

李英,高永国,王维欢,等.龙门山断裂带的贝尼奥夫应变分析[J].地震工程学报,2022,44(4):896-900.DOI:10.20000/j.1000-0844.20210330001

LI Ying, GAO Yongguo, WANG Weihuan, et al. Benioff strain analysis of the Longmenshan fault zone [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(4): 896-900. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20210330001

龙门山断裂带的贝尼奥夫应变分析

李 英, 高永国, 王维欢, 许康生

(甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 基于 2011—2020 年在龙门山地区发生的地震, 分 3 个区段估算累积贝尼奥夫应变。结果表明, 龙门山北段对九寨沟 $M_s7.0$ 地震存在阶跃, 震后一年内累积贝尼奥夫应变抬升量约为 2000×10^8 ; 龙门山中段对芦山 $M_s7.0$ 地震存在明显阶跃, 震后一年内累积贝尼奥夫应变抬升量约为 5300×10^8 。由此可以认为, 龙门山中段与芦山地震有较高关联度, 而其北段与九寨沟地震的关联度次之。这个抬升量是该区域构造运动与对应地震关联度的一个描述, 这对于研究地震的动力源、孕震构造及发震机理有参考意义。另外, 对累积贝尼奥夫应变时变斜率的研究结果还表明, 累积贝尼奥夫应变的时变斜率在邻近地震前均存在降低的现象, 这可能是震前应力松弛过程的表现, 但这仅是一个初步研究, 对其机理以及可否成为大地震孕育指标等问题还需要对更多震例作进一步研究。

关键词: 地震目录; 龙门山断裂带; 贝尼奥夫应变; 九寨沟 $M_s7.0$ 地震; 芦山 $M_s7.0$ 地震

中图分类号: P315.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2022)04-0896-06

DOI:10.20000/j.1000-0844.20210330001

Benioff strain analysis of the Longmenshan fault zone

LI Ying, GAO Yongguo, WANG Weihuan, XU Kangsheng

(Gansu Earthquake Agency, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: In this paper, based on the earthquakes occurred in the Longmenshan region from 2011 to 2020, the cumulative Benioff strain in three sections were estimated. The results show that there is a step-up in the northern section of Longmenshan fault to the Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake, and the cumulative Benioff strain uplift within one year after the earthquake is about 2000×10^8 ; there is a significant step-up in the middle section of Longmenshan fault to the Lushan $M_s7.0$ earthquake, and the cumulative Benioff strain uplift within one year after the earthquake is about 5300×10^8 . Therefore, it is believed that the correlation between the middle section of Longmenshan fault and the Lushan earthquake is high, followed by that between the north section of Longmenshan fault and the Jiuzhaigou earthquake. As a description of the correlation between regional tectonic movement and corresponding earthquake, the uplift amount is of reference significance to study the dynamic source, seismogenic structure, and seismogenic mechanism of earthquake. The research results also show that the time-varying slope of cumulative Benioff strain decreases prior to the earthquake, which may be the manifestation of the stress

relaxation process before earthquake. This paper is just a preliminary study on the Benioff strain, and more earthquake cases are needed to study its mechanism and whether it can become a preparation index for large earthquakes.

Keywords: earthquake catalogue; Longmenshan fault zone; Benioff strain; Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake; Lushan $M_s7.0$ earthquake

0 引言

滑动速率是对构造运动状态的描述,龙门山地区的构造运动及滑动速率一直是地学界关注的热点问题。Densemore 等^[1]认为龙门山断裂带在全新世的滑动率在 0.5 mm/a 之下。基于 GPS 的观测结果,一些学者也给出了略有差异的结果,King 等^[2]在 1997 年指出龙门山断裂带的缩短速率在 0~5 mm/a;2000 年 Holt 等^[3]认为是在 1~5 mm/a,2004 年张培震等^[4]认为是在(4.0±2.0) mm/a。上述研究都是在较大时间尺度和空间尺度上的平均结果,已经发表的小尺度的研究结果不多。继 2008 年汶川大地震之后,这一区域附近又发生了几次大的地震,例如 2013 年的芦山 $M_s7.0$ 地震,2017 年的九寨沟 $M_s7.0$ 地震。关于这些地震的发震构造、震源机制及与龙门山断裂带的关系已有一些研究成果^[5-7]。那么在较小的时间尺度上,龙门山地区不同区段的构造运动有什么特征或差异,和邻区发生的强震存在怎样的关系?关于岩石受压的声发射实验

室研究表明,基于声发射密度计算的加卸载响应比曲线和基于贝尼奥夫应变计算的加卸载响应比曲线相当一致^[8],意味着贝尼奥夫应变描述了介质受压渐进破坏的力学过程。本文基于最近 10 年该区域地震观测的结果,估算不同区段的贝尼奥夫应变,并试图初步探讨与本区域大地震孕育和发生的关系。

1 资料和资料处理

本文所用资料来自中国地震台网的统一编目结果,研究对象为龙门山断裂带。龙门山断裂带位于巴颜喀拉块体和华南块体的交汇区域。自西向东排列有汶川—茂县断裂、映秀—北川断裂和灌县—安县断裂,沿断裂走向一般分为南、中、北 3 段(泸定—灌县,灌县—北川、北川—广元)^[5,9-10]。据此我们从北到南大致划分三个区域进行研究,如图 1 所示,区域 a:103°~106°E,32°~34°N;区域 b:101.5°~104.5°E,30°~32°N;区域 c:101°~104.0°E,28°~30°N。研究时段为 2011—2020 年,震级 $M_{L}2.5$ 以上,不同区段地震震级的时序在图 2 中给出。

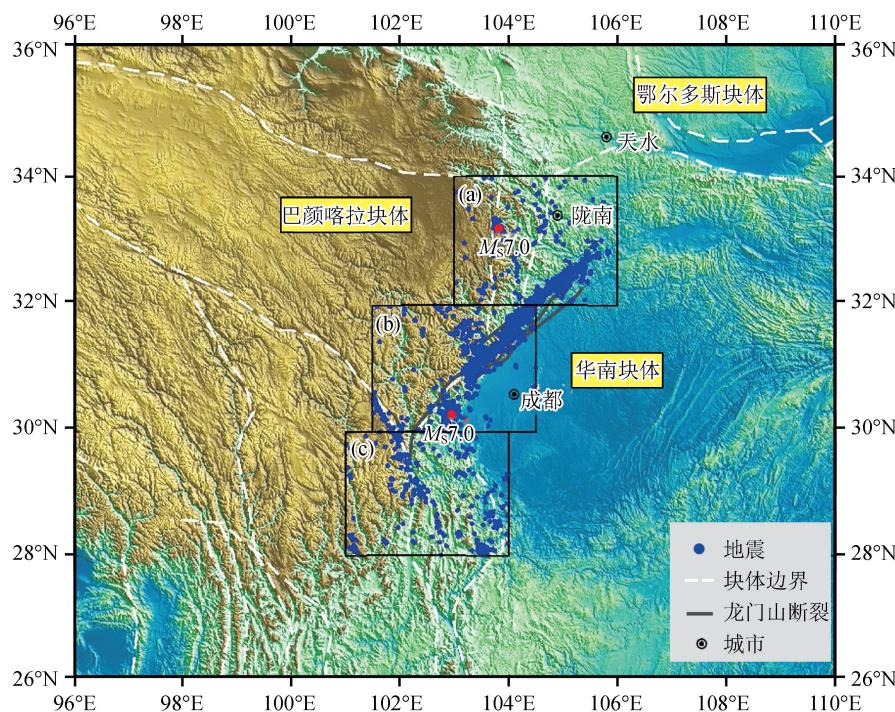


图 1 地震分布及分区(2011—2020 年)

Fig.1 Earthquake distribution and zonation in the study area (2011–2020)

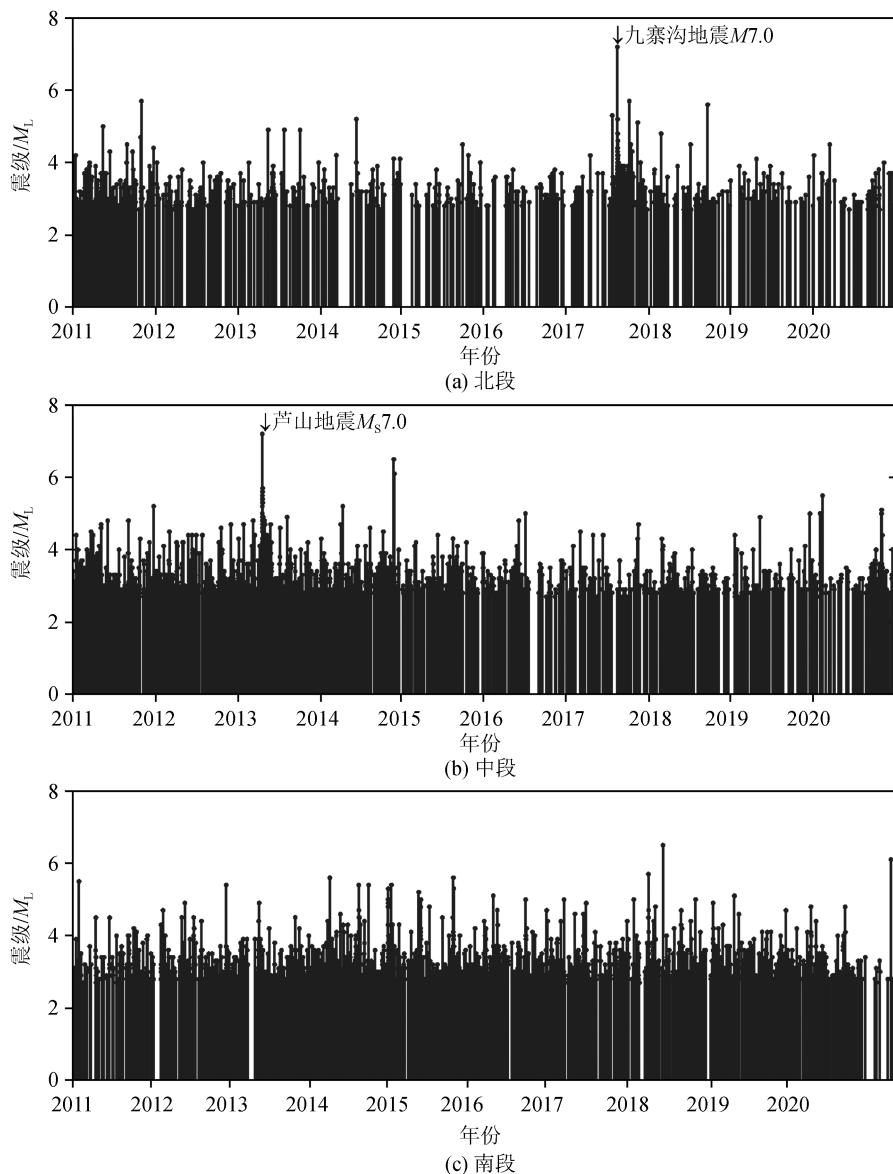


图 2 龙门山断裂带三个区域地震震级时序图

Fig.2 The magnitude sequence of earthquakes in three sections of Longmenshan fault zone

早在 21 世纪中叶,美国地震学家 Benioff^[112]指出,贝尼奥夫应变可以用于度量一个区域的滑动速率。近年来其在地震前兆释放加速研究方面得到了应用^[12]。本文采用了 Robinson 提出的关系式^[13]:

$$\lg M_0 = 1.5 M_L + 9.05 \quad (1)$$

式中: M_L 为震级; M_0 为地震矩($N \cdot m$)。地震矩和能量的关系,采用了 1977 年 Kanamori 给出的数学式^[14]:

$$E = \frac{M_0}{2 \times 10^4} \quad (2)$$

式中: E 为地震辐射能,将其开平方就得到了贝尼奥夫应变。贝尼奥夫应变在时序上的逐项累加就得到了累积贝尼奥夫应变。

2 结果与讨论

图 3(a)所示,这是基于龙门山断裂北段发生地震估算的累积贝尼奥夫应变。可见九寨沟 $M_s 7.0$ 地震产生了明显的累积贝尼奥夫应变的阶跃,而对于芦山 $M_s 7.0$ 地震反映微弱。图 3(b)展示的是龙门山中段的累积贝尼奥夫应变,对于芦山 $M_s 7.0$ 地震产生了明显阶跃,而对于九寨沟地震没有明显反映。图 3(c)给出了龙门山南段的累积贝尼奥夫应变,对于上述两例地震没有明显反映。这就显示出较为明显的区域性特征。我们知道,贝尼奥夫应变是对区域内深部及地壳在力源作用下应力积累及运动状态的一种描述,区域应力和运动状态也受到周

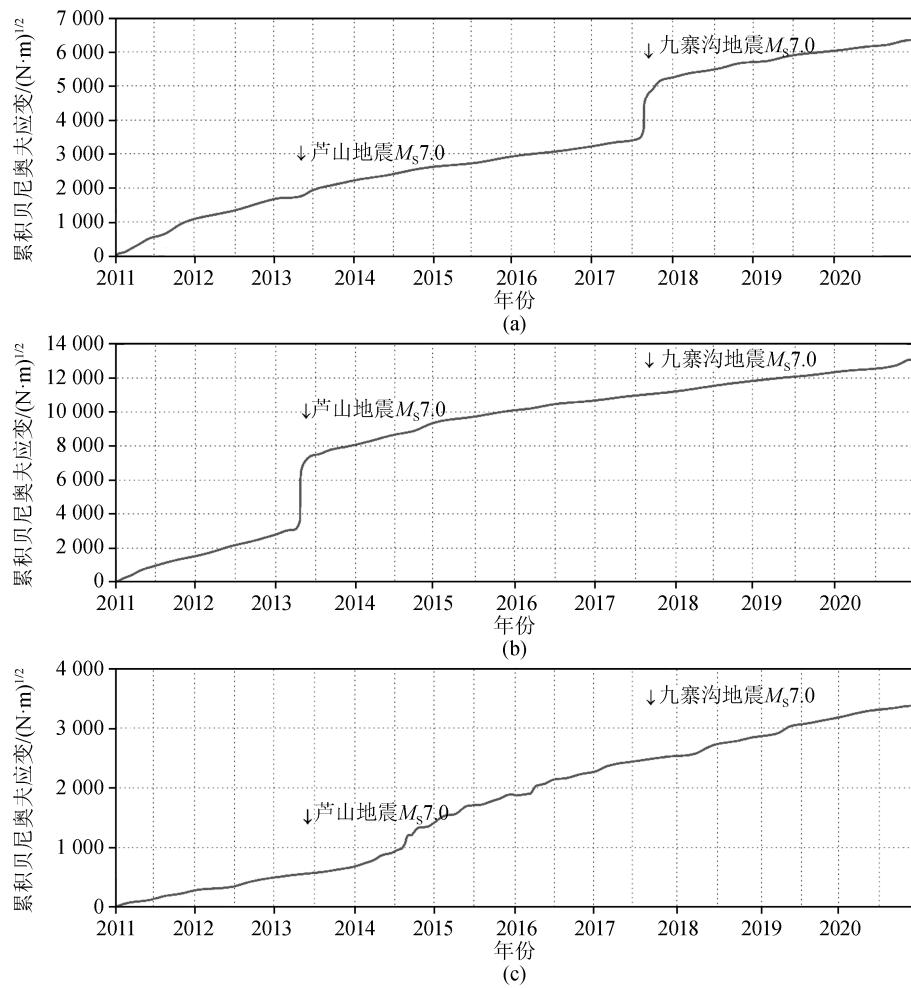


图 3 龙门山断裂带三个区域的累积贝尼奥夫应变

Fig.3 Cumulative Benioff strain in three sections of Longmenshan fault zone

边构造运动状态的作用和影响。

为了考察各区域内贝尼奥夫应变与附近地震的关系,我们选择这几个大地震之间相对“平静”期的累积贝尼奥夫应变拟合直线并计算其斜率。从表 1 中可知,较大的斜率意味着地壳运动能量的释放相对“活跃”,反之则意味着能量的释放相对“平静”。我们注意到,在 2011—2012 年这一时段内,区域 a 具有较高的斜率,意味着区域地壳具有较强的活跃性,2015 年至 2017 年 7 月,该区域斜率减小超过一半,为 10 年间的最低斜率。九寨沟 $M_s 7.0$ 地震发

表 1 不同时段累积贝尼奥夫应变的时变斜率

Table 1 Time varying slope of cumulative Benioff strain in several periods

区域	时段		
	2011 年 1 月— 2012 年 12 月	2015 年 1 月— 2017 年 7 月	2018 年 1 月— 2020 年 12 月
区域 a	2.64×10^{-5}	1.03×10^{-5}	1.11×10^{-5}
区域 b	4.40×10^{-6}	1.34×10^{-4}	1.47×10^{-4}
区域 c	7.43×10^{-6}	1.30×10^{-5}	9.63×10^{-6}

生后 1 年内,该区域贝尼奥夫应变抬升约 2000×10^8 ,地震后应变的时变斜率略有提升。区域 b 在 2011—2012 年这一时段内,显示出 10 年内最低的斜率,芦山 $M_s 7.0$ 地震后一年内贝尼奥夫应变抬升约 5300×10^8 ,贝尼奥夫应变的时变斜率在震后增大约 30 倍,但对九寨沟 $M_s 7.0$ 无明显反映,意味着区域 b 的构造活动与芦山地震关系密切,而与九寨沟地震关联较弱。区域 c 在 2011—2012 时段内和 2018—2020 时段内都显示出较低的斜率。关于地震孕育和发生较为公认的解释是,孕震过程是在应力作用下能量不断积累的过程,地震的发生是一种临界现象^[15],本文得到的贝尼奥夫应变对大地震的阶跃抬升也支持了这一观点。对于在邻区地震时产生明显阶跃的区域 a 和区域 b,我们可以看到一个共同的特征就是在临近地震之前一段时间,具有在研究时段内最小的应变时变斜率。对于这种现象,一些学者的研究认为,是由于大地震之前震源及其附近滑移导致的应力松弛过程^[16-17]。关于震前应变

释放的研究表明,在孕震区较大范围内显示加速,在较小的范围内存在应变释放减小的现象^[18-19]。由于本文研究范围较小,显示存在震前应变时变斜率减小的现象,这与上述其他学者的研究结果也是吻合的。基于力学原理,地震孕育是震源区介质受力后变形、损伤、演化、破坏的过程,整个过程伴随着能量的释放,微震活动就是能量释放的表现,也就是说贝尼奥夫应变也描述了大地震孕育的过程^[20]。贝尼奥夫应变时变斜率的变化表征了能量释放的不均匀性,基本原因就是介质的不均匀性,因为震源区介质的不均匀性使得裂纹在成核、扩展、相互作用和连通的过程表现出非线性行为^[21]。籍此,我们认为,由于孕震能量的大小、构造介质的差异等因素,不同区域贝尼奥夫应变具有共同的表现,也会显示出区域特征。研究不同区域的贝尼奥夫应变特征,有助于对该区域地震孕育和发生的特征和机理研究。

3 结语

基于最近10年龙门山地区发生地震估算的贝尼奥夫应变结果可以看到,龙门山地区三个区段贝尼奥夫应变对邻区地震存在区域性差异,其中龙门山中段与芦山地震存在最为紧密的关系,震后一年内累积贝尼奥夫应变抬升量最大,约为 $5\ 300 \times 10^8$,但对于九寨沟地震几乎没有反映;而龙门山北段与九寨沟地震有关联,而其关联度不及前者,九寨沟地震和芦山地震同为 $M_s7.0$ 地震,能量相当,但龙门山北段在九寨沟地震震后一年累积贝尼奥夫应变抬升量约为 $2\ 000 \times 10^8$,不及前者一半。由此可以推测,龙门山断裂带的活动对芦山地震的发生有较大贡献,而对于九寨沟地震的贡献不及前者。另外我们还注意到累积贝尼奥夫应变的时变斜率在邻近地震前均存在降低的现象,这应该是震前应力松弛过程的表现。当然,这只是一个初步研究,还需要对更多震例作进一步的研究。

参考文献(References)

- [1] DENSEMORE A L, ELLIS M A, LI Y, et al. Active tectonic of the Beichuan and Pengguan fault at the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Tectonics, 2007, 26(4): TC4005.
- [2] KING R W, SHEN F, BOURCHFIELD B C, et al. Geodetic measurement of crustal motion in southwest China[J]. Geology, 1997, 25(2): 179-182.
- [3] HOLT W E, CHAMOT-ROOKE N, LE PICHON X, et al. Velocity field in Asia inferred from Quaternary fault slip rates and global positioning system observations[J]. Journal of Geophysical Research (Solid Earth), 2000, 105(B8): 19185-19209.
- [4] ZHANG P Z, SHEN Z K, WANG M, et al. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data[J]. Geology, 2004, 32(9): 809-812.
- [5] 李勇, 邵崇建, 李芃宇, 等. 九寨沟 $M_s7.0$ 级地震的左旋走滑作用与动力机制[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2017, 44(6): 641-648.
LI Yong, SHAO Chongjian, LI Pengyu, et al. Left-lateral strike-slip effect and dynamic mechanism of the Jiuzhaigou $M_{s7.0}$ earthquake in the eastern margin of Tibetan Plateau, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2017, 44(6): 641-648.
- [6] 季灵运, 刘传金, 徐磊, 等. 九寨沟 $M_s7.0$ 地震的InSar观测及发震构造分析[J]. 地球物理学报, 2017, 60(1): 4069-4082.
JI Lingyun, LIU Chuanjin, XU Lei, et al. Insar observation and inversion of the seismogenic fault for the 2017 Jiuzhaigou $M_{s7.0}$ earthquake in China[J]. Chinese J Geophys, 2017, 60(1): 4069-4082.
- [7] 许力生, 严川, 张旭, 等. 芦山 $M_s7.0$ 地震究竟发生在哪[J]. 地球物理学报, 2013, 56(9): 2982-2993.
XU Lisheng, YAN Chuan, ZHANG Xu, et al. Where did the Lushan $M_{s7.0}$ earthquake occur in the world? [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(9): 2982-2993.
- [8] 张浪平, 尹祥础, 梁乃刚. 加卸载响应比与损伤变量关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1874-1881.
ZHANG Langping, YIN Xiangchu, LIANG Naigang. Study on relation between load/unload response ratio and damage variable[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1874-1881.
- [9] 付碧宏, 时丕龙, 王萍, 等. 2008年汶川地震断层北川段的几何学与运动学特征及地震地质灾害效应[J]. 地球物理学报, 2009, 52(2): 485-495.
FU Bihong, SHI Pilong, WANG Ping, et al. Geometry and kinematics of the 2008 Wenchuan earthquake surface ruptures around the Qushan Town of Beichuan County, Sichuan: implications for mitigation of seismic and geologic disasters[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(2): 485-495.
- [10] 焦青, 杨选辉, 许丽卿, 等. 汶川8.0级地震前后龙门山断裂活动特征浅析[J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(4): 7-11, 37.
JIAO Qing, YANG Xuanhui, XU Liqing, et al. Preliminary study on motion characteristics of Longmenshan fault before and after $M_s8.0$ Wenchuan earthquake[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2008, 28(4): 7-11, 37.
- [11] BENIOFF H. Earthquake and rock creep (part I: creep characteristics of rocks and the origin of aftershocks)[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1951, 41(1): 31-62.
- [12] WANG L F, MA S L, MA L. Accelerating moment release of acoustic emission during rock deformation in the laboratory[J]. Pure and Applied Geophysics, 2008, 165(2): 181-199.

(下转第912页)

- 拉善地块壳幔电性结构研究[J].地球物理学报,2019,62(3):950-966.
- XIA Shibin, WANG Xuben, MIN Gang, et al. Crust and uppermost mantle electrical structure beneath Qilianshan Orogenic Belt and Alxa Block in northeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(3):950-966.
- [27] 张珂, 刘开瑜, 吴加敏, 等. 宁夏中卫盆地的沉积特征及其所反映的新构造运动[J]. 沉积学报, 2004, 22(3): 465-473.
- ZHANG Ke, LIU Kaiyu, WU Jiamin, et al. Depositional features of the Zhongwei Basin, Ningxia, and its implications for Neotectonic movements [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(3): 465-473.
- [28] WANG W T, ZHANG P Z, KIRBY E, et al. A revised chro-
- nology for Tertiary sedimentation in the Sikouzi Basin: implications for the tectonic evolution of the northeastern corner of the Tibetan Plateau[J]. Tectonophysics, 2011, 505(1/2/3/4): 100-114.
- [29] WANG W T, KIRBY E, ZHANG P Z, et al. Tertiary Basin evolution along the northeastern margin of the Tibetan Plateau: evidence for basin formation during Oligocene transtension[J]. Geological Society of America Bulletin, 2013, 125(3/4): 377-400.
- [30] 宁夏回族自治区地矿局. 区域水文地质普查报告(1:20万, 中卫幅)[Z]. 1981
Bureau of Geology and Mineral Resources of Ningxia Hui Autonomous Region. Regional hydrogeological survey report (1: 200 000, Zhongwei)[Z]. 1981.

(上接第 900 页)

- [13] ROBINSON R. A test of the precursory accelerating moment release model on some recent New Zealand earthquakes[J]. Geophysical Journal International, 2000, 140(3): 568-576.
- [14] KANAMORI H. The energy release in great earthquakes[J]. Journal of Geophysics Research, 1977, 82(B20): 2981-2987.
- [15] JAUMÉ S C, SYKES L R. Evolving towards a critical point: a review of accelerating seismic moment/energy release prior to large and great earthquakes[J]. Pure and Applied Geophysics, 1999, 155(2-4): 279-305.
- [16] WYSS M, KLEIN F, JOHNSON A C. Precursors of the Kapapana $M=7.2$ earthquake[J]. JGP, 1981, 86: 3881-3900.
- [17] KATO N, OHTAKE M, HIRASAWA T. Possible mechanism of precursory seismic quiescence: regional stress relaxation due to preseismic sliding[J]. Pure and Applied Geophysics, 1997, 150(2): 249-267.
- [18] PAPAZACHOS C B, KARAKAISIS G F, SCORDILIS E M, et al. Probabilities of activation of seismic faults in critical regions of the Aegean area[J]. Geophysical Journal International, 2004, 159(2): 679-687.
- [19] PAPAZACHOS C B, KARAKAISIS G F, SAVVAIDIS A S, et al. Decelerating pre-shock seismic deformation in fault regions during critical periods[J]. Bull Geol Soc Greece, 2004, 36: 1-9.
- [20] 秦四清, 熊巨华, 薛雷, 等. 强震的孕育规律与孕震模式[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(3): 311-316.
QIN Siqing, XIONG Juhua, XUE Lei, et al. Seismogenic law and mode of strong earthquakes[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(3): 311-316.
- [21] TANG C A. Numerical simulation of progressive rock failure and associated seismicity[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(2): 240-261.