

苑俐,魏学,王志春,等.赤峰市雷电活动规律及雷电流幅值累积概率分析[J].陕西气象,2025(5):63-68.

文章编号:1006-4354(2025)05-0063-06

赤峰市雷电活动规律及雷电流幅值累积概率分析

苑俐¹,魏学¹,王志春¹,刘洁²,徐立强³

(1. 赤峰市气象局,内蒙古赤峰 024000;2. 泰安市气象局,山东泰安 271000;

(3. 宁城县气象局,内蒙古赤峰 024000)

摘要:利用 ADTD 雷电监测系统观测资料,对赤峰市 2014—2023 年雷电流幅值及频次的时空分布、累积概率进行了特征分析。结果表明:赤峰市南部地区闪击密度较高,正负闪击雷电流幅值均呈南低北高分布,同时正闪击幅值明显高于负闪击;所有极性闪击多发生 6—9 月,午后到傍晚时段居多;正、负闪击均在 6 月雷电流幅值较高,夜间至上午易发生高幅值闪击。2014—2023 年赤峰市共监测雷电活动 225 661 次,其中 61.3% 为负闪击;正、负闪击平均雷电流幅值分别为 52.1 kA 和 34.4 kA,正闪击出现高幅值电流的概率更大,同时幅值分布范围更广;负闪击和总闪击的雷电流幅值频次呈对数正态分布,正闪击为双峰分布。依据 IEEE 工作组和 GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》两种推荐公式,拟合得到赤峰地区不同极性闪击的雷电流幅值累积概率公式,其中 IEEE 拟合效果最优,与实测曲线高度重合,拟合公式可为本地雷电防护设计和风险区划等工作提供参考。

关键词:雷电活动规律;雷电流幅值;累积概率分布;曲线拟合;赤峰市

中图分类号:P427.32

文献标识码:A

雷电是一种自然现象,指在大气中带有不同电荷的云层相互接近时,因静电场达到极限而发生的高电压、高电流、大电流的天气现象^[1]。雷电在全世界范围内分布广泛,其危险性不容小觑^[2]。国内外对雷电流的研究最早开展于 19 世纪 80 年代,Anderson 等^[3]首次给出雷电流幅值的累积概率分布表达式。随着 20 世纪 80 年代末我国开展雷电定位监测技术研究,同时全国各地逐渐开展闪电探测仪建设工作,对雷电的研究也日益丰富。陈家宏^[4]发现不同地区雷电流幅值累积概率分布曲线特征相似,但中值电流和曲线陡度有所不同;李瑞芳^[5]利用广东省 10 a 雷电流监测数据,参考 IEEE 推荐公式^[6],拟合出最优累积概率分布公式;李家启等^[7-8]对重庆地区雷电流活动特征进行了深入研究,得出雷电流幅值的概率密度公式以

及累积概率公式;国内许多学者对各地区的雷电活动特征进行了研究分析^[9-13]。

雷电活动与气候特点、地形、海拔等密切相关。赤峰市地处内蒙古东南部,地形地貌呈现三面环山、多山多丘陵特征,地形由山地、高平原和平原组成,海拔高度跨度较大,从 300 到 2 000 m 不等。雷电活动频繁,年平均雷暴日数在 50 d 左右。本文利用 2014—2023 年 ADTD 雷电监测系统数据,分析了赤峰市雷电强度及频次的时空分布特征,并提出适用于赤峰市的雷电流幅值累积概率公式,可为开展雷击风险评估、建筑工程防雷设计提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 资料

内蒙古自治区气象部门从 2009 年开始布设

收稿日期:2025-01-21

作者简介:苑俐(1992—),女,汉族,辽宁朝阳人,硕士,工程师,主要从事气象灾害风险分析及评估工作。

通信作者:刘洁(1992—),女,汉族,山东泰安人,硕士,工程师,主要从事雷电监测及预警工作。

基金项目:内蒙古自治区自然科学基金面上项目(2024MS05047)

了 ADTD 雷电探测仪,目前共设有 46 个探测站,探测仪通过测量云地闪回击电流辐射的强电磁脉冲,采用定向时差联合法对雷电进行定位,闪电监测网单站的探测范围约 150 km。本文所用资料为 2014—2023 年赤峰市境内的 ADTD 雷电监测数据,包括闪电发生的时间、经纬度、雷电流幅值等参数。根据 IEEE 工作组建议对数据进行质量控制^[6],即将雷电流幅值在 2~200 kA 以外的记录剔除,分析赤峰市雷电活动时空分布特征及雷电流幅值的累积概率分布。

1.2 雷电流幅值累积概率公式

目前,最常用的雷电流幅值累积概率公式主要有两种。

一种是 IEEE 工作组推荐公式^[6]:

$$P = \frac{1}{1 + (I/a)^b} \quad (1)$$

其中 I 为雷电流幅值(kA), P 为雷电流幅值大于 I 时对应雷电流幅值累积概率, a 、 b 为中值幅值和累积概率曲线变化程度,IEEE 工作组基于全球雷电流幅值推荐 a 为 31, b 为 2.6。

另一种是我国相关技术标准推荐的雷电流幅值累积概率公式,包括 GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》^[14] 和 DL/T 620—1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》^[15] (下文简称标准)中的推荐公式:

$$\lg P = -I/c \quad (2)$$

c 为待定参数,标准推荐值为 88,在雷电活动较少地区为 44。

利用 Levenberg - Marquardt 算法,参考 IEEE 工作组和标准推荐公式,对赤峰市 2014—2023 年雷电流幅值和相应累积概率进行非线性回归拟合,计算得到参数 a 、 b 、 c ,对比两种公式拟合效果,选取最优公式。

2 赤峰市雷电流幅值时空分布特征

2.1 空间分布

2.1.1 闪击密度 根据经纬度与地理距离的对应关系,以 1 km×1 km 为单位面积统计赤峰市闪击密度空间分布(图 1)。可以看出赤峰市闪击密度大致呈现自北向南递增的分布态势,在敖汉

旗东南部存在显著大值区,该区域内闪击密度高于 1.2 次/(km²·a);其次闪击密度较大的为宁城县南部,以及松山区、翁牛特旗、克什克腾旗交界处;另外在东北部的阿鲁科尔沁旗存在小范围大值区。以上地区发生闪电的概率相对较高,其余大部地区闪击密度低于 0.6 次/(km²·a)。地闪密度南北差异的主要原因是:赤峰南部属山地向平原过渡带,地势起伏较大,容易形成大气不稳定层结,同时受到地形抬升作用更容易产生对流天气,从而导致雷电的发生。

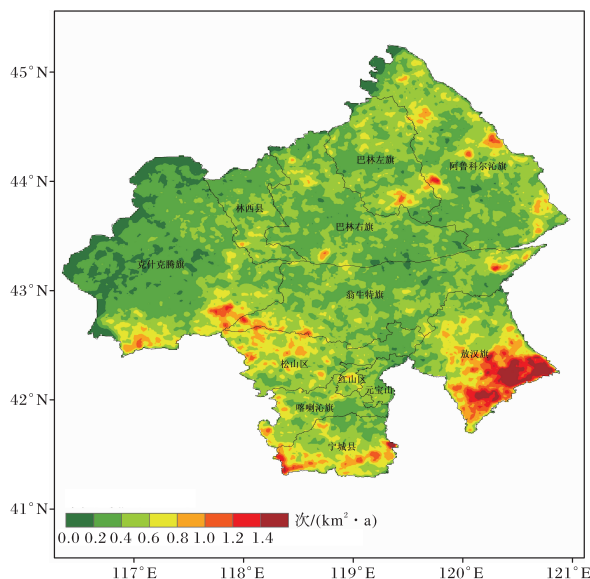


图 1 赤峰市 2014—2023 年闪击密度空间分布图

(审图号:蒙 S[2019]33 号,下同)

2.1.2 雷电流幅值 利用 ArcGIS 系统,采取克里金插值法将雷电流幅值插值为面数据,得到赤峰市 2014—2023 年雷电流幅值空间分布(图 2)。可以看出,正闪击的雷电流幅值明显高于负闪击,大部地区正闪击雷电流幅值在 60 kA 以上,负闪击则以 50 kA 以下居多。正闪击和负闪击雷电流幅值均大致表现为北高南低,东西变化不显著:正闪击在喀喇沁旗、宁城县等南部地区存在明显的低值区,其余地区都存在局地小范围的高值区;负闪击的南北差异更加明显,北部地区出现高雷电流幅值的区域明显多于南部。同时与闪击密度分布结合起来看,南部地闪高密度区域对应雷电流幅值较小,二者大致呈反向关系。

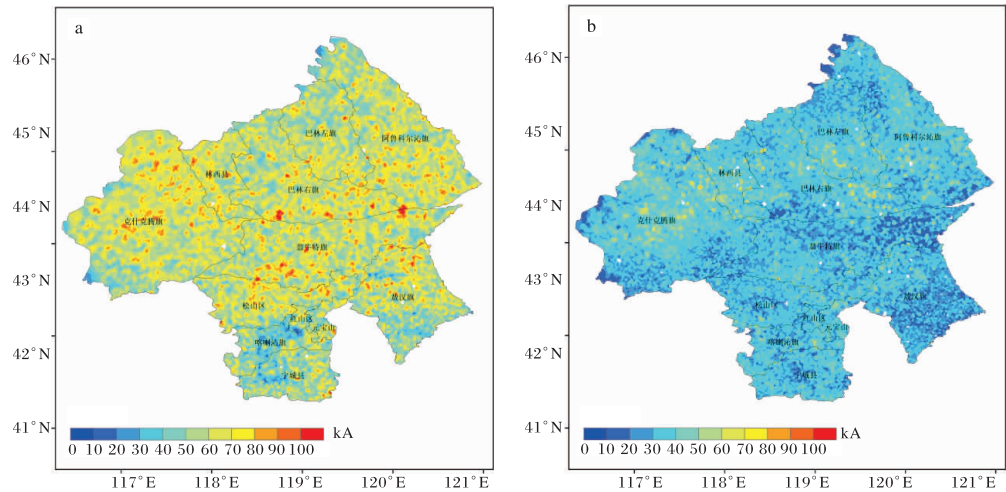


图2 赤峰市 2014—2023 年正(a)、负(b)闪击雷电流幅值空间分布

2.2 时间分布

2.2.1 闪击频次 通过分析赤峰市逐月各时次的正负闪击年均次数(图 3)可以明显看出,由于赤峰市地处我国北方,两种闪击均在 1—4 月和 10—12 月发生次数较少,该时间段内各时次年均

闪击次数少于 30 次,其中在 1—3 月、12 月的大部分时次未发生过雷电活动。正闪击年均发生次数为 8 727.7 次,大多集中发生在 6—8 月(占比 75.6%);负闪击年均发生次数多于正闪击,为 13 838.4次,7—9 月发生次数最多(占比 77.0%)。

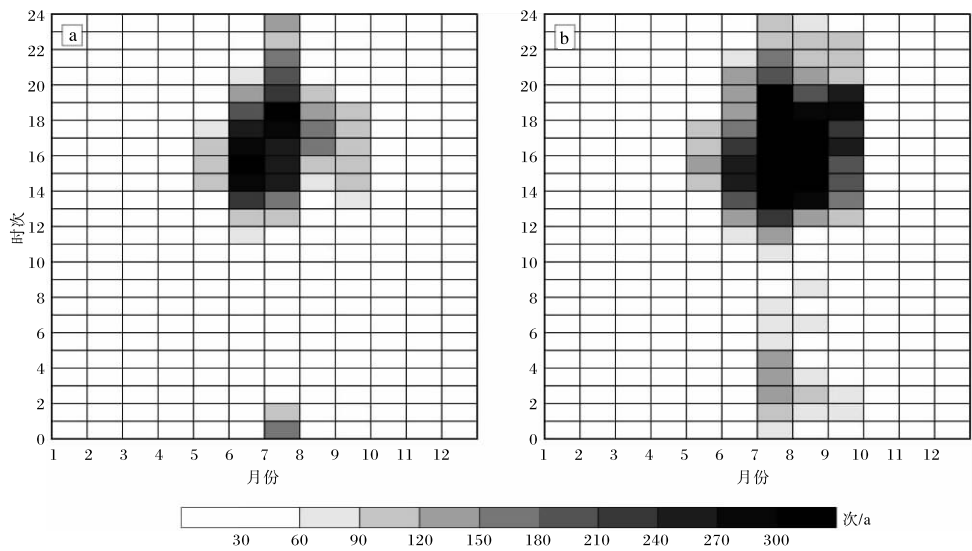


图3 赤峰市 2014—2023 年逐月各时次正(a)、负(b)闪击年均发生次数

从日变化上来看,正闪击在 13—19 时发生的次数明显多于其他时段,05—10 时发生次数最少,6 月 15 时闪击次数最多,为 368.3 次/a;负闪击同样在 13—19 时发生的次数最多,05—11 时最少,其中 7 月 14 时闪击次数最多,达到 480.3 次/a。

2.2.2 雷电流幅值 利用 2014—2023 年赤峰市闪电定位数据计算得到逐月各时次的正负闪击平

均雷电流幅值(图 4)。赤峰市雷电活动主要发生在 5—9 月,其他月份的闪击总数极少,仅占全年 2.3%。在闪电发生次数较少的月份,若多年间仅发生一次大幅值雷电活动将会显著增大雷电流幅值平均值,故在 1—4 月和 10—12 月的某些时次出现的高雷电流幅值没有代表意义,在分析时不予考虑。从图中可以看出,正闪击的雷电流幅值明显高于负闪击。正闪击雷电流幅值集中在40~

100 kA(占比 51.4%),50 kA 以上占比 35.4%;负闪击多集中在 30~60 kA(占比 52.8%),其中 50 kA 以上占比仅为 7.3%,远低于正闪击。各月中 6 月的雷电流幅值最高,正闪击雷电流幅值均在 50 kA 以上,有 16 个时次达到 70 kA 以上

(占比 66.7%);负闪击雷电流幅值均在 30 kA 以上,10 个时次在 40 kA 以上(占比 42.0%)。此外,5 月正闪击雷电流幅值仅次于 6 月,负闪击在其他月份的雷电流幅值相差不大。

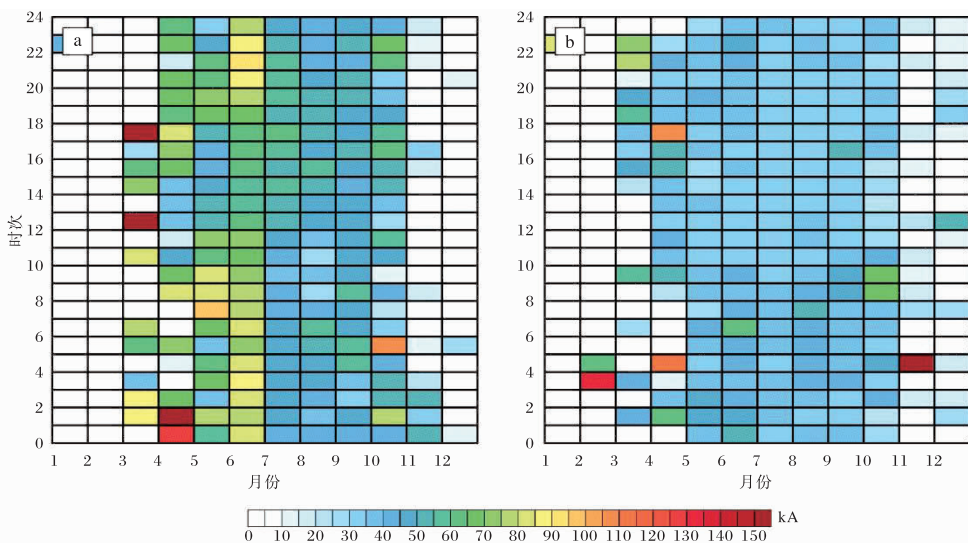


图 4 赤峰市 2014—2023 年逐月各时次正(a)、负(b)闪击平均雷电流幅值

在日变化上,高雷电流幅值的正闪击主要出现在上午和夜间时段,最大为 96.41 kA,出现在 5 月 07 时;高雷电流幅值的负闪击集中在凌晨到上午,最大为 66.93 kA,出现在 10 月 08 时。

3 雷电流幅值及其累积概率分布特征

3.1 雷电流幅值

对赤峰市正、负闪击的雷电流幅值分布特征进行分析(图 5),2014—2023 年全市正、负闪击的平均雷电流幅值分别为 52.1 kA 和 34.4 kA。同时,正闪击的雷电流幅值的 25%~75%对应范围为 24.2~72.9 kA,负闪击的则为 21.0~39.0 kA,可见正闪击雷电流幅值的分布范围更广,负闪击相对更集中。

2014—2023 年赤峰市境内监测到雷电活动 225 661 次,其中正闪击 87 277 次(占比 38.7%),负闪击 138 384 次(占比 61.3%)。从各类闪击频次分布图中可以看出(图 6),负闪击的频次分布呈单峰变化,雷电流幅值集中在 20~30 kA,最大频次可达到 6×10^{-4} 次/($\text{km}^2 \cdot \text{a}$);正闪击频次分布呈双峰形态,分别在 10 kA 和 40 kA 附近存在

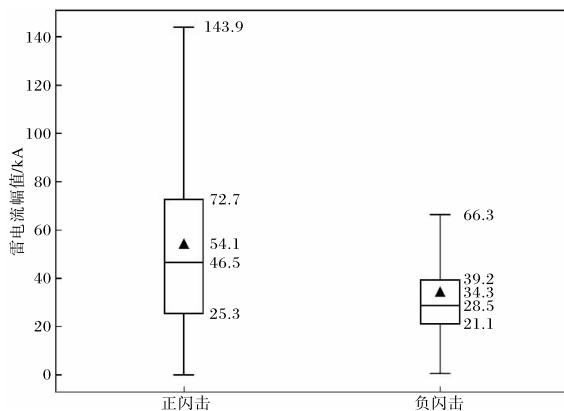


图 5 赤峰市 2014—2023 年正、负闪击雷电流幅值(单位:kA)分布(三角代表均值,横线为中位数)

高频次峰值,对应的频次相对较低,在 1×10^{-4} 次/($\text{km}^2 \cdot \text{a}$)左右;总闪击频次分布与负闪击接近,在 20~30 kA 附近达到峰值,最大为 7×10^{-4} 次/($\text{km}^2 \cdot \text{a}$)。

3.2 雷电流幅值的累积概率

雷电流幅值的累积概率指雷电流幅值高于某一特定电流值的概率。利用 2014—2023 年赤峰市实测雷电监测数据,分别统计正闪、负闪和总闪

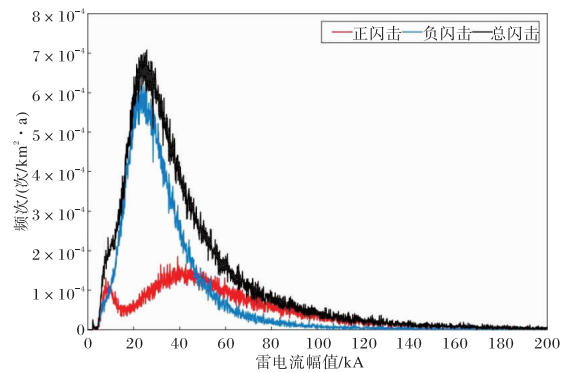


图6 赤峰市2014—2023年正闪击、负闪击、总闪击随雷电流幅值分布频次

的雷电流幅值分别依次大于0, 0.1, 0.2, …, 200 kA的比例,可以得到雷电流幅值的累积概率分布曲线。利用SPSS软件的非线性回归拟合工具,

基于累积概率分布曲线,根据式1和式2,通过多次迭代求解参数,使得理论分布曲线尽可能接近实测曲线,从而分别计算出正闪击、负闪击和总闪击的相应参数,得到拟合公式和相应拟合优度(R^2)、均方误差(MSE),见表1。 R^2 和MSE是评估模型拟合效果的重要指标。 R^2 越接近1,表明模型解释变异的能力越强;MSE越小,说明预测值与实际值的偏差越小。两者结合可以全面反映模型的拟合优劣。从表1可以看到,IEEE拟合中,负闪击的拟合优度近似为1,均方误差仅为 2×10^{-5} kA²,拟合效果最好;标准拟合中,总闪击的拟合优度为0.950,均方误差为0.005 kA²,拟合效果相对较优。整体来看,IEEE拟合的各极性拟合优度均在0.995以上,明显优于标准拟合。

表1 赤峰市各类闪击雷电流幅值累积概率两种拟合公式及相应拟合参数

闪击类型	IEEE拟合公式	拟合优度	均方误差/kA ²	标准拟合公式	拟合优度	均方误差/kA ²
正闪击	$P=\frac{1}{1+\left(\frac{I}{49.140}\right)^{2.743}}$	0.996	4×10^{-4}	$\lg P=-\frac{I}{138.358}$	0.940	0.006
负闪击	$P=\frac{1}{1+\left(\frac{I}{28.558}\right)^{3.452}}$	1.000	2×10^{-5}	$\lg P=-\frac{I}{77.515}$	0.919	0.007
总闪击	$P=\frac{1}{1+\left(\frac{I}{33.886}\right)^{2.665}}$	0.999	5×10^{-5}	$\lg P=-\frac{I}{97.796}$	0.950	0.005

从雷电流幅值的累积频率分布曲线(图7)可以看到,正闪击的曲线更为平缓,总闪击和负闪击形态较接近,陡度较大。正闪击中大于50、100 kA的累积概率分别为50.0%和12.1%,负闪击中大于50 kA、100 kA的累积概率仅为12.8%和

1.7%,即当幅值超过50 kA时,正闪击出现的概率要明显高于负闪击。同时正闪击在20 kA以内存在先凸后凹的“波浪变化”,在10 kA附近存在正闪击次数突增。有研究表明,小幅值正地闪可能为ADTD系统对云闪分支的误判,不予分析^[17-19]。

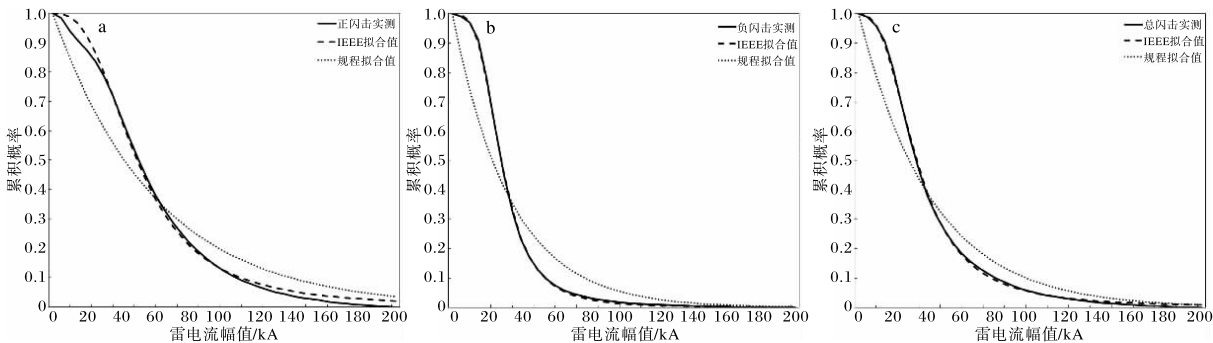


图7 赤峰市正闪击(a)、负闪击(b)、总闪击(c)实测雷电流幅值概率实测值与IEEE、标准拟合值曲线对比

对比IEEE和标准拟合效果(图7),IEEE拟合曲线与实测闪击累计概率分布曲线高度重合,

拟合效果更好。标准拟合曲线与实测差异较大,没有表现出0~40 kA低幅值区间的上凸形态,

同时在 40~100 kA 高幅值区间内较实测曲线更平缓,陡度过小。总闪击和负闪击实测累积概率与 IEEE 拟合公式计算得到的累积概率相关系数分别为 0.999 767 和 0.999 924,而正闪击的相关系数稍低,为 0.998 674,这是由于在 10 kA 以下的低幅值区域的实测数据存在误差,并且在 120 kA 以上的高幅值区域 IEEE 拟合结果存在过高估计。总体来说,IEEE 拟合公式基本可以表征赤峰地区的雷电流幅值累积概率分布,能够用于雷电灾害防御设计。

4 结论与讨论

利用 2014—2023 年 ADTD 闪电定位系统监测的闪电资料,对赤峰市境内雷电活动特征及幅值累积概率进行了分析,得到如下主要结论。

(1)赤峰市雷电活动呈现显著空间差异。地闪密度南北差异明显,南部高于北部,其中东南部敖汉旗为雷电高发核心区;雷电流幅值则呈现北高南低分布特征,正闪击幅值普遍超过 60 kA,显著高于负闪击。

(2)雷电活动具有明显时间集中性。主要发生于 5—9 月的午后时段(13—19 时),负闪击发生次数均多于正闪击;高幅值的雷电活动多出现在 6 月夜间至上午,且频次与平均幅值大致呈负相关。

(3)正、负闪击雷电流幅值分布特征迥异。正闪击平均幅值(52.1 kA)与中位数(46.7 kA)均高于负闪击(34.4 kA、28.4 kA),且在 10 kA 和 40 kA 处呈双峰分布,负闪击与总闪击则在 30 kA 附近呈单峰;大部分雷电流幅值的正闪击频率要低于负闪击。

(4)从雷电流幅值累积概率实测分布曲线来看,总闪击与负闪击曲线趋势一致,这主要是因为负闪击发生次数明显多于正闪击,占比较大。采用 IEEE 推荐公式对赤峰雷电累积概率的拟合效果显著优于标准拟合,拟合优度较好。

(5)基于 10 a 闪电定位数据揭示了赤峰市雷电时空规律及幅值分布特性,并利用 IEEE 工作组推荐公式拟合出适合赤峰地区的雷电流幅值累积概率分布公式,但在高幅值和低幅值部分仍存在一定差异。未来需针对高/低幅值段开展分段修正工作,并融合环流与地形因子深化雷电成因

研究,以提升雷电灾害防控精度。

参考文献:

- [1] 陈渭民. 雷电学原理[M]. 北京:气象出版社, 2003.
- [2] 周筠珺. 雷电监测与预警技术[M]. 北京:气象出版社, 2015.
- [3] ANDERSON R B, ERIKSSON A J. Lightning parameters for engineering application[J]. Electra, 1980, 69:65-102.
- [4] 陈家宏,童雪芳,谷山强,等. 雷电定位系统测量的雷电流幅值分布特征[J]. 高电压技术, 2008(9): 1893-1897.
- [5] 李瑞芳,吴广宁,曹晓斌,等. 雷电流幅值概率计算公式[J]. 电工技术学报, 2011, 26(4):161-167.
- [6] IEEE guide for improving the lightning performance of transmission lines: IEEE Std 1243-1997[S].
- [7] 李家启,李博,申双和,等. 基于 ADTD 系统的雷电流波头陡度频率分布特征[J]. 气象科技, 2010, 38(6):741-745.
- [8] 李家启,王劲松,廖瑞金,等. 重庆库区地貌 1999—2008 雷电流幅值频率分布特征[J]. 高电压技术, 2011, 37(5):1123-1128.
- [9] 吴清,张丹丹,梁亚峰,等. 海南省雷电流幅值概率分布研究[J]. 陕西气象, 2015(4):24-27.
- [10] 马仪,王科. 基于雷电定位系统监测数据的云南省雷电参数分析[J]. 云南电力技术, 2009, 37(2): 4-6.
- [11] 张磊,许勇,付亚平,等. 基于闪电定位资料的太朴山广电发射台雷电防御分析[J]. 陕西气象, 2016(1):40-42.
- [12] 陈洁,曹继军,苏炳彦,等. 2008—2016 年陕西省雷电灾害特征分析[J]. 陕西气象, 2019(4):33-36.
- [13] 王学良,张科杰,余田野,等. 湖北省山区与平原雷电分布及其参数特征[J]. 气象科技, 2019, 47(2):337-348.
- [14] 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范:GB/T 50064—2014[S]. 北京:中国计划出版社, 2014:64.
- [15] 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合:DL/T 620—1997[S]. 北京:中国电力出版社, 1997: 1438.