

刘维成,王 勇,周晓军. SWAN 系统 QPE 产品的误差统计及订正方法研究[J]. 干旱气象,2014,32(6):1025-1030, [LIU Weicheng, WANG Yong, ZHOU Xiaojun. Error Statistics and Correction Method of QPE Product in SWAN System[J]. Journal of Arid Meteorology, 2014, 32(6):1025-1030], doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2014)-06-1025

SWAN 系统 QPE 产品的误差统计及订正方法研究

刘维成^{1,2},王 勇¹,周晓军³

(1. 兰州中心气象台,甘肃 兰州 730020;2. 兰州大学大气科学学院,
甘肃 兰州 730000;3. 甘肃省兰州市气象局,甘肃 兰州 730020)

摘 要:利用 SWAN 系统 QPE 产品资料和自动站降水量,对甘肃省 2010~2012 年汛期 QPE 产品的应用效果进行检验。结果表明:QPE 产品在 0.1~0.9 mm 降水量级上存在较小的高估,而在其它降水量级上均表现为低估,且随着降水量级的增加低估的越为明显;对于 5.0 mm 以下降水,QPE 产品估测误差较小,平均误差 < 2.0 mm,但对于 > 5.0 mm 降水会出现估测误差跃增现象,且随着降水强度的增加误差增大,估测产品的效果明显减弱;降水估测值命中率 *POD1* 在降水量 < 2.5 mm 区间效果较好,但随着降水量的增加其命中率迅速减小,而降水估测绝对误差命中率 *POD2* 对于 < 10.0 mm 降水的响应较好,同样地随着降水量的增加其命中率快速减小;海拔高度、经度和纬度是影响甘肃地区 QPE 产品误差的主要因子,利用影响降水分布较大的 3 个因子分别建立一元、多元加权回归方程,在此基础上对 QPE 产品进行订正,通过 2012 年的应用检验表明该方法对 QPE 产品的订正效果明显。

关键词:QPE;误差统计;订正方法

文章编号:1006-7639(2014)-06-1025-06 doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2014)-06-1025

中图分类号:P457.6

文献标识码:A

引 言

灾害性天气临近预报业务系统(SWAN, Severe Weather Auto Nowcasting)由广东、湖北、安徽等十余个省市气象部门和国家气象中心联合研发,以 MI-CAPS3.1 平台为基础搭建,优选全国各地开发的算法和研究成果,检验、集成并加以优化,形成统一的业务系统^[1]。该系统基于雷达、卫星、自动站、危险天气报等数据资料,具有对灾害性天气实况自动监测报警和分析、风暴追踪、雷达三维拼图、定量降水估测、定量降水预报、反射率因子预报、回波移动矢量、降水临近预报和预报实时检验、预警信息制作等功能。目前已在全国大部分省级气象部门投入业务应用,结果表明该系统对灾害性天气具有一定的监测预警能力^[2-6]。

定量降水估测(QPE, Quantitative Precipitation Estimation)是现代天气业务体系的重要组成部分,一直以来是天气预报业务的难点和重点,也是定量

降水预报、强降水短临预警的基础,对山洪地质灾害和中小河流洪水精细化预报起重要支撑作用^[7]。随着新一代天气雷达观测网络的逐步建成和业务运行,应用天气雷达联合雨量计开展定量降水估测已成为一种较为成熟可靠的实现手段^[8-9],目前已形成卡尔曼滤波校准方法、最优化方法、概率配对方法^[10]、迭代法^[11]、变分校正法^[12]和加权回归法^[13]等多种不同计算方法。

SWAN 系统的 QPE 产品采用动态分型 $Z-I$ 关系法进行雷达降水估计,其主要流程是:首先将 10~75 dBZ 之间的回波反射率以 5 dBZ 为间隔等分为 13 等级,再计算上一时刻每个等级 60×38 组($m = 1, 2, \dots, 60; n = 1, 2, \dots, 38$)的雷达 QPE 和判别函数 $CTF2$,最后比较各组 $CTF2$ 的大小,将 $CTF2$ 最小值对应的 $Z = aI^b$ 作为最优 $Z-I$ 关系,其方法参见文献^[14]。其中计算 $CTF2$ 的公式如下:

$$CTF2 = \min \left\{ \sum_i (P_i - G_i)^2 + (P_i - G_i) \right\} \quad (1)$$

收稿日期:2014-02-28;改回日期:2014-05-08

基金项目:中国气象局气象关键技术集成与应用重点项目(CMAGJ2013Z09)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206029)及中国气象局预报员专项(CMAYBY2012-063)共同资助

作者简介:刘维成(1984-),男,汉族,甘肃镇原人,工程师,硕士,主要从事雷达资料应用及数值预报工作。E-mail:gsluwc@163.com

其中, P_i 为 $Z-I$ 关系反演的降水, G_i 为实测降水, i 为自动雨量站序号。自 2010 年起 SWAN 系统在甘肃地区投入业务使用, 应用结果表明其 QPE 产品对于甘肃地区强降水的监测与预报预警有一定的指导作用, 但对不同地理特征和气候背景条件下降水天气的适应性仍有欠缺。本文针对 QPE 产品在甘肃地区的应用效果进行检验评估, 并结合本地的地理特征和气候背景对该产品优化改进, 以期改善其估测误差分布不均的问题。

1 资料

所用资料为 SWAN 系统 QPE 产品资料和自动站降水量数据。其中 SWAN 系统选用兰州、庆阳、天水、张掖和嘉峪关 5 部新一代天气雷达数据生成甘肃省雷达拼图, 生成的 QPE 产品空间分辨率为 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$, 时间分辨率为 1 h; 降水量数据为雷达扫描覆盖地区自动站雨量计的观测资料(包括常规气象站和加密区域气象站), 共 1 504 个站点, 时间分辨率为 1 h。雷达站点及覆盖范围和雨量计站点分布见图 1。

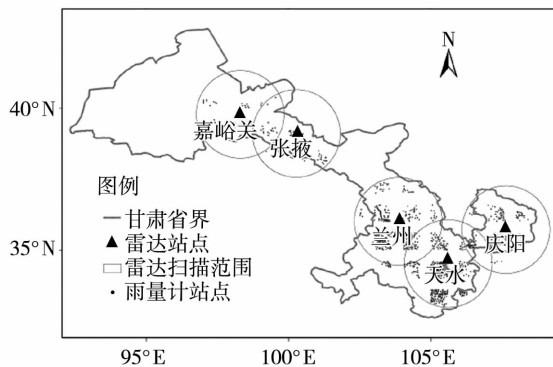


图 1 雷达站及覆盖范围和雨量计分布

Fig. 1 The spatial distribution of locations and scanning range of radar and rain gauge

资料的时段为 2010~2012 年每年 6 月 1 日至 9 月 30 日, 6~9 月是甘肃省降水量最多的时段, 此时蒙古高压已退至西伯利亚北部, 亚洲大陆为热低压控制, 甘肃位于其东北部, 盛行偏南及偏东风, 高空北支西风急流向北撤退过程中, 其势力较弱, 副热带高压已向北推进, 高压西侧的偏南暖湿气流与西北侵入的冷空气相遇, 导致了降水量显著增多^[15]。资料筛选时, 考虑到雷达观测和雨量计观测的误差, 只选取雷达观测和雨量计观测均有数据的站点, 共形成 43 740 对数据。在检验 QPE 产品的准确性时, 将格点形式的 QPE 产品采用反距离加权法^[16]插值到

观测站点上, 以便进行对比。

2 QPE 应用检验

为了检验 QPE 产品在不同量级降水中的表现, 本文按不同降水量级分别进行评估, 其中降水量级划分为 $0.1 \sim 0.9$ mm、 $1.0 \sim 2.4$ mm、 $2.5 \sim 4.9$ mm、 $5.0 \sim 9.9$ mm、 $10.0 \sim 14.9$ mm、 $15.0 \sim 19.9$ mm 和 ≥ 20.0 mm 等 7 个等级(按雨量计站点降水实况划分)。误差检验采用了平均误差(E)、平均相对误差(W)、平均偏差(B)、平均相对均方根误差($RMSE$)等 4 种统计评估指标和探测概率评分(POD)^[17], 其中 E 、 W 和 B 表示了估测值相对于雨量计观测值的偏离程度, $RMSE$ 表示估测值与雨量计观测值的接近程度, POD 表示对于某一给定阈值, 估测值与雨量计观测值的吻合程度。 POD 采用 2 种定义方法, 分别为降水估测值在设定范围内的命中率(定义为 $POD1$)和降水估测绝对误差在设定范围内的命中率(定义为 $POD2$), 考虑到业务实际需求, $POD1$ 有效误差范围同前文按降水实况划分的区间, 而 $POD2$ 有效误差范围分别定义为降水量 < 1.0 mm 时的有效误差为 < 1.0 mm、降水量为 $1.0 \sim 2.5$ mm 时的有效误差为 < 1.25 mm、降水量为 $2.6 \sim 19.9$ mm 时的有效误差为 < 2.5 mm、降水量 ≥ 20.0 mm 时的有效误差为 < 5.0 mm。各参数定义如下:

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - G_i) \quad (2)$$

$$W = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - G_i| / \bar{G} \quad (3)$$

$$B = \sum_{i=1}^n G_i / \sum_{i=1}^n P_i \quad (4)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - G_i)^2 \right]^{1/2} / \bar{G} \quad (5)$$

$$POD = \frac{x}{x + y} \quad (6)$$

其中, n 为总样本数, i 为 QPE 雨量计的序列, G_i 、 P_i 和 \bar{G} 分别为雨量计实测雨量、QPE 估测雨量和雨量计实测平均雨量, x 为雨量计实测雨量和 QPE 估测雨量同时达到某一阈值的站数, y 为雨量计实测雨量达到阈值而 QPE 估测雨量未达到阈值的站数。

表 1 分别统计了 QPE 产品在不同量级降水中的表现。从 E 、 B 统计来看, QPE 产品除在 $0.1 \sim 0.9$ mm 降水量级上估测值存在较小的高估外, 其它量级均表现为低估, 且随着降水量级的增加其低估的越明显, 降水总体表现为较小的低估, 平均偏差为 1.9 mm; 从 E 、 W 、 $RMSE$ 统计来看, 5.0 mm 以下降水

QPE 产品效果较好,平均误差 < 2.0 mm,平均相对误差 < 0.4 mm,而 5.0 mm 降水区间前后出现了估测误差的跃增,平均相对误差从 0.38 mm 跃增至 0.66 mm,且随着降水强度的增加估测产品的误差递增较明显,平均误差和平均相对误差最大分别达到 -16.7 mm 和 0.84 mm。

表 1 不同降水量级的 QPE 产品检验统计(单位:mm)
Tab.1 The tests of QPE products with different precipitation grades (Unit:mm)

降水量级	<i>E</i>	<i>W</i>	<i>B</i>	<i>RMSE</i>	样本数
0.1~0.9	0.2	0.24	0.7	0.38	20 260
1.0~2.4	-0.4	0.37	1.5	0.48	11 236
2.5~4.9	-1.2	0.38	1.8	0.52	6 803
5.0~9.9	-3.5	0.66	2.4	0.57	3 534
10.0~14.9	-7.6	0.71	3.1	0.63	1 064
15.0~19.9	-10.9	0.82	3.4	0.71	450
≥20.0	-16.7	0.84	3.4	0.83	393
总体	-0.6	0.45	1.9	0.51	43 740

另外,2 种方法统计得到的 *POD* 均在降水量级较小的区域表现良好,但二者的响应区间差别较为明显(图 2)。*POD1* 在降水量 < 2.5 mm 区间的效果较好,平均 > 50%,之后随着降水量的增加其命中率迅速减小,最小值仅为 1.60% (15.0 ~ 19.9 mm 降水区间),而在降水量 ≥ 20.0 mm 的区间其命中率有一个小幅的回升,为 8.03%,主要原因可能是设定的降水量统计范围较为苛刻,且降水估测整体低估明显,导致随着降水量的增加其命中率降低,而 ≥ 20.0 mm 降水区间较为宽松使得其命中率有所升高。另外发现,*POD2* 对于降水 < 10.0 mm 的响应较好,命中率均在 41% 以上,但同样地随着降水量的增加其命中率会出现骤降,≥ 10.0 mm 降水的命中率均低于 22%。

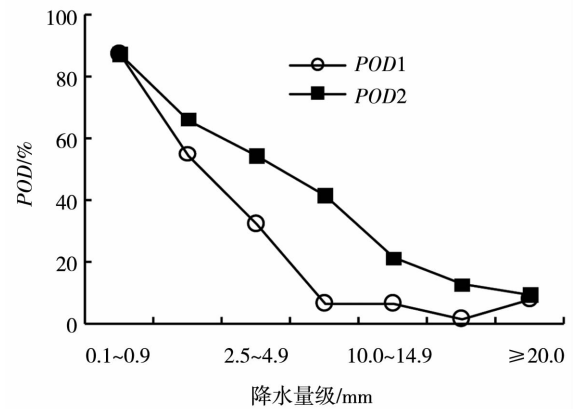


图 2 不同降水量级的 QPE 产品 *POD* 统计
Fig.2 The *POD* statistics of QPE for different precipitation grades

3 QPE 订正方法

降水的空间分布取决于海陆分布、地理位置、地形因素以及大气环流等条件,单纯考虑地理位置及地形条件(经度、纬度、海拔高度等)影响下的降水即地形性降水的分布,其影响是相对固定的^[18]。考虑到雷达回波随距离的衰减^[19],加入扫描范围内各点距雷达站的距离作为另一因子,并将这些影响因子与估测降水和实况降水做相关性分析,为雷达估测降水回归订正提供依据。

表 2 中分别列出 4 个降水影响因子(包括 2 个影响因子的不同表达形式)与估测降水和实况降水的相关性统计。其中估测降水和实况降水的关系可采用 4 种表达形式,关系如下:

$$F_{dB}(G_i/P_i) = 10 \lg(G_i/P_i)$$

$$F_{dB}(P_i/G_i) = 10 \lg(P_i/G_i) \quad (7)$$

上述降水站点海拔、经度和纬度可从雨量计位置信息中获取,距雷达的距离可通过雨量站、雷达站位置信息计算得到。

由表 2 统计结果发现,海拔、经度、纬度和距雷达站距离 4 种影响因子对估测降水和实况降水均有

表 2 降水影响因子相关性统计

Tab.2 The correlation coefficient between influence factors and observed and estimated precipitation

	海拔(<i>H</i>)	lg <i>H</i>	经度(<i>Lon</i>)	纬度(<i>Lat</i>)	距雷达距离(<i>D</i>)	lg <i>D</i>
G_i/P_i	0.23 **	0.24 **	0.16 **	-0.32 **	0.26 **	0.18 **
P_i/G_i	-0.01	-0.03	-0.17 **	0.22 **	0.06	0.05
$F_{dB}(G_i/P_i)$	0.42 **	0.44 **	0.31 **	-0.52 **	0.21 **	0.16 **
$F_{dB}(P_i/G_i)$	-0.14 *	-0.16 **	-0.22 **	0.33 **	-0.06	0.01

注: ** 表示通过 0.01 信度的显著性检验; * 表示通过 0.05 信度的显著性检验

响应。其中 G_i/P_i 、 $F_{dB}(G_i/P_i)$ 与海拔、经度和距雷达距离呈正相关,与纬度呈负相关,且相关系数都较大,尤其是 $F_{dB}(G_i/P_i)$ 与纬度的相关系数达到了 -0.52 ; P_i/G_i 、 $F_{dB}(P_i/G_i)$ 与海拔和经度呈负相关,与纬度呈正相关,且相关系数较 G_i/P_i 、 $F_{dB}(G_i/P_i)$ 小,最小值是与距雷达距离的相关系数,均为 0.06 ,但其相关性质有差异,这可能与雷达回波数据在后期处理中做距离衰减订正有关^[19]。

从相关性整体较大 $F_{dB}(G_i/P_i)$ 的对应数据中,找出 3 个影响较大的因子(Lon 、 Lat 、 lgH)分别建立一元和多元加权回归方程(平均值 \pm 标准误差),其中一元加权回归方程仅选取了 Lat 和 lgH 因子,主要是由于与这 2 个因子的相关系数较大,而 0°C 层高度是影响降水分布的一个主要因子,其随纬度和高度的变化而变化是选取这 2 个因子的另一重要原因^[20]。

建立的一元加权回归方程分别为:

$$f_H = 10 \lg(G_i/P_i) = (-49.0 \pm 6.0) + (16.4 \pm 1.8) \lg H \quad (8)$$

$$f_{Lat} = 10 \lg(G_i/P_i) = (45.2 \pm 3.7) - (1.1 \pm 0.1) Lat \quad (9)$$

其中,(8)式统计的 R^2 为 0.25 ;(9)式的 R^2 为 0.28 。

多元加权回归方程为:

$$f_n = 10 \lg(G_i/P_i) = (203.3 \pm 27.1) - (1.3 \pm 0.2) Lon - (2.4 \pm 0.2) Lat + (6.6 \pm 1.8) \lg H \quad (10)$$

其中,(10)式统计的 R^2 为 0.43 。

的 QPE 值 P_i 后,利用公式(8)、(9)、(10)即可得到任意格点订正后的降水量,其表达式:

SWAN 系统实际业务应用中,在获得任意格点

$$G_{iH} = P_i \cdot 10^{[(-49.0 \pm 6.0) + (16.4 \pm 1.8) \lg H] / 10} \quad (11)$$

$$G_{iLat} = P_i \cdot 10^{[(45.2 \pm 3.7) - (1.1 \pm 0.1) Lat] / 10} \quad (12)$$

$$G_{in} = P_i \cdot 10^{[(203.3 \pm 27.1) - (1.3 \pm 0.2) Lon - (2.4 \pm 0.2) Lat + (6.6 \pm 1.8) \lg H] / 10} \quad (13)$$

其中,格点的经纬度可由 QPE 产品计算得到,海拔高度数据来源于 $1:250\,000$ 数字高程模型数据(Digital Elevation Model, DEM)。对于公式(11)~(13)中的以“平均值 \pm 标准误差”形式表述的计算系数,计算第 1 个时次时将平均值作为计算系数,之后的每次计算先以平均值、平均值 + 标准误差、平均值 - 标准误差 3 种形式搭配作为计算系数来计算上一时次各系数所获得的 QPE 订正值,然后再与雨量计的观测值对比,找出 QPE 订正降水量误差最小的 1 组系数作为本时次的计算系数。考虑到可能出现由于不确定的

P_i 虚大值导致 G_i 值过大的情况,对 G_i 做最大值处理,已有研究表明本地出现 1 h 降水 $> 50.0\text{ mm}$ 的几率较小^[17],因此设定 G_i 最大值不超过 50.0 ,定为 49.99 (取 2 位小数以区别于保留 1 位小数的真实值)。

4 订正效果检验

选取了 2012 年 6~9 月发生的 5 次降水过程,共 2 268 组降水检验样本(表 3),对 QPE 产品 3 种不同方法的订正效果进行 E 、 W 、 B 、 $RMSE$ 、 POD 指标检验(表 4 和图 3)。

表 3 订正效果检验样本

Tab. 3 The statistics of testing samples

日期	降水等级/mm							总计
	0.1~0.9	1.0~2.4	2.5~4.9	5.0~9.9	10.0~14.9	15.0~19.9	≥ 20.0	
06-28	141	242	107	5	2	4	3	504
07-08	180	185	114	94	12	5	3	593
07-20	201	114	75	30	17	3	1	441
07-30	61	89	105	91	48	27	21	442
08-13	87	62	52	34	19	17	18	289
总计	670	692	453	254	98	56	46	2 268

表 4 不同方法的 QPE 产品校准效果检验统计
Tab.4 The statistics of rectified-QPE product verification with different calibration methods

订正方法	降水量级/mm	<i>E</i>	<i>W</i>	<i>B</i>	<i>RMSE</i>
f_H	0.1~0.9	-0.1	0.22	0.8	0.43
	1.0~2.4	-0.6	0.18	1.3	0.41
	2.5~4.9	-1.5	0.33	1.8	0.55
	5.0~9.9	-1.2	0.52	1.7	0.50
	10.0~14.9	-3.0	0.61	2.8	0.61
	15.0~19.9	-4.9	0.68	3.5	0.64
	≥20.0	-6.9	0.80	3.2	0.75
总体		-1.4	0.50	1.5	0.47
f_{Lat}	0.1~0.9	0.2	0.20	0.7	0.35
	1.0~2.4	0.1	0.25	1.1	0.32
	2.5~4.9	0.4	0.18	0.8	0.41
	5.0~9.9	-1.1	0.35	1.2	0.51
	10.0~14.9	-1.6	0.52	1.6	0.59
	15.0~19.9	-2.6	0.56	3.1	0.70
	≥20.0	-5.2	0.72	2.8	0.78
总体		-0.6	0.38	1.2	0.42
f_n	0.1~0.9	0.1	0.18	0.9	0.26
	1.0~2.4	0.3	0.32	0.8	0.32
	2.5~4.9	-0.8	0.35	1.1	0.42
	5.0~9.9	-3.2	0.48	1.3	0.49
	10.0~14.9	-7.0	0.68	2.1	0.56
	15.0~19.9	-6.2	0.65	2.8	0.75
	≥20.0	-6.5	0.81	3.1	0.68
总体		-1.2	0.41	1.1	0.35

从表 4 中可以看出, QPE 产品经过 3 种方法订正后其降水估测能力均有不同幅度的提高。从总体的 *E*、*B* 来看, 订正后的 QPE 产品也存在低估, 但低估幅度较之前有所下降, f_{Lat} 最小平均误差 *E* 为 -0.6, f_n 平均偏差 *B* 为 1.1, 这 2 项表现出的降水估测能力与实况降水量已极为接近; 对于平均相对误差 *W* 和平均相对均方根误差 *RMSE*, 除 *W* 最大为 $f_H = 0.50$ 大于订正之前外, 其余均比订正前有不同幅度的减小, 且亦为 f_{Lat} 和 f_n 表现最优。从不同降水量级的订正结果来看, QPE 产品对于 < 5.0 mm 的降水估计其可靠性很高; 对于 < 2.5 mm 降水除 f_H 方法外其余 2 种方法的订正结果均存在高估, 但高估的幅度不大, 和实况降水几乎吻合; 而其它降水量级, f_{Lat} 方法对于 2.5~4.9 mm 降水也存在高估, 除此之

外 QPE 订正产品对于其它量级降水全部低估, 但低估幅度较未订正前下降明显。综合考虑可见, f_{Lat} 订正方法最优, f_n 次之, 而 f_H 订正能力最弱。

图 3 中的 *POD* 统计可以看出, 订正后 *POD1* 较订正前有很大程度的提高, 3 种方法 f_H 、 f_{Lat} 、 f_n 降水估测值在设定范围内的命中率分别为 51.86%、63.74% 和 59.22%, 除 f_H 外均比订正前的 52.47% 有所提高, 尤其是对 < 5.0 mm 降水的估测能力超过 20%, 但对于 ≥ 10.0 mm 降水的估测能力 3 种订正方法命中率大都 < 10%, 尤其是 f_H 对于 15.0~19.9 mm 降水的估测命中率为 0; 而对于 *POD2*, 3 种订正方法的表现令人满意, 分别为 70.03%、76.42%、70.56%, 比订正前的 63.86% 高出不少, 特别是对 < 10.0 mm 降水的估测能力其命中率 > 40%, 而对 ≥ 10.0 mm 降水的估测能力命中率下降迅速, 大都 < 20%, 且 3 种方法中 f_{Lat} 的表现也为最优。综合考虑, f_{Lat} 方法也为最优, f_n 次之, f_H 订正能力最小。其原因可能是甘肃地区降水分布与纬度的关系较为密切所致。

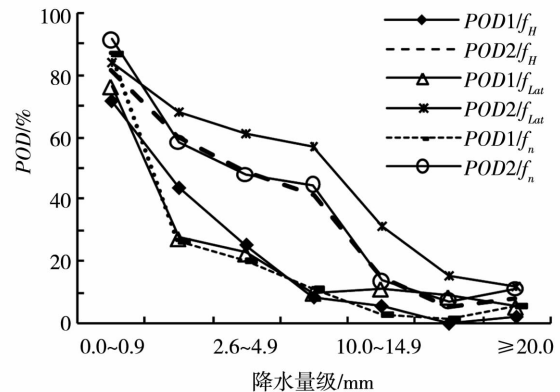


图 3 不同降水量级的 QPE 订正产品的 *POD* 统计

Fig.3 The statistics of rectified-QPE *POD* with different precipitation grades

5 结 论

(1) 甘肃地区的 QPE 产品误差较大。其中对于 1.0 mm 及以上的降水, QPE 产品存在明显的低估, 且随着降水量级的增加其低估的越为明显; 对于 5.0 mm 以下降水, QPE 产品估测误差较小, 但对于 > 5.0 mm 降水, 其估测误差逐渐加大, 且随着降水强度的增加估测产品的效果递减得比较明显。

(2) 降水估测值及降水估测绝对误差的命中率均在降水量较小区间表现良好, 但二者的响应区间差别较为明显。

(3) 海拔高度、经度和纬度是影响甘肃地区降

水分布的主要因子。

(4) 基于 3 个影响降水分布较大的因子, 分别建立了一元加权回归方程和多元加权回归方程, 在此基础上对 QPE 产品进行实时订正, 应用检验表明这些方法对 QPE 产品的订正效果明显。

参考文献:

- [1] 蔡辉, 高嵩, 沃伟峰, 等. 基于 MICAPS3 框架的 SWAN 客户端平台设计与开发 [A]. 大尺度估测产品的效果递减的. 第 27 届中国气象学会年会雷达技术开发与应用分会场论文集 [C]. 北京, 2010.
- [2] 胡胜, 罗兵, 黄晓梅, 等. 临近预报系统 (SWIFT) 中风暴产品的设计及应用 [J]. 气象, 2010, 36(1): 54-58.
- [3] 苏军锋, 张锋, 魏邦宪, 等. SWAN 在陇南短历时强降水监测预警预报中的应用 [J]. 干旱气象, 2012, 30(2): 287-292.
- [4] 胡胜, 孙广凤, 郑永光, 等. 临近预报系统 (SWAN) 产品特征及在 2010 年 5 月 7 日广州强对流过程中的应用 [J]. 广东气象, 2011, 33(3): 11-15.
- [5] 牛淑贞, 张宇星, 吕林宜. 一次冷涡横槽型强对流天气过程分析 [J]. 气象与环境科学, 2013, 36(2): 1-9.
- [6] 傅朝, 闫晗, 刘维成, 等. SWAN 雷达产品在甘肃河东地区冰雹短临预报中的应用 [J]. 干旱气象, 2013, 31(1): 199-205.
- [7] 赵琳娜, 包红军, 田付友, 等. 水文气象研究进展 [J]. 气象, 2012, 38(2): 147-154.
- [8] 东高红, 刘黎平. 雷达与雨量计联合估测降水的相关性分析 [J]. 应用气象学报, 2012, 23(1): 30-39.
- [9] Salek M, Novak P, Seo D J. Operational application of combined radar and raingaugesprecipitation estimation at the CHMI [J]. Proceedings of ERAD, 2004: 16-20.
- [10] 郑媛媛, 谢亦峰, 吴林林, 等. 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, 2004, 20(2): 192-197.
- [11] 李德俊, 尤卫红, 李跃清. 迭代法在低纬高原地区多普勒天气雷达测量降水中的应用 [J]. 云南大学学报 (自然科学版), 2008, 30(1): 61-67.
- [12] 马慧, 万齐林, 陈子通, 等. 基于 Z-I 关系和变分校正法改进雷达估测降水 [J]. 热带气象学报, 2008, 24(5): 546-549.
- [13] Efrat Morin, Marco Gabella. Radar-based quantitative precipitation estimation over Mediterranean and dry climate regimes [J]. J Geophys Res, 2007, 112(D20108).
- [14] 汪瑛, 冯业荣, 蔡锦辉, 等. 雷达定量降水动态分级 Z-I 关系估算方法 [J]. 热带气象学报, 2011, 27(4): 601-608.
- [15] 李栋梁, 刘德祥. 甘肃气候 [M]. 北京: 气象出版社, 2000. 68-75.
- [16] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法 [M]. 北京: 气象出版社, 2010. 3-18.
- [17] 寿绍文. 中尺度气象学 [M]. 北京: 气象出版社, 2011. 300-311.
- [18] 舒守娟, 王元, 熊安元. 中国区域地理、地形因子对降水分布影响的估算和分析 [J]. 地球物理学报, 2007, 50(6): 1703-1712.
- [19] 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 雷达气象学 [M]. 北京: 气象出版社, 2011. 28-211.
- [20] Harris, Gettys N, Kenneth P. Comparison of Freezing-Level Altitudes from the NCEP Reanalysis with TRMM Precipitation Radar Brightband Data [J]. J Climate, 2000, 13: 4137-4148.

Error Statistics and Correction Method of QPE Product in SWAN System

LIU Weicheng^{1,2}, WANG Yong¹, ZHOU Xiaojun³

(1. Lanzhou Central Meteorological Observatory, Lanzhou 730020, China;
2. College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;
3. Lanzhou Meteorological Bureau of Gansu Province, Lanzhou 730020, China)

Abstract: Based on QPE product from SWAN system and precipitation data from automatic stations in Gansu Province, the effect of QPE products during the flood season from 2010 to 2012 was tested. The results showed that the estimated values of QPE products for 0.1~0.9 mm precipitation were slightly bigger than the observation, while to other grades precipitation those were smaller, and the under valuation was obvious as the magnitude of precipitation increase. For less than 50 mm precipitation, the error of QPE products was small, and the average error was less 2.0 mm. But it appeared a sharp increase for more than 5.0 mm precipitation, the error increased with the intensity of precipitation, and the effect of decreasing with the increase of rainfall intensity was more noticeable. The hit rates of estimation values when precipitation was less than 2.5 mm were high, but decreased rapidly with the increase of precipitation. And the responses of the hit rate with precipitation estimation absolute error to less than 10.0 mm precipitation was good, similarly reduced quickly with the increase of rainfall. The altitude, longitude and latitude affected greatly the QPE product error in Gansu. A simple and multiple variables weighted regression equation to correct the QPE product were respectively established based on three effect factors. Through application test in 2012, the effect of the method on QPE product correction was obvious.

Key words: QPE; error statistics; correction method