

Le GM, Ye ZH, Yu SH, et al. Wavelet analysis of the cosmic ray intensities at Guangzhou muon station during January 7 - 11, 1997. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(2):190~194

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

乐贵明 叶宗海 余绍华 龚菊红

中国科学院空间科学与应用研究中心,北京 100080

摘要 1997 年 1 月 6 日爆发的日冕物质喷射 (CME) 到达地球时引起了强烈的地球物理效应, CME 在行星际空间传播时, 广州的多方向 μ 介子望远镜观测到银河宇宙线强度的变化. 本文采用小波分析方法分析了磁暴前后广州台宇宙线强度的频谱变化特征, 结果表明, 在磁暴前宇宙线周期为 16~32h 的信号发生了较明显的变化, 其中周期为 24~32h 的周期特征过去没有被报道过. 广州台垂直方向宇宙线强度的谱在磁暴发生前 48h 就出现明显的变化, 比各向异性分析方法得到的时间提前量更大. 同时还分析了几个方向宇宙线强度的最强信号以及达到最大值的时间, 并进行了简要的分析与讨论.

关键词 日冕物质喷射 (CME) 地磁暴 银河宇宙线 小波分析

文章编号 0001-5733(2004)02-0190-05 中图分类号 P353 收稿日期 2002-11-19, 2003-11-12 收修定稿

WAVELET ANALYSIS OF THE COSMIC RAY INTENSITIES AT GUANGZHOU MUON STATION DURING JANUARY 7 - 11, 1997

LE Gui-Ming YE Zong-Hai YU Shao-Hua GONG Ju-Hong

Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

Abstract Using wavelet analysis method, the cosmic ray intensity data observed at the Guangzhou muon station during the period from Jan. 7 to Jan. 11, 1997 is investigated. The results show that signal with periods of 16~32h has obvious variations, of which the period feature of 24~32h has not been reported before. The spectrum of the cosmic ray intensity in vertical direction has obvious variations 48h ahead of the geomagnetic storm which has more time ahead of the geomagnetic storm than the result obtained by the anisotropy method. The strongest signal in each direction is also studied and discussed briefly.

Key words Coronal Mass Ejection, Geomagnetic storm, Galactic cosmic ray, Wavelet analysis.

1 引言

已有的研究表明, 日冕物质喷射 (简称 CME) 是造成灾害性空间天气的主要原因. 对空间环境影响较大的大地磁暴绝大多数都是由快速 CME 及其驱

动的激波造成太阳风的扰动引起的^[1~4]. 因此, 对 CME 的监测就成为预测灾害性空间环境的重要组成部分. 银河宇宙线是能量很高的带电粒子, 当其穿过行星际空间时, 部分粒子将与 CME 相互作用, 其结果是有些粒子被 CME 携带的磁场捕获, 有些粒子则被改变运动方向, 从而使地面某些台站记录的

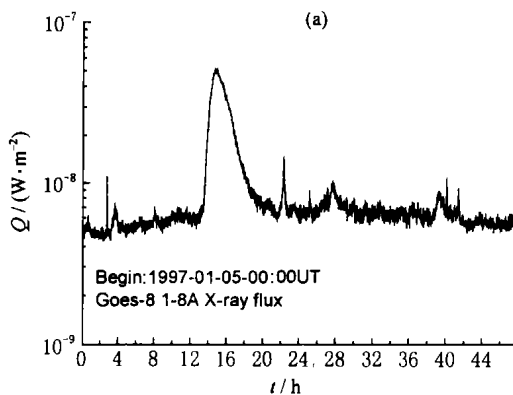
基金项目 国家 863 项目 (228144), 载人航天应用项目共同资助.

作者简介 乐贵明, 男, 1964 年生, 2002 年于中国科学院研究生院获空间物理学博士学位, 副研究员, 主要从事空间天气的研究与预报.

E-mail: lgm@earth.sepc.ac.cn

宇宙线的强度发生变化,宇宙线的频谱特征也会发生变化.因此,利用银河宇宙线的强度变化与频谱的变化可以监测 CME,从而进行空间环境预测.薛顺生等^[5]指出,银河宇宙线各向异性的观测是监测行星际磁场分量的有力工具,可以利用这种观测为空间环境预报服务.郭维吉等^[6]和叶宗海等^[7]在银河宇宙线与行星际和磁场扰动方面做过统计研究,Kazuoki 等^[8]和 Belove 等^[9]也进行了一些相应研究.Kudela 等^[10]采用传统的功率谱方法研究了周期介于 1~24h 之间银河宇宙线的功率谱与地磁指数 D_{st} 之间的统计关系,没有考虑周期大于 24h 信号变化情况.传统的谱分析方法(如 Fourier 方法等)存在很多缺陷而不能得到信号的局部特征.用传统方法分析信号的某一周期特征,则要求数据的长度不能太短,如 Fourier 分析方法要求数据的长度不能低于被分析周期的 6 倍^[11].当信号的某种周期特征出现的时间较短(低于 6 倍的周期长度)时,采用传统的谱分析方法将无法得到这种周期特征.熵谱分析与 Fourier 分析相比提高了谱的分辨率,对数据的长度要求也有所降低,但仍得不到信号的局部时频特征.小波分析方法克服了去谱分析方法的缺陷,可以得到信号的局部的精细特征^[12].

1997 年 1 月 6 日 17:34UT,太阳上爆发了一个 CME,当时太阳活动水平很低,CME 的速度为 450km/s,CME 刚离开太阳时并未受到关注.当 CME 结束行星际空间的传播到达地球附近时不仅引起了中等强度的地磁暴,还引起了强烈的地球物理效应^[13,14],并造成一颗卫星报废,这才引起国内外空间界学者极大的关注^[15-17].



2 基本原理

本文采用的小波为满足小波允许条件的 Morlet 小波, Morlet 小波的数学表达式为

$$\psi(t) = \exp(-at^2) \cos(5t), \quad (1)$$

$\psi(t)$ 满足允许小波的条件

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0, \quad (2)$$

信号 $f(t)$ 的小波变换为

$$W_f(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\psi_{ab}(t)} dt, \quad (3)$$

其中 $\psi_{ab}(a, t) = |a|^{-1/2} \psi(at - b)$, 而 $\overline{\psi_{ab}(a, t)}$ 为 $\psi_{ab}(a, t)$ 的共轭函数.

3 观测数据及其分析

1997 年 1 月 5~6 日太阳 X 射线流量见图 1a 所示,从图 1a 看到太阳 X 射线背景水平很低,在 5 日太阳爆发的耀斑是一个级别为 A7 级的耀斑,这样的耀斑或太阳活动水平不会引起人们的注意.在这次耀斑爆发后的第二天,发生了日冕物质抛射事件,SOHO 卫星的 LASCO C2 日冕仪观测到该 CME 为偏的全晕 CME,本文研究表明,这次 CME 是偏向地球南半球的,其中处在南半球的高纬 McMurdo 台站在磁暴前 9h 发生强度突增现象,突增幅度达到 1%. CME 在 1 月 10 日到达 WIND 卫星所处的位置,到达地球后引起了一次中等强度的急始型磁暴, D_{st} 的极值为 -78,见图 1b 所示.

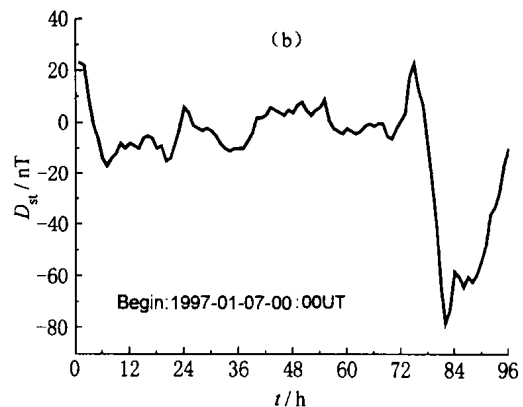


图 1 1997 年 1 月 5~6 日太阳耀斑(a)和 1997 年 1 月 7~10 日 D_{st} 指数(b)

Q 为 X 射线流量.

Fig. 1 Solar X-ray flux on Jan. 5~6, 1997 (a) and index D_{st} on Jan. 7~10, 1997 (b)

广州宇宙线台建于 1988 年,位于东经 113°18', 北纬 23°6', 海拔 20m,垂直截止刚度为 16GV,用一台

位于低纬的多方向闪烁 μ 介子望远镜进行观测. 1997 年 1 月 7~11 日期间,广州台站在垂直方向,南

向、北向、东向和西向方向实际观测的宇宙线强度以及对应强度的小波分析的等值线分别见图 2 与图 3 (见图版 I), 其中宇宙线强度数据的抽样时间间隔为 1h, 即每小时一个数据, 小波分析的等值线 W 是采用公式 (3) 计算得到的.

从图 2a 可以看到, 垂直方向的宇宙线强度从 8 日开始变化幅度增大, 一天当中的最大值增加, 而最小值变得更小, 在 11 日 12:00UT 之前宇宙线强度达到最大值, 然后宇宙线强度逐渐变小. 从垂直方向宇宙线强度的小波分析结果 (图 3a, 见图版 I) 可以看到, 从 8 日开始银河宇宙线周期为 16~32h 的强

度都明显增加, 因此, 在 8 日广州台站垂直方向的宇宙线强度明显受到 CME 的扰动, 比磁暴发生时间提前 48h 以上. 垂直方向最强的信号是周期为 23.425h 的信号, 该信号最大值的取得时间为 10 日 01:00UT. 对于这次事件, 采用各向异性方法分析多个高纬台站的宇宙线强度数据只能在磁暴前 40h 左右看出宇宙线强度的各向异性特征出现较明显的变化^[18], 而我们用小波方法只分析了一个低纬台站 (广州台站) 的数据, 而且时间提前量更大. 从这点说, 采用小波分析方法具有明显的优势, 而且用的是低纬台站 (广州台站) 的数据.

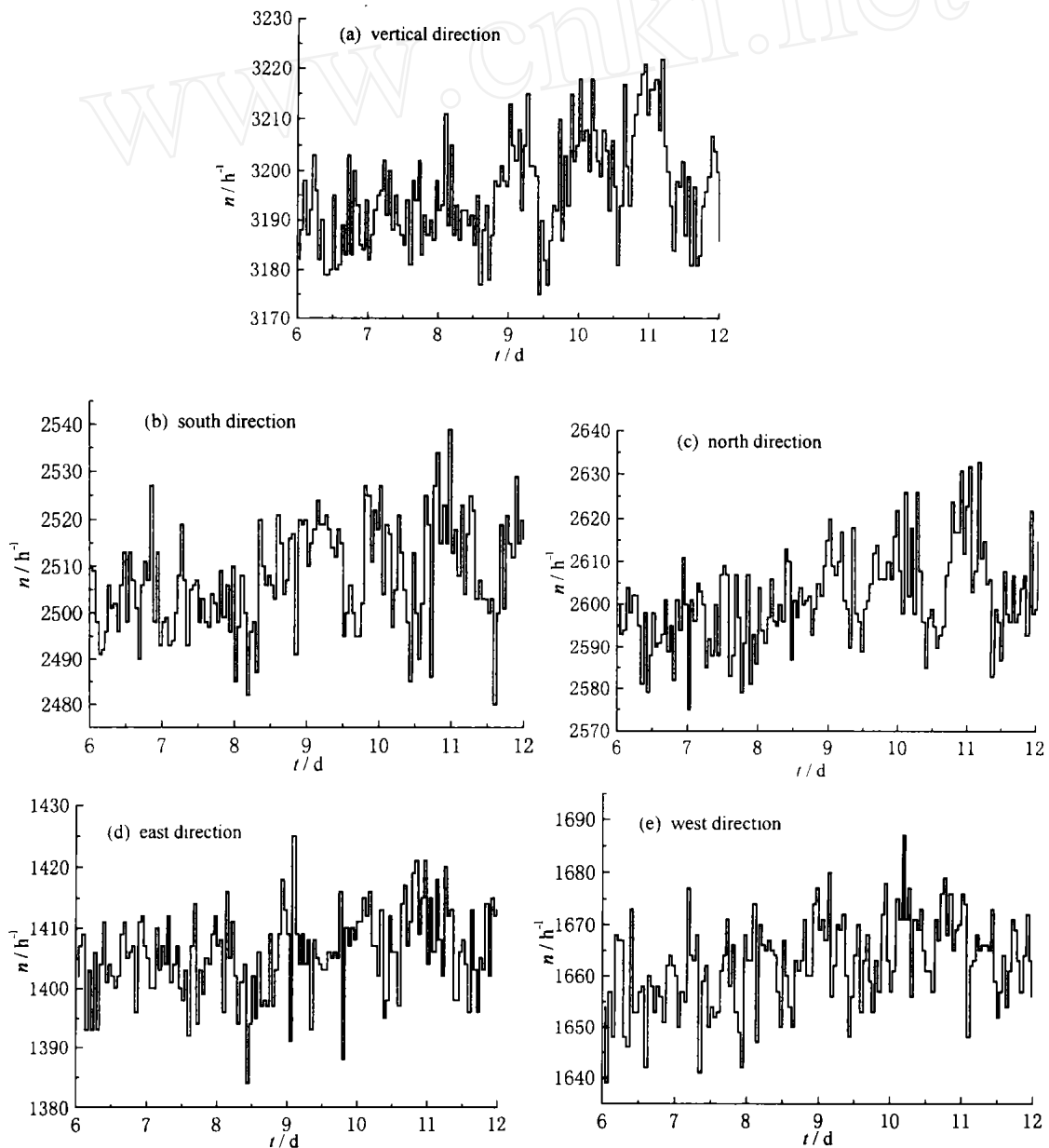


图 2 垂直方向 (a)、南向 (b)、北向 (c)、东向 (d) 和西向 (e) 银河宇宙线强度的观测值 n 为计数率.

Fig. 2 Cosmic rays' intensity in vertical direction (a), south direction (b), north direction (c), east direction (d) and west direction (e)

从图 2b, 3b(见图版 I) 可以看到, 南向宇宙线强度的变化比较复杂, 其中有两个周期段的信号变化特征非常明显. 一是从 9 日左右开始的周期为 16~32h 的信号, 增强的信号一直延续到 11 日快结束的时候. 另一个是从 7 日左右开始的周期为 32~64h 的信号有较明显的增强并持续到 10 日. 从南向宇宙线强度的小波分析还可以看出, 在 7~11 日期间, 2~64h 周期的信号都有不同程度的变化, 反映出南向宇宙线强度的变化很复杂, 而且受影响的时间比垂直方向宇宙线强度受行星际扰动的影响时间更早. 南向宇宙线强度最强的信号是周期为 22.627h 的信号, 该信号的最大值取得时间为 11 日 00:00UT.

从图 3c 可以看到, 北向宇宙线强度在 8 日 12:00UT 以后, 周期在 16~40h 之间的信号变化比较明显, 即北向宇宙线强度受 CME 的影响比南向宇宙线强度晚, 这符合这次 CME 朝向地球南半球的特征.

表 1 给出各个方向宇宙线强度的最强信号的特征, 从表 1 可以看出, 尽管每个方向的宇宙线强度各种时间尺度的周期都有变化而且也不相同, 但垂直方向、东向、北向及西向宇宙线强度的最强信号的周期都是 23.425h, 它们之间的不同是取得最大值的时

间不同, 即几个方向周期为 23.425h 信号的相位不同, 幅度也不同. 南向宇宙线强度最强的信号是周期为 22.627h 的信号, 这个周期与其他几个方向的周期不同, 而且取得最大值的时间最晚. 我们注意到, CME 到达地球时并没有出现通常的 Forbush 下降, 反而出现了宇宙线强度的增加. 显然这是由于 CME/磁云里含有大量的高能粒子, 当 CME/磁云到达磁层时造成宇宙线强度的上升. 由于这次 CME 偏向地球南半球, 因此, 南向宇宙线强度的时频特征反映了这一点. 从南北向宇宙线强度最大值取得的时间看, 北向宇宙线强度的最大值的时间出现在 10 日 23:00UT, 比 CME 到达地球的时间要晚, 因此, CME 到达地球后使北向宇宙线强度连续增加直到 10 日的 23:00UT. 尽管 CME 偏向地球的南半球, 但 CME 到达地球后还是把整个地球包起来, CME 的尺度比地球的尺度大得多. 南向宇宙线的强度最大值的时间在 11 日 00:00UT, 这也反映了 CME 偏向地球南半球的特征. 从最大值的取值时间看, CME 里面高能粒子的密度是不均匀的, 在磁云的前端与后端高能粒子密度要低于 10 日 23:00UT~11 日 00:00UT 这段时间粒子的密度.

表 1 各个方向宇宙线强度的最强信号特征

Table 1 The properties of the strongest signal in each direction

方向	垂直	东向	西向	南向	北向
最强信号的周期	23.425h	23.425h	23.425h	22.627h	23.425h
取得最大值的时刻	10 日 01:00UT	8 日 12:00UT	9 日 02:00UT	11 日 00:00UT	10 日 23:00UT

4 结果与讨论

通过以上分析我们可以看到, 广州观测台站南向宇宙线强度受 CME 的影响最早, 而且信号的变化特征最复杂. 除了南向宇宙线强度最强信号的周期为 22.627h 外, 其他几个方向最强信号的周期都是 23.425h. 北向宇宙线强度在周期为 24~40h 的信号都有明显的变化, 南向宇宙线强度在周期为 24~64h 的信号都有明显的变化, 这一点与 K Kudela 等人^[10]的观点不同, 即宇宙线周期大于 24h 的信号不受行星际扰动的影响, 这主要是由于他们在分析磁暴事件前宇宙线强度变化的特征时没有采用小波分析的方法. 在对垂直方向的强度分析后我们看到, 广州台垂直方向宇宙线强度的频谱在磁暴发生前 48h 就出现明显的变化, 比各向异性分析方法得到

的时间提前量更大^[18]. 如果采用传统的谱分析方法和各向异性分析方法分析, 我们无法得到这样好的结果. CME 中粒子密度是不均匀的, 其中在 10 日 23:00UT~11 日 00:00UT 到达地球的那部分 CME 含有高能粒子密度最大, 南向宇宙线强度达到最大值的时间最晚, 这符合 CME 偏向地球南半球的特征.

本文采用的小波分析方法分析广州的宇宙线数据得到的宇宙线强度谱变化的时间比 John W Bieber 和 Paul Evenson^[18]采用 9 个高纬台站的数据得到的在磁暴前 40h 左右各向异性变化的时间明显提前, 比采用广州台数据进行的各向异性分析得到的磁暴前 28h 垂直方向出现较明显的变化^[16]的时间提前量更大. 因此, 采用小波分析得到的谱变化特征比采用各向异性变化特征分析宇宙线强度的变化更有效. 小波分析方法的巨大优势是能给出信号的局部

时频特征. 国际上公认高纬台站记录的宇宙线强度在分析宇宙线的各向异性特征方面具有优势, 确实高纬台站的截止刚度低, 计数率高, 对行星际扰动非常敏感. 但利用高纬台站的观测数据分析宇宙线的各向异性时需要多个台站的数据, 而且对于实际应用来说还有一定的距离, 因为多个台站进行实时数据交换目前还存在一定的困难. 广州台站是位于低纬的观测台站, 截止刚度偏高, 同样条件下的行星际扰动, 广州台站的宇宙线强度的变化比高纬台站的宇宙线强度的变化要弱得多. 但是, 小波分析具有很强的信号分析能力, 它能够检测微弱的信号, 这为低纬台站监测 CME 提供了一种很好的分析方法.

由于当 CME 到达磁层时, 广州宇宙线台站的几个方向都出现了计数率增高的现象, 因此, 这次 CME 里面含有的粒子能量很高, 在 CME 里面含有如此高能量的粒子是很少见的, 我们不清楚为什么这次 CME/磁云内能有这么多高能的带电粒子而且粒子没有逃逸掉(或扩散掉).

参考文献

- [1] 王家龙. 日冕物质抛射—空间天气的扰动源. 地球物理学进展, 1999, **14**(增刊): 8~19
Wang J L. Solar coronal mass ejections in space weather. *Prog. Geophys.* (in Chinese), 1999, **14**(Suppl.): 8~19
- [2] J T Gosling. Coronal Mass Ejections: Overview. *Coronal Mass Ejection*, Geophysical Monograph 99, 1997
- [3] David F Webb. Coronal Mass Ejections: origins, evolution, and role in space weather. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2000, **28**(6): 1795~1806
- [4] Simon P Plunkett, Shi Tsan Wu. Coronal Mass Ejection (CMEs) and their geoeffectives. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2000, **28**(6): 1807~1817
- [5] 薛顺生, 章公亮, 肖少俞. 宇宙线南北各向异性的共转变化. 空间科学学报, 1989, **9**(2): 155~160
Xue S S, Zhang GL, Xiao S Y. The corotating variation of the north-south anisotropy of cosmic rays. *Chinese J. Space Sci.* (in Chinese), 1989, **9**(2): 155~160
- [6] 郭维吉, 章公亮. 强磁场扰动对宇宙线调制的统计研究. 空间科学学报, 1995, **15**(4): 295~300
Guo W J, Zhang GL. Statistical study of cosmic ray modulation produced by interplanetary strong field disturbance. *Chinese J. Space Sci.* (in Chinese), 1995, **15**(4): 295~300
- [7] 叶宗海, 卢钦棠, 宗秋刚. 宇宙线强度变化与磁扰 K 类型. 空间科学学报, 1987, **7**(4): 306~313
Ye Z H, Lu Q T, Zong Q G. The variation of galactic ray intensity and the K category of disturbance. *Chinese J. Space Sci.* (in Chinese), 1987, **7**(4): 306~313
- [8] Kazuoki Munakata, Bieber J W, Shir-ichi Yasue, et al. Precursor Geomagnetic storms observed by the muon detector network. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**(A12): 27457~27468
- [9] Belov A V, Bieber J W, Eroshenko E A, et al. Pitch-angle features in cosmic rays in advance of severe magnetic storms: Neutron monitor observation. 27th ICRC, Hamburg, 2001, **9**(SH2): 3507~3510
- [10] K Kudela, E O Flückiger, R Langer, et al. Power spectra of neutron monitor time series at frequencies $f > 1.15 \times 10^{-5}$ Hz. 25th ICRC, Durban, South Africa, 1997, **2**(SH6.3): 425~428
- [11] 林带茂, 茅于海. 适于短序列最大熵谱估计的一种快速算法. 中国科学(A辑), 1983, **9**: 857~870
Lin D M, Mao Y H. A quick arithmetic suit to short series for maximum entropy. *Science in China (Series A)* (in Chinese), 1983, **9**: 857~870
- [12] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用. 北京: 科学出版社, 2000
Yang F S. *The Engineering Analysis and Application of Wavelet Transform* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2000
- [13] Villante U, Francia P, Lepid S, et al. Geomagnetic field variations at low and high latitude during the January 10 - 11, 1997 magnetic cloud. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**(14): 2593~2596
- [14] R. S. Selesnick, J. B. Blake. Radiation belt observations following the January 1997 magnetic cloud event. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**(14): 2593~2596
- [15] 石勇, 魏奉思, 冯学尚等. 1997年1月行星际扰动在三维背景太阳风中传播的数值模拟. 地球物理学报, 2001, **44**(3): 303~310
Shi Y, Wei F S, Feng X S, et al. Numerical simulation for propagation of interplanetary disturbance in three dimension solar wind background during January 1997 event. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2001, **44**(3): 303~310
- [16] 乐贵明, 叶宗海, 余绍华等. 1997年1月7—10日广州台银河宇宙线强度变化特征. 空间科学学报, 2002, **22**(4): 310~313
Le GM, Ye Z H, Yu S H, et al. The variational properties of galactic cosmic rays' intensities observed at Guangzhou station during Jan. 7 - 10 1997. *Chinese J. Space Sci.* (in Chinese), 2002, **22**(4): 310~313
- [17] Webb D F, Cliver E W, Gopalswamy N, et al. The solar origin of the January 1997 coronal mass ejection, magnetic cloud and geomagnetic storm. *Geophys. Res. Lett.*, **25**(14): 2469~2472
- [18] John W Bieber, Paul Evenson. CME Geometry in relation to cosmic ray anisotropy. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**(15): 2955~2958

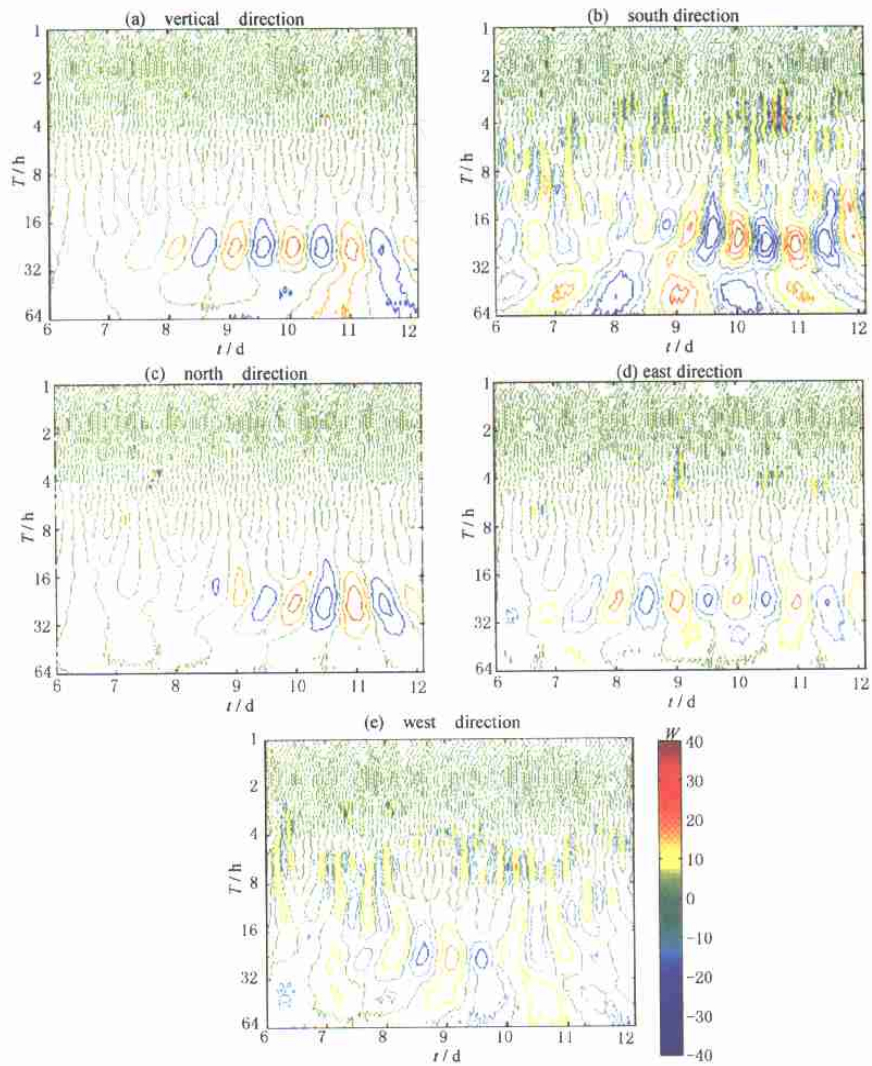


图3 垂直方向(a)、南向(b)、北向(c)、东向(d)和西向(e)银河宇宙线强度的小波分析

Fig.3 Wavelet analysis of the vertical intensity (a), south intensity (b), north intensity (c), east intensity (d) and west intensity (e)