

# 广州白云国际机场近46年来雷暴气候的统计特征\*

张美平 敖淑珍 刘翔 李念英

(民航中南空管局气象中心,广州 510405)

## 摘要

利用广州白云机场1956~2001年46年的逐时观测资料,通过数理统计和小波分析,揭示出白云机场雷暴气候的演变特征。结果表明:白云机场年平均出现雷暴日数为75.4天,初雷一般在3月1日,终雷一般在10月14日,一年12个月都有可能出现雷暴,其中雷暴多集中出现在4~9月份,以8月份出现最多,12月份出现最少;雷暴的历史演变有着较好的9~12年振荡周期,而且近46年来雷暴的发生有逐渐减小的趋势变化,另外雷暴有明显的季节和日变化特征。

关键词:雷暴 统计 小波分析

## 引言

雷暴是目前公认的严重威胁飞行安全的天气现象。雷暴云能产生各种各样的危及飞行安全的天气现象——强烈的湍流、积冰、闪电(雷击)、雷雨、大风、下击暴流、低空风切变,有时甚至还伴有冰雹和龙卷风。若飞机误入雷暴活动区内其后果将不堪设想。据估计<sup>[1]</sup>,全球每年发生雷暴约1600万次,平均每天约发生4.4万次,每小时约发生1820次。所以,每一个飞行员都有可能遇到雷暴,特别是民航运输机夏季飞行差不多经常会遇到雷暴。目前,白云机场日平均起降架次在800架左右,在繁忙时段每隔一分钟有一架次飞机起降。而每延误、返航一架次航班损失约在2000~50000元之间。因此,了解白云机场雷暴的气候概况不仅能保障飞行安全而且对提高航空公司的经济效益都具有重要意义。

## 1 资料及统计说明

本文利用广州白云机场1956~2001年(缺1976年7月份资料)46年的逐日每小时、半小时定时观测和特殊天气纪要栏记录的雷暴资料进行统计分析。

根据华南地区的气候特点,本文分别用3~5月、6~8月、9~11月、12月~次年2月分别代表春、夏、秋、冬四季。

## 2 雷暴近46年的气候统计特征

### 2.1 雷暴的年变化特征

图1给出了雷暴的年际变化情况,从图中可以看出以下特征:20世纪60、70年代基

\* 2002-12-12收到,2003-05-14收到再改稿。

本在年平均线以上运行,并在 50 年代末(1959 年)和 70 年代中(1975 年)达到最高峰后,在 80 年代初再到达另一高峰,然后逐年下降,到 90 年代初达到最低值,然后稍有回升但基本在年平均值 75.4 天以下波动。46 年来共出现 3469 个雷暴日,年平均雷暴日数为 75.4 天。雷暴出现最多的年份是 1959、1975 年,有 109 个雷暴日;出现最少的年份是 1991 年,只有 49 个雷暴日。

另外,为清楚地了解该雷暴日数时间序列特征,一是对该序列做标准化处理,  $X_z = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma}$ ,其中  $\sigma$  是标准差,  $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$ ;

二是做五年滑动平均,  $\bar{X}_5 = (X_{i-2} + X_{i-1} + X_i + X_{i+1} + X_{i+2})/5$ ;

三是计算可以定量了解要素在长期气候变化中升降程度的气候趋势系数  $r_{xt}^{[2]}$ :

$$r_{xt} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(i - \bar{T})}{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \times \sum_{i=1}^n (i - \bar{T})^2]^{1/2}}$$

其中,  $n$  为年数,  $x_i$  是第  $i$  年的值,  $\bar{x}$  为样本平均值,  $\bar{T} = (n + 1)/2$ ,  $r_{xt}$  的正(负)值表示该要素在计算的年内有增(降)的趋势(用直线反映)。

结果表明:由图 2 可以看到它的标准化值(直方线),5 年滑动平均值(曲线)有 10 年左右的年际变化特征,同时可以看出这个雷暴序列的气候变化(直线)有减小的趋势,即近 46 年来白云机场雷暴的发生有减小的趋势变化。

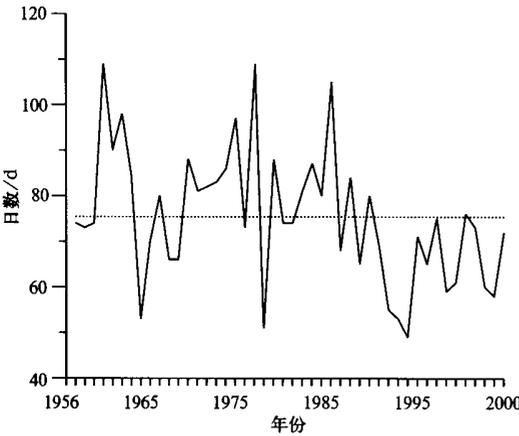


图 1 白云机场雷暴的年际变化图

(虚点线为年平均线,资料年限:1956~2001 年共 46 年)

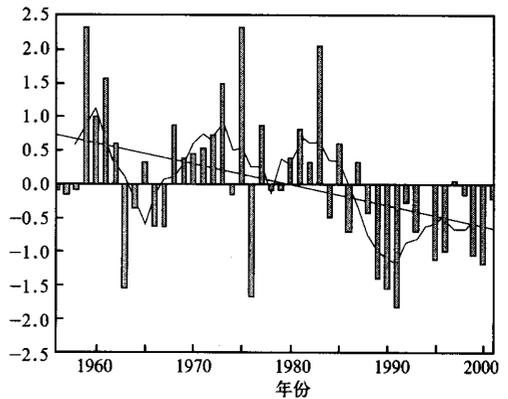


图 2 白云机场 1956~2001 年雷暴序列的标准化值(直方线),5 年滑动平均值(曲线)和气候趋势(直线)

### 2.2 雷暴的季节变化特征

由表 1 可见,一年四季中,雷暴以夏季出现最多,累年平均出现 42.1 个雷暴日,是各季累计平均出现日数(18.9 天)的两倍多,约占全年雷暴出现日数的 55.4%;春季次之,累年平均出现 21.7 个雷暴日;冬季出现最少,累年平均出现 1.57 个雷暴日,约是各季累计平均出现日数(18.9 天)的十二分之一,约占全年雷暴出现日数的 2%,普查 46 年的资料

发现其中有 22 年在冬季没有出现雷暴,可见在冬季白云机场出现雷暴的概率非常小。

表 1 累年各季雷暴出现日数分布

	春	夏	秋	冬	平均
累计平均	21.7	42.1	10.4	1.57	18.9

### 2.3 雷暴的月变化特征

由表 2 可见,一年 12 个月都有可能出现雷暴,其中雷暴多集中出现在 4~9 月份,4~9 月份累计平均出现 68.7 天,约占全年雷暴出现日数的 90.7%;以 8 月份出现最多,累年平均有 14.5 个雷暴日,约占全年雷暴出现日数的 19.2%;其次为 6、7 月份,累年平均分别为 13.9、13.7 个雷暴日;12 月份出现最少,累年平均有 0.04 个雷暴日,其次为 1、11 月份,累年平均出现分别为 0.13、0.17 个雷暴日,这 3 个月累计约占全年雷暴出现日数的 0.5%,普查 46 年的资料发现其中仅有 11 个月曾出现雷暴,即每年的 11、12、1 月份出现雷暴的概率约为 8%,可见在该时期白云机场出现雷暴的概率非常小。

表 2 累年各月雷暴出现日数分布

	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	平均
累计平均	3.5	6.7	11.5	13.9	13.7	14.5	8.4	1.8	0.17	0.04	0.13	1.4	6.31

### 2.4 雷暴的日变化特征

由图 3、4 可见,就全年平均情况来看,雷暴每天较集中出现的时间为 05:00~14:00(UTC,下同),其中又以 08:00~10:00 出现最多,早上至上午(23:00~02:00)出现最少,这一特征在夏季(6~8 月)表现得最为明显。春季雷暴较集中出现的时间为 08:00~13:00,其中峰值出现在 09:00~11:00,比夏季推后 1 h,下半夜(17:00~18:00)出现最少。秋、冬季出现的雷暴概率相对较少故不作分析。

白云机场平均气温最高值多出现于 06:00~08:00,比雷暴出现最多的时段早了 2 h,平均气温最低值则多出现于 21:00~23:00,比雷暴出现最少的时段早了 1~2 h,这一特征在夏季(6~8 月)表现得最为明显。而平均相对湿度则刚好相反,最小值出现于 06:00~

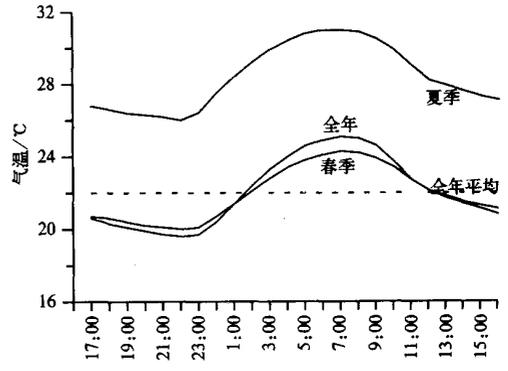
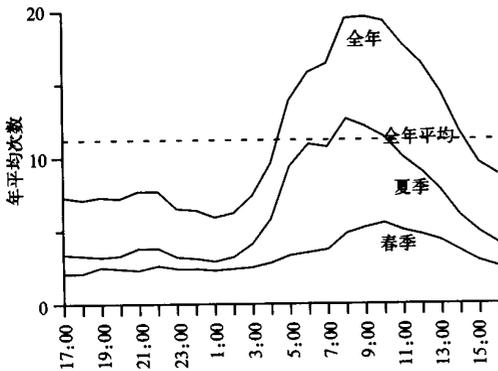


图 3 全年、春、夏季逐时出现雷暴的年平均次数变化图

(资料年限:1956~2001 年共 46 年)

图 4 全年、春、夏季逐时累年平均气温变化图

(资料年限:1956~2001 年共 46 年)

08:00, 最大值出现于 20:00 ~ 23:00。这主要是由于白云机场雷暴天气集中出现于 4 ~ 9 月份, 该期间本场主要受副热带高压系统的影响, 造成该期间的平均气温偏高, 可见白云机场的雷暴天气主要与高温天气有关, 雷暴出现多少与气温高低关系密切。

### 2.5 雷暴的初 终期及持续时间

白云机场雷暴初期平均是 3 月 1 日, 最早是 1 月 4 日(1983 年), 最晚是 4 月 1 日(1974 和 2000 年); 雷暴终期平均是 10 月 14 日, 最早是 9 月 5 日(1991 年), 最晚是 12 月 22 日(1989 年)。

由图 6 可见, 近 46 年来白云机场每年初雷的发生, 其时间有越来越早的趋势变化。而每年终雷的结束时间却有越来越晚的趋势变化, 这与白云机场近年来气温有日益升高的趋势变化是一致的(详见图 7)。

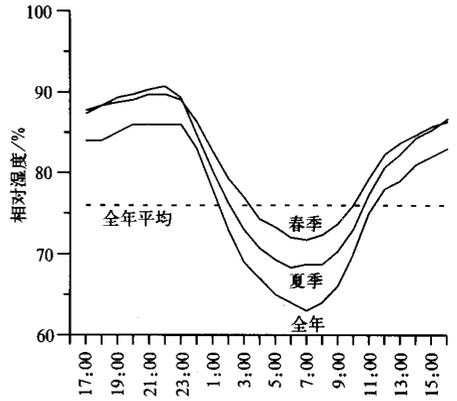


图 5 全年、春、夏季逐时累年平均相对湿度变化图  
(资料年限: 1956 ~ 2001 年共 46 年)

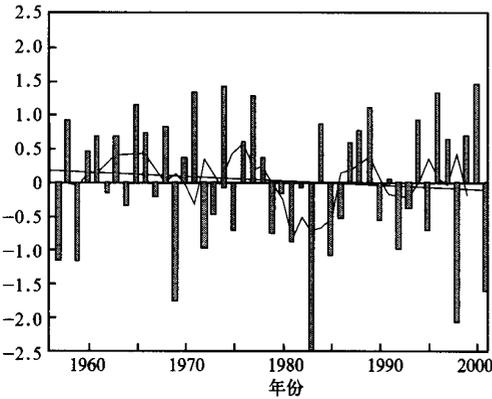


图 6 白云机场 1956 ~ 2001 年初雷序列的标准值(直方线), 5 年滑动平均值(曲线)和初雷序列气候趋势(直线)

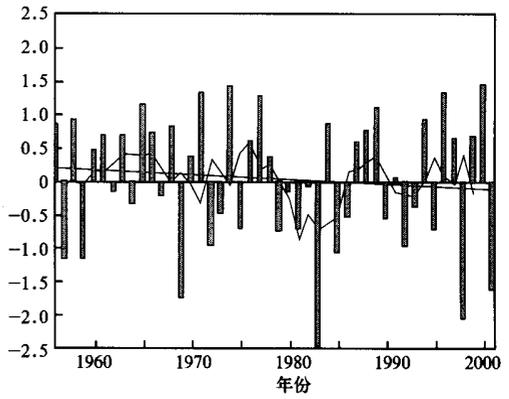


图 7 白云机场 1956 ~ 2001 年终雷序列的标准值(直方线), 5 年滑动平均值(曲线)和终雷序列气候趋势(直线)

一年中, 持续时间在 1 ~ 2 h 的雷暴出现最多, 其次是持续时间在 0 ~ 1(含) h 的雷暴, 2 ~ 4 h 的雷暴排第三。由表 3 可见, 持续时间在 0 ~ 2 h 的雷暴, 即持续时间较短的雷暴主要出现在夏季, 其中持续时间在 0 ~ 1(含) h 的雷暴出现最多是在 7 月份, 平均为 8 次, 其次是 8 月份(平均为 7.9 次)和 6 月份(平均为 7.0 次); 而持续时间在 1 ~ 2 h 的雷暴出现最多在 8 月份, 平均为 8.3 次, 其次是 7 月份(平均为 8.1 次); 可见, 白云机场夏季多以持续时间为 2 h 以内的短时性雷暴为主, 而持续时间在 4 h 以上的雷暴就较少出现, 持续时间在 12 h 以上的雷暴出现得就更少, 其中在 1982 年 7 月 22 日曾出现持续时间为 23.5 h 的雷暴天气, 是 46 年来出现雷暴时间最长的一次, 详见表 3。

表 3 累年各月雷暴持续时间的平均次数(资料年限:1956~2001年共46年)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	全年	
持续时间(h)	0~1(含)	0.3	0.8	2.2	2.8	5.2	7.0	8.0	7.9	4.0	1.4	0.1	0.1	39.8
	1~2	0.1	1.0	1.5	3.2	5.8	7.3	8.1	8.3	4.8	0.5	-	-	40.6
	2~4	0.1	0.3	1.1	2.4	4.4	4.1	3.8	3.8	2.5	0.7	-	-	23.2
	4~6	-	0.1	0.3	0.6	1.0	0.8	0.6	0.6	0.3	0.1	-	-	4.4
	6~12	-	0.1	0.1	0.4	0.5	0.3	0.3	0.4	0.1	0.1	-	-	2.3
	12~24	-	-	0.1	-	0.1	0.1	0.3	0.2	0.1	-	-	-	0.9
	>24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
最长持续时间(h)	2.45	9.49	21.0	10.32	11.4	21.39	23.3	22.36	19.16	6.16	0.55	0.35	23.3	
出现日期	2001-01-25	1985-02-08	1982-03-13	1979-04-03	1989-05-17	1983-06-27	1982-07-22	1996-08-14	1996-09-16	2000-10-05	1978-11-10	1997-12-21	1982-07-22	

## 2.6 雷暴的影响系统

上述分析已经发现,白云机场以夏季和持续时间在 0~2 h 的雷暴出现最多。为进一步了解造成雷暴的天气系统,对其进行了普查(详见表 4),发现副热带高压是造成雷暴的主要天气系统,约占总出现日数的一半,其次是高空槽、低压槽,而锋后极少出现雷暴天气。

不过,在中高纬度地区,锋面雷暴出现的次数最多,锋面是造成雷暴的主要天气系统<sup>[1]</sup>,可见表 4 的统计事实,具有地方性特点。应该指出,鉴于资料的限制和处理难度,表 4 仅用 22 年资料进行统计,如增加资料样本长度,会使分析结果更具代表性。

表 4 累年各月雷暴出现日数和影响系统及其出现次数(资料年限:1980~2001年)

出现日数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	合计
		5	45	86	154	205	265	296	285	160	39	4	2
静止锋	-	3	23	27	9	-	-	-	-	-	-	-	62
冷锋	3	21	9	5	2	-	-	-	-	-	-	-	40
锋前	2	7	13	10	3	-	-	-	5	2	2	1	45
锋后	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	2
副高	-	-	-	12	102	168	193	188	70	9	-	-	742
切变线	-	3	11	25	15	9	-	-	19	8	-	-	90
高空槽	-	11	20	39	40	13	10	2	23	10	2	1	171
低压槽	-	-	9	35	29	20	18	13	7	5	-	-	136
热带辐合线	-	-	-	-	2	23	36	33	13	2	-	-	109
台风	-	-	-	-	3	23	28	36	19	3	-	-	112
东风波	-	-	-	-	-	9	11	13	4	-	-	-	37

## 3 白云机场近 46 年雷暴时间序列演变规律的小波分析

### 3.1 小波分析方法简介

小波分析又称子波分析(Wavelet Transforms,简称 WT),是由法国 Elf Aquitaine 公司的石油工程师 Morlet 于 1980 年在进行地震数据分析工作时首创的<sup>[3]</sup>。近年来,子波分析的数学理论和方法正成为极为活跃的科学领域。子波分析被誉为数学显微镜,它可将气象时间序列曲线分解成交织在一起的多尺度成分,并对不同尺度成分采用相应粗细的时域的取样步长,从而能不断聚焦到曲线的任意细节。这是子波分析优于窗口富氏分析之处。

对于一个离散的时间序列  $f(t), (t=1, 2, \dots, N)$ , 小波变换的形式可写为:

$$F_W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{C_k}} \times \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_{i=1}^N f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

式中  $C_k$  为小波变换系数:

$$C_k = 2\pi \sum_{i=1}^N \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|}$$

$a=2^j (j=1, 2, \dots)$  为放大因子, 其倒数相当于频率, 当  $a$  较小时, 频域分辨率较差, 而时域分辨率较好。当频域分辨率增加时, 时域分辨率则减小。一般取  $1 \leq a \leq N/4$  较宜,  $N$  为样本数,  $b$  为平移因子;  $\hat{\psi}(\omega)$  是子波  $\psi(\omega)$  经富氏变换得到的谱。这里  $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$  为基本小波, 它具有波动性和衰减性。基本小波有很多种形式, 本文采用 Morlet 子波对序列进行变换。

Morlet 子波:

$$\psi = e^{ict} e^{-\frac{t^2}{2}} \quad c \text{ 是常数, 这里取 } c = 6.0。$$

### 3.2 结果分析

图 8 是子波变换系数的实部, 具有以下特征: 这个雷暴序列在 9~12 年的时间尺度上正负闭合中心最明显, 表明雷暴日数序列在 9~12 年时间尺度下交替振荡最为显著, 即白云机场雷暴日数的年际变化存在以 9~12 年作周期振荡的特征。

由图 9 可见, 白云机场的初雷出现时间, 振荡周期的长度在 9~14 年前后有明显变化, 其中 11~14 年的周期振荡在 1980 年以前一直很强, 而 9~10 年的周期振荡在 1980 年以后很明显。另外, 白云机场的终雷结束时间, 振荡周期的长度在 6

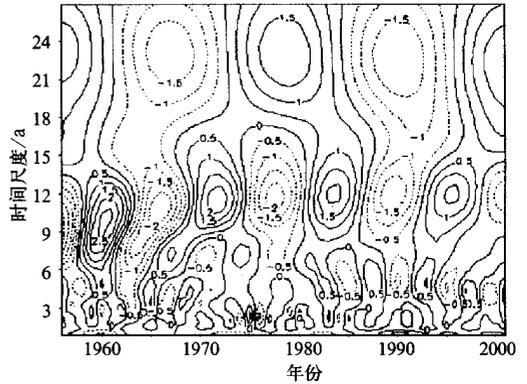


图 8 白云机场 1956~2001 年雷暴序列的子波系数实部分布

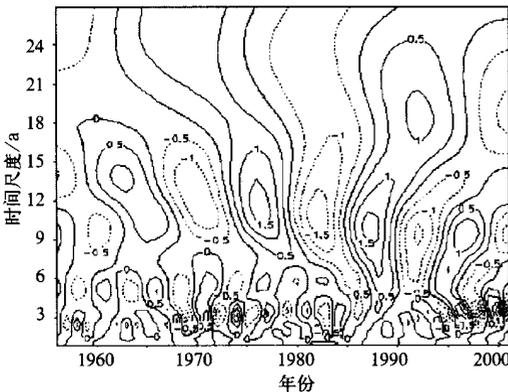


图 9 白云机场 1956~2001 年初雷序列的子波系数实部分布

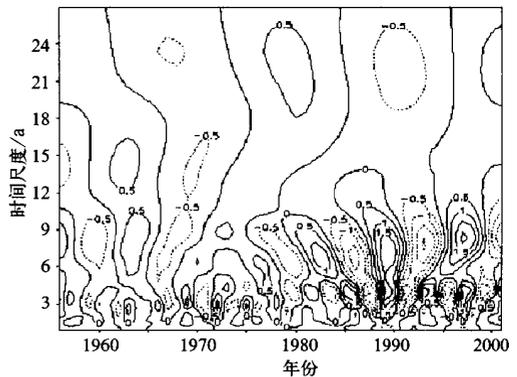


图 10 白云机场 1956~2001 年终雷序列的子波系数实部分布

~9 年前后有明显变化,其中 8~9 年的周期振荡在 1975 年以前一直很强,而 6~7 年的周期振荡在 1975 年以后很明显(详见图 10)。

#### 4 小 结

(1) 白云机场年平均出现雷暴日数为 75.4 天,最多为 109 个雷暴日,最少为 49 个雷暴日;

(2) 一年四季中,雷暴以夏季出现最多,冬季出现最少;

(3) 一年 12 个月都有可能出现雷暴,其中雷暴多集中出现在 4~9 月份,以 8 月份出现最多,12 月份出现最少;

(4) 雷暴的日变化特征是,雷暴每天较集中出现的时间为 05:00~14:00 UTC,其中又以 08:00~10:00 UTC 出现最多,早上至上午出现最少。而雷暴出现峰值时间比平均气温最高值出现时间晚 2 h,说明雷暴出现多少与气温高低关系密切;

(5) 出现雷暴初期平均是 3 月 1 日,雷暴终期平均是 10 月 14 日,近 46 年来白云机场每年初雷发生,其时间有越来越早的趋势变化,而每年终雷结束时间却有越来越晚的趋势变化;

(6) 一年中,持续时间在 1~2 h 的雷暴出现最多,其次是持续时间在 0~1(含)h 的雷暴,白云机场夏季多以持续时间为 2 h 以内的短时性雷暴为主;

(7) 副热带高压是造成白云机场雷暴的主要天气系统;

(8) 从小波分析结果看,近 46 年来广州白云机场雷暴日数的年际变化有着较好的 9~12 年振荡周期,而且雷暴的发生有逐渐减小的趋势变化。白云机场的初雷出现时间,振荡周期的长度在 9~14 年前后有明显变化,而终雷的结束时间,振荡周期的长度在 6~9 年前后有明显变化。

#### 参 考 文 献

- 1 陈廷良. 现代运输机航空气象学. 北京:气象出版社,1992. 235,245~256.
- 2 施能,鲁建军,朱乾根,东亚冬、夏季风百年强度指数及其气候变化. 南京气象学院学报,1996, 19(2): 168~177.
- 3 Farge M. Wavelet transforms and their applications to turbulence. *Annu. Rev. Fluid. Mech.*, 1992, 24: 395~457.

## STATISTIC CHARACTERISTICS OF THUNDERSTORM CLIMATE AT GUANGZHOU BAIYUN INTERNATIONAL AIRPORT IN THE LATE 46 YEARS

Zhang Meiping Ao Shuzhen Liu Xiang Li Nianying

(*Meteorological Center, Air Traffic Administration of the Mid-Southern China, Guangzhou, 510405*)

### Abstracts

The 46-year's hourly observational information from 1956—2001 at Guangzhou Baiyun Airport is used to statistically analyzed the thunderstorm climatic characteristics and the wavelet transform is conducted. The results are obtained as follows: Year-averaged days of thunderstorm emergence at Baiyun Airport is 75.4 days. The early thunderstorm day in a year is generally on March 1, and the last thunderstorm day is generally on October 14. It is possible to occur a thunderstorm in any month a year, but occurring frequency of thunderstorm is much concentrated in April—September, the peak is in August and the minimum is in December. There are conspicuous seasonal and daily variations for the thunderstorm. The variation period of thunderstorm climatology has a 9—12 years, and the frequency is gradually decreased in the last 46 years.

**Key words:** Thunderstorm    Statistic analysis    Wavelet transform

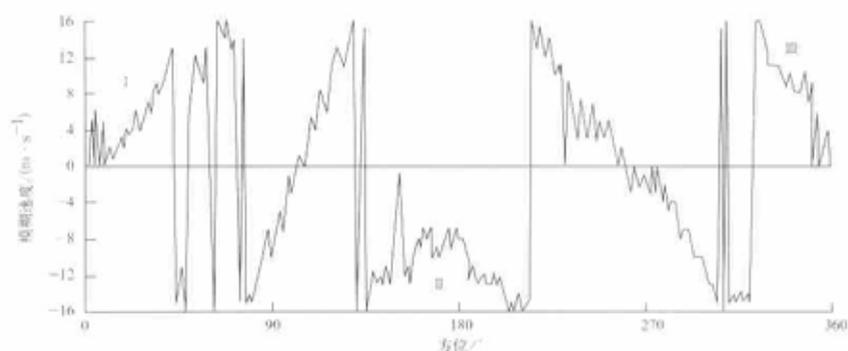


图1 广州白云机场多普勒雷达观测的存在速度折叠的一个距离图  
多普勒速度-方位廓线( $V_{max}=16.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

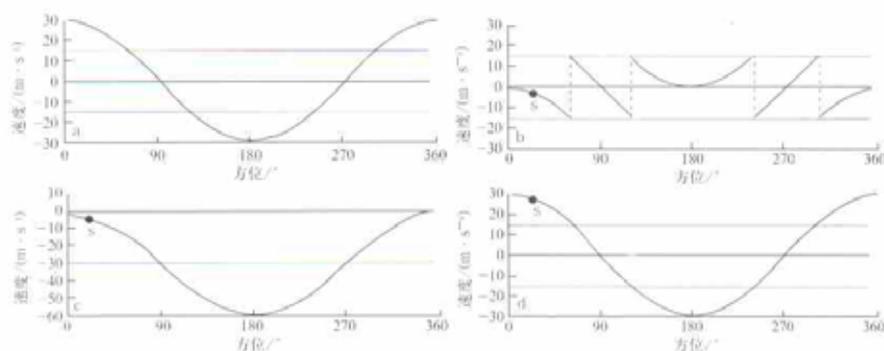


图2 纠正速度折叠原理示意图

(a) 没有模糊的速度-方位廓线, (b) 存在模糊的速度-方位廓线, (c) 恢复连续后的廓线, (d) 对整体偏移经过调整后的廓线

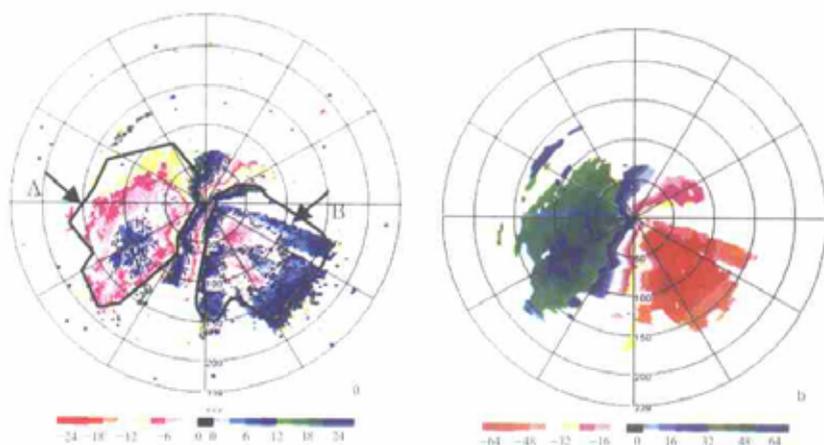


图3 1993年9月17日10:17:2.73°仰角广州白云机场多普勒雷达观测的  
(a) 原始径向速度 (b) 消除模糊后的径向速度(单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

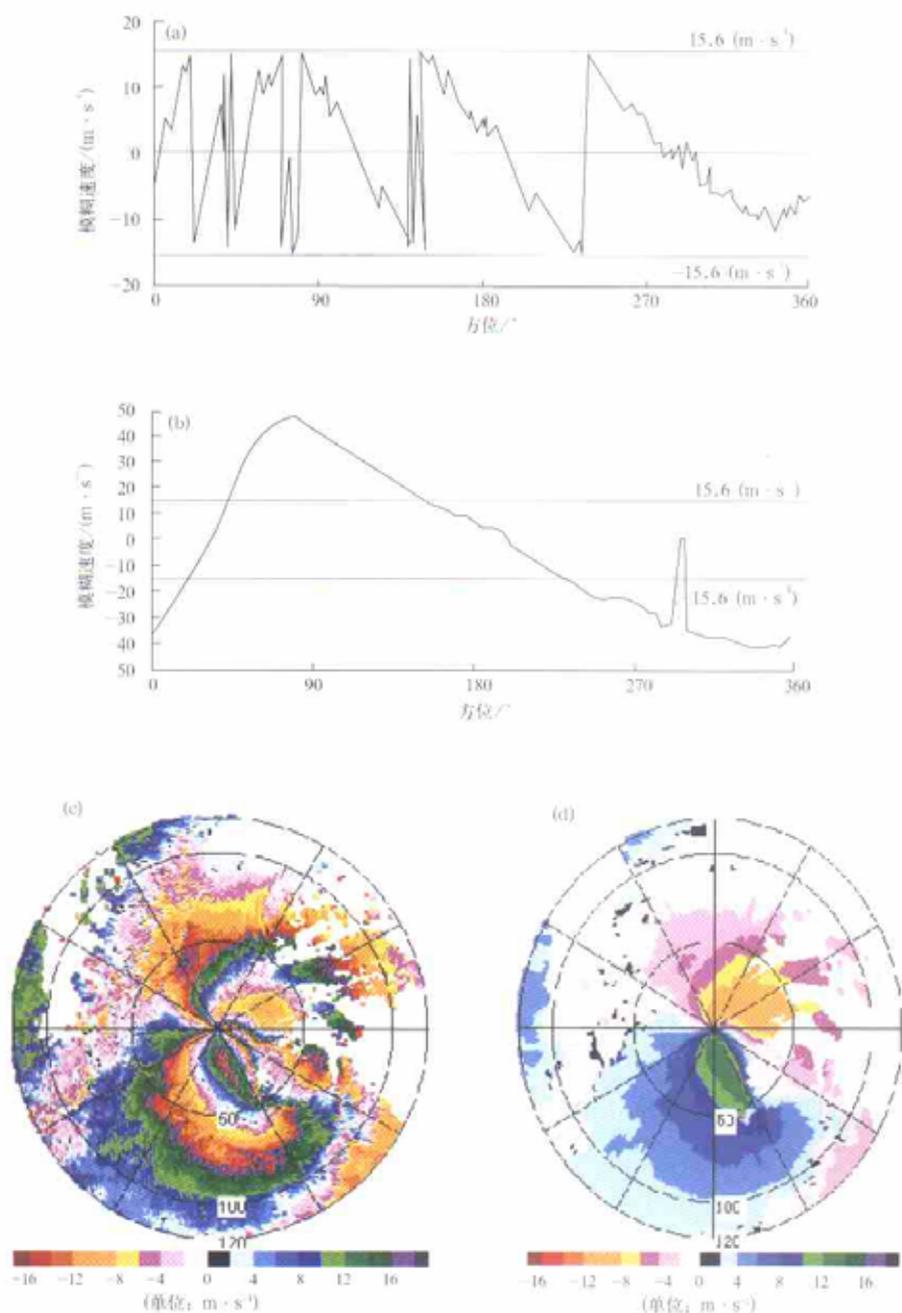


图4 台湾绿岛雷达1998年8月4日01:30观测的OTTO台风1.06°仰角速度场 (a) 第50距离圈原始速度-方位廓线 (b) 第50距离圈模糊纠正后速度-方位廓线 (c) 原始图像 (d) 模糊纠正后的速度图像