

杨学斌,代玉田,吕伟琦.闪电发生的环境场特征及闪电活动的预报[J].海洋气象学报,2019,39(3):96-102.
YANG Xuebin, DAI Yutian, LÜ Weiqi. Environmental field characteristics and prediction of lightning activity[J].Journal of Marine Meteorology, 2019, 39(3): 96-102. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.03.011. (in Chinese)

闪电发生的环境场特征及闪电活动的预报

杨学斌,代玉田,吕伟琦
(德州市气象局,山东 德州 253078)

摘要: 利用2006—2015年6—8月章丘探空站逐日探空资料,计算了K指数、抬升指数、对流稳定度指数等6个环境参数,探讨了单个环境参数和多个环境参数组合与闪电活动的关系。结果表明:1)单个环境参数在一定数值范围内可作为闪电活动预报的指标,且较强的闪电活动更容易由大气的不稳定状态来预报;2)多个环境参数的组合可在一定程度上反映闪电活动的特征,闪电出现的概率随着达到大气不稳定临界值物理量参数个数的增多而增大,预报效果比单个参数更好;3)应用事件概率回归方法建立了闪电概率潜势预报方程,方程通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检验,通过检验和评估,闪电概率预报的TS评分达到78%,该方法的建立为闪电潜势预报提供了参考依据。

关键词: 闪电活动;环境场特征;闪电活动预报

中图分类号: P427.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2019)03-0096-07

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.03.011

Environmental field characteristics and prediction of lightning activity

YANG Xuebin, DAI Yutian, LÜ Weiqi
(Dezhou Meteorological Bureau, Dezhou 253078, China)

Abstract Based on the daily sounding data of Zhangqiu Sounding Station between June and August from 2006 to 2015, the 6 environmental parameters, such as K index, lifting index, and convective stability index, are calculated. The correlations between a single environmental parameter and lightning activities as well as correlations between combined environmental parameters and lightning activities are studied. The results are as follows. 1) A single environmental parameter within a range of values can be used as an indicator of lightning activities and stronger lightning activities are more likely to be predicted based on the atmospheric instability. 2) Combined environmental parameters can reflect the characteristics of lightning activities to some extent. With the increase of the number of physical parameters reaching critical values in the unstable state, the probability of lightning activities increases and the forecasting skills are better than that using a single parameter. 3) Regression estimation of event probability method is used to establish an equation of lightning probability forecast, which passes the significance test at 0.01 level, and the threat score of the probability forecast reaches 78%. The method provides reference for the lightning potential forecast.

Key words lightning activity; environment field characteristics; forecasting of lightning activity

收稿日期:2018-08-17; 修订日期:2018-12-25

基金项目:中国气象局预报员专项(CMAYBY2016-040);山东省气象局科研项目(2015sdqxz03,2016sdqxz07,2013sdqx04)

作者简介:杨学斌,男,正高级工程师,主要从事灾害性天气研究,yxb5@163.com。

引言

闪电是对流天气系统发展到一定程度的产物, 不仅与大气动力过程和微物理过程的发展密切相关, 在很大程度上指示强对流天气的发生和发展^[1], 而且能够作为灾害性天气预警的参考资料^[2-3]。作为灾害性天气, 闪电对交通、通讯、航天等活动构成较大的威胁, 造成的经济损失和人员伤亡日益严重^[4-5]。雷暴云的发展与热气团在不稳定环境中的对流抬升有关^[6], 许多专家学者进行了研究。张翠华等^[7]研究发现, 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, 并可通过层结因子对对流风暴进行预报。陈光舟等^[8]研究了安徽大气不稳定参数与闪电的关系, 指出抬升指数、K指数和对流有效位能等对安徽地区闪电活动有良好的预报作用。张霞等^[9]研究了郑州雷电发生的环境场特征及潜势预报, 指出雷电活动出现的概率随着有利环境参数的个数增多而显著增大, 雷电概率预报 TS 评分达到 63.6%。王基鑫等^[10]研究了山东东南区域闪电活动特征及其与大气环境参数的关系, 指出东南闪电高发区的闪电活动与地面温度、700~400 hPa 平均相对湿度等参数有明显正相关。刘岩等^[11]对比研究了兰州和杭州地区闪电活动与大气稳定度参数的关系, 得出了地面相对湿度、沙氏指数、对流有效位能等参数与地闪频数具有较好的相关性结论, 指出杭州地区地闪频数与对流抑制能量的相关性较大, 兰州地区地面相对湿度对闪电活动的影响更为明显。郑栋等^[12]研究了北京及周边地区多个大气不稳定参数和其后 12 h 内 250 km 范围内闪电活动的关系, 指出潜在-对流性稳定度指数、对流有效位能、抬升指数等与闪电活动具有较好的相关性, 进一步分析了多参数综合预报闪电活动的概率, 提出了闪电活动的诊断指标。这些研究说明, 在一定范围内, 利用大气环境参数可以对闪电活动进行预报, 但由于地域差异以及所选研究区域的范围不同、闪电定位资料的观测设备不同, 闪电活动与环境参数的相关性也存在差异, 因此针对某一地区, 研究大气环境参数与闪电活动的相关性及对闪电活动的预报十分必要。

此文利用闪电资料和探空资料, 研究一定范围内闪电活动与大气环境参数的相关性, 进而分析大气环境参数对山东闪电活动预报的可行性。山东闪电资料由 ADTD 型闪电定位系统(共布设 13 个探测基站, 其中, 2006—2007 年建成兖州、蒙阴、青岛、

潍坊、河口和章丘等 6 站, 2013—2014 年建成陵城、菏泽、龙口、威海、乳山、临沭、东阿等 7 站)监测所得, 其传感器的时间精度为 0.1 μs , 云地闪平均定位精度可达 300 m, 平均探测范围 300 km。

1 资料与处理方法

利用 2006—2015 年 6—8 月章丘探空站逐日 08:00 和 20:00(北京时, 下同)观测资料, 计算抬升指数、K 指数、对流稳定度指数、对流有效位能、850 hPa 假相当位温和强天气威胁指数等环境参数; 利用 ADTD 型闪电定位系统观测资料, 统计以章丘探空站为中心、半径 200 km 范围内(图 1)两次探空站观测后的 12 h 内闪电频数之和, 结合天气实况, 依据闪电频数、分布状态, 确定研究区域内有、无闪电活动过程, 对于散乱、少量的闪电和无闪电记录的观测, 确定为无闪电活动过程, 否则为有闪电活动过程^[12]。首先分析 10 a 单个环境参数和多个环境参数组合与 12 h 内闪电活动的相关性, 然后建立利用环境参数预报闪电出现概率的潜势预报方程。考虑探空资料及闪电资料的完整性, 确定出 1 072 个有闪电活动过程和 696 个无闪电活动过程。

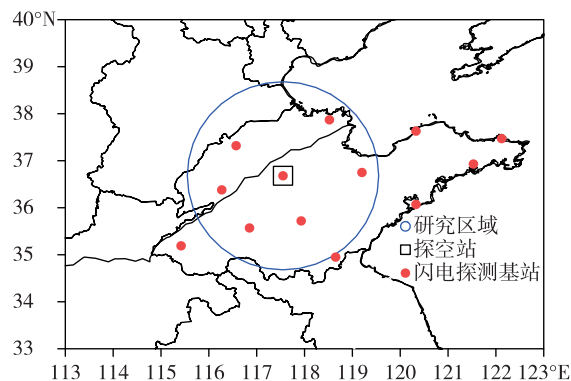


图1 山东 ADTD 型闪电定位系统分布
Fig.1 Distribution of ADTD lightning location system in Shandong

2 环境参数与闪电活动的相关性分析

2.1 单参数分析

2.1.1 抬升指数

抬升指数(LI)分布统计如图 2a 所示, 有闪电情况下, 抬升指数最小值为 $-11.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 中位数为 $-1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 80% 闪电活动发生在抬升指数值 $-4.5\sim 3.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内; 无闪电情况下, 抬升指数最小值为 $-8.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, 中位数为 $1.85\text{ }^{\circ}\text{C}$, 80% 的抬升指数值分布在 $-2.6\sim 7.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。统计抬升指数主要分布范围

内闪电出现的累积概率(即区间内所有可能取值的概率之和),由图2b看出, $LI>0^{\circ}\text{C}$ 时,章丘站探空观测后12 h出现闪电的概率为36%, $LI\leq 0^{\circ}\text{C}$ 时出现

闪电的概率为64%。若以 0°C 为判别临界值,12 h内对预报区域闪电的发生有较好的预报性,因此,抬升指数可作为闪电预报预警的一个重要参数。

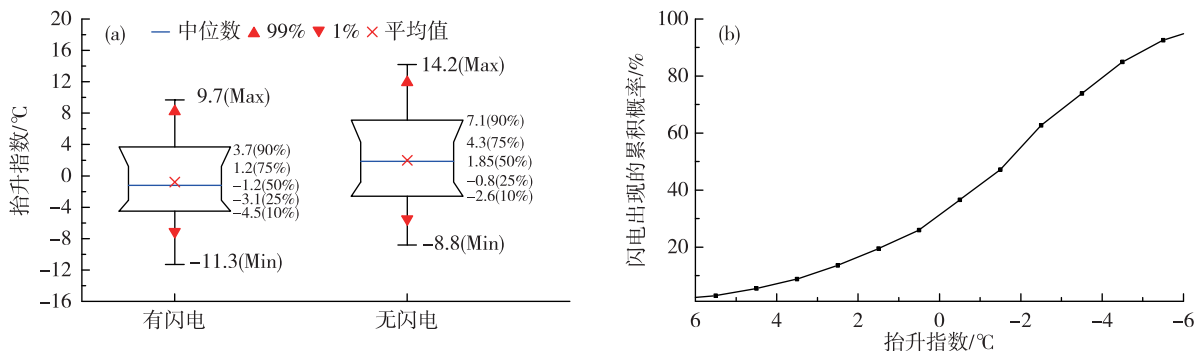


图2 抬升指数分布(a)及抬升指数与闪电出现的累积概率(b)

Fig.2 Distribution of lifting index (a) and cumulative probability of occurring lightning with lifting index (b)

2.1.2 对流有效位能

对流有效位能(CAPE)体现了不稳定能量的大小,反映了不稳定能量的强弱和对流发展的深厚程度。但当层结曲线和状态曲线没有交点时,CAPE值无法计算,为便于分析,无法计算CAPE值时统一以-1 000表示。

统计对流有效位能分布(图3a),有闪电情况时,对流有效位能最大值为 $3\ 815.2\ \text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$,中位数为 $287.2\ \text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$,50%闪电活动发生在对流有效位

能值 $13.7\sim 839\ \text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间;无闪电情况时,对流有效位能最大值为 $3\ 436.4\ \text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$,中位数为 $10.2\ \text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$,50%的CAPE值 $\leq 10.2\ \text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。从CAPE主要分布范围内闪电出现的累积概率(图3b)来看,CAPE值 $<400\ \text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,章丘站探空观测后12 h出现闪电的概率为43.6%,相对应地,CAPE值 $\geq 400\ \text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,章丘站探空观测后12 h出现闪电的概率为56.4%,因此对流有效位能可作为闪电预警的参数。

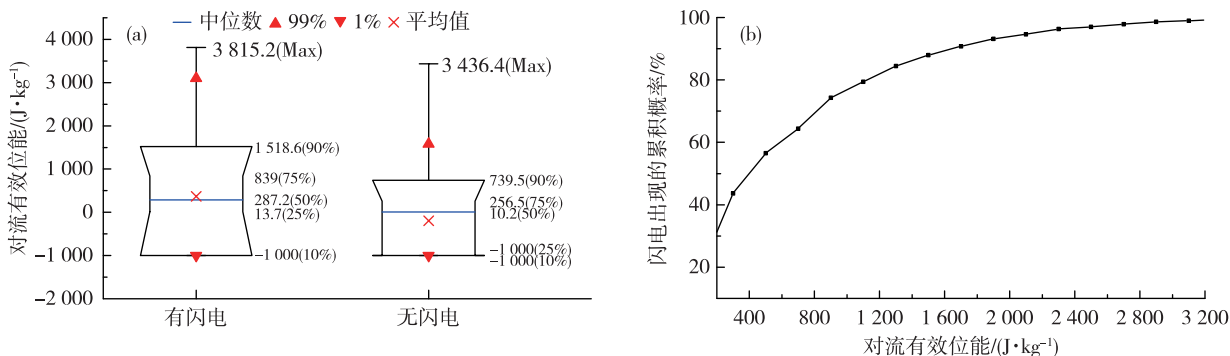


图3 对流有效位能分布(a)及对流有效位能与闪电出现的累积概率(b)

Fig.3 Distribution of CAPE (a) and cumulative probability of occurring lightning with CAPE (b)

2.1.3 K 指数

K 指数分布统计情况如图4a所示,有闪电情况下,K指数最大值为 47°C ,中位数为 30°C ,80%闪电活动发生在K指数值 $8\sim 38^{\circ}\text{C}$ 范围内;无闪电情况下,K指数最大值为 43°C ,中位数为 19°C ,80%的K指数值分布在 $-11\sim 33^{\circ}\text{C}$ 之间,较有闪电情况下明显偏小。统计K指数主要分布范围内闪电出现的累积概率(图4b),K指数 $<26^{\circ}\text{C}$ 时,章丘站探

空观测后12 h闪电出现的概率为36%,K指数 $\geq 26^{\circ}\text{C}$ 时,章丘站探空观测后12 h闪电出现的概率为64%。因此,以 26°C 为判别临界值,K指数对闪电具有较好的预报作用,并可作为闪电预警的参数。

2.1.4 对流稳定度指数

把500 hPa的假相当位温与850 hPa的假相当位温之差作为对流稳定度指数(I_c)。由对流稳定度指数分布统计(图5a)可以看出,有闪电情况下,对

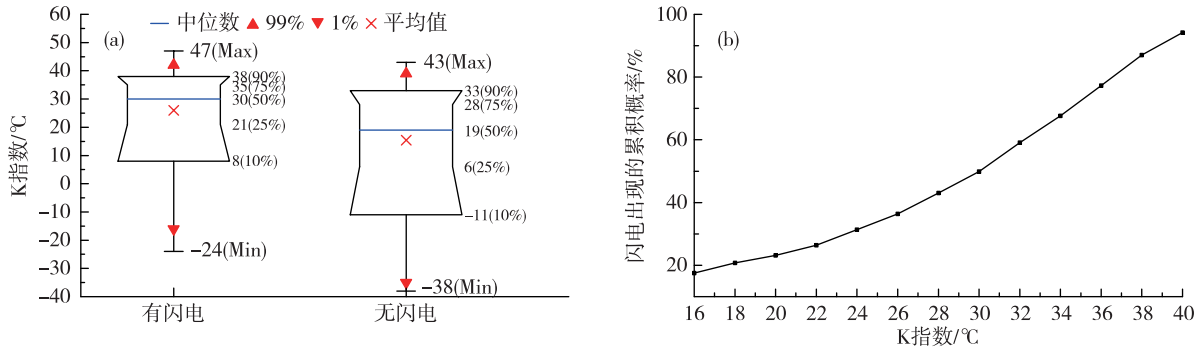


图4 K指数分布(a)及K指数与闪电出现的累积概率(b)
Fig.4 Distribution of K index (a) and cumulative probability of occurring lightning with K index (b)

流稳定度指数最小值为 $-33.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，中位数为 $-6.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，80%闪电活动的对流稳定度指数值分布在 $-17.6\sim 8.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间；无闪电情况下，对流稳定度指数最小值为 $-27.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，中位数为 $-0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，80%对流稳定度指数值分布在 $-13.5\sim 13.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。统计对流稳定度指数主要分布范围内闪电出现的累积概率

(图5b)， $I_c > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，章丘站探空观测后 12 h 闪电出现的概率为 28%， $I_c \leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时闪电出现的概率为 72%。若以 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为判别临界值，12 h 内对预报区域闪电的发生有显著的预报性，因此，对流稳定度指数可作为闪电预报预警的一个重要参数。

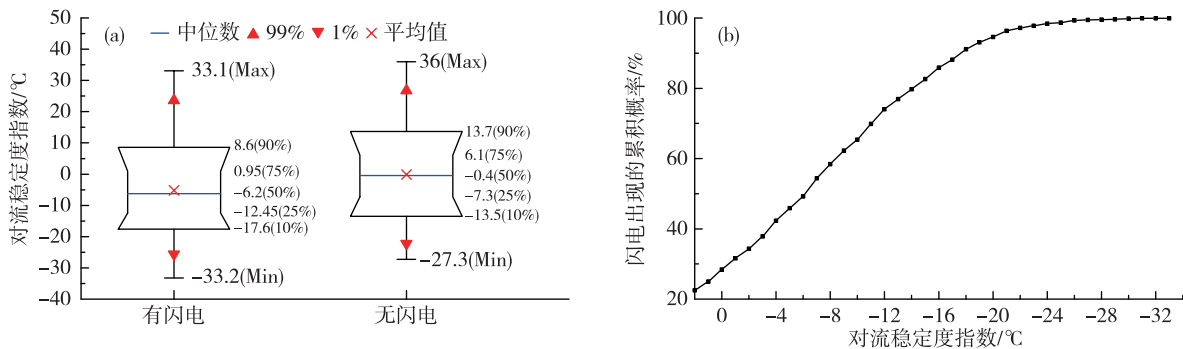


图5 对流稳定度指数分布(a)及对流稳定度指数与闪电出现的累积概率(b)
Fig.5 Distribution of convective stability index (a) and cumulative probability of occurring lightning with convective stability index (b)

2.1.5 850 hPa 假相当位温

统计 850 hPa 假相当位温 (θ_{se}) 分布 (图 6a) 可以看出，有闪电情况下，假相当位温最小值为 $33.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，最大值为 $90.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，中位数为 $65.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，80%闪电活动的 850 hPa 假相当位温值分布在 $49.3\sim 78.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间；无闪电情况下，假相当位温最小值为 $29.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，最大值为 $87.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，中位数为 $56\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，80%的 850 hPa 假相当位温值分布在 $42.1\sim 71\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内。图 6b 为 850 hPa 假相当位温值主要分布范围内闪电出现的累积概率， $\theta_{se} < 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，章丘站探空观测后 12 h 闪电出现的概率为 28.8%， $\theta_{se} \geq 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，章丘站探空观测后 12 h 闪电出现的概率为 71.2%。以 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为判别临界值，12 h 内对预报区域闪电的发生有较好的预报性。

2.1.6 强天气威胁指数

强天气威胁指数 (SWEAT) 分布统计情况如图 7a 所示，有闪电情况下，强天气威胁指数最大值为 664.2，最小值为 13.6，中位数为 203.25，80%闪电活动发生在强天气威胁指数值 $78.6\sim 281.9$ 之间；无闪电情况下，强天气威胁指数最大值为 386.9，最小值为 7.8，中位数为 154.65，80%强天气威胁指数值在 $44.7\sim 228.6$ 范围内。统计强天气威胁指数主要分布范围内闪电出现的累积概率，如图 7b 所示， $SWEAT \geq 180$ 时，章丘站探空观测后 12 h 闪电出现的概率为 69%， $SWEAT < 180$ 时，章丘站探空观测后 12 h 闪电出现的概率为 31%。因此，以 $SWEAT = 180$ 作为参考，强天气威胁指数对闪电具有显著预报作用。

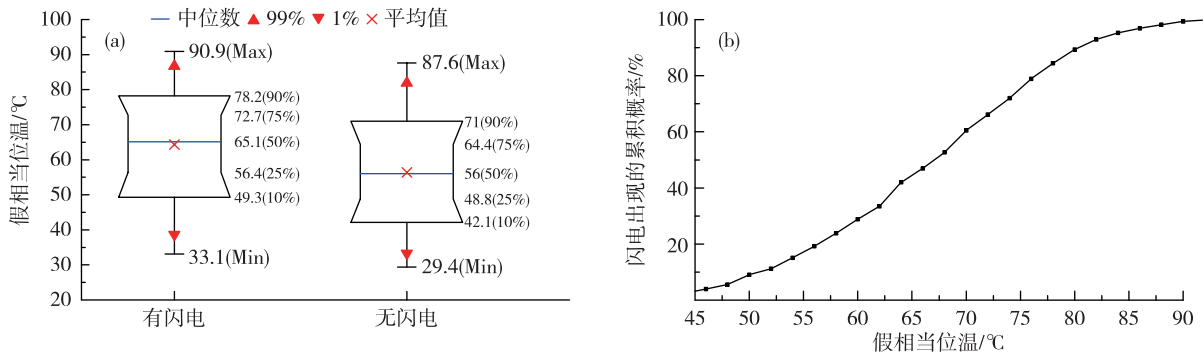


图 6 850 hPa 假相当位温分布 (a) 及 850 hPa 假相当位温与闪电出现的累积概率 (b)

Fig.6 Distribution of pseudo-equivalent potential temperature at 850 hPa (a) and cumulative probability of occurring lightning with pseudo-equivalent potential temperature at 850 hPa (b)

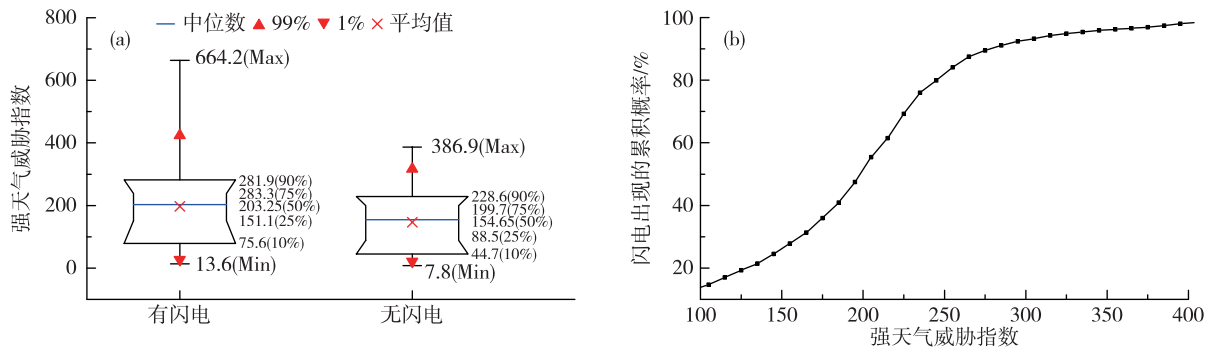


图 7 强天气威胁指数分布 (a) 及强天气威胁指数与闪电出现的累积概率 (b)

Fig.7 Distribution of SWEAT index (a) and cumulative probability of occurring lightning with SWEAT index (b)

2.1.7 不同等级的闪电活动与环境参数的关系

地闪频数的大小可以间接反映出对流活动的强弱,因此可以把闪电活动按照地闪频数进行分级,然后分析各参数在不同级别闪电活动中的分布状况。按文献[12]分级标准,结果如表 1,分析得到,闪电活动主要分布闪电数 $N \leq 500$ 次,占 55.7%;其次为闪电数 $N \geq 1000$ 次,占 33.9% ;

$500 < N < 1000$ 次最少,为 10.4%。从不同闪电活动级别对应的各参数状态下的百分比来看,随着闪电活动的增强,其自身处在大气不稳定状态下的概率就越大,也就是说,闪电活动的强弱变化与大气的的不稳定性有一定的关系,大气越不稳定,闪电活动更易发生,因此,闪电活动就更容易由大气的的不稳定状态来预报。

表 1 不同等级的闪电与各参数分布情况

Table 1 Distribution of each parameter for lightning activities at different grades

分级地闪 频数(N) /次	各分级 占比/%	各参数状态占比/%					
		LI 在 0 °C 以下	CAPE 在 400 J · kg ⁻¹ 以上	K 指数在 26 °C 以上	$I_c \leq 0$ °C	$\theta_{se} \geq 60$ °C	SWEAT 在 180 以上
$N \leq 500$	55.7	53.6	33.7	52.6	63.8	55.3	53.3
$500 < N < 1000$	10.4	67.0	44.6	67.0	78.6	65.2	69.6
$N \geq 1000$	33.9	80.4	59.2	80.4	82.9	84.0	80.2

2.2 多参数综合分析

从以上分析可以看到,抬升指数、对流有效位能、强天气威胁指数、对流稳定度指数、850 hPa 假

相当位温和 K 指数能够预报闪电活动,为考虑各参数共同作用,以 K 指数 ≥ 26 °C、 $LI \leq 0$ °C、 $I_c \leq 0$ °C、 $\theta_{se} \geq 60$ °C、 $CAPE \geq 400$ J · kg⁻¹、 $SWEAT \geq 180$ 等 6

个大气不稳定状态为判据,研究达到大气不稳定临界值的物理量参数的个数不同时,有、无闪电活动过程发生的比例,进而分析不同个数的达到大气不稳定临界值的物理量参数的有闪电活动的概率。

由表 2 可以看出,6 个大气稳定度参数都达到大气不稳定临界值时,发生闪电的概率达到了 86%,有闪电活动个数占 26.4%,无闪电活动个数占 6.6%;6 个大气稳定度参数都达不到大气不稳定临界值时,发生闪电的概率为 32%,有闪电活动过程个数占 9%,无闪电活动过程个数占 29.6%;大气稳定度参数不低于 4 个达到大气不稳定临界值时,发生闪电的概率为 77.9%。因此可以得到,有闪电情

况下,达到大气不稳定临界值物理量参数个数越多,闪电活动个数过程越多,所占比例越大,有闪电活动概率越大;无闪电活动时,达到大气不稳定临界值物理量参数越少,所占比例越大。这种分布也说明了可以通过判别大气不稳定临界值物理量参数分布状态来预报闪电活动具有一定的可行性,处于大气不稳定临界值物理量参数越多,闪电活动的概率也越大,反之无闪电活动的可能性越大,这与雷暴天气预报相符,即当大气处于更加不稳定状态时,闪电活动的预报将更为精确,出现雷暴天气的可能性更大。

表 2 达到大气不稳定临界值的物理量参数个数与闪电活动概率分析

Table 2 Analysis of the number of physical parameters reaching critical values in the unstable state and the probability of lightning activities

达到大气不稳定临界值的物理量参数个数	有闪电活动过程个数 (所占比例/%)	无闪电活动过程个数 (所占比例/%)	有闪电活动概率/%
6	283 (26.4)	46 (6.6)	86.0
5	174 (16.2)	69 (9.9)	71.6
4	161 (15.0)	60 (8.6)	72.9
3	147 (13.7)	99 (14.2)	59.8
2	129 (12.0)	97 (13.9)	57.1
1	81 (7.6)	119 (17.1)	40.5
0	97 (9.0)	206 (29.6)	32.0
≥4	618 (57.6)	175 (25.1)	77.9

3 闪电概率潜势预报

3.1 预报方程的建立

本文选择资料齐全的 1 768 个样本,采用 Miller 提出的事件概率回归 (Regression Estimation of Event Probability) 方法^[13],进行多元回归分析。把闪电出现与否作为预报量(出现为 1,不出现为 0),选用 K 指数、抬升指数、对流有效位能、对流稳定度指数、850 hPa 假相当位温和强天气威胁指数 6 个因子组建概率回归方程,各因子根据前文分析结果进行 (0,1) 处理(临界值见表 3)。根据最小二乘法原理求出回归系数,得到闪电概率多元线性回归方程为:

$$y = 0.146K - 0.0204I_c + 0.0628SWEAT + 0.0522CAPE + 0.1538LI + 0.1182\theta_{se} + 0.3488 \quad (1)$$

对所得方程进行 F 检验^[13],其表达式为:

$$F = \frac{R^2/p}{(1 - R^2)/(n - p - 1)} \quad (2)$$

其中 $p=6$ 为预报因子个数, $n=1768$ 为样本个数; $R=0.388$ 为复相关系数;当显著水平 $\alpha=0.01$ 时, $F_\alpha < 2.832$, 计算得 $F=51.87$, 故 $F > F_\alpha$, 说明闪电概率预报方程是显著的。

表 3 环境参数 (0,1) 处理的临界值

Table 3 Critical values of environmental parameters (0,1)

环境参数名称	临界值
K 指数 (K)	$K \geq 26$ °C 时取值 1, 否则为 0
抬升指数 (LI)	$LI \leq 0$ °C 时取值 1, 否则为 0
对流有效位能 (CAPE)	$CAPE \geq 400$ J · kg ⁻¹ 时取值 1, 否则为 0
对流稳定度指数 (I_c)	$I_c \leq 0$ °C 时取值 1, 否则为 0
850 hPa 假相当位温 (θ_{se})	$\theta_{se} \geq 60$ °C 时取值 1, 否则为 0
强天气威胁指数 (SWEAT)	$SWEAT \geq 180$ 时取值 1, 否则为 0

3.2 方程检验

利用 2007—2014 年 6—8 月逐日有闪电活动和无闪电活动样本分别进行回代回归方程,结果(图 8)显示,大于 68.1% 的闪电出现在预报概率值为

60%及其以上的范围内,这一取值范围内无闪电仅出现了29.8%。依据“起报值域内包含尽可能多的闪电活动样本和尽可能少的无闪电活动样本”的原则,选取预报概率 $\geq 60\%$ 时预报未来12 h内有闪电活动,否则预报无闪电活动发生^[9]。用该方程对2015年6—8月逐日逐12 h资料齐全的样本进行检验,总样本182个,实况为92次有闪电活动,90次无闪电活动,预报概率达到60%以上的样本共有92个。有闪电情况下,方程预报出72次,漏报20次;无闪电情况下,方程预报出70次,空报20次,TS评分为78%,可见该方程对闪电活动具有一定的预报能力。

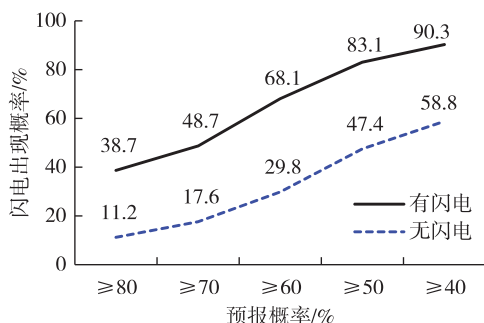


图8 预报概率与有、无闪电活动变化曲线

Fig.8 Variation curve of the forecast probability and the probability of occurring lightning activities

4 结论

1) K指数、抬升指数、对流有效位能、对流稳定度指数、强天气威胁指数和850 hPa假相当位温等6个环境参数与闪电活动的发生有较好的相关性,依据环境参数所处的状态,可以对闪电活动进行预报,但不能完全反映闪电活动特征。

2) 通过分析多个环境参数发现,有闪电活动主要出现在达到大气不稳定临界值物理量参数个数较多的条件下,且闪电出现的概率随着参数个数增多而显著增大,无闪电活动常出现在达不到大气稳定临界值物理量参数个数较多的条件下。因此,通过判别多种大气稳定度参数来预报闪电活动的方法具有一定的可行性,即处于达到大气不稳定临界值物理量越多,闪电出现概率越大。

3) 通过不同阈值对各个环境参数进行(0,1)处理,建立0~12 h闪电概率潜势预报方程,经检验方程显著,说明闪电活动与环境参数间有一定的回归效果。通过检验2015年6—8月逐日逐12 h闪电预报得到,闪电预报概率TS评分达到了78%,可见,该方法对于闪电活动具有良好的预报能力。

参考文献:

- [1] 鄧秀书,刘冬霞,孙竹玲.闪电气象学研究进展[J].气象学报,2014,72(5):1054-1068.
- [2] GOODMAN S J, BLAKESLEE R, CHRISTIAN H, et al. The North Alabama lightning mapping array: Recent severe storm observations and future prospects[J]. Atmos Res, 2005, 76(1/4): 423-437.
- [3] MANSELL E R, ZIEGLER C L, MACGORMAN D R. A lightning data assimilation technique for mesoscale forecast models[J]. Mon Wea Rev, 2007, 135(5): 1732-1748.
- [4] 许小峰.雷电灾害与监测预报[J].气象,2004,30(12): 17-21.
- [5] 马明,吕伟涛,张义军,等.1997—2006年我国雷电灾情特征[J].应用气象学报,2008,19(4):393-400.
- [6] 王道洪,鄧秀书,郭昌明,等.雷电与人工引雷[M].上海:上海交通大学出版社,2000.
- [7] 张翠华,张义军,鄧秀书,等.平凉地区对流风暴地闪活动与环境层结因子相关性分析[J].高原气象,2002, 21(6): 632-636.
- [8] 陈光舟,王体健,娄珊珊,等.安徽闪电分布特征和不稳定条件分析[J].气象科学,2014,34(5):543-548.
- [9] 张霞,王新敏,王全周,等.郑州雷电发生的环境场特征及潜势预报[J].气象,2010,36(6):95-100.
- [10] 王基鑫,祝宝友,马明.中国东南区域闪电活动特征及其与大气环境参数的关系[J].中国科学技术大学学报,2017,47(5):403-412.
- [11] 刘岩,李征,康凤琴.兰州和杭州地区闪电活动与大气不稳定参数关系的对比[J].干旱气象,2010,28(2): 142-147.
- [12] 郑栋,张义军,吕伟涛,等.大气不稳定度参数与闪电活动的预报[J].高原气象,2005,24(2):196-203.
- [13] 黄嘉佑,李庆祥.气象数据统计分析方法[M].北京:气象出版社,2015:335-337.