

用雷达反射率作对流性降水和层状云降水自动分类

吴涛^{1,2} 吴翠红³ 万玉发¹ 舒防国²

(1 中国气象局武汉暴雨研究所, 武汉 430074; 2 湖北省十堰市气象局, 十堰 442000; 3 武汉中心气象台, 武汉 430074)

摘要 为提高雷达定量测量降水的精度, 利用武汉 CINRAD/SA 雷达反射率数据, 研究提出了对流性降水和层状云降水自动分类算法(ACSS)。该算法在二维反射率结构场初步分类降水的基础上, 识别亮带并从体扫描数据中提取降水的三维结构特征, 然后对初步分类结果进行订正。试验表明, ACSS 能较准确地实现对流性降水和层状云降水的自动分类, 相对于只根据二维结构分类降水性能上有较大提高, 主要表现在能正确识别出亮带特征明显的强层状云和对流核外沿的对流弱回波区。

关键词 武汉雷达 对流性 层状云 分类

引言

在雷达定量测量降水中, 雷达反射率与降水的关系 $Z-R$ 关系不稳定是产生估算误差的主要来源之一, 并且降水谱型的变化直接导致了 $Z-R$ 关系的变化^[1~3]。Austin^[4]、Joss 和 Waldvogel^[5]认为, 对不同类型的降水使用相应不同的 $Z-R$ 关系能提高雷达降水估算的精度。Anagnostou^[6]等建议, 在雷达回波中将对流性和层状云降水区分开, 并建立不同的 $Z-R$ 关系。Seo^[7]等则指出, 使用雷达反射率垂直廓线订正混合性降水估算时, 需对降水回波进行分类, 并只对层状云的降水估算进行订正。由此看来, 在雷达定量测量降水中, 加入降水分类处理这个环节是非常必要的。在早期的降水分类方法中, 主要注重于对对流性降水核(中心)的识别, 认为只要雨强超过背景强度达到了一定阈值, 便识别为对流性降水。Churchill 和 Houze Jr^[8]将该技术应用到雷达反射率产生的二维降水场, 并通过设置固定的核影响半径将对流核周围的区域识别为对流性降水。Adler 和 Negri^[9]在区分红外云图中的对流性和层状云降水时, 核的影响半径并不固定, 而是取决于对流核云顶红外亮温的强度等因素。Steiner^[10]

等使用水平的二维反射率场资料, 建立了对流核的影响半径和超出背景强度的阈值均随背景强度变化的函数曲线, 但也存在一些问题。如将对流核外围的弱回波识别为层状云降水, 将亮带特性明显的较强层状云回波识别为对流性降水, 以及由于只使用 3 km CAPPI 产品造成降水分类最大距离只有 158 km(武汉雷达)。Rosenfeld^[11]和 Biggerstaff^[12]等在原有二维降水场的基础上, 增加了对雷达探测垂直结构信息的分析, 但实际应用也有局限性。

本文在充分借鉴国外雷达降水分类先进技术和进行降水分类处理取得一定经验的基础上, 结合武汉雷达探测区域的实际, 研究开发了基于雷达三维反射率场进行对流性降水和层状云降水自动分类技术(简称 ACSS, Automated Convective/Stratiform precipitation Separation based on radar reflectivity)。

1 SHY 算法简介

SHY 是 Steiner、Houze Jr 和 Yuter^[10]所研究的降水分类技术的简称, 使用笛卡尔坐标 3 km 高度的 CAPPI 产品, 格点分辨率为 2 km。分类步骤如下。

1.1 对流核识别

如任一格点反射率 Z 满足式(1)或(2), 则该格

点识别为对流核。

$$Z > 40 \quad (1)$$

$$Z \leq 40 \text{ 且 } Z - Z_{bg} > \begin{cases} 10, & Z_{bg} < 0 \\ 10 - Z_{bg}^2/180, & 0 \leq Z_{bg} < 42.43 \\ 0, & Z_{bg} \geq 42.43 \end{cases} \quad (2)$$

Z_{bg} 为格点周围半径 11 km 范围内所有非零降水反射率的平均值,反射率单位为 dBz。

1.2 对流区域识别

将对流核为中心的圆形区域也标识为对流性降水,区域半径(km)定义为:

$$r = \begin{cases} 1, & Z_{bg} < 30 \\ 2, & 30 \leq Z_{bg} < 35 \\ 3, & 35 \leq Z_{bg} < 40 \\ 4, & Z_{bg} \geq 40 \end{cases} \quad (3)$$

Z_{bg} 定义与 1.1 节相同。在同一背景强度下,对流半径还有小、中、大 3 个等级之分。

1.3 层状云降水区域识别

将对流区域以外的所有非零降水区域标识为层状云降水,从而生成降水分类场。

2 ACSS 算法

ACSS 首先对 SHY 算法进行改进,并将处理结果作为初步分类场,再进行亮带识别和从雷达体扫描反射率数据中提取三维结构信息对其进行订正,生成新的降水分类场。

2.1 二维结构场的降水初步分类

从体扫描反射率数据中生成分辨率为 1 km 的极坐标和笛卡尔坐标 CAPPI 产品,将后一种坐标数据输入到 SHY 算法中进行初步分类,生成的降水场再转为极坐标。由于层状云降水回波强度可能超过 40 dBz,因此在对流核识别时不进行强度判断。此外,根据武汉雷达海拔高度,CAPPI 产品由 2 个高度层的 CAPPI 数据组合而成,即在 0~158 km 水平距离以内使用 3 km CAPPI 数据,158 km 以外使用 5 km CAPPI 数据,使最大距离接近 230 km。

2.2 三维结构场的降水分类改进

2.2.1 主要分类参数

反射率径向梯度 $|\nabla_r Z|$ 。在 CAPPI 产品中,计算每个格点邻近区域内所有径向扫描线上相邻非零降水格点强度差别绝对值的平均即为 $|\nabla_r Z|$,它代

表了该区域的强度变化。邻近区域形状为扇形,方位宽度为 11° ,径向长度为 7 km,格点位于扇形中心。在对流核外围特别是飚线前沿 $|\nabla_r Z|$ 较大,可用来识别对流核外围的对流弱回波区。但在非强对流区域存在 $|\nabla_r Z|$ 局部偏大的现象,为避免错误识别为对流性降水,当 $|\nabla_r Z|$ 较大时要求邻近区域内至少有一个格点的对流性降水。

反射率垂直递减率 $|\nabla_z Z|$ 。从体扫描基数据中提取每个格点垂直方向上最强反射率,计算其高度以上的 3 km 范围内反射率随高度的递减率即为 $|\nabla_z Z|$ 。在层状云中,亮带上方的反射率随高度急剧下降,因此该参数可用来识别亮带特征明显的层状云。此外,为减少雷达远距离探测误差及地物杂波对亮带识别造成的影响,如最强反射率位于最低层扫描线,则 $|\nabla_z Z|$ 设为无效。

亮带百分数(BBF:Bright Band Fraction)。如亮带存在,计算每个格点邻近区域内亮带格点数占整个区域内非零降水格点的比例即为 BBF,邻近区域的定义与计算 $|\nabla_r Z|$ 时格点邻近区域相同。亮带格点必须满足垂直方向的最强回波高度与亮带差别在 ± 1.5 km 范围内,且 $|\nabla_z Z| > 3.5 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ 。

2.2.2 对 SHY 降水初步分类结果进行订正

若 SHY 降水分类场中对流性降水区域满足以下条件,则订正为层状云降水:

$|\nabla_r Z| < 3.5 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$, $|\nabla_z Z| > 3.5 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$, CAPPI 中反射率小于 35 dBz;或者亮带百分数大于 0.60, $|\nabla_r Z| < 3 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$,位于最强反射率的两倍高度处反射率小于 28 dBz。

若 SHY 降水分类场中层状云降水区域满足以下条件,则订正为对流性降水:

$|\nabla_r Z| > 3.5 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$,且邻近区域内(定义与计算 $|\nabla_r Z|$ 时格点邻近区域相同)至少有 1 个格点的对流性降水;或者 $3 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1} < |\nabla_r Z| < 3.5 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$,亮带百分数小于 40%,且邻近区域内至少有 1 个格点的对流性降水。

2.2.3 降水分类场优化

通过以上订正后,发现对流核外沿仍有部分对流弱回波区不能正确识别,需进一步订正。如任一格点周围 $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$ 的矩形窗口内所有不同于该格点降水类型的格点数量所占百分比大于 55%,则改变该格点的降水类型。

2.3 亮带识别算法

亮带是否存在及亮带中心高度是计算 BBF 参数的先决条件。Rosenfeld^[11]直接用 0℃ 层高度来代替亮带高度,但亮带形成于 0℃ 层以下的融化层内,其高度低于 0℃ 层,因此该方法有系统误差,且该高度值来源于其它资料(如探空数据),给实际应用带来不便。本文提出一种只根据体扫描基数据判断亮带是否存在并计算其高度的新算法。

如果某一格点 $|\nabla_z Z| > 3.5 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$, 则该格点作为亮带的候选格点,所有候选格点的最强回波高度组成了回波高度场。由于某一径向距离上的亮带高度不随方位发生变化,统计高度场中每一个径向距离圆圈上高度的频率分布,出现频率最高的高度即是该距离档上的主要高度,从而生成沿径向分布的高度曲线。受雷达采集方式的影响,亮带区域的垂直强中心高度随距离有周期性的增加、减少(或减少、增加)现象^[13](图 1)。以此为判据,将该曲线中高度连续增长所对应的径向距离超过 10 km 的线段作为识别一个增长周期的标准,如果连续的增长周期数超过两个,则认为亮带存在,对所有连续的增长周期的高度值求平均,然后去掉其中高度偏离平均值超过 1 km 的数据,再次求平均即为亮带高度。此算法的特点是识别原理较简单,且效果较好,能识别出非大范围层状云降水中的亮带。

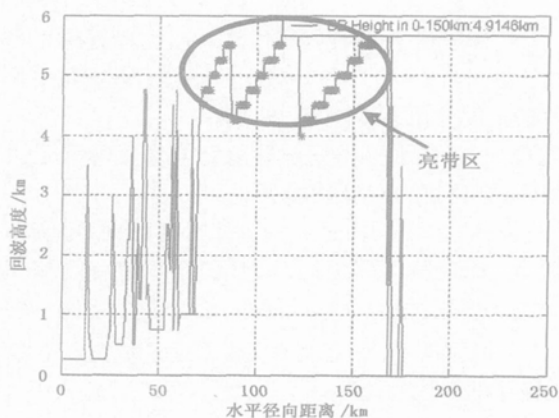


图1 垂直方向强中心高度随水平径向距离分布

3 ACSS 与 SHY 降水分类结果对比检验

选用武汉 CINRAD/SA 雷达原始体扫描基数据,雷达工作在 V21 降水模式下,采集间隔为 6 min。降水过程时间分别为 2004 年 6 月 18 日 03:05

~15:00(约 12 h)、2004 年 7 月 17 日 18:22 至 18 日 05:27(约 11 h)、2005 年 4 月 10 日 07:51 ~ 12:26(约 5 h)。第 1 个降水过程为大范围层状云降水中夹杂着对流性降水,对流发展不旺盛。第 2 个降水过程中层状云和对流性降水区域并列存在,对流性降水强度较强,范围大,且排列为离散带状。第 3 个降水过程为带状强层状云降水。

3.1 2004 年 7 月 17 日降水分类对比

分析图 2(见图版 5)可知,SHY 和 ACSS 的降水分类结果很类似,能正确识别出大部分的层状云和对流性降水。对图 2a 中对流性和层状云降水区域做垂直剖面显示(图 2b)发现,大部分对流性降水区域上方为柱状回波,中心强度达到 40 dBz,是明显的对流性降水,而后部的层状云降水区域上方回波强度较弱,水平强度梯度小,云顶较平,表明降水分布均匀,是明显的层状云降水,这进一步表明 ACSS 和 SHY 降水分类算法基本是正确的。然而,分类结果也存在明显的区别。SHY 的对流性降水区域分布比较零散,位于雷达南部的局地对流核被层状云区域所包围(图 2c 中箭头所示),类似的现象普遍出现在带状对流区域中,造成对流性降水区域偏小。虽然这些对流核外围的回波强度较弱(小于 30 dBz),但它们是在对流上升运动中发展并从对流核分离出来的,将其分类为层状云降水是不合适的^[12]。因此,ACSS 将其订正为对流性降水。从图 2d 中看出,ACSS 能将对流核外沿的大部分区域订正为对流性降水,使对流性降水面积显著扩大。图 2b 中箭头所示回波在 SHY 中识别为层状云降水,显然这是一个正在发展的对流单体,回波柱状明显,云顶高度 4 km,底部还未完全接地,而 ACSS 能正确地将此回波识别为对流性降水。

3.2 2005 年 4 月 10 日降水分类对比

分析图 3(见图版 5)可知,SHY 与 ACSS 降水分类的主要差别位于带状回波中强度为 35 ~ 40 dBz 的区域(图 3a 中椭圆圈所示),SHY 识别为对流性降水,ACSS 则相反。该区域的垂直剖面显示,该区域上方有明显的亮带(图 3b 中椭圆圈所示),应为层状云降水。该亮带回波强度超过 40 dBz,使得在 CAPPI 中受亮带污染的层状云回波强度也很强,满足了在二维结构场中对流性降水的判别条件,因而 SHY 错误地将其识别为对流性降水,这表明仅根据二维结构场信息分类降水是不够的,ACSS 由于考

虑了降水的垂直结构信息,对较强的层状云降水识别能力有明显提高。

3.3 ACSS 与 SHY 降水分类差别统计分析

为进一步检验 ACSS 的订正效果,对 3 个降水过程中所有时次的 ACSS 与 SHY 降水分类结果差别做统计平均(表 2)。分析表 2 可知,第 2 个降水过程中 Fs2c 最大,使得 Fc1 比 Fc0 增加了近 10%,表明 ACSS 识别对流核外围弱回波的效果较好。第 3 个降水过程中 Fc2s 最大,表明 ACSS 能较好识别出强层状云降水。但由于整个对流性降水区域较小,Fc1 比 Fc0 只减少了 2%。第 1 个降水过程中虽然 Fs2c 比 Fc2s 小近 14%,同样由于整个对流性降水区域较小,反而使 Fc1 比 Fc0 略有增加。在以上 3 个降水过程中,第 2 个过程 Fcs 最大,第 1 个过程 Fcs 最小,这主要与回波形态有关,表明对于强带状对流回波 ACSS 性能比 SHY 提升明显,而对于大范围层状云中夹杂着对流性降水则不明显。

表 2 ACSS 与 SHY 分类结果差别统计 %

降水过程	Fs2c	Fc2s	Fcs	Fc0	Fc1
2004 - 06 - 18	1.6	15.1	2.3	5.1	5.9
2004 - 07 - 17	12.2	8.0	11.6	13.7	23.0
2005 - 04 - 10	0.6	66.4	3.2	3.7	1.7

注:Fs2c、Fc2s 分别为 SHY 分类结果中层状云(对流性)降水被 ACSS 订正为对流性(层状云)降水的区域占整个层状云(对流性)降水区域的百分比。Fcs 为所有订正区域占整个降水区域的百分比,反映了 ACSS 订正降水的总体效果。Fc0、Fc1 分别为 SHY、ACSS 对流性降水区域占整个降水区域的百分比。

4 结语

利用武汉 CINRAD/SA 雷达反射率数据,研究提出了对流性/层状云降水的自动分类算法(ACSS)。该算法充分利用了降水场的三维结构信息,在二维降水结构场初步分类降水的基础上,利用降水垂直结构信息如 $|\nabla_z Z|$ 、BBF 以及 $|\nabla_r Z|$ 进行订正(包括亮带识别算法),最后得出新的降水分类。

经武汉雷达 3 个降水过程检验表明,ACSS 能较正确地实现对流性/层状云降水的自动分类,并且相对于只从二维结构分类降水性能上有较大提高,主要表现在能正确识别出亮带特征明显的强层状云和对流核外沿的对流弱回波区。但 ACSS 也产生了不正确的降水分类,如不能完全识别出由于雷达波

束遮挡等原因造成的非对流性 $|\nabla_r Z|$ 偏大区域。虽然这些错误识别的区域较小,但也表明 ACSS 存在不完善的地方,期待以后通过改进算法或引入新的分类参数加以解决。

参考文献

[1] 张培昌,杜秉玉,戴铁丕.雷达气象学[M].北京:气象出版社,2001:182-205.

[2] Šálek M, Cheze J L, Handwerker J, et al. Radar techniques for identifying precipitation type and estimating quantity of precipitation[R]. Document of COST Action 717, WG1,2004.

[3] Uijlenhoet R. Raindrop size distributions and radar reflectivity-rain rate relationships for radar hydrology[J]. Hydrol. Earth Syst. Sci., 2001, 5: 615-627.

[4] Austin P M. Relation between measured radar reflectivity and surface rainfall[J]. Mon. Wea. Rev., 1987, 115: 1053-1070.

[5] Joss J, Waldvogel A. A method to improve the accuracy of radar measured amounts of precipitation[C]. Preprint. 14th Radar Meteorology Conf., Amer. Meteor. Soc., 1970: 237-238.

[6] Anagnostou E N, Krajewski W F. Real-time radar rainfall estimation. part I: Algorithm formulation[J]. J. Atmos. Ocean. Technol., 1999, 16: 189-197.

[7] Seo D J, Breidenbach J, Fulton R, et al. Final report for June 1, 1999 to May 31, 2000 interagency memorandum of understanding among the NEXRAD program[R]. WSR-88d Operational Support Facility, National Weather Service Office of Hydrology, 2000.

[8] Churchill D D, Houze R A Jr. Development and structure of winter monsoon cloud clusters on 10 December 1978[J]. J. Atmos. Sci., 1984, 41: 933-960.

[9] Adler R F, Negri A J. A satellite infrared technique to estimate tropical convective and stratiform rainfall[J]. J. Appl. Meteor., 1988, 27: 30-51.

[10] Steiner M, Houze R A Jr, Yuter S E. Climatological characterization of three-dimensional storm structure from operational radar and rain gauge data[J]. J. Appl. Meteor., 1995, 34: 1978-2007.

[11] Rosenfeld D, Amitai E, Wolff D B. Classification of rain regimes by the three-dimensional properties of reflectivity fields[J]. J. Appl. Meteor., 1995, 34: 198-211.

[12] Biggerstaff M I, Listema S A. An improved scheme for convective/stratiform echo classification using radar reflectivity[J]. J. Appl. Meteor., 2000, 39: 2129-2150.

[13] Sanchez-Diezma R, Zawadzki I, Sempere-Torres D. Identification of the bright band through the analysis of volumetric radar data[J]. J. Geophys. Res., 2000, 105 (D2): 2225-2236.

Automatic Convective/ Stratiform Cloud Precipitation Classification Based on Radar Reflectivity

Wu Tao^{1, 2} Wu Cuihong³ Wan Yufa¹ Shu Fangguo²

(1 Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430074; 2 Shiyan Meteorological Bureau, Hubei Province, Shiyan 442000; 3 Wuhan Central Weather Office, Wuhan 430074)

Abstract: To increase the accuracy of radar rainfall estimation, an automatic convective/stratiform precipitation classification algorithm based on radar reflectivity data at the Wuhan radar station is proposed. Based on the two-dimensional reflectivity field, it can identify bright bands, extract the information about the three-dimensional structure of precipitation, and use them to correct the preliminarily analyzed results. Evaluation shows that the method can separate most of the convective and stratiform cloud precipitation correctly, and the performance is obviously better than that by using two-dimensional information. Especially it can identify stratiform precipitation with an obvious bright band and weak echoes in the periphery of the convective core.

Key words: weather radar, convective/stratiform cloud, classification

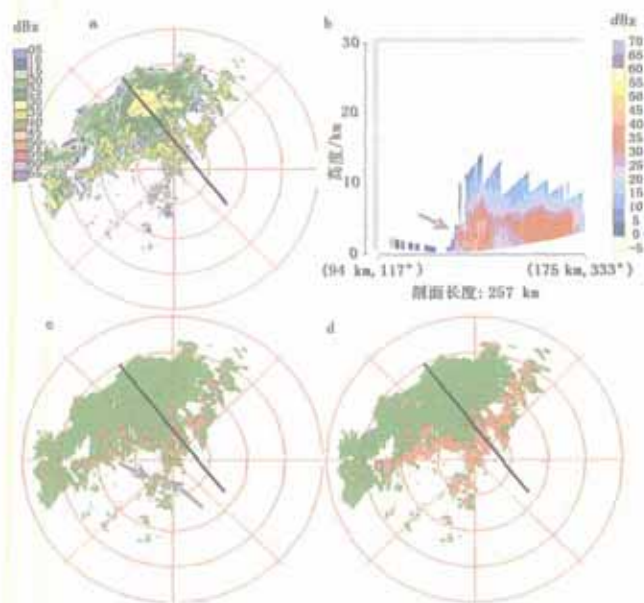


图2 (a) 2004年7月17日21:34武汉雷达3 km CAPPI图; (b)图a中黑色直线之间的垂直剖面图; (c)和(d)分别表示SHY、ACSS降水分类图(绿色区域表示层状云降水,红色区域表示对流性降水,圆圈间距为60 km,下同)

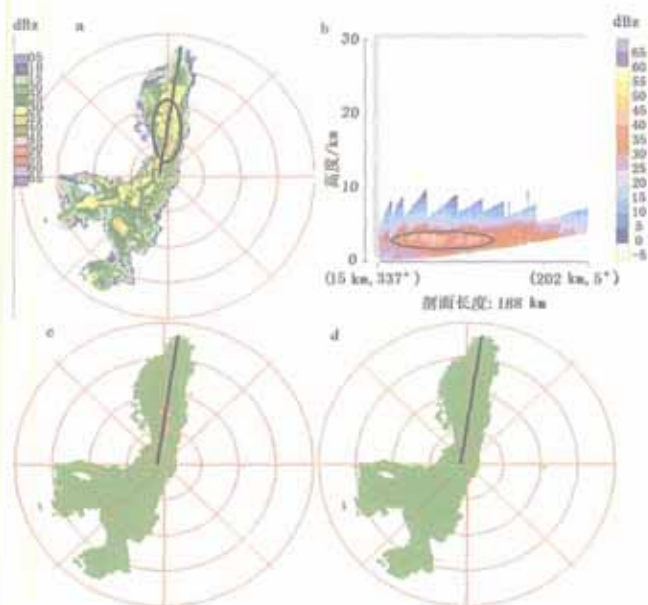


图3 (a) 2005年4月10日09:35武汉雷达3 km CAPPI图; (b)图a中黑色直线之间的垂直剖面图; (c)和(d)分别为SHY、ACSS降水分类图