

赤道异常峰区电离层的某些特点

陈培仁

(中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京)

摘 要

由于赤道异常北峰覆盖我国整个南部地带, 因此对峰区电离层特征的研究就成为掌握中国电离层特点的关键之一。本文试图对以下六个问题作些介绍和评述: 1. 逐日起伏和子夜前极大; 2. 峰位置的移动; 3. 赤道异常的经度效应; 4. 不均匀结构引起的强闪烁和快速法拉第衰落; 5. 顶部电离层的离化突起和中性赤道异常; 6. 粒子沉降的双峰分布。

关键词 电离层赤道异常, 中性赤道异常, 强闪烁, 电子沉降

一、引 言

由于许多高层大气物理现象都受地磁场控制, 所以, 一般地将地磁纬 60° 以上的地区称作高纬地区, $60^\circ-30^\circ$ 称中纬地区, $30^\circ-10^\circ$ 称作低纬地区, 而围绕磁赤道 $\pm 10^\circ$ 的地带叫做赤道带^[1]。

根据这种划分大致上我国天山-阴山山脉以南一直到广东沿海属于低纬地区, 以北属于中纬地区, 而海口以南则属于赤道带。所以, 从高层大气物理研究的角度来看我国基本上属于低磁纬国家, 但兼跨中纬及赤道带。

由于已发达的国家(欧洲、北美)大多处于中、高纬地区, 过去在这些地段开展了较多的研究。不过由于高纬地区的高层大气物理现象十分复杂, 遗留问题不少, 至今仍是人们关注的热点。赤道带由于地磁场水平走向而使得许多高层大气物理现象呈现出独特的个性, 加之有围绕 Jicamarca 非相干散射雷达而形成的多种探测手段的配合。过去对赤道高层大气也有较多的研究, 每四年召开一次的国际赤道高层大气物理讨论会论至今仍在继续中。

对于低纬地区及赤道带外边缘地带, 过去研究较少, 近年来人们的兴趣正在增加。美国伊利诺斯大学和西德马普协会高层大气物理研究所都希望和我国合作在海南岛观测研究电离层不均匀结构, 就是这种兴趣增加的反映^[2]。

就电离层来说, 低纬地区最大规模、最重要的一个电动力学过程就是赤道异常。赤道异常的北峰峰区覆盖了半个中国版图, 至少是武汉以南、三亚以北整个南中国地带, 见图

1. 因此着重研究峰区电离层的特点就可以在在一定程度上迅速把握住中国电离层的某些特征。当然这些特征是世界低磁纬地带或赤道异常峰区地带共有的,但在具体数值上具体位置上,各地会有些差别。本文试图对峰区电离层特征作些介绍和评述。

二、峰区电离层的几个特点

1. 等离子体浓度的逐日起伏和子夜前极大
自从赤道异常发现以来不论在观测上、行态学研究上或者理论计算方面都取得了很大进展,但也有遗留问题,其中最突出的就是赤道异常的逐日起伏^[3]。近几年对这个问题的研究有些突破,发现了赤道异常的两日振荡^[4],并且把这种逐日起伏与 Sq 电场的逐日

起伏^[5],赤道电急流的逐日起伏以及 Sq 电流焦点位置的逐日起伏^[6]联系起来一起考虑,提出一个物理模型来解释这些逐日起伏的内在联系和激发机制。即大气行星波或者不同周期大气行星波的叠加会调制潮汐风场,使得通过电离层发电机效应产生的 Sq 电场也会有同步的振荡或起伏,而当此极化电场沿磁力线传到 F 层通过喷泉效应就会导至赤道异常

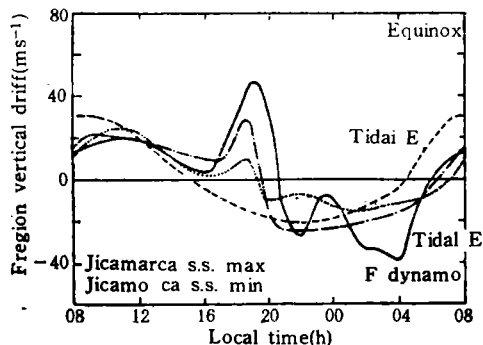


图2 太阳活动高年与低年 F 层的电场日变化曲线与单纯的 Sq 电场或 Sq 电场加 F 层发电机电场的比较(表示成 $E \times B$ 垂直漂移的形式)

Fig. 2 Mean diurnal variation of vertical F-region drift observed at Jicamarca (12°) during equinox at sunspot maximum (1968—1971) and minimum (1975—1976) compared with calculations for tidal E-region fields only (dashed curves), and for tidal E-region fields plus F-region dynamo fields (full curve)

然而在太阳活动高年,由于日落后 F₂ 层发电机起作用使得日落后电场不但不减弱,反而

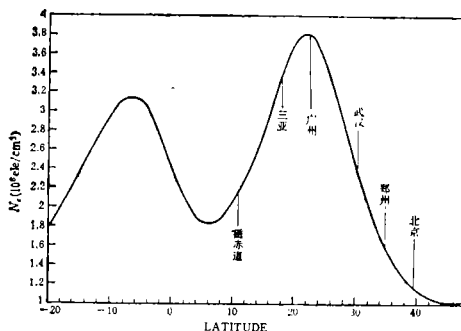


图1 太阳黑子数为 130 时, 10 月份 16LT 由 IR186 算出的赤道异常北峰对中国版土的覆盖示意图

Fig. 1 Illustration of the southern China covered by northern crest of the equatorial anomaly

同步振荡或起伏^[7]。有趣的是在低纬赤道带电层中很小的电场(例如 0.5mV/m)就足以引起非常明显的电动力学效应(例如赤道异常)。模拟计算表明只要这个电场有 25%(即 0.125mV/m)的波动起伏,就可以形成明显的赤道异常的波动或起伏^[8]。将流星余迹雷达测到的大气两日波风速代入发电机方程可以计算出 Sq 电场的两日波振幅在低纬地区振幅有 0.3mV/m 左右,足够产生明显的赤道异常的两日振荡。通过以上叙述可以看到,发生在低纬赤道带的几个电离层参数的逐日起伏似乎已有一个比较合理的解释。

通常情况下形成喷泉效应的电场来自低纬赤道带的 Sq 电场的东西向分量,白天向东夜晚向西大致成正弦形变化^[9],因而形成相当规律的赤道异常的日变化:即上午开始形成逐渐增强双峰逐渐拉开,下午达极大,然后逐渐减弱,双峰逐渐靠拢,日落后很快消失。

要增强 2—3 小时, 然后才从东向转为西向, 如图 2^[9-12]。由于日落后电场反向以前这段时间内东向电场比单纯的 Sq 电场下午值还要强, 造成日落后电场反向以前喷泉效应特强, 于是形成赤道异常的双峰比下午还要强。位于峰区一带观测站(例如冲绳、台北、广州)在高年经常会看到由这种特强的喷泉造成的 f_oF_2 或 TEC 的子夜前极大, 并且往往这个子夜前极大超过由太阳紫外幅射在下午形成的日变化主极大。这种子夜前极大当然不是亚洲特有的现象, 别的经度也有如图 3^[13], 图 3 给出高年秋季, Ascension Island 站测出的 TEC 若干天的日变化曲线。本图既清楚显示出子夜前极大经常超过下午的日变化主极大, 也清楚显示出赤道异常逐日起伏的频繁程度和起伏的幅度之大。

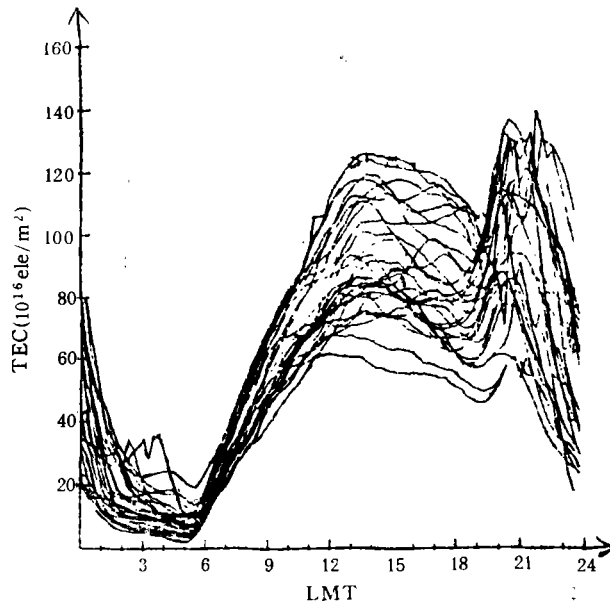


图 3 1979 年 9 月在 Ascension Island 站 ($8^{\circ}S$, $35^{\circ}E$, $15.5^{\circ}dip$) 观测的电子含量日变化曲线的逐日起伏

Fig. 3 The diurnal variation in Faraday total electron content observed at Ascension Island on a number of days in September 1979

这种大幅度的逐日起伏和强的子夜前极大是赤道异常峰区电离层固有的特点。并且随着纬度的增加逐渐减弱(例如在武汉, 可以看到子夜前极大现象, 但一般不会超过下午主极大, 逐日起伏的幅度也比冲绳小许多)。因此可以利用这两个特点来判断赤道异常对我国电离层的影响程度和影响范围。从日本垂测链的资料看来, 差不多武汉以南地区临频是完全同步起伏的, 少部分强的逐日起伏可以同步到郑州、北京, 这种纬度地区^[14]。子夜前极大现象在武汉以南地区很容易看到, 但到郑州这种纬度就较难看见。因此大致上可以认为我国武汉以南地区属于赤道异常峰区电离层。峰区电离层的各种特点在不同程度上总会被观测到。

2. 峰位置的移动

赤道异常峰位置的纬度值并不是固定不变的, 在一天之内是由低到高再返回到低夜间消失。最近发现峰位置与季节关系十分密切, 夏季低且比较固定(我国地区在广州一

带)。其他三个季节则随太阳黑子数的增加北峰逐渐北移。一般地说,总是喷泉越强,赤道异常峰也就越高,双峰也就拉得越开,北峰也就更北移一些。因此,伴随着赤道异常的逐日起伏必然有峰位置的逐日起伏。我们比较峰区几个垂测站的资料已看到了北峰位置的两日振荡。而数值模拟计算表明两日振荡的振幅大约 4° — 5° ^[18]。NNSS 卫星信标观测也十分清楚地显示出这种北峰位置的逐日移动^[15]。台湾的卫星信标观测和印度的卫星信标观测不仅发现总电子含量在赤道异常峰区有很强的逐日起伏,并且峰的位置也有明显的逐日移动^[16,17]。

由于赤道异常的逐日起伏和峰位置的逐日移动,必然会形成峰区电离层电子浓度及电子含量有较大的逐日变化。根据这一特点预料到我国南方电离层的逐日起伏要比北方大,并导致低纬临频实测值与 IRI 计算值有较大的偏差^[18]。

由于赤道异常峰位置有明显的逐日移动以及季节变化逐年变化,使得我国地区的北峰位置最南可南移到海口一带(磁纬 8.5°),最北可北移到衡阳、长沙一带(磁纬 16.5°)。印度峰区的变化范围为磁纬 9° — 16° ,随着峰位置的移动,峰区当然也就跟着移动。掌握峰位置的移动规律就可以应用峰区电离层的特点去解释一些观测到的现象。

3. 赤道异常的经度效应

虽然赤道异常是全球普遍存在的一种高层大气物理现象,但存在有显著的经度效应。不仅美洲、非洲、亚洲形态各异,经度只差 40° 的印度扇区和东亚扇区也明显不同^[19]。最近探测发现赤道异常槽中心位置并不总在磁赤道上空,而是有相当的偏离最大可达磁倾角 4° — 5° ,如图 4^[20]。值得特别注意的是亚洲地区有最大的偏离微商(对经度),因此不难想象亚洲地区特别是东亚扇区将会有最明显的赤道异常经度效应。对比日本垂测链,我国东部垂测链以及我国西部垂测站的资料,果然证实了这种推测的正确性。因此对于受赤道异常控制的我国南方地区,东部的探测结果外推到西部地带将会有较大的误差。对

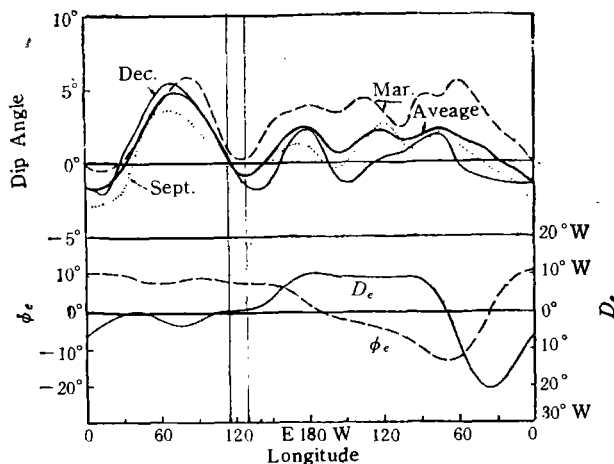


图 4 赤道异常槽位置随经度的变化(上图),
磁倾角与磁偏角随经度的变化(下图)

Fig. 4 Longitudinal variations of the trough location for different seasons and those of magnetic declination and geographic latitude at the magnetic equator

于赤道异常影响很小的北方地带, 东部的探测结果 (指 f_oF_2) 外推到西部地带则是允许的。

4. 不均匀结构引起的强闪烁和快速 Faraday 衰落

电离层不均匀结构引起的电波闪烁主要集中在地球两极及低纬赤道带^[21]。两极闪烁不如赤道强, 但白天晚上都有, 赤道带则主要发生在高年夜晚, 特别是前半夜。闪烁的强弱与太阳黑子数密切相关。太阳活动高年即使频率高到 L 波段也经常可以看到强达 20dB 的起伏, UHF、VHF 波段的振幅闪烁经常使记录饱和。低年闪烁强度大大减弱对 L 波段的影响基本上可以忽略不计^[22]。

由于引起通过电离层电波相位随机起伏的大小正比于沿电波路径电子浓度起伏的积分 $\int \Delta N ds$, 可以证明这个量受控于不均匀结构的振幅 $\Delta N/N$, 及背景电子浓度 $N^{[22]}$, 因此在相对起伏 $\Delta N/N$ 相同的情况下, 背景电子浓度大的地方应有较强的闪烁。高年日落后, 子夜前赤道异常峰区有最大的背景电子浓度, 具备了产生最强闪烁的物质基础。70 年代发现了电离层泡 (bubble), 这种由瑞利-泰勒不稳定性形成的“泡”, 正好形成于高年前半夜, 尽管它产生于赤道上空, 但可以沿磁力线延伸到赤道异常峰区。于是在峰区高年的夜晚 (特别是前半夜) 形成最强的不均匀结构并导致微波的明显闪烁, VHF、UHF 波段饱和型闪烁以及快速 Faraday 衰落^[23-25] (快速 Faraday 衰落是由于去极化的结果即通过不均匀结构后的寻常波与非常波不再相干^[26])。

这种由 bubble 引起的伴随着快速 Faraday 衰落的强振幅闪烁, 已在 Ascension Island^[24] 和武汉观测到, 当然在别的赤道异常峰区的观测站也应该观测到。图 5 显示出 L 波段电波闪烁的全球分布, 这是对上段叙述的极好图示。

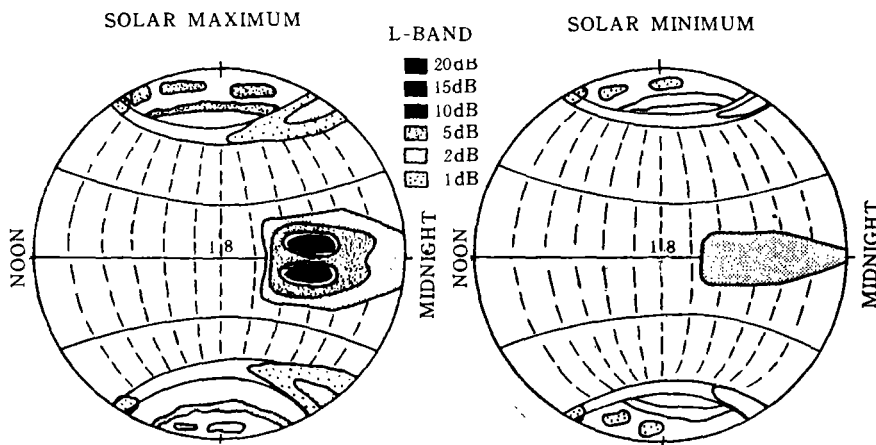


图 5 L 波段闪烁强度的全球分布

Fig. 5 Global variation of scintillation fades during solar maximum and solar minimum

强闪烁及快速 Faraday 衰落是赤道异常峰区电离层又一重要特征。可以预见位于我国南方, 利用电波进行通信广播或跟踪定位的系统肯定会受到由 bubble 引起的闪烁

的影响,比较幸运的是这种强闪烁仅限于高年的夜晚特别是前半夜。

5. 顶部电离层的离化突起与中性赤道异常

卫星顶部探测发现电离层顶部不同高度上往往有离化突起 (ionization ledges)^[27],在 1530 LT 以前这种离化突起正好分布于联结南北半球赤道异常峰区的磁力线管内,如图 6 所示^[3]。根据产生赤道异常的喷泉理论,沿整个喷泉路径上都应该有较高的电子密度,而不应该是仅仅在喷泉路径的末端才表现出来。所以顶部电离层沿联结双峰磁力线管的位置上出现离化突起是意料中的事情,出乎意料的是在 1530LT 以后,赤道异常双峰逐渐靠拢最后消失,联结双峰的磁力线管也逐渐下降。但顶部的离化突起却不随之下降,且往往在赤道异常消失后还存在 2—3 小时^[28]。目前对这种现象还未找到合理的解释。

卫星 OGO-6 中性质谱测量发现氮分子浓度也存在对称于磁赤道的双峰分布,峰区比谷区高 20% 并且峰谷的位置与赤道异常峰谷的位置一致这就是所谓中性赤道异常 (neutral anomaly)^[29],典型结果见图 7^[30]。由于氮分子浓度与逃逸层大气湿度 T_{∞} 有关,对应于图 7 的 N_2 浓度双峰分布可以导出 T_{∞} 的双峰分布,峰谷温度差达到 40K^[29]。

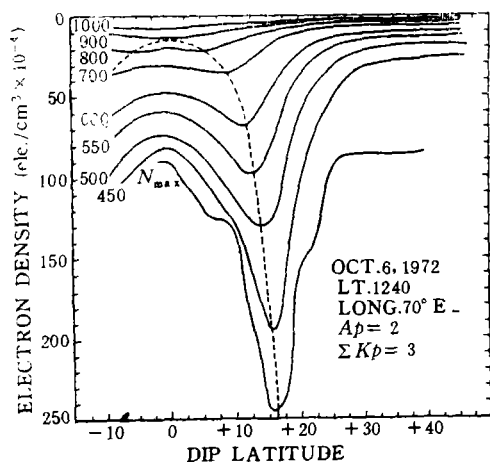


图 6 离化突起沿联结赤道异常双峰的磁力线而分布的典型例子

Fig. 6 A typical ledge formation along the magnetic field lines

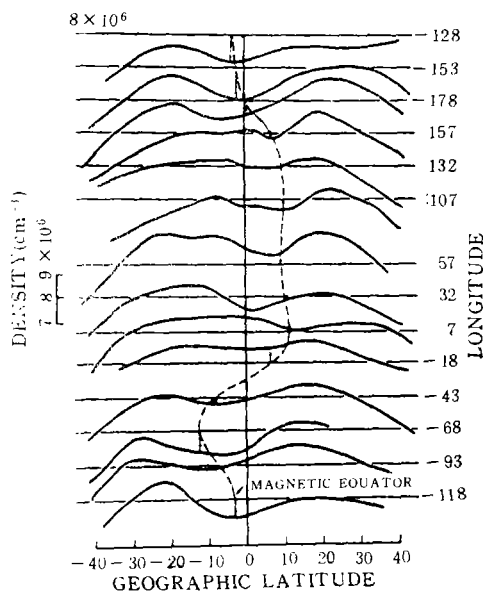


图 7 卫星 OGO-6 测出的 N_2 浓度对对称于磁赤道的双峰分布

Fig. 7 Field-aligned enhancement of neutral densities indicating the formation of the neutral anomaly

中性赤道异常全球各个经度都存在(图 7),在赤道异常比较明显的下午它也比较明显,在赤道异常消失的 0060LT 它也消失,这就揭示出电离层与热层的紧密耦合;揭示出赤道异常与中性赤道异常的因果联系。目前人们认为产生中性赤道异常的主要原因是离子的拖拽力。这种力正比于离子与中性粒子的速度差及离子浓度。由于赤道异常峰区离子浓度比谷区要大 2—3 倍,所以离子的拖拽力也要大 2—3 倍。由于离子白天向西运动,

而中性大气下午向东运动,峰区离子阻尼较大,阻碍了中性大气能量和质量从日半球输往夜半球,导致峰区白天有较高的温度及中性浓度^[29]。

6. 粒子沉降的双峰分布

根据 70 年代广泛的探测结果,文献[31]总结出全球 5 个粒子沉降带。其中以磁赤道为中心 $\pm 20^\circ$ 宽度的第五沉降带属于离子沉降带。来源于环电流质子通过两次电荷交换引起的沉降,并引起赤道极光(equatorial aurora)。然而最近的探测却发现通量高达 $10^5 - 10^6 \text{ ele} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 的电子沉降事件。并且沉降也沿磁纬呈双峰分布如图 8^[32]。其中有两次正好发生在亚洲。能谱范围在 1—12.5 keV 的电子沉降会对 E 层和 F 层产生电离效应。沉降事件是发生在磁暴期间,这和人们通常所说的磁暴的暴后效应是一致的^[33]。但是沉降对称于磁赤道呈双峰分布且大致上重合于赤道异常峰区,确是非常奇怪的现象。目前还没有任何的理论可以对此作出解释。文献[32]就随机加速、热带闪电、长距离平行加速的可能性进行了简短的讨论。

三、结 束 语

上述前四个峰区电离层特点,在我国南方各电离层观测站都或多或少或明或暗地被测到过。由于当时人们不了解为什么会那样,于是感到奇怪,甚至称之为反常。其实这些现象是赤道异常峰区必然具有的正常现象。第五点说明电离层与热层中性大气有很强的耦合。所以不难想象中性赤道异常大概也会有大的逐日起伏、夜极大、峰位置的移动等现象,只不过目前还没有探测、没有人去分析这些问题。由于热层与电离层耦合,所以研究电离层物理问题必须考虑热层大气的影响,反之亦然。当然最好是将两方面的问题合到一起联立求解,这大概是今后的方向。

赤道异常的驱动力是潮汐风。而行星波会导致它有大的逐日起伏,尽管两者都存在于中层及 E 层高度上,但却控制 F 层的等离子体运动(通过发电机效应和喷泉效应),所

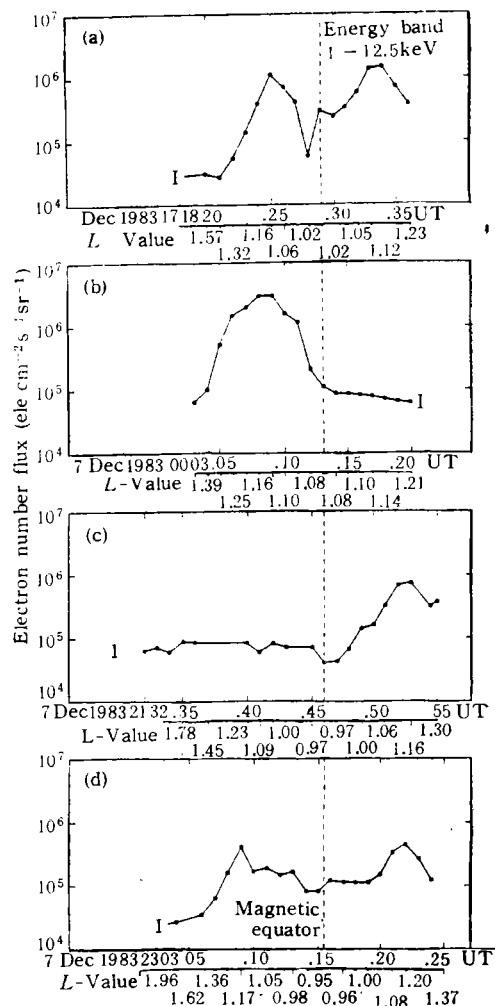


图 8 能量范围在 1—12.5 keV 的电子沉降通量随 UT 及磁壳参数 L 的分布

Fig. 8 Electron fluxes as a function of UT and L value for each of the four flight passes which recorded flux levels higher than 310 electrons $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$ in the energy range 1-12.5-keV

以,这是一种从下往上的电动力学耦合过程。从日地物理整体行为的角度来看当然从上(太阳)往下(行星际空间→磁层→热层(电离层)→中层→地面)的耦合是主要的。但自下往上的反作用的重要性已被越来越多的人认识到。具体到低纬赤道带电离层研究上,过去人们只注意到声重力波、潮汐风的作用,而对行星波的影响研究太少,致使低纬地区几个电离层参数的逐日起伏得不到合理的解释。目前虽然在这方面有所突破,但要真正找出逐日起伏的规律性还有大量工作要做。

电场沿磁力线传递,导致低纬地区的许多耦合并不是垂直上下地耦合,而是沿磁力线传递或延伸。例如,低纬 E 层的 Sq 电场沿磁力线传到磁赤道上空,产生 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 向上漂移,然后等离子体又沿磁力线扩散形成赤道异常。bubble 在磁赤道上空形成,沿磁力线延伸到赤道异常峰区。最近还有人提出,形成 bubble 前兆的小幅度波动是来源于低纬 E 层的波动并沿磁力线传到赤道上空^[34]。

前面提到的第六点是最近的新发现。如果呈双峰分布的大通量电子沉降频繁出现,将会产生可观的电离,导致加热等一系列动力学效应值得引起注意。

我国南方处于赤道异常峰区,这对我们研究峰区高层大气物理提供了有利的地理位置。由于高年峰的位置在台北、韶关、桂林、昆明一线,但整个大陆在这一线没有常规的电离层观测站。这不能不说是一个遗憾。

参 考 文 献

- [1] Matsushita, S., *J. Geophys. Res.*, Vol. **64**, p. 305, 1959.
- [2] Nielsen, E. and P. R. Chen, International Symposium on Radio Propagation, Beijing, p. 81, 1988.
- [3] Raghavarao, R. et al., WITS Handbook (Ed. by C. H. Liu and B. Edwards), University of Illinois, Vol. **1**, p. 48, 1988.
- [4] 陈培仁,空间科学学报,第 **9** 卷,第 280 页,1989.
- [5] Woodman, R. F., *J. Geophys. Res.*, Vol. **74**, p. 6249, 1970.
- [6] Shiraki, M., *Mém. Kakioka Magn. Obs.*, Vol. **16**, p. 29, 1974.
- [7] 陈培仁,地球物理学报,第 **32** 卷,第 225 页,1989.
- [8] 周立群和陈培仁,地球物理学报,第 **33** 卷,第 22 页,1990.
- [9] Rishbeth, H., *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. **43**, p. 387, 1981.
- [10] Fejer, B. G. et al., *J. Geophys. Res.*, Vol. **84**, p. 5792, 1979.
- [11] Heelis, et al., *Planet. Space Sci.*, Vol. **22**, p. 743, 1974.
- [12] Farley, D. T., E. Bonelli, B. G. Fejer and Larsen, *J. Geophys. Res.*, Vol. **91**, p. 13, 732, 1986.
- [13] Anderson, D. N. and J. A. Klobuchar, *J. Geophys. Res.*, Vol. **88**, p. 8082, 1983.
- [14] 陈培仁,空间科学学报,第 **7** 卷,第 241 页,1987.
- [15] 刘选谋,黄天锡和刘荣道,空间科学学报,第 **9** 卷,第 52 页,1989.
- [16] Huang, Y. N. et al., *J. Geophys. Res.*, Vol. **94**, p. 13515, 1989.
- [17] Rastogi, R. G. and S. Alex, *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. **49**, p. 1133, 1987.
- [18] 王伟平,电波科学学报,第 **3** 卷,第 64 页,1988.
- [19] Walker, G. O., *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. **43**, p. 579, 1981.
- [20] Huang, C. M., *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. **48**, p. 579, 1986.
- [21] Aarons, J., *Proceedings of the IEEE*, Vol. **70**, p. 360, 1982.
- [22] Basu, S., E. MacKenzie and S. Basu, *Radio Science*, Vol. **32**, p. 363, 1988.
- [23] Maitra, A. et al., *Radio Science*, Vol. **19**, p. 705, 1984.
- [24] Aarons, J. et al., *Radio Science*, Vol. **18**, p. 421, 1983.
- [25] Somayajulu, Y. V. et al., *Radio Science*, Vol. **19**, p. 707, 1984.
- [26] Lee, M. C. et al., *Radio Science*, Vol. **17**, p. 399, 1982.
- [27] Raghavarao, R. and M. R. Sivaraman, *Nature*, Vol. **249**, p. 331, 1974.

- [28] Raghavao, R. and M. R. Sivaraman, *Space Research*, Vol.15, p. 385, 1975.
- [29] Hedin, A. E. and H. G. Mayr, *J. Geophys. Res.*, Vol.78, p. 1688, 1973.
- [30] Hedin, A. E. and H. G. Mayr, *Space Research*, Vol.13, p. 315, 1973.
- [31] Vos, H. D. and L. G. Smith, *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol.42, p. 227, 1980.
- [32] Lien, R. et al., *J. Geophys. Res.*, Vol.93, p. 4131, 1988.
- [33] Larsen, T. R. et al., *J. Geophys. Res.*, Vol.82, p. 1519, 1977.
- [34] Klobuchar, J. A. and M. C. Lee, *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol.51, p. 733, 1989.

SOME FEATURES OF THE IONOSPHERE AT THE CREST REGION OF THE EQUATORIAL ANOMALY

Chen Pei-ren

(Center for Space Science and Applied Research, Academia Sinica, Beijing)

Abstract

The northern crest of the equatorial anomaly covers Southern China, therefore, the investigation of the ionospheric features of equatorial anomaly at crest is the key for understanding ionospheric characteristics over China. In this paper, 6 related topics are reviewed: 1. Day-to-day variations and the post sunset enhancement of the equatorial anomaly; 2. The movement of the crest; 3. Longitudinal structure of the equatorial anomaly; 4. Intensive scintillation and fast Faraday fading caused by bubble effects; 5. The ionization ledges in the topside ionosphere and the neutral anomaly; 6. Low-latitude electron precipitation, which is symmetric to the magnetic equator.

Key words Equatorial anomaly, Intensive scintillation, Neutral anomaly, Electron precipitation