

热带测雨卫星的星载雷达和地基雷达探测云回波强度及结构误差的模拟分析^{*}

刘黎平

(中国气象科学研究院, 北京, 100081)

摘 要

为了揭示热带测雨卫星上的测雨雷达热带测雨卫星的星载雷达与 X 波段多普勒雷达在探测云的反射率因子的大小和结构方面的差异, 用散射模式和数值模拟的方法讨论了这两种雷达的波长、雷达波入射方向、波瓣宽度等参量对反射率因子的大小和结构的影响, 并利用所得结果讨论了两种雷达实际观测的差异。结果表明: 雷达波长和入射方向的不同引起的两种雷达测量的反射率因子的差异在 2.0 dBz 以内, TRMM PR 可在强回波中心探测到更大的反射率因子, 并在很大程度上平滑了回波的结构, 在强回波和弱回波区分别低估和高估 3~5 dBz, 造成了观测的云的面积增大、平均回波强度减小、面积积分降水量增大。这些理论结果还不能完全揭示两种雷达实际观测结果的差异, 看来星载雷达和地基雷达探测结果的对比问题很复杂, 其中雷达波的衰减问题是必须考虑的。

关键词: TRMM 测雨雷达, 地基雷达, 模拟分析。

1 引 言

对于 X 波段及波长更短的气象雷达来说, 由于降水粒子对雷达波的散射不严格遵守瑞利散射规律, 天气雷达探测到的等效反射率因子 Z_e 和反射率因子 Z 有所不同, 而且不同波长的雷达所探测到的同一散射体的等效反射率因子也有所不同^[1]。雷达波束到达散射体时具有一定宽度, 它造成了云和降水的回波结构在一定程度上被平滑, 强降水区的降水强度和回波强度常常被低估, 而且波束越宽或雷达相对散射体的距离越远, 这种趋势就越强。由于雷达估测的降水强度与反射率因子不是线性关系, 云和降水结构被平滑就造成了雷达估测面积积分降水量的误差。雷达探测的云和降水回波的结构及雷达估测降水量受很多因素的影响, 不同雷达探测的结果可能有所不同。研究这些因素对雷达探测结果的影响, 对不同雷达资料的分析和利用有重要意义。

1997 年发射的热带测雨卫星 (TRMM) 载有第

一部空间测雨雷达 (PR)^[2], 与常规地基雷达相比, TRMM PR 可以在更大的范围内观测云和降水的三维结构, 定量评估降水量, 而且它还可以获取到难以设置地基雷达的地区如海域、沙漠区云和降水资料, 它的成功发射大大提高了人们对不同区域云和降水性质的认识。但 TRMM PR 的探测结果有待于利用地基雷达资料进行检验, 由于 TRMM PR 的主要参数和探测方式与地基雷达不同, 在进行 TRMM PR 和地基雷达对比分析中应注意这些参数的不同引起的探测结果的差异。星载雷达 TRMM PR 和那曲多普勒雷达 1998 年夏季观测结果的对比分析初步表明: 尽管星载雷达和地基雷达在总体上探测的云面积、回波强度和高度等较为一致, 但在云的细微结构上仍有一定的差异, 特别是强回波区的反射率因子的测量值和云下部平均反射率因子大小有较大的差异^[3]。除了两种雷达的系统误差及雷达波的衰减等因素之外, 这两种雷达的波长、雷达波的入射方向、波束宽度和空间分辨率是造成两种雷达探测结果有所差异的主要原因。为此本文利用散射计

^{*} 初稿时间: 2000 年 3 月 30 日; 修改稿时间: 2001 年 4 月 25 日。

资助课题: 国家重点基础研究发展规划项目“我国重大气候和天气灾害形成机理和预测理论研究(II) 我国重大灾害的形成和预测理论研究(G1998040909)”和国家自然科学基金(49875002)。

算模式和数值模拟方法, 定量研究了上述雷达参量对探测误差的贡献, 以供星载雷达资料分析参考。

2 星载雷达和地基雷达波长和入射方向的不同引起的观测误差

由于降水粒子对 X 波段和小于 X 波段的雷达波的后向散射截面不严格与粒子尺度的 6 次方成正比, 另一方面, TRMM PR 和地基雷达的入射方向和偏振方向不一致, 降水粒子特别是液态粒子在水平方向的尺度大于在垂直方向上的尺度, 这些都会造成 TRMM PR 和地基雷达测量的反射率因子的一定差异。为此, 文中首先分析不同尺度和不同相态的降水粒子对 TRMM PR 和 X 波段地基雷达波的散射特性的差异, 然后在一定粒子谱分布的假设下研究这两种雷达测量不同相态和不同强度回波区的等效反射率因子的差异。

TRMM 星载雷达和 GAME-TIBET IOP 观测期间使用的多普勒雷达的波长分别为 2.2 和 3.2 cm, 这两种雷达波分别以垂直方向和水平方向入射到降水粒子上, 地基雷达波的偏振方向为水平, 在某种意义上, 可以认为这两部雷达组成了“双波长双偏振雷达”。假设液态降水粒子的形状为旋转对称椭球粒子, 其对称轴为垂直方向, 固态降水粒子为球形, 环境温度为 0 °C。这样就可以利用扩展边界条件法计算椭球形和球形粒子的后向散射截面^[4]。

一般来讲, 波长越短, 粒子的后向散射截面就越大, 如何对不同波长的后向散射截面对测量的等效反射率因子的作用进行定量比较呢? 从雷达等效反射率因子的定义式中可知:

$$Z_e = \frac{10^6 \times \lambda^4}{\pi^5 |K|^2} \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \sigma \cdot N(D) dD \quad (1)$$

Z_e 与 $\lambda^4 |K|^{-2}$ 及后向散射截面成正比, 为了研究由于雷达波长、入射方向和偏振方向的不同而产生的等效反射率因子的探测误差, 将这两种雷达波的后向散射截面乘以 $\lambda^4 |K|^{-2}$ 后(乘积表示为 Q)进行对比。图 1 给出了不同尺度的扁椭球液态降水粒子和球状固态粒子对 TRMM PR 和 X 波段地基雷达 Q 值的对比分析结果。从计算的单粒子的散射结果来看, 液态粒子直径在小于 0.2 cm 固态粒子在小于 0.4 cm 时, 降水粒子对两种雷达波的 Q 基本一致, 差异主要发生在较大的降水粒子上。对于液态降水粒子, 直径在 0.2 ~ 0.4 cm 范围内的粒子对 2.2 cm 波长的 Q 大于对 3.2 cm 波长的值, 粒子直径为 0.3 cm 时, 2.2 cm 波长的该值是 3.2 cm 波长的 2.3 倍, 当粒子尺度大于 0.4 cm 时则反之。在 0.6 cm 时, 3.2 cm 波长的 Q 是 2.2 cm 波长的 1.6 倍。冰相降水粒子对 3.2 cm 雷达波的散射能力始终大于对 2.2 cm 雷达波的散射能力, 粒子越大, 这种差异就越大。

对于实际的降水粒子散射体, 假设液态降水粒子谱和固态降水粒子谱为 M-P 谱分布:

$$N(D) = 8000e^{-\frac{3.4D}{D_0}} \quad (2)$$

利用散射模式计算的后向散射截面的结果, 给出了液态和固态降水粒子在不同中值直径情况下, 地基雷达和星载雷达探测的等效反射率因子的差异(图 2)。其中虚线表示 TRMM PR 探测的等效反射率因子, 实线表示地基雷达探测的等效反射率因子

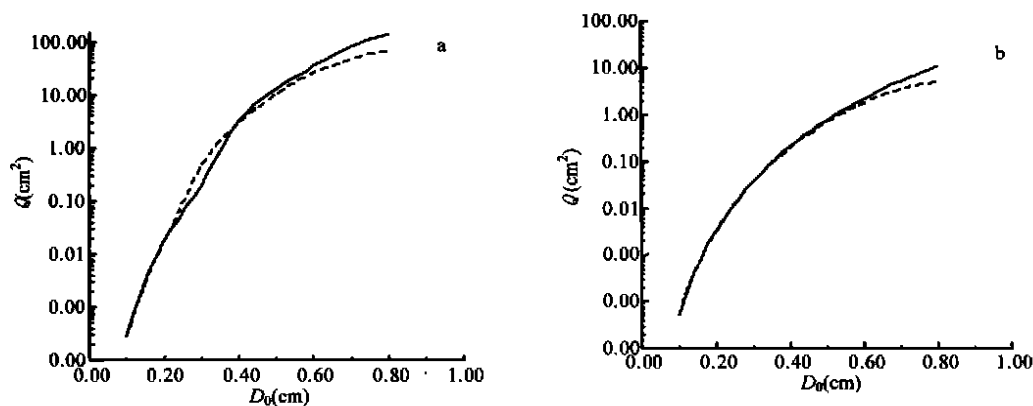


图 1 液态(a)和固态(b)降水粒子对两种雷达波的后向散射截面的比较

(实线表示 3.2 cm, 虚线表示 2.2 cm)

与星载雷达探测值之差。从图中可以看出: 在等效反射率因子小于 65 dBz 范围内 ($D_0 < 0.28 \text{ cm}$), TRMM PR 探测到的等效反射率因子大于地基雷达的探测值, D_0 在 0.13 cm 附近或 $Z = 40 \text{ dBz}$ 时, 两者相差最大, 为 1.0 dBz 左右; 而在大粒子区 ($D_0 > 0.28 \text{ cm}$) 或等效反射率因子大于 65 dBz 时, 地基雷

达探测的等效反射率因子测量值大于星载雷达的测量值, 这样强的回波强度一般出现的比较少, 两种雷达探测的液态降水的等效反射率因子的差异的变化幅度为 1.6 dBz。对于固态降水来讲, 在一般情况下, 地基雷达能探测到更大的回波强度, 但两者差异不大于 0.6 dBz。

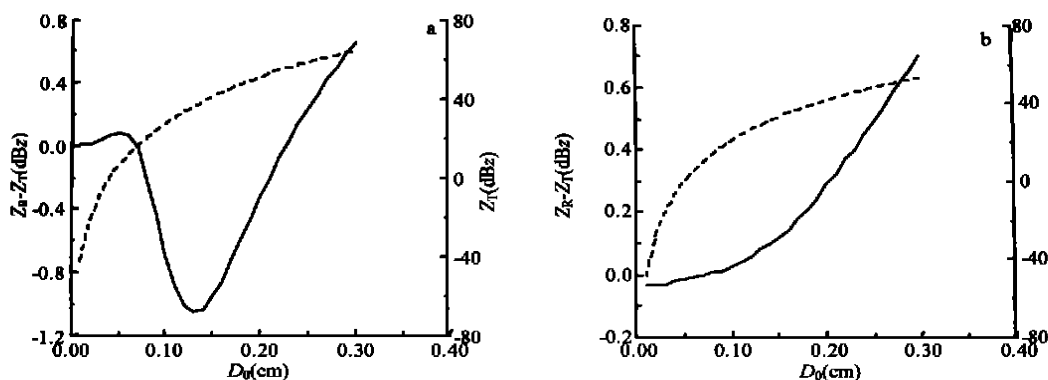


图2 地基雷达和星载雷达探测的液态(a)和固态(b)的不同中值直径的等效反射率因子的对比
(实线为地基雷达和星载雷达参量测量值之差, 虚线为星载雷达测量的等效反射率因子)

从青藏高原云和降水的多普勒雷达探测结果来看, 绝大多数云的反射率因子小于 60 dBz, 如果降水粒子的滴谱符合 M-P 谱, 那么, 雷达波长和入射方向的不同使 TRMM PR 探测的等效反射率因子要大于地基雷达的测量值, 特别是在 40 dBz 附近的回波区内。这一理论计算结果可以在一定程度上反映了 TRMM PR 和地基雷达的对比结果的大致趋势。通过这两种雷达对 1998 年西藏地区的两个个例的观测资料分析, 两种雷达探测云和降水结构差异的初步结论为: 星载雷达在 35 dBz 强度的回波区探测的反射率因子要显著大于地基雷达的测量值, 而且它们测量的水平平均回波强度之差也随高度的降低或反射率因子的增大而增大^[5], 这一观测的对比结果与以上理论结果相一致。但以上理论结果还不能说明为何在强回波区, TRMM PR 和地基雷达的反射率因子的测量值有 3~5 dBz 如此大的差别, 这一差异可能与以下讨论的因素和雷达波的衰减有关。

总之, 由于降水粒子对这两种雷达波的散射不符合瑞利散射规律及其雷达波的入射方向不一致, 造成了这两种雷达观测的云和降水的等效反射率因子有一定差异, 而这种差异与回波强度有关, 它造成了 TRMM PR 雷达能在强回波区中探测到比地基雷达更大的等效反射率因子。

3 波瓣宽度和距离对探测云结构的影响

3.1 计算模式

另一个引起 TRMM PR 和地基雷达探测云和降水误差的原因就是雷达的波瓣宽度、雷达相对观测目标的距离和雷达波入射方向。地基雷达的波瓣宽度为 1.3° , 距离分辨率为 125 m 或 250 m, 最大探测距离为 64 km 或 128 km, 在 64 km 距离上的波束宽度大约为 0.5 km, 它对回波的平滑主要发生在垂直平面上。TRMM PR 雷达的波瓣宽度为 0.7° , 在距地球表面约 350 km 的高度上飞行, 云和降水距 TRMM PR 的距离不小于 330 km, 其距离分辨率为 250 m, 它发射的雷达波与垂直方向的最大夹角小于 13° , 也就是说: 雷达波基本上以垂直方向入射到云中的, 它的波束到达云和降水时的波束宽度约为 1.4 km, 它主要在水平方向对回波进行平滑。星载雷达和地基雷达散射元的体积、水平和垂直方向上的尺度均不一致, 如果云的反射率因子在水平或垂直方向上的变化梯度较大, 这就会造成探测的云的反射率因子大小和结构有所不同。下面用数值模拟的方法定量分析波瓣宽度、入射方向和距离对探测云结构的影响。

天气雷达的波束都有一定宽度和长度, 雷达探测的回波强度实际上是一定体积内(散射体)的不同

位置反射率因子以天线增益为权重的加权平均结果。在一般雷达方程中, 都是假设在该体积内云是均匀的。在这里, 主要讨论在这一体积内云不均匀的情况。现以 Z 表示在散射体内不同位置的云的反射率因子, Z_m 表示实际 TRMM PR 或地基雷达探测的反射率因子, 则 Z_m 可表示为:

$$Z_m = \frac{\iiint_V f(\theta, \Phi) G(\theta - \theta_0, \Phi - \Phi_0) d\theta d\Phi dr}{\left[\iiint_V G(\theta - \theta_0, \Phi - \Phi_0) d\theta d\Phi dr \right]^{-1}} \quad (3)$$

式中, θ_0, Φ_0 表示雷达天线电轴的方位和仰角, θ, Φ 表示散射元的方位和仰角, G 为双路天线增益。这里采用了 Donaldson^[6] 给出的表达式:

$$G = 10^{-0.6(\alpha/\alpha_0)^2} + 10^{-4} \times 10^{-2.4(\alpha - 4\alpha_0)^2/\alpha_0^2} + 4 \times 10^{-6} \times 10^{-2.4(\alpha - 6\alpha_0)^2/\alpha_0^2} + 10^{-6} \times 10^{-2.4(\alpha - 8\alpha_0)^2/\alpha_0^2} \quad (4)$$

其中: α 表示散射体内不同位置和雷达天线的连线与天线电轴的夹角, α_0 为天线波瓣宽度。雷达波的能量主要集中在波瓣宽度以内, α 越大, 雷达波的能量就越小, G 也越小。

文中的主要目的是分析造成 TRMM PR 和地基雷达实际观测云和降水反射率因子的大小和结构差异的原因, 首先必须构造空间分辨率很高的反射率因子的“真实场”, 然后根据两种雷达的参数对式(3)进行积分, 得到模拟的两种雷达观测场的分布,

最后, 比较“真实场”和雷达观测场的差异, 以研究雷达的波束宽度、距离等因素对云和降水三维结构探测的影响。为了使模拟结果更接近实际情况, 参考地基多普勒雷达观测的一个个例资料来构造“真实”反射率因子场, 地基多普勒雷达资料的水平和垂直分辨率为 1.0 km 和 0.5 km, 这一空间分辨率不能满足对 Z_m 积分的要求, 为了保证 Z_m 计算精度, 利用双线性插值的方法, 得到水平和垂直分辨率为 100 m 的细网格资料, 根据每个细网格点相当于雷达的位置 (θ, Φ) , 对式(3)进行积分计算。 θ, Φ 的积分范围为波瓣宽度的 4 倍。由于天线增益随散射单元偏离天线电轴的角度迅速减小, 积分范围的大小对模拟结果影响不大。

选用了 1998 年 7 月 24 日 16 时 40 分(GMT)的体扫作为个例进行水平和垂直结构观测的模拟对比分析。

3.2 水平结构的模拟

图 3 给出了这一个例 2 km 高度上的“真实”场、模拟的 TRMM PR 和地基雷达观测的水平结构的比较。该对流云的最大强度为 30 dBz, 水平尺度为 50 km, 相当于雷达的高度为 11 km(地基雷达高度为 0.45 km), 在青藏高原那曲地区为中等强度和高度、回波面积较大的对流云, 回波的水平 and 垂直梯度中等, 在模拟研究雷达的估测误差方面有一定代表性。选择 2 km 高的水平主要是考虑避免地物回波的影响并研究雷达估测面积积分降水量的问题。

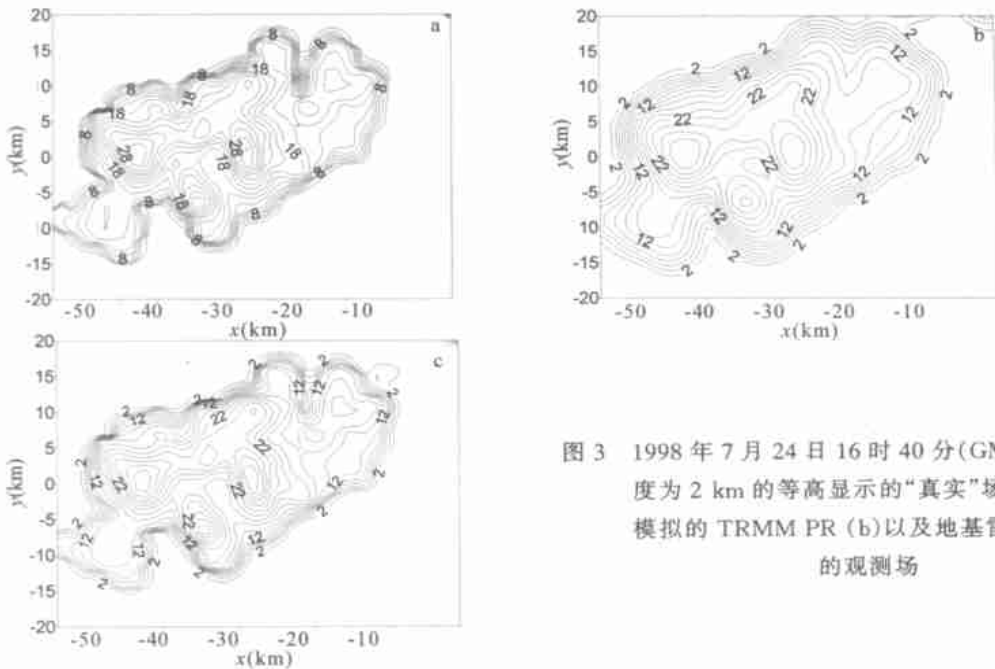


图 3 1998 年 7 月 24 日 16 时 40 分(GMT)高度为 2 km 的等高显示的“真实”场(a)和模拟的 TRMM PR (b)以及地基雷达(c)的观测场

从图 3 可以看出: TRMM PR 观测的反射率因子场与“真实场”的大致结构基本一致,但在很大程度上平滑了实际的云的反射率因子的结构,扩大了云的面积。雷达实际观测的强回波中心的强度小于真实值,而在弱回波区,反射率的观测值大于真实值,同时小的回波中心也消失了。而地基雷达的观测场与“真实场”的差异很小,在等高显示(CAPPI)图上两者的差异不明显。

降水强度的雷达估测值 R 和反射率因子 Z 的关系为非线性关系, TRMM PR 对云和降水回波的平滑必然引起雷达观测面积积分降水量的误差。这里假设强对流降水的 $Z-R$ 关系为:

$$Z = 327 R^{1.55}$$

利用模拟的地基雷达和 TRMM PR 观测的反射率因子估测的图 3 中那一块对流云的面积积分降水量分别为“真实值”的 99% 和 108%, 大于 5 dBz 的回波面积分别增加 2% 和 31%, 大于 10 dBz 的回波面积分别增加 1% 和 8%, 这里可以看出: TRMM PR 的平滑作用对面积积分降水量和回波面积与“真实”值有一定的影响。

TRMM PR 实际上只能探测到大于 18 dBz 的回波, 对大于 18 dBz 的“真实”场和模拟的两种雷达的观测场进行统计, 结果表明: TRMM PR 和地基雷达观测的回波面积与真实值相比分别增加了 2% 和 15%, 平均回波强度减小 0.1 和 0.2 dBz, TRMM PR 高估面积积分降水 4%。

为了更清楚地分析两种雷达对回波的平滑作用, 图 4 给出了 CAPPI“真实场”、TRMM PR 和地

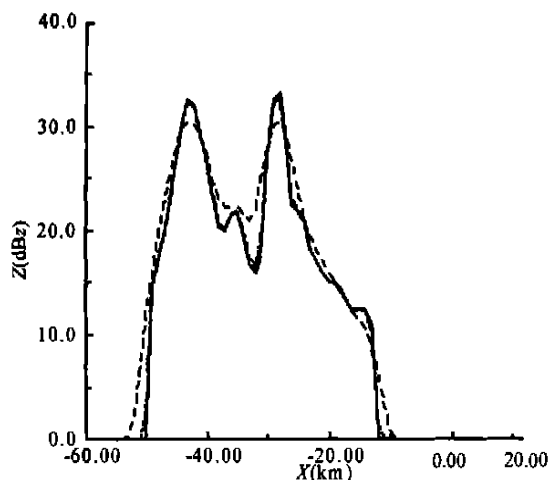


图 4 PPI 上沿 $y = 0$ km 线的“真实”反射率因子和模拟的两种雷达估测值的分布

基雷达观测的反射率因子沿通过两个回波中心的 $y = 0$ km 线的分布, 其中实线表示反射率因子的真实值, 长虚线表示 TRMM PR 的模拟结果, 短虚线表示地基雷达的模拟结果。地基雷达和“真实场”的差异很小, 而 TRMM PR 的反射率因子的观测值在回波的强弱中心和回波边缘与“真实”值有较大的差异。TRMM PR 低估了两个强回波中心 3 dBz 左右, 在弱回波中心高估了 5 dBz, 在回波区边缘观测到了强度达 15 dBz 尺度为 3 km 左右的虚假回波。

从以上讨论可以看出: 地基雷达探测的云和降水的结构与“真实”场相差不大, 比较接近实际情况, TRMM PR 观测结果也大致反映了云和降水的实际情况。但 TRMM PR 的波束达到云体时已经变得比较宽, 它的平滑作用给云的结构、云体的回波面积和降水的探测均带来比较大的影响, 它使 TRMM PR 低估了强中心的回波强度, 增大了弱回波区的回波强度, 减小了云体的平均回波强度, 在实际 TRMM PR 资料分析中应充分注意这种作用。

3.3 垂直结构观测的模拟

图 5 给出了沿 $y = 0.0$ km 上作的通过两个回波中心的 RHI 的“真实”场、模拟的地基雷达和 TRMM PR 的估测场的结构。同样 TRMM PR 在水平方向上也平滑了 RHI 的结构, 使强回波中心的反射率因子减小 2 dBz 左右, 两强中心周围弱回波的强度增大 2~4 dBz, 水平回波尺度也有明显增加, 由于

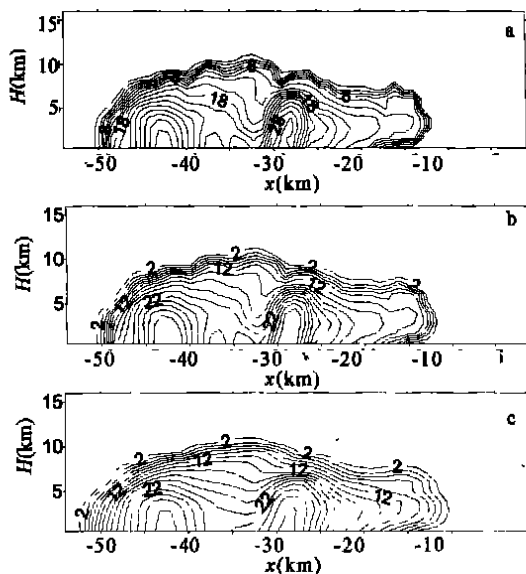


图 5 1998 年 7 月 24 日 16 时 40 分(GMT)沿 $y = 0$ 的 RHI 的“真实”场(a)和模拟的地基雷达(b)以及 TRMM PR(c)的探测场

它只是在水平方向上平滑了回波结构, 它对回波高度影响不大。

由于回波的垂直尺度要小于水平尺度, 而且回波强度的垂直梯度也比水平方向的梯度大, 地基雷达的平滑主要影响 RHI 回波的垂直变化, 使两个回波中心减小 1.0~2.0 dBz, 回波高度也有一定增加。

统计结果表明: 地基雷达和 TRMM PR 使大于 5 dBz 的回波面积分别增加 4% 和 11%, 大于 10 dBz 的回波面积减小 2% 和 5%, 大于 18 dBz 的回波分别增加 2% 和 13%。

图 6 给出了图 5 经过 $x = -28$ km 点的垂直剖面

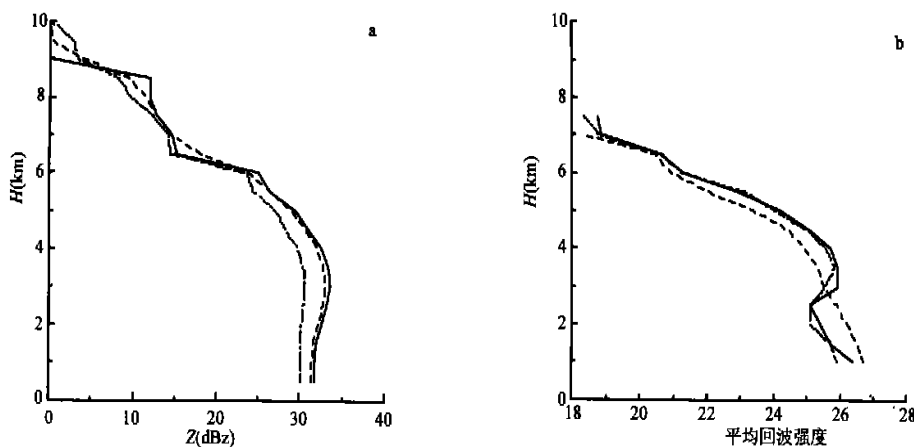


图 6 经过 $x = -28$ km 点的垂直剖面的“真实”场、地基雷达和 TRMM PR 探测的反射率因子 (a) 和大于 18 dBz 的回波水平平均的垂直变化 (b)

以上给出了 1998 年 7 月 24 日的模拟结果, 同样本文也模拟了 6 月 17 日和 8 月 11 日两个个例, 结果和 7 月 24 日相似。总的来讲, 云体越小, 回波水平变化梯度越强, TRMM PR 平滑作用对回波造成的影响就越大。

4 结论和讨论

文中利用数值模拟的方法讨论了地基雷达和 TRMM PR 由于波长、波瓣宽度、距离等因素引起的两种雷达观测云和降水结构的误差, 并得到如下初步结论:

(1) 由于降水粒子对不同入射方向 3.2 和 2.2 cm 雷达波散射特性的不同, 造成 TRMM PR 在强回波区可探测到较地基雷达大 1.0 dBz 左右的回波强度。

(2) TRMM PR 在水平方向的平滑作用在一定

面的“真实”场、地基雷达和 TRMM PR 探测的反射率因子 (图 6a) 和 RHI 上水平平均回波强度 (图 6b) 的垂直变化。由于 TRMM PR 在水平方向的平滑作用使得通过回波中心的回波强度有明显的减小。在 $H = 6$ km 高度上, 垂直变化比较大, 地基雷达的垂直平滑明显改变了回波的变化趋势。从水平平均回波强度的垂直变化来看, 由于 TRMM PR 在水平方向的平滑作用使平均回波强度在 3 km 高度以上小于“真实”值而在此高度以下大于“真实值”, 这一结果与实际观测结果相一致。地基雷达的观测的平均结果随高度的变化趋势与“真实”结果比较一致。

程度上改变了回波的结构, 使强回波变弱, 弱回波变强。

(3) TRMM PR 的平滑作用也改变了平均强度随高度的变化趋势, 使云下层的平均回波强度高于实际值 1 dBz, 在上层低 1 dBz。

(4) TRMM PR 显著增加了弱回波的面积, 使面积积分降水量有所变化。

以上结果是针对一个 50 km 尺度大小的回波进行分析研究的, 很明显, 回波面积越小, 回波强度的空间变化梯度越大, TRMM PR 的平滑作用就越明显。另外, 本文从降水粒子的散射特性、雷达波入射角、波束宽度和雷达相对观测目标的距离等方面分析了它们对两种雷达观测云和降水结构的影响, 但没有涉及雷达波的衰减问题。实际上云和降水对雷达波的衰减是一个很重要的问题, 在 TRMM PR 和 3 cm 地基雷达资料处理和分析时必须考虑衰减

的影响。青藏高原云和降水有明显的地域特征, 其零度层很接近地面, 降水粒子的相态分布很复杂, 目

前还缺少降水粒子的滴谱分布, 这样进行衰减订正存在一定困难。

参考文献

- 1 Rogers R R. The effect of variable target reflectivity on weather radar measurements. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1971, 97: 154 ~ 167
- 2 Simpson J. Tropical rainfall measuring mission (TRMM): A Satellite mission to measure tropical rainfall. Report of the science Steering Group. Printinf office, Washington D C, 1988. 94pp
- 3 冯锦明, 刘黎平, 王致君, 楚荣忠. 青藏高原地面 Doppler 雷达与 TRMM 星载雷达测云比较. *高原气象*, 2001, 20(4): 345 ~ 353
- 4 Barber P, Yeh C. Scattering of electromagnetic wave by arbitrarily shaped dielectric bodies. *Appl Opt*, 1975, 14: 2864~ 2872
- 5 冯锦明, 刘黎平等. 青藏高原地面 Doppler 雷达与 TRMM 星载雷达测云比较. *高原气象*, 2001, 20(4): 345~ 353
- 6 Donaldson R J. A demonstration odd antenna beam errors in radar reflectivity patterns. *J Appl Meteor*, 1964, 3: 611~ 623

SIMULATION AND ANALYSIS ON OBSERVATION ERRORS OF CLOUD INTENSITY AND STRUCTURE WITH TRMM PR AND GROUND-BASED RADAR

Liu Liping

(*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

Abstract

In order to explain theoretically the difference of observed cloud intensities and structures by TRMM PR and ground-based radar, the effects of wavelengths, orientations of radar waves and radar beam width on the observations of reflectivity were simulated. The results show that the error due to the different wavelength and orientation of radar wave is within 2.0 dBz, TRMM PR can observe larger reflectivity than ground-based radar in echo center. TRMM PR smoothes the cloud structure, overestimates and underestimates 3– 5 dBz in strong and weak echo areas, respectively. Beam width and long distance from TRMM PR to target cause TRMM PR to observe large echo area and area integrated rainfall amount and weak averaged echo intensity. The theoretical results above can only explain part of observed facts, which means that the comparison of observation result between TRMM PR and ground-based radar is complicated, the attenuation of radar wave within precipitation area is the main factor to affect the observed result.

Key words: TRMM PR, Ground-based radar, Simulation analysis.