第3卷 第1期 空间科学学报 Vol. 3, No. 1
1983 年 1 月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Jan., 1983

中纬电离层暴负相的开始时间与磁暴主相开始时间的对应关系及其理论模式

涂传诒
(北京大学地球物理系)

摘 要

本文分析了满洲里、Freiburg、Billerica 三个站的电离层暴负相开始时间与磁暴主相开始时间的相关关系，并且提出了一个电离层暴负相开始时间的计算模式. 假定在磁暴主相开始时，在极光椭圆上空出现了含有较多分子的气体. 气体被热层风携带，同时向外膨胀. 当富含分子的气体到达台站上空时，负相电离层暴就开始了. 计算结果与满洲里. Freiburg 和 Billerica 三个站的统计结果相符合.

一、引 言

Thomas 1966 年[1]，Mendillo 1973 年[2] 研究了中纬电离层暴负相开始时间与磁暴发生时间的关系，他们发现若磁暴发生在白天，当天午后将发生正相扰动，然后，接着一个负相扰动. 若磁暴发生在夜间而且磁暴主相又较强，当夜就有负相扰动. 下面对地理纬度大致相同而经度不同的三个台站：Billerica 站* (43°N、71.5°W)，Freiburg 站 (48°N、07°E)，满洲里站 (49.5°N、117.5°E)，1969 年至 1973 年期间发生的主要的负相电离层暴资料进行分析，从中发现：若相应磁暴主相发生在中午，在 Billerica 站 (Maynard 站) 和 Freiburg 相应负相电离层暴发生在午后，但是在满洲里站，相应负相电离层暴却集中发生在午夜，而不是在午后.

目前还没有完满的理论模式能解释负相电离层暴的形态. Davies[3,4] 认为，磁暴期间在极光椭圆中午部分沉降的热量将激发起波动，波向中纬传播，并且发生聚焦. 在波聚焦的区域，大气受到扰动，下层分子成份上升，使得 F_2 层电子复合系数增大，于是产生负相电离层暴. Davies 的模式不能解释在夜间发生的电离层暴，而且其计算的在白天发生的电离层暴也不能持续到夜间. 显然这一模式不能解释主要的负相电离层暴现象. 我们提出了一个不同的计算模式，认为在磁暴期间极光椭圆带上空出现了含有较多分子成份的气体，这些气体被中性风携带到中纬，产生负相电离层暴，如果取气体的膨胀速度 $U_0 \sim (3°—4°)$/小时，计算结果可以很好地解释由上述三个站的资料得到的负相电离层暴开始时间的统计结果.

本文于 1982 年 6 月 14 日收到. 贾志华同志曾参与部分资料整理工作

* 当 Billerica 站没有数据时，用 Maynard 站 (42.43°N、71.45°W) 的数据代替.

二、负相电离层暴开始时间的统计

我们选择在主相前 Dst 指数开始很快下降的时刻为磁暴主相开始时间，选择电离层 F_2 层临界频率 f_0F_2 较长时间地小于月中值（如果电离层暴发生在月初或月末则取相邻两个月的中值平均）的事件中 f_0F_2 开始很快下降的时刻为负相电离层暴开始时间．图 1 给出了一个实例．在这次事件中，磁暴主相开始于 1970 年 10 月 16 日满洲里地方时 18 时，而负相电离层暴开始于午夜．图 2 中给出了 f_0F_2 对月中值百分比偏离随地方时的变化，四条曲线分别对应于四次事件．由图上可看到，在这四次事件中磁暴主相分别发生在 12 时、14 时、16 时、18 时，而相应电离层暴负相却都集中在午夜 0—2 时开始．图 3 给出了在 1969—1973 年期间，在 Billerica、Freiburg 和满洲里三个站发生的主要负相电离层暴开始时间随相应磁暴主相开始时间的变化．由图看到若磁暴主相在地方时 1 点至 7 点开始，相应电离层暴大都在清晨和上午开始，若磁暴主相发生在 18 点至午夜，相应电离层暴也发生在 18 点至午夜．但是，若磁暴主相发生在中午和午后，相应电离层暴负相在 Bille-

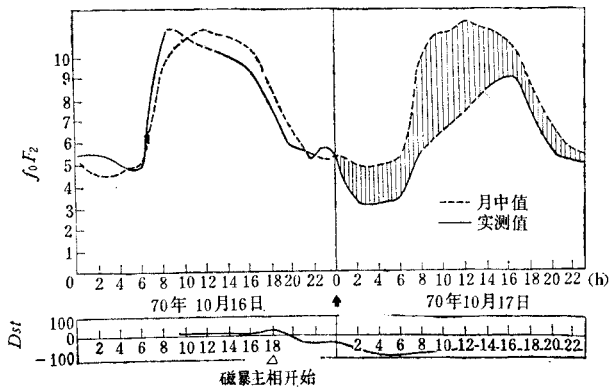

图 1　磁暴主相开始时间和相应电离层暴负相开始时间

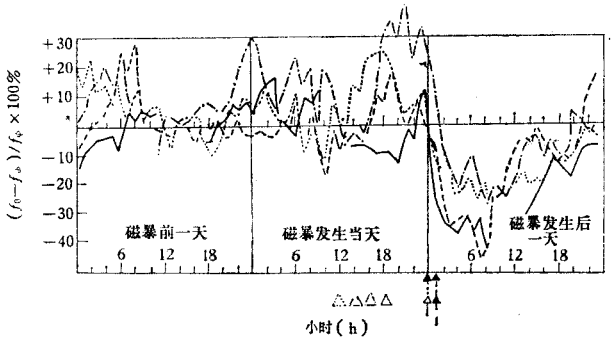

图 2　满洲里负相电离层暴的实例
……1972 年 8 月 8 日—10 日
——1970 年 10 月 15 日—17 日
------1971 年 4 月 8 日—10 日
—·—·—1973 年 3 月 18 日—20 日

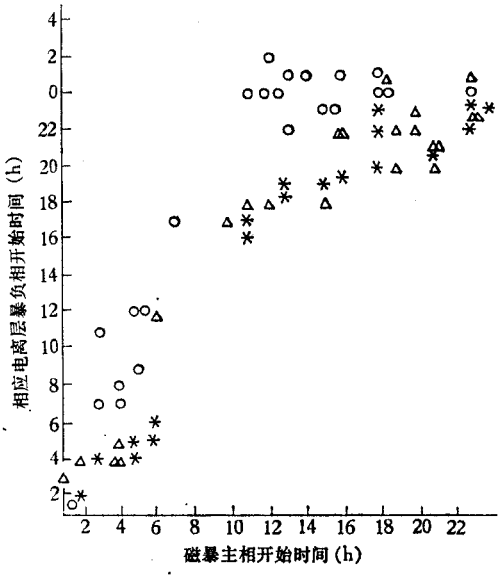

图 3 不同经度的三个台站负相开始时间随磁暴主相开始时间的变化
*Billerica (Maynard) 43°N, 71.5°W
△Freiburg 48°N, 07°E
○ 满洲里 49.5°N, 117.5°E

rica 和 Freiburg 发生在午后，而在满洲里则集中发生在午夜.

三、计 算 模 式

我们认为在磁暴主相期间由于极光粒子沉降和极光电射流的焦耳热，极光椭圆上空的大气被加热. 下层有较大分子数与原子数比的气体受热上升. 在热层中，这些气体被热层风携带到中纬，同时向外膨胀和扩散，好象由烟筒冒出的烟被风吹走一样. 当这些有较大分子数与原子数比的气体到达台站上空时，就使得 F_2 层电子损失系数增加，电子密度下降. 这时负相电离层暴就开始了. 显然上述模式与 Devies 的模式是完全不同的. Davies 的模式主要处理波的传播和聚焦，而我们的模式主要处理含有较多分子数的气体团被热层风的携带以及向外的膨胀和扩散. 在本文中我们暂略去扩散效应.

为了简化计算，不具体考虑气体的上升过程. 我们假设在磁暴主相开始时，在极光椭圆上空热层中出现了含有较大分子数与原子数比的气体源. 取地磁纬度 $\Phi_{s\alpha}=78°-2Kp$ 偶极地方时 $t_{ap}=10$ 至 $t_{ap}=15$ 的 6 个点源表示极光椭圆向阳部分含有较大分子数与原子数比的气体源的位置，称为日源. 取地磁纬度 $\Phi_{sN}=60°-\frac{1}{40}Dst$ 偶极地方时 $t_{ap}=20$ 至 $t_{ap}=0.6$ 的 11 个点源表示极光椭圆背阳部分含有较大分子数与原子数比的气体源，称为夜源. 为了简化，略去磁暴时由于高纬加热引起热层风场的变化. 根据 Blum 与 Harris 1975 年计算的热风场计算气团中心被携带的轨迹.

为了便于计算机处理，我们用如下的模式来模拟 Blum 与 Harris 计算的风场.

若地理纬度 $\varphi \geqslant 70°$，我们用相对太阳固定的极区平面坐标 x、y．x 轴由北极指向夜间 1 点的方向．假定热层风速是平行于 x 轴的，风速为每小时 4 度(大圆角距离)．

若 $25° \leqslant \varphi \leqslant 70°$，在相对太阳固定的球坐标系中，风速为

$$\frac{d\lambda'}{dt} = f_\lambda(\lambda', \varphi),$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = f_\varphi(\lambda', \varphi).$$

λ' 为经度，取夜间 1 点的经度 $\lambda' = 0$，φ 为地理纬度．

$$f_\lambda(\lambda', \varphi) = \begin{cases} -b_2 \dfrac{\sin\lambda'}{\cos\varphi} + \dfrac{\pi}{12}, & 225° \leqslant \lambda' < 285° \\ -b_3 \dfrac{\sin\lambda'}{\cos\varphi} + \dfrac{\pi}{12}, & 285° \leqslant \lambda' < 360° \\ & 0 \leqslant \lambda' < 45° \\ -b_4 \dfrac{\sin\lambda'}{\cos\varphi} + \dfrac{\pi}{12}, & 45° \leqslant \lambda' < 90° \\ -b_5 \dfrac{1}{\cos\varphi} + \dfrac{\pi}{12}, & 90° \leqslant \lambda' < 180° \\ \pi/12. & 180° \leqslant \lambda' < 225° \end{cases}$$

$$f_\varphi(\lambda', \varphi) = \begin{cases} -b_2\cos\lambda', & 225° \leqslant \lambda' < 285° \\ -b_3\cos\lambda', & 285° \leqslant \lambda' < 360° \\ & 0 \leqslant \lambda' < 45° \\ -b_4\cos\lambda', & 45° \leqslant \lambda' < 90° \\ 0, & 90° \leqslant \lambda' < 180° \\ b_6. & 180° \leqslant \lambda' < 225° \end{cases}$$

其中　$b_1 = 4°/\text{小时} \times \dfrac{\pi}{180}$，　$b_4 = 3.2°/\text{小时} \times \dfrac{\pi}{180}$，

$b_2 = 2°/\text{小时} \times \dfrac{\pi}{180}$，　$b_5 = 1°/\text{小时} \times \dfrac{\pi}{180}$，

$b_3 = 6.4°/\text{小时} \times \dfrac{\pi}{180}$，　$b_6 = 1°/\text{小时} \times \dfrac{\pi}{180}$．

图 6 中箭头标出了由上述公式所计算出的风场．

假定由日源和夜源发出的分子数与原子数比大的气体是沿着风场的轨迹线被携带到中纬的．气体被中性风携带的同时还以速度 U_0 向外膨胀．U_0 是随着时间变化的，但为了简化，我们假设 U_0 是常数，由计算结果与统计结果比较，确定 U_0 取 3°/小时和 4°/小时最合适．当含有较多分子的气体膨胀到观测站 P 时，P 站电离层负相暴就开始了．如果在磁暴主相开始的时刻，在极光椭圆带不同磁地方时的 17 个点源上，同时发出 17 个含有较多分子成份的气体团，它们先后在不同的时刻到达台站上空．其中最早到达台站上空的时刻称为瞬时源相应的负相暴开始时间．在磁暴主相持续的时间内，假设在 17 个点源上，每小时向外发出一个气团．有时后发出的气团，却先到达台站上空．在整个磁暴主相

期间，17 个点源发出的所有气团到达台站的时刻中，最先到达的时刻就是与磁暴相应的负相电离层暴的开始时间.

图 4、图 5、图 6 在相对太阳固定的极坐标中画出了气体团被热层中性风携带的运动轨迹. 图 4 为满洲里地方时 22 点瞬时夜源产生负相电离层暴示意图. 假定满洲里站地方时 22 点磁暴主相开始，这时满洲里站位于图中 P_0，在偶极磁地方时 21 点，磁纬 55° 处出现含有较多分子成份的气体源(在计算纬度时假定 $K_p = 7$，$Dst = 200$，下同)位于图中 S_0 处. S_1、S_2、S_4、S_6 分别表示 1、2、4、6 小时后气团中心所在的位置. 假定气体团以 $U_0 = 4°$/小时的速度向外膨胀. 图中用一系列圆圈表示气团在不同时刻膨胀到的位置. 由于地球自转，2 小时后满洲里站由 P_0 运动到达 P_2，与膨胀的气团相遇. 这时在满洲里站，负相电离层暴就开始了，相应台站地方时是 24 点. 以后台站处于气团内，而且其余 10 个夜源点源发出的气团也将陆续到达台站上空，负相电离层暴将继续下去.

图 5 为满洲里地方时 13 时日源产生负相电离层暴的示意图. 假定在满洲里站地方时 13 点磁暴主相开始，这时偶极磁地方时 11 点磁纬 64° 的点源位于图中 S_0. S_0 的地理纬度很高，约 75°. 气体团很快被中性风携带掠过极盖区到达地球的背阳侧面，满洲里站要经过 10 小时后才能同膨胀的气体相遇. 实际上，由于台站与气体中心的距离很远，膨胀到台站上空的含有较多分子成份的气体很稀薄，对负相电离层暴贡献不大. 满洲里站负相电离层暴主要是由夜间的源引起的.

图 6 为 Freiburg 地方时 11 点日源产生负相电离层暴的示意图，Freiburg 位于图中 P_0 点. 这时偶极磁地方时 11 点磁纬 64° 的点源在图中位于 S_0. 由于在 Freiburg 地磁纬度与地理纬度相差不多，S_0 的地理纬度较低，约 60°. 经过 2、4、6、8 小时后气体中心分别运动到 S_2、S_4、S_6、S_8. 图中还标出了四个圆圈，分别相应于经过 2、4、6、8 小时后气体膨胀到的位置. P_2、P_4、P_6、P_8 分别表示经过 2、4、6、8 小时后台站的位置. 由图中可

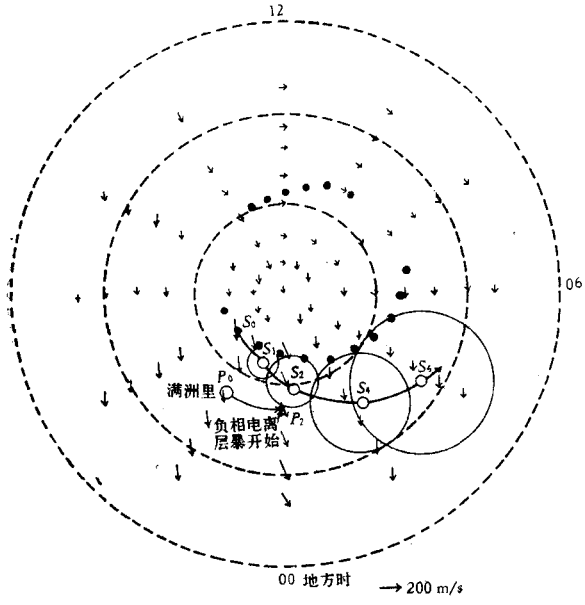

图 4 满洲里地方时夜源产生负相电离层暴示意图

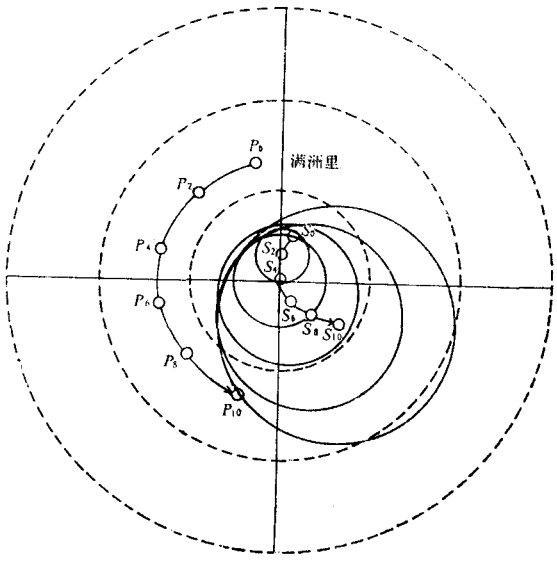

图 5 满洲里地方时 13 时日源 S_0 产生负相电离层暴示意图

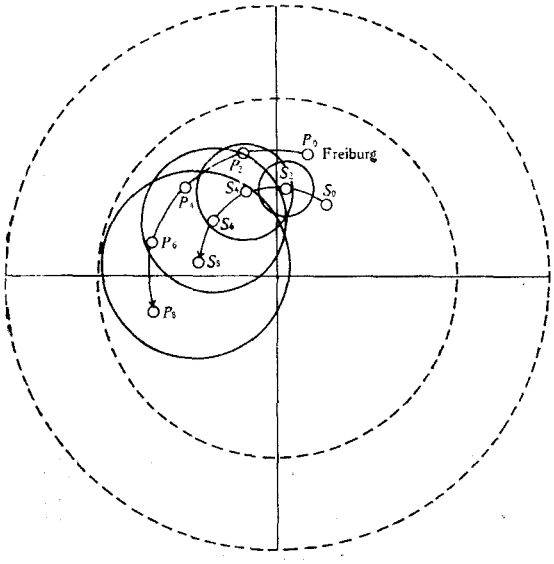

图 6　Freiburg 地方时 11 时日源产生负相电离层暴示意图

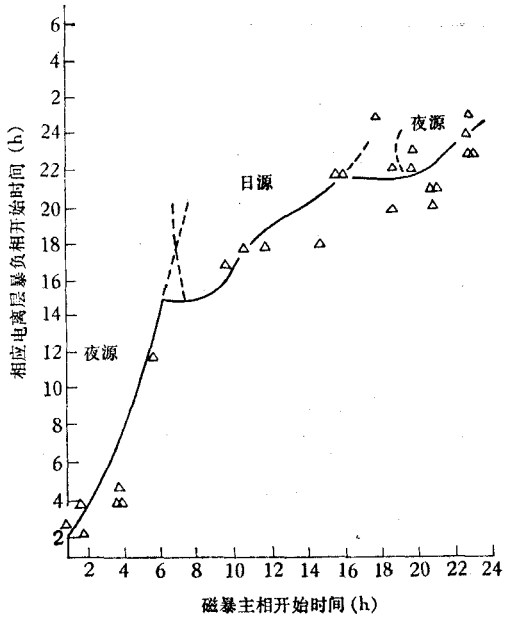

图 7　Freiburg 站负相电离层暴开始时间的理论计算值与实测值比较

——理论曲线，$U_0 = 3$，$Kp = 6$，$Dst = 100$

△实测值

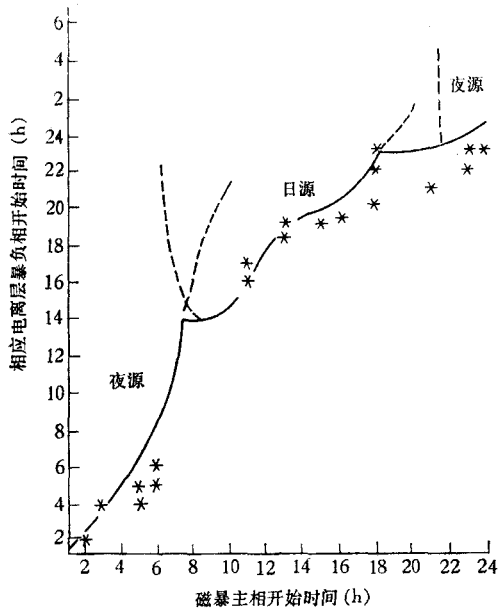

图 8　Billerice 站负相电离层暴开始时间理论计算值与实测值比较

——理论曲线，$u_0 = 3$，$Kp = 6$，$Dst = 100$，

*实测值.

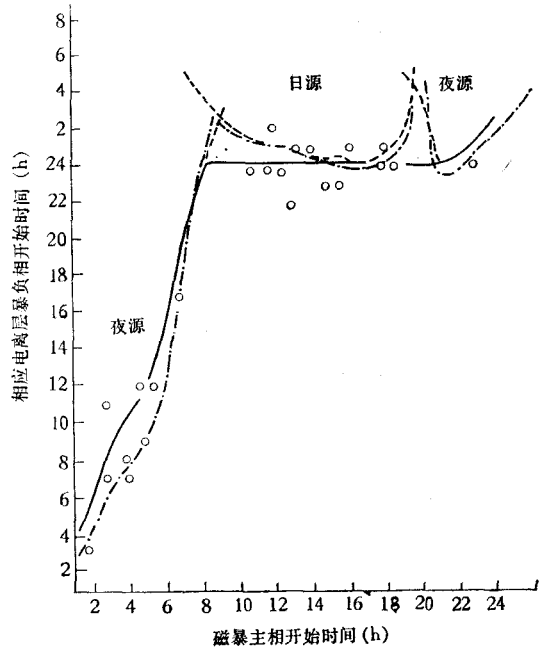

图 9　满洲里站负相电离层暴开始时间的理论计算值与实测值比较

——理论曲线，$U_0 = 3$，$Kp = 6$，$Dst = 100$　O 实测

-----瞬时源引起的负相暴开始时间

—·—·—迭加暴时风场后的瞬时源引起的负相暴开始时间

看到 5.5 小时后，Freiburg 站与膨胀的气团相遇，这时地方时为 16.5 时．以后台站一直在气团内，而且其它的日源和夜源也将陆续影响到台站，所以负相扰动将继续下去．

由上面三个图我们看到，对于在满洲里和 Freiburg 中午开始的磁暴主相，相应负相电离层暴开始时间不同．简单地说，这是因为虽然两个站的地理纬度相同但地磁纬度不同，热层风主要按地理纬度分布，而含有较大分子数与原子数比的气体源是按地磁纬度分布的．当满洲里站位于中午时刻时，相应日源位于地理纬度 75°，由源发出的气体被热层风扫过极区很晚才到达满洲里站．当 Freiburg 站位于中午时刻时，相应日源位于地理纬度 65° 左右，由源发出的气体受热层风影响较小，在午后膨胀到达台站上空．

图 7、图 8、图 9 分别为 Feriburg、Billerice 和满洲里的负相电离层暴开始时间的理论值与实测值之比较．两条虚线(其中一部分与实线重合)分别为瞬时日源和夜源相应的负相电离层暴开始时间．横坐标为气体源发生的地方时，所用参数为 $U_0 = 3°$/小时，$Kp = 6$，$Dst = 100$．实线为长时间主相对应的负相电离层暴的开始时间，就是磁暴主相开始以后不同时刻瞬时气体源对应虚线指示的最早时刻．从图中可看出理论值与实测值是相符合的．

四、讨 论

我们发现满洲里站负相电离层暴开始时间与磁暴主相开始时间的对应关系与由 Freiburg 站和 Billerica 站得到的结果有所不同，并提出了一简单的计算负相开始时间的模式，解释了由统计得到的电离层暴负相开始时间与磁暴主相开始时间的对应关系．

为了考虑磁暴时由于极光椭圆带加热而引起的风场的变化，我们在上述静日热层风场上面叠加一沿着磁子午面由高纬吹向赤道每小时 1.5°(约 45 米/秒) 的风场来模拟暴时风场，做了上述同样的计算，发现计算结果没有原则上的变化，见图 9 中长短间断线．

根据我们提出的模式，电离层暴负相开始时间应在磁暴主相开始时间之后，但是在 Freiburg 站和 Billerica 站却发现在某些事件中，电离层暴负相开始时间在磁暴主相开始时间之前一、二个小时，见图 3．可能的原因是(1)对这些事件来说，本文提出的模式仍是正确的，但由于 f_0F_2 本身固有的短周期的小扰动(见图 2) 可使负相开始时间提前一、二小时，或推后一、二小时．当磁暴主相开始时刻在午夜前后时，模式预计的负相开始的推迟时间很短，考虑到上述原因，可能判读出来的负相开始时间在磁暴主相开始之前．(2)用 Dst 突然下降的时刻来决定磁暴主相开始时刻(即热量注入到极光椭圆带上空的时刻)也可能会产生一、二个小时的误差．(3)在 Freiburg 站和 Billerica 站测到的某些 f_0F_2 负相扰动事件可能是等离子体层顶和电离层槽向赤道方向移动导致的．电离层槽向赤道方向移动导致的负相开始时间与磁暴主相开始时间大致相同．由于前述数据判读的误差，容易导致负相开始时刻提前一、二个小时．由于满洲里站地磁纬度太低，电离层槽几乎不会移动到满洲里站．这就有可能去解释为什么在满洲里站没有电离层暴负相开始于磁暴主相之前的现象．如果在统计中，能把由于电离层槽南移引起的负相扰动事件除去，我们的模式将会与统计结果符合更好．

为了计算方便，我们提出的模式可能是过于简化了，例如我们用 17 个点表示极光椭

圆沉降区域，用每小时出现一次的点源表示一个持续的源．为了模拟单个电离层暴，这模式还需要进一步改进．为了验证这一模式，除了解释负相开始时间外，还需说明其他负相电离层暴的形态，我们已在这方面作了初步的尝试．[6,7]

参　考　文　献

[1] Thomas, L., *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. **28**, p. 599, 1966.
[2] Mendillo, M., *Planet Space Sci.*, Vol. **21**, p. 349, 1973.
[3] Davies, K., *Planet Space Sci.*, Vol. **22**, p. 237, 1974.
[4] Davies, K., *J. Geophys. Res.*, Vol. **79**, p. 605, 1974.
[5] Blum, P. W. and Harris, *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. **37**, p. 213, 1975.
[6] 涂传诒，贾志华，北京大学学报，(自然科学版)，p. 10, No. 2, 1977.
[7] 涂传诒，贾志华，中国科学(A 辑)，No. 12, 1982.

THE RELATION BETWEEN THE ONSET TIMES OF THE NEGATIVE PHASE OF IONOSPHERIC STORMS AND THE MAIN PHASE OF MAGNETIC STORMS AND A THEORETICAL MODEL

Tu Chuan-yi

(Department of Geophysics, Peking University)

Abstract

In this paper, major negative phase ionospheric storms occurred from 1969 to 1973 at Manchouli (49.5°N, 117.5°E), Billerica (43°N, 71.5°W) and Freiburg (48°N, 07°E) are analyzed. It is found that if the associated magnetic storm main phase being around noon, the ionospheric storm negative phase begins in the afternoon at Billerica station and at Freiburg station, but the negative phase begins around midnight at Manchouli station. A thearetical model is presented to calculate the negative phase onset time. The model is based on two extended heat sources, one is on the day side of the auroral oval and the other on the night side. When the magnetic storm main phase begins, the molecule enriched air appears at the heat sources. The air is brought to the middle latitudes by the thermospheric winds and the electron loss rate there increases. This gives rise to the occurrence of the negative phase ionospheric storms. The onset times of negative phase is calculated, and the results agree rather well with those of statistics.