

地磁暴前地面宇宙线强度变化 Morlet 小波特征分析^{*}

苗 娟 薛炳森 叶宗海

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

摘 要

用 Morlet 小波变换对 Oulu 台站和 Apatity 台站 (主要是 Apatity 台站) 1998—2002 年间宇宙线静日和地磁暴前的地面宇宙线强度变化特征进行分析, 得到: 在宇宙线静日期间普遍存在准 24 h 周期变化特征, 并且在当地时间 0200, 1400 左右分别出现最小值和最大值; 对 12 个例子的分析可以看到地面宇宙线强度在地磁暴之前 1—2 天均出现了不同于宇宙线静日期间变化特征, 或有小尺度周期出现, 或周期变化完全消失, 或有异常 24 h 周期变化, 这种变化特征在一定程度上可作为地磁预报的先兆特征之一。

关键词 小波变换; 宇宙线强度; 地磁暴

1 引言

宇宙射线作为人类早期研究和认识空间的重要手段, 积累了大量的观测结果, 为人类认识空间提供重要途径。国内外很多学者对此有很多研究。Cane 等^{[1],[2]}对宇宙线下降及激波结构进行了研究; Dorman 等^{[3],[4]}对宇宙线闪烁的动力过程及利用宇宙线预报灾害现象进行了研究; Alania 等^[5]研究了地磁活动和宇宙线的 27 天变化; 叶宗海等^{[6],[7]}对宇宙线高频闪烁及宇宙线强度变化和磁扰 K 类型进行了分析研究; Hofer^[8]等对近地宇宙线谱变化和各向异性进行分析。随着空间探测的不断深入, 人们不仅对宇宙线有了进一步的认识, 并且对宇宙线波动特征与太阳爆发、行星际不均匀结构的传播、空间环境扰动的关系也逐渐得到认证, 进一步揭示了宇宙线并不是孤立的, 它与行星际和近地空间的状态有着密切的联系, 特别是大地磁暴来临之前的宇宙线变化特征可为预报大地磁暴提供一种信息, 因此, 宇宙线的强度变化特征正在成为空间环境预报的有效手段之一。本文主要利用小波变换对 1998—2002 年间大地磁暴前 Apatiy (67.56°N, 33.4°E, 俄罗斯) 宇宙线台站和 Oulu 台站 (65.05°N, 25.47°E, 芬兰) 记录的地面宇宙线强度变化进行分析, 所用数据的时间序列为 1 h。

由于小波变换在分析时域与频域同时具有良好的局部性, 它可将信号或图像分解成交织在一起的多尺度成分, 并对不同尺度 (层次) 成分采用相应精度时域或空域取相同步长, 从而能够不断地聚焦到所研究对象的任意微小细节^{[9]—[11]}, 近十多年作为工具和方法上的重大突破小波分析被广泛地应用到信号处理、地震探测、湍流、雷达监控、大气科学

^{*} 国家重点基础研究发展规划项目 G2000078408)

2003-03-24 收到原稿, 2003-09-15 收到修定稿

研究以及非线性科学等领域, 并取得了丰硕的成果. 近年来我们也开始把小波分析方法引入到空间科学领域.

2 小波分析方法简介

小波基具有正交性, 局部性和 k 阶消失矩等良好性质, 这些性质使得小波分析适合于对信号进行多尺度、局部分析以及奇异分析. 小波变换的主要思想是平移和伸缩, 小波母函数 $\Psi(x)$ 的子小波 $\Psi_{ba}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{x-b}{a}\right)$, 其中 $a > 0$, 为伸缩尺度, b 为平移参数,

若 $f(x)$ 为平方可积函数, 即 $\int_{-\infty}^{+\infty} |f(x)|^2 dx < \infty$, 则其连续小波变换为

$$W_{ba}f(x) = \Psi_{ba}(x) * f(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi_{ba}(x)f(x)dx, \quad (1)$$

重构公式为

$$f(x) = \frac{1}{C_{\Psi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} W_{ba}f(x) \Psi_{ba}(x) \frac{da db}{a^2}. \quad (2)$$

本文将使用 Morlet 小波, 其母函数为

$$\Psi(x) = e^{icx} \exp(-x^2)$$

显然, Morlet 小波是周期函数 e^{icx} 经过 Gaussian 平滑得到的, 它的伸缩尺度 a 与 Fourier 分析中的周期 T 有一一对应关系, 即 $T = \frac{4\pi}{C + \sqrt{2 + C^2}}a$, 且可分别作“模”、“实部”、“位相”的小波变换图, 进行多方位研究.

3 宇宙线强度变化和地磁暴的相关分析

早在 20 世纪 50 年代人们就已经注意到宇宙线强度记录中许多时段具有相同的变化规律, 而且通常对应时间的地磁也是平静的, 这些时段被称为宇宙线静日, 下面我们用小波变换来分析宇宙线静日的变化情况. 图 1、图 2 分别是 Apatity 台站、Oulu 台站 2000

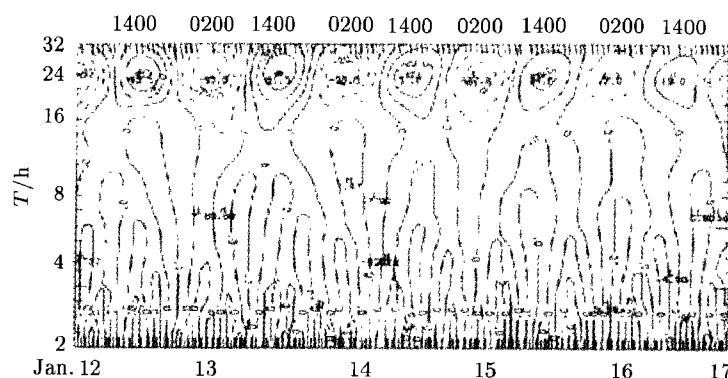


图 1 Apatity 台站 2000 年 1 月宇宙线静日的 Morlet 小波变换

Fig.1 Morlet transform of cosmic ray of Apatity station in Jan. 2000

年1月和5月中宇宙线静日的 Morlet 小波变换图, 等值线图表示通过小波变化之后信号的强弱 (实线表示正值, 即信号高于定常部分的变化; 虚线表示负值, 信号低于定常部分的变化), 可以看到, Apatity 和 Oulu 台站在宇宙线静日准 24 h 周期性特别明显, 并且在当地时间 0200, 1400 左右分别出现最小峰值 (L) 和最大峰值 (H), 这种特征在宇宙线静日

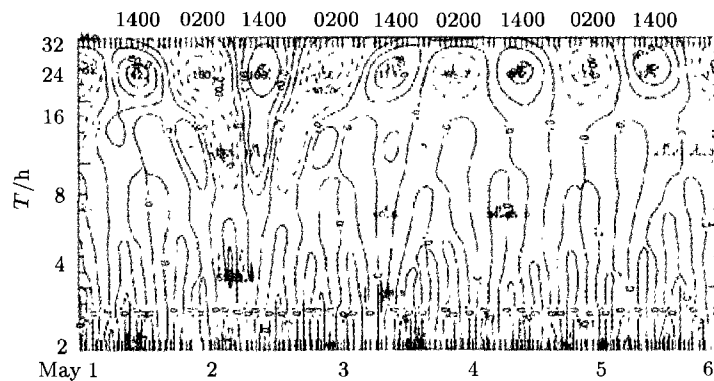


图2 Oulu 台站 2000 年 5 月宇宙线静日的 Morlet 小波变换 *
Fig.2 Morlet transform of cosmic ray of Oulu station in May 2000

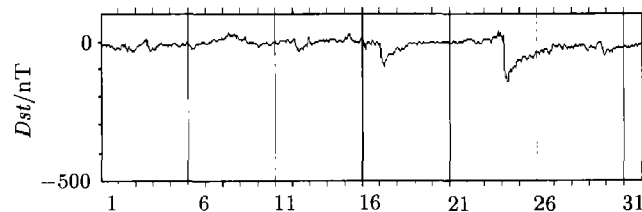


图3 2000 年 5 月地磁 *Dst* 指数的变化 *
Fig.3 Geomagnetic *Dst* index in May, 2000

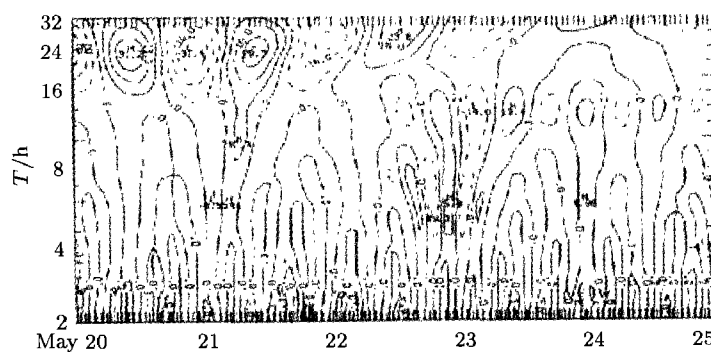


图4 Apatity 台站 2000 年 5 月 24 日的地磁暴前地面宇宙线小波变换
Fig.4 Morlet transform of cosmic ray before geomagnetic storm on May 24, 2000

* 该图取自于 <http://swdcd.b.kyoto-u.ac.jp/dstdir/dst1/quick.html>.

期间普遍存在, 本文在此只是选取两个例子进行说明.

在用 Morlet 小波分析了宇宙线静日的变化特征之后, 我们对 1998 年以来的主要大地磁暴 (在此选取 Dst 指数小于 -100 nT) 前的 Apatity 台站宇宙线强度变化特征进行分析. 图 3 是 2000 年 5 月地磁 Dst 指数的变化, 可以看到在 24 日 0400 Dst 开始急剧下降, 0900 Dst 达极值 -147 nT . 图 4 是 2000 年 5 月 24 日发生大地磁暴前几天的 Apatity 台站记录的宇宙线的小波变换图, 可以看出, 在 22 日之前准 24 h 周期变化仍很明显, 但从 22 日开始, 这种变化特征开始消失, 并出现了近似 14 h 的周期变化特征.

图 5 是 1999 年 9 月 22 日大地磁暴前几天 Apatity 台站记录的宇宙线强度的小波变换图, 可以看到, 在 20 日之前准 24 h 周期变化仍很明显, 但从 20 日开始, 这种变化特征开始消失, 与图 3 不同的是, 小尺度的周期变化特征也不存在. 图 6、图 7 分别是 Apatity 台站 2000 年 7 月宇宙线观测情况及其小波变换, 由图 6 可以看出, 宇宙线在 2000 年 7 月 14 日之前强度有所减弱, 但在 14 日 1100 强度突然增强, 之后强度又开始减弱. 图 7 是与图 6 对应的宇宙线小波变换, 同样可以看到在 14 日宇宙线强度突然增加, 但不同于图 4、图 5 的是在这段时间内, 准 24 h 周期变化并没有消失, 但分析可看出, 此时的 24 h

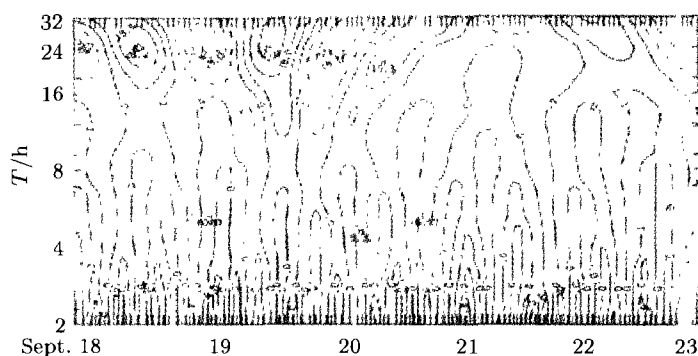


图 5 1999 年 9 月 22 日的地磁暴前地面宇宙线小波变换

Fig.5 Morlet transform of cosmic ray before geomagnetic storm on Sept. 22, 1999

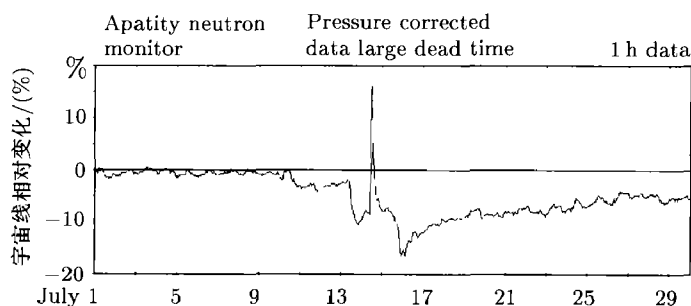


图 6 Apatity 台站 2000 年 7 月记录的宇宙线变化 *

Fig.6 Cosmic ray of Apatity station in July 2000

* 该图取自于 <http://pgi.kolasc.net.ru/cosmicray>.

周期变化不同于宇宙线静日的变化特征,从 12 日开始,最小峰值(虚线)和最大峰值(实线)并不是在当地时间 0200, 1400 出现,而是发生了变化,在此我们称之为异常 24 h 周期变化. 通过对 3 次地磁暴前宇宙线的小波变化分析可以简单说明,不同地磁暴前宇宙线的变化特征并不完全相同. 因此,我们对 1998—2002 年间的 12 次大地磁暴前的 Apatity 台站地面宇宙线小波变化特征及磁暴之前的太阳爆发活动进行统计分析(见表 1).

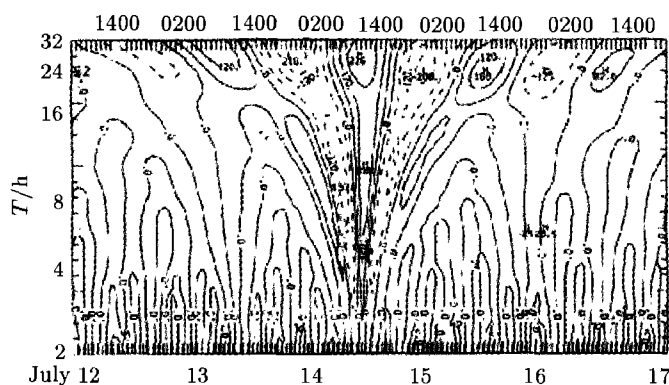


图 7 2000 年 7 月 12—16 日 Apatity 台站记录的宇宙线小波变换

Fig.7 Morlet transform of cosmic ray before geomagnetic storm in July 2000

表 1 1998—2002 年地磁暴及磁暴前宇宙线强度变化、太阳活动的统计

Table 1 The statistic of cosmic ray intensity variety and geomagnetic storms, solar activity

地磁暴发生日	Dst/nT	磁暴前 1—2 天宇宙线小波变化特征	磁暴前太阳活动
1998 年 3 月 19 日	-165	出现准 8 h 周期	CME
1998 年 9 月 24 日	-207	周期特征消失	无
1998 年 10 月 18 日	-112	出现准 14 h 周期	CME
1999 年 9 月 22 日	-173	周期特征消失	无
1999 年 10 月 22 日	-237	出现准 14 h 周期	CME
2000 年 5 月 24 日	-147	出现准 14 h 周期	C7 耀斑
2000 年 7 月 16 日	-300	异常 24 h 周期	Coronal hole
2001 年 3 月 19 日	-165	周期特征消失	CME
2001 年 3 月 31 日	-358	出现准 16 h 周期	CME
2001 年 11 月 6 日	-277	出现准 12 h 周期	CME
2002 年 3 月 25 日	-101	出现准 8 h 周期	CME
2002 年 4 月 18 日	-123	出现准 14 h 周期	CME

注: 此表只统计 32 h 尺度以下的小波变化特征; 磁暴前太阳活动指日冕物质抛射冕洞 (Coronal hole)、耀斑.

由表 1 可以看到,统计的 12 次大地磁暴之前的宇宙线小波变换情况中,磁暴之前 1—2 天均出现了不同于宇宙线静日期间的准 24 h 变化特征,其中 8 次有小尺度周期出

现, 2 次周期变化完全消失, 1 次出现了异常 24 h 周期变化. 这在一定程度上说明地磁暴来临的前 1—2 天地面宇宙射线会表现出不同于宇宙线静日的变化特征, 这种变化特征在一定程度上可以作为地磁暴来临的一种先兆. 同时我们也看到, 在磁暴前, 大多数情况下都有 CME 发生, 这也在一定程度上说明地面宇宙线强度变化与 CME 有密切关系. 地面宇宙线受 CME 影响的原因主要是当宇宙线在行星际空间要穿过 CME 引起的行星激波, 受激波的影响, 原来的宇宙线部分会被反射, 因此到达地面宇宙线会表现出不同以往的变化特征来. 也正是因为磁暴前出现这些变化, 地面宇宙线强度变化可被用来作为地磁暴预报的一种先兆因子.

4 结论

通过利用 Morlet 小波变换对 Oulu 台站和 Apatity 台站 (主要是 Apatity 台站) 宇宙线静日和地磁暴前的地面宇宙线强度变化特征进行分析, 得到: 在宇宙线静日普遍存在准 24 h 周期变化特征, 并且在当地时间 0200, 1400 左右分别出现最小值和最大值; 对 1998—2002 年的 12 个例子分析可以看到地面宇宙线强度在地磁暴之前 1—2 天均出现了不同于宇宙线静日期间变化特征, 或有小尺度周期出现, 或周期变化完全消失, 或有异常 24 h 周期变化, 这种变化特征在一定程度上可作为地磁预报的先兆特征之一.

本文只用小波变换是分析了 Apatity 台站与 Oulu 台站地面宇宙线的部分数据得到的结论, 今后需要更进一步对较多台站的数据进行研究分析.

参 考 文 献

- [1] Cane H V, Richardson I G, Rosenvinge T T. Cosmic ray decreases and shock structure: A multispacecraft study. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**(A11):21 429—21 441
- [2] Cane H V. Cosmic ray decrease: 1964—1994. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**(A10):21 561—21 572
- [3] Dorman L I *et al.* Cosmic ray scintillations and daymic process in space. *Space Sci. Rev.*, 1984, **39**:91—152
- [4] Dorman L I, Iurri N, Villosesi G. The use of cosmic ray for continuous and prediction of some dangerous phenomena for the earth's civilization. *Astrophys. Space Sci.*, 1993, **208**:55—68
- [5] Alania Michael *et al.* The changes of 27-day variation in cosmic rays and geomagnetic activity. In: Proc. 26th Int. Cosmic Ray Conf., Salt Lake City, 1999, **SH3—4**, 7:91—94
- [6] Ye Zonghai, Feng Zhuma. Primary research of HF scintillating of cosmic ray in May, 1987, Corpus of observation and research on Chinese partial solar eclipse. Beijing: Science Press, 1990. 349—357. in Chinese (叶宗海, 冯珠玛等. 1987 年 5 月宇宙线高频闪烁的初步研究. 中国日环食观测研究文集, 北京: 科学出版社, 1990. 349—357)
- [7] Ye Zonghai *et al.* Variety of cosmic ray intensity and K type of geomagnetic disturbance. *Chin. J. Space Sci.*, 1987, **7**(4):306—313. in Chinese (叶宗海等. 宇宙线强度变化和磁扰 K 类型. 空间科学学报, 1987, **7**(4):306—313)
- [8] Hoter M Y, Fluchige E O. Cosmic ray spectral variations and anisotropy near earth during the March 24, 1991, Forbush decrease. *J. Geophys. Res.*, 1974, **79**(7):895—906
- [9] Cui Jingtai. Wavelet Analysis. Xian: Xidian University Press, 1995. in Chinese (崔景泰. 小波分析导论. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1995)
- [10] Qin Qianqing, Yang Zongkai. Applied Wavelet Analysis. Xian: Xidian University Press, 1994. in Chinese (秦前清, 杨宗凯. 实用小波分析. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1994)

- [11] Lin Zhenshan, Deng Ziwang. Research on diagnosis of wavelet climate. Beijing: China Meteorological Press, 1999. 21—26. in Chinese (林振山, 邓自旺. 小波气候诊断技术的研究. 北京: 气象出版社, 1999. 21—26)

THE WAVELET CHARACTER OF COSMIC RAY INTENSITY BEFORE GEOMAGNETIC STORMS

MIAO Juan XUE Bingsen YE Zonghai

(Center for Space Science and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract

In this paper, Morlet wavelet is applied to analyze the character of cosmic ray intensity of Apatity station (latitude: 67.56°N , longitude: 33.4°E , Russia) and Oulu station (latitude: 65.05°N , longitude: 25.47°E , Finland) respectively during quiet period of geomagnetic field and before geomagnetic storms from 1998 to 2002. Fourteen examples are selected including two examples of quiet period and 12 examples before geomagnetic storms. The level of major storms selected in this paper is that index Dst is less than -100 nT . By Morlet wavelet transform, cosmic ray intensity of different condition shows different variety. Results show that 24 h periodicity exists and is distinct during quiet time, and usually minimum value of cosmic ray intensity appears around about 0200 local time and maximum value appears around about 1400 local time; Twelve examples before geomagnetic storms period show that variety of 24 h periodicity all change. Some minish, some disappear, and some have anomalous 24 h periodicity, and these varieties differ from that of quiet time. These characters before geomagnetic storms may provide a sign that can be used to forecast the coming of geomagnetic storms.

Key words Morlet wavelet, Cosmic ray intensity, Geomagnetic storm