第9卷 第2期 空间科学学报 Vol. 9, No. 2
1989年4月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Apr., 1989

极光区电离层特性和磁层-电离层耦合

沈长寿 罗 毅
(北京大学地球物理系)
K. Schlegel
(*Max-Planck-Institut für Aeronomie, FRG*)

摘 要

本文用 EISCAT 雷达的综合资料，分析了磁静条件下极光区电离层的季节、昼夜变化，与磁扰时的特殊形态进行了比较，讨论了磁层-电离层耦合对电离层形态的影响.

一、引 言

高纬电离层形态与中低纬情况有很大差异，因为这里的太阳照射很少(特别在冬季)，而磁层活动的能量又很容易耦合下来. 人们关心的是，在这里太阳辐射电离还起多大作用？电子密度还有没有昼夜、季节变化？地磁扰动和宁静期间的差别有多大？ 这些问题的解答，不仅对极区电离层研究十分重要，而且也是正确理解磁层物理过程、以及磁层-电离层耦合所必需的.

由于高纬电离层变化迅速、复杂，给研究带来了很大困难. 这是因为对变化过程的全面了解，需要整体电离层的多参数的同时观测资料. 近年来，非相干散射雷达技术的发展为此提供了某些必要的条件. 本文所用欧洲空间局的 EISCAT 就是这类雷达. 作者曾利用该雷达资料分析了磁暴期间的一个典型事例[1]. 本文进一步用 EISCAT 的综合资料，分析磁静条件下极光区电离层的季节、昼夜变化，并与磁扰时的特殊形态进行比较，讨论磁层-电离层耦合对电离层形态的影响.

非相干散射雷达可同时测得电离层电子密度 n_e，电子温度 T_e，离子温度 T_i 和离子漂移速度等参数. 由于技术复杂，此类雷达不仅建造困难，费用昂贵，即使要维持经常观测也是个很大的负担，因此不能进行长期的连续观测，故一般都只作事例分析[2,3]，即使如此，寻找典型的事例进行研究，这仍然是相当不易的.

关于这里使用的 EISCAT (CP1) 观测情况及资料处理方法，已在文献 [1, 4] 中作了较详细的介绍. 现补充说明如下： 一、CP1 的观测程序是天线方向固定不变，每五(或十)分钟观测一次，每次可观测若干确定高度上的上述四个电离层参数. 二、用多普勒原理测量离子漂移速度需要三个雷达(分设在 Tromsφ, Kiruna 和 Sodankyla 三地)所测速度分量的合成，CP1 程序中只对 312km 高度有此三雷达的同时观测资料，因而

本文于1988年7月20日收到.

只能得到该高度上的总速度，即代表F层的离子漂移速度．在其它高度上，仅有此漂移速沿 Tromsφ 雷达射线方向的分量，而无法得到合成速度． 三、雷达接收的返回讯号强度，即实测的 n_e^0，不仅与真实电子密度 n_e 有关，还随 T_e/T_i 而变化，它们之间的关系是

$$n_e = (1+\alpha^2)(1+\alpha^2+T_e/T_i)\cdot n_e^0/2,$$

其中，$\alpha = 4\pi D/\lambda$；德拜长度

$$D = \sqrt{\frac{kT_e}{4\pi e^2 n_e}};$$

λ 为雷达波长(对 EISCAT，$\lambda = 0.321$m)； k 是 Boltzmann 常数；e 为电子的电荷．

对于 154km 以下的高度，因为没有 T_e、T_i 的同时测量数据，无法作此修正． 但在E层高度上，T_e 与 T_i 很相近，$\alpha \sim 0$，因此，$n_e \sim n_e^0$ 不必修正．在低F层 (154km 以下)，虽仅测到不完全真实的电子密度 n_e^0，但它仍能反映 n_e 变化的一般趋势．

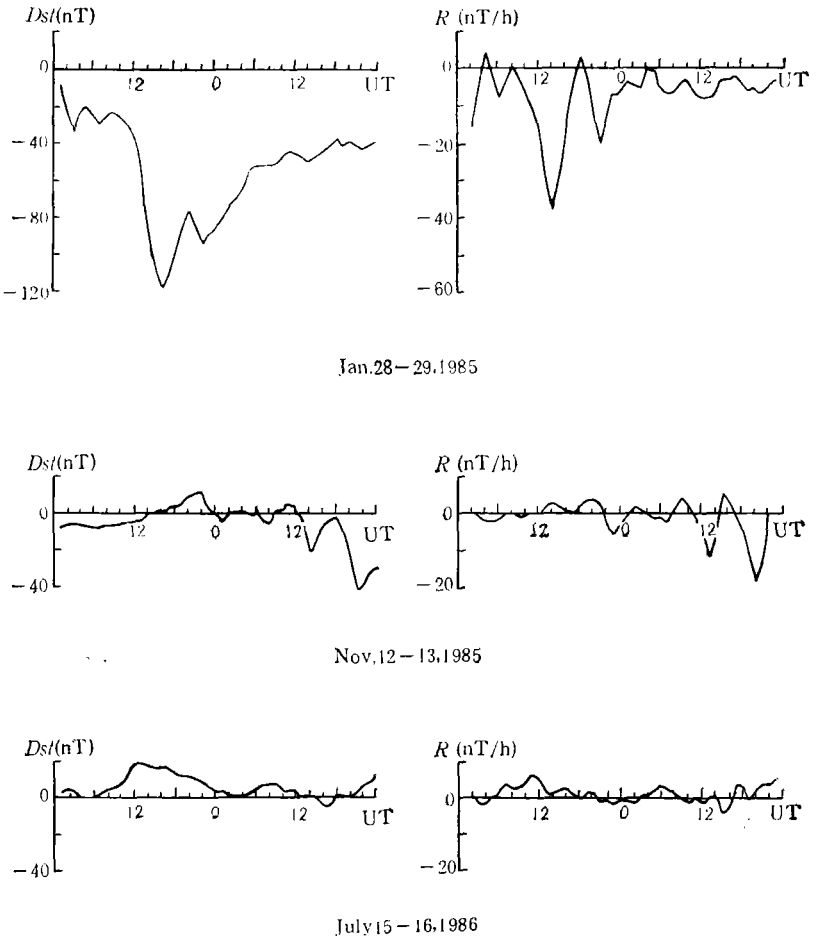


图 1 本文事例有关的地磁活动情况

Fig. 1 The magnetic condition concerned

二、有关的地磁情况

为了分析电离层变化与地磁扰动、以及磁层-电离层耦合的关系，有必要了解雷达观测期内的地磁活动情况．图 1 给出了表征磁扰程度的 Dst 指数，以及有关环电流能量变化的曲线，$R = \mathrm{d}Dst/\mathrm{d}t + Dst/\tau$，$\tau$ 取平均情况的数值，即 8 小时，R 往负方向变大表明环电流能量增加．可以看到，1986 年 7 月 15—16 日期间，Dst 基本为正值，R 没有多大起伏，属于夏季磁静条件的典型事例．1985 年11 月 12—13 日的前期可代表冬季磁静情况，但在 13 日 0 UT 附近有磁扰；12 UT 后有两次明显的 Dst 下降和 R 负幅度的较大增加，而 13 日上午仍属平静条件．第三个事例中，1985 年 1 月 28 日 12 UT 后有一很强磁暴，Dst 下降到 −120 nT，R 变化也十分剧烈；29 日 8 UT 后才进入缓慢恢复相阶段，这是典型的冬季磁暴事件．以下各图中，随时间的变化均取 UT 变化，而

$$\mathrm{LT} = \mathrm{UT} + 1.5\mathrm{h}.$$

这样，连同文献 [1] 的 1985 年 8 月 13—14 日夏季磁暴事件在内，已有冬、夏的磁静和磁暴各事例．此四事例可用来分析、对比在不同情况下，太阳辐射和磁层活动过程的相对重要性．下面分别加以讨论．

三、磁静条件下的极光区电离层特性

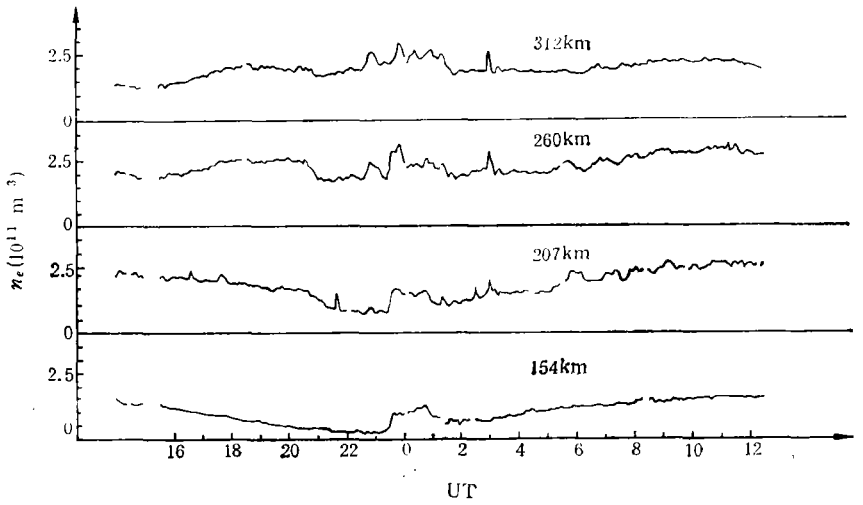
图 2 给出夏、冬磁静日四个高度（154 km，207 km，260 km 和 312 km）上，n_e 随时间的变化．其中，154 km 上的 n_e 保留了E 层变化的主要特征，其它三曲线反映了F 层各高度上的情况．

图 2 (a) 为夏季情况，图中的光滑连续曲线是按 Chapman 简单层理论的 $(\cos\chi)^{1/2}$ 规律变化作出的．（为了比较的方便，取地方时中午 n_e 的理论最大值略高于观测值。）可以看到，太阳天顶角 χ 较小时，太阳辐射的电离作用仍较明显．这种作用一直延伸到 200 km 附近，这以上的F 层 n_e 变化已看不到 χ 的作用了．值得注意的是，F 层 n_e 中午最大值的高度 h_mF 在较低的260 km 附近．另一方面，当 χ 很大(地方时午夜)时，尽管只有极微弱的日照，电离层各高度上的 n_e 均为较大值，且 h_mF 在 300 km 或更高的高度上．这表明除太阳辐射外，在极光区电离层上还有其它的控制因素．

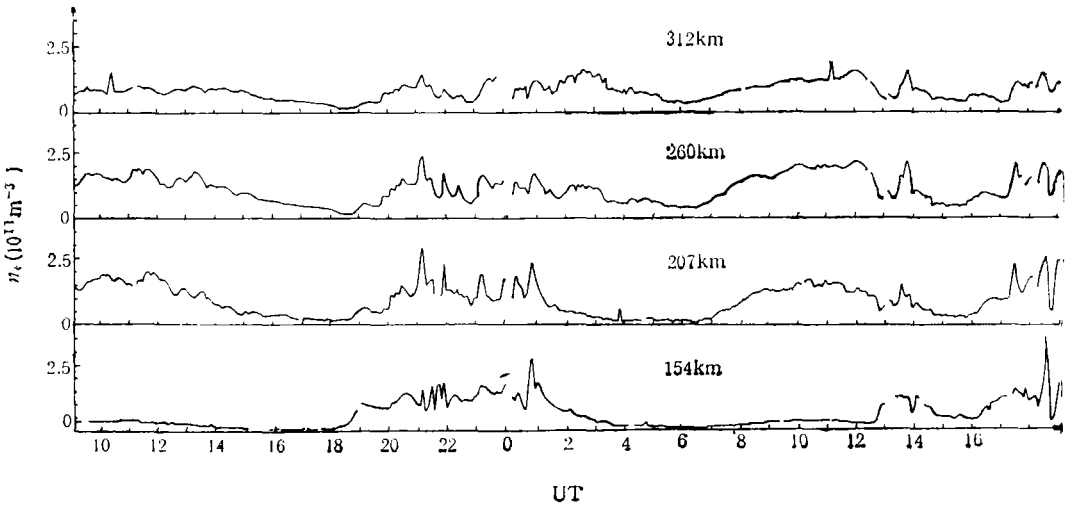
图 2 (b) 为冬季情况．这时日照时间不到两小时，且 χ 很大．在E 层（以 154km 为代表），n_e 变化的 $(\cos\chi)^{1/2}$ 因子虽不很明显，但除上述 13 日 0 UT 和 12 UT 后的磁扰时段外，仍能辨出地方时中午 n_e 略高，而其前后均较弱的变化趋势．在F 层，中午前后仍可看到 h_mF 在较低的 260 km 处．遗憾的是，地方时午夜前后有磁扰（E 层 n_e 很大），因而无法得知冬夜磁静时的特性．

完全按 $(\cos\chi)^{1/2}$ 因子变化的话，上两例夏、冬E 层 n_e 值应相差约 8 倍，但从图 2 得到的（154km）实际差值仅 3—4 倍．这又一次表明，极区电离层不完全受太阳辐射的控制．其它可能的控制因素将在下面进一步讨论．

关于静日上两事例中的离子漂移速度，7 月 15—16 日 $\boldsymbol{V}$ 的幅度大都近于 200m/s，



(a) 1986 年 7 月 15—16 日,夏季事例 (Summer, July 15—16, 1986)



(b) 1985 年 11 月 12—13 日,冬季事例 (Winter, Nov. 12—16, 1985)

图 2 地磁宁静期间,电离层四高度上的电子密度变化

Fig. 2 The variations of the ionospheric electron density during magnetic quiet period

而 11 月 12—13 日期间,除亚暴时 V 较大,甚至可达 1000m/s 外,一般都在 200—300m/s 内,且变化十分平稳 (见图 3). 漂移的方向分布则与众所周知的静日双对流圈形态一致.

四、磁暴期间的高纬电离层特性

磁暴时高纬电离层特性与磁层对流、粒子沉降密切相关,所以这里首先给出电离层等离子漂移速度(反映磁层对流速度) 的观测结果. 1985 年 1 月 28—29 日这次磁暴期间,

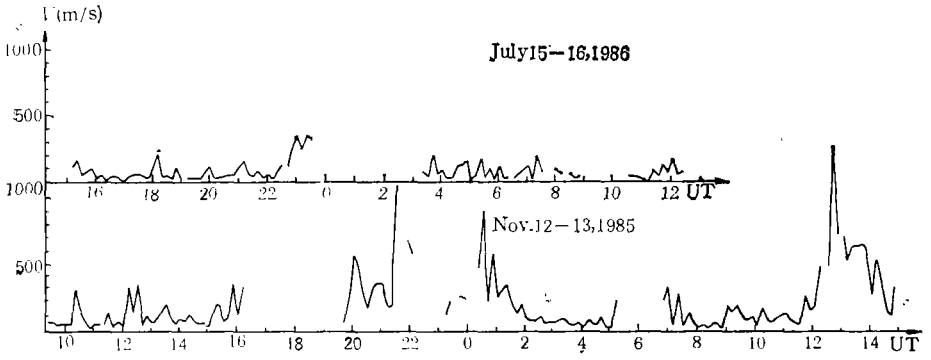


图3　磁静日 F 层离子漂移速度随时间的变化

Fig. 3　Time variation of the ion drift velocity during magnetic quiet days

EISCAT 三个雷达站观测资料较全，得到的 312 km 高度上的离子漂移速度 $\boldsymbol{V}$ 示于图 4. 其上部为幅值，主相期间一般大于 500 m/s，最大值超过 1000 m/s；进入缓慢恢复相（29 日 8 UT）后，降为宁静时的 200—300 m/s. 图 4 下部表示了速度方向，虽然由于扰动、涨落和测量误差等，数据较为分散，但基本上都在图中斜线上下，表现为正午偏北，午夜偏南，昏侧偏西和晨侧偏东. 这结果与通常的扰时双对流圈图象也完全相符.

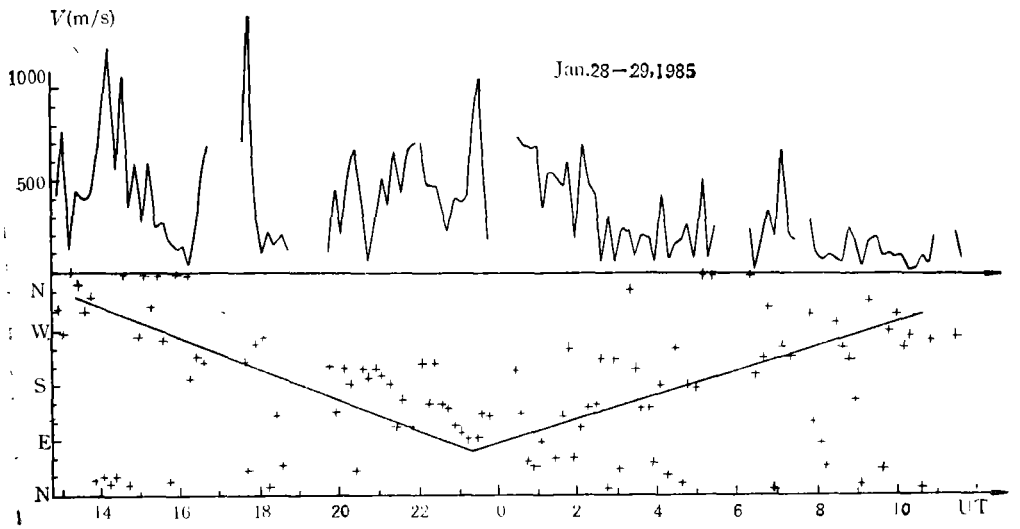


图4　磁暴期间 F 层离子漂移速度随时间的变化

Fig. 4　Time variation of the ion drift velocity during the magnetic storm

图 5 给出此磁暴期间电离层四个高度上的电子密度变化. 与图 4 及文献 [1] 对照可知，暴时 n_e 变化形态与文献[1]的结果相同. 即由于高能粒子沉降的电离作用，在 154km（代表 E 层）上的 n_e 变化已完全偏离 Chapman 层形态，n_e 大大增加，经常超过 2.5×10^{11} m^{-3}. 与此同时，漂移速度的增大使电离成分的复合加快，从而 200 km 以上的 n_e 却变得很小. 29 日 8 UT 进入缓慢恢复相后，154 km 上的 n_e 逐渐下降，而较高高度上的 n_e 则缓

缓增大．纵观图 5，对比相同时刻不同高度上电子密度的大小，可清楚地看到，扰时 E 层 n_e 的剧烈增强和 F 层 n_e 的迅速变小，而且，n_e（E 层）可大大超过 n_e（F 层）；也可以看到在恢复相期间的正常 n_e 垂直分布．这类图象与文献[1]中图 5 所示十分相近，故这里无需重复给出剖面图了．本文讨论的磁暴发生在 1 月，属冬季事例；文献[1]中 8 月的磁暴属夏季．此两磁暴期间电离层特性变化相似，这既可互相验证所得结论的正确性，又能

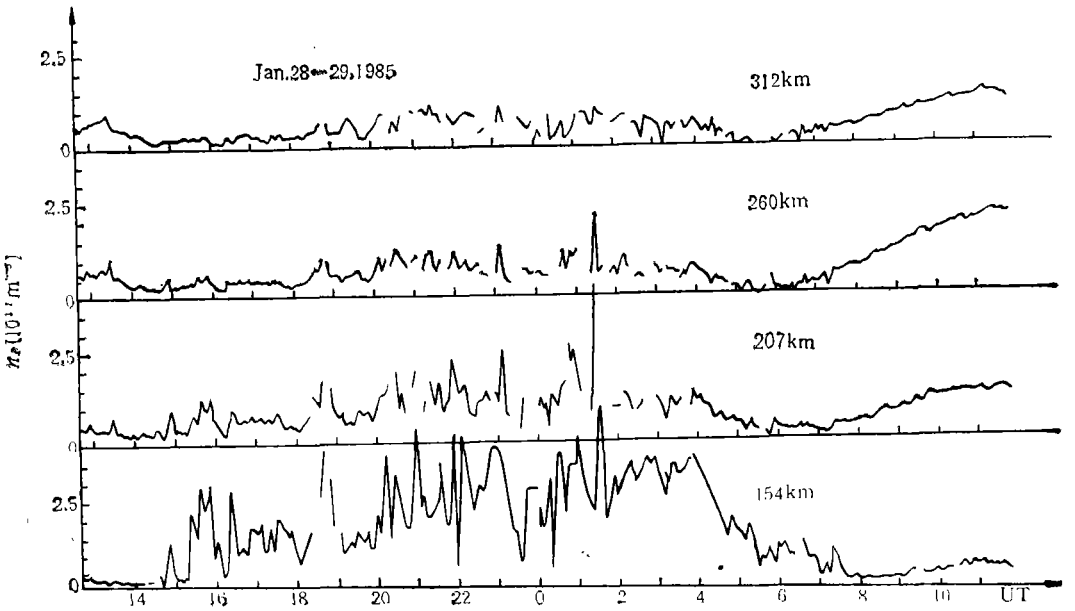


图 5 磁暴事件中电离层电子密度的变化

Fig. 5 The variation of the ionospheric electron density during the magnetic storm

说明磁暴效应与季节变化关系不大．

五、讨 论

1．有关的物理过程

对上述各观测现象有关的物理过程可分为两类．第一类为控制电子生成、消失的诸光化反应；第二类是决定电离成分输运的过程，如磁层对流、中性大气的全球经向环流、热层风等等．这些过程对不同高度上的电离层特性的影响各异，它们的相对重要性还随季节、纬度及地磁活动程度而变化．

太阳紫外辐射及其变化仍然对极光区电离层形态起一定作用，特别在夏季磁静条件下更为明显．高能沉降粒子对于高纬电离层起着重要的作用，尤其是磁暴期间．全球经向环流引起的输运与对流效应完全不同．中性大气的全球环流速度方向冬夏相反，它能改变大气各成分的相对含量；而对流产生的等离子体漂移方向则与季节无关．热层风的日夜变化也是中性成分的运动，但只是局地性的流动；由于它的拖曳，使北极高纬上空的电离成分沿磁力线运动，中午地区向下，子夜附近向上．

2. 磁静日的电离层特性

先看 E 层，如上所述，无论冬夏正午附近 Chapman 因子 $(\cos\chi)^{1/2}$ 对磁静日的 n_e 变化仍有较大作用. 但 154 km 上正午 n_e(夏)/n_e (冬) 之观测值仅为按 $(\cos\chi)^{1/2}$ 计算的一半还略小. 这两天的 n_e 变化相当平稳 (见图 2)，个别时段上的变化明显地与地磁扰动相联. 1985 年 11 月 12—13 日的日均 $F_{10.7}$ 太阳射电通量分别为 74.7 和 74.3，而 1986 年 7 月 15—16 日分别为 74.0 和 74.4. 这四天的太阳(国际)相对黑子数 R_i 都在 30 上下. 从中午 n_e 基本不变看，也不象有太阳 EUV 的突变事件. 总之，n_e(夏)/n_e (冬) 的中午观测值已不能由太阳辐射变化来说明了. 按照 Buller[5] 和 King[16] 的环流理论，夏半球极区有分子成分为主的上升气流，冬半球极区则有氧原子相对丰富的下降气流.这样，热层全球环流对中性成分的输运使电离层高度上夏季时分子成分比例大，从而电子生成率小复合率大，导至 n_e 减小，冬季则正相反. 其结果是 n_e (夏)/n_e (冬)变小.

至于 F 层，全球环流理论曾较好地解释了中纬地区电离层的冬季反常(冬季电子密度峰值大于夏季值)现象[6,7]. 按此理论，高纬的 n_e (冬)/n_e (夏)比值应更大. 这与本文所给的观测结果不符(如图 2 所示，F 层的 n_e (冬)与 n_e (夏)基本相同). 这说明其它因素在起更大的作用.

首先讨论中午地区，这里，EISCAT 观测区的漂移速度方向以北向为主 (冬、夏相同). 若按环流理论，冬季，观测到的 n_e 应大于中纬值，夏季则相反. 现在，北向漂移能使高纬 n_e 的冬季值变小，夏季值增大，再加上这里夏季太阳天顶角很小，冬季很大 (近于无日照)，最后的结果是环流不再起重要的作用.

热层风对 n_e 变化也有贡献，它的拖曳使中午地区的电离层等离子体沿磁力线向下 (冬、夏一样)，从而使 n_e 减小，h_mF 降低. 这正好能说明上述两磁静日中午 h_mF 较低 (~260 km) 的观测结果.

对于子夜附近的情况，夏季的南向漂移能把极盖区(全天有日照) 密度较大的电离气体带至观测区(子夜)上空，这能使 n_e 维持为较高值. 同时，南向热层风的拖曳使等离子体沿磁力线上升，从而 h_mF 增高(观测到~300 km、或更高). 这些都与观测一致. 同样的理由，冬季的 n_e 应较低，但本文的冬季事例子夜附近有一亚暴，因而无法证实这点结论.

总之，即使在地磁宁静期间，高纬电离层的控制因素也是很复杂的. 这里虽没进行定量分析，但已能看到，输运效应能超过太阳辐射的电离作用，其中漂移项更是不容忽略的.

3. 磁暴时的电离层特性

在磁扰期间，除了对流电场作用大大加强外，还应考虑粒子沉降这个因素. 高能沉降粒子的电离作用能完全地改变电离层 n_e 的分布状态. 由于高能粒子能穿透到大气的较低高度，由它导至的大气粒子电离率的最大值是在 E 层高度上. 这样，在短时间内，E 层附近的电子密度会剧烈地上升. 与此同时，漂移速度的大大增加将使 F 层内电离成分的复合速率迅速提高. 这是因为，F 层电离成分消失过程主要是离子、中性成分间的碰撞反应，此反应的碰撞截面取决于反应粒子间的相对速度. 磁暴时，可高达 1000 m/s 的离子漂移速度加快了离子的复合，从而使 F 层的 n_e 迅速下降. 于是 n_e 的垂直剖面与正常状态

完全不同. 对比本文的冬季磁暴与文献[1]中的夏季事例,二者十分相似,即暴时效应主要由磁层过程决定,从而冬夏和昼夜的差别都是不重要的了. 关于磁暴期间电离层形态变化的物理机制,其更细致的情况已在文献[1]中作了讨论,这里不再重复.

4. 电子温度 T_e 和离子温度 T_i

在磁静日,F 层的 T_e 与 n_e 有反向变化的趋势. 因为此时 F 层高度上的能量输入 $\mathscr{E}$ 基本不变,当忽略对流项的能量变化时, $\mathscr{E}$ 仅由电子气体的能量密度所平衡[3], 即 $\mathscr{E} = n_e k T_e$ (k 为 Boltzmann 常数),从而 n_e 与 T_e 成反比变化. 在冬季 $T_e \sim 2000$K, $T_i \sim 600$K; 夏季 $T_e \sim 2500$K, $T_i \sim 800$K. 这与中性大气温度的年变化有关.

磁扰期间, T_e、T_i 都有较大变化和涨落. T_i 增高是对流电场增强、导至较大的焦耳加热所致. T_e 的变化与磁层源的能量输入及电离层内的各种过程有关, 情况比较复杂. 当磁暴进入缓慢恢复相后,温度也恢复到宁静时的状态.

总起来说,通过静、扰日,夏季、冬季四个事例的分析表明, 磁层过程对高纬电离层形态有极重要的作用. 即使是夏季,太阳辐射作用较强时,磁静期间的磁层对流速度仍是决定 F 层电子密度变化的重要因素. 到了冬季、磁层对流作用更为明显. 特别在磁暴期间, 磁层活动(对流增强和粒子沉降)则成了 n_e 变化的决定性因素. 因此,对极光区电离层特性的研究已成了考察磁层-电离层耦合的一个重要手段. 进而, 磁层-电离层耦合对高纬电离层特性的影响又会反过来影响全球磁层-电离层电动和动力耦合的其它方面, 影响中、低纬的电离层过程. 这些都是值得进一步深入研究的课题.

参 考 文 献

[1] 沈长寿、资民筠和 K. Schlegel, 地球物理学报,第 **32** 卷,1989.
[2] Lockwood, M. et al., *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. **46**, p. 489, 1984.
[3] Schlegel, K., *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. **46**, p. 517, 1984.
[4] Baron, M., *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. **46**, p. 469, 1984.
[5] Buller, J. M., *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. **26**, p. 559, 1964.
[6] King, G. A. M., *J. Atmos Terr. Phys.*, Vol. **21**, p. 231, 1964.
[7] 沈长寿和资民筠,全国空间物理学术会议论文集(1979),科学出版社,第 125 页,1982.

THE FEATURE OF THE IONOSPHERE IN THE AURORAL ZONE AND THE MAGNETOSPHERE-IONOSPHERE COUPLING

Shen Chang-shou　Luo Yi

(Department of Geophysics, Beijing University)

K. Schlegel

(Max-Planck-Institut für Aeronomie, FRG)

Abstract

Four cases are investigated by using EISCAT data. It is shown that the magnetosphere-ionosphere coupling significantly influences the auroral ionospheric morphology. During the magnetic storm, the enhancement of the convection electric field and the particle precipitation could make the electron density of the Eregion much larger than that of the F-region, and the vertical profile deviates from the normal distribution completely. The solar radiation is not the only factor controlling the day-night and annual variation of the ionospheric electron density even in the magnetic quiet periods. The plasma drift caused by the magnetospheric process plays an important role, especially in winter.