0254-6124/2007/27(3)-182-10 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Li Changxing, Huang Zhaohui, Wang Chi. The interplanetary causes of the anormalous SSC events. *Chin. J. Space Sci.*, 2007, **27**(3): 182~191

异常 SSC 事件的行星际原因分析*

李昌兴[1,2,3] 黄朝晖[1] 王 赤[1]

[1](中国科学院空间科学与应用研究中心 中国科学院空间天气学国家重点实验室 北京 100080)

[2](中国科学院研究生院)

[3](中国气象局)

摘 要 磁暴急始 (SSC) 是强烈太阳风动压或行星际激波与磁层相互作用的结果. 通常 SSC 事件的上升时间在 4~10 min, 我们把上升时间超过 15 min 的 SSC 事件称为异常 SSC 事件. 本文利用地磁 SYM-H 指数鉴别出了 5 个有地磁观测历史以来发生的上升时间大于 15 min 的异常 SSC 事件, 并利用 Wind, ACE, IMP 8, Goes, Geotail 多点卫星太阳风观测数据和地磁观测数据, 分析了异常 SSC 事件的行星际原因. 结果表明, 异常 SSC 事件通常都是强烈行星际扰动引起的, 5 个异常 SSC 事件有 4 个对应于行星际激波, 有 3 个对应于多步太阳风动压跃变, 有 1 个对应于行星际电场大幅度变化; 由行星际激波产生的异常 SSC 事件, 其上升时间依赖于行星际激波的方向, 方向相对于日地连线越偏, 上升时间越长; 异常 SSC 事件上升时间与行星际磁场方向关系不明显.

关键词 磁暴急始; 行星际激波; 太阳风动压; 行星际磁场

中图法分类号 P353

The Interplanetary Causes of the Anormalous SSC Events

LI Changxing[1,2,3] HUANG Zhaohui[1] WANG Chi[1]

[1](*State Key Laboratory of Space Weather, Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100080)

[2](*The Graduate School of Chinese Academy of Sciences*)

[3](*China Meteorological Administration*)

Abstract SSC is a result of the interrelation between strong solar wind dynamic pressure or interplanetary shock and the geomagnetosphere. Generally, the rise time of SSC varies from 4 minutes to 10 minutes. So, we refer to the SSC of the rise time which is more than 15 minutes as anomalous SSC event. We identified 5 anomalous SSC events from the geomagnetic index SYM-H data since the observation beginning of the geomagnetic field. Using the multipoint observations of the solar wind from the Wind, ACE, IMP 8, Goes and Geotail, the interplanetary causes of those anomalous SSC events were analyzed. It is found that: (1) all of 5 anomalous SSC events are accompanied with strong interplanetary disturbances, among which there are 4 events corresponding with the forward fast interplanetary shocks, and 3 events corresponding with multi-step solar wind dynamic pressure

* 国家自然科学基金项目 (40574069) 和国家杰出青年基金项目 (40325010) 共同资助

2006-09-15 收到原稿, 2007-01-13 收到修定稿

changes and 1 event corresponding with a sudden direction change and large amplitude variation in interplanetary electric field. (2) the rise time of those resulted from interplanetary shocks desponds on the orientation of the interplanetary shock, i.e., the bigger the angle between the interplanetary shock normal and the Sun-Earth line, the shorter the rise time, and the contribution of the orientation of the interplanetary shock is more remarkable than its speed. (3) There is no explicit relation between the rise time of the anomalous SSC events and the interplanetary field direction.

Key words Storm sudden commencement, Interplanetary shock, Solar wind dynamic pressure, Interplanetary magnetic field

1 引言

根据新的定义，磁暴急始 (SSC) 是磁暴前地磁的突然增长或者地磁至少持续一个小时的增长，这意味着 SSC 新的定义更加注重考虑地磁变化，而不仅仅考虑磁暴的强度，SSC 发生后不一定都会出现真实的磁暴 [1]. 30 多年来，理论和观测上大量的研究表明，SSC 通常是行星际扰动引起的地球磁层压缩的结果 [2]. 早期研究地磁对太阳风的响应立足地面观测和理论分析，需要逐一考虑地磁响应随纬度、局地时间、地磁倾角、行星际磁场和太阳活动变化的因素 [3],[4]. 卫星观测时代开始以后，人们开始结合地空多点观测研究地磁对太阳风扰动的全球响应，并逐步建立了 SSC 的物理模型 [5]~[11]. 进一步研究表明，产生 SSC 的行星际扰动大多是前向行星际快激波 (FFS)，SSC 的增长幅度与间断面前后太阳风动压平方根的变化有着很好的相关 [2],[12]~[15].

最近，人们开始研究行星际扰动通过磁层向地面传播的问题 [16~21]，但是很少有人研究行星际扰动方向对 SSC 的效应. Russell 等 [14],[15] 研究了行星际磁场北向和南向情况下地磁对太阳风动压的响应，证实地磁在不同的行星际磁场方向下对动压有不同的响应. 地面观测表明 SSC 的增长时间通常为 2~10 min，增长幅度为几十个 nT[1],[22],[23]. 理论上 SSC 的增长时间主要依赖于间断面过渡区的厚度 [24]，但由于行星际激波厚度只有离子惯性长度的量级 [25]，太薄而不能导致 SSC 达到几分钟的增长时间. 因此，SSC 的增长时间被认为是激波扫过日侧磁层顶并达到磁尾磁层顶所用的时间，而且激波越快 (或者越强) 时间越短 [24]~[29]. Wang 等 [30] 从统计上证实了对 15 min 以下的 SSC 事件的上升时间与行星际激波方向的这种关系. Takeuchi 等 [31] 对于 1995 年 12 月 15 日和 1997 年增长时间分别为 30 min，9 min 的 SSC 事件研究表明，尽管两个事件相应的太阳风动压基本类似，但不同的行星际激波方向却导致了如此不同的 SSC 的增长时间，长达 30 min 的异常 SSC 增长时间在很大程度上取决于行星际激波的方向. 最近，Wang 等 [32] 运用新发展的 3D MHD 太阳风磁层耦合模式模拟了不同激波方向情况下行星际激波与磁层的相互作用，得到与文献 [3] 一致的结论. 显然，增长时间异常长的 SSC 事件的行星际原因与其他 SSC 事件有很大不同，需要进一步从观测上统计证实. 本文利用高分辨率地磁数据，鉴别出了 5 个有地磁观测历史以来发生的增长时间大于 15 min 的异常 SSC 事件，结合多点卫星观测数据分析了这些事件的行星际原因.

2 数据和异常 SSC 事件

本文运用的卫星观测数据来自于 ISEE 3, Wind, ACE, IMP 8, Geotail 和 Goes 系列卫星. 1998 年以前的太阳风行星际磁场和等离子体数据来自于 Wind 卫星 3 s 分辨率的 MFI 和 92 s 分辨率的 SWE, 1998 年以后的太阳风行星际磁场和等离子体数据来自于 ACE 卫星 16 s 分辨率的 MFI 和 64 s 秒分辨率的 SWEPAM. Geotail 卫星和 Goes 系列卫星数据还被用于检测磁层对行星际扰动的响应.

地面观测数据为国际地磁数据中心提供的分辨率为 1 min 的 SYM-H 指数和地磁数据. 根据美国国家地球物理数据中心 (NGDC) 给出的 SSC 事件数据库，逐一检查每个 SSC 事件发生前后的地磁数据和 SYM-H 指数，得到 SSC 增长时间和增长幅度. 根据 SSC 起始时刻和 SYM-H 指数或地磁水平分量达到最大值的时刻差，得到 SSC 增长时间，相应的地磁水平分量跃变值被认为是 SSC 增长强度. 这样，鉴别出了有地磁观测历史以来发生的增长时间

大于 15 min 的 5 个异常 SSC 事件. 表 1 给出了这 6 个事件的发生时间、增长时间、增长强度. 图 1(b)、图 3(c)、图 4(c)、图 5(c) 显示出这些事件发生前后一个小时的地磁水平分量变化情况.

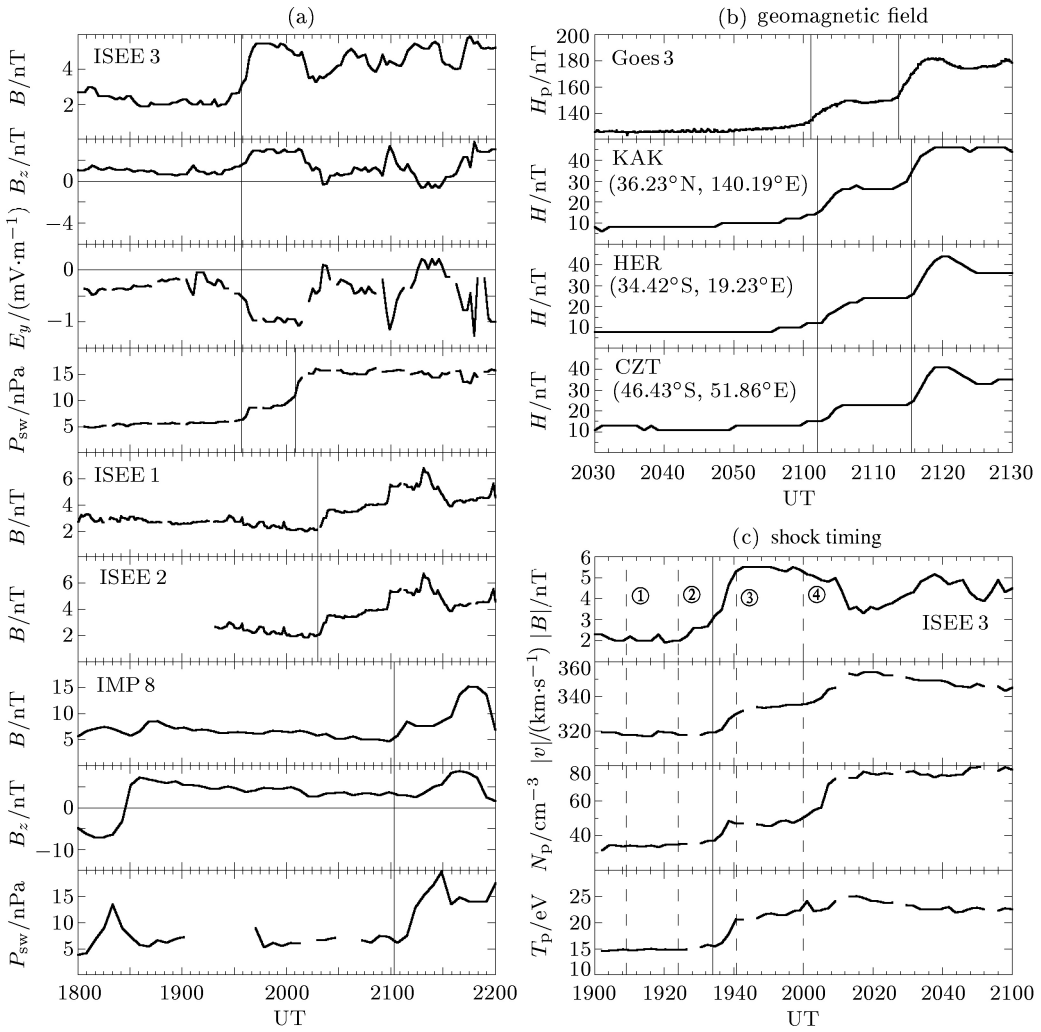

图 1 1979 年 7 月 28 日 ISEE 3, ISEE 1, ISEE 2, IMP 8, Goes 3 卫星和地面观测结果

Fig.1 A SSC event and relevant interplanetary condition observed by ISEE 3, ISEE 1, ISEE 2, IMP 8, and Goes 3 on July 28, 1979

3 观测分析与讨论

3.1 个例分析

(1) 1979 年 7 月 8 日 SSC 事件

图 1 给出 1979 年 7 月 28 日地面对行星际扰动的观测情况. 图 1(a) 从上到下依次为 ISEE 3 观测到的太阳风和等离子体磁场强度 (B)、在 GSE 坐标系中磁场的 B_z 分量、行星际电场 (E_y)、动压 (P_{sw})、ISEE 1 和 ISEE 2 观测到的磁场强度 (B) 以及 IMP 8 观测到的磁场强度 (B)、磁场的 B_z 分量和动压 (P_{sw}). 图 1(a) 中垂直实线表示扰动到达时刻. 图 1(b) 为 Goes 3 观测到磁场变化以及 KAK (36.23°N, 140.19°E), HER (34.42°S, 19.23°E), CZT

表 1 从地磁观测数据中鉴别出的异常 SSC 事件

Table 1 Anomalous SSC events identified by geomagnetic data

年-月-日	UT	上升时间 /min	上升幅度 /nT
1979-07-28	2101	18	32
1995-12-15	0445	30	13
1998-06-10	1329	22	22
2000-07-13	0942	17	61
2004-12-11	1339	20	22

(46.43°S, 51.86°E) 3 个站观测到的地磁水平分量 (H) 的变化，图 1(b) 中垂直实线表示 SSC 上升时刻. 图 1(c) 从上到下依次为 ISEE 3 观测到的太阳风和等离子体磁场强度 (B)、速度 (v)、质子数密度 ($N_{\rm p}$) 和质子温度 ($T_{\rm p}$)，图 1(c) 中垂直实线表示激波的到达时刻，虚线①和②及③和④之间表示激波上下游区间.

由图 1 可见，1978 年 7 月 28 日 1934 UT ISEE 3 观测到一个行星际激波扰动，此时 ISEE 3 位于 L1 点附近，太阳风动压在 42 min 内两次跃变，第一次在 4 min 内增加 2.6 nPa，第二次在 10 min 内增加 5.5 nPa，行星际磁场 B_z 在动压达到最高点前一致处于北向，随着 B_z 转向，动压开始略有下降但仍维持在 12~16 nPa 的水平. 可以注意到，动压第一次跃变到最高点到第二次跃变前的这段时间正好是激波下游区间. 2101 UT 扰动达到 IMP 8，此时 IMP 8 处于地球磁层黄昏侧行星际空间，类似 ISEE 3 观测结果，太阳风动压也经历两次跃变，第一次在 16 min 内增加幅度为 9.7 nPa，第二次在 7 min 内增加幅度为 12.8 nPa，之后恢复到第一次跃变后的水平，行星际磁场 B_z 则一直处于北向状态. 2102 UT 地面观测到一个 SSC 事件，尽管 3 个站分布在南北半球不同地方，但几乎同时观测到这个 SSC 事件，且呈现类似的特点，即 SSC 分两步先缓慢继而快速上升，平均上升时间为 18.2 min，幅度为 32 nT，其中第一次缓慢上升时间平均长达 14 min，上升幅度平均约为 20 nT，随着观测纬度降低，SSC 上升时间变长，SSC 两次上升的响应特征与太阳风动压两次跃变特征比较吻合.

通常，地面对这次行星际扰动的响应早于 IMP 8 的响应，但从图 1 中可以看到，IMP 8 和地面对行星际激波扰动的响应几乎是同时观测到的，IMP 8 的响应甚至比 SSC 起始时间早 1 min，这说明行星际激波向磁层的传输方向是倾斜的，以至于先被 IMP 8 观测到. 图 1(c) 中磁场和等离子体参量的跃变十分清楚地显示出这是一个前向激波扰动. 选取激波面前后比较平稳的区间作为激波上下游区间，利用文献 [34] 的方法求得激波上下游参数，然后运用磁共面法 (MC)、速度共面法 (VC)、磁场和速度混合法 (MX1, MX2, MX3) 等计算激波法向的 3 个分量 (n_x, n_y, n_z)、激波法向与上游磁场夹角 ($\theta_{\rm bn}$)、激波法向与 GSE 坐标系 x 轴夹角 (θ_{xn})、激波速度 ($v_{\rm sh}$) 等激波参数 [34]. 激波从 ISEE 3 到 IMP 8 传输的平均时间为 $\Delta t = \dfrac{|\Delta \boldsymbol{R}\cdot\hat{\boldsymbol{n}}|}{v_{\rm sh}}$，$\Delta\boldsymbol{R}$ 为 ISEE 3 到 IMP 8 的距离，$\hat{\boldsymbol{n}}$ 为激波法线方向矢量，计算结果列于表 2 和表 3. 可见 MC 计算结果与实际观测值 87 min 最为接近. 如果考虑激波为一维平面，由于地面与 IMP 8 几乎同时观测到扰动事件，激波到达地面和 IMP 8 时的位置如图 2 所示，虚线为激波到达 ISEE 3 时刻的位置，该激波法向与 x 轴夹角为 137.5°，这与激波倾斜的推测一致.

(2) 1998 年 6 月 10 日 SSC 事件

图 3 给出了 1998 年 6 月 10 日地面对行星际扰动的观测情况. 图 3(a) 从上到下依次为 ACE 观测到的太阳风和等离子体磁场在 GSE 坐标系中的 B_z

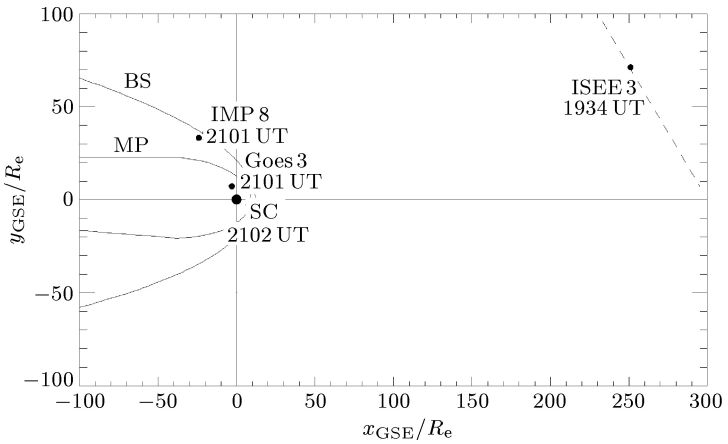

图 2 1979 年 7 月 28 日卫星和地面观测的位置

Fig.2 Position of satellite and geomagnetic station on the time of the interplanetary shock passing ISEE 3 on July 28, 1979

表 2 1979 年 7 月 28 日 ISEE 3 卫星观测到的激波上下游参数

Table 2 Upstream and downstream parameters of Interplanetary shock obseved by ISEE 3 on July 28,1979

	B_x/nT	B_y/nT	B_z/nT	v_x/(km·s^{-1})	v_y/(km·s^{-1})	v_z/(km·s^{-1})	N_p/cm^{-3}
upstream	−1.79	0.56	0.84	318.06	−11.82	−1.9	34.54
downstream	−4.11	2.06	2.9	334.13	−9.5	−3.92	47.4

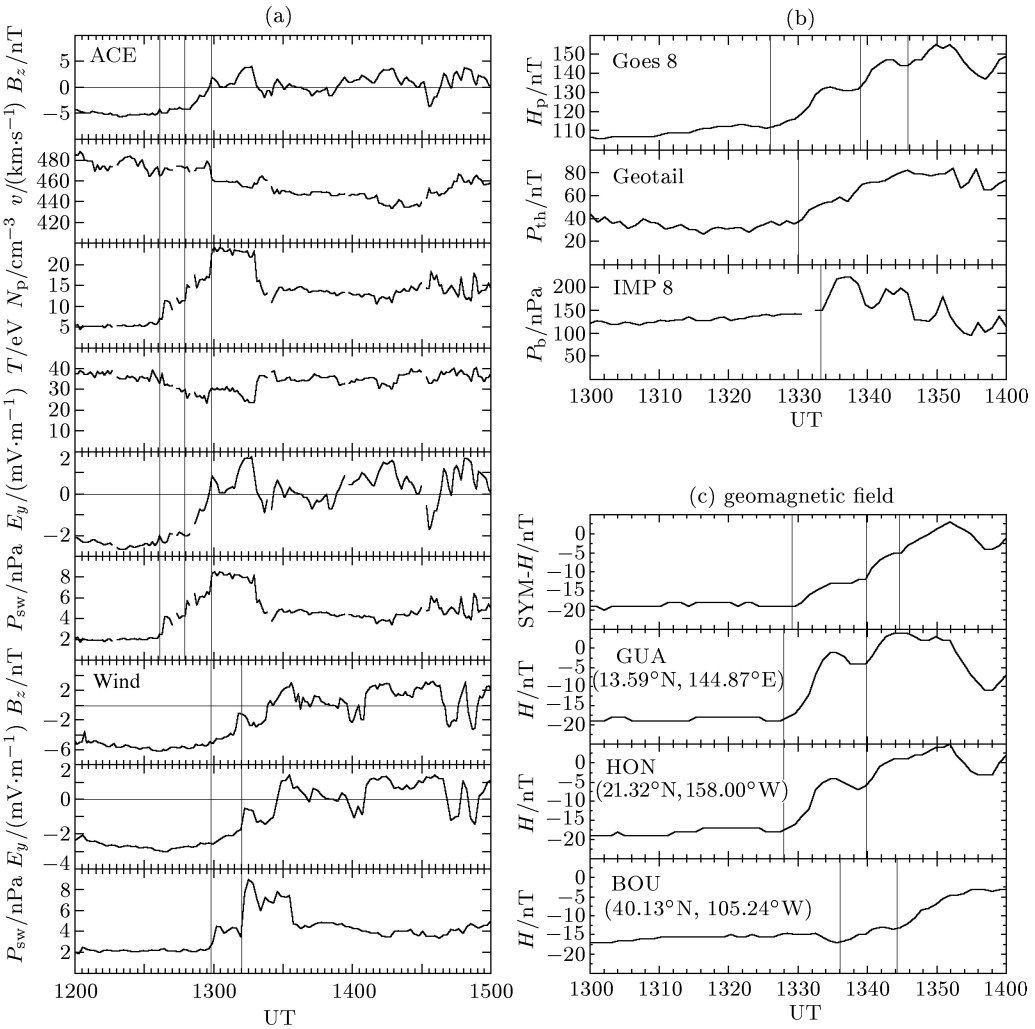

图 3 1998 年 6 月 10 日 ACE, Wind, Goes 8, Geotail, IMP 8 卫星和地面观测结果

Fig.3 A SSC event and relevant interplanetary condition observed by ACE, Wind, Goes 8, Geotail, and IMP 8 on June 10, 1998

分量、速度 (v) 、质子数密度 (N_p) 、质子温度 (T) 、行星际电场 (E_y) 、动压 (P_{sw}) 以及 Wind 观测到的磁场 B_z 分量、行星际电场 (E_y) 和动压 (P_{sw}), 图 3(a) 中垂直实线表示扰动到达时刻. 图 3(b) 为 Goes 8, Geotail 和 IMP 8 观测到磁场变化和质子热压的变化, 图 3(b) 中垂直实线表示扰动到达时刻. 图 3(c) 从上到下依次为 SYM-H 指数以及 GUA(13.59°N, 144.87°E), HON(21.32°N, 158.00°W), BOU(40.13°N, 105.24°W) 3 个站观测到的地磁水平分量 (H) 的变化, 图 3(c) 中垂直实线表示 SSC 上升时刻.

从图 3 可见, ACE 观测到太阳风动压从 1998 年 6 月 10 日 1236 UT 开始在 21 min 内有 3 次跃变, 首次在 5 min 内幅度增加 1.9 nPa, 后续在 16 min

表 3　不同方法计算激波参数的结果

Table 3　Interplanetary shock parameters calculated by different methods

method	n_x	n_y	n_z	$\theta_{\rm bn}/(^\circ)$	$\theta_{xn}/(^\circ)$	$v_{\rm sh}/({\rm km\cdot s^{-1}})$	Ma	Δt
MC	−0.74	−0.46	−0.5	71.88	137.46	271.51	2.99	88.9
VC	−0.98	−0.14	0.12	29.9	169.27	371.27	4.08	77.8
MX1	−0.7	−0.64	−0.32	72.51	134.28	257.99	2.81	90.4
MX2	−0.71	−0.6	−0.36	72.27	135.27	262.35	2.86	89.7
MX3	−0.71	−0.6	−0.36	72.19	135.62	263.87	2.88	89.2

内增加 4.1 nPa, 行星际磁场 B_z 在动压达到最高点开始由南转北, 行星际电场方向也发生改变, 而强度有较大幅度增加, 随着 B_z 转向, 动压开始逐步下降到跃变前的水平. Wind 观测类似于 ACE, 但是动压在 19 min 内只有两次跃变. Goes 8 在 22 min 内观测到三次连续跃变. 1329 UT 地面观测到一个上升时间达 22 min 的 SSC 事件, 3 个分布在北半球不同纬度的观测站均观测到这个 SSC 事件且呈现多步上升的特点.

(3) 2000 年 7 月 13 日 SSC 事件

图 4 给出了 2000 年 7 月 13 日地面对行星际扰动的观测情况. 图 4(a) 从上到下依次为 ACE 观测

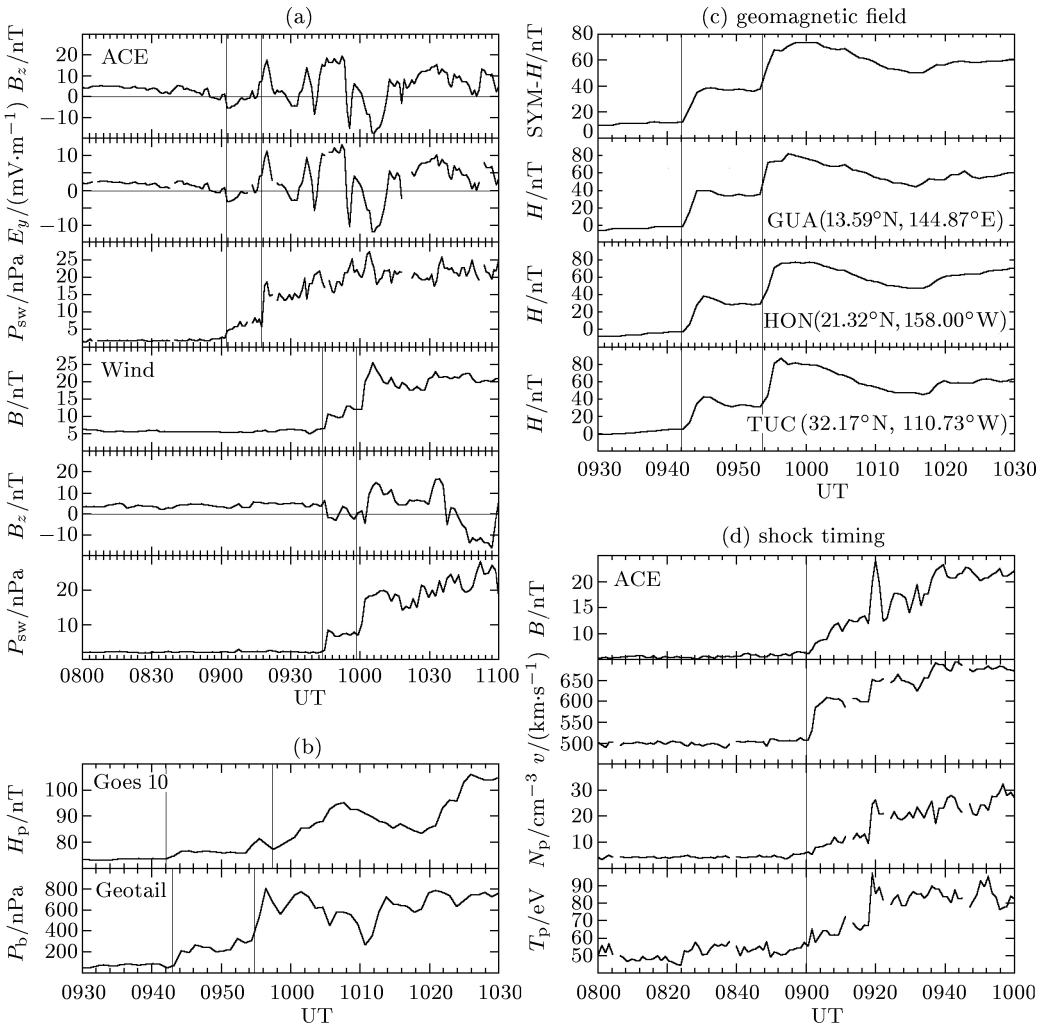

图 4　2000 年 7 月 13 日 ACE, Wind, Goes 10, Geotail 卫星和地面观测结果

Fig.4　A SSC event and relevant interplanetary condition observed by ACE, Wind, Goes 10, and Geotail on July 13, 2000

到的太阳风和等离子体磁场在 GSE 坐标系中的 B_z 分量、行星际电场 (E_y) 、动压 ($P_{\rm sw}$) 以及 Wind 观测到的磁场强度 (B) 、磁场的 B_z 分量和动压 ($P_{\rm sw}$), 图 4(a) 中垂直实线表示扰动到达时刻. 图 4(b) 为 Goes 10 和 Geotail 观测到的磁场变化和质子热压的变化, 图 4(b) 中垂直实线表示扰动到达时刻. 图 4(c) 从上到下依次为 SYM-H 指数以及 GUA (13.59°N, 144.87°E), HON (21.32°N, 158.00°W), TUC (32.17°N, 110.73°W) 3 个站观测到的地磁水平分量 (H) 的变化, 图 4(c) 中垂直实线表示 SSC 上升时刻. 图 4(d) 从上到下依次为 ACE 观测到的太阳风和等离子体磁场幅度 (B) 、速度 (v) 、质子数密度 ($N_{\rm p}$) 和质子温度 ($T_{\rm p}$), 图 4(d) 中垂直实线表示激波到达时刻.

从图 4 可见, ACE 观测到太阳风动压从 2000 年 7 月 1309 UT 开始在 20 min 内发生了两次主要的跃变, 首次在 3 min 内, 幅度增加 2.1 nPa, 后续在 17 min 内增加近 15 nPa, 行星际磁场 B_z 在扰动到达时开始由北转南, 然后开始剧烈震荡, 行星际电场方向也发生改变, 而强度在动压跃变最大时大幅度增加. Wind 观测类似于 ACE, 只是动压两次跃变在 17 min 内, 幅度完成. Goes 和 Geotail 也有两次跃变响应, 但表现为不完全同步发展. 0942 UT 地面观测到两步上升跃变的 SSC 事件, 3 个分布在北半球不同纬度的观测站也几乎同步观测到这个多步上升的 SSC 事件. 类似于 1979 年的 SSC 事件分

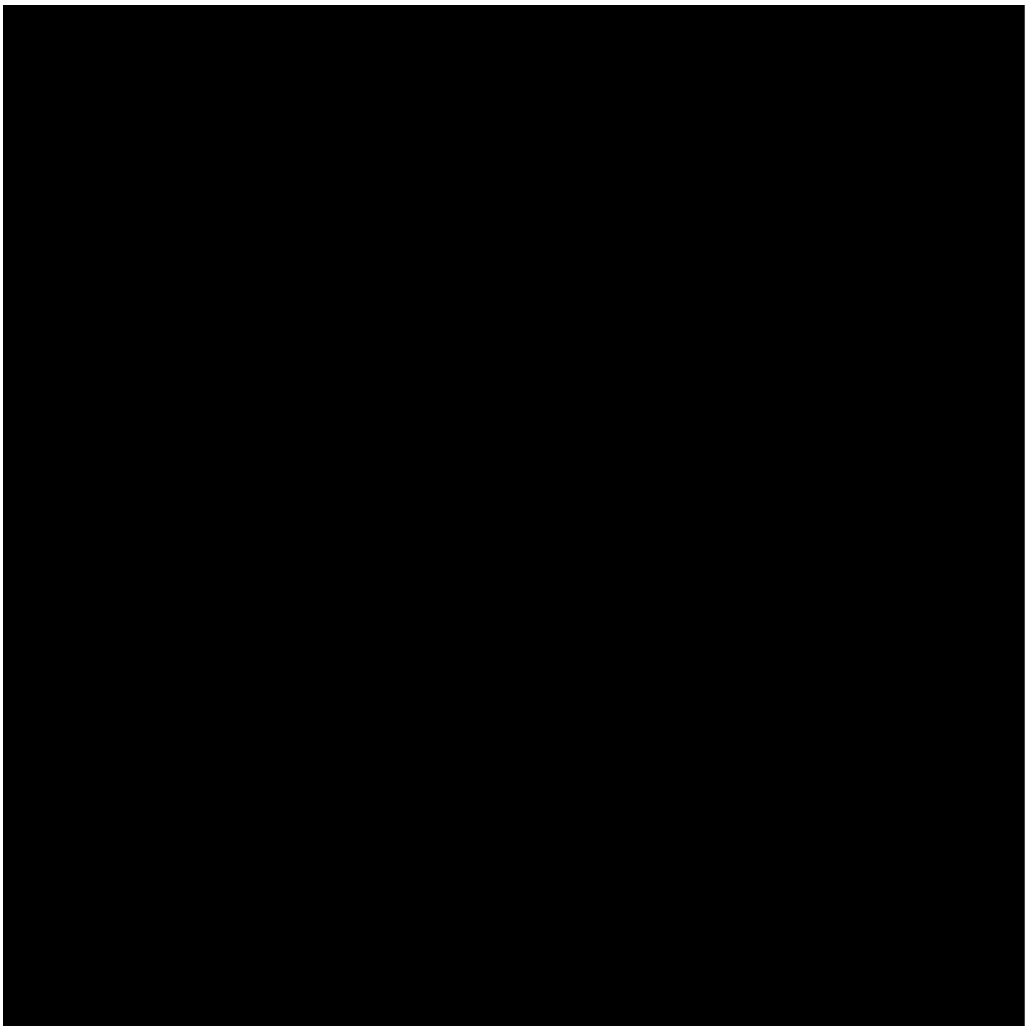

图 5 2004 年 12 月 11 日 ACE, Wind, Goes 12, Geotail 卫星和地面观测结果

Fig.5 A SSC event and relevant interplanetary condition observed by ACE, Wind, Goes 12, and Geotail on Dec. 11, 2004

析方法，我们计算得到激波法向与 x 轴夹角为 138.0°, 表明激波是比较倾斜的.

(4) 2004 年 12 月 11 日 SSC 事件

图 5 给出了 2004 年 12 月 11 日地面对行星际扰动的观测情况. 图 5(a) 从上到下依次为 ACE 观测到的太阳风和等离子体磁场在 GSE 坐标系中的 B_z 分量、行星际电场 (E_y)、动压 ($P_{\rm sw}$) 以及 Wind 观测到的磁场的 B_z 分量和动压 ($P_{\rm sw}$), 图 5(a) 中垂直实线表示扰动到达时刻. 图 5(b) 为 Goes 12 和 Geotail 观测到磁场变化和质子热压的变化，图 5(b) 中垂直实线表示扰动到达时刻. 图 5(c) 从上到下依次为 SYM-H 指数以及 GUA(13.59°N, 144.87°E), HER (34.42°S, 19.23°E), CZT (46.43°S, 51.86°E) 3 个站观测到的地磁水平分量 (H) 的变化, 图 5(c) 中垂直实线表示 SSC 上升时刻. 图 5(d) 从上到下依次为 ACE 观测到的太阳风和等离子体磁场强度 (B)、速度 (v)、质子数密度 ($N_{\rm p}$) 和质子温度 ($T_{\rm p}$), 图 5(d) 中垂直实线表示激波到达时刻.

从图 5 可见， ACE 观测到太阳风动压从 2004 年 12 月 11 日 1251 UT 开始在 10 min 内发生跃变, 幅度增加 4.6 nPa, 行星际磁场 B_z 在扰动到达时开始由北转南，然后开始剧烈震荡，但动压强度没有大的变化，只是保持着较高水平. Goes 和 Geotail 对行星际太阳风动压的响应比较吻合，表现出持续缓慢增加，1339 UT 地面观测到的 SSC 事件也是持续缓慢增加的. 同样，我们计算得到的激波法向与 x 轴夹角为 129.8°.

3.2 分析结果

总结上述对 5 个异常 SSC 事件的分析, 结果列于表 4. 5 个事件中有 4 个是由于前向行星际激波引起的，而且激波方向对异常 SSC 事件的上升时间起着重要作用，看起来激波越倾斜，引起的 SSC 上升时间越长，这与文献 [30] 的统计结果一致，但激波速度则与上升时间关系不大 (见图 6). 此外， 5 个事件中有 3 个对应着多步动压跃变，说明动压特性也直接影响 SSC 上升时间，而且相对而言多步跃变的动压引起的 SSC 上升幅度更大一些. 从表 4 中还可以看出， 5 个事件与行星际磁场方向关系不明显，北向行星际磁场条件、行星际磁场北转南和南转北条件下均可以发生异常 SSC 事件，但南向行星际磁场条件下能否发生异常 SSC 事件尚没有得到观测证实.

4 结论

通过利用多点卫星观测数据和地磁观测数据,

表 4 5 个异常 SSC 事件的分析结果

Table 4 Interplanetary causes of anomalous SSC events

事件 年-月-日	发生时间 UT	上升时间 /min	θ_{xn}/(°)	$v_{\rm sh}$ /(km·s^{-1})	动压跃变 幅度 /nPa	行星际原因
1979-07-28	2101	18	137.5	276	2.6, 5.5	前向行星际斜激波 两步动压跃变 北向行星际磁场事件
1995-12-15*	0445	30	119	327	3	前向行星际斜激波 动压跃变 北向行星际磁场事件
1998-06-10	1329	22			1.9, 4.1	行星际电场事件 多步动压跃变 南转北行星际磁场事件
2000-07-13	0942	17	138	414	2.1, 15	前向行星际斜激波 两步动压跃变 行星际磁场北转南剧烈振荡
2004-12-11	1339	20	129.8	549	4.6	前向行星际斜激波 动压跃变 行星际磁场北转南剧烈振荡

注： * 为文献 [3] 的结果.

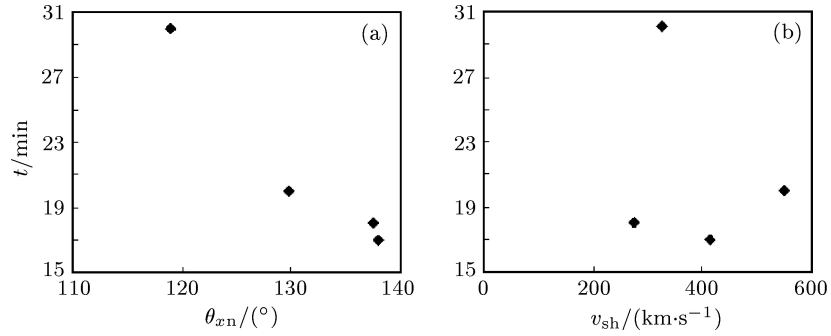

图 6 SSC 上升时间与激波方向和速度的关系

Fig.6 Relationship between the rise time of SSC and the interplanetary shock orientation

分析了异常 SSC 的行星际原因，可得如下结论.

(1) 异常 SSC 事件通常都是强烈行星际扰动引起的， 5 个异常 SSC 事件有 4 个对应行星际激波扰动，有 3 个对应多步太阳风动压跃变，有 1 个对应行星际电场大幅度变化.

(2) 由行星际激波扰动产生的异常 SSC 事件，其上升时间依赖于行星际扰动的方向，方向越偏，时间越长，而且行星际扰动的方向比速度对 SSC 异常增长时间贡献更大.

(3) 异常 SSC 事件上升时间与行星际磁场方向关系不明显.

参考文献

[1] Mayaud P N. A Hundred years series of geomagnetic data, 1868—1967, indices aa and storm sudden commencements. In: IAGA Bulletin (33). Paris: International Union of Geodesy and Geophysics, 1973

[2] Smith E J, Slavin J A, Zwickl R D, Bame S J. Shocks and storm sudden commencements. In: Kamide Y, Slavin J A ed. Solar Wind-Magnetosphere Coupling. Tokyo: Terra Science Press, 1986. 345~365

[3] Matsushita S. On geomagnetic sudden commencements, sudden impulses, and storm durations. *J. Geophys. Res.*, 1962, **67**:3753~3777

[4] Araki T. Global structure of geomagnetic sudden commencements. *Planet. Space Sci.*, 1977, **25**:373~384

[5] Winken B, Goertz C K, Baker D N, Higbie P R, Friz A. The SSC on July 29, 1977, and its propagation within the magnetosphere. *J. Geophys. Res.*, 1982, **87**:5901~5910

[6] Araki T. A physical model of geomagnetic sudden commencements. In: Engebretson M J *et al* ed. Solar Wind Sources of Magnetospheric Ultra-Low-Frequency Waves. Washington: AGU, 1994. 183~200

[7] Lam *et al*. A case study test of Araki's physical model of geomagnetic sudden commencement. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**:13 135~13 144

[8] Fujita S, Tanaka T, Kikuchi T, Fujimoto K, Hosokawa K, Itonaga M. A numerical simulation of the geomagnetic sudden commencement: 1 Generation of the field-aligned current associated with the preliminary impulse. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**(A12):SMP2.1–SMP2.14

[9] Fujita S, Tanaka T, Kikuchi T, Fujimoto K, Hosokawa K, Itonaga M. A numerical simulation of the geomagnetic sudden commencement: 2 Plasma process in the main impulse. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**(A12): SMP3.1-SMP2.12

[10] Fujita S, Tanaka T, Kikuchi T, Fujimoto K, Hosokawa K, Itonaga M. A numerical simulation of the geomagnetic sudden commencement: 3 a sudden commencement in the magnetosphere-ionosphere compound system. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**(A11):A11203.1- A11203.8

[11] Villante U, Piersanti M, Giuseppe D P, Vellante M, Zhang T L, Magnes W. Sudden commencement event of 17 April 2002: Aspects of the geomagnetic response at low latitudes. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**(A12):A12S23.1-A12S23.10

[12] Siscoe G L, Formisano V, Lazarus A J. Relation between geomagnetic sudden impulses and solar wind pressure changes-an experimental investigation. *J. Geophys. Res.*, 1968, **73**:4869~4874

[13] Russel C T, Ginskey M, Petrinec S, Le G. The effect of solar wind dynamic pressure changes on low and mid-latitude magnetic records. *Geophys. Res. Lett.*, 1992, **19**:1227~1230

[14] Russell C T, Ginskey M, Petrinec S M. Sudden impulses at lowl atitude stations: Steady state response for northward interplanetary magnetic field. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**:253~261

[15] Russell C T, Ginskey M, Petrinec S M. Sudden impulses at lowl atitude stations: Steady state response for southward interplanetary magnetic field. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**:13 403~13 408

[16] Fowler G J, Russell C T. Geomagnetic field response along the polar orbit to rapid changes in the solar

wind dynamic pressure. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**:18 943∼18 956

[17] Sastri J H, Takeuchi T, Araki T, Yumoto K, Tsunomura S, Tachihara H, Luehr H, Watermann J. Preliminary impulse of the geomagnetic storm sudden commencement of November 18, 1993. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**:3905∼3918

[18] Chi P J, Russell C T, Raeder J, Zesta E, Yumoto K, Kawanto H, Kitamura K, Petrinec S M, Angelopoulos V, Le G, Moldwin M B. Propagation of the preliminary reverse impulse of sudden commencements to low latitudes. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**:18 857∼18 864

[19] Kataoka R, Fukunishi H, Lanzerotti L J, Maclennan C G, Frey H U, Mende S B, Doolittle J H, Rosenberg T J, Waetherwax A T. Magnetic impulse event: A detailed case study of extended ground and space observations. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**:25 873∼25 889

[20] Kikuchi T S, Tsunomura S, Hashimoto K. Field aligned current effects on mid-latitude geomagnetic sudden commencement. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**:15 555∼15 565

[21] Lee Dong-Hun, Sung Suk-Kyung. Propagation of sudden impulses in a dipolar magnetosphere. *J. Kor. Astron. Soc.*, 2003, **36**:S101∼S107

[22] Maeda H, Sakurai K, Ondoh T, Yamamoto M. Solar terrestrial relationships during the IGY and IGC. *Ann. Geophys.*, 1962, **18**:305∼310

[23] Jursa A S. Handbook of Geophysics and the Space Environment. Springfiled: Air Force Geophysics Laboratory, 1985. 14∼19

[24] Nishida A. Transmission of storm sudden commencements through the interplanetary space; shock wave mode and non-shock mode. *Rep. Ionos. Space Res. Jap.*, 1964, **18**:295∼231

[25] Mellott M M. Subcritical collisionless shock waves. In: Tsurutani B T *et al* ed. Collisionless Shocks in the Heliosphere, Reviews of Current Research, Geophysical Monograph Series (35). Washington: AGU, 1985. 69∼73

[26] Dessler A J, Francis W E, Parker E N. Geomagnetic storm sudden commencement rise times. *J. Geophys. Res.*, 1960, **65**:2715∼2720

[27] Ondoh T. Longitudinal distribution of SSC rise time. *J. Geomagn. Geoele.*, 1963, **14**:198∼203

[28] Nishida A. Interpretation of SSC rise time. *Rep. Ionos. Space Res. Jap.*, 1966, **20**:42∼49

[29] Baumjohann W, Bauer O H, Haerendel G, Junginger H. Magnetospheric plasma drifts during a sudden impulse. *J. Geophys. Res.*, 1983, **88**:9287∼9294

[30] Wang C, Li C X, Huang Z H, Richardson J D. Effect of interplanetary shock strengths and orientations on storm sudden commencement rise times. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, **33**:14 104∼14 106

[31] Takeuchi T, Russell C T, Araki T. Effect of the orientation of interplanetary shock on the geomagnetic sudden commencement. *J. Geophys. Res.*, 2002 **107**(A12): 1423∼1431

[32] Wang C, Huang Z H, Hu Y Q, Guo X C. 3D global simulation of the interaction of interplanetary shocks with the magnetosphere. In: Li G *et al* ed. The Physics of Collisionless Shocks. Washington: American Institute of Physics, 2005. 320∼324

[33] Schwartz S J. Shock and discontinuity normals, mach numbers, and related parameters. In: Paschmann G *et al* ed. Analysis Methods for Multi-Spacecraft Data. Noordwijk: ESA Publ. Div., 1998

[34] Liu Shuhui, Marsch E, Schwenn R, Rosenbauer H. A method for shock determination and classification. In: Daniel W *et al* ed. Proceedings of the Eigth International Solar Wind Conference: Solar Wind Eight.Dana Point. California: American Institute of Physics, 1996. 376∼379