

闪电与大气层结因子相关性的探讨*

张喜轩 张翠华

(中国科学院兰州高原大气物理研究所)

众所周知,闪电总是与雷暴等强烈对流性天气的发生相联系在一起。“闪电造成的总死亡人数,比包括龙卷和台风在内的其他强烈天气现象造成的死亡都多。另一个值得关心的方面是闪电对森林的影响,森林这种自然资源正在失掉其不断增长的趋势”^[1]。闪电引起的森林火灾是造成这一现象的主要原因。基于这个目的,我们利用我所的双通道型(DB型)闪电计数器,其灵敏度为 0.4 s,有效观测范围为 40 km、为期三年(1977,1978,1985)对甘肃平凉和兰州东乡地区的观测资料,结合其相应的早晨探空资料,进行一个初步的探讨。

1. 闪电与层结因子相关性的统计分析

根据对闪电观测结果表明,冰雹云的闪电频率远超过雷雨云^[2]。降雹大小和雷暴的发生^[3]与大气层结条件密切相关的,它们主要基于这三项指标——不稳定度、余额不稳定性 5°C 处的环境温度和层结的湿度条件决定的^[4]。根据对甘肃平凉地区气象台为期 10 年(1963—1972)发生在六盘山区的雷暴和雹暴的早晨探空资料统计结果和实践表明,这两者具备中湿条件^[4,5],这样我们在进行数理统计时,可采用二元回归分析方法,使得计算大大简化了。在二元回归计算过程中全部用距平值^[1],现将其结果列于表 1 中。

我们设想闪电总数有如下关系式

$$y = a + b_1 x_1 + b_2 x_2 \quad (1)$$

其中 x_1 为不稳定度值, x_2 为余额不稳定性 5°C 处的环境温度。这二项值可根据当天早晨的探空资料,根据作者的预报冰雹的方法求得。 y 为所求的该日雷暴(或雹暴)的闪电总次数。

根据最小二乘法原理,可以导出 b_1, b_2 值必须满足这样的方程^[6],

$$\begin{cases} l_{11} b_1 + l_{12} b_2 = l_{10} \\ l_{21} b_1 + l_{22} b_2 = l_{20} \end{cases} \quad (2)$$

根据表 1 中的二元回归计算结果可得:

$$\begin{cases} l_{11} = 207.75 & l_{22} = 2464.47 & l_{00} = 62573.4 \times 10^4 \\ l_{12} = l_{21} = -315.85 & l_{10} = 174358.0 & l_{20} = -739067.6 \end{cases} \quad (3)$$

现将(3)式各值代入(2)式便可求得: $b_1 = 476, b_2 = -239$ 。常数 a 值可由此算出: $a = \bar{y} - b_1 \bar{x}_1 - b_2 \bar{x}_2$, 其中 $\bar{y}, \bar{x}_1, \bar{x}_2$ 值由表 1 中可知,将 b_1, b_2 值代入便得: $a = 4639 - 476 \times 7.5 - (-239) \times (-32.2) = -6627$

因此闪电的预报方程是:

$$y = -6627 + 476 x_1 - 239 x_2 \quad (4)$$

鉴于闪电计数器对雷暴和雹暴观测问题上开机时间和观测上出现的误差性,为此我们应用线性回归的方差分析,对它进行 F 检验^[7]。其表达式如下:

* 本文于 1987 年 4 月 13 日收到, 1988 年 4 月 25 日收到修改稿。

1) 黄嘉佑, 气象统计预报试用教材, 北京大学地球物理系气象专业。

表 1 二元回归计算结果表

日期	编号	x_{1i}	x_{2i}	y_i	$(x_{1i}-\bar{x}_1)$	$(x_{2i}-\bar{x}_2)$	$(y_i-\bar{y})$	$(x_{1i}-\bar{x}_1)^2$	$(x_{2i}-\bar{x}_2)^2$	$(y_i-\bar{y})^2$	$(x_{1i}-\bar{x}_1)(x_{2i}-\bar{x}_2)$	$(x_{1i}-\bar{x}_1)(y_i-\bar{y})$	$(x_{2i}-\bar{x}_2)(y_i-\bar{y})$
78.6.18	1	9.5	-47.0	3776	2.0	-14.8	-863	4.00	219.04	74.5×10^4	-29.6	-1726.0	12772.4
6.19	2	5.5	-36.0	2585	-2.0	-3.8	-2054	4.00	14.44	421.9×10^4	7.6	4108.0	7805.2
6.25	3	6.0	-35.0	8559	-1.5	-2.8	3920	2.25	7.84	1536.6×10^4	4.2	-5880.0	-10376.0
6.30	4	9.0	-28.0	2840	1.5	3.2	-1999	2.25	10.24	399.6×10^4	4.8	-2998.5	-6396.8
7.9	5	9.5	-38.0	2831	2.0	-5.8	-1808	4.00	33.64	326.9×10^4	-11.6	-3616.0	10486.4
7.10	6	4.0	-12.5	1679	-3.5	19.7	-2960	12.25	388.09	876.2×10^4	-68.95	10360.0	-58312.0
7.12	7	5.5	-26.5	697	-2.0	5.7	-3942	4.00	32.49	1553.9×10^4	-11.40	7884.0	-22469.4
7.17	8	9.5	-31.0	1238	2.0	1.2	-3401	4.00	1.44	1156.7×10^4	2.4	-6802.0	-4081.2
7.18	9	12.0	-45.5	18630	4.5	-13.3	13991	20.25	176.89	19574.8×10^4	-59.85	62959.5	-186080.3
7.20	10	7.5	-34.0	8681	0	-1.8	4042	0	3.24	1633.8×10^4	0	0	-7276.6
85.6.16	11	8.0	-37.0	2761	0.5	-4.8	-1878	0.25	23.04	352.7×10^4	2.4	-939.0	9014.4
6.18	12	5.0	-34.0	4559	-2.5	-1.8	-80	6.25	3.24	0.6×10^4	4.5	200.0	144.0
6.20	13	7.5	-15.5	189	0	16.7	-4450	0	278.89	1980.3×10^4	0	0	-74319.0
7.4	14	4.0	-18.5	863	-3.5	13.7	-3776	12.25	187.69	1425.8×10^4	-47.95	13216.0	-51731.2
7.6	15	5.0	-36.5	1441	-2.5	-4.3	-3198	6.25	18.49	1022.7×10^4	10.75	7995.0	13751.4
7.7	16	6.0	-38.5	3097	-1.5	-6.3	-1542	2.25	39.69	237.8×10^4	9.45	2313.0	9714.6
7.12	17	11.0	-23.5	260	3.5	8.7	-4379	12.25	75.69	1917.6×10^4	30.45	-15326.5	-38097.3
7.18	18	9.0	-36.0	8763	1.5	-3.8	4124	2.25	14.44	1700.7×10^4	-5.7	6186.0	-15671.2
7.30	19	14.5	-42.0	11808	7.0	9.8	7169	49.00	96.04	5139.5×10^4	-68.6	50183.0	-70256.2
8.3	20	11.5	-43.5	12293	4.0	-11.3	7654	16.00	127.69	5858.4×10^4	-45.2	30616.0	-86490.2
8.5	21	9.0	-47.0	5900	1.5	-14.8	1261	2.25	219.04	159.0×10^4	-22.2	1891.5	-18662.8
8.9	22	3.0	-27.5	1777	-4.5	4.7	-2862	20.25	22.09	819.1×10^4	-21.15	+12879.0	-13451.4
8.10	23	7.0	-39.5	14456	-0.5	-7.3	9817	0.25	53.29	9637.3×10^4	3.65	-4908.5	-71664.1
8.11	24	7.5	-22.5	6835	0	9.7	2196	0	94.09	482.2×10^4	0	0	21301.2
8.13	25	7.5	-30.5	1959	0	1.7	-2680	0	2.89	718.2×10^4	0	0	-4556.0
8.18	26	9.5	-30.5	1507	2.0	1.7	-3132	4.00	2.89	980.9×10^4	3.4	-6264.0	-5324.4
77.6.23	27	5.0	-35.5	4155	-2.5	-3.3	-484	6.25	10.89	23.4×10^4	8.25	1210.0	1597.2
6.24	28	5.0	-36.5	3760	-2.5	-4.3	-879	6.25	18.49	77.3×10^4	10.75	2197.5	3779.7
6.25	29	8.0	-35.0	5860	0.5	-2.8	1221	0.25	7.84	149.1×10^4	-1.4	610.5	-3418.8
6.28	30	6.0	-26.0	2420	-1.5	6.2	-2419	2.25	38.44	492.4×10^4	-9.3	3328.5	-13757.8
7.12	31	8.0	-26.5	3225	0.5	5.7	-1414	0.25	32.49	199.9×10^4	2.85	-707.0	-8059.8
7.21	32	6.5	-18.5	965	-1.0	13.7	-3674	1.00	187.69	1349.8×10^4	-13.7	3674.0	-50333.8
7.27	33	6.5	-27.5	2925	-1.0	4.7	-1714	1.00	22.09	293.8×10^4	-4.7	1714.0	-8055.8
Σ		248.0	-1062.5	153094	207.75	2464.47	62573.4 $\times 10^4$				-315.85	174358.0	-739067.6
平均		7.5	-32.2	4639							l_{11}	l_{10}	l_{20}

$$F = \frac{u/m}{Q/n-m-1} \quad (5)$$

其中 m 为预报因子数, n 值为样本数, 剩余平方和的自由度 $f = n - m - 1 = 33 - 2 - 1 = 30$

$$\text{计算平方和: } u = \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n b_i l_i, \quad (6)$$

$$\text{其中 } l_i = \sum_{i=1}^n x'_i y'_i$$

$$\text{由表 1 计算可知: } l_{1y} = \sum_{i=1}^n x'_{1i} y'_i = 174358.0, l_{2y} = \sum_{i=1}^n x'_{2i} y'_i = -739067.6, b_1 = 476, b_2 = -239,$$

$$l_{yy} = l_{0y} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = 62573.4 \times 10^4,$$

$$\text{则 } u = 476 \times 174358 + 239 \times 739070.4 = 25963 \times 10^4 \quad (7)$$

$$Q = l_{yy} - u = 62573 \times 10^4 - 25963 \times 10^4 = 36610 \times 10^4 \quad (8)$$

将(7)和(8)式有关值代入(5)式中便得:

$$F = \frac{25963 \times 10^4 / 2}{36610 \times 10^4 / 30} = 10.6$$

取显著水平 $\alpha = 0.01, f_1 = 2, f_2 = 30$, 查数理统计表, 则有 F 检验的临界值 $F(0.01, 2, 30) = 5.39$, $F > F(0.01, 2, 30)$, 说明建立的闪电预报的线性复回归方程 $y = -6627 + 476x_1 - 239x_2$, 在显著水平 $\alpha = 0.01$ 时回归效果显著。

在二元回归分析中, 我们可用偏回平方和确定这二个因子——不稳定度值和余额不稳定度 5°C 处的环境温度, 那个因子对雷暴或雹暴的闪电总数起着决定性作用。其所用公式如下:

$$p_1 = b_1 \left(l_{11} - \frac{l_{12}^2}{l_{22}} \right) \quad (9)$$

$$p_2 = b_2 \left(l_{22} - \frac{l_{12}^2}{l_{11}} \right) \quad (10)$$

将二元回归计算结果(3)式有关值和 b_1, b_2 值代入(9)和(10)式中, 便可求出 $p_1 = 37.8 \times 10^6, p_2 = 113.34 \times 10^6$, 由此不难判断 $p_2 > p_1$ 值, 因此通过数理统计结果可以证实: 余额不稳定度 5°C 处的环境温度对雷暴(或雹暴)过程的闪电起着决定性作用。为了证实这个问题, 也可以用“标准回归系数”作比较。其数学表达式如下:

$$b'_i = b_i \sqrt{\frac{l_{ii}}{l_{00}}} \quad (i=1, 2) \quad (11)$$

b'_1, b'_2 与 x_1, x_2, y 的单位无关, 那个绝对值大, 那个因子就是起着决定性作用。现将二元回归计算结果的(3)式有关值和 b_1, b_2 值代入(11)式中便可求得:

$$b'_1 = b_1 \sqrt{\frac{l_{11}}{l_{00}}} = 476 \sqrt{\frac{207.75}{62573.4 \times 10^4}} = 0.274 \quad (12)$$

$$b'_2 = b_2 \sqrt{\frac{l_{22}}{l_{00}}} = -239 \sqrt{\frac{2464.47}{62573.4 \times 10^4}} = -0.474 \quad (13)$$

从(12)和(13)式的计算结果, 不难看出 $|b'_2| > |b'_1|$ 值, 这和偏回归平方和的结论一致。它证实了余额不稳定度 5°C 处的环境温度对雷暴(或雹暴)过程的闪电总数起着决定性作用。不稳定度值在雷暴(或雹暴)过程中形成闪电问题上, 是不是可以忽略? 同样可用数理公式推算。其表达式为:

$$t_i = \sqrt{\frac{p_i}{s}} \quad (i=1, 2) \quad (14)$$

$$\text{其中: } S = \sqrt{\frac{S_{\text{余}}}{n-m-1}} \quad (15)$$

$S_{\text{余}} = l_{00} - S_{\text{回}}$, 从 (3) 式已知 $l_{00} = 62573.4 \times 10^4$, 从 (7) 式已知 $u = S_{\text{回}} = 25963 \times 10^4$, 因此 $S_{\text{余}} = 36610.4 \times 10^4$, 所以 $S = \sqrt{\frac{36610.4 \times 10^4}{33-2-1}} = 3493$, 将其值代入 (14) 式中, 则有:

$$t_1 = \frac{\sqrt{p_1}}{S} = \frac{\sqrt{37.8 \times 10^6}}{3493} = 1.76$$

$$t_2 = \frac{\sqrt{p_2}}{S} = \frac{\sqrt{113.34 \times 10^6}}{3493} = 3.05$$

从求出的 t_1 值大于 1, 但小于 2, 因此从数理统计学的角度认为, 不稳定度值对雷暴 (或雹暴) 过程中形成闪电问题上具有一定的影响, 而不能忽略。因此当大气层结满足中等湿度条件下, 闪电的预报方程表达如下:

$$y = -6627 + 476x_1 - 239x_2 \quad (16)$$

2. 对雷暴和雹暴过程中闪电总数的估算

基于上述, 根据对甘肃平凉和兰州东乡地区的雷暴和雹暴过程的闪电情况, 结合其相应的当天早晨大气层结资料, 所导出的闪电预报方程 (16) 式进行估算, 现将其数据列于表 2 中, 只能供人们作参考。因为闪电情况可能会因地理位置和季节不同有很大的差别, 况且我们只限于甘肃两地的观测资料所导出的闪电预报方程。

表 2 对各类雹暴和雷暴过程的闪电总数估算结果表

类别	判 据			降雹大小及其受灾情况	闪电(击)总数范围
	不稳定度值 (°C)	余额不稳定度 5°C 处的环境温度	中层平均相对湿度 (700-400hPa)		
特强雹暴	$\Delta T \geq 6^\circ\text{C}$	此环境温度必须低于 -45°C 以下	中 湿	50至70多mm 受灾面积在 20万亩以上	8875—13200次甚至更多
强雹暴	$\Delta T \geq 6^\circ\text{C}$	此环境温度在 -37°C — -45°C 之间变化	中 湿	最大降雹 40—50mm 雹灾面积 10—20万亩	6500—8875次之间变化
中等雹暴	$\Delta T \geq 6^\circ\text{C}$	在 -26°C — -36°C 之间	中 湿	最大降雹 25mm 至 40mm 之间 雹灾 1—10 万亩之间	2200—6500次范围
弱雹暴	$\Delta T \geq 5^\circ\text{C}$	-12°C — -25°C	中 湿	最大雹径可达 25mm	1000—2200次范围
雷 暴	$\Delta T \geq 3-5^\circ\text{C}$	通常此环境温度高于 -12°C 以下	中 湿		通常闪电(击)总数在 1000 次范围内, 但也有例外

3. 讨 论

基于上述, 我们简要地讨论二个问题:

第一个问题, 由闪电预报方程 (16) 式可知, 当 y 值为零时, 实质就是阵性降水天气。由此可以解出层结的不稳定性与余额不稳定度 5°C 处的环境温度这两者间的关系。即:

$$x_1 = \frac{476x_2 - 6627}{239} \quad (17)$$

由 (17) 式可以定性地说明二个问题: (1) 阵性降水天气, 它的最大不稳定层高度要比雷暴天气来的低。(2) 当不稳定度值很小的情况下, 其不稳定层伸展较高才能发生雷暴; 反之, 当不稳定度值较大时,

其不稳定层次较低同样可以出现雷暴天气。

第二个问题:关于暖性积云能否产生闪电的问题。从我们导出的闪电预报方程(16)式,似乎可以得到答案。我们假定:余额不稳定度 5°C 处的环境温度落在零度层,由此可以解出 y 值要大于零值的话,其不稳定度值要高达 14°C ,也就是说,大气层结处于极端不稳定的条件下,暖性积云才会发生闪电之可能。其原因就在于,余额不稳定度 5°C 处的环境温度对闪电起着决定性作用。在暖性积云中,此环境温度处在正温区,它对闪电起着负的贡献;反之,此环境温度落在负温区,才是对闪电起着正的贡献。由此可以推断,最大不稳定层至余额不稳定度 5°C 处的能量区间,大量过冷却水滴被冻结的程度,是对闪电形成起着决定性作用,而对流作用对闪电只是起着较次要的作用。

4. 结 论

综合本文上述,可以得出二点结论:

1) 闪电过程,实质上就是不稳定能量的释放过程。通过上述资料进行初步的数理统计分析结果表明,在层结满足中等湿度条件下,余额不稳定度 5°C 处的环境温度对闪电起着决定性作用。由于甘肃平凉和兰州东乡两地的雷暴和雹暴的此环境温度处在负温区,强雹暴的此环境温度分别比中等雹暴和弱雹暴平均说来要低 10°C 和 20°C 左右,而雷暴天气的余额不稳定度 5°C 处的环境温度比雹暴天气的此环境温度来得高,由于此环境温度高低的不同,其云中的过冷却水滴被冻结的程度和形成的降雹大小各不相同,因此造成云中的闪电程度也大不相同。

2) 在闪电问题上,不稳定度值大小对它起着一定的影响,而不是决定性影响,因此对于暖性积云而言,只有处在极端不稳定的条件下,才会有发生闪电之可能;但其闪电与冷性积云是无法相比的。其原因在于,暖性积云中,它的余额不稳定度 5°C 处的环境温度是处在正温区,它对闪电是起着负的贡献;相反,冷性积云中,此环境温度落在负温区,它对闪电是起着正的贡献。

参 考 文 献

- [1] Taylor, A. R., Lightning effect on the forest complex, *Proc. Ann. Tall Timber fire Ecology Conf.* 9, 127—150, 1969.
- [2] 叶宗秀、陈倩、郭昌明、夏雨人,冰雹云的闪电频数特征及其在防雷中的应用, *高原气象*, 1, 2, 53—59, 1982.
- [3] 张喜轩,预报冰雹的方法, *气象*, 1980年第4期14—15页。
- [4] 张喜轩,甘肃平凉地区冰雹和雷雨天气的层结特征及其在预报中的应用, *北方灾害性天气汇编*, 1976年12月。
- [5] 张喜轩,冰雹天气的短期预报检验, *高原气象*, 2, 4, 71—78, 1983.
- [6] 中国科学院数学研究所统计组编著, *常用数理统计方法*, 100, 科学出版社, 1974年。
- [7] 李云林等, *气象站天气预报*, 143—148, 河南人民出版社, 1980年12月。

SEARCH FOR CORRELATIVITY OF LIGHTNING (STROKE) WITH STRATIFICATION FACTORS

Zhang Xixuan

Zhang Cuihua

(Lanzhou Institute of Plateau Atmospheric Physics, Academia Sinica)

Abstract

Based on the statistical method, the double channel lightning counter (DB-type) data for hailstorm and thunderstorm, and its stratification correspondly in summer 1977-1978 and 1985 in the Lanzhou and the Pinliang area of the Gansu province are analysed. The result shows that the numbers of stroke in lightning process are mainly decided by environment temperature at the residual instability of 5°C. The instability have some effect for numbers of stroke, but is not decided for it. Forecasting equation is conducted in this paper with statistical analysis.