

安装场地环境对地面大气电场观测的影响研究

刘晓东^{1,2,3}, 李庆君³, 宋昊泽³, 石茹琳³

(1. 内蒙古自治区气象科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2. 内蒙古自治区人工影响天气重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010051; 3. 内蒙古自治区雷电预警防护中心, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要: 为了研究安装场地环境对地面大气电场观测的影响, 选取呼和浩特市 2018—2020 年大气电场观测资料, 运用数理统计和有限差分方法开展了建筑物对地面大气电场影响的观测分析和模拟研究。结果表明, 呼和浩特地区晴天大气电场日变化呈双峰双谷型, 晴天大气电场均值为 123.34 V/m; 其日变化与全球普遍变化较为一致, 一年之中冬春季晴天大气电场强度较高。当大气电场仪安装在不同高度的建筑物屋顶或安装在离建筑物不同距离的地面时, 建筑物对大气电场测量值影响的模拟结果表明, 大气电场仪测量值修正系数与建筑物高度呈正相关, 遮蔽仰角与建筑物高度呈正相关, 而地面影响距离随着建筑物高度的不断增加其增大幅度减小; 模拟的修正系数比较适合于该站长期观测大气电场的均值的修正。

关键词: 大气电场; 建筑物; 影响; 修正系数

Research on influence of installation site environment on ground atmospheric electric field observation

LIU Xiaodong^{1,2,3}, LI Qingjun³, SONG Haoze³, SHI Rulin³

(1. Inner Mongolia Meteorological Institute, Hohhot 010051, China; 2. Inner Mongolia Key Laboratory Of Manual Weather Modification, Hohhot 010051, China; 3. Inner Mongolia Lightning Warning & Protection Center, Hohhot 010051, China)

Abstract: In order to study the influence of installation site on the observation of atmospheric electric field on the ground, based on the data of atmospheric electric field from Hohhot 2018 to 2020, the observation analysis and simulation study of the influence of buildings on the ground atmospheric electric field were carried out by using mathematical statistics and finite difference method. The results show that the diurnal variation of the atmospheric electric field in Hohhot on fair-weather was double-peak and double-valley, and the average value of the atmospheric electric field on fair-weather was 123.34 V/m; its diurnal variation was consistent with the global change, and the intensity of the atmospheric electric field on fair-weather in winter and spring was relatively higher throughout the year. When the atmospheric electric field meter is installed on the roof of a building with different heights or on the ground with different distances from the building, the simulation results show that the correction coefficient of the measured value of the atmospheric electric field meter was positively correlated with the height of the building, The height of the building was positively correlated with the shielding elevation angle, and the ground influence distance increases with the increasing height of the building. The correction coefficient of simulation was more suitable for the mean value of atmospheric electric field observed in the station for a long time.

Key words: atmospheric electric field; building; influence; correction coefficient

0 引言

全球大气电路的物理模型中,雷暴活动和晴天区大气电流共同维持了全球电路的平衡^[1],晴天大气电场是大气电学的重要物理量,它代表的是一个参考状态^[2],因此大气电场的研究对于分析雷电活动大气电场特征具有重要意义。国内外许多学者开展了建筑物等地面物体对于雷电电磁场的影响研究:文献[3]开展了卫星地面站建筑物对于雷电直击效应的研究;文献[4-5]分析了广州高建筑物对雷电电磁场的影响;文献[6-7]对雷电电磁场及大气电场的相关影响因素进行了研究;文献[8-9]分析了楼高对于云闪和地闪回击电场观测值比地面测量结果增大的现象;文献[10]模拟了建筑物高度和离建筑物的距离对地闪回击电场的影响;文献[11-15]对各地晴天大气电场观测值的变化特征开展了相关的研究,并开展了建筑物对大气电场影响的数值模拟研究;文献[16-19]采用有限差分法针对建筑物不同参数对大气电场畸变影响进行了数值模拟研究;文献[20]采用有限元法分析了建筑物对大气电场测量的影响;文献[21-22]分别采用不同方法模拟了雷暴天气下建筑物对大气电场的畸变效应。以上的模拟研究结果揭示了大气电场随着建筑物高度的增加而增大的规律并给出了关系式,目前模拟研究与实际观测结果的对比研究较少,因此本文结合呼和浩特市2018—2020年大气电场观测资料,对比研究建筑物对地面大气电场影响的观测和模拟结果,这对大气电场测量值的修正具有重要意义。

1 资料与方法

1.1 资料来源

本文所用大气电场数据为内蒙古自治区气象局在呼和浩特市布置的8个Pre-storm 2.0大气电场仪2018—2020年的大气电场观测资料,Pre-storm 2.0的性能参数见表1。每次记录信息包含具体日期、时间、大气电场极性和强度等参数。呼和浩特市8个大气电场仪布设于内蒙古气象局、伊利、河西公司、机场人影基地、炼油厂、

医科大学附属医院、和林格尔气象局及和林格尔云计算中心,如图1所示。其中内蒙古气象局、河西公司、机场人影基地与和林格尔气象局在当地地面测场安装大气电场仪,其他都安装于建筑物屋顶。内蒙古气象局与医科大学附属医院站址距离为2 036.78 m,同步气象资料来源于相距7 593.69 m的呼和浩特国家观象台。

表1 Pre-storm 2.0 性能指标

Tab. 1 Pre-Storm 2.0 performance indicators

序号	性能参数	技术指标
1	探测距离/km	15 ~ 20
2	电场测量量程/(kV/km)	- 300 ~ 300
3	分辨力/(V/m)	10
4	最大允许测量误差/(V/m)	± (20+3% E)
5	采样频率/Hz	1

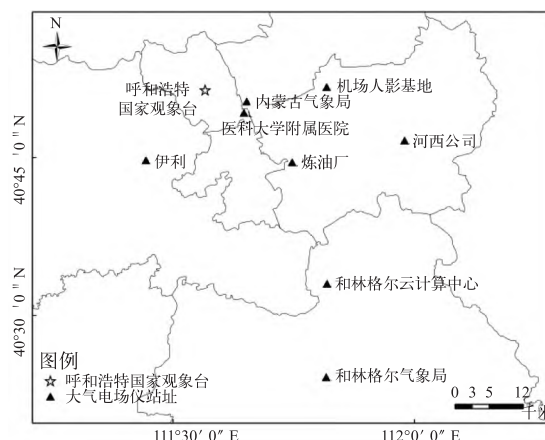
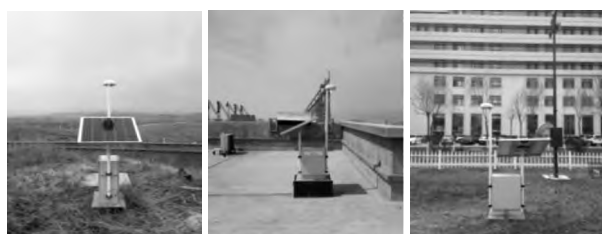


图1 大气电场仪站址分布

Fig. 1 The distribution of the stations of atmospheric electric field

由于河西公司站址周边较为空旷,无建筑物遮挡,观测环境比较理想,故选取该站址作为呼和浩特市大气电场观测的基准站,如图2所示。医科大学附属医院站大气电场仪安装在高度为90.40 m的大楼屋面(该建筑物长和宽分别为71.00 m和20.25 m),内蒙古气象局站的南侧距离该站41.68 m处为内蒙古气象局预警大楼,该预警大楼长、宽和高分别为100.00 m、23.00 m和33.60 m;医科大学附属医院站和内蒙古气象局站大气电场仪分别安装在高楼的屋顶和大楼楼底旁边,因此选取这两站作为建筑物对大气电场影响的研究站。



(a) 河西公司站 (b) 附属医院站 (c) 内蒙古气象站

图2 代表站周边环境

Fig. 2 Surrounding environment of representative station

1.2 数据处理

选取的代表站的观测资料情况见表2，其中晴天的选取是对呼和浩特国家气象台2018—2020年每日平均2 min风速大于6 m/s、平均总运量超过天空30%的整天数据剔除后的日数；晴天大气电场数据样本是在晴天日数大气电场观测数据基础上剔除大于1.0 kV/m或者小于0 kV/m数值的大气电场数据，通过上述条件筛选出2018—2020年237天晴天日数和275 410个晴天大气电场数据样本。

表2 代表站观测资料情况

Tab. 2 Data information of representative station

站点	观测资料时段	总数据 样本 / 个	晴天 日数 / 天	晴天数 据样本 / 个
河西 公司	2018-02-02—2018-12-31	604 071	98	125 422
	2019-01-22—2019-12-13	511 761	73	80 202
	2020-01-02—2020-12-30	602 435	66	69 786
附属 医院	2018-02-02—2018-12-30	965 117	98	125 422
	2019-01-22—2019-12-13	522 393	73	80 202
	2020-01-02—2020-12-30	634 359	66	69 786
气象 局	2018-04-24—2018-11-28	186 456	98	125 422
	2019-03-04—2019-12-02	256 474	73	80 202
	2020-01-02—2020-12-30	431 753	66	69 786

2 晴天大气电场的变化特征

2.1 晴天大气电场日变化特征

晴天大气电场日相对变化主要取决于电离层相对变化、晴天柱体电阻和大气总电导率相对变化，电离层电位相对变化主要受全球雷暴活动、宇宙辐射和太阳活动（如太阳紫外线辐射）等因素的制约，属于全球性的普遍变化；在大多数陆

地测站，电位梯度极大值，即电场强度极小值在7~10时和19~21时出现，电场强度极大值出现在4~6时和12~16时^[23]。晴天大气电场日变化如图3所示。可以看到，呼和浩特地区晴天近地面大气电场日变化基本上为双峰双谷型，3年晴天大气电场平均值为123.34 V/m，其变化范围为97.31~155.65 V/m。在早晨6时左右，电场强度出现第一个主波谷，强度为97.31 V/m；然后在午后14时左右达到主峰值，强度为155.65 V/m；随后缓慢下降，在傍晚23时左右到达次波谷，强度为109.66 V/m；接着起伏缓慢地变化，于次日凌晨1时达到次波峰；最后在次日凌晨6时左右达到下一个主波谷；不同年份不同时段晴天大气电场的峰值可能与当年闪电发生的高峰时段有密切关系。

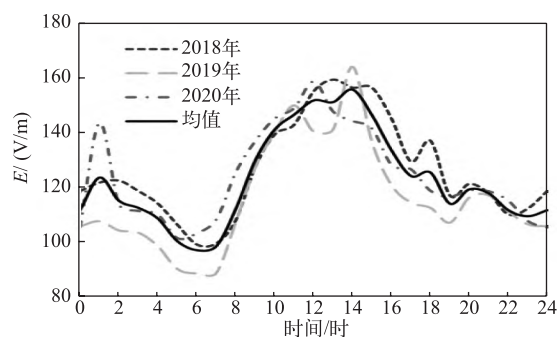


图3 晴天大气电场日变化

Fig. 3 Diurnal variation of fair-weather atmospheric electric field

可见呼和浩特地区晴天大气电场的日变化与全球普遍变化较为一致，日变化的第一峰值较全球普遍变化第一峰值出现时间提前3 h左右，次波谷值推迟2 h左右，这可能是局地气象环境影响的结果。呼和浩特地区晴天电场日变化是全球性普遍变化和地方性局地变化机理综合作用的结果，地方性局地变化的影响相对较弱一些，即晴天大气柱体电阻和大气电导率对晴天大气电场强度影响较电离层电位相对变化影响小。早上日出后温度上升，随着太阳辐射增强，大气电场强度持续增大；人类活动导致大气中气溶胶含量增加，大气中氢离子浓度减小，导致大气电导率值降低，从而加速了大气电场强度的增大，电场值在午后14时达到峰值；随着温度的增大，大气湍

流垂直输送加大,将地面水汽、气溶胶等输送到较高层大气,使得近地面大气中的气溶胶含量降低,大气电场强度下降,到23时降到最低;夜间随着空气中带电粒子的尘埃逐渐沉积,使得大气柱体电阻和电导率减小,大气电场强度缓慢回升,在次日凌晨1时左右达到次波峰;清晨气温最低,大气电场随着温度的下降达到最低值。

2.2 晴天大气电场季节变化特征

晴天大气电场日变化情况如图4所示。从图4可以看到,晴天大气电场具有明显的季节效应。一年中晴天大气电场最大值出现在2月,为191.26 V/m;最小值出现在8月,为87.03 V/m;总体而言,冬春季晴天大气电场强度较高,冬季均值为134.01 V/m,春季均值最大为141.50 V/m;夏秋季晴天大气电场强度较低且相差不大,分别为110.91 V/m和106.90 V/m。这一结果与山西和西藏等地的观测结果较为一致。可见晴天大气电场的季节变化与呼和浩特市的大气污染季节变化规律密切相关^[24],呼和浩特市冬春季为采暖期,大气气溶胶浓度较大,再加上春季容易出现沙尘天气,故使得大气电场强度值达到最大。

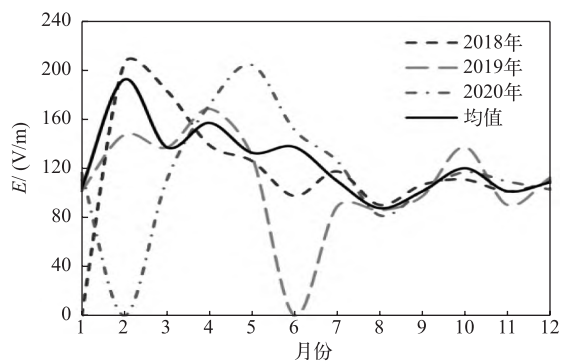


图4 晴天大气电场月变化

Fig. 4 The monthly variation of the fair-weather atmospheric electric field

3 建筑物对大气电场观测的影响

3.1 晴天时建筑物对大气电场观测的影响

地面大气电场的观测受安装位置场地环境的影响,使得测试的数据产生一定的误差,尤其在城市中受安装场地的限制,大气电场仪往往安装

在建筑物的楼顶,由于建筑物使得地面电场发生畸变,故楼顶传感器所测得的数据会偏大,这种长期观测的误差属于系统误差,可通过系数进行修正^[25]。图5a为2020年6月16日一天24 h河西公司和附属医院两站的晴天大气电场观测数据对比情况,可以看出两站一天的大气电场观测数据总体符合该地区晴天大气电场的日变化特征,即中午时段出现主峰值,在一天中某些时段出现相对较大的变化可能是当时所处位置的大气污染造成的;除主峰值时段,安装在高楼楼顶的附属医院站观测的数据比地面观测站河西公司站的电场值大,主峰值的变化可能受全球性普遍变化较强作用的结果;由于受局地具体安装环境的影响,附属医院站2020年6月16日一天的电场平均值较河西公司站偏大1.35倍左右。同样选取了2020年10月23日(见图5b)一天晴天的天气电场两站观测数据对比分析,附属医院站观测结果较河西公司站大1.37倍。

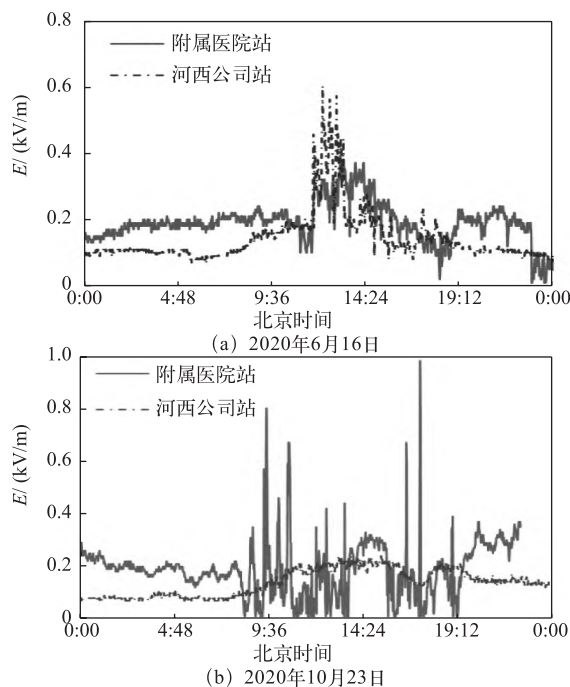


图5 两站晴天大气电场的观测记录

Fig. 5 Observation records of atmospheric electric field on fair-weather at two stations

3.2 雷暴时建筑物对大气电场观测的影响

从图6可以看出,当雷云过顶时,地面的内

蒙古气象局测站和相距2 036.78 m的医科大学附属医院90.40 m高楼屋面测站观测大气电场的变化趋势基本一致,楼顶测站测量数据的波动幅度明显高于地面的测量结果。雷暴来临时,楼顶观测的大气电场强度与地面测量大气电场的比值较晴天相比更不稳定,在大气电场幅值较大时表现得更为明显。主要原因是雷暴过程中大气电场除了会受到建筑物引起的电场畸变影响外,还会受到尖端物体放电效应的影响,当地面处电场强度值超过2 kV/m时,地表处具有小曲率半径的物体在强电场的作用下发生尖端放电现象,向空气中释放出大量正离子,这些离子的存在在一定程度上对地面电场起到抑制作用^[26],而这种效应会随着高度的增加迅速减小。图6a为2018年8月22日15:00—17:00的一次雷暴过程,该过程附属医院站所测电场的平均值为内蒙古气象局站的12.61倍;图6b为2019年8月9日16:00—18:00的一次雷暴过程,该过程附属医院站所测电场的平均值为内蒙古气象局站的7.05倍;综上所述,在雷暴过

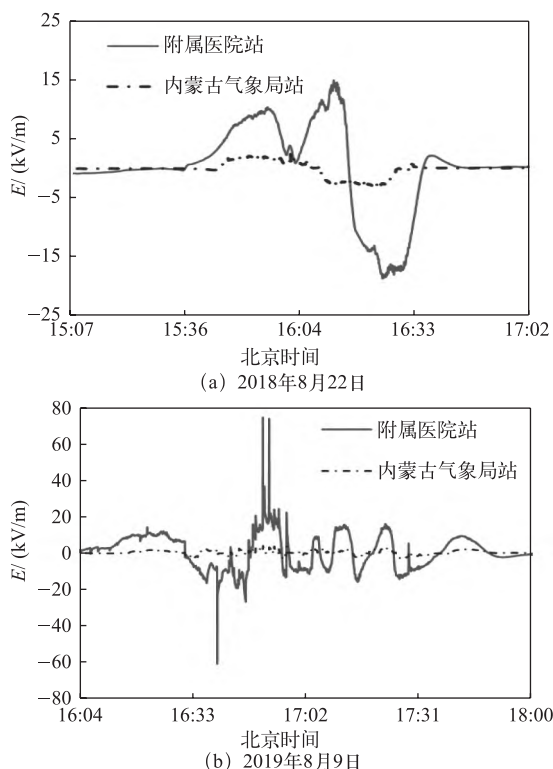


图6 两站雷暴大气电场的观测记录

Fig. 6 Observational records of atmospheric electric fields during thunderstorms at two stations

程中大气电场的观测结果受背景环境和测试位置的影响较为明显,对于不同测量位置及高度,所测电场幅度的比值的随机性较大。

3.3 建筑物对大气电场观测影响的数值模拟

3.3.1 模拟方法

利用有限差分方法计算地面建筑物对大气电场畸变的影响,可得到安装环境对大气电场仪测量结果造成影响的修正系数。大气中的静电场问题可归结为在给定电荷分布和边界条件下求解泊松方程的问题,对于二维大气电场满足的泊松方程计算公式为

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (1)$$

式中, φ 为电动势,单位为V; ρ 为自由电荷密度,单位为C/m³; ε 为介电常数,真空介电常数的数值为 $10^7/(4\pi c^2)$ 。

在没有自由电荷的区域, $\rho=0$,此时泊松方程简化为拉普拉斯方程,在直角坐标系下,拉普拉斯方程表示为

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0 \quad (2)$$

在求解二维拉普拉斯方程时,采用五点差分格式,假定在x和y方向上的步长均相等,且为l,则场域内得到的差分格式为

$$\left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \right)_{i,j} = \frac{\varphi_{i,j+1} - 2\varphi_{i,j} + \varphi_{i,j-1}}{l^2} \quad (3)$$

$$\left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \right)_{i,j} = \frac{\varphi_{i+1,j} - 2\varphi_{i,j} + \varphi_{i-1,j}}{l^2} \quad (4)$$

将式(3)、式(4)代入直角坐标系下的拉普拉斯方程得

$$\varphi_{i-1,j} + \varphi_{i,j-1} + \varphi_{i,j+1} + \varphi_{i+1,j} - 4\varphi_{i,j} = 0 \quad (5)$$

边界条件的设定:建筑物及地面满足Dirichlet(狄利克莱)边界条件,即此边界上的电位为常数;空气边界满足Neumann(诺埃曼)边界条件,此边界的法向电位梯度为常数。

差分方程组的求解采用超松弛迭代法,超松弛迭代在计算每一节点时,会代入之前计算得到的临近点的电动势新值,即

$$\varphi_{i,j}^{n+1} = \varphi_{i,j}^n + \frac{a}{4} (\varphi_{i-1,j}^{n+1} + \varphi_{i,j-1}^{n+1} + \varphi_{i,j+1}^n + \varphi_{i+1,j}^n - 4\varphi_{i,j}^n) \quad (6)$$

式中, a 为松弛因子, 取值范围一般在 $1 \sim 2$ 之间。

在上述计算的基础上, 空间电场强度值的计算式为

$$E = -\nabla \varphi \quad (7)$$

定义大气电场测量值 E 与地面大气电场的原始值 E_0 的比值为修正系数 k , 即

$$k = E/E_0 \quad (8)$$

3.3.2 模拟结果

设定建立的二维建筑物及其周围电场畸变模型以地面上方 $300 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 范围为研究区域, 空间分辨率为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 。模拟区域背景电场取呼和浩特市晴天大气电场的均值, 即 123.34 V/m , 大气电场方向垂直指向地面, 且近地面在雷暴过程下大气电场几乎是均匀分布的, 因此该模拟可以代表晴天或雷暴天气下建筑物对大气电场的影响情况。利用 MATLAB 软件模拟大气电场仪安装在不同高度的建筑物屋顶或安装在离建筑物不同距离的地面时建筑物对大气电场测量值的影响。

模拟大气电场仪安装在附属医院大楼屋顶时大气电场受建筑物高度的影响, 附属医院大楼高度为 90.40 m , 该建筑物长和宽分别为 71.00 m 和 20.25 m , 大气电场仪高度为 1.5 m , 大气电场仪安装在屋面离墙 1.5 m 的位置, 模拟结果如图 7a 所示。由于建筑物对大气电场的畸变效应, 模拟大气电场仪位置的电场强度为 675.71 V/m , 是背景电场的 5.48 倍。按照相同的方法, 选取建筑物高度取值范围为 $10 \sim 100 \text{ m}$ 时, 研究其高度对大气电场的畸变效应, 修正系数 k 与建筑物的高度 h 的拟合关系式为

$$k = 0.0478h + 1.2301 \quad (9)$$

可见大气电场仪测量值修正系数与建筑物高度呈正相关, 即建筑物越高, 修正系数值越大。

模拟大气电场仪安装在距内蒙古气象局预警大楼 41.68 m 处地面测场位置时建筑物对大气电场测量值的影响, 内蒙古气象局预警大楼长、宽和高分别为 100.00 m 、 23.00 m 和 33.60 m 。模拟结果如图 7b 所示。由于建筑物对其底部附近大气

电场的屏蔽效应, 模拟大气电场仪位置的电场强度为 111.76 V/m , 是背景电场的 0.91 倍。

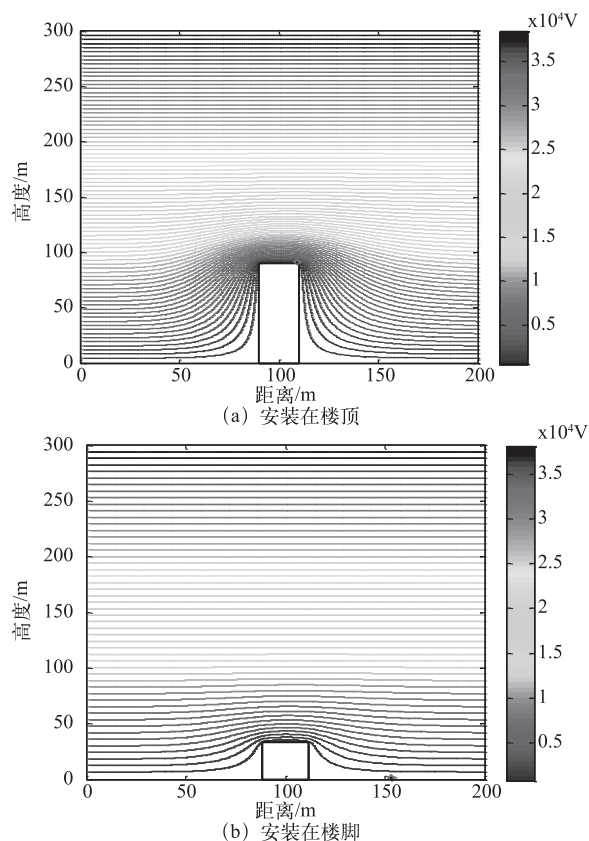


图 7 大气电场仪安装在建筑物不同位置时的模拟结果

Fig. 7 Simulation results of the atmospheric electric field instrument installed on the roof or beside the building

为了研究建筑物不同高度对其附近大气电场的影响距离, 定义地面影响距离 D 为地面上大气电场仪测量值的 $95\% E_0$ 时所在位置到建筑物的水平距离, 定义遮蔽仰角 θ 为建筑物地面影响距离 D 所在位置与建筑物顶部边沿连线的仰角, 选取建筑物不同高度取值时, 研究其高度对大气电场的地面影响距离和遮蔽仰角的影响规律。图 8 为建筑物不同高度下地面电场仪不同观测距离处的修正系数的模拟结果, 可见地面影响距离和遮蔽仰角均随建筑物高度的增加而增大, 随着建筑物高度的不断增加, 地面影响距离 D 的变化越来越小, D 处对应的遮蔽仰角 θ 不断增大, 建筑物高度 h 与遮蔽仰角 θ 拟合关系式为

$$\theta = 0.4693h + 14.6 \quad (10)$$

拟合的相关系数达 0.99 。

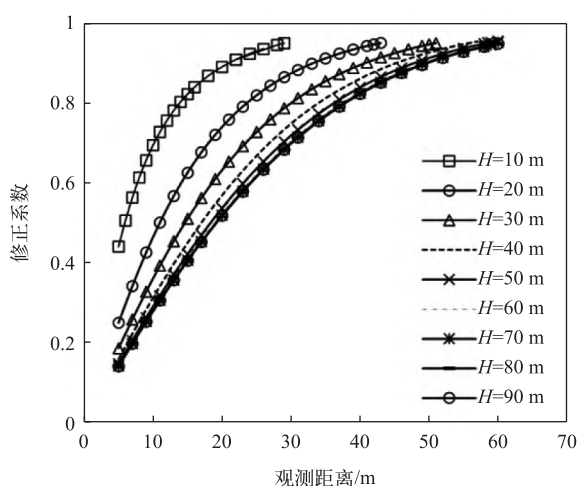


图8 建筑物不同高度下其影响距离修正系数模拟结果

Fig. 8 Simulation results of correction coefficient of influence distance for buildings with different heights

3.4 观测值与模拟值的比较

2018—2020年安装在附属医院大楼屋顶的大气电场仪观测的年平均值分别为1.35 kV/m、1.83 kV/m和1.59 kV/m，而安装在内蒙古气象局预警大楼下的大气电场仪三年的观测值为0.19 kV/m、0.27 kV/m和0.22 kV/m，两站点年度电场观测均值比值分别为7.11、6.78和7.23，如图9所示，两站大气电场模拟结果的比值为6.05倍，接近于两站3年的观测均值比值，比3年比值的平均值小14%左右。可见模拟的修正系数比较适合于该站长期观测大气电场均值的修正，比雷暴过程期修正值略小。

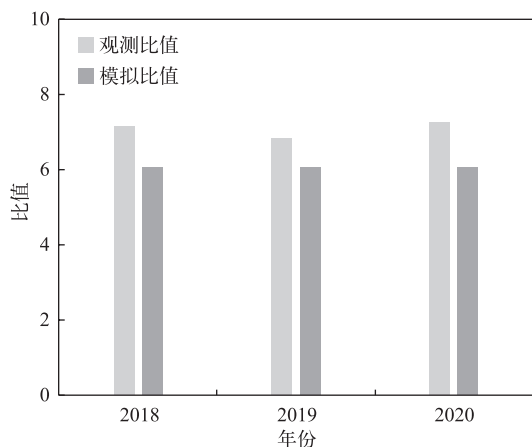


图9 两站点大气电场观测与模拟比值的对比

Fig. 9 Simulation results of correction coefficient of influence distance for buildings with different heights

4 结束语

呼和浩特地区晴天大气电场日变化呈双峰双谷型，2018—2020年三年晴天大气电场平均值为123.34 V/m，变化范围为97.31~155.65 V/m；其日变化是全球性普遍变化和地方性局地变化机理综合作用的结果，地方性局地变化的影响相对较弱一些。晴天大气电场具有明显的季节效应，冬春季晴天大气电场强度较高，夏秋季晴天大气电场强度较低且相差不大，这与呼和浩特市的大气污染季节变化规律密切相关。

对于不同观测位置及高度，晴天大气电场受建筑物高度影响产生的误差较为稳定，可视为系统误差；在雷暴过程中，大气电场的观测结果受背景环境和测试位置的影响显著且随机性较大。

当大气电场仪安装在不同高度的建筑物屋顶或安装在离建筑物不同距离的地面时，大气电场仪测量值修正系数与建筑物高度呈正相关，遮蔽仰角与建筑物高度呈正相关，而地面影响距离随着建筑物高度的不断增加，其增大幅度减小；模拟的修正系数比较适合于该站长期观测大气电场均值的修正。

参考文献

- [1] EARLE R W. The global electrical circuit: A review[J]. Atmospheric Research, 2008, 91(2): 140-152.
- [2] 王道洪, 郗秀书. 雷电与人工引雷[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000.
- [3] 孙俊德, 李志鹏, 赵洪升, 等. 卫星地面站雷电直击效应防护设计探讨[J]. 气象与环境科学, 2019, 42(2): 124-128.
- [4] 王智敏, 吕伟涛, 陈绿文, 等. 2011—2012年广州高建筑物雷电磁场特征统计[J]. 应用气象学报, 2015, 26(1): 87-94.
- [5] 殷启元, 黄惺惺. 广州珠江新城地区高建筑物雷电回击磁场分析[J]. 气象科技, 2018, 46(2): 423-428.
- [6] 欧阳双, 张其林, 李颖, 等. 地表湿度导致土壤

- 电参数变化对雷电电磁场传播的影响[J]. 气象科技, 2012, 40(6): 1018-1024.
- [7] 张华明, 张义军, 杨世刚, 等. 太原地区大气电场及其与大气污染物关系[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(9): 66-69, 95.
- [8] RUBINSTEIN M, MONTANDON E, IANOZ M. Analysis of multistation cloud lightning electric field pulses recorded with the Swiss LPATS network[C]// Paper presented at the 22nd Int. Conf. Lightning Prot, Budapest, Hungary, 1994.
- [9] BERMUDEZ J L, RACHIDI F, RUBINSTEIN M, et al. Far-field-current relationship based on the TL model for lightning return strokes to elevated strike objects[J]. IEEE Transactions Electromagn Compat, 2005, 47(1): 146-159.
- [10] YOSHIHIRO Baba, RAKOV V A. Electromagnetic field at the top of a tall building associated with nearby lightning return strokes[J]. IEEE Transactions Electromagn Compat, 2007, 49(3): 632-643.
- [11] 李芳, 付亚平, 郝孝智, 等. 山西省中北部地区近地面晴天大气电场特征及其与污染物的关系[J]. 沙漠与绿洲气象, 2018, 12(2): 50-56.
- [12] 杨超, 曾金全, 江慧远, 等. 台湾海峡西岸晴天近地面大气电场日变化及其影响因素[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2018(3): 143-149.
- [13] 张祎, 张卫斌, 王振会, 等. 欧亚大陆晴天大气电场变化特征统计分析[J]. 大气科学学报, 2015, 38(5): 703-709.
- [14] 徐斌, 贺华, 杨晓艳, 等. 西藏地区近地晴天大气电场气象效应和时间变化研究[J]. 物理学报, 2012, 61(17): 352-361.
- [15] 徐斌, 张颖, 贾焕玉, 等. 西藏羊八井地区近地晴天大气电场周期变化[J]. 高原气象, 2009, 28(2): 314-318.
- [16] 谭涌波, 张冬冬, 郭秀峰, 等. 轴对称建筑物形状对电场畸变影响的数值模拟[J]. 电波科学学报, 2014, 29(6): 1219-1224.
- [17] 郭秀峰, 谭涌波, 郭凤霞, 等. 建筑物尖端对大气电场畸变影响的数值计算[J]. 应用气象学报, 2013, 24(2): 189-196.
- [18] 周先春, 邹宇, 陈凯峰, 等. 建筑物不同参数对大气电场畸变效应的数值模拟研究[J]. 电瓷避雷器, 2017(4): 8-15.
- [19] 许强. 不同相对介电常数建筑物对大气电场畸变的研究[J]. 电瓷避雷器, 2017(3): 178-181, 186.
- [20] 陈加清, 刘君, 王迎强, 等. 建(构)筑物对大气电场测量影响的有限元分析[J]. 电子测量技术, 2013, 36(8): 45-48, 52.
- [21] 耿雪莹, 张其林, 刘明远. 地面建筑物(群)对雷暴云大气电场影响的模拟研究[J]. 气象科技, 2012, 40(5): 827-833.
- [22] 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.
- [23] 陈渭民. 雷电学原理[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [24] 徐丽娜, 李兴华, 冯震, 等. 呼和浩特市大气污染特征及气象影响因子研究[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(6): 150-157.
- [25] 杨仲江, 朱浩, 唐宏科, 等. 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, 2010, 33(6): 751-756.
- [26] 魏光辉, 万浩江, 潘晓东. 雷电放电数值模拟与主动防护[M]. 北京: 科学出版社, 2014.

作者简介

刘晓东(1981—), 男, 硕士, 正高级工程师, 研究方向为大气电学、雷电防护。

(收稿日期: 2022-09-30)