Res.*, 107 (B10): 2220, doi:10.1029/2001 JB000402.
- ### 附中文参考文献
- 邓万明, 1991. 中昆仑造山带钾玄质火山岩地质、地球化学和时代. *地质科学*, (3): 201—213.
- 邓万明, 郑锡澜, 松本征夫, 1996. 青海可可西里地区新生代火山岩的岩石特征与时代. *岩石矿物学杂志*, 15(4): 289—297.
- 傅容珊, 黄建华, 刘文忠, 1994. 区域重力异常和上地幔小尺度对流相关方程. *地球物理学报*, 37: 638—646.
- 傅容珊, 黄建华, 徐耀民, 等, 1998. 青藏高原—天山地区岩石层构造运动的地幔动力学机制. *地球物理学报*, 41: 658—668.
- 高锐, 黄东定, 卢德源, 等, 2000. 横过西昆仑造山带与塔里木盆地结合带的深地震反射剖面. *科学通报*, 45(17): 1874—1879.
- 洪汉净, 于泳, 郑秀珍, 等, 2003. 全球火山活动分布特征. *地质前缘*, 10(特刊): 11—16.
- 黄培华, 傅容珊, 1983. 中国岩石层底面地幔对流状态的探讨. *地球物理学报*, 26(1): 39—47.
- 李光明, 2000. 藏北羌塘地区新生代火山岩岩石特征及其成因探讨. *地质地球化学*, 28(2): 38—44.
- 李秋生, 卢德源, 高锐, 等, 2000. 横跨西昆仑—塔里木接触带的爆炸地震探测. *中国科学(D 辑)*, 30(增刊): 16—21.
- 刘桑, 迟效国, 李才, 等, 2001. 藏北新生代火山岩系列的地球化学及成因. *长春科技大学学报*, 31(3): 230—234.
- 潘桂棠, 王培生, 徐耀荣, 等, 1990. 青藏高原新生代构造演化. 北京: 地质出版社, 32—70.