

冯丽丽. 2019. 2010—2016 年南北地震带岩石圈磁场变化分析. 地震学报, 41(2): 239–248. doi: 10.11939/jass.20180059.
Feng L L. 2019. Lithospheric geomagnetic field variation in the North-South Seismic Belt from 2010 to 2016. *Acta Seismologica Sinica*, 41(2): 239–248. doi: 10.11939/jass.20180059.

2010—2016 年南北地震带岩石圈 磁场变化分析*

冯丽丽[†]

(中国西宁 810001 青海省地震局)

摘要 利用小波分解对 2010—2016 年南北地震带(21°N—37°N, 97°E—109°E)区域 6 期岩石圈磁场年变化数据进行处理, 并对 2011 年 6 月以来该区域发生的 $M_S \geq 5.0$ 强震震中区的岩石圈磁场变化空间分布及时间演化特征进行了系统分析. 结果显示: 震级与岩石圈磁场 ΔX , ΔY , ΔZ 分量变化的相关系数分别为 0.26, -0.26, 0.15, 即二者无显著相关性; 震中处岩石圈磁场分量变化的最大幅值分别为 18.46, 14.98, -15.54 nT. 对岩石圈磁场变化进行小波分解的结果表明: $M_S 7.0$ 地震前两年出现显著基底异常, 其尺度可能达到上千千米; $M_S 6.0$ 地震前一年也出现显著基底异常, 但异常尺度较小; $M_S 5.0$ 地震前尚未观测到明确的基底或中层异常.

关键词 南北地震带 岩石圈磁场变化 小波分解 芦山地震

doi: 10.11939/jass.20180059 中图分类号: P315.72⁺¹ 文献标识码: A

Lithospheric geomagnetic field variation in the North-South Seismic Belt from 2010 to 2016

Feng Lili[†]

(Qinghai Earthquake Agency, Xining 810001, China)

Abstract: This paper processed six issues of annual variation data of lithospheric magnetic field from 2010 to 2016 in the North-South Seismic Belt (21°N–37°N, 97°E–109°E) by using wavelet decomposition, and systematically analyzed the annual variation of lithospheric magnetic field in epicenters of strong earthquakes ($M_S \geq 5.0$) since June of 2011. The results show that correlative coefficients between earthquake magnitude and lithospheric magnetic field components ΔX , ΔY , ΔZ are 0.26, -0.26, 0.15, respectively, which means there is no significant correlation between the two parameters; the maximum variation amplitude of lithospheric magnetic field components ΔX , ΔY , ΔZ in the epicenters of strong earthquakes are 18.46, 14.98, -15.54 nT, respectively. The wavelet decomposition results show that there is significant variation on basic layers with maximum scale of one thousand kilometers in two years before $M_S 7.0$ earthquakes, and significant variation also appears on basic layer in one year before $M_S 6.0$ earthquakes, but the scale is smaller; as to before $M_S 5.0$ earthquakes, no significant anomalies

* 基金项目 青海省地震科学基金(2017A01)和 2017 年震情跟踪定向工作任务(2017010402)共同资助.

收稿日期 2018-04-27 收到初稿, 2018-10-31 决定采用修改稿.

[†] 通信作者 e-mail: ynufl@sina.com



have been found on basic layer or middle layer.

Key words: North-South Seismic Belt; lithospheric magnetic field variation; wavelet decomposition; Lushan earthquake

引言

从 19 世纪末起,与地震有关的地磁场变化便开始受到关注,至今已有一百多年的历史.然而,真正的震磁效应实验与理论研究始于 20 世纪 50 年代,我国应用地磁信息开展地震前兆观测与地震预测的实践则始于 1966 年邢台 $M_S 6.8$ 地震之后(郝锦琦等, 1989; 杨涛等, 2004).在这五十多年的研究实践中,研究人员提出了压磁效应(Stacey, 1964)、膨胀磁效应(祁贵仲, 1978)、感应磁效应(祁贵仲等, 1981)、流变磁效应(郝锦琦等, 1992)等理论,并将其用于解释震前观测到的地磁场异常变化.随着观测数据的不断积累及数据处理水平的不断提高,对震前岩石圈磁场变化的认识逐渐清晰,尤其是近年来,在 2012 年芦山 $M_S 7.0$ (倪喆等, 2014a)、2013 年洱源 $M_S 5.5$ (倪喆, 2014)、2014 年云南鲁甸 $M_S 6.5$ (倪喆等, 2014b; 王青华等, 2017)和 2015 年新疆皮山 $M_S 6.5$ (丁新娟等, 2017)等地震前一年左右,岩石圈磁场变化矢量均产生强度减弱、方向转折等变化,震中往往位于强变化带或零变线附近.这些研究结果对认识岩石圈磁场变化与强震活动之间的关系具有重要的参考意义.

小波分解方法是基于小波函数的数据分析处理方法,近年来在地球重力场和地球磁场数据处理方面得到了广泛的应用(Ucan *et al.*, 2001; Li, Oldenburg, 2003; Sailhac, Gibert, 2003; Büyüksaraç *et al.*, 2005; Chambodut *et al.*, 2005; Enescu *et al.*, 2006; Audet, Mareschal, 2007; Kato *et al.*, 2007; Hou, Yang, 2011; 周稳生等, 2014; Singh, Badruddin, 2014; 徐梦龙, 2016; 杨学立等, 2016). Boukerbout 和 Gibert (2006)利用小波分析方法定位了位场异常的场源; Fedi 和 Cascone (2011)系统地论述了位场的小波分解方法; Li 等(2015)使用小波多尺度分解和能量谱分析方法分析了松辽盆地的磁异常特征,其结果表明二维小波多尺度分解能够将地磁异常场分解为不同尺度的异常,这有利于进一步研究磁异常的来源以及磁异常与地质构造的关系.利用二维小波多尺度分解技术处理岩石圈磁场变化数据,可以得到不同尺度下的岩石圈磁场变化,进而利用小波分解方法对其进行分层剥离,有利于区分不同深度的场源特征,以解释岩石圈磁场变化的成因.

近年来,基于地震监测的实际需求,中国地震局地球物理研究所牵头组织地震系统多家单位持续开展了数期流动地磁矢量观测任务,在全国重点地区(如大华北地区、南北地震带)积累了若干期流动地磁矢量观测资料.南北地震带作为中国大陆地应力场一级分区的边界,其构造应力场的研究对理解大陆强震机理、构造变形与地震应力的相互作用具有重要意义(王晓山等, 2015).鉴于此,本文基于这些流动地磁矢量观测数据,将关注范围锁定为连续 7 年流动地磁矢量观测的南北地震带主体区域(21°N — 37°N , 97°E — 109°E),拟对该区域 2010—2016 年 6 期岩石圈磁场年变化进行小波分解,并系统地分析 2011 年 6 月—2017 年 6 月所发生的 24 次 $M_S \geq 5.0$ 地震(强震的 $M_S \geq 5.0$ 余震不列入计算)震中区的岩石圈磁场变化,以进一步了解孕震区岩石圈磁场变化的背景.

1 数据

流动地磁矢量测量能够获得测点在测量时刻的 3 个地磁场独立分量(总强度 F 、磁偏角

D 及磁倾角 I), 由此计算得到地磁场所有 7 个分量的数值.

2010 年以来, 南北地震带流动地磁矢量测量工作持续展开, 其中: 2010—2014 年每年 1 期, 2015—2016 年每年 2 期; 第一期测点共计 209 个(图 1), 测量范围为 (21°N — 37°N , 97°E — 109°E); 2011—2012 年测点数量与 2010 年一致, 2013 年和 2014 年增加至 229 个, 2015 年增加至 312 个, 范围扩展至西北部的阿尔金地区. 本文将关注范围锁定为连续 7 年观测的 (21°N — 37°N , 97°E — 109°E) 区域. 实际计算中, 为了获得合理可信的结果, 将相邻期中点位发生移动、点位差超限等的测点予以剔除. 在数据处理过程中, 还使用了兰州台、成都台、通海台等地磁台站数据以消除地磁场日变化及长期变化.

2 计算方法

2.1 岩石圈磁场变化

为了剥离得到岩石圈磁场成分, 流动地磁数据处理一般分为以下 3 个步骤:

第一步为日变化改正, 其目的是为了消除地磁观测数据中的短周期变化成分, 利用邻近台站的连续观测数据, 将测量值统一归算至日变化通化日(静日)0:00—3:00(北京时);

第二步为长期变化改正. 剔除变化磁场后, 采用中国地区地磁基本场长期变化的 6 阶自然正交分量(nature orthogonal components, 简称为 NOC)的非线性模型, 计算测点位置 2010.0 至日变化通化零日的 NOC 模型时间变化量, 并将其从日变改正结果中扣除, 剩余部分即为统一归算至 2010 年 1 月 1 日的内源场成分;

第三步为主磁场剥离. 从内源场中减去第 11 代国际地磁参考场(the 11th generation of International Geomagnetic Reference Field, 简称为 IGRF11)模型的计算值, 即可得到测点处的地磁异常(岩石圈磁场), 将相邻期同位测点岩石圈磁场相减即为岩石圈磁场年变化.

2.2 小波分析

设 $f=f(x, y) \in V_j^2$ 为待分析的图像信号, 其二维逼近图像为

$$A_j f = A_{j+1} f + D_{j+1}^1 f + D_{j+1}^2 f + D_{j+1}^3 f, \tag{1}$$

其中

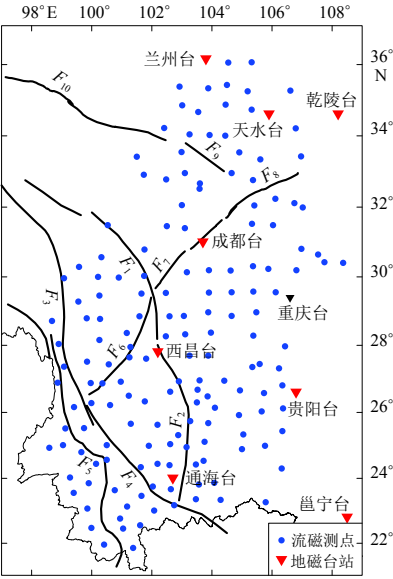


图 1 2010 年南北地震带第一期流动地磁测点分布图

F_1 : 鲜水河断裂; F_2 : 小江断裂; F_3 : 金沙江断裂; F_4 : 红河断裂; F_5 : 澜沧江断裂; F_6 : 小金河断裂; F_7 : 龙门山断裂; F_8 : 映秀—北川断裂; F_9 : 塔藏断裂; F_{10} : 东昆仑断裂, 下同
Fig. 1 Distribution of the first issue of geomagnetic observatories in the North-South Seismic Belt in 2010
 F_1 : Xianshuihe fault; F_2 : Xiaojiang fault; F_3 : Jinshajiang fault; F_4 : Honghe fault; F_5 : Lancangjiang fault; F_6 : Xiaojinhe fault; F_7 : Longmenshan fault; F_8 : Yingxiu-Beichuan fault; F_9 : Tazang fault; F_{10} : East Kunlun fault, the same below

$$A_{j+1}f = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_{j+1}(m, n) \varphi_{j+1}(m, n),$$

$$D_{j+1}^i f = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} D_{j+1}^i(m, n) \varphi_{j+1}(m, n), \quad i=1, 2, 3, \quad (2)$$

式中: $A_j f$ 为 f 在尺度 2^j 分辨下的连续逼近, 可理解为函数 f 的分辨尺度不超过 2^{-j} 的成分; $D_j f$ 为 f 在尺度 2^j 分辨下的连续细节, 为函数 f 的分辨尺度介于 2^{-j} 与 $2^{-(j-1)}$ 之间的成分(孙延奎, 2005).

根据上述小波多尺度分析理论可以将地球岩石圈磁场进行分解, 从而得到各种尺度意义下的异常分解, 其中小波基的选取尤为重要. 目前, 利用二维多尺度小波分解岩石圈磁场的方法尚处于探索阶段, 通常首先考虑小波基本身的性质, 然后根据研究问题的需要选择合适的小波基. 在对磁场数据进行小波分解时, 一般选择双正交紧支撑小波基. 本文选取分解地磁场时常用的 6 阶双正交紧支撑小波基 db5 将南北地震带的岩石圈磁场变化分解为 1—6 阶小波细节和 6 阶小波逼近, 并根据其性质将 1—3 阶、4—6 阶小波细节和 6 阶小波逼近分别看作浅表、中层和基底的变化.

3 岩石圈磁场变化及其小波分析

根据上述理论及方法, 对南北地震带 2010—2016 年流动地磁矢量测量数据进行处理并编程计算, 获得了南北地震带 2010—2011 年(图 2a), 2011—2012 年(图 2b), 2012—2013 年(图 2c), 2013—2014 年(图 2d), 2014—2015 年(图 2e)及 2015—2016 年(图 2f)共 6 期岩石圈磁场 ΔZ 分量变化及其相应的小波分解, 原始图像为浅表变化、中层变化、基底变化三者之和.

6 期岩石圈磁场变化的计算结果(图 2)显示, 南北地震带岩石圈磁场 ΔZ 分量的年变化绝大部分处于 $-30 \sim 30$ nT 范围内, 仅 2011—2012 年部分区域的 ΔZ 分量的年变化超过 30 nT, 研究区东南边界的年变化接近 40 nT, 可见岩石圈磁场变化分布并未显示出明显的构造相关性.

由图 2 可见: 浅表变化的尺度略大于测点间隔, 显示细碎的正负相间变化, 幅值处于 $-15 \sim 15$ nT 之间; 中层变化的尺度约为测点间距的 2 倍, 显示稍大尺度的异常信息, 其幅值略大于浅表变化; 基底变化显示异常尺度最大, 幅值与分解前 ΔZ 的变化相当.

4 主要地震的岩石圈磁场变化特征分析

根据经验, 一般利用岩石圈磁场年变化来判断下一年的强震趋势, 例如以 2010 年 6 月至 2011 年 6 月的岩石圈磁场变化对应 2011 年 6 月至 2012 年 6 月的强震. 本文根据中国地震台网中心的地震目录整理了各期岩石圈磁场变化所对应的 $M_s \geq 5.0$ 地震(强震的 $M_s \geq 5.0$ 余震不包括在其中), 将其绘制在岩石圈磁场变化及其小波分解图(图 2)中, 并对其岩石圈磁场变化结果及小波分解结果进行统计, 统计结果分别列于表 1 和表 2.

4.1 岩石圈磁场变化与强震关系分析

2011 年 6 月—2017 年 6 月研究区共发生 $M_s \geq 5.0$ 地震 24 次, 其中最大地震为 2013 年 4 月 20 日四川芦山 $M_s 7.0$ 地震. 追溯该地震发生之前岩石圈磁场异常变化可知, ΔX 分量变化约为 5 nT, ΔY 分量变化接近 0 nT, 而 ΔZ 分量变化约为 2 nT. 24 次强震中, $M_s 6.0 \sim 6.9$ 地震共 5 次, 其中第三期 2 次、第四期 3 次, 这 5 次地震中: ΔX 分量的年变化均为正值, 最大为 10.2 nT, 最小为 4.5 nT; ΔY 分量的年变化除 2014 年 5 月 30 日云南盈江 $M_s 6.1$ 地震为正值

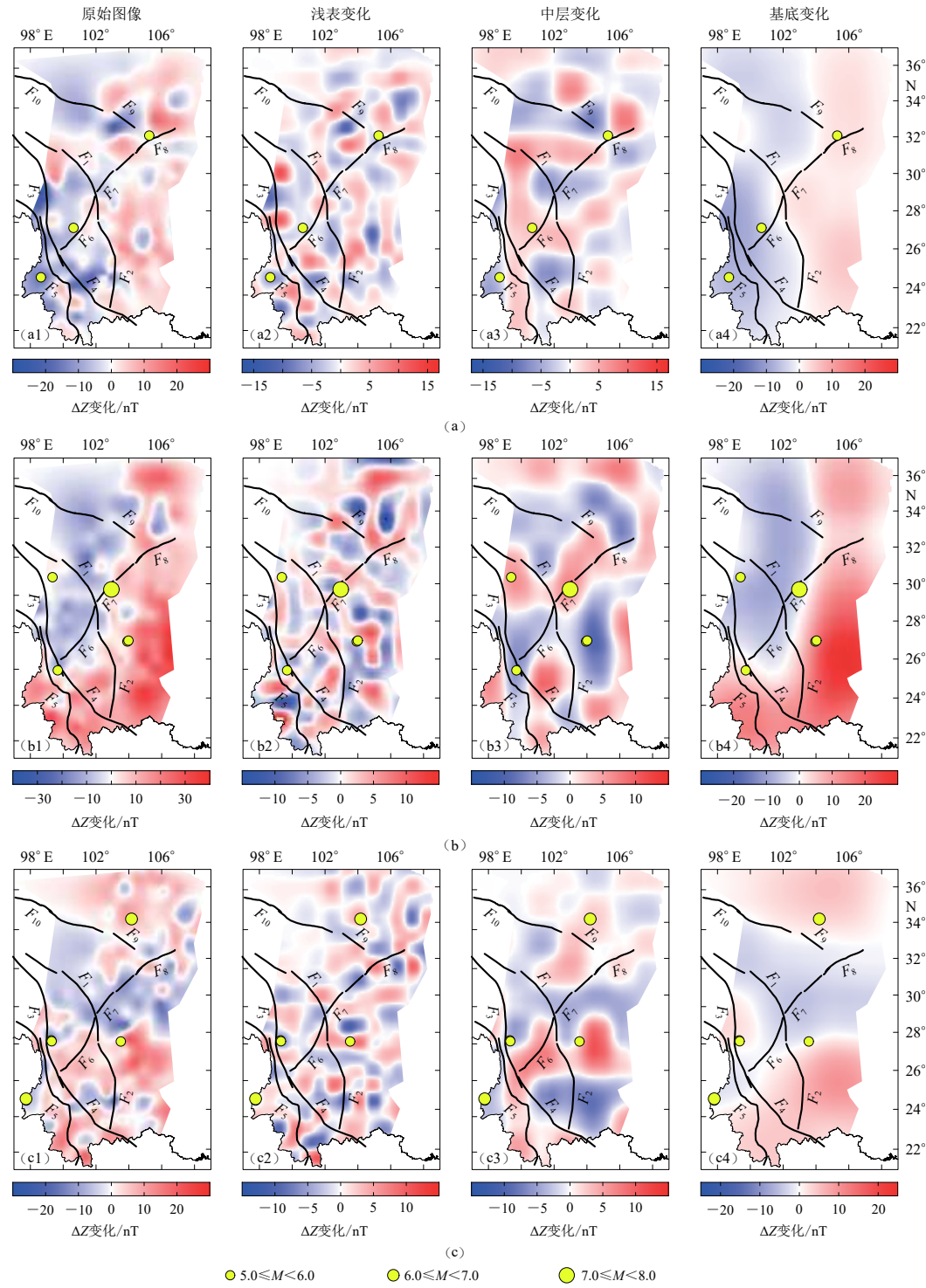


图 2 2010—2016 年南北地震带岩石圈磁场 ΔZ 分量变化及 ΔZ 的浅表、中层和基底变化
Fig. 2 Lithospheric geomagnetic field component ΔZ variation and ΔZ variation of surface layer, middle layer and bottom layer during 2010 to 2016 in the North-South Seismic Belt
(a) 2010—2011; (b) 2011—2012; (c) 2012—2013

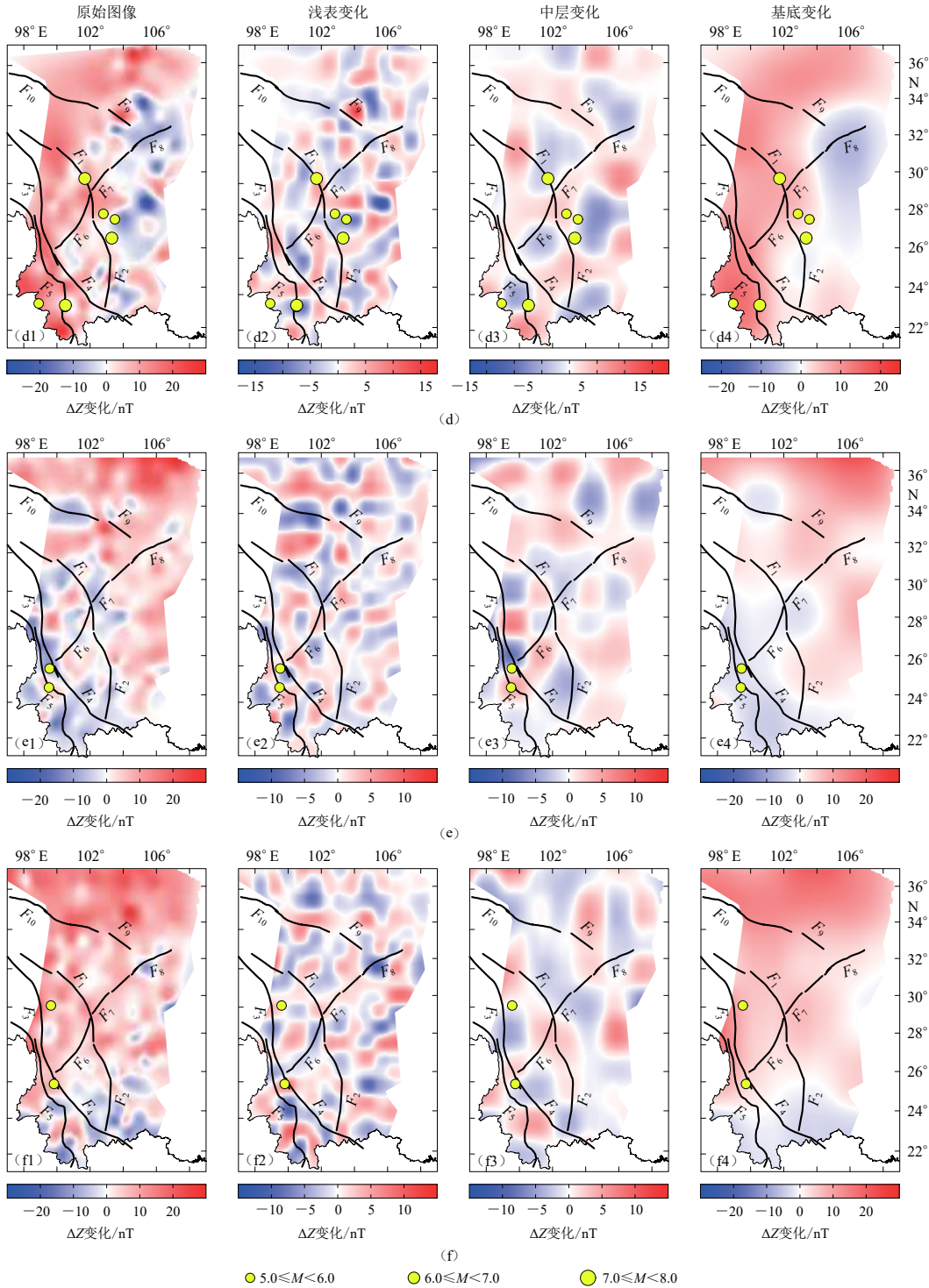


图 2 2010—2016 年南北地震带岩石圈磁场 ΔZ 分量变化及 ΔZ 的浅表、中层和基底变化
Fig. 2 Lithospheric geomagnetic field component ΔZ variation and ΔZ variation of surface layer, middle layer and bottom layer during 2010 to 2016 in the North-South Seismic Belt
(d) 2013—2014; (e) 2014—2015; (f) 2015—2016

表 1 主要 $M_S \geq 5.0$ 地震震中的岩石圈磁场变化统计

Table 1 Lithospheric magnetic field variation in the epicenters of main earthquakes with $M_S \geq 5.0$										
期数	地震 编号	发震时间		参考位置	东经/ $^{\circ}$	北纬/ $^{\circ}$	M_S	ΔX 变化 /nT	ΔY 变化 /nT	ΔZ 变化 /nT
		年-月-日	时: 分: 秒							
1 (2010—2011 年)	1-1	2011-08-09	19: 50: 17	云南腾冲	98.70	25.00	5.2	-3.56	-12.47	-15.54
	1-2	2011-11-01	05: 58: 05	四川青川	105.30	32.60	5.2	-6.96	-6.26	-0.59
	1-3	2012-06-24	15: 59: 34	云南宁蒗	100.69	27.71	5.7	-3.83	4.01	-4.75
2 (2011—2012 年)	2-1	2012-09-07	11: 19: 42	云南彝良	103.97	27.51	5.7	5.52	6.10	6.66
	2-2	2012-09-07	12: 16: 30	云南彝良	104.03	27.56	5.6	3.76	5.91	7.40
	2-3	2013-01-18	20: 42: 50	四川白玉	99.40	30.95	5.5	9.94	3.98	-0.14
	2-4	2013-03-03	13: 41: 16	云南洱源	99.72	25.93	5.5	3.73	1.74	-4.68
	2-5	2013-04-20	08: 02: 48	四川芦山	102.99	30.30	7.0	5.32	0.49	1.69
3 (2012—2013 年)	3-1	2013-07-22	07: 45: 56	甘肃岷县	104.21	34.54	6.7	7.19	-10.90	8.27
	3-2	2013-08-28	04: 04: 52	四川得荣	99.33	28.20	5.2	8.13	0.83	-12.07
	3-3	2013-08-31	08: 04: 16	云南香格里拉	99.35	28.15	5.9	7.71	0.78	-10.70
	3-4	2014-04-05	06: 40: 33	云南永善	103.57	28.14	5.1	7.32	-0.64	7.37
	3-5	2014-05-24	04: 49: 23	云南盈江	97.80	24.90	5.6	11.20	2.98	-6.75
	3-6	2014-05-30	09: 20: 12	云南盈江	97.80	25.00	6.1	10.23	2.24	-6.94
4 (2013—2014 年)	4-1	2014-08-03	16: 30: 10	云南鲁甸	103.30	27.10	6.5	6.30	-14.98	0.84
	4-2	2014-10-01	09: 23: 27	四川越西	102.80	28.40	5.0	1.61	2.32	6.96
	4-3	2014-10-07	21: 49: 39	云南景谷	100.50	23.40	6.6	4.50	-6.62	-0.45
	4-4	2014-11-22	16: 55: 25	四川康定	101.69	30.26	6.3	6.25	-7.38	6.83
	4-5	2014-08-17	06: 07: 58	云南永善	103.50	28.10	5.0	-2.76	-4.08	-6.32
	4-6	2015-03-01	18: 24: 40	云南沧源	98.90	23.50	5.5	-3.19	2.32	14.05
5 (2014—2015 年)	5-1	2015-10-30	19: 26: 39	云南昌宁	99.50	25.06	5.1	-5.55	-6.45	-0.14
	5-2	2016-05-18	00: 48: 47	云南云龙	99.53	26.10	5.0	1.90	-3.63	-10.91
6 (2015—2016 年)	6-1	2016-09-23	01: 23: 11	四川理塘	99.61	30.10	5.1	18.46	-0.50	5.65
	6-2	2017-03-27	07: 55: 00	云南漾濞	99.80	25.89	5.1	5.56	2.73	8.51

外, 其余均为负值, 最大的为 2014 年 8 月 3 日云南鲁甸 $M_S6.5$ 地震, 接近-15 nT; ΔZ 分量年变化的绝对值均较小, 最大为 2013 年岷县 $M_S6.7$ 地震, 约 8 nT. 其余 18 次 $M_S5.0—5.9$ 地震中: ΔX 分量年变化最大的为 2016 年 9 月 23 日四川理塘 $M_S5.1$ 地震, 该地震位于研究区域的边界, 不排除边界效应引起的计算偏差; ΔY 和 ΔZ 分量年变化最大的均为 2011 年 8 月 9 日云南腾冲 $M_S5.2$ 地震, 其震中也位于研究区域的边界.

所统计的 24 次地震震中的磁场 ΔX , ΔY , ΔZ 分量变化的绝对值之平均值分别为 6.3, 4.6, 6.4 nT, 震级与岩石圈磁场 ΔX , ΔY , ΔZ 分量变化的相关系数分别为 0.26, -0.26, 0.15, 表明震级大小与震中所处位置的岩石圈磁场变化大小无显著相关性, 即岩石圈磁场变化强弱对震中位置无特征性指示, 但震中位置处的岩石圈磁场变化普遍不大.

4.2 岩石圈磁场变化小波分解与强震关系分析

如上所述, 对各期岩石圈磁场变化(图 2 第一列)进行小波分解, 得到了相应的浅表变化(图 2 第二列)、中层变化(图 2 第三列)及基底变化(图 2 第四列).

由图 2 可见, 磁场 ΔZ 分量变化最显著的时段为四川芦山 $M_S7.0$ 地震发震前两期, 即 2010—2011 年和 2011—2012 年 ΔZ 分量的基底变化(图 2a4 和图 2b4), 其正负变化几乎呈东西对称, 不同之处在于 2010—2011 年正异常在芦山地震震中位置附近向西突出, 而 2011—2012 年时段该突出已经消失, 但在其后便发生了 2013 年 4 月 20 日四川芦山地震, 震后 ΔZ 分

表 2 主要 $M_S \geq 5.0$ 地震震中处岩石圈磁场的浅表、中层及基底的变化统计

Table 2 Variation of lithospheric magnetic field for surface layer, middle layer and bottom layer in the epicenters of main earthquakes with $M_S \geq 5.0$

地震 编号	M_S	ΔX 变化/nT			ΔY 变化/nT			ΔZ 变化/nT		
		浅表	中层	基底	浅表	中层	基底	浅表	中层	基底
1-1	5.2	4.89	0.60	-9.92	-2.74	-1.73	-8.16	-5.70	-2.64	-7.10
1-2	5.2	1.33	-1.13	-6.32	-5.44	-0.29	-1.49	-0.95	-0.51	2.69
1-3	5.7	1.55	-0.04	-4.15	3.40	3.34	-2.09	-1.54	3.25	-5.23
2-1	5.7	2.64	3.33	1.34	0.28	-1.91	8.76	-0.86	-8.00	16.05
2-2	5.6	1.40	3.30	1.67	1.26	-2.32	8.51	0.40	-8.06	15.66
2-3	5.5	-0.67	1.85	8.61	-0.81	1.60	2.24	-0.53	5.80	-4.97
2-4	5.5	1.89	3.66	4.07	3.00	-7.82	10.65	-0.10	-5.96	2.92
2-5	7.0	-3.90	-1.49	8.35	1.32	-3.16	4.67	-1.01	6.03	-3.76
3-1	6.7	1.37	2.27	2.58	-0.35	-3.32	-7.73	4.56	2.31	3.02
3-2	5.2	4.57	3.41	0.36	-1.21	-3.89	5.69	-5.93	-3.12	1.52
3-3	5.9	4.35	2.98	0.40	-1.05	-3.83	5.71	-6.12	-3.05	1.38
3-4	5.1	-1.54	6.03	2.52	7.32	-3.69	-4.01	5.48	1.86	-0.39
3-5	5.6	6.63	2.86	1.24	-0.48	-3.68	6.55	-2.28	-3.28	-1.17
3-6	6.1	6.52	2.61	1.10	-0.58	-4.13	6.43	-2.39	-3.37	-1.35
4-1	6.5	3.41	2.30	0.39	-1.44	-6.43	-5.89	0.83	-0.41	0.26
4-2	5.0	0.02	0.02	1.96	-2.65	5.05	-0.41	-1.32	2.66	4.59
4-3	6.6	3.59	1.59	-1.21	-3.49	-6.81	4.17	-8.57	-1.70	9.75
4-4	6.3	2.39	-0.25	2.45	-1.77	-3.76	3.37	3.57	-2.20	7.65
4-5	5.0	-0.91	-1.97	0.46	-3.59	3.01	-3.53	-7.21	-0.94	2.15
4-6	5.5	-1.47	0.22	-2.49	-3.89	-2.61	9.76	-0.63	-0.14	15.22
5-1	5.1	1.95	-1.74	-4.84	-2.47	-2.89	-0.72	-2.09	3.05	-2.49
5-2	5.0	4.71	-0.62	-4.83	-3.31	-1.03	-0.61	-1.83	-1.80	-2.43
6-1	5.1	1.20	-2.58	12.56	1.61	3.23	-5.63	1.40	-0.27	7.17
6-2	5.1	-7.41	-4.91	16.26	5.29	-3.21	3.23	6.89	-0.70	3.86
绝对值的平均值/nT		2.92	2.16	4.17	2.45	3.45	5.00	3.00	2.96	5.12

量变化东西对称的现象消失. 该现象表明, $M_S \geq 7.0$ 强震孕震期引起的岩石圈磁场变化尺度相当大, 可能达到上千千米(南北向贯穿整个研究区域), 其异常源位于基底层, 且该异常在震前两年已经存在.

由图 2c 和 2d 可以看出, $M_S 6.0-6.9$ 地震的震中分布在岩石圈磁场 ΔZ 分量的浅表变化、中层变化、基底变化基本未呈明显特征, 但从图 2a4—2d4 中基底层 ΔZ 的动态变化来看, $M_S 6.0-6.9$ 地震发震前引起了岩石圈磁场变化分布格局的变化, 即发震前岩石圈磁场分量 ΔZ 的基底变化由负值变为正值, 且异常分布形态与上一期变化完全不同, 表明 $M_S 6.0$ 地震孕震期的磁场异常变化持续时间在一年以内, 异常源仍在基底层, 但无论异常尺度还是异常时间均显著小于 $M_S 7.0$ 地震前的岩石圈磁场异常变化.

$M_S 5.0-5.9$ 地震震中在岩石圈磁场 ΔZ 分量基底变化图像上的分布无规律(图 2a4—2f4), 而浅表变化分布过于细碎(图 2a2—2f2), 难于总结规律; 中层变化图(图 2a3—2f3)中绝大部分位于正负分界位置, 仅第二期(2011—2012 年)对应的 $M_S 5.0-5.9$ 地震例外(图 2b4). 该现象表明 $M_S 5.0-5.9$ 地震由于孕震而引起的磁场变化源仅局限于中层, 尚未达到基底深度.

此外对主要地震震中的岩石圈磁场变化进行小波分解的统计结果显示, 浅表、中层及基

底变化幅值与震级均未显示出相关性, 其平均强度均处于较低水平。

5 讨论与结论

本文对 24 次 $M_S \geq 5.0$ 地震震中的岩石圈磁场变化的统计结果表明, 岩石圈磁场变化与震级无相关性。这一结果与以往研究结果不冲突。

本文将强震震中与小波分解结果对比研究, 得到以下认识: $M_S 7.0$ 地震震前两年出现尺度上千千米量级的显著基底变化, 表明孕震异常源穿透了基底层; $M_S 6.0$ 地震磁场异常变化持续时间在一年以内, 表明异常源仍在基底层, 但其异常尺度和异常时间均显著小于 $M_S 7.0$ 地震; $M_S 5.0$ 地震前尚未发现明确的基底或中层异常信息。

以上结果对辅助判定该地区 $M_S \geq 6.0$ 强震的发震背景具有一定的现实意义, 对该地区地球物理场观测及分析处理具有积极的作用。

但本文对岩石圈磁场基底变化、中层变化及浅表变化所代表的深度尚未进行定量计算, 此外对岩石圈磁场变化的机理解释仍然欠缺, 下一步将在这两方面展开研究。

感谢中国地震局流动地磁技术团队为本文提供数据支持。

参 考 文 献

- 丁新娟, 杨福喜, 贾路, 王桢. 2017. 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*, **40**(3): 362–367.
- Ding X J, Yang F X, Jia L, Wang C. 2017. Analysis of local lithospheric magnetic field anomalies characteristics before Xinjiang Pishan $M_S 6.5$ earthquake in 2015[J]. *Journal of Seismological Research*, **40**(3): 362–367 (in Chinese).
- 郝锦绮, 黄平章, 张天中, 徐明发, 周建国, 马醒华. 1989. 岩石剩余磁化强度的应力效应[J]. *地震学报*, **11**(4): 381–391.
- Hao J Q, Huang P Z, Zhang T Z, Xu M F, Zhou J G, Ma X H. 1989. The stress effect on remanent magnetization of rocks[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **11**(4): 381–391 (in Chinese).
- 郝锦绮, 黄平章, 周建国. 1992. 岩石流变磁效应: 震磁效应的一种可能机理[J]. *中国地震*, **8**(2): 53–60.
- Hao J Q, Huang P Z, Zhou J G. 1992. The effect of rheological property on rock magnetism: A possible mechanism of seismo-magnetism[J]. *Earthquake Research in China*, **8**(2): 53–60 (in Chinese).
- 郝锦绮, 钱书清, 高金田, 周建国, 朱涛. 2003. 岩石破裂过程中的超低频电磁异常[J]. *地震学报*, **25**(1): 102–111.
- Hao J Q, Qian S Q, Gao J T, Zhou J G, Zhu T. 2003. ULF electric and magnetic anomalies accompanying the cracking of rock sample[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **25**(1): 102–111 (in Chinese).
- 倪喆. 2014. 洱源 5.5 级地震前后地磁场变化异常特征分析[J]. *地震研究*, **37**(3): 426–432.
- Ni Z. 2014. Analysis of anomalous characteristics of geomagnetic change before and after Eryuan $M_S 5.5$ earthquake[J]. *Journal of Seismological Research*, **37**(3): 426–432 (in Chinese).
- 倪喆, 陈双贵, 袁洁浩, 伊炜, 王桢. 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.
- Ni Z, Chen S G, Yuan J H, Yi W, Wang C. 2014a. Research on anomalies variation of lithosphere magnetic field before and after Lushan $M_S 7.0$ earthquake[J]. *Journal of Seismological Research*, **37**(1): 61–65 (in Chinese).
- 倪喆, 袁洁浩, 王桢, 陈双贵, 闫万生. 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.
- Ni Z, Yuan J H, Wang C, Chen S G, Yan W S. 2014b. Analysis of local anomalous characteristics of lithospheric magnetic field before Ludian $M_6.5$ and Yongshan $M_5.0$ earthquakes in Yunnan in 2014[J]. *Journal of Seismological Research*, **37**(4): 537–541 (in Chinese).
- 祁贵仲. 1978. “膨胀”磁效应[J]. *地球物理学报*, **21**(1): 18–33.
- Qi G Z. 1978. On the dilatancy-magnetic effect[J]. *Acta Geophysica Sinica*, **21**(1): 18–33 (in Chinese).
- 祁贵仲, 侯作中, 范国华, 詹志佳. 1981. 地震的感应磁效应(二)[J]. *地球物理学报*, **24**(3): 276–308.
- Qi G Z, Hou Z Z, Fan G H, Zhan Z J. 1981. On the seismo-magnetic induction effect (II)[J]. *Acta Geophysica Sinica*, **24**(3):

- 276–308 (in Chinese).
- 孙延奎. 2005. 小波分析及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社: 54–56.
- Sun Y K. 2005. *Wavelet Analysis and Application*[M]. Beijing: China Machine Press: 54–56 (in Chinese).
- 王青华, 陈政宇, 张忠龙, 赵育飞, 顾健. 2017. 2014 年鲁甸 6.5 级地震相关断裂的岩石圈磁异常分析[J]. *地震研究*, **40**(3): 377–381.
- Wang Q H, Chen Z Y, Zhang Z L, Zhao Y F, Gu J. 2017. Lithosphere magnetic anomaly analysis of related faults of the 2014 Ludian M_s 6.5 earthquake[J]. *Journal of Seismological Research*, **40**(3): 377–381 (in Chinese).
- 徐梦龙. 2016. 几种位场数据处理方法的研究及应用[D]. 长春: 吉林大学: 4–5.
- Xu M L. 2016. *The Research and Application on Several Processing Methods to the Potential-Field Data*[D]. Changchun: Jilin University: 4–5 (in Chinese).
- 杨涛, 刘庆生, 付媛媛, 李西京. 2004. 震磁效应研究及进展[J]. *地震地磁观测与研究*, **25**(6): 63–71.
- Yang T, Liu Q S, Fu Y Y, Li X J. 2004. Study and development of seismomagnetic effects[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, **25**(6): 63–71 (in Chinese).
- 杨学立, 周树亮, 高宝龙, 邵攀. 2016. 小波多尺度分析在重磁勘探位场解释中的应用[J]. *地球物理学进展*, **31**(6): 2707–2716.
- Yang X L, Zhou S L, Gao B L, Shao P. 2016. Application of multi-scale wavelet analysis in gravity data interpretation[J]. *Progress in Geophysics*, **31**(6): 2707–2716 (in Chinese).
- 周稳生, 董平, 王良书, 孙斌. 2014. 三江盆地重磁场特征与深部结构[J]. *地球物理学进展*, **29**(6): 2620–2627.
- Zhou W S, Dong P, Wang L S, Sun B. 2014. Gravity and magnetic anomalies and deep structure in the Sanjiang basin[J]. *Progress in Geophysics*, **29**(6): 2620–2627 (in Chinese).
- Audet P, Mareschal J C. 2007. Wavelet analysis of the coherence between Bouguer gravity and topography: Application to the elastic thickness anisotropy in the Canadian Shield[J]. *Geophys J Int*, **168**(1): 287–298.
- Boukerbout H, Gibert D. 2006. Identification of sources of potential fields with the continuous wavelet transform: Two-dimensional ridgelet analysis[J]. *J Geophys Res*, **111**(B7): B07104.
- Büyüksaraç A, Jordanova D, Ateş A, Karloukovski V. 2005. Interpretation of the gravity and magnetic anomalies of the Capadocia region, central Turkey[J]. *Pure Appl Geophys*, **162**(11): 2197–2213.
- Chambodut A, Panet I, Manda M, Diamant M, Holschneider M, Jamet O. 2005. Wavelet frames: An alternative to spherical harmonic representation of potential fields[J]. *Geophys J Int*, **163**(3): 875–899.
- Enescu B, Ito K, Struzik Z R. 2006. Wavelet-based multiscale resolution analysis of real and simulated time-series of earthquakes[J]. *Geophys J Int*, **164**(1): 63–74.
- Fedi M, Cascone L. 2011. Composite continuous wavelet transform of potential fields with different choices of analyzing wavelets[J]. *J Geophys Res*, **116**(B7): B07104.
- Hou Z Z, Yang W C. 2011. Multi-scale inversion of density structure from gravity anomalies in Tarim basin[J]. *Science China Earth Science*, **54**(3): 399–409.
- Kato H, Isezaki N, Park C H, Kim C H, Nakanishi M. 2007. Characteristics of crustal magnetic structures in the Tsushima (Ulleung) and Japan basins from vector magnetic anomalies[J]. *Earth Planets Space*, **59**(7): 887–895.
- Li C B, Wang L S, Sun B, Wu Y H, Feng R J. 2015. Interpretations of gravity and magnetic anomalies in the Songliao basin with wavelet multi-scale decomposition[J]. *Front Earth Sci*, **9**(3): 427–436.
- Li Y G, Oldenburg D W. 2003. Fast inversion of large-scale magnetic data using wavelet transforms and a logarithmic barrier method[J]. *Geophys J Int*, **152**(2): 251–265.
- Sailhac P, Gibert D. 2003. Identification of sources of potential fields with the continuous wavelet transform: Two-dimensional wavelets and multipolar approximations[J]. *J Geophys Res*, **108**(B5): 2262.
- Singh Y P, Badruddin. 2014. Prominent short-, mid-, and long-term periodicities in solar and geomagnetic activity: Wavelet analysis[J]. *Planet Space Sci*, **96**: 120–124.
- Stacey F D. 1964. The seismomagnetic effect[J]. *Pure Appl Geophys*, **58**(1): 5–22.
- Ucan O N, Albora A M, Hisarli Z M. 2001. Comments on the gravity and magnetic anomalies of Saros bay using wavelet approach[J]. *Mar Geophys Res*, **22**(4): 251–264.