

热层大气赤道异常的研究进展

雷久侯

(中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽合肥 230026)

摘要:热层大气赤道异常是指热层大气存在类似电离层赤道异常的驼峰结构,但其南北驼峰出现于磁纬 $\pm 20\sim 30^\circ$ 区域.热层赤道现象早在40年前就被发现,然而其形成机制一直是电离层学界研究的热点问题.前人陆续提出了化学加热及纬向风场拖曳作用等假说来解释热层赤道异常的形成,但基于这些假说得到的低纬热层结构与观测不符.最近研究发现,热层赤道异常槽与电离层驼峰的形成原因不同,离子与中性大气的场向拖曳作用形成热层赤道槽,且离子与中性气体相互碰撞引起的能量交换是热层赤道异常驼峰的形成机制.本文简述热层大气赤道异常的研究进展以及存在的科学问题.

关键词:电离层;热层赤道异常;空间天气

中图分类号:P352 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.0253-2778.2013.11.007

引用格式: Lei Jiuhou. A brief review of the equatorial thermosphere anomaly[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2013, 43(11): 922-928.

雷久侯. 热层大气赤道异常的研究进展[J]. 中国科学技术大学学报, 2013, 43(11): 922-928.

特
约
评
述

A brief review of the equatorial thermosphere anomaly

LEI Jiuhou

(School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: The equatorial thermosphere anomaly (ETA), a similar phenomenon to the equatorial ionization anomaly (EIA), is a feature of the upper thermosphere with two crests at $\pm 20\sim 30^\circ$ in magnetic latitude and a trough at the magnetic equator. Albeit the ETA was first reported in the N_2 observations from the OGO6 satellite back in the 1970s, the causes of the ETA formation and its variability are not well understood. Recent studies have revealed that neither heat transport due to zonal winds nor chemical heating can explain the formation of the ETA crests. Instead, it was found that plasma-neutral collisional heating and the field-aligned ion drag are the major contributors in producing the ETA crest and trough respectively. A brief review was given on some significant achievements gained to the mechanisms of the

收稿日期:2013-08-21;修回日期:2013-09-27

基金项目:国家自然科学基金(41325017, 41274157, 41174139)资助.

作者简介:雷久侯,中国科学技术大学教授、博士生导师,国家杰出青年科学基金获得者.2005年获中国科学院空间物理学博士学位.2005~2008年在美国国家大气研究中心(NCAR)电离层磁层研究组工作;2008~2011年在美国科罗拉多大学航天航空工程系从事热层大气方面的研究工作.2011年入选中组部首批“青年千人计划”,并全职回国到中国科学技术大学工作,被聘为教授.2010年曾获国际空间物理委员会(COSPAR) Zeldovich 青年科学家奖.近年来主要对热层大气变化特性及其相关物理机制、电离层与热层耦合过程以及电离层和热层暴时响应等国际较为关注的热点与难点问题开展研究.已发表SCI论文80余篇,其中以第一作者发表在J Geophys Res, Geophys Res Lett等SCI杂志上的文章27篇,共计被引用1200余次. E-mail: leijh@ustc.edu.cn



ETA formation and questions remaining about the physical processes for the ETA variability, which should be explored in the near future.

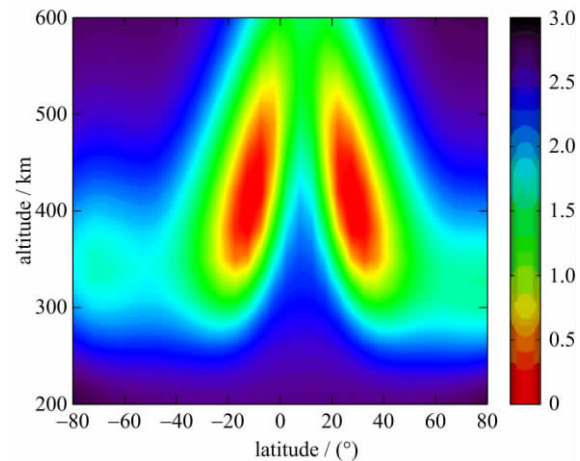
Key words: ionosphere; equatorial thermosphere anomaly; space weather

0 引言

电离层是位于地面以上大约 60~1 000 km 高度的区域,处于未电离的低层中性大气与更远的磁层之间,也是近地空间环境的重要组成部分^[1-2]. 由于受太阳紫外和极紫外以及 X 射线等辐射,该区域的中性大气被部分电离,从而存在大量带电粒子. 电离层电子浓度的变化及不规则结构等影响着卫星导航与地面通讯. 热层大气与电离层处于同一高度范围,是电离层高度上未被电离的中性背景大气. 热层大气的密度对卫星导航与定轨有着重要的作用. 电离层不但本身具有复杂的变化,还与背景中性大气相互耦合. 电离层及其与背景热层相互耦合过程是当前空间天气研究的前沿和热点,本文将重点介绍其中典型代表之一,即热层赤道异常及其与电离层赤道异常耦合的研究.

电离层赤道异常现象是指,电离层电子浓度在南北地磁纬度 15°左右的区域存在“双峰”结构,而在地磁赤道处出现电子浓度槽,称之为电离层赤道异常的“驼峰”结构. 该现象早在 1946 年被英国空间物理学家、诺贝尔物理奖获得者 Appleton 发现,并发表于国际著名期刊 Nature^[3],电离层赤道异常也被称为 Appleton 异常. 几乎同时,我国学者梁百先教授分析了 1946 年全球电离层测高仪观测的电离层电子临界频率 foF2 的分布与地磁纬度的关系,也发现类似于 Appleton 报道的电离层赤道异常现象,即赤道南北有驼峰结构. 该研究结果于 1947 年 11 月在 Nature 上发表^[4-5]. 因此,后来也有学者建议将电离层赤道异常称作 Appleton-Liang 异常. 电离层电子浓度的驼峰现象被归入异常类现象是该双峰结构受到地磁场的强烈影响,而电子密度分布不是简单受太阳辐射电离作用的主控. 前人的研究表明,电离层赤道异常的形成主要归因于白天 E 区(100 km 附近)的风场发电效应产生的电离层东向电场. 该电场产生垂直向上的等离子体漂移,等离子体随后在重力与场向扩散作用下在南北地磁纬度 15°区域形成堆积^[6]. 这一过程被称为电离层赤道“喷泉效应”. 图 1 给出利用美国国家大气研究中心建立的电离层-热层-电动力学耦合环流模式(NCAR TIEGCM)^[7]模拟

的白天电子浓度随高度和纬度的分布. 该图的结果对应太阳活动高年,经度为 110°E,该区域的地磁赤道位于地理北纬 10°左右. 由图 1 可见,数值模拟的电离层电子浓度的纬度结构特征与观测相符较好. 中国的广州、厦门一带经常处于北驼峰区域,因而该区域高的带电粒子密度对电波传播可产生较大影响. 电离层赤道异常的位置、强度呈现随地磁活动等变化的特点^[8]. 例如在地磁活动较为活跃期间,北驼峰可向北移至武汉等地区. 自电离层赤道异常发现以来,电离层赤道异常的变化特征一直是电离层物理研究的热点问题,包括其受地磁活动、太阳活动以及低层大气潮汐与波动的影响的过程与机理^[9-20].



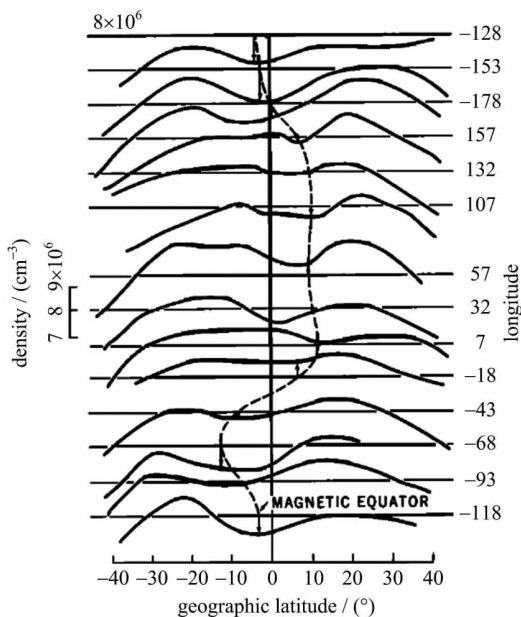
电子浓度的单位为 $10^{12}/\text{m}^3$,地方时为 14:00 点,经度为 110°E

图 1 白天电离层电子浓度随高度与纬度的变化

Fig. 1 Variation of daytime electron densities (in unit of $10^{12}/\text{m}^3$) as a function of altitude and latitude

热层大气赤道异常是与电离层赤道异常纬度相类似的大气结构. 该现象早在 20 世纪 70 年代被首次报道. Philbrick 等^[21-23]系列研究利用 OG6 卫星 N_2 的观测反演成热层大气温度的,发现热层温度在白天呈现类似电离层赤道异常的驼峰纬度结构,但其南北驼峰出现在磁纬 20~30°的区域. 显而易见,热层大气的驼峰出现在电离层赤道异常驼峰的极向一侧. 同时, Hedin 等^[22]将 OG6 卫星观测的 N_2 白天纬度剖面沿经度排列后发现一个有趣的结果,即热层大气赤道异常槽与地磁赤道的纬度吻合得较好(如图 2 所示). 随后, DE-2 及 AE 卫星提供有限的

热层大气温度纬度剖面也证实热层大气存在赤道异常现象,且驼峰与槽区温度差别可达 $40 \sim 100^\circ$ ^[24-27]. 由于平静期间的热层大气近似处于扩散平衡,前面提到的热层密度赤道异常结构可以认为主要由温度赤道异常导致,所以后文对热层大气赤道形成机制的讨论主要着重于热层大气温度的变化. 近年来 CHAMP 与 GRACE 卫星搭载的高精度加速仪能测量从南极到北极全纬度范围的热层大气密度的变化. 这些观测资料为系统研究热层赤道异常的变化规律提供了良好条件^[28-31]. Liu 等^[29] 利用多年积累的 CHAMP 卫星资料详细地研究了热层大气密度赤道异常结构随地方时、季节、经度、太阳活动及地磁活动等变化特征. 例如,图 3 给出利用卫星数据统计得到的中等太阳活动及春分期间 400 km 高度上白天热层大气密度赤道异常结构. 这些分析结果为进一步研究热层赤道异常现象的形成机制提供重要的参考依据.

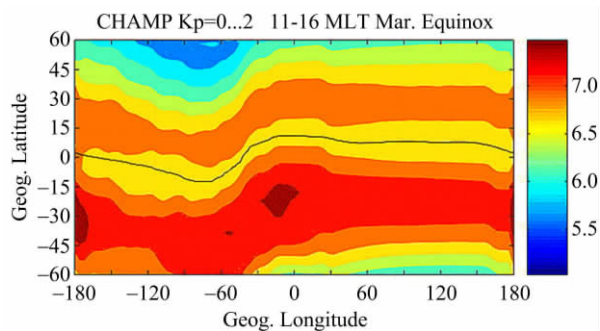


虚线表示磁赤道的所处的纬度
图 2 1969 年 9 月 22 日 OG6 卫星观测 450 km 高度处的氮气分子(N_2)浓度随纬度与经度的变化
(摘自 Hedin 等^[22])

Fig. 2 The measured N_2 densities at 450 km from the OG6 satellite on 22 September, 1969 (adapted from Hedin et al^[22])

1 热层赤道异常形成机制

既然热层大气不像带电粒子一样可直接受地磁场的控制,为什么 OG6 卫星观测的热层大气赤道异



黑线表示磁赤道的所处的纬度,密度单位为 10^{-12} kg/m^3
图 3 中等太阳活动及春分期间 CHAMP 卫星观测的白天热层大气密度随地理随纬度与经度的变化
(摘自 Liu 等^[29])

Fig. 3 Distribution of the dayside thermospheric mass density (in units of $10^{-12} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) from CHAMP over geographic coordinates under quiet geomagnetic conditions for a solar flux level of $F10.7=150$ (adapted from Liu et al^[29])

常槽位置与地磁赤道一致呢?为解释这一现象,早期的研究者提出:热层赤道异常现象具有与电离层赤道异常相类似的受地磁场控制特征,其原因可能是由电离层带电粒子与中性大气成分相互耦合过程导致.两者之间动量和能量耦合过程的多种观点陆续被提出. Hedin 等^[22] 早期建议,由于地磁赤道区域的低密度带电粒子对中性大气的阻尼作用小,中性大气在赤道区形成从白天向夜间的强烈流动,即高速的纬向风场;该过程同时将该区域“热”的中性气体输入夜间一侧,从而形成白天的热层赤道槽.该建议也被称为纬向拖曳机制.如果热层赤道异常是由纬向拖曳作用造成,那么夜侧的热层大气会形成与白天热层大气相反的纬度结构,即赤道区温度高、南北纬度 $30 \sim 40^\circ$ 出现温度槽.显然,上述特征与卫星观测结果不相符合.

1997 年,Fuller-Rowell 等^[32] 运用电离层热层数值模式模拟并考虑了中性大气的纬向拖曳作用,但不能重现热层赤道异常现象,他们的研究从而否定了纬向拖曳机制.同时,他们提出化学加热机制来解释热层赤道异常现象.电离层 F2 层(约 300 km 高度)带电离子主要由 O^+ 组成, O^+ 与 N_2 发生复合反应时的放热反应成为中性大气的加热源, O^+ 浓度高的区域也就是电离层赤道异常驼峰处的放热率最强,从而形成热层异常驼峰.该机制既简单又形象,多年来广为电离层学界接受.但是这种机制不能解释热层赤道异常驼峰与电离层赤道异常驼峰出现的

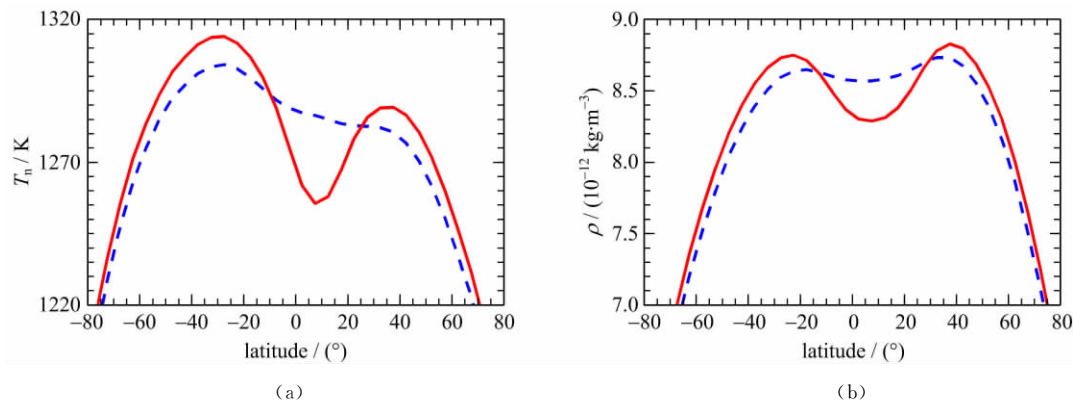
纬度差异. 如果热层大气赤道异常是由电离层化学加热引起, 则热层和电离层驼峰的位置以及它们的经度变化应该一致. 后来, Pant 等^[26]认为化学加热机制可解释热层大气赤道异常的 30%, 而其余的 70% 由纬向拖曳机制来解释. Raghavarao 等^[33]进一步分析发现, 即使联合化学加热和纬向拖曳机制亦不能解释热层大气赤道异常的形成.

上述提及的解释机制大多停留在推断的层面, 且未能计算或者重现热层大气赤道异常的观测特征. Maruyama 等^[34]根据三维电离层热层耦合模式模拟建议, 场向离子拖曳作用导致场向风场的发散以及赤道区的绝热膨胀冷却, 从而形成热层大气赤道槽. 该研究推进了对热层赤道异常的机制研究. 但遗憾的是, Maruyama 等利用的模式并没有自洽的低纬电离层模式, 因而不能研究该区域的带电粒子与中性大气的相互耦合过程. 另外, 他们建议热层赤道驼峰的出现是由于赤道槽导致的, 这不能解释热层赤道异常驼峰与电离层赤道异常驼峰出现的纬度差异.

近年来, Lei 等^[35-36]通过完善现有的全球电离层热层耦合模式 TIEGCM, 并结合多年的卫星观测数据, 详细研究了热层赤道异常的形成机制. 我们通过系统的控制模拟实验, 发现前人假设中的化学加热及纬向风场拖曳作用均不能解释热层赤道异常的形成. 带电粒子通过化学加热供给中性气体的能量能使中性温度增加达到 120 K, 但化学加热率随纬度的差异太弱, 并不能形成热层赤道异常. 同时, 纬向风场在赤道区会形成向夜侧的较强风速, 这主要是纬向拖曳力需与压力梯度力平衡的结果. 模式模拟的纬向风场与 Hedin 等^[22]相符, 同时也与

CHAMP 观测风场一致. 但是, Hedin 等所建议的纬向风场拖曳只能使温度总体变化 30 K 左右, 该机制也不能解释热层赤道异常的特征.

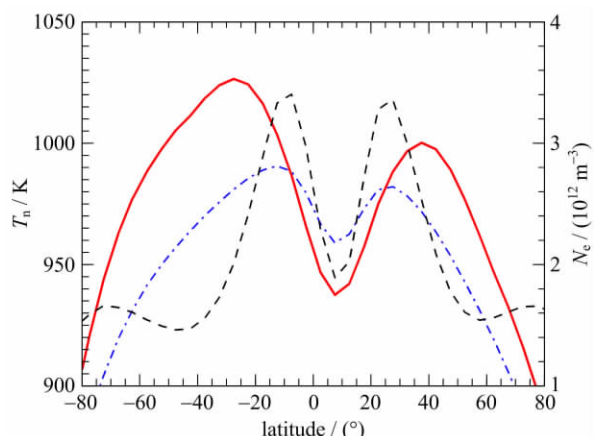
Lei 等^[35-36]进一步的研究发现, 热层赤道异常槽与电离层驼峰的形成原因不同. 如图 4 所示, 引入场向离子拖曳作用后磁赤道的温度下降达 30 K, 但中高纬区域温度呈现弱的增加. 图 4 中结果对应的峰—槽温度差为 46 K, 400 km 高度的热层密度的峰—槽比为 1.06. 该研究结果表明, 场向离子拖曳作用导致场向风场的发散以及赤道区的绝热膨胀冷却, 之后导致中性大气场向压力梯度以及热传导发生, 以平衡绝热膨胀效应, 从而形成稳定的赤道槽. 同时, 模拟结果显示垂直风场在日落后是向下, 这与 DE-2 卫星的观测基本相符, 而日落之前为向上. 该结果表明, 场向离子拖曳作用只是在背景的垂直风场上叠加一个向上分量. 一个更重要的发现是, 热层赤道异常驼峰并不是由场向离子拖曳导致赤道槽而自然出现的产物, 而是由离子与中性气体相互碰撞引起的能量交换形成. 如图 5 所示, 当忽略离子与中性气体相互碰撞加热的过程时, 中性大气在引入场向离子拖曳作用条件下, 热层温度只出现 30 K 左右的赤道槽, 且赤道异常驼峰位置与电离层赤道异常驼峰的位置基本一致, 这与观测不相符. 通过系列控制模拟实验发现, 离子与中性气体相互碰撞加热的纬度结构可决定电离层赤道异常驼峰与热层赤道异常驼峰纬度差异. 离子与中性气体相互碰撞加热率可以近似表示为 $N_e^2 (T_e - T_i)$, 其中 N_e 为电离层电子浓度, T_e 为电子温度, T_i 为离子温度. 由于电子浓度在电离层驼峰纬度占优, 而温度项 ($T_e - T_i$)



虚线表示忽略场向离子拖曳作用, 实线表示引入场向离子拖曳作用. 地方时为 14:00 点, 经度为 110°E

图 4 理论模式模拟 400 km 高度的热层大气温度(a)及密度(b)随纬度的变化

Fig. 4 Comparison of neutral temperature (a) and mass density (b) at 400 km with (solid line) and without (dashed line) field-aligned ion drag effect in the TIEGCM simulations



实线表示包括场向离子拖曳及离子-中性碰撞加热作用, 虚点线表示包括场向离子拖曳作用但忽略离子-中性碰撞加热.

间断线表示电离层 F2 层最大电子浓度.

地方时为 14:00 点, 经度为 110°E.

为了便于比较, 实线温度已经减去 320 K

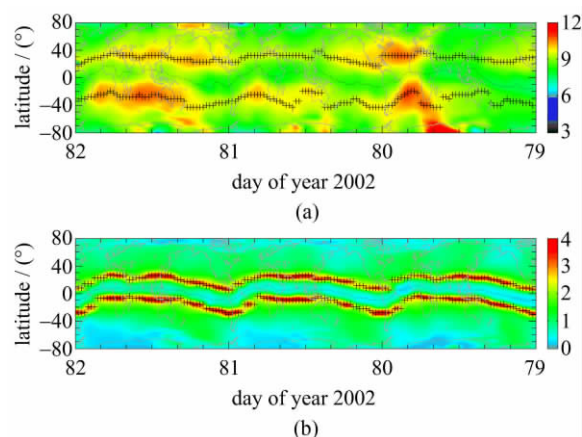
图 5 理论模式模拟不同条件下热层大气逃逸温度随地理纬度的分布

Fig. 5 Comparison of exospheric temperature with (solid line) and without (dash-dotted line) the plasma-neutral collisional heating in the TIEGCM simulations

在低纬区域较小且随纬度增加而增加, 尤其在顶部电离层高度. 鉴于电子浓度与温度项两者的纬度变化, 则离子与中性气体碰撞加热峰值出现在电离层赤道驼峰极向一侧, 且通过热传导向下传递引起热层高度温度形成双驼峰. 我们^[35-36]的模拟结果与观测现象较为一致, 并解释了热层赤道异常随纬度、地方时及经度的变化特征.

2 热层赤道异常的研究展望

CHAMP 卫星观测表明, 热层赤道异常结构具有明显的时空变化^[37]. 如图 6 所示, 电离层赤道异常槽与热层赤道异常槽的纬度位置吻合较好, 而两者的驼峰位置差别显著; 热层赤道驼峰的位置往往位于电离层赤道驼峰极向侧, 两者相距 10~15°. 同时可以看出, 热层赤道驼峰大气密度呈现波数为 1 的经度变化, 而电离层赤道驼峰处的电子浓度表现为波数 4 的经度变化特征. 近期大量研究^[14-20]将电离层热层赤道异常经度变化归因于非迁移潮汐对电离层热层的直接/间接贡献, 同时地磁场位性对其也有着重要调制作用. 图 7 显示电离层与热层赤道异常均受地磁活动强烈调制, 且带电粒子与中性大气的变化受地磁活动的调制明显不同. 图 6 也揭示了热层赤道异常存在半球不对称性和逐日变化并受地

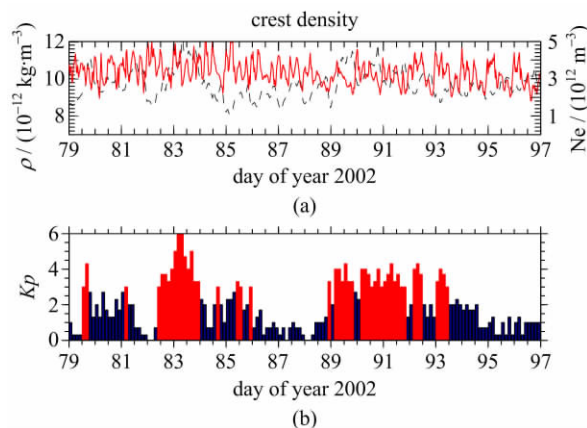


图中世界时按从右到左的顺序标注

热层大气密度单位为 $10^{-12} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 电子浓度单位为 10^{12} m^{-3}

图 6 2002 年第 79~81 天期间 CHAMP 卫星同时观测的热层大气密度(a)与电离层电子浓度(b)的经度与时间演变

Fig. 6 The simultaneous neutral mass density (a) and electron density (b) from the CHAMP satellite at around 19 LT in Equinox (day 79~81 in 2002)



由于卫星在一天内不同时间探测不同经度, 该图中每天的变化也包括电离层和热层的经度变化. (b)图中红色柱形代表 $Kp \geq 3$

图 7 2002 年第 79 至 96 天期间 CHAMP 卫星观测的热层大气密度((a)图虚线)与电子浓度((a)图实线)驼峰强度以及地磁活动指数 Kp ((b)图)随时间的变化

Fig. 7 Variation of the simultaneous neutral mass density ((a), dashed line) and electron density ((a), solid line) at the ETA and EIA crests from the CHAMP satellite at around 19 LT during Equinox (day 79~96 in 2002), and Kp index is shown in (b) (red bars for $Kp \geq 3$)

磁活动的强烈影响. 另外需要指出的是, Miyoshi 等^[38]推测低层大气 8 h 的迁移潮汐是形成热层赤道异常的原因, 但他们的结果只能再现热层密度的双峰结构, 而给出的温度与卫星观测不一致, 因此低层大气 8 h 的迁移潮汐的贡献需要进一步研究分

析. 另外, CHAMP 卫星的观测数据显示夜间也有可能出现类似白天的热层赤道异常结构, 尽管夜间驼峰现象出现率较低^[39]. 因此, 一系列关于热层赤道异常结构的变化特性的科学问题有待于解答:

① 除了场向离子拖曳和离子-中性气体碰撞加热, 低层大气 8 h 迁移潮汐对热层赤道异常的形成影响如何?

② 电离层与热层赤道异常受非迁移潮汐的影响而产生的经度变化有何异同?

③ 热层赤道异常结构如何受磁场位形和地磁活动等因素的调制?

④ 太阳活动与地磁活动如何直接调制电离层热层以及如何通过影响电离层热层相互耦合间接影响电离层热层赤道异常?

⑤ 太阳活动高年与低年间太阳辐射通量和低层潮汐如何相互竞争并影响热层赤道异常的变化特征?

⑥ 夜间热层赤道异常结构的形成原因是什么?

3 结论

对热层赤道异常形成机制的研究加深了对热层光化学与动力学过程的认识, 并将推动热层-电离层耦合机制方面的研究进展. 过去几十年里, 电离层学界一直认为化学加热和离子-中性动量耦合是热层赤道异常形成的主要原因, 而忽略了离子与中性气体间能量交换过程. 该类研究将为热层大气模式预报提供理论依据, 有助于预报精度的提高, 对卫星轨道设计及航天活动、通讯、导航和国防安全等有着重要的应用意义. 但是, 我们必须认识到热层赤道异常存在有复杂、显著的时空变化, 诸多相关电离层热层相互耦合的科学问题还有待更加深入的研究. 我国正在进行的大科学工程“子午工程”^[40]以及神舟飞船系列、天宫飞行器提供的电离层热层观测为研究电离层热层相互耦合问题提供了条件^[41], 同时对相关耦合问题的研究也将有助于磁层-电离层-热层(MIT)等预研卫星科学问题的提炼.

参考文献(References)

- [1] Rishbeth H, Garriott O K. Introduction to Ionospheric Physics [M]. New York: Academic Press, 1969.
- [2] Xiao Zuo. Researches on ionospheric physics in recent years in China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1997, 40(S1): 21-28.
肖佐. 近年来中国电离层物理研究进展 [J]. 地球物理学报, 1997, 40(S1): 21-28.
- [3] Appleton E V. Two anomalies in the ionosphere [J]. Nature, 1946, 157: 691-693.
- [4] Liang P H. F2 ionization and geomagnetic latitudes [J]. Nature, 1947, 160: 642.
- [5] Liang Baixian, Li Jun, Ma Shuying. Progress of ionospheric research in China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1994, 37(S1): 51-73.
梁百先, 李钧, 马淑英. 我国的电离层研究 [J]. 地球物理学报, 1994, 37(S1): 51-73.
- [6] Hanson W B, Moffett R J. Ionization transport effects in the equatorial F region [J]. J Geophys Res, 1966, 71: 5 559-5 572.
- [7] Richmond A D, Ridley E C, Roble R G. A thermosphere/ionosphere general circulation model with coupled electrodynamics [J]. Geophys Res Lett, 1992, 19: 601-604.
- [8] Chen Peiren. Some features of the ionosphere at the crest region of the equatorial anomaly [J]. Chinese Journal of Space Science, 1990, 10(3): 221-229.
陈培仁. 赤道异常峰区电离层的某些特点 [J]. 空间科学学报, 1990, 10(3): 221-229.
- [9] Abdu M A, Sobral J H A, De Paula E R, et al. Magnetospheric disturbance effects on the Equatorial Ionization Anomaly (EIA): An overview [J]. J Atmos Sol Terr Phys, 1991, 53: 757-771.
- [10] Buonsanto M J. Ionospheric storms: A review [J]. Space Sci Rev, 1999, 88: 563-601.
- [11] Prölss G W. Ionospheric F-region storms [M]// Volland H. Handbook of Atmospheric Electrodynamics. CRC Press, 1995: 195-248.
- [12] Lei J, Wang W, Burns A G, et al. Observations and simulations of the ionospheric and thermospheric response to the December 2006 geomagnetic storm: Initial phase [J]. J Geophys Res, 2008, 113(A1): A01314; doi:10.1029/2007JA012807.
- [13] Chen Peiren. Planetary-scale oscillation of the equatorial anomaly [J]. Chinese Journal of Space Science, 1987, 7(3): 241-246.
陈培仁. 赤道异常的行星波振荡 [J]. 空间科学学报, 1987, 7(3): 241-246.
- [14] Immel T J, Sagawa E, England S L, et al. The control of equatorial ionospheric morphology by atmospheric tides [J]. Geophys Res Lett, 2006, 33: L15108; doi: 10.1029/2006GL026161.
- [15] England S L, Immel T J, Sagawa E, et al. Effect of atmospheric tides on the morphology of the quiet time, postsunset equatorial ionospheric anomaly [J]. J Geophys Res, 2006, 111: A10S19; doi: 10.1029/2006JA011795.
- [16] Hagan M E, Maute A, Roble R G, et al. Connections

- between deep tropical clouds and the Earth's ionosphere [J]. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L20109; doi:10.1029/2007GL030142.
- [17] Lin C H, Wang W, Hagan M E, et al. Plausible effect of atmospheric tides on the equatorial ionosphere observed by the FORMOSAT-3/COSMIC: Three-dimensional electron density structures [J]. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L11112; doi:10.1029/2007GL029265.
- [18] Wan W, Liu L, Pi X, et al. Wavenumber-4 patterns of the total electron content over the low latitude ionosphere [J]. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L12104; doi:10.1029/2008GL033755.
- [19] Wan W, Ren Z, Ding F, et al. A simulation study for the couplings between DE3 tide and longitudinal WN4 structure in the thermosphere and ionosphere [J]. *J Atmos Sol Terr Phys*, 2012, 90: 52-60.
- [20] Ren Z, Wan W, Xiong J, et al. Simulated wave number 4 structure in equatorial F-region vertical plasma drifts [J]. *J Geophys Res*, 2010, 115: A05301; doi:10.1029/2009JA014746.
- [21] Philbrick C R, McIsaac J P. Measurements of atmospheric composition near 400 km [J]. *Space Res*, 1972, 12: 743-750.
- [22] Hedin A E, Mayr H G. Magnetic control of the near equatorial neutral thermosphere [J]. *J Geophys Res*, 1973, 78: 1 688-1 691.
- [23] Mayr H G, Hedin A E, Reber C A, et al. Global characteristics in the diurnal variations of the thermospheric temperature and composition [J]. *J Geophys Res*, 1974, 79: 619-628.
- [24] Raghavarao R, Wharton L E, Spencer N W, et al. An equatorial temperature and wind anomaly (ETWA) [J]. *Geophys Res Lett*, 1991, 18: 1 193-1 196.
- [25] Raghavarao R, Hoegy W R, Spencer N W, et al. Neutral temperature anomaly in the equatorial thermosphere: A source of vertical winds [J]. *Geophys Res Lett*, 1993, 20: 1 023-1 026.
- [26] Pant T K, Sridharan R. Plausible explanation for the equatorial temperature and wind anomaly (ETWA) based on chemical and dynamical processes [J]. *J Atmos Sol Terr Phys*, 2001, 63: 885-891.
- [27] Raghavarao R, Suhasini R, Hoegy W R, et al. Local time variation of equatorial temperature and zonal wind anomaly (ETWA) [J]. *J Atmos Sol Terr Phys*, 1998, 60: 631-642.
- [28] Liu H, Lühr H, Henize V, et al. Global distribution of the thermospheric total mass density derived from CHAMP [J]. *J Geophys Res*, 2005, 110: A04301; doi:10.1029/2004JA010741.
- [29] Liu H, Lühr H, Watanabe S. Climatology of the equatorial thermospheric mass density anomaly [J]. *J Geophys Res*, 2007, 112: A05305; doi:10.1029/2006JA012199.
- [30] Liu H, Yamamoto M, Lühr H. Wave-4 pattern of the equatorial mass density anomaly: A thermospheric signature of tropical deep convection [J]. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: L18104; doi:10.1029/2009GL039865.
- [31] Lei J, Matsuo T, Dou X, et al. Annual and semiannual variations of thermospheric density: EOF analysis of CHAMP and GRACE data [J]. *J Geophys Res*, 2012, 117: A01310; doi:10.1029/2011JA017324.
- [32] Fuller-Rowell T J, Codrescu M V, Fejer B G, et al. Dynamics of the low-latitude thermosphere: Quiet and disturbed conditions [J]. *J Atmos Terr Phys*, 1997, 61: 1 533-1 540.
- [33] Raghavarao R, Suhasini R. Equatorial temperature and wind anomaly (ETWA): A review [J]. *J Atmos Sol Terr Phys*, 2002, 64: 1 371-1 381.
- [34] Maruyama N, Watanabe S, Fuller-Rowell T J. Dynamic and energetic coupling in the equatorial ionosphere and thermosphere [J]. *J Geophys Res*, 2003, 108 (A11): 1396; doi:10.1029/2002JA009599.
- [35] Lei J, Thayer J P, Wang W, et al. Simulations of the equatorial thermosphere anomaly: Field-aligned ion drag effect [J]. *J Geophys Res*, 2012, 117 (A1): A01304; doi:10.1029/2011JA017114.
- [36] Lei J, Thayer J P, Wang W, et al. Simulations of the equatorial thermosphere anomaly: Physical mechanisms for crest formation [J]. *J Geophys Res*, 2012, 117 (A6): A06318; doi:10.1029/2012JA017613.
- [37] Lei J, Thayer J P, Forbes J M. Longitudinal and geomagnetic activity modulation of the equatorial thermosphere anomaly [J]. *J Geophys Res*, 2010, 115 (A8): A08311; doi:10.1029/2009JA015177.
- [38] Miyoshi Y, Fujiwara H, Jin H, et al. Model study on the formation of the equatorial mass density anomaly in the thermosphere [J]. *J Geophys Res*, 2011, 116 (A5): A05322; doi:10.1029/2010JA016315.
- [39] Liu J, Liu L, Zhao B, et al. On the relationship between the postmidnight thermospheric equatorial mass anomaly and equatorial ionization anomaly under geomagnetic quiet conditions [J]. *J Geophys Res*, 2011, 116: A12312; doi:10.1029/2011JA016958.
- [40] Wang C. New chains of space weather monitoring stations in China [J]. *Space Weather*, 2010, 8(8); doi: 10.1029/2010SW000603.
- [41] Qin Guotai, Qiu Shiyan, He Aiqing, et al. Changes of the atmospheric density at SZ-3 orbit altitude [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2004, 24(4): 269-274. 秦国泰, 邱时彦, 贺爱卿, 等. “神州 3 号”运行高度上大气密度的变化 [J]. *空间科学学报*, 2004, 24 (4): 269-274.