第17卷第3期	气 候 与 环 境 研 究	Vol. 17	No. 3
2012 年 5 月	Climatic and Environmental Research	May	2012

陈羿辰,刘锦丽,段树,等. 2012. X波段双极化雷达在北京夏季降水估测中的应用 [J]. 气候与环境研究, 17 (3): 292-302, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2012.10115. Chen Yichen, Liu Jinli, Duan Shu, et al. 2012. Application of X-band dual polarization radar in precipitation estimation in summer of Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (3): 292-302.

X 波段双极化雷达在北京夏季降水估测中的应用

陈羿辰^{1,2,3} 刘锦丽² 段树² 苏德斌^{2,4} 吕达仁²

- 1 成都信息工程学院电子工程学院,成都 610225
- 2 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测重点实验室,北京 100029
- 3 北京市人工影响天气办公室,北京 100089
- 4 北京市气象局,北京 100089

摘 要利用 X 波段双极化雷达和地面自动雨量站数据对北京地区 2009 年夏季降水进行分析,先采用低通 滤波、衰减订正等方法对数据质量进行控制,提取了单位差分传播相移 K_{tp}之后,分别拟合出 X 波段双极化雷 达参数与降水之间的两个关系式: Z_h=159R^{1.37}及 R =13.9K_{dp}^{0.81},最后再分别利用这些拟合公式对北京地区 进行降雨估测。结果表明:雷达用这两个公式估测的降雨量与地面实测降雨量有较好的一致性;且当每小时降 雨量大于 10 mm 时, K_{dp}-R的估测比 Z_h-R 估测更稳定、准确;通过平均标准差统计可知, K_{dp}-R 估测精度 明显高于 Z_h-R 估测精度。

关键词 双极化雷达 单位差分传播相移 自动雨量站 降水估测
 文章编号 1006 - 9585 (2012) 03 - 0292 - 11 中图分类号 P412 文献标识码 A doi:10.3878/j.issn.1006 - 9585.2012.10115

Application of X-Band Dual Polarization Radar in Precipitation Estimation in Summer of Beijing

CHEN Yichen^{1,2,3}, LIU Jinli², DUAN Shu², SU Debin^{2,4}, and LÜ Daren²

- 1 Electronic Engineering College, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225
- 2 Key Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029
- 3 Beijing Weather Modification Office, Beijing 100089
- 4 Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089

Abstract Dual polarization X-band radar data and ground-based automatic rain gauge data were analyzed for precipitation estimation in summer of Beijing in 2009. Firstly, the low pass filtering and attenuation correction methods were used for controlling the quality of radar data. Then two relationships of X-band radar parameters and rain rate were established, i. e. $Z_{\rm h} = 159R^{1.37}$ and $R = 13.9K_{\rm dp}^{0.81}$, after the specific differential propagation phase ($K_{\rm dp}$) was extracted. Finally the comparison analysis was made between the rain rates estimated from the two relationships and the corresponding ground data. The results indicate that the rain rates estimated from the two relationships have

收稿日期 2010-09-02 收到, 2012-03-19 收到修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重要方向课题 KZCX2-YW-206,国家自然科学基金重点项目 40930949,国家自然科学基金专项基金项目 40227001

作者简介 陈羿辰, 男, 1983年出生, 硕士, 主要从事气象雷达应用研究。E-mail. chenyichen2004@163.com

a good consistency with the ground data. In addition, when the rain rates are greater than 10 mm \cdot h⁻¹, the estimated rain rates from $K_{dp}-R$ are more accurate and stable than that from Z_h-R . Also, the average standard deviation analysis shows that the estimation accuracy of $K_{dp}-R$ is significantly higher than Z_h-R .

Key words dual polarization radar, specific differential propagation phase, automatic rain gauge, precipitation estimation

1 引言

利用气象雷达进行区域降水监测和定量分布 探测已有 50 多年历史。天气雷达研制成功后,利 用天气雷达估测降水就成为它的重要任务。Bent (1943)提出了雷达降水估计的概念,并系统阐述 了影响雷达估测降水的不确定性。Marshall et al. (1947)利用测量到的雨滴谱分布 (Drop Size Distribution, DSD) 来计算反射率因子 (Z), 并研 究得到二者与雷达回波功率有很好的相关性,但 没有在数学上建立回波强度与降水率的关系。直 到1948年, Marshall and Palmer (1948)提出了 Z=200I^{1.6}的关系式,并解释了雨滴谱与反射率 因子Z以及降水强度I(以下降水强度用R表 示)之间的关系,才在数学上建立了反射率因子 与降水强度的统计关系,极大地促进了雷达定量 估测降水的发展,之后,许多基于不同雨滴谱测 量与计算所得反射率因子的 Z-R 关系被相继 提出。

20世纪70年代, Seliga and Bringi (1976) 提 出了双极化雷达(Dual Linear Polarization Radar, DLPR)理论,此后极化气象雷达研究取得了巨大 发展,双极化雷达系统除了在数据的质量控制方 面优于单极化雷达系统外,其差分反射率 Z_d和单 位差分传播相移 K_a还可用于估计降水粒子的大 小、形状、去向和相态。Jameson (1983, 1985) 提出了基于 Z_d、K_d降雨估算的关键是雨滴的形 变率与雨滴大小之间的关系。Chandrasekar et al. (1990)指出S波段雷达基于K_b的算法在估算低 降水率时会产生较大误差。然而不同频率雷达所 观测的 K_{dp} 有不同的动态范围, Chandrasekar et al. (1990) 发现了 X 波段 K_a·估测低降雨率的优 势。Gorgucci et al. (2001) 提出了不受雨滴谱影响 的复合式降雨估计方法。Matrosov et al. (2002, 2005) 对 X 波段双极化雷达进行了降雨估计以及 对比研究了 X 波段和 S 波段基于 K₄,的降雨估计。

20世纪80年代末,中国科学院寒区旱区环境 与工程研究所(原中国科学院兰州高原大气物理 研究所)成功研制出我国第一部 X 波段圆偏振雷 达和C波段双线偏振雷达(王致君等, 1988)。张 鸿发等(1995)利用大量不同类型降雨的雨滴谱 资料,分析了 Z_d和 Z_h测雨精度优于传统的 Z-R 关系。刘黎平等(2002)利用雨滴谱γ分布和散 射计算模式分析了C波段双极化雷达的几种测雨 关系式,并得出R(K_{dp}、Z_d)方法受雨滴谱分布 的影响不大,其探测结果优于其他方法。马学谦 等(2008)利用地面雨量计提出了适合于反演 X 波段雷达测雨参数的方法,并给出了一些分析结 果。上述工作虽然已取得一些进展,但多停留在 理论、方法的探讨方面,离实际的应用需求还有 距离。由于降水类型与相关雨滴谱的复杂变化使 得定量关系的建立需要更好针对降水的地区特点 与类型,亦即需要有更多针对实际降雨类型和更 多可对比验证的条件下开展的研究。

在中国科学院知识创新工程重大科研装备研制改造项目的支持下,中国科学院大气物理研究 所成功研制出 X 波段双极化雷达(段树等, 2002)。该雷达可进行多方面的观测研究,本文利 用 2009 年该雷达北京夏季观测资料,经过较严格 的质量控制和衰减订正,联合北京市自动雨量站 每分钟实测降雨量数据,拟合出适合北京地区夏 季降水的 *Z*_h-*R*和*K*_ф-*R*两个关系式,最后对比 分析了这两种方法的降雨估测能力,并作了误差 初步分析。

2 资料

本文采用 2009 年 6、7 月北京地区降雨观测 数据,该数据包括两部分:一部分来自 X 波段双 极化雷达观测的反射率因子 Z 和差分传播相移 K_中,另一部分是北京市气象局自动雨量站网每分 钟实测降雨量数据(分布见图1)由于X波段雷达 架设地点地物遮挡原因,本文所选降水区域不包 含雷达的南边150°~200°的范围。

2.1 X 波段双极化雷达资料

X 波段双极化雷达主要性能指标如下:频率 9.377 GHz,脉冲宽度 0.5 μ s⁻¹,峰值功率 70 kW;主瓣宽度 1.1°;可测量水平/垂直反射率、 多普勒速度、谱宽、差分传播相移、零相关系数、 差分反射率(线性退极化比)等参数。该雷达 (39.9768°N,116.3812°E)架设在中国科学院大 气物理研究所 40 号楼楼顶,海拔 93 m。

在应用雷达资料进行降水估计时,作了以下 的假定和处理:

(1) 雷达完成一次体扫需 6 min, 假定该时段 内水平反射率因子 Z_h、单位差分传播相移 K_{dp}保 持不变;

(2)使用雷达基数据时,由于地物遮挡,取 2°仰角的平面位置显示(Plane Position Indicator, PPI)资料,单点计算面积为1km×3°,并假定 在这个面积内降雨是均匀的;

(3) 对水平反射率因子、单位差分传播相移 转换成降雨量值时,忽略小于 0.1 mm • h⁻¹的所 有样本。

2.2 自动雨量站资料

本文采用的雨量站资料由北京市气象局短临 交互预报系统(Very-short-range Interactive Prediction System, VIPS)的自动雨量站提供(苏德 斌等,2010)。此系统中,北京市境内共有188 个自动雨量站(位置见图1)提供降水数据。在 使用该资料前,对自动雨量站资料进行了常规质 量控制。为了和雷达进行比对时在空间范围上更 为合理,我们还使用空间数据平滑方法对雨量计 测值进行处理,以便考虑雨量站周围降水的 影响。

3 资料分析

3.1 水平反射率衰减订正

由于 X 波段水平反射率在雨区衰减十分严重, 因此在使用 X 波段雷达水平反射率因子进行降雨 估计之前,必须对其进行衰减订正。采用毕永恒 (2010)改进的自适应约束算法订正方案,该方案 与 Bringi et al. (2001)提出的不断调整衰减率与 单位差分传播相移 K₄关系中的最佳系数,及综合 考虑雨滴谱、粒子形状、温度等因素影响的衰减 订正方案类似。2009 年 6 月 8 日 08:02 (北京时



图 1 X 波段双极化雷达位置与地面自动雨量计站点分布(编号为具有代表性的雨量站点)

Fig. 1 X-band radar station and distribution of ground rain gauge stations in Beijing (the numbers represent typical rain gauge stations)

间,下同)进行一次 PPI 扫描,取仰角为 2°,方 位角为 84.3°,径向距离为 20~85 km。对比发 现,差分传播相移 Φ_{4p} 经低通滤波后,滤除了其中 的高频噪声(如图 2a 所示)。由反射率订正前后 对比(图 2b)可知,在 20~25 km 时,由于雷达 波束刚刚进入雨区,衰减不明显,所以订正前后 曲线几乎重合。在 25~70 km 时, Φ_{4p} 变化缓慢, 由 40°增加到 70°,对应的水平反射率订正后比订 正前高 1~8 dBZ,因为随着径向距离的增加,雷 达波束穿过的雨区越来越大,衰减也随之增强, 所以订正前后的差值也随着雨区的增大而增大; 在 70~85 km 时, Φ_{4p} 由 70°陡增到 140°,这是由 于雷达波束经过了一片强对流雨区,所以相应的 水平反射率订正后比订正前高 8~15 dBZ。

3.2 单位差分传播相移的提取

由于本雷达所观测的参数是 Φ_{dp} ,据 K_{dp} 定义,可以从 Φ_{dp} 获得相应的

$$K_{\rm dp} = rac{1}{2} rac{\Phi_{
m dp}(r_{n+1}) - \Phi_{
m dp}(r_n)}{r_{n+1} - r_n}$$

其中 $\Phi_{dp}(r_n)$ 、 $\Phi_{dp}(r_{n+1})$ 为降水区中相邻距离 r_n 、 r_{n+1} 处测得的差分传播相移。

在实际应用中,为了保证 K_ф的精度,不是对 每一个距离库都计算出 K_ф,而是对几个距离库进 行一定的处理,得到一个 K_ф值,把这个值作为这 几个距离库的 K_ф。具体算法如下:降水区中距离 r₁、r₂ 之间包含 N 个距离库,每个距离库都能测



图 2 X波段雷达质量控制效果前后对比: (a) 差分传播相移滤波; (b) 水平反射率滤波前后以及衰减订正 Fig. 2 Results of X-band radar before and after quality control: (a) Filtering of differential phase shift; (b) filtering and attenuation correction of horizontal polarization reflectivity

得一个 Φ_{ϕ} ,对这 $N \uparrow \Phi_{\phi}$ 用最小二乘法进行线性 回归,拟合直线的斜率就是 r_1 、 r_2 之间的平均 K_{ϕ} ,表达式可写成

$$K_{\mathrm{dp}} = rac{\displaystyle\sum_{i=1}^{N} \left[\Phi_{\mathrm{dp}}(r_i) - \overline{\Phi}_{\mathrm{dp}}
ight](r_i - \overline{r})}{\displaystyle 2 \sum_{i=1}^{N} (r_i - \overline{r})^2}, \ \overline{r} = rac{\displaystyle\sum_{i=1}^{N} r_i}{\displaystyle N},$$

其中, r_i 表示第 i 个距离库与雷达的径向距离, $\overline{\Phi}_{dp}$ 为 N 个距离库的平均值, \overline{r} 表示径向距离的平均值。则 K_{dp} 的方差(用 var 表示)与 Φ_{dp} 的方差 有如下线性关系:

$$\operatorname{var}(K_{\mathrm{dp}}) = \frac{\operatorname{var}(\Phi_{\mathrm{dp}})}{4\sum_{i}^{N} (r_{i} - \overline{r})^{2}}$$

本文选取 7 个距离库为一个单元,即取 N=7。图 3 给出了 K_t机合曲线,显然可见 K_t值基本大于 0°/km,较符合 K_t值的分布范围,这也说明了该 方法是可行的。

3.3 *Z*_h-*R* 关系的建立及验证



图 3 单位差分传播相移 K_{dp}随径向距离的变化

Fig. 3 Specific differential propagation phase K_{dp} versus distance

3.3.1 Zh-R关系的建立

本次分析采用 2009 年 6、7 月 8 次降雨观测 资料近 3300 个数据样本,结合北京市自动雨量站 每分钟实测降雨量数据,拟合出雷达的水平反射 率 Z_b与降雨量 R 的关系,即

$$R = 0.024 Z_{\rm h}^{0.7305}$$

为了与国内外惯用的 Z-R 关系相比较,求出关系式

$$Z_{
m h} = 159 R^{1.37}$$

图4给出了水平反射率和雨强的散点图,以及拟



图 4 X波段雷达 *Z*_h-*R*关系散点图及拟合曲线(实线为本次数据拟合曲线,虚线表示由雨滴谱所得 *Z*_h-*R*关系曲线) Fig. 4 Scatter plots and fitting curve of *Z*_h-*R* (solid line is obtained from in-situ data and dashed line is from estimated result with raindrop spectrum)

合的 $Z_h - R$ 曲线。

3.3.2 Z_h-R关系验证

为了验证拟合的 Z_h-R 关系是否合理有效, 把拟合的 Z_h-R 关系与常用 Z_h-R 关系进行对比, 并计算出相应的平均标准差以及相关系数。由于 X 波段雷达很少用于降雨估测,以至很难找到已 发表的北京地区相应的 Z_h-R 关系。中国科学院 大气物理研究所微波遥感组(1982)给出的 Z_h= 237R^{1.57}是利用北京地区多年各种类型的雨滴谱资 料 1650 份,统计分析得出温度 T=10 °C 时 X 波 段雷达反射率因子与降雨的关系。

平均标准差(用 ERR 表示)定义为

ERR =
$$\left\{ \left[\sum_{i=1}^{N} (R - R_z)^2 \right]^{1/2} / \sum_{i=1}^{N} R \right\} \times 100\%$$
,

其中, *R* 为雨量计实测值, *R*_{*}为雷达估测值, *N* 为取样的个数。

为了更好验证 Z_h-R 关系的合理有效性,把

数据分为两组,2009年7月17日为拟合数据,7 月31日为测试数据,分别利用这两组数据进行验证。图 5a表明无论是本文拟合 Z_h -R公式还是利 用雨滴谱拟合公式所估算的降雨量普遍偏低,在 降雨量大于5 mm·h⁻¹时估测出现较大误差,只 有极个别点估测准确,而在降雨量较小时,估测 准确率较高。图 5b则表明本文拟合公式 Z_h = 159 $R^{1.37}$ 出现了高估,而雨滴谱拟合公式普遍低 估。综合表1所给出的平均标准差和相关系数可 以得出结论:本文拟合公式和雨滴谱拟合公式估 测结果与地面自动雨量站实测雨量都有很好的相 关性,说明根据该公式进行降水估测是合理可行 的; Z_h =159 $R^{1.37}$ 在估测较低降水率时保持较高的 准确度,而在估测较高降水率时,效果明显好于 雨滴谱拟合公式。

297

3.4 *K*_{dp}-*R* 关系的建立与比对

因为K_w是从相位测量值推导出来的,所以它



图 5 2009 年 7 月 (a) 17 日和 (b) 31 日 X 波段雷达多站点降雨 Z_h-R 关系验证对比 Fig. 5 Validating comparison of Z_h-R at X-band rainfall stations on (a) 17 Jul and (b) 31 Jul 2009

表 1 X 波段雷达 $Z_h - R$ 的统计平均标准差以及相关系数 Table 1 Average standard deviations and correlation coefficients from $Z_h - R$ of X-band radar

	平均标准差		相关	系数
所用公式	7月17日	7月31日	7月17日	7月31日
$Z_{\rm h} = 159 R^{1.37}$	5.83%	8.56%	0.9015	0.8479
$Z_{\rm h} = 237 R^{1.57}$	9.48%	9.60%	0.9047	0.8351

不受绝对标定误差和雨区衰减的影响,即使在雨 中混有球形冰雹时,其测量值也不受影响。值得 注意的是,当降水中混有冰雹时,对地面降水量 的估测有影响,因而对该区域用 K_{4p} 估测降水时会 产生误差。Chandrasekar et al. (1990)指出,S 波段雷达基于 K_{4p} 的算法在估算低降水率时由于 K_{4p} 的值中含有相对较大的噪声,会产生较大误 差。然而 K_{4p} 的动态范围随着频率的变化很大,利 用这个特性他证明了X波段基于 K_{4p} 的测雨方法 在低降雨率时也能较好地估测,因此利用X波段 雷达观测的 K_{4p} 在估测降水中有一定的优势。然而 在 K_{4p} 的实际提取中,只能在有限的路径上进行估 计,这样基于 K_{4p} 的降水估测算法就存在精度与距 离分辨率之间的折中。

本次分析采用 2009 年 6、7 月 8 次降雨观测

资料,结合自动雨量站每分钟实测降雨量数据, 拟合出雷达的 K_{th}-R关系,即

$$R = 13.9 K_{\rm dp}^{0.81}$$

图 6 给出了 $R = K_{dp}$ 的散点图以及 $K_{dp} = R$ 的关系 拟合曲线。

3.5 *Z*_h-*R* 关系与*K*_{dp}-*R* 关系对比分析

经过上述方法分别得到了 Z_h - R 与 K_{dp} - R 降 雨估测公式。为了对比二者的估测效果,将其估 测结果与地面实测降雨量进行对比,并计算出平 均标准差。从图 7 中可见,两种降雨估测公式估 测结果与地面实测结果整体趋势基本一致,估测 结果比较合理可信。对比图 7a、7b 可以发现,图 7b 散点较图 7a 散点相对于直线更集中,这说明 K_{dp} - R 整体估测效果要好于 Z_h - R 估测结果;当 雨量大于 10 mm 时,图 7b 散点明显多于图 7a, 这说明 K_{dp} - R 在估测较大雨量时要好于 Z_h - R。

为了分析一次降雨过程的整体情况,对分布 雨区的41个自动雨量站进行统计,这些雨量站主 要分布于城区(A1003 - A1065)、平谷(A1501 -A1509)、顺义(A1551 - A1563)、怀柔(A1601 -A1621)、密云(A1651 - A1663)等,基本覆盖整 个降雨区域。从图 8a 和 8b 可以看出, *Z*_h - *R*、



图 6 $R 与 K_{dp}$ 的散点图以及 K_{dp} -R 关系拟合曲线 Fig. 6 Scatter plots and fitting curve of K_{dp} -R



图 7 地面自动雨量站实测雨量与雷达估测降雨量的散点图: (a) $Z_h - R$; (b) $K_{dp} - R$ Fig. 7 Scatter plots of the rainfall amount form rainfall gauge and estimated rain from radar: (a) $Z_h - R$; (b) $K_{dp} - R$

 K_{dp} -R 估测结果与地面实测雨量值的变化趋势基本一致,图 8a 中 K_{dp} -R 相对于 Z_h -R 无论是变化趋势还是值的大小上都更接近于地面实测雨量, Z_h -R 在离雷达较近的站点 A1003 - A1014 出现了明显高估,而在相对较远的站点出现了估测偏低,这可能是由于 Z_h -R 关系的不稳定性和雷达回波

高度与地面降水位置不一致所导致的。图 8b 中可 以看到在强对流区 K_{dp}-R 的估测相比 Z_h-R 估测 要稳定而且更准确些,这是由于 K_{dp}对雨滴谱变化 相对不敏感,当降雨量增大时雷达信号较强,信噪 比较大,K_{dp}的值比 Z_h 稳定可靠些。从表 2 可知, Z_h-R 的平均标准差要高于K_{dp}-R,这说明了 K_{dp}



图 8 2009 年 7 月 (a) 17 日 06: 39-06: 45 和 (b) 23 日 16: 44-16: 50 的多站点降雨统计 Fig. 8 Statistics analysis of precipitation at target rainfall stations during (a) 0639 LST-0645 LST 17 Jul and (b) 1644 LST-1650 LST 23 Jul 2009

-

-R的降水估测精度要高于 Z_h -R的估测精度。

3.6 误差分析

关于用单部雷达作降水估测的误差问题已有 讨论(刘锦丽和孙海冰,1997),现简要归纳和补 充如下:

(1)降水类型及降水元形状、相态、谱参数 等的复杂变化导致寻求雷达参数与地面降水之间 的简单的统计关系十分困难。这是影响雷达参数 反演降水方法精度的重要局限,本文建立的 Z_h-R 和K_{dp}-R 两个关系也不例外。 表 2 2009 年 7 月 17 日 06: 39 - 06: 45 和 23 日 16: 44 - 16: 50 降雨估测的平均标准差

Table 2Mean standard deviation of the predicted precipita-tion during 0639 LST - 0645 LST 17 Jul and 1644 LST - 1650LST 23 Jul 2009

	平均标准差	
时间	$Z_{\rm h}$ – R	$K_{\rm dp}$ – R
2009 - 07 - 17 06:39 - 06:45	13.63%	6.70%
2009 - 07 - 23 16:44 - 16:50	19.32%	11.35%

(2) 雷达与地面雨量计空间不一致性问题。 雷达有效照射体积与雨量计代表的空间区域是不 同的。特别是雷达的有效体积随着距本站的距离 加大而变大,而且离地面愈高,这样它与地面雨 量计代表的区域的空间位置变得更加不一致。我 们的雷达由于地物遮挡不得不选择 2°仰角扫描, 上述问题更显突出。用雷达参数反演降水时,两 者空间的不一致性是导致估测误差的重要因素 之一。

(3)对雷达资料进行质量控制和衰减订正时 所用方法的局限性。虽然我们对雷达原始数据进 行了较严格的质量控制,也获得了较好效果,对 X波段雷达做了衰减订正,但方法本身仍有待进 一步改进。

4 小结

本文利用北京地区 2009 年夏季中国科学院大 气物理研究所 X 波段双极化雷达和北京市气象局 地面自动雨量站资料分析并建立了估测降水的方 法,获得 Z_h=159R^{1.37}和 R =13.9K_{dp}^{0.81}两个关系 式。经与地面实测降水进行验证对比,得到如下 初步结果:

(1)本文建立的利用雷达反射率 Zh、单位差 分传播相移 Kdp反演地面降水的方法是可行的。验 证表明,雷达用这两个公式估测的降雨量与地面 实测降雨量有较好的一致性;其相关系数较高, 平均标准差较小。

(2)对比分析关系式 Z_h-R和K_{dp}-R与地面 实测降水看出,当每小时降雨量大于 10 mm 时, 用单位差分传播相移 K_{dp}估测地面降水比利用雷达 反射率 Z_h更稳定、可靠;由平均标准差分析可 知,前者估测精度明显高于后者。

参考文献 (References)

- Bent A E. 1943. Radar Echoes from Atmospheric Phenomena [M]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, Radiation Laboratory, 173: 10.
- 毕永恒. 2010. X 波段双线偏振雷达反射率和差分反射率的衰减订 正 [D]. 成都信息工程学院硕士学位论文, 16 - 24. Bi Yongheng. 2010. Attenuation correction of reflectivity and differential reflectivity for X-band dual-polarization radar [D]. M.S. thesis

(in Chinese), Chengdu University of Information Technology, 16 – 24.

- Bringi V N, Keenan T D, Chandrasekar V. 2001. Correcting C-band radar reflectivity and differential reflectivitydata for rain attenuation: A self-consistent method with constraints [J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 39: 1906 - 1915.
- 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]. J. Atmos. Oceanic Technol., 7: 621-629.
- 段树,张凌,刘锦丽,等. 2002. 双线偏振双波段(X/Ka) 主被动 微波遥感系统的研制与初步试验 [J]. 遥感学报,6(4):289-295. Duan Shu, Zhang Ling, Liu Jinli, et al. 2002. Development of an active and passive dual-wavelength (X/Ka) dual-polarization remote sensing system and its preliminary test [J]. Journal of Remote Sensing (in Chinese), 6(4): 289-295.
- Gorgucci E, Scarchilli G, Chandrasekar V, et al. 2001. Rainfall estimation from polarimetric radar measurements: Composite algorithms immune to variability in raindrop shape-size relation [J].
 J. Atmos. Oceanic Technol., 18: 1773-1786.
- Jameson A R. 1983. Microphysical interpretation of multi-parameter radar measurements in rain. Part I: Interpretation of polarization measurements and estimation of raindrop shapes [J]. J. Atmos. Sci. , 40: 1792-1802.
- Jameson A R. 1985. Microphysical interpretation of multi-parameter radar measurements in rain. Part III: Interpretation and measurement of propagation differential phase shift between orthogonal linear polarizations [J]. J. Atmos. Sci., 42: 607-614.
- 刘锦丽,孙海冰. 1997. 区域降水分布定量测量及其在 IMGRASS 综合试验中的应用方案研究 [J]. 气候与环境研究,2 (3): 286 - 292. Liu Jinli, Sun Haibing. 1997. A design of quantitative regional precipitation measurement for IMGRASS [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 2 (3): 286-292.
- 刘黎平,葛润生,张沛源. 2002. 双线偏振多普勒天气雷达遥测降 水强度和液态含水量的方法和精度研究 [J]. 大气科学,26 (5):709 - 731. Liu Liping, Ge Runsheng, Zhang Peiyuan. 2002. A study of method and accuracy of rainfall rate and liquid water content measurements by dual linear polarization Doppler radar [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (5):709-731.
- 马学谦, 董万胜, 楚荣忠, 等. 2008. X 波段双偏振多普勒天气雷 达降雨估算试验 [J]. 高原气象, 27 (2): 382 - 392. Ma Xueqian, Dong Wansheng, Chu Rongzhong, et al. 2008. Experiment of rainfall estimation using X-band dual-polarized Doppler weather radar [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27 (2): 382-392.
- Marshall J S, Langille R C, Palmer W M. 1947. Measurement of rainfall by radar [J]. J. Meteor. , 4: 186-192.
- Marshall J S, Palmer W M. 1948. The distribution of raindrops

with size [J]. J. Meteor., 5 (4): 165-166.

- Matrosov S Y, Clark K A, Martner B E, et al. 2002. X-band polarimetric radar measurements of rainfall [J]. J. Appl. Meteor., 41: 941-952.
- Matrosov S Y, Kingsmill D E, Martner B E, et al. 2005. The utility of X-band polarimetric radar for quantitative estimates of rainfall parameters [J]. J. Hydrometeor., 6: 248–262.
- Seliga T A, Bringi V N. 1976. Potential use of radar differential reflectivity measurements at orthogonal polarizations for measuring precipitation [J]. J. Appl. Meteor., 15: 69-76.
- 苏德斌, 孙成云, 余东昌, 等. 2010. 短临交互预报系统 VIPS 设计 开发与应用 [J]. 气候与环境研究, 15 (5): 571 – 578. Su Debin, Sun Chengyun, Yu Dongchang, et al. 2010. The development and application of a very-short-range interactive prediction system [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (5): 517 – 578.
- 王致君, 蔡启铭, 徐宝祥. 1988. 713 雷达的双线偏振改装 [J]. 高

原气象, 7 (2): 177-185. Wang Zhijun, Cai Qiming, Xu Baoxiang. 1988. Development into dual linear polarization of 713 type weather radar [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 7 (2): 177-185.

- 张鸿发,王致君,徐宝祥,等. 1995. 差分反射率 ZDR 和反射率 Ze 测雨精度的对比分析 [J]. 大气科学,19 (1): 31-39. Zhang Hongfa, Wang Zhijun, Xu Baoxiang, et al. 1995. A comparative analysis of rainfall accuracy by using dual linear polarization radar and the conventional weather radar [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 19 (1): 31-39.
- 中国科学院大气物理研究所微波遥感组. 1982. 中国晴空和云雨大 气的微波辐射和传播特性 [M]. 北京:国防工业出版社,24-28. Microwave Remote Sensing Group of Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences. 1982. Microwave Radiation and Propagation Characteristics of China's Clear Sky and Cloud the Atmosphere (in Chinese) [M]. Beijing: China National Defence Industry Press, 24-28.