中国科学: 地球科学 2021 年 第 51 卷 第 1 期: 159 ~ 166
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

磁云内局部高温现象的起因研究

王杰敏[1,2], 冯恒强[1,2*], 李洪波[1,2], 赵岩[1,2]

1. 洛阳师范学院空间物理研究所, 洛阳 471934;
2. 河南省电磁变换与探测重点实验室, 洛阳 471934
* 通讯作者, E-mail: fenghq9921@163.com

收稿日期: 2020-04-26; 收修改稿日期: 2020-08-05; 接受日期: 2020-08-14; 网络版发表日期: 2020-11-05
国家自然科学基金项目(批准号: 41804162、41674170、41974197)资助

摘要 文章用三种方法分析了1998~2008年ACE卫星观测的17个存在持续时间大于2h的局部高温区的磁云事件. 分析结果显示: 磁云内部的大尺度局部高温区有5个很可能是耀斑加热的结果, 有7个可能是由磁云在日地空间传播过程其本身的非均匀膨胀引起的, 有4个可能是耀斑加热和磁云自身非均匀膨胀共同作用的结果; 只有1个磁云内部的大尺度局部高温区与耀斑加热和磁云自身非均匀膨胀都不相关, 内部也没有发现磁场重联发生过或者存在的证据. 该分析结果表明, 磁云内部的大尺度局部高温现象可能主要是耀斑加热和非均匀膨胀单独作用的结果, 或者是两者共同作用的结果; 磁场重联在磁云内部的大尺度局部高温区的形成方面作用很小.

关键词 磁云, 高温区, 耀斑加热, 非均匀膨胀

1 引言

磁云(magnetic cloud)是行星际日冕物质抛射(interplanetary coronal mass ejection, ICME)的一个子集, 它来源于太阳上的日冕物质抛射(coronal mass ejection, CME)(Burlaga等, 1981; Burlaga, 1988). 磁云须同时具有以下3个基本特征: (1) 磁场方向在大约一天的时间内发生大角度平滑旋转; (2) 具有相对较强的磁场; (3) 相对低的质子温度和等离子体Beta值(Burlaga等, 1981). 磁云的磁场位形可近似表示为无力场通量绳, 在1AU处, 磁云作为磁通量绳的直径大约是0.2~0.4AU(Lepping等, 1990; Wei等, 2003a, 2003b, 2006; Feng等, 2006, 2010; Li等, 2013). 由于磁云具有简单稳定的磁通量绳结构, 在磁云和地磁层作用时, 部分事件能够持续稳定地提供较强的南向磁场, 从而使地球空间的形态、结构和动力学过程发生激变, 而产生磁暴、电离层暴、热层暴和粒子暴等, 以致磁云常常引发大的空间灾害性天气事件(Wu等, 2000; Wang等, 2003a, 2003b; Xiong等, 2007, 2009; Zuo等, 2007). 所以关于磁云的研究, 无论是在科学上还是应用需求上都占有十分重要的位置(魏奉思等, 2002).

虽然低的质子温度是磁云的一个基本观测特征, 但是磁云内部往往会出现局部质子温度升高现象(冯恒强和王杰敏, 2014; 王杰敏和冯恒强, 2016). 我们这里称磁云内部存在质子温度显著高于其他部分的区间, 且高温区间持续时间大于2h的现象为磁云内部的

中文引用格式: 王杰敏, 冯恒强, 李洪波, 赵岩. 2021. 磁云内局部高温现象的起因研究. 中国科学: 地球科学, 51(1): 159–166, doi: 10.1360/SSTe-2020-0109
英文引用格式: Wang J, Feng H, Li H, Zhao Y. 2021. Local high-temperature phenomena within magnetic clouds. Science China Earth Sciences, 64(1): 177–184, https://doi.org/10.1007/s11430-020-9669-5

© 2020 《中国科学》杂志社

大尺度局部高温现象. 我们已经对磁云内部的大尺度局部高温现象进行了初步探索, 取得一些研究进展, 如发现有磁云事件内部的大尺度高温区域存在8个磁场重联事件, 并据此提出了内部的大尺度局部高温现象的一个可能加热机制: 磁场重联(冯恒强和王杰敏, 2014). 我们还发现有些磁云内部的大尺度局部高温现象来源于太阳耀斑加热的可靠证据: 这些持续时间大于2h的局部高温区的质子温度曲线和O^{7+}/O^{6+}比值(或铁平均电离态$\langle Q_{Fe}\rangle$)曲线具有较好的相关性, 甚至相关系数可以达到0.9左右. 太阳风中的重离子电离成分的比例是不变的(冻结), 磁云内部O^{7+}/O^{6+}比值(或$\langle Q_{Fe}\rangle$)的高低一定程度上反映了其源区温度的高低(Lepri等, 2001; Lepri和Zurbuchen, 2004; Reinard, 2005; Wang等, 2018, 2019a; Feng等, 2020). 所以, 这些磁云内部的大尺度局部高温现象应该起源于太阳(王杰敏和冯恒强, 2016). 虽然我们已经在磁云内部的大尺度局部高温现象的研究方面取得了一定进展, 但是观测数据表明只有一个磁云内部的大尺度局部高温可能是磁场重联所致, 还有一些磁云内部的大尺度局部高温现象的起因没找到, 这些事件内既没有发现足以形成高温区的磁场重联发生过或者存在的证据, 也没有发现O^{7+}/O^{6+}比值(或$\langle Q_{Fe}\rangle$)和质子温度呈现较好的正相关性. 另外, 磁云内部的大尺度局部高温现象还可能由其非均匀膨胀引起. 磁云在抛离太阳后, 由于内部相对较高的磁场导致其快速膨胀, 进而引起内部的质子温度下降. 如果磁云在传播过程中不是各部分均匀膨胀, 那么各部分质子温度下降的速度将不同, 膨胀较慢的区域质子温度下降得就较慢, 从而导致内部呈现局部高温现象(Wang等, 2018, 2019a). 本文将分析1998~2008年ACE卫星观测到的存在持续时间大于2h的局部高温现象的磁云事件, 综合分析, 讨论这些磁云内部的大尺度局部高温区的可能起因, 并对磁云内部的大尺度局部高温现象给出合理的解释.

2 方法与数据

根据前面介绍, 本文主要利用以下3种方法来分析磁云内局部高温区的起因: (1) 利用Gosling等(2005)提出的行星际磁场重联出流区的判据检查, 确认这些局部高温区内是否存在磁场重联出流事件. (2) 分析高温区内质子温度与O^{7+}/O^{6+}比值和$\langle Q_{Fe}\rangle$的相关性, 如果出现线性相关系数大于0.6, 则考虑该局部高温区是在太阳上被耀斑加热的(王杰敏和冯恒强, 2016). (3) 我们猜想磁云在传播过程中不是各部分均匀膨胀, 那么磁云内磁场相对较弱部分会由于磁压低而膨胀速度较慢, 相应地该部分的质子温度也下降较慢, 出现局部相对高温现象; 如果这样, 非均匀膨胀造成的局部高温区内的磁场强度就会和温度呈现反相关性, 这里分析了持续时间大于2h的局部高温区内的磁场强和温度的相关性.

本文检查了1998~2008年ACE卫星观测到的存在持续时间大于2h的局部高温现象的17个磁云事件, 在选取磁云事件时我们参考了Wang等(2019b)以及Richardson和Cane给出ICME列表(http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm#(g))给出的磁云事件, 并结合等离子体和磁场特征给定了磁云的边界. 表1给出了对这17个磁云内部的大尺度局部高温区的成因进行综合分析的结果. 由于ACE卫星搭载的太阳风离子成分谱仪(solar wind Ion composition spectrometer, SWICS)记录的O^{7+}/O^{6+}电离态比值和$\langle Q_{Fe}\rangle$数据最高时间分辨率仅为1h, 所以在分析质子温度与O^{7+}/O^{6+}比值和$\langle Q_{Fe}\rangle$的相关性时, 仍然用时间分辨率为1h的质子温度数据, 即将离子数据记录点附近1h内的64s分辨率的温度数据取平均. 这里需要指出的是, 表1中第一列序号加星号的事件高温区的持续时间仅为2h多点, 进行相关性分析的意义不大. 另外, 在分析高温区内磁场强弱和质子温度的相关性时所用数据的时间分辨率为5min. 表1的第5~7列分别给出高温区内质子温度与O^{7+}/O^{6+}比值, $\langle Q_{Fe}\rangle$和磁场强度的相关性. 接下来我们将结合3个事例来具体分析这些磁云内部的大尺度局部高温区, 并对这些磁云内部的大尺度局部高温区的成因给出合理的解释.

3 观测事例分析

图1给出了2001年10月31至11月1日ACE卫星观测到的磁云事件, 从上到下分别给出了磁场强度(B_t)、磁场在GSE坐标系里的分量(B_x、B_y、B_n)、质子密度(N)、质子温度(T)、O^{7+}/O^{6+}电离态比和$\langle Q_{Fe}\rangle$. 图中两条竖直线是我们给出的该事件的前后边界, 分别用FB和RB进行标注. 由图1可以看出该事件整体上具有相对较高的磁场强度, 但该事件并不像多数磁云那样,

表 1　磁云内高温区域内质子温度与O^{7+}/O^{6+}、$\langle Q_{Fe}\rangle$和B_t的相关性[a)]

No.	磁云前边界(UT)	磁云后边界(UT)	质子高温区间(UT)	O^{7+}/O^{6+}	$\langle Q_{Fe}\rangle$	B_t
01	1998-08-20 05:00	1998-08-21 22:00	1998-08-20 05:00~14:00	0.616	0.076	0.155
02	1998-10-19 03:00	1998-10-20 07:00	1998-10-19 14:10~01:20	0.378	0.094	−0.543
03*	2000-02-12 12:15	2000-02-13 00:10	2000-02-12 16:05~18:10	−0.984	−0.966	−0.833
04	2000-07-28 13:00	2000-07-29 09:00	2000-07-28 19:00~00:30	0.904	0.423	0.257
05*	2000-10-13 16:15	2000-10-14 17:00	2000-10-14 06:20~08:25	0.209	0.101	−0.658
06	2001-04-04 18:00	2001-04-05 18:00	2001-04-04 22:00~02:15	0.326	0.404	−0.717
07	2001-10-31 21:00	2001-11-01 18:00	2001-11-01 02:00~06:15	0.041	0.139	−0.964
08	2002-03-19 06:00	2002-03-20 13:00	2002-03-19 16:00~02:00	0.577	−0.323	−0.746
09	2002-09-30 22:00	2002-10-01 20:00	2002-09-30 21:50~06:15	−0.495	0.476	−0.749
10	2003-08-18 03:00	2003-08-19 12:00	2003-08-18 14:00~18:30	0.113	0.654	−0.202
11*	2004-11-07 23:10	2004-11-09 09:10	2004-11-08 02:45~04:50	0.817	−0.374	−0.046
12	2005-02-20 12:00	2005-02-22 07:00	2005-02-21 09:30~12:30	0.964	0.221	−0.639
13	2005-05-29 09:00	2005-05-30 23:00	2005-05-29 14:40~01:20	0.680	−0.368	−0.210
14	2005-06-15 06:00	2005-06-15 09:00	2005-06-15 06:00~10:30	0.490	0.649	0.191
15*	2005-12-31 06:00	2006-01-01 15:00	2005-12-31 12:30~14:45	0.858	0.062	−0.865
16	2006-04-13 15:00	2006-04-14 12:00	2006-04-14 05:45~12:00	−0.471	−0.634	−0.861
17	2006-11-29 05:00	2006-11-30 06:00	2006-11-29 10:00~13:00	−0.364	−0.033	0.757

a) 标*的事件, 其高温区的持续时间仅为2h

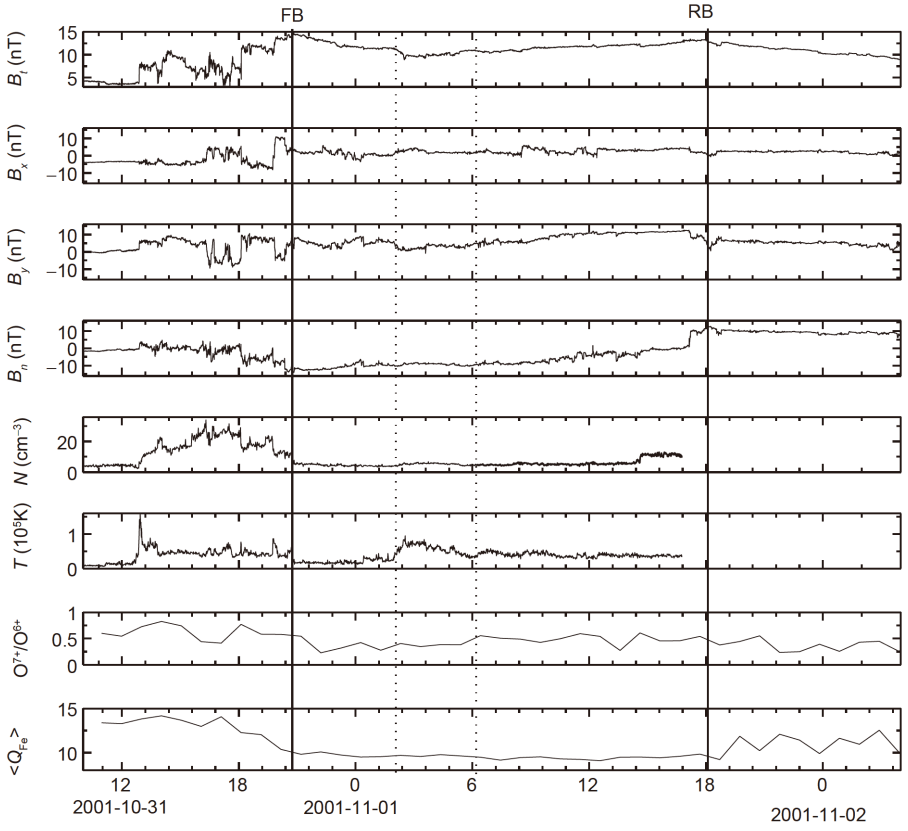


图 1　**2001年10月31日至11月1日磁云事件的太阳风磁场和等离子体参数(GSE坐标系)**

中间位置附近磁场较高边界附近磁场较低，而恰恰是边界附近的磁场较高，并在前半部分的1日03:00UT附近磁场强度达到最低．由图1的温度曲线可以看出该事件的总体温度偏高，并在1日02:00UT附近温度曲线开始快速上升，在03:00UT附近到达最大，接着缓慢下降并在06:15UT附近降到最低，图中的两条竖直虚线表示该高温区前后边界．对比该高温区的磁场强度曲线和温度曲线可以发现：温度曲线快速上升阶段正好对应磁场曲线快速下降阶段，温度曲线缓慢下降阶段也刚好对应磁场曲线的缓慢上升阶段．计算结果显示两者在该区间的线性相关系数为−0.964，两者呈很好的反向关性．对应该区间内O^{7+}/O^{6+}比值和$\langle Q_{Fe}\rangle$曲线则没有发现明显地相应变化特征，也没有在该区间发现磁场重联发生过或者存在的证据．根据前面的介绍可以推测，该高温区应该由磁云的非均匀膨胀引起，即磁云在传播过程中由于该区间相对较低的磁场强度造成其膨胀相对较慢，进而造成该区间温度降低较慢，最终形成该局部高温区．

图2给出了ACE卫星在2005年12月31日至2006年1月1日观测到磁云事件的磁场和等离子体数据．由图2可以看出该事件的磁场强度曲线除了在31日12:30附近有个明显下凹外整体呈现前低后高并逐渐升高态势，而温度曲线则在磁场曲线下凹对应处有一个明显的凸起，且温度曲线呈现整体下降趋势．这表明该事件温度的发展演化受磁场强度的影响很大，尤其在12月31日12:30~14:45UT间的高温区温度曲线和磁场强度曲线有很好的反相关性，其相关系数为−0.865．另外，质子密度曲线在该高温区也有一个明显凸起，这表明质子密度和温度在该时间段共同受非均匀膨胀的支配．有趣的是图2中的O^{7+}/O^{6+}比值曲线在该高温区也有一个对应的凸起，计算得知该区域质子温度和O^{7+}/O^{6+}比值的相关系数高达0.858，说明这两组数据具

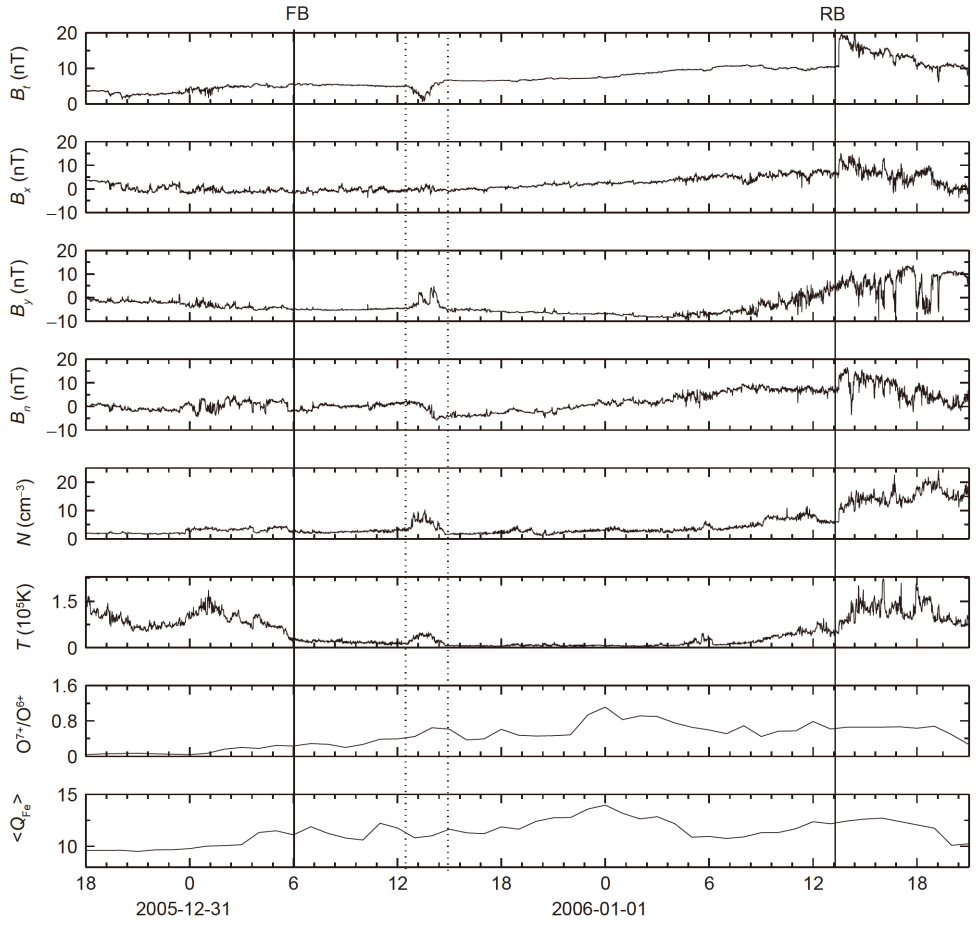


图 2　2005年12月31日至2006年1月1日磁云事件的太阳风磁场和等离子体参数

有很好的正相关性. 虽然该时间段内⟨Q_{Fe}⟩和质子温度没有明显相关性, 但是根据王杰敏和冯恒强(2016)的分析, 只要在磁云内部的大尺度局部高温区⟨Q_{Fe}⟩和O^{7+}/O^{6+}比值中有一个量和温度呈现较好的相关性, 其高温就很可能来源于太阳. 那么该磁云内部的大尺度局部高温区是在磁云对应的CME在抛离日冕时就具有相对较高的温度还是由其本身的非均匀膨胀引起的? 或者是两者的共同作用的结果? 通过表1可以看出, 该高温区持续时间较短只有2h多一点, 而O^{7+}/O^{6+}比值数据的时间分辨率只有1h, 考虑到该区间O^{7+}/O^{6+}比值可能会受到附近两个点的数值影响, 计算该区间质子温度和O^{7+}/O^{6+}比值的相关系数时用了4个点的数据. 尽管这样, 用来计算相关系数所采取数据点仍然较少, 计算出的相关系数的可靠性就比较低. 另外, 通过观察该磁云事件的O^{7+}/O^{6+}比值和⟨Q_{Fe}⟩曲线可以发现, 这种时间尺度的凸起有很多, 而且这个凸起也不在O^{7+}/O^{6+}比值的最大值附近. 所以, 该高温区的O^{7+}/O^{6+}比值的凸起很可能是偶发现象. 如同表1中第3个事件, 虽然其磁云内部的大尺度局部高温区温度与O^{7+}/O^{6+}比值和⟨Q_{Fe}⟩的相关系数均小于−0.9, 并不能代表两者有确定的因果关系, 只是因为选取数据点较少而引起的巧合而已. 综合考虑该事件的高温区内没有发现磁场重联事件, 我们认为该局部高温区也是由磁云的非均匀膨胀引起的. 另外, 表1中第12个磁云事件和这个事例相似, 虽然在高温区温度曲线和O^{7+}/O^{6+}比值呈现出很好的正相关性, 但该高温区的成因是非均匀膨胀而非耀斑加热.

图3给出了2005年5月29~30日磁云事件的磁场和

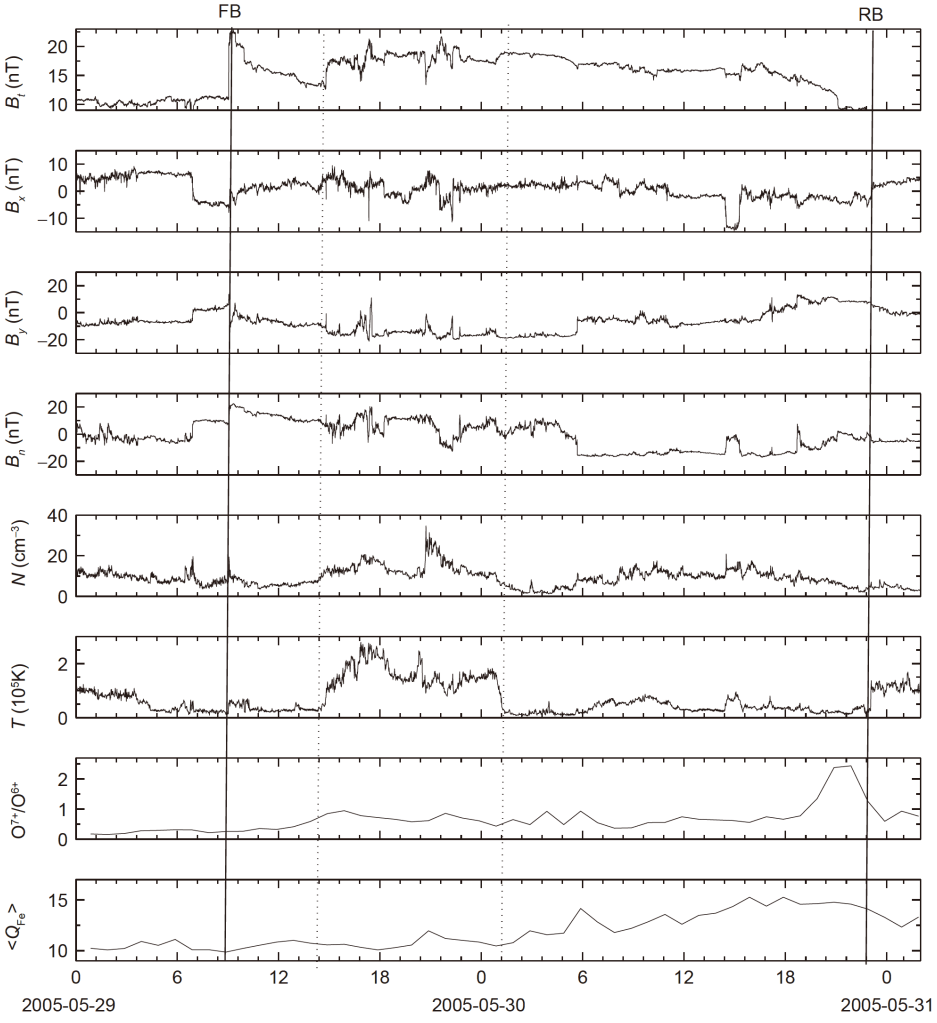


图 3　2005年5月29~31日磁云事件的太阳风磁场和等离子体参数

等离子数据的变化曲线. 由图3可以看出, 该事件在5月29日14:40UT至30日01:20UT之间有一个明显的温度凸起, 该高温区的持续时间超过了10h. 该高温区域的O^{7+}/O^{6+}比值曲线也相应地有明显升高, 但在29日21:10UT之后O^{7+}/O^{6+}比值曲线和温度曲线的变化趋势不太一致. 通过计算可知该高温区域内温度与O^{7+}/O^{6+}比值和$\langle Q_{Fe}\rangle$相关系数分别为0.680和−0.225, 且该高温区间持续时间较长, 所以该高温区很有可能是抛离太阳前被与其对应CME相关的耀斑加热所致. 图4展示了2005年5月29~31日磁云事件对应的日面源区概况, 极紫外以及其磁场观测都表明该事件发生期间日面只有很少活动区, 依据时间和空间对应关系可以确定该事件对应的日面源区即为活动区NOAA 10767. 其对应的耀斑(如图4所示)发生在活动区前导黑子旁边, 其等级为C8.6级. 通过图3中的磁场强度曲线可以看出, 在该高温区内磁场强度并没有特别明显地降低, 且在整个时间区间内磁场强度曲线和温度曲线的变化趋势并非完全相反, 两者相关系数为−0.210. 但是在29日21:10UT之后的高温区内磁场强度曲线和温度曲线的变化趋势完全相反, 且该时间段内磁场强度曲线明

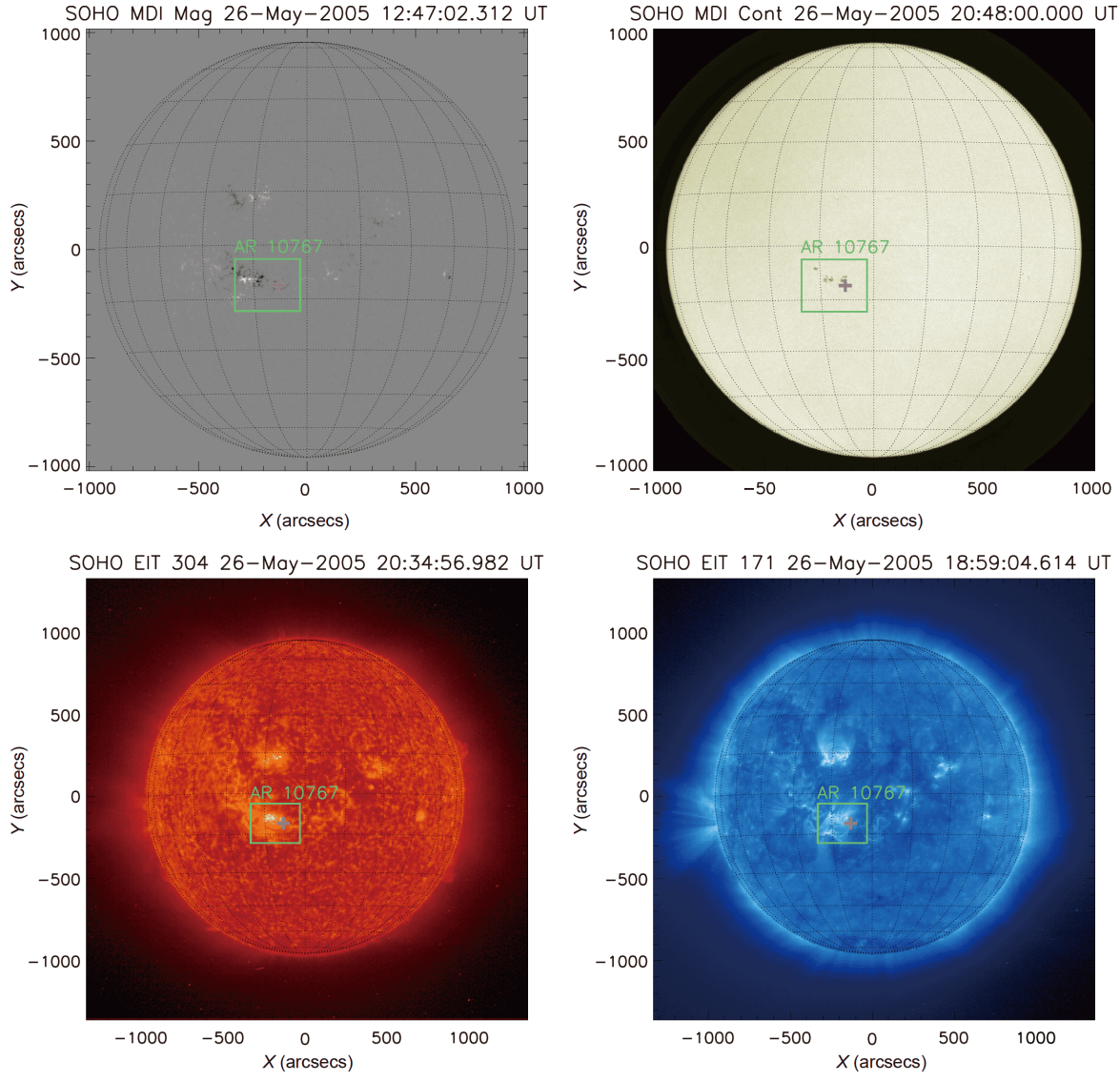


图 4　2005年5月29~31日磁云事件对应的耀斑以及相应活动区概况

耀斑位置被标记为粉红十字线, 其所在的活动区则被标记为绿色方框

显下凹，磁场强度和温度在该时间段的相关系数却为−0.731. 这意味着29日21:10UT之后的高温区间很可能是该磁云在传播过程中不均匀膨胀引起的. 另外, 在这个磁云高温区的29日16:28~16:33UT还发现了一个磁场重联喷流事件，但是这个重联出流事件的时间尺度只有5min左右，对这个持续时间超过10h的高温区加热效果十分有限. 综上所述，该磁云内部的大尺度局部高温区应该是其对应CME相关的耀斑加热和非均匀膨胀共同作用的结果. 图5给出了该磁云内部的大尺度局部高温区起因的截面示意图. 图5中黑色曲线代表磁场线，其疏密表示磁场强度的相对强弱. 阴影区域为局部高温区，蓝色虚线代表卫星相对磁云的轨迹, 黑色十字线代表相对高的O^{7+}/O^{6+}比值. 表1中第2个磁云事件(1998年10月18~20日)内部的大尺度局部高温区的成因应该和2005年5月29~30日磁云事件类似，王杰敏和冯恒强(2016)已经对这个事件做了详细介绍，相关信息可以参考文献中图3和相关的文字描述. 1998年10月18~20日磁云事件内高温区的温度与O^{7+}/O^{6+}比和$\langle Q_{Fe}\rangle$的相关性系数只有0.378和0.094, 但是O^{7+}/O^{6+}比值和$\langle Q_{Fe}\rangle$曲线与温度曲线的变化趋势具有相似性，即有同时上升或同时下降趋势. 由王杰敏和冯恒强(2016)中的图3还可以看到, 该高温区内磁场强度曲线和温度曲线的变化趋势也基本上完全相反，只是相关系数为−0.5434，没有小于−0.6. 该事件的高温区内同样没有发现磁场重联事件，所以1998年10月18~20日磁云内的高温区也应该是耀斑加热和非均匀膨胀共同作用的结果，只是两者的共同作用降低了单个作用因素的效果，造成两类相关系数的绝对值都没有大于0.6. 另外, 表1中第8、9个磁云内部的大尺度局部高温现象也应该是耀斑加热和非均匀膨胀共同作用的结果.

4　结果与结论

本文用第二部分介绍的三种方法分析了1998~2008年ACE卫星观测到17个存在持续时间大于2h的局部高温现象的磁云事件, 结果显示: (1) 只有极个别高温区内发现了磁场重联事件, 即第1个磁云事件内的1998年8月20日05:18~05:25UT和第13个事件内2005年5月29日16:28~16:33UT处观测到了磁场重联喷流事件. (2) 有9个磁云事件高温区域内呈现出质子温

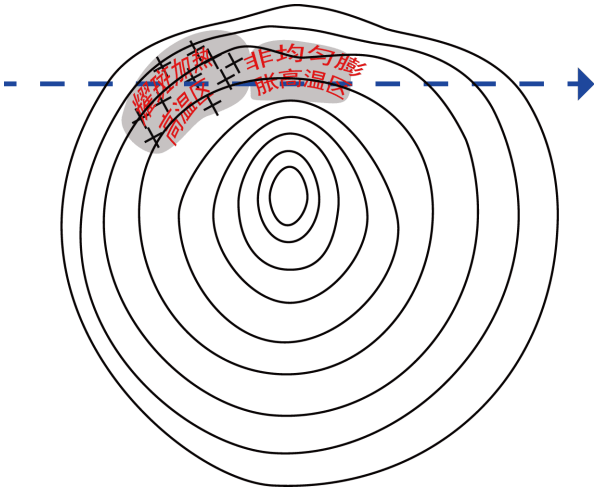


图 5　2005年5月29~31日磁云内部的大尺度局部高温区起因的截面示意图

度和O^{7+}/O^{6+}比值(或$\langle Q_{Fe}\rangle$)具有较好的相关性(相关系数大于0.6)，其中有2个事件中的质子温度同时和磁场强度呈现较好的反相关性. (3) 共有9个磁云事件的高温区域和磁场强度呈现了较好的反相关性(相关系数小于于−0.6). (4) 只有1个磁云事件(2006年11月29~30日)的高温区内质子温度既不和O^{7+}/O^{6+}比值(或$\langle Q_{Fe}\rangle$)呈现较好的正相关性，也不和磁场强度呈现较好的反相关性，也没有发现磁场重联事件. 结合这些分析结果和第三部分的具体事例分析，这17个磁云内部持续时间大于2h的局部高温现象的起因可能如下: 5个磁云内部的大尺度局部高温区内只呈现出质子温度和O^{7+}/O^{6+}比值(或$\langle Q_{Fe}\rangle$)具有较好的相关性，这些高温区很可能是耀斑加热所致; 7个磁云内部的大尺度局部高温区内温度只和磁场强度呈现了较好的反相关性, 这7个高温区可能是由磁云在日地空间传播过程其本身的非均匀膨胀引起的，当然也不能排除等离子体不稳定性，磁流体波，波-粒相互作用的加热作用; 4个磁云内部的大尺度局部高温区内的温度和磁场强度以及O^{7+}/O^{6+}比值(或$\langle Q_{Fe}\rangle$)都具有一定的相关性，它们可能是耀斑加热和磁云自身非均匀膨胀共同作用的结果; 只有1个磁云内部的大尺度局部高温区的温度与磁场强度以及O^{7+}/O^{6+}比值(或$\langle Q_{Fe}\rangle$)都不相关，在其内部也没有发现磁场重联发生过或者存在的证据. 这表明磁云内局部高温现象可能主要是耀斑加热和非均匀膨胀单独作用的结果或者两者的共同作用的结果，磁场重联在磁云内局部高温区的形成方面作用很小，目前的

研究还不能确定等离子体不稳定性、磁流体波、波-粒相互作用对高温区的贡献, 需要进一步深入研究.

参考文献

冯恒强, 王杰敏. 2014. 磁云内局部高温质子的可能加热机制: 磁场重联. 中国科学: 地球科学, 44: 810–816

王杰敏, 冯恒强. 2016. 磁云内局部高温现象和太阳的观测关系. 中国科学: 地球科学, 46: 563–568

魏奉思, 刘睿, 范全林, 冯学尚. 2002. 行星际磁云边界层特征及边界新定义. 中国科学E辑: 技术科学, 32: 608–617

Burlaga L F. 1988. Magnetic clouds and force-free fields with constant alpha. J Geophys Res, 93: 7217–7224

Burlaga L, Sittler E, Mariani F, Schwenn R. 1981. Magnetic loop behind an interplanetary shock: Voyager, Helios, and IMP 8 observations. J Geophys Res, 86: 6673–6684

Feng H Q, Wu D J, Chao J K. 2006. Identification of configuration and boundaries of interplanetary magnetic clouds. J Geophys Res, 111: A07S90

Feng H Q, Wu D J, Chao J K, Lee L C, Lyu L H. 2010. Are all leading shocks driven by magnetic clouds? J Geophys Res, 115: A04107

Feng H Q, Zhao G Q, Wang J M. 2020. Small interplanetary magnetic flux rope. Sci China Tech Sci, 63: 183–194

Gosling J T, Skoug R M, McComas D J, Smith C W. 2005. Direct evidence for magnetic reconnection in the solar wind near 1 AU. J Geophys Res, 110: A01107

Lepping R P, Jones J A, Burlaga L F. 1990. Magnetic field structure of interplanetary magnetic clouds at 1 AU. J Geophys Res, 95: 11957–11965

Lepri S T, Zurbuchen T H. 2004. Iron charge state distributions as an indicator of hot ICMEs: Possible sources and temporal and spatial variations during solar maximum. J Geophys Res, 109: A01112

Lepri S T, Zurbuchen T H, Fisk L A, Richardson I G, Cane H V, Gloeckler G. 2001. Iron charge distribution as an identifier of interplanetary coronal mass ejections. J Geophys Res, 106: 29231–29238

Li H J, Feng X S, Xiang J, Zuo P B. 2013. New approach for solving the inverse boundary value problem of Laplace's equation on a circle: Technique renovation of the Grad-Shafranov (GS) reconstruction. J Geophys Res-Space Phys, 118: 2876–2881

Reinard A. 2005. Comparison of interplanetary CME charge state composition with CME-associated flare magnitude. Astrophys J, 620: 501–505

Wang J M, Feng H Q, Zhao G Q. 2018. Cold prominence materials detected within magnetic clouds during 1998–2007. Astron Astrophys, 616: A41

Wang J M, Feng H Q, Li H B, Zhao A K, Tian Z J, Zhao G Q, Zhao Y, Liu Q. 2019a. Possible cool prominence materials detected within interplanetary small magnetic flux ropes. Astrophys J, 876: 57

Wang J M, Zhao Y, Feng H Q, Liu Q, Tian Z J, Li H B, Zhao A K, Zhao G Q. 2019b. Comparison of counterstreaming suprathermal electron signatures of ICMEs with and without magnetic cloud: Are all ICMEs flux ropes? Astron Astrophys, 632: A129

Wang Y M, Ye P Z, Wang S, Xue X H. 2003a. An interplanetary cause of large geomagnetic storms: Fast forward shock overtaking preceding magnetic cloud. Geophys Res Lett, 30: 1700

Wang Y M, Ye P Z, Wang S, Xiong M. 2003b. Theoretical analysis on the geoeffectiveness of a shock overtaking a preceding magnetic cloud. Sol Phys, 216: 295–310

Wei F S, Feng X S, Yang F, Zhong D. 2006. A new non-pressure-balanced structure in interplanetary space: Boundary layers of magnetic clouds. J Geophys Res, 111: A03102

Wei F S, Liu R, Fan Q L, Feng X. 2003a. Identification of the magnetic cloud boundary layers. J Geophys Res, 108: 1263

Wei F S, Liu R, Feng X S, Zhong D, Yang F. 2003b. Magnetic structures inside boundary layers of magnetic clouds. Geophys Res Lett, 30: 2283

Wu D J, Chao J K, Lepping R P. 2000. Interaction between an interplanetary magnetic cloud and the Earth's magnetosphere: Motions of the bow shock. J Geophys Res, 105: 12627–12638

Xiong M, Zheng H N, Wang S. 2009. Magnetohydrodynamic simulation of the interaction between two interplanetary magnetic clouds and its consequent geoeffectiveness: 2. Oblique collision. J Geophys Res, 114: A11101

Xiong M, Zheng H, Wu S T, Wang Y, Wang S. 2007. Magnetohydrodynamic simulation of the interaction between two interplanetary magnetic clouds and its consequent geoeffectiveness. J Geophys Res, 112: A11103

Zuo P B, Wei F S, Feng X S, Yang F. 2007. The Relationship between the magnetic cloud boundary layer and the substorm expansion phase. Sol Phys, 242: 167–185

(责任编委: 冯学尚)