

降水过程中多普勒天气雷达风廓线产品特征

夏文梅¹ 陈楠² 程婷³ 徐芬¹ 顾松山²

(1. 江苏省气象科学研究所, 南京 210008; 2. 南京信息工程大学;
3. 江苏省气候中心)

提 要: 利用南京多普勒天气雷达资料, 在对 VWP 风廓线产品可靠性研究和表征“湿度”变化能力研究基础上, 对南京地区春季大面积积层混合云降水过程中风廓线产品的特征进行了细致研究。研究表明, 在降水前夕、维持增强和降水消亡的不同时段风廓线产品都呈现出相应的图像特征: 在图像上 ND 区域呈现一楔形, 快速减少, 预示着降水在 2 个小时内发生; 暖平流、切变层和大风区的存在有利于降水的维持和加强; VWP 最高位置风向标的突降和高层 ND 区域的出现预示着降水即将结束。

关键词: 多普勒天气雷达 VWP 产品 大面积降水过程 湿度变化

Analysis on Characteristics of VWP Wind Product of Doppler Weather Radar During Rainfall Process

Xia Wenmei¹ Chen Nan² Cheng Ting³ Xu Fen¹ Gu Songshan²

(1. Jiangsu Institute of Meteorological Sciences, Nanjing 210044;
2. Nanjing University of Information Science & Technology; 3. Jiangsu Climate Center)

Abstract: Based on the study of VWP product reliability and its capability representing atmospheric humidity, the characteristics of VWP product in spring large scale rainfall process in Nanjing are statistically analyzed and studied in detail by using Doppler weather radar data of Nanjing. The results show that VWP product presents respective characteristics at different stages of rainfall development (formation, development and dissipation). The main points are as follows: ND area in VWP images presents a wedge shape and is decreasing quickly, which indicates the appearance of rainfall within 2 hours; the existence of warm advection, shear layer and strong wind area are propitious to the continuance and reinforcement of the precipitation; an abrupt reduce of the highest vane in the VWP production or the

基金项目: 国家自然科学基金项目(40665001、40475017)、中国气象局新技术推广项目(CMATG2008M39)和江苏省气象局 200610 项目共同资助

收稿日期: 2008 年 3 月 12 日; 修定稿日期: 2008 年 8 月 25 日

emergence of ND area in the middle layer predicts that the rainfall will end soon.

Key Words: Doppler weather radar VWP produce large scale rainfall process humidity variation

引 言

近年来,随着多普勒天气雷达在气象部门进一步推广和普及,气象学者对该类型天气雷达数据和产品有了更深入的理解和应用,特别是对速度产品的研究和应用有了极大推动:径向速度数据的分析开发^[1-4],速度产品的应用^[5-9]等有了较大的提高。二次产品风廓线因其分高度层,逐时效的同幅显示特征更获得了预报员的青睐,对其特征研究也在一些个例分析文章中出现^[10-12],程向阳等^[13]还针对合肥的雷暴天气进行了更详尽的特征统计分析,这些工作为预报员对该产品在业务中的应用提供了参考依据。基于此,本文在收集整理南京 CINRAD/SA 型多普勒天气雷达风廓线产品的基础上,先对该产品的可靠性和表征湿度能力进行了研究,再针对南京地区春季大面积积层混合云降水发生、发展维持和消散过程中风廓线产品所表现出的特征进行了分析探讨,以期对日后诸类降水过程的短时预报工作带来成效。

1 VWP 产品可靠性研究

VWP 产品图像直观反映了不同时刻、不同高度上的风向风速,清楚展示了风场的垂直结构,比起一天两个时次的探空风更新更受预报员青睐。不过由于其是径向速度数据在一定假设条件下的反演风场产品,是否可靠,可靠性多大,适用范围多大直接影响该产品的应用效果。为此,本文从 VWP 风场在有无降水、不同高度、不同速度、不同降水性质等几方面对其可靠性进行了较为细致的统计分析,并给出该类产品的适用范围。本

文采用 850hPa、700hPa、500hPa 探空风场资料作为真实风场分别与 1.5km、3km、5.5km 三种高度的 VWP 风场作比较。

1.1 有无降水时风场可靠性比较

本文将列入统计的 50 次降水过程中的风场分为无降水时的风场(降水前或降水结束后的风场)和降水时的风场。误差统计结果见表 1。从表 1 可见,只要反演出 VWP 风场产品,该产品在降水前、后还是降水过程中,误差相差不大;VWP 反演的风向比起风速更加可靠;该结果说明只要反演出 VWP 产品,该产品的可信度与有无降水关系不大。

表 1 有无降水时风场的误差结果

有无降水	标准误差		绝对误差	
	风向/°	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	风向/°	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
有降水时	25.62	3.22	14.44	2.4
无降水时	19.25	3.44	12.24	3.28

1.2 不同高度风场可靠性比较

分别对 1.5km、3km 和 5.5km 三个高度的 VWP 风场与相应高度的探空风场比较,误差结果见表 2。VWP 风场产品在各高度层的表现能力几乎差不多,都较可靠。相比较而言,5.5km 的风向可靠性更高;3km 处的风场无论是风向还是风速都是可靠性相对弱一点;不同高度风场的可靠性是有差别的。

表 2 不同高度风场的误差结果

高度/km	标准误差		绝对误差	
	风向/°	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	风向/°	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
1.5	24.92	2.97	13.7	2.24
3	26.15	3.28	15.71	2.98
5.5	16.39	3.63	10.83	3.21

1.3 不同速度风场可靠性比较

根据 VWP 图的风场,分为风速小于等

于 $10\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风场和风速在 $10\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的风场。比较 VWP 与高空图风场,见表 3。结果表明:除了在风速的标准误差这一项风速小于等于 $10\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的误差结果小于风速大于 $10\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的误差,其他均是风速大于 $10\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的误差更小。可见,风速增大,VWP 风场可靠性也随之增加。

表 3 不同速度时风场的误差结果

速度	标准误差		绝对误差	
	风向/ $^{\circ}$	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	风向/ $^{\circ}$	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
$\leq 10\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	28.28	2.41	17.71	2.82
$> 10\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	11.87	2.69	7.58	2.77

1.4 大面积降水与对流性降水过程中风场可靠性比较

再从降水性质来考察 VWP 风场可靠性情况,将 50 次降水过程分为大面积降水和对流性降水两种,同样分别进行风场可靠性的分析,见表 4。在误差结果中,很容易发现不论是风速还是风向大面积降水过程的风场误差均小于对流性降水的风场误差。结果表明,大面积降水过程的风场可靠性明显比对流性降水高。

表 4 大面积降水与对流性降水时的风场误差分析

降水类型	标准误差		绝对误差	
	风向/ $^{\circ}$	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	风向/ $^{\circ}$	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
对流性	29.26	3.46	19.01	3.13
大面积	13.18	3.09	7.46	2.45

1.5 VWP 可靠性及适用范围总结

从上述可靠性统计结果可知:VWP 产品只要是反演出了风场在总体上来说是可信的,但是降水前后、高度不同、风速不同及降水类型不同对风场可靠性有一定影响,其中风速小或对流云降水类型的风场误差会增大。风廓线产品基本揭示了风场的真实结构,比起常规风场资料,VWP 产品时空分辨率高,相对于单站易于浏览,使用方便,便于

应用。

2 VWP 产品表征“湿度”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(不满足 VWP 算法的要求在相应高度处用“ND”表示^[15])。在干燥的冬季晴空情况下,几乎完全得不到垂直风廓线^[14]。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好。表明“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。

采用了南京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,然后再进行比较(下文“ND”厚度也都指平均后的“ND”厚度)。

2.1 “ND”厚度定义

在 VWP 图上,每一时间点对应 30 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 30。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。

2.2 统计分析

本文把参与统计的 91 次降水过程按降水性质分为大面积混合性降水和强对流降水

来分别进行统计。得到 VWP 的“ND”厚度和测站相对湿度的相关结果如下:第一类“ND”厚度和相对湿度的相关系数为 -0.393 ,经检验,达到 0.01 的特别显著线性

反相关(见图 1)。第二类“ND”厚度和相对湿度的相关系数为 0.058 ,经过检验,不存在线性相关关系。

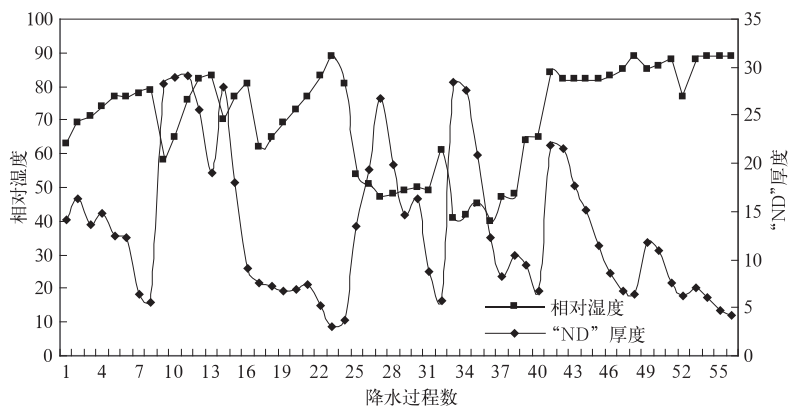


图 1 第一类降水“ND”厚度与相对湿度随时间的变化

统计表明:“ND”厚度变化在一定程度上反映了测站上空空气相对湿度大小的变化,可通过“ND”厚度的变化了解相对湿度的变化趋势,对临近预报有一定的指导意义。但是,“ND”厚度可以用于表征空气相对湿度这一结论仅适用于大面积的层状云或混合云降水,对强对流降水没有指导意义。

3 降水天气过程 VWP 特征分析

每年的 3—7 月是南京地区降水主要阶段,尤其是 6—7 月的梅汛期降水更易给国民经济带来较大损失,因此针对该阶段降水类型,又结合 VWP 适用范围,分春季连阴雨天气和梅汛期天气两种,本文所选统计个例均为大面积的积层混合云降水。

根据前文第 2 部分的研究,由于“ND”厚度变化与相对湿度变化呈反相关,我们可将 VWP 风场厚度在此段均说明为水汽层厚度,便于理解。

3.1 降水前夕 VWP 特征

一般而言 3—6 月初降水过程前夕 VWP 风场通常表现为两层水汽层的配合,低层约在 $1\sim 4\text{km}$ 之间,中层约在 $6\sim 10\text{km}$ 之间,3—4 月份中层维持在 5.5km 左右,5—6 月则维持在更高层。研究发现,中层水汽层的突然向下延伸是降水即将开始的信号,统计表明:中层水汽层在 0.5 小时内突然向下延伸约 1km ,在图像上呈现一楔形,并逐渐与下层连接,形成一深厚的水汽层(图 2,见彩页),降水一般在 2 小时内发生。

图 2 是 2006 年 4 月 8 日一次大面积降水过程,该过程断断续续持续了 22 小时,总雨量为 28mm ,最大雨强为 $10.5\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$,属于典型的积层混合云降水,降水前夕 VWP 图像呈现出明显的楔形特征,低层水汽层位于 $1.2\sim 2.1\text{km}$ 之间,中层位于 $4.6\sim 6.1\text{km}$ 之间,从 $10:46$ 开始到 $11:11$ 半小时内风向杆向下延伸了 1.5km 。逐渐与下层

连接,到 11:23 风场垂直结构完整,降水在 13 时发生。

6—7 月的梅汛期降水由于西南暖湿气流将水汽远远不断地输送,其水汽条件更加充沛,往往在降水前 VWP 图像上表现出的水汽场深厚,楔形特征并不明显。

3.2 降水维持过程 VWP 特征

统计分析表明,降水维持加强与暖平流存在加深、垂直切变区位置变化和大风区位置变化这三个因素有很密切的因素。

3.2.1 暖平流

由 ω 方程可知^[16],暖平流产生上升运动,冷平流产生下沉运动,暖平流是维持降水的大尺度系统,然而统计工作中真正暖平流风场结构明显的个例并不多,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,西南风层厚度加大,表明此段时间存在很强暖平流,产生的上升气流也非常强,降水维持将进一步加强。这些结论与文献[12]所分析个例结果相一致。

3.2.2 切变层

切变层的存在也是降水维持的一个重要特征,根据统计分析,切变层一般都出现在低层 2~3km 的位置,风速不大,一般维持在 $4 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,切变层的加深增厚也是降水加强的一个标志。

3.2.3 大风区

本文把 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的风场定义为大风区,大风区的存在以及其位置的移动与降水的维持加强也密不可分。从高度上本文将位于 4km 以上的大风区定义为高空大风区,1km 附近的急流定义为低空大风区。统计表明低空大风区一般多出现在梅汛期期间,而且同时存在高空大风区。4—5 月份往往只出现高空大风区。

统计结果发现,高空大风区位置半小时内下降 1.5km 左右,降水将在随后半小时内维持并加大。这可能是中空动量的下传,低层的能量得到进一步积聚,使雨强得到维持并增大;梅汛期期间低层往往存在较薄的低空大风区,厚度在 0.9~2.0km 之间。

图 3(见彩页)是 2006 年 4 月 21 日一次降水过程,如图所示 4km 以上都维持着一个 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的西南大风区域,随着时间推移,高空大风区域呈现向中低层延伸态势,从 07:27 开始向下延伸程度加强,半小时内大风区域向下延伸了 1.5km 左右,在大风下探蔓延和持续过程中均是雨强大值区出现的时间段。雨强从 08 时开始从 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 突增到 $7.2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,随后 4 小时内雨强一直维持在 $6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右。

3.2.4 结论

(1) 雨强最大值出现时间讨论:据统计分析,每一次高空大风区域下探和收缩都对应雨强的增大和缩小;高空大风区域位置的延伸和收缩与雨强变化有很好的对应关系。

(2) 风廓线最高位置与雨强大小关系讨论:王丽荣在文献[12]中提到最低“ND”层大致可以反映回波顶高的情况,也就是有效风廓线风向杆最高位置与回波顶高有一定的对应关系。经统计发现,4—5 月风廓线风向杆最高位置一般在 7km 以下,而梅汛期风向杆最高高度都在 10km 以上。这与回波顶高在不同季节高度的变化相一致。但是风廓线最大高度与雨强大小并没有直接关系,风向杆越高并不代表雨强越大,但是最大高度的连续下降都会对应雨强的减弱。

(3) 降水维持特征:暖平流、切变层和大风区存在是春季夏初降水维持的主要特征,并且这三种因素任意两种同时出现雨势都较大。暖平流的风速随高度加大,顺转程度加大,暖平流加深都是雨势增强的标志;低层薄

切变层的维持是降水维持的原因之一,切变层加深也预示着雨强即将增大。高空大风区的存在也是维持降水的重要原因,大风区位置的向下延伸和向上收缩都对应着降水的加大和减小。这三种在 VWP 图像上表现出的特征是南京地区春季夏初大面积积层混合云降水维持和增强的主要原因。

3.3 降水减弱渐止过程 VWP 特征

降水减弱渐止的因素除了与上述暖平流、切变层、急流的相应减弱有对应关系外,还有在 VWP 图像上呈现出的特有特征。经统计分析主要有两种情形:

(1) VWP 最高位置风向杆的突然下降:也可说水汽层最高位置的突降将导致降水即刻减弱停止。经统计风向杆最高位置在 1 小时内连续下降 3km 左右,降水随即结束。水汽输送源的突然切断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。此种情形多出现在 4—5 月降水过程(图 4,见彩页)。

(2) 中层“ND”区域的出现:统计发现,当 VWP 图像 4~5km 高度处开始出现“ND”,并且“ND”区域呈现上下扩展态势,降水一般在 2 小时内停止;在梅汛期由于降水回波发展旺盛,高度较高,有时会出现中高层和中层“ND”区域先后出现,并迅速向上下高度延伸,连成一片,导致降水期间所构建的深厚水汽层瓦解,降水结束(图 5,见彩页)。

4 结论

通过对南京地区春季大面积积层混合云降水过程统计分析,总结出降水前夕、维持增强和停止阶段在 VWP 图像上表现出的一些特征,总结如下:

(1) VWP 产品只要是反演出的风场在总体上来说是可信的,但是降水前后、高度不

同、风速不同及降水类型不同对风场可靠性有一定影响,其中风速小或对流云降水类型的风场误差会增大。风廓线产品基本揭示了风场的真实结构,比起常规风场资料,VWP 产品时空分辨率高,相对于单站易于浏览,使用方便,便于应用。

(2) 在大面积层状云或积层混合云降水情况下,“ND”厚度变化反映了测站上空大气相对湿度大小的变化,可通过“ND”厚度变化了解相对湿度的变化趋势,对该类降水临近预报具有指导意义。

(3) 3—6 月初降水过程前夕在 VWP 产品图像上通常表现为低层 1~4km,中层 6~10km 两层水汽层的配合。中层水汽层在 0.5 小时内突然向低层延伸约 1km,降水一般在 2 小时内发生。该信号在图像上呈现一楔形,并逐渐与下层连接,形成一深厚的水汽层。

(4) 暖平流、切变层和急流存在是春季夏初降水维持的主要特征。暖平流顺转程度加大加深、切变层加深、高空大风区位置下延都预示降水加强。

(5) 降水减弱渐止在 VWP 图像上主要对应两种情形:① VWP 最高位置风向杆突降,在 1 小时内连续下降 3km 左右,降水随即结束。② 中层 4~5km 高度层“ND”区域的出现,并呈现上下扩展趋势,降水一般在 2 小时内结束;梅汛期有时会出现中高层和中层“ND”区域前后出现,并迅速向上下高度延伸连成一片,降水迅速结束。

参考文献

- [1] 王俊,朱君鉴,任钟冬.利用双多普勒雷达研究强对流过程的三维风场结构[J].气象学报,2007,65(02):241-251.
- [2] 徐芬,夏文梅,吴蕾,等.多普勒天气雷达速度 PPI 图散度分布信息提取[J].气象,2007,33(11):22-27.
- [3] 周海光.多普勒天气雷达风场反演技术研究进展.地球科学进展[J],2002,17(3):384-390.

- [4] 朱立娟, 龚建东. QIQC 技术在雷达反演 VAD 廓线资料退模糊中的应用研究[J]. 高原气象, 2006, 25(5): 862-869.
- [5] 徐芬, 夏文梅, 胡志群, 等. 多普勒天气雷达风场产品在螺旋度计算中的应用[J]. 气象科学, 2007, 27(5): 495-501.
- [6] 朱敏华, 姜有山, 周红根. 两次暴雨过程的多普勒天气雷达资料对比分析[J]. 气象科学, 2005, 25(1): 71-78.
- [7] 金巍, 曲岩, 姚秀萍, 等. 一次大暴雨过程中低空急流演变与强降水的关系[J]. 气象, 2007, 33(12): 31-38.
- [8] 东高红, 张志茹, 等. 一次大雪天气过程的多普勒雷达特征分析[J]. 气象, 2007, 33(7): 75-81.
- [9] 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, 3: 22-23.
- [10] 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.
- [11] 叶爱芬. 多普勒雷达 VWP 产品在一次大暴雨过程中的特征[J]. 广东气象, 2007, 29(1): 19-21.
- [12] 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.
- [13] 程向阳, 王兴荣, 胡雯, 等. 雷暴天气在多普勒雷达资料上的前兆特征分析[J]. 气象科学, 2003, 23(4): 485-490.
- [14] 俞小鼎, 姚秀萍, 等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006. 217.
- [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(S1): 156-160.
- [16] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法[M]. 气象出版社, 2003. 366.

夏文梅等：降水过程中多普勒天气雷达风廓线产品特征

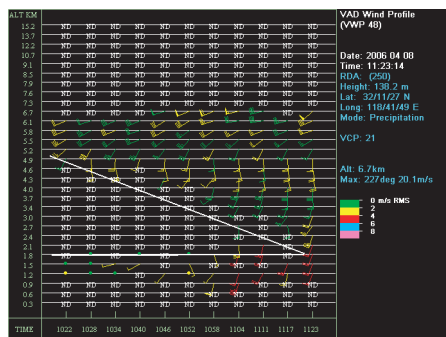


图 2 2006年4月8日11:23(世界时)的VWP图

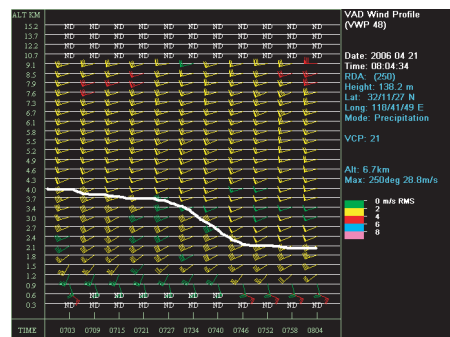


图 3 2006年4月21日08:04(世界时)的VWP图

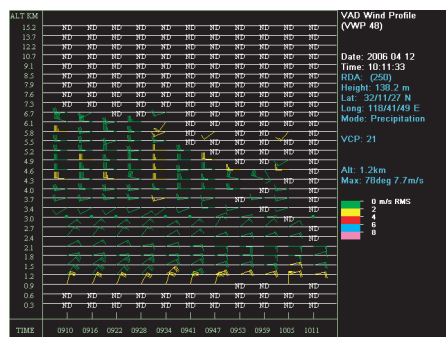


图 4 2006年4月12日10:11(世界时)的VWP图

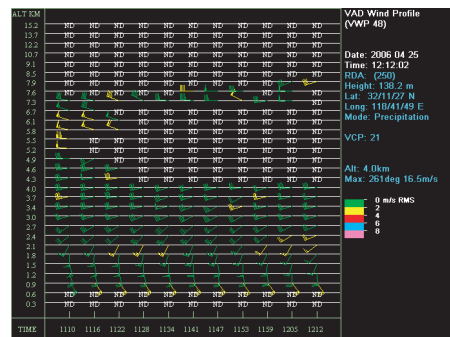


图 5 2006年4月25日12:12(世界时)的VWP图