

青藏高原中部的东西向扩张构造运动

徐纪人¹, 赵志新¹, 石川有三²

(1. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037; 2. 日本气象厅 气象研究所, 筑波 305-0052, 日本)

摘要: 系统分析了 1933~2003 年间青藏高原及其周缘发生的 745 个中、强地震的震源机制解, 研究了高原地壳构造运动及其动力学特征。结果表明, 大量正断层型地震集中发生在青藏高原中部海拔 4 000 m 以上的地区, 其中许多地震是纯正断层型地震。震源机制结果显示, 该区正断层型地震的断层走向多为南北方向, 断层位错矢量的水平分量均位于近东西方向, 这表明青藏高原高海拔地区存在着近东西方向的扩张构造运动。地震震源应力场的研究表明, 在高原中部高海拔地区, E_W 向或 WNW_ESE 向的水平扩张作用控制着该区的地壳应力场。青藏高原高海拔地区近东西方向的扩张构造运动是该区引张应力场的作用结果, 其动力学原因可能与持续隆升的高原自重增大引起的重力崩塌及其周边区域构造应力状况有关。而青藏高原周缘地区, 除了东部边缘外, 南部的喜马拉雅山前缘以及青藏高原的北部、西部边缘所发生的绝大部分地震都是逆断层型或走滑逆断层型地震。在青藏高原周缘地区, 北东或者北北东方向水平挤压的构造应力场为优势应力场。在中国西部的大范围内, 主压应力 P 轴水平分量位于 NE_SW 方向, 形成了一个广域的 NE_SW 方向的挤压应力场。青藏高原及其周缘应力场特征表明, 印度板块的北上运动以及它与欧亚板块之间的碰撞所形成的挤压应力场是高原强烈隆起的直接原因。在青藏高原中南部形成了近东西向引张应力场为主的区域, 并以东西向扩张构造运动部分释放其应力积累。研究高原高海拔地区的引张应力场和近东西向扩张构造运动的特征, 对于认识青藏高原强烈隆起的地球动力学过程与机制, 有着重要的理论意义。

关键词: 震源机制解; 正断层型地震; 扩张运动; 应力场; 重力崩塌

中图分类号: P315; P542

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2005)05-0447-06

EW-trending extensional motions in central Tibetan Plateau

XU Ji-ren¹, ZHAO Zhi-xin¹ and ISHIKAWA Yozo²

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2. Meteorological Research Institute of Japan Meteorological Agency, Tsukuba, 305-0052, Japan)

Abstract: In the present paper, the authors analyzed the earthquake mechanism solutions (M4.6~8.5) during 1933~2003 for the study of the extensional tectonic movement at the surface of the Tibetan Plateau and its relative dynamics. The results show that a lot of normal fault type earthquakes are concentrated in the central part of the Tibetan Plateau with the elevation greater than 4 000 m. Many earthquakes are pure normal fault events. Their focal mechanism solutions show that the strike directions of faults are almost in the N-S direction. The dislocation slip vectors of the normal fault type events have large components in the E-W direction, suggesting the extensional motions in nearly E-W direction in the high elevation area of the plateau. The tensional forces in the E-W or WNW-ESE directions are predominant in this region, and may result in the above extensional tectonic motions. The dynamics for extensional motions can be attributed to the gravitational collapse of the rising plateau and the stress of its surrounding areas. Around the Tibetan Plateau, earthquakes caused by reverse and strike-slip faulting are predominant on the north and west margins (except for the east margin), and the Himalayan Mountains. Horizontal stress field in nearly NE or NNE direction dominates the tectonic motions along all margins. The tectonic forces from the relative movement between the Indo-Australian and Eurasian plates cause P-axes to line up in the NE-SW direction in the western China.

收稿日期: 2005-07-15; 修订日期: 2005-08-05

基金项目: 国家重点基础研究发展(973)计划(2003CB716505); 国家自然科学基金资助项目(40399141)

作者简介: 徐纪人(1947-), 女, 博士, 研究员, 主要从事地震发生机制、应力场和地球动力学、不均匀介质中地震波传播过程以及地壳应力场数值模拟等研究, E-mail: xujiren@ccsd.org.cn。

Key words: source mechanism solution; normal fault earthquake; extensional motion; stress field; gravitational collapse

青藏高原及其周围区域是世界上构造运动最激烈、强震活动最集中的地域之一(Xu *et al.*, 1988; 王勇等, 2003)。由于印度板块在喜马拉雅山南缘向欧亚大陆碰撞俯冲, 造成大量的逆冲构造运动发生。许多学者都报道过该区诸如此类的构造运动及其伴随发生的强地震活动等现象(曾融生等, 2000; 傅容珊等, 2000)。沿着喜马拉雅地区的印度洋板块和欧亚板块碰撞运动所产生的强烈的挤压构造应力, 不仅导致了青藏高原持续隆升, 并致使周缘的喜马拉雅、阿尔金山以及祁连山等发生剧烈的造山、大规模断层活动等构造运动, 使其发生激烈的地壳形变和频繁的大地震活动。印度洋板块和欧亚板块碰撞运动的影响, 控制了中国西部乃至其以北的广大地区(Rob *et al.*, 1997; Brown *et al.*, 2002)。从地震活动、地震应力场等可知, 青藏高原及其周围区域的构造运动明显表现为挤压、逆冲等特征(赵志新等, 1988; 许忠淮, 2001; Qin *et al.*, 2002), 而且这种强烈的构造运动一直延伸到天山山脉及其以西地区。许多研究结果还表明青藏高原及其周围地区的地震活动性与喜马拉雅地区地震活动的时间变化相关性相当密切, 这种地震活动性时间变化的同步特征表明了青藏高原地震活动的孕震力源与印度板块和欧亚大陆板块的挤压碰撞有着密切的关系(Oike *et al.*, 1989; Zhao *et al.*, 1990)。

一些研究成果报道了在青藏高原地区的构造运动除了有挤压运动特征外, 高原内部还存在着大量的张性地质构造活动。地质学证据表明该地区曾经发生过晚新生代的東西向扩张延伸运动(Ni & York, 1978)。近年来的科学人造卫星照片资料也显示在青藏高原确实发生过扩张活动(Molnar, 1990)。许多正断层活动发生在青藏高原的前沿扩张区域内, 在那里高角度的脆性正断层破裂向造山带边缘区延伸(Hancock and Bevan, 1987)。同时, 在青藏高原还出现了许多张性裂隙以及张性地堇等(Dewey and Bird, 1970)。多组近南北走向的正断层切割了青藏高原南部, 那些正断层在地表面的特征呈现为区域性的ESE方向的延伸(Armijao *et al.*, 1986)。本文将详细、系统研究青藏高原及其周围地区的地震震源机制解, 进而研究该区构造运动和地球动力学特征。根据区域构造应力场的特征和地震断层运动的类型特征, 研究青藏高原地区的地壳运动特征, 特别是高原可能的扩张运动的地震学资料证据和地震学资料所呈现的地壳构造运动特征。

1 资料及其分析处理方法

本文系统地分析了在1933~2003年期间青藏高原及其周缘地区发生的M 4.6~8.5的岩石圈地震的震源机制解, 最终得到震源深度小于100 km的745个岩石圈中、强震的震源机制解结果, 其中包括1950年8月15日M 8.5的察隅大

地震、2001年11月14日M 8.1的昆仑地震等青藏高原巨大地震的震源机制结果。在这些震源机制结果中, 有利用世界地震中心(ISC)报告及其他资料解析确定的217个地震的震源机制解, 有美国哈佛大学和美国地质调查局的CMT解以及其他解析结果。本文初次使用并发表2000年以后的地震震源机制结果, 全部震源机制结果均经过严格审核。选用的1980年以前的地震大多使用P波初动解的解析结果, 每个地震的观测记录点数一般不少于15个, 结果的矛盾比均小于10%。1980年以后的地震大多使用CMT解的结果, 对于同一地震有多个解析结果的情况, 本文根据观测记录台站点数多少、布局合理性及理论地震图形与观测资料的吻合程度, 并参照宏观考察等结果, 确定采用其最佳震源机制解。可以认为, 本文所用震源机制资料均有较好的精度和可信度。

为方便研究, 本文将所有地震发生的类型按照其震源机制解中应力主轴的仰角大小等划分为3种类型, 即正断层型地震、逆断层型地震和走滑断层型地震(Xu *et al.*, 2002; 徐纪人等, 2003)。正断层型地震是震源机制解中主压应力P轴的仰角大于45°且张应力T轴的仰角小于45°的地震; 逆断层型地震是震源机制解中张应力轴T轴的仰角大于45°且P轴的仰角小于45°的地震; 走滑断层型的地震是指震源机制解中P轴和T轴的仰角均小于45°的地震。对于极个别P轴或T轴等于45°的事件进行了特殊的分析处理, 以确定它们的地震断层活动类型。如前所述, 用于本研究的地震震源机制解的事件都是发生在岩石圈内部的地震。通过解析并分析各种类型中、强地震震源断层参数得到的位错量的空间分布, 研究了青藏高原及其周缘地区区域地壳及岩石圈的构造运动特征。

2 构造应力场特征

为了研究青藏高原及其周围邻区的构造应力场分布特征, 图1和图2分别给出了研究区地震震源机制解的主压应力P轴和张应力T轴在水平方向的投影分布。图中P、T上面的直线表示当P、T轴平行于水平面时的长度。从图1、图2可以看出, 在青藏高原及其周围地区除了南北地震带南部东侧发生的地震外, 大部分地震震源机制解P轴的空间方位主要沿着从N-S方向到NE-SW方向排列(图1)。在喜马拉雅山前沿地区P轴的方向几乎是在NNE-SSW到NE-SW方向范围变化, 且在多数地段垂直于喜马拉雅山弧。除了东缘南北地震带南部之外, 青藏高原的周缘区域地震震源机制解T轴的水平分量较小, P轴的水平分量明显大于其T轴的水平分量。这表明青藏高原的周缘区域特别是喜马拉雅前地带的构造运动和造山运动主要由NNE-SSW或NE-SW方向的挤压应力场所支配。

图2显示, 由喜马拉雅、阿尔金山、祁连山围绕的青藏高

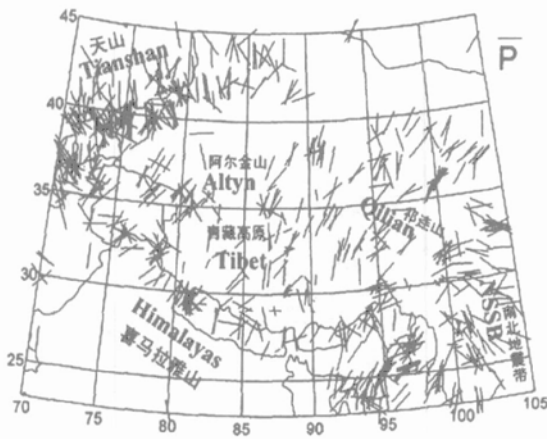


图1 青藏高原震源机制解P轴水平投影分布

Fig. 1 Horizontal projections of compressive axes (P) of focal mechanism solutions in and around the Tibetan Plateau

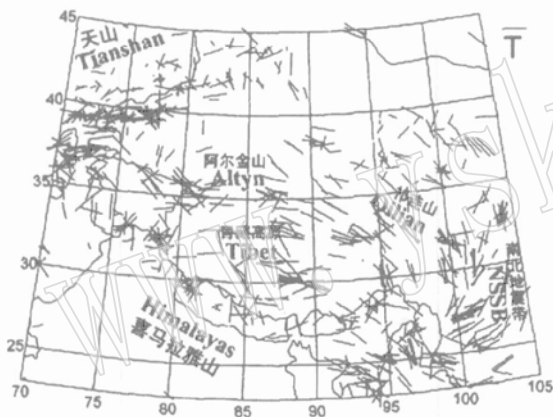


图2 青藏高原震源机制解T轴水平分量投影分布

Fig. 2 Horizontal projections of extensional axes (T) of focal mechanism solutions in and around the Tibetan Plateau

原中部地区地震震源机制解的T轴有较大的水平分量,其空间分布基本位于近E-W方向,或沿近NNW-SSE方向排列。与T轴相比较,该区地震震源机制解P轴的水平分量一般均小于T轴的水平分量,一些P轴的方向接近于垂直方向,多数T轴的水平分量接近平行于水平面的长度,尤其是在高原海拔较高的地区T的水平分量,几乎没有例外地明显大于高原周缘地区。因此可以看出,由近E-W方向到WNW-ESE方向的扩张应力场控制着该地区的构造地震的断层活动,而从NNE-SSW到NE-SW方向的挤压应力场可能仅起着辅助作用。青藏高原高海拔的中部地区的构造应力场特征与青藏高原的周缘地区,特别是与其南缘的喜马拉雅山脉前缘地区是完全不同的。

在青藏高原北部边界区域的阿尔金山、祁连山乃至祁连山以北的广阔地区,地震的震源机制的主压应力P轴方向主

要为近N-S方向或者NE-SW方向。而主张应力轴T轴几乎都位于E-W或者NW-SE方向。在这些区域发生的多数地震的震源机制结果,其P轴与T轴的水平分量大小差别较小。阿尔金山等地一些地震的震源机制解的T轴的水平分量比较小,而P轴的水平分量较大,显示出较强的挤压应力场控制着该区。这种挤压作用一直向北和西北延伸至天山山脉地区。在天山地区,主压应力P轴几乎都位于近N-S方向,而且震源机制解的P轴的水平分量明显地大于主张应力T轴,表明强烈的挤压应力场存在于天山地区,并控制了那里的地震活动。仅在青藏高原的东部边缘地区,即中国南北地震带(NSSB)的南部的西侧,P轴差不多均位于NE-SW方向,与青藏高原整体挤压应力场的方向大体相同。而在其东侧的P轴则大多数都位于NWN-SES方向上,与华南地区应力场的主压应力方向大体相同(徐纪人等,1995)。南北地震带南部地区地震震源机制解的P轴和T轴的水平分量基本相等,均基本平行于地表,显示出水平挤压与引张应力场共同控制着青藏高原东部边缘地区。

3 青藏高原的运动学特征

为了研究青藏高原及其周缘地区的构造运动特征,图3给出了根据地震震源机制解划分的正断层、逆断层和走滑断层型地震的空间分布。地震的震源断层活动类型的分类方法如第1节所述,是根据每个地震震源机制解中的主压应力轴及主张应力轴的仰角的大小来确定的。从图3的地震震源断层类型空间分布来看,在青藏高原南缘,沿喜马拉雅山弧前西侧直到克什米尔地区主要分布着挤压应力为主的逆断层型地

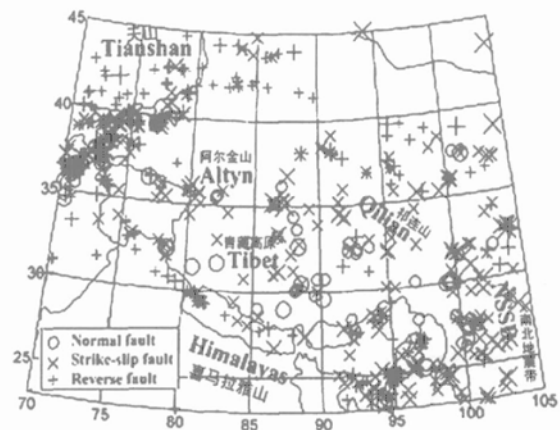


图3 青藏高原及其周缘地区正断层、逆断层和走滑断层型地震空间分布图

Fig. 3 Distribution of normal, thrust and strike-slip faulting events in and around the Tibetan Plateau

○—正断层型地震; + —逆断层型地震; × —走滑断层型地震
○—normal faulting event; + —reverse faulting event;
× —strike-slip faulting event

震,然而在喜马拉雅山弧前沿东段所发生的地震主要是走滑断层型的地震和少量逆断层型地震,没有正断层型地震发生。图3中一个非常明显的特征是,除了一些走滑正断层型的地震以外,大量正断层型的地震集中发生在青藏高原的中部大约海拔4000 m以上的地区。该正断层型地震集中区内几乎没有逆断层型地震发生。从地理位置上看,这个正断层型的地震集中发生区在大约北纬28.5°~34.5°、东经80°~93°的地域范围内,其北部边界为阿尔金山和祁连山脉。沿着阿尔金山断裂带有大量的走滑断层型大地震频繁地发生,还有许多逆断层型地震时常发生。这表明,在青藏块体的北部边缘地区,地震断层的活动方式明显不同于青藏高原中部4000 m以上地区的地震活动,走滑逆断层型地震以及一些逆断层型地震活动取代了扩张运动为主的正断层型地震活动。从图3中还可以看出,在阿尔金山北部的天山地区的地震活动特征主要呈现为逆断层型地震的频繁活动。

总体上看,青藏高原中部与其周缘地区的地震断层活动特征是截然不同的:中部是以扩张运动为主的正断层型地震活动;而在高原周缘地区除东部边缘外,都是以挤压、上升为主的逆断层型地震活动。仅在青藏高原的东缘边界,即中国南北地震带(NSSB)的南部(北纬33°以南的地区,大体沿东经102°延伸),绝大多数地震都是以走滑断层型的断裂方式发生的。也可以说,从总体上来看,在青藏高原周缘海拔较低的地区,地震主要是以逆断层型或者走滑逆断层型活动发生,显示了在印度板块向欧亚大陆挤压碰撞的作用下,青藏高原不断隆升的构造运动特征。然而,青藏高原中部高海拔地区内却发生着相反趋势的构造运动,促使不断隆升的青藏高原基本保持着重力均衡状态(曾融生等,2000)。

4 青藏高原中部的扩张应力场与张性构造运动

图3的地震断层类型分布显示,在青藏高原中部存在着一个明显的正断层型和走滑正断层型地震集中发生区,与其周缘的逆断层和走滑逆断层型地震形成鲜明的对照。该区大体位于拉萨地体、羌塘地体及其周围海拔4000 m以上的青藏高原高地。震源机制的乌尔夫网平面投影与主压、主张应力轴等剖面分布显示,该区地震应力场大体有3个特征:主压应力P轴基本垂直于地表面;主张压应力T轴平行于地表面,且大体呈近东西向分布;地震断层走向多数为近南北方向(徐纪人等,2005)。这说明在青藏高原中、南部,近东西向的区域扩张应力场处于主导地位,控制着该区的地震活动及其构造运动。为了进一步分析研究青藏高原块体中部的正断层地震引起的扩张活动的特征,图4给出了青藏高原及其周围地区的M5.6到M8的正断层型地震的震源机制解的乌尔夫网投影分布,其目的是通过分析图中正断层地震的震源机制特征,进一步研究青藏高原的构造运动形态和作用方式。从图4中可以看出,青藏高原高海拔地区正断层型地震无论

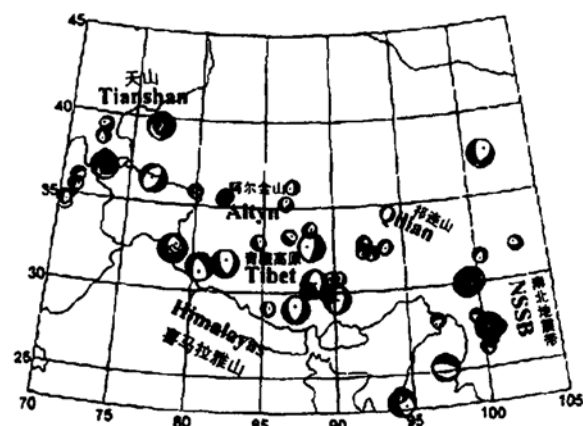


图4 青藏高原高原及其周围地区正断层型地震的震源机制解的投影图的分布

Fig. 4 Distribution of fault plane solutions with normal fault type events in and around the Tibetan Plateau

震级大小,都有着相当大的正断层分量,其P轴大体位于震源机制解投影图的正中央,可见这些P轴的方向几乎垂直于地表面。有许多地震都近乎于纯正断层型地震。因为两条节线无论哪一条是断层面都差不多接近南北方向,可以认为这些地震断层的走向几乎都是近N-S方向。根据利用波形反演目前已得到的部分地震断层滑动矢量的分布(图5),青藏高原中部扩张应力区及其周边区域,伴随一次M6~8级地震的发生,震源断层有1~6.6 m的近东西向的水平位错发生。这是与青藏高原南缘以及其他地区所发生地震的近南北向的滑动矢量完全不同。例如,2001年11月14日Ms 8.1 (Mw 7.9)的昆仑大地震造成360 km长、30 km宽的地震断层向西滑动了6.6 m。其他一些解析结果,特别是喜马拉雅以北、昆仑山以南的青藏高原中部扩张应力区域的地震断层参数解析结果,其滑动矢量均有约1至数米近东西向的水平分量,表现出鲜明的区域运动特征。

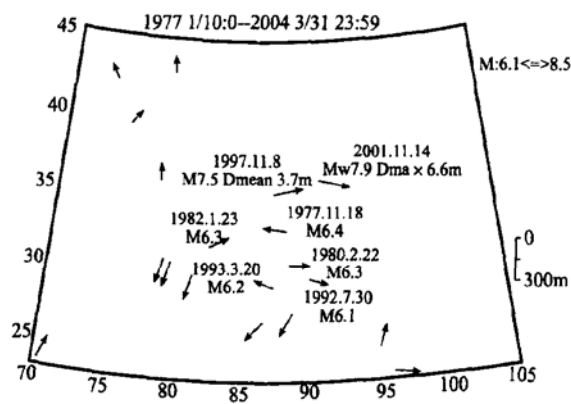


图5 青藏高原及其周缘部分大地震的地震断层滑动矢量分布

Fig. 5 Distribution of slip vectors of large earthquake faults in and around the Tibetan Plateau

众所周知,根据地震断层模式及其参数确定的理论与方法,地震应力场的主应力轴与断层面上的滑动矢量在空间方位上有一定的角度。而根据正、逆断层型地震震源的主应力轴和滑动矢量在平面投影的关系可以断定,青藏高原中部在近东西向的扩张应力场的控制下,不断发生正断层和走滑正断层型地震。随着这些类型地震的发生,高原中部通过断层位错产生垂直向下和近东西向扩张性构造运动。根据以上分析可以得出结论,在青藏高原海拔 4 000 m 以上的高地来自正断层型地震的构造运动可能在沿着东西方向扩张。这种张性构造运动完全不同于青藏高原周缘的挤压、隆升构造运动。青藏高原高海拔地区近东西方向的张性构造运动是该区扩张应力场的作用结果,其动力学原因可能与持续隆升的高原自重增大引起的重力崩塌以及青藏高原与其周边构造的相互作用有关。研究高原 4 000 m 以上高地的引张应力场和扩张构造运动的特征,对于认识青藏高原强烈隆起的地球动力学过程,有着极为重要的理论意义。

5 GPS 结果与青藏高原运动特征

近年来在青藏高原地区进行的 GPS 观测及其观测研究结果有力地推动了高原运动特征的研究。本文重点研究的青藏高原中部区域内 GPS 观测点虽然不如喜马拉雅山脉地区多,但是 GPS 观测结果(王勇等, 2003)表明,高原中南部地区的观测结果不同于其他地区,有大于北向分量的东向运动分量,高原中南部温泉地区两次观测结果的东向运动矢量都比北向矢量大,且两者差值都大于其中最大均方根误差的 2 倍;处于青藏高原中部的拉萨等地区的结果中也有东向分量大于该区的北向分量的,但差值小于均方根误差的 2 倍;其余地点观测结果的东向分量小于北向分量(王勇等, 2003)。因此可以说,本文由地震资料求得的青藏高原高海拔中部地区的东西向扩张运动完全不同于青藏高原周缘区域的南北向挤压运动的结论是与 GPS 结果基本吻合的。随着 GPS 观测点数量的增加与布局合理化的增强,以及更多地震断层参数解析结果的积累,将会对青藏高原的构造运动特征有更详尽的研究结果。

6 讨论与结论

众所周知,青藏高原的隆升是印度洋板块与欧亚板块的碰撞挤压的结果,而青藏高原中部高海拔地区内的扩张应力场与扩张运动很可能是隆升后的青藏高原不断调整自身与其周边动力平衡关系所导致的结果。如前所述,印度洋板块持续向北运动(Yeats & Lillie, 1991),强大的水平挤压应力使得喜马拉雅、青藏高原不断地隆升。板块相对作用力使得包括青藏高原在内的中国西部广大地区形成了一个广域的近 N_S 或者 NNE_SSW 方向的挤压应力场,强烈的水平挤压应力控制了青藏高原周围海拔较低的边缘地区。大量逆冲断层

和走滑断层型地震发生在喜马拉雅山前沿地带。在阿尔金山地区有大量走滑断层型地震发生。大量的逆断层型地震发生在祁连山和天山山脉地区(Bendick *et al.*, 2000)。此外,全球卫星定位观测系统资料表明,在青藏高原北部边界的阿尔金山地和祁连山地区的北向运动的年均速率仅有在喜马拉雅山区印度洋板块相对于欧亚板块运动速率的十分之一(Hetzel, 2002)。这意味着青藏高原块体的北向运动在其北部的周缘地区遇到了极大的阻碍。在青藏高原的东部边缘地带即南北地震带的南部,除了南北地震带南部北端有少数逆断层型地震外大部分地震都是走滑型地震,说明在青藏高原东部边界地区所受到的来自华南块体的阻力,与高原南、北和西部边界相比,可能相对要弱一些。

另一方面,随着隆升中高原自重的增加导致重力不断增大,同时该区地壳底部受到的来自地幔的负浮力作用,致使垂直方向上的应力不断增强。当垂直应力强度超过水平应力时,应力场发生了逆转,由水平挤压逐渐转变为近垂直挤压及水平扩张为主的应力场。该应力场以正断层地震不断发生的形式,致使局部地形释放及相应地壳减薄等构造活动。换句话说,因为青藏高原中部比其周缘地区要高,在海拔 4 000 m 高地的正断层活动很可能是由于高原重力作用导致青藏高原向其周围地区的崩塌作用所引起的(Robert *et al.*, 1997; Lave, 1997)。同时,板块边界作用力下向北或北东方向运动的青藏高原,由于受到北部的祁连山、柴达木盆地和西北部的阿尔金山、塔里木的强烈阻挡,致使隆升抬高后的高原运动方向转向阻力相对较弱的东部,从而造成青藏高原中部高海拔区域发生了近 E-W 方向的扩张运动。

从图 2 可以看出,与周缘的挤压应力场相反的是,在青藏高原的高海拔地区存在有一个近 E-W 方向的引张应力场区。这一强烈的水平方向的引张应力场导致青藏高原中部发生 E-W 方向的扩张运动。本文所述的近南北走向正断层上所发生的东西方向的扩张运动,与高原块体物质东向逃逸的构造假说没有矛盾。该假说认为,当欧亚板块离开印度洋板块的前端时,欧亚大陆的地壳朝中国东部的大洋板块地壳运动(Avouac & Tapponnier, 1993)。综上所述,青藏高原中部高海拔地区伴随正断层型地震而发生的 E-W 向的扩张运动,无疑与印度洋板块北向运动所造成的 NE-SW 向挤压应力、近 E-W 方向的引张应力场以及它们之间强弱转化相关,其构造原因可能是直接抬升后高原的重力崩塌作用及其周边区域构造应力状况所致。青藏高原中部高海拔地区存在着以南北走向的正断层的东西向扩张运动为主的构造区域,该区域构造运动的定量研究是今后青藏高原研究的一个重要课题。

笔者感谢两位审稿人提出的有益的建议与意见。

References

Armijao R, Tapponnier P, Mercier J L, *et al.* 1986. Quaternary ex-

- tension in southern Tibet: field observations and tectonic Implications[J]. *J. Geophys. Res.*, 91: 13 083~ 13 872.
- Avouac A & Tapponnier P. 1993. Kinematic model of active deformation in central Asia[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 20: 895~ 898.
- Bendick R, Bilham R, Freymueller J, *et al.* 2000. Geodetic evidence for a low slip rate on the Altyn tagh fault system[J]. *Nature*, 404: 69 ~ 72.
- Brown E T, Bendick R, Bourles L D, *et al.* 2002. Slip rates of the Karakorum fault, Ladakh, India, determined using cosmic ray exposure dating of debris flows and moraines[J]. *J. Geophys. Res.* 107, ESE 7_1_7_13.
- Dewey J F & Bird J M. 1970. Mountain belts and new global tectonics [J]. *J. Geophys. Res.*, 75: 2 625~ 2 647.
- Fu Rongshan, Xu Yaomin, Huang Jianhua, *et al.* 2000. Numerical simulation of the compression uplift of the Qinghai- Xizang plateau[J]. *Chinese J. Geophys.*, 43: 346~ 355 (in Chinese).
- Hancock P L & Bevan T G. 1987. Brittle modes of foreland extension [A]. Coward M P, Dewey J F & Hancock P L. *Continental Extensional Tectonics*[C]. Geological Society Special Publication, 28: 127~ 137.
- Lave J, Avouac J P, Lacassin R, *et al.* 1997. Seismic anisotropy beneath Tibet—evidence for eastward extrusion of the Tibetan lithosphere[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 24: 1 851~ 1 854.
- Molnar P. 1990. A review of the seismicity and the rates of active underthrusting and deformation at the Himalaya[J]. *Journal of Himalayan Geology*, 1: 131~ 154.
- Ni J & York J E. 1978. Late Cenozoic tectonics of the Tibetan plateau [J]. *J. Geophys. Res.*, 83(B11): 5 377~ 5 384.
- Oike K, Zhao Z X & Xu J R. 1989. Variations of the regional stress field and space_time distribution of seismic activity [J]. *Earth Monthly (Japanese)*, 11: 209~ 213.
- Qin C, Papazachos C & Papadimitriou E. 2002. Velocity field for crustal deformation in China Derived from seismic moment tensor summation of earthquakes[J]. *Tectonophysics*, 359: 29~ 46.
- Hetzl R, Niedermann S, Tao Mingxin, *et al.* 2002. Low slip rates and long_term preservation of geomorphic features in Central Asia[J]. *Nature*, 417: 428~ 431.
- Rob V V, Wim Spakman & Harmen Bijwaard. 1997. Tethyan subducted slabs under India[J]. *Earth and Planetary Sci. Lett.*, 171: 7~ 20.
- Robert S, Yeats K S & Clarence R A. 1997. *The Geology of Earthquakes*[M]. Oxford University Press, 256~ 257.
- Wang Yong and Xu Houze. 2003. A study on convergence rate of the India plate to Eurasia subduction beneath Qinghai- Xizang plateau—Inversion results from GPS observational data[J]. *Chinese J. Geophys.*, 46: 185~ 190 (in Chinese).
- Xu Jiren, Zhao Zhixin and Ishikawa Yozo. 2005. Extensional Stress Field in the central and southern Tibetan plateau and Dynamic Mechanism of geothermic anomaly in the Yangbajain[J]. *Chinese J. Geophys.* 48: 861~ 869 (in Chinese).
- Xu J R, Zhao Z X, Ishikawa Y & Oike K. 1988. Properties of the stress field in and around west China derived from earthquake Mechanism solutions[J]. *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, 38: 49~ 78.
- Xu Jiren and Oike Kazuo. 1995. Earthquake mechanisms and its implication for tectonic stress field in the southern part of north-south seismic belt in China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 17(1): 31~ 40 (in Chinese).
- Xu Jiren and Yoshiteru Kono. 2002. Geometry of slab, intraslab stress field and its tectonic implication in the Nankai Trough, Japan[J]. *Earth Planes and Space*, 54: 733~ 742.
- Xu Jiren, Zhao Zhixin, Kono Y, *et al.* 2003. Regional characteristics of stress field and its dynamics in and around the Nanhai trough, Japan [J]. *Chinese J. Geophys.*, 46(4): 488~ 494(in Chinese).
- Xu Zhonghuai. 2001. A present_day tectonic stress map for eastern Asia region[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 14(5): 524~ 533(in Chinese).
- Yeats R S & Lillie R J. 1991. Contemporary tectonics of the Himalaya frontal fault system: folds, blind thrust, and the 1905 Kangra earthquake[J]. *J. Structural Geology*, 13: 215~ 225.
- Zeng Rongsheng, Ding Zhifeng and Wu Qingju. 2000. Seismological evidence for the multiple incomplete crustal subductions in Himalaya and south Tibet[J]. *Chinese J. Geophys.*, 43: 590~ 599(in Chinese).
- Zhao Z X, Matsumura K, Oike K & Ishikawa Y. 1988. Regional characteristics of temporal variations of seismic activity in east Asia and their mutual relations (3) West China and its Neighboring regions [J]. *Zisin*, 41: 389~ 400.
- Zhao Z X, Oike K, Matsumura K & Ishikawa Y. 1990. Stress field in the continental part of China derived from temporal variations of Seismic activity[J]. *Tectonophysics*, 178: 357~ 372.

附中文参考文献

- 傅容珊, 徐耀民, 黄建华, 等. 2000. 青藏高原挤压隆升过程的数值模拟[J]. *地球物理学报*, 43(3): 346~ 355.
- 王 勇, 许厚泽. 2003. 青藏高原印度洋板块向欧亚大陆俯冲速率的研究——GPS 观测资料的反演结果[J]. *地球物理学报*, 46(2): 185~ 190.
- 徐纪人, 尾池和夫. 1995. 南北地震带南段应力场特征及其与板块运动的关系[J]. *地震学报*, 17(1): 31~ 40.
- 徐纪人, 赵志新, 河野芳辉, 等. 2003. 日本南海海槽区域应力场及其板块构造动力学特征[J]. *地球物理学报*, 46(4): 488~ 494.
- 徐纪人, 赵志新, 石川有三. 2005. 青藏高原中南部岩石圈扩张应力场与羊八井地热异常形成机制[J]. *地球物理学报*, 48(4): 861 ~ 869.
- 许忠淮. 2001. 东亚地区现今构造应力图的编制[J]. *地震学报*, 23: 492~ 501.
- 曾融生, 丁志峰, 吴庆举. 2000. 喜马拉雅及南藏的地壳俯冲带——地震学证据[J]. *地球物理学报*, 43: 590~ 599.
- 赵志新, 松村一男, 尾池和夫, 等. 1988. 东アジアにおける地震活动变化の地域特徴と关连性について (3) 中国西部と邻接地域 [J]. *地震*, 第2辑, 41: 389~ 400.