

刘静, 姜春华, 邓迟, 杨国斌, 张学民, 娄文字, 杨春华. 2016. 我国西南地区电离层垂测网数据应用研究. 地震学报, 38(3): 399–407. doi:10.11939/jass.2016.03.007.
Liu J, Jiang C H, Deng C, Yang G B, Zhang X M, Lou W Y, Yang C H. 2016. Vertical ionosonde net and its data application in southwestern China. Acta Seismologica Sinica, 38(3): 399–407. doi:10.11939/jass.2016.03.007.

我国西南地区电离层垂测网数据应用研究^{*}

刘 静^{1),*} 姜春华²⁾ 邓 迟³⁾ 杨国斌²⁾
张学民¹⁾ 娄文字¹⁾ 杨春华⁴⁾

1) 中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所
2) 中国武汉 430072 武汉大学电子信息学院
3) 中国四川乐山 614000 乐山师范学院
4) 中国云南普洱 665000 普洱市地震局

摘要 本文基于我国西南地区电离层垂测网普洱站和乐山站的基础数据, 结合空间天气事件指数, 通过限定不同阈值的滑动平均方法, 提出靠近南部的普洱站应选取中值 $M \pm 1.5\sigma$ (标准差) 作为限定阈值, 靠近北部的乐山站应选取中值 $M \pm IQR$ (四分位距) 作为限定阈值. 在此基础上, 利用本文提出的扰动识别方法, 对 2015 年 4 月 25 日尼泊尔 $M_s 8.1$ 地震予以分析. 研究结果显示, 震前 1 天普洱站和乐山站均出现了正向扰动, 震前 3 小时乐山站持续出现负异常. 根据规划, 我们还将西南地区建立 1—2 个垂测台站, 架设数台被动接收垂测仪信号的电离层斜向探测仪, 通过组网对西南地区上空的电离层进行监测, 为分析震前电离层扰动提供数据支持.

关键词 电离层垂测 异常提取 尼泊尔 $M_s 8.1$ 地震
doi:10.11939/jass.2016.03.007 **中图分类号**: P352.7 **文献标志码**: A

Vertical ionosonde net and its data application in southwestern China

Liu Jing^{1),*} Jiang Chunhua²⁾ Deng Chi³⁾ Yang Guobin²⁾
Zhang Xuemin¹⁾ Lou Wenyu¹⁾ Yang Chunhua⁴⁾

1) Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China
2) Electron and Information School, Wuhan University, Wuhan 430072, China
3) Leshan Normal University, Sichuan Leshan 614000, China
4) Earthquake Administration of Pu'er City, Yunnan Pu'er 665000, China

Abstract: In order to monitor the ionospheric change in southwestern China, two stations were established in Pu'er City of Yunnan Province and Leshan Normal University of Sichuan Province jointly by Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration and Wuhan University. Based on the

^{*} 基金项目 国家国际科技合作专项(2014DFR21280)、国家自然科学基金(41511130032)和亚太空间合作组织国际科技合作项目“亚太地区地电电离层监测及地震扰动特征研究”(APSCO-SP/PM-EARTHQUAKE)共同资助.

收稿日期 2015-10-28 收到初稿, 2015-12-16 决定采用修改稿.
⁺ 通讯作者 e-mail: liujingeva@163.com



vertical ionosonde data from the two stations and space weather events, we used the moving average method with different threshold to extract ionospheric perturbation, and selected median $\pm 1.5\text{Std}$ and median $\pm \text{IQR}$ as the threshold at the stations Pu'er and Leshan, respectively. Furthermore, using this method, we analyzed the data before Nepal $M_s 8.1$ earthquake occurred at 14:11 on 25 April 2015. The results showed that there were positive anomalies in April 24 at the two stations Pu'er and Leshan, and negative anomalies lasting for three hours at Leshan station before the Nepal earthquake. According to our plan, besides the two stations, one or two vertical ionosonde stations and several oblique ionosondes will be set up in southwestern China, which will monitor the ionosphere over the region, and provide data for analyzing seismo-ionospheric disturbance.

Key words: vertical ionosonde; anomaly extraction; Nepal $M_s 8.1$ earthquake

引言

在近地空间中,电离层作为电波传播介质对人类活动具有重要影响,其时空剧烈变化会导致全球短波通信质量和卫星导航定位精度极大降低;因此,电离层探测研究作为近地空间环境研究的重要组成部分,历来受到空间物理界的重视。

20 世纪 50 年代之前,探测电离层物理特性主要使用地面测高仪;50 年代后期,人造地球卫星的成功发射,为电离层探测提供了强有力的探测工具,极大地促进了高层大气物理探测技术的发展。现阶段,全球定位系统(Global Positioning System, 简称为 GPS)探测、非相干散射雷达、斜向探测、斜向返回探测、长波探测等多种手段,均被广泛应用于电离层探测中(熊年禄等, 1999)。20 世纪 70—90 年代,美国、前苏联先后建立起各自的全球卫星导航定位系统,即 GPS 和 GLONASS (Global Navigation Satellite System)。目前,欧盟和我国的全球卫星导航定位系统“伽利略”(Galileo)和“北斗”也正在架设中(李强等, 2012)。这些卫星导航定位系统的建立,使得利用稠密的、连续运行的多功能监测网的观测数据进行高时空分辨率电离层动态监测成为可能(万卫星等, 2007)。

我国电离层垂测站始建于 20 世纪 40 年代,目前中国电波传播研究所已建成 13 个电离层垂测站,覆盖了我国中低纬地区(徐彤等, 2012),积累了数个太阳周的电离层观测数据。中国科学院地质与地球物理研究所沿 120°E 经度链建立了漠河、北京、武汉、三亚等 4 个台站,均装置了垂测仪、流星雷达和用于气辉观测、闪烁观测的仪器,并使用长时间观测数据开展了大量的电离层研究(Li *et al.*, 2013; Yu *et al.*, 2013)。

在中国地震局地震预测研究所修缮购置项目的支持下,2013 年中国地震局地震预测研究所和武汉大学在云南省普洱市大寨台站(普洱站)和四川省乐山师范学院(乐山站)共同建立了两个常规电离层垂测站,用于监测电离层特性的基本变化,并通过对扰动提取方法的研究,分析电离层扰动与非震及地震的相关性。

1 电离层垂测管理系统

1.1 台站建设

普洱站位于云南省普洱市地震局大寨观测站内。该站始建于 2013 年 1 月,2013 年 5

月实现全天候无人值守常规观测。图 1 给出了该站垂测仪发射天线、接收天线及机房所在位置。



图 1 普洱站构建图
Fig. 1 Layout for the Pu'er station

乐山站位于乐山师范学院院内，始建于 2013 年 12 月，2014 年 1 月实现全天候无人值守常规观测。

1.2 数据管理

鉴于普洱站和乐山站均位于我国西南地区，为了实现探测设备的网络化管理、无人值守以及探测数据的自动处理，我们通过互联网将观测站与北京、武汉数据服务中心联网，便于实现观测数据实时传输至数据服务中心。通过自动判读软件对探测数据文件进行处理，自动提取电离层的特性参数，并将所获取的电离层参数存入数据库，便于后期对该数据进行处理及分析。利用 SQLServer 数据库服务器，实现电离层探测参数的数据化管理；利用 Server-U ftp 服务器，实现探测文件在网络内的传输。该数据管理系统的布局示意图如图 2 所示。

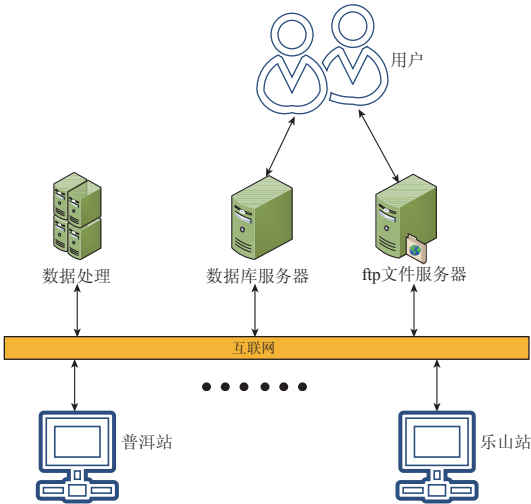


图 2 普洱和乐山电离层垂测站的数据管理系统示意图
Fig. 2 Schematic diagram of data management system for ionosonde stations
Pu'er and Leshan

1.3 电离图编辑软件(ionoEditor)

电离层垂测网使用武汉大学自主开发的一套电离图自动判读软件 ionoEditor; 从目前的判读结果来看, 其误差可以控制在合理的范围之内, 与人工判读的结果相比, 判读精度在 85% 以上. 如图 3 所示, 该软件能够给出的电离图判读参数有电离层最大反射频率(f_xI)、 F_2 层寻常波临界频率(f_oF_2)、 F_1 层寻常波临界频率(f_oF_1)、E 层寻常波临界频率(f_oE)、 E_s 层寻常波临界频率(f_oE_s)和 F_2 层电离层虚高($h'F_2$), 在自动处理完电离图之后, 对应的电离层参数及探测文件会通过网络传输至业务服务器中心(数据库服务器、文件服务器). 除了自动判读功能, 电离图编辑软件还具有手动修正电离层判读参数的功能, 并可将判读结果保存至数据库.

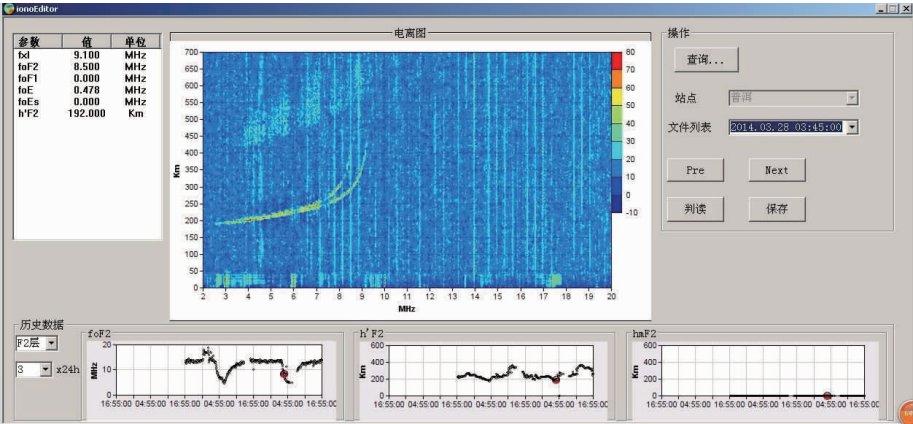


图 3 电离图编译软件界面

Fig. 3 Compiling software interface for the ionogram

1.4 数据分析软件(ionoAnalyzer)

电离层垂测网所使用的数据分析软件 ionoAnalyzer 也是由武汉大学自主研发的. 基于该软件, 用户可以通过连接数据库与互联网, 下载并绘制空间天气事件指数及垂测数据变化图, 也可以通过选取时间段、背景天数、异常阈值等参数对垂测数据进行分析 and 展示(图 4).

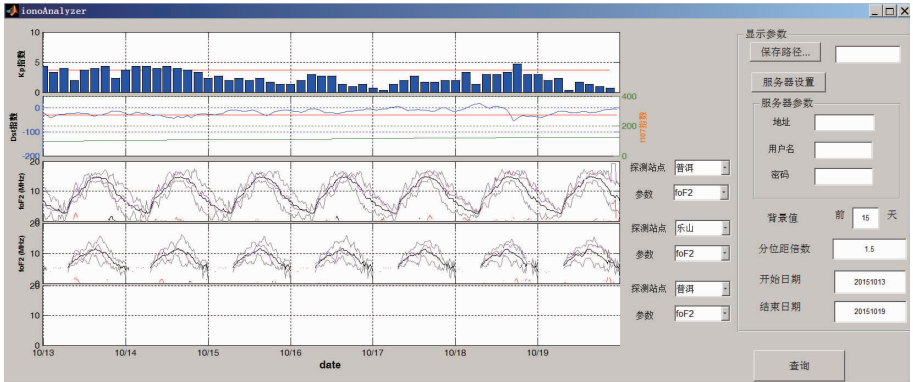


图 4 数据分析软件界面

Fig. 4 Software interface for data analyses

目前该垂测网内仅有两个垂测站，如后续增加台站，该软件也具有扩展功能，可实现多个台站的数据分析和同步显示。

2 异常提取方法

电离层扰动中，部分来自太阳活动、磁暴、亚暴、大气波动等空间事件，部分来自无线电通讯、火山、地震等地面事件。本文基于普洱站和乐山站的电离层垂测数据，通过限定不同阈值的滑动平均方法提取垂测数据中的扰动信息，并依据空间天气相关指数评价各阈值在提取相关空间天气事件引起电离层扰动的效能。采用 R 值计算方法(张国民等，2001)如下：

$$R = 1 - a - b, \quad (1)$$

式中： a 为漏报率， $a = \text{漏报次数} / \text{实际事件次数}$ ； b 为空报率， $b = \text{虚报次数} / \text{实际无事件次数}$ 。

普洱站自 2013 年 5 月 8 日起开始有观测数据，乐山站自 2013 年 12 月 19 日起开始有观测数据。本文将以 15 天为背景(Liu *et al.*, 2006)、以 1 天为步长进行滑动平均方法分析，计算观测数据前 15 天的中值 M ，四分位距 IQR ，标准差 σ 以及 10%，20%，25%，75%，80%，90% 分位值，分别设定 $M \pm IQR$ ， $M \pm 1.5IQR$ ， $M \pm 2IQR$ ， $M \pm \sigma$ ， $M \pm 1.5\sigma$ ， $M \pm 2\sigma$ ，10% 和 90%，20% 和 80%，25% 和 75% 为上下阈值，当异常连续出现 2 小时以上时视为电离层扰动。

按照上述标准提取普洱站 2013 年 5 月 23 日—2014 年 5 月 1 日和乐山站 2014 年 1 月 3 日—2014 年 5 月 1 日的电离层扰动。同时，将 $F_{10.7}$ 指数、 K_p 指数、 D_{st} 指数和 A_E 转化成北京时间的相应值，分析该时段内的太阳活动、磁暴和亚暴事件。当 $F_{10.7} > 160$ 时，本文认为扰动与太阳活动有关，该时段共发生 50 次；当 $K_p > 3$ 或 $D_{st} \leq -30$ nT 时认为扰动为磁暴事件，共发生 123 次；当 $A_E > 500$ nT 时则认为扰动为亚暴事件，共发生 118 次。

依据两个台站所提取的扰动及其与空间天气事件的对应关系，分别计算 R 值、扰动提取比值(扰动提取数量/该事件总次数 $\times 100$)、空报率(b)，具体结果如表 1 所示。

从扰动提取比值来看，四分位距、标准差和百分比所限定的阈值越低，针对每种事件所提取的扰动越好，但其空报率也明显增高。

从 R 值来看，普洱站以 $M \pm 1.5\sigma$ 作为阈值时 R 值较高，2013 年太阳活动事件较少，如不考虑对于太阳活动事件的预报能力，磁暴事件的 R 值可达 0.2061，亚暴事件的 R 值可达 0.1983，同时空报率也相对较低。相对而言，扰动提取对磁暴的预报能力要优于其对太阳活动事件和亚暴事件的预报能力，以 80% 和 20% 作为阈值， R 值可达 0.1035，以 90% 和 10% 作为阈值， R 值可达 0.1481。对于乐山站，以 1 倍 IQR 作为阈值时， R 值最高，磁暴事件的 R 值可达 0.2760，亚暴事件的 R 值可达 0.2881，太阳活动事件的 R 值相对较低，为 0.0914，同时，扰动提取比值也相对较高；以 $M \pm 1.5\sigma$ 作为阈值时，3 种事件的 R 值均为正，磁暴事件的 R 值可达 0.1478，亚暴事件的 R 值可达 0.2226；如不考虑太阳活动事件的 R 值，分别以 $M \pm 1\sigma$ ，90% 和 10% 作为阈值限定提取扰动，磁暴事件和亚暴事件的 R 值均大于 0.1。

由表 1 可看出，乐山站不同阈值的效果略优于普洱站，造成这种现象的原因可能有两个：其一，乐山站只分析了 2014 年的数据，而 2014 年的太阳活动明显增强，这使得事件空

报率有一定的降低;其二,普洱站比乐山站更靠近电离层赤道异常区,其扰动变化会更多且更不稳定,给空间天气事件预报造成更大困难.

依据上述分析,不同阈值分析方法适用于不同纬度上的台站,因此在日常数据分析应用中,我们分别选取 $M \pm 1.5\sigma$ 和 $M \pm \text{IQR}$ 作为普洱站和乐山站的限定阈值.

表 1 普洱站和乐山站不同阈值条件下各类事件的 R 值、扰动提取比值及空报率
Table 1 R value, disturbance ratio and false rate of forecast for different thresholds at the stations Pu'er and Leshan

| 阈值 | | R 值 | | 扰动提取比值 | | 空报率 | |
|------|-----------------------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|
| | | 普洱 | 乐山 | 普洱 | 乐山 | 普洱 | 乐山 |
| 太阳活动 | $M \pm \text{IQR}$ | -0.0179 | 0.0914 | 32.00% | 41.67% | 0.3379 | 0.3253 |
| 磁暴 | | 0.0984 | 0.2760 | 39.84% | 53.85% | 0.3000 | 0.2625 |
| 亚暴 | | 0.0186 | 0.2881 | 34.75% | 52.00% | 0.3289 | 0.2319 |
| 太阳活动 | $M \pm 1.5\text{IQR}$ | -0.0599 | 0.0425 | 8.00% | 13.89% | 0.1399 | 0.0964 |
| 磁暴 | | 0.0490 | -0.0481 | 16.26% | 7.69% | 0.1136 | 0.1250 |
| 亚暴 | | 0.0067 | 0.0186 | 13.56% | 12.00% | 0.1289 | 0.1014 |
| 太阳活动 | $M \pm 2\text{IQR}$ | 0.0020 | 0.0592 | 6.00% | 8.33% | 0.0580 | 0.0241 |
| 磁暴 | | 0.0358 | 0.0519 | 8.13% | 7.69% | 0.0455 | 0.0250 |
| 亚暴 | | -0.0114 | 0.0655 | 5.08% | 8.00% | 0.0622 | 0.0145 |
| 太阳活动 | $M \pm \sigma$ | -0.0797 | -0.0311 | 48.00% | 58.33% | 0.5597 | 0.6145 |
| 磁暴 | | 0.0961 | 0.2061 | 60.98% | 74.35% | 0.5136 | 0.5375 |
| 亚暴 | | 0.0042 | 0.1983 | 55.08% | 72.00% | 0.5467 | 0.5217 |
| 太阳活动 | $M \pm 1.5\sigma$ | -0.0335 | 0.0321 | 26.00% | 33.33% | 0.2935 | 0.3012 |
| 磁暴 | | 0.1077 | 0.1478 | 35.77% | 41.03% | 0.2500 | 0.2625 |
| 亚暴 | | 0.1343 | 0.2226 | 32.20% | 44.00% | 0.1877 | 0.2174 |
| 太阳活动 | $M \pm 2\sigma$ | -0.0365 | 0.0305 | 10.00% | 13.89% | 0.1365 | 0.1084 |
| 磁暴 | | 0.0743 | -0.0224 | 17.89% | 10.26% | 0.1045 | 0.1250 |
| 亚暴 | | 0.0325 | 0.1075 | 15.25% | 18.00% | 0.1200 | 0.0725 |
| 太阳活动 | 75% | -0.0474 | -0.0646 | 70.00% | 69.44% | 0.7474 | 0.7590 |
| 磁暴 | 25% | 0.0877 | 0.0442 | 79.67% | 76.92% | 0.7091 | 0.7250 |
| 亚暴 | | -0.0179 | 0.0354 | 72.88% | 76.00% | 0.7467 | 0.7246 |
| 太阳活动 | 80% | -0.0626 | -0.1275 | 62.00% | 58.33% | 0.6826 | 0.7108 |
| 磁暴 | 20% | 0.1035 | 0.1061 | 73.98% | 74.36% | 0.6364 | 0.6375 |
| 亚暴 | | 0.0069 | 0.0823 | 67.80% | 72.00% | 0.6711 | 0.6377 |
| 太阳活动 | 90% | -0.1920 | -0.0402 | 18.00% | 33.33% | 0.3720 | 0.3735 |
| 磁暴 | 10% | 0.1481 | 0.1490 | 43.90% | 46.15% | 0.2909 | 0.3125 |
| 亚暴 | | 0.0311 | 0.2046 | 36.44% | 48.00% | 0.3333 | 0.2754 |

注: IQR 为四分位距, σ 为标准差.

3 尼泊尔 $M_s8.1$ 地震的电离层异常分析

2015 年 4 月 25 日 14 时 11 分(北京时间)尼泊尔发生 $M_s8.1$ 地震,震中位置为 $(84.65^{\circ}\text{E}, 28.15^{\circ}\text{N})$,普洱站和乐山站分别距离震中 17° 和 19° . 按照孕震区半径 D 与震级 M 的关系 $D=10^{0.43M}$ (Dobrovolsky *et al*, 1979)可知, $M_s8.1$ 地震可影响半径约为 3300 km 的圆周区域,该范围涵盖了普洱和乐山两个垂测台站,因此提取两个台站震前 7 天及震后 2 天数据进行研究,有可能会揭示出震前电离层扰动. 按上述选定的扰动提取阈值分别对两个台站相应的数据进行分析,结果如图 5 所示. 可以看出,在尼泊尔地震前后 10 天数据中,普洱站在震前 1 天(4 月 24 日)出现正向扰动,持续时间约为 2 小时 30 分钟;乐山站在

4 月 22 日、23 日和 24 日均出现正向扰动, 25 日出现负向扰动. 经对比空间天气事件指数, 本文认为 22 日和 23 日的扰动应与磁暴和亚暴事件有关, 而 24 日两台站的异常及 25 日乐山站震前持续 3 小时的异常应与尼泊尔 $M_s8.1$ 地震有一定的相关性.

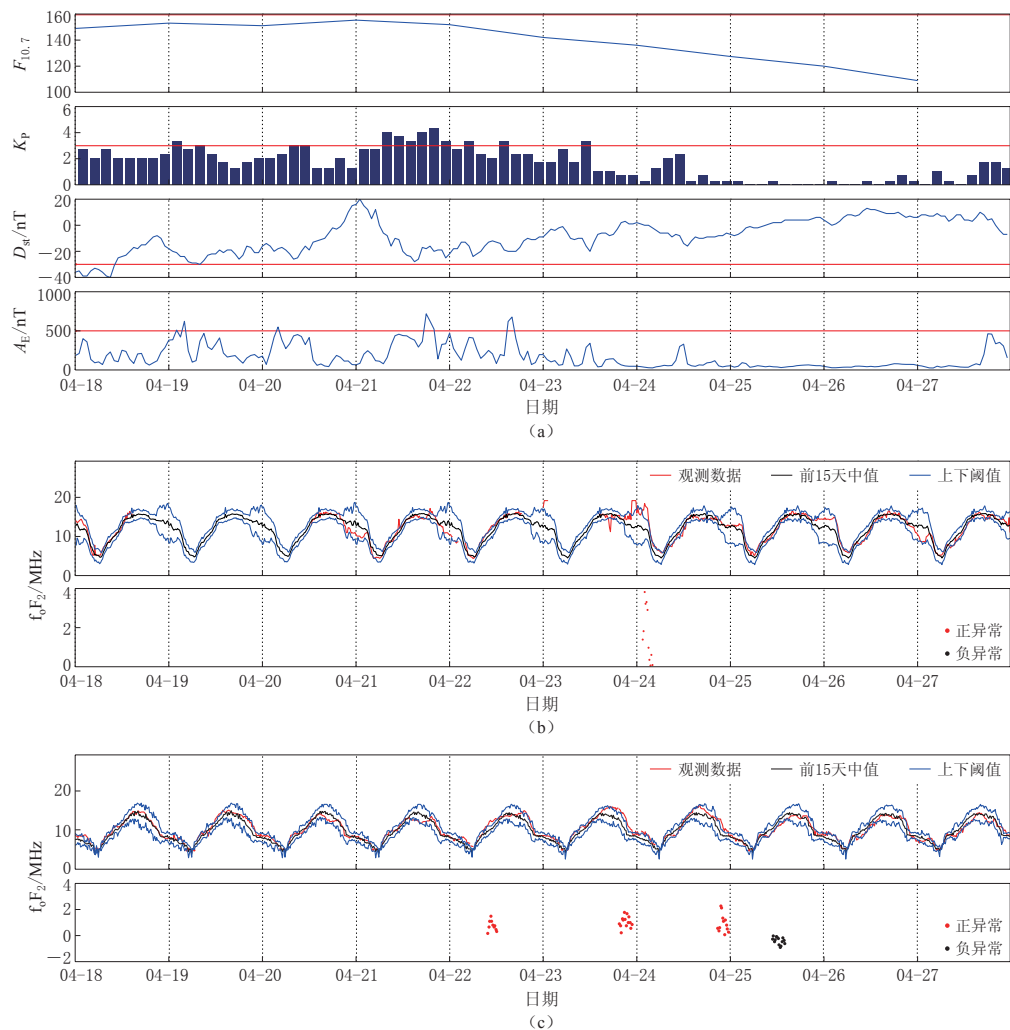


图 5 2015 年 4 月 18—27 日普洱站和乐山站相关指数及垂测数据

(a) 表征太阳活动情况的 $F_{10.7}$ 指数, 表征磁暴事件的 K_p 和 D_{st} 指数, 以及表征亚暴事件的 A_E 指数, 图中红线表示有事件活动的界限; (b) 上图为普洱站垂测数据, 如观测值连续 2 小时以上超出阈值, 则用观测值与阈值相减, 得到下图的差值图; (c) 上图为乐山站垂测数据, 下图为差值图, 说明同图 (b)

Fig. 5 Ionosonde data and index for the stations Pu'er and Leshan from 18 to 27 April, 2015
(a) $F_{10.7}$ index characterizing the solar activity, index K_p and D_{st} characterizing the magnetic storm event, and A_E index characterizing the substorm event, in which the red line represents the threshold. (b) The upper panel is the ionosonde data for Pu'er station where red, black, and blue lines denote observation, median, and threshold value, respectively. If the observation data exceed the threshold for more than two hours, the difference between observation and threshold data are obtained as shown in the lower panel, in which red points represent positive anomalies, and black points represent negative anomalies.
(c) The upper panel is the ionosonde data for Leshan station, and anomalies are got in the lower panel, illustrations are the same as Fig. (b)

4 讨论与结论

基于西南地区普洱站和乐山站的电离层垂测数据,本文结合空间天气事件指数,通过对限定不同阈值的滑动平均方法的研究,提出靠近南部的普洱站应选取 $M \pm 1.5\sigma$ 作为限定阈值,靠近北部的乐山站应选取 $M \pm IQR$ 作为限定阈值. IQR 相当于 1.34σ (Liu *et al*, 2009),也就是说,普洱站提取扰动的阈值较乐山站高.这可能是由于普洱站离赤道北驼峰较近(Ryu *et al*, 2014),扰动也相对较多所致.

利用本文提出的扰动判定方法,对 2015 年尼泊尔 $M_s 8.1$ 地震进行分析,研究结果显示,震前 1 天(4 月 24 日)普洱站和乐山站均出现了正向扰动,4 月 25 日震前 3 小时乐山站持续出现负异常.

根据规划,除现有的普洱站和乐山站外,我们还将西南地区建立 1—2 个垂测台站,并根据该区域的断层分布情况,架设数台被动接收垂测仪信号的电离层斜向探测仪,通过组网对西南地区上空的电离层进行监测,为分析震前电离层扰动提供数据支持.

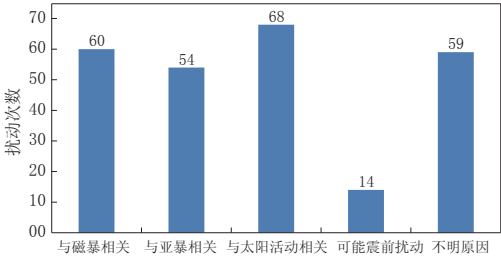


图 6 垂测数据扰动及其与各类事件的对应次数

Fig. 6 Numbers of ionosonde disturbance corresponding to several kinds of events

基于现有两个台站的垂测数据,我们一直在开展震前电离层扰动研究和示范性的应用工作.通过分析普洱站 2013 年 5 月 23 日—2014 年 12 月 31 日及乐山站 2014 年 1 月 3 日—2014 年 12 月 31 日的垂测数据,共提取正异常 145 次,负异常 110 次.如图 6 所示,在这 255 次电离层异常中,与磁暴相关的事件有 60 次,与亚暴相关的事件有 54 次,与太阳活动相关的事件有 68 次.在排除空间天气事件的影响后,通过对比 $M6.0$ 以

上地震位置及其发震时刻,本文初步认为可能有 14 次异常与地震有一定的关系.尽管如此,但是在排除上述影响后,仍有 59 次异常找不到扰动源,占扰动总次数的 23%,尚需深入研究.进一步探讨岩石圈-大气层-电离层的耦合机制,逐渐探索临震电离层扰动的时空特征,是我们近期的研究方向.

参 考 文 献

李强, 宁百齐, 赵必强, 丁峰, 张锐, 师宏波, 乐会军, 李国主, 李建勇, 韩宇飞. 2012. 基于陆态网络 GPS 数据的电离层空间天气监测与研究[J]. 地球物理学报, **55**(7): 2193–2202.

Li Q, Ning B Q, Zhao B Q, Ding F, Zhang R, Shi H B, Yue H J, Li G Z, Li J Y, Han Y F. 2012. Applications of the CMONOC based GNSS data in monitoring and investigation of ionospheric space weather[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **55**(7): 2193–2202 (in Chinese).

万卫星, 宁百齐, 刘立波, 丁峰, 毛田, 李国主, 熊波. 2007. 中国电离层 TEC 现报系统[J]. 地球物理学进展, **22**(4): 1040–1045.

Wan W X, Ning B Q, Liu L B, Ding F, Mao T, Li G Z, Xiong B. 2007. Nowcasting the ionospheric total electron content over China[J]. *Progress in Geophysics*, **22**(4): 1040–1045 (in Chinese).

熊年禄, 唐存琛, 李行健. 1999. 电离层物理概论[M]. 武汉: 武汉大学出版社: 354–433.

Xiong N L, Tang C C, Li X J. 1999. *Introduction to Physics of the Ionosphere*[M]. Wuhan: Wuhan University Press: 354–433 (in Chinese).

- 徐彤, 胡艳莉, 吴健, 李春斌, 吴振森, 索玉成, 冯健. 2012. 中国大陆 14 次强震前电离层异常统计分析[J]. 电波科学学报, **27**(3): 507–512.
- Xu T, Hu Y L, Wu J, Li C B, Wu Z S, Suo Y C, Feng J. 2012. Statistical analysis of seismo-ionospheric perturbation before 14 $M_s \geq 7.0$ strong earthquakes in Chinese subcontinent[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, **27**(3): 507–512 (in Chinese).
- 张国民, 傅征祥, 桂燮泰. 2001. 地震预报引论[M]. 北京: 科学出版社: 60–61.
- Zhang G M, Fu Z X, Gui X T. 2001. *Introduction to Earthquake Prediction*[M]. Beijing: Science Press: 60–61 (in Chinese).
- Dobrovolsky I P, Zubkov S I, Miachkin V I. 1979. Estimation of the size of earthquake preparation zones[J]. *Pure Appl Geophys*, **117**(5): 1025–1044.
- Li G Z, Ning B Q, Patra A K, Abdu M A, Chen J S, Liu L B, Hu L H. 2013. On the linkage of daytime 150 km echoes and abnormal intermediate layer traces over Sanya[J]. *J Geophys Res*, **118**(11): 7262–7267. doi:10.1002/2013JA019462.
- Liu J Y, Chen Y I, Chuo Y J, Chen C S. 2006. A statistical investigation of preearthquake ionospheric anomaly[J]. *J Geophys Res*, **111**(A5): A05304. doi:10.1029/2005JA011333.
- Liu J Y, Chen Y I, Chen C H, Liu C Y, Chen C Y, Nishihashi M, Li J Z, Xia Y Q, Oyama K I, Hattori K, Lin C H. 2009. Seismoionospheric GPS total electron content anomalies observed before the 12 May 2008 $M_w 7.9$ Wenchuan earthquake[J]. *J Geophys Res*, **114**(A4): A04320. doi:10.1029/2008JA013698.
- Ryu K, Lee E, Chae J S, Parrot M, Pulinets S. 2014. Seismo-ionospheric coupling appearing as equatorial electron density enhancements observed via DEMETER electron density measurements[J]. *J Geophys Res*, **119**(10): 8524–8542.
- Yu Y, Wan W X, Ning B Q, Liu L B, Wang Z G, Hu L H, Ren Z P. 2013. Tidal wind mapping from observations of a meteor radar chain in December 2011[J]. *J Geophys Res*, **118**(5): 2321–2332. doi:10.1029/2012JA017976.