

文章编号: 1674-7054(2022)04-0358-09



4种配对方法在海南秋季雷达定量估测降水中的效果对比

董凌宇^{1,2}, 林晓斌^{1,2}, 翁小芳^{1,2}

(1. 海南省南海气象防灾减灾重点实验室, 海口 570203; 2. 海南省气象台, 海口 570203)

摘要: 为了获得更稳定、更精确的海南秋季暴雨定量降水估测产品, 利用2017—2018年9—11月海口多普勒雷达体扫复合仰角资料和自动气象雨量计资料, 采用传统配对法、概率配对法、窗口概率配对法和窗口相关配对法, 分别得到不同区域的气候 Z-R 关系, 并对小时雨强和面雨量估测降水误差进行对比分析。结果表明, 4种配对法均存在对弱降水事件估测偏大, 强降水事件估测偏小的倾向; 估测降水的效果随雷达探测距离的增大而下降; PMM 法优于其他3种方法, 小时雨强的平均绝对误差在 $4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下, 面雨量偏差最低仅为 2.1%。

关键词: 降水估测; 概率配对法; 窗口概率配对法; 窗口相关配对法

中图分类号: P 413

文献标志码: A

引用格式: 董凌宇, 林晓斌, 翁小芳. 4种配对方法在海南秋季雷达定量估测降水中的效果对比 [J]. 热带生物学报, 2022, 13(4): 358-366. DOI: [10.15886/j.cnki.rds wxb.2022.04.006](https://doi.org/10.15886/j.cnki.rds wxb.2022.04.006)

海南岛地处热带北缘, 属热带季风气候, 是地球上同纬度降雨量最多的地区之一^[1]。海南岛秋季降水约占年降水量的 37.6%, 是暴雨出现频次较高的季节, 且易出现连续暴雨天气过程^[2]。海南岛秋季连续暴雨常造成洪涝、城市内涝、泥石流等灾害, 造成严重的经济和人员损失。如何及时定量获取秋季暴雨的空间分布, 为政府部门的防洪救灾决策提供帮助, 成为近年来气象科研人员关注的重点领域之一。雨量计、雷达和卫星是目前测量降雨的 3 种最主要手段。雨量计作为传统的测雨工具, 其观测量常被认为是真实的或者参考的降雨值。然而, 雨量计分布的不均匀或者空间覆盖率的不足会导致在估算面雨量时容易出现较大偏差, 尤其是在山区和流域周围^[3]。利用卫星观测雨量是一种很具吸引力的方式。卫星观测能提供全球尺度的降雨量, 但很难提供小尺度和实时的雨量数据。此外, 随着时间尺度的减小(即从月到日到小时), 卫星估测降雨的精度也随之降低^[4]。

雷达定量估测降水是通过建立雷达回波与雨量计测雨值之间的关系, 得到较大范围内高时空分辨率的降雨场, 在一定程度上弥补了雨量计和卫星观测的不足^[5]。

在利用雷达估测降雨中, Z-R 关系被广泛应用。雷达反射率因子 Z 与雨量计实测雨强 R 的配对方法是影响 Z-R 关系精度的关键因素。CALHEIROS 等^[6]假设雨滴从大气下降到雨量计的过程绝对垂直且耗时为零, 即匹配同一时刻且正垂直的雨量计实测量 R 和雷达实测值 Z, 这就是传统的 Z-R 配对方法(the traditional matching method, 简称 TMM 法)。TMM 法物理过程清晰, 简单易行, 是最基本匹配法之一。在 TMM 法的假设未考虑现实中 Z、R 数据集存在的时空不匹配问题, 而这恰是影响 Z-R 关系准确性的关键因素。因此, ATAS^[7]、ROSENFELD^[8]提出概率配对法(the probability matching method, 简称 PMM 法), 假设雷达反射率因子 Z 与雨量计实测量 R 具有相同的发生概率,

收稿日期: 2021-09-24

修回日期: 2022-03-25

基金项目: 海南省气象局科研项目(hnqxSJ202103)

第一作者: 董凌宇(1986-), 男, 高级工程师. 研究方向: 雷达定量降水、热带天气. E-mail: donglingyu86@qq.com

即可用概率密度函数把 Z 、 R 匹配起来, 进而建立 Z - R 关系。ROSENFELD^[9] 进一步提出了窗口概率配对法(the window probability matching method, 简称 WPMM 法), 旨在减少概率配对法中的时空不匹配问题。PMM 和 WPMM 法的基本假设是一致的, 通过寻找基于雷达反射率 Z 对雨量计实测降水 R 的一种概率密度函数, 建立 Z - R 关系。其缺点在于匹配中未能再现降雨的真实物理过程, 而优点也在于匹配过程中几乎不需要考虑 R 和 Z 之间的物理联系以及同步性, 具有较强实用性且估测精度较高。PIMAN^[4] 提出窗口相关配对法(the window correlation matching method, 简称 WCMM 法), 寻找最优 Z - R 配对, 试图解决雷达观测高度与风的客观存在导致 Z 、 R 配对时的时空不匹配问题。WCMM 法在泰国的应用情况显示 WCMM 法的估测精度较 TMM 法、PMM 法和 WPMM 法有不同程度的提高^[10]。该方法采用 1 个小的滑动时空窗并应用相关关系匹配 Z - R 对, 在一定程度上解决了 Z 、 R 配对时的时空不匹配问题, 但计算相对复杂, 计算机资源需要较大。

中国基于雷达反射率和雨量计进行降水估测的研究很多。李腹广等^[11] 基于 TMM 法, 利用兴义多普勒雷达体扫复合仰角资料进行降水估测, 结果表明, 所得 Z - R 关系适用性较好, 准确率较高。吴星霖等^[12] 基于 TMM 法本地化邵通地区的 Z - R 关系, 小时降水估计的拟合率约 80%。郑媛媛等^[13] 根据雷达不同距离段不同仰角 PPI 资料与雨强, 建立概率配对序列, 得到安徽地区的 Z - R 关系。张爱民等^[14] 利用安徽合肥 S 波段多普勒雷达进行降水估测, 结果表明, PMM 法的表现优于最优化法, 24 h 站点雨量平均相对误差均小于 40%。高晓荣等^[15] 利用 PMM 法对广东的 6 部多普勒雷达估测降水, 再进行降水估计拼接, 以此来扩展降水估计范围。邵月红等^[16] 通过改进的最佳窗概率配对法(WPMM 法)、遗传算法和最优化法分别得到沂沭河流域多普勒雷达降水 Z - R 关系, 对比结果表明, 改进的最佳窗概率配对法估测结果最优。目前国内尚无基于 WCMM 法进行定量估算降水的文献。另一方面, 受到降雨分布, 雨滴谱特征、近地面气流、区域特点等因素的综合影响, Z - R 关系具有很强的区域性, 如何使其本地化是一个待解决的问题。目前, 海南岛秋季暴雨的雷达定量

降水估测方面的工作还较少, 笔者采用 TMM、PMM、WPMM 和 WCMM 共 4 种配对方法同时进行降水估测试验, 改进海南岛地区多普勒雷达降水产品的性能, 以期获得更精准的秋季降水定量估测产品。

1 雷达和雨量计资料处理

1.1 雷达资料处理 采用海口 CINRAD WSR-98D 雷达, 位于 $19^{\circ}59'47''\text{N}$, $110^{\circ}14'45''\text{E}$, 海拔 118 m。收集 2017 年和 2018 年 9—11 月逐 6 min 1 次的多普勒雷达体扫资料。

对雷达基本反射率数据进行处理, 主要包括以下几个方面: (1)数据的方位统一: 为了方便进行不同仰角数据的比较, 将每个仰角的数据统一插值到 $0 \sim 359^{\circ}$ 的方位角上^[17]; (2)假定引起降水的最小反射率因子为 21 dBz^[13], 小于该强度的回波认为是非降水事件; (3)将 >55 dBz 的反射率因子, 令其为 55 dBz; (4)为避开地物杂波干扰, 距雷达 $0 \sim 60$ km 采用 3.4° 仰角, $60 \sim 120$ km 采用 1.5° 仰角, $120 \sim 230$ km 采用 0.5° 仰角。

1.2 雨量计资料处理 收集海南省 490 个气象观测站 2017 年和 2018 年 9—11 月逐 5 min 自计雨量资料。本研究所使用各气象台站的雨量计多为虹吸式雨量计, 其精度为 0.1 mm。考虑到雷达体扫间距与雨量计观测间距的不匹配, 将雨量资料插值成 6 min 间隔的数据。本研究选取的雨强阈值为 $0.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 即不考虑 $0.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下的降水。

从收集的雨量计数据中选取 19 个强降水事件(共 23 d), 其中 2017 年 10 个, 2018 年 9 个。强降水事件的定义: 在降水时段内观测到强降水 ($>50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 或者 $>20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$) 的市县达 3 个以上。

2 4种 Z-R 配对方法

2.1 传统配对方法(TMM 法) TMM 法为匹配同一时刻且正垂直的雨量计实测量和雷达实测量。本研究把 1 h 雨量计降雨量 R 和同一时段的垂直于雨量计的平均雷达反射率因子值 Z , 配成 1 个 Z - R 对。在得到若干 Z - R 对后, 利用最小二乘法拟合得到 Z - R 关系式, 可用公式(1)表示(本研究所有配对法所得 Z - R 关系式将统一使用该式表示):

$$Z = a \cdot R^b \quad (1)$$

式中, Z 是以 $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$ 为单位的雷达反射率, R 是以 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 为单位的降雨强度, a 和 b 为参数。此外, $\text{dBZ} = 10 \lg [Z]$; $\text{dBR} = 10 \lg [R]$ 。

2.2 概率配对法 (PMM 法) 在 TMM 法中假设, 雨量计测量的降雨量与雨量计正上方的雷达反射率是同步的。然而, 现实中该假设几乎是不存在的。原因: (1) 地面雨量计附近雨滴谱分布与雷达有效照射体积的空间不一致; (2) 雷达波束的平均作用; (3) 雨量计测量和雷达测量的时间、地点上的不一致。为了消除 Z 、 R 之间的时空不匹配, CALHEIROS 等^[6]、ATLAS 等^[7] 提出 PMM 法, 假设在气候均匀的区域, 雷达反射率因子 Z 与雨量计实测量 R 是描述降水事件的 2 个随机变量, 具有相同的发生概率。任一点任一时刻雨强 R 的发生概率为 $P[R]dR$, 雷达反射率因子 Z 的发生概率为 $P[Z]dZ$, 若 Z 和 R 2 个随机变量一一对应, 那么必有 $P[R]dR = P[Z]dZ$; 反之, 若已知 Z 和 R 的概率分布, 那么依据概率相等原理即可决定 Z - R 关系。PMM 法消除了定时误差, 因为 PMM 法没有利用每对 R 和 Z 发生的实际时间, 并且只要雨量计上雷达像素处的雨滴绝对垂直, PMM 法就间接消除了几何误差。

通常, 对累计雨量贡献很小的雨强常占有相当大的概率, 为了减少小雨强事件的干扰, 为此, ATLAS^[6] 建议用公式(2)配对:

$$\text{CDF1} = 100 \times \frac{\int_{Z_c}^{Z_i} P[Z] dZ}{\int_{Z_c}^{\infty} P[Z] dZ} = 100 \times \frac{\int_{R_c}^{R_i} P[R] dR}{\int_{R_c}^{\infty} P[R] dR} \quad (2)$$

公式(2)增大了大雨强和大反射率的影响, 对 Z_c 阈值 R_i 和选取不太敏感。按 CDF1 相等原理, 得到一组 Z_i - R_i 对的序列, 利用最小二乘法拟合即可得到气候 Z - R 关系。公式(2)中的 Z_c 和 R_c 分别为 21 dBZ 和 $0.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

2.3 窗口概率配对法 (WPMM 法) 为了减少 Z 和 R 在匹配中的几何失配和同步误差, ROSENFELD 等^[9] 发展了 WPMM 法。WPMM 法考虑到雨滴从雷达像素处下落到雨量计需要时间, 且雨滴在下落过程中并不垂直。因此, 可通过将雨量计测量的降雨强度匹配仅从围绕雨量计中心的小窗口(时间和空间)获取的雷达反射率来消除时空误差。该窗口必须足够小, 以便雨量计能够表示雨量计

上方雷达窗口内的降水量度, 但要足够大, 以包含此类测量固有的时间误差和几何误差。本研究选择使用以雨量计为中心的空间窗尺寸 7×7 的雷达网格(共包含 49 个雷达反射率因子), 以及 3 个 6 min 时间窗口的雨强值。如图 1 所示, 其中 Z 从空间窗口获得, 位于雨量计坐标的中心, R 从雷达扫描时中心的 3 个 6 min 平均雨量计强度中获得。为了得到 1 个无时间误差的代表性 $\text{PDF}(R)$, 必须包含前一个和后一个 6 min 的雨强度。因此, 每个雷达扫描和每个雨量计分别为 $\text{PDF}(Z)$ 贡献 49 个 Z 值和为 $\text{PDF}(R)$ 贡献 3 个 R 值(包括零值)。通过 WPMM 法匹配, 可以获得雷达和雨量计观测之间较接近的同步, 并且可以确保高空的雷达观测与地面的雨水测量相对应, 从而减少因风吹动雨滴导致的 Z 、 R 匹配时存在的误差。该匹配方法能增加 Z - R 对的数量(相对 PMM 法), 对提高估计的 Z - R 关系的精度有帮助^[9]。

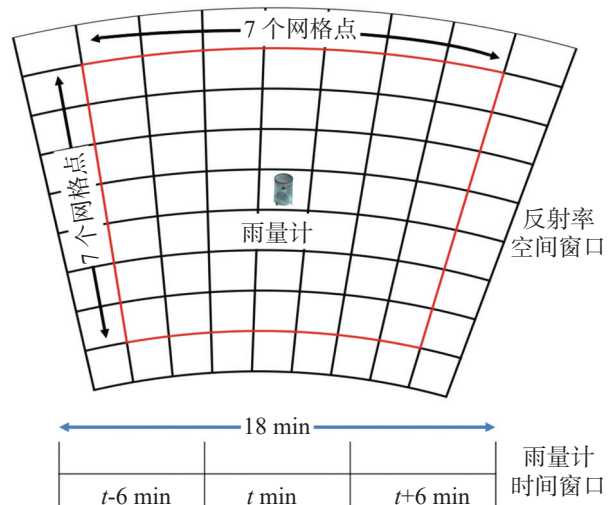


图 1 窗口概率配对法示意图

计算 WPMM 的 Z - R 关系为拟合从所有窗口获得的通过无条件累积概率匹配得到的 Z - R 对。把来自同一窗口的 Z 和 R 两个数据集(每个窗口提供 49 个 Z 和 3 个 R 值)排序; 具有相同累积百分位数的 Z 和 R 是相互关联的, 这样每一个雨量计可提供若干个 Z - R 对; 最后利用范围内所有雨量计提供的 Z - R 对求解出 Z - R 关系式。

2.4 窗口相关配对法 (WCMM 法) 为了减少降雨过程中由风和雷达测量高度引起的 Z - R 配置错误和定时错误(非同步的 Z - R 数据集), PIMAN 等^[4] 提出了 WCMM 法。WCMM 法与 WPMM 法在物理假设上是相近的, 主要区别在于 Z 和 R 数据集

的处理上。WCMM 法使用非同步的 Z 和 R 数据集来建立具有代表性的反射率-雨强关系。该方法的概念是对传统配对方法中搜索和寻找与 R 具有最佳对应关系的最优匹配区域的扩展。

WCMM 法的匹配过程 (图 2) 包括将空间和时间窗内的 Z 值与参考雨量计的降雨强度 R 进行匹配, 搜索出雷达反射率因子 Z 值, 使得 Z 和 R 之间的相关性达到最大, 其中相关系数 r 根据公式 (3) 和公式 (4) 求得。将该 Z 值指定为与参考雨量计的降雨强度 R 匹配, 这对 Z - R 被称为“最优 Z - R 对”。

对”。

$$r = \frac{\text{cov}ZR}{S_Z S_R} \tag{3}$$

$$\text{cov}ZR = \frac{\sum_{i=1}^R \{ [Z_i - \bar{Z}] \times [R_i - \bar{R}] \}}{(n-1)} \tag{4}$$

式中, Z_i 是非零 Z - R 对数据集中第 i 个 Z 值, \bar{Z} 是 Z 的平均值, R_i 是非零 Z - R 对数据集中第 i 个 R 值, \bar{R} 是 R 的平均值, S_Z 是 Z 的标准偏差, S_R 是 R 的标准偏差, n 是所计算雨量站若干小时内的非零 Z - R 对个数。

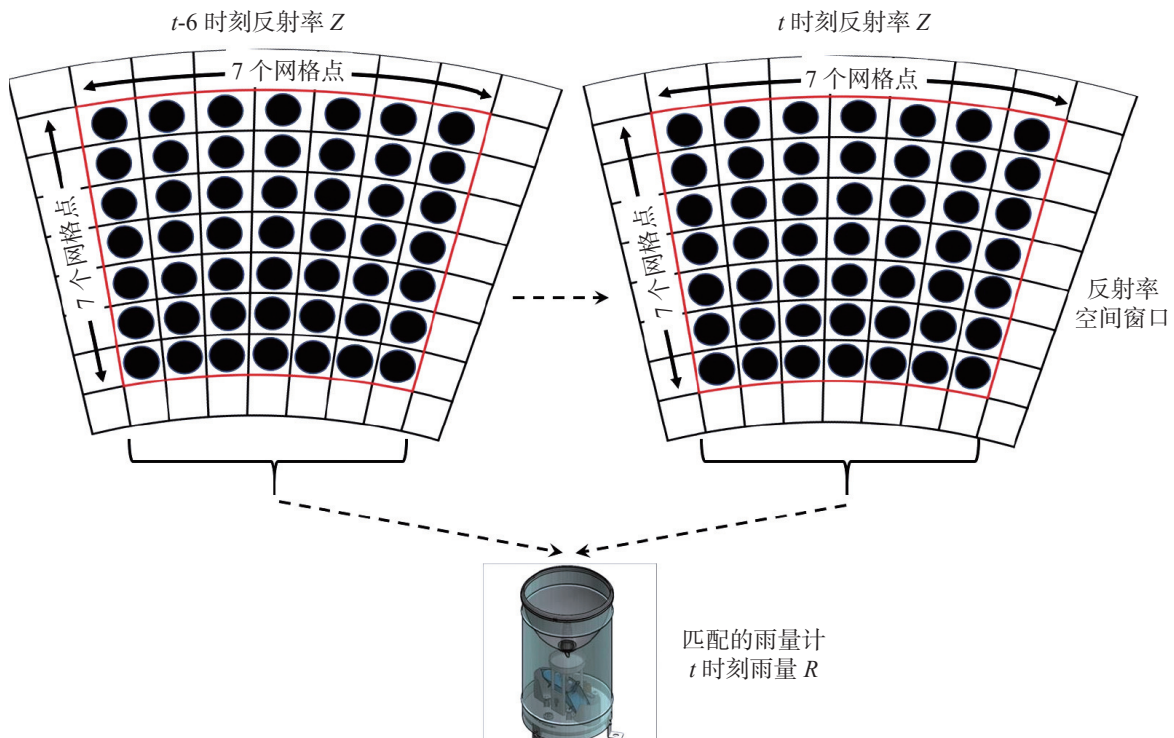


图 2 窗口相关配对法示意图

根据前人的研究结果^[4], 使用空间窗尺寸 7×7 的雷达网格, 并结合当前时间和前 6 min 雷达扫描时间窗口, 可以纠正 Z - R 对中的配置和定时错误, 因此本研究沿用该配置 (简称 S77T6 配置)。S77T6 配置中, 为了寻找最优 Z - R 对, 每个站点的每个 R 值需要匹配 98 个 Z 值 (需要匹配前后两个雷达窗口的网格点: $7 \times 7 \times 2$)。另外, 考虑到计算量的问题, 本研究选取实测雨强的变化范围为 $6 \sim 90 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 增量为 $6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

3 Z-R 关系评估

3.1 估算 a 、 b 系数 利用 TMM、PMM、WPMM 和 WCMM 4 种配对法分别获得各自的 Z - R 对, 通

过最小二乘法线性拟合回归求得 a 、 b 参数值, 得到不同区域的气候 Z - R 关系 (a 、 b 参数的详细分布见表 1)。

为了评估不同区域 Z - R 配对的合理性, 对不同区域的 4 种 Z - R 对绘制散度图及拟合直线, 结果如图 3 所示 (仅展示距雷达 $0 \sim <30 \text{ km}$ 范围的情况, 其他区域相类似)。TMM (图 3-a)、PMM (图 3-b)、WPMM (图 3-c) 和 WCMM (图 3-d) 分布匹配的 Z - R 对 (黑色散点) 大致均匀分布在拟合直线 (红线) 两侧, 表明 4 种配对法拟合的 Z - R 函数可以较好描述 Z - R 对的分布, 尤其是 PMM 法所得拟合直线几乎与 Z - R 对分布重合, 拟合效果最好。

3.2 小时雨强效果评估 表 2 给出了 4 种配对

表1 4种配对法的Z-R关系式参数分布

距离/km	Z-R关系式参数							
	TMM		PMM		WPMM		WCMM	
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
0 ~ <30	360.32	0.80	197.52	1.27	83.99	1.52	29.28	1.68
30 ~ <60	365.11	0.66	143.56	1.41	64.22	1.53	18.7	1.90
60 ~ <90	375.14	0.69	147.53	1.38	78.36	1.47	52.87	0.75
90 ~ <120	397.61	0.64	135.10	1.41	82.26	1.46	49.32	0.70
120 ~ <150	379.37	0.57	106.76	1.47	71.67	1.47	65.61	0.55
150 ~ <180	374.66	0.53	145.80	1.29	98.60	1.34	43.14	0.81
180 ~ <210	414.76	0.35	204.52	1.02	106.79	1.24	18.83	1.14
210 ~ <230	421.52	0.35	217.95	1.02	100.72	1.26	73.49	1.03

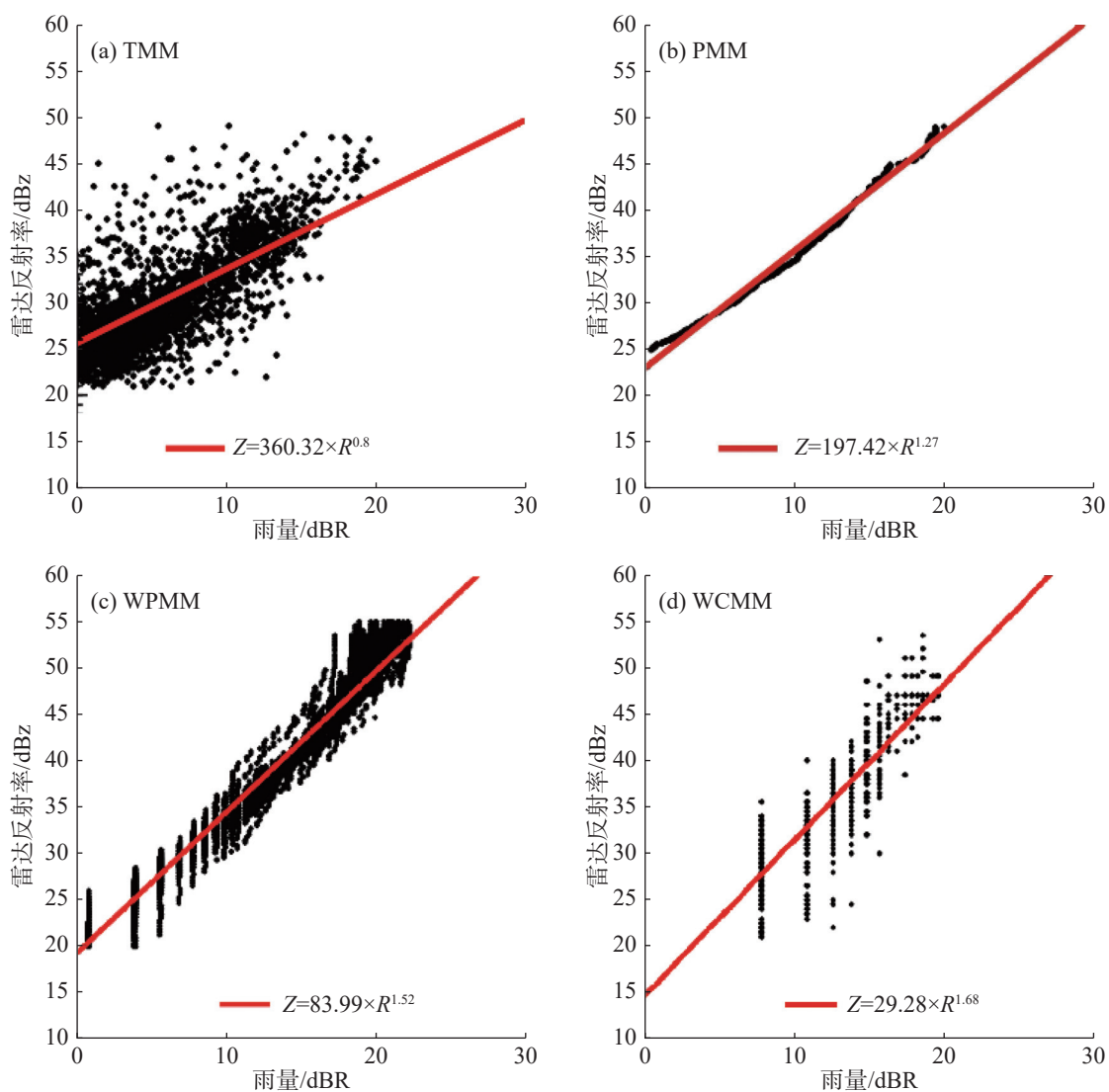


图3 距雷达0~<30 km范围内雷达估测降雨与雨量计观测降雨量的散点图
红色直线为利用最小二乘法拟合回归Z-R对所得。

法所得小时雨量的绝对误差和相对误差,加粗的数值表示绝对误差小于0。对于小时雨强(<5 mm·h⁻¹)事件,4种配对法对QPE的反演都存在明显的高估,随着雷达探测距离的增长,高估程度趋于增大,210~<230 km的相对误差可达725.3%(WCMM)。PMM法对小雨强事件的高估程度在4种方法中最低,0~<30 km的误差为1.9 mm,相对误差为94.1%。4种配对法对中等雨强(5~20 mm·h⁻¹)事件的反演的相对误差较小雨强(<5 mm·h⁻¹)事件有所降低。PMM和WPMM法

所得时雨强存在低估,WCMM法和TMM法存在高估。PMM法和WPMM法的相对误差明显小于其他两种配对法,反演结果更接近实况。对于大雨强(>20 mm·h⁻¹)事件,4种配对法的反演大多为低估,PMM法和WPMM法低估的程度(相对误差)小于TMM法和WCMM法。总之,4种配对都有着对弱降水事件估测偏大,强降水事件估测偏小的倾向;PMM法和WPMM法的小时雨强反演效果更好,更接近实况。

表2 4种配对法所得小时雨量的绝对误差和相对误差

距离/km	TMM			PMM			WPMM			WCMM		
	<5	5~20	>20	<5	5~20	>20	<5	5~20	>20	<5	5~20	>20
0~<30	5.2	14.1	17.8	1.9	-0.8	-16.5	3.1	0.7	-15.3	6.0	5.8	-8.0
	253.8	133.5	52.8	94.1	7.1	48.9	153.9	6.3	45.5	295.6	54.5	23.7
30~<60	10.2	14.5	17.1	2.2	-2.5	-21.2	4.2	0.3	-17.9	9.7	7.6	-30.0
	497.7	262.4	58.1	102.3	26.9	72.0	192.8	3.4	60.9	446.6	81.0	134.1
60~<90	11.8	7.9	-33.6	2.5	-4.1	-28.0	4.2	-2.3	-26.5	11.7	22.6	-54.1
	541.1	86.8	105.5	110.6	44.7	87.9	184.9	25.2	83.2	537.0	248.8	169.8
90~<120	8.5	6.5	-40.0	3.5	-5.6	-31.7	5.2	-4.4	-30.9	6.9	33.3	-41.9
	407.4	70.4	119.1	170.2	60.4	93.2	251.6	47.6	90.8	322.0	356.9	124.4
120~<150	7.4	19.3	-48.1	3.5	-5.8	-27.1	5.2	-4.5	-25.8	8.7	44.4	-74.7
	329.9	193.5	153.9	173.6	58.2	86.7	258.8	45.1	82.5	422.9	445.9	254.3
150~<180	8.2	7.7	-33.0	3.4	-5.8	-26.7	4.6	-4.8	-25.9	9.1	43.3	10.8
	469.2	82.1	111.2	172.5	61.3	90.0	237.0	51.3	87.3	521.1	460.4	36.3
180~<210	10.6	13.4	-35.6	3.4	-3.9	-21.1	4.0	-3.1	-21.0	12.1	25.3	-24.1
	553.7	180.9	126.1	167.9	41.9	71.2	198.5	33.6	70.9	684.4	271.8	91.2
210~<230	15.2	11.6	-27.2	7.4	1.8	-26.7	7.5	1.4	-25.5	17.6	33.7	-30.4
	692.7	121.3	94.4	384.9	18.6	92.8	391.5	14.8	88.5	725.3	349.9	122.1

注:(1)表中带底色部分为绝对误差,公式: $AE = QPE - OBS$, 单位为mm; (2)表中无底色部分为相对误差,公式: $RE = \frac{|QPE - OBS|}{OBS} \times 100\%$; (3)表中加粗部分表示绝对误差小于0。

从估测小时雨强|相对误差|≤20%的个数在所有样本中所占比例分布柱状图(图4-a)可以看出,随着离雷达位置越远,比例呈下降趋势,估测降水的相对误差在增大。PMM法估测降水的表现最好,估测降水相对误差较小,比例在30%~40%之间,其次为WPMM法。在平均绝对误差(MAE)方面,MAE也随距离的增加而增大(图4-b)。PMM法的MAE都在4 mm·h⁻¹以下,是4种方法

中最小的。说明PMM法估测单点降水能力较TMM法、WPMM法和WCMM法强。

3.3 区域面雨量效果评估 为了更全面评估4种配对法的估测结果,本研究计算区域范围内雨量计所有降水量之和及相应站的估测降水量总和。表3给出了2017—2018年秋季区域总雨量实况与4种配对法估测降水的对比,可以看到TMM法、WPMM法和WCMM法在面雨量上都

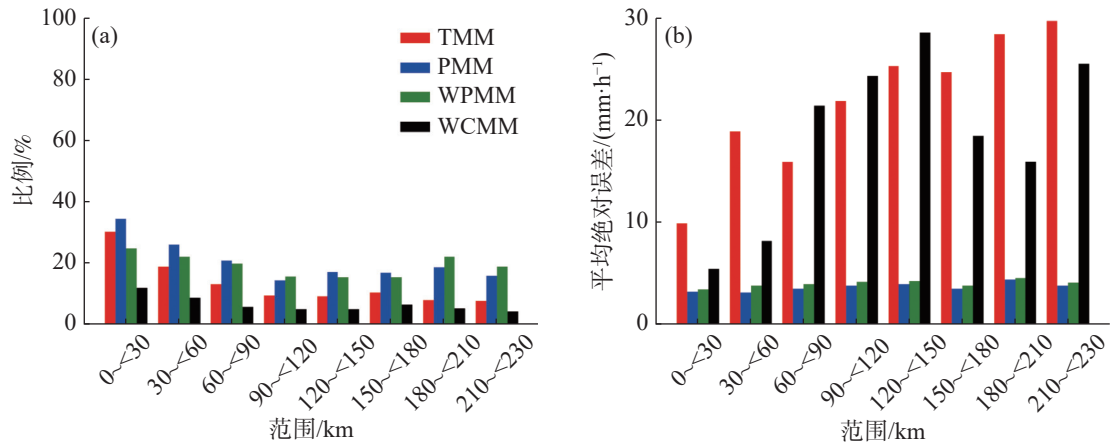


图4 4种配对法所估测降水的小时雨强效果检验柱状图

(a) 小时雨强的|相对误差| $\leq 20\%$ 的个数在所有样本中所占比例; (b) 估测小时雨强与实测小时雨强的平均绝对误差(MAE)。

表3 2017—2018年秋季区域总雨量实况与估测对比

距离/km	实测雨量/mm	估测雨量							
		TMM		PMM		WPMM		WCMM	
		偏差/mm	比例/%	偏差/mm	比例/%	偏差/mm	比例/%	偏差/mm	比例/%
0~<30	15 726	21 021	133.8	324	2.1	3 588	22.8	13 156	83.7
30~<60	12 362	59 657	482.6	759	6.1	6 458	52.2	21 865	176.9
60~<90	24 943	53 877	216.5	-3 819	-15.3	3 669	14.7	6 288	252.1
90~<120	21 104	65 973	312.6	-4 434	-21.0	699	3.3	8 777	415.9
120~<150	12 813	104 115	812.6	-2 229	-17.4	1 067	8.3	9 863	769.8
150~<180	14 658	118 740	810.1	-778	-5.3	2 576	17.6	10 975	865.3
180~<210	4 412	4 077	952.1	1 269	28.8	19.24	43.6	5 132	1 163.3
210~<230	1 085	1 230	1 134.5	1 146.7	105.7	1 171	108.0	1 678.7	1 547.2

存在不同程度的高估,并且距离雷达越远,高估程度越大。PMM法在距雷达60~<180 km的范围内出现面雨量低估,其余范围内为高估。在0~<60 km和150~<230 km范围内,PMM法的面雨量估测精度最高,在0~<30 km范围内仅偏差了324 mm,占实测面雨量的2.1%。60~<150 km范围,WPMM表现最佳,偏差均小于15%。

4 结论

本研究利用4种方法分别求解海南岛秋季的区域气候Z-R关系,对秋季暴雨过程进行雷达定量降水估测,并与雨量计实测降水进行比较,可以得到以下结论:

(1) 4种配对都存在对弱降水事件估测偏大,强降水事件估测偏小的倾向。估测降水的效果随

雷达探测距离的增大而下降。

(2) 在小时雨强评估中,PMM法的平均绝对误差和相对误差都是4种方法中最小的,表明PMM法估测单点降水能力较TMM法、WPMM法和WCMM法强。

(3) 在面雨量评估中,PMM法估测面雨量在0~<60 km和150~<230 km范围内偏差最小,WPMM法则在60~<150 km范围内表现更优。

(4) 总体上看,PMM法在小时雨强和面雨量估测两方面较其他3种方法具有明显优势,可利用PMM法得到的Z-R关系调整海南雷达估测降水,形成更稳定更精准的雷达定量估测降水产品。

本研究仅利用海口CINRAD WSR-98D雷达资料对2017—2018年海南秋季强降水过程进行分析,所得结论具有一定的局限性和时空独特

性。今后可进一步对更多年份的秋季强降水过程进行检验分析,并对海南的台风降水、午后强对流降水等过程进行对比分析,以便得到普适性更高,更有价值的结果,从而切实提高海南地区降水的定量估测能力。

参考文献:

- [1] 苏涛, 苗峻峰, 蔡亲波. 海南岛海风雷暴结构的数值模拟[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(1): 59 – 78.
- [2] 王春乙. 海南气候[M]. 北京: 气象出版社, 2014.
- [3] BORGA M. Accuracy of radar rainfall estimates for streamflow simulation [J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 267: 26 – 39.
- [4] PIMAN T, BABEL M S, GUPTA A D, et al. Development of a window correlation matching method for improved radar rainfall estimation [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2007, 4(2): 785 – 788.
- [5] SUN X, MEIN R G, KEENAN T D, et al. Flood estimation using radar and raingauge data [J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 239(1): 4 – 18.
- [6] CALHEIROS R V, ZAWADZKI I I. Reflectivity-rain rate relationships for radar hydrology in Brazil [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1987, 26(1): 118 – 132.
- [7] ATLAS D, ROSENFELD D, WOLFF D B. Climatologically tuned reflectivity-rain rate relations and links to area-time integrals [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1990, 29(11): 1120 – 1135.
- [8] ROSENFELD D, WOLFF D B, ATLAS D. General probability-matched relations between radar reflectivity and rain rate. [J]. *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, 1993, 32(1): 50 – 72.
- [9] ROSENFELD D, WOLFF D B, AMITAI E. The window probability matching method for rainfall measurements with radar. [J]. *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, 1994, 33(6): 682 – 693.
- [10] PIMAN T, BABEL M S. Prediction of rainfall-runoff in an ungauged basin: case study in the mountainous region of northern Thailand [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2013, 18(2): 285 – 296.
- [11] 李腹广, 王芬. 用天气雷达回波强度资料估测降水[J]. *气象科技*, 2007(2): 128 – 130.
- [12] 吴星霖, 罗松, 余加贵. 多普勒雷达回波强度估测降雨的气候统计方法[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2011(S2): 374 – 378.
- [13] 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.
- [14] 张爱民, 郑媛媛, 郑兰芝, 等. 基于 CINRAD 和卫星的淮河流域致洪暴雨综合定量估测及预警研究[J]. *热带气象学报*, 2006, 22(1): 96 – 100.
- [15] 高晓荣, 梁建茵, 李春晖. 雷达定量降水估计技术及效果评估[J]. *热带气象学报*, 2012, 28(1): 77 – 88.
- [16] 邵月红, 张万昌, 刘永和, 等. 沂沭河流域不同多普勒雷达降水量估算方法的效果评估[J]. *大气科学*, 2009, 33(5): 971 – 980.
- [17] 王丽荣, 裴宇杰, 王立荣, 等. 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*, 2008(S1): 203 – 207.

Comparative experiment of several quantitative precipitation estimation techniques based on doppler radar over the Hainan Island during autumn

DONG Lingyu^{1,2}, LIN Xiaobin^{1,2}, WENG Xiaofang^{1,2}

(1. Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Hainan Province, Haikou, China;

2. Hainan Meteorological Observatory, , Haikou, China)

Abstract: The Haikou Doppler radar volume scan composite elevation data and rainfall data from automatic meteorological rain gauges from Hainan Island collected from September to November in 2017—2018 was used to develop radar reflectivity Z and gauge rainfall R relationships (Z - R relationship) in various areas of Hainan Island for quantitative precipitation estimation by four matching methods: traditional matching method (TMM), probability matching method (PMM), window probability matching method (WPMM) and window correlation matching method (WCMM). And the errors of the four matching methods in hourly rainfall intensity and areal rainfall estimation were compared and analyzed. The results show that the four matching methods tend to overestimate the low rainfall events and underestimate the high rainfall events. The effect of rainfall estimation decreases with the increase of radar distance. PMM provides better result in estimating the Z - R relationships and much higher accuracy in quantitative estimation of precipitation than the other three matching methods. The mean absolute error of PMM in hourly rainfall intensity is less than $4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, and the minimum deviation of areal rainfall is only 2.1%.

Keywords: quantitative precipitation estimation(QPE); probability matching method(PMM); window probability matching method(WPMM); window correlation matching method(WCMM)

(责任编辑:罗启香 责任编辑:钟云芳)