

# 高山雷达VWP产品在暴雨预报中的应用研究

## ——以丽江市为例

张崇莉\*, 秦香婷, 和丽云, 董自香, 木丽赞

云南省丽江市气象局, 云南 丽江

收稿日期: 2023年2月22日; 录用日期: 2023年3月24日; 发布日期: 2023年3月31日

### 摘要

选取丽江市四个气候站6年具有代表性的暴雨观测记录、CINRAD/CC雷达观测资料, 对垂直风廓线(Vad Wind Profile, 简称: VWP)在暴雨过程中的应用特征进行了统计分析。结果表明: VWP产品在暴雨过程降水前夕的主要特征有三个方面: 1) 风向变化: 在降水前夕风向随着高度的增加顺时针旋转即暖平流是其主要特征, 还存在风的垂直切变、西南气流、风向随着高度增加逆时针旋转即冷平流等特征。2) 风速变化: 风速随着高度的增大能促使降水的发生。3) 风向风速的同时变化: 风随高度增加顺时针旋转且风速增大, 在西南气流背景下, 风速随高度增加; 风向垂直方向上有切变, 风速的增大等都有利于降水的发生。VWP产品在降水维持阶段的主要特征有: 降水的维持与暖平流、冷平流、风的垂直切变有密切关系。VWP产品在降水减弱阶段除了与暖平流、西南气流, 风切变的减弱有对应关系外, 还有以下主要特征: 一是在非冷平流系统中VWP产品的风向变为随着高度的增加逆时针旋转; 二是VWP高层风向杆的突然下降; 三是中层ND区域的出现, 当VWP图像中层开始出现ND时, 并且ND区域呈现上下扩展态势, 降水一般在短期内停止。

### 关键词

CINRAD/CC雷达, 垂直风廓线, 暴雨, 应用

# Application Research of Mountain Radar VWP Product in Forecast of Heavy Rains

## —Taking the City of Lijiang for Example

Chongli Zhang\*, Xiangting Qin, Liyun He, Zixiang Dong, Liyun Mu

Lijiang Meteorological Office of Yunnan Province, Lijiang Yunnan

Received: Feb. 22<sup>nd</sup>, 2023; accepted: Mar. 24<sup>th</sup>, 2023; published: Mar. 31<sup>st</sup>, 2023

\*第一作者。

文章引用: 张崇莉, 秦香婷, 和丽云, 董自香, 木丽赞. 高山雷达 VWP 产品在暴雨预报中的应用研究[J]. 气候变化研究快报, 2023, 12(2): 429-437. DOI: 10.12677/ccrl.2023.122045

## Abstract

The typical rainstorm observation records of four climate stations and CINRAD/CC radar observations of 6 years at Lijiang are used to make a statistical analysis of the application characteristics of the Vertical Wind Profile (VWP) in the heavy rains process. Our results show that the VWP product on the eve of precipitation in the heavy rains process has three main characteristics as follows: 1) The change of wind direction: on the eve of precipitation, the main characteristic is that the wind direction rotates clockwise with the increase of height, that is the warm advection, and there are also vertical shear of wind, southwest airflow, and counterclockwise rotation of wind direction with the increased height, that is the cold advection. 2) The change of the wind speed: the increased wind speed with height can promote the occurrence of precipitation. 3) Simultaneous change of wind direction and speed: the wind rotates clockwise and the wind speed increases with the increased height. Under the background of southwest airflow, the wind speed increases with height. In addition, the vertical shear of wind direction and the increase of wind speed are conducive to the occurrence of precipitation. There are main characteristics of VWP products in the stage of precipitation maintenance: the maintenance of precipitation is closely related to warm advection, cold advection and vertical shear of wind. In the weakening stage of precipitation, besides the corresponding relationship with the warm advection, southwest air flow and weakening of wind shear, VWP products have the following main characteristics: First, in the non cold advection system, the wind direction of VWP products turns counterclockwise with the increase of height. The second is the sudden drop of the wind rod at the high level of VWP. The third is the appearance of the ND region at the middle level. When ND begins to appear in the middle layer of VWP image, and the ND region shows a trend of expanding up and down, precipitation generally stops in a short period.

## Keywords

CINRAD/CC Radar, Vertical Wind Profile, Heavy Rains, Application

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

垂直风廓线(Vertical Wind Profile, 简称: VWP)是基于质控后的丽江雷达径向速度数据, 采用分层 VWP (Volume Velocity Processing)方法反演而来[1]。分层 VWP 方法在雷达周围降水回波分布不均匀的情况下也能提供有效的垂直风廓线, 而业务雷达系统中采用的 VAD 方法却会因通不过对称性检查而给出“ND”标识。VWP 产品是新一代天气雷达系统提供了一种导出产品, VWP 是在风场呈水平均匀分布的假设条件下得到的、反映水平风场随高度、时间变化的图象产品[2]。VWP 可实时提供测站上空高空风的分布随时间的变化, 这是常规观测手段无法做到的。罗义等[3]将雷达反演技术应用在临近预报中, 刘红艳等[4]用 VAD 方法得到不同高度的反演风场作为雷达回波的引导风场, 对不同高度上的回波进行了外推实验。王珏等[5]研究了有利于超级单体和龙卷风发生的 VWP 产品特征, 肖艳姣等[6]研究了基于多普勒天气雷达的两种垂直风廓线反演方法的对比分析, 陈鹏等[7]研究了一次暴雨过程中垂直风廓线的时间演变特征, 暴雨发生、发展过程中, 中低层强西南风风速的下传和低层切变辐合的存在对中尺度对流系统的增强有

着重要的作用；陈鹏等[8]在另一次重庆特大暴雨过程的中尺度分析中也研究了 VWP 的演变特征。唐明晖等[9]分析了一次湖北省监利县发生一次由下击暴流带来的极端大风天气过程，得出较强的低层垂直风切变是其发生的有利条件。上述研究主要集中在多普勒天气雷达资料 VWP 产品的个例分析应用，其结论对开展 VWP 产品在冰雹、暴雨等复杂天气研究、指导强对流天气实时预报业务具有重要意义。

暴雨从其发生的范围可分为区域性和局地性两种[10]。局地性暴雨因其范围小、时间短，而预报难度大；而区域性暴雨影响范围大、降水时间长，降水持续时间则不把握。大量的气象工作者将多普勒雷达资料应用在暴雨过天气程的研究中，苏爱芳等[11]利用雷达资料分析了郑州“7.20”极端暴雨天气，韦惠红等[12]利用雷达资料分析了复杂山地下引发特大暴雨的准静止 MCS 的结构特征，徐芬等[13]利用多普勒雷达速度资料分析了长江中下游地区一次春季暴雨过程，张桂莲等[14]利用雷达资料分析了“列车效应”诱发的一次河套地区致灾暴雨，这些研究取得了丰盛的研究成果。此外，滇西北高原位于青藏高原与云贵高原交界处，地形地貌复杂多样，也使该地区气象灾害呈现复杂性，极端暴雨天气时有发生，且预报难度大，所以对于暴雨过天气程的研究尤为重要，而将 VWP 产品应用在暴雨预报中的系统研究应用更是稀少。因此本文选取 6 年暴雨个例中的 VWP 产品进行统计分析，找出 VWP 产品在暴雨过程中的回波演变特征，并总结出该产品在降水前夕、降水维持和降水减弱阶段的回波特征，同时还找出 ND 资料在降水过程中的指示作用，为丽江市暴雨天气预报提供决策依据。

## 2. 资料选取

### 2.1. 暴雨实况资料

本文精心选取了 6 年(2006~2011 年)具有代表性的丽江市辖区内 4 个气候站(丽江、永胜、宁蒗、华坪)观测到的 43 次个例，作为 VWP 产品分析的资料来源。

### 2.2. 雷达回波产品资料

CINRAD/CC 型雷达是华东电子工程研究所设计、开发，安徽四创电子股份有限研制并生产，丽江已投入业务运行的新一代 C 波段全相参脉冲多普勒天气雷达。丽江新一代天气雷达安装在丽江香炉山(100°2'33"E, 26°43'40"N)上，天线高度是 3175 m，探测半径是 150 km，距离圈之间的距离是 50 km，采用 VPPI 扫描模式。文中使用的 VWP 资料是 VOL 原始资料经 RPG 处理、PUP 接收显示的二次产品中的 48 号产品。

## 3. VWP 产品在降水前夕的特征统计分析

### 3.1. 暴雨发生前风向变化与降水

对 35 个暴雨日降水前夕的 VWP 产品风向变化特征进行统计分析，发现在暴雨出现夕 VWP 产品中为 ND 的有 13 次，有风资料的有 22 次。这 22 次过程的风场资料在降水前夕具有如下特征：风向随着高度的增加顺时针旋转的有 17 次，存在风的垂直切变的有 3 次，西南气流的有 1 次，风向随着高度增加逆时针旋转的有 1 次(详见表 1)。

#### 3.1.1. ND 与降水

ND 在降水前夕 VWP 产品中一共出现了 13 次。究其原因有二：一是这些暴雨过程都出现在位于雷达探测区域边沿的华坪县和宁蒗县，这两个县距雷达测站较远，而降水云系主要从东侧、东北侧、东南侧进入雷达探测区域而影响两县，使的在降水前 VWP 产品中的主要特征是 ND(见图 1(a))；二是出现在华坪县、宁蒗县的单点性强降水，这类降水系统因持续时间短、强度强而得反演不到完整的 VWP 产品(见

图 1(b)), 使得降水前夕的 VWP 产品上的主要特征是 ND。VWP 产品在此类降水过程中的暴雨预报提前量为零, 需要结合其它雷达资料综合判断。

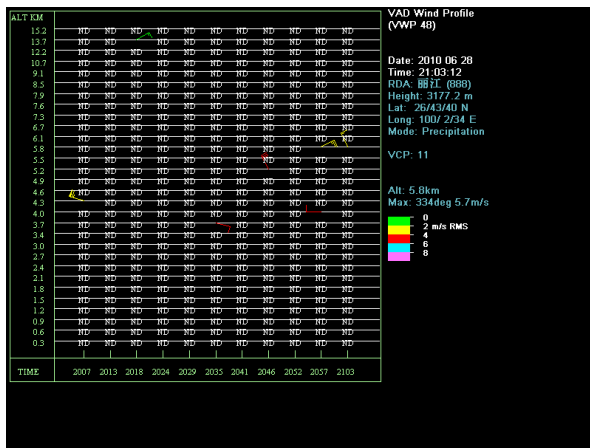
**Table 1.** Relationship between VWP wind direction change and rainstorm occurrence

**表 1.** VWP 风向变化与暴雨发生的关系

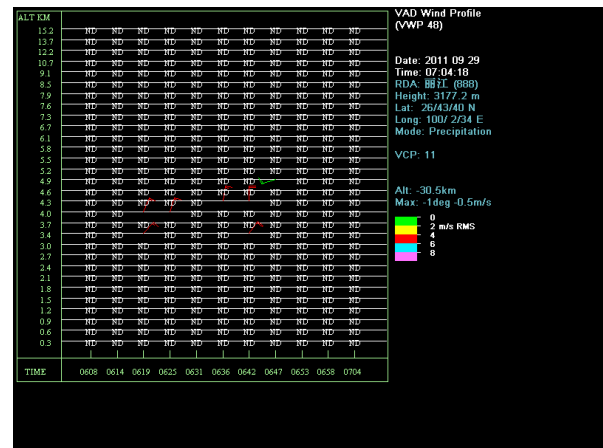
类型	出现次数	占总次数比例
顺转	17	77%
其他	3	13%
逆转	1	5%
西南气流	1	5%
合计	22	100%

### 3.1.2. 暖平流、冷平流与降水

在降水前夕 VWP 产品中出现次数最多的是风向随着高度的增加顺时针旋转, 一共出现了 17 次, 占 77%; 风向随着高度的增加逆时针旋转, 只出现了 1 次, 占 5%。当风向随着高度的增加顺时针旋转, 即反气旋环流情况下, 这时有暖平流, 当风向随着高度增加逆时针旋转, 即气旋环流情况下, 这时有冷平流发生。我们可以藉此来判断冷暖平流的层次和估计冷暖平流的大小[15]。且由  $\omega$  方程可知, 暖平流产生上升运动, 冷平流产生下沉运动[16]。从而当风随高度的增加顺时针旋转时, 有暖平流, 产生上升运动, 有利于降水的出现。顺时针旋转的暴雨预测时间提前量为 1.5~17 小时不等。但是有 9 次暴雨过程的预测时间提前量在前量为 5~17 h, 在短时临近预报中已经失去意义。35 个雨日的暴雨过程中有 17 个雨日在降水前夕是顺时针旋转, 只有 1 个雨日在降水前夕是逆时针旋转。可见在降水前冷、暖平流均可能存在, 但是暖平流出现频率要明显高于冷平流。



(a) 2010 年 6 月 28 日 21 时 03 分的 VWP



(b) 2011 年 9 月 29 日 07 时 04 分的 VWP

**Figure 1.** VWP data

**图 1.** VWP 资料

### 3.1.3. 其他

除了以上的冷暖平流、ND 与降水的关系外, 在暴雨发生前夕 VWP 产品中存在风的垂直切变的有 3 次, 其预报提前量为 1.5~2 小时; 西南气流的天气背景下发生暴雨的有 1 次。在西南暖湿气流背景下发

生的这次暴雨是一次层状云降水经过长时间累积而成的暴雨过程。其特点是小时雨量少，持续时间长。

### 3.2. 暴雨发生前夕风速变化与降水

对 22 个雨日降水前夕的 VWP 产品中风速特征进行统计(详见表 2)，风速随高度增加而增大的有 18 次，随高度的增加减小的有 1 次，随高度增加不变的有 3 次。因此风速随着高度的增大能促使降水的发生。

**Table 2.** Relationship between VWP wind speed variation and rainstorm occurrence

**表 2.** VWP 风速变化与暴雨发生的关系

降水前的 VWP 图	暴雨出现次数	占总次数比例
风速增大(包括先增后减)	18	82%
风速减小(包括先减后增)	1	4%
不变	3	14%
合计	22	100%

### 3.3. 降水前风向、风速的同时变化与降水

从表 3 可以发现，在 22 个暴雨发生前夕，风向随着高度的增加顺时针旋转且风速增大的有 14 次，从而说明风向的顺转和风速的增大同时出现有利于雨量的增大。风向随着高度的增加顺转风速不变的风有 3 次，而风向随着高度的增加顺转风速减小的风没有。风的垂直切变明显，同时风速增大的有 2 次，风速减小的有 1 次。西南气流下风速增大的有 1 次，风随高度增加逆时针旋转而风速增大的有 1 次，风速减小的没有。因此风随高度增加顺时针旋转且风速增大，上升运动加强，有利于降水的发生；在西南气流背景下，风速随高度增加，加强了能量的累计，有利于降水的出现；风向垂直方向上有切变，风速的加强同样有利于降水的发生。

## 4. 暴雨维持阶段的 VWP 特征

对 35 个暴雨日降水维持阶段的 VWP 产品进行统计分析，一共有 27 个个列出现了风资料，剩余的 8 次均为 ND。27 个个列中暖平流出现了 17 次，得出暖平流的出现与暴雨系统密切相关，其次是西南气流出现了流出现了 2 次，然后是东北气流出现了 1 次。4 次，风的垂直切变出现了 3 次，冷平流统计分析表明(详见表 4)，降水的维持与暖平流、冷平流、垂直切变区有密切的关系。

**Table 3.** Relation between wind direction and wind speed of VWP and rainstorm occurrence

**表 3.** VWP 风向、风速的变化与暴雨发生的关系

降水前的 VWP 图	暴雨出现次数	占总次数比例
顺转 + 增大	14	63%
顺转 + 不变	3	13%
切变 + 增大	2	9%
切变 + 减小	1	5%
逆转 + 增大	1	5%
西南气流 + 增大	1	5%
合计	22	100%

**Table 4.** Characteristics of VWP products in the maintenance phase  
**表 4.** VWP 产品在维持阶段的特征

类型	出现次数	占总次数比例
暖平流	18	67%
西南气流	3	11%
风切变	3	11%
冷平流	2	7%
东北气流	1	4%
合计	27	100%

### 4.1. ND

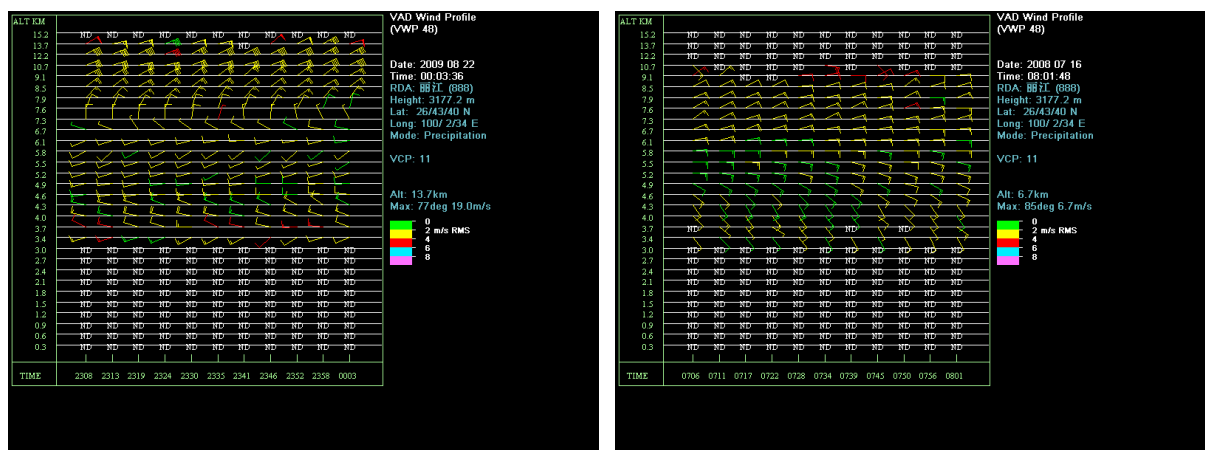
暴雨维持时段 VWP 产品中为 ND 的一共有 8 次，对应的是华坪站和宁蒗站的暴雨过程，这与两地的地理位置相关，一是都远离测站，二是海拔落差大；还有一个原因就是与 VWP 产品的算法有关。

### 4.2. 暖平流

由  $\omega$  方程可知，暖平流产生上升运动，冷平流产生下沉运动[15]，因此暖平流是维持降水的大尺度系统，但凡该特征出现，伴随风向随高度明显顺转，风速随高度增加，西南风层厚度增加，表明此段时间存在很强的暖平流，产生的上升气流也非常强，降水将维持。这些结论与文献[16]所分析个例结果相一致。2009 年 8 月 22 日发生在永胜的暴雨过程中，在暴雨维持阶段就是一个暖平流系统，风向随着高度的增加从西南气流顺时针旋转至东北气流(见图 2(a))，风速随着高度的增加而增加，有利于降水的维持，促进暴雨的发生。

### 4.3. 冷平流

冷平流背景下出现的暴雨有 2 次，风向都是从低层的东南气流随着高度的增加逆时针旋转至东北气流。这两次暴雨都出现在华坪站，与华坪站的特殊地形有关。由于受近东西向河谷的切割，华坪县形成西北高东南低的喇叭口地形特点，从图 2(b)中可以看出影响此次降水过程的风场结构是低层有东南风，中高层为东北风，西北高东南低的地形刚好形成迎风坡的动力抬升条件有助于降水的形成。



(a) 2009 年 8 月 22 日 00 时 03 分

(b) 2008 年 7 月 16 日 08 时 01 分

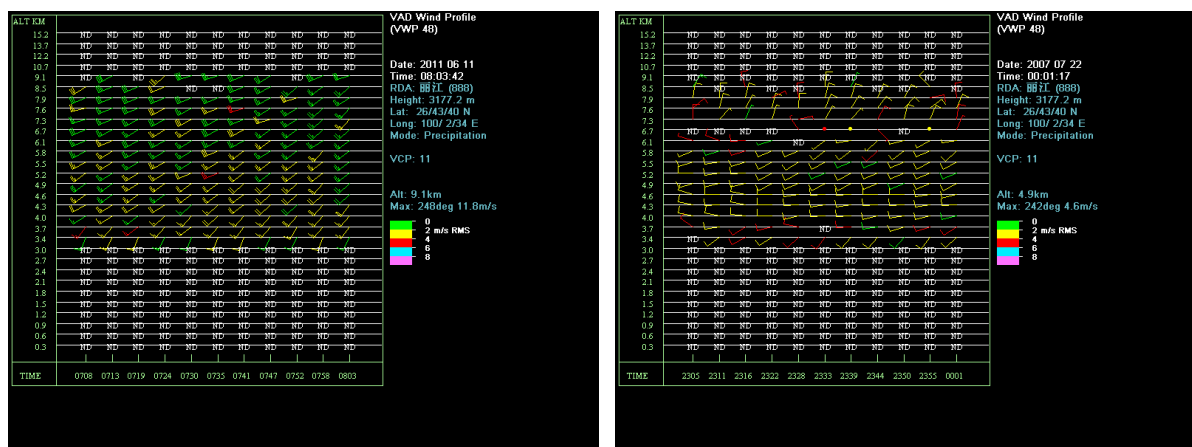
**Figure 2.** Characteristics of cold advection and warm advection VWP products

**图 2.** 冷平流、暖平流的 VWP 产品特征



#### 4.4. 西南气流

西南气流有一个长时间的水汽累积过程，为降水的维持积累了能量。西南气流越深厚，积累的能量越大，越有利于降水的维持。在西南气流背景下出现暴雨的次数有 3 次，其中有 2 次风速随着高度的增加而增大，这两次过程的小时雨量不大，当时持续时间长，说明有源源不断的水汽在补充，云体在加强，有利于降水的维持，累计达到暴雨。例如 2011 年 6 月 11 日的暴雨过程中，在降雨维持阶段的主要特征就是西南气流(见图 3(a))。



(a) 2011 年 6 月 11 日 08 时 03 分

(b) 2007 年 7 月 22 日 00 时 01 分

Figure 3. VWP products

图 3. VWP 产品

#### 4.5. 切变层

风切变简单地定义为空间任意两点之间风向和风速的突然变化。而水平风的垂直切变是水平风在垂直方向上两个不同高度点之间的风向和风速的变化。在强对流天气或锋面天气影响下的一定空间范围内，均可产生较强的风切变。切变线在我国各地区、各个季节都可出现，会引起不同程度的降水过程。水平风的垂直切变可分为风向切变和风速切变。风的垂直切变也是降水维持的一个重要特征，在 3 次切变个例中有 1 次还伴随着冰雹过程。2007 年 7 月 22 日出现在华坪站的暴雨过程中，在降水维持阶段的主要特征就是中低层西南气流到中高层东北气流的风切变，切变高度是 6.7 km (见图 3(b))。

### 5. 暴雨减弱渐止过程 VWP 特征分析

暴雨过程的减弱除了与上述暖平流、西南气流，风切变的减弱有对应关系外，还有在 VWP 图像上呈现出特有的特征。经分析研究主要有以下四中类型：

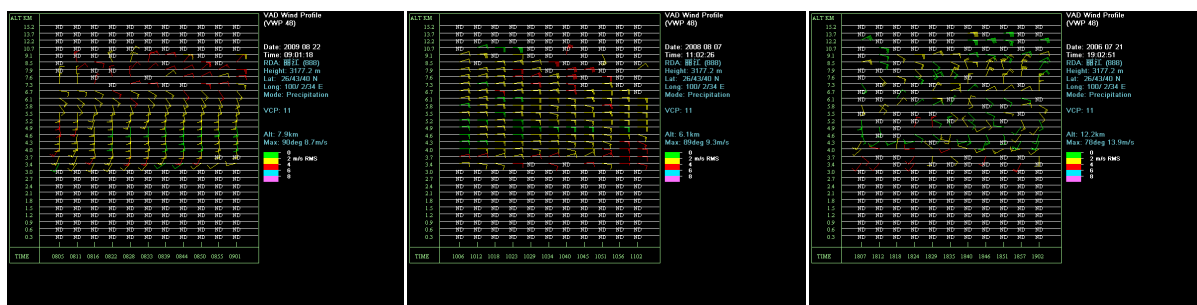
1) 在非冷平流系统中 VWP 产品中的风向变为随着高度的增加逆时针旋转时，系统开始减弱。这是因为冷平流产生下沉运动，不利于降水的维持。2009 年 8 月 22 日发生在永胜的暴雨过程中，08 时后风向从低层的西南气流逆时针旋转至中高层的东北气流时系统开始减弱，小时雨量开始减小，暴雨过程即将结束，08~10 时降水量仅为 0.2 mm (见图 4(a))。

2) VWP 高层风向杆的突然下降，即高层风资料突然被 ND 取代，也可说是水汽层在高位置的突降导致降水系统减弱。水汽输送源的突然切段或是动量无法传输是此类降水无法维持而停止的主要原因。2008 年 8 月 7 日发生在华坪站的暴雨过程中，在降水过程中 VWP 图上的主要特征是低层的东南气流随着高度的增加逆时针旋转到高层的东北气流，在降水减弱过程中有两个特点：一是冷平流减弱，二是 ND 从

高层开始往下增加(见图 4(b))。

3) 中层 ND 区域的出现, 统计分析发现, 当 VWP 图像中层开始出现 ND 时, 并且 ND 区域呈现上下扩展态势, 降水一般在短期内停止。在有的降水过程中 ND 会从中层到高层无序增加, 导致降水期间所构建的深厚水汽层瓦解, 导致降水过程减弱。2006 年 7 月 21 日出现在丽江站的暴雨过程中, 风资料从低层到高层减少, ND 资料程无序增加(见图 4(c)), 破坏了水汽层, 导致降水过程很快结束。

4) 从东侧、东北侧、东南侧进入雷达探测范围的降水云系致使华坪站和宁蒗站出现暴雨时, 在暴雨减弱过程中, 降水云系在移动的过程中已经影响到永胜县和古城区及以西地区, 进而得到比较完整的 VWP 风廓线产品, 这些产品特征和华坪站、宁蒗站的暴雨过程没有关系, 这是在 VWP 的应用中值得关注。



(a) 2009 年 8 月 22 日 09 时 01 分 (b) 2008 年 8 月 7 日 11 时 02 分 (c) 2006 年 7 月 21 日 19 时 02 分

Figure 4. Characteristics of VWP product when rainstorm abated

图 4. 暴雨减弱时的 VWP 产品特征

## 6. VWP 产品表征“湿度”的变化能力研究

通常只有在大面积降水情况下才能得到比较完整的垂直风廓线。在非降水情况下, 如果云层较厚或水汽较充沛, 可以得到不太完整的垂直风廓线(有很多高度处标为 ND)。在干燥的晴空, 几乎完全得不到垂直风廓线[2]。这很容易让人联想到“ND”可能和空气湿度有关。陆大春[15]首先提出可以粗略地把“ND”认为含水量相对较少, 或称为“相对干区”, 并指出在暴雨发生前“ND”层遭到破坏, 说明整层含水量条件变好, 即“ND”与空气湿度有一定的关系。为探究“ND”与空气湿度是否有确切的相关性, 本文对“ND”和空气湿度的关系进行了统计分析。采用丽江自动站逐时的相对湿度数据与“ND”厚度变化进行比较。由于相对湿度数据是 1 小时相对湿度, 为与之匹配, 本文将“ND”厚度取 1 小时平均处理, 然后进行比较(下文“ND”厚度也都值平均后的“ND”厚度)。

### 6.1. “ND”厚度的定义

丽江雷达站天线高度为 3175 m, VWP 产品在 3.4 km 以上才有数据, 以下都为 ND, 这些 ND 的厚度 10。因此, 在 VWP 图上, 每一时间点 3.4 km 以下的数据层刚好有 10 个, 有 20 个高度层风场数据。为便于描述, 本文定义有一个高度层数据为“ND”, 就称“ND”厚度为 1, 依次类推, 每一时间点“ND”最厚为 20。在无降水天气中, “ND”厚度通常都很厚, 几乎无明显变化趋势, 但是在逐渐接近降水发生时, “ND”区域会大幅度减少, “ND”厚度会明显下降。

### 6.2. 统计分析

本文把参与统计的 35 个暴雨日按降水性质分为大面积积层混合降水回波和对流性降水回波分别进行统计。得到 VWP 的“ND”厚度和测站相对湿度的关系结果如下: 第一类“ND”厚度和相对湿度的相关系数为-0.0818, 第二类“ND”厚度和相对湿度的相关系数为-0.2655。经检验不存在线性相关关系,



因此不能通过 ND 厚度的变化来了解相对湿度的变化趋势。

## 7. VWP 产品在暴雨预报中的应用研究小结

1) VWP 产品在降水前夕的主要特征有三个方面, 一是风向变化: 在暴雨过程中降水前夕风向随着高度的增加顺时针旋转即暖平流是其主要特征, 还存在风的垂直切变、西南气流、风向随着高度增加逆时针旋转即冷平流等特征。二是风速变化: 风速随着高度的增大能促使降水的发生。三是风向风速的同时变化: 风随高度增加顺时针旋转且风速增大, 有利于降水的发生; 在西南气流背景下, 风速随高度增加, 有利于降水的出现; 风向垂直方向上有切变, 风速的加强同样有利于降水的发生。2) VWP 产品在降水维持阶段的主要特征有: 降水的维持与暖平流、冷平流、风的垂直切变有密切关系。3) 暴雨过程的减弱除了与暖平流、西南气流, 风切变的减弱有对应关系外。还有以下特征: 一是在非冷平流系统中 VWP 产品的风向变为随着高度的增加逆时针旋转时, 系统开始减弱; 二是 VWP 高层风向杆的突然下降, 即水汽层在高位置的突降导致降水系统减弱; 三是中层 ND 区域的出现, 当 VWP 图像中层开始出现 ND 时, 并且 ND 区域呈现上下扩展态势, 降水一般在短期内停止; 四是从东侧、东北侧、东南侧进入雷达探测范围的降水云系致使华坪站和宁蒍站出现暴雨时, 在暴雨减弱过程中, 降水云系在移动的过程中已经影响到永胜县和古城区及以西地区, 进而得到比较完整的 VWP 风廓线产品, 这些产品特征和华坪站、宁蒍站的暴雨过程没有关系。

## 基金项目

云南省气象局预报员项目(YB201213)资助。

## 参考文献

- [1] 肖艳姣, 吴涛, 李中华, 等. 基于多普勒天气雷达的垂直散度和温度平流廓线反演[J]. 气象, 2016, 42(8): 987-995.
- [2] 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 216-218.
- [3] 罗义, 梁旭东, 王刚, 等. 雷达反演的多尺度风场在临近预报中的应用研究[J]. 暴雨灾害, 2021, 40(4): 401-409.
- [4] 刘红艳, 魏鸣, 管理. 多普勒雷达风场资料在临近预报中的应用[J]. 大气科学学报, 2015, 38(4): 483-491.
- [5] 王珏, 肖艳姣, 冷亮, 等. 2021年5月武汉两次对流性大风天气的多普勒雷达观测分析[J]. 暴雨灾害, 2022, 41(2): 119-129.
- [6] 肖艳姣, 万玉发, 吴涛, 等. 基于多普勒天气雷达的两种垂直风廓线反演方法的对比分析[J]. 高原气象, 2015, 34(1): 288-297.
- [7] 陈鹏, 刘毅, 刘德, 等. 一次暴雨过程中两个降水阶段的差异分析[J]. 高原气象, 2015, 34(3): 732-740.
- [8] 陈鹏, 刘德, 周盈颖, 等. 一次重庆特大暴雨过程的中尺度分析[J]. 高原气象, 2015, 34(1): 82-92.
- [9] 唐明晖, 姚秀萍, 杨湘婧, 等. 基于多普勒天气雷达资料的“6.1”监利极端大风成因分析[J]. 暴雨灾害, 2016, 35(5): 393-402.
- [10] 林佩贤, 田刚, 李超. 湖北省区域性暴雨雨团识别及特征分析[J]. 暴雨灾害, 2021, 40(5): 505-512.
- [11] 苏爱芳, 吕晓娜, 崔丽曼, 等. 郑州“7.20”极端暴雨天气的基本观测分析[J]. 暴雨灾害, 2021, 40(5): 445-454.
- [12] 韦惠红, 黄小彦, 刘文婷, 等. 复杂山地下引发特大暴雨的准静止 MCS 观测分析[J]. 暴雨灾害, 2022, 41(3): 241-253.
- [13] 徐芬, 王博妮, 夏文梅, 等. 长江中下游地区一次春季暴雨过程的多普勒雷达速度特征分析与研究[J]. 高原气象, 2014, 33(2): 548-556.
- [14] 张桂莲, 杭月荷, 付丽娟, 等. “列车效应”诱发的一次河套地区致灾暴雨成因[J]. 高原气象, 2020, 39(4): 788-795.
- [15] 陆大春, 蒋年冲. VAD 有关产品在临近预报中的应用[J]. 应用气象学报, 2003, 14(Z1): 156-160.
- [16] 王丽荣, 汤达章, 张艳刚. 春季强降水过程的多普勒天气雷达图像特征剖析[J]. 气象科技, 2006, 34(1): 88-92.