0254-6124/2017/37(6)-667–08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

XUE Bingsen, CANG Zhongya, ZHANG Jilong. Study of Multi-directional muon flux in geomagnetic storm prediction (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2017, **37**(6): 667-674. DOI:10.11728/cjss2017.06.667

多方向 μ 介子通量一致性特征研究 *

薛炳森 [1] 苍中亚 [1,2] 张吉龙 [3]

1(中国气象局空间天气重点开放实验室 北京 100081)

2(南京信息工程大学空间天气研究所 南京 210044)

3(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘 要 通过地面 μ 介子望远镜可以探测不同方向到达的宇宙线通量, 得到从外空间入射的宇宙线受到不均匀结构的调制情况, 判断 CME 的特征. 通过分析, 发现大地磁暴前 Nagoya 台站东向和南向的探测数据存在固定的 2 h 时间差, 认为这是由两个入射方向的宇宙线粒子先后穿越 CME 结构引起的. 分别计算了两个方向相同时间和南向相位后移 2 h 后通量探测数据的相关系数, 以及两种情形下通量差的变化幅度, 定量描述了 CME 接近地球过程中两个方向通量的相关特征. 通过比较发现, CME 接近地球过程中, 经过相位变换的两个方向的相关系数明显高于未经变换的情况, 经过相位变换的两个方向的通量差幅度明显小于未经变换的情况; CME 到达地球后, 两种情形的相关系数和通量差幅度则趋于相同. 对 2003－2005 年 $Kp = 9$ 的地磁暴事件的分析均发现了这种现象. 对 2006 年 12 月 14 日大地磁暴前的 μ 介子通量特征进行了分析, 也完全符合上述特征.

关键词 μ 介子, 多方向, 相关分析, 地磁暴

中图分类号 P 352

Study of Multi-directional Muon Flux in Geomagnetic Storm Prediction

XUE Bingsen[1] CANG Zhongya[1,2] ZHANG Jilong[3]

1(*Key Laboratory of Space Weather, China Meteorological Administration, Beijing* 100081)

2(*Institute of Space Weather, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing* 210044)

3(*Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

Abstract By analyzing the characteristics of cosmic ray flux evolution, the approaching of CMEs could be identified, and the geomagnetic disturbance could be forecasted. The modulation of cosmic by CMEs could be derived by comparing the fluxes from different directions, and the parameters, such as Interplanetary Magnetic Field (IMF) and direction, could be derived. In this paper, data obtained by Nagoya muon telescope are used, and southward and eastward flux are chosen for investigation in detail. The results show that the evolutions of muon fluxes from the two directions share similar

* 国家自然科学基金项目资助 (11575204)

2016-11-21 收到原稿, 2017-05-08 收到修定稿

E-mail: xuebs@cma.gov.cn

pattern before the strong geomagnetic storm, while there is a 2-hour phase delay between them. It is analyzed that the cosmic rays corresponding to the two directions went into and out the CME successively and the time difference is about 2 hours. The correlation coefficient and flux difference of the fluxes in eastern and southern, concluding the phase of the southern flux is moved backward two hours or not, are calculated respectively. As CMEs approaching, the correlation coefficient with southward phase change is significantly higher than that without phase change, and the flux difference with the southward phase change is much lower than that without phase change. However, the coefficient and the flux difference began to get close to each other when CMEs arrive at the Earth. And the above parameters of phase changed disparity amplitude even exceeded the unchanged one. The characteristics are also found in the geomagnetic storms with $Kp = 9$ from 2003 to 2005. The muon flux before the great geomagnetic storm on December 14, 2006 is analyzed, and the study found that it is coincident with the above characteristics. Therefore, directional muon detection possesses a unique ability to remote sensing CMEs propagation through the difference of the flux evolution from different directions.

Key words Muon, Multi-direction, Correlation analysis, Geomagnetic storms

0 引言

研究发现高速太阳风与行星际磁场南向分量的配合是形成强地磁扰动的有利条件之一 [1]. 准确预报 CME 的到达及其所携带行星际磁场的强度成为地磁暴预报的关键. 由于探测手段的限制, 目前可以通过日冕仪判断 CME 的运动速度和方向, CME 接近地球时, L1 点的卫星能够探测 CME 引起的太阳风和行星际磁场突变, 但行星际空间缺少原位测量的手段. 带电的宇宙线粒子在行星际空间传播, 经过强磁的 CME 结构时发生偏转, 造成到达地球的通量扰动. 近期研究发现, 地面宇宙线通量在地磁暴发生前出现特殊状态. 行星际空间的高速太阳风流和强磁场区主要出现在速度很高的 CME 驱动的行星际不均匀结构区. 特别强的地磁暴一般由 CME 扫过地球形成, CME 的速度, 内部磁场强弱、方向和等离子体密度均影响其地球物理效应的大小, 这些参数同时也决定了不均匀结构对其周围带电宇宙线粒子的调制程度. 由于宇宙线在行星际中的运动速度接近光速, 有关行星际扰动结构的信息在 CME 到达之前 1~2 天传到地球 [2]. Ruffolo 等 [3] 发现由于太阳风上游激波的传播使宇宙线背景产生较大扰动, 每日宇宙线不对称性的增长预示着空间环境扰动的产生. 因此单站的连续宇宙线观测可能成为空间天气的重要预报手段. Dorman 等 [4,5] 提出利用地面宇宙线台站对有威胁的空间天气事件进行预报, 迄今宇宙线变化特征作为预报特征参数的应用已有很多 [6], 其中墨西哥大学联合国际上主要的宇宙线台站, 建立了全球宇宙线预报台网, 可以进行地磁暴警报工作 [7], Munakata 等 [8] 利用全球 μ 介子探测台网数据进行地磁暴先兆特征研究, 但尚不具备预报应用的能力.

高能宇宙线穿过 CME 结构时, CME 内的强磁场改变带电宇宙线粒子的原有路径, 引起地面宇宙线通量扰动, 地面台站探测到的宇宙线通量表现出与平时不同的变化特征. 不同位置宇宙线台站的地面中子探测器通常呈现相似的通量变化趋势, 但 CME 事件发生后, 不同经度上的地磁台站在不同时刻朝向 CME, 各站的通量监测显示出不同的变化趋势. μ 介子探测器可以分辨不同方位角和天顶角的粒子, CME 事件发生后同一时间不同方向的 μ 介子通量也有差别.

到达地球的高能宇宙线粒子在地面上空 20 km 处受到大气层的阻挡, 形成大气簇射. 初级高能宇宙线粒子中的质子及重核与大气中的氧核、氮核等产生碰撞, 通过核作用产生次级粒子. 这些次级粒子的一部分通过电磁相互作用产生级联反应, 产生大量的电子、中子、μ 介子等. 其中 μ 介子穿透力极强, 对于上下两层的闪烁体探测器组, μ 介子几乎同时穿过两个探头, 结合探头位置可以得到 μ 介子方向, 即得到初级宇宙线方向. 通过地磁场中带电粒子的追迹

模型, 可以计算出该方向宇宙线进入大气时的天顶角和方位角. 相对于地面中子探测器, μ 介子探测器具有采样率高、结构简单、运行稳定等特点. 此外, 通过上下双层复合技术, μ 介子探测器能够实现方向性探测的功能. 因此, μ 介子探测器不仅能够得到宇宙线的时间变化趋势, 还能同时探测和比较穿过不同空间结构的宇宙线通量特征.

由于多方向 μ 介子探测器能同时观测多个方向入射的宇宙线通量变化, 国际上 μ 介子台站建设和相关研究受到越来越多的关注. Savian 等 [8] 通过分析 2001−2004 年 36 次强地磁暴前后 μ 介子变化情况发现: 约半数地磁暴同时伴随 μ 介子通量的下降, 与宇宙线中子同时发生; 其余的地磁暴前, μ 介子通量已经开始下降, 特别是台站朝向太阳时, 其通量下降更为明显, 提前量最多可达 12 h. 因此, μ 介子通量能够作为地磁预报的一种先兆特征. Munakata 等 [9] 也对地磁暴发生前的不同方向 μ 介子通量变化特征进行了分类研究. Le 等 [10] 对 μ 介子通量在地磁暴前的不同方向通量频谱进行分析, 发现了 1997 年 1 月 6 日地磁暴前的方向性不对称性特征. Wang 等 [11] 分析了 Nagoya 宇宙线台站多方向闪烁体望远镜 30°, 49°, 64° 倾角的东西南北方向探测数据变化特点, 运用小波分析方法研究磁暴前后宇宙线南北及东西各向异性变化特征, 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发生非常大的变化, 这种变化一般在磁暴发生前 10~20 h 开始出现, 当描述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.

上述工作仅局限于对有限事件的统计和归类, 而且多为定性分析, 与实际应用有一定距离. Kane[12] 研究 1996−2006 年的 15 次强磁暴事件 ($Dst < -200$) 后发现, μ 介子方向性通量在地磁暴前后变化不对称, 但有明显不对称特征的事件仅为 44%. 因此该特征可以作为地磁暴预报的一种辅助手段, 单独使用预报准确率较差, 而且对地磁暴强弱的估算也不准. 因此, Kane 认为 μ 介子不是一个好的地磁暴预报手段. 综上所述, μ 介子在宇宙线方向性探测方面具有独到的优势, 可以通过比较不同方向宇宙线通量变化特征, 反推宇宙线高能粒子传播过程中受到的调制, 发现 CME 等异常空间结构的存在和运动特征, 为地磁暴的预报提供参考.

1 μ 介子望远镜数据各向异性分析

这里采用第 23 太阳活动周下降年 2003−2006 年 Nagoya 宇宙线台 (35°N, 137°E) 的连续监测数据 *, 通过分析不同方向的宇宙线变化特征以及各方向变化的相关性, 提取 CME 到达之前的特征参数, 为地磁暴的预报提供参考.

Nagoya 宇宙线台站接收 13 个方向的 μ 介子通量数据, 分别是天顶角为 21°, 39°, 47° 的北东南西方向以及垂直方向的通量. 根据台站数据说明可知, 天顶角较大方向的计数率较低, 例如 47° 各方向的计数率仅为 21° 各方向的一半左右. 这里采用了 21° 天顶角北东南西方向共计 4 组数据进行交叉比对. 由于天顶角较小, 可以避免高空温度区域变化引起的不同方向宇宙线通量差异.

为了估算初级宇宙线粒子入射到大气层顶时的方向, 需要对初级宇宙线粒子的入射径迹进行模拟, 研究在到达大气层顶之前地磁场对宇宙线粒子运动方向的调制, 从而得到宇宙线进入磁层之前的运动方向, 分析该方向宇宙线通量变化的原因. Sabbah 等 [13] 研究发现, Nagoya 站从东向和南向入射的宇宙线粒子方向分别为 (157°, 2.9°) 和 (194°, 10.8°), 北向和西向入射的宇宙线粒子方向分别为 (193.7°, 47.0°) 和 (135.0°, 40.1°).

研究和数据分析表明, 太阳系外的初级宇宙线通量近乎恒定. 由于行星际磁场的调制, 到达地球的宇宙线通量表现为不同的周期性变化. 能够引起宇宙线通量突变的通常是行星际不均匀结构, 如 CME 等. 此外, 地面测量时的气象因素也是引起宇宙线通量波动的另一主要因素. 探空气球实验结果显示, 高空大气温度的改变引起地面 μ 介子通量的显著变化 [14]. 但是现有的 μ 介子探测台站未进行连续的气球探空测量, 因此 μ 介子通量变化可能包含了气象因素的影响. 在天顶角不大的情况下, 气象因素对各方向 μ 介子通量的影响是同步的. 因此, 通过分析通量的各向异性能够将大气层外结构的影响分离出来.

首先分析一次显著的 CME 事件到达地球前后宇宙线 μ 介子的各向异性特征变化. 2005 年 9 月 8 日 02:15 UT 发生一次 X5 级耀斑并伴有全晕 CME; 9 月 11 日 CME 到达地球并引起强地磁暴; 9 月 11 日 06:00 UT, Kp 指数达到 7; 9 月 11 日 09:00 UT,

*http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/ste-www1/div3/muon/

Kp 达到最高级别的 9, 全球宇宙线通量急剧减小, 形成 Forbush 下降, OULU 站宇宙线通量下降幅度达到 10%. 这是一次典型的由 CME 驱动的强地磁暴过程. 图 1 显示的是 2005 年 9 月 7−11 日 Nagoya 宇宙线台站多方向望远镜观测到的天顶角 21° 北向和东向的宇宙线强度变化对比.

由图 1 可以看出, 两个方向探测到的 μ 介子通量曲线几乎重合, 包括 9 月 11 日地磁暴当天和前 4 天. 两个方向分别为北向 (194°, 10.8°), 东向 (193.7°, 47.0°), 二者方位角相差很小. 因此, 两个方向的入射粒子位于同一个子午面内. 随着地球的自转, 该平面同时扫过相同的不均匀结构. 因此, 二者受空间不均匀结构的散射、减速过程相同, 通量变化趋势一致.

将同一次事件南向和东向的宇宙线通量进行比较, 如图 2 所示. 由图 2 可以看出, 南向宇宙线通量与东向通量有一个固定的相位差, 但地磁暴发生当日, 二者又趋于一致. 这里将南向通量曲线相位错后 2 h, 如图 3 所示, 可以发现 9 月 7−9 日两方向的通量曲线变化趋势一致, 但 9 月 11 日前后二者的相关性变差. 从东向和南向入射的宇宙线粒子方向分别为 (157°, 2.9°) 和 (194°, 10.8°), 即两个方向入射的宇宙线方位角相差 37°, 而天顶角都比较小. 随着地球的自转, 两个方向前后扫过行星际空间, 存在一个 2 h 左右的相位差. 由于 2005 年 9 月 11 日前后有多个 CME 发生, 因此宇宙线在穿过这些不均匀结构时引起通量变化, 而南向和东向对应的宇宙线入射方向穿越不均匀结构的时间不同, 因此南向通量曲线提前于东向的宇宙线通量, 相位差相对固定为 2 h. 但 CME 接近地球时立体角增大, 两个入射方向的宇宙线同时受到不均匀体的影响, 变化趋势趋于一致, 相位差消失.

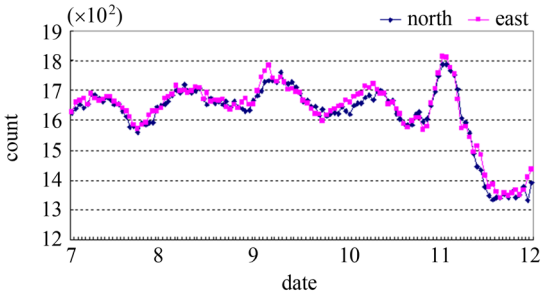

图 1 Nagoya 宇宙线台站北向和东向 μ 介子通量在 2005 年 9 月 11 日地磁暴前后的相关特性

Fig. 1 Relationship of northward and eastward muon flux at Nagoya station during geomagnetic storm on September 11, 2005

上述两个方向的宇宙线通量相位差现象在向日面表现更明显, 夜侧均呈现出下降的趋势, 并没有特殊的结构. 因此, 可以初步认为宇宙线通量不同方向的固定相位差现象主要由向日面行星际结构引起. 对南向和东向的固定相位差的解释如图 4 所示, 两个方向接收到的宇宙线前后穿过 CME, 因此次级成分 μ 介子通量所受影响存在一个时间差, 表现在通量变化曲线上即为固定相位差.

以上举例说明了不同入射方向 μ 介子的相关特性. 这里也比较分析了 Nagoya 宇宙线台站其他时段上述两个方向的结果, 分析发现: 所有时段北向和东向的通量都表现一致, 而且通量接近; 没有 CME 的时段, 南向和东向通量相关性差, 相位差现象不明显; CME 出现以后的时段, 南向和东向通量曲线趋势接近, 但二者存在 2 h 的固定相位差; CME 到达地球时刻开始, 南向和东向通量变化一致. 通过比较上述几

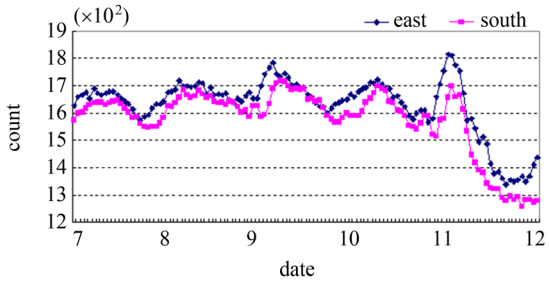

图 2 Nagoya 宇宙线台站南向和东向 μ 介子通量 2005 年 9 月 11 日地磁暴前后的相关特性

Fig. 2 Relationship of southward and eastward muon flux at Nagoya station during geomagnetic storm on September 11, 2005

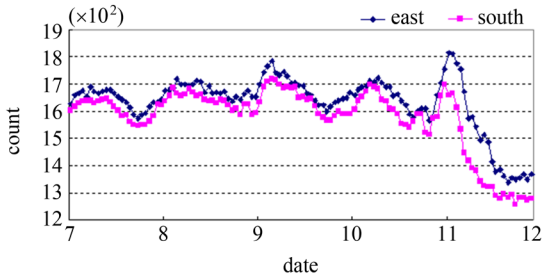

图 3 Nagoya 宇宙线台站东向 μ 介子通量 2005 年 9 月 11 日地磁暴前后对相位前移 2 h 后的南向通量相关特性

Fig. 3 Relationship of southward (phase lagged for 2 h) and eastward muon flux at Nagoya station during geomagnetic storm on September 11, 2005

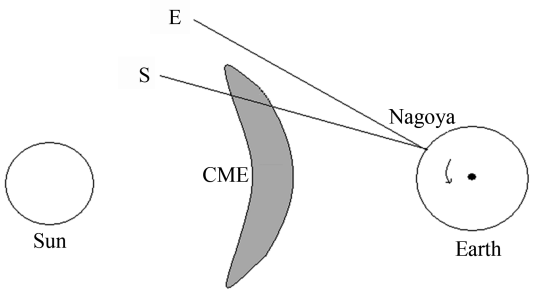

图 4 南向和东向的固定相位差形成原理

Fig. 4 Schematic diagram of stable phase difference between southward and eastward muon flux

个方向的宇宙线通量变化特点, 能够初步判定朝向地球 CME 的存在, 并在其接近地球时得到较为明显的信号. 上述为定性分析结果, 发现 CME 和地磁暴先兆需要作进一步的定量分析.

这里主要关注宇宙线受 CME 等行星际空间不均匀结构调制在地面台站探测数据上的表现. μ 介子是较高能量宇宙线产生的次级粒子, 受地磁场的影响较小, 因此可以探测不同方向到达地球的宇宙线通量差异. 此外, CME 在行星际的位置及其携带的磁场结构强弱等信息也可以反映到宇宙线通量的变化上. 但对于同一个入射方向, 由于初级宇宙线经过的行星际磁场的复杂性, 以及地面宇宙线通量受到的气象条件影响 [1], 通过分析单一方向的宇宙线通量变化, 无法判断该方向初级宇宙线受到调制的原因. 这里通过比较两个方向宇宙线变化的不同特征, 可以得到可能影响宇宙线变化的因素, 从而提取出行星际不均匀结构的信息.

分析不同方向宇宙线通量相关特性具有如下优点. 一是有效避免了气象变化因素对判断的影响. 对于宇宙线台站上空的局部区域, 温度、气压在 30 km 左右高度, 数百 km 范围内可认为变化不大, 因此二者进行比较, 特别是进行差异性分析时, 气象因素的影响很小. 二是来自不同方向的宇宙线穿过磁场较强的结构 (例如 CME) 时发生显著强度变化, 通过不同方向宇宙线通量变化的比较, 能够初步分辨出不均匀结构的存在. 三是多个方向的宇宙线强度变化分析能够初步确定行星际不均匀结构的范围. 四是 CME 接近地球时, 由于阻止区的作用, 不同方向宇宙线通量出现一致下降, 可以作为地磁暴的预警信号.

通过对 2005 年 9 月 11 日地磁暴前 Nagoya 宇宙线几个方向通量的比较, 发现南向和东向存在固定的相位差, 该相位差为两个方向接收到射线由于地球自转先后穿过 CME 所致. 将上述研究结果应用于地磁暴的预报, 不仅需要研究分析更多事例, 还需要定量分析该固定相位现象.

2 数据处理

通过上节的分析发现, Nagoya 宇宙线台站探测的南向和东向宇宙线通量相关特性可以反映行星际空间不均匀结构的存在情况, 并有可能为地磁暴预警提供参考信息.

针对两个方向宇宙线通量曲线在 CME 出现的时段呈现出形状相似、相位差固定的特点, 分别对两方向消除和未消除相位差条件下的通量曲线进行相关性分析及通量差分布的计算, 并根据计算结果分析 CME 发展过程中宇宙线通量的不对称性特征.

2.1 相关性分析

采用 24 h 滑动窗口, 计算 Nagoya 宇宙线台站连续的东向和南向宇宙线通量相关系数, 即

$$\Phi_0 = \frac{\sum_{i=1}^{24}(F_{\mathrm{e}i}-\overline{F}_{\mathrm{e}})(F_{\mathrm{s}i}-\overline{F}_{\mathrm{s}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{24}(F_{\mathrm{e}i}-\overline{F}_{\mathrm{e}})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{24}(F_{\mathrm{s}i}-\overline{F}_{\mathrm{s}})^2}}. \quad (1)$$

其中, $F_{\mathrm{e}i}$ 和 $F_{\mathrm{s}i}$ 为时间窗口内 24 个时间点两个方向的宇宙线通量, 下标 e 和 s 分别表示东向和南向, i 为时间顺序, $\overline{F}_{\mathrm{e}}$ 和 $\overline{F}_{\mathrm{s}}$ 为时间窗口内通量的平均值.

将南向通量向后移动 2 h, 即研究南向通量 t 时刻开始的窗口与东向通量 $t+2$ 时刻开始的窗口中通量时间序列的相关系数, 有

$$\Phi_2 = \frac{\sum_{i=1}^{24}(F_{\mathrm{e}i}-\overline{F}_{\mathrm{e}})(F_{\mathrm{s}i+2}-\overline{F}_{\mathrm{s}+2})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{24}(F_{\mathrm{e}i}-\overline{F}_{\mathrm{e}})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{24}(F_{\mathrm{s}i+2}-\overline{F}_{\mathrm{s}+2})^2}}. \quad (2)$$

其中, $F_{\mathrm{s}i+2}$ 为南向分量相位增加 2 h 后的通量, $\overline{F}_{\mathrm{s}i+2}$ 为相位后延之后时间窗口内的平均通量. 图 5 给出了 2005 年 9 月 8−11 日的同步滑动窗口和南向通量

相位后移 2 h 两种情况下通量时间序列的相关系数.

由图 5 可以看出, 2005 年 9 月 8 日南向通量相位后移 2 h 之后的相关系数开始显著高于相位未后移的相关系数. 这说明随着 CME 的靠近, 两个方向的宇宙线通量受到 CME 调制, 由于方位角不同, μ 介子南向通量对应的初级宇宙线超前于东向通量对应的宇宙线 2 h. 因此从 8 日开始, 南向通量相位后移 2 h 之后与东向通量的相关系数明显高于相位未后移的相关系数. 将图 5 与图 2 和图 3 进行比较, 发现两方向的通量经过相位变化后趋势更加接近. 这表明即将到达的 CME 边界和内部结构稳定. 9 日两个相关性变化曲线开始趋近, 9 日 20:00 UT 相位未后移的相关系数甚至超过了相位后移 2 h 之后的相关系数, 10 日 08:00 UT 开始两条曲线逐渐接近, 直到 11 日 06:00 UT CME 到达.

2.2 一致性误差分析

从图 5 可以看出, 若消除南向通量的相位差, 即将 $f_{\rm s}(t+2)$ 与 $f_{\rm e}(t)$ 相比较, 可以发现二者的趋势更加相似, 表现为不同时间两个方向的通量差值更加接近. 因此这里利用通量差变化幅度定量描述消除相位差前后两方向通量的一致性, 具体过程如下.

首先选取一个 24 h 的时间窗口, 计算不同方向的通量差

$$\Delta f_i = |f_{2i} - f_{1i}|. \tag{3}$$

其中, f_{2i} 和 f_{1i} 为两个方向通量对应时间点的通量, i 表示时间窗口中的位置. 计算通量差平均值

$$f_{\rm Ad} = \Big(\sum_{i=1}^{24} \Delta f_i\Big)\Big/24. \tag{4}$$

然后计算通量差的平均幅度

$$\Delta f_{\rm d} = \Big(\sum_{i=1}^{24} |\Delta f_i - f_{\rm Ad}|\Big)\Big/24. \tag{5}$$

在应用上述方法计算时, f_{2i} 和 f_{1i} 可以是相同时间的两个通量时间序列或者南向通量消除 2 h 相位差后的两个通量时间序列.

由图 6 可以看出, 2005 年 9 月 8 日未经相位变换的两个方向的通量差变化幅度开始迅速增大. 这说明由于 CME 的接近, 二者对应的宇宙线进入和偏出 CME 对通量的影响较大, CME 的细致结构也先后影响两方向对应的宇宙线通量, 相位差效应趋于明显. 9 月 9 日后两条曲线开始接近, 这主要是因为地磁场扰动开始增强, 特别是 10 日开始的 24 小时窗口已经包含了地磁暴前期的地磁扰动部分, 地球已经进入 CME 当中, 两方向的相位差消失, 而且地磁场发生扰动, 导致相位差变化前后的通量差幅度均开始增大, 后者甚至超越前者. 因此, CME 发展过程中不同方向宇宙线的影响存在较大差别, 但 CME 趋近和到达地球的过程相似, 推测在此期间不同方向宇宙线 μ 介子通量的表现相似.

2.3 大地磁暴前后一致性参数分析

对 2003, 2004 和 2005 年最大 Kp 指数为 9 的大地磁暴前的相关性进行了统计. 在此期间, 发生上述条件的大磁暴共 7 次, 其共同特征是进行相位变换后, 即南向通量相位后移 2 h, 相关系数普遍高于没有经过相位变换的情况, 而对应的经过变换的通量差幅度也明显较小. 在地磁暴前 1 天, 相位变换前后的南

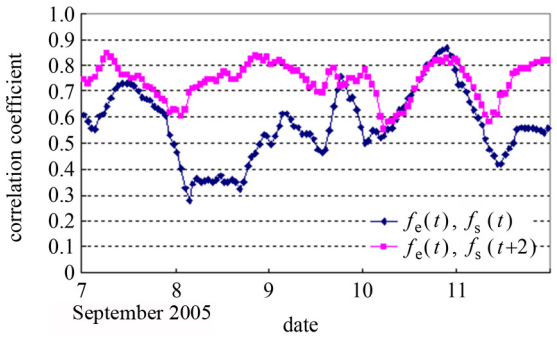

图 5 2005 年 9 月 11 日磁暴期间南向通量经过相位变换处理前后与东向通量的相关系数

Fig. 5 Correlation coefficient of southward muon flux (with phase transformation or not) with eastward muon flux on September 11, 2005

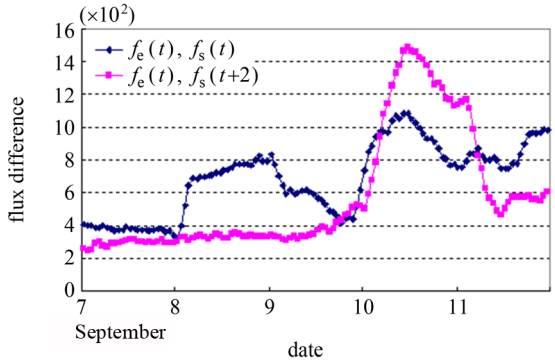

图 6 2005 年 9 月 11 日磁暴期间南向通量经过相位变换处理前后与东向通量差幅度的变化

Fig. 6 Flux difference of southward muon (with phase transformation or not) with eastward muon on September 11, 2005

向和东向相关系数差别明显, 变换后的相关系数显著高于变换前, 变换后的通量差幅度也显著小于变换前. 当时间窗口包含磁暴开始时刻时, 变换后的相关系数迅速下降, 进而与变换前的相关系数趋于一致, 而变换后的通量差幅度则迅速增加, 进而超过未经过变换的幅度. 图 7 和图 8 给出了 2003 年 10 月 29 日特大地磁暴前相位变换前后的相关系数和通量差幅度的变化过程.

对典型强 CME 接近地球过程中两个不同方向的宇宙线强度变化及其相关特性进行分析, 结论如下. 不同的初级宇宙线入射方向导致的 Nagoya 宇宙线台站南向和东向通量变化在 CME 接近地球时出现相位差的现象, 通过对二者的相关系数和通量差幅度进行定量计算后, 可以获得相位变换前后上述参数的大小和变化趋势.

根据上述对强 CME 接近地球过程中 Nagoya 台站南向和东向宇宙线通量相关特性的分析和总结, 初步确定了强 CME 接近地球过程中的识别规则. 这些规则可作为其他类似事件的预报依据. 以 2006 年 12 月 14 日开始的地磁暴为例, 图 9 和图 10 给出了这次地磁暴前 Nagoya 台站东向和南向的一致性参数变化. 可以看出相关系数和通量差幅度的变化特征与前述强 CME 接近过程中的特征完全一致. 因此, 可以初步确认 Nagoya 台站东向和南向 μ 介子通量的联合分析, 能够给预报 CME 的接近及其可能对地磁场的影响提供理论支撑.

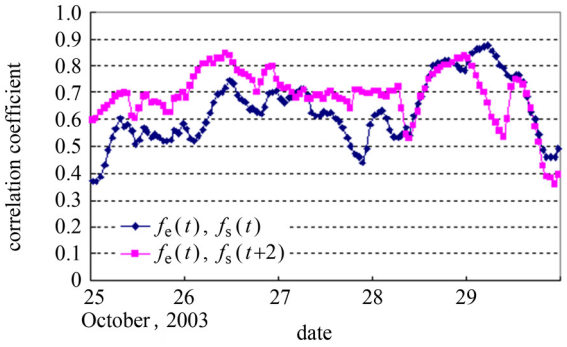

图 7 2003 年 10 月 29 日磁暴期间南向通量经过相位变换处理前后与东向通量的相关系数

Fig. 7 Correlation coefficient between southward muon flux (with phase transformation or not) and eastward muon flux on October 29, 2003

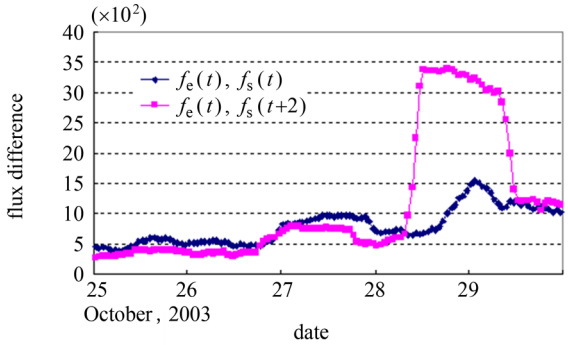

图 8 2003 年 10 月 29 日磁暴期间南向通量经过相位变换处理前后与东向的通量差幅度的变化

Fig. 8 Flux difference between southward muon (with phase transformation or not) and eastward muon on October 29, 2003

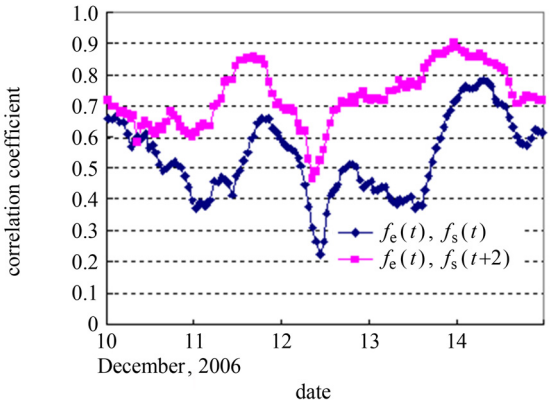

图 9 2006 年 12 月 14 日磁暴期间南向通量经过相位变换处理前后与东向通量的相关系数变化

Fig. 9 Correlation coefficient between southward muon flux (with phase transformation or not) and eastward muon flux on December 14, 2006

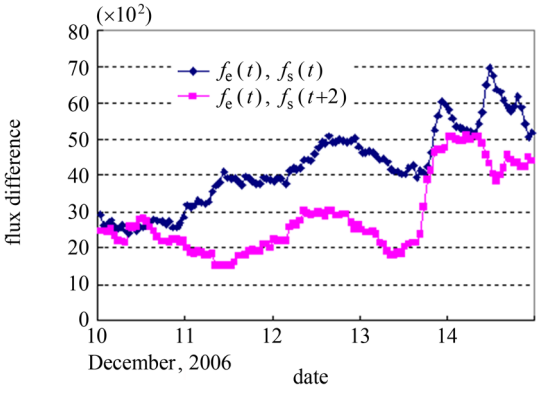

图 10 2006 年 12 月 14 日磁暴期间南向通量经过相位变换处理前后与东向的通量差幅度的变化

Fig. 10 Flux difference between southward muon (with phase transformation or not) and eastward muon on December 14, 2006

3 结论与讨论

以 2005 年 9 月 11 日的 CME+ 强地磁暴事件为例, 对 Nagoya 宇宙线台站不同方向的 μ 介子通量的相似性进行了对比分析. 对于多方向的探测数据, 分析两个方位角相差较为显著的 21° 东向和南向 μ 介子通量. CME 爆发并在行星际形成明显的不均匀结构时, 二者通量变化趋势呈现出高度的一致性, 但具有相对固定的相位差. 当 CME 到达地球时, 相位差消失, 通量同步下降, 即与宇宙线中子的通量变化趋势一致, 发生 Forbush 下降. 通过对更多显著的 CME 事件进行比较和分析可以发现, 南向和东向的 μ 介子通量都存在这种相位差. 分析认为, 这种现象的产生是因为从南向和东向到达 Nagoya 台站的宇宙线先后进入 CME, 并在扫过 CME 过程中先后穿越精细结构, 造成了两方向上宇宙线通量变化规律相似, 但存在一个固定的相位差.

为定量描述两方向的通量变化及其相关特性, 计算相同时间南向通量后移 2 h (即相位变换) 条件下, 两个方向通量的相关系数以及通量差变化幅度. 通过分析发现, 在 CME 接近地球过程中, 经过相位变换后, 两个方向通量的相关性高于未做变换的相关性, 而通量差变化幅度也明显降低.

导致 2003−2005 年 7 次 Kp 值达到 9 的地磁暴的 CME 都伴随很强的磁场. 通过分析发现, 这些 CME 接近地球的过程中, 其南向和东向通量的一致性随 CME 的接近而增强, CME 到达地球之后, 其一致性显著变差. 因此, 强 CME 接近地球过程中, 南向和东向 μ 介子通量的一致性变化特征可以作为证认强 CME 的重要参考量. 通过对 2006 年 12 月 14 日开始的地磁暴之前的南向和东向 μ 介子通量一致性特征和参数变化进行分析, 能够提前 12 h 以上预报地磁暴的发生.

Nagoya 宇宙线台站南向和东向是两个比较特殊的方向, 二者数据的联合分析初步揭示了 CME 对宇宙线的调制作用. 如果结合更多的相关方向, 联合更多台站, 则可以得到 CME 传播和结构的更多信息.

致谢 多方向 μ 介子数据由 Nagoya 宇宙线台站提供.

参考文献

[1] JOSELYN J A. Geomagnetic activity forecasting: the state of the art [J]. *Rev. Geophys.*, 1995, **33**(3): 383-401

[2] KUDELA K, STORINI M, HOFER M, *et al.* Cosmic rays in relation to space weather [J]. *Space Sci. Rev.*, 2000, **93**(1/2): 153-174

[3] RUFFOLO D. Transport and acceleration of energetic charged particles near an oblique shock [J]. *Astrophys. J.*, 1999, **515**(2): 787-800

[4] DORMAN L I, IUCCI N, VILLORESI G. The use of cosmic rays for continuous monitoring and prediction of some dangerous phenomena for the earth's civilization [J]. *Astrophys. Space Sci.*, 1993, **208**(1): 55-68

[5] DORMAN L I, IUCCI N, VILLORESI G. Possible monitoring of space processes by cosmic rays [C]// Proceedings of the 23rd International Cosmic Ray Conference. Alberta, Canada: University of Calgary, 1993: 695-698

[6] DORMAN L I, IUCCI N, VILLORESI V. The nature of cosmic ray Forbush-decrease and precursory effects [C]//Proceedings of the 24th International Cosmic Ray Conference. Rome, Italy: International Union of Pure and Applied Physics, 1995: 892-895

[7] DORMAN L I, PUSTIL'NIK L A, STERNLIEB A, *et al.* Monitoring and forecasting of great solar proton events using the neutron monitor network in real time [J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2004, **32**(4): 1478-1488

[8] SAVIAN J F, DA SILVA M R, VIEIRA L E A, *et al.* Forbush decreases for 2001—2004 observed with low latitude muon telescopes of Brazilian SSO observatory [J]. *Geophys. Res. Abstr.*, 2005, **7**: 340

[9] MUNAKATA K, BIEBER J W, YASUE S I, *et al.* Precursors of geomagnetic storms observed by the muon detector network[J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**(A12): 27457-27468

[10] LE Guiming, YE Zonghai, YU Shaohua, *et al.* Wavelet analysis of the cosmic ray intensities at Guangzhou muon station during January 7—11, 1997 [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2004, **47**(2): 190-194

[11] WANG Jing, LIU Siqing, XUE Bingsen, *et al.* Anisotropy analyses of cosmic ray before the geomagnetic storm on Sept. 24, 1998 [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2009, **29**(5): 495-501

[12] KANE R P. Directional muon telescopes not useful for estimating the magnitudes of Forbush decreases and geomagnetic storms [J]. *Indian J. Radio Space Phys.*, 2011, **40**: 76-84

[13] SABBAH I, TOKUMARU S M, DULDIG M L, *et al.* First observed coronal mass ejection from the middle east using cosmic rays [J]. *Kuwait J. Sci. Eng.*, 2010, **37**(2): 43-61

[14] DE MENDONCA R R S, RAULIN J P, ECHER E, *et al.* Analysis of atmospheric pressure and temperature effects on cosmic ray measurements [J]. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 2013, **118**(4): 1403-1409