第30卷　第2期(219~225)　中国地震　Vol. 30　No. 2
2014年6月　EARTHQUAKE RESEARCH IN CHINA　Jun. 2014

杨文、周龙泉、刘杰等,2014,新疆于田两次7.3级地震之后南北地震带 Benioff 应变比分布特征研究,中国地震,**30**(2),219~225。

新疆于田两次7.3级地震之后南北地震带 Benioff 应变比分布特征研究

杨文[1)]　周龙泉[1)]　刘杰[1)]　程佳[1,2)]

1) 中国地震台网中心,北京市西城区三里河南横街5号　100045

2) 中国地震局地质研究所活动构造与火山重点实验室,北京　100029

摘要　利用中国地震台网的地震目录,分别计算新疆于田2008年3月21日7.3级、2014年2月12日7.3级地震前后30天南北地震带 Benioff 应变比。结果表明,2008年7.3级地震后1年内,后续5级以上地震均发生在 Benioff 应变比高值区域附近或者高、低值交界区域,强震活动与 Benioff 应变比的高值区域存在明显对应关系。这反映了相应区域应力水平可能较高,于田地震的发生导致这些应力高值区容易释放小地震,研究结果对该区域后续强震的发生有一定指示意义。

关键词:　两次于田地震　Benioff 应变比　地震活动性　南北地震带

[文章编号] 1001-4683(2014)02-0219-07　[中图分类号] P315　[文献标识码] A

0　引言

2014年2月12日新疆于田发生 M_S7.3 地震,震中位于晚新生代以来较为活跃的康西瓦断裂附近。该断裂在地表表现为一条显著的线性构造,沿 WNW-ESE 向延伸近700km(付碧宏等,2006),晚第四纪以来地震活动强烈(王萍等,2006)。2008年3月21日在2014年 M_S7.3 地震震中的西南方向约100km处曾发生7.3级强震。根据震后高分辨率卫星数据解译结果,2014年2月12日于田地震的地表破裂带长约9km,走向 NEE。地表破裂带沿多个洪积扇中后缘断续延伸,在最新的洪积物上形成断层陡坎①。

康西瓦断裂位于巴颜喀拉块体与塔里木块体之间的大型走滑断裂带——阿尔金断裂带西南端部地区。作为巴颜喀拉块体的西边界断裂,在康西瓦断裂发生的2014年于田7.3级地震与巴颜喀拉块体的整体地震活动有紧密关系(邓起东等,2010;程佳等,2014)。巴颜喀拉块体东侧位于我国南北地震带的中间部位,南北地震带的强震活动受控于活动地块的运动与变形,地震活动在空间上具有分区、分带的特征(张培震等,2013)。从历史地震的统计

[收稿日期] 2014-03-20;[修定日期] 2014-04-30

[项目类别] "十二·五"国家科技支撑计划项目(2012BAK19B02-01)资助

[作者简介] 杨文,男,1986年生,研究实习员,主要从事数字地震学和地震活动性研究。

E-mail:yangwen@seis.ac.cn

① http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/984/100061/20140224142549767628025/

结果看，新疆于田地区 6.0 级以上地震对南北地震带的地震活动有一定影响，如：1920 年 10 月 12 日新疆策勒 6.3 级地震后，1920 年 12 月 16 日宁夏海原发生 8.5 级地震；2008 年 3 月 21 日新疆于田 7.3 级地震后，2008 年 5 月 12 日四川汶川发生 8.0 级地震。2008 年新疆于田 7.3 级地震后，该年度内南北地震带 5 级以上地震较为活跃（图 1），这表明 2008 年于田 7.3 级强震的发生使得南北地震带应力发生明显调整。基于上述认识，2014 年于田 7.3 级地震发生后，南北地震带的强震危险性可能会发生相应的调整，对于这一问题的研究在该地区的地震危险性分析中具有重要的现实意义。

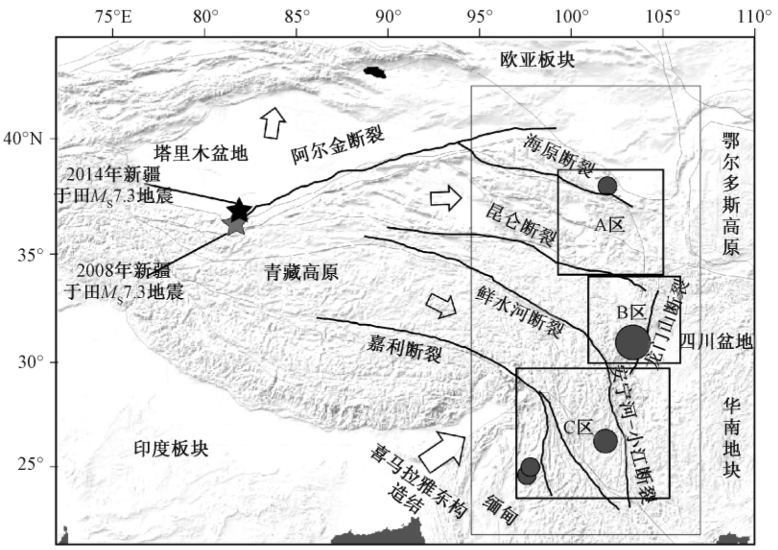

图 1　青藏块体及其周边运动示意图（据张培震等（2013）文献修改）

灰色矩形框为南北地震带大致范围；黑色矩形框为本文的 3 个研究区域；黑、灰五角星分别为 2014 年、2008 年新疆于田 7.3 级地震；灰色圆圈为 2008 年于田地震后当年南北地震带 5 级以上地震

本文通过对比新疆于田 2014 年、2008 年 7.3 级地震前后南北地震带 Benioff 应变比的空间分布特征，结合 2008 年于田 7.3 级地震后南北地震带中强地震的分布，将于田地震作为一个外部触发条件，探讨 2014 年于田 7.3 级地震对南北地震带不同区带的影响，为研究南北地震带可能的强震活动区提供参考。

1　研究区资料和方法

南北地震带（图 1）北起鄂尔多斯地块西缘，穿过龙门山，再沿安宁河–小江断裂带向南延至缅甸境内，是分隔中国大陆东部相对稳定的鄂尔多斯高原、四川盆地和华南地块与西部强烈隆升的青藏高原之间的边界活动构造带（张培震，2008）。本文选取南北地震带作为研究范围对不同构造分区分别进行了分析。

加卸载响应比是一个定量反映地壳系统不稳定程度的参数（尹祥础等，1994），该参数可以判定引潮力对断层是加载还是卸载。目前该方法已经取得了很大发展，并被广泛应用于地震预测中（刘桂萍等，1994；zhang et al，2004；张浪平等，2006；余怀忠等，2010）。类似于固体潮汐对断层面的加卸载，大地震对周围地震断层有正或者负的影响（Das et al，1981；

Toda et al,1998),同样也可以作为一种外界的扰动因素。而 Benioff 应变作为一个区域中滑动速率的量度(赵祎喆等,2008),可比较好地刻画外界扰动引起的地震活动变化。本文通过计算两次于田地震前后的 Benioff 应变比,对于田地震后该地区应变比分布特征进行了研究。

1.1　资料和最小完整性震级的选取

根据中国地震台网中心提供的统一快报目录②,本文采用了 2008 年 1 月 1 日 ~2014 年 3 月 14 日南北地震带(20°~44°N,94°~108°E)的微震目录。由于最小完整性震级 M_c 可能具有不同的时空分布特征,本文参考韩立波等(2012)给出的南北地震带 M_c 空间分布结果,将南北地震带分成 A 区(34°~39.5°N,99°~105°E)、B 区(30°~34°N,101.5°~106°E)、C 区(23°~30°N,97°~105°E)等 3 个 M_c 分区特征明显的区域(图 1),并利用震级-频度关系计算各分区整体的 M_c(图 2)。最小二乘法计算结果表明,A、B、C 等 3 个分区的最小完整性震级 M_c 约为 $M_L1.8$、$M_L1.5$、$M_L1.3$。考虑到不同的计算方法得到的结果之间可能存在差异,本文采用适当提高 M_c 数值的方式以减小计算结果的误差。最终将这 3 个区域的 M_c 分别确定为 $M_L1.9$、$M_L1.6$、$M_L1.4$。

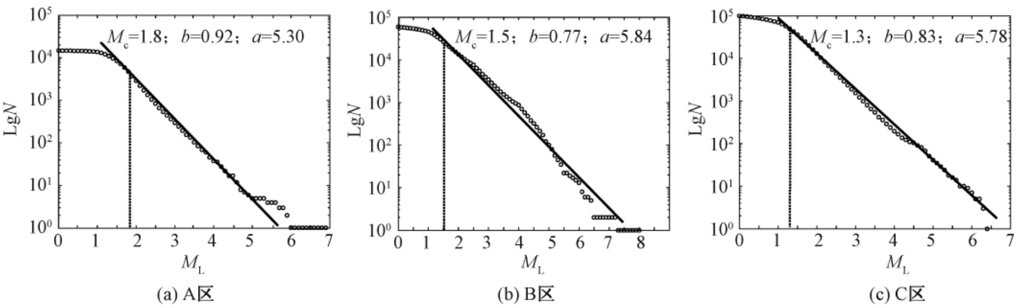

图 2　南北地震带不同区域震级-频度关系

1.2　大震前后地震应变比的计算

本文使用地震释放能量的 1/2 次方,即 Benioff 应变作为响应参数。定义 Benioff 应变比 R 为在某一区域震后所有地震的能量的开方和与震前所有地震的能量的开方和之比。Benioff 应变比计算方法为(Benioff,1951)

$$R = \frac{\sum \sqrt{E_{后}}}{\sum \sqrt{E_{前}}} \tag{1}$$

式中 $\sqrt{E}$ 为 Bennioff 应变,$\sqrt{E_{前}}$、$\sqrt{E_{后}}$ 分别为震前和震后 n 天的应变能释放。$\sqrt{E}$ 根据 Gutenberg 等(1956)及 Kanamori(1977)的能量-震级经验公式 $\lg E = 4.8 + 1.5M_S$ 计算得到,震级转换采用经验公式 $M_S = 1.13M_L - 1.08$(汪素云等,2009)。

具体计算过程为:对不同地区以 0.5°的间距分别进行网格化,以每个网格点为中心,挑选网格内、经纬度方向窗长均为 0.5°的矩形框内的地震。对于每个矩形框,分别计算每个单元在于田地震前后 n 天的 Bennioff 应变,两者比值作为该矩形框中心点的应变比。利用

② http://10.5.202.22/bianmu/

插值方法绘制区域内 R 值的空间场分布图。如果 $R<1$，说明该区域应变能释放减速；如果 $R>1$，说明该区域应变能释放加速；如果 $R=1$，说明该区域应变能释放无变化。

2　2008 年、2014 年于田两次 7.3 级地震前后南北地震带 Benioff 应变比分布特征

本文使用新疆于田 2008 年 3 月 21 日 7.3 级、2014 年 2 月 12 日 7.3 级地震前后 30 天的地震目录资料，分别计算两个时间段内南北地震带不同区域的应变比，两次 7.3 级地震前后不同区域应变比空间分布如图 3 所示。

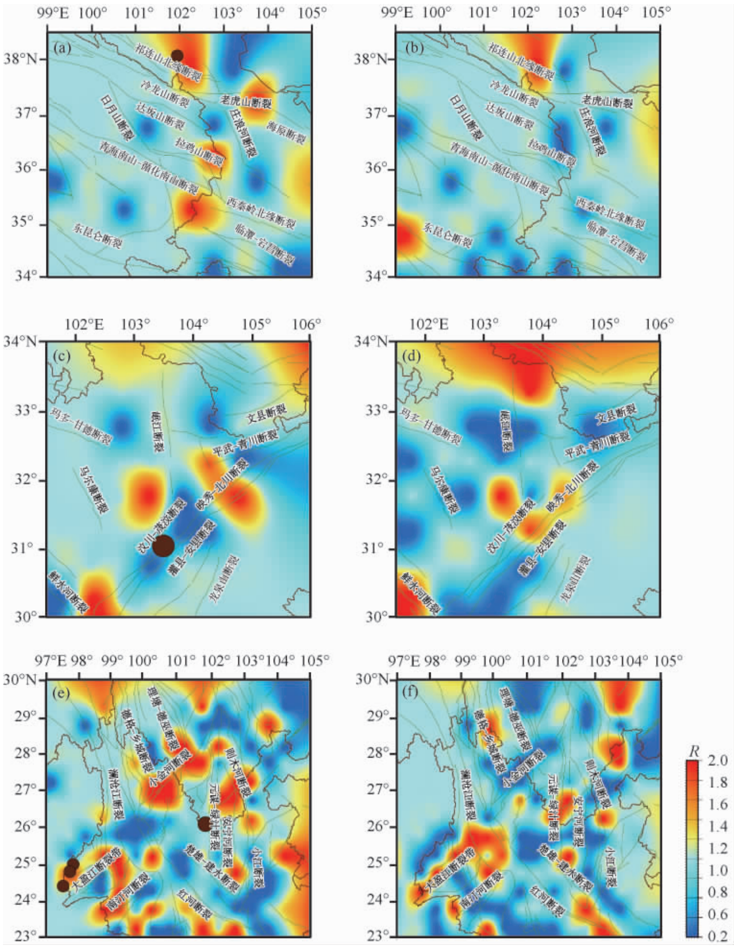

图 3　于田两次 7.3 级地震后南北地震带不同分区应变比空间分布

红色圆圈为 2008 年 3 月 21 日于田 7.3 级地震后 1 年内该地区 5 级以上地震

(a) 2008 年 3 月 21 日于田地震后 A 区应变比分布；(b) 2014 年 2 月 12 日于田地震后 A 区应变比分布；
(c) 2008 年 3 月 21 日于田地震后 B 区应变比分布；(d) 2014 年 2 月 12 日于田地震后 B 区应变比分布；
(e) 2008 年 3 月 21 日于田地震后 C 区应变比分布；(f) 2014 年 2 月 12 日于田地震后 C 区应变比分布

2.1　A 区应变比分布特征

2008 年于田 7.3 级地震后在祁连山北缘断裂附近出现应变比增强现象，而 2008 年 3 月 30 日甘肃肃南 5.0 级地震震中正位于应变比高值异常区域附近(图 3(a))。此外，在甘青交界南部的拉鸡山断裂、老虎山断裂、西秦岭北缘断裂北段应变比也有明显增强，但范围较小。2014 年于田 7.3 级地震之后在祁连山北缘断裂附近也出现应变比增强现象(图 3(b))，但比 2008 年于田 7.3 级地震之后应变比高值异常区的范围稍小。

2.2　B 区应变比分布特征

两次地震后 B 区应变比空间分布具有相似的特征，均在龙门山断裂附近出现高值异常。2008 年于田 7.3 级地震之后在龙门山断裂带上的汶川-茂汶断裂、映秀-北川断裂附近出现高值异常，而 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震震中正位于该地区的高、低值异常区交界处。2014 年于田 7.3 级地震之后，该区域应变比高值区位于 2008 年高值区南边，分别沿 NE 和 NW 向展布。

2.3　C 区应变比分布特征

2008 年于田 7.3 级地震之后，C 区应变比高值异常区域范围较大(图 3(e))，主要分布在小金河断裂、则木河断裂、安宁河断裂、大盈江断裂、南汀河断裂附近，而 2008 年 8 月 20、21 日云南盈江 5.0 级、5.9 级地震以及 2008 年 8 月 30 日四川攀枝花 6.1 级地震均位于高值区附近或者高、低值交界区域。2014 年于田 7.3 级地震之后该区高值异常区分布范围与 2008 年相比明显缩小(图 3(e)、3(f))，主要分布在大盈江断裂、南汀河断裂、元谋-绿汁断裂、安宁河断裂附近，在小金河断裂附近未出现高值异常区。

3　分析与讨论

2008 年 3 月 21 日新疆于田 7.3 级地震后，南北地震带地震活动明显增强，1 年内先后发生 2008 年 3 月 30 日甘肃肃南 5.0 级地震，2008 年 5 月 12 日四川汶川 8.0 级地震，2008 年 8 月 20、21 日云南盈江 5.0 级、5.9 级地震以及 2008 年 8 月 30 日四川攀枝花 6.1 级地震。从应变比空间分布可以看出，上述强震均发生在 2008 年于田地震后应变比高值异常区域附近或者高、低值交界区域。应变比高值反映了这些地区应力水平较高，在 2008 年于田 7.3 级地震后这种应力高值区容易发生一些小震。

南北地震带的应变比在于田 2014 年 7.3 级地震后与 2008 年 7.3 级地震后具有一定的相似性。应变比高值区主要分布在祁连山北缘断裂、映秀-北川断裂、大盈江断裂、南汀河断裂、元谋-绿汁断裂、安宁河断裂附近地区。

地震应力的突然变化可以引起其周边地震活动性的显著变化，随着应力增加或者降低，地震活动性相应地增强或者减弱(Stein，1999)。本文通过计算两次于田地震前后不同区域的应变比，对应力增强区域进行了研究。已有研究结果表明，在引起地震活动性变化方面应变比与反映地下介质改变的波速变化和库仑破裂应力变化能吻合地较好(杨文等，2013)。本文采用了相对容易获取的地震目录资料进行研究，故可以更方便地为地震危险性分析提供参考。

参考文献

程佳、杨文、刘杰等,2014,2014 年 2 月 12 日新疆于田 M_S7.3 地震序列及其构造背景研究,地震学报,**36**(3),350 ~ 361。

邓起东、高翔、陈桂华等,2010,青藏高原昆仑-汶川地震系列与巴颜喀喇断块的最新活动,地学前缘,**17**(5),163 ~ 178。

付碧宏、张松林、谢小平等,2006,阿尔金断裂系西段-康西瓦断裂的晚第四纪构造地貌特征研究,第四纪研究,**26**(2),228 ~ 235。

韩立波、蒋长胜、李艳娥等,2012,用于地震可预测性 CSEP 计划的南北地震带地区地震最小完整性震级 M_c 研究,地震,**32**(1),17 ~ 27。

刘桂萍、马丽、尹祥础,1994,首都圈地区中等地震前响应比特征的研究,地震,**14**(6),34 ~ 39。

汪素云、俞言祥,2009,震级转换关系及其对地震活动性参数的影响研究,震灾防御技术,**4**(2),141 ~ 149。

王萍、王增光、雷生学等,2006,阿尔金断裂东端破裂生长点的最新构造变形,第四纪研究,**26**(1),108 ~ 116。

杨文、刘杰、程佳,2013,2011 年 3 月 24 日缅甸 7.2 级地震对云南地区的影响研究,地学前缘,**20**(3),35 ~ 44。

尹祥础、陈学忠、宋治平,1994,加卸载响应比理论及其在地震预测中的应用研究进展,地球物理学报,**37**(增刊 I),223 ~ 230。

余怀忠、程佳、万永革,2010,加卸载响应比与震前应力积累模式研究,地震学报,**32**(5),517 ~ 528。

张浪平、尹祥础、梁乃刚,2006,加卸载响应比在伊朗地区地震活动性研究中的应用,中国地震,**22**(4),356 ~ 363。

张培震,2008,青藏高原东缘川西地区的现今构造变形、应变分配与深部动力过程,中国科学 D 辑:地球科学,**38**(9),1041 ~ 1056。

张培震、邓起东、张竹琪等,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**(10),1607 ~ 1620。

赵祎喆、吴忠良、蒋长胜等,2008,用地震资料估计的龙门山断裂深部形变及其对于汶川地震成因的意义,地质学报,**82**(12),1778 ~ 1787。

Benioff H,1951,Earthquake and rock creep,Bull Seism Soc Am,**41**(1),31 ~ 62.

Das S,Scholz C,1981,Off-fault aftershock clusters caused by shear stress increase,Bull Seism Soc Am,**71**(5),1669 ~ 1675.

Gutenberg B,Richter C F,1956,Earthquake magnitude,intensity,energy and acceleration(second paper),Bull Seism Soc Am,**46**(2),105 ~ 145.

Kanamori H,1977,The energy release in great earthquakes,J Geophys Res,**82**(B20),2981 ~ 2987.

Stein R S,1999,The role of stress transfer in earthquake occurrence,Natrure,**402**(6762),605 ~ 609.

Toda S,Stein R S,Reasenberg P A,et al,1998,Stress transferred by the 1995 M_W = 6.9 Kobe,Japan shock:Effect on aftershocks and future earthquake probabilities,J Geophys Res,**103**(B10),24543 ~ 24565.

Zhang Y X,Yin X C,Peng K Y,2004,Spatial and temporal variation of LURR and its implication for the tendency of earthquake occurrence in southern California,Pure Appl Geophys,**161**(11/12),2359 ~ 2367.

Research on the distribution features of the Benioff strain ratio in the North South Seismic Belt after the two Yutian M_S 7.3 earthquakes

Yang Wen[1)]　*Zhou Longquan*[1)]　*Liu Jie*[1)]　*Cheng Jia*[1,2)]

1）ChinaEarthquakeNetworksCenter，Beijing 100045，China

2）Key Laboratory of Active Tectonics and Volcano，Institute of Geology，CEA，Beijing 100029，China

Abstract　After the 2014 Yutian M_S7.3 earthquake，as the impact of the relation with tectonic and seismic activity，the earthquake risk in the North South Seismic Belt is a matter of concern. Using the catalog provided by China Earthquake Networks Center，the Benioff strain ratio is calculated in the North South Seismic Belt 30 days before and after the March 21，2008 and February 12，2014 Yutian M_S7.3 earthquakes. The results show that the main shocks with $M>5.0$ within one year all occurred in the area near the high strain ratio or the junction area of the high and low strain ratio after the 2008 Yutian M_S 7.3 earthquake. The activity of strong earthquake coincides with the high strain ratio obviously. This reflects the high stress level in the regions. The area with high stress easily releases some small earthquakes after the Yutian earthquake and the research has certain significance for the strong earthquake.

Key words: **Two Yutian earthquakes　Benioff strain ratio　Seismic activity　North South Seismic Belt**