

图象识别法在磁暴预报中的应用

曾小苹 林云芳 陆晨 冯忠孝 郭启华 王碧泉

(国家地震局地球物理研究所)

摘 要

本文将所研究的全部太阳和地球物理资料时间划分为442个时间段,其中前195段为“下降期”,后247段为“低年期”。按一定的选暴标准将其分为有磁暴时间段“D”和无磁暴时间段“N”。以表的形式提出与磁暴的发生有一定相关的12个物理先兆。利用计算机进行“D”和“N”的识别。

结果表明:1)在“下降期”中,综合耀斑指数 $CFI \geq 6$ 、持续时间大于10分钟的IV型射电爆发和行星际磁场的扇形边界过地球等现象,是引起磁暴发生的主要原因;2)在“低年期”,当太阳上的耀斑及其相关活动现象不发生时,产生磁暴的主要条件是反映27天重现性的太阳活动源(冕洞发出的高速流)和行星际磁场的扇形边界过地球等先兆;3)在“试验时段”内,“D”和“N”类识别的识别率为73—82%,在“预报时段”内用此图象识别法识别率为73—80%,误识率均不大于30%。用多组阈值(K)进行了正交设计试验,并经过“显著性”检验,本方法成功率的置信度大于97.5%。

一、前 言

图象识别方法就是用电子计算机解决图象的分类问题,在本文中即从能引起磁扰的许多因素中找出最有可能引起磁扰的因素群作为判断根据,对任一指定时段能否出现磁扰作出判断。为此,要经过以下三个步骤来实现:1)确定若干个产生两类物理图象的先兆,对先兆数量化,并将物理先兆按拟定的标准进行分类;2)确定先兆群的结构,选择一定的阈值(K)作为判据,判断先兆群的属性,即判断任一先兆群所引起的是哪一类图象;3)利用有已知属性的若干个先兆群来判断从前的或未来的每一时间段应该归属图象的类别(图象分“D”和“N”两类)。最后,给出这种方法的识别率、误识率、成功率和相应的显著性检验。将此方法用于未来时间段即可进行磁暴预测。此方法的细节详见文献[1]。

近20年来,图象识别法在许多科学和技术领域中得到了越来越广泛的应用。70年代初,此方法被引入地震学中用于划分地震危险区和识别未来可能发生强震的地点。70年代末,王碧泉等^[1]将图象识别法用于地震预测中识别强震的发生时间。本文企图将此法用于磁暴预报。

严格说来,对磁暴的预报应该包含三个内容,即预报一个磁暴的发生时间、强度随时间的发展和结束时间。本文仅在预报磁暴发生时间这一个方面进行了方法的初步探讨。参考文献[2]提出的预报地磁扰动的逻辑框图和文献[3—6]所作的大量统计结果,从太阳活动引起地磁效应的物理原因和过程出发,提出了与磁暴发生相关的较多的若干个先兆,用图象识别法进行分类和综合处理,以识别磁暴的发生时间,得到了较好的结果。

二、磁暴的选定和物理先兆的提出

1. 时间段的选定

本文将所研究的资料时间(1971.1.1.—1977.1.18.)按每 5 天一个间隔分为 442 个时间段,其中磁暴占有 232 段时间。用 27 天重现性指数 $R_{aa}^{[7]}$ 将 1973 年 9 月 1 日以前的 195 个时间段定为“下降期”($R_{aa} < 30$),后 247 个时间段定为“低年期”($R_{aa} \geq 30$)。

2. 选择磁暴的标准

先由 SGD^[8]的磁暴报告中查出磁暴,即在 1971.1.1.—1977.1.18. 期间有 5 个以上台站同时选定的磁暴中,选出连续有 2 个 aa 指数 ≥ 30 的磁暴,或一个 aa 指数 > 50 的急始型磁暴,作为本文研究的对象。对复合暴或大磁暴,如果持续时间跨越 2 个时间段,则按占据 2 个时间段计算。磁暴发生时刻所占时间段为“D”,其它为“N”。

3. 物理先兆表

本文参考文献[2—6],并考虑磁暴发生的物理原因及其发展过程,收集了以下资料:综合耀斑指数 CFI 、IV 型和 II 型射电爆发、 SID 和 10 厘米射电流量^[9,10]、行星际磁场扇形边界过地球日期^[7]、 C_9 指数^[11]和磁暴的重现性等,提出了 12 个物理先兆,列于下表。

表 1 物理先兆表

编 号	内 容
1	处于日面经度 $45^\circ\text{E}—70^\circ\text{W}$ 、 $CFI \geq 6$ 的耀斑发生后 1—3 天。
2	处于日面经度 $46^\circ—70^\circ\text{E}$ 、 $CFI \geq 6$ 的耀斑发生后 1—3 天。
3	处于日面经度 $71^\circ—90^\circ\text{W}$ 、 $CFI \geq 6$ 的耀斑发生后 1—3 天。
4	$CFI \geq 6$ 情况发生后 1—3 天。
5	持续时间大于 10 分钟的 IV 型射电爆发发生后 1—3 天。
6	II 型和 IV 型射电爆发同时发生后 1—3 天。
7	3 级 SID 发生后 1—3 天。
8	2 级 SID 和 IV 型射电爆发同时发生后 1—3 天。
9	3 级 10 厘米射电流量发生后 1—3 天
10	磁暴发生后 27 天
11	有 27 天重现性的扇形边界过地球后 27—28 天。
12	$C_9 \geq 5$, 或连续 3 天 $C_9 = 4$ 以后 26—27 天。

注: 此处 SID 是指引起短波消失或电离层骚扰的太阳离子化辐射。

4. 提取新的特征性质

为了刻划“D”、“N”的本质区别,按表 1 中的每一个,或二个,或三个物理先兆的组合构造新的特征性质。当表 2 中 K_{11} 、 K_{12} 、 K_{21} 、 K_{22} 的值选定后,所有新特征性质的全

部取值按表中的判据进行分类,具有新特征性质的某种取值则称为“D类(或N类)性质”。

表 2 新特征性质的测定

有暴时间段 (D)	无暴时间段 (N)	性质所属类别
$\geq K_{11}$	$\leq K_{12}$	D类性质
$\leq K_{21}$	$\geq K_{21}$	N类性质

三、计 算 结 果

1. K 值的确定及对计算结果的检验

根据本文研究的实际情况,以及表 1 中每一物理先兆的出现频次,经过试算,在表 3 中给出“下降期”和“低年期”的 K_{ij} 的取值范围。

表 3 “下降期”和“低年期”K 值表

“下降期”				“低年期”			
K_{11}	K_{12}	K_{21}	K_{22}	K_{11}	K_{12}	K_{21}	K_{22}
0.55	0.35	0.35	0.60	0.60	0.20	0.20	0.60
0.50	0.30	0.30	0.55	0.50	0.30	0.30	0.50
0.40	0.25	0.25	0.50	0.40	0.35	0.35	0.40
0.30	0.20	0.20	0.40				

表 4.1 “下降期”K 值的正交试验及显著性检验

编 号	K 值				“试验时段”识别结果				“预报时段”识别结果			
	K_{11}	K_{12}	K_{21}	K_{22}	识别率 (%)	误识率 (%)	R	R_s	识别率 (%)	误识率 (%)	R	R_s
1	0.55	0.35	0.35	0.60	72.6	28.4	0.217	0.123	80.6	29.2	0.206	0.166
2	0.55	0.30	0.30	0.55	73.5	29.8	0.217	0.122	80.6	29.2	0.206	0.166
3	0.55	0.25	0.25	0.50	69.2	29.8	0.195	0.125	75.0	29.2	0.183	0.173
4	0.55	0.20	0.20	0.40	75.0	28.4	0.232	0.120	75.0	29.2	0.183	0.173
5	0.50	0.35	0.30	0.50	76.5	31.3	0.224	0.119	80.6	29.2	0.206	0.166
6	0.50	0.30	0.35	0.40	69.1	26.9	0.210	0.126	72.2	29.2	0.189	0.177
7	0.50	0.25	0.20	0.60	75.0	29.8	0.224	0.122	80.6	29.2	0.206	0.166
8	0.50	0.20	0.25	0.55	72.0	28.4	0.217	0.123	80.6	29.2	0.206	0.166
9	0.40	0.35	0.25	0.40	77.9	26.9	0.254	0.118	80.6	29.2	0.206	0.166
10	0.40	0.30	0.20	0.50	79.4	29.8	0.246	0.116	83.3	29.2	0.217	0.162
11	0.40	0.25	0.35	0.55	72.0	28.4	0.217	0.123	80.6	29.2	0.206	0.166
12	0.40	0.20	0.30	0.60	77.9	29.8	0.239	0.118	83.3	29.2	0.217	0.162
13	0.30	0.35	0.20	0.55	77.9	29.8	0.239	0.118	75.0	29.2	0.183	0.173
14	0.30	0.30	0.25	0.60	77.9	28.4	0.246	0.118	75.0	29.2	0.183	0.173
15	0.30	0.25	0.30	0.40	76.5	26.9	0.246	0.119	80.6	29.2	0.206	0.166
16	0.30	0.20	0.35	0.50	76.5	29.8	0.231	0.119	80.6	29.2	0.206	0.166
17	0.30	0.35	0.35	0.40	76.5	28.4	0.239	0.119	80.6	29.2	0.206	0.166

K 值组 ($K_{11}, K_{12}, K_{21}, K_{22}$) 的组数总和应是 $K_{ij}(i, j = 1, 2)$ 的所有可能取值的组合数。为了通过尽量少的组合试验得出能代表全部组合的最合理的试验结果, 本文采用了“正交试验设计方法”^[12]。现将 K 值的正交试验中前 2/3 的试验时段用于分类识别, 后 1/3 的预报时段用于内符合检验, 按“下降期”和“低年期”分别列于表 4.1 和 4.2。

表 4.2 “低年期” K 值的正交试验及显著性检验

编 号	K 值				“试验时段”识别结果				“预报时段”识别结果			
	K_{11}	K_{12}	K_{21}	K_{22}	识别率 (%)	误识率 (%)	R	R_s	识别率 (%)	误识率 (%)	R	R_s
1	0.60	0.20	0.20	0.60	82.1	27.5	0.250	0.096	72.7	28.2	0.241	0.180
2	0.60	0.30	0.20	0.40	82.1	28.8	0.244	0.096	72.7	28.2	0.241	0.180
3	0.60	0.35	0.30	0.50	82.1	30.0	0.238	0.096	72.7	28.2	0.241	0.180
4	0.50	0.20	0.30	0.40	82.1	30.0	0.238	0.096	72.7	28.2	0.241	0.180
5	0.50	0.30	0.30	0.50	78.9	27.5	0.235	0.099	72.7	28.2	0.241	0.180
6	0.50	0.35	0.35	0.60	81.0	30.0	0.233	0.097	72.7	28.2	0.241	0.180
7	0.40	0.20	0.35	0.50	80.0	28.8	0.234	0.098	66.7	20.5	0.250	0.180
8	0.40	0.30	0.35	0.60	81.0	28.8	0.239	0.097	72.7	28.2	0.241	0.180
9	0.40	0.35	0.20	0.40	76.8	27.5	0.226	0.100	72.7	28.2	0.241	0.180
10	0.50	0.30	0.35	0.60	81.0	30.0	0.233	0.097	72.7	28.2	0.241	0.180

表 4 中 R 和 R_s 值为显著性检验结果, R 为扣除了随机概率后的预报成功率(或称“识别成功率”), 即

$$R = \frac{\text{“D” 总时段数中识别出 “D” 的时段数}}{\text{“D” 的总时段数}} - \frac{\text{“D + N” 总时段数中识别出 “D” 的时段数}}{\text{“D + N” 总时段数}},$$

表 5.1 “下降期”“D” 和 “N” 类性质的新特征取值 ($K_{ij} = 0.30, 0.35, 0.35, 0.40$)

物理征兆编号	“D” 类性质												总 和	“N” 类性质	
	一个征兆				二个征兆组合						三个征兆组合	总 和			
1	1					1								2	30
2														0	27
3														0	23
4		1				1	1	1	1	1			1 1	8	37
5			1				1			1	1	1	1 1	7	38
6				1				1					1	4	31
7														0	28
8														0	27
9					1			1						2	30
10						1				1		1 1		5	63
11							1	1			1 1		1 1	7	64
12						1						1 1		4	51

而 R_i 是按二项式分布原则编制的一个保证 97.5% 置信度的最低 R 值表中, 按识别和漏识个数查出的最低 R 值。

2. 被提取的新特征取值

表 4 “ K 值的正交试验”结果表明, 各试验组之间不仅识别率、误识率有高低之分, 而且显著性检验亦有优劣之别, 所以, 对“下降期”和“低年期”中拟选用代表性强、结果适中的最后一组(表中的最后一组)来说明“新特征取值”, 其结果列于表 5。

表 5.1 表明, 在“下降期”期间用图象识别法可提取出表 1 中第 1、4—6 和 9—12 等物理先兆, 即这些物理先兆发生后会引起磁暴。值得注意的是由表中“N”类性质总和数可以看出, 同样是这些物理先兆的否定答复给出了不发生磁暴的信息。

表 5.2 指出, 在“低年期”期间, 只有与重现性有关的先兆(表 1 中的第 9—12 等先兆)及其相互组合, 才会给出发生磁暴的信息, 而这些重现性和表 1 中的第 1、4、5、9 等物理先兆不发生时, 则给出无暴的回答。

3. 识别情况

预报(或识别)磁暴的效果, 应该包括识别、漏识和误识这几方面, 其中对大磁暴的预报(或识别)效果则是一个十分重要的问题。现以列表形式分述如下。

4. 结论

1) 在地磁活动的“下降期”期间, 综合耀斑指数 $CFI \geq 6$, 持续时间大于 10 分钟的

表 5.2 “低年期”“D”和“N”类性质的新特征取值 ($K_{ij} = 0.50, 0.30, 0.35, 0.60$)

物理征兆编号	“D”类性质							“N”类性质	
	一个征兆			二个征兆组合			三个征兆组合	总 和	总 和
1								0	30
2								0	26
3								0	26
4								0	28
5								0	27
6								0	29
7								0	26
8								0	25
9								0	30
10	1			1	1		1	4	64
11		1		1		1	1	4	50
12			1		1	1	1	4	62

注: 1) 表中所列各项的意义见文献[1]。

2) 表中略去了“N”类性质的新特征取值, 仅列出了总和值。

表 6 识别情况一览表

时间段	段数	无暴段数	有暴段数	识别段数	误识段数	漏识段数
“下降期”	195	91	104	81	26	23
“低年期”	247	119	128	99	33	29
共计	442	210	232	180	59	52

IV 型射电爆发, 以及有 27 天重现性的行星际磁场的扇形边界过地球等现象, 是引起地球上发生磁暴的主要原因。以上几个物理先兆和重现性磁扰若不出现, 则给出不发生磁暴的信息(见表 5.1)。

表 7 大磁暴的识别情况

时 间 段	对应日期 (年.月.日)	大暴个数	识别个数	识别率(%)
“下降期”	1971.1.1.—1973.9.1.	19	18	95
“低年期”	1973.9.2.—1977.1.18.	20	17	85
共计	1971.1.1.—1977.1.18.	39	35	90

注: 大磁暴规定为该磁暴期间最大 $aa \geq 88$ 者。

表 8 漏识情况

时间段	漏识个数	无表 1 中先兆 对应的个数	小磁暴个数	与扇形边界过地球 先兆对应个数	与重现性先兆 对应个数	与太阳耀斑活动 先兆对应个数
“下降期”	23	11	12	7	4	2
“低年期”	29	20	11	5	1	4
共计	52	31	23	12	5	6

注: 小磁暴规定为该磁暴期间最大 $aa \leq 50$ 者。

表 9 误识情况

时 间 段	误识个数	重现性先兆 误识个数	太阳耀斑活动 先兆误识个数	扇形边界过地球 先兆误识个数
“下降期”	26	22	13	14
“低年期”	33	30	7	18
共计	59	52	20	32

2) 在地磁活动的“低年期”阶段, 太阳耀斑及其相关活动不出现时, 产生磁暴的主要条件是反映 27 天重现性的太阳活动源(即冕洞发出的高速流)和行星际磁场的扇形边界过地球。而这些条件不发生时, 也给出无暴的信息(见表 5.2)。

3) 在本文所研究的时间内, 具有 27 天重现的扇形边界过地球这一物理先兆, 在“D”类性质和“N”类性质的提取中(见表 5) 均被提取出来了。这说明扇形边界过地球是发生磁暴的一个重要的近地球环境条件。至于它所包含的更深刻的物理意义还有待进一步研究。

4) 在本文所研究的“下降期”内, 有些不是来源于冕洞的磁暴亦具有重现性(见表 5.1)。这种现象表明在此期间太阳耀斑所在的活动区寿命较长。

5) 计算结果(表 4)表明: “试验时段”的识别率对“下降期”和“低年期”分别为 73% 和 82% 左右, “预报时段”的识别率分别为 80% 和 73% 左右, 误识率均不大于 30%。在显著性检验中, 扣除了随机概率的识别(或“预报”)成功率 R 为 0.22—0.24, 均大于置信度为 97.5% 的最低值 $R_c(0.10—0.18)$ 。这说明本文所用图象识别法, 经过“显著性”检验,

其成功率的置信度超过 97.5%。

四、讨 论

1. 图象识别法能对表 1 所列的全部物理先兆的“特征”作出判断, 所以用此方法提取的物理现象再次证明是进一步研究日地关系和磁暴机制的重要依据。另外, 图象识别法用于识别大磁暴是相当有效的, 由表 7 可知, 在本文研究的时间内, 共发生了 39 个大磁暴, 识别率为 90% 左右。但是, 对于出现频次远小于磁暴发生频次的现象, 即使与磁暴的对应关系很好, 图象识别法的识别能力也极低。例如表 1 中第 7、8 两个先兆, 即 3 级 SID 和与 IV 型射电爆发同时发生的 2 级 SID, 在 1975—1978 年期间分别发生 24 次和 43 次, 1—3 天后发生磁暴分别是 18 次和 30 次, 对应情况分别为 75% 和 70%。而图象识别法未能将这类先兆提取出来。这是一个有待进一步研究的技术问题。

2. 由表 8 可知, 在漏识的 52 个“D”时段中, 有 31 个不对应表 1 所列 12 个物理先兆中的任何一个(占 60%)。我们估计主要原因有两点: 其一是有的磁暴来源不在本文所列 12 个先兆之内, 如色球暗条消失, 东西边沿事件和瞬变的冕洞等。其二是在 52 个“D”时段中, 小磁暴(最大 $aa \leq 50$ 者)就有 23 个, 占 44%, 说明选暴标准还不够合理。

3. 由表 9 可知, 在 210 个“N”时段中就有 59 个时段被误识为有暴(“D”)时段。其中由于重现性先兆误识的就有 52 个, 占 88%, 由于耀斑及其相关活动误识的共 20 个, 占 34%。这说明: 第一, 27 天重现性现象在磁暴预报中作为一种先兆虽然被提取出来了, 但还存在较大的误识率和漏识率。如果直接利用冕洞资料对重现性的开始和结束进行研究判断, 则会提高对重现性磁暴的识别(或预报)成功率。第二, 需要对行星际介质作三维的、全面的了解, 才能解决耀斑及其相关活动的误识问题。

4. 对预报效果的评价问题。从“用户”的观点看, 预报的成功率一般有两种算法:

1) 报准率。应该分为对有暴和无暴的报准率两种, 从表 6 可算出:

$$\text{有暴报准率} = \frac{\text{有暴识别段数}}{\text{有暴段数}} \doteq 78\%$$

$$\text{无暴报准率} = \frac{\text{无暴识别段数}}{\text{无暴段数}} \doteq 72\%$$

2) 成功率。考虑识别、误识和漏识情况, 其算法为:

$$\text{成功率} = \frac{\text{识别时间段数}}{\text{识别时间段数} + \text{误识时间段数} + \text{漏识时间段数}} \doteq 75\%$$

实际上, 以上算法中均未扣除“预报”的随机概率, 是不够合理的。

5. 磁暴预报在宇航环境、通讯、电力传输、物探、天气和气候等有关国防、科研和生产实用方面都起着重要的作用。国内外不少学者对预报磁暴的方法进行了各种探索。随着科学技术的迅速发展, 同步卫星的实时监测和大型电子计算机的使用, 为提高磁暴预报的成功率创造了良好的客观条件。在预报方法的探索中, T. V. Garivonaskaya 等^[13]在 1979 年的国际日地预报会上曾做过关于利用计算机预报磁扰的报告。本文作者经过试验, 认为从识别率和成功率来看, 用图象识别法预报磁暴, 前景是良好的。如能收集到更

完整的资料,则可提取出更多的信息,提高预报的成功率。

在本工作中,一直得到祁贵仲和章公亮同志的指导和帮助,在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] 王碧泉等,地震学报,第4卷,第105页,1982.
- [2] Joselyn, J. A., *Solar-Terrestrial Predictions Proceedings*, Vol. 4. A-115, 1980.
- [3] 章公亮等,地球物理学报,第25卷,第10页,1982.
- [4] Nagai, M., *Solar Terrestrial Environmental Research in Japan*, Vol. 1, p. 44, 1977.
- [5] 永井正男,地磁气观测所要报,Vol. 17, p. 87, 1978.
- [6] 丸桥克英,石井隆広雄,南極資料, Vol. 68, p. 47, 1980.
- [7] Sargent, H. H., *Solar-Terrestrial Physics and Meteorology*, Working Document III, p. 93, 1979.
- [8] World Data Center A for Solar-Geophysical Data, NOAA, Boulder, Colorado, 1971—1977.
- [9] Report UAG-52, World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics, NOAA, Boulder, Colorado, 1975.
- [10] Report UAG-80, World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics, NOAA, Boulder, Colorado, 1981.
- [11] И. Д. Зосимовин, Геомашинитная активность и устойчивость корпускулярношо поля Солнца Изд "Наука" Москва. 1981.
- [12] 中国科学技术大学,概率论与数理统计,附录 2,中国科学技术大学印刷厂,1980.
- [13] Garivonaskaya, T. V. & Kuleshova, P., *Solar-Terrestrial Predictions Proceedings*, Vol. 4, A-19, 1980.

Application of Pattern Recognition Method to the Prediction of Geomagnetic Storms

Zeng Xiaoping Lin Yunfang Lu Chen
Feng Zhong-xiao Guo Qi-hua Wang Bi-quan
(Institute of Geophysics, State Seismological Bureau)

Abstract

The solar and geophysical data in the period from January 1st, 1971 to January 18th, 1977 are divided into 442 intervals, each containing 5 consecutive days. The 195 intervals before September 1st, 1973 were defined as "declining phase" and the following 247 intervals as "minimum phase". Each interval can be characterized as geomagnetic disturbed "D" or calm "N" according to the beginning of geomagnetic storm.

On the other hand, we try to define by computer the disturbed days on the base of solar or geophysical features in association with the geomagnetic storms in the first two third of number of intervals (referred to as "learning period") in both declining and minimum phase in order to determine certain threshold values necessary for this method. Then we use this method to identify the "D" and "N" intervals in the remaining one third of number of intervals (referred to as "test period").

The main results as follows:

- (1) In the declining phase the comprehensive flare index (CFI) of importance

equal 6 or more, the radio bursts of Type IV with duration 10 min. or more and the interplanetary magnetic field (IMF) sector boundary passage through Earth are most likely associated with geomagnetic storm.

(2) In the minimum phase the solar active source exhibiting 27-day reoccurring tendency (i.e. the high speed stream from the coronal hole) and the IMF sector boundary passage through Earth are most likely the cause of geomagnetic disturbances.

(3) The recognition efficiency is 73—82% in the learning period and 73—80% in the test period with error $\leq 30\%$ in both cases.

We also have made experiments of orthogonal design with a member of groups of threshold values and test of significance. The resulting confidence limit in this method is greater than 97.5%.