



亚暴的卫星观测及其与SWMF模型的比较研究

王慧^{①②③}, 马淑英^{①*}, Ridley A J^③

① 武汉大学电子信息学院, 地球空间环境与大地测量教育部重点实验室, 武汉 430079;

② 空间天气学国家重点实验室, 北京 100080;

③ Department of Atmospheric, Oceanic and Space Science, University of Michigan, Ann Arbor, MI-48105, USA

* 联系人, E-mail: syma@whu.edu.cn

2009-01-09 收稿, 2009-03-16 接受

国家自然科学基金(批准号: 40604017)和空间天气学国家重点实验室专项基金资助项目

摘要 利用密西根大学空间环境模拟中心的 SWMF (space weather modeling framework) 模型对亚暴事件首次进行预测模拟, 并结合 Geotail 和 Cluster 卫星数据对模拟结果进行了验证. 该亚暴事件发生在 2004 年 9 月 28 日 22:08 UT 时刻, 由美国宇航局 IMAGE 卫星极光观测仪器记录. SWMF 能够有效地耦合磁层、内磁层和电离层区域, 由太阳风行星际磁场驱动. 研究表明, SWMF 模型能较好地预测亚暴期间磁尾磁场和电离层电流大尺度的变化, 太阳风行星际磁场参数从 ACE 卫星到模型外边界的时间延迟方法的准确性对模型结果有较大影响, 最后对亚暴的触发机制进行了讨论并指出模型需要改进之处.

关键词

亚暴

SWMF 模型

太阳风行星际磁场

时间延迟

磁层亚暴发生在磁层夜晚面, 持续 2~3 h, 平均一天出现 4~5 次, 每次释放一个中等地震的能量, 是最经常发生的空间天气现象. 磁层亚暴增强磁层/电离层电流, 引起强能电子沉降, 产生极光, 加热极区电离层、热层, 并将能量带电粒子注入环电流和辐射带; 是磁层最基本的全球扰动形式和磁层-电离层空间最重要的能量传输与转化过程. 磁层亚暴可导致同步轨道和极轨卫星充电, 并引发电离层亚暴和热层亚暴. 电离层亚暴主要出现在极区, 与极盖吸收事件类似, 可造成通信中断.

磁层亚暴的触发机理长期以来受到人们极大的重视和广泛的研究^[1~4], 但至今仍然还是一个困惑学术界的谜. 目前被广泛接受的有两种亚暴触发机制的模型——CCI (cross-tail current instability)^[1]和 NENL (near earth neutral line)^[3]模型. 对全球不同层次的关键空间区域进行卫星协同观测对于揭示亚暴触发之谜至关重要, 然而由于卫星观测在空间和时间上都存在较大的局限性, 因此对亚暴过程的模拟

研究具有重要的意义, 它能够让我们同时对磁层亚暴期间在全球不同层次的关键空间区域同时发生的现象进行研究, 从而能够更好的理解亚暴现象.

本文将利用密西根大学空间环境模拟中心的 SWMF (space weather modeling framework) 模型对 2004 年 9 月 28 日 22:07:46 UT 时刻发生的亚暴事件进行预测模拟, 该亚暴的初始时间由美国宇航局 IMAGE 卫星极光图像判断所得(时间误差为 2 min), Wang 等人^[5]曾利用多颗卫星和地磁台站数据对该事件进行了具体分析.

SWMF 能够有效地耦合日冕、日光层、磁层、电离层和热层等各个领域(对该模型的具体介绍见文献[6]). 该框架能够模拟单独的物理模型所不能模拟的物理过程, 并能够在大型计算机上实时运行. 本文使用的 SWMF 模型包括 BATSRUS 模型-用来模拟磁层^[7], RCM 模型模拟内磁层^[8], 以及 Ridley 模型模拟电离层电动力学过程^[9]. SWMF 模型由太阳风行星际磁场驱动, 这些输入参数由 ACE 卫星测量并时间延迟

引用格式: 王慧, 马淑英, Ridley A J. 亚暴的卫星观测及其与 SWMF 模型比较研究. 科学通报, 2009, 54: 2548~2555

Wang H, Ma S Y, Ridley A J. Comparative study of a substorm event by satellite observation and model simulation. Chinese Sci Bull, 2009, 54, doi: 10.1007/s11434-009-0282-4

到地球弓形激波的上游,即模型的外边界 $32 R_E$ 处。近年来人们对该模型及模拟结果进行了大量的验证工作[10~13]。本文将利用SWMF模型对一次亚暴过程进行预测和研究,并结合Geotail和Cluster卫星数据对模拟结果进行验证。利用行星际条件来预报亚暴的发生一直是一个空间物理中的一个重要,但也极为困难的挑战性课题。本工作利用SWMF模型在这方面的工作的开展将对空间天气研究具有重要意义。

1 模拟结果与卫星观测值的比较

1.1 亚暴发生前的行星际磁场情况

ACE 卫星(位于向阳面 Lagrange 点,大致 $220 R_E$ 处)观测到的太阳风行星际磁场参数时间延迟到模型的外边界 $32 R_E$ 处,作为模型的输入参数,如图 1 所示。模型中所采用的时间延迟的计算仅考虑了卫星所在的位置 X_{gsm} 和太阳风行星际磁场的速度分量 V_{xgsm} ,该方法假设太阳风的相前和 X_{gsm} 轴垂直(关于

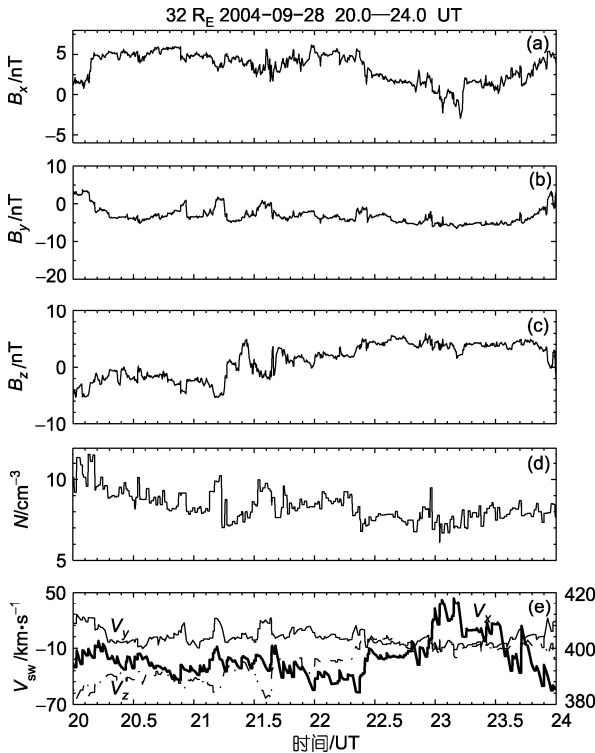


图 1 ACE 卫星观测的太阳风行星际磁场参数

时间延迟~1 h 到 $32 R_E$ 处,作为模型的外边界输入参数,(a)~(e)分别为 GSM 坐标下的 IMF B_x , B_y , B_z 分量,太阳风密度 N , 和速度三分量 V_{sw} , 其中 V_y 和 V_z 用实线和点划线给出, V_x 用粗实线给出

时间延迟方法的总结见文献[14]),由此计算得到的时间延迟大约为 1 h。

为了检测模型中所使用的太阳风行星际磁场时间延迟方法的准确性,图 2 给出 Geotail 卫星轨道上(位于 $X = 15 R_E$) SWMF 模拟磁场和 Geotail 卫星观测值的比较图,我们分别将模拟曲线和观测曲线进行了互相关分析,从而得到最大相关系数和相对应的最优时间延迟,并根据该最优时间延迟对模拟曲线进行了平移。可以看到模拟值提前观测值大约 15~30 min,行星际磁场各分量的最优延迟时间并不相同,表明时间延迟方法的不准确。IMF B_z 分量被认为是触发亚暴的主要因素之一,其模拟/观测值相差 30 min,相关系数为 0.7,因此我们可以粗略判定模拟的亚暴将比观测提前至少 30 min 发生。

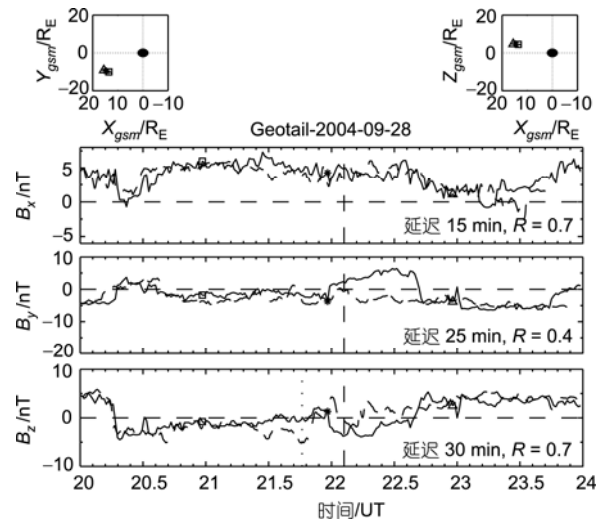


图 2 2004 年 9 月 28 日 Geotail 卫星在 20:00~24:00 UT 期间的轨迹及 SWMF 模拟与卫星观测的磁场比较图

虚线为 SWMF 模拟值,实线为 Geotail 观测值。模拟曲线向后平移了一定时间,其最优延迟时间和最大相关系数(R)分别给出。竖直虚线表明亚暴初始时间(从 IMAGE 极光图像得到,~22:07 UT),竖直点线为模拟亚暴发生的时间(见 1.2 部分具体说明,~21:14 UT)

Geotail 轨道处模拟和观测值之间 15~30 min 的时间延迟表明 SWMF 模型所采用的太阳风行星际磁场延迟方法在延迟时间上的不准确性;IMF 三分量最优延迟时间各不相同,且相关系数不高,尤其是 IMF B_y 分量,其相关系数只有 0.4,表明太阳风传播过程中,行星际磁场结构可能发生了变化,该时间延迟方法不能准确反映近地空间太阳风行星际磁场的真实结构。

1.2 磁尾磁场的结构

图3给出亚暴期间磁尾4颗 Cluster 卫星轨道上 SWMF 模拟磁场(虚线)与 Cluster 观测值(实线)的比较图, 模拟曲线向后平移了 52 min (该延迟时间由互相关分析计算得到). 亚暴发生期间, Cluster 卫星大致位于 $[X, Y, Z]_{\text{gsm}} = [-14.3, 4.3, 3.2] R_E$ 处, 靠近磁尾磁重联位置, 模拟与观测都显示磁尾磁场偶极化发生, 即 B_x 分量减少, B_z 分量增强. 亚暴发生之前 B_x 和 B_y 分量预测值和观测值比较接近, 只是在 20:45 ~ 21:30 UT 期间 B_z 分量模拟和观测值极性相反, 但模拟和观测的 B_z 分量相对于 B_x 分量来说较小, 所以模拟和观测都表明亚暴发生之前整个磁尾磁场结构被拉伸, 只是拉伸的程度不同; 模拟磁场偶极化时间比观测

提前了 52 min, 观测磁场偶极化发生在 22:06 UT, 模拟磁场偶极化发生在 21:14 UT; 亚暴发生之后模拟和观测磁场值较为相近, 不过观测磁场出现频繁的小尺度波动, 而模拟曲线变化较为平缓, 这可能与模型的空间和时间精度不高有关.

为了进一步了解亚暴发生前后磁尾的变化情况, 图4给出亚暴发生前后磁尾模拟磁场在 $y = 0$ 平面的结构图, 图4中颜色表示离子压强的大小, 带箭头的实线表示磁力线, 图4(a)为磁场偶极化发生之前的情况(21:10 UT), 可以看到磁力线向磁尾方向拉伸; 图4(b)为磁场偶极化期间(~21:15 UT), 磁尾发生重联(重联点位于 ~14 R_E 处), 磁场偶极化, 等离子体团在两中性线之间形成, 并向磁尾方向运动.

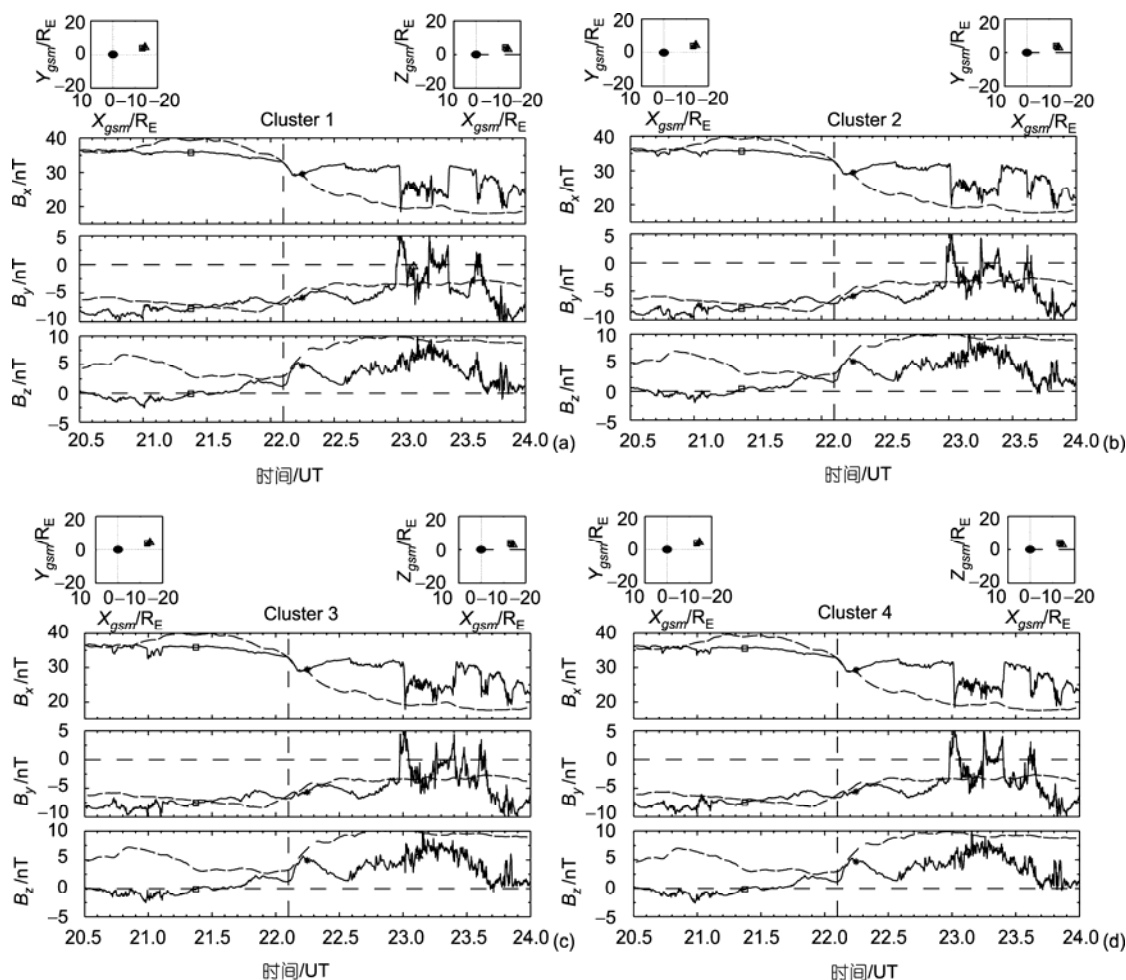


图3 2004年9月28日 Cluster 卫星轨道处 SWMF 模拟与观测磁场的比较

虚线为模拟磁场, 实线为观测磁场. 模拟曲线向后平移了 52 min. 竖直虚线表示磁场偶极化时间(22:06 UT)

图4 亚暴发生前后 $y = 0$ 平面(正午-子夜平面)磁层磁场和压强的模拟

黑线为磁力线, 背景颜色代表等离子体压强的大小. (a)为磁场偶极化之前($\sim 21:10$ UT), (b)为偶极化发生($\sim 21:15$ UT)

1.3 电离层越极盖电势和场向电流

图5给出模拟的南北半球越极盖电势和场向电流随时间的变化图, 模拟曲线没有做任何时间延迟, 竖直虚线表示模拟亚暴发生的时间, 可以看到亚暴发生后南北半球越极盖电势和场向电流都有所增强.

2 结果与讨论

本文利用密西根大学空间环境模拟中心的SWMF (space weather modeling framework)模型对2004年9月28日发生的一次亚暴事件进行了模拟, 并结合Geotail和Cluster卫星数据对模拟结果进行了验证.

亚暴发生期间, Cluster位于磁尾重联处($-14 R_E$)附近, 模拟和观测都显示了磁场偶极化现象(图3),

由于模型空间和时间精度的限制, 模型只能给出亚暴过程中磁尾结构的大尺度变化, 很多细节变化不能给出, 模拟还显示亚暴发生后电离层越极盖电势和场向电流都有所增强.

在亚暴过程中有重联、磁场偶极化、高速流、电流中断等现象, 通过比较这些物理现象的时序关系, 研究SWMF模型预报的亚暴现象与哪个模型更加靠近是非常有意义的一件事. Wang等人^[5]利用中国双星TC-1($[x, y, z]_{gsm} = [-7.0, 6.3, -0.03] R_E$)和Cluster($[x, y, z]_{gsm} = [-14.3, 4.3, 3.2] R_E$)卫星详细讨论了该亚暴事件中相关物理现象的发生时序问题, 研究表明: 磁层近地空间扰动导致远磁尾重联, 最终导致亚暴的发生. 图6^[5]给出位于近地空间的TC-1($\sim -7 R_E$)和位于远地

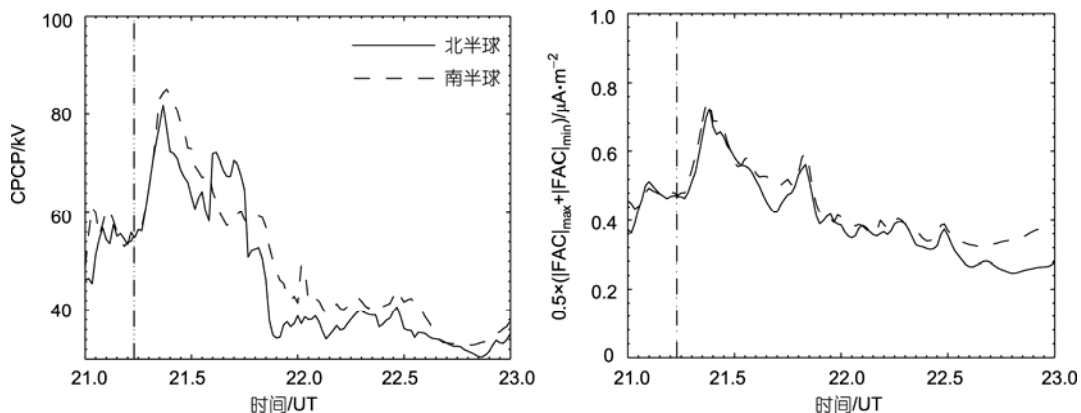


图5 电离层越极盖电势和场向电流随 UT 时间的变化图

竖直虚线表明磁尾偶极化的时间

空间的Cluster($\sim -14 R_E$)观测到的磁场和等离子体速度的变化情况(TC-1 没有等离子体速度的数据),从图6中可以看出,TC-1 先于Cluster观测到磁场偶极化的开始,然而,对于大尺度磁场偶极化结构来说,Cluster先于TC-1 观测到磁场偶极化的峰值,分析结果表明:内磁层的扰动引起远磁尾重联,远磁尾重联触发亚暴,重联引起的磁场偶极化结构向地传播依次经过Cluster和TC-1(具体参见Wang等人^[5]).值得注意的是Cluster在磁场偶极化开始之后才观测到向地高速流现象。

由于模型空间和时间精度的限制,SWMF 只能模拟出磁尾结构的大尺度变化,因此 SWMF 只能粗略判断各个物理现象的发生时间:

(1) 重联发生时刻. 图4为SWMF模拟的正午-子夜平面磁层磁场和等离子体压强的变化图,可以看到,重联开始时间在21:10~21:15 UT之间,由于模型输出结果的时间间隔为5 min,所以不能给出模

拟重联发生的具体时刻。

(2) 高速流发生时刻. 图7与4类似,不同的是背景颜色代表等离子体高速流速度 V_x 分量的大小.从图7可以看出高速流发生的时间为21:15~21:20 UT之间,即发生在磁尾重联之后。

(3) 电流中断时间. 图8为TC-1轨道处SWMF模拟和卫星观测的磁场结构变化图,与图3一样,模拟曲线向后平移了52 min,由于模型的精度不高,模拟曲线变化较为平缓,可以看到在22:04 UT,模拟和观测都表明近地空间发生了磁场偶极化现象,我们粗略判定模拟的电流中断时间为 $\sim 21:12$ UT。

(4) 远磁尾磁场偶极化时间. 从原文分析中我们知道在Cluster处模拟的磁场发生偶极化的时间为 $\sim 21:14$ UT。

模拟的各个物理现象发生的时序总结如下:内磁层(TC-1, $\sim -7 R_E$)扰动发生在 $\sim 21:12$ UT,磁尾重联发生在21:10~21:15 UT,远磁尾处(Cluster, $\sim -14 R_E$)磁场偶极化发生在 $\sim 21:14$ UT,因为模型空间和时间精度的限制,我们很难推断,模拟的亚暴也是由近地空间磁场扰动触发还是由于远磁尾重联触发,在今后的工作中我们将进一步提高模型的时间和空间精度,从而能够更好的理解亚暴现象.另外,Cao等人^[15]发现高速流与亚暴具有一一对应的关系,模拟和观测表明,亚暴高速流发生在亚暴初始之后(参见图4和7)。

下面讨论模拟与观测亚暴的太阳风行星际磁场的触发机制.图9给出Geotail卫星轨道上模拟和观测太阳风行星际磁场和动力学压强随时间的变化图,这两个参数是导致亚暴发生的最主要的因素^[16].根据Lyons等人^[16]的理论,南向行星际磁场分量的减小或北向旋转,或太阳风动力学压强的增强都可能触发亚暴.正如本文1.1部分所叙述,由于单颗卫星ACE测量和时间延迟方法带来的误差,向阳侧Geotail观测和SWMF模拟值存在较大差别,尤其是在亚暴发生时刻附近.由图9中IMF B_z 分量可以看出,在观测亚暴发生($\sim 22:07$ UT,如图中竖直虚线所示)之前,Geotail(实线)观测到行星际磁场在 $\sim 21:50$ UT之前近1 h内基本保持为南向方向,表明增强的太阳风能量持续输入磁层,越尾电流增加;21:50 UT之后行星际磁场转为北向(如图6中箭头所示),越尾电流减小,可能触发亚暴^[16].在此期间太阳风动力学压强

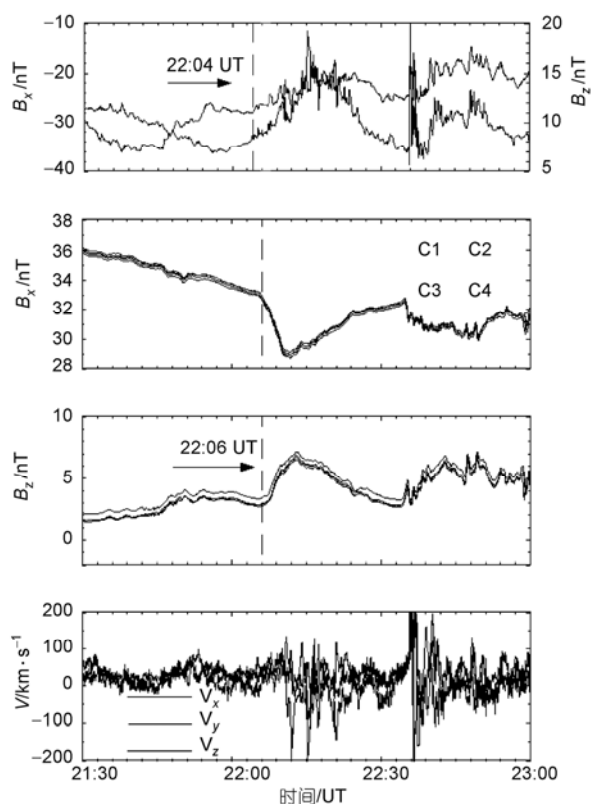


图6 TC-1观测到的磁场变化和Cluster观测到的磁场及离子流速度变化情况

图中竖直虚线表示卫星观测到的磁场偶极化时间
Image卫星极光图像有2 min的观测误差. 摘自Wang等人^[5]

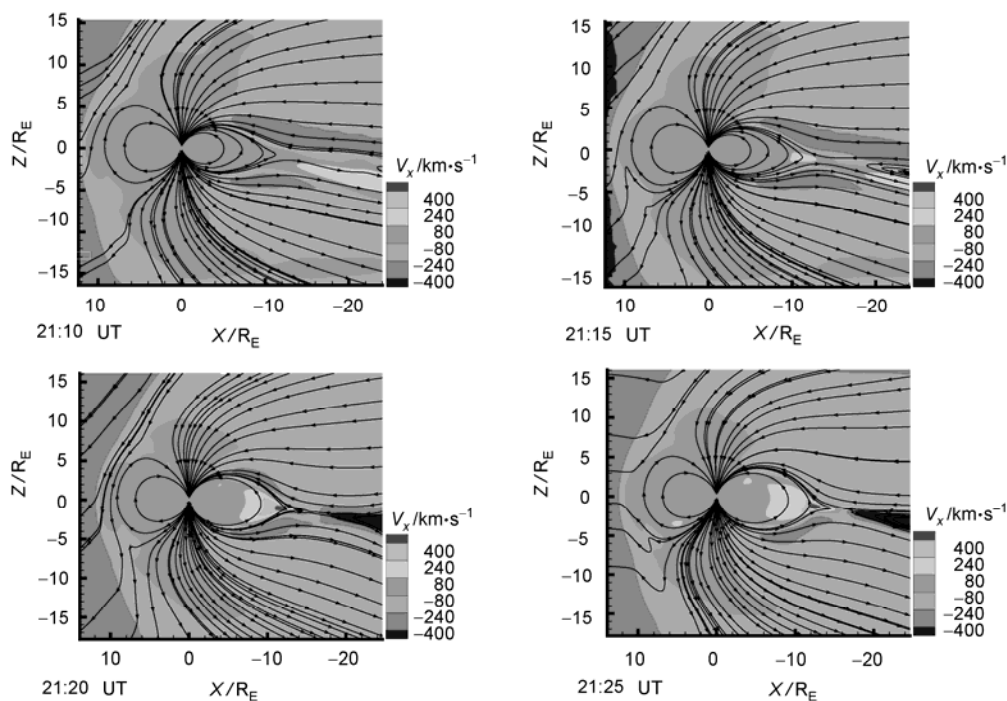


图7 亚暴发生前后 $y=0$ 平面(正午-子夜平面)磁层磁场和等离子体速度 x 分量的模拟
黑线为磁力线, 背景颜色代表等离子体速度的大小

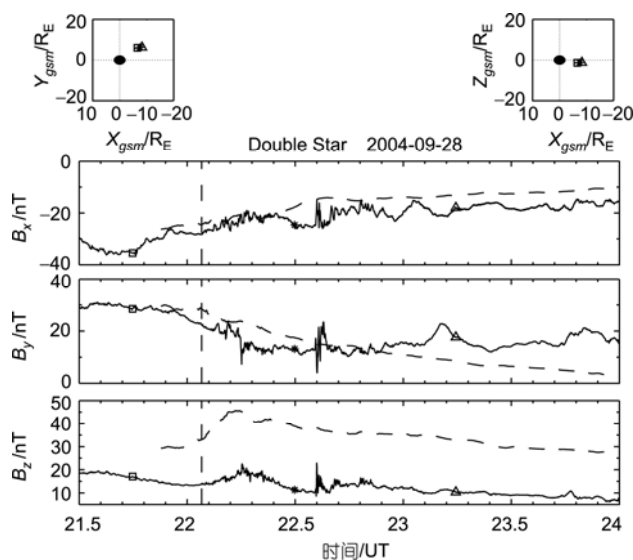


图8 2004年9月28日 TC-1 卫星轨道处 SWMF
模拟与观测磁场的比较

虚线为模拟磁场, 实线为观测磁场. 模拟曲线向后平移了 52 min.
竖直虚线表示观测的磁场偶极化时间(22:04 UT)

在 $1\sim 2$ nPa 之间来回波动, 并没有明显较大的增强, 故我们推测行星际磁场在 $\sim 21:50$ UT 时刻的北向旋转

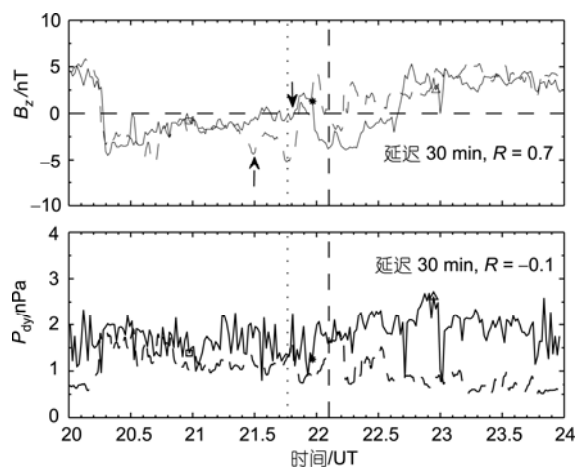


图9 Geotail 测量(实线)和模拟(虚线)太阳行星际磁场
 B_z 分量和太阳风动力学压强 P

模拟曲线向后延迟了 0.5 h. 竖直点线表示模拟亚暴发生的时间, 竖直虚线表示观测亚暴发生的时间

可能是导致观测亚暴发生的主要原因. 模拟亚暴(如图中竖直点线所示)发生之前行星际磁场(虚线所示)保持为南向, 而太阳风动力学压强变化不是很明显, 但在 21:30 UT 时刻南向行星际磁场有一个突然减小

的趋势(如图 9 中虚箭头所示), 该变化可能是导致模拟亚暴发生的主要原因。

太阳风行星际磁场参数从 ACE 卫星到模型外边界(32 R_E)的传播时间的准确性对模拟结果有重要影响, SWMF 模型的外边界输入参数与 Geotail 实际观测值有较大的差别, 由于 IMF B_z 和太阳风动力学压强是亚暴触发的主要机制, 其差别将导致模拟和观测亚暴的触发机制不同, 使得模拟与观测值存在较大差异. 本文中模拟亚暴发生时间比观测提前~50 min, 一方面是由于太阳风行星际磁场从观测卫星 ACE 到模型外边界的时间延迟的计算方法存在误差(~30 min), 该误差主要是由于太阳风的相前可能与太阳和地球连线方向不一定完全垂直, 存在一定夹角, 使得实际的传播时间会有差别, 以往的研究表明该时间差别可能达到 1 h 左右^[14].

下面简单讨论一下速度分量对时间延迟的影响. 从图 1 可以看到太阳风 V_x 分量占主导地位, 而 V_y 分量相对 V_z 分量来说较小, 基本在零值附近起伏, 为了简化起见, 在讨论太阳风速度分量对时间延迟的影响时, 我们仅考虑 V_x 和 V_z 分量.

考虑一种较简单的情况, 假设太阳风行星际磁场的相前与 y 轴平行, 但在 x - z 平面与 x 轴有夹角 θ (如图 10 所示), 设 ACE 卫星到 Geotail 卫星 x 轴方向上的距离为 dx , z 轴上的距离为 dz , 则从 ACE 卫星到 Geotail 卫星之间的时间延迟可以计算为

$$t_r = \frac{dx \cos \theta + dz \sin \theta}{|V_x| \cos \theta - |V_z| \sin \theta}. \quad (1)$$

SWMF 模型中假设太阳风相前与日地连线垂直, 时间延迟为 $t_m = \frac{dx}{|V_x|}$, 公式(1)可以写为

$$t_r = \frac{\frac{dx \cos \theta}{|V_x| \cos \theta} + \frac{dz \sin \theta}{|V_x| \cos \theta}}{1 - \frac{|V_z| \sin \theta}{|V_x| \cos \theta}} = \frac{t_m + \frac{dz}{|V_x|} \tan \theta}{1 - \frac{|V_z|}{|V_x|} \tan \theta}. \quad (2)$$

通过比较向阳面模拟和观测磁场, 发现模拟值

提前观测值大约 15 ~ 30 min, 表明 SWMF 模型中太阳风的传播时间小于实际传播时间, 即 $t_m < t_r$, 由于 $dz > 0$, $|V_z| \ll |V_x|$, 因此要求 $\tan \theta > 0$, 即太阳风的相前传播方向应为 $+z$ 和 $-x$ 方向(如图 10 中所示). 通过以上简单的讨论可以看到, 太阳风相前如果与日地连线不垂直、存在较大的不能忽略的 V_z 和 dz , 则该模型中所采用的时间延迟计算方法的误差就愈大.

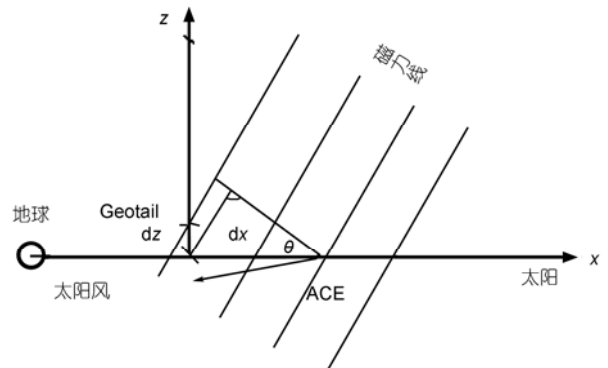


图 10 太阳风行星际磁场相前与日地连线存在一定夹角的示意图

造成 SWMF 模型的外边界输入参数与 Geotail 实际观测值有较大的差别的另一个原因是太阳风行星际磁场在向地传播过程中结构可能发生了变化, 所以在 220 R_E 处测量到的太阳风行星际磁场不能完全反映地球磁层顶附近(20 R_E)的太阳风行星际磁场状况. Lyons 等人^[17]发现 30~56.7 R_E 处观测到的可能导致亚暴发生的太阳风行星际磁场情况只能导致 50% 的亚暴发生率, 而 $< 30 R_E$ 处观测到的可能导致亚暴发生的行星际磁场却可以导致 80% 的亚暴发生率, 说明太阳风行星际磁场在传播过程中的不确定性. 另外需要补充说明的是模型精度和电离层电导率的大小也会影响模拟亚暴发生的时间^[18], 以往研究表明, 模型精度愈高, 电离层电导率愈高, 模拟亚暴发生的时间愈晚. 今后我们将利用 SWMF 模型具体讨论这两个因素(模型精度和电离层电导率)的影响.

致谢 本研究所用 SWMF 模型由美国密西根大学空间环境研究中心提供, ACE 卫星数据和各种地磁指数由 ISTP 有关课题 PI 与工作人员通过国际互网络提供, 在此一并表示衷心感谢.

参考文献

- 1 Lui A T Y. Current disruption in the Earth's magnetosphere: Observations and models. J Geophys Res, 1996, 101: 13067—13088[DOI]
- 2 Shiokawa K, Baumjohann W, Haerendel G, et al. High-speed ion flow, substorm current wedge, and multiple Pi2 pulsations. J Geo-

- phys Res, 1998, 103: 4491—4507[\[DOI\]](#)
- 3 Baker D N, Pulkkinen T I, Angelopoulos V, et al. Neutral line model of substorms: Past results and present view. *J Geophys Res*, 1996, 101: 12975—13010[\[DOI\]](#)
- 4 Pu Z Y, Kang K B, Korth A, et al. Ballooning instability in the presence of a plasma flow: A synthesis of tail reconnection and current disruption models for the initiation of substorms. *J Geophys Res*, 1999, 104: 10235—10248[\[DOI\]](#)
- 5 Wang H, Luehr H, Ma S Y, et al. Substorm onset dynamics in the magnetotail as derived from joint TC-1 and Cluster data analysis. *Earth Planets Space*, 2008, 60: 613—621
- 6 Tóth G, Sokolov I V, Gombosi T I, et al. Space Weather Modeling Framework: A new tool for the space science community. *J Geophys Res*, 2005, 110, doi: 10.1029/2005JA011126
- 7 Powell K G, Roe P L, Linde T J, et al. A solution-adaptive upwind scheme for ideal magnetohydrodynamics. *J Comp Phys*, 1999, 154: 284—309[\[DOI\]](#)
- 8 Toffoletto F, Sazykin S, Spiro R, et al. Inner magnetospheric modeling with the Rice Convection Model. *Space Sci Rev*, 2003, 107: 175—196[\[DOI\]](#)
- 9 Ridley A J, Gombosi T I, DeZeeuw D L. Ionospheric control of the magnetosphere: Conductance. *Ann Geophys*, 2004, 22: 567—584
- 10 De Zeeuw D L, Sazykin S, Wolf R A, et al. Coupling of a global MHD code and an inner magnetospheric model: Initial results. *J Geophys Res*, 2004, 109, doi: 10.1029/2003JA010366
- 11 Tóth G, De Zeeuw D L, Gombosi T I, et al. Sun to thermosphere simulation of the 28—30 October 2003 storm with the Space Weather Modeling Framework. *Space Weather*, 2007, 5, doi: 10.1029/2006SW000272
- 12 Wang H, Luehr H, Ridley A J, et al. Storm time dynamics of auroral electrojets: CHAMP observation and the Space Weather Modeling Framework simulation. *Ann Geophys*, 2008, 26: 555—570
- 13 Wang H, Ridley A J, Luehr H. Validation of the Space Weather Modeling Framework with CHAMP and DMSP satellite observations. *Space Weather*, 2008, 6, doi: 10.1029/2007SW000355
- 14 Weimer D R, Ober D M, Maynard N C, et al. Variable time delays in the propagation of the interplanetary magnetic field. *J Geophys Res*, 2002, 107, doi: 10.1029/2001JA009102
- 15 Cao J B, Ma Y D, Parks G, et al. Joint observations by Cluster satellites of bursty bulk flows in the magnetotail. *J Geophys Res*, 2006, 111, doi: 10.1029/2005JA011322
- 16 Lyons L R, Lee D Y, Wang C P, et al. Global auroral responses to abrupt solar wind changes: Dynamic pressure, substorm, and null events. *J Geophys Res*, 2005, 110, doi: 10.1029/2005JA011089
- 17 Lyons L R, Blanchard G T, Samson J C, et al. Coordinated observations demonstrating external substorm triggering. *J Geophys Res*, 1997, 102: 27039—27051[\[DOI\]](#)
- 18 Fedder J A, Slinker S P, Lyon J G, et al. Global numerical simulation of the growth phase and the expansion onset for a substorm observed by viking. *J Geophys Res*, 1995, 100: 19083—19093[\[DOI\]](#)