

沈正康. 2021. 卫星大地测量用于东亚大陆地球动力学与地震学研究回顾. 地球物理学报, 64(10):3514-3520, doi:10.6038/cjg2021P0541.

Shen Z K. 2021. Satellite geodesy applied to geodynamic and seismological studies in East Asia: A review. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 64(10):3514-3520, doi:10.6038/cjg2021P0541.

卫星大地测量用于东亚大陆地球动力学与地震学研究回顾

沈正康

北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

摘要 王仁先生是中国地球动力学研究的开创者,他所引领的有关潮汐和板块运动造成的地壳应力场演化研究使得有关活动构造、断层形变和地震危险性的研究从定性走向定量,并在过去半个世纪中不断丰富发展.卫星大地测量方法从 20 世纪 80 年代开始用于精密定位和运动测量,为地球动力学和地震学研究提供了不可缺少的观测资料,极大促进了相关学科的发展.本文结合本人研究经历回顾卫星大地测量方法用于东亚大陆地球动力学、地震构造学和地震物理过程研究带来的一些重要发现,作为对王仁先生在相关领域开创性贡献的纪念.

关键词 卫星大地测量; 地球动力学; 地震学; 东亚大陆; 回顾

doi:10.6038/cjg2021P0541

中图分类号 P541, P228

收稿日期 2021-07-29, 2021-09-15 收修定稿

Satellite geodesy applied to geodynamic and seismological studies in East Asia: A review

SHEN ZhengKang

School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract Dr. Wang Ren was the pioneer of geodynamic research in China. He led a series of groundbreaking studies on crustal stress evolution induced by Earth tides and tectonic plate motions, which promoted quantitative analyses in the fields of tectonic deformation, fault zone dynamics, and earthquake potential, which have gained great advancement in the past half century. Starting from the 1980s methods of satellite geodesy have been used for precise positioning and deformation measurements, which have provided vitally important observations for and facilitated the growth of the geodynamic and seismological research. In this paper, based partially on my own research experience, I review some of the important discoveries achieved during the journey of applying satellite geodesy to the studies of geodynamics, seismo-tectonics, and earthquake physical processes in East Asia, to commemorate groundbreaking contributions of Dr. Wang Ren in these fields.

Keywords Satellite geodesy; Geodynamics; Seismology; East Asia; Review

0 引言

科学发展史上经常有这样的故事,某种全新的观测手段的发明带来全新的观测结果,引发相关科学领域的一场革命.这样的例子有光栅的发明催生了波动光学,而显微镜的发明使人们认识全新的微生物世界.这种观测手段引发革命的事例在科学发展的今天仍时有发生,每一次都会对学科的发展产生巨大推动.20世纪晚期开始发展的卫星大地测量就是这样一种发明,它的发展和完善催生了地学研究领域的一场革命.

卫星大地测量技术主要包括二类,其一是全球导航服务系统(GNSS),另一类是合成孔径雷达(SAR).由GNSS技术进一步发展出精密卫星定位,如全球定位系统(GPS),在20世纪80年代开始用于地壳形变场监测;由SAR技术进一步发展起来的合成孔径雷达干涉测量技术(InSAR)在20世纪90年代开始用于地壳形变场观测.GPS可以实现测站三维精确定位,精度达到毫米级;一经应用就在不同时空尺度的构造形变场监测中发挥重要作用:从长期监测的全球板块运动,区域构造变形和断裂带震间形变,到覆盖不同频段的地震破裂过程监测;从地震波记录,同震形变场,到震后形变过程(Segall and Davis, 1997).而InSAR可以在没有地面观测设备的情况下,实现二维空间在一定空间格网内(米级尺度)沿雷达视线向(LOS)的形变量测,精度可达到厘米级(Bürgmann et al., 2000),观测时间间隔从早期的35天(ERS与Envisat卫星)到如今的6~12天,甚至更短(如Sentinel-1系列卫星).随着SAR卫星高精度观测数据的不断累积,InSAR形变场监测从早期的以同震变形测量为主,逐渐扩展到如今包括震间形变和震后形变等地震周期中的多个阶段.

王仁先生从20世纪70年代起开创了地震构造学和地球动力学研究的新方向(王仁,1977),尝试通过严格的力学分析对一系列地球动力学和地震学问题给出答案.但是受观测资料所限,许多问题在当时难以得到广泛验证.而运用卫星大地测量方法对地壳形变场进行精密时空观测,可以为地震学与地球动力学研究提供至关重要的观测资料,促进学科发展到一个新的时代.对于东亚地区来说,由于印度与欧亚板块的碰撞造成青藏高原的隆升和周边地区的大范围变形,其奇特的构造地貌与强烈的变形使得

东亚大陆成为地学界广泛关注的大陆动力学研究的重要实验场与研究焦点,强烈的地震活动也使得该地区成为地震学与构造物理学研究的前沿,研究成果具有强烈的社会意义.本文谨以我所经历的GPS与InSAR方法用于东亚大陆地震学与地球动力学研究的历史作一个简略的回顾.

1 板块运动学研究

板块运动学说是地学领域的一场革命.引领这一场革命的实现是来自海底地貌、古地磁和俯冲带地震的观测结果.由此获得的板块运动模型给出了全球各大板块在地质时间尺度(百万-千万年)的平均运动速率(NUVEL-1模型, DeMets et al., 1990, 1994).但是这一模型的精度不足以揭示其在不同时空尺度上的广泛适用性,如:地质时间尺度得到的模型是否仍然适用于描述现今地壳运动?此外,这一模型无法解释大陆内部的形变场,而这种形变场在部分大陆内部广泛存在,特别是东亚大陆.所以另一个需要回答的问题是:大陆内部不同尺度的次级块体是怎样运动的,与此相关的形变场是如何分布的?

针对欧亚板块的运动学问题,Shen等(2000, 2001)分析了20世纪90年代在东亚至欧洲大陆的GPS流动与连续观测数据,得到的结果表明:1)欧亚大陆北部构成稳定的刚性块体,覆盖从北欧到西伯利亚数千公里范围,其内部应变率在1 nano-strain/a左右或更低.2)印度板块相对欧亚板块运动速率 $\sim 36 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,这一结果比全球板块运动模型NUVEL-1的预测值要低 $\sim 6 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ (Shen et al., 2001),也被其后的GPS资料分析结果证实(如Sella et al., 2002).这一结果促使NUVEL-1模型的提出者对模型作进一步检验,发现原模型对于东非裂谷的运动估计存在误差,修正之后预期印度板块运动的结果与GPS结果相当一致(DeMets et al., 2010).这也说明在从东部非洲到西伯利亚数千公里尺度的板块运动中,地质与大地测量得到的结果相当一致.而进一步的GPS全球板块运动研究也表明,虽然存在一些例外,多数全球板块的运动在大的空间尺度上具有极高的稳定性(Sella et al., 2002).

从20世纪70年代起人们就认识到受到印度板块北向推挤,东亚大陆内部形变剧烈(Molnar and Tapponnier, 1975).但是形变究竟是如何分布的一直存在争议,特别是中国东部地区受到何种影响并

不清楚,这也使得相应的动力学机制争论不断持续. Shen 等(2001)借助区域 GPS 观测结果,首次发现:印度板块推挤造成中国大陆大范围的物质东向逃逸,在华南地区(以上海、武汉台站为代表)速率达到 $\sim 8 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,而进一步的研究表明中国大陆东部可以划分为东北、华北、华南三个活动地块,其东向逃逸速率由北向南逐步增加,从 $\sim 2 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, $\sim 5 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,到 $\sim 8 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,并同时伴有逆时针旋转(Calais et al., 2006; Wang and Shen, 2020). 这样的运动是东亚大陆与相邻印度、太平洋和菲律宾板块相互作用的结果,也为相应的动力学机制的研究提供重要约束.

青藏高原形变模式一直是人们争论的重要内容. Wang 等(2001)、Zhang 等(2004)、Gan 等(2007)等发现:形变在高原内部高度连续,在高原南部形成东向流动场,在东端形成绕东喜马拉雅构造结的大尺度顺时针旋转(Chen et al., 2000; Shen et al., 2005). 而印度板块对青藏高原的推挤不仅造成高原物质的东向逃逸,在玉树断裂与嘉黎断裂之间达到峰值 $\sim 20 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$;也造成物质的西向逃逸,在兴都—库什—帕米尔高原达到峰值 $\sim 6 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ (Wang and Shen, 2020). 这些结果揭示高原内部岩石圈介质极强的流变学特征,在印度板块的横向推挤和高原重力势作用下地壳物质产生的流滑响应.

2 断裂带活动性研究

在 GPS 被用于断裂带活动性研究以前,相关研究主要采用地质与传统大地测量方法. 传统大地测量的观测精度有限,并且误差随着观测距离增加而增大. 由于孕震断层的闭锁效应,观测断层错动需要跨越几十公里的断层弹性形变区,使得高精度的断裂带形变监测很难实现. GPS 方法的应用使得断裂带活动性监测现状得以改观,并且带来一系列中国大陆区域构造运动的全新认识. 主要有:

1) 阿尔金断裂带走滑运动. 作为青藏高原北缘的大型走滑断裂,阿尔金断裂的滑动速率一直受到强烈关注,并且被认为是判断青藏高原形变模式的关键证据之一:高滑移率被认为支持块体运动模式,而低滑移率符合连续形变模式. GPS 和 InSAR 观测获得的断裂带中段 $\sim 9 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 的错动率(Bendick et al., 2000; Shen et al., 2001; Elliott et al., 2008),可以认为是青藏高原有限大型块体运动模型的否定.

2) 张家口—渤海地震带(张渤带)现今构造变

形. 在应用 GPS 方法研究华北地区构造形变场之前,人们的一般认识是该地区构造活动由一系列走向北北东的走滑断裂所支配,如郯庐断裂、唐山—河间—磁县断裂等,一系列历史地震也发生在这些断裂带上. 走向北西西的张渤带虽然中小地震密集,但一般不认为它是一个主要构造边界. 而 Shen 等(2000)分析华北地区的 GPS 观测资料,没有发现北北东走向断层的明显活动,但发现跨张渤带存在 $\sim 2 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 的左旋走滑. 这一结果表明张渤带是中国东部地区活动性最强的块体边界,构成了东北(阿穆尔)块体与华北块体的边界,而不是传统活动地块模型认为的燕山北缘山前断裂作为两个块体的边界. 这一结果对于认知华北—东北地区的活动构造模型和形变模式以及相关的地震危险分析都有重大修正(张培震等,2003; Zhang et al., 2018; Wang and Shen, 2020).

3) 龙日坝断裂活动的发现. 在 GPS 方法用于青藏高原地壳形变场研究之前,人们知道青藏高原物质存在东向逃逸,但对于逃逸的方式、量级以及相关的结构并不清楚. Shen 等(2005)报告了一个新发现,在青藏高原东缘甘孜—玉树地块内存在一个走向北东的右旋剪切带,错动率 $\sim 5 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$. 其后的地质学研究证实这一剪切形变来源于龙日坝断裂带,并且找到其全新世活动痕迹(Xu et al., 2008). 区域构造运动分析表明青藏高原的东向逃逸分为南、北两部分;以甘孜—玉树断层为界,南部物质以鲜水河—小江断裂为外边界作顺时针旋转,最终融入印支北部高原;而北部物质沿龙日坝断裂向北东方向运动,驱动着高原东北缘向北东方向扩展及该区域一系列逆冲推覆构造的现今活动. 所以龙日坝断裂带构造活动的发现对于认识高原现今变形模式及机理有着十分关键的作用.

4) 青藏东南缘回转块体的发现. 在 GPS 方法用于青藏高原地壳形变场研究之前,普遍认为高原东南缘地区存在一个“川滇菱形块体”,构造运动围绕这个块体的周边发生. 块体的北边界和东边界是左旋走滑运动的鲜水河—安宁河—则木河—小江断裂带,块体的西南边界是右旋走滑运动的红河断裂带. GPS 观测给出了同传统认知很不一样的结果. Shen 等(2005)发现青藏高原东南缘物质相对华南地块作顺时针大回转,其回转外边界即是鲜水河—小江断裂系. 与传统认知不同的是,红河断裂活动性不强,其右旋走滑运动强度可能还不如其北面的南华—建水断裂和南面的无量山断裂. 而块体的回转运动造成红河断裂南向弯曲,其外边界由小江断裂穿过红

河断裂向西南方向偏转,形成包括莫边府断裂在内一系列左旋走滑断裂的形变带(王闫昭等,2008). Wang 和 Shen(2020)则进一步发现这一回转地块的内边界,包括嘉黎断裂、澜沧江断裂、怒江断裂、大盈江断裂、龙陵断裂等在内的右旋走滑运动边界. 这些结果有助于认识该地区构造运动的动力学机制,也有助于修正长期以来基于地质学研究获得的构造运动模型,区分历史构造运动与现今构造运动的区别;而这一点对于认识地震危险性,减轻地震灾害尤其重要.

5) 中国大陆现今活动块体的运动. 根据 GPS 资料分析获得了现今中国大陆块体运动的定量结果(如:王敏等,2003; Wang and Shen, 2020). 根据块体内部运动一致性与块体间运动差异性分析,可以认为青藏高原与天山以外的中国大陆可以分为东北、华北、华南、鄂尔多斯、塔里木和准噶尔 6 个活动地块. 这些地块内部相对稳定,形变主要发生在块体边界. 中国东部地块内部应变率一般在 ~ 1 nano-strain/a 范围;而华北地块具有其特殊性,由于独特的地理位置与边界作用,内部剪切形变较为强烈,应变率达到 ~ 2 nano-strain/a,引发断层和地震活动.

3 地震构造与物理机制研究

过去 30 年来 GPS(包括高频 GPS)和 InSAR 方法已经成为地震研究的有力武器. 通过观测地震发生过程中地表位移场的演化,人们可以反演同震破裂分布、震后的余滑过程与介质的弛豫形变,由此推断断裂带结构、介质力学性质、构造应力场的时空演化、地震的孕育与发生过程等,并对区域未来地震危险性做出评估. 这方面的典型研究案例如 2008 年的汶川地震. 由 GPS 和 InSAR 观测提供约束, Shen 等(2009)、Wang 等(2011)、Fielding 等(2013)和 Wan 等(2017)等反演了地震破裂断层的几何形态和破裂空间分布;结果显示断层存在明显的分段,各段之间存在空间错位,地震的发生表现为各段的梯次破裂,即克服断层段之间几何障碍体的级联破裂. 这一结果揭示了大陆内部类似龙门山断裂、兼具走滑分量的大型逆冲断裂发生大地震可能具有的特征;这类断裂构造一般具有分段性,各段之间形成几何障碍物,而大地震的发生需要突破这些障碍物,形成级联破裂. 所以障碍体的研究是研究大陆逆冲型大震发生方式和机制的重要内容,而现今空间大地测

量学(如 GPS 和 InSAR)为此提供了充分的数据约束.

4 地震震后形变与构造运动动力学机制研究

青藏高原地壳形变动力学机制一直是一个争论的话题,争议的焦点之一是下地壳与上地幔的形变方式以及它们与上地壳形变的耦合程度,例如是否存在下地壳流并且驱动着地壳形变. 这些问题的回答与下地壳上地幔介质流变学性质直接相关,而这些力学性质平时很难被观测到. 大地震的发生造成岩石圈内应力场的突然改变,由此激发下地壳与上地幔介质的弛豫形变. 这样的形变会造成地表位移,可以通过大地测量的方法观测到,并用来反演下地壳与上地幔的流变学性质. 21 世纪初在青藏高原及边缘发生的两个大震即为我们研究高原岩石圈流变学性质及构造运动动力学介质提供了机会.

2001 年在青藏高原北部东昆仑断裂发生了 $M_w 7.8$ 可可西里地震. 地震后人们通过 GPS 和 InSAR 进行了多年的震后形变观测,并用来反演岩石圈流变学结构(如 Ryder et al., 2011; Wen et al., 2012; 贺鹏超等,2018). 贺鹏超等(2018)结果表明断裂带两侧下地壳与上地幔介质黏滞系数有明显差异,北侧的柴达木盆地 1.5×10^{20} Pa·s 而南侧的巴颜喀拉—羌塘地区 1.5×10^{19} Pa·s,意味着巴颜喀拉—羌塘地区下地壳可能存在部分熔融,其地壳形变模式更趋近于塑性连续形变;而柴达木盆地形变场则包含更多弹性形变成分. 即便如此,研究区南部的巴颜喀拉—羌塘地区其下地壳介质长期黏滞系数比下地壳流模型所主张的黏滞系数高二三个数量级,表明下地壳流在本地区可能不存在.

类似的研究也在 2008 年汶川地震之后展开(如 Huang et al., 2014; Diao et al., 2018). Wang 等(2021)通过分析 GPS 观测得到震后形变场并用来约束岩石圈弛豫形变模型,结果表明青藏高原东缘的松潘—甘孜地区下地壳介质长期黏滞系数为 $\sim 5 \times 10^{18}$ Pa·s,上地幔介质黏滞系数为 $\sim 2 \times 10^{19}$ Pa·s,证实该地区介质力学性质符合“三明治”模型. 但下地壳介质流变学系数比下地壳流模型所主张的高二一个数量级,表明下地壳流在本地区可能不存在. 而形变模式表现为上地壳一系列共轭断裂的剪切形变和下地壳的连续塑性形变,共同吸收青藏高原东缘的东西向消减和南北向扩张.

5 构造应力场演化、强震迁移与地震危险性研究

20 世纪 70 年代王仁先生开创了用数值方法模拟华北地区过去 700 年构造应力场演化与强震迁移的研究,为地震危险性分析开辟了新的途径(王仁等,1980).从那以后相关领域的研究有了很大进展,其中卫星大地测量的观测也做出很大贡献,包括提供强震破裂分布、地震矩精确测量和长期构造加载的量化约束.这方面早期的工作有用力学方法模拟东昆仑断裂带上地震发生与构造应力场时空演化的关系及其地震危险性分析(沈正康等,2003),汶川地震造成的区域应力场变化及地震危险性分析(如 Parsons et al., 2008; Wan and Shen, 2010)等.更为深入的分析有:

1) 华北地区构造应力场演化与强震活动研究(沈正康等,2004).这一研究是二十多年后对于王仁等(1980)工作的更新.相较 1970 年代,计算硬件软件都有了极大的发展,通过 GPS 观测得到的地壳形变场也为更为精确的长期构造加载约束提供了可能.该研究采用黏弹性力学分层模型模拟构造应力场时空演化,用重新标定的历史地震地震矩与破裂量计算应力场的改变,考虑同震、震后与长期构造加载造成断裂带上库仑应力的变化.结果表明库仑应力的增加与后续地震的发生有很高的相关性(~80%),在此基础上对于未来地震危险性增加的地区做出判断.

2) 川滇地区构造应力场演化与地震危险性研究(Wang et al., 2015).区域地震危险性可以借助多种观测资料与分析方法进行分析,包括:a)与历史地震目录的空间相关性;b)与大地测量得到的地区应变率场的空间相关性;c)与断裂带上累积地震矩大小的相关性.该研究根据这三种方法,借助地震、地质和 GPS 观测资料和断层震间形变演化模型对川滇地区地震危险性进行评估.其中用到的应变率方法在美国南加州的地震预测实验中获得相当好的结果(Shen et al., 2007; Zechar et al., 2013),期待在川滇地区的应用在未来获得进一步的检验.

3) 紫坪铺水库蓄水对汶川地震触发作用研究(Tao et al., 2015).2008 年汶川地震造成重大灾难,而建在发震断层附近的紫坪铺水库于震前 2.7 年开始蓄水,其与本次地震的关系引起世人关注.基

于完全耦合孔隙弹性理论,利用三维有限元模型模拟水库蓄水造成的区域孔隙压力场和应力场的演化,结果显示紫坪铺水库蓄水形成孔隙压力梯度源并向周边地壳传播,造成龙门山断裂带上库仑应力增加且范围逐步扩大.影响由浅入深扩散到整条断层,尤其对浅层范围的加载作用明显,达数十千帕,等效~60—450 年的断层构造应力加载.综合分析认为汶川地震的发生有可能源于起始点的小震破裂,触发已接近破裂边缘的浅层断裂带大规模破裂,汶川地震可能与紫坪铺水库蓄水造成的间接触发作用有关.

6 结语

以上的回顾仅为卫星大地测量方法应用于东亚大陆地质研究中的一些成果,多与本人研究有关,有一定主观成分,并不全面.但是从中可以反映出地球动力学与地震学在该地区过去 30 年来取得的重大进展,谨以此作为对王仁先生的纪念.

致谢 感谢纪念王仁先生百年诞辰组委会的邀请,感谢多位合作者特别是王敏、张培震、孙建宝、万永革、王闫昭、陶玮等的学术贡献,感谢编辑与四位匿名评审的细致审阅、认真批改及建议,使得文章得到很大完善与提高.

References

- Bürgmann R, Rosen P A, Fielding E J. 2000. Synthetic aperture radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28: 169-209.
- Bendick R, Bilham R, Freymueller J, et al. 2000. Geodetic evidence for a low slip rate in the Altyn Tagh fault system. *Nature*, 404 (6773): 69-72.
- Calais E, Dong L, Wang M, et al. 2006. Continental deformation in Asia from a combined GPS solution. *Geophysical Research Letters*, 33 (24): L24319, doi: 10.1029/2006GL028433.
- Chen Z, Burchfiel B C, Liu Y, et al. 2000. Global Positioning System measurements from eastern Tibet and their implications for India/Eurasia intercontinental deformation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B7): 16215-16227.
- DeMets C, Gordon R G, Argus D F, et al. 1990. Current plate motions. *Geophysical Journal International*, 101(2): 425-478.
- DeMets C, Gordon R G, Argus D F, et al. 1994. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophysical Research Letters*, 21(20): 2191-2194.

- DeMets C, Gordon R G, Argus D F. 2010. Geologically current plate motions. *Geophysical Journal International*, 181(1): 1-80.
- Diao F Q, Wang R J, Wang Y B, et al. 2018. Fault behavior and lower crustal rheology inferred from the first seven years of postseismic GPS data after the 2008 Wenchuan earthquake. *Earth and Planetary Science Letters*, 495: 202-212.
- Elliott J R, Biggs J, Parsons B, et al. 2008. InSAR slip rate determination on the Altyn Tagh Fault, northern Tibet, in the presence of topographically correlated atmospheric delays. *Geophysical Research Letters*, 35(12): L12309, doi: 10.1029/2008GL033659.
- Fielding E J, Sladen A, Li Z H, et al. 2013. Kinematic fault slip evolution source models of the 2008 $M_{7.9}$ Wenchuan earthquake in China from SAR interferometry, GPS and teleseismic analysis and implications for Longmen Shan tectonics. *Geophysical Journal International*, 194(2): 1138-1166.
- Gan W J, Zhang P Z, Shen Z K, et al. 2007. Present-day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B8): B08416, doi: 10.1029/2005JB004120.
- He P C, Wang M, Wang Q, et al. 2018. Rheological structure of lithosphere in northern Tibet inferred from postseismic deformation modeling of the 2001 $M_{7.8}$ Kokoxili earthquake. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 61(2): 531-544, doi: 10.6038/cjg2018L0189.
- Huang M H, Bürgmann R, Freed A M. 2014. Probing the lithospheric rheology across the eastern margin of the Tibetan Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 396: 88-96.
- Molnar P, Tapponnier P. 1975. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision. *Science*, 189(4201): 419-426.
- Parsons T, Ji C, Kirby E. 2008. Stress changes from the 2008 Wenchuan earthquake and increased hazard in the Sichuan basin. *Nature*, 454(7203): 509-510.
- Ryder I, Bürgmann R, Pollitz F. 2011. Lower crustal relaxation beneath the Tibetan Plateau and Qaidam Basin following the 2001 Kokoxili earthquake. *Geophysical Journal International*, 187(2): 613-630.
- Segall P, Davis J L. 1997. GPS applications for geodynamics and earthquake studies. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 25: 301-336.
- Sella G F, Dixon T H, Mao A L. 2002. REVEL: A model for recent plate velocities from space geodesy. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B4): ETG-11-1-ETG 11-30.
- Shen Z K, Zhao C K, Li A, et al. 2000. Contemporary crustal deformation in East Asia constrained by global positioning system measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B3): 5721-5734.
- Shen Z K, Wang M, Li Y X, et al. 2001. Crustal deformation along the Altyn Tagh fault system, western China, from GPS. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106(B12): 30607-30621.
- Shen Z K, Wan Y G, Gan W J, et al. 2003. Viscoelastic triggering among large earthquakes along the East Kunlun fault system. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 46(6): 786-795.
- Shen Z K, Wan Y G, Gan W J, et al. 2004. Crustal stress evolution of the last 700 years in North China and earthquake occurrence. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 20(3): 211-228.
- Shen Z K, Lv J N, Wang M, et al. 2005. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan plateau. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(B11): B11409, doi: 10.1029/2004JB003421.
- Shen Z K, Jackson D D, Kagan Y Y. 2007. Implications of geodetic strain rate for future earthquakes, with a five-year forecast of M_5 earthquakes in Southern California. *Seismological Research Letters*, 78(1): 116-120.
- Shen Z K, Sun J B, Zhang P Z, et al. 2009. Slip maxima at fault junctions and rupturing of barriers during the 2008 Wenchuan earthquake. *Nature Geoscience*, 2(10): 718-724.
- Tao W, Masterlark T, Shen Z K, et al. 2015. Impoundment of the Zipingpu reservoir and triggering of the 2008 $M_{7.9}$ Wenchuan earthquake, China. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(10): 7033-7047.
- Wan Y G, Shen Z K. 2010. Static Coulomb stress changes on faults caused by the 2008 $M_{7.9}$ Wenchuan, China earthquake. *Tectonophysics*, 491(1-4): 105-118, doi: 10.1016/j.tecto.2010.03.017.
- Wan Y G, Shen Z K, Bürgmann R, et al. 2017. Fault geometry and slip distribution of the 2008 $M_{7.9}$ Wenchuan, China earthquake, inferred from GPS and InSAR measurements. *Geophysical Journal International*, 208(2): 748-766.
- Wang F, Wang M, Wang Y Z, et al. 2015. Earthquake potential of the Sichuan-Yunnan region, western China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 107: 232-243, doi: 10.1016/j.jseaes.2015.04.041.
- Wang M, Shen Z K, Niu Z J, et al. 2003. Contemporary crustal deformation of the Chinese continent and tectonic block model. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 46(S2): 25-40.
- Wang M, Shen Z K. 2020. Present-day crustal deformation of continental China derived from GPS and its tectonic implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(2): e2019JB018774, doi: 10.1029/2019JB018774.
- Wang M, Shen Z K, Wang Y Z, et al. 2021. Postseismic deformation of the 2008 Wenchuan earthquake illuminates lithospheric rheological structure and dynamics of eastern Tibet. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(9): e2021JB022399, doi: 10.1029/2021JB022399.
- Wang Q, Zhang P Z, Freymueller J T, et al. 2001. Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements. *Science*, 294(5542): 574-577.
- Wang Q, Qiao X J, Lan Q G, et al. 2011. Rupture of deep faults in the 2008 Wenchuan earthquake and uplift of the Longmen Shan. *Nature Geoscience*, 4(9): 634-640.
- Wang R. 1977. A few mechanical problems in earthquake prediction research. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics* (in Chinese), 13(3): 234-241.
- Wang R, He G Q, Yin Y Q, et al. 1980. The mathematical simulation for

- the pattern of seismic transference in North China. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2(1): 32-42.
- Wang Y Z, Wang E N, Shen Z K, et al. 2008. GPS-constrained inversion of present-day slip rates along major faults of the Sichuan-Yunnan region, China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 51(9): 1267-1283.
- Wen Y M, Li Z H, Xu C J, et al. 2012. Postseismic motion after the 2001 M_w 7.8 Kokoxili earthquake in Tibet observed by InSAR time series. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B8): B08405, doi: 10.1029/2011JB009043.
- Xu X W, Wen X Z, Chen G H, et al. 2008. Discovery of the Longriba fault zone in eastern Bayan Har block, China and its tectonic implication. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 51(9): 1209-1223.
- Zechar J D, Schorlemmer D, Werner M J, et al. 2013. Regional earthquake likelihood models I: First-order results. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(2A): 787-798.
- Zhang P Z, Deng Q D, Zhang G M, et al. 2003. Active tectonic blocks and strong earthquakes in the continent of China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 46(S2): 13-24.
- Zhang P Z, Shen Z K, Wang M, et al. 2004. Continuous deformation of the Tibetan plateau from global positioning system data. *Geology*, 32(9): 809-812.
- Zhang Y G, Zheng W J, Wang Y J, et al. 2018. Contemporary deformation of the North China plain from global positioning system data. *Geophysical Research Letters*, 45(4): 1851-1859.

附中文参考文献

- 贺鹏超, 王敏, 王琪等. 2008. 基于 2001 年 M_w 7.8 可可西里地震震后形变模拟研究藏北地区岩石圈流变学结构. *地球物理学报*, 61(2): 531-544, doi: 10.6038/cjg2018L0189.
- 沈正康, 万永革, 甘卫军等. 2003. 东昆仑活动断裂带大地震之间的黏弹性应力触发研究. *地球物理学报*, 46(6): 786-795.
- 沈正康, 万永革, 甘卫军等. 2004. 华北地区 700 年来地壳应力场演化与地震的关系研究. *中国地震*, 20(3): 211-228.
- 王敏, 沈正康, 牛之俊等. 2003. 现今中国大陆地壳运动与活动块体模型. *中国科学(D辑)*, 33(S1): 21-32.
- 王仁. 1977. 地震预报中提出的一些力学问题. *力学学报*, 13(3): 234-241.
- 王仁, 何国琦, 殷有泉等. 1980. 华北地区地震迁移规律的数学模拟. *地震学报*, 2(1): 32-42.
- 王闯昭, 王恩宁, 沈正康等. 2008. 基于 GPS 资料约束反演川滇地区主要断裂现今活动速率. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 38(5): 582-597.
- 张培震, 邓起东, 张国民等. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块. *中国科学(D辑)*, 33(S1): 12-20.

(本文编辑 何燕)