

肖艳姣,马中元,李中华.改进的雷达回波顶高、垂直积分液态水含量及其密度算法.暴雨灾害,2009,28(3):210-214.

改进的雷达回波顶高、垂直积分液态水含量及其密度算法

肖艳姣¹,马中元²,李中华³

(1.中国气象局武汉暴雨研究所,武汉 430074;2.江西省气象科学研究所,南昌 330046;

3.湖北气象信息与技术保障中心,武汉 430074)

摘要:鉴于新一代天气雷达回波顶高和垂直积分液态水含量产品的若干缺陷,提出其改进算法,并增加垂直积分液态水含量密度算法。改进的回波顶高算法通过极坐标方式将该产品的空间分辨率从 4 km×4 km 提高为 1°×1 km,且通过垂直线性内插处理得到更精确的回波顶高值。改进的垂直积分液态水含量算法通过扩大计算范围(460 km)满足监视来自上风方向对流的需求,通过去掉 18 dBz 阈值的限制,提高空间分辨率(1°×1 km)以及保存未分等级的数据,从而提高其产品的精细化分辨能力,以满足监视初生天气潜在发展的需求。通过对比分析算法改进前后的回波顶高和垂直积分液态水含量产品以描述改进产品的优点,结果表明:改进后的回波顶高产品已无原产品中的锯齿状振荡;回波顶高值大于等于改进前的;改进的垂直积分液态水含量产品纹理更加光滑、结构更加精细。相比垂直积分液态水含量,垂直积分液态水含量密度更适合作为冰雹判别指标。

关键词:雷达;回波顶高;垂直积分液态水含量;垂直积分液态水含量密度

中图分类号:P412.25 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-9045(2009)03-0210-05

1 引言

中国新一代天气雷达(CINRAD)已能为用户提供很多有用产品^[1],如何充分应用这些产品的相关研究也在进行之中^[2-4],回波顶高(Echo Tops,简称 ET)和垂直积分液态水含量(Vertically Integrated Liquid,简称 VIL)就是其中 2 个产品。ET 指的是在大于等于给定阈值(缺省值为 18 dBz)的反射率因子被探测到以最高扫描仰角为基础的回波顶高度。VIL 代表的是天气雷达能测量的大气水含量和可降水量,是在所有反射率因子来自液态水的假设下用经验关系导出的等价液态水值。ET 和 VIL 常被用来评估风暴强度。一般来说,对流云云顶高度与上升气流强度相关联,云内上升气流越强,对流发展越旺盛,其回波顶高越高,VIL 值越大;强反射率因子增长达到的高度,大的 VIL 常与地面降雹事件相联系^[5-7];强反射率因子高度、VIL 快速下降常与地面对流性大风发生相联系^[8-10]。当雷达回波上同时存在多个风暴时,有较高 ET 和较大 VIL 值的风暴是最有可能产生最强天气(如对流性大风和冰雹)的风暴。然而,CINRAD 现有的 ET 和 VIL 产品还存在诸多缺陷,如其空间分辨率均较粗糙(4 km×4 km),都分 16 个等级,计算范围为 230 km;ET 值近似为满足条件的最高扫描仰角的波束轴线距地面的高度,总是被低估^[11],此外由于雷达扫描仰角不连续,ET 产品中

经常出现锯齿状不连续现象,表现为回波高度的振荡;VIL 产品因受 18 dBz 反射率因子阈值的限制,使 18 dBz 以下的反射率因子不能被累积,且小于 1 kg·m⁻³的 VIL 值不被显示,这不利于对初生天气潜在发展的监视。

上述缺陷使现有 ET 和 VIL 产品的分辨率和精度有时不能满足一些强天气识别算法(如冰雹算法)和一些特殊用户(如航空管制、人影作业等)的需求。Maddox^[12]使用相邻 2 部雷达同步观测得到回波顶高,显著减少了用单部雷达获得的回波顶高的不确定性。美国联邦航空局(FAA)为满足航空服务的需求,委托马萨诸塞技术学院的林肯实验室(MIT/LL)为其改进 WSR-88D 的 ET 和 VIL 算法,结果使这 2 个产品的空间分辨率和精度有所提高^[13]。此外,由于 VIL 还与气团性质、离开雷达的距离等因素有关,选用固定的 VIL 阈值作为冰雹判别指标也存在一些问题,为了减轻这些问题,VIL 密度(VIL 与回波厚度之比)被研究和使用^[14]。本文针对 CINRAD 提出一种改进的 ET 和 VIL 算法,以满足精细化需求;此外,增加现有雷达产品中没有的 VIL 密度(VIL Density,简称 VILD)算法,用于冰雹识别研究。

2 回波顶高的不确定性及其算法改进

2.1 回波顶高的不确定性

图 1 给出 VCP (Volume Coverage Pattern)21 的扫描仰角和在标准大气条件下的波束传播路径。

收稿日期:2009-05-31;定稿日期:2009-06-25

基金项目:中国气象局气象探测中心新一代天气雷达业务建设软件开发项目资助

作者简介:肖艳姣,女,1971 年生,副研究员,主要从事雷达探测技术研究。E-mail: yanjiao.xiao@163.com

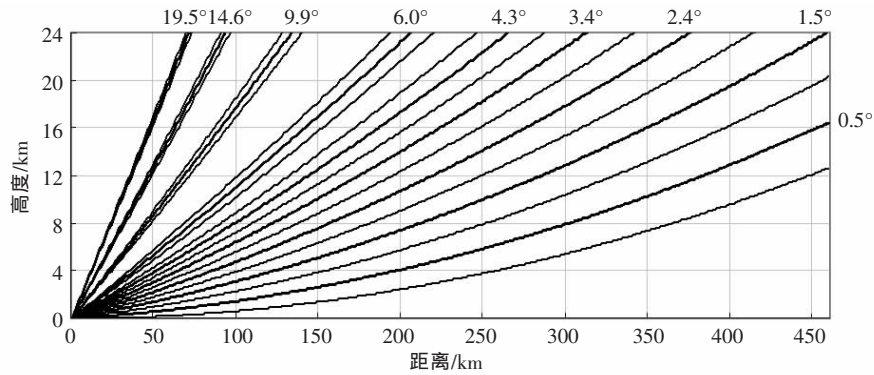


图 1 VCP21 扫描方式下的仰角及在标准大气条件下的波束传播路径(波束宽度 0.95°,粗实线为波束轴线)

从图 1 中可见,由于雷达抽样体积(以下称为距离库)呈球面几何形状,雷达波束在垂直方向的宽度随距离增加而增大;此外,在高仰角区,相邻仰角的波束之间还存在间隙。现有的 ET 算法是在 ≥ 18 dBz 的反射率因子被探测到时,采用标准大气条件下的雷达测高公式计算满足条件的最高扫描仰角的波束轴线离地面的高度,会引起回波顶高估计的不确定。因为雷达的一个观测资料不只是一个点的观测,而是一个距离库内所有散射粒子返回的电磁功率之和。某个方位-斜距库的回波顶高的不确定范围等于用来计算回波顶高的那个仰角与其相邻的上面那个仰角的波束轴线之间的距离,其表达式为:

$$\Delta d \approx r\sqrt{2[1-\cos(\Delta\phi)]} \quad (1)$$

其中 r 为斜距, $\Delta\phi$ 为相邻仰角差。从式(1)中可看出,回波顶高的不确定范围随距离增加以及相邻仰角差增大而增大,在 100~125 km 之间,其不确定范围可达到 7~8 km。

2.2 ET 算法的改进

对新一代天气雷达中的 ET 算法进行两方面改进:一是将产品数据格式从直角坐标变为极坐标格式,并提高产品的空间分辨率,从原来的 4 km×4 km 变为 1°×1 km;二是在计算回波顶高时进行垂直线性内插处理。图 2 给出不使用和使用垂直线性内插得到的回波顶高示意图,图中粗实线表示对应 18 dBz 的真实回波顶高。

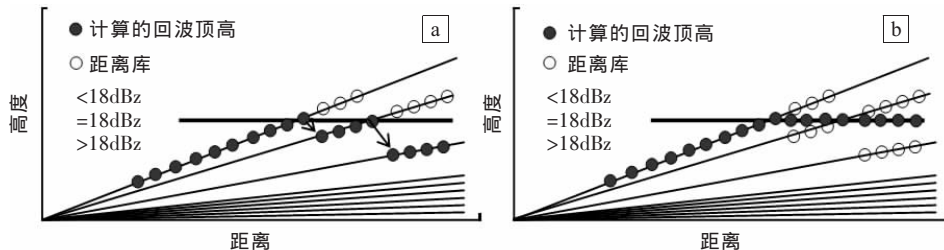


图 2 不使用(a)和使用(b)垂直线性内插得到的回波顶高示意图
粗实线表示对应 18 dBz 的真实回波顶高

从图 2 中可见,在雷达静锥区,由于雷达探测不到真实的回波顶高,只能用最高扫描仰角的波束轴线离地面的高度近似表示为回波顶高,该区域回波顶高被低估。在雷达能探测到真实回波顶的区域,使用和不使用垂直线性内插得到的回波顶高的差异较大,如果只使用波束轴线高度作为回波顶高,计算出来的回波顶高值就会随着距离增加而呈现锯齿状振荡(图 2a),而以反射率因子作为权重进行垂直线性内插后,计算出来的回波顶高就接近真实的回波顶高(图 2b)。由于采用垂直线性内插考虑了反射率因子在垂直方向上的连续性,因此也就消除了回波顶高随距离增加的振荡现象。

使用垂直线性内插方法计算回波顶高的步骤如下:首先,基于雷达极坐标体扫数据,在每个方位-斜

距库上从高仰角向低仰角寻找大于等于给定反射率因子阈值 T_z (缺省值为 18 dBz)的最高仰角(该仰角记为 e_1),如果该仰角为扫描最高仰角,则该处的回波顶高 h_{ET} 计算为该仰角波束轴线离地面的高度,否则也记下该仰角上面的相邻仰角 e_2 ;然后,用标准大气条件下的雷达测高公式计算 e_1, e_2 对应的波束轴线距地面的高度 h_1, h_2 ;最后,用 e_1, e_2 对应的反射率因子 Z_1, Z_2 与 T_z 的差作为权重,通过线性内插获取 T_z 所对应的高度,即该方位-斜距库的回波顶高 h_{ET} 。 h_1, h_2, h_{ET} 分别按公式(2)、(3)、(4)计算:

$$h_1 = h_0 + r \sin e_1 + r^2 \cos^2 e_1 / (2R_e) \quad (2)$$

$$h_2 = h_0 + r \sin e_2 + r^2 \cos^2 e_2 / (2R_e) \quad (3)$$

$$h_{ET} = w_1 \times h_2 + w_2 \times h_1 \quad (4)$$

其中 $w_1 = (Z_1 - T_z) / (Z_1 - Z_2), w_2 = (1 - w_1)$ 。 T_z, Z_1, Z_2 的单位

为 dBz。 h_0 为雷达站海拔高度, r 为斜距, R_e 为等效地球半径, 其单位均为 km。

图 3 给出 2007 年 7 月 8 日 10:06(世界时) 武汉

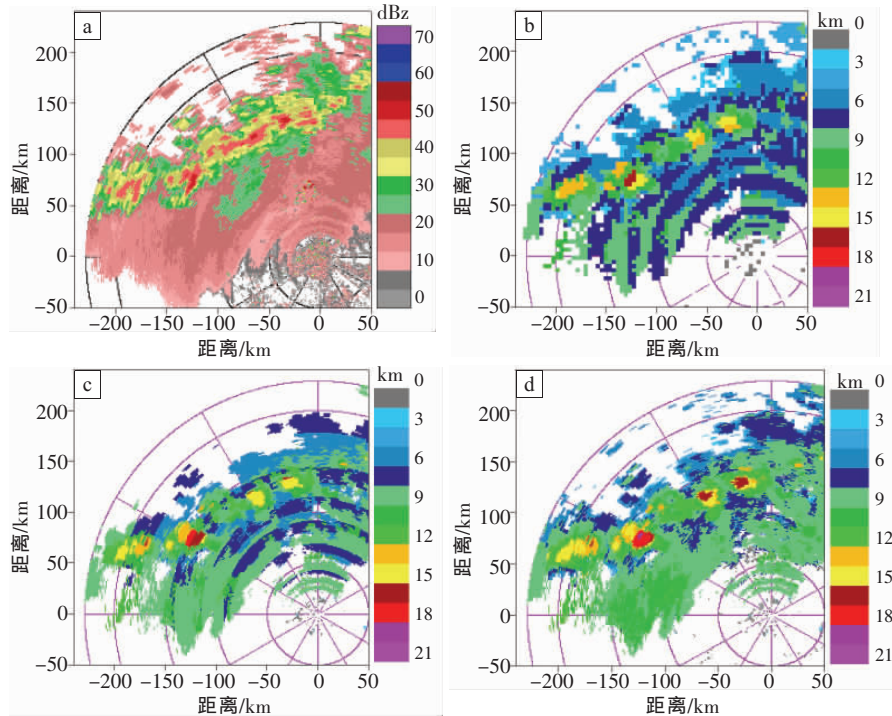


图 3 2007 年 7 月 8 日 10:06(世界时) 武汉 CINRAD/SA 雷达观测的 CR(a)、ET(b)、没有垂直线性内插得到的高分辨 ET(c)和经过垂直线性内插得到的高分辨 ET(d)产品图

从图 3a 中可见,在雷达的西北方向有一条东北—西南向对流带,对流带前侧是层状云降水回波。从图 3b 中可见, 现有 ET 产品的回波顶高值随距离增加呈现明显的锯齿状振荡,特别是在层状云区域,而真实的层状云降水的顶部应比较平整,且由于其分辨率比较粗糙,有明显的“马赛克”斑块。比较图 3b 和 3c 可知, 没有垂直线性内插得到的高分辨 ET 产品的纹理变得更细致光滑,但回波顶高值还是随距离增加呈现明显的锯齿状振荡。比较图 3c 和 3d 可知,经过垂直线性内插得到的高分辨 ET 产品的空间分布非常连续,锯齿状不连续现象消失。

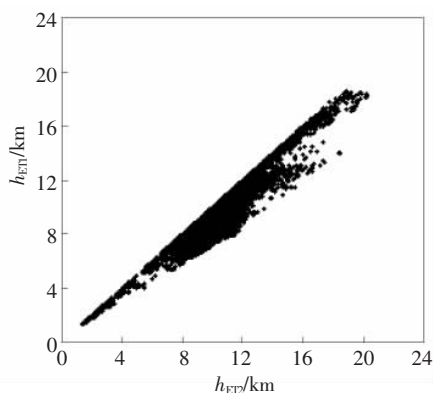


图 4 图 3c 和图 3d 中的回波顶高值的散点图(h_{ETI} 为经过垂直线性内插得到的, h_{ETI} 为未经过垂直线性内插得到的)

CINRAD/SA 雷达观测的组合反射率因子 CR、ET、没有垂直内插得到的高分辨 ET 和经过垂直线性内插得到的高分辨 ET 产品图。

图 4 给出图 3c 和图 3d 中回波顶高值的散点图, 从中可见,通过垂直线性内插得到的回波顶高值要大于等于直接用波束轴线高度近似的回波顶高值,二者之差在 0~4 km 之间。

3 改进的 VIL 算法

对新一代天气雷达中的 VIL 算法进行两方面改进: 一是将产品数据格式从直角坐标变为极坐标格式,并提高产品分辨率,即从原来的 $4\text{ km} \times 4\text{ km}$ 变为 $1^\circ \times 1\text{ km}$; 二是去掉 18 dBz 的反射率因子阈值设定,并显示小于 $1\text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 的 VIL 值,将计算范围从 230 km 扩展到反射率因子最大探测范围(460 km),保存的产品数据不分等级。

改进的 VIL 计算步骤如下: 首先,基于雷达极坐标体扫数据,在每个方位-斜距库上搜索能探测到有效反射率因子值的最低仰角 e_b 和最高仰角 e_t (对应的反射率因子分别为 Z_b 、 Z_t); 然后,利用公式(6)计算 e_b 、 e_t 所在波束轴线之间的垂直累积液态水含量 M_1 ,对于 e_b 以下的半个波束和 e_t 以上的半个波束内的垂直累积液态含水量 M_b 、 M_t ,分别用公式(7)和(8)计算。那么,雷达探测到的该方位-斜距库的总的 VIL 为 M_1 、 M_b 、 M_t 之和(M_{VII})。 M_1 、 M_b 、 M_t 、 M_{VII} 的计算公式如下:

$$M_1 = \sum 3.44 \times 10^{-6} \times [(Z_i + Z_{i+1})/2]^{4.7} \Delta h_i \quad (5)$$

$$M_b = 3.44 \times 10^{-6} \times Z_b^{4/7} \Delta h_b \quad (6)$$

$$M_i = 3.44 \times 10^{-6} \times Z_i^{4/7} \Delta h_i \quad (7)$$

$$M_{VIL} = M_i + M_b + M_t \quad (8)$$

其中, M_{VIL} 的单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$, Z_i, Z_{i+1} 分别是某个斜距-方位库上相邻仰角上的反射率因子(单位 $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$), Δh_i 是 Z_i 和 Z_{i+1} 所在距离库之间的距离(单位 m)。 $\Delta h_b =$

$\Delta h_i = r \sin(\psi/2)$, r 为斜距(单位 m), ψ 为雷达的垂直波束宽度(单位为弧度)。

图 5 给出 2007 年 7 月 8 日 10:06(世界时)武汉 CINRAD/SA 雷达观测的 VIL 图、改进的与图 5a 中分级相同的 VIL 图、改进的与图 5a 中分级不相同的 VIL 图,对应的 CR 见图 3a。

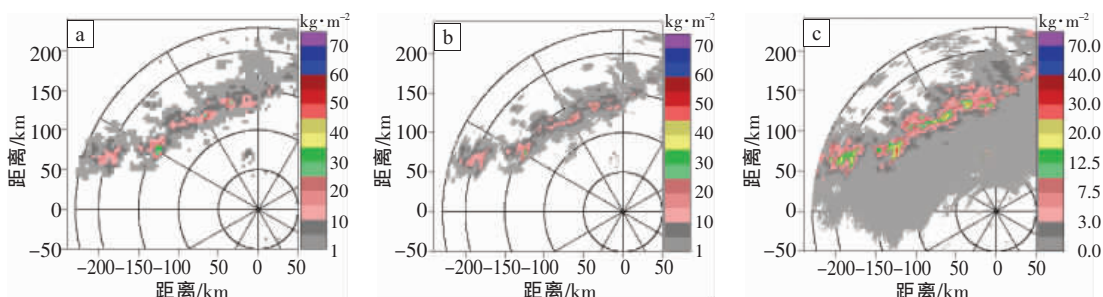


图 5 2007 年 7 月 8 日 10:06(世界时)武汉 CINRAD/SA 雷达观测的 VIL 图(a)、改进的与图 5a 中分级相同的 VIL 图(b)、改进的与图 5a 中分级不相同的 VIL 图(c)

比较图 5a 和图 5b 发现,二者有值的区域、强中心位置和强度均一致,不同的是图 5b 比图 5a 的纹理更光滑、结构更精细,这是因二者分辨率不同所致。在图 5c 中,小于 $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 的 VIL 值也被显示出来,且在 VIL 小值区分级更细,因此相比图 5b,图 5c 中有值的区域更大、结构更精细。

4 VIL 密度

选用固定的 VIL 阈值作为冰雹判别指标存在几个问题^[14]: 1)VIL 值大小与气团性质有关,冷气团中的对流可能产生强冰雹,但对应的 VIL 较低,而那些暖气团中的具有高 VIL 的风暴不一定产生强冰雹,也就是说 VIL 具有日变化和地区变化;2)由于 VIL 是雷达探测到的整个降水云厚度内的反射率因子的积分,因

此它无法区分具有较低反射率因子的高风暴(可能产生小冰雹)和具有高反射率因子的矮风暴(可能产生大冰雹);3)风暴的 VIL 值受到风暴离雷达距离的影响,特别是当风暴离雷达很近或很远时,由于雷达扫描仰角的限制,风暴 VIL 值会显著偏低。为了减轻单独使用 VIL 产品存在的一些问题,VILD 会被作为冰雹判别指标使用。VILD 是标准化的 VIL,是 VIL 与其对应的回波厚度之比(D_{VIL} , 单位 $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)。

$$D_{VIL} = M_i / \Delta h \quad (9)$$

其中, Δh 为最低仰角 e_b 、最高仰角 e_t 所在波束轴线之间的高度差(单位 km)。在生成 VIL 产品的同时,生成 VILD 产品。图 6 给出的是 2007 年 7 月 27 日 11:26(世界时)武汉 CINRAD/SA 雷达观测的 CR、改进的 VIL 以及 VILD。

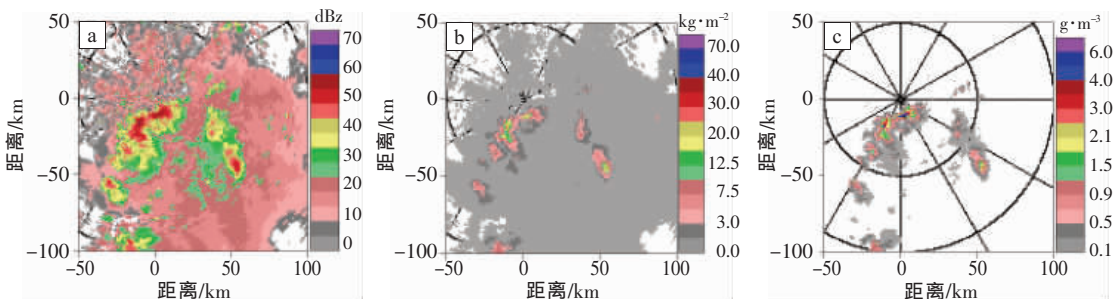


图 6 2007 年 7 月 27 日 11:26(世界时)武汉 CINRAD/SA 雷达观测的 CR(a)、改进的 VIL(b)和 VILD(c)

从图 6a 中可见,在雷达附近有 2 个风暴,由于离雷达太近,最高扫描仰角探测不到风暴顶,因此其对应的 VIL 值不是特别大,但其对应的 VILD 却超过了 $4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,据 Amburn 等人统计^[14],无论 VIL 和 ET 有多大,凡是 VILD 大于 $4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的风暴都会产生冰雹,事实上这 2 个风暴都产生了冰雹。

5 结论

鉴于新一代天气雷达现存的 ET 和 VIL 产品的缺陷,本文提出了改进的 ET 和 VIL 产品算法,此外增加了 VILD 产品算法。通过对比算法改进前后的 ET 和 VIL 产品发现,改进后的 ET 产品的空间分布非常连

续,出现在原产品中的锯齿状振荡被成功消除,回波顶高值要大于等于改进前的;改进的 VIL 产品纹理更加光滑、结构更加精细。相比 VIL,VILD 更适合作为冰雹判别指标。

参考文献:

- [1] 俞小鼎,姚秀萍,熊延南,等.多普勒天气雷达原理与业务应用[M].北京:气象出版社,2006:181-230.
- [2] 王建国,汪应琼.CINRAD/SA 雷达产品在冰雹预警中的适用性分析[J].暴雨灾害,2008,27(3):268-272.
- [3] 尹忠海,刘应军,黎祖贤,等.湘中“6.26”雷雨大风过程的多普勒雷达产品分析[J].暴雨灾害,2007,26(4):319-322.
- [4] 宋晓辉,柴东红,曹秀芝,等.“5.10”强对流天气雷达产品特征及临近预报[J].气象科学,2007,27(B12):85-88.
- [5] Waldvogel A, Schmid W, Grimm P. Criteria for the detection of hail cells [J]. J Appl Meteor, 1979, 18: 1521-1525.
- [6] Witt A, Eilts M D, Stumpf G J, et al. An enhanced hail detection algorithm for the WSR-88D [J].Wea Forecasting, 1998, 13: 286-303.
- [7] 付双喜,安林,康凤琴,等.VIL 在识别冰雹云中的应用及估测误差分析[J].高原气象,2004,23(6):810-814.
- [8] Eilts M D, Doviak R J. Oklahoma downbursts and their asymmetry [J]. J Climate Appl Meteor, 1987, 26: 69-78.
- [9] 肖艳姣,李中华,张端禹,等.“07.7”鄂东南强对流天气的多普勒雷达资料分析[J].暴雨灾害,2008,27(3):213-218.
- [10] 郑媛媛,俞小鼎,方翀,等.一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析[J].气象学报,2004,62(3):317-328.
- [11] Howard K W, Gourley J J, Maddox R A. Uncertainties in WSR-88D measurements and their impacts on monitoring thunderstorm life cycles [J]. Wea Forecasting, 1997, 12: 166-174.
- [12] Maddox R A, Zaras D S, Mackeen P L, et al. Echo Height Measurements with the WSR-88D: Use of Data from One Versus Two Radars [J]. Wea Forecasting, 1999, 14: 455-460.
- [13] Smalley D J, Bennett B J, Pawlak M L. New products for the NEXRAD ORPG to support FAA Critical Systems[C].Preprints, 19th International Interactive Processing Systems Conference, Long Beach, CA. Amer Meteor Soc, 2003, 14: 12.
- [14] Amburn S, Wolf P. VIL Density as a Hail Indicator [J]. Wea Forecasting, 1997, 12: 473-478.

Advanced Algorithms of ET, VIL and VIL Density for the CINRAD

XIAO Yan-jiao¹, MA Zhong-yuan², LI Zhong-hua³

(1.Wuhan Institute of Heavy Rain,CMA,Wuhan 430074;

2.Meteorological Institute of Jiangxi Province,Nanchang 330046;

3.Meteorological Information and Technology Support Center of Hubei Province,Wuhan 430074)

Abstract: There are several known limitations in using existing ET (Echo Tops) and VIL (Vertically Integrated Liquid) products from CINRAD (China New Generation Weather Radar), therefore, the high resolution enhanced ET and VIL algorithms have been developed. Besides, a new VIL density algorithm has been developed. The high resolution enhanced ET algorithm provides a higher spatial resolution by virtue of its polar (1° by 1 km) format than the original (4 km by 4 km) and the more precise ET values by the vertical linear interpolation. The high resolution VIL algorithm provides the range (460 km) needed to monitor upwind convection and the fine resolution (1° by 1 km with digital data level resolution and no 18 dBz restriction) to monitor incipient weather for potential development. The benefits of the high resolution enhanced ET and VIL algorithms are illustrated through the comparison of the enhanced products with the original products. Results show that the saw tooth artifact of the original echo tops product is successfully mitigated in the enhanced product. In addition, the altitude of enhanced echo tops is larger than or equal to that of the original one. The texture of the high resolution VIL product is smoother resulting in much detail and higher resolution. VIL density is more fit than VIL as a severe hail indicator.

Key words: Radar; Vertically Integrated Liquid; VIL density; Echo Tops