

文章编号: 1000-2022(2000)-01-0087-06

利用垂直积分含水量估测降水*

潘 江, 张培昌

(南京气象学院电子信息与应用物理系, 南京 210044)

摘要: 讨论了垂直积分含水量(Q_{VIL}) 在估测降水中的实际应用, 并首次针对其他常规方法做了较为详实的对比实验——将 Q_{VIL} 与 PPI、CA PPI 资料在估测降水中的应用进行了对比分析。最后, 将 Q_{VIL} 的估测降水结果与雨量站实测资料进行了比较。

关 键 词: 垂直积分含水量; 雨强; 估测降水

中图分类号: P412. 25 **文献标识码:** A

70 年代初期, Greene 等^[1] 提出了一种新的预报因子——垂直积分含水量(Vertically Integrated Liquid Water, Q_{VIL}), 之后 Robert 等^[2] 和 Yates^[3] 继续在 Q_{VIL} 预报强对流天气、回波跟踪以及估测降水上作了进一步的研究。80 年代, 美国雷达气象学者进一步发展和完善了使用 Q_{VIL} 作为预报因子的研究, 特别是在强对流天气预报方面取得了较大的成绩^[4, 5], 建立了 SWP 算法, 并且对各种天气情况以及不同季节、不同区域都作了相应的研究。李承明等^[6] 研究了雨滴微波特征量与含水量之间的关系。这里仅就使用 Q_{VIL} 估测降水作一些研究。用雷达体扫资料, 提取 Q_{VIL} , 再使用 Q_{VIL} 估测降水, 并且将 Q_{VIL} 与使用 PPI 和 CA PPI 估测降水的精度作对比分析, 并讨论了提高估测降水精度的方法和业务应用的可行性措施。

1 垂直积分含水量

1. 1 理论模式

假设云内雨滴谱符合 M-P 分布, 可以得到反射率因子

$$Z = \int_0^\infty N_0 e^{-ba} a^6 da = N_0 \frac{(7)}{b^7}, \tag{1}$$

含水量

$$M = \frac{1}{6} \int_0^\infty N_0 e^{-ba} a^3 da = \frac{1}{6} N_0 \frac{(4)}{b^4}。 \tag{2}$$

由(1)、(2)两式可得

$$M = 3.44 \times 10^{-3} Z^{4/7}。 \tag{3}$$

最后得到

$$Q_{VIL} = \int_{base}^{h_{op}} M dh = 3.44 \times 10^{-6} \int_{base}^{h_{op}} Z^{4/7} dh。 \tag{4}$$

* 收稿日期: 1999-02-01; 改回日期: 1999-09-10
作者简介: 潘 江, 男, 1971 年 5 月生, 硕士, 助教

离散化后

$$Q_{\text{vii}} = 3.44 \times 10^{-6} \sum_{i=0}^{\infty} ((Z_i + Z_{i+1})/2)^{4/7} h' \quad (5)$$

这里, h 是高度, 单位为 m ; Q_{vii} 的单位是 $\text{kg} \cdot \text{km}^{-2}$; Z_i 是第 i 层高度上的雷达反射率因子。

应用体扫雷达资料, 通过对回波体在以 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 网格范围的含水量垂直积分, 可以得到在雷达探测范围内液态水的三维分布情况, 这种产品对于气象、水文和水利业务应用都有较大的价值。

1.2 资料说明和处理

本实验所用的雷达(714SD)资料是由厦门市气象台提供, 1995 年 6 月 8 至 9 日的一次暴雨过程, 扫描方式是体扫 14 个扫描层, 收集时间间隔为 0.5 h, 资料是以 360 根扫描线(0 ~ 359)分别用 1 000 个距离库存放, 每个距离库内存放一个速度和一个强度值。雨量站资料从自记纸上读出, 共 10 个站。

由于实验要求使用 CAPPI 资料, 因此预处理首先完成了资料转化工作。将 14 个仰角的体扫极坐标资料转化为具有 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 网格和 6 个高度(取 0.5、2.0、3.5、5.0、7.0、9.0 km)的 CAPPI 资料。这样设计主要是考虑到该过程的实际云顶高度较高, 并考虑到计算时间和资料转化误差。

处理后的 CAPPI 资料转化为直角坐标系资料, 利用(5)式进行理论模式的 Q_{vii} 计算, 并且对应每个 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 网格, 垂直从地面积分到 10 km(选择这样的积分区间是由于实际降水回波顶一般都低于 10 km), 这样就得到 $480 \text{ km} \times 480 \text{ km}$ 的 Q_{vii} 分布资料, 由于 Q_{vii} 值一般在 $0 \sim 50 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$, 故 Q_{vii} 值乘以 10 后以整形存储和计算(即考虑小数点后的一位), 这样做是考虑到计算速度和计算精度的综合需求。为了进一步优化资料, 设计了一个包括收缩和 3×3 网格邻域滤波两个步骤的处理方案, 其目的是消除孤立回波点和实现噪声滤波。

2 Q_{vii} 在估测降水中的应用

一般业务上使用的测量降水方法, 是据统计的 $Z-I$ 关系由雷达 Z 值得到降水强度 I , 其误差有时达到 200 % ~ 300 %, 甚至得到有回波的区域无降水, 或无回波的区域有降水的结果。在不考虑风场带来的影响和雷达本身的误差情况下, 一个主要的原因是 PPI 资料在某些情况下不能较好地反映出实际降水回波, 回波的立体结构复杂, 最大含水量出现的区域不确定以及地物的影响, 探测仰角很难选择恰当, 但该方法有方便、快捷的优点; 使用 CAPPI 资料估测降水又存在选择恰当高度的问题^[7]。而使用 Q_{vii} 估测降水使用体扫资料, 能够全面地解决上述问题, 是一种提高测量精度的有效方法, 并且有很强的业务应用和推广价值。对于 3 种资料类型, 由相应的地面雨量站资料, 根据最小二乘回归法得到以下的关系,

$$I = B_1 Z^{Q_1}, \quad (6)$$

和

$$I = B_2 Q_{\text{vii}}^{Q_2}. \quad (7)$$

其中 I 的单位是 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$, Z 的单位是 $\text{mm}^6 \cdot \text{mm}^{-3}$, B_1 、 B_2 、 Q_1 、 Q_2 是回归系数。由于地面雨量站仅 10 个(收集到资料的), 因此采用连续时次(6 月 8 日 20: 20、21: 05、21: 54、22: 16、22: 50、23: 16)的 6 份资料中共有 60 组数据, 分别对不同仰角的 PPI 资料、不同高度 CAPPI 资料以及 Q_{vii} 资料作相关分析, 及作平均校准前后的误差分析, 前两种情况如表 1 和表 2 所示, 对 Q_{vii} 资料处理的结果为: 回归系数 $B_2 = 3.032$, $Q_2 = 0.570$, 相关系数 $r = 0.80$, 校准前相对误

差为 53 % , 校准后为 43 %。

表 1 使用不同仰角 PPI 资料的降水点相关及测量误差情况

Table 1 Precipitation relevance and estimating error by PPI data of different elevation

	扫描仰角(°)				
	0. 00	0. 80	1. 39	4. 70	8. 00
B_1	0. 619	0. 358	0. 297	0. 795	0. 931
Q_1	0. 392	0. 339	0. 341	0. 235	0. 190
相关系数 r	0. 64	0. 76	0. 79	0. 51	0. 41
相对误差绝对值(%)	68	58	68	83	94
校准后误差绝对值(%)	58	48	58	70	91

表 2 使用不同高度 CAPPI 资料的降水点相关及测量误差情况

Table 2 Precipitation relevance and estimating error by CAPPI data of different height

	CAPPI 高度(km)				
	0. 5	2. 0	3. 5	5. 0	7. 0
B_1	0. 441	0. 353	0. 444	0. 707	0. 891
Q_1	0. 380	0. 368	0. 305	0. 254	0. 177
相关系数 r	0. 76	0. 81	0. 75	0. 61	0. 48
相对误差绝对值(%)	64	57	66	72	110
校准后误差绝对值(%)	57	48	58	64	98

注: 以上所作的精度分析, 由回归关系得出的雨强和地面雨量计测量值得出。

通过对以上的结果进行分析发现, 应用 Q_{VIL} 因子所作的降水分析相关性好, 测量降水精度高; 由 PPI 资料所作出的结果, 易受到地物的影响, 在相关性和精度上稍差, 但由于它有处理速度快这一优点, 因此实际工作中选择低仰角(一般 1 ° 左右最为合适) 可基本满足要求; 由 CAPPI 资料所作出的结果, 相关性较好, 测量精度也高一些, 但是如果采用的高度层不适合也不能取得好的结果。

3 用 Q_{VIL} 估测降水强度分布的实验

利用前面得出的 $Q_{VIL}-I$ 关系, 将 1995-06-09T06: 51 的雷达体扫资料通过 Q_{VIL} 求得的 I_R 和雨量计资料求得的 I_G 进行对比实验。该过程的降雨是混合云降水, 由西南暖湿气流提供大量的水汽输送, 维持长达 12 h 的降水过程, 致使厦门站总降水量达到 142 mm, 据周围水库提供的资料得出的平均总雨量为 70 mm, 该过程的降水量大, 对于研究降水是一次很好的个例。图 1 至图 4 分别是该时次的 CAPPI 资料回波强度(dBz) 等值线、PPI 资料回波强度(dBz) 等值线(0 ° ~2. 3 ° 仰角) 和 Q_{VIL} 等值线。图 5、图 6 分别为由 Q_{VIL} 得到的雨强分布和雨量计测值经权重插值后的雨强分布。

从图 1 到图 4 发现, 在 0 ° 仰角 PPI 资料中有些回波没有表现出来, 黑箭头所指虚线圈区域没有回波, 而在 CAPPI、 Q_{VIL} 及 2. 3 ° 仰角 PPI 强度图中, 发现此处有一强度约为 40 dBz(垂直积分含水量约为 $7. 0 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$) 的回波中心, 而据地面降雨情况分析该处有约为 $5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的降雨; 0 ° 雷达仰角回波图中实线圈内没有回波, 而在 CAPPI、 Q_{VIL} 及 2. 3 ° 仰角

PPI 强度图中, 此处有回波或一定的含水量, 并且实际上该处也是有降水的。这是由于 0° 仰角 PPI 资料估测降水, 易受地物阻挡出现漏测, 致使实验结果不够客观。另外, 从表 1 和表 2 的对比分析发现, 用 PPI 和 CAPPI 资料估测降水的效果很大程度上取决于雷达的探测仰角或等高面高度的选择, 而在实际业务应用中它们恰恰又是较难确定的。而应用 Q_{VIL} 作为估测降水因

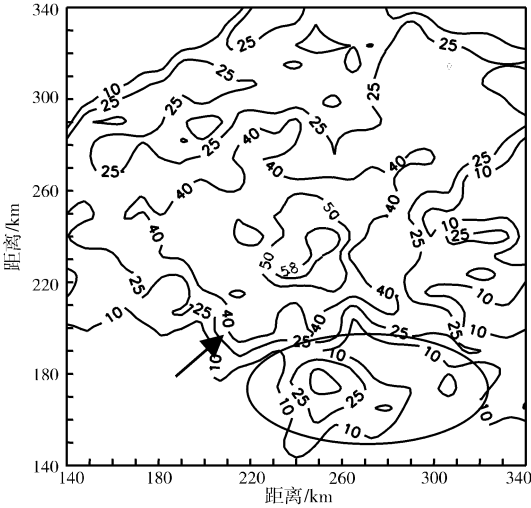


图 1 3.5 km CAPPI 上反射率因子分布(单位: dBz)

Fig. 1 CAPPI distribution at 3.5 km (dBz)

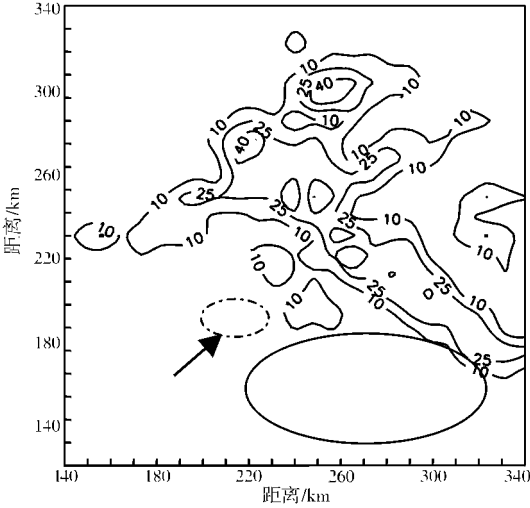


图 2 0° 仰角 PPI 上反射率因子分布(单位: dBz)

Fig. 2 PPI distribution at 0° elevation (dBz)

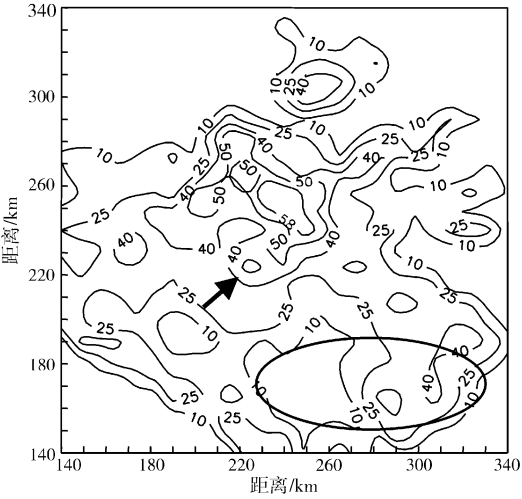


图 3 2.3° 仰角 PPI 上反射率因子分布(单位: dBz)

Fig. 3 PPI distribution at 2.3° elevation (dBz)

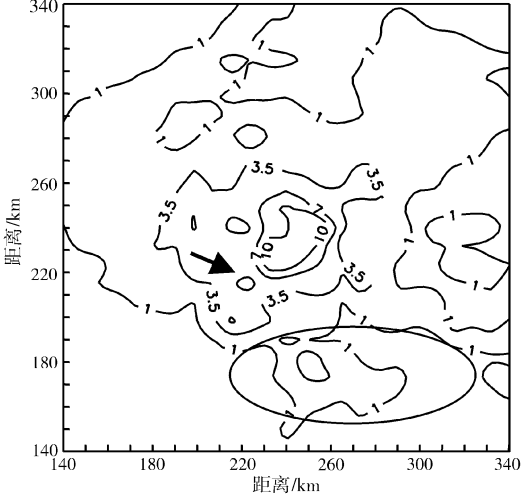


图 4 Q_{VIL} 分布(单位: $\text{kg} \cdot \text{km}^{-2}$)

Fig. 4 Q_{VIL} distribution ($\text{kg} \cdot \text{km}^{-2}$)

子, 能够反映降水回波的三维状况, 还能适当弥补地物阻挡的缺陷, 从而得到比较客观的实验结果。由 Q_{VIL} 测得的降水分布情况(图 5) 和地面雨量计测量结果(图 6) 作比较, 从总体上看测量基本与实况吻合(长箭头所指为 $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 等值线内的降水情况), 但由于实际降水状况是由 10 个雨量计资料插值而成, 雨量计密度分布太稀($1 \text{ 个}/1\,000 \text{ km}^2$), 只能反应出一个大

致状况; 图 6 中 H 处 15.0 的等值线为一降水强中心, 它与图 5 中 F 处值为 15.0 的雨强中心相对应; 图 6 中 E 处在 8.0 的等值线内, 相对周围的雨强较小, 而在图 5 中 D 处表现为一干舌, 并且在 C 处有一降水强中心, 可以看出降水回波在 D 处分支向两个方向延伸, 是由于福建晋江地形阻挡所致。

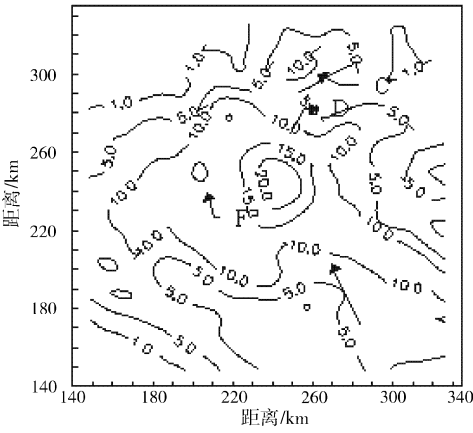


图 5 $Q_{VIL}-I$ 关系测得 I 分布

Fig. 5 Distribution of estimated I from Q_{VIL} according to $Q_{VIL}-I$ relationship

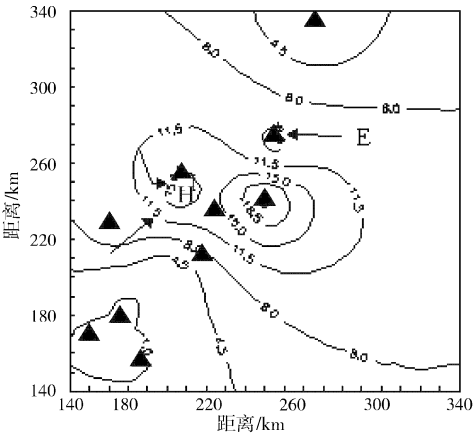


图 6 权重插值后地面 I 分布 (▲: 雨量站)

Fig. 6 I distribution at ground after weighted interpolation (▲: rain gauge)

从以上实例及其他几个时次(本文略)的分析看出, Q_{VIL} 作为测降水因子能更为真实地反映实况, 估计准确率较高; 而且相对于 PPI 资料作降水测量来说, 其可靠性更高。由于地面雨量计密度一般比较稀, 因此由雨量计测值经权重插值所得到的雨强分布, 还没有完全反映实际状况, 特别是在一些细节上, 如强降水中心和雨强梯度较大区域, 而由 Q_{VIL} 能对无雨量计区作出较为可靠的降水状况分析, 并且还能准确的探测出强对流单体或雨强中心。

4 结 论

使用 Q_{VIL} 测量降水, 能够反映降水回波的三维状况和适当弥补地物阻挡的缺欠, 能够提高探测精度, 使得测量结果更为客观; 系统在 586/166PC 机上运行时间为 3~5 min, 当今计算机运行速度飞快发展, 该方法具有推广应用价值。

致谢: 厦门市气象局提供了资料, 在此表示深深的谢意。

参考文献:

[1] GREENE D R, CLARK R A. An indicator of explosive development in severe storms[R]. 7th conference on severe local storms, Missouri, 1971

[2] ROBERT A C, YATES J C. Applications of digital radar data in both meteorology and hydrology[R]. Preprints 15th conference on radar meteorology. America Meteorology Society, 1972

[3] YATES J C. Partial vertical integration of liquid water (PVIL), an improved radar-analytical tool[R]. Preprints 16th conference on radar meteorology. America Meteorology Society, 1975

[4] HERF A W, LARRU J R. Evaluation of RADAP severe-storm-detection algorithms [J]. Bulletin American Meteorological Society, 1986, 2(2): 145~150

[5] WAYNE E M, ROBERT E S. Verification results from 1982~1984 operational radar reflectivity experiment [R].

Preprints 22nd conference on radar meteorology. America Meteorology Society, 1984

[6] 李承明, 戴铁丕. 雨滴微波辐射特征量之间关系的探讨[J]. 南京气象学院学报, 1995, 18(1): 126 ~ 131
[7] 戴铁丕, 詹 煜, 刘婉丽. 用 CAPPI 和 PPI 资料测定区域降水量精度比较[J]. 气象, 1995, 21(7): 9 ~ 14

Estimating precipitation by radar-measured vertical integration of liquid water

PAN Jiang, ZHANG Pei-chang

(Department of Electronic Information and Applied Physics, NIM, Nanjing 210044)

Abstract: The application of Q_{VIL} (Vertical Integration of Liquid Water) to estimating precipitation is discussed. It is the first time that the detailed comparison is made between the estimated precipitation from Q_{VIL} , from the conventionally used PPI and CAPPI, and the in situ measurement of raingauges. It shows that Q_{VIL} can make use of the three-dimensional characteristics of radar observations, and better than Z from either PPI or CAPPI as far as for estimating precipitation.

Key words: vertical integration of liquid water; precipitation intensity; estimating precipitation