

Wang Jing, Liu Siqing, Xue Bingsen, Gong Jiancun. Anisotropy analyses of cosmic ray before the geomagnetic storm on Sep. 24, 1998. *Chin. J. Space Sci.*, 2009, **29**(5): 495-501

1998 年 9 月 24 日地磁暴前宇宙线 各向异性特性分析^{*}

王 晶 刘四清 薛炳森 龚建村

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

摘 要 分析了日本 Nagoya 宇宙线闪烁体望远镜 30° , 49° , 64° 倾角的东、西、南、北方向探测数据的变化特点, 运用小波分析方法定性地探讨了磁暴前后宇宙线南北、东西各向异性的变化特征. 研究发现, 当发生大地磁暴时, 地面宇宙线强度的各向异性特征将发生非常大的变化, 这种变化一般在磁暴发生前 10~20 h 就开始出现. 当描述这种各向异性特征的各向异性指数的小波系数变化达到一定阈值时, 就可能有大地磁暴发生.

关键词 地磁暴; 宇宙线; 小波分析

中图法分类号 P 353

Anisotropy Analyses of Cosmic Ray Before the Geomagnetic Storm on Sep. 24, 1998

WANG Jing LIU Siqing XUE Bingsen GONG Jiancun

(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract Cosmic rays are energetic particles originating from outer space that impinge on Earth's atmosphere. Almost 90% of all the incoming cosmic ray particles are protons, about 9% are helium nuclei and about 1% are electrons. The nuclei that make up cosmic rays are able to travel from their distant sources to the Earth because of the low density of matter in space. Nuclei interact strongly with other matter, so when the cosmic rays approach Earth they begin to collide with the nuclei of atmospheric gases. These collisions, in a process known as shower, result in the production of many pions and kaons, unstable mesons which quickly decay into muons. Muons are ionizing radiation, and may easily be detected by many types of particle detectors such as bubble chambers or scintillation detectors. Based on the muon measurement data of 30° , 49° , 64° of East, West, South, North components of cosmic ray from Nagoya station, the north-south and west-east anisotropy of cosmic ray just before geomagnetic disturbances and quiet days is analyzed by use of Haar wavelet. It was found that fluctuations of the anisotropy of cosmic ray before geomagnetic disturbances increased due to the approaching of CME because the shock front and strong IMF induced by CME and the coefficient of wavelet always increased monotonously more than 10 hours ahead the geomagnetic

^{*} 国家重点基础研究发展计划 (G2006CB806300) 和中国科学院知识创新工程共同资助

2008-09-19 收到原稿, 2008-12-08 收到修定稿

E-mail: jwang@spaceweather.ac.cn

storm, which hopefully could be the premonitory properties of the eruption of severe geomagnetic storm.

Key words Geomagnetic disturbances, Cosmic ray, Wavelet analysis

1 引言

地面宇宙线观测开始于 20 世纪 50 年代, 对地面宇宙线以及与空间环境各种现象之间的关系研究已经开展了大量的工作. 20 世纪 80 年代, Xue^[1] 等进行了宇宙线南北各向异性共转变化的研究, 指出宇宙线南北各向异性与行星际磁场有关, 可以利用地面宇宙线的各向异性监测行星际磁场分量, 进而为空间环境预警提供有价值的信息. 地面宇宙线通量与空间高能粒子, 特别是其中能量较高的粒子的通量关系密切^[2], 所以地面宇宙线在监测和预报高能粒子研究方面也具有重要意义. Lai 等^[3] 开展了利用地面中子强度数据反演行星际空间高能质子和重离子通量研究. 从质子和重离子的能谱出发, 结合 OULU 台站中子强度的数据, 提出了由地面中子强度数据反演空间高能质子和重离子微分通量的新方法. 乐贵明等^[4-5] 运用小波方法和快速傅里叶变换分别分析了磁暴前后广州台宇宙线强度的频谱变化特征和北京宇宙线超中子堆的功率谱, 结果表明广州台垂直方向宇宙线强度的谱和北京超中子堆的功率谱在磁暴前几十个小时就发生了显著的变化.

宇宙线闪烁体望远镜可以对宇宙线不对称性进行测量, 通过两层闪烁体信号的复合, 可以监测到不同入射方向上的 μ 介子强度. Munakada^[6] 经过对观测数据的分析认为, 银河宇宙线粒子穿越激波时, 由于投掷角的改变, 到达地球的宇宙线通量会发生改变, 地面上的 μ 介子强度变化可以达到 1%~2%. Jansen^[7] 给出了公式,

$$r \approx 0.1\lambda_{//} \cos \Psi,$$

用来估算通过地面宇宙线可以感知的 CME 的距离. 式中, $\lambda_{//}$ 为宇宙线粒子在行星际中运动的自由程, 单位为 AU; Ψ 为行星际磁场与日地连线的夹角. 因此, 利用 μ 介子望远镜可以实现对 CME 的间接监测, 从而对其引起的地磁暴进行预报. 薛炳森等^[8] 分析了 Nagoya 地面宇宙线闪烁体望远镜探测数据的变化特点, 定性地探讨了 CME 可能引起的地面宇宙线的变化特征, 通过个例分析发现, 地面宇宙线通量的

异常波动是地磁暴发生的先兆特征, 当宇宙线 $D_{8(t)}$ 参数达到一定阈值时发生地磁暴的可能性很大.

本文利用日本 Nagoya 宇宙线台站的闪烁体望远镜 (35.12° N, 136.97° E) 在 30°, 49°, 64° 倾角的东、西、南、北方向的 μ 介子强度观测数据, 运用小波分析方法研究了 1998 年 9 月 24 日地磁暴前宇宙线的南北、东西各向异性. 经过对 Nagoya 地面宇宙线闪烁体望远镜探测数据的分析与讨论, 发现宇宙线各向异性指数的小波系数变化达到一定阈值可以成为地磁暴发生的判据之一. 此研究结果为基于宇宙线实测数据的地磁暴预报方法的研究提供了重要的线索.

2 资料选择与分析方法

小波分析方法是宇宙线分析研究中的一种常用的方法, 利用小波分析方法可以对宇宙线数据进行连续分析, 有效地监视由行星际不均匀结构所造成的宇宙线的涨落及其在接近地球的过程中演化的动态过程, 进而从中提取反映行星际不均匀结构及其运动的宇宙线参数.

由于单站宇宙线数据仅为二维分布且数据分布范围相对有限, 本文选择较为简洁适用于一维数据处理的 Haar 小波函数对宇宙线数据进行处理和分析.

Haar 小波函数的表达式为

$$\Psi(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < \frac{1}{2}. \\ -1, & \frac{1}{2} \leq t < 1. \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (1)$$

式 (1) 是样条函数的简化形式.

在数据选取方面, 以 Nagoya 宇宙线台站在 30°, 49°, 64° 倾角的东、西、南、北方向宇宙线强度的 1h 数据为基础, 采样时间段包含磁暴急始开始的前 2 天, 地磁扰动期间以及地磁恢复期. 这里定义南北方向的各向异性指数为

$$A_{SN} = \frac{2(I_S - I_N)}{(I_S + I_N)}. \quad (2)$$

式中, I_S 和 I_N 分别为宇宙线的南向和北向强度. 东西方向的各向异性指数为

$$A_{WE} = \frac{2(I_W - I_E)}{(I_W + I_E)}. \quad (3)$$

I_W 和 I_E 分别为宇宙线的西向强度和东向强度.

3 平静期地面宇宙线各向异性特征分析

一般情况下, 在地面上测量到的银河宇宙线各向异性指数都很小, 但是当行星际空间发生大的扰动情况下, 地面宇宙线各向异性指数会发生明显的变化. 不同地面宇宙线台站观测到的地面宇宙线各向异性特征可能有些差异. 为了分析扰动前后 Nagoya 台站宇宙线各向异性的特征变化, 我们首先对台站平静期的各向异性指数进行了分析计算, 发现该台站平静期宇宙线各向异性指数的小波系数变化幅度一般不超

过 8%.

图 1 为 2001 年 2 月 Nagoya 宇宙线 30° 倾角的南北、东西各向异性小波分析. 2001 年 2 月期间没有引发地磁暴的 CME 事件及 C 级以上的耀斑爆发, 没有大的行星际扰动和地磁扰动. 从图 1 中可以看出, 除个别时段小波系数有些小的扰动外, 其他时段各尺度小波系数均无明显变化. 一个月的时间里 A_{SN} 和 A_{WE} 各种尺度小波系数变化的平均值分别为 0.24% 和 0.01%, 最大变化幅度不超过 8%. 图 2 为尺度 58 时的南北各向异性指数 A_{SN} 的变化, 从图 2 可以看出尺度 58 变化的最大幅度为 6%.

根据以上分析, 可以初步认为, Nagoya 宇宙线台站观测数据在平静期各向异性指数一般小于 8%, 因此, 可以初步设定当南北、东西各向异性的小波系数变化幅度同时在多个尺度上超过阈值 8%, 就很有可能发生地磁暴. 下面将选择一个典型的地磁暴事件, 对其扰动前后的宇宙线各向异性特征进行进一步细致分析.

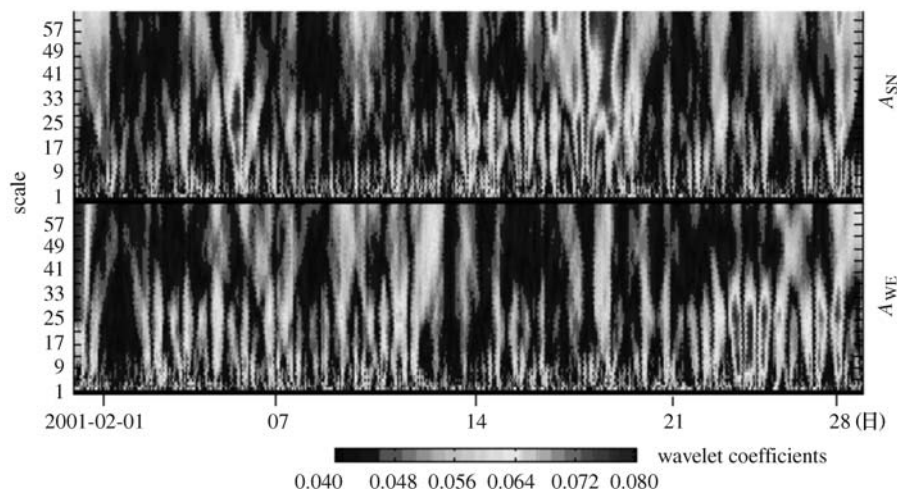


图 1 2001 年 2 月 30° 倾角方向宇宙线南北、东西各向异性的小波分析

Fig. 1 North-south and west-east anisotropy wavelet analyses of 30° component of cosmic ray intensities in Feb., 2001

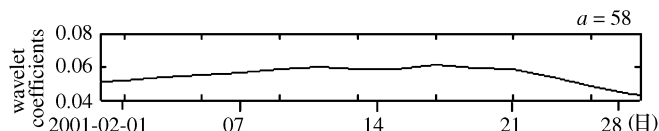


图 2 2001 年 2 月 30° 倾角方向宇宙线各向异性指数 A_{SN} 当尺度为 58 时的小波系数变化

Fig. 2 Wavelet coefficient curve of scale 58 of anisotropy index A_{SN} of 30° component of cosmic ray intensities in Feb., 2001

4 1998 年 9 月 24 日特大地磁暴前 30° 倾角宇宙线各向异性分析

1998 年 9 月 23 日 11:00 UT 爆发了一次全晕状 CME, 引发了一次特大地磁暴. 这是一次典型的由 CME 引发地磁暴爆发的事例. 为了研究地面宇宙线强度变化对 CME 在行星际传播中的反应, 寻找地磁暴发生前的宇宙线变化特征, 在此对该事例的宇宙线各向异性特征进行全面的分析研究. 该 CME 爆发

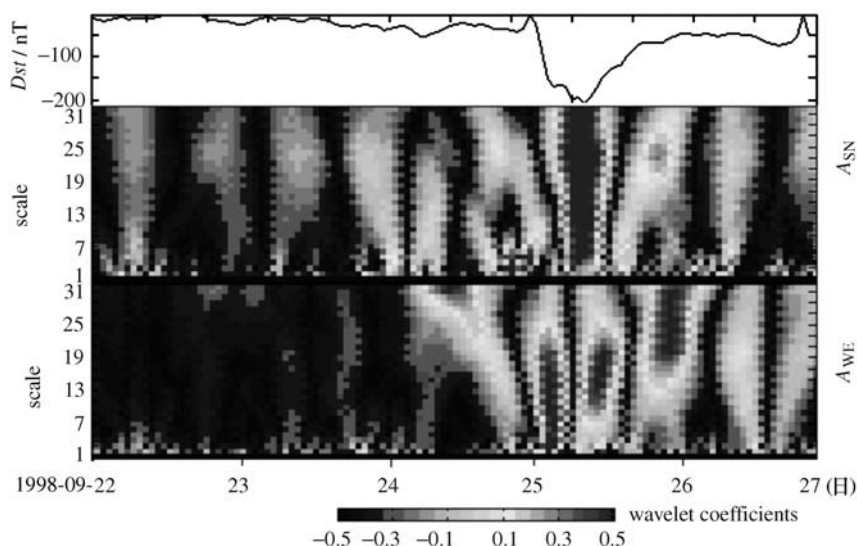


图3 1998年9月22—26日的 Dst 指数和 30° 倾角方向宇宙线南北、东西各向异性的小波分析
Fig. 3 Dst curve and the north-south and west-east anisotropy wavelet analyses of 30° component of cosmic ray intensities during Sep. 22—29, 1998

事件的爆发源位置为 18°N , 9°W , 太阳风速度为 480 km/s , CME 速度为 680 km/s . 从图3中可以看出, 磁暴急始开始时间为1998年9月24日23:45 UT, 并于1998年9月25日10:00 UT Dst 指数降到了最低值 -234 nT .

4.1 30° 倾角宇宙线各向异性分析

首先对1998年9月22—26日 Nagoya 的宇宙线 30° 倾角的南北、东西各向异性进行小波分析, 分析结果如图3所示. 图3中 $T = 0$ 为9月22日00:00 UT (以下 $T = 0$ 时刻均以此为参考). 从南北各向异性的小波分析结果可以看到, 在 $T = 47\text{ h}$ (23日23:00 UT) 左右的时候, 尺度15至尺度27的南北各向异性指数 A_{SN} 发生了明显的变化, 比磁暴急始提前了25 h左右, 即磁暴前25 h CME 就对宇宙线强度的南北各向异性产生了较强的影响. 通过对东西方向的各向异性分析可以发现, 在 $T = 59\text{ h}$ (24日11:00 UT) 左右的时候, 尺度27至尺度32的东西各向异性指数 A_{WE} 发生了明显的变化, 比磁暴急始提前了13 h左右.

为了具体分析磁暴前小波系数的变化特征, 需要对各种尺度的小波系数变化进行具体、定量地分析. 由于篇幅原因, 在图4中只给出了 30° 倾角方向尺度20至尺度26变化下的 A_{SN} 指数的小波系数变化, 以及尺度27至尺度32变化下的 A_{WE} 指数小波系数变化. 从图4可以看出, 南北各向异性的尺度20

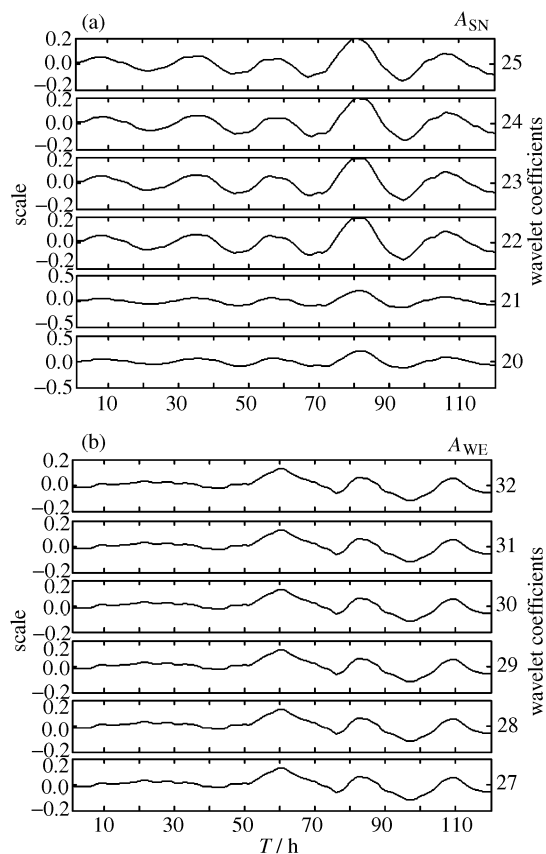


图4 30° 倾角方向宇宙线各向异性的小波系数变化
Fig. 4 Anisotropy wavelet coefficient curve of 30° component of cosmic ray intensities

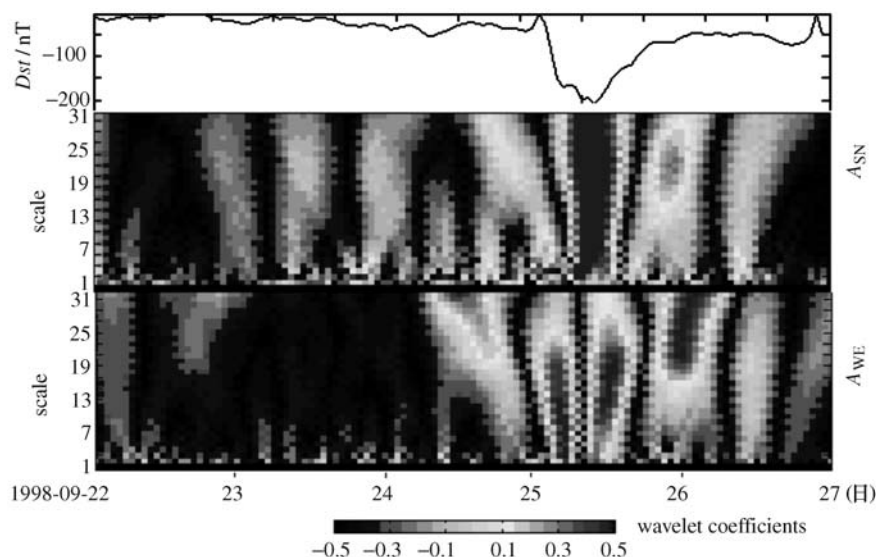


图 5 1998 年 9 月 22—26 日 Dst 指数图和 49° 倾角方向宇宙线南北、东西各向异性的小波分析

Fig. 5 Dst curve and the north-south and west-east anisotropy wavelet analyses of 49° component of cosmic ray intensities during Sep. 22—29, 1998

到尺度 26 的小波系数在 $T = 47\text{h}$ (23 日 23:00 UT) 的时候出现了先兆性的振幅变化, 且变化的幅度超过了 8%, 磁暴主相期间变化幅度达到 21%; 东西各向异性中的尺度 27 至尺度 32 的小波系数在 $T = 59\text{h}$ (24 日 11:00 UT) 的时候出现了先兆性的振幅变化, 这一变化达到了 8% 左右, 磁暴主相期间变化幅度最大达到 20%.

4.2 49° 倾角宇宙线各向异性分析

Nagoya 宇宙线 49° 倾角方向的南北、东西各向异性小波分析结果如图 5 所示. 在 $T = 46\text{h}$ (23 日 22:00 UT) 左右的时候各尺度发生了先兆性的变化, 变化的幅度超过了 8%, 比磁暴急始约提前了 26h. 东西各向异性的尺度 25 至尺度 32 在 $T = 58\text{h}$ (24 日 10:00 UT) 的时候开始发生先兆性的变化, 比磁暴急始约提前了 14h, 在 $T = 82\text{h}$ (25 日 10:00 UT) 即磁暴主相的时候各个尺度再次发生明显的变化.

从图 6 可以看出, 南北各向异性的小波系数在 $T = 46\text{h}$ (23 日 22:00 UT) 的时候下降幅度达到了 8%, 在磁暴主相, 即 $T = 82\text{h}$ (25 日 10:00 UT) 左右的时候下降幅度约达到了 27%; 东西各向异性的小波系数在 $T = 58\text{h}$ (24 日 10:00 UT) 的时候变化幅度达到了 11%, 而后在磁暴主相时, 即 $T = 82\text{h}$ (25 日 10:00 UT) 时变化幅度达到 20% 以上.

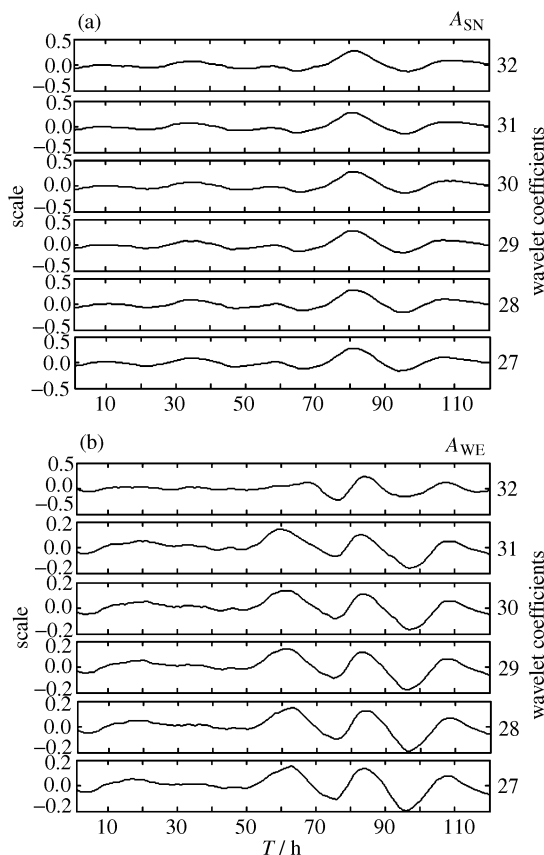


图 6 49° 倾角方向宇宙线各向异性的小波系数变化
Fig. 6 Anisotropy wavelet coefficient curve of 49° component of cosmic ray intensities

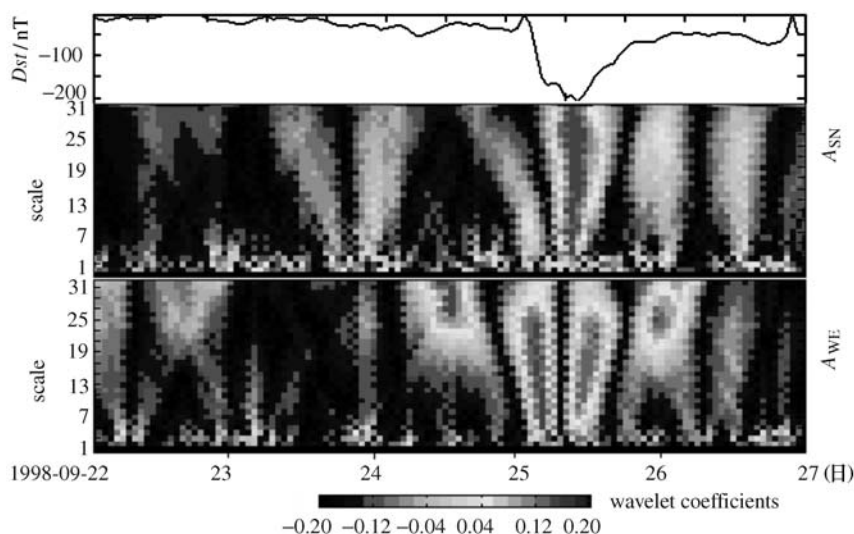


图 7 1998 年 9 月 22—26 日的 Dst 指数和 64° 倾角方向宇宙线南北、东西各向异性的小波分析
Fig. 7 Dst curve and the north-south and west-east anisotropy wavelet analyses of 64° component of cosmic ray intensities during Sep. 22—29, 1998

4.3 64° 倾角宇宙线各向异性分析

对 Nagoya 宇宙线 64° 南北、东西的各向异性进行了小波分析, 结果示于图 7. 从图 7 中可以看出, 在 $T = 47\text{ h}$ (24 日 01:00 UT) 的时候各个尺度开始发生先兆性变化, 比磁暴急始开始时间提前了 23 h. 东西各向异性尺度 23 至尺度 32 在 $T = 58\text{ h}$ (24 日 10:00 UT) 的时候开始发生先兆性变化, 比磁暴急始开始时间提前了 14 h 左右.

从图 8 的小波系数变化分析中可以发现, 南北各向异性的尺度 23 至尺度 28 的小波系数在 $T = 47\text{ h}$ (24 日 01:00 UT) 的时候下降幅度达到了 8%, 在 $T = 82\text{ h}$ (25 日 10:00 UT) 的时候即磁暴主相时, 下降幅度达到 20%. 东西各向异性的小波系数在 $T = 58\text{ h}$ (24 日 10:00 UT) 的时候变化幅度达到了 11%, 在 $T = 82\text{ h}$ (25 日 10:00) 的时候即磁暴主相期间下降幅度达到了 18%.

4.4 地磁暴前宇宙线各向异性变化特征分析

通过对 1998 年 9 月 24 日地磁暴前日本 Nagoya 宇宙线台站的闪烁体望远镜在 30° , 49° , 64° 倾角东、西、南、北方向 μ 介子强度观测数据各向异性的分析, 可以清楚看到, 当发生大地磁暴时, 地面宇宙线强度的各向异性特征将发生非常大的变化, 而且这种变化一般都会在地磁暴前开始. 表 1 给出了该次地磁暴发生前 Nagoya 台站宇宙线观测的南北、东西各向

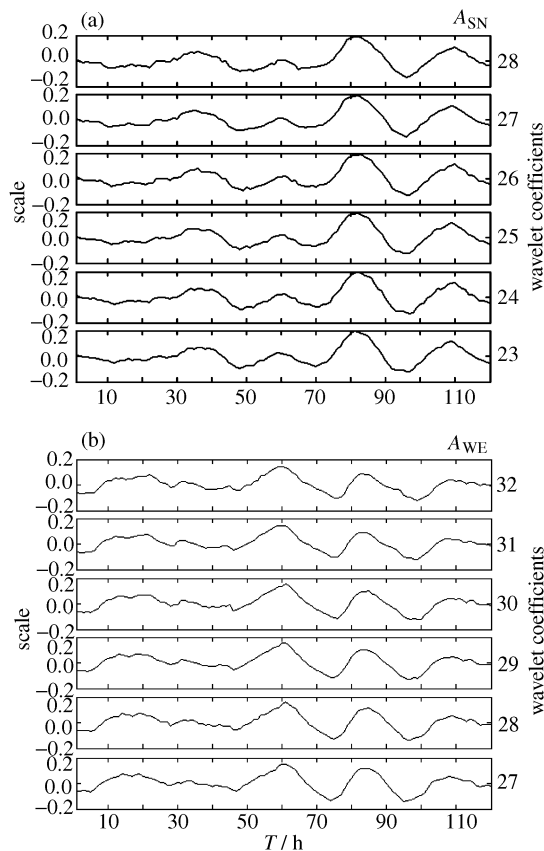


图 8 64° 倾角方向宇宙线各向异性的小波系数变化
Fig. 8 Anisotropy wavelet coefficient curve of 64° component of cosmic ray intensities

表 1 1998 年 9 月 24 日地磁暴前宇宙线小波系数
各向异性特征变化量

Table 1 Anisotropy variance of wavelet coefficients
before the geomagnetic storm on Sep. 24, 1998

	30°		49°		64°	
	南北	东西	南北	东西	南北	东西
预报提前量/h	25	13	26	14	23	14
磁暴前小波系数 变化幅度/(%)	8	8	8	11	8	11
磁暴主相期间 小波系数变化幅 度/(%)	21	20	27	20	20	18

异性的变化情况. 从表 1 中可以看出, 当磁暴发生后即磁暴主相期间各向异性指数将会发生很大的变化, 一般可以达到 20% 左右, 同时在磁暴发生前的十几、二十个小时各向异性就开始发生变化. 由此可以认为, 地面宇宙线强度各向异性特征参数的变化可以作为地磁暴预报的重要先兆特征.

5 结论与讨论

本文通过对日本 Nagoya 宇宙线台站地面宇宙线强度在地磁暴前后的各向异性特征分析, 可以得出以下结论.

(1) Nagoya 宇宙线台站观测数据在平静期各尺度小波系数均无明显变化, 各向异性指数一般小于 8%.

(2) 当发生大地磁暴时, 地面宇宙线强度的各向异性特征将发生非常大的变化, 而且这种变化一般都会在地磁暴前开始, 时间提前量为 10~20h.

(3) 地面宇宙线强度各向异性指数的小波系数变化是大地磁暴发生的重要先兆特征, 当小波系数变化达到一定阈值, 如 8%, 就可能发生大地磁暴. 该结果为基于宇宙线实测数据的地磁暴预报方法的研究提供了重要线索.

需要说明的是, 本文的结论只是通过一个台站, 根据一个典型事例的分析而得出来的, 是否具有普遍意义还需要用更多实例来进一步进行统计分析和验证. 另外, 还可以通过分析其他方向的宇宙线各向异性特征及增加宇宙线台站数量和宇宙线数据的采样密度等方式, 对地磁暴前地面宇宙线强度各向异性变

化特征开展更加细致和全面的研究, 提取出更显著的预报因子和明确的预报阈值, 为利用地面宇宙线观测数据预报地磁暴奠定基础.

致谢 日本 Nagoya 宇宙线台站提供闪烁体望远镜探测数据.

参考文献

[1] Xue Shunsheng, Zhang Gongliang, Xiao Shaoyu. The corotating variation of the north-south anisotropy of cosmic ray [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 1989, **9**:155-160. in Chinese (薛顺生, 章公亮, 肖少俞. 宇宙线南北各向异性的共转变化 [J]. *空间科学学报*, 1989, **9**:155-160)

[2] Allkofer O C. Introduction to Cosmic Radiation [M]. Beijing: Science Publishing Company, 1987. 200-235. in Chinese (阿尔科费尔著. 宇宙线入门 [M]. 北京: 科学出版社, 1987. 200-235)

[3] Lai Zhijuan, Xue Bingsen. Reverting the distribution of space protons and ions from the ground cosmic ray neutros intensity [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2007, **27**:474-480. in Chinese (赖志娟, 薛炳森. 由地面宇宙线中子强度反演空间质子和重离子的分布 [J]. *空间科学学报*, 2007, **27**:474-480)

[4] Le Guiming, Ye Zonghai, Yu Shaohua, Gong Juhong. Wavelet analysis of the cosmic ray intensities at guangzhou muon station during January 7—11, 1997 [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2004, **47**:190-194. in Chinese (乐贵明, 叶宗海, 余绍华, 龚菊红. 1997 年 1 月 7 日至 11 日广州站宇宙线强度变化特征的小波分析 [J]. *地球物理学报*, 2004, **47**:190-194)

[5] Le Guiming, Ye Zonghai, Gong Juhong. Power spectrum biggest analyses of cosmic rays observed by short time scale, Beijing superneutron monitor before the severe magnetic storm on Nov. 24, 2001 [J]. *J. Grad. School Chin. Acad. Sci.*, 2002, **19**:163-167. in Chinese (乐贵明, 叶宗海, 龚菊红. 2001 年 11 月 24 日特大磁暴前银河宇宙线短时间尺度功率谱分析 [J]. *中国科学院研究生院学报*, 2002, **19**:163-167)

[6] Munakada K, *et al.* Precursors of geomagnetic storm observed by muon detector network [J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**:27 457-27 468

[7] Jansen G. The Muon Detector Network in Geomagnetic Storm Prediction//Second European Space Weather Week Online Proceedings [G]. Noordwijk, Netherland: ESA-ESTEC, 2005

[8] Xue Bingsen, Ye Zonghai, Gong Juhong. Preliminary attempt in prediction the geomagnetic storm with ground cosmic ray data [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2007, **27**:218-222. in Chinese (薛炳森, 叶宗海, 龚菊红. 利用地面宇宙线强度变化预报地磁暴方法初步研究 [J]. *空间科学学报*, 2007, **27**:218-222)