2017年5月磁暴过程及近地空间环境响应分析

黄为权^{1,2*}, 万卫星^{1,2}, 薛炳森³

1. 中国科学院大学, 北京 100049;

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;

3. 中国气象局空间天气重点开放实验室, 北京 100081

* E-mail: huangwquan@pku.org.cn

收稿日期: 2018-04-17; 接受日期: 2018-08-27; 网络版发表日期: 2019-03-07

摘要 世界时间2017年5月27日15:37, 地磁场开始发生强烈扰动, 达到大磁暴水平. 分析显示, 5月23日的日冕物质抛射(CME)在行星际空间形成磁云, 其携带的行星际磁场南向分量持续12 h小于 -10 nT, 最小达到 -20.71 nT. 长时间强南向磁场分量与磁层顶地磁场相互作用, 地磁场发生强扰动, SYM-H指数最小达到 -142 nT. 全球多个电离层台站监测到电离层扰动. 综合电离层测高仪、TIMED-GUVI观测和模式同化TEC数据分析表明, 此次电离层暴具有南北半球不对称性, 大气成分(N_2 , O_2)扰动很可能是此次电离层负暴的主要原因, 赤道向热层风抬升或者 O/N_2 的升高是正暴的可能原因. 磁暴期间热层大气密度增加, 引起低轨道航天器从29~30日开始轨道衰减速度显著加快, 与HPI有很好的对应关系.

关键词 磁暴, 日冕物质抛射, 电离层暴, 轨道衰减

1 引言

磁暴是地磁场全球性剧烈扰动事件, 磁暴的发生与太阳活动密切相关, 特别是大磁暴通常由日冕物质抛射(coronal mass ejection, CME)引起. CME进入行星际后, 会形成具有大尺度结构和规则磁场的磁云(MC), 其本体质子温度、密度和 β 值比较低, 磁场方向有着大而光滑的旋转. Li和Luhmann^[1]和Echer^[2]分别研究了1978~2002和1996~2001年间的磁云, 发现磁暴与磁云有密切的联系, 70%的特大磁暴($Dst < -200$ nT)与磁云有关, 97%的磁云会引起 $Dst < -30$ nT的磁暴.

磁暴期间电离层的响应与很多因素有关, 比如当

地时间、地磁经纬度、季节、太阳活动、磁暴开始时间、磁暴发展阶段、磁暴强度和暴前背景等. 诸多实验与理论研究表明, 磁暴期间电离层的响应受热层暴的显著影响, 包括中性风的改变、大气成分的改变引起产生率与损失率的变化. 张晓芳等人^[3]的统计分析表明热层大气在不同磁暴期间响应具有不同的特征, 这可能也是电离层形态各异的原因之一. 刘立波等人^[4]、张满莲等人^[5]、於晓等人^[6]利用地基观测资料或者电离层层析技术分析了磁暴个例的电离层响应过程, Buonsanto^[7], Blagoveshchenskii^[8]等对磁暴期间电离层响应研究作了总结回顾. 2015年3月17~18日发生了第24太阳活动周以来最强的地磁暴, Astafyeva等

引用格式: 黄为权, 万卫星, 薛炳森. 2017年5月磁暴过程及近地空间环境响应分析. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 1051–1063

Huang W Q, Wan W X, Xue B S. Analyses of geospace response to the geomagnetic storm in May 2017 (in Chinese). Sci Sin Tech, 2019, 49: 1051–1063, doi: 10.1360/N092018-00104

人^[9]、Nava等人^[10]对期间电离层响应作了分析, 为电离层扰动过程的建模分析预报提供了参考. 经过多年的分析研究, 对磁暴期间电离层响应过程及机理的认识不断深入, 但仍有未得到解决的问题, 对典型个例分析将有助于促进对电离层扰动机制的理解.

本文按照日地因果链回顾了2017年5月磁暴过程的日冕物质抛射(CME)、行星际磁云背景特征及其与磁层顶相互作用, 引发大磁暴的过程, 重点分析了磁暴在近地空间环境的响应, 包括电离层和热层参数在磁暴过程中的扰动特点.

2 磁暴过程

2017年5月23日太阳日面爆发了一个Halo CME, SOHO/LASCO观测到CME进入视场的开始时间是世界时13:36, 该CME离开太阳进入行星际空间后成为磁云并被卫星观测到.

根据魏奉思等人^[11]对行星际磁云边界的定义, 由L1点DSCOVR卫星行星际太阳风的监测数据可以看到(图1), 世界时27日14:48, 质子高温高密度的磁重联作用区、磁云的外边界层到达L1点, 太阳风速度从300 km/s左右突增到360 km/s左右, 质子温度从约 10^4 K突增到约 3.6×10^4 K以上, 质子数密度从约5个/cm³突增到约20个/cm³. 22:50, 质子低温低密度, 且携带着强行星际磁场南向分量的磁云本体到达. 行星际磁场南向分量 B_z 持续约12 h小于-10 nT, 期间最小达-20.71 nT.

此次磁云结构抵达地球磁层顶后, 引起地磁场强烈扰动. 由于磁云速度不高, 在360 km/s左右, 磁云前边界压缩磁层顶作用不强. 根据图2中SYM-H和AE系列指数变化图, 此次大磁暴急始发生在世界时间5月27日15:37(A线), SYM-H指数上升到10 nT. 图2初相开始时刻(急始)比图1滞后约48 min, 是太阳风从L1点DSCOVR监测点传输到磁层顶并引起地磁指数SYM-H突增的时间差. 经历约6 h后, 在21:32(B线)达到最大值60 nT, 初相结束, 主相开始. SYM-H指数急速下降, 在28日2:34下降到-116 nT, 之后小幅回升, 在4:20达到-89 nT后继续下降, 在28日7:13(C线)达到最小值-142 nT, 主相经历了约10 h, SYM-H指数变幅达到202 nT, K_p 指数最大达到7, 达到大磁暴级别.

3 电离层响应

本文首先利用NOAA公开的19个站点2017年5月的电离层数据, 分析大磁暴期间电离层F2层临界频率(foF2)、电离图导出总电子含量(ITEC)和F2层峰值高度(hmF2)的变化情况. 站点分布如图3所示, 所处经纬度如表1所示.

5月23~26日地磁活动平静, 为比较方便, 以各站23~26日各参数的中间值作为背景值, 部分站点数据不全的则以26日为背景值, 在各图中均以实线标画. Δ ITEC和 Δ hmF2分别是当日的ITEC和hmF2数值减去背景值的差, 以星点线标画. 由于不同台站电离层参数类型、数据可用性不同, 且为了考察地方时效应, 本文分美洲扇区、欧洲和非洲扇区、东亚和澳大利亚扇区等3个区域对电离层响应分别进行比较分析. 美洲扇区电离层数据只分析foF2的变化情况, 欧洲和非洲扇区电离层数据分析foF2, Δ ITEC和 Δ hmF2变化情况, 东亚区域分析TEC和foF2变化情况, 澳大利亚区域分析foF2的变化情况.

一是美洲的4个站. 如图4所示, 为Eglin, Boulder, Gakona, Jicamarca 4个站foF2的23~26日背景值(实线)和磁暴期间实测值(星点线)变化图. 在磁暴初相和主相期间处于上午到午夜之间. 4个站主相期间都有显著的正暴, 恢复相除磁赤道附近的Jicamarca站外都是负暴, Boulder站在初相期间为负暴, 而Eglin和Gakona两站为正暴.

二是欧洲和非洲扇区8个台站. 如图5所示, 为欧洲(左边)和非洲(右边)8个站foF2, Δ ITEC和 Δ hmF2随地方时的变化图, 各图的横坐标为地方时, 第一栏为foF2, 实线为23~26日背景值, 星点线为磁暴期间实测值; 第二栏为磁暴期间ITEC与背景值之差; 第三栏为磁暴期间hmF2与背景值之差. 磁暴初相和主相期间该扇区处于地方时下午到早晨, 欧洲5个站电离层响应非常相似. 磁暴急始约3 h开始, 在日落后、主相开始前后有不同程度的正暴. 主相开始后约4 h开始转为负暴, 并持续1 d多时间. 除了Rome站缺乏部分数据外, 其他4个台站从主相后期开始伴随着foF2下降的同时观测到白天从日出到日落之间hmF2和ITEC同步下降, 持续10 h左右.

非洲3个台站中, Hermanus和Grahamstown两站响应基本一致, 从主相结束前约1 h开始为负暴, 持续约

图 1 (网络版彩图)DSCOVR 卫星观测的太阳风数据. 从上下分别分别是行星际磁场分量 B_z 和南向磁场分量 B_y 、磁场方向与黄道面的夹角 θ 、黄道面内磁场方向与日地连线夹角 ϕ 、太阳风速度、质子数密度、质子温度. I, II, V 竖虚线分别对应大磁暴的初相(急始)、主相和恢复相的分界点(实际时间滞后约 48 min, 是太阳风从 L1 点传输到磁层顶并引起地磁指数 SYM-H 突增的时间差), III, IV 两条粗的竖虚线是磁云本体分界线

图2 (网络版彩图)从上往下分别是5月27日开始的SYM-H, AE/AU/AL, HPI和Kp指数(图中A, B和C三条竖虚线分别对应图1的I, II和V, 分别表示磁暴的初相(急始)、主相和恢复相开始时刻)

图 3 (网络版彩图)本文所用电离层数据监测站点(圆点)分布图

表 1 本文所用电离层数据监测站点地理经纬度和地磁经纬度

序号	台站名称	地理经纬度	地磁经纬度
一 美洲扇区			
1	Eglin	30°N, 273°E	40°N, 344°E
2	Boulder	40°N, 255°E	48°N, 222°E
3	Gakona	62°N, 215°E	64°N, 269°E
4	Jicamarca	12°S, 283°E	2°S, 356°E
二 欧洲和非洲扇区			
1	San Vito	40°N, 17°E	40°N, 99°E
2	Rome	42°N, 13°E	42°N, 94°E
3	Pruhonice	50°N, 15°E	49°N, 99°E
4	Dourbes	50°N, 5°E	51°N, 89°E
5	Fairford	51°N, 358°E	54°N, 83°E
6	Madimbo	22°S, 31°E	24°S, 100°E
7	Grahamstown	33°S, 27°E	34°S, 93°E
8	Hermanus	34°S, 19°E	34°S, 85°E
三 东亚和澳大利亚扇区			
1	Jeju	33°N, 126°E	24°N, 198°E
2	Khabarovsk	48°N, 135°E	40°N, 204°E
3	Magadan	60°N, 151°E	52°N, 215°E
4	Brisbane	27°S, 153°E	34°S, 230°E
5	Camden	34°S, 151°E	40°S, 229°E
6	Canberra	35°S, 149°E	42°S, 227°E
7	Hobart	43°S, 147°E	50°S, 227°E

1 d. 两站东北面处于南半球低磁纬度的Madimbo站则响应相反, 为正暴. 与北半球欧洲5个台站不同的是, 同扇区南半球非洲的3个台站主相前后未见明显的正暴, 且hmF2和ITEC也没有明显的长时间下降过程, 相反, hmF2和ITEC存在较大幅度的正扰动, 疑似电离层行扰(TIDs).

三是东亚和澳大利亚扇区7个台站. 如图6所示, 东亚(左边)和澳大利亚(右边)7个站foF2随地方时的变化图, 横坐标为地方时, 图中实线为23~26日背景值, 星点线为磁暴期间实测值. 该扇区在磁暴初相和主相期间处于午夜到下午. 北半球Khabarovsk和Magadan两站从初相开始foF2均为正暴, 峰值出现在主相中后期, 在恢复相初期存在短暂的foF2数据缺失, 但从恢复相开始4 h后部分数据看, foF2存在负暴. 而同时段位于北半球低磁纬度的Jeju站初相期间未见正暴, 而从主相开始持续1 d时间为正暴.

为进一步分析东亚区域电离层在磁暴期间的响应, 本文采用了中国气象局基于GNSS的区域TEC同化数据. 这些TEC数据是利用在中国区域内布设的GPS地面监测网接收到的单频信号, 反演得到TEC后, 与IRI模式进行同化得到区域网格点数据. 格点数据为0.5°×0.5°经纬度分辨率、1 h间隔数据. 本文以23~26日的平均值作为背景, 分析经度范围80°~130°E, 纬度范围20°~50°N区域27~29日TEC的变化情况. 如图7所

图4 (网络版彩图)美洲4个站foF2随地方时的变化图. 横坐标为地方时, 实线为背景值(23~26日的中间值, 下同), 星点线为磁暴期间实测值, 三条竖虚线同图2的A, B, C

示, 从28日01UT(09LT)开始, 东亚区域TEC开始有显著的增强, 持续到日落后, 在02~06UT(10~14LT)最强, 之后逐渐转为负相暴, 与各电离层测高仪站观测结果基本一致.

为了考察电离层响应与大气成分扰动关系, 本文参考了TIMED-GUVI在5月26~29日的O/N₂插值平滑图像产品, 如图8所示. 显著的变化可从28日图看出, O/N₂显著降低的区域从高纬度逐渐向中低纬度扩散, 在28日约13UT到达最低纬度后逐渐恢复.

4 低轨航天器轨道衰减效应

本文利用北美防空司令部公开的两行轨道根数, 计算了5个低轨道航天器轨道半长轴在此次磁暴期间的变化过程, 通过轨道变化速率考察热层大气密度扰动情况. 图9为5月26日至6月1日低轨道航天器半长轴变化, 各小图纵坐标为半长轴每天变化的高度(m/d). 从5月29~30日开始, 各航天器轨道衰减率显著增大, 比平静期的26日增加了2倍以上, 如天宫-1从26日的128 m/d增加到455 m/d.

5 分析与讨论

(1) 低速但具有强南向B_z的磁云引发大磁暴

引起此次磁暴的磁云前边界的激波速度不高, 在380 km/s左右, 只比背景太阳风速度(约300 km/s)快不到100 km/s, 与常见的磁云相比显然属于速度较慢的一类. 但其携带的磁场南向分量较强, 且持续时间长, 小于-15 nT的持续时间约9 h. 根据Dungey提出的磁重联理论, 强的南向磁场分量更有利于磁重联过程的发生, 将磁能转化为等离子体的动能和热能, 使得更多的高能粒子进入地球磁层, 进入环电流的高能粒子增多, 环电流显著增强, 引起地磁场水平分量显著下降, 使得Dst指数大幅降低. Li和Luhmann^[1], Echer等人^[2]认为, 如果磁云有较大的南向磁场分量且持续时间比较长, 就会产生显著的地磁效应. 此次低速磁云能引发大磁暴, 主要原因是由于长时间的强南向磁场分量与地球磁场相互作用的结果.

(2) 电离层负暴

热层大气是电离层的背景, 两者的耦合作用在分析磁暴期间电离层响应过程是不可忽视的. 通常认为, 磁暴期间极区太阳风能量的注入通过焦耳加热和库仑碰撞作用, 使得热层大气加热膨胀, 低层富含分子(N₂, O₂)大气上涌到高层大气; 极区大气加热同时引起压力梯度, 驱动热层风携带着富含分子的成分扰动区从极光区扩展到中低纬度, 引起大范围的大气成分扰动, 可能伴随激发行进大气扰动(TADs).

电离层负暴通常以大气成分的扰动解释, 并得到

图 5 (网络版彩图) 欧洲(左边)和非洲(右边)8个站foF2、Δf2、ΔTEC和Δhmf2随地方时的变化图, 各图横坐标为地方时, 第一栏为foF2, 其中实线为背景值, 星点线为磁暴期间实测值; 第二栏为磁暴期间Δf2与背景值之差; 第三栏为磁暴期间ΔTEC与背景值之差, 三条竖虚线同图2的A、B、C

图6 (网络版彩图)东亚(左边)和澳大利亚(右边)7个站foF2随地方时的变化图. 横坐标为地方时, 图中圆点线为背景值, 三角线为磁暴期间实测值, 三条竖虚线同图2的A, B, C

卫星观测的证实(Astafyeva等人^[9], Nava等人^[10]). 由于电离率与中性氧原子数密度([O])成正比, 复合率与氮分子、氧分子数密度([N₂], [O₂])成正比, 通常用[O]/[N₂], [O]/[O₂]或平均分子量作表征, [O]的下降或者[N₂], [O₂]的增加都表现为[O]/[N₂], [O]/[O₂]或平均分子量的减小, 导致电离率下降、电子密度的降低, 引起负暴.

此次磁暴期间负暴主要发生在北半球, 欧洲扇区从主相后期凌晨到恢复相, 亚洲扇区和美洲扇区在恢复相之后发生. 从图8 TIMED-GUVI观测结果看, 从28日开始, O/N₂降低的扰动区从北半球高纬度地区向中低纬度传播, 在13UT左右到达赤道, 之后逐渐恢复. 由28日的图可以看出, O/N₂显著降低的扰动区在03UT左右就已经到达与欧洲扇区台站相同纬度(40°~54°N), 与图5中欧洲扇区台站负暴开始的时间相吻合. O/N₂显著降低的扰动区在28和29日一直徘徊在图7东亚区域东面, 但在Khabarovsk和Magadan站上方, 直到30日00UT左右才开始到达东亚区域上空, 而图6中Khabarovsk和Magadan两站从恢复相28日开始为负相暴, 图7

东亚区域30日出现了显著的负暴, 表明此次磁暴期间电离层负暴很可能是由于富含分子大气成分扰动区影响而产生的. Astafyeva等人^[9], Nava等人^[10]的分析也显示出O/N₂减低的扰动区对电离层负暴的可能影响. 美洲扇区北半球3个台站负暴开始的时间, 较高纬度的Boulder(40°N, 255°E)比相对较低纬度的Eglin(30°N, 273°E)出现负暴时间早, 也可能是由于O/N₂显著降低的扰动区从极区传播延迟导致的.

(3) 中纬度电离层正暴

Balan等人^[12]基于观测、理论模拟和基础原理提出的中低纬度电离层正暴的物理机制认为, 赤道向热层风抬升电离到损失率减小区域, 在日间电离过程持续发生, 自由电子增加的过程大大强于化学损失过程, 引起自由电子堆积, 导致NmF₂的增加引起正暴. 正暴最有可能发生在早晨-正午时刻磁暴急始的经度区域, 此时电离过程占主导作用, 等离子体堆积效果易超过化学损失过程.

HPI指数是NOAA利用POES系列卫星对极光粒子沉降监测数据计算高于45°的南北极区域注入到大气

图 7 2017年5月27~30日基于GNSS的东亚区域 Δ TEC变化图. LT=UT+8, 以23~26日的平均TEC作为背景值, 单位为TECU. 区域经度范围[80°E, 130°E], 纬度范围[20°N, 50°N]. 图中SC, MP和RP分别对应图2中的初相(急始)、主相和恢复相开始时刻

的能量指数, 能反映出磁扰期间能量注入热层大气, 使焦耳加热增强的情况. 图2显示HPI从27日23UT开始迅速上升, 在28日03UT时达到最大, 此时段极区热层加热达到峰值, 赤道向风达到最强. 东亚区域、澳大利亚扇区和美洲扇区的正暴最强时段与HPI最强的时段对应, 显示可能由于赤道向热层风抬升电离层引起正暴的影响.

另一方面, 从图8中TIMED-GUVI观测结果可以看出, 在28日01UT左右, 极区加热引起的 O/N_2 降低的扰动区已经传播到了中纬度, 29日的图像显示可能并未传播到东亚区域上空. 28日有一个 O/N_2 相对较高的区域从东南亚区域延伸到非洲区域, 29~30日范围有所缩小. O/N_2 增大可能是由于 $[N_2]$ 的减小或者 $[O]$ 的增大, 引起电离率增大或者复合降低, 引起正暴.

在东亚和澳大利亚扇区、美洲扇区观测到的日间中纬度电离层正暴可能主要是由于上述两种原因引起的, 至于哪种占主导左右则需要进一步的分析.

图4和6显示东亚和澳大利亚扇区的最强正暴时间比美洲扇区的晚, 这可能与地方时有关. 初相期间, 美洲扇区处于白天, 正暴在日落前(19LT, 02UT)早于东亚

和澳大利亚扇区达到最强; 东亚和澳大利亚扇区初相期间处于子夜到凌晨, 正暴在午后时段(14LT, 05UT)达到最强. 相比较而言, 如Fuller-Rowell等人^[13]模型所述, 本次磁暴急始时刻处于夜间的亚洲和澳大利亚扇区电离层正暴响应最强. 这种地方时效应与Nava等人^[10]文中图3显示的区域电子含量(REC)变化图结果类似. 图中显示初相期间, 亚洲扇区处于下午时段, 在日落前(~19LT, 12UT)出现峰值; 非洲扇区和美洲扇区则经历日出到日落, REC在午后和日落前存在两个峰值; 太平洋扇区处于夜间则未见明显的峰值.

(4) 低纬度电离层正暴

东亚的Jeju站(磁纬度约24°N)和非洲的Madimbo站(磁纬度约24°S)观测到的电离层暴与相同扇区其他站有所不同. Jeju站的正暴明显比同处北半球东亚扇区的Magadan和Khabarovsk站更强, 且持续到恢复相, 而后两站则在恢复相之后转为负暴; Madimbo站与同属南半球非洲扇区的Hermanus和Grahamstown两站观测结果相反, Madimbo站为正暴, 后两站为负暴. 根据Balan等人^[12]提出的机制, 如果发生东向瞬时穿透电场(prompt penetration electric field, PPEF), 赤道电离异常

图8 TIMED-GUVI O/N_2 全球变化图。(a)~(e)分别为5月26日~30日变化图。横坐标第一行为地方时, 第二行为世界时; 右侧色标为 O/N_2 比值

区会移动到较高的纬度, 大约在南北磁纬 30° 附近。位于南北低磁纬的Madimbo和Jeju这两个站可能在PPEF的作用下引起赤道电离异常区的北移而发生正暴。

(5) 南北半球不对称性

此次磁暴在全球电离层引发大范围的电离层暴, 在相同扇区南北半球观测表现出一定的南北不对称性。图5显示欧洲扇区台站在主相时段前后有弱的正相暴, 且ITEC和hmF2在白天同步起落, 这可能是由于电离层F2层电子密度耗空, 在白天甚至可能比F1层的低, F层电子密度峰值高度相应下降到F1层, 引起所谓的电离层G现象。而同扇区南半球同为负暴的Hermannus和Grahamstown两站则未见到ITEC和hmF2的下降。在主相开始时段附近也未见正暴。东亚扇区在转入恢复相后出现负暴, 而澳大利亚扇区主相期间正暴更强, 且未见负暴。这些都显示出南北半球电离层响应的不

对称性。

Astafyeva等人^[9]对南北半球不对称性概括为4种原因: 大气成分改变的南北不对称性、地球磁场非偶极子不对称性、行星际磁场 B_y 对1区(极向区域)场向电流的影响和大气环流季节的不一致性。磁暴期间, 北半球为夏季, 南半球为冬季, 大气环流更有利于北半球的赤道向热层风带动高纬度富含分子气体的扰动区传向中低纬度, 引起大范围的负暴, 南半球赤道向热层风相对更难向中低纬度传播。此外, 南北极地磁场差异引起北半球HPI比南半球HPI高表明更多能量沉积到北半球, 导致北半球更强的暴时热层扰动。行星际磁场 B_y 在主相期间由正转为负, 其对南北不对称性的贡献需要进一步分析。

(6) 近地空间航天器轨道衰减与极区能量注入

由于低轨道航天器轨道摄动力主要是大气阻力,

图9 2017年5月磁暴期间部分低轨道航天器轨道半长轴变化率。(a) 天宫-1; (b) 天宫-2; (c) 天舟; (d) 国际空间站(ZARYA); (e) 遥感-28

轨道半长轴变化率扰动情况可直接与热层大气密度变化情况联系起来。根据苍中亚等人^[14]对地磁扰动期间低轨航天器轨道分析结论, 低轨道航天器半长轴变化率与半球功率指数(HPI)有很高的相关性, 但滞后约1.2 d。从图2 HPI变化趋势看, HPI指数在28日03:05UT达到峰值。本文分析的所有低轨道航天器在30日左右轨道衰减速度达到最快, 而部分航天器从29日已经开始加速下降, 距离HPI峰值的时间滞后大约为1 d多。与苍中亚等人^[14]的研究结论基本相符。

6 总结

本文首次利用2017年5月27~29日DSCOVR卫星的行星际太阳风监测数据, 分析了磁云结构影响地球磁场、引发大磁暴的过程, 利用全球电离层监测台网数据、基于地基GNSS数据的TEC同化产品、TIMED-GUVI观测结果和航天器轨道根数等数据, 分析了电离层和热层对此次大磁暴的响应特点, 总结分析结果如下。

(1) 5月23日爆发的CME在行星际空间形成磁云结构, 其携带的强南向分量(B_z)持续十多个小时影响地球磁场, 导致地磁场强烈扰动, Dst 指数快速下降到

极小值 -122 nT, 引发大磁暴。

(2) 电离层暴在中纬度地区地方时差异较大; 磁暴初相和主相期间, 欧洲和非洲扇区为下午到早晨, 主要为负暴, 但负暴前有弱的正暴; 东亚和澳大利亚扇区为午夜到下午, 主要为正暴; 美洲扇区为上午到午夜, 主要是正暴。恢复相期间除了澳大利亚扇区外, 主要是负暴。

(3) 此次磁暴期间的负暴可能主要是由于富含分子的大气扰动导致的, 正暴可能是由于赤道向高层风抬升或者 O/N_2 升高导致的。而南北半球3个扇区低纬度的3个台站在整个磁暴过程主要为正暴, Jeju和Maddimba两站的正暴可能是由于赤道电离异常峰极向移动引起的。

(4) 南北半球大气环流的差异引起大气成分扰动分布的不同可能是引起此次磁暴期间电离层扰动南北差异的主要原因。

(5) 在HPI表征的极区能量注入达到峰值后约1天多, 低轨道航天器轨道衰减达到最大。

此次磁暴过程在近地空间环境引起的响应是显著的, 其中一些现象需要进一步分析, 如PPEF的作用、南北不对称性的原因等, 有助于促进对电离层暴过程的理解, 为建模预报提供参考。

致谢 电离层台站监测数据和HPI数据下载于美国空间天气预报中心(<http://legacy-www.swpc.noaa.gov/ftplib/lists/>)、

Kp 指数下载于地球物理数据中心(NGDC, <ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/>)、DSCOVR太阳风数据下载于(<ftp://cdaweb.gsfc.nasa.gov/pub/data/dscovr/>)、SYM-H指数和AE系列指数下载于Kyoto地磁世界数据中心(WDC)(<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>)、TIMED-GUVI的O/N₂插值平滑图像产品来源于约翰霍普金斯大学应用物理实验室(http://guvitimed.jhuapl.edu/data_products), 中国气象局国家空间天气监测预警中心提供了TEC产品, 在此表示感谢.

参考文献

- 1 Li Y, Luhmann J. Solar cycle control of the magnetic cloud polarity and the geoeffectiveness. *J Atmos Sol-Terr Phys*, 2004, 66: 323–331
- 2 Echer E, Alves M V, Gonzalez W D. A statistical study of magnetic cloud parameters and geoeffectiveness. *J Atmos Sol-Terr Phys*, 2005, 67: 839–852
- 3 张晓芳, 刘立波, 刘松涛, 等. 磁暴期间热层大气密度变化. *地球物理学报*, 2015, 58: 3023–3037
- 4 刘立波, 万卫星, 宁百齐, 等. 2000年7月磁暴期间120°E附近低纬电离层响应. *中国科学A辑*, 2001, 31(增刊): 126–132
- 5 张满莲, 尚杜平, 郭兼善, 等. 1998年5月磁暴事件期间全球电离层响应形态与机制的研究. *空间科学学报*, 2001, 21: 131–140
- 6 於晓, 欧明, 刘钝, 等. 地磁暴期间中国中低纬电离层的CIT研究. *空间科学学报*, 2010, 30: 221–227
- 7 Buonsanto M J. Ionospheric storms—A review. *Space Sci Rev*, 1999, 88: 563–601
- 8 Blagoveshchenskii D V. Effect of geomagnetic storms (substorms) on the ionosphere: 1. A review. *Geomagn Aeron*, 2013, 53: 275–290
- 9 Astafyeva E, Zakharenkova I, Förster M. Ionospheric response to the 2015 St. Patrick's Day storm: A global multi-instrumental overview. *J Geophys Res Space Phys*, 2015, 120: 9023–9037
- 10 Nava B, Rodríguez-Zuluaga J, Alazo-Cuartas K, et al. Middle- and low-latitude ionosphere response to 2015 St. Patrick's Day geomagnetic storm. *J Geophys Res Space Phys*, 2016, 121: 3421–3438
- 11 魏奉思, 刘睿, 范全林, 等. 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*, 2002, 32: 608–617
- 12 Balan N, Shiokawa K, Otsuka Y, et al. A physical mechanism of positive ionospheric storms at low latitudes and midlatitudes. *J Geophys Res*, 2010, 115: A02304
- 13 Fuller-Rowell T J, Codrescu M V, Moffett R J, et al. Response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms. *J Geophys Res*, 1994, 99: 3893–3914
- 14 苍中亚, 薛炳森, 程国生. 地磁扰动期间低轨目标轨道预报的误差修正. *宇航学报*, 2016, 37: 544–551

Analyses of geospace response to the geomagnetic storm in May 2017

HUANG WeiQuan^{1,2}, WAN WeiXing^{1,2} & XUE BingSen³

¹ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

² Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

³ Key Laboratory of Space Weather, National Center for Space Weather, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

Strong geomagnetic storm occurred since 15:37UT May 27th, 2017. The analysis result showed that, the corona mass ejection (CME) on May 23rd transformed into magnetic cloud while travelling towards the Earth, the B_z component of which stayed continually below -10 nT, and reached minimum value of -20.71 nT. Under effect of the interaction between the B_z component and the magnetic field in the magnetopause, the minimum value of SYM-H index reached -142 nT. Plenty of the global ionosonde stations observed ionospheric disturbances. Comprehensive study of the ionosonde, TIMED-GUVI observation and TEC assimilation data revealed that, such ionospheric storm showed apparent hemispheric asymmetries, neutral composition (N_2 , O_2) disturbance may be the primary cause of the negative storm, while the positive storm may be caused by the upward effect of equatorward thermospheric wind or the increase of the neutral density ratio O/N_2 . The enhancement of the thermospheric atmosphere density during the geomagnetic storm caused the significant acceleration of the altitude decay speed of low orbit satellites, which was in good correspondence with the change of the HPI index.

geomagnetic storm, corona mass ejection, ionospheric storm, orbit decay

doi: [10.1360/N092018-00104](https://doi.org/10.1360/N092018-00104)