

倪晓寅,陈莹,杨锦玲,2022. 地磁逐日比异常电磁学成因的进一步分析. 中国地震,38(2):239~247.

地磁逐日比异常电磁学成因的进一步分析

倪晓寅 陈莹 杨锦玲

福建省地震局,福州 350003

摘要 基于地磁逐日比异常期间地磁垂直分量日变化幅度变大或变小的统计结果,发现地磁逐日比高值异常是由异常日的地磁垂直分量日变化幅度变小和异常前一天的日变化幅度变大所致。其中,异常日的日变化幅度变小可能是地磁逐日比异常的主要因素,但异常前一天的日变化幅度变大也是异常成立的重要因素。此外,引用前人感应电流假说,结合统计结果进行了机理解释,研究结论进一步证实了前人对该方法的机理推测。

关键词: 地磁场 垂直分量 反相位 逐日比 异常

[文章编号] 1001-4683(2022)02-0239-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

地磁日变化来自电离层的环状电流及其在地球内的感应电流,岩石破裂实验和野外震例观测研究表明,地震孕育发生过程会伴随着岩石电导率变化(Brace et al, 1965; Yamazaki, 1966; 陈峰等, 2013),由于这一变化过程主要发生在上地幔和地壳中,其引起的感应电流异常变化埋深较浅,产生的地磁异常特征类似地壳上地幔电导率横向不均匀性引起的地磁异常特征(徐文耀等, 1978; 侯作中等, 1984; 徐文耀, 2009; Untiedt, 1970; Nishida, 1976; Rokityansky, 1982; Neska, 2016),异常区与正常区有分界线,异常主要出现在地磁垂直分量中,高导带两侧地磁垂直分量短周期存在反相位变化(徐文耀等, 1978; 侯作中等, 1984)。地震地磁日变化异常也会出现异常特征线,如地磁低点位移线(冯志生等, 2009; 黄颂等, 2020; 中国地震局监测预报司, 2020),地磁日变化空间相关异常阈值线(冯志生等, 2020; 中国地震局监测预报司, 2020; 李军辉等, 2021),地磁加卸载响应比异常阈值线和地磁逐日比异常阈值线(倪晓寅等, 2018, 2019; 冯志生等, 2020)。前人认为特征线下方存在地磁日变化感应电流集中分布,导致特征线两侧地磁垂直分量存在反相位变化(冯志生等, 2009, 2020; 中国地震局监测预报司, 2020),这种反相位变化可能抵消或部分抵消地磁垂直分量日变化,导致地磁垂直分量日变化幅度变小,也可能加强或部分加强地磁垂直分量日变化,导致地磁垂直分量日变化幅度变大,进而导致地磁加卸载响应比和地磁逐日比出现高值异常(倪晓寅等, 2018, 2019; 中国地震局监测预报司, 2020)。然而,上述研究均未给出具体观测实例,来证明异常期间地磁垂直分量日变化存在抵消或增强的现象。因此,本文分析了2008年1月—2018年6月期间38个地磁逐日比异常期间的地磁垂直分量日变化特征,以期

[收稿日期] 2021-10-26 [修定日期] 2022-02-25

[作者简介] 倪晓寅,男,1981年生,硕士,高级工程师,主要从事地震电磁分析预测工作。E-mail: 16465074@qq.com

表明上述现象是客观存在的。

1 地磁逐日比计算公式

地磁逐日比(简称逐日比)可表示为

$$P(Z) = \frac{R_z(t_1)}{R_z(t_2)} \tag{1}$$

$$t_2 = t_1 + 1 \tag{2}$$

式中, R_z 为地磁场垂直分量日变化幅度, t 为观测日期, $P(Z)$ 高值为异常。异常日期以 $R_z(t_2)$ 日期为准, 即分母数据日期为异常日期。

2 异常期间日变化幅度变化特征

由地磁逐日比计算公式可以看出, 逐日比异常的直接原因是垂直分量日变化幅度出现异常, 即式(1)分子日变化幅度 $R_z(t_1)$ 异常变大, 或分母 $R_z(t_2)$ 异常变小, 或者二者兼而有之。

根据地磁逐日比异常判据(中国地震局监测预报司, 2020), 2008年1月—2018年6月共出现38次满足异常判据的逐日比异常现象, 表1列举了这些逐日比异常时段部分异常台站的垂直分量日变化幅度和异常日前后15天垂直分量日变化幅度均值 $\bar{R}_z(t)$ 。经统计发现, 在38次异常中, 每次异常均伴随着 $R_z(t_1)$ 大于 $\bar{R}_z(t)$ 超过30%, 或 $R_z(t_2)$ 小于 $\bar{R}_z(t)$ 超过30%的情况。因此, 若将 $R_z(t_1)/\bar{R}_z(t) > 1.3$ 和 $R_z(t_2)/\bar{R}_z(t) < 0.7$ 视为日变化幅度出现异常, 则计算公式分子日变化幅度 $R_z(t_1)$ 变小异常22次, 占比58%; 分母 $R_z(t_2)$ 变大异常37次, 占比97%; 分子 $R_z(t_1)$ 变大异常和分母 $R_z(t_2)$ 变小异常同时出现15次, 占比39%; 分子 $R_z(t_1)$ 变大异常1次, 占比3%; 分母 $R_z(t_2)$ 变小异常16次, 占比42%。

表1 中国大陆地区逐日比异常时段异常台站地磁垂直分量日变幅变化

序 号	异常时间 (年·月·日)	异常 台站	$R_z(t_1)$	$R_z(t_2)$	$\bar{R}_z(t)$	$\frac{R_z(t_1)}{\bar{R}_z(t)}$	$\frac{R_z(t_2)}{\bar{R}_z(t)}$	$\frac{R_z(t_1)}{\bar{R}_z(t)} > 1.3$	$\frac{R_z(t_2)}{\bar{R}_z(t)} < 0.7$	$\frac{R_z(t_1)}{\bar{R}_z(t)} > 1.3, \frac{R_z(t_2)}{\bar{R}_z(t)} < 0.7$	$\frac{R_z(t_1)}{\bar{R}_z(t)} \leq 1.3, \frac{R_z(t_2)}{\bar{R}_z(t)} \geq 0.7$	$\frac{R_z(t_1)}{\bar{R}_z(t)} \leq 1.3, \frac{R_z(t_2)}{\bar{R}_z(t)} < 0.7$
1	2008-02-05	昭觉台	20.3	6.2	16.5	1.23	0.38		是			是
2	2008-02-12	兰州台	21.7	6.4	12.1	1.79	0.39	是	是	是		
3	2008-03-01	大连台	23.6	7.6	14.9	1.59	0.46	是	是	是		
4	2008-04-07	三岗台	19.4	6.1	17.4	1.11	0.37		是			是
5	2008-11-05	平地台	27.3	8.3	16.2	1.69	0.50	是	是	是		
6	2008-12-24	信阳台	17.4	5.7	9.6	1.81	0.35	是	是	是		
7	2009-01-18	大同台	18.9	6.5	11.1	1.70	0.39	是	是	是		
8	2009-01-24	湟源台	15.1	4.4	12.3	1.23	0.27		是			是
9	2009-02-05	邕宁台	26.6	6.9	17.2	1.55	0.42	是	是	是		
10	2009-02-13	三岗台	16.0	3.5	10.6	1.51	0.21	是	是	是		
11	2009-06-29	通海台	15.1	4.4	17.1	0.88	0.27		是			是

续表 1

序 号	异常时间 (年-月-日)	异常 台站	$R_z(t_1)$	$R_z(t_2)$	$\bar{R}_z(t)$	$\frac{R_z(t_1)}{\bar{R}_z(t)}$	$\frac{R_z(t_2)}{\bar{R}_z(t)}$	$\frac{R_z(t_1)}{\bar{R}_z(t)} > 1.3$	$\frac{R_z(t_2)}{\bar{R}_z(t)} < 0.7$	$\frac{R_z(t_1)}{\bar{R}_z(t)} > 1.3, \frac{R_z(t_2)}{\bar{R}_z(t)} < 0.7$	$\frac{R_z(t_1)}{\bar{R}_z(t)} > 1.3, \frac{R_z(t_2)}{\bar{R}_z(t)} \geq 0.7$	$\frac{R_z(t_1)}{\bar{R}_z(t)} \leq 1.3, \frac{R_z(t_2)}{\bar{R}_z(t)} < 0.7$
12	2009-11-29	楚雄台	23.6	6.3	21.0	1.12	0.38		是			是
13	2010-02-23	大同台	27.8	9.9	18.1	1.54	0.60	是	是	是		
14	2010-05-06	宝坻台	25.5	8.9	12.2	2.09	0.54	是	是	是		
15	2011-01-13	三岗台	19.5	6.4	10.5	1.86	0.39	是	是	是		
16	2011-02-06	营口台	29.1	9.3	24.2	1.20	0.56		是			是
17	2011-08-17	恩施台	9.6	2.4	9.2	1.04	0.15		是			是
18	2012-02-02	大同台	23.6	8.2	29.6	0.80	0.50		是			是
19	2012-07-14	都兰台	20.3	6.2	16.5	1.23	0.19		是			是
20	2012-12-11	都兰台	15.1	3.2	12.3	1.47	0.47	是	是	是		
21	2012-12-19	西昌台	23.4	7.7	15.9	1.80	0.71	是			是	
22	2013-10-03	承德台	36.3	11.7	20.2	0.99	0.46		是			是
23	2013-10-15	昔阳台	22.6	7.6	22.9	1.35	0.32	是	是	是		
24	2013-12-23	承德台	17.8	5.3	13.2	1.11	0.32		是			是
25	2014-01-11	红山台	16.5	5.3	14.9	1.75	0.49	是	是	是		
26	2015-01-11	银川台	27.6	8.1	15.8	1.37	0.42	是	是	是		
27	2015-01-24	红山台	23.5	6.9	17.1	1.15	0.28		是			是
28	2015-12-25	泾阳台	16.1	4.6	14.0	0.81	0.42		是			是
29	2016-03-04	丽江台	21.1	7.0	26.2	1.50	0.64	是	是	是		
30	2016-05-13	文安台	32.7	10.5	21.8	1.12	0.15		是			是
31	2016-12-04	红山台	9.4	2.4	8.4	1.10	0.18		是			是
32	2016-12-15	宝坻台	9.1	2.9	8.3	1.31	0.27	是	是			
33	2017-01-07	红山台	13.4	4.5	10.3	0.94	0.47		是			是
34	2017-08-08	肇庆台	24.2	7.8	25.9	1.35	0.64	是	是			
35	2017-11-23	大连台	30.3	10.6	22.4	1.90	0.56	是	是	是		
36	2017-12-14	信阳台	28.8	9.3	15.1	1.56	0.30	是	是	是		
37	2017-12-25	泾阳台	15.9	4.9	10.2	1.97	0.42	是	是	是		
38	2018-02-20	楚雄台	24.2	6.9	12.3	1.51	0.34	是	是	是		
合计次数								22	37	15	1	16

由以上统计结果可以看出,由分子变大异常和分母变小异常同时出现导致逐日比出现异常的比例约占 39%,完全由分母异常导致逐日比出现异常的比例达 42%,而完全由分子变大异常导致逐日比出现异常的比例仅为 3%。因此,分母变小异常更有可能导致逐日比出现异常。

3 异常产生的电磁学机理分析

研究分析地磁逐日比异常机理时,推测地磁逐日比阈值线下方附近存在地磁日变化感

应电流集中分布现象,该电流导致阈值线两侧的地磁垂直分量出现反相位变化(中国地震局监测预报司,2020),参照上述逐日比异常机理绘制了异常成因模型,如图1所示。

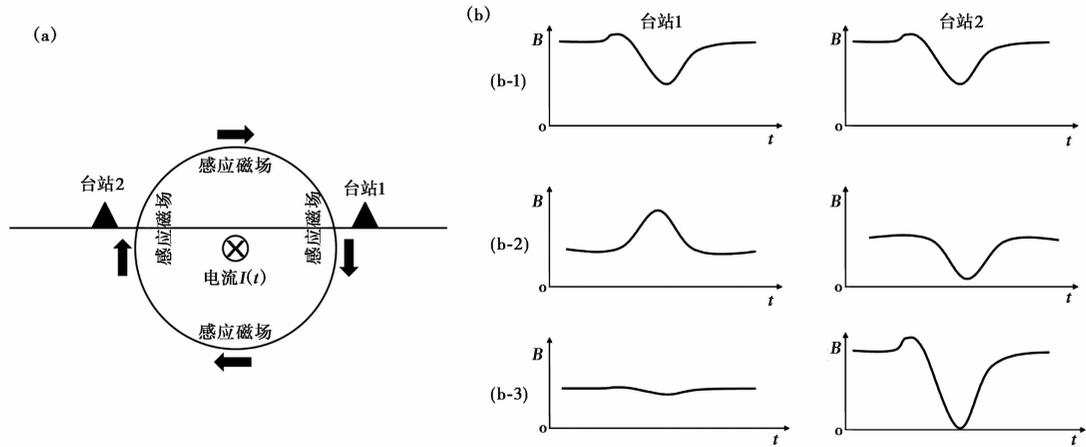


图1 感应电流产生的磁场(a)及其对台站垂直分量日变化的影响(b)

在图1(a)中,台站1和台站2为2个地磁台站,线状集中分布的感应电流位于2个台站正中间,感应电流方向垂直于剖面向里,并位于上地幔到地壳中,感应电流深度相对于台站间距可以忽略不计,因此,根据 Biot-Savart 定律,感应电流在2个台站产生的磁场只有垂直分量且方向相反。

图1(b-1)为2个台站正常的近似“V”字形垂直分量日变化曲线,当感应电流集中分布于台站1和台站2之间时,线状集中分布感应电流在2个台站产生的垂直分量为图1(b-2),其特征是2个台站的变化为反相位。2个台站实际的垂直分量日变化曲线为图1(b-1)和图1(b-2)的叠加,即图1(b-3)。由图1(b-3)可以发现,台站1的垂直分量日变化几乎被抵消为直线,而台站2的垂直分量日变化被加强拉长,日变化幅度变大。

对于实际的逐日比异常而言,公式(1)的分子日变化幅度 $R_z(t_1)$ 异常变大是模型台站2的情形,分母 $R_z(t_2)$ 异常变小是模型台站1的情形。如果逐日比异常是由分子日变化幅度 $R_z(t_1)$ 异常变大和分母 $R_z(t_2)$ 异常变小2种情形引起的,则阈值线内台站在异常前1日出现模型台站2情形,异常日出现模型台站1情形;如果逐日比仅由分母日变化幅度 $R_z(t_2)$ 异常变小引起,则阈值线内台站仅在异常日出现台站1情形;如果逐日比仅由分子日变化幅度 $R_z(t_1)$ 异常变大引起,则阈值线内台站仅在异常前1日出现台站2情形。

需要说明的是,实际情形并不是简单的感应电流磁场和电流两侧2个台站地磁记录的叠加,而是感应电流由相对均匀分布向中间集中分布的转变过程。另外,本研究未考虑电离层电流影响,即没有考虑外源场的影响,因为地磁垂直分量异常主要来自感应场(徐文耀,2009),而外源场引起的变化是正常同步的地磁日变化。

4 异常期间垂直分量日变化的反相位现象

为进一步说明日变化幅度变大或变小是由阈值线附近下方集中分布感应电流导致的反相位变化所致,我们选择了南北地震带2008年2月5日和2009年2月5日地磁逐日比异常

的垂直分量日变化曲线进行对比分析,台站选择间距小但位于阈值线两侧的台站组合。由于日变化是周期为小时级别的变化,为减少高频信号对分析结果的影响,分析前对垂直分量日变化分钟值数据进行了 24 阶傅立叶拟合低通滤波,以滤除周期小于 1h 的高频信号。

图 2 给出了 2008 年 2 月 5 日逐日比异常阈值线和台站分布,以及阈值线两侧台站的地磁场垂直分量日变化曲线对比,由图可见异常台站兰州、昭觉和重庆台位于阈值线内,逐日比值分别为 5.0、3.3、3.6,非异常台站都兰、通海和贵阳台位于阈值线外,逐日比值分别为 1.9、1.4、1.7。

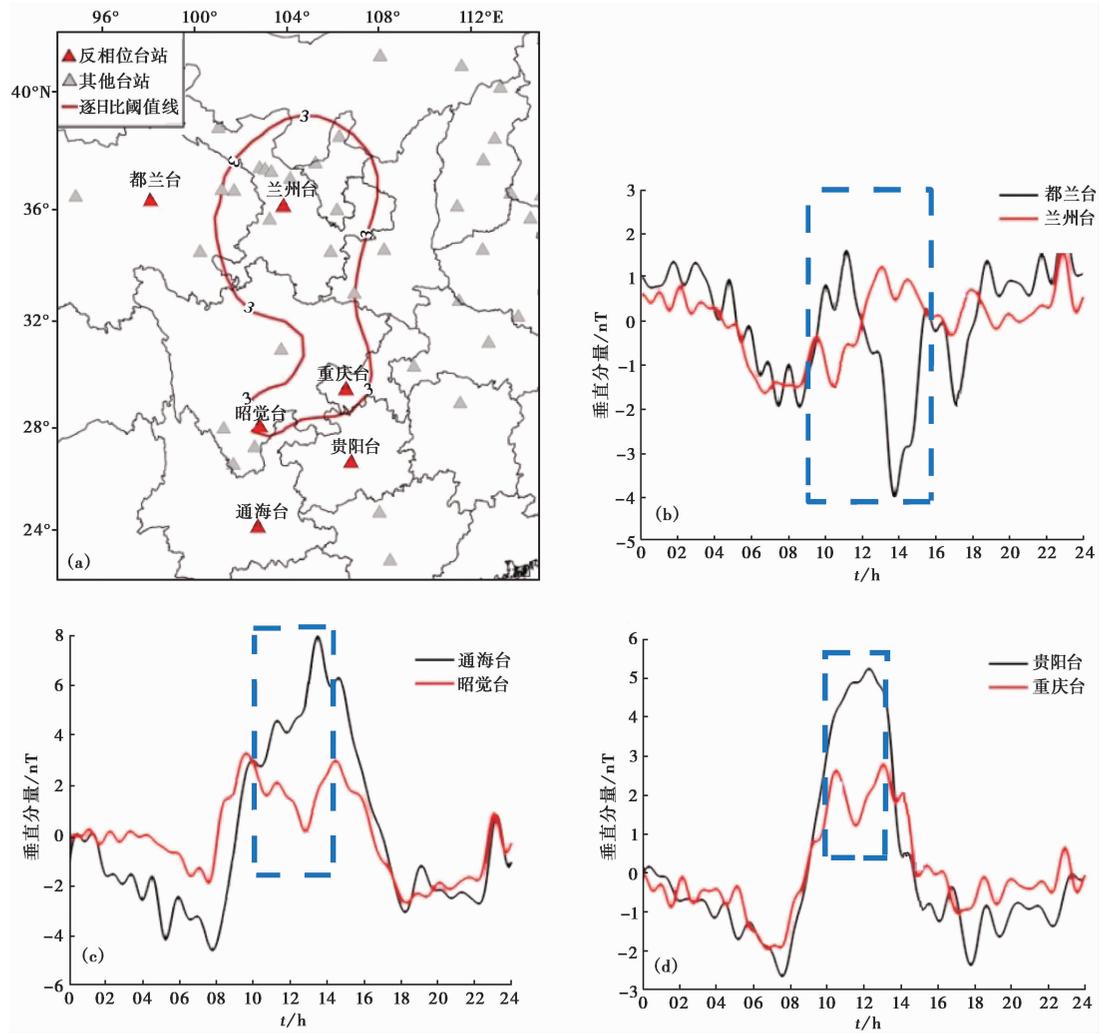


图 2 2008 年 2 月 5 日逐日比异常和台站垂直分量反相位变化

图 3 给出了 2009 年 2 月 5 日逐日比异常阈值线和台站分布,以及阈值线两侧台站的地磁场垂直分量日变化曲线对比,由图可见异常台站通海、河池和贵阳台位于阈值线内,逐日比值分别为 3.1、4.3、3.0,非异常台站卫城、西昌和重庆台位于阈值线外,逐日比值分别为 2.4、2.4、1.9。

相邻台站地磁垂直分量日变化一般具有较好的同步性,即其变化具有较好的一致性,但由图 2(b)~2(d)和图 3(b)~3(d)不难看出(图中蓝色虚线框所示),在逐日比异常日,异常阈值线两侧相邻台站地磁垂直分量存在反相位变化,这种变化类似高导带两侧地磁垂直分量存在的短周期反相位变化(徐文耀等,1978;侯作中等,1984),但不同的是,高导带两侧垂直分量短周期反相位变化是经常出现的,位置也是固定的,而此处的反相位变化仅出现在异常期间,且位置不固定。

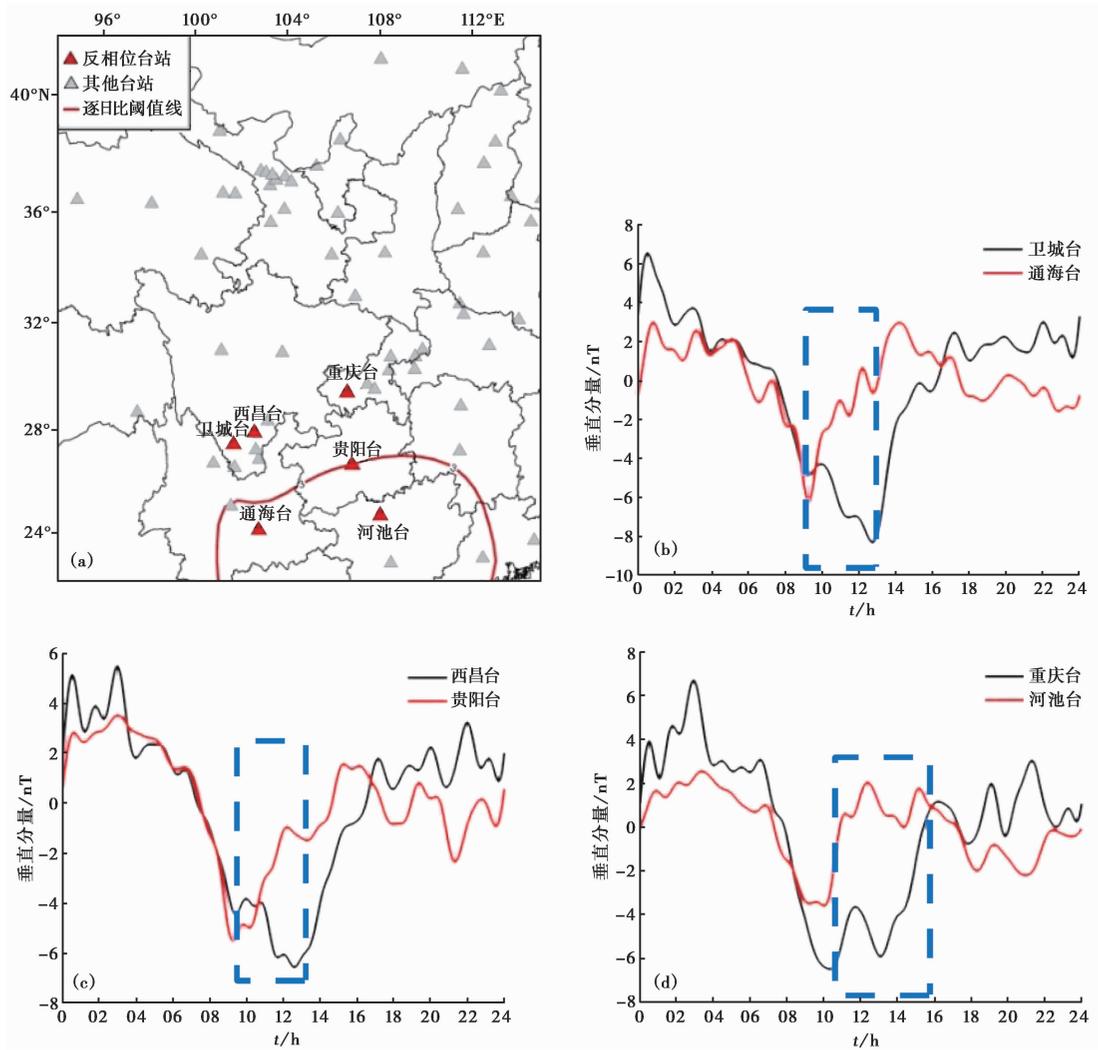


图 3 2009 年 2 月 5 日逐日比异常和台站垂直分量反相位变化

进一步滤除地磁日变化主要成分的 1 阶、2 阶谐波(徐文耀等,1994)及 10 阶以上的高频成分,便可更清晰地观察到 2 个台站间的反相位信号,这些反相位现象持续时间在 2~6h 内,如图 4、图 5 所示。与地壳上地幔电导率横向不均匀性引起的地磁异常特征主要出现在垂直分量中一样(Untiedt, 1970; Nishida, 1976; 徐文耀等, 1978; 徐文耀, 2009; Rokityansky, 1982; 侯作中等, 1984; Neska, 2016),地磁逐日比异常的反相位变化也仅出现垂直分量中。

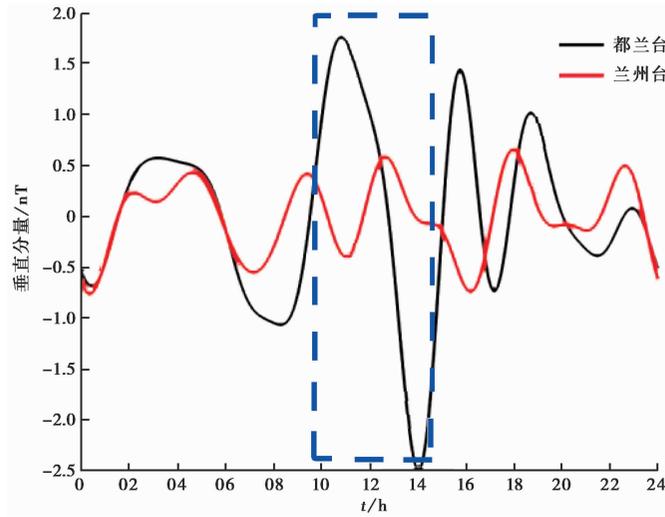


图 4 2008 年 2 月 5 日兰州台与都兰台反相位变化

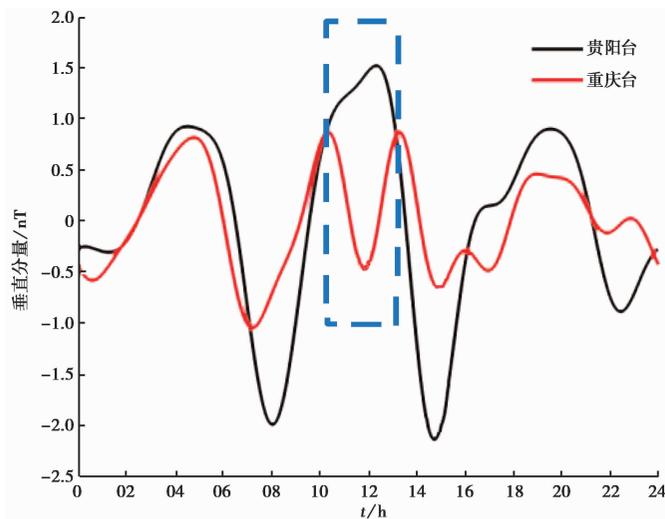


图 5 2008 年 2 月 5 日重庆台与贵阳台反相位变化

图 6 给出 2008 年 2 月 5 日地磁逐日比异常日重庆台与贵阳台地磁水平分量的日变化曲线，可以看出，其变化是同步的，未出现反向变化。因此，我们推测垂直分量反相位信号并非外源场信号，而是来源于地下感应电流。

5 结论

《地震电磁分析预测技术方法工作手册》(简称《手册》)中认为地磁逐日比异常的成因主要源于异常日地磁垂直分量日变化幅度变小(中国地震局监测预报司,2020),该解释只是相对定性的分析,缺少相应的统计数据,也未提及异常前一天的日变化幅度变大对异常的影响。本文基于地磁逐日比异常的日变化幅度变大或变小的统计结果,发现地磁逐日比高值

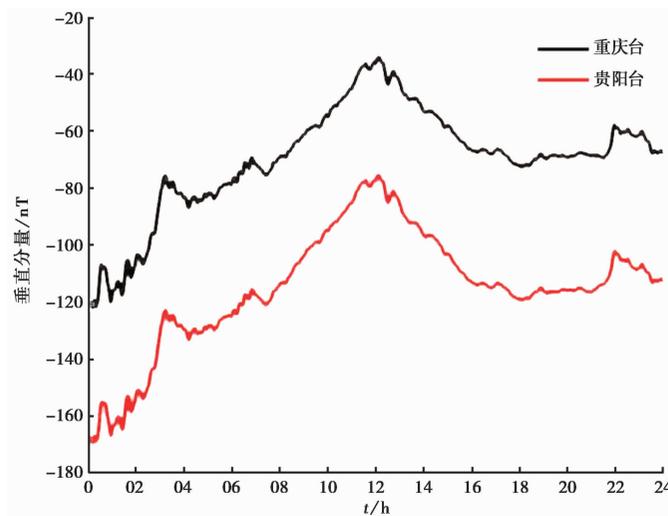


图6 2008年2月5日重庆台与贵阳台水平分量日变化

异常是由异常日地磁垂直分量日变化幅度变小和异常前一天的日变化幅度变大所致,其中,异常日的日变化幅度变小是地磁逐日异常的主要因素,而异常前一天的日变化幅度变大也是异常成立的重要因素。《手册》中针对逐日比异常机理提出了地下感应电流两侧的反向感应磁场叠加在地表台站地磁观测记录上的假说,而本文列举的逐日比异常日阈值线两侧台站垂直分量反相位变化现象进一步证实了这种推测。

地磁加卸载响应比计算公式与逐日比类似,因此,此文分析结果也适用于解释地磁加卸载响应比异常。但地磁加卸载响应比计算公式分子异常与分母异常对地磁加卸载响应比异常的具体贡献大小和比例,还需要基于实际资料进行进一步统计。

致谢:文中用到的数据源自中国地震局地球物理研究所国家地磁台网中心,在此表示感谢。

参考文献

- 陈峰,马麦宁,安金珍,2013. 承压介质电阻率变化的方向性与主应力的关系. 地震学报,35(1):84~93.
- 冯志生,姜楚峰,冯丽丽,等,2020. 短期重现性地磁日变化感应电流集中分布与地震关系初步研究. 中国地震,36(3):502~516.
- 冯志生,李琪,李鸿宇,等,2009. 地磁低点位移线两侧异常变化的反相位现象及其解释. 中国地震,25(2):206~213.
- 侯作中,史铁生,1984. 云南省的地磁短周期变化异常. 地震学报,6(3):287~293.
- 黄颂,姚丽,姜楚峰,2020. 基于幅相法的地磁低点位移异常可靠性分析方法. 地震,40(3):131~141.
- 李军辉,姜楚峰,冯志生,等,2021. 2013年岷县-漳县6.6级地震前地磁日变化异常及机理分析. 地震工程学报,43(3):551~558.
- 倪晓寅,郭雨帆,谢小玲,等,2018. 华南地区地磁加卸载响应比异常指标. 华南地震,38(4):22~28.
- 倪晓寅,赖见深,朱培育,2019. 汶川8.0级地震前地磁日变化异常综合分析. 中国地震,35(1):65~75.
- 徐文耀,2009. 地球电磁现象物理学. 合肥:中国科学技术大学出版社.
- 徐文耀,李卫东,1994. 东亚大陆磁异常区地磁太阳日变化的异常特征. 空间科学学报,14(2):134~143.
- 徐文耀,祁骥,王仕明,1978. 甘肃省东部地区短周期地磁变化异常及其与地震的关系. 地球物理学报,21(3):218~224.
- 中国地震局监测预报司,2020. 地震电磁分析预测技术方法工作手册. 北京:地震出版社.

- Brace W F, Orange A S, Madden T R, 1965. The effect of pressure on the electrical resistivity of water-saturated crystalline rocks. *J Geophys Res*, **70**(22):5669~5678.
- Neska A, 2016. Conductivity anomalies in Central Europe. *Surv Geophys*, **37**(1):5~26.
- Nishida Y, 1976. Conductivity anomalies in the southern half of Hokkaido, Japan. *J Geomag Geoelectr*, **28**(5):375~394.
- Rokityansky I I, 1982. *Geoelectromagnetic Investigation of the Earth's Crust and Mantle*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Untiedt J, 1970. Conductivity anomalies in central and southern Europe. *J Geomag Geoelectr*, **22**(1~2):131~149.
- Yamazaki Y, 1966. Electrical conductivity of strained rocks, The second paper: Further experiments on sedimentary rocks. *Bull Earthq Res Inst*, **44**(4):1553~1570.

Further Analysis on the Electromagnetism Cause of the Geomagnetic Daily Ratio Anomaly

Ni Xiaoyin, Chen Ying, Yang Jinling

Fujian Earthquake Agency, Fuzhou 350003, China

Abstract Base on the statistical results of increase or decrease of geomagnetic vertical component daily variation amplitude during abnormal geomagnetic daily ratio period, we found that the abnormal high value is caused by the decrease of the geomagnetic vertical component daily variation amplitude during the abnormal day and the increase during the day before anomaly. The decrease of daily variation amplitude of abnormal day may be the main cause of geomagnetic daily ratio anomaly. However, the increase of daily variation amplitude of the day before anomaly is also an important factor too. We established an electromagnetic model to explain the mechanism in this paper, and our results confirm the speculation on the mechanism of this method by previous studies.

Keywords: Geomagnetism; Vertical component; Inverse phase; Daily ratio; Anomaly