

文章编号: 2096-1618(2023)05-0566-06

四川省闪电活动特征及其与海拔高度的关系分析

魏庆¹, 周威², 陈小尘¹, 吴容¹, 谢亚雄¹, 张婧雯¹

(1. 四川省防雷中心, 四川 成都 610072; 2. 四川省气象台, 四川 成都 610072)

摘要:为深入分析四川省闪电活动特征及其与海拔高度的关系, 利用2015–2019年四川省地闪资料和海拔高度信息资料, 运用皮尔逊双变量相关性分析等方法, 统计分析闪电密度和强度的空间分布特征、闪电特征与海拔高度的相关性以及不同海拔高度范围和闪电强度区间的相互关系。结果表明: 负地闪年平均密度为正地闪的13倍, 而正地闪强度为负地闪的3倍; 负地闪年平均密度随海拔高度的增加而减少, 两者呈明显的负相关, 相关系数为 -0.42 ; 随着海拔高度的增加, 正地闪年平均密度呈先减小再增大的趋势, 但两者没有明显的相关性; 正地闪和负地闪强度均在海拔高度 $1.0 \sim 1.5$ km最强, 而强度较弱的正地闪和强度较强的负地闪均偏向于发生在海拔高度更高的区域。

关键词:气象学; 大气电学; 闪电特征; 空间分布; 海拔高度; 皮尔逊双变量分析

中图分类号: P427.32

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcu.2023.05.011

0 引言

四川省横跨青藏高原、横断山脉、云贵高原、秦巴山地以及四川盆地等几大地貌单元, 海拔高度从200 m到5000 m以上, 包括平原、丘陵、山地、高原等多种地形, 其海拔悬殊巨大, 地形构造极为复杂^[1–2]。研究表明, 地形是触发和加强强对流天气发生的重要条件之一, 而闪电又是最为常见的强对流天气之一^[3–6], 所以研究闪电的活动特征与海拔高度的关系有重要意义。

目前, 国内外已有关于闪电与海拔高度关系的一些研究: 马明等^[7]分析了中国及周边地区的闪电密度分布, 发现喜马拉雅山系南侧的平均闪电密度为北侧的10倍, 而中国内陆地区东部为西部的3倍且东部湿润地区高闪密度带经常出现在南北或者东北–西南走向, 其海拔高度在500~1500 m的中尺度山脉和丘陵地带, 而低密度带则容易出现在山间谷地和平原地区。Mazarakis N等^[8]分析了希腊地区闪电活动特征与海拔高度的关系, 发现闪电的密度与海拔高度呈正相关。但是, 刘海兵等^[9]指出江西地区的闪电密度随着海拔高度的上升逐渐减小, 呈显著的负相关, 而正负闪电的平均强度随着海拔高度的上升而增强, 呈显著的正相关。李政等^[10]发现重庆地区正地闪平均强度随海拔上升变化较明显, 尤其是在高海拔地区, 且闪电强度超过200 kA的大幅值闪电在不同海拔时所占比例是不同的, 比低海拔地区大。可见不同地区或区域, 其海拔高

度与闪电活动特征的相关性是存在差异的。

因此, 研究不同地区不同海拔高度对应的闪电活动特征, 不仅对了解该地区的闪电活动规律有积极意义, 而且对当地防雷减灾工作有重要的指导价值。另外, 与其他省份相比, 四川省海拔高度差异巨大, 以四川盆地、川西高原及攀西地区构成了复杂的地形分布特征, 其闪电灾害时常发生。尤其是近年来雷电引起森林火灾事件频发, 引起了相关部门的高度重视。然而, 目前针对于四川省闪电特征与海拔高度的相关性研究极少, 所以非常有必要开展相关研究。

1 数据资料

研究选取2015–2019年四川省ADTD(advanced TOA and direction system)地闪定位系统资料^[11–12], ADTD雷电定位系统是专门探测云地闪(简称地闪)的, 该方法主要是基于TOA(time of arrival)定位方法, 即测量信号到达不同基站的时间, 然后转换为距离, 从而进行定位, 该方法至少需要3个基站同时定位。系统平均探测效率为90%, 探测范围约300 km, 四川共有19部ADTD定位仪, 能够完全覆盖全省范围, 具体分布如图1所示。选取时段内共计发生地闪2785031次, 平均每年发生557006次, 包括负地闪516800次, 正地闪40206次, 负地闪频次明显多于正地闪, 前者约为后者的13倍; 负地闪平均电流强度(简称强度)则弱于正地闪, 负地闪平均强度为11.5 kA, 正地闪平均强度为33.8 kA, 后者约为前者的3倍。而且不同的地理区域、海拔高度对应的闪电频次和强度存在明显差

收稿日期: 2022-05-16

基金项目: 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室科技发展基金青年专项资助项目(SCQXKJQN202109)

通信作者: 魏庆. E-mail: 997400080@qq.com

异。研究采用临近插值方法,根据闪电经纬度信息将所有闪电数据依次插值到 $0.05^{\circ}\times0.05^{\circ}$ 格点中^[13],建立闪电格点样本数据集,即形成闪电的年平均密度,文中的闪电密度均指的是 $0.05^{\circ}\times0.05^{\circ}$ 范围(约 $5\text{ km}\times5\text{ km}$)内闪电的年平均次数。另外,研究还选取了四川省测绘局的地理信息海拔高度格点数据($0.05^{\circ}\times0.05^{\circ}$),形成与闪电格点一一对应的格点海拔高度,图 2 给出了全省海拔高度的空间分布图。

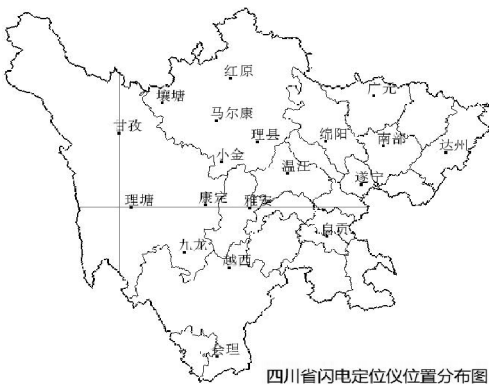


图 1 四川省闪电定位仪位置分布图

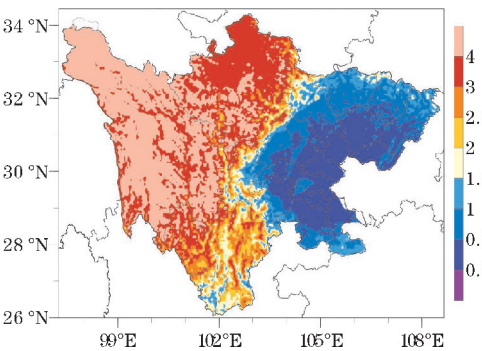


图 2 四川省海拔高度分布图

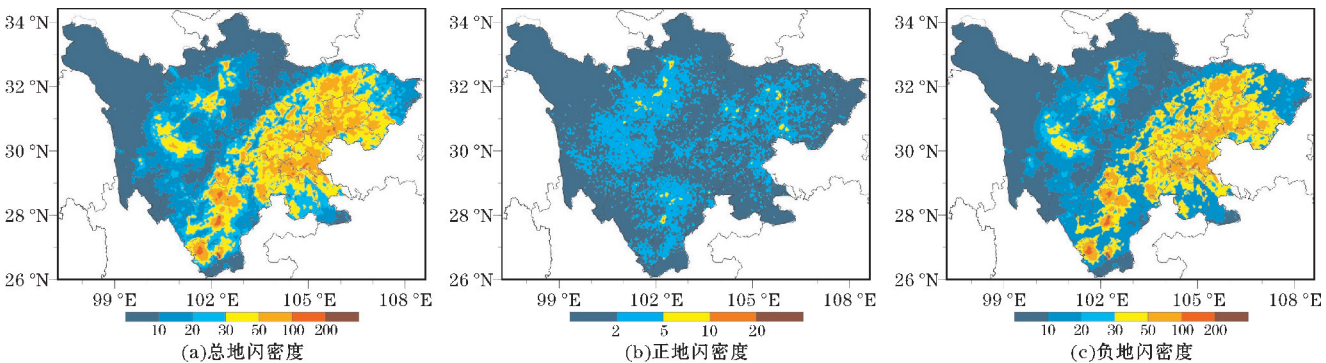


图 3 四川省年平均闪电密度分布图

2.2 闪电电流强度的空间分布特征

电流强度是闪电本身最重要的特征之一,尤其是与雷电防护工作息息相关,不同的电流强度等级对雷电防护的防护标准也必然不同^[7-8]。图 4 给出了全省地闪平

2 闪电的空间分布特征

2.1 闪电密度的空间分布特征

闪电密度一定程度上能表征雷暴活动强弱^[5],也能为强对流天气预报提供参考。图 3 给出了 2015–2019 年总地闪、正地闪以及负地闪的年平均密度空间分布特征。如图 3(a)所示,除盆周山区以外,四川盆地的闪电密度主要为 30~100 次,越往盆地的中心(靠近重庆西部区域)密度相对更大;凉山州北部和中部、攀枝花市大部密度在 2.0 次以上,密度高值中心位于该地区,密度最大的达 200 次以上,但区域非常小,主要位于凉山州的中部(西昌市)和南部(会理县),可见攀西地区是一个雷暴活动较为旺盛的区域;川西高原(阿坝州、甘孜州)的闪电密度整体上比盆地和攀西地区的要少 1~2 个等级,多数在 10~20 次,中心大值区也在 50 次以下,其中甘孜州西部和北部、阿坝州东部和北部以及攀西地区南部边缘,密度最小的更是小于 10 次。由于正地闪发生的频次更低,所以正地闪的密度更小,基本在 5 次以下,其中阿坝州北部、凉山州中部的极小区域能够达到 5~10 次,如图 3(b)所示。负地闪密度的空间分布与总地闪的非常相似(图 3c),是因为负地闪的频次明显多于正地闪,总闪以负地闪为主。

结合海拔高度空间分布特征(图 2),发现海拔高度在 0.5 km 以下和 1.0~2.0 km 对应的闪电密度更大,均能够超过 50 次。可见,海拔高度更低和地形更为复杂的区域闪电密度更大,这可能与低海拔区域的能量、水汽条件相对更好、山地地形抬升作用更强有一定的关系^[14]。

均强度的空间分布特征,从图 4(a)总地闪强度的分布特征来看,全省绝大多数地区的闪电平均强度均在 20 kA 以下且 10 kA 以下的区域较为分散,而阿坝州北部(若尔盖、九寨沟)的部分区域能达 20~30 kA,甘孜州西北部闪电平均强度分布比较特别,既有小于 10 kA 的,

又有超过50 kA的,分布非常不均。除甘孜州西北部外,正地闪强度基本上均超过10 kA,其中,四川盆地的正地闪强度主要分布在 20 ~ 50 kA,而盆地南部(宜宾、泸州)和东北部(巴中、达州、广安)的强度更强,能够达到 50 ~ 100 kA,同样分布较为分散(图 4b)。负地闪空间分布特征与总地闪较为相似,但10 kA以下的范围更广且更为集中(图 4c)。另外,研究还发现尽管凉山州北部和中部的闪电密度较大,但对应的正地闪强度却相对更弱,基本在30 kA以下,而密度更小的区域对应的正地闪强度更大,能够达50 kA以上。

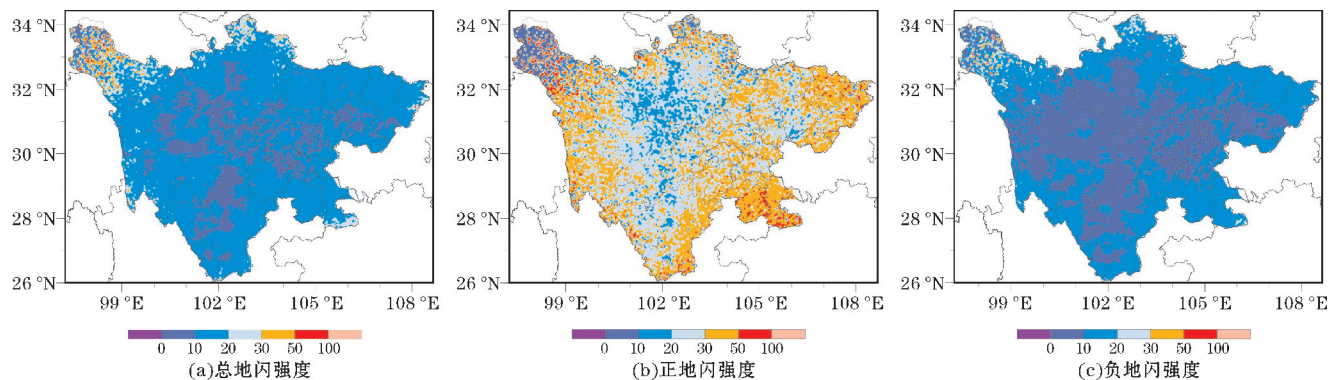


图4 四川省闪电平均电流强度分布图

3 闪电特征和海拔高度的关系分析

3.1 闪电强度和密度与海拔高度的相关性分析

针对两个或多个变量进行相关性分析,进而判断变量的相关密切程度,而变量之间也应存在一定的联系,相关性并不代表因果关系。本研究利用皮尔逊(Pearson)双变量相关性检验^[15-16],对闪电密度和强度与海拔高度的相关性进行分析。其中,Pearson 相关系数 r 的算法公式:

$$r = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X - \bar{X})^2 \sum (Y - \bar{Y})^2}} = \frac{l_{XY}}{\sqrt{l_{XX}l_{YY}}}$$

式中, X 和 Y 为变量因子, \bar{X} 和 \bar{Y} 为变量的平均值。通过数据筛选,排除奇异值等,共计 31623 个样本变量纳入统计分析。表 1 给出了正、负地闪的密度和强度分别与海拔高度的相关性分析结果。除了正地闪密度没有通过显著性水平检验,其余变量的显著性水平均为 0.00,全部通过了 0.01 的显著性检验^[7](显著性水平超过 0.05,则没有通过显著性检验,即无相关性),说明正地闪密度的分布与海拔高度无关。然而,负地闪密度与海拔高度存在明显的负相关,相关系数达到了 -0.42,表明随海拔高度的增加负地闪密度越

同样结合海拔高度的分布特征(图 2),四川盆地的负地闪强度具有一定的规律可循,其北部、南部海拔高度在 0.5 ~ 1.0 km 的山地区域,强度集中分布在 10 ~ 20 kA,而海拔小于 0.5 km 的区域则主要分布在 10 kA 以下;攀西地区海拔高度在 1.0 ~ 2.0 km 的狭长地形带区域对应的负闪电强度多数在 10 kA 以下,而超过 2.0 km 海拔的区域则大多数都在 20 kA 以上。综上分析,说明四川盆地和攀西地区负地闪强度与海拔高度在空间上呈正相关,即海拔高度越高对应的负地闪强度越强。

小。同样,正地闪强度和负地闪强度与海拔高度均存在一定的负相关,相关系数分别为 -0.093 和 -0.072,但是相关性没有负地闪密度的强。

表 1 闪电密度和强度与海拔高度的相关性分析

变量	显著性水平	与海拔高度的相关系数
正地闪密度	0.982	0.00
正地闪强度	0.00	-0.093 *
负地闪密度	0.00	-0.420 *
负地闪强度	0.00	-0.072 *

注:* 表示在 0.01 水平上显著相关。

3.2 不同海拔高度的闪电(正、负)平均密度分布特征

为进一步分析海拔高度的变化与闪电密度和强度的关系,对海拔高度进行了等级范围划分,并对比分析不同海拔高度范围内对应的闪电密度和强度的关系。该高度划分与地形地貌分类有一定的对应关系^[1],这里不具体展开。

图 5 为不同海拔高度段和对应的闪电年平均密度分布关系图。结果表明,不同海拔高段对应的负地闪年平均密度均明显高于正地闪。负地闪年平均密度随海拔高度的增加呈减少的趋势(蓝色柱形图),与相关性分析结果一致。当海拔高度低于 0.5 km 时,负地闪密度为 39.0 次,明显高于其他海拔高度段所对应的;其次是海拔高度在 0.5 ~ 1.0 km 时,为 20.3 次;当海拔高

度在2.0~3.0 km时,为14.0次,仅比海拔低于1.0 km对应的负地闪年平均密度小;当海拔高度高于4.0 km时,负地闪年平均密度仅有7.2次。

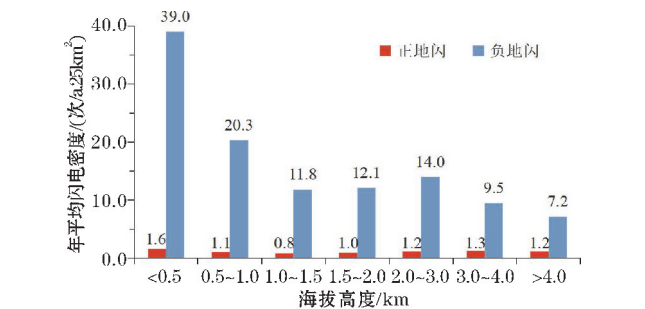


图5 不同海拔高度范围与闪电平均密度分布关系图

正地闪平均密度相对负地闪的明显偏小,各海拔高度段对应的正地闪年平均密度均在1.0次左右,当海拔高度低于0.5 km时,密度最大,但只有1.6次。尽管前面结果显示正地闪密度和海拔高度没有明显的相关性,但是从不同海拔高度范围分析来看(红色柱形图),随着海拔高度的增加,正地闪年平均密度呈先减小再增加的趋势,海拔高度在1.0~1.5 km,对应的正地闪年平均密度最小,仅有0.8次,从海拔高度空间分布图可知,该海拔高度主要集中在盆地周边山区一地带,属于高原与盆地的过渡带区域。

3.3 不同海拔高度的闪电平均强度分布特征

图6为不同海拔高度范围与闪电平均电流强度的关系分布图。结果表明,不同海拔高度范围的正地闪强度均强于负地闪强度,前者约为后者的2~3倍。整体上,两者与各海拔高度范围的关系同相关性分析结果一致,均无明显的相关性。正地闪(红色柱形图)和负地闪(蓝色柱形图)强度均在海拔高度1.0~1.5 km为最强,分别为44.3 kA和17.5 kA,结合海拔高度的空间分布,发现1.0~1.5 km的海拔高度主要集中在盆周山区一带,即海拔高度跨度最明显的区域,该区域闪电强度最强应该与地形抬升作用有一定的关系。平均强度最弱的正地闪分布在海拔高度3.0~4.0 km,即川西

高原和攀西地区西北部的高原地区,为32.4 kA,由于海拔高度越高,能量条件相对低海拔地区较差,而正地闪的发生需要在更高的位置放电^[3-4],这可能是高海拔地区正闪强度相对较弱的原因;平均强度最弱的负地闪分布在海拔高度小于0.5 km的盆地内,为11.5 kA,该海拔主要为平原地区,没有明显的地形抬升作用,若一般的对流发展高度可能不会太高,所以负地闪强度相对较弱。

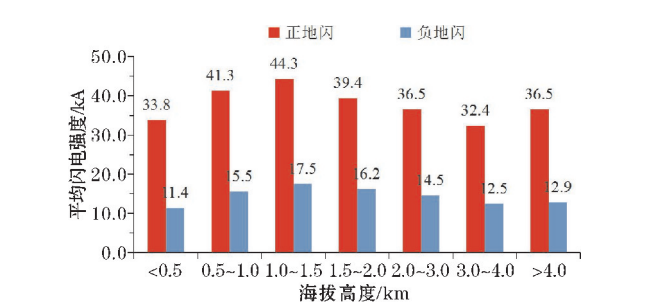


图6 不同海拔高度范围与闪电强度分布关系图

另外,闪电强度是闪电最重要的特征之一,也是雷电防护和研究最关注的参量之一,所以将正、负闪电强度进行再分级,并分析其在不同海拔高度范围内的占比,为雷电防护、防雷检测等工作提供参考。表2将闪电强度 CI (current intensity) 划分为5个等级,其中30~50 kA占比最多,达到了42.2%,其次是20~30 kA,为29.9%,而小于10 kA的仅有0.1%。具体分析,30~50 kA的正地闪在各个海拔高度段分布较为均匀,其中占比最多的两个在海拔高度为0.5~1.0 km和4.0 km以上,分别为17.4%和17.0%,其余的在各海拔高度占比约10%~15%。另外,10 kA以下、10~20 kA及20~30 kA的正地闪则主要分布在海拔3.0 km以上,分别占比36.1%、59.8%及46.1%,可见电流强度更弱的正地闪容易发生在高海拔地区。而强度超过50 kA的闪电则主要集中在0.5~1.0 km、1.0~1.5 km及4.0 km以上,分别占比19.2%、20.7%及22.1%,3个海拔高度段共计占比62%。

表2 正地闪平均强度闪电在不同海拔高度中的比例分布 单位:%

正地闪 强度 CI/kA	强度等级 占比	海拔高度/km						
		<0.5	0.5~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0	2.0~3.0	3.0~4.0	>4.0
CI<10	0.1	13.9	11.1	8.3	13.9	16.7	16.7	19.4
10<CI<20	9.2	9.9	5.8	5.4	6.3	12.7	29.8	30.0
20<CI<30	29.9	15.1	11.0	6.7	6.9	14.2	23.1	23.0
30<CI<50	42.2	15.7	17.4	13.4	9.5	13.5	13.5	17.0
CI>50	18.5	5.6	19.2	20.7	9.7	11.1	10.5	22.1

同样地,类似于正地闪的划分等级,表3也给出了负地闪强度在不同海拔段的占比情况。与正地闪强度

占比不同的是,负地闪强度主要集中在20 kA以下,明显弱于正地闪,其中10~20 kA占比最多为56.4%,其

次是10 kA以下占比 28% ,而对应正地闪强度占比最多的是 30 ~ 50 kA ,为42.2% ,此强度负地闪仅占比 2.3% 。具体分析,10 ~ 20 kA的负地闪在各个海拔高度段分布同样较为均匀,且最多的两个占比与正地闪完全一致,出现在海拔高度为0.5 ~ 1.0 km和4.0 km 以上,分别为17.3% 和17.1% ,其余的在各海拔高度段

占比分布在 9% ~ 16% 。10 kA以下强度的负地闪则主要分布在海拔4.0 km以上,占比为31.1% 。而超过 30 kA的闪电则主要集中在海拔4.0 km以上,其中 30 ~ 50 kA在该海拔高度占比32.4% ,50 kA 以上占比 40.4% ,可见电流强度更强的负地闪更容易发生在高海拔地区。

表3 负地闪平均强度闪电在不同海拔高度中的比例分布 单位:%

负地闪 强度 CI/kA	强度等级 占比	海拔高度/km						
		<0.5	0.5 ~ 1.0	1.0 ~ 1.5	1.5 ~ 2.0	2.0 ~ 3.0	3.0 ~ 4.0	>4.0
CI<10	28.0	17.8	7.7	2.8	4.6	12.6	23.5	31.1
10<CI<20	56.4	14.3	17.3	13.2	9.2	13.2	15.8	17.1
20<CI<30	12.8	1.5	19.6	27.3	13.8	14.1	10.7	13.0
30<CI<50	2.3	2.3	12.0	12.8	8.2	15.3	17.0	32.4
CI>50	0.5	4.8	12.3	4.1	8.2	15.8	14.4	40.4

4 结论

(1)四川省 2015 ~ 2019 年共计发生地闪 2785031 次,平均每年发生 557006 次,包括负地闪 516800 次,正地闪 40206 次,负地闪频次明显多于正地闪,前者约为后者的 13 倍;负地闪平均强度则弱于正地闪,负地闪平均强度为11.5 kA,正地闪的平均强度为33.8 kA,后者约为前者的 3 倍。

(2)全省海拔呈西高东低特征,盆地海拔主要在 0.2 ~ 1.0 km,川西高原主要在3.0 ~ 4.0 km及以上,攀西地区主要在1.5 ~ 3.0 km,中部一线存在明显的低海拔狭长的复杂地形带(海拔在1.0 ~ 2.0 km)。当海拔高度低于0.5 km的盆地东部和地形更为复杂的攀西地区狭长低海拔地形带(1.0 ~ 2.0 km)的闪电密度更大,年平均闪电密度超过 50 ~ 100 次/(a · 25 km²)或以上,这可能与低海拔区域的能量、水汽条件相对更好以及山地地形抬升作用更强有一定的关系。

(3)随海拔高度的增加负地闪密度呈减少的趋势,两者呈明显的负相关,其相关系数达到了-0.42,其中当海拔高度低于0.5 km时,负地闪年平均密度最大,为39.0次;当海拔高度高于4.0 km时,负地闪年平均密度最小,仅有7.2次。正地闪平均密度相对负地闪的明显偏小,正地闪年平均密度呈先减小再增加的趋势,当海拔高度低于0.5 km时,密度最大,但也只有1.6次,当海拔高度在1.0 ~ 1.5 km,正地闪年平均密度最小,仅有0.8次。

(4)正地闪和负地闪平均强度均在海拔高度为 1.0 ~ 1.5 km为最强(盆地西部沿山和攀西地区,分别为44.3 kA和17.5 kA,即地形海拔跨度最大和最为复

杂的地区,同样与地形抬升作用有关系,而电流强度较弱的正地闪和电流强度更强的负地闪偏向于发生在海拔更高的地区。

参考文献:

[1] 马力,冯汉中,杨进,等. 四川省天气预报员手册[M]. 成都:西南交通大学出版社,2014.

[2] 谢冬,王霄,李平兰,等. 云贵高原和青藏高原闪电活动的对比分析[J]. 高原山地气象研究, 2022,42(S1):82-87.

[3] 王道洪,郅秀书,郭昌明. 雷电与人工引雷[M]. 上海:上海交通大学出版社,2000.

[4] 张义军,言穆弘,孙安平,等. 雷暴电学[M]. 北京:气象出版社,2009.

[5] 郑栋,张义军,吕伟涛,等. 大气不稳定参数与闪电活动的预报[J]. 高原气象,2005,24(2):196-203.

[6] 张婧雯,张远扬,刘畅,等. 四川省复杂地貌区域雷电活动中大气电场特征研究[J]. 高原山地气象研究,2021,41(4):56-60.

[7] 马明,陶善昌,祝宝友,等. 卫星观测的中国及周边地区闪电密度的气候分布[J]. 中国科学 D 辑地球科学,2004,34(4):298-306.

[8] Mazarakis N, Kotroni V, Lagouvardos K, et al. Storms and lightning activity Greece during the warm periods of 2003-2006[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology,2008.46(12):3089-3098.

[9] 刘海兵,张云峰,李玉塔. 江西省闪电特征海拔高度影响分析[J]. 气象科技,2017,45(2):342-348.

- [10] 李政,肖稳安,李家启,等. 区域海拔高度变化对闪电特征影响的初步分析[J]. 湖北大学学报(自然科学版),2011,33(2):197-201.
- [11] 王志超,庞文静,梁丽,等. ADTD 闪电定位网在北京地区定位效率的自评估[J]. 气象科技,2018,46(4):638-643.
- [12] 孙凌,周筠珺,郭在华,等. 湖南雷暴天气中地闪活动的预报研究[J]. 成都信息工程学院学报,2010,25(2):186-192.
- [13] 周威,张武龙,康岚等. 基于 EC 模式闪电格点概率预报产品应用研究[J]. 气象科技,2020,48(6):862-870177-183.
- [14] 陈双,王迎春,张文龙,等. 复杂地形下雷暴增强过程的个例研究[J]. 气象,2011,37(7):802-813.
- [15] 杨帆,冯翔,阮羚,等. 基于皮尔逊相关系数法的水树枝与超低频介损的相关性研究[J]. 高电压器,2014,50(6):21-25.
- [16] 赵海龙,张丹丹,黄松,等. 基于皮尔逊相关系数的海南省地闪密度和雷击故障关系分析[J]. 高电压器,2019,55(8):186-192.

Study on the Relationship between the Characteristics of Lightning Activity and Altitude

WEI Qing¹, ZHOU Wei², CHEN Xiaochen¹, WU Rong¹, XIE Yaxiong¹, ZHANG Jingwen¹

(1. Sichuan Lightning Protection Center, Chengdu 610072, China; 2. Sichuan Provincial Meteorology Observatory, Chengdu 610072, China)

Abstract: In order to deeply analyze the characteristics of lightning activity and its relationship with altitude in Sichuan Province, the ground lightning data and altitude information data of Sichuan province from 2015 to 2019 were used. The spatial distribution characteristics of annual average lightning density and average current intensity, and the correlation between lightning characteristics and altitude, and the relationship between different altitude ranges and lightning intensity are analyzed by using Pearson bivariate analysis and other methods. The results show that the density of negative ground lightning is 13 times as much as positive ground lightning, while the intensity of positive ground lightning is 3 times as much as negative ground lightning. Density of negative lightning decreases with the increase of altitude, and the correlation coefficient between them reached -0.42 . With the increase of altitude, the density of positive ground lightning decreases first and then increases, but there is no significant correlation between them. The intensity of positive and negative ground lightning is the strongest at the altitude of $1.0-1.5$ km, while the positive ground lightning with weak intensity and negative ground lightning with strong intensity tend to occur in higher altitude.

Keywords: meteorology; atmospheric electricity; lightning characteristics; spatial distribution; altitude; Pearson bivariate analysis