

大陆构造变形与地震活动

——以青藏高原为例

李海兵^{1,2)}, 潘家伟^{1,2)}, 孙志明³⁾, 司家亮^{1,2)}, 裴军令³⁾, 刘栋梁^{1,2)},
Marie-Luce CHEVALIER^{1,2)}, 王焕^{1,2)}, 卢海建^{1,2)}, 郑勇^{1,2)}, 李春锐^{1,4)}

1) 中国地质科学院地质研究所, 自然资源部深地动力学重点实验室, 北京, 100037;

2) 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州, 511458;

3) 中国地质科学院地质力学研究所, 自然资源部古地磁与古构造重建重点实验室, 北京, 100081;

4) 北京大学, 地球与空间科学学院, 北京, 100871

内容提要:大陆内部构造变形和地震活动往往突出复杂的、区域性的特征, 很难用板块构造理论来解释。青藏高原是大陆构造变形的典型实例, 具有不同构造变形的分区特征, 不仅表现在物质组成、地形地貌和断裂组合等方面的不同, 而且还表现出不同的地震活动特征。东昆仑断裂带以北的青藏高原北部地块, 主要发育一系列挤压环境下的盆岭构造, 表现为以连续变形为特征的上地壳挤压缩短变形; 高原中北部巴颜喀拉地块, 具有整体向东运动的特点, 变形主要集中在其边缘, 表现为刚性块体运动特征。在东部, 由于稳定的四川盆地(扬子地块)的阻挡, 位于龙日坝和龙门山断裂带之间相对坚硬的龙门山地区受到东西向强烈挤压, 西部边界为伸展变形; 在高原中央腹地羌塘地块西部, 由于上地壳物质在向东挤出的驱动下不断变形, 沿一系列小型正断层和走滑断层以伸展变形为主, 表现为弥散型变形特征。相比之下, 羌塘地块的东部向东-南东方向挤出, 在大型走滑断层之间形成一个刚性块体; 高原南部地块以东西向伸展的南北向裂谷系为主要变形特征, 高原南缘以南北向挤压的大型逆冲断裂系为特征。历史地震和仪器记录的大地震($M \geq 8$)只发生在高原东北和东南部的大型走滑带, 以及东部和南部边缘的大型逆冲断裂上, 沿后者更为频发。到目前为止, 高原其他地区只发生了8级以下地震。青藏高原这种分区域的地壳变形形式和地震活动分布是大陆构造变形的重要特征。

关键词:大陆构造; 构造变形; 地震活动; 地块; 青藏高原

板块构造理论的基础是刚性块体运动学, 其运动主要反映在板块边界上, 世界上大部分的地震、火山以及新生山脉的形成都发生在板块边界上。然而, 刚性板块运动学的理论不能解释大陆内部复杂的弥散型构造变形和强烈的地震活动。地震活动是构造变形作用的反映, 不同的地震活动可指示不同的构造特征, 尤其是大陆内部地震。

自2001年发生在东昆仑山的 $M_s 8.1$ 级强震揭开了本世纪全球强震的序幕(Zhang Peizhen et al., 2013)以来, 全球强震频发, 造成了巨大的人员伤亡

和财产损失。2004年印度尼西亚苏门答腊地震($M_w 9$)及其伴随的海啸、2008年汶川地震($M_s 8.0$)、2010年海地地震($M_s 7.0$)、2010年玉树地震($M_s 7.0$)、2011年日本宫城 $M_w 9.0$ 级地震及其伴随的海啸、2015年尼泊尔地震($M_s 8.1$)等强震造成了几十万人的死亡。人们越来越意识到认识地震及其发生规律已是当前人类社会的重大课题, 同时也是关键的科学问题和社会问题, 尤其是认识大陆内部地震的发生规律, 因为大陆内部地震造成了全球主要的地震灾害(Zhang Peizhen et al., 2013)。

注: 本文为国家自然科学基金项目(编号 41830217, 41672211, 41941016)、第二次青藏高原综合科学考察研究项目(编号 2019QZKK0901)、中国地质调查局项目(编号 DD20190059)、南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(编号 GML2019ZD0201)联合资助的成果。

收稿日期: 2020-12-10; 改回日期: 2021-01-07; 网络发表日期: 2020-01-15; 责任编辑: 黄敏。

作者简介: 李海兵, 男, 1966年生, 研究员, 博士生导师, 构造地质学专业。Email: lihaibing06@163.com。

引用本文: 李海兵, 潘家伟, 孙志明, 司家亮, 裴军令, 刘栋梁, Marie-Luce CHEVALIER, 王焕, 卢海建, 郑勇, 李春锐. 2021. 大陆构造变形与地震活动——以青藏高原为例. 地质学报, 95(1): 194~213. doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021051.

Li Haibing, Pan Jiawei, Sun Zhiming, Si Jialiang, Pei Junling, Liu Dongliang, Marie-Luce CHEVALIER, Wang Huan, Lu Haijian, Zheng Yong, Li Chunrui. 2021. Continental tectonic deformation and seismic activity: a case study from the Tibetan Plateau. Acta Geologica Sinica, 95(1): 194~213.

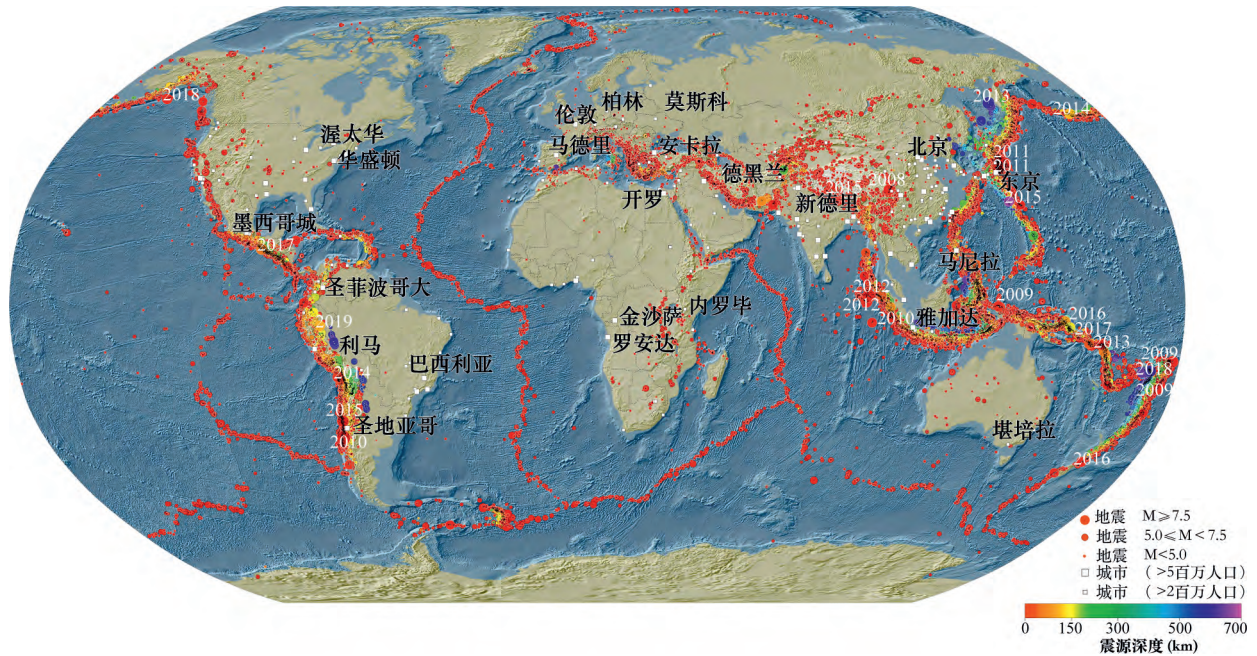


图 1 全球主要地震分布(2009~2019年,

据 <https://www.gfz-potsdam.de/en/media-and-communication/current-earthquake-information/>)

Fig 1 Major earthquake distribution globally

(2009~2019, from <https://www.gfz-potsdam.de/en/media-and-communication/current-earthquake-information/>)

虽然全球大多数(~85%)地震集中在板块边界上,有少数(~15%)地震分布在与板块边界关系不大的大陆内部(图 1),但是目前还没有可靠的方法来准确地预测地震发生的时间、地点和震级。从全球地震分布特征(图 1)来看,板块边界上的地震主要分布在大洋板块俯冲带、洋中脊和转换断层地区,具有明显的线状分布、范围小且断层滑动类型单一等特征(Bird et al., 2004, 2009)。呈面状广泛分布,虽然看似混乱,但仍然存在一定的规律性(Zhang Peizhen et al., 2013; Deng Qidong et al., 2014)(图 2)。对于由构造环境决定的地震活动来说,地震类型、大小和分布特征都与构造变形的形式相关。

本文以青藏高原为例,依据活动断裂、现今地震活动、地壳形变和地貌特征,分析青藏高原大陆构造变形与地震活动之间的关系,探讨大陆构造变形的动力学过程及控制地震孕育的因素,为认识青藏高原现今构造变形规律和形成过程以及区域防震减灾提供科学基础。

1 青藏高原现今构造变形分区与地震活动

新生代时期印度/欧亚板块的碰撞和持续挤压

造就了全球最壮观的地质事件——青藏高原的形成。青藏高原作为大陆变形的典型构造,其大陆变形过程一直存在争议。目前,有两种主流的大陆变形模型:①岩石圈块体向东挤出模型,或称大陆逃逸模型(Tapponnier et al., 1982, 2001),该模型主要聚焦上地壳变形和断裂几何学,认为大陆变形以沿大型断裂带的走滑运动和块体的横向滑移为主要变形方式;②连续变形模型(England et al., 1986, 1997, 2005),主要聚焦地壳连续变形的流变学,认为大陆变形以地壳缩短和增厚为主要变形特征。这两种不同的典型大陆变形模型从 20 世纪 80 年代一直到现在仍然存在着争议,其争议的焦点是断裂在地壳变形中的作用。纵观整个青藏高原大陆变形很难用某一种变形模型去解释,不同地区或块体可能存在以某一种变形方式为主。从青藏高原现今的 GPS 速度场分布(图 3)来看,不同的区域速度场不同,揭示了拉萨、羌塘、巴颜喀拉、柴达木、祁连和川滇六个活动地块(Zhang Peizhen et al., 2003),并反映出不同的地壳变形行为。

不同性质的活动断裂在青藏高原具有明显的区域分布特征(见图 3)(Elliott et al., 2010; Zhang Peizhen et al., 2013):在高原周缘的低海拔区主要分布逆冲断裂,反映高原向周缘的挤压缩短作用;在

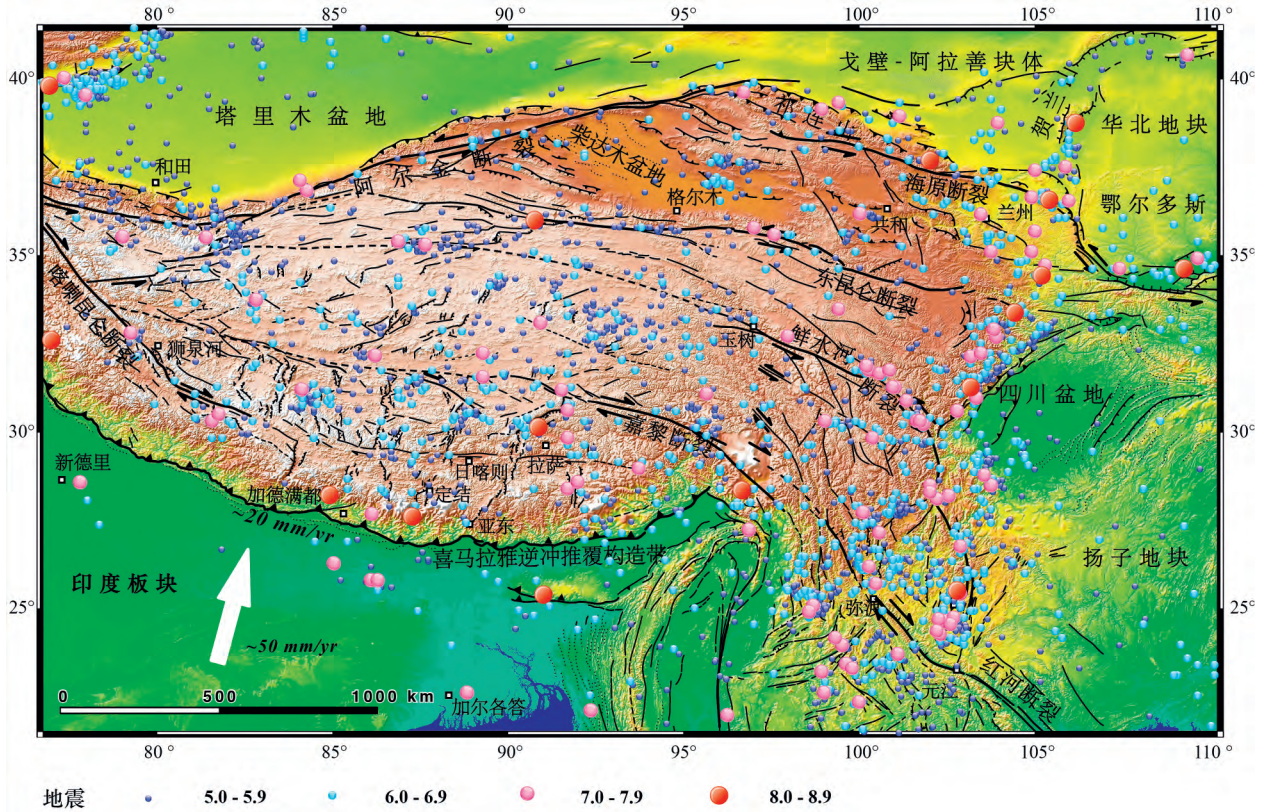


图2 青藏高原活动构造及周缘地震分布

Fig. 2 Active tectonics in the Tibetan Plateau and earthquake distribution adjacent

青藏高原活动断裂分布图据 Tapponnier et al., 2001;地震数据为公元前 780 至 2020 年 12 月之间地震; 现代地震据中国地震台网中心,历史地震据“中国历史强震目录”

Active tectonics in the Tibetan Plateau is based on Tapponnier et al., 2001; seismicity data between 780 BC and Dec. 2020. Modern seismicity data is from the China Earthquake Networks Center, historical seismicity is from the Catalogue of historical strong earthquakes in China

内部高海拔地区以拉张性质的南北向正断裂和共轭走滑断裂为主;走滑断裂发育在高原不同海拔的不同部位,反映高原内部地壳物质向东运移所导致的巨型走滑剪切作用(Zhang Peizhen et al., 2004; Gan Weijun et al., 2007)。不同性质活动断裂的分布,控制着不同地区地壳变形和地震性质(Elliott et al., 2010)。

从高原的地形地貌特征来看(图 4),从北到南可粗略分为:地形起伏较大的盆地和山脉区(盆岭)、相对平坦区、小起伏区和大起伏区。虽然高原地貌形态是在构造隆升和地表剥蚀的相互作用下形成,高原内部地势平坦,高原边缘带遭受强烈侵蚀下切地形起伏和坡度加大(Fielding et al., 1994; Kirby et al., 2003; Liu-Zeng Jing et al., 2008),但是这种地形地貌分区仍然反映了区域地壳变形特征。这种分区同时具有不同的岩性组合(图 5),从地质历史演化角度来看,它们是由不同时期的块体拼贴而成(Xu Zhiqin et al., 2006; Li Yalin et al.,

2015),从北向南分别为:“阿尔金-祁连-昆仑”早古生代复合地体、“巴颜喀拉-松潘甘孜”中生代地体、羌塘地体、拉萨地体、新生代喜马拉雅地体等。各地体被不同的缝合带分开,自印度/欧亚板块碰撞以来,古老的缝合带被重新复活和改造,形成巨型逆冲-走滑断裂带。不同地体再活动时代不同,具有向北逐渐年轻的趋势,指示青藏高原向北生长的过程(Tapponnier et al., 2001)。

因此,青藏高原现今构造变形包含有早期变形成分,高原不同的构造变形分区控制着大陆内部强震的展布格局。

1.1 青藏高原北部:盆岭构造挤压区块

近 EW 走向的东昆仑断裂带以北的青藏高原北部地区,是“阿尔金-祁连-昆仑”早古生代复合地体(Xu Zhiqin et al., 2006),亦称昆仑-柴达木地体(Li Yalin et al., 2015)或“青藏高原北部地块”,主要由元古代、古生代和新生代地层组成(见图 5)。

在地貌上,中-西部由南向北依次分布有东昆仑

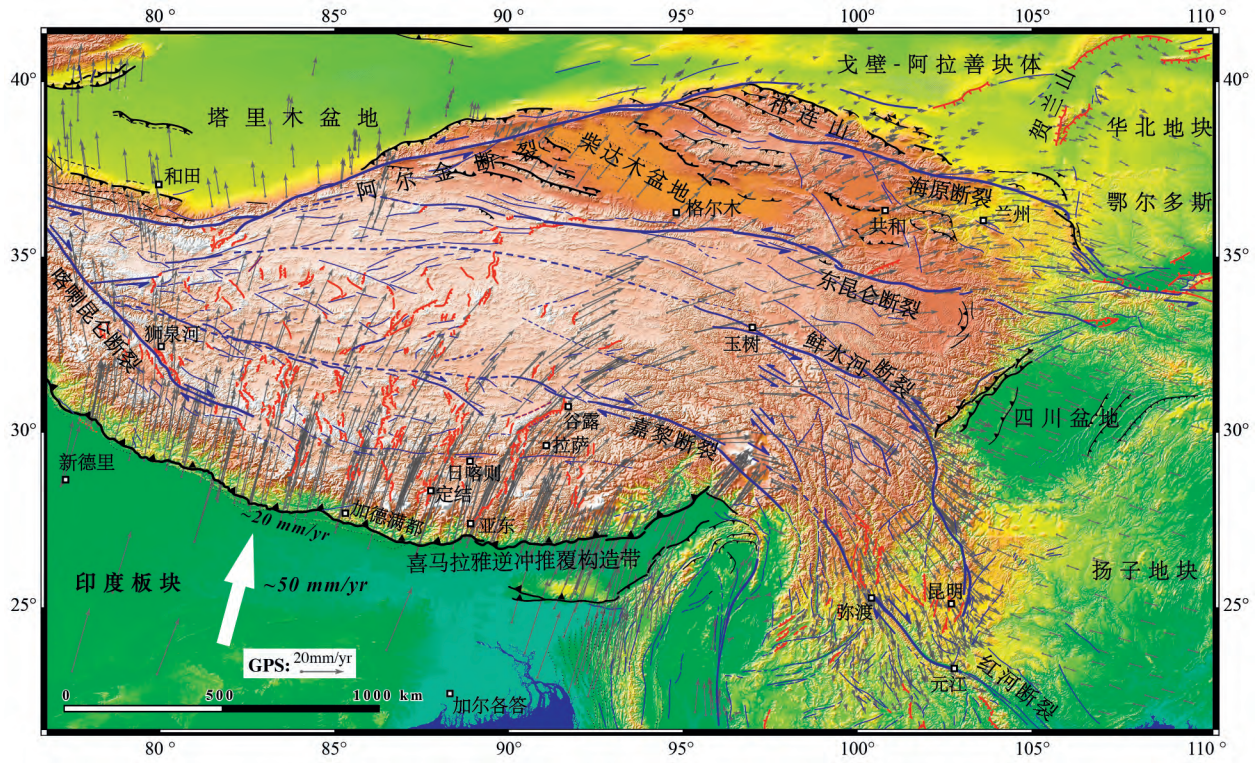


图 3 青藏高原活动断裂分布与 GPS 速度场分布图

Fig 3 Active faults and GPS velocity field distribution in the Tibetan Plateau

地貌和活动断裂分布图据 Tapponnier et al., 2001; 不同颜色的粗线条代表主要活动断裂。黑色粗线代表逆冲断裂, 红色粗线是正断裂, 蓝色粗线是走滑断裂; 细线条是次要的活动断裂。GPS 数据来自 Wang Min et al., 2020

Bold lines of different colors represent major active faults. The black bold lines represent thrust faults, the red bold lines are normal faults, and the blue bold lines are strike-slip faults. The fine lines are minor active faults.

Geomorphology and active fault distribution from Tapponnier et al., 2001, GPS data from Wang Min et al., 2020

山、祁漫塔格山、赛什腾-柴达木山、党河南山、大雪山、祁连山等山脉, 在它们之间发育有库木库里盆地、柴达木盆地、苏干湖盆地、盐池湾盆地、昌马盆地等, 显示出地形高差达 500~2500m 的盆岭地貌特征(图 4, 图 6)。

活动断裂主要发育 NEE、EW 向的大型左行走滑断裂带(阿尔金断裂带、海原断裂带)、NNW 向的逆冲断裂带(祁连山北缘逆冲断裂带、柴北缘逆冲断裂带、祁漫塔格逆冲断裂带等)和 NNW 向的右行走滑断裂带(鄂拉山断裂、拉脊山断裂)等三组不同方向和不同运动性质的活动断裂, 它们共同控制着高原北部的现今构造变形(Zheng Wenjun et al., 2016)。

山脉前缘发育一系列逆冲断裂带, 受阿尔金断裂带左行走滑的控制, 尤其在西部起着调节和吸收大型走滑断裂东南侧水平滑动的作用(Li Haibing et al., 2006; Zhang Peizhen et al., 2007; Pan Jiawei et al., 2015; Zheng Wenjun et al., 2016)。距阿尔

金断裂带由近到远, 山前断层产状由近直立逐渐转变为南倾, 震源机制解表现为走滑特征逐渐转变为逆冲性质为主(Liu Kang et al., 2018)。在柴达木盆地内部存在一系列 NNW 向的褶皱构造带, 由北向南依次分布的红三旱、尖顶山-黑梁子、南翼山和油砂山褶皱构造带均由不对称的直立褶皱或同斜褶皱构成, 并且在整个盆地中显示出背斜相对紧闭, 向斜宽缓的“侏罗山式”褶皱特征, 表明地壳深部滑脱构造带的存在(Wu Chan et al., 2013)。高原北部地区表现出挤压环境下的盆-山构造特征(图 6, 7)。

高原北部是现今构造变形与地震活动强烈的地区, 大部分地区以 M7 以下的逆冲型地震为主(见图 2, 8), 有记载的 M7 级以上地震主要发育在祁连山地区: 公元 180 年高台地震(M7.5)、1609 年红崖堡地震(M7.25)、1920 年海原地震(M8.5)、1927 年古浪地震(M8.0)、1932 年昌马地震(M7.6)和 1954 年山丹地震(M7.3) (Li Shanbang, 1960; Gu Gongxu, 1983)。1920 年海原地震(M8.5)沿左行

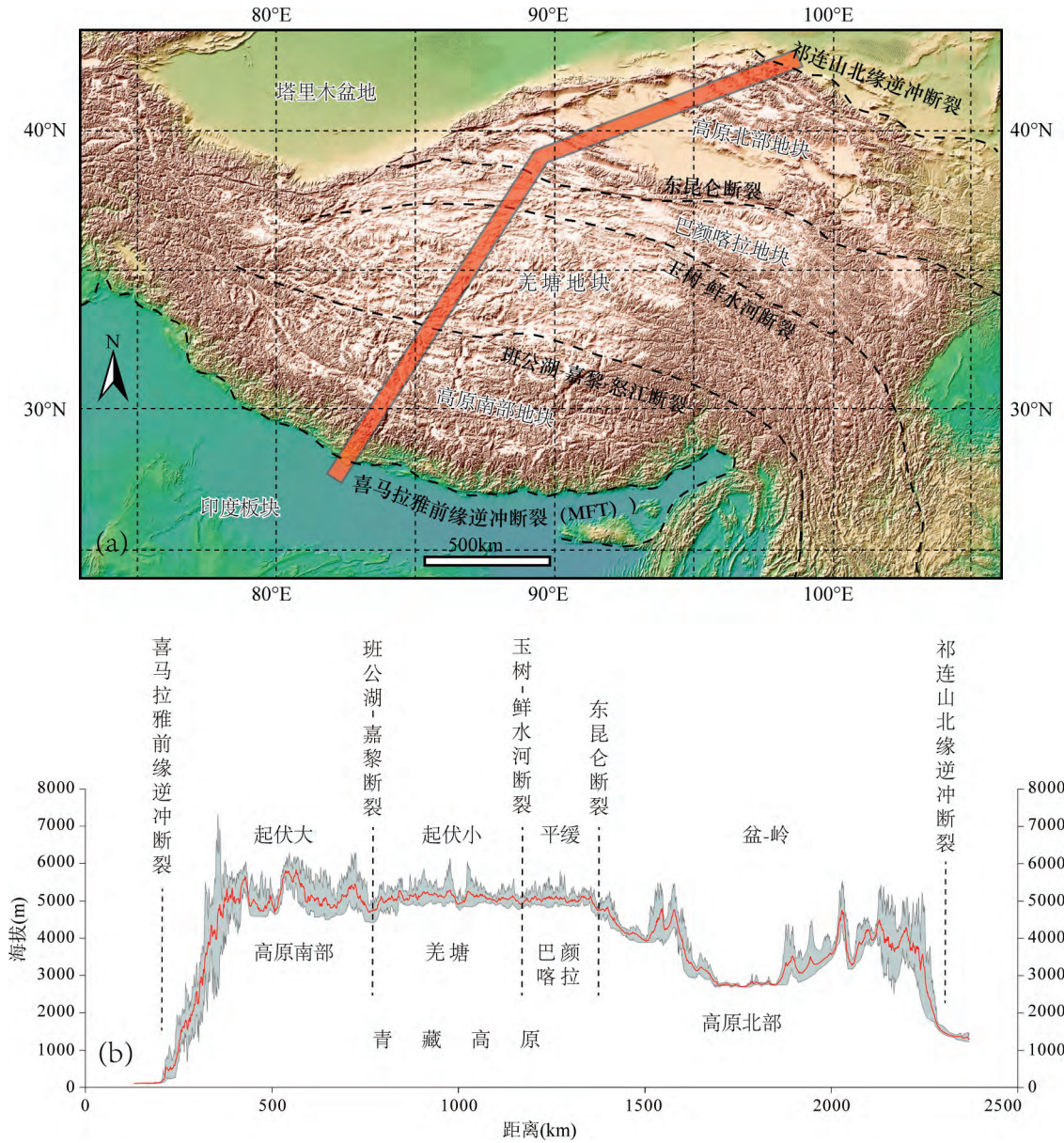


图 4 青藏高原不同区域地貌特征

Fig 4 Geomorphologic features of different regions on the Tibetan Plateau

(a)—青藏高原及邻区地貌图,黑虚线是主要地貌边界,粗浅红线为地形剖面位置;

(b)—横跨青藏高原南北缘的地形剖面,灰色区域为最大高程与最低高程的区域,红色线为平均高程值

(a)—The geomorphological map of the Tibetan Plateau and its adjacent areas, the black dotted lines are the main geomorphic boundaries, the light red lines indicate the topographic profile location; (b)—the topographic section across the northern and southern margin of the Tibetan Plateau, the gray interval is the area between the maximum and lowest elevation, and the red line is the average elevation

走滑的海原断裂发生,虽然沿祁连山北缘逆冲断裂发生的 1927 年古浪地震震级为 M8.0,但根据地表破裂长度和同震位移来估算,其震级小于 Mw8 级 (Xu Xiwei et al., 2010)。

青藏高原北部地区,主要发育一系列逆冲断裂形成的盆岭构造,表现为上地壳挤压缩短增厚的连续变形特征。该区域发生的地震主要为浅源逆冲型地震机制,震级多在 M7 级以下,祁连山地区可发生

M7 级以上强地震,沿大型走滑断裂可发生 M8 级以上大地震。

1.2 青藏高原中北部:巴颜喀拉地块向东运移挤压构造区块

以东昆仑断裂带以南和(玛尼-)玉树-鲜水河断裂带以北的青藏高原中北部地区,是“巴颜喀拉-松潘甘孜”中生代地体(Xu Zhiqin et al., 2006),也称“可可西里-巴颜喀拉地体”(Li Yalin et al., 2015)或

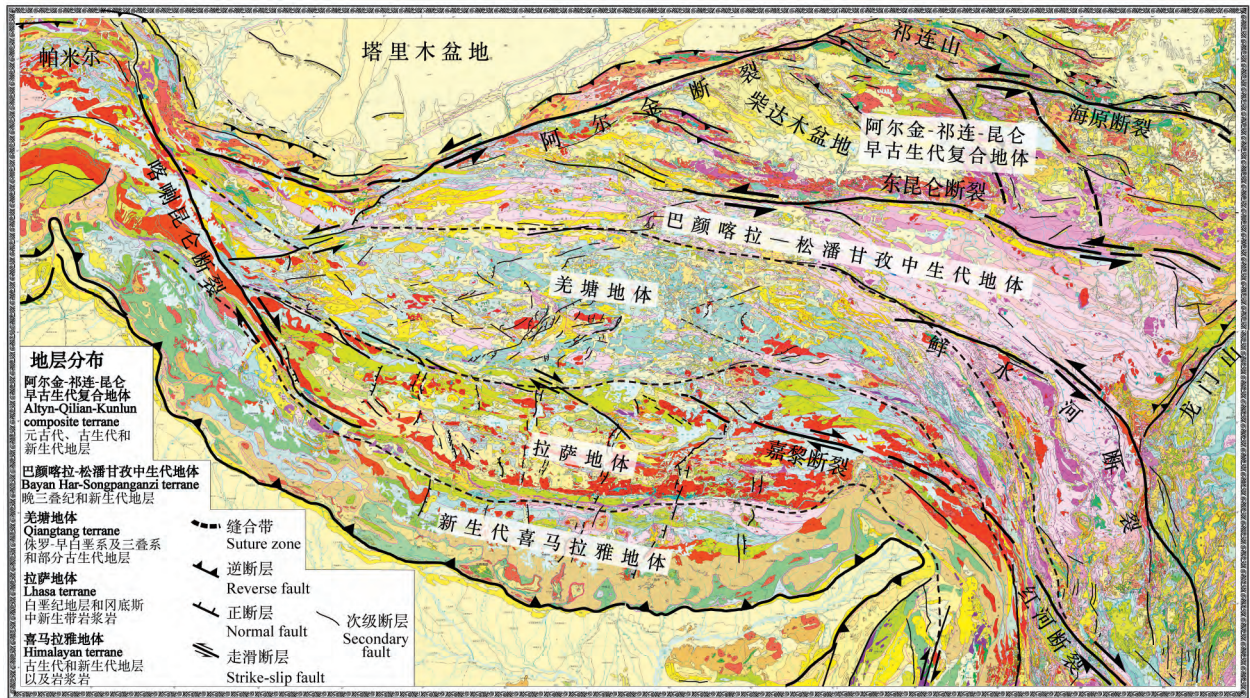


图 5 青藏高原及周缘地质图及地体分区

Fig 5 Geological map and terrane partition of the Tibetan Plateau and its adjacent areas

地质图据 Pan Guitang et al., 2013, 地体/地块分区据 Xu Zhiqin et al., 2006 和 Li Yalin et al., 2015

The geological map is from Pan Guitang et al., 2012, the Terrane partition is adapted from Xu Zhiqin et al., 2006 and Li Yalin et al., 2015

“巴颜喀拉地块”，主要由晚三叠纪地层和部分新生代地层组成(见图 5)。

从地貌上来看，巴颜喀拉地块在整个青藏高原地势最为平坦，平均海拔~5000m(图 4)。活动断裂主要发育在块体的四个边界带，东边界主要发育龙门山断裂带(逆冲)、西边界主要为阿什库勒-平顶山断裂带(正滑)和碛尔库勒断裂带(走滑-正滑)、北边界为东昆仑断裂带(走滑)、南边界为玛尼-玉树-鲜水河断裂带(走滑)，块体内部相对稳定，晚新生代构造变形较弱。

二十多年来，沿巴颜喀拉地块四个边界带发生了八次 M7 级以上强地震(图 9)。这 8 次强震发生具有“跳跃性”特征：首先在南边界发生 1997 年玛尼地震(Ms7.5)，其次沿北边界发生 2001 年昆仑山地震(Ms8.1)，再是在西边界发生 2008 年于田地震(Ms7.3)，然后就是在东边界发生震惊全球的 2008 年汶川大地震(Ms8.0)，紧接着就是在南边界东侧发生 2010 年玉树地震(Ms7.1)，以及东边界 2013 年芦山地震(Ms7.0)、西边界 2014 年于田地震(Ms7.3)和北边界东侧 2017 年九寨沟地震(Ms7.0)，这种地震的跳跃性表明应力是沿整个块体传递，块体边界发生变形而内部不变形或弱变形，

表明巴颜喀拉地块具有“刚性块体”性质。

发生在巴颜喀拉地块东边界的 2008 年汶川地震和 2013 年芦山地震都是逆冲型地震，使得上地壳挤压缩短，汶川地震地表破裂带(图 10a)近 EW 向平均水平缩短量为~3m(Lin Aiming et al., 2009)，显示出龙门山为强烈的挤压区域。在块体西边界的 2008 年于田地震是正断型地震(图 10b)，EW 向伸展作用强烈(Li Haibing et al., 2009; Xu Xiwei et al., 2013)，水平伸展量 3~4m。2014 年于田地震具有左行走滑运动性质(图 10c)。块体北边界的 2001 年昆仑山地震表现出强烈的左行走滑作用(图 10d)，块体南边界的 1997 年玛尼地震和 2010 年玉树地震为左行走滑运动性质(图 10e, f)。四个边界带的地震行为表现出巴颜喀拉地块具有向东运移的特征，由于四川盆地/扬子块体的阻挡，巴颜喀拉地块东边界具有强烈的挤压缩短作用。

因此，高原中北部为“巴颜喀拉地块向东挤压构造区块”，以刚性块体整体向东运动为主要特征，变形主要集中在块体四个边界区域。东部边界以挤压变形为主，主要集中在龙日坝断裂与龙门山断裂之间区域；西部边界以伸展变形为主，由于边界规模小，不会发生 M8 级以上大地震，南北边界以走滑变

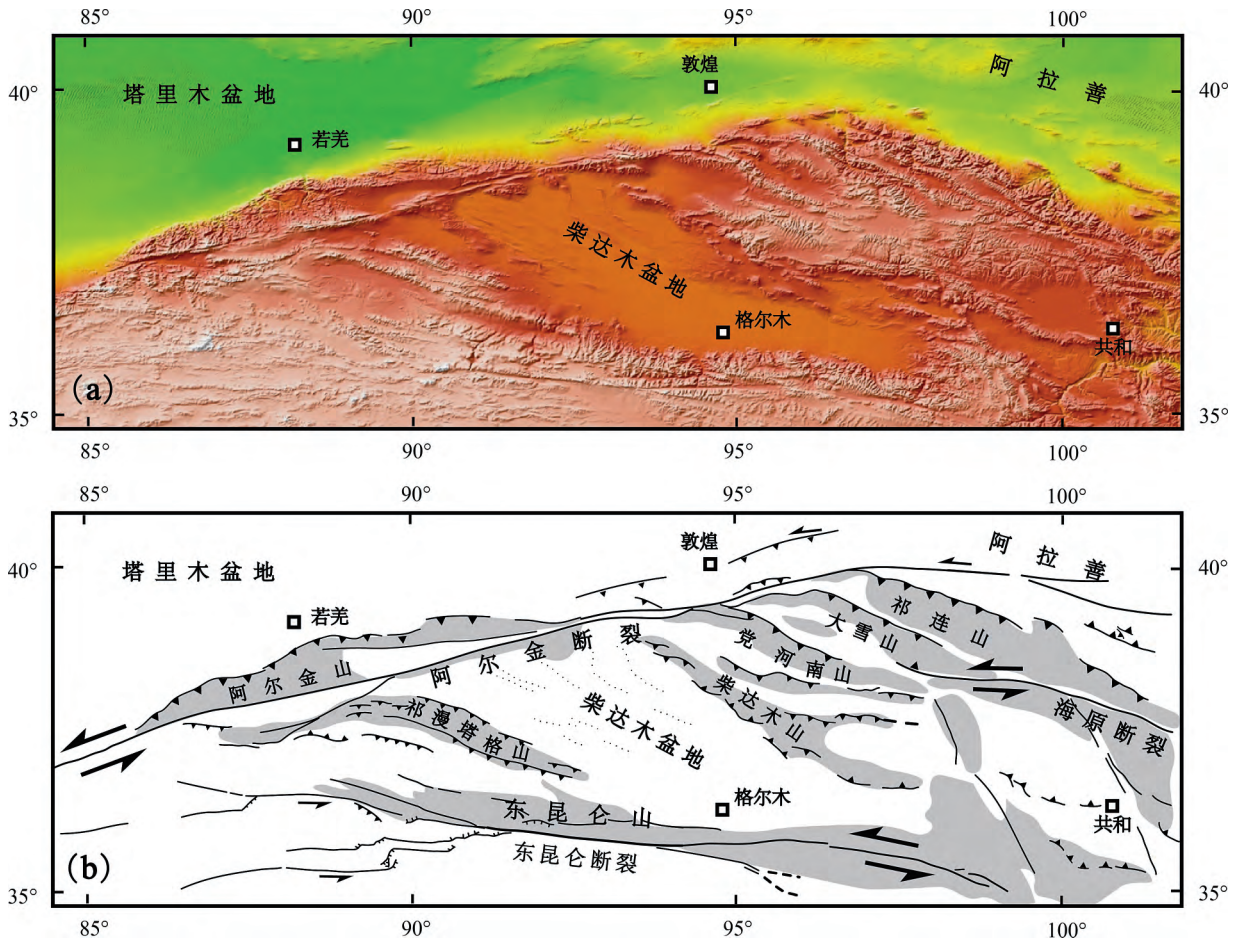


图6 青藏高原北部盆山分布特征

Fig. 6 Characteristics of basin-mountain structures in the northern Tibetan Plateau

(a)—青藏高原北部地貌图; (b)—青藏高原北部盆地与山脉分布示意图

(a)—Geomorphological map of the northern Tibetan Plateau;

(b)—schematic diagram of the basin-mountain structures in the northern Tibetan Plateau

形为主。四个边界带可发生 M7 级以上强地震,北、东边界可发生 M8 级以上大地震。

1.3 青藏高原腹地:羌塘地块向东挤出构造区块

以鲜水河-玉树(-金沙江)断裂带以南和班公湖-嘉黎断裂带以北的青藏高原中部腹地,是“羌塘地块”(Xu Zhiqin et al., 2006),或称“羌塘地块”,大部分地区为侏罗-早白垩系及三叠系(Li Yalin et al., 2005),也有部分古生代地层(Li Cai et al., 2008)(见图5)。

在地貌上,羌塘地块地势具有一定的起伏,西北高,东南低,主要由低山缓丘与湖盆宽谷组成的地形,西侧地势起伏略大,平均海拔~5200m,相对高差可达500~1000m;东侧起伏相对平缓(图11),平均海拔4800m;东南侧发育数条大型河流,形成高山峡谷,起伏相对大,但平均高山海拔相对一致,并向南东逐渐降低。

羌塘地块内部活动断裂的分布存在明显差异,在地势起伏相对较大的西侧,块体内部发育一系列SN向正断裂和共轭走滑断裂(图11)(Yin An, 2000; Han Shuai et al., 2018),两组走滑断裂为NE-SW向左行走滑断裂和NW-SE向右行走滑断裂。此外,西侧大部分湖泊的形成与裂谷/地堑的正断裂或走滑断裂的活动有关(Han Shuai, 2019),造成地势的较大起伏。在地势起伏相对平坦的东侧,块体内部活动断裂明显较少,以沿块体边界发育的断裂为主,北边界玉树-鲜水河-小江断裂带以左行走滑运动为特征,南边界嘉黎-怒江断裂带以右行走滑运动为特征,表现出块体向E-ES方向移动。在块体东南侧内部发育一系列近平行的断裂带,如红河断裂带、澜沧江断裂带、理塘断裂带等,以及一些逆冲断裂带,如玉龙-木里逆冲断裂带、金河-箐河逆冲断裂带等。根据断裂分布和活动强度,羌塘地块东

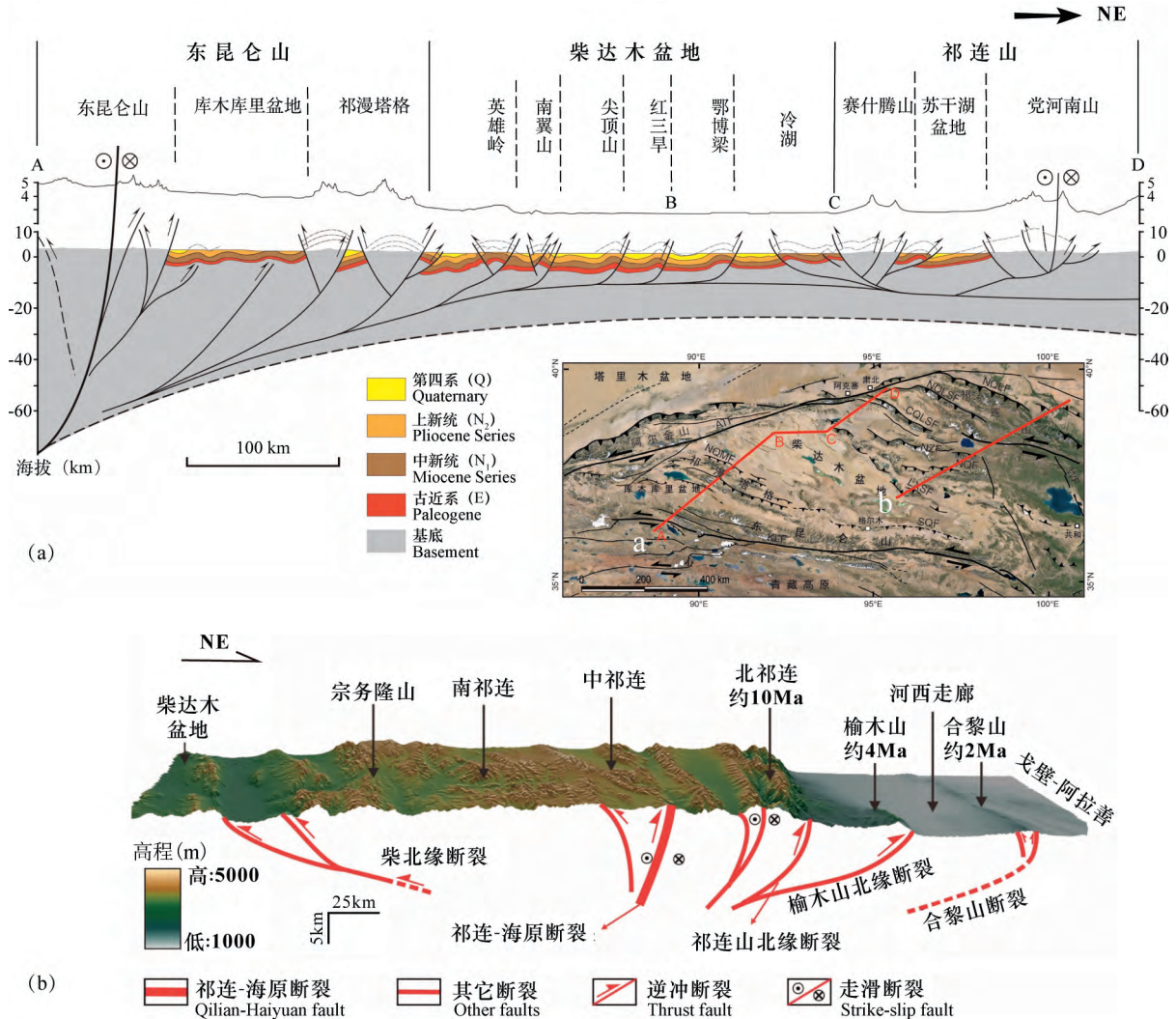


图 7 横穿青藏高原北部的地质剖面

Fig 7 Geological section across the northern Tibetan Plateau

(a) 横穿东昆仑-祁曼塔格-柴达木盆地及其南祁连构造示意剖面(据 Meyer et al., 1998 修改);

(b) 横穿祁连山构造示意剖面(据 Zheng Wenjun et al., 2016)

(a)—Structural schematic section cross the East Kunlun-Qimantager-Qaidam Basin and the South Qilian (adapted from Meyer et al., 1998); (b)—tectonic schematic section across the Qilian Mountains (from Zheng Wenjun et al., 2016)

南部又另可分出金沙江-红河断裂带与鲜水河-安宁河-小江断裂带所围绕的地区“川滇地块”(Zhang Peizhen et al., 2003)。

羌塘地块的地震活动强烈,尤其在东南部,沿鲜水河-小江断裂带已形成明显的 M7 级以上强震带。据记载的强震记录,沿该断裂带已发生 M7 级以上地震 17 次(Allen et al., 1991; Zhang Peizhen et al., 2003; Wen Xueze et al., 2008),并且在小江断裂带上曾发生过 1833 年 M8 级嵩明大地震(见图 2)。另外,1996 年云南丽江曾发生 M7 级地震,并有大量的 6 级左右地震发生。然而,沿红河断裂的强震记录并不多,除了 1925 年大理凤仪 M7 级强震

和 1652 年弥渡 M7 级强震(Guo Shunmin et al., 2001; Wang Shaojin et al., 2010)外,就没有 M7 级以上的强震记录,但是沿它北侧平行的楚雄-建水断裂带发生一系列 M7 级以上强震(Zhang Peizhen et al., 2003)。在块体西部主要发生 M7 级以下的地震,少许 M7 级以上地震沿走滑断裂发生。沿近 SN 向裂谷多发生 M7 级以下地震,2020 年 7 月 23 日西藏尼玛 M6.6 级地震是日干配错左行走滑断裂北侧近 SN 向依布茶卡地堑正断裂活动的结果(Liu Fucui et al., 2021),近 SN 向正断裂倾角 40°~50°(图 11)。从双湖地区野外出露的正断裂地表破裂带来看,近 SN 向的正断裂曾发生过多次 M7 级以

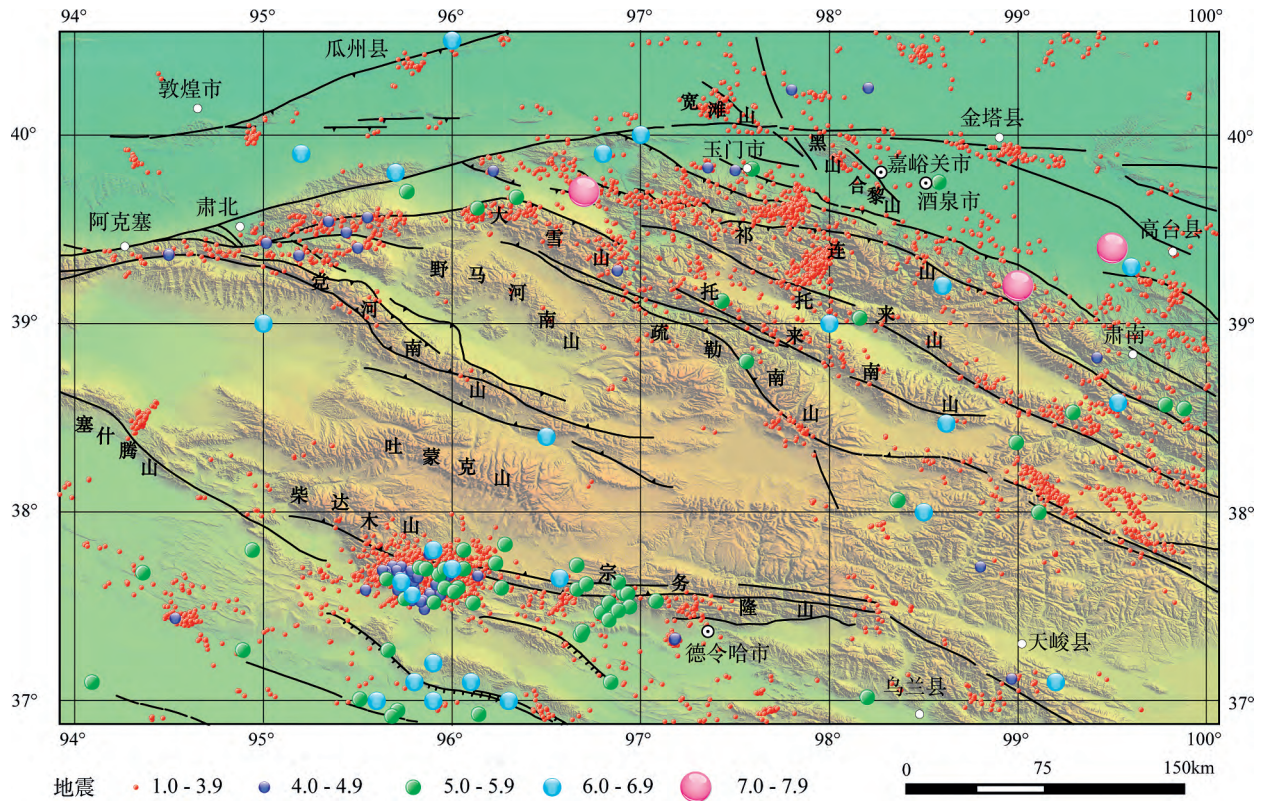


图8 青藏高原北部地震震中分布特征(据 Liu Kang et al., 2018, 修改)震级1级以上地震分布,数据来源中国地震台网中心

Fig. 8 Distribution characteristics of the earthquake ($M > 1$) epicenters on the northern Tibetan plateau (adapted from Liu Kang et al., 2018). Seismic data from China Earthquake Networks Center

上强震(Pan Jiawei et al., 2018)。

高原腹地为“羌塘地块向东挤出构造区块”,东-东南部主要以块体向南东方向运动为特征,变形主要分布在两侧走滑边界及内部近平行边界的断裂带区域。大地震以 $M7$ 级以上强震为主,鲜有 $M8$ 级以上大震发生。块体西部的变形主要发生在块体内部,以一系列正断裂和走滑断裂组合的弥散型变形为特征,是由于块体向东运移牵引过程中后部上地壳物质不连续向东运移或拉断所造成,所发生的地震震级普遍小于 $M7$ 级,沿走滑断裂可发生 $M7$ 级以上地震(Han Shuai et al., 2018)。

1.4 青藏高原南部:藏南 EW 向伸展区块

班公湖-嘉黎断裂带以南的青藏高原南部地块,是“拉萨地体(冈底斯地体)”和“新生代喜马拉雅地体(喜马拉雅地体)”,它们之间的分界是雅鲁藏布缝合带(Xu Zhiqin et al., 2006; Li Yalin et al., 2015)。“拉萨地体”主要由白垩纪地层和冈底斯中生带岩浆岩带组成(见图5)，“喜马拉雅地体”主要由古生代地层和新生代地层以及岩浆岩组成(见图5),属于特提斯-喜马拉雅构造带。

在地貌上,青藏高原南部地势起伏较大,平均海

拔从 4600 到 6000m(图4)。藏南最为显著的活动构造为七个近 SN 向裂谷(地堑和半地堑)和正断裂(Armijo et al., 1986)组成的裂谷系,以及近 EW 走向并向南凸出的巨型(>2500 km 长)弧形喜马拉雅前缘逆冲推覆断裂带(MFT,青藏高原南边界)(图3,12)。SN 向裂谷之间平均间隔 ~ 200 km,长约 100~500km 规模不等,规模最大的裂谷为“亚东-谷露裂谷”(Yin An, 2000; Tapponnier et al., 2001; Chevalier et al., 2020),其中东侧五个裂谷横跨“拉萨地体”和“喜马拉雅地体”(图12)(Chevalier et al., 2020),呈现出现今“拉萨地体”和“喜马拉雅地体”为统一块体特征,也就是青藏高原南部地块。

藏南地区地震活动强烈,主要沿 SN 向裂谷和喜马拉雅前缘逆冲推覆断裂带上分布。沿 SN 向裂谷发生的地震都为正断层型地震,多为 $M7$ 级以下的地震,但 1952 年在谷露发生过 $M7.4$ 级强震(图13)(Armijo et al., 1986)。震源机制解表明这些地震的主张应力轴(T轴)走向近 EW 或 NWW-SEE,大体上垂直于近 SN 向地堑系和正断裂,表明该区主要遭受近东西向的伸展作用(Molnar et al., 1989; Elliott et al., 2010; Zhang Peizhen et

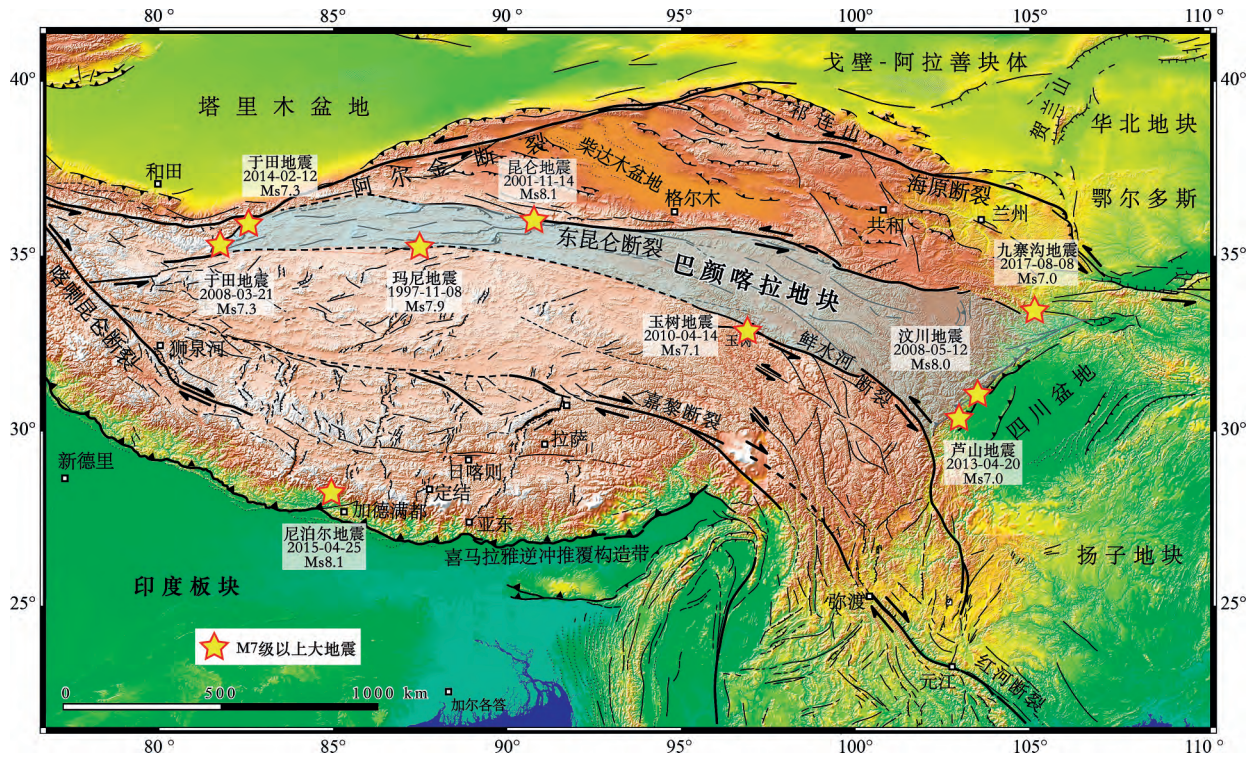


图 9 青藏高原近 20 多年来的主要强震(M≥7)分布

Fig. 9 Strong earthquakes (M≥7) in the Tibetan Plateau in the past 20 years

围绕巴颜喀拉地块发生 8 次 M7 级以上大地震

8 major earthquakes(M≥7) occurred around the Bayan Har block

al., 2013), 近 SN 向正断裂倾角 60°~70°(图 13)。有文字记载以来该地区最大的地震是 1411 年当雄南羊八井 M8 级大地震(Huang Shengmu, 1982)(见图 2)。

巨型弧形喜马拉雅前缘逆冲推覆断裂带(MFT)是一条经常发生 M8 级大地震的断裂带,它控制了包括 1950 年察隅 Mw8.7 级地震(Coudurier-Curveur et al., 2020)在内的有历史记载以来的 5 次 M8 级以上逆断层型大地震(USGS)(图 2)。其中,1950 年察隅 Mw8.7 级地震是世界上有史以来记录到的最大的内陆型地震。这些大地震震源机制解表明其中的一个节面倾向北或北东,一般具有缓倾角(10°~20°或~30°),代表了印度板块向喜马拉雅之下的低倾角俯冲(Avouac, 2003)。这些大地震往往产生较大的地表形变(图 14),地震断裂面的走向与喜马拉雅山脉的走向一致,其主压应力轴随山脉向南凸出同步呈放射状向南凸出,指示垂直于山脉弧的逆冲挤压(Molnar et al., 1989)(图 2,3)。

高原南部地块为“藏南 EW 向伸展构造区块”,以 SN 向挤压、EW 向伸展为主要变形特征。南北

向裂谷系为显著的变形方式,主要发生震级不超过 M7 的正断型地震,高原南部边界逆冲断裂带是发生 M8 级大地震的主要区域。

2 现今地表形变与运动特征

虽然 GPS 观测资料只反映近二十年时间段的运动特征,以年为时间尺度,但是结合活动断裂的分布和地震活动性特征,可以反映出以百年到万年时间尺度的地壳变形行为(Zhang Peizhen et al., 2003, 2013)。青藏高原现今的 GPS 速度场分布已显示出不同区域速度场不同(图 3),反映出不同区域具有不同的地壳变形行为。

青藏高原北部地区相对于固定欧亚大陆,其 GPS 速度场由 S 向 N 和 NE 方向具有明显的变化规律:地表形变的运动方向由 NE 向逐渐变为 NEE 向,速率由~11mm/yr 变为~8mm/yr 再变为~4mm/yr(Zhang Peizhen et al., 2007),表现出逐渐变小的趋势(图 3),反映了连续变形的特征,这与该地区一系列逆冲断裂系所反映的上地壳变形形成的盆岭地貌结构相吻合。

青藏高原中北部巴颜喀拉地块,由西向东,其



图 10 青藏高原主要强震地表破裂特征

Fig. 10 Characteristics of surface ruptures of the major strong earthquakes in the Tibetan Plateau

- (a)—2008 年汶川地震($M_s 8.0$)地表破裂带,具有垂直位错和右行水平位错;(b)—2008 年于田地震($M_s 7.3$)地表破裂带,显示正断裂作用;
 (c)—2014 年于田地震($M_s 7.3$)地表破裂带,显示左行走滑特征;(d)—2001 年昆仑山地震($M_s 8.1$)地表破裂带,具左行走滑特征;
 (e)—1997 年玛尼地震($M_s 7.5$)地表破裂带卫星影像,显示左行走滑特征;(f)—2010 年玉树地震($M_s 7.1$)地表破裂带,具左行走滑特征
- (a)—The surface rupture zone of the 2008 Wenchuan earthquake ($M_s 8.0$), characterized by vertical and dextral-horizontal offsets;
 (b)—the surface rupture zone of the 2008 Yutian earthquake ($M_s 7.3$), showing normal faulting;
 (c)—the surface rupture zone of the 2014 Yutian earthquake, showing sinistral strike-slip;
 (d)—the surface rupture zone of the 2001 Kunlun earthquake ($M_s 8.1$) with sinistral strike-slip features;
 (e)—satellite image of the surface rupture zone of the 1997 Mani earthquake ($M_s 7.5$), showing sinistral strike-slip features;
 (f)—the surface rupture zone of the 2010 Yushu earthquake ($M_s 7.1$), showing sinistral strike-slip features

GPS 速度场的方向由 NNE 向变为 NE 向及近 EW 向逐渐变化,表现出一定的顺时针旋转特征(Zuza et al., 2016)(图 3),西部存在 EW 向伸展,北边界东昆仑断裂南侧速率明显高于北侧速率(Liu

Shaozhuo et al., 2019),晚第四纪以来的滑移速率和现今滑移速率均为 $\sim 10\text{mm/yr}$ (Van Der Woerd et al., 2000; Li Haibing et al., 2005; Liu Shaozhuo et al., 2019),整体速率变化不大,反映出

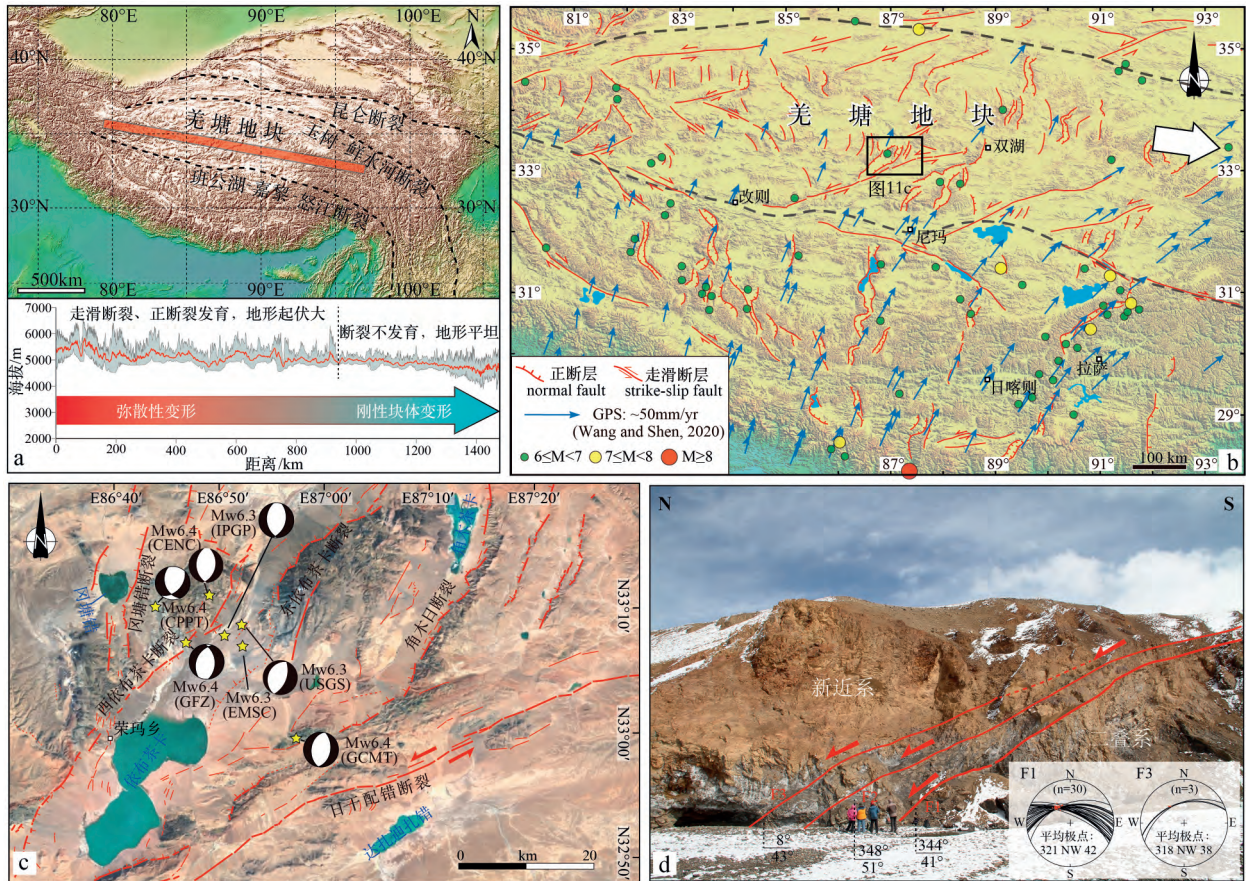


图 11 青藏高原羌塘地区地貌特征与活动断裂分布

Fig 11 Geomorphologic characteristics and active fault distribution in Qiangtang area, Tibetan Plateau

(a) —青藏高原地貌及羌塘地区 EW 向地形剖面; (b) —羌塘地区活动断裂分布; (c) —羌塘中部依布茶卡地堑活动断裂分布;

(d) —依布茶卡地堑东侧边界正断层剖面野外照片及断层面、擦痕产状统计图

(a) —Geomorphology of the Tibetan Plateau and EW-trending topography section of Qiangtang area; (b) —active faults in Qiangtang area;

(c) —active faults in the Yibug Caka graben in central Qiangtang area; (d) —field photo show normal fault section on the eastern boundary of the Yibug Caka graben, fault plane and statistical map of slickenline occurrences

整体准刚性块体向东运动特征,地势相对平坦。东侧龙日坝断裂带与龙门山断裂带之间的速率明显小于西侧,块体受扬子地块的阻挡,在东边缘龙门山地区发生强烈的挤压作用,造成上地壳水平缩短与垂向增厚。

青藏高原中部腹地羌塘地块, GPS 速度场显示羌塘地块西部同时存在 SN 向收缩和 EW 向伸展,不存在大规模的快速滑移,而羌塘东部则表现为明显的快速运移 (Wang Qi et al., 2001; Zhang Peizhen et al., 2004; Gan Weijun et al., 2007; Wang Min et al., 2020), 具有整体物质运移的刚性块体运动特征。这个带西起约 90°E, 北以玉树-鲜水河断裂为界, 南以嘉黎-怒江断裂带为界。可以理解为东部物质快速向东和南东方向运移过程中, 牵引着西部物质不连续地向东运移, 拉伸过程中造成一系列共轭走滑断裂和近南北向正断裂, 表现出块

体西部弥散型变形, 同时地表地势起伏较大。

青藏高原南部地区, GPS 速度场明显地表现出同时存在 SN 向收缩和 EW 向伸展 (图 3), 而 EW 向伸展作用尤为强烈, 其现今的伸展速率为 15~16mm/yr (Wang Wei et al., 2017), 大于晚第四纪以来的伸展速率 9 ± 2 mm/yr (Chevalier et al., 2020), 表明长期以来藏南地区具有强烈的 EW 向伸展作用。

从现今的 GPS 速度场来看, 羌塘地区和藏南地区的 SN 向裂谷具有不同的形成机制, 前者属于拉伸环境下弥散型变形, 正断裂的形成规律性不强, 规模小, 而后者属于整个块体在挤压环境下, 均匀受力, 有规律的伸展, 形成大规模的裂谷。

3 深部控制作用

青藏高原分区块的地壳变形和地震活动的差异

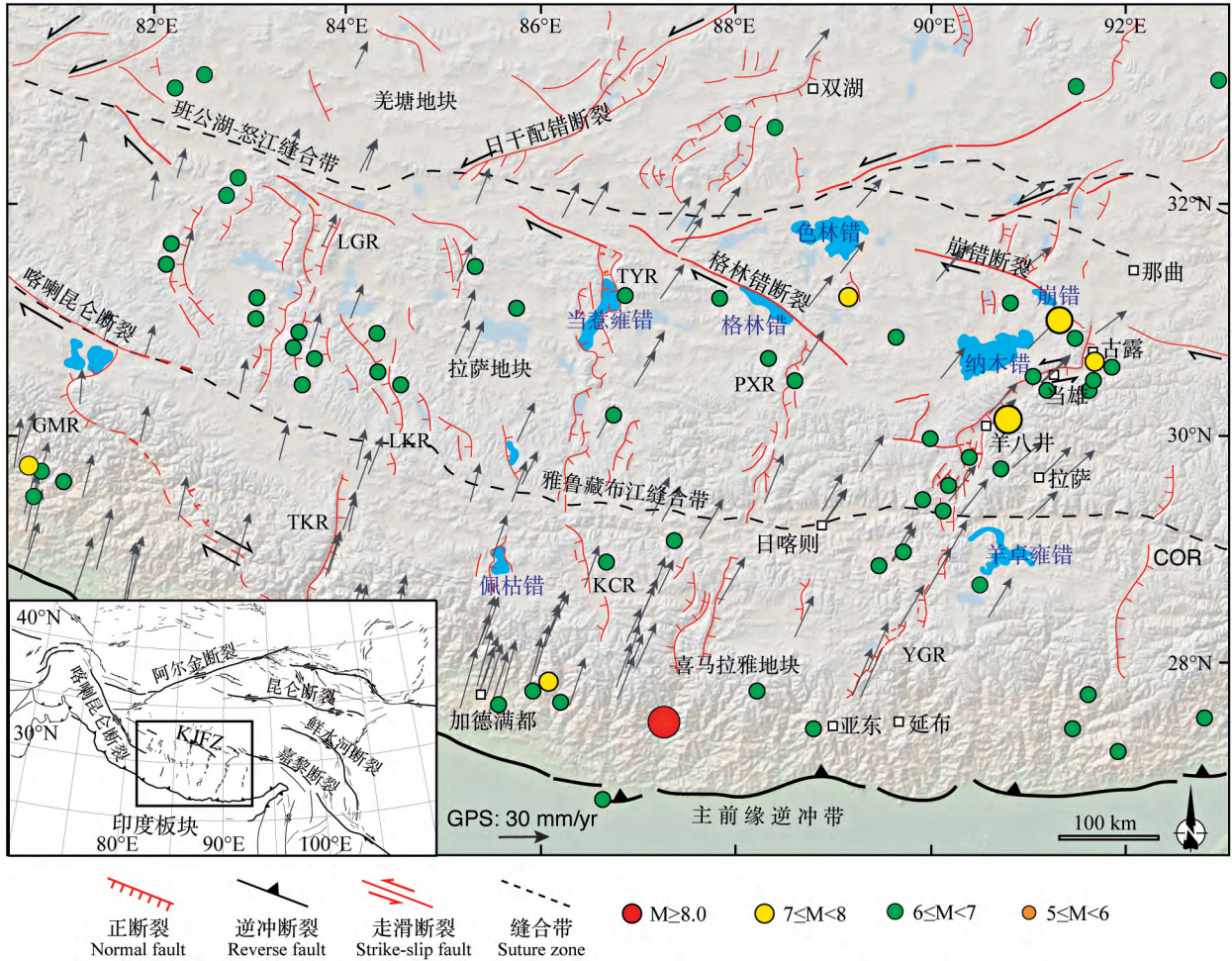


图 12 青藏高原南部地区活动断裂分布(据 Chevalier et al., 2020)

Fig 12 Active faults distribution in the southern Tibetan Plateau (from Chevalier et al., 2020)

COR—错那-沃卡裂谷;GMR—Gurla Mandhata 裂谷(普兰裂谷);KCR—空错裂谷;LGR—隆格裂谷;LKR—Lopukangri 裂谷;
 PXR—朋曲-申扎裂谷;TKR—Thakkhola 裂谷;TYR—当惹雍错裂谷;YGR—亚东-古露裂谷;KJFZ—喀喇昆仑-嘉黎断裂系
 COR—Cona-Oiga rift; GMR—Gurla Mandhata rift (or Pulan); KCR—KungCo rift; LGR—Lunggar rift;
 LKR—Lopukangri rift; PXR—Pumqu-Xainza rift; TKR—Thakkhola rift; TYR—Tangra YumCo rift;
 YGR—Yadong-Gulu rift;KJFZ=Karakorum-Jiali fault zone

是什么原因导致?这不仅与大陆本身不同时代的块体组成有关,而且受深部不同动力学过程的控制。

巴颜喀拉地块东部的大地电磁剖面 (Zhao Guoze et al., 2012; Wang Xuben et al., 2014) 显示,在块体中-上地壳之间普遍存在壳内低阻层,存在中地壳流,表明上地壳相对为刚性块体,与中地壳解耦,块体可整体运动。在龙门山和四川盆地之下存在高阻体,阻挡块体向东运动。

随着印度板块向欧亚大陆的持续挤压,羌塘地块东部上地壳沿着鲜水河断裂和怒江、哀牢山—红河断裂夹持的地块向东南方向逃逸挤出 (Searle, 2006; Leloup et al., 2007; Ren Zhikun et al., 2010; Bai Mingkun et al., 2018)。大地电磁观测结果表明高原东南部存在两条中下地壳的弱物质流

(低阻异常带):一条从拉萨地块沿雅鲁藏布缝合带向东延伸,环绕东喜马拉雅构造结向南转折;另一条从羌塘地体沿金沙江断裂带、鲜水河断裂带向东南延伸,最后通过小江断裂和红河断裂之间的川滇菱形块体。深部以两个中下地壳弱物质流的快速塑性变形为主,脆性上地壳变形与下地壳解耦,上地壳则以南北两个边界断裂的块体走滑变形为主 (Bai Denghai et al., 2010)。羌塘地体西部和中部地区在南北向挤压及东部物质向东或南东方向牵引的影响下发生缓慢运动和被动变形。变形沿着完整的西边界喀喇昆仑断裂 (Chevalier et al., 2012, 2015, 2016)、不完整的南边界班公—怒江缝合带走滑断裂体系 (Taylor et al., 2003) 和北边界龙木错—郭扎错断层 (Chevalier et al., 2017) 到金沙江一线(以左

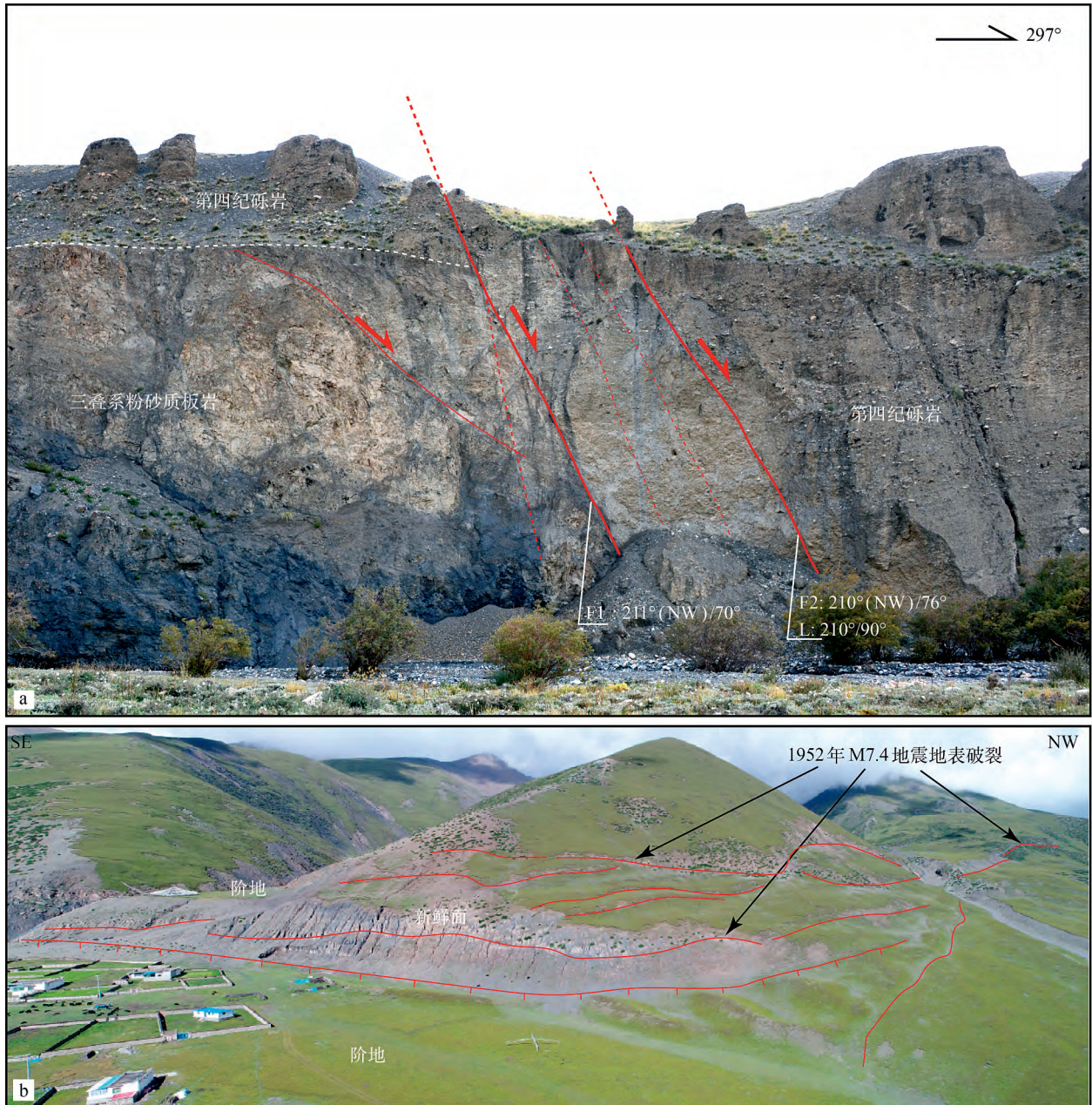


图 13 亚东-谷露裂谷正断裂和地表破裂特征

Fig. 13 Characteristics of normal faults and surface ruptures in the Yadong-Gulu Rift valley

(a)—亚东裂谷中涅如堆地堑达孜剖面中显示的陡倾的正断裂;(b)—谷露裂谷地表破裂带。可见 1952 年 M7.4 级强地震地表破裂新鲜面(引自 Chevalier et al., 2020)

(a)—Steep-dipping normal faults in the Dazi section of the Nierudui graben in the Middle Yadong rift vally; (b)—the surface rupture zone of the Gulu rift valley. Surface rupture zone of the 1952 strong earthquake (M7. 4) is visible. (from Chevalier et al., 2020)

旋走滑断裂为主)。羌塘中西部发育的正断裂和共轭走滑断裂(如布尔嘎错断裂与心湖断裂,五指湖断裂与大雄湖断裂)主要通过有限的垂向起伏和流变性应变来调节局部变形,进而吸收由上地壳物质向东挤出引起的东西向伸展以及中上地壳之间的底板剪切拖曳。在羌塘地块的西部,岩石学和同位素年代学的研究发现,在近 SN 向正断裂的下盘具有高

级变质-韧性特征的中地壳环境物质,而上盘为低变质的脆性上地壳物质,表明羌塘地体西侧上地壳似块体运动与中-下地壳的运动在很大程度上解耦(Van Buer et al., 2015)。目前这种解耦的程度和范围尚不明确,可能存在不完全解耦,才可能产生弥散型变形。

藏南裂谷系的形成机制一直存在着争议。目前

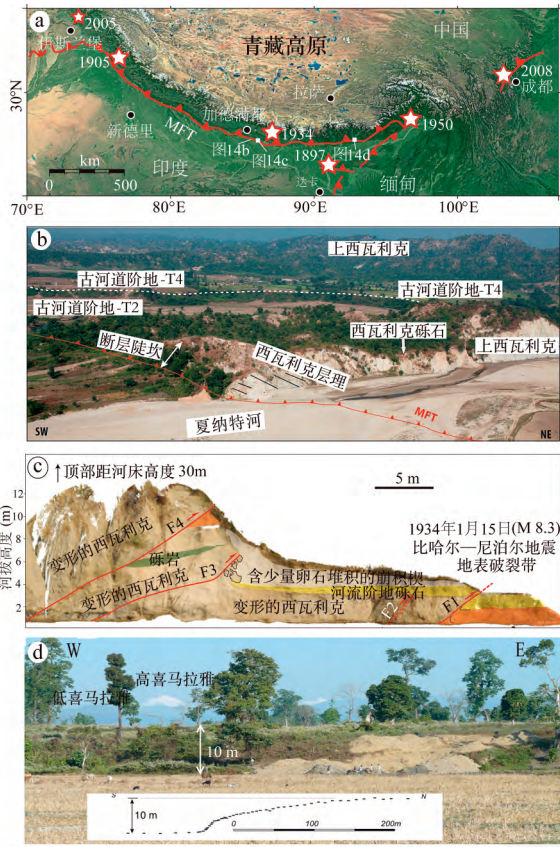


图 14 喜马拉雅前缘逆冲断裂带(MFT)及地表破裂陡坎特征

Fig. 14 Characteristics of Himalayan front thrust fault zone (MFT) and surface rupture scarp

(a)—青藏高原南边界的喜马拉雅前缘逆冲断裂带(MFT)分布及1895年以来的大地震；(b)—喜马拉雅山前中段夏纳特河地区逆冲断裂(MFT)(引自 Rizza et al. , 2019),位置见图 a；(c)—喜马拉雅山前中段 Sir 河流陡坎剖面上的喜马拉雅前缘逆冲断裂带(MFT),可见四条断裂面,具有前展式序列(引自 Sapkota et al. , 2014),位置见图 a；(d)—喜马拉雅山前东段历史大地震(M≥8)形成的~10m高的地表破裂陡坎(引自 Kumar et al. , 2010),位置见图 a

(a)—Himalayan front thrust fault zone (MFT) and large earthquakes since 1895 on the southern boundary of the Tibetan Plateau; (b)—the MFT in the Charnath Khola area at middle front of the Himalayas (adapted from Rizza et al. , 2019); (c)—the MFT in the Sir River scarp section at middle front of the Himalayas. Four main thrust faults shows forward spreading sequence (adapted from Sapkota et al. , 2014); (d)—the surface rupture scarp with ~10 m vertical offset formed by the historical large earthquake (M ≥ 8) at eastern front of the Himalayas (adapted from Kumar et al. , 2010). Locations of Fig. b, c and d are shown in Fig. a

有以下几种认识:①大陆地壳的重力垮塌作用或地幔岩石圈的拆沉作用(Molnar et al. , 1978; England et al. , 1989; Harrison et al. , 1992;

Coleman et al. , 1995);②下地壳物质的侧向流动或上地幔的上涌(Lee et al. , 2007; Yin An, 2000; Tian Xiaobo et al. , 2015; Liang Xiaofeng et al. , 2016);③印度板块的斜向俯冲或印度/欧亚板块碰撞导致放射状张裂隙(McCaffrey et al. , 1988; Kapp et al. , 2004);④印度板片撕裂(Hou Zengqian et al. , 2006; Chen Yun et al. , 2015; Liang Xiaofeng et al. , 2016; Wang Wei et al. , 2017; Guo Xiaoyu et al. , 2018; Si Shaokun et al. , 2019)。这几种模型都涉及到深部作用的控制。目前,越来越多的学者认为印度岩石圈板片不同角度的俯冲而产生的板片撕裂可能是藏南裂谷系形成的主要因素。需要指出的是,藏南裂谷系不同于羌塘裂谷系,不仅规模上有较大不同(前者几百千米长、后者几十千米长),而且几何形态和断裂组合也不同。此外,藏南裂谷系基岩区正断裂倾角较陡,一般为~70°(图 13),而羌塘裂谷系基岩区正断裂较缓,一般≤~50°(图 11d),可能反映前者正断裂面下切较深。

青藏高原不同地块的深部结构控制着不同地块地壳变形形式,这是大陆内部构造变形的特征。

4 结论

大陆内部发育弥散型的构造变形与地震活动,而不只在块体边缘。显然,这与刚体板块动力作用与变形主要在边界发生的板块构造原理不相符。大陆内部为什么发生这种变形?其动力机制是人们长期研究和探讨的科学问题。大陆包含了自地球早期形成至现今的不同岩石圈块体的拼贴组合,是历经长期演化的复杂拼合体。因此,大陆构造具有其自身的复杂性。

从青藏高原大陆构造变形的特征来看,连续变形或弥散型变形地区,往往地势起伏大,主要发生小地震;刚性块体变形主要集中在块体周缘,其地势起伏小,相对平坦,往往在边界带可发生 M7 以上,甚至 M8 级以上大地震。青藏高原现今地壳变形和地震活动具有明显的分区块特性,根据不同的大陆构造变形特征可分为四大区块(图 15):①青藏高原北部为“盆岭构造挤压区块”,主要发育一系列逆冲断裂形成的盆岭构造,地势起伏大,表现为以连续变形为特征的上地壳挤压缩短变形构造,主要发生 M7 级或以下逆冲型地震,在大型走滑断裂上可发生 M8 级以上大地震;②青藏高原中北部为“巴颜喀拉地块向东挤压构造区块”,以准刚性块体整体向东运

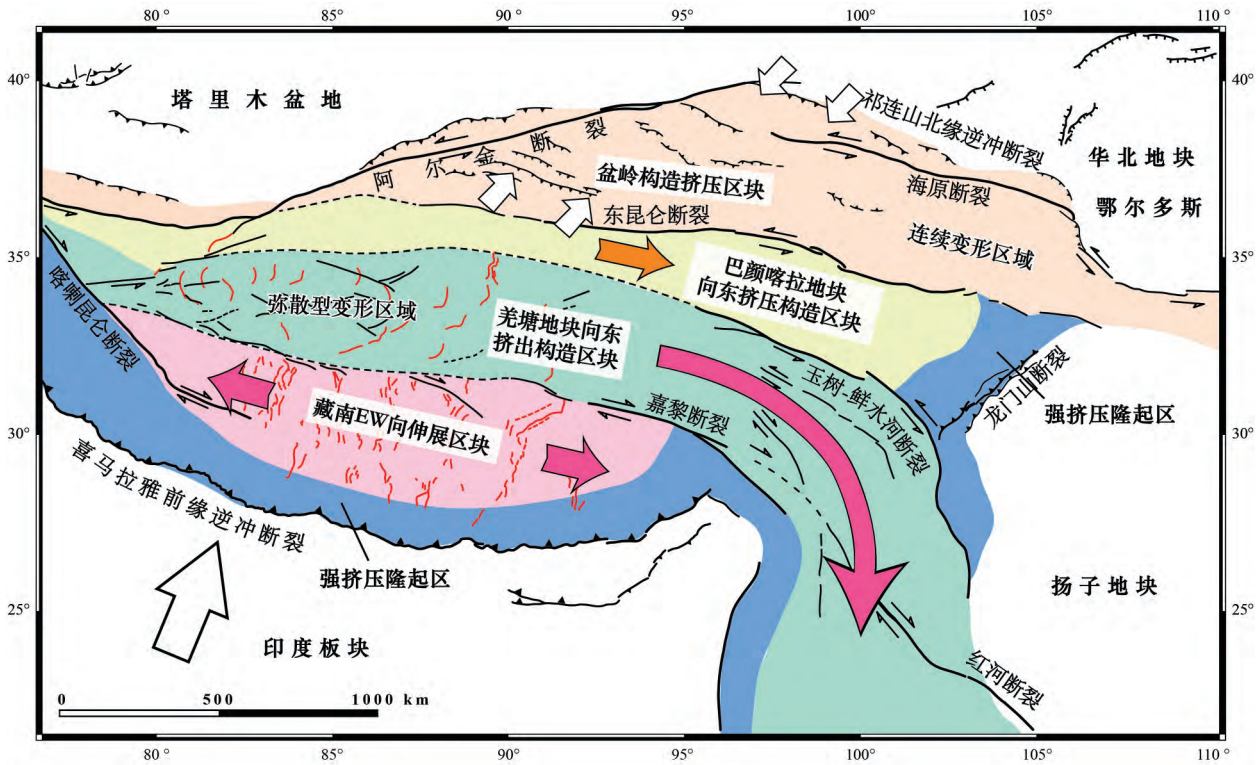


图 15 青藏高原现今构造变形分区

Fig. 15 Current tectonic deformation zones of the Tibetan Plateau

动为主要特征,总体地势平缓,变形主要集中在四个边界区域:东部边界龙门山地区为强烈挤压变形区域,西部边界以伸展变形为主,南北边界以走滑变形为主。由于具有弱的顺时针旋转特征,北边界滑移速率大,东边界水平挤压作用强烈,均可发生 M8 级以上大地震;③青藏高原中部腹地为“羌塘地块向东挤出构造区”,东部主要以块体向东南方向运动为特征,变形主要分布在两侧走滑边界,可发生 M7 级以上强震,偶可发生 M8 级大震。中西部的块体内部以一系列正断裂和走滑断裂组合的弥散型变形为特征,由东部块体向东南挤出运移过程中,牵引西部上地壳物质不连续向东运移或拉断所造成,地势起伏大,以发生的 M7 级以下地震为主;④高原南部为“藏南东西向伸展构造区”,以南北向裂谷系为主要变形特征,地势起伏大,沿裂谷系可发生 M7 级以上正断型强震。南部边界逆冲构造带是整个青藏高原发生 M8 级大地震的主要区域。青藏高原这种分区块的地壳变形形式和不同的地震活动是大陆构造变形的重要特征。

许志琴院士是中国著名的构造地质学家,是在中国构造地质学领域把显微构造(10^{-8} cm)和宏观构造(10^8 cm)相结合的重要开拓者。许老师不仅在

中国造山带和青藏高原形成演化等多个方面做出了重要的贡献,而且在中国大陆科学钻探(CCSZ)和汶川地震断裂带科学钻探(WFSD)等深部地质领域贡献巨大。30 多年前,我进入中国地质科学院地质研究所,即在许老师领导下工作,并有幸成为她的学生,得到她的细心指教和帮助,正是许老师的指导和引领才使我认识、理解和研究构造地质学。许老师对地球科学的热爱与执着、实事求是的严谨作风和孜孜不倦的探索精神是我们学习的榜样。今年时逢许老师 80 周年寿辰,谨以此文表达学生晚辈深深的敬意!

References

Allen C R., Luo Zhuoli, Qian Hong, Wen Xueze, Zhou Huawei, Huang Weishi. 1991. Field study of a highly active fault zone: The Xianshuihe fault of southwestern China. *Geological Society of America Bulletin*, 103: 1178~1199.

Armijo R., Tapponnier P., Mercier J L., Han Tonglin. 1986. Quaternary extension in southern Tibet: Field observations and tectonic implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91(B14):13803~13872.

Avouac J P. 2003. Mountain building, erosion, and the seismic cycle in the nepal himalaya-ScienceDirect. *Advances in Geophysics*, 46: 1~80.

Bai Denghai, Unsworth M J., Meju M A., Ma Xiaobing, Liu Mei. 2010. Crustal deformation of the eastern Tibetan Plateau revealed by Magnetotelluric imaging. *Nature Geoscience*, 3: 358~362.

- Bai Mingkun, Chevalier M L, Pan Jiawei, Replumaz Anne, Leloup Philippe Hervé, Métois Marianne, Li Haibing. 2018. Southeastward increase of the late Quaternary slip-rate of the Xianshuihe fault, eastern Tibet. *Geodynamic and seismic hazard implications. Earth and Planetary Science Letters*, 485: 19~31.
- Bird P, Kagan Y Y, Jackson D D, Schoenberg F P, Werner M J. 2009. Linear and Nonlinear Relations between Relative Plate Velocity and Seismicity. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99: 3097~3113.
- Bird P, Kagan Y Y. 2004. Plate-tectonic analysis of shallow seismicity: Apparent boundary width, beta, corner magnitude, coupled lithosphere thickness, and coupling in seven tectonic settings. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94: 2380~2399.
- Chen Yun, Li Wei, Yuan Xiaohui, Badal J, Teng Jiwen. 2015. Tearing of the Indian lithospheric slab beneath southern Tibet revealed by SKS-wave splitting measurements. *Earth and Planetary Science Letters*, 413: 13~24.
- Chevalier M L, Tapponnier P, Van Der Woerd J, Leloup P, Wang Shiguang, Pan Jiawei, Bai Mingkun, Kali E, Liu X, Li Haibing. 2020. Late Quaternary Extension Rates Across the Northern Half of the Yadong-Gulu Rift: Implication for East-West Extension in Southern Tibet. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125: e2019JB019106.
- Chevalier M L, Tapponnier P, Woerd J M, Ryerson F J, Finkel R C, Li Haibing. 2012. Spatially constant slip rate along the southern segment of the Karakorum fault since 200 ka. *Tectonophysics*, 530~531: 152~179.
- Chevalier M-L, Leloup P H, Li Haibing. 2015. Large-scale Geometry of Intra-continental Strike-slip Faults: Example of the Karakorum Fault, Western Tibet. *AGUFM*, 2015: T31A-2843.
- Chevalier M-L, Pan Jiawei, Li Haibing, Sun Zhiming, Liu Dongliang, Pei Jiawei, Xu Wei, Wu Chan. 2017. First tectonic-geomorphology study along the Longmu-Gozha Co fault system, Western Tibet. *Gondwana Research*, 41: 411~424.
- Chevalier M-L, Van Der Woerd J, Tapponnier P, Li Haibing, Ryerson F J, Finkel R C. 2016. Late Quaternary slip-rate along the central Bangong-Chaxikang segment of the Karakorum fault, western Tibet. *Bulletin*, 128: 284~314.
- Coleman M, Hodges K. 1995. Evidence for Tibetan plateau uplift before 14 Myr ago from a new minimum age for east-west extension. *Nature*, 374: 49~52.
- Coudurier-Curveur A, Tapponnier P, Okal E, Van Der Woerd J, Kali E, Choudhury S, Baruah S, Etchebes M, Karakaş Ç. 2020. A composite rupture model for the great 1950 Assam earthquake across the cusp of the East Himalayan Syntaxis. *Earth and Planetary Science Letters*, 531: 115928.
- Deng Qidong, Cheng Shaoping, Ma Ji, Du Peng. 2014. Seismic activities and earthquake potential in the Tibetan Plateau. *Chinese J. Geophys*, 57: 2025~2042. (in Chinese)
- Elliott J, Walters R, England P, Jackson J, Li Z, Parsons B. 2010. Extension on the Tibetan plateau: recent normal faulting measured by InSAR and body wave seismology. *Geophysical Journal International*, 183: 503~535.
- England P, Houseman G. 1986. Finite strain calculations of continental deformation. 2. Comparison with the India-Asia collision zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91: 3664~3676.
- England P, Houseman G. 1989. Extension during continental convergence, with application to the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 94(B12):17561~17579.
- England P, Molnar P. 1997. The field of crustal velocity in Asia calculated from Quaternary rates of slip on faults. *Geophysical Journal International*, 130: 551~582.
- England P, Molnar P. 2005. Late Quaternary to decadal velocity fields in Asia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110, B12401.
- Fielding E, Isacks B, Barazangi M, Duncan C. 1994. How flat is Tibet? *Geology*, 22: 163~167.
- Gan Weijun, Zhang Peizhen, Shen Zhengkang, Niu Zhijun, Wang Min, Wan Yongge, Zhou Demin, Cheng Jia. 2007. Present-day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B8):416~430.
- Gu Gongxu, Lin Tinghuang, Shi Zhenliang, Li Qun. 1983. The Catalogue of Earthquakes in China (1831 BC-1969AD). Science Press, Beijing, 894 pp. (in Chinese).
- Guo Shunmin, Ji Fengju, Xiang Hongfa, Dong Xingquan, Yan Fuhua, Zhang Shuanglin, Li Xinyuan, Zhang Wanxia. 2001. The Honghe Active Fault Zone. China Ocean Press. (in Chinese)
- Guo Xiaoyu, Gao Rui, Zhao Junmeng, Xu Xiao, Lu Zhanwu, Klemperer S L, Liu Hongbing. 2018. Deep-seated lithospheric geometry in revealing collapse of the Tibetan Plateau. *Earth-Science Reviews*, 185: 751~762.
- Han Shuai, Li Haibing, Pan Jiawei, Lu Haijian, Zheng Yong, Liu Dongliang, Ge Chenglong. 2018. Co-seismic surface ruptures in Qiangtang Terrane: Insight into Late Cenozoic deformation of central Tibet. *Tectonophysics*, 750:359~378.
- Han Shuai. Tectonic Deformation History of The Late Cenozoic Faults in The Western Qiangtang Terrane and Implications for The Geodynamic Process of Tibetan Plateau. 2019. Peking University. (in Chinese)
- Harrison T M, Copeland P, Kidd W S F, Yin A. 1992. Raising Tibet. *Science*, 255: 1663~1670.
- Hou Zengqian, Zhao Zhidan, Gao Yongfeng, Yang Zhiming, Jiang Wan. 2006. Tearing and dischronal subduction of the Indian continental slab: Evidence from Cenozoic Gangdese volcano-magmatic rocks in south Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (004), 761~774. (in Chinese)
- Huang Shengmu. 1982. Overview of five historical earthquakes of magnitude 8 or higher in Tibet (Compilation). *International earthquake developments*, 11:14~16. (in Chinese)
- Kapp P, Gynn J H. 2004. Indian punch rifts Tibet. *Geology*, 32: 993~996.
- Kirby E, Whipple K X, Tang Wenqin, Chen Zhiliang. 2003. Distribution of active rock uplift along the eastern margin of the Tibetan Plateau: Inferences from bedrock channel longitudinal profiles. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108: 2217~2233.
- Kumar S, Wesnousky S G, Jayangondaperumal R, Nakata T, Kumahara Y, Singh V. 2010. Paleoseismological evidence of surface faulting along the northeastern Himalayan front, India: Timing, size, and spatial extent of great earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 115, B12422, doi: 10.1029/2009JB006789.
- Lee J, Whitehouse M J. 2007. Onset of mid-crustal extensional flow in southern Tibet: Evidence from U/Pb zircon ages. *Geology*, 35: 45~48.
- Leloup P H, Tapponnier P, Lacassin R, Searle M P. 2007. Discussion on the role of the Red River shear zone, Yunnan and Vietnam, in the continental extrusion of SE Asia *Journal*, Vol. 163, 2006, 1025~1036. *Ind. eng. chem*, 164: 1253~1260.
- Li Cai, Zhai Qingguo, Dong Yongsheng, Jiang Guangwu, Xie Chaoming, Wu Yanwang, Wang Ming. 2008. Oceanic crust on the northern margin of Gondwana-evidence from Early Paleozoic ophiolite in central Qiangtang, Qinghai-Tibet Plateau. *Geological Bulletin of China*, 27: 29~36. (in Chinese)
- Li Haibing, Tapponnier P, Klinger Y, Lacassin R, Pei Junling, Qiu Z, Pan Jiawei, Si Jialiang. 2009. Field study of the 20/03/2008, Mw 7.2 Ashikule earthquake rupture (Xinjiang, China). *AGUFM*, 2009: GP21A~0770.
- Li Haibing, Woerd V D, Tapponnier P, Yann K, Qi Xuexiang, Yang Jingsui, Zhu Yintang. 2005. Slip rate on the Kunlun fault at Hongshui Gou, and recurrence time of great events comparable to the 14/11/2001, Mw7.9 Kokoxili earthquake.

- Earth & Planetary Science Letters, 237: 285~299.
- Li Haibing, Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Sun Zhiming, Tapponnier Paul, Woerd Jerome Van Der, Meriaux Anne Sophie. 2006. The constraint of the Altyn Tagh fault system to the growth and rise of the northern Tibetan plateau. *Earth Science Frontiers*, 013: 59~79. (in Chinese)
- Li Yalin, Wang Chengshan, Dai Jingen, Xu Ganqing, Hou Yunling, Li Xiaohan. 2015. Propagation of the deformation and growth of the Tibetan-Himalayan orogen: a review. *Earth-Science Reviews*, 143: 36~61.
- Li Yalin, Wang Chengshan, Wu Xinhe, Tao Xiaofeng, Zhao Bing, Ma Runze. 2005. Discovery of Upper Jurassic marine oil shale in the Tuonamu area, northern Tibet, China. *Geological Bulletin of China*, 24: 783~784. (in Chinese)
- Li Shanbang. 1960. *The Catalog of Earthquakes in China*. Science Press, Beijing. (in Chinese).
- Liang Xiaofeng, Chen Yun, Tian Xiaobo, Chen Yongshun, Ni J, Gallegos Andrea, Klemperer S L, Wang Mingling, Xu Tao, Sun Changqing. 2016. 3D imaging of subducting and fragmenting Indian continental lithosphere beneath southern and central Tibet using body-wave finite-frequency tomography. *Earth and Planetary Science Letters*, 443: 162~175.
- Lin Aiming, Ren Zhikun, Jia Dong, Wu Xiaojun. 2009. Co-seismic thrusting rupture and slip distribution produced by the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake, China. *Tectonophysics*, 471(3~4), 203~215.
- Liu Fucui, Pan Jiawei, Li Haibing, Sun Zhiming, Liu Dongliang, Lu Haijian, Zheng Yong, Wang Shiguang, Bai Mingkun, Chevalier M L, Zhang Lei, Cao Yong. 2021. Quaternary activity characteristics of the Riganpeicuo fault in the central Qinghai-Tibet Plateau and July 2020 Seismogenic structure analysis of the Mw6.4 Nima earthquake in Tibet. *Acta Geosciences*, 2021, 42 (in Chinese)
- Liu Kang, Li Haibing, Wang Changzai, Zhang Hui, Xiao Genru, Li Hongguang, Zhang Ling. 2018. Study of tectonic transformation along the eastern Altyn Tagh fault zone based on small earthquake relocation and focal mechanism solutions. *Chinese Journal of Geophysics*, 61: 143~158. (in Chinese)
- Liu Shaozhuo, Xu Xiwei, Klinger Y, Nocquet J, Chen Guihua, Yu Guihua, Jónsson S. 2019. Lower crustal heterogeneity beneath the northern Tibetan Plateau constrained by GPS measurements following the 2001 Mw7.8 Kokoxili earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124: 11992~12022.
- Liu-Zeng J, Tapponnier P, Gaudemer Y, Ding Lin. 2008. Quantifying landscape differences across the Tibetan plateau: Implications for topographic relief evolution. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 113(F4):18~44.
- Mccaffrey R, Nabelek J. 1998. Role of oblique convergence in the active deformation of the Himalayas and southern Tibet plateau. *Geology*, 26: 691~694.
- Meyer B, Tapponnier P, Bourjot L, Metivier F, Gaudemer Y, Peltzer G, Shunmin G, Zhitai C. 1998. Crustal thickening in Gansu-Qinghai, lithospheric mantle subduction, and oblique, strike-slip controlled growth of the Tibet plateau. *Geophysical Journal International*, 135: 1~47.
- Molnar P, Lyon-Caent H. 1989. Fault plane solutions of earthquakes and active tectonics of the Tibetan Plateau and its margins. *Geophysical Journal International*, 99: 123~153.
- Molnar P, Tapponnier P. 1978. Active tectonics of Tibet. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 83(B11): 5361~5375.
- Pan Guitang, Wang Liquan, Zhang Wanping. 2013. *Geotectonic map and description of the Qinghai-Tibet Plateau and adjacent areas (1: 1,500,000)*. Beijing: Geological Press. (in Chinese)
- Pan Jiawei, Li Haibing, Sun Zhiming, Liu Dongliang, Lu Haijian, Zheng Yong, Zhang Lei, Chevalier M. 2018. Reassessment of the late Quaternary slip rate of the Shuanghu graben, central Tibet. *AGUFM*, 2018: EP53A~01.
- Pan Jiawei, Li Haibing, Sun Zhiming, Liu Dongliang, Wu Chan, Yu Changqing. 2015. Tectonic responses in the Qaidam basin induced by Cenozoic activities of the Altyn Tagh fault. *Acta Petrologica Sinica*, 31: 003701~003712. (in Chinese)
- Ren Zhikun, Lin Aiming, Rao Gang. 2010. Late Pleistocene-Holocene activity of the Zemuhe Fault on the southeastern margin of the Tibetan Plateau. *Tectonophysics*, 495: 324~336.
- Searle M, Law R, Jessup M. 2006. Crustal structure, restoration and evolution of the Greater Himalaya in Nepal-South Tibet: implications for channel flow and ductile extrusion of the middle crust. *Geological Society, London, Special Publications*, 268: 355~378.
- Si Shaokun, Gao Rui, Tian Xiaobo. 2019. East-West Differential Underthrusting of the Indian Lithospheric Plate Beneath Central Tibet Revealed by Imaging VP/VS. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124: 9714~9730.
- Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A, Armijo R, Cobbold P. 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, 10: 611~616.
- Tapponnier, P, Xu Zhiqin, Roger, F, Meyer, B, Arnaud, N, Wittlinger, G, Yang Jingsui. 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau. *science*, 294(5547), 1671~1677.
- Taylor M, Yin A, Ryerson F J, Kapp P, Ding L. 2003. Conjugate strike-slip faulting along the Bangong-Nujiang suture zone accommodates coeval east-west extension and north-south shortening in the interior of the Tibetan Plateau. *Tectonics*, 22:4.
- Tian Xiaobo, Chen Yun, Tseng T L, Klemperer S L, Thybo H, Liu Zhen, Xu Tao, Liang Xiaofeng, Bai Zhiming, Zhang Xin, Si Shaokun, Sun Changqing, Lan Haiqiang, Wang Erchie, Teng Jiwen. 2015. Weakly coupled lithospheric extension in southern Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 430, 171~177.
- Van Buer N J, Jagoutz O, Upadhyay R, Guillong M. 2015. Mid-crustal detachment beneath western Tibet exhumed where conjugate Karakoram and Longmu-Gozha Co faults intersect. *Earth and Planetary Science Letters*, 413: 144~157.
- Van Der Woerd J, Ryerson F, Tapponnier P, Meriaux A S, Gaudemer Y, Meyer B, Finkel R, Caffee M, Guoguang Z, Zhiqin X. 2000. Uniform slip-rate along the Kunlun Fault: Implications for seismic behaviour and large-scale tectonics. *Geophysical Research Letters*, 27: 2353~2356.
- Wang Gang, Wei Wenbo, Ye Gaofeng, Jin Sheng, Jing Jianen, Zhang Letian, Dong Hao, Xie Chengliang, Omisore Busayo O, Guo Zeqiu. 2017a. 3-D electrical structure across the Yadong-Gulu rift revealed by magnetotelluric data: new insights on the extension of the upper crust and the geometry of the underthrusting Indian lithospheric slab in southern Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 474: 172~179.
- Wang Min, Shen Zhengkang. 2020. Present-Day Crustal Deformation of Continental China Derived From GPS and Its Tectonic Implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125: e2019JB018774.
- Wang Qi, Zhang Pei-Zhen, Freymueller J T, Bilham R, Larson K M, You Xinzhaoh, Niu Zhijun, Wu Jianchun, Li Yanxin, Liu Jingnan. 2001. Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements. *Science*, 294: 574~577.
- Wang Shaojin, Zhang Jianguo, Yu Qingkun, Long Xiaofan. 2010. Focal Mechanism of Strong and Medium-small Earthquakes and Modern Tectonic Stress-Field of the Red-River Fault Zone. *Journal of Seismological Research*. 33(2): 200~207. (in Chinese)
- Wang Wei, Qiao Xuejun, Yang Shaomin, Wang Dijin. 2017. Present-day velocity field and block kinematics of Tibetan Plateau from GPS measurements. *Geophysical Journal International*, 208: 1088~1102.
- Wang Xuben, Zhang Gang, Fang Hui, Luo Wei, Zhang Wei, Zhong Qing, Cai Xuelin, Luo Haozhong. 2014. Crust and upper mantle resistivity structure at middle section of Longmenshan,

- eastern Tibetan plateau. *Tectonophysics*, 619: 143~148.
- Wen Xue Ze, Ma Sheng Li, Xu Xi Wei, He Yong Nian. 2008. Historical pattern and behavior of earthquake ruptures along the eastern boundary of the Sichuan-Yunnan faulted-block, southwestern China. *Physics of the Earth & Planetary Interiors*, 168: 16~36.
- Wu Chan, Yan Cunfeng, Li Haibing, Tian Guangrong, Sun Zhiming, Liu Dongliang, Yu Changqing, Pan Jiawei. 2013. Cenozoic tectonic evolution of the western Qaidam Basin and its constrain on the growth of the northern Tibetan Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 029: 2211~2222. (in Chinese)
- Xu Xiwei, Tan Xibin, Yu Guihua, Wu Guodong, Fang Wei, Chen Jianbo, Song Heping, Shen Jun. 2013. Normal-and oblique-slip of the 2008 Yutian earthquake: Evidence for eastward block motion, northern Tibetan Plateau. *Tectonophysics*, 584: 152~165.
- Xu Xiwei, Yeats R. S., Yu Guihua. 2010. Five Short Historical Earthquake Surface Ruptures near the Silk Road, Gansu Province, China. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100: 541~561.
- Xu Zhiqin, Li Haibing, Yang Jingsui. 2006. An orogenic plateau-the orogenic collage and orogenic types of the Qinghai-Tibet plateau. *Earth Science Frontiers*, 13: 1~17. (in Chinese)
- Yin An. 2000. Mode of Cenozoic east-west extension in Tibet suggesting a common origin of rifts in Asia during the Indo-Asian collision. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105: 21745~21759.
- Zhang Peizhen, Deng Qidong, Zhang Guomin, Ma Jin, Gan Weijun, Min Wei, Mao Fengying, Wang Qi. 2003. Strong earthquakes and active blocks in continental China. *Science In China (Series D)*, 33: 12~20. (in Chinese)
- Zhang Peizhen, Deng Qidong, Zhang Zhuqi, Li Haibing. 2013. Active faults, earthquake hazards and associated geodynamic processes in continental China (in Chinese). *Science In China (Series D)*, 43: 1607~1620. (in Chinese)
- Zhang Peizhen, Molnar P, Xu Xiwei. 2007. Late Quaternary and present-day rates of slip along the Altyn Tagh Fault, northern margin of the Tibetan Plateau. *Tectonics*, 26: 5.
- Zhang Peizhen, Shen Zhengkang, Wang Min, Gan Weijun, Bürgmann R, Molnar P, Wang Qi, Niu Zhijun, Sun Jianzhong, Wu Jianchun. 2004. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data. *Geology*, 32: 809~812.
- Zhao Guoze, Unsworth M J., Zhan Yan, Wang Lifeng, Zhang Jihong. 2012. Crustal structure and rheology of the Longmenshan and Wenchuan Mw 7.9 earthquake epicentral area from magnetotelluric data. *Geology*, 40: 1139~1142.
- Zheng Wenjun, Yuan Daoyang, Zhang Peizhen, Yu Jingxing, Lei Qiyun, Wang Weitao, Zheng Dewen, Zhang Huiping, Li Xinnan, Li Chuanyou. 2016. Tectonic geometry and kinematic dissipation of the active faults in the northeastern tibetan plateau and their implications for understanding northeastward growth of the plateau. *Quaternary Sciences*, 36: 775~788. (in Chinese)
- Zuza A V, Yin A. 2016. Continental deformation accommodated by non-rigid passive bookshelf faulting: An example from the Cenozoic tectonic development of northern Tibet. *Tectonophysics*, 677: 227~240.

参 考 文 献

- 邓起东, 程绍平, 马冀, 杜鹃. 2014. 青藏高原地震活动特征及当前地震活动形势. *地球物理学报*, 57: 2025~2042.
- 顾功叙, 林庭煌, 时振梁, 李群. 1983. 中国地震目录: 公元前1831-公元1969年. 北京: 科学出版社.
- 魏顺民, 计凤桔, 向宏发, 董兴权, 严富华, 张双林, 李新元, 张晚霞. 2001. 红河活动断裂带. 北京: 海洋出版社.
- 韩帅, 羌塘地体西部晚新生代断裂构造变形历史及其对青藏高原动力学过程的启示. 2019. 北京大学.
- 侯增谦, 赵志丹, 高永丰, 杨志明, 江万. 2006. 印度大陆板片前缘撕裂与分段俯冲: 来自冈底斯新生代火山-岩浆作用证据. 22: 4.
- 黄圣睦. 1982. 西藏五次8级以上历史地震的概况(汇编). *国际地震动态*, 11: 5.
- 李才, 翟庆国, 董永胜, 蒋光武, 解超明, 吴彦旺, 王明. 2008. 冈瓦纳大陆北缘早期的洋壳信息——来自青藏高原羌塘中部早古生代蛇绿岩的依据. *地质通报*, 27: 29~36.
- 李海兵, 杨经绥, 许志琴, 孙知明, Tapponnier P, Woerd J V D, Meriaux A S. 2006. 阿尔金断裂带对青藏高原北部生长、隆升的制约. *地学前缘*, 013: 59~79.
- 李善邦, 武官英, 曾佑思. 1960. 中国地震目录. 北京: 科学出版社.
- 李亚林, 王成善, 伍新和, 陶晓风, 赵兵, 马润则. 2005. 藏北托纳木地区发现上侏罗统海相油页岩. *地质通报*, 24: 783~784.
- 刘富财, 潘家伟, 李海兵, 孙知明, 刘栋梁, 卢海建, 郑勇, 王世广, 白明坤, Chevalier M L, 张蕾, 曹勇. 2021. 青藏高原中部日干配错断裂第四纪活动特征及2020年7月23日西藏尼玛 Mw6.4地震发震构造分析. *地球学报*, 2021, 42.
- 刘亢, 李海兵, 王长在, 张辉, 肖根如, 李红光, 张凌. 2018. 基于小震定位与震源机制解信息的阿尔金断裂带东段构造转换研究. *地球物理学报*, 61: 143~158.
- 潘桂棠, 王立全, 张万平. 2013. 青藏高原及邻区大地构造图及说明书(1:1500000). 北京: 地质出版社.
- 潘家伟, 李海兵, 孙知明, 刘栋梁, 吴婵, 于长青. 2015. 阿尔金断裂带新生代活动在柴达木盆地中的响应. *岩石学报*, 31: 003701~003712.
- 王绍晋, 张建国, 余庆坤, 龙晓帆. 2010. 红河断裂带的震源机制与现代构造应力场. *地震研究*, 33(2): 200~207.
- 吴婵, 阎存凤, 李海兵, 田光荣, 孙知明, 刘栋梁, 于长青, 潘家伟. 2013. 柴达木盆地西部新生代构造演化及其对青藏高原北部生长过程的制约. *岩石学报*, 029: 2211~2222.
- 许志琴, 李海兵, 杨经绥. 2006. 造山的高原——青藏高原巨型造山拼贴体和造山类型. *地学前缘*, 13: 1~17.
- 张培震, 邓起东, 张国民, 马瑾, 甘卫军, 阎伟, 毛凤英, 王琪. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块. *中国科学: 地球科学*, 33: 12~20.
- 张培震, 邓起东, 张竹琪, 李海兵. 2013. 中国大陆的活动断裂, 地震灾害及其动力过程. *中国科学: 地球科学*, 43: 1607~1620.
- 郑文俊, 袁道阳, 张培震, 俞晶星, 雷启云, 王伟涛, 郑德文, 张会平, 李新男, 李传友. 2016. 青藏高原东北缘活动构造几何图像, 运动转换与高原扩展. *第四纪研究*, 36: 775~788.

Continental tectonic deformation and seismic activity: a case study from the Tibetan Plateau

LI Haibing^{*1,2)}, PAN Jiawei^{1,2)}, SUN Zhiming³⁾, SI Jialiang^{1,2)}, PEI Junling³⁾,
LIU Dongliang^{1,2)}, Marie-Luce CHEVALIER^{1,2)}, WANG Huan^{1,2)}, LU Haijian^{1,2)},
ZHENG Yong^{1,2)}, LI Chunrui^{1,4)}

1) *Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics of Ministry of Natural Resources, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037;*

2) *Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou, 511458;*

3) *Key Laboratory of Paleomagnetism and Tectonic Reconstruction of Ministry of Natural Resources, Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081*

4) *School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing, 100871*

** Corresponding author: lihaibing06@163.com*

Abstract

The high complexity of tectonic deformation and seismic activity in intracontinental settings cannot be explained by the theory of plate tectonics only. The Tibetan Plateau, extraordinary example of continental tectonic deformation, is characterized by different types of tectonic deformation in different parts of the plateau not only in terms of geology, topography, geomorphology and active faulting, but also in terms of different seismicity characteristics. It can be divided in the following areas: ① The northern Tibetan Plateau (north of the Kunlun fault), which is under compression while being characterized by a basin and range structure, which formed by a series of thrust faults. There, continuous deformation occurs by upper crustal shortening. ② The rigid Bayan Har block between the Kunlun and Xianshuihe faults, is characterized by eastward motion of the entire block, with deformation mainly localized along its margins. To the east, the relatively rigid Longmenshan block between the Longriba and Longmenshan faults is strongly compressed due to the stable Sichuan basin. ③ The western part of the central plateau, the Qiangtang terrane, is dominated by extensional deformation along a series of minor normal and strike-slip faults, due to continuous deformation in the upper crust, driven by eastward extrusion. By contrast, the eastern part of the Qiangtang terrane is extruded eastward as a somewhat rigid block between large strike-slip faults. ④ The southern Tibetan plateau is governed by east-west extension thanks to N-S trending rifts. The southern margin of the plateau is characterized by large thrusts. Large historical and instrumental earthquakes ($M \geq 8$) only occurred along large strike-slip in the NE and SE parts of the plateau, and along large thrust faults in the eastern and southern margins, very frequent along the latter. In other parts of the plateau, only earthquake of $M < 8$ occurred so far. These different regional crustal deformations and seismic activities are important features of intracontinental tectonic deformation.

Key words: continental tectonics; tectonic deformation; seismic activity; block; Tibetan Plateau