

文章编号: 1000-2022(2005)02-0205-08

VIL 中心区自动识别、跟踪和临近预报

梁明珠^{1,2}, 胡志群³,
夏文梅⁴, 汤达章¹, 马玉岩⁵

(1. 南京信息工程大学 大气科学系, 江苏 南京 210044 2. 山西省气象台, 山西 太原 030006;
3. 南京信息工程大学 应用气象学系, 江苏 南京 210044 4. 江苏省气象台, 江苏 南京 210008
5. 青海省气象局 人工影响天气办公室, 青海 西宁 810001)

摘要: 利用多普勒天气雷达体扫数据资料计算垂直累积液态含水量 (VIL), 用逐步增大初始阈值法识别 VIL 中心区; 利用动态预测面积比法、分类跟踪法以及中心区面积守恒原则相结合的方法对中心区进行跟踪; 运用线性最小二乘法、线性集成法和线性外推法对中心区的重心位置进行临近预报。实例结果表明: 所使用的方法能很好地识别、跟踪和预报 VIL 中心区。

关键词: VIL 中心区; 识别; 跟踪; 临近预报

中图分类号: P415.2 **文献标识码:** A

20 世纪 70 年代, Greene 等^[1-2] 提出了一种新的利用雷达数字回波资料计算的预报因子——垂直累积液态含水量 (Vertical Integrated Liquid-water content, 简称 VIL), 并利用最大相关系数法跟踪 VIL, 结果表明其稳定性很好。VIL 是判别强对流天气造成的暴雨、暴雪和冰雹等灾害性天气的有效工具之一^[3], Robert 等^[4] 的研究结果也表明: VIL 中心与降水中心密切相关。因此, 建立在自动识别和跟踪基础上的 VIL 中心区的临近预报具有重要意义。

肖艳姣等^[5] 用规定初始阈值和最小体积阈值来识别三维风暴。此种方法也经常被用来识别 PPI 回波, 但是, 当规定较大的初始阈值时, 面积较小的回波, 其矩心 (反射率加权中心) 的运动有时显得很古怪, 难以跟踪。本文提出: 用逐步增大初始阈值法识别 VIL 中心区, 并且得到了一条重要原则: 中心区面积守恒原则, 为成功跟踪奠定了基础。

在跟踪方面, 面积比法最初由 A maud 等^[6] 提出, 过仲阳等^[7] 利用此方法对中尺度对流系统进行了跟踪。面积比法对在移动方向跨度较大的中心区效果较好, 但对跨度较小的中心区效果不佳。另外, 叠加面积比值的大小对此方法的效果影响很大。本文引入中心区孤立指数和预测移动路径对面积比法进行改进, 改进后的面积比法称为: 动态预测面积比法。同时使用分类跟踪法和中心区面积守恒原则以提高跟踪精度。

收稿日期: 2004-04-16 改回日期: 2004-12-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40475017); 江苏省科技厅资助项目 (BS2003054)

作者简介: 梁明珠 (1971-), 男, 山西临汾人, 工程师, 硕士生, 研究方向: 多普勒雷达资料分析与应用。

E-mail: liangmz100@sohu.com.

建立在线性外推基础上的临近预报方法,对数小时以内的局地天气预报来说,这种方法的质量是很高的^[8]。利用线性最小二乘法^[9]计算的中心区移动速度,有助于提高线性外推的稳定性。本文中,线性集成长短两个时段的移动速度,以同时提高线性外推的稳定性和灵敏度。

1 VIL 计算原理和方法

VIL 是反映降水云中,在某一个底面积的垂直柱体内液态水总量的分布。假设雨滴谱满足 $M-P$ 分布,利用 $M-Z$ 关系式计算 VIL 的值 M_{VIL} ,具体方法参见文献 [1, 3]。实际应用时, M_{VIL} 的计算式为

$$M_{VIL} = 3.44 \times 10^{-6} \sum_{i=1}^{N-1} \left(\frac{Z_i + Z_{i+1}}{2} \right)^{4.7} \Delta h_i \quad (1)$$

式中, Z_i (单位: $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$) 为第 i 层高度上的雷达反射率因子, Δh_i (单位: m) 为第 i 层和第 $i+1$ 层之间的高度差, N 为体扫描的仰角总数, VIL 单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。本文中 VIL 的底平面取 0° 仰角对应的平面,垂直柱体底面积取 $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$ 。

2 VIL 中心区识别

2.1 VIL 核心阈值、VIL 参考初始阈值和中心区面积阈值

VIL 核心阈值 M_k 是某一时刻的每个 VIL 中心区极大值 M_{\max} 都要达到的阈值,是确定某个 VIL 区能否被识别为中心区的必要条件。当 $M_{\max} \geq M_k$ 时,就表明这个区包含中心区。 M_k 是自动选取的,首先根据经验规定能够形成降水的最小 VIL 值 M_{\min} , M_k 需要满足:所有 $M_{VIL} \geq M_k$ 的 VIL 总面积与所有 $M_{VIL} \geq M_{\min}$ 的 VIL 总面积的比值等于 P 。

VIL 参考初始阈值 M_n 是事先规定的中心区最大初始阈值。中心区面积阈值 S_n 是结合经验和跟踪的需要事先规定的中心区的面积 S ,用来识别 VIL 初始阈值小于 M_n 的中心区。

2.2 VIL 分区方法

VIL 是以多个 $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$ 为底面积的小方块来表示的,对其分区就是对这些小方块分区。根据 VIL 初始阈值 M_n ,从西向东,先北后南逐行扫描整个 VIL,东西向为行,南北向为列。在同一行上 $M_{VIL} \geq M_n$ 的相连 VIL 小方块被划分为一个 VIL 段,这样整个 VIL 就被划分为多个 VIL 段。以 VIL 段所在的行的行号,以及在该行上的起始和结束列号来表示段的位置。相邻行上的两个 VIL 段,只要两个段中的小方块有一个列相同,就认为这两个段相连,所有相连的 VIL 段就被划分为一个 VIL 区。

2.3 逐步增大初始阈值法

VIL 中心区是 VIL 大值中心区,反映了降水云中液态水含量的大值中心,同时也反映了云中降水潜力最大的区域。VIL 区被识别为中心区的识别条件是满足以下两个条件之一:

$$M_{\max} \geq M_k, M_a \geq M_n;$$

$$M_{\max} \geq M_k, M_a < M_n, S \leq S_n.$$

对 VIL 进行第一次扫描分区时 $M_a = M_{\min}$, 满足识别条件 的区则最先被识别为中心区,相应的初始阈值为 M_{\min} 。然后逐步增大 M_n 重新分区,直到 $M_a = M_n$ 。随着 M_n 的逐渐增大,没有被识别为中心区的区就会逐渐分离和收缩,当它第一次满足识别条件 时,就被识别为中心区,对应的 M_n 就是相应中心区的初始阈值。显然, $M_a < M_n$ 时识别到的中心区面积大都接近于 S_n , 面积较小的中心区,有可能本身就较小,也有可能是相邻很近的将要合并或者刚刚分裂的中心区,但其面积之和接近于原中心区面积。 $M_a = M_n$ 时,满足识别条件 时,则被识别为中心

区, 并且 $S \geq S_n$, 保留了较强中心区的“原貌”。同时, 相邻很近的将要合并或者刚刚分裂的中心区的总面积与原中心区面积大致相等。

对面积过小的中心区进行剔除 ($M_a = M_{min}$ 的中心区除外)。给中心区编号, 记录各个中心区所在的行号以及各行上起始和结束列号。计算各个中心区的面积、重心 (中心区的 M_{VIL} 加权中心), 并标注可用标示, 把这些信息保存于识别信息表中。

3 VIL 中心区跟踪

3.1 VIL 中心区孤立指数和参考面积比值

按照中心区可能的最大移动和发展速度 (根据经验取为 $150 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$), 结合雷达观测时间间隔, 计算 t_{i-1} 时刻两个中心区即便是迎面移动和发展在 t_i 时刻也不会发生面积重叠的距离指标 R 。把某个中心区边缘与其他中心区边缘之间的最短距离 (中心区间距离) 与 R 的比值定义为该中心区孤立指数 G 。 $G = 1$ 说明 t_{i-1} 时刻的这个中心区在 t_i 时刻不会和任何中心区发生面积重叠; $G = 2$ 说明 t_{i+1} 时刻也不会发生面积重叠, 依此类推。 G 值大小反映了中心区间距离的远近程度。

参考面积比值 P 是确定两个中心区是否成功重叠的面积比值, 利用 G 确定 P 。对 G 较大的中心区, P 取较小值, 尽可能避免漏跟踪; 对 G 较小的中心区, P 取较大值, 以防止近距离中心区在跟踪时发生误跟踪, 这样就给每个中心区都确定一个 P 。两个中心区进行面积重叠时, P 取其中大值。根据经验规定: $G \geq 1$ 时, $P_r = 0.2$; $0.5 \leq G < 1$ 时, $P_r = 0.3$; $0.3 \leq G < 0.5$ 时, $P_r = 0.4$; $G < 0.3$ 时, $P_r = 0.5$ 。

3.2 动态预测面积比法

相邻时刻中心区的重叠面积: 两个中心区中具有相同行号和列号的所有 VIL 小方块的面积和。对 t_i 时刻的中心区进行跟踪时, 首先利用 t_{i-1} 时刻的一个时间间隔的预报结果 (t_i 时刻的可能位置)。 t_{i-1} 时刻和预报的 t_i 时刻的重心位置所连成的线, 就是 t_{i-1} 时刻的中心区预测移动路径。然后让 t_{i-1} 时刻的中心区重心从原重心位置开始沿预测移动路径移动直到预测的重心位置, 同时与 t_i 时刻的中心区进行面积重叠运算, 整个移动叠加过程中两个中心区的最大重叠面积为这两个中心区的动态预测重叠面积。

设在 t_{i-1} 时刻某个中心区 C_{i-1} 的面积为 S_{i-1} , t_i 时刻某个中心区 C_i 的面积为 S_i , C_{i-1} 与 C_i 的动态预测重叠面积为 S_r , 满足动态预测重叠面积条件 (P 取 C_{i-1} 与 C_i 的大值):

$$S_r/S_{i-1} \geq P_r \text{ 或者 } S_r/S_i \geq P_r.$$

就认定 C_i 与 C_{i-1} 属于同一个中心区, 跟踪成功。

3.3 VIL 中心区跟踪方式和质量控制

对识别信息表中存在可用标示的中心区进行面积重叠运算。若是禁用标示, 说明这个中心区已经跟踪完毕。每次跟踪成功或者做了新生、衰亡团处理, 相应中心区的可用标示要改写为禁用标示。具体跟踪时, 以下列几种方式来跟踪:

(1) 单中心区跟踪。如果 C_{i-1} 与一个 C_i 同时 C_i 也只与 C_{i-1} 满足动态预测重叠面积条件, 单中心区跟踪成功。

(2) 分裂中心区跟踪。如果一个 C_{i-1} 与多个 C_i 同时这多个 C_i 也只与 C_{i-1} 满足动态预测重叠面积条件, 分裂中心区跟踪成功。

(3) 合并中心区跟踪。如果多个 C_{i-1} 与一个 C_i 同时 C_i 也只与这多个 C_{i-1} 满足动态预测重叠面积条件, 合并中心区跟踪成功。

(4) 衰亡中心区跟踪。如果 C_{i-1} 与任何 C 都不满足动态预测重叠面积条件, C_{i-1} 衰亡。

(5) 新生中心区跟踪。如果 C_i 与任何 C_{i-1} , 都不满足动态预测重叠面积条件, C_i 新生。

(6) 交叉中心区跟踪。交叉中心区就是多个 C_{i-1} 与多个 C_i 满足动态预测重叠面积条件, 其中会同时发生分裂和合并等现象。把多个 C_{i-1} 与多个 C_i 分别按两个总中心区来跟踪。

在识别时所采用的方法使得中心区的面积在相邻时次变化很小, 满足同一中心区面积守恒原则。面积守恒原则是: 同一中心区的面积在相邻两个时次其面积几乎相等, 不仅适用于单一中心区, 同时适用于合并、分裂和交叉中心区。这一原则被用于跟踪, 大大提高了跟踪的准确率, 特别是合并、分裂以及交叉等复杂跟踪的精度得到了极大的提高。

3.4 VIL 中心区移动路径计算原理

对跟踪成功的中心区, 根据两个时刻的重心位置计算中心区移动速度。如果是分裂中心区 (C_{i-1} 分裂成多个 C_i), 就利用多个 C_i 的总重心和 C_{i-1} 的重心来计算; 如果是合并中心区 (多个 C_{i-1} 合并成 C_i), 就利用多个 C_{i-1} 的总重心和 C_i 的重心来计算; 如果是交叉中心区 (多个 C_{i-1} 与多个 C 交叉), 就利用多个 C_{i-1} 的总重心和多个 C 的总重心来计算中心区的移动速度。

4 VIL 中心区临近预报

对 t 时刻中心区位置进行临近预报时, 利用线性最小二乘法根据中心区的重心位置分别计算每个中心区在 $t_i \sim t_{i-n}$ 时刻和 $t_i \sim t_{i-m}$ 时刻的趋势移动速度和短时移动速度。 n 根据预报时效长短来确定, 通常 $m = 2n$ 和 m 满足 $n \geq m$ 。用 V_{td} 和 V_{ts} 表示趋势移动速度的方向和速率, V_{md} 和 V_{ms} 表示短时移动速度的方向和速率。趋势移动速度反映了中心区在较长时间内的移动情况, 其结果比较稳定。短时移动速度则反映了中心区的最新移动趋势。

对 V_{td} 和 V_{md} , V_{ts} 和 V_{ms} 进行线性集成, 并进行线性外推, 得到 t 时刻的中心区预报移动速度, 方向 V_d 和速率 V_s :

$$V_d = aV_{td} + bV_{md}, \quad (2)$$

$$V_s = cV_{ts} + dV_{ms}. \quad (3)$$

式中, a , b , c 和 d 为集成权重系数 ($a + b = 1$, $c + d = 1$), 在此都取为 0.5。以 t 时刻中心区重心位置为起始点, 就可得到某个预报时效 t 的中心区重心位置。

5 应用分析

本文选用的多普勒雷达资料为南京 (降雨) 和天津 (降雪) 多普勒雷达体扫基数据资料, 基数据时间 (GMT) 为雷达开始扫描的时间, 相邻的开始观测时间大约相隔 6 min。利用这些资料对本文使用的方法进行了检验。本文中, $P_s = 5\%$, $S_n = 960 \text{ km}^2$, 降雨时 $M_{min} = 0.24 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, $M_n = 0.9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 降雪时 $M_{min} = 0.12 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, $M_n = 0.24 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

5.1 南京多普勒雷达资料应用分析

对南京 2003 年 6 月 11 日 03 时 57 分 29 秒到 04 时 47 分 17 秒共计 9 个时次 ($t_1 \sim t_9$) 的基数据进行 VIL 计算和中心区识别。 $t_1 \sim t_9$ 时次识别到的中心区数目都在 4~8 个之间, 中心区的面积普遍比较大, 只有很少的几个中心区面积较小, 总体识别结果是较好的。 t_1 时次识别到 4 个中心区 (图 1a), t_9 时次识别到 7 个中心区 (图 1b)。

对 8 个时次 ($t_2 \sim t_9$) 中心区进行了连续跟踪 (相邻观测时次), 在不使用预测移动路径时, 只有对 t_8 时次的一个中心区跟踪失败, 其余时次全部跟踪成功, 跟踪成功率达 98%。使用预测移动路径 (t_2 时次没有使用), 对这 8 个时次重新跟踪, 8 次全部跟踪成功, 跟踪成功率达

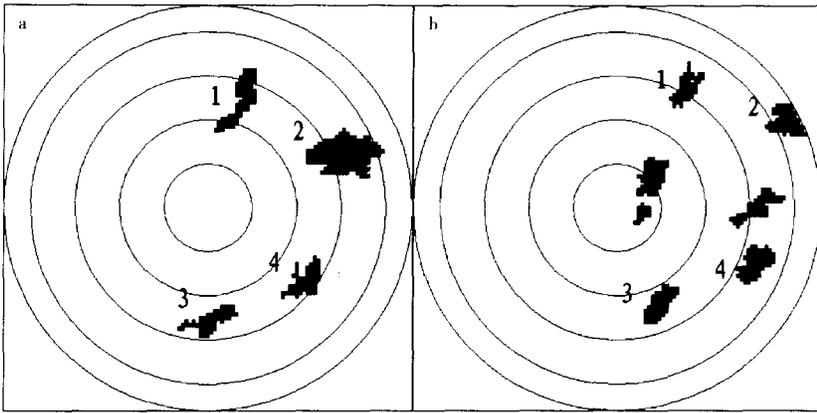


图 1 VIL 中心区分布

a 03:57:29(t_1); b 04:47:17(t_2)

Fig 1 Distributions of vertical integrated liquid-water content(VIL) heartland

a 03:57:29(t_1); b 04:47:17(t_2)

100%, 可见预测移动路径对跟踪成功是很重要的。

对 7 个时次 ($t_3 \sim t_9$) 中心区进行不连续跟踪 (相隔一个观测时次), 在不使用预测移动路径时, 在每个时次都有 33% 左右的中心区跟踪失败。使用预测移动路径重新跟踪, 除去 t_7 时次一个新生中心区 (无法计算预测移动路径) 跟踪失败外, 另有 t_9 时次一个中心区没有跟踪成功, 其余全部跟踪成功, 跟踪成功率达 95.7%, 再次说明了预测移动路径的重要性。 t_9 时次没有跟踪成功的中心区, 实际是 t_7 时次 2 个中心区的合并中心区。跟踪认为 t_9 时次合并中心区是 t_7 时次其中 1 个面积较大的中心区, 对面积较小中心区出现了漏跟踪。究其原因有 3 个: (1) 中心区变形比较严重; (2) 中心区面积偏小; (3) 中心区距离很近, 使得参考面积比值较大。针对漏跟踪采取了相应的改进措施: 当中心区面积小于参考面积阈值较多时, 根据其比值降低 P_r ($P_r = P_r(S_r/S)$), 重新进行跟踪, 跟踪成功。

利用 $t_1 \sim t_5$ 时次的各个中心区重心, 计算图 1 中 1~4 号中心区的趋势移动速度, 短时移动速度利用 $t_3 \sim t_5$ 时次来计算。以 t_5 时次 1~4 号中心区的重心位置为起点进行位置预报, 预报时效为: $t = 4\Delta t$ (Δt 取为相邻观测时间间隔, 大约 6 min), 得到 t_9 时次的重心位置。对预报结果与实况进行了比较, 3 号和 4 号中心区的预报与实况对比见图 2 (雷达中心为坐标原点)。结果表明, 重心的移动方向与实况相吻合, 重心位置与实况接近。

5.2 天津多普勒雷达资料应用分析

对天津 2003 年 11 月 6 日 16 时 17 分 08 秒到 17 时 23 分 39 秒共计 12 个时次 ($t_1 \sim t_{12}$) 的基数据进行 VIL 计算、中心区识别、连续和相隔一个时次的跟踪, 并利用连续的 $t = \Delta t$ 的临近预报结果检验了预测移动路径的可靠性。

中心区显著特点是最强中心区呈带状分布 (图 3 中 1 号中心区), 而且面积较大。全部 11 个时次的连续跟踪结果和相隔一个时次的 10 个时次的跟踪结果都正确。对图 3 中带状的中心区, 以 $t_2 \sim t_{11}$ 各个时次的中心区重心位置为起点, 进行预报时效为 $t = \Delta t$ 的重心位置预报 (图 4 雷达中心为坐标原点)。

在跟踪时所使用的预测移动路径, 就是以上各时次的 Δt 预报移动路径。只要预测移动路

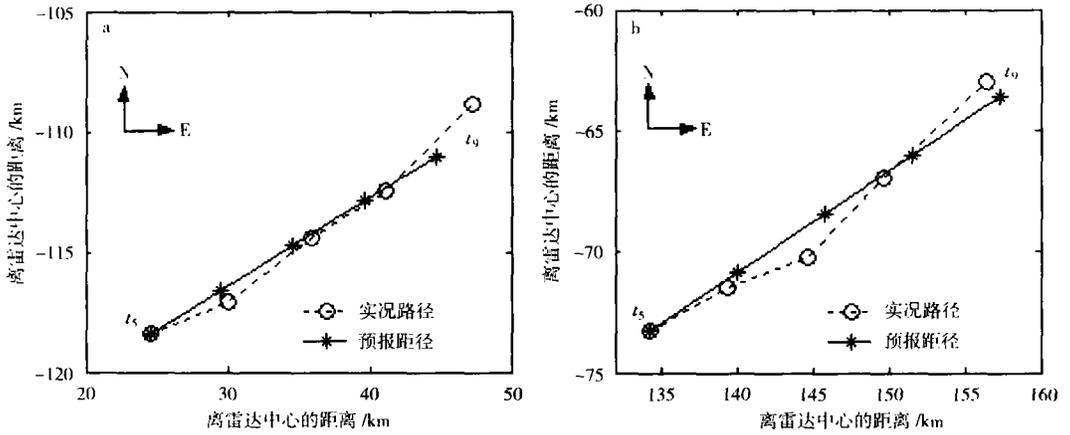


图 2 VIL中心区移动路径

a 3号中心区; b 4号中心区

Fig 2 Tracks of vertical integrated liquid-water content(VIL) heartland

a No 3 heartland b No 4 heartland

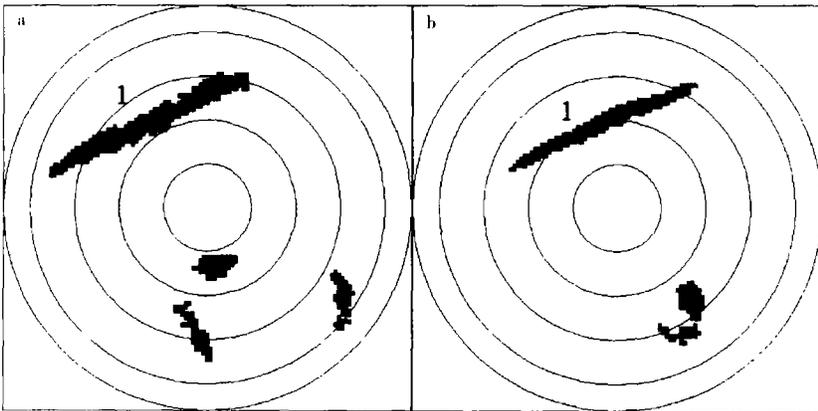


图 3 VIL中心区分布

a 16 17: 08(t_1); b 17 17: 36(t_{11})

Fig 3 Distributions of vertical integrated liquid-water content(VIL) heartland

a 16 17: 08(t_1); b 17 17: 36(t_{11})

径与实际移动路径的夹角小于 90° , 在不考虑参考面积比值时, 动态预测面积比法的效果就优于面积比法, 即便是大于 90° , 这两种方法的效果还是一样的, 不会因为预测移动路径的偏差较大而使动态预测面积比法的效果低于面积比法, 在考虑参考面积比值时, 动态预测面积比法的优越性会更明显。当然, 预测移动路径的偏差越小, 动态预测面积比法的效果越好。预测移动路径与实际路径的夹角小于 90° 时, 预测移动路径的理想长度是接近或者略小于实际路径长度, 当长度大于实际路径很多时, 容易产生误跟踪。从图 4 中可以看出所有时次的预测移动路径方向与实况相比都远远小于 90° ; 所有预测移动路径的长度都接近或者略小于实况长度。显然, 预测移动路径的可靠性是很高的, 它对中心区的跟踪成功所起的作用是显而易见的。

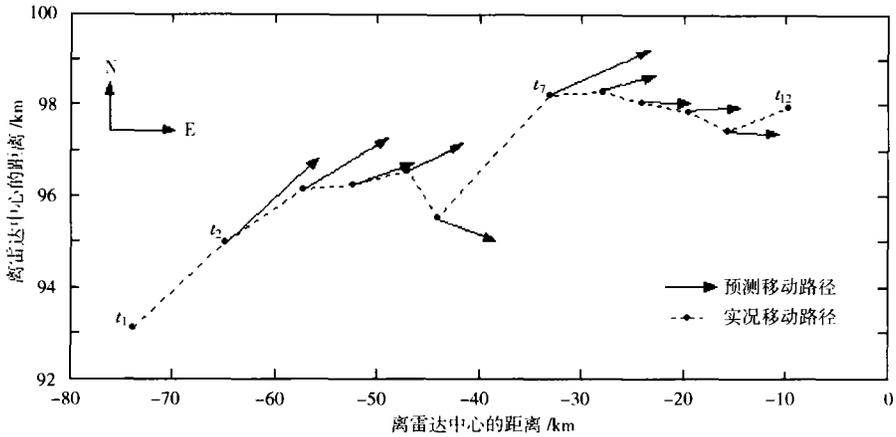


图 4 VIL 中心区预测移动路径

Fig 4 Forecasted tracks of vertical integrated liquid-water content(VIL) heartland

6 结 语

本文对 VIL 中心区自动识别、跟踪和临近预报进行了方法研究和应用, 分析结果是令人满意的。由于搜集的资料有限, 时效较长的临近预报有待于进一步检验。以下几点值得进一步探讨:

(1) 参考面积比值是根据中心区孤立指数确定的, 对面积偏小的中心区进行跟踪时, 应该根据中心区面积适当降低参考面积比值;

(2) M_k 是在 $P_s = 5\%$ 的条件下选取的, 以此也就确定了中心区的数目。也可以先确定中心区数目, 自动选取 P_s 值 (M_k 也会相应改变), 重新进行分区识别, 直到中心区数目达到规定值;

(3) 本文中所使用的各种阈值是根据经验规定的, 使用时应根据当地实际情况进行修订;

(4) 预测移动路径和实际路径必然会有误差, 根据误差规定预测移动路径可能的改变范围, 这样预测移动路径就扩展为预测移动区域, 必然会进一步提高动态预测面积比法的效果。

参考文献:

- [1] Greene D R, Clark R A. An Indicator of Explosive Development in Severe Storm [R]. 7th Conf on Severe Local Storms Missouri AMS, 1971: 97-104
- [2] Greene D R. A Comparison of Echo Predictability Constant Elevation vs VIL Radar-data Patterns [R]. 15th Conf on Radar Meteor. Champaign-Urbana IL: AMS, 1972: 111-116.
- [3] 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: 146-150
- [4] Robert A C, Yates J C. Applications of Digital Radar Data in Both Meteorology and Hydrology [R]. 15th Conf on Radar Meteor. Champaign-Urbana IL: AMS, 1972: 93-98
- [5] 肖艳姣, 汤达章, 李中华, 等. 风暴的自动识别、跟踪与预报 [J]. 南京气象学院学报, 1998, 21(2): 223-229
- [6] A maud Y, Michel D, Jøel M. Automatic tracking and characterization of African Convective system on meteorosat pictures [J]. J Appl Meteor, 1992, 31(5): 443-453
- [7] 过仲阳, 林 琛, 江吉喜, 等. 卫星遥感揭示的青藏高原上 MCS 活动特征及东移传播 [J]. 遥感学报, 2003, 7(5): 351-357
- [8] 马振骅, 陶善昌, 葛润生, 等. 气象雷达回波信息原理 [M]. 北京: 科学出版社, 1986: 82-95.

[9] 蒋长锦. 科学计算和 C 程序集 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1998: 182-198

Automatic Identification, Tracking and Forecasting of VIL Heartland

LIANG Ming-zhu^{1, 2}, HU Zhi-qun³,
XIA Wen-mei⁴, TANG Da-zhang¹, MA Yu-yan⁵

(1. Department of Atmospheric Sciences, NUIST, Nanjing 210044, China)

(2. Shanxi Province Meteorological Observatory, Taiyuan 030006, China)

(3. Department of Applied Meteorology, NUIST, Nanjing 210044, China)

(4. Jiangsu Province Meteorological Observatory, Nanjing 210008, China)

(5. Qinghai Weather Modification Center, Xining 810001, China)

Abstract Vertical integrated liquid-water content (VIL) is calculated based on the voluminal scan data of Doppler weather radar. The analysis of gradually increasing initial threshold-value is employed in identifying the VIL heartland. A real-time dynamical forecasting method, classification method and VIL heartland area-conservation principle are employed in tracking VIL heartland. Based on the least square analysis and integration method and linear extrapolation, the new heartland position can be predicted for a short time period. Results show that those methods are able to identify, track, and forecast the VIL heartland well.

Key words VIL heartland, identification, tracking, forecasting