

文章编号:2096 - 5389(2021)06 - 0017 - 09

双流机场雷暴天气预报方法研究

李典南¹, 徐 海², 许东蓓³

(1. 贵州省气象台, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国民用航空西南地区空中交通管理局气象中心, 四川 成都 610202;
3. 成都信息工程大学大气科学学院高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225)

摘 要:利用双流国际机场 2013—2018 年的逐小时气象观测资料、欧洲中心 ERA - interim 逐 6 h 再分析资料、成都市气象局多普勒天气雷达产品资料, 运用统计学方法分析双流机场雷暴月变化和日变化特征, 并利用相关性分析筛选出双流机场雷暴天气预报因子, 在此基础上基于二级逻辑回归法建立潜势预报模型(预报方程和消空方程), 最后进行数据的回代检验。结果表明:对流有效位能、K 指数、850 hPa 比湿、850 与 500 hPa 假相当位温差、回波顶高、1.5°仰角基本反射率、3.4°仰角基本反射率、垂直累积液态水含量为雷暴天气的主要预报因子, 据此建立的潜势预报模型对双流机场雷暴天气的预报具有一定指示性, 且综合来看在夏季的预报效果更好。

关键词:双流机场; 雷暴; 预报因子; 预报方程

中图分类号:P456.8 **文献标识码:**A

Study on Thunderstorm Forecasting Methods at Shuangliu Airport

LI Diannan¹, XU Hai², XU Dongbei³

(1. Guizhou Meteorological Observatory, Guiyang 550002, China; 2. Meteorological Center of Southwest Air Traffic Management Bureau, CAAC, Chengdu 610202, China; 3. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610225, China)

Abstract:Based on the hourly meteorological observation data of Shuangliu International Airport from 2013 to 2018, the 6 hourly reanalysis data of European Center ECMWF ERA - interim, and the products data of Doppler Weather Radar of Chengdu Meteorological Bureau, statistical methods were used to analyze the monthly and daily characteristics of the changes of thunderstorms at Shuangliu Airport, and correlation analysis were used to screen out some thunderstorm forecast factors of Shuangliu Airport. On this basis, the potential forecast models (prediction equation and voiding equation) were established based on the two - level logistic regression method, and finally the existing data were tested for retrogression. The results show: The main predictors of thunderstorms are convective available potential energy, K index, 850 hPa specific humidity, potential pseudo - equivalent temperature difference between 850 hPa and 500 hPa, echo top, 1.5° elevation angle basic reflectance, 3.4° elevation angle basic reflectance, and vertically integrated liquid. The potential forecast models established based on these has certain indications for the forecast of thunderstorm at Shuangliu Airport, and the overall forecasting effect in summer is better.

Key words:Shuangliu Airport; thunderstorm; forecast factors; prediction equation

收稿日期:2020 - 11 - 29

第一作者简介:李典南(1994—),女,硕士,助工,主要从事灾害性天气预报及相关研究工作,E-mail:627578222@qq.com。

资助项目:中国民用航空西南地区空中交通管理局(XNKG2019070):强对流天气对西南地区飞行影响的研究。

0 引言

雷暴是一种常见的带有雷电现象的局地性强对流天气^[1],其水平发展的范围为几千米至几十千米,垂直发展的高度可达 8~15 km,持续时间为几分钟到几小时不等^[2]。雷暴的发生通常伴有雷暴大风、短时强降水、冰雹甚至龙卷等一种或多种天气现象^[3],给航空飞行带来了十分恶劣的影响。据统计,全球每天约有 4.4 万个雷暴发生,并且在任意一个时刻都有 0.2~0.4 万个雷暴在活动,其活动面积占比全球面积高达 1%^[4],严重威胁航空飞行的安全。近年来国内外相关统计显示,每年由于气象因素造成的飞行事故超过事故总数的 1/3^[5],而在这部分由于气象因素造成的飞行事故中,又有至少 1/3 是受到雷暴天气的影响^[6-8]。由此可见,提高雷暴天气的预报水平,可在一定程度上减少航空飞行事故的发生以及降低飞行事故带来的损失。

雷暴的形成通常需要 3 个必要条件:深厚且明显不稳定的气层、充沛的水汽以及合适的触发条件^[9]。在雷暴发生发展过程中,大气各气象要素在不断发生变化,当某些气象要素的强度达到一定程度时,雷暴便会发生。为了表征某个时刻大气的性质特征,可选用某些参数的数值来衡量,这就引入了对流参数的概念:将基于气块法分析对流条件而得出的参数,统称为对流参数。在实际预报中,可依据对流参数的数值特征来判断大气层结的不稳定性、水汽条件和动力条件等的强弱变化情况,并基于此得出未来强对流天气的发生时间、落区和强度等信息^[10]。利用对流参数进行预报的方法有许多,比如指标叠套法^[11],即选取多个因子并计算其指标,通过对这些指标进行分析叠套来进行潜势预报。还可将多个因子相结合为一个新的预报因子,比如将垂直螺旋度与对流有效位能相结合而成的“垂直能量螺旋度指数(VEH)”^[12-13],VEH 能有效体现强对流天气的动力因子和热力因子的共同贡献,杨晶铁等^[14]通过实际验证,发现 VEH 对双流机场的雷暴天气的预报具有一定指示性。此外,建立潜势预报模型也是一种常用的预报方法,比如:主分量旋转法、二级逻辑回归法、Bayes 判别法、Logistic 回归判别法、神经网络法等^[15-20]。其大体思路是:筛选出与雷暴发生关系最密切的几个对流参数或物理量,再将这些参数或物理量利用不同方法来建立预报模型。

成都双流国际机场位于 103°57′02″E、30°34′47″N,地处四川盆地西部的平原腹地,海拔约为

504.3 m,是中国大陆的八大航空枢纽之一,是西南地区重要的客货集散地。双流机场地势西高东低,自西北向东南倾斜^[21],受青藏高原大地形和盆地气候特征的影响,容易在近地面形成较强的垂直风切变以及气流辐合线、低涡等中小尺度天气系统^[22]。在夏季,双流机场常处于太平洋副热带高压的西南边缘,加之机场东面河流纵横、水汽充沛^[23-25],使得雷暴天气频发。

为研究双流机场的雷暴天气并为其空中管制提供技术支持,本文参考了常用预报方法的思路来建立潜势预报模型,并在其基础上做了一定改进。全文综合利用了多种气象资料,首先运用统计学方法分析双流机场雷暴天气的时间变化特征,再利用相关性分析筛选出对双流机场雷暴天气指示性较好的物理量因子以及主要雷达特征量,最后在此基础上基于二级逻辑回归法建立潜势预报模型。

1 资料与方法

1.1 资料数据

所用的资料主要为:①2013—2018 年双流机场的逐小时观测资料。该资料由双流机场例行每小时记录一次,要素包括风向、风速、气温、露点、相对湿度、修正海平面气压、云、能见度、天气现象等等。②欧洲中期天气预报中心(ECMWF)2013—2018 年的 ERA-interim 逐 6 h 再分析资料(水平分辨率为 0.125°×0.125°),主要为高空资料。③成都市气象局多普勒天气雷达 S 波段 SC 型号的雷达产品资料,主要包含回波顶高、1.5°仰角基本反射率、3.4°仰角基本反射率、反射率最大回波出现的高度、组合反射率、垂直累积液态水含量和 3 h 累积降水量,所选取的数值是以双流机场为中心、半径 20 km 范围内的最大值。

1.2 研究方法

1.2.1 相关系数的计算 相关系数是最早由统计学家卡尔·皮尔逊设计的统计指标,是研究变量之间线性相关程度的量,一般用字母 r 表示。记某一天雷暴过程的发生与否为 Y ,发生为 $Y=1$,不发生为 $Y=0$;记某因子为 X , X 的样本序列为 $X_i(i=1,2,3,\dots)$ 。为判断 X 因子与雷暴发生与否 Y 的相关性,可运用点双序列公式^[26]来计算相关系数:

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

r 表示 X 与 Y 的相关系数值, r 越大,说明 X 因子与雷暴天气发生的关联性越好,即 X 因子对雷暴天气发生的指示性越好。其中 $\bar{X}$ 为 X_i 序列的平均

值, $\overline{X(1)}$ 为 $Y=1$ 时 X_i 序列的平均值, P 为 $Y=1$ 事件出现的频率, S_x 是 X_i 序列的标准差。

1.2.2 多元回归方程的建立 利用二级逻辑回归的思路建立多元回归方程组(第一级预报方程、第二级消空方程)^[27],该方法的基本思路是把一个预报事件与多个预报因子均看成随机事件,将随机事件 Y 的出现用“1”记录,未出现用“0”记录,将事件 Y 与 n 个预报因子之间的关系看成是 n 个因子已经出现的条件下事件 Y 出现与否的关系。

在逻辑回归中, X 和 Y 均为“0”“1”化后的矩阵,具体方法为: X 表示因子与阈值之间的关系,当因子的值大于其阈值,则记为 $X=1$,反之记为 $X=0$; Y 表示当日有无雷暴过程,若当日有雷暴过程发生则记为 $Y=1$,反之记为 $Y=0$ 。通过拟合计算,可建立如下形式的多元回归方程($b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$ 为回归参数):

$$Y = b_0 + b_1 \times X_1 + b_2 \times X_2 + b_3 \times X_3 \cdots + b_n \times X_n \tag{2}$$

1.2.3 预报因子的检验方法 在确定好预报因子和预报模型之后,将一份样本数据带入检验,以评估其预报效果,具体步骤为:

首先,将预报因子 $X_1, X_2, X_3 \cdots X_n$ 的指标(阈值)带入对应的第一级预报方程,用 k_1 代表计算出的 Y 值;再将样本数据带入同一方程,用 $Y_{(\text{预报})}$ 代表利用样本数据计算出的 Y 值。若有 $Y_{(\text{预报})} \geq k_1$,则预报为有雷暴过程,反之为无雷暴过程。

第二步,将预报因子 $X_{n+1}, X_{n+2}, X_{n+3} \cdots X_{2n}$ 的指标(阈值)带入对应的第二级消空方程,用 k_2 代表计算出的 Y 值,同样再将样本数据带入第二步的方

程得出 $Y_{(\text{消空})}$,预报有无雷暴的方法与第一步相同。

第三步,结合第一级预报方程、第二级消空方程的预报结论来综合判定:若某日 $Y_{(\text{预报})}$ 预报为“无”,则预报结论为“无”。若某日 $Y_{(\text{预报})}$ 预报为“有”,则进一步利用第二级消空方程进行判定——若 $Y_{(\text{消空})}$ 也预报为“有”,则结论为“有”;若 $Y_{(\text{消空})}$ 预报为“无”,则结论为“无”。

第四步,通过计算和统计,将预报结论带入王名才等^[28]公式来分析预报效果:

$$\text{命中率: } POD = \frac{n_1}{N} \tag{3}$$

$$\text{虚警率: } FAR = \frac{n'}{n} \tag{4}$$

$$\text{临界成功指数: } CSI = \frac{n_1}{N + n'} \tag{5}$$

其中, N 为实况发生雷暴的总次数, n 为预报有雷暴的总次数, n_1 为正确预报出雷暴的次数, n' 为预报有雷暴但实况无雷暴的次数。

2 双流机场雷暴变化特征

根据双流机场的逐小时天气现象资料,将每一次雷暴天气自开始时间至结束时间的整个过程记为1次(除1.2节外均按此标准统计)。通过统计(表1),2013—2018年双流机场共有221 d出现雷暴过程,累计发生283次。其中伴随降水过程的雷暴共发生了187 d,累计218次,占雷暴总次数的77.03%;其余为干雷暴过程,共发生了62 d,累计65次,占雷暴总次数的22.97%。下面对这6 a的雷暴天气进行月变化和日变化的特征讨论。

表1 双流机场2013—2018年雷暴发生天数和次数统计

Tab. 1 Statistics on the number of days and the number of thunderstorms at Shuangliu Airport from 2013 to 2018

年份	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	总计
雷暴发生总天数/d	39	30	33	37	33	49	221
雷暴发生总次数/次	51	33	40	46	42	71	283
伴随降水的雷暴发生总天数/d	32	28	28	35	27	37	187
伴随降水的雷暴发生总次数/次	38	31	29	39	34	41	218
干雷暴发生总天数/d	12	3	10	6	10	21	62
干雷暴发生总次数/次	13	2	11	7	8	24	65

2.1 月变化特征

2013—2018年的初雷在2月、3月各出现1次,4月出现4次;终雷在8月出现2次,9月出现3次,10月出现1次。图1为双流机场2013—2018年雷暴逐月发生次数统计图,由图可见雷暴的发生次数随月变化呈显著的单峰型:1—7月雷暴发生次数随

时间增加,7月雷暴发生的次数最多,8月雷暴发生的次数仅次于7月。经计算,每年7、8月雷暴发生的次数之和,均达到各年全年发生总次数的一半以上。从9月开始雷暴发生次数明显减少,11月—次年1月基本无雷暴发生。可见春季(3—5月)和夏季(6—8月)是雷暴的多发季,其中以夏季7、8月发

生次数最多。这是因为在春季和夏季,双流机场边界层附近的气流受日照加热抬升较强,并且机场东侧水域丰富,近地面潮湿,尤其在炎热的夏季,双流机场处太平洋副热带高压和青藏高压的过渡区中,常受西南暖湿气流和高原波动槽的影响,所以形成了高温高湿且不稳定的环境,有利于雷暴天气发生^[29]。而秋季和冬季四川盆地层结较稳定,水汽条件和抬升条件较弱,雷暴发生条件不足,故发生次数较少。

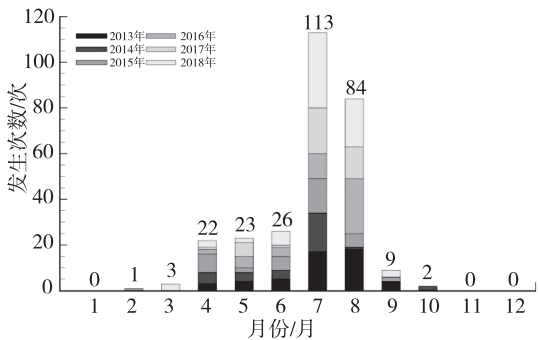


图 1 双流机场 2013—2018 年雷暴各年的逐月发生次数柱状图

Fig. 1 Histogram chart of the number of monthly thunderstorms occurrence in Shuangliu Airport from 2013 to 2018

2.2 日变化特征

将每小时作为一个时段,若某个时段有雷暴过程发生或有雷暴过程持续,则记该时段发生 1 次,统计结果如图 2 所示。由图可知,雷暴在上午发生的次数最少,6 a 里平均每小时仅发生十几次。午后雷暴发生次数逐渐增加,21 时—次日 06 时(北京时,下同)是高发时段,6 a 共计发生 521 次,占比总次数的 58.54%,这期间平均每小时发生雷暴超过 40 次。若以每 3 h 为 1 个时段,则雷暴发生次数最多的时间段是 21 时—00 时,共计发生 193 次;其次是 00—03 时 169 次,03—06 时 159 次,18—21 时 98 次。综合来看,雷暴在一天之内的时间分布呈明显的“夜雷多、日雷少”特征。

形成该特征的主要原因有:第一,双流机场所处地形较闭塞,近地面潮湿,云雾较多,夜间云层上部辐射冷却速度较快,云层下部由于云雾的保暖作用而冷却较慢,气层上冷下暖趋于不稳定,易形成雷暴天气^[30]。第二,夏季太平洋副热带高压伸入我国西南地区且活动频繁,太平洋副热带高压白天多西伸,使双流机场受西南暖湿气流影响,为雷暴的发生发展预备了良好条件;夜间多东退,高原西风

槽东移,多在后半夜移动到双流机场附近引起雷暴天气^[31]。此外,弱冷锋在经过四川盆地时,由于受到地形抬升和太阳辐射的共同作用,在白天常表现为锋消;而夜间随着地表辐射增强,又逐渐表现为锋生,易形成锋面雷暴^[32]。

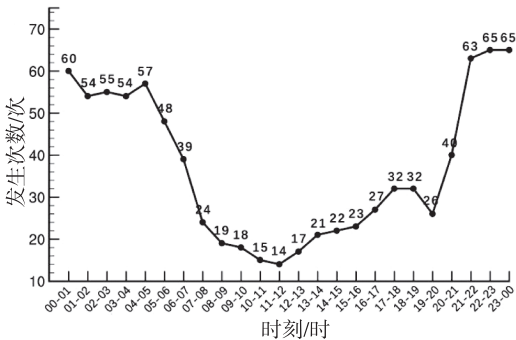


图 2 双流机场 2013—2018 年雷暴在一天各时段内发生次数折线图

Fig. 2 Line chart of the number of thunderstorms occurrence in Shuangliu Airport from 2013 to 2018 during various periods of the day

3 预报因子的筛选

3.1 物理量因子

基于雷暴形成的 3 个必要条件^[33],初步选取了 850 hPa 假相当位温、850 与 500 hPa 假相当位温差、相对湿度、比湿等物理量因子以及对流有效位能、K 指数、强天气威胁指数、热力总指数、抬升指数、风切变指数等对流参数(以下统称为物理量因子)。借助欧洲中心 ERA - interim 逐 6 h 再分析资料,针对双流机场 2013—2018 年的雷暴天气进行物理量因子的相关系数计算(公式(1))。计算样本为 2013—2018 年每年的 4—8 月(2014 年 8 月资料不全,故排除,下同),共计 887 d,其中有 208 d 发生雷暴天气。物理量因子 X_i 的取值为每日的算术平均值。

如表 2 所示,将通过 $\alpha = 0.05$ 显著性水平检验的因子按相关系数的绝对值从大到小排列,相关系数越大说明因子对雷暴的预报指示性越好。由表 2 可知,对流有效位能、K 指数、850 与 500 hPa 假相当位温差、850 hPa 比湿、850 hPa 假相当位温、强天气威胁指数对雷暴有较高的指示意义,相关系数绝对值均高于 0.4。除此之外,700 hPa 比湿、热力总指数、抬升指数与雷暴的相关性也较好,相关系数绝对值均高于 0.3。

表 2 物理量因子与雷暴发生情况的相关系数

Tab. 2 The correlation coefficient between the physical factors and thunderstorms

序号	物理量因子	点双序列相关系数
1	对流有效位能	0.4785
2	K 指数	0.4453
3	850 与 500 hPa 的假相当位温差	0.4320
4	850 hPa 比湿	0.4271
5	850 hPa 假相当位温	0.4178
6	强天气威胁指数	0.4056
7	700 hPa 比湿	0.3497
8	热力总指数	0.3477
9	抬升指数	-0.3442
10	850 hPa 散度	-0.3166
11	气温	0.2703
12	场面气压	-0.2692
13	700 hPa 垂直速度	0.2631
14	700 hPa 相对湿度	0.2553
15	850 hPa 相对湿度	0.2265
16	近地面相对湿度	0.1854
17	700 hPa 散度	0.1735
18	500 hPa 垂直速度	0.1701
19	850 与 500 hPa 的温差	-0.1697
20	700 hPa 相对湿度	0.1493

统计学中,箱线图(又称箱图)能以简单的组合图形直观地反映较大容量样本的值分布情况和数据批中隐含的结构信息,可通过分析数据批的分布形状、排除异常数据点,来进行数据批之间的比较^[34]。利用相关系数绝对值大于 0.3 的前 9 个物理量因子的日均值,绘制雷暴日、非雷暴日的箱线图(图 3)。由图可知,每组因子箱线图的箱体之间存在一定交集(值域交集),计算各因子箱体交叉部分占雷暴日箱体的比例,得出的结论按从小到达排列为:对流有效位能 0%;K 指数 0%;抬升指数 6.56%;850 与 500 hPa 的假相当位温差 10.49%;850 hPa 比湿 15.27%;850 hPa 假相当位温 16.18%;强天气威胁指数 20.21%;热力总指数 29.07%;700 hPa 比湿 40.94%。当某因子在雷暴日和非雷暴日的值域交集越少,说明该因子对雷暴的预报指示性越好,即对流有效位能、K 指数、850 与 500 hPa 的假相当位温差和抬升指数对雷暴的预报更有利。

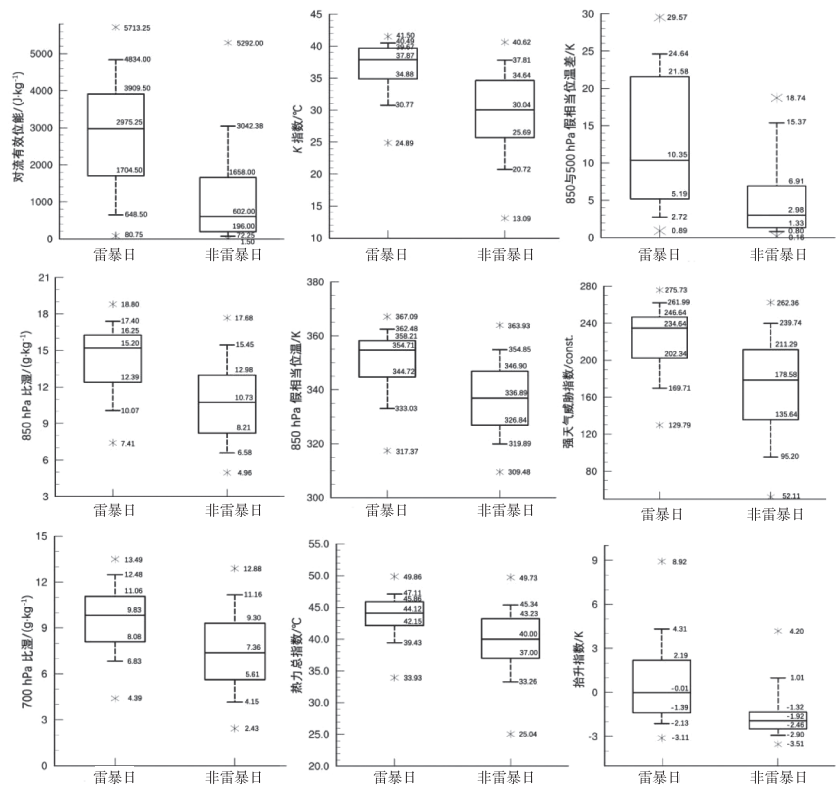


图 3 2013—2018 年 887 个样本有无雷暴情况下各物理量因子箱线图(上下 * 号:第 99 百分位数和第 1 百分位数;上下短实线:第 90 百分位数和第 10 百分位数;矩形内实线:中位数;矩形上下边线:第 75 百分位数和第 25 百分位数)

Fig. 3 Box plot of each physical factors in 887 samples with or without thunderstorms from 2013 to 2018 (Upper and lower *: the 99th percentile and the 1st percentile; upper and lower short solid lines: the 90th percentile and the 10th percentile; solid line within the rectangle: median; upper and lower edges of the rectangle: 75th percentile and 25th percentile)

在样本容量固定的情况下,因子过多不仅对拟合方程起的贡献不大,因子本身存在的随机因素还容易对方程的稳定性产生影响^[19]。基于雷暴发生的 3 个基本条件以及相关系数和箱线图所显示结果综合考虑,最后确定出如下 4 个物理量预报因子:对流有效位能、K 指数、850 hPa 比湿、850 与 500 hPa 的假相当位温差。

3.2 雷达因子

多普勒天气雷达是监测实况天气的重要手段,广泛运用于强对流天气的监测和预警。许多雷达产品都可用于反映强对流天气的发展状态,比如回波顶高、垂直累积液态水含量常被用来评估风暴强度^[35],雷达回波强度、回波顶高等常用来反映闪电和雷暴云发展的高度^[36-37]等等。

结合实际业务经验^[37-42],初步选取了与强对流天气联系较紧密的 7 个雷达因子进行相关系数的计算(表 3)。计算样本为 2013—2018 年每年 4—8 月的雷暴日,共计 208 d,雷达因子值取逐小时整点时刻的值,共计 4 992 h,其中发生雷暴的时间有 873 h。表 3 中雷达因子已按相关系数的绝对值从大到小排列,且均通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性水平检验。

表 3 多普勒天气雷达因子与雷暴发生情况的相关系数
Tab.3 The correlation coefficient between the doppler weather radar factors and thunderstorms

雷达因子	点双序列相关系数
1.5°仰角基本反射率	0.4513
垂直累积液态水含量	0.4083
回波顶高	0.3854
3.4°仰角基本反射率	0.3507
组合反射率	0.3039
反射率最大回波出现的高度	0.2712
3 h 累积降水量	0.2210

以相同方法绘制箱线图(图 4),并计算各雷达因子箱体交叉部分(值域交集)占雷暴日箱体的比例,结论如下:1.5°仰角基本反射率 0%;垂直累积液态水含量 0%;3 h 累积降水量 13.52%;3.4°仰角基本反射率 15.79%;回波顶高 20.00%;组合反射率 52.17%;反射率最大回波出现的高度 46.03%。综合相关系数和箱线图两方面考虑,最终确定的 4 个雷达预报因子为:回波顶高、1.5°仰角基本反射率、3.4°仰角基本反射率、垂直累积液态水含量。

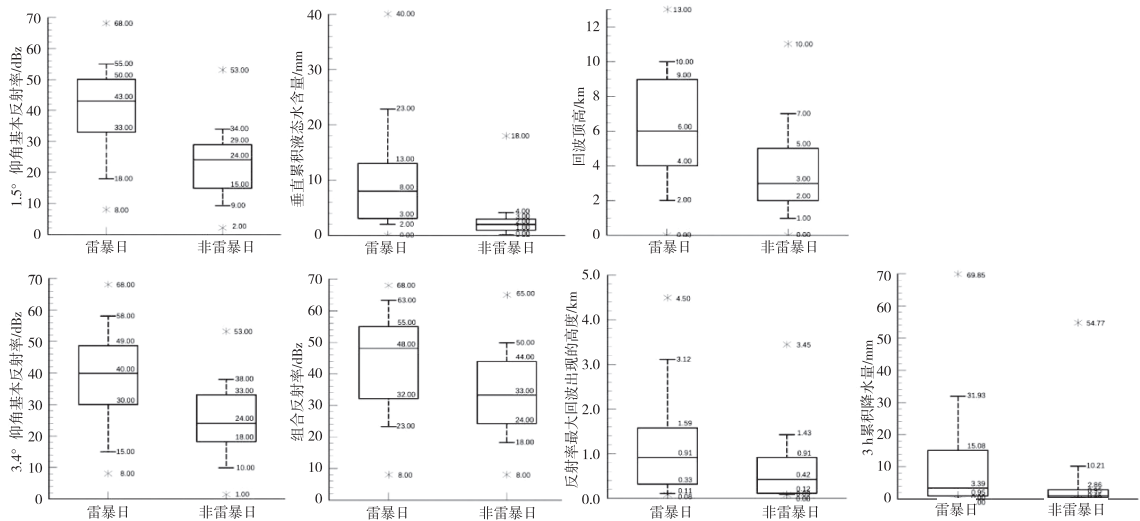


图 4 2013—2018 年 4992 个样本有无雷暴过程的情况下各雷达因子箱线图(上下 * 号:第 99 百分位数和第 1 百分位数;上下短实线:第 90 百分位数和第 10 百分位数;矩形内实线:中位数;矩形上下边线:第 75 百分位数和第 25 百分位数)
Fig.4 Box plot of each radar factors in 887 samples with or without thunderstorms from 2013 to 2018(Upper and lower * : the 99th percentile and the 1st percentile; upper and lower short solid lines: the 90th percentile and the 10th percentile; solid line within the rectangle: median; upper and lower edges of the rectangle: 75th percentile and 25th percentile)

4 潜势预报模型的建立

4.1 预报因子阈值的计算

利用雷暴日物理量预报因子月平均值以及雷

暴发生的整点时刻的雷达预报因子月平均值,绘制如图 5 所示折线图。图 5a 显示,物理量预报因子的月平均值随时间变化的趋势基本一致:最小值出现在 4、5 月,最大值出现在 7、8 月,具有明显的月变化

特征或季节变化特征,说明物理量预报因子阈值的计算需要分春季、夏季考虑。而图 5b 显示,雷达预报因子的月平均值无明显的时间特征,说明满足雷暴发生条件的雷达预报因子受季节影响较小,故阈值的计算无需分季节考虑。

将物理量预报因子按季节分为春夏两组(4、5 月为春季,6—8 月为夏季),雷达预报因子不分组;再将每组每个因子的值按从大到小排列,选取每个因子的第一、四分位值作为该因子的预报阈值^[17],即双流机场雷暴天气的预报指标,计算结果如表 4 所示。

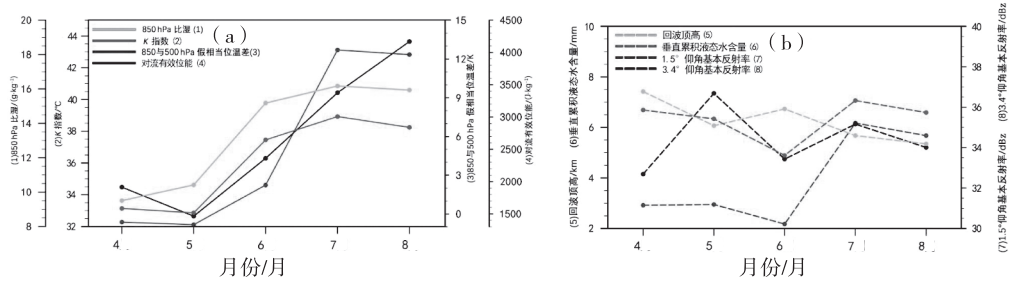


图 5 2013—2018 年双流机场雷暴日物理量预报因子(a)、雷达预报因子(b)的月平均值
Fig. 5 The monthly average of thunderstorm daily physical predictors (a) and radar predictors (b) of Shuangliu Airport from 2013 to 2018

表 4 双流机场雷暴天气的预报因子阈值

Tab. 4 Thresholds of predictors for thunderstorms in Shuangliu Airport

预报因子	阈值		雷达预报因子(不分组)	
	春季	夏季		
850 hPa 比湿/(g·kg ⁻¹)	9.40	14.57	回波顶高/km	4
K 指数/℃	29.25	37.30	1.5°仰角基本反射率/dBz	33
850 与 500 hPa 假相当位温差/℃	3.35	7.68	3.4°仰角基本反射率/dBz	30
对流有效位能/(J·kg ⁻¹)	396.7	2341.75	垂直累积液态水含量/mm	3

4.2 潜势预报方程的建立

参照 1.2.2 节,用 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 分别表示 850 hPa 比湿、K 指数、850 与 500 hPa 的假相当位温差、对流有效位能,利用这些物理量预报因子建立如公式(2)所示的春季 Y_1 、夏季 Y_2 多元回归预报方程,作为第一级预报方程:

$$Y_1 = 0.012 + 0.100 \times X_1 + 0.081 \times X_2 + 0.180 \times X_3 + 0.038 \times X_4 \tag{6}$$

$$Y_2 = 0.052 + 0.142 \times X_1 + 0.243 \times X_2 + 0.200 \times X_3 + 0.031 \times X_4 \tag{7}$$

若仅使用 Y_1 、 Y_2 方程进行预报,容易造成命中率较高、虚警率也较高的情况(已验证,结果略),故进一步利用雷达预报因子建立 Y_3 方程作为第二级消空方程:

$$Y_3 = 0.050 + 0.064 \times X_5 + 0.163 \times X_6 + 0.063 \times X_7 + 0.093 \times X_8 \tag{8}$$

其中, X_5 、 X_6 、 X_7 、 X_8 分别表示回波顶高、1.5°仰角基本反射率、3.4°仰角基本反射率、垂直累积液态水含量。最后再对求得的上述回归方程 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 进行 F 检验^[43],结果表明这 3 个方程是显著的。

4.3 预报效果的检验

用于检验的样本为 2018 年 4—8 月的相关数据,利用 1.2.3 节的检验方法:首先,将表 3 中所示的物理量预报因子的阈值按季节带入对应的第一级预报方程(公式(6)或公式(7)),再将雷达预报因子的阈值带入第二级消空方程(公式(8)),用 k_1 、 k_2 、 k_3 分别代表计算出的 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 的值,即各方程的阈值: $k_1 = Y_1 = 19.00$ 、 $k_2 = Y_2 = 85.32$ 、 $k_3 = Y_3 = 7.85$ 。再将 2018 年 4—8 月每日的物理量预报因子日均值依季节带入对应的第一级预报方程 Y_1 、 Y_2 ,在春季,当 $Y_{1(预报)} \geq k_1$ 时,预报为有雷暴过程,反之无雷暴过程;同理,在夏季,当 $Y_{2(预报)} \geq k_2$ 时,预报为有雷暴过程,反之无雷暴过程。第三步,运用第二级消空方程,将样本中每日逐小时的雷达预报因子值带入 Y_3 ,当 $Y_{3(消空)} \geq k_3$ 时,预报为有雷暴过程,反之无雷暴过程。第四步,结合两级方程的结论来综合判定:若 Y_1 (或 Y_2)、 Y_3 均预报为“有”,则最终结论为“有”,其他情况下最终结论均为“无”。最后,将最终预报结果带入公式(3)、公式(4)和公式(5)进行计算,结论如表 5 所示。

表 5 利用 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 方程预报 2018 年 4—8 月雷暴天气

Tab. 5 The conclusion of using Y_1 , Y_2 , Y_3 equations to forecast thunderstorm from April to August 2018

季节	雷暴发生 总天数(N)	预报的雷 暴总数(n)	正确预报雷 暴天数(n_1)	空报数 (n')	漏报数 ($N - n_1$)	命中率 (POD)	虚警率 (FAR)	临界成功 指数(CSI)
春季(4—5 月)	4	8	4	4	0	100.00%	50.00%	50.00%
夏季(6—8 月)	41	36	33	3	8	80.49%	8.33%	75.00%

由表 5 可知,预报指标在春季的命中率、虚警率、临界成功指数分别为 100%、50.00%、50.00%,命中率虽然很高,但由于空报数较多,使得虚警率较高、临界成功指数较低。指标在夏季的命中率、虚警率、临界成功指数分别为 80.49%、8.33%、75.00%,命中率虽不如春季,但因为空报数较少,所以虚警率较低、临界成功指数较高。因此可以认为这套指标以及建立的两级预报方程,对双流机场雷暴天气的预报具有一定指示意义,且综合来看在夏季的预报效果更好。在实际运用中,可将第一级预报方程用作 24 h 潜势预报,若预报结论显示第 2 d 有雷暴天气,则加强天气监测,再配合第二级消空方程,以更准确地判断临近时间的天气情况。

5 结论与展望

5.1 结论

本文利用双流国际机场 2013—2018 年的逐小时气象观测资料、欧洲中心 ERA - interim 逐 6 h 再分析资料、多普勒天气雷达产品资料,对双流机场的雷暴天气进行了时间特征分析,并选取预报因子建立潜势预报模型,结果表明:

①双流机场 2013—2018 年共有 221 d 发生雷暴天气,累积发生 283 次,77.03% 的雷暴过程伴随降水。雷暴发生次数随时间呈单峰型,春夏为多发季,其中以夏季 7、8 月发生的次数最多。雷暴多于午后发生,21 时—次日 06 时是高发时段,呈现明显的“夜雷多、日雷少”特征。

②依据雷暴发生的基本条件和实际业务经验选取物理量和雷达参数,通过相关分析,筛选出预报因子:对流有效位能、K 指数、850 hPa 比湿、850 与 500 hPa 假相当位温差、回波顶高、1.5°仰角基本反射率、3.4°仰角基本反射率、垂直累积液态水含量。再基于二级逻辑回归的思路建立预报方程和消空方程:利用物理量预报因子分春、夏两季建立两个第一级预报方程;利用雷达预报因子建立一个第二级消空方程。通过回代检验,结果表明,夏季的命中率低于春季,但因为夏季预报的空报数较少,所以虚警率和临界成功指数相对于春季都表现较好。由此可认为所建立的潜势预报模型对双流

机场雷暴天气的预报具有一定指示性,且综合来看在夏季的预报效果更好。

5.2 反思与展望

论文中仍有许多的内容需要完善和探讨,首先是建立预报方程方面,使用的仅仅是二级逻辑回归法,若选择多种方法(比如神经元方法、SVM 方法等),就可通过对比检验得出最优方案,或形成集成预报。其次是方程的检验方面,使用的是 2018 年的数据进行回代,若资料充足,选取 2019 年或之后的资料进行检验,会更具有说服力。最后,在雷达资料选取上,由于双流机场的雷达资料缺失较多,故本文使用的雷达资料是成都市气象局的多普勒天气雷达产品资料,但若采用双流机场的雷达资料进行分析,得出的结论会更加有说服力。

参考文献

[1] Charles A, Doswell III. Severe Convective Storms ——An Overview [J]. American Meteorological Society, 2001, 28(50): 257 - 308.

[2] 王海东, 万寒, 吴正可. 温州地区雷暴日数时空变化研究[J]. 贵州气象, 2014, 38(1): 31 - 33.

[3] 李春生. 雷暴—航空飞行的天敌[J]. 空中交通管理, 2006, 12(1): 38 - 39.

[4] 李娟, 王建新, 邹德龙. 南宁吴圩国际机场近 30 年雷暴气候特征分析及天气形势概况[J]. 气象研究与应用, 2017, 38(3): 64 - 67.

[5] 胡家美, 李萍. 国际航空气象预报的发展趋势[J]. 广东气象, 2009, 31(4): 11 - 13, 19.

[6] 周线娅. 西安咸阳机场强对流天气气象保障案例分析[J]. 空中交通, 2015(5): 40 - 43.

[7] 王永刚, 张朋鹏. 基于组织因素的航空事故致因因素评价[J]. 中国民航飞行学院学报, 2007, 18(4): 9 - 12.

[8] Fultz A J, Ashley W S. Fatal weather - related general aviation accidents in the United States [J]. Physical Geography, 2016, 37(5): 291 - 312.

[9] 陈会芝. 危险天气条件下的航空飞行与安全 [D]. 西南交通大学, 2003.

[10] 官晓军. 对流参数概率预报在强对流天气预报中的应用 [C]// 中国气象学会. 第 33 届中国气象学会年会论文集, 2016: 149 - 154.

[11] 李力, 万雪丽, 齐大鹏, 等. 贵州省雷暴大风时空分布及对流参数特征分析[J]. 中低纬山地气象, 2020, 44(2): 1 - 8.

[12] 严仕尧, 李昀英, 齐琳琳, 等. 垂直能量螺旋度指数及其在槽前型雷暴大风预报中的应用[J]. 暴雨灾害, 2012, 31(1): 23 - 28.

[13] Lapenta K D. Preliminary guidelines for using helicity, buoyancy

- and the energy – helicity index from the SHARP workstation[J]. Weather Forecast,1991,6:160 – 165.
- [14] 杨晶铁,何勇,李跃春. 垂直能量螺旋度在双流机场雷暴预报中的应用[J]. 内蒙古气象,2014,38(4):7 – 11.
- [15] 李博渊,赵江伟,庄晓翠. ECMWF 细网格模式探空在阿勒泰地区短时强降水预报中的统计检验[J]. 沙漠与绿洲气象,2020,14(3):61 – 67.
- [16] 余蓉,杜牧云,杜九三,等. 基于多对流参数的武汉地区雷电动预报方法研究[J]. 气象科技,2016,44(2):269 – 274.
- [17] 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.
- [18] 柳志慧,王式功,尚可政,等. 天山南麓雷暴日短期预报研究[J]. 沙漠与绿洲气象,2016,10(2):43 – 49.
- [19] 刘宸钊,卓伟,裴军林. 基于对流参数的雷暴预报方法研究[J]. 高原山地气象研究,2010,30(2):22 – 25.
- [20] 梁维亮,屈梅芳,翟丽萍. 基于对流参数南宁地区雷暴天气潜势预报方法研究[J]. 气象与环境学报,2015,31(4):107 – 112.
- [21] 竺维,刘晓达. 双流机场 2015 年气象预报服务质量分析及探讨[J]. 民航管理,2016,31(5):60 – 62.
- [22] 孙继松,戴建华,何立富,等. 强对流天气预报的基本原理与技术方法——中国强对流天气预报手册[M]. 北京:气象出版社,2014:122.
- [23] 何明霞,崔永,袁振. 双流机场一次长时间雷暴天气的过程分析[J]. 民航科技,2008,(4):109 – 111.
- [24] 韦道明,李崇银,谭言科. 夏季西太平洋副热带高压南北位置变动特征及其影响[J]. 气候与环境研究,2011,16(3):255 – 272.
- [25] 李毅,周继业. 双流机场 2006 年夏季雷暴的多普勒雷达回波特征分析[J]. 四川气象,2007,27(S1):15 – 18.
- [26] 柳金浦,王义东. 概率论与数理统计[M]. 武汉:武汉大学出版社,2006:240.
- [27] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法[M]. 北京:气象出版社,2004:46 – 47,296.
- [28] 王名才. 大气科学常用公式[M]. 北京:气象出版社. 1994:275.
- [29] 沈宏彬,陶祖钰,张义. 成都双流机场一次多雷暴天气的雷达回波分析[J]. 北京大学学报(自然科学版),2003,39(1):58 – 67.
- [30] 任景轩,徐志升,陈琦. 近 54 年四川雷暴气候特征分析[J]. 高原山地气象研究,2015,35(3):62 – 67.
- [31] 钱坤. 双流机场雷暴特点及雷雨天气下航空管制探讨[J]. 科技风,2014(16):235.
- [32] 冉心. 双流机场雷暴的气候特征分析及预报初探[J]. 四川气象,2001,21(4):27 – 30,42.
- [33] 章国材. 强对流天气分析与预报[M]. 北京:气象出版社,2011:11 – 15.
- [34] 庄作钦. BOX PLOT——描述统计的一个简便工具[J]. 统计与预测,2003,22(2):56 – 57.
- [35] 肖艳姣,马中元,李中华. 改进的雷达回波顶高、垂直积分液态水含量及其密度算法[J]. 暴雨灾害,2009,28(3):210 – 214.
- [36] 黄金全,李丽丽,文继芬,等. 风廓线雷达和多普勒天气雷达在一次强对流天气过程中的分析应用[J]. 中低纬山地气象,2019,43(3):34 – 40.
- [37] 肖红茹,顾清源. 新一代天气雷达产品在四川冰雹天气监测与预警中的应用[J]. 四川气象,2007,27(3):23 – 24.
- [38] 曹水,邹书平,曾勇,等. 一次冰雹云天气过程不同波段雷达回波对比分析[J]. 中低纬山地气象,2020,44(2):66 – 70.
- [39] 邹书平,李波,杨哲,等. 强对流天气雷达回波强度相关性对比分析[J]. 中低纬山地气象,2018,42(6):1 – 7.
- [40] 俞小鼎. 短时强降水临近预报的思路与方法[J]. 暴雨灾害,2013,32(3):202 – 209.
- [41] 俞小鼎,周小刚,王秀明. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J]. 气象学报,2012,70(3):311 – 337.
- [42] 张腾飞,段旭,鲁亚斌,等. 云南一次强对流冰雹过程的环流及雷达回波特征分析[J]. 高原气象,2006,25(3):531 – 538.
- [43] 胡良平. SAS 统计分析教程[M]. 北京:电子工业出版社,2010:365 – 399.