

蔡红涛,马淑英,McCrea I W 等. 极区电离层对 IMF B_z 4 次快速转向的响应——EISCAT/ESR 雷达观测. 地球物理学报, 2009, **52**(7):1685~1692, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.07.002

Cai H T, Ma S Y, McCrea I W, et al. Polar ionospheric responses to 4-times rapid turnings of the IMF B_z component—EISCAT/ESR radar observations. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(7):1685~1692, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.07.002

极区电离层对 IMF B_z 4 次快速转向的响应 ——EISCAT/ESR 雷达观测

蔡红涛^{1,2}, 马淑英^{1,2}, I. W. McCrea³, J. A. Davis³,
M. Lockwood³, S. E. Milan⁴

1 武汉大学电子信息学院, 武汉 430079

2 武汉大学空间环境与大地测量教育部重点实验室, 武汉 430079

3 Space Science and Technique Department, Rutherford Appleton Laboratory, Chilton, Oxfordshire, OX11 0QX, UK

4 Department Physics and Astronomy, University of Leicester, UK

摘 要 利用 EISCAT VHF 和 EISCAT Svalbard(ESR)雷达观测数据,对 2003 年 2 月 12 日 IMF B_z 分量 4 次快速方向转换期间,极区电离层,尤其是极尖/极隙区的响应特征进行了分析研究.随着 IMF B_z 方向的多次快速变化,地面雷达观测到极尖/极隙区所在位置随着开放-闭合磁力线边界在纬度方向上来回移动.在此期间,极区电离层等离子体水平对流多次反向,表现出与 IMF B_z 分量强的负相关性.进一步分析表明:极区磁层-电离层系统在日侧对 IMF 极性变化的平均响应时间约为 3 min.

关键词 极尖/极隙区,行星际磁场,EISCAT/ESR 雷达,磁重联

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.07.002

中图分类号 P352

收稿日期 2009-03-18,2009-04-30 收修定稿

Polar ionospheric responses to 4-times rapid turnings of the IMF B_z component—EISCAT/ESR radar observations

CAI Hong-Tao^{1,2}, MA Shu-Ying^{1,2}, I. W. McCrea³, J. A. Davis³, M. Lockwood³, S. E. Milan⁴

1 School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, CNEM, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3 Space Science and Technique Department, Rutherford Appleton Laboratory, Chilton, Oxfordshire, OX11 0QX, UK

4 Department Physics and Astronomy, University of Leicester, UK

Abstract With the observations from EISCAT/ESR radar on Feb. 12 2003, the responses of polar ionosphere, especially those of the cusp/cleft region to the 4-times rapid turnings of IMF B_z component are investigated in this paper. During this event, latitudinal location of the cusp/cleft region was found moving back and forth, likely resulted from the variations of the reconnection sites at the magnetopause which are widely accepted to be ruled by the IMF polarity. Meanwhile, polar ionospheric plasma convection reversed several times, exhibiting strong correlation with the signs of the IMF B_z component. Correlative and timing analysis suggest that the dayside

基金项目 国家自然科学基金项目(40874079)和国家科技支撑计划重点项目(2006BAB18B06)资助.

作者简介 蔡红涛,男,1976 年生,副教授,2003 年在武汉大学获理学博士学位,主要从事极区电离层与磁层耦合方面的研究.

E-mail:htcai@whu.edu.cn

magnetosphere-ionosphere system seems to need an average reconfiguration time of approximate 3 minutes in response to the variations of the IMF polarity in polar region.

Keywords Cusp/cleft region, Interplanetary magnetic field, EISCAT/ESR radar, Magnetic reconnection

1 引言

磁场将磁层和电离层联系在一起,引起两个区域能量和动量的交换或耦合.在高纬地区,电离层高度的磁力线近似垂直于地面,极尖/极隙区及其紧邻区域的磁力线可延伸至磁层顶进而进入磁鞘和太阳风,或者延伸至磁层顶边界层区域,包括低纬边界层和高纬边界层(进入层/内极尖区和等离子体幔).极区电离层通过地磁场与外磁层以及发生在那里的各种动态过程相联系,并受太阳风与行星际磁场 IMF (Interplanetary Magnetic Field) 的直接控制.例如,太阳风携带的电场(直接或间接通过磁层)沿磁力线映射(map)至电离层,驱动高纬电离层水平方向的 $E \times B$ 等离子体整体漂移,通常称之为等离子体水平对流.

高纬电离层中等离子体对流的强弱和对流图像在很大程度上受 IMF 的方向和大小的影响,尤其是南北向分量 B_z 和晨昏方向分量 B_y ^[1].一般地, B_z 分量控制着对流图像的主要结构,而 B_y 分量则影响对流结构的晨昏对称性^[2].长期的观测研究表明,当 IMF 南向时($B_z < 0$),发生在向阳侧磁层顶低纬区域的磁重联可以导致等离子体对流图像呈现出“双涡旋”结构.在开放磁力线区域,等离子体朝着背离太阳的方向流动,并在较低纬度上的闭合磁力线区朝向太阳返回流动^[3].当 IMF 北向时($B_z > 0$),磁层 lobe 区的开放磁力线有可能与北向的 IMF 发生重联^[4, 5].由于此时磁重联通常发生在较高纬度上(极尖/极隙区极向),有些学者也称之为“高纬重联”;相应地,南向 IMF 时多发生在向阳侧磁层顶日下点(sub-solar)区域附近的重联被称为“低纬重联”.在“高纬重联”的驱动下,高纬电离层的等离子体对流图像将会变得很复杂,可能会在极区出现多个涡旋^[6, 7],例如,在极盖区正午扇区内形成两个“反方向”的对流单元.在磁场张力(magnetic tension force)的作用下,一端与地球相连接的“新重联”磁力线最初向低纬运动(北半球),在极尖/极隙区内形成朝向太阳方向的等离子体对流,这明显地区别于 IMF $B_z < 0$ 期间开放磁力线区域内背阳方

向的等离子体对流. Maezawa^[8] 利用地磁观测数据,首次证实了 IMF $B_z > 0$ 期间极区电离层向阳方向的对流. Milan 等^[9] 报道了强北向 IMF 条件下 SuperDARN 雷达在极尖区观测到向阳的等离子体对流.相对于南向 IMF 而言,北向 IMF 条件下的电离层等离子体通常具有较小的对流速度.

随着在磁层顶发生磁重联位置的变化,极尖/极隙区出现在不同纬度上. Newell 等^[10] 统计研究指出极尖/极隙区通常位于 75° MLat (Magnetic Latitude) 附近,但强烈地依赖于 IMF B_z 分量的方向和大小.一般地,当 IMF 南向时,极尖/极隙区位于相对较低的纬度上^[11, 12];当 IMF 北向时,极盖区收缩,极尖/极隙区通常出现在更高纬度上^[13].可能的解释是: IMF B_z 分量控制着磁层顶发生磁重联的位置,进而直接影响着极尖/极隙区所在的纬度.由此可以预见:当 IMF B_z 分量方向连续变化时,极尖/极隙区所在位置会在高、低纬度上来回移动.利用 EISCAT/ESR 雷达观测数据, McCreary 等^[14] 报道了 IMF 由北向南转换期间极尖/极隙区的低纬方向移动. Pitout 等^[15] 报道了 IMF 由南向北转换期间极尖/极隙区反方向(朝极向)的移动.

2003 年 2 月 12 日 08:00~12:00 UT 期间, ACE 卫星观测表明, IMF B_z 分量连续出现了 4 次快速的南/北方向转换,并且在感兴趣的绝大部分时间内, B_z 分量占主导地位.本文联合利用 EISCAT VHF, ESR(包括 32 m 和 42 m) 雷达以及 SuperDARN 雷达观测数据,对此期间极区电离层,尤其是在极尖/极隙区的响应特征进行分析研究.

2 空间环境及观测结果

2.1 空间环境

图 1 给出延时 69 min 的 ACE IMF 各分量以及时钟角(clock angle)在 GSE 坐标系中随时间的变化.太阳风从 ACE 卫星到电离层的传播延时按照 Khan 和 Cowley^[16] 方法计算获得. IMF 时钟角(θ)定义如下^[17]:

$$\theta = \arctan(|B_y/B_z|), \quad B_z > 0$$

$$\theta = 180^\circ - \arctan(|B_y/B_z|), \quad B_z < 0$$

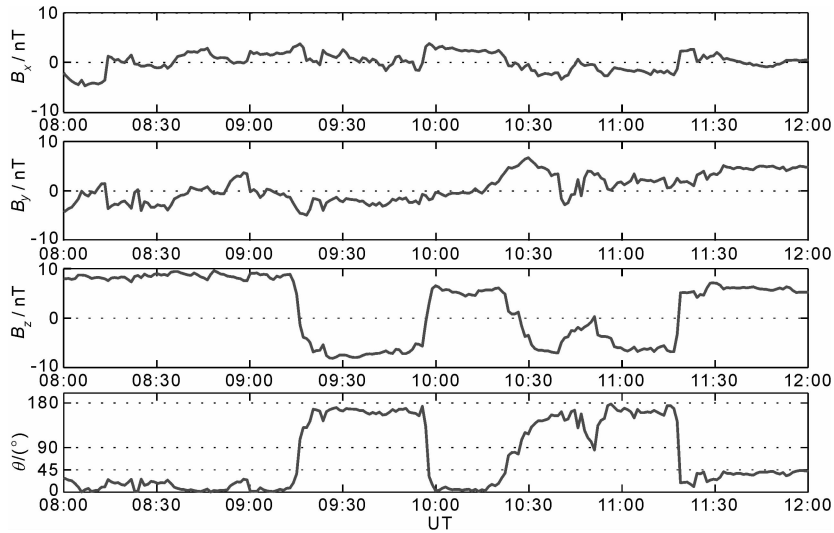


图 1 2003 年 2 月 12 日,在 08 : 00~12 : 00UT 期间延时 69 min 的 ACE 卫星观测结果

从上至下,依次为 IMF B_x , B_y 和 B_z 三分量和时钟角 θ .

Fig. 1 IMF monitored by the ACE satellite in 08 : 00~12 : 00UT on Feb. 12 2003, lagged by 69 min

From top to bottom, panels show the IMF B_x , B_y , B_z and the clock angle, respectively.

其中,当 $B_z > 0$ 时,有 $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$; 当 $B_z < 0$ 时,有 $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$. 在图 1 中,IMF 最显著的变化特征是 B_z 分量 4 次快速的南向/北向转换. 最开始(从 08 : 00UT 开始), B_z 约 9 nT; 在约 09 : 19UT 时刻, B_z 由稳定的北向快速地转变为稳定的南向, B_z 约 -8 nT; 在持续南向约 34 min 后,IMF B_z 在约 09 : 57UT 快速地转回为稳定的北向, B_z 约 5 nT; 约 22 min 后, B_z 再次由北向转变为南向,并保持了约 46 min,在此期间,南向 B_z 经历了一个先减弱后恢复的过程(约 10 : 41~10 : 52UT),但始终保持南向; IMF B_z 的第二次由南向向北的转换发生在约 11 : 18UT, B_z 约 6 nT. 在图 1 所示的绝大部分时间段内, B_z 分量占主导地位, B_x 和 B_y 分量基本上在 $[-5, 5]$ nT 内变化. 在整个时间段内, $Kp \leq 3$.

2.2 EISCAT/ESR 雷达

2003 年 2 月 12 日 08 : 00-12 : 00UT 期间, EISCAT VHF 和 ESR 32 m 雷达都工作在“北向、低仰角”观测模式. 该工作模式使得雷达波束能实现大范围的纬度覆盖. 其中,32 m 雷达波束指向地磁北极, VHF 雷达波束指向地理北极,二者间存在 30° 的夹角. 由于仰角非常低 (30°), 上述两雷达波束测量的离子视线速度 V_i , 可以作为极区电离层等离子体水平对流的一个很好的指示, 至少二者在方向上是一致的. 考虑到在本文感兴趣时段内雷达位于白天侧, 因此, $V_i > 0$ 表示极区等离子体水平对流是背阳向的; 相反, 若 $V_i < 0$, 则表示向阳方向的对流. ESR 42 m 雷达波束固定沿当地磁场方向向上观测.

图 2 给出了 EISCAT/ESR 雷达当天在 08 : 00~12 : 00UT 期间的观测结果. 图中 EISCAT VHF 和 ESR 32 m 雷达的探测距离已经按其工作模式参数转化为地磁纬度 (MLat). 竖直线表示 IMF B_z 分量 4 次转换方向所对应时刻, 依次为 09 : 19UT, 09 : 59UT, 10 : 27UT 和 11 : 20UT. 为叙述方便, 将各子区间依次标号为 (1)~(5). 图中空白是由于该时段内雷达无观测数据.

在时段 (1) 内, IMF $B_z > 0$. ESR 32 m 雷达观测到“稀薄”的极盖区, N_e 约 $1.2 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$, 主要集中在 $78^\circ \sim 80^\circ$ MLat 间(约 300~400 km 高度). ESR 42 m 雷达观测到该纬度处电离层 F 层磁正午前后典型的电子密度^[18], N_e 约 $3.1 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$, 电子温度 T_e 约 2500 K. 在此期间, 雷达观测到向阳的等离子体对流(图 2e, 2f).

在 IMF 快速转为南向后(时段 (2) 内), 等离子体对流快速地转为背阳方向, 对流速度增加, ESR 32 m 雷达观测到的最大离子视线速度 V_i 超过 1000 m/s. 对流电场的增强将引起热层焦耳加热的增加, 离子温度随之升高(图 2d), 进而将极大地促进电子复合消失过程, 在电离层 F 区高度上引起显著的电离耗空^[19]. 然而, ESR 两个雷达都观测到显著的电离增强, 其中 32 m 雷达还观测到极盖区极向运动的等离子体结构^[20, 21], 这说明在此期间电离过程似乎占主导作用. 在约 09 : 30UT 时刻, 42 m 雷达观测到电子温度突然的增强, 预示着开放-闭合磁力线边界 (Open-Closed Field Line Boundary, OCB) 在持续

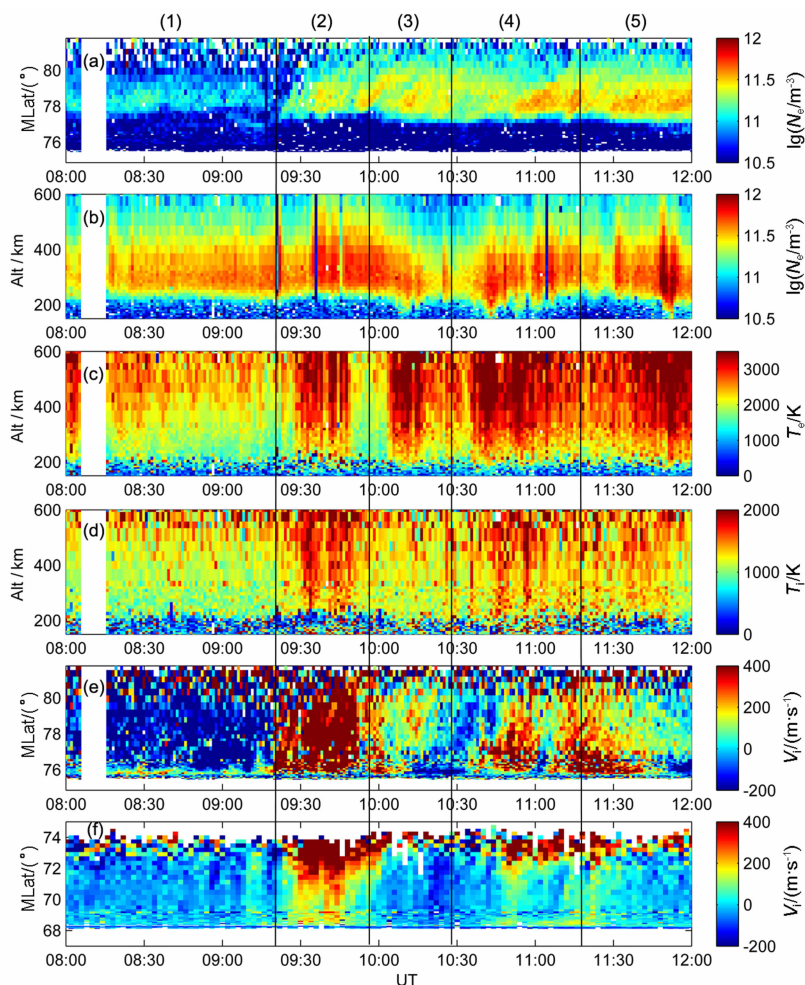


图2 2003年2月12日08:00~12:00UT期间EISCAT/ESR雷达观测结果

(a)和(e)为ESR 32 m雷达观测到的电子密度和离子视线速度;(b),(c)和(d)为ESR 42 m雷达观测的电子密度、电子温度和离子温度;(f)为EISCAT VHF雷达观测到的离子视线速度。

Fig. 2 Ionospheric observations from the EISCAT/ESR radar in 08:00~12:00UT on Feb. 12 2003

(a) and (e) present the electron density and ion velocity from the ESR 32 m radar, respectively; (b), (c) and (d) display the electron density, electron and ion temperature from the ESR 42 m radar, respectively; (f) shows the ion velocity from the EISCAT VHF radar.

强南向 IMF 期间向低纬扩展、并越过 42 m 雷达^[22, 23]. 约 4 min 后, ESR 42 m 雷达开始观测到电子密度的增强(图 2b), 从约 $3.1 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ 增加到约 $6 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$, 伴随着高的电子温度, T_e 约 3000 K. 这是极尖/极隙区内典型的粒子沉降特征, 表明 ESR 雷达随地球自转已进入极尖/极隙区. 在约 09:48UT 时刻, 42 m 雷达观测到另一个电子温度边界(下降), 这可能是极尖/极隙粒子沉降的突然停止. 另一个可能的解释是: 随着 OCB 向低纬扩展, 其极向边界被雷达观测到. 不过, Moen 等^[23] 曾指出, 当电子密度超过某个水平(约 $3 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$) 时, 地面雷达观测到的电子温度纬度梯度可能不再适合作为 OCB 的可靠标示.

当 IMF B_z 转回北向后(时段(3)), 位于 Tromsø

的 VHF 雷达捕捉到等离子体对流对 IMF 极向变化的迅速响应, 然而 ESR 32 m 雷达仍然在更高纬度上继续观测到极向运动的等离子体结构. ESR 42 m 雷达在约 10:06UT 再次观测到电子温度的增强, 这表明随着 IMF B_z 转为北向之后, 极尖区粒子沉降再次回退至 Svalbard 纬度. 到该时段结束时, 极盖区极向运动的等离子体结构已经停止(图 2a); 雷达主要观测到向阳方向的等离子体对流(图 2e, 2f); 42 m 雷达也未观测到极尖/极隙区的典型特征.

时段(4)内, IMF $B_z < 0$. 与时段(2)内观测结果相类似, ESR 32 m 雷达再次观测到极盖区内极向运动的等离子体结构(图 2a); 42 m 雷达也重新观测到疑似极尖/极隙区的电子密度和温度(图 2b, 2c) 以及极盖区背阳方向的等离子体对流(图 2e, 2f).

在时段(5)内,IMF 转为稳定的北向, B_z 约 5 nT.最初,雷达继续观测到持续朝极运动的等离子体结构(图 2a),这与时段(3)内的观测结果相类似.从等离子体密度结构的斜率看,其极向运动的速度要略低于时段(3)内的观测结果.在较高纬度上,雷达观测到的等离子体对流基本上是背离太阳方向的(图 2e,图 2f 的高纬部分),约 11:30UT 后,对流速度逐渐减弱.需要指出的是:考虑到此时段对应的磁地方时已晚(约 15:00MLT),虽然有观测^[24]表明强的昏向 B_y 分量条件有利于极尖/极隙区出现在午后扇区,但作者仍愿持谨慎态度而避免将该时段内的观测结果与极尖/极隙区相联系.

总的来说,EISCAT VHF 和 ESR 雷达观测数据都较清楚地表现出对 IMF B_z 分量方向改变的响应.其中,有些响应被延后,比如,当 IMF $B_z < 0$ 时,32 m 雷达观测到的极向运动的等离子体结构需要约几分钟的建立时间;相应地,当 B_z 快速转为北向后,该结构同样需要时间逐步衰退.另外,还有些响应比较复杂,比如,在 OCB 向低纬扩展以及向高纬收缩期间 42 m 雷达观测到的电子密度与温度的调制.

2.3 IMAGE 地磁台链

图 3 给出了 IMAGE 地磁台链在 ESR 和 EISCAT 雷达附近观测到地磁 B_y 分量(1 min 平均结果)随时间的变化,图中虚线表示各台站平静条件下的 B_y 分量水平.从上至下,各台站依次为 NAL(78.92°N, 11.93°E),LYR(78.20°N, 15.82°E),HOR(77.00°N, 15.55°E),HOP(76.50°N, 25.01°E),BJN(74.50°N, 19.00°E),SOR(69.66°N, 18.94°E),KEV(70.54°N, 22.22°E)和 TRO(69.76°N, 27.01°E).

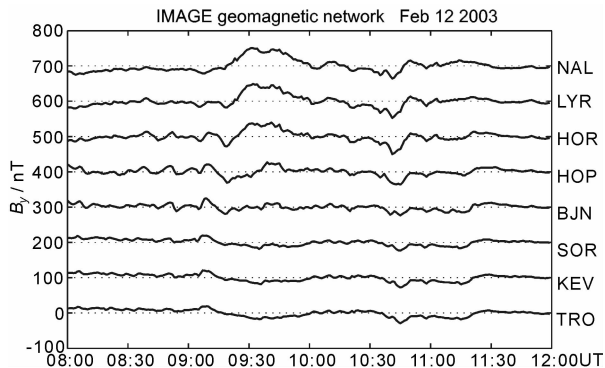


图 3 IMAGE 地磁台链在 ESR 和 EISCAT 雷达附近观测到的地磁 B_y 分量随时间的变换

图中各台站观测数据相对偏移了 100 nT.

Fig. 3 Geomagnetic B_y component observed by the IMAGE networks around the EISCAT/ESR radars

The data at each station are offset by 100 nT.

KEV(70.54°N, 22.22°E)和 TRO(69.76°N, 27.01°E).为表述清楚,图中各台站观测结果依次相对偏移了 100 nT.

从图 3 不难看出,地磁 B_y 分量的扰动主要发生在 HOR 台站及更高纬度上(LYR 和 NAL 站).地磁 B_y 分量正的偏离表明赤道向电流(极向对流)的增强;相反地,负的偏离表明极向电流(赤道向对流)的增强.从图 3 中不难看出,高纬度(NAL 和 LYR 站)处地磁 B_y 分量在约 09:19~09:53UT 和约 10:40~11:30UT 期间出现正的偏离;在约 08:00~09:19UT 和约 10:20~10:40UT 期间主要表现出负的偏离.这与 ESR 32 m 雷达和 EISCAT VHF 雷达观测到向阳/背阳的极区等离子体对流是吻合的.图 3 结果同时也表明,在此次事件中,等离子体对流对 IMF 极向变化的响应主要出现在高纬度上.

3 讨论

如前节所述,在 IMF B_z 连续 4 次快速南北方向转换期间,极区电离层表现出一系列变化特征.在本节,我们将重点讨论极尖/极隙区纬度位置和极区等离子体对流等过程对 IMF B_z 方向变换的响应.

3.1 极尖/极隙区纬度位置的变化

如图 2 所示,ESR 42 m 雷达多次观测到电子温度的纬度边界,似乎表明极尖/极隙区随着 OCB 的扩展和收缩在高、低纬度上来回移动. SuperDARN Pykkvibaer 站雷达清楚地捕捉到了在此期间极尖/极隙区所在纬度位置的运动过程.

图 4 给出了 SuperDARN Pykkvibaer 站雷达 3 个时刻的回波谱宽(spectral width)图.图中坐标为地理坐标,时间分辨率为 1 min.如文献[25]及其所列文献所述,虽然精确的物理机制目前还没有被十分清楚地解释,较宽的谱宽,尤其是在 200~400 m/s 间的谱宽,通常被看成是电离层极尖/极隙区一个十分有效的标示.在本次事件中,09:50UT 时刻的高谱宽区域所在位置,与 09:50~09:54UT 期间 DMSP F13 观测到的南向 IMF 极尖区所在位置是相吻合的(未给出卫星观测结果).

最开始(从 ESR 雷达观测开始, $B_z > 0$),ESR 42 m 雷达观测数据表明雷达尚未进入极尖/极隙区,32 m 雷达观测到“稀薄”的极盖区. Cluster 观测证实,此时极尖区位于 ESR 雷达东边稍高纬处.

在 IMF 第一次转为南向后,极尖/极隙区朝低纬方向运动.在电离层高度,Pykkvibaer 雷达的谱

宽图显示:从 09:28UT 到 09:50UT,高谱宽区域纬度位置发生了明显的移动.图 2(b,c)结果表明:在约 09:34UT,随着地球的转动,ESR 雷达进入了极尖/极隙区.到时段(3)结束时,ESR 42 m 雷达只在 280 km 高度上观测到十分微弱的 F_2 峰.在 Pykkvibaer 雷达视野中,与 09:50UT 时刻观测结果相比,10:29UT 时刻的高谱宽区域已明显地位于较高的地磁纬度上,Svalbard 似乎位于极尖/极隙区边缘附近.

随着 B_z 第二次转为南向(时段(4)),ESR 42 m 雷达在约 10:42UT 再次观测到疑似极尖/极隙区的典型特征,32 m 雷达也重新观测到极盖区极向运动的等离子体结构,极区等离子体对流主要为背阳方向(图 2e,2f).这些特征似乎都暗示着随着 B_z 的南向转换,极尖/极隙区再次出现在较低纬度上.

3.2 高纬电离层等离子体水平对流

如 2.2 节所述,随着 IMF B_z 分量方向的快速变化,ESR 32 m 和 EISCAT VHF 雷达都多次观测到极区等离子体水平对流的向阳/背阳方向转换,二者间似乎存在较强的相关性.将 EISCAT VHF 雷达在各高度上观测的离子视线速度与 IMF B_z 做相关分析,结果表明,当 VHF 雷达在 145~660 km 范围内各高度上的离子视线速度与 IMF B_z 分量具有最好相关性时,后者的时延为 72 ± 2.3 min;在 320 km 高度上,离子视线速度与 B_z 分量的相关性最佳,相关系数为 -0.65 ,IMF 的时延为 72 min.

图 5 给出了 EISCAT VHF 雷达在 320 km 高度上(约 71° MLat)观测到的离子视线速度在 08:00~12:00UT 时段内的变化情况;作为对比,同时给出了 ACE 卫星观测的、延时 72 min 的 IMF B_z 分量

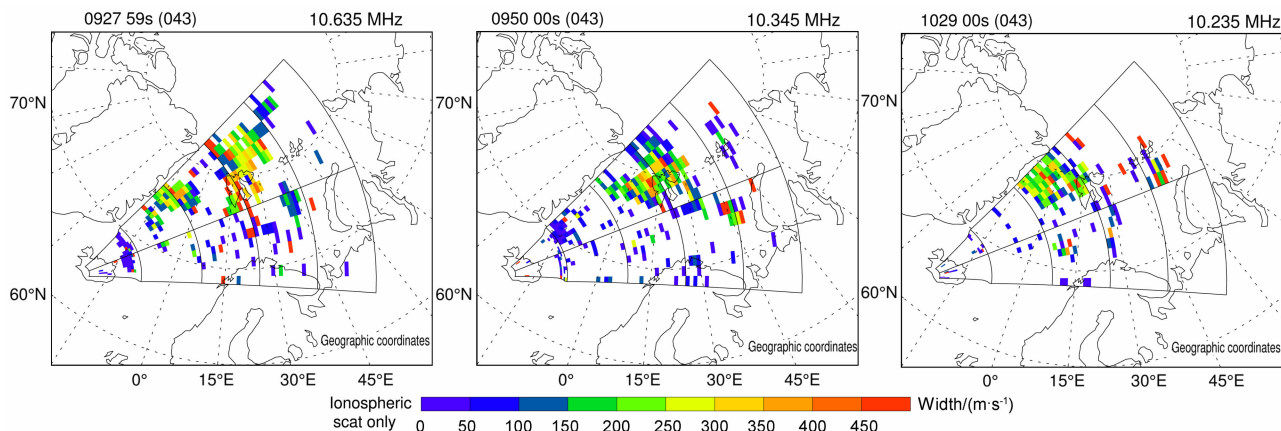


图 4 2003 年 2 月 12 日,3 个时刻 SuperDARN Pykkvibaer (冰岛) 雷达谱宽图
Fig. 4 Selected spectral widths in geographic latitude from the SuperDARN Pykkvibaer (Iceland) HF radar with 1-min resolution on Feb. 12 2003

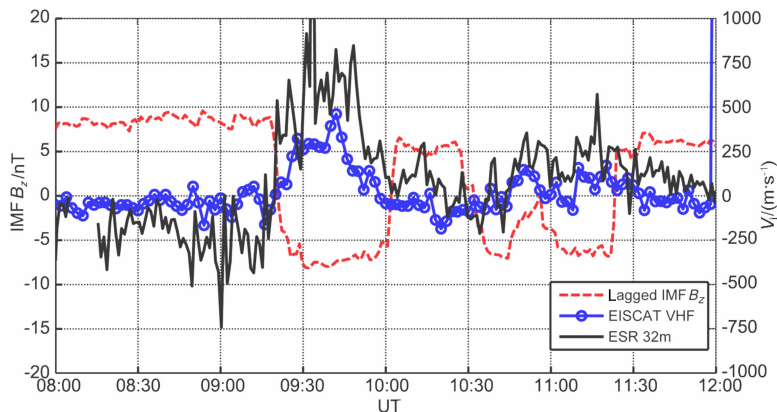


图 5 EISCAT VHF 和 ESR 32 m 雷达在 320 km 高度(分别对应于约 71° MLat 和约 78° MLat)上观测到的离子视线速度与延时 72 min 的 IMF B_z 分量的对比

Fig. 5 Comparison of the 72 min lagged IMF B_z and the ion velocity at 320 km observed by the EISCAT VHF radar. Ion velocity from the ESR 32 m radar at the same altitude was also presented

的变化情况.二者间的负相关性是明显的:当 IMF $B_z > 0$ (北向)时,有 $V_i < 0$ (向阳方向的等离子体水平对流);当 IMF $B_z < 0$ (南向)时,有 $V_i > 0$ (背阳方向的对流).作为对比,图 5 还给出了 ESR 32 m 雷达在相同高度(约 78° MLat)上的离子视线速度.值得注意的是,图 5 中的 72 min 延时比 2.1 节中由 ACE 卫星位置和太阳风速估计的时延(69 min)之间存在 3 min 的差异,这与 Taylor 等^[26]和 Pitout 等^[15]所报道的结果是相吻合的:在此时间间隔内,日侧极区磁层-电离层系统需要根据 IMF 的变化调整自己,以适应新的空间环境.

3.3 IMF 时钟角

在 3.2 节,我们讨论了 IMF 的极性与高纬电离层等离子体水平对流之间的强相关性,表明 IMF B_z 分量对磁层顶磁重联发生的位置具有较强的控制作用.然而,许多研究结果表明,除 B_z 分量外,IMF 的时钟角在磁重联过程中可能也起着十分重要的作用.Sandholt 等^[27]研究发现,与“低纬重联”相联系的白天侧极光(“类型 1”)多出现在 $|\theta| > 45^\circ$ 期间;“类型 2”极光(与 lobe 区重联相关联)多在 $|\theta| < 90^\circ$ 期间被观测到;“类型 1”和“类型 2”极光在 $45^\circ < |\theta| < 90^\circ$ 期间被同时观测到.需要指出的是,Sandholt 等所采用的时钟角 θ 为 IMF 向量在 Y-Z 平面内的投影与地球偶极轴间的极角,有别于本文所采用的定义.

在约 10:30~10:40UT 期间,IMF $B_z < 0$,有利于在向阳侧磁层顶日下点附近发生磁重联.在此期间,ESR 32 m 雷达观测到的电子密度结构突然变得模糊,其朝极的运动也停止了;电子温度甚至出现向低纬度运动的结构(未给图).42 m 雷达观测结果表明此时极尖/极隙区可能已偏离 Svalbard.在此期间,雷达观测到向阳的等离子体对流(图 2e, 2f).注意到,在此期间 IMF B_z 分量经历了一个先减弱后恢复的过程; $B_x \leq 0$ nT, $90^\circ < \theta < 135^\circ$, B_y 分量占主导地位,约 3 nT.作者推测:虽然 IMF $B_z < 0$,但由于 B_y 分量的作用,使得磁层 lobe 区重联能够继续进行^[14, 25].相反地,有报道表明当 $B_z > 0$ 时,低纬重联也有可能继续发生^[28, 29].在这些过程中,IMF 时钟角 θ 的取值起着十分关键的作用^[30~32].

在时段(1)和(3)内, $B_z > 0$; B_x 分量虽然很弱,但在绝大多数时间内有 $B_x > 0$.根据发生重联所需要的磁场反平行构型, $B_x > 0$ 和 $B_z > 0$ 并不是在冬季半球磁层 lobe 区发生磁重联的有利条件^[10, 33].然而,雷达观测到明显的向阳的高纬电离层水平对流似乎表明:磁重联有可能正在北半球高纬 lobe 区有

效地进行.Lockwood 和 Moen^[28]曾指出:足够大的 IMF B_x 分量能够克服冬季半球这种不利的磁场构型,以在 lobe 区域发生重联.在本次事件中, $B_x \leq 3$ nT,相对于 $B_z \geq 5$ nT 的北向分量,似乎还不足以改变 IMF 与冬季半球磁场之间的相对构型.不过,注意到在此期间 IMF 时钟角非常小, $\theta < 30^\circ$,依据 Sandholt 等^[27]的结果,在磁层 lobe 区发生重联的可能性比较大.

4 结 论

联合利用 EISCAT/ESR 和 SuperDARN 雷达观测数据,对 IMF 4 次快速南/北向转换期间极区电离层,尤其是极尖/极隙区的响应进行了分析研究.主要结果如下:

(1)随着 IMF 极性的变化,高纬电离层等离子体水平对流出现多次反向,表现出与 IMF B_z 分量间较强的负相关性: $B_z > 0$ 时为向阳方向对流; $B_z < 0$ 时为背阳方向对流.

(2)极区电离层等离子体对流的反转与 IMF B_z 分量方向的变化是不同步的.时序分析结果表明:极区磁层-电离层系统在日侧对 IMF B_z 方向变化的平均响应时间约为 3 min.

(3)在此期间,地面雷达观测到极尖/极隙区在高、低纬间来回移动,表明 IMF B_z 分量对磁层顶磁重联发生位置可能有强的控制作用,尤其是在 B_z 分量占主导地位期间.

(4)IMF 时钟角在磁重联过程中可能起着不可忽视的作用.

致 谢 感谢英国 Rutherford Appleton Laboratory 提供 EISCAT/ESR 雷达数据. IMAGE 地磁数据通过其互联网主页获得.

参考文献(References)

- [1] Cowley S W H. The auroral ionosphere and its coupling to the magnetosphere and solar wind. Modern Ionospheric Science, European Geophysical Society, Germany, 1996. 32~66
- [2] Reiff P, Burch J L. IMF by-dependent plasma flow and Birkeland currents in the dayside magnetosphere-2. A global model for northward and southward IMF. *J. Geophys. Res.*, 1985, **90**:1595~1609
- [3] Kelly M C. The Earth's Ionosphere Plasma Physics and Electrodynamics. San Diego: Academic Press Inc., 1989. 1~561
- [4] Dungey J W. The structure of the exosphere of adventures in velocity space. // DeWitt C, Hieblot J, Lebeau A eds. Geophysics: The Earth's Environment. 1963. 505~550

- [5] Russell C T. The configuration of the magnetosphere. // Dyer E R ed. *Critical Problems of Magnetospheric Physics*. Washington: National Academy of Sciences, 1972. 1~35
- [6] Crooker N U. Reverse convection. *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**:19363~19372
- [7] Huang C S, Andre D A, Sofko G J, et al. Super dual auroral radar network observations of ionospheric multi-cell convection during northward interplanetary magnetic field. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**:7419~7428
- [8] Maezawa K. Magnetosphere convection induced by the positive and negative z components of the interplanetary magnetic field quantitative analysis using polar CAP magnetic records. *J. Geophys. Res.*, 1976, **81**:2289~2303
- [9] Milan S E, Lester M, Cowley S W H, et al. Dayside convection and auroral morphology during an interval of northward interplanetary magnetic field. *Ann. Geophys.*, 2000, **18**:436~444
- [10] Newell P T, Meng C I, Sibeck D, et al. Some low altitude cusp dependencies on the interplanetary magnetic field. *J. Geophys. Res.*, 1989, **94**:8921~8927
- [11] Vorobjev V G, Gustafsson G A, Starkov G V, et al. Dynamics of day and night aurora during substorms. *Planetary and Space Sci.*, 1975, **23**:269~278
- [12] Sandholt P E, Lockwood M, Denig W F, et al. Dynamical auroral structure in the vicinity of the polar cusp: multipoint observations during southward and northward IMF. *Ann. Geophys.*, 1992, **10**:483~497
- [13] Russell C T, Fedder J A, Slinker S P, et al. Entry of the polar spacecraft into the polar cusp under northward IMF conditions. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**:3015~3018
- [14] McCrea I W, Lockwood M, Moen J, et al. ESR and EISCAT observations of the response of the cusp and cleft to IMF orientation changes. *Ann. Geophys.*, 2000, **18**:1009~1026
- [15] Pitout F, Bosqued J M, Alcayde D, et al. Observations of the cusp region under northward IMF. *Ann. Geophys.*, 2001, **19**:1641~1653
- [16] Khan H, Cowley S W H. Observations of the response time of high-latitude ionospheric convection to variations in the interplanetary magnetic field using EISCAT and IMP-8 data. *Ann. Geophys.*, 1999, **17**:1306~1335
- [17] Pryse S E, Sims R W, Moen J, et al. Ionospheric signatures of the low-latitude boundary layer under conditions of northward IMF and small clock angle. *Ann. Geophys.*, 2006, **24**:2169~2178
- [18] Cai H T, Ma S Y, Fan Y, et al. Climatological features of electron density in the polar ionosphere from long-term observations of EISCAT/ESR radar. *Ann. Geophys.*, 2007, **25**:2561~2569
- [19] Hong-Tao Cai, Shu-Ying Ma, Kirchengast G. A simulation study of ionization depletion in the auroral ionospheric F-region caused by strong convection electric field. *Wuhan Univ. J. Natural Sci.*, 2001, **6**:680~686
- [20] Lockwood M, Fazakerley A, Opgenoorth H, et al. Coordinated Cluster and ground-based instrument observations of transient changes in the magnetopause boundary layer during an interval of predominantly northward IMF; relation to reconnection pulses and FTE signatures. *Ann. Geophys.*, 2001, **19**:1613~1640
- [21] Lockwood M, McCrea I W, Milan S E, et al. Plasma structure within poleward-moving cusp/cleft auroral transients: EISCAT Svalbard radar observations and an explanation in terms of large local time extent of events. *Ann. Geophys.*, 2000, **18**:1027~1042
- [22] Lockwood M, Moen J, Van Eyken A P, et al. Motion of the dayside polar cap boundary during substorm cycles: I. Observations of pulses in the magnetopause reconnection rate. *Ann. Geophys.*, 2005, **23**:3495~3511
- [23] Moen J, Lockwood M, Oksavik K, et al. The dynamics and relationships of precipitation, temperature and convection boundaries in the dayside auroral ionosphere. *Ann. Geophys.*, 2004, **22**:1973~1987
- [24] Cowley S W H, Lockwood M. Excitation and decay of solar wind-driven flows in the magnetosphere-ionosphere system. *Ann. Geophys.*, 1992, **10**:103~115
- [25] Davies J A, Yeoman T K, Rae I J, et al. Ground-based observations of the auroral zone and polar cap ionospheric responses to dayside transient reconnection. *Ann. Geophys.*, 2002, **20**:781~794
- [26] Taylor J R, Lester M, Yeoman T K, et al. Ionospheric convection response to a northward turning of the interplanetary magnetic field on March 23, 1995 studied employing Superdarn HF radar data. *Advances in Space Research*, 1989, **22**(9):1289~1292
- [27] Sandholt P E, Farrugia C J, Moen J, et al. Dayside auroral configurations: responses to southward and northward rotations of the interplanetary magnetic field. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**:20279~20295
- [28] Lockwood M, Moen J. Reconfiguration and closure of lobe flux by reconnection during northward IMF: possible evidence for signatures in cusp/cleft auroral emissions. *Ann. Geophys.*, 1999, **17**:996~1011
- [29] Fuselier S A, Trattner K J, Petrincic S M. Cusp observations of high- and low-latitude reconnection for northward interplanetary magnetic field. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**:253~266
- [30] Freeman M P, Farrugia C J, Burlaga L F, et al. The interaction of a magnetic cloud with the Earth ionospheric convection in the northern and southern hemispheres for a wide range of quasi-steady interplanetary magnetic field conditions. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**:7633~7655
- [31] Phan T D, Paschmann G. Low-latitude dayside magnetopause and boundary layer for high magnetic shear 1. Structure and motion. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**:7801~7815
- [32] Scurry L, Russell C T, Gosling J T. A statistical study of accelerated flow events at the dayside magnetopause. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**:14815~14829
- [33] Crooker N U, Rich F J. Lobe-cell convection as a summer phenomenon. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**:13403~14407