

# 两种垂直累积液态含水量产品的 应用对比分析

吴书君<sup>1</sup> 王凤娇<sup>1</sup> 刘昭武<sup>1</sup> 冯桂利<sup>2</sup>

(1. 山东滨州市气象局, 256612; 2. 山东省气象科学研究所)

**提 要:** 结合雷达体扫工作模式以及风暴单体垂直结构分布, 利用 CINRAD 气象产品软件包提供的基于单体和格点的 VIL 产品, 对滨州 SC 雷达监测到的几例强对流风暴单体个例进行分析发现, 两种 VIL 产品的变化趋势基本与风暴变化同步, 对灾害性天气发生的预警具有较好的指示意义; 一般情况下, 基于单体的 VIL 数值大于基于格点的 VIL 数值, 尤其是发展成、孤立的强风暴单体表现更加明显, 可以作为判断风暴单体强度的定性指标; 对于多单体风暴, 由于风暴质心识别等因素会造成 VIL 数值误差增大, 而雷达体扫模式的限制可能造成 VIL 数值失真。

**关键词:** 风暴单体 基于单体的 VIL 基于格点的 VIL

## Applied Comparison of Two Products of Vertically Integrated Liquid Water Content

Wu Shujun<sup>1</sup> Wang Fengjiao<sup>1</sup> Liu Zhaowu<sup>1</sup> Feng Guilil<sup>2</sup>

(1. Binzhou Meteorological Office, Shangdong Province, Binzhou 256612;  
2. Shandong Research Institute of Meteorological Sciences)

**Abstract:** By using the data of grid-based vertically integrated liquid water (VIL) and cell-based VIL, which were observed by Binzhou SC radar in volume scan mode, vertical structures of several severe convective storms were studied. The results show that the two VIL products varied in-phase with storm evolution, and they were both well indicative for warning damage weather. Generally, cell-based VIL is larger than grid-based VIL, especially in

the case of mature and isolated severe cell storms. The difference of the two *VIL* products may be used as the quantitative indicator of cell storm intensity. The limitation of volume scan mode possibly leads to the *VIL* distortion, due to the increase of *VIL* errors caused by the identification of centroid of multicell storm.

**Key Words:** storm cell vertically integrated liquid water (*VIL*) cell-based *VIL* grid-based *VIL*

## 引 言

垂直累积(积分)液态含水量(*VIL*)是新一代天气雷达系统提供的一种导出产品,它表示将反射率因子数值转换成等价的液态水值,它用的是假设所有反射率因子返回都是由液态水引起的经验导出关系,反映了降水云体中在某一确定底面积的垂直柱体内液态水的总量。*VIL*是Greene<sup>[1]</sup>于1970年代初期提出的一个全新的预报因子,1980年代,美国雷达气象学家结合WSR-88D气象产品的开发,进一步发展和完善了*VIL*的应用,尤其是在强对流天气预报方面取得了较大的进展。根据1998年3月美国NEXRAD业务支持处(OSF)对WSR-88D用户进行的调查,表明*VIL*是实际业务中应用次数最多的产品之一<sup>[2]</sup>。近年来,随我国新一代天气雷达建设的逐步展开,对*VIL*的应用研究得到了加强,潘江、张培昌<sup>[3]</sup>利用*VIL*资料进行了估测降水的研究,王炜<sup>[4]</sup>等则利用*VIL*资料进行了冰雹预测等,均取得了较好的效果,王凤娇<sup>[5]</sup>、郭艳等<sup>[6]</sup>结合典型对流风暴单体,对风暴单体生命史中的*VIL*演变进行了分析。目前,CINRAD气象产品软件包提供了两种*VIL*产品,即基于格点的*VIL*图像产品和基于单体的*VIL*文字产品。但就这两种产品有何异同、使用时应分别注意何事项,对云体变化的反应有何优劣等,相关研究却不多。本文利用山东滨州CINRAD/SC雷达观测

的几个对流单体实例,就两种*VIL*产品的差异以及在风暴演变过程中变化规律进行了探讨。

## 1 *VIL* 的原理

假设降水云内雨滴直径的分布(简称雨滴谱)符合*M-P*分布,根据雷达反射率因子*Z*的定义,应用伽玛函数及其性质,可得*Z-M*关系: $M=3.44 \times 10^{-3} Z^{4/7}$ ,它把雷达反射率因子*Z*和降水云中含水量*M*直接联系起来,而*Z*值可通过雷达直接测量到。*VIL*定义为某一定底面积的垂直柱体中的总含水量, $VIL = \int_{\text{底高}}^{\text{顶高}} 3.44 \times 10^{-3} Z^{4/7} dh$ 。此式为*VIL*产品的理论表达式,实际计算时只能应用实测的体积扫描三维回波强度数据进行离散求和<sup>[7]</sup>。

在*VIL*产品的使用中,水滴滴谱的不确定性使得*VIL*值有偏差,*VIL*临界值是逐日且随区域差异而不同的。由于雷达静锥区的影响,近雷达站风暴不能被完整扫描,*VIL*值可能被低估;远离雷达站风暴,低仰角波束或许穿过风暴中层的冰雹高反射率因子区,一般导致数值被高估,而发展较低的对流云又可能被低估,造成*VIL*值有时是不可靠的。

## 2 CINRAD 气象产品软件包 *VIL* 产品

本文应用CINRAD气象产品软件包

(Build 7.0) 提供的基于单体的 *VIL* (简记为 *C-VIL*) 和基于格点的 *VIL* (简记为 *G-VIL*) 产品<sup>[8]</sup>。

*G-VIL* 产品是在雷达的 230km 半径内, 对每个仰角, 在每  $4\text{km} \times 4\text{km}$  格点上导出值, 然后累加, 以图像的形式 (57 号产品) 显示云体含水量的水平分布。

在风暴单体的识别和跟踪算法 SCIT 算法中, *VIL* 产品是通过由风暴单体质心所确定的单体最大反射率因子值垂直积分计算来的, 它采用每层三门平均的最大反射率因子值, 然后对整个风暴厚度垂直积分, 因此称为基于单体的 *VIL*, 它考虑了风暴核所呈现出的倾斜结构。*C-VIL* 与风暴跟踪识

别信息一起以文字形式显示 (62 号产品), 或通过特定产品的联合属性表列出。

图 1 为两种 *VIL* 值的定义图解<sup>[8]</sup>。从图中可看出, 强烈倾斜的对流降水云体, 其上部可能伸展到其它的格点中。快速移动的降水云体, 由于雷达探测从低仰角和高仰角之间的时间差也可能使对流降水云体的上部伸展到其它的格点中, 即雷达观测到的云体可能较实际云体更倾斜或悬垂更明显, 通称风暴的倾斜。所以 *G-VIL* 值可能小于假定这些云体不倾斜或移动较慢时的 *VIL* 值; *C-VIL* 可考虑风暴核所呈现出的倾斜结构, 因此相对于 *G-VIL*, 对于快速移动或高度倾斜的风暴通常有更高的 *VIL* 值。

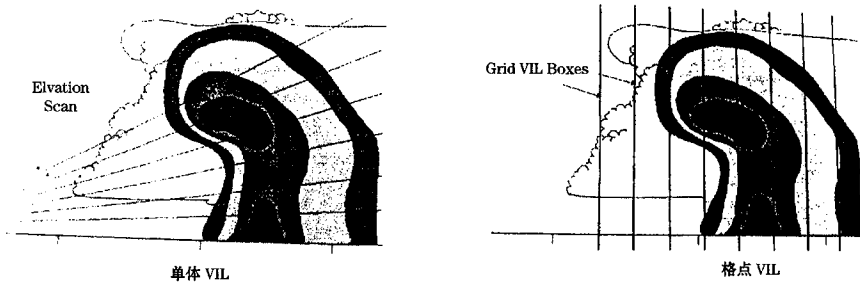


图 1 单体 *VIL*、格点 *VIL* 产品定义图示

### 3 观测实例

选取滨州 CINRAD/SC 雷达采集到的几次强风暴单体个例资料, 对经 CINRAD 产品软件包生成的 *VIL* 产品进行对比分析。为了方便对比分析, 这里所选实例均为移向雷达, *C-VIL* 采用风暴结构产品 (62 号产品) 中 *VIL* 值, *G-VIL* 值取 *VIL* 产品 (57 号产品) 中对应风暴单体质心附近  $4\text{km}$  范围内的最大 *VIL* 值。由于 *G-VIL* 产品是以图像元的方式提供, 以每 5 个数量级为显示级别, 在读取数值时, 选取该风暴质心附近最大数值图像元中, 最接近其 *C-VIL* 数值

作为 *G-VIL* 数值。

#### 3.1 孤立单体风暴

图 2 为两例成灾孤立单体 *VIL* 值变化曲线。图 2a 为 2003 年 6 月 28 日 (北京时, 下同) 凌晨, 造成山东德州南部地区雷雨大风、冰雹的风暴单体 A0 在 00:58—03:28 这一时段的两种 *VIL* 值的变化曲线, 该单体形成后迅速发展、东南移, 风暴单体维持明显的孤立单体特征, 降雹前 *VIL* 数值均跃增到  $60\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$  以上。可以看出两种 *VIL* 值的变化趋势几乎一致。但风暴发展时期 *C-VIL* 数值略高于 *G-VIL*, 降雹减弱阶段的数值基本一致。从风暴质心与 *G-VIL*

极值区位置看，自 02:07 开始单体质心位置就开始落后于 G-VIL 极值区。

图 2b 为 2004 年 7 月 7 日傍晚，造成滨州惠民雷灾的风暴 D1 生命史中 VIL 数值变化曲线。可以看出单体 D1 初生后 VIL 数值均迅速跃增，降雹前出现第二次跃增，C-VIL 在 12 分钟内由 43kg·m<sup>-2</sup> 跃增至 69 kg·m<sup>-2</sup> 并出现降雹，降雹结束，又剧降至 45kg·m<sup>-2</sup>。G-VIL 值虽较 C-VIL 值有一些大小的差异，但变化曲线基本重合。分析风暴单体质心位置，发现基本与 G-VIL 极值区一致，但降雹时单体质心位置略落后极值区。

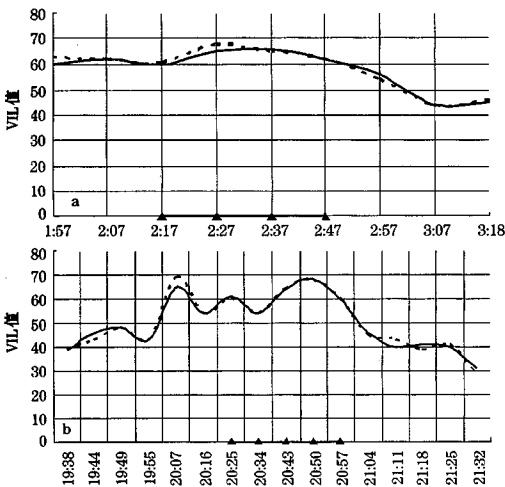


图 2 孤立风暴单体 VIL 变化特征

a. 2003 年 6 月 28 日 A0 单体；

b. 2004 年 7 月 7 日 D1 单体

—格点 VIL；·····单体 VIL；—▲—降雹时间

### 3.2 多单体风暴

图 3 为两例多风暴单体 VIL 变化曲线。2003 年 7 月 20 日滨州邹平发生了一次典型的多单体风暴，该单体 P8 从新生、发展并入风暴母体、减弱，其间不断有单体生成、合并<sup>[5]</sup>，两种 VIL 值的变化曲线十分相似

(图略)。图 3a 为风暴单体 P8 生命史中发展成熟时期的 VIL 值变化曲线。可以看出，VIL 值的跃增与单体合并发展成为强风暴一致，G-VIL 值也由 19:50 的 40kg·m<sup>-2</sup> 一路飙升到 70kg·m<sup>-2</sup>；并维持近 10 分钟后迅速减小，到 20:31 已减至 40kg·m<sup>-2</sup>。而 C-VIL 则上升到 82kg·m<sup>-2</sup> 后才下降，邹平的大风、降雹就出现在 C-VIL 最大值剧减之后的 15 分钟左右。从 G-VIL 极值区与风暴质心位置分布看，自 20:01 开始极值区较质心位置明显偏前，并一直维持到降雹开始。

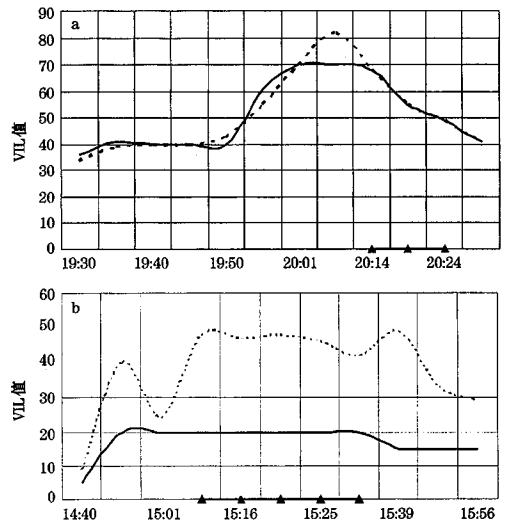


图 3 多风暴单体 VIL 变化特征

a. 2003 年 7 月 20 日 P8 单体；b. 6 月 11 日 N0 单体

—格点 VIL；·····单体 VIL；—▲—降雹时间

图 3b 为 2003 年 6 月 11 日发生在滨州惠民南部出现了一次强对流天气中 N0 发展过程的 VIL 的变化曲线。此次降雹过程为典型的多单体风暴，风暴单体在距滨州雷达 279° 82km 附近开始发展，在东移过程中其南部不断有单体新生、加强、并入，形成风暴向东南方向传播。单体 N0 初生后先与较强的单体 L0、G0 合并跃增发展，于 15:10

前后发展成为强冰雹云。可以看出 C-VIL 的两次跃增与云体的合并发展同步, 降雹开始后 VIL 缓慢下降; 而 G-VIL 的变化情况明显偏小, 最大仅  $20\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 较 C-VIL 值平均偏小  $20.4\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 除初生阶段变化趋势一致外, G-VIL 在降雹结束前变化均不明显。

#### 4 对比分析

##### 4.1 单体垂直结构造成的数值差异

根据 G-VIL 与 C-VIL 的定义及计算方法, 风暴的 VIL 值与云体的发展、变化一致, 且 C-VIL 值大于或等于 G-VIL, 从以上个例分析可知, 基本符合这一特征。从孤立单体风暴的两种 VIL 产品的变化情况看, 一般情况 C-VIL 数值略大于或等于 G-VIL 数值, 一旦出现单体的分裂、合并, 呈现多单体风暴特征, 这种现象就不明显了, 甚至出现 C-VIL 数值小的现象。

表 1 为分析的 4 个单体统计数值。结合

表 1 风暴单体的特征

风暴单体	孤立单体风暴		多单体风暴	
	A0	D1	P8	N0
G-VIL 平均值/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	56.0	40.5	42.5	17.3
C-VIL 平均值/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	56.9	40.1	42.5	37.7
离测站距离/km	最远	153	101	40
	最近	80	68	25
降雹时间/min	40	20	10	30
体扫模式/层	9	9、14(60km内)		9

风暴单体的垂直结构分析发现, C-VIL 值明显大于 G-VIL 值时, 单体倾斜明显。图 4 为四例风暴单体发展极盛时期, 针对每个单体的高度, 分别选取了风暴单体 50dBz 的底层、中间层、顶层的 CAPPI 资料叠加图。分析发现, 四例风暴单体的顶层均向风暴单体的运动方向前倾, 风暴单体 N0 的云体前倾尤其明显, 三层几乎未重叠; 而其他三例中间层与顶层大部分重叠甚至三层均大部分重叠, 且重叠部分越多、两种 VIL 值的差越小。因此, C-VIL 数值大于 G-VIL 与风暴距离雷达远近关系不大, 而与风暴出现明显的倾斜或悬垂有关。

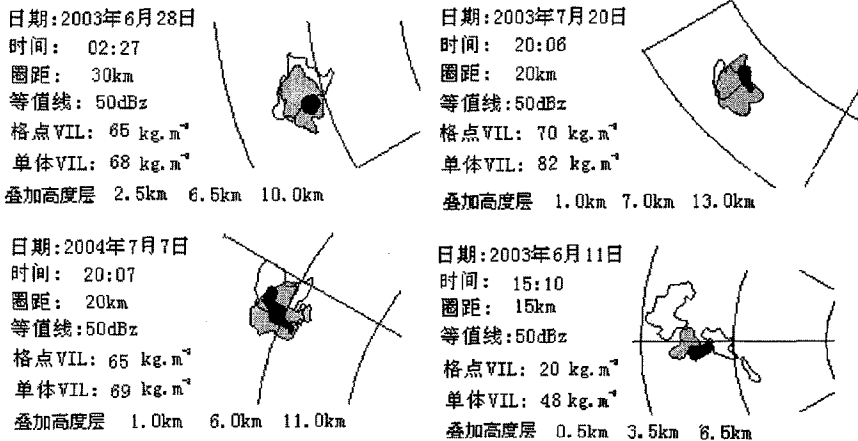


图 4 风暴单体反射率因子多层分布图

白色为低层、灰色为中层、黑色为高层

对于风暴单体 P8, 20:06 的 G-VIL 值为  $70\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、C-VIL 值为  $82\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 这与云体发展旺盛时期出现明显的倾斜, C-VIL 具有更高值的分析一致。另外, 由于 G-VIL 值显示上限为  $70\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 当 G-VIL 大于此值时, 只能显示  $70\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 而不能反应 G-VIL 的真实值, C-VIL 则无此限制, 这是造成了 C-VIL 值大于 G-VIL 值的又一原因, 这种情况可能造成的 C-VIL 值可远远大于 G-VIL 值, 如滨州雷达 2003 年 7 月 25 日下午探测到的风暴单体 Z7 的 G-VIL 值从 15:30 到 15:52 一直为最大值  $70\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 而 C-VIL 值则在  $75 \sim 102\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$  之间变化, 最大差值达  $32\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

以上分析个例中 G-VIL 值大于 C-VIL 值的情况, 一般在  $4\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$  以内, 但 P8 风暴单体 19:26 相差  $11\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。结合其他单体分析发现, 对于多单体风暴, 如果单体排列较紧凑, 则易造成风暴单体识别及其质心判断失误<sup>[8]</sup>, 从而使计算出现偏差, 另外若较强单体倾斜明显, 其风暴顶伸展到较弱的风暴单体上方, 则造成较弱的风暴单体的 G-VIL 值大于 C-VIL 值。对于孤立单体风暴和相对较分散且个体明显的多单体风暴, 上述情况均不大可能出现, 可以看出这主要与两种 VIL 计算方法上的差异和计算误差有关。

对于风暴单体 N0, G-VIL 值明显低于 C-VIL 值, 降雹时偏低  $22.5\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 总体偏低  $20.4\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。比较距离测站较近的两个风暴单体 D1、N0, 均存在因雷达静锥原因而未探测到风暴顶的现象。结合表 1 统计数据及图 4 分析, 可以看出造成两种 VIL 数值明显差异的原因, 与风暴单体降雹持续时间、离测站距离等关系不大, 而主要与风暴单体的倾斜有关。

## 4.2 体扫模式造成的数值差异

从雷达体扫模式分析, 以上分析单体除 D1 在测距 60km 以内用 14 层的 VCP11 模式外, 其他均用 9 层的 VCP21 模式。滨州 CINRAD/SC 雷达采用的这两种探测模式的最低、最高仰角一致, VCP21 自第 5 层以上仰角间距由  $1^\circ$  增大到  $2 \sim 5^\circ$ , 而 VCP11 到第 10 层以上仰角间距才增大到  $2 \sim 3^\circ$ 。

通过对 2003 年 6 月 11 日位于测站西部, 与 N0 单体同时存在的 5 个风暴单体的 VIL 值的变化进行比较, 可以看出利用 VCP21 模式观测, 近测站 (小于 60km) 风暴均出现了 C-VIL 值比 G-VIL 明显偏大、且 G-VIL 数值少变情况 (列表略), 结合 D1 高仰角回波强度分布进行分析, 发现雷达实际探测到风暴顶的最高两个仰角的回波强度分布, 是造成这种现象的主要原因。由于 G-VIL 数值计算一般是采用各层实测体扫回波强度数值离散求和, 在某距离上相邻两仰角之间的高度间隔内, 采用这两仰角的实际数据取平均值进行计算。由于低层探测仰角间隔小, 近雷达站时垂直高度小, 回波强度变化幅度不大, 随仰角抬高, 到高层扫描模式的两层仰角间隔增大, 两仰角之间的垂直高度差增加, 对处于一定高度的对流风暴, 可能出现某一层探测到风暴中上部强回波区, 而下一个仰角已经探测不到云顶, 这样这层探测到的强回波决定了 G-VIL 数值, 造成维持几个体扫不变。当风暴单体出现明显向雷达测站一侧倾斜, 探测到的云顶位置, 已经偏离识别出的风暴质心位置较远位置, 但能够满足对风暴单体进行识别要求, 计算的 C-VIL 数值是真实的, 而 G-VIL 数值偏小, 出现两种产品数值差异明显。这样说明了体扫模式仰角分布的差异造成对风暴观测的不完整, 以及风暴的倾斜是两种产品数值差异的主要原因。

## 5 小 结

(1) 一般两种 *VIL* 值的大小及趋势变化与云体的发展变化同步且趋势一致, 尤其是孤立的风暴单体, 因此在日常工作中可以利用 *G-VIL* 产品直观、明了的优点, 提高对云体发展的监测能力。

(2) 由于两种 *VIL* 计算方法和数值显示的不同, 会造成 *C-VIL* 大于或明显大于 *G-VIL* 的现象, 尤其是当 *VIL* 数值小于  $70\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$  时, 表明风暴单体发展到极盛, 云体已经出现明显的倾斜, 灾害性的大风、冰雹天气将很快发生, 应及时发布强对流天气预警信息。可以利用风暴质心位置与 *G-VIL* 极值区的关系, 判断风暴单体的倾斜程度, 定性地判断风暴单体强度。

(3) 对于多单体风暴, 可能造成风暴质心识别出现偏差或失败, 或因邻近发展旺盛的倾斜风暴伸展到其他风暴上部, 这是造成 *G-VIL* 大于 *C-VIL* 现象的主要原因, 计算方法的差异和计算误差是另一原因, 但对 *VIL* 产品的使用基本无影响, 仅对风暴的跟踪、预测造成一定的影响。

(4) 当风暴离测站较近时, 由于雷达探

测能力和扫描模式的限制, 造成 *VIL* 计算的误差增大, 尤其是 *G-VIL* 数值失真, 在使用时要特别注意, 这时可以结合 *C-VIL* 数值进行风暴预警。建议近距离观测对流风暴时使用 *VCP11* 模式, 以减少因扫描策略原因造成的 *VIL* 计算失真。

## 参考文献

- 1 GREENE D R, CLARK R A. An indicator of explosive development in severe storms [C]. 7th conference on severe local storms, Missouri 1971.
- 2 R. R. Lee. WSR-88D算法和产品改进的用户反馈信息 [J]. 气象科技, 2000, 25 (2): 56-58.
- 3 潘江, 张培昌. 利用垂直积分含水量估测降水 [J]. 南京气象学院学报, 2000, 25 (3): 87-92.
- 4 王炜, 贾惠珍. 用雷达垂直累积液态水含量资料预测冰雹 [J]. 气象, 2002, 28 (1): 47-48.
- 5 王凤娇, 王立静, 吴书君. 一次强风暴的雷达回波特征分析 [C]. 2004 年全国重大天气过程总结和预报技术交流大会.
- 6 郭艳, 应冬梅, 刘冬梅. 江西“4.12”降雹过程的多普勒雷达资料分析 [J]. 气象, 2005, 31 (11): 47-48.
- 7 胡明宝, 高太长, 汤达章. 多普勒天气雷达资料分析与应用 [M]. 北京: 解放军出版社, 2000: 146-149.
- 8 中国气象局培训中心. 新一代天气雷达讲义 (试用) [G]. 北京: 2000: 247-273.