

中国岩石圈应力场与构造运动区域特征

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)

提要:笔者系统分析了 1918—2005 年间中国大陆及其周缘发生的 3130 个中、强地震的震源机制解, 根据其特征进行了岩石圈应力场构造分区, 首次得到区域应力场的压应力轴和张应力轴空间分布的统计数字结果。在此基础上研究了应力场的区域特征、探讨了其动力学来源以及构造运动特征。总体结果表明, 中国大陆及其周缘岩石圈应力场和构造运动可以归结为印度洋板块、太平洋板块、菲律宾海板块与欧亚板块之间相对运动, 以及大陆板内区域块体之间的相互作用的结果。印度洋板块向欧亚板块的碰撞挤压运动所产生的强烈的挤压应力, 控制了喜马拉雅、青藏高原、中国西部乃至延伸到天山及其以北的广大地区。在青藏高原周缘地区和中国西部的大范围内, 压应力 P 轴水平分量方位位于 20~40°, 形成了近 NE 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, 以及天山等地区。而多数正断层型地震集中发生在青藏高原中部高海拔的地区, 断层位错的水平分量位于近东西方向。表明青藏高原周缘区域发生南北向强烈挤压短缩的同时, 中部高海拔地区存在着明显的近东西向的扩张运动。中国东部的华北地区受到太平洋板块向欧亚板块俯冲挤压的同时, 又受到从贝加尔湖经过大华北直到琉球海沟的广阔地域里存在着的统一的、方位为 170° 的引张应力场的控制。华北地区大地震的震源机制解均反映出该区地震的发生大体为 NEE 向挤压应力和 NNW 向张应力的共同作用结果。台湾纵谷断层是菲律宾海板块与欧亚板块之间碰撞挤压边界。来自北西向运动的菲律宾海板块构造应力控制了从台湾纵谷、华南块体, 直到中国南北地震带南段东部地域的应力场。地震的震源机制结果还表明, 将中国大陆分成东、西两部分的中国南北地震带是印度洋板块、菲律宾海板块与太平洋板块在中国大陆内部影响控制范围的分界线。

关键词: 中国大陆; 岩石圈应力场; 震源机制解; 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)04-0782-11

地处欧亚板块东部古老的中国大陆及其周围地域, 受到其东边太平洋板块、东南边菲律宾海板块、西南边印度板块的碰撞、挤压和俯冲, 控制了板块边界乃至中国大陆内部广阔地域的岩石圈应力场及构造运动。特别是近 45 Ma 以来, 印度次大陆向亚洲大陆运动并发生强烈碰撞、挤压, 极大地改变了中国西部的面貌。印度板块的持续北进, 导致从中新世中期(16~10 Ma)起, 喜马拉雅山加速上升, 青藏高原迅速隆升。青藏高原的隆升不仅使高原及其周缘区域成为世界上岩石圈构造运动最剧烈的区域^[1], 同时也对中国东部的华北、华南以及东、西部交界的南北地震带等地域的区域应力场与构造运动有极大的影响^[2-7]。

地震是在区域构造应力作用下积累的大量应变能达到一定程度时, 导致岩石圈岩层突然破裂、错动的一种自然现象。大地震发生时, 随着岩层的破裂释放出巨大能量, 其中一部分以地震波形式传播出去。强烈的地震造成地面破坏的同时, 也带来震源应力场、速度结构与构造运动等种种信息。其中, 利用地震波的初动及波形反演得到的震源机制结果能够得知震源断层参数和应力状态, 大量解析结果可以反映区域的应力场和构造运动特征, 是目前研究岩石圈应力场与构造运动区域特征的一个重要途径, 也得到一些结果^[8-9]。近年来, 随着中国以及全球地震观测台网的普及与改良, 特别是数字化地震观测技术的发展及数据处理方法的进步, 提供了更

收稿日期: 2006-02-01; 修订日期: 2006-03-31

基金项目: 国土资源部中国岩石圈三维结构专项计划项目(200010103)和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)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。

多、精度更高的资料。目前,有必要也有条件利用近 70 年特别是 1980 年以来的资料积累,进行中国岩石圈应力场与构造运动区域特征的高精度研究。

岩石圈应力场与构造运动区域特征研究成果不仅推动了地球基础科学的发展,而且为中国国民经济的发展提供了基本地质学资料,在环境、资源、地震和地质灾害预报预防等方面有着直接的指导意义,是国家现代化建设中一项必不可少的基础性研究。

1 资料及其分析处理方法

笔者系统地分析了在 1918—2005 年期间,中国大陆及其周缘地区(北纬 15°~55°,东经 70°~145°)发生的 M4.5~8.5 的岩石圈地震的震源机制解,最终得到 3130 个岩石圈地震的震源机制解结果。其中包括 1931 年 8 月新疆富蕴、1950 年 8 月西藏察隅、1957 年 12 月蒙古国南、1972 年 1 月台湾东等 M8~8.5 的巨大地震;114 个 M7 以上的大地震;710 个 M6 以上的强震;以及 3 010 个 M5 以上的中、强地震的震源机制结果。包括了近年来发生的重要地震,如 2001 年 11 月 14 日的昆仑大地震等震源机制结果^[9]。

在 3 130 个震源机制结果中,徐纪人^[9]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、中国地震局及其各省局解析处理的结果和东京大学地震研究所等其他单位处理的结果。大部分 2005 年以后的地震震源机制结果是本文初次使用并发表的。全部震源机制结果均经过严格审核。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,结果的矛盾比小于 10%。1980 年以后的地震大量采用了 CMT 解的结果。对于同一地震有多个解析结果的情况,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。

为了分析研究方便,笔者将所有地震发生的类型按照其震源机制解中的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^[29]。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。

中国大陆及其周围地域的地质构造非常复杂,无论是

地史上还是现代都受到板块构造运动的影响与控制,是世界上地震多发地域,也是岩石圈应力场及构造运动最复杂的地域之一。根据地震活动性等研究结果,中国大陆及其周围地域以南北地震带为界大体可以划分为东部和西部两大区域。在全面解析研究中国大陆及其周围地域的岩石圈应力场及构造运动的区域特征的基础上,对青藏高原、华北和华南地区、台湾地区以及位于中国西、东部过渡交界的南北地震带等地区进行了重点分析研究。在以往研究成果的基础上,突出区域应力场特征的最新研究成果,并对岩石圈动力学机制进行了初步探讨。

2 中国大陆及其周围地域的区域应力场特征

中国大陆的喜马拉雅以及台湾等周围海域地区位于世界两大地震活动带,即欧亚地震带和环太平洋地震带上,是强烈地震集中发生的地区。根据美国地质调查局的资料,1964—2000 年期间本文研究范围内就发生 M5 以上的地震 7 000 余次,其中 M6.5 以上的大地震有 137 次。这些大地震大多集中发生在中国的喜马拉雅、青藏高原、台湾以及华北等地区。笔者集中解析并研究了其中主要地震的震源机制结果。图 1 和图 2 分别给出了研究区域内 3 130 个中、强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 3 为中深和深源地震(深度 100~700 km)震源机制解的主压应力 P 轴在水平方向的投影分布。图 1~2 中 P、T 轴上的直线表示当 P、T 轴平行于水平面时的长度。图 3 显示,除了长白山以东的中、朝、俄交界地区、台湾以东的海域、兴都库什—帕米尔和缅甸地区有来自太平洋板块和印度板块的俯冲带有深源地震和中深地震发生外,中国大陆及其周围地区发生的地震基本上均属于震源深度小于 100 km 的岩石圈地震。

从图 1、图 2 可以看出,根据 P、T 轴的水平投影方向分布特征,中国大陆及其周围地域的岩石圈应力场大体可以划分为 3 个大区域,即中国西部,包括青藏高原及其周围区域、中国东部的大华北以及台湾—华南地区。根据这 3 个区域的岩石圈应力场特征分别作具体分析。

2.1 中国西部青藏高原及其周围地域

该区包括中国西藏、新疆和南北地震带以西以及蒙古西部直至贝加尔湖以南的大范围。从喜马拉雅、青藏高原及其以北的昆仑山、阿尔金山、祁连山、阿尔泰、蒙古西部直到贝加尔湖以南的广阔地域里,地震应力场 P、T 轴的水平投影方向分布显示出相当好的一致性。绝大部分地震震源机制解的 P 轴方位都是沿着近 NNE—SSW 或 NE—SW 方向排列。具有较大水平分量的地震震源机制解的 T 轴方位则大部分沿着近 NW—SE 方向排列。根据中国西部青藏高原及其周围地域 510 个地震资料 P、T 轴方位与倾角的统计结果(图 4-a),全域内地震震源机制 P 轴方位集中分布在 0~50°范围,优势方位为 20~40°;P 轴倾角集中于 0~30°,优势倾角为 10~

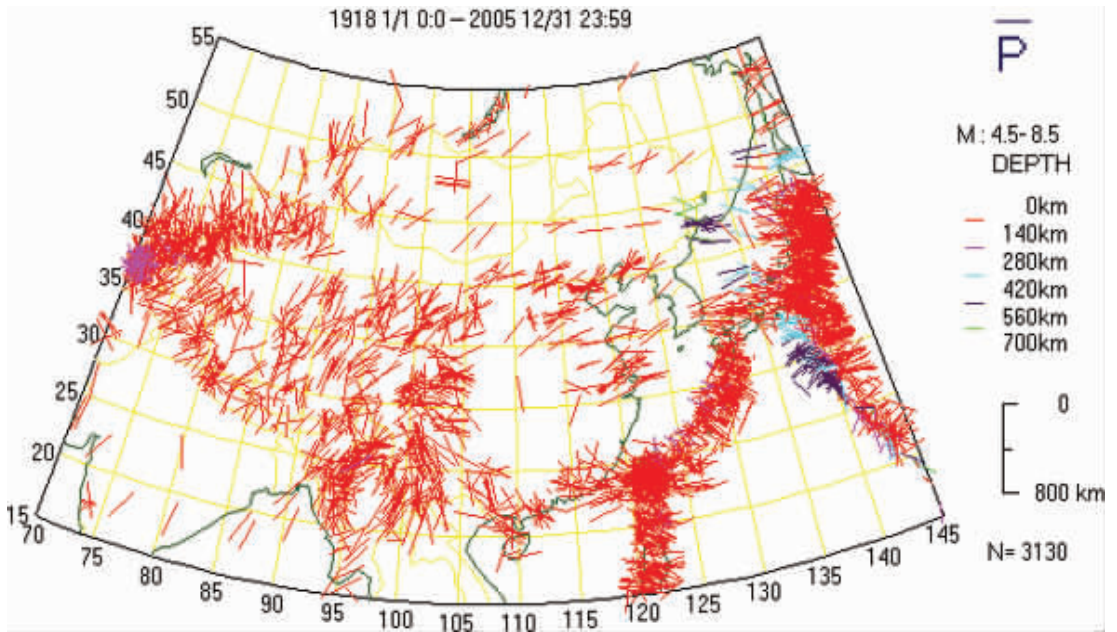


图 1 中国大陆及其周围地域的震源机制解主压应力 P 轴水平投影分布

Fig.1 Horizontal projections of principal compressive axes (P-axes) of focal mechanism solutions in and around continental China

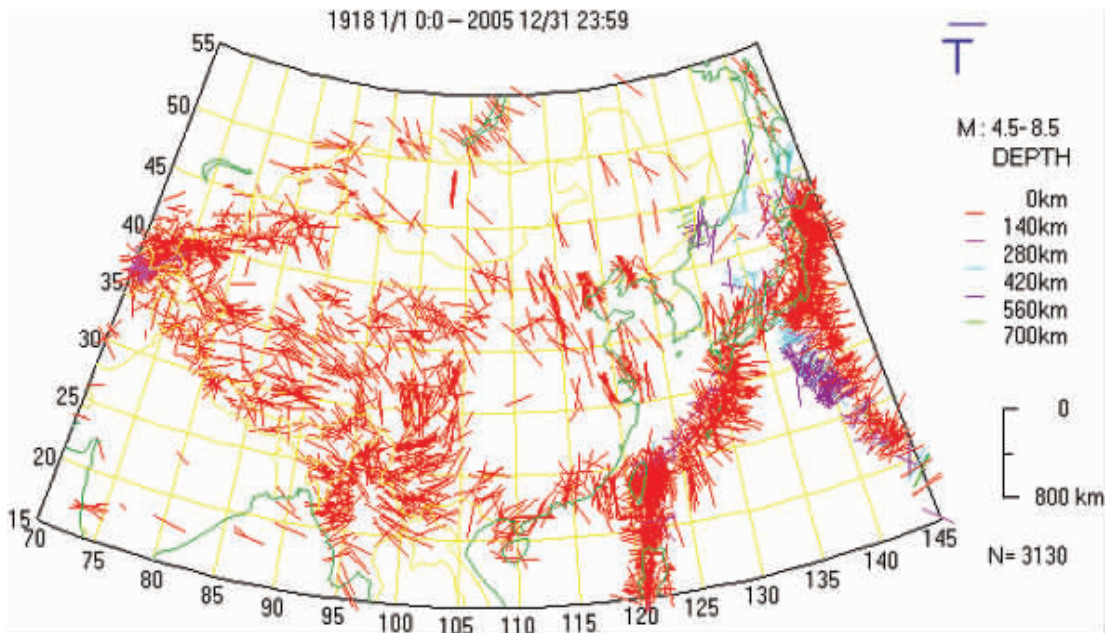


图 2 中国大陆及其周围地域的震源机制解主张应力 T 轴水平投影分布

Fig.2 Horizontal projections of principal extensional axes (T-axes) of focal mechanism solutions in and around continental China

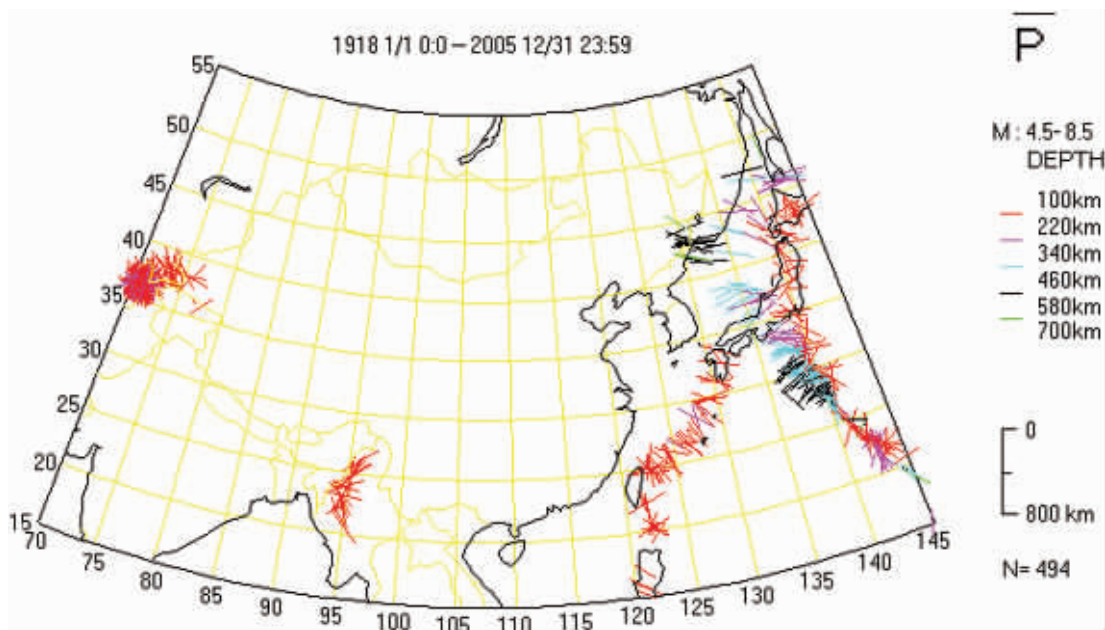


图 3 中国大陆及其周围地域的深源地震和中深地震(深度 100~700 km)震源机制解主压应力 P 轴水平投影分布

Fig.3 Horizontal projections of principal compressive axes (P-axes) of focal mechanism solutions of deep- and intermediate-focus earthquakes (at depth of 100–700 km) in and around continental China.

20°。T 轴优势方位为 $120 \pm 20^\circ$; 倾角大体可分两类, 其中 $10^\circ \sim 30^\circ$ 低倾角的地震约占 50%, 而 $50^\circ \sim 80^\circ$ 高倾角的约占 25%。中国西部岩石圈应力场特征充分表明, 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。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强烈挤压应力场是青藏高原持续隆升的直接原因。

中国西部岩石圈应力场从整体上有较好一致性, 同时, 震源机制结果还反映出该区具有明显的区域特征。为了研究青藏高原及其周缘地区的构造运动特征, 笔者在图 5 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倾角的大小来确定的。图 1~2 及图 4~5 均显示出, 强烈的挤压应力控制了青藏高原的南、北和西北缘地区, 特别是喜马拉雅、祁连山、阿尔金山和天山等地区。在喜马拉雅地区 P 轴的方向几乎都是在 NNE-SSW 到 NE-SW 方向范围变化, 且大多垂直于喜马拉雅山弧。在青藏高原北部的阿尔金山、祁连山及其以北的广阔地区, 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。这种挤压作用一直向北和西北延伸至天山山脉地区。强震集中活动的天山地区, 震源机制解的主压应力 P 轴大多数都转向为近 N-S 方向, 而且 T 轴的水平分量相当小, 接近垂

直于地表面。根据图 4-b 的统计, 天山地区 P 轴方位集中在 $170 \pm 10^\circ$, 优势倾角为 $0^\circ \sim 20^\circ$; 而 T 轴倾角为 $60^\circ \sim 70^\circ$ 的约占 35% 以上, 明显高于低倾角的地震, 表现出近南北向的水平挤压应力更为强势。其他如阿尔金山、祁连山等地, 大多数地震的震源机制解同样具有 P 轴的水平分量大于 T 轴的水平分量, 显示出水平挤压应力场为主的区域特征。地震震源断层类型空间分布同样显示(图 5), 强挤压应力作用下发生的逆断层型地震, 主要分布在喜马拉雅山、阿尔金以北以及祁连山、天山等青藏高原南、北和西北周缘地区。这些地区集中发生大量逆断层型地震和走滑断层型地震, 几乎没有正断层型地震发生。

图 5 显示, 大量正断层型和走滑正断层型地震集中发生在青藏高原的中部和中南部地区。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 $28.5^\circ \sim 34.5^\circ$, 东经 $80^\circ \sim 93^\circ$ 的地域范围, 海拔 4 000 m 以上的青藏高原中部高地。其北部大体以昆仑山脉为边界, 东部是中国南北地震带的南段。根据图 4-c 的统计, 青藏高原中南部地区 P 轴方位 $0^\circ \sim 10^\circ$, 优势倾角为 $60^\circ \sim 70^\circ$; 而 T 轴方位集中在 $70^\circ \sim 130^\circ$, 倾角为 $10^\circ \pm 10^\circ$ 的约占 75% 以上, 表现出近 E-W 向或 NW-SEE 向的水平引张应力为主的区域特征。这表明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高地, 近 E-W 向或 NW-SEE 向的水平扩张应力控制着该区的岩石圈应力

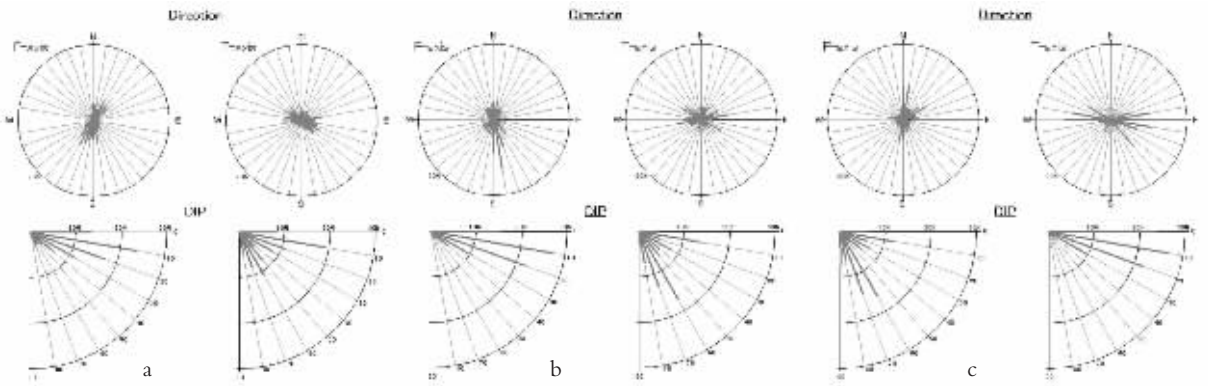


图4 中国西部青藏高原及其周围地域岩石圈应力场P、T轴方位与倾角的统计图
a—全域;b—天山地区;c—青藏高原中南部地区

Fig.4 Statistics of azimuths and dips of P and T-axes in western China
a—West China;b—The Tianshan region;c—The south-central Qinghai-Tibet Plateau

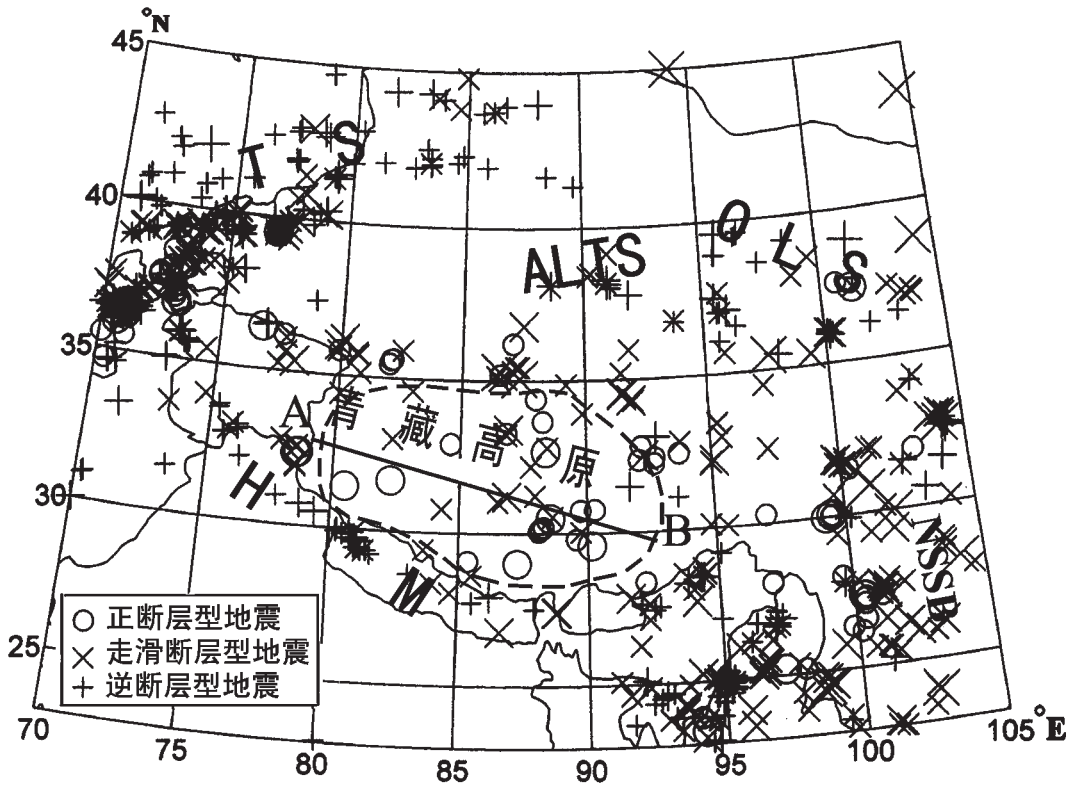


图5 青藏高原及其周围地区正断层、逆断层和走滑断层型地震空间分布
HM—喜马拉雅; TS—天山; ALTS—阿尔金山; QLS—祁连山; NSSB—南北地震带

Fig.5 Distribution of normal fault (O), thrust fault (+) and strike-slip fault (X) type earthquakes in and around the Qinghai-Tibet Plateau

HM—Himalaya; TS—Tianshan; ALTS—Altyn Tagh (Altun); QLS—Qilian; NSSB—North-South Seismic Belt

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。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。

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^[10];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,青藏高原周缘地区具有不断隆升并北向运动的构造运动特征。然而,青藏高原中部高海拔地区内除了有北向运动外,还有垂直向下与东西向运动趋势,促使不断隆升的青藏高原基本保持着重力均衡状态^[11]。

2.2 从台湾、华南到南北地震带南段西部地区的区域应力场

台湾地处欧亚板块与菲律宾海板块的收敛边界,属于世界环太平洋地震带的一部分,是世界上地震活动频度最高、强度最大的地区之一。由于菲律宾板块以 7~8 cm/a 的速率,沿北西 50°方向移动,并在台东纵谷与欧亚板块发生强烈的挤压碰撞。致使纵谷以东的海岸山脉以 5~9.7 mm/a 隆升,而在水平上以 7 cm/a 的速率缩短,直接控制了台湾东海岸起至台湾中部地区的构造运动。台湾纵谷碰撞带的东北海域里菲律宾海板块向欧亚板块俯冲,并与琉球海沟相接;南部则呈现为欧亚板块向菲律宾海板块低角度俯冲,并与马尼拉海沟—吕宋弧相连,是世界上板块收敛边界带上既有碰撞带又有俯冲带的构造复杂地段之一。台湾地区活断层十分发育。东海岸的台东纵谷作为菲律宾板块与欧亚板块间碰撞边界,是台湾地区规模最大的活断层。沿台东纵谷及其东边与北边的海域里,地震活动十分强烈,经常发生 M7~8 级强震。台湾岛中、西部,中央山脉及其西麓则有一系列北北东走向,向西北推覆的活动逆冲断层。在这一带的许多断层上发生过多次破坏性地震并产生了明显的地表断层。由于这一带的地震深度较浅,往往形成强烈的地面变形,造成的灾害较重。震源机制表明,台湾中部 1999 年 9 月 21 日的集集大地震(Ms7.6)就是沿这些活动逆冲断层系列中的车笼埔断层发生的。该地震造成的地表断裂带有 80 km 长,最大水平错距为 9 m,沿 NWW 方向;最大垂直位错为上升 8 m,是目前世界上观测到的最大量级地面位错^[11],反映了纵谷区域构造运动的典型特征。根据震源机制结果,笔者将台湾及其周围的陆地与海域划分为 3 个区域,台东纵谷及其东西陆地和海域(简称纵

谷)、花莲东北海域(简称花莲)以及纵谷南部海域(简称纵谷南)。从板块构造学说观点,该区域是由两端的俯冲带和中间的碰撞带组成,这与喜马拉雅碰撞带周围非常相似。台东纵谷区为菲律宾海板块与欧亚板块之间的碰撞带和直接影响地区,台湾地区 M7 以上的强烈地震几乎都集中发生在这里。统计结果表明(表 1),近水平(倾角 0~30°)、方位 110~140°的北北西方向挤压应力控制了该区的应力场,致使大量逆断层或走滑逆断层发生,其中包括 1999 年 9 月 21 日的集集大地震(Ms7.6)。地震等资料显示,台湾花莲东北海域的俯冲带是菲律宾海板块向北俯冲插向欧亚板块之下,俯冲深度约 300 km。花莲东北俯冲带周围是地震活动区,每年有大量 M6 左右的中、强地震频繁地在这里发生。震源机制的研究结果反映出,该俯冲带 0~150 km 深的浅部应力场为俯冲拉张型,随后转为俯冲挤压型。台湾纵谷南至吕宋岛的地震俯冲带是欧亚板块向东俯冲插向菲律宾海板块之下,俯冲深度约 220 km。震源机制的研究结果表明,沿该俯冲带的应力场,浅部(0~130 km)为俯冲拉张型,较深则转变为俯冲挤压型。

从图 1~2 可以看出,从台湾纵谷、华南至南北地震带南段东部,震源机制结果特别是中、强地震结果,反映的应力场挤压应力方向有相当好的一致性。图 6-a 给出 M6 以上地震震源机制 P、T 轴的统计结果。P 轴方位集中于 110~120°,优势倾角为 10~20°。而 T 轴方位分为两类,10~20°的和近垂直的;倾角为 0~10°的约占 45%,50~70°的约占 35%。后者表现出纵谷断层附近发生的逆断层型地震的特性。应力场研究结果表明,华南至南北地震带南段东部地区均受到菲律宾板块向欧亚板块碰撞挤压运动所产生的北西西方向(110~120°)挤压应力的控制。当然,随着距离以及区域构造条件的变化,挤压应力的强度有所变化,地震活动性的水平有很大差别^[12-13]。

2.3 华北地区应力场区域特征

华北地区是中国东部重要地震活动区域之一。赵志新等^[14]研究了 1500 年以来华北、朝鲜半岛与日本海沟地区地震活动性。结果表明,各区域存在着基本同步的高潮期与平静期,反映出它们有相同的构造力源。华北地区大地震的震源机制结果(如 1976 年唐山大地震),均反映出地震起震应力场是 NEE 向挤压应力和 NNW 向张应力共同作用的结果。从图 1~2 可以看出,包括中国东北在内的大华北地区,震源机制反映出区域应力场的 P、T 轴方位有很好的 consistency。根据图 6-b 和表 1 中 P、T 轴方位和倾角的统计结果,华北地区应力场 P 轴方位集中于 70±20°,优势倾角为 10~20°,但是有部分地震倾角为 40°;T 轴方位集中于 160~180°,低倾角 10±10°的约占 90%,表现出更好的一致性。研究结果充分表明,中国东部除了华南地区受到菲律宾板块向欧亚板块碰撞挤压构造应力控制之外,华北地区受到太平洋板块向欧亚板块俯冲挤压作用的控制和影响。特别引人注目的是,在从贝加尔湖经过大华北地区直到琉球海沟的广阔地域里,存在着一个统一的北北西向引张应力场(图 2)。其形成机制有可能与贝加尔湖和琉球海沟的扩张有关。地震的震源机制结果还

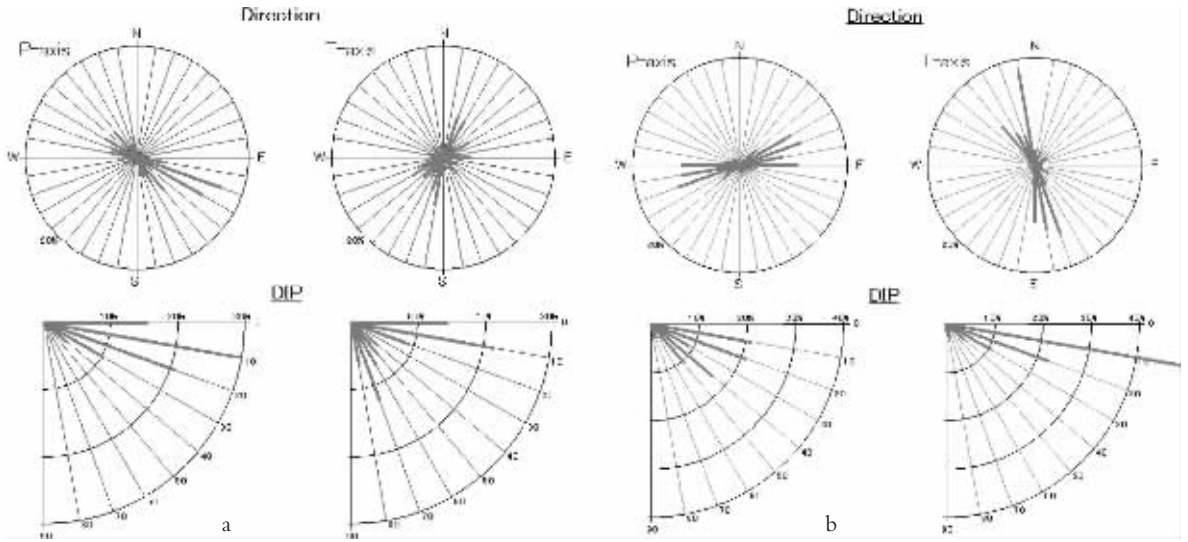


图6 中国东部地区岩石圈应力场 P、T 轴方位与倾角的统计图

a—从台湾纵谷、华南至南北地震带南段东部；b—大华北地区

Fig.6 Statistics of azimuths and dips of P- and T-axes in eastern China

a—from the Longitudinal Valley of Taiwan through South China to the eastern part of the southern segment of the North-South Seismic Belts; b—North China

表明,将中国大陆分成东、西两部分的中国南北地震带是太平洋板块、菲律宾海板块和印度洋板块在中国大陆内部控制范围的分界线。从最近大量解析得到的中、小地震的震源机制解的研究结果表明,中国东部华北块体与华南块体之间的分界线东段大体位于北纬 27~28°的海域。

2.4 南北地震带的区域应力场特征

位于中国东、西部分界地带的南北地震带是中国大陆内部地震活动水平高、构造运动激烈、也是应力场相当复杂的地域之一。根据地震活动性等特征,以秦岭以南的汉中地区为界,南北地震带可以划分为南、北两段。相对其北段,南段的云南、川西以及西藏东部的地震活动水平更高;岩石圈应力场更为复杂,是利用地震活动性的时空分析无法判断其动力来源的大陆内部的唯一地区^[15]。笔者根据该区内发生的 600 余个地震的震源机制结果发现,虽然从整体上看中国南北地震带南段是一个以走滑地震为主的地震活动区,然而其东、西部地区的应力场的方向特征是完全不同的,其西部受 NE-SW 方向的主压应力控制,而东部则为 NW-SE 方向主压应力的控制。图 7-a 显示,南北地震带南段西部,其 P 轴方位集中在 $30 \pm 20^\circ$, 倾角为 $10 \pm 10^\circ$; T 轴倾角为 $290 \sim 310^\circ$, 倾角为 $10 \sim 20^\circ$ 。而图 7-b 和图 7-c 显示,南北地震带南段东部应力场方向,东北(b)和东南地区(c)P 轴方位分别位于 $280 \sim 290^\circ$ 和 $340 \sim 350^\circ$, T 轴倾角为 $10 \sim 30^\circ$ 和 $240 \sim 260^\circ$ 。从整体上看中国南北地震带南段的西部和东部应力场特征分别与青

藏高原和华南块体相同,说明其动力学来源分别来自西部印度洋板块与东部菲律宾海板块与欧亚板块之间相对运动。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曲线,部分与地表的红河断裂重合^[16]。可以认为,该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区的分界线。

3 区域应力场特征总结

系统解析并研究地震震源机制解,笔者得到了中国大陆及其周围岩石圈应力场的构造分区(图 8),以及区域特征的统计结果(表 1)。总体研究结果表明,中国大陆及其周围岩石圈应力场和构造运动可以归结为印度洋板块、太平洋板块、菲律宾海板块与欧亚板块之间相对运动,以及大陆板内区域块体之间的相互作用的结果。印度板块对欧亚板块的强烈碰撞与挤压,致使青藏高原快速隆升并控制了西部直至贝加尔以南大陆内部广阔地域的岩石圈应力场及构造运动。太平洋板块对欧亚板块的俯冲、挤压,控制了包括东北地区、西至鄂尔多斯块体、南至秦岭、大别及其延伸地带的大华北的广阔地域。菲律宾海板块对欧亚板块的碰撞与挤压而形成的北西西方向挤压,不仅控制了台湾主要地区应力场,同时控制了华南直至南北地震带南段东部的岩石圈应力场。位于中国东、西部分界地带的南北地震带是印度洋板块、太平洋板块、菲律宾海板块在中国大陆内部控制范围的分界线。

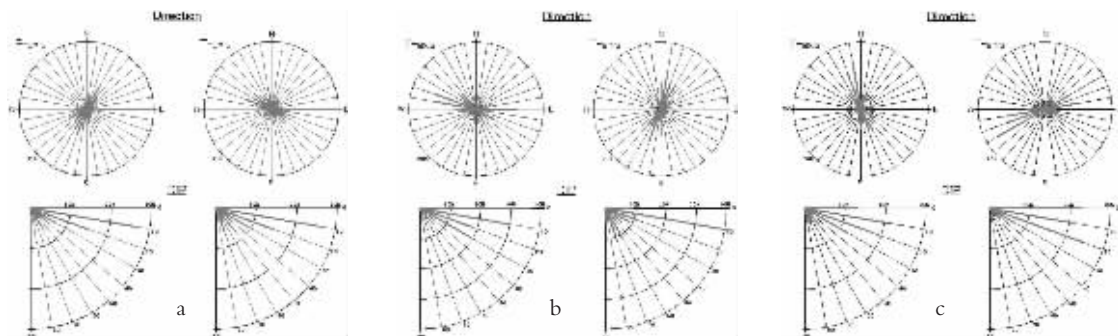


图 7 中国南北地震带南段西部(a)、东北部(b)和东南部(c)地域岩石圈应力场 P、T 轴方位与倾角的统计图
 Fig.7 Statistics of azimuths and dips of P- and T-axes in the southern part of the North-South Seismic Belt
 (a)-In the western region; (b)-In the northeastern region; (c)-In the southeastern region

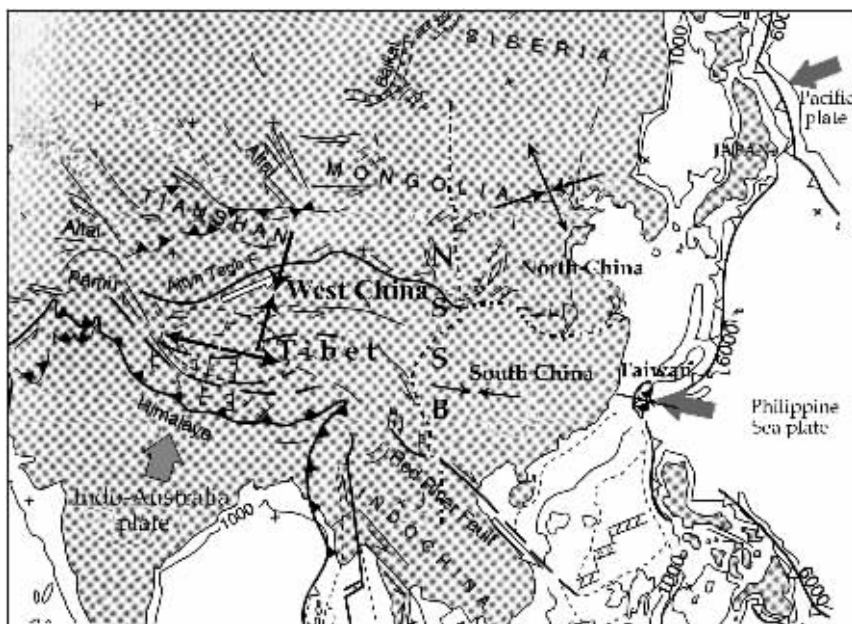


图 8 中国大陆及其周围岩石圈应力场构造分区及区域应力场特征

➔ : 板块相对运动方向; - - - : 岩石圈区域边界; ➔➔ : 挤压应力方位; ➔➔ : 引张应力方位;
 ○ : 引张应力控制区; ▲▲▲ : 主要逆断层; ▲▲▲ : 板块俯冲带; NSSB: 南北地震带

Fig.8 Tectonic divisions and regional characteristics of the lithospheric stress field in and around continental China.

➔ : direction of relative plate movement; - - - : boundary of areas; ➔➔ : azimuths of P-axes; ➔➔ : azimuths of T-axes;
 ○ : extensional stress region; ▲▲▲ : major thrust fault; ▲▲▲ : plate subduction zone; NSSB: North-South Seismic Belt

在中国大陆及其周围区域的岩石圈应力场研究中,有几个重要问题应该进一步研究解决。一是青藏高原周缘的强烈挤压与内部的近东西向引张应力的形成和转换条件与机制。笔者认为,这是青藏高原能够保持持续上升,成为世界

脊之关键问题。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体的相互作用有关。应该加强观测,寻求更多科学证据并深入研究。二是在从贝加尔湖经过大华北地区直到琉球海沟的广阔地域里,

表1 中国大陆及其周围地域的区域应力场特征

Table 1 Characteristics of the regional stress field in continental China and its surrounding areas

地域	地区	P轴方位	倾角	T轴方位	倾角	地震类型	应力场特征
中国西部	青藏高原	0~50° 优势 20~40°	10±10°	120±20°	低倾角 10~30° 约 50% 高倾角 50~80° 约 25%	周缘地区: 逆断层 中、南部: 正断层	近北东方向挤压周缘地区: 强烈挤压; 中、南部: 近东西向引张
	高原中南部	0~10°	60~70°	70~130°	0~30°	正断层	近东西向引张
	天山	170±10°	10±10°	80~120°	60~70°	逆断层	近南北向挤压
中国东部	华北地区	70±20°	10~20° 40°	160~180° 170°	10±10°	走滑断层 正断层	NNW 向引张 NEE 向挤压
	华南地区	110~120°	10~20°	10~20°	0~20°	走滑断层	北西西向挤压
	台湾(纵谷) (花莲东北) (纵谷南)	110~140° 170±10° 290~310°	0~30° 20~40° 170±10°	190-310° 320±10° 直立	50~70° 50~60° 60~70°	逆断层、走滑断层 俯冲带(PH向EU) 俯冲带(EU向PH)	北西西方向挤压 俯冲拉张-俯冲挤压型 俯冲拉张-俯冲挤压型
南北地震带南段	西部	30±20°	0~30° 优势 10°	290~310°	10~20°	走滑断层	北东方向挤压和 北西西方向引张
	东北部	280~290°	0~30°	10~30°	10°	走滑断层	北西西方向挤压和 北北东方向引张
	东南部	340~350°	0~30°	240~260°	0~10°	走滑断层	北北西方向挤压和 北东东方向引张

存在着的北北西向引张应力场的形成机制,及其对中国大陆岩石圈的影响等问题。三是一些科学家^[17]提出的所谓的阿穆尔(黑龙江)板块是否存在及其界线,特别是南边的界线。这些科学问题是深入研究中国乃至东亚岩石圈问题的关键,笔者将在今后的研究中逐步解决这些重要问题。

4 结论

根据大量中、强地震的震源机制结果,笔者系统分析研究了中国大陆及其周缘地区岩石圈应力场区域特征。总体结果表明,中国大陆及其周缘岩石圈应力场和构造运动可以归结为印度洋板块、太平洋板块、菲律宾海板块与欧亚板块之间相对运动,以及大陆板内区域块体之间相互作用的结果。

① 印度洋板块向欧亚板块的碰撞挤压产生的强烈的构造应力,控制了喜马拉雅、青藏高原、天山及其以北的中国西部的大范围地域,形成了NE20~40°的挤压应力场,特别是高原的南、北和西部边缘等地区。而近东西方向的引张应力控制了青藏高原中部高海拔区的应力场。表明青藏高原周缘区域在强烈挤压应力作用下发生南北短缩的同时,中部地区呈现为东西向张应力控制下的东西扩张构造运动。

② 中国东部大华北地区受到太平洋板块向欧亚板块俯冲挤压而形成的方位70°挤压应力,和从贝加尔、经过大华北直到琉球海沟的大范围里的方位为170°引张应力场的共同控制。

③ 台湾纵谷断层是菲律宾海板块与欧亚板块之间碰撞挤压边界。来自板块边界的方位为110~120°挤压应力控制了

从台湾纵谷、华南块体,直到中国南北地震带南段东部广阔地域。

④ 将中国大陆分成东、西两部分的中国南北地震带是印度洋板块、菲律宾海板块与太平洋板块在中国大陆内部影响控制范围的分界地带。东部华北与华南块体之间的分界线东段大体位于北纬27~28°的海域。

致谢: 资料的解析处理采用了日本气象厅石川有三的SEIS-PC程序软件。江苏省地震局的王铮铮、浙江省地震局姚立珣和广东省地震局杨马陵研究员等提供了部分宝贵资料,在此一并致谢。

参考文献(References):

- 汪一鹏. 青藏高原活动构造基本特征[A]. 见: 马宗晋, 汪一鹏等主编. 青藏高原岩石圈现今变动与动力学[C]. 北京: 地震出版社, 2001. 251~262.
Wang Yipeng. Principal features of the active tectonics in Qinghai-Xizang Plateau [A]. In: Ma Zongjin, Wang Yipeng, et al (ed). Study on the Recent Deformation and Dynamics of the Lithosphere of Qinghai-Xizang Plateau[C]. Beijing: Seismological Press, 2001. 251~262(in Chinese with English abstract).
- 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.
- Avouac A, Tapponnier P. Kinematic model of active deformation in central Asia[J]. Geophys. Res. Lett., 1993, 20: 895~898.

- [4] 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 Journal of Geophysics, 2000,43(2):590~599(in Chinese with English abstract).
- [5] 徐纪人, 赵志新. 青藏高原及其周围地区区域应力场与构造运动特征[J]. 中国地质, 2006,33(2):275~285.
Xu Jiren, Zhao Zhixin. Characteristics of the regional stress field and tectonic movement on the Qinghai-Tibet Plateau and in its surrounding areas [J]. Geology in China, 2006,33 (2):275~285(in Chinese with English abstract).
- [6] 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, 1988,41(2): 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(in Japanese).
- [7] 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.
- [8] 许忠淮. 东亚地区现今构造应力图的编制 [J]. 地震学报, (5): 2001,23492~501.
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] Xu Jiren, Zhao Zhixin, Oike Kazuo. Tectonics Characteristics of Seismogenic Stress Field in East Asia [A]. In: Fujinawa A Y, et al (eds.). Seismotectonics in Convergent Plate Boundary [C]. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company, 2002,481~497.
- [10] 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 Journal of Geophysics, 2005,48(4): 861~869(in Chinese with English abstract)
- [11] Froidevaux C, Ricard Y. Tectonic evolution of high plateau [J]. Tectonophysics, 1987,134:227~238.
- [12] 台湾“中央气象局”网页 <http://www.cwb.gov.tw/V4/index.htm>.
- [13] 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、(2)台湾から華南へいたる地域[J]. 地震, 1987,第 2 輯, 40,593~604.
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, 1987,40(2):593~604(in Japanese).
- [14] 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、(1)中国華北から日本海溝へいたる地域[J]. 地震, 1987,40(2):383~392.
Zhao Zhixin, Matsumura K, Oike K, et al. Regional characteristics of temporal variations of seismic activity in east Asia and their mutual relations (1)Region from North China to Japan Trench[J]. Zisin, 1987,40(2): 383~392(in Japanese).
- [15] 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.
- [16] 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 the North-South Seismic Belt in China[J]. Acta Seismologica Sinica, 1995,17(1):31~40(in Chinese)
- [17] 石川有三. 西日本とアムールプレート [J]. 月刊地球, 2002,38: 20~30.
Ishikawa Y. West Japan and Amur plate [J]. Earth, 2002,38:20~30 (in Japanese).

Regional characteristics of the lithospheric stress field and tectonic motions in China and its adjacent areas

XU Ji-ren, ZHAO Zhi-xin

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

Abstract: The focal mechanism solutions of 3130 moderate and strong earthquakes occurred in continental China and its surroundings between 1918 and 2005 have been analyzed systematically, and according to their characteristics the tectonic divisions of the lithospheric stress field have been determined. The distribution of extensional and compressive axes was studied by statistics. The results suggest that the stress field of the lithosphere and tectonic movement in and around continental China are attributable to the motions of the Eurasian plate relative to the Indian, Pacific and Philippine Sea plates and interactions among blocks within the continental plate. The strong compressive stress due to collisions between the Eurasian and Indian plates dominated the movements from the Himalayas to Tianshan mountains in western China. Azimuths of the horizontal component of compressive stress P-axes likely lie between 20° and 40°, forming a nearly NE-directed stress field in the wide region west of the North-South Seismic Belt. Thrust type strong earthquakes occurred frequently along the edges of the Qinghai-Tibet Plateau and in the Tianshan region. Most normal fault type earthquakes are concentrated in the central Qinghai-Tibet Plateau with high altitudes. The horizontal component of the fault dislocation is oriented in an E-W direction. It implies that, simultaneously with the north-south strong compression and shortening in the Qinghai-Tibet Plateau and its surroundings, a nearly E-W-directed extensional motion apparently occurred in the high-altitude area of the central part of the plateau. Focal mechanism solutions in North China show that the earthquakes occurred under the combined action of the ENE compressive stress due to the subduction of the Pacific plate beneath the Eurasian plate and the NNW extensional stress in a unifying extensional stress field with a 170°azimuth in a vast region from Baikal Lake through North China to the Ryukyu Trench. The Longitudinal Valley fault of Taiwan is the boundary of collision and compression between the Eurasian and Philippine Sea plates. The stress field due to the northwestward motion of the Philippine Sea plate controls the stress field of the lithosphere from the Longitudinal Valley of Taiwan through the South China block to the eastern part of the southern segment of the North-South Seismic Belt. The results of the focal mechanism solutions also indicate that the North-South Seismic Belt that divides continental China into the eastern and western parts is the boundary of the influence scope between the Indian plate and eastern Philippine Sea and the Pacific plate within in the interior of continental China.

Key words: continental China; stress field of the lithosphere; focal mechanism solution; tectonic motion; earthquake fault type

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.