

冯民学,周俊驰,曾明剑,等. 基于对流参数的洋口港地区雷暴预报方法研究[J]. 气象,2012,38(12):1515-1522.

基于对流参数的洋口港地区雷暴预报方法研究^{*1}

冯民学¹ 周俊驰¹ 曾明剑² 焦 雪¹
王洪生¹ 许小川¹ 葛黎黎³ 庄智福⁴

1 江苏省防雷中心,南京 210009

2 江苏省气象台,南京 210008

3 南京信息工程大学,南京 210044

4 江苏省气象信息中心 南京 210008

提 要: 文章分析了洋口港地区 2001—2009 年 4—9 月 1645 个样本 22 种对流参数与雷暴事件的相关性以及这些参数的统计特征。结果表明,各对流参数月际分布差异较大,各参数与雷暴事件相关系数也不同。因而选择沙氏指数 SI 、全总指数 TT 、杰弗逊指数 JI 、抬升凝结高度温度 tcl_t 、上下层温差 dt_58 、大气可降水量 p_w 、风暴强度指数 SSI 等 7 个对于雷暴活动具有较好相关性的因子,并考虑到 4—9 月月际分布差异,使用不同月份 p_w 、 SI 、 TT 、 JI 的不同阈值作为排空因子,不同月份 SSI 、 tcl_t 、 dt_58 的不同阈值作为预报因子,使用二级逻辑回归法建立排空方程和预报方程,同时对所建立各月预报方程进行了检验和拟合结果分析,并对 2010 年 4—9 月样本进行试报,预报效果较好。

关键词: 对流参数, 相关系数, 月际分布, 二级逻辑回归预报方程, 雷暴

Research on Lightning Forecast at Yangkou Harbor Based on Convective Indexes

FENG Minxue¹ ZHOU Junchi¹ ZENG Mingjian² JIAO Xue¹
WANG Hongsheng¹ XU Xiaochuan¹ GE Lili³ ZHUANG Zhifu⁴

1 Jiangsu Lightning Protection Centre, Nanjing 210009

2 Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008

3 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

4 Jiangsu Meteorological Information Centre, Nanjing 210008

Abstract: This paper analyzed statistical characteristics of 22 convective indexes in the 1645 samples from April to September, 2001—2009 at Yangkou Harbor and their correlation with lightning activities. The results have shown the monthly variations and different coefficients of the indexes, and then the elimination and forecasting equations were set up by means of bi-level logistic regression using the multiple thresholds of indexes p_w , SI , TT , JI for elimination and those of SSI , tcl_t , dt_58 for prediction with consideration of monthly diversity of each index which is in close correlation with lightning activities. The fitting test has confirmed good forecasting effects of the equations above.

Key words: convective indexes, correlation coefficients, monthly variation, bi-level logistic regression equations, thunderstorm

* 江苏省“科技支撑计划——社会发展”项目(BS20025)资助

2011年12月19日收稿; 2012年8月27日收修定稿

第一作者:冯民学,主要从事雷电预警及防护研究. Email: fengminxue@tom.com

引言

洋口港位于江苏省南通市如东县东部沿海,是中国沿海中部唯一能建 30 万吨级的天然深水良港,它的开发建设作为江苏沿海开发的核心工程,已经列入国家战略布局,对整个中国沿海开发和能源安全具有重要战略意义。该港口地处江淮下游,是暖温带与亚热带过渡地带,冷暖气流频繁交汇,气候复杂多变,雷暴活动和雷电灾害频繁,加强对该地区雷暴天气的分析与研究,提高对洋口港地区雷暴活动的预报能力,具有重大意义。

雷暴云的发展与热气团在不稳定环境中的对流抬升有关^[1-2],所以雷暴事件与大气的不稳定因子之间必然有一定关系。陈艳等^[3]采用中尺度数值模式模拟一次暴雨过程后指出,对流有效位能、风暴相对螺旋度等参数对强对流过程的发生发展有较好的指示作用。赵秀英等^[4]和高守亭等^[5]也分别把与动力、热力都相关的风暴强度指数、里查森指数用于强对流发生机制的研究。张翠华等^[6]研究发现,中层(700~400 hPa)平均相对湿度与地闪活动有较好的相关性。郑栋等^[7]使用对流性稳定度指数、抬升指数、对流有效位能和 700 hPa 相当位温等指数综合预报闪电活动。陈秋萍等^[8]、郝莹等^[9]分别采用逐步消空法和指标叠加法进行基于对流参数的雷电预报。Solomon 等^[10]在研究新墨西哥州雷暴时,使用了对流有效位能和抬升指数等因子,并发现当对流有效位能的值 > 400 J·kg⁻¹ 时,可以较好地预报闪电活动的发生,而抬升指数不是预报闪电活动的关键因子。

上述研究中,对单个或少数对流参数的研究较多,对各种对流参数与雷暴的相关性进行全面考察的少;且以有限的个例为研究样本较多,建立基于长时间序列样本,预报效果较稳定的雷暴预报方程的少。此外,从上述研究可以看出,由于地域的差异及预报方法的不同,雷暴事件与一些参数的相关性也存在一定差异。本文分析了江苏省洋口港地区 2001—2009 年 4—9 月 1645 个样本 22 种对流参数与雷暴事件的相关性及统计特征,优选因子,采用二级逻辑回归的方法,逐月建立雷暴预报方程,形成较为完善、稳定的基于对流参数的雷暴预报方法。

1 本文所使用资料

本文根据江苏省气象台普查后取得的 NCEP

再分析资料,经整理后借助 MICAPS 3.0 的 $T-\ln p$ 软件模块,计算 2001—2009 年 4—9 月 1645 个样本中(其中雷暴日 242 天,非雷暴日 1403 天)江苏地区 154 个格点不同时刻的 22 种对流参数,并选取处于洋口港地区的所有格点的各参数的算术平均值作为该区域相应参数的历史资料。

本文所使用的雷暴日资料来源于江苏省气候中心,因洋口港开发建设不久,没有专门的雷暴观测资料,所以使用其相邻市县观测站 2001—2009 年 4—9 月的雷暴日资料,规定若其相邻市县同时有 2 个或以上发生雷暴活动,则记为该区域的雷暴日。

2 预报因子的选取

2.1 各因子的相关系数

将该区域当日是否是雷暴日情况设为 Y ,有雷暴时, $Y=1$,无雷暴时, $Y=0$,则 Y 为“0”、“1”变量。 X_i 是各参数值,为连续型变量。使用下式求出 X_i 与 Y 的点双序列相关系数^[11],可以考察各个参数 X 和 Y 之间的相互关系(线性相关)。

$$r = \frac{\bar{X}(1) - \bar{X}}{S_x} \left(\frac{P}{1-P} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中, \bar{X} 为因子 X_i 的平均值, $\bar{X}(1)$ 为 $Y=1$ 时, X_i 的平均值, P 为 $Y=1$ 事件出现的频率, S_x 为因子的样本标准差。

使用式(1)求得 1645 个样本(其中雷暴日 242 天,非雷暴日 1403 天)中各因子各自与当日是否为雷暴日情况 Y 的点双序列相关系数,相关系数大于 0.3 的参数如表 1,并且均通过双尾检验^[11] Sig. (2-tailed) < 0.05。

由表 1 可以看到,沙氏指数、条件对流稳定度指数、全总指数、抬升指数、对流稳定度指数、对流有效位能、风暴强度指数、杰弗逊指数、 K 指数、抬升凝结高度温度、上下层温差、大气可降水量、修正 K 指数、莱克利指数、风暴相当螺旋度与是否发生雷暴情况 Y 的点双序列相关系数在 0.3 以上,沙氏指数最高,达到 0.544。其中,沙氏指数、抬升指数、对流稳定度指数、条件对流稳定度指数这几个因子均是通过计算气块在不同高度处的温度差来反映大气的不稳定情况,公式和物理意义相似,根据预报因子不可重复的原则,故只选取其中相关系数最大的沙氏指数;同理, K 指数、修正 K 指数只选取 K 指数,杰弗逊

表 1 1829 个样本中与是否发生雷暴相关性较好的对流参数

Table 1 Indexes in close correlation with thunderstorms

对流参数	符号	点双序列 相关系数	公式	物理意义
沙氏指数	SI	0.544	$SI = T_{500} - T'_{850}$	反映 850 hPa 气块移动到 500 hPa 时的不稳定状况, 负值越大, 气层越不稳定
条件对流稳定度指数	ILC	0.436	$ILC = (T_{500}^* - T_{\sigma_0}) + (T_{\sigma_{500}} - T_{\sigma_{850}})$	$ILC > 0$, 为对流性稳定; $ILC < 0$, 为对流性不稳定
全总指数	TT	0.429	$TT = T_{850} + T_{d850} - 2T_{500}$	反映 850 hPa 与 500 hPa 处的温度与露点温度状况, TT 越大, 越容易发生对流天气
抬升指数	LI	0.427	$LI = T_{500} - T'$	当 $LI < 0$ 时, 大气层结不稳定, 且负值越大, 不稳定程度越大
对流性稳定度指数	IC	0.423	$IC = (\theta_{seL} - \theta_{seT})$	$IC > 0$, 为对流性稳定; $IC < 0$, 为对流性不稳定
对流有效位能	CAPE	0.395	$CAPE = g \int_{Z_{LFC}}^{Z_{EL}} \left(\frac{T_{sp} - T_{re}}{T_{re}} \right) dz$	CAPE 为气块在自由对流高度和平衡高度之间受环境净浮力累积做的功, 值越大越容易产生雷暴
风暴强度指数	SSI	0.365	$SSI = 100[2 + 0.27 \ln(SHR) + 2.011 \times 10^{-4} \times CAPE]$	表达了浮力能和垂直风切变之间的线性关系, SSI 越大, 越容易发生对流天气
杰弗逊指数	JI	0.352	$JI = 1.6\theta_{w900} - T_{500} - 11$	一种修正的综合性指数, 通过湿球位温与气层温度指示对流活动发生的可能性, JI 越大, 气层越不稳定
K 指数	K	0.331	$K = (T_{850} - T_{300}) + T_{d850} - (T - T_d)_{700}$	一般 K 值越大大气层结越不稳定
抬升凝结高度温度	tcl_t	0.324	$tcl_t = T(z_i) - \frac{g}{c_p} z - 273.15$	空气受到强迫抬升达到凝结时的高度称为抬升凝结高度, 此高度处温度为抬升凝结高度温度, tcl_t 越高, 越有利于气层不稳定
上下层温差	dt_58	0.324	$dt_58 = T_{500} - T_{850}$	上下层的温度之差越大, 对大气层结不稳定作用越大
大气可降水量	p_w	0.321	$p_w = \int_0^{\infty} \alpha q dz$	指从地面到大气顶层单位截面大气柱中所含水汽总量全部凝结并降落到地面可产生的降水量, p_w 越大, 水汽越丰富, 容易发生对流天气
修正的 K 指数	MK	0.32	$MK = \frac{1}{2}(T_0 + T_{850}) + \frac{1}{2}(T_{d0} + T_{d850}) - T_{500} - (T - T_d)_{700}$	MK 值越大表示气团低层暖湿, 稳定度越小, 因而有利于对流产生
莱克利指数	MJI	0.311	$MJ = 1.6\theta_{w900} - T_{500} - \frac{1}{2}(T - T_d)_{700} - 8$	是一种修正的不稳定指数, MJ 越大, 气层越不稳定
风暴相当螺旋度	SRH	0.309	$SRH = \int_0^z (\bar{V} - \bar{C}) \bar{\omega}_{xy} dz$	SRH 反映了风暴的移动速度, 一般 SRH 越大, 越容易发生雷暴

指数、莱克利指数只选取杰弗逊指数; 对流有效位能与风暴强度指数只选取风暴强度指数。

2.2 各因子在有雷暴情况下的统计特征

统计学中, 箱线图(Boxplot, 又称箱图)可以直观地反映较大容量样本的值分布情况, 并且排除异常数据点^[12]。图 1 是 2001—2009 年 1645 个样本中有无雷暴情况下各对流参数的箱图。理想情况下, 当某预报因子在有雷暴情况下取值完全不同, 即值域不相交时, 则该因子对雷暴预报具有完全的

指示作用, 此时有无雷暴情况下的箱图在 y 轴应没有任何交集, 即任意一个 y 值至多只经过一个箱图。从图 1 看到, 各参数有无雷暴时的箱图均存在一定的交集, 有些相交较少, 如图 1a 的沙氏指数; 有些则相交较多, 如图 1d 的 K 指数和图 1i 的风暴相当螺旋度。显然, 交集越少, 则该参数对雷暴的指示作用越好。设各因子涵盖 90% 雷暴事件的取值区间为 θ_i , 非雷暴情况下, 各因子取值落在 θ_i 区间内的频率 η 如图 2 所示。可以看到, SI 、 TT 、 JI 、 tcl_t 、 dt_58 、 p_w 、 SSI 的 η 均未超过 30%, 有无雷暴情况

下的取值交加较少(如图 1a、b、c、e、f、g、h),对于是否发生雷暴事件具有良好的指示作用。而 K 指数

和风暴相当螺旋度的 η 分别为 38.7%和 52.8%,值域在有雷暴情况下存在较多的交集(如图 1d、i)。

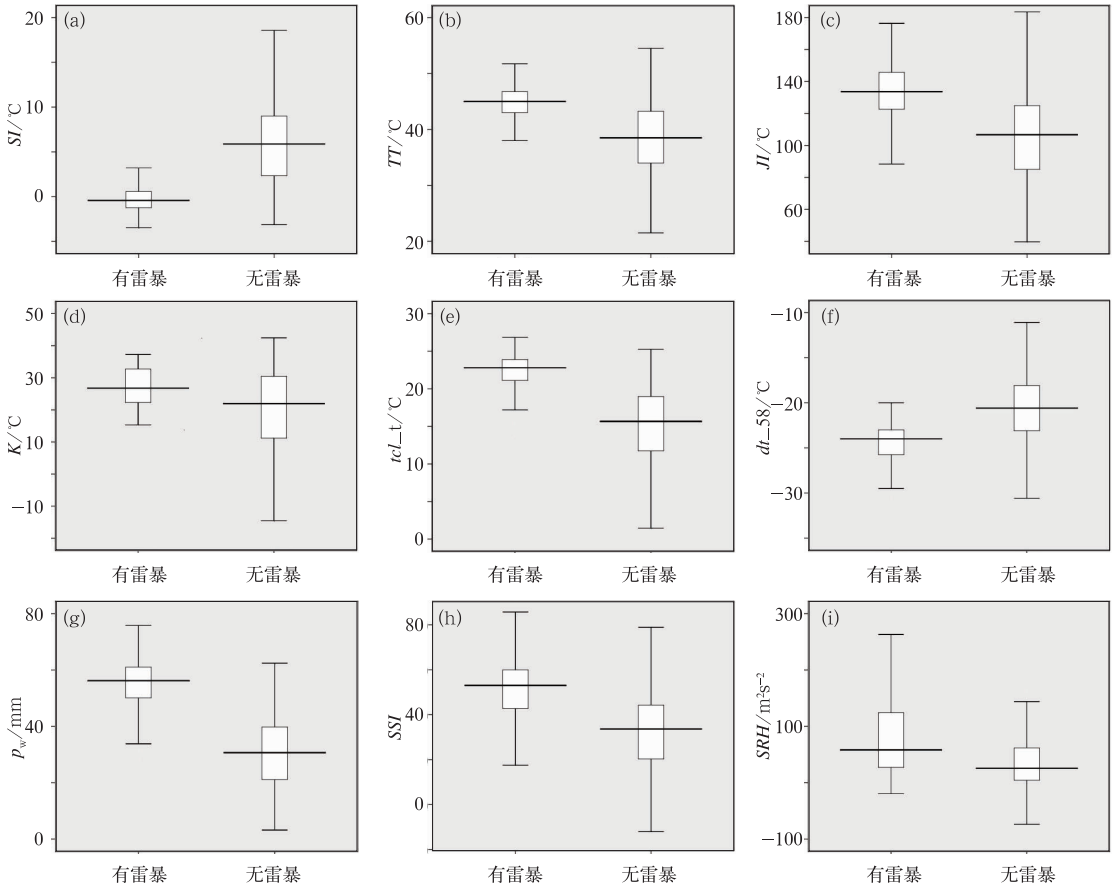


图 1 2001—2009 年 1645 个样本有无雷暴情况下各对流参数的箱线图

(短实线:第 1 百分位数和第 99 百分位数,长实线:中位数,矩形下边线:第 10 百分位数,矩形上边线:第 90 百分位数)

Fig. 1 Box-whisker plots of the 9 indexes in thunderstorms and fine weather of the 1645 samples

(top and bottom bars: the 1st centile and 99th centile, long bars: the median, the bottom of the box: 10th centile, the top of the box: 90th centile)

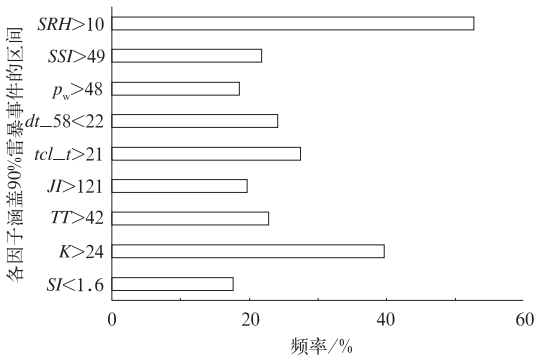


图 2 非雷暴事件中各参数处于雷暴所在区间的频率

Fig. 2 Intersection of indexes in lightning events and fine weather

因此,若引入 K 指数或风暴相当螺旋度作为预报因子,必然会带来较多的空报。

所以,本文使用沙氏指数 SI 、全总指数 TT 、杰弗逊指数 JI 、抬升凝结高度温度 tcl_t 、上下层温差 dt_{58} 、大气可降水量 p_w 、风暴强度指数 SSI 这 7 个参数作为预报因子。

3 预报方程的建立

3.1 各参数的月分布特征

统计了 2001—2009 年 4—9 月洋口港地区的 242 次雷暴事件,得到各参数雷暴日的月均值分布

如图 3。沙氏指数、杰弗逊指数、抬升凝结高度温度、大气可降水量、风暴强度指数的雷暴日均值均是在 7、8 月份达到正的或负的最大值,4、5 月份相对较小,这是因为 7、8 月份对流活动最为旺盛,气层不稳定程度高;全总指数、上下层温差则是在 4、5 月份

达到正的或负的最大值,这可能是由于这两个参数公式中的 T_{500} 春季容易出现较强低温。可见各参数都存在明显的月变化特征,因此,本文对 4—9 月逐月建立预报方程。

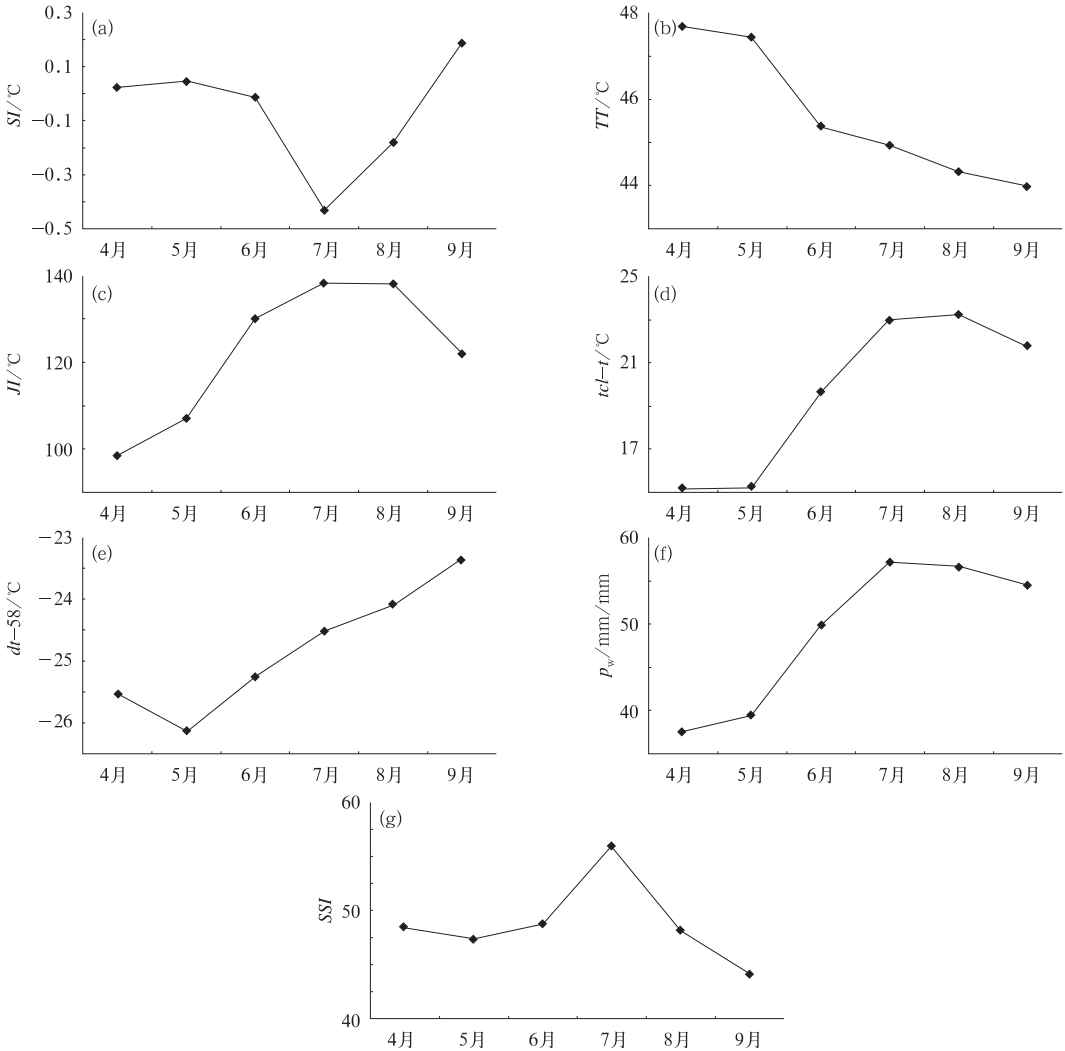


图 3 2001—2009 年洋口港地区各参数雷暴日的月均值
Fig. 3 Monthly average of every index during 2001—2009

3.2 使用二级逻辑回归法建立各月预报方程

3.2.1 建立预报方程

逻辑回归的基本思想是把预报量和因子均看成随机事件,随机事件出现与否用“0”和“1”表示,把预报量事件 y 与 n 个预报因子 x_1, x_2, \dots, x_n 事件之间的关系看成是 n 个因子已经出现的条件下事件出现与否的关系,则可以建立对预报量 y 的条件期望。

逻辑回归中 X 为各因子“0”、“1”化之后的矩阵。 Y 作为预报量,也要进行“0”、“1”化,当该样本为该区域的雷暴日时,则设 $y=1$;否则,设 $y=0$ 。

考虑各因子物理意义的相对独立性,并经过上述 7 个参数的组合试验以达到最佳拟合效果,第一级排空回归,我们选用含水量指标 p_w 、稳定度指标沙氏指数 SI 、热力指标全总指数 TT 和综合性指标杰弗逊指数 JI 作为因子。各因子的“0”、“1”化方

法是:以各因子雷暴事件中的四分位数作为临界值,即将 9 年中各月各因子雷暴日的取值由小到大排列,并分成四等份,处于第一个分割点位置的是第一四分位数 Q_1 ,处于第三个分割点位置的是第三四分位数 Q_3 ^[11]。从上一章中图 1 可以看到, p_w 、 TT 和 JI 雷暴日的取值较非雷暴日大,则 $X_i < Q_1$ 时,设为“1”,否则设为“0”; SI 雷暴日的取值较非雷暴日小,则 $X_i > Q_3$ 时,设为“1”,否则设为“0”。经过拟合计算,得到排空回归方程(为便于阅读,式中因子用()括起,下同):

$$y = b_0 + b_1(JI) + b_2(SI) + b_3(TT) \quad (2)$$

回归结果得到,雷暴情况下,即当 $y = 1$ 时,使用上式求得的预测 $y' \leq k_1$,则将样本中经式(2)计算后得到的预测 $y' > k_1$ 的排除,剩余样本进入第二级预报回归。

第二级预报回归使用风暴强度指数 SSI ,抬升凝结高度温度 tcl_t ,上下层温差 dt_58 作为参数。各因子的“0”、“1”化也是以各因子雷暴事件中的四分位数作为临界值。对于 SSI 和 tcl_t ,当 $X_i \geq Q_1$ 时,设为“1”,否则设为“0”;对于 SI ,当 $X_i \leq Q_3$ 时,设为“1”,否则设为“0”。经过拟合计算,得到预报方程:

$$y = c_0 + c_1(SSI) + c_2(tcl_t) + c_3(dt_58) \quad (3)$$

回归结果得到,雷暴情况下,即当 $y = 1$ 时,使用上式求得的预测 $y' \geq k_2$,则当样本中经式(3)计算后得到的预测 $y' > k_2$ 时,作为预报有雷电发生的阈值。

使用上述方法,逐月求得排空方程和预报方程如表 2。

对各月的二级回归方程均进行了 F 检验^[12],并且求得“0”、“1”化之后的回归因子与预报量的复相关系数如表 2。Sig. $F \in [4.99 \times 10^{-6}, 0.0065]$,所以认为我们建立的回归模型是可以接受的^[11];复相关系数 $R \in [0.49, 0.8]$,雷暴事件集中的 6—8 月 R 值均在 0.6 以上,说明我们选取的因子和设立的门槛对于预报量具有良好的指示作用。

3.2.2 拟合结果分析

使用上述方法,对 2001—2009 年 4—9 月的 1645 个样本进行拟合结果分析,其中^[13],

$$\text{命中率 } POD = \frac{n_1}{N} \quad (4)$$

$$\text{虚警率 } FAR = \frac{n'}{n} \quad (5)$$

$$\text{临界成功指数 } CSI = \frac{n_1}{N + n'} \quad (6)$$

式中, N 为实况雷暴事件次数, n_1 为报出的雷暴事件次数, n' 为预报有雷暴实况无雷暴事件次数, n 为预报有雷暴次数。

如表 3 可见,命中率平均值为 84.9%,最高为 7 月的 91.5%,最低为 5 月的 80.0%;虚警率的平均值为 26.1%,最低为 7 月的 21.2%,最高为 5 月的 33.3%;临界成功指数的平均值为 62.8%,最高为 7 月的 70.3%,最低为 5 月的 55.7%。因此可以认为我们建立的预报模型拟合程度较好。

3.2.3 对 2010 年 4—9 月 184 个样本进行试报

使用上述方法,对 2010 年 4—9 月的样本进行试报,样本容量 184 个,其中,雷暴日 31 天,非雷暴日 153 天。试报结果为:报警 41 次,命中 27 次,空报 16 次,命中率 87.1%,虚警率 39%,临界成功指数 57.4%。

各月的预报结果如表 4,可以看到,各月雷暴事件命中率均在 80.0% 以上,7—9 月份的临界成功指数较高。由于 2010 年 5 月没有发生雷暴,4 和 6 月雷暴事件分别只有 1 和 2 次,样本较少,试报结果难免具有一定偶然性,需要更多样本进行验证。

4 小结和探讨

本文基于洋口港地区 2001—2009 年 4—9 月 1645 个样本,探讨了对流性天气指数对于雷电预报的指示作用,得到以下结论:

(1) 本文计算分析 22 种对流参数与雷暴事件的相关性得出:沙氏指数、全总指数、杰弗逊指数、抬升凝结高度温度、上下层温差、大气可降水量、风暴强度指数等参数的点双序列相关系数较高,在 0.3 以上;且在不同天气条件下(是否发生雷暴)的区分度较好,在涵盖 90% 雷暴事件的参数区间内,非雷暴事件发生的概率都没有超过 30%,对于雷暴具有良好的甄别指示作用。

(2) 本文统计了 2001—2009 年 4—9 月洋口港地区的 242 次雷暴中各参数的逐月均值,分析得到:沙氏指数、杰弗逊指数、抬升凝结高度温度、大气可降水量、风暴强度指数的雷暴日均值均是在 7、8 月达到正的或负的最大值,4—9 月相对较小;全总指数、上下层温差在 4、5 月达到正的或负的最大值。各参数均存在明显的月变化特征。

表 2 各月预报方程
Table 2 Monthly forecasting equations

月份	事件	因子	门限	方程	复相关系数 R	Sig. F
4 月	排空	p_w	<30	$y = -0.04 + 0.171(JI) + 0.746(SI) + 0.117(TT)$	0.63	6.5×10^{-3}
		JI	<63			
		SI	>0.3			
	预报	TT	<40			
		SSI	>45			
		tcl_t	>15			
		dt_58	<-22	$y = 0.061 + 0.192(SSI) + 0.391(tcl_t) + 0.532(dt_58)$	0.66	5.1×10^{-4}
5 月	排空	p_w	<24	$y = -0.013 + 0.157(JI) + 0.721(SI) + 0.139(TT)$	0.61	1.1×10^{-3}
		JI	<104			
		SI	>0.2			
	预报	TT	<47			
		SSI	≥ 42			
		tcl_t	≥ 14			
		dt_58	≤ -25	$y = 0.045 + 0.558(SSI) + 0.049(tcl_t) + 0.182(dt_58)$	0.52	4.5×10^{-3}
6 月	排空	p_w	<30	$y = 0.035 + 0.168(JI) + 0.66(SI) + 0.128(TT)$	0.67	2.6×10^{-5}
		JI	<120			
		SI	>0.7			
	预报	TT	<43			
		SSI	≥ 50			
		tcl_t	≥ 20			
		dt_58	≤ -23	$y = -0.128 + 0.359(SSI) + 0.428(tcl_t) + 0.339(dt_58)$	0.61	6.5×10^{-4}
7 月	排空	p_w	<50	$y = 0.105 + 0.217(JI) + 0.382(SI) + 0.33(TT)$	0.8	8.5×10^{-5}
		JI	<125			
		SI	>-0.2			
	预报	TT	<44			
		SSI	>38			
		tcl_t	>22.5			
		dt_58	<-23	$y = -0.059 + 0.212(SSI) + 0.446(tcl_t) + 0.407(dt_58)$	0.66	6.0×10^{-4}
8 月	排空	p_w	<50	$y = 0.085 + 0.198(JI) + 0.512(SI) + 0.373(TT)$	0.74	5.0×10^{-6}
		JI	<130			
		SI	>0			
	预报	TT	<45			
		SSI	>45			
		tcl_t	>22			
		dt_58	<-22.5	$y = 0.073 + 0.371(SSI) + 0.258(tcl_t) + 0.242(dt_58)$	0.65	1.9×10^{-5}
9 月	排空	JI	<106	$y = -0.12 + 0.341(JI) + 0.457(SI) + 0.226(TT)$	0.58	5.8×10^{-5}
		SI	>0.65			
		TT	<40			
	预报	p_w	<47			
		SSI	>40			
		tcl_t	>22			
		dt_58	<-22	$y = 0.312 + 0.401(SSI) + 0.221(tcl_t) + 0.137(dt_58)$	0.49	2.6×10^{-3}

表 3 拟合结果分析

Table 3 Analysis of fitting results

月份	预测 y' 阈值	命中率/%	虚警率/%	临界成功指数/%
4	$y' > 0.64$	81.8	28.3	58.4
5	$y' > 0.6$	80.0	33.3	55.7
6	$y' > 0.55$	84.4	25.7	63.3
7	$y' > 0.5$	91.5	21.2	70.3
8	$y' > 0.44$	88.4	23.3	66.4
9	$y' > 0.66$	83.1	25.0	62.6

表 4 2010 年 184 个样本试报结果

Table 4 Test forecasting results of the 184 samples in 2010

月份	实况雷暴事件次数	命中率/%	虚警率/%	临界成功指数/%
4	1	100.0	66.7	33.3
5	0	N/A	N/A	N/A
6	2	100.0	50.0	50.0
7	10	90.0	30.8	64.3
8	13	84.6	33.3	61.1
9	5	80.0	28.6	57.1

(3)本文选择与雷暴事件具有较好相关性的参数作为因子,并考虑到各参数月际数值分布差异,使用不同月份的 p_w, SI, TT, JI 的不同阈值作为排空因子,不同月份的 SSI, tcl_t, dt_58 的不同阈值作为预报因子,使用二级逻辑回归法建立排空方程和预报方程。经检验,复相关系数 $R > 0.48$, $\text{Sig. } F < 0.02$;经拟合结果分析,命中率平均值为 84.9%,虚警率平均值为 26.1%,临界成功指数的平均值为 62.8%;使用 2010 年 4—9 月 184 个样本(31 个雷暴事件)进行试报,临界成功指数为 57.4%,达到一定预报效果。

由于本文所使用的样本中 4、5 和 9 月的雷暴事件较少,预报结果难免存在一定的偶然性,还需要更多的资料进行验证。另外,我们的预报方法没有考虑与环流形势的结合和触发因子,接下来的工作中,我们将开展这方面的研究,进一步改进和完善我们的预报方法。

参考文献

- [1] 郑媛媛,姚晨,郝莹,等. 不同类型大尺度环流背景下强对流天气的短时临近预报预警研究[J]. 气象,2011,37(7):796-801.
- [2] 苏永玲,何立富,巩远发,等. 京津冀地区强对流时空分布与天气学特征分析[J]. 气象,2011,37(2):177-184.
- [3] 陈艳,寿绍文,宿海良. CAPE 等环境参数在华北罕见秋季大暴雨中的应用[J]. 气象,2005,31(10):56-61.
- [4] 赵秀英,吴宝俊. 风暴强度指数 SSI[J]. 气象,2005,26(5):55-56.
- [5] 高守亭,孙淑清. 应用里查逊数判别中尺度波动的不稳定[J]. 大气科学,1986,10(2):171-182.
- [6] 张翠华,张义军,郗秀书,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.
- [7] 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):196-202.
- [8] 陈秋萍,冯晋勤,李白良,等. 福建强天气短时潜势预报方法研究[J]. 气象,2010,36(2):28-32.
- [9] 郝莹,姚叶青,陈焱,等. 基于对流参数的雷暴潜势预报研究[J]. 气象,2007,33(1):52-56.
- [10] Solomon R. Baker M. Electrification of New Mexico thunderstorms[J]. Mon Wea Rev, 1994,122:1878-1886.
- [11] 柳金甫,王义东. 概率论与数理统计[M]. 武汉:武汉大学出版社,2006:240.
- [12] 胡良平. SAS 统计分析教程[M]. 北京:电子工业出版社,2010:365-399.
- [13] 王铭才. 大气科学常用公式[M]. 北京:气象出版社,1994:275.