

武当山景区雷电环境及古建筑防雷

段振中¹ 朱传林¹ 刘国臻²

(1. 湖北省防雷中心 湖北 武汉 430074; 2. 湖北省十堰市气象局 湖北 十堰 442000)

摘 要: 武当山是世界文化与自然遗产,因而武当山风景区的雷电防护尤为重要。截取风景区的地闪数据,以 1 km² 范围为基本单元,得到各单元内 2008 - 01 - 01—2011 - 12 - 31 期间的全部地闪频次、极性、强度等参数,分析了武当山的雷电环境及地理环境对雷电活动的影响。研究表明:雷击大地密度整体上随高度表现出明显的增长趋势,电流强度平均值与高度大致呈现反向分布趋势。通过研究致灾环境的基本规律,进而有针对性的制定出科学合理的防护措施,对古建筑的防雷具有重要意义。

关键词: 武当山;雷电环境;古建筑;防雷

中图分类号: P427.3 ,P446

文献标志码: A

雷电灾害是一种严重的自然灾害,它不仅威胁人身安全和财产安全,还会造成不可复原的文化遗产损失。武当山不仅拥有奇特绚丽的自然景观,而且拥有丰富多彩的人文景观。武当山无与伦比的美,是自然美与人文美高度和谐的统一,因此被誉为“亘古无双胜境,天下第一仙山”。武当山是联合国公布的世界文化遗产地之一,是中国国家重点风景名胜区,同时也是道教名山和武当拳的发源地。作为世界文化与自然遗产,其珍贵程度不言而喻。因此加强对武当山的雷电灾害风险分析,采取有效措施降低风险,对保障风景区游客人身安全,保护古建筑文化遗产可持续性具有重要意义。本文利用闪电定位系统资料并结合 Google 地理信息数据,对武当山风景区雷电特征进行分析,所获得的闪电活动特征闪电参数在雷电防护、雷击风险评估等领域具有一定的应用价值。

1 资料来源与处理方法

湖北省闪电监测定位系统是从中国科学院空间

科学与应用研究中心引进的,2006 年 1 月试运行。该系统主要由 ADTD 雷击探测仪、中心数据处理站、图形显示终端构成。其中,有 13 个 ADTD 雷击探测仪分布在湖北省不同地方。

该系统的中心数据处理站设在武汉,其主要功能是将 13 个闪电定位仪(分别分布在武汉、咸宁、天门、麻城、随州、十堰、巴东、襄樊、恩施、荆门、荆州、宜昌、神农架)接收到的闪电回击数据进行实时计算处理,给出每个闪电回击的准确位置、强度等参数,由其图形显示终端设备随时存储、显示、打印及拷贝成图;中心数据处理站也可经通信系统对各个闪电定位仪进行参数设置、调出闪电定位仪工作状态等;该闪电监测定位系统采用的是时差测向混合法(IMPACT),系统能够探测的地闪参数有经度、纬度、闪电强度(包含极性)、陡度、误差及定位方式,闪电位置和发生时间等参数。湖北省大部分地区的探测效率在 90% 以上,武当山风景区的探测效率可达 95% 以上^[1],如图 1 所示。

武当山风景区的主要范围为 111.0017° ~ 111.1049°E,32.3916° ~ 32.5277°N。根据湖北省气

收稿日期(Received date): 2012 - 09 - 08; 改回日期(Accepted): 2012 - 12 - 12。

基金项目(Foundation item): 湖北省气象局科技发展基金项目(2012Q02)。[Technology Development Fund of Meteorological Bureau of Hubei Province(2012Q02).]

作者简介(Biography): 段振中 1958 - ,男(汉),辽宁锦州人,学士,工程师,主要从事雷电防护研究。[Duan Zhenzhong(1958 -), male, Han nationality, born in Jinzhou, Liaoning province, bachelor's degree, engineer, work on lightning protection.] E-mail: duanzz1058@163.com



图1 湖北省闪电探测效率示意图

Fig. 1 The lightning detection efficiency of Hubei province

象局提供的 2008 - 01 - 01—2011 - 12 - 31 的闪电定位资料 (资料由 Oracle 数据库对闪电定位原始数据处理得到 , 主要包括闪电发生的时间、闪电的经纬度、电流强度及陡度等信息) 。对原始数据进行筛选 , 将武当山景区以外的数据予以剔除 , 并且利用 SQL 语句科学地统计出各个月闪电总数与闪电强度、0 ~ 24 h 的闪电总数等^[2]。

2 武当山风景区雷电活动时空分布

2.1 闪电频数的分布

经统计发现 , 2008 年至 2011 年武当山风景区共发生闪电 1 480 次 , 图 2 是各个月的平均闪电频数。由图看出: 总闪的年变化呈典型的单峰分布特征 , 闪电的高发期集中在 6—8 月 , 占全年闪电总数的 90% 以上 , 平均每月发生 119 次左右 , 其中以 8 月最为突出 , 可达 228 次 , 其他各月闪电数量骤减 , 1—3 月、10—12 月均无闪电发生; 负闪的年分布特征与总闪基本相同; 正闪年变化呈多峰分布 , 平均每年发生正闪 6 次 , 约占总闪的 1.62% , 4、7 两个月正闪数量较多 , 各出现了一次峰值 , 其余各月 (5 月、6 月和 8 月) 正闪数量都较少。从季节变化的角度来看 , 春夏两季的闪电占全年总闪电的 99.86% , 秋冬季节几乎无闪电发生。

图 3 为闪频数的日变化分布特征 , 由图可以看出: 闪电多发生于 14—18 时及 0 时 , 平均每小时发生 48 次闪电 , 其中 16 时出现最大值 , 其他各月闪电频数较低 , 10 时、11 时最少。因此 , 14—18 时是风

景区雷电防护的关键时段。

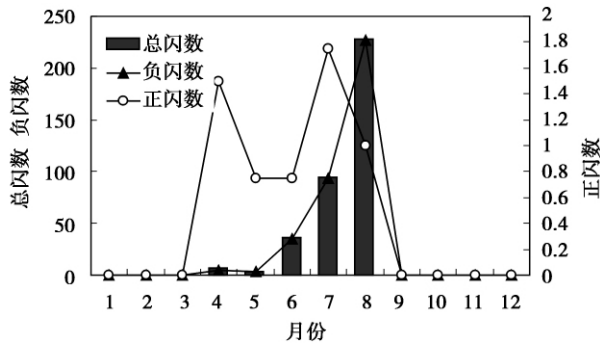


图2 闪电频数的年分布

Fig. 2 The annual distribution of lightning frequency

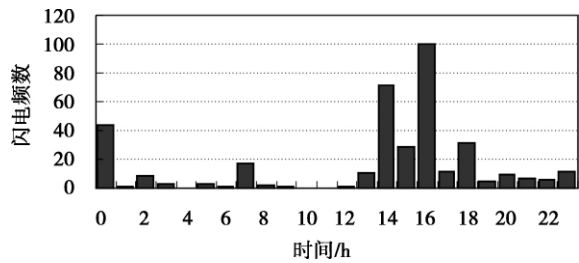


图3 闪电频数的日变化

Fig. 3 The daily distribution of lightning frequency

2.2 闪电强度时间分布规律

取逐时的闪电强度均值为样本个例 , 分别统计 2008 - 01 - 01—2011 - 12 - 31 期间各月的所有闪电强度样本 , 制成方框 - 端须图 , 如图 4。假定闪电强度数值呈 (准) 正态分布 , 在每个长方框的上下

底,分别表示(准)正态分布两端占样本总数 25 % 个例的闪电强度数值(平均,下同);方框中的黑线(该线不一定位于长方框正中间)表示占样本总数 50 % 个例的闪电强度数值;从长方框上下边延伸出之粗黑线的端点,分别表示占样本总数 5 % 个例的闪电强度数值,‘×’表示占样本总数 1% 个例的闪电强度数值,最上端和最下端的短横线‘—’分别表示该月份所有闪电强度样本的最大值和最小值,方框中的‘□’表示样本均值^[3-4]。由图 4 可以看出:

1. 各月可能出现强闪电(>100 kA)的概率极小,只有 5 月、7 月、8 月出现了 >100 kA 强闪电;
2. 各月闪电强度跨度范围不大,98% 的闪电介于 $10 \sim 100$ kA 间,且各月均有 1% 的闪电 >100 kA;

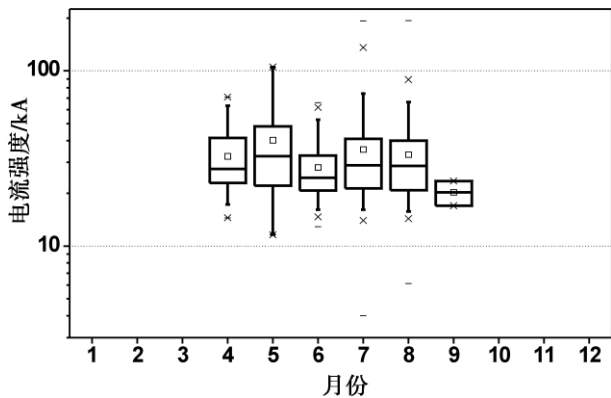


图 4 总闪电强度年分布特征

Fig. 4 The distribution characteristics of total lightning intensity

3. 各月平均闪电强度在 $20 \sim 40$ kA 间,并且各月(除 9 月外)半数以上的样本其强度在平均闪电强度以下,5 月平均闪电强度可达 40 kA,其余各月闪电强度均在 30 kA 以下。

综上所述:由闪电强度的分布特征可以看出,与闪电频数不同,闪电强度随时间的分布无明显规律,一年中各月各时次均有可能发生强闪电。但由于闪电集中发生在 6—8 月的 14—18 时,因此,该时段内强闪电出现频数很高。

2.3 闪电频数和强度的空间分布

统计 2008-01-01—2011-12-31 期间的闪电定位资料,经过插值分别绘制武当山景区的雷击大地密度图和雷击强度图^[5]。如图 5、6 所示,图中的小圆圈为景点所在地。

由图 5 可以看出: 32.46°N 以北的大部分区域平均雷击大地密度值在 2.4 次/($\text{km}^2 \cdot \text{a}$) 以下,平均雷击大地密度较小的景点有玉虚宫、元和观及五龙宫等; 32.4°N 附近区域平均雷击大地密度均在 5.2 次/($\text{km}^2 \cdot \text{a}$) 以上,密度较大的景点有紫霄宫、南岩宫、金殿,其中以金殿的密度值最大,最大可达 5.2 次/($\text{km}^2 \cdot \text{a}$) 以上。景区雷击大地密度分布并不均匀,整体呈现“南高北低”的趋势。由图 6 可以得出: 32.42°N 以北的大部分区域,其对应的雷电流强度在 27 kA 以上,并且分别在玉虚宫北部、紫霄宫北部出现了 2 个电流极大值中心,其最大可达 39 kA 以上。在金殿附近雷电流强度在 27 kA 以下,平均电流强度整体呈现“北强南弱”的趋势。

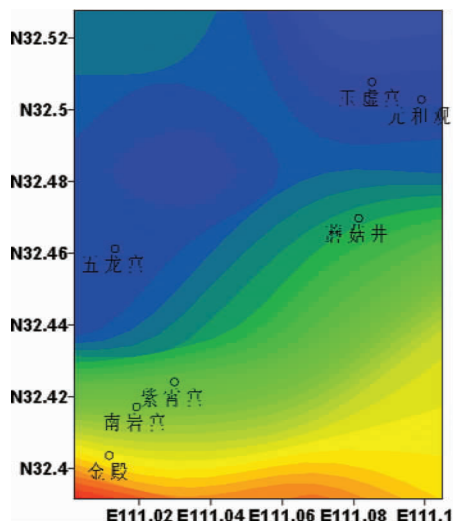


图 5 雷击大地密度分布

Fig. 5 The Lightning density distribution

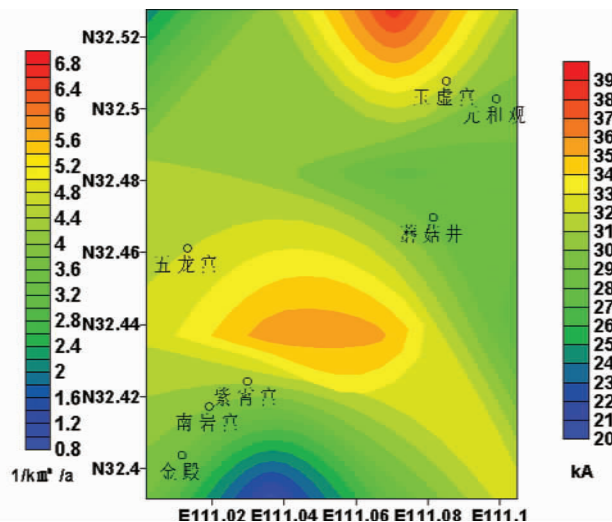


图 6 雷击强度分布

Fig. 6 The lightning intensity distribution

2.4 闪电活动与地形高度的关系

图7表征了该区域的地形高度分布,该数据来源于 Google 地图的高程数据,水平网格精度约为 60 m,可以满足闪电与地形关系的分析需求。图中标注了武当山的代表性景点:金殿、南岩宫、五龙宫、蘑菇井、玉虚宫、元和观。32.46°N 以北的大部分区域的海拔 < 700 m, 32.42°~32.44°N 大部分区域的海拔在 700~1 000 m; 32.4°N 附近部分区域的海拔可达 1 400 m 以上,武当山海拔最高的天柱峰位于整个景区的西南部。

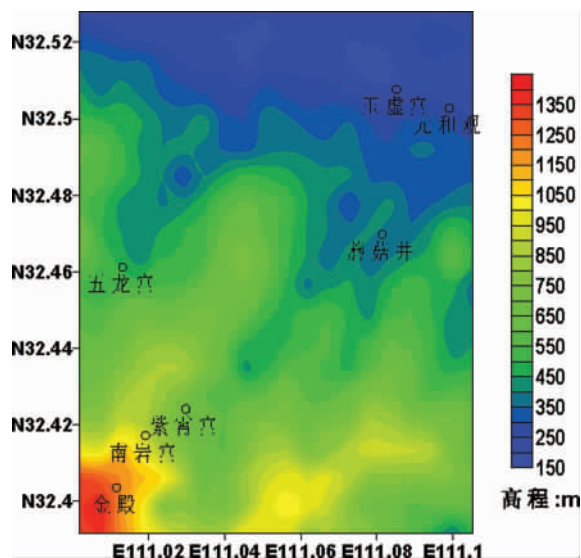


图7 分析区域的地形

Fig.7 The terrain of analysis regions

通过对比分析闪电活动时空分布图及根据统计资料,可以得出:雷击大地密度整体上随高度表现出明显的增长趋势,其密度高值区与海拔高的山峰有很好的对应关系,密度低值中心与低谷区域吻合;在 500 m 以下的高度,雷击密度大都在 2 次/(km²·a) 以下,并且在该区间内雷击密度随高度的变化未呈现明显规律;在 500 m 以上的高度,雷击密度与高度表现出明显的正向相关性。电流强度平均值与高度大致呈现反向分布趋势,电流强度的低值区域位于天柱峰附近,电流强度的高值区域与低谷区域基本吻合;在 700 m 以下的高度,电流强度随高度的增加呈明显的减弱趋势;在海拔 700~1 200 m,电流强度随高度的变化稍有波动,其平均电流值在 30 kA 左右;在 1 200 m 以上的高度,电流强度随高度的变化规律明显,如图 8 所示。

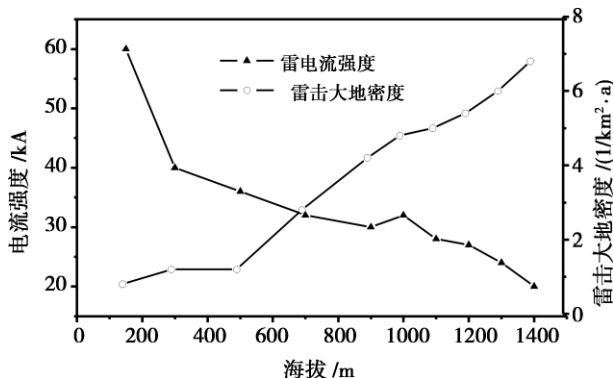


图8 闪电活动与地形高度关系

Fig.8 The relationship between the lightning activity with the terrain

3 古建筑防雷的几点探讨

武当山索道开通运营十多年来,雷暴为其安全运行的重要制约因素,2007—2009 年由于雷暴天气影响停运共 22 次。据记载,2001—08—11 索道遭受雷击,210 名游客悬在吊箱内时间超过 30 min; 2004 年索道高压变压器、计算机、控制器均遭受雷击,造成重大经济损失。索道作为高导电性的材料,引发云中雷电流在此释放,由于索道没有做接地(也无法做)处理,电流释放没有接地通道,导致相关设备受损。

考虑到目前直击雷的防护措施在一些文献中探讨的较为详细^[6],关于这部分在本文中不赘述,结合景区的闪电数据主要做以下几个方面的探讨。

3.1 闪电感应的计算

由闪电强度的时间分布规律得知,各月均有 1% 的闪电 > 100 kA,有个别闪电强度 > 150 kA,例如 2008—08—08T 0:14 监测到的负闪电强度为 193.5 kA。根据电子计算机场地通用规范,机房内磁场干扰场强不大于 800 A/m^[7],如果超出该值将会对电子敏感设备的正常工作造成干扰。

1. 当闪电发生于一座古建筑附近时,其内部电子敏感设备处感应的磁场强度计算如下:

1) 当无屏蔽时,处于 LPZ0A 和 LPZ0B 区内电子设备上产生的磁场强度计算公式^[8]为

$$H_0 = i_0 / (2\pi s_a) \quad (1)$$

式中 H_0 为无屏蔽时产生的无衰减磁场强度(A/m); i_0 为雷电流;雷击点与屏蔽空间之间的平均距离。

将 $H_0 = 800$ A/m, $i_0 = 193.5$ kA 代入(1)式得: $s_a = 38.52$ (m),即在该种情况下,电子设备距闪击点的距离 > 38.52 m 时,才能保证其正常工作。

2) 当有采取屏蔽时,LPZ1 区内的磁场强度的计算公式^[8]为

$$H_1 = H_0 / 10^{SF/20} \quad (2)$$

式中 H_1 为栅格形大空间屏蔽内的磁场强度(A/m); SF 为屏蔽系数,此处假设为首次雷击,且屏蔽材料为铜或铝,则 $SF = 20 \times \log(8.5/w)$, w 为栅格形屏蔽的网格宽度。

此处假设 $w = 3\text{ m}$, 则 $SF = 20 \times \log(8.5/3) = 9.05 < 10$, 代入(2)式得: $H_1 = 0.35H_0$ 。考虑到最坏的情况,若衰减后的 $H_1 = 800\text{ A/m}$, 则 $H_0 = 2285.7\text{ A/m}$, 将数据返回公式(1)可得: $s_a = 13.48\text{ m}$, 即在安全距离不小于3 m的情况下,采用铜或铝材料的3 m网格后,容许闪击点的距离为13.48 m。

2. 当闪电直接击中古建筑的接闪器时,其内部LPZ1 区电子敏感设备处感应的磁场强度计算公式^[8]如下

$$H_1 = k_H \cdot i_0 \cdot w / (d_w \cdot \sqrt{d_r}) \quad (3)$$

式中 H_1 为安全空间内某点的磁场强度(A/m); d_r 为所确定的点距LPZ1 区屏蔽顶的最短距离(m); d_w 为所确定的点距LPZ1 区屏蔽壁的最短距离(m); k_H 为形状系数,取 $k_H = 0.01(1/\sqrt{\text{m}})$ 。

将 $H_1 = 800\text{ A/m}$, $i_0 = 193.5\text{ kA}$, $w = 3\text{ m}$, $k_H = 0.01(1/\sqrt{\text{m}})$ 代入(3)式得: $d_w \cdot \sqrt{d_r} = 7.27(\text{m} \cdot \sqrt{\text{m}})$ 。即此时只要保证 d_r 、 d_w 的距离合适,就可避免电子设备受到外界磁场的干扰。

3.2 雷电反击的计算

为了防止雷击电流流过防雷装置时所产生的高电位对保护物的建筑物或与其有联系的金属物发生反击,应使防雷装置与这些物体之间保持一定的安全距离。安全距离按电阻电压降和电感电压降相应求出的距离相加而得^[8-9]。地上部分的安全距离为(由于古建筑的特殊性,部分防护措施可能采取第一类防雷建筑物的措施,故采用了其相应的计算公式)

$$S_a = IR_i / E_R + (L_0 \cdot h_x \cdot di/dt) / E_L \quad (4)$$

式中 S_a 为地上部分安全距离(m); I 为雷电流幅值(kA); R_i 为接地装置的冲击接地电阻(Q); E_R 为电阻电压降的空气击穿强度,取值为 500 kV/m ; L_0 为引下线的单位长度电感,取值为 $1.5\mu\text{H/m}$; h_x 为被保护物或计算点的高度(m); di/dt 为雷电流陡度($\text{kA}/\mu\text{s}$); E_L 为电感电压降的空气击穿强度(kV/m),其值为 $E_L = 600(1 + 1/T_1)(\text{kV/m})$, T_1 为雷电流波形波头时间(μs)。

同样采用 2008-08-08T0:14 监测到的负闪电强度为 193.5 kA , 陡度为 $28.2\text{ kA}/\mu\text{s}$ 的数据,根据

公式(4)可求得地上安全距离 $S_a = IR_i / E_R + (L_0 \cdot h_x \cdot di/dt) / E_L = 193.5 \times 30 / 500 + (1.5 \times 10 \times 28.2) / 523.66 = 4.67(\text{m})$ 。

其中,假设 R_i 在高土壤电阻率时可以做到 10Ω ; 取 $h_x = 10\text{ m}$, $T_1 = 193.5/28.2 = 6.86(\mu\text{s})$; $E_L = 600(1 + 1/6.86) = 523.66\text{ kV/m}$ 。

按照《建筑物防雷设计规范》第一类防雷建筑物地上部分的安全距离计算:当 $h_x < 5R_i$ 时, $S_a \geq 0.4(R_i + 0.1h_x)$, 将 $R_i = 10\Omega$, $h_x = 10\text{ m}$ 带入可得 $S_a \geq 4.4\text{ m}$ 。因此,可以断定如果按照《建筑物防雷设计规范》第一类防雷建筑物地上部分的安全距离为 4.4 m , 因安全距离过小,将会发生雷电反击。

同理,按照上述监测到的强闪电计算地下部分的安全距离^[8-9]

$$S_e = IR_i / 500 = 193.5R_i / 500$$

$$= 0.387R_i \geq 200R_i / 500 = 0.4R_i$$

即,在这种情况下地下不会发生反击。目前只是根据历史最大的数据分析,一旦发生 $>200\text{ kA}$ 的强闪电,按照第一类防雷设计标准也会发生反击。

3.3 古建筑防雷存在的难题

1. 许多古建筑建在崇山峻岭之中,地表多为岩石,主要由变质基性至中酸性火山岩组成^[10],土壤电阻率高达几千欧姆米,接地电阻很难达到规范要求。

2. 到目前为止,古建筑防雷没有统一的标准。一方面,武当山景区古建筑周围的地理环境、地质条件不理想;另一方面,建筑物的外形结构也比较复杂,给古建筑防雷装置的施工带来了一定的难度,很难达到理想的防雷效果。

4 结论和讨论

从孕灾气象环境的危险性以及承灾体的雷击事故和易损性分析得到以下几个结论:

1. 闪电集中发生在6—8月的午后14—18时。4—9月应作为全年的主要防护期,其中6—8月的防雷工作更是重中之重,特别是午后强对流易发时段。

2. 闪电强度随时间的分布无明显规律,但由于闪电集中发生在6—8月的14—18时,因此,该时段内强闪电出现频数很高。

3. 整个景区时空分布特征表现为:雷击大地密度值呈现“南大北小”,雷电流强度表现为“北强南弱”。

4. 闪电活动与地形高度有密切的关系:雷击大地密度整体上随高度表现出明显的增长趋势,电流

强度平均值与高度大致呈现反向分布趋势。

5. 地质条件、地形、地貌、人为因素等都会影响到雷灾频次及损失程度。在武当山特殊的地形地貌情况下,产生了比较特殊的局地气象条件。这样的气象条件下,紫霄宫、南岩宫、金殿等南部景区成为主要的雷击区域。

6. 闪电感应与雷电反击的计算表明:一方面,应当加强古建筑内电子敏感设备的空间屏蔽;另一方面,也要考虑雷电反击带来的危害,防雷设计时考虑安全余量。

参考文献(References)

- [1] Yang Bo, Qiu Shi, Ning Jun, et al. Evaluation of error in lightning orientation and lightning detection efficiency[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2006, 7(5): 507–510 [杨波, 邱实, 宁军, 等. 闪电定位误差及探测效率评估[J]. 解放军理工大学学报, 2006, 7(5): 507–510]
- [2] Zhu Chuanlin, Yang Zhongjiang, Chen Xiangxiang, et al. Lightning distribution characteristics in Nanjing from 2006 to 2009[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology, 2012, 4(3): 248–253 [朱传林, 杨仲江, 陈翔翔, 等. 2006—2009年南京地区闪电活动分布特征[J]. 南京信息工程大学学报, 2012, 4(3): 248–253]
- [3] Yang Zhongjiang. The basis of lightning disaster risk assessment and management[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2010: 106–114 [杨仲江. 雷电灾害风险评估与管理基础[M]. 北京: 气象出版社, 2010: 106–114]
- [4] Zhu Chuanlin, Wang Xueliang, Yang Zhongjiang, et al. Application of Dimension reduction concept in computing ground flash density[J]. Meteorological Science and Technology, 2012, 40(5): 839–842 [朱传林, 王学良, 杨仲江, 等. 降维思想在统计雷击大地密度中的应用探讨[J]. 气象科技, 2012, 40(5): 839–842]
- [5] Chen Xiangyang, Yang Zhongjiang, Yang Bin. Analysis of lightning environment in Huangshan Scenic Area with special geological features[J]. Meteorological Science and Technology, 2009, 37(6): 759–761 [程向阳, 杨仲江, 杨彬, 等. 具有特殊地质地貌的黄山风景区雷电环境分析[J]. 气象科技, 2009, 37(6): 759–761]
- [6] Gong Jiajun, Liu Guozhen. Discussion about lightning protection measures of historical building[J]. Low Voltage Apparatus, 2008, 14: 33–36 [龚家军, 刘国臻. 古建筑防雷措施探讨[J]. 低压电器, 2008, 14: 33–36]
- [7] GB/T2887–2000 Specification for electronic computer field[M]. Beijing: Publishing house of China Building Industry, 2000: 1–2 [GB/T2887–2000 电子计算机场地通用规范[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000: 1–2]
- [8] GB50057–2010 Code for design protection of structures against lightning[M]. Beijing: Publishing house of China Plan, 2011: 115–118 [GB50057–2010 建筑物防雷设计规范[M]. 北京: 中国计划出版社, 2011: 115–118]
- [9] Wang Xueliang, Liu Xuechun, Shi Yajing. Study of lightning characteristics and protective[J]. Meteorological Science and Technology, 2010, 38(6): 805–809 [王学良, 刘学春, 史雅静. 武汉地区云地闪电特征及防护效率研究[J]. 气象科技, 2010, 38(6): 805–809]
- [10] Zhang zongqing, Zhang Guowei, Tang Suohan, et al. The age of metamorphic rocks of the WuDang Group[J]. Geology in China, 2002, 29(2): 117–125 [张宗清, 张国伟, 唐索寒, 等. 武当群变质岩年龄[J]. 中国地质, 2002, 29(2): 117–125]

Lightning Environment in Wudangshan Mountain Scenic Area and Lightning Protection of Ancient Buildings

DUAN Zhenzhong¹, ZHU Chuanlin¹, LIU Guozhen²

(1. Hubei Provincial Lightning Protection Center, Wuhan 430074, China; 2. Hubei Province Shiyan Weather Bureau, Shiyan 442000, China)

Abstract: Wudangshan Mountain is the World Cultural and Natural Heritage, so that lightning protection is particularly important about Wudangshan Mountain Scenic Area. The lightning frequency, polarity, intensity and other parameters in each unit from January 1, 2008 to December 31, 2011 are gained, with the range of 1 km² (1 km × 1 km) being the basic unit for the whole area of the Wudangshan Mountain. At the same time, the influences of geological features and the lightning environment and geographical environment of the Wudangshan Mountain on lightning activities are analyzed. Research shows that: the lightning frequency increases with increasing altitude, while the average lightning current intensity decreases in the mountainous areas. It is targeted to make scientific and reasonable measures by researching and analyzing the basic laws of the hazard environment, which is of great significance for lightning protection of ancient buildings.

Key words: Wudang Mountain; lightning environment; ancient buildings; lightning protection