

宋成科,倪喆,陈斌,等.龙门山断裂带南段岩石圈磁场变化分析[J].地震工程学报,2019,41(6):1529-1535.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1529

SONG Chengke, NI Zhe, CHEN Bin, et al. Variation of the Lithospheric Magnetic Field in the Southern Segment of the Longmenshan Fault Zone[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(6): 1529-1535. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1529

# 龙门山断裂带南段岩石圈磁场变化分析

宋成科<sup>1</sup>, 倪 喆<sup>2</sup>, 陈 斌<sup>3</sup>, 袁洁浩<sup>3</sup>

(1. 中国地震局第一监测中心, 天津 300180; 2. 云南省地震局, 云南 昆明 650224;  
3. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

**摘要:** 根据巴颜喀拉块体东部 2011—2014 年 3 期岩石圈磁场年变化情况, 结合地壳应力资料, 重点分析龙门山断裂带南段的岩石圈磁场变化与应力积累的关系。该区域 2011—2012 年和 2012—2013 年岩石圈磁场变化明显弱于周边区域, 实测地壳应力结果反映汶川  $M_{S}8.0$  地震震后应力积累水平很高。压磁效应分析认为汶川  $M_{S}8.0$  地震后该区域高应力积累、低应变率的动力学背景是控制该区域岩石圈磁场弱变化的主要因素。此外, 芦山  $M_{S}7.0$  地震及康定  $M_{S}6.3$  地震前震中区存在局部岩石圈磁场水平矢量的弱变化现象, 尤其是 2012—2013 年水平矢量大小和方向均与周边区域相比存在明显差异, 这可能是两次地震的前兆异常。

**关键词:** 巴颜喀拉块体东部; 岩石圈磁场; 地壳应力; 地震活动

中图分类号: P318 文献标志码: A 文章编号: 1000-0844(2019)06-1529-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1529

## Variation of the Lithospheric Magnetic Field in the Southern Segment of the Longmenshan Fault Zone

SONG Chengke<sup>1</sup>, NI Zhe<sup>2</sup>, CHEN Bin<sup>3</sup>, YUAN Jiehao<sup>3</sup>

(1. First Crust Monitoring and Application Center, CEA, Tianjin 300180, China;  
2. Earthquake Agency of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China;  
3. Institute of Geophysics, China Earthquake Agency, Beijing 100081, China)

**Abstract:** According to known annual variations in the lithospheric magnetic field along the eastern segment of the Bayan Har block during the 2011—2014 period and crust stress data, the relationship between the lithospheric magnetic field and stress accumulation in the southern segment of the Longmenshan fault zone was studied. Annual variations in the lithospheric field in the local area was weaker than for surrounding areas during 2011—2012 and 2012—2013. High-stress accumulation was reflected in in-situ crust stress measurement after the Wenchuan  $M_{S}8.0$  earthquake. Based on analysis of the piezomagnetic effect, it was concluded that the tectonic background of high-stress accumulation and low strain rate in the local area after Wenchuan  $M_{S}8.0$  earthquake was the main factor controlling the weak variations in the lithospheric magnetic field. Additionally, the horizontal component of the lithospheric field in the area of the epicenter be-

came weak before the Lushan  $M_s 7.0$  and Kangding  $M_s 6.3$  earthquakes. Both magnitude and direction of the horizontal vector for the 2012–2013 period differed across the surrounding area, which may be a precursor of two earthquakes.

**Keywords:** eastern segment of Bayan Har block; lithospheric magnetic field; crust stress; earthquake activities

## 0 引言

构造磁学研究表明构造运动,诸如6级以上地震活动、火山活动,会引起震中及周边地区磁场的变化<sup>[1-2]</sup>。Johnston分析了距离震中数十千米的台站观测到2004年帕克菲尔德  $M_s 6.0$  地震的同震地磁场变化为0.4 nT,而与该地震相关的构造运动引起的较长时间的地磁场变化为5.0 nT<sup>[3]</sup>。Utada等报道了距离震中数百千米的台站观测到2011年日本  $M_s 9.0$  地震同震磁场变化为0.8 nT<sup>[4]</sup>。Takla等报道了距离震中20 km台站观测到2009台湾花莲  $M_s 6.4$  地震前10~15 nT的异常<sup>[5]</sup>。研究与地震有关的地磁异常现象,可以为研究区域应力变化,衡量区域地壳介质磁性,评估区域监测能力和认识地震破裂过程分析等方面提供帮助。

与地震有关的地磁异常通常较弱,空间分布密集的台网能够记录可识别的震磁异常,如日本、中国台湾地区,而中国大陆地磁台网则鲜有直接的震磁异常记录。近年来,中国地震局流动地磁技术团队在地震活动较多的南北地震带区域开展每年一次的流动地磁三分量观测,获得了该区域磁场的年变化<sup>[6-8]</sup>,为该区域地震地磁关系研究积累了宝贵的数据。

巴颜喀拉块体东部位于青藏高原东缘,是青藏高原物质向东“逃逸”的重要构造单元,其南边界为鲜水河断裂带,东边界为龙门山断裂带,北边界为东昆仑断裂带东缘。现今GPS观测数据显示,巴颜喀拉块体东部地表速度差和块体边界断裂带滑动速率存在明显差异<sup>[9-10]</sup>。2008年5月12日汶川  $M_s 8.0$  地震发生在滑动速率较低的龙门山断裂带,后继又发生了2013年芦山  $M_s 7.0$  地震、2014年康定  $M_s 6.3$  地震,芦山地震破裂段与汶川地震破裂段之间的空区仍值得关注<sup>[11-13]</sup>。本文收集了2011—2014年巴颜喀拉块体东部区域磁场变化资料,分析与芦山地震、康定地震有关的地磁异常,希望对该区域震磁异常识别有所帮助。

## 1 数据来源

2010年以来,中国地震局流动地磁技术团队在

巴颜喀拉块体东部地区(图1)每年开展一次地磁矢量观测,能够获得地磁场七分量绝对观测值。测点以约75 km间距均匀分布,地磁场总强度观测仪器为质子旋进磁力仪,仪器灵敏度为0.15 nT@1 Hz,绝对精度为±0.2 nT<sup>[14]</sup>,磁偏角和磁倾角测量仪器为磁通门经纬仪,仪器精度优于0.2'。工作测点处埋设固定标桩,测点周围梯度小于5 nT/m。测量方式为同一测点重复观测,仪器安装误差小于1 cm,从而消除了测量位置变化的影响。

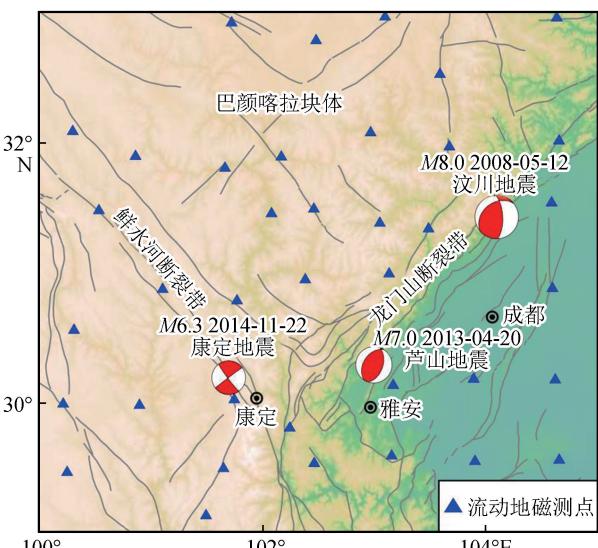


图1 研究区构造及测点分布图

Fig.1 Distribution of measuring points and geological structure in the study area

为了厘清地磁场变化与地震的相关性,需消除外源磁场诸如电离层和磁层等高频磁场成分<sup>[5,14]</sup>及地球主磁场。对于流动地磁观测,常用的技术手段为观测数据的日变通化、长期变化改正处理,详细处理方法见文献[15-16],其中日变通化所使用数据为距离观测点最近的成都地磁台站连续观测数据。将相邻两年计算结果相减,即获得该区域岩石圈磁场年变化。陈斌等研究结果认为基于该数据处理方法获得的结果误差约为5 nT<sup>[15]</sup>。倪皓等<sup>[7]</sup>,丁新娟等<sup>[17]</sup>利用该方法获得了鲁甸  $M_s 6.5$  地震、皮山  $M_s 6.5$  地震等多个地震的前兆异常。本文的数据处理方法与台站连续观测数据的处理方法有所不同,

因此后续结果的分析着眼于磁场的相对变化,而非绝对变化。

## 2 区域岩石圈磁场变化

本节给出巴颜喀拉 2011—2014 年岩石圈磁场总强度和水平矢量的年变化特征,如图 2 和图 3 所示。通过 2011—2014 年研究区岩石圈磁场总强度年变化可看出区域磁场变化差异明显,正负异常变化并无明显规律,磁场变化差异可高达 20 nT,这种差异显然不是由地壳浅表构造运动产生的。尽管巴颜喀拉块

体东部地壳运动存在差异,但浅部地壳运动仅能够引起千帕量级的应力变化,这对岩石圈磁场变化的影响非常微弱。

从图 2 可看出,龙门山断裂带与鲜水河断裂带交汇区域岩石圈磁场变化特征较一致,且年变化幅度都不大,尤其是 2011—2012 年和 2012—2013 年,该区域岩石圈磁场年变化均小于 5 nT。2013—2014 年岩石圈磁场以正变化为主,龙门山断裂带南段变化幅度比鲜水河断裂带东南段变化幅度小约 4 nT,这可能与 2013 年 4 月 20 日芦山  $M_s 7.0$  地震有关。

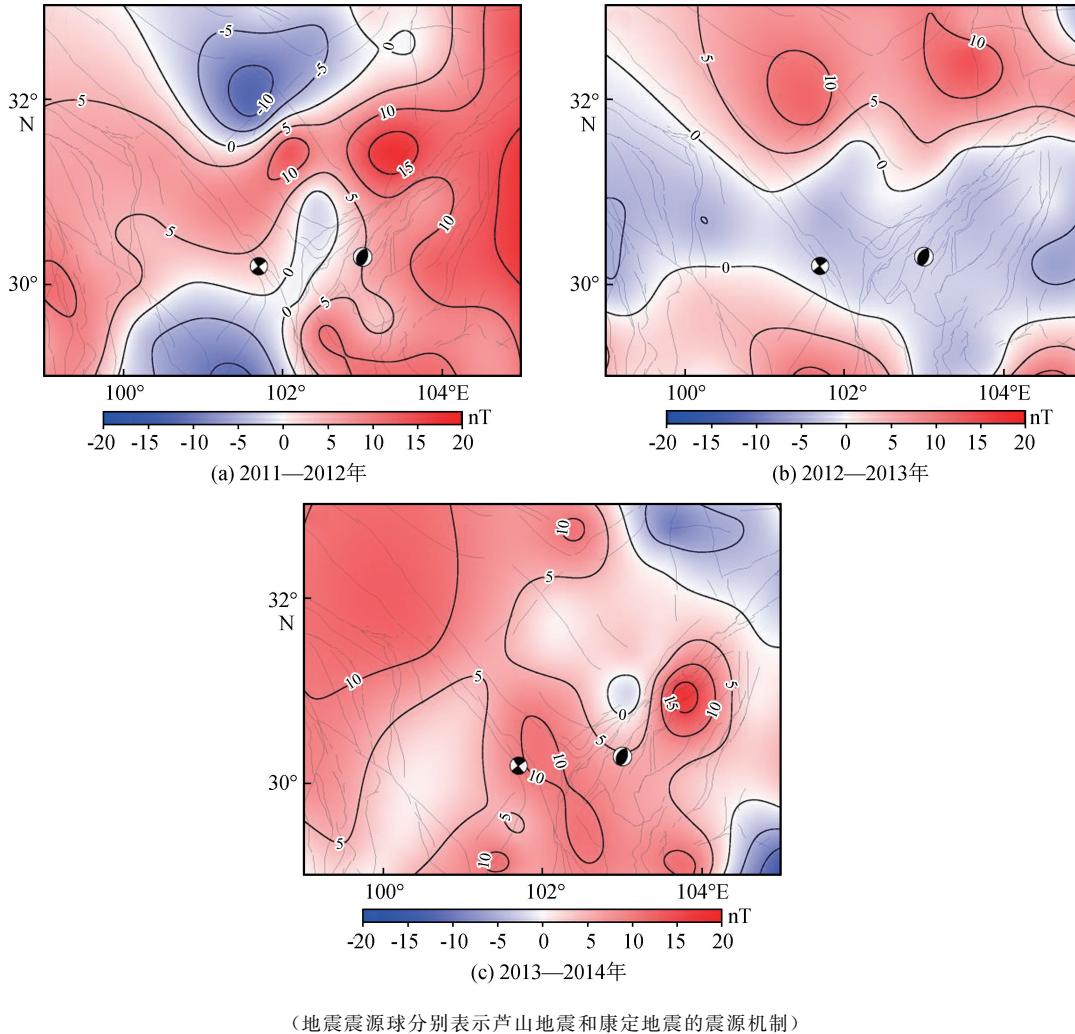


图 2 2011—2014 年岩石圈磁场总强度年变化

Fig.2 Annual variation of total intensity of lithosphere magnetic field during 2011—2014

2011—2012 年研究区岩石圈磁场水平矢量年变化的方向较一致,优势方向朝北,但在龙门山断裂带与鲜水河断裂带交汇区出现明显异常,水平矢量比周边区域小。2012—2013 年研究区岩石圈磁场水平矢量继承了 2011—2012 年的变化特征,但在龙门山断裂带与鲜水河断裂带交汇区异常更加明显,

不仅表现为矢量较小,而且方向比较散乱。2011—2012 和 2012—2013 两期水平矢量的异常变化可能包含了芦山地震和康定地震的异常信息,是断层进入亚失稳阶段后潜在震源区应力、温度等方面异常变化的反映<sup>[18–20]</sup>。2013—2014 年水平矢量变化特征与 2011—2012 和 2012—2013 明显不同,区域矢

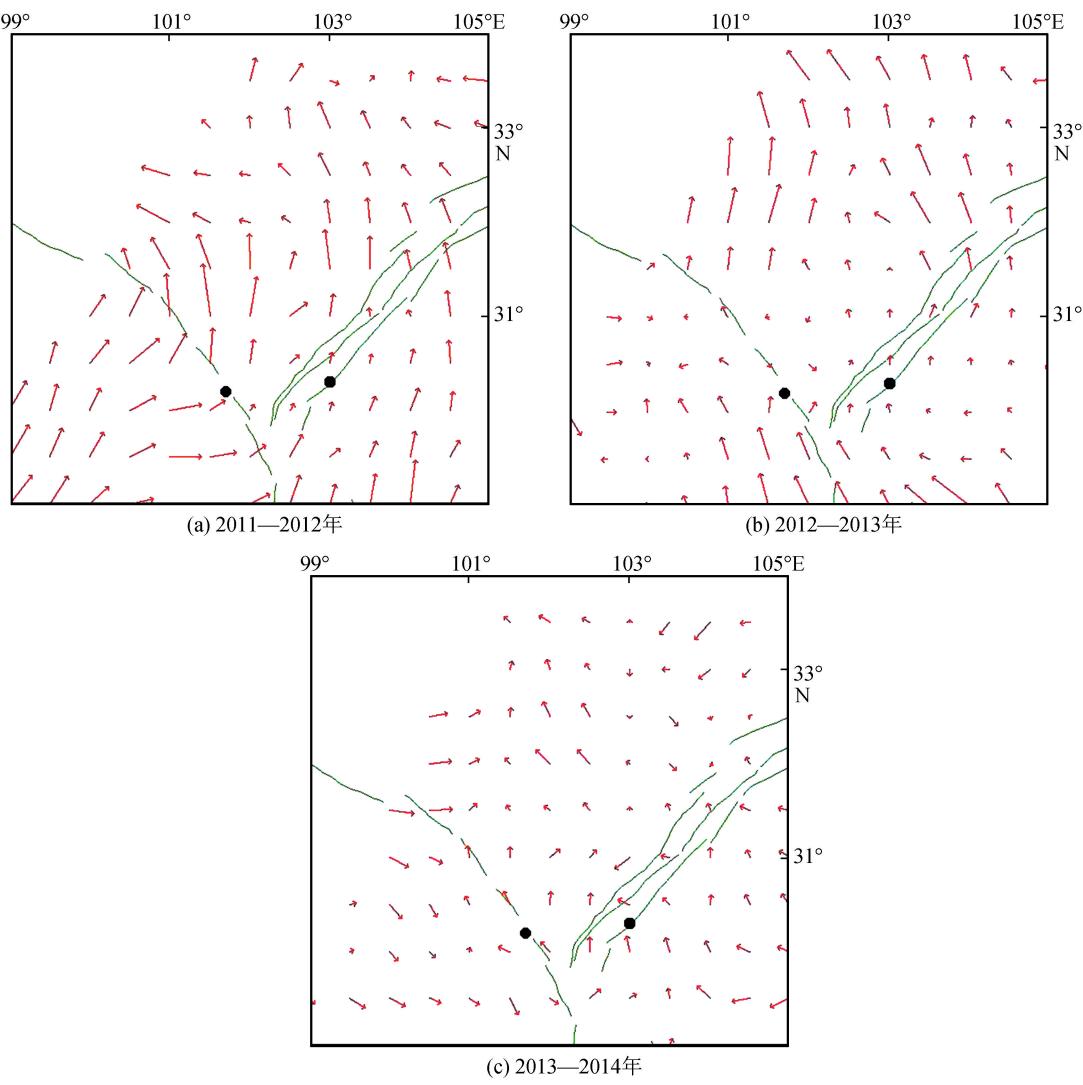


图 3 2011—2014 年岩石圈磁场水平矢量年变化

Fig.3 Annual variation of horizontal vector of lithosphere magnetic field during 2011—2014

量变化并无优势方向,也不存在局部弱化,尽管并不完全确定产生这种变化的原因,但芦山地震可能是一种解释。地震同震和震后形变释放了该区域积累的应力和能量,造成区域应力调整,从而产生磁场的变化。

### 3 讨论

岩石圈磁场异常变化可能与由构造活动而引起岩石矿物磁性变化有关<sup>[5]</sup>。岩石磁学实验表明,岩石的磁化率会随应力变化而变化,相当多的岩石在应力增加时磁化率降低,应力降低时磁化率升高<sup>[21–22]</sup>,即压磁效应。这种效应被应用于解释部分火山活动、地震活动、水库蓄水前后的磁场变化<sup>[5,23]</sup>,如 Wang 等分析了呼图壁储气库注气加压

产生的局部岩石圈磁场负变化和采气卸压产生的局部岩石圈磁场正变化<sup>[14]</sup>。

2008 年发生的汶川  $M_{\mathrm{S}}8.0$  地震,使得作为巴颜喀拉地块东边界的龙门山断裂带中北段较大尺度的断层解锁,对应力状态和应变积累产生了重大影响。地壳形变结果显示,汶川地震后龙门山断裂带南段的应变积累速度明显大于震前<sup>[9,24]</sup>,而应变率依然较小<sup>[25]</sup>,断层闭锁程度高<sup>[26–27]</sup>。

表 1 和表 2 列出了汶川地震前后该区域地应力实测结果, $\mu_m$  代表该区域应力积累水平,当  $\mu_m < 0.3$  时,说明地应力积累水平较低, $\mu_m > 0.5$  时说明地应力水平较高。地应力实测结果显示,汶川地震使得龙门山断裂带中北段应力水平显著降低<sup>[28–31]</sup>,而龙门山断裂带南段地应力依然维持较高水平<sup>[30,32–33]</sup>。

表 1 汶川地震前龙门山断裂带地应力实测结果总结

Table 1 In-situ stress measuring data along Longmenshan fault before Wenchuan earthquake

测点	深度/m	$S_H$ /MPa	$S_h$ /MPa	$S_v$ /MPa	$\mu_m$	测量时间	备注
青川	391~418	21.1~21.9	12.8~13.6	10.2~10.9	0.45~0.47	2008	北段 <sup>[28]</sup>
汶川	240	14	10	6.4	0.49	2004	中段 <sup>[34]</sup>
泸定	150	16	10	4	0.71	2004	南段 <sup>[34]</sup>
康定	158~212	9.0~14.9	4.2~5.6	1.6~2.1	0.63~0.74	2003	南段 <sup>[33]</sup>
宝兴	180~280	14.4~25.5	8.2~13.5	4.8~7.4	0.55~0.66	1999	南段 <sup>[35]</sup>

注:①以上数据均使用水压致裂地应力测试方法获得;② $S_H$ 表示最大主应力, $S_h$ 表示中间主应力, $S_v$ 表示最小主应力。

表 2 汶川地震后龙门山断裂带地应力实测结果总结

Table 2 In-situ stress measuring data along Longmenshan fault after Wenchuan earthquake

测点	深度/m	$S_H$ /MPa	$S_h$ /MPa	$S_v$ /MPa	$\mu_m$	测量时间	备注
青川	391~418	15.7~16.0	10.0~10.3	10.2~10.9	0.31~0.33	2008	北段 <sup>[28]</sup>
WFSD-1	110~1190	7.1~69.1	6.8~59.8	4.5~35.3	0.28~0.42	2011	中段 <sup>[31]</sup>
宝兴	283~354	17.3~25.7	11.1~15.8	7.5~9.4	0.46~0.58	2008	南段 <sup>[33]</sup>
康定-2	121~185	9.5~30.7	7.1~14.5	3.5~4.9	0.58~0.82	2010	南段 <sup>[33]</sup>

注:①WFSD-1 指汶川地震断裂带科学钻探 1 号钻孔,该数据为差应变法测得,其他数据均使用水压致裂地应力测试方法获得;② $S_H$ 、 $S_h$ 及  $S_v$  的意义同表 1。

根据压磁效应,这种高应力、高应变积累、低应变率的动力学背景,可能是 2011—2013 年龙门山断裂带南段芦山地震前岩石圈磁场较弱负异常变化的原因。换言之,岩石圈磁场变化较弱的区域可能是地壳应力水平高、深部闭锁程度高的地区,需引起关注。

## 4 结 论

本文分析了巴颜喀拉块体东部 2011—2014 年 3 期岩石圈磁场的年变化情况,同时结合地壳应力资料,对该区域岩石圈磁场变化可能的原因进行了讨论,得出如下结论:

(1) 龙门山断裂带南段 2011—2012 年和 2012—2013 年两期岩石圈磁场弱变化反映了该区域高应力积累、低应变率的动力学背景,岩石圈磁场变化较弱的区域可能是地壳应力水平较高的地区,需引起关注。

(2) 2011—2012 年和 2012—2013 年龙门山断裂带西南段岩石圈磁场水平矢量的局部弱化,方向不一致的异常变化可能是芦山  $M_{s7.0}$  地震的前兆异常,甄别岩石圈磁场整体均匀变化过程中存在的局部不均匀变化可以作为识别地震危险区的有效方法。

致谢:感谢中国地震局流动地磁技术团队在数据采集、处理方法和模型计算等方面的努力。

## 参考文献(References)

[1] NAGATA T. Tectonomagnetism[J]. IAGA Bull, 1969, 27: 12-43.

- [2] NAGATA T. Application of Tectonomagnetism to Earthquake Phenomena[J]. Tectonophysics, 1972, 14(3-4): 263-271.
- [3] JOHNSTON M J S. Seismomagnetic Effects from the Long-Awaited 28 September 2004 M6.0 Parkfield Earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2006, 96(4B): S206-S220.
- [4] UTADA H, SHIMIZU H, OGAWA T, et al. Geomagnetic Field Changes in Response to the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake and Tsunami[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2011, 311(1-2): 11-27.
- [5] TAKLA E M, YUMOTO K, LIU J Y, et al. Anomalous Geomagnetic Variations Possibly Linked with the Taiwan Earthquake ( $M_w=6.4$ ) on 19 December 2009[J]. International Journal of Geophysics, 2011, 2011: 1-10.
- [6] 倪喆, 洪源. 5.5 级地震前后地磁场变化异常特征分析[J]. 地震研究, 2014, 37(3): 426-432.
- NI Zhe. Analysis of Anomalous Characteristics of Geomagnetic Change before and after Eryuan M5.5 Earthquake[J]. Journal of Seismological Research, 2014, 37(3): 426-432.
- [7] 倪喆, 袁洁浩, 王粲, 等. 2014 年云南鲁甸 6.5 级、永善 5.0 级地震前岩石圈磁场局部异常特征分析[J]. 地震研究, 2014, 37(4): 537-541.
- NI Zhe, YUAN Jiehao, WANG Can, et al. Analysis of Local Anomalous Characteristics of Lithospheric Magnetic Field before Ludian M6.5 and Yongshan M5.0 Earthquakes in Yunnan in 2014[J]. Journal of Seismological Research, 2014, 37(4): 537-541.
- [8] 倪喆, 陈双贵, 袁洁浩, 等. 芦山 7.0 级地震前后岩石圈磁场异常变化研究[J]. 地震研究, 2014, 37(1): 61-65.
- NI Zhe, CHEN Shuanggui, YUAN Jiehao, et al. Research on Anomalies Variation of Lithosphere Magnetic Field before and after Lushan  $M_{s7.0}$  Earthquake[J]. Journal of Seismological Research, 2014, 37(1): 61-65.

- [9] 庞亚瑾,程惠红,张怀,等.巴颜喀拉块体东缘形变及九寨沟地震孕震环境数值分析[J].地球物理学报,2017,60(10):4046-4055.  
PANG Yajin, CHENG Huihong, ZHANG Huai, et al. Numerical Modeling of Crustal Deformation in the Eastern Margin of the Bayan Har Block and Analysis of Seismogenic Environment of the 2017 Jiuzhaigou Earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(10): 4046-4055.
- [10] 陈长云,任金卫,孟国杰,等.巴颜喀拉块体东部活动块体的划分、形变特征及构造意义[J].地球物理学报,2013,56(12):4125-4141.  
CHEN ChangYun, REN JinWei, MENG GuoJie, et al. Division, Deformation and Tectonic Implication of Active Blocks in the Eastern Segment of Bayan Har Block[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(12): 4125-4141.
- [11] 单斌,熊熊,郑勇,等.2013年芦山地震导致的周边断层应力变化及其与2008年汶川地震的关系[J].中国科学(地球科学),2013,43(6):1002-1009.  
SHAN Bin, XIONG Xiong, ZHENG Yong, et al. Stress changes on major faults caused by 2013 Lushan earthquake, and its relationship with 2008 Wenchuan earthquake[J]. Science China: Earth Sciences, 2013, 43(6): 1002-1009.
- [12] 董培育,程惠红,曾祥方,等.四川芦山M<sub>S</sub>7.0级地震导致周边断层的应力变化[J].科技导报,2013,31(12):19-22.  
DONG Peiyu, CHENG Huihong, ZENG Xiangfang, et al. Stress Changes on Major Faults Caused by M<sub>S</sub> 7.0 Lushan Earthquake[J]. Science & Technology Review, 2013, 31(12): 19-22.
- [13] 黄禄渊,杨树新,陈连旺,等.2015年尼泊尔M<sub>w</sub>7.9地震对强余震的触发作用和对周边断层的影响[J].地震研究,2016,39(2):187-195,175.  
HUANG Luyuan, YANG Shuxin, CHEN Lianwang, et al. Strong Aftershocks Triggering and Stress Effect on nearby Faults Induced by Nepal M<sub>w</sub>7.9 Earthquake in 2015[J]. Journal of Seismological Research, 2016, 39(2): 187-195, 175.
- [14] WANG Z D, CHEN B, YUAN J H, et al. Localized Geomagnetic Field Anomalies in an Underground Gas Storage[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2018, 283: 92-97.
- [15] 陈斌,袁洁浩,王粲,等.流动地磁监测数据处理流程[J].地震研究,2017,40(3):335-339,510-511.  
CHEN Bin, YUAN Jiehao, WANG Can, et al. Data Processing Flowchart of Chinese Mobile Geomagnet Monitoring Array [J]. Journal of Seismological Research, 2017, 40(3): 335-339, 510-511.
- [16] 苏树朋,李博,宋志刚,等.晋冀蒙地磁总强度加密区观测资料分析[J].地震地磁观测与研究,2016,37(2):84-89.  
SU Shupeng, LI Bo, SONG Zhigang, et al. Analysis and Application of the Observation Data of Hebei, Shanxi and Inner Mongolia Geomagnetic Total Intensity Encryption Region[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2016, 37(2): 84-89.
- [17] 丁新娟,杨福喜,贾璐,等.2015年新疆皮山6.5级地震前岩石圈磁场局部异常特征分析[J].地震研究,2017,40(3):362-367.  
DING Xinjuan, YANG Fuxi, JIA Lu, et al. Analysis of Local Lithospheric Magnetic Field Anomalies Characteristics before Xinjiang Pishan M<sub>S</sub>6.5 Earthquake in 2015[J]. Journal of Seismological Research, 2017, 40(3): 362-367.
- [18] 马瑾,S I SHERMAN,郭彦双.地震前亚失稳应力状态的识别:以5°拐折断层变形温度场演化的实验为例[J].中国科学(地球科学),2012,42(5):633-645.  
MA Jin, SHERMAN S, GUO Yanshuang. Identification of Meta-instable Stress State Based on Experimental Study of Evolution of the Temperature Field during Stick-slip Instability on a 5° Bending Fault[J]. Science China (Earth Sciences), 2012, 42(5): 633-645.
- [19] 任雅琼,刘培淳,马瑾,等.亚失稳阶段雁列断层热场演化的实验研究[J].地球物理学报,2013,56(7):2348-2357.  
REN Yaqiong, LIU Peixun, MA Jin, et al. Experimental Study on Evolution of Thermal Field of En Echelon Fault during the Meta-Instability Stage[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(7): 2348-2357.
- [20] 王凯英,郭彦双,冯向东.应力时空演化揭示出的汶川地震前亚失稳过程[J].地球物理学报,2018,61(5):1883-1890.  
WANG Kaiying, GUO Yanshuang, FENG Xiangdong. Sub-Instability Stress State Prior to the 2008 Wenchuan Earthquake from Temporal and Spatial Stress Evolution[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(5): 1883-1890.
- [21] OHNAKA M, KINOSHITA H. Effects of Uniaxial Compression on Remanent Magnetization[J]. Journal of Geomagnetism and Geoelectricity, 1968, 20(2): 93-99.
- [22] NAGATA T. Basic Magnetic Properties of Rocks under the Effects of Mechanical Stresses[J]. Tectonophysics, 1970, 9(2-3): 167-195.
- [23] CURRENTI G, DEL NEGRO C, JOHNSTON M, et al. Close-Temporal Correspondence between Geomagnetic Anomalies and Earthquakes during the 2002—2003 Eruption of Etna Volcano[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112(B9): B09103.
- [24] 武艳强,江在森,王敏,等.GPS监测的芦山7.0级地震前应变积累及同震位移场初步结果[J].科学通报,2013,58(20):1910-1916.  
WU Yanqiang, JIANG Zaisen, WANG Min, et al. Preliminary Results of the Co-seismic Displacement and Pre-seismic Strain Accumulation of the Lushan M<sub>S</sub>7.0 Earthquake Reflected by the GPS Surveying [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(20): 1910-1916.
- [25] 杨国华,杨博,占伟,等.玉树和汶川地震前后区域水平形变的空间分布[J].地震,2012,32(2):40-51.  
YANG Guohua, YANG Bo, ZHAN Wei, CHEN Xin, et al. Spatial Distribution of Regional Horizontal Deformations before and after the Yushu and Wenchuan Earthquakes[J]. Earthquake, 2012, 32(2): 40-51.
- [26] 赵静,江在森,牛安福,等.川滇菱形块体东边界断层闭锁程度

- 与滑动亏损动态特征研究[J].地球物理学报,2015,58(3):872-885.
- ZHAO Jing, JIANG Zaisen, NIU Anfu, et al. Study on Dynamic Characteristics of Fault Locking and Fault Slip Deficit in the Eastern Boundary of the Sichuan-Yunnan Rhombic Block[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(3): 872-885.
- [27] 赵静,武艳强,江在森,等.芦山地震前龙门山断裂带闭锁程度与变形动态特征研究[J].地震学报,2013,35(5):681-691,1.  
ZHAO Jing, WU Yanqiang, JIANG Zaisen, et al. Fault Locking and Dynamic Deformation of the Longmenshan Fault Zone before the 2013 Lushan  $M_{S}7.0$  Earthquake[J]. Acta Seismologica Sinica, 2013, 35(5): 681-691, 1.
- [28] 郭啟良,王成虎,马洪生,等.汶川  $M_{S}8.0$  级大震前后的水压致裂原地应力测量[J].地球物理学报,2009,52(5):1395-1401.  
GUO QiLiang, WANG ChengHu, MA HongSheng, et al. In-Situ Hydro-Fracture Stress Measurement before and after the Wenchuan  $M_{S}8.0$  Earthquake of China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(5): 1395-1401.
- [29] 王成虎,丁立丰,李方全,等.川西北跨度 23 a 的原地应力实测数据特征及其地壳动力学意义分析[J].岩石力学与工程学报,2012,31(11):2171-2181.  
WANG Chenghu, DING Lifeng, LI Fangquan, et al. Characteristics of In-Situ Stress Measurement in Northwest Sichuan Basin with Timespan of 23 Years and Its Crustal Dynamics Significance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(11): 2171-2181.
- [30] 吴满路,张岳桥,廖椿庭,等.汶川地震后沿龙门山断裂带原地应力测量初步结果[J].地质学报,2010,84(9):1292-1299.  
WU Manlu, ZHANG Yueqiao, LIAO Chunting, et al. Preliminary Results of In-Situ Stress Measurements along the Longmenshan Fault Zone after the Wenchuan  $M_{S}8.0$  Earthquake [J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(9): 1292-1299.
- [31] 彭华,马秀敏,姜景捷.差应变法地应力测量:以汶川地震断裂带科学钻探 WFSD-1 钻孔为例[J].地质力学学报,2011,17(3):249-261.  
PENG Hua, MA Xiumin, JIANG Jingjie. In-Situ Stress Measurement by Differential Strain Analysis Method in WfSD-1[J]. Journal of Geomechanics, 2011, 17(3): 249-261.
- [32] 王成虎,宋成科,郭启良,等.利用原地应力实测资料分析芦山地震震前浅部地壳应力积累[J].地球物理学报,2014,57(1):102-114.  
WANG ChengHu, SONG ChengKe, GUO QiLiang, et al. Stress Build-Up in the Shallow Crust before the Lushan Earthquake Based on the In-Situ Stress Measurements[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(1): 102-114.
- [33] 秦向辉,陈群策,谭成轩,等.龙门山断裂带西南段现今地应力状态与地震危险性分析[J].岩石力学与工程学报,2013,32(A01):2870-2876.  
QIN Xianghui, CHEN Qunce, TAN Chengxuan, et al. Analysis of Current Geostress State and Seismic Risk in Southwest Segment of Longmenshan Fracture Belt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32 (A01): 2870-2876.
- [34] 安其美,丁立丰,王海忠,等.龙门山断裂带的性质与活动性研究[J].大地测量与地球动力学,2004,24(2):115-119.  
AN Qimei, DING Lifeng, WANG Haizhong, et al. Research of Property and Activity of Longmen Mountain Fault Zone[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2004, 24(2): 115-119.
- [35] WANG Chenghu, SONG Chengke, GUO Qiliang. New Insights into Stress Changes before and after the Wenchuan Earthquake Using Hydraulic Fracturing Measurements[J]. Engineering Geology, 2015, 194: 98-113.