

双线偏振多普勒雷达估算降水方法的比较研究^①

王建林 刘黎平 曹俊武

(中国气象科学研究院,北京 100081)

提 要

用美国 KOUN 双线偏振多普勒雷达 2003 年 5~6 月观测的两次强对流降水的天气过程资料,研究了从冰雹云降水回波中剔除冰雹回波得到液态降水区域的方法,冰雹回波剔除的结果保证了估测降水量不受冰雹的影响;分析了 S 波段双线偏振多普勒雷达几种估测降水强度方法的差异,并与地面雨量站资料进行对比,研究了 K_{DP} 计算方法本身对降水估测的影响。结果表明:在实际的估测降水中,不同降水估测方法得到的结果有较大的差异,利用 K_{DP} 估测降水的方法不适合小雨阶段的测量。

关键词: 双线偏振雷达 反射率因子 差分反射率 差传播相移率

引 言

目前,雷达定量估测降水强度在灾害性天气的监测和预警、人工影响天气的作业指挥、气象模式资料同化及模拟结果的检验等方面具有十分重要的意义^[1]。常规天气雷达只能探测到与降水强度有关的一个参量——反射率因子 Z_H ,由于 Z_H - R 关系随雨滴谱型变化较明显,假定雨滴是球形的,只靠着一个参量很难准确测量降水强度。具有双线偏振功能的多普勒雷达系统可以探测到水平偏振反射率因子 Z_H 、差分反射率因子 Z_{DR} 、差传播相移率 K_{DP} 、水平偏振和垂直偏振回波功率零延迟互相关系数 $\rho_{HV}(0)$ 等与降水粒子类型、形状、空间取向等密切相关的参数,这种多参数测量降水的方法提高了降水估测精度。差分反射率因子 Z_{DR} 、退偏振因子 L_{DR} 反映了降水粒子对不同偏振方向雷达波后向散射的性质的差异,而差传播相移率 K_{DP} 则是非球形粒子对不同偏振方向雷达波传播相位或传播速度差异的量度^[2]。研究结果表

明:利用 Z_H 和 Z_{DR} 联合反演降水强度, K_{DP} 单独反演降水强度, Z_{DR} 和 K_{DP} 联合反演降水强度的技术比常规雷达 Z_H - R 关系反演降水强度的精度有了明显提高^[3]。1974 年, Humphries 得出了差传播相移率 K_{DP} 几乎和雨强 R 呈线性关系,而且对雨滴谱(DSD)变化相对来说不敏感的结论,认为 K_{DP} 更能适应雨滴谱中 N_0 的变化^[4]。Aydin 等利用雨滴谱在 Z_H 、 Z_{DR} 坐标系上确定雨区对应的 Z_H 、 Z_{DR} 的范围,实验证明 Z_{DR} 能够较精确地反映雨滴谱的变化^[5]。

新一代多普勒天气雷达(CINRAD)改装成双线偏振多普勒雷达,可进一步提高人工影响天气、灾害性天气监测预警、大型科学试验方面的气象服务水平。北京市气象局的原 C 波段多普勒天气雷达已经改造成双线偏振雷达,数据产品处于试验阶段。

美国 KOUN 雷达是在 WSR-88D 雷达的基础上被改造成具有双线偏振的功能。本文采用美国 KOUN 雷达观测的两次强对流

^① 本文由国家科技部科研院所技术开发研究专项资金“双线偏振雷达产品生成软件系统的研究”项目资助。

天气过程资料,首先对雷达资料进行有效地预处理,保证降水区域不受杂波的影响,利用从降水云中提取的物理量及双线偏振天气雷达的偏振参量,来研究各种估测降水方法在不同回波降水强度中的差异,并讨论了偏振参量之间的关系及其对降水的影响,对其在实际运用中的合理性和可行性作了合理的解释。

1 估测降水方法和 KOUN 雷达资料的预处理

1.1 估测降水方法

利用双线偏振雷达的不同参量进行组合,可以得到不同的测雨方法及测雨效果,下面对适用于对流性降水的四种估测降水方法进行对比分析^[6]:

方法一:

$$R_1 = 1.7 \times 10^{-2} Z_h^{0.174} \quad (1)$$

方法二:

$$R_2 = 1.59 \times 10^{-2} Z_h^{0.737} Z_{dr}^{-1.03} \quad (2)$$

方法三:

$$R_3 = 50.3 K_{DP}^{0.812} \quad (3)$$

方法四:

$$R_4 = 63.3 K_{DP}^{0.851} Z_{dr}^{-0.72} \quad (4)$$

其中, R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 分别表示运用四种方法计算得出的雨强,单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$; 式中 Z_h 的单位为 $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$, K_{DP} 的单位为 $^{\circ} \cdot \text{km}^{-1}$ 。需要注意的是:雷达测量的反射率因子 $Z_H(\text{dBz})$ 和差分反射率 $Z_{DR}(\text{dB})$ 与公式给出 $Z_h(\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3})$ 和 $Z_{dr}(\text{dB})$ 的不同,其转换关系如下:

$$Z_H = 10 \times \log Z_h \quad (5)$$

$$Z_{DR} = 10 \times \log Z_{dr} \quad (6)$$

方法一只利用一个反射率因子 Z_H 来估测降水,由于 Z_H - R 关系受雨滴谱型变化影响较大,假定雨滴是球形的,中到大雨使估测降水强度的精度误差更大;方法二利用了反射率因子 Z_H 和差分反射因子 Z_{DR} 两个参量,该测雨方法对滴谱分布变化敏感性较差,利用双参数(Z_H 、 Z_{DR})的方法提高了降水精度;

方法三利用 K_{DP} 直接估测降水,在测量强降水方面精度有很大提高,该方法对雨滴谱变化较不敏感, K_{DP} 本身也易精确测量,在探测云体内微物理结构方面有很大的潜力;方法四是联合差分反射率因子 Z_{DR} 、差传播相移率 K_{DP} 反演降水,1991 年 Jameson 就提出这种观点,1995 年 Seliga 和 Bringi 得到 Z_{DR} 、 K_{DP} 联合探测降水强度方法的公式,从理论上解释了这种测量降水的方法对于任何降水类型都能得到精确的探测结果的观点。 Z_{DR} 可以反映滴谱中大小粒子比例的变化, K_{DP} 可以提高雷达探测效果,且液态水对它的贡献最大,引入参量 Z_{DR} 明显改善了常规雷达反演强降水过大的现象,但是 Z_{DR} 、 K_{DP} 的系统误差和随机误差可能影响这一方法的探测效果。

1.2 资料简介

美国 KOUN 雷达是在 WSR-88D 雷达的基础上增加双偏振功能后升级而来的,扫描半径为 300km,雷达的距离库为 267m,由于 KOUN 雷达不支持 RHI 的天线扫描方式,只利用 PPI 扫描资料。2003 年 4 月 1 日到 7 月 30 日期间,位于 Oklahoma State 的美国气象服务预报局(NWSFO)做了一个大型的联合试验(JPOLE),利用 KOUN 雷达和其它先进的探测工具来收集和分析在这段时间内可能发生在 Oklahoma State 的强天气过程。本文采用了 2003 年 5 月 10 日和 6 月 12 日两次降水过程中的数据资料,其中包括近 100 个地面 1 小时降水的站点资料,实验所用的雷达资料 PPI 仰角层为 0.5° 、 1.5° 、 2.5° 。5 月 10 日降水是一次发展迅速强对流性降水过程,降水情况从 18:00 开始观测,降水已经进入发展很强的阶段,一直持续到 18:20 左右,这个阶段为最强盛时期,18:30 以后范围减小。到 18:50 左右出现很强的对流单体,回波强中心由东南部向正东方移动,在 UTC 时间 19:03 左右,出现冰雹。该资料中, Z_H 最大可达 70dBz,有一部分回波 Z_{DR} 出

现负值, K_{DP} 超过 $1^\circ \cdot \text{km}^{-1}$, 这是典型的冰雹回波; 6月12日发生了一次大范围的降水, 历时长达6个小时。

1.3 KOUN 雷达资料的预处理

美国 KOUN 雷达测量的参量没有差传播相移率 K_{DP} 参量, 须经 ϕ_{DP} 转换提取 K_{DP} 信号。为了保证得到空间分布较为平滑的 K_{DP} , 在进行转化的过程中, 对 ϕ_{DP} 资料进行了9点差值平滑处理, 然后假定降水区中距离 r_1 、 r_2 之间包含 N 个距离库, 每个库都测得一个 ϕ_{DP} , 对这 N 个 ϕ_{DP} 用最小二乘法进行拟合计算得到 K_{DP} 。其表达式为:

$$K_{DP} = \frac{\sum \phi_{DP}(r_i) - \bar{\phi}_{DP}(r_i - r_0)}{2 \sum (r_i - r_0)^2} \quad (7)$$

式中 $r_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i$, r_i 为第 i 个库与雷达的径向距离, $\bar{\phi}_{DP}$ 代表 N 个库的平均值。需要注意的是: 根据回波强弱的不同, 降水过程中提取 K_{DP} 信号的库数也不同。取反射率 $Z_H > 40\text{dBz}$, $N = 17$; 当反射率 $Z_H < 40\text{dBz}$, $N = 33$ 。

2003年5月10日降水过程的数据混有冰雹固相粒子, 使计算降水强度出现误差, 因此必须解决剔除降水回波中的冰雹回波的问题。使用两种方法剔除冰雹回波^[7]:

(1) 认为 $Z_H > 53\text{dBz}$ 的回波是冰雹回波, 将回波强度限制在降雨区中, 使 $Z_H \leq 53\text{dBz}$, 可剔除冰雹回波。

(2) 使用参量 H_{DR} 判别冰雹区。冰雹参量 H_{DR} 定义为:

$$H_{DR} = Z_H - f(Z_{DR})$$

$f(Z_{DR})$ 的具体表达式为:

$$f(Z_{DR}) = 25 + 17.5Z_{DR} \quad \text{当 } 2 \geq Z_{DR} > 0 \quad (8)$$

$$f(Z_{DR}) = 60 \quad \text{当 } Z_{DR} > 2 \quad (9)$$

当 $H_{DR} > 0$ 时, 判为冰雹区; $H_{DR} \leq 0$ 时, 判为降雨区。

图1(见封三)是剔除冰雹回波前后(18:

36UTC)反射率因子 Z_H 的对比图, 从图1中看出: 在剔除冰雹回波以后, 已经滤掉小于 15dBz 的回波边缘反射率因子, 强回波中心也相应滤去(见图1中箭头1、2), 可以看出, 强回波反射率因子 Z_H 较高且差分反射率因子 Z_{DR} 值较小的区域为冰雹区。这些资料不参与降水估测, 保证了降水估测结果的可靠性。

2 个例分析

2.1 雷达估测降水计算方法对比分析

现采用四个时刻(2003年5月10日 18:00:08、18:12:19、18:24:46、18:36:20UTC)的 KOUN 雷达观测资料来分析不同测雨方法估测降水误差的差异。

图2分别给出了方法二、方法三、方法四与方法一估测降水强度的对比图, 图中数据采用四个时刻雷达 PPI 统计数据。

从图2中的总体趋势来看, 方法一、二估测降水强度明显要高于方法三、四, 主要原因一是在提取 K_{DP} 信号时对 K_{DP} 平滑处理造成的影响(强回波与弱回波的分界处最明显), 其次是方法一在回波比较强的阶段适用性已经大大地降低。方法一与方法三、四的雨强测量值有较大差异, 特别是当回波强度 Z_H 小于 20dBz 时, 方法三、四出现异常高估测降水的情况, 误差分析可以达到 $11.9\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$; 当反射率因子 Z_H 小于 20dBz 时, 方法三、四得到很高的降水强度, 这是不合理的现象, Z_H 较小的时候 Z_{DR} 、 K_{DP} 值也很小, 几乎等于零, 且相对来说它们的噪声很大, 也会造成一定的偏差, 直接影响着估测降水效果, 其次也有平滑处理带来的误差, 所以此时可直接使用 Z_H 来估测降水强度, 以避免 Z_{DR} 、 K_{DP} 误差给降水带来负面影响; 当反射率因子 Z_H 大于 20dBz 时, 方法三、四较方法一过低估测降水, 相对来说, 它们之间的差异减小, 而且图2a、d发现: 方法一、二与方法三、四两组测雨效果很相似, 可以得出: 在方法二、四中 Z_{DR} 带来的影响很小, 较方法一、三估测降水

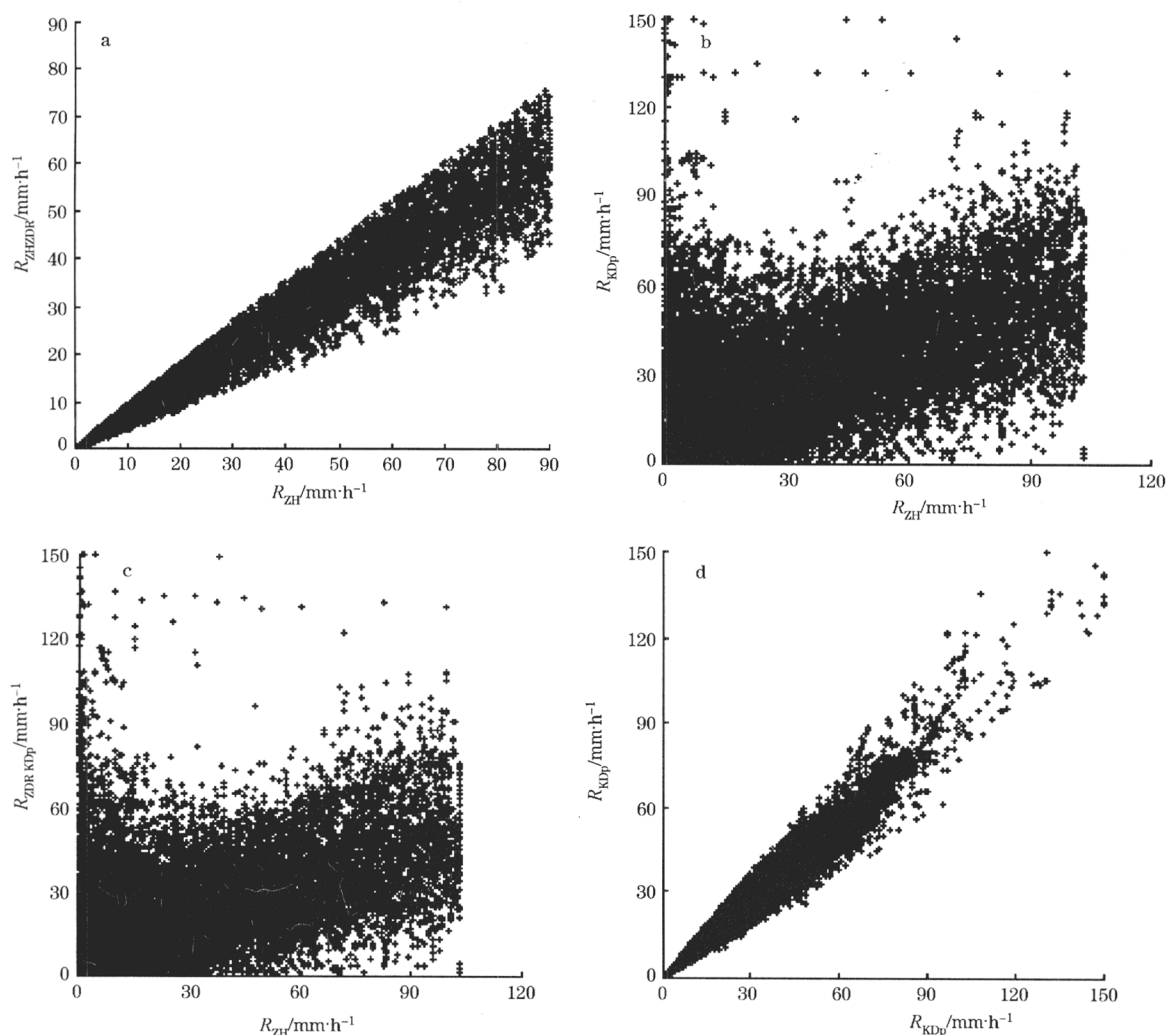


图2 双线偏振多普勒雷达四种估测降水方法对比图

强度的降低,更接近于实际降水强度,这将在后面分析。

2.2 雷达结合地面雨量计估测降水

下面分析不同方法估测降水的1小时累加降水量的对比及与地面降水资料 R_G 的对比,图3是雨量站上空相应的雷达四种方法估测降水1小时累加降水量与地面资料对比图。

分析图3,四种方法估测1小时降水量与地面雨量站资料对比结果表明:当1小时降水量在0.1~5mm之间时,方法一、二估测结果高于地面资料,造成小雨高估,方法三、四较接近于地面资料;当1小时降水量在5~11mm之间时,四种估测结果与地面资料较为接近;当1小时降水量在11~25mm之间时,估测结果要低于地面资料; $25\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$

以上的样本较少,不做进一步分析。从总体来看1小时降水量在11mm以下时方法三、四优于方法一、二的估测结果,加入 Z_{DR} 后,计算值降低,与地面资料较接近。

在图3中雷达估测降水与地面资料对比,个别点偏差很大,原因如下:

(1)在计算 K_{DP} 值时,平滑处理造成一定的误差。

(2)选取云层较高的回波,在空中形成降水粒子,但并未实际降落到地面,也会引起雷达估测值偏高。

(3)当云层较低时,雷达观测超出云层时会出现某一时刻缺测值,造成地面资料偏高。

(4)地面蒸发、风向扰动等也会导致地面雨量站资料与实际降水量不符。

2.3 偏振量之间关系

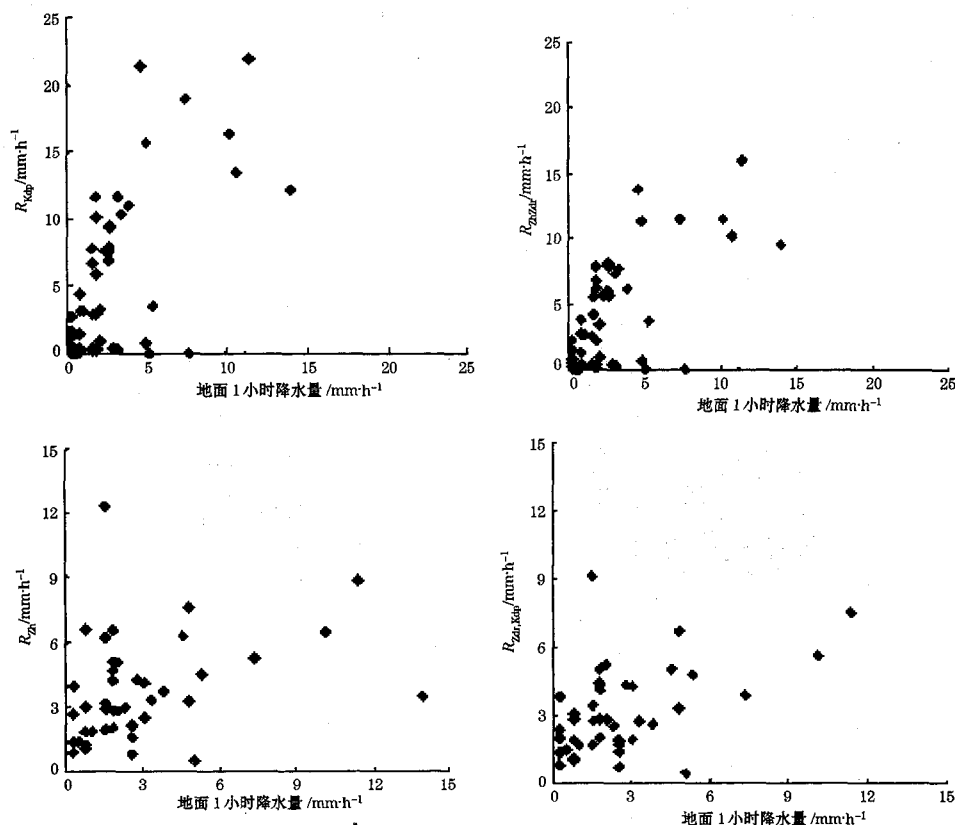


图3 1小时累加雷达算法与地面资料对比

KOUN 双线偏振雷达可以探测到更多的回波参量,采用多参数法估测降水能明显提高降水精度。现分析雷达参量 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} ,研究 K_{DP} 、 Z_{DR} 与反射率因子 Z_H 的关系,探讨以上提到的四种方法估测降水强度差距较大的原因。图4分析 KOUN 雷达测量三个参量 Z_H 与 Z_{DR} 、 Z_H 与 K_{DP} 的之间的规律,可以看出:在降雨区,随着 Z_H 值增大, Z_{DR} 保持正值,数值在 $0 \sim 5\text{dB}$ 范围内,随着 Z_H 的增大, Z_{DR} 有明显的增大趋势, Z_{DR} 与反射率因子呈现简单的线性关系。当反射率因子 $Z_H < 40\text{dBz}$ 时, K_{DP} 整体趋势小于 $0.5^\circ \cdot \text{km}^{-1}$,有一些散点大于 $0.5^\circ \cdot \text{km}^{-1}$,主要原因是当 Z_H 较小时, Z_{DR} 、 K_{DP} 值较小,噪声很大,对 Z_{DR} 、 K_{DP} 影响很大,在提取 K_{DP} 时强回波与弱回波平滑处理时出现一些散乱点,可能会造成估测降水在回波较弱的情况

下测量误差较大。从统计角度来分析,当反射率因子 $Z_H > 40\text{dBz}$ 时, Z_{DR} 、 K_{DP} 和反射率因子 Z_H 有很好的相关性,随反射率因子 Z_H 的增加, K_{DP} 迅速增长, K_{DP} 在取对数后和反射率因子 Z_H 有一定的简单线性关系。理论分析固态粒子产生的 K_{DP} 值不大,近似接近零, K_{DP} 的取值主要来自于液态降水^[1], Z_{DR} 、 K_{DP} 的测量不受雷达回波功率和相移绝对值的影响。综合以上分析,从整体来看,利用双线偏振雷达得到这三个参量的变化规律,根据每一个距离库所对应的 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} ,拟合出如下关系:

$$Z_H = a + b \log(K_{DP}) + c Z_{DR} \quad (7)$$

其中, Z_H 的单位用 dBz , Z_{DR} 的单位用 dB , K_{DP} 的单位用 $^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ 。式(7)中 a 、 b 、 c 的值根据不同的波段雷达和雨滴降落形状而不同,但是相对 DSD 变化不是很敏感。据

2003年5月10日的资料得出 $a = 21.68$ 、 $b = -0.26$ 、 $c = 10.67$ 。 $Z_H = 21.68 - 0.26 \log K_{DP} + 10.67 Z_{DR}$ 。

雷达测量的反射率因子与公式计算得到的反射率因子的对比图(图略),从中可以看

出,在反射率因子 Z_H 这样大的变化范围内,利用 Z_{DR} 、 K_{DP} 给出的 Z_H 与雷达测量值 Z_H 很接近,两者平均相对误差达 3.2dBz,相关性较好。

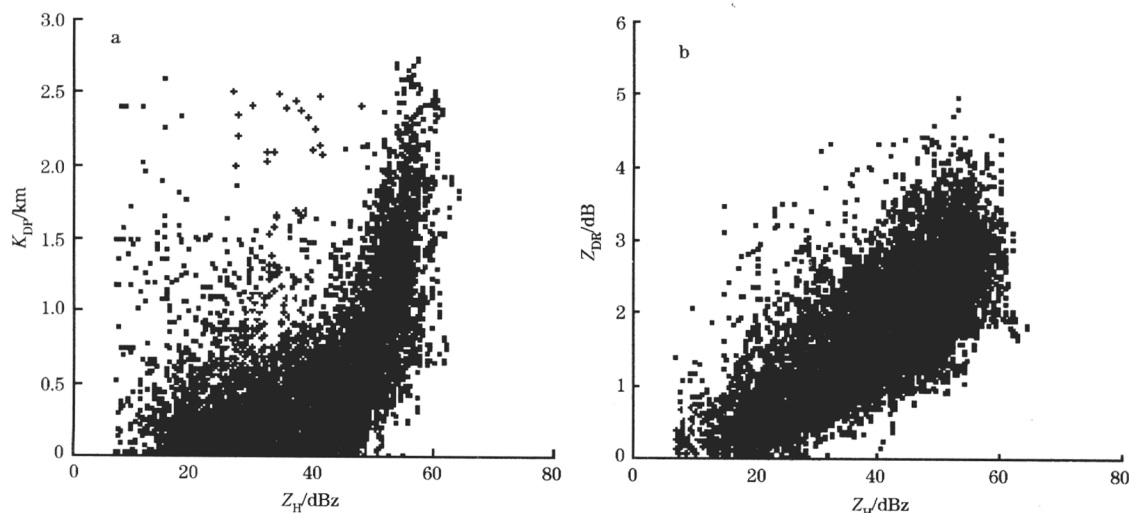


图4 2003年5月10日18时 KOUN 雷达三个参量简单线性关系图

3 结 语

(1) 对美国 KOUN 雷达资料进行预处理,通过几种方法对降水资料进行限制,剔除降水回波中的冰雹回波,效果很好,保证了降水区的可靠性。

(2) 分析了测雨公式探测结果的差异,结果表明:各种算法给出的结果差距很大,尤其是在小雨阶段,方法一、二与方法三、四估测降水差异很大,在中雨阶段误差相对减小。当回波较弱时, K_{DP} 比较大的系统误差及 K_{DP} 的平滑可能是造成小雨测量降水误差的原因,得出当反射率因子小于 20dBz 时可采用方法一进行估测降水;方法一、二与方法三、四两组测雨方法得到的效果近似,得出在计算估测降水中 Z_{DR} 起的作用不是很大。

(3) 采用实测雷达资料结合地面资料来检验各种估测降水方法,各阶段偏差较大,在小雨阶段,雷达估测降水强度明显高于地面资料,在中雨到大雨阶段,雷达估测降水与地面资料较为接近。算法中加入 Z_{DR} 后,使计算降水强度降低,接近地面雨量站资料,提高了测量精度。

(4) 分析 KOUN 雷达测量的三个参量 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 之间的关系,从统计角度分析,随着反射率因子 Z_H 增加,差分反射率因子 Z_{DR} 呈增长趋势;当反射率因子 $Z_H < 40\text{dBz}$ 时, K_{DP} 值整体趋势小于 $0.5^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ 。当反射率因子 $Z_H > 40\text{dBz}$ 时,随反射率因子 Z_H 的增加, K_{DP} 迅速增长, K_{DP} 在取对数后和反射率因子 Z_H 有一定的简单线性关系。三个偏振参量之间的关系如下:

$$Z_H = a + b \log(K_{DP}) + c Z_{DR}$$

参考文献

- 1 刘黎平. 双线偏振多普勒天气雷达估测混合区降雨和降雹方法的理论研究. 大气科学, 2002, 26(6).
- 2 刘黎平, 葛润生, 张沛源. 双线偏振多普勒雷达遥测降水强度和液态含水量的方法和精度研究. 大气科学, 2002, 26(5).
- 3 A. V. Ryzhkov, D. S. Zrnic. Comparison of Dual-polarization Radar Estimators of Rain, Journal of atmospheric and Oceanic Technology, 1995, april, 12: 249—256.

(下转第 41 页)

- 4 Alexander Ryzhkov and Dusan Zrnic, Assessment of Rainfall Measurement that Uses Specific Differential Phase, Journal of Applied Meteorology, 1996, 35:2080—2090.
- 5 Alexander Ryzhkov and Dusan Zrnic. An Evaluation of Radar Rainfall Estimates from Specific Differential Phase, Brandes ET AL, 2001:363—375.
- 6 A. Ryzhkov S. Giangrande and T. Schur. Rainfall Measurements with the Polarimetric WSR-88D Radar CIMMS 2003, Sep.
- 7 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 雷达气象学. 北京: 气象出版社, 2001.

A Comparison of Methods of Rainfall Rate Measurements by Dual Linear Polarization Doppler Radar

Wang Jianlin Liu Liping Cao Junwu

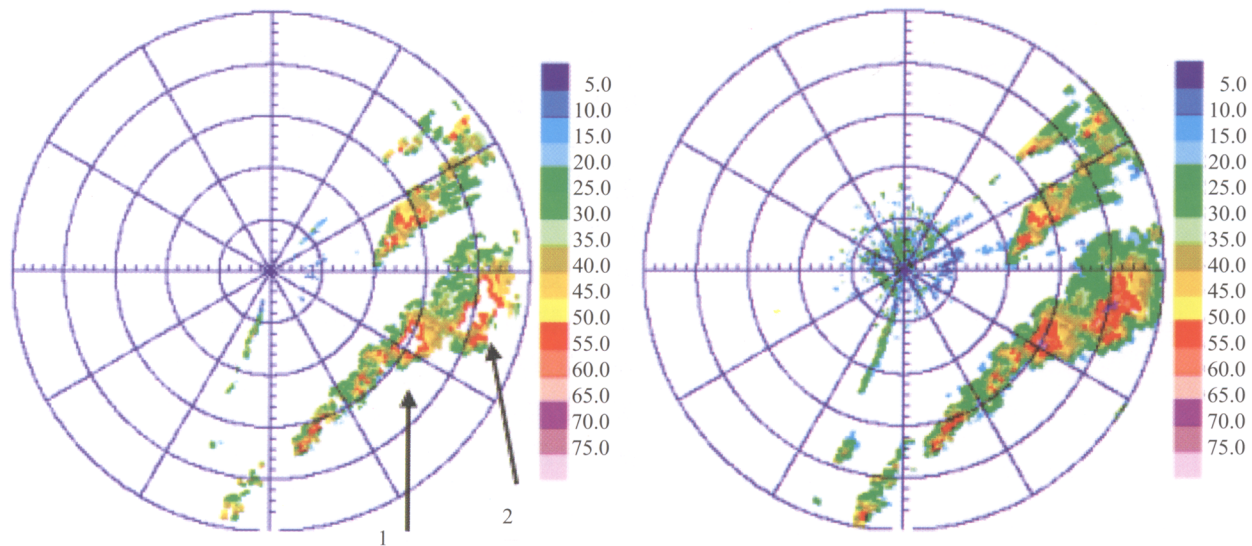
(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

Based on the data observed by KOUN radar of USA on the two convective rainfall events on May 10th and June 12th in 2003, a method of estimating liquid precipitation is developed by eliminating the hail echo from hybridtype precipitation echo. This method ensures hail has no influence on estimating rainfall rate. By analysis of the differences of the four methods on estimating rain intensity at S band of dual linear polarization Doppler radar, the influence of K_{DP} numerical method on the estimating rainfall is also studied here. The conclusion is that there is great difference in the four estimation methods and the K_{DP} method is not fit to estimate precipitation when the rain intensity is weak.

Key Words: dual linear polarization Doppler radar reflectivity differential reflectivity specific differential phase

《双线偏振多普勒雷达估算降水方法的比较研究》附图



反射率因子 Z_H 剔除冰雹回波后

反射率因子 Z_H 剔除冰雹回波前

图1 2003年5月10日剔除冰雹回波反射率因子 Z_H 前后对比图 (18:36UTC)