

青藏高原东北缘 $M_s \geq 6.0$ 强震活动特征及未来形势研究

姚家骏¹, 王慧娟², 冯建刚³, 马玉虎¹, 李玮杰¹

(1. 青海省地震局, 青海 西宁 810001; 2. 湖北省气象局, 湖北 武汉 430074; 3. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 2013年7月22日甘肃岷县漳县6.6级地震打破了青藏高原东北缘地区自2003年以来近十年的6级平静, 该地震的意义及该区未来震情发展受到了地震学家的关注。本文运用Morlet小波变换分析了1875-2013年青藏高原东北缘 $M_s \geq 6.0$ 强震活动的周期特征, 结果表明该区强震存在2~3年、8~10年、25~30年等尺度的显著周期; 1977年以来青藏高原东北缘地区强震活动频度虽然正常但活动强度处于一个相对较低的阶段。在讨论了岷县漳县6.6级地震的发震背景基础上, 认为该地震在青藏高原东北缘强震活动长时间较弱的背景下发生, 可能是该区强震活动强弱的一个拐点, 未来该区强震活动的频度与强度有增加的趋势。研究结果对该区震情跟踪工作有一定的参考价值。

关键词: Morlet小波; 青藏高原东北缘; 岷县漳县6.6级地震; 强震活动趋势。

中图分类号: P315.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2013)04-737-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2013.04.737

The Activity and Trends of $M_s \geq 6.0$ Earthquakes at the Northeastern Margin of the Qinghai-Tibetan Plateau

YAO Jia-jun¹, WANG Hui-juan², FENG Jian-gang³, MA Yu-hu¹, LI Wei-jie¹

(1. Earthquake Administration of Qinghai Province, Xining Qinghai 810000, China;

2. Hubei Meteorological Bureau, Wuhan Hubei 430074, China;

3. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: The northeastern margin of the Qinghai-Tibetan plateau is an earthquake-prone zone, where some $M_s \geq 8.0$ strong earthquakes have had serious consequences, for example, the 1920 Haiyuan earthquake of magnitude 8.5 resulted in more than 220 000 deaths. The Minxian-Zhangxian $M_s 6.6$ earthquake of 2013, which occurred in the northeastern margin of the Qinghai-Tibetan plateau, broke about ten years of seismic quiescence ($M_s \geq 6.0$) since the Minle earthquake of 2003. The significance of the $M_s 6.6$ earthquake and the earthquake tendency has attracted a great deal of attention, because many seismologists believe that the seismic risk in this area increased after the Wenchuan earthquake of 2008. The Benioff strain energy is a physical quantity that can be used to describe seismic activity, and it contains information on the frequency and strength of earthquakes in a given region. Some research on Benioff strain energy has been done to obtain a law for seismic activity. In

收稿日期: 2013-10-20

基金项目: 2013年度震情跟踪青年课题(2013020105); 2012年星火计划青年项目(XH12051Y); 青海省工程地震研究院基金(Matlab在工程场地地震安全性评价中的应用)

作者简介: 姚家骏(1981-), 男, 助研, 主要从事数字地震资料处理与应用研究。

this article, we calculate the Benioff strain energy of $M_s \geq 6.0$ earthquakes in the northeastern margin of the Qinghai-Tibetan plateau, and analyze the periodic characteristics of $M_s \geq 6.0$ strong earthquakes from 1875 to 2013 using the Morlet wavelet method. The results show that there were several main periods of activity, which are about 2 to 3 years, 8 to 10 years, and 25 to 30 years, and the first two periods were determined after the significance test was made. From the Benioff strain energy, the frequency of strong earthquakes in the northeastern margin of the Qinghai-Tibetan plateau has been normal since 1977, but the strength is relatively low. Using the effective earthquake case, this paper also discusses the background of the Minxian-Zhangxian $M_s 6.6$ earthquake and estimates the post-earthquake trend by analyzing the relationship between the probability of earthquake occurrence and the leaving time. The results show that there is a fairly large risk of a $M_s \geq 7.0$ earthquake in this region. The probability of earthquake occurrence has significantly increased since the Gonghe $M_s 7.0$ earthquake of 1990, and it will reach 1.00 by the end of 2015. In summary, the Minxian-Zhangxian $M_s 6.6$ earthquake displays the risk of a strong earthquake in the northeastern margin of the Qinghai-Tibetan plateau and may be an inflection point for the strength of seismic activity in this region. The primary results in this paper have a reference value for seismic research.

Key words: Morlet wavelet; northeastern margin of the Qinghai-Tibetan plateau; Minxian-Zhangxian $M_s 6.6$ earthquake; activity trend of strong earthquakes

0 引言

青藏高原东北缘是青藏高原块体与鄂尔多斯块体、阿拉善块体的交汇区,长期受到青藏高原不断的隆升和挤压作用,发育了一系列活动强烈的弧形构造带,是我国主要的强震活动地区之一,曾发生1879年甘肃武都8.0级、1920年宁夏海原8.5级、1927甘肃古浪8.0级等多次大震^[1-4]。2008年汶川8.0级地震发生后,中国大陆西部多个地震高发区迅速发生了响应地震,如2008年8月21日云南盈江5.9级、8月25日西藏日喀则6.8级、11月10日青海海西6.3级等强震,但是汶川震区北部的青藏高原东北缘地区继续保持着2003年10月25日甘肃民乐-山丹6.1级地震以来的6级地震平静状态,直至2013年7月22日甘肃岷县漳县6.6级地震的发生才打破了该区近十年之久的平静状态。甘肃岷县漳县6.6级地震是否标志着本地区进入新一轮地震活跃期,成为地震专家近期关注的焦点。

地震活动具有一定的周期或准周期性,这已为许多事实所证实^[5-8]。本文以青藏高原东北缘的地震活动资料为基础,用Morlet小波分析方法研究了该区域1875~2013年之间 $M_s \geq 6.0$ 地震活动的变化特征,进一步探讨岷县漳县6.6级地震震后青藏高原东北缘地区可能的强震趋势。

1 研究资料与方法

1.1 研究区域与资料

本文研究的是2008年汶川地震震区以北、2008年青海海西6.3级地震震区以东的青藏高原东北缘地区(E98°~

107°,N32°~40°),该区在2013年岷县漳县6.6级地震之前保持了长时间的6级地震平静状态。

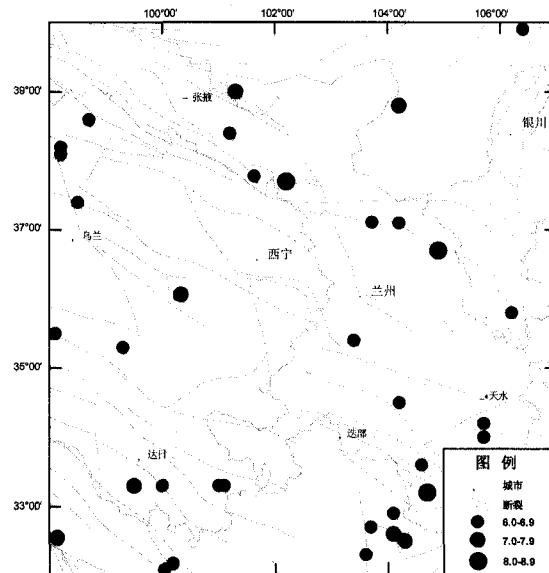


图1 青藏高原东北缘1870年以来 $M_s \geq 6.0$ 地震分布图
Fig.1 Distribution of earthquakes with $M_s \geq 6.0$ in the northeastern margin of the Qinghai-Tibetan plateau since 1870

图1是1870年以来青藏高原东北缘 $M_s \geq 6.0$ 地震震中分布图,图2是公元2000年以来该区 $M_s \geq 6.0$ MT图,据图可观察到1870年前后6级以上地震数量存在着明显的差异。考虑到历史地震目录的不完整性,并参考青藏高原北部地区地震目录完整性的相关分析^[9],本文选取1875~2013年地震资料来分析青藏高原东北缘 $M_s \geq 6.0$ 地震活动

特征。

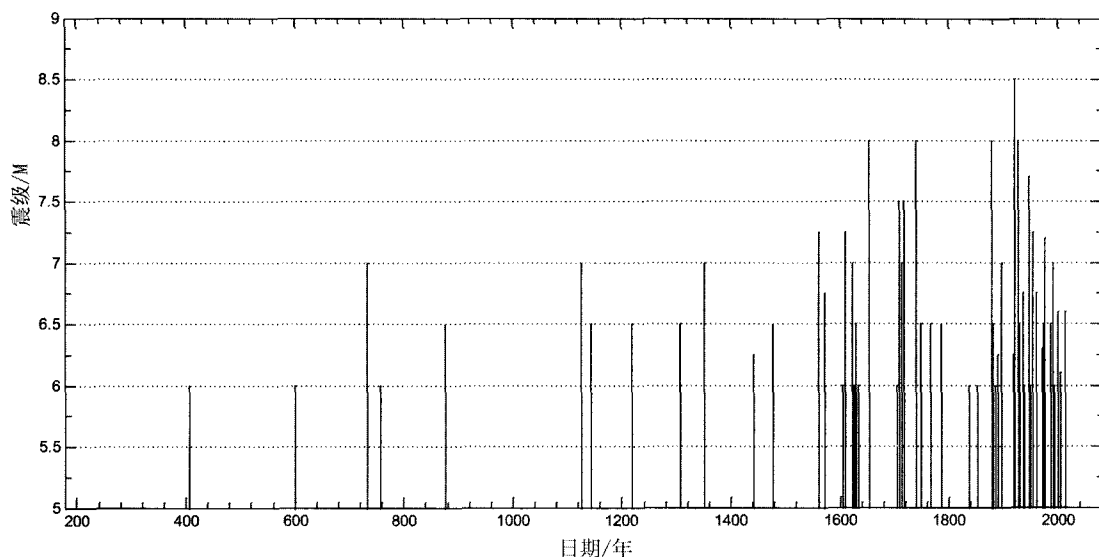


图2 青藏高原东北缘 $M_s \geq 6.0$ 地震 M - T 图(200-2012)

Fig.2 M - T chart of earthquakes with $M_s \geq 6.0$ in the northeastern margin of Qinghai-Tibetan plateau(200-2012)

Benioff 应变能是对地震频度和能量强度的综合反映,是地震活动中常用的物理量^[10-11]。通常利用地震震级与能量公式 $\lg E = 1.5M + 11.8$ 来计算地震能量,然后以年为采样时间, N 为一定时间内该区域的地震个数,按照如下公式计算 Benioff 应变能随时间的变化^[12]:

$$f(t) = \sum_{i=1}^N \sqrt{10^{1.5M_i + 11.8}} \quad (1)$$

1.2 分析方法

小波分析是一种强有力的信号分析工具,其中 Morlet 小波作为一种分解工具和检测长时间序列中多尺度突变的方法,已广泛应用于气象学、地震学等地球物理学各个领域^[13-16]。Morlet 小波不但具有非正交性,而且还是由 Gauss 调节^[17],其表达式近似为

$$\psi_0(t) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0 t} e^{-t^2/2} \quad (2)$$

式中: t 为时间; ω_0 是无量纲频率。当 $\omega_0 = 6$ 时,小波尺度 s 与傅里叶周期 T 基本相等 ($T = 1.03$ s)^[18],所以尺度项与周期项可以相互替代。由此可见 Morlet 小波在时间与频率的局部化之间有着很好的平衡。此外, Morlet 小波中还包含着更多的振动信息,小波功率可以将正、负峰值包含在一个宽峰之中^[19]。

离散小波变换公式为

$$W_f(a, b) = |a|^{-1/2} \sum_{i=1}^N f(i\delta t) \phi^* \left(\frac{i\delta t - b}{a} \right) \quad (3)$$

式中, $*$ 表示复共轭; a 为尺度因子 (与周期和频率有关); b 为平移因子 (时间位置); i 为资料序列时间位置标号; $f(t)$ 为变量时间序列; $W_f(a, b)$ 为小波系数; δt 为变量序列时间间隔,因为小波是复数形式的,所以小波变换后的系数

也是复数。

小波功率谱定义为

$$E_{a,b} = |W_f(a, b)|^2 \quad (4)$$

总体小波功率谱定义为

$$E_a = \frac{1}{N} \sum_{b=1}^N |W_f(a, b)|^2 \quad (5)$$

表征不同尺度对应的能量密度。

许多地球物理时间系列具有红噪声特征 (即方差随着尺度的增加或频率的下降而增加),所以常采用红噪声作为背景谱对小波谱进行检验^[20],在实际计算中,每个尺度上用影响锥以外的值以 $\alpha = 0.05$ 的显著水平进行估计。

2 地震活动周期分析及显著性检验

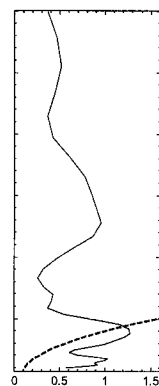
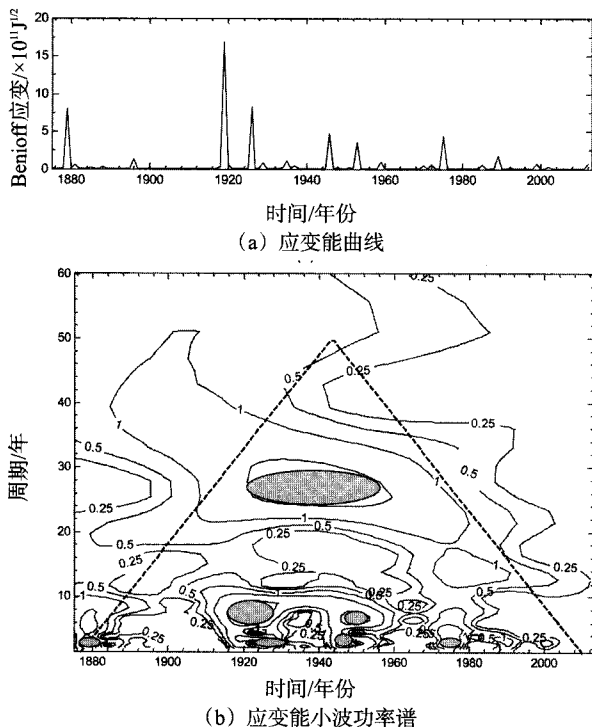
根据上述小波分析方法对青藏高原东北缘地区地震活动参数 Benioff 应变能进行了分析。首先将 Benioff 应变能年平均值 (图 3(a)) 标准化,数据标准化的好处是可以消除数值相差较大所引起的误差,操作方法为应变能年平均值序列减去整个序列平均值,再除上序列的标准差。图 3b 为应变能标准化数据小波功率谱,小波功率越大,等值线越密集。图中锥形虚线为影响锥,该锥线以外表明该部分小波功率谱图受到边缘效应的影响,表现出的周期特征存在较大不确定性。由图 3(b) 可见,青藏高原东北缘地区地震活动存在着 2~3 年、8~10 年及 25~30 年尺度的优势周期 (图中阴影指示的部分),其中 25~30 年尺度周期存在于 1920—1960 年之间,应该与 1920 年海原 8.5 级、1927 年古浪 8.0 级、1947 年达日 7.7 级、1954 年山丹 7.25

级、民勤7.0级等一系列巨大地震有关,这是一个大震密集的阶段。两个8年周期也存在于1920—1960年之间,涵盖于25~30年周期之内,说明了上述1920—1960年之间7.0级以上巨大地震活动分为两个活跃周期。根据实际资料可以看出,1920—1927年的海原地震、古浪地震在第一个8~10年尺度活跃周期,1947—1954年达日地震、山丹地震、民勤地震在第二个8~10年尺度活跃周期。四个2~3年尺度的优势周期存在于1875—1980年之间的各个地震活跃阶段之中,每个活跃阶段中平均两年左右即可能有6级以上强震发生。

图3(c)为对小波谱进行 $\alpha=0.05$ 水平显著性检验的小波全谱图,当小波功率谱曲线大于显著性检验(图中虚线)时,表明该区段对应的周期特征达到了 $\alpha=0.05$ 水平的显著性检验。因此从图中可以看出,通过显著性检验的周期为2~3年、8~10年,但是25~30年较长尺度的周期并未通过检验。由信号分析的基本原理可知,分析结果的精度与观测时间长短有着重要关系,观测时间越长,所得结果精度越高^[12],1875—2013年近140年间的长度上只检测出一个25~30年较长尺度的周期,数据长度与样本数目的不足造成了长尺度周期未能通过 $\alpha=0.05$ 水平显著性检验。

3 岷县漳县6.6级地震震后强震趋势估计

根据对青藏高原东北缘地区1875年以来地震目录的分析(图4),可以发现该区强震活动有以下特点:(1)1875年至今共发生6.0~6.9级地震26次,7.0~7.9级大震6次,



总体小波功率谱 ($\times 10^{12} \text{J}$)

(c) 小波全谱图及显著性检验

图3 青藏高原东北缘 Benioff应变能周期谱

Fig.3 Period spectrum analysis of Benioff strain energy in the northeastern margin of Qinghai-Tibetan Plateau

8.0~8.9级大震3次,最大地震为1920年宁夏海原8.5级大震,7级以上大震占26%,可见该区大震发生的比例是较高的。(2)由1885年甘肃天水南6.0级地震到1920年宁夏海原8.5级大震,历时35年,震级呈线性递增趋势;由1920年宁夏海原8.5级大震至2000年青海兴海6.6级地震,历时80年,期间每个阶段的最大震级呈线性递减的趋势(图中虚线所示),因此可知海原地震以来青藏高原东北缘地区地震能量的强度是逐渐递减的,2000年至今处于一个相对底部的阶段。(3)进一步研究发现该区两次8级地震有直接前震现象,1879年7月1日甘肃武都8.0级地震震中附近在震前两天左右发生一个5 $\frac{3}{4}$ 地震,1927年5月23日甘肃古浪8.0级地震震中附近震前50分钟左右发生一个5.5级地震,但由于当时没有数字地震观测资料,所以地震学者们无法对这些前震例子做深入的研究。

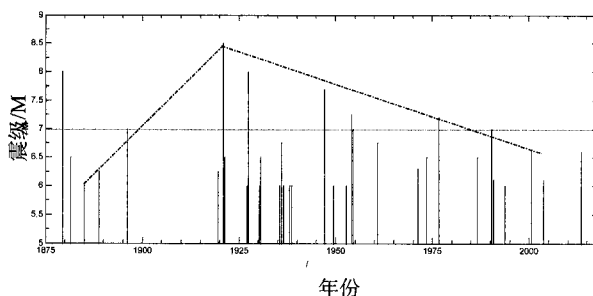
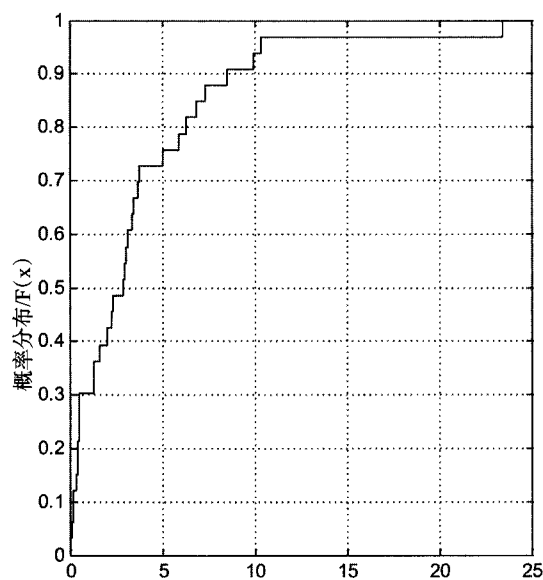


图4 青藏高原东北缘1875年以来 $M_s \geq 6.0$ 地震M-T图

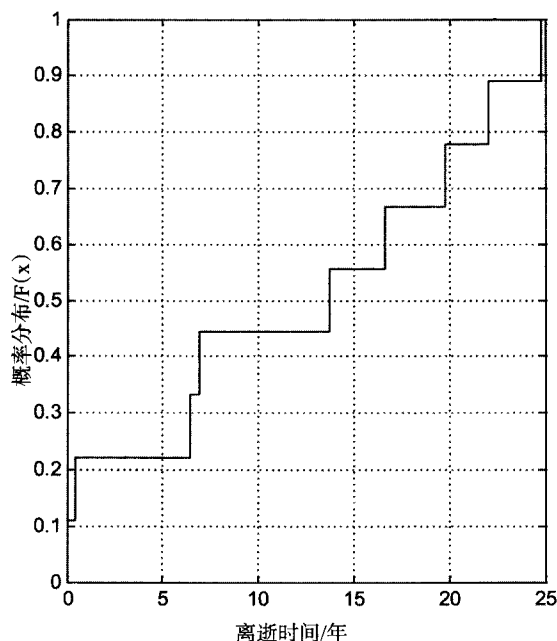
Fig.4 M-T chart of earthquakes with $M_s \geq 6.0$ in the northeastern margin of the Qinghai-Tibetan plateau since 1875

利用以往有效的震例,从1879年武都南8.0级地震开始,令每个地震的发震时间为 $T_1, T_2, T_3, \dots, T_n$,根据发震时间间隔($\Delta T_i = T_{i+1} - T_i$),统计离逝时间与发震概率的关系,如图5所示。6级地震发震概率在离逝时间为6年之前迅速增加,2013年岷县漳县6.6级地震临震前发震累积

概率为0.91。7级地震概率与离逝时间呈逐步增大的关系,1990年共和7.0级地震以来7级地震离逝时间近23.5年,发震的概率已经累积接近0.9。



(a) $M_s \geq 6.0$



(b) $M_s \geq 7.0$

图5 青藏高原东北缘地震离逝时间与发震概率分布

Fig.5 Distribution of the elapsed time and earthquake occurrence probabilities in the northeastern margin of Qinghai-Tibetan plateau

根据前述对 Benioff 应变能的小波分析,发现青藏高原东北缘地区在1977年至今地震频度上无太大变化,虽然1990年有共和7.0级地震的发生,但该区地震在强度上相对于1977以前比较弱,又经历了2003—2013年间长达

9.74年的平静后才发生了本次岷县漳县6.6级地震,可见1977年至今是青藏高原东北缘一个强震活动较弱的阶段。2008年于田7.3级地震以来中国大陆西部发生了多次7级以上的大震,地震专家一致认为中国大陆进入7级地震活跃期,但青藏高原东北缘地区地震活动的强度自1920年以来一直处于逐渐衰减的状态。目前7级地震离逝时间已经处于历史高值,在这种背景下2013年岷县漳县6.6级地震打破了青藏高原东北缘6级地震近十年的平静。在构造活动强烈的地区,大范围的地震平静可能是与未来强震有关^[21-22],因此,岷县漳县地震有可能是青藏高原东北缘地震活动强弱期的一个拐点。

4 结论与讨论

(1) 青藏高原东北缘地区地震活动存在着2年、8年及25年尺度的优势周期,其中2~3年、8~10年尺度的周期通过了到了 $\alpha=0.05$ 水平的显著性检验;

(2) 1977年至今地震活动频度上无太大变化,但地震活动强度相对于以前是较弱的,可见青藏高原东北缘地区30多年来一直处于地震活动较弱的阶段;

(3) 2013年7月22日岷县漳县6.6级地震打破了青藏高原东北缘2003年民乐—山丹地震以来近十年的6级强震平静,临震前积累的 $M_s \geq 6.0$ 强震发震概率为0.91,目前7级地震离逝时间近23.5年,处于历史的高值,发震概率已经接近0.9。

青藏高原东北缘历史上的大震活动强度大、频次高,但30多年来该区地震活动的强度保持较弱的状态,并在2003—2013年间保持了近十年的强震平静,在这种地震弱活动背景下,2013年7月22日岷县漳县6.6级地震对平静期的突破有可能预示着该区域进入新一轮的地震活跃时期,对未来强震活动具有一定的指示意义。

本文得到了中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地、湖北省气象局气候变化处、甘肃省地震局预报中心专家们的指导与帮助,也得到了审稿专家宝贵的修改意见,在此一并表示感谢。

参考文献(References)

- [1] 邓启东, 张培震, 冉勇康, 等. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学: D辑, 2002, 32(12): 1020-1030.
Deng Q D, Zhang P Z, Ran Z K, et al. Characteristics of Active Tectonics of China[J]. Science in China: Series D, 2002, 32(12): 1020-1030. (in Chinese)
- [2] 袁道阳, 何文贵, 刘小凤, 等. 10余年来甘肃省中强地震的发震构造特征[J]. 西北地震学报, 2006, 28(3): 235-241.
Yuan D Y, He W G, Liu X F, et al. The Characteristics of Seismogenic Structure of Middle-strong Earthquakes in Recent

- Year, Gansu Province[J]. Northwestern Seismological Journal, 2006, 28(3):235-241. (in Chinese)
- [3] 张培震, 邓启东, 张国民, 等. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学: D辑, 2003, 33(增刊): 12-20.
Zhang P Z, Deng Q D, Zhang G M, et al. Active Tectonic Blocks and Strong Earthquakes[J]. Science in China: Series D, 2003, 33 (Suppl.): 12-20. (in Chinese)
- [4] 蔡副全. 1879年武都南8级地震新资料的发现与应用[J]. 地震工程学报, 2013, 35(2): 311-320.
CAI F Q. New Discovery and Application of Some Historical Data for the M8. 0 Earthquake in Southern Wudu in 1879[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(2): 311-320. (in Chinese)
- [5] 张国民, 李丽. 地震大形势预测的利学思路及未来几年我国地震形势[G]//中国地震趋势预测研究. 北京: 地震出版社, 1998: 174-187.
Zhang G M, Li L. Scientific Thinking of Earthquake Trend Prediction and our Country's Earthquake Trend in the Years to Come[G]//Earthquake Prediction Study of China. Beijing: Seismological Press, 1998: 174-187. (in Chinese)
- [6] 傅征祥, 刘杰, 刘桂萍, 等. 中国大陆成组强震活动水平的三分法及其应用[J]. 地震, 2000, 20(S1): 34-37.
Fu Z X, Liu J, Liu G P, et al. Three Division Method of Clustering Strong Earthquake Activity in China's Continent and its Applications[J]. Earthquake, 2000, 20(S1): 34-37. (in Chinese)
- [7] 马宗晋, 傅征祥. 1966-1976年中国九大地震[M]. 北京: 地震出版社, 1982.
Ma Z J, Fu Z X. Nine Macroquakes of China Between 1966-1976[M]. Beijing: Seismological Press, 1982. (in Chinese)
- [8] 刘小凤, 梅秀苹, 冯建刚, 等. 青藏高原北部地区地震基本活动状态定量评价[J]. 西北地震学报, 2011, 33(2): 130-136.
Liu X F, Mei X P, Feng J G, et al. Quantitative Estimating Basic State of Seismicity in Northern Region of Qinghai-Xizang Plateau[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(2): 130-136. (in Chinese)
- [9] 屠泓为, 李智敏, 李文巧, 等. 青海省及邻近区域历史地震目录完整性分析探讨[J]. 高原地震, 2010, 22(3): 7-15.
Tu H W, Li Z M, Li W Q, et al. Completeness Analysis on Earthquake Catalogues in Qinghai and Its Neighboring Areas[J]. Plateau Earthquake Research, 2010, 22(3): 7-15. (in Chinese)
- [10] Mogi K. Active Periods in the World's Chief Seismic Belts[J]. Tectonophysics, 1974, 22(3-4): 265-282.
- [11] 傅淑芳, 刘宝诚. 地震学教程[M]. 北京: 地震出版社, 1991.
Fu S F, Liu B C. Seismology Course[M]. Beijing: Seismology Seismological Press, 1991. (in Chinese)
- [12] 宋治平, 尹继尧, 薛艳, 等. 全球及各地震区带强震活动周期特征[J]. 地球物理学报, 2013, 56(6): 1868-1876.
Song Z P, Yin J Y, Xue Y, et al. The Global and Subzone Period Characteristics for Large Earthquakes[J]. Chinese J. Geophys., 2013, 56(6): 1868-1876. (in Chinese)
- [13] 邵辉成, 杜常娥, 刘志辉, 等. 中国大陆地震活动的多尺度分析[J]. 地震学报, 2004, 26(1): 102-105.
Shao H C, Du C E, Liu Z H, et al. Multi-scale Analysis of Earthquake Activity in Chinese Mainland[J]. Acta Seismologica Sinica, 2004, 26(1): 102-105. (in Chinese)
- [14] 宋治平, 武安绪, 王梅, 等. 小波变换在前兆观测资料分析中的应用[J]. 中国地震, 2004, 20(1): 31-38.
Song Z P, Wu A X, Wang M, et al. Application of Wavelet Transform to Analyze Digital Data of Precursors[J]. Earthquake Research in China, 2004, 20(1): 31-38. (in Chinese)
- [15] 刘太中, 荣平平, 刘式达, 等. 气候突变的子波分析[J]. 地球物理学报, 1995, 38(2): 158-162.
Liu T Z, Rong P P, Liu S D, et al. The Wavelet Analysis of climate Change[J]. Chinese J. Geophys., 1995, 38(2): 158-162. (in Chinese)
- [16] 白春华, 徐文耀. 主磁场长期变化十年至百年尺度的周期[J]. 地球物理学报, 2010, 53(4): 904-911.
Bai C H, Xu W Y. Multi-decadal to Centennial Secular Variation of the Main Geomagnetic Field[J]. Chinese J. Geophys., 2010, 53(4): 904-911. (in Chinese)
- [17] Torrence C, Compo G P. A Practical Guide to Wavelet Analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(1): 61-78.
- [18] Torrence C, Compo G P. Interdecadal Changes in the ENSO-monsoon System[J]. J. Climate, 1999, 12: 2679-2690.
- [19] Grinsted A, J C Moore, S Jevrejeva. Application of the Cross Wavelet Transform and Wavelet Coherence to Geophysical Time Series[J]. Nonlinear Processes Geophys., 2004, 11: 561-566.
- [20] 高静怀, 满蔚仕, 陈树民. 广义S变换域有色噪声与信号识别方法[J]. 地球物理学报, 2004, 47(5): 867-875.
Gao J H, Man W S, Chen S M. Recognition of Signal from Colored Noise Background in Generalized S-transformation Domain[J]. Chinese J. Geophys., 2004, 47(5): 867-875. (in Chinese)
- [21] 杨立明, 肖丽珠, 张小美, 等. 青藏高原北部地震活动形势及其与中国大陆地区地震活动的关系研究[J]. 西北地震学报, 2001, 23(3): 243-249.
Yang L M, Xiao L Z, Zhang X M, et al. Study on Seismicity Character of Northeastern Margin of the Qinghai-Tibetan Plateau and Relationship between it and Seismicity of Continent of China[J]. Northwestern Seismological Journal, 2001, 23(3): 243-249. (in Chinese)
- [22] 戴志阳, 陈宇卫, 傅容珊. 前兆性地震平静研究[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(1): 18-24.
Dai Z Y, Chen Y W, Fu R S, et al. The Study of Precursory Seismic Quiescence[J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(1): 18-24. (in Chinese)