

晋立军, 封秋娟, 李军霞, 等. 2012. 激光雨滴谱仪在雷达降水估测中的应用 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 740–746, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.11. Jin Lijun, Feng Qiujuan, Li Junxia, et al. 2012. Application of automatic laser raindrops spectrometer in radar rainfall estimation [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 740–746.

自动激光雨滴谱仪在雷达降水估测中的应用

晋立军 封秋娟 李军霞 孙鸿娉 申东东 任晓霞

山西省人工降雨防雹办公室, 太原 030002

摘 要 利用 Parsivel 激光降水粒子谱与地面雨量计对 2008 年 9 月 9 号山西的一次混合降水天气过程进行分析, 根据汾阳、介休两站的雨滴谱资料, 利用最小二乘法拟合出反射率因子 Z 与雨强 I 的关系 $Z_{\text{ott}}=159I_{\text{ott}}^{1.5}$, 利用最优化关系法计算出地面雨量计与雷达反射率因子的关系 $Z_{\text{rad}}=200I_{\text{rain}}^{1.2}$, WSR_88D 中默认的关系 $Z_{\text{Def}}=300I^{1.4}$, 然后分别利用 3 种 $Z-I$ 关系对此次降水过程进行估测, 计算过程累计雨量, 并将估测降水结果与地面雨量计实测结果进行对比。结果表明: 利用雨滴谱关系的估测降水效果最好, 利用雨量计关系的估测降水结果次之, 默认关系计算结果最差; 第一者相对第二者提高 4% 左右, 相对第三者则提高近 18% 左右。

关键词 自动激光雨滴谱仪 估测降水

文章编号 1006-9585 (2012) 06-0740-07

中图分类号 P412

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.11

Application of Automatic Laser Raindrops Spectrometer in Radar Rainfall Estimation

JIN Lijun, FENG Qiujuan, LI Junxia, SUN Hongping, SHEN Dongdong, and REN Xiaoxia

Weather Modification Office of Shanxi Province, Taiyuan 030032

Abstract A mixed precipitation weather process by using Parsivel laser raindrops spectrometer system (OTT Parsivel Co., Germany) and a ground rain gauge on 9 September 2008, in Shanxi Province, China, was analysed. With the least squares method, spectrum data of Fenyang and Jiexiu stations were used to determine the first $Z-I$ relationship $Z_{\text{ott}}=159I_{\text{ott}}^{1.5}$. With optimization $Z-I$ relationships, the data of the ground rain gauge and radar reflectivity is used to calculate the second $Z-I$ relationship $Z_{\text{rad}}=200I_{\text{rain}}^{1.2}$, the third is the WSR_88D default $Z-I$ relationship $Z_{\text{Def}}=300I^{1.4}$. The precipitation process by using these three types of $Z-I$ relationships was estimated, the accumulated rainfall was calculated, and the results of precipitation were compared with the ground rain gauge measured results. The results show that the precipitation estimation of the rain spectrum $Z_{\text{ott}}-I_{\text{ott}}$ relationship had the best effect; using the rain gauge $Z_{\text{rad}}-I_{\text{rain}}$ relationship to estimate precipitation provided the second-best effect; and the default $Z_{\text{Def}}-I$ relationship calculation showed the worst results. The first method is nearly promoted 4% in contrast with the second method and nearly 18% in contrast with the third method.

Keywords Automatic laser raindrops spectrometer, Precipitation estimation

1 引言

Bent (1943) 提出雷达估测降水的概念, 并系

统阐述了估测降水的不确定性, Marshall and Palmer (1948) 提出了 $Z=200I^{1.6}$ 的关系式, 在数学上建立了雷达反射率因子与降水强度的统计关系, 采用适合的 $Z-I$ 关系是提高雷达定量测量降水精度的关

收稿日期 2012-08-30 收到, 2012-09-29 收到修定稿

作者简介 晋立军, 男, 1974 年出生, 高级工程师, 现从事雷达专业研究。E-mail: shanxijlj@163.com

键。我国新一代天气雷达的降水系列算法中利用 WSR-88D 中设定的 $Z-I$ 关系式—— $Z_{\text{Def}}=300I^{1.4}$ ，它是由美国夏季深对流云降水统计得到的。由于 $Z-I$ 关系随季节和地区变化较大，此 $Z-I$ 关系式的本地化还需深入分析。刘娟等（1999）、郑媛媛等（2004）、陈秋萍等（2006）、陈羿辰等（2012）全国许多气象工作者对此 $Z-I$ 关系都进行了分析调整并进行降水产品优化方法试验，使降水产品质量明显提高。目前 $Z-I$ 关系调整主要是利用雨量筒或者自动站的小时雨量，雨滴谱在这方面的使用比较少，张鸿发等（1995）利用大量不同类型降雨的雨滴谱资料，分析了差分反射率因子 Z_{DR} 和反射率 Z_e 测雨精度优于传统的 $Z-I$ 关系，冯雷和陈宝君（2009）利用 PMS 的 GBPP-100 型雨滴谱仪观测资料确定 $Z-I$ 关系，表明 $Z=AI^b$ 形式能够很好地描述 $Z-I$ 关系，对降水类型分类得到的 $Z-I$ 关系代表性更好，刘红燕等（2008）详细

分析了降水强度和雷达反射率因子的关系，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，并得出雨滴谱在很大范围变化时，利用差分反射率因子 Z_{DR} 和差传播相移 K_{DP} 可以很好的反演出降水强度和液态水含量，它受雨滴谱的分布的影响不大。

山西省人影实验基地布设了 Parsivel 激光降水粒子谱仪，该仪器可以测量瞬时降水强度、降水粒子总数、累积降水量、降水时的能见度和雷达反射因子等。激光降水粒子谱仪主要用于气象水文观测，在雷达气象学领域可用于 $Z-I$ 关系的拟合修正，比传统的用雨量筒观测数据拟合效果好得多。2008 年 9 月 9 日 00:00（北京时间，下同）至 23:00，山西省大部有降水，24 h 降雨量在 0.3~46.3 mm 之间，大雨区主要位于山西中部（如图 1 所示）。

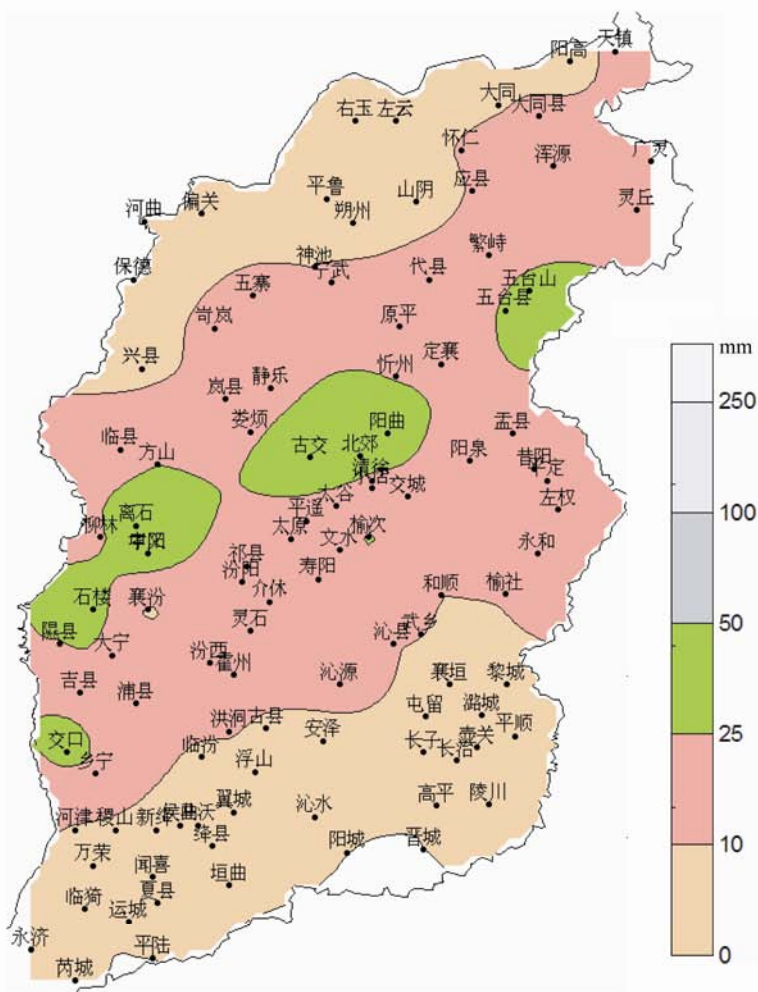


图 1 2008 年 9 月 9 日山西省 24 h 累计降雨量

Fig. 1 24-h accumulated precipitation of Shanxi Province on 9 Sep 2008

2 仪器设备

2.1 雨滴谱仪

德国 OTT 公司的 Parsivel 激光降水粒子谱测量系统以激光测量为基础,采用平行激光束和光电管阵列结合,当有降水粒子穿越采样空间时,自动记录遮挡物的宽度,通过测量降水中所有液体和固体粒子对激光强度的衰减程度和通过时间来计算降水粒子的尺度和速度。它根据各种参数的综合信息对降水粒子进行分类,并能够以数字形式显示瞬时降水强度、降水粒子总数、累积降水量、降水时的能见度和雷达反射因子,以图形方式显示降水粒子尺度谱、速度谱、降水粒子分类且自动生成天气现象代码,实现天气现象的自动识别。表 1 是该雨滴谱的主要技术指标。图 2 是本文所用雨滴谱仪与对比站(没有安装雨滴谱仪)的位置。

2.2 多普勒雷达

观测雷达位于山西省太原市小店区(37°44'6"N, 112°34'45"E),海拔高度 817 m,文中所用体扫资料为体扫模式 2,雷达资料库长为 150 m,量程 150 km,采用窄脉冲 1 μs。表 2 列出太原新一代天气雷达的常用模式及参数设置。

2.3 翻斗式自动雨量计

翻斗式自动雨量计的分辨率是 0.1 mm,即当降水量累积到 0.1 mm 时,输出一个脉冲电流,自动雨量计在接收到脉冲电流的时刻记录下 0.1 mm 的降水量,每分钟记录一个降水量值。这样记录的降雨强度存在着±0.1 mm 的误差。

3 资料处理

3.1 数据质量控制

由于雨滴谱的采样时间比较短[汾阳(37°15'N,

表 1 Parsivel 主要技术参数
Table 1 Main parameters of Parsivel

中心 波长	输出 功率	采样区域 尺寸	采样区 域面积	降水强度 测量范围	粒子尺度 测量范围	粒子落速 测量范围	降水时能 见度测量 范围	系统工 作电压 (VDC)	信号传 输方式	计算 显示 软件	粒子 尺度 分级	粒子下 落速度 分级
650 nm	3 mW	180 mm×30 mm	254 cm	0.001~1200 mm/h	0.2~25 mm	0.2~20 m/s	100~5000 m	10~30	RS-485	ASDO V1.1	32	32

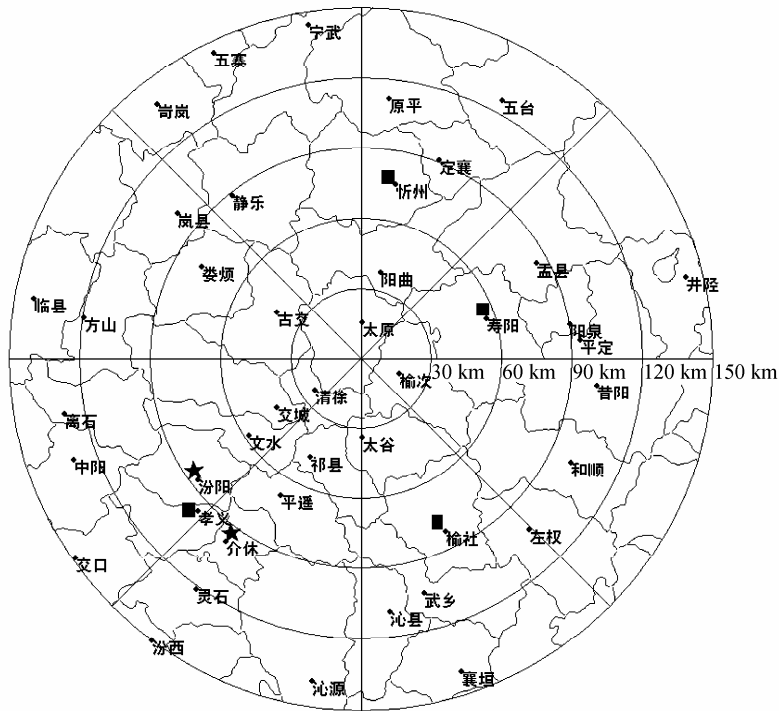


图2 山西省雨滴谱(★汾阳、介休)与对比站(■寿阳、孝义、榆社、忻州)的位置
Fig. 2 Locations of stations with raindrop spectrum(★ denote Fenyang and Jiexiu stations) and correlation stations(■ denote Shouyang, Xiaoyi, Yusheng, and Xinzhou stations)

111°47'E) 为 10 s, 介休 (37°2'N, 111°55'E) 2 min], 而雷达一个体扫大概需要 6 min, 为了保证两者在时间上的一致性, 将雨滴谱数据按照 6 min 进行平均。图 3 是经过处理的 9 月 9 日的汾阳雨滴谱雨量, 从图 3 中可以看出, 降雨起伏还是比较大。

表2 雷达体扫模式参数

Table 2 Radar parameters of volume scan mode

名称	转速 (圈/分)	PRF (Hz)	滤波	仰角层 (°)
降水模式 1	3.0	900:600	3	0.5,1.5,2.4,3.4,4.3,5.3,6.7,7.5,8.7,10.0,12.0,14.0,16.7,19.5 (共 14 层)
降水模式 2	2.0	900:600	2	0.5,1.5,2.4,3.4,4.3,6.0,9.9,14.6,19.5 (共 9 层)

数据过滤：滤除无效数据，没有雷达回波但是雨滴谱有数据、有回波但是雨滴谱没有数据的都认为是无效数据，在数据处理进行滤除。

3.2 雨滴谱反射率与雷达反射率的对应

雨滴谱资料代表该站位置上单点的情况，属于点资料，而雷达数据属于面资料，在选取雨滴谱资料与雷达资料对应时，有多种方法，可以直接点对点，也可以采取多点平均的方法，图 4 是站点反射率和周边反射率对应的示意图，图中 Z1 代表与雨滴谱对应的雷达库，Z2 至 Z9 代表相邻的雷达库。根据下面的公式读取计算与雨滴谱对应的雷达反射率

$$Z_{\text{rad}} = \sum_{i=1}^N Z(i) / N, \quad (1)$$

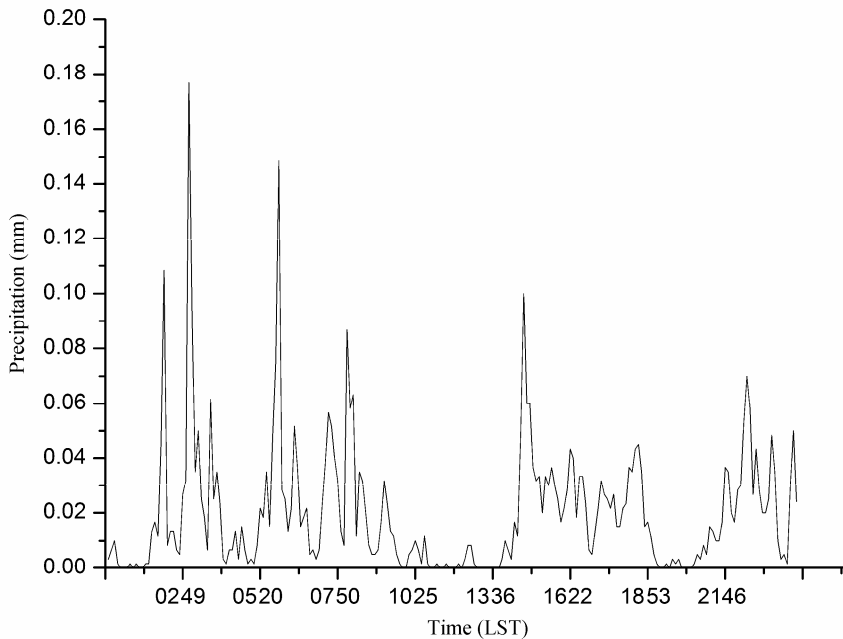


图3 汾阳雨滴谱6 min 平均雨量

Fig. 3 Six-minute average precipitation of raindrops spectrometer at Fenyang station

其中, $Z(i)$ 表示雷达反射率, N 代表取样点, $N=1、3、5、9$ 分别对应点对点、3 点平均、5 点平均和 9 点平均。从图 4 中可以看出, 3 点平均主要是距离扩展, 5 点平均是距离与方位同时扩展, 9 点平均在 5 点的基础上增加周围的 4 个点。分别利用上述方法读取汾阳站对应的雷达数据 (体扫的第一层 0.5°仰角的数据), 并与雨滴谱反射率因子进行对比, 利用公式 (2) 计算两者的相关系数。表 3 是上述方法计算得到的结果, 从表 3 中可以看出, 利用 5 点平均法的相关性最好, 9 点平均次之, 单点最差, 因此读取雷达资料选用 5 点平均。

$$R(X,Y) = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}}, \quad (2)$$

其中, $X、x$ 代表读取出来的雷达反射率数据, $Y、y$ 代表雨滴谱反射率数据, $\bar{x}、\bar{y}$ 为平均, R 表示雷达反射率数据与雨滴谱反射率数据的相关系数。

表3 雷达反射率与雨滴谱反射率的相关系数

Table 3 Correlation efficients of radar reflectivity and raindrop spectrum reflectivity

计算方式	相关系数
点对点	0.689
3 点平均	0.691
5 点平均	0.717
9 点平均	0.716

建立雨滴谱的反射率因子 Z_{ott} 与雷达的反射率因子 Z_{rad} 的统计关系, 图 5 是 2008 年 9 月 9 日汾阳站的 Z_{ott} 与 Z_{rad} 的散点图。在今后的研究中, 将通过更多的个例总结两者之间更好的回归关系。

3.3 $Z-I$ 关系计算

读取雨滴谱的反射率因子 Z_{ott} 与雨强 I_{ott} , 利用最小二乘法计算得到雨滴谱的 $Z_{\text{ott}}-I_{\text{ott}}$ 关系。从图 6 可以看出, 两者的相关性非常好, 系数 $A=159.6$, 系数 $b=1.477$ 。

利用最优化 $Z-I$ 关系法, 计算此次过程雨量计雨量与雷达反射率的 $Z_{\text{rad}}-I_{\text{rain}}$ 关系, 系数 $A=200$,

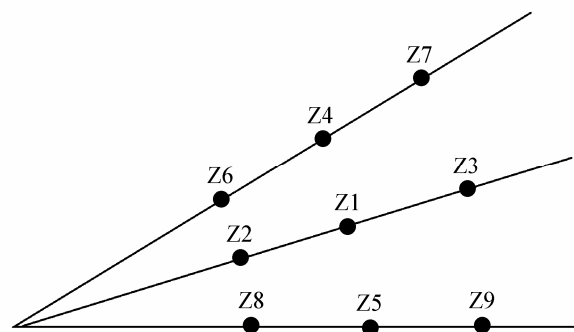


图 4 雷达反射率点平均示意图 (山西太原, 2012)

Fig. 4 Diagram of radar reflectivity (Taiyuan, Shanxi Province, 2012)

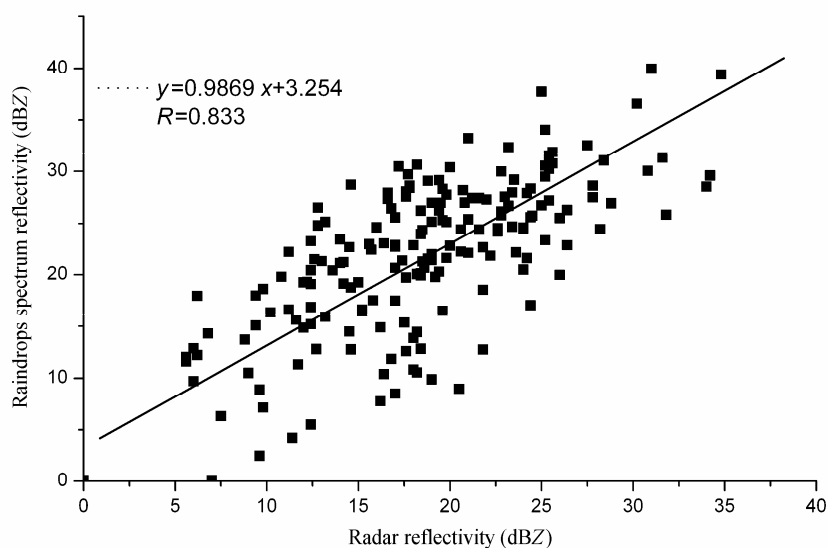


图 5 汾阳站 2008 年 9 月 9 日的 Z_{rad} 与 Z_{ott} 的散点图及拟合

Fig. 5 Poly figure and the polynomial fitting curve between Z_{rad} and Z_{ott} of Fenyang station on 9 Sep 2008

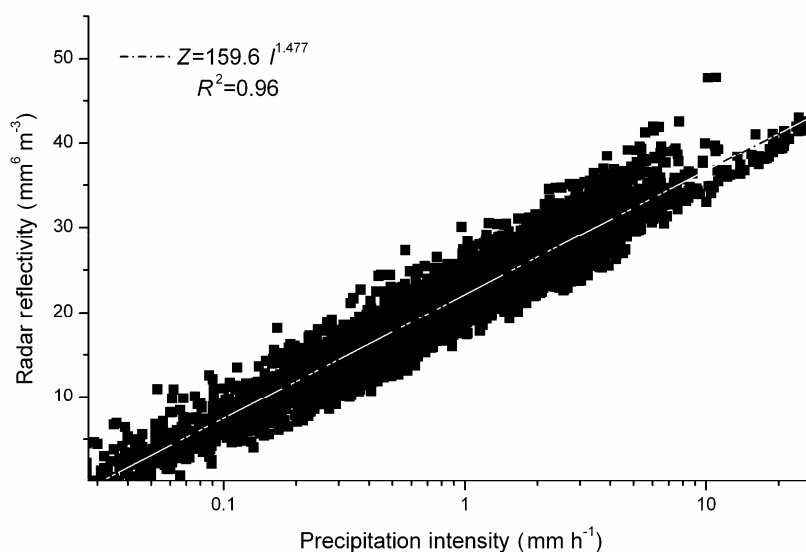


图 6 2008 年 9 月 9 日介休、汾阳两站雨滴谱点聚图及拟合曲线

Fig. 6 The point poly figure and the polynomial fitting curve of raindrops spectrum at Jiexiu and Fenyang stations on 9 Sep 2008

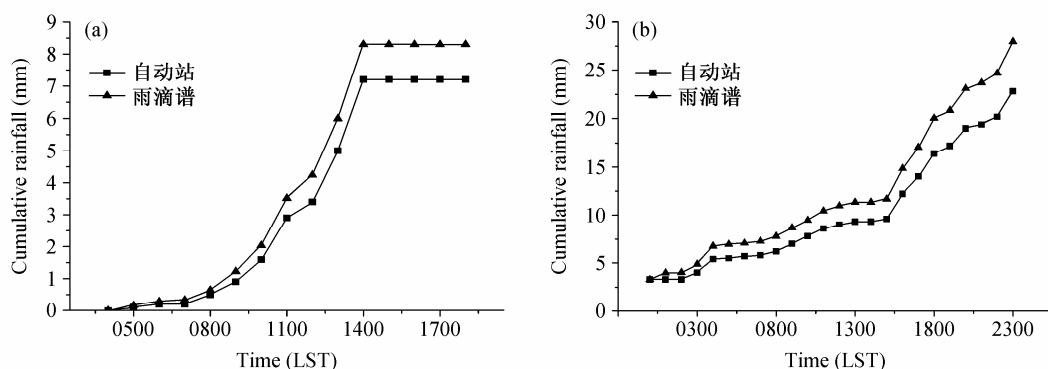


图7 2008年9月9日 (a) 汾阳和 (b) 介休雨滴谱雨量与自动站雨量对比

Fig. 7 Contrast of accumulated precipitation of raindrops spectrometer at (a) Fenyang and (b) Jiexiu stations with automatic weather station on 9 Sep 2008

系数 $b=1.2$; WSR-88D 默认的 $Z_{Def}-I$ 关系的系数 $A=300$, 系数 $b=1.4$ 。

3.4 估测雨量的计算

通过经上述质量控制后的雷达反射率因子 Z_{rad} (0.5° 仰角), 利用图 5 的拟合关系式, 计算出对应的地面雨滴谱的反射率因子 Z'_{ott} , 利用 Z'_{ott} 通过 $Z_{ott}-I_{ott}$ 关系计算雨滴谱的估测降水, 利用 Z_{rad} 通过 $Z_{rad}-I_{rain}$ 与 $Z_{Def}-I$ 分别计算雨量计和默认关系的估测降水, 并对计算结果进行累计, 得出过程累计雨量。

4 结果与讨论

4.1 雨滴谱反演雨量与雨量计雨量的对比

图 7 是山西省汾阳、介休两站 2008 年 9 月 9 日的对流性降水过程的雨滴谱反演雨量 (简称雨滴谱雨量) 与雨量计雨量的对比曲线, 汾阳的过程累积雨滴谱雨量 25.53 mm、雨量计雨量 22.0 mm, 这两个值介休分别为 27.97 mm 和 22.8 mm。图 8 是 2008 年 7 月 17 日的稳定性降水的汾阳雨滴谱雨量与雨量计雨量的对比曲线 (介休当时没有资料)。从图 7 和图 8 可以看出, 雨滴谱仪测量的降水强度与自动雨量站测量的降水强度具有很好的一致性, 说明雨滴谱用于估测降水的可行性。相比较而言, 前者相对偏大, 过程累积雨量相对偏大 25% 左右, 误差偏大主要有以下几方面的原因: 其一, 取样面积不同, 雨滴谱仪取样面积小; 其二, 雨滴谱仪不能够区分采样区雨滴的重叠, 有可能造成测值偏大; 其三, 观测精度不同, 雨滴谱雨强精度为 0.001 mm, 而雨量计为 0.1 mm; 其四, 测量方式不同, 雨滴谱是反演的, 雨量计是直接测量; 其五, 与雨滴的重叠以及测量地点差异有关。

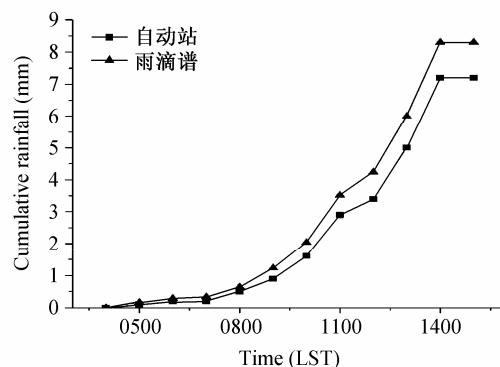


图8 2008年7月17日雨滴谱雨量与自动站雨量对比

Fig. 8 Contrast of accumulated precipitation of raindrops spectrometer with automatic weather station on 17 Jul 2008

4.2 3种 $Z-I$ 关系的对比分析

在雷达观测范围之内, 选择另外 4 个没有安装雨滴谱的气象站 (忻州、寿阳、榆社、孝义, 见图 1) 作为对比站, 分别利用上述的雨滴谱 $Z_{ott}-I_{ott}$ 关系、雨量站 $Z_{rad}-I_{rain}$ 关系以及默认的 $Z_{Def}-I$ 关系, 利用 3.4 节描述的方法计算各站的过程累计雨量。表 4 列出了 4 个对比站利用 3 种 $Z-I$ 关系估测降水结果与雨量计实际观测结果的变化。

表 4 估测雨量与雨量计实测雨量

Table 4 Cumulative rainfall from estimation and automatic weather stations

	$Z_{rad}-I_{rain}$ (mm)	$Z_{ott}-I_{ott}$ (mm)	$Z_{Def}-I$ (mm)	雨量计实测 (mm)
忻州	20.8	19.8	13.4	17.6
寿阳	13.7	14.5	9.6	23.4
榆社	3.7	4.5	2.9	11.0
孝义	20.9	20.6	13.8	20.0

从表 4 中可以看出:

(1) 利用雨滴谱 $Z_{\text{ott}}-I_{\text{ott}}$ 关系估测降水的效果最好, 利用雨量计 $Z_{\text{rad}}-I_{\text{rain}}$ 关系估测降水的误差次之, 默认 $Z_{\text{Def}}-I$ 关系估测降水的误差最大, 雨滴谱 $Z_{\text{ott}}-I_{\text{ott}}$ 关系的过程平均相对误差为 28.1%, 雨量计 $Z_{\text{rad}}-I_{\text{rain}}$ 关系的为 32.6%, 默认 $Z_{\text{Def}}-I$ 关系的为 46.8%。利用雨滴谱 $Z_{\text{ott}}-I_{\text{ott}}$ 关系估测降水比雨量计 $Z_{\text{rad}}-I_{\text{rain}}$ 关系提高 4% 左右, 比利用默认 $Z_{\text{Def}}-I$ 关系提高近 18% 左右。

(2) 忻州、孝义两站的雨滴谱估测降水的误差最小, 非常接近雨量站的实测雨量。寿阳、榆社两站的误差比较大。

误差分析:

(1) 目前采用的汾阳、介休两站位置的原因; 汾阳、介休两站距离太近, 位于相同地区, 因此数据难以代表整个过程以及地区的降水特征。

(2) 雷达与雨滴谱仪、地面雨量及空间上的一致;

(3) $Z-I$ 关系的复杂性。

应该指出: 本文只是对一次降水过程的降水估测, 具有启发意义, 还需通过更多个例分析, 才能得出合理的结论。

参考文献 (References)

- Bent A E. 1943. Radar Echoes from Atmospheric Phenomena [M]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, Radiation Laboratory, 173:10.
- Marshall J S, Palmer W M. 1948. The distribution of raindrops with of size [J]. *J. Meteor.*, 5 (4): 165-166.
- 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.
- 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.
- 陈秋萍, 余建华, 杨林增, 等. 2006. 闽中北前期多普勒雷达定量估测降水分析 [J]. *气象*, 32 (4): 56-61.
- Chen Qiuping, Yu Jianhua, Yang Linzeng, et al. 2006. Analysis of quantitative precipitation estimation based on doppler radar data in pre-rainy season in northern and central Fujian [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 32 (4): 56-61.
- 冯雷, 陈宝君. 2009. 利用 PMS 的 GBPP-100 型雨滴谱仪观测资料确定 $Z-R$ 关系 [J]. *气象科学*, 29 (2): 192-198.
- Feng Lei, Chen Baojun. 2009. The radar reflectivity-rain rate relationships as inferred from ground-based raindrop spectra observed by GBPP-100 probe [J]. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 29 (2): 192-198.
- 刘娟, 宋子忠, 刘东风, 等. 1999. 分组 $Z-I$ 关系及其在淮河流域雷达测雨中应用 [J]. *气象科学*, 19 (2): 213-219.
- Liu Juan, Song Zizhong, Liu Dongfeng, et al. 1999. Classified $Z-I$ relationship and its application to the measurement of rainfall by weather radar over the Huanhe River basin [J]. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 19 (2): 213-219.
- 刘红燕, 陈洪滨, 雷恒池, 等. 2008. 利用 2004 年北京雨滴谱资料分析降水强度和雷达反射率因子的关系 [J]. *气象学报*, 66 (1): 125-129.
- Liu Hongyan, Chen Hongbin, Lei Hengchi, et al. Relationship between rain rate and radar reflectivity based on the raindrop distribution data in Beijing during 2004 [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 66 (1): 125-129.
- 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与精度研究 [J]. *大气科学*, 26 (5): 709-731.
- Liu Liping, Ge Rensheng, 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.
- 张鸿发, 王致君, 徐宝祥, 等. 1995. 差分反射率 Z_{DR} 和反射率 Z_{e} 测雨精度的分析 [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]. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 19 (1): 31-39.
- 郑媛媛, 谢亦峰, 吴林林, 等. 2004. 多普勒雷达定量估测降水的三种方法比较试验 [J]. *热带气象学报*, 20 (2): 192-198.
- Zheng Yuanyuan, Xie Yifeng, Wu Linlin, et al. 2004. Comparative experiment with several quantitative precipitation estimator techniques based on doppler radar over the Huaihe valley during rainy season [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 20 (2): 192-198.