

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.

# 郑州雷电发生的环境场特征及潜势预报<sup>\* 1</sup>

张 霞<sup>1</sup> 王新敏<sup>1</sup> 王全周<sup>2</sup> 范学锋<sup>2</sup> 刘和平<sup>3</sup> 王玉岗<sup>4</sup>

1 河南省气象台, 郑州 450003

2 河南省气象局, 郑州 450003

3 河南省气候中心, 郑州 450003

4 河南省荥阳市气象局, 荥阳 450100

**提 要:** 利用郑州站雷暴日观测资料,分析了郑州雷电活动的气候特征;使用 2004—2006 年郑州站探空资料计算了强天气威胁指数、最有利抬升指数等环境参数,分别探讨了单个环境参数和多个环境参数组合与郑州雷电天气之间的相关性。结果表明:(1)单个环境参数在一定的取值范围内与雷电活动具有相关性,但不能完全反映雷电活动特征;(2)多参数综合可在一定程度上反映雷电活动的特征,雷电活动出现的几率随着有利环境参数的个数增多而显著增大。应用多元线性回归方法建立了郑州雷电概率潜势预报方程,方程通过了  $\alpha=0.05$  的显著性水平检验;采用郑州地区 ADTD 闪电监测资料对 2008 年 6—8 月业务试运行结果进行评估,雷电概率预报的 TS 评分达到 63.6%。该方法的建立为郑州市雷电天气的预报提供了客观、定量的参考依据。

**关键词:** 雷电特征, 环境参数, 潜势预报

## The Favorable Environment Characteristics and the Potential Forecast of Lightning in Zhengzhou

ZHANG Xia<sup>1</sup> WANG Xinmin<sup>1</sup> WANG Quanzhou<sup>2</sup> FAN Xuefeng<sup>2</sup> LIU Heping<sup>3</sup> WANG Yugang<sup>4</sup>

1 Henan Meteorological Observatory, Zhengzhou 450003

2 Henan Meteorological Bureau, Zhengzhou 450003

3 Henan Climate Center, Zhengzhou 450003

4 Xingyang Meteorological Office of Henan Province, Xingyang 450100

**Abstract:** Based on the observed thunderstorm data of Zhengzhou, the climatic characteristics of lightning are analyzed. And based on the sounding data from 2004 to 2006, the environment parameters such as *Sweat* index, the best lifting index, the 850 hPa pseudo-equivalent potential temperature and so on are calculated. The correlations between the single environment parameter and lightning weather in Zhengzhou, as well as correlations between compound parameters and lightning weather have been studied respectively. The result shows that: (1) the single environment parameter has good relationship to the lightning activity when taking value in some extent, but can not reflect the lightning characteristics totally. (2) Multi-parameters can reflect the characteristics of lightning activity to some extent. The equation of lightning probability potential forecast is constructed by using multi-dimensional linear regression, and the significance test of  $\alpha=0.05$  is passed. Using the lightning observed data, the operational results from June to August in 2008 are assessed, and the TS score of the probability forecast reaches 63.6%. The method provides the objective and quantitative reference to the forecast of lightning in Zhengzhou.

**Key words:** characteristics of lightning, environment parameter, potential forecast

\* 河南省气象局“河南省雷电潜势预报系统及预警技术研究”(Z200703)课题资助  
2008 年 12 月 12 日收稿; 2009 年 8 月 30 日收修定稿  
第一作者: 张霞,主要从事雷电预报预警技术研究. Email:zhxia1970@163.com

## 引言

郑州市是河南省政治、经济、文化中心,地处中原腹地,北临黄河,西依嵩山,东南为广阔的黄淮平原,陇海、京广铁路在这里交汇,是全国重要的交通、通讯枢纽,全市总面积 7446.2 km<sup>2</sup>,总人口 716 万人。随着城市的快速发展,高层建筑、电子通讯设备日益增多,因雷电灾害引起的火灾及电子、通讯设备遭到破坏的事故逐年增加,雷电灾害导致人员伤亡事故也时有发生,郑州市的防雷减灾任务十分艰巨。每年汛期(6—8 月)是雷电活动的频发期,而一直以来,对于雷电活动的预报仅局限于预报员的主观考虑,缺乏客观、定量的预报方法支持。为此,本文利用郑州市探空资料和雷暴观测资料对郑州雷电活动的气候特征、环境场参数与雷电活动的相关性等进行分析研究,并建立雷电潜势预报方法,其目的是为预报员制作雷电预报提供一个客观定量的参考依据。

国内一些学者对于雷电的时空分布特征及致灾雷电天气过程进行了研究和分析<sup>[1-4]</sup>,指出东南近海区域是我国闪电活动最频繁的地区,并向西北地区逐渐减弱,我国闪电活动主要集中在夏季,且闪电活动绝大多数发生在午后至傍晚时分。雷电产生于有利于对流天气的大尺度天气形势背景下,往往有强降水、雷雨大风、冰雹等强对流天气伴随。气象工作者从研究雷电活动与大气不稳定因子间关系方面入手,取得了一些进展<sup>[5-6]</sup>。张喜轩<sup>[7]</sup>研究发现,有 83% 的冰雹天气,其中层(700~400 hPa)的平均相对湿度在 30%~70% 之间;63% 的雷雨天气,其中层湿度也在这一范围内。郟秀书、张义军等<sup>[8-9]</sup>对青藏高原地区的闪电活动进行了研究,指出青藏高原上的闪电活动呈现出大陆性气候特征,青藏高原上的闪电放电强度比其它地区弱得多,其差别归因于高原上较低的对流不稳定能量。郑栋等<sup>[10]</sup>研究了多个大气不稳定参数与北京地区闪电活动的关系,指出潜在对流性稳定度指数、抬升指数等与闪电活动具有较好的相关性,并进一步分析了多参数综合预报的闪电活动的概率,提出了闪电活动的诊断指标。强对流天气过程中闪电活动特征的研究也有较多成果,冯桂力等<sup>[11]</sup>研究了大范围降雹过程形成和发展的不同阶段闪电的变化特征,指出降雹前 20~30 分钟闪电频数有跃增现象。蔡晓云等<sup>[12]</sup>研究了

北京地区对流云天气的闪电特征,并根据闪电轨迹推断对流天气中小尺度天气活动。易笑园等<sup>[13]</sup>分析了华北飚线系统中地闪活动与雷达回波顶高的关系,并提出雷电预警指标。以上的已有成果为我们的分析研究奠定了基础。

## 1 郑州市雷电天气特征

郑州辖区共有 7 个气象观测站,其中郑州站是国家基准观测站,每天有 24 次观测记录;且该站自建站以来未经搬迁,资料序列长且质量稳定,因此以下雷电天气特征采用郑州站雷暴观测资料进行分析。

### 1.1 雷暴的月变化特征

分析郑州市 1951—2007 年的雷暴观测资料发现:郑州市初雷日一般出现在每年的 4 月中下旬,9 月以后,雷暴日数明显减少,终雷日一般在每年的 9 月底。一年中雷暴日主要集中在 6—8 月,约占全年总雷暴日数的 77.8%,且以主汛期的 7 月为最多(占夏季雷暴日数的 45.3%),占全年总雷暴日数的 35.2%(年平均各月雷暴日分布如图 1)。而郑州市的强对流天气一般也是出现在汛期的 6—8 月之间,据统计,有 90% 以上的雷暴天气同时伴有降雨、短时大风、冰雹等强对流天气。

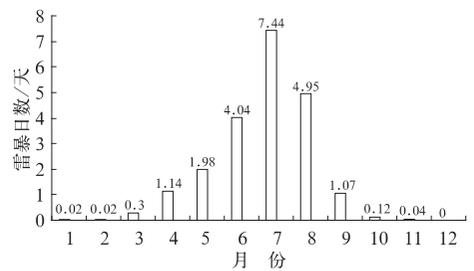


图 1 郑州 1951—2007 年平均各月雷暴日数

Fig. 1 Monthly mean thunderstorm days in Zhengzhou from 1951 to 2007

### 1.2 雷暴的年变化及年代变化特征

图 2 给出了 1951—2007 年郑州市逐年雷暴日的距平图,郑州市 57 年平均雷暴日为 21 天,各年间出现的雷暴日数有较大不同,雷暴出现最多的年份为 1977 年,全年共有雷暴日 35 天,最少的年份为 1988 年,全年共有雷暴日 11 天。20 世纪 70 年代末

至 80 年代末,郑州雷暴日数呈现减少趋势,90 年代至本世纪初,雷暴日大都在多年平均线附近小幅波动。

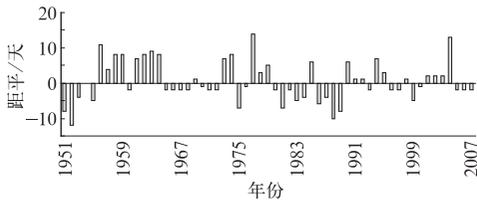


图 2 郑州 1951—2007 年逐年雷暴日数距平图

Fig. 2 Anomalies of annual thunderstorm days in Zhengzhou from 1951 to 2007

### 1.3 雷暴出现的时段特征

统计雷暴出现的时段得出:只有较少的雷暴出现在上午时段,大部分雷暴开始于下午,以 14 时后出现的较多。

## 2 环境参数与雷电活动相关性分析

### 2.1 资料选取

根据郑州市雷暴天气的月分布特征和时段特征,选取 2004—2006 年 6—8 月郑州探空站(34°43'N、113°34'E)每日 08 时(北京时,下同)的探空资料和郑州观测站的雷暴观测资料进行研究,用 2007 年同期资料进行检验。

本文所选环境参数主要有:强天气威胁指数(*Sweat* 指数)、850 hPa 假相当位温、*K* 指数、最有利抬升指数、对流稳定度指数,各参数值利用每日 08 时探空资料计算得到。雷电样本来自郑州站雷暴观测记录,以 08 时探空后至次日 08 时 24 h 内有雷暴记录者记为一个有雷电活动样本,否则记为无雷电活动样本。依据上述标准,2004—2006 年试验期中共选取 265 个样本,其中有雷电活动样本 78 个,无雷电样本 187 个,2007 年选取了 82 个样本参与预报检验。

### 2.2 单参数分析

#### 2.2.1 强天气威胁指数(*Sweat* 指数)

强天气威胁指数(*Sweat*)主要用于监测强烈的对流性天气,它反映了不稳定能量与风速垂直切变及风向垂直切变对风暴强度的综合作用,是一个无

量纲值。其公式为:

$$Sweat = 12T_{d850} + 20(TT - 49) + 2f_{850} + f_{500} + 125(S + 0.2)$$

式中  $TT = T_{850} + T_{d850} - 2T_{500}$  是全总指数;  $S = \sin(\alpha_{500} - \alpha_{850})$ , 其中  $\alpha_{500}$ 、 $\alpha_{850}$ 、 $f_{500}$ 、 $f_{850}$  分别是 500 hPa 和 850 hPa 的风向和风速。*Sweat* 的值愈高,发生强雷电的可能性愈大。表 1 是 *Sweat* 指数取不同值域时雷电活动出现与否的统计分析结果。

表 1 *Sweat* 指数与雷电活动统计

Table 1 Analyses on *Sweat* indices

<i>Sweat</i> 指数取值区间	无雷电活动天数 (所占比例%)	有雷电活动天数 (所占比例%)
$Sweat < 180$	158(84.5%)	29(37.2%)
$Sweat \geq 180$	29(15.5%)	49(62.8%)
$Sweat \geq 200$	22(11.8%)	43(55.1%)

可以看出,62.8%的雷电活动发生在 *Sweat* 指数值为 180 及其以上的范围内,该取值范围内无雷电活动发生的比例仅有 15%;而当 *Sweat* 指数小于 180 时,无雷电活动出现的比例增加到 84.5%,雷电活动发生比例只有 37.2%。随着 *Sweat* 指数值的增大,无雷电出现的几率迅速减小。因此,我们认为,*Sweat* 指数值的增大有利于雷电活动的出现, $Sweat \geq 180$  的值域范围与雷电活动的出现关系密切。

#### 2.2.2 850 hPa 假相当位温( $\theta_{sc}$ )

分析 850 hPa 的  $\theta_{sc}$  发现(表 2),有 59%的雷电活动出现在 850 hPa  $\theta_{sc} \geq 340$  K 的环境场中,该取值范围内无雷电活动出现的比例为 32.6%;当  $\theta_{sc} < 340$  K 时,无雷电活动出现的可能性较雷电活动要大得多。

表 2 850 hPa  $\theta_{sc}$  与雷电活动统计

Table 2 Analyses on  $\theta_{sc}$  on 850 hPa

850 hPa $\theta_{sc}$ 取值区间	无雷电活动天数 (所占比例%)	有雷电活动天数 (所占比例%)
$\theta_{sc} < 340$ K	126(67.4%)	32(41%)
$\theta_{sc} \geq 340$ K	61(32.6%)	46(59%)

#### 2.2.3 *K* 指数(*KI*)

表 3 给出了 *K* 指数与雷电活动的对应关系,78.2%的雷电活动出现在  $KI \geq 28$  °C 的取值范围内,该范围内无雷电出现的比例有 48%,随着 *K* 指数值的增大,无雷电出现的比例迅速减小, $KI \geq 30$  °C 的范围内,出现了 65.4%的雷电日,而无雷电日的出现比例降低至 36.4%, $KI \geq 35$  °C,无雷电日

的出现比例仅有 14.4%。由此可见,  $K$  指数在一定程度上可以指示雷电活动的潜势。

表 3  $K$  指数与雷电活动统计

Table 3 Analyses on  $K$  indices

$K$ 指数取值区间	无雷电活动天数 (所占比例%)	有雷电活动天数 (所占比例%)
$KI \geq 28$ °C	90(48.1%)	61(78.2%)
$KI \geq 30$ °C	68(36.4%)	51(65.4%)
$KI \geq 35$ °C	27(14.4%)	28(35.9%)

### 2.2.4 最有利抬升指数

抬升指数  $LI$  是气块从自由对流高度沿湿绝热线抬升到 500 hPa 的温度  $T_L$  与 500 hPa 环境温度  $T$  的差值 ( $LI = T_L - T_{500}$ ), 本文选取了最有利抬升指数 ( $BLI$ ) 来进行分析。其计算方法是利用 700 hPa 以下的 1000、925、850 和 700 hPa 各层空气块, 分别沿干绝热抬升到凝结高度, 然后沿湿绝热抬升到 500 hPa, 得出空气块的抬升温度  $T_L$ , 选其中最高者再计算其与 500 hPa 环境温度  $T$  的差值, 就得到最有利抬升指数。

如表 4 所示, 最有利抬升指数  $> 0$  °C 的范围内, 雷电活动出现的比例为 91%, 无雷电出现的比例为 41.7%,  $BLI$  越大, 无雷电出现的比例越小, 在  $BLI \geq 3$  °C 的范围内, 无雷电出现的比例仅为 13.9%, 而在  $BLI \leq -2$  °C 的范围内, 有雷电活动出现的比例为 5.1%, 这表明, 在  $BLI > 0$  °C 的范围内, 雷电出现的几率是很高的。而在  $BLI \leq -2$  °C 时, 雷电出现的几率很低。

表 4 最有利抬升指数 ( $BLI$ ) 与雷电活动统计

Table 4 Analyses on best lifting indices

$BLI$ 取值区间	无雷电活动天数 (所占比例%)	有雷电活动天数 (所占比例%)
$BLI > 0$ °C	78(41.7%)	71(91%)
$BLI \geq 3$ °C	26(13.9%)	38(48.7%)
$BLI \leq -2$ °C	67(35.8%)	4(5.1%)

### 2.2.5 对流稳定度指数

分析发现(表 5), 对流稳定度指数  $CI < 0$  K 时, 雷电活动出现的比例为 88.5%, 无雷电活动出现的比例为 53.5%, 随着对流稳定度指数的减小, 无雷电活动出现的比例大大降低, 在  $CI \leq -10$  K 时, 仅有 12.8% 无雷电活动出现, 该范围内雷电出现的比例为 46.2%, 仅有 5.1% 的雷电活动出现在  $CI \geq 5$  K 的值域范围内。

表 5 对流稳定度指数 ( $CI$ ) 与雷电活动统计

Table 5 Analyses on convective instability indices

对流稳定度指数 取值区间	无雷电活动天数 (所占比例%)	有雷电活动天数 (所占比例%)
$CI < 0$ K	100(53.5%)	69(88.5%)
$CI \leq -5$ K	58(31%)	54(69.2%)
$CI \leq -10$ K	24(12.8%)	36(46.2%)
$CI \geq 5$ K	47(25.1%)	4(5.1%)

### 2.3 多参数综合分析

以上单个环境参数与雷电活动的相关性分析结果表明, 各环境参数在一定的取值范围内与雷电活动出现与否具有一定的相关性, 但就某一个环境参数而言, 又不能完全反映雷电活动特征, 如果把这些参数综合考虑其预报性如何? 我们取  $S_{wheat} \geq 180$ 、850 hPa  $\theta_{se} \geq 340$  K、 $KI \geq 30$  °C、 $BLI > 0$  °C 及  $CI \leq -5$  K 时作为有利于雷电活动出现的环境参数判据, 来分析当不同个数环境参数达到该判据时(以下称有利环境参数)雷电活动出现的几率。表 6 是分析结果。

表 6 多参数综合与雷电活动相关性分析结果

Table 6 Analyses on the correlation between multi-parameters and lightning activities

有利环境参数个数	有雷电活动天数 (所占比例%)	无雷电活动天数 (所占比例%)	有雷电活动几率/%
有利环境参数个数=5	25(32.1%)	13(7%)	65.8
有利环境参数个数=4	20(25.6%)	20(10.7%)	50.0
有利环境参数个数=3	13(16.7%)	20(10.7%)	39.4
有利环境参数个数=2	10(12.8%)	27(14.4%)	27.0
有利环境参数个数=1	6(7.7%)	36(19.3%)	14.3
有利环境参数个数=0	4(5.1%)	71(37.9%)	5.3
有利环境参数个数 $\geq 3$	58(74.4%)	53(28.3%)	52.3
有利环境参数个数 $\leq 2$	20(25.6%)	53(71.7%)	27.3

可以看出, 当 5 个环境参数均处于有利的取值范围内时, 有 32.1% 的雷电活动出现, 有超过 74% 的雷电活动出现在 3 个以上(含 3 个)环境参数都有利的状态, 只有少数的雷电活动出现在 2 个环境参数或更少环境参数有利的状态下。无雷电活动通常出现在有利环境参数个数较少的状态下, 有 71.7% 的无雷电活动出现在 2 个(含 2 个)以下参数有利的环境中。通过对相同有利环境参数状态与雷电有、无的分析比较, 可以看到, 有利环境参数个数越多, 雷电活动出现的几率越大; 反之, 无雷电活动出现的几率越大, 且有雷电活动的几率随着有利环境参数的个数增多而显著增大。这种特征说明了通过判别

多种环境参数分布状态来预报雷电活动具有一定的可行性。

### 3 雷电概率潜势预报

#### 3.1 预报方程的建立

本文选择 2004—2006 年资料齐全的 265 个样本,采用 Miller 提出的事件概率回归(Regression Estimation of Event Probability)方法<sup>[14]</sup>,进行多元回归分析。把郑州市雷电出现与否作为预报量(出现为 1,否为 0),选用 *Sweat* 指数( $x_1$ )、850 hPa  $\theta_{se}$  ( $x_2$ )、*K* 指数( $x_3$ )、最有利抬升指数( $x_4$ )、对流稳定度指数( $x_5$ )5 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(临界值如表 7)。根据最小二乘法原理解得雷电概率多元线性回归方程为:

$$y = 0.3049x_1 + 0.1364x_2 + 0.1173x_3 + 0.2388x_4 + 0.1152x_5 + 0.0412$$

对上述所得方程进行 *F* 检验<sup>[14]</sup>,其表达式为:

$F = \frac{R^2/p}{(1-R^2)/(n-p-1)}$ ,其中  $p=5$  为预报因子个数, $n=265$  为样本个数; $R=0.45$  为复相关系数;当显著水平  $\alpha = 0.05$  时, $F_\alpha = 2.24$ ,计算得  $F = 13.15$ , $F > F_\alpha$ ,说明雷电概率预报方程是显著的。

表 7 预报因子 0,1 处理的临界值

Table 7 The critical threshold of forecast factors

因子名称	临界值
<i>Sweat</i> 指数( $x_1$ )	$x_1 \geq 180.0$ 时取 1,否则取 0
850 hPa 假相当位温( $x_2$ )	$x_2 \geq 340$ K 时取 1,否则取 0
<i>K</i> 指数( $x_3$ )	$x_3 \geq 30$ °C 时取 1,否则取 0
最有利抬升指数( $x_4$ )	$x_4 > 0.0$ °C 时取 1,否则取 0
对流稳定度指数( $x_5$ )	$x_5 \leq -5.0$ °C 时取 1,否则取 0

#### 3.2 方程回代和检验

采用建立的方程对 2004—2006 年间有雷电样本和无雷电样本分别进行回代,结果显示(图 3)大于 69%(54/78)的雷电活动出现在预报概率值为 60%及其以上的范围内,这一取值范围内无雷电活动仅出现了 19.8%(37/187)。依据“起报值域内包含尽可能多的雷电活动样本和尽可能少的无雷电活动样本”的原则,选取预报概率  $\geq 60\%$  时预报未来 24 h 内有雷电活动,否则预报无雷电活动发生。用所建方程对 2007 年 6—8 月逐日进行检验,资料齐

全参与检验的样本共 82 个,预报概率达到 60%以上的样本共有 19 个,实况共出现 15 次雷暴,方程报出 11 次,漏报 4 次,空报 8 次,可见该方法对雷电活动具有一定的预报能力。

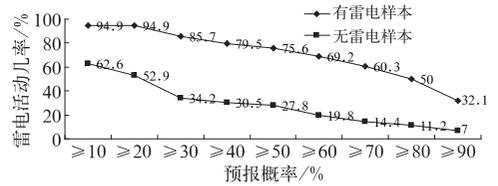


图 3 预报概率与有无雷电活动样本的变化曲线

Fig. 3 The variation of the lightning activity probability with the forecast probability

#### 3.3 业务试用情况

本方法于 2008 年 6 月起进行业务试运行,每日使用 08 时和 20 时探空资料进行郑州市雷电概率潜势预报,取预报概率  $\ge 60\%$  预报未来 24 h 内有雷电,低于 60%的为预报时段内无雷电,采用郑州地区 ADTD 闪电监测资料对业务试运行结果进行评估。2008 年 6—8 月运行结果有 174 个样本,其中有雷电样本 41 个,方程预报正确 35 次,漏报 6 次,无雷电样本共 133 个,方程预报正确 119 次,空报 14 次,TS 评分为 63.6%,正确率为 88.5%。试用结果表明,该方法对于郑州单站的雷电活动具有良好的预报能力,可以作为业务参考使用。

表 8 2008 年 6—8 月 08 和 20 时郑州雷电概率预报结果检验

Table 8 The verification of the lightning probability forecast results in Zhengzhou from June to August in 2008

	有雷电	无雷电
实况有(无)雷电次数	41	133
方程预报正确次数	35	119
空报次数(率)		14(28.6%)
漏报次数(率)	6(14.6%)	
雷电有无正确率	88.5%	
TS 评分	63.6%	

### 4 结论

(1) 郑州的雷暴日主要出现在每年夏季 6—8 月份,以 7 月为最多,雷暴活动具有明显的日变化,只有较少的雷暴出现在上午时段,大部分雷暴开始于午后,以 14 时后出现的较多。

(2) *Sweat* 指数、850 hPa  $\theta_{se}$ 、*K* 指数、最有利抬升指数、对流稳定度指数 5 个环境参数和雷电活动的发生有较好的相关性,但就某一个环境参数而言,又不能完全反映雷电活动特征。

(3) 多参数综合分析发现,有雷电活动主要出现在有利环境参数个数较多的环境状态下,而无雷电活动常出现在有利的环境参数个数较少的环境条件下;有雷电活动的发生几率随着有利环境参数的个数增多而显著增大。这种特征使得通过判别多种环境参数分布状态来预报雷电活动的方法具有一定的可行性。

(4) 采用合适的阈值对各个环境参数进行 0,1 化处理,建立郑州 12~24 h 雷电概率潜势预报模型,经检验方程显著,说明雷电活动与环境参数间有一定的回归效果。

(5) 本方法的业务试用效果表明,2008 年 6—8 月,雷电 TS 评分达到 63.6%,雷电有无预报评分达 88.5%,可见,该方法对于郑州市的雷电活动具有良好的预报能力。

## 参考文献

- [1] 郭虎,熊亚军,付宗钰,等.北京市自然雷电与雷电灾害的时空分布[J].气象,2008,34(1):13-17.
- [2] 袁铁,鄒秀书.卫星观测到的我国闪电活动的时空分步特征[J].高原气象,2004,23(4):488-494.
- [3] 许爱华,马中元,郭艳.“7.17”庐山雷击事件分析[J].气象,2004,30(6):53-56.
- [4] 许爱华,李玉塔,郑婧,等.两次致灾雷电天气过程对比分析[J].气象,2008,34(4):71-78.
- [5] 薛秋芳,孟青,葛润生.北京地区闪电活动及其与强对流天气的关系[J].气象,1999,25(11):15-19.
- [6] 郝莹,姚叶青,陈焱,等.基于对流参数的雷电潜势预报研究[J].气象,2007,33(1):51-56.
- [7] 张喜轩.预报冰雹的方法[J].气象,1980,6(4):14-15.
- [8] 鄒秀书,Ralf Toumi.卫星观测到的青藏高原雷电活动特征[J].高原气象,2003,22(3):288-293.
- [9] 张义军,言穆弘,张翠花,等.甘肃平凉地区正地闪特征分析[J].高原气象,2003,22(3):295-300.
- [10] 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.
- [11] 冯桂力,边道相,刘洪鹏,等.冰雹云形成发展与闪电演变特征分析[J].气象,2001,27(3):33-37.
- [12] 蔡晓云,宛霞,郭虎.北京地区对流云天气闪电特征及短时预报[J].气象,2003,29(8):16-21.
- [13] 易笑园,宫全胜,李培彦,等.华北飚线系统中地闪活动与雷达回波顶高的关系及预警指标[J].气象,2009,35(2):34-40.
- [14] 黄嘉佑.气象统计分析与预报方法[M].北京:气象出版社,2004:46-54.
- [1] 郭虎,熊亚军,付宗钰,等.北京市自然雷电与雷电灾害的时