第12卷 第4期 空间科学学报 Vol. 12, No. 4
1992 年10月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Oct., 1992

宇宙线暴时增加及其特征

叶宗海 孙小青
(中国科学院空间科学与应用研究中心,北京 100080)

摘 要

利用11个地面超中子堆的资料分析了6个不同地磁暴期间由于赤道环电流增强引起的暴时增加,并分析了它们的特征. 结果表明,地磁暴愈强, 暴时增加愈明显. 暴时增加与地磁H分量的变化有很好的负相关, 并有明显的纬度效应或与地磁截止刚度有依赖关系. 北京地区是暴时增加相当明显的区域. 暴时增加还有明显的地方时依赖关系. 在白昼一侧的增加更大,表明环电流具有不对称性的特征.

关键词 宇宙线 Forbush下降,暴时增加, 环电流, 地磁暴

一、引 言

Yoshida 和 Wada[1] 曾论述了磁暴时宇宙线强度的“异常”增加效应——暴时增加效应. Treiman[2] 发展了 Chapman-Ferraro 环电流理论. 他通过求解带电粒子在理想偶极子磁场和球对称环电流场中的运动方程, 把环电流参数与暴时增加和地磁截止刚度变化很好地联系起来. 三者之间的因果关系可以表示为环电流增强⟶宇宙线地磁截止刚度下降⟶宇宙线暴时增加.

本文利用世界台站网的观测,从不同类型磁暴和环电流条件下的宇宙线资料中,提取和区分宇宙线强度的暴时增加量, 并研究其特征. 同时对暴时增加与地磁暴和某些日地现象的关系进行讨论. 文中首次揭示了北京地区宇宙线暴时增加的特征.

二、暴时宙宇线强度变化

若令R表示宇宙线粒子的刚度; $D(R)$ 为初级宇宙线的微分刚度谱; $m^i(R, h_0)$ 为增殖函数, 它表示在大气深处 h_0 高度上观测时,由每个刚度为R的初级粒子产生的 i 类次级粒子数. 那末,在 h_0 高度上宇宙线台站 k 观测到的 i 类次级粒子强度变化为[3]:

$$\frac{\delta I_k^i(h_0)}{I_k^i(h_0)} = \int_{R_c(k)}^{\infty} \frac{\delta m^i(R,h_0)}{m^i(R,h_0)} W_k^i(R,h_0)\cdot \mathrm{d}R - \delta R_c(k)\cdot W_k^i(R,h_0) + \int_{R_c(k)}^{\infty} \frac{\delta D(R)}{D(R)} W_k^i(R,h_0)\cdot \mathrm{d}R. \quad (1)$$

这里

$$W_k^i(R,h_0) = \frac{m^i(R,h_0)\cdot D(R)}{I_k^i(h_0)}, \quad (2)$$

本文于1991年4月3日收到.

是宇宙线初级成分与 i 类次级成分之间的关联系数，R_c 是台站 k 处粒子的有效截止刚度.从(1)式看出，宇宙线强度变化可分为三大类：

第 I 类，与地球大气层中某些变化(如压力、温度的重新分布)所造成的增殖函数的变化有关，此即大气起源的宇宙线变化或称为气象效应((1)式中的第 1 项).

第 II 类，与地磁扰动所造成的地磁截止刚度变化有关，即地磁效应((1)式中的第 2 项).

第 III 类，与地球外初级宇宙线能谱变化有关((1)式中的第 3 项).

本文主要讨论第 II 类变化。磁暴期间，宇宙线强度主要包含三种变化。其一为全球范围的宇宙线暴，即 Forbush 下降，其二是暴时增加，再就是周日变化.

Forbush 下降源自太阳爆发时所引起的大尺度行星际磁场扰动，它是伴随行星际激波和太阳风高速流的一种现象。现在有人提出[4]，这可能与行星际磁云有关。周日变化是一个周期性的准正弦变化，这种调制的起因是太阳风与磁层磁场的相互作用.

现在人们确信[5]，暴时增加来源于地磁活动时，磁层中外辐射带甚至地面更高处产生或加强的西向环电流，它是由磁层内带电粒子(主要是质子)漂移运动引起的.东西向环电流的存在，使得在地磁基本磁场之上附加了一个负的扰动场。在此扰动场中，地磁截止刚度变小，这样，在宁静时期被地磁场屏蔽的部分低能宇宙线也能穿越大气抵达地球表面.由于暴时增加一般重叠于 Forbush 下降和周日变化之上，因而要从强度曲线上对它作直观的判别是困难的，因此，必须从宇宙线强度的变化中消除 Forbush 下降和周日变化，从中提取暴时增加.

三、数 据 处 理

本文将11个超中子堆站(见表 1)的时均值计数率选作基本的数据分析对象。这些数据已经过气象效应校正。表中台站的选择以覆盖较宽的纬度区域为原则，而且除 Irkutsk 站以外，它们具有相近的地理高度.

表 2 列出了所选用的磁暴事件(1984—1989)和 Forbush 下降的某些特征。表中 G_c 和 S_c 分别表示缓始型和急始型磁暴；S 和 MS 分别表示强烈和中等磁暴。为避免太阳爆

表 1　中子堆台站及有关参数

台站	截止刚度 R_c(GV)	地理 纬度	地理 经度	地磁纬度	高度 (m)	F_k
Alert	0.00	82.50N	62.33W	85.92N	57	—
Thule	0.00	76.50N	68.70W	87.89N	44	—
Terre Adelie	0.00	66.67S	140.02E	75.47S	35	—
Deep River	1.07	16.10N	77.50W	57.37N	145	1.00
Kerguelen Is.	1.10	49.35S	70.27E	57.40S	33	1.00
Kiel	2.32	54.34N	10.12E	54.75N	54	1.00
Irkutsk	3.56	52.47N	104.03E	41.12N	433	0.97
Hermanus	4.56	31.42S	19.22E	33.10S	26	0.91
Rome	6.24	41.90N	12.52E	42.40N	60	0.83
Beijing	9.56	40.08N	116.26E	28.74N	48	0.68
Tokyo	11.50	35.75N	139.72E	25.67N	20	0.61

表 2 磁暴事件及有关特征

磁暴事件	磁暴特征	极区 FD 幅度
1984年 4 月 2 日	G_c-MS	无
1984年 4 月26日	S_c-MS	7.4%
1985日 4 月26日	G_c-MS	5.7%
1986年 2 月 6 日	S_c-S	11.3%
1988年 4 月 3 日	S_c-MS	5.9%
1989年 3 月13日	S_c-S	15.5%

发时，太阳高通量质子流对记录强度的影响，事例选择排除了伴有太阳质子事件的情形.

出于我们讨论的目的，对照 (1) 式之表述，可以把宇宙线强度变化按以下分解:

$$CR_k(t) = FD_k(t) + DV_k(t) + STI_k(t). \tag{3}$$

式中各项都以相对变化量表示，其参考水平是暴前两天记录的平均值. 式中 FD——Forbush 下降; DV——周日变化; STI——暴时增加; CR——宇宙线强度总变化.

根据公式 (3)，首先从总强度变化中分离出 Forbush 下降. 可以想象，在极区

$$R_c = 0,$$

按照 Chapman 的观点，即使有截止刚度的变化，它们的极限也只能为零，所以不可能记录到暴时增加. 因此，可以将极区记录看作纯粹的 Forbush 下降 (当有 Forbush 下降存在时).

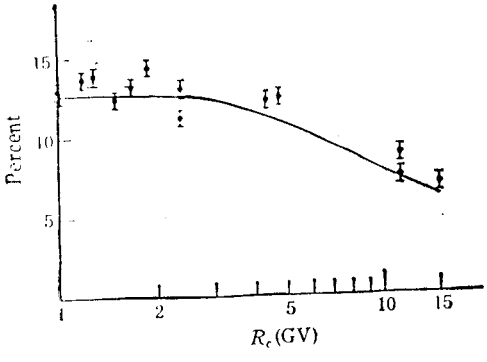


图 1 地面中子堆记录的 Forbush 下降的纬度效应

Fig. 1 The latitude effect of Forbush decrease recorded by ground neutron monitor

Forbush 下降是地磁纬度的函数. 大量事实显示，在极区 Forbush 下降幅度最大，在地磁赤道上最小，而且赤道处的下降率约为极区的一半[6,7]. 图 1 是 Forbush 下降纬度效应的一个例子.

因此，任一纬度上的 Forbush 下降比率可写成

$$FD_k(t) = FD_p(t) \cdot F_k. \tag{4}$$

式中 FD_p 是极区 ($R_c = 0$) 的 Forbush 下降，它由表 1 中极区三个站给出; F_k 是一数值因子，它表征 Forbush 下降的纬度效应，是截止刚度的函数. 对于近极区 ($R_c = 0$—3GV)，$F_k = 1$，赤道站 ($R_c \approx 15$GV) $F_k = \frac{1}{2}$. 按照 Forbush 下降与截止刚度依赖关系的谱特性为一指数谱形式，得到了各中子堆站的 F_k 值，已在表 1 中给出.

为了很好地分离出周日变化 $DV_k(t)$，就暴前几天内(本文取 4 天) 日变化的一次谐波分别对各事例中各站的强度变化消去周日变化，即

$$DV_k(t) = a_k \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{24} t\right) + b_k \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{24} t\right), \tag{5}$$

式中 a_k、b_k 为待定常数。

尽管暴时增加通常伴随 Forbush 下降，但不乏彼此独立存在的例证。根据它们之间的对应关系，Forbush 下降与暴时增加之间主要可分为三种情况[8]：

1. 有强环电流存在的地磁暴期间没有明显的 Forbush 下降，而只有暴时增加的情况。无急始的地磁暴往往不伴随大的 Forbush 下降。

2. 在地磁暴出现时，暴时增加和 Forbush 下降同时存在的情况。

3. 在没有强环电流存在的地磁暴出现时，看不出暴时增加，但有强的 Forbush 下降存在。

四、事例分析

1. 有强环电流和大的 Forbush 下降

(1) 1986 年 2 月 6 日事件

这次磁暴是 1960 年以来记录到的最大磁暴。北京地磁台于 2 月 6 日 1312UT 记录到这一磁暴，持续约 4 天，最大变幅约 280nT。

两极区中子堆同时记录到了大的 Forbush 下降。Alert 站最大下降发生在 2 月 9 日 0100UT 左右，下降幅度为 10.7%。Thule 站于 0200UT 观测到最大下降幅度 11.3%。用上述两站记录归一处理后的结果作为极区 Forbush 下降，其最大变幅为 10.9%。

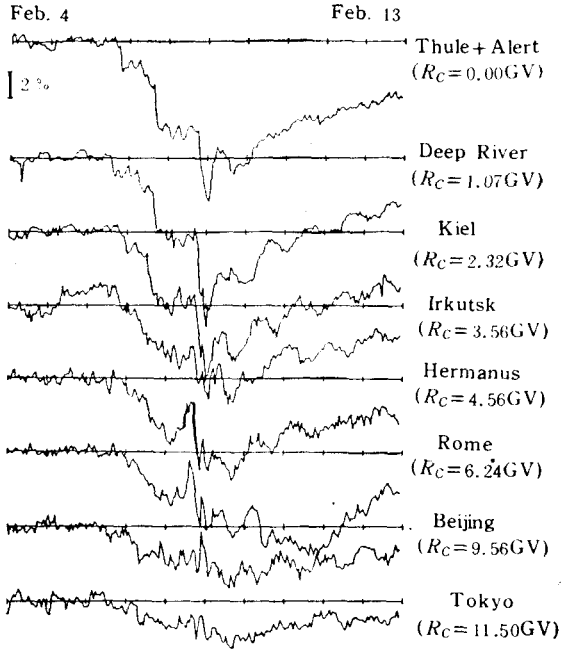


图 2　1986 年 2 月 6 日事件宇宙线的强度时间变化

Fig. 2　The intensity-time variations of cosmic ray event on 6 Feb. 1986

图 2 给出了极区 Forbush 下降以及 7 个中低纬站强度时间变化的图象. 各水平线代表以暴前两天平均值计算得到的静日水平. 从图中可以看到,该事件中 Forbush 下降具有多暴的特点，它与耀斑连续多次爆发是一致的. 北京超中子堆观测到的最大下降幅度为 4.2%,不足极区的 40%.

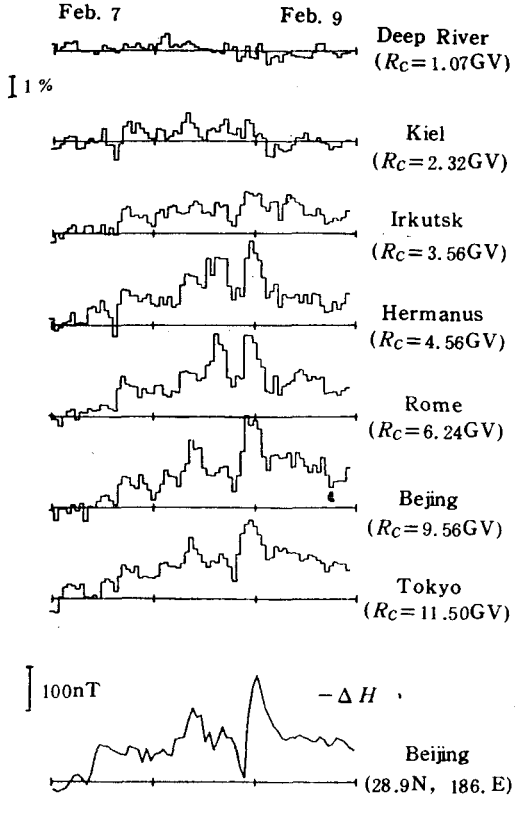


图 3 1986 年 2 月 6 日事件中宇宙线暴时增加和地磁水平分量的时间变化

Fig. 3 The storm-time increases and horizontal component of geomagnetic field for the event on 2 Feb. 1986

利用极区资料对其它各站消去Forbush下降和周日变化后，所得结果绘于图 3. 图中同时给出了北京地磁台水平分量变化，为便于比较，水平分量变化按$-\Delta H$ 画出.

由图可以看出，该事件的暴时增加过程有以下几个特点:

1) 暴时增加在所有台站几乎是同时开始的(~0900UT).

2) 暴时增加有显著的纬度效应,即它具有明显的地磁截止刚度依赖关系的特点. 在地磁截止刚度较低的地区暴时增加很小，往往难以分辨. 随着截止刚度的增高，暴时增加呈现迅速增长的趋势，且幅度增加较大的地区出现在截止刚度大于 4GV 的台站. 在此次事件中北京站的暴时增加幅度最大(见表 3).

3) 参照地磁H分量变化曲线可以看到，暴时增加与H分量变化 ΔH 之间有很好的负相关.

4) 暴时增加对地方时有明显的依赖关系. 由图可以看到，在 2 月 8 日这一天，暴时增加有两个明显的峰值. 对应于第一个峰值 (1000UT)，落在白昼侧的北京中子堆和东京中子堆的增加幅度比落在夜晚一侧的Hermanus 和Rome 中子堆的增幅要大. 然而，与此恰恰相反,对应的第二个峰(~1700UT)，落在白昼侧的 Hermanus 和 Rome 中子堆记录的暴时增加比落在黑夜侧的北京和东京站的幅度要大. 此外,在整个磁暴过程中出现暴时增加最大时,北京和东京中子堆都位于白昼侧，这时两

表 3 1986 年 2 月 6 日事件中的暴时增加

台站	Deep River	Kiel	Irkutsk	Hermanus	Rome	Beijing	Tokyo
暴时增加(%)	2.1	2.7	4.2	4.8	4.8	5.4	4.6

站的增长幅度比其它站都大。

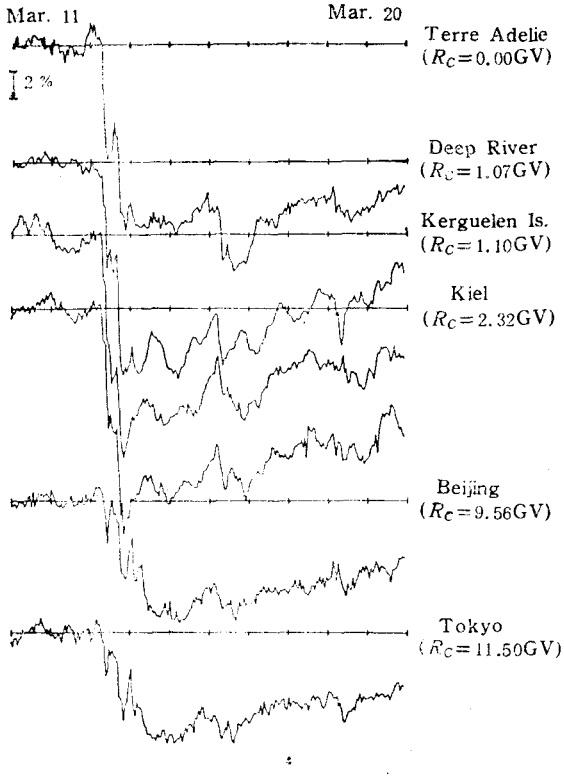


图 4　1989 年 3 月 13 日事件宇宙线的强度时间变化

Fig. 4　The intensity-time variations of cosmic ray event on 13 March 1989

(2) 1989 年 3 月 13 日事件

1989 年是太阳活动高年。3 月上旬由于太阳出现超级活动区，导致多次大耀斑出现，在地球上引起了一群强磁暴。其中 3 月 13 日开始的急始型磁暴是 1932 年以来仅次于 1941 年 9 月 18 日磁暴的强烈磁暴。北京台记录到的最大变幅达 741nT，是该台建台以来记录到的最大磁暴。

在这样强烈的磁暴环境下，极区 Terre Adelie 超中子堆于 0700UT 开始记录到比 1986 年 2 月 6 日更大的 Forbush 下降，最大下降比率高达 15.5%。与此同时，其它中低纬中子堆也记录到了这一宇宙线效应，北京超中子堆的降幅达 8.3%，是北京超中子堆有史以来记录到的最大 Forbush 下降。北京和东京站强度下降和恢复阶段，其强度起伏较大，有着比极区和高纬更为复杂的结构，这正是暴时增加叠合在 Forbush 下降之上的结果(见图 4)。

经数据处理后各站的暴时增加对时间的变化在图 5 中给出。由该图看出，3 月13日—14日环电流迅速加强，约在 13 日 2400UT 环电流增强到最大，然后逐步减弱。受环电流影响，在 13 日 1200UT 北京和东京站记录到了宇宙线强度的迅速增加，经过约 12 小时，

暴时增加幅度达到最大，北京站约为 5.2%，东京站为 4.3%. 高纬三站的暴时增加虽然其幅度比低纬站小得多，但仍能看出这种趋势. 其暴时增加的特点与 1986 年 2 月 6 日事件相同.

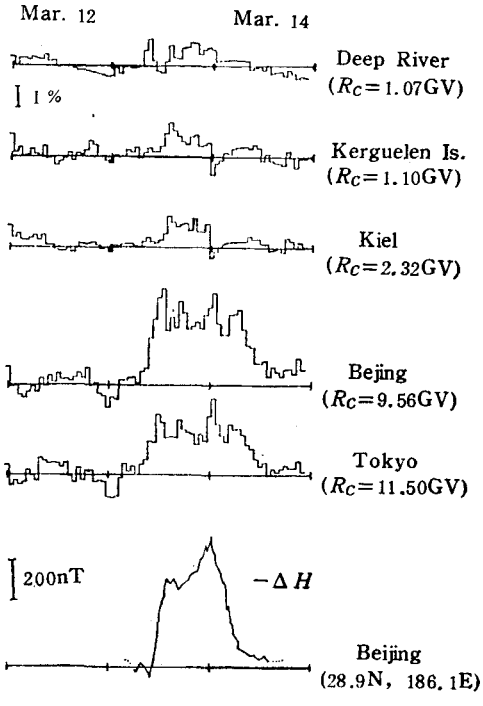


图 5 1989 年 3 月 13 日事件的宇宙线暴时增加和地磁水平分量的变化

Fig. 5 The storm-time increases and horizontal component of geomagnetic field for the event on 13 March 1989

2. 有较强环电流但无大的 Forbush 下降

对于这种情况，我们分析了 1984 年 4 月 2 日事件和 1988 年 4 月 3 日事件，本文给出前一事件的分析结果. 该事件的一个主要特征是磁暴期间没有明显的 Forbush 下降. 经数据处理后，将该事件的暴时增加的最大幅度及对应的地方时列于表 4.

表 4 1984 年 4 月 2 日事件的暴时增加

台站	Deep River	Kiel	Irkutsk	Hermanus	Rome	Beijing	Tokyo
暴时增加(%)	1.4	2.0	2.0	2.4	1.7	2.0	1.4
地方时 (LT)	1600	1300	1500	1100	1100	1500	1200

由表 4 可以看出，除暴时增加的纬度效应外，它还有地方时依赖关系的特点. 暴时增加极大出现在白昼一侧，这是环电流的不对称性决定的. 这一事件还说明了另一个问题，即暴时增加并不总是与宇宙线 Forbush 下降相伴随，因而它也不是太阳耀斑爆发的必然

结果.

3. 有大的 Forbush 下降而无强环电流

1984 年 4 月 26 日事件和 1985 年 4 月 26 日事件属于这种情况，现以前者为例加以讨论.

1984年 4 月 26 日事件属于中等磁暴，但有较大的 Forbush 下降，极区最大下降幅度为 7.4%. 经数据处理后的暴时增加绘于图 6 中. 由该图可以看到，尽管暴期有较大的 Forbush 下降，但观测到的暴时增加较小.比较磁暴过程和暴时增加过程，可知两者之间有较好的相似特性. 纵观以上分析的各个事例，可以得出这样一个事实：强磁暴对应大的暴时增加，小磁暴对应小的暴时增加. 并再次看到暴时增加的纬度和地方时的依赖关系.

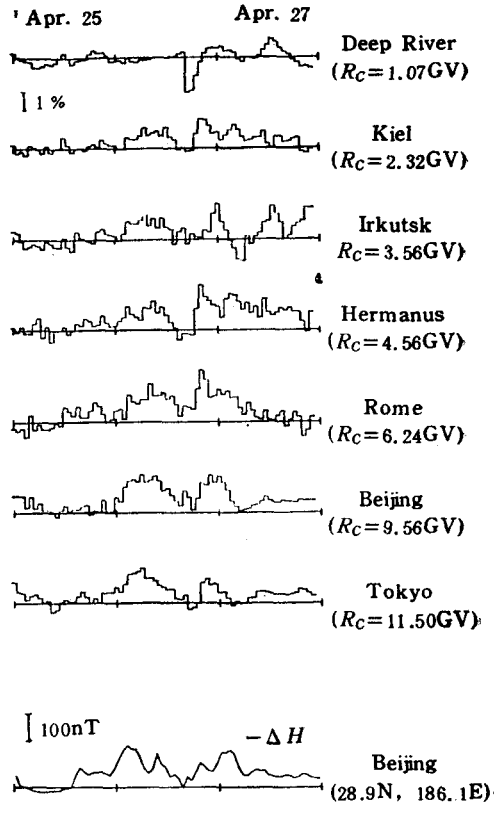


图 6　1984 年 4 月 26 日事件的暴时增加和地磁水平分量的变化

Fig. 6　The storm-time increases and horizontal component of geomagnetic field for the event on 26 April 1984

五、结果与讨论

从对以上磁暴事件中宇宙线暴时增加的资料处理与分析中可以看出：

1. 文中得到的宇宙线强度变化已经过气压校正和消除了 Forbush 下降，已排除了由大气状态变化和宇宙线初级能谱变化产生的可能性.

2. 尽管太阳耀斑能够产生高能粒子辐射，然而在资料选取上，我们已经注意到了不选择含有地面 GLE 事件的资料. 而且，即使伴有大的太阳质子事件，我们也不能把它归入宇宙线的异常增加，因为两者之间的纬度效应正好相反，而且出现时间也不一样，太阳质子事件出现在 Forbush 下降之前.

3. 暴时增加并不是暴期宇宙线异常的周日变化所致. 这种强度增加在白昼和黑夜都能观测到.

由以上的分析和讨论，可得出如下结论：

(1) 暴时增加是磁暴过程中加强的环电流引起的. 通常暴时增加与地磁 H 分量变化 ΔH 之间有较好的负相关. 磁暴越强，暴时增加也愈大.

(2) 暴时增加同地磁截止刚度有明显的依赖关系. 暴时增加在中纬区较大，低纬次之，高纬最小. 北京地区处于暴时增加较明显的区域.

(3) 暴时增加同地方时有明显的依赖关系. 一般情况下，暴时增加较大出现在白昼一侧，它说明了环电流的不对称性特性.

但是,行星际介质的扰动是复杂的,强度变化还与行星际磁场不均匀性结构、宇宙线的各向异性等有关,这些因素将会对暴时增加的变化带来一些影响. 现在已知道,行星际磁云结构对地磁场和宇宙线扰动有着十分密切的关系[9],如我们分析的 1986 年 2 月 6 日和 1989 年 3 月 13 日事件与负磁云紧密相联系,而 1984 年 4 月 26 日事件则可能与正磁云紧密相关. 所以,磁云的形态、结构对宇宙线和地磁扰动都将产生不同的影响.

此外,环电流本身的形态、结构、分布位置等对暴时增加也会产生影响,从而导致一些事件的精细特征并不完全一致. 这些问题都需要作进一步的探讨与研究.

致谢 国家地震局北京地磁台聂华山等同志提供了地磁资料,在此深表感谢.

参 考 文 献

[1] Yoshida, S. and M. Wada, *Nature*, Vol. **183**, p. 381, 1969.
[2] Treiman, S. B., *Phys. Rev.*, Vol. **89**, p. 130, 1953.
[3] 周志文等译,宇宙线天体物理实验和理论基础(多尔曼著),科学出版社,第93页,1987.
[4] Sanderson, T. R. et al., Proc. 21st International Cosmic Ray Conf., Vol. **6**, p. 255, 1990.
[5] Kondo, S. et al., Proc. 20th International Cosmic Ray Conf., Vol. **4**, p. 212, 1987.
[6] Lockwood, J. A., *Space Sci. Rev.*, Vol. **12**, p. 658, 1971.
[7] Wilson, J. G. et al., Progress in Elementary Particle and cosmic Ray Physics, Noth-Holland Publishing Company, p. 212, 1962.
[8] 叶宗海,全国空间物理学术会议文集(1979),科学出版社,第69页,1982.
[9] 章公亮,空间科学学报,第 8 卷,第261页,1988.

STORM-TIME INCREASE IN COSMIC RAY INTENSITY AND ITS CHARACTERISTICS

Ye Zong-hai Sun Xiao-qing
(Center for Space Science and Applied Research, Academia Sinica, Beijing 100080)

Abstract

The cosmic ray increases due to considerable depressions of cosmic ray cut off rigidity during large geomagnetic storms are investigated. Data from 11 superneutron monitors in world network are analyzed for six geomagnetic storms of various type during 1984—1989. The results show that the storm-time increases are due to existence of westward equatorial ring currents developing or intensifying during geomagnetic storms. The stronger the geomagnetic storm, the larger the storm-time increase. The storm-time increases have obvious latitude effect or geomagnetic cut off rigidity dependence. Beijing station is at the obvious region for the storm-time increase, and storm-time increases are of local time dependence. This enhancement is larger at the daytime than at the nighttime. Showing that the intensifying ring current is asymmetrical.

Key words Cosmic ray Forbush decrease, Storm-time increase, Ring current, Geomagnetic storm