

太阳风扰动对极光电急流和环电流指数的影响^{*}

邹自明^{1,2} 曹晋滨^{3,2} 李毅¹

1(中国科学技术大学地球与空间科学学院 合肥 230026)

2(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

3(北京航空航天大学宇航学院 北京 100191)

摘要 利用 WIND 卫星的太阳风观测数据和地磁活动指数, 研究了太阳风扰动对环电流 SYM- H 指数, 西向极光电急流 AL 指数和东向极光电急流 AU 指数的影响. 结果表明, 太阳风动压增长和减少能够同步或延迟引起地磁活动指数的强烈扰动, 其包括环电流指数的上升, 西向极光电急流指数的下降和东向极光电急流指数的上升. 太阳风动压的突然剧烈增加还能够触发超级亚暴和大磁暴. 太阳风动压脉冲引起的地磁效应具有复杂的表现形式, 这说明太阳风动压脉冲的地磁效应不仅与太阳风动压脉冲大小和持续时间有关, 还与磁层本身所处的状态有关. 时间尺度较长, 消耗能量较大的磁暴只有大的持续时间较长的太阳风动压脉冲才能激发.

关键词 太阳风扰动, 极光电急流指数, 环电流指数, 亚暴

中图法分类号 P 353

Influence of Solar Wind Disturbance on Ring Current and Auroral Electrojet Indexes

ZOU Ziming^{1,2} CAO Jinbin^{3,2} LI Yi¹

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

2(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

3(School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191)

Abstract Using the data of solar wind recorded by WIND and geomagnetic activity index, we studied the influence of the variation of solar wind dynamical pressure on ring current index SYM- H and auroral electrojet indexes (AU and AL). The increase and decrease of solar wind dynamical pressure can produce simultaneous or delayed disturbances in geomagnetic activity indexes, which include the transient increase of ring current index SYM- H , increase of eastward electrojet index AU and decrease of westward electrojet index AL . The sudden large increase of solar wind dynamical pressure can trigger super substorm and large geomagnetic storm. The response of geomagnetic activity indexes to solar wind dynamical pressure impulse is complicated and various, indicating the

* 科技部地球系统科学数据共享平台项目资助

2010-12-13 收到原稿, 2011-10-07 收到修定稿

E-mail: mzou@nssc.ac.cn

geomagnetic effect of solar wind dynamical pressure impulse not only depends on the strength and duration of solar wind dynamical pressure impulse, but also on the state of magnetosphere. Large geomagnetic storm, which last long and consume more energy, can only be triggered by strong and long impulse of solar wind dynamical pressure.

Key words Solar wind disturbance, Auroral electrojet indexes, Ring current, substorm

0 引言

当太阳风动压增强时, 地球磁层被压缩, 从而在地球磁层中产生剧烈扰动. 在此过程中磁层中的电流体系也不可避免地出现相应改变. 这些电流体系包括磁层顶电流, 环电流, 越尾电流和场向电流. 环电流的改变可以由测量近赤道纬度地磁场 H 分量扰动的环电流 SYM- H 指数来表示. 由于场向电流的改变也将导致同一电流回路中极光电急流的改变. 所以极光电急流 $AU(AL)$ 指数也会对太阳风扰动做出响应. 但是以往的研究主要集中于太阳风动压增强对 Dst 指数的影响. 而有关太阳风动压扰动对极光电急流指数影响的研究相对还很少.

太阳风动压的增加可以使西向极光电急流增强^[1-3]. 进一步分析还表明, 太阳风密度的增强在行星际磁场南向期间要比行星际磁场北向期间产生更大的极光电急流^[4]. 一般认为西向电急流增强是由于电场增强或极光亮度增加导致电导率增强产生的. Brittnacher 等^[5] 2000 年分析了 1997 年 10 月 1 日一次日冕物质抛射激波通过地球的事例, 发现伴随太阳风动压增强, 极光首先在日侧亮度增加, 并快速扩展到夜侧, 进而认为太阳风动压增强产生磁层顶压缩及磁流体力学波是导致极光增强和扩展的原因. 而且同时发生的亚暴也是伴随行星际日冕物质抛射 (ICME) 激波太阳风动压增强所导致的.

太阳风密度的增加可以使极光电急流增强, 极光椭圆带的纬度范围增大. 但在 $50^\circ - 80^\circ$ 地磁纬度范围内的极光能量并没有随太阳风温度增强显著增加. Shue 等^[2] 认为这是由于发生在太阳风动压增强之前的亚暴已经将磁尾中储存的能量消耗了相当大的一部分, 因此这时太阳风密度的增强并没有使粒子沉降能量增大.

Wang 等^[6] 利用太阳风动压和 Dst 数据研究表明, 太阳风动压对环电流衰减和注入也有影响, 发现当磁层受到较高太阳风动压冲击而被压缩时, 环电

流注入率增加, 进而研究讨论了太阳风动压增强对环电流非对称性的影响. 太阳风动压增强对环电流非对称性影响取决于太阳风动压开始增强时环电流的非对称状态. 此外动压增强的时间尺度和强度也对地面环电流非对称 SYM- H 扰动具有影响. Borodkova 等^[7] 利用地球同步轨道磁场数据, 统计研究了太阳风动压变化与地球同步轨道磁场 B_z 分量的关系, 发现地球同步轨道 B_z 分量对太阳风动压变化的响应取决于观测者相对于中午子午面的相对位置, 太阳风动压变化前太阳风动压值以及太阳风动压变化值.

本文重点研究太阳风动压变化对于极光电急流指数 $AU(AL)$ 和环电流指数 SYM- H 的影响, 探讨极光电急流指数和环电流指数对不同性质的太阳风动压变化的响应. 太阳风参数主要取自于 WIND 卫星, 并将其平移到地球弓激波鼻端处 (nose of bow shock). 延迟时间可由 $dt = x/(-v_x)$ 计算得到, 其中 x 为 WIND 卫星与地球的距离, v_x 为测量到的 x 方向上的太阳风速度.

1 观测

为了研究太阳风动压增强净的地磁活动效应, 首先研究一个没有引起磁暴的太阳风动压脉冲事件. 1998 年 6 月 26 日 WIND 卫星观测到一个由太阳风密度增强导致的太阳风动压增长脉冲事件. 此时 WIND 卫星在 GSE 坐标系处于 $(60.6, 65.3, 3.0) R_e$ 的位置. 图 1 给出了在 09:40 UT–11:20 UT 时间段, 太阳风动压、密度、速度、 $AU (AL)$ 和 SYM- H 指数随时间的变化. 太阳风数据向后约延迟 6 min, 即大致反映在弓激波鼻端的太阳风特性. 可以看出太阳风动压在 10:07 UT 开始迅速增长. 在 1 min 左右从 13 nPa 增加到 40 nPa. 并在 10:33 UT 时开始迅速下降, 恢复到太阳风动压增长以前的水平. 这次太阳风动压脉冲没有触发磁暴, 但是引起了环电流指

数 $SYM-H$ 在延迟 10 min 后的一个增长. 这个增长持续了 18 min, 在 10:44 UT 恢复到太阳风动压增长以前的状态. $SYM-H$ 的增长幅度达到 50 nT. 在太阳风到达地球以后, 西向电急流 AL 指数开始下降, 下降过程持续 10 min, 然后开始上升恢复. 东向电急流指数在 10 min 后开始增长, 并在 10:25 UT 达到 200 nT, 然后开始下降. 当太阳风动压在 10:33 UT 开始下降时, 东向电急流指数开始增长, 达到 200 nT, 西向电急流指数开始下降, 并达到 -150 nT. 与此同时 $SYM-H$ 指数开始下降, 恢复到太阳风动压增长以前水平.

在这个事例中, 太阳风动压的增加和减少都能导致 AL , AU 和 $SYM-H$ 指数的变化. AL 指数下降与太阳风动压增长基本同步, 但 AU 和 $SYM-H$ 指数

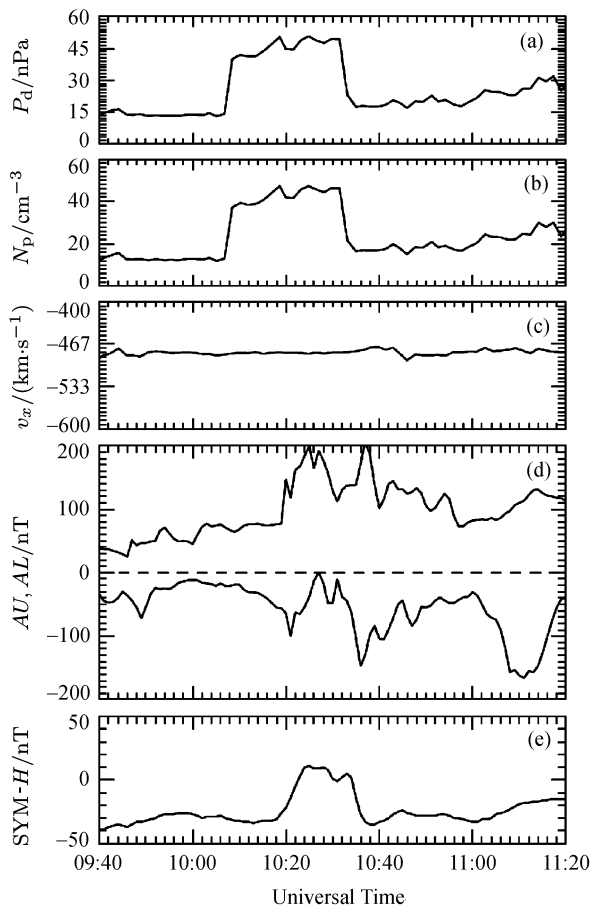


图 1 1998 年 6 月 26 日 09:40 UT–11:20 UT 时间段, 太阳风动压、密度、速度、 $AU(AL)$ 和 $SYM-H$ 指数随时间的变化

Fig. 1 Dynamical pressure, density and velocity of solar wind measured by WIND, AU , AL and $SYM-H$ during the interval 09:40 UT–11:20 UT on June 26, 1998

延迟太阳风动压增长 8~10 min. 而 AL 下降, AU 上升和 $SYM-H$ 下降基本上与太阳风动压下降同步.

1998 年 9 月 24–25 日持续约 3 h 的太阳风动压脉冲触发了一次大磁暴.

图 2 给出了在 1998 年 9 月 24 日 09:40 UT 至 25 日 16:00 UT 时间段, 太阳风动压、密度、速度、 $AU(AL)$ 和 $SYM-H$ 指数随时间的变化情况. 从图 2 可以看出, 太阳风数据向后约延迟了 28 min. 在这一时间段中太阳风动压有两个脉冲. 一个位于 24 日 23:40 UT 至 25 日 02:50 UT 时间段, 另一个位于 25 日 06:00 UT–07:10 UT 时间段.

在 24 日 23:40 UT, 太阳风密度快速增长, 速度快速增加, 导致太阳风动压快速增长, 引起了环电流指数 $SYM-H$ 的增加. 由于其后伴随着一个大磁暴,

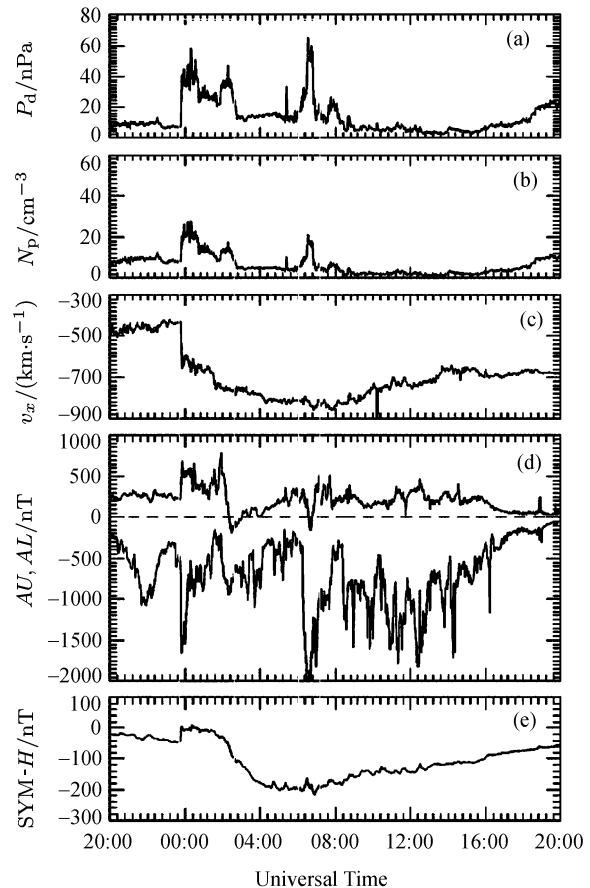


图 2 1998 年 9 月 24–25 日, 太阳风动压、密度、速度、 $AU(AL)$ 和 $SYM-H$ 指数随时间的变化

Fig. 2 Dynamical pressure, density and velocity of solar wind measured by WIND, AU , AL and $SYM-H$ from 24 to 25 September 1998

所以该事件可以认为是一个磁暴急始事件 (sudden storm commencement). SYM-*H* 指数极小值达到 -200 nT. 特别需要注意的是, 太阳风动压增长同步引起了西向电急流指数 *AL* 的快速下降, 从亚暴恢复相的 -350 nT 下降到 -1650 nT. 与此同时东向电急流指数从 200 nT 增加到 650 nT. 所以最终 *AE* 指数达到了 2164 nT. 这表明太阳风动压的突然增强能够触发超级亚暴. 磁暴急始持续时间, 极光电急流增强持续时间与太阳风动压增强的持续时间相当, 表明磁暴的急始和极光电急流的增强都是太阳风动压增强所产生的. 与太阳风增长时情况不同, 当太阳风动压在 $02:24$ UT 开始减少时, 西向电急流 *AL* 指数开始下降, 东向电急流指数也开始下降.

在 $06:00$ UT, 第二个太阳风动压脉冲到达地球. 到达时间正好处于磁暴的恢复相初期. 与第一个太阳风动压脉冲不一样, *AU* 指数和 *AL* 指数同时下降. 西向电急流 *AL* 指数下降到 -2800 nT. 再一次说明太阳风动压脉冲可以触发超级亚暴. 第二个太阳风动压脉冲到达地球时, 前面一个亚暴刚刚结束. 一般来说在亚暴恢复相, 磁尾存储的能量已经基本耗尽. 没有外来触发因素很难再次发生大亚暴. 在本例中发生的超级亚暴只有类似于太阳风动压突变这种外部因素才可能触发.

第二次太阳风动压脉冲也使 SYM-*H* 指数增长, 增幅约为 30 nT, 但持续时间很短, 只有 24 min. 这个太阳风动压脉冲对环电流影响较小, 只是造成了轻微的扰动. 以上事例说明太阳风动压脉冲能够触发超级亚暴和大磁暴. 但在磁暴恢复相期间的太阳风动压脉冲对环电流影响较小. 环电流 SYM-*H* 指数和极光电急流指数与太阳风变化基本同步. 极光电急流对太阳风动压脉冲的响应有两种方式, 一种是东向电急流和西向电急流同时增长, 另一种是东向电急流减小, 而西向电急流增大.

图 3 给出的是发生在 1997 年 4 月 10–11 日的一个太阳风动压变化引起 *AL*, *AU* 和 SYM-*H* 指数变化的一个实例. 在这两天中太阳风动压变化比较剧烈和不规则. 对于发生在 10 日 $13:12$ UT– $14:00$ UT 一个小的太阳风动压正脉冲 (动压增长幅度约为 6 nPa), 环电流指数 SYM-*H* 同步增长, 但极光电急流指数几乎没有出现明显响应. 太阳风动压在 $16:48$ UT 开始从 5 nPa 缓慢增长, 在 $19:12$ UT 处

达到 32 nPa. 与太阳风动压增长的同时, 东向电急流指数缓慢上升, 西向电急流指数缓慢下降. 随后发生的大亚暴显然与前面的太阳风能量的不断输入有关, 但很难与具体那一个太阳风动压脉冲对应. 很明显发生在亚暴恢复相的 $05:24$ UT– $06:36$ UT 期间的太阳风动压脉冲引起了西向电急流指数 *AL* 的下降, 东向电急流 *AU* 指数的上升和环电流 SYM-*H* 指数的上升. 从数值上来看, 太阳风动压增幅约为 20 nPa, *AL* 指数下降幅度为 220 nT, 东向电急流指数上升幅度为 150 nT, SYM-*H* 环电流指数增加约为 30 nT. 但因为这个太阳风动压脉冲发生在亚暴的恢复相早期和磁暴的主相 SYM-*H* 极小点附近, 太阳风动压脉冲产生的净效应很难准确确定.

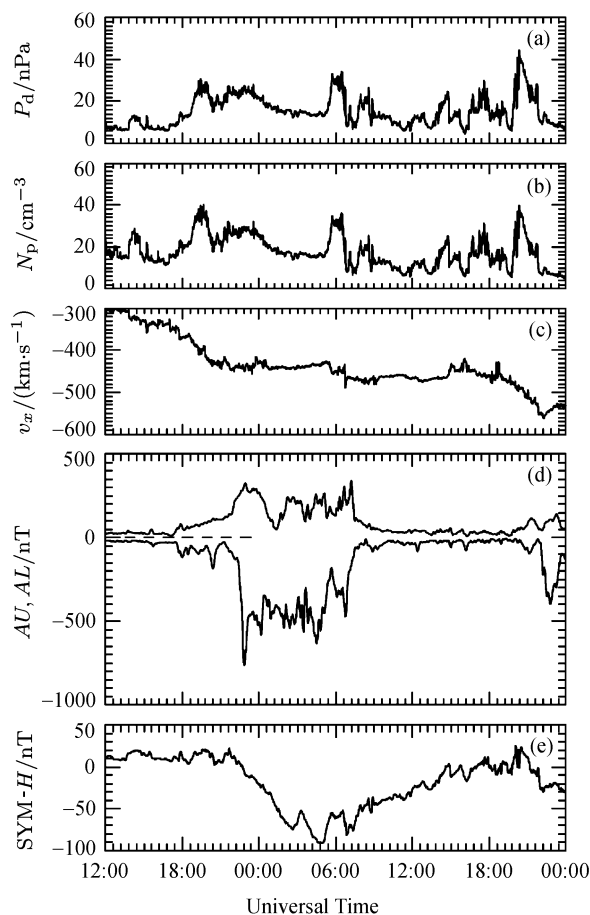


图 3 1997 年 4 月 10–11 日, 太阳风动压、密度、速度、*AU*(*AL*) 和 SYM-*H* 指数随时间的变化
Fig. 3 Dynamical pressure, density and velocity of solar wind measured by WIND, *AU*, *AL* and SYM-*H* from 10 to 11 April, 1997

在 11 日 19:54 UT–21:54 UT 期间, WIND 卫星也观测到一次太阳风动压脉冲. 这次太阳风动压增幅较大, 达到了 35 nPa, 且太阳风动压脉冲也明显造成了西向电急流指数 AL 的下降, 东向电急流 AU 指数的上升和环电流 $SYM-H$ 指数的上升. 但对应于这次太阳风动压脉冲, AL 指数下降幅度仅为 60 nT, 东向电急流指数上升幅度也仅为 60 nT, $SYM-H$ 环电流指数增加约 25 nT.

以上事例说明太阳风动压脉冲引起的地磁效应不仅与太阳风动压脉冲大小和持续时间有关, 还与磁层本身所处的状态有关. 实际上, 有研究还发现太阳风对环电流非对称性的影响与太阳风中行星际磁场的 B_z 分量有关.

图 4 给出的是发生在 2003 年 5 月 29–30 日太

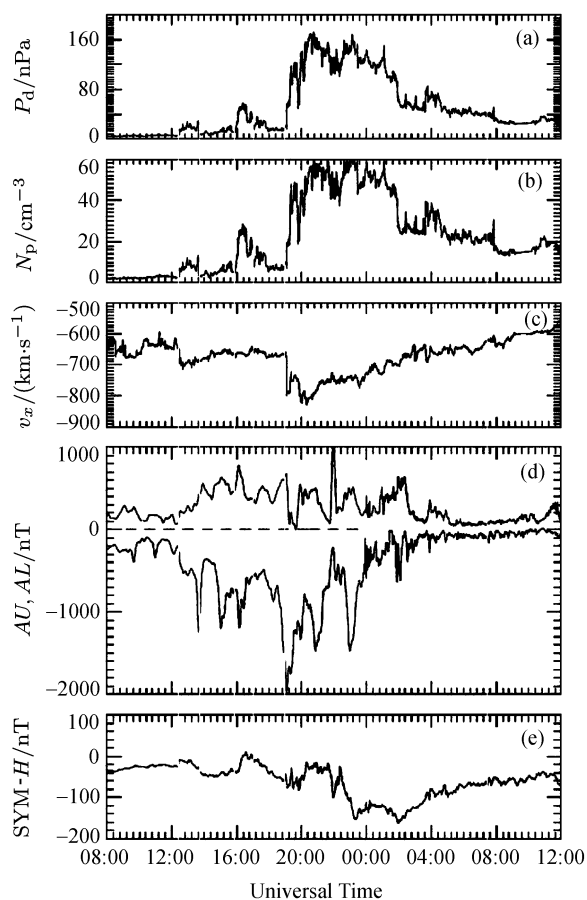


图 4 2003 年 5 月 29–30 日, 太阳风动压, 密度, 速度, AU (AL) 和 $SYM-H$ 指数随时间的变化

Fig. 4 Dynamical pressure, density and velocity of solar wind measured by WIND, AU , AL and $SYM-H$ from 29 to 30 May, 2003

阳风动压变化引起地磁扰动的一个实例. 在 29 日 08:00 UT 至 30 日 16:00 UT 期间, 观测到三次太阳风动压正脉冲, 时间段为 29 日 12:15 UT–13:50 UT, 15:50 UT–17:45 UT 和 29 日 19:00 UT 至 30 日 08:00 UT. 前两个动压脉冲动压增长幅度较小 (小于 40 nPa), 持续时间较短 (小于 90 min). 第三个太阳风动压脉冲动压增长幅度达到 160 nPa, 持续时间长达 13 h. 可以看出前面两个小的太阳风动压脉冲虽然也使得西向电急流指数 AL 的下降和东向电急流 AU 指数的上升激发了一个小的亚暴, 但是没有激发磁暴. 环电流 $SYM-H$ 指数给出了类似于 SI^+ (Sudden Impulse) 的增长, 幅度约为 20~40 nT. 第三个太阳风大动压脉冲到达地球时, 磁层正处于一个亚暴的主相. 所以这次亚暴与第三个太阳风动压脉冲没有相关联系. 但第三个太阳风动压脉冲产生了幅度约为 50 nT 的磁暴急始, 以及随后的 $SYM-H$ 极小值为 -160 nT 的大磁暴. 所以小的持续时间较短的太阳风动压脉冲, 虽然也能产生东向电急流 AU 指数上升, 西向电急流 AL 指数下降, 以及环电流 SI^+ 的响应 ($SYM-H$ 增长), 但是不能触发大磁暴. 只有大的、持续时间较长的太阳风动压脉冲才能激发时间尺度较长, 消耗能量较大的磁暴.

2 结论与讨论

利用 WIND 卫星的太阳风观测数据和地磁活动指数, 研究了太阳风扰动对环电流 $SYM-H$ 指数, 西向极光电急流 AL 指数和东向极光电急流 AU 指数的影响.

对四个事例分析表明, 太阳风动压增长和减少能够同步或延迟引起地磁活动指数的强烈扰动, 其包括环电流指数的上升, 西向极光电急流指数的下降和东向极光电急流指数的上升. 太阳风动压的突然剧烈增加还能够触发超级亚暴和大磁暴. 但在磁暴恢复相期间的太阳风动压脉冲对环电流影响较小. 极光电急流对太阳风动压脉冲的响应主要有两种方式, 一种是东向电急流和西向电急流同时增长, 另一种是东向电急流减小, 而西向电急流增大. 太阳风动压脉冲引起的地磁效应应具有复杂的表现形式, 这说明太阳风动压脉冲的地磁效应不仅与太阳风动压脉冲大小和持续时间有关, 还与磁层本身所处的状态有关. 时

间尺度较长, 消耗能量较大的磁暴只有大的持续时间较长的太阳风动压脉冲才能激发.

太阳风动压影响环电流指数和极光电急流指数的机制是不一样的. 环电流 SYM- H 指数对太阳风动压脉冲的响应主要是通过磁层顶电流的改变和环电流增长来实现的. 一般来说, 太阳风动压增长, 磁层被压缩, 磁层顶电流将增长, 这表现为环电流指数上磁暴急始 (SSC) 或太阳风动压正冲击 (SI). 太阳风动压的增长还将导致极光区电子沉降的增强^[8], 从而使电离层电导率增长, 这也将导致极光电急流的增大.

致谢 本文使用了 WIND 卫星 SWE 仪器的太阳风数据, 特向 WIND 卫星 SWE 仪器工作队的 K.W. Ogilvie (NASA GSFC) 和 A.J. Lazarus (MIT) 表示感谢.

参考文献

- [1] Kamide Y, Shue J H, Li X, Lu G, Brittnacher M J, Parks G K, Reeves G D. Internally and externally triggered substorms: A case study of the January 10, 1997 events, Substorm-4 [M]. Tokyo: Terra Science, 1998. 305
- [2] Shue J H, Kamide Y. A systematic study of effects of solar wind density on auroral electrojets [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**, L14112, doi:10.1029/2005GL023197
- [3] Zesta E, Singer H J, Lummerzheim D, *et al.* The effect of the January 10, 1997 pressure pulse on the magnetosphere ionosphere current system [J]. *Magnetos. Current Sys. Geophys. Monog. Ser.*, **118**:217
- [4] Liou K, Newell P T, Meng C I, Wu C C, Lepping R P. On the relationship between shock-induced polar magnetic bays and solar wind parameters [J]. *J. Geophys. Res.*, **109**, A06306, doi:10.1029/2004JA010400, 2004
- [5] Brittnacher M, Wilber M, Fillingim M, Chua D, Parks G, Spann J, Germany G. Global auroral response to a solar wind pressure pulse [J]. *Adv. Space Res.*, 2000, **25**(7/8): 1377-1385
- [6] Wang C B, Chao J K, Lin C H. Influence of the solar wind dynamic pressure on the decay and injection of the ring current [J]. *J. Geophys. Res.*, **108**(A9), 1341, doi:10.1029/2003JA009851, 2003
- [7] Borodkova N L, Liu J B, Huang Z H, Zastenker G N. Geosynchronous magnetic field response to the large and fast solar wind dynamic pressure change [J]. *Adv. Space Res.*, 2008, **41**(8):1220-1225
- [8] Boudouridis A, Zesta E, Lyons L R, Anderson P C, Lummerzheim D. Effect of solar wind pressure pulses on the size and strength of the auroral oval [J]. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**(A4), 8012, doi:10.1029/2002JA009373