

申成龙,汪毓明,叶品中等. 冕洞阻碍太阳高能粒子事件形成的典型事例分析. 地球物理学报, 2006, 49(3):629~635  
Shen C.L., Wang Y.M., Ye P.Z., et al. Analysis of typical events of coronal holes against formation of solar energetic particles. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(3):629~635

# 冕洞阻碍太阳高能粒子事件形成的典型事例分析

申成龙<sup>1,2</sup>,汪毓明<sup>1,2</sup>,叶品中<sup>2,3</sup>,王 水<sup>1,2</sup>

1 中国科学院基础等离子体物理重点实验室,合肥 230026

2 中国科学技术大学地球和空间科学学院,合肥 230026

3 中国科学院空间天气学重点实验室,北京 100080

**摘 要** 通过对比两次快速晕状日冕物质抛射(CME)事件,分析相应的日面和行星际的观测资料,发现源区距离冕洞较远的CME引起了极强的太阳高能粒子(Solar Energetic Particle,SEP)事件,而源区非常靠近冕洞的CME则没有引起大的SEP事件.该结果表明,冕洞可能对CME形成SEP事件有阻碍作用.继而分析1997~2003年所有爆发在冕洞边缘的快速晕状CME,发现源区离冕洞距离小于 $0.2R_s$ (太阳半径)的CME均没有引起大的SEP事件.从而进一步证实了冕洞可能对邻近CME形成大SEP事件有影响,它阻碍SEP事件的形成.最后讨论了冕洞阻碍CME形成大SEP事件的可能原因.

**关键词** 冕洞,日冕物质抛射,太阳高能粒子事件,空间天气,激波

**文章编号** 0001-5733(2006)03-0629-07 **中图分类号** P353 **收稿日期** 2005-04-30,2006-01-16收修定稿

## Analysis of typical events of coronal holes against formation of solar energetic particles

SHEN Cheng-Long<sup>1,2</sup>, WANG Yur-Ming<sup>1,2</sup>, YE Pin-Zhong<sup>2,3</sup>, WANG Shui<sup>1,2</sup>

1 Key Laboratory of Basic Plasma Physics, University of Science and Technology of China, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026, China

2 School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

3 Key Laboratory for Space Weather, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

**Abstract** By comparing and analyzing the solar and interplanetary data of two typical fast halo Coronal Mass Ejections (CMEs), we have found that the event far away from Coronal Holes (CHs) caused a great Solar Energetic Particle (SEP) event, but the event very close to CHs did not cause a major SEP event. This result reveals that coronal holes may suppress the production of SEPs. Then by investigating all fast halo CMEs close to CHs from 1997 to 2003, it is found that none of the CMEs produced a major SEP event when the surface distance between the CME and coronal holes is less than  $0.2R_s$ . The result further proves that the CHs may have effects against the CME producing SEPs. The reasons why CHs affect CMEs in SEP acceleration are briefly addressed finally.

**Key words** Coronal hole, Coronal Mass Ejection (CME), Solar Energetic Particle (SEP), Space weather, Shock

**基金项目** 国家自然科学基金项目(40525014,40574063,40404014,40336052),中国科学院创新基金(KZCX3-SW-144和启动基金),2004年度教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-04-0578),以及中国科学院空间天气学重点实验室开放课题资助.

**作者简介** 申成龙,男,1981年生,2003年毕业于中国科学技术大学地球和空间科学系.现在中国科学技术大学攻读博士学位,主要研究太阳高能粒子事件. E-mail: ymwang@ustc.edu.cn 或 clshen@mail.ustc.edu.cn

## 1 引言

太阳高能粒子 (Solar Energetic Particle, SEP) 事件对空间天气有重要的影响. 国际空间环境组织 (International Space Environment Service, ISES) 定义 SEP 事件为能量大于 10MeV 的质子的积分通量峰值大于  $10\text{pfu}(\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{ster}^{-1})$  的事件, 而广义认为观测到质子通量增加均为 SEP 事件. 参照 ISES 的标准, 我们定义大 SEP 事件为能量大于 10MeV 的质子的积分通量峰值大于  $10\text{pfu}$  的事件. SEP 事件可以分为脉冲 (Impulsive) 事件和渐进 (Gradual) 事件两类<sup>[1,2]</sup>. 脉冲事件是由耀斑过程中磁能通过磁场重联快速释放而加速粒子形成的, 该类事件持续时间短, 强度小; 渐进事件则是由快速 CME 驱动的激波加速粒子形成的, 其持续时间长, 强度大. 渐进 SEP 事件能否形成以及形成的强度, 主要依赖于 CME 驱动的激波的强度, 以及粒子能否被激波捕获而反复加速<sup>[2]</sup>.

渐进 SEP 事件的强度与 CME 速度正相关, 但是其离散仍然很大. 对于相同速度的 CME, 其产生 SEP 事件的强度可以相差三四个量级<sup>[3]</sup>. 这种显著的离散不仅是因为 CME 速度不能真实反映激波的速度和强度, 还因为许多其他因素对 SEP 事件能否形成及形成的强度有影响. 这些可能的影响因素包括

CME 源区的日面经度、CME 宽度、CME 相互作用、背景太阳风速度、种子粒子的注入、能量谱的变化、激波处的磁场位形等等<sup>[4~9]</sup>. 本文探讨冕洞对 CME 形成 SEP 事件的可能影响.

冕洞最初是在 X 射线频段 ( $\lambda = 3 \sim 60\text{\AA}$ ) 观测到的日冕大尺度结构, 其亮度和等离子体密度均低于背景日冕, 温度  $T \sim 10^6\text{K}$ . 冕洞具有开放的磁场, 是太阳风高速流的源区<sup>[10,11]</sup>. 在冕洞产生的太阳风高速流中, MHD 快波以及背景太阳风速度较大, 高强度的激波很难形成; 同时, 冕洞具有的开场结构以及较直的磁力线位形也使得带电粒子容易逃逸. 由于以上两个特征, 冕洞可能会阻碍邻近 CME 引起 SEP 事件.

## 2 冕洞的确定

现在常用的冕洞研究资料来自 Kitt Peak 天文台对 He 10830 $\text{\AA}$  谱线的观测, 称之为 Kitt Peak 冕洞, 一般认为其反映的是冕洞底部的情况<sup>[11]</sup>. 冕洞在太阳表面附近 ( $< 2R_s$ ) 随着高度增大而迅速膨胀<sup>[12~14]</sup>, 故较高高度观测到的冕洞会略微不同于 Kitt Peak 冕洞. 由于激波加速粒子最有效的高度在  $3R_s$  附近<sup>[15]</sup>, 因此, 利用更高高度的观测资料, 能够更好地研究冕洞对 SEP 事件形成的影响.

SOHO/EIT 和 Yohkoh/SXT 均提供了较高高度处

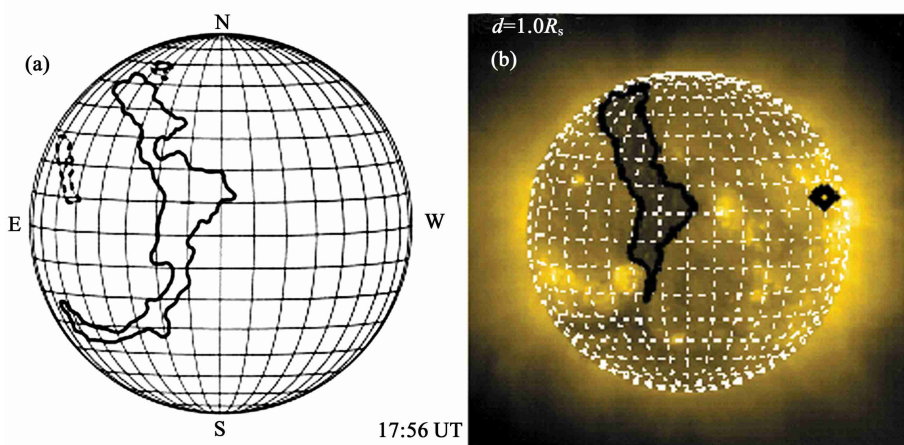


图 1 2000 年 11 月 8 日 Kitt Peak 冕洞图 (a) 及 EIT 284 $\text{\AA}$  冕洞轮廓 (b)  
Kitt Peak 冕洞资料来源于 Solar-Geophysical Data (SGD, <http://sgd.ngdc.noaa.gov>),  
(b) 中黑线所围区域即冕洞, 小黑圈标示 CME 源区位置.

Fig. 1 Outline diagram of Kitt Peak CH and EIT 284 $\text{\AA}$  CH for Nov. 8, 2000  
The region enclosed by black line is CH, and the small black circle in (b) indicates the source region of CME. The Kitt Peak CH data are derived from Solar-Geophysical Data.

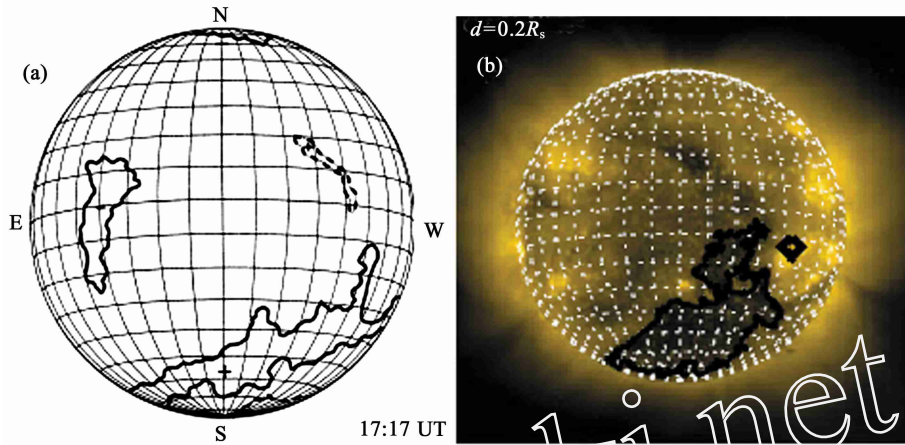


图2 2003年3月18日 Kitt Peak 冕洞(a)和 EIT 284Å 日冕及冕洞轮廓图(b) 中 小 黑 圈 标 示 CME 源 区 位 置。

Fig. 2 Outline diagram of Kitt Peak CH and EIT 284Å CH for Mar. 18, 2003  
The region enclosed by black line is CH, and the small black circle in (b) indicated the source region of CME.

的日冕观测资料. SOHO/EIT对 Fe IX/X (171Å, 观测温度:  $1.3 \times 10^6$  K), Fe XII (195Å, 观测温度:  $1.6 \times 10^6$  K), Fe XV (284Å, 观测温度:  $2.0 \times 10^6$  K), He II (304Å, 观测温度:  $8.0 \times 10^4$  K) 4 个波段进行观测<sup>[16]</sup>. Yohkoh/SXT 观测的能量范围为 0.25 ~ 4.0keV. 由于 Yohkoh/SXT 于 2001 年停止使用, 所以在我们的研究区间 (1997 ~ 2003) 中, 只有 EIT 能提供完整的资料. 而在 EIT 的 4 个波段中, EIT 284Å 观测高度最高, 故选取 EIT 284Å 的资料进行分析, EIT 284Å 图上的暗区即为冕洞. 图 1 和图 2 分别给出了 2000 年 11 月 8 日事件和 2003 年 3 月 18 日事件的 Kitt Peak 冕洞图和 EIT 284Å 日冕及冕洞轮廓图. 通过比较可以看出, EIT 284Å 的冕洞与 Kitt Peak 冕洞基本一致.

### 3 两次事件的比较

表 1 列出了两次典型快速晕状 CME 事件的爆

发时间、角宽度、速度、源区位置以及伴随耀斑等情况. 图 1b 和图 2b 分别给出了事件 A 和 B 的 EIT 284Å 日冕以及冕洞轮廓图.

图 3 显示了 2000 年 11 月 8 ~ 11 日 1AU 处 ACE 卫星记录的行星际磁场 B 和其南向分量  $B_z$ , 太阳风速度  $v$ , 低能粒子通量  $Q_l$ , 高能粒子通量  $Q_h$  以及 GOES 卫星观测到的质子的积分通量  $Q_i$  等资料. 从图 3 中的  $Q_l, Q_h, Q_i$  可以看到, 对于事件 A, CME 爆发时 ACE 卫星和 GOES 卫星观测到的各种能量段的粒子通量均急速上升了几个数量级, 并在随后二天内一直保持着很高的值. GOES 卫星观测到的能量大于 10MeV 的质子积分通量的峰值为 14800pfu, 为特强 SEP 事件. 一个非常强的激波于 2000 年 11 月 10 日 06:00UT 左右到达 1AU, 激波到达后, 引起了 20nT 以上的磁场跳变. 激波的平均传输速度大于  $1300\text{km s}^{-1}$ .

图 4 给出了 2003 年 3 月 18 ~ 21 日的 ACE 卫星

表 1 两次典型 CME 事件以及伴随耀斑情况列表  
Table 1 Two typical CME events and associated flares

编号	日期(UT)	CME <sup>a</sup>		位置 <sup>b</sup>	耀斑 <sup>c</sup>	
		宽度	速度 ( $\text{km s}^{-1}$ )		时间 <sup>d</sup> (UT)	级别
A	2000 - 11 - 08 23:06	> 170°	1738	N14W63	23:28	M7.4
B	2003 - 03 - 18 12:30	209°	1601	S13W48	12:08	X1.5

注: CME<sup>a</sup> 资料来自 CME CATALOG ([http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/)); 位置<sup>b</sup> 通过 EIT 195Å 资料确定; 耀斑<sup>c</sup> 资料来自 NOAA; 时间<sup>d</sup> 为耀斑峰值时间.

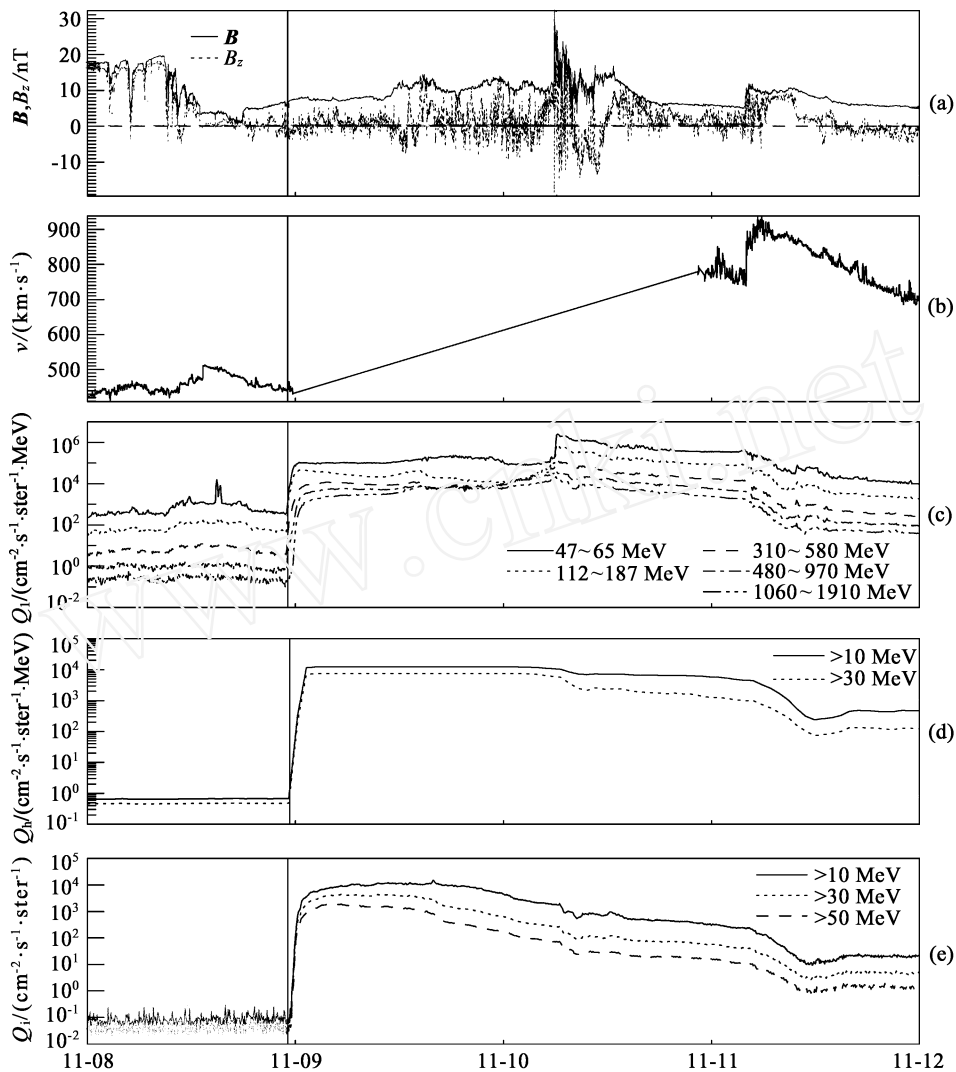


图3 2000年11月8~11日的ACE和GOES卫星观测资料  
图中竖线表示CME爆发的时间。

Fig. 3 Observations of ACE and GOES spacecraft during Nov. 8 - 11, 2000

The solid vertical line denotes the burst time of CME.

及GOES卫星资料。从图4可以看出,在事件B中,CME爆发后,低能粒子通量出现长时间较大幅度的渐变上升,这表明存在激波对粒子的加速过程。但高能粒子通量仅在CME爆发后很短一段时间内有上升迹象,上升幅度很小,表明在这次激波加速过程中高能粒子没有大量形成。GOES卫星观测到的能量大于10MeV的质子积分通量的峰值仅为0.84pfu,根据定义,这仅仅是一次小SEP事件。在2003年3月20日05:00UT左右观测到激波,激波处的磁场跳变很小,但激波的平均传输速度很快,大于 $1000\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

以上两次事件均为源自日面西边的快速晕状CME事件,伴随着M5.0级以上耀斑,在1AU处均观

测到了传输速度非常快的激波,但两次CME所引起的SEP事件的强度相差4个数量级,显然这是因为其他因素影响了SEP事件的形成。分析两次事件的EIT 284Å日冕及冕洞轮廓图(图1b,图2b)可以看到,这两次事件爆发时日面均存在着从极区延伸至赤道的大冕洞。但引起了特强SEP事件的CME事件A,源区远离冕洞,其到冕洞的日面最近距离为 $1R_s$ ,而没有引起大SEP事件的CME事件B,源区非常靠近冕洞,距离冕洞的日面最近距离仅为 $0.2R_s$ 。我们认为可能因为CME源区距离冕洞的远近引起了这两次快速晕状CME形成SEP事件的差别,即冕洞可能对邻近的CME形成SEP事件有阻碍作用。

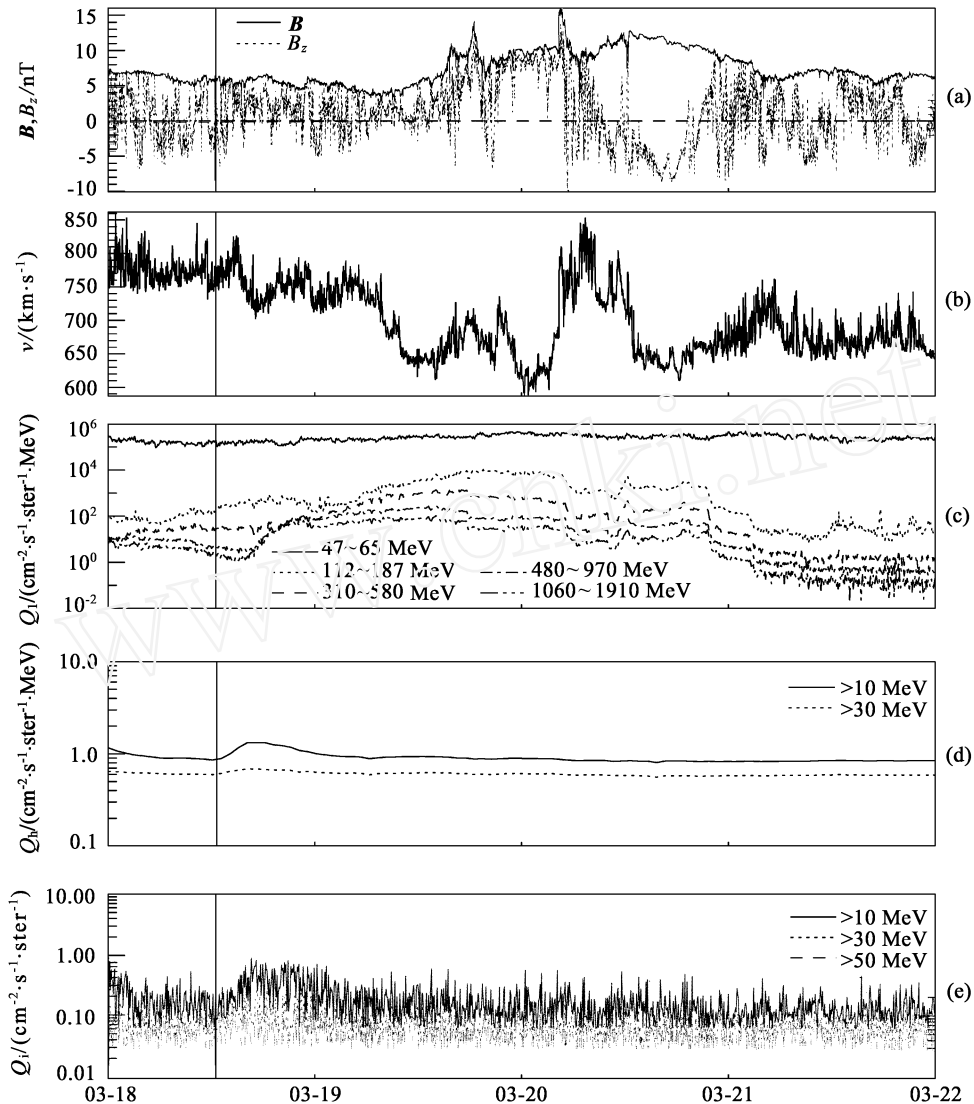


图 4 2003 年 3 月 18~21 日的 ACE 和 GOES 卫星观测资料

图中竖线表示 CME 爆发的时间。

Fig. 4 Observations of ACE and GOES spacecraft during Mar. 18 - 21, 2003

The solid vertical line indicates the burst time of CME.

## 4 其他事件

为了进一步讨论冕洞对 CME 形成 SEP 事件的影响,分析了 1997~2003 年间冕洞边缘的快速晕状 CME 事件.其中冕洞边缘事件定义为 CME 源区离冕洞距离小于  $0.2R_s$  的事件,快速指 CME 抛射速度大于  $1000\text{ km s}^{-1}$ ,晕状指 CME 角宽度大于  $130^\circ$ .如表 2 所列,共有 6 次这样的事件.图 5 从左至右分别给出了事件 1, 2, 3 的 EIT  $284\text{ \AA}$  日冕及冕洞轮廓图.对于事件 2 (2000 年 6 月 28 日事件),其爆发源区

(N24W84) 在日面边缘位置,由于边缘效应的存在, CME 源区附近的冕洞不能被准确观测,故选取了 3 天前 (2000 年 6 月 25 日) 的 EIT  $284\text{ \AA}$  资料进行分析, CME 源区和冕洞的距离大致一致.事件 4 为第 3 节分析的事件 B,而事件 5, 6 与事件 4 为发生在同一活动区且靠近同一冕洞的事件,故认为其日冕及冕洞情况相同,均如图 2 所示.一般认为,受行星际磁场的影响,发生在日面中心子午线附近及西边的 CME 较容易引起 SEP 事件.表 2 中的 6 次 CME 事件的源区分布在  $20^\circ\text{E}$  和  $90^\circ\text{W}$  之间,故均容易引起 SEP 事件.

表 2 1997~2003 年间离冕洞小于  $0.2 R_s$  的快速晕状 CME 列表  
Table 2 Fast halo CMEs near big CHs ( $d < 0.2 R_s$ ) during 1997~2003

编号	日期 (UT)	CME <sup>a</sup>				$d^c$	$I_p^d$ (pfu)
		宽度	速度 ( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	位置 <sup>b</sup>			
1	2000 - 02 - 08 09:30	360°	1079	N27E15	0.1		
2	2000 - 06 - 28 19:31	> 134°	1198	N24W84	0.1		
3	2000 - 09 - 16 05:18	360°	1215	N13W06	0.2	7.14	
4	2003 - 03 - 18 12:30	360°	1601	S13W48	0.2	0.84	
5	2003 - 03 - 18 13:54	360°	1042	S13W48	0.2	?	
6	2003 - 03 - 19 02:30	360°	1342	S13W48	0.2		

注: CME<sup>a</sup> 资料来自 CME CATALOG ([http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/)); 位置<sup>b</sup> 通过 EIT 195 Å 资料确定;  $d^c$  为 CME 位置到冕洞的最近日面距离;  $I_p^d$  为 COES 卫星观测到的能量大于 10MeV 的质子积分通量的峰值。

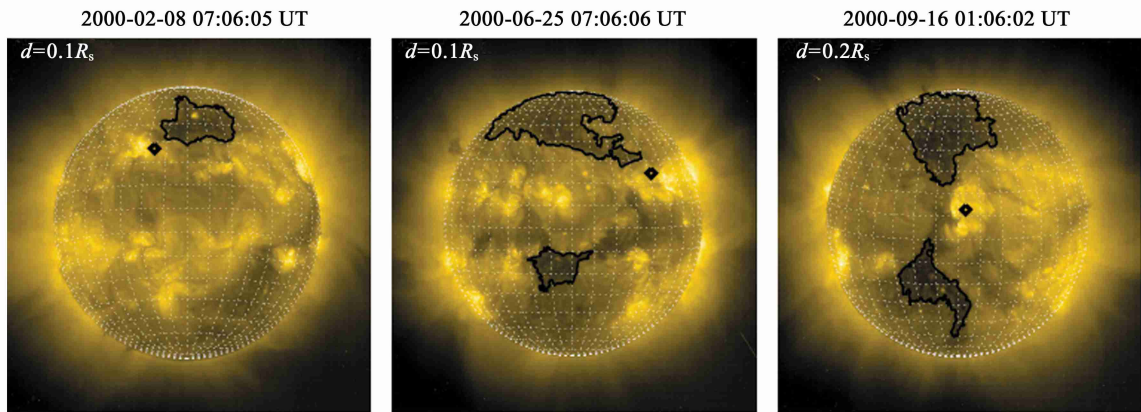


图 5 表 2 中事件 1, 2, 3 的 EIT 284 Å 日冕及冕洞轮廓图

Fig. 5 Outline diagrams of EIT 284 Å coronal and coronal holes for the events in Table 2

然而,分析这 6 次 CME 发生后三四天内的 COES 卫星观测资料,均没有引起大 SEP 事件. 其中,在事件 3 和事件 4 中 COES 卫星观测到能量大于 10MeV 的质子积分通量有上升迹象,但其峰值均小于 10pfu,分别为 7.14pfu 和 0.84pfu. 由于事件 5 爆发时,事件 4 所引起的质子积分通量仍在上升,故无法判断它是否引起了质子积分通量的上升,但可以肯定它没有造成大的 SEP 事件. 这一结果进一步证明了第 3 节中给出的观点,即冕洞可能影响了邻近 CME 加速 SEP 的过程,它阻碍了 SEP 事件的形成. 我们增大了选取冕洞边缘 CME 事件的距离阈值,发现对于其他阈值(如  $0.3 R_s$ ,  $0.4 R_s$ )所选取的 CME 事件中,存在引起大的 SEP 事件的反例,因此,  $0.2 R_s$  似乎是冕洞阻碍 SEP 事件形成的最有效的作用范围.

尽管在这 7 年中只有 6 次爆发在冕洞边缘的快速晕状 CME 事件,但并不意味着爆发在大冕洞边缘的 CME 事件很少. 若放宽对 CME 速度和角宽度的限制条件,符合条件的 CME 将远不止这些. 但 SEP

事件的形成受很多因素的制约,为了分析和突出冕洞对 CME 形成 SEP 的影响,需要排除其他因素(如 CME 速度过慢,宽度过窄等等)的干扰. 因此分析快速晕状 CME 能够更加突出冕洞对其形成 SEP 事件的影响,而不被其他因素掩盖,所以在分析中只选取了快速的晕状 CME 事件.

## 5 小结和讨论

通过分析 1997~2003 年中的所有冕洞边缘的快速晕状 CME 事件,发现距离冕洞边缘的日面最近距离小于  $0.2 R_s$  的 CME 均没有引起大 SEP 事件. 这表明冕洞可能对邻近 CME 形成大 SEP 事件有阻碍作用,其作用范围可能为  $0.2 R_s$ .

我们认为冕洞之所以存在对 SEP 事件形成的可能阻碍作用,有以下两个最主要的原因:(1)冕洞产生的太阳风高速流中,由于其 MHD 快波以及背景太阳风速度较大,强度大的激波很难形成. 一般来说,CME 驱动的激波要比 CME 本身宽得多,因此其

驱动的激波有很大部分位于高速流中,难以形成强度很大的激波,故造成的 SEP 事件较小,甚至没有。

(2)冕洞的开放磁场位形使得周围的带电粒子容易逃逸,因此在冕洞边缘,激波很难反复捕获粒子,进行多次加速,从而无法形成大的 SEP 事件。

**致 谢** 本文使用了 SOHO/EIT 和 Yohkoh/SXT 关于日冕的观测图像、Kit Peak 天文台的冕洞轮廓图, ACE 和 GOES 卫星关于行星际磁场及等离子体参数及高能质子通量的观测数据,以及 SOHO/LASCO 的 CME 目录册。在此表示感谢。

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] Reames D V. Particle acceleration at the sun and in the heliosphere. *Space Sci. Rev.*, 1999, **90**: 413 ~ 491
- [ 2 ] Kallenrode M B. Current views on impulsive and gradual solar energetic particle events. *Phys. G: Nucl. Part. Phys.*, 2003, **29**: 965 ~ 981
- [ 3 ] Reames D V. Particle acceleration by CME-driven shock waves. In: Dings B L, Kieda D B, Salamon M H eds. *Invited, Rapporteur, and Highlight Papers*, Vol. 516 of AIP Conf. Proc. 2000. 289 ~ 300
- [ 4 ] Cane H V, Reames D V, von Rosenvinge T T. The role of interplanetary shocks in the longitude distribution of solar energetic particles. *J. Geophys. Res.*, 1988, **93**: 9555 ~ 9567
- [ 5 ] Reames D V, Kahler S W, Ng C K. Spatial and temporal invariance in the spectra of energetic particle in gradual solar events. *Astrophys. J.*, 1997, **491**: 414 ~ 420
- [ 6 ] 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 ~ 20955
- [ 7 ] Kahler S W, Reames D. Solar energetic particle production by coronal mass ejection driven shocks in solar fast-wind regions. *Astrophys. J.*, 2003, **284**: 1063 ~ 1070
- [ 8 ] Kahler S W. Solar fast-wind regions as sources of shock energetic particle production. *Astrophys. J.*, 2004, **603**: 330 ~ 334
- [ 9 ] Gopalswamy N, Yashiro S, Krucker S, et al. Intensity variation of large solar energetic particle events associated with coronal mass ejections. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**(A12): 105
- [ 10 ] Bohlin J D. An observational definition of coronal holes. In: Zirker J ed. *Coronal Holes and High-Speed Wind Streams*. Boulder: Colo. Univ. Press, 1977. 27
- [ 11 ] Harvey K L, Recely F. Polar coronal holes during cycles 22 and 23. *Sol. Phys.*, 2002, **211**: 31 ~ 52
- [ 12 ] Munro R H, Jackson B V. Physical properties of a polar coronal hole from 2 to 5 solar radii. *Astrophys. J.*, 1977, **213**: 874 ~ 886
- [ 13 ] Fisher R, Guhathakurta M. Physical properties of polar coronal rays and holes as observed with the SPARTAN 201-01 coronagraph. *Astrophys. J.*, 1995, **447**: L139
- [ 14 ] DeForest C E, Lamy P L, Llebaria A. Solar polar plume lifetime and coronal hole expansion: determination from long-term observations. *Astrophys. J.*, 2001, **560**: 490 ~ 498
- [ 15 ] Cliver E W, Kahler S W, Reames D V. Coronal shocks and solar energetic proton events. *Astrophys. J.*, 2004, **605**: 902 ~ 910
- [ 16 ] Delaboudiniere J P, Artzner G E, Brunaud J, et al. EIT: Extreme-Ultraviolet Imaging Telescope for the SOHO Mission. *Sol. Phys.*, 1995, **162**: 291 ~ 312

(本文编辑 何 燕)