

黄琴,魏鸣,胡汉峰,等,2018.晴空回波的大气风温湿结构及双偏振雷达参量分析[J].气象,44(4):526-537.

晴空回波的大气风温湿结构及 双偏振雷达参量分析*

黄琴^{1,2} 魏鸣^{1,2} 胡汉峰^{1,2} ABRO Mohammad Ilyas^{1,2}

1 南京信息工程大学,气象灾害预报预警与评估协同创新中心,南京 210044

2 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室,南京信息工程大学,南京 210044

提 要:晴空回波有助于认识大气的风温湿结构,双偏振多普勒天气雷达为探测晴空大气提供了丰富信息。本文以2015年夏季南京信息工程大学C波段双偏振雷达探测的晴空回波为例,结合探空资料分析大气风温湿结构及晴空回波的影响因素,分析了晴空大气的反射率因子 Z 、径向速度 V_r 以及差分反射率因子 Z_{DR} 回波特征。研究表明:大气温、压、湿梯度造成折射指数分布不均以及背景风场引起的湍流增强,均可造成晴空回波,其回波机理为湍流散射;差分反射率因子受到多普勒效应的影响;在风场及大气湍团干湿特性不同的情况下,晴空回波的差分反射率因子呈现不同的特征。研究结果有益于深入认识大气风温湿结构特征对雷达电磁波的散射的影响以及雷达资料质量控制。

关键词:晴空回波,双偏振雷达,湍流散射,大气风,温湿结构

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.04.006

Analysis of Atmospheric Wind, Temperature and Humidity Structure and Dual-Polarization Radar Parameters of Clear Air Echo

HUANG Qin^{1,2} WEI Ming^{1,2} HU Hanfeng^{1,2} ABRO Mohammad Ilyas^{1,2}

1 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University
of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation, CMA, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract: Clear air echo (CAE) helps to understand the structure of wind, temperature and humidity of the atmosphere; dual-polarization Doppler weather radar provides a wealth of information in detecting atmosphere. In this paper, CAE of Nanjing University of Information Science and Technology, C-Pol dual-polarization radar in summer of 2015 is taken as cases to analyze the wind, temperature and humidity structure of atmosphere and the impact factors of CAE, combined with the sounding observations. The characteristics of radar reflectivity factor Z , radial velocity V_r and differential reflectivity factor Z_{DR} of CAE are analyzed. The results show that the uneven distribution of refractive index caused by the temperature, pressure and humidity gradients and the turbulence enhancement induced by the background wind field can cause the clear sky echo. The echo mechanism is turbulent scattering. The differential reflectivity factor is affected by the Doppler effect. The Z_{DR} of CAE has different characteristics in different wind and air turbulence situations. The results are helpful for better understanding the impact of atmospheric wind, temperature and

* 国家自然科学基金项目(41675029)、国家重点基础研究发展计划(973计划)(2013CB430102)、地理信息科学教育部重点实验室开放研究基金资助项目(KLGIS2015A01)和中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室开放课题(2016LASW-B12)共同资助

2017年1月19日收稿; 2018年1月12日收修定稿

第一作者:黄琴,主要从事天气雷达与灾害性天气预警方面工作. Email:592303140@qq.com

通信作者:魏鸣,主要从事大气遥感方面研究. Email:mingwei@nuist.edu.cn

humidity structure on radar electro-magnetic scattering and the quality control of radar data.

Key words: clear air echo(CAE), dual-polarization radar, turbulence scattering, atmospheric wind, temperature and humidity structure

引 言

晴空回波是一种常见的雷达回波,这种回波在PPI上的特征是在靠近测站周围100 km范围内出现的弱回波。由于微波雷达所探测到的晴空回波主要出现在大气边界层中(Balsley and Peterson, 1981),所以研究它们的回波特征和形成机理,对研究大气边界层的结构及性质很有意义。

虽然国内外雷达气象界对晴空回波已有多年研究,但20世纪60—90年代,大多为研究整个对流层大气中的晴空回波(Lhermitte, 2002)。特别是在我国,利用高灵敏度的新一代雷达,针对出现在大气边界层的晴空回波,研究边界层大气的稳定性或湍流结构的相关文献还较少见(魏鸣等, 2007)。

20世纪60年代,科学工作者发展了湍流介质中电磁波散射的理论,合理地解释了大多数晴空回波现象。其中有重要贡献的学者是Tatarski,他应用Kolmogorov的局地各向同性湍流概念,推导出了电磁波在湍流介质中的散射公式,它与试验结果相符合,因此他的理论被许多科学家用来解释大气中的晴空回波现象(Kusunoki, 2002)。自那时起,在通过利用雷达观测晴空回波来研究大气结构和运动方面作了大量的工作,主要研究的现象有晴空对流、大气波动和晴空湍流,其散射机制主要是大气中的湍流运动造成的空气折射指数的不均匀结构。Chang et al(2003)通过调查统计台湾低仰角雷达反射率数据,发现晴空回波有强的日变化和季节变化特征。Kusunoki(2002)在对1997年7—12月日本Kanto平原上空对流层内晴空回波进行统计研究时发现:7月至11月末,当没有降水发生时,白天发现晴空回波的概率为40%~80%,并且发现晴空回波日变化存在两个峰值,分别是早晨日出前后和黄昏时分,而从11月末至12月则没有出现晴空回波。Wilson et al(1994)在对Florida和Colorado的多普勒雷达资料统计分析发现:陆面上从春季到秋季都能探测到晴空回波,在冬季,气温在10℃以上时,也有可能探测到晴空回波。Knupp et al(2005)利用新一代多普勒雷达对不同下界面边界层观测研究发现

新一代多普勒雷达增强了对边界层的探测能力,具有较高的灵敏度,经常可以在晴空探测到回波。关于晴空回波的形成机理与回波特征,经典雷达气象学理论与前人的工作中已有一些研究(Miller, 1985; Sauvageot, 1992; 张培昌等, 2001)。Lhermitte(2002)指出大气折射指数的脉动引起的后向散射遵从Bragg散射定律,并且湍流介质产生的散射有明显的不连续性。Zhang et al(2005)在利用双基地雷达探测晴空风场研究中证实了双基地雷达能增加雷达探测Bragg散射的敏感度。Weckwerth et al(2001)利用S波段雷达对1999年9—11月意大利米兰附近观测到对流发展前的晴空回波结构特征。

孙鸿娉等(2007)研究多普勒雷达非降水回波在临近预报中的应用,发现非降水回波的强度虽然很弱,但其速度回波显示出冷暖平流和大尺度风向、风速辐合(散)相结合的特征,为临近预报提供了一种新思路。唐云志(2014)利用多普勒雷达分析了晴空回波径向速度特征将其分类并分析其机理,揭示了晴空回波的速度特征不仅与大气边界层的风速有关,也与大气的逆温结构有关。冷亮等(2011)在现有多普勒天气雷达资料质量控制基础上,对多普勒雷达晴空回波识别并将识别的晴空回波区域所对应多普勒速度可用于判别大气平流状况,从而为预报工作提供帮助。

雷达资料在灾害性天气的研究上应用较为广泛(李柏等, 2013; 张沛源等, 2008; 周小刚等, 2015),对晴空回波关注较少。虽然国内外雷达气象界对晴空回波已有多年研究,但利用双偏振雷达探测晴空回波,研究边界层大气的稳定性或湍流结构的相关文献还很少见。本文根据2015年夏季南京信息工程大学C波段双偏振雷达(简称NUIST C-Pol雷达)探测的晴空回波个例,结合大气风温湿特征,分析它的形成机理和演变特征,并分析晴空回波的偏振参量特征,了解大气边界层结构,相对探空资料具有较高的时空分辨率。以便深入认识大气风温湿结构特征对雷达电磁波的散射以及雷达资料质量控制(杨杰等, 2014)。

1 晴空回波现象及散射机理

1.1 晴空回波现象

晴空回波是一种没有降水或云的大气中得到的雷达回波。在雷达 PPI 上所呈现的晴空大气回波形状具有多样性,如圆点状、窄带状、细胞状、层状、白炽状、环状和波状等。人们把它们分成两大类:第一类称为圆点状回波,第二类是具有很大水平尺度呈窄带状或层状的回波。第一类回波多半是由于鸟和昆虫所造成;第二类回波主要是由于大气强折射指数梯度区对电磁波产生的反射或后向散射造成的。

天气雷达观测的晴空回波的成因可以考虑为:一是大气中悬浮的可引起散射的微粒。二是大气折射指数的不均匀。无论是折射率的不均匀还是大气微粒在空间的分布,均与各种尺度的大气运动有关,湍流运动导致其速度谱展宽。晴空回波的高度一般都很低,强度很弱,因此只有在测站近处才能探测到,其速度一般都比较小,这主要是由大气湍流的散射造成的。

1.2 散射机理

由于折射指数不均匀造成的散射遵从 Bragg 定律,它是衍射与折射并存的过程,折射指数与大气要素的关系如下(张培昌等, 2001):

$$N = (n - 1)10^6 = \frac{77.6}{T} \left(p + \frac{4810e}{T} \right) \quad (1)$$

式中, n 是折射指数, $n = \frac{c}{v}$, $N = (n - 1)10^6$ 是大气折射指数的实际应用单位,简称折射指数 N 单位。 c 是电磁波在真空中的传播速度, v 是电磁波在某种均匀介质中的传播速度,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。 p 是大气压(单位: hPa), e 是水汽压(单位: hPa), T 是绝对温度(单位: K)。由上式得折射指数的差分式:

$$\Delta N = -\frac{77.6}{T^2} \Delta T \left(p + \frac{4810e}{T} \right) + \frac{77.6}{T} \left[\Delta p + 4810 \left(\frac{\Delta e}{T} - \frac{e}{T^2} \Delta T \right) \right] \quad (2)$$

在标准大气中,令 $T = 288 \text{ K}$, $p = 1013 \text{ hPa}$, $e = 10.2 \text{ hPa}$,可得:

$$\Delta N = -4.02 \Delta T + 4.51 \Delta e + 0.27 \Delta p \quad (3)$$

相比于水汽压和温度,气压的变化对折射指数的影响所占比重较小。湍流散射是大气中因温度、

气压和湿度不均匀分布而引起的湍流对微波、光波和声波造成的散射。湍流大气对雷达波的反射率 η 为(Wilson et al, 1994):

$$\eta = 0.39 C_n^2 \lambda^{-1/3} \quad (4)$$

式中, λ 是雷达波长, C_n^2 是大气折射率的结构常数。上式表明,折射率起伏的大气中电磁波的反射率 η 正比于大气折射率结构常数 C_n^2 ,且与雷达波长 λ 的 $-1/3$ 次幂成正比。

并且

$$C_n^2 = 5.45 (\Delta n)^2 L_0^{-2/3} \quad (5)$$

由式(1)可得:

$$10^{-6} \Delta N = \Delta n \quad (6)$$

将式(5)、式(6)代入式(4)得:

$$\eta = 2.1255 (\Delta n)^2 L_0^{-2/3} \lambda^{-1/3} \times 10^{-12} \quad (7)$$

由式(7)可以看出,当湍流尺度 L_0 、雷达波长 λ 一定时,雷达反射率 η 只与大气折射指数的变化率 ΔN 有关。能够造成湍流回波的湍流尺度为(张培昌等, 2001):

$$l_0 = \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\theta}{2}} \quad (8)$$

由于雷达只能接收到电磁波的后向散射($\theta = 180^\circ$),所以 $l_0 = \lambda/2$,即只有湍流尺度为雷达波长的一半时,才能接收到散射信号,这个尺度称为有效湍流尺度。晴空湍流区有时可以产生晴空回波,但不是所有晴空湍流区都能探测到回波。观测事实表明水汽对折射指数梯度的影响较大,高度较高时,由于水汽少,折射指数梯度也小,即使有明显的扰动,雷达也不易探测到(张培昌等, 2001)。同时本文用的双偏振雷达为 C 波段,所以能探测到的晴空回波主要出现在边界层内,它为研究边界层内温、压、湿结构的不均匀性提供了一种有效的探测手段。晴空回波的出现,说明了当时大气边界层的气象要素具有较大的梯度,存在着一定的湍流输送过程。

2 资料与研究区域

2.1 资料来源

使用南京信息工程大学 C 波段双线偏振全相参脉冲多普勒天气雷达(简称 NUIST C-Pol 雷达)所采集的基数据,其主要技术参数性能如表 1。雷达系统采用双发双收机制,即同时发射水平和垂直

偏振波,接收同极化和正交极化的回波,获得有关降水粒子形状、尺寸和相态等信息。其中雷达波束宽度 0.54° ,支持 4 个不同的脉冲宽度,距离分辨率可

达 $75\text{ m}(0.5\text{ }\mu\text{s}$ 脉宽),采用 RVP900 和国产信号处理机。NUIST C-Pol 雷达是窄波束、多脉冲宽度、高分辨率($0.54^\circ\times 75\text{ m}$)的大尺寸天线。

表 1 NUIST C-Pol 雷达的参数
Table 1 Parameters of NUIST C-Pol Radar

天线		接收机	
天线直径	8.5 m	通道数	2(水平、垂直同时接收)
波束宽度	≤0.54°	噪声系数	≤3 dB
天线增益	水平 48.5 dB;垂直 48.6 dB	灵敏度	0.5 μs≤ −109 dBm
雷达波偏振状态	水平、垂直		2.0 μs≤ −112 dBm
双通道隔离度	≥40 dB	动态范围	≥90 dB
	发射机	资料处理系统(RVP900+WRSP 信号处理器)	
工作频率	5600 MHz(全相参速调管)		
峰值功率	≥250 kW	数据输出	Z、V、W、SNR、Z _{DR} 、ρ _{HV} 、Φ _{DP} 、K _{DP}
峰值功率	≥250 kW		
峰值功率	0.3 μs,0.5 μs		
脉冲宽度	1.0 μs,2.0 μs		
波长	C 波段	Z 测量精度	1 dB
峰值功率	≥250 kW	ρ _{HV} 测量精度	0.01
脉冲宽度	0.3 μs,0.5 μs,1.0 μs,2.0 μs	Z _{DR} 测量精度	0.2 dB
脉冲重复频率	300~2000 Hz	Φ _{DP} 测量精度	2°

2.2 研究区域

研究范围是雷达所覆盖的区域,即以南京江北的南京信息工程大学气象楼为中心,半径 150 km 的圆形区域。为避开地物回波的干扰,本文采用海拔高度 87 m,仰角 1.5° 的雷达资料,可以更多地探测到地面覆盖的范围,便于研究边界层晴空回波。

经过对 2015 年夏季 6—8 月晴空回波资料的处理与分析,发现了比较典型的晴空回波特征。本文以 2015 年 6 月 5 日、11 日及 8 月 3 日 NUIST C-Pol 雷达探测的晴空回波为例,对反射率因子强度 Z (简称强度)、径向速度 V_r (简称速度)及差分反射率因子 Z_{DR} 回波特征进行分析,发现大气温湿结构不同,晴空回波特征也不同,后面讨论三类晴空回波。

3 个例 1:均匀片状晴空回波

3.1 大气温湿结构与折射指数

2015 年 6 月 5 日,华东地区处于大面积的晴空背景下,从 08 时的卫星云图看到南京是无云的晴好天气(图略),图 1 是 2015 年 6 月 5 日 08 时南京的 $T\text{-log}p$ 图(北京时,下同),本文的 $T\text{-log}p$ 图均来自美国 Wyoming 大学的网站。分析 $T\text{-log}p$ 图,低层

的风向为西南风,900 hPa 以上转为西北风,风速随高度增大;约 1 km 高度以下的温度露点差($T-T_d$)较小,说明近地面水汽比较丰富;在 729 m 处,温度与露点温度均发生逆温,逆温层湿度比较大,逆温层以上,水汽含量随高度的增加迅速减少,温、湿梯度较大。

由美国 Wyoming 大学的网站得到的探空数据,根据公式(1)可计算折射指数 N ,图 2 是 2015 年

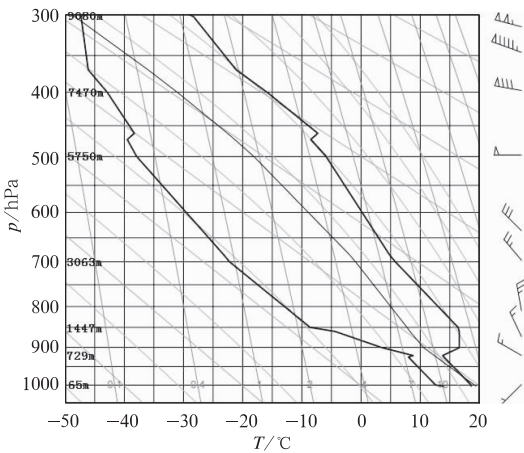


图 1 2015 年 6 月 5 日 08 时南京的 $T\text{-log}p$ 图

Fig. 1 $T\text{-log}p$ plot in Nanjing at 08:00 BT 5 June 2015

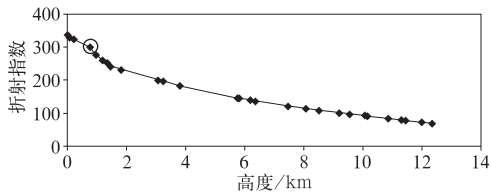


图 2 2015 年 6 月 5 日 08 时南京站
折射指数随高度变化图
Fig. 2 Variation of refractive index with
height in Nanjing at 08:00 BT 5 June 2015

6 月 5 日 08 时折射指数随高度变化图。圆圈标注处折射指数 N 有较明显的变化,与 950~900 hPa 附近温层高度一致,低空较大的温、湿梯度造成了较大的折射指数梯度。

3.2 雷达回波特征

3.2.1 雷达反射率因子 Z

2015 年 6 月 5 日 08 时,南京地区是无云的晴

好天气,图 3a 的雷达反射率因子图上,出现了点状的弱回波,即晴空回波,范围大约在 25 km 距离圈以内,强度在 $-5 \sim 15$ dBz,根据测高公式算出其高度大约在 740 m 以下,与图 3 折射指数变化率较大的高度相对应。这种弱回波能被雷达探测到,说明雷达的最小可测功率很小,即灵敏度很高。

3.2.2 雷达径向速度 V_r

图 3b 的径向速度图中,速度回波面积大于强度回波面积,零速线呈弱 S 型,风向随高度顺转,低层为西南风,高层为西北风,风速随高度增大,与探空资料风场一致,说明雷达探测到的为背景风场。

3.2.3 差分反射率因子 Z_{DR}

差分反射率因子 Z_{DR} : $Z_{DR} = 10 \lg(\frac{Z_{HH}}{Z_{VV}})$, 单位: dB,反映水凝物粒子水平和垂直方向上尺度的差异即粒子的非球形程度,取决于粒子形状和轴比,与降水区中粒子的数量无关。

地物回波差分反射率呈随机极化特点,值分布

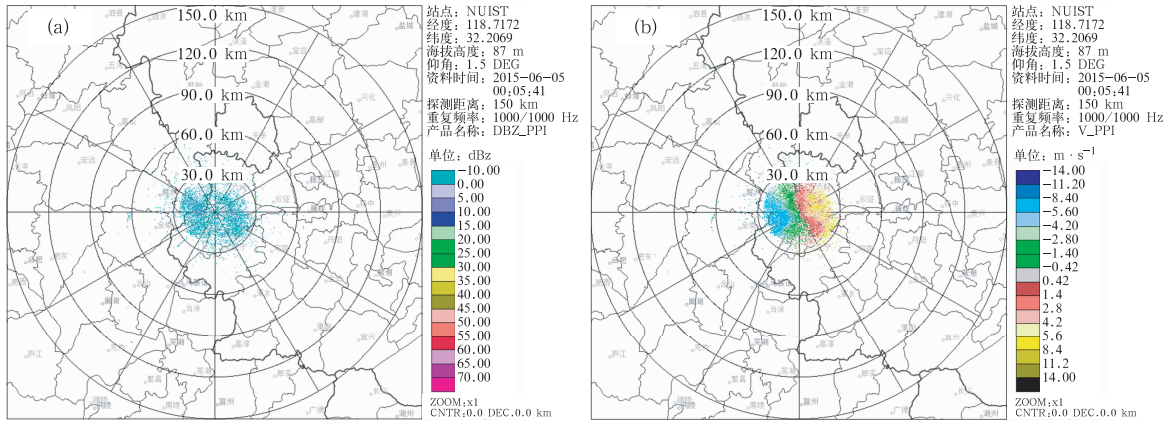


图 3 2015 年 6 月 5 日 08 时 NUIST C-Pol 雷达的强度 Z (a) 及速度 V_r (b) 回波图(仰角 1.5°)
Fig. 3 Z (a) and V_r (b) of NUIST C-Pol Radar at 08:00 BT 5 June 2015 (elevation angle= 1.5°)

表 2 Z_{DR} 物理意义

Table 2 Physical significance of Z_{DR}

球形 (毛毛雨、小冰雹等)	扁椭球形 (大雨、融化冰晶等)	长椭球形 (垂直指向冰晶等)
$Z_H \sim Z_V$ $Z_{DR} \sim 0$ dB	$Z_H > Z_V$ $Z_{DR} > 0$ dB	$Z_H < Z_V$ $Z_{DR} < 0$ dB

在 $-20\sim 20$ dB,且均值集中于0 dB,降水回波差分反射率集中分布于 $-3\sim 6$ dB。

晴空回波本身回波强度较弱,其信噪比相对于降水回波也较小;且信噪比对双偏振雷达数据质量影响较大,有研究指出信噪比大于20 dB时数据质量较好(姚晓娟,2016),可信度高。本文研究时为保留回波特征并排除数据质量的影响,剔除信噪比小于15 dB的数据。图4中可以看到此例晴空回波的 Z_{DR} 分布在 $-10\sim 20$ dB,中心值在1.6 dB左右,相较于地物回波及降水回波,晴空回波的 Z_{DR} 值较大。

图5可见,在约700 m的高度上出现大值,与逆温层的高度一致。正东正西方位,高度300~400 m,也出现 Z_{DR} 大值区,将图5与图3b进行对比可以发现, Z_{DR} 大值区与径向速度的大值区相对应,与速度图上零速线相对应的区域, Z_{DR} 呈现正负相间的特点。大量分析资料发现,当风速较大、零速线较清晰时,此特征出现较为明显。此现象与多普勒效应有关, Z_{DR} 在与零速线垂直的雷达径向方向完全投影,故 Z_{DR} 较大,对与零速线平行的雷达径向投影为零, Z_{DR} 值较小,出现了 Z_{DR} 小值区与零速线的走向相吻合的特征。观察其他偏振参量无此特征。

3.3 机理分析

雷达探测到的风场与背景风一致,说明雷达探测到的湍流为背景风引起的湍流;晴空回波出现的范围与折射指数变化率较大(即折射指数梯度较大)的层结相对应,大气温湿梯度较大造成折射指数分布不均均是晴空回波形成的原因。

在此晴空回波个例中,低层 Z_{DR} 值出现正负相间的特征,高层 Z_{DR} 值较大,分析其原因,且湍团的尺度随高度增加,高层背景风速较大,湍团的尺度大,在强水平风的作用下,湍团的形状发生改变大,趋于扁平(图6)。而低层风速较小,湍团尺度小,所以湍团的形状改变小。

在图5中出现 Z_{DR} 大值区与逆温层高度相一致的特征。逆温层的水汽相对饱和,为湿性湍流,水凝物相态的梯度较大,并且由式(3)可知,相对于温度 T 和气压 p ,水汽压 e 的变化对折射指数的变化作主要贡献,在湍流强度一定的情况下,湿度越大,反射率因子更大。由于形状对电磁波散射的影响,椭球各轴长度不同,各方向极化系数有差异,因此发射垂直偏振波,扁椭球的回波强度比同体积的

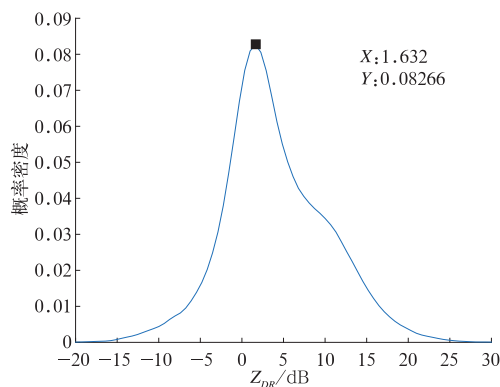


图4 2015年6月5日08时NUIST C-Pol雷达 Z_{DR} 概率密度分布图(仰角 1.5°)

Fig. 4 Probability density distribution of Z_{DR} of NUIST C-Pol Radar at 08:00 BT 5 June 2015 (elevation angle = 1.5°)

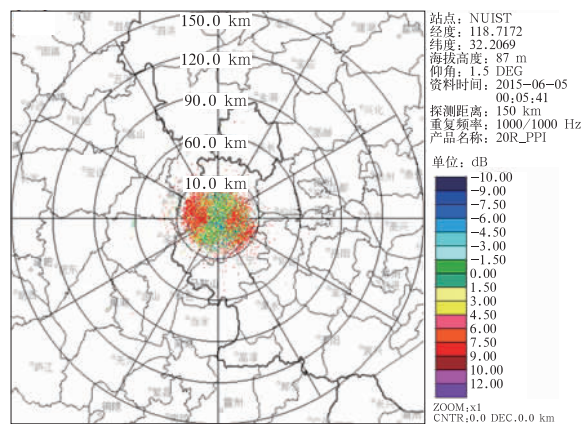


图5 2015年6月5日08时NUIST C-Pol雷达的 Z_{DR} (仰角 1.5°)

Fig. 5 Z_{DR} of NUIST C-Pol Radar at 08:00 BT 5 June 2015 (elevation angle = 1.5°)

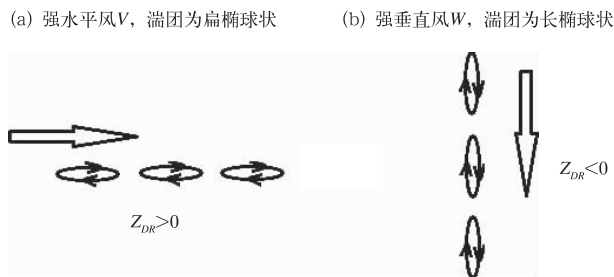


图6 强风对湍团形状的影响

Fig. 6 Effect of strong winds on the shape of turbulence

球形小,发射水平偏振波,扁椭球的回波强度比同体积的球形大;反射率因子越大, Z_{DR} 也越大,因此湿

性湍流的 Z_{DR} 值更大。

同时 Z_{DR} 受多普勒效应影响。湍团在风的作用下发生形变, Z_{DR} 的值受湍团的取向与雷达探测的方向相对位置的影响, Z_{DR} 在垂直于雷达径向方向完全投影, 沿雷达径向完全不投影, 出现了与速度图零速线相对应处 Z_{DR} 分布不均匀、正负相间的特征。

4 个例 2: 非对称晴空回波

4.1 大气风温湿结构与折射指数

从 2015 年 6 月 11 日 20 时的卫星云图看出南京处于西南暖湿气流中(图略), 有局地水汽供应。图 7 是 2015 年 6 月 11 日 20 时南京的 T - $\log p$ 图, 低层西风, 1.4 km 以上转为西北风, 风速较大, 可达 $10 \sim 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 风向的变化导致局地对流, 此高度处上层来自西北的干冷空气与下层的暖湿气流交汇, 加速水汽的凝结并释放潜热, 在图 8 中圆圈标记处出现逆温, 此层具有较大的温湿梯度。

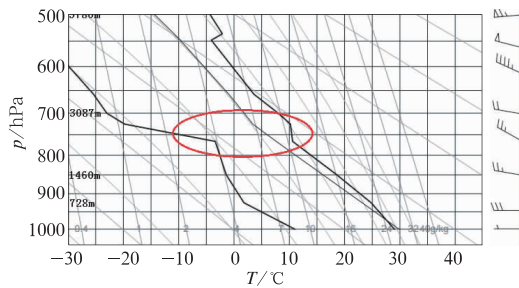


图 7 同图 1, 但为 2015 年 6 月 11 日 20 时

Fig. 7 Same as Fig. 1, but at 20:00 BT

11 June 2015

图 8 是 2015 年 6 月 11 日 20 时 N 随高度变化图。2.3 km 以下, N 无明显梯度变化。如图中圆圈标记, 2.3 km 处 N 随高度变化曲线发生折拐, N 的梯度增大, 与下沉逆温层的高度相对应。此处温度随高度增加, $\Delta T > 0$, 水汽随高度减少, $\Delta e < 0$, 结合式(3), 较大的温湿梯度造成 $\Delta N < 0$ 而 $|\Delta N|$ 较大。

4.2 雷达回波特征

4.2.1 雷达反射率因子 Z 特征

图 9a 的雷达反射率因子 Z 图中, 出现了大面积回波, 且具有不对称性。图中以红线为界, 右侧为均匀的圆形回波, 强度较弱, 在 $-10 \sim 5 \text{ dBz}$, 范围覆盖约 45 km 距离圈, 其对应高度为 1.2 km 以下; 左侧回波呈弧形, 左侧回波强度较右侧回波强度大, 在 $0 \sim 10 \text{ dBz}$ 。

4.2.2 雷达径向速度 V_r 特征

与强度图相同, 雷达径向速度图也呈现不对称的特点。图 9b 右侧风场为背景风场(西风), 风速随高度增加, 零速线两侧均出现了牛眼, 并发生速度模

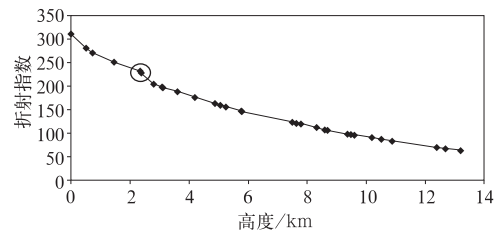


图 8 同图 2, 但为 2015 年 6 月 11 日 20 时

Fig. 8 Same as Fig. 2, but at 20:00 BT

11 June 2015

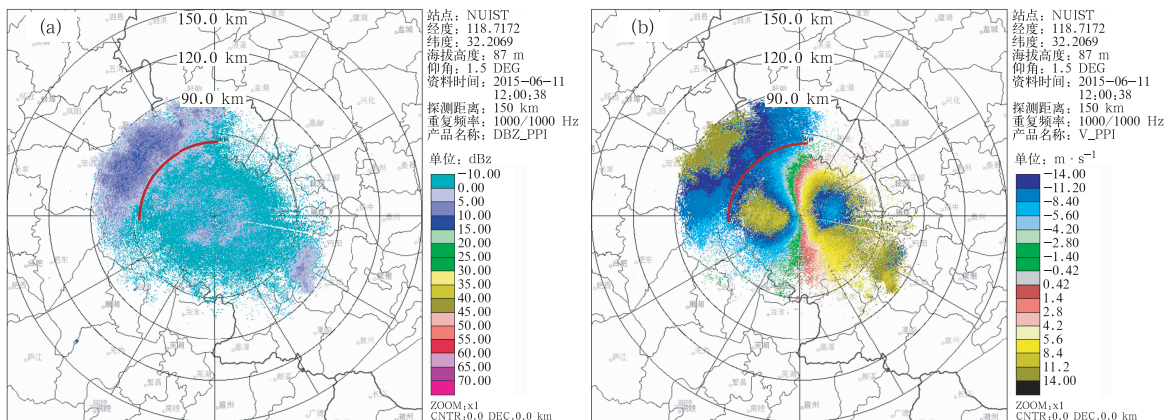


图 9 同图 3, 但为 2015 年 6 月 11 日 20 时

Fig. 9 Same as Fig. 3, but at 20:00 BT 11 June 2015

糊,说明风速较大;左侧风向转为西北风,出现速度模糊,风速超过 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。对比雷达速度回波与探空资料风场,风向一致,雷达资料速度偏大,这是由于速度回波为径向速度,是实际风在径向方向的投影,探空资料则为实际水平风,两者存在一定差异。

4.2.3 差分反射率因子 Z_{DR} 特征

图 10 中右侧相对均匀的片状晴空回波其 Z_{DR} 中心值约为 3.6 dB;左上方的晴空回波其 Z_{DR} 中心值约为 7.2 dB,左侧晴空回波的 Z_{DR} 值明显大于右侧;在图 10 中标记住处即右侧圆形片状回波与左侧弧形回波的交界处,风向由西风转为西南风的高度上,为狭窄的 Z_{DR} 的负值区。

4.3 机理分析

层状晴空回波的形成不仅与大气的温度、气压和湿度随高度的梯度有关,还与湍流的强度有关,即与湍流涡旋的外尺度 L_0 有关,因为背景风大,会引起 L_0 大,进而导致湍流散射强。右侧的圆形晴空回波,其温湿梯度较小,折射指数梯度无明显变化,此回波是由于风速较大使湍流混合较强形成的。逆温出现时, $\Delta T > 0$, $\Delta e < 0$,较大的温湿梯度造成 $\Delta N < 0$ 而 $|\Delta N|$ 较大,左侧晴空回波是由逆温引起的温湿梯度较大造成的折射指数分布不均造成。

左右两侧晴空回波的 Z_{DR} 值多数均为正值,但左侧值大于右侧(图 11)。右侧圆形晴空回波成因是强背景风引起的湍流散射,由于风向为西风,不随高度变化,湍团的形状在强水平风的作用下偏扁平型且排列较为有序,因此其 Z_{DR} 值为正值,但此区域

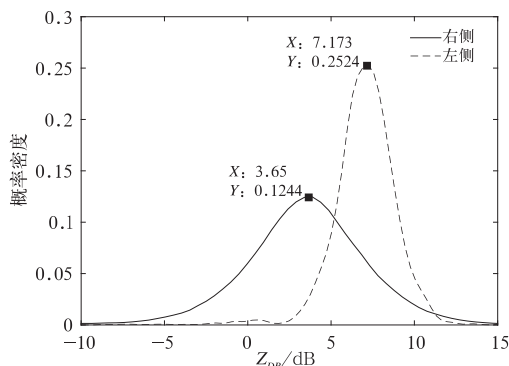


图 11 2015 年 6 月 11 日 20 时 NUIST C-Pol 雷达 Z_{DR} 概率密度分布图
(仰角 1.5° , SNR > 15 dB)

Fig. 11 Probability density distribution of Z_{DR} of NUIST C-Pol Radar at 20:00 BT
11 June 2015 (elevation angle = 1.5° , SNR > 15 dB)

湿度较小,相态梯度小,因而其 Z_{DR} 值相对左侧回波较小;左侧晴空回波的产生是由于逆温,温湿梯度较大造成折射指数分布不均,湿度增加,为湿性湍流,且湍团尺度随高度增加,左侧回波高度高,湍团尺度大,所以湍团的形状改变大,因此同样在背景风速较大且风向均较一致的情况下,左侧晴空回波的 Z_{DR} 值较大。而在交界处,风向发生改变,在垂直风切变的作用下湍团的形状更接近长椭球,因此出现了在交界处出现了狭窄的 Z_{DR} 的负值区。

5 个例 3: 环状晴空回波

5.1 大气风温湿结构与折射指数

2015 年 8 月 3 日华东地区处于大面积的晴空背景下,从卫星云图中可以看到南京是无云的晴好天气(图略),图 12 是 2015 年 8 月 3 日 08 时南京的 T - $\log p$ 图。首先分析风场,低空为西南风,风速较小,风速随高度的增加而增大;900 hPa 风向变为偏西风,风速减小至 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;800 hPa 风向转为偏南风,风速 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。图 13 中由下至上 T 、 T_d 先均随高度增加而减小,且 T_d 减小的速度更快,温湿梯度较大;随后虽然 T 仍随高度迅速减小,但 T_d 随高度基本不变,垂直方向上无水汽梯度;圆圈标注区域为下沉逆温, T 随高度增加, T_d 随高度的增加迅速较少,温湿梯度较大。

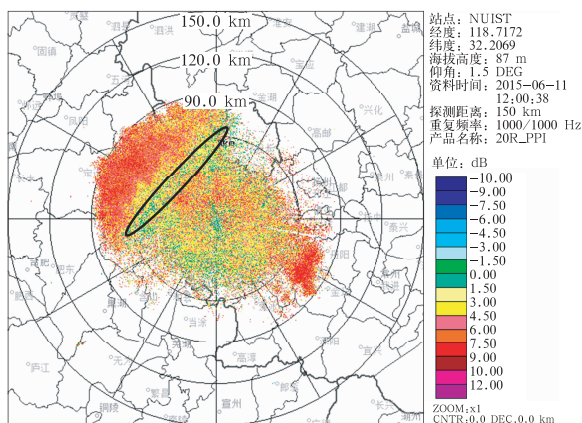


图 10 同图 5, 但为 2015 年 6 月 11 日 20 时

Fig. 10 Same as Fig. 5, but at 20:00 BT

11 June 2015

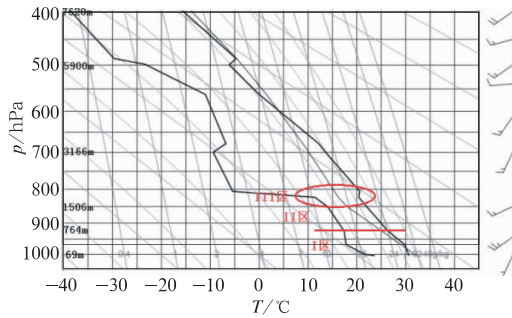


图 12 同图 1, 但为 2015 年 8 月 3 日 08 时
Fig. 12 Same as Fig. 1, but at 08:00 BT
3 August 2015

图 13 是 2015 年 8 月 3 日 08 时折射指数随高度变化图。0~360 m(起点至左侧竖线标注位置)高度上,折射指数随高度迅速减小,表 3 中可以看到, $\Delta T < 0$ 且温度随高度的递减率较小, $\Delta e < 0$ 且湿度随高度的增加迅速减小,由式(3)可知,正的 ΔT

及负的 Δe 对 $|\Delta N|$ 有贡献,因此 0~360 m 高度上水汽的梯度对折射指数的变化贡献大;在 360~1619 m 高度上(两根竖线之间的区域),折射指数的变化较为平缓;1786 m 处(圆圈标记处)曲线发生明显折拐,其高度与 $T\text{-}\log p$ 图上逆温层的高度相对应,进一步分析温湿特性, $\Delta T > 0$, $\Delta e < 0$, 温湿梯度均对 $|\Delta N|$ 有较大贡献,折射指数在此层结突变。

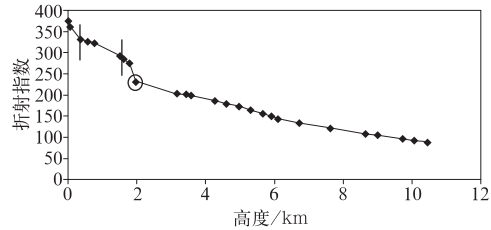


图 13 同图 2, 但为 2015 年 8 月 3 日 08 时
Fig. 13 Same as Fig. 2, but at 08:00 BT
3 August 2015

表 3 2015 年 8 月 3 日 08 时南京气象要素分布表
Table 3 Meteorology elements with height in Nanjing at 08:00 BT 3 August 2015

H/km	N	$\Delta e/\Delta H$ $/\text{hPa} \cdot \text{km}^{-1}$	$\Delta T/\Delta H$ $/\text{K} \cdot \text{km}^{-1}$	$\Delta N/\Delta H$ $/\text{km}^{-1}$	$T-T_d$ $/\text{°C}$	风速 $/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
0.007	374.80	-53.87	0.00	-234.41	7	4
0.069	360.26	-18.71	-2.75	-100.03	9	6
0.36	331.16	-1.30	-8.52	-21.34	12	17
0.583	326.40	-1.30	-8.29	-21.26	10.3	25
0.764	322.55	-5.25	-5.93	-40.92	9	25
1.506	292.19	-9.43	-5.31	-59.70	8	17
1.619	285.44	-8.67	-5.99	-55.76	8.5	17
1.786	276.13	-52.27	1.11	-252.33	9	17
1.966	230.71	-0.92	-5.83	-23.00	26	17
3.166	203.12	2.51	-5.22	-6.87	23	17
3.434	201.28	-0.73	-8.16	-19.41	19	16

5.2 雷达回波特征

5.2.1 雷达反射率因子 Z 特征

双偏振雷达探测到的 08:05 晴空回波呈现了不同的特征,图 14a 中出现了环状晴空回波,且仔细观察,可以看到 0~30 km 为圆形回波,32~40 km 及 45~60 km 距离圈有两层环状回波,出现晴空回波对应高度分别为 0~872,924~1134 及 1265~1658 m,且最外一层的环状回波强度较大,可达 10~20 dBz,为方便分析将出现回波的三个区域高度由低到高分别称为 I 区,II 区,III 区。

5.2.2 雷达径向速度 V_r 特征

对径向速度图(图 14b)进行分析,与强度图环

状回波对应,风场也呈现不连续特征。I 区零速线较模糊,大致呈 S 型,风速随高度增加,在约 660 m 高度处出现速度模糊;II 区为偏西风,III 区为西南风,风速约为 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。I 区、II 区回波较离散,III 区的回波较连续。将雷达径向速度图与探空资料得到的风场进行对比,两者风向一致,雷达测得风速偏大。

5.2.3 差分反射率因子 Z_{DR} 特征

观察 Z_{DR} 回波图(图 15)的特征进一步将 I 区分为两个部分进行讨论:0~25 km 为 I(a)区(对应高度 0~741 m), Z_{DR} 值正负相间,从 Z_{DR} 概率密度图中可以看到其中心值约为 -0.89 dB 附近;25~30 km 为 I(b)区(对应高度 741~872 m),从 Z_{DR} 概

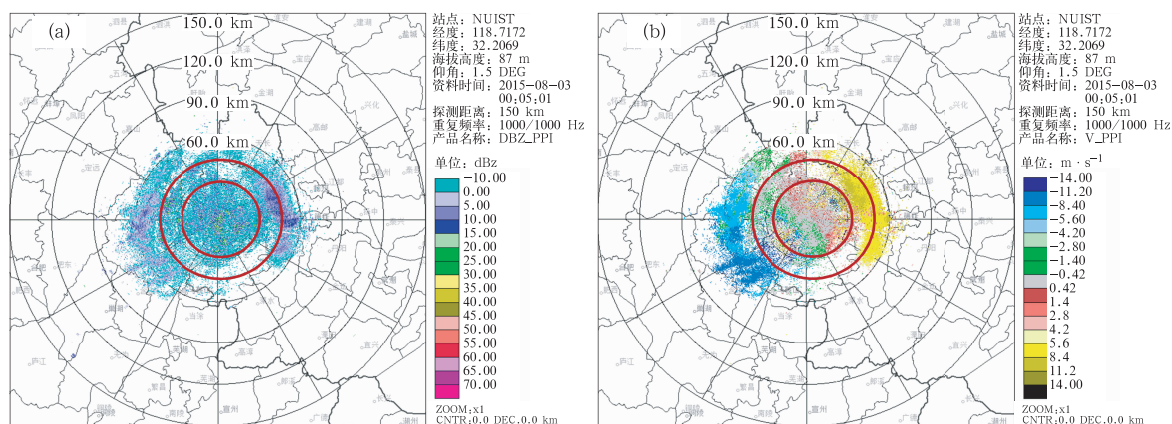


图14 同图3,但为2015年8月3日08:05

Fig. 14 Same as Fig. 3, but at 08:05 BT 3 August 2015

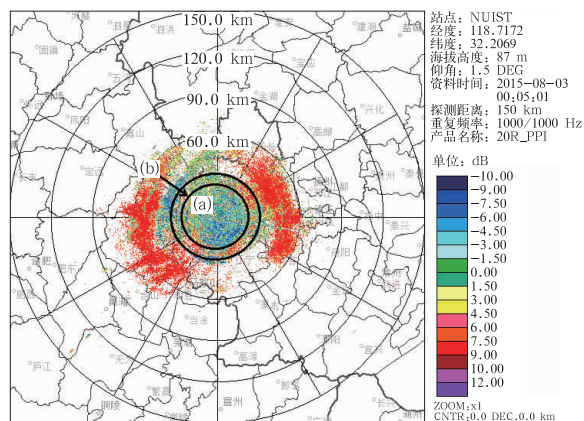


图15 同图5,但为2015年8月3日08:05

Fig. 15 Same as Fig. 5, but at 08:05 BT
3 August 2015

率密度图中可以看到其中心值在1.17 dB附近,相对于I(a)区值较大。

II区中 Z_{DR} 值正负相间,中心值约为-0.72 dB,但西南方向弧形区域为明显的 Z_{DR} 负值区;III区回波呈不连续环状(正南、正北方向出现缺口),差分反射率因子多为正值且较大,中心值约为10.8 dB。

5.3 机理分析

三个区域的回波形成原因各不相同(图16)。

I区 $\Delta T < 0$, $\Delta e < 0$, $|\Delta e| > |\Delta T|$,且由公式(3)可知水汽压 e 的变化对折射指数变化的影响所占比重大,因此I区晴空回波的形成主要是由于较大的水汽梯度。

I(a)区背景风小(图16a),零速线呈S型且较为

模糊,湍团也会发生形变,但排列及取向较无序,差分反射率因子正负相间且 Z_{DR} 中心值约为-0.89 dB;I(b)区背景风大(图16b),速度图上出现模糊,风向为西南风,湍团在强水平风的作用下趋于扁平,且温度露点差较小,湍流湿性强,因此此区 Z_{DR} 回波呈明显环状且相对于I(a)区值较大。

II区折射指数梯度较小(图16c),但此层对应的风速较大,湍流散射强,因而II区的晴空回波的形成是由于背景风大引起的湍流散射增强;但各方向风向风速大小不均匀,湍团取向及排列较随机,因此差分反射率因子 Z_{DR} 中心值约为-0.72 dB。

T - $\log p$ 图上1786 m处出现逆温,温度随高度的增加而增加,露点温度随高度减小,气温与露点温度的差值较大,且差值随高度升高逐渐加大, $\Delta T > 0$, $\Delta e < 0$, ΔT 及 Δe 均对 $|\Delta N|$ 的增大有贡献,使折射指数突变,形成了III区的环状晴空回波(图16d)。此区的水平风速较大,湍团趋于扁平, Z_{DR} 值大于0,同时由于逆温的存在,此层湿度大,为湿性湍流,因而其 Z_{DR} 值较大,且中心值约为10.8 dB。

6 结 论

(1) NUIST C-Pol雷达探测到的层状晴空回波处于大气边界层内,主要散射机制遵循湍团尺度为 $\lambda/2$ 的Bragg定律。边界层晴空回波的出现,说明边界层中存在着较强的大气温、压、湿梯度,易引起湍流,并且湿度梯度对折射指数的影响更明显。

(2) 双偏振雷达探测到的风场与探空资料探测到的风场对比,风向一致,风速存在差异;雷达速度

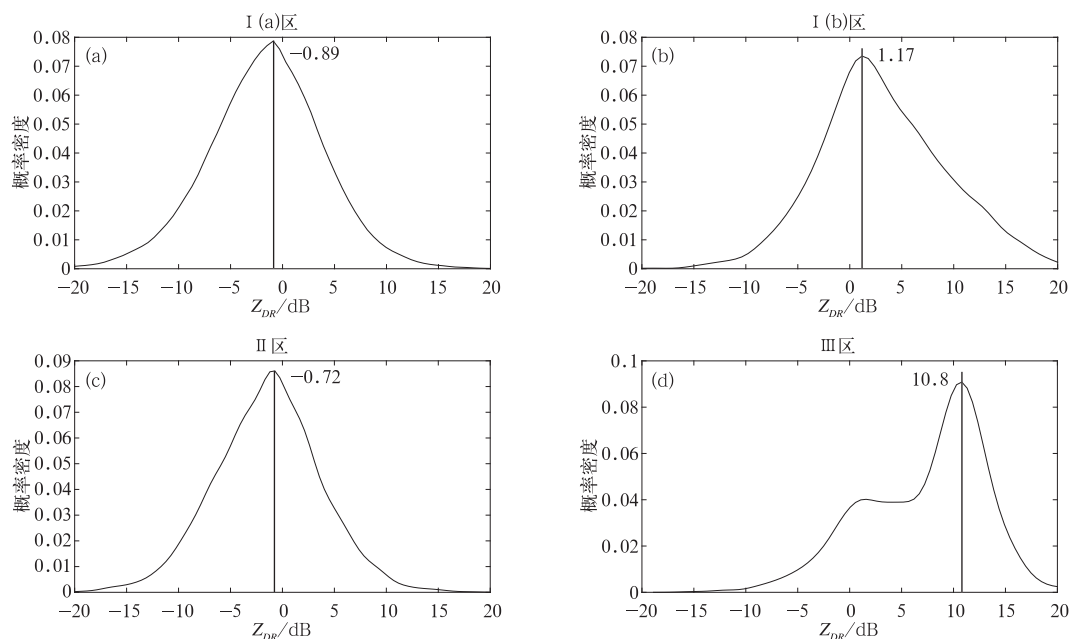


图 16 2015 年 8 月 3 日 08:05 NUIST C-Pol 雷达 Z_{DR}

概率密度分布图(仰角 1.5° , $SNR > 15$ dB)

(a) I(a)区, (b) I(b)区, (c) II区, (d) III区

Fig. 16 Probability density distribution of Z_{DR} of NUIST C-Pol Radar

at 08:05 BT 3 August 2015 (elevation angle = 1.5° , $SNR > 15$ dB)

(a) I(a) area, (b) I(b) area, (c) II area, (d) III area

图显示的为径向速度, 探空资料为水平风速, 可借助晴空速度图判断背景风场。

(3) 非对称晴空回波表示对应高度存在温湿特性不同的气团交汇; 环状晴空回波与大气垂直结构不均有明显关系; 借助雷达强度图、速度图、偏振参量特征以及探空资料, 在探空资料时空分辨率较低的情况下, 可借此判断大气的结构。

(4) 在风场及湍团干湿特性不同的情况下, 晴空回波的 Z_{DR} 呈现不同的特征; 当风向均匀一致且水平风较强时, 湍团在强水平风的作用下发生形变, 形状趋于扁平因而 Z_{DR} 大于 0, 且湿性湍流的 Z_{DR} 值较大, 可达 8 dB 以上; 同理, 当垂直风速较大时湍团趋于长椭圆形, Z_{DR} 小于 0; 当风速较小或风向不均匀时, 湍团也会发生形变, 但排列及取向较无序, Z_{DR} 中心值分布在 0 dB 左右;

(5) Z_{DR} 受多普勒效应影响。湍团在风的作用下发生形变, Z_{DR} 的值受湍团的取向与雷达探测方向相对位置的影响, Z_{DR} 在垂直于雷达径向方向完全投影, 沿雷达径向完全不投影, 出现了速度图上与零速线相对应处 Z_{DR} 分布不均匀、正负相间的特征。

参考文献

- 冷亮, 黄兴友, 杨洪平, 2011. 多普勒雷达晴空回波识别与应用[C]//第 28 届中国气象学会年会论文集. 厦门: 中国气象学会.
- 李柏, 古庆同, 李瑞义, 等, 2013. 新一代天气雷达灾害性天气监测能力分析及未来发展[J]. 气象, 39(3): 265-280.
- 孙鸿娉, 汤达章, 李培仁, 等, 2007. 多普勒雷达非降水回波在临近预报中的应用研究[J]. 气象科学, 27(3): 272-279.
- 唐云志, 2014. 晴空回波的散射机理与回波分析[D]. 南京: 南京信息工程大学.
- 魏鸣, 秦学, 王啸华, 等, 2007. 南京地区大气边界层晴空回波研究[J]. 南京气象学院学报, 30(6): 736-744.
- 杨杰, 刘黎平, 勾亚彬, 2014. 影响浙江地区降水估测几个因素的分析[J]. 气象, 40(5): 589-597.
- 姚晓娟, 2016. NUIST-C 波段双线偏振多普勒雷达资料质量控制及回波特征分析[D]. 南京: 南京信息工程大学.
- 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕, 2001. 雷达气象学: 第 2 版[M]. 北京: 气象出版社: 327-341.
- 张沛源, 杨洪平, 胡绍萍, 2008. 新一代天气雷达在临近预报和灾害性天气警报中的应用[J]. 气象, 34(1): 3-11.
- 周小刚, 费海燕, 王秀明, 等, 2015. 多普勒雷达探测冰雹的算法发展与业务应用讨论[J]. 气象, 41(11): 1390-1397.
- Balsley B, Peterson V L, 1981. Doppler-radar measurements of clear air atmospheric turbulence at 1290 MHz[J]. J Appl Meteor, 20

- (3):266-274.
- Chang P L, Wang B S, Shieh S L, et al, 2003. Clear-air echo statistics and beam blockage patterns of Taiwan Doppler radar network [C]//Proceedings of the 31st International Conference on Radar Meteorology. Seattle, WA, USA: American Meteorological Society.
- Knupp K R, Walters J T, Petersen W A, et al, 2005. Single Doppler observations of boundary layer flows over heterogeneous terrain [C]//Proceedings of the 32nd Conference on Radar Meteorology. Albuquerque, NM, USA: American Meteorological Society.
- Kusunoki K, 2002. A preliminary survey of clear-air echo appearances over the Kanto plain in Japan from July to December 1997 [J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 19(7):1063-1072.
- Lhermitte R, 2002. Centimeter & Millimeter Wavelength Radars in Meteorology [M]. Miami, FL, USA: Lhermitte Publications; 550.
- Miller G, 1985. Doppler radar and weather observations [J]. *Phys Bull*, 36(8):350.
- Sauvageot H, 1992. Radar Meteorology [M]. Norwood, MA, USA: Artech House.
- Weckwerth T M, Flamant C, Wulfmeyer V, 2001. Clear-air boundary layer observations from radar and water vapor dial [C]//Proceedings of the 30th International Conference on Radar Meteorology. Munich, Germany: AMS.
- Wilson J W, Weckwerth T M, Vivekanandan J, et al, 1994. Boundary layer clear-air radar echoes; origin of echoes and accuracy of derived winds [J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 11(5):1184-1206.
- Zhang G F, Doviak R J, Palmer R D, et al, 2005. Bistatic interferometry to measure clear air wind [C]//Proceedings of the 32nd Conference on Radar Meteorology. Albuquerque, NM, USA: AMS.