



川滇地区电离层多参量异常监测系统的设计与实现

刘江 徐锐 陈聪 饶太国 李兴泉

Design and implementation of ionospheric multi-parameter anomaly monitoring system in Sichuan-Yunnan region

Liu Jiang, Xu Rui, Chen Cong, Rao Taiguo, Li Xingquan

引用本文:

刘江, 徐锐, 陈聪, 饶太国, 李兴泉. 2021. 川滇地区电离层多参量异常监测系统的设计与实现. 地震学报[J], 43(5): 605–614. DOI: 10.11939/jass.20210038

Liu J, Xu R, Chen C, Rao T G, Li X Q. 2021. Design and implementation of ionospheric multi-parameter anomaly monitoring system in Sichuan–Yunnan region. *Acta Seismologica Sinica*[J], 43(5): 605–614. DOI: 10.11939/jass.20210038

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11939/jass.20210038>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

2018年8月5日印度尼西亚地震震前电离层异常特征

Characteristics of ionospheric anomalies before the earthquake in Indonesia on August 5, 2018
地震学报. 2020, 42(3): 327–340 <https://doi.org/10.11939/jass.20190134>

利用地基观测对卫星观测电离层结构参数的定量验证研究

Quantitative verification on satellite observational data of ionospheric structure parameters using ground-based data
地震学报. 2017, 39(4): 549–557 <https://doi.org/10.11939/jass.2017.04.009>

基于Swarm卫星数据的一次地震电离层现象辨识

The identification of a seismo-ionospheric phenomenon based on Swarm satellite data
地震学报. 2020, 42(6): 745–759 <https://doi.org/10.11939/jass.20200010>

川滇地区地壳密度变化与强震孕育关系

Crustal density variation and its relationship with the seismogenic structure of strong earthquakes in Sichuan–Yunnan region
地震学报. 2019, 41(5): 600–612 <https://doi.org/10.11939/jass.20190029>

基于背景噪声的川滇地区勒夫波层析成像

Love wave tomography in Sichuan–Yunnan area from ambient noise
地震学报. 2017, 39(5): 633–647 <https://doi.org/10.11939/jass.2017.05.001>

模拟地震图纸数字化存储信息录入的设计与实现

Design and implementation of digitalized storage information input for analog seismograms
地震学报. 2020, 42(1): 101–108 <https://doi.org/10.11939/jass.20190114>

刘江, 徐锐, 陈聪, 饶太国, 李兴泉. 2021. 川滇地区电离层多参量异常监测系统的设计与实现. 地震学报, 43(5): 605–614. doi: [10.11939/jass.20210038](https://doi.org/10.11939/jass.20210038).

Liu J, Xu R, Chen C, Rao T G, Li X Q. 2021. Design and implementation of ionospheric multi-parameter anomaly monitoring system in Sichuan-Yunnan region. *Acta Seismologica Sinica*, **43**(5): 605–614. doi: [10.11939/jass.20210038](https://doi.org/10.11939/jass.20210038).

川滇地区电离层多参量异常监测 系统的设计与实现^{*}

刘 江[†] 徐 锐 陈 聪 饶太国 李兴泉

(中国成都 610041 四川省地震局)

摘要 介绍了川滇地区电离层多参量异常监测系统的设计思路与功能实现，并将该系统应用于2019年6月17日四川长宁 $M_{\text{S}}6.0$ 地震的监测试验。结果表明：该系统实现了全球和中国区域垂直总电子含量 VTEC、站点 VTEC 和 F_2 层临界频率 $f_{\text{o}}F_2$ 异常变化的实时监测，有助于开展示范性地震电离层异常监测工作，其图形及数据结果可为地震-电离层异常扰动判识提供佐证，为川滇地区地震监测预报提供电离层前兆信息支持。

关键词 电离层异常 垂直总电子含量 VTEC F_2 层临界频率 $f_{\text{o}}F_2$

doi: [10.11939/jass.20210038](https://doi.org/10.11939/jass.20210038) 中图分类号: P352.7 文献标识码: A

Design and implementation of ionospheric multi-parameter anomaly monitoring system in Sichuan-Yunnan region

Liu Jiang[†] Xu Rui Chen Cong Rao Taiguo Li Xingquan

(Sichuan Earthquake Agency, Chengdu 610041, China)

Abstract: This paper introduced the design ideas and function implementation of ionospheric multi-parameter anomaly monitoring system in Sichuan-Yunnan region, and then applied the system to monitoring test of the $M_{\text{S}}6.0$ earthquake on June 17, 2019 in Changning, Sichuan. The results show that the system realizes the real-time monitoring of abnormal changes such as global and China regional VTEC, site VTEC and $f_{\text{o}}F_2$, which is helpful to carry out the demonstrative seismic-ionospheric anomaly monitoring. The graphic and data results can provide evidences for the identification of seismic-ionospheric anomalous disturbance, and ionospheric precursor information for earthquake monitoring and prediction in Sichuan-Yunnan region.

Key words: ionospheric anomaly; vertical total electron content VTEC; F_2 critical frequency $f_{\text{o}}F_2$

* 基金项目 中国地震局震情跟踪定向工作任务(2020010406)、国家自然基金青年项目(41704014)和四川省地震局“川滇地区川滇地区 GNSS 大地构造物理及壳幔动力研究”创新团队(202003)共同资助。

收稿日期 2021-02-16 收到初稿, 2021-05-14 决定采用修改稿。

† 通信作者 e-mail: liujiang0103@foxmail.com



引言

自 1964 年电离层异常扰动在美国阿拉斯加大地震震前首次被发现 (Leonard, Barnes, 1965), 地震-电离层耦合效应逐渐得到各国研究人员的广泛关注。对于地震电离层耦合机理的大量研究, 异常电场理论能较好地解释震前电离层异常扰动现象。该理论认为, 地震孕育过程中由地表岩石破裂引起的一系列复杂的物理化学反应, 产生了大气电场异常, 进而叠加作用于电离层, 引起了电离层电子浓度、电子温度等参量的显著变化 (Pulinets *et al.*, 2000; Sorokin *et al.*, 2001; Kuo *et al.*, 2011)。近年来, 以全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, 简写为 GNSS) 连续观测和电离层垂直观测为代表的地基电离层探测技术已被广泛应用于地震前兆监测和研究中 (张学民等, 2016; 吴健等, 2016; 何宇飞等, 2020)。基于该技术, 研究人员可获取电离层垂直总电子含量 (vertical total electron content, 简写为 VTEC)、电离层 F_2 层临界频率 (f_0F_2) 等电离层形态特征的重要指标。其中, 电离层 VTEC 可通过 GNSS 台站观测数据反演获取, f_0F_2 可通过电离层垂测站观测获取。大量研究结果表明, $M_S 5.0$ 以上强震发生前数天到数小时内, 上述参量可能会出现不同程度的异常变化 (张学民等, 2014; 王壮凯等, 2020), 而多参量同步分析可为地震-电离层异常扰动判识提供佐证, 对于强震频发地区的震情研判具有重要意义。

川滇地区位于青藏高原东南缘, 包括川滇地块、巴颜喀拉地块南部、华南地块西部等二级地块。长期以来, 在印度板块的推挤及华南地块的阻挡作用下, 川滇地区的构造变形活动强烈, 发育了规模、产状和活动速率各异的断裂, 致使强震频发。由于地震短临预报的困难性, 地震电离层监测预报模式逐渐成为川滇地区地震监测预报的新方向。目前, 地震-电离层现象的研究主要处于震例研究和统计研究阶段 (闫相相等, 2014), 区域电离层实时监测系统开发实例较少, 电离层多参量异常关联及时空演化分析不够深入, 快速获取电离层多参量异常扰动信息及其临震监测预报的应用还有待加强。

鉴于此, 本文设计开发川滇地区的电离层多参量异常监测系统, 旨在实现各类观测数据的自动化处理、电离层多参量图形及数据结果的自动化产出以及川滇地区电离层多参量异常变化的实时监测, 为该区域地震电离层异常扰动判识提供证据。同时, 本文拟通过 2019 年 6 月 17 日四川长宁 $M_S 6.0$ 地震分析测试该系统图形产出功能的可靠性, 以进一步验证川滇地区地震电离层监测预报的应用效能。

1 系统概述

为了实现川滇地区电离层异常扰动变化的实时监测, 本文设计开发川滇地区电离层多参量异常监测系统, 快速产出全球和中国区域 VTEC 异常分布、空间参数、站点 VTEC 和 f_0F_2 时序曲线, 同时实现网页方式下图形及数据结果的查询、浏览、对比和下载等功能。基于该系统可开展示范性地震电离层监测工作, 分析地震发生前后孕震区附近电离层多参量的异常扰动变化, 尝试探索地震电离层现象的内在联系, 为该地区地震监测预报提供电离层前兆异常的判定依据。

1.1 数据处理

1) 全球和中国区域 VTEC 异常分布。在中国区域按照均匀分布原则选取陆态网络的 70 个 GNSS 基准站。基于该基准站的观测数据, 利用球谐函数建立大规模高精度格网电离层模

型(林剑等, 2009; 王泽民等, 2016), 利用 Bernese 软件解算处理(Dach *et al.*, 2015)获取中国区域电离层 VTEC 格网数据(经纬度分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 时间分辨率为 2 h), 并结合欧洲轨道确定中心(Center for Orbit Determination in Europe, 缩写为 CODE)提供的全球电离层格网数据(经纬度分辨率为 $5^\circ \times 2.5^\circ$, 时间分辨率为 1 h)自动监测全球和中国区域 VTEC 异常分布特征变化.

2) 空间参数、站点 VTEC 和 f_0F_2 时序曲线. 采用川滇地区 GNSS 基准站观测数据, 通过单站点 VTEC 解算(熊波, 2012), 获取站点上空的 VTEC 数据(时间分辨率为 15 min). 结合川滇地区垂测站(乐山、道孚、普洱、腾冲)的 f_0F_2 观测数据(时间分辨率为 15 min)、空间环境参数($F_{10.7}$, K_p , D_{st} , A_E), 自动监测站点 VTEC、站点 f_0F_2 以及其它空间参数的时序曲线特征变化. 川滇地区 GNSS、垂测台站的分布如图 1 所示.

1.2 异常检验

选用滑动四分位距法提取电离层 VTEC 和 f_0F_2 的异常信息, 基于前 15 天相同时刻的观测值求取相应四分位距(IQR)及中位数(M), 确定异常检验倍数(N), 建立上(下)边界阈值 $M \pm N \times IQR$, 观测值超出上(下)边界即视为异常, 高于上边界为正异常, 低于下边界为负异常. 然后, 从二维空间分布获取全球和中国区域 VTEC 异常分布, 所用公式如下:

$$\Delta TEC = \begin{cases} K - L_1 & K > L_1, \\ K - L_2 & K < L_2, \\ 0 & L_2 \leq K \leq L_1, \end{cases} \quad (1)$$

式中, ΔTEC 为 VTEC 异常扰动变化量, L_1 和 L_2 分别为 VTEC 背景上、下边界阈值, K 为 VTEC 观测值. 站点 VTEC 和 f_0F_2 时序曲线的异常变化获取方法同上.

2 系统设计

2.1 结构设计

为满足川滇地区电离层多参量异常扰动监测的总体需求, 结合数据获取、数据解算、图形及数据结果展示等需求, 采用 CS+BS 架构将该系统分为电离层 VTEC 异常分布产出子系统(简写为“异常分布子系统”)、GNSS 站点 VTEC 及垂测站 f_0F_2 曲线产出子系统(简写为“时序曲线子系统”)和电离层多参量异常监测平台(简写为“监测平台”)等三部分. 其中: 异常分布子系统用于监测全球和中国区域的电离层 VTEC 异常变化, 实时产出全球和中国区域 VTEC 异常分布; 时序曲线子系统用于监测川滇地区 GNSS 单站点 VTEC 及垂测站 f_0F_2 的异常时序变化, 实时产出空间参数、站点 VTEC 和 f_0F_2 时序曲线; 监测平台将各类图形及数据结果以网页方式自动发布, 方便用户按照权限查询、浏览、对比和下载. 两个子系统布设在不同服务器上, 独立运行, 方便维护管理. 系统总体结构如图 2 所示.

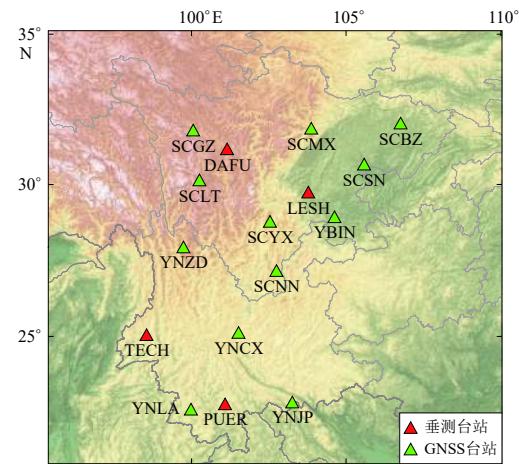


图 1 川滇地区 GNSS 和垂测台站分布图

Fig. 1 Distribution of GNSS and vertical ionosonde stations in Sichuan-Yunnan region

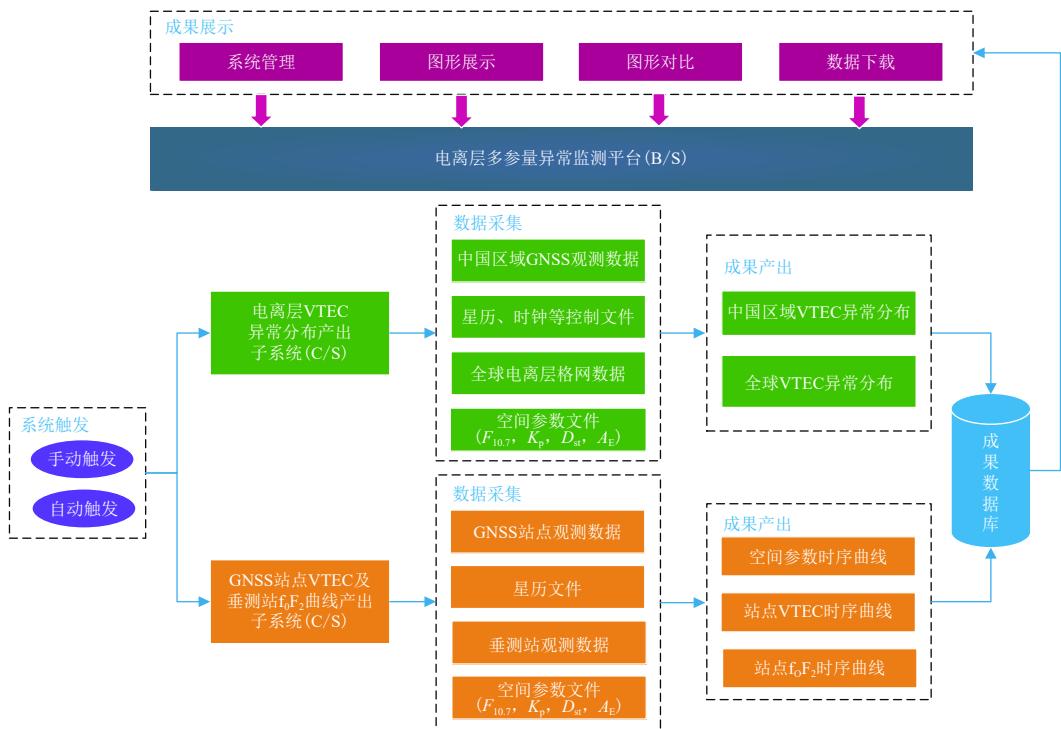


图 2 川滇地区电离层多参量异常监测系统的总体结构图

Fig. 2 Overall structure diagram of the ionospheric multi-parameter anomaly monitoring system in Sichuan-Yunnan region

2.2 功能设计

基于系统结构设计、业务需求及日常监测工作的要求，系统功能模块划分如图 3 所示。可见：异常分布子系统分为参数设置、自动产出、手动产出、数据服务、任务列表等五部分，主要实现全球和中国区域 VTEC 异常分布图形结果产出，同时提供数据转换、数据导出、数据下载等功能；时序曲线子系统分为参数设置、自动产出、手动产出、数据服务、任务列表等五部分，主要实现站点 VTEC 和 f_0F_2 、空间参数时序曲线图形结果的产出，同时提供数据导出、下载等功能。监测平台分为系统管理、图形展示、图形对比、数据下载等四部分，主要实现 VTEC 异常分布，空间参数、站点 VTEC 和 f_0F_2 时序曲线查询、浏览，同时提供电离层多参量数据分析结果的下载功能。

2.3 业务流程

异常分布子系统。该子系统可分别通过自动和手动模式以 FTP 方式下载各类数据，自动调用 Bernese 数据处理软件，基于球谐函数建立中国区域电离层格网模型，解算中国区域电离层 VTEC 格网数据。结合 CODE 全球电离层格网数据和空间环境参数($F_{10.7}$, K_p , D_{st} , A_E)，提取全球和中国区域 VTEC 异常信息，利用 ArcGIS 平台分别产出全球和中国区域 VTEC 异常分布以及格网点 VTEC 时序曲线，自动产出结果延迟 1—2 天，具体业务流程如图 4 所示。

时序曲线子系统。该子系统通过自动和手动模式以 FTP 方式下载各类数据，自动调用 GPS-TEC 数据处理软件，获取单站点 VTEC 数据。结合川滇地区垂测站(乐山、道孚、普洱、腾冲) f_0F_2 观测数据、空间环境参数($F_{10.7}$, K_p , D_{st} , A_E)，提取站点 VTEC 和 f_0F_2 异常信息，并

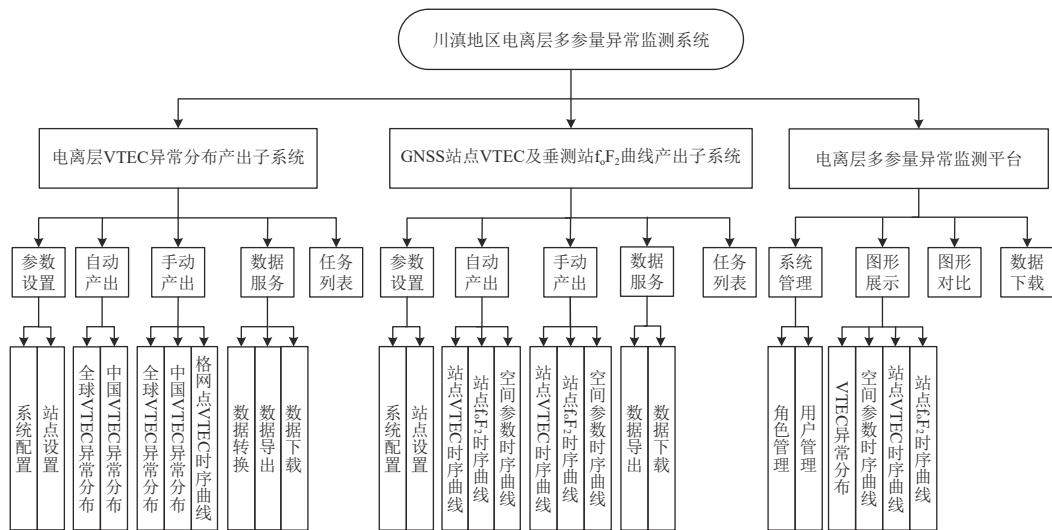


图3 川滇地区电离层多参量异常监 测系统功能图

Fig. 3 The function diagram of the ionospheric multi-parameter anomaly monitoring system in Sichuan-Yunnan region

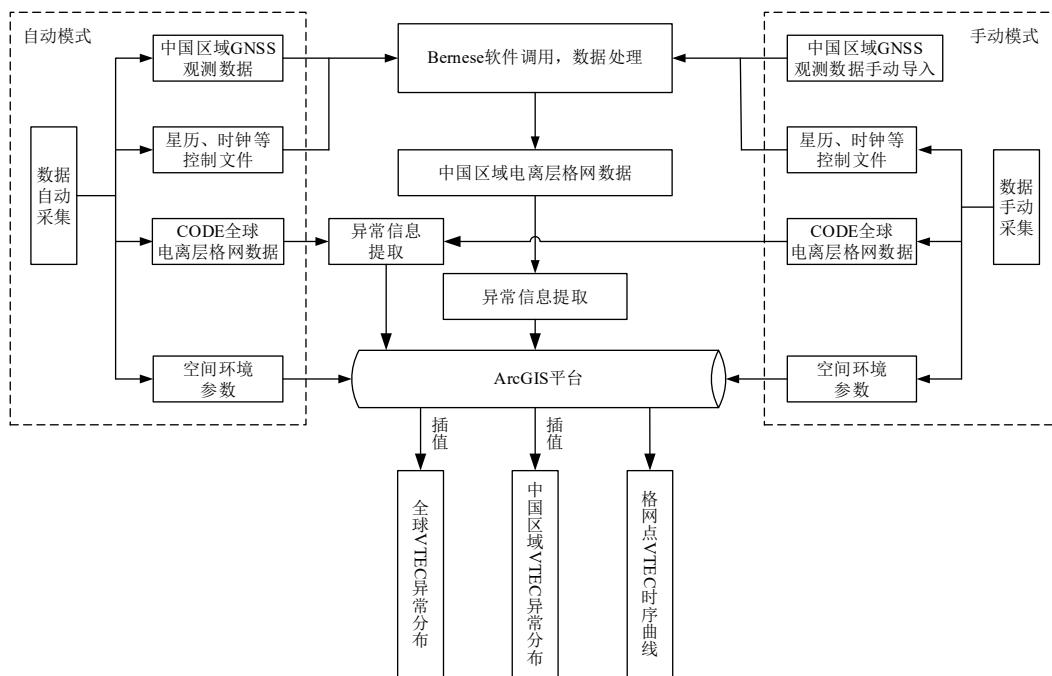


图4 异常分布子系统业务流程图

Fig. 4 Business flow chart of anomaly distribution subsystem

利用 Matlab 平台分别产出站点 VTEC 和 f_0F_2 、空间参数的时序曲线，自动产出结果延迟 1—2 天，具体业务流程如图 5 所示。

监测平台。该平台实时访问异常分布子系统和时序曲线子系统，将各类图形、数据产出结果通过 http 自动发布，根据用户权限为用户提供查询、浏览、对比、下载等差异化功能。

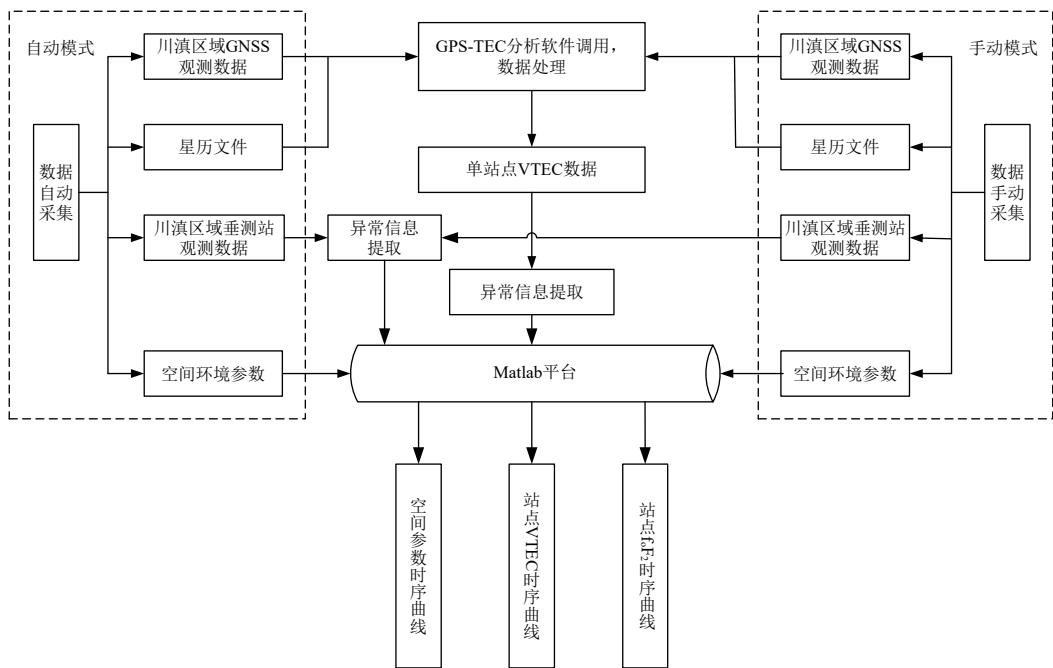


图 5 时序曲线子系统业务流程图

Fig. 5 Business flow chart of time series curve subsystem

3 系统实现和震例分析

3.1 系统实现

该系统性能要求较高, 需要实现各类数据的自动化下载、多个第三方软件的自动化运行和监测、各类图形及数据结果的自动化生成与发布。为实现系统运行稳定性、人机交互性及功能扩展性等多方面要求, 具体实现内容如下:

1) 异常分布子系统。基于 Windows 2008/2012 操作系统, 采用 C/S (Client-Server, 即客户端/服务器模式) 架构, 将面向对象的编程语言 C# 作为后台开发语言, MySQL 作为后台数据库管理系统, ArcGIS 作为图形结果产出平台, 通过分层技术体系结构实现系统运行的稳定性和交互性。子系统主界面分为功能菜单、用户操作及图形展示等三部分, 其中: 功能菜单位于主界面左上方, 包含系统配置、手动产出、时序曲线、数据转换、数据导出、数据下载、任务列表、站点管理等功能; 用户操作位于功能菜单左下方, 包含查询条件和查询结果两部分; 图形展示位于用户操作界面的右侧, 根据查询条件和查询结果查看电离层 VTEC 异常分布情况, 全球 VTEC 异常分布间隔一小时, 中国区域 VTEC 异常分布间隔两小时(图 6a)。

2) 时序曲线子系统。基于 Windows 2008/2012 操作系统, 采用 C/S 架构, 将 C# 作为后台开发语言, MySQL 作为后台数据库管理系统, Matlab 作为图形结果产出平台, 通过分层技术体系结构实现系统运行的稳定性和交互性。子系统主界面分为功能菜单、用户操作及图形展示等三部分, 其中: 功能菜单位于主界面左上方, 包含手动产出、数据导出、数据下载、任务列表、站点设置、系统配置等功能; 用户操作位于功能菜单左下方, 包含查询条件和查询结果两部分; 图形展示位于用户操作界面的右侧, 根据查询条件和查询结果分别展示站点

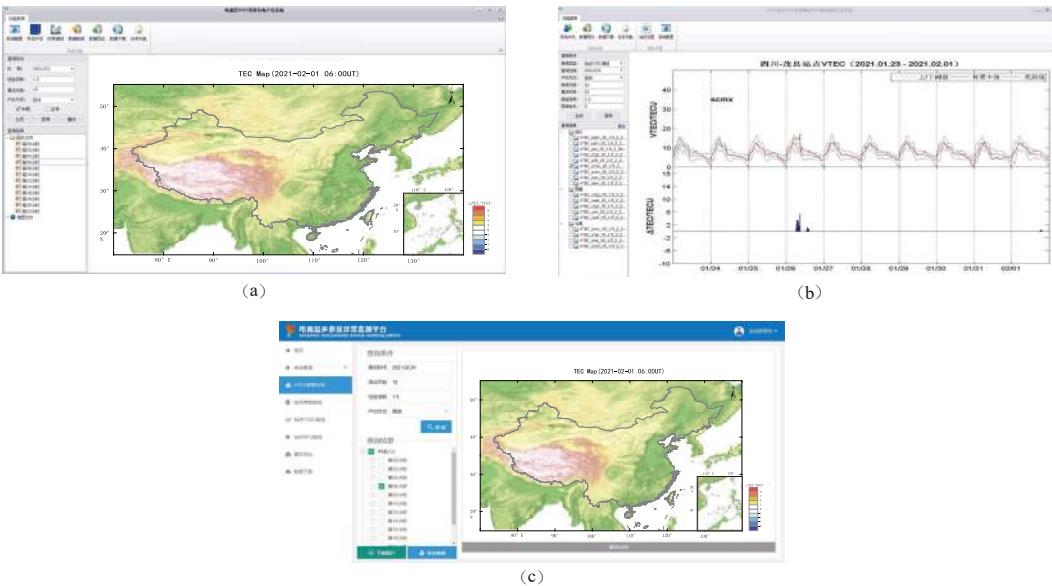


图 6 系统主界面

(a) 异常分布子系统; (b) 时序曲线子系统; (c) 监测平台

Fig. 6 Main system interfaces

(a) Anomaly distribution subsystem; (b) Time series curve subsystem; (c) Monitoring platform

VTEC 和 f_0F_2 、空间参数时序曲线(图 6b).

3) 监测平台. 基于 Windows 操作系统, 采用 B/S (Browser-Server, 即浏览器/服务器模式) 架构, 将 C# 作为后台开发语言. 该平台设置用户权限, 通过网页方式登录. 功能菜单位于主界面左侧, 包含系统管理、VTEC 异常分布、空间参数曲线、站点 VTEC 曲线、站点 f_0F_2 曲线、图形对比和数据下载等功能. 选择功能菜单, 打开用户操作界面, 根据查询条件和查询结果分别展示 VTEC 异常分布及空间参数、站点 VTEC 和 f_0F_2 的时序曲线. 同时, 平台提供不同时期的电离层多参量图形结果对比展示功能, 方便用户针对电离层前兆异常分析判断(图 6c).

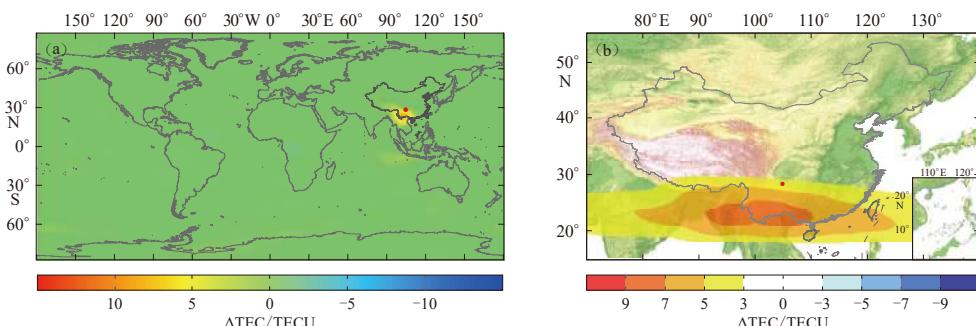


图 7 异常分布子系统关于长宁地震前 2019 年 6 月 14 日 12:00 UT 全球(a)和中国区域(b)
VTEC 异常分布图形结果, 图中红色圆点代表震中

Fig. 7 Global (a) and China regional (b) VTEC anomaly distribution graphic results of the anomaly distribution subsystem at 12:00 UT on June 14, 2019 before Changning earthquake, where red dots represent the epicenter

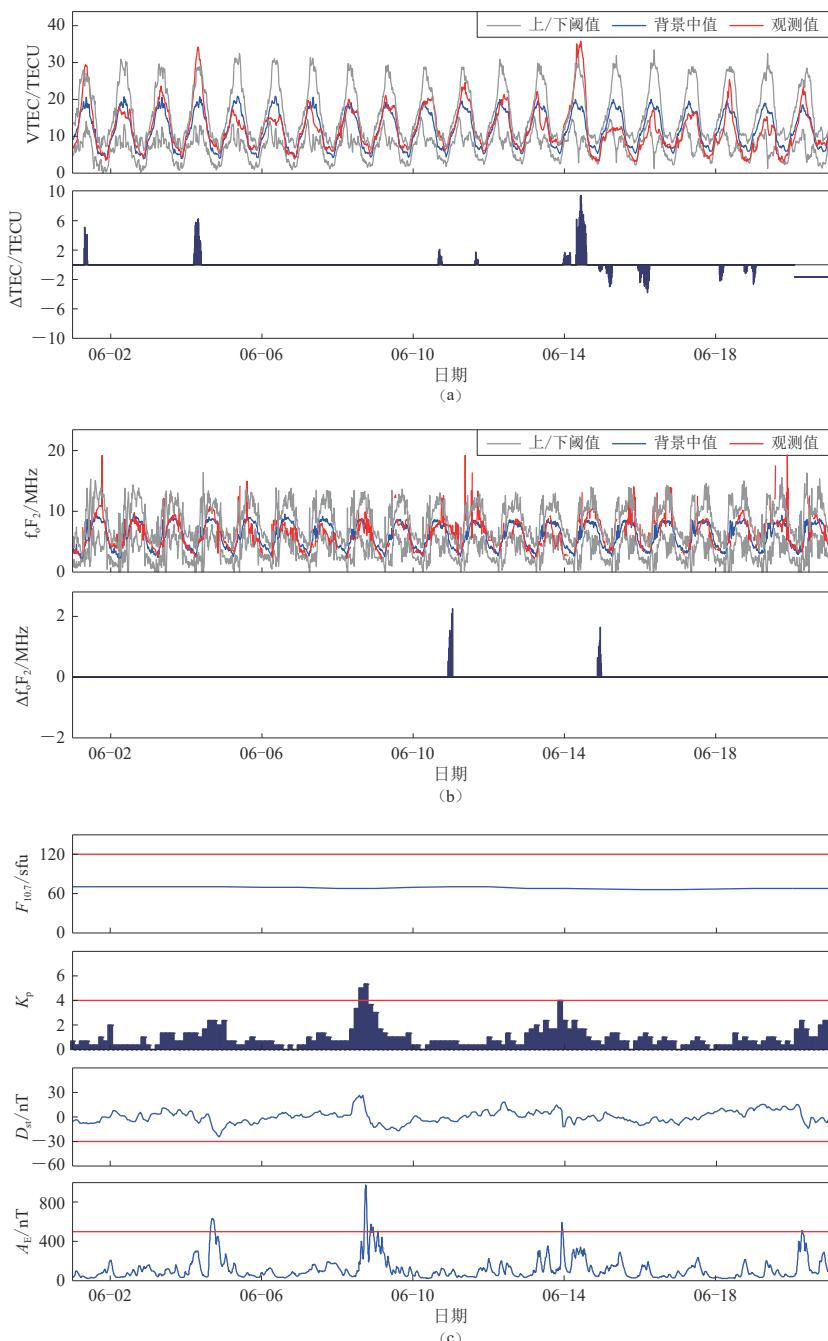


图 8 时序曲线子系统图形结果(2019年6月1—20日)

(a) 四川宁南站点 VTEC 时序曲线; (b) 云南腾冲站点 f_0F_2 时序曲线; (c) 空间参数时序曲线, 图中红色直线为参数阈值

Fig. 8 Graphic results of time series curve subsystem (June 1 to June 20, 2019)

(a) VTEC time series curves of Ningnan station in Sichuan Province; (b) f_0F_2 time series curves of Tengchong station in Yunnan Province; (c) Time series curves of spatial parameter, where all red lines are parameter thresholds

3.2 震例分析

为测试系统图形产出功能的可靠性,验证川滇地区地震电离层监测预报的可行性,本文选择2019年6月17日四川长宁 $M_S 6.0$ 地震前后的观测数据,利用该系统手动产出全球和中国区域VTEC异常分布及站点VTEC、 f_0F_2 和空间参数的时序曲线,综合分析长宁地震震前电离层多参量异常扰动变化特征。鉴于篇幅有限,本文仅展示个别图形结果(图7,8)。

从全球和中国区域VTEC异常分布(图7)可以看出,6月14日12:00 UT(北京时间20:00),震中附近区域均出现显著的电离层VTEC正异常,地震电离层耦合的局部性、集中性和显著性特征明显。同时,以个别站点为例,站点VTEC(图8a)和站点 f_0F_2 (图8b)的时序曲线显示6月14日四川宁南GNSS站点VTEC出现正异常,云南腾冲垂测站 f_0F_2 同步出现正异常,该同步异常现象与VTEC异常分布结果基本吻合。结合空间参数时序曲线变化(图8c)可知,6月14日空间环境参数 $F_{10.7}$ 为68 sfu, K_p 最大值为2.3, D_{st} 最小值为-12 nT, A_E 最大值为338 nT,均未超过参数阈值,可以排除太阳活动、地磁变化对电离层异常扰动的影响。同时,长宁地震发生前后该异常区域并未发生其它强震事件。综上,2019年6月14日震中附近区域电离层多参量异常扰动满足地震电离层异常判识标准,可能是地震前兆异常,与长宁 $M_S 6.0$ 地震具有一定的相关性。

4 讨论与结论

本文主要介绍了川滇地区电离层多参量异常监测系统的结构设计、功能设计和业务流程设计,并给出了系统实现结果。该系统实现了全球和中国区域VTEC、站点VTEC和 f_0F_2 异常变化的实时监测,有助于开展示范性地震-电离层异常监测工作,目前该系统已成功应用于四川省地震局的监测预报日常工作,图形产出结果已参与地震监测预报会商。

该系统虽然较大地提高了川滇地区电离层异常变化监测能力,但对电离层参量的监测手段较为单一,电离层异常对比分析功能较弱。该系统下一步仍需不断补充完善,基于地基和空基电离层探测技术开展天地一体化联合观测,并结合临震电离层多参量同步分析为各参量异常指标提供量化信息,为地震监测任务提供更便捷的技术支撑,为深入研究地震孕育期、临震、主震及余震中的电离层异常扰动机理提供便捷的数据支撑。

CODE提供了全球电离层格网数据,中国地震台网中心和中国地震局地震预测研究所提供了GNSS台站和电离层垂测台站的观测数据,作者在此一并表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 何宇飞, 杨冬梅, 和少鹏. 2020. 基于地震电离层现象研究结果的分析与总结[J]. 中国地震, 36(2): 244-257.
- He Y F, Yang D M, He S P. 2020. Preliminary studies on seismo-ionospheric phenomena[J]. *Earthquake Research in China*, 36(2): 244-257 (in Chinese).
- 林剑, 吴云, 祝英英, 乔学军, 周义炎. 2009. 基于GPS探测汶川地震电离层TEC的异常[J]. 地球物理学报, 52(1): 297-300.
- Lin J, Wu Y, Zhu F Y, Qiao X J, Zhou Y Y. 2009. Wenchuan earthquake ionosphere TEC anomaly detected by GPS[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(1): 297-300 (in Chinese).
- 王壮凯, 刘伟, 刘静, 张学民, 周晨. 2020. 2018年8月5日印度尼西亚地震震前电离层异常特征[J]. 地震学报, 42(3):

- 327–340.
- Wang Z K, Liu Y, Liu J, Zhang X M, Zhou C. 2020. Characteristics of ionospheric anomalies before the earthquake in Indonesia on August 5, 2018[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **42**(3): 327–340 (in Chinese).
- 王泽民, 孙伟, 安家春. 2016. 2015-04-25 尼泊尔 $M_{S}8.1$ 地震前后电离层 VTEC 异常变化分析 [J]. 大地测量与地球动力学, **36**(2): 133–137.
- Wang Z M, Sun W, An J C. 2016. Anomaly variation analysis of the ionospheric VTEC before and after the 25 April 2015 $M_{S}8.1$ Nepal earthquake[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **36**(2): 133–137 (in Chinese).
- 吴健, 徐彤, 胡艳莉. 2016. 基于国家电波观测站网电离层垂测数据的地震电离层异常研究进展 [J]. 地震学报, **38**(3): 345–355.
- Wu J, Xu T, Hu Y L. 2016. Recent progress in the study of ionospheric anomalies before strong earthquakes using ionosonde data of National Radio Observation Network in China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **38**(3): 345–355 (in Chinese).
- 熊波. 2012. 太阳耀斑的电离层响应和 GPS-TEC 监测 [D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所: 20–29.
- Xiong B. 2012. *Ionospheric Response to Solar Flare and GPS-TEC Monitoring*[D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences: 20–29 (in Chinese).
- 闫相相, 单新建, 曹晋滨, 汤吉, 刘展, 王振杰. 2014. 中国西南区域孕震区电离层 TEC 变化长时间序列分析 [J]. 地震地质, **36**(1): 253–265.
- Yan X X, Shan X J, Cao J B, Tang J, Liu Z, Wang Z J. 2014. Long time series analysis of ionospheric TEC disturbance over seismically active region in southwest China during low solar activity[J]. *Seismology and Geology*, **36**(1): 253–265 (in Chinese).
- 张学民, 刘静, 赵必强, 徐彤, 申旭辉, 姚璐. 2014. 玉树地震前的电离层异常现象分析 [J]. 空间科学学报, **34**(6): 822–829.
- Zhang X M, Liu J, Zhao B Q, Xu T, Shen X H, Yao L. 2014. Analysis on ionospheric perturbations before Yushu earthquake[J]. *Chinese Journal of Space Science*, **34**(6): 822–829 (in Chinese).
- 张学民, 申旭辉, 赵庶凡, 刘静, 欧阳新艳, 娄文宇, 泽仁志玛, 何建辉, 钱庚. 2016. 地震电离层探测技术及其应用研究进展 [J]. 地震学报, **38**(3): 356–375.
- Zhang X M, Shen X H, Zhao S F, Liu J, Ouyang X Y, Lou W Y, Zeren Z M, He J H, Qian G. 2016. The seismo-ionospheric monitoring technologies and their application research development[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **38**(3): 356–375 (in Chinese).
- Dach R, Lutz S, Walser P, Fridez P. 2015. Bernese GNSS software version 5.2[CP]. Bern: Astronomical Institute, University of Bern: 318–322.
- Kuo C L, Huba J D, Joyce G, Lee L C. 2011. Ionosphere plasma bubbles and density variations induced by pre-earthquake rock currents and associated surface charges[J]. *J Geophys Res*, **116**: A10317.
- Leonard R S, Barnes R A. 1965. Observation of ionospheric disturbances following the Alaska earthquake[J]. *J Geophys Res*, **70**(5): 1250–1253.
- Pulinets S A, Boyarchuk K A, Hegai V V, Kim V P, Lomonosov A M. 2000. Quasielectrostatic model of atmosphere-thermosphere-ionosphere coupling[J]. *Adv Space Res*, **26**(8): 1209–1218.
- Sorokin V M, Chmyrev V M, Yaschenko A K. 2001. Electrodynamic model of the lower atmosphere and the ionosphere coupling[J]. *J Atmos Sol Terr Phys*, **63**(16): 1681–1691.