

2003~2006年磁暴期间欧洲区域电离层 三维层析及演变分析

姚宜斌¹ 陈家君¹ 陈 鹏² 孔 建^{1,3}

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

2 西安科技大学测绘科学与技术学院,陕西 西安,710054

3 Ohio State University School of Earth Science, Columbus, OH, USA

摘要:基于IGS跟踪站的GNSS观测资料,利用电离层三维层析技术,对2003~2006年间3次不同类型强磁暴期间欧洲区域上空电离层电子密度的三维时空分布进行了反演,反演结果精细地反映了电离层电子密度的三维结构。通过对电离层扰动演变过程的分析,表明电离层扰动情况与磁暴发展过程一致,同时发现磁暴引起的电离层扰动具有显著的纬度效应。另外,随着磁暴的发展,电子密度极大值所在高度也会发生变化。研究分析表明,电离层电子密度三维重构图像可以直观清晰地反映各经度面、纬度面和高度面上电子密度的分布和演变情况,能有效地辅助分析电离层在磁暴发生期间的扰动情况。

关键词:磁暴;电离层;三维层析技术;电子密度

中图法分类号:P228.41;P352.4

文献标志码:A

电离层的不规则扰动对航天安全、无线电通信、导航定位等有重要的影响。随着GNSS理论的快速发展和电离层三维层析技术(CIT)的成熟应用,基于GNSS的CIT逐渐成为一种研究电离层电子密度三维分布特性,大范围连续监测电离层变化的新技术。近年来,国内外学者相继利用CIT技术进行了各种异常情况下电离层的扰动研究。邹玉华和徐继生基于GPS与掩星观测数据,获得电子密度在高度-纬度-经度-时间四维空间中的变化,显示了磁暴发生期间电离层负向暴效应^[1]。Thampi等人采用CIT技术研究了中纬度地区夏季夜间电离层异常现象^[2]。Yizengaw等利用地基和卫星数据反演了2001-03-31磁暴期间150°E经度面内南半球电离层电子密度的变化^[3]。闻德保等基于中国地壳连续运动观测网(CMONOC)的GPS资料研究了2003-08-18^[4]和2003-08-21^[5]磁暴发生期间中国区域上空电离层电子密度的周日时空变化特性。姚宜斌等在排除磁暴影响的基础上,利用CIT技术反演了2012年日本3·11地震前电离层电子密度的三维变化,分析发现震前电离层出现了显著的正异常^[6]。

本文基于IGS跟踪站的GNSS观测资料,利用电离层三维层析技术,分别反演并分析了2003~2006年间3次不同类型强磁暴发生期间欧洲区域上空电离层电子密度的三维时空分布以及电离层扰动结构的演化过程,并得出一些有用的结论。

1 基础数据和研究算法

1.1 GNSS数据选取与处理

本文选取欧洲(35°N~65°N,0°E~32°E)上空作为反演区域。将其电离层空间按照经度方向4°、纬度方向2°、高度方向50 km的间隔进行了网格划分。然后利用IGS提供的该区域内基准站的双频GPS观测数据重构了磁暴发生期间电子密度三维分布图像。

1.2 磁暴选取

为了更全面地研究磁暴期间电离层三维演变过程,本文选取3次不同类型和强度的磁暴进行分析。图1给出了3次磁暴期间磁暴环电流指数(Dst)逐日变化情况,Dst是在中、低纬台站地磁场水平分量(H)的小时平均偏离值,可以用来描

收稿日期:2013-03-20

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41174012,41274022);国家863计划资助项目(2013AA122502);国家教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-12-0428)。

第一作者:姚宜斌,教授,博士生导师,现主要从事GNSS空间环境学研究。E-mail: ybyao@whu.edu.cn

述磁暴大小。一般而言, $Dst < 30 \text{ nT}$ 即为有磁暴发生, Dst 值越小, 磁暴强度越大。通常, 按照 Dst 值大小和变化情况, 可以将磁暴划分为初相 (Dst 呈现波动变化)、主相 (Dst 迅速下降)、和恢复相等 3 个阶段 (Dst 缓慢回升)^[7]。在 3 次磁暴

中, 以磁暴类型来看, 图 1 (a) (2003-10 下旬) 和图 1 (b) (2004-11 月上旬) 为双主相急始型强磁暴, 图 1 (c) (2006-12 中旬) 为单一主相型磁暴; 从磁暴强度上, 图 1 (a) 、1 (b) 明显强于图 1 (c)。

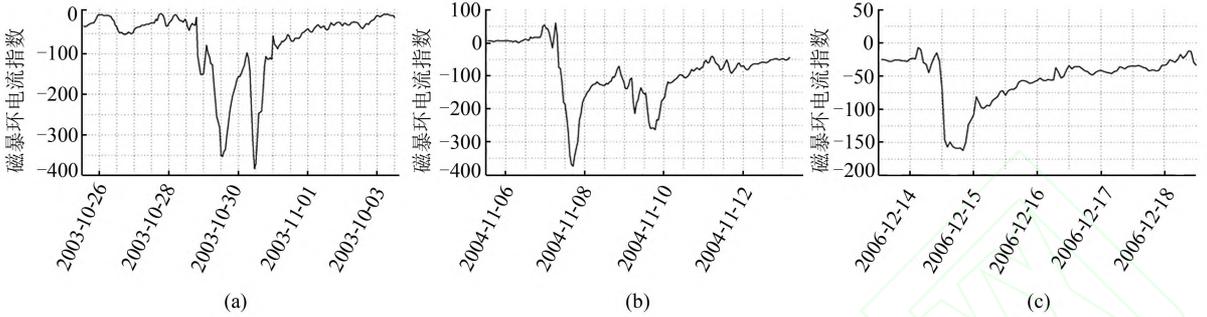


图1 磁暴期间Dst 指数变化

Fig.1 Dst Index During Magnetic Storms

1.3 三维CIT 层析原理和算法

1) 层析原理

基于GNSS 的电离层层析问题实质就是根据反演区域内的一系列卫星信号沿传播路径上的总电子含量(STEC) 信息反演该区域内的电离层电子密度的时空分布^[8]。

电离层STEC 为电离层电子密度沿信号传播路径的线积分, 一般表示为:

$$STEC = \int_s N_e(r, t) ds \quad (1)$$

式中, N_e 为GPS 卫星与接收机间信号传播路径上电离层电子密度, r 是由经度、纬度和高度组成的位置矢量, s 为GPS 卫星和接收机之间的卫星信号传播路径。

将式(1)离散化, 并考虑到GPS 测量中存在的噪声, 用矩阵形式表示为:

$$y_{M \times 1} = A_{M \times X} x_{X \times 1} + e_{M \times 1} \quad (2)$$

式中, y 为 M 条GPS 信号传播路径上电离层 STEC 观测值所构成的列向量; A 为卫星信号射线在对应像素内的截距构成的 $M \times X$ 维向量; e 为 M 条射线上观测噪声和离散误差组成的 M 维列向量。

2) 重构算法

由于实际观测中, 受GPS 台站数量和分布的影响, 式(2)中的系数矩阵 A 是一个巨型稀疏阵, 通常是秩亏的, 因此, 求解各格网电子密度 x 是一个典型的反演问题, 需要选取合适的重构算法。考虑到电子密度必须为正, 本文选用乘法代数重构算法(MART) 进行反演, MART 算法中的每一步迭代以乘法的形式进行, 即有:

$$x_j^{(k+1)} = x_j^{(k)} \left(\frac{y_i}{\sum_i a_i x_j^{(k)}} \right)^{\frac{\gamma_0 a_i}{A_i}} \quad (3)$$

式中, $x^{(k)}$ 表示第 k 次迭代的待求参数, 在本文中是指待估的电子密度 N_e , a_i 表示矩阵 A 的第 i 行, A_i 表示第 i 条射线穿过的所有格网总长, γ_0 为迭代松弛因子, $0 < \gamma_0 < 1$ 。MART 算法能使任何趋于特殊值的概率最小, 这个特点使其成为一种在数据不完整的情况下非常有效的算法。

2 不同类型和强度的磁暴期间电离层三维层析及演变分析

2.1 2003 年10 月下旬磁暴

图2 给出的是2003 年10 月下旬磁暴不同发展阶段 $12^\circ E$ 面上电子密度重构图, 从左起第一幅开始依次表示初相、第一次主相、第二次主相、恢复相等 4 个阶段。从图2 中可以看出, 磁暴主相阶段(30 日 UT14:00-31 日 UT04:00) 电子密度值较初相呈显著减小, 表明重构区域发生了“负相暴”。从右侧的尺度因子上可以看出, 第一次主相阶段电离层扰动较第二次更剧烈。同时, 电子密度极大值所在高度都约为300 km, 说明此次磁暴期间电子密度极大值所在高度没有发生明显变化。

分析第一个主相阶段不同经度面重构图电离层扰动沿经度、纬度和高度方向的情况, 如图3 所示。在磁暴主相期间, 电子密度在经度面上的分布呈现自西向东逐渐缓慢增大的变化趋势。另外, 从经度剖面图可以看出, 各经度面上较低纬度 ($35^\circ N \sim 45^\circ N$) 电子密度变化较大, 表明此次磁暴对较低纬度区域上空电离层影响较大。

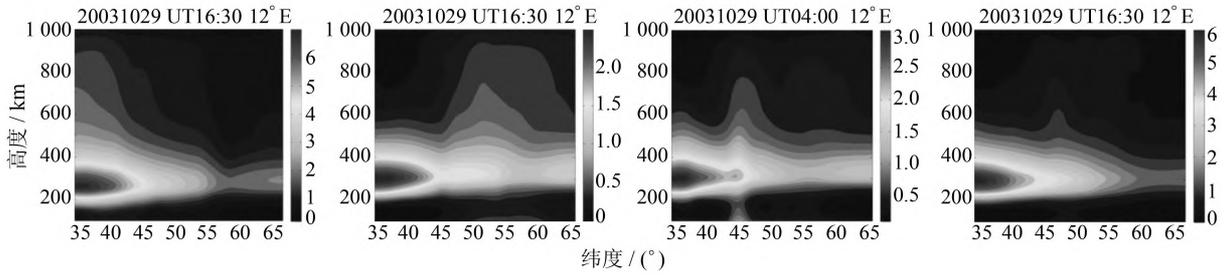


图2 磁暴不同发展阶段12°E 经度面上电子密度重构图/(10¹¹ e · m⁻³)

Fig.2 Ionospheric Electron Density Distribution at the Plane of 12°E During the Storm

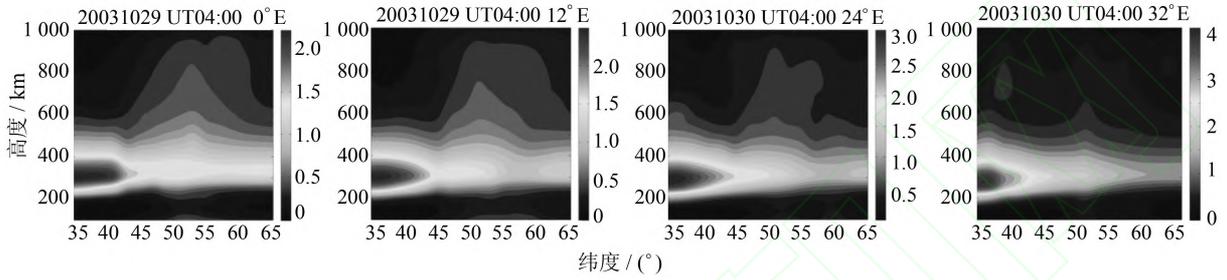


图3 第一个磁暴主相阶段不同经度面上电子密度重构图/(10¹¹ e · m⁻³)

Fig.3 Ionospheric Electron Density Distribution at Different Longitude Planes in First Main Phase

分析图3、图4 可得: ① 2003-10 下旬磁暴引起的电离层暴具有很强的纬度效应: 磁暴发生过程中重构区域内较低纬度区域(35° N ~45° N) 电子密度变化较大。② 此次磁暴期间电子密度极

大值所在高度基本没有变化: 从初相到恢复相, 各经度和纬度方向电子密度极大值保持在300 km 高度附近。

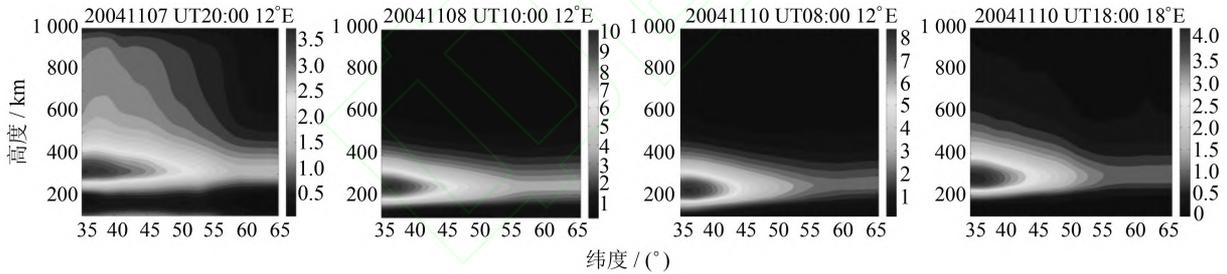


图4 磁暴不同发展阶段12°E 经度面上电子密度重构图/(10¹¹ e · m⁻³)

Fig.4 Ionospheric Electron Density Distribution at the Plane of 12°E During the Storm

2.2 2004 年11 月上旬磁暴

图4 给出了本次磁暴不同阶段12°E 面上电子密度重构图。可以看出, 磁暴主相阶段重构区域发生了"正相暴", 此结论与徐继生等通过分析全球TEC 获得的结果一致^[9]。电子密度值变化较大的范围为35° N ~ 55° N ; 主相期间最大电子密度高度在250 km 附近, 初相和恢复相期间均在300 km 附近。图5 给出了磁暴主相阶段不同经度面上电子密度分布情况, 可以看出, 各经度面上电子密度沿纬度和高度方向的变化趋势基本一致。

对图4 和图5 磁暴主相阶段的电子密度重构图分析可知: ① 2004-11 月上旬磁暴引起的电离层

暴具有显著的纬度效应: 重构区域内较低纬度区域(30° N ~45° N) 电子密度显著增大。② 磁暴期间电子密度极大值高度随磁暴发展发生变化: 初相和恢复相阶段约为300 km , 主相阶段下降到约250 km 。

2.3 2006 年12 月中旬磁暴

图6 为本次磁暴不同发展阶段12°E 面上电子密度重构图。从图6 可以看出, 反演区域电离层发生了"正相暴"; 初相和恢复相期间最大电子密度高度在300 km 附近, 主相阶段则在200 km 附近。图7 给出了磁暴主相阶段不同经度面上电子密度分布情况, 12 月15 日整个反演区域内, 电子密度值较大区域在35° N ~ 45° N 范围内。不

同经度面上电子密度沿纬度方向分布基本一致,

均表现为从低纬到高纬逐渐减小。

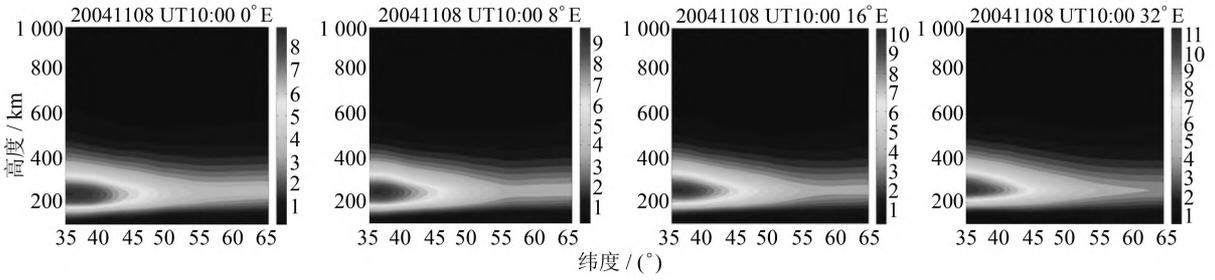


图5 第一个磁暴主相阶段不同经度面上电子密度重构图/($10^{11} \text{ e} \cdot \text{m}^{-3}$)

Fig.5 Ionospheric Electron Density Distribution at Different Longitude Planes in First Main Phase

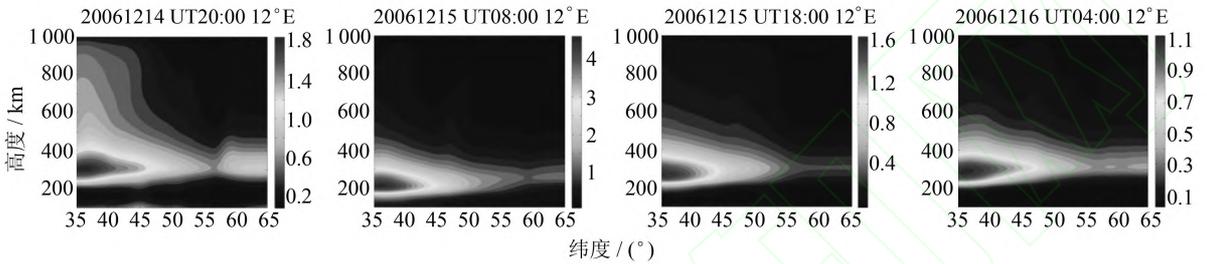


图6 磁暴不同发展阶段12°E 经度面上电子密度重构图/($10^{11} \text{ e} \cdot \text{m}^{-3}$)

Fig.6 Ionospheric Electron Density Distribution at the Plane of 12°E During the Storm

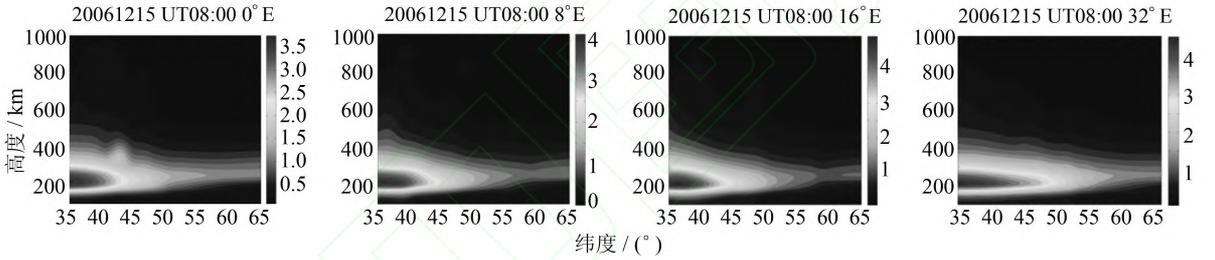


图7 磁暴主相阶段不同经度面上电子密度重构图/($10^{11} \text{ e} \cdot \text{m}^{-3}$)

Fig.7 Ionospheric Electron Density Distribution at Different Longitude Planes in the Main Phase

从图1 可知,2006 年12 月中旬磁暴强度是3 次磁暴中最低的,然而从图6 可以看出,它在反演区域内引起的电离层扰动程度与其余3 次磁暴是相当的。总结可知:① 2006-12 中旬磁暴引起的电离层暴具有很强的纬度效应:磁暴发生过程中重构区域内较低纬度区域(35°N ~45°N)电子密度变化较大。② 磁暴期间电子密度极大值所在高度随磁暴发展发生变化:初相阶段约为300 km,主相阶段下降到约250 km,恢复相阶段回升至300 km。

3 结 语

本文采用基于 MART 算法的电离层三维层析技术,对2003 ~2006 年间三次磁暴期间欧洲区域上空电离层电子密度时空分布进行了重构,并

进行了电子密度三维演变分析。3 次磁暴发生时刻,电离层均呈现不同程度的正扰动或负扰动。磁暴不同发展阶段12°E 经度面上的电子密度重构图表明电离层扰动情况与磁暴发展过程基本一致。对于2003-10 月下旬和2004-11 月上旬的两次双主相型磁暴,磁暴发展过程比较复杂,重构结果能完整地再现电离层在磁暴发生时刻的三维时空分布和扰动情况。对比本文3 次磁暴期间电离层电子密度三维层析及演变分析结果,可以得出:① 磁暴引起的电离层扰动具有明显的纬度效应,3 次磁暴均表现为较低纬度处(35°N ~50°N)的明显电离层扰动。② 从整体上看,电子密度极大值所在高度随磁暴的发展发生变化。除2003-10 月下旬磁暴前后电子密度极大值所在高度基本保持不变外,其余两次均随着磁暴的发展,在主相阶段呈现显著的增高或降低。

参 考 文 献

- [1] Zou Yuhua, Xu Jisheng. Reconstruction Formula of Time-dependent 3-D Computerized Ionospheric Tomography with Ground-based GPS and Occultation Observations[J]. Journal of Guilin University of Electronic Technology, 2005, 25(5): 56-60 (邹玉华, 徐继生. GPS 地基与掩星观测结合的时变三维 CIT 重建公式[J]. 桂林电子工业学院学报, 2005, 25(5): 56-60)
- [2] Thampi S V, Lin Charles, Liu Huixin, et al. First Tomographic Observations of the Midlatitude Summer Nighttime Anomaly over Japan[J]. J Geophys Res, 2009, 114: A10318, doi: 10.1029/2009JA014439
- [3] Yizengaw E, Dyson P L, Essex E A, et al. Ionosphere Dynamics over the Southern Hemisphere During the 31 March 2001 Severe Magnetic Storm Using Multi-instrument Measurement Data[J]. Ann Geophys, 2005, 23(3): 707-721
- [4] Wen Debao, Yuan Yunbin, Ou Jikun, et al. Ionospheric Temporal and Spatial Variations During the 18 August 2003 Storm over China[J]. Earth Planets and Space, 2007, 59(4): 313-317
- [5] Wen Debao, Yuan Yunbin, Ou Jikun, et al. Ionospheric Response to the Geomagnetic Storm on August 21, 2003 over China Using GNSS-Based Tomographic Technique[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens, 2010, 48: 3 212-3 217
- [6] Yao Yibin, Chen Peng, Wu H, et al. Analysis of Ionospheric Anomalies Before the 2011 Mw 9.0 Japan Earthquake[J]. Chin Sci Bull, 2012, 57(5): 500-510
- [7] Xiong Nianlu, Tang Cunshen, Li Xingjian. Introduction to Ionospheric Physics[D]. Wuhan: Wuhan University Press, 1997 (熊年禄, 唐存深, 李行健. 电离层物理概论[D]. 武汉: 武汉大学出版社, 1997)
- [8] Wen Debao. Investigation of GPS-based Ionospheric Tomographic Algorithms and Their Applications[D]. Wuhan: Institute of Geodesy and Geophysics Chinese Academy of Sciences, 2007 (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)
- [9] Xu Jisheng, Luo Weihua, Cheng Guanghui. A Study of Global Ionospheric Disturbances During a Strong Magnetic Storm[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(4): 606-611 (徐继生, 罗伟华, 程光辉. 一次强磁暴期间全球电离层扰动研究[J]. 电波科学学报, 2008, 23(4): 606-611)

Analysis of Europe Ionospheric Responses During Magnetic Storms in 2003-2006 Using Ionospheric Tomographic Technology

YAO Yibin¹, CHEN Jiajun¹, CHEN Peng², KONG Jian^{1,3}

¹ School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

² College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China

³ Ohio State University School of Earth Science, Columbus, OH, USA

Abstract: Based on GNSS observations from the IGS, this paper reconstructed the 3D spatial and temporal distribution of ionospheric electron density over Europe during three strong magnetic storms in 2003-2006, using computerized ionospheric tomographic technology (CIT). The reconstructed images present the 3D structure of ionospheric electron density. By analyzing the evolutionary process of ionospheric disturbances, the paper shows that ionospheric responses are coincident with the development of magnetic storms; and further that such disturbances have a remarkable latitudinal effect. Additionally, the altitudes where electron densities are the maximum also changed during the magnetic storms. The research and analyses in this paper illustrate that CIT can reflect the distribution and involvement of electron densities in each longitude, latitude, and altitude lane. CIT is shown to be useful for improved analyses of ionospheric disturbances during magnetic storms.

Key words: magnetic storms; ionosphere; 3D computerized tomography; electron density