

赵斌,王敏,胡岩,等,2020. 中国及邻域强震震后变形监测及岩石流变性质研究. 中国地震,36(4):806~816.

中国及邻域强震震后变形监测 及岩石流变性质研究

赵斌¹⁾ 王敏²⁾ 胡岩³⁾ 王琪⁴⁾

1) 中国地震局地震研究所地震大地测量重点实验室,武汉 430071

2) 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室,北京 100029

3) 中国科学技术大学,地球和空间科学学院,合肥 230026

4) 中国地质大学(武汉),地球物理与空间信息学院,武汉 430074

摘要 大地测量技术观测的震后变形是地壳和地幔岩石对同震应力扰动的变形响应,震后变形的强度及时空演化特征主要受断层面的摩擦性质、下地壳及上地幔岩石的流变参数等控制。震后大地测量被广泛用于研究断层及深部岩石的流变性质及其动力学过程,是对岩石力学实验、冰后回弹等手段探测结果的检验和补充。本文回顾性地总结了我国及邻域中强地震震后变形监测成效,这些震例主要集中在青藏高原内部和边界带。通过对包括昆仑山口西地震、汶川地震和尼泊尔地震在内的发生在青藏高原及周缘的强震震后变形机制、岩石圈流变参数约束等方面的研究,大大提升了对青藏高原不同区域深部岩石流变结构和性质的认识,为研究地震周期变形、地震危险性、青藏高原的形变模式、高原演化动力学提供了观测依据和定量参数。同时,指出进一步约束青藏高原深部岩石流变参数,一方面需要进一步提高西部地区连续 GNSS 监测能力,另一方面需要与地球物理成像技术进行融合。

关键词: 大地测量 震后变形 岩石流变 青藏高原

[文章编号] 1001-4683(2020)04-0806-11 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

通常采用“岩石流变”描述地球内部岩石的应力-应变本构关系(Bürgmann et al, 2008)。岩石流变参数是研究绝大多数地球动力学问题的重要参数(石耀霖等, 2008),在一定程度上控制了全球板块运动(Ghosh et al, 2012)、区域构造运动(Chen et al, 2017)、冰后回弹(Milne et al, 2001)、地震周期变形(Barbot et al, 2012; Barbot, 2018)等不同空间尺度岩石的变形幅度、方向及时间演化过程。

采用微观尺度的岩石力学实验和宏观岩石圈尺度力学实验两类方法可获得岩石流变参数。但实验室岩石力学实验与天然岩石力学变形实验在时间尺度、空间尺度和应变等条件下差异甚大,延拓至地球岩石圈存在不确定性。大自然界岩石圈尺度的力学实验则是通过

[收稿日期] 2020-07-31; [修定日期] 2020-09-15

[项目类别] 国家自然科学基金(42074116)资助

[作者简介] 赵斌,男,1981年生,博士,副研究员,主要从事地震大地测量学相关研究。E-mail: zhaobin@cgps.ac.cn

观测岩石对应力扰动的形变或重力响应(重力不属于本文的论述范围),进而约束岩石的流变性质,是对实验室结果的检验和有益补充。天然的应力扰动主要包括同震应力扰动(Hu et al, 2016; Moore et al, 2017)、负荷质量变化(冰川融化、季节性水负荷)(Milne et al, 2001; Chanard et al, 2018; Shi et al, 2015)以及天体对地球的引潮力。季节性负荷变化和引潮力由于应力小、周期短,则更多地反映地球岩石的弹性属性,黏弹性的贡献比较微弱。通常采用震后形变和冰后回弹约束深部岩石的黏弹性参数。本文主要介绍利用震后变形资料研究岩石流变性质的观测和模型。

震后形变的物理机理主要包括同震应力变化驱动的摩擦余滑、同震应力扰动激发下地壳和上地幔物质流动引起的黏弹性应力松弛以及地壳浅部孔隙水压再平衡引起的弹性回弹(Zhao et al, 2017),如图 1 所示。由于孔隙弹性回弹量级较小,且主要发生在破裂区域附近(Jónsson et al, 2003),通常忽略不计。因此,震后形变的动力过程主要与断层面速率增强区域的摩擦参数($a-b$)(Marone, 1998)和深部介质的黏滞系数及几何结构有关(Agata et al, 2019),震后大地测量资料可以用来约束断层面摩擦参数以及下地壳和上地幔岩石的流变参数。

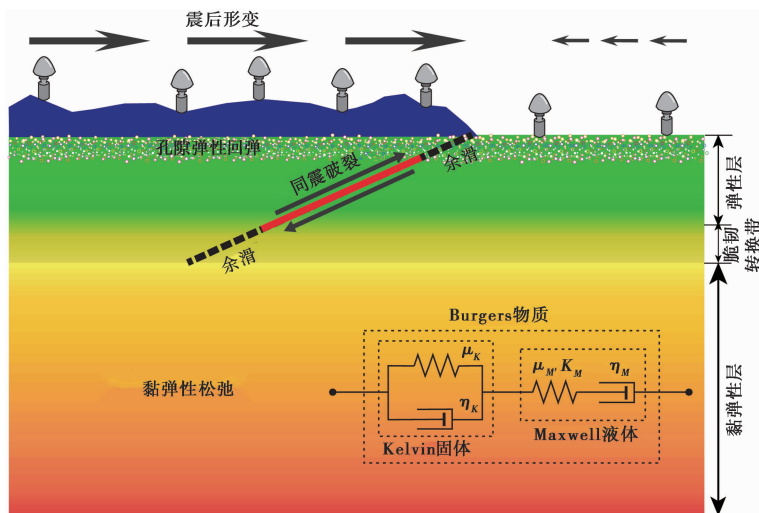


图 1 震后变形机制及空间大地测量监测示意图(以逆冲地震为例)

本文回顾中国及邻域中强地震震后变形监测情况,重点总结 2001 年昆仑山口西 $M_w 7.8$ 、2008 年汶川 $M_w 7.9$ 和 2015 年廓尔喀 $M_w 7.8$ 大地震的震后位移场及动力学机制。此外,作为特例,还将展示 2011 年日本宫城 $M_w 9.0$ 特大地震对中国大陆东北和华北地区的震后形变影响。在此基础上,对震后形变资料约束的青藏高原内部及边界带岩石流变性质进行总结,并指出未来监测研究发展之路。

1 中国及邻域强震震后变形监测

以 20 世纪 90 年代为界,中国地壳形变监测大致划分为传统大地测量和空间大地测量两个时代。传统大地测量时代,由于测点稀疏、精度低、复测周期长等原因,有震后形变监测



记录的震例寥寥,制约了对震后形变物理机制及岩石流变属性的深入研究。具有较高科研价值的资料当属 1973 年四川炉霍 $M_s7.5$ 地震后布设在鲜水河断裂带的跨断层短基线、短水准以及蠕变仪观测,成功记录了震后形变呈对数衰减的信号(杜方等,2010)。1990 年共和地震后,水准观测也成功记录到震后垂向位移随时间的变化(Hao et al,2012)。

空间大地测量时代,中国大陆及邻区相继发生 $M>5.0$ 地震 60 余次,尽管有部分地震资料稀疏残缺,不足以约束较为精细的同震滑动模型,但均有 GPS 或 InSAR 同震资料。其中仅有 1/6 的地震观测到震后变形,主要集中在青藏高原内部及其边界(表 1)。论震后形变观测资料的丰富性,尤以 2001 年昆仑山口西地震、2008 年汶川地震和 2015 年廓尔喀地震最具代表性,这 3 次大地震对研究青藏高原边界及其内部的岩石圈流变性质起到了重要作用。值得一提的是,中国境内的 GPS 网络还监测到日本宫城 $M_w9.0$ 特大地震在东北和华北地区产生的远场震后形变,对认识西太平洋板块俯冲中国大陆及其对区域动力学背景具有重要意义(Hu et al,2016)。

表 1 中国及领域中强震震后形变监测情况

时间(年)	地震名	震级	地震类型	观测资料	震后形变机理
1973	炉霍	$M_s7.5$	走滑	短基线、短水准	浅部余滑
1990	共和	$M_w6.4$	逆冲	水准	黏弹性松弛
1997	尼玛	$M_w7.6$	走滑	InSAR	余滑+黏弹性松弛
1999	集集	$M_w7.9$	逆冲	GPS	余滑+黏弹性松弛
2001	昆仑山口西	$M_w7.8$	走滑	GPS、InSAR	余滑+黏弹性松弛
2004	苏门答腊	$M_w9.2$	俯冲	GPS	余滑+黏弹性松弛
2008	汶川	$M_w7.9$	逆冲兼走滑	GPS、InSAR	余滑+黏弹性松弛
2008	当雄	$M_w6.3$	正断	InSAR	余滑+黏弹性松弛
2008	改则	$M_s6.4$	正断	InSAR	余滑
2010	玉树	$M_w7.0$	走滑	GPS	余滑
2011	宫城	$M_w9.0$	俯冲	GPS	余滑+黏弹性松弛
2013	芦山	$M_w6.6$	逆冲	GPS	黏弹性松弛
2015	廓尔喀	$M_w7.8$	逆冲	GPS、InSAR	余滑+黏弹性松弛

1.1 青藏高原震后变形监测

(1) 昆仑山口西地震。2001 年昆仑山口西 $M_w7.8$ 地震是中国大陆地壳运动构造网络(简称“网络工程”)建成后首次发生的大地震。“网络工程”GPS 测站主要沿着青藏公路布设,仅有 10 个左右 GPS 测站监测到震后变形。震后加密观测大大改善了该区域的 GPS 监控能力(贺鹏超等,2018;Liu et al,2019),但也仅覆盖了地震地表破裂约一半长度。图 2(a)显示昆仑山断裂带南、北两侧震后形变不对称(Ryder et al,2010;贺鹏超等,2018;Liu et al,2019)。还有学者采用欧洲航天局 C 波段 Envisat 卫星资料获取了整个断裂带的 InSAR 视线向震后形变,弥补了 GPS 空间覆盖不足的缺陷(Ryder et al,2011;Wen et al,2012)。

(2) 汶川地震。得益于“网络工程”和中国大陆构造环境监测网络(简称“陆态网络”)在龙门山地区的布网,汶川地震震后 GPS 数据量比昆仑山口西地震有很大提升。四川省 CORS 网络及临时加密观测资料进一步改善了 GPS 监测密度,尤其是近场变形较大的区域。



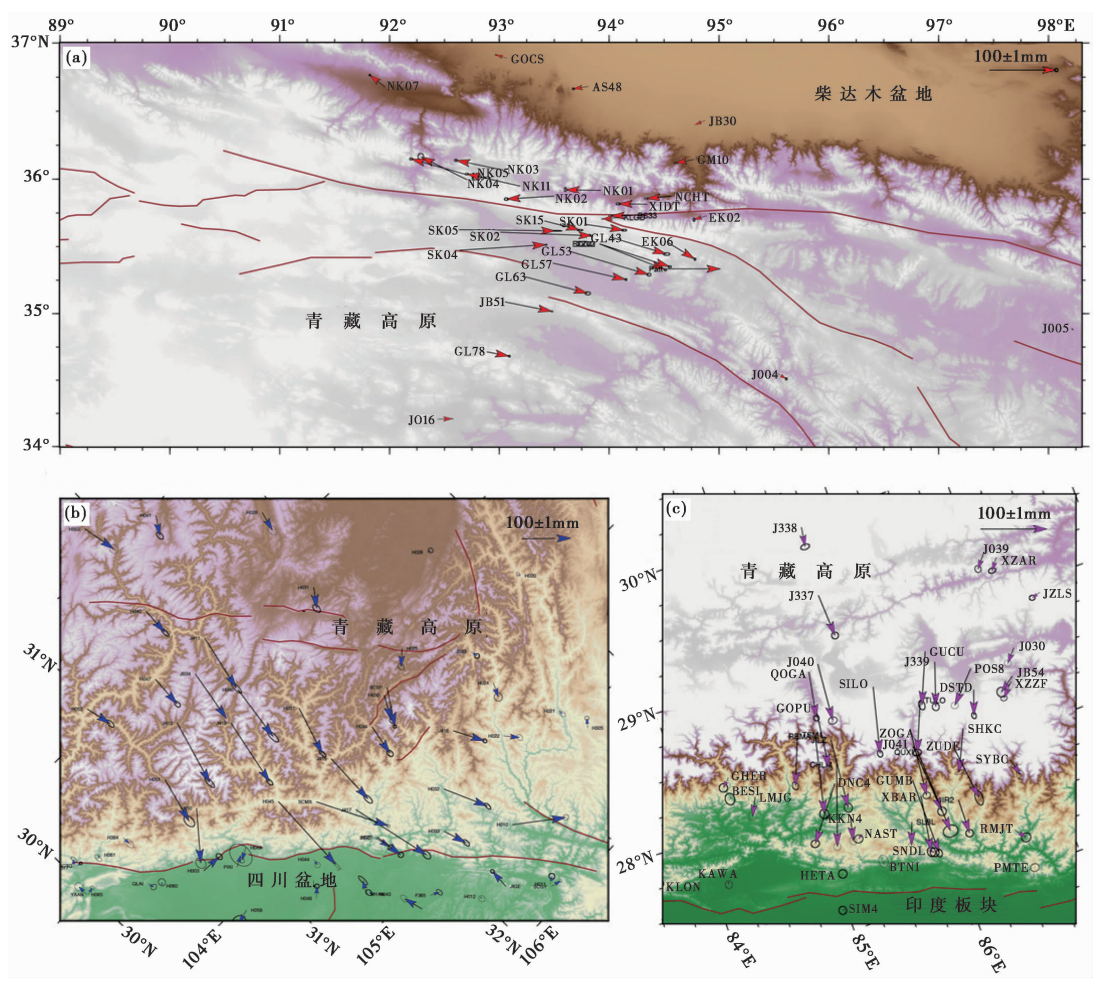


图 2 青藏高原地区震后形变场
(a) 昆仑山地震震后 1 年形变场(贺鹏超等,2018);(b) 汶川地震震后 10 年形变场;(c) 廓尔喀地震震后 4 年形变场

汶川地震震后形变范围广,龙门山断裂带以西 360km 范围均可分辨出震后变形信号。震后变形继承了同震的基本形态。断层两侧震后形变幅度差异显著,震后 10 年四川盆地地震后形变小于 4cm,而川西高原最大位移接近 20cm(图 2(b))。除 GPS 外,温扬茂等(2014)和 Huang 等(2014)还采用 ALOS 影像获取了震后 InSAR 地表形变场,丰富了震后形变资料。

(3)廓尔喀地震。2015 年廓尔喀地震是继 2005 年喀什米尔地震之后发生在喜马拉雅逆冲带的又一次强震。尽管地震破裂发生在尼泊尔境内,但无论同震还是震后变形均对中国藏南地区广大范围产生影响。尼泊尔和中国藏南的 GPS 站较为完整地监测到震后形变演化图像。图 2(c)显示震后变形最大值主要发生在中尼边界,震后 5 年可达 8cm。Wang 等(2018)和 Ingleby 等(2020)分别采用哨兵卫星影像处理了震后 2 年和震后半年的 InSAR 时间序列,显示同震破裂以北的区域存在明显的震后变形。

1.2 日本宫城大地震远场震后变形

中国大陆构造环境监测网络基准站、区域站和省域 GPS 连续站不但精确测定了日本宫

城 $M_w 9.0$ 地震在中国造成的远场同震位移场,还在东北和华北地区监测到明显的震后变形信号(图 3),这是迄今为止观测到的最明显的远场震后变形场之一。震后位移矢量指向震源位置,靠近中国边境的 GPS 站 2011~2013 年的震后平均速率为 $5 \sim 10 \text{ mm/a}$, 2013~2015 年平均速率减小为 $2 \sim 6 \text{ mm/a}$ 。

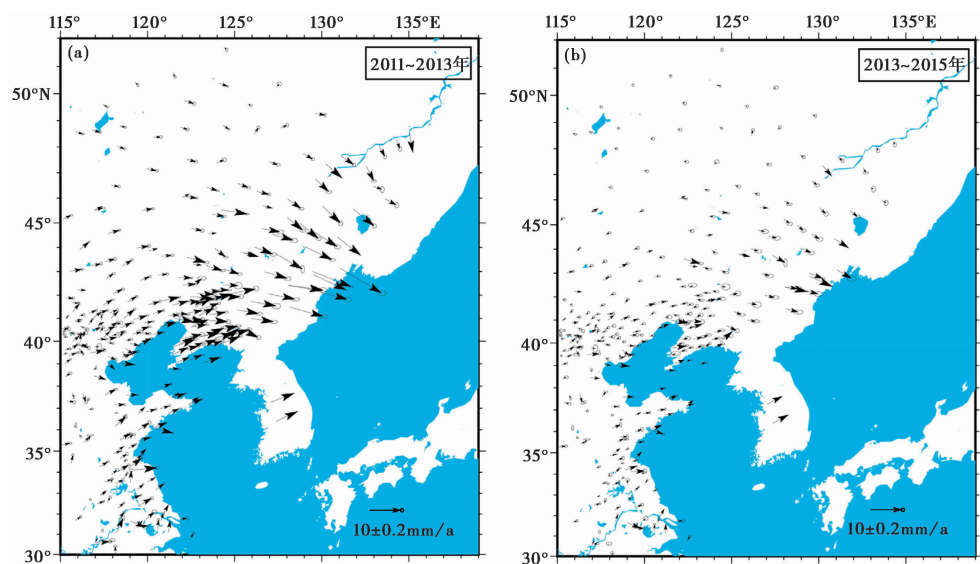


图 3 2011 年日本宫城 $M_w 9.0$ 特大地震在中国东北和华北震后平均速率

2 青藏高原边界及内部岩石流变参数

印度板块与欧亚板块俯冲碰撞是新生代以来最重要的地质事件之一,围绕青藏高原的隆升机制、形变模式、岩石圈强度等基础科学问题,发展了不同的学说和理论,具有影响力和代表性的模型为下地壳隧道流学说(Royden et al, 1997; Clark et al, 2000)。地球物理观测结果推测青藏高原存在低速、低导、高热层(Liu et al, 2014; Zhao et al, 2012),为该学说提供了佐证。基于震后变形资料约束的深部岩石的黏滞系数可以进一步检验该学说。

2.1 青藏高原北部

1997 年玛尼 $M_w 7.6$ 地震是中国大陆首次采用 InSAR 资料研究震后变形的震例,该研究由国外学者主导。Ryder 等(2007)发现震后余滑和黏弹性松弛均可以解释 InSAR 资料,如果只考虑黏弹性松弛的贡献,约束的中、下地壳的黏滞系数为 $4 \times 10^{18} \text{ Pas}$,并指出有效黏滞系数随时间变大才能解释观测值。Yamasaki 等(2012)采用相同的资料研究,认为黏滞系数随深度增加而变小,符合幂律流变定律。2001 年昆山口西地震位于玛尼地震以东约 250km,是中国大陆首次有翔实 GPS 和 InSAR 震后形变资料的大地震。震后数值模拟显示仅用 InSAR 资料难以区分震后余滑和黏弹性松弛效应的贡献(Wen et al, 2012),靠近断层的 GPS 资料需要考虑断层面的余滑(Ryder et al, 2011)。更长时间的资料表明中、下地壳有效黏滞系数由震后 2 年的 10^{18} Pas 增加到现在的 10^{19} Pas (Liu et al, 2019)。研究还表明柴达木盆地与藏北的流变结构存在横向差异(Ryder et al, 2011; Liu et al, 2019; 贺鹏超等, 2018)。

2.2 青藏高原东部

汶川地震震后形变模拟显示震后变形由黏弹性松弛效应主导,主要控制中、远场的形变,而发生在同震破裂下倾与滑脱层交汇区域的无震滑移则控制近场变形(Diao et al, 2018; Huang et al, 2014; 赵斌, 2017)。震后 2~7 年的观测模拟显示川西高原中、下地壳的稳态黏滞系数为 10^{18} Pas, 比四川盆地(大于 10^{20} Pas)低 1~2 个数量级。不同学者约束的中、下地壳黏滞系数存在一定差异,总体上,早期资料约束值偏小(Shao et al, 2011),而长时间的资料探测值略有增大(Diao et al, 2018; Huang et al, 2014; 余建胜等, 2018),符合有效黏滞系数随时间变大的认识(Thatcher 等, 2008)。发生在龙门山断裂带南端的芦山 M_w 6.6 地震为研究该区域岩石流变参数提供了新的机会, Wang 等(2019)研究发现,在忽略断层面余滑作用情况下约束的川西高原中、下地壳黏滞系数与汶川地震分析结果相当。2017 年九寨沟地震震后 1 年的 GPS 和 InSAR 均未观测到可靠的震后变形信号,推测该发震断层发育尚不成熟(Li et al, 2020)。

2.3 青藏高原中南部

2005 年喀什米尔地震发生在喜马拉雅逆冲构造带的西端,该区域构造环境复杂。Bendick 等(2015)根据地形地貌特征,推测区域岩石圈流变结构存在横向差异,震后形变数值模拟验证了此猜测。由于观测资料的限制,不同研究人员认为岩石流变参数的约束存在较大不确定型,并存在一定差异(Wang et al, 2014; Bendick et al, 2015)。2015 年廓尔喀地震吸引了国内外若干团队开展震后变形机制和岩石流变的相关研究,迄今已发表 10 余篇论文。这些研究结果均显示该地震震后变形以断层下倾方向的余滑为主(Gualandi et al, 2017),上倾区域仍处于闭锁状态。Zhao 等(2017)联合藏南 GPS 观测资料,首次提出藏南地区慢黏弹性松弛即使在震后早期也在起作用,并分析得到印度-藏南黏滞系数存在明显的横向差异,与青藏高原东缘具有相似型(Huang et al, 2014)。Tian 等(2020)分析了更长时间的资料,进一步证实黏弹性松弛效应对藏南中远场形变的控制,约束的藏南下地壳稳态黏滞系数为 5×10^{18} Pas。值得说明的是,基于震后形变资料还约束了主逆冲断裂在速率强化区域的摩擦参数(Wang et al, 2018; Ingleby et al, 2020; Liu-Zeng et al, 2020)。

除喜马拉雅边界带的逆冲型地震外,青藏高原中南部还经常发生中等强度的正断型和走滑兼正断型地震,基于 InSAR 资料的震后形变模拟,约束了 2008 年当雄和尼玛-改则地区中、下地壳的稳态黏滞系数在 $10^{18} \sim 10^{19}$ Pas 之间(Bie et al, 2014; Ryder et al, 2010, 2014)。

3 科学成果与挑战

3.1 取得的成果

20 余年来,以 GPS 和 InSAR 为代表的空间大地测量技术极大地提升了我国地震震后变形的监测能力。已观测的 10 余次震例丰富了对大陆岩石圈流变结构、地震周期变形等问题的认识。其一,初步刻画了青藏高原边界带岩石圈流变结构的横向差异性及其与地形地貌的相关性(图 4)。例如,环绕青藏高原的印度板块、四川盆地和柴达木盆地海拔高程比青藏高原低数千米,而下地壳黏滞系数则比高原内部高 1~2 个量级。不同研究结果约束的青藏高原内部的黏滞系数存在一定差异,初步显示高原北部的黏滞系数略低,与基于温度模型和幂律流变率计算的结果基本吻合(张晔军等, 2008)。其二,震后形变观测及模拟提供了数年

至数十年时间尺度岩石圈强度和流变参数的约束,填补了地震破裂(数十秒)与冰后回弹(数千年)时间尺度的范围,进一步证实黏滞系数对时间和应力的依赖性,在震后变形数值建模时既要考虑震后早期的瞬态变化,也要考虑震后晚期的稳态变化,分别对应瞬态黏滞系数和稳态黏滞系数。其三,震后形变观测资料不但约束了下地壳和上地幔岩石黏滞系数,还约束了断层面速率强化区域的摩擦参数,为地震周期形变的动力学模型提供了重要的参数。以此建立的动力学模型更适用于分析地震的失稳破裂、震后变形、震间应变积累的物理机制,探索断层面应力的迁移演化和地震应力触发机制,为地震危险性判定提供依据。

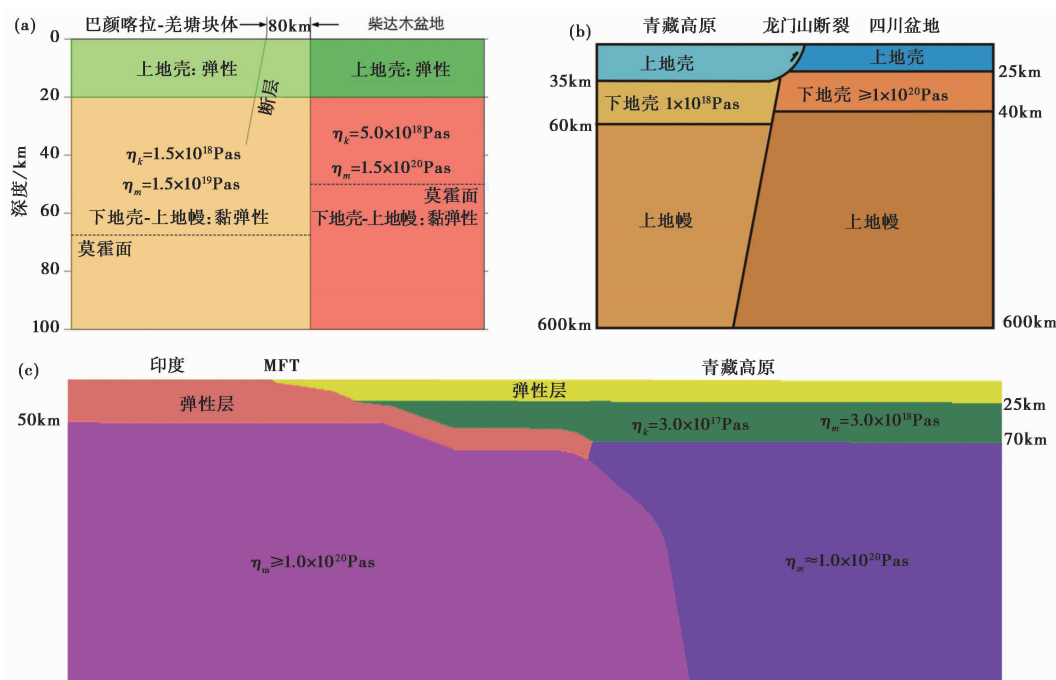


图 4 大地测量约束的青藏高原岩石圈流变结构示意图

(a) 青藏高原北部昆仑山口西地震区域(据贺鹏超等(2018));(b) 青藏高原东缘汶川地震区域(据 Diao 等(2018));(c) 青藏高原南部尼泊尔地震区域; η_k 和 η_m 分别表示瞬态黏滞系数和稳态黏滞系数

3.2 存在的问题

震后形变物理机制的复杂性决定了采用该方法研究岩石流变性质时,必须厘清断层面摩擦余滑和深部岩石黏弹性松弛对震后形变的耦合贡献,才可约束断层流变参数(摩擦参数)和深部岩石黏滞系数。相比冰后回弹或古湖泊水位变化等其他方法,该方法增加了问题的复杂性和约束结果的不确定性。其次,该方法仅适用于中国西部地震活动性强的区域,而对于华南地区或发震周期长的华北地区,则难以推广应用。此外,震后形变资料约束的黏滞系数在横向和纵向上相对均匀,通常仅能约束较为明显的横向差异,如川西高原与四川盆地、藏南与印度板块、藏北与柴达木盆地之间显著的流变结构差异。

3.3 未来与展望

远、近场覆盖完整、时间连续、高精度的三维形变场是研究震后形变机制、约束断层和岩石流变参数的基础。中国西部地区的 GNSS 监测网对 7 级左右的地震震后变形监测能力还

较弱,部分地区还存在监测盲区。以 1997 年玛尼地震为例,时至今日震源附近的 GNSS 测站仍非常稀缺。我国北斗卫星导航系统已全面建成,随着相关软、硬件产业的发展和观测精度的提升,建立低成本、高密度的地壳形变监测网络将大大提高震后变形的监测能力。

尽管实验室力学实验对不同岩石矿物聚合物的流变学研究存在局限性,然而采用幂律定律架起了连接宏观岩石力学实验(震后变形)和微观岩石力学实验的桥梁,可以深入认识青藏高原深部环境条件(含水量、温度结构)和岩石成分对岩石流变的影响。由于地震波速和大地电磁具有对岩性、含水、温度比较敏感的特性,Liu 等(2016)和 Shinevar 等(2018)分别采用大地电磁探测或地震波层析成像,通过“配准”的方法间接计算黏滞系数。通过采用震后大地测量资料对地球物理资料约束的黏滞系数进行校准以及联合反演有望获取较高空间分辨率的黏滞系数,为地震动力学、地球动力学研究提供更精细的流变结构。

4 结语

20 余年来,通过对发生在青藏高原内部及边界的 10 余次强震的震后形变监测,较为全面地显示了走滑、倾滑和正断 3 种地震破裂形式对应的震后变形场的基本特征,定量地展示了震后形变的时空变化图像,促进了震后形变机制、断层流变参数(摩擦参数)、岩石流变参数(黏滞系数)、地震周期变形物理机制等方面的研究。未来应进一步提高西部地区连续 GNSS 站的密度,并从震后变形动力学机制角度开展数值模拟,加强与地球物理深部探测结果的融合。

致谢: 感谢刁法启教授提供的图 4(b)中龙门山地区岩石圈流变结构图。

参考文献

- 杜方,闻学泽,张培震,2010. 鲜水河断裂带炉霍段的震后滑动与形变. 地球物理学报, **53**(10):2355~2366.
- 贺鹏超,王敏,王琪,等,2018. 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.
- 石耀霖,曹建玲,2008. 中国大陆岩石圈等效粘滞系数的计算和讨论. 地学前缘, **15**(3):82~95.
- 温扬茂,许才军,李振洪,等,2014. InSAR 约束下的 2008 年汶川地震同震和震后形变分析. 地球物理学报, **57**(6):1814~1824.
- 余建胜,赵斌,谭凯,等,2018. 汶川地震震后 GNSS 形变分析. 测绘学报, **47**(9):1196~1206.
- 张晔军,曹建玲,石耀霖,2018. 从震后形变探讨青藏高原下地壳黏滞系数. 中国科学:地球科学, **38**(10):1250~1257.
- 赵斌,2017. 利用震后 GPS 资料探测青藏高原东、南边界岩石圈流变结构. 博士学位论文. 武汉:武汉大学.
- Agata R, Barbot S D, Fujita K, et al, 2019. Rapid mantle flow with power-law creep explains deformation after the 2011 Tohoku mega-quake. Nat Commun, **10**(1):1385.
- Barbot S, 2018. Asthenosphere flow modulated by megathrust earthquake cycles. Geophys Res Lett, **45**(12):6018~6031.
- Barbot S, Lapusta N, Avouac J P, 2012. Under the hood of the earthquake machine: toward predictive modeling of the seismic cycle. Science, **336**(6082):707~710.
- Bendick R, Khan S F, Bürgmann R, et al, 2015. Postseismic relaxation in Kashmir and lateral variations in crustal architecture and materials. Geophys Res Lett, **42**(11):4375~4383.
- Bie L D, Ryder I, Nippres S E J, et al, 2014. Coseismic and post-seismic activity associated with the 2008 M_w 6.3 Damxung earthquake, Tibet, constrained by InSAR. Geophys J Int, **196**(2):788~803.
- Bürgmann R, Dresen R, 2008. Rheology of the lower crust and upper mantle: evidence from rock mechanics, geodesy, and field

- observations. *Annu Rev Earth Planet Sci*, **36**:531~567.
- Chanard K, Fleitout L, Calais E, et al, 2018. Constraints on transient viscoelastic rheology of the asthenosphere from seasonal deformation. *Geophys Res Lett*, **45**(5):2328~2338.
- Chen L, Capitanio F A, Liu L J, et al, 2017. Crustal rheology controls on the Tibetan Plateau formation during India-Asia convergence. *Nat Commun*, **8**:15992.
- Clark M K, Royden L H, 2000. Topographic ooze: building the eastern margin of Tibet by lower crustal flow. *Geology*, **28**(8):703~706.
- 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 Planet Sci Lett*, **495**:202~212.
- Ghosh A, Holt W E, 2012. Plate motions and stresses from global dynamic models. *Science*, **335**(6070):838~843.
- Gualandi A, Avouac J P, Galetzka J, et al, 2017. Pre- and post-seismic deformation related to the 2015 M_w 7.8 Gorkha earthquake, Nepal. *Tectonophysics*, 714~715:90~106.
- Hao M, Shen Z K, Wang Q L, et al, 2012. Postseismic deformation mechanisms of the 1990 M_w 6.4 Gonghe, China earthquake constrained using leveling measurements. *Tectonophysics*, **532~535**:205~214.
- Hu Y, Bürgmann R, Banerjee P, et al, 2016. Asthenosphere rheology inferred from observations of the 2012 Indian Ocean earthquake. *Nature*, **538**(7625):368~372.
- Huang M H, Bürgmann R, Freed A M, 2014. Probing the lithospheric rheology across the eastern margin of the Tibetan Plateau. *Earth Planet Sci Lett*, **396**:88~96.
- Ingleby T, Wright T J, Hooper A, et al, 2020. Constraints on the geometry and frictional properties of the Main Himalayan Thrust using coseismic, postseismic, and interseismic deformation in Nepal. *J Geophys Res: Solid Earth*, **125**(2):e2019JB019201.
- Jónsson S, Segall P, Pedersen P, et al, 2003. Post-earthquake ground movements correlated to pore-pressure transients. *Nature*, **424**(6945):179~183.
- Li Y X, Bürgmann R, Zhao B, 2020. Evidence of fault immaturity from shallow slip deficit and lack of postseismic deformation of the 2017 M_w 6.5 Jiuzhaigou earthquake. *Bull Seismol Soc Am*, **110**(1):154~165.
- Liu L J, Hasterok D, 2016. High-resolution lithosphere viscosity and dynamics revealed by magnetotelluric imaging. *Science*, **353**(6307):1515~1519.
- Liu Q Y, Van Der Hilst R D, Li Y, et al, 2014. Eastward expansion of the Tibetan Plateau by crustal flow and strain partitioning across faults. *Nat Geosci*, **7**(5):361~365.
- Liu S Z, Xu X W, Klinger Y, et al, 2019. Lower crustal heterogeneity beneath the Northern Tibetan Plateau constrained by GPS measurements following the 2001 M_w 7.8 Kokoxili earthquake. *J Geophys Res: Solid Earth*, **124**(11):11992~12022.
- Liu-Zeng J, Zhang Z, Rollins C, et al, 2020. Postseismic deformation following the 2015 M_w 7.8 Gorkha (Nepal) earthquake: new GPS data, kinematic and dynamic models, and the roles of afterslip and viscoelastic relaxation. *J Geophys Res: Solid Earth*, **125**(9):e2020JB019852.
- Marone C, 1998. Laboratory-derived friction laws and their application to seismic faulting. *Ann Rev Earth Planet Sci*, **26**:643~696.
- Milne G A, Davis J L, Mitrovica J X, et al, 2001. Space-geodetic constraints on glacial isostatic adjustment in Fennoscandia. *Science*, **291**(5512):2381~2385.
- Moore J D P, Yu H, Tang C H, et al, 2017. Imaging the distribution of transient viscosity after the 2016 M_w 7.1 Kumamoto earthquake. *Science*, **356**(6334):163~167.
- Royden L H, Burchfiel B C, King R W, et al, 1997. Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet. *Science*, **276**(5313):788~790.
- Ryder I, Bürgmann R, Pollitz F, 2011. Lower crustal relaxation beneath the Tibetan Plateau and Qaidam Basin following the 2001 Kokoxili earthquake. *Geophys J Int*, **187**(2):613~630.
- Ryder I, Bürgmann R, Sun J, 2010. Tandem afterslip on connected fault planes following the 2008 Nima-Gaize (Tibet) earthquake. *J Geophys Res: Solid Earth*, **115**(B3):B03404.
- Ryder I, Parsons B, Wright T J, et al, 2007. Post-seismic motion following the 1997 Manyi (Tibet) earthquake: InSAR observations

- and modelling. *Geophys J Int*, **169**(3):1009~1027.
- Ryder I, Wang H, Bie L D, et al, 2014. Geodetic imaging of late postseismic lower crustal flow in Tibet. *Earth Planet Sci Lett*, **404**: 136~143.
- Shao Z G, Wang R J, Wu Y Q, et al, 2011. Rapid afterslip and short-term viscoelastic relaxation following the 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake. *Earthq Sci*, **24**(2):163~175.
- Shi X, Kirby E, Furlong K P, et al, 2015. Crustal strength in central Tibet determined from Holocene shoreline deflection around Siling Co. *Earth Planet Sci Lett*, **423**:145~154.
- Shinevar W J, Behn M D, Hirth G, et al, 2018. Inferring crustal viscosity from seismic velocity: application to the lower crust of Southern California. *Earth Planet Sci Lett*, **494**:83~91.
- Thatcher W, Pollitz F F, 2008. Temporal evolution of continental lithospheric strength in actively deforming regions. *GSA Today*, **18**(4~5):4~11.
- Tian Z, Freymueller J T, Yang Z Q, 2020. Spatio-temporal variations of afterslip and viscoelastic relaxation following the M_w 7.8 Gorkha (Nepal) earthquake. *Earth Planet Sci Lett*, **532**:116031.
- Wang K, Fialko Y, 2014. Space geodetic observations and models of postseismic deformation due to the 2005 M 7.6 kashmir (Pakistan) earthquake. *J Geophys Res; Solid Earth*, **119**(9):7306~7318.
- Wang K, Fialko Y, 2018. Observations and modeling of coseismic and postseismic deformation due to the 2015 M_w 7.8 Gorkha (Nepal) earthquake. *J Geophys Res; Solid Earth*, **123**(1):761~779.
- Wang Q Z, Xu X W, Shyu J B H, et al, 2019. Viscoelastic behavior of the crust around the Longmenshan thrust belt inferred from post-seismic deformation of the 2013 Lushan earthquake, China. *J Asian Earth Sci*, **173**:386~396.
- 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. *J Geophys Res; Solid Earth*, **117**(B8):B08405.
- Yamasaki T, Houseman G A, 2012. The crustal viscosity gradient measured from post-seismic deformation: a case study of the 1997 Manyi (Tibet) earthquake. *Earth Planet Sci Lett*, **351~352**:105~114.
- Zhao B, Bürgmann R, Wang D Z, et al, 2017. Dominant controls of downdip afterslip and viscous relaxation on the postseismic displacements following the M_w 7.9 Gorkha, Nepal, earthquake. *J Geophys Res; Solid Earth*, **122**(10):8376~8401.
- Zhao G, Unsworth M J, Zhan Y, et al, 2012. Crustal structure and rheology of the Longmenshan and Wenchuan M_w 7.9 earthquake epicentral area from magnetotelluric data. *Geology*, **40**(12):1139~1142.

Rock Rheology and Observations of Postseismic Deformation Following Strong Earthquakes in China and Its Surrounding Region

*Zhao Bin*¹⁾ *Wang Min*²⁾ *Hu Yan*³⁾ *Wang Qi*⁴⁾

1) Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071, China

2) State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, CEA, Beijing 100029, China

3) School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

4) Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract The observed transient postseismic deformation represents the response to stress perturbations induced by large earthquakes. The amplitude and spatiotemporal evolution of the postseismic deformation are closely related to frictional properties of the velocity-strengthening region of the fault plane and the viscosity of lower crust and upper mantle. The rheological parameters inferred through modeling the postseismic deformation gain insights to earthquake cycle time scale compared to those values derived from rock-mechanics laboratory experiments and geodetic observations of glacial isostatic adjustment. In this paper, we conduct a brief review on the postseismic geodetic observations following strong earthquakes occurred in China and surrounding regions over the past two decades, in particular the 2001 Kokoxili earthquake, 2008 Wenchuan earthquake and 2015 Gorkha earthquake, and summarize the published studies on the postseismic deformation mechanisms and the inferred rheology of the lower crust and upper mantle beneath the margins and interior of the Tibetan Plateau. These progresses shed important lights on earthquake cycle deformation, seismic hazard assessment, tectonic evolution and geodynamics of the Tibetan Plateau. For better understanding the rock rheology of the lower crustal and upper mantle, we suggest to improve the spatial density and temporal resolution of GNSS network in the western China. Moreover, it is very significant to integrate the dynamic modeling of the postseismic deformation with extended geodetic data, such as geophysical surveys from seismic and magnetotelluric imaging.

Keywords: Geodesy; Postseismic deformation; Rock rheology; Tibetan Plateau