

蔡苏苏,陈斌. 2022. 中国大陆岩石圈震磁异常年变统计分析[J]. 地震研究, 45(4): 592–598, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0060.

Cai S S, Chen B. 2022. Statistical analysis of the annual variation of the lithospheric seismomagnetic anomaly in Chinese mainland[J]. Journal of Seismological Research, 45(4): 592–598, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0060.

中国大陆岩石圈震磁异常年变统计分析*

蔡苏苏, 陈斌*

(中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

摘要: 根据 2010—2020 年中国大陆岩石圈磁场年变数据与 $M_s \geq 6.0$ 地震事件, 按照 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 网格筛选出震前 1 年震中所处的网格中心点所对应的地磁要素进行对比分析。结果表明: ①2011—2012 年 $M_s \geq 6.0$ 地震往往发生在磁偏角 D 、总强度 F 、垂直分量 Z 的零变线附近, 但其梯度等值线图特征不显著。②2010—2020 年 $M_s \geq 6.0$ 地震共 15 次, D 值在 $\pm 0.5^\circ$ 之间的震例占比 40%, F 值在 ± 4 nT 之间的震例占比 53.33%, Z 值在 ± 6 nT 之间的震例占比 53.33%; 66.67% 的震例分布在磁偏角梯度值为 $0.5 \sim 1^\circ/\circ$ 的地区, 仅 13.33% 的震例分布在总强度梯度值为 $8 \sim 10$ nT/ $^\circ$ 的地区, 6.67% 的震例分布在垂直分量梯度值为 $8 \sim 10$ nT/ $^\circ$ 的地区。③水平矢量模 $|P|$ 分布在 $10 \sim 12$ nT、梯度在 $8 \sim 10$ nT/ $^\circ$ 的震例占比分别为: 20.00%、26.67%; 矢量模 $|P_f|$ 分布在 $12 \sim 14$ nT、梯度在 $8 \sim 12$ nT/ $^\circ$ 的震例占比分别为 26.67%、20.00%。

关键词: 地震统计; 岩石圈磁场; 年度变化; 磁异常; 梯度

中图分类号: P318.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2022)04-0592-07

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0060

0 引言

地震的孕育是一个复杂的过程, 其影响因素繁多, 其中地磁场异常变化与地震孕育过程具有关联性。我国正式开展广泛和系统的震磁观测与深入研究, 始于 20 世纪 50—60 年代(丁鉴海等, 2011)。许多科学家针对地震与震中附近磁异常的相关性进行了研究, 如李家发等(1992)提出地震多沿地磁异常及梯度带、磁异常的端点转折交汇处分布。研究表明地震震中与单个要素的零值线存在相关性, 若干与地震相关的地球内部磁场异常特征也被提出, 如内源场的磁偏角 D 零值周围区域往往易发地震(哈奇基扬, 2008; 顾春雷等, 2012); 岩石圈磁场的 Z 要素与地震具有相关性: 如魏荣强和于磊(2012)提出中国大陆及周边地区大多数 $M_s \geq 5.0$ 地震震中位于垂直分量 Z 的零值线上或附近, 李琪等(2006)研究得出

1998 年张北 6.2 级地震震中基本上位于 $0 \sim 3$ nT 的 Z 分量等值线上。但 Lei 等(2018)分析认为 $-5 \sim -3$ nT 才是地震高发区, 该区域聚集了 2004—2007 年 53.2% 的 $M_s \geq 5.0$ 地震。

岩石圈磁场变化量与地震对应性的研究也呈现不同震例异常对应一个或多个不同地磁要素的现象。比如 2013 年芦山 $M_s 7.0$ 地震对应的异常要素为地磁场总强度 F 、垂直分量 Z 、地磁场水平分量 H 以及磁偏角 D (倪喆等, 2014a, b); 2015 年九江—瑞昌 $M_s 5.7$ 地震震中 100 km 附近存在明显的水平分量异常(顾左文等, 2006), 震中对应的异常要素为磁偏角 D 和磁倾角 I (顾春雷等, 2010); 汤筱麒等(2019)研究认为甘川交界地区 $M_s \geq 5.0$ 地震对应的异常应为水平分量 H 的磁弱变区域边界。

总结前述研究发现, 各震例异常分析针对的地磁要素并不完全相同, 即便是对同一地磁要素

* 收稿日期: 2021-12-03.

基金项目: 中国地震局地球物理研究所基本科研业务费专项(DQJB22B20)资助.

第一作者简介: 蔡苏苏(1998-), 硕士研究生在读, 主要从事地震地磁场分析研究. E-mail: 2559632056@qq.com.

✉ 通讯作者简介: 陈斌(1979-), 副研究员, 主要从事地磁场建模与地震地磁研究. E-mail: champion_chb@126.com.

的分析,异常判定指标阈值也不尽相同。寻求与地震存在相关性较好的地磁异常对应的地磁要素及异常的某种定量描述,是地震地磁研究需要解决的问题,也是进一步提出异常机制解释的基础。

前人在重力、地震相关研究方面提出了一些统计和检验方法值得借鉴:如对研究区域的目标数据进行重力数据网格化(贾民育等,1995,1996,2000),分析地震震中所在网格的数据特征量,得出 $M_s \geq 5.0$ 地震主要发生在重力变化正—负转换的高梯度带上(胡敏章等,2015)。在中长期地震危险性分析中,蒋长胜等(2011)将青藏高原东北缘地区进行了网格间距尺度为 0.2° 的划分,并运用 PI 算法和 RI 算法对各网格进行回溯性预测。

考虑到岩石圈磁场分布的复杂性、地震震中位置与各个地磁要素异常特征的相关性、统计方法的多样性,本文对2010—2020年中国大陆地区的岩石圈磁场年变数据进行区域网格化划分,并针对网格中心点对应的 $M_s \geq 6.0$ 地震相关地磁要素进行相关统计与计算分析。

1 岩石圈磁场数据处理

1.1 数据来源

中国地震局流动地磁团队每年进行一次地磁矢量地面测量,测量的地磁要素为地磁总强度 F 、磁偏角 D 和磁倾角 I ,经过换算可以得到其他4个地磁要素的数值,即地磁场北向分量 X 、东向分量 Y 、垂直分量 Z 和水平分量 H 。测量得到的地磁场数据包括外源场、主磁场和岩石圈磁场,因此需对野外获得的磁场数据进行数据处理,以去除岩石圈磁场以外的外源变化磁场以及主磁场部分的影响。本文将2010—2020年相邻两年的中国大陆($19.5^\circ \sim 44.5^\circ N$, $95.5^\circ \sim 126.5^\circ E$)岩石圈磁场数据进行时序差分获得这一时间段内的岩石圈磁场年变数据。笔者从中国地震台网中心下载2010—2020年 $M_s \geq 6.0$ 的地震目录,从中删除处于地面矢量地磁测网有效监测范围之外的地震事件及所有余震事件,最终共选取15次 $M_s \geq 6.0$ 地震事件进行研究。

1.2 地磁数据处理

原始观测数据是地球磁场内源场和外源场的总和,地球磁场内源场包括起源于核幔边界的主磁场以及起源于地壳居里点温度以上的岩石圈磁

场;外源场包括电离层场、磁层场及感应场(徐文耀,2003)。要想获得岩石圈磁场变化数据,需要对观测数据进行处理,去除主磁场和外源场的影响。野外观测数据处理一共分为3步(董超等,2021;宋成科,2021):

(1) 日变通化改正。为消除流动地磁观测数据包含的地磁场日变化等外源场成分,利用邻近台站的连续观测地磁场分钟值对数据进行日变通化改正(陈斌等,2017),测量时间段内通化零时为地方时00:00—03:00。

(2) 长期变化改正。为消除观测数据中的地球主磁场长期变化成分,采用自然正交分量模型方法(陈斌,2011),对每期日变通化数据集进行长期变化改正,改正日期为上一期的日变通化日。

(3) 主磁场剥离。以IGRF-13为观测区域地球主磁场参考场模型(Alken *et al.*, 2021),对应各测点位置的日变通化结果减去主磁场部分,得到当期岩石圈磁场结果。将相邻两期岩石圈磁场相减,可获得岩石圈磁场空间变化模型。

1.3 地磁矢量场数据网格化

基于上述数据处理过程得到的岩石圈磁场数据,收集2010—2020年的岩石圈磁场年变数据并运用曲面样条插值方法(余志伟,1987)生成 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的岩石圈磁场年变数值。将研究区域($18^\circ \sim 54^\circ N$, $73^\circ \sim 135^\circ E$)划分为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的网格区域,以每个网格的中心点代表该网格,生成网格中心经纬度数据点,再从中筛选出有地震的网格中心经纬度数据点。计算岩石圈磁场年变数据与网格特征值的梯度,再挑选出 $M_s \geq 6.0$ 地震的震前1年的岩石圈磁场数据(表1)进行研究。

分别定义水平矢量模 $|\mathbf{P}|$ 表示为:

$$|\mathbf{P}| = \sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2} \quad (1)$$

水平矢量模的梯度 $|\text{grad } \mathbf{P}|$ (周建兴,2008)表示为:

$$|\text{grad } \mathbf{P}| = \sqrt{(|\mathbf{P}_x|)^2 + (|\mathbf{P}_y|)^2} \quad (2)$$

$$|\mathbf{P}_x| = \frac{\mathbf{P}(x+1, y) - \mathbf{P}(x-1, y)}{2 \times dx} \quad (3)$$

$$|\mathbf{P}_y| = \frac{\mathbf{P}(x, y+1) - \mathbf{P}(x, y-1)}{2 \times dy} \quad (4)$$

矢量模 $|\mathbf{P}_f|$ 表示为:

$$|\mathbf{P}_f| = \sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2 + (\Delta Z)^2} \quad (5)$$

矢量模的梯度 $|\text{grad } \mathbf{P}_f|$ 表示为:

$$|\text{grad } \mathbf{P}_f| = \sqrt{(|\mathbf{P}_{fx}|)^2 + (|\mathbf{P}_{fy}|)^2} \quad (6)$$

$$|\mathbf{P}_{fx}| = \frac{[\mathbf{P}_f(x+1, y) - \mathbf{P}_f(x-1, y)]}{(2 \times dx)} \quad (7)$$

$$|\mathbf{P}_{fy}| = \frac{[\mathbf{P}_f(x, y+1) - \mathbf{P}_f(x, y-1)]}{(2 \times dy)} \quad (8)$$

式中: $|\text{grad } \mathbf{P}|$ 、 $|\text{grad } \mathbf{P}_f|$ 分别为直角坐标系下两矢量模的梯度值; $|\mathbf{P}_x|$ 为水平(东西)向水平矢量模的梯度值; $|\mathbf{P}_y|$ 为垂直(南北)向水平矢量模上的梯度值; $|\mathbf{P}_{fx}|$ 为水平方向上矢量模的梯度值; $|\mathbf{P}_{fy}|$ 为垂直方向上矢量模的梯度值; ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 为北向、东向和垂直分量的年变数值; dx 、 dy 为两个方向的间距, 此处均为 0.5° 。 $|\mathbf{P}_x|$ 的首列数据为原矩阵第二列与第一列数据之差除以 dx , 最后一列则为最后两列之差除以 dx ; 同理, 可以得到 $|\mathbf{P}_y|$ 、 $|\mathbf{P}_{fx}|$ 、 $|\mathbf{P}_{fy}|$ 。

2 地震前一年岩石圈磁场磁异常变化特征分析

2.1 地磁矢量异常变化特征分析

2010—2020 年 $M_s \geq 6.0$ 地震共 15 次, 挑选网格中震前 1 年的岩石圈磁场年变数据(如 2013 年 4 月 20 日 $M_s 7.0$ 芦山地震, 挑选 2011—2012 年的岩石圈磁场年变数据), 绘制了所有年份对应的岩石圈磁场空间等变线分布图。本文以 2011—2012 年 $M_s \geq 6.0$ 地震的磁偏角 D 、垂直分量 Z 、总强度 F 、水平矢量模 $|\mathbf{P}|$ 、矢量模 $|\mathbf{P}_f|$ 及其梯度的等值线图 ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$) 为例进行说明。图 1、2 显示 $M_s \geq 5.0$ 地震事件共 8 次, 其中 $M_s 5.0 \sim 5.9$ 地震事件 6 次、 $M_s 6.0 \sim 6.9$ 地震事件 1 次(即岷县—漳县 $M_s 6.6$ 地震)、 $M_s 7.0$ 及以上地震事件 1 次(即芦山 $M_s 7.0$ 地震)。

图 1a、b 分别为磁偏角 D 年变率及其梯度的空间等值线分布, 等值线间隔分别为 $0.1'$ 、 $0.1'/^\circ$, 图中的黑色实线分别为磁偏角 D 的零值线与梯度值为 $0.5'/^\circ$ 的等值线。岷县—漳县 $M_s 6.6$ 地震(图中

紫红色点)与芦山 $M_s 7.0$ 地震(图中红色点)的震中均位于磁偏角的零值线附近(图 1a)及磁偏角梯度值为 $0.5'/^\circ$ 的等值线附近(图 1b)。

图 1c、d 分别为 2011—2012 年总强度 F 年度变化及其梯度的等值线图, 等值线间隔分别为 2 nT 、 $2 \text{ nT}/^\circ$, 图中的黑色实线分别为总强度 F 的零值线与梯度值为 $10 \text{ nT}/^\circ$ 的等值线。岷县—漳县 $M_s 6.6$ 地震与芦山 $M_s 7.0$ 地震震中位于总强度 F 的零变线附近(图 1c); 图 1d 显示总强度 F 的梯度值介于 $0 \sim 42 \text{ nT}/^\circ$, 芦山地震与岷县—漳县地震震中位于 $10 \text{ nT}/^\circ$ 等值线附近, 震中周围 200 km 附近区域总结度 F 梯度值比较小, 属于低值区; 岷县—漳县地震震中东北部 100 km 附近的区域总结度 F 梯度值为 $15 \sim 35 \text{ nT}/^\circ$, 属于中高值区。

图 1e、f 分别为震前垂直分量 Z 年度变化及其梯度的等值线图, 等值线间隔分别为 2 nT 、 $2 \text{ nT}/^\circ$, 图中的黑色实线分别为垂直分量 Z 的零值线与梯度值为 $10 \text{ nT}/^\circ$ 的等值线。岷县—漳县 $M_s 6.6$ 地震与芦山 $M_s 7.0$ 地震的西北方向为负值区, 东南方向为正值区, 两片区域大致以零变线为轴线呈对称分布, 其震中位于垂直分量 Z 正负异常区交界附近(图 1e)。图 1f 显示震中位于垂直分量 Z 梯度的 $10 \text{ nT}/^\circ$ 附近, 芦山 $M_s 7.0$ 地震震中附近 100 km 仍为低梯度带, 无异常梯度带出现。

2.2 水平矢量模与矢量模及梯度特征

图 2a、b 为 2011—2012 年水平矢量模 $|\mathbf{P}|$ 及其梯度的岩石圈磁场等变线图, 等值线间隔分别为 2 nT 、 $2 \text{ nT}/^\circ$, 图中黑色实线分别为水平矢量模 $|\mathbf{P}|$ 及其梯度分别为 10 nT 、 $10 \text{ nT}/^\circ$ 的等值线。 $M_s \geq 6.0$ 地震震中均位于图中黑色实线附近。水平矢量模 $|\mathbf{P}|$ 在芦山 $M_s 7.0$ 地震震中周围 100 km 左右均大于 10 nT , 在小于 100 km 的区域小于 10 nT , 但震中附近并未出现高梯度带。岷县—漳县 $M_s 6.6$ 地震震中东部存在分块的中高值区, 其震中附近的水平梯度值与梯度值分别小于 10 nT 与 $10 \text{ nT}/^\circ$ 。

图 2c、d 为 2011—2012 年矢量模 $|\mathbf{P}_f|$ 及其梯度的等值线图, 等值线间隔分别为 2 nT 、 $2 \text{ nT}/^\circ$, 图中黑色实线分别为矢量模 $|\mathbf{P}_f|$ 及其梯度分别为 10 nT 、 $10 \text{ nT}/^\circ$ 的等值线。由图 2c 与图 2a 对比可知, 水平矢量模和矢量模的 $M_s \geq 6.0$ 地震震中附近的值均为 10 nT 左右, 但矢量模 $|\mathbf{P}_f|$ 加入垂直分量后其高值异常区更为明显。图 2b 与图 2d 显示 $M_s \geq 6.0$ 地震震中附近并未出现高梯度带。

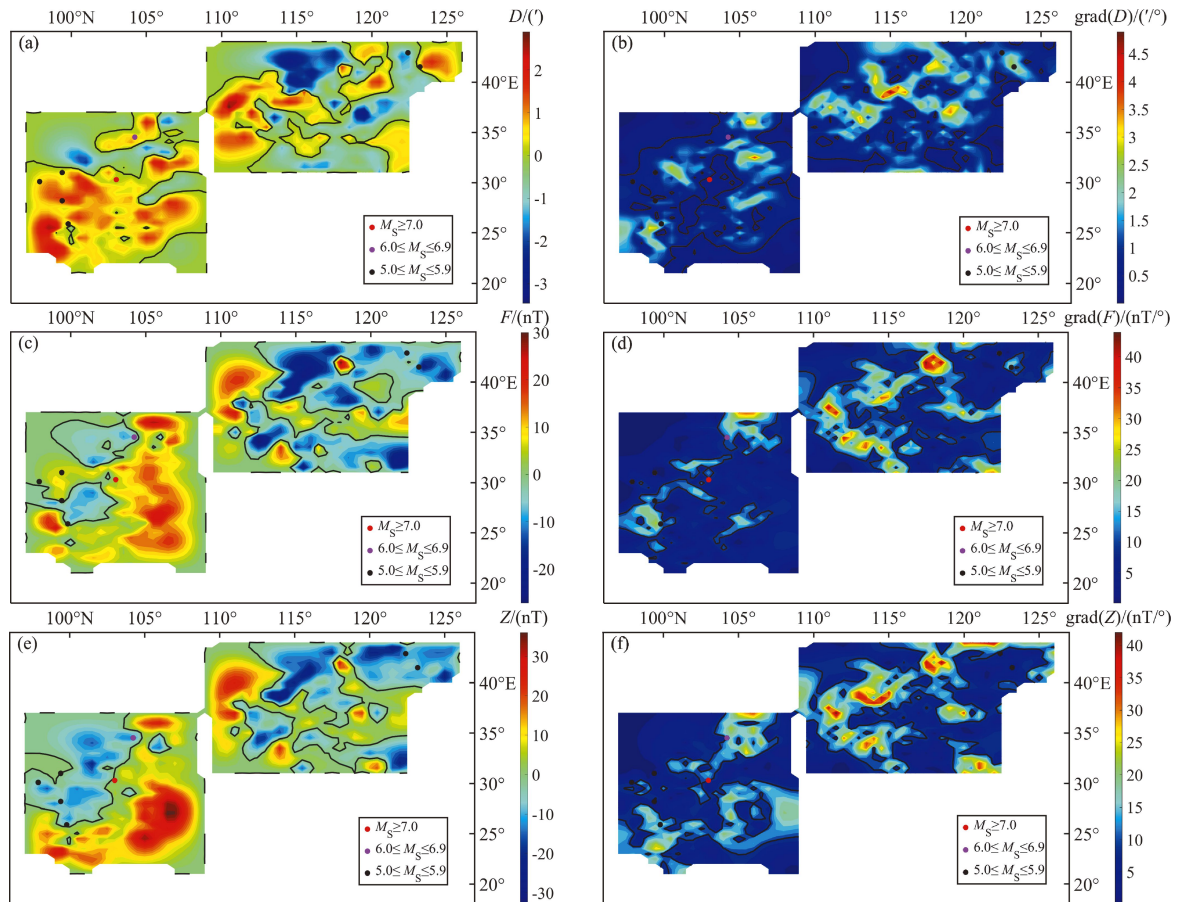


图 1 2011—2012 年磁偏角 (a)、磁偏角梯度 (b)、总强度 (c)、总强度梯度 (d)、垂直分量 (e) 和垂直分量梯度 (f) 等值线图

Fig. 1 Contour maps of the magnetic declination (a), gradient of magnetic declination (b), total magnetic intensity (c), gradient of total magnetic intensity (d), vertical component (e) and gradient of vertical component (f) from 2011 to 2012

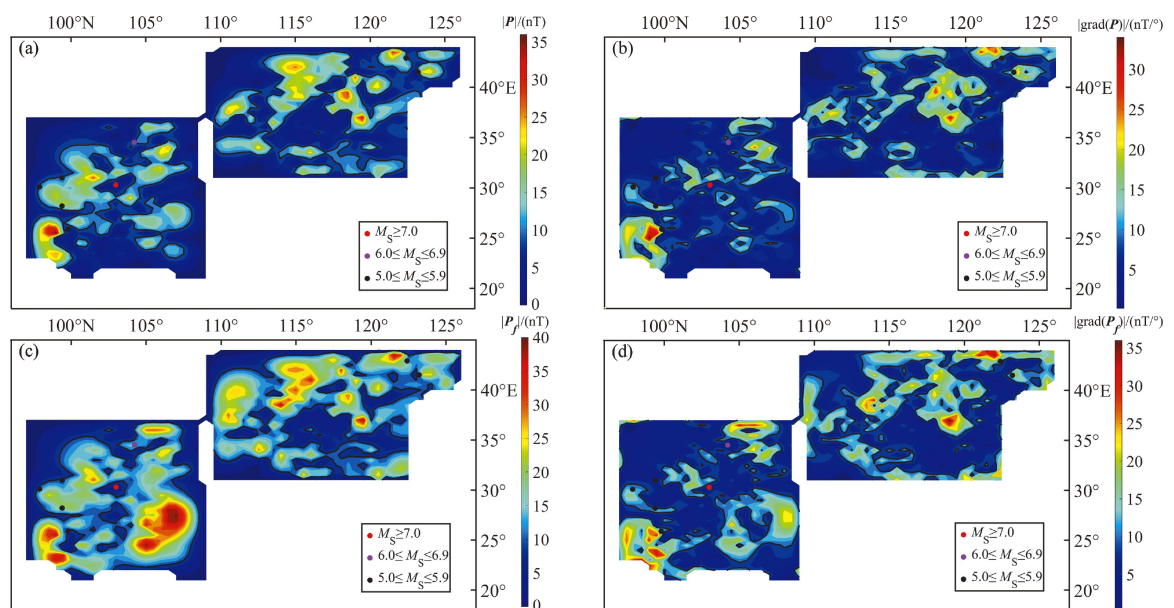


图 2 2011—2012 年水平矢量模 (a)、水平矢量模梯度 (b)、矢量模 (c) 和矢量模梯度 (d) 等值线图

Fig. 2 Contour maps of horizontal vector norm (a), gradient of horizontal vector norm (b), vector norm (c) and gradient of vector norm (d) from 2011 to 2012

从图 2 与表 1 的数据可以看出,统计 10 年以来的水平矢量模和矢量模梯度均值略小于 10 nT/°,与对应的 2011—2012 年水平矢量模和矢量模的梯度特征值有 2~4 nT/°的误差,但若单独考虑水平矢量模和矢量模的异常梯度形态与地震震中的位置则较难统一量化,而图 2 震中附近两要素模大致在 10 nT。

对比分析 2011—2012 年 $M_s \geq 6.0$ 地震地磁要素等值线图,发现震中主要位于磁偏角 D 、总强度 F 、垂直分量 Z 的零变线附近,震中附近水平矢量模和矢量模值在 10 nT 左右;对应的梯度值并未出现较大的高梯度带,显示高梯度带与地震震中的对应关系并不明显。

2.3 震例统计结果

表 1 为 2010—2020 年 15 次 $M_s \geq 6.0$ 地震的磁偏角 D 、总强度 F 、垂直分量 Z 、水平矢量模 $|P|$ 与矢量模 $|P_f|$ 及各要素梯度所对应的震前岩石圈磁场年度变化 ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$)。

磁偏角 D 的值介于 $-2.26' \sim 2.02'$,磁偏角 D

梯度值介于 $0.29' / ^\circ \sim 1.49' / ^\circ$,均值分别为 $-0.31'$ 与 $0.80' / ^\circ$,均方差值分别为 $1.05'$ 与 $0.33' / ^\circ$ 。40% 的磁偏角 D 的值分布在 $\pm 0.5'$ 之间,66.67% 的梯度值分布在 $0.5' / ^\circ \sim 1' / ^\circ$ 。

总强度 F 的值介于 $-15.16 \sim 22.46$ nT,其梯度值介于 $0.53 \sim 10.33$ nT/°;53.33% 的总强度 F 的值分布在 ± 4 nT 之间,13.33% 的总强度 F 的梯度值分布在 $8 \sim 10$ nT/°。垂直分量 Z 的值介于 $-16.13 \sim 12.16$ nT,其梯度值介于 $2.13 \sim 14.63$ nT/°;53.33% 的垂直分量 Z 的值分布在 ± 6 nT 之间,6.67% 的垂直分量 Z 的梯度值分布于 $8 \sim 10$ nT/°。

水平矢量模 $|P|$ 的值介于 $1.75 \sim 22.40$ nT,其梯度值介于 $1.58 \sim 12.22$ nT/°;20.00% 的水平矢量模 $|P|$ 分布在 $10 \sim 12$ nT,26.67% 的梯度值分布于 $8 \sim 10$ nT/°。矢量模 $|P_f|$ 介于 $3.78 \sim 25.49$ nT,其梯度值介于 $3.43 \sim 13.16$ nT;26.67% 的矢量模 $|P_f|$ 分布在 $12 \sim 14$ nT,20.00% 的梯度值分布在 $8 \sim 12$ nT/°。

表 1 2010—2020 年 $M_s \geq 6.0$ 地震地磁场要素及梯度网格中心值统计

Tab. 1 Grid center values of the components of the geomagnetic field and their gradients from 2010 to 2020 ($M_s \geq 6.0$ earthquake)

地震	日期	网格中心位置		$D/$	$F/$	$Z/$	$\text{grad}(D)/$	$\text{grad}(F)/$	$\text{grad}(Z)/$	$ P /$	$ P_f /$	$ \text{grad}P /$	$ \text{grad}P_f /$
		$\varphi_N/(^\circ)$	$\lambda_E/(^\circ)$	($'$)	(nT)	(nT)	($' / ^\circ$)	(nT/°)	(nT/°)	(nT)	(nT)	(nT/°)	(nT/°)
岷县—漳县 $M_s 6.6$	2013-07-22	34.50	104.00	0.772	-6.430	-12.426	0.850	8.428	4.486	9.175	15.447	8.324	3.433
四川芦山 $M_s 7.0$	2013-04-20	30.50	103.00	0.163	4.448	1.001	0.458	10.332	12.956	5.681	5.768	7.659	6.608
四川康定 $M_s 6.3$	2014-11-22	30.50	101.50	0.091	-3.401	-3.352	0.979	2.818	6.652	1.746	3.780	6.572	9.244
云南景谷 $M_s 6.6$	2014-10-07	23.50	100.50	2.015	8.601	12.160	0.863	3.639	6.032	22.404	25.491	9.614	11.112
云南鲁甸 $M_s 6.5$	2014-08-03	27.00	103.50	0.043	1.492	6.659	1.012	6.578	14.633	3.924	7.729	6.993	13.162
云南盈江 $M_s 6.1$	2014-05-30	25.00	98.00	0.257	3.492	-7.020	0.748	8.460	3.917	10.114	12.312	10.511	6.363
青海门源 $M_s 6.4$	2016-01-21	37.50	101.50	-0.671	-2.344	4.597	0.973	6.690	9.312	12.720	13.525	7.610	7.682
西藏米林 $M_s 6.9$	2017-11-18	29.50	95.00	-0.629	22.463	11.524	0.290	7.812	4.671	21.275	24.195	6.720	8.003
西藏米林 $M_s 6.9$	2017-11-18	30.00	95.00	-0.767	21.063	10.321	0.324	8.317	4.796	21.040	23.435	7.247	8.426
新疆精河 $M_s 6.6$	2017-08-09	44.50	83.00	0.871	3.470	10.006	0.773	6.924	5.272	14.454	17.579	12.215	10.067
四川九寨沟 $M_s 7.0$	2017-08-08	33.00	104.00	-0.130	3.978	8.170	1.489	5.264	4.749	3.993	9.094	1.580	4.171
四川长宁 $M_s 6.0$	2019-06-17	28.50	105.00	-1.159	-15.158	-16.129	1.274	6.534	2.129	13.130	20.798	8.284	7.033
西藏墨脱 $M_s 6.3$	2019-04-24	28.50	94.50	-0.872	-11.592	2.507	0.945	0.534	2.341	20.758	20.909	3.917	4.008
西藏尼玛 $M_s 6.6$	2020-07-23	33.00	87.00	-1.134	-0.650	-0.422	0.834	3.004	4.490	10.638	10.647	7.680	7.438
新疆于田 $M_s 6.4$	2020-06-26	35.50	82.50	-2.263	-6.556	-5.477	0.420	3.103	2.623	20.481	21.200	4.204	3.982
新疆伽师 $M_s 6.4$	2020-01-19	40.00	77.00	-1.594	-4.465	-5.042	0.504	4.158	4.112	12.405	13.390	3.676	4.840
均值				-0.313	1.151	1.067	0.796	5.787	5.823	12.746	15.331	7.050	7.223
均方差				1.047	10.162	8.715	0.334	2.677	3.572	6.887	6.869	2.697	2.784
最大值				2.015	22.463	12.160	1.489	10.332	14.633	22.404	25.491	12.215	13.162
最小值				-2.263	-15.158	-16.129	0.290	0.534	2.129	1.746	3.780	1.580	3.433

3 结论

本文选取 2011—2012 年中国大陆 ($19.5^{\circ} \sim 44.5^{\circ}\text{N}$, $95.5^{\circ} \sim 126.5^{\circ}\text{E}$) 的岩石圈磁场年变数据, 基于网格划分, 统计分析各要素值的零值线以及各要素梯度值与 $M_s \geq 6.0$ 地震震中位置的相关性, 发现地磁要素零值线与震中位置相关性各异, 要素值的高梯度带仅存在于个别震例中, 主要结论如下:

(1) 2011—2012 年岩石圈磁场等变线图中, $M_s \geq 6.0$ 地震震中位于磁偏角 D , 总强度 F , 垂直分量 Z 零值线附近, 水平矢量模 $|P|$ 与矢量模 $|P_f|$ 的值均为 10 nT 左右。

(2) 15 次 $M_s \geq 6.0$ 地震中, 分布在磁偏角 D 的值为 $\pm 0.5^{\circ}$ 之间的震例占比为 40%, 分布在总强度 F 的值为 ± 4 nT 之间的震例占比为 53.33%, 分布在垂直分量 Z 的值为 ± 6 nT 之间的震例占比为 53.33%, 分布在水平矢量模 $|P|$ 为 10 ~ 12 nT 的震例占比为 20.00%, 分布在矢量模 $|P_f|$ 为 12 ~ 14 nT 的震例占比为 26.67%。

(3) 66.67% 的震例分布在磁偏角 D 梯度值为 $0.5^{\circ}/^{\circ} \sim 1^{\circ}/^{\circ}$ 的地区, 13.33% 的震例分布在总强度 F 梯度值为 $8 \sim 10$ nT/ $^{\circ}$ 的地区, 6.67% 的震例分布在垂直分量 Z 梯度值为 $8 \sim 10$ nT/ $^{\circ}$ 的地区, 26.67% 的震例分布在水平矢量 $|P|$ 模梯度值为 $8 \sim 10$ nT/ $^{\circ}$ 的地区, 20.00% 的震例分布在矢量模 $|P_f|$ 梯度值为 $8 \sim 12$ nT/ $^{\circ}$ 的地区。梯度数据分布太分散, 导致高梯度带与地震震中对应并不准确。

统计 2010—2020 年研究区 $M_s \geq 6.0$ 地震震中位置与各要素之间的相关性发现, 总强度 F 、磁偏角 D 、垂直分量 Z 单个地磁要素的零值附近指标较其他地磁要素对地震的指示更显著, 但震例比例仅为 50% 左右, 仍不太理想, 这或许与仅用网格中心点作为整个网格特征值的近似处理过于简单有关。与过去的认识不同的是, 高梯度带的震例比例远较预想低, 一方面可能是网格特征值的简单处理引起, 但另一方面可能是一个客观存在, 还需要继续分析这一现象。下一步将研究网格特征值的选取方法, 并综合多要素联合分析以期得到更有效的异常特征指标。

中国地震局流动地磁观测团队提供了岩石圈磁场数据以及开展了前期集中数据处理工作, 中国地震台网中心提供了地震目录, 审稿专家对本文提出了宝贵修改意见, 在此一并表示感谢。

参考文献:

- 陈斌. 2011. 自然正交分量方法在地震地磁监测中的应用[J]. 地震研究, 34(4): 466-469.
- 陈斌, 袁洁浩, 王黎, 等. 2017. 流动地磁监测数据处理流程. 地震研究, 40(3): 335-339.
- 丁鉴海, 卢振业, 余素荣. 2011. 地震地磁学概论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1-30.
- 董超, 陈斌, 袁洁浩, 等. 2021. 2021 年 5 月 22 日玛多 $M_s 7.4$ 地震震前岩石圈磁场变化特征分析[J]. 地震学报, 43(4): 1-9.
- 顾春雷, 张毅, 顾左文, 等. 2012. 华北地震区岩石圈磁异常场零值线与中强震震中分布关系[J]. 西北地震学报, 34(2): 174-179.
- 顾春雷, 张毅, 徐如刚, 等. 2010. 地震前后岩石圈磁场变化特征分析[J]. 地球物理学进展, 25(2): 472-477.
- 顾左文, 张毅, 姚同起, 等. 2006. 九江—瑞昌 $M_s 5.7$ 地震地磁异常的观测与分析[J]. 地震学报, 28(6): 611-621.
- 胡敏章, 李辉, 刘子维, 等. 2015. 川滇地区 2010—2013 年重力变化及重力网的地震监测能力[J]. 大地测量与地球动力学, 35(4): 616-620.
- 贾民育. 1996. 滇西动态重力网的分形特征及空间分辨率[J]. 地壳形变与地震, 16(4): 28-32.
- 贾民育, 邢灿飞. 1995. 滇西重力变化的二维图象及其与 5 级 (M_s) 以上地震的关系[J]. 地壳形变与地震, 15(3): 9-19.
- 贾民育, 詹洁晖. 2000. 中国地震重力监测体系的结构与能力[J]. 地震学报, 22(4): 24-31.
- 蒋长胜, 张浪平, 韩立波, 等. 2011. 中长期地震危险性概率预测中的统计检验方法 I: molchan 图表法[J]. 地震, 31(2): 106-113.
- 李家发, 吴一柱, 安振昌, 等. 1992. 中国地区地磁异常与地震分布关系[J]. 华南地震, 12(1): 13-18.
- 李琪, 林云芳, 曾小苹. 2006. 应用小波变换提取张北地震的震磁效应[J]. 地球物理学报, 49(3): 855-863.
- 倪喆, 陈双贵, 袁洁浩, 等. 2014a. 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, 37(1): 61-65.
- 倪喆, 袁洁浩, 王黎, 等. 2014b. 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, 37(4): 537-541.
- 宋成科. 2021. 九寨沟 $M_s 7.0$ 地震前地磁异常[J]. 地震工程学报, 43(5): 1037-1044.
- 汤筱麒, 陈政宇, 赵育飞, 等. 2019. 2010—2017 年甘川交界地震前震磁异常特征分析[J]. 华南地震, 39(4): 69-74.
- 魏荣强, 于磊. 2012. 中国大陆地壳地震震中分布的卫星磁异常约束[J]. 地球物理学报, 55(8): 2643-2650.
- 徐文耀. 2003. 地磁学[M]. 北京: 地震出版社, 32-56.

- 余志伟. 1987. 一种新的地质曲面插值算法——曲面样条函数方法[J]. 中国矿业学院学报, (4): 72–79.
- 周建兴. 2008. MATLAB 从入门到精通[M]. 北京: 人民邮电出版社, 6–7.
- 哈奇基扬 Т Я, 斯基哈尔娜娅 Г Г, 斯基哈尔内 А П, 等. 2008. 地震震中和地磁偏角的空间分布[J]. 内陆地震, 22(3): 264–270.
- Alken P, Thébaud E, Begga C D, *et al.* 2021. International geomagnetic reference field: the thirteenth generation[J]. Earth Planet & Space, 73(1): 1–24.
- Lei Y, Jiao L, Chen H. 2018. Possible correlation between the vertical component of lithospheric magnetic field and continental seismicity [J]. Earth Planets & Space, 70(1): 1–19.

Statistical Analysis of the Annual Variation of the Lithospheric Seismomagnetic Anomaly in Chinese Mainland

CAI Susu, CHEN Bin

(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract

We select 15 earthquakes ($M_s \geq 6.0$) and the annual variation data of the lithospheric magnetic field in Chinese mainland from 2010 to 2020, and on the scale of $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ grid, we screen the magnetic components corresponding to the grid centers where the earthquake epicenter is located. The results show: ① These earthquakes usually occur near the zero-variation line of the magnetic declination D , total intensity F , and vertical component Z . However, the characteristics of their gradient contour map are not significant. ② Among these 15 earthquakes, there are 40% corresponding to the annual variation rate between $-0.5'$ and $+0.5'$ of the magnetic declination D . There are 53.33% corresponding to the total intensity F between -4 nT and $+4$ nT. There are 53.33% corresponding to the vertical component Z between -6 nT and $+6$ nT. There are 66.67% events occurring in the areas in which the gradient value of the magnetic declination D is from $0.5'/^\circ$ to $1'/^\circ$. There are only 13.33% events occurring in the areas in which the gradient values of the total intensity F are from 8 nT/ $^\circ$ to 10 nT/ $^\circ$. ③ There are 20.00% events corresponding to the horizontal vector norm $|P|$ from 10 nT to 12 nT. There are 26.67% events corresponding to gradient values from 8 nT/ $^\circ$ to 10 nT/ $^\circ$. There are 26.67% events corresponding to the vector norm $|P_f|$ from 12 nT to 14 nT. There are 20.00% events corresponding to the gradient of the vector norm from 8 nT/ $^\circ$ to 12 nT/ $^\circ$.

Keywords: earthquake statistics; the lithospheric magnetic field; annual variation; magnetic anomaly; gradient