

基于雷电监测的大气电场地震短临异常研究

邱桂兰^{1*}, 靳小兵², 卜俊伟², 赵航¹, 陈学芬¹

¹四川省地震局, 四川 成都

²四川省气象局, 四川 成都

Email: *285108546@qq.com

收稿日期: 2020年11月27日; 录用日期: 2020年12月23日; 发布日期: 2020年12月31日

摘要

本研究通过对2014年至2019年基于雷电监测的大气电场观测资料的分析, 发现同期在四川省的16次中强地震前, 在排除雷电干扰的情况下, 存在以下特征: 1) 日均值呈低值异常变化; 2) 日均值的异常变化形态呈不规则的“W”型、“V”型及“U”型变化; 3) 日均值低值异常出现后, 第10天至19天时间范围内, 周围 $r = e^M$ 空间范围内发生中强以上地震的概率为33%。

关键词

雷电监测, 大气电场, 地震, 短临异常

Study on the Short-Impending Anomaly before Earthquakes of Atmospheric Electric Field Based on Lightning Monitoring

Guilan Qiu^{1*}, Xiaobing Jin², Junwei Bu², Hang Zhao¹, Xuefen Chen¹

¹Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu Sichuan

²Sichuan Meteorological Bureau, Chengdu Sichuan

Email: *285108546@qq.com

Received: Nov. 27th, 2020; accepted: Dec. 23rd, 2020; published: Dec. 31st, 2020

Abstract

In this study, through the analysis of the observational data of atmospheric electric field based on

*通讯作者。

文章引用: 邱桂兰, 靳小兵, 卜俊伟, 赵航, 陈学芬. 基于雷电监测的大气电场地震短临异常研究[J]. 地球科学前沿, 2020, 10(12): 1266-1274. DOI: 10.12677/ag.2020.1012123

lightning monitoring from 2014 to 2019, it was found that before the 16 moderate and strong earthquakes in Sichuan Province, in the case of eliminating lightning interference, the following characteristics existed: 1) Daily mean values have anomalous variations of low values; 2) The trend of daily mean values have irregular “W”, “V” and “U” anomaly; 3) After the anomalous low value of daily mean, the probability of occurrence of moderate and strong earthquakes is 33% in $r = e^M$ space from the 10th day to the 19th day.

Keywords

Lightning Monitoring, Atmospheric Electric Field, Earthquakes, Short-Impending Anomaly

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地震在孕震期地壳内部由地质活动引起的压电、动电等多种效应激发电磁辐射引起地电场和大气电场异常变化[1] [2] [3] [4], 多次被国内外的中强震观测研究结果所证实。早在二十世纪九十年代, 我国先后在北京白家疃、延庆、天津宝坻、河北北戴河、邯郸、文安、山西大同等地开展了大气电场观测, 并开始对震前大气电场异常进行研究, 结果表明在近场较大地震前可以观测到明显的异常现象[5] [6]。近年来, 我国气象部门用于气象雷电预警等服务的大气电场观测在 2008 年汶川、2017 年云南漾濞、四川九寨沟和 2019 年宜宾长宁等多次中强以上地震前出现了明显的异常变化[7], 且这些异常变化已作为一种临震前兆引起了人们的关注。对于大气电场地震异常的识别, 郝建国认为大气电场出现的是负异常, 异常幅度较大, 异常持续时间从数小时至十余小时不等, 在震前一段时间内多次出现。李一丁、靳小兵等在汶川地震前看到的是正异常变化, 在漾濞地震前看到的是孕震区内大气电位梯度呈普遍降低趋势。地震系统已有二十多年未进行大气电场观测, 对大气电场与地震关系的研究也近乎处于“休眠”状态。作为一种尝试, 本文将基于气象雷电监测的大气电场的地震短临异常进行研究, 拟探寻静电前兆异常变化对于中强以上地震短临预测中是否具有普适意义, 以进一步促进地震部门与气象部门的合作, 进一步促进地震系统大气电场与地震关系的观测与研究。

2. 基本概述

2.1. 观测基本情况

为有效监测省内雷电情况, 四川省气象局建有一个由 24 个大气静电场观测站等组成的雷电定位网, 网内大气电场观测台站大部分分布于川东南地区, 见图 1。根据我国无线电管理委员会对无线电频段用途分布分配, TLF 及以下(0~0.3 Hz)相对较高频率具有杂波干扰小、介质衰减小特性, 能量较为集中, 是地震电磁前兆异常观测的理想频段, 分配给地震实验[8] [9]。目前, 四川省气象局采用的中科院电工所 DF 系列大气静电观测仪、大气电位梯度观测仪, 其工频符合地震观测要求。

2.2. 大气电位梯度仪和闪电定位网技术指标

测试环境: 测站位于标准气象地面观测场内, 电磁环境满足气象探测环境要求; 大气静电仪置于距离地面 1.5 米高处; 电位梯度量程范围: ± 50 kV/m/m; 工频: 0~0.3 Hz; 精确度: 10 (v/m); 采样输出时

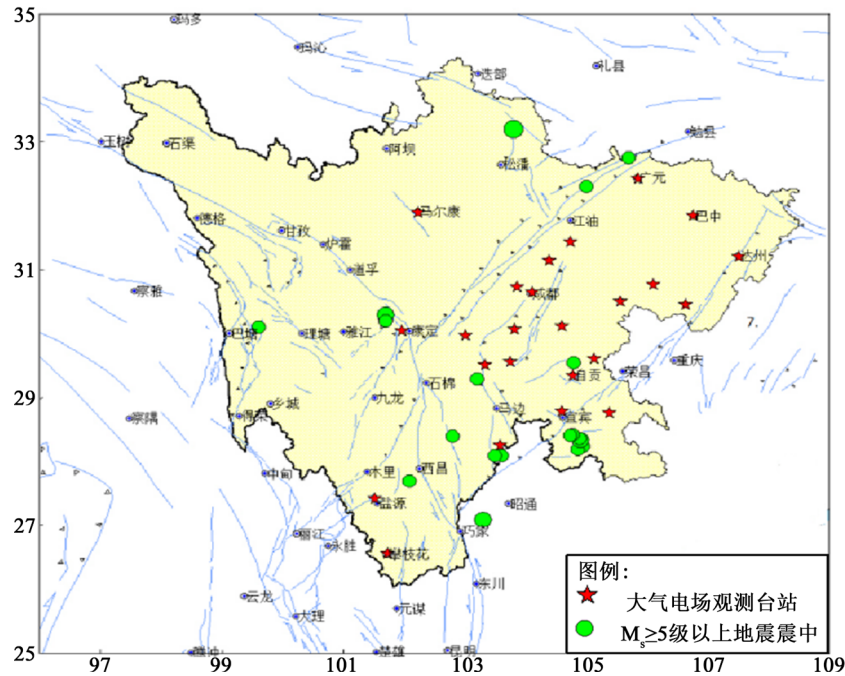


Figure 1. Distribution map of Sichuan atmospheric electric field observation station and epicenter of $M_S \geq 5$ earthquakes in Sichuan and its adjacent areas in 2014~2019

图 1. 四川省大气电场观测台站及 2014~2019 年四川及邻区 $M_S \geq 5$ 级地震震中分布图

间：1 秒。

雷电监测：采用 VLF 频段，探测效率 > 80%，定位精度 < 1 km，时差 < 1 S。

3. 大气电场观测基本原理

大气电场测量的是大气静电场垂直分量。大气静电场点位静电电场强度与测试范围内空间某点点电荷关系，根据高斯定律，大气电场垂直静电场场强可简化表达为式(1) [10]。

$$E_r = Q \cdot d / (4\epsilon r^3) \tag{1}$$

式(1)中， r 为点电荷距离大气电场测量点位距离， Q 为点电荷电荷量， ϵ 为空气介电常数，在大气中基本处于各向同性变化不大， d 为形成电场的正负电荷距离。

当空间有 N 个点电荷 $Q_1, Q_2 \dots Q_N$ 时，大气电场表达式为[10]：

$$E = \sum_{i=1}^N E_i \tag{2}$$

由于云内电荷分布无法探测，在实际应用是把带电云团内 N 个电荷视为单个体电荷，即式(1)可以代表两个体电荷之间大气电场。本文中 E 为带电云团与大地之间在大气电场仪附近产生的局部大气垂直静电场强度(以下简称大气电场)。

4. 大气电场杂波抑制

4.1. 雷电对大气电场的影响

孕震期动电、压电效应产生的电场异常变化较弱，而雷电对电场干扰较强，虽然经过地 - 空耦合正向电场放大效应，但雷电还是会引起大气电场异常变化，见图 2。因此，排除雷电干扰对于提取地震前兆静电异常变化仍是非常重要的环节之一。

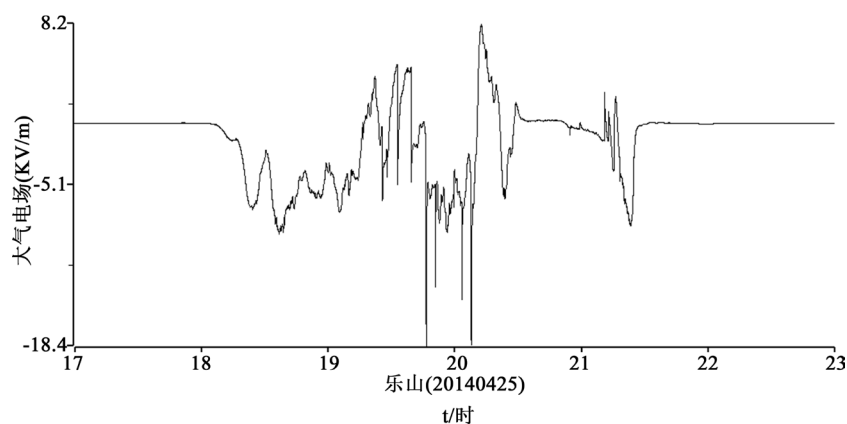


Figure 2. Seconds value curve of atmospheric electric field observation in Leshan lightning weather on April 25, 2014
图 2. 2014 年 4 月 25 日乐山雷电天气大气电场观测秒值曲线图

4.2. 雷电或带电云团对大气电场影响的识别和排除

雷电或带电云团会对大气电场产生强烈干扰, 可用雷电定位资料推算出对大气电场的影响[11] [12]。当带电云团接近大气电场仪或雷电距大气电场仪的距离减小时, 大气电场会随距离接近呈抖动增大。当地面大气电位梯度强度达到 $\pm 2\sim 3.6$ kV/m 时, 将会在距离 10~20 km 处产生空气介质击穿而形成闪电。从晴天大气电场强度增大到放电需要 5~77 分钟, 而末次放电后大气电场恢复到晴天变化规律, 时间也大于 30 分钟[13] [14] [15]。将 $T > 77$ 分钟, 以距离 10 km 处闪电在大气电场造成 2 kV/m 静电场强 E_{10} 为基准, 在不考虑电荷量变化基础上, 根据库仑定律[10]:

$$E_{10} = Q / (4\pi\epsilon 10^3) = 2 \text{ kV/m} \quad (3)$$

由公式(3)可见, r 对 E_0 影响最大, 在距离 r 处静电场强 E_r 为:

$$E_r = E_{10} / (r/10)^3 \quad (4)$$

由公式(4)计算得表 1。

Table 1. Field strength caused by lightning at different distances
表 1. 不同距离雷电引起的场强

r 距离 km	E_r 场强(kV/m)	E_r 与 E_{10} 比例(%)
2	250	12500
5	16	800
10	2	100
20	0.25	12.5
30	0.074	3.7
40	0.031	1.6
50	0.016	0.8
100	0.002	0.1

由表 1 可见, 雷电引起的近地面大气静电场强随距离衰减较快, 在 30 km 距离上衰减近 96%, 即使电荷量变化较大, 电场值仍处于晴天大气正常波动范围内。将发生雷电的时间阈值和场强指标延长, 时

域 T 延长至 120 分钟, 场强指标定位 $E_{30} > 0.074 \text{ kV/m}$, 将有效排除雷电对大气电场的干扰。

4.3. 晴天大气电场杂波识别及抑制

大量观测数据表明由大气压、温、湿、风、空气成分、降水、雾、地形地貌、测场环境、大气成分等自然现象(统称为晴天大气)产生的大气静电场强变化 $< \pm 1 \text{ kV/m}$, 波形特征为小幅波动, 近光滑曲线。季节变化、日变化、太阳辐射等引起的周期性变化、探测环境微弱改变也会引起 $< \pm 50 \text{ V/m}$ 的变化, 波形特征也近光滑曲线, 幅度小于晴天大气, 波动周期大于晴天大气[10] [15]。故将测试基准值设置为 $\pm 10 \text{ V/m}$ 可以有效抑制部分晴天大气和周期性变化引起的大气电场变化和滤除部分探测环境等引起的变化。

以上分析可见, 排除雷电干扰后, 在电场仪 30 km 范围内如果发生超过晴天大气场正常波动的异常变化, 应寻找地震孕震期动电或压电产生的干扰原因。如果小于 30 km 范围内有雷电活动, 即便电场出现异常变化, 也应视为雷电干扰, 需排除。

5. 大气电场异常信号识别及特征分析

5.1. 资料选取

地震目录: 根据中国地震台网正式测定的 2014 年至 2019 年四川及邻区 $M5$ 以上地震。本研究共选取地震目录 16 个(不含余震), 见图 1 及表 2。

大气电场和雷电监测网观测资料: 2014 年至 2019 年四川省气象局雷电监测网和大气电场观测的所有观测数据。

5.2. 异常信息识别

由于大气中闪电及伴随的强降水、高云量、高风速、低能见度将对大气电位梯度造成强烈干扰, 因此应该采用晴天标准排除这些强天气因子的变化。并在排除雷电天气现象和晴天大气波动后, 如果无人干扰而大气电位梯度出现异常变化, 将考虑是由孕震区内由地质活动动电、压电等效应引起的地震前兆静电异常。

根据历史上对大气电场地震异常的分析方法及现在对大地电场的分析方法, 主要有: 趋势法和数学分析法。其中数学分析法主要包括拟合法、去趋势法、滤波法、差分分析、均方差分析、方位角法等。为更好结合地震部门与气象部门的分析与研究, 本研究主要采用趋势分析法, 即根据观测资料原始观测曲线形态与年度变化规律的对比分析, 在年变规律正常, 无任何干扰的情况下, 短期出现的不符合年变规律的异常变化来识别异常。

5.3. 大气电场异常特征

日均值分析法是地震前兆趋势分析中比较常用的分析法。通过对 2014 年至 2019 年四川 16 次中强地震前大气电场资料日均值的分析, 发现在排除雷电干扰的情况下, 存在以下变化特征:

1) 日均值呈低值突跳。统计显示, 大气电场观测日均值高值异常变化大多伴有雷电发生, 日均值低值异常变化, 有的伴有雷电发生, 有的无雷电发生(朱培育等, 2019)。图 3 显示, 在 2014 年 4 月 5 日云南永善 $M 5.3$ 地震、2014 年 11 月 22 日四川康定 $M 6.3$ 地震及 2019 年 6 月 17 日四川宜宾长宁 $M 6.0$ 地震前, 在排除雷电干扰的情况下, 四川雷波、马尔康、内江等气象台的大气电场日均值均出现了低值突跳变化。图 3 中红色椭圆虚线标识为无干扰异常变化, 红色长方形虚线标识为雷电干扰(下同)。

2) 日均值形态存在“W”型、“V”型、“U”型异常变化。资料显示, 不同观测台站, 因受到的大气运动、太阳辐射、外环境干扰等不同, 其静电场变化规律也不同。各观测站点的日均值变化, 一般

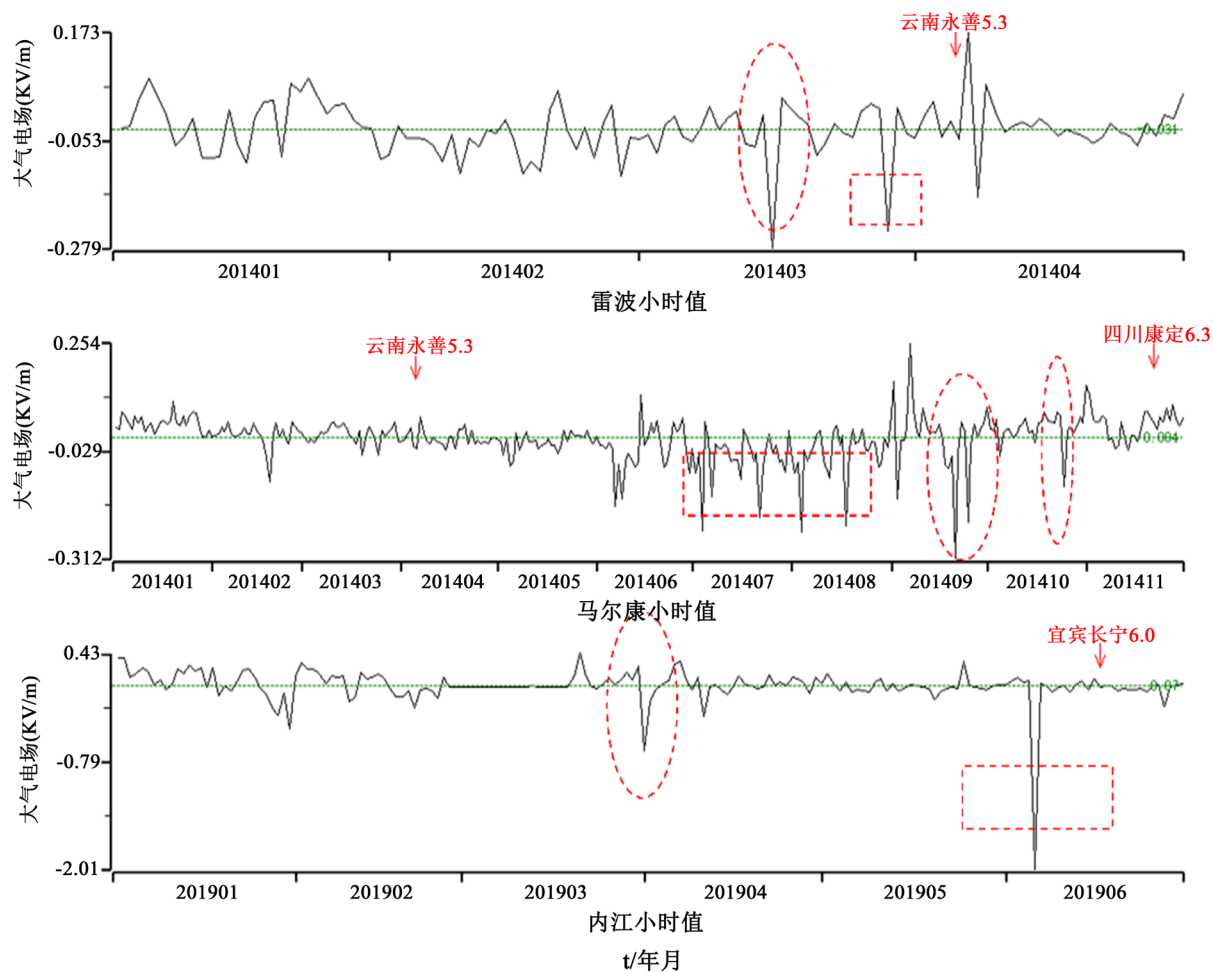


Figure 3. Abnormal variations curve of daily mean values of atmospheric electric field

图 3. 大气电场日均值异常变化曲线

在不同范围内呈有规律的变化。图 4 是四川宜宾、马尔康、雅安和纳溪气象台 2014 年及 2019 年的日均值图，该图显示，在 2014 年 11 月 22 日四川康定 $M6.3$ 地震及 2019 年 6 月 17 日四川宜宾长宁 $M6.0$ 地震前有明显的“W”、“V”、“U”型异常变化。以上异常变化均是在排除雷电干扰的基础上出现，故很有可能是地震前兆异常。

3) 日均值低值异常与未来中强地震存在相关性。统计显示，日均值低值异常出现后，最短 1 天，最长 114 天时间范围， $r = e^M$ 空间孕震范围内有中强以上地震发生(表 2)。考虑本研究是基于短临异常的研究，114 天时间，已经超过 3 个月的“短临”时间规定，故取接近 3 个月的 92 天为最长异常时间。其中，第 10 天至第 19 天时间范围内，发生中强地震的概率为 33%，第 2 天至第 9 天发生中强地震的概率为 17%。

5.4. 异常特征机理分析

以上研究显示，大气静电场观测的地震前兆异常大多呈负值变化，分析原因有以下几个方面：

1) 大气电场强度的大小和方向主要取决于大气电位的分布。大气中某点处大气电场的大小等于该点大气电位梯度值，其方向与大气电位梯度方向相反。

2) 观测表明，晴天大气中始终存在方向垂直向下的大气电场，这就意味着大气相对于大地带正电荷，而大地带负电荷。在晴天大气情况下，大气电场强度为正，其常作为扰动天气条件下大气电学量的基准。

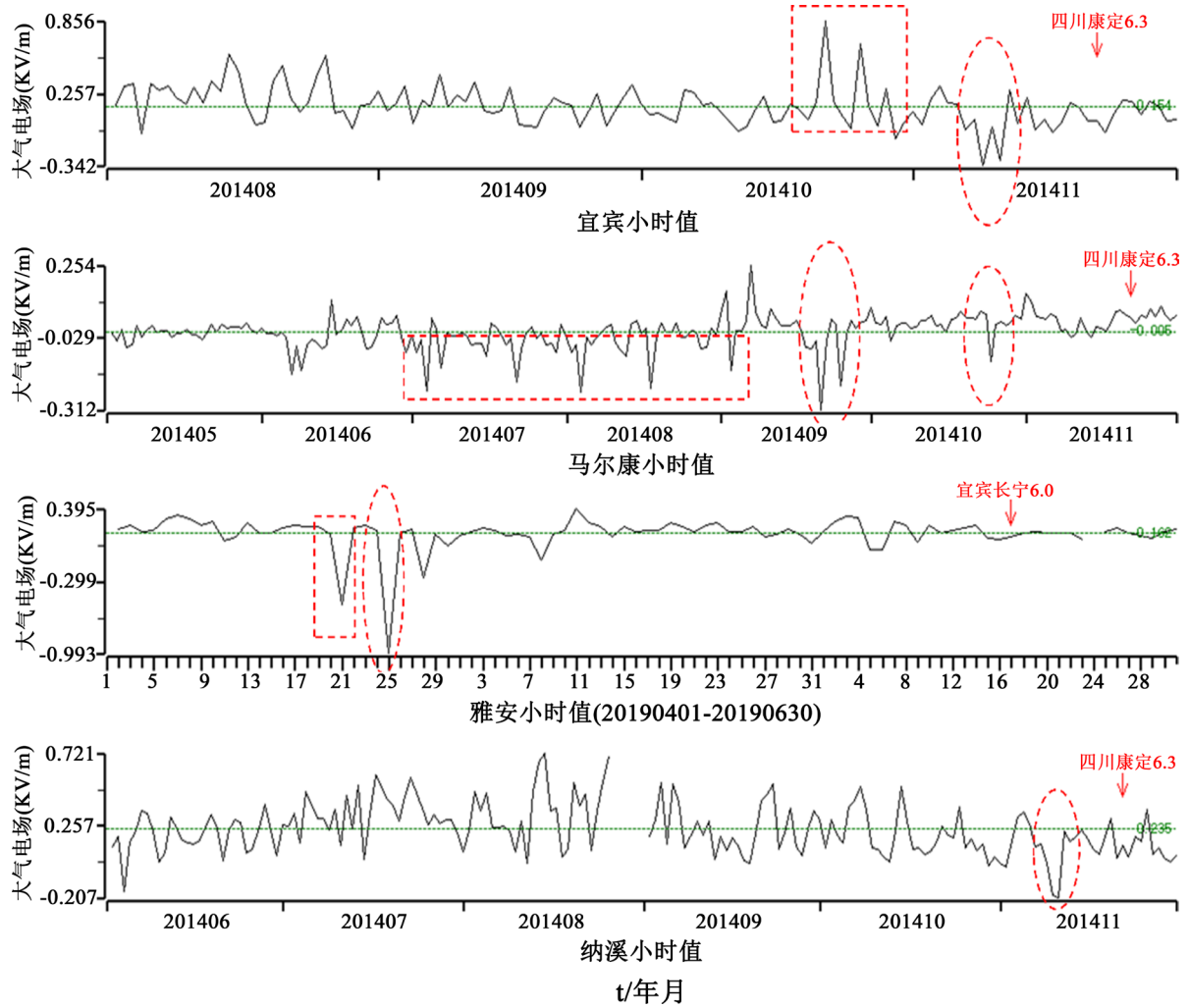


Figure 4. “W”, “V”, “U” type anomaly before the earthquake
图 4. 震前的“W”、“V”、“U”型异常变化图

Table 2. Statistics of $M \geq 5$ earthquakes (excluding aftershocks) and characteristics of anomalies in Sichuan and its adjacent areas in 2014~2019

表 2. 2014~2019 年四川及邻区 $M \geq 5$ 地震(不含余震)及异常特征

序号	时间	地点	震级	r 值范围 (km)	r 值范围内的台站数(个)	异常台站	异常形态	异常幅度(kv/m)	至发震时间
1	2014.04.05	云南永善县	5.3	200.3	6	雷波	V 型	0.248	21 天
2	2014.08.03	云南鲁甸县	6.5	665.1	24	盐源、马尔康	V 型、W 型	0.142、0.16	14 天、60 天
3	2014.08.17	云南永善县	5	148.4	2	无			
4	2014.10.01	四川越西县	5	148.4	2	无			
5	2014.11.22	四川康定县	6.3	544.6	23	光华村、马尔康、资阳、纳溪、宜宾	W 型、V 型、U 型	0.3、0.326、0.815、0.442、0.54	39 天、81 天、14 天、13 天、14 天
6	2015.01.14	乐山市金口河	5	148.4	7	康定、乐山	V 型	0.799、0.22	15 天、114 天
7	2016.09.23	四川理塘县	5.1	164.0	0	无			
8	2017.08.08	四川九寨沟县	7	1096.6	24	罗江、内江	V 型	0.445、0.167	55 天、92 天

Continued

9	2017.09.30	四川青川县	5.4	221.4	8	无			
10	2018.09.12	陕西宁强县	5.3	200.3	3	无			
11	2018.10.31	四川西昌市	5.1	164.0	3	无			
12	2018.12.16	宜宾市兴文县	5.7	298.9	14	雷波、内江	U型、V型	0.85、0.385	43天、1天
13	2019.01.03	宜宾市珙县	5.3	200.3	6	内江、纳溪	U型、W型	0.381、0.328	6天、7天
14	2019.06.17	宜宾市长宁县	6	403.4	20	纳溪、内江、雅安	V型	0.363、0.587、1.147	78天、78天、54天
15	2019.07.04	宜宾市珙县	5.6	270.4	12	无			
16	2019.09.08	内江市威远县	5.4	221.4	17	无			

3) 雷暴天气情况下,雷电产生的强大闪电电流,将导致静电场的变化。其产生的云地闪电过程,以及云体下方地物和植物等的尖端放电过程,所形成的闪电电流和尖端放电电流,将增加大气和大地所携带的异性电荷,从而引起大气电场强度大幅度变化。此时,大气相对于大地即是带负电荷,而大地带正电荷。

4) 大气电场观测的异常变化与雷电、降水、云带电、风速、气溶胶浓度变化、太空辐射、太阳辐射、湿度、温度、电场日变化等诸多因素相关,采用晴天标准排除这些强天气因子的变化,并在排除雷电天气现象和晴天大气波动后,如果无人干扰而大气电位梯度出现异常变化,将考虑是由孕震区内由地质活动动电、压电等效效应引起的地震前兆静电异常。

6. 结论与讨论

6.1. 结论

1) 不同的观测台点因受到的大气运动、太阳辐射、外环境干扰等不同,导致具有不同的变化规律。

2) 大气静电场的变化,与震源区的电学性质、孕震区结构、地质构造、传播途径及台站位置等诸因素有关。

3) 排除雷电干扰后,四川部分中强地震前,大气电场观测的日均值存在低值异常变化特征,异常形态主要有“W”型、“V”型和“U”型。日均值低值异常出现后,第10天至19天, $r = e^M$ 空间范围内发生中强以上地震的概率最大,为33%。

6.2. 讨论

1) 为有效使用气象行业的观测资料,如何用地震行业的标准对气象行业的资料进行预报效能评估,值得深入研讨。

2) 因行业要求和需求不一样,在资料的使用过程中,除了雷电干扰资料比较容易获得外,其他干扰因素资料的获取比较困难。行业的深度合作,任重而道远。

3) 初步研究显示,雷电干扰是大气电场观测用于地震研究最大的干扰之一,且雷电干扰的形态与地震异常形态有雷同之处,如若将大气电场观测用于地震预报研究,如何有效、高效排除雷电干扰,是值得深入研究的课题。

基金项目

基于四川省雷电监测的地电场雷电干扰排除方法研究(项目编号:2018JY0428);中国地震科学实验场(四川)地球物理观测台网建设规划研究(项目编号:LY2012);基于四川雷电监测网的地震前兆静电信息

研究(项目编号: 2018JY0259)。

参考文献

- [1] 郝建国. 地震静电预测学[M]. 北京: 中国石油大学出版社, 2001: 1-100.
- [2] 李一丁, 张亮, 张琨, 等. “5.12”汶川地震前近地面大气电场异常研究[J]. 高原山地气象研究, 2017, 37(1): 49-53.
- [3] 马伽洛伦, 马富润. 地电异常与地震前兆引论[M]. 昆明: 云南大学出版社, 2014.
- [4] Ozaki, M. (2009) Ionospheric Penetration Characteristics of ELF Waves Radiated from a Current Source in the Lithosphere Related to Seismic Activity. *Radio Science*, **44**, 1-12. <https://doi.org/10.1029/2008RS003927>
- [5] 郝建国, 唐天明, 李德瑞. 大气电场异常作为地震短临预报标志研究进展[J]. 地震, 1998, 18(3): 245-256.
- [6] 郝建国. 近地表大气电场异常与地震[J]. 地震学报, 1988, 10(2): 206-212.
- [7] Jin, X.B., *et al.* (2020) Discussion on Anomaly of Atmospheric Electrostatic Field in Wenchuan Ms8.0 Earthquake. *Journal of Electrostatics*, **104**, Article ID: 103423. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2020.103423>
- [8] 希玉久. 地震电磁辐射观测是短临预测重要手段之一[J]. 国际地震动态, 2009(7): 43-50.
- [9] 张建国, 焦立果, 刘晓灿, 等. 汶川 MS8.0 级地震前后 ULF 电磁辐射频谱特征研究[J]. 地球物理学报, 2012, 56(4): 1253-1261.
- [10] 孙景群. 大气电学基础[M]. 北京: 气象出版社, 1987: 1-99.
- [11] 靳小兵, 卜俊伟, 陆茂, 等. 四川省雷电探测网效率评估和改进方法研究[J]. 高原山地气象研究, 2011, 32(3): 65-68.
- [12] 靳小兵, 李一丁, 卜俊伟, 等. 两个雷电预警系统的应用与对比[J]. 气象科技, 2013, 41(5): 923-928.
- [13] 柴瑞, 王振会, 肖稳安, 等. 大气电场资料在雷电预警中应用[J]. 气象科技, 2009, 37(6): 724-728.
- [14] 高菊霞, 杨碧轩, 程永进. 闪电和大气电场资料在预警业务中的应用[J]. 陕西气象, 2015(z1): 20-24.
- [15] 刘畅, 张婧雯, 靳小兵. 成都地区不同天气条件下大气电场特征研究[J]. 高原山地气象研究, 2016, 32(2): 88-92.