

李京校¹ 宋平健¹ 甘璐² 轩京平¹ 李如箭¹ 李银生¹

故宫博物院“6·23”雷击事件分析

摘要

2011年6月23日故宫博物院锡庆门、箭亭等5个场所遭雷击。利用该日常规天气资料、卫星资料、雷达资料、大气电场资料、闪电定位资料,分析了该次雷击事件的天气背景和雷击时段大气电场、闪电分布的相关特征;根据雷击现场调查,分析了故宫遭雷击的具体原因和防雷薄弱环节,针对存在的问题给出了整改建议;提出了采取小范围雷电监测预警措施,进行故宫精细化雷电监测预警,改善故宫防雷现状。相关结论可以为文物古建场所的雷电监测预警以及防雷措施的选择提供参考。

关键词

故宫;雷击事故;天气分析;防雷措施;监测预警

中图分类号 P427.321

文献标志码 A

0 引言

作为全国重点文物保护单位,北京故宫博物院(简称故宫博物院或故宫)被誉为世界五大宫之一,并被联合国科教文组织列为“世界文化遗产”,是国家重要的人文旅游资源和珍贵文化遗产,具有不可复原性。因此,故宫的安全保护显得尤为重要,防止自然灾害的破坏也是故宫的重要任务,防护雷电就是其中之一。故宫从明朝永乐十八年(1420年)建成到清朝溥仪退位(1911年)共491年历史,有记录的雷击事件约有34起,最严重的一次是明嘉靖三十六年(1557年)紫禁城3大殿(包括太和殿、中和殿、保和殿及午门外左右廊)因雷击火灾而焚毁^[1]。建国后故宫的防雷工作受到国家重视^[2-4],但仍有多次雷击记录,如2011年和2012年故宫3次遭雷击,所以很有必要研究故宫的雷击原因及相应对策。

目前对雷击事故分析的有对学校及风景区重大雷击事件天气背景的分析^[5-6],对储油罐雷击起火成因及防护的探讨^[7],对通信基站建设诱发雷电灾害事故调查^[8]和对高速公路雷击的研究^[9],以及对苏州紫金庵、扬州重宁寺藏经楼等文物保护单位的雷击灾害和雷电防护分析^[10-11]。2011年6月23日故宫修缮中心、箭亭、电管科办公室、锡庆门售票处、宝蕴楼后驻故宫武警院内这5个场所的建筑物及设备遭受雷击,造成文物建筑和设备的损坏,本文就此次雷击事故进行综合分析。首先利用该日气象相关资料,分析了这次雷暴天气背景、大气电场和闪电分布特征;接着根据雷击现场的调查情况,探讨了故宫遭雷击的原因和防雷的薄弱环节,针对存在的问题提出了防雷整改建议;最后讨论了建立故宫精细化雷电监测预警系统的可能性,以进一步改善故宫的防雷现状,提高故宫的雷电防护水平。

1 相关资料分析

2011年6月23日16:00(北京时,下同)左右,北京市城区出现强对流天气,故宫上空云层低且发生对地放电,16:00—17:00故宫院内发生雷击事故,据故宫修缮中心和电管科西办公室值班人员描述,这两场所的雷击事件发生在16:50左右,其他场所雷击具体时间不详。利用该日常规天气资料、卫星和雷达资料、大气电场资料、闪电定位资料,对这次雷灾事故天气背景以及雷击时间段大气电场和闪电特征详细分析如下。

收稿日期 2013-01-31

资助项目 北京市气象局气象科技研发专项(2013BMBKYZX17)

作者简介

李京校,男,硕士,主要从事雷电防护和监测预警研究,ljxzzu@126.com

1 北京市避雷装置安全检测中心,北京,100089

2 北京市气象科技服务中心,北京,100089

1.1 天气实况及大气环流特性分析

此次强对流天气过程降雨强度之大,在北京历史上是不多见的.降水时段主要集中在该日 16:00—19:00,此次降雨市区平均降水 72 mm,超过 120 km² 的区域降水量在 100 mm 以上.降雨区域从北京市西北往东南方向发展,当日 15:00 许降雨带到达北京市西北部的延庆县,17:00 石景山区模式口站出现最大雨强(128.9 mm/h),18:00 南郊观象台达到最大雨强(59 mm/h),其中天安门站和南长街站(2 个观测站距离故宫最近)16:00—17:00 的降水分别为 33.4 和 32.8 mm.

由图 1a 给出的 6 月 23 日 14 时 500 hPa 天气尺度环流背景场可看出:在暴雨发生前中高纬度贝加尔湖附近为一强大的高压,在高压前部的日本海北部经东北到华北北部为一横槽;高压发生倾斜迫使横槽南压,槽后冷空气的强烈补充南下使得北京西北向激发出闭和的小低压,并在偏西偏北气流的引导下逐步影响北京,强降雨中心正好与该低压中心吻合.同时,700 hPa 系统和 500 hPa 配合密切,在北京东北方向有一高压脊,渤海至辽东有偏东风,这种形势的出现有利于大量的不稳定能量和水汽在华北地区聚集.在低纬地区,西太平洋副热带高压稳定少动,从高空到地面均为该形势.副高西侧的偏南暖湿气流将不稳定能量和水汽大量地聚集在北京地区,与切变线的偏北气流在北京附近产生强烈的辐合.

分析 14:00 850 hPa 风场(图 1b)可以看到,近地面有 10~16 m/s 的低空急流,并随高压的北抬不断加强.由于地面有冷空气不断补充,低压不断加强,明显的切变线出现于河北中北部,温度场则表现为自西南向东北伸展的暖舌,北京处在暖舌的前部.另外,高低空具有很强风向切变,500 hPa 为西北风,850 hPa 为西南风.随着低涡呈现东西向,经向环流转为纬向环流,横槽不断南压,使得 700 hPa 冷槽叠加于 850 hPa 暖脊上,造成大范围不稳定.当 500 hPa 干冷空气随着横槽一次次南摆加强时,造成北京地区出现很强的雷阵雨.

1.2 卫星资料和雷达资料分析

卫星红外云图的云顶温度资料可以反映出对流系统的强度和发展趋势.分析雷击时段内北京地区的 FY-2E 静止卫星红外云图可知,此次雷击事件是由一个中尺度对流系统(MCS)的强烈发展造成的,对流单体于 6 月 23 日 10:00 左右出现,并逐渐东移发展.从该日 16:01 卫星红外云图(图 2a)上可发现,

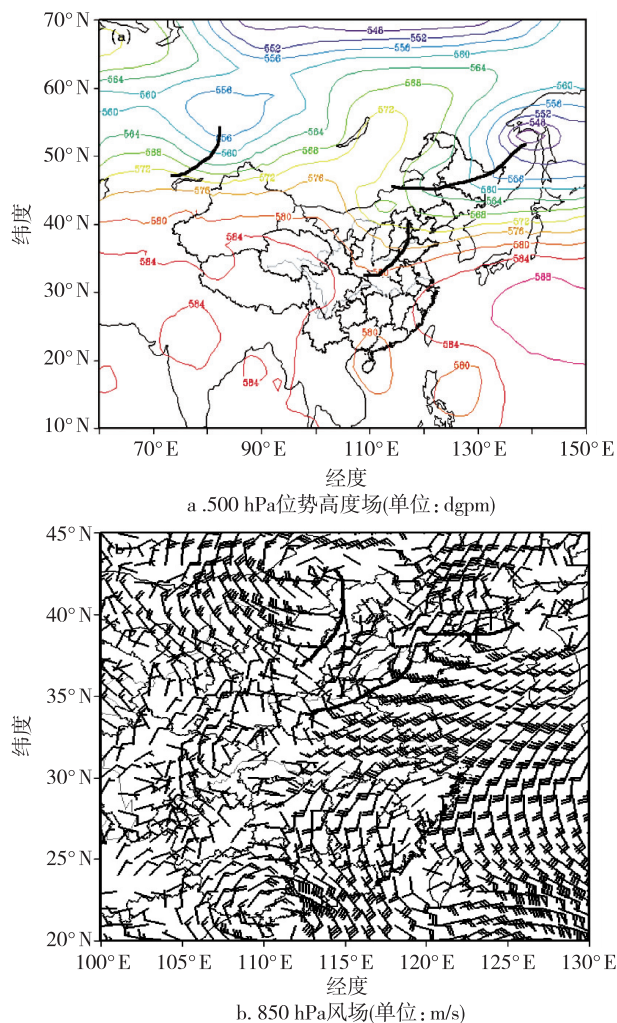


图 1 2011 年 6 月 23 日 14:00 天气形势

Fig. 1 Weather situation at 14:00 on June 23, 2011 at 500 hPa geopotential height and 850 hPa wind field

北京城区附近存在亮温为 -52°C 的强对流区,随着中尺度对流系统的进一步发展,对流云团进一步加强.从 16:31(接近雷击发生的时刻)卫星红外云图(图 2b)可看出,北京区域上空的对流上升云顶比较明显,雷击区附近云顶相对较平坦,由于高空横槽向东南移动影响北京,使得低层辐合加强,强对流云团在北京上空不断发展.强水汽累积区云团同时伴随着低层高能中心移动,表明云内整层含水量充沛,为雷电的发生创造了很好的水汽条件.

本文所用雷达资料来自北京市南郊观象台 CIN-RAD/SA 天气雷达(116.471°E , 39.808°N)观测资料.6 月 23 日 14:00—18:00,在有利于对流发展的环境条件下,北京西南部到东北部之间不断有中尺度对流单体自西南向东北方向活动,并展现出较复杂的空间结构.

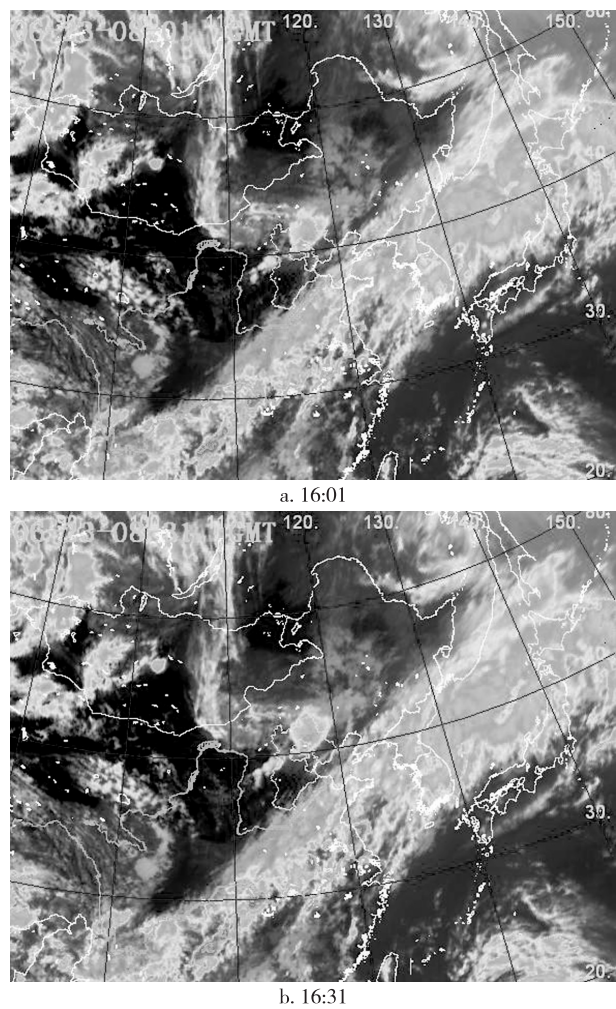


图2 6月23日FY-2E卫星红外云图(图中“○”位置为北京)
Fig. 2 The FY-2E IR Satellite cloud images at 16:01 and 16:31 on June 23, 2011, with circles representing Beijing area

从16:00—17:00雷达回波(图略)看,可以明显地看到东北—西南向的强回波东移南压的发展过程,与高空天气形势的演变基本一致.整个强回波在张家口东部形成后逐步向东南方向有组织地移动,由多个发展旺盛的 β 和 γ 中尺度对流单体组成,并在前进方向的右侧不断的激发新的对流单体.从16:48雷达回波(图3a)来看,强对流区向东移动逼近北京城区,而回波中心强度也增长到50 dBz.在影响北京北部地区的带状强回波南部,存在一强烈发展的中尺度对流辐合体.故宫所在的北京东城区存在成片的回波强度大于35 dBz的强对流区,最大回波强度超过45 dBz.沿北京城区东南—西北走向做雷达回波垂直剖面(剖面位置见图3a蓝色箭头),对其(图3b)进行分析可以发现对流单体最强回波达到55 dBz,该回波垂直厚度从2 km伸展到5 km,

35 dBz的回波伸展到8 km高度,最高回波高度约为11 km.由回波结构看,回波由西北往东南方向倾斜发展,强回波的水平空间尺度范围在100 km左右.强雷达回波移动、发展演变过程表明这次致灾暴雨、雷电是由强对流云团活动造成的.

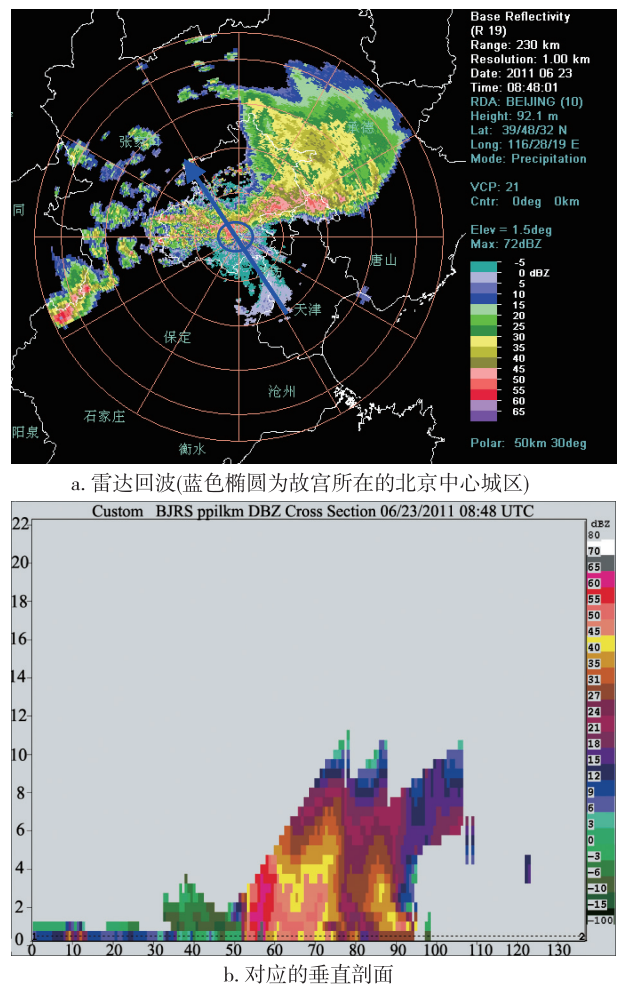


图3 6月23日16:48雷达回波及对应的垂直剖面
Fig. 3 Radar echo image and corresponding vertical profile at 16:48 on June 23, 2011, with the blue oval representing the main urban area of Beijing

1.3 大气电场资料分析

本文所使用的电场资料来自北京市气象局分别安装在海淀(116.28°E,39.98°N)、朝阳(116.48°E,39.95°N)、观象台(116.47°E,39.80°N,位于大兴区)的大气电场仪,这3个电场仪所在位置到故宫的距离分别为12.19、8.87和14.01 km,其空间分布如图4d和图5d所示.电场仪为法国阿古斯公司的StormDetec 猎雷者II,其探测范围为+650 kV/m,有效探测距离为8~15 km.

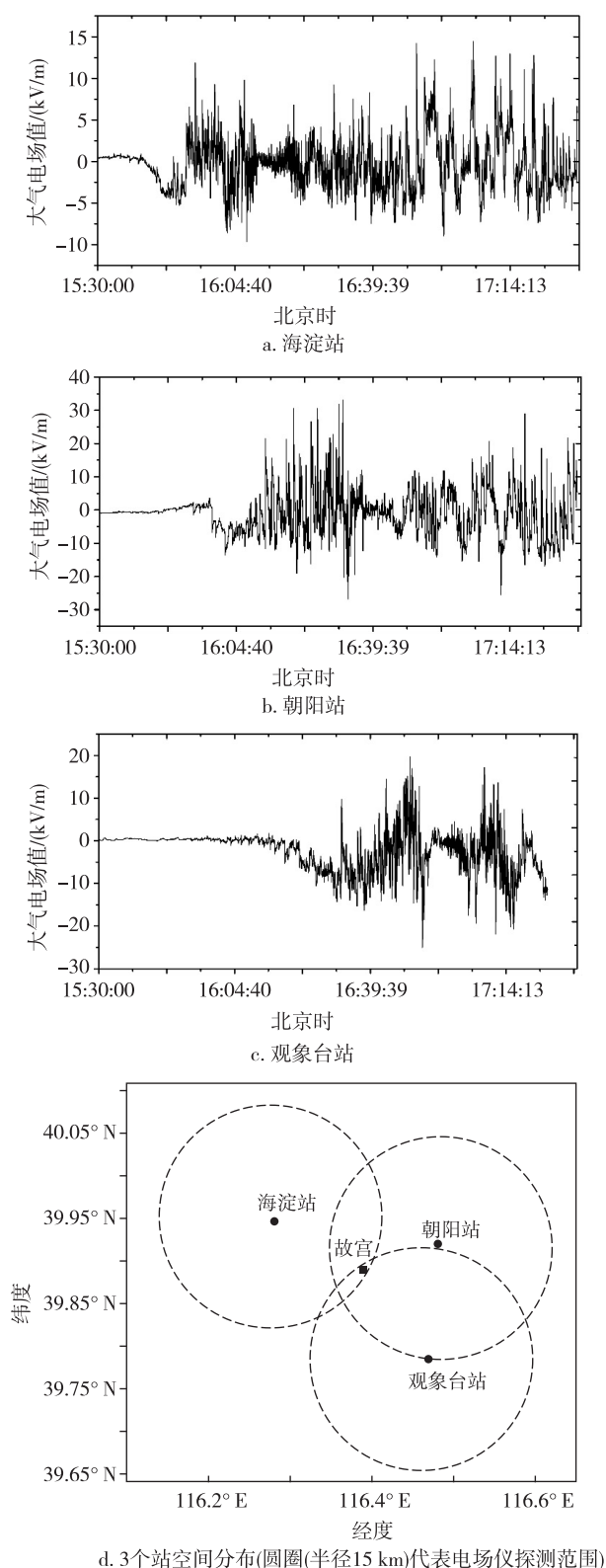


图4 6月23日15:30—17:30大气电场变化及3个站点分布
Fig. 4 Atmospheric electric field changes from 15:30 to 17:30 on June 23, 2011 at Haidian, Chaoyang, Guanxiangtai station and spatial distribution of the three stations, with circle representing detection range of electric field instrument

从图4可看到:海淀站观测到的大气电场值15:45出现抖动,16:00后抖动较大,电场值达到+8 kV/m,此后一直抖动变化,说明16:00之前已发生闪电;朝阳站16:00以前电场值约为0 kV/m,表明该区域尚未发生闪电,在16:00—16:30,大气电场值发生剧烈的抖动,其电场最大值达到30 kV/m,最小值为-25 kV/m,此时段该地区上空对流云电荷结构发生变化,云内发生放电,该地区有闪电发生,16:40—17:10抖动稍小,此后又变大;观象台站16:00—16:30开始出现抖动,预示初步有闪电,16:30—17:00抖动特别剧烈,说明其上空的对流云内有闪电发生。

闪电定位资料显示,海淀区15:52开始打雷,21 min后朝阳区开始打雷,16:50南郊观象台(位于大兴区)出现雷电,电场抖动开始时间早于闪电出现时间.海淀观测站电场值抖动开始最早,朝阳站次之,观象台电场值抖动发生最晚,说明这次雷暴从北京西北往东南方向发展,这和降水发展方向一致.另外,故宫修缮中心和电管科西办公室遭雷击时(约16:50),观象台大气电场值达到+20 kV/m,大气电场绝对值最大,海淀站正电场值15 kV/m,负电场值-10 kV/m,朝阳站为+10 kV/m。

1.4 闪电定位资料分析

利用电力部门闪电定位系统所监测的资料来分析雷击时段闪电相关特征.该定位系统采用高精度时差+方向综合定位,能探测每次地闪的位置、时间、极性、强度等信息,其闪电电流测量范围为15~800 kA,闪电定位精度约0~5 km,探测站间距在150~200 km时,探测效率大于90%。

分析北京市6月23日15:30—17:30每30 min闪电分布(图5):该日15:30—16:00闪电主要位于海淀、昌平和怀柔区域,主城区没有闪电;在16:00—16:30北京中心城区(包括东城区和西城区,故宫位于东城区)闪电非常密集,分布范围呈团簇状,此外北京东北部密云县闪电也较多;在16:30—17:00闪电分布呈带状,主要位于门头沟北部—石景山—主城区一带,中心城区闪电较为密集;在17:00—17:30闪电基本远离中心城区,移向北京东南部的通州,另一部分由门头沟北部移向中南部.从每10 min闪电次数分布(图6)来看:15:30—15:40闪电次数最多,这时主要位于北京西北部;其次为16:20—16:30,这时闪电多位于中心城区;17:00之后闪电变得很少.总体来说,该次天气过程闪电从西北往东南发展,逐

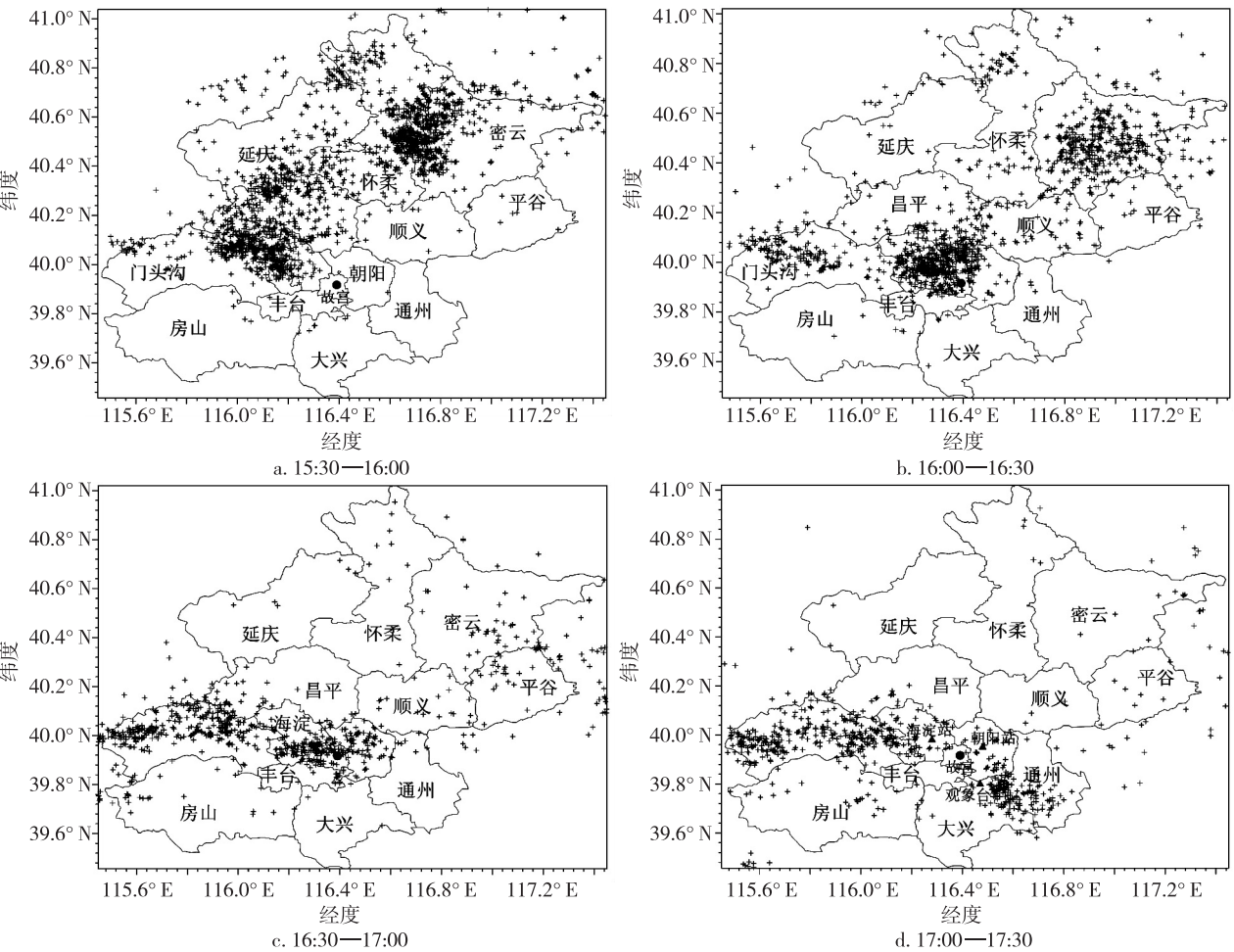


图5 北京地区6月23日15:30—17:30每30 min闪电分布(图中“●”为故宫位置)
Fig. 5 Lightning distribution per 30 min from 15:30 to 17:30 on June 23, 2011 in Beijing,
with black dots representing the location of the Palace Museum

渐减少.这和雷达回波探测到的强回波发展运动方向一致,和不同站大气电场值开始抖动先后顺序较为吻合.

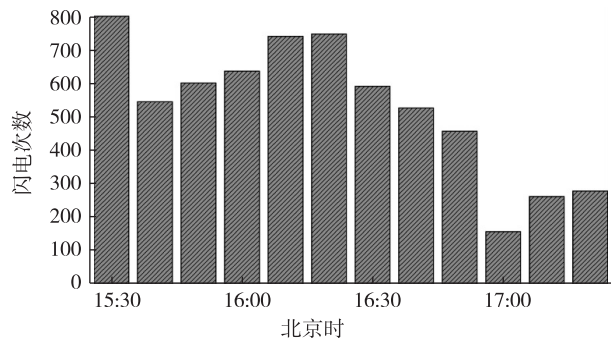


图6 北京市6月23日15:30—17:30每10 min闪电分布
Fig. 6 Lightning number distribution per 10 min from
15:30 to 17:30 on June 23, 2011 in Beijing

鉴于北京中心城区的闪电主要发生在16:00—17:00,所以统计该时间段故宫及周围闪电发生情况.保和殿(116.390 8°E, 39.916 9°N)基本位于故宫中心位置,所以选择保和殿为中心,其周围10 km内的闪电进行统计.图7a为该日16:00—17:00故宫保和殿10 km范围内闪电空间分布,该时段正闪5次,负闪251次,共发生闪电256次,平均4.25次/min以上,最大正闪电流强度114.7kA,最大负闪电流强度为-203.1 kA,故宫雷击正是发生在该时段内.表1给出了故宫保和殿附近方圆2.5 km范围内的闪电情况,该区域该时间段共有13次闪电,均为负闪,最大电流强度为-38 kA,最小为-8.4 kA,平均强度为-21.58 kA.其空间分布如图7b所示,图中数字和表1中序号一一对应,结合表1可知图7b每次闪电的具体时间和电流强度.

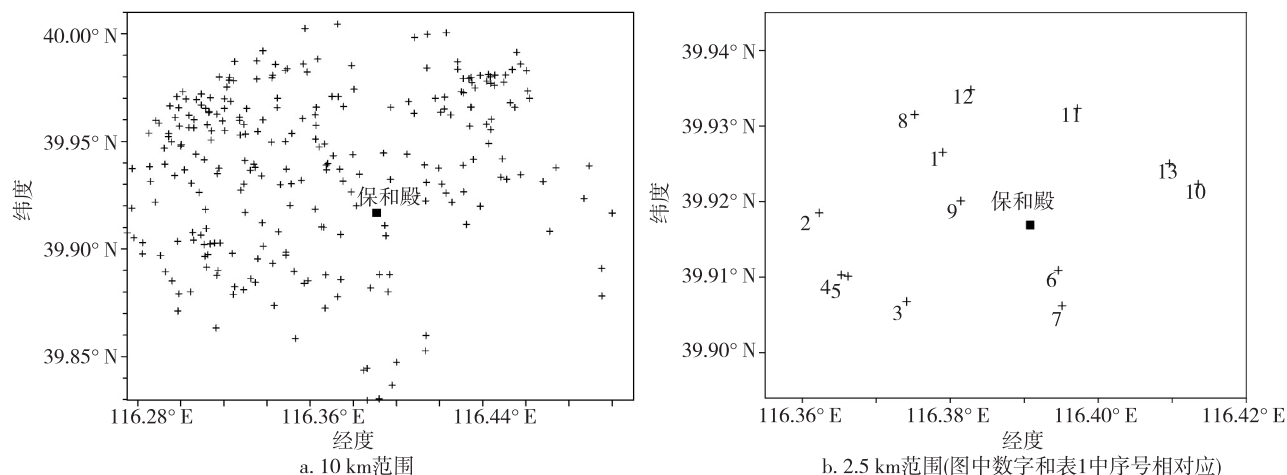


图7 6月23日16:00—17:00 故宫保和殿周围闪电分布

Fig. 7 Lightning distribution from 16:00 to 17:00 on June 23, 2011 within the scope of 10 km and 2.5 km around the Baohe palace. The numbers correspond to the serial numbers in Table 1

表1 6月23日16:00—17:00 故宫保和殿2.5 km范围内的闪电

Table 1 Lightning within 2.5km around Baohe palace at the Palace Museum from 16:00 to 17:00 on June 23, 2011

序号	北京时	纬度/°N	经度/°E	到保和殿 距离/km	闪电强度/ kA
1	16:15:57.155 6	39.926 5	116.379 0	1.467 001	-26.5
2	16:20:42.222 2	39.918 5	116.362 3	2.437 063	-28.5
3	16:21:50.770 7	39.906 8	116.374 1	1.813 847	-18.8
4	16:21:54.717 9	39.910 3	116.365 3	2.295 328	-17.2
5	16:21:54.751 7	39.910 1	116.366 2	2.230 178	-14.9
6	16:22:34.594 1	39.910 9	116.394 6	0.741 722	-8.4
7	16:29:15.484 7	39.906 2	116.395 1	1.245 028	-20.1
8	16:31:58.668 5	39.931 5	116.375 2	2.098 866	-23.7
9	16:34:14.167 6	39.920 1	116.381 4	0.877 070	-18.5
10	16:38:53.889 3	39.922 3	116.413 5	2.026 850	-34.6
11	16:44:20.959 3	39.932 3	116.397 2	1.797 267	-11.1
12	16:48:41.640 9	39.934 8	116.382 8	2.104 049	-20.3
13	16:56:34.921 6	39.925 0	116.409 6	1.838 914	-38.0

2 雷击原因分析及对策

2.1 雷击原因分析和整改建议

故宫“6·23”雷击事件中5个遭雷击的场所具体分布位置如图8所示.北京市避雷装置安全检测中心会同故宫古建筑部对雷击灾害现场进行的调查发现:故宫此次发生的雷击事件其雷击类型既有雷击建筑物的S1型(S1及下文的S2、D2、L2等见文献[12]),又有雷击发生在建筑物附近区域的S2型;损害类型包括了建筑物物理损坏的D2型及电涌导

致的电气电子系统功能损坏的D3型;损失类型包括故宫内配电、安防、通信等系统的损失L2,还包括了文化遗产损失L3和由此带来的经济损失L4.

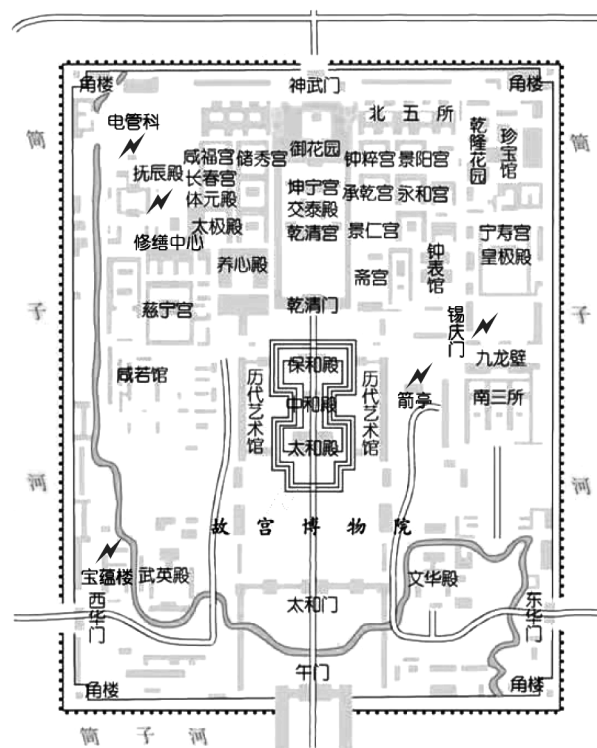


图8 故宫“6·23”遭雷击的5个场所示意

Fig. 8 The five sites(indicating with lightning symbols) stroke by lightning on June 23, 2011 at the Palace Museum

从遭雷击的地方来看,锡庆门、箭亭较矮遭雷击,而西侧较高的太和殿、保和殿未发现雷击损坏

现象.锡庆门、箭亭均未安装避雷带,太和殿、保和殿安装有避雷带,可能当时也在接闪,只因为有防直击雷措施,所以未遭破坏.如果当时在太和殿、保和殿引下线处安装雷击计数器,将会对雷击点的查找和雷击损坏的原因分析提供更多方便.王时煦^[4]认为高大恢弘的建筑,飞檐翘角的林立,加上发达的水系使土壤电阻率很低,以及北京地区雷暴系统主要移动发展路径(西山→八里庄→故宫→朝阳门→十八里店→宋家庄→百子湾→通州)经过故宫,这些原因综合在一起,是故宫易遭雷击的原因,但雷电具体击在哪个宫殿、哪个位置,即雷击点的选择,受很多因素的影响.故宫此次雷击事件的具体情况如表 2 所示,针对此次雷击原因分析及整改建议如表 3 所示.

虽然故宫在防雷方面近些年做了很多工作,但

是在其建筑物的防直击雷和电气电子系统的防雷电磁脉冲(LEMP)两方面均存在薄弱环节.部分建筑物没有安装直击雷防护装置或现有防雷装置不完善,不能对建筑物完全保护,如图 9 为故宫内某殿的垂脊下半部分未安装避雷带,不能有效地保护建筑物的檐角、吻兽及走兽.这些位置均为建筑物最突出的部位,甚至是故宫区域内的最高点,更是易遭受雷击的部位.故宫内的部分配电线路及监控、广播、通信等信息系统线缆由于受文物建筑保护要求的制约,多数为沿外墙体敷设,且线缆电磁屏蔽措施不完善,因此该区域发生雷云对地放电时容易出现设备遭损坏.

鉴于故宫的社会地位及文物建筑的结构特点,故宫的雷电防护应全面规划、系统防护、综合治理.

表 2 故宫雷击具体情况
Table 2 The detailed conditions of lightning stroke at the Palace Museum

序号	雷击场所	雷击具体情况
1	修缮中心	该日下午 16:50 时许遭雷击,修缮中心屋脊西端瓦件被击破脱落,因当时办公室电源已拉闸断电,配电盘也按规范要求加装了浪涌保护器,因此未造成用电设备损坏,但修缮中心办公区内多处网络交换机、监控摄像头等信息设备遭损坏.
2	西华门宝蕴楼后武警部队院内	驻故宫武警部队院内 2 台大型监视器、2 台电视机、3 台摄像机、1 台 DVD 机及网络信息端口遭损坏.
3	电管科西办公室	该日下午 16:50 时许,电管科办公室 6 台电脑和 1 台空调损坏.据事发现场人员描述,雷击时见空调室内断路器冒出火球;使用计算机的工作人员当时身体有电流通过的麻木感觉.
4	锡庆门售票处	锡庆门售票处建筑遭雷击,造成建筑物屋顶兽头损坏.雷击时因室内已拉闸断电,没有造成室内用电设备损坏.
5	箭亭	当时并没有注意到其遭雷击,后来工作人员发现箭亭正脊、房檐遭破坏,脊上走兽和房檐古瓦脱落才发现遭雷击.

表 3 故宫雷击原因分析及整改建议
Table 3 Analysis of lightning stroke causes and suggestions for lightning protection in the Palace Museum

序号	雷击原因分析	整改建议
1	修缮中心雷击原因为该区域内所有建筑物均无直击雷防护措施,木工房工作室为钢架结构且高于区域内其他建筑,虽然钢架作了接地处理,但屋顶未设置接闪器,直击雷落在屋脊上造成建筑物损坏.同时雷电感应在办公区域内的信息系统中产生过电压,各类架空线缆也未采取屏蔽措施,因此造成多处信息设备损坏.	依据国家标准 GB50057—2010 ^[13] 第 4.3.1 条、北京市地方标准 DB11/741—2010 ^[14] 第 7.1.1 条的规定:文物建筑应加装直击雷防护装置,接地阻值 $\leq 10\ \Omega$;信息设备前加装信号浪涌保护器.架空线缆按 GB50057—2010 第 4.2.3 条规定,应改为埋地引入(出),埋地长度应符合国家标准 GB50343—2004 ^[12] 第 5.3.2 条规定.
2	宝蕴楼后武警院内总配电及各分配电盘和用电设备处均未按相关规范要求加装浪涌保护器,总配电盘为 TN-C 方式供电,无 PE 线,监控室内监控台和网络机柜均未接地,各类金属线缆未采取屏蔽措施,遭雷电波入侵及雷电电磁脉冲破坏.	依据 GB50057—2010 的规定:总配电及各分配电盘和用电设备处应按要求加装适配的浪涌保护器,其配电应改为 TN-S 或 TN-C-S 系统;金属线缆采取屏蔽措施,监控室内设备做好接地及等电位连接,并确保接地阻值 $\leq 10\ \Omega$.
3	电管科西办公室雷击原因为建筑物无直击雷防护,配电分盘及用电设备处均未按防雷规范要求安装浪涌保护器,雷电波入侵电源系统,造成用电设备损坏.	依据 GB50057—2010 第 4.3.1 条的规定安装避雷带,配电分盘及用电设备处均应按防雷规范要求安装适配的浪涌保护器.
4	锡庆门售票处雷击是由于建筑无直击雷防护,且室内用电设备较多,增加了遭雷电袭击的概率,未采取完善的综合防雷措施.	按照 GB50057—2010 第 4.3.1 条、DB11/741—2010 第 7.1.1 条的规定完善直击雷防护措施,并完善线缆屏蔽、设备等电位连接和接地,电源及信息线路的浪涌保护等.
5	箭亭雷击原因为建筑正脊、斜脊和屋檐未按防雷规范要求安装避雷带,从而遭直接雷击.	按照 GB50057—2010 第 4.3.1 条规定:正脊、斜脊和屋檐等安装避雷带,完善直击雷防护措施.



图9 故宫某殿的垂脊下半部分未安装避雷带
(图中方框位置)

Fig. 9 Area(in blue box) without lightning
protection in the Palace Museum

首先,雷电防护应严格执行国家、地方相关技术标准及要求,规范防雷设计、施工中各个环节;其次,对古建筑的直击雷防护和电气电子系统的雷电电磁脉冲防护统筹规划、综合防护,同时做好针对游客的雷电接触电压及跨步电压的防护;再次,完善防雷装置的检测、维护与管理,对检测中发现的防雷隐患及时排除,将雷击可能性降到最低。

2.2 故宫精细化雷电预警和监测

故宫锡庆门虽然未安装浪涌保护器,但是雷电来临时室外电闸已断开,雷电流没有进入,室内设备未遭破坏。可以认为,如果能在雷电到来之前发出预警信号,及时采取规避措施,可中断工作的设备暂停工作,疏散游人或撤离到安全地方,可减少或避免雷击带来的破坏或损失,能降低雷击风险^[15]。为实现雷电预警,可考虑建立雷电预警系统,如安装小范围大气电场仪,通过积累故宫及附近的大气电场观测资料,得到该地区雷电预警针对性指标,进而实现雷电预警。此外在故宫安装实时气象信息接收端口,及时接收察看由气象部门发出的故宫区域小尺度天气资料,特别是雷电预警信息、雷电发展移动的趋势等。结合故宫内的大气电场仪的预警,能增强雷电预警准确性和针对性,实现故宫精细化雷电预警。丁德平等^[16]利用大气电场仪开展北京地区雷电预警研究,结果显示可提前 16 min 预警(为三级预警到雷电发生的时间),准确率为 90.6%。

箭亭这次雷击事故当时未能及时发现,1987 年 8 月 24 日故宫雷击事故也是未及时发现。1987 年的雷击发生在夜晚 11 点多,故宫巡逻人员闻到有木材燃烧味,同时隐约看到有亮光,发现是雷击引起古建

筑起火,这次雷击起火损失了 20 多万元。如果当时有闪电监测设备,可以更及时发现雷击事故从而采取灭火措施。故宫面积约 72 万 m^2 ,房间约 9 000 间,这么多房间当遭雷击时未必能及时发现,逐个排查费时费力,所以应安装闪电监测设备。除了使用闪电定位仪监测闪电具体位置外,还可以在引下线处安装雷击计数器,雷击计数资料自动传输到故宫管理平台,便于管理人员及时发现雷击位置。当遭雷电感应袭击时,引下线处的雷击计数器很难显示出来,还需闪电定位仪判断故宫及附近是否有闪电。

精细化预警可及时预警到故宫是否会发生雷电,是否需要采取规避措施,减少或避免雷击事故发生,通过大气电场仪和实时气象信息接收端口二者结合可实现精细化预警。精细化监测可及时发现故宫内雷电发生的具体位置,避免发生雷击却未能及时发现,特别是对于雷击古建筑起火情况,通过闪电定位仪和雷击计数器合理的结合可实现精细化监测。

3 小结

引起故宫雷击的这次强雷暴天气是由中尺度对流系统(MCS)强烈发展造成的,该系统是在有利的强对流天气大尺度气象背景下产生的,在天气形势场、卫星云图、雷达回波图上都有明显的特征,整个系统从西北往东南方向发展移动。从卫星红外云图上可看到此次对流系统的云顶亮温可达 $-52\text{ }^{\circ}\text{C}$,故宫附近出现大于 45 dBz 的雷达回波,故宫附近气象观测站出现超过 32 mm/h 的强降雨。从大气电场资料上看故宫附近的 3 个站均出现绝对值大于 10 kV/m 的抖动,电场抖动开始时间早于闪电出现时间。从闪电定位仪监测得到故宫周围闪电很密集,距故宫中心保和殿 2.5 km 范围内出现 13 次闪电。

故宫此次雷击事件既有直接雷击,也有雷电感应及雷电波侵入导致的设备损坏。对于故宫的防雷,各建筑物应建设完善的外部防雷装置,加强对直接雷击的防护。同时对各种电气电子系统的线缆应埋地或穿金属管敷设,在电子设备集中的机房等场所采取良好的接地及等电位连接措施,相应位置加装适配的电源或信号浪涌保护器。此外,建立故宫雷电精细化预警和监测系统,通过安装大气电场仪和实时气象信息接收端口预警闪电,预警到闪电后采取合理的规避措施;通过闪电定位仪和雷击计数器精细化监测闪电,及时发现雷击位置,采取应急措施。

参考文献

References

- [1] 马宏达.故宫防雷调查兼论中国古建防雷的特点[C] //中国科学院电工研究所论文报告集,1989,18: 118-122
MA Hongda. An investigation on the lightning protection for the Forbidden City also as an essay about the specialty of the lightning protection for the ancient Chinese building[C] // Papers of Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, 1989, 18: 118-122
- [2] 安卫华,魏乃永,张萌.故宫博物院太和殿等古建筑的防雷改造设计体会[J].电气应用,2011,30(22): 50-53
AN Weihua, WEI Naiyong, ZHANG Meng. Renovation design of lightning protection in Taihe Hall of the Palace Museum and other ancient buildings[J]. Electrotechnical Application, 2011, 30(22): 50-53
- [3] 白丽娟.故宫博物院古建筑防雷保护工作的回顾[J].故宫博物院院刊,2005(5):344-367
BAI Lijuan. The practice of the lightning proofing of ancient buildings in the Gugong (Palace Museum)[J]. Palace Museum Journal, 2005(5): 344-367
- [4] 王时煦.再论古建筑物与故宫博物院的防雷[C] //中国紫禁城学会论文集,1996:340-348
WANG Shixu. Discusses again on lightning protection of ancient buildings and the Palace Museum[C] // Proceedings of the Forbidden City Society, 1996: 340-348
- [5] 孙军,周兵,宗志平,等.重庆开县雷击事件天气背景分析[J].气象,2010,36(3):70-76
SUN Jun, ZHOU Bing, ZONG Zhipin, et al. Analysis of a lightning stroke event at Kaixian, Chongqing[J]. Meteorological Monthly, 2010, 36(3): 70-76
- [6] 许爱华,马中元,郭艳.“7.17”庐山雷击事件分析[J].气象,2004,30(6):35-39
XU Aihua, MA Zhongyuan, GUO Yan. Analysis of a lightning disaster event on July 17, 2002 in Lushan Mountain[J]. Meteorological Monthly, 2004, 30(6): 35-39
- [7] 冯民学,罗慧,焦雪.闪电定位资料对仪征储油罐雷灾成因的分析应用[J].气象科学,2007,27(6):679-684
FENG Minxue, LUO Hui, JIAO Xue. An approach to the cause of forming the lightning strike disaster of oil tanks in Yizheng according to the lightning flash positioning data and an application[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2007, 27(6): 679-684
- [8] 李家启.通信基站建设诱发雷电灾害事故分析[J].气象科技,2012,40(4):651-655
LI Jiaqi. Accident analysis of lightning disasters induced by communication base station construction[J]. Meteorology Science & Technology, 2012, 40(4): 651-655
- [9] 程琳,裴晓芳,沈刚,等.江苏高速公路收费站一次雷击事故分析[J].气象科学,2011,31(增刊1):120-125
CHENG Lin, PEI Xiaofang, SHEN Gang, et al. An analysis on a lightning accident at a Jiangsu highway toll station[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2011, 31(sup1): 120-125
- [10] 姜启成,张其林,姜有山,等.苏州紫金庵雷击原因分析及古建筑防雷技术[J].气象科技,2010,38(6): 825-831
JIANG Qicheng, ZHANG Qilin, JIANG Youshan, et al. Lightning protection of ancient buildings and causal analysis of a lightning accident[J]. Meteorological Science & Technology, 2010, 38(6): 825-831
- [11] 杨仲江,李玉照,姜长稷.从扬州重宁寺藏经楼雷击事故看古建筑防雷[J].建筑电气,2009,28(10): 536-539
YANG Zhongjiang, LI Yuzhao, JIANG Changji. Lightning protection of ancient building by analyzing lightning accidents of depositary of buddhist sutra Chongning Temple in Yangzhou city[J]. Building Electricity, 2009, 28(10): 536-539
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB50343—2012建筑物电子信息系统防雷技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2012
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB50343—2012 Technical code for protection of building electronic information system against lightning[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB50057—2010建筑物防雷设计规范[S].北京:中国计划出版社,2010
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB50057—2010 Design code for protection of structures against lightning[S]. Beijing: China Planning Press, 2010
- [14] 北京市文物局,北京市气象局.DB11/741—2010文物建筑雷电防护技术规范[S].2010
Beijing Municipal Administration of Cultural Heritage, Beijing Meteorological Bureau. DB11/741—2010 Technical specifications for lightning protection of historical and cultural relics[S]. 2010
- [15] 李京校,扈海波,樊荣,等.雷电监测预警对雷击风险评估的影响分析[J].气象科学,2013,33(6):678-684
LI Jingxiao, HU Haibo, FAN Rong, et al. Analysis of impact of lightning monitoring and warning on lightning risk assessment[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2013, 33(6): 678-684
- [16] 丁德平,李迅,邓长菊,等.北京地区大气电场的特征及雷电预警中的订正分析[J].沙漠与绿洲气象,2012,6(4):68-73
DING Deping, LI Xun, DENG Changju, et al. Characteristics of atmospheric electric field and their application to lightning warning in Beijing[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2012, 6(4): 68-73

Analysis of lightning stroke event on June 23, 2011 in the Palace Museum

LI Jingxiao¹ SONG Pingjian¹ GAN Lu² XUAN Jingping¹ LI Rujian¹ LI Yinsheng¹

1 Beijing Lightning Devices Security Test Center, Beijing 100089

2 Beijing Meteorological Information Service Centre, Beijing 100089

Abstract On June 23, 2011, five sites including Xiqing Gate and the Arrow Station in the Palace Museum were struck by lightning. The weather condition and the characteristics of atmospheric electric field and lightning distribution during the lightning stroke period are analyzed in detail utilizing the routine weather data, satellite data, radar echo data, the atmospheric electric field data as well as the lightning data. Then, on the basis of the field investigation of lightning stroke in each place, the specific causes of lightning stroke and the weak link of lightning protection are analyzed. Aiming at these existent problems, the improvement suggestions are given. Especially, the small scale lightning monitoring and early warning measures are put forward. Thus the precise monitoring and warning measures will be implemented and the lightning protection of the Palace Museum will be improved. Some references are provided for lightning monitoring & warning and the selection of lightning protection measures in the cultural relics sites.

Key words Palace Museum; lightning stroke accident; weather analysis; lightning protection measures; monitoring and warning