

# 2000年7月14日与2003年10月28日 太阳质子事件的观测比较分析

乐贵明

( 中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 北京 100081; 中国气象局国家空间天气监测预警中心, 北京 100081; 中国科学院国家天文台, 北京 100012. E-mail: [kjzhxsge@263.net](mailto:kjzhxsge@263.net))

**摘要** 对2000年7月14日(巴士底事件)与2003年10月28日的太阳质子事件进行了对比分析, 尽管2003年10月28日太阳质子事件的峰值流量比巴士底事件的高, 但行星际观测到, 巴士底事件能量大于10和30 MeV质子的最大强度都高于2003年10月28日相应能量的最大强度. 进一步的研究表明, 巴士底事件CME驱动的激波在2000年7月14日12:00~17:00UT时间段内, 可被加速到能量大于10和30 MeV的种子粒子的数量远比2003年10月28日12:00~17:00UT期间的多. 巴士底事件CME的高度达到约14 $R_{\odot}$ 高度时, 其驱动激波加速能量大于100 MeV高能质子的能力达到最大, 而2003年10月28日的CME在约58  $R_{\odot}$ 高度时其驱动激波加速100 MeV质子的能力达到最大, 此时能量大于100 MeV的通量在155 pfu左右, 比巴士底事件能量超过100 MeV高能质子的峰值通量355 pfu要低得多, 说明巴士底事件可被加速到100 MeV以上能量的种子粒子的数量比2003年10月28日的多. 太阳质子事件的峰值流量不仅取决于行星际太阳高能质子的强度, 还取决于CME驱动的行星际激波的速度和太阳风中可被加速的粒子数以及行星际的磁环境. 伴随2003年10月28日ICME在行星际形成的磁鞘捕获了大量的高能质子, 其中含能量超过100 MeV的高能质子.

**关键词** 太阳质子事件 太阳耀斑 CME 行星际激波

强的太阳高能粒子事件对卫星和空间作业的宇航员构成非常严重的威胁, 因此, 强的太阳高能粒子事件是空间天气监测预警中最关注的现象. 2000年7月14日太阳活动事件(空间巴士底事件)是活动区9077的系列活动引发的, 除X5.7级的太阳耀斑外, 还观测到强烈的CME事件, 行星际观测到很强的太阳高能粒子事件, 磁层空间观测到特大地磁暴, 相关的研究也非常多<sup>[1-8]</sup>. 2003年10月28日活动区10486产生了X17.2的大耀斑和强烈的CME事件, 随后观测到强烈的太阳质子事件和特大地磁暴. 对于太阳高能粒子事件, 基本的观点是: 脉冲型太阳高能粒子事件粒子的加速是耀斑加速, 由于脉冲型耀斑的时间短, 因此粒子的加速时间短, 整个事件的持续时间也短; 对于缓变型太阳高能粒子事件, 粒子的加速是由快速CME驱动的激波加速的<sup>[9]</sup>. Reames<sup>[10]</sup>的一个重要观点是, 所有强的太阳高能粒子事件都是缓变型的, 都是快速CME驱动的激波加速粒子引起的, 与耀斑无关. Kallenrode<sup>[11]</sup>最新的论述指出, 除了脉冲型和缓变型质子事件外, 还有混合型质子事件, 即一次太阳高能粒子事件, 既有耀斑加速, 又有CME加

速, 而且纯耀斑加速和纯激波加速只是极端的情况. 对于影响太阳高能粒子事件强度因素的研究, Kahler<sup>[12]</sup>指出供激波加速的初始种子粒子的强度对太阳高能粒子的强度贡献很大. 在激波加速的太阳高能粒子事件中, 在10 MeV/n能量范围以内, Fe/O值在0.1左右, 脉冲型事件Fe/O值可以达到1<sup>[13]</sup>; 在30 MeV/n时, 日冕的Fe/O值约为0.09<sup>[14]</sup>.

过去研究太阳高能粒子的强度采用的是地球同步轨道能量大于10 MeV的质子强度, 因此, 过去研究的实际上是太阳质子事件的峰值强度与CME速度之间的关系. Gopalswamy等人<sup>[15,16]</sup>认为, CME之间的相互作用对太阳高能粒子强度起至关重要作用的研究也是采用太阳质子事件的峰值强度, 没有对两个事件进行具体细致的对比分析. 过去只注意同步轨道上能量大于10 MeV高能质子通量的比较, 没有对两次事件之间的行星际高能质子强度进行过详细的比较分析.

在地球同步轨道上观测到2003年10月28日和空间巴士底事件太阳高能粒子事件能量大于10 MeV的质子强度的极值分别为29500和24000 pfu, 然而

通过对两次太阳高能粒子事件行星际空间的观测对比发现,在能量大于 10 和 30 MeV 两个能段,行星际观测到的巴士底事件太阳高能质子的强度均高于 2003 年 10 月 28 日的太阳高能质子的强度.我们曾指出,地球同步轨道观测的太阳质子事件的峰值强度不能反映行星际太阳高能粒子强度变化的实际情况<sup>[8]</sup>.本文的研究指出,太阳质子事件的峰值强度不仅与行星际太阳高能质子的强度有关,而且还与行星际激波的速度和背景太阳风中可被加速的种子粒子的数量有关.另外,本文还估算了两次事件 CME 达到什么高度时其加速 100 MeV 质子的能力达到最大.最后,简要讨论了供 CME 驱动激波加速的种子粒子数量随 CME 离开太阳距离变化的情况.

### 1 观测数据分析

2000 年 7 月 14 日和 2003 年 10 月 28 日耀斑与 CME 的信息列于表 1.从表 1 可以看出,在耀斑的级别和 CME 的速度方面,前者都低于后者.尽管 2003 年 10 月 28 日太阳质子事件的峰值流量为 29500 pfu,高于 2000 年 7 月 14 日太阳质子事件 24000 pfu 的峰值流量(<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/>).然而,2000 年 7 月 14 日 13:00UT,行星际空间的 ACE 卫星观测到能量大于 10 和 30 MeV 的质子流量都达到了饱和,即分别超过 10000 和 7000 pfu ([http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/sp\\_phys/](http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/sp_phys/)).2003 年 10 月 28 日 15:00UT,

ACE 卫星观测到能量大于 10 和 30 MeV 的高能质子流量分别为 3559 和 1445 pfu,远低于巴士底事件在 2000 年 7 月 14 日 13:00UT 的行星际同一能档的高能质子的强度(图 1).对于巴士底事件,CME 在 10:54UT 达到的高度为 5.41R<sub>⊙</sub> ([http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/)),经过两个多小时,能量大于 10 和 30 MeV 的质子的流量就达到饱和,说明在这两个多小时中可被 CME 驱动的激波加速到能量超过 10 和 30 MeV 的背景质子数量都非常多.对于 2003 年 10 月 28 日的太阳高能粒子事件,从 CME 在 11:30UT 到达 5.84R<sub>⊙</sub> 高度开始到 15:00UT 的 3 个多小时里([http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/)),可被 CME 驱动的激波加速的背景粒子比巴士底事件的少得多.因此,CME 的速度和耀斑的级别并不能完全决定行星际太阳高能粒子的强度,必须考虑另一个非常重要的因素,即可被加速的背景粒子的数量(也可称之为种子粒子的数量).

对于巴士底事件,激波在 2000 年 7 月 15 日到达 1 AU 附近时的速度约为 1100 km/s ([http://pwg.gsfc.nasa.gov/scripts/istp-events/000714-17/000714-17wi\\_mfi-swe.gif](http://pwg.gsfc.nasa.gov/scripts/istp-events/000714-17/000714-17wi_mfi-swe.gif)),因此,在 2000 年 7 月 14 日 17:00UT CME 速度与起始速度相比变化不大,粒子的强度出现明显的下降,一定是由于可被加速的背景粒子的数量出现大幅度的下降,说明对于这次高能粒子事件,可被加速的背景粒子的数量随离开太阳距离的变化出现很大的变化.对 2003 年 10 月 28 日的太阳高能粒

表 1 2000 年 7 月 14 日与 2003 年 10 月 28 日太阳质子事件的部分信息

时间	活动区	日面位置	耀斑	CME 初始速度	CME 在 1 AU 附近的速度	太阳质子事件峰值流量
2000-07-14	9077	N22W07	X5.7	1671 km/s	约 1100 km/s	24000 pfu
2003-10-28	10486	S16E08	X17.2	2429 km/s	约 2000 km/s	29500 pfu

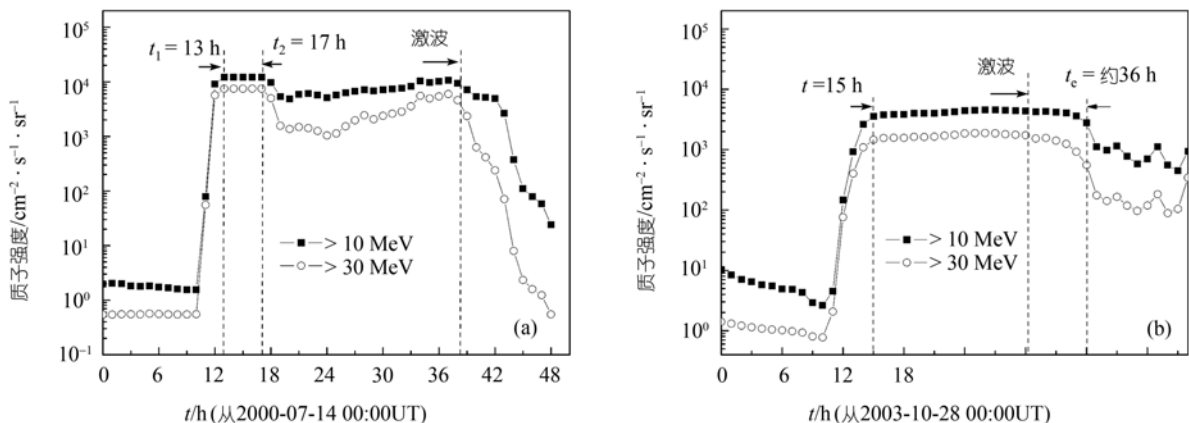


图 1 行星际 ACE 卫星观测的 2000 年 7 月 14 日(a)与 2003 年 10 月 28 日(b)太阳高能质子的强度

子事件, 行星际观测到能量大于 10 和 30 MeV 的太阳高能质子的强度变化并不大, 由于激波在 1 AU 附近的速度还超过 2000 km/s<sup>[17]</sup>, 所以对于 2003 年 10 月 28 日的 CME 事件, CME 在行星际空间传播的速度变化不大. 由于激波速度在行星际空间的变化不大, 所以行星际观测到的太阳高能粒子强度变化不大的现象, 反映的是可被加速的背景粒子的数量没有出现大幅度的变化.

尽管巴士底事件行星际太阳高能质子的最大强度比 2003 年 10 月 28 日强得多, 而且在激波到达磁层附近时, 巴士底事件行星际观测到能量大于 10 MeV 的高能质子的强度依旧高于 2003 年 10 月 28 日该能量的粒子强度, 但 2003 年 10 月 28 日的太阳质子事件强度(在同步轨道上能量大于 10 MeV 的质子的峰值流量)比巴士底事件太阳质子事件的强度要强, 我们认为很重要的一个原因是 2003 年 10 月 28 日 CME 驱动的行星际激波的速度比巴士底事件的大. 因为 10 MeV 的高能质子到达地球同步轨道后会停留一些时间, 行星际激波的速度大, 其“发送”高能粒子到达地球同步轨道的速率也越大, 从而使同步轨道的高能质子堆积得越来越多. 因此, 太阳高能粒子在磁层内的强度不仅与行星际高能粒子的强度有关, 还与 CME 驱动的行星际激波的速度有关.

我们估算了 CME 到达多高的度会使 CME 加速能量超过 100 MeV 的质子数达到最大. 行星际 ACE 卫星对太阳高能质子监测的高能端只有能量分别大于 10 和 30 MeV 能量通道, 没有更高能量的监测. 我们对巴士底事件的分析情况表明, 行星际观测到的能量分别大于 10 和 30 MeV 的高能质子的积分通量下降时, 地球同步轨道却观测到质子积分通量在上升, 说明地球同步轨道可以准捕获 10 和 30 MeV 的高能质子, 所以, 同步轨道探测的能量大于 10 和 30 MeV 高能质子通量变化的情况不能真实反映行星际高能粒子强度的变化情况. 对于能量大于 100 MeV 的高能质子, 地球同步轨道粒子强度的变化基本上能反映行星际激波对该能量粒子加速的情况. 地球同步轨道的能量大于 100 MeV 的高能质子的积分通量在一定时间内达到局部极大值, 反映的是行星际激波到达一定高度后其对 100 MeV 以上的高能质子的加速能力达到极大值. 对于巴士底事件, 在 2000 年 7 月 14 日的 12:00UT 左右, 能量大于 100 MeV 的高能质子就几乎达到其流量的极大值; 对于 2003 年

10 月 28 日的太阳高能粒子事件, 在约 16:00UT, 能量大于 100 MeV 的高能质子就几乎达到其流量的极大值. 依据 CME 速度变化的情况, 对于巴士底事件, 我们估算出 CME 达到约 14 $R_{\odot}$  高度时其加速 100 MeV 质子的能力达到最大, 此时能量大于 100 MeV 的通量在 355 pfu 左右. 对于 2003 年 10 月 28 日的太阳质子事件, 我们估算出当 CME 达到约 58 $R_{\odot}$  高度时其加速 100 MeV 质子的能力达到最大, 此时能量大于 100 MeV 的通量在 155 pfu 左右, 比巴士底事件的强度要低得多.

无论是能量大于 100 MeV 的能量很高的质子, 还是能量大于 10 MeV 的高能质子, 在行星际空间巴士底事件高能质子的强度都比 2003 年 10 月 28 日的质子事件达到极大值所需的时间短而且通量更大. 由此, 我们可以推断在离日冕不远的地方(14 $R_{\odot}$  以内), 种子粒子的数量与能谱在两个事件中有很大的差异. 我们还注意到, 对于 2003 年 10 月 28 日的太阳高能粒子事件, 激波到达磁层后行星际观测到的能量大于 10 MeV 的高能粒子的通量还持续了约 6 h(图 1). 同时, 从图 2 中还可以看出, 激波通过磁层后, 地球同步轨道观测到的几个能道(含大于 100 MeV 能道)的太阳高能粒子的强度也没有出现大幅度的下降, 因此, 激波后面的物质肯定捕获了大量的质子. 在分析巴士底事件后, 我们注意到激波后面的磁鞘区捕获了大量的质子. 为此, 我们给出自 2003 年 10 月 29 日时刻起 ACE 卫星观测到的行星际磁场的的数据 ([http://nssdc.gsfc.nasa.gov/ftp/helper/ace\\_merge.htm](http://nssdc.gsfc.nasa.gov/ftp/helper/ace_merge.htm)), 如图 3 所示. 由于激波是 2003 年 10 月 29 日 06:11UT 到达磁层的, 而 ACE 卫星与地球的距离约为  $1.5 \times 10^6$  km, 因此, 激波通过 ACE 卫星所在的位置时间应该在 06:00UT 左右(图 3 中的激波). 由于磁云为强磁场且有旋转的磁结构, 因此我们给出一个估计的磁鞘区域(见图 3), 显然磁鞘区域约有超过 5 h 的长度, 这个时间长度与图 2 中 ACE 卫星激波与  $t_0$  之间的长度吻合得非常好( $t_0$  对应的是 ACE 卫星观测的能量大于 10 和 30 MeV 的高能质子强度出现明显下降的时刻), 这说明磁鞘区确实捕获了大量的质子, 而且磁鞘中含能量超过 100 MeV 的高能质子.

## 2 结论

2000 年 7 月 14 日行星际观测的能量大于 10 和 30 MeV 质子的最大强度都远高于 2003 年 10 月 28 日相应能量的最大强度. 对于巴士底事件, 地球同步



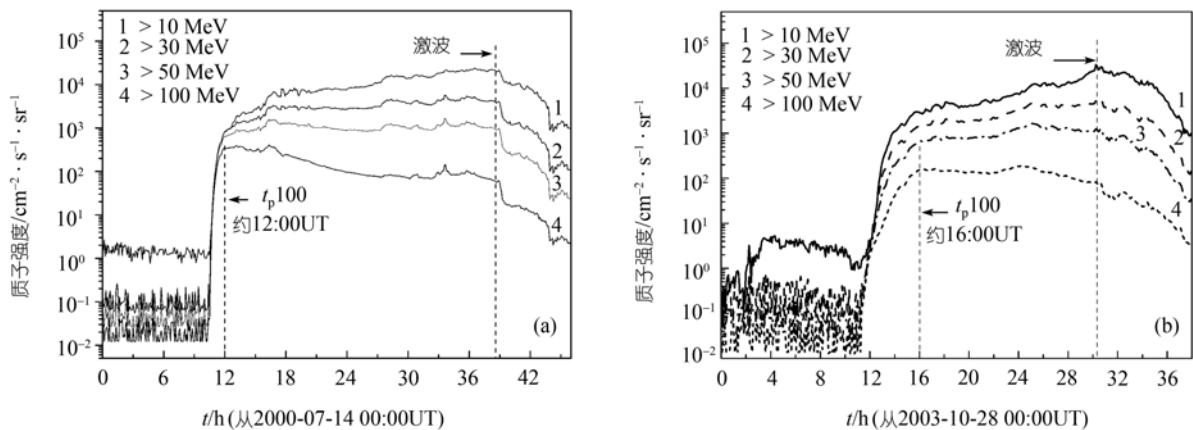


图 2 地球同步轨道 GOES8 卫星观测到的巴士底太阳高能质子事件(a)与 GOES10 卫星观测到的 2003 年 10 月 28 日太阳高能质子事件(b)的强度的几个能段的积分谱  $t_p$ 对应的是能量大于 100 MeV 的质子通量达到峰值的时间

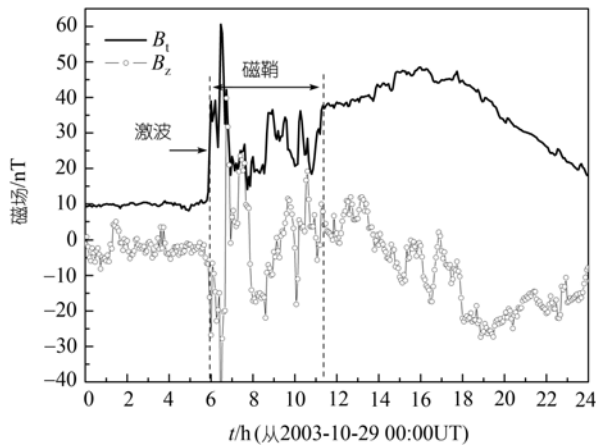


图 3 ACE 卫星观测的伴随 2003 年 10 月 28 日 CME 在行星际形成的磁鞘

轨道观测到的能量大于 100 MeV 的高能质子的最大强度远大于 2003 年 10 月 28 日. 同步轨道观测的能量大于 10 和 30 MeV 质子强度的变化不能反映行星际太阳高能粒子强度的实际情况. 地球同步轨道观测的太阳质子事件的峰值不仅与行星际太阳高能粒子的强度有关, 还与行星际激波的速度和行星际的磁环境以及行星际背景太阳风中可被加速的种子粒子的数量有关.

研究表明, 2000 年 7 月 14 日 12:00~17:00UT 期间可被加速到能量大于 10, 30 和 100 MeV 的背景粒子(即种子粒子)的数量, 远大于 2003 年 10 月 28 日 12:00~17:00UT 期间可被加速到相同能量范围背景粒子的数量. 巴士底事件在从日冕到离日冕约 22R<sub>☉</sub>的

空间可被加速到能量超过 100 MeV 的种子粒子的数量比 2003 年 10 月 28 日从日冕到离日冕约 61R<sub>☉</sub>附近多. 根据观测, 巴士底事件在 3.2~5 和 30~40 MeV/n 两个能段的 Fe/O 值分别为 3.97 和 0.57, 而 2003 年 10 月 28 日的高能粒子事件中在 3.2~5 和 30~40 MeV/n 两个能段的 Fe/O 值分别为 4.63 和 0.068<sup>[18]</sup>, 其中在 30~40 MeV/n 能段的 0.068 与日冕的丰度值相同, 所以, 巴士底事件耀斑产生的能量较高的种子粒子, 比 2003 年 10 月 28 日耀斑产生的较高能量的种子粒子要多得多, 这可能是巴士底事件能量超过 100 MeV 粒子强度高的重要原因. 此外, 太阳高能粒子强度还可能与活动区周围日冕的其他环境有关. 对于巴士底事件, 随着 CME 距太阳距离的不同, 种子粒子的数量出现很大的变化, 而 2003 年 10 月 28 日事件种子粒子的数量随 CME 距太阳距离的变化没有出现大幅度的变化. 本文的研究表明, 同步轨道能量大于 10 MeV 高能质子的积分强度不能反映行星际能量大于 10 MeV 高能质子的积分强度, 要反映行星际高能质子强度的情况以及行星际激波对粒子加速的情况, 必须采用行星际观测的高能质子的数据. 与巴士底事件类似, 本文研究发现, 伴随 2003 年 10 月 28 日 ICME 形成的磁鞘区也捕获了大量的高能质子, 被捕获的高能质子中含能量大于 100 MeV 的高能质子.

致谢 本工作受国家自然科学基金面上项目(批准号: 10373017)和重点项目(批准号: 10333040)资助.

## 参 考 文 献

- 1 Reames D V, Ng C K, Tylka A J. Heavy ion abundances and spectra and the large gradual solar energetic particle event of 2000 July 14. *Astrophys J*, 2001, 548: L233—L236[DOI]
- 2 Bieber J W, Droge W, Evenson P A, et al. Energetic particle observations during the 2000 July 14 solar event. *Astrophys J*, 2002, 567: 622—634[DOI]
- 3 Tylka A J, Cohen C M S, Dietrich W F. Evidence for remnant flare suprathermals in the source population of solar energetic particles in the 2000 Bastille Day event. *Astrophys J*, 2001, 558: L59—L63[DOI]
- 4 Maia D, Pick M, Hawkins III S E, et al. 14 July 2000, a near-global coronal event and its association with energetic electron events detected in the interplanetary medium. *Solar Phys*, 2001, 204: 199—212
- 5 Mäkelä P, Torsti J. Energetic particle fluxes during the Bastille Day solar eruption. *Solar Phys*, 2001, 204: 213—225[DOI]
- 6 Raeder J, Wang Y L. Global simulation of magnetospheric space weather effects of the Bastille Day storm. *Solar Phys*, 2001, 204: 323—327[DOI]
- 7 Tang Y H, Dai Y. Origin of coronal and interplanetary shock and particle acceleration of a flare/CME event. *Adv Space Res*, 2003, 32: 2609—2612
- 8 Le G M, Han Y B. Analysis of the acceleration process of SEPs by an interplanetary shock for Bastille Day event. In: Dere K, Wang J X, Yan Y H, eds. *Proceeding of the 226 Symposium of the International Astronomical Union, Beijing, 2004*. Cambridge City: Cambridge University Press, 2005. 346—349
- 9 Reames D V. Particle acceleration at the Sun and in the heliosphere. *Space Sci Rev*, 1999, 90: 413—491[DOI]
- 10 Reames D V. Magnetic topology of impulsive and gradual solar energetic particle events. *Astrophys J*, 2002, 571: L63—L66[DOI]
- 11 Kallenrode M B. Current view on impulsive and gradual solar energetic events. *J Phys G: Nucl Part Phys*, 2003, 9: 965—981[DOI]
- 12 Kahler S W. The correlation between solar energetic particle peak intensities and speeds of coronal mass ejections: Effects of ambient particle intensities and energy spectra. *J Geophys Res*, 2001, 106: 20947—20956[DOI]
- 13 Tylka A J, Boberg P R, Cohen C M S, et al. Flare- and shock-accelerated energetic particles in the solar events of 2001 April 14 and 15. *Astrophys J*, 2002, 581: L119—L123[DOI]
- 14 Cane H V, von Rosenvinge T T, Cohen C M S, et al. Two components in major solar particle events. *Geophys Res Lett*, 2003, 30: SEP5-1
- 15 Gopalswamy N, Yashiro S, Krucker S, et al. CME interaction and the intensity of solar energetic particle events. In: Dere K P, Wang J, Yan Y, eds. *Proceeding of the 226 Symposium of the International Astronomical Union, Beijing, 2004*. Cambridge City: Cambridge University Press, 2005. 367—373
- 16 Gopalswamy N, Yashiro S, Michalek G, et al. Interacting coronal mass ejections and solar energetic particles. *Astrophys J*, 2002, 572: L103—L107[DOI]
- 17 Skoug R M, Gosling J T, Steinberg J T, et al. Extremely high speed solar wind: 29-30 October 2003. *J Geophys Res*, 2004, 109: A09102[DOI]
- 18 Tylka A J, Cohen C M S, Dietrich W F, et al. Shock geometry, seed populations, and the origin of variable elemental composition at high energies in large gradual solar particle events. *Astrophys J*, 2005, 625: 474—495[DOI]

(2005-10-26 收稿, 2006-04-05 接受)