

曾小团, 梁巧倩, 农孟松, 等. 交叉相关算法在强对流天气临近预报中的应用[J]. 气象, 2010, 36(1): 31-40.

交叉相关算法在强对流天气临近预报中的应用^{*1}

曾小团¹ 梁巧倩² 农孟松¹ 冯业荣² 许向春³ 陈业国¹

¹ 广西壮族自治区气象台, 南宁 530022

² 广东省气象台, 广州 510080

³ 海南省气象局, 海口 570203

提 要: 利用“雨燕”临近预报系统的雷达回波外推算法, 对三次强对流个例的 3 km CAPPI 反射率因子、回波顶和垂直累积液态含水量进行 0~1 小时外推预测, 将预测结果和组合阈值比较进行强对流天气预警区域预报试验。资料来源于 CINRAD-SB 雷达基数据经 RPG 算法处理得到的雷达产品数据。所用的方法是在扩展后的交叉相关追踪算法基础上实现雷达回波移动预测。试验结果表明: 3 km CAPPI 反射率因子、回波顶和垂直累积液态含水量雷达产品与实况有较好的吻合, 能较好地预报出回波的形状、变化趋势和移动方向, 回波的范围、位置和强度中心与实况相似, 外推时间越短, 预报效果越好。交叉相关追踪算法外推得到的雷达回波结果在 0~1 h 内是可用的; 外推预测结果经过组合阈值的过滤后, 得出的强对流天气预警区域预警结果也是可行的, 对强对流天气临近预报有一定指示意义。

关键词: 交叉相关, 强对流, 临近预报, 雷达回波外推

Application Test of TREC Algorithm to Severe Convective Storm Nowcasting

ZENG Xiaotuan¹ LIANG Qiaoqian² NONG Mengsong¹
FENG Yerong² XU Xiangchun³ CHEN Yeguo¹

¹ Guangxi Meteorological Observatory, Nanning 530022

² Guangdong Meteorological Observatory, Guangzhou 510080

³ Hainan Meteorological Bureau, Haikou 570203

Abstract: Using radar echo extrapolation method of the GRAPES-based Severe Weather integrated Forecasting Tools (GRAPES-SWIFT) of the nowcast system, the 0—1 h ahead extrapolation and forecast are made for the radar products such as reflectivity factor, echo peak and vertical accumulated liquid water content in three cases of severe convective storms, and we try to forecast the severe convection weather early warning area by comparing with the forecast outcome of the radar data to the threshold. The data come from the radar products derived from the CINRAD-SB radar based data which were processed by PRG algorithm. The method is based on the TREC algorithm to get the moving forecast of radar echoes. The result shows that radar products such as 3 km CAPPI reflectivity factor, echo peak and vertical accumulated liquid water content are approximately coincident with the actuality, which can forecast the shape, change trend and moving direction of the echo, and the range, location and intensity center of the echo are similar to the actuality. The shorter the time of extrapolation is, the better the forecast is. The extrapolated radar echo from the TREC Algorithm is available within 0—1 h, and the forecast to the convection weather early warning area by the extrapolated result which gets through making up the threshold is also feasible, and they all can be used for the severe convective storm nowcasting.

Key words: cross-correlation, severe convective storm, nowcast, extrapolation of radar echo

* 广西青年基金(0991061); 广州区域气象中心气象科技攻关项目(GRMC2007B05); 广西科技厅攻关项目(0816006-9)

2008 年 5 月 11 日收稿; 2009 年 10 月 10 日收修定稿

第一作者: 曾小团, 主要从事强天气预报研究. Email: pouryun@sina.com

引言

近十几年来,随着天气雷达技术进一步发展,以雷达资料为基础的对流天气临近预报技术进展很快,为突发灾害性天气的临近预警预测提供了技术保障。自 1950 年开始,基于天气雷达资料的对流临近预报自动外推技术研究已经开展了近半个世纪,出现了很多理论和方法,这些方法可分为持续性预报法、交叉相关追踪法和单体追踪法三种。持续性预报法只是简单地假设所有的雷达回波的大小和强度在预报时效内保持不变,并以定常速度平移进行预报,其结果比其他两种外推预报法差距较大,目前已很少使用。单体追踪法是基于三维雷暴追踪的算法,通过识别和分析雷达回波,获得雷暴单体的特征,如雷暴中心、反射率因子权重中心、雷暴顶、底和体积等,然后追踪和外推这些雷暴特征的运动来作出对流临近预报,这类算法仅适用于强对流风暴的跟踪和临近预报。而交叉相关追踪算法(TREC)主要是利用最优化空间相关的方法,建立不同时段雷达回波最佳拟合关系,来达到追踪一定区域雷达回波在过去移动特征,并根据这些特征来外推确定回波未来位置和形状。该方法不仅适合于强对流风暴的跟踪和临近预报,而且适用于范围较广一般性对流降水系统以及对流和层状混合降水系统的跟踪和临近预报,故也被称为区域追踪法^[1-2]。目前它被广泛用于确定雷达回波移动的引导风场,是国际上许多临近预报系统的主要算法之一。

交叉相关追踪算法在反演和追踪热带气旋的风场和螺旋雨带中得到了很好应用^[3-5],并已用于以气象卫星资料为基础的短时临近预报中^[5],同时该算法也是最早用来追踪雷达回波移动的算法之一,被广泛用于 Rinehart 等人的工作研究中^[6]。目前,陈明轩等^[7]利用改进的交叉相关外推算法对四个强对流个例进行反射率因子外推临近预报试验,算法给出未来 30 min 或 60 min 内雷达回波和雷暴特征的位置和形状的外推预报,预报结果和实况较为接近。冯业荣等^[8]利用改进的交叉相关外推算法进行 0~1 h 反射率因子外推,经对 2006 年 11 月 18—19 日个例试报,发现 3 km CAPPI 雷达反射率因子在 30、60 min 的雷达回波移动预测与实况相吻合。赵放等^[9]根据台风主体回波螺旋带形状的结构,及其回波系统(团)移动过程中又具有明显的旋转性运动

的特点,对交叉相关法进行了适当改进,对外推出的回波在移动方向上加以控制和修正,最后,在回波追踪与外推基础上结合估测降水强度作出 0~1 h 的降水临近预报和监测预警。但陈明轩与冯业荣等人仅用交叉相关追踪算法对雷达反射率因子进行外推试预报,并没有对其他雷达产品作进一步试验。本文主要应用“雨燕”临近预报系统中的雷达外推算法对三次强对流个例的 3 km CAPPI 雷达反射率因子、回波顶和垂直累积液态含水量产品(以下均称为雷达回波)进行 0~1 h 外推预测,并利用外推得到的预测结果与这三类产品所组合的阈值比较,进行强对流天气预警区域预报试验,期望通过对扩展后的交叉相关追踪算法在雷达回波短时预测方面的应用,为强对流天气的短时临近预报提供一些参考和依据。文章所用的外推方法是在交叉相关追踪算法基础上采用多种有效的调整方法和插值手段来获得高精度平滑雷达回波移动风场,并采用带补偿的差分格式实现雷达回波的移动预测。

1 交叉相关追踪算法原理

交叉相关追踪算法原理就是把整个数据区域划分成若干小区域,相邻时刻雷达回波图像的小区域之间计算相关系数,通过最大相关系数确定相邻时刻图像中的区域对应关系,进而确定回波区域的平均运动(见图 1)。

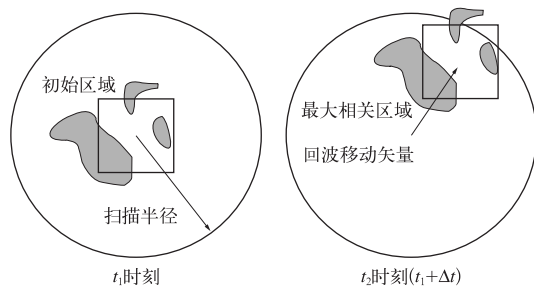


图 1 交叉相关追踪算法示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the TREC

对于相邻 Δt 时间的两个时刻雷达回波图 t_1 和 t_2 ,对 t_2 时刻的雷达回波,以某一小面积 a 为单位,在 t_1 时刻雷达回波图上以 a 的中心位置为圆心,在一定的扫描半径 R 内寻找与 a 相关最好的同面积 b ,认为雷达回波从 b 位置到 a 位置就是雷达回波 a 在 Δt 时间内的平均移动距离,将 a 和 b 的中心连接起来,即为回波移动矢量。遍历 t_2 时刻所有雷达回

波单位 α_n , 在 t_1 时刻雷达回波图上找出最好的相关, 即可得到所有小面积回波单位 α_n 移动距离, 其中 n 是划分单位的个数, 也是移动距离个数。移动距离除以间隔时间 Δt 可得 α_n 的移动速度, 从而得到 t_2 时刻雷达回波移动风矢量。这里相关系数 R 表示为:

$$R = \frac{\sum_k Z_1(k) \times Z_2(k) - \frac{1}{N} \sum_k Z_1(k) \sum_k Z_2(k)}{\left[\left(\sum_K Z_1^2(k) - N\bar{Z}_1^2 \right) \times \left(\sum_K Z_2^2(k) - N\bar{Z}_2^2 \right) \right]} \quad (1)$$

其中 Z_1 、 Z_2 分别为 t_1 和 t_2 时刻这些区域内各个资料点上的回波值, N 是“区域”内的资料点数 (k 是变化数)。当确定了雷达回波各个“区域”的移动矢量后, 利用获得的这些矢量来外推相应“区域”回波场, 最终可获得整个回波场的预报图像。由于是按照每个“区域”追踪的回波移动矢量进行外推, 因此对一定范围的对流区域而言, 这种外推临近预报既考虑了回波移动快慢和方向的变化, 也考虑了整个回波在移动过程中的形变。虽然交叉相关追踪算法获得雷达回波移动矢量主要是水平方向上, 没有考虑深对流系统存在的较强垂直运动, 但如果仅仅考虑短时间内 ($0 \sim 1$ h) 回波移动或对流发展的话, 该算法获得的移动矢量具有较好的代表性, 根据获得的移动矢量来外推回波进行 1 小时以内的临近预报也有一定的有效性。有研究表明, 利用交叉相关追踪法及其扩展方法推导的移动风矢量进行雷达回波的平流外推在 1 小时内是有效的^[12-13]。

2 雷达回波 0~1 小时移动预测

雷达回波的预测方法是在假设雷达回波的移动是受环境风场的引导, 且环境风场在 1 小时内是缓慢变化的, 不存在明显的突变下进行的。因此, 可通过确定环境引导风场, 采用有效的差分格式对雷达回波进行移动预测。本研究采用“雨燕”临近预报系统中的扩展后交叉相关追踪算法由已知的前后 10 分钟两个时刻雷达回波获得当前雷达回波的移动风矢量, 并假设该移动风矢量就是未来 1 小时雷达回波移动的引导风矢量。

首先对前后相隔 10 分钟时刻的雷达回波资料进行计算, 得到雷达回波区域内的移动风矢量, 然后对雷达回波存在区域的移动风矢量进行误差订正和调整。对于没有回波存在或回波尚未移动到的区域引导风没有明显变化, 则可以利用已有的移动风矢

量进行空间插值来获得计算区域内的缺省值, 其中空间插值采用了 Akima 的水平拟合方法。经过空间插值, 最后得到雷达回波图范围的风场分辨率的移动风矢量场。其次对雷达回波图范围的移动风矢量场, 引入变分技术, 以二维无辐散的连续方程为限定条件, 求解泛函 J 的极值, 得到比较平滑的满足质量连续原则的风矢量场。通过变分调整后的移动风矢量分别 u 、 v 风分量再进行一次空间的 Akima 水平拟合, 得到雷达回波资料分辨率的移动风矢量场, 从而使得移动风矢量与雷达回波资料在空间上的分辨率一致, 即每一个格点上同时存在一个移动风矢量和雷达回波值。

经上述计算得到的移动风矢量场即 Δt 时间内雷达回波的平均移动矢量, 在拉格朗日坐标下实现雷达回波的外推预测。采用 Germann 和 Zawadzki 的后向外推格式^[13-14]对雷达回波进行外推计算, 后向外推格式可表示为:

$$Z_{i,j}(t+n) = Z_{i-\Delta i, j-\Delta j}(t+n-1) \quad (2)$$

其中, Z 是雷达回波值, t 是移动风矢量的计算时刻, 也就是外推的起始时刻, n 是每隔 Δt 时间的外推次数, $n=1, 2, \dots$, 这里 Δt 取 10 分钟, n 取 6, 正好是 1 h 的外推, 依此类推。 $\Delta u_i = u_{i,i,j} \cdot \Delta t$, $\Delta v_j = v_{i,i,j} \cdot \Delta t$, 其中 i 和 j 是雷达回波分辨率的格点下标, u 和 v 分别是移动风矢量的纬向和经向风分量。对得到计算结果通过取整补偿方案后, 解决后向外推值落在格点上的问题, 使得外推的平流移动与实际更符合(详见文献[8])。

3 强对流个例预报试验与分析

3.1 个例概况

个例 1(简称“0417”个例): 2007 年 4 月 17 日 08—17 时, 受高空槽、中低层切变线和地面冷锋共同影响, 广西出现强对流天气。雷达和中尺度自动站观测资料表明这是一次飑线影响过程。经统计, 广西三江等 18 个县市出现了 8 级以上的短时雷雨大风, 其中全州和都安县最大风速 $23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 合山自动气象站观测到的瞬间风速达 $52 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 资源等 5 县还出现了冰雹, 最大直径为 14 mm。

个例 2(简称“0505”个例): 2005 年 5 月 4 日 20 时至 5 日 20 时, 受地面冷锋和中低层切变线影响, 广西先后有 18 个市县出现冰雹、短时雷雨大风和局

部暴雨等强对流天气,其中昭平县最大风速 $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,象州县冰雹最大直径 27 mm ,全州县 6 小时降水 105 mm 。

个例 3(简称“0612”个例):2007 年 6 月 12 日 20 时至 13 日 20 时,受低涡切变天气系统影响,广西出现大范围强降雨天气,其中暴雨 25 市县,大暴雨 5 市县,特大暴雨 1 市县。柳江、柳州日降雨量分别为 307.3 mm 、 234.0 mm ,打破了当地建站以来最大日降雨量的历史最高纪录。

3.2 资料来源、处理和预测方案

文章所用的资料来源于 CINRAD-SB 雷达基数据经 RPG 中算法处理得到的 3 km CAPPI 反射率因子、回波顶和垂直累积液态含水量雷达产品数据。个例 1 和个例 2 的强对流主要发生在桂林雷达探测区域,因此选择桂林雷达产品资料进行预报试验,个例 3 选取柳州雷达产品资料。

3 km CAPPI 反射率因子产品是径向图数据,坐标系为平面极坐标,通过地理坐标系与平面极坐标系的转换关系,获得地理坐标系下的二维网格数据。回波顶和垂直累积液态含水量产品是栅格图数据,坐标系为平面直角坐标,首先将其转换为极坐标数据,然后通过地理坐标系与平面极坐标系间的转换,得到地理坐标系下的二维网格数据。对于得到的网格数据进行一定的质量控制,其中对于 3 km CAPPI 反射率因子和垂直累积液态含水量产品 $< 5 \text{ dBz}(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$ 或 $> 75 \text{ dBz}(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$ 格点值以缺省值“0”替换,对回波顶产品 $< 3 \text{ km}$ 或 $> 21 \text{ km}$ 格点值以缺省值“0”替换,以消除异常值。

经处理后得到的地理坐标系二维网格数据的范围:桂林雷达 $107.900^{\circ} \sim 112.700^{\circ} \text{E}$ 、 $27.477^{\circ} \sim 23.157^{\circ} \text{N}$,柳州雷达 $107.056^{\circ} \sim 111.856^{\circ} \text{E}$ 、 $25.517^{\circ} \sim 21.197^{\circ} \text{N}$,网格分辨率为 $0.02^{\circ} \times 0.02^{\circ}$,时间分辨率为 10 分钟。算法中追踪区域 a 的面积选取 11×11 格点,即 $0.22^{\circ} \times 0.22^{\circ}$ 。扫描半径 R 取雷达回波的最大可能移速 V_{\max} 与时间间隔 Δt 的乘积,其中 V_{\max} 取约 100 km 每小时的速度,扫描步长选择 7 格点,即移动风矢量空间分辨率为 $0.14^{\circ} \times 0.14^{\circ}$ 。

回波预测方案主要是选择雷达探测区内强对流发生的主要时段进行预报试验,运用交叉相关追踪算法对 2007 年 4 月 17 日 10—17 时桂林、2005 年 5 月 5 日 14—23 时桂林、2007 年 6 月 12 日 21 时至 13 日 05 时柳州 3 km CAPPI 雷达反射率因子、回

波顶和垂直累积液态含水量产品逐 10 分钟进行外推预测,对前后 10 分钟两个时刻雷达资料计算得到雷达回波移动风矢量,用雷达回波移动风矢量外推未来 1 小时内每 10 分钟 6 个时次的雷达回波,并用雷达回波预测结果和组合阈值比较获得强对流预警区域。“0417”每类资料的 10、20、30、40、50 和 60 分钟外推图各得 42 次,“0505”54 次,“0612”48 次。

3.3 雷达回波外推结果检验方法

将外推得到的 3 km CAPPI 雷达反射率因子、回波顶和垂直累积液态含水量产品与实况格点对格点逐一检验,用两种方法检验:(1) 分 5 个等级进行检验(其中 3 km CAPPI 雷达反射率因子和垂直累积液态含水量分为 $5 \sim 15$ 、 $15 \sim 30$ 、 $30 \sim 45$ 、 $45 \sim 55$ 、 $55 \sim 65 \text{ dBz}(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$,回波顶分为 $3 \sim 6$ 、 $6 \sim 11$ 、 $11 \sim 15$ 、 $15 \sim 18$ 、 $18 \sim 21 \text{ km}$ 等级)。计算以下评分: $POD = X/(X+Y)$; $FAR = Z/(X+Z)$; $CSI = X/(X+Y+Z)$ 其中: POD 为命中率, FAR 为空报率, CSI 为成功指数; X 为预报正确的次数, Y 为漏报次数, Z 为空报次数。(2) 计算 $TS = X/(X+Y)$; 其中: TS 为正确率, X 为预报正确的次数, Y 为错报次数,当预报格点值或实况值 > 0 且预报格点值与实况值之差的绝对值在某一数值之内则认为是正确,反之为错报,其中 3 km CAPPI 雷达反射率因子和垂直累积液态含水量产品取值 $5 \text{ dBz}(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$,回波顶取值 1 km 。检验的区域:考虑到 3 km CAPPI 雷达反射率因子及回波顶产品超过 200 km 以外效果较差,因此检验的区域是以雷达站为中心,探测范围大约 200 km 内的数据,网格范围为 101×101 格点。

3.4 雷达回波 0~1 小时外推预报

3.4.1 3 km CAPPI 反射率因子

3 km CAPPI 反射率因子产品表示距雷达站点上空 3 km 等高面雷达扫描回波的强度。图 2 是“0417”个例 13 时 00 分 3 km CAPPI 反射率因子实况与 10、20、30、40、60 分钟外推得到的 13 时 00 分预报图对比,此时对流发展处于旺盛阶段,灌阳县出现 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 大风和冰雹。实况图中共有 4 块回波,第 1 块位于融安和灌阳县,第 2 块位于富川县,第 3 块位于金秀县,第 4 块位于昭平县。其中第 1 块回波是造成强对流天气的主要影响回波,长约 300 km ,宽 150 km ,占探测区回波的绝大部分范围,

呈东北—西南向带状排列, ≥ 30 dBz 区域占较大部分, ≥ 45 dBz 强中心区位于灵川和临桂县。第 2、3、4 块回波面积较小, 强度多在 10~35 dBz 之间。在从 10、20 分钟外推预报图可看到: ≥ 10 dBz 范围、位置和 ≥ 30 dBz 强中心区的回波与实况相比, 4 块回波都能预报出来, 且范围、位置和强中心区与实况相似, 尤其是第一块回波的形状和 ≥ 45 dBz 强中心区与实况相当吻合。从 30、40 分钟的外推预报图可看到, 都能预报出 4 块回波, 但 ≥ 10 dBz 范围比实况要小一些, 位置比实况稍偏北, ≥ 30 dBz 强中心区与实况相近, 第 1 块回波的形状结构与实况较吻合, 整体来看, 预报效果比较好。60 分钟外推图可看出: 预报结果比前面的要差, 第 4 块回波基本未预

报出来, 第 1、2、3 块回波虽能预报出来, 但 ≥ 10 dBz 范围和 ≥ 30 dBz 强度中心区域比实况小, 位置也偏北, 第 1 块回波的形状与实况相近, 总体来看, 预报结果尚可。以上分析可看到第 1 块回波的预报效果比第 2、3、4 块回波预报效果要好, 这与交叉相关追踪算法计算有关, 算法前提是假定雷达回波的移动是受环境风场的引导, 且环境风场在 1 小时内是缓慢变化的, 不存在明显的突变进行外推的。由于第 1 块回波属于大范围系统性回波, 在 1 小时内移动较稳定, 且没无太大明显形变, 所以外推效果较好, 而第 2、3、4 块回波范围较小, 在 1 小时内变化明显, 用交叉相关追踪算法外推得到的效果就差于第 1 块回波。

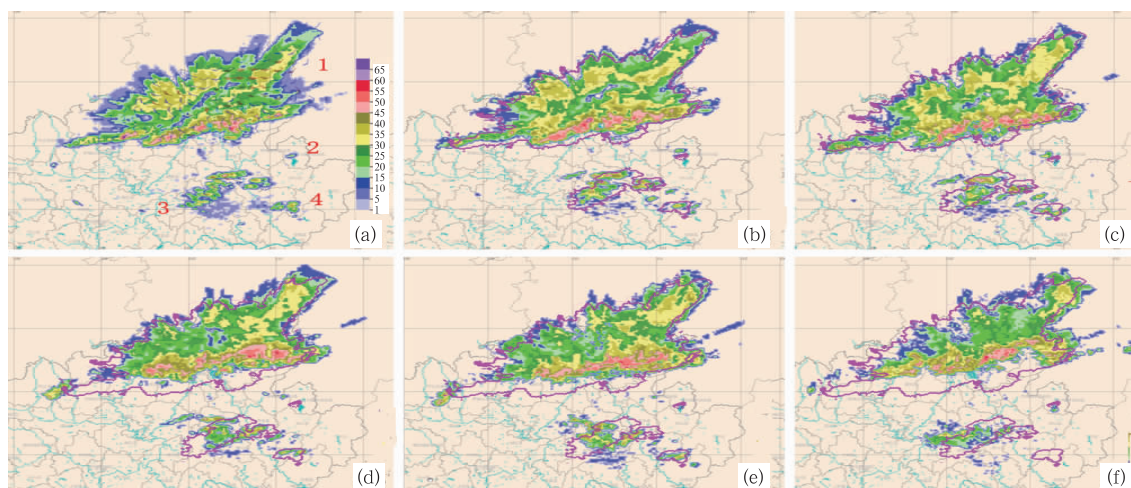


图2 2007年4月17日13时00分3 km CAPPI反射率因子实况和外推预报图

(红色实线表示13时00分实况3 km反射率因子 ≥ 10 dBz范围和位置)

(a) 13时00分3 km CAPPI反射率因子实况图; (b) 10分钟预报图; (c) 20分钟预报图;
(d). 30分钟预报图; (e) 40分钟预报图; (f) 60分钟预报图

Fig. 2 Actuality and extrapolated forecast pictures of 3 km CAPPI reflectivity factor at 13:00

(red solid line represents the scope and location of the reflectivity factor of ≥ 10 dBz)

(a) actuality of the 3 km CAPPI reflectivity factor at 13:00, (b) 10 min forecast, (c) 20 min forecast,
(d) 30 min forecast, (e) 40 min forecast, (f) 60 min forecast

通过对3次个例进行逐10分钟外推预测, 结果与实况比较发现: 在强对流发展、成熟和消亡不同阶段, 如回波在某一段时间内无明显变化, 外推结果与实况较好吻合, 而当回波出现明显变化时, 外推结果出现较明显差距, 面积大的回波也比面积小的回波预报要好。这跟交叉相关追踪算法的局限性是有关的, 算法计算的是水平方向的移动矢量, 并没有考虑深对流系统存在的较强垂直运动, 对于回波的生消变化及快速明显形变用算法计算得到的结果和实际

有较大的出入, 由于面积范围大的回波在1小时内变化没有范围小的回波变化明显, 因此整体上面积范围大的回波外推预报要好些。在这三次个例中, 对流成熟阶段的外推预测正确率要高于发展和消亡阶段, “0417”个例、“0505”个例能预报出主要回波的带状分布, 并能预测回波的变化和移动方向。“0612”个例可预报出主要回波的带状变化以及回波带内对流单体的移向与带的整体走向一致的特点。

三次个例外推得到的 3 km CAPPI 雷达反射率因子与实况进行 CSI、TS 评分(方法如前述),结果如图 3 所示:CSI 随着时效延长明显降低,30 分钟以内 CSI 明显好于 30~60 分钟,55 dBz 以上的回波在 30 分钟后几乎没有预报能力,CSI 等于 0。15~30 dBz 和 30~45 dBz 等级的 CSI 明显高于其他等级,分析可知这两类格点值在三次个例中占较大范围,说明交叉相关追踪算法对于较大面积回波预

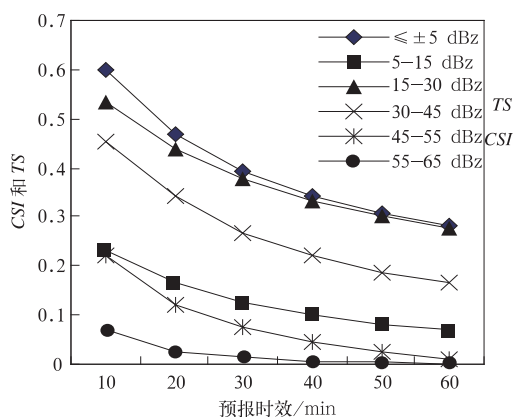


图 3 3 km CAPPI 反射率因子外推预报结果的各等级 CSI 和 TS

Fig. 3 CSI and TS of each graded level for the extrapolated forecast result of 3 km CAPPI reflectivity factor

报效果更好。而对于预报格点值与实况值之差在 ± 5 dBz 之内的 TS 也是随着时效延长明显降低,但可看到 TS 要高于各等级的 CSI,比 15~30 dBz 等级的 CSI 稍高些,这表明,外推预报回波与实况格点值误差多数集中在 ± 5 dBz 以内。因此对于预报员来说,这种外推得到的预测结果是可用的。

3.4.2 回波顶

回波顶指的是在 ≥ 18 dBz 反射率因子被探测到时,显示以最高仰角为基础的回波顶高度,因此可通过对最高顶定位来识别较强的对流风暴。图 4 是“0417”个例 13 时 50 分回波顶实况与 10、20、30、40、60 分钟外推得到的 13 时 50 分预报图对比,此时对流风暴处于逐渐减弱阶段。实况图中共有 3 块回波,第 1 块是位于融安、桂林和灌阳县,第 2 块位于象州、钟山县,第 3 块位于苍梧县附近。第 1 块回波占探测区回波的绝大部分范围,呈东北—西南向带状排列,5~9 km 区域占较大部分, ≥ 9 km 强中心区位于灌阳、临桂和罗城县,最大回波顶高 13 km。第 2、3 块回波顶面积较小,高度多在 5~8 km 之间。从 10、20 分钟外推图可看到: ≥ 5 km 范围、位置和 ≥ 9 km 强度中心的回波顶与实况对比,3 块回波都能预报出来,范围、位置和强度中心与实况相

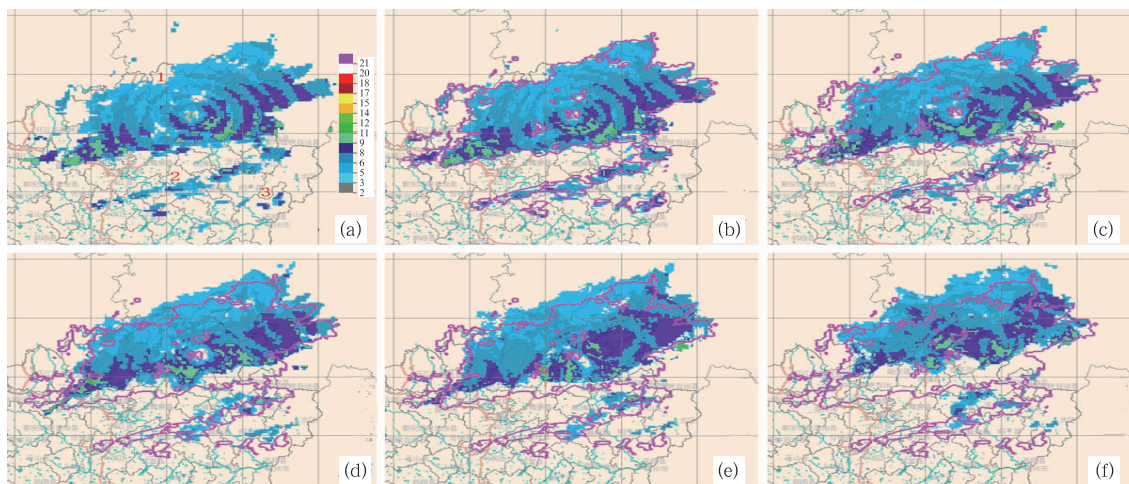


图 4 2007 年 4 月 17 日 13 时 50 分回波顶实况和外推预测图

(红色实线表示 13 时 50 分实况回波顶 ≥ 5 km 的范围和位置)

(a) 13 时 50 分回波顶实况图; (b) 10 分钟预报图; (c) 20 分钟预报图;
(d) 30 分钟预报图; (e) 40 分钟预报图; (f) 60 分钟预报图

Fig. 4 Actuality and extrapolated forecast pictures of echo top at 13:50

(red solid line represents the scope and location of the echo top of ≥ 5 km)

(a) actuality of the echo top at 13:50, (b) 10 min forecast, (c) 20 min forecast,
(d) 30 min forecast, (e) 40 min forecast, (f) 60 min forecast

似,尤其是第 1 块,预报的最高回波顶和实况均为 13 km。从 30、40 分钟的外推图可看到,第 1、3 块回波 ≥ 5 km 的范围与实况接近,第 2 块比实况小,位置比实况稍偏北,第 1 块回波预报出 ≥ 9 km 强中心区,范围比实况小,位置偏北,最大高回波顶 12.8 km 与实况接近,整体看,效果尚可。60 分外推图可看到:预报结果比前面的要差些,第 1 块回波 ≥ 5 km 的范围与实况接近,第 2、3 块比实况小,位置比实况偏北, ≥ 9 km 强度中心区域比实况小且位置更偏北,整体上,对预报有指示意义。

通过对三次个例进行逐 10 分钟外推预测与实况比较发现:回波顶的外推结果和 3 km CAPPI 反射率因子外推结果类似,对于面积范围较大且移动稳定和变化不太明显的回波顶外推预测效果好于范围较小和变化较明显的回波顶,对流成熟阶段的回波顶外推预测正确率高于发展和消亡阶段。3 次个例都能预报出回波顶的带状分布、变化趋势和移动方向。

3 次个例的回波顶外推结果与实况进行 CSI、TS 评分,结果如图 5 所示,CSI 随着时效延长明显降低,30 分钟以内 CSI 明显好于 30~60 分钟。15 km 以上回波基本没有预报能力。6~11 km 等级的 CSI 明显高于其他等级,这类格点值在三次个例中占较大范围。而对于预报格点值与实况值之差在 ± 1 km 之内的 TS 也是随着时效延长明显降低,TS 稍低于 6~11 km 等级的 CSI,高于大多数等级的 CSI,也高于 3 km CAPPI 反射率因子的 TS。这表明,外推预报回波与实况格点值误差多集中在 ± 1 km 之内,对于预报员来说,这种外推得到的预报结果也是可以采用的。

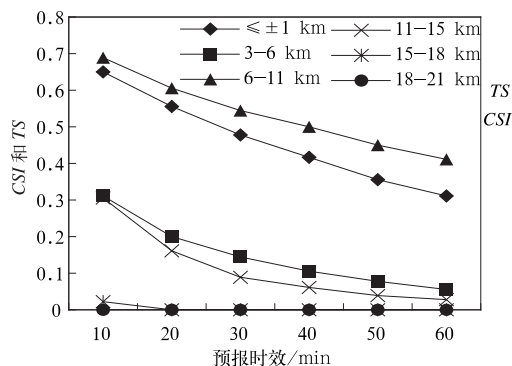


图 5 回波顶外推预报结果的各等级 CSI 和 TS
Fig. 5 CSI and TS of each graded level for the extrapolated forecast result of echo top

3.4.3 垂直累积液态含水量

垂直累积液态含水量表示将反射率因子数据转换成等价的液态水值,并且假定反射率因子是完全由液态水反射得到。图 6 是“0417”个例 13 时 00 分垂直累积液态含水量实况与 10、20、30、40、60 分钟外推得到的 13 时 00 分预报图对比,此时对流处于发展旺盛阶段。实况图中共 4 块回波,第 1 块位于融安、灵川、灌阳县,第 2 块位于融水,第 3 块位于荔浦,第 4 块位于平乐。第 1 块回波长约 150 km,宽约 25 km,占探测区回波的绝大部分范围,呈东—西向带状排列, $\geq 10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 区域占较大部分, $\geq 15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 强中心区位于桂林、临桂和永福县,最大垂直累积液态含水量值为 $38 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。第 2、3、4 块回波面积较小,强度多在 $5 \sim 15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间。从 10、20 分钟外推图可看到: $\geq 5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 范围、位置和 $\geq 15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 强度中心区域的回波与实况对比,4 块回波都能预报出来,且范围、位置和强度中心与实况相似,尤其是第一块回波,带状结构与实况相当吻合,预报的最大垂直累积液态含水量值 $38 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和实况值一致。从 30、40 分钟外推图可看到,第 1 块回波带状结构和强度中心与实况较吻合,第 3、4 块回波 $\geq 5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 范围与实况接近,第 2 块比实况小,位置比实况略偏北, $\geq 15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 强度中心区域与实况接近,位置稍偏北,整体看,预报效果良好。60 分钟外推图可看到:预报结果比前面的差些,4 块回波 $\geq 5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 范围和 $\geq 15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 强中心区比实况要小,位置也比实况偏北,尤其第 2 块预报相差较大,但第 1 块带状结构能预报出来,强度也大体相当,预报的最大垂直累积液态含水量值为 $36 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,比实况值略小,整体预报是可行的。

通过对三次个例进行逐 10 分钟外推预测结果与实况比较发现:同样对于面积范围较大且移动稳定和变化不太明显的垂直累积液态含水量回波的外推效果好于范围较小和变化较明显的回波,对流成熟阶段的外推预测正确率高于发展和消亡阶段。3 次个例都能预报出垂直累积液态含水量的带状分布、变化趋势和移动方向。

对外推得到的垂直累积液态含水量与实况进行 CSI、TS 评分,结果如图 7 所示:CSI 随着时效延长明显降低,30 分钟以内 CSI 明显好于 30~60 分钟。45 dBz 以上垂直累积液态含水量几乎没有预报能力。5~15 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 15~30 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 等级的 CSI

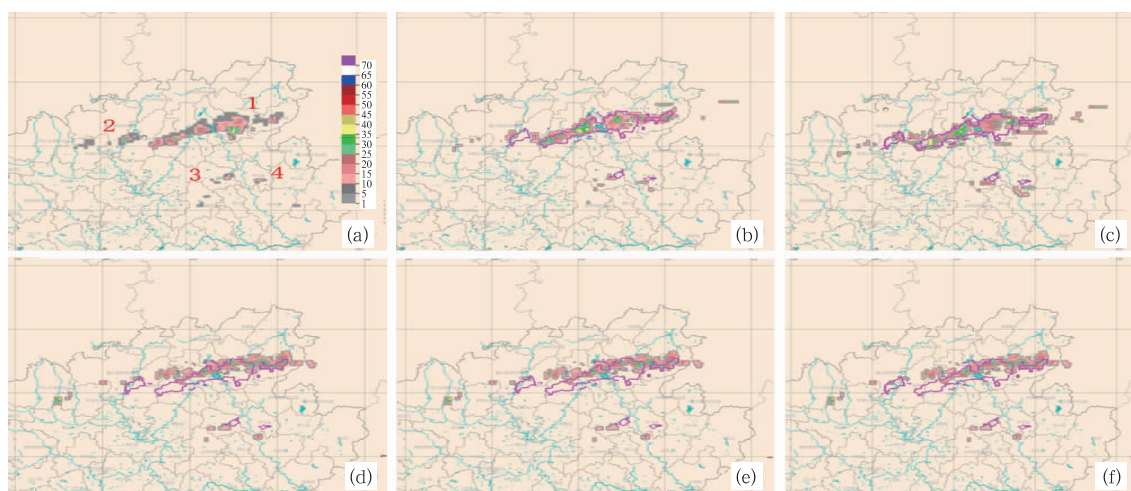


图 6 2007 年 4 月 17 日 13 时 00 分垂直累积液态含水量实况和外推预测图

(红色实线表示实况 13 时 00 分垂直累积液态含水量 $\geq 5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 范围)

(a) 13 时 00 分垂直累积液态含水量实况图; (b) 10 分钟预报图; (c) 20 分钟预报图;
(d) 30 分钟预报图; (e) 40 分钟预报图; (f) 60 分钟预报图

Fig. 6 Actuality and extrapolated forecasts pictures of vertical integral liquid at 13:00

(red solid line represents the scope and location of the vertical integral liquid of $\geq 5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)

(a) actuality of the vertical integral liquid at 13:00, (b) 10 min forecast, (c) 20 min forecast,
(d) 30 min forecast, (e) 40 min forecast, (f) 60 min forecast

高于其他等级,整体 CSI 低于 3 km CAPPI 反射率因子和回波顶的 CSI。对于预报格点值与实况值之差在 $\pm 5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 之内的 TS 也是随着时效延长明显降低,但 TS 要明显高于各等级的 CSI。

3.5 强对流预警区域预报试验

3 km CAPPI 反射率因子、回波顶和垂直累积液态含水量分别反映的是扫描回波的强度、顶高度

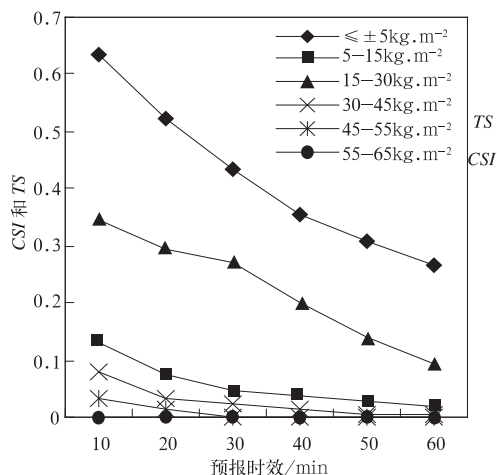


图 7 垂直累积液态含水量外推
预报结果的各等级 CSI 和 TS

Fig. 7 CSI and TS of each graded level for the
extrapolated forecast result of vertical integral liquid

和液态水的含量特征,因而在强对流短时预警预报中,可以考虑通过对 3 km CAPPI 反射率因子、回波顶和垂直累积液态含水量 3 种回波进行综合分析,来确定强对流天气的预警区域,即利用这 3 种产品分别设定的某一值组合成一组阈值作为预报强对流天气的临界值,当某区域上的值大于或等于该阈值时,则预报该区域出现强对流天气。据经验和统计分析,雷雨大风和冰雹强对流发生区域的 3 km CAPPI 反射率因子、回波顶、垂直累积液态含水量值一般较大,强降雨的值可稍小些。经计算和比较筛选,“0417”、“0505”个例选取的组合阈值为 3 km CAPPI 反射率因子 45 dBz、回波顶 9 km、垂直累积液态含水量 $30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,“0612”个例选取的组合阈值为 40 dBz、9 km、 $15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。用交叉相关追踪算法计算得到的外推预测图经过以上阈值过滤,“0417”、“0505”、“0612”个例 10、20、30、40、50 和 60 分钟的预警区域 CSI 评分如图 8。CSI = $X / (X + Y + Z)$,其中: X 为预报正确的次数, Y 为漏报次数, Z 为空报次数。预报检验标准为在某县区范围内 ≥ 2 (某乡镇范围内 ≥ 1) 个格点的区域预报出现强对流,而实况该县区(乡镇) 1 小时内也出现强对流天气则认为该县(乡镇)区域预报是正确的,如预警后实况不出现则为空报,无预警而实况出现为漏

报。由图 8 可看到预警区域 CSI 也是随着时效延长而降低,前 30 分钟的预警正确率还是比较高的,后 30 分钟有明显下降。这是由于预警区域与回波外推预报的准确率密切相关,由前面的分析可知,整体上,回波外推预报的预报时间越短,效果越好,因此,预警区域正确率也是如此。分析还知道,强对流天气预警区域对县区区域的预报是较好的,但是预报具体到乡镇还有较大误差,这主要与回波外推的形状及强度密切相关,同时也与气象观测站点分布有关,因为有可能当地出现强对流天气而没有观测站所以无法记录造成预报错误。对于以上的预测结果是依赖于一定的评定标准,换不同的标准会有不同的结果,如标准放宽,预报准确率会更高。总体上通过外推得到的雷达回波结果经过阈值的过滤后得到强对流天气预警区域的预报结果是可行的,目前在业务工作中,用来进行短时预警预测有一定的预报指示意义。

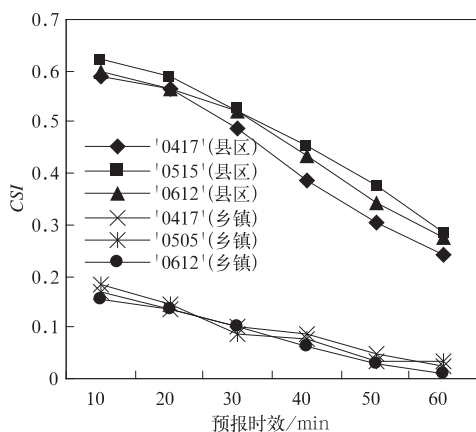


图 8 三次个例的县区(乡镇)预警区域预报 CSI

Fig. 8 Early warning area forecast CSI in counties of the three examples forecast result of vertical integral liquid

4 总结与思考

(1) 通过利用“雨燕”临近预报系统中的雷达回波 0~1 小时外推算法对两次雷雨大风、冰雹和一次强降水强对流天气个例的 3 km CAPPI 雷达反射率因子、回波顶、垂直累积液态含水量雷达产品进行 0~1 小时外推预测,结果和实况比较表明:外推预测结果与实况有较好的吻合,能预报出回波的形状、变化趋势和移动方向,回波的范围、位置和强度中心与实况相似,外推时间越短,预报效果越好,30 分钟以

内的外推效果明显好于 30~60 分钟。对于面积范围较大且移动稳定和变化不太明显的回波外推预测效果好于范围较小和变化较明显的回波,对流成熟阶段的外推预测正确率高于发展和消亡阶段。

(2) 用交叉相关追踪算法计算得到 3 km CAPPI 反射率因子、回波顶和垂直累积液态含水量的外推预报结果,通过和事先设定的组合阈值相比较来确定强对流天气预警区域,对县区区域的预报较好,吻合率较高,但是预报具体到乡镇还有较大误差。总体上通过外推得到的雷达回波结果经过阈值的过滤后得到强对流天气预警区域的预报结果是可行的,目前用来进行强对流天气的短时临近预报有一定的预报指示意义。

(3) 通过分析发现,在三次个例中,用交叉相关追踪算法外推 30 分钟后的预测结果有一定的偏差,对此,是否在交叉相关追踪算法引入高分辨率中尺度模式的预报风场进行外推预测,值得进行研究。

(4) 目前业务上采用 CINRAD-SB 雷达基数据经 RPG 算法处理得到的 3 km CAPPI 反射率因子、回波顶和垂直累积液态含水量雷达产品仍有一些问题,反演的回波质量与实际有偏差。因此导致通过交叉相关追踪算法计算得到预测结果也相应会出现偏差。如能应用雷达基数据经质量控制反演出更准确的 3 km CAPPI 反射率因子、回波顶和垂直累积液态含水量产品数据源将会对外推预测结果有更好的提高。

参考文献

- [1] Muell C, Sxsen T, Roberts R, et al. NCAR Auto-nowcast system [J]. Weather and Forecasting, 2003, 18: 545-561.
- [2] Li P W, Wong W K, Chan K Y, et al. SWIRLS—An evolving nowcasting system [J]. Technical Note, 2000, No. 100, Hong Kong Observatory.
- [3] Tuttle J D, Gall R. A sing-radar technique for estimating the winds in tropical cyclone [J]. Bull Amer Met Soc, 1999, 80: 653-668.
- [4] Lai E S T. TREC Application in tropical cyclone obsetvation [R]. Reprint, 324, ESCAP/WMO Typhoon Committee Annual Review (1998): 135-139. Typhoon Committee Secretariat, Manila, Philippines.
- [5] Amill T, Nehrkorn T. A short-term cloud forecast scheme using cross correlations [J]. Weather and Forecasting, 1993, 8: 401-411.
- [6] Rinehar R E, Garvey E T. Three-dimensional storm motion detection by conventional weather radar [J]. Nature, 273, 1978: 287-289.
- [7] 陈明轩, 王迎春, 俞小鼎. 交叉相关外推算法的改进及其在对流临近预报中的应用 [J]. 应用气象学报, 2007, 18(5): 690-701.

- [8] 冯业荣,曾沁,梁巧倩.综合临近预报系统“雨燕”(GRAPES-SWIFT)之 0-3 小时雷达外推算法研究[G]. 第二十一届粤港澳气象科技研讨会论文.
- [9] 赵放,冀春晓,任鸿翔,等.应用多普勒雷达制作近海台风临近预报技术研究[J]. 气象,2008,34(5):64-74.
- [10] 韩雷,王洪庆,谭晓光,等.基于雷达数据的风暴体识别、追踪及预警的研究进展[J]. 气象,2007,33(1):3-10.
- [11] 王改利,刘黎平.多普勒雷达资料在暴雨临近预报中的应用[J]. 气象,2005,31(10):12-15.
- [12] Edwin S. T. Lai. Advances in nowcasting[G]. CBS Technical Conference on Public Weather Services, St Petersburg, Russian Federation, 21-22 February 2005.
- [13] Seed A. W. A dynamic and spatial scaling approach to advection forecasting[J]. Journal of Applied Meteorology, Vol. 42:381-388.
- [14] Germann. U, I. Zawadzki, 2002: Scale-dependence of the predictability of precipitation from continental radarimages. Part I: Description of the methodology[J]. Mon. Wea. Rev. 130, 2859-2873.
- [15] 吕江津,刘一玮,王彦.用多普勒雷达对三次强对流天气的短时预报对比分析[J]. 气象,2009,35(1):48-54.
- [16] 朱平,李生辰,肖建设,等.天气雷达回波外推技术应用研究[J]. 气象,2008,34(1):3-9.
- [17] 张沛源,杨洪平,胡绍萍.新一代天气雷达在临近预报和灾害性天气警报中的应用[J]. 气象,2008,34(1):3-11.

更 正

本刊 2009 年第 35 卷第 12 期第 44 页《2008 年西北太平洋热带气旋活动特征分析》一文的资助项目为:公益性行业(气象)专项“气象卫星及其对地观测数据产品和应用研究(GYHY(QX)2007-6-9)”。特此说明。

本刊 2009 年第 35 卷第 12 期第 47 页图 1 误为:

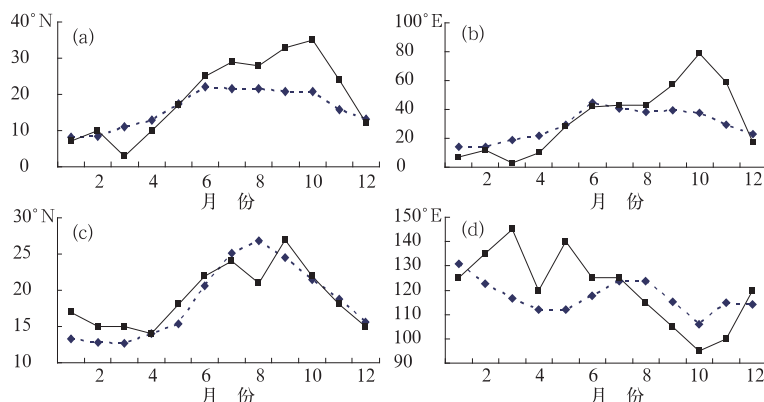


图 1 西北太平洋副热带各项指数的逐月变化
(a) 副高面积指数; (b) 副高强度指数; (c) 副高脊线位置;
(d) 副高西伸脊点; 实线为 2008 年, 虚线为 1971—2000 年平均

应为:

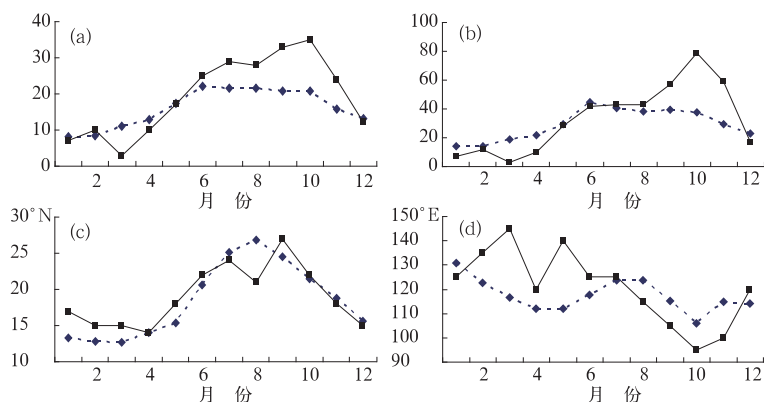


图 1 西北太平洋副热带各项指数的逐月变化
(a) 副高面积指数; (b) 副高强度指数; (c) 副高脊线位置;
(d) 副高西伸脊点; 实线为 2008 年, 虚线为 1971—2000 年平均