

X波段双线偏振雷达不同衰减订正方法对比 及其对降水估测影响研究^{* 1}

胡志群^{1,2} 刘黎平¹ 楚荣忠³ 金荣花⁴

HU Zhiqun^{1,2} LIU Liping¹ CHU Rongzhong³ JIN Ronghua⁴

1. 中国气象科学研究院,灾害天气国家重点实验室,北京,100081

2. 南京信息工程大学,南京,210044

3. 中国科学院寒区旱区环境工程研究所,兰州,730000

4. 国家气象中心,北京,100081

1. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

2. Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

3. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

4. National Meteorological Center, Beijing 100081, China

2006-08-15 收稿,2006-12-18 改回.

Hu Zhiqun, Liu Liping, Chu Rongzhong, Jin Ronghua. 2008. Comparison of different attenuation correction methods and their effects on estimated rainfall using X-band dual linear polarimetric radar. Acta Meteorologica Sinica, 66(2):251-261

Abstract Except its smaller antenna, mobile convenience and low cost, X-band radar has a higher resolution than the S-bands, and C-bands, and therefore can therefore detect more subtle microphysical processes information of clouds, raindrop, hail and hydrometeor etc. As an effective complementarity of new generation weather radar network, it can be widely applied to the monitoring and warning of disastrous weather such as heavy rain and hails, the operations guidance and effect evaluation of weather modification, and the managements of reservoir, urban area and aviation etc., therefore, it has a huge potential in the remote sensing of clouds and precipitation and in nowcasting. Compared to ordinary Doppler weather radars, dual polarimetric radar have a very distinct advantage in the quantitative estimation of precipitation, however, the radar signal attenuation is an important shortcoming which hampers the wide application of X-Band radar, especially in precipitation estimate. Various kinds of signal attenuation correction methods for X-band dual linear polarimetric radar are analyzed, the specific differential phase shift K_{DP} is considered as an effective approach on attenuation correction. However, the values of K_{DP} for light rain are too small, which results in instable quality and larger error, therefore, reflectivity and specific differential phase shift are combined together in the Z_H-K_{DP} method to correct the attenuation error. Based on the similar consideration, $Z_H-K_{DP}-R$ combined technique is also suggested when Z_H and K_{DP} are used to estimate rainfall. During the development stage of the synchronous transmitting and receiving dual polarimetric Doppler weather radar with 3.2 cm wave length by the Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences and Jinjiang Electronic System Engineering Co., Ltd, Chendu, a set of observational data were obtained in the field experiment in Pingliang in August 2005. By means of the set of observational data, the effect of combined attenuation correction and rainfall estimation methods are examined, the results indicate that the Z_H-K_{DP} combined method is effective in correcting Z_H and K_{DP} , and furthermore, the correction speed is able to meet the requirement of real time operations. Some continuous detection records with the 5-12 minute intermission were gained in the time period of 15:08:03-22:05:46 BST August 11, 2005. The contrastive analysis of this precipitation process show that

^{*} 资助课题:科技部科研院所技术开发研究专项“双线偏振雷达气象产品生成软件系统研制”和国家重大基础研究项目(2004CB418305)。
作者简介:胡志群,主要从事双偏振多普勒天气雷达应用研究。E-mail:Huzq121@163.com

Z_H - K_{DP} - R combined estimation technique is better than single factor methods such as K_{DP} - R or Z - R , more suitable when the precipitation intensity varies widely, and the estimated results is in good agreement with automatic rain-gauge records. As to the Z - R relation, the deviations between precipitation estimations and available rain-gauge measurements decrease obviously when the corrected Z_H is used, indicating that the radar data quality are obviously improved after the attenuation correction.

Key words X-band dual linear polarimetric radar, Attenuation correction, Z_H - K_{DP} method, Rainfall estimate, Z_H - K_{DP} - R method

摘要 文中分析了 X 波段双线偏振雷达衰减订正各种方法的特点,考虑到差传播相移率(K_{DP})作为衰减订正的一种有效途径,以及由于 K_{DP} 值较小,数据质量不稳定,往往导致订正误差较大,因此提出了同时利用水平反射率因子 Z_H 与 K_{DP} 进行衰减订正的 Z_H - K_{DP} 综合法。基于同样的考虑,在随后利用 Z_H 、 K_{DP} 进行降水估测时,提出了 Z_H - K_{DP} - R 综合估测方法。利用中国科学院寒区旱区环境与工程研究所和成都锦江电子系统工程有限公司,在研制 3.2 cm 波长同时收发式多普勒偏振天气雷达过程中,2005 年 8 月在平凉外场试验取得的一批观测资料,对提出的衰减订正综合法及降水估测综合法的效果进行了分析检验,结果表明, Z_H - K_{DP} 综合法对 Z_H 、 Z_{DR} 有稳定的订正效果,并且订正速度快,能够达到实时运行的要求。2005 年 8 月 11 日 15:08:03—22:05:46,间隔 5—12 min 不等,雷达开机取得了连续的观测资料,通过对这次降水过程的对比分析表明, Z_H - K_{DP} - R 综合估测法比单因子 K_{DP} - R 法、 Z - R 关系法,适用估测的降水强度变化范围广,与自动雨量计的观测结果较为吻合。 Z - R 关系法中,利用订正后的 Z_H 值,比利用订正前的 Z_H 值,降水估测值与雨量记实测值的误差明显减小,说明衰减订正后的雷达数据质量有明显的改善。

关键词 X 波段双线偏振雷达,衰减订正,降水估测

中图法分类号 P412.25, P414.9+5

1 引言

X 波段雷达由于其天线体积小、移动方便、造价低廉,比 S 波段、C 波段有着更好的探测分辨率,数值模拟显示,X 波段双线偏振雷达的差传播相移率(K_{DP})分别是 C 波段和 S 波段雷达的 1.5、3.0 倍(Chandrasekar, et al, 1990; Matrosov, et al, 1999; Maki, et al, 2005)。相对于普通的多普勒天气雷达,双线偏振雷达在定量估测降水上,有着非常明显的优势(刘黎平等,1996;楚荣忠等,1997;王叶红等,2006;张鸿发等,2002;Matrosov, et al, 2002),然而,雷达信号的衰减问题一直是影响 X 波段广泛应用的重要因素,降水估测时,受衰减影响,会引起较大的误差。

最早的衰减订正方法研究是从 S 波段和 C 波段开始的,根据衰减与降水关系的经验公式,利用降水量的大小去调整反射率因子值,再反推衰减大小。但是 Z - R 关系本身的误差就很大,所以这种方法是极不稳定的(Hitschfeld, et al, 1954; Hildebrand, 1978)。多普勒雷达具有双偏振功能后, K_{DP} 由于其本身的定义,通过它来进行衰减订正成为一种有效途径,许多科学家对此进行了广泛的研究。

Bringi 等(1990)通过散射的数值模拟表明,衰减率(A_H ,单位: dB/km),差分衰减率(A_{DP})与 K_{DP} 之间基本上为线性关系,提出了 A_H - K_{DP} 、 A_{DP} - K_{DP} 经验公式,这一研究成果此后被广泛应用在 S 波段

和 C 波段的衰减订正中(Carey, et al, 2000; Testud, et al, 2000; Bringi, et al, 2001)。然而,由于雨滴谱(尤其是当存在 >2.5 mm 的大降水粒子时)、温度、粒子形状等等因素的影响,经验公式中的系数往往变化范围很大。Jameson(1992)讨论了温度对系数的影响,因此 Ryzhkov 等(1995)提出一种变系数的方法,Carey 等(2000)讨论了温度、粒子形状等各种因素在 C 波段衰减订正中的影响,并改进了 Ryzhkov 的方法,结果表明,变系数法对 S、C 波段的衰减订正有了较大改进,但是该方法要求降水粒子分布比较均匀,所以仍然有一定的局限性。

Testud 等(2000)提出了“ZPHI”降水廓线订正法,该方法假设在雷达波束上,水平反射率因子 Z_H 的累计衰减随差传播相移 φ_{DP} (Differential Propagation Phase Shift)($\varphi_{DP} = \varphi_H - \varphi_V$, φ_H 、 φ_V 分别为水平、垂直偏振时的传播相移,单位: deg) 的增加而增加,但是 A_H - K_{DP} 关系中仍然采用固定系数的方法。Le Bouar 等(2001)利用 C 波段的观测资料,对此方法进行分析后指出,虽然这种方法能够提供稳定的衰减订正,但是采用由数值模拟或者几次观测所拟合得到的固定系数,仍然存在较大的误差。Smyth 等(1998)也采取上述假设对 S 波段的资料进行了研究分析,提出 A_H - K_{DP} 关系中的系数不固定,进一步假设在雨区边缘,因为雨滴直径已经变得较小,甚至是小的毛毛雨,因此以雨区边缘处的 $Z_{DP}(r_0) = 0$ 作为衰减订正的约束条件。不过,这种约束往往与实况

不相吻合,很有可能在雷达探测最大范围处刚好在中雨或者强降雨的边缘,这时 $Z_{DP}(r_0)$ 一般并不会等于 0。尤其是对 X 波段来说,由于探测距离较短,这种可能性更大。为解决以上方法的局限性,Bringi 等(2001)提出了“自适应约束”算法,它是 Testud 和 Smyth 等订正算法的推广,这种方法利用雷达资料本身,不断调整得到 A_H-K_{DP} 、 $A_{DP}-K_{DP}$ 关系中的最佳系数,综合考虑了雨滴谱、粒子形状等因素的影响,用 C 波段雷达资料中对此进行了分析验证,是一种相对较好的订正方法。

为了利用 X 波段双线偏振雷达资料定量估测降水,Iwanami 等(2001)对“ZPHI”方法作了改进用于 X 波段衰减订正。Park 等(2005a, b)改进自适应约束方法,通过数值模拟与实例分析,对 X 波段双线偏振雷达的衰减订正问题进行了探讨。Matrosov 等(2002)根据 Gorgucci 等(2000)提出的降水粒子椭圆率与直径的线性关系,研究了各种降水粒子形态的衰减订正问题,并以此对降水估测进行订正,取得了一些应用于 X 波段估测降水的 $Z-R$ 关系法、多参数复合法等经验公式的系数。

利用 K_{DP} 进行衰减订正及降水估测,虽然比较准确有效,然而,在实际的雷达探测工作中,由于小雨的 K_{DP} 值比较小,往往会有较大的误差,从而对衰减订正,估测降水或液态含水量产生不可低估的影响。因此,本文提出 Z_H-K_{DP} 法, $Z_H-K_{DP}-R$ 法,综合利用 Z_H 与 K_{DP} 等进行衰减订正及降水估测。中国科学院寒区旱区环境与工程研究所和成都锦江电子系统工程公司,研制 3.2 cm 波长同时收发式多普勒偏振天气雷达过程中,2005 年 8 月外场试验取得了一批观测资料,利用这些观测资料,对提出的衰减订正及降水估测方法的效果进行了分析检验。

2 X 波段衰减订正方法

2.1 K_{DP} 订正法

差传播相移率 K_{DP} 的定义为: $K_{DP} = \text{Re}(k_H - k_V)$ (单位: deg/km), 其中 k_H 、 k_V 分别为水平与垂直偏振波的传播常数, Re 表示取复数的实部, 利用 K_{DP} 进行衰减订正, 考虑的是在由非球形粒子组成的雨区中, 衰减率 A_H , 差分衰减率 A_{DP} ($A_{DP} = A_H - A_V$, A_H 、 A_V 分别为水平与垂直偏振波在降水区中的衰减率)。能够线性地表示为 (Bringi, et al, 1990)

$$A_H = a_1 K_{DP} \quad (1)$$

$$A_{DP} = a_2 K_{DP} \quad (2)$$

对 X 波段, 系数 a_1 的值, Bringi 等(1990), Jameson(1991)通过假设雨滴谱为 gamma 分布, 用数值模拟分别求得为 0.247、0.21, Matrosov 等(2002)根据外场实验得到 0.22 dB/deg。系数 a_2 对雨滴形状不是很敏感, 取 $a_2 = 0.033$ dB/deg 已经可以达到精度要求 (Matrosov, et al, 2002), 从而 Z_H 、 Z_{DR} 的订正值可由下式得到。

$$Z_{He}(r) = Z_{Ha}(r) + 2 \int_0^r A_H(s) ds \quad (3)$$

$$Z_{DRe}(r) = Z_{DRa}(r) + 2 \int_0^r A_{DR}(s) ds \quad (4)$$

其中 $Z_{Ha}(r)$ 、 $Z_{He}(r)$ 分别为订正前后的水平反射率因子(单位: dBz), $Z_{DRa}(r)$ 、 $Z_{DRe}(r)$ 分别为订正前后的差分反射率因子(单位: dB), r 为距离雷达中心的距离(单位: km)。在实际资料处理中, 式(1)、(2)分别代入式(3)、(4), 得到

$$Z_{He}(r) = Z_{Ha}(r) + 2a_1 \cdot B_W \sum_{k=1}^{n_r} K_{DP}(k) \quad (5)$$

$$Z_{DRe}(r) = Z_{DRa}(r) + 2a_2 \cdot B_W \sum_{k=1}^{n_r} K_{DP}(k) \quad (6)$$

其中 B_W 为库长(单位: km), n_r 为雷达探测库数。根据 φ_{DP} 的定义, 式(5)(6)改写为

$$Z_{He}(r) = Z_{Ha}(r) + 2a_1 \varphi_{DP}(r) \quad (7)$$

$$Z_{DRe}(r) = Z_{DRa}(r) + 2a_2 \varphi_{DP}(r) \quad (8)$$

为了对比订正效果, 对式(5)、(6), K_{DP} 采取质量控制措施为: 将 $K_{DP} < \sigma_1$ 及 $K_{DP} > \sigma_2$ 的值, 认为是观测误差引起, 令其等于 0, σ_1 、 σ_2 为质量控制阈值, 文中分别取 $\sigma_1 = 0.1$, $\sigma_2 = 3.0$ deg/km, 以下将此方法称为 K_{DP} 法。对式(7)、(8), φ_{DP} 采取质量控制措施为: 令 10 km 处的 $\varphi_{DP} = 0$ deg, 而将 10 km 以内的 φ_{DP} 不用, 但是对 10 km 之外的 K_{DP} 不再另外进行质量控制, 以下将此方法称为 φ_{DP} (或 PHIDP) 法。

2.2 Z_H 订正法

A_H 与 Z_h , A_H 与 A_{DP} 一般有如下关系 (Park, et al, 2005)。

$$A_H = \alpha Z_h^\beta \quad (9)$$

$$A_{DP} = \gamma A_H^d \quad (10)$$

式(9)中 $Z_h = 10^{Z_H/10}$ (mm^6/m^3), α 、 β 值基本上不受雨滴形状的影响。这里分别取为常数: $\alpha = 1.370 \times 10^{-4}$ dB/km $\cdot (\text{mm}^6/\text{m}^3)^{-1}$, $\beta = 0.779$ 。式(10)中,

d 的变化很小,因此取常数 1.13,相对而言, γ 的变化范围大一些为 0.114—0.166,其平均值取 0.14。

2.3 Z_H - K_{DP} 综合订正法

在实际的雷达探测工作中,利用 K_{DP} 法衰减订正,效果一般要比 Z_H 法要好,然而,由于 K_{DP} 值比较小,受各种因素的影响,往往会有较大的误差,对衰减订正产生不可忽略的影响。利用 Z_H 法计算较稳定,但没有充分利用到偏振信息,也没有充分考虑滴谱变化对衰减系数的影响,衰减订正效果稍差。为了利用两种算法的优点,弥补缺点,根据 Z_H 、 K_{DP} 等的物理意义,本文提出 Z_H - K_{DP} 综合订正法,将 $K_{DP} < \sigma_1$ 及 $K_{DP} > \sigma_2$ 的值,认为是观测误差引起,不予利用,而综合利用 Z_H 、 K_{DP} ,求得 A_H 、 A_{DP}

$$A_H = \begin{cases} a_1 K_{DP} & \sigma_1 \leq K_{DP} \leq \sigma_2 \\ a Z_H^\beta & K_{DP} < \sigma_1 \text{ or } K_{DP} > \sigma_2 \end{cases} \quad (11)$$

$$A_{DP} = \begin{cases} a_2 K_{DP} & \sigma_1 \leq K_{DP} \leq \sigma_2 \\ \gamma A_H^d & K_{DP} < \sigma_1 \text{ or } K_{DP} > \sigma_2 \end{cases} \quad (12)$$

最后,将利用式(11)、(12)得到的衰减率和差分衰减率代入式(3)、(4),从而完成对水平反射率以及差分反射率的衰减订正。

2.4 X 波段雷达信号在大气中的衰减

由大气引起的衰减问题,除测云雷达外,在 S、C 波段,甚至于包括 X 波段资料处理中通常被忽略。氧气和水汽是主要的吸收雷达信号,引起衰减的气体成份,Ulaby 等(1981)讨论的吸收模式被用于 3.2 cm 双程气体衰减上,因为大气引起的衰减随着距离单调增加,X 波段信号衰减作为距离 r (单位:km)的一个函数,由下式可以简单地近似得到双程反射率的衰减订正:

$$\Delta Z_H^{(g)}(r) \approx 0.030r^{0.96} \quad (13)$$

其中 $\Delta Z_H^{(g)}(r)$ 代表大气在距离 r 处引起的水平反射率衰减,单位:dBz。

3 X 波段降水估测方法

3.1 降水估测经验公式

降水估测算法最常用的为 Z - R 关系法,雷达加上偏振功能后,由于 K_{DP} 能够反映出非球形雨滴的扁平状况,且受衰减的影响小,因此很快发展出 K_{DP} - R 关系法。对于 X 波段,一般分别采用以下经验公式(Matrossov, et al, 2002, 2005):

$$Z_h(\text{mm}^6/\text{m}^3) \approx 180R^{1.4}(\text{mm/h}) \quad (14)$$

$$R(\text{mm/h}) \approx 14K_{DP}^{0.8}(\text{deg/km}) \quad (15)$$

3.2 Z_H - K_{DP} - R 综合降水估测法

当降水强度较小时,利用 Z - R 关系法估测降水可以达到较好的精度。而此时 K_{DP} 值因为较小,较易产生测量误差,用 K_{DP} - R 法反而会导致较大的降水估测偏差。当降水强度较大时,由于雨滴在下落过程中受空气阻力而变为扁平状, Z - R 关系法降水估测误差随着降水强度增加而迅速增大,但是,此时 K_{DP} 值较大, K_{DP} - R 关系法降水估测精度明显提高。因此,可以对 K_{DP} 给定判别阈值 ζ ,通过比较雷达观测到的 K_{DP} 平均值与阈值的大小,决定采取 Z - R 关系法,或者 K_{DP} - R 关系法。由式(14)、(15),得到 Z_H - K_{DP} - R 综合降水估测法公式:

$$R(\text{mm/h}) \approx \begin{cases} 0.0245Z_H^{0.714} & K_{DP} < \zeta \\ 14K_{DP}^{0.8} & K_{DP} \geq \zeta \end{cases} \quad (16)$$

本文取 $\zeta = 0.6 \text{ deg/km}$ 。

4 衰减订正效果检验分析

4.1 资料来源及数据预处理

本文采用的雷达资料为中国科学院寒区旱区环境与工程研究所和成都锦江电子系统工程有限公司联合研制的 3.2 cm 波长同时收发式车载多普勒偏振天气雷达,于 2005 年 8 月中国科学院寒区旱区环境与工程研究所平凉站附近外场试验取得的部分观测资料,观测地点位于 35.57°N , 106.69°E ,海拔高度为 1600 m。定时雨量计资料来自于泾源站 (35.50°N , 106.32°E ;海拔 1949 m)。

雷达波束库长为 150 m,方位角分辨率 1° ,所取资料仰角皆为 0.2° ,因为仰角较低,所以不考虑零度层亮带的影响。雷达基数据中包括的参量分别为 Z_H ,多普勒速度 (V_r),速度谱宽 (S_w), Z_{DR} , K_{DP} ,相关系数 (ρ)。为避免雷达附近杂波,在对数据进行统计分析时,将前 50 个库的资料舍弃不用。并对资料首先进行中值滤波,将相关系数小于 80% 的信号作为非降水回波,如地物等影响,进行滤波处理。

4.2 订正前后 Z_H 、 Z_{DR} 的 PPI 图像

2005 年 8 月 6 日 09 时 12 分(北京时,下同),雷达探测到一次大面积的降水云系。图 1 为利用 Z_H - K_{DP} 综合法衰减订正前后的 Z_H 、 Z_{DR} PPI 图像,

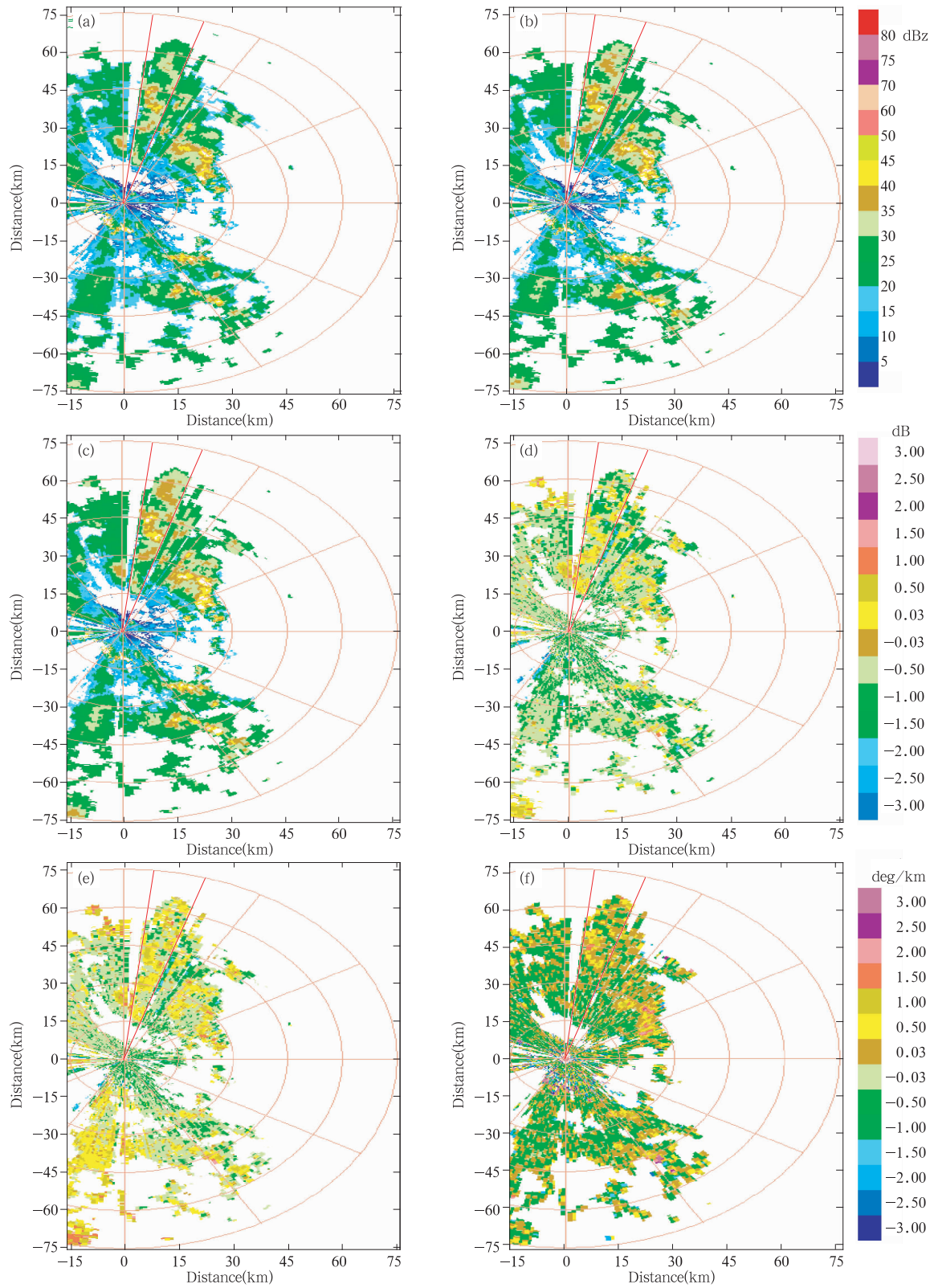


图1 订正前后的偏振参数 PPI 图 (a. 实测 Z_H (单位: dBz); b. 经雨滴订正但未空气订正的 Z_H ; c. 经雨滴及大气订正后的 Z_H ; d. 未经订正的 Z_{DR} (单位: dB); e. 订正后的 Z_{DR} ; f. K_{DP} (单位: deg/km))
 Fig. 1 PPI of corrected and uncorrected polarimetric parameters of uncorrected Z_H (unit: dBz) (a), rain drop corrected Z_H except for air corrected (b), Z_H after rain drop and air corrected (c), uncorrected Z_{DR} (unit: dB), corrected Z_{DR} (d) and K_{DP} (unit: deg/km) (f)

及 K_{DP} 的 PPI 图像。

图 1a 为实测水平反射率因子 Z_H 的 PPI 图,从图中可以看出,在方位角 $5^\circ-65^\circ$,以及 120° 附近,有几块明显的较强的回波单体,强度在 $35-45$ dBz,在这些单体后面, Z_H 随距离增加而减少。

图 1b、1c 分别为经雨区订正、加上大气订正后的 Z_H 图像。对应图 1f 的 K_{DP} 大值区,订正后的回波反射率都得到明显的增强, Z_H 值大都订正到 $35-45$ dBz,与其前方强回波区的值相近,说明 K_{DP} 大值区域,仍然为强回波区,订正后具有较好的对应关系。另外,比较图 1b、1c 可以看出,当距离较远时,由大气引起的衰减一般不可忽略。例如图中红线标识的方位角 $6^\circ-17^\circ$ 的扇形区域中,大气引起的 Z_H 衰减平均为 0.88 dBz,其中最大衰减值达 1.67 dBz。

图 1d、1e 为订正前后差分反射率因子 Z_{DR} 的 PPI 图像,图 1d 中对应图 1a 强回波区的 Z_{DR} 值也较大,但是,雷达波束穿过强回波区后, Z_{DR} 值随距离增加明显减小,变成了大片的较大负值区。而在强回波区前等区域, Z_{DR} 的值大多为正值,或者较小的负值,根据偏振理论,雷达波束穿过雨区时的 Z_{DR} 一般为正值,对 Z_{DR} 较小的负值,可能是由雷达定标引起的。而对于经过强回波区域后, Z_{DR} 出现的较大负值,则很有可能是由于信号经过强降雨区衰减引起。从订正后的图 1e 可以看出,大片的负值区已经被订

正为正值区,或者较小的负值,特别是在强回波区后面,对应 K_{DP} 的大值区, Z_{DR} 值增加十分明显,与 Z_H 的对应关系完全一致。

图 1f 为 K_{DP} 的 PPI 图像,对应图 1a 中所提到的那几块强回波区, K_{DP} 为明显的高值区,但是,在这些强回波区的后面,仍然有许多 K_{DP} 值较大的区域,而对应这些 K_{DP} 大值区,未经订正的 Z_H 值在 35 dBz 以下, Z_{DR} 值也大多小于 -1.0 ,一般而言,大的 K_{DP} 区域,往往是由于大的降水粒子在下落过程中,受空气阻力变形为扁平状所引起,因此, K_{DP} 大值区应该对应于 Z_H 、 Z_{DR} 大值区。图 1a、1d、1f 中,上述强回波区域后 K_{DP} 、 Z_H 、 Z_{DR} 的不对应,说明这些地方,由于 X 波段的雷达波束经过强降雨区后,信号产生剧烈衰减,引起 Z_H 、 Z_{DR} 减小。而经衰减订正后,图 1c、1e、1f 则对应较好。

4.3 点聚图分析

为了进一步分析衰减订正的效果,对图 1 中有代表性的 $6^\circ-17^\circ$ 方位角的数据(见红线所标记的扇形区域),作衰减订正前后的 Z_H-K_{DP} 点聚图(图 2),其中的实线为根据最常用的 Marshall-Palmer 滴谱分布得到的 Z_H-K_{DP} 关系:

$$Z_H = 13.86 \lg(K_{DP}) + 48.2 \quad (13)$$

由图 2 可以看出, Z_H-K_{DP} 点聚图与式(13)有一定的对应关系,说明 Marshall-Palmer 分布基本上可以代表雷达上空的滴谱分布。订正后的点聚图与

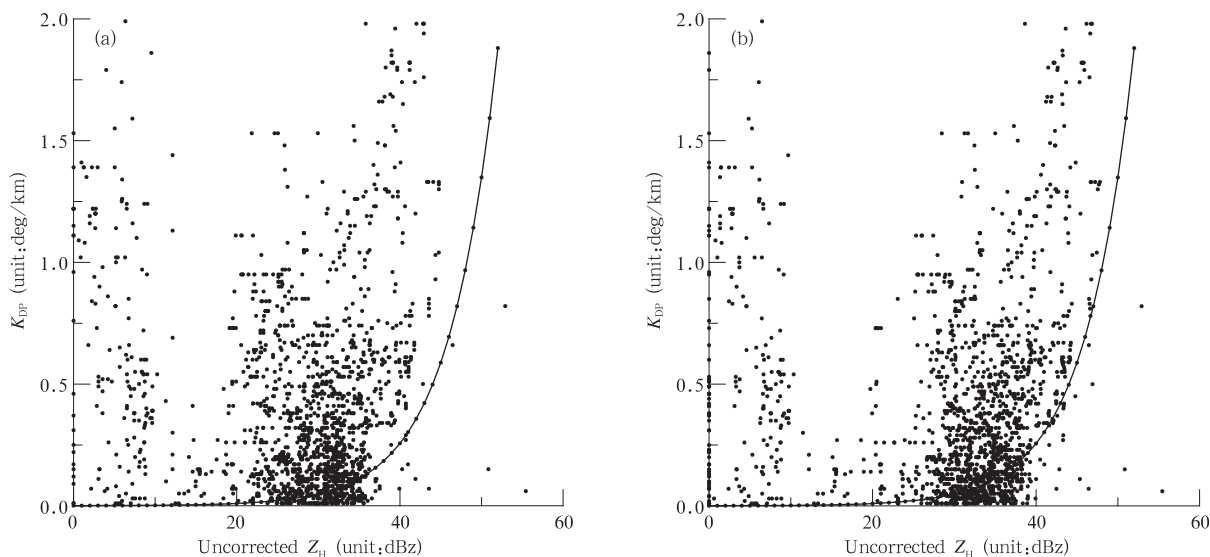


图 2 Z_H-K_{DP} 点聚图 (a. Z_H 未经衰减订正, b. Z_H 已经衰减订正)

Fig. 2 Scatter plots of (a) uncorrected and (b) corrected Z_H versus K_{DP}

Z_H-K_{DP} 曲线更为接近,基本上满足式(13),而订正前则误差稍大。

4.4 Z_H 、 Z_{DR} 沿径向变化的定量分析

取图1中有代表性的方位角为 11° 的一条径向,画出衰减订正前后的 Z_H 、 Z_{DR} 随距离的变化情况(图3、图4)。由图3、图4可以看出,用 Z_H 法, K_{DP} 法,PHIDP法, Z_H-K_{DP} 综合法都能够有效地对 Z_H 、 Z_{DR} 进行订正,前面3种方法的订正效果较为接近,特别是 K_{DP} 法与PHIDP法在40 km以外基本上一致,但

是,在40 km以内,用PHIDP法求得的 Z_H 、 Z_{DR} 值甚至于比实测值还要小,说明 K_{DP} 的观测误差对衰减订正影响较大。 Z_H-K_{DP} 法因为综合利用了 Z_H 、 K_{DP} 值,订正值要更大一些,特别是距离雷达远处,以及波束穿过强回波区时,订正的效果尤其明显。该径向上, Z_H-K_{DP} 综合法对 Z_H 的订正平均为2.58 dBz,最大达6.77 dBz,对 Z_{DR} 的订正平均为0.21 dB,最大为0.66 dB。

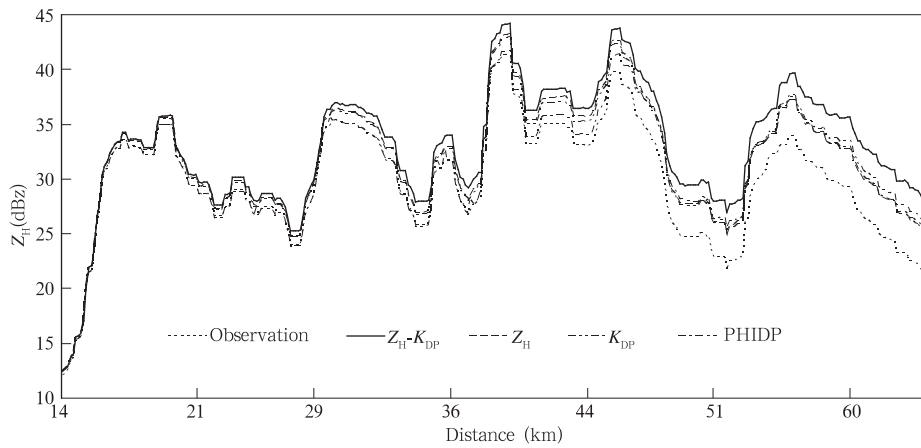


图3 Z_H 随距离变化图(方位角 11°)

Fig. 3 Z_H after four attenuation corrections as a function of range (Azimuth 11°)

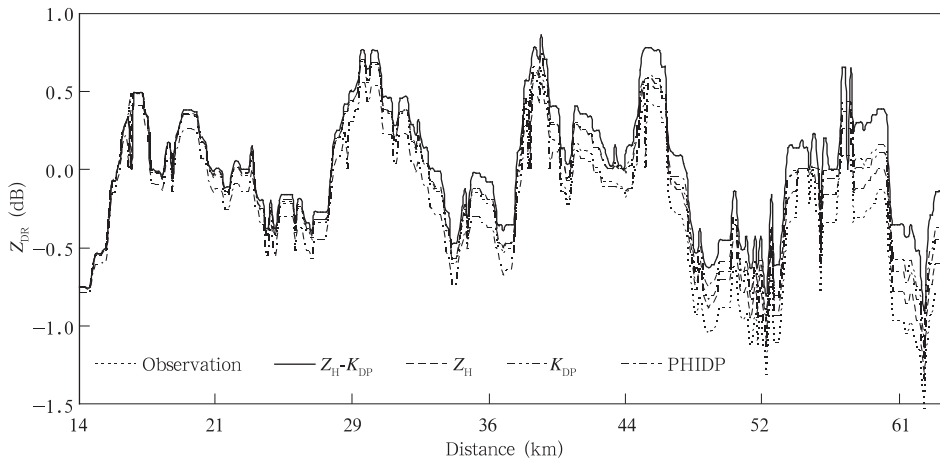


图4 Z_{DR} 随距离变化图(方位角 11°)

Fig. 4 Same as Fig. 3 but for Z_{DR}

图5为经中值滤波后的该径向上 K_{DP} 值,以及令10 km处的 $\varphi_{DP}=0 \text{ deg}$,由 K_{DP} 求得的 φ_{DP} 随距离的变化情况,由图5可以看出,从雷达测站到16 km左右,受各种杂波影响, K_{DP} 值变化非常剧烈,且大

多数为较大的负值,此段距离的 K_{DP} 值基本上没有利用价值,16—38 km,由于回波强度较弱, K_{DP} 值在正负很小的范围浮动,这段距离的 K_{DP} 值利用价值也有限。38 km以后,由于 Z_H 值较大, K_{DP} 值也明显

加大,但是由于波束穿过强回波区后强烈的衰减导致信噪比增加,使其后的 K_{DP} 波动较大,在部分弱回波区域甚至于变成负值,因此,对这些 K_{DP} 值需要进行相应的质量控制。图中 φ_{DP} 曲线由于受 K_{DP} 负值的影响,并不呈现单调递增,而是随距离增加有波动现象,因此在这种情况下,利用 φ_{DP} 法无法得到稳定的订正效果。

为进一步分析各种情况下的衰减订正效果,对8月份观测到的几次比较明显的回波进行衰减订正分析,表1为其中9个PPI资料径向平均,用 Z_H - K_{DP} 综合法衰减订正前后的 Z_H 、 Z_{DR} 值。由表1可以看出, Z_H 平均订正 1.88 dBz,订正率达 9.02%。实测的 Z_{DRa} 值平均都很小,有些甚至为负值,与波

束经过雨区 Z_{DR} 一般为正值的偏振理论相悖,订正后的 Z_{DR} 值平均增加 0.15 dB,原来为负值的个例,订正后全部为正值,说明订正效果较好。

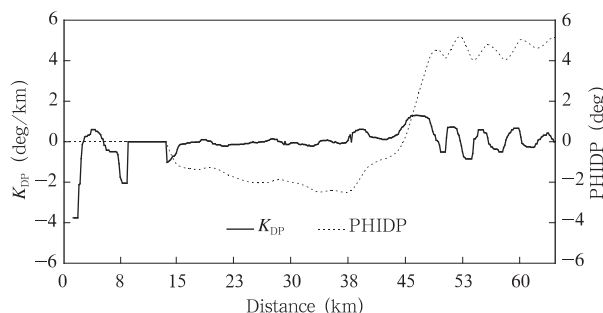


图5 K_{DP} 、 φ_{DP} 随距离变化图(方位角 11°)

Fig. 5 K_{DP} and φ_{DP} as a function of range (Azimuth 11°)

表1 衰减订正前后的 Z_H 、 Z_{DR}

Table 1 Z_H and Z_{DR} before and after attenuation correction

序号	观测日期	观测时间	Z_{Ha} (dBz)	Z_{He} (dBz)	Z_{DRa} (dB)	Z_{DRe} (dB)	$\frac{Z_{He}-Z_{Ha}}{Z_{Ha}}$ (%)	ΔZ_{DR} (dB)
1	20050806	09:12:46	22.71	24.94	-0.03	0.15	9.82	0.18
2	20050806	12:08:59	24.16	25.98	0.00	0.15	7.53	0.15
3	20050808	16:16:37	10.86	11.41	0.03	0.06	5.06	0.03
4	20050808	16:31:57	15.52	16.43	-0.01	0.05	5.86	0.06
5	20050811	10:00:58	23.48	24.74	0.04	0.12	5.37	0.08
6	20050811	15:06:54	23.44	26.14	0.13	0.37	11.52	0.24
7	20050811	21:58:40	24.57	26.76	0.17	0.36	8.91	0.19
8	20050827	15:48:52	21.49	23.97	-0.02	0.18	11.54	0.20
9	20050827	16:24:46	21.28	24.05	0.02	0.26	13.02	0.24
平均	—	—	20.83	22.71	0.04	0.19	9.02	0.15

5 衰减订正对降水估测的影响

2005年8月11日早晨至14时,雷达观测站点处于锋面前部的低压区内,有小阵雨。高空图上,11日08时宁夏以西—甘肃中部,青海东部一带有高空槽,观测站点受副热带高压边缘偏南暖湿气流控制,11日副高减弱东撤,低槽东移,下午,锋面过境,低槽与锋面配合,雨势加大。当日15:08:03—22:05:46,间隔5—12 min不等,雷达开机取得了连续的外场观测资料。

图6为该次降水过程中,各个PPI数据由综合法订正前后的平均 Z_H 、 Z_{DR} 值随时间变化曲线,整个过程对 Z_H 平均订正 2.10 dBz, Z_{DR} 平均订正 0.19 dB,由图6可以看出,订正效果非常明显。

表2所示为16—22时,以涇源为中心,半径为3 km上空的平均 K_{DP} 值,以及订正前后的强度值

Z_{Ha} 、 Z_{He} ,整个观测过程中 K_{DP} 平均值 0.43 (deg/km), Z_H 订正值 5.26 dBz,订正率达 25.89%。

表3为涇源站分别根据 $Z-R$ 关系法、 $K_{DP}-R$ 关系法、 $Z_H-K_{DP}-R$ 综合法的降水估测值、雨量计实测值及估测误差。计算过程中, K_{DP} 质量控制的阈值分别取: $\sigma_1=0.1$ deg/km, $\sigma_2=3.0$ deg/km,降水估测的阈值取: $\zeta=0.6$ deg/km。

几种估测方法与雨量计观测结果对比可以看出,以 $Z_H-K_{DP}-R$ 综合法估测的逐时降水误差最小(平均 34.7%),其中误差主要来源于22时,达 183.3%, $K_{DP}-R$ 关系法误差最大,达 274.8%,这与本次过程大部分时段降水强度不大(如22时)有关, K_{DP} 值较小,易产生观测误差,从而导致较大的降水估测误差。利用衰减订正后的 Z_H 值, $Z-R$ 关系平均估测误差为 55.0%,要好于衰减订正前的 67.0%。表3各个时次的误差可以看出,对 $1 < R \leq 4$ mm/h 的降

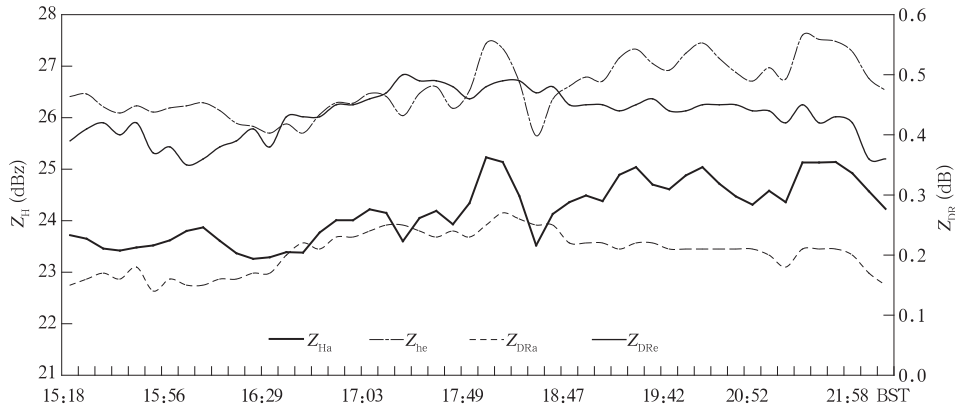


图 6 2005 年 8 月 11 日 16—22 时衰减订正前后 Z_H (dBz)、 Z_{DR} (dB)变化曲线
 Fig. 6 Z_H (dBz) and Z_{DR} (dB) before and after attenuation correction
 in 16:00—22:00 BST August 11, 2005

表 2 2005 年 8 月 11 日 16—22 时 K_{DP} 及订正前后强度值 Z_{Ha} 、 Z_{He}
 Table 2 K_{DP} , uncorrected and corrected Z_{Ha} and Z_{He} in the same time period as Fig. 6

时次	K_{DP} (deg/km)	Z_{Ha} (dBz)	Z_{He} (dBz)	$Z_{He} - Z_{Ha}$	$\frac{Z_{He} - Z_{Ha}}{Z_{Ha}} \times 100\%$
16	0.22	20.7	24.5	3.8	18.36
17	0.58	21.89	27.59	5.7	26.04
18	0.73	20.8	26.8	6	28.85
19	0.68	19.06	24.81	5.75	30.17
20	0.29	19.5	24.77	5.27	27.03
21	0.34	19.75	25.55	5.8	29.37
22	0.18	20.51	25.06	4.55	22.18
平均	0.43	20.32	25.58	5.26	25.89

表 3 2005 年 8 月 11 日 16—22 时降水强度(单位: mm/h)及误差(%)
 Table 3 Rainfall rates(mm/h)and its error (%)in the same time period as Fig. 6

时次	$Z_{Ha}-R$ R_1 (mm/h)	$Z_{He}-R$ R_2 (mm/h)	$K_{DP}-R$ R_3 (mm/h)	综合法 R_4 (mm/h)	雨量计 R (mm/h)	$\frac{ R-R_1 }{R}$	$\frac{ R-R_2 }{R}$	$\frac{ R-R_3 }{R}$	$\frac{ R-R_4 }{R}$
16	0.94	1.86	4.92	1.86	2.0	53.0	7.0	146.0	7.0
17	1.31	3.45	10.7	3.45	4.0	67.3	13.8	167.5	13.8
18	0.71	2.16	7.76	7.76	8.0	91.1	73.0	3.0	3.0
19	0.56	1.47	5.79	5.79	6.0	90.7	75.5	3.5	3.5
20	0.58	1.41	6.02	1.41	2.0	71.0	29.5	201.0	29.5
21	0.71	1.94	8.04	1.94	2.0	64.5	3.0	302.0	3.0
22	0.79	1.70	7.20	1.70	0.6	31.7	183.3	1100.0	183.3
平均	0.80	2.00	7.20	3.42	3.51	67.0	55.0	274.7	34.7

水强度(16、17、20、21 时),这些时刻的 K_{DP} 值均小于阈值 $\zeta=0.6$ deg/km,因而用订正后的 Z_H 值, $Z-R$ 关系法可以得到比较好的降水估测效果,而订正前的误差相对较大。对于大于 4 mm/h 的降水强度(18、19 时),此时因为雨滴较大, K_{DP} 平均值大于设定的阈值 ζ , $Z-R$ 关系法估测的降水明显偏小,改用

$K_{DP}-R$ 关系较为准确。但是,对于 22 时那样 0.6 mm/h 的弱降水, K_{DP} 平均值较小,既无法用 $K_{DP}-R$ 关系估测,用 $Z-R$ 关系估测的降水也明显偏大。总体来看, $Z-R$ 关系存在小雨高估,大雨低估的趋势。当降水强度小于 4 mm/h 时,由于 K_{DP} 值较小, $Z-R$ 关系好于 $K_{DP}-R$ 关系,对于大于 4 mm/h 的降水强

度,由于 K_{DP} 观测质量的改善, K_{DP} - R 关系估测精度明显高于 Z - R 关系,但是,对小于 1 mm/h 弱降水,还有待于进一步探讨如何利用各种参量,改进估测算法。

6 结论与讨论

本文分析了 X 波段双线偏振雷达各种衰减订正、降水估测方法的特点,提出了利用反射率因子与差传播相移率进行衰减订正的 Z_H - K_{DP} 综合法,以及降水估测的 Z_H - K_{DP} - R 综合法。并利用实测资料,对提出的衰减订正、降水估测方法效果进行了分析检验,得到如下几点结论:

(1) Z_H - K_{DP} 综合法对 Z_H 、 Z_{DR} 有稳定的订正效果,并且方法简便易行,订正速度快,能够达到实时运行的要求。

(2) 从 Z_H - K_{DP} - R 综合法、 K_{DP} - R 关系法、 Z - R 关系法的降水估测值与自动雨量记实测值比较可以看出,相对而言,综合法较其他两种方法适用估测降水强度的范围广,误差较小。另外,利用订正后的 Z_H 值,比订正前的 Z_H 值,根据 Z - R 关系法进行降水估测的误差明显减小,说明衰减订正对雷达数据质量有较好的改善作用。

(3) 由于小到中等强度的降水, K_{DP} 值较小, K_{DP} 的观测误差往往会导致较大的降水估测误差,此时 Z - R 关系法降水估测效果好于 K_{DP} - R 关系法。对于较强的降水, K_{DP} 增大, K_{DP} 数据质量提高, K_{DP} - R 关系法降水估测效果明显要好于 Z - R 关系法。但是,对于较弱降水,3 种方法的估测效果都较差,因此,对于较弱降水的定量估测算法,还有待于进一步探讨。

因为 K_{DP} 是雷达波束穿过雨区时,单位距离内水平与垂直偏振方向相位差引起的,与雨区的衰减无关,从理论上讲,利用 K_{DP} 进行衰减订正及降水估测应该可以达到很高的精度,国内外的许多研究也是基于此进行的。但是,以上分析可以看出,由于 K_{DP} 数值较小,观测质量的不稳定, K_{DP} 的误差将导致衰减订正、降水估测过程中不可忽视的误差, K_{DP} 质量的好坏,将直接影响到衰减订正及降水估测的效果。因此, K_{DP} 的质量控制阈值 σ_1 、 σ_2 ,降水估测算法选择阈值 ζ ,以及衰减订正、降水估测经验公式中的各种参数等,还需要更多的不同区域、不同时间的雷达及降水资料,进一步分析得到适用于各种条件

下的参数。

由于外场实验时,各个时次包括的雷达基数据为 5—11 个不等,另外,雷达定量估测降水时存在的各种问题,如:随高度变化的降水场在时间和空间上的采样问题,雷达标定和噪声等等,对各个时次的降水估测精度有一定影响,与自记雨量计对比分析时应酌情考虑。

References

- Bringi V N, Chandrasekar V, Balakrishnan N, et al. 1990. An examination of propagation effects in rainfall on polarimetric variables at microwave frequencies. *J Atmos Oceanic Technol*, 7: 829-840
- Bringi V N, Keenan T D, Chandrasekar V. 2001. Correcting C band radar reflectivity and differential reflectivity data for rain attenuation: A self-consistent method with constraints [T]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 39: 1906-1915
- Carey L D, Rutledge S A, Ahijevych D A, et al. 2000. Correcting propagation effects in C-band polarimetric radar observations of tropical convection using differential propagation phase. *J Appl Meteor*, 39: 1405-1433
- Chandrasekar V, Bringi V N, Balakrishnan N, et al. 1990. Error structure of multiparameter radar and surface measurements of rainfall. Part III: Specific differential phase. *J Atmos Oceanic Technol*, 7: 621-629
- Chu Rongzhong, Wang Zhijun, Liu Liping, et al. 1997. Preliminary analysis of rainfall estimate utilizing dual linear polarization radar. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 55(1):103-109
- Gorgucci E, Scarchilli G, Chandrasekar V, et al. 2000. Measurement of mean raindrop shape from polarimetric radar observations. *J Atmos Sci*, 57: 3406-3413
- Hitschfeld W, Bordan J. 1954. Errors inherent in the radar measurement of rainfall at attenuating wavelengths. *J Meteor*, 11: 58-67
- Hildebrand P H. 1978. Iterative correction for attenuation of 5 cm radar in rain. *J Appl Meteor*, 17: 508-514
- Iwanami K, Misumi R, Maki M, et al. 2001. Development of a multiparameter radar system on mobile platform. Preprints, 30th Int Conf on Radar Meteorology, Munich, Germany, Amer Meteor Soc, 104-106
- Jameson A R. 1991. Polarization radar measurements in rain at 5 and 9 GHz. *J Appl Meteor*, 30: 1500-1513
- Jameson A R. 1992. The effect of temperature on attenuation-correction schemes in rain using polarization propagation differential phase shift. *J Appl Meteor*, 31: 1106-1118
- Le Bouar E, Testud J, Keenan T D. 2001. Validation of the rain profiling algorithm ZPHI from the C-band polarimetric weather radar in Darwin. *J Atmos Oceanic Technol*, 18: 1819-1837

- Liu Liping, Qian yongfu, Wang Zhijun. 1996. The study of special distribution of phase and size of hydrometeors in cloud by dual linear polarization radar. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 54(5): 590-599
- Matrosov S Y, Kropfli R A, Reinking R F, et al. 1999. Prospects of measuring rainfall using propagation differential phase in X- and Ka-radar bands. *J Appl Meteor*, 38: 766-776
- Maki M, et al. 2005. Semi-operational rainfall observations with X-band multi-parameter radar. *Atmos Sci Lett*, 6: 12-18
- Matrosov S Y, Clark K A, Martner B E. 2002. X-band polarimetric radar measurements of rainfall. *J Appl Meteor*, 41: 941-952
- Matrosov S Y, DAVID E K, Brooks E M, et al. 2005. The utility of X-band polarimetric radar for quantitative estimates of rainfall parameters. *J Hydrometeor*, 6: 248-262
- Park S-G, Bringi V N, Chandrasekar V, et al. 2005. Correction of radar reflectivity and differential reflectivity for rain attenuation at X-band. Part I: Theoretical and empirical basis. *J Atmos Oceanic Technol*, 22: 1621-1632
- Park S-G, Maki M, Iwanami K, et al. 2005. Correction of radar reflectivity and differential reflectivity for rain attenuation at X band. Part II: Evaluation and application. *J Atmos Oceanic Technol*, 22: 1633-1655
- Ryzhkov A, Zrnicek D S. 1995. Precipitation and attenuation measurements at a 10-cm wavelength. *J Appl Meteor*, 34: 2121-2134
- Smyth T J, Illingworth A J. 1998. Correction for attenuation of radar reflectivity using polarization data. *Quart J Roy Meteor Soc*, 124: 2393-2415
- Testud J, Le Bouar E, Obligis E, et al. 2000. The rain profiling algorithm applied to polarimetric weather radar. *J Atmos Oceanic Technol*, 17: 332-356
- Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. 1981. *Fundamentals and Radiometry*. Vol. 1, Microwave Remote Sensing: Active and Passive. Addison-Wesley, 450pp
- Wang Yehong, Zhao Yuchun, Cui Chunguang. 2006. Numerical research on effects upon precipitation forecast of Doppler radar estimated precipitation and retrieved wind field under different model initial schemes. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 2006, 64(4): 485-499
- Zhang Hongfa, Zuo Hongchao, Qie Xiushu, et al. 2002. Analysis of echo character of Pingliang hailstorm. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 60(1): 110-115
- Zhang Peichang, Du Bingyu, Dai Tiepi. 2001. *Radar Meteorology*. Beijing: China Meteorological Press, 263-279

附中文参考文献

- 楚荣忠, 王致君, 刘黎平等. 1997. 双线偏振雷达降雨估测分析. *气象学报*, 55(1): 103-109
- 刘黎平, 钱永甫, 王致君. 1996. 用双线偏振雷达研究云内粒子相态及尺度的空间分布. *气象学报*, 54(5): 590-599
- 王叶红, 赵玉春, 崔春光. 2006. 多普勒雷达估算降水和反演风在不同初值方案下对降水预报影响的数值研究. *气象学报*, 64(4): 485-499
- 张鸿发, 左洪超, 郗秀书等. 2002. 平凉冰雹云回波特征分析. *气象学报*, 2002, 60(1): 110-115
- 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 2001. *雷达气象学*. 北京: 气象出版社, 263-279