

王丽荣,王立荣,2017. 水平距离和海拔高度对雷达估测降水影响及订正[J]. 气象,43(9):1152-1159.

水平距离和海拔高度对雷达估测降水影响及订正^{*}

王丽荣¹ 王立荣²

1 河北省气象灾害防御中心,石家庄 050021

2 石家庄市气象局,石家庄 050081

提 要: 以石家庄 2006—2008 年 77 次降水过程为例,分析了海拔高度和距雷达站水平距离对定量估测降水的影响,给出了估测降水时反射率因子取值的最佳高度以及距离高度订正值。对比了经验公式法和最优化法分别在有无距离高度订正 4 种情况下的估测效果,依据估测效果,设计了雷达定量估测降水最佳方案:若反射率因子小于 30 dBz,则不进行距离高度订正,仅采用最优化法估测降水;若反射率因子大于 30 dBz,则首先对反射率因子进行距离高度订正,然后采用最优化法估测降水。实例检验表明,该方案对单站 $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上的强降水、过程降水量和区域降水量估测效果较好。

关键词: 雷达估测降水,距离高度订正,最佳估测方案

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.09.012

Influence of Horizontal Distance and Altitude on Radar Rainfall Estimation and Its Correction

WANG Lirong¹ WANG Lirong²

1 Hebei Provincial Meteorological Disaster Prevention Centre, Shijiazhuang 050021

2 Shijiazhuang Meteorological Bureau, Shijiazhuang 050081

Abstract: Based on 77 rainfall processes in Shijiazhuang from 2006 to 2008, this paper analyzes how quantitative precipitation estimation (QPE) is influenced by the altitude and horizontal distance from radar stations. Meanwhile, the optimum height of reflectivity factor for radar QPE and the values of distance and height corrections are suggested. The effect of QPE using the empirical formula and the optimization method are contrasted with and without distance and height corrections in four situations, and a QPE optimum scheme is designed according to the comparison results. No correction but only optimization method is adopted when the reflectivity is less than 30 dBz. Otherwise, distance and height corrections are performed firstly, and then optimization method is used in QPE. The results show that the proposed scheme has a good effect on heavy precipitation exceeding $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ at single station, and on the process rainfall as well as on the estimation of regional precipitation.

Key words: radar estimate precipitation, distance and height correction, optimum estimation scheme

引 言

多年来,很多气象工作者在不同地点用实测的滴谱资料统计 $Z-I$ 关系(刘红燕等,2008;李金辉和

罗俊颖,2006),结果表明,其系数 A 和 b 值的变化范围很大。 $Z-I$ 关系并不固定,它不仅随地点、季节以及不同降水类型而变,即使在同一次降水过程中,其 A 和 b 值也是变化的。 $Z-I$ 关系的不稳定性,给雷达定量估测降水带来了很大困难,有些人对大量

* 国家自然科学基金项目(41375038)资助

2016 年 1 月 22 日收稿; 2017 年 1 月 23 日收修定稿

第一作者:王丽荣,主要从事雷达资料分析与应用。Email:wlr_wzy@163.com

的雷达资料进行分析,按降水成因、气候特征或天气系统特征分别对不同类型降水统计出相应的 $Z-I$ 关系(刘娟等,1999;仲凌志等,2007),但在某次降水过程中,所有研究都是用固定的 $Z-I$ 关系来估测降水,效果仍然不是很理想。

由此,我们希望找到变化的 $Z-I$ 关系,对于任意降水过程,不同的地点、不同的反射率因子采用不同的 A 、 b 值,试图解决降水性质不断变化的问题。国内外在雷达定量估测降水方面已经做了大量工作,开发了诸如平均校准法(Wilson and Brandes, 1979)、变分校准法(伍志方等,1991;邓雪娇等,2000)、概率配对法(王丽荣等,2008)、卡尔曼滤波校准法(尹忠海和张沛源,2005)、云分类法(陈小华和段旭,2013)等方法,并对各种方法的优劣进行了比较(郑媛媛等,2004;张亚萍等,2013;李建通等,2015)。不论何种方法,反射率因子的选取始终是影响雷达估测降水精度的主要因素。

由于降水粒子在下降过程中的碰并增长、分裂、蒸发、气流运动、相态变化等,反射率因子垂直廓线(Vertical Profile of Reflectivity, VPR)的变化是客观存在的,而且这一变化产生的误差随着距雷达站水平距离(以下如无特别说明,简称水平距离)及距地面垂直高度的增加而增大(Joss et al,1990)。在山区,当使用高仰角探测以避免地物和波束阻挡时,VPR 变化造成误差更为明显(Bourrel et al,1994)。国内的气象科研人员为了减小反射率因子垂直廓线(VPR)在估测降水上产生的误差,也坚持不懈地研究了几十年。史锐等(2005)应用最小二乘曲线拟合数值,将降水分为层状云和对流云,联合雨量计平均校准因子估测降水,在不考虑地形的作用下,大部分区域估测效果比较合理。杜秉玉和高志球(1998)提出了 Hgood-Zgood 法,用此方法反演降水,不必从概念上区分“对流降水”或“层状云降水”,使降水反演过程中的一个主要步骤客观化。

以往的文献中,对所估测站点的海拔高度和距雷达站的水平距离考虑的很少。河北省地处太行山东麓,山地、丘陵、平原等并存,地形复杂,影响降水估测效果的因素比较多,因此,更需要因地制宜的设计本地化的降水估测方案。本文以石家庄为例,分析了海拔高度和水平距离对雷达估测降水效果的影响,发展了一套订正算法,找出订正因子;同时,将反射率因子分级,分别得到不同级别最优化的 $Z-I$ 关系;通过对比分析,将两方面相结合,设计了雷达估

测降水的最佳方案。文中用到两个概念:(1)距离高度订正:指估测降水时,不同海拔高度和水平距离的站点所采用的反射率因子订正值。(2)估测降水最佳方案:指在综合分析海拔高度、水平距离以及反射率因子大小的基础上,设计估测降水效果最好的方案。

1 资料和方法

1.1 资料来源

本文以石家庄为例,统计分析时选取了 2006—2008 年 5—9 月共 77 次降水过程。

雷达资料采用石家庄新乐 CINRAD-SA 雷达探测资料。本文研究对象是不同海拔高度和水平距离对雷达定量估测降水的影响,采用不同高度上的 CAPPI(Constant Altitude Plane Position Indicating)产品。利用中国气象科学研究院国家灾害天气重点实验室开发的多普勒雷达三维拼图程序(张志强等,2007)反算 2006—2008 年逐次降水过程的反射率因子 CAPPI 产品。考虑到“静锥区”和探测高度随距离增加等雷达探测局限性的影响,初始分析高度为 0.5 km。

降水资料取自石家庄 16 个人工观测站,时间分辨率为 1 h。16 个观测站中,海拔高度低于 50 m 有 5 站,50~100 m 有 7 站,高于 100 m 有 4 站,辛集站最低(37 m),井陉站最高(256 m);距雷达站水平距离全部在 100 km 以内,其中,50 km 内有 9 站,50~100 km 有 7 站,行唐站最近(17.91 km),高邑站最远(85.59 km)。

1.2 降水估测方法简介

本文在两种最基本的雷达定量估测降水方法的基础上,分析水平距离和海拔高度对估测降水效果的影响,设计新的估测降水方案。两种基本的方法分别是:

方法一:经验 $Z-I$ 关系法,即 $Z=300I^{1.4}$ 或者 $Z=200I^{1.6}$,在分析水平距离和海拔高度的影响,以及效果对比分析及方案设计时均用到了此方法。

方法二:最优化法,在对比分析及方案设计时采用。具体思路和做法为:利用反射率因子和降水成正比的关系,将反射率因子分为不同的等级,然后利用最优化方法计算每个等级最优的 $Z-I$ 关系。试验

中,将反射率因子间隔 10 dBz 分为一个等级,共分为 5 个等级:(1) $0 \text{ dBz} < Z < 10 \text{ dBz}$; (2) $10 \text{ dBz} \leq Z < 20 \text{ dBz}$; (3) $20 \text{ dBz} \leq Z < 30 \text{ dBz}$; (4) $30 \text{ dBz} \leq Z < 40 \text{ dBz}$; (5) $Z \geq 40 \text{ dBz}$ 。实施最优化方案时,先确定一个初始的 $Z-I$ 关系式,令 A 、 b 变化范围分别为: $0.1 \sim 3000.0$ 、 $0.3 \sim 10.0$,然后用此初始关系式,计算出每小时雷达估测的降雨量 H_i 值与用雨量计测得的每小时雨量值 G_i 进行比较。若它们之间差异过大,就调整 $Z-I$ 关系的系数 A 和指数 b 。在试验中,当 $A < 1$ 时, A 的步长取为 0.1; 当 $A \geq 1$ 时, A 的步长取为 1; b 的步长始终取为 0.1。每调整一次

A 或 b , 就可以得到调整后新的 $Z-I$ 关系,将 Z_i 值带入,得到一组新的每小时雷达估测的降雨量值,再与雨量计测得的每小时雨量值进行比较,如此循环往复,另判别函数 CTF 达最小值时的 A 和 b 值就是该等级最优的。根据计算,得到不同级别反射率因子估测降水最佳的 $Z-I$ 关系, A 、 b 值见表 1。

$$CTF = \text{MIN} \left\{ \sum_{i=1}^N (H_i - G_i)^2 + (H_i - G_i) \right\}$$

式中, i 代表第 i 个雨量站, N 代表雨量站总个数, H_i 为雷达估测的降水量, G_i 为雨量计实测降水量。

表 1 反射率因子间隔 10 dBz 分等级对应的 A 、 b 值

Table 1 Values of A and b corresponding to the interval of 10 dBz of reflectivity factor

反射率因子/dBz	$0 < Z < 10$	$10 \leq Z < 20$	$20 \leq Z < 30$	$30 \leq Z < 40$	$Z \geq 40$
A	362	90	102	48	0.1
b	0.4	0.9	1.2	1.7	4.0

1.3 评估方法

$$\text{相对误差率: } \sigma(i) = \frac{H_i - G_i}{G_i} \times 100\%$$

$$\text{绝对误差率: } \text{rel}(i) = \frac{|H_i - G_i|}{G_i} \times 100\%$$

2 海拔高度和水平距离对降水估测的影响

2.1 不同高度反射率因子估测降水效果分析

因石家庄 5—9 月降水大多为对流云或者积层混合云降水过程,所以,本节选用经验公式 $Z=300I^{1.4}$ 进行降水估测分析。图 1 为不同高度反射率因子估测降水的平均相对误差率和绝对误差率。可以看出:(1)相对误差率全部为负值,说明估测降水结果整体偏小。相对误差率曲线呈抛物线型,3.5 km 估测效果最好,误差率仅为 -1.0% , $2 \sim 4.5$ km 误差率控制在 -20% 以内。(2)从平均绝对误差率来看, $1 \sim 2.5$ km 误差率在 $70\% \sim 85\%$,且高度越低,误差越小; $3 \sim 4.5$ km 误差率大于 85% , 5 km 及以上误差率略有降低。所有高度误差率全部在 60% 以上,说明将所有过程、所有站点统一用对流云降水估测公式处理将会带来一定的误差。尽管如此,也还是能够看出,若同时考虑石家庄 0°C 层亮带的高度(王丽荣等,2014),则估测降水高度应该

选在 4 km 以下,而且高度尽可能降低。

2.2 不同水平距离对降水估测的影响

由不同水平距离估测降水绝对误差率(图 2)可以看出, 50 km 以内估测误差比较稳定,各高度层估

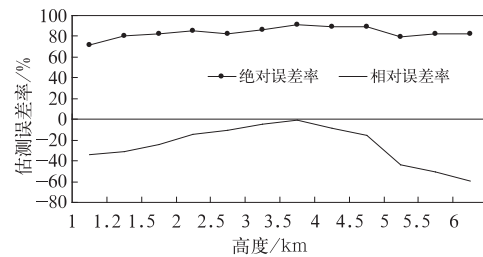


图 1 不同高度估测降水平均误差率分布曲线

Fig. 1 Distribution curve of average error rate of QPE at different heights

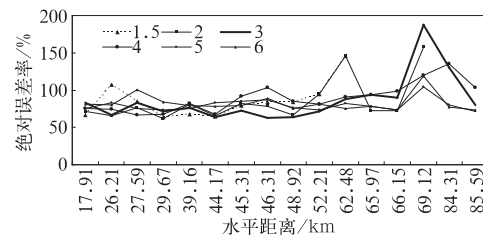


图 2 不同水平距离估测降水绝对误差率分布曲线

Fig. 2 Distribution curve of absolute error rate of QPE at different horizontal distance from the radar

测效果差别不大,2~3 km 高度估测效果最好。50 km 以外,估测误差波动范围较大,特别是 2~3 km,误差表现的更为明显;绝对误差率比较大的站点海拔高度较高,由 1~6 km 平均绝对误差表(表略)看到,误差平均值大于 90%的站点分别为井陘、赞皇和元氏,此 3 站是 50 km 以外海拔高度最高的 3 个站,海拔高度全部在 60 m 以上。由误差平均值还可以看出,距离雷达越远,平均误差越大。可见,估测降水反射率因子选取时,水平距离 50 km 以内 2~3 km 较好,50 km 以外 3~4 km 较好。

2.3 不同海拔高度对降水估测的影响

由不同海拔高度估测降水绝对误差率(图 3)看出,估测降水效果随海拔高度增加变化不大。按海拔高度 50 m 间隔分段计算平均误差率(表略)可知:(1)随着海拔高度增高,估测降水误差也略有增大。(2)以绝对误差率 80%以内为判断指标,估测效果较好的高度分别为:50 m 以内 2~2.5 km,50~100 m 为 1.5 km,100~150 m 为 1~2 km。可见,考虑海拔高度进行降水估测时,对于海拔高度低于 150 m 的站点,反射率因子高度选在 2.5 km 以下。(3)海拔高度高于 150 m 的站点,海拔高度越高,反射率因子高度选取尽量降低;对于井陘站,海拔高度 256 m,因为静锥区的原因,1.5 和 2 km 高度无数据或者为孤立点,相对来说,3~4 km 高度略好一些。

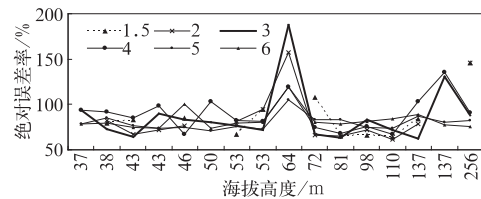


图 3 不同海拔高度估测降水绝对误差率分布曲线

Fig. 3 Distribution curve of absolute error rate of QPE at different altitude

2.4 同时考虑海拔高度和水平距离时,估测降水订正因子设计

由反射率因子垂直廓线分布、海拔高度和水平距离对估测降水效果的分析可知:利用不同高度反射率因子估测降水,水平距离和海拔高度不同,估测效果也不相同,而且,水平距离远近的影响较海拔高度造成的影响更为明显。因此,降水估测方案设计时先考虑水平距离的因素,同时兼顾海拔高度因素。将水平距离和海拔高度分别按每 50 km 和 50 m 进行分段,分析估测降水误差情况(表略),分别寻求对应距离和海拔高度估测降水时选取反射率因子的最佳高度,亦即最佳估测高度。

按水平距离和测站海拔高度分为 6 种情况,同时考虑 0℃层亮带的高度,得到估测降水方案设计表(表 2)。利用表 2 中最佳估测高度,分别计算 6 种

表 2 考虑海拔高度和水平距离的降水估测方案设计表

Table 2 Design scheme of QPE considering altitude and horizontal distance

水平距离	测站海拔高度/m	最佳反射率因子高度/km	实况降水反算的反射率因子值(Z_g)/dBz	雷达探测的反射率因子值(Z)/dBz	订正值(ΔZ)/dBz
50 km 以内	≤ 50	3.0	24.62	20.91	3.71
	50~100	2.5	24.00	18.36	5.64
	> 100	3.0	24.22	19.65	4.57
50~100 km	≤ 50	2.5	24.89	21.96	2.93
	50~100	2.5	25.26	22.40	2.86
	> 100	3.5	24.23	21.58	2.65

情况下所取高度反射率因子的平均值 Z , 然后与利用实况降水反算的反射率因子平均值 Z_g 比较, 从而得到不同情况下估测降水时的反射率因子的订正值 $\Delta Z = Z_g - Z$, 也即距离高度订正值。

3 估测降水最佳方案设计

通过前面的分析,有 4 种估测降水方案可以采

用:(1)无距离高度订正,用经验公式估测;(2)有距离高度订正,用经验公式估测;(3)无距离高度订正,用最优化法估测;(4)有距离高度订正,用最优化法估测。下面以 2009 年 8 月 25 日石家庄强降雨过程为例,对 4 种估测效果进行分析,并设计估测降水的最佳方案。此次过程为对流性降水,经验公式采用 $Z = 300I^{1.4}$;最优化法采用表 1 的结果。

3.1 不同方案估测效果分析

3.1.1 逐站估测降水效果比较

图 4 是石家庄逐时降水实况和各种方案估测降水的变化曲线,将所有站点、所有时间共 71 组数据绘制成一个序列,综合分析单站估测降水的效果。可以看出:(1)各种方案估测降水变化趋势与实况一致。(2)对于经验公式法:反射率因子距离高度订正前估测降水较实况降水全部偏小;订正后整体效果得到一定的改善,但除 $5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下降水略有高估外,大部分情况仍然是低估。(3)对于最优化法:距离高度订正前估测降水较实况大部分仍然偏小。订正后估测降水明显加大,此时,实况降水在 $2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下时,估测降水高估,但是绝对误差较小;实况降水在 $5 \sim 10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,估测降水高估明显,订正前更为接近实况;实况降水在 $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上时,估测降水绝大部分低估,订正后更接近于实况。

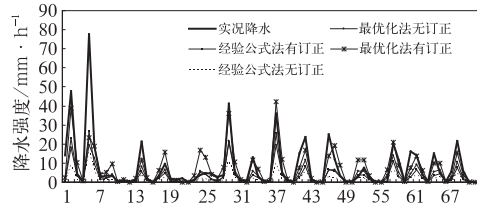


图 4 2009 年 8 月 25 日石家庄 16 站逐时实况降水和估测降水序列

Fig. 4 Sequence of hourly measured rainfall and QPE with 16 stations in Shijiazhuang on 25 August 2009

表 3 给出了不同情况估测降水绝对误差率。可以看到:(1)对于经验公式法,有距离高度订正估测降水平均绝对误差率降低了 23.5%,效果得到明显改善。在此个例中,除“距离大于 50 km,高度小于 50 m”订正以后效果略有降低外,其他几种情况订正以后估测降水效果都有很大的改善,平均绝对误

表 3 不同情况估测降水平均绝对误差率(单位: %)

Table 3 The mean absolute error rate (unit: %) in different situations

水平距离	海拔高度/m	经验公式无订正	经验公式有订正	最优化无订正	最优化有订正
50 km 以内	≤ 50	65.13	41.04	60.22	98.19
	50~100	75.66	34.04	55.89	107.96
	>100	72.27	40.24	62.74	81.62
50~100 km	≤ 50	87.89	96.99	121.15	190.66
	50~100	64.57	49.49	58.91	72.18
	>100	61.78	45.13	62.33	86.46
综合评定		71.91	48.41	68.07	106.61

差率由原来的大于 60% 降低至 40%~50%,特别是“距离小于 50 km,高度 50~100 m”的情况平均绝对误差率降低了 41.62%。(2)采用最优化法估测降水时,距离高度订正前,当水平距离小于 50 km 时,估测降水绝对误差率降低 5%~10%,效果得到改善。50 km 以外,海拔高度在 50~100 m 时,估测效果有所提高,但是当海拔高度小于 50 m 或者大于 100 m 时,估测效果降低,特别是海拔高度小于 50 m 时,绝对误差率增加了 33.26%。从表 3 最后一列看到,对距离高度订正后的反射率因子采用最优化法估测降水时绝对误差率明显加大。

3.1.2 区域降水量和过程降水量估测效果分析

区域降水量指分别将区域内各站点所有时次降水累加,然后分布在同一张平面图上(图 5)。可以看到:(1)各种方法估测降水区域降水量分布同实况降水一致,雨量西北小,东南大,而且存在两个雨量

中心。(2)经验公式法订正前、后估测降水较实况降水均明显偏小,但订正后明显增大,更接近于实况分布。对于最优化法,订正前,10 mm 以下降水估测量值一致,但是 10 mm 以上降水估测量值偏小;订正后,估测降水量级明显增大,特别是降水中心值与实况更为接近,但是,对实况 10 mm 以下的降水明显高估。

此次过程全区平均降水量为 34.96 mm,从逐站过程雨量表(表略)可以看出:(1)采用经验公式法时:距离高度订正前、后平均的估测降水量分别为 8.03 和 18.33 mm,估测降水较实况降水均偏小,订正后绝对误差率较订正前平均降低了 29.47%,效果略有改善。水平距离越近,订正效果越好,50 km 以内,订正前、后绝对误差率平均值分别为 74.18% 和 33.15%,订正后降低了 41.03%;50 km 以外,订正前、后绝对误差率平均值分别为 77.61%

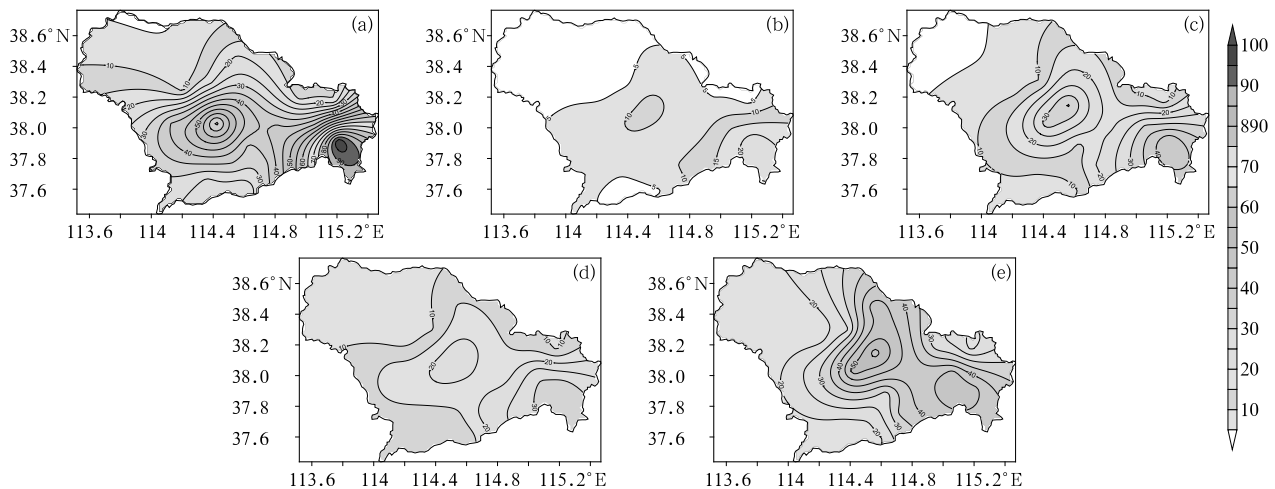


图5 2009年8月25日不同情形下实况和估测区域降水量分布图(单位:mm)

(a)实况,(b)经验公式法无距离高度订正,(c)经验公式法有距离高度订正,
(d)最优化法无距离高度订正,(e)最优化法有距离高度订正

Fig. 5 Regional distribution of (a) actual rainfall and QPE by (b) the empirical formula without distance and height correction and (c) with correction, (d) the optimization method without correction and (e) with correction in different situations on 25 August 2009, respectively (unit: mm)

和57.56%,订正后降低了20.05%。还可以看到,过程降水量估测效果受海拔高度变化影响不明显。(2)采用最优化方法时:距离高度订正前、后平均的估测降水量分别为17.23和33.01 mm,订正后采用最优化法估测降水较实况降水仅低估了1.95 mm,完全可以代表实况降水。从逐站来看,订正前全部低估;订正以后,估测降水量值明显加大,而且降水量低于20 mm时,出现明显的高估现象。绝对误差率大部分降低了10%以上,说明距离高度订正后再采用最优化法过程雨量估测效果明显提高。同逐时降水估测结果比较,过程雨量绝对误差率明显减小,这主要是由于估测逐时降水时该方法对较小量级降水高估,较大量级降水低估,计算过程雨量时两者得到了平滑。

3.2 估测降水最佳方案设计

综合3.1节讨论的各种估测方法的检验结果,可知:(1)不考虑距离高度订正时,最优化法较经验公式法单站估测降水明显加大,更接近于实况,区域降水估测效果也得到改善。(2)仅考虑距离高度订正时,利用经验公式估测,对单站降水,订正前估测值偏低,订正后效果得到一定的改善;对区域降水,订正后存在对10 mm以下降水高估,10 mm以上降水低估的现象。(3)在距离高度订正的基础上,利用最优化法进行估测时,对单站逐时降水,容易造成弱

降水高估,降水分段检验表明,5 mm·h⁻¹以下降水距离高度订正前估测效果较好,5 mm·h⁻¹以上则订正以后效果较好。对于区域降水,10 mm以下降水,订正前估测效果优于订正以后;10 mm以上的降水,订正后估测效果明显改善,但估测降水中心值仍然偏小。

也就是说,不同水平距离和不同海拔高度、采用不同方法估测降水存在一定的差别。根据前面的分析,对于过程雨量10 mm以下和降水强度小于5 mm·h⁻¹的降水,订正前估测效果优于订正以后,且采用最优化法优于经验公式法;而对于过程雨量10 mm以上和降水强度大于5 mm·h⁻¹的降水,距离高度订正后再采用最优化法估测效果最好。因此,结合降水等级和降水强度的关系(表略),我们设计估测降水的最佳方案如下:若反射率因子小于30 dBz,则不进行距离高度订正,仅采用最优化法估测降水;若反射率因子大于30 dBz,则首先对反射率因子进行距离高度订正,然后采用最优化法估测降水。

4 效果检验

受冷空气影响,2009年8月4日上午石家庄出现分布极不均匀的雷阵雨,市区及部分乡镇出现暴雨。这次降水属对流云降水过程,经验公式仍采用

$Z=300I^{1.4}$,与最佳降水估测方案分别估测降水,检验对比两种估测降水的效果。

4.1 逐站降水估测效果比较

图 6 是石家庄 16 个站点逐时降水实况和估测降水的变化曲线,共 62 组数据。可以看出:两种方案估测降水变化趋势与实况基本一致。但是,经验公式法估测降水较实况降水绝大部分偏小,最佳方案估测降水强度较经验公式法明显加大;对于 $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上的降水经验公式法估测误差更大,最佳方案估测效果明显优于经验公式法。

4.2 区域降水量和过程降水量估测效果比较

图 7 是两种估测方法的区域降水量分布图。从分布趋势来看:估测降水分布同实况降水一致,最强降水中心位置与实况对应也比较好。但是,从数值来看,经验公式法明显偏小,代表性很差;而最佳方案估测降水强度明显增加很多,降水中心的位置和数值接近于实况。两种方法西北部的降水均未估测出来,这和西北部降水回波较弱有关,同时,和此处所选站点更偏向于中心位置有关。

由两种方法逐站估测降水过程雨量表(表略)同样可以看出:经验公式法估测降水明显偏小,实况 6 站 35 mm 以上的降水,经验公式法最大仅估测为 15.82 mm,远不及实况降水。而最佳方案估测降水则更接近于实况,所有站降水量平均值为 20.6 mm,仅比实况少 4.4 mm,并且 16 个站中,有 8 站估测

误差在 5 mm 以下。所有站平均绝对误差率仅为 17.6%,较经验公式法降低了 58.1%。从单站绝对误差率来看,除 4 站实况降水小于 10 mm 经验公式法略优于最佳方案外,其余 12 站最佳方案全部优于经验公式法。

4.3 降水量分段检验

由单站估测效果分析可知,不同估测方法对不同量级的降水估测效果不一样,因此我们将降水强度分级进行检验,分析两种方法对不同量级降水的估测效果。由表 4 看出:当降水强度小于 $0.3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,最佳方案估测绝对误差率远大于经验公式法;当降水强度在 $0.3 \leq r_1 < 2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 及 $5 \leq r_1 < 10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,两种方法估测效果相当,经验公式法略优于最佳方案;当降水强度在 $2 \leq r_1 < 5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $10 \leq r_1 < 15 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以及 $r_1 \geq 15 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 几个级别时,最佳方案估测效果明显优于经验公式法。可见,最佳方案估测效果优于经验公式法。

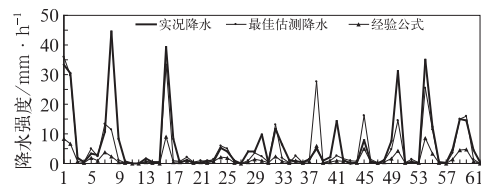


图 6 2009 年 8 月 4 日石家庄 16 站逐时实况降水和估测降水序列

Fig. 6 Sequence of hourly measured rainfall and QPE with 16 stations in Shijiazhuang on 4 August 2009

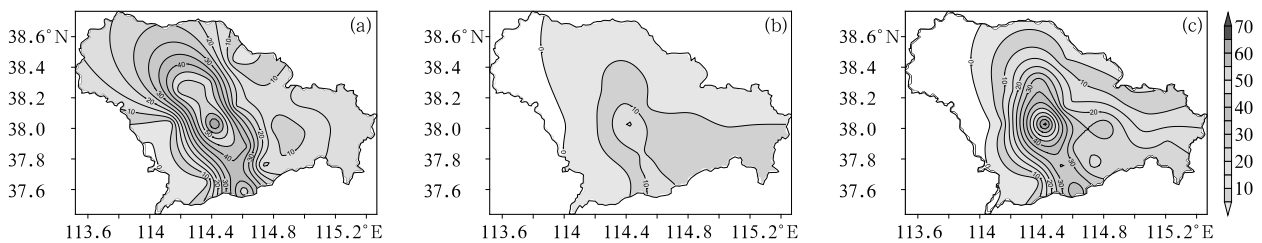


图 7 2009 年 8 月 4 日石家庄实况和估测区域降水量分布图(单位:mm)

(a) 实况, (b) 经验公式, (c) 最佳方案

Fig. 7 Distribution of (a) actual regional rainfall, QPE by (b) the empirical formula and (c) the optimum scheme in Shijiazhuang on 4 August 2009 (unit: mm)

表 4 不同量级降水估测效果对比表

Table 4 Comparison of QPE effects in different measurement orders

降水等级 / $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$	$0 \leq r_1 < 0.3$		$0.3 \leq r_1 < 2$		$2 \leq r_1 < 5$		$5 \leq r_1 < 10$		$10 \leq r_1 < 15$		$r_1 \geq 15$	
	经验	最佳	经验	最佳	经验	最佳	经验	最佳	经验	最佳	经验	最佳
绝对误差率/%	82.5	247.1	54.5	60.3	70.4	42.4	69.94	71.2	75.27	27.08	79.55	25.67

5 结论和讨论

本文以石家庄为例,研究了不同海拔高度、距雷达站不同水平距离对雷达定量估测降水效果的影响,得出考虑了海拔高度和水平距离的估测降水最佳方案。

(1) 通过对海拔高度和水平距离估测降水效果的分析,找到了不同测站估测降水时所采用的反射率因子最佳估测高度以及距离高度订正值 ΔZ 。

(2) 在对比分析四种降水估测方案优缺点的基础上,设计了利用雷达估测降水的最佳方案:若反射率因子小于 30 dBz,则不进行距离高度订正,仅采用最优化法估测降水;若反射率因子大于 30 dBz,则首先对反射率因子进行距离高度订正,然后采用最优化法估测降水。

(3) 个例检验结果表明,对于单站降水,最佳方案对 $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上降水强度效果优于经验公式法,而对于 $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下降水强度则高估比较明显;对于过程降水量和区域降水量,最佳方案估测效果较经验公式有了极大的提高。

(4) 本研究应用的地面雨量资料每 60 min 一次,而雷达资料每 6 min 一次,应用雷达产品进行降水估测时,雷达探测时间、空间与地面实际测量雨量不一致会造成估测误差。今后,将在雨量计和雷达资料对应方面继续开展工作。

参考文献

陈小华,段旭,2013. 基于卫星和雷达资料估测滇中地区降水量方法研究[J]. 气象,39(2):203-209.

邓雪娇,黄浩辉,吴兑,2000. 变分法在校准雷达定量估测降水中的应用[J]. 应用气象学报,11(2):255-256.

杜秉玉,高志球,1998. 雷达反射率因子垂直廓线研究和多种遥感资料综合估计降水[J]. 南京气象学院学报,21(4):729-736.

李建成,李柏,杨洪平,等,2015. 雷达雨量计联合估测区域降水量方法检验与评估[J]. 气象,41(2):200-211.

李金辉,罗俊颖,2006. 稳定性层状云降雨量的估算研究[J]. 气象,32(4):34-39.

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.

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):213-220.

史锐,程明虎,崔哲虎,等,2005. 多普勒雷达实时反射率因子垂直廓线观测研究[J]. 气象,31(9):39-43.

王丽荣,刘黎平,王立荣,2014. 回波强度垂直廓线与雷达定量估测降水的关系[J]. 干旱气象,32(3):399-406.

王丽荣,裴宇杰,王立荣,等,2008. 概率配对法在雷达定量估测降水中的应用[J]. 气象与环境科学,31(增刊):195-199.

伍志方,戴铁丕,张培昌,1991. 天气雷达定量测量区域降水量的校准技术及误差分析[J]. 气象,17(10):9-14.

尹忠海,张沛源,2005. 利用卡尔曼滤波校准方法估算区域降水量[J]. 应用气象学报,16(2):213-219.

张亚萍,张勇,廖峻,等,2013. 天气雷达定量降水估测不同校准方法的比较与应用[J]. 气象,39(7):923-929.

张志强,刘黎平,谢明元,等,2007. CINRAD 三维拼图产品显示系统[J]. 气象,33(9):19-24.

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):192-197.

仲凌志,刘黎平,顾松山,2007. 层状云和对流云的雷达识别及在估测雨量中的应用[J]. 高原气象,26(3):593-602.

Bourrel L, Sauvageot H, Vidal J J, et al, 1994. Radar measurement of precipitation in cold mountainous areas: the Garonne basin [J]. Hydrol Sci J, 39(4):369-389.

Joss J, Waldvogel A, Collier C G, 1990. Precipitation measurement and hydrology[M]// Atlas D. Radar in Meteorology. Boston: AMS:577-606.

Wilson J W, Brandes E A, 1979. Radar measurement of rainfall—A summary[J]. Bull Amer Meteor Soc, 60(9):1048-1058.