

文章编号: 1000-0534(2002)06-0632-05

平凉地区对流风暴地闪活动与环境层结因子相关性分析

张翠华, 张义军, 郅秀书, 王怀斌

(中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 利用 1997 年和 1998 年 6~8 月间在甘肃平凉地区的 3 站闪电定位系统所取得的地闪资料与当天早晨探空资料进行了初步的统计分析。分析表明, 对流风暴中地闪活动与环境层结因子之间有良好的相关性, 不稳定性、余额不稳定性 5°C 处的环境温度、温度层结中(中层)平均相对湿度是影响对流风暴中地闪活动的重要因子, 对流风暴的地闪活动可通过这些因子进行预报。

关键词: 地闪; 对流风暴; 环境层结

中图分类号: P457 **文献标识码:** A

1 引言

对流风暴中一般都存在大量的雷电活动, 雷电特别是地闪常常造成人员伤亡、电力系统的损坏、引起森林火灾等, 造成的损失越来越严重。随着雷电探测技术的发展, 国内外利用闪电定位系统和多种雷达对对流风暴进行了大量的观测, 取得了许多有意义的结果。研究发现^[1], 利用对流风暴系统中的闪电资料可以预测对流风暴过程及其发展趋势等, 但能否提前预报对流风暴中的雷电活动, 一直是人们所关注的重要问题。张喜轩等^[2]曾利用闪电计数器的观测资料, 结合当天早晨探空资料, 探讨了闪电(包括云闪和地闪)与大气层结的相关性, 并提出了一个两因子闪电预报方程。但由于观测条件的限制, 难以对常常引起严重灾害的地闪进行有针对性的预报。大量的观测表明, 地闪和云闪的比例、地闪特性在不同地区、对不同类型的对流风暴都有较大差异。随着社会的发展, 人们户外活动的增多, 露天采矿以及重要建筑物的施工等, 对地闪提前预报的要求也越来越高, 因此对对流风暴中地闪活动的发生发展特征及其预报方法进行研究不仅具有重要的科学意义, 也具有实际应用价值。1997 年和 1998 年夏季我们在甘肃平凉雷电与雹暴实验站设置了 3 站闪电定位系统, 对这一地区的对流性

风暴的地闪活动进行了观测。本文利用所取得的地闪资料与当天早晨的探空资料进行了初步的统计分析, 研究了它们之间的相关性, 并对利用探空资料对对流风暴地闪活动进行预报的可能性进行了探讨。

2 观测实验和资料

1997 年和 1998 年 6~8 月间, 我们以甘肃平凉雷电与雹暴实验站($36^{\circ}34'N$, $106^{\circ}41'E$)为中心, 对对流风暴进行了综合观测, 观测设备主要有 JM-130 型 3 cm 雷达, 国产 713 雷达改装的双线偏振雷达及由三台闪电定向仪 (DF) 组成的闪电定位系统 (LLS)。三台 DF 分别设在六盘山、彭阳和平凉雷电与雹暴实验站, 分布相距约 40 km、40 km 和 30 km 的等腰三角形上(图 1), 都工作在中增益档, 相当于 90 km 的有效探测距离。三个 DF 的闪电资料包括闪电发生的时间、方向、强度、回击数等都实时传输给中心站的位置分析仪 PA (图像显示系统), 并在这里实时处理。本文选取了 22 次对流风暴过程的地闪定位资料结合当天早晨的探空资料进行分析。

收稿日期: 2001-01-07; 改回日期: 2001-10-24

基金项目: 中国科学院创新工程项目(KZCX2-201); 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所创新项目(210037)共同资助

作者简介: 张翠华(1956—), 女, 四川仁寿人, 实验师, 主要从事大气电学方面的研究

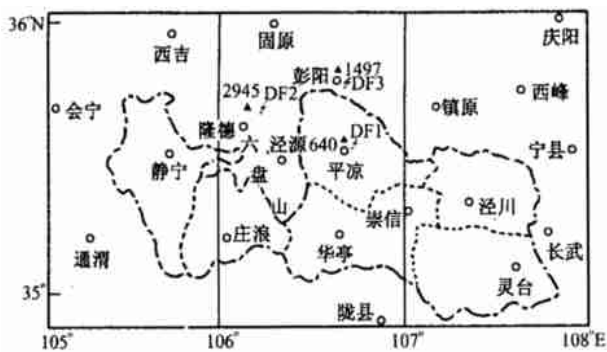


图 1 三站 DF 闪电定位位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of lightning location of 3 Direction Finder(DF)

3 地闪与层结因子相关性的统计分析

对流风暴的发生发展与大气层结条件密切相关, 有许多因子可能在不同程度上影响对流风暴的发生和发展。经过大量探空资料的研究发现, 不稳定度、余额不稳定度 5℃处的环境温度和层结湿度可能是影响对流风暴发生发展的重要因子^[3]。为了得到这三个因素与闪电频数之间的关系, 我们利用 1997 年和 1998 年 6~8 月间发生在测站覆盖范围内的 22 次对流风暴天气过程中的地闪定位资料与对应的 07:30 (北京时, 下同) 的探空资料进行多元线性回归分析。假设一次风暴过程中的地闪总次数与大气层结多种因素成正相关, 并有如下表达式:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \cdots + a_{m+1}x_m.$$

假设 $x_1, x_2, \cdots x_m$ 为大气层结因子数, $a_0, a_1, \cdots a_{m+1}$ 为对应因子的比例系数, y 为实际测量的地闪总数, Q 为计算的理论值与实际值之间的误差。根据最小二乘法估计原理^[4]:

$$Q = \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1x_{1i} + a_2x_{2i} + \cdots + a_{m+1}x_{mi})]^2,$$

为使 Q 达到最小, 采用乔里斯基(Cholesky)分解法求解回归系数, 得出对流风暴地闪活动与环境层结因子相关性的多元线性回归方程为

$$y = -2457 + 191x_1 - 73x_2 + 11x_3,$$

式中 x_1 为不稳定度值, x_2 为余额不稳定度 5℃处的环境温度, x_3 为中层(700~400 hPa)的平均湿度。这三项值可根据当天早晨的探空资料, 利用冰雹预报的方法^[3]求得。 y 为所求该日对流风暴中的地闪总次数。

由于观测中不可能避免出现误差, 因此有必要对上述结果进行回归效果分析。

3.1 线性复回归的方差分析

首先, 进行 F 检验^[3], 其表达式如下:

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

其中, m 为预报因子数, n 为样本数, Q 为剩余平方和, u 为回归平方和, 剩余平方和的自由度 $f = n - m - 1 = 22 - 3 - 1 = 18$ 。计算结果列于表 1。

表 1 线性回归方差

Table 1 Linear regression variance					
方差来源	平方和	自由度	方差	F	$F_{(0.01, 3, 18)}$
回归	14755138	3	4918379	20.01	5.09
剩余	4423902	18	245772		

从表中可以看出, 取显著水平 $\alpha=0.01, f_1=3, f_2=18$, 查数理统计表, 则有 F 检验的临界值 $F_{(0.01, 3, 18)}=5.09, F>F_{(0.01, 3, 18)}$, 说明建立的地闪与对流风暴的多元线性复回归方程 $y = -2457 + 191x_1 - 73x_2 + 11x_3$, 在显著水平 $\alpha=0.01$ 时回归效果显著。

3.2 复相关系数及预报因子的作用

在回归分析中, 首先讨论我们所建立的回归方程是否有意义, 其次是所用预报因子——不稳定度、余额不稳定度 5℃处的环境温度和 中层平均相对湿度, 三个因子中哪个因子对对流风暴的地闪总次数起着决定性的作用。下面将进行复相关系数和各单因子相关系数的检验, 其表达式为

$$R = \sqrt{1 - Q/d_{yy}},$$

式中, $d_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$, 而 $\bar{y} = \sum_{i=1}^n y_i/n$ 。当 R 接近于 1 时, 说明相对误差 $\frac{Q}{d_{yy}}$ 接近于零, 线性回归效果好。

单因子相关系数 v_j 的分析:

$$v_j = \sqrt{1 - Q/Q_j}, j = 1, 2, 3$$

其中

$$Q_j = \sum_{i=1}^n [y_i - (a_1 + \sum_{k=1, k \neq j}^m a_{k+1}x_{kj})]^2,$$

当 $j=1, 2, 3$ 时, v_j 分别表示不稳定度值的相关系数、余额不稳定度 5℃处的环境温度和 中层平均相对湿度相关系数。

从表 2 可以看出, 由回归方程得到的地闪总次

数与对流风暴层结因子的相关性较好。除大气层结因子的不稳定性、余额不稳定性 5℃处的环境温度对对流风暴过程的地闪起着决定性的作用之外,中层平均相对湿度对地闪也具有一定的影响,其作用是不可忽略的。

表 2 复相关系数和单因子相关系数
Table 2 Multivariate and single factor correlation coefficients

复回归系数 R	单因子相关系数		
	v_1	v_2	v_3
0.877	0.94	0.97	0.83

3.3 各类对流风暴过程中地闪总数的估算

基于上述分析,根据甘肃平凉地区的对流风暴过程的地闪情况,结合其相应当天 07:00 的大气层结资料所导出的地闪预报方程式进行估算,其数据列于表 3。由于风暴内部结构的复杂性,只考虑三个因子是不够的,对不同类型的风暴可能起主要作用的因子不同,所以需要进一步的观测和深入研究。另外由于我们采用的地闪资料是甘肃六盘山区对流风暴发生过程,所以受地形影响、季节不同等会有很大差别。因此,对不同地区也要考虑不同的大气层结因子,其预报方程也需进一步完善。

从表 3 可以看出,对流风暴的强、弱及其发生发展特征是受大气层结条件制约的。当这三者处于有利配合时,对流天气过程将得到形成和发展。只要其中一个条件不符合,对流风暴天气过程将随之

减弱、甚至消亡。

3.4 个例分析

2001 年夏季,我们以甘肃平凉雷电与雹暴实验站为中心进行了雷电综合观测。由于 2001 年雷暴天气很少,所以取得的资料也少,现将主要的两次对流过程的大气层结因子与地闪资料列于表 4。

从表 4 可以看出,2001 年 7 月 21 日 07:30 的探空资料计算结果,大气层结因子都达到了雷暴天气条件,而该日的天气实况是测站降了雷阵雨,大秦、寨河等地降了蚕豆大的冰雹。根据现场观测,当天的雷暴较弱,持续时间很短,云内放电情况主要是以云闪为主,地闪非常少。因此,根据建立的地闪与对流风暴的多元线性复回归方程 $y = -2457 + 191x_1 - 73x_2 + 11x_3$ 估算的地闪总数与实测值的偏差较大。其原因是回归方程选的是中等以上雷暴天气过程资料进行统计的。对弱雷暴而言,其计算值与实测值的偏差较大,对中等以上雷暴偏差较小,并且与对流风暴的类型有关。如 2001 年 8 月 2 日 07:30 的探空资料计算结果是大气层结处于雷暴天气条件,并且比 7 月 21 日的强,因为最大不稳定性与余额不稳定性 5℃处的环境温度都比 7 月 21 日的强。从大气层结的演变中可以看出,中层的水汽条件处于下湿上干状态。而实际情况是 17:15 测站闻雷并开始下雨,由 713 双线偏振雷达观测到 Cb 云主要发生在测站的 NE 方向,离测站 50 km 向 ES 方向移动,最大回波强度为 40 dBz,

表 3 各类对流风暴过程中地闪总数的估算结果
Table 3 Estimated number of ground flash for different convective storms

类 别	判 据			地闪总数范围
	不稳定性 $\Delta T_m(^{\circ}\text{C})$	余额不稳定性 5℃的 环境温度 (ΔT_5)	中层平均相对湿度 (700~400 hPa)	
特强风暴(最大雷达回波为 60 dBz)	$\Delta T_m \geq 6^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_5 \leq -45^{\circ}\text{C}$ 以下	55	2359 次以上
强风暴(最大雷达回波为 55 dBz)	$\Delta T_m \geq 6^{\circ}\text{C}$	$-37 \leq \Delta T_5 \leq -45^{\circ}\text{C}$	50	1775~2359 次之间
中等风暴(最大雷达回波为 45 dBz)	$\Delta T_m \geq 6^{\circ}\text{C}$	$-26 \leq \Delta T_5 \leq -36^{\circ}\text{C}$	45	972~1775 次之间
弱风暴(最大雷达回波为 40 dBz)	$\Delta T_m \geq 5^{\circ}\text{C}$	$-12 \leq \Delta T_5 \leq 25^{\circ}\text{C}$	中 湿	1000 次以下
雷暴(最大雷达回波为 35 dBz)	$\Delta T_m \geq 3 \sim 6^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_5 \geq -12^{\circ}\text{C}$ 以上	中 湿	

表 4 两次对流风暴过程中地闪实测值和计算值的个例对比
Table 4 Observed and calculated ground flash numbers in two storms

日 期 (年-月-日)	不稳定性 $\Delta T_m(^{\circ}\text{C})$	余额不稳定性 5℃的 环境温度 $\Delta T_5(^{\circ}\text{C})$	中层平均相对湿度 (%)	地闪个数		测站点天气实况
				测量值	计算值	
2001-07-21	4.5	-24.0	43.0	628.0	161.0	雷阵雨,局地下蚕豆大冰雹
2001-08-02	5.5	-26.0	34.0	865.0	596.0	雷阵雨,云高 8 km,强度 40 dBz

高度达 8 km, , 所以 8 月 2 日的雷暴天气比 7 月 21 日要强一些。因此, 计算值与实测值偏差较小。

4 对流风暴过程中地闪特征与大气层结因子的相关分析

大气层结的不稳定度是假定云内按湿绝热温度递减率变化, 从云底(H_c)开始计算, 一直计算到最大不稳定层为止(图 2)。最大不稳定度 $\Delta T = T_m - T$, T_m 为湿绝热温度, T 为层结温度。它表明在最大不稳定层以上, 云中的垂直速度因层结出现负的不稳定能量而逐渐减小。大气层结的不稳定度的大小决定了对流风暴的发展强度, 不稳定度越大, 表明云中的对流越强, 对流风暴则有能力发展到比较高的高度, 云中起电过程也增强, 地闪频数增多。张义军等^[6]对我国不同地区雷暴电荷结构的研究发现, 在我国南方雷暴的形成过程中, 大气层结的不稳定度比北方要大得多, 其起电过程也强, 闪电频数也大, 所以雷电灾害发生的几率大。

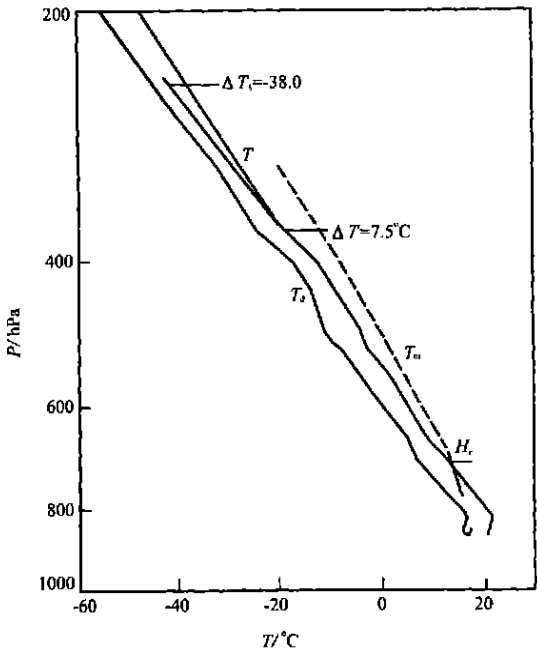


图 2 1997 年 7 月 27 日平凉 07:30 探空分析
Fig. 2 Analysis for 07:30 sounding at Pingliang on July 27, 1997

余额不稳定度 5°C 是最大不稳定层以上剩余不稳定度等于 5°C (ΔT_5) (见图 2), 相应这层的环境温度就是余额不稳定度 5°C 处的环境温度。根据大量探空资料的统计分析, 这一层到最大不稳定层可以看作是能量的集中区。这一温度表明了大气层结的不稳定能量, 而不稳定能量的大小决定着对流风

暴中对流发展的潜力^[7]。张义军等^[8]通过对不同云系电活动、对流及降水特性相关性的研究表明, 一般对流云系均具有较大的层结不稳定能量, 雷暴发展较强, 最大云顶高度也高, 闪电活动强烈。

对流风暴发展所需的另外一个重要条件是水汽条件, 中层的环境湿度显然对云体发展影响很大。研究表明^[9, 10], 云中起电过程(感应起电和非感应起电)主要依赖于固态降水粒子的形成及其相互作用。中层较大的湿度应该有助于提高该层降水粒子的形成并影响降水粒子的浓度而增强起电率。图 3 和图 4 是中层不同相对湿度条件下对流风暴中地闪活动的日变化。从图 3 可见, 当中层相对湿度为 $40\% \sim 65\%$ 时, 即中等相对湿度, 地闪主要发生在 01:00~03:00 时段内, 最大平均数为 41 次/h, 且从 13:00~07:00 均有比较强的地闪活动, 正地闪数占总地闪数的 12% 。当中层相对湿度 $> 65\%$ 时(图 4), 即高相对湿度, 地闪主要发生在 14:00~

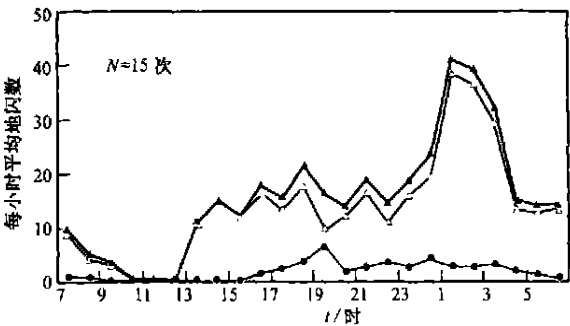


图 3 相对湿度为中湿度时地闪的日变化($40\% < F < 65\%$)
—▲—: 总地闪, —△—: 负地闪 —●—: 正地闪
Fig. 3 Diurnal variation of flash number for middle relative humidity ($40\% < F < 65\%$). —▲—: Total ground flash, —△—: Netative ground flash, —●—: Positive ground flash

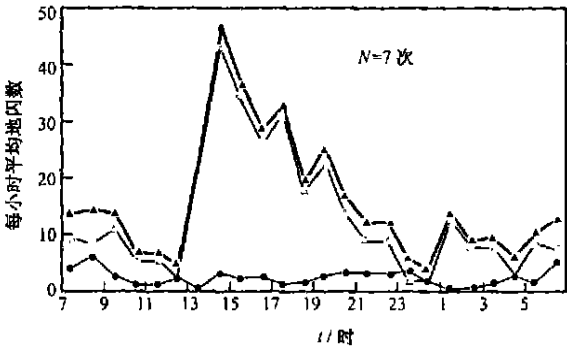


图 4 同图 3, 但为高湿度($F > 65\%$)

Fig. 4 The same as Fig. 3, but for high relative humidity ($F > 65\%$)

17:00 时段内, 最大平均数为 47 次/h, 且较强的地闪活动主要集中在午后, 正地闪数占总地闪数的 16%。尽管上述分析的雷暴样本数不是很多, 图 3 为 15 次 Cb 云, 图 4 为 7 次 Cb 云, 但二者峰值出现时段的差别是明显的, 其原因可能与很多因子有关, 但中层湿度可能是一个较重要的因子。本文分析中层湿度取自上午 07:30 的探空资料, 随着时间的增加, 一般而言, 在白天中层湿度会逐渐减弱, 而起电又与中层湿度呈正相关, 且有一个湿度阈值。对于高湿度情况, 上述条件容易满足, 所以在中午起电很大, 产生地闪峰值; 而湿度较低时, 上述条件不能满足。白天起电很弱; 在晚上, 由于中层湿度会逐渐增大, 从而增加起电率; 在午夜出现地闪峰值。此外, 比较图 3 和图 4, 65% 的中层相对湿度可能是引起强起电的一个阈值。通过以上分析, 表明大气中层相对湿度是对流风暴地闪活动的重要影响因子, 并且决定着对流风暴发生的时段。这对对流风暴以及地闪的预报更有意义。

5 小结

通过对地闪资料与 07:30 探空资料进行的统计分析得到以下初步结论:

(1) 对流风暴中地闪活动与环境层结因子之间有较好的相关性, 不稳定度、余额不稳定度 5°C 处的环境温度、温度层结中(中层)平均相对湿度三者是影响对流风暴中地闪活动的重要因子, 其相关系数分别为 0.94、0.97 和 0.83。

(2) 对流风暴的地闪活动可通过大气层结多因子进行预报, 甘肃平凉地区的预报方程为

$$Y = -2457 + 191x_1 - 73x_2 + 11x_3$$

(3) 大气中层相对湿度与地闪活动的发生时段有关, 中等相对湿度时, 地闪主要发生在 01:00 ~ 03:00 时段内, 而高相对湿度时, 地闪主要发生在 14:00 ~ 17:00 时段内, 且与对流风暴类型有关。

致谢: 非常感谢王才伟研究员、张鸿发研究员为本工作给予的指导和帮助。

参考文献

- [1] Qie Xiushu, Yan Muhong, Guo Changming et al. Lightning data and study of thunderstorm nowcasting[J]. Acta Meteor Sinica, 1993, 7(2): 224—256
- [2] 张喜轩, 张翠华. 闪电与大气层结因子相关性的探讨[J]. 气象学报, 1990, 48(1): 102—107
- [3] 张喜轩. 预报冰雹的方法[J]. 气象, 1980, 4: 14—15
- [4] 徐士良. FORTRAN 常用算法程序集[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996
- [5] 余剑莉. 统计天气预报[M]. 北京: 气象出版社, 1989
- [6] 张义军, 言穆弘, 张翠华等. 不同地区雷暴电荷结构的模式计算[J]. 气象学报, 2000, 58(5): 617—627
- [7] 张喜轩, 孙秀霞. 大气层结演变对持续性雷暴天气过程的影响[J]. 高原气象, 1987, 6(2): 161—168
- [8] 张义军, 华贵义, 言穆弘等. 对流和层状云系电活动、对流及降水特性的相关分析[J]. 高原气象, 1995, 14(4): 396—405
- [9] 言穆弘, 刘欣生, 安学敏等. 雷暴非感应起电机制的模拟研究 I. 云内因子影响[J]. 高原气象, 1996, 15(4): 425—437
- [10] 言穆弘, 刘欣生, 安学敏等. 雷暴非感应起电机制的模拟研究 II. 环境因子影响[J]. 高原气象, 1996, 15(4): 438—447

Correlation Analyses between Atmospheric Stratification Factors and Ground Lightning Activities in Pingliang Convective Storms

ZHANG Cui-hua, ZHANG Yi-jun, QIE Xiu-shu, WANG Huai-bin

(Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Statistical analyses are made of morning sounding data and ground flash data from June to August 1997 and 1998, the latter was obtained with a 3-station lightning direction finder network installed in Pingliang. The results show that there is good correlation between total ground flash number of convective storm and environmental stratification factors. Atmospheric instability, ambient temperature at altitude with residual instability of 5°C and mean relative humidity in the middle layer are important factors, which affect the ground flash frequency of storm, therefore can be used for lightning activity forecast.

Key words: Ground flash; Convective storm; Environmental stratification