

文章编号:1671-5942(2013)01-0013-04

# 用BP神经网络技术探测汶川地震前电离层NmF2异常扰动<sup>\*</sup>

熊晶<sup>1,2)</sup> 吴云<sup>1,2)</sup> 林剑<sup>1,2)</sup>

(1)中国地震局地震研究所(地震大地测量重点实验室),武汉 430071

(2)中国地震局地壳应力研究所武汉科技创新基地,武汉 430071

**摘要** 基于 UCAR 公布的电离层 F2 层最大电子密度数据 NmF2, 利用人工神经网络技术, 构建局部地区 NmF2 模型。以年积日 DOY、当地时 LT、经度 LON、纬度 LAT 和 F10.7 太阳活动指数 FLUX 为网络输入, 以 NmF2 为网络输出, 提供磁平静期 NmF2 模型值作为参考背景, 通过模型值与观测值的比较, 发现 2008 年 5 月 12 日汶川 7.9 级地震前震中附近上空 NmF2 在震前第 6~4 天(6—8 日)减小约 30%, 震前第 3~2 天(9—10 日)明显增大约 40%。

**关键词** 人工神经网络;掩星;地震前兆;电离层;电子密度

中图分类号:P315.72

文献标识码:A

## IONOSPHERIC ELECTRON DENSITY ANOMALIES DETECTED BY BP ARTIFICIAL NEURAL NETWORK BEFORE WENCHUAN EARTHQUAKE

Xiong Jing<sup>1,2)</sup>, Wu Yun<sup>1,2)</sup> and Lin Jian<sup>1,2)</sup>

(1)Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071

(2)Wuhan Base of Institute of Crustal Dynamics, CEA, Wuhan 430071

**Abstract** On the basis of the F2 layer peak electron density (NmF2) from University Corporation for Atmospheric Research (UCAR), we constructed a Back Propagation (BP) artificial neural network (ANN) in order to detect pre-earthquake anomalies for the first time. The ANN provides NmF2 model value with five parameters: DOY, local time (LT), longitude (LON), latitude (LAT) and solar activity index of F10.7 (FLUX). We compare the model value with observations during the Wenchuan earthquake. It is found that NmF2 around the forthcoming epicenter decreased remarkably in the afternoon period of day 6—4 before the earthquake, but enhanced day 3—2 before the earthquake.

**Key words:** artificial neural network (ANN); occultation; earthquake precursor; ionosphere; electron density

## 1 引言

地震电离层前兆研究表明, 大地震发生前, 孕震区上空电离层 F2 层最大电子密度 NmF2 (F2 layer peak electron density) 和电离层电子密度总含量 TEC (Total Electron Content) 会出现异常变化<sup>[1-10]</sup>。但

在这些研究成果中, 电离层异常判断的背景值是基于震前多天观测值的均值, 而这种异常判断方法无法保证背景值不会受到地震活动的影响, 所以其准确性值得商榷。本文将采用 BP(Back Propagation) 神经网络技术, 利用 2006—2010 年 UCAR 公布的 NmF2 数据, 建立局部地区电离层模型, 解算电离层

\* 收稿日期:2012-10-16

基金项目:中国地震局行业专项(201108004)

作者简介:熊晶,男,1982 年生,助理研究员,主要从事空间大地测量和地震电离层效应方面的研究. E-mail:whu.xiongjing@gmail.com

NmF2, 提供“干净”的电离层 NmF2 参考值, 以避免异常判断方法的弊端。

掩星观测与电离层测高仪、卫星电离层顶部探测、地基 TEC 观测等电离层探测手段相比, 掩星观测能够提供准实时、高精度、全天候的全球电离层三维电子密度数据, 而且, 相关研究结果表明掩星探测数据反演的电子密度剖面与非相关散射雷达和电离层测高仪观测结果一致<sup>[11,12]</sup>。目前, 美国、德国、阿根廷等多个国家均有掩星计划在研或运行, 而中国台湾地区与美国合作的 COSMIC ( Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate) 是迄今为止最成功的掩星计划<sup>[13]</sup>, 它由 6 颗在 800km 处运行的低轨小卫星组成观测星座, 在轨期间能提供每天最多约 3 000 个掩星探测剖面, 虽然现在卫星已到使用寿命, 但其在轨 6 年累计的观测数据能为电离层模型的建立提供丰富的电离层电子密度数据, 而且正在研制的 COSMIC-2 系统, 预计其数据观测能力将十倍于 COSMIC-1。

为了研究 2008 年 5 月 12 日汶川 7.9 级地震前孕震区电离层电子密度的变化情况, 我们选取 UCAR 公布的 2006-08—2010-12 月电离层 F2 层最大电子密度 NmF2, 建立以震中为中心, 经纬向跨度为  $80^\circ \times 80^\circ$  ( $10^\circ\text{S} \sim 70^\circ\text{N}, 60^\circ\text{E} \sim 140^\circ\text{E}$ ) 的区域电离层 NmF2 模型, 解算震前孕震区上空各掩星 NmF2 探测点的模型值, 通过观测值与模型值的比较, 研究汶川地震前电离层是否出现异常变化。

## 2 BP 神经网络构建

选取年积日 DOY、当地时 LT、经度 LON、纬度 LAT 和 F10.7 太阳活动指数 FLUX 为网络输入, 掩星观测点 NmF2 为网络输出, 利用 MATLAB 神经网络工具箱构建 BP 网络模型, 以 2006-08—2010-12 月考察范围内的数据集训练网络。另外, 由于在磁暴发生时期, COSMIC 数据误差较大, 为了使模型更加精确, 我们剔除磁扰时段 ( $k_p \leq 3$ ) 的数据。而且, 在日出日落时段, 电离层电子密度变化剧烈, 故也将此时段的数据剔除。目前的研究显示, 汶川地震前的电离层异常主要出现在当地的下午时段, 同时, 为了避免过多的数据导致 MATLAB 运算内存溢出错误, 故只选取考察区域当地时 12:00LT—17:00LT 的掩星探测数据来训练网络。

另外, 为了确保区域电离层模型的准确性, 我们采用均方根 (RMS, Root mean Square Error) 描述网络的整体误差。其中,  $O_i$  为观测值,  $M_i$  为模型值,  $N$  为符合筛选条件的掩星 NmF2 观测点的总数。经过比较各种网络参数的组合, 例如: 隐层数及神经元个数、激活函数、学习速率、期望误差等, 得出最优的网络参数组合, 根据

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (O_i - M_i)^2}$$

得到对应的最小网络误差为:  $RMS = 1.1 \times 10^5 \text{ el/cm}^3$ 。

## 3 数据对比与分析

针对汶川地震前出现的电离层异常, 目前的研究成果均基于 TEC 数据<sup>[6-9]</sup>, 而电离层 NmF2 与 TEC 有明显的正相关性<sup>[14-16]</sup>, 于是可以将汶川震前 TEC 的异常变化情况与 NmF2 的变化情况相比对。相关研究表明, 汶川地震前第 3 天 (5 月 9 日) 当地时下午 17:00LT 震中附近 2 495km 半径范围内, 震中南部及东南部上空 TEC 出现明显的增强现象, 幅度增大约 40% ~ 50%。图 1(a) 黑色虚线圈内为 NmF2 明显增大的区域, 半径约为 2 000km, 两条蓝色实线之间的 NmF2 观测点将用来代表震中所在经度带内 NmF2 在不同纬度的变化情况; 图 1(b) 表示震中附近 3 个 NmF2 观测点对应掩星事件的电子密度剖面显示的 2008 年 5 月 9 日 12:00LT—17:00LT 考察区域内的电离层 NmF2 观测值与由 BP 神经网络模型解算相应的 NmF2 模型值之间的偏离程度, 表示为:  $(O-M)/M$ , 其中,  $O$  为 NmF2 观测值,  $M$  为对应 NmF2 观测点的模型值。从图 1(a) 可以看出, 震中南侧大约 475km ( $95\text{km}/^\circ \times 5^\circ = 475\text{km}$ ) 处, 电离层 NmF2 出现明显增强的现象 (图 1(a) 中的 3 号 NmF2 点), 幅度约为 50%, 而离 3 号 NmF2 点西南向约 100km 的处的 2 号 NmF2 点幅度增大不到 10%, 震中东侧大约 2 000km ( $115\text{km}/^\circ \times 20^\circ = 2 300\text{km}$ ) 的 1 号 NmF2 点也出现增大的现象, 增强幅度约为 20%, 在考察区域其他地区的 NmF2 没有出现明显的异常, 变化的幅度基本低于 10%。

地震前第 2 天 (5 月 10 日) 当地时下午时段, TEC 的变化幅度没有超过异常阈值 (图 2, (a) 表示汶川地震前第 2 天 (2008 年 5 月 10 日) 12:00LT—17:00LT 考察范围内的电离层 NmF2 观测值与对应点模型值的偏差程度, 黑色虚线圈内为 NmF2 明显增大的区域, 半径约为 2000km, 两条蓝色实线之间的 NmF2 观测点将用来代表震中所在经度带内 NmF2 在不同纬度的变化情况; (b) 表示震中附近 4 个 NmF2 观测点对应掩星事件的密度剖面)。与基于 TEC 的研究结果不同的是, 图 2(a) 显示 NmF2 出现显著增大的现象, 幅度达到 50%。

图 3(a) 为 4 月 28—5 月 19 日震中所在的区域 ( $10^\circ\text{S} \sim 70^\circ\text{N}, 83^\circ\text{E} \sim 123^\circ\text{E}$ , 即图 1、2 中蓝色实线之间的区域), 各天下午时段 12:00LT—17:00LT 内 NmF2 观测值相对模型值的变化情况。图 3(b) 为对震中所在的经度带以  $5^\circ$  划分纬度, 用各纬度区域内 NmF2 偏离程度的均值代表该区域 NmF2 的变化情况。图 3(c) 表示上述时期  $K_p$  指数的变化情况, 经查询国家空间天气监测预警中心的空间天气报告 (<http://spaceweather.cma.gov.cn/bulletin/month/>), 虽然 4 月底至 5 月初没有发生小磁暴, 但 4 月 28—5

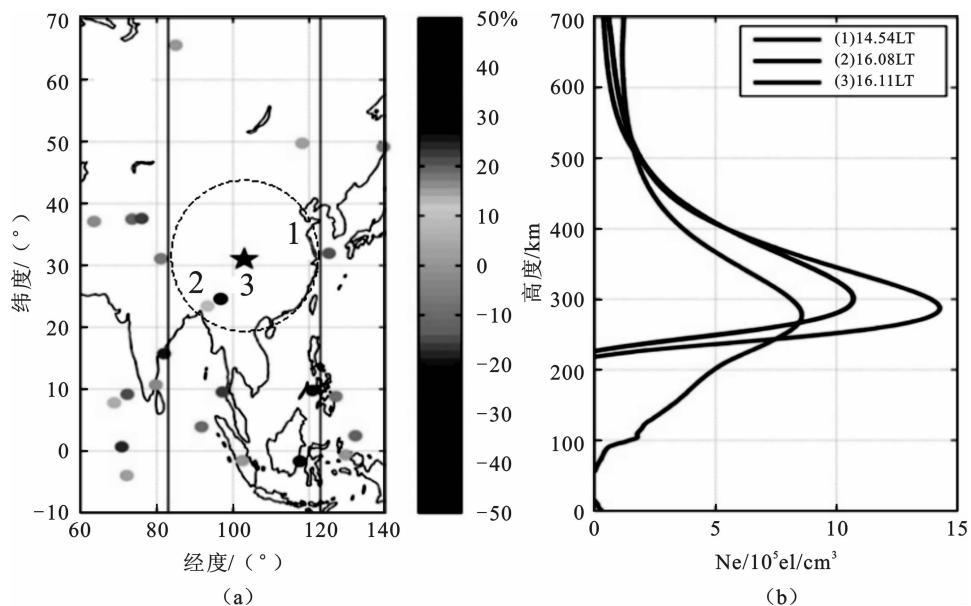


图1 NmF2 观测值相对模型值的变化程度和对应掩星事件剖面(2008-05-09)

Fig. 1 Deviations between NmF2 observations and model values and three occultation profile in the circle (2008-05-09)

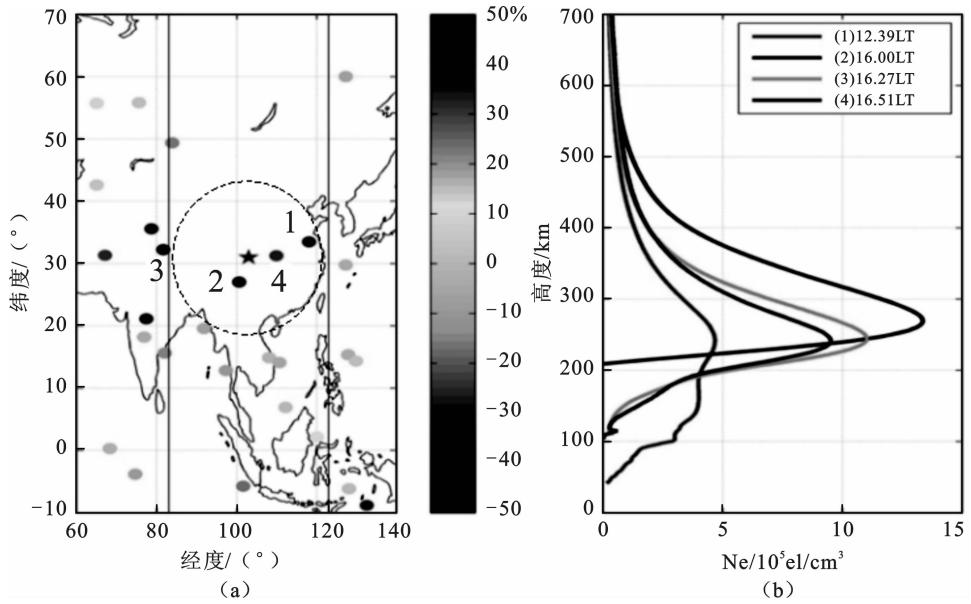


图2 NmF2 观测值相对模型值的变化程度和对应掩星事件剖面(2008-05-09)

Fig. 2 Deviations between NmF2 observations and model values and three occultation profile in the circle (2008-05-10)

月5日K<sub>p</sub>指数均在3左右,说明地磁环境较为活跃,从图3(b)可看出,此段时间各纬度区域的NmF2均出现明显扰动,5月3—5日电离层出现明显的正扰动,这与TEC的异常分析结果相一致。而后直到5月19日,K<sub>p</sub>指数均在2以下,说明地磁环境极为平静,但6—8日NmF2出现明显的负异常,幅度约30%,而9日出现明显正异常,幅度达到40%,TEC的异常分析也有类似的现象。另外,10日也出现明显正异常,幅度达到50%,这与TEC的分析结果不同。

## 4 结论

图1显示汶川地震前第3天(5月9日)震中附近上空电离层下午时段出现NmF2显著增强的现

象,相关研究表明,当天下午的TEC及foF2也有明显增强的现象。震前第6~4天(5月6—8日)出现一系列NmF2减小的现象,同时,TEC也出现类似的情况。与TEC分析结果的一致性,说明采用BP神经网络建立区域电离层模型的分析方法是可靠的。而5月10日的TEC没有出现异常增大的现象,我们认为这有可能是与TEC异常分析的方法有关,其异常判断的阈值基于当前观测值若干天前的观测值均值,则阈值很可能已经包含了地震活动对电离层的影响,而我们采用模型值作为异常判断的阈值,可以避免上述方法的弊端。

目前,关于地震电离层耦合效应的物理机理还没有定论,有研究证明,地震前孕震区岩石的微破裂

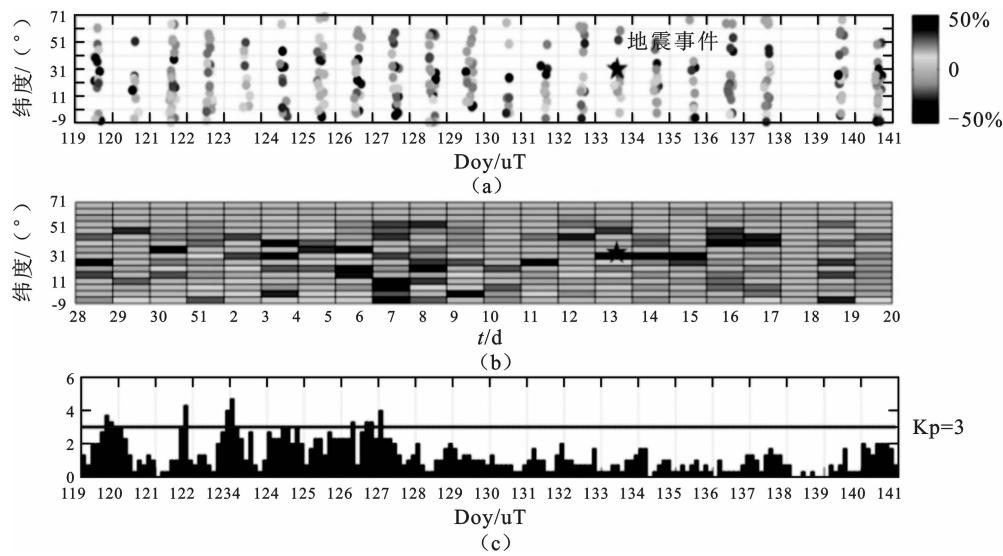


图 3 NmF2 观测值与模型偏差情况的统计与 Kp 指数

Fig. 3 Statiesics of the deviations between NmF2 observations and model values and the Kp index

可以产生大量正电子穴,大量的正电子穴足以影响孕震区的电磁环境,其产生的上升电场可以造成 NmF2 和 TEC 的显著减小<sup>[17,18]</sup>。但是,尚没有相关理论能解释地震前 NmF2 增强的现象,有可能是孕震区存在下降电场造成,这需要进一步的研究和论证。综上所述,在空间天气平静的情况下,我们认为 5 月 6—8 日 NmF2 减弱和 5 月 9—10 日 NmF2 增强的现象极有可能与地震孕育活动有关。

致谢 感谢 COSMIC 数据中心 CDAAC 和美国国家地球物理数据中心提供相关研究数据。

## 参 考 文 献

- 1 Hayakawa M and Molchanov O A. Seismo electromagnetics: Lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling [ M ]. Tokyo, 2000.
- 2 Liu J Y, et al. Chuo, seismo-ionospheric signatures prior to  $M \geq 6.0$  Taiwan earthquakes [ J ]. Geophys Res Lett., 2000, 27:3 113 – 3 116.
- 3 Liu J Y, et al. Variations of ionospheric total electron content during the Chi-Chi earthquake [ J ]. Geophys Res Lett., 2001,28:1 381 – 1 386.
- 4 Pulinets S and Boyarchuk K. Ionospheric precursors of earthquakes [ M ]. Berlin:Springer,2004.
- 5 Liu J Y, et al. Temporal and spatial precursors in the ionospheric global positioning system ( GPS ) total electron content observed before the 26 December 2004  $M9.3$  Sumatra-Andaman earthquake [ J ]. Journal of Geophysical Research, 2010,115:A09312.
- 6 Zhao B Q, et al. Is an unusual large enhancement of ionospheric electron density linked with the 2008 great Wenchuan earthquake? [ J ]. Jounal of Geophysical Research, 2008,113:A11034.
- 7 Liu J Y, et al. Seismoionospheric GPS total electron content anomalies observed before the 12 May 2008  $Mw7.9$  Wenchuan earthquake [ J ]. Journal of Geophysical Research, 2009,114:A04320.
- 8 Zhou Y Y, et al. Ionospheric anomalies detected by ground-based GPS before the  $Mw7.9$  Wenchuan earthquake of May 12, 2008 ,China [ J ]. Journal of Atmospheric and Solar-terrestrial Physics,2009,959 – 966.
- 9 Lin J, et al. Wenchuan earthquake ionosphere TEC anomaly detected by GPS[ J ]. Chinese Journal of Geophysics,2009, 52(1):297 – 300.
- 10 KosukeHeki. Ionospheric electron enhancement preceding the 2011 Tohoku-Oki earthquake[ J ]. Geophysical Research Letters,2011,38:L17312.
- 11 Schreiner W, et al. Estimates of the precision of GPS radio occultations from the COSMIC/FORMOSAT-3 mission[ J ]. Geophys Res Lett., 2007, 34:L04808.
- 12 Lei J, et al. Comparison of COSMIC ionospheric measurements with ground-based observations and model predictions: preliminary results[ J ]. J Geophys Res., 2007, 112: A07308.
- 13 Rocken C, et al. COSMIC system description [ J ]. Terr Atmos Ocean Sci. ,2000, 11(1):21 – 52.
- 14 Liu J Y, et al. Variations of ionospheric total electron content during the Chi-Chi earthquake[ J ]. Geophys Res Lett., 2001,28:1 381 – 1 386.
- 15 Liu J Y, et al. Ionospheric foF2 and TEC anomalous days associated with  $M \geq 5.0$  earthquakes in Taiwan during 1997 – 1999 [ J ]. Terr Atmos Oceanic Sci. ,2004,15:371 – 383.
- 16 Liu J Y, et al. Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements, Ann [ J ]. Geophys. ,2004,22:1 585 – 1 593.
- 17 Bolt B A. Earthquake(4th ed)[ M ]. New York,1999.
- 18 Freund F. Time-resolved study of charge generation and propagation in igneous rocks [ J ]. J Geophys Res. , 2000, 105:11 001 – 11 019.