

2020 年第 14 期（总第 15 期） 2020 年 9 月 23 日

地震电磁短临监测手段评估—GPS TEC

■ 张学民 熊攀

地震数值预测研究和传统方法评估试点项目

地震监测站网评估试点项目

人工智能地震监测分析系统完善与应用

地震危险区精细调查和地震现场综合科学考察试点项目

预报员访学试点项目

地震信息专题图试点

地震重点监视防御区公共服务试点

中国地震局地震预测研究所

地震电磁短临监测手段评估—GPS TEC*

张学民 熊攀**

一、目的

中国地震局地震预测研究所自 2016 年起开始将 GPS TEC 正式纳入地震震情跟踪环节,并按台网中心短临手段管理原则,每周填报零异常报告提交至台网中心汇总,参与中国地震局短临监测和大震震情跟踪会商工作。本次总结是在整理以往零异常报告的基础上,回顾 GPS TEC 在川滇地区长达 4 年多的跟踪结果,对 TEC 在日常跟踪应用中的效能进行评估,逐步形成短临手段有效评估方法,并对未来工作给出指导和改进意见,进一步提高短临监测手段预报水平。

二、资料基本情况介绍

2.1 基本原理

当卫星发射电磁信号在电离层中传播时,由于受到电离层介质的折射影响,产生了附加的信号传播时延,从而使所测的信号传播时间产生误差。在影响 GPS 定位精度的各种误差因素中,电离层干扰是仅次于卫星星历误差的误差源,电离层引起的 GPS 误差主要与沿卫星至接收机收视方向上的积分电子含量(又称电子总含量,即 Total Electron Content,简称 TEC)有关。基于电磁波传播与 TEC 的相关性,利用电离层对电磁波的折射效应即可研究电离层本身,即利用 GPS 卫星信号的伪距($\rho = c \cdot \Delta t$, Δt 是某颗卫星发送信号的時刻到接收机天线接收到该信号的时间差, c 为真空中电波速度,实际电波速度低于该值,因此

据此计算的距離称为伪距,与电离层测高中的电离层虚高物理含义类似)和载波相位差分即可计算信号传播路径上的 TEC(具体公式推导及反演计算流程参考相关论文(夏淳亮,2004;及其中索引论文)):

$$TEC = \frac{1}{40.3} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \Delta \rho \quad (1)$$

式中 $f_1=1.57542\text{GHz}$, $f_2=1.2276\text{GHz}$, 为 GPS 卫星工作频率, $\Delta \rho$ 为伪距差。

同样,利用载波的相位测量,考虑到整周模糊度(又称整周未知数,是在全球定位系统技术的载波相位测量时,载波相位与基准相位之间相位差的首观测值所对应的整周未知数;因为载波在空间传输的整周期数是一个无法通过观测获得的未知数,接收机只能记录这个差值的非整周部分,其整周部分尚且未知称为整周模糊度)可计算相对 TEC:

$$TEC = \frac{1}{40.3} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \left(\frac{c\Phi_1}{f_1} - \frac{c\Phi_2}{f_2} \right) + \Delta n \quad (2)$$

式中 Φ_1 和 Φ_2 为分别对应两个工作频率的载波相位, Δn 为整周模糊度,因式中含有一定的未知参量,只能得到 TEC 的相对变化,因此称为相对 TEC(测量精度为 10^{13} 数量级),而通过伪距差分得到的 TEC 称

* 支撑新时代防震减灾事业现代化建设试点任务之一“地震数值预测研究和传统方法评估试点项目”成果。

** 本文由张学民、熊攀执笔,资料收集汇总工作由张学民、熊攀、周煜林完成,吴忠良所长指导完成。

为绝对 TEC(测量精度为 10^{16} 数量级)。

由于目前 GPS 接收站在全球分布较多，具有观测及时、覆盖范围广、观测精度高、低成本、高效率等多方面的优势，因此 GPS TEC 观测手段越来越被各种电离层研究和地震电离层监测所广泛采用 (张学民等，2016)。

2.2 台站分布及数据处理

由中国地震局牵头的“中国地壳运动观测网络”是“九五”国家重大科学工程建设项目，自 1998 年投入开工建设，二期工程称为“中国大陆环境构造监测网络”，目前已形成具有 260 个 GPS 基准连续站、千

余个不定期复测 GPS 站的区域观测网络 (甘卫军等，2007)，这些台站的建设为反演产出我国大陆地区 GPS TEC 数据奠定了良好的基础。为保持数据的连续性，我们主要使用连续 GPS 站点数据，并在重点监测区遴选出 5-10 个站点，保证台站分布能有效覆盖监测区。

为监测川滇地区电离层异常变化，分别从两个省份各选择了 5 个 GPS 接收站作为 TEC 连续跟踪站点，分别为云南腾冲、施甸、临沧、云龙、澜沧、和四川石棉、理塘、茂县、盐源、松潘站，图 1 为两个区域的站点分布图。

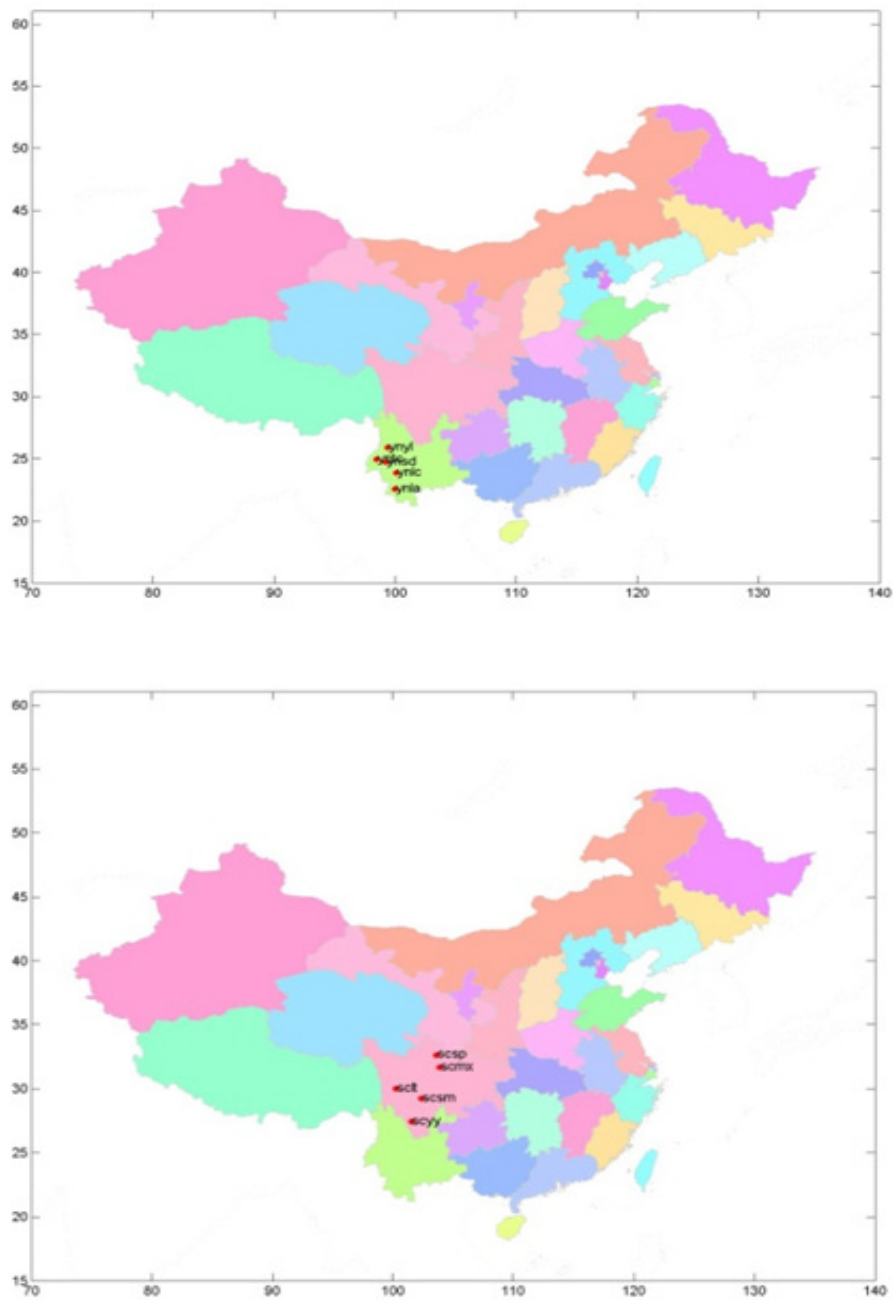


图 1 川滇地区 GPS TEC 跟踪站点分布 (上: 云南; 下: 四川)

TEC 反演时间间隔为 15min, 即每小时产出 4 个 TEC 观测值, 每天 96 个观测值。由于 TEC 数据中有非常典型的日变化, 所以异常分析方法采用的是针对每个测值的四分位 (IQR) 分析法, 利用前 15 的每日 96 个点, 每个测点计算得到一个中值 (median) 和上下四分位 (upper, lower), 这样得到对应背景数据的每日 96 点中值和上下四分位值, 作为当日异常分析的参考, Δ TEC 异常按公式 (3) 计算, 当 TEC 值超出其背景 1.5 倍上四分位限时为正异常, 当 TEC 低于其背景 1.5 倍下四分位限时为负异常, 超出上下四分位部分重新得到一条 Δ TEC 曲线。

$$\Delta \text{TEC} = \begin{cases} \text{TEC}_i - (\text{TEC}_m + 1.5\text{IQR}_{\text{upper}}) & \text{TEC} > \text{TEC}_m + 1.5\text{IQR}_{\text{upper}} \\ 0 & \text{TEC}_m - 1.5\text{IQR}_{\text{lower}} \leq \text{TEC} \leq \text{TEC}_m + 1.5\text{IQR}_{\text{upper}} \\ \text{TEC}_i - (\text{TEC}_m - 1.5\text{IQR}_{\text{lower}}) & \text{TEC} < \text{TEC}_m - 1.5\text{IQR}_{\text{lower}} \end{cases} \quad (3)$$

其中 $i=1-96$, 代表一天 96 个测值。

图 2 以四川地区 2019 年 2 月 5 日 -19 日的跟踪曲线为例, 图中顶部的两幅图给出了太阳及地磁活动参数 Dst (<-30nT 为扰动)、Kp (>3 为扰动) 和 F10.7 (>90sfu 为太阳活动增强), 用作排除空间天气因素干扰, 其中任何一个指标超过阈值均认为可能与空间天气有关 (如 2 月 8-9 日)。下面的 5 个四川省 GPS TEC 站点

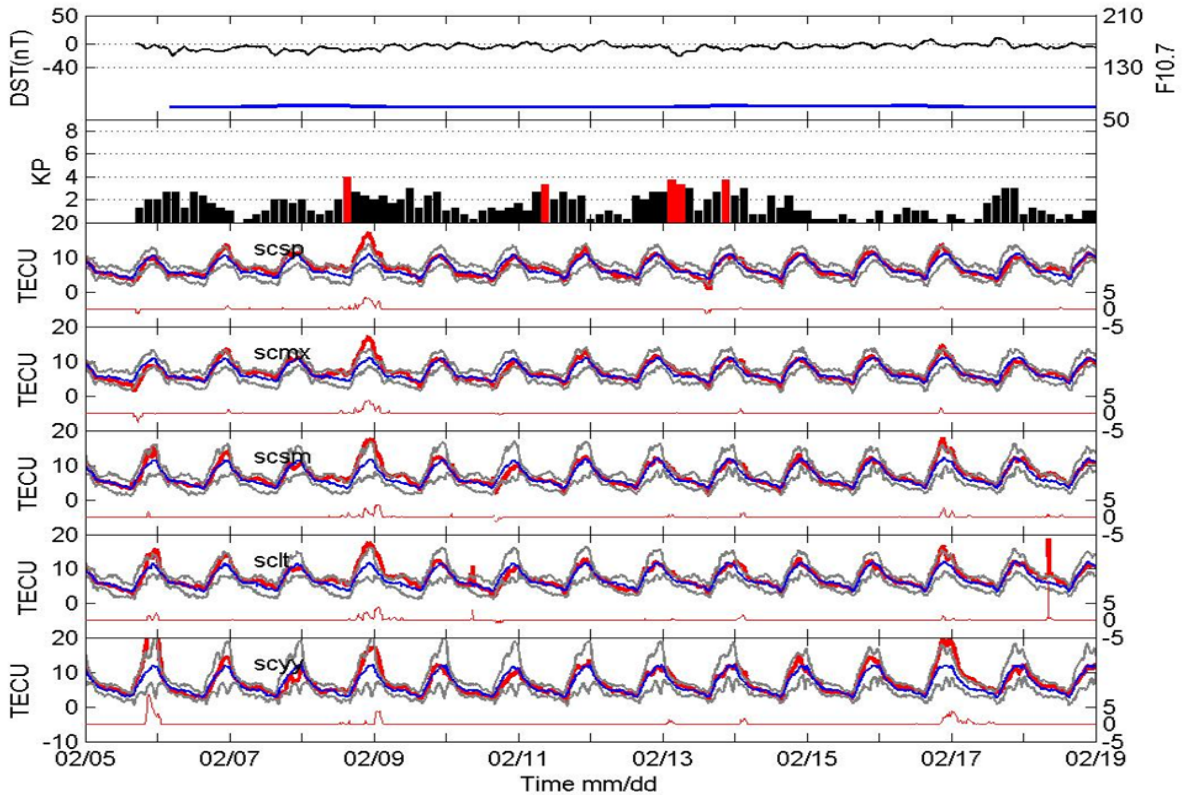


图 2 四川地区 GPS TEC 跟踪时序曲线

时序曲线, 台站名标注在曲线上方, 坐标在左侧标识, 其中红色线为实测值, 蓝色线为滑动背景中值 (窗长 15 天, 滑动步长 1 天), 灰色线为上下阈值 (1.5 倍四分位), 每个台站下方又单独给出了 Δ TEC 异常曲线, 坐标在右侧标识, 据此可非常容易判断正负向扰动异常。当异常出现在地磁、太阳活动平静期, 且一次异常超过 2 小时即记为 1 次异常 (如 2 月 16-17 日), 认为可能与区域电离层或地震自然灾害活动有关。

中国地震局地震预测研究所跟踪使用 GPS 站点数据由预测所数据中心整理标校后发布, 一般会滞后 2-3 天时间, TEC 时序曲线因此也有 2-3 天的时间延迟。TEC 作为短临监测手段, 每周三填报零异常报告, 同时在之前的研究中也发现地震电离层异常集中出现在震前 1 周内 (Le et al., 2011), 两者综合考虑, 定义 TEC 预测时段为一周。

2.3 地震信息

根据台网中心发布的正式地震目录, 我们收集了 2016 年至 2020 年期间川滇监测区域内及邻区 5 级以上地震 (表 1, 其中红色为川滇监测区外, 加黑为区域内接近 6 级或 6 级以上地震), 共计 23 次, 其中有 2 次 6 级以上地震, 分别为 2017 年九寨沟 7.0 级和 2019 年长宁 6.0 级地震, 其次最大震级为 2018 年 9 月 8 日墨江 5.9 级。

根据台网中心发布的正式地震目录, 我们收集了 2016 年至 2020 年期间川滇监测区域内及邻区 5 级以上地震 (表 1, 其中红色为川滇监测区外, 加黑为区域内接近 6 级或 6 级以上地震), 共计 23 次, 其中有 2 次 6 级以上地震, 分别为 2017 年九寨沟 7.0 级和 2019 年长宁 6.0 级地震, 其次最大震级为 2018 年 9 月 8 日墨江 5.9 级。

表 1 2016-2020 年川滇地区 5 级以上地震目录信息

序号	日期	时间	纬度	经度	<i>M_s</i>	深度（米）	位置
/	2016/5/18	00:48:47	26.1	99.53	5	15000	云南大理州云龙县
/	2016/9/23	01:23:11	30.1	99.61	5.1	16000	四川甘孜州理塘县
1	2017/3/27	07:55:00	25.89	99.8	5.1	12000	云南大理漾濞
2	2017/8/8	21:19:46	33.2	103.82	7	20000	九寨沟
3	2017/9/30	14:14:37	32.27	105	5.4	13000	四川广元市青川县
4	2017/11/23	17:43:33	29.4	107.94	5	10000	重庆武隆
5	2018/8/13	01:44:24	24.19	102.71	5	7000	云南玉溪通海
5	2018/8/14	03:50:36	24.19	102.71	5	6000	云南玉溪通海
6	2018/9/8	10:31:29	23.28	101.53	5.9	11000	云南普洱市墨江县
7	2018/9/12	19:06:34	32.75	105.69	5.3	11000	陕西汉中市宁强县
8	2018/10/31	16:29:55	27.7	102.08	5.1	19000	四川凉山州西昌市
9	2018/12/16	12:46:07	28.24	104.95	5.7	12000	四川宜宾市兴文县
10	2019/1/3	08:48:06	28.2	104.86	5.3	15000	四川宜宾市珙县
11	2019/6/17	22:55:43	28.34	104.9	6	16000	四川宜宾市长宁县
	2019/6/17	23:36:01	28.43	104.77	5.1	16000	四川宜宾市珙县
	2019/6/18	07:34:33	28.37	104.89	5.3	17000	四川宜宾市长宁县
12	2019/6/22	22:29:56	28.43	104.77	5.4	10000	四川宜宾市珙县
13	2019/7/4	10:17:58	28.41	104.74	5.6	8000	四川宜宾市珙县
14	2019/9/8	06:42:13	29.55	104.79	5.4	10000	四川内江市威远县
15	2019/12/18	08:14:05	29.59	104.82	5.2	14000	四川内江市资中县
16	2020/2/3	00:05:41	30.74	104.46	5.1	21000	四川成都青白江区
17	2020/4/1	20:23:27	33.04	98.92	5.6	10000	四川甘孜州石渠县
18	2020/5/18	21:47:59	27.18	103.16	5	8000	云南昭通市巧家县

三、TEC 零异常报告整理及预测效能评估

通过台网中心电磁学科组，下载了全部 2016-2020 预测所上报的电离层零异常报告，并将其中与川滇地区 GPS TEC 跟踪上报的零异常报告进行了拷贝整理，删除了没有异常信息的数据。然后通过人工分析整理，形成了 2016-2020 每年度 TEC 异常报表（附表 1-5），其中 2016 年原始零异常报告自 5 月份开始 TEC 无任何信息记录，明显上报有所缺失，故该年地震不计入本次统计分析，2016 年度零异常汇总数据（附表 1）仅供参考。2020 年度统计至 7 月 15 日。这些汇总信息中剔除了由空间天气引起的扰动，只保留地磁活动

平静时期 TEC 异常，同时日期比较接近在同一周内出现的也进行了合并，记为 1 次异常，多数信息参考了每年度的部门任务专项总结报告，结合表 1 的地震目录，我们将 2017-2020 年区域内异常记录一周内发生的地震标注了附表的最后一列，以方便对应核查。

3.1 人工统计结果

基于考附表 2-5 的每年度零异常报告汇总结果，以及表 1 的地震目录信息，我们统计了异常和地震的对应关系，结果见表 2 和表 3（其中红色字部分为重点关注数据）。

表 2 TEC 跟踪结果评估 (以地震频次分震级统计)

2017-2020 年	有异常	无异常
总地震数目 (17 次)	14/18=77.8%	4/18=22.2% (漏报率)
5.9 级以上地震 (3 次)	3/3=100%	0/3=0
$5.0 \leq M_s < 5.9$ (15 次)	11/15=73.3%	4/15=26.7%
$5.5 \leq M_s < 5.9$ (3 次)	2/3=66.7%	1/3=33.3%
$5.0 \leq M_s < 5.5$ (12 次)	9/12=75%	3/12=25%

表 3 TEC 跟踪结果评估 (以异常频次统计)

2017-2020 年总次数	有地震概率	无地震概率
异常总次数 (73)	18/73=24.7%	55/73=75.3%
负向扰动次数 (8)	0/8=0%	8/8=100%
剔除负向扰动异常总频次 (65)	18/65=27.7%	47/65=72.3% (虚报率)
正向扰动次数 (55)	13/55=23.6%	42/55=76.4%
正负向扰动次数 (10)	5/10=50%	5/10=50%

综合表 2 和表 3 的统计结果, 可发现以下特征:

- (1) 2017-2020 年川滇监测区共发生 5 级以上地震 18 次, 共发生 3 次 5.9 级以上地震, 均有异常记录;
- (2) 18 次 5 级地震前有 4 次 7 天内无 TEC 异常记录, 漏报率为 0.222;
- (3) 2017-2020 年共上报零异常共 73 次, 其中有 8 次仅出现负向扰动, 目前无一次对应地震, 表明该区域负向异常作为地震前兆的概率极低, 未来可不作为地震异常对待;
- (4) 剔除负向扰动异常总频次为 65 次, 有 18 次异常后续发生 5 级以上地震, 47 次无地震对应, 虚报率为 0.723, 说明川滇地区 TEC 异常虚报率很高;
- (5) 该区域处于赤道双峰效应的北驼峰位置, 所以正向异常频次较高, 还需加强赤道峰值背景性演化特征及其与地震之间的关联性研究。

3.2 基于机器学习算法的预测效能评估

本次评估中共设计了两套规则, 其中规则 1 设置了异常和地震等比重放大效应, 规则 2 将地震比重降低至实际发生水平。

规则 1:

- (1) 计入 2017.1.1-2020.7.15 全部监测天数, 按日

期排列记为 1 列数据;

- (2) 每次异常覆盖预测时段为异常当日 + 未来 7 天共计 8 天, 标记为 1, 其余天数标记为 0; 记为 1 列数据;

- (3) 每次地震对应时段为地震当日 + 之前 7 天共计 8 天, 标记为 1, 其余天数标记为 0; 记为 1 列数据;
- 规则 2:

- (1) 计入 2017.1.1-2020.7.15 全部监测天数, 按日期排列记为 1 列数据;

- (2) 每次异常覆盖预测时段为异常当日 + 未来 7 天共计 8 天, 标记为 1, 其余天数标记为 0; 记为 1 列数据;

- (3) 每次地震当日记为 1, 发生在同一天的 1 次以上地震仍记为 1, 相邻日期的地震单独计数, 不按一个震群统计, 其他无震日标记为 0; 记为 1 列数据。

效能评估参数定义请参考网站上使用的评估方法介绍的相关文档信息 (https://en.wikipedia.org/wiki/Confusion_matrix)。下面就主要参数进行简介, 以方便理解最后给出的评估结果。在此我们引入了机器学习二元分类的思路, 把真实发生地震影响到的天数作为一类 (真实值), 将 TEC 零异常填报的天数作为另

外一类（预测值），按照下面的指标对两套规则下形成的数据矩阵进行评估。

3.2.1 混淆矩阵

TP: True Positives, 真实类别为 Positive (标记为 1), 预测的类别也为 Positive。

FP: False Positives, 预测为 Positive, 但真实类别为 Negative (标记为 0)。

FN: False Negatives, 预测为 Negative, 但真实类别为 Positive。

TN: True Negatives, 真实类别为 Negative, 预测的类别也为 Negative。

准确率 ACC (Accuracy) 计算公式如下:

$$ACC = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$

准确率表示预测正确的样本 (TP 和 TN) 在所有样本 (All Data) 中占比。

Positive Class 的精确率 (Precision) 计算公式如下:

$$PR = \frac{TP}{TP + FP}$$

Positive Class 的召回率 (Recall), 常常被称作敏感度 (Sensitive), 计算公式如下:

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN}$$

Positive Class 的精确率表示在预测为 Positive 的样本中真实类别为 Positive 的样本所占比例; Positive Class 的召回率表示在真实为 Positive 的样本中模型成功预测出的样本所占比例 (在所有实际为正例的样本中, 被预测为正例的样本比例)。

特异性 (Specificity) 计算公式如下所示:

$$TNR = \frac{TN}{TN + FP}$$

特异性表示为: 实际为负的样本中, 有多大概率被预测出来, 这个定义和召回率非常像, 二者区别只是对象不同, 召回率是针对正例, 而特异性针对的是负例。

3.2.2 马修斯相关系数 (Matthews Correlation Coefficient, MCC)

MCC 主要用于衡量二分类问题, 其综合考虑了 TP, TN, FP, FN, 是一个比较均衡的指标, 对于样本不均衡情况下也可以使用。MCC 的取值范围在 [-1,1], 取值为 1 表示预测与实际完全一致, 取值为 0 表示预测的结果还不如随机预测的结果, -1 表示预测结果与实际的结果完全不一致。因此我们看到, MCC 本质上描述了预测结果与实际结果之间的相关系数

$$MCC = \frac{TP \times TN - FP \times FN}{\sqrt{(TP + FP)(TP + FN)(TN + FP)(TN + FN)}}$$

3.2.3 ROC 曲线及其 AUC 值

AUC 全称为 Area Under Curve, 表示一条曲线下面的面积, ROC 曲线的 AUC 值可以用来对模型进行评价。

ROC 曲线的纵坐标 True Positive Rate (TPR) 在数值上就等于 Positive Class 的 Recall 横坐标 False Positive Rate (FPR) 在数值上等于 (1 - Negative Class 的 Recall):

$$\begin{aligned} \text{横坐标: } FPR &= \frac{FP}{FP + FN} \\ \text{纵坐标: } TPR &= \frac{TP}{TP + FN} \end{aligned}$$

通过对分类阈值 θ (默认 0.5) 从大到小或者从小到大依次取值, 我们可以得到很多组 TPR 和 FPR 的值, 将其在图像中依次画出就可以得到一条 ROC 曲线, 阈值 θ 取值范围为 [0,1]。

ROC 曲线在图像上越接近左上角 (0,1) 模型越好, 即 ROC 曲线下面与横轴和直线 FPR=1 围成的面积 (AUC 值) 越大越好。直观上理解, 纵坐标 TPR 就是 Recall Positive 值, 横坐标 FPR 就是 (1 - Recall Negative), 前者越大越好, 后者整体越小越好, 在图像上表示就是曲线越接近左上角 (0,1) 坐标越好。

3.2.4 P-R 曲线

P-R 曲线其横坐标为 Recall, 纵坐标为 Precision, P-R 曲线刻画查准率 (Precision) 和查全率 (Recall) 之间的关系, 查准率指的是在所有预测为正例的数据中, 真正例所占的比例, 查全率是指预测为真正例的数据占有所有正例数据的比例。查准率和查全率是一对矛盾的度量, 一般来说, 查准率高时, 查全率往往偏低, 查全率高时, 查准率往往偏低。

3.3 小结

为了对比评估 TEC 预报地震的效能, 我们生成两个数据集 (DataSet), 其中 DataSet I 和 II 的分别对应开始提出的两套规则。

表 4 为两个数据集中 TEC 效能的各项评估指标, 可以看出 DataSet I 和 DataSet II 的准确度 (Accuracy) 差不多 (0.6006 和 0.5944), 但 DataSet II 的 AUC 比 DataSet I 高 18.3%, 其中的主要原因是非异常天数占据了较大的比例, 在 DataSet II 中 TN 的天数比 DataSet I 中 TN 的天数多了 55 天。图 1 为 ROC 曲线和 P-R 曲线, ROC 曲线可以看作是随着阈值的不断移动, 所有样本中正例 (样本被分类器判为正例, 其本身是正例) 与负例 (样本被分类器判为正例, 本身是负例) 之间的“对抗”。图 1 中 ROC 曲线表现为较少的正例优先于负例, 而图 1b 的曲线图 1a 较越靠近左上角, 表明 DataSet II 的分类性能优于 DataSet I。P-R 曲线的两个指标都聚焦于正例, 主要反应样本的类别不平衡问题, 而 DataSet I 和 DataSet II 的 Negative 天数远大于 Positive 天数, 其对应的 P-R 曲线表现较差。

预测效能评估结果显示：

- (1) 两套规则下 ACC 和 AUC 均高于 0.5，反映 TEC 有一定监测预测效能；
- (2) 异常预测天数占总天数的 41%，反映虚异常

问题较为严重；

- (3) 统计时间短，地震样本数很少，地震数才 20 个，而且大多数为 6 级以下地震，结果不尽理想，还需要更多强震资料积累。

表 4 机器学习预测评估结果

Dataset	MCC	Rscore	AUC	Specificity	Sensitivity	Accuracy	Precision	TN	TP	FP	FN
I	0.1106	0.1764	0.5882	0.604	0.5725	0.6006	0.1474	697	79	59	457
II	0.098	0.3912	0.6956	0.8	0.8	0.5944	0.0299	752	16	4	520

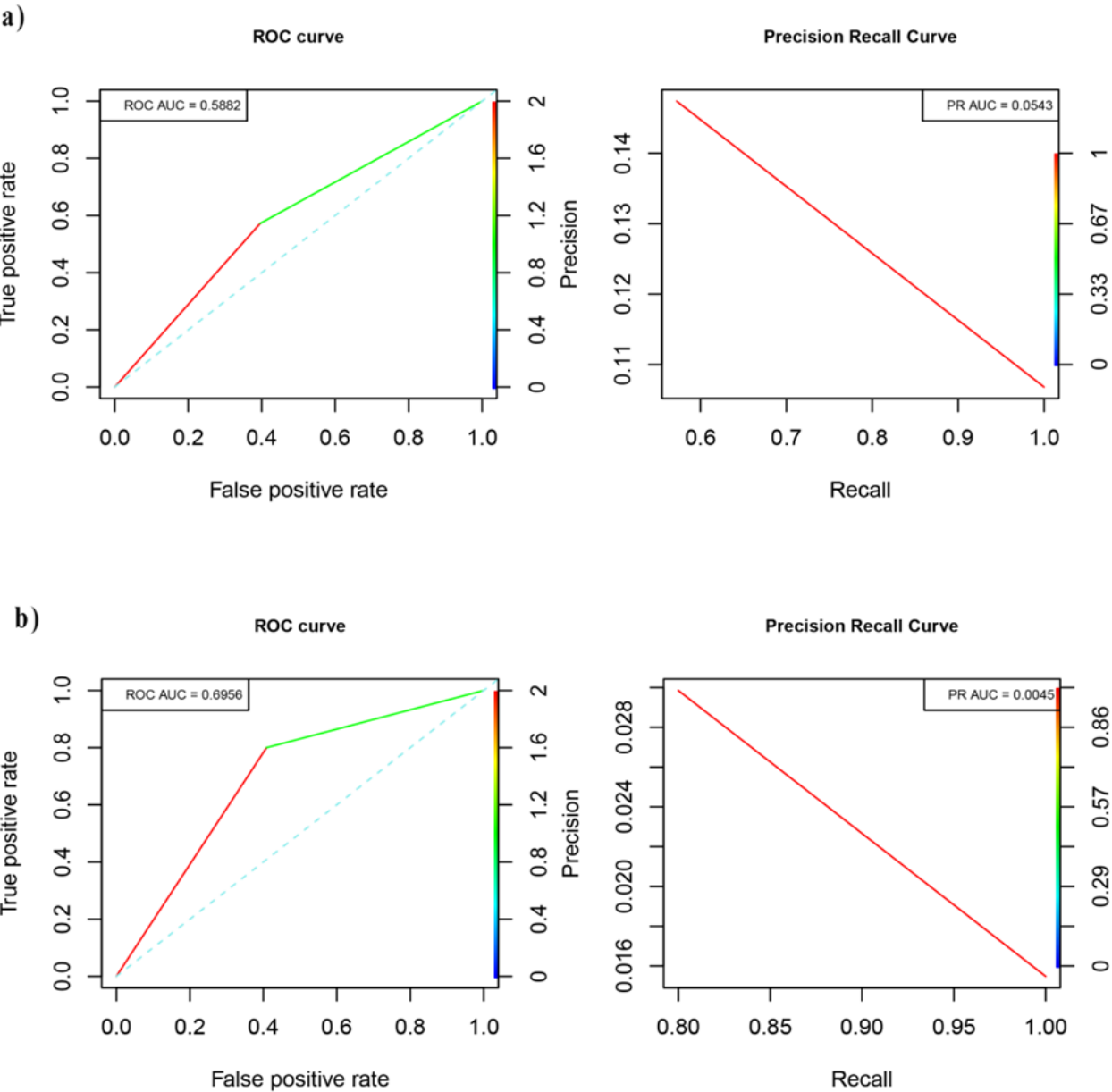


图 3 GPS TEC 预测效能评估（（a）Dataset I；（b）Dataset II）

四、存在问题及未来工作设想

(1) 异常汇总及空间天气干扰问题。经过详细核查,结合其他空间天气活动指数等,我们又发现了7次在异常当日有一定磁暴活动,也标注在附表1-6中。可以看到其中有6次为虚异常,后续无地震。另外一次发生在2018年9月12日,但当日陕西宁强发射地震,如果考虑受到空间干扰的话,则本次统计中两次发生在川滇地区以外的地震(重庆武隆、陕西宁强)均未在川滇地区引起电离层扰动响应。另外有些异常日期之前有强磁暴活动,这些磁暴的后续影响也并未关注,这也意味着我们在剔除空间天气干扰,以及区分叠加在空间天气扰动上的地震异常信息提取上都还有许多工作要做。而全球地磁场数据分析也显示即使在地磁平静期也存在全球范围内的小幅度扰动现象,需要加强大范围空间扰动事件识别。本次统计以之前的分析汇总结果为准,不再另行更新汇总数据表格,以便更准确地反映历史工作的效能。

(2) 虚异常频次过高问题。根据全球电离层TEC背景分布特征,电离层电子密度峰值并不出现在磁赤道上空,而是呈现喷泉效应,形成双峰一谷的结构。川滇地区正好位于南北双峰中的北驼峰,因此在日侧经常出现较高的峰值变化。赤道喷泉效应的强弱、位置均受到各种因素的影响,无法用简单的数学公式进行模拟,只能依靠长期观测进行规律性研究。我们在川滇地区的观测中尽管考虑到了赤道异常的效应,并采用一定阈值(1.5倍四分位)尝试降低赤道效应的影响,但仍然有很多正异常被观测到,所以如何区分这种强背景信息,并有效提取到地震叠加在其上的电离层扰动时未来需要考虑的重点工作,以期有效降低虚异常频次,提高TEC预测水平。

(3) 地震电离层共轭效应问题。在本次统计分析中我们只针对川滇地区本地的地震进行了总结,但实际应用研究中我们还发现低纬度地区如印尼、菲律宾等地的一些比较强的地震也能够加强赤道喷泉效应,从而分别在南北半球也即在川滇地区观测到明显的异常。这种共轭区地震与本地异常的对应情况如何,其异常特征与本地地震激发的电离层异常在时间和空间上是否有明显差异,是否可以有效加以区分等等问题都需要我们加强共轭区地震的电离层扰动特征研究,也同步积累更多预测经验。

(4) 点面结合的小尺度异常监测。在川滇地区地震电离层监测中,我们使用的每省5个站点的大区域面上覆盖模式,对于区域地震监控确实有一定效能,但相对精准布控而言还有较大差距。而多次地震的TEC异常空间分布也显示距离震中越近的台站异常强度越大、异常频次也越高。针对年度跟踪危险区监测要求,可以考虑在7级地震危险区周围加密台站跟踪模式,实现小区域小尺度精度布控,获取更精细的电离层扰动特征,以点面结合的方式发挥各自优势,提高小区域小尺度监控和预测能力。

(5) 地震预测现代化跟踪技术。在之前的研究

应用中,TEC探测技术已经完成多个监控区域的网上准实时发布系统建设(http://10.16.24.26:8080/tec_track/tecportal/product);并实现震情实时响应,在地震发生后自动搜索距离震中最近的5个站点,显示其前15天至震后1天的TEC分析曲线。不过目前还存在一些问题,如TEC曲线中突跳点过多、曲线不稳定、部分台站数据严重缺失等,使得分析结果大打折扣。未来将不仅利用GPS卫星,而且引入GNSS系统的所有卫星,重点引入北斗卫星数据,参与TEC反演,改善数据反演的精度和稳定性,提高原始观测数据的可靠性,从而进一步保障数据分析结果的科学性。同时计算每条卫星-接收站链路的TEC反演曲线,提取其中的中小尺度电离层行扰,进一步挖掘和拓展TEC的潜在信息和应用效能。

五、结论

地震电离层短临监测技术与传统前兆监测有重大区别,电离层因其较强的每日生成和恢复能力,扰动异常多以突发性为主,且持续时间非常有限,我们的预测也集中在未来7天的时间内,根据资料分析记录,对7天内地震情况给出判识意见,异常结束也非常迅速,不会延长预报时限,是真正能够推进数量级为天的预测技术,也是真正期待未来能发挥减灾实效的短临监测手段。推动该项技术的进步是地震预测现代化改革的重要举措,对于发挥短临技术的预测应用效能具有重要的现实意义。

本次TEC效能评估工作全面收集整理了预测所GPS TEC自2016年以来上报零异常报告结果,通过与监测区内5级以上地震进行对比分析,对TEC的预测效能有了更清晰的认知,也针对当前存在的问题提出了未来工作的方向。结果虽然不尽理想,但也充分反映了现阶段地震短临跟踪应用中存在的问题,对未来TEC研究和应用工作有重要的启发,也希望借此机会,推进短临监测手段评估技术的成熟化进度,为其他探测手段和方法效能评估提供参考。

致谢:本次工作中得到了预测所刘静、张永仙、孙柯、台网中心李美等多位同志的支持和帮助,在此表示感谢。

参考文献

甘卫军,张锐,张勇,唐方头.2007.中国地壳运动观测网络的建设及应用[J].国际地震动态,7:32-37.

夏淳亮.2004.GPS台网观测中电离层TEC的解算方法及TEC现报系统的初步研制[D].武汉:中国科学院武汉物理与数学研究所,硕士学位论文.

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.地震学报,38(3):356-375.

Le Huijun, Liu, J.Y., Liu, L. 2011. A statistical analysis of ionospheric anomalies before 736 M6.0+ earthquakes during 2002 - 2010. Journal of Geophysical Research 116, A02303, doi:10.1029/2010JA015781.

附表 1 2016 年 GPS TEC 异常跟踪情况总结

序号	日期	异常描述	对应地震情况
1	2 月 2 日	云南出现电离层正向扰动	无
2	2 月 25 日	云南出现电离层负向扰动	无
3	3 月 4 日	云南出现电离层正向扰动	无
4	4 月 11 日	云南、四川均出现电离层扰动	4 月 13 日缅甸 7.2 级地震
5	4 月 20 日	云南出现电离层负向扰动	无

附表 2 2017 年 GPS TEC 异常跟踪情况总结

序号	日期	异常描述	对应地震情况
1	1 月 13 日、 1 月 14 日	云南、四川均出现电离层正向扰动， 异常幅度由南向北逐渐降低	无
2	2 月 25 日	云南地区出现了正扰动	无
3	3 月 19 日 -20 日	四川和云南地区电离层正向扰动	3 月 27 日云南大理漾濞 5.1 级地震
4	8 月 8 日	四川和云南地区出现了超过 2 小时的正扰动	8 月 8 日九寨沟 7.0 级地震
5	8 月 25 日	四川和云南地区出现了正扰动	无
6	9 月 26 日	四川和云南地区电离层出现正向扰动	9 月 30 日四川青川 5.4 级地震
7	10 月 4 日、 10 月 8 日	四川和云南地区电离层出现扰动	无
8	12 月 1 日	四川地区电离层出现正向扰动	无
9	12 月 28 日	云南地区电离层出现正向扰动	无
10	12 月 31 日	四川和云南地区出现电离层正向扰动	无

附表 3 2018 年 GPS TEC 异常跟踪情况总结

序号	日期	异常描述	对应地震情况
1	1 月 3 日 -7 日	四川和云南地区均出现了超过 2 天的正扰动	无
2	2 月 2 日	四川和云南地区均出现了超过 6 个小时的正扰动	无
3	3 月 4 日	四川和云南地区均出现电离层正向扰动	无
4	3 月 7 日、 3 月 8 日	云南、四川及华北均出现电离层正向扰动， 异常幅度由南向北逐渐降低	无
5	4 月 1 日	四川和云南地区均出现电离层正向扰动	无
6	4 月 3 日、 4 月 7 日	四川和云南地区均出现电离层正向扰动	无
7	4 月 26 日、 4 月 27 日	四川和云南地区出现电离层正负向扰动	无
8	5 月 4 日	云南出现电离层正向扰动	无
9	5 月 23 日	四川和华北地区均出现了超过 2 个小时的正扰动	无 有弱磁暴
10	5 月 29 日	四川和云南地区均出现电离层正向扰动	无
11	7 月 4 日	四川和云南地区均出现电离层负向扰动	无
12	7 月 10-13 日	四川和云南地区均出现电离层正向扰动	无
13	8 月 1 日	四川和云南地区均出现电离层正向扰动	无
14	8 月 10 日、 8 月 12 日	四川和云南地区均出现电离层正向扰动	8 月 13 日云南通海 5.0 级地震 8 月 14 日云南通海 5.0 级地震
15	8 月 14 日	四川和云南地区均出现电离层正向扰动	8 月 14 日云南通海 5.0 级地震
16	9 月 4 日	云南出现电离层正向扰动	9 月 8 日云南墨江 5.9 级地震
17	9 月 12 日	云南出现电离层正向扰动	9 月 12 日陕西宁强 5.3 级地震 有磁暴
18	9 月 19 日、 9 月 20 日	云南出现电离层正向扰动	无
19	9 月 30 日	四川和云南地区均出现电离层正向扰动	无
20	10 月 3-6 日	华北和云南地区出现电离层正负向扰动、 四川地区出现电离层正向扰动	无
21	10 月 14 日	云南地区出现电离层正负向扰动、 华北地区出现电离层正向扰动	无
22	10 月 18-19 日	华北和云南地区出现电离层正向扰动	无
23	10 月 23-27 日	云南、四川均出现电离层正负向扰动	10 月 31 日四川西昌 5.1 级地震
24	11 月 28 日 - 12 月 1 日	云南、四川均出现电离层正负扰动	无
25	12 月 12 日、 12 月 16 日	云南、四川均出现电离层正负扰动	12 月 16 日四川宜宾 5.7 级地震

附表 4 2019 年 GPS TEC 异常跟踪情况总结

序号	日期	异常描述	对应地震情况
1	1 月 1 日	云南出现电离层正向扰动	1 月 3 日四川珙县 5.3 级地震
2	1 月 7-13 日	四川和云南地区均出现电离层正负向扰动	无
3	2 月 8、2 月 9 日	四川和云南地区均出现了超过 2 天的正扰动	无 有磁暴
4	2 月 12 日、2 月 14 日、 2 月 17 日	四川和云南地区出现了电离层正扰动	无 有磁暴
5	4 月 7 日	四川和云南地区均出现电离层正向扰动	无
6	4 月 11 日	云南、四川均出现电离层正向扰动	无
7	4 月 14 日	四川和云南地区均出现电离层正向扰动	无
8	4 月 26 日、 4 月 27 日	四川和云南地区出现电离层负正扰动	无
9	6 月 1 日、 6 月 2 日	四川地区出现电离层正向扰动	无
10	6 月 10 日、 6 月 14 日	云南出现电离层正向扰动	6 月 17 日四川宜宾长宁 6.0 级地震 6 月 17 日四川珙县 5.1 级地震 6 月 18 日四川长宁 5.3 级地震
11	7 月 1 日、 7 月 5 日	四川和云南地区均出现了电离层正扰动	7 月 4 日四川珙县 5.6 级地震
12	7 月 10 日	四川地区出现电离层负向扰动	无 有磁暴
13	7 月 11 日	云南地区出现电离层负向扰动	无
14	7 月 17 日	四川地区出现电离层负向扰动	无
15	7 月 25 日	四川、云南地区均出现电离层正负向扰动	无
16	8 月 1 日、 8 月 2 日	云南地区出现电离层正向扰动	无 8 月 1 日有弱磁暴
17	8 月 9 日、 8 月 11 日	云南地区出现电离层正向扰动	无
18	8 月 24 日	四川和云南地区出现电离层正扰动	无
19	9 月 3 日	四川和云南地区均出现电离层正负向扰动	9 月 8 日四川内江 5.4 级地震 注：8 月 30 日至 9 月 2 日有强磁暴活动
20	9 月 4 日、9 月 10 日、 9 月 12 日、9 月 13 日	云南地区出现电离层正负向扰动	9 月 8 日四川内江 5.4 级地震
21	9 月 7 日	四川地区出现电离层正向扰动	9 月 8 日四川内江 5.4 级地震
22	9 月 19 日、 9 月 21 日	四川、云南及华北地区出现电离层正向扰动	无
23	9 月 24 日	四川、云南地区均出现电离层正向扰动	无 有磁暴

附表 5 2020 年 GPS TEC 异常跟踪情况总结 (截止到 2020 年 7 月 15 日)

序号	日期	异常描述	对应地震情况
1	1 月 11 日	云南地区出现电离层正向扰动	无
2	1 月 14 日	云南地区出现电离层正向扰动	无
3	2 月 1 日	云南地区出现电离层正向扰动	2 月 3 日四川成都市青白江区 5.1 级
4	2 月 9 日	四川和云南地区均出现电离层正向扰动	无
5	3 月 6 日	四川和云南地区均出现电离层正向扰动	无
6	3 月 10-14 日	四川和云南地区均出现电离层正向扰动	无
7	4 月 2 日	四川和云南地区均出现电离层正向扰动	无
8	4 月 18、19 日	四川地区出现了 2 天的正扰动	无
9	5 月 12-17 日	四川地区出现了电离层负正扰动	5 月 18 日云南昭通市巧家县 5.0 级地震
10	5 月 16 日	四川和云南地区均出现电离层正向扰动	5 月 18 日云南昭通市巧家县 5.0 级地震
11	6 月 19 日、 6 月 17-21 日	四川和云南地区均出现电离层正向扰动、	无
12	6 月 23-28 日	四川地区出现电离层正向扰动	无
13	6 月 27-30 日	云南地区出现电离层负正扰动	无
14	7 月 3 日	四川和云南地区均出现电离层负向扰动	无
15	7 月 6-8 日	四川和云南地区均出现电离层负向扰动	无

加强科技创新支撑新时代防震减灾事业现代化建设
全国地震重点监视防御区公共服务

试点

工作通讯目录

关于观测仪器中的模拟滤波与数字滤波	2020 年第 1 期 (总第 1 期)
推进新时代地震预测研究现代化框架方案 (2020-2035 年)	2020 年第 2 期 (总第 2 期)
2020 年 6 月 26 日新疆于田 $M_s6.4$ 地震虚拟科学考察试点工作报告	2020 年第 3 期 (总第 3 期)
研究所加强科技创新支撑新时代防震减灾事业现代化建设试点行动方案 (2020 ~ 2022 年)	特刊第 1 期 (总第 4 期)
地震预测基础研究成果支撑引领地震预测业务的若干基本问题	2020 年第 4 期 (总第 5 期)
地震监测预报预警科技进展和发展趋势	2020 年第 5 期 (总第 6 期)
地震危险区精细调查与地震现场综合科学考察规划 (初稿)	2020 年第 6 期 (总第 7 期)
北京地区活动断裂与地震图	2020 年第 7 期 (总第 8 期)
科学规划地震预测的进步	2020 年第 8 期 (总第 9 期)
中国地震科学实验场地震科学考察工作预案 (初稿)	2020 年第 9 期 (总第 10 期)
预测所地震重点监视防御区公共服务试点工作方案	2020 年第 10 期 (总第 11 期)
地震大形势科学问题清单	2020 年第 11 期 (总第 12 期)
人工智能实时地震监测分析系统的应用	2020 年第 12 期 (总第 13 期)
亚太经合组织地震科学合作项目 ACES	2020 年第 13 期 (总第 14 期)
地震电磁短临监测手段评估—GPS TEC	2020 年第 14 期 (总第 15 期)

编委会

王武星 王琳琳 田勤俭 汤 毅 孙汉荣 吴忠良 李 营 杨林章 张永仙 张晓东 邵志刚
赵翠萍 黄 伟

编辑部：

中国地震局地震预测研究所科研管理部
E-mail:sycglb@ief.ac.cn