

薛炳森. 高能质子能谱特征在日冕物质抛射影响预报中的应用. 地球物理学报, 2012, 55(3): 738-743, doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 03. 002.

Xue B S. The application of spectrum of energetic protons accelerated by CME in the geomagnetic storm forecast. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(3): 738-743, doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 03. 002.

高能质子能谱特征在日冕物质 抛射影响预报中的应用

薛炳森

中国气象局国家空间天气监测预警中心 100081

摘 要 日冕物质抛射(CME)的规模和对地有效性是地磁暴预报中重点关注的特征. 本项研究的目的是通过对行星际高能质子通量和能谱的特征与演化规律的分析, 得到 CME 对粒子的加速能力, 评估 CME 可能对地磁场造成的影响. 在工作中, 统计分析了 ACE/EPAM 的 1998—2010 年的质子数据, 对质子能谱进行了拟合, 得到了能谱指数, 并对能谱指数及其变化特征所对应的 CME 和地磁暴进行了相关统计. 通过研究发现: (1) 能谱指数随着太阳活动水平而变化, 高年最大, 达到 -2.6 , 而且涨落幅度也达到 ± 0.4 , 而在太阳活动低年则稳定在 -3.0 左右; (2) CME 对粒子的加速对应着能谱指数的升高, 幅度达到 20% 时, CME 引起地磁暴的可能性较大; (3) 冕洞高速流到达地球时, 高能质子通量也会升高, 但能谱指数同时会有下降; (4) 以 2004 年全年的能谱指数为例, 对能谱指数在地磁暴预报中的应用进行了评估, 结论认为, 能谱指数的升高是 CME 引发地磁暴的必要条件, 可以作为地磁暴预报的参数使用.

关键词 CME, 加速, 高能质子, 能谱指数, 地磁暴

doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 03. 002

中图分类号 P353

收稿日期 2010-12-06, 2012-01-21 收修定稿

The application of spectrum of energetic protons accelerated by CME in the geomagnetic storm forecast

XUE Bing-Sen

National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

Abstract The character of CME is crucial in the forecast of geomagnetic storm. In this work, the flux and spectrum of interplanetary energetic proton, together with the particularity of their evolution, were investigated to get the judgment of the acceleration process occurred in CME and evaluate the effect of the CME on geomagnetic field. The proton flux data from ACE/EPAM during 1998 to 2010 was employed and a so-called spectrum index was derived by modeling the data. Through the statistic work on the proton flux, spectrum and relative CME and geomagnetic disturbance, following conclusion was found: (1) The background of spectrum index was -2.6 while its fluctuation reached ± 0.4 in the high period of solar activity and it was stable in low period of solar activity with a value of -3.0 ; (2) The elevating of the spectrum usually corresponds to the acceleration process in CME, and 20% or more increasing in spectrum index

基金项目 公益性气象行业专项项目“风云卫星空间天气监测数据应用技术研究”(GYHY200906013)资助.

作者简介 薛炳森, 男, 1966 年生, 1988 年本科、2009 年博士毕业于中国科学技术大学, 主要从事空间天气预报方法和业务化技术研究.

E-mail: xuebs@cma.gov.cn

means a good probability of geomagnetic storm; (3) There was increasing of energetic proton flux when the shock by high speed stream from coronal hole reached the earth but the spectrum went slightly down; (4) The efficiency of the application of spectrum in geomagnetic storm forecast was evaluated with the relative data in 2004 and the result showed that the CME originated geomagnetic storm always followed the significant increasing in spectrum index, and the proton spectrum index could be an indicator of geomagnetic storm.

Keywords CME, Acceleration, Energetic proton, Spectrum index, Geomagnetic storm

1 引言

地磁场的扰动需要外界的驱动源,而 CME 携带着太阳日冕物质,具有很强的磁场和超过背景太阳风数倍的速度,它与地磁场相互作用形成物质和能量向此层的注入,形成一系列综合的空间物理效应,其中地磁暴是最显著的扰动事件^[1-3]. 在第 23 太阳活动周中,共有 9 天的 A_p 指数超过 100,全部是由强的全晕 CME 引起 (http://www.swpc.noaa.gov/ftpdir/indices/old_indices),并且都伴有行星际高能质子通量的增长和强太阳质子事件 (http://www.swpc.noaa.gov/ftpdir/indices/old_indices). Verma 等(2009)^[4]的统计工作显示,1998—2005 年的 15 次 $Dst < -200$ nT 的强地磁暴中,14 次均与 CME 所引发的激波有关,而且这些激波均为前向激波,比例达到 93.3%. 而且,CME 在到达并影响地球前,有一个在行星际传输的过程,这样就为预报 CME 将会引发的地磁暴提供了 1—2 天的提前量. 因此,对 CME 的判识,对其对地有效性的认证就成为进行相关地磁暴预报的关键.

CME 对粒子的加速是确认 CME 激波的重要标志,薛炳森等(2006)^[5]将 ACE/EPAM 1~1.69 MeV 能道质子通量作为非重现性地磁暴的主要预报参数,并构建了地磁暴预报模式. Reames (1999)^[6]则对 CME 加速高能粒子的原理和过程进行了综合描述,他将太阳高能质子通量的增长划分为脉冲型和缓变型两种,尽管目前对这种划分仍有很多争论,但普遍接受的观点认为,缓变型事件是通过 Fermi 加速机制(又称为扩散激波加速机制)而形成的. 激波是由 CME 所激发,带电粒子可以通过扩散加速机制被激波加速到 MeV 量级,随着激波的传播、扩散和衰减,被加速的粒子可从激波的束缚中逃逸到行星际介质中. 实际观测中,离子的电荷态显示高能粒子来自日冕,其温度约为 2×10^6 K,也与日冕相似,证实这部分高能粒子为日冕物质.

一般认为,激波对带电粒子的加速是通过一阶 Fermi 加速实现的,也称为激波扩散加速,即由于磁场的湍动,如 Alfvén 波等,带电粒子在激波的前沿和后沿之间来回反射,平均每次弹跳离子获得的动量为 $m\Delta v$,其中, m 为粒子质量, $\Delta v = |v_2 - v_1|$ 为激波上下游的速度差. 因此,决定粒子能量的参数主要是激波的速度和粒子在激波中来回弹射的时间,而后者取决于激波的强度和结构.

Zank 等(2000)^[7]建立了一维模型,对激波对离子的加速过程进行了模拟,结果显示,被加速的离子将先于激波到达 1AU; Li 等(2003)^[8]利用 ACE、WIND 卫星的观测结果进一步确认了激波加速离子模型的计算结果. Rice 等(2003)^[9]建立的二维离子加速模型模拟了 CME 驱动的激波,及其引起的带电粒子的加速过程. 结果显示,强激波可以在太阳附近将质子加速到 GeV 量级,被加速的粒子能够在一定条件下逃离激波区域,然后沿行星际磁场向外运动;而且径向方向的 CME 加速出的高能粒子会比东向 CME 所加速的相同能量的离子更快到达 1AU.

Aran 等(2006)^[10]根据 CME 形成的激波加速带电粒子的理论构建了太阳粒子工程软件 SOLPENCO,可以对粒子的加速过程进行模拟,能够给出高能粒子在空间中的分布和能谱,作为实例,文中给出了他们对 2000 年 4 月 4—6 日期间 CME 加速所造成的地球附近的高能质子通量的模拟结果,并与当时 ACE/EPAM 实测的响应能道的通量值进行了比较,结果显示,模式的计算结果在通量幅度和演化趋势方面均与实测值相符. 这进一步证实了 CME 对带电粒子加速过程的存在.

随着行星际高能粒子探测卫星的增加和数据的不断积累,一些科学家开始研究将行星际高能离子通量的上升作为判识 CME 是否朝向地球运动,进而预报地磁暴的先兆因子. Lam(2009)^[11]对 1997—2005 年期间的全晕(halo)CME 之后 ACE/EPAM 各能道高能离子通量变化与加拿大地区的地磁扰动进行了统计分析,发现地磁扰动幅度与离子通量的

增幅正相关,而且几次大地磁暴之前,ACE/EPAM 离子通量都有巨幅增长. Valtonen 等(2005)^[12]则分析了 SOHO/ERNE 的 1~110 MeV 的高能质子通量数据在全晕 CME 到达地球之前的变化,证实了强地磁暴之前数小时都会有高能质子通量增加的现象,可以作为地磁暴的先兆特征. 另外,还有利用 ACE 的 EPAM/P1(47~65 keV)的峰值通量 f_{\max} 及当时的行星际磁场 $|B|$ 进行地磁暴预报的方法^[13],他们的统计表明,以 $f_{\max} > 10^6 \text{ cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, $|B| > 20 \text{ nT}$ 作为条件,对强地磁暴($Kp > 7$)的预警准确率超过 83%. 因此,行星际高能粒子既然是 CME 加速的产物,必然与 CME 的内在特征存在联系,通过分析 CME 到达地球之前的高能离子通量变化特征是提前感知 CME,进而预报地磁暴的重要线索.

综上所述,理论模拟计算和卫星实测数据都证明,CME 所形成的激波具有加速带电粒子的能力,粒子通量的变化能够反映 CME 的速度等参数特征. 但目前利用行星际高能粒子的通量反推 CME 特征,进而预报地磁暴的工作仍不多. 本文认为,行星际的高能粒子通量的增长变化形态是 CME 激波加速形成的,包含了许多 CME 的信息,特别是粒子的能谱,反映了 CME 对粒子的加速能力,是后续地磁暴预报的重要数据. 在实际应用中,CME 的发生位置、喷发方向、宽度、运动速度、磁场强度等因素都会影响 L1 点监测到的高能粒子通量. 反过来,通过分析 L1 点探测到的高能粒子通量的变化,结合日冕仪得到的 CME 的形态和运动信息,能够对 CME 的结构进行定性描述,并应用于 CME 的对地有效性的评估.

2 数据分析

而对 CME 加速过程的分析就需要对行星际不

同能量的高能粒子的通量进行连续监测,受限于当前的探测水平,对行星际高能粒子的监测数据主要来自 ACE 卫星,本项研究中选取的粒子是 1 MeV 左右的高能质子. ACE 卫星定点于日地连线上距地球 1500000 km 的 L1 点,其上搭载的电子/质子/ α 粒子探测器(EPAM)是一套综合监测设备,可以对中高能带电粒子通量进行连续监测,其中的 LEMS30 望远镜是针对中高能质子通量的监测设备,分 8 个能道,其指标如表 1 所示. 本文主要参考了 P5—P8 能道的监测值.

表 1 ACE/EPAM 高能质子探测器能道范围

Table 1 Energy channel of the energetic proton detector of ACE/EPAM

能道	能量范围(MeV)	能道	能量范围(MeV)
P1	0.047~0.065	P5	0.310~0.580
P2	0.065~0.112	P6	0.580~1.06
P3	0.112~0.187	P7	1.06~1.91
P4	0.187~0.310	P8	1.91~4.75

本文除了考虑 P5—P8 能道的通量变化外,主要针对质子的能谱进行了分析. 通过统计分析,发现上述 4 个能道的通量分布可以用指数,即 $F = aE^b$ 的能谱公式进行模拟,其中 F 为通量, E 为通道能量中值, a 、 b 为能谱拟合系数,称 b 为行星际高能质子的能谱指数.

CME 是大地磁暴的主要起因,而 CME 在太阳附近运动时是加速粒子的最重要阶段,被加速出的带电粒子逃逸到行星际,是我们了解 CME 结构参数,进而判断其对地有效性的重要信息. 从数据统计来看,特别是太阳活动高年,行星际中 1 MeV 左右的高能质子通量变化非常剧烈,但其能谱的变化却在一定的范围内. 图 1 为 1998—2010 年一个太阳活动周中的行星际高能质子能谱的日均值,可以看到 1998—2003 年,太阳活动处于上升段和峰值段,能

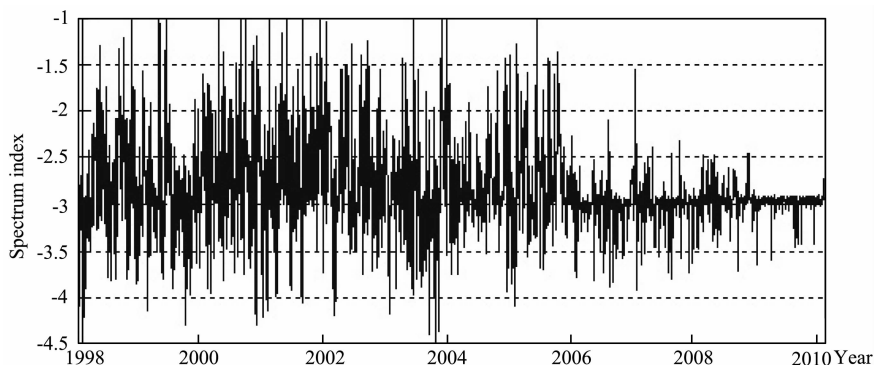


图 1 1998—2010 年的一个太阳活动周中高能质子能谱指数的变化

Fig. 1 The evolution of energetic proton spectrum index during 1998—2010

谱指数的变化较为剧烈,但主要集中于 -2.6 左右,通过对比,能谱指数大于 -2.0 的时段都有 CME 活动相对应. 2003—2006 年为第 23 周的下降段,能谱指数的振幅也变小,而 2006 年以后,随着太阳活动进入低年,能谱指数基本维持在 -3.0 左右. 因此,通过数据分析本文认为,尽管在太阳活动高年能谱指数的变化幅度较大,但在相对较短的时期内,如 1 个月,行星际高能质子的能谱指数相对于质子通量的变化还是相对稳定的. 另外,能谱指数的明显增加都对应着 CME 事件,因此可以通过能谱指数的相对变化幅度来区分是否有 CME 加速过程.

3 2010 年 4 月 3—6 日 CME 事件分析

CME 对高能质子的加速在质子通量的增加幅度方面差别很大,但高能质子通量及能谱指数的变化过程则是比较类似的.

2010 年 4 月 3 日 9:54UT,日冕上 11059 活动

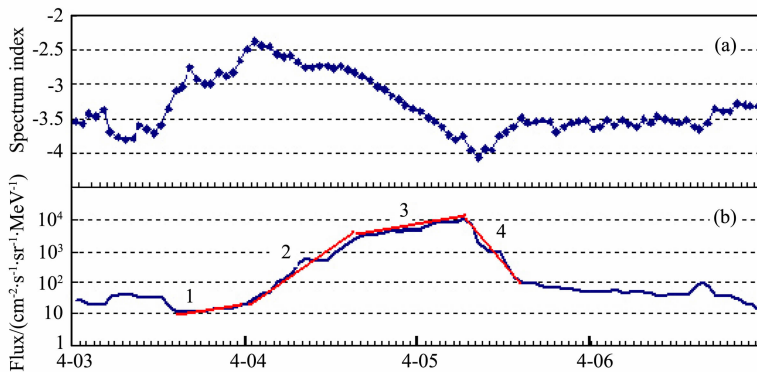


图 2 2010 年 4 月 3—6 日 CME 事件所对应的行星际高能质子通量(a)和能谱指数变化(b)

Fig. 2 The evolution of energetic proton flux (a) and spectrum index (b) by the CME during Apr. 3—6, 2010

本文认为,该事件是一次典型的 CME 喷发,直至到达地球附近的过程,在此期间,中高能质子通量和能谱的演化充分地反映了 CME 对带电粒子的加速过程的特点. 在第 1 阶段,CME 所激发的激波开始对质子加速,但大部分质子仍被束缚在激波区域内,而部分逃逸出的质子的能谱已经体现出粒子能量的增长,表现在质子能谱的快速“变硬”;第 2 阶段中,加速过程持续,被加速并逃逸出激波区域的粒子数量增加,质子通量开始迅速上升;第 3 阶段显示,随着 CME 的扩散,其对带电粒子的加速能力逐渐减弱,而束缚在激波区域的高能粒子容易进入到行星际空间,因而质子通量仍在缓慢上升,而能谱则开始“变软”,但激波正面会“扫起”一些粒子,所以在激波临近时,质子通量会有一个脉冲式的增加,而激波

区(S22W15)暴发了一次 B7 级耀斑,该耀斑持续时间长达 2 小时以上,并伴有全晕(halo)CME,初始速度为 500 km/s 左右. 3 日 12:00UT 开始,ACE 卫星所搭载的高能粒子探测器(EPAM)所监测到的 300 keV 以上的三个能道的高能质子通量开始增长,能谱指数开始上升. 以 $310\sim 580 \text{ keV}$ 能道为例(图 2b),质子通量的变化过程可分为 4 个阶段:第 1 阶段,3 日 12:00—23:00UT,通量开始缓慢上升,而能谱系数则从 -3.5 左右迅速上升至 -2.7 ;第 2 阶段,质子通量快速增加,能谱系数稳定在 -2.7 左右;第 3 阶段,质子通量继续缓慢上升,而能谱系数则单调下降,直到 5 日 5:00UT,质子通量达到 $1.1 \times 10^4 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{MeV}^{-1}$,此时对应着激波的到达时间,能谱系数也达到了极小值;第 4 阶段,激波跨越 ACE 所在位置,质子通量快速下降,能谱指数也开始上升,至 5 日 13:00UT,质子通量稳定在 $1.5 \times 10^1 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{MeV}^{-1}$,能谱指数恢复到 -3.5 左右的正常值.

前堆积的质子以低能成分居多,这将使质子能谱更“软”,这与涂传诒(1988)^[14]的结论是一致的;在第 4 阶段,激波通过 ACE 卫星,随着激波的远离,质子的通量和能谱恢复常态.

通过对多次 CME 事件后的高能质子通量和能谱指数演化趋势的分析,大多数 CME 事件后,行星际高能质子都会顺序经历上述 4 个发展阶段,但各阶段的幅度有所不同. 有些 CME 事件出现前后追赶、CME 与冕洞共同作用的情况,这时质子通量和能谱指数变化较为复杂,需要进一步的认证方法.

4 2009 年 1 月冕洞高速流事件分析

行星际高能质子通量的增长不仅发生在 CME

驱动的激波形成之后,在数据分析过程中,本文发现,特别是太阳活动低年期间,冕洞高速流形成的激波到达地球时,ACE/EPAM 探测到的高能质子通量也会有增加,但这种增加通常在低能区间更为明显.

图 3 是 2009 年 1 月 29 日地磁暴前的高能质子的通量和能谱的演化形态. 这是一次典型的由太阳风高速流引发的地磁暴事件,引起这次事件的冕洞已经在日面上稳定存在了 3 个太阳自转周,都引发了地磁场的扰动,受其影响,1 月 29 日,地磁 A_p 指数当日达到了 26, K_p 指数为 7. 从激波到达前后的行星际高能质子的通量和能谱演化形态分析,1 月 28 日开始,310~580 keV 高能质子通量有一个明显的跃升,与 CME 前的特征相反,高能质子的能谱指数由 -2.9 左右下降到 -3.6. 1 月 29 日 12:00UT 前,质子通量略有下降,能谱指数开始恢复,此后,质子通量再次增长,16:00UT 左右达到最大值,此时能谱指数为 -3.0 左右. 30 日 10:00UT 左右,质子通量开始下降,而能谱指数也稳定在 -2.6 左右. 可见,冕洞高速流形成的激波之前高能质子的特征是: (1) 质子通量的上升与激波到达时间相近; (2) 通量

上升而能谱指数变化不大甚至下降. 这说明,冕洞高速流所形成的激波对高能质子的加速作用不大,但可在激波前形成粒子的堆积,而且,以能量较低的粒子居多.

5 结论与讨论

CME 在日冕中运动时,所激发的激波可加速带电粒子,成为认证 CME 的一个显著特征,此后, CME 传播到地球仍需 1—3 天的时间,为预测其地球物理效应提供了一定的提前量,因而,通过分析在行星际所接收到的高能质子的通量和能谱变化特征,能够在地磁暴预报中得到应用.

为了验证 CME 引起的行星际高能质子通量和能谱特征与地磁扰动的相关性,本文对 2004 年的 7 次显著的非重现性磁暴前的 ACE/EPAM 的数据进行了分析,主要针对地磁暴前 P5—P8 能道的能谱指数和 P5 能道的通量变化. 统计结果如表 2 所示. 可以看出,能谱指数的大小与地磁活动的响应没有明确的对应关系,但这些事例中,能谱指数的增加均在 20% 以上,且 P5 能道的通量均超过 $10^3 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{MeV}^{-1}$.

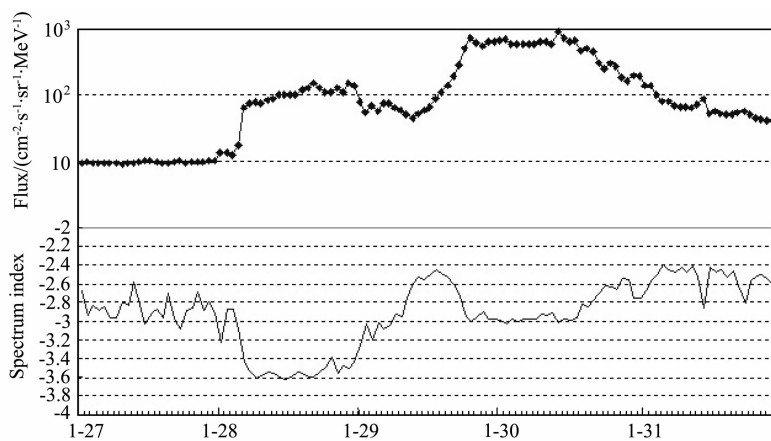


图 3 2009 年 1 月 27—31 日 CME 事件所对应的行星际高能质子通量和能谱指数变化

Fig. 3 The evolution of energetic proton flux and spectrum index by the CME during Jan. 27—31, 2009

表 2 2004 年 ACE/EPAM 质子通量和能谱指数与地磁暴的对应关系

Table 2 The correspondence between proton flux and spectrum index and geomagnetic storm in 2004

日期	能谱指数	背景指数	最大通量 ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{MeV}^{-1}$)	地磁响应时间	A_p	最大 K_p
1 月 20 日	-2.17	-3.1	2.6×10^3	1 月 22 日	62	7
7 月 23 日	-1.55	-2.9	5.6×10^3	7 月 25 日	122	8
7 月 25 日	-1.62	-2.7	2.5×10^4	7 月 27 日	162	9
9 月 14 日	-1.97	-3.2	1.1×10^5	9 月 16 日	20	5
11 月 5 日	-2.24	-2.8	2.3×10^5	11 月 7 日	189	9
11 月 7 日	-1.18	-2.7	1.7×10^4	11 月 9 日	120	8
11 月 10 日	-1.31	-2.6	2.9×10^4	11 月 12 日	30	5

本文对 2004 年能谱指数高出背景 20% 的高能质子通量增加作为 CME 的特征与其后的地磁活动的变化进行了相关分析, 大部分都有较为明显的地磁扰动事件相对应, 但高能质子的特征明显程度, 如能谱指数的大小和 P5 能道的通量等与地磁扰动的强度没有明显的显性关系, 而且, 本文也发现两次高能质子通量的增长没有地磁扰动相对应的事件, 分别发生在 1 月 9 日和 3 月 21 日, 两次事件的能谱指数分别为 -1.25 和 -1.16 , 分析发现, 第一次事件的 P5 能道质子通量最大值为 $50 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{MeV}^{-1}$, 而第二次事件虽然最大质子通量达到 $4 \times 10^5 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{MeV}^{-1}$, 但相关观测显示该事件为一次暗条消失事件所引起, 伴随的是一次偏晕的 CME. 因此, 仅凭行星际高能质子的特征还不能独立地做出地磁暴预报, 但质子的通量和能谱指数可以作为地磁暴预报的重要参数.

参考文献 (References)

- [1] Gosling J T, McComas D J, Phillips J L, et al. Geomagnetic activity associated with earth passage of interplanetary shock disturbances and coronal mass ejections. *J. Geophys. Res.*, 1991, 96(A5): 7831-7839.
- [2] Richardson I G, Cliver E W, Cane H V. Sources of geomagnetic storms for solar minimum and maximum conditions during 1972—2000. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, 28(13): 2569-2572.
- [3] Richardson I G, Cane H V, Cliver E W. Sources of geomagnetic activity during nearly three solar cycles (1972—2000). *J. Geophys. Res.*, 2002, 107: 1187-1200.
- [4] Verma P L, Gupta R S, Chamadia P K. Large geomagnetic storms in relation to CME related shocks and magnetic clouds. *J. Plasma Fusion Res. SERIES*, 2009, 8: 226-229.
- [5] 薛炳森, 龚建村. 利用行星际监测数据进行地磁暴预报. *空间科学学报*, 2006, 26(3): 183-187.
Xue B S, Gong J C. Forecasting Dst index with artificial neural network. *Chinese J. Space Sci.* (in Chinese), 2006, 26(3): 183-187.
- [6] Reams D V. Particle acceleration at the Sun and in the heliosphere. *Space Science Reviews*, 1999, 90(3-4): 413-491.
- [7] Zank G P, Rice W K M, Wu C C. Particle acceleration and coronal mass ejection driven shocks: A theoretical model. *J. Geophys. Res.*, 2000, 105(A11): 25079-25095.
- [8] Li G, Zank G P, Rice W K M. Acceleration and transport of energetic particle. *Adv. Space Res.*, 2003, 32(12): 2597-2602.
- [9] Rice W K M, Zank G P. Particle acceleration at CME driven shock waves. *Adv. Space Res.*, 2003, 31(4): 901-906.
- [10] Aran A, Sanahuja B, Lario D. SOLPENCO: A solar particle engineering code. *Adv. Space Res.*, 2006, 37(6): 1240-1246.
- [11] Lam H L. Enhancement of solar wind low-energy energetic particles as precursor of geomagnetic disturbance in operational geomagnetic forecast. *Adv. Space Res.*, 2009, 43(9): 1299-1313.
- [12] Valtonen E, Laitinen T, Huttunen-Heikinmaa K. Energetic particle signatures of geoeffective coronal mass ejections. *Adv. Space Res.*, 2005, 36(12): 2295-2230.
- [13] Smith Z K, Murtagh W J. Solar wind low-energy energetic ion enhancements: A tool to forecast large geomagnetic storms. *Adv. Space Res.*, 2009, 44(7): 775-788.
- [14] 涂传诒. 日地空间物理学. 北京: 科学出版社, 1988.
Tu C Y. Solar Terrisical Physics (in Chinese). Beijing: Science Press, 1988.

(本文编辑 何 燕)