

冕洞发展及其相关地球空间效应的个例分析^{*}

马冬兰^{1,2} 刘四清¹ 龚建村¹

¹(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

²(中国科学院研究生院)

摘 要 利用出现在 2003—2004 年的一个大冕洞及其相关太阳风、行星际磁场和地磁资料, 分析了冕洞自身演化规律以及对太阳风和重现性地磁暴的影响. 研究发现, 冕洞发展经历了生长期、成熟期和衰减期三个阶段; 成熟期, 冕洞高速流中的最大太阳风速度和地磁暴平均强度基本维持在同一个水平上; 但地磁暴的持续时间和冕洞高速流的持续时间仍有较大变化, 该时间长短主要与冕洞穿越太阳赤道部分所横跨的经度相关.

关键词 冕洞; 重现性地磁暴

中图法分类号 P 353.7

One Case Study About the Development of Coronal Hole and the Correlative Earth Effects

MA Donglan^{1,2} LIU Siqing¹ GONG Jiancun¹

¹(Center for Space Science and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

²(Graduate School, The Chinese Academy of Sciences)

Abstract The evolutionary features of the coronal hole, the interplanetary and geomagnetic field effects were studied in this paper using the data of a significant coronal hole which recurred between 2003 and 2004, and the data of its correlative solar wind, interplanetary magnetic field (IMF) and geomagnetic field. It is found that the development of the coronal hole can be separated into three phases according to the geomagnetic field effects of coronal hole. That is growth phase, maturation phase and decay phase. There are different characters among these three phases. During maturation phase, the maximum solar wind speed of the high speed stream and the average effect to magnetic field maintain a same level. That means the peak of solar wind speed and the corresponding geomagnetic index (average $\sum Kp$ and maximum $\sum Kp$) are confined. On the other hand, the structure of this coronal high speed stream and the corresponding recurrent geomagnetic storm are studied. Then it is found that the high speed streams have steady structures on the maturation phase, and the durations of recurrent geomagnetic storms were varied with the high-speed streams. Meanwhile the duration of the high speed is related to the shape and development of the coronal hole, especially to the longitudinal extend of the coronal hole in equator.

Key words Coronal hole, High speed stream, Recurrent geomagnetic storm

^{*} 国家重点基础研究规划项目 (G2000078408) 与中国科学院空间环境研究预报中心共同资助

2004-05-10 收到原稿, 2004-12-29 收到修定稿

1 引言

引起地磁暴的太阳活动主要有两类,一类是以日冕物质抛射为代表的太阳爆发活动,另一类是以太阳开放性磁场区所喷发的太阳风高速流为代表的太阳冕洞。一般在太阳活动高年,太阳爆发活动频繁,大地磁暴主要由第一类太阳源引起;而在太阳活动低年,地磁活动主要受第二类太阳活动所控制。研究冕洞和由冕洞发出的太阳风高速流的发生、发展规律,以及它们对地磁活动的影响是解决太阳活动低年地磁预报的重要途径,因此一直备受关注。

在太阳活动下降年和低年,地磁活动具有较明显的 27 天重现性。70 年代通过对一些飞船资料的分析发现,这些 27 天的重现性地磁扰动与从冕洞喷出的太阳风高速流和持续的慢太阳风形成的相互作用区 (CIRs) 有关^{[1]~[3]}。近年来,人们针对冕洞和周期型地磁暴进行了许多研究工作,发现伴随 CIRs 后的高速流,持续存在相应的地磁扰动^[4]。

Nolte 等人提到,从冕洞出来的太阳风速度大概与冕洞的面积成比例,冕洞位于赤道附近比其位于极区附近更有机会影响地球^[5]。然而, Watari 等人近期的分析表明,冕洞的面积与太阳风的速度关系,要比 Nolte 提出的更加复杂。Watari 分析了在 1993 年 12 月—1994 年 6 月间的长时间的地磁扰动,这些扰动与一个发展很好的南部冕洞有关。他们在研究中发现令人有兴趣的一点是,最大的 Dst 指数并没有与最大的速度和最大的冕洞相对应着,甚至在冕洞有大约相同的面积时,观测到的最大的速度和 Dst 指数也是不同的^[4]。Thomson 也指出,单个的冕洞参数(面积、极性和纬度)与 A_p 指数的相关性很小 (≤ 0.1)^[6]。罗葆荣等人的研究发现,无论那种类型的冕洞,在其过中经后 1—3 天,地磁指数都有不同程度的增长;大冕洞(跨度 >30 经度)比小冕洞(跨度 <30 经度)引起的地磁效应强烈;跨越赤道的冕洞比未跨越赤道的同级冕洞引起的地磁效应强烈;延伸到低纬,跨越赤道的极区冕洞,要比同等水平的赤道冕洞引起的地磁效应强烈^[7]。特别是当极区冕洞向赤道扩展很严重时,重现性地磁暴表现最为显著^{[8]~[11]}。

虽然对冕洞以及重现性地磁暴的研究已经取得了很多结果,但是对于冕洞的发展以及对与冕洞相关的重现性地磁暴的预报问题仍然没有得到完全解决。近来,随着空间探测技术的发展,卫星空间探

测和卫星太阳成像技术,为该领域的研究又提供了新的机会。本文通过 2003—2004 年重复出现的大冕洞的观测资料以及与之相关的冕洞高速流、地磁扰动资料,分析了冕洞自身发展规律、冕洞高速流以及相应的地磁扰动规律。

2 2003—2004 年大冕洞介绍

从 2003 年 1 月开始,在太阳表面出现了持续时间长、稳定性好的大冕洞,下面我们把该冕洞简称为 03 冕洞。图 1 是 SOHO 卫星紫外探测仪所观测到的 03 冕洞。03 冕洞是一个由太阳南极发展、延伸至赤道的极冕洞,至 2004 年 2 月 03 冕洞在日面上重复出现了 16 个太阳自转周,经历了从成长到成熟,再到衰减的全过程。由于该冕洞生存时间长,稳定性好,冕洞及相关行星际和地磁场观测资料齐

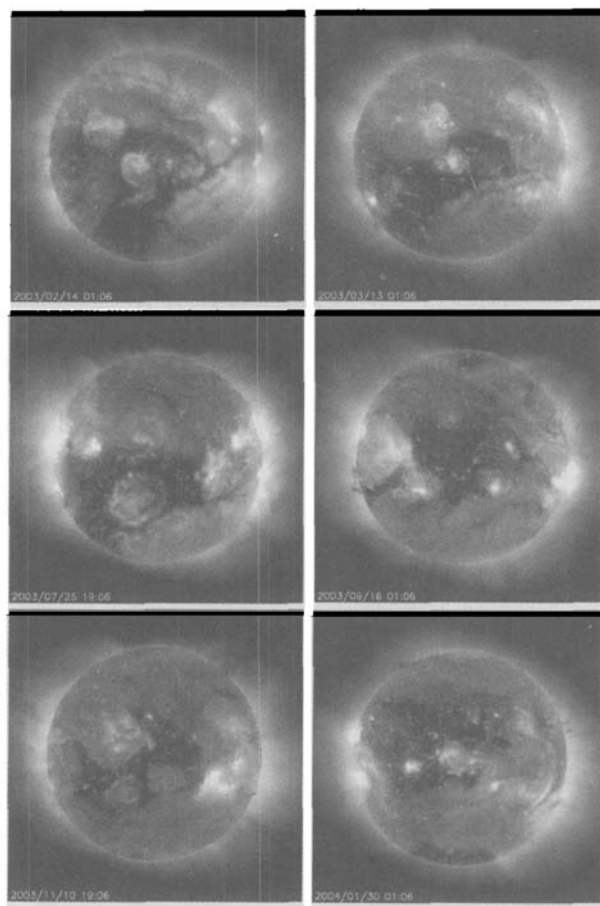


图 1 SOHO 卫星观测到的“03 冕洞”

Fig.1 “No.3 coronal hole” plots observed by SOHO satellite

全, 为我们对冕洞特性、冕洞演化规律、以及冕洞对行星际和地磁活动影响的研究提供了很好的样本。

研究中地磁资料 (主要是 Kp 指数) 取自于世界数据中心地磁分中心 (京都) 的数据资料, 太阳冕洞观测资料取自 SOHO 卫星的紫外探测结果, 分析中所用的太阳风参数 (太阳风速度、密度) 和行星际磁场 (磁场强度、磁场南向分量) 的观测资料来自 ACE 卫星观测结果。表 1 列出了该冕洞 16 次过日面中心线的日期以及重现周期。

3 03 冕洞不同阶段对地磁影响分析

随着冕洞的演化发展, 它对地磁活动的影响也会发生相应的改变。这里, 我们以冕洞对地磁的影响程度来分析冕洞的演化过程。利用了地磁指数 $\overline{\sum Kp}$ 和 $(\sum Kp)_{\max}$ 两个参数来衡量冕洞对地磁活动影响的大小。其中 $\overline{\sum Kp}$ 代表一次冕洞过程中地磁扰动 $\sum Kp$ 的平均值, $(\sum Kp)_{\max}$ 代表一次冕洞过程中地磁扰动 $\sum Kp$ 的最大值。引入了一个地磁扰动日, 用以衡量冕洞对地磁活动影响时间长短。规定一天内有 4 个时段以上时间 (即半天以上) 地磁 Kp 大于 4, 则为地磁扰动日。表 1 列出了该冕洞 16 次

出现所引起的地磁 $\overline{\sum Kp}$ 指数、 $(\sum Kp)_{\max}$ 指数、影响地磁扰动的天数。

通过冕洞对地磁的影响程度可以从一个侧面来分析冕洞自身演化过程。从表 1 中地磁 $\overline{\sum Kp}$ 参数的数据可以看到, 该冕洞在刚出现的几周内, $\overline{\sum Kp}$ 是逐渐增加的, 从 CR1998 的 26 增加到 CR2002 的 33.5, 然后 $\overline{\sum Kp}$ 趋于稳定, 并在 9 个太阳活动周稳定在该扰动水平上。从 CR2011 开始, 冕洞影响的地磁指数 $\overline{\sum Kp}$ 突然降至 27, 在此后两周里冕洞对地磁扰动的影响程度明显低于前几个太阳活动周。由此可以看到, 该冕洞对地磁活动的影响大概可以分为上升、稳定和衰减三个阶段, 我们将相应冕洞发展阶段称之为生长期、成熟期和衰退期。

针对冕洞的不同发展阶段, 分别对其 $\overline{\sum Kp}$ 指数进行线性拟合 (拟合结果见图 2)。从图 2 可以看到, $\overline{\sum Kp}$ 指数在不同阶段有明显不同的变化趋势。对应于生长期, 拟合直线斜率为 1.6, 呈上升趋势; 在成熟期, 直线斜率为 0.285, 基本稳定; 在衰退期, 直线斜率为 -2.09, 呈下降趋势。

冕洞对地磁影响的 $\sum Kp$ 最大值 $(\sum Kp)_{\max}$ 在不同发展阶段的变化规律与 $\overline{\sum Kp}$ 基本相似, 在冕洞发展的成熟期内 $(\sum Kp)_{\max}$ 保持在一个较高的水平上 (见表 1)。

表 1 03 冕洞基本参数以及相关地磁扰动参数

Table 1 No.3 Coronal Hole Parameters and Related Geomagnetic Storm Parameters

	卡林顿周	冕洞过日面 中心线日期	冕洞重现 周期 /d	影响地磁 活动天数 /d	最高日均 太阳风速 /(km·s ⁻¹)	$\overline{\sum Kp}$	$(\sum Kp)_{\max}$
生 长 期	CR1998	2003-01-16	**	3	667	26	27-
	CR1999	2003-02-12	27	2	649	28	29-
	CR2000	2003-03-11	27	5	774	31.8	37
	CR2001	2003-04-06	26	2	686	29	29+
成 熟 期	CR2002	2003-05-02	26	6	795	33.5	37-
	CR2003	2003-05-29	27	3	792	33	35+
	CR2004	2003-06-24	27	3	755	33	36+
	CR2005	2003-07-23	29	5	804	31.5	36
	CR2006	2003-08-18	26	3	759	34	42+
	CR2007	2003-09-14	27	5	774	37	45
	CR2008	2003-10-12	28	9	688	35.3	41+
	CR2009	2003-11-08	27	10	776	36	44-
	CR2010	2003-12-05	27	8	807	33	37+
	CR2011	2004-01-01	27	8	680	27.6	34
衰 退 期	CR2012	2004-01-28	27	4	558	23.2	26
	CR2013	2004-02-23	26	2	497	27.5	28

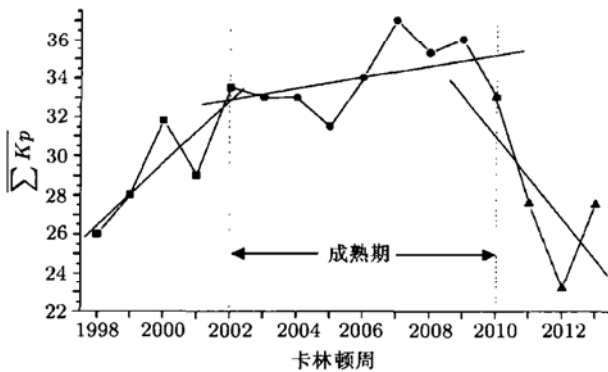


图2 不同发展时期冕洞对地磁活动影响强度的变化
(点线代表冕洞对地磁影响指数 $\sum Kp$ 随卡林顿周变化,
直线代表分区的线性拟合)

Fig.2 The variety of geomagnetic parameter $\sum Kp$ affected by "No.3 coronal hole" during each Carrington rotation (dot-lines present geomagnetic parameter $\sum Kp$ affected by the coronal hole in diferent carrington rotations, the lines present linearity coupling during diferent period)

而相对冕洞对地磁活动影响时间长短的磁扰日天数来看, 规律就不是那么明显了. 图3显示, 虽然从总体趋势来看, 影响时间长的情况主要存在于冕洞发展的成熟期. 生长期和衰减期的磁扰日天数相对都比较小. 但是, 在成熟期内磁扰日天数有较大差异, 影响时间短的只有3天, 影响时间长的可以达到10天. 冕洞对地磁扰动时间的长短取决于冕洞穿越太阳赤道部分所横跨的经度. 冕洞跨越的经度大, 影响地磁的时间长; 相反, 冕洞跨越的经度小, 对地磁影响的时间短. 成熟期冕洞对地磁扰动影响时间的较大差异, 说明冕洞在成熟期内形态仍有较大变化的可能性.

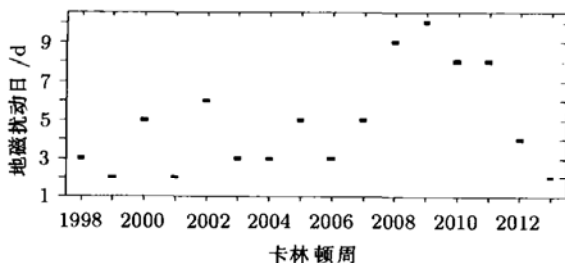


图3 03冕洞影响地磁扰动日随卡林顿周变化图

Fig.3 The variety of geomagnetic disturbance day affected by "No.3 coronal hole" during each Carrington rotation

由以上分析可见, 首先冕洞自身存在一个发展、成熟和衰减的过程. 在成熟期内, 冕洞自身存在一定的稳定特性, 这样就使得冕洞对地磁扰动的强度基本维持在一个较为稳定的水平上, 但在成熟期, 冕洞对地磁活动影响的时间长短仍有较大差异, 这说明冕洞在成熟期形态仍可能有大的变化.

4 冕洞对太阳风、行星际磁场的影响

冕洞对地磁活动的影响是通过太阳风和行星际磁场与地磁场相互作用而产生的. 因此, 太阳风、行星际磁场是太阳活动影响地球磁场的重要纽带. 研究冕洞对太阳风、行星际磁场的影响, 对分析预测冕洞对地磁活动影响是非常重要的. 通过对03冕洞对太阳风、行星际影响的分析发现, 在冕洞高速流中, 一般都具有稳定相似的等离子体结构和磁场结构, 特别是在冕洞成熟期所喷发出的冕洞高速流中.

首先我们以03冕洞在2003年9月(CR2007)所喷发出的太阳风高速流为例, 分析冕洞高速流的特征. 图4列出了冕洞高速流在1AU处太阳风速度、密度, 行星际磁场总强度、 B_z 分量、行星际磁场方向角(ϕ)、 Kp 指数和 $\sum Kp$ 的变化. 图中第1天从冕洞高速流到达1AU开始算起. 冕洞高速流到达有几个明显的标志, 一是行星际磁场 ϕ 角有大约 180° 的突然变化, 这表明冕洞高速流一般处于一个与周围磁场反向的单独扇区. 进入这个扇区后, 首先出现的是一个高密度、强磁场区, 该区为高速流与低速流相互作用区(第1天), 与之相对应的太阳风速度呈缓慢上升趋势. 当太阳风速度由400 km/s增加到800 km/s(第2天), 即进入冕洞高速流区, 等离子体密度和行星际磁场都下降至低水平. 在随后的几天内太阳风速度维持在700 km/s以上, 而密度和磁场值都非常低. 因此, 冕洞高速流区为高速度、低密度和低磁场区.

通过对冕洞高速流剖面结构与地磁 Kp 指数和 $\sum Kp$ 的比较可以看出: 冕洞对地磁活动的影响从密度、磁场增加的地方开始的, 即在相互作用区开始的, 影响最大的在冕洞高速流的头部(即第2天太阳风速度由400 km/s迅速增长至800 km/s). 在随后的几天内, 地磁扰动随高速太阳风的持续而维持, 并随太阳风速度的缓慢下降而逐渐衰退.

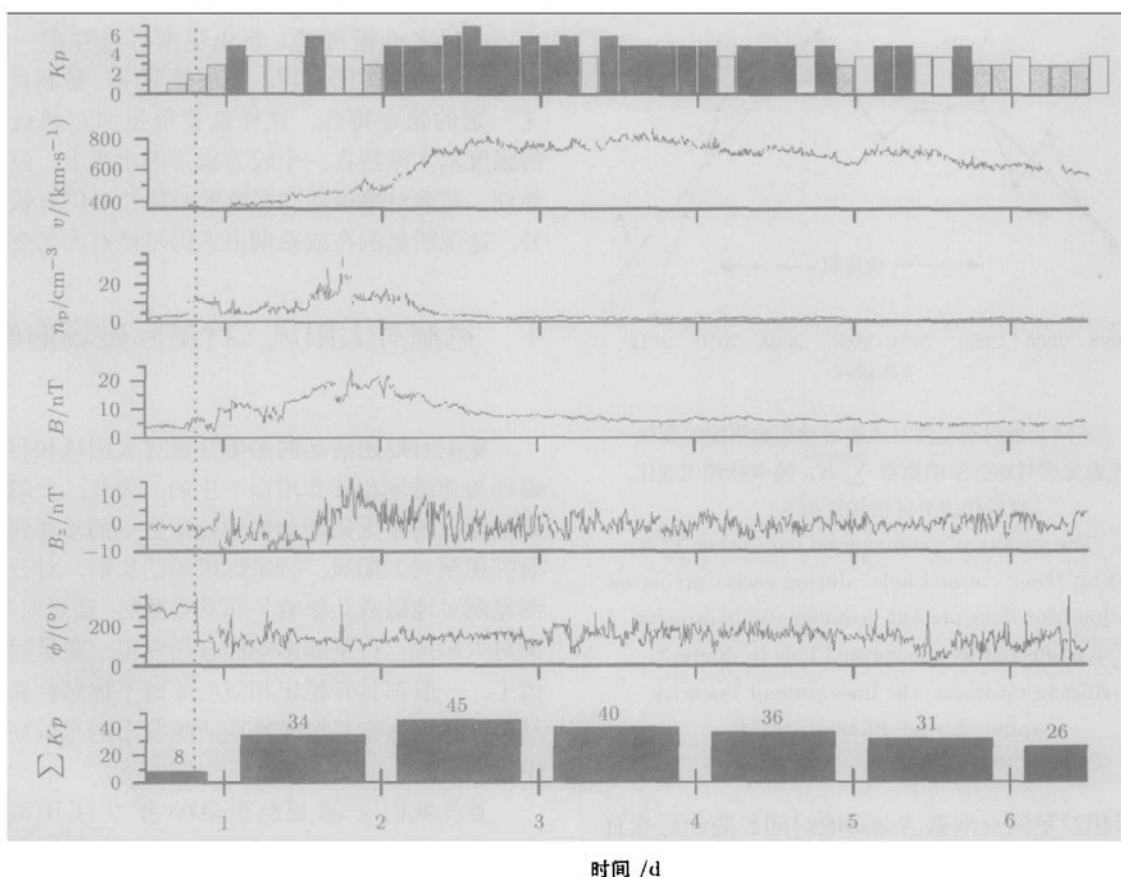


图4 第2007卡林顿周冕洞高速流情况及地磁影响

Fig.4 The parameters of the coronal hole high speed stream and related geomagnetic index during No.2007 Carrington Rotation

在冕洞成熟区, 冕洞高速流的这种结构基本上是相似稳定的. 都具有与 CR2007 类似的结构特征, 并且高速流中最高太阳风速度变化不大, 基本在 $800 \pm 50 \text{ km}$ 范围内浮动. 地磁扰动也基本与太阳风速度大小呈正相关, 如图 5(a), (b) 所示. 但由于冕洞自身形态仍存在一定的变化, 它对 1 AU 处太阳风和行星际磁场的影响也会有所不同. 这突出表现在太阳风高速流的持续时间的长短上, 而对于等离子体密度和行星际磁场则没有太大的差别, 如图 5(c), (d) 所示. 从图 5(a), (b) 的比较可以看出, 高速流持续时间的长短与冕洞对地磁活动影响时间的长短有着很好的相关关系.

5 结果与讨论

通过对 03 冕洞的演化规律以及对太阳风行星际磁场和地磁活动影响的分析研究可以得出以下结

论.

(1) 冕洞发展经历了生长期、成熟期和衰减期三个阶段, 不同阶段, 具有不同特征. 在冕洞的成熟期, 太阳风高速流的最大速度和对地磁活动的平均影响程度基本维持在稳定的水平上, 即冕洞高速流中的最大太阳风速度和相应的 $\overline{\sum Kp}$ 和 $(\sum Kp)_{\max}$ 值变化不大.

(2) 在冕洞成熟期, 地磁暴的持续时间和冕洞高速流的持续时间相关联, 并且随着冕洞形态的演化而有较大的变化. 持续时间的长短与冕洞穿越太阳赤道部分所横跨的经度呈正比例.

该结果与过去研究工作的结论基本上是一致的 [3],[7]. 这两个研究结果对于重现性地磁暴的预测有重要的指导意义. 首先, 在冕洞的成熟期, 冕洞高速流对地磁扰动的影响强度没有太大变化; 其次, 冕洞可能影响地磁活动的时间长短可以通过对太阳冕洞的观测来进行预测.

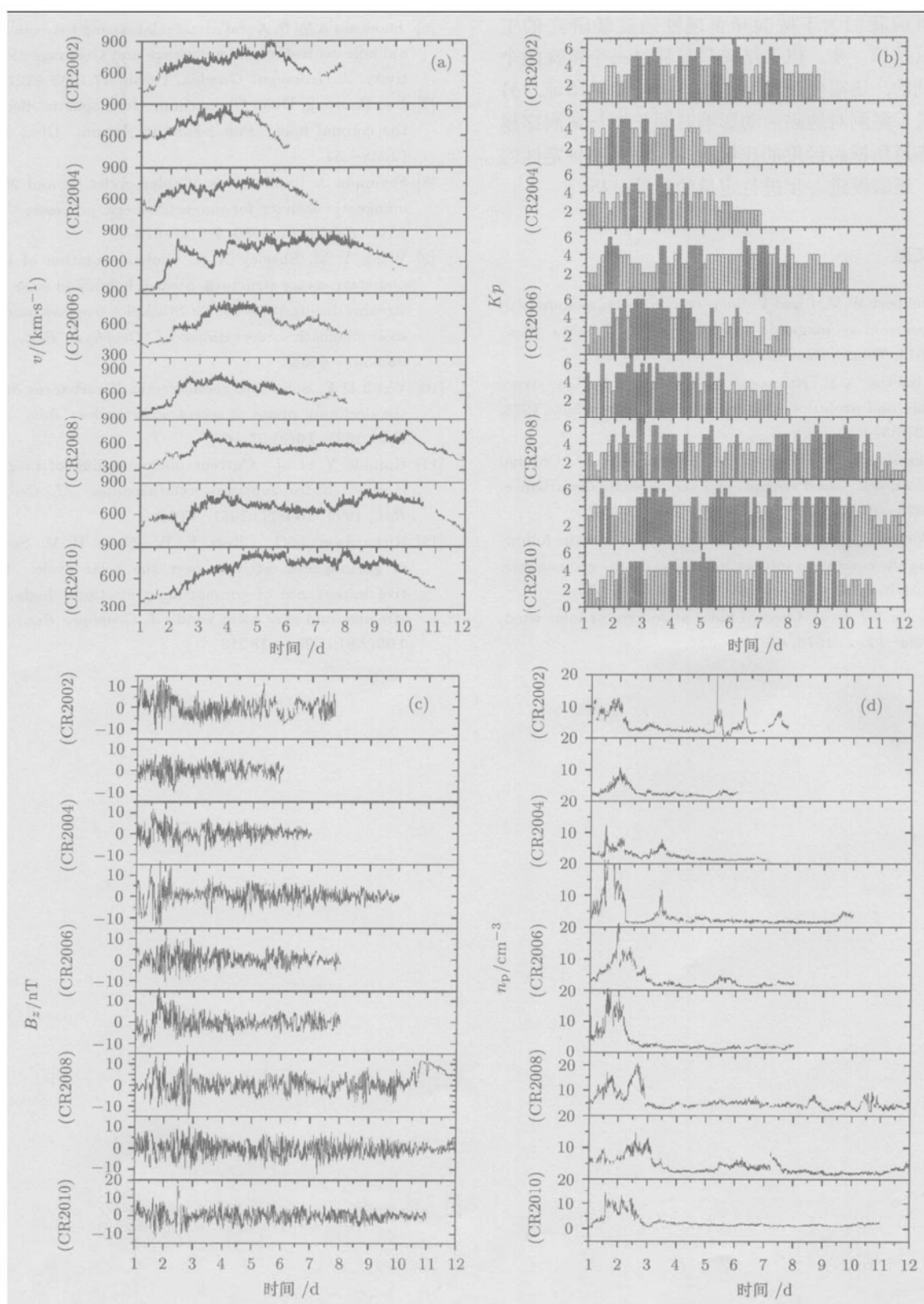


图5 冕洞成熟期冕洞高速流特征及地磁扰动特征. (a) 太阳风速度 v , (b) 地磁指数 Kp , (c) 行星际南向分量 B_z , (d) 等离子体密度

Fig.5 During the coronal hole maturation phase, the varieties of the solar wind speed (a), geomagnetic index Kp (b), B_z (c) and the density (d) affected by the coronal hole at 1 AU

目前我们关于冕洞和重现性地磁暴研究的工作还只是第一步。以上结果只是通过一个特殊的个例得到的, 还需要通过更多的事例来加以印证。另外, 关于冕洞对地磁活动影响时间长短与冕洞穿越太阳赤道所横跨经度的比例关系, 只是一种定性的结论, 还需要进一步进行定量的计算分析。

参考文献

- [1] Neupert W M, Pizzo V. Solar coronal holes as sources of recurrent geomagnetic disturbances. *J. Geophys. Res.*, 1974, **79**(25):3701—3709
- [2] Timothy A F, Krieger A S, Vaiana G S. The structure and evolution of coronal holes. *Solar Phys.*, 1975, **42**:135—156
- [3] Sheeley N R, Harvey J W, Feldman W C. Coronal holes, solar wind streams and geomagnetic disturbance: 1973—1976. *Solar Phys.*, 1976, **49**:271—282
- [4] Watari S. The effect of the high-speed stream following the corotating interaction region on the geomagnetic activities. *Ann. Geophys.*, 1997, **15**:662—670
- [5] Nolte J T *et al.* Coronal holes as sources of solar wind. *Solar Phys.*, 1976, **46**:303—321
- [6] Thomson A W P. A statistical relationship between coronal hole central meridian passage and Geomagnetic Activity. *J. Geomagn. Geoelec.*, 1995b, **47**:1263—1276
- [7] Luo Baorong, Duan Changchun. Geomagnetic effects of the coronal hole. *Pub. Yunnan Astron. Obs.*, 1997, (2):48—54
- [8] Feynman J. Implications of solar cycles 19 and 20 geomagnetic activity for magnetospheric processes. *Geophys. Res. Lett.*, 1980, **7**:971—976
- [9] Wang Y M, Sheeley N R. Global evolution of interplanetary sector structure, coronal holes, and solar wind streams during 1976—1993: Stackplot displays based on solar magnetic observations. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**:6597—6608
- [10] Webb D F. Solar and geomagnetic disturbances during the declining phase of recent solar cycles. *Adv. Space Res.*, 1995, **16**(9):57—69
- [11] Kamide Y *et al.* Current understanding of magnetic storms: Storm-substorm relationships. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**(17):7051—7052
- [12] Richardson I G, Cliver E W, Cane H V. Sources of geomagnetic activity over the solar cycle: Relative importance of coronal mass ejections, high-speed streams, and slow solar wind. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**(A8):18 203—18 213