

郭泓, 谢克勇, 罗淑尹, 等, 2023. 基于大气电场的雷电监测预警方法[J]. 气象与减灾研究, 46(2):120-124.

Guo Hong, Xie Keyong, Luo Shuyin, et al, 2023. Thunderstorm monitoring and early warning based on the atmospheric electric field[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 46(2):120-124.

基于大气电场的雷电监测预警方法

郭泓¹, 谢克勇¹, 罗淑尹², 陈义轩³, 张勇平⁴

1. 江西省气象服务中心, 江西 南昌 330096

2. 南昌市气象局, 江西 南昌 330038

3. 南昌县气象局, 江西 南昌 330200

4. 新余市气象局, 江西 新余 338001

摘要: 利用大气电场强度数据设计了一种雷电监测预警方法, 并对江西省南昌县 2020 年 8 月的一次雷电过程进行预测。首先对大气电场仪采集的电场数据进行去噪处理和缺失填补, 然后利用经验模态分解法分解大气电场数据, 得到大气电场数据的幅值和频率的分布特征, 运用多元回归模型构建雷电预警模型, 预测未来一段时间内的大气电场强度值。参考大气电场强度等级划分表, 开展雷电监测预警。结果表明, 运用模型预测的大气电场强度结果与实况之间的可决系数均在 0.9 以上, 即大气电场强度预测结果与实况较为接近, 该监测预警方法具有一定的可行性。

关键词: 雷电预警, 大气电场, 特征提取, 模型构建

中图分类号: P427.32

文献标识码: A

文章编号: 1007-9033(2023)02-0120-05

DOI: 10.12013/qxyjzyj2023-017

Thunderstorm Monitoring and Early Warning Based on the Atmospheric Electric Field

Guo Hong¹, Xie Keyong¹, Luo Shuyin², Chen Yixuan³, Zhang Yongping⁴

1. Jiangxi Meteorological Service Center, Nanchang 330096, China

2. Nanchang Meteorological Bureau of Jiangxi Province, Nanchang 330038, China

3. Nanchang County Meteorological Bureau of Jiangxi Province, Nanchang 330200, China

4. Xinyu Meteorological Bureau of Jiangxi Province, Xinyu 338001, China

Abstract: In order to better carry out accurate lightning monitoring and early warning, a lightning monitoring and early warning method was designed based on the atmospheric electric field data of Nanchang County, Jiangxi province in August 2020. Firstly, the electric field data were denoised and interpolated. Then, the atmospheric electric field data were decomposed by the empirical mode decomposition method, so as to obtain the amplitude distribution and frequency distribution characteristics of the atmospheric electric field data. The lightning warning model was constructed by the multiple regression model to predict the lightning intensity value in the future period. Lightning monitoring and early warning were carried out by considering the classification table of lightning intensity. The results showed that there was a good correlation between the simulated results of lightning intensity and the actual results, with the correlation coefficient above 0.9. The predicted results of lightning intensity were closed to the actual situation, indicating that the monitoring and warning method was feasible.

Key words: thunderstorm warning; atmospheric electric field; feature extraction; model construction

收稿日期: 2022-12-03; 修订日期: 2023-02-14.

基金项目: 江西省气象局重点项目(编号: JX2021Z07).

作者简介: 郭泓, 助理工程师, 主要从事雷电防护业务和服务, E-mail: 515766341@qq.com.

谢克勇(通信作者), 副高级工程师, 主要从事应用气象服务研究, E-mail: xiekeyong11@163.com.

0 引言

雷电是发生于大气中的一种瞬时高电压、大电流、强电磁辐射的灾害性天气现象。许多学者针对雷电现象开展了广泛的研究(罗林艳等,2010;余勇等,2010;李典南等,2021)。大气的云系中都或多或少带有电荷,尤其在积雨云等对流活动强盛的云体中,电荷分离会使得云中的不同部位之间或云与地面之间的电位梯度不断增大,当电位梯度超过大气能够承受的范围时,就会出现击穿现象,这就是大气发生的闪电。随着社会经济的发展,各种电子器件和信息技术得到广泛应用,雷电灾害给社会造成的损失也越来越严重,许多行业对雷电灾害监测、预警的需求越来越多。

我国的雷电监测预警研究取得了很多成果。例如,孟青等(2005)、罗林艳等(2010)利用地面电场仪的组网,以大气电场测量为基础,并结合闪电定位系统观测结果,研究了雷电预警预报的技术方法。赵伟等(2020)利用融合的三种设备的雷电监测数据,通过一种预测模型实现雷电预警。张焯方等(2021)以天气雷达和闪电监测资料为基础,进行切片处理和压缩处理,输入到卷积神经网络当中,实现雷电极近预警。陈靖宇等(2021)利用2019—2020年广东省大气电场仪探测和闪电定位资料,应用集成学习方法,建立不同分类器,开展雷电预警。

文中利用2020年8月江西省南昌县大气电场监测资料,采用小波分析、经验模态分解、多元线性回归等方法,设计了基于大气电场强度数据的雷电监测预警方法,以期对雷电预警业务提供参考。

1 大气电场监测设备

目前国际和国内采用的雷电监测设备有许多,一般分为雷电定位探测设备和大气电场探测设备两大类(孟青等,2005)。雷电定位探测设备一般可提供闪电放电的发生时间、地点以及雷闪回击的电磁场强度、电流幅度、电流波形等特征信息。大气电场探测设备目前多为大气电场仪,可用来测量地面大气电场的极性和强度,可对大气中对流云的起电过程进行连续监测,既可连续记录雷电发生前雷暴体中的电场活动,又可记录雷暴过程中发生的闪电信息。江西省南昌县选用的大气电场仪为Prestorm 2.0,该设备采用了差模测量技术(有2个电极,所采集的数据是2个电极的差模),避免干扰信号,提供更为准确的测量结果。量程范围 ± 300 kV/m,有效

监测半径15—20 km。单个大气电场仪可单独记录局地雷电变化情况,多个联网则可监测整个区域内电场结构及其变化情况,能够提供整个监测区域内电场等值线分布,从而实现雷电预警及相关服务。

2 雷电监测预警方法构建

大气电场的雷电监测预警方法,主要步骤包括:1)大气电场强度的采集与处理;2)大气电场强度的特征提取;3)建立预测模型,开展雷电监测预警。

2.1 数据采集与处理

晴天时大气电场波动较小,雷暴等恶劣天气时大气电场就会发生剧烈的波动。大气电场仪能测量反映大气平均电场的连续变化情况。利用大气电场仪测量和采集大气平均电场的强度及极性的连续变化,既能得到静电电场的缓慢变化,又能得到近距离雷暴过顶时雷暴在地面产生的静电场和云闪、地闪的变化情况。因此,大气电场仪既能用于局地的雷电监测与预警,也可用在易起静电或易受静电危害的场所,以监测静电强度避免相关危险。采集和分析大气电场强度资料数据,是实现雷电监测和预警的前提。大气电场仪的工作原理是通过感应周围电荷变化来检测电场强度,其计算式(张鸿波等,2021):

$$E = S \cdot Q \quad (1)$$

式中, E 为电场强度,单位:kV/m; S 为感应等效面积,单位: m^2 ; Q 为感应电荷密度,单位:kV/ m^3 ,其计算式:

$$Q = f \cdot K \cdot U \quad (2)$$

式中, f 为空气中介电常数; K 为电场畸变系数,单位: m^{-3} ; U 代表电压,单位:kV。

大气电场仪得到的电场强度数据,既包含需要探测的实际地面大气电场强度数据,也掺杂着各种干扰噪声,这些干扰噪声有系统的、也有随机的(杨仲江等,2010)。预处理分为缺失数据填补和干扰数据去噪。

受到各种外界因素的影响,大气电场强度数据在采集过程中部分时间序列的数据可能会缺失,需要进行填补,使得数据恢复完整。缺失数据填补采用以下步骤:

1)对数据进行统一标准的规范化处理:

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}(x_1 - x_2) + x_2 \quad (3)$$

式中, x' 代表规范化处理后的数据; x 代表处理前的数据; x_{\max} 、 x_{\min} 代表数据中最大值和最小值; x_1 、

x_2 代表规范后映射区间的极大值和极小值。

2) 将原始数据集(包含缺失数据)作为一个测试样本,记为 A_1 ;将完整的没有数据缺失的 N 个数据集作为训练样本,记为 $A_i (i=1,2,\dots,N)$ 。

3) 计算 A_1 与 A_i 之间的欧式距离。

4) 对 N 个距离按照从小到大的顺序排序。

5) 在 A_i 中找出 A_1 的 k 个最近相邻样本。

6) 计算 A_1 与 k 最近相邻之间距离的平均值。

该平均值即为要填补的缺失数据。经缺失填补之后,大气电场资料完整,有效降低了数据缺失的干扰。除去大气电场资料中的干扰数据(即去噪),这里选择小波分析法。具体步骤:

1) 选择合适的 Haar 小波基(李红等,2015)。

2) 利用 Haar 小波变换将大气电场数据分解为层数据。

3) 分别得到高频系数和低频系数。

4) 用阈值函数对高频系数进行阈值量化处理:

$$H = \begin{cases} \gamma \cdot \lambda, & |\gamma| \geq \lambda \\ 0, & |\gamma| < \lambda \end{cases} \quad (4)$$

式中, H 为阈值量化后的高频系数; γ 为包含噪声的小波高频系数; λ 为给定阈值。

5) 对低频系数和高频系数进行小波重构,实现大气电场数据去噪。

经过资料数据处理后,大气电场数据质量得到提高,可以保证后续计算具有更高效率和准确性。

2.2 大气电场特征的提取

大气电场强度数据采集处理后,利用经验模态分解法(孙娴和林振山,2007)得到若干个本征模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)分量,这些 IMF 分量中包含了时间特征。大气电场强度数据的分解步骤:

1) 预处理好的大气电场强度数据记为 $x(t)$ 。

2) 确定 $x(t)$ 中 2 个极值点。

3) 拟合 2 个极值点,得到 $x(t)$ 的上、下包络线,记为 $\psi_{\max}(t)$ 和 $\psi_{\min}(t)$ 。

4) 计算 $\psi_{\max}(t)$ 、 $\psi_{\min}(t)$ 平均值,得到 $F_1(t)$,其计算式为

$$F_1(t) = 0.5[\psi_{\max}(t) + \psi_{\min}(t)] \quad (5)$$

5) 用 $x(t)$ 减去 $F_1(t)$,得到 $P_1^1(t)$,即

$$P_1^1(t) = x(t) - F_1(t) \quad (6)$$

6) 一般 $P_1^1(t)$ 不是一个平稳信号,不满足 IMF 定义的两个条件:a) 极值点数必须和过零点数一致或者至多相差一个;b) 在某一个局部点,极大值包络和极小值包络在该点的值的算术平均和趋近 0 或

小于给定值。重复上述过程,假定经过 k 次运算之后(k 一般小于 10) $P_1^k(t)$ 满足 IMF 定义的两个条件,则电场数据 $x(t)$ 的一阶 IMF 分量为 $D_1(t) = P_1^k(t)$,用电场数据 $x(t)$ 减去 $D_1(t)$,得到一个新数据 $r_1(t) = x(t)$,其中 $r_1(t) = x(t) - D_1(t)$ 。

7) 将 $r_1(t)$ 作为新的大气电场强度数据,重复得到 $D_1(t)$ 的过程,得到第二个 IMF 分量 $D_2(t)$;多次重复上述过程,一直到第 n 阶 IMF 分量 $D_n(t)$ 或其残余分量 $r_n(t)$ 小于预设值,或当其残余分量 $r_n(t)$ 是单函数或常量时,分解过程停止。

经过上述一系列过程,大气电场数据 $x(t)$ 最终被分解为

$$x(t) = \sum_{i=1}^n D_i(t) + r_n(t) \quad (7)$$

式中, $D_i(t)$ 代表第 i 个 IMF 分量; n 代表 IMF 分量的总数; $r_n(t)$ 代表残余分量。针对分解出来的 IMF 分量进行希尔伯特变换,得到大气电场强度频率和幅值的分布特征。

2.3 基于预测模型的雷电监测预警方法

大气电场强度经过数据处理和特征提取后,运用多元线性回归方法构建预测模型,对未来一段时间内的大气电场强度开展预警。多元线性回归模型基本形式为

$$Y = q_0 + q_1 X_1 + q_2 X_2 + \dots + q_k X_k + e \quad (8)$$

式中, Y 为因变量; $X_i (i=1,2,\dots,k)$ 为 k 个自变量; $q_i (i=0,1,2,\dots,k)$ 为 $k+1$ 个回归系数; e 为随机误差项。

现假设有 n 组大气电场强度数据观测样本,记为 $Y_i, X_{1i}, X_{2i} (i=1,2,\dots,n)$, Y_i 代表第 i 个观测样本中的大气电场强度; X_{1i}, X_{2i} 分别代表第 i 个观测样本的频率和幅值分布特征。

将数据代入多元线性回归模型,建立方程组:

$$\begin{cases} Y_1 = q_0 + q_1 X_{11} + q_2 X_{21} + e_1 \\ Y_2 = q_0 + q_1 X_{12} + q_2 X_{22} + e_2 \\ \dots \\ Y_n = q_0 + q_1 X_{1n} + q_2 X_{2n} + e_n \end{cases} \quad (9)$$

利用最小二乘法对方程组(9)进行求解,得到回归系数 q_0, q_1, q_2 的估计值,从而构建大气电场强度预测模型。对回归系数的估计值进行 t 检验。

将通过检验的 q_0, q_1, q_2 代入回归方程,对构建的大气电场强度预测模型进行总体显著性检验。计算式为

$$G = \frac{E_{ss}}{k} \cdot \frac{n-k-1}{R_{ss}} \quad (10)$$

式中, G 为显著性水平,即概率; E_{ss} 为剩余平方和; R_{ss} 为剩余平方和。当 G 值大于临界值 G' ,则认为预测模型通过了显著性检验。

将测试样本的频率和幅值分布特征输入构建的大气电场强度预测模型,得到预测的大气电场强度值。再根据预测的大气电场强度进行等级判断(表 1),然后按照等级发布雷电预警(实际业务中,不发布蓝色预警)。

表 1 大气电场强度等级划分
Table 1 Classification of thunderstorm intensity

等级	大气电场强度/($V \cdot m^{-1}$)	预警级别
1 级	[1 500,3 000)	蓝色预警
2 级	[3 000,5 000)	黄色预警
3 级	[5 000,8 000)	橙色预警
4 级	[8 000, ∞)	红色预警

3 个例分析与测试

江西省南昌县气象局所辖区域共有 7 个大气电场仪站点,选取资料相对完整的一段进行缺失数据填补和去噪,对雷电监测预警方法的效果进行检验。如,以 2020 年 8 月 13 日监测得到的大气电场数据为观测样本,以 14 日 09:00—12:00(北京时,下同)监测到的大气电场数据为测试样本(图 1),前者用于计算 q_0, q_1, q_2 三个回归系数,后者用于预测 14 日 12:00—14:00 雷电强度。

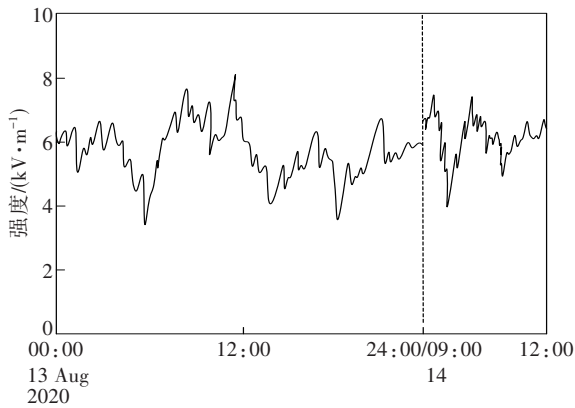


图 1 江西省南昌县大气电场强度曲线
Fig. 1 Sample data of atmospheric electric field intensity in Nanchang County, Jiangxi Province

利用经验模态分解方法分解样本数据,得到 5 个 IMF 分量和 1 个残余分量(图 2)。对得到的 5 个 IMF 分量进行希尔伯特变换,得到大气电场强度的频率分布特征和幅值分布特征。

将观测样本的频率和幅值分布特征输入线性回

归模型,建立方程组,求解回归系数 q_0, q_1, q_2 ,并进行信度 0.05 的显著性检验,得到 3 个回归系数分别为 $-0.213, 0.314, 1.128$,完成预测模型的构建。再将测试样本输入预测模型,得到 2020 年 8 月 14 日 12:00—14:00 大气电场强度的预测结果(图 3)。

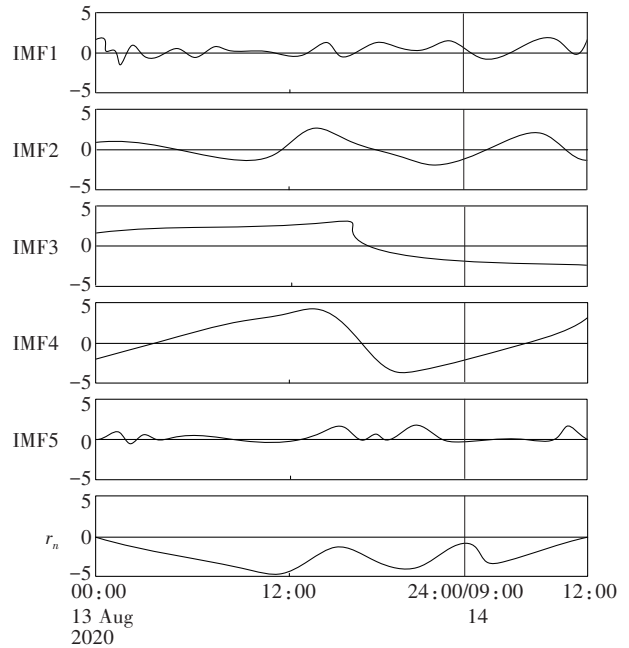


图 2 江西省南昌县大气电场强度样本分解结果
Fig. 2 Decomposition results of atmospheric electric field data samples in Nanchang County, Jiangxi Province

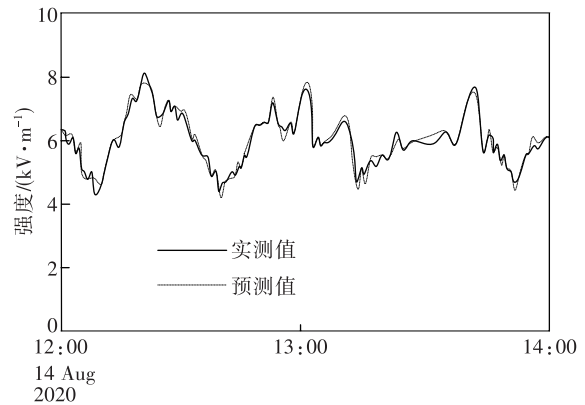


图 3 江西省南昌县大气电场强度预测结果
Fig. 3 Thunderstorm intensity prediction results in Nanchang County, Jiangxi Province

计算大气电场强度预测结果与实际观测结果之间的可决系数:

$$r^2 = \frac{\sum (\hat{y} - \bar{y})^2}{\sum (y - \bar{y})^2} = 1 - \frac{\sum (y - \hat{y}_c)^2}{\sum (y - \bar{y})^2} \quad (11)$$

式中, r^2 代表可决系数; \hat{y} 代表大气电场强度预测

值; y 代表实际大气电场强度值; \bar{y} 代表实际大气电场强度平均值; \hat{y}_c 代表预报与实际大气电场强度差值。如果可决系数越接近1,则越接近实际结果。

此次大气电场强度预测结果与实际观测之间的可决系数计算结果(表2)显示,可决系数均在0.9以上,表明该方法对大气电场强度预测结果接近实际情况。在12时根据大气电场强度预测值的大小对照预警级别(表1)发布橙色预警,取得了良好的预警服务效果,表明该方法的监测预警有效可行。

表2 大气电场强度预测结果与实际观测结果的可决系数
Table 2 Determination coefficients between the predicted results of atmospheric electric field intensity and the actual observation results

时间	可决系数
2020-08-14T12:00	0.918 6
2020-08-14T12:30	0.923 2
2020-08-14T13:00	0.950 1
2020-08-14T13:30	0.937 8
2020-08-14T14:00	0.956 8

4 小 结

文中采用小波分析、经验模态分解、多元线性回归等方法,设计了一种基于大气电场强度数据的雷电监测预警方法,并利用2020年8月江西省南昌县大气电场仪雷电监测实况资料进行个个例分析与测试。结果表明,通过对历史大气电场强度数据分析统计、提取特征、构建预报模型,来预测未来一段时间内的大气电场强度数值,再按照等级划分进行雷电监测预警,经过测试,大气电场强度预测结果与实际结果之间的可决系数均在0.9以上,说明该方法具有一定可行性。

然而,目前收集到的大气电场的资料较少,可测试的个例较少,在模式构建等方面还存在不足,在实际应用中还需要收集更多的样本,并根据地区差异调整模型参数,对该方法开展进一步的分析验证。

参考文献 (References)

陈靖宇,汤德佑,伍光胜,等,2021.基于特征提取和集成学习的雷电预测能力提升[J].热带气象学报,37(3):450-456. Chen J Y, Tang D Y, Wu G S, et al, 2021. Improving lightning prediction ability based on feature extraction and ensemble learning[J]. J Trop Meteor,37(3):450-456. (in Chinese)

李典南,许东蓓,2021.双流机场雷暴天气特征及天气形势分类研究[J].高原气象,40(5):1164-1176. Li D N, Xu D B, 2021. Study on thunderstorm weather characteristics and weather pat-

tern classification at Shuangliu airport[J]. Plateau Meteor,40(5):1164-1176. (in Chinese)

李红,马媛媛,杨毅,2015.基于激光雷达资料的小波变换法反演边界层高度的方法[J].干旱气象,33(1):78-88. Li H, Ma Y Y, Yang Y, 2015. Study on retrieval of boundary layer height using wavelet transformation method based on lidar data[J]. Arid Meteor,33(1):78-88. (in Chinese)

罗林艳,祝燕德,王智刚,等,2010.基于大气电场与闪电资料的雷电临近预警方法[J].成都信息工程学院学报,27(5):524-530. Luo L Y, Zhu Y D, Wang Z G, et al, 2010. Lightning approaching warning method based on atmospheric electric field and lightning data[J]. J Chengdu Univ Infor Technol,27(5):524-530. (in Chinese)

孟青,吕伟涛,姚雯,等,2005.地面电场资料在雷电预警技术中的应用[J].气象,31(9):30-33. Meng Q, Lv W T, Yao W, et al, 2005. Application of ground electric field data in lightning warning technology[J]. Meteor Mon,31(9):30-33. (in Chinese)

王振会,李青,张祎,等,2010.大气电场仪观测资料数字序列的时间特征分析[J].电子测量技术,33(12):20-23. Wang Z H, Li Q, Zhang Y, et al, 2010. Time characteristic analysis of digital series of atmospheric electric field instrument observation data [J]. Elec Meas Technol,33(12):20-23. (in Chinese)

孙娴,林振山,2007.经验模态分解下中国气温变化趋势的区域特征[J].地理学报,62(11):1132-1141. Sun X, Lin Z S, 2007. The Regional features of temperature variation trends over China by empirical mode decomposition method[J]. Acta Geogr Sinica,62(11):1132-1141. (in Chinese)

杨仲江,朱浩,唐宏科,等,2010.地面电场仪测量数据的误差来源及分析处理[J].大气科学学报,33(6):751-756. Yang Z J, Zhu H, Tang H K, et al, 2010. Error source and analysis of ground electric field instrument measurement data[J]. J Atmos Sci,33(6):751-756. (in Chinese)

余勇,彭骏,卜俊伟,2010.基于地理信息系统的雷电业务系统[J].成都信息工程学院学报,25(3):308-311. Yu Y, Peng J, Bu J W, 2010. Lightning service system based on geographic information system[J]. J Chengdu Univ Infor Technol,25(3):308-311. (in Chinese)

张鸿波,郗秀书,刘明远,等,2021.基于双金属球三维电场探空仪的一次雷暴云内电荷结构观测研究[J].地球物理学报,64(4):1155-1166. Zhang H B, Qie X S, Liu M Y, et al, 2021. Observation of charge structure in a thunderstorm cloud based on bimetallic sphere three-dimensional electric field sonde[J]. Chinese J Geophys,64(4):1155-1166. (in Chinese)

张烨方,冯真真,刘冰,2021.基于卷积神经网络的雷电临近预警模型[J].气象,47(3):373-380. Zhang Y F, Feng Z Z, Liu B, 2021. Lightning approach warning model based on convolutional neural network[J]. Meteor Mon,47(3):373-380. (in Chinese)

赵伟,陆韬,张祎,等,2020.基于多源监测数据的雷电预警方法[J].气象科技,48(3):438-442. Zhao W, Lu T, Zhang W, et al, 2020. Lightning warning method based on multi-source monitoring data[J]. Meteor Sci Technol,48(3):438-442. (in Chinese)