

刘裔文,徐继生,徐良等. 顶部电离层和等离子体层电子密度分布——基于 GRACE 星载 GPS 信标测量的 CT 反演. 地球物理学报, 2013, 56(9): 2885-2891, doi:10.6038/cjg20130902.

Liu Y W, Xu J S, Xu L, et al. Electron density distribution in the upper ionosphere and plasmasphere——CT imaging based on GRACE GPS data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2013, 56(9): 2885-2891, doi:10.6038/cjg20130902.

顶部电离层和等离子体层电子密度分布 ——基于 GRACE 星载 GPS 信标测量的 CT 反演

刘裔文¹, 徐继生^{1*}, 徐良¹, 尹凡¹, 马淑英¹, H. Lühr²

¹ 武汉大学电子信息学院, 武汉 430072

² Germany Research Center for Geoscience, Telegrafenberg, 14473 Potsdam, Germany

摘 要 本文利用两颗跟飞的 GRACE 卫星载 GPS 信标测量数据和基于差分相对 TEC 的层析算法, 实现了全球范围的顶部电离层和等离子体层(450~5000 km)层析成像. 反演结果表明, 利用低轨道卫星载 GPS 信标测量数据可以有效地重建顶部电离层和等离子体层的全球二维分布图像. 对不同地磁活动条件下的天基层析反演结果表明, 等离子体层电子密度随纬度的分布是不均匀的; 在低纬赤道带, 从顶部电离层向上延伸直到等离子体层, 以及等离子体层中局地的电离增强云团, 经常出现近似垂直于磁力线的电子密度柱状增强结构.

关键词 电离层, 等离子体层, 层析, 全球定位系统, GRACE 卫星, 电子密度增强结构

doi:10.6038/cjg20130902

中图分类号 P352

收稿日期 2012-10-08, 2013-06-05 收修定稿

Electron density distribution in the upper ionosphere and plasmasphere ——CT imaging based on GRACE GPS data

LIU Yi-Wen¹, XU Ji-Sheng^{1*}, XU Liang¹, YIN Fan¹, MA Shu-Ying¹, H. Lühr²

¹ School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China

² Germany Research Center for Geoscience, Telegrafenberg, 14473 Potsdam, Germany

Abstract Based on TEC data measured by the GRACE-borne GPS receivers, and the tomography algorithm with the differential relative TEC, the tomographic imaging of the topside ionosphere and plasmasphere (450 km to 5000 km) has been carried out in this paper. It has been demonstrated that CT reconstruction based on the LEO-GPS data is an efficient technological way to obtain the global 2-D electron density distribution of the topside-ionosphere and plasmasphere. A few topside electron density profiles reconstructed under both quiet and storm conditions show that the electron density distribution with latitude in the plasmasphere is generally uneven. Some interested phenomena have been detected in the low latitude and equatorial zone, which include column-like enhanced electron density structures that usually extend from the topside ionosphere up to the plasmasphere approximatively vertical to the magnetic field lines, as well as some local enhanced density cluster in the plasmasphere.

Keywords Ionosphere, Plasmasphere, Computerized tomography, GPS, GRACE, Column-like electron density enhancement

基金项目 国家自然科学基金项目(41274160, 40974087)和国家国际科技合作专项(2011DFA22270)资助。

作者简介 刘裔文, 男, 1986 年生, 2007 年毕业于南昌大学, 现为武汉大学博士研究生, 主要从事电离层和电波传播研究。

E-mail: liuyiwen@whu.edu.cn

* **通讯作者** 徐继生, 男, 武汉大学电子信息学院教授、博士生导师, E-mail: jsxu@whu.edu.cn

1 引言

1986年,美国伊利诺大学波传播实验室首次提出电离层层析(简称CT)的构想^[1-2].随后,国际上多个研究小组先后开展电离层CT探测与研究,取得了一系列有意义的成果,表明电离层CT是一种强有力的电离层探测技术^[3-6].叶公节等通过理论分析讨论了电离层CT的潜力及其局限性^[7].

1994年,24颗GPS卫星星座布设完成,利用遍布全球的GPS接收台网,开展地基电离层CT探测成为可能.20世纪90年代中后期,已有一些研究者提出利用GPS台网测量数据开展电离层CT成像^[8-9].为将电离层CT从准静态二维推广到时变三维,还有一些小组先后研究了时变三维电离层CT的原理和算法,并给出了初步的研究结果^[10-13].不过,仅用地基GPS接收台网的观测数据反演电离层电子密度分布存在严重的局限性,一个主要的问题是数据严重不完备,特别是缺少近水平向的射线,导致重建的电子密度分布,其垂直分辨率较低.为改善反演质量,提高垂直分辨率,一些研究者先后把GPS掩星数据和电离层垂测数据加入到电离层CT反演中,以补充近水平向射线的缺失^[14-15].

对于地基CT反演,沿传播路径的电子密度质心高度通常在350 km和450 km之间,射线在1000 km以上的部分对总电子含量(简称TEC)的贡献很小,所以地基CT探测区域的高度范围通常取在100~1000 km.利用电离层电子密度分布模型,通过正演可估计出,对于轨道高度在500 km上下的低轨卫星,沿传播路径的电子密度质心高度通常在1000 km上下,因此,利用低轨卫星载GPS双频信标测量解算的TEC数据与合适的CT反演算法,得到低轨卫星高度以上顶部电离层和等离子体层的电子密度分布的信息,是一条有效的技术途径.最近,Yizengaw等曾利用FedSat卫星GPS信标观测数据,开展天基CT反演,重建顶部电离层和等离子体层电子密度分布,得到了一些有意义的结果^[16-17].

本文将利用两颗跟飞的GRACE卫星载GPS双频信标测量解算的TEC数据,借助差分相对TEC层析算法,开展全球范围的顶部电离层和等离子体层(450~5000 km)天基CT成像.对不同地磁活动条件下的CT反演结果表明,等离子体层电子密度随纬度的分布是不均匀的;在低纬赤道带,经常出现近似垂直于磁力线的电子密度柱状增强结构,

从顶部电离层向上延伸直到等离子体层.在下一节,将首先介绍基于差分相对TEC的层析算法,然后介绍所使用的数据,在第4节将给出磁静日和不同强度磁扰动条件下的CT反演结果,最后给出总结和简要的讨论.

2 原理和算法

CT技术的基础是所谓“投影”(projections),即介质对波作用的积分效应,它可以表述为,已知待测量穿过探测区域的线积分,重建待测参量的空间分布.在天基电离层-等离子体层CT反演问题中,线积分是沿GPS卫星信标发射机至低轨卫星载信标接收机路径的TEC,而待测量为探测区域内的电子密度分布.观测方程为

$$N_{T_i} = \int_{S_i} Ne(\mathbf{r}) ds, \quad (1)$$

式中 S_i 表示GPS卫星至低轨卫星载信标接收机的第 i 条射线传播路径, N_{T_i} 表示沿 S_i 的TEC, $Ne(\mathbf{r})$ 表示沿路径的电子密度分布, \mathbf{r} 是位置矢量.

借助计算机数值求解,需要将方程(1)离散化,把探测区域沿垂直和子午方向划分为 N 个网格,观测方程变为

$$d_i = \sum_{j=1}^N Ne_j \int_{S_i} b_j ds = \sum_{j=1}^N a_{ij} Ne_j, \quad (2)$$

式中 d_i 表示沿第 i 条射线测量的TEC, a_{ij} 表示第 i 条射线穿过第 j 个网格的截距, b_j 是基函数, Ne_j 表示第 j 个网格中的电子密度.

对于不同的接收机,存在不同的硬件偏差和整周模糊度,导致在同一时刻沿同一路径测量的TEC的量值不一致.精确消除这种硬件造成的一致性很困难.一些作者先后提出,用差分相对TEC进行反演,可以回避硬件造成的一致性这一难题^[18-19].计算相对TEC的差要求对每一段连续的数据进行,求第 k 条射线和第1条射线之差后,由(2)式可以得到

$$\delta d_{k1} = d_k - d_1 = \sum_{j=1}^N Ne_j (a_{kj} - a_{1j}). \quad (3)$$

若有 M 个形如(3)式的差分表达式,则离散化的观测方程可写成矩阵形式,

$$\mathbf{D} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{X}, \quad (4)$$

式中 \mathbf{D} 是一个列向量,表示沿 M 条路径的差分相对TEC, \mathbf{A} 表示 $M \times N$ 维系数矩阵, \mathbf{X} 也是一个列向量,表示待测的各网格内的电子密度.

于是,CT 问题转化为线性代数方程组(4)的求解问题. 为求解(4)式,本文利用代数重建算法(ART)来重建电子密度二维分布. ART 是一种迭代算法,在每一次迭代过程中计算观测值与上一轮迭代结果之差,然后根据这个差值对待测量反复修正,最终得到一个稳定的收敛解.在数据不完备的条件下,选择迭代过程所需要的合适的初始分布非常重要.

3 数据

2002 年,德国航空中心与美国国家航空航天局合作,发射升空了 GRACE 卫星. GRACE 卫星星座含两颗跟飞的小卫星,即 GRACE-A 和 GRACE-B,两颗卫星在同一轨道面内,前后相距约 200 km,都为近极圆轨道,轨道倾角为 89° ,轨道设计高度为 500 km,运行周期约 1.57 h. 两颗 GRACE 卫星都载有 GPS 双频信标接收机. 本文所使用的 GRACE 卫星 GPS 信标观测数据采样间隔为 10 s,在相邻两次采样时间内,卫星飞行了约 70 km. 为了获得较好的射线覆盖,同时又能近似作为一个二维问题进行反演,本文定义满足以下条件的射线为有效射线:从 GRACE 卫星轨道高度至 5000 km 高度,射线与 GRACE 卫星轨道面的夹角都在 $\pm 15^\circ$ 之内. 图 1 给出 GRACE-GPS 有效射线覆盖的一个示例.

从图 1 中可以看出,两个半球绝大部分区域都有很好的射线覆盖,且由于每颗 GPS 卫星同时被 GRACE-A 和 GRACE-B 接收,因此覆盖区域的射

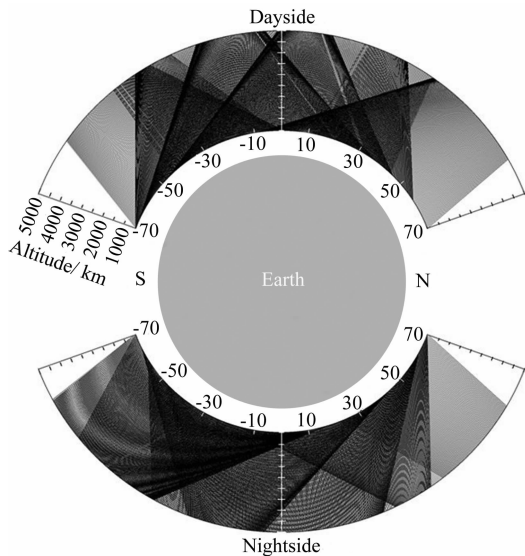


图 1 GRACE-GPS 射线覆盖示意图

Fig. 1 A sketch map of the coverage for the GRACE-GPS effective ray paths

线交叉情况也较好,有利于 CT 反演. 不过,由于 GPS 卫星轨道面倾角只有 55° ,在高纬地区较高高度上,没有射线覆盖.

图 2a 和图 2b 分别给出了地基 GPS 台站观测到的 TEC 和 GRACE 卫星观测到的 TEC 及相应的接收机对 GPS 卫星仰角随时间的变化. 从图 2a 可以看出,当仰角较低时,地基 GPS 台站观测到的相对 TEC 曲线出现周跳和明显的快速随机起伏,这主要是多路径效应所引起. 这种现象经常出现,因此,在地基 CT 中,只有较高仰角的射线可用,缺少接近水平向的射线,数据严重不完备. 这导致反演得到的电子密度分布垂直分辨率较低. 从图 2b 可以看出,GRACE 卫星观测到的相对 TEC,即使在仰角低至 0° 时依然很平滑,没有周跳和明显抖动. 所以,对于天基 CT,仰角接近 0° 的射线依然可以使用,有利于改善反演结果的垂直分辨率,这是天基 CT 与地基 CT 相比的优势之一. 此外,地表大部分区域为海洋所覆盖,在海洋覆盖的区域,无法获取地基测量数据进行 CT 反演,对于天基 CT,则不受此限制,这是天基 CT 与地基 CT 相比的另一优势.

4 反演结果

本文设定 CT 反演区域的高度范围从 450 km

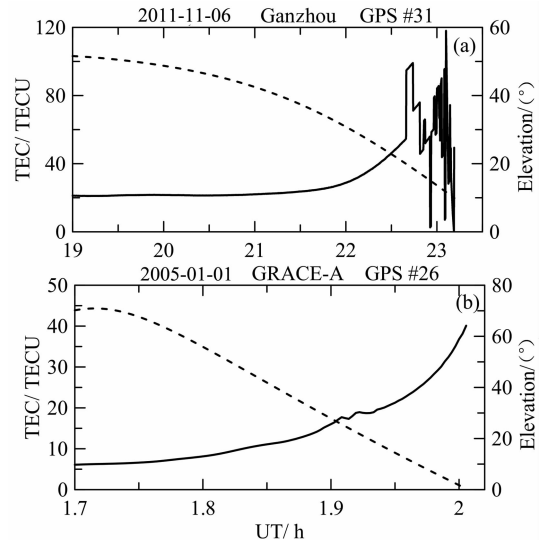


图 2 地基观测台站测量的斜 TEC(a) 和 GRACE-A 卫星接收机测量的斜 TEC(b) 比较. 实线代表斜 TEC, 虚线代表仰角

Fig. 2 A comparison of slant TEC measured by ground-based GPS receiver (a) and slant TEC from GRACE-A borne receiver (b). The solid and the dash lines represent variations of TEC and elevation with universal time, respectively

至 5000 km, 纬度范围从 70°S 至 70°N. 在南北方向均匀划分网格, 网格尺度为 1° (~110 km). 在垂直方向, 取不等间距网格, 1000 km 以下高度, 网格尺度为 50 km; 1000 至 2000 km 高度, 网格尺度为 100 km; 高度在 2000 km 以上, 网格尺度为 200 km.

图 3 是利用上述算法得到的一个反演实例, 以及反演结果与 CHAMP 卫星实测电子密度和 DMSP-F13 卫星实测离子密度的比较.

图 3a 中在约 800 km 以下, 赤道电离异常结构

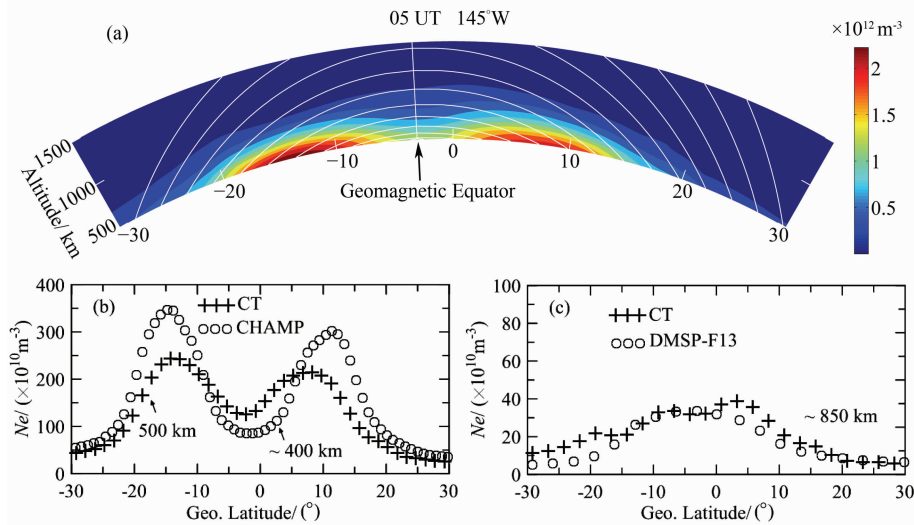


图 3 2003 年 4 月 4 日 CT 反演得到的电子密度剖面(a); 以及反演结果分别与 CHAMP 卫星实测结果(b)和 DMSP-F13 卫星实测结果(c)对比图

Fig. 3 Reconstructed 2-D electron density profile on April 04, 2003 (a); and comparison of reconstructed electron density at 500 km and electron density measured by CHAMP at about 400 km (b); and comparison of reconstructed electron density at 850 km and plasma density measured by DMSP-F13 at about 850km (c)

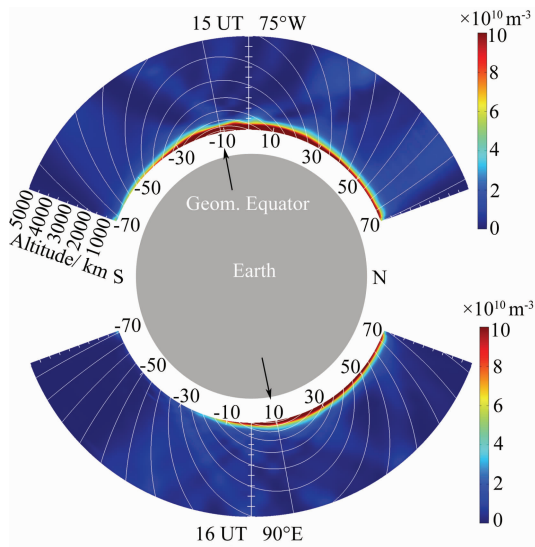


图 4 2004 年 6 月 27 日 CT 反演得到的全球范围顶部电离层-等离子体层电子密度二维剖面

Fig. 4 Reconstructed 2D plasma density profile of the topside ionosphere and plasmasphere on June 27, 2004

清晰可见. 从图 3b 可以看出, CHAMP 卫星载探针实地测量得到的电子密度与本文反演得到的电子密度随纬度分布的形状基本一致. 图 3c 是 850 km 高度上 CT 反演的电子密度与同一高度上 DMSP-F13 卫星实地测量的离子密度随纬度变化的比较, 表明两者无论量值还是随纬度的变化趋势均基本一致. 图 3 表明, 本文 CT 反演结果是可靠的.

4.1 磁静日的 CT 反演结果

图 4 为 2004 年 6 月 27 日 CT 反演得到的全球

电子密度二维剖面, 图中白色弧线给出了偶极磁场的磁力线分布, 箭头所指表示磁赤道的位置, 上半图对应 15 UT (10 LT) 前后, 磁赤道所在地理纬度约为 11°S, 下半图对应 16 UT (22 LT) 前后, 磁赤道所在地理纬度约为 10°N. 在得到图 4 及以下的反演结果时, 迭代所需的初始电子密度分布均由 NeQuick 模型计算得到.

2004 年 6 月 27 日地磁活动非常平静, 全天 $\Sigma Kp=6$, 平均 A_p 指数为 3.25. 从图 4 中可以看出, 在磁静日, 在大约 1000 km 以下的顶部电离层, 电子密度随高度升高下降很快, 从 450 km 至 1000 km, 电子密度下降了一个量级左右; 昼夜子午面内电子密度随纬度的分布均呈现出南北不对称, 夜间半球南北不对称性更为显著, 北半球电子密度值较高; 此外, 在等离子体层高度上, 电子密度值较低, 昼夜子午面内电子密度随纬度变化都呈现一定程度的不均匀性, 但没有明显的扰动或大尺度的异常结构出现.

4.2 磁扰日的 CT 反演结果

图 5a 给出了 2003 年 4 月 10 日 07:10 UT (19 LT) 前后的 CT 反演结果. 图 5b 是 NeQuick 模型得到的初值分布. 图中白色弧线给出了偶极磁场的磁力线分布, 磁赤道所在地理纬度约为 5°N , 箭头所指表示磁赤道的位置. 这一天存在弱的地磁扰动, Kp 指数最高为 4, 全天 $\sum Kp = 29^+$, A_p 指数最高为 32, 平均约 28.

由图 5 可以看出, 175°E 子午面正处于日落时段 (19 LT 前后), 此时电子密度量级依然处于较高水平, 在顶部电离层和等离子体层的较低高度上, 电子密度分布基本上关于磁赤道对称. 图中一个值得注意的现象是, 在等离子体层中, 电子密度随纬度的分布是不均匀的, 特别是在磁赤道及邻近区域上空, 电子密度随高度下降的速度比其他纬度更慢, 这就使得磁赤道附近顶部电离层存在一个电子密度显著增强的区域, 向上一直延伸到等离子体层. 在约 4000 km 以上, 磁赤道以南 5° 左右存在一个相对孤立的电离增强云团.

为了定量地分析图 5a 所示的电子密度分布的特征, 我们选取了若干高度, 给出在这些高度上反演得到的电子密度随纬度的变化, 如图 6 所示.

从图 6 中可以看出: (1) 在所有高度上, 低纬地区电子密度都明显高于中、高纬地区; (2) 在 450 km 高度峰值电子密度最大, 接近 $9 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$, 至 1000 km 高度, 峰值电子密度降低至 10^{11} m^{-3} 左右, 2000 km 高度, 峰值电子密度降为 1000 km 处的 50% 左右, 3000 km 高度, 峰值电子密度降为 2000 km 的 40% 左右. 若电子密度分布处于扩散平衡状态, 设 $n = n_0 \exp(-h/H)$, 利用电子密度随高度的衰减速率, 可粗略估计出, 800 km 至 1000 km, 平均等离子体标高 H 约 345 km; 2003 年 4 月 10 日 06:00 UT 前后, DMSP F13 号卫星的轨道面位于 180°E 附近 (约 18:00 LT), 非常接近图 5 CT 反演所在的子午面, 利用 DMSP F13 号卫星实测离子成分及离子和电子温度数据以及标高的定义, 可以近似估算出, DMSP 卫星高度 (约 850 km) 的等离子体标高约为 340 km, 与依据 CT 反演结果估计的等离子体标高基本一致; (3) 电子密度随纬度变化呈现不均匀分布, 在某些纬度, 存在电子密度耗尽, 而在另一些纬度, 出现电子密度增强, 且在等离子体层中, 随着高度增加, 电子密度随纬度的相对起伏更加明显; (4) 在低纬赤道区, 3500 km 至 5000 km 高度上, 电子密度随高度出现异常变化, 其值不是随高度增高而减

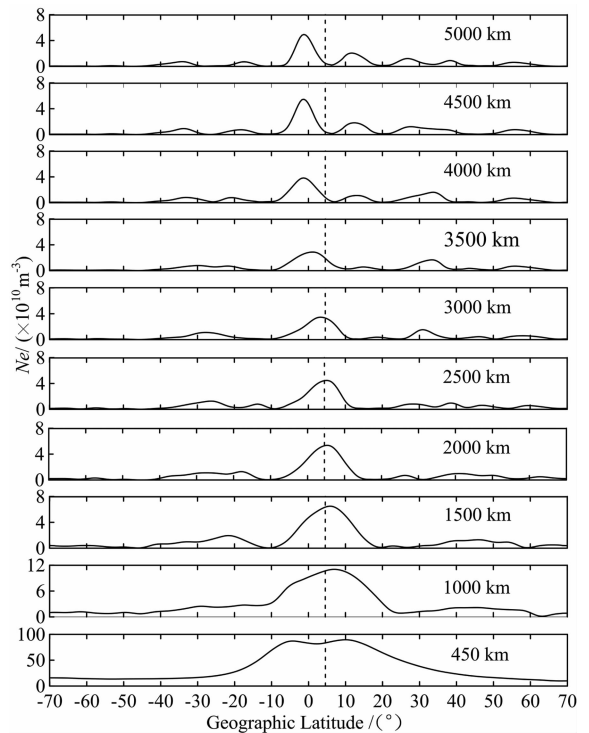


图 6 2003 年 4 月 10 日 175°E 子午面 CT 反演得到的不同高度上电子密度随纬度的变化. 图中竖虚线代表磁赤道
Fig. 6 Electron density variations with latitude in different altitudes obtained by CT reconstruction on Apr. 10, 2003, 175°E . The vertical dash lines indicate the geomagnetic equator

小, 而是出现弱的增强; (5) 电子密度的极大值在 1000 km 高度位于磁赤道偏北上空, 随高度增高, 电子密度增强区的中心跨过磁赤道, 逐渐向南移动, 至 5000 km 高度, 电子密度增强区的中心偏移至磁赤道以南约 7° 左右.

2003 年 10 月 29 日至 11 月 1 日发生了一次多主相型的超强磁暴, 磁暴急始发生在 29 日 06:12 UT, 第 3 个主相出现在 10 月 30 日, SYM-H 指数在当天 23:36 UT 达到极小值 -403 nT . 图 7a 为 2003 年 10 月 30 日 CT 反演结果. 反演结果对应的地方时在 16 LT 前后, 即该超强磁暴第 3 个主相环电流开始增强的阶段. 2004 年 7 月 22 至 10 月 28 日发生了一个多主相型的强磁暴, 磁暴急始发生在 22 日 10:39 UT, 第 2 个主相出现在 7 月 25 日, SYM-H 指数在 18:30 UT 达到极小值 -168 nT . 图 7b 为 2004 年 7 月 25 日 CT 反演结果. 该图给出的电子密度分布对应的地方时在 20 LT 前后, 即磁暴第 2 个主相环电流达到极大期间. 从图 7a 和图 7b 可以看出, 与图 5 类似, 在低纬地区也出现近似垂直于磁力线分布的电子密度增强结构. 图 7a 中的电子密度增

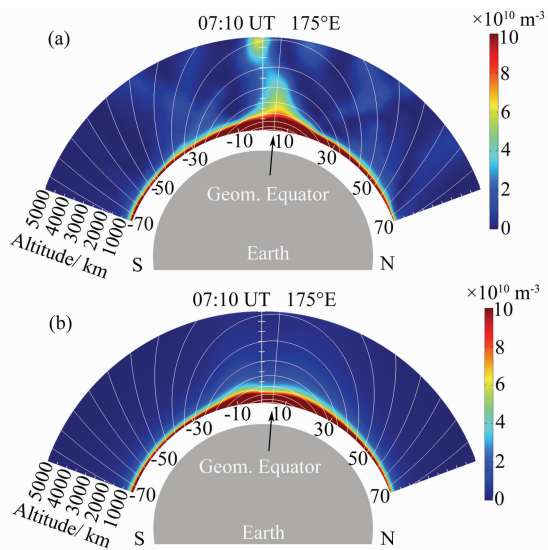


图5 (a)2003年4月10日,CT反演得到的顶部电离层-等离子体层电子密度分布;(b)2003年4月10日, NeQuick模型得到的初始电子密度分布

Fig. 5 (a) Reconstructed 2-D electron density profile of the topside ionosphere and plasmasphere on April 10, 2003; and (b) initial electron density profile derived from NeQuick model on April 10, 2003

强结构出现在磁赤道以南,从顶部电离层开始一直延伸到5000 km,形成一个较强的柱状电离增强结构,该结构随着高度升高逐渐向南偏移,至5000 km处到达地理纬度20°S(磁纬约11°S)左右,增强结构形态下粗上细,随高度增高,其覆盖的纬度范围逐渐变小,在等离子体层中,增强结构的中心最大电子密度比背景电子密度高2至5倍。Yizengaw等^[16]曾利用FedSat卫星GPS信标测量解算的TEC数据进行了天基CT反演,结果表明,在10月30日21:50 UT前后,160°E子午面(07:50 LT),南半球中纬度地区也曾有与图7a形态类似的近似垂直于磁力线的电子密度增强结构出现,这表明等离子体层中,这一类电子密度增强结构可以重现,具有一定的普遍性。图7b表明,在低纬赤道区顶部电离层直至2500 km,较大的纬度范围内出现的电子密度增强,也许是超级赤道喷泉效应所致。在等离子体层约3500 km以上,地理纬度约15°N至30°N(磁纬5°-20°N)之间,出现一个相对孤立的电离增强云团。在约2500 km至3500 km之间,低纬赤道区存在一些不连续的弱电离增强。

5 总结与讨论

本文利用两颗跟飞的GRACE卫星载GPS信标TEC测量数据和基于差分相对TEC的CT反演

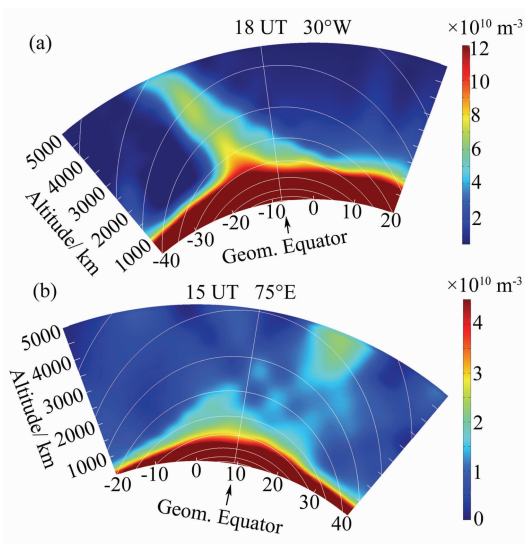


图7 2003年10月30日(a)和2004年7月25日(b) CT反演的顶部电离层-等离子体层电子密度分布
Fig. 7 Reconstructed electron density profile of the topside ionosphere and plasmasphere on (a) Oct. 30, 2003 and (b) July. 25, 2004

算法,实现了全球范围顶部电离层和等离子体层的CT成像。研究表明,基于低轨卫星的星载GPS双频信标测量解算的TEC数据进行天基CT反演,是获得顶部电离层-等离子体层电子密度二维分布的一种有效的技术手段。

天基CT技术与地基CT或天地基结合的CT技术相比主要有下列不同点。首先,主要由于多路径效应的影响,开展地基CT反演,只有较高仰角的射线可用,缺少接近水平向的射线,而在数百千米高度飞行的低轨道卫星,其星载GPS信标接收机的电磁环境很好,仰角接近0°的射线依然可以使用,有利于改善反演结果的垂直分辨率。其次,在海洋覆盖的区域,无法获取地基测量数据,而天基CT则不受此限制,这有利于在广阔的海洋上空进行CT反演,如本文图5所示,175°E子午面电离层几乎都位于海洋之上,只有通过天基CT反演,才能得到该子午面的电离层-等离子体层电子密度分布。此外,对于地基CT,射线的电离层穿刺点一般位于350至450 km高度,有效反演区域仅能覆盖电离层,而对天基CT,穿刺点一般在1000 km或更高的高度,可以同时反演电离层-等离子体层电子密度分布。不过,天基CT只能得到轨道高度以上的电离层-等离子体层电子密度分布,不能得到轨道高度以下电离层的电子密度分布,这是它的局限性。

静日的CT反演结果表明,昼夜子午面内电子密度随纬度的分布均呈现出南北不对称,夜间半球

南北不对称性更为显著;在等离子体层高度上,电子密度值较低,没有强的大尺度扰动或异常结构出现。在不同强度的磁暴期间,几个 CT 反演示例表明,在低纬地区都出现近似垂直于磁力线分布的电子密度柱状增强结构和等离子体层中孤立的电离增强云团,电子密度柱状增强结构下宽上窄,随高度增高,其覆盖的纬度范围逐渐变小,在等离子体层中,增强结构的中心最大电子密度比背景电子密度高 2 至 5 倍。文献[16]和[20]的 CT 反演结果,也显示有类似的垂直于磁力线的电子密度增强结构出现,说明这种现象具有一定的普遍性。

本文反演结果中出现的近似垂直于磁力线从顶部电离层向上延伸到等离子体层的电离柱状增强以及等离子体层中局地的电离增强云团,是近年来 CT 反演发现的一种新的现象。研究表明,磁暴期间,跨极盖电位的快速变化,有利于极区对流电场向中低纬电离层穿透^[21],强的东向即时穿透电场,通过低纬赤道区离子 $E \times B$ 漂移机制,引起较长时间持续的强离子上行,是形成近似垂直于磁力线从顶部电离层向上延伸到等离子体层的电离柱状增强结构的可能原因之一;此外,源于磁层的热粒子向下注入,也是形成等离子体层中局地的电离增强云团的一种可能的过程。如前所述,这种现象多次反复出现,具有一定程度的普遍性,其形成机制是一个有待解决的问题,值得进一步深入研究。

参考文献(References)

[1] Austen J R, Franke S J, Liu C H, et al. Application of computerized tomography technique to ionospheric research. // Tauriainen A ed. URSI and COSPAR International Beacon Satellite Symposium on Radio Beacon Contribution to the Study of Ionization and Dynamics of the Ionosphere and to Corrections to Geodesy and Technical Workshop, Oulu, Finland. Proc. Part I, 25. University of Oulu, ISBN 951-42-2256-3, 1986.

[2] Austen J R, Franke S J, Liu C H. Ionospheric imaging using computerized tomography. *Radio Sci.*, 1988, 23(3): 299-307.

[3] Raymund T D, Austen J R, Franke S J, et al. Application of computerized tomography to the investigation of ionospheric structures. *Radio Sci.*, 1990, 25(5): 771-789.

[4] Pryse S E, Kersley L, Rice D L, et al. Tomographic imaging of the ionospheric mid-latitude trough. *Ann. Geophys.*, 1993, 11(2-3): 144-149.

[5] Pryse S E, Mitchell C N, Heaton J A T, et al. Travelling ionospheric disturbances imaged by tomographic techniques. *Ann. Geophys.*, 1995, 12(12): 1325-1330.

[6] 徐继生, 马淑英, 阳其罕等. 东亚赤道异常区电离层 CT 诊断-实验及初步结果. *地球物理学报*, 1995, 38(5): 553-563. Xu J S, Ma S Y, Yang Q H, et al. Tomographic diagnosis of the ionospheric equatorial anomaly in the region of East-Asia-

experiment and early results. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1995, 38(5): 553-563.

[7] Yeh K C, Raymund T D. Limitations of ionospheric imaging by tomography. *Radio Sci.*, 1991, 26(6): 1361-1380.

[8] Hajj G A, Ibañez-Meier R, Kursinski E R, et al. Imaging the ionosphere with the Global Positioning System. *Int. J. Imaging System Tech.*, 1994, 5(2): 174-184.

[9] Kunitsyn V E, Andreeva E S, Razinkov O G. Possibilities of the near-space environment radio tomography. *Radio Sci.*, 1997, 32(5): 1953-1963.

[10] Mitchell C N, Spencer P S J. A three-dimensional time-dependent algorithm for ionospheric imaging using GPS. *Ann. Geophys.*, 2003, 46(4): 687-696.

[11] 徐继生, 邹玉华. 时变三维电离层层析成像重建公式. *地球物理学报*, 2003, 46(4): 438-445. Xu J S, Zou Y H. Reconstruction formula of time-dependent 3-D computerized ionospheric tomography. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2003, 46(4): 438-445.

[12] 徐继生, 邹玉华, 马淑英. GPS 地面台网和掩星观测结合的时变三维电离层层析. *地球物理学报*, 2005, 48(4): 759-767. Xu J S, Zou Y H, Ma S Y. Time-dependent 3-D computerized ionospheric tomography with ground-based GPS network and occultation observations. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, 48(4): 759-767.

[13] Ma X F, Maruyama T, Ma G, et al. Three-dimensional ionospheric tomography using observation data of GPS ground receivers and ionosonde by neural network. *J. Geophys. Res.*, 2005, 110 (A5), A05308, doi:10.1029/2004JA010797.

[14] Rius A, Ruffini G, Cucurull L. Improving the vertical resolution of ionospheric tomography with GPS occultations. *Geophys. Res. Lett.*, 1997, 24(18): 2291-2294.

[15] Hernández-Pajares M, Juan J M, Sanz J, et al. Global observation of the ionospheric electronic response to solar events using ground and LEO GPS data. *J. Geophys. Res.*, 1998, 103(A9): 20789-20796.

[16] Yizengaw E, Dyson P L, Essex E A. A study of the spatial density distribution in the topside ionosphere and plasmasphere using the FedSat GPS receiver. *Advances in Space Research*, 2006, 38(11): 2318-2323.

[17] Yizengaw E, Moldwin M B, Dyson P L, et al. First tomographic image of ionospheric outflows. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, 33(20): L20102, doi:10.1029/2006GL027698.

[18] Kunitsyn V E, Preobrazhensky N G, Tereshchenko E D. Reconstruction of ionospheric irregularities structure based on the radioprobing data. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1989, 306: 575-579.

[19] Kunitsyn V E, Tereshchenko E D, Andreeva E S, et al. Radio tomography of Global Ionospheric Structure. Preprint Polar Geophys. Inst., 90-10-78. Apatity: Kola Science Center AS USSR, 1990; 1-30.

[20] Xiao R, Xu J S, Ma S Y, et al. Abnormal distribution of ionospheric electron density during November 2004 super-storm by 3D CT reconstructions from IGS and LEO/GPS observations. *Sci. China (Ser. E-Tech. Sci.)*, 2012, 55(5): 1230-1239.

[21] Xiong W, Xu J S, Wang H, et al. Effect of temporal variation rate of cross polar cap potential on the equatorial ionospheric vertical drift: A statistical study. *Sci. China (Ser. E-Tech. Sci.)*, 2012, 55(5): 1217-1223.