

青藏高原及其周围地区 区域应力场与构造运动特征

徐纪人 赵志新

(中国地质科学院地质研究所, 国土资源部大陆动力学重点实验室, 北京 100037)

摘要: 本文系统解析并分析了 1931 年 8 月—2005 年 10 月期间青藏高原及其周围发生的 905 个震级 M4.5~8.5 地震的震源机制结果, 研究了青藏高原岩石圈的区域应力场与构造运动特征。结果表明, 来自印度板块的北北东或北东方向的水平挤压应力控制了青藏高原及其周缘地区的岩石圈应力场。从喜马拉雅到贝加尔湖以南包括中国西部的广大范围内, 主压应力 P 轴的水平分量位于近 NE-SW 方向, 形成了一个广域 NE-SW 方向的挤压应力场。特别是青藏高原周缘地区, 除其东部边缘外, 南部的喜马拉雅山前沿以及青藏高原的北部、西部边缘地区所发生的绝大部分地震都属于逆断层型或走滑逆断层型地震, 表现出周缘地区的水平挤压应力更为强势。应力场特征充分表明, 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青藏高原强烈隆起的直接原因。在青藏高原周缘地区受到强烈挤压应力场控制的同时, 有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, 近 E-W 向或 WNW-ESE 向的水平扩张应力控制着该区的岩石圈应力场; 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大体位于近东西方向。这表明青藏高原中部高海拔地区存在着近东西方向的扩张构造运动, 且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。研究青藏高原存在挤压应力场与引张应力场及其构造运动的区域特征, 对于认识青藏高原形成、发展的地球动力学机制, 有着极其重要的意义。

关键词: 青藏高原; 震源机制解; 应力场; 构造运动; 地震断层类型

中图分类号: P315.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2006)02-0275-11

喜马拉雅造山运动与青藏高原隆升是全球最新的一次岩石圈强烈构造运动, 也是中、新生代以来世界上最大的地质事件之一。它不仅导致世界最高的喜马拉雅和号称“世界屋脊”青藏高原的形成, 并且致使青藏高原及其周缘地区成为现今世界上构造运动最激烈、强震活动最集中的地域之一^[1-2]。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^[3-4]。沿着喜马拉雅地区的印度洋板块和欧亚板块的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造山, 使其发生激烈的地壳形变和频繁的大地震活动等构造运动。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^[5-6]。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^[7-9]。而且这种强烈的构造运动一直延伸到天山山脉地区及其以西地区。研究结果还表明青藏高原及其周围地区的地震活动性, 与喜马拉雅地区的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的相对运动有着密切的关系^[10-11]。然而, 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^[12]。近年来的人造科学卫星照片资料也显示在青藏高原确实发生过扩张活动^[13]。许多正断层活动

收稿日期: 2005-10-30; 改回日期: 2006-02-05

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2003CB716505); 国家自然科学基金项目(40399141)和国土资源部中国岩石圈三维结构专项计划项目(200010103)资助。

作者简介: 徐纪人, 女, 1947 年生, 留日博士, 研究员, 主要从事地球物理与地震学以及地球动力学研究; E-mail: xujiren@ccsd.org.cn。

发生在青藏高原前沿的扩张区域内,在那里高角度的脆性正断层破裂朝向造山带边缘区延伸^[14]。同时,在青藏高原还出现了许多张性的裂隙以及张性的地堑等^[15]。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^[16]。

地震的孕育与发生是岩石圈内部应力积累与释放的结果。地震震源机制的解析结果能定量地反映出地震发生时的应力场,而大量的地震震源机制结果则反映了地震区的岩石圈区域应力场特征,是研究岩石圈应力场的优势方法。为了探明青藏高原及其周缘区域应力场与构造运动的区域特征,笔者详细、系统研究了青藏高原及其周围地区 1931 年以来所发生地震的震源机制解,进而研究其区域构造运动和地球动力学特征。

1 资料及其分析处理方法

笔者系统地解析了 1931 年 8 月—2005 年 10 月期间,青藏高原及其周缘地区发生的 M4.5~8.5 的岩石圈地震的震源机制解。具体研究区域范围为北纬 15°~50°N,东经 70°~115°E。最终得到震源深度 0~100km 的 905 个岩石圈中、强震的震源机制结果,其中包括青藏高原 1950 年 8 月 15 日

M8.5 的察隅大地震、2001 年 11 月 14 日 M8.1 的昆仑地震以及最近发生的 2005 年 10 月 M7.6 巴基斯坦等巨大地震的震源机制结果。这些震源机制结果包括笔者利用世界地震中心 (ISC) 报告及其他资料解析确定的 217 个地震的震源机制解、美国哈佛大学和美国地质调查局的 CMT 解、以及日本东京大学地震研究所的解析结果等,本文初次使用并发表 2005 年的地震震源机制结果,全部震源机制结果均经过严格审核。其中,1980 年以前的地震震源机制解,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,笔者根据观测记录台站点数多少、布局合理性;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。

为了分析研究的需要,笔者将地震发生的类型按照其震源机制解中的应力主轴的仰角数值划分为 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^[17-18]。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°,并且张应力 T 轴的仰角小于 45°的地震;逆断层型地震是震源机制解

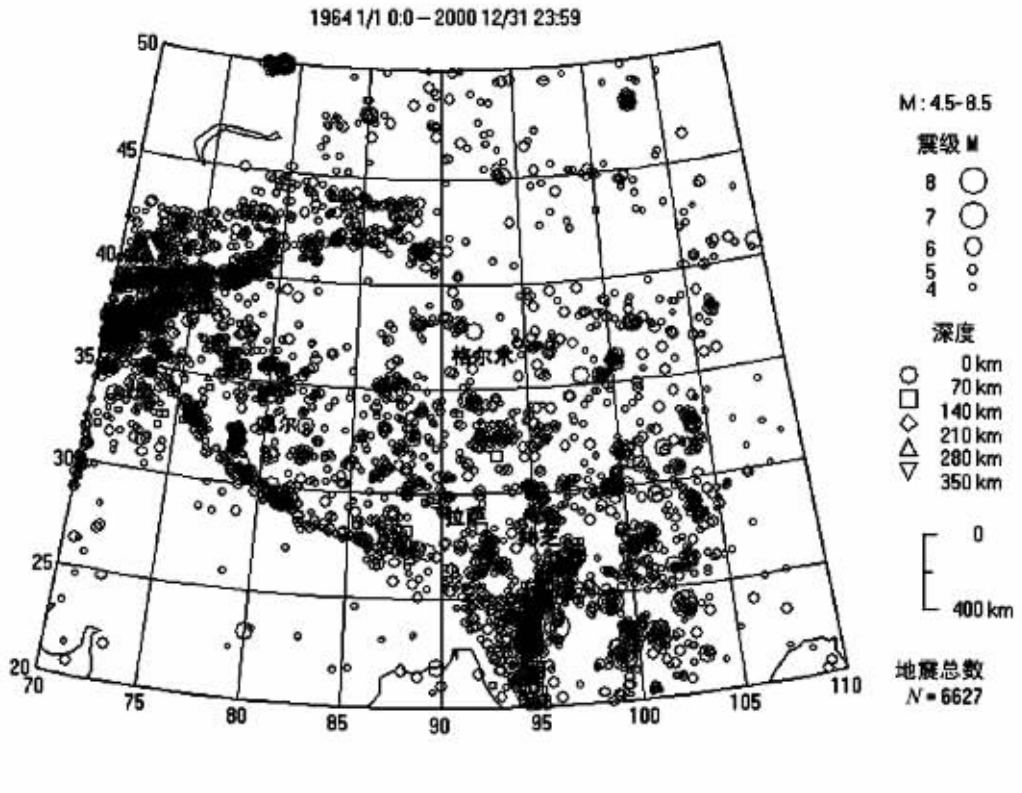


图 1 青藏高原及其周围地震震中分布图(根据美国地质调查局 1964—2000 年地震报告,震级 M4.5 以上,震源深度为 0~350 km)

Fig.1 Epicentral distribution of earthquakes in and around the Qinghai-Tibet Plateau, 1964-2000 (database after USGS reports, 1964 - 2000; M ≥ 4.5, focal depths : 0 - 350 km)

中张应力轴 T 轴的仰角大于 45°, 并且 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,用于本研究中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 青藏高原及其周围岩石圈应力场的区域特征

青藏高原及其周围地区是世界强地震集中发生区。根据美国地质调查局资料,1964-2000 年期间,该区共计发生 M4.5-8 的中、强地震 6627 次(图 1)。其中除了高原西北缘的帕米尔—兴都库什地区和东南方的缅甸地区有中深地震发生外,绝大部分的地震都是岩石圈地壳内部发生的浅源地震。从图 1 的地震震中分布可以清楚看出,除了柴达木等少数地区之外,青藏高原及其周围地区特别是其周缘地带都是强震的集中发生区。

笔者在系统解析研究 1931-2005 年发生的 905 个地震的震源机制结果中,发现有 M5 以上的中强震 855 次,M6 以上的强震 201 次,M7.5 以上的大地震 13 次,其中包括了 M8-8.5 的巨大地震 3 次。为了研究青藏高原及其周围邻区

的构造应力场分布的方向特征,图 2 和图 3 分别给出了研究区域内 905 个地震震源机制解的主压应力 P 轴和张应力 T 轴的水平投影分布。图中右角 P、T 上面的直线表示当 P、T 轴平行于水平面时的最大投影长度。反之,当 P、T 轴垂直于地表时,其投影成为一个点。因此,P、T 轴的水平投影不仅反映了地震应力场主压应力轴和张应力轴的地表水平投影方位,同时也能反映出它们的空间分布特征。

从图 2 地震震源机制解主压应力轴的投影分布看出,除了南北地震带南部东侧所发生的地震外,从喜马拉雅山、昆仑山、阿尔金山、祁连山、阿尔泰山,一直到贝加尔湖以南的蒙古中部地区,绝大部分地震震源机制解的 P 轴方位都是沿着近 NE-SW 方向排列。在喜马拉雅山前沿地区 P 轴的方向几乎都是在 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。在青藏高原北部的阿尔金山、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 NNE-SSW 方向或者 NE-SW 方向。而从图 3 的震源机制解张应力轴的投影分布可以看出,上述区域内主张应力轴 T 轴大体均位于近 E-W 或者 NW-SE 方向。在阿尔金山等地的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。青藏高原西北缘的天山地区,主压应力 P 轴大

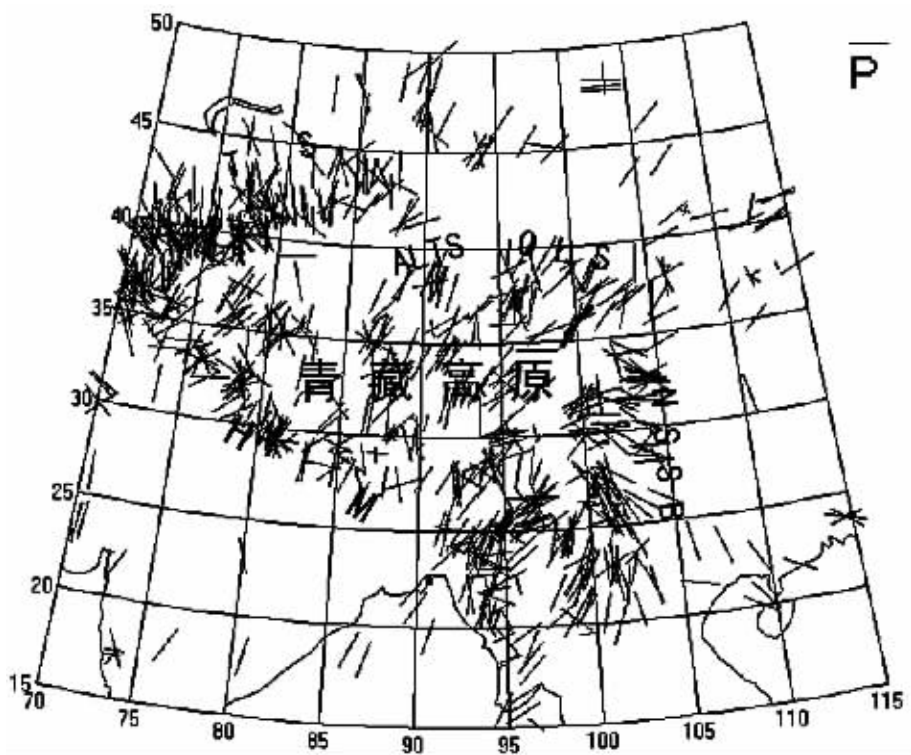


图 2 青藏高原震源机制解 P 轴水平投影分布

HM—喜马拉雅;TS—天山;ALTS—阿尔金山;QLS—祁连山;NSSB—南北地震带

Fig.2 Horizontal projections of principal compressional stress axes (P) of focal mechanism solutions in and around Qinghai-Tibet Plateau

HM—Himalaya; TS—Tianshan; ALTS—Altyin Tagh; QLS—Qilian; NSSB—North-South seismic belt

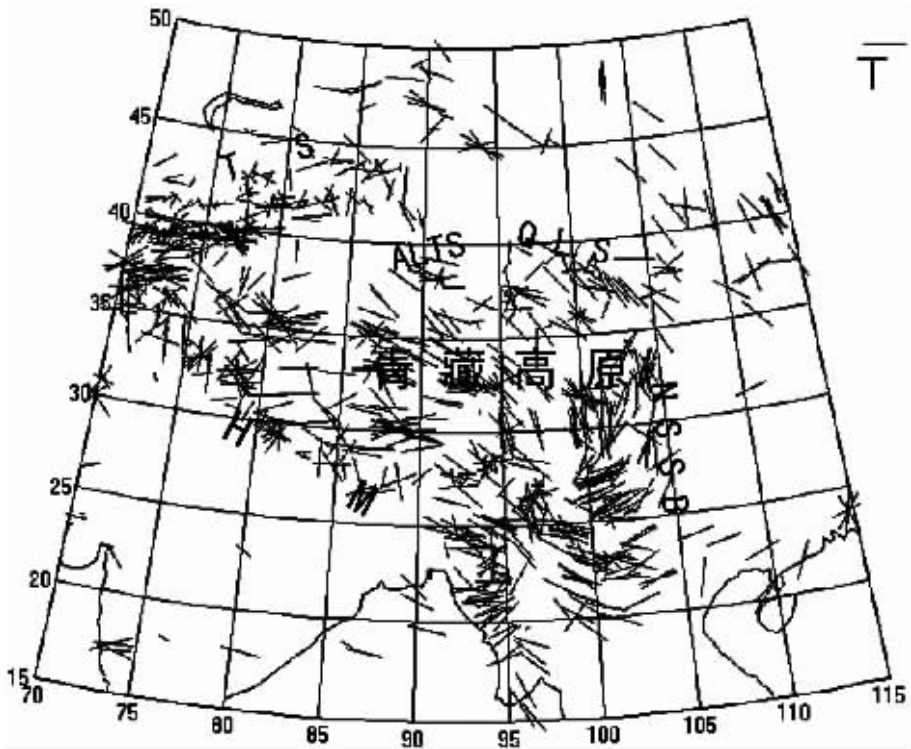


图3 青藏高原震源机制解 T 轴水平分量投影分布

HM—喜马拉雅; TS—天山; ALTS—阿尔金山; QLS—祁连山; NSSB—南北地震带

Fig.3 Horizontal projections of principal tensional stress axes (T) of focal mechanism solutions in and around Qinghai-Tibet Plateau

HM—Himalaya; TS—Tianshan; ALTS—Altyn Tagh; QLS—Qilian; NSSB—North-South seismic belt

多数转向为近 N-S 方向,而且震源机制解的 T 轴的水平分量相当小,接近垂直于地表面。天山地区震源机制解的 P 轴的水平分量明显地大于其主张应力 T 轴,表明近 N-S 方向的非常强烈挤压应力场控制了天山地区的地震活动。除了东缘南北地震带南部之外,青藏高原的南缘、北缘和西北边缘等大部分周缘区域地震震源机制解均表现出, T 轴的水平分量较小, P 轴的水平分量明显大于其 T 轴的水平分量的特征。这表明了青藏高原的周缘区域特别是喜马拉雅前沿地带的应力场、构造运动即造山运动,主要由强烈的近 NE-SW 方向的挤压应力场所支配。

震源机制解 T 轴水平分量投影分布(图 2~3)还显示,青藏高原的南、北和西北等大部分周缘区域均表现出具有强烈的近 NE-SW 向挤压应力场作用的同时,在由喜马拉雅山、昆仑山等围绕的高原中南部有一个与其周缘完全不同应力场特征的地区。该区大约位于北纬 28.5°~34.5°,东经 80°~93°的高海拔地域范围内,区域内地震震源机制解的 T 轴均具有较大的水平分量,多数地震震源机制解 T 轴的水平分量接近平行于水平面,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

解的 P 轴的水平分量一般均小于 T 轴的水平分量,多数地震的 P 轴的方向接近于沿垂直方向。尤其是在高原海拔比较高的地区 T 的水平分量,几乎没有例外的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 方向的挤压引力场可能仅起着辅助作用。在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沿地区是完全不同的。

详细分析研究图 2 和图 3 的震源机制结果还可以看出,与青藏高原的其他边缘地区不同的东部边缘地区,即中国南北地震带(NSSB)南段的东、西两侧的区域应力场,具有完全不同的方向特征。西侧的 P 轴均位于近 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 NNW-SSE 方向上,与华南地区应力场的主压应力方向大体相同^[19]。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,均大致平行于地表,显示出水平挤压应力与引张应力共同控制着青藏高原东部边缘地区的应力场。根据震源机制解得到的应力场结果表

明,著名的南北地震带是划分中国东部与西部的边界,其南段则是青藏高原与华南块体之间的边界带。利用应力场特征划分的南北地震带南段东、西部之间的界线是大体与华南板块西缘相吻合的一条曲线,曲线在部分地段与地表的红河断裂重合。可以认为,南北地震带南段东、西部之间的界线是印度洋板块与菲律宾海板块在中国大陆内部应力控制影响范围的分界线。

大量中、强地震的震源机制解表明,在青藏高原周缘地区和中国西部的大范围内,印度洋板块向欧亚板块的碰撞挤压运动所产生的强烈的构造应力,控制了喜马拉雅、青藏高原、中国西部乃至延伸到天山山脉地区及其以西、以北的广大地区。主压应力 P 轴水平分量大多位于 NE-SW 方向,形成了一个广域的近 NE-SW 方向的挤压应力场。大量逆断层型强震集中发生在青藏高原的南、北和西部周缘地区,以及

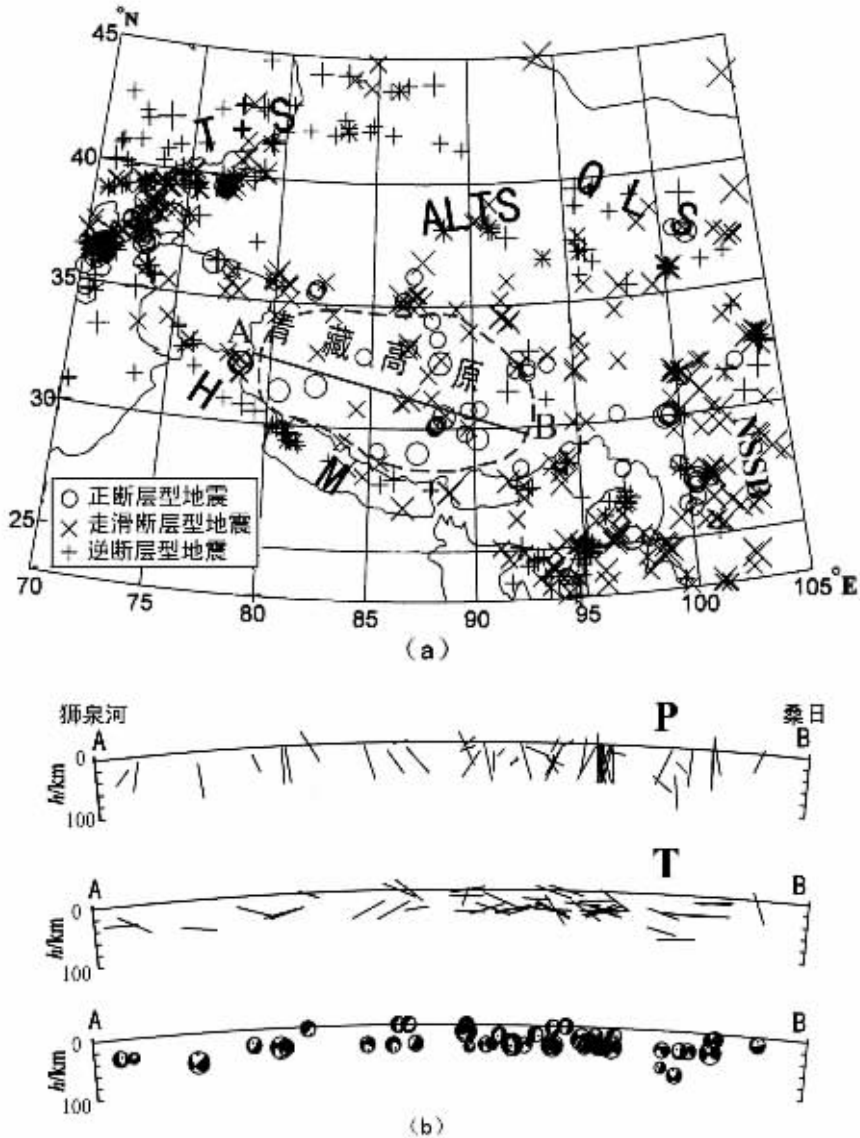


图 4 青藏高原及其周缘地区正断层、逆断层和走滑断层型地震空间分布图(a)及中部扩张运动为主的正断层型地震区域主压应力轴(P)、主张应力轴(T)和震源机制乌尔网投影图沿 AB 线的剖面分布(b)
HM—喜马拉雅; TS—天山; ALTS—阿尔金山; QLS—祁连山; NSSB—南北地震带

Fig.4 Spatial distribution of the normal, thrust and strike-slip fault type earthquakes in and around Qinghai-Tibet Plateau (a) and profiles of the P and T axes and Wulff stereonets of focal mechanisms along line AB (b) in the central part
HM-Himalaya; TS-Tianshan; ALTS-Alty Tagh; QLS-Qilian; NSSB-North-South seismic belt

天山南北等地区。显示了来自印度洋板块持续北东向移动的挤压应力以及大陆板块内部区域块体之间的阻力,是导致青藏高原整体隆升以及周缘的喜马拉雅、阿尔金山、祁连山等著名高山形成的动力学原因。

3 地震震源断层活动类型与青藏高原构造运动特征

为了研究青藏高原及其周缘地区的构造运动特征,笔者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(图4)。地震的震源断层活动类型的划分,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4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震,然而在喜马拉雅山弧前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4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在青藏高原的中部大约海拔4000m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大体位于拉萨地体、羌塘地体及其周围的北纬28.5°~4.5°,东经80°~93°的地域范围,海拔4000m以上的青藏高原中部高地。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在那里;在祁连山断裂带除了大量走滑断层型地震外,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4000m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4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。

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(图4-a)与主压、主张应力轴等剖面(图4-b)分布显示,该区地震应力场大体有3个特征,①主压应力轴(P轴)基本垂直于地表面;②主张压应力轴(T轴)平行于地表面,且大体沿近东西向的AB线分布;③地震断层走向多数为近南北方向。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。

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、隆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)的地震,震源机制解的结果表明,那里的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,青藏高原在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^[3]。

4 青藏高原中部岩石圈扩张应力场与张性构造运动

如前所述,图2~4的地震断层类型分布显示,在青藏高原中部存在着一个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了鲜明对照。震源机制结果表明,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。为了研究该区域内岩石圈扩张应力场的控制深度,图5给出了青藏高原及其周围地区的中深地震与深震(震源深度为60~350km)的震中分布。与图1相比较可以看出,除了帕米尔—兴都库什地区和缅甸地区存在印度洋板块向欧亚板块的俯冲带有中深地震发生外,震源深度为60~110km的下地壳或岩石圈底部地震几乎都集中发生在青藏高原中部的正断层型地震集中区域内。这些中深地震多为M5~6的中强震,且均为正断层型或走滑正断层型地震。该区属高地热异常区,且地热异常区的空间位置与青藏高原中部中深地震区即扩张应力区域基本一致^[18,20]。该区的羊八井等典型高地热区的震源剖面还表明,地震震源有从110km深的岩石圈底部到地表呈现柱状分布的特征。地震等资料表明,青藏高原中部存在的扩张应力在深度范围有可能控制了从上地壳到岩石圈底部。分析其动力学机制,除了岩石圈板块以及板内各块体之间的相互作用之外,来自岩石圈之下的软流圈上涌等也可能是其动力来源。

地震发生时,伴随着岩石圈的应力释放震源断层发生急剧的错动。因而,地震断层滑动矢量反映了震源区的构造运动特征。图6是根据利用宽频地震台网记录的波形资料,反演得到的青藏高原部分地震震源断层水平滑动矢量的分布。图6显示,青藏高原周缘地带与其中部地区地震断层滑动矢量的方向是完全不同的。周缘地带地震断层滑动矢量大体为近南北方向。而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1~6.6m的近东西向的水平位错发生。例如,2001年11月14日Ms8.1(Mw7.9)的昆仑大地震造成长360km、宽30km的地震断层向东滑动了6.6m。这与青藏高原南缘等其他地区所发生的近南北向的滑动矢量是完全不同的。特别是沿喜马拉雅的大地震,其水平滑动矢量均为南向运动,非常类似于岛弧地带地震活动的特征,而天山周围则表现出北向运动的特征。青藏高原及其周缘地震的震源断层水平滑动矢量分布清楚地反映了挤压与扩张应力区域的构造运动特征。

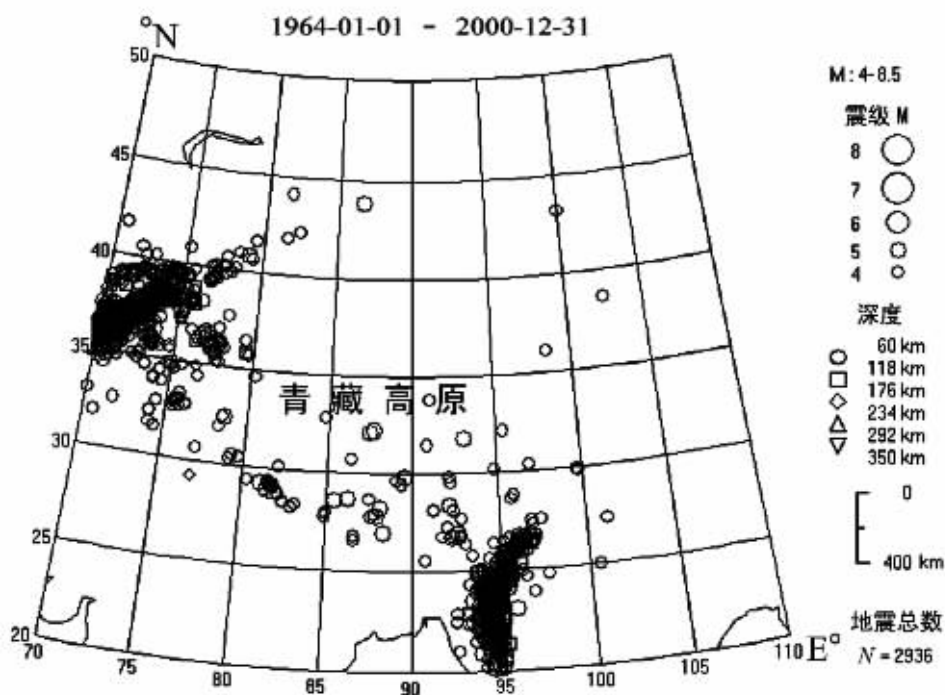


图 5 青藏高原及其周围中深和深震的震中分布图(根据 USGS 报告,震源深度为 60~350 km)
 Fig.5 Distribution of intermediate- and deep-epicenter earthquakes in and around Qinghai-Tibet Plateau
 (database after USGS reports; focal depths: 60-350 km)

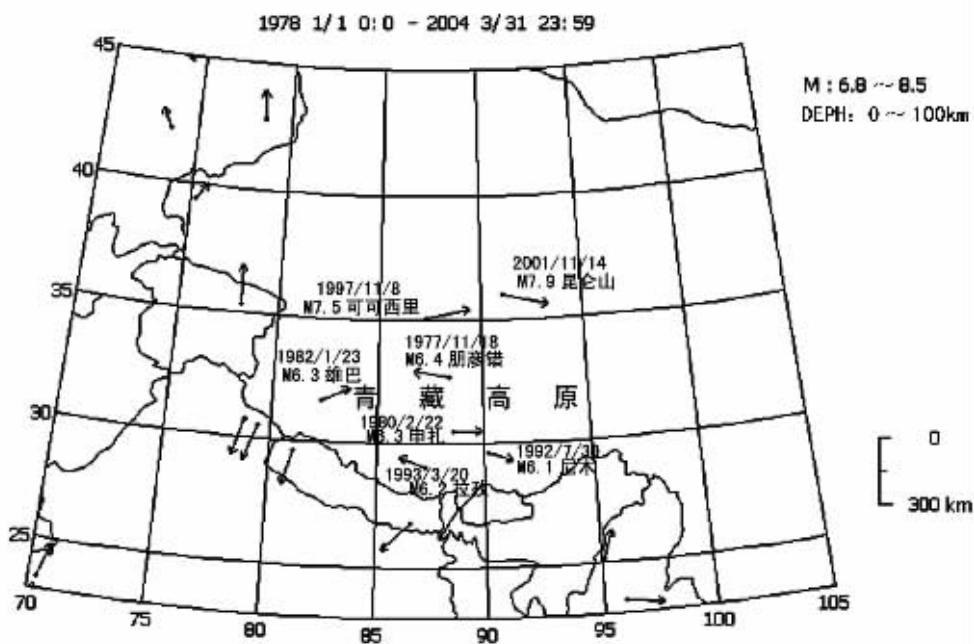


图 6 青藏高原及其周缘部分大地震的震源断层水平滑动矢量分布
 Fig.6 Distribution of horizontal slip vectors of focal faults of large earthquakes in and around Qinghai-Tibet Plateau

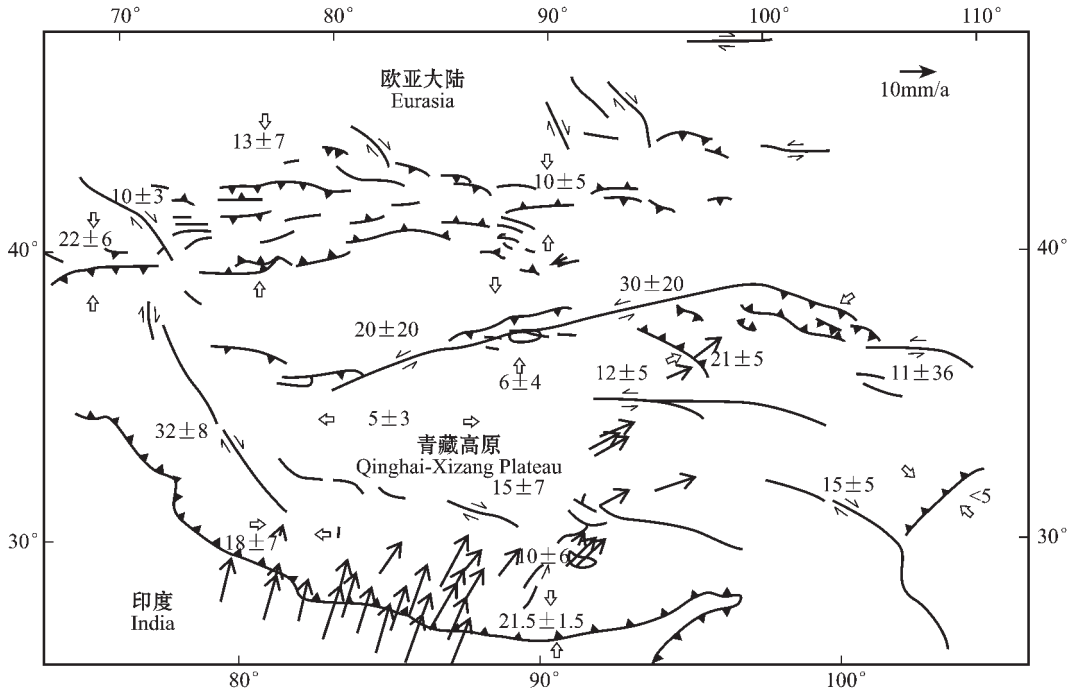


图7 青藏高原 GPS 观测点相对欧亚大陆板块的运动矢量^[2]

⇨:由地质资料推断的青藏高原和相邻块体运动方向;↗:GPS 观测结果得出的观测点相对于欧亚大陆的运动年变化矢量;阿拉伯数字表示年运动速率大小(单位:cm/a)

Fig.7 Horizontal displacement vectors of the Eurasian plate obtained at the GPS observation station in and around Qinghai-Tibet Plateau^[2]

⇨:Displacement vectors between the Qinghai-Tibet Plateau and its neighboring areas deduced from geological data;↗:Displacement vectors of the Eurasian plate obtained at the GPS observation station in and around Qinghai-Tibet Plateau The Arabic figures denote the annual displacement rate (unit:cm/a)

表 1 青藏高原 GPS 观测结果 根据王勇等^[2]修改)
Table 1 Results of GPS observations on the Qinghai-Tibet Plateau
(modified from Wang et al, 2003)

观测地点	纬度		经度		相对于欧亚板块运动速率 (mm/a)	
	(°)	(')	(°)	(')	东向	北向
温泉	33	06	91	53	27.7 ± 0.64	16.4 ± 3.5
	33	03	91	52	23.8 ± 2.4	17.1 ± 1.8
格尔木	36	26	94	52	15.8 ± 8.4	12.3 ± 4.5
	36	15	94	52	11.9 ± 2.2	14.2 ± 1.5
拉萨	29	39	91	6	19.3 ± 2.8	23.2 ± 2.5
	29	39	91	6	21.5 ± 0.9	24.7 ± 0.3
	29	39	91	6	21.5 ± 1.2	20.7 ± 1.0
江孜	28	55	89	36	19.1 ± 4.5	26.7 ± 2.5
	28	55	89	36	17.4 ± 1.8	28.2 ± 1.7
聂拉木	28	18	86	1	16.9 ± 5.4	30.0 ± 3.1
	28	18	86	1	14.5 ± 2.3	44.3 ± 2.0

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 4000 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。

近年来在青藏高原地区进行的 GPS 观测及其观测研究成果有力地推动了高原运动特征的研究。图 7 和表 1 是青藏高原 GPS 观测结果相对于欧亚大陆板块稳定区的年平均运动速率的部分矢量结果^[2]。图中空心箭头表示由地质资料推断的青藏高原和相邻块体运动方向。箭头表示由 GPS 观测结果得出的青藏高原各观测点相对于欧亚大陆运动的年变化速率,并将速率大小用数字标在图中。表 1 列出的相同观测点上的不同的结果是引自不同的观测研究成果。图 6 中,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。表 1 结果更清楚地显示,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。表中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 2 倍的均方根误差。其余地点观测结果的东向分量小于北向分量。可以说,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。

5 讨论与结论

本文利用地震震源机制结果,系统研究了青藏高原岩石圈的区域应力场与构造运动特征。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^[21],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缘地带。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^[22]。近年来全球卫星定位观测系统资料表明,在青藏高原北部的阿尔金山地区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^[23]。这意味着青藏高原块体的北向运动在其北部和西北部的周缘地区

上都遇到了极大的阻碍。而在青藏高原的东部边缘地带即南北地震带的南段,除了其最北端有少数逆断层型地震外大部分地震都是走滑型地震。这说明与高原南、北和西北部边界相比,在青藏高原东缘地区所受到的来自华南块体的阻力,可能相对要弱一些。

此外,青藏高原中部随着隆升中的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,水平扩张为主的应力场。该区域应力场以正断层地震不断发生的形式,导致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 4000 m 高地的正断层活动很可能是由于高原重力增大,导致青藏高原向它周围地区的崩塌而引起的^[24-25]。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。

总体上看,青藏高原及其周围区域应力场与构造运动特征是复杂而有规律的。在高原周缘受到强烈挤压应力场控制的同时,高原中部高海拔地区存在有一个近 E-W 方向的引张应力场区,并导致青藏高原中部发生近 E-W 方向的扩张运动。笔者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^[26]。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,其构造原因可能直接由于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。笔者指出的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向西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。

参考文献 (References):

- [1] Xu J R, Zhao Z X, Ishikawa Y, et al. 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, 1988, 38: 49~78.
- [2] 王勇,许厚泽. 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, 2003, 46(2): 185~190.
Wang Yong, Xu Houze. 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, 2003, 46(2):185~190 (in Chinese with English abstract).
- [3] 曾融生, 丁志峰, 吴庆举. 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, 2000, 43(2):590~599.
Zeng Rongsheng, Ding Zhifeng, Wu Qingju. Seismological evidence for the multiple incomplete crustal subductions in Himalaya and south Tibet[J]. Chinese J. Geophys, 2000, 43(2):590~599(in Chinese with English abstract).
- [4] 傅容珊, 徐耀民, 黄建华, 等. 青藏高原挤压隆升过程的数值模拟[J]. 地球物理学报, 2000, 43(3):346~355.
Fu Rongshan, Xu Yaomin, Huang Jianhua, et al. Numerical simulation of the compression uplift of the Qinghai-Xizang plateau[J]. Chinese J. Geophys, 2000, 43(3):346~355 (in Chinese with English abstract).
- [5] Rob V V, Wim S, Harmen B. Tethyan subducted slabs under India [J]. Earth and Planetary Sci. Lett. 1997, 171, 7~20.
- [6] Brown E T, Bendick R, Bourles L D, et al. Slip rates of the Karakorum fault, Ladakh, India, determined using cosmic ray exposure dating of debris flows and moraines[J]. J. Geophys. Res. 2002, 107, ESE 7-1-7-13.
- [7] 赵志新, 松村一男, 尾池和夫, 等. 東アジアにおける地震活動変化の地域特徴と関連性について、(3) 中国西部と隣接地域 [J]. 地震, 1988, 第2輯, 41, 389~400.
Zhao Zhixin, Matsumura K, Oike K, et al. Regional characteristics of temporal variations of seismic activity in east Asia and their mutual relations (3) West China and its Neighboring regions[J]. Zisin, 1988, 41(2):389~400.
- [8] 许忠淮. 东亚地区现今构造应力图的编制[J]. 地震学报, 2001, 23(5):492~501.
Xu Zhonghuai. A present-day tectonic stress map for eastern Asia region[J]. Acta Seismologica Sinica, 2001, 23(5):492~501(in Chinese with English abstract).
- [9] Qin C, Papazachos C, Papadimitriou E, et al. Velocity field for crustal deformation in China derived from seismic moment tensor summation of earthquakes[J]. Tectonophysics, 2002, 359:29~46.
- [10] Oike K, Zhao Z X, Xu J R. Variations of the regional stress field and space-time distribution of seismic activity[J]. Earth Monthly, 1989, 11:209~213 (in Japanese).
- [11] Zhao Z X, Oike K, Matsumura K. Stress field in the continental part of China derived from temporal variations of Seismic activity [J]. Tectonophysics, 1990, 178:357~372.
- [12] Ni J, York J E. Late Cenozoic tectonics of the Tibetan plateau[J]. J. Geophys. Res., 1978, 83: B11, 5377~5384.
- [13] Molnar P. A review of the seismicity and the rates of active underthrusting and deformation at the Himalaya [J]. Journal of Himalayan Geology, 1990, 1:131~154.
- [14] Hancock P L, Bevan T G. Brittle modes of foreland extension [A]. In: Coward M P, Dewey J F, Hancock P L (ed.). On Continental Extensional Tectonics [C]. Geological Society Special Publication, 1987. 127~137.
- [15] Dewey J F, Bird J M. Mountain belts and new global tectonics[J]. J. Geophys. Res., 1970, 75:2625~2647.
- [16] Armijao R, Tapponnier P, Mercier J L, et al. Quaternary extension in southern Tibet: field observations and tectonic implications[J]. J. Geophys. Res., 1986, 91:13083~13872.
- [17] Xu Jiren, Yoshiteru Kono. Geometry of slab, intraslab stress field and its tectonic implication in the Nankai Trough, Japan[J]. Earth, Planes and Space, 2002, 54:733~742.
- [18] 徐纪人, 赵志新, 石川有三. 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, 2005, 48(4):861~869.
Xu Jiren, Zhao Zhixin, Ishikawa Yozo. Extensional stress field in the central and southern Tibetan plateau and dynamic mechanism of geothermic anomaly in the Yangbajain[J]. Chinese J. Geophys. 2005, 48(4):861~869 (in Chinese with English abstract).
- [19] 徐纪人, 尾池和夫. 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, 1995, 17(1):31~40.
Xu Jiren, Oike Kazuo. Earthquake mechanisms and its implication for tectonic stress field in the southern part of North-South Seismic Belt in China[J]. Acta Seismologica Sinica, 1995, 17(1):31~40(in Chinese with English abstract).
- [20] 侯增谦, 李振清, 曲晓明, 等. 0.5 Ma 以来青藏高原隆升过程——来自冈底斯带热水活动的证据 [J]. 中国科学 (D 辑), 2001, 31(增刊):27~33.
Hou Zengqian, Li Zhenqing, Qu Xiaoming. The uplifting processes of the Tibetan Plateau since 0.5 Ma evidence from hydrothermal activity in the Gangdise Belt [J]. Science in China (Series D), 2001, 31(Supp.):27~33(in Chinese).
- [21] Yeats R S, Lillie R J. Contemporary tectonics of the Himalaya frontal fault system: folds, blind thrust, and the 1905 Kangra earthquake[J]. J. Structural Geology, 1991, 13:215~225.
- [22] Bendick R, Bilham R, Freymueller J, et al. Geodetic evidence for a low slip rate on the Altyn tagh fault system [J]. Nature, 2000, 404:69~72.
- [23] Hetzel R, Niedermann S, Tao M, et al. Low slip rates and long-term preservation of geomorphic features in Central Asia [J]. Nature, 2002, 417:428~431.
- [24] Robert S, Yeats K S, Clarence R A. The Geology of Earthquakes [M]. Oxford University Press, 1997. 256~257.
- [25] Lave J, Avouac J-P, Lacassin R, et al. Seismic anisotropy beneath Tibet - evidence for eastward extrusion of the Tibetan lithosphere[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1997, 24:1851~1854.
- [26] Avouac A, Tapponnier P. Kinematic model of active deformation in central Asia[J]. Geophys. Res. Lett., 1993, 20:895~898.

Characteristics of the regional stress field and tectonic movement on the Qinghai–Tibet Plateau and in its surrounding areas

XU Ji-ren, ZHAO Zhi-xin

(*Key Laboratory for Continental Dynamics of the Ministry of Land and Resources of China, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*)

Abstract: The authors systematically analyzed the focal mechanism solutions of 905 earthquakes (M4.6–8.5) that occurred in and around the Qinghai–Tibet Plateau between 1931 and 2005 and studied the characteristics of the regional stress field and tectonic movement of the lithosphere below the Qinghai–Tibet Plateau. The results show that the NNE or NE horizontal compressional stress due to the northward movement of the Indian plate predominates the tectonic stress fields in and around the study region. The horizontal components of the principal compressional stress P axes are oriented in a nearly NE–SW direction, forming a wide NE–SW compressional stress field in a wide areal extent from the Himalayas to south of Baikal Lake, including western China. Especially in the surrounding areas of the Qinghai–Tibet Plateau, earthquakes caused by reverse and strike–slip faulting are predominant in the Himalayan Mountain front on the southern Qinghai–Tibet Plateau and on the northern and western margins of the plateau, except the eastern margin. It implies that a strong horizontal compressional stress exists around the plateau. The characteristics of the stress field show that the direct cause of the uplift of the Qinghai–Tibet Plateau is due to the compressional stress field formed by the northward movement of the Indian plate and India–Eurasia collision. Many normal fault type earthquakes are concentrated in areas with elevations of >4000 m above sea level on the central Qinghai–Tibet Plateau while the surrounding areas of the Qinghai–Tibet Plateau are subjected to the control of the strong compressional stress field. Of these, many earthquakes are pure normal fault type ones. Their focal mechanism solutions show that the nearly E–W or WNW–ESE horizontal tensional stress controls the lithospheric stress field in the region. The normal fault type earthquake faults mostly strike N–S and the horizontal component of the displacement vectors of the faults is largely oriented in a nearly E–W direction. This indicates that a nearly E–W extensional movement exists in areas with a high altitude in the central part of the plateau and that the extensional movement is the result of the action of the tensional stress field. The dynamics for the extensional movement may be attributed to the gravitational collapse caused by the increasing load of the continuously rising plateau and the regional stress of its surroundings. The study of the regional characteristics of the compressional and extensional stress fields and their tectonic movement on the Qinghai–Tibet Plateau has very great significance for understanding the geodynamic mechanisms of the formation and development of the Qinghai–Tibet Plateau.

Key words: Qinghai–Tibet Plateau; focal mechanism solution; stress field; tectonic movement; types of seismic fault

About the first author: XU Ji-ren, female, born in 1947, professor and Ph.D of geophysics of Kyoto University, Japan; main research interests include geophysics, seismology and geodynamics; E-mail: xujiren@ccsd.org.cn.