

贾立峰, 乔子云, 张国苓, 丁志华, 张建国, 2015. 地磁加卸载响应比方法最佳阈值研究. 震灾防御技术, 10(2): 472—478.
doi: 10.11899/zzyfy20150229

地磁加卸载响应比方法最佳阈值研究¹

贾立峰¹⁾ 乔子云¹⁾ 张国苓¹⁾ 丁志华¹⁾ 张建国²⁾

1) 河北省地震局, 石家庄 050021

2) 河北省地震局邯郸中心台, 邯郸 056001

摘要 地磁加卸载响应比方法(LURR)是从测震学中移植过来的、用于地震中期分析预测的一种地磁学方法。笔者应用红山地震台地磁数字化观测数据进行了地磁加卸载响应比的计算分析, 经过统计得出在阈值选择为 3.0 时对地震进行预测的效果比较好, 其与地震的对应概率为 42%。同时, 笔者还认为可能受限于方法本身及外界因素, 地磁加卸载响应比方法在进行地震预测时, 其虚报率及漏报率较高。

关键词: 地磁 加卸载响应比 阈值 地震预报

引言

地磁场是地球固有的地球物理场, 能够深刻反应地下物质信息的变化(徐文耀, 2003; 2009), 同时地磁场也是一种用来研究地震、预测地震的前兆手段(丁鉴海等, 1994)。地磁加卸载响应比方法(LURR)便是其中的方法之一, 目前这一方法在全国地震系统应用较为广泛, 已经成为一种用来进行中短期地震分析预测的地磁手段。这一方法的提出源于测震学中的加卸载响应比理论, 即在非线性系统失稳的过程中伴随着外部应力加载与卸载的不平衡作用过程(尹祥础等, 1991)。随后, 加卸载响应比理论被应用于地震活动性预测当中并取得了一定的效果, 同时, 这一方法在地形变、地下水位、重力等地震前兆资料的分析中也得到了较好的验证(宋治平等, 1996)。例如: 曾小苹等(1996)将这一方法运用于地磁分析中, 将磁暴发生过程中地磁场的变化视为磁场对太阳风的加卸载响应, 分析了磁暴场暴时扰日变化 $D(Z)$ 的响应比值 $P(Z)$ 随时间的变化, 发现 $P(Z)$ 的高值与地磁台站周边一定范围内 $M_S \geq 5.5$ 级的中强主震有较好的对应结果, 随后, 作者使用这一方法对我国华北和西南两个地震活动带进行了分析检验, 同样发现在地震发生前的不同时间段内 $P(Z)$ 值有出现高值的现象发生; 冯志生等(2000)使用这一方法研究了江苏地磁台网 1983—1997 年间的加卸载响应比异常, 以及这一期间台内和网络附近 $M_S 4.6$ 级以上地震之间的关系, 并对其内检预报效能进行了评价, 同时提出了适用于江苏地磁台分析预测的标志体系; 李伟等(2013)的研究发现, 同一台站分别使用 57 型模拟磁力仪和 GM4 型数字化磁力仪分别观测得到的 $P(Z)$ 值存在不同程度的差异, 在 $P(Z) > 2.5$ 的情况下, 两者的差异比重范围为 $-19.51\% \sim -0.39\%$, 作者利用 $P(Z) > 2.5$

1 基金项目 国家自然科学基金(41274079); 地震行业科研专项(201508009-09)

[收稿日期] 2014-04-09

[作者简介] 贾立峰, 男, 生于 1981 年。硕士。主要从事地震地磁分析工作。E-mail: 729102262@qq.com

的频次分析地震时，由 GM4 型数字化磁力仪观测结果计算得到的 $P(Z)$ 值在反映地震前兆异常的能力上较强。

自 2002 年起，河北省红山地震台在继续进行模拟地磁观测的基础上，增加了一套 FHD-1 型分量质子磁力仪，数据产品为地磁分钟值相对记录数据。在“十五”时期，根据中国地震前兆数字化观测网络的要求，该分量质子磁力仪升级为 FHD-2B 型并增加了网络传输协议，同时也提高了仪器的观测精度。本文对红山台周边一定范围内的地震数据进行了分析研究，计算并提取了适用于该地区 $P(Z)$ 的阈值，可为红山台所在地区震情的判定提供标志依据。

1 红山台背景

1966 年 3 月在邢台地区发生了 $M_S 7.2$ 级地震，同年 4 月由中国科学院地球物理研究所在邢台地区负责筹建红山地震台，并于当年 7 月开始投入使用，之后，在 1971 年 10 月移交给河北省地震局负责。

红山台地处华北平原南部邢台市山口镇，其地理位置如图 1 所示。红山台位于太行山山前断裂带分支断裂即隆尧束鹿断裂的南段，海拔高度 37m，基岩裸露，周围是大面积冲积平原，地表出露地层为震旦纪石英砂岩，层位较低，基岩出露面积小。同时，红山台远离城镇和村庄，干扰源较少，是比较理想的地震及地磁观测场所。

红山台开展地磁观测较早，自建台以来已积累了 30 多年的丰富地磁观测资料，数据质量稳定可靠。同时作为全国地磁观测的基准台，其地磁观测数据还承担着对外交换的任务。红山台数字化地磁观测从 2002 年 1 月开始，现有的绝对观测仪器为 G856 型质子核旋仪及 Mingeo-DI 型仪，相对记录仪为 GM4 型磁通门磁力仪及 FHD-2B 型分量质子磁力仪。

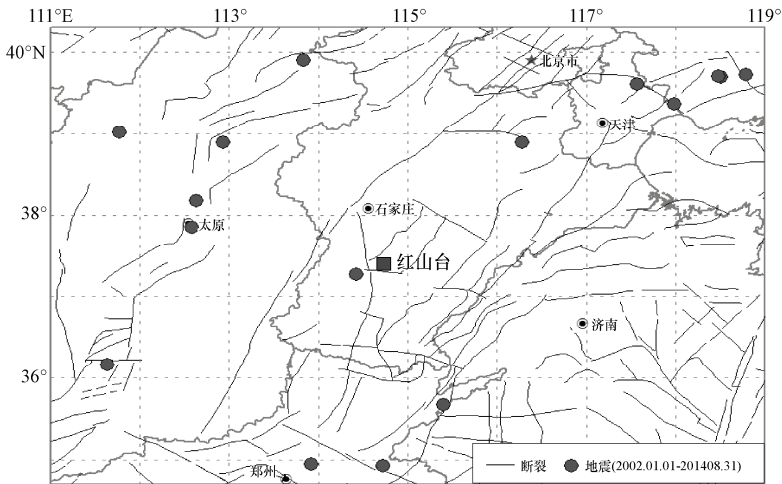


图 1 红山台地理位置及周边 $M_S \geq 4.0$ 级地震分布图

Fig. 1 Map showing the location of Hongshan station and distribution of earthquakes with $M_S \geq 4.0$

2 原理与方法

太阳风主要以紫外辐射和粒子流辐射两种辐射形式影响地球磁场，从而使地磁场出现变化磁场。变化磁场主要有两种：一是地磁场变化即太阳静日变化 S_q ；二是磁暴场 D 。其中，

磁暴场 D 的构成为: $D=Dst+Ds+Dp(B)$, 式中 Dst 为暴时变化, Ds 为暴时扰日变化, $Dp(B)$ 为极区亚暴。

按照曾小苹等(1996)的地磁加卸载响应比理论, 地球自转使太阳的紫外辐射对地球每天加卸载一次, 其地磁效应即是 Sq ; 太阳暴风粒子流辐射的地磁效应就是全球同时发生的磁暴现象, 由统计可知, 平均大约 5—6 天地球便会被太阳高速暴风粒子流加卸载一次。另外, 考虑到地震是一种非线性失稳现象, 在孕震区地下介质系统由稳态变为非稳态的过程中, 介质的物理性质, 其中包括电导率将会发生相应的反应。因而可以认为, 不同的地磁测点, 稳定地区和非稳定地区暴时扰日变化不同; 同一地磁测点非稳定时期暴时扰日变化与正常时期的变化又不同。因此, 可通过计算地磁加卸载响应比 $P(Z)$ 值来得到其异常信息。

地磁垂直分量 Z 与地下介质及其变化较其它地磁分量的关系更密切, 因此可以取 Z 分量作为计算 $Ds(Z)$ 的加卸载响应参量:

$$P(Z)=Ds(Z)_+/Ds(Z)_- \quad (1)$$

式中, $Ds(Z)$ 为 Z 分量地磁扰动场的日变幅; 标志 “+” 表示加载; 标志 “-” 表示卸载。

在实际运用中可将地磁场垂直分量日变幅 ΔZ_+ 和 ΔZ_- 看作是太阳风对地磁场的加载和卸载, 此时计算公式可简化为:

$$P(Z)=\Delta Z_+/\Delta Z_- \quad (2)$$

3 计算结果及分析

目前, 红山台所使用的地磁相对记录仪器有两种: 一种为 FHD 型分量质子磁力仪; 另一种为 GM4 型磁通门磁力仪。本文中采用的数据为 FHD 型分量质子磁力仪所产出的分钟值相对记录数据。该仪器总强度 F 观测精度为 0.3nT, 水平分量 H 观测精度为 0.6nT, 磁偏角 D 观测精度为 0.1'。

根据红山台的地理位置及周边历史地震记录, 笔者以距离台站 300km 范围为限, 选取了自红山台 2002 年 1 月数字化地磁观测以来, 台站周边发生的 $M_S 4.0$ 级以上地震作为研究对象, 地震目录及参数如表 1 所示, 地震空间分布如图 1 所示。

表 1 红山台周边 300km 以内 $M_S 4.0$ 级以上地震统计

Table 1 Statistics of earthquakes with $M_S \geq 4.0$ within 300km surrounding Hongshan station

序号	时间(年-月-日)	北纬	东经	地点	震级 (M_S)	震中距 (km)
1	2002-04-22	37.4°	114.6°	河北隆尧	4.8	29
2	2002-09-03	37.9°	112.6°	山西寿阳	4.6	193
3	2002-11-07	34.9°	113.9°	河南原阳	4.1	280
4	2006-04-09	35.8°	115.4°	河南范县	4.2	202
5	2006-07-04	38.9°	116.3°	河北文安	5.1	217
6	2008-03-10	35.0°	114.7°	河南封丘	4.4	275
7	2009-03-28	38.9°	112.9°	山西原平	4.3	228
8	2010-04-04	40.0°	113.9°	山西大同	4.2	288
9	2010-06-05	38.2°	112.7°	山西阳曲	4.6	202

红山台 2012 年 1 月至 2013 年 12 月的地磁加卸载响应比计算结果如图 2 所示, 并在计算前进行了细致校对, 剔除了因缺数造成的错误日变幅数据。

图 2 中出现的高值突跳即为地磁加卸载响应比异常，而且该类异常通常具有成丛性。图 2 中所标注的地震为台站周边 300km 以内发生的所有 M_S4 级以上地震，从图中可以看出，这些地震的发生和该地磁加卸载响应比的高值分布有一定的对应关系。

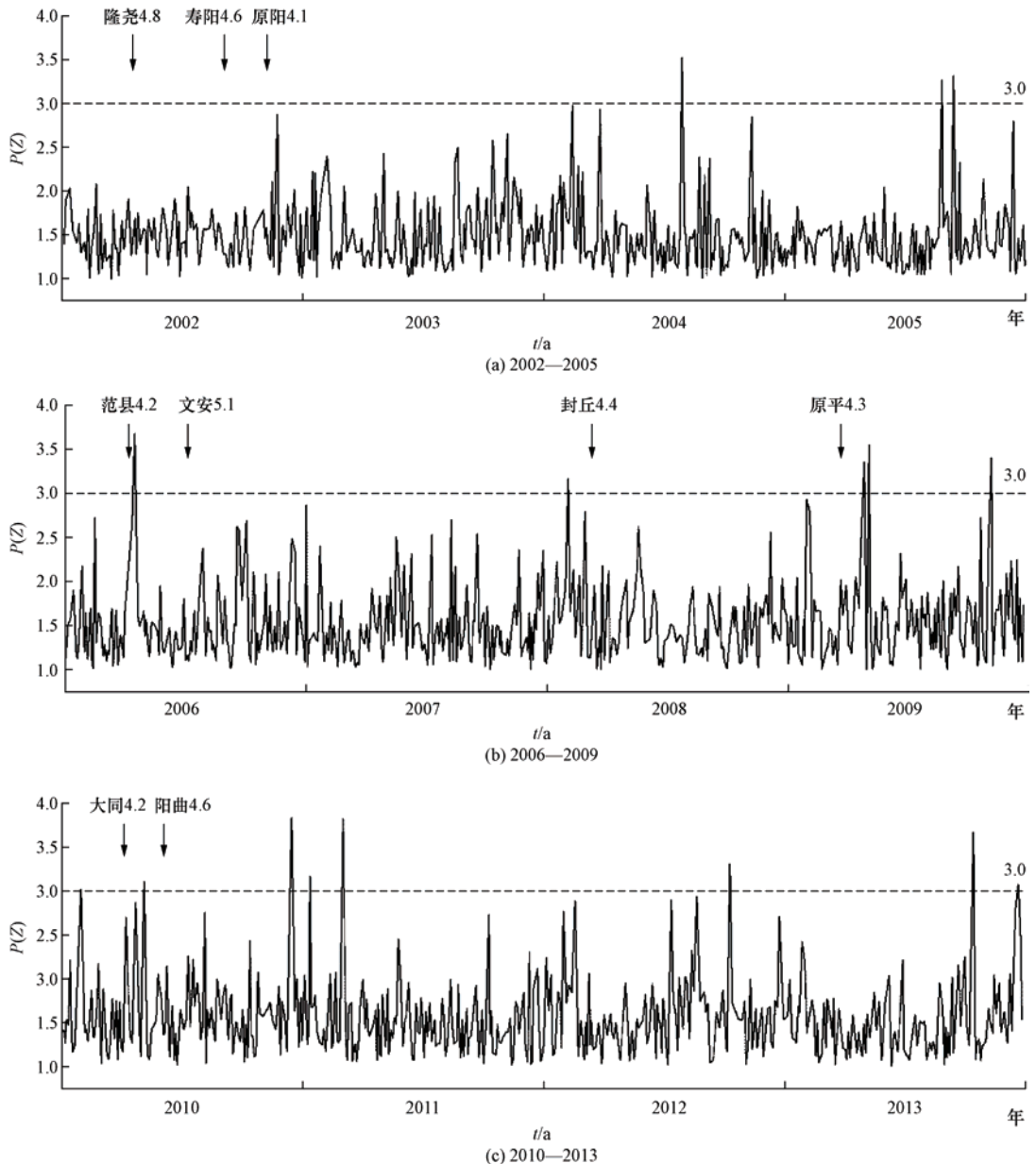


图 2 红山台地磁加卸载响应比 $P(Z)$ 计算结果

Fig. 2 Calculating results of geomagnetic LURR $P(Z)$ from Hongshan station

同时，对加卸载响应比计算结果进行阈值的选取是确定异常的关键。为了确定响应比是否为异常的映震效果，笔者尝试规定了以下准则：①确定阈值后，高于阈值的值定为异常，异常间隔小于 3 个月定为一组异常，每组异常有效期为 12 个月，有效期开始时间以最后高值

出现的日值为准；②地震可以在异常结束后发生，也可以发生在异常期间内（震前或震后异常）；③若地震发生在若干组异常的共同有效期内，则判定各组异常均为有效异常，但对应的地震次数只记 1 次。

按照上述准则，笔者对红山台的 $P(Z)$ 计算结果尝试进行了不同阈值的选择和统计，对异常阈值的起始值划分为 5 个级别即从阈值 2.6 划分至阈值 3.4，将高于阈值的加卸载高值定为异常，同时根据规定的准则统计各次异常分组，其结果如表 2 所示。

表 2 红山台地磁加卸载响应比映震效能检验统计

Table 2 Statistical efficiency analysis on the Hongshan geomagnetic LURR

阈值	异常数 (组)	对应地震数 (次)	对应率 (%)	虚报率 (%)	漏报率 (%)
$P(Z)=2.6$	20	6	30	70	33
$P(Z)=2.8$	17	6	35	65	33
$P(Z)=3.0$	12	5	42	50	44
$P(Z)=3.2$	9	4	44	56	56
$P(Z)=3.4$	7	3	43	57	67

例如从表 2 可以看出，当 $P(Z)$ 的阈值选择为 3.0 时，共统计出异常 12 组，对应地震次数为 5 次，对应概率为 42%；其对应的地震分别为 2006 年 4 月 9 日河南范县 $M_S4.1$ 级地震、2006 年 7 月 4 日河北文安 $M_S5.1$ 级地震、2008 年 3 月 10 日河南封丘 $M_S4.4$ 级地震、2010 年 4 月 4 日山西大同 $M_S4.2$ 级地震、2010 年 6 月 5 日山西阳曲 $M_S4.6$ 级地震（见表 3）。同时，表 3 还给出了其他阈值异常与地震的对应情况。

表 3 红山台地磁加卸载响应比 ($P(Z)=3.0$) 对应地震统计表

Table 3 Statistical earthquake corresponding analysis on the Hongshan geomagnetic LURR ($P(Z)=3.0$)

事件序号	异常组号	异常日期 (年-月-日)	异常值	对应地震	发震间隔 (天)	震中距 (km)
1				2002-04-22 河北隆尧 $M_S5.1$ 级地震	漏报	29
2				2002-09-03 山西寿阳 $M_S4.6$ 级地震	漏报	193
3				2002-11-07 河南原阳 $M_S4.1$ 级地震	漏报	280
4	1	2004-02-14	3.0	虚报		
5	2	2004-07-29	3.52	虚报		
6	3	2005-08-27	3.27	2006-04-09 河南范县 $M_S4.3$ 级地震	207	202
		2005-09-14	3.32			
7	4	2006-04-17	3.68	2006-07-04 河北文安 $M_S5.1$ 级地震	78	217
8	5	2008-02-05	3.16	2008-03-10 河南封丘 $M_S4.4$ 级地震	34	275
9				2009-03-28 山西原平 $M_S4.3$ 级地震	漏报	228
10	6	2009-05-01	3.36	2010-04-04 山西大同 $M_S4.2$ 级地震	331	288
		2009-05-08	3.55			
11	7	2009-11-10	3.4		145	
		2010-01-30	3.02			
12	8	2010-05-06	3.11	2010-06-05 山西阳曲 $M_S4.6$ 级地震	30	202

续表

事件序号	异常组号	异常日期 (年-月-日)	异常值	对应地震	发震间隔(天)	震中距(km)
13	9	2010-12-16	3.84	虚报		
		2011-01-13	3.17			
		2011-03-04	3.83			
14	10	2012-10-11	3.31	虚报		
		2013-10-16	3.67			
15	11	2013-12-23	3.08	虚报		
		2014-01-11	3.09			
16	12	2014-08-30	4.09	虚报		

另外,从表 3 还可以看出,上述 5 次对应发生的地震与响应比异常的最短间隔为 30 天,最长间隔为 331 天。所以从统计结果看,阈值选择为 3.0 时,对地震的预测效果较其他阈值更为理想。尽管阈值 3.0 低于阈值 3.2 和阈值 3.4 对应的地震发生概率,但阈值 3.0 时的地震虚报率和漏报率较低,显示出了明显的统计优势。

4 讨论

笔者将红山台数字化地磁数据进行了加卸载响应比计算及分析,确定了可以利用的合理阈值起始值。同时还得出以下几点初步认识:

(1) 地磁加卸载响应比方法在统计学意义上对地震有一定的预测性。红山台的计算结果显示,选择合适的异常阈值后可以在未来 1 年的时间尺度内,对 $M_s4.0$ 级及以上地震作出 40% 以上的预测,此时的虚报率为 50%。

(2) 加卸载响应比方法有时会出现连续性的漏报及虚报。从表 3 的统计结果可以看出,红山台对最早的 3 次震例均为漏报,造成漏报率高的直接原因可能是由于缺乏 2001 年的响应比数据,因此,满足一定时间长度的地磁数据样本是对该方法进行计算、验证及研究的前提条件。

另外,该方法虚报率较高也是一个无法回避的问题。笔者在对红山台进行过的所有阈值划定结果中,其虚报率始终不低于 50%。造成这种结果的原因除了该方法本身外,对地震目录选择限制过多也可能是另一种原因,假如对 300km 以内及 M_s4 级以上两个地震目录的限制条件有所改变,其响应比计算结果可能会有所不同。这一点笔者将在以后的研究中对其进行进一步的计算验证。

总之,地磁加卸载响应比方法是从测震学中移植借鉴的一种方法,其使用的是能较好地反应地下介质导电性质的响应比 $P(Z)$ 作为响应函数,并以它在正常情况下的时间变化和空间分布作为背景,研究震前由于电导率变化引起的地磁响应比异常来预测地震。在我国目前的地震科研及地震预测预报体系中,对预测方法的研究及建立一定的映震指标体系是一项重要的工作,以此为基础可以对地磁前兆数据进行合理的异常量化及判定,这对地震分析预报工作有着积极的意义。

参考文献

- 丁鉴海, 卢振业, 黄雪香, 1994. 地震地磁学. 北京: 地震出版社.
- 冯志生, 林芸芳, 王建宇等, 2000. 江苏地磁加卸载响应比的异常标志体系. 地震, **20** (2): 61—68.
- 李伟, 龚耀, 2013. 上海地磁加卸载响应比资料分析与地震研究. 华南地震, **33** (4): 31—37.
- 宋治平, 尹祥础, 陈学中, 1996. 加卸载响应比的时空演变特征及其对地震三要素的预测意义. 地震学报, **18** (2): 179—186.
- 徐文耀, 2003. 地磁学. 北京: 地震出版社.
- 徐文耀, 2009. 地球电磁现象物理学. 北京: 中国科学技术大学出版社.
- 尹祥础, 尹灿, 1991. 非线性系统的失稳前兆与地震预测. 中国科学 (B 辑), **5** (5): 512—518.
- 曾小苹, 续春荣, 赵明等, 1996. 地球磁场对太阳风的加载响应与地震. 地震地磁观测与研究, **17** (1): 49—53.

The Study of Optimal Threshold of Geomagnetic Load-Unloading Response Ratio

Jia Lifeng¹⁾, Qiao Ziyun¹⁾, Zhang Gouling¹⁾, Ding Zhihua¹⁾ and Zhang Jianguo²⁾

1) Earthquake Administration of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China

2) Handan Seismic Station, Handan 066001, China

Abstract As a middle-term earthquake prediction method, the geomagnetic load-unload response ratio (LURR) was transplanted from the seismological method. Based on digital observation data, we calculated the LURR of Hongshan station. Our results show that when the threshold is 3.0, the accurate rate of the earthquake prediction probability is about 42%. Meantime, find that the false and missing ratio is relatively high when we applied the LURR to predict earthquake.

Key words: Geomagnetic; Load-unload response ratio; Threshold; Earthquake prediction