



魏晋·说说地震活动性

冯 锐

Wei-Jin Dynasty: Talking about seismic activity

Feng Rui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19987/j.dzqxjz.2023-186>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

南北地震带地震活动特征

Study on the seismic distribution and migration law of North-South seismic belt in China

地震科学进展. 2019(7): 2-8

吴忠—灵武地区地震活动性与强震危险性分析

The earthquake activity and strong earthquake risk analysis of Wuzhong-Lingwu region

地震科学进展. 2020(10): 1-12

华北地震活动韵律性及近期活动阶段分析

Rhythmic characteristics of seismic activity in North China and analysis of recent activity stages

地震科学进展. 2020(2): 16-22

吉尔吉斯地震活动性及监测台网研究

Research on Kyrgyzstan seismic activity and monitoring network

地震科学进展. 2021(2): 65-71

2013年10月31日吉林前郭M_{5.8}震群研究

Research on Qianguo M_{5.8} earthquake swarm on October 31, 2013

地震科学进展. 2018(4): 80-89

2019年四川荣县M_{5.4}地震序列监测与活动特征研究

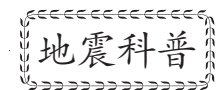
Research on the monitoring and seismicity characteristics of the M_{5.4} earthquake sequence in Rong County, Sichuan Province, 2019

地震科学进展. 2021(8): 362-370



关注微信公众号，获得更多资讯信息

冯锐. 魏晋·说说地震活动性——漫步地震五千年(7)[J]. 地震科学进展, 2024, 54(5): 359-371. doi:10.19987/j.dzxxjz.2023-186
Feng R. Wei-Jin Dynasty: Talking about seismic activity[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2024, 54(5): 359-371. doi:10.19987/j.dzxxjz.2023-186



魏晋·说说地震活动性 ——漫步地震五千年(7)

冯 锐*

(中国地震台网中心, 北京 100045)

摘要 谈及中国的地震活动性研究, 必然涉及一位杰出的女科学家——梅世蓉。她没有院士的头衔, 却是公认的、无人可替代的中国地震预报的领军者。本文以梅世蓉先生在地震活动性上的研究成果为代表, 选择了 3 个方面加以介绍。南北地震带的提出促进了深浅构造研究的深入, 龙日坝断裂带的发现具有重要的大地构造意义。分析了地震空区和震中迁移现象, 给出了南北地震带与南亚地震带间的地震呼应震例, 介绍了力学机制。直接前震和前兆震群的正确判断在地震预测上十分重要, 简介了直接前震的特征, 给出了中国大陆震群的分布。

关键词 梅世蓉; 南北地震带; 地震空区和震中迁移; 前震和震群

中图分类号: P315 文献标识码: A 文章编号: 2096-7780(2024)05-0359-13

doi: 10.19987/j.dzxxjz.2023-186

Wei-Jin Dynasty: Talking about seismic activity

Feng Rui

(China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China)

Abstract Talking about China's seismicity research inevitably involves an outstanding female scientist, Mei Shirong. She does not have the title of academician, but is recognized and irreplaceable as an academic leader in the field of earthquake prediction in China. In this paper, three topics are selected to be presented as representative of Mei Shirong's research on seismicity. The proposal of North-South Seismic Belt promotes the study of deep and shallow tectonics, and the discovery of Longriba fracture zone has important geotectonic significance. The phenomena of seismic gap and epicenter migration are analyzed, examples of seismic echoes between the North-South and South Asian seismic belts are given, and the mechanical mechanisms are described. The correct judgment of direct foreshocks and precursor seismic swarms is very important in earthquake prediction. The characteristics of direct foreshocks are introduced, and the distribution of seismic swarms in the mainland of China is given.

Keywords Mei Shirong; North-South Seismic Belt; seismic gap and epicenter migration; foreshocks and seismic swarms

收稿日期: 2023-12-11; 采用日期: 2024-03-20。

* 通信作者: 冯锐(1941-), 男, 研究员, 主要从事地球物理学的研究。E-mail: fr97214@sina.com。



0 引言

中国美术史上的第一位画家是谁？

当推东晋顾恺之(348—409)。

他的《女史箴图》《洛神赋图》是流传于今的我国著名的古代美术作品，极为珍贵。“冯媛挡熊”是《女史箴图》12篇的首篇(图1)。说的是西汉元帝到虎圈看斗兽，一头熊逃出虎圈，突然攀上栏杆要跑到殿上，众人逃跑。冯媛挺身而出，果敢地挡住了黑熊，最后由左右侍卫杀掉了熊。图画中的女子身形窈窕，侍卫奋力搏斗，与凶猛的黑熊形成鲜明的对比，传神之笔成就传世之宝。同期的王昭君出塞，也是流传千古的巾帼英杰。



图1 冯媛挡熊(顾恺之，东晋)

Fig. 1 Feng Yuan blocking the bear (Gu Kaizhi, Eastern Jin)

魏晋期间(220 AD—420 AD)社会混乱，西晋末年的“永嘉之乱”导致中原地区第一次被游牧民族控制，出现五胡十六国，全国人口降到约1600万的历史最低水平。地震记载几乎空白，不再讨论。

不过，冯媛挡熊、王昭君出塞这一系列事迹会让后代牢牢记住：华夏历史中的巾帼英豪如海浪一般地从未间断过，平凡或伟大，古代或今日，于我们民族的灿烂辉煌都有女性的贡献，包括中国的地震事业。

本篇，便以地震巾帼的代表人物——梅世蓉先生为主线，选择了3个方面来介绍地震活动性的一些研究情况。

1 梅世蓉先生

遍及九州的地震活动对人口众多的中国来说，不是一个能够等闲视之的问题，需要一个无冕之王来统领业务，这样的人物非常宝贵、极难选出。不仅要默默无闻、忍辱负重、承担风险；还必须精通专业、学识渊博、团结同事，能高瞻远瞩地起到指导作用。

历史选择了梅世蓉先生，我们敬爱的师长(图2)。



图2 梅世蓉先生(1928—2013)

Fig. 2 Ms. Mei Shirong (1928—2013)

梅世蓉先生，四川人，1928年生，1956年留苏，1960年回国。她的学术成就非常突出，活跃的学术思想、严谨的科研作风和平易待人的品德受到大家普遍的尊重和爱戴。自20世纪70年代就承担起地震系统的分析预报重任，30多年间一直主持全国地震预测的会商工作、确定重点监视区和研究思路，她发表的科学论文126篇以上，学术专著5部，指导了大量学生和青年工作者的业务。

梅世蓉先生是位纯洁善良的科学家，全无学阀的霸道，更无高官的城府，一直是科研人员亲密无间的良师益友，和她一起工作是非常快活的。

记得1966年国庆节的次日，长春怀德的范家屯发生5.2级地震，社会十分恐慌和混乱，当时的地方专业机构还没有建立。中国科学院地球物理所便迅即从邢台震区抽出3个年青人赶赴吉林开展工作，笔者是其中之一。后来，省政府突然提出个要求，希望年底前给出预测意见：千百万群众能否平安过年？我作为小萝卜头，傻了眼，只能向北京的梅世蓉老师求援。

元旦前，梅老师赶到了冰天雪地的吉林，向省委详细汇报了东北地区的震情。我也第一次听到了她

讲的“松辽地震带”的总形势, 顿然明白了危险并不在长春, 下一步的监测重点也不在吉林省, 而是辽宁省的南部——海城、熊岳、金县和大连一带。1970年, 梅先生调入中央地震工作领导小组办公室, 正是在她的具体指导下, 当年便在辽东半岛启动了水准测量, 次年又开始了流动重力监测, 随后水化、地磁、地电和地应力的前兆监测手段也陆续上马, 1974年国务院又下发69号文, 通报了华北及渤海地区的地震震情……这才有了1975年海城地震成功预报的思想和物质基础。

此事, 梅老师就是百丈冰里的一朵梅花, 俏也不争春, 只把春来报。

后来, 梅先生又亲自率队到新疆阿克苏地区搞地震预报试验, 在艰苦卓绝的戈壁滩上一干就将近4年, 她那种严谨的科学态度、和蔼可亲的工作作风深深地感动了每一个人, 温暖了每一颗心, 让我受益终生。梅老师的工作作风有个很大的特点: 从来不讲空话大话套话, 哪怕是会议的开场白; 愿意倾听不同的意见和观点, 而且还会饶有兴味地提出建议和分享, 尽管她的学识和经验是最丰富的。

返京后, 全国震情处处告急, 仅大陆地区1976年一年就发生了24次6级以上的强烈地震, 震后效应和震前征兆混在一起, 从东到西从南到北都在折腾, 达到百年来的最高潮。糟糕的政治环境下, 天地人鬼都异常, 震后总有诸葛亮。

当时我在研究所地震总值班室负责《今日震情》, 头脑里还没有建立起概率的观念, 总是用确定性的思维方式来分析具有强不确定性的自然活动, 更没掌握“科学不等于确定性, 概率不等于无知”这一现代科学的认识论。一遇到“情况”就不知所措慌忙上报。常人难以想象的压力便落到梅老师和她的团队头上了……

她们对唐山地震做了重点研究, 所发表论文的数量、质量和研究深度, 至今是首屈一指的^[1-2]。而这, 只不过是她大量工作的一滴水而已。

梅世蓉老师单纯而执着, 对自己呕心沥血的贡献, 从来没有讲过一句话。无私奉献是她的人生信念, 即便被严重误解的时候也都是这样。

具有如此崇高境界的女性, 我在地震系统里见过的, 仅她一人。

退休后, 与梅老师的当面交谈变得很经常, 毕竟住在同一单元的楼上楼下。白发苍苍久拖病体的她已然步履蹒跚, 但她那种生命不息战斗不止的精神依然在教育着我, 活跃的科学思维让她保持了永久

的年轻和乐观。2008年汶川发生地震, 时值她的老伴、德高望重的地震学老前辈林庭煌逝世一周年, 在亲人离去、孩子生病、自己严重心脏病和糖尿病等病痛折磨下, 梅老师完全不顾自己80岁高龄, 再次跃起投入工作。她极其清楚自己所追求的东西, 对所有劝慰只有一句回答: 我放不下心。

2009年元旦, 梅世蓉老师发表了重头论文《汶川8.0级与昆仑山口西8.1级地震前地震活动异常特征与启示》^[3], 详细分析了汶川地震的活动特点, 对今后的科研思路、预报战略、观测系统和组织机构等问题, 语重心长地做了交代, 点燃了她生命的最后一根蜡烛。

2013年4月20日四川芦山7级地震的第二天, 梅先生逝世。她为地震而生, 为地震而去。她的离去, 是中国地震事业的重大损失。所留下的空白在很长时间内都无法弥补。

中国地震事业的巾帼元勋、地震预报的先驱梅世蓉先生, 是一位高尚的人, 一个有益于人民的人, 她将永存于世。

2 南北地震带

2.1 概念的提出

中国大陆中间部位存在有一条从北而南延续18000 km、带宽不足200 km的巨型地震带(图3), 把中国分割成了东西两大地震活动区^[4], 这里一直是我国地震最活跃、灾情最严重的地带, 汶川地震和一系列的8级大震都位于其中。

不了解它, 就不能说了解中国的地震国情。

“地震带”是从漫天分布的地震里提炼出的一个升华概念。位于同一个地震带的地震会具有相近的破裂机制, 彼此会互相诱发和补偿, 深部会有共同的地质构造。地震带的位置一旦确立, 就可以利用这个地震带的历史地震推断现今地震活动的危险性, 预测今后地震的可能位置、强度和频谱分布, 也就容易告诉工程建设应该如何设计和防范。

中国地震带(区)的最早划分, 是翁文灏(1889—1971)1921年的工作^[5], 以及谢毓寿(1917—2013)50年代的工作^[6]。不过研究得最深入的还是梅世蓉先生, 她1960年在苏联的博士论文完成了一系列的开创性工作^[7], 确定了弹性应变的平均积累速度、地震频度、地震强度作为地震活动性的定量指标, 明确提出了“甘肃地震带”的定义(图3), 还把这个带细致地划分成贺兰山—六盘山—平武松潘—祁连山4个小段, 逐一做了研究。具体地将这个带的地震划分出4个时期: 高活动期是(200 BC—200 AD)、(734—

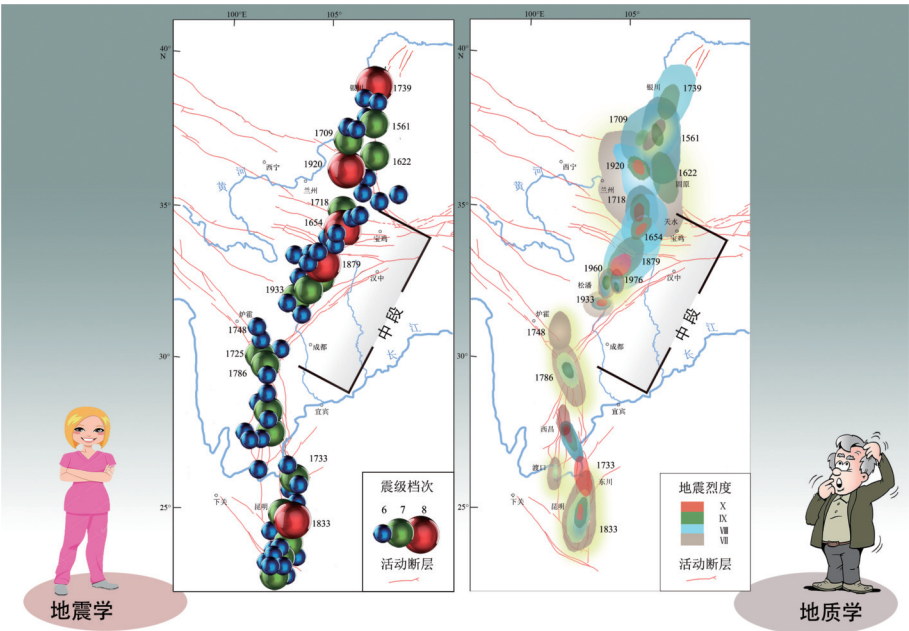


图3 汶川地震前的南北地震带(左-震中分布; 右-强震等震线)

Fig. 3 North-south seismic belt before Wenchuan earthquake (left, epicenters; right, isoseismal lines of some strong earthquakes)

1550)、(1550—至今); 低活动期是(200—734)。强震的平均周期约380年, 有感地震的平均周期为430年。后来, 大家约定俗成地改称之“南北地震带”, 只为方便顺口。

就在地震学兴高采烈地觉得这个地震带的划出美轮美奂的时候, 地质学发难了: 这算个啥带呀? 南段和北段还能与断裂构造吻合, 但中段既不符合大地构造, 又没有断裂带。你们的震中是不是搞错啦?

地震学拿出了两个重磅炸弹: 1654年礼县8级地震等震线^[8](图4)和1879年文县8级地震等震线^[9](图5)。等震线的长轴方向能够反映震源位错的方向,

这是确切无可动摇的。那么, 这两次大地震的震中连线, 以及每一次地震等震线的长轴和震源机制解的位错平面都是沿着北—北东方向延伸, 义无反顾地切割了地质断裂、横跨了高山、越过了峡谷! 没有受到地表活动断裂线和地形的任何影响, 空间位置上也明显不与龙门山断裂带吻合。

如果地质学画的这些条条、线线没有搞错, 那么可能的解释只有一条: 地震的震源在深部, 地质的断裂在浅部, 二者表象上的不吻合反映着该处存在深浅立交构造。

就这样, 大家吵了50年, 谁也没说服谁。

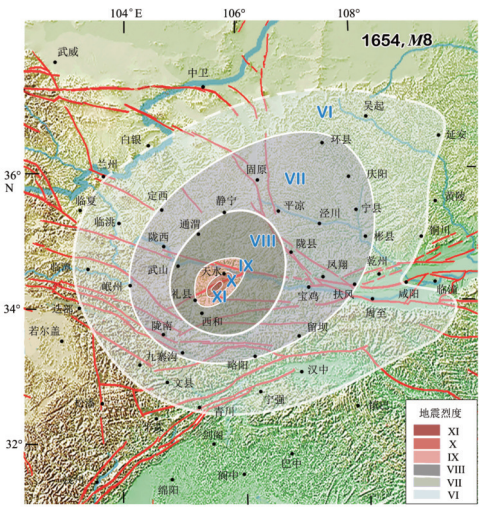


图4 礼县1654年8级地震等震线

Fig. 4 Isoseismal map of Lixian M8 earthquake in 1654

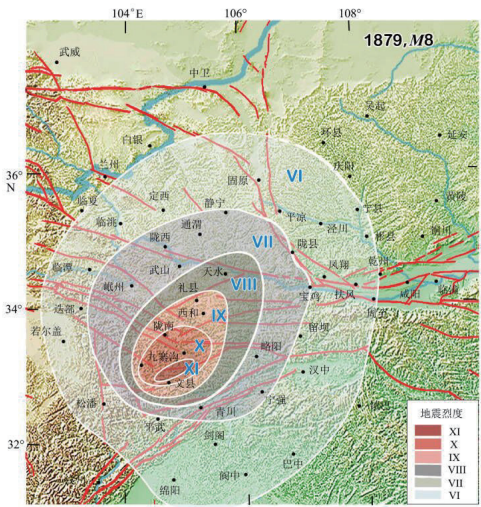


图5 文县1879年8级地震等震线

Fig. 5 Isoseismal map of M8 earthquake in 1879

说来可笑, 人一吵累, 共识就有了:
嘿! 这个地区的深部构造还没查清呀。

2.2 构造背景的初步明晰

日子熬到了2008年, 汶川发生大地震。

为研究汶川地震的深部构造和龙门山的抬升机制, 专家们分析了GPS复测资料和卫星影像, 开展了野外现场考察^[10], 还布设了长达500 km的地震探测^[11-12], 大有斩获: 在南北地震带中段——以前争论的地方, 居然发现了一条重要的、切穿了整个地壳的大断裂, 以前一直被忽略!

这条断裂叫龙日坝断裂带, 位于龙门山以西200 km处, 由相距约30 km的两条平行的分支断层组成, 一条叫龙日曲, 一条叫毛尔盖。跟龙门山断裂带一样都呈北东走向, 但是在北端转向南北状了(图6)。更有意义的是, 大地构造的单元划分也不得不做修改了。

以前总认为巴颜喀拉块体是完整地接触到龙门山断裂带, 因此对于青藏高原的向东运移, 理论上应该直接在龙门山断裂带处引发大量地震——沿着龙门山、并呈北东向延展。而这与实际严重不符。

新的观点^[10]是: 新构造运动在龙门山区发生于11~5 MaBP(距今百万年), 而岷江以西的岷山、邛崃山、阿坝等山区却发生在5~3 MaBP, 反映出从成都平原向西北方向的岷山、阿坝地区存在一个从老

逐渐变新的趋势! 通俗点地说: 龙门山是老的, 岷山是新的; 老的僵化了, 地震就少了; 新的活奔, 地震就没完了。

比如2008年汶川大震之前, 发生在龙门山断裂带的最大地震仅有汶川1657年4月21日、绵竹1958年2月8日、大邑1970年2月4日的3次6.2级地震, 说明龙门山断裂带至少呼呼酣睡了四五百年。

龙日坝断裂带的发现, 意义重大。

此事决定了巴颜喀拉块体的东侧要再划分出两个次级的小块体——阿坝次块体和龙门山次块体(图6和图7)。青藏高原的东向推挤和运移之所以能被华南块体阻挡住, 是靠宽达200 km的龙门山次块体的地壳缩短来消化完成的, 它把阿坝次块体的年形变率从11.4 mm压缩到8.5 mm, 年地壳缩短率约0.55 mm, 只有小部分的剩余量才传递给了龙门山。于是在龙门山次块体(而不是龙门山断裂带)的部位就出现了大量地震——南北地震带中段, 这个地区是在龙门山西侧的、断续的、看似小规模断层, 比如岷江断裂、虎牙断裂、文县武都断裂等, 以不断释放的形变能才维系了整体能量调节的稳定(图8)。

如何评估龙日坝断裂带的发现, 以及它在大地构造上的地位, 也存在不同的观点。有些研究认为, 龙日坝断裂带实际上是扬子块体和松潘地块的部分

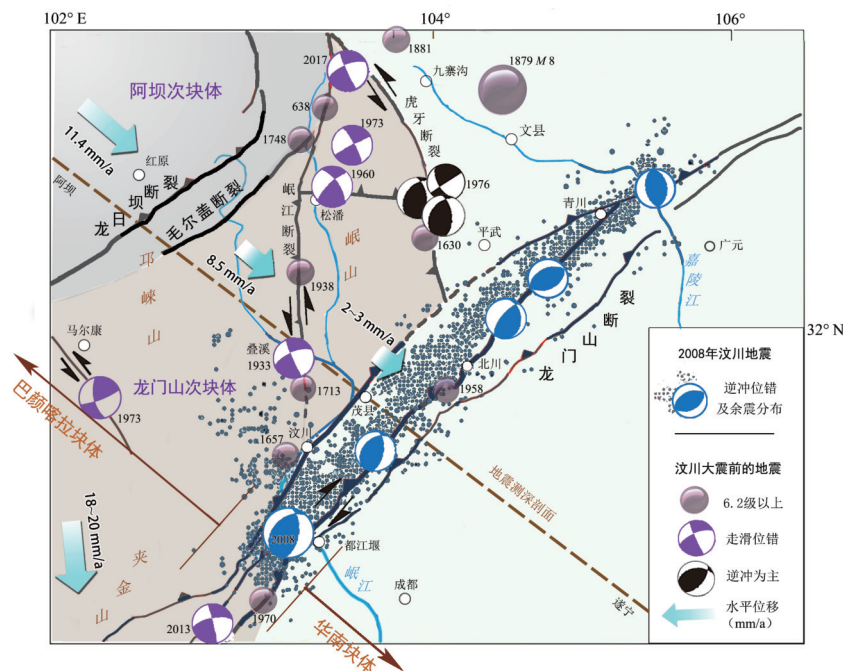


图6 龙门山次块体(参考[13]并修改)

Fig. 6 Longmenshan sub-block (refer to [13] with modifications)

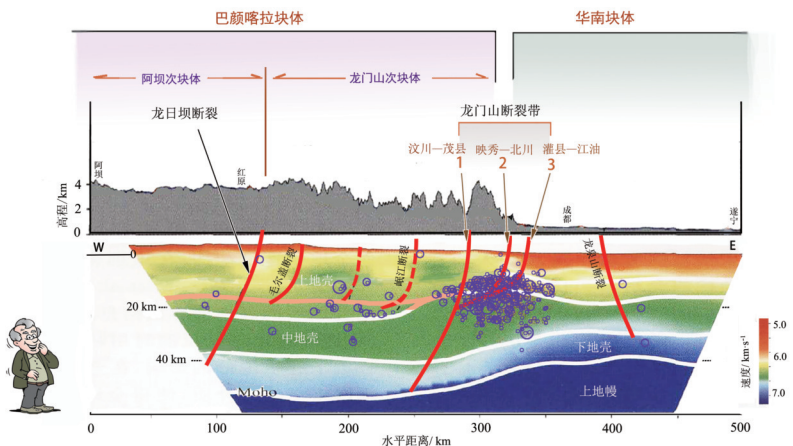


图 7 穿经龙门山次块体的地震剖面 (根据 [12] 并做修改)

Fig. 7 Seismic profile through Longmenshan sub-block (refer to [12] with modifications)

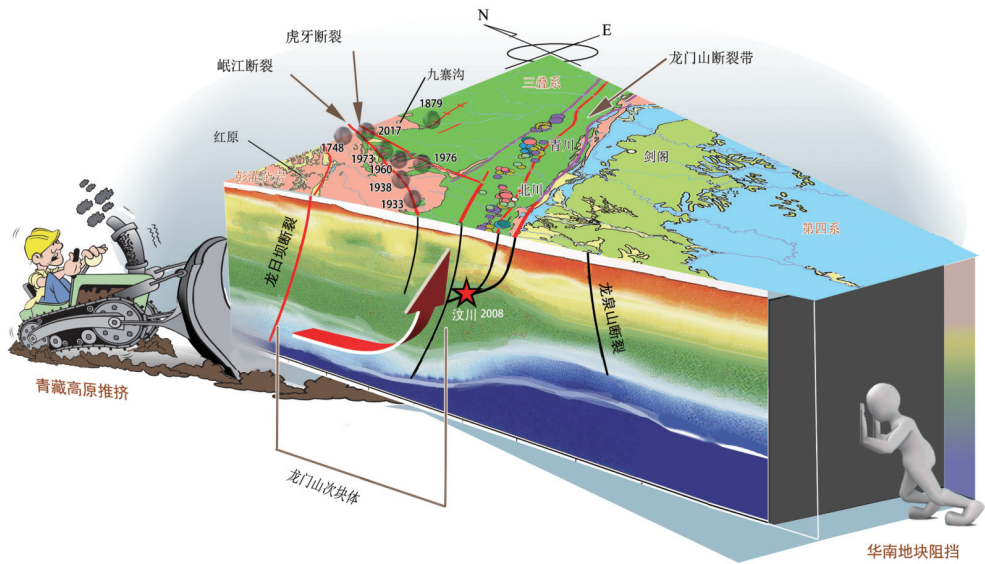


图 8 青藏高原和华南块体的力学关系

Fig. 8 Mechanical relationships between the Tibetan Plateau and South China blocks

构造边界，它的前身是一古老洋壳与陆壳的边界，在青藏高原东向挤压逃逸过程中，把这个构造薄弱带激活了^[11]。

3 地震空区和迁移

3.1 地震空区

地震空区是地震活动性研究中常用的方法之一。由前苏联学者费多托夫 (Fedotov) 在 1965 年提出，梅世蓉先生在 1960 年的研究中也发现了这个奇特的现象^[2-3, 7]：所有的毁灭性地震都不发生在有感地震频度最高的地方，而且随着地震活动的增强，在空区内或周边会有很高的概率发生强地震，包括

2008 年的汶川地震都有一定程度的显现。

从最近的统计看^[14]，大陆地区的 367 次 5 级以上的地震，有 194 次即 52% 出现了震前的空区，可作为前兆信息参考。

梅世蓉先生还指出，空区的存在会表现出前兆的减少和外围地震活动的相对增高，分析工作“非常容易将一个特大地震孕育的前兆场非均匀分布理解为多个中强以上地震在孕育，甚至分别交代为别处的大地震”^[3]。

3.2 震中迁移

3.2.1 现象和机理

地震震中的迁移是地震活动性的一个常见现象，小到震中区，大到整个地震带。谚语“地震两头

跳, 这边震了那边闹”, 对判断地震的发展趋势很具现实意义(图 9)。

在邢台、唐山震中区, “地震两头跳”十分明显: 强地震反复地交替发生在余震区的两端, 成为判断发展趋势的基本依据之一。

就南北地震带而言, 也是这样: 四川汶川大地震后, 2~3 个月内就迅速发展到北端青川的 6.4 级、6.1 级强震; 然后掉头南下, 8 月 31 日在川滇的攀枝花发生 6.1 级地震、继而又在雅安芦山 2013 年和九寨沟 2017 年发生两次 7 级地震^[13], 甚至在 2022 年 9 月、2023 年 1 月发生的 6 级左右的地震都集中在龙门山断裂的南端——早已预判的康定地区。

研究表明, 南北地震带的整体也存在震中迁移^[15], 但现象比较复杂, 大迁移和小迁移交织在一起、彼此叠加, 这种复杂性与地震带经由不同的构造单元有关(图 10)。

地震震中的跳跃或迁移现象反映着构造体系的整体调整。一旦断裂带的某个部位释放了应变能、降低了高应力的背景值之后, 构造应力的集中点便会迅即转移到断层两端, 继续激发出一些小的破裂才能最终完成整体的平衡, 这是断裂力学的一个基本结论。一次地震的破裂越充分, 原地再次应力集中的时间就会越长, 复发地震的可能性就越小。因此, 很少有 7~8 级地震在百年以后仍然会在原地重复发生的现象。

日常生活中亦如此: 别看扣眼小, 两端应力大。扣眼的两端必须处理好, 否则最容易撕裂(图 11 和图 12)。

地震活动时, 断裂带两端以外的岩石强度如果能扛得住剪切力或拉张力, 余震就只在两端之内的小区发生; 两端扛不住, 就进一步外扩。在多条断裂带汇集区, 地震空区便出现了, 异常由外围向震中

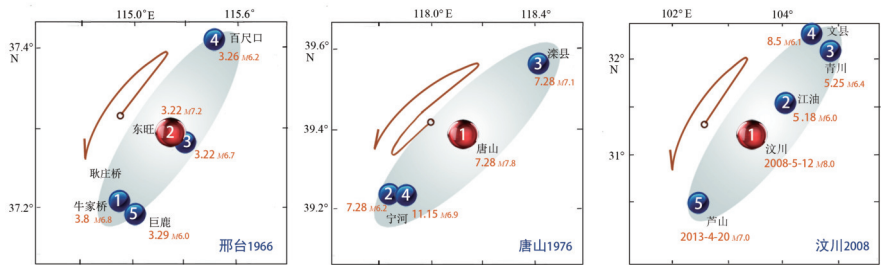


图 9 地震两头跳的现象

Fig. 9 The phenomenon of earthquakes jumping from one end to the other

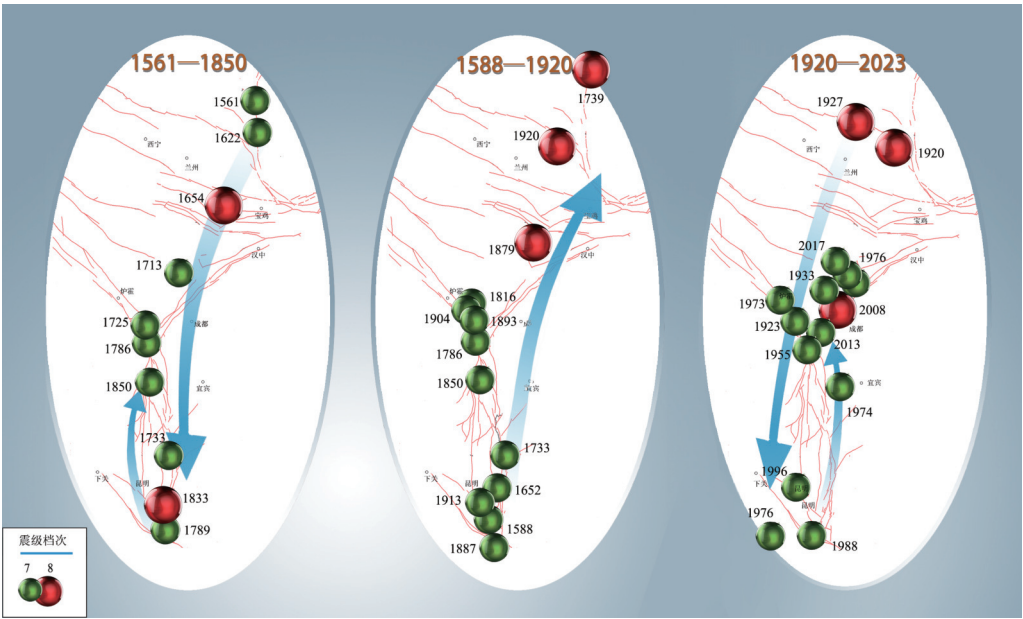


图 10 南北地震带存在复杂的震中迁移现象

Fig. 10 Complex epicentral migration in the North-South seismic belt

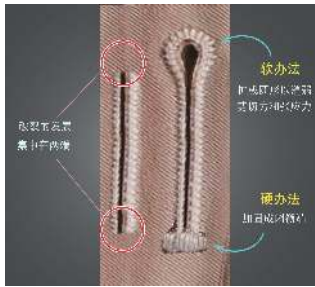


图 11 锁扣眼

Fig. 11 Buttonholes for clothing

迁移的现象也就出现了,直到在更大的区间内被锁住,或发生另一次地震并重复前述过程。梅世蓉先生提出了“坚固体孕震模式”的思想^[15],并对此做了深入的阐述。

3.2.2 思想启迪和预测

2004 年 12 月 26 日印尼苏门答腊—安达曼发生了 9.1 级地震,引起巨浪海啸灾害,又在 2006 年印尼的爪哇岛发生 6.4 级地震。针对它们对中国大陆的地震活动会产生怎样的影响,汪一鹏等^[16]迅速开展了工作,2007 年 3 月发表文章指出:

南北地震带发生强震的可能性不能忽视……未来几年内,强震向中国南北地震带发展迁移是非常可能的事。

就在这段期间,印尼的地震活动愈发升级,连续在南亚地震带上发生了 3 次 8 级大震:2005 年 3 月 8.6 级、2007 年 9 月 8.2 级和 8.6 级大震。最后的结果是,在南北地震带 2008 年 5 月发生了汶川 8 级地



图 12 锁扣眼的不同方式和结果

Fig. 12 Different buttonholes for clothing and their results

震,未出所料。

他们的思路可以复盘一下:

印尼 2004 年 9.1 级大震之后,我国地震台网的监测立刻发现了异常:在不到 20 分钟内,云南宾川便发生了 4.6 级地震、双柏发生了 5.0 级地震。而且云南地区地震活动的日均频度从 12 月 26 日之前的 20.9 次,急剧增到 12 月 28 日的 216 次,2005 年 1 月 4 日达 316 次,竟然是正常活动水平的 15 倍!

这种情况,曾在 20 世纪出现过两期——(1930—1950)和(1970—2010),都是从最南部的多次强震向北迁移而终止的(图 13)^[16]。

现象的根源在于深部。俗称的“南北地震带”实际上并不局限于中国境内,它一直往南延伸到缅甸、安达曼海,再到印尼的苏门答腊岛及其西侧,与南亚地震带沟通在一起。

50 MaBP 印度板块与欧亚大陆碰撞,既作用到了中国大陆也产生了反噬效应,遭受扰动的东南亚上地幔的对流对它进行了补偿——琉球群岛的弧后

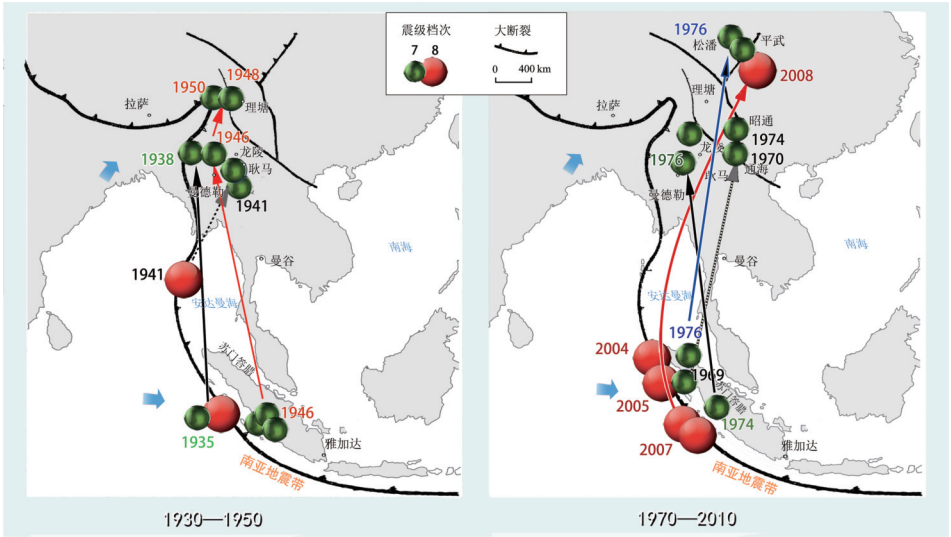


图 13 南亚地震带的震中北迁事件(参考 [16] 数据,做修改并绘制)

Fig. 13 Northward migration of epicenters in the South Asian seismic belt (refer to [16] data with modifications)

扩张,形成了东海;南中国海的海底扩张发生在大约 32~15.5 MaBP;印支半岛和苏门答腊一带随后出现了弧状拖曳形状……这一系列物质的顺时针运移,反映出南亚地区的上地幔出现了小尺度的新对流(图 14)。

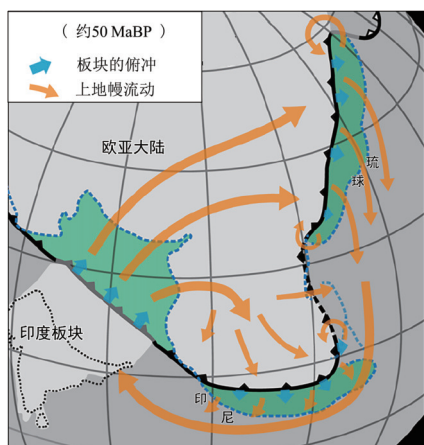


图 14 东南亚上地幔运动示意图

Fig. 14 Schematic diagram of upper mantle motion in South-east Asia

因此,南北地震带的南端——南亚地震带的重大活动就不是孤立的事件,由南而北的震中迁移会成常态,过去如此,今后依旧。地壳上部的“锁扣眼”机制(图 12),在这里要用上地幔的大规模运动来认识了。

4 前震和震群

4.1 现实的问题

地球每年大约有 500 万次地震,好在绝大多数发生在海域或为小地震,能造成灾害的大约有 100 次,其中 7 级以上的每年只有 18 次左右。

问题是,地震台网一旦记录到中等或频发的小震,值班员该怎么办?这是梅世蓉先生每天不得不考虑的现实问题。

再等两天吧——不敢!

1976 年 5 月 29 日云南龙陵 7.3 级和 7.4 级大震,震前的 15 分钟内监测到 16 次小地震、6 次有感地震,预报刚发出地震就来到,没起到应有的效果。

发现小震就预报——也不行!

2011 年 1 月 1 日江苏建湖发生 3.4 级地震,短短 3 天内小震达 100 多次,仅 3.0 级以上的有感地震就有 5 次,大量居民露天住宿,十分恐慌。结果仅是一次小小的震群活动,并没有发生强震或大震。

一有震感大家就跑——更不行!

1984 年 5 月 21 日南黄海 6.2 级地震,恰值子夜。山东、浙江、安徽 500 km 内都有感。上海、南通、南京、扬州、无锡、镇江等城市有 500 多人惊慌跳楼(上海 18 起,南通 70 多起),受伤人数 263 人,重伤 54 人。同济大学有 125 名学生因跳楼致伤,紧张猝死的约有 10 人……地震局连一句话还没来得及讲。

这些教训都不是一次,也不是一地!

为改变局面,最现实的一步是迅速判断地震类型。根据手头掌握的短时段、有限的地震数据,从 3 种情况中选其一:主震-余震型,震群型和孤立型(图 15)。



图 15 地震序列的 3 种类型

Fig. 15 Three types of earthquake sequences

孤立型地震,相对简单。这类地震的最大震级尚未见过 7 级以上者,余震极少或没有,持续时间也很短。比如 2006 年 7 月 4 日中午的河北雄安 5.1 级地震,北京、天津、山东均有感,仅在 13 时有个 1.6 级的余震便结束了。2023 年 8 月 6 日 02 时的山东德州 5.5 级地震,华北多地有感,2 级多的余震闹了几下便结束了。都不需要公众采取什么措施。

难对付的是主震-余震型地震和震群型地震。

它们的后面,既可能是一次大地震,也可能是多次小地震。或者说,要么是场狂风暴雨,要么是没完没了的毛毛雨。为了能从研究前震和震群中提取有用信息,梅世蓉先生曾组织力量开展过研究。

4.2 前震

前震有广义和直接之分。

广义前震泛指主震之前、在主震附近发生的中小地震。如果把距主震 200 km、3~5 年前的地震活动都统计在内,出现前震的概率大约会高于 50%。比如唐山大地震前 5 年,华北小震活动出现过空区;大震前 10 年,震群数目比早期增加了 3 倍^[17]。不过这些广义前震的不确定性比较高,实际运作中只能作为背景场来对待。

研究的重点在于“直接前震”——主震之前发生在主震断层面的、紧邻主震起始破裂点的小地震，它们多数出现在主震前1~2天、距主震10~75 km，活动强度随震级而增大。这些前震也是一个小小的“主震-余震”序列，频度上会有两种形态：密集—平静一大震，或密集—加剧一大震。

统计表明^[18]，全球6级以上大震当中，有这种前震的震例仅占13%左右，其中68%的主震为逆冲型，17%为走滑型，15%为拉张型破裂。

尽管直接前震的出现总是那么怪吝，但在强震预报指标之中它仍被公认是最闪亮的那颗星星，不论预报是成功的还是失败的，都必须搞准它(图16)。海城地震的成功预报离不开4.7级以下的527次前震，而唐山地震和汶川地震的漏报，至少没有监测到这颗星星的闪光。

按照目前的研究，可予关注的直接前震有如下几个特点^[18-19]：

- 震源机制与主震的震源机制相似，而这种机制的一致性在余震序列和震群中并不存在；
- 震级-频度定律的 b 值偏低，即不同震级数量分布的比值较低；
- 地震的时空丛集特点更明显，深度有逐渐下迁的趋势，与大震的成核过程相吻。

笔者对我国(前21世纪—2022年)7级以上大震的广义前震做了统计(图17)，全国分成4个区——华北、西部、南北带的两段，西部地区的前震发

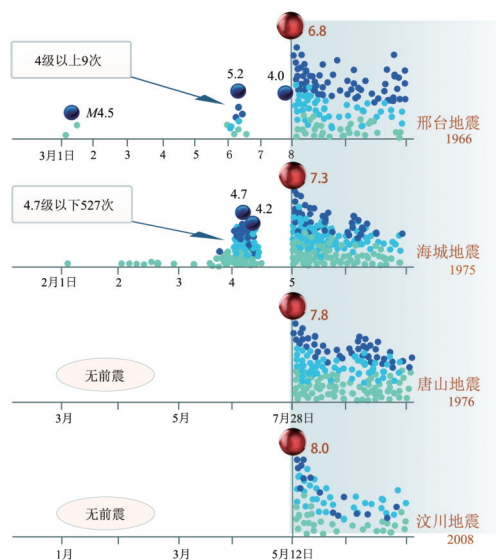


图16 大震前的不同前震活动

Fig. 16 Different foreshock activities before major earthquake

生率较低，仅20%；南北地震带在水天以南的南段，有最高的前震发生率，约为75%(图18)。当然，广义前震的统计结果还是太乐观，因为判定的标准很宽松，仅仅是大区域的背景水平。

4.3 震群

震群的基本特征是：短时间内在相同的地方发生许多地震，多数为5级以下的活动，后续没有大震，也没有明显的主震-余震特点，周期性不明显，震源机制杂乱。

我国震群活动的震例要比前震序列多得多，分

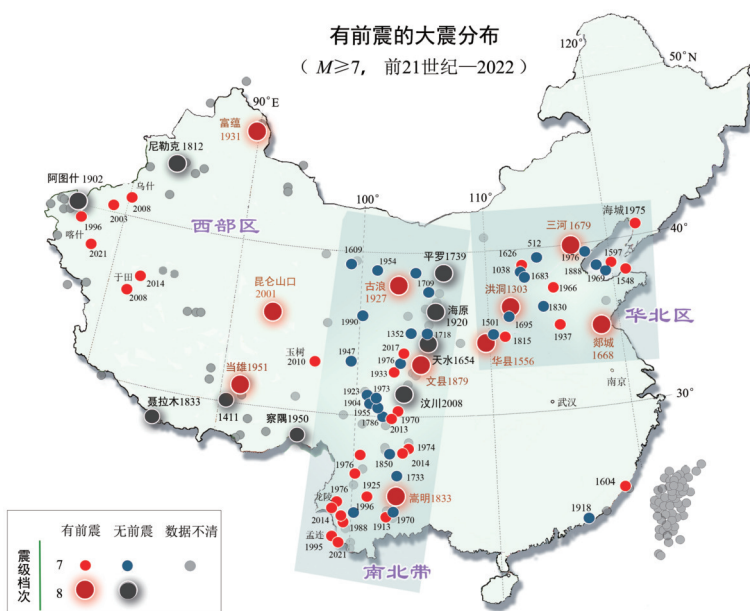


图17 中国广义前震的大震分布

Fig. 17 Distribution of generalized foreshocks of large earthquakes in China

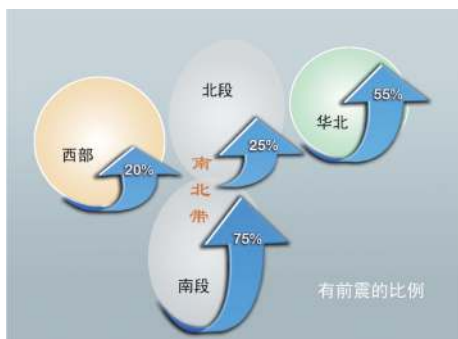


图 18 各区出现前震的比例

Fig. 18 Proportion of foreshocks in four districts

布也广，它们经常出现在下述地区：

- 地点上多在岩体破碎、中小型断裂交汇的地区，但又不在于大的地震带上。比如洛阳—开封地区、南京和苏北地区、山西太原一带、山东蓬莱地区，历史上的有感地震记录一直没有停

止过，但又一直没有发生过大地震；

- 早期某次强震的余震区，断续延续下来的地点。比如北京西北郊—延庆的震群，与该区 1720 年 6.8 级地震、1730 年 6.5 级地震有着明显的关系，至今还时不时地捣乱。银川磴口地区的震群，与 1976 巴音木仁 6.2 级地震关系紧密。河北滦县丰润的震群，应该是 1976 年唐山地震的后遗；

- 青藏高原、天山地区的几个震群的出现都是现今地震活动的反映，震群与强震在这些地区交替发生。震群既可以是前兆震群，也可以是大震的余震延续。

笔者根据新疆、青海、山东、甘肃、内蒙等 14 个省(自治区)的 30 篇论文，以及文献 [19] 所列的华北地区 27 份震群资料，初步绘制了中国地震震群的分布(图 19)，供读者参考。



图 19 中国地震带和震群的分布

Fig. 19 Distribution of seismic belts and earthquake swarms in China

梅世蓉先生曾对“一般震群”和“前兆震群”做过仔细研究^[17]，又指导学生做了进一步的工作^[20-21]。目前来看，震群活动与大区域内的强震关系较密切，它的频度起伏能反映大区地震活动水平的强弱。震群区多为岩体的弱化部位，容易形成应力集中点，故而对应力场扰动敏感。但是若把震群的活动用于具体强震的预测，作用还是有限的。

回眸来时路，自然科学中的预报问题一直很难，

而地震的预报就更难。这不是一代人能解决的科学问题，无数的攀登者都在崎岖的山路上步履蹒跚、矢志不移地前行着。

让人欣慰的是，道路中的那些最细腻、最美丽的石子是由女性科学工作者铺就的，她们做出了更大的付出和贡献……

无尽山路曲曲弯弯，遥看前方似有若无。

心甘情愿仍在铺路的正是你和我，还有她和他。

参考文献

- [1] 国家地震局《一九七六年唐山地震》编辑组. 一九七六年唐山地震[M]. 北京: 地震出版社, 1982
The Editing Group of *Tangshan earthquake in 1976* by the National Seismological Bureau. *Tangshan earthquake in 1976*[M]. Beijing: Seismological Press, 1982
- [2] 梅世蓉. 地震科学研究论文选集(地震学、地震前兆与地震预报)[M]. 北京: 地震出版社, 1993
Mei S R. Selected research papers in earthquake science (seismology, earthquake precursor and earthquake prediction)[M]. Beijing: Seismological Press, 1993
- [3] 梅世蓉, 薛艳, 宋治平. 汶川 8.0 级与昆仑山口西 8.1 级地震前地震活动异常特征与启示[J]. 地震, 2009, 29(1): 1-14
Mei S R, Xue Y, Song Z P. Anomalous seismic characteristics before Wenchuan M8.0 and Kunlunshan M8.1 earthquakes and their implications[J]. *Earthquake*, 2009, 29(1): 1-14
- [4] 康来迅. 中国南北地震带的基本特征及其形成机理之探讨[J]. 地壳形变与地震, 1991, 11(4): 76-85
Kang L X. Discussion on the basic characteristics and formation mechanism of the South-North Seismic Zone in China[J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 1991, 11(4): 76-85
- [5] 冯锐. 张衡地动仪[M]. 北京: 地震出版社, 2019
Feng R. Zhang Heng's seismoscope[M]. Beijing: Seismological Press, 2019
- [6] 谢毓寿. 云南中东部的地震活动与表面断裂[J]. 地球物理学报, 1958, 7(1): 31-40
Xie Y S. The seismicity and surface faulting of central eastern Yunnan[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1958, 7(1): 31-40
- [7] 梅世蓉. 中国的地震活动性[J]. 地球物理学报, 1960, 9(1): 1-19
Mei S R. Seismic activity in China[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1960, 9(1): 1-19
- [8] 袁道阳, 雷中生, 王爱国. 1654 年甘肃天水南 8 级地震补充考证[J]. 地震工程学报, 2017, 39(3): 509-520
Yuan D Y, Lei Z S, Wang A G. Additional textual criticism of southern Tianshui M8 earthquake in Gansu Province in 1654[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2017, 39(3): 509-520
- [9] 袁道阳, 雷中生, 杨青云, 等. 1879 年甘肃武都南 8 级地震的震灾特征[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2014, 50(5): 611-621
Yuan D Y, Lei Z S, Yang Q Y, et al. Seismic disaster features of the 1879 southern Wudu M8 earthquake in Gansu Province[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2014, 50(5): 611-621
- [10] 徐锡伟, 闻学泽, 陈桂华, 等. 巴颜喀拉地块东部龙日坝断裂带的发现及其大地构造意义[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38(5): 529-542
Xu X W, Wen X Z, Chen G H, et al. Discovery of the Longriba fault zone in eastern Bayan Har block, China and its tectonic implication[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, 51(9): 1209-1223
- [11] 高锐, 郭晓玉, 王海燕, 等. 青藏高原东缘龙日坝断裂带: 位于松潘地块和扬子块体之间的一条重要构造边界——深地震反射剖面的揭露[C]//2014 年中国地球科学联合学术年会论文集. 2014: 2694
Gao R, Guo X Y, Wang H Y, et al. Longriba fracture zone in the eastern part of Tibetan Plateau: An important tectonic boundary between Songpan and Yangzi crustal blocks—result from deep seismic sounding[C]//Proceedings of the 2014 China Earth Science Joint Academic Annual Conference. 2014: 2694
- [12] 张新彦, 高锐, 白志明, 等. 阿坝—遂宁宽角地震剖面重建藏东缘龙门山地区地壳速度结构[J]. 地球物理学报, 2017, 60(6): 2200-2212
Zhang X Y, Gao R, Bai Z M, et al. Crustal structure beneath the Longmenshan area in eastern Tibet: New constraints from reprocessing wide-angle seismic data of the Aba-Longmenshan-Suining profile[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(6): 2200-2212
- [13] 闻学泽. 巴颜喀拉块体东边界千年破裂历史与 2008 年汶川、2013 年芦山和 2017 年九寨沟地震[J]. 地震学报, 2018, 40(3): 255-267
Wen X Z. The 2008 Wenchuan, 2013 Lushan and 2017 Jiuzhaigou earthquakes, Sichuan, in the last more than one thousand years of rupture history of the eastern margin of the Bayan Har block[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2018, 40(3): 255-267
- [14] 曲延军, 王海涛, 邬成栋, 等. 中国大陆地震空区统计特征分析[J]. 地震学报, 2010, 32(5): 544-556
Qu Y J, Wang H T, Wu C D, et al. Analysis on statistic characteristics of seismic gap in Chinese mainland[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2010, 32(5): 544-556
- [15] 梅世蓉. 地震前兆场物理模式及前兆分布特征与机制研究进展[J]. 地震, 1995, 15(增刊 1): 2-22

- Mei S R. Development of research on the physical model of earthquake precursor field and the mechanism of precursors' time-space distribution[J]. Earthquake, 1995, 15(S1): 2-22
- [16] 汪一鹏, 马瑾, 李传友. 南北地震带强震迁移特征及其与南亚地震带的联系[J]. 地震地质, 2007, 29(1): 1-14
Wang Y P, Ma J, Li C Y. The migration characteristics of strong earthquakes on the North-South Seismic Belt and its relation with the South Asia seismic belt[J]. Seismology and Geology, 2007, 29(1): 1-14
- [17] 梅世蓉, 冯德益. 中国地震预报概论[M]. 北京: 地震出版社, 1993
Mei S R, Feng D Y. Introduction to earthquake prediction in China[M]. Beijing: Seismological Press, 1993
- [18] 周少辉, 蒋海昆. 前震研究进展综述[J]. 地震, 2016, 36(3): 1-13
Zhou S H, Jiang H K. A review of foreshock research[J]. Earthquake, 2016, 36(3): 1-13
- [19] 陈颢, 刘杰, 杨文. 前震序列的图像特征研究[J]. 中国地震, 2015, 31(2): 177-187
Chen Y, Liu J, Yang W. Pattern characteristics of foreshock sequences[J]. Earthquake Research in China, 2015, 31(2): 177-187
- [20] 薛艳, 梅世蓉. 唐山大震前后一般震群与前兆震群时空演化特征研究[J]. 地震, 1999, 19(2): 183-189
Xue Y, Mei S R. The spatio-temporal evolution characteristics of general earthquake swarms and precursory swarms before and after the Tangshan earthquake[J]. Earthquake, 1999, 19(2): 183-189
- [21] 薛艳, 陈琳荣, 黎明晓, 等. 华北地区震群活动与强震[J]. 华北地震科学, 2017, 35(2): 1-9
Xue Y, Chen L R, Li M X, et al. Relationship between earthquake swarms and the strong earthquake in North China[J]. North China Earthquake Sciences, 2017, 35(2): 1-9