0254-6124/2014/34(6)-785–09 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Jian Yi, Lai Min, Ding Liuguan. Statistical study on the ascending time of solar energetic particle events(in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2014, **34**(6): 785-793, doi:10.11728/cjss2014.06.785

太阳高能粒子事件上升时间统计研究 *

简 昳[1,2] 赖 敏[3] 丁留贯[3]

1(南京信息工程大学数学与统计学院 南京 210044)

2(河池市气象局 河池 547000)

3(南京信息工程大学物理与光电工程学院 南京 210044)

摘 要 选取 1997—2006 年共 66 个较大的缓变型太阳高能粒子 (SEP) 事件, 分析了不同条件下太阳高能粒子通量廓线上升时间与源区日面经向分布之间的相关关系, 研究了日冕物质抛射 (CME) 和耀斑在 SEP 上升阶段的作用特点. 统计结果表明, 大 SEP 事件的源区主要分布在太阳西半球, 特别是磁足点东西两侧 45° 范围内; 在高速太阳风条件下, 低能通道的通量上升时间与日面相对经度有较好的相关性, 即离磁足点越远, 上升时间越长, 而高能通道相关性则不明显; 全晕状 CME 产生的 SEP 事件对应的上升时间与源区位置没有明显的相关性, 而部分晕状 CME 伴随的 SEP 事件则与二次拟合曲线符合很好. 分析表明, 在缓变型 SEP 事件的通量上升阶段, 耀斑加速过程起着重要作用, 这在部分晕状 CME 伴随的 SEP 事件中尤为显著.

关键词 太阳高能粒子, 日冕物质抛射, 太阳风, 日面经度

中图分类号 P 353

Statistical Study on the Ascending Time of Solar Energetic Particle Events

JIAN Yi[1,2] LAI Min[3] DING Liuguan[3]

1(*School of Mathematics and Statistics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing* 210044)

2(*Hechi Bureau of Meteorology, Hechi* 547000)

3(*School of Physics and Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing* 210044)

Abstract A total of 66 great gradual Solar Energetic Particle events (SEPs) from 1997 to 2006 were selected for analysis. The correlations were analyzed between the ascending time of the SEPs in time profile and the heliographic longitude of the source active region. The Coronal Mass Ejection (CME) and flares were also investigated in the ascending stage of the SEP flux profile. The results of statistical analysis indicate that the source regions of these great SEPs are mainly distributed in the western hemisphere, particularly within the area from 45° east longitude to 45° west longitude

* 国家自然科学基金项目 (41304150), 江苏省高校自然科学基金项目 (12KJB170008), 江苏省六大人才高峰项目 (2012-XCL-037) 和江苏省青蓝工程项目共同资助

2013-12-25 收到原稿, 2014-06-11 收到修定稿

E-mail: mlai@nuist.edu.cn, dlgnuist@163.com

relative to the magnetic footpoint. In the presence of fast solar wind, the ascending time in low-energy channel has a good correlation with the relative longitude and the ascending time increases with the distance from magnetic footpoint. However, the correlation is unobvious in high-energy channel. Correlations have not been observed between the ascending time of the SEPs associated with full halo CMEs and the source region longitude. However, the relations between the ascending time of the SEPs and source longitude are well fitted with quadratic curves. The analytical results show that the flare acceleration process played an important role in the gradual phase of SEP time profile, especially for the SEPs associated with partial halo CMEs.

Key words Solar energetic particle, Coronal Mass Ejection(CME), Solar wind, Heliographic longitude

0 引言

极端太阳高能粒子事件不仅对航天员的健康构成巨大威胁, 而且会导致航天器电子芯片内部单粒子翻转, 产生误操作或错误信息, 甚至击穿关键集成电路导致设备彻底毁坏.

太阳高能粒子事件一般可分为两类, 即缓变型太阳高能粒子事件 (gradual SEPs) 和脉冲型太阳高能粒子事件 (impulsive SEP)[1]. 缓变型 SEP 事件的通量曲线通常呈渐进式变化, 持续时间长, 强度大, 主要是日冕物质抛射 (CME) 所驱动的日冕激波及行星际激波加速粒子的结果; 脉冲型 SEP 事件的通量曲线通常呈脉冲式变化, 变化快, 持续时间短, 强度较小, 主要源于太阳耀斑. 这两类 SEP 事件的能谱、离子成分、丰度以及离子价态均不尽相同 [2−6]. 本文主要研究的是对空间天气影响较大的缓变型 SEP 事件.

太阳高能粒子从源区释放后, 沿磁力线在行星际空间传播. 大的缓变型 SEP 事件可以被处于不同经纬度的多颗卫星观测到 [7]. Reames 等 [8] 的研究表明, 在不同经度观测同一个 SEP 事件时, 通量的时间廓线不同. Reames[9] 分析了太阳高能粒子起始逃逸时间随经度的变化关系, 发现当激波在低日冕区时, 主要由日冕物质抛射的中心前沿加速粒子, 而当 CME 传播至较高高度时会向两边扩展, 其侧翼也能加速粒子, 这样就形成了一些起始逃逸高度较高的高能粒子事件, 与地球连接的行星际磁场在日面上的足点 (磁足点) 和 CME 爆发源区之间的相对经度也会影响粒子的起始逃逸高度和通量廓线变化. 一般情况下, 太阳西半球中部为高能粒子沿磁力线向地球传播的最佳区域, 因为在标准 Parker 螺旋线行星际磁场情况下, 与地球连接的磁力线足点位于日面中心以西约 50°.

掌握太阳高能粒子事件的粒子通量时间廓线规律对于准确预报高能粒子事件的变化至关重要, 同时也有助于理解耀斑和 CME 这两种粒子加速机制在具体 SEP 事件不同阶段中的不同作用. 本文主要运用统计学方法, 研究不同太阳风条件以及不同 CME 伴随情况下, 太阳高能粒子通量时间曲线中的快速上升时间与源区经度之间的相关关系, 进而分析 CME 和耀斑在 SEP 上升阶段的不同作用.

1 SEP 数据及处理

采用 NOAA 发布的影响地球环境的太阳质子事件作为基本数据, 此数据包括了从 1976 年迄今所有较大的 SEP 事件. 为能较好地借助 SOHO/EIT 观测识别 SEP 事件对应的源区, 本文在统计过程中只选取了所发布数据第 23 太阳活动周中源区在日面经度 (−89°, +89°) 以内的 SEP 事件. 共选取 66 个大的 SEP 事件 (见表 1).

表 1 给出了所分析的 SEP 太阳高能粒子事件发生的具体日期. 表 1 中 CME 的爆发时间是指 SEP 事件相关日冕物质抛射的爆发时间; CME CPA 为相关 CME 的角宽, 其中 halo 指角宽为 360° 的 CME; 源区位置为 SEP 事件源区在太阳经纬度上的分布; 耀斑时间是 SEP 事件相应耀斑的爆发时间; T_1 为能级 >30 MeV 的太阳高能粒子通量快速上升的时间, T_2 为能级 >60 MeV 的太阳高能粒子通量快速上升的时间; 太阳风速度为 SEP 事件爆发前后 5 h 内太阳风速度的平均值; 磁足点为与地球相连的行星际

表 1 1997−2006 年的缓变型 SEP 事件数据

Table 1 Dataset of large gradual solar energetic particle events from 1997 to 2006

序号	SEP 日期	CME 爆发时间 (UT)	CME CPA	源区位置 /(°)	耀斑 时间 (UT)	耀斑 等级	T_1/h	T_2/h	太阳风 速度/(km·s^{-1})	磁足点 /(°)	相对 经度/(°)
1	1997-11-04	06:10	halo	14S 33W	05:52	X2.1	1.8518	0.6878	319.96	71.44	−38.44
2	1997-11-06	12:10	halo	18S 63W	11:49	X9.4	1.8842	2.6861	349.62	65.38	−2.38
3	1998-05-02	14:06	halo	15S 15W	13:31	X1.1	1.5156	0.3276	600.41	38.07	−23.07
4	1998-05-06	08:29	309	11S 65W	07:58	X2.7	0.7630	0.1764	458.95	49.8	15.20
5	1999-06-04	07:26	289	17N 69W	06:52	M3.9	0.9670	0.5453	414.66	55.13	13.87
6	2000-04-04	16:32	halo	16N 66W	15:12	C9.7	0.6958	0.1723	380.19	60.12	5.88
7	2000-06-06	15:54	halo	20N 18E	14:58	X2.3	10.9181	6.3166	432.39	52.86	−70.86
8	2000-06-10	17:08	halo	22N 38W	16:40	M5.2	0.5366	0.4562	477.06	47.91	−9.91
9	2000-07-14	10:54	halo	22N 07W	10:03	X5.7	1.6836	1.3990	588.44	38.85	−31.85
10	2000-07-22	11:54	256	14N 56W	11:17	M3.7	0.7037	0.4908	421.07	54.29	1.71
11	2000-09-12	11:54	halo	17S 09W	11:31	M1.0	2.2913	0.4817	368.80	61.98	−52.98
12	2000-10-25	08:26	halo	10N 66W	08:45	C4.0	2.0143	0.3386	404.15	56.56	9.44
13	2000-11-08	23:06	271	10N 77W	22:42	M7.4	0.9451	0.8246	444.07	51.47	25.53
14	2000-11-24	15:30	halo	22N 07W	14:51	X2.3	1.3066	1.0099	456.37	50.09	−43.09
15	2001-01-28	15:54	halo	04S 59W	15:40	M1.5	1.1714	1.0174	320.11	71.41	−12.41
16	2001-03-29	10:26	halo	20N 19W	09:57	X1.7	1.8521	1.7395	531.91	42.97	−23.97
17	2001-04-02	22:06	261	18N 82W	21:32	X20	1.9625	3.5866	531.02	43.05	38.95
18	2001-04-10	05:30	halo	23S 09W	05:06	X2.3	2.9690	4.3495	559.89	40.83	−31.83
19	2001-04-12	10:31	halo	19S 42W	09:39	X2.0	0.9737	0.3538	621.02	36.81	5.19
20	2001-04-15	14:06	245	20S 85W	13:19	X14	0.8268	0.7310	499.56	45.76	39.24
21	2001-08-09	21:30	125	17S 19E	18:22	C7.8	10.7033	2.9986	364.29	62.75	−81.75
22	2001-09-15	11:54	263	21S 49W	11:04	M1.5	1.1465	0.2635	561.34	40.72	8.28
23	2001-09-24	10:30	halo	16S 23E	09:31	X2.6	0.7037	0.4805	442.06	51.71	−74.71
24	2001-10-01	05:30	halo	20S 84W	04:41	M9.1	–	–	476.78	47.94	36.06
25	2001-10-19	16:50	halo	15N 29W	16:13	X1.6	0.084	0.3235	334.26	68.38	−39.38
26	2001-10-22	15:06	halo	21S 18E	14:26	M6.7	2.4120	2.3938	526.36	43.43	−61.43
27	2001-11-04	16:35	halo	06N 18W	16:03	X1.0	1.3152	1.2962	316.83	72.15	−54.15
28	2001-11-17	05:30	halo	13S 42E	04:48	M2.8	51.4819	–	407.45	56.10	−98.10
29	2001-11-22	20:30	halo	24S 68W	20:18	M3.8	0.8866	1.3985	442.64	51.64	16.36
30	2001-11-23	23:30*	halo	15S 34W	22:32	M9.9	1.4782	1.3279	449.65	50.83	−16.83
31	2001-12-26	05:30	281	08N 54W	04:32	M7.1	1.8168	0.8242	376.33	60.74	−6.74
32	2002-01-14	05:35	halo	28S 83W	05:29	M4.4	7.3992	6.5177	478.46	47.77	35.23
33	2002-02-20	06:30	halo	12N 72W	05:52	M5.1	0.5386	0.1990	404.33	56.53	15.47
34	2002-03-16	23:06*	halo	08S 03W	22:09	M2.2	–	–	329.60	63.35	−66.35
35	2002-03-18	02:54	halo	09S 46W	02:16	M1.0	10.5958	7.6488	291.21	78.49	−32.49
36	2002-04-17	08:26	halo	14S 34W	07:46	M2.6	1.4736	0.3228	416.35	54.90	−20.90
37	2002-04-21	01:27	halo	14S 84W	00:43	X1.5	1.4546	1.4059	470.31	48.60	35.40
38	2002-05-22	03:50	halo	15S 70W	03:18	C5.0	6.0893	12.5069	400.94	57.01	12.99
39	2002-07-16	21:30*	14	19N 01W	21:03	M1.8	7.4222	7.1136	396.42	61.88	−60.88
40	2002-08-14	02:30	297	09N 54W	01:47	M2.3	2.8523	0.2678	441.09	51.82	2.18
41	2002-08-22	02:06	halo	07S 62W	01:47	M5.4	1.3054	0.9770	418.49	54.62	7.38

表 1 续

Table 1 continued

序号	SEP 日期	CME 爆发时间 (UT)	CME CPA	源区位置 /(°)	耀斑 时间 (UT)	耀斑 等级	T_1/h	T_2/h	太阳风 速度/(km·s^{-1})	磁足点 /(°)	相对 经度/(°)
42	2002-08-24	01:27	halo	02S 81W	00:49	X3.1	1.4623	0.8293	394.20	57.99	23.01
43	2002-09-06	02:06	241	08N 31W	–	–	15.7519	4.1882	411.60	55.53	−24.53
44	2002-11-09	13:31	halo	12S 29W	13:08	M4.6	6.1759	5.1187	358.40	63.78	−34.78
45	2003-05-28	00:50	halo	07S 20W	00:17	X3.6	8.0945	4.3346	667.54	34.24	−14.24
46	2003-05-31	02:30	halo	07S 65W	02:13	M9.3	1.0354	0.9353	763.43	29.94	35.06
47	2003-06-18	23:18*	halo	08S 58E	22:26	M6.8	14.9234	–	531.92	42.97	−100.97
48	2003-10-26	17:54	270	04N 43W	17:21	X1.2	0.7814	0.3924	480.70	47.55	−4.55
49	2003-10-28	11:30	halo	16S 08E	11:00	X17	1.9589	1.8235	733.15	31.18	−39.18
50	2003-11-02	09:30	halo	17S 55W	–	–	–	–	547.71	41.73	13.27
51	2003-11-02	17:30	halo	14S 56W	17:03	X8.3	1.6639	0.8100	515.60	44.33	11.67
52	2003-11-04	19:54	halo	19S 83W	19:29	X17	2.3868	5.2046	606.22	37.71	45.29
53	2003-11-20	08:06	halo	01N 08W	07:35	M9.6	1.4198	0.8935	590.26	38.73	−30.73
54	2003-12-02	10:50	261	19S 89W	09:39	C7.2	2.7096	0.6394	453.20	50.44	38.56
55	2004-04-11	04:30	203	16S 46W	03:54	C9.6	0.6470	0.7606	426.62	53.58	−7.58
56	2004-07-25	14:54	halo	08N 33W	14:49	M1.1	4.5415	2.7756	614.87	37.18	−4.18
57	2004-11-04	16:54	halo	N09W17	15:42	X2.0	2.6976	2.7626	544.06	42.01	−25.01
58	2004-11-10	02:26	halo	09N 49W	01:59	X2.5	0.7608	0.6545	766.19	29.83	19.17
59	2005-01-16	23:06*	halo	15N 05W	22:25	X2.6	1.7885	1.4626	532.77	42.90	−37.90
60	2005-01-17	09:54	halo	15N 25W	09:41	X3.8	2.1814	2.1941	698.61	32.72	−7.72
61	2005-01-20	06:54	halo	14N 61W	06:36	X7.1	0.3530	0.3804	777.17	29.41	31.59
62	2005-07-13	14:30	halo	08N 79W	14:01	M5.0	5.1228	0.2935	599.17	38.15	40.85
63	2005-08-22	17:30	halo	12S 60W	16:46	M5.6	3.0468	4.7681	531.18	43.03	16.97
64	2005-09-13	20:00	halo	09S 10E	19:18	X1.5	5.2927	1.2055	633.11	36.10	−46.10
65	2006-12-13	02:54	halo	06S 23W	02:14	X3.4	1.2792	0.9876	656.20	34.83	−11.83
66	2006-12-14	22:30	halo	06S46W	21:07	X1.5	1.0478	0.6490	852.33	26.82	19.18

注 * 为 SEP 事件前一天.

磁力线足点在太阳表面的经度位置; 相对经度为 SEP 事件源区位置与磁足点位置的经度差.

对于每一个 SEP 事件而言, 其爆发时刻的行星际磁力线形状和足点与局地太阳风速度有关 (假设行星际磁力线为 Parker 螺旋线). 对每个 SEP 事件选取爆发时刻前后 5 h 内太阳风速度的平均值作为此时的太阳风速度, 获得对应的太阳风速度后利用

$$\phi = -\Omega r / v_{\rm sw} \tag{1}$$

计算 Parker 螺旋行星际磁力线在地球处的偏转角, 即与地球连接的磁力线在太阳上的足点位置 (经度). 式 (1) 中, Ω 为太阳自转角速度, r 为日心径向距离, $v_{\rm sw}$ 为太阳风速度. 将日面经度范围设置为 (−180°, +180°), 东经为负, 西经为正. 将观测到的粒子源区的日面经度减去利用式 (1) 计算得到的偏转角, 即可得到 SEP 源区与地球连接磁足点的相对经度. 可以看出 SEP 源区离磁足点越近, 相对经度越小, SEP 越容易被地球附近的卫星观测到.

图 1 为 66 个 SEP 事件源区的日面绝对经度及相对经度的分布统计. 将日面经度划分为 (−180°, +180°), 以 15° 作为一个单位区间计算每个区间内爆发的 SEP 事件总数. 从图 1(a) 可以看出, 发生大 SEP 事件的源区主要集中在太阳日面西半球, 这主要是因为西半球与地球有较好的磁连接. 从图 1(b) 可以看出, SEP 源区相对磁足点有一定的空间分布, 主要集中在磁足点东西 45° 范围内. 从图 1(b) 中并

没有看到相对经度 0° 附近出现明显的事件峰值, 说明在这些大的缓变型 SEP 事件中, 耀斑加速迹象并不显著, 由 CME 激波加速占主导. 这与缓变型 SEP 事件持续时间通常较长的事实吻合. 可以认为 SEP 事件的最大峰值通量 (定义大 SEP 事件的依据) 和持续时间主要是由 CME 激波决定的.

为能更好地理解 CME 和耀斑在太阳高能粒子事件通量上升阶段的不同作用特征, 对 GOES 卫星观测的 SEP 通量时间曲线的上升时间进行了研究. 图 2 给出的是一个典型的太阳高能粒子事件的通量时间曲线. 一次完整的 SEP 事件应包括太阳高能粒子处于宇宙背景值、急剧上升过程、到达峰值后缓慢衰减这三个基本阶段. 这里定义粒子通量最初从背景值急剧近似按直线上升的时间为 T, 在这段时间内粒子按指数规律上升的斜率最大. 从图 2 可以看出, 当源区处在不同经度位置时, 其通量时间曲线的上升速度不同 [10].

通过分析太阳高能粒子事件通量上升时间与经度、太阳风、CME 等的相关关系, 可以进一步研究 SEP 事件与 CME 和耀斑的关系.

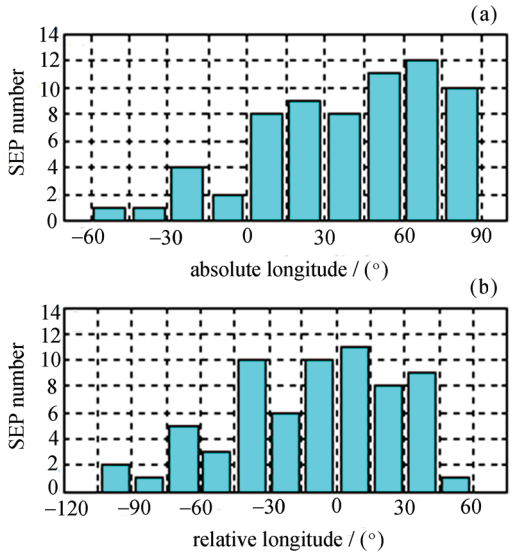

图 1　SEP 事件次数随绝对经度 (a) 及相对经度 (b) 分布

Fig. 1　Distribution of SEPs number as the function of absolute longitude (a) and relative longitude (b)

2　统计分析

2.1　太阳风速度对 SEP 事件相对经度分布的影响

图 3 给出不同太阳风速度条件下以 30° 为一个区间统计的 SEP 事件在不同相对经度上的发生概率分布. 从图 3 可以看出, SEP 事件主要发生在相对经度 $(-45°, +45°)$ 范围. 低速太阳风下, SEP 事件的源区较高速太阳风下略偏东, 且在磁足点附近出现明显的峰值. 高速太阳风下, SEP 事件的发生概率在相对经度 $(-45°, +45°)$ 内没有明显的差异.

图 4(a) (b) 给出了低速太阳风下 SEP 事件上升时间随相对经度变化的关系曲线. 图 4(a) 给出的是 > 30 MeV 通道的 SEP 事件上升时间, 拟合方程为 $f(x) = 0.0033x^2 + 0.0346x + 0.1261$, 最低点位于 $(-5.17, 0.04)$, 快速上升时间与相对经度的相关系数为 0.72 (置信度 99%); 图 4(b) 给出的是 > 60 MeV

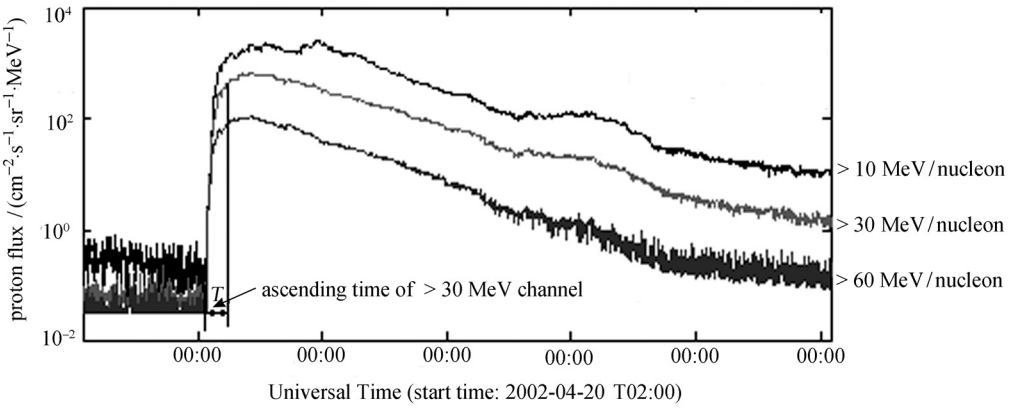

图 2　一个典型的太阳高能粒子事件通量时间曲线

Fig. 2　Time-flux curve of a typical solar energetic particle event

通道的 SEP 事件上升时间, 拟合方程为 $f(x) = 0.0004x^2 + 0.0014x + 1.6564$, 最低点位于 $(-1.89, 1.66)$, 快速上升时间与相对经度的相关系数为0.21.

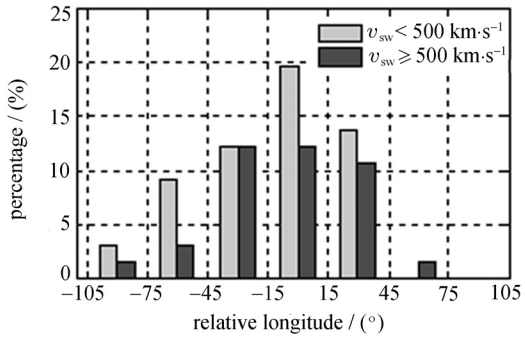

图 3 太阳风作用下 SEP 事件发生概率与相对经度的关系

Fig. 3 Time-flux curve of a typical solar energetic particle event

图 4(c)(d) 给出了高速太阳风下 SEP 事件上升时间随相对经度变化的关系曲线, 图 4(c) 给出的是 > 30 MeV 通道的 SEP 事件上升时间, 拟合方程为 $f(x) = 0.001x^2 - 0.0097x + 1.4502$, 最低点位于 (4.63, 1.43), 快速上升时间与相对经度的相关系数达到 0.77 (置信度 99%); 图 4(d) 给出的是 > 60 MeV 通道的 SEP 事件上升时间, 拟合方程为 $f(x) = 0.0003x^2 + 0.0026x + 1.6064$, 最低点位于 $(-4.53, 1.60)$, 快速上升时间与相对经度的相关系数仅为 0.16.

从图 4 的对比分析可以看出, > 30 MeV 能量通道观测到的 SEP 事件上升时间具有明显的相对经度分布; 而 > 60 MeV 能量通道 SEP 事件上升时间随相对经度变化不明显. 能量较大粒子到达地球的时间要小于能量较小的粒子, 并且能量越大, 其上升时间越短. 从二次拟合曲线分析, 曲线最低点几乎都在 0°

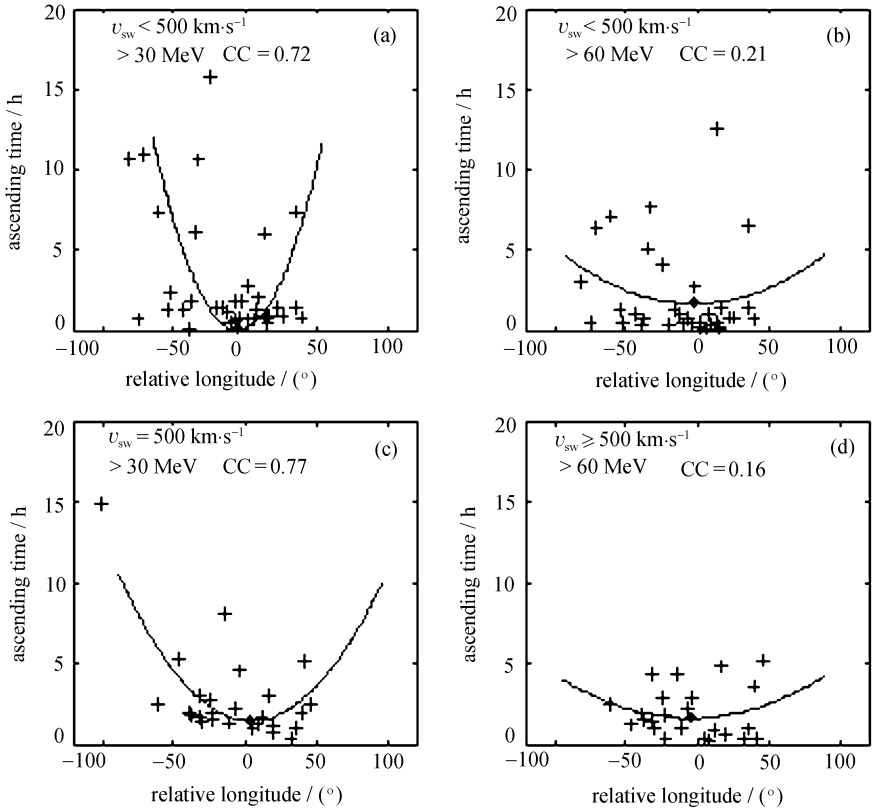

图 4 低速 (a) (b) 及高速 (c) (d) 太阳风下 SEP 上升时间与相对经度的关系 (实线为 SEP 事件的上升时间与相对经度关系的二次拟合曲线, 圆点表示该拟合线的最低点, CC 表示相关系数)

Fig. 4 Relationship between the ascending time of SEPs and relative longitude in the presence of slow solar wind (a) (b) and fast solar wind (c) (d). Solid line shows a quadratic curve fitting, the circle dot shows the minimum value on the curve, and CC is the correlation coefficient

附近, 即具有较好磁连接的源区爆发产生的 SEP 事件上升时间最短, 上升速度最快, 这与 Reames 等 [10] 的研究结论一致. 虽然这两类 SEP 事件的相对经度分布范围都比较大, 但 > 30 MeV 通道的 SEP 事件上升时间拟合较好, 且最短时间出现在磁足点附近, 上升时间与相对经度具有较好的相关性, 可以认为耀斑在缓变型 SEP 事件中的上升阶段起到一定作用. 高速太阳风下的拟合效果要好于低速太阳风下的拟合效果, 这可能是由于高速太阳风所对应的行星际磁力线较短, 粒子传播路径上磁力线可能出现的扰动因素较少所导致的.

2.2 CME 角宽对 SEP 事件相对经度分布的影响

将 SEP 事件按其伴随的 CME 角宽进行分类, 可分为全晕状 CME 和部分晕状 CME. 图 5 给出的是全晕状和部分晕状 CME 伴随的 SEP 事件在日面相对经度上的分布. 从图 5 可以明显看出, 全晕状 CME 伴随 SEP 事件占绝大多数, 而部分晕状 CME 伴随 SEP 事件爆发次数整体而言较少, 且主要分布在相对经度 $(-10°, +10°)$ 范围. 对于大多数部分晕状 CME 伴随 SEP 事件源区而言, 其位置相对于磁足点较近. 如果考虑太阳源表面以下磁场的变化, 上面计算得到的相对经度误差在 $\pm 15°$ 左右 [11]. 显然误差是在允许范围内的, 可以认为这类 SEP 事件的活动区大多与地球有很好的磁连接.

两类不同 CME 伴随的 SEP 事件上升时间随相对经度变化关系如图 6 所示. 图 6(a) 中的拟合方程为 $f(x) = 0.0002x^2 + 0.007x + 1.9174$, 最低点位于 $(-15.06, 1.86)$. 图 6(b) 中的拟合方程为 $f(x) = 0.0014x^2 - 0.0269x + 0.6801$, 最低点位于 $(9.35, 0.55)$.

图 6(a) 表明, > 60 MeV 通道的全晕状 CME 伴随的 SEP 事件上升时间随相对经度变化较为平缓且点较为分散, 两者无明显相关关系, 快速上升时间与相对经度的相关系数仅为 0.099. 由于全晕状 CME 爆发时角宽较大, CME 激波空间分布宽广, 激波能很快跨越与地球相连的磁力线, 因此激波加速的高能粒子能沿磁力线快速传播到达地球附近而被观测到. 即使在这些事件中出现耀斑加速粒子的迹象, 也会被大范围的激波加速粒子所淹没, 不能明显表现出来, 因而表现为无明显的径向分布.

图 6(b) 表明, > 60 MeV 通道的部分晕状 CME 伴随的 SEP 事件上升时间随相对经度变化关系十分

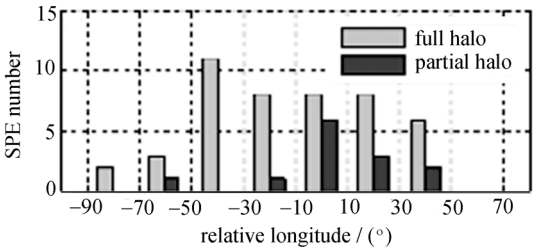

图 5 全晕状和部分晕状 CME 伴随 SEP 事件随相对经度的频次分布

Fig. 5 Distribution histograms of the probability of SEPs versus relative longitude associated with full and partial halo CMEs

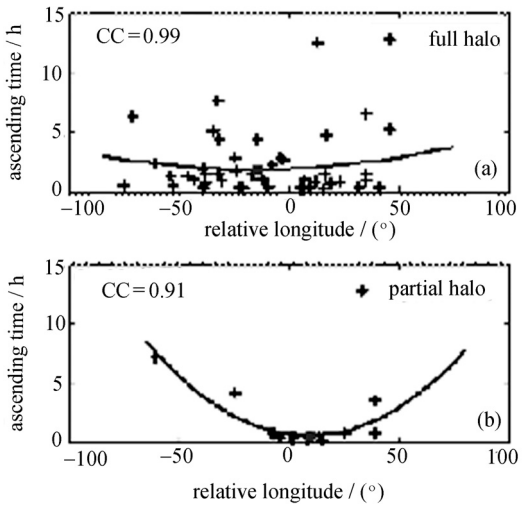

图 6 全晕状 (a) 和部分晕状 (b) CME 事件中 > 60 MeV 能量通道的 SEP 事件上升时间与相对经度关系 (实线为二次拟合曲线, 圆点表示该拟合线上的最小值点, CC 表示相关系数)

Fig. 6 Relationships between the ascending time of SEPs in the channel with the energy larger than 60 MeV and relative longitude in full (a) and partial (b) CMEs. The solid line shows a quadratic curve fitting, the circle dot shows the minimum value on the curve, and CC is the correlation coefficient

显著, 具有非常明显的相对经度依赖性, 快速上升时间与相对经度的相关系数高达 0.91 (置信度 99%). 这些事件大多集中在磁足点附近, 且上升时间与相对经度有很好的二次拟合关系, 曲线最低点在磁足点附近. 通过分析可以看出, 部分晕状 CME 伴随的 SEP 事件源区主要分布在磁足点附近, 上升时间显著依赖于相对经度. 由于部分晕状 CME 的角宽相对较小,

在空间的分布也相对较小, 激波加速过程在 SEP 事件上升阶段的作用明显弱化, 更凸显出耀斑在其中的作用, 因此可以认为耀斑在这类事件上升阶段的作用要比 CME 显著. 当然也不排除其他可能因素的作用, 例如 CME 与耀斑的同时作用. CME 通常具有更大的角宽, 传播范围更广, 因此 CME 激波加速而产生的 SEP 受到相对经度的制约作用非常小. 相比之下, 耀斑加速的粒子源属于点状源, 因而来自耀斑的 SEP 受相对经度影响的效果十分明显. 由于粒子沿磁力线传播远比横向扩散容易得多, 因此这两种加速机制作用下的 SEP 受到相对经度的影响不同.

3 结论与讨论

通过对 66 个大的太阳高能粒子事件通量时间廓线中上升时间随源区相对经度的变化关系分析, 结合太阳风条件与 CME 宽度, 研究了 CME 激波和耀斑在太阳高能粒子事件产生中的不同作用特点. 通过这一研究, 可以更好地理解 CME 激波与耀斑这两种粒子加速机制在不同类型事件不同阶段的差异, 从而深入理解太阳高能粒子事件的产生过程, 以推进灾害性太阳高能粒子事件空间天气预报模型的建立.

行星际太阳风条件影响行星际磁力线的形状, 在标准 Parker 螺旋磁力线条件下, 高速和低速太阳风分别对应短长两种不同的行星际磁力线. 行星际磁力线是太阳高能粒子向外传播的通道, 对 1 AU 附近太阳高能粒子的观测具有直接影响. 太阳风速度越慢, Parker 磁力线越长, 相对应的磁足点在日面上的经度就越大. 磁力线越长, 粒子向外传播过程中受到其他行星际扰动影响的概率就越大. 所以在低速太阳风条件下, 粒子通量廓线随源区相对经度的变化变得复杂, 与相对经度的相关性变差.

CME 在太阳高能粒子事件的产生过程中具有非常重要的作用, 尤其是大的灾害性缓变型 SEP 事件. 由于 CME 的空间分布范围大, 特别是晕状 CME, 因此在不同经度上能够观测到同一次 SEP 事件. 由于 CME 的传播速度、方向和形状的不同, 导致在不同经度观测到的 SEP 事件的通量廓线经常与 Reames 等 [8] 的结果存在较大差异, 也导致本文中晕状 CME 类 SEP 事件的数据点相对较分散, 与相对经度没有明显相关性.

此外, 缓变型 SEP 事件的通量峰值和持续时间主要由 CME 确定, 缓变型 SEP 事件是由 CME 加速形成的观点目前被普遍认同. 但在 SEP 的上升阶段, 尚不清楚何种加速过程起主导作用. 实际观测中, 很多缓变型 SEP 事件的上升过程并不是缓变的, 而是在短时间内很快上升几个量级.

如果 CME 的宽度较小且没有正对地球传播, 即没有在地球方向上形成较大范围的激波, 那么此时 CME 激波产生的 SEP 只可能在偏移地球方向的特定范围被观测到. 在 SEP 事件的上升阶段, CME 加速效果不能被有效观测到, 而耀斑加速过程则会凸显出来. 当然, 随着 CME 的膨胀, 激波也有可能横穿与地球相连的磁力线, 从而 SEP 在地球附近被观测到, 形成缓慢变化的通量曲线. 因此在所有事件中, 这类事件数并不多.

另外, 耀斑加速过程在大的太阳高能粒子事件中具有非常重要的作用. 只是耀斑产生的太阳高能粒子大多只在磁连接较好的条件, 即源区在磁足点附近或磁足点上下时才能被观测到. 较远源区的耀斑粒子要想被观测到, 必须经历长时间的横跨磁力线运动. 显然耀斑产生的高能粒子具有很强的经度相关性. 综上分析, 可以得出以下结论.

(1) 产生大 SEP 事件的源区主要集中在太阳西半球, 分布在磁足点东西两侧 45° 范围内. 说明与源区和 CME 激波面具有良好的磁连接条件有利于大的缓变型 SEP 事件的观测.

(2) 高速和低速太阳风条件下, 粒子通量上升的快慢与源区相对经度具有明显的相关性, 并且在 > 30 MeV 能量通道更为明显. 说明耀斑加速过程在 SEP 事件的上升阶段起着重要作用. 低速太阳风条件下, > 30 MeV 能量通道的相关性略有降低, 这可能是由于不同太阳风条件下行星际磁力线形状和受扰动的不同所致.

(3) 对于全晕状 CME 产生的 SEP 事件, 其通量上升时间与源区位置之间没有明显的相关性; 而部分晕状 CME 伴随的 SEP 事件, 其上升时间与相对经度具有很好的相关性, 可以得到很好的二次拟合曲线, 最低点在磁足点附近. 这说明耀斑加速粒子过程在部分晕状 CME 伴随 SEP 事件的上升阶段起着非常显著的作用.

通过对缓变型 SEP 事件上升时间的统计分析发现, 耀斑加速粒子的过程在 SEP 事件上升阶段起有非常重要的作用, 并且在部分晕状 CME 伴随的 SEP

事件中尤为明显. 这对深入理解 SEP 事件的起始爆发过程具有重要意义.

参考文献

[1] Reames D V. Particle acceleration at the Sun and in the heliosphere [J]. *Space Sci. Rev.*, 1999, **90**: 413-491

[2] Cohen C M S, Mewaldt R A, Cummings A C, *et al.* Variability of Spectra in Large Solar Energetic Particle Events [M]. England: Pergamon-Elsevier Science LTD, 2003: 2649-2654

[3] Desai M I, Mason G M, Wiedenbeck M E, *et al.* Spectral properties of heavy ions associated with the passage of interplanetary shocks at 1 AU [J]. *Astrophys. J.*, 2004, **611**:1156-1174

[4] Li C, Tang Y H, Dai Y, *et al.* Flare magnetic reconnection and relativistic particles in the 2003 October 28 event [J]. *Astron. Astrophys.*, 2007, **472**: 283-286

[5] Mewaldt R A, Cohen C M S, Labrador A W, *et al.* Proton, helium, and electron spectra during the large solar particle events of October—November 2003 [J]. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**(A9): A09S18, doi:10.1029/2005JA011004

[6] 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 [J]. *Astrophys. J.*, 2005, **625**(1):474-495

[7] He Hongqing. Study on Propagation of Solar Energetic Particles in Three-dimensional Interplanetary Magnetic Fields [D]. Beijing: Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, 2011. In Chinese (何宏青. 太阳高能粒子在三维行星际磁场中传播的研究 [D]. 北京: 中国科学院空间科学与应用研究中心, 2011)

[8] Reames D V. Solar energetic particles–A paradigm shift [J]. *Rev. Geophy.*, 1995, **33**: 585-589

[9] Reames D V, Solar release times of energetic particles in ground-level events [J]. *Astrophy. J.*, 2009, **693**:812-821

[10] Reames D V, Barbier L, Ng C. The spatial distribution of particles accelerated by coronal mass ejection-driven shocks [J]. *Astrophy. J.*, 1996, **466**:473

[11] Tylka A J, Malandraki O E, Dorrian G, *et al.* Initial Fe-O enhancements in large, gradual, solar energetic particle events: Observations from Wind and Ulysses [J]. *Solar Phy.*, 2012, **285**:251-267