第7卷 第2期 空间科学学报 Vol. 7, No. 2
1987 年 4 月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Apr, 1987

电离层电场对环电流变化响应的时延

沈 长 寿
（北京大学地球物理系）

摘 要

本文讨论了强磁暴期间磁层环电流能量变化率与电离层电场变化之间的联系. STARE和SABRE 雷达资料表明，电离层对环电流变化响应的主要特点是：(1)在磁地方时午后区，响应的时延达最大(约 1—2 小时)，场强以指数形式增加；在其它时区内，无系统的增强过程，仅观测到较大的、有明显涨落的电场值. (2) STARE (70.2°N) 和 SABRE (65.8°N) 测到的电场变化往往具有相反的趋势. (3)在 STARE 视场内，环电流能量变化达极大后，较低纬 (70.2°N) 上的电场值经常大于较高纬 (71.8°N) 上的值. 分析结果表明，磁暴期间磁层-电离层耦合过程中，环电流起着重要作用.

一、引 言

电离层响应是太阳风-磁层-电离层耦合中许多重要研究课题之一. 据我们的工作，反映太阳风能量输入过程的电离层电场变化可分为两类：第一类是行星际磁场(IMF)B_z分量(作为高纬电离层驱动电位的外源)突然自北转南时，电场立即有相应的增强变化. 这种变化常与亚暴活动相联. STARE 资料中有大量事例可表明这类“同步变化”. 从 Chatanika 雷达观测[1]，也可得此结论.

第二类电场变化与磁暴主相有关. 这时，环电流已充分发展起来，它可通过场向电流与电离层电流形成封闭系统. 由于场向电流的建立进程是弛豫过程[2,3]，因而电场对环电流变化的响应也必有一时间迟延. 耦合中，电离层电导率对磁层环电流的反馈作用，使响应变得更加复杂.

以前我们曾用扰日电离层电场变化讨论过太阳风-磁层-电离层耦合过程中的一些宏观特征[注一]. 本文重点则是深入考察环电流经由二区场向电流所引起的电离层电场随时间的变化. 特别是电场响应的时延及其随地方时区的分布、反馈的调制作用、二区场向电流的屏蔽效应等.

由于 STARE/SABRE 雷达系统有分辨率高、视场广的特点[4]，采用 Shen 和 Nielsen 提出的分析方法，[注二]可以把电场变化的时空成分分离出来. 本文用此方法考察了开始于不同地方时的环电流增强事件中，电离层变化的响应特点.

本文于 1986 年 8 月 6 日收到.

[注一] 沈长寿，地球物理学报，1987.

[注二] Shen, C. S. and E. Nielsen, *J. Geophys. Res.*, 1987.

取得强磁暴期间的完整电场资料，尤其是两个雷达系统的同时观测资料，是相当困难的．尽管如此，还是找到了近十个事例．作为例子，下面分析两个典型的记录．

二、1978 年 8 月 27—28 日磁暴

此磁暴持续数日之久．图 1 中上三条曲线分别给出行星际介质和磁层中的相应条件．B_Z 值取自文[5]．由图可见，8 月 27 日 22:00UT 时，B_Z 突然(两小时内)自北向转南，并在其后 18 小时内保持为南向．此磁暴中，Dst 最低值达 −242nT，而环电流能量增长率 $\frac{D}{Dt}Dst+\frac{Dst}{8}$ 的极值达 −80nT．

应该指出，用 $\frac{D}{Dt}(Dst)+\frac{Dst}{\tau}$ 来表示环电流能量增长率只是很粗的估计．但本文只关心环电流的相对强度，并认为，二区场向电流出现前环电流能量逐渐积累，其极值对应于向电离层传输能量的开始．从此时刻至电场达极大的间隔为响应的时延．这样，尽管上述环电流能量变化指标不够精确，其生存时间 τ 只采用了平均情况下的值 ($\tau=8$ 小时)，但对选取能量极值而言，取此指标仍是合理的．

由于雷达视场宽度(经度 10°)所限，无法测到整个磁暴期间中更广空间上的电离层电场变化，只能采用雷达处于不同地方时区域上测得的电子漂移速度(与电场等效)分布来描述电离层的响应情况．图 1 中第四五两条曲线给出两个纬度 (70.2°N 和 71.8°N) 上的测量结果．这是把每 2° 经度宽的小区内，40 分钟间测得的最大速率值连接而成的曲线．虽然这种变化中也包含了电场变化的空间成分，但对强磁暴日，当在较小经度范围内有较大电场变化时，相对说，空间变化成分很小，所给曲线大致地反映了电场的时间变化．

图 1 中最突出的特点，是电场随时间变化并不总是跟着磁层对流驱动源 B_Z 而变．例如，因 STARE 测量有阈值 (15—20mV/m)，静日的 06:00—13:00 MLT 区域内，是收不到雷达的反射信号的．但在本例中，虽然 08:00 UT(10:30MLT) 后，B_Z 已在下降，从 07:00 UT 开始的漂移速率增长却持续了几个小时，并于 10:00 UT 后达最大值(>3000 m/s)．不仅如此，B_Z 长期为南向时，高纬电场增强常发生在环电流能量变化达极大之后(图 1 中第三条曲线上的 R_1—R_4)；而对南向 B_Z 变化的关系并不明显．对于 R_2(06:30—08:30 UT)，电离层响应有～2 小时的时延；对 R_3(～11:30 UT)，时延约一小时．由于 Dst 的时间精度较低，未能发现 R_1、R_4 所对应的时延值．图 1 中的虚线表明了环电流能量变化率极大值与电场响应间的时延情况．04:00 UT 附近的漂移速率峰值似乎也可算作对 R_1 的响应．但这时 R_1 的变化率较小，而 01:00—04:00 UT 间 B_Z 从 −10.6 增至 −16.9 nT，故此峰值很可能是由直接驱动源 B_Z 的南向增大所造成的．

作为上述直观分析的数学检验，我们采用时间交叉相关分析，考察场强响应的时延情况．因为不同地方时区域上的时延值不同，取每三小时宽度区域分别作此统计(但05:30—11:30 UT 间有一完整的环电流增强，故取了六小时的区域)．Dst 值每小时仅一个，故每两 Dst 之间的值用线性内插法求取．对 70.2° N 的电场分析表明，在 05:30—11:30 UT

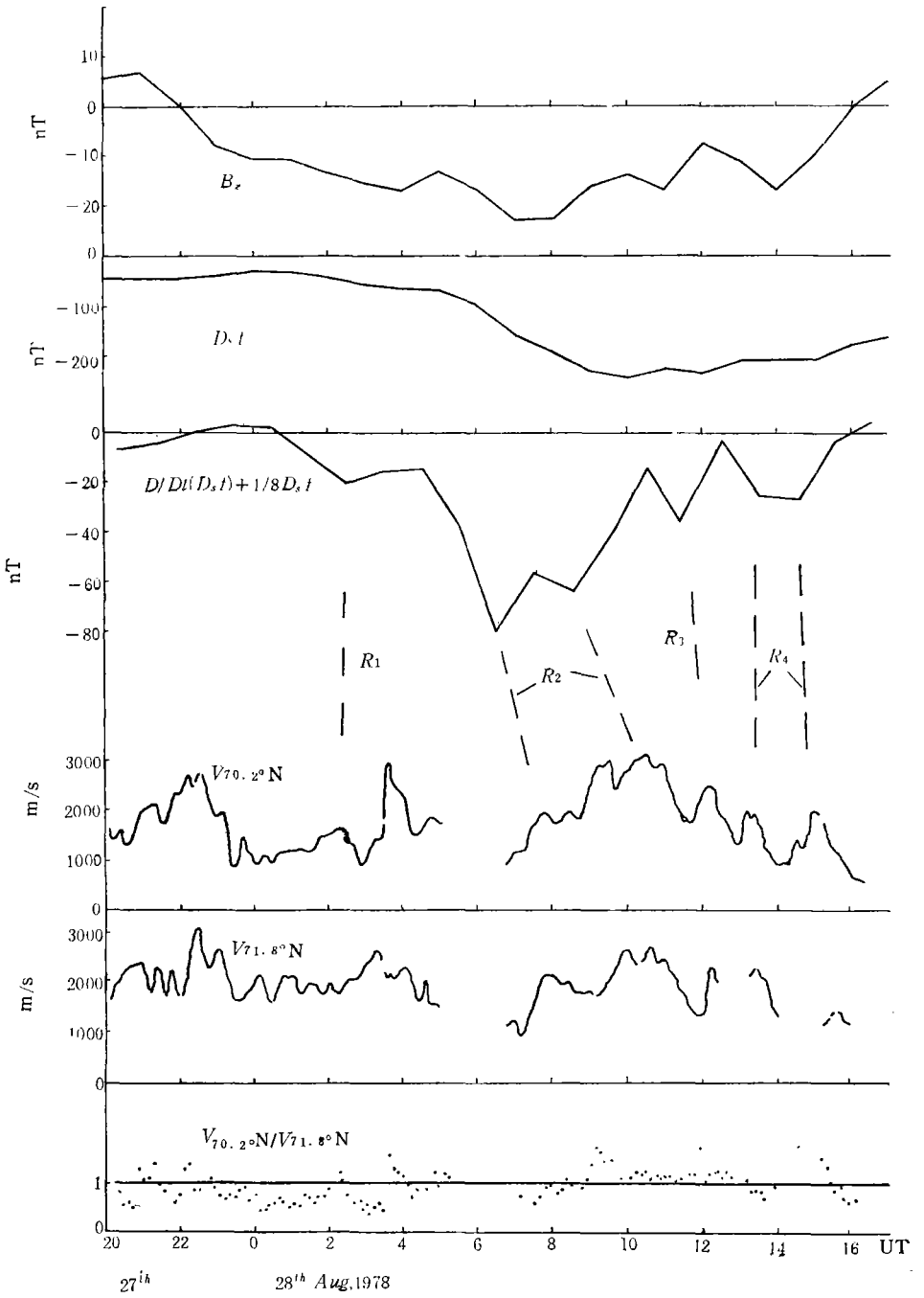

图 1　行星际和地面磁场，以及电离层电子漂移速率随时间的变化

Fig. 1　Time variation of the IMF B_Z, Dst and the electron drift velocity in the ionosphere

内，时延为 104 分钟，其交叉相关系数为 0.91；在 12:30—15:30 UT 内，时延为零，交叉相关系数是 0.86. 这表明上述直观分析基本正确，又说明电离层响应时延的长短确实与环

电流增强极值所在地方时有关.

现在讨论空间固定点上 40 分钟内,电场的"真实"时间变化. 图 2 中每条曲线给出某确定 2° 经度小区内,雷达视场扫过的 40 分钟里,某一纬度上漂移速率随时间变化的五个状态;即每 8 分钟间隔给出一个一分钟的速率平均值,相邻两值用一直线连接. 共给出13个纬度上的变化值,每 40 分钟连续观测的开始时间 (UT) 已注于每一(小区)直条的底部,此时,该小区所在空间位置是 (UT + 2.5 小时) MLT.

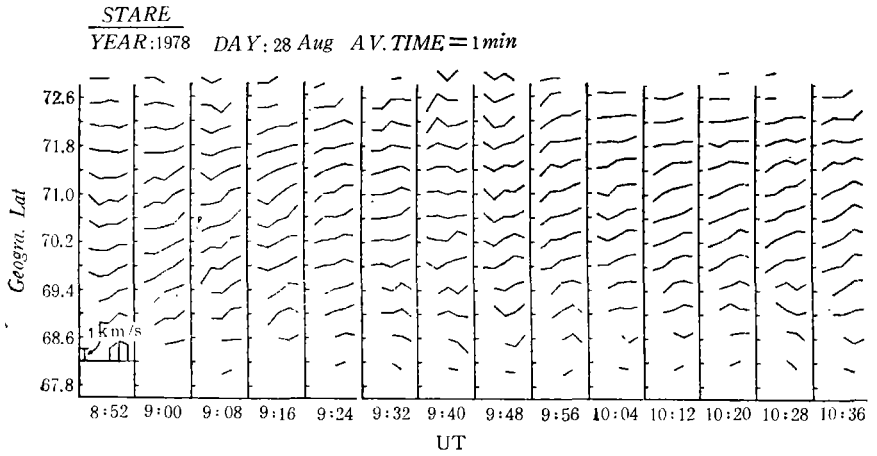

图 2 在雷达视场扫过的 40 分钟内,所测电子漂移速率的变化过程

Fig. 2 The real time variation of the electron drift velocity within 40 minutes, when STARE field of view swept over the region.

从图 2 可知,在 09:00—11:00 UT 区域内,尽管 B_Z 在减弱,漂移速率却维持着增长. 如上所述,由环电流增强所引起的这种场强增加是个弛豫过程,可用如下数学形式来表示

$$E(t) = E_\infty - [E_\infty - E(t_0)]\exp[-(t-t_0)/\tau_s],$$

其中,E_∞ 是平衡态时的电场值;τ_s 是过程的弛豫时间;t_0 是电场响应的初始时刻;$E(t_0)$ 为初始电场. 对于图 2 中每一较光滑的曲线,取其上相邻四点的观测值 $E(t)$,即可估算出上面四个未知参数. 对 70.2° N 和 71.0° N 上 10:52 UT 时的 τ_s 估算值已列于表 1,表中同时给出交叉相关分析所得的相应时延值. 估算中还发现如下特点:(1)同一小区(2° 经度)内,不同纬度上算得的 t_0 值相差小于五分钟;但 τ_s 值随纬度而异. (2) 不同磁地方时区域上估算的 τ_s 相差甚大;如在 13:22—13:30 MLT 区上为 103 分钟;在 12:50—12:58 MLT 上为 45 分;而 11:46—11:54 MLT 上为 36 分.

上述估算都是在 MLT 中午区域附近,当环电流增强发生在其它区域(如 R_1、R_4)时,仅测到有较大涨落的,已增强的电场值,无法估算时延值.

三、1984 年 11 月 15—16 日磁暴

这个强磁暴持续了三天. 图 3 与图 1 类似,给出了有关参数的时间变化. *Dst* 的最

小值达 −133 nT; $\frac{D}{Dt}(Dst)+\frac{1}{8}Dst$ 的最大极值约 −40 nT. 底部两曲线是 STARE 和 SABRE 同时测量的电子漂移速率随时间变化的情况(只给出 70.2° N 和 65.8° N 地理纬度上的观测值).

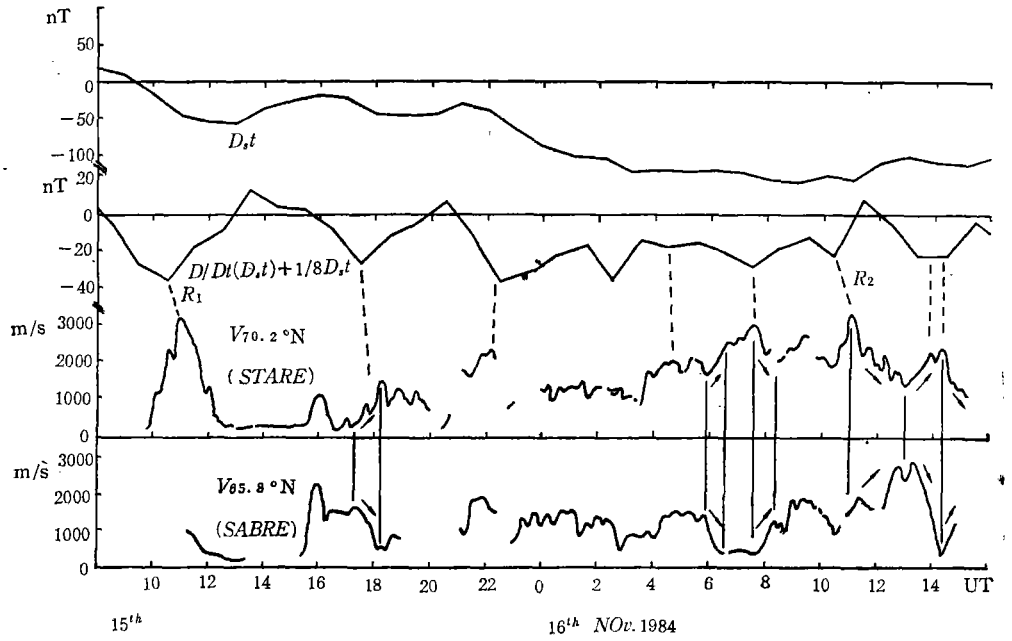

图 3　环电流和电离层电场随时间的变化(如图 1)

Fig. 3　Time variation of the ring currents and the ionospheric electric fields, as in Fig. 1

与图 1 一样，虚线指出了环电流变化极值与电离层响应之间的联系. 并由此可得时延值随地方时区域的分布. 从 15 日 10:00 UT 开始(通常磁静日时，此区域内仅有很弱的电子漂移速率)，测到很强的电场增长，对环电流变化的响应时延为 0.5 小时(图 3 中的 R_1). 其后，环电流减弱，场强无时空变化，很为平稳(图 3 中 15 日 13:00—15:00 UT 区域). 16 日 10:00 UT 后，再次观测到场强的增大，响应的时延为 1 小时(图 3 中的 R_2). 同样，若环电流增强极值不在中午前后区域，就不出现电场有系统增强的过程，也无法确定时延的大小.

为确信这种相关，再次用时间交叉相关分析法加以检验. 全部情况与上节类似. 以每三小时区域作此分析，对 70.2° N 的结论是：15 日 9:30—12:30 UT 区域内时延为 32 分，相关系数是 0.93；对 16 日的同一区域，时延为 64 分，相关系数是 0.7. 在其它区域，时延为零. 此结果表明，图 3 中虚线所示的直观估计也是基本正确的.

同样，用与图 2 类似的电场的"真实"时间变化曲线(为节省篇幅，这里不再给出这类图)，可以估算弛豫时间 τ_s. 表 1 中给出了 70.2° N 和 71.0° N 上的 τ_s 值，以及 70.2° N 上相应的交叉相关分析所得的时延 τ_{CR} 值，可以看到，在同一纬度上，τ_{CR} 和 τ_s 粗略地相等，但在不同日子里变化较大. 对于不同纬度，τ_s 也有较大差别.

表 1

	τ_s(min)		τ_{CR}(min)
	70.2°N	71.0°N	70.2°N
1978 年 8 月 28 日 10:52 UT	103	22	104
1984 年 11 月 15 日 10:40 UT	17	25	32
1984 年 11 月 16 日 10:52 UT	56	75	64

另一有趣的事实是，环电流增强时经常伴有较高纬度（70.2° N，STARE）上的电场增加，以及较低纬度（65.8° N，SABRE）上的电场减弱．在作这一比较时，还需再次说明，图 3 中漂移速率随时间变化的表示中也包含了空间变化成分，而且对 STARE 和 SABRE 来说，需扣除的空间成分是不同的．尽管如此，还是发现了许多经度区域(图 3 中用垂直实线和箭头表示)，其上由 STARE 和 SABRE 所观测到的漂移速率变化具有恰好相反的趋势．

四、讨论和结论

上面找到了一些与环电流增强有关的电离层电场变化的特点，如电场响应的时延，环电流的屏蔽作用，电离层的反馈作用等．现需说明那些物理过程和机制在起支配作用？

Senior 和 Blanc[2] 提出了一个磁层-电离层耦合的线性分析的模式．在外源施加于磁层(即电离层极盖边界)上的晨昏电位降 ($2\phi_0$) 作用下，内磁层赤道环电流的内边缘上会积累起极化电荷．最后，这些极化电荷通过二区场向电流 $J_{\parallel}^{(2)}$ 向电离层放电．与许多电路系统相似，磁层-电离层耦合系统对外源驱动电位变化的响应，也是一个弛豫过程，有一定的时延．他们的工作中，假定了 ϕ_0 变化为阶梯函数．

Zi 和 Shen[3] 以 Senior 和 Blanc 模式为基础，用电离层电导率的日夜梯度分布代替均匀分布，得到了一些更有意义的结论．二区场向电流随时间变化仍为弛豫过程：$J_{\parallel}^{(2)}(t) = J_{\parallel}^{(2)}(t=\infty)(1-e^{t/\tau})$，其中 $J_{\parallel}^{(2)}(t=\infty)$ 是平衡态时的 $J_{\parallel}^{(2)}$ 值；τ 是与弛豫时间接近的时间常数，称平衡时间或屏蔽时间．τ 的大小不仅取决于环电流的等效电导率，也还决定于电离层电导率的分布．因此，当电离层电导率有日夜不对称性时，τ 也与 MLT 有关．电导率高的区域 τ 也大，τ 的最大值在 MLT 的中午区域，在其两侧 τ 值迅速下降．再者，电离层内电位分布的日夜不均匀也将调制场向电流的再分布，从而 τ 的最大值将移至午后区域(详见[3])．

磁暴期间的观测资料不可能与上述简单模式理论完全相符．模式中要求 ϕ_0 是阶梯函数，但实际的外源 B_z (从而 ϕ_0) 是在不断变化的．模式中极盖边界和二区场向电流的位置是以(磁)极心为中心的两个无厚度的圆周，而事实上它们的形状很不规则，并占一定宽度的面积，且都随时间而变化．尽管如此，作为近似估计，仍可把观测电场的宏观特征与理论预言加以比较；因为不管实际过程多么复杂，诸如 $J_{\parallel}^{(2)}$ 变化的弛豫过程和它的屏蔽作用等基本特点仍是有效的．事实上，前两节所总结的扰日电场的主要特征几乎全可由模式加以说明．

以下是本文主要结论：

(1) 南向 B_Z 已开始减小，而环电流却有明显增强时，电场也是增大的. 这种响应在 MLT 的中午及午后区域有 1—2 小时的时延(各次磁暴中是不相同的)；在其它区域上，既无系统的增长过程，也无响应的时延.

按上述理论，$J_{\parallel}^{(2)}$ 的演化为一弛豫过程，因而由外驱动源 ϕ_0 和二区场向电流 $J_{\parallel}^{(2)}$ 所确定的电离层电场变化，自然也是个弛豫过程. 建立 $J_{\parallel}^{(2)}$ 的平衡时间 τ 应近似等于场强变化的弛豫时间 τ_s. 它们与电场响应的时延也应基本一致. 时延随地方时而变则是由电离层电导率不均匀分布所决定的. 这些都表明了，磁层环电流对电场变化有极重要作用，而电离层也有反馈作用.

(2) 磁暴期间，环电流增强后，经常观测到 70.2° N (STARE) 与 65.8° N (SABRE) 上的电场变化有相反的趋向. 这是由于 $J_{\parallel}^{(2)}$ 有屏蔽作用，对它两侧的电场有反向的影响[6]. 按卫星观测的统计结果[7]，扰日时，$J_{\parallel}^{(2)}$ 在电离层高度上的位置在 63—70° 地磁纬度之间(在不同的 MLT 区上，处于不同的纬度)；即通常位于 65.8° N 与 70.2° N 之间，从而能观测到 $J_{\parallel}^{(2)}$ 位置两边的电场有反向的变化趋势.

(3) 当环电流增强时，STARE 视场内较高纬度 (71.8° N) 上的电子漂移速率经常小于较低纬度 (70.2° N) 上的对应值，即 $V_{70.2°N}/V_{71.8°N} > 1$ (见图 1 中最低下的那条点线). 其原因可能是：磁层热离子的内边界 Λ_i 与电子成分内边界 Λ_e 之间产生了位移 (Λ 是地磁纬度)，且 $\Lambda_e > \Lambda_i$ (详见文献[2]). 此位移当然与环电流有关. 当位移存在时，由于沉降电子能使电离层电导率增大，Λ_e 边界两边，从高纬穿经 Λ_e 时，电导率有急剧下降. 由于电流的连续性，此电导率的下降必导至 Λ_e 和 Λ_i 之间的电场升高. 这能说明经常观测到的较低纬 (70.2° N) 上的电场值反高于 71.8° N 上相应值的现象.

除了本文所引两个典型事例外，还有许多大磁暴时的电离层资料也可以定性地证明上述结论是确实存在的. 这表明，在强磁暴期间的磁层-电离层耦合中，上述电场对环电流变化响应的物理过程是很基本的.

还有更多的细节有待进一步的研究. 为了能理解更多的观测现象，有必要考察复杂的 B_Z 变化情况下的电场响应. 简单模式中 B_Z 突然转为南向是 $J_{\parallel}^{(2)}$ 开始建立的时刻，这也应是电离层电场增强的起点. 而本文中第二类电场变化开始时，B_Z 已过了南向最大值并开始减小了. 这一差别，可能是假定 B_Z 为阶梯函数变化所引起的. 因此，研究近于实际的 B_Z 变化下，电离层响应的弛豫过程是很有必要的.

从观测方面说，更希望能有对空间各固定点上长于 40 分钟的电场连续监测资料，以及高时间精度的 Dst 观测值. 这将有助于对理论的检验.

本文的电离层资料由西德马普协会高空研究所的 E. Nielsen 博士提供，谨表感谢.

参　考　文　献

[1] Foster, J. C., J. R. Doupnik and G. S. Stiles, *J. Geophys. Res.*, Vol. **86**, p. 11357, 1981.
[2] Senior, C. and M. Blanc, *J. Geophys. Res.*, Vol. **89**, p. 261, 1984.
[3] Zi, M. Y. and Shen, C. S., *Planet. Space Sci.*, Vol. **34**, p. 353, 1986.
[4] Nielsen, E., The IMS Source Book (Ed. by C. T. Rucell and D. T. Southwood), p. 213, American Geophys.

Union, Washington, D. C., 1982.
[5] King, J. H., Interplanetary Medium Data Book, Supplement 2, 1978—1982. NSSDC/WDC-A-R&S 83—01, Natl. Space Sci. Data Center, Greenbelt, 1983.
[6] Vasyliunas, U. M., Earth's Magnetospheric Process (Ed. by B. M. McCormac) D. Reidel Pub. Co., p. 29, 1972.
[7] Iijima, T. and T. A. Potemra, *J. Geophys. Res.*, Vol. 81, p. 2165, 1976.

The Time Delay of the Ionospheric Response to the Ring Current Variation

Shen Chang-shou
(Dept. of Geophysics, Peking University)

Abstract

The link between intensification of the ring current inflation rate and the variation of ionospheric electric fields during the long-lasted storms is discussed. The main features of the ionospheric response to the ring current variation observed by STARE and SABRE are the following: (1) The ionospheric response has a time delay of 1—2 hours in the afternoon sector of MLT where the electric field increases as a near-exponentiasl function, while in other sectors there is no delay and no systematic increase of electric fields, but an enhanced state with fluctuations, can be found. (2) Opposite tendency of electric field variations often appears from STARE (70.2°N) and SABRE (65.8°N) observations. (3) In the STARE field of view the magnitude of electric fields at lower latitude (70.2°N) is usually larger than that at higher latitude (71.8°N) during ring current increase events. These facts are consistent qualitatively with predictions of simple model of Zi and Shen, 1986. The results show that the ring current has an important influence on the magnetosphere-ionosphere coupling.