

史良文, 申成龙, 汪毓明. 2014. 2007—2012 年 $Dst_{\min} \leq -50$ nT 的中等以上地磁暴的行星际源统计. 地球物理学报, 57(11): 3822-3833, doi:10. 6038/cjg20141136.

Shi L W, Shen C L, Wang Y M. 2014. The interplanetary origins of geomagnetic storm with $Dst_{\min} \leq -50$ nT in 2007—2012. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(11): 3822-3833, doi:10. 6038/cjg20141136.

2007—2012 年 $Dst_{\min} \leq -50$ nT 的 中等以上地磁暴的行星际源统计

史良文^{1,2,3}, 申成龙^{1,2*}, 汪毓明^{1,2}

1 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026

2 中国科学院近地空间环境重点实验室, 合肥 230026

3 安徽蒙城地球物理国家野外科学观测研究站, 合肥 230026

摘要 地磁暴的行星际源研究是了解及预报地磁暴的关键因素之一. 本文研究了 2007—2012 年间的所有 $Dst_{\min} \leq -50$ nT 的中等以上地磁暴, 建立了这些地磁暴及其行星际源的列表. 在这 6 年中, 共发生了 51 次 $Dst_{\min} \leq -50$ nT 的中等以上地磁暴, 其中 9 次为 $Dst_{\min} \leq -100$ nT 的强地磁暴事件. 对比上一活动周相同时间段发现, 在这段太阳活动极低的时间, 地磁暴的数目显著减少. 对这些地磁暴行星际源的分析表明, 65% 的中等以上地磁暴由与日冕物质抛射相关的行星际结构引起, 31% 的地磁暴由共转相互作用区引起, 这与以前的结果一致. 特别的, 在这个太阳活动极低时期内, 共转相互作用区没有引起 $Dst_{\min} \leq -100$ nT 的强地磁暴, 同时, 日冕物质抛射相关结构也没有引起 $Dst_{\min} \leq -200$ nT 的超强地磁暴. 以上结果表明极低太阳活动同时导致了共转相互作用区和日冕物质抛射地磁效应的减弱. 进一步, 分析不同太阳活动期间地磁暴的行星际源发现: 在太阳活动低年(2007—2009 年), 共转相互作用区是引起地磁暴的主要原因; 而在太阳活动上升期和高年(2010—2013 年), 大部分(75%, 30/40)的中等以上地磁暴均由日冕物质抛射相关结构引起.

关键词 地磁暴; 行星际起源; 行星际日冕物质抛射; 共转流相互作用区

doi:10. 6038/cjg20141136

中图分类号 P353

收稿日期 2014-05-05, 2014-06-18 收修定稿

The interplanetary origins of geomagnetic storm with $Dst_{\min} \leq -50$ nT in 2007—2012

SHI Liang-Wen^{1,2,3}, SHEN Cheng-Long^{1,2*}, WANG Yu-Ming^{1,2}

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

2 Key Laboratory of Geospace Environment, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026, China

3 Mengcheng National Geophysical Observatory, Hefei 230026, China

Abstract Previous results show that various interplanetary structures, such as interplanetary coronal mass ejections (ICMEs) and corotating interaction regions (CIRs), may contain the southward component of the magnetic field. Thus, all these structures are thought to be the

基金项目 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-01); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2011CB811403); 国家自然科学基金(41131065, 41274173, 40874075, 41121003); 中国科学院百人计划(KZCX2-YWQN511); 教育部(20113402110001)和大学基础研究计划(WK2080000031); 中国科学院空间科学战略性先导科技专项(XDA04060801); 中国科学院知识创新工程项目(YYYJ-1110-03)资助.

作者简介 史良文, 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 研究方向: 日地物理. E-mail: slwen@mail.ustc.edu.cn

* **通讯作者** 申成龙, 男, 重庆合川人, 副教授, 研究方向: 日地空间环境. E-mail: clshen@ustc.edu.cn

interplanetary origins of the geomagnetic storm. In this paper, all moderate and strong geomagnetic storms with $Dst_{\min} \leq -50$ nT between 2007 and 2012 are studied. During this period, there are total 51 geomagnetic storms, in which 9 geomagnetic storms are strong events with $Dst_{\min} \leq -100$ nT. The number of the geomagnetic storm during this period is much smaller than similar period of 1996—2001 in the previous solar cycle. In addition, the interplanetary origins of these geomagnetic storms are identified based on the in-situ observations from WIND and ACE. It is found that 65% geomagnetic storms with $Dst_{\min} \leq -50$ nT were caused by the structures related to coronal mass ejections (CMEs), and 31% were caused by corotating interaction regions (CIRs). It should be noted that in this period, the CME related structures did not produce any extreme strong geomagnetic storm with $Dst_{\min} \leq -200$ nT and the CIR did not cause the strong geomagnetic storm with $Dst_{\min} \leq -100$ nT. These results suggest that the geoeffectiveness of the CME and CIR is weak in this period. Furthermore, we found that the CIRs were the main cause of geomagnetic storms in solar minimum while CMEs-related structures were the main cause of geomagnetic storm in the rising phase and solar maximum.

Keywords Geomagnetic storms; Interplanetary origins; Interplanetary CME; CIR

1 引言

在中低纬台站经常观测到地磁场水平分量大幅度减小,并且大约持续数天,这种现象叫做地磁暴(Gonzalez et al., 1994).地磁暴是一类灾害性空间天气事件,它能引起磁层、电离层和中高层大气等的剧烈变化,从而对航天器、输电系统等产生各种危害.一般地,地磁暴的强度可用 AE 指数、 Kp 指数以及 Dst 指数等来描述.根据 Dst 指数最小值的不同,地磁暴可分为弱磁暴($Dst_{\min} \leq -30$ nT)、中等磁暴($Dst_{\min} \leq -50$ nT)以及强磁暴($Dst_{\min} \leq -100$ nT)等.

一般认为,地磁暴是具有南向分量的行星际磁场与地球磁层发生相互作用而形成(Gonzalez et al., 1994).因而,可能伴随行星际磁场南向分量的行星际日冕物质抛射、激波以及共转相互作用区等被认为是地磁暴的主要行星际源(Gonzalez et al., 1994, 1999; Zhang et al., 2003; Wang et al., 2002b; Xue et al., 2005; Gonzalez et al., 2007; Zhang et al., 2007b; Echer et al., 2008; Gonzalez et al., 2011; Echer et al., 2013).近年特别是进入 23 太阳活动周以来,随着观测技术的进步,人们开始对太阳活动和近地空间的环境进行长期的监测.利用这些观测数据,人们对地磁暴特别是强地磁暴的行星际源进行了深入、广泛的讨论.根据太阳和行星际局地观测,Zhang 等(2007a, 2007b)统计分析了 1996—2005 年间 $Dst_{\min} \leq -100$ nT 的强地磁暴的行星际和太阳源,发现大部分(87%)的强地磁暴

主要由日冕物质抛射(Coronal Mass Ejection, CME)及其相关行星际结构引起,而共转相互作用区(Corotating Interaction Regions, CIR)则引起了约 13% 的强地磁暴.对 1996—2008 年的中等地磁暴(-100 nT $< Dst_{\min} \leq -50$ nT)的行星际源分析,Echer 等(2013)发现共转相互作用区和太阳风高速流(HSSs)是中等地磁暴的主要驱动力.进一步,人们根据 23 太阳周完整的行星际和地磁暴观测数据,对太阳活动不同强度时的地磁暴强度及起因进行了研究,发现在太阳低年,共转相互作用区是引起地磁暴的主要起因,而在太阳高年,行星际日冕物质抛射(Interplanetary Coronal Mass Ejection, ICME)及其相关结构则是引起地磁暴的主要因素(Zhang et al., 2007a; Echer et al., 2013).

现有的研究工作已对上一太阳周的地磁暴事件进行了较完整的分析和讨论.2008 年开始,太阳进入了一个活动极弱的时期.2008 年和 2009 年中,分别出现了 266 天和 262 天的无黑子日(李可军等, 2010).同时,人们也开始注意到 23 太阳周后地磁活动性急剧减弱,并根据不同的观测资料对地磁活动性减弱的原因进行了讨论(Richardson, 2013; Gopalswamy et al., 2014),发现可能的原因是在这段时间内日冕物质抛射的数目和速度(Richardson, 2013)、太阳风的磁场强度(Gopalswamy et al., 2014)等均明显下降.同时,2007—2012 年间地磁暴及其行星际源的完整列表仍没有建立,对这段时期内地磁暴的完整统计分析研究仍缺乏.本文将根据 WIND 卫星和 ACE 卫星的局地行星际磁场以及太

阳风等离子体参数等的观测数据,对 2007—2012 年间的所有中等以上($Dst_{\min} \leq -50$ nT)地磁暴及其行星际源进行统计分析.第 2 节将给出地磁暴事例的选取及发生率随太阳周的变化.第 3 节将介绍地磁暴行星际源的认定方法、典型事例及统计结果.最后,将在第 4 节中给出结论和讨论.

2 地磁暴事件的选取及其发生率年变化

根据国际数据中心(<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/>)提供的 Dst 指数数据,我们挑选出了 2007 年至 2012 年所有的 Dst 指数峰值小于 -50 nT ($Dst_{\min} \leq -50$ nT)的中等以上地磁暴事件.图 1 给出了这段时间内 Dst 指数随时间的变化.图中的菱形符号对应于我们所选取的事件及其峰值大小.在此期间,国际数据中心一共记录到 51 次 $Dst_{\min} \leq -50$ nT 的中等以上地磁暴,其中有 9 次 $Dst_{\min} \leq -100$ nT 的强磁暴,没有 $Dst_{\min} \leq -200$ nT 的特大地磁暴.2007 年至 2012 年中,最强的地磁暴发生于 2011 年 10 月 25 日,其 Dst 指数峰值为 -132 nT.

为了比较,选取了上一活动周类似的区间:1996 年至 2001 年.图 2 给出了太阳黑子数随时间的变化,图中阴影区域(b)为本文所研究的时间段,阴影区域(a)为上次类似时间段(1996 年至 2001 年).可以看到,在本文研究的区间中(图 2 中阴影区域

(b)),黑子数远小于上一类似时期,这表明在该段时期内太阳活动性显著减弱.同时,对地磁暴产生数的对比发现,2007 年至 2012 年间的地磁暴数目显著减小.在 1996 年至 2001 年间,发生了 48 次 $Dst_{\min} \leq -100$ nT 的强磁暴事件(Zhang et al., 2007b),其中 $Dst_{\min} \leq -200$ nT 的地磁暴发生了 10 次,最大地磁暴的 Dst 指数峰值为 -387 nT(2001 年 3 月 31 日).对比结果表明,2007 年开始的这个太阳活动极小期及 24 周的太阳活动上升期,地磁活动显著减弱,这与以前所得结果一致(Gopalswamy et al., 2014).

图 3 给出了这段时间地磁暴发生数随年度的变化.从图 3 可以看到,地磁暴的发生数呈现明显的太阳活动周变化,其发生数与太阳黑子数(图 3 中的红色“*”符号)的演化规律基本一致.2007 年和 2008 年,每年各发生了 5 次中等以上地磁暴事件.而在太阳活动极低的 2009 年,只有一个中等以上地磁暴发生.随着太阳活动的增强,从 2010 年开始,地磁暴的数目快速增加.特别的,2012 年共记录到中等以上地磁暴 19 次.图 3 中蓝色部分给出了 $Dst_{\min} \leq -100$ nT 的强地磁暴数目随年份的变化.可以看到,在太阳活动较弱的 2007 年至 2010 年,没有发生 $Dst_{\min} \leq -100$ nT 的强地磁暴.随着太阳黑子数的迅速增加,2011 年和 2012 年分别发生了 3 次和 6 次 $Dst_{\min} \leq -100$ nT 的强磁暴.这表明地磁活动的

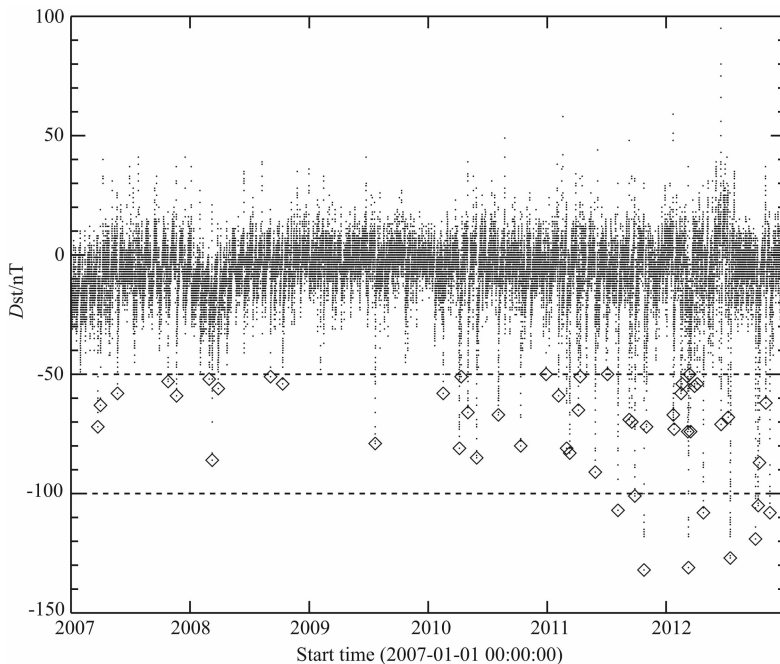


图 1 2007—2012 年间 Dst 指数变化图

Fig. 1 The Dst index from 2007 to 2012

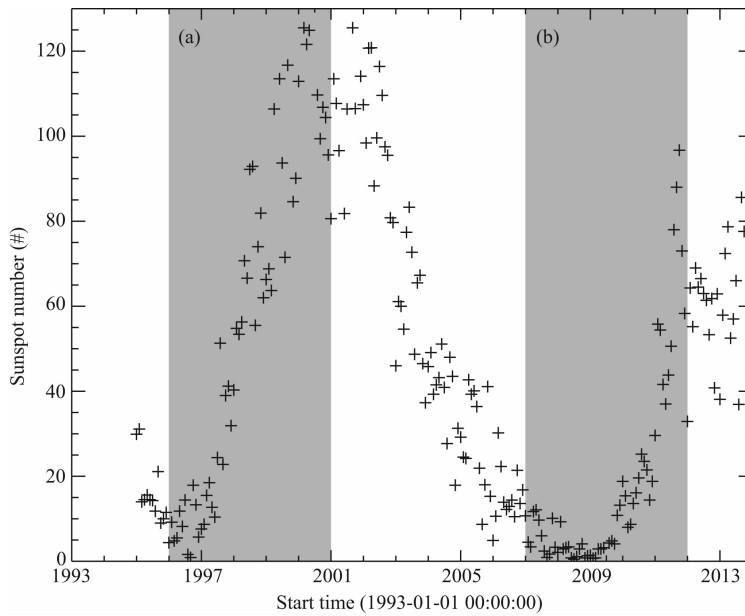


图 2 1995—2013 年黑子数的变化

图中阴影区域(b)为本文所分析的时间段, 阴影区域(a)为上次类似时间段 1996 年至 2001 年.

Fig. 2 The sunspot number from 1995 to 2013

The shadow (b) shows the period we studied in this work while the shadow

(a) shows the previous similar region from 1996 to 2001.

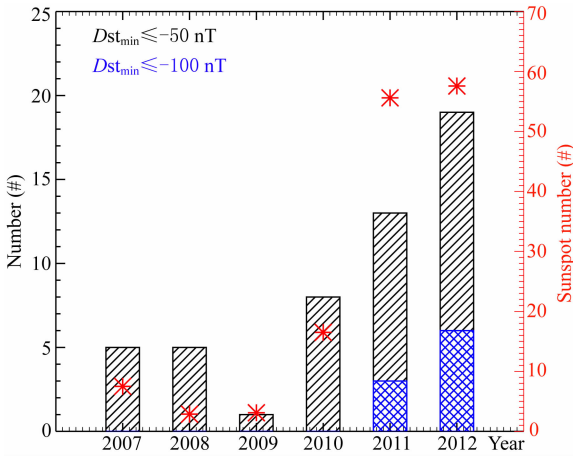


图 3 地磁暴发生数年变化图

图中蓝色部分表示 $Dst_{min} \leq -100$ nT 的强地磁暴的数量, 红色符号表示年平均黑子数.

Fig. 3 The annual number of geomagnetic storm

The blue regions show the number of large geomagnetic storm with $Dst_{min} \leq -100$ nT. The red symbols show the annual sunspot numbers.

强弱可能受太阳活动强弱的直接影响.

3 地磁暴的行星际源

我们利用 WIND 卫星和 ACE 卫星的局地行星际磁场及太阳风等离子体观测数据认证了 2007 年

至 2012 年间的 51 次地磁暴事件的行星际源. 在 Zhang 等 (2007a) 以及 Echer 等 (2013) 的工作中, 地磁暴对应的行星际源被详细地分为行星际日冕物质抛射、具有前导激波的行星际日冕物质抛射、激波鞘区、共转相互作用区、高速太阳风等. 在本文中, 我们把地磁暴的行星际源简单分为与日冕物质抛射相关的现象、与共转相互作用区相关现象及其他等三类. 表 1 给出了这些事件的列表和行星际源认证结果. 同时, 我们的在线列表 (<http://space.ustc.edu.cn/dreams/geostorms2007/> (保持更新)) 还进一步给出了这些事件的相关图像. 下面, 将对每一类事件的典型事例进行详细说明.

3.1 与日冕物质抛射相关的地磁暴

行星际日冕物质抛射是行星际局地观测所探测到的特殊结构, 一般被认为是日冕物质抛射的行星际观测表现. 行星际日冕物质抛射的可能观测特征包括增强的磁场、高能粒子通量的降低、增强的磁场、不同寻常的电离态以及双向电子流等 (Wang et al., 2002b; Jian et al., 2006a). 快速的日冕物质抛射可能驱动激波, 进而与太阳风相互作用形成由激波、激波鞘区和行星际日冕物质抛射所组成的结构. 图 4 给出了一个由与日冕物质抛射相关结构引起的地磁暴的典型事例. 图中灰色阴影区域为可能的行星际日冕物质抛射区域. 该行星际日冕物质抛射于

表 1 2007—2012 年所有中等以上地磁暴及其行星际源种类列表

Table 1 The list of the geomagnetic storm with $Dst_{\min} \leq -50$ nT from 2007 to 2012 and the types of their interplanetary sources

编号	峰值时间	峰值强度/nT	行星际源种类	编号	峰值时间	峰值强度/nT	行星际源种类
1	2007-03-24T09:00	-72	ICME	27	2011-08-06T04:00	-107	ICME+SH
2	2007-04-01T09:00	-63	CIR	28	2011-09-09T18:00	-69	CIR
3	2007-05-23T14:00	-58	CIR	29	2011-09-17T16:00	-70	ICME+SH
4	2007-10-25T22:00	-53	CIR	30	2011-09-27T00:00	-101	ICME+SH
5	2007-11-20T21:00	-59	ICME	31	2011-10-25T02:00	-132	ICME+SH
6	2008-02-28T23:00	-52	CIR	32	2011-11-01T16:00	-72	ICME+SH
7	2008-03-09T06:00	-86	CIR	33	2012-01-22T22:00	-67	ICME+SH
8	2008-03-27T22:00	-56	CIR	34	2012-01-25T11:00	-73	Shock
9	2008-09-04T05:00	-51	ICME	35	2012-02-15T17:00	-58	ICME
10	2008-10-11T12:00	-54	CIR	36	2012-02-19T05:00	-54	CIR
11	2009-07-22T10:00	-79	CIR	37	2012-03-07T10:00	-74	CIR
12	2010-02-15T23:00	-58	ICME	38	2012-03-09T09:00	-131	ICME+SH
13	2010-04-06T15:00	-81	ICME+SH	39	2012-03-12T17:00	-50	ICME+SH
14	2010-04-12T02:00	-51	ICME+SH	40	2012-03-15T21:00	-74	ICME+SH
15	2010-05-02T18:00	-66	CIR	41	2012-03-28T05:00	-55	ICME+SH
16	2010-05-29T14:00	-85	ICME+SH	42	2012-04-05T08:00	-54	ICME
17	2010-08-04T05:00	-67	ICME+SH	43	2012-04-24T05:00	-108	ICME+SH
18	2010-10-11T19:00	-80	ICME	44	2012-06-17T14:00	-71	ICME+SH
19	2010-12-28T17:00	-50	Others	45	2012-07-09T13:00	-68	ICME
20	2011-02-04T22:00	-59	CIR	46	2012-07-15T19:00	-127	ICME+SH
21	2011-03-01T15:00	-81	CIR	47	2012-10-01T05:00	-119	ICME+SH
22	2011-03-11T06:00	-83	CIR	48	2012-10-09T09:00	-105	ICME+SH
23	2011-04-06T19:00	-65	ICME+SH	49	2012-10-13T08:00	-87	ICME
24	2011-04-12T10:00	-51	CIR	50	2012-11-01T21:00	-62	ICME+SH
25	2011-05-28T12:00	-91	ICME	51	2012-11-14T08:00	-108	ICME+SH
26	2011-07-05T01:00	-50	ICME				

注:ICME:行星际日冕物质抛射;ICME+SH:行星际日冕物质抛射及其驱动激波结构;Shock:激波;CIR:共转相互作用区;Other:太阳风中其他小尺度结构。

2010年5月28日19:50UT到达地球,2010年5月29日12:10UT结束.在该区域中,磁场强度明显增强且平滑旋转、质子温度和等离子 β 低且存在明显的双向电子流,这是一个典型的行星际日冕物质抛射观测.同时,该行星际日冕物质抛射驱动激波于2010年5月28日01:50UT(如图中红色虚线所示)被WIND卫星观测到.从 Dst 指数随时间的演化可以看出,该激波的到来引起了 Dst 指数的突然增加,即地磁暴急始的开始.随后,伴随着鞘区和ICME所携带的南向行星际磁场的到来, Dst 指数缓慢下降,开始了磁暴的主相,并于2010年5月29日14:00到达其峰值-85 nT.

一般认为,地球附近观测到的行星际激波由日冕物质抛射驱动.但是,一些局地探测到的行星际激波可能并没有观测到随后的行星际日冕物质抛射结构(Gopalswamy et al., 2009).这并不表明这类激波不是由日冕物质抛射驱动,可能的原因有:(1)激波宽度远大于日冕物质抛射本体,这导致我们的局地观测只能探测到激波而探测不到日冕物质抛射本体;(2)日冕物质抛射在传播过程中发生偏转(Shen et al., 2011a; Wang et al., 2004; Gopalswamy et al., 2009; Wang et al., 2014),而导致其本体没有被局地卫星探测到.激波到达地球压缩行星际磁场也可能引起地磁暴,图5给出一个只由激波引起的地

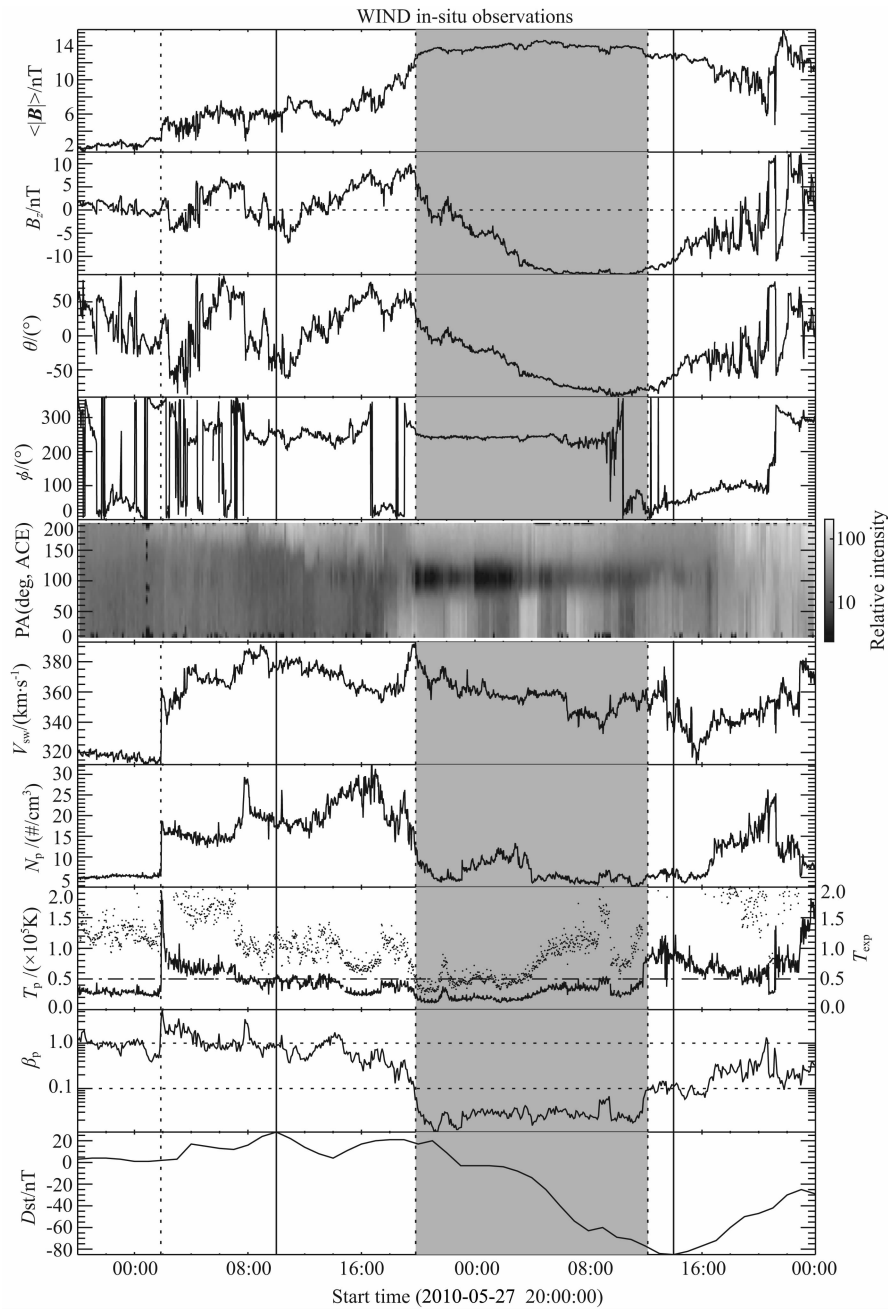


图 4 与日冕物质抛射相关的地磁暴典型事例(2010 年 5 月 29 日地磁暴)的 WIND 卫星和 ACE 卫星的行星际观测
 从上到下各面板依次为: 总磁场强度; z 方向磁场分量强度 B_z ; 磁场立体角; 磁场方位角; 各个方向电子强度的
 分布(来自于 ACE 卫星); 背景太阳风速度; 质子密度; 质子温度; 离子体; Dst 指数.

Fig. 4 The WIND and ACE in-situ observations for a typical example (the May 29 2010 geomagnetic storm)
 of the geomagnetic storm caused by interplanetary coronal mass ejection

From top to bottom, they are the magnetic field strength (B), the southward component of magnetic field (B_z), the elevation (θ) and azimuthal (ϕ) of field direction, the energetic electron distribution at different position angle (PA), solar wind speed (V_{sw}), proton density (N_p), proton temperature (T_p), the ratio of proton thermal pressure to magnetic pressure (β), and the geomagnetic index (Dst) respectively.

磁暴事例:2012 年 1 月 24 日事例. Shen 等(2013, 2014)报道了这次激波事件及其驱动的太阳物质抛射,他们发现这个激波由爆发于日面($15^\circ W, 40^\circ N$)的一次全晕状日冕物质抛射引起.但由于日冕物质抛射本体的宽度较小或可能的偏转,WIND 卫星未

观测到日冕物质抛射本体对应的行星际日冕物质抛射,而只观测到了这次具有较宽宽度的激波.由于该类事件中的激波也是由日冕物质抛射所驱动,因而在本文中我们仍认为该类事件为与日冕物质抛射相关的地磁暴.

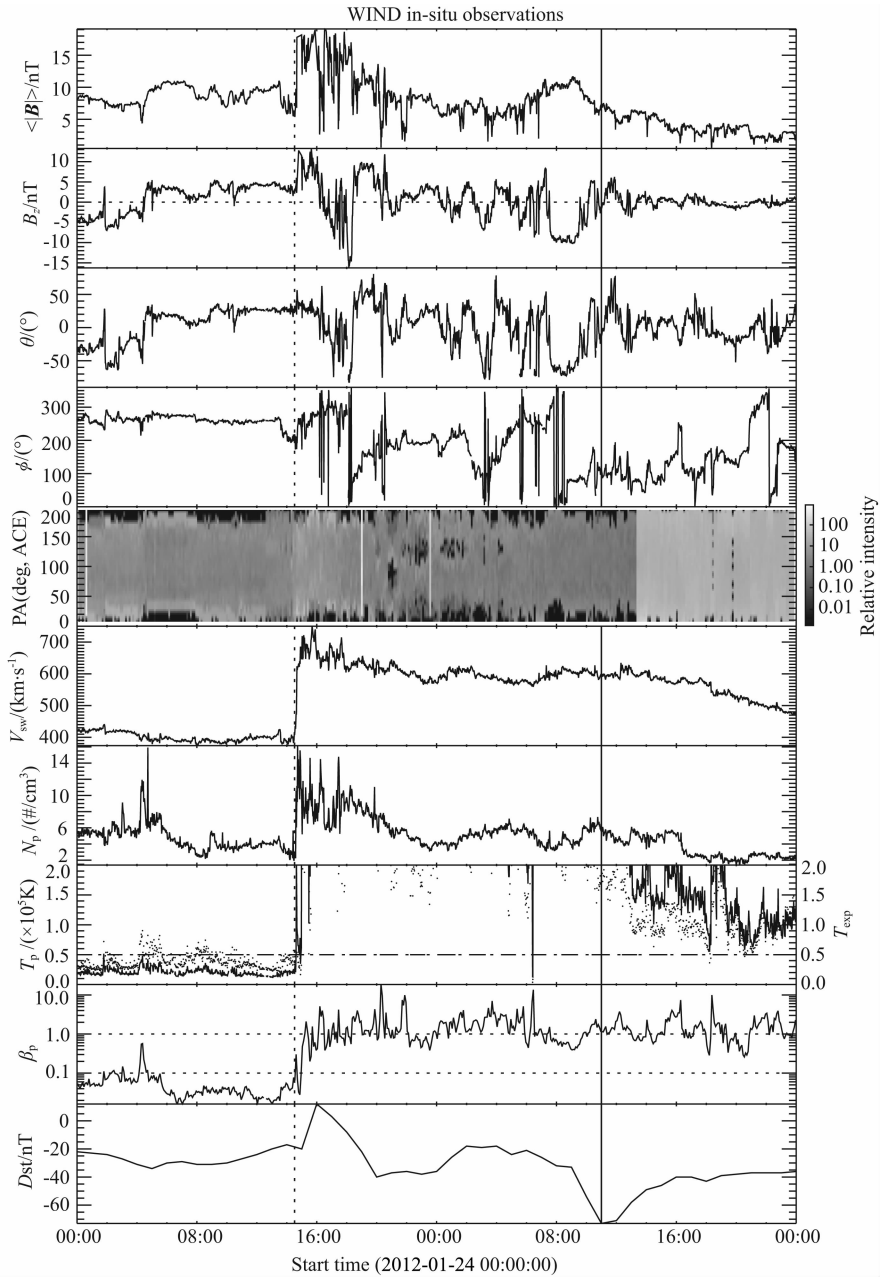


图 5 由激波引起的地磁暴示意图:2012年1月24日地磁暴事件

Fig. 5 A typical event of the geomagnetic storm caused by the shock; 2012 January 24 event

基于卫星的局地观测数据,多个日冕物质抛射在行星际空间中形成复杂结构也已被广泛地报道 (Wang et al., 2003a, 2002a, 2003b, 2003c; Lugaz and Farrugia, 2014), 在本文中,我们没有单独区分这种复杂结构,而简单归为与日冕物质抛射相关结构类. 因而,与日冕物质抛射相关结构包括单个行星际日冕物质抛射、行星际日冕物质抛射及其驱动激波结构以及日冕物质抛射相互作用复杂结构等三小类,这三类均与太阳爆发活动相关.

3.2 与共转相互作用区相关的地磁暴

共转相互作用区是高速太阳风和低速太阳风相

互作用形成的区域 (Jian et al., 2006b). 图 6 给出了一次由共转相互作用区引起地磁暴的典型事例:2010年5月2日地磁暴事件. 在该次事件中,共转相互作用区于2010年5月2日03:00UT至16:00UT间被局地卫星观测到. 从图6可以看到,该区间为低速太阳风和高速太阳风的过渡区间,在该区间内太阳风速度缓慢上升. 而高速太阳风与低速太阳风的相互作用导致了该区域内的磁场、等离子体密度和温度的增强. 本次共转相互作用区所携带的南向行星际磁场使得 Dst 指数从约2010年5月2日09:00UT开始下降,并于2010年5月2日18:00UT达到其

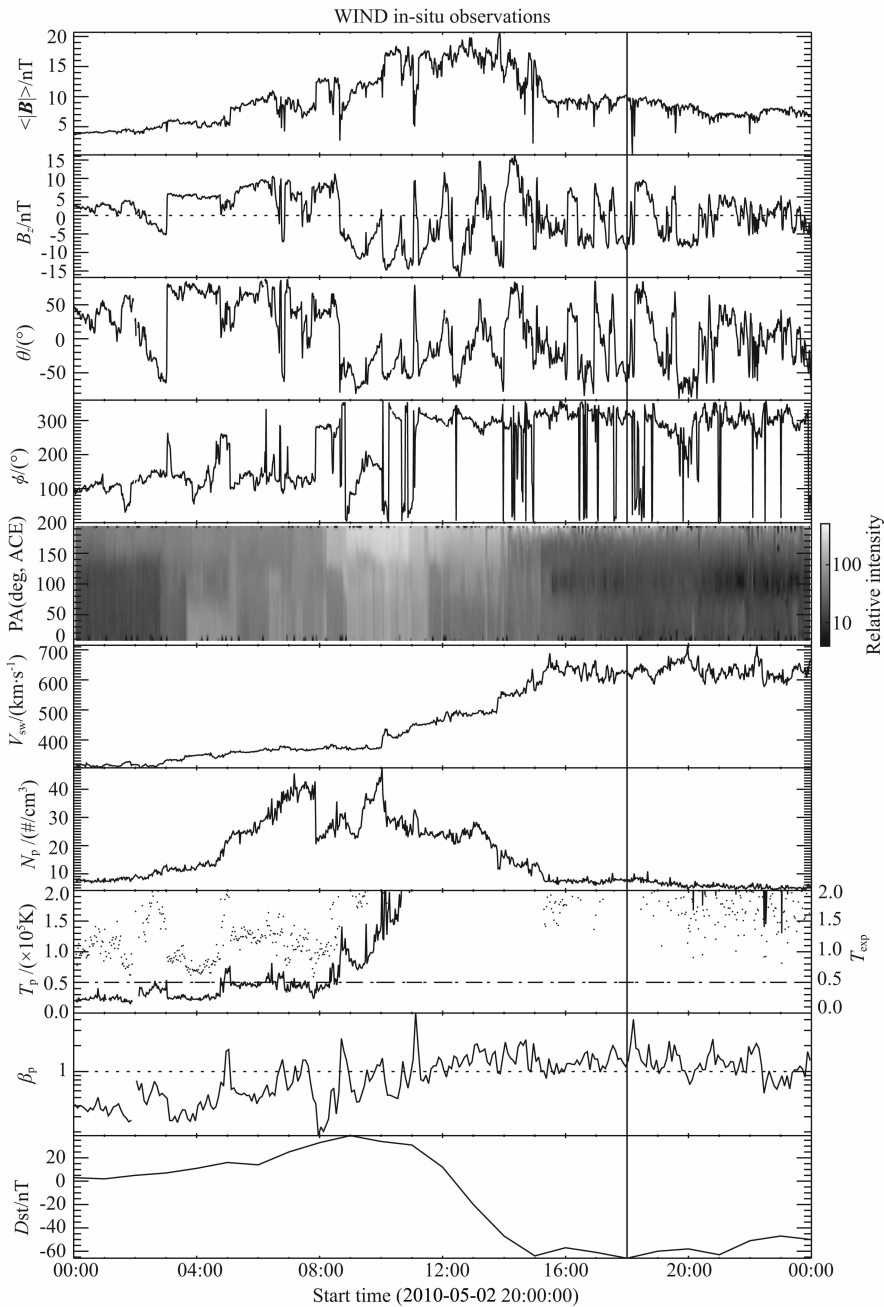


图 6 由共转相互作用区引起的地磁暴示意图:2010 年 5 月 2 日地磁暴事件

Fig. 6 A typical event of geomagnetic storm caused by co-rotating interaction region; the 2010 May 2 event

峰值 -66 nT.

3.3 其他行星际源引起的地磁暴

在本文中,其他不与日冕物质抛射或者共转相互作用区相关的行星际源均归为其他类.图 7 给出了一个事例:2010 年 12 月 28 日地磁暴事件.从图中可以看出,该次地磁暴开始时间约为 2010 年 12 月 28 日 11:00UT,并于 2010 年 12 月 28 日 17:00UT 到达其峰值 -50 nT.在该段时间附近,行星际观测无法找到明显的结构.从图 7 中可以看到,在该段时间中太阳风中存在一些小尺度的磁场扰动.这些扰

动中的南向行星际磁场是形成这次地磁暴事件的主因.

3.4 统计结果

表 2 给出了对所有事件的行星际源的统计结果.从表中可以看到,在 2007 年至 2012 年这段时间内,大部分(65%)的地磁暴由与日冕物质抛射相关的行星际结构引起,而由共转相互作用区引起的地磁暴占总地磁暴的 31%.特别的,所有 $Dst_{\min} \leq -100$ nT 的强磁暴均由与日冕物质抛射相关的行星际结构引起.而在 1996 年至 2001 年间的,共转相

表 2 不同强度及不同行星际源引起的地磁暴数目

Table 2 The number of geomagnetic storm caused by different interplanetary source

	与日冕物质 抛射相关	与共转相 作用区相关	其他	总数
$-50 \text{ nT} \leq Dst_{\min} < -100 \text{ nT}$	24	16	2	42
$Dst_{\min} \leq -100 \text{ nT}$	9	0	0	9
所有事例	33	16	2	51

相互作用区引起了 3 次 $Dst_{\min} \leq -100 \text{ nT}$ 的强地磁暴事件 (Zhang et al., 2007a). 这表明, 在这段太阳活

动较弱的时期内, 共转相互作用区的地磁效应也被削弱. 同时, 日冕物质抛射相关结构也没能引起 $Dst_{\min} \leq -200 \text{ nT}$ 的地磁暴, 这也表明日冕物质抛射本身的地磁效应相对也显著减弱. 图 8 给出了不同行星际源引起地磁暴数目随年份的变化. 从图中可看到, 在太阳下降期的 2007 年和 2008 年, 大部分地磁暴均由共转相互作用区引起. 特别的, 在太阳极低的 2009 年, 唯一地磁暴由共转相互作用区引起. 而随着太阳活动的增强, 2010 年开始与日冕物质抛射相关的行星际结构则成了地磁暴的主要行星际源.

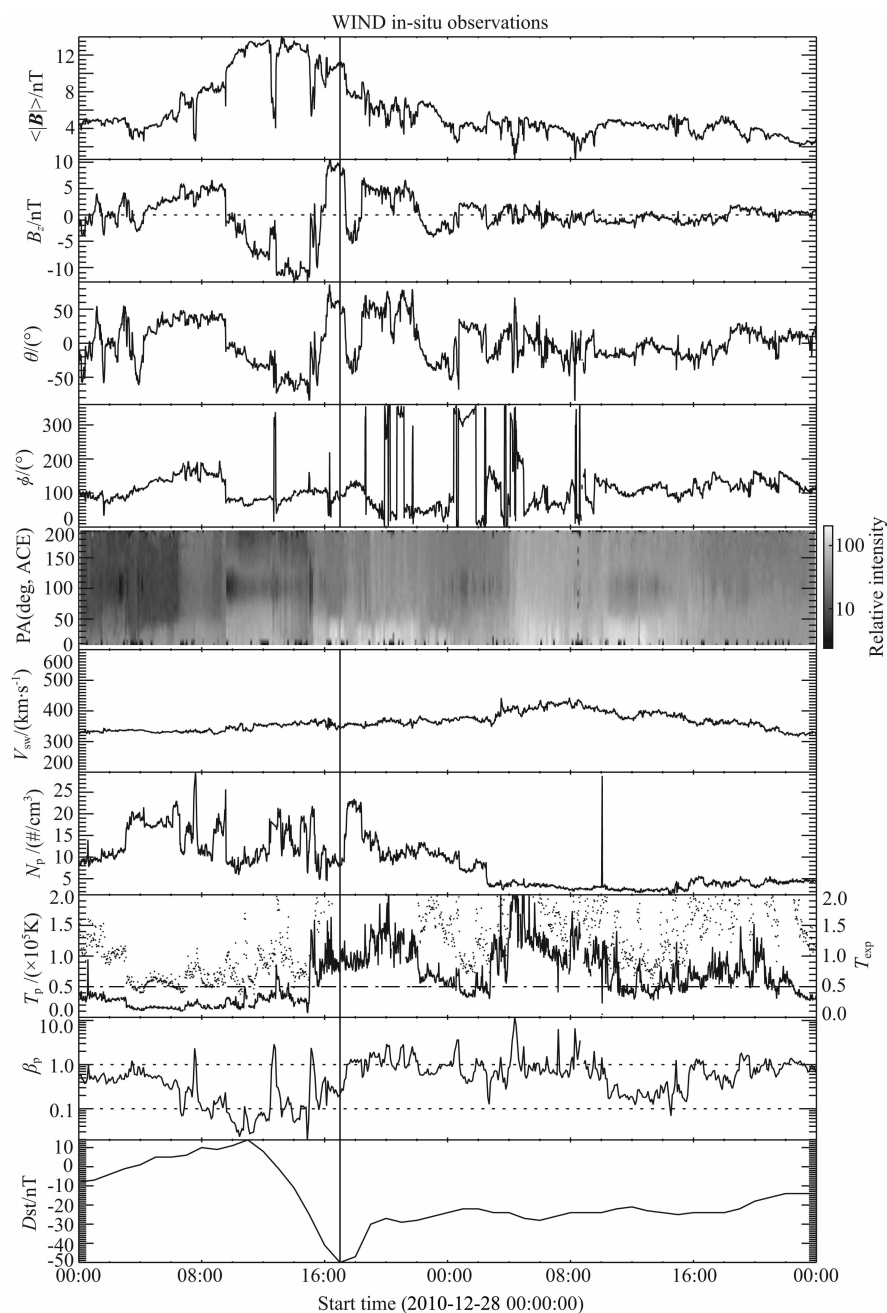


图 7 由太阳风中扰动引起的地磁暴示意图: 2010 年 12 月 28 日地磁暴事件

Fig. 7 A geomagnetic storm caused by the disturbance in the solar wind: 2010 December 28 event

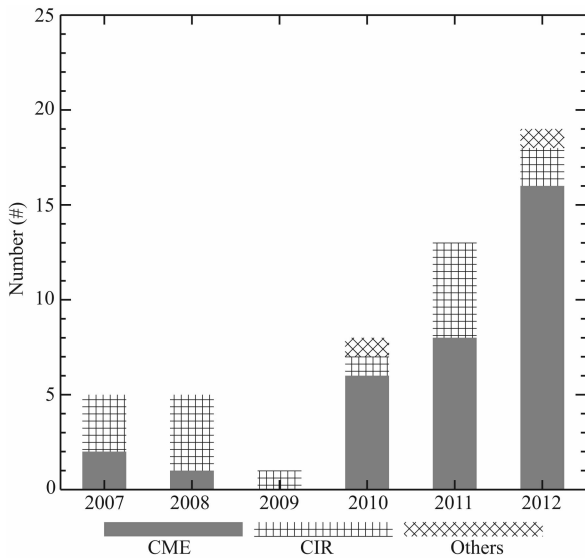


图 8 不同行星际源引起的地磁暴数随年份的变化

Fig. 8 The annual number of the geomagnetic storm caused by different interplanetary source

4 结论和讨论

本文建立了最近一段太阳活动极低及 24 周太阳活动上升期(2007 年至 2012 年)所有 $Dst_{\min} \leq -50$ nT 的中等以上地磁暴事件列表,并根据行星际观测资料认证了这些地磁暴的行星际源.在此基础上,我们讨论了这些地磁暴及其行星际源的特征和随太阳周的变化规律,并与上一周类似太阳活动时期的已有研究结果进行了初步的对比.主要结论包括:

(1)2007 年至 2012 年间,共发生地磁暴 51 次,其中 $Dst_{\min} \leq -100$ nT 的强地磁暴 9 次,没有 $Dst_{\min} \leq -200$ nT 的超强地磁暴产生,远小于上一类似太阳活动期间(1996 年至 2001 年)的地磁暴数,这与已有的最近太阳活动低年和上升期的地磁活动水平弱的结果一致(Gopalswamy et al., 2014; Kilpua et al., 2014).进一步,我们发现地磁暴发生的次数与太阳黑子数正相关,且 $Dst_{\min} \leq -100$ nT 的强地磁暴只在上升期和高年间发生,这与以前的结果一致.

(2)在该段时间内,约 65% 的地磁暴由与日冕物质抛射相关结构引起,31% 的地磁暴由共转相互作用区引起,这与以前的观测结果类似.同时,在该段时间内所有 $Dst_{\min} \leq -100$ nT 的强地磁暴均由与日冕物质抛射相关结构引起.与上一个类似太阳活动区间的比较发现,与日冕物质抛射相关结构没有

引起 $Dst_{\min} \leq -200$ nT 的超强地磁暴,共转相互作用区也没能引起 $Dst_{\min} \leq -100$ nT 的强地磁暴.该结果表明,在该段太阳活动极弱的时期内,共转相互作用区和日冕物质抛射的地磁效应弱,没能产生强的地磁暴.对于共转相互作用区,一个可能的解释是在该段时间内背景太阳风速度、行星际磁场特别是其南向分量强度等均显著降低(Jian et al., 2011; Kilpua et al., 2014),这可能导致共转相互作用区的磁场强度等均减小,故而地磁效应也相应减弱.最近,Gopalswamy 等(2014)发现引起 24 周前 4 年的地磁暴的行星际日冕物质抛射的磁场强度、太阳风速度等均小于 23 周相似时间段,这可能是日冕物质抛射相关结构地磁效应减弱的直接原因.

(3)在太阳下降期(2007 年,2008 年)和低年(2009 年),共转相互作用区是引起地磁暴的主要行星际源.而在上升期和高年,与日冕物质抛射相关的行星际结构是引起地磁暴的主要因素,这与以前的观测结果一致.

需要指出的是,在这段时间内,有约 18% (9/51) 的地磁暴由持续时间小于 12 h 的行星际磁结构引起.在本文中,由于这些结构具有行星际日冕物质抛射的特征或者包含在共转相互作用区中,因而我们仍归为与日冕物质抛射相关或者与共转相互作用区相关的地磁暴类.但是,最近研究也提出太阳风中的小结构也可能来源于冕流区域或者在太阳风中产生(Yu et al., 2013).因而,利用多点、多种类的观测资料,对这些引起地磁暴的小尺度规则结构进行详细分析,将为我们更进一步了解可能的地磁暴行星际源及这些小结构的形成、传播具有重要的意义.

日冕物质抛射相互作用对地磁效应的影响也已被研究(Wang et al., 2003a, 2002a, 2003b, 2003c; Lugaz et al., 2005; Xue et al., 2005; Shen et al., 2011b).在我们分析的事件中可能存在相互作用的事件为 7 个,约占所有与日冕物质抛射相关事件的 21%,这一比例略小于 Zhang 等(2007b)的结果.这可能是因为在该段时间中太阳活动较弱,因而连续爆发日冕物质抛射进而发生相互作用的可能性降低.同时,存在相互作用的由日冕物质抛射事件引起的地磁暴也没有显著增强.需要说明的是,现在的日冕物质抛射相互作用只通过局地数据认证,这可能存在一定的偏差.因而,结合日球层成像观测数据对真实存在日冕物质抛射相互作用事件的地磁效应的分析也需要深入的进行.

References

- Echer E, Gonzalez W D, Tsurutani B T. 2008. Interplanetary conditions leading to superintense geomagnetic storms ($Dst \leq -250$ nT) during solar cycle 23. *Geophysical Research Letters*, 35(6); L06S03, doi: 10.1029/2007GL031755.
- Echer E, Tsurutani B T, Gonzalez W D. 2013. Interplanetary origins of moderate (-100 nT $< Dst \leq -50$ nT) geomagnetic storms during solar cycle 23 (1996–2008). *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118(1): 385–392, doi: 10.1029/2012JA018086.
- Gonzalez W D, Joselyn J A, Kamide Y, et al. 1994. What is a geomagnetic storm? *Journal of Geophysical Research*, 99 (A4): 5771–5792.
- Gonzalez W D, Tsurutani B T, Clúa de Gonzalez A L. 1999. Interplanetary origin of geomagnetic storms. *Space Science Reviews*, 88(3–4): 529–562.
- Gonzalez W D, Echer E, Clúa Gonzalez A L, et al. 2007. Interplanetary origin of intense geomagnetic storms ($Dst < -100$ nT) during solar cycle 23. *Geophysical Research Letters*, 34(6); L06101, doi: 10.1029/2006GL028879.
- Gonzalez W D, Echer E, Tsurutani B T, et al. 2011. Interplanetary origin of intense, superintense and extreme geomagnetic storms. *Space Science Reviews*, 158(1): 69–89.
- Gopalswamy N, Mäkelä P, Xie H, et al. 2009. CME interactions with coronal holes and their interplanetary consequences. *Journal of Geophysical Research*, 114 (A3): A00A22, doi: 10.1029/2008JA013686.
- Gopalswamy N, Akiyama S, Yashiro S, et al. 2014. Anomalous expansion of coronal mass ejections during solar cycle 24 and its space weather implications. *Geophysical Research Letters*, 41 (8): 2673–2680.
- Jian L, Russell C T, Luhmann J G, et al. 2006a. Properties of interplanetary coronal mass ejections at one AU during 1995–2004. *Solar Physics*, 239(1–2): 393–436.
- Jian L, Russell C T, Luhmann J G, et al. 2006b. Properties of stream interactions at one AU during 1995–2004. *Solar Physics*, 239(1–2): 337–392.
- Jian L K, Russell C T, Luhmann J G. 2011. Comparing solar minimum 23/24 with historical solar wind records at 1 AU. *Solar Physics*, 274(1–2): 321–344.
- Kilpua E K J, Luhmann J G, Jian L, et al. 2014. Why have geomagnetic storms been so weak during the recent solar minimum and the rising phase of cycle 24? *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 107: 12–19, doi: 10.1016/j.jastp.2013.11.001.
- Li K J, Feng W, Liang H F. 2010. The abnormal 24th solar cycle—The first complete solar cycle of the new millennium. *Scientia Sinica Phys., Mech. & Astron.* (in Chinese), 40(10): 1293–1301.
- Lugaz N, Farrugia C J. 2014. A new class of complex ejecta resulting from the interaction of two CMEs and its expected geoeffectiveness. *Geophysical Research Letters*, 41(3): 769–776.
- Lugaz N, Manchester IV W B, Gombosi T I. 2005. Numerical simulation of the interaction of two coronal mass ejections from sun to earth. *Astrophysical Journal*, 634(1): 651–662.
- Richardson I G. 2013. Geomagnetic activity during the rising phase of solar cycle 24. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 3(A8), doi: 10.1051/swsc/2013031.
- Shen C L, Wang Y M, Gui B, et al. 2011a. Kinematic evolution of a slow CME in corona viewed by STEREO-B on 8 October 2007. *Solar Physics*, 269(2): 389–400.
- Shen C L, Wang Y M, Pan Z H, et al. 2013. Full halo coronal mass ejections: Do we need to correct the projection effect in terms of velocity? *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118(11): 6858–6865, doi: 10.1002/2013JA018872.
- Shen C L, Wang Y M, Pan Z H, et al. 2014. Full-halo coronal mass ejections: arrival at the earth. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 119(7): 5107–5116, doi: 10.1002/2014JA020001.
- Shen F, Feng X S, Wang Y M, et al. 2011b. Three-dimensional MHD simulation of two coronal mass ejections' propagation and interaction using a successive magnetized plasma blobs model. *Journal of Geophysical Research*, 116(A9), doi: 10.1029/2011JA016584.
- Wang Y M, Shen C L, Wang S, et al. 2004. Deflection of coronal mass ejection in the interplanetary medium. *Solar Physics*, 222 (2): 329–343.
- Wang Y M, Wang B Y, Shen C L, et al. 2014. Deflected propagation of a coronal mass ejection from the corona to interplanetary space. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 119(7): 5117–5132, doi: 10.1002/2013JA-19537.
- Wang Y M, Wang S, Ye P Z. 2002a. Multiple magnetic clouds in interplanetary space. *Solar Physics*, 211(1–2): 333–344.
- Wang Y M, Ye P Z, Wang S, et al. 2002b. A statistical study on the geoeffectiveness of Earth-directed coronal mass ejections from March 1997 to December 2000. *Journal of Geophysical Research*, 107(A11): SSH 2-1–SSH 2-9.
- Wang Y M, Ye P Z, Wang S. 2003a. Multiple magnetic clouds: Several examples during March–April 2001. *Journal of Geophysical Research*, 108 (A10): 1370, doi: 10.1029/2003JA009850.
- Wang Y M, Ye P Z, Wang S, et al. 2003b. Theoretical analysis on the geoeffectiveness of a shock overtaking a preceding magnetic cloud. *Solar Physics*, 216(1–2): 295–310.
- Wang Y M, Ye P Z, Wang S, et al. 2003c. An interplanetary cause of large geomagnetic storms: Fast forward shock overtaking preceding magnetic cloud. *Geophysical Research Letters*, 30 (13): 31–33.
- Xue X H, Wang Y M, Ye P Z, et al. 2005. Analysis on the interplanetary causes of the great magnetic storms in solar maximum (2000–2001). *Planetary and Space Science*, 53

(4): 443-457.

Yu W, Farrugia C J, Lugaz N, et al. 2013. A statistical analysis of properties of small transients in the solar wind 2007—2009; STEREO and Wind observations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 119(2): 689-708, doi: 10.1002/2013JA019115.

Zhang J, Dere K P, Howard R A, et al. 2003. Identification of solar sources of major geomagnetic storms between 1996 and 2000. *Astrophysical Journal*, 582(1): 520-533.

Zhang J, Richardson I G, Webb D F, et al. 2007a. Correction to “Solar and interplanetary sources of major geomagnetic storms

($Dst \leq -100$ nT) during 1996—2005”. *Journal of Geophysical Research*, 112(A12): A12103, doi: 10.1029/2007JA012891.

Zhang J, Richardson I G, Webb D F, et al. 2007b. Solar and interplanetary sources of major geomagnetic storms ($Dst \leq -100$ nT) during 1996—2005. *Journal of Geophysical Research*, 112(A10): A10102, doi: 10.1029/2007JA012321.

附中文参考文献

李可军, 冯雯, 梁红飞. 2010. 异常的第 24 太阳活动周——新千年的第一个完整的太阳活动周. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 40(10): 1293-1301.

(本文编辑 何燕)