1999年中国台湾集集7. 6级地震评述

□ 罗　艳

1999年9月21日凌晨01时47分，中国台湾南投县发生强烈地震，震中北纬23.87°、东经120.75°，位于日月潭西南12.5km，震源深度大约7.5km，震级为7.6级（黄蓓，2014）。当天除了主震外，还有五百多次余震，其中最大的一次发生在台中地区凌晨2时16分16秒，震级6.8。9月22日上午8时14分40秒，日月潭东边又发生了6.8级余震。集集大地震发生后的第六天，9月26日上午7时52分50秒再次发生6.8级强烈余震，震中位于日月潭东方10km（王彦斌，2000）。据统计，集集7.6级地震，造成2405人死亡，11306人受伤，房屋垮塌十万多栋，经济损失达92亿美元，福建省沿海城市福州、泉州、厦门、宁德等地震感强烈，地震波及浙江、广东、江西等省（陈祥熊，2000）。1999年9月21日集集地震（*M*w7.6）是台湾板内新生代挤压造山带百年来规模最大的地震，在车笼铺断层上形成的地震地表破裂长度约100km，最大垂直位移约80m，为少见的逆断层型地震，地震地表破裂带和震源机制显示其发震断层为大致平行于山麓带近南北走向的低角度逆断层（Kao and Chen，2000；Ma et al.，1999）。

王彦斌等（2000）根据集集地震后进行的地震地表断层和相关构造的调查结果，集集大地震在地表形成的破裂沿车笼埔断层和台中盆地的东侧边缘分布，基本上呈南北走向，由南投县竹山镇南侧的桶头桥开始，向北经竹山、名间、南投、草屯、雾峰、太平、台中、丰原，然后向东弯了70°切过石冈到大甲溪，斜切入苗栗县卓兰镇的内弯，延伸长度80多km。

陈祥熊（2000）根据台湾方面提供的有感余震目录（M_L≥3.5）对该地震序列的基本特征进行了初步分析，余震基本上包围主震震中，主要分布在南、北部和东侧（中央山脉以东）并且呈近北北东向的线性分布，这与车笼埔断层和双冬-大茅埔断层的走向和倾向一致。余震震源深度都在20公里以内，没有明显加深的现象，这与板缘逆冲断层发生的地震都是浅震的特点一致。朱守彪等（2011）绘制了集集地震及余震分布图（如图1所示），图中显示，余震主要集中在震中附近及南北向展布，此外还扩展到东部地区，主震东部还有两个余震分布条带。余震与主震一样，每一次余震其震源区介质也要变得破碎或不完整，亦即余震也能使其震源区及周边地区的物性发生变化。

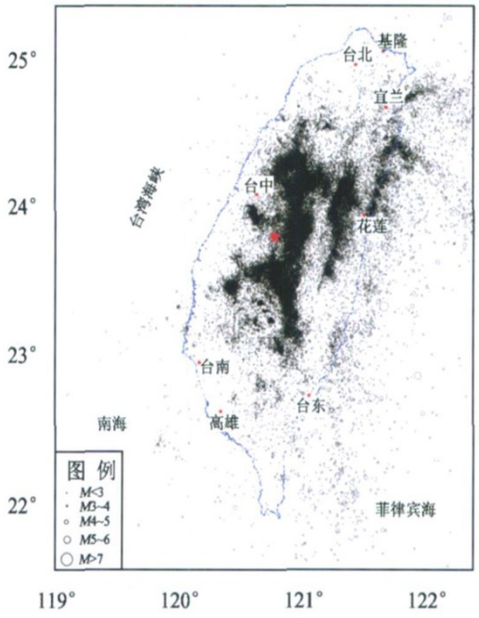

图1 集集地震主余震分布（1999.10 – 2000.12；五角星为主震位置）（朱守彪等，2011）

集集地震，沿着已知活动断层——车龙埔断层，在西部麓山带和滨海平原的接触带形成约100km长的地表破裂，其中近南北向的破裂约85km，在丰原东北部转为近东西向，破裂长度约15km，如图2所示（王卫民等，2005）。王彦斌等（2000）根据集集地震后进行的地震地表断层和相关构造的调查结果，集集大地震在地表形成的破裂沿车笼埔断层和台中盆地的东侧边缘分布，基本上呈南北走向，由南投县竹山镇南侧的桶头桥开始，向北经竹山、名间、南投、草屯、雾峰、太平、台中、丰原，然后向东弯了70°切过石冈到大甲溪，斜切入苗栗县卓兰镇的内弯，延伸长度80多km。

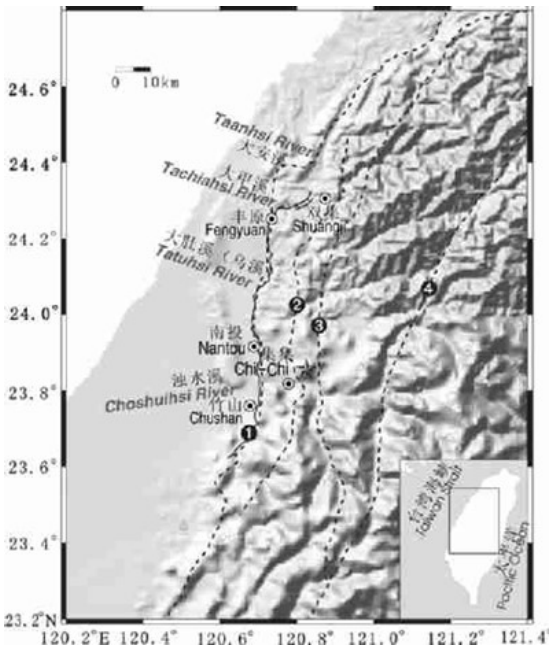

图2 台湾岛中部地区主要断层（虚线）和集集地震地表破裂轨迹（实线）（王卫民等，2005）

□车龙埔断层;□双东断层;□屈尺断层;□梨山断层.星号为 震中位置(CWB 结果), 小圆圈代表4级以上的余震(USGS)

震后地表变形的动力学机制是地球动力学研究的重要方面，1999年台湾集集地震GPS观测系统记录到了空前的资料，为研究震后变形的动力学机制提供了难得的机会。国内外许多研究人员根据这些资料研究了震后地表变形的机制（Sheu et al.，2004；Hsu et al.，2002；Yu et al.，2003；朱守彪等，2009）。Sheu et al.（2004）、Hsu et al.（2002）、Yu et al（2003）分别采用运动学正演和反演方法，探讨了黏性松弛和震后滑动两种机制对台湾集集地震震后地表变形的影响，Sheu et al（2004）认为黏性松弛和震后滑动共同作用产生了地表变形，而Hsu et al（2002）、Yu et al（2003）则认为主要是震后滑动起作用。朱守彪等（2009）运用黏弹性有限单元模型（麦克斯威尔体），利用GPS观测的时间序列资料对震后余滑、地壳/地幔黏度以及等效的震源区介质物性变化进行了反演，反演模型给出了震后余滑的分布及变化特征，反演结果初步显示台湾地区的下地壳/上地幔的黏度分别为2.7×1018，4.2×1020Pa·s。此外反演结果还给出每种影响因素对地表变形的贡献大小，在集集地震后的450d时间，断层的震后余滑引起的地表变形占总变形的44.6%，下地壳/上地幔的黏性松弛占34.7%，等效的震源区介质的物性变化占20.7%。他认为集集地震后地表变形由震后断层余滑、下地壳/上地幔的黏弹性松弛、震源区介质的破裂、孔隙弹性回跳、地下流体的运移、介质孔隙度及孔隙压的变化等多种因素共同影响决定。付真等（2013）利用接触问题的黏弹性有限元方法，以GPS观测数据作为约束，分别考察了黏性松弛和震后滑动机制对地表震后变形的影响．计算结果表明，黏性松弛机制产生的地表位移与观测数据吻合较好，通过试错法由震后GPS观测约束得到的下地壳黏度为1017Pa·s，而上地幔黏度对计算结果影响不大。

不同学者分别应用地震的远场、近场波形资料、GPS测量的同震形变等多方面的资料开展集集地震震源过程的研究（Yu et al， 2001；Yang et al， 2000；Lee and Ma 2000；Huang et al，2000； Chen et al， 2000；Ma et al，2000； Ji et al， 2001；Zeng et al， 2001；Wu et al， 2001；Shin， 2000；王卫民等，2005；周仕勇等，2006）。Yu et al（2001）和Yang et al（2000）相继发表了集集地震同震位移数据。Ji et al （2001）基于台湾中部地壳模型，进一步细分断层，利用GPS资料和近场强震记录给出了一个更精细的剪切滑动模型，更好地拟合了GPS观测资料，并利用得到的滑动分布拟合了21个宽频带远场P波和SH波地震记录。Lee和Ma（2000）利用22个宽频带远场P波记录和一个单断层模型研究了集集地震的破裂过程。Zeng et al（2001）根据地表破裂轨迹构造了一个3D模型，利用GPS和强震记录研究了集集地震破裂过程。Chen et al（2000）通过全球数字地震台网的远场波形记录中提取集集地震的震源时间函数，用拟合震源时间函数的方法对集集地震的震源破裂过程作了初步研究。Ma et al（2000）用多时间窗线性矩阵反演方法，用全球数字地震台网记录的远场波形反演了集集地震的破裂过程。Huang et al（2000）用了近400台的近场波形记录重构了集集地震所引起的近场强地面振动过程，发现集集地震在震源破裂开始的前10s集中在发震断层的南端，在15s左右主要震源破裂区移向断层北段，整个震源破裂过程持续了38s左右。周仕勇等（2006）充分利用近场地震波观测资料反演集集地震震源破裂过程，发现集集地震的破裂在其起始点附近及断层中部是相对较弱的，断层南、北两端存在两个相对分离的破裂区，断层的北端（初始破裂点沿断层向北40-70km）破裂最为强烈，最强处的破裂位错达23m，逆冲破裂明显大于走滑破裂，平均滑动角为64.5°，此外反演结果还表明集集

地震大体持续了约32s，震源破裂大体可分为三个子阶段：第一阶段是前6s，是震源初始破裂的成核过程，滑动量较弱，释放的地震矩仅为地震全过程的5.3%。第二阶段是震源破裂快速扩展阶段，前10s破裂主要集中发生在断层的南段，逆冲破裂机制，走滑分量很弱，从11-20s，破裂主要集中发生在断层的北段，仍是逆冲破裂机制为主，但有较强的走滑分量。第三个子阶段是震源破裂减缓、中止过程，21s开始震源地震矩释放速率有明显减速，27s后地震矩释放率已变得非常低，32s地震矩释放完全停止，破裂过程中止。王卫民等（2009）利用Yang et al（2000）发表的GPS同震位移观测资料，根据地表破裂、地质构造和余震分布特征构造了一个三段弯曲界面的同震断层几何模型，分别使用弹性半空间模型和分层地壳模型反演集集地震断层面滑动分布，同时利用静力学同震位移资料和地震波形记录来研究集集地震的震源破裂时空过程。结果表明，集集地震存在5个高剪切位错区（图3a），余震分布(图3c)与高滑区呈负相关。

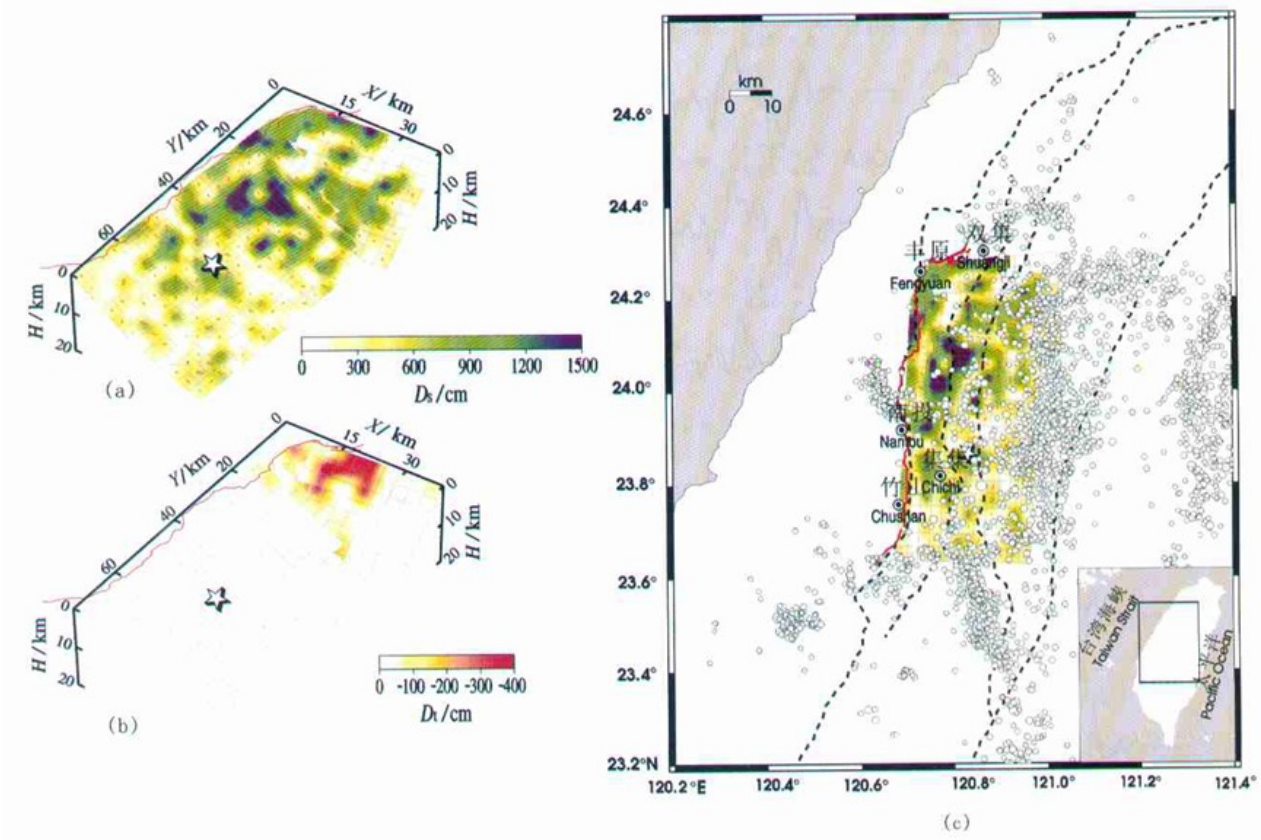

图3　远场 P 波反演得到的断层面上滑动分布（王卫民等，2005）
(a) 剪切滑动分布；(b) 拉张位错分布；(c) 剪切滑动分布与震后四个月的余震分布 (CWB 资料)

越来越多的震例表明，大震产生的库仑破裂应力的增加明显有利于后续中强 地震的发生.许多研究都认为库仑应力增加超过0.1bar的区域有利于余震的触发（Ma et al.,2005; Harris 1998; Deng and Sykes,1997; 石耀霖等，2001；沈正康等，2003；）。Wang et al（2003）粗略地计算了集集地震引起的库仑应力变化，Ma et al（2005）详细分析了大震前后的地震分布，地震发生率的变化以及地震库仑应力的变化。Ma et al（2005）发现，库仑应力增加地区和地震活动性增加有很好的一致性。邵志刚等（2009）以多个小断层地震位错模型和更接近实际的层状地质结构为基础，计算了地震引起的位移及应力变化，并分析了库仑应力变化与余震的对应关系，计算了四个深度上（12km，18km，24km，30km）的走滑断层及逆冲断层上的库仑应力变化，余震为对应深度上下

3km的地震，整体上震后50个月的余震约有72%分布在库仑应力增加超过0.1bar的区域，这说明集集地震所引起的库仑应力变化确实有利于本地区余震的发生。

集集7.6级地震发生于全球GPS观测系统最为密集的地区，GPS系统对集集地震震前、震时及震后地表运动进行了全面的观测，收集到了前所未有的丰富资料（Yu et al.， 1997，2001，2003；Lin et al.，2010）。这些对研究台湾的应力、应变及动力机制提供了高质量的数据。为此，朱守彪等（2011）利用集集地震震前（1990-1995年）及震后（2003-2005年）的 GPS观测资料，对台湾及附近地区的地应变率场进行了计算（如图4、图5所示）。图4为台湾地区1990—1995年最大、最小主应变率分布。由图4可见，最大主压应变率出现在从台东到花莲一线的台东海岸山脉地区，方向与海岸线倾斜相交，体现了吕宋岛弧与台湾的倾斜碰撞特征。由台湾东部的海岸山脉向西，主压应变率迅速衰减，主张应变分量逐渐增大。在中央山脉地区N-S向较大的范围内主压应，变率的数值小于主张应变，说明变形的性质发生了变化，从海岸山脉地区的碰撞挤压到中央山脉南北两面的引张挤出的变形特征。但在中央山脉以西的台湾西部丘陵及平原地带，主张应变分量较小，主压应变占主导地位，主压应变的最小值出现在台湾西部平原，其方向几乎与海岸线垂直。图5为2003—2005年最大、最小主应变率分布，图中显示，最大主压应变率仍然出现在台湾东部海岸山脉地区，但最大值在空间的分布范围明显变小，主压应变的次大值转移到集集地震的震中及附近地区，尽管高雄与台南之间的主压应变率依然较高。此外，在中央山脉南北两侧主张应变大于主压应变，但在宜兰平原及附近，拉应变率明显大于压应变，呈典型的拉张状态。对比两次计算结果，集集地震前后，台湾地区的应变率场分布格局基本一致，最大主压应变率的最大值位于台湾东部的海岸山脉地区，方向与台湾岛倾斜相交，主压应变由东向西迅速衰减，在中央山脉地区主压应变率小于主张应变率，呈现拉张的应变状态。此外，计算的应变率场体现了台湾碰撞带的变形特征，台湾与吕宋岛弧碰撞后，形变主要被台湾东部的海岸山脉所吸收，变形向西衰减迅速，碰撞过程中，物质向两侧逃逸。

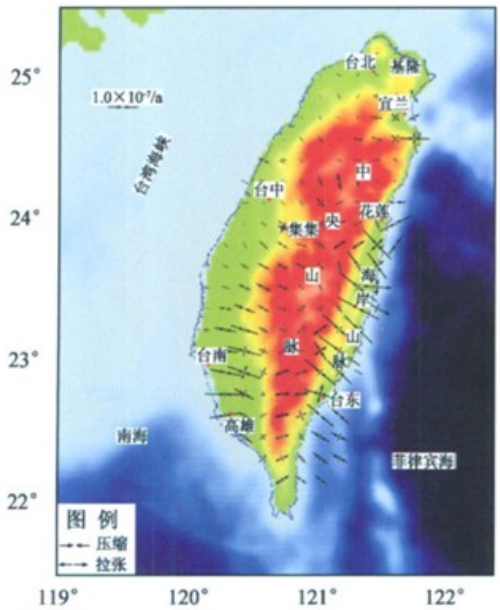

图4 1990 –1995年最大、最小主应变率分布（朱守彪等2011）

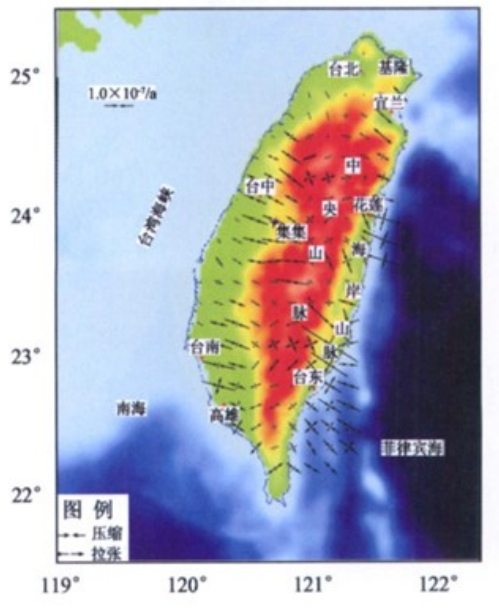

图5 2003—2005年最大、最小主应变率分布（朱守彪等2011）

参考文献

1. Chen Y T, Xu L S.2000. A preliminary analysis of temporal-spatial rupture process of 1999 Chi-Chi earthquake. Proceeding of the Second World Chinese Conference on Geological Science, Standford University, Augu. 2-4.

2. Chen W, Huang B, Chen, Y, et al. 2001. 1999 Chi-Chi earthquake: A case study on the role of Thrust-Ramp structures for generating earthquakes. Bull. Seism Soc. Am.,91:986-994.

3. Deng J, Sykes L R. 1997. Evolution of the stress field in southern California and triggering of moderate-size earthquake: A 200 year perspective. J. Geophys. Res., 102 (B5):9859-9886.

4. Harris R A. 1998. Introduction to special section: Stress triggers, stress shadows, and implication for seismic hazard. J. Geophys. Res.,103(10):24347-24358.

5. Hsu Y J, Bechor N, Segall P, et al. 2002. Rapid afterslipfollowing the 1999 Chi-Chi, Taiwan Earthquake. Geophys Res. Lett,, 29(16):1-4.

6. Hsu Y J, Segall P. Yu S B, et al. 2007. Temporal and spatial variations of post-seismic deformation following the 1999 Chi-Chi,Taiwan earthquake. Geophys. J. Int., 169(2):367-379.

7. Hsu Y J,Bechor N, Segall P, et al. 2002. Rapid afterslip following the 1999 Chi-Chi,Taiwan earthquake. Geophys. Res. Lett.,29(16):1-4.

8. Huang BS. 2000. Two-dimensional reconstruction of the surface ground mothions of an earthquake: the September 21, 1999, Chi-Chi, Taiwan Earthquake. Geophy Res. Lett, 27(18):3025-3028.

9. Ji C , Helmberger DV .Song A, et al. 2001. Slip distribution and tectonic implication of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake .Geophys.Res.Lett ., 28(23):4379-4382.

10. Ji C , Helmberger DV, Wald D J, et al .2003. Slip history and dynami c implications of the 1999 Chi_Chi, Taiwan, earthquake.J.Geophys.Res.,108 (B9):2412, doi:10.1029/2002JB001764.

11. Johnson K M , Hsu Y J, Segall P, et al. 2001.Fault geomertry and slip distribution of the 1999 Chi-Chi,Taiwanearthquake imaged from inversion of GPS data .Geophys .Res .Lett ., 28(11):2285-2288.

12. KaoH,ChenW P. 2000. TheChi-Chiearthquakesequence active out-of sequence thrust faulting in Taiwan. Science,288(5475):2346-2349.

13. Lee S J, Ma K F. 2000. Rupture process of 1999 Chi_Chi, Taiwan earthquake from the inversion of teleseismic data.TAO , 11,(3):591-608.

14. Lin A, Ouchi T, Chen A, et al. 2001. Coseismic displacements, folding and shortening structures along Chelungpu surface rupture zone occurred during the 1999 Chi-Chi (Taiwan) earthquake.Tectonophysics , 330(3-4):225-244.

15. LinKC, Hu J C, Ching K E, etal. 2010. GPScrustaldeformation, strainrateandseismicactivityafter the1999Chi-ChiearthquakeinTaiwan. J.Geophys.Res., 115, B07407,doi:10.1029/2009JB006417.

16. Ma K F, Lee C T, Tsai Y B et al. 1999. The Chi-Chi, Taiwan earthquake: large surface displacements on an inland thrust fault. EOS,80(5):605-611.

17. Ma KF,Song TR A,Lee SJ, et al. 2000. Spatial slip distribution of the September 20, 1999, Chi-Chi, Taiwan,earthquake(*M*w7.6)—inverted from teleseismic data. Geophy Res Lett, 27(20): 3417-3420.

18. Ma K F. Chan C H, Stein R S. 2005. Response of seismicity to Coulomb stress triggers and shadows of the 1999 Mw=7.6 Chi-ChiTaiwan, earthquake. J. Gcophys. Res.,110,B05S19, doi:10.1029/2004JB003389.

19. Sheu S Y, Shieh C F.2004. Viscoelastic-afterslip concurrence: a possible mechanism in the early post-seismic deformation of the Mw7.6,1999 Chi-Chi(Taiwan) earthquake. Geophys. J. Int.,159(3):1112-1124.

20. Shin Tzay-Chyn.2000. Some seismological aspects of the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan. TAO, 11:555-566.

21. Wang J C, Shieh C F, Chang T M. 2003. Static stress changes as a triggering mechanism of a shallow earthquake: case study of the 1999 Chi-Chi(Taiwan) earthquake. Physics of the Earth Planetary Interiors, 135:17-25.

22. Wu C J. Takeo M and Satoshi I. 2001. Source Process of the Chi-Chi earthquake: A joint inversion of strong motion data and global positioning system data with multifault model. Bull Beis Soc Am, 91:1128-1143.

23. Yang M, Rau R.J, Yu J Y, et al. 2000. Geodetically observed surface displacements of the 1999 Chi-Chi , Taiwan earthquake.Earth Planets Space, 52:403-413.

24. Yu SB, Chen HY and Kuo LC. 1997. Velocity field of GPS stations in the Taiwan area. Tectonophysics,274:41-59.

25. Yu S B, Hsu Y J, Kuo L C, et al. 2003. GPS measurement of postseismic deformation following the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake. J Geophys Res, 108 (B11):2520, doi: 10.1029/2003JB002396

26. Yu S B, Kuo L C, Hsu Y J. 2001. Preseismic deformation and coseismic displacements associated with the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake. Bull. Seism Soc. Am.,91(5):995-1012.

27. Zeng Y H, Chen C H.2001. Fault rupture process of the 20 September 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake. Bull Beis Soc Amer, 91(5):1088-1098.

28. 陈祥熊. 2000.集集地震的综合研究.福建地震,16(3,4):74-89.

29. 刁桂苓,徐锡伟 陈于高等. 2011. 汶川M_W7.和集集 M_W7.6地震前应力场转换现 象及其可能的前兆意义. 地球物理学报, 54(1):128-136,doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.01.014.

30. 付真,张海明,蔡永恩. 2013. 1999年台湾集集地震震后地表变形的力学机制.地球物理学报,56(8):2681-2689.

31. 黄蓓. 2014.逆冲型地震强地面运动特性的研究-以1999年台湾集集地震和2008 年汶川地震为例.中国地震局地质研究所.

32. 邵志刚,傅容珊,薛霆幌,等.2009. 库仑应力变化与余震对应关系的初步探讨一以集集地震为例.地球物理学进展,24(2):367-374.

33. 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.

34. 石耀霖.2001. 关于应力触发和应力影概念在地震预报中应用的一些思考. 地震,21(3):1-7.

35. 王卫民,赵连锋,李娟,姚振兴, 2005. 1999 年台湾集集地震震源破裂过程[J].地球物理学报,48(1):132-147.

36. 王彦斌,王永.2000.1999年台湾集集大地震的地表断层破裂特征.地震地质, 22(2): 97-103.

37. 朱守彪,蔡永恩. 2009.强震后地表变形的动力学机制研究—以1999年台湾集集地震为例.中国科学D辑:地球科学,39(9):1209-1219.

38. 朱守彪, 赵晓燕, 刘杨等. 2011. 1999年集集地震前后台湾地区地应变率场的分布及其动力学成因.大地测量与地球动力学,31(2):38-43.