

# 低纬地区电离层时空分布特征的层析结果分析<sup>\* 1</sup>

闻德保 吕慧珠 张 啸  
(长沙理工大学交通运输工程学院,长沙 410004)

**摘 要** 利用 IGS 的 126 个观测站双频 GNSS 观测资料和电离层层析成像技术,重构了 2005-06-10 电离层电子密度随纬度、经度和高度的三维时空变化规律。研究了低纬度地区电离层电子密度分布的周日变化规律和垂直结构特性,分析了赤道异常结构南北驼峰的形成、发展和消亡过程,讨论了影响电离层电子密度反演精度的因素。

**关键词** 电离层;层析;赤道异常;电子密度

**中图分类号**:P228.42

**文献标识码**:A

## ANALYSES OF TOMOGRAPHY RESULTS FOR THE IONOSPHERIC TEMPORAL-SPATIAL CHARACTERISTICS IN LOW-LATITUDE REGION

Wen Debao, Lü Huizhu and Zhang Xiao

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004)

**Abstract** 3 D temporal-spatial variation regularity of ionospheric electron density were reconstructed by using the ionospheric tomography technique for the GNSS data of 126 stations on 10 June, 2005. The diurnal variation regularity of ionospheric electron density distribution and variation characteristics of the ionospheric vertical structure in low-latitude region were investigated and the process of occurrence, development and disappearance of the equatorial anomaly structure were carefully analyzed. The factors that impact the accuracy of ionospheric electron density were discussed, and some suggestions were given for further investigation of ionospheric tomography technique.

**Key words**: ionosphere; tomography; equatorial anomaly; electron density

电磁波信号通过电离层时,会产生反射、折射、散射和吸收现象,从而给地面用户带来较大的延迟误差<sup>[1]</sup>。电离层层析成像技术的出现,为监测和了解大尺度电离层垂直结构变化特征提供了机遇。该技术通过对电离层进行分层研究,克服了常用的薄层假设电离层 TEC 模型不能有效反映电离层垂直结构的局限性,能够有效地重构大尺度三维电离层时空结构<sup>[2]</sup>。国内外学者先后从理论和算法上对电离层层析成像技术进行深入研究<sup>[3-11]</sup>,而低纬度地区电离层由于其复杂性,发表成果并不多。本

文利用 IGS 提供的 126 个低纬度地区的 GNSS 观测资料,借助层析手段,重构了地磁静日低纬度地区三维电离层电子密度的时序变化图,分析了低纬度地区赤道异常结构的产生、发展和消亡过程,并分析了影响电子密度重构精度的主要因素。

### 1 层析原理与方法

电离层 TEC 为电子密度沿卫星信号传播路径的积分,表示为:

$$TEC = \int_l N_e ds \quad (1)$$

\* 收稿日期:2014-06-30

**基金项目**:湖南省杰出青年基金项目(14JJ1021);国家自然科学基金项目(41174001,41174015);教育部科学技术类项目(213028A);湖南省教育厅重点项目(12A002)。

**作者简介**:闻德保,男,1974 年生,博士,教授,主要从事电离层层析成像和 GNSS 气象学等方面的研究。E-mail:wdbwhigg@163.com。

其中,  $N_e$  为卫星信号传播路径上的电子密度,  $l$  为卫星信号传播路径。GNSS 电离层层析就是根据反演区域内一系列卫星信号传播路径上的斜 TEC 信息, 重构电子密度的三维时空分布。

为便于计算, 通常将上式线性化。因此, 事先需要选取合适的基函数  $b_j$ , 模型化待反演的电离层电子密度。于是有:

$$N_e \approx \sum_{j=1}^n x_j b_j \quad (2)$$

式中,  $x_j (j=1, 2, \dots, n)$  代表基函数的系数,  $n$  表示所选择的基函数的数量, 其大小与反演区域内的像素数一致。将式(2)代入式(1)可得:

$$\text{TEC}(t) = \int_l \sum_{j=1}^n x_j b_j ds = \sum_{j=1}^n x_j \int_l b_j ds \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

其中,  $m$  代表电离层斜 TEC 观测值总数。以  $A_{ij}$  代表上式中的积分项, 则有:

$$A_{ij} = \int_l b_j ds \quad (4)$$

考虑到 GNSS 实际测量中存在噪声影响, 合并式(3)和式(4), 则每条 GNSS 信号传播路径上电离层斜 TEC 可以表示为:

$$\text{TEC} = \sum_{j=1}^n A_{ij} x_j + \varepsilon \quad (5)$$

本文选择像素指标函数作为基函数, 即

$$b(r) = \begin{cases} 1, & r \in \text{像素} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)代入式(4), 有:

$$A_{ij} = \Delta s_{ij} \quad (7)$$

$\Delta s_{ij}$  表示第  $i$  条 GNSS 射线在第  $j$  个像素内的截距。将式(5)以矩阵形式表示, 可得:

$$\mathbf{y}_{m \times 1} = \mathbf{A}_{m \times n} \mathbf{x}_{n \times 1} + \mathbf{e}_{m \times 1} \quad (8)$$

其中,  $\mathbf{y}$  为  $m$  条 GNSS 信号传播路径上电离层斜距 TEC 观测值所构成的列向量;  $\mathbf{A}$  为 GNSS 射线在对应像素内的截距构成的  $m \times n$  维向量,  $\mathbf{e}$  为  $m$  条 GNSS 射线上的观测噪声和离散误差组成的  $m$  维列向量。采用像素指标函数作为基函数离散待反演的电离层区域之后, 式(5)中的  $x_j$  即为第  $j$  个像素中心的电子密度, 这也就意味着式(8)中的  $\mathbf{x}$  为电子密度所构成的列向量。

## 2 层析结果

### 2.1 GNSS 数据选取与处理

选取 IGS 提供的 2005-06-10 的 126 个低纬度地区 GNSS 站的双频观测数据, 采样间隔为 30 s。采用 Blewitt<sup>[12]</sup> 提出的数据处理方法进行预处理。为减弱多路径误差的影响, 卫星观测的截止高度角设

定为  $10^\circ$ 。在 GPS 测量中, 虽然利用载波相位观测量的 L4 组合得到的电离层 TEC 的相对精度较高, 但其只能反映电离层 TEC 的相对变化情况; 码观测的 P4 组合虽然能够得到电离层 TEC 的绝对值, 但其精度相对较低。本文采用两种组合联合计算电离层 TEC, 从而得到高精度的绝对 TEC。

### 2.2 结果分析

利用 IGS 提供的双频 GNSS 观测资料, 反演了每个时段内各个像素的电子密度值, 绘制电子密度三维变化时间序列图。选择的重构日期为 2005-06-10, 重构区域为  $0^\circ\text{E} \sim 150^\circ\text{E}$ ,  $30^\circ\text{S} \sim 30^\circ\text{N}$ , 高度范围为  $100 \sim 1\,000$  km。在利用像素基层析模型重构电离层电子密度分布前, 首先将所选择的重构区域离散成一些小的像素, 所选择的离散间隔在经度和纬度上分别为  $2.5^\circ$  和  $1^\circ$ , 高度间隔为 50 km。采用三维时间关联算法进行电离层电子密度反演<sup>[13]</sup>。

图 1 给出了利用 GNSS 资料和像素基层析模型重构的  $114^\circ\text{E}$  经度链上电子密度随着纬度和高度变化的情况。可以看出, 赤道异常的南驼峰形成于 1 UT, 主要分布在  $15^\circ\text{S} \sim 12^\circ\text{N}$ , 且呈现一定程度的倾斜。在 3 UT, 南驼峰范围缩小至  $12^\circ\text{S} \sim 9^\circ\text{N}$ , 其倾斜度进一步增加。同时, 赤道异常北驼峰逐步形成, 其范围分布在  $15^\circ\text{N} \sim 26^\circ\text{N}$  之间, 其电子密度值低于南驼峰。在 5 UT, 赤道异常南驼峰范围进一步缩小至  $10^\circ\text{S} \sim 5^\circ\text{N}$ , 而北驼峰则扩大至  $15^\circ\text{N} \sim 30^\circ\text{N}$ , 其电子密度值高于南驼峰。随着时间的推移, 赤道异常的南驼峰进一步弱化且倾斜度逐步减小, 在 11 UT, 赤道异常南驼峰完全消失, 而北驼峰范围则扩大至  $1^\circ\text{S} \sim 30^\circ\text{N}$ , 相对于以前, 北驼峰的倾斜度则变缓。图 1(g) 显示, 在 13 UT, 赤道异常结构完全消失。同时, 从图 1 可以看出, 在 5~23 UT 之间, 低纬度地区北部电离层电子密度整体上高于南部。

另外, 图 1 显示, 在 1~5 UT 之间, 电离层电子密度峰值高度逐步由 250 km 升高至 380 km。随后开始下降, 至 11 UT 下降到 300 km。在 15~19 UT 之间, 电子密度峰值高度逐步上升到 380 km。此后又开始下降, 在 23 UT 下降至 280 km。前述结果在一定程度上反映了电离层电子密度垂直分布的变化情况。

从图 2 可以看出, 在 1~7 UT 之间, 东部电离层电子密度整体上高于西部, 电离层电子密度峰值区随时间的推移逐步扩大。在 9 UT, 向西移至  $50^\circ\text{E} \sim 145^\circ\text{E}$ , 且呈现进一步向西运动的趋势。至 11 UT, 移动至  $17^\circ\text{E} \sim 91^\circ\text{E}$ 。在 13~19 UT, 西部电离层电子密度高于东部。随着时间的推移, 在 21~23 UT, 东部电离层电子密度则恢复到高于西部的状态。同

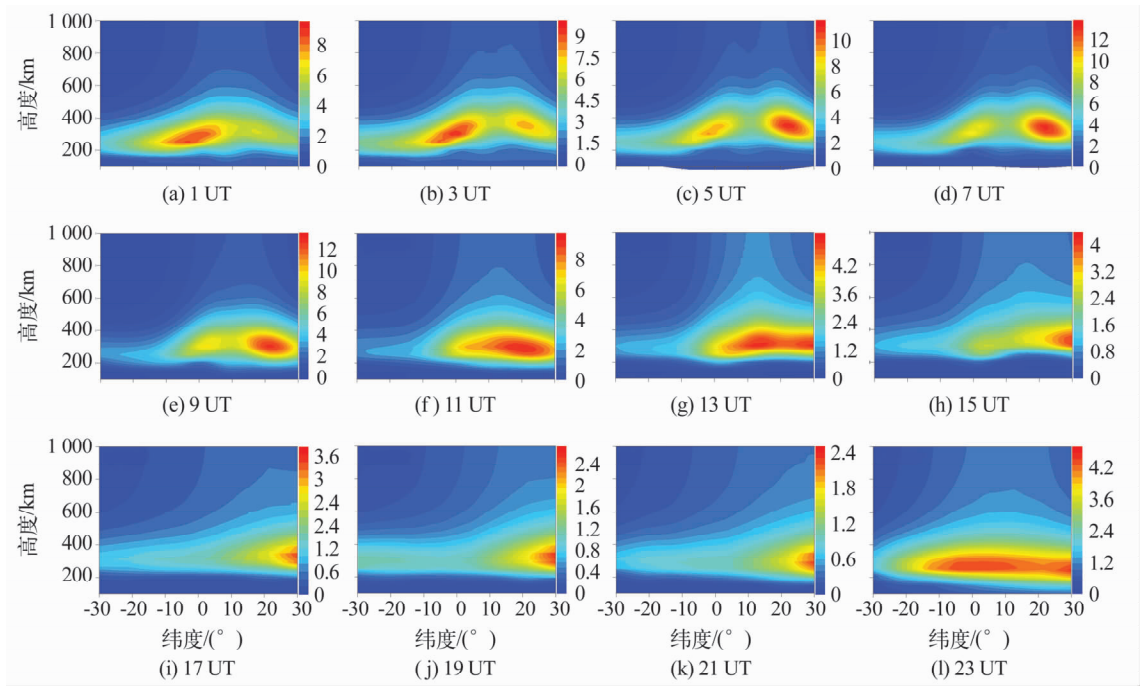


图1 114°E 经度链上电离层电子密度随纬度和高度的时间序列变化(2005-06-10 ,单位为  $10^{11} \text{ el/m}^3$ )

Fig.1 Changes of time-series of ionospheric electron density with latitude and altitude in the cross section at on June 10,2005( unit: $10^{11} \text{ el/m}^3$ )

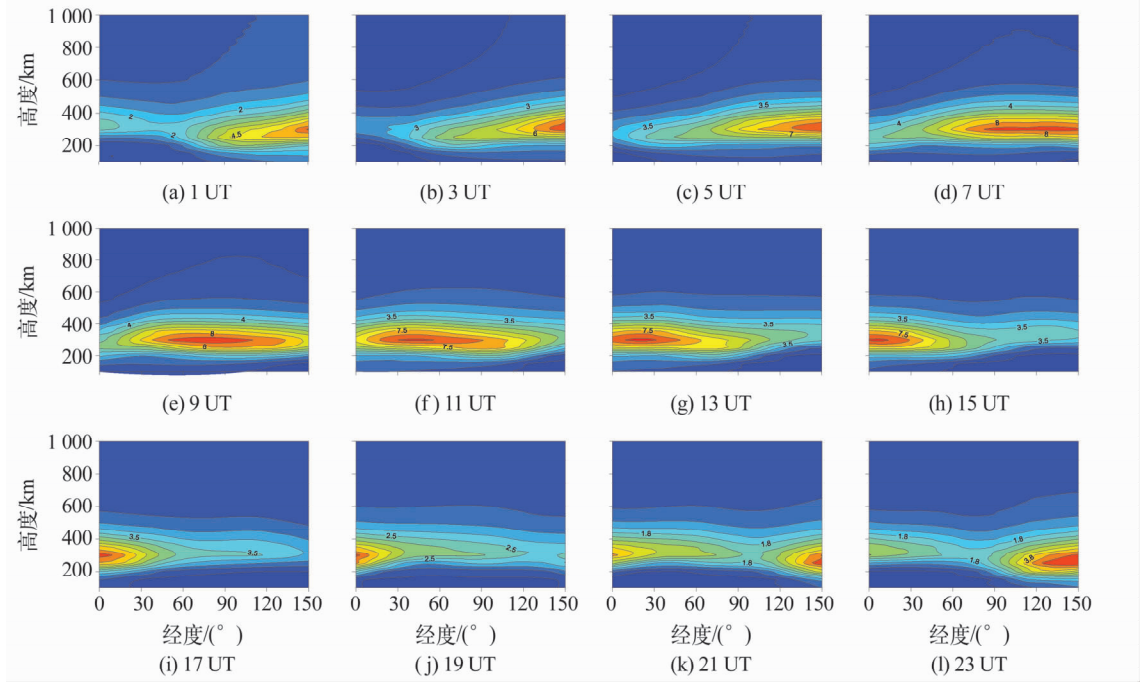


图2 30.5°N 纬度链上电离层电子密度随经度和高度的时间序列变化(2005-06-10,单位为  $10^{11} \text{ el/m}^3$ )

Fig.2 Changes of time-series of ionospheric electron density with longitude and height in the cross section of at 30.5°N on June 10,2005( unit: $10^{11} \text{ el/m}^3$ )

时,随着地球自西向东自转,在 1 ~ 21 UT,电离层电子密度随时间呈现自东向西由小变大再变小的现象。在 23 UT,电离层电子密度进一步增大。

2.3 影响反演精度的因素分析

目前,影响低纬度地区电离层密度反演精度和

可靠性的因素主要有:

1) 电离层层析模型:本文采用的是像素基电离层层析模型,该模型通常假定在所选择的反演时段内每个像素的电子密度为一常量。实际上,电离层电子密度是动态变化的,在顾及电离层反演结果实

际物理意义的前提下,构建一种时变的三维电离层层析模型是提高反演精度的必要手段。

2)GNSS 测站的空间分布及数量:由于可利用的 GNSS 地面测站数量有限、分布不均匀以及观测视角的局限性,导致用来反演电子密度的观测信息不充足,从而限制了利用 GNSS 资料反演电子密度的精度和可靠性。

3)等离子体层中电离层电子密度分布:在利用实测的 GPS 数据进行电离层电子密度反演时,没有考虑等离子体层电子密度对电离层 TEC 的影响。尽管等离子体层电子密度比电离层中电子密度低 3~4 个量级,但 GPS 信号在等离子体层中传播的路径比较长,因此,其对电离层电子密度反演所需要的 TEC 观测量的影响需要加以考虑,尤其是在太阳活动低年和夜间。如何结合等离子体层模式,合理地消除基于 GNSS 的电离层层析模型中等离子层电子密度分布对 TEC 数据的影响,是提高电离层反演精度的一种新途径。

4)反演算法:针对观测数据的不完备性引起的不适定问题,国内外学者先后提出了多种算法<sup>[14-16]</sup>,虽然在一定程度上解决了电离层电子密度反演中的不适定问题,但在计算效率、重构精度和实时性方面尚存在一定的改进空间。

### 3 结 语

利用 GNSS 电离层层析成像技术能够较好地反演低纬度地区电离层活动规律及周日时序变化情况,但精度还不能完全满足高精度用户对电离层延迟改正的需求。为了进一步提高 GNSS 电离层层析技术的精度和可靠性,还有待于精化和改进现有模型,改善地面 GPS 观测站的分布结构,进一步优化电离层层析算法。

### 参 考 文 献

- 1 章红平. 电离层延迟改正模型综述 [J]. 天文学进展, 2006, 24(1): 16-25. (Zhang Hongping. Brief review of the ionospheric delay models [J]. Progress in Astronomy, 2006, 24(1): 16-25)
- 2 闻德保. 基于 GPS 的电离层层析算法及其应用研究 [D]. 武汉: 中国科学院测量与地球物理研究所, 2007. (Wen Debao. Investigation of GPS-based ionospheric tomography algorithms and their applications [D]. Wuhan: Insti-

- tute of Geodesy and Geophysics, CAS, 2007)
- 3 Ma X F, Maruyama T. Three-dimensional ionospheric tomography using observation data of GPS ground receiver and ionosonde by neural network [J]. J Geophys Res, 2005, 110: A05308.
- 4 Ruffini G. A PIM-aided kalman filter for GPS tomography of the ionospheric electron content [J]. Phys Chem Earth, 1999, 24(4): 365-369.
- 5 Horvath I, Essex E A. The southern-hemisphere mid-latitude day-time and night-time trough at low-sunspot numbers [J]. J Atmos Sol-terr Phy, 2003(6): 917-940.
- 6 Cilliers P J. Electron density profiles determined from tomographic reconstruction of total electron content obtained from GPS dual frequency data; first results from the south African network of dual frequency GPS receiver stations [J]. Adv Space Res, 2004, 34: 2 049-2 055.
- 7 Yizengaw E. The souther hemisphere and equatorial region ionization response for a 22 Sept. 1999 severe magnetic storm [J]. Ann Geophys, 2004, 22: 2 765-2 773.
- 8 Gracia R, Crespon F. Radio tomography of the ionosphere: Analysis of an underdetermined, ill-posed inverse problem, and regional application [J]. Radio Sci, 2008, 43.
- 9 Nesterov I A, Kunitsyn V E. GNSS radio tomography of the ionosphere: The problem with essential incomplete data [J]. Adv Space Res, 2011, 47: 1 789-1 803.
- 10 Wen D B. A new two-step algorithm for ionospheric tomography solution [J]. GPS Solut, 2012, 16: 89-94.
- 11 Li H. Ionospheric electron concentration imaging using combination of LEO satellites data with ground-based GPS observations over China [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2012, 50: 1 728-1 735.
- 12 Blewitt G. An automatic editing algorithm for GPS data [J]. Geophys Res Lett, 1990, 17(3): 199-202.
- 13 Mitchell C N, Spencer P S J. A three-dimensional time-dependent algorithm for ionospheric imaging using GPS [J]. Ann Geophys, 2003, 46(4): 687-696.
- 14 Lee K J, Kamalabadi F. GPS-based radio tomography with edge-preserving regularization [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2009, 47: 312-324.
- 15 Bhuyan B S, Bhuyan P K. Tomographic reconstruction of the ionosphere using generalized singular value decomposition [J]. Curr Sci, 2002, 83: 1 117-1 220.
- 16 Yao Y B. Application of hybrid regularization method for tomographic reconstruction of midlatitude ionospheric electron density [J]. Adv Space Res, 2013, 52: 1 406-1 415.