一次强降水过程 TWP16 风廓线雷达资料分析

郑石^{1,2},王冠³,关健华⁴,康博识²,黄兴友^{5,6}

(1.中国气象局沈阳大气环境研究所,沈阳 110166; 2.辽宁省气象装备保障中心,沈阳 110166;
3.中国气象局气象干部培训学院辽宁分院,沈阳 110166; 4.辽宁省气象服务中心,沈阳 110166;
5.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;
6.中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室,南京 210044)

摘要:利用 TWP16 风廓线雷达资料,对 2019 年 8 月 10—15 日"利奇马"台风在辽宁盘锦登陆引发的强降 水天气过程进行诊断分析。结果表明,风廓线雷达资料从时间和空间上能准确清晰地对这次强降水的天气 系统变化过程进行连续监测。对流层中下层径向速度大于 9 m/s (极值为 11.2 m/s)、SNR 大于 55 dB (极值 为 70 dB)、 C_n^2 大于 1.0×10⁻¹⁰、速度谱宽大于 2.5 m/s 是强降水发生发展阶段,整个大气层垂直风场运动与 降水过程有着较好的对应关系。对流中下层垂直下沉速度数值越大,降水越强,SNR 能够很好地揭示强降 水发生、发展、结束时雷达接收到目标散射信号的强弱, C_n^2 最大值 1.0×10⁻¹⁰ 出现的最大探测高度和持续时 间与降水有密切的关系。降雨不同高度层内,速度谱宽与其降雨量存在着显著的线性关系,即降雨强度越 强,速度谱宽数值越大,反之利用速度谱宽的变化趋势可以得到降水强的变化趋势。研究结果揭示了风廓 线雷达水平风廓线、径向速度、SNR、速度谱宽与降雨强度之间的内在联系,为风廓线雷达应用在降雨天气 监测提供了参考。

关键词:风廓线雷达;强降水;特征分析 中图分类号:P412.25 文献标识码:A DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.12.018

文章编号: 1672-9242(2021)12-0116-012

Analysis of TWP16 Wind Profile Radar Data during the Heavy Precipitation

ZHANG Shi^{1,2}, WANG Guan³, GUAN Jian-hua⁴, KANG Bo-shi², HUANG Xing-you^{5,6}

(1.Shenyang Institute of Atmospheric Environment, CMA, Shenyang 110166, China; 2.Liaoning Meteorological Equipment Support Center, Shenyang 110166, China; 3.Liaoning Branch, Training Institute for Meteorological Cadres, CMA, Shenyang 110166, China; 4.Liaoning Provincial Meteorological Service Center, Shenyang 110166, China; 5.Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nan-

通讯作者:王冠(1987—),女,硕士,工程师,主要研究方向为雷达资料处理及应用。

收稿日期: 2021-07-07; 修订日期: 2021-08-22

Received: 2021-07-07; Revised: 2021-08-22

基金项目:中国气象局沈阳大气环境研究所和东北冷涡重点开放实验室联合开放基金项目(2020SYIAE03);国家自然科学基金(40775029);辽宁省气象局科研项目(BA201905)

Fund: Shenyang Institute of Atmospheric Environment of China Meteorological Administration and Northeast Cold- vortex Key Open Laboratory Joint Open Fund Project (2020SYIAE03), The National Natural Science Fund of China (40775029) and Liaoning Provincial Meteorological Bureau Scientific Research Project (BA201905)

作者简介:郑石(1986-),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为雷达资料处理及应用。

Biography: ZHENG Shi (1986—), Male, Master, Senior engineer, Research focus: radar data processing and application.

Corresponding author: WANG Guan (1987---), Female, Master, Engineer, Research focus: radar data processing and application.

引文格式:郑石,王冠,康博识,等.一次强降水过程 TWP16 风廓线雷达资料分析[J]. 装备环境工程,2021,18(12):116-127.

ZHENG Shi, WANG Guan, KANG Bo-shi, et al. Analysis of TWP16 wind profile radar data during the heavy precipitation[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(12): 116-127.

jing 210044, China; 6.Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

ABSTRACT: Based on TWP16 wind profile radar data, this paper diagnoses and analyzes the weather process of heavy precipitation caused by Typhoon Lekima landing in Panjin, Liaoning from August 10 to August 15 in 2019. The results show that the wind profile radar data can accurately and clearly monitor the weather system change process of this heavy rainfall continuously in time and space. The radial velocity in the middle and lower troposphere is greater than 9 m/s (the extreme value is 11.2 m/s), SNR is greater than 55 dB (the extreme value is 70 dB), C_n^2 is greater than 1.0×10^{-10} , and the velocity spectrum width is greater than 2.5 m/s. The vertical wind field movement in the whole atmosphere has a good correspondence with the precipitation process. The larger the value of vertical sinking velocity in the middle and lower layers of convection, the stronger the precipitation. SNR can well reveal the signal intensity of target scattering received by radar at the occurrence, development and end of heavy precipitation. The maximum detection height and duration with the maximum value 1.0×10^{-10} of C_n^2 are closely related to precipitation. There is a significant linear relationship between the velocity spectrum width in different rainfall height layers and the rainfall, that is, the stronger the rainfall intensity, the larger the value of velocity spectrum width. The results reveal the internal relations among horizontal wind profile, radial velocity, SNR, velocity spectrum width and rainfall intensity of wind profile radar, and provide reference for the application of wind profile radar in rainfall weather monitoring.

KEY WORDS: wind profile radar; heavy precipitation; feature analysis

中国暴雨大多数是由台风天气形势所造成的, 24h降雨 50 mm 就成为暴雨,一个台风登陆通常 24h 内可下几百毫米的暴雨,甚至可以达到上千毫米的特 大暴雨。暴雨是中国东北地区主要的灾害性天气之 一,大范围持续性暴雨和突发性暴雨均会造成严重的 洪涝灾害,淹没城镇房屋,危害人民的生命和财产安 全^[1]。用雷达回波(Reflectivity)来估测登陆台风的 降水量和降水分布是一项研究发展多年的技术,该技 术的关键在于建立雷达雨量与实际雨量间的关系。

风廓线雷达开始于 20 世纪 80 年代, 是高空气象 探测系统的重要组成部分。风廓线雷达最初研制的目 的是为了探测晴空大气风场。大量研究表明,UHF、 VHF、P 波段的风廓线雷达对降水信息也十分敏感, 因此利用风廓线雷达探测资料实现对降水天气的监 测具有重要研究价值[2-4]。风廓线雷达早在美国、英 国、日本等国家已进行了业务组网全面应用,国内学 者对风廓线雷达探空资料在科学研究和业务应用方 面前期也开展了大量工作,并在诸多领域都取得了很 大进步。国内应用风廓线雷达在探测降水方面已开展 了一些具体工作,主要是应用水平风廓线分析暖平 流、冷平流、风切变、高低空急流和风场辐合辐散等 特征[5-6]。风廓线雷达径向速度大小及厚度与降水量 的变化存在一定的关系;风廓线雷达信噪比的变化与 降水的开始、结束及降水的变化有明显的对应关系^[7]; 风廓线雷达速度谱宽、垂直速度、信噪比等资料结合 分析可对降水过程进行估测;大气湿度与折射率结构 常数之间存在着一定关系[8-9]。张旭斌等[10]在质控及 其资料同化应用方面做了实验对比研究,通过准确描 述模式初始场特征,最终对强降水发生的强度和位置 作出精确预报。邹德龙等^[11]指出了风廓线雷达能够探测出强降水发生前空中冷暖平流变化导致大气层结 不稳定,风廓线雷达测到地面风向转变,对降水预报 有一定的指示意义。张京英、郑石、Bob L W 等^[12-14] 应用风廓线雷达资料对暴雨等强对流天气进行了分 析,指出了强降水前,在垂直风场结构上可以清晰展 示高低空急流脉动耦合,对强降水的发生有着很好的 预示作用。体现出了风廓线雷达在监测中小尺度强对 流天气独特的优越性和指导预报应用价值。

1 资料与方法

1.1 风廓线雷达资料

文中主要使用的探测设备为 TWP16 对流层风廓 线雷达(探测方式为五波束),北京敏视达雷达有限 公司生产,位于辽宁省盘锦市盘山区国家基本站,地 处盆地,南面临海。利用辽宁 SWAN 系统及盘锦高 频地波雷达和营口双偏振雷达资料进行辅助分析。 TWP16 风廓线雷达参数见表 1。应用 TWP16 对流层 风廓线雷达风廓线、径向速度、信噪比、折射率结构 常数、谱宽等资料对 2019 年 8 月 10—15 日"利奇马" 台风在辽宁省盘锦市登陆引发的强降水天气过程进 行详细分析。

1.2 高频地波雷达资料

文中所用 OS081H 型高频地波雷达为中船重工 鹏力南京大气海洋信息系统有限公司生产, 探测设备 布设在盘锦市大洼区红海滩国家 5A 级风景区, 位于 渤海湾东北区域。探测资料为风场、流场、浪场, 有 表 1 TWP16 型风廓线雷达高/低模式相关参数 Tab.1 Relevant parameters related to TWP16 wind profile radar high/low mode

主要参数名称	高模式	低模式
最大探测高度/m	16 800	5 070
第一距离门底高度/m	2 070	150
距离门数目	140	41
距离门高度分辨率/m	120	120
每个距离门可能的速度值个数	256	256
最大径向速度/(m·s ⁻¹)	25.5	25.7
径向谱分辨率/(m·s ⁻¹)	0.199	0.2
最大径向速度/(m·s ⁻¹)	23.2	23.2
径向谱分辨率/(m·s ⁻¹)	0.182	0.18

效半径在 150 km 左右,扇形扫描 120°范围,探测周 期为 10 min,见表 2。

1.3 双偏振雷达资料

文中所用 CINRAD/SA-D 双偏振雷达为北京敏视 达雷达有限公司生产, 探测设备位于辽宁省营口市大 石桥蟠龙山上。营口双偏振雷达(技术指标见表 3) 是东北首部业务升级的双偏振天气雷达,于 2019 年 6 月开始业务试运行。

表 2 盘锦高频地波雷达相关参数

Tab.2 Relevant parameters related to high frequency ground wave radar in Panjin

主要参数名称	盘锦市	
产品资料	径向风场、流场、浪场	
观测站海拔高度/m	2	
观测周期/min	10	

1.4 天气形势及台风系统演变分析

利用 Micaps 高空地面资料和卫星云图演变分析,台风"利奇马"对辽宁的影响共分为3个阶段: 第一阶段是从10日8时至12日8时,辽宁主要受台风北上外围云系影响;第二阶段从12日8时至13日 8时,台风"利奇马"在莱州湾回旋少动;第三阶段从13日8时至15日6时,辽宁受台风减弱为热带低压与西风槽结合影响。台风"利奇马"于13日11时停止编号,但其残涡依然影响辽宁,又与西风槽结合, 给辽宁又带来一次降水集中时段。14日20时,500 hPa 西风槽东移南下,不断有冷空气侵入到残涡中,干空 气不断卷入,使深对流减弱,地面有残涡在渤海中回 旋,又有一部分分裂北上到辽宁吉林中部。又由于台 风"罗燕"的影响,辽宁南部水汽被阻断,吉林、辽 宁中部水汽得到补充,逐渐向锋面系统转变。

表 3 营口 CINRAD/SA-D 双偏振雷达主要技术指标 Tab.3 Main technical indicators of CINRAD/SA-D dual polarization radar in Yingkou

主要参数名称	技术指标
雷达作用距离	反射率: 1~460 km, 径向速度和谱宽:
	1~230 km, 双偏振量: 1~230 km
发射频率变化	2.7~3.0 GHz
峰值输出功率	≥0.65 MW
平均输出功率	300~1800 W
脉冲宽度	1.57, 4.70 μs
距离分辨率	250 m
脉冲重复频率(PRF)	宽脉冲: 300~452 Hz, 窄脉 300~1304 Hz
天线形式、尺寸	S 波段中心馈电抛物面天线、8.53/m
波束宽度	1.0°针状波束
极化形式	线性水平极化/垂直极化
动态范围	≥95 dB
接收机噪声系数	$\leq 3 \text{ dB}$

1.5 降水实况分析

受台风"利奇马"和西风带冷空气共同影响,8 月 10 日 20 时至 15 日 20 时,辽宁全省大部分地区累 计降水量达 100~250 mm,平均降水量达 126.5 mm, 突破 1951 年以来同期极值。此次降雨过程持续时间 长,累计雨量大,影响范围广,风雨齐上阵。2019 年 8 月 10 日 20 时—8 月 15 日 20 时辽宁省雨情分布 如图 1 所示,全省降水统计数据 1561 个站中,大于 250 mm 的站数为 35 个,100~249.9 mm 站数 1028 个, 50~99.9 mm 站数 390 个,25~49.9 mm 站数 71 个,10~ 24.9 mm 站数 17 个。从影响范围广上来看,全省 14 个市均出暴雨到大暴雨,出现暴雨以上站数占总站数 的 91%,大暴雨以上站数占总站数的 65%。此次台风 影响强降水过程中,平均降水量最大值出现在盘锦地 区,为 162.3 mm。



图 1 2019 年 8 月 10 日 20:00—8 月 15 日 20:00 辽宁省雨情分布 Fig.1 Rainfall distribution in Liaoning Province from 20:00 on August 10 to 20:00 on August 15, 2019

从辽宁 SWAN 系统辅助分析可知,本次台风引起的强降水在盘锦地区主要有 3 个时段,降水主要时段为 8 月 10 日 12:00—15 日 04:00 时。8 月 10 日 12:00,强降水前 6 h,雷达组网基本反射率(强度)如图 2a 所示。可以看出,本次强降水开始阶段强回波区由西南至东北方向移动,逐渐进入辽宁省界,影响锦州,即将到达盘锦地区,均值为 40~45 dBz。8

月 12 日 20:00—13 日 10:00,为本次强降水发展阶段, 也是降水极大值时段。从 8 月 13 日 09:00 (见图 2b) 雷达组网基本反射率可以看出,强回波区域经过 45 h 的移动和消散,到 13 日 09:00 左右,强回波数值极 大值达到 50 dBz,标志着盘锦地区暴雨最强点的到 来。8 月 15 日 23:30 分 (见图 2c),可以清晰看出主 要为零散微弱回波,降水完全结束。



图 2 2019 年 8 月 11 日 12:00 (a)、8 月 13 日 09:00 (b)、8 月 15 日 23:30 (c)组合基本反射率 Fig.2 Basic reflectance at 12:00 on August 11 (a), 9:00 on August 13(b), and 23:30 on August 15(c), 2019 respectively

2 风廓线雷达特征分析

2.1 水平风廓线

2019 年 8 月 10 日 12:00—8 月 11 日 02:00,盘锦 地区水平风逐时高度分布如图 3 所示。可以看出,降 水前 6 h,近地面到高空主要由西南风控制,风速随 高度的增高而增大。近地面到 150~750 m,平均风速 为 7 m/s;5000 m 高度层平均风速达到 14 m/s; 5~12 km高度层,随时间推移,风速不断增大,最大 值达到 35 m/s。强降水前期长时间深厚的西南气流积 累为降水提供了充足的水汽和能量,具有明显的中尺 度系统影响特征。雷达在 8 月 10 日 19:00—8 月 11 日 02:00 探测的风廓线上,近地面至 1 km 高度层存 在风数据缺测,出现空洞,致使风廓线部分杂乱不完 整,这主要是由于台风登陆对微弱的风廓线雷达回波 干扰影响所造成。

2019 年 8 月 10 日 18:00 时,风速和风向随高度 的变化曲线如图 4 所示。可以看出,水平风场资料的







图 4 2019 年 8 月 10 日 18:00 盘锦地区风速、风向随高度变化的曲线 Fig.4 Curve of (a) wind speed and (b) wind direction with altitude in Panjin at 18:00 on August 10, 2019

有效获取高度达到 13.5 km, 从近地面到 6~13.5 km 高度层,随高度的增加,风度不断变大,最大值为 38 m/s,达到了高空急流的标准。0~6 km 高度层,随 高度的增加,风速变化稍有杂乱,不规律;6~13.5 km 高度层,风速随高度的增加变化呈规律的正比关系, 这是由于台风临近登陆,对大气底层影响较大,高层 影响较小。由图 4 还可以看出, 500~3 km 高度层, 风向随高度变化呈现顺转关系; 3~4 km 高度层,风 向随高度变化呈现逆转关系; 4~4.5 km 高度层, 风向 随高度变化再次呈现顺转关系; 4.5~5 km 高度层, 风 向随高度变化再次呈现逆转关系; 4.5~5 km 高度层, 风向随高度变化第三次呈现顺转关系; 4.5~5 km 高度 层,风向随高度变化第三次呈现逆转关系。同一时刻 随着高度增加,风向依次出现顺转逆转、二次顺转逆 转、三次顺转逆转。结合同一等压面上的温度平流计 算公式:

$$-V \cdot \Delta T \approx \frac{\overline{p}f}{R_{\rm d}\Delta p} V_1 V_2 \sin(\theta_1 \theta_2) \tag{1}$$

式中: f 为科式参数, f=7.292×10⁻⁵; R_d 为空气气 体常数, R_d=8.314。可以得出风向随高度顺转变化产 生暖平流,逆转变化产生冷平流,与图4变化一致。 3~7 km 出现了两条明显 S 型曲线,表明在大气层中 冷暖层相互叠加,对流效应明显,呈现多层平流结构。 底层有冷平流叠加在暖平流上,大气层结趋于不稳定, 并且风速随高度增高逐渐增大,底层辐合,高层辐散, 有利于对流天气的形成,为强降水产生提供了充足能 量。风廓线雷达可以准确清晰展示出水平风廓线资料 随时间在大气各个高度层的变化情况,其风场资料高 时空分辨率的特点是其他类型雷达无法比拟的。

2.2 径向速度

在降水情况下,风廓线雷达探测到的径向速度为 垂直方向气流运动速度与粒子运动速度之和,向下为 正,向上为负。垂直方向上风速绝对值越大,反映出 不同高度层上水汽和热交换的程度越剧烈,因此在一 定程度上可以反映对流活动的强弱。

2019 年 8 月 10 日 12:00—8 月 11 日 02:00,盘锦 强降水开始阶段径向速度随时间的变化如图 5 所示。 该径向速度未作落速订正,代表了空气自身垂直运动 和降水粒子引起下沉运动的加合后产品。从图 5 可以 看出,在降水前 6 h,从低层到高空为上升的暖湿西 南气流。从 18:30 开始,4~8 km 开始出现明显下沉气 流,为 6 m/s,大气层 5 km 范围内主要为下沉气流, 此时强降水开始;8~12 km 高空,气流继续被抬升, 对流继续加强。

2019 年 8 月 12 日 20:00—13 日 10:00,盘锦强降 水发展阶段径向速度随时间的变化如图 6 所示。可以 看出,本次强降水最大极值区域在 5 km 高度层。径 向速度存在一个明显的分界线,5 km 以下径向速度 为 8 m/s,极值为 9 m/s;5 km 以上径向速度均值为 0 m/s。下沉气流主要集中在 5 km 以下,强降水主要 由 5 km 高度对流层降水云系引起,5 km 以上以微弱 上升气流为主。径向速度大于 9 m/s 的垂直速度发生 在 12 日 20:00—13 日 10:00,并且下沉气流最大值出



图 5 2019 年 8 月 10 日 12:00—8 月 11 日 02:00 盘锦地区强降水开始阶段径向速度随时间变化 Fig.5 The radial velocity at he beginning of heavy precipitation in Panjin changes with time from 12:00 on August 10 to 02:00 on August 11, 2019



图 6 2019年8月12日20:00—15日10:00 盈铈地区强犀水发展所按任问速度随时问受化 Fig.6 The radial velocity development stage of Panjin area changes with time from 20:00-12 August 10 to 10:00—13 August 10, 2019

现在 13 日 09:00, 达到 11.2 m/s。这与强降水最大时 段相吻合,即从 12 日 20:00 强降水开展,在 13 日 00:00 左右,降雨强度达到极值,13 日 10:00 强降水结束。 由以上分析可知,风廓线雷达径向速度探测到约 9 m/s 的垂直下沉速度反映了强降水的开始和结束时 间,且垂直下沉速度数值越大,降水越强。风廓线雷 达探测到的径向速度是空气中自身垂直气流下沉速 度与降水时降水粒子下落速度共同造成的,从一定程 度上也反映了降水粒子的密度,可进一步根据径向速 度的大小来判断是否有强降水发生。

2019 年 8 月 15 日 00:00—14:00,盘锦地区强降 水结束阶段径向速度随时间的变化如图 7 所示。从图 7 可以清晰看出,8月 15 日 03:30 强降水基本结束。 地面到 5 km 大气层范围内,径向速度约为 1 m/s,但 其降雨粒子真实下落速度应该大于 1 m/s,空中还有 微弱降水存在。直到 8 月 15 日 23:30,径向速度为-0.2 m/s,接近于 0,降水完全停止。

2.3 信号噪声比

2019 年 8 月 10 日 12:00—8 月 11 日 02:00, 盘锦 地区强降水开始阶段信噪比随时间变化如图 8 所示。 可以看出,强降水前 6 h, 10 日 12:00—18:00, SNR 数值在 25 dB 左右,空中一直存在着微弱降雨过程。 10 日 18:30, SNR 数值开始不断变大,预示着强降水 即将到来。

2019 年 8 月 12 日 20:00—13 日 10:00,强降水发 展阶段信噪比随时间的变化如图 9 所示。可以看出, SNR 数值 55 dB 的出现标志着此次强降水的极大值 区域。在 13 日 09:00 出现 70 dB SNR 极大值,这与 前面分析的降水最强时刻及径向速度出现极大值时 间完全吻合,有着较好的对应关系。SNR 数值 55 dB 的出现对应了此次降雨过程中最强降水时段的开始 与结束,SNR 强度与降水强度有着密切的对应关系。

2019 年 8 月 15 日 00:00—14:00, 盘锦地区强降 水结束阶段信噪比随时间的变化如图 10 所示。从图







图 8 2019 年 8 月 10 日 12:00—8 月 11 日 02:00 盘锦地区强降水开始阶段信噪比随时间变化 Fig.8 The signal-to-noise ratio at the beginning of heavy precipitation in Panjin changes with time from 12:00 on August 10 to 02:00 on August 11, 2019





10 可以清晰看出, 15 日 03:30 左右,强降雨过程基本结束。SNR 数值由 50 dB 左右突降 20 dB 左右,空 气中还存在着微弱的降水。直到 15 日 23:30 左右, 降水完全停止。

2.4 折射率结构常数

2019 年 8 月 10 日 12:00—8 月 11 日 02:00, 盘锦 地区强降水开始阶段折射率结构常数随时间的变化 如图 11 所示。 C_n^2 是反映大气湍流状况的常数,它与 大气的湿度有关,通过平均的温度和气压来计算,是 大气光学湍流强度的一个重要参量,可以看作是多普 勒天气雷达不同时刻 RHI 回波特征。由图 11 可知, 强降水前 6 h, 8 月 11 日 12:00—18:00,在5 km 高度层 以下, C_n^2 维持在 1.0×10^{-13} 以上;在 5~12 km 高度层, C_n^2 维持在 1.0×10^{-16} 左右,并且随着高度的增加而逐

渐变小。

2019 年 8 月 12 日 20:00—13 日 10:00, 强降水发 展阶段折射率结构常数随时间的变化如图 12 所示。 可以看出, 8 月 12:20 时—13 日 10:00, C_n^2 大于 1.0×10^{-10} 区域标志着此次强降水的极大值区域,并且 在 10 km 高度层以下,随着高度的降低, C_n^2 不断增 大。由以上分析可以判断, C_n^2 为 1.0×10^{-10} 对应了最 强降水时段的开始和结束, C_n^2 最大值出现的探测高 度和持续时间与降水有着密切关系。

2019 年 8 月 15 日 00:00—14:00,盘锦地区强降 水结束阶段折射率结构常数随时间的变化如图 13 所 示。从图 13 可以清晰看出,15 日 03:30 左右,强降 雨过程基本结束。 C_n^2 数值突降至 1.0×10^{-16} 左右,空 气中还存在较多的水汽。直到 15 日 23 时 30 分,降 水停止。



图 10 2019 年 8 月 15 日 00:00—14:00 盘锦地区强降水结束阶段信噪比随时间变化 Fig.10 The signal-to-noise ratio at the end of heavy precipitation in Panjin changes with time from 00: 00:00 to 14:00on August 12, 2019



图 11 2019 年 8 月 10 日 12:00—8 月 11 日 02:00 盘锦地区强降水开始阶段折射率结构常数随时间变化 Fig.11 The refractive index structure constant at the beginning of heavy precipitation in Panjin area changes with time from 12:00 on August 10 to 02:00 on August 11, 2019



图 12 2019 年 8 月 12 日 20:00 时—13 日 10:00 强降水发展阶段折射率结构常数随时间变化 Fig.12 The refractive index structure constant during the development stage of heavy precipitation changes with time from 20:00 on August 12 to 10:00 August 13, 2019



图 13 2019 年 8 月 15 日 00:00—14:00 盘锦地区强降水结束阶段折射率结构常数随时间变化 Fig.13 The refractive index structure constant at the end of heavy precipitation in Panjin area changes with time from 00:00 to 14:00 on August 15, 2019

2.5 速度谱宽

2019 年 8 月 10 日 12:00—8 月 11 日 02:00,盘锦 地区强降水开始阶段速度谱宽随时间的变化如图 14 所示。可以看出,8月 10 日 18:30 开始,5 km 高度 层以下,速度谱宽均值在 2.5 m/s 以上;5 km 高度层 以上,速度谱宽接近 0 m/s 左右。5 km 大气高度层内, 速度谱宽数值不断增大,预示着强降水即将开始。

2019 年 8 月 15 日 00:00—14:00,盘锦地区强降 水结束阶段速度谱宽随时间的变化如图 15 所示。从 图 15 可以清晰地看出,15 日 03:30 左右,速度谱宽 由 2.5 m/s 突降至 0 m/s 左右,强降水过程基本结束。 降雨不同高度层内的速度谱宽与其降雨量存在着显 著的线性关系,即降雨强度越强,速度谱宽数值越大。 因此,利用速度谱宽的变化趋势,可以得到降水强的 变化趋势。在强降水过程时段,速度谱宽与降雨强度 存在正比的线性关系,但是近地面 300 m 内,两者的 相关性不明显,相关性很差。这是由于近地面地物杂 波的影响与干扰导致,速度谱宽对速度差值十分敏 感,即便微弱的地物杂波,对其都有很大的影响,所 以在近地面区域会显示相关性变弱或看起来不具相 关性的特点^[15-17]。

2.6 多要素资料拟合分析

2019 年 8 月 12 日 06:00 盘锦地区强降水多要素 资料拟合如图 16 所示。将同一时刻水平风廓线、垂 直速度、速度谱宽、信噪比、折射率结构常数多种资 料拟合在一起进行验证分析。雷达采用全模式 5 波束 观测。从图 16 可知,在 5 km 大气高度层以下,水平 风廓线资料出现顺转辐合上升,聚集大量的水汽和能 量,垂直速度均在 5 m/s 以上,速度谱宽均值在 2.5 m/s



图 14 2019 年 8 月 10 日 12:00—8 月 11 日 02:00 盘锦地区强降水开始阶段速度谱宽随时间变化 Fig.14 The velocity spectrum width at the beginning of heavy precipitation in Panjin area changes with time from 12:00 on August 10 to 02:00 on August 11, 2019



图 15 2019 年 8 月 15 日 00:00—14:00 盘锦地区强降水结束阶段速度谱宽随时间变化 Fig.15 TheVelocity spectrum width at the end of heavy precipitation in Panjin area changes with time from 00:00 to 14:00 on August 15, 2019





以上, SNR 均值在 50 dB 以上, C_n^2 均值在 1.0×10^{-13} 以上。从图像可以直观看出,风廓线雷达各资料有着 较好的对应关系,可彼此互为验证。

3 高频地波雷达与双偏振雷达水平 风场资料

高频地波雷达是利用垂直极化高频电磁波沿高 导电率海水表面的绕射特性,实现对海洋环境气象要 素产品进行监测,主要资料有风场、流场、浪场。程 攀等^[18]利用高频地波雷达对风场资料应用分析,结果 表明,在风速<6 m/s、6~10 m/s 和>10 m/s 的不同风 力条件下,高波地波雷达都有很好的可用性,作为大 风过程分析、大风预警和强降水过程辅助研究是很好 资料。文中给出了高频地波雷达所探测到的海平面风 场,探测范围在数据有效半径(150 km)之内 80 km 左右,距海平面高度 10 m 左右,平均风速为 8 m/s。 说明在降水过程发展强盛时期,海平面上主导的西南 风场输送大量暖湿气流,在盘锦汇聚,受夏季城市热 力抬升作用,为降水过程提供能量。

高频地波雷达风场信息可用来印证风场输送情况,从垂直和水平两个角度以及从高空和近地面两个 角度,得到同为西南气流为强降水发生提供水汽能量 的结论。图 17 为 2019 年 8 月 12 日 12:00 时盘锦地 区强降水前 6 h高频地波雷达海平面上 10 h左右水平 风场资料,受"利奇马"台风登陆影响,从图 17 上 可以看出,强降水前期,海面大风主要为西南风控制, 50 km范围内风力均值在 8 m/s。前期充足的西南风 场气流、海水浪场涌动、流场滚动为强降水的发生聚 集了大量的水汽能量,这与风廓线雷达水平风廓线资 料(图 3)分析结论完全一致。高频地波雷达水平风 场资料只能展示半径 150 km、海平面上空 10 m 高度 层内、120°扇形范围的风场实况,风场资料在探测范 围和时空分辨率等多方面存在局限性。



图 17 2019 年 8 月 12 日 12:00 盘锦地区强降水风廓线资料 Fig.17 The heavy precipitation wind profile data in Panjin area at 12:00 August 12, 2019

2019 年 8 月 11 日 18:00 营口双偏振雷达水平风 廓线资料如图 18 所示。结合多个不同时刻、不同仰 角双偏振雷达风场资料与上述风廓线产品资料联合 分析可看出,1 km 以下近地面为东北风,1~3 km 为 东南风,3~5 km 以上为南风,5 km 以上为西南风。 风向随高度呈顺时针旋转,顺转产生暖平流,底层到 高空风场呈辐合的趋势。在 8 km 以上,风向出现微 弱的逆时趋势,逆转产生冷平流,高空风场呈微弱的 辐散趋势。从零风速线到低层 1~2 km 处存在明显的 东南大风速区,中心风速为 20 m/s^[19-20]。双偏振雷达 某一时刻水平风场资料获取同单偏振雷达获取风场 资料原理一样,是在假设大气风场线性均匀的状态 下,通过线性拟合运算得到,其单一时刻的风场资料 只能反映出大气中真实风场实况的趋势,一般需要与 多个时刻风场资料或径向速度资料结合分析,独立应 用风场资料不能给出定性结论需进一步验证。

2019 年 8 月 11 日 18:00 营口双偏振雷达径向速 度资料如图 19 所示。盘锦位于营口北偏西方向 130 km







图 19 2019 年 8 月 11 日 18:00 营口双偏振雷达径向速度资料 Fig.19 The radial velocity data of Yingkou dual polarization radar at 18:00 on August 11, 2019

左右,由图 19 可看出,在以雷达站为中心点,探测 半径为 230 km 的等距离圆内,呈现出了明显的 S 形 曲线。由径向速度资料可知,从大气低空到高空存在 底层风向顺转、高层逆转,高层风向逆转产生的冷平 流叠加在底层风向顺转产生的暖平流之上,大气层结 趋于不稳定,有利于对流性降水的发生。从径向速度 图的面积上看,底层负速度面积大于正速度面积,利 于气流辐合上升,高层正速度面积大于负速度面积, 利于辐散下降。双偏振雷达径向速度的分析结果可对 其风场资料的分析结果进行进一步验证,两者相互结 合分析可对降水进行预测。风廓线雷达可以独立应用 水平风廓线资料得到风廓线随时间在各大气高度层 的精准变化趋势,进而独立应用高时空分辨率的风廓 线资料判断是否有降水发生^[21]。

4 结论

1)风廓线雷达廓线资料可以展示大气水平运作 在垂直方向的细微结构,清晰直观地反映出降水过程 中风场垂直结构和变化特征,直观反映强降水开始前 至降水结束后大气的微观风场变化,对强降水预报预 警有重要意义和使用价值。定性判断和定量分析风 向、风速随时间和空间的不连续变化,可以掌握天气 系统的活动。在强降水阶段,大气对流上升和下沉运 动严重不规律,探测资料很难满足局地均匀、各向湍 流同性的条件,在一定程度上会影响回波信号,空气 中存在大量的强降水粒子,也会降低风数据的获取 率。当降水减弱时,湍流运动逐渐恢复稳定,风数据 获取的峰值时间稍有偏差,这是由于降水最强阶段数 据获取率较低所造成。因此,低的风数据获取率在某 种意义上对强降水也存在一定的指示意义。

2)风廓线雷达径向速度、信噪比(SNR)、折射 率结构常数(C_n^2)能清晰反映此次强降水开始、结 束、降水持续时间和强度。9 m/s 的径向速度对应了 强降水的开始和结束,垂直下沉速度越大,降水越强。 55 dB 信噪比的出现和结束对应了强降水的始末时 间,最大信噪比 70 dB 的出现对应了降水强度最大极 值点。折射率结构常数 1.0×10^{-10} 的出现和结束反映 了降水的始末时间,最大值 1.0×10^{-10} 出现的最大探 测高度和持续时间与降水有密切的关系。降雨不同高 度层内的速度谱宽与其降雨量存在着显著的线性关 系,即降雨强度越强,速度谱宽数值越大,反之利用 速度谱宽的变化趋势可以得到降水强的变化趋势。

3)将风廓线雷达多种二次产品进行拟合相互比 对分析,均可得到高度一致分析结果。在5km大气 高度层以下,水平风廓线资料出现顺转辐合上升聚集 大量的水汽和能量,垂直速度数值均在 5 m/s 以上,速度谱宽均值在 2.5 m/s 以上,SNR 均值在 50 dB 以上, C_n^2 均值在 1.0×10^{-13} 以上。从图像可以直观看出风廓线雷达各资料有着较好的对应关系,可彼此互为验证。

4)通过高频地波雷达和双偏振雷达水平风廓线 资料进行辅助分析,均可得到与风廓线雷达风场分析 一致结论,验证了 TWP16 风廓线雷达高时空分辨率 独特的优势,可从不同角度探测中小尺度天气系统与 暴雨等强对流天气。

参考文献:

- 王秀娟,姜忠宝,马晓华,等. 2018 年吉林省一次暴雨 过程成因分析[J]. 气象与环境学报, 2020, 36(2): 1-8.
 WANG Xiu-juan, JIANG Zhong-bao, MA Xiao-hua, et al. Causes analysis of heavy rainfall in 2018 in Jilin province[J]. Journal of meteorology and environment, 2020, 36(2): 1-8.
- [2] 许敏,张瑜,张绍恢.风廓线雷达资料在冀中一次强降水天气预报中的应用[J].干旱气象,2016,34(5): 898-905.

XU Min, ZHANG Yu, ZHANG Shao-hui. Application of wind profiler radar data in a heavy precipitation process in central Hebei Province[J]. Journal of arid meteorology, 2016, 34(5): 898-905.

- [3] WAKASUGI K, MIZUTANI A, MATSUO M, et al. A direct method for deriving drop-size distribution and vertical air velocities from VHF Doppler radar spectra[J]. Journal of atmospheric and oceanic technology, 1986, 3(4): 623-629.
- [4] FUKAO S, WAKASUGI K, SATO T, et al. Direct measurement of air and precipitation particle motion by very high frequency Doppler radar[J]. Nature, 1985, 316 (6030): 712-714.
- [5] 何平.相控阵风廓线雷达[M].北京:气象出版社, 2006.

HE Ping. Phased array wind profile radar[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006.

[6] 刘淑媛,郑永光,陶祖钰.利用风廓线雷达资料分析低空急流的脉动与暴雨关系[J].热带气象学报,2003, 19(3): 285-290.

LIU Shu-yuan, ZHENG Yong-guang, TAO Zu-yu. The analysis of the relationship between pulse of LLJ and heavy rain using wind profiler DATA[J]. Journal of tropical meteorology, 2003, 19(3): 285-290.

 [7] 古红萍,马舒庆,王迎春,等.边界层风廓线雷达资料 在北京夏季强降水天气分析中的应用[J].气象科技, 2008,36(3):300-304.
 GU Hong-ping, MA Shu-qing, WANG Ying-chun, et al. Application of airda-3000 boundary wind profile radar in analyzing summer heavy rainfall in Beijing[J]. Meteorological science and technology, 2008, 36(3): 300-304.

- [8] 王爽, 吕环宇, 郭志刚, 等. 一次强降水超级单体风暴 过程分析[J]. 气象与环境学报, 2007, 23(2): 15-20.
 WANG Shuang, LV Huan-yu, GUO Zhi-gang, et al. Analysis of a heavy precipitation supercell storm[J]. Journal of meteorology and environment, 2007, 23(2): 15-20.
- [9] 郑石, 王冠, 林中冠, 等. 1961—2013 年中国强降水特 征分析[J]. 气象与环境学报, 2018, 34(6): 102-107.
 ZHENG Shi, WANG Guan, LIN Zhong-guan, et al. Characteristics analysis of heavy precipitation in China from 1961 to 2013 [J]. Journal of meteorology and environment, 2018, 34(6): 102-107.
- [10] 张旭斌, 万齐林, 薛纪善, 等. 风廓线雷达资料质量控制及其同化应用[J]. 气象学报, 2015, 73(1): 159-176. ZHANG Xu-bin, WAN Qi-lin, XUE Ji-shan, et al. Quality control of wind profile radar data and its application to assimilation[J]. Acta meteorologica sinica, 2015, 73(1): 159-176.
- [11] 邹德龙,梁晓京,岑易峰,等. 基于风廓线雷达资料的 一次强降水天气过程分析[J]. 气象研究与应用, 2019, 40(3): 26-30.
 ZOU De-long, LIANG Xiao-jing, CEN Yi-feng, et al. Analysis of a heavy rainfall weather process based on wind profiler radar Data[J]. Journal of meteorological research and application, 2019, 40(3): 26-30.
 [12] 建克莱 漆漆油 工店住, 田季社园庭代亲日公托, 波
- [12] 张京英,漆梁波,王庆华. 用雷达风廓线产品分析一次 暴雨与高低空急流的关系[J]. 气象, 2005, 31(12): 41-45.
 ZHANG Jing-ying, QI Liang-bo, WANG Qing-hua.

Analysis of relationship between heavy rain and jetstream with radar VWP Product[J]. Meteorological monthly, 2005, 31(12): 41-45.

[13] 郑石,黄兴友,李艳芳.一次短时暴雨 WP-3000 边界层
 风廓线雷达回波分析[J]. 气象与环境学报, 2011, 27(3):
 6-11.

ZHENG Shi, HUANG Xing-you, LI Yan-fang. Analysis of echo characteristics of WP-3000 boundary wind profile radar from a short period heavy rain[J]. Journal of meteorology and environment, 2011, 27(3): 6-11.

- [14] WEBER B L, WUERTZ D B. Comparison of rawinsonde and wind profiler radar measurements[J]. Journal of atmospheric and oceanic technology, 1990, 7(1): 157-174.
- [15] 王文波,高晓梅,李晓利,等.一次雨雪天气过程的风 廓线雷达特征[J]. 干旱气象, 2020, 38(1): 109-116.
 WANG Wen-bo, GAO Xiao-mei, LI Xiao-li, et al. Analysis of wind profile radar characteristics during a rain and snow weather Process[J]. Journal of arid meteorology, 2020, 38(1): 109-116.
- [16] 许敏,张瑜,张绍恢.风廓线雷达资料在冀中一次强降水天气预报中的应用[J].干旱气象,2016,34(5):898-905.

XU Min, ZHANG Yu, ZHANG Shao-hui. Application of wind profiler radar data in a heavy precipitation process in central Hebei Province[J]. Journal of arid meteorology, 2016, 34(5): 898-905.

- [17] 冯晋勤,张深寿,吴陈锋,等.双偏振雷达产品在福建 强对流天气过程中的应用分析[J]. 气象, 2018, 44(12): 1565-1574.
 FENG Jin-qin, ZHANG Shen-shou, WU Chen-feng, et al. Application of dual polarization weather radar products to severe convective weather in Fujian[J]. Meteorological monthly, 2018, 44(12): 1565-1574.
- [18] 程攀,孙虹雨,陈传雷,等.高频地波雷达在辽宁省海 上大风预警中的应用研究[J]. 气象与环境学报, 2017, 33(5): 25-34.
 CHENG Pan, SUN Hong-yu, CHEN Chuan-lei, et al. Application of high-frequency ground wave radar in early warning of sea gale in Liaoning province[J]. Journal of meteorology and environment, 2017, 33(5): 25-34.
- [19] 陈超, 胡志群, 胡胜, 等. CINRAD-SA 双偏振雷达资料

在降水估测中的应用初探[J]. 气象, 2019, 45(1): 113-125.

CHEN Chao, HU Zhi-qun, HU Sheng, et al. Preliminary application of CINRAD-SA dual polarization radar data in rainfall Estimation[J]. Meteorological monthly, 2019, 45(1): 113-125.

- [20] 杨磊, 贺宏兵,杨波,等. 基于 S 波段双线偏振天气雷达的降水粒子相态识别[J]. 气象与环境学报, 2019, 35(4): 127-132.
 YANG Lei, HE Hong-bing, YANG Bo, et al. Identification of hydrometeors based on S-band dual-polarimetric radar measurement[J]. Journal of meteorology and environment, 2019, 35(4): 127-132.
- [21] 陈楠, 胡明宝, 徐芬, 等. 一次降雨过程风廓线雷达回 波特征[J]. 气象与环境学报, 2012, 28(5): 19-24.
 CHEN Nan, HU Ming-bao, XU Fen, et al. The characteristics of wind profile radar echo in a rainfall process[J].
 Journal of meteorology and environment, 2012, 28(5): 19-24.