DOI: 10.13382/j.jemi.B2104660

地表相对介电常数对雷暴云定位影响分析与研究*

李胤演 行鸿彦
(南京信息工程大学江苏省气象灾害预报预警与评估协同创新中心 南京 210044)

摘 要:地表并非均匀介质的理想导体,传统的一维大气电场分量无法准确的对雷暴云进行定位,而利用大气电场三维场强分量进行雷暴云定位时,电场的场强、雷暴云的高度角测量往往会受到地表及空气介电常数的影响,产生定位误差。为解决雷暴云定位精度低的问题,分析了三维大气电场对于地表相对介电常数的敏感特性,结合镜像法,利用空中电荷电场分布、雷暴云电荷结构等原理,建立了雷暴云定位模型,分析得到大气电场场强、高度角与环境相对介电常数的关系。实验结果表明,地表相对介电常数越大,所测得的电场水平分量与雷暴云高度角越大,地表相对介电常数与大气电场水平分量的相关系数为-9.5,呈负相关,相关性强,因此要获得准确的雷暴云高度及方位,还须实时的地表相对介电常数进行修正。

关键词: 大气电场测量;地表相对介电常数;雷暴云定位;大气电场仪
中图分类号: TM930 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 510.4010

Analysis and research on the influence of the relative permittivity of the earth surface on thunderstorm cloud positioning

Li Yinyan Xing Hongyan
(Jiangsu Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: The ground surface is not an ideal conductor of a homogeneous medium. The traditional one-dimensional atmospheric electric field component cannot accurately locate the thunderstorm cloud. When the three-dimensional field intensity component of the atmospheric electric field is used to locate the thunderstorm cloud, the field strength of the electric field and the altitude angle of the thunderstorm cloud are often measured. The electric field will be affected by the dielectric constant of the ground and air, resulting in positioning errors. In order to solve the problem of low positioning accuracy of thunderstorm clouds, this paper analyzes the sensitive characteristics of the three-dimensional atmospheric electric field to the relative permittivity of the surface, combined with the mirror image method, and establishes a thunderstorm cloud positioning model using the principles of electric field distribution in the air and the charge structure of thunderstorm clouds. Analyze the relationship between the atmospheric electric field strength, altitude angle and the relative permittivity of the environment. The experimental results show that the greater the relative permittivity of the surface, the greater the measured electric field horizontal component and the height angle of the thunderstorm cloud. The correlation coefficient between the relative permittivity of the surface and the horizontal component of the atmospheric electric field is -9.5, showing a negative correlation. Therefore, to obtain the accurate height and azimuth of the thunderstorm cloud, the relative permittivity of the ground surface must be corrected in real time.

Keywords: atmospheric electric field measurement; relative permittivity; thunderstorm cloud positioning; atmospheric electric field measuring instrument

收稿日期: 2021-08-19 Received Date: 2021-08-19
*基金项目:国家重点研发计划(2021YFE0105500)、国家自然科学基金(62171228)项目资助

0　引　言

强对流雷暴云是我国主要的小尺度灾害性天气过程之一,常常伴有雷电、冰雹、局部暴雨和强风等[1]。雷暴云是闪电的主要产生源,当云中局部电场超过约400 kV/m时,就能发生闪电放电。在闪电发生期间,大气中出现脉冲变化的大气电场,其强度峰值可达到几百kV/m。闪电放电过程产生的大电流及电磁辐射会对现代电子设备、通信系统、地面建筑物造成破坏[2],从而影响农业、交通、通信、航空、军事和高科技的发展。因此,研究雷暴云[3]的形成和发展,对雷暴云进行准确定位对于当今社会具有重要的理论和应用价值。

大气电场仪可以对不同天气情况下地面大气电场的大小和极性进行连续监测。由于雷暴云所携电荷与近地面电场直接相关,因此大气电场仪在探测近距离雷暴活动及小尺度雷电预警方面具有极好的应用场景。大气电场仪在雷暴云定位方面的应用研究在国内外早已开展。国外开展的大气电场研究较早,2012 年,Aranguren 等[4]利用 11 月份哥伦比亚地区雷暴期间的大气电场仪监测数据,进行大气电场传感器的性能分析,定义雷暴云电荷模型,该模型可用作静电场传感器用作雷电预警系统的参考。2016 年 Boldyrev 等[5]描述了大气电场传感器的设计和工作原理,记录大气中电场强度的微弱变化,例如全球电磁舒曼共振,以及由大气锋、厚云、雷暴等引起的电场变化。2017 年 Lucas 等[6]对区域大气电场仪阵列进行了长期分析,通过对长期数据集的初步统计分析,开发模型确定近地表电场,分析与近地表电场相关的积云情况。在国内,2017 年 7 月,杨春明等[7]利用大气电场仪实时获取的雷电发生和发展的垂直电场监测数据,追踪雷电的移动轨迹和电场强度变化。2022 年 2 月,陈镇等[8]开展了大气电场仪辅助观测机场区域雷暴的方法探析,发现大气电场场强分量的变化和雷暴的产生、发展及移动有着较好的对应关系。以上的国内外相关研究表明,大气电场的数据监测可以为雷暴云的定位预警提供很好的支撑作用。

大气电场是由带负电荷的地表和带正电荷的电离层组成的类似于球形电容器产生的,其场强大小不仅与距雷暴云距离相关,还与地表介质、地面建筑物、大气绝对湿度、气溶胶及气态污染物等监测环境因素相关[9],基于大气电场监测数据的雷暴云定位方法在不同的测量环境下存在着定位精度低的问题。针对上述问题,探究如何利用地面或空中电场观测资料以及测量环境参数,有针对性地研究某个区域内中小尺度雷暴云电荷结构及其三维电场分布,为实现雷暴云定位[7-8]提供技术支持,提高雷暴云定位精度,减少雷暴云灾害,是很有实际应用价值的研究方向。2015 年 9 月,柴健等[10]讨论了雷暴天气下建筑物对大气电场测量的影响,发现不同材料的建筑物对大气电场中的垂直电场分布所产生的影响较小,可忽略不计。2016 年 5 月,陈晓东等[11]采用有限差分、经验模态分解等方法,对深圳地区大气电场仪安装位置进行了场地环境修订,并研究了深圳地区的大气电场变化特征。2017 年,张华明等[12]利用大气电场和气象要素数据,分析了晴天大气电场与大气污染物的相关性,污染气体与带电粒子的相关性决定了污染物与大气电场间的关系。2021 年 4 月,宋琳等[13]利用有限元法模拟大气电场仪所在位置处的真实地形和建筑物对大气电场畸变的影响,并对实测数据进行了环境误差修订。上述研究大都聚焦于地表建筑物、空气污染物对于晴天大气电场的影响。晴天大气电场的电场方向主要为垂直方向的电场分量,水平方向的电场分量可忽略不计,而在雷暴等激烈的天气现象中,大气电场的数值和方向均存在显著的变化,而水平方向电场分量的监测与校正对于提高雷暴云定位精度的作用缺乏研究。

因此本文基于三维大气电场仪所测的三维场强分量,结合镜像法、空中电荷电场分布[14]、雷暴云电荷结构[15]等原理,构建雷暴云定位模型,利用地表相对介电常数对水平大气电场分量进行校正,并通过实验验证地表相对介电常数与雷暴云定位的相关性。

1　雷暴云定位方法分析

1.1　传统的基于一维大气电场分量的雷暴云定位方法分析

传统方法分析雷暴天气的地表电场分布时,通常将地表视为均匀介质的理想导体,其地表大气电场示意图如图 1 所示。

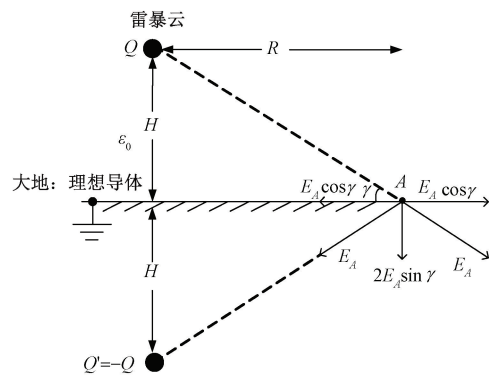

图 1　理想地表情况下的大气电场示意图

Fig. 1　Schematic diagram of atmospheric electric field under ideal surface conditions

其中,距地表高度为 H 的雷暴云作点电荷处理,雷暴

云带电量为 Q，空气介电常数为 ε_0，地面观测点 A 距雷暴云的水平距离为 R。由静电场中镜像法原理可知，A 点的大气电场是由雷暴云电荷 Q 与镜像电荷 Q' 共同作用，两电荷在 A 点的水平电场分量相互抵消，因此 A 点所测电场仅为一维的垂直电场分量，其电场强度 E 为：

$$E = \frac{QH}{2\pi\varepsilon_0 (H^2 + R^2)^{3/2}} \tag{1}$$

但在实际测量环境中，地表并非完全平坦的表面，且地表介质是由岩石、干湿土壤、混凝土等介电常数各不相同的多种介质共同组成，并非理想导体。此外，降雨也会改变地表介电常数，此时地表相对于大地有一非零电势。因此，实际的地表大气电场分布并非只有垂直电场分量，还存在较大的水平电场分量，传统的基于一维电场测量的雷暴云定位方法不适合雷暴云的高精度定位。

1.2　基于三维电场分量的雷暴云定位方法分析

地壳是地球固体表面的最外层结构，平均厚度为 17 km，陆地部分厚度一般为 33 km。地壳结构如图 2 所示，其上层结构以氧、硅、铝成分为主，称为“硅铝层”；其下层结构以硅、镁元素为主，被称为硅镁层[16]。其中，在地层 16 km 的深度范围之内，硅铝氧化物在地壳中含量最多，达总量的 75%，而硅铝氧化物的介电常数约为 4.5，因此，整个陆地地表可粗略的视为介电常数为 4.5 的介质层[17]。

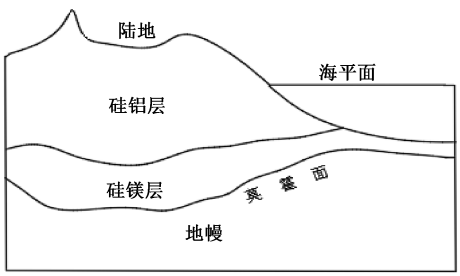

图 2　地壳结构图

Fig. 2　Crustal structure diagram

雷暴云一般处于距离地表 1～12 km 的范围之内，而地壳的平均厚度为 30～40 km 范围，雷暴云的镜像电荷处于地壳深度范围之内，因此，镜像法适用于分析雷暴云电荷的分布情况[18]。

基于雷暴云高度与地壳结构的相对位置，选用镜像法对大气电场进行分析。由于大气中电场是关于 z 轴对称的，因此利用 xoz 截面分析大气电场即可，镜像法示意图如图 3 所示[19]。将空中雷暴云电荷视为点电荷，将地表视为无限大均匀电介质平面，利用镜像法进行电场分析。x 轴为地平线，q 为点电荷，q_1 为点电荷在地壳介质中的镜像电荷，q_2 为点电荷在空气介质中的镜像电荷，R_1 为点电荷 q 距离观测点 A 的距离，R_2 为地壳镜像电荷距离观测点 A 的距离，z 为观测点 A 距离地表的距离，H 为镜像电荷距离地表的距离，空气介质的介电常数为 ε_1，地壳介质的介电常数为 ε_2。

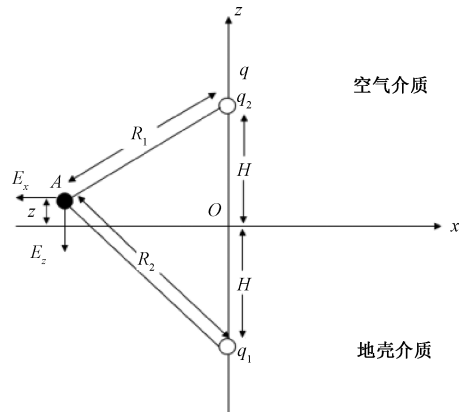

图 3　点电荷镜像示意图

Fig. 3　Schematic diagram of point charge mirroring

由镜像法知，空气区域的电场由点电荷 q 和地壳中的镜像电荷 q_1 共同产生，地壳中的电场由点电荷 q 和空气中的镜像电荷 q_2 共同产生。当 $z \geqslant 0$ 时，其空间电位为：

$$\varphi_1 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_1}\left(\frac{q}{R_1} + \frac{q_1}{R_2}\right) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_1}\left(\frac{q}{\sqrt{x^2 + (z-H)^2}} + \frac{q_1}{\sqrt{x^2 + (z+H)^2}}\right) \tag{2}$$

当 $z \leqslant 0$ 时，其空间电位为：

$$\varphi_2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_1}\left(\frac{q + q_2}{R}\right) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_1}\frac{q + q_2}{\sqrt{x^2 + (z-H)^2}} \tag{3}$$

方程的边界条件为：

$$\varphi_1 \big|_{z=0} = \varphi_2 \big|_{z=0} \tag{4}$$

$$\varepsilon_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial z}\bigg|_{z=0} = \varepsilon_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial z}\bigg|_{z=0} \tag{5}$$

推得镜像电荷大小为：

$$q_1 = -\frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1} q \tag{6}$$

$$q_2 = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1} q \tag{7}$$

将 q_1、q_2 表达式代入式(2)、(3)可得空气介质和地壳介质中的电位，分别为：

$$\varphi_1 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_1}\left(\frac{q}{\sqrt{x^2 + (z-H)^2}} - \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1}\frac{q}{\sqrt{x^2 + (z+H)^2}}\right) \tag{8}$$

$$\varphi_2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_2}\frac{q}{\sqrt{x^2 + (z-H)^2}}\frac{2\varepsilon_2}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1} \tag{9}$$

根据静电学原理，由空间介质中的电位可推得大气

电场的水平方向 x、y 轴电场分量 E_x、E_y 和垂直方向 Z 轴电场分量 E_z，其计算公式为：

$$E_x = -\frac{\partial \varphi_1}{\partial x} = \frac{qx}{4\pi\varepsilon_0}[x^2 + y^2 + (z-H)^2]^{-3/2} - \frac{qx}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1}[x^2 + y^2 + (z+H)^2]^{-3/2} \tag{10}$$

$$E_y = -\frac{\partial \varphi_1}{\partial y} = \frac{qy}{4\pi\varepsilon_0}[x^2 + y^2 + (z-H)^2]^{-3/2} - \frac{qy}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1}[x^2 + y^2 + (z+H)^2]^{-3/2} \tag{11}$$

$$E_z = -\frac{\partial \varphi_1}{\partial z} = -\frac{q}{4\pi\varepsilon_0}(z-H)[x^2 + y^2 + (z-H)^2]^{-3/2} + \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1}(z+H)[x^2 + y^2 + (z+H)^2]^{-3/2} \tag{12}$$

其中，ε_0 为真空介电常数。

如图4所示，假定探测点位于点$(a,b,0)$，雷暴云点电荷位于点$(0,0,H)$，则位于点$(a,b,0)$处的三维电场大小为：

$$E_x = \frac{qa}{4\pi\varepsilon_0}\frac{2\varepsilon_1}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1}(a^2 + b^2 + H^2)^{-3/2} \tag{13}$$

$$E_y = \frac{qb}{4\pi\varepsilon_0}\frac{2\varepsilon_1}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1}(a^2 + b^2 + H^2)^{-3/2} \tag{14}$$

$$E_z = \frac{H}{4\pi\varepsilon_0}\frac{2\varepsilon_2}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1}q(a^2 + b^2 + H^2)^{-3/2} \tag{15}$$

由式(13)~(15)可得，探测点所测得的大气电场三维场强分量大小不仅与距雷暴云点电荷位置相关，还与地表相对介电常数相关。若获得实时的地表相对介电常数测量值，则可由所测场强分量反演雷暴云方位，从而实现高精度的雷暴云定位。

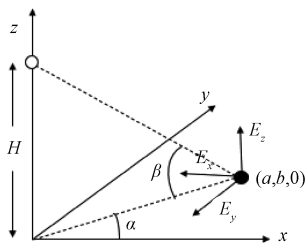

图4　地表大气电场测量示意图

Fig. 4　Schematic diagram of surface atmospheric electric field measurement

2　地表相对介电常数对雷暴云定位的影响分析

2.1　地表介电常数对大气电场场强影响分析

表1列出常见介质的相对介电常数大小。其中，空气相对介电常数为1，淡水相对介电常数为81，土壤相对介电常数为16。

表1　常见地表介质相对介电常数大小

Table 1　The relative permittivity of common surface media

材料	相对介电常数	材料	相对介电常数
空气	1	土壤	16
淡水冰	4	沼泽	12
沥青	3~5	淡水	81
石英	4.3	永冻土	1~8
砂岩(湿润)	6	花岗岩	5~8
泥岩(湿润)	7	石灰岩	7~9
花岗岩(湿润)	8	白云岩	6.8~8

由表1知，当地表为潮湿的土壤时，地表相对介电常数大于16，远远大于空气介电常数，此时垂直电场分量 E_V 可由式(15)简化为：

$$E_V \approx \frac{2H}{4\pi\varepsilon_0}q(a^2 + b^2 + H^2)^{-3/2} \tag{16}$$

上式可见，当地表相对介电常数较大时，如地表潮湿情形下，环境相对介电常数对于垂直电场分量的影响是微小的。

式(15)中 $\sqrt{a^2 + b^2}$ 为雷暴云距测量点的水平投影距离 R，因此垂直方向电场分量 E_V 可表示为：

$$E_V = \frac{q\varepsilon_2}{2\pi\varepsilon_0(\varepsilon_2 + \varepsilon_1)}\frac{H}{(R^2 + H^2)^{3/2}} \tag{17}$$

而在水平方向上，水平电场分量 E_H 可由水平方向上 x、y 轴的场强分量推算所得：

$$E_H = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = \frac{q\varepsilon_1}{2\pi\varepsilon_0(\varepsilon_2 + \varepsilon_1)}\frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{(a^2 + b^2 + H^2)^{3/2}} = \frac{q\varepsilon_1}{2\pi\varepsilon_0(\varepsilon_2 + \varepsilon_1)}\frac{R}{(R^2 + H^2)^{3/2}} \tag{18}$$

当雷暴云所携电荷不变时，地表相对介电常数 ε_2 越大，所测得的水平电场分量越小。

分析式(17)、(18)知，水平电场分量 E_H、垂直电场分量 E_V 大小与 ε_1、ε_2、H、R 相关，在 E_V 与 E_H 的表达式中，将雷暴云带电荷量 q 以及空气介电常数 ε_1 设为定置，除地表相对介电常数 ε_2 这一个变量外，还存在 H、R 两个变量，因此将雷暴云高度 H 与水平投影距离 R 的比值 H/R 作为横坐标，取 H/R 作为横坐标可以便于定量分析 ε_2 与场强分量 E_H、E_V 间的关系。

在不同介电常数地表环境下，根据式(17)、(18)，大气电场的水平电场分量 E_H 和垂直电场分量 E_V 随着雷暴云高度 H 与水平投影距离 R 的比值 H/R 的变化如图5所示。

图5分别展示了干土(ε_r=3)、混凝土(ε_r=6)、潮湿

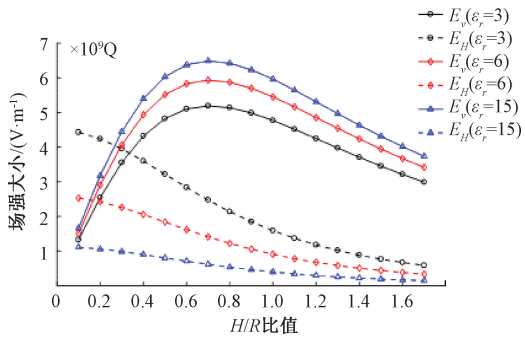

图 5　不同介电常数和 H/R 时地表大气电场的水平和垂直分量(干土 ε_r = 3,混凝土 ε_r = 6,潮湿土壤 ε_r = 15)

Fig. 5　The horizontal and vertical components of the ground atmospheric electric field at different dielectric constants and H/R (dry soil ε_r = 3, concrete ε_r = 6, moist soil ε_r = 15)

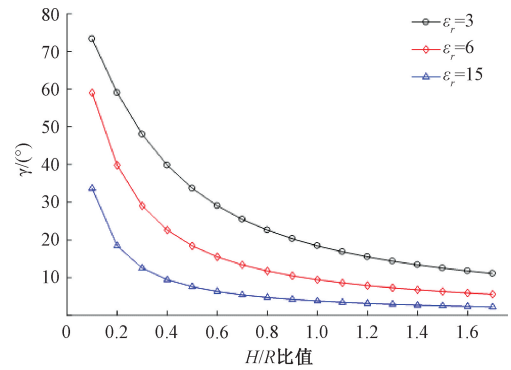

图 6　雷暴云高度角受地表相对介电常数影响(干土 ε_r = 3,混凝土 ε_r = 6,潮湿土壤 ε_r = 15)

Fig. 6　The height angle of thunderstorm cloud is affected by the relative permittivity of the ground surface (dry soil ε_r = 3, concrete ε_r = 6, moist soil ε_r = 15)

土壤(ε_r=15)地表环境下,大气水平与垂直电场分量和 H/R 比值之间的关系曲线。当地表介电常数一定时,随着 H/R 比值的增加,水平分量总体呈现减小的趋势,垂直分量则是先增大后减小。雷暴云与地面观测点处于同样的距离和方位关系时,不同的地表介电常数,水平分量与垂直分量的比例存在较大的差异,水平分量的大小甚至有可能超过垂直分量。雷暴云高度 H 与水平投影距离 R 的比值 H/R 小于 0.3 时,地表相对介电常数对于垂直电场分量的影响较小,而当 H/R 比值大于 1.6 时,地表相对介电常数对于水平电场分量的影响较小。

2.2　地表相对介电常数对雷暴云高度角测量影响分析

雷暴云高度角的测量值是实现雷暴云定位的重要参数,测量时利用大气电场水平与垂直电场分量的关系得到雷暴云高度角,因此地表介电常数对大气电场的影响也造成高度角的测量误差。基于图 4 所示的地表大气电场测量示意图,由地面电场与电荷相对于观测点的水平角与高度角的关系可推得水平角 φ 与高度角 γ:

$$\tan\varphi = \frac{E_y}{E_x} = \frac{b}{a} \tag{19}$$

$$\tan\gamma = \frac{E_z}{\sqrt{E_x^2 + E_y^2}} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}\frac{H}{\sqrt{a^2 + b^2}} \tag{20}$$

其中,$\sqrt{a^2 + b^2}$ 为雷暴云距测量点的水平投影距离 R,可将式(20)简化为:

$$\tan\gamma = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}\frac{H}{R} \tag{21}$$

由式(19)、(21)可见,地表介电常数对于水平角的影响是可忽略的,但在高度角测量上,则需要带入 $\varepsilon_2/\varepsilon_1$ 参量进行校正。当地表介电常数与 H/R 取值不同时,大气电场的高度角变化如图 6 所示。

图 6 分别展示了干土(ε_r=3)、混凝土(ε_r=6)、潮湿土壤(ε_r=15)地表环境下,雷暴云高度角和 H/R 比值之间的关系曲线。可以看出,比值 H/R 相同时,不同的地表介电常数会对雷暴云的倾角造成较大差异的变化,地表相对介电常数越大,所测得雷暴云高度角越小。地表介电常数相同时,倾角 γ 会随着 H/R 的增加而逐渐减小。当雷暴云高度 H 与水平投影距离 R 的比值 H/R 大于 1.6 时,地表相对介电常数对雷暴云高度角的测量影响较小。考虑到雷暴云的一般距地高度为 8~10 km,因此,当雷暴云距测量点的距离小于 5 km 时地表相对介电常数对雷暴云定位影响较小。而当雷暴云距测量点的水平距离大于 5 km 时,需实时记录当前环境的地表相对介电常数变化,及时对高度角测量进行校正。

3　实际实验

为验证本文所论环境介电常数与大气电场之间的关系,利用三维大气电场仪在户外进行实际测量[20]。实验选用电场仪型号为南京信息工程大学自主研制,试验场地为南京信息工程大学学科楼 2 号楼楼顶,如图 7 所示。测量位置海拔高度约 28 m,相比于地面,电场测量值会偏大,但不影响本实验的定性分析。周围环境空旷,无高大建筑物影响电场分布。

图 7 中,三维大气电场仪的测量距离为 10~20 km,最小电场分辨率为 10 V/m,数据采样率为每秒 250 次,能够保证每分钟输出一次三维电场分量均值数据。实验通过监测地表湿度的变化反映地表相对介电常数的变化,测量三维大气电场的变化情况,验证本文所推的环境介电常数对大气三维电场分量影响模型,为利用环境介电常数提高雷暴云定位精度提供理论基础。

图 7　三维大气电场仪户外测量

Fig. 7　Outdoor measurement of three-dimensional atmospheric electric field measuring instrument

3.1　介电常数影响实验

开展介电常数影响实验需要实时监测地表相对介电常数的变化，当前市场上不乏各类介电常数测试仪。在国内，苏州 TSK-TEST 科技有限公司研发了 6632 型精密介电常数测试仪，其最快测量时间小于 3 ms，相对介电常数测量范围为 0～100 000；北京北广精仪仪器设备有限公司的 GDAT-A 型介电常数测试仪，电容直接测量范围为 1～200 PF，电容分辨率为 0.5 PF。在国外，英国 Wayne kerr 的 6500B 系列介电常数测试仪可以得到相对介电常数复数值以及损耗因子等测试参数，基本测试精度为 0.05%。此类介电常数测试仪都具有较高的测量精度，但都需要对被测介质进行采样制样，因此只适用于车间、实验室、科研单位等场所，不适合对介电常数的户外持续监测。

2002 年 Robinson 等[21]研究地表相对介电常数与土壤水分之间的相关性，使用土壤含水量模拟土壤的相对介电常数，发现两者之间的线性关系。基于上述研究，本文通过记录地表湿度的变化曲线来反映地表相对介电常数的变化曲线，地表湿度越大，地表相对介电常数越大。采用 SN-485 型土壤湿度传感器实时监测土壤湿度变化。

图 8 为 2019 年 5 月 25 日观测的地表湿度变化曲线图。实验环境温度为 21 ℃～27 ℃，天气多云。当天温差为 6 ℃，根据郭文川等[22]在 2013 年所做的土壤介电特性与水分检测频率及温度影响研究成果，温差 6 ℃ 所带来的介电常数变化很小，温度变化对于实验的影响可忽略。

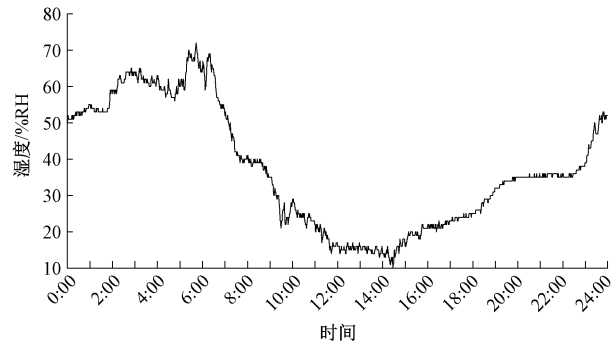

图 8　地表相对湿度变化曲线

Fig. 8　Change curve of the ground surface relative humidity

由图 8 可见，实验当天地表湿度变化较大，0:00～7:00 时段内，凌晨地表露水凝结，地表湿度较大；在 7:00～20:00 时段内，地面由于光照的作用，湿度逐渐减小，直至夜间地表湿度再次变大。

图 9 为与地表湿度测量同时同地的电场变化曲线图，E_x、E_y 为水平 x、y 轴方向的电场分量，分别为图 9 中的三角标注和圆形标注曲线；E_z 为垂直 z 轴方向的电场分量，为图 9 中的无形状标注曲线。

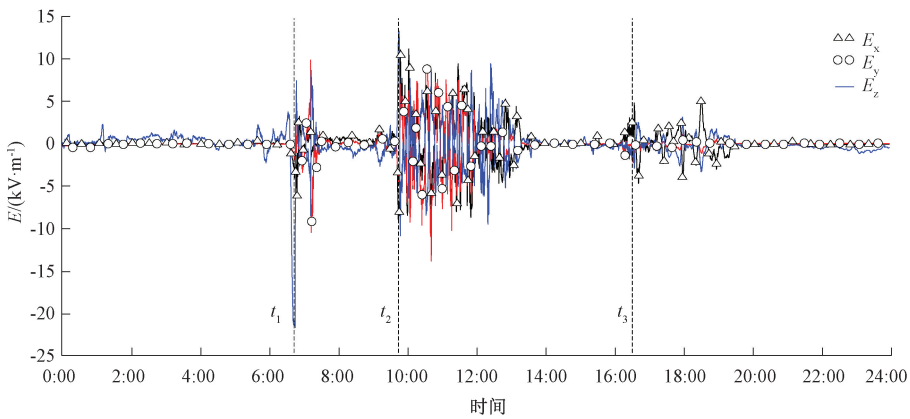

图 9　大气电场变化曲线

Fig. 9　Change curve of atmospheric electric field

对照图 8、9 两图发现，在 0:00~7:00 这一时间段内，地表湿度较大，x 、y 轴方向的水平电场分量小于 z 轴方向的垂直电场分量；在 7:00~20:00 这一时间段内，地表湿度减小，此时 x 、y 轴方向的水平电场分量增大，水平场强分量在这一时间段内均值可达 10 kV/m，且大于 z 轴方向的垂直电场分量；在 20:00~24:00，地表湿度逐渐增大，对应的 x 、y 轴方向的水平电场分量再次减小。综上，当地表相对介电常数较大时，水平电场分量会显著增大，甚至大于垂直电场分量，而地表相对介电常数较小时，水平电场分量极小，可忽略。实验结果符合式(17)、(18)表征的物理意义。

3.2　对照试验

为反映潮湿混凝土地表环境下大气电场的变化情况，开展对照试验，图 10 为 2019 年 5 月 26 日地表湿度变化曲线。

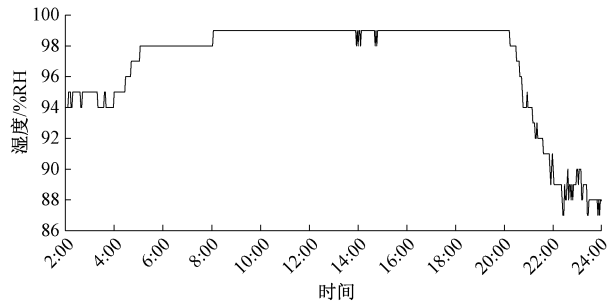

图 10　地表相对湿度变化曲线

Fig. 10　Change curve of the ground surface relative humidity

实验当天场地地表潮湿，存在积水，地表湿度达到饱和，地表相对介电常数整体偏大，湿度变化较小，环境温度为 21~26 ℃，温度变化小，温度变化带来对介电常数的影响可忽略。

图 11 为 2019 年 5 月 26 日实验当天的大气电场变化曲线。

图 11 可见，由于地表环境潮湿，地表相对介电常数较大，大气电场分量受地表相对介电常数的影响，各项电场分量数值都较小，水平电场分量均值仅为 0.1 kV/m，垂直电场分量均值则为 0.6 kV/m，垂直电场分量 E_z 始终大于水平电场分量 E_x、E_y，符合式(17)、(18)表征的物理意义。

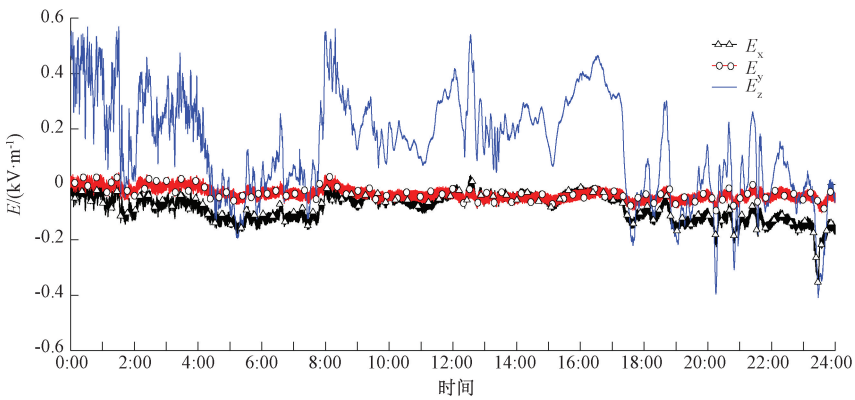

图 11　大气电场对照试验变化曲线

Fig. 11　Change curve of atmospheric electric field control test

为清晰展示水平电场分量与地表湿度间关系，采用简单相关系数进行表示。简单相关系数是用以反映变量之间相关关系密切程度的统计指标。相关系数是按积差方法计算，同样以两变量与各自平均值的离差为基础，通过两个离差相乘来反映两变量之间相关程度，其计算公式为：

$$r(X,Y)=\frac{Cov(X,Y)}{\sqrt{Var[X]*Var[Y]}} \tag{22}$$

其中，$Cov(X,Y)$ 为 X 与 Y 的协方差，$Var[X]$ 为 X 的方差，$Var[Y]$ 为 Y 的方差。

简单相关系数的变化范围为-1~1。简单相关系数的绝对值为 1 表明 X 和 Y 可以很好的由直线方程来描述，当相关系数为正时，Y 随着 X 的增加而增加，相关系数为负时，Y 随着 X 的减少而减少。而当相关系数为 0 时则表明 X、Y 两个变量间没有线性关系。结合表 2 中的实验数据，得到水平电场分量与地表湿度间的简单相关系数。

表 2　对应水平电场及地表湿度实验数据

Table 2　Corresponding horizontal electric field and surface humidity experimental data

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
场强/(kV·m^{-1})	0.2	0.1	0.1	0.2	0.8	5	3	0.5	4	1	0.3	0.2	0.2
湿度/%RH	51	55	56	60	35	22	15	54	25	28	52	59	54

根据两组实验数据，得到大气电场水平分量与地表相对介电常数的简单相关系数为-0.95，两者成负相关，

且相关性强,符合本文所建立的地表介电常数与雷暴云定位关系模型。因此,为提高雷暴云定位精度,将地表相对介电常数引入雷暴云定位校正是极为必要的。

4 结 论

利用镜像法,将地壳视为电介质,将雷暴云电荷视为点电荷,根据空中电荷电场分布、雷暴云电荷结构等原理建立大气电场测量模型,分析大气电场三维场强分量,推导大气电场场强和雷暴云高度角公式,分析地表相对介电常数对雷暴云定位的影响,并通过实验验证了结果。研究发现,在相对介电常数较小的干燥地表,水平电场分量比较显著,如干燥土壤,岩石,混凝土表面存在较大的水平电场分量。此外,地表相对介电常数越大,所测得的雷暴云高度角越大,因此要获得准确的高度方位还须测量实时的地表相对介电常数进行修正。

在本文中,利用理论推导和实验验证,分析了地表相对介电常数对雷暴云定位的影响,并提出利用地表相对介电常数提高雷暴云定位精度的新思路,但本文工作实验不够充分。下一步工作,将设计一套地表相对介电常数实时测量装置,通过实验,分析地表相对介电常数对提高雷暴云定位精度的实际效果,建立实时的雷暴云定位校正系统。

参考文献

[1] XU B, ZOU D, CHEN B Y, et al. Periodic variations of atmospheric electric field on fair weather conditions at YBJ, Tibet [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2013, 97: 85-90.

[2] MKRTCHYAN H, KARAPETYAN G, ASLANYAN D. Atmospheric electric field variations during fair weather and thunderstorms at different altitudes [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2020, 211: 105452.

[3] GALANAKI E, LAGOUVARDOS K, KOTRONI V, et al. Thunderstorm climatology in the Mediterranean using cloud-to-ground lightning observations [J]. Atmospheric Research, 2018, 207: 136-144.

[4] ARANGUREN D, INAMPUÉS J, TORRES H, et al. Operational analysis of electric field mills as lightning warning systems in Colombia [C]. 2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP). IEEE, 2012: 1-6.

[5] BOLDYREV A I, VYAZILOV A E, IVANOV V N, et al. A highly sensitive field mill for registering weak and strong variations of the electric-field intensity of the Earth's atmosphere [J]. Instruments and Experimental Techniques, 2016, 59(5): 740-748.

[6] LUCAS G M, THAYER J P, DEIERLING W. Statistical analysis of spatial and temporal variations in atmospheric electric fields from a regional array of field mills [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122(2): 1158-1174.

[7] 杨春明,徐书璋. 大气电场仪在雷电监测预警中的应用[J]. 现代建筑电气,2017,8(9):47-49,60.
YANG CH M, XU SH ZH. Application of atmospheric electric field instrument in lightning monitoring and early warning[J]. Modern Building Electrical, 2017, 8(9): 47-49, 60.

[8] 陈镇,徐志钦,林士渠,等. 大气电场仪辅助观测机场区域雷暴的方法探析[J]. 科学技术创新,2022(5):17-20.
CHEN ZH, XU ZH Q, LIN SH Q, et al. Analysis on the method of observing thunderstorm in airport area with the aid of atmospheric electric field instrument[J]. Science and Technology Innovation, 2022, (5): 17-20.

[9] 林向东,徐平,鲁跃,等. 地电场观测中几种常见干扰[J]. 华北地震科学,2007,25(1):16-22.
LIN X D, XU P, LU Y, et al. Several common interferences in geoelectric field observation [J]. North China Seismology, 2007, 25 (1): 16-22.

[10] 柴健,张谦. 雷暴天气下建筑物对大气电场测量的影响[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版),2017,18(1):56-60.
CHAI J, ZHANG Q. Influence of buildings on atmospheric electric field measurement during thunderstorm [J]. Journal of PLA University of Technology (Natural Science Edition), 2017, 18 (1): 56-60.

[11] 陈晓东,孙金华. 大气电场仪场地因子修订及 EMD 分解分析[J]. 电子测量技术,2016,39(12):93-97,108.
CHEN X D, SUN J H. Revision of site factor of atmospheric electric field instrument and EMD decomposition analysis [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39 (12): 93-97, 108.

[12] 张华明,赵桂香,康永刚,等. 大气电场与大气污染物关系研究[J]. 中国农学通报,2016,32(30):127-131.
ZHANG H M, ZHAO G X, KANG Y G, et al. Relationship between atmospheric electric field and atmospheric pollutants[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(30): 127-131.

[13] 宋琳,丁锋,张金波,等. 有限元法在真实环境下大气电场仪误差修订中的应用[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(8):152-161.
SONG L, DING F, ZHANG J B, et al. Application of finite element method in error correction of atmospheric

electric field instrument in real environment[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35 (8): 152-161.

[14] ILLINGWORTH A J, LATHAM J. Calculations of electric field growth, field structure and charge distributions in thunderstorms[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2010, 103 (436): 281-295.

[15] ZHAO Z K, QIE X S, LONG T, et al. Electric field soundings and the charge structure within an isolated thunderstorm[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(9):872-876.

[16] 李锦轶,张进,刘建峰,等. 中国地壳结构构造与形成过程:来自构造变形的约束[J]. 地质力学学报,2019, 25(5):678-698.
LI J Y, ZHANG J, LIU J F, et al. Crustal structure and formation process in China: constraints from tectonic deformation[J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25 (5): 678-698.

[17] 唐雁冰,李闽. 基于网络模型的岩石电学性质研究[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版),2012,14(2):85-88.
TANG Y B, LI M. Study on electrical properties of rock based on network model[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012,14 (2): 85-88.

[18] 周璧华,姜慧,刘海波,等. 地面与空中大气电场的对应关系研究[J]. 电波科学学报,2010,25(1):20-25,201.
ZHOU B H, JIANG H, LIU H B, et al. Study on the corresponding relationship between ground and air atmospheric electric field[J]. Journal of Radio Wave Science, 2010,25 (1): 20-25, 201.

[19] 吴轲娜,周国华,马文帅,等. 利用镜像法求解劈形导体边界的讨论[J]. 大学物理,2022,41(3):21-22,67.
WU K N, ZHOU G H, MA W SH, et al. Discussion on solving the boundary of split conductor by image method[J]. College Physics, 2022,41(3):21-22,67.

[20] 行鸿彦,张强,徐伟,等. 大气电场仪观测数据的海拔校正及联网[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2014,15(6):591-597.
XING H Y, ZHANG Q, XU W, et al. Altitude correction and networking of atmospheric electric field instrument observation data[J]. Journal of PLA University of Technology (Natural Science Edition), 2014,15 (6): 591-597.

[21] ROBINSON D A, COOPER J D, GARDNER C. Modelling the relative permittivity of soils using soil hygroscopic water content[J]. Journal of Hydrology, 2002, 255(1-4):39-49.

[22] 郭文川,张鹏,宋克鑫,等. 塿土介电特性与水分检测频率及温度影响[J]. 排灌机械工程学报,2013, 31(8):713-718.
GUO W CH, ZHANG P, SONG K X, et al. Dielectric properties of Lou soil and influence of moisture detection frequency and temperature[J]. Journal of Drainage and Irrigation Mechanical Engineering, 2013, 31 (8): 713-718.

作者简介

李胤演,2020 年于南京信息工程大学滨江学院获得学士学位,现为南京信息工程大学硕士研究生,主要研究方向为微弱信号的检测与处理、智能化电子测量技术与仪器。
E-mail: lyy827517@163.com

Li Yinyan received his B. Sc. in 2020 from Binjiang College of Nanjing University of Information Science & Technology. Now he is a M. Sc in Nanjing University of Information Science & Technology. His main research interests include weak signal detection, design of intelligent electronic measurement technology and instrument.

行鸿彦(通信作者),2003 年于西安交通大学获得博士学位,现为南京信息工程大学教授、博士生导师,主要研究方向:微弱信号检测与处理、生物医学信号采集与处理、智能化电子测量技术与仪器。
E-mail: xinghy@nuist.edu.cn

Xing Hongyan received his Ph. D. degree in 2003 from Xi'an Jiaotong University. Now he is a professor and supervisor for Ph. D. student in Nanjing University of Information Science & Technology. His main research interests include weak signal detection, bio-medical signal collection and processing, and design of intelligent electronic measurement technology and instrument.