

基于微波成像仪资料反演陆面降水

闵爱荣¹ 张翠荣² 王晓芳¹

(1 中国气象局武汉暴雨研究所, 武汉 430074; 2 武汉市气象局, 武汉 430040)

摘要 为了探讨微波亮温与降水的关系, 结合时空匹配较好的 TRMM 卫星测雨雷达(PR)、微波成像仪(TMI)资料, 用逐步回归方法, 建立统计反演降水的新算式, 并对新算式反演结果进行验证。结果表明: 对 0.1~3 mm/h 和 3~6 mm/h 的降水来说, 新算式反演结果与 PR 雷达反演降水相关较好; 对 6~10 mm/h 的降水来说, 新算式反演结果与 PR 雷达反演降水相关较差; 对于大于 10 mm/h 的降水, 新算式反演结果与 PR 雷达反演降水有较好的相关性, 但均方根误差比较大, 说明用这种方法反演降水, 对于强降水中心的确定有很好的参考价值, 但反演结果较实际偏小。通过对 2004 年 7 月 18 日发生的一次特大降水反演结果表明, 卫星反演雨带的空间分布、强降水中心位置与 PR 雷达反演降水以及地基雷达反演降水基本一致。

关键词 TRMM 卫星 测雨雷达 资料匹配 反演降水

引言

我国是一个雨季集中、暴雨多发的国家, 因暴雨所引发的洪涝灾害常给人们生命财产和国民经济建设带来巨大损失, 因此, 对定量降水的研究不仅是一个科学研究的范畴, 而且还有着重要的社会意义。由于降水在时间和空间上存在很大的不均匀性, 而常规使用的雨量计分布密度有限, 地基雷达也只能测量有限的空间范围, 作为空基观测重要手段的卫星观测, 由于其较大的空间覆盖性, 使其可以快速对全球降水的分布做出时间和空间上都较为连续的观测, 因此成为监测研究全球降水变化的一种重要手段。

早期的卫星估算降水最主要是应用静止卫星的热红外通道和可见光通道进行降水估计, 其原理是依据云顶温度越低降水量越大来估计雨强。但是, 可见光和红外波对云和降水的穿透性较差, 所获得的可见光和红外云图信息主要来自降水云顶部, 降低了遥感信息与地面观测资料的可比性。近年来, 随着星载微波探测器的发展, 微波资料反演降水成为近年来卫星遥感降水的一个重要方向, 其原因在于相比热红外通道和可见光通道而言, 微波能深入一定的云层, 甚至到地表, 可直接反映降水云的微物

理特性, 与降水的关系更为直接。

微波资料反演降水, 其求解方法可以分为两类: 物理方法和经验方法。物理方法是把微波辐射传输方程与云的微物理模式相结合, 根据大气模式进行辐射传输方程的数值积分获得地表降水。该方法物理意义较强, 但对云、雨微物理过程的认知程度, 方程求解方法及解的稳定性等问题制约了其发展。经验方法是根据降水在物理意义上的可测性, 不考虑微波亮温和降水之间复杂的物理机制, 直接建立观测值和降水之间的统计关系, 又称之为统计方法。Butten 于 1963 年最早提出微波降水反演思想。随后, Spencer 等^[1,2] 通过结合 SMMR 微波资料和地基雷达来估计降水, 并且第一个建立了用 SMMR 的 37 GHz 散射信息来反演陆面降水的经验算式。近 20 年来, 随着多通道微波观测仪器的发展, 统计方法反演地面降水也取得了很大进展, 如 Ferraro 等^[3] 利用 8 年 SSM/I 观测资料分析了降水率、云、水汽、雪盖、海冰的时间序列变化特征, 并根据微波亮温资料建立了判断雪盖、海冰、沙漠等下垫面的方法。Grody^[4] 利用 SSM/I 资料, 建立了用散射指数反演陆面降水的散射方法。Anagnostou 等和 Hong 等^[5] 利用 SSM/I 和 TMI 资料, 采用统计方法先后建立了一些判别指数来区分层状云和对流云降

水,取得了一定的效果。近年来,我国学者也开始利用微波资料来反演降水并探讨其中的优缺点^[6~10]。本文在 TRMM 卫星上搭载的测雨雷达 PR(Precipitation Radar)及微波成像仪 TMI(TRMM Microwave Imager)产品的基础上,建立统计反演降水的新算式,探讨微波反演降水的精度。

1 资料介绍及资料匹配

TRMM 卫星由美国国家宇航局(National Aeronautics and Space Administration)和日本国家空间发展局(National Space Development Agency)共同研制,并于 1997 年 11 月 27 日成功发射,是第 1 颗专门用于定量测量热带、亚热带降雨的气象卫星。TRMM 卫星上搭载有 5 种科学测量仪器,与降水测量密切相关的有 3 种:可见光/红外扫描仪 VIRS(Visible and Infrared Scanner)、测雨雷达(PR)及微波成像仪(TMI)。本文所使用的卫星资料是由日本 NASDA 地球观测中心的遥感技术中心提供的 TRMM 卫星主被动微波探测资料,其中包括 TMI 的 1B11 产品和测雨雷达 PR 提供的 2A25 产品,资料分布时间为 2002 年 6~7 月,所取的资料范围为 $26^{\circ}\sim 34^{\circ}\text{N}$, $109^{\circ}\sim 123^{\circ}\text{E}$ 。

由于 TRMM 卫星时间、空间分辨率上的限制,TRMM 卫星每天约有 16 条轨道不定点、不定时通过热带地区,通过选取范围所需要的时间也只有 2 min 左右,为了使 TMI、PR 资料在时间和空间上相匹配,以 TMI 像素为中心,取距离 TMI 像素点半径为 0.125° (19 GHz 分辨率的一半)范围内的所有 PR 像素,求其权重平均后的结果作为 TMI 像素对应的雨强。通过这样的匹配得到 22201 组降雨样本,含有 PR 提供的 3 种瞬时雨强和 TMI 各个通道亮温。由于 PR 回波强度在 1.5 km 下受地物回波的影响较大,因此我们选取 PR 降雨垂直廓线中 2 km 的雨强来近似表征地面雨强,文中所有提及 PR 雨强都是指测雨雷达 2 km 高度处的雨强。

2 统计反演算式的建立

从前面建立的测雨雷达与亮温匹配的数据中选取大约 80% 的样本,一共有 16656 组样本用来建立反演算式,其余 20% 的样本用来检验。采用逐步回归方法,通过多次比较回归效果,建立统计反演算式。从表 1 可以看出:通过对高频率的通道亮温

的逐步引入,复相关系数有了明显提高,最后通过对 9 个通道亮温的引入,得到复相关系数相对较高而估计标准误差相对较小的统计反演算式:

$$R_0 = 74.3022 + 0.163902T_{b10v} - 0.148594T_{b10h} + 0.131376T_{b19v} + 0.179945T_{b19h} - 0.261698T_{b22v} - 0.475055T_{b37v} + 0.120816T_{b37h} - 0.109160T_{b85v} + 0.135505T_{b85h} \quad (1)$$

式中 R_0 为雨强, T_b 为各通道亮温,其下标中 v 表示垂直极化, h 表示水平极化。

表 1 多通道亮温与降水强度的逐步回归结果

因子	复相关系数	估计标准误差
通道 1	0.067339	3.05980
通道 1~2	0.154508	3.03003
通道 1~3	0.157642	3.02860
通道 1~4	0.526754	2.60704
通道 1~5	0.641015	2.35411
通道 1~6	0.703534	2.17969
通道 1~7	0.706569	2.17057
通道 1~8	0.712433	2.15252
通道 1~9	0.719924	2.12901

3 反演结果的验证

从前面建立的测雨雷达与亮温匹配的数据中选取大约 20% 的样本对得到的统计反演算式进行验证,选取反映平均误差(B)、均方根误差(σ)和标准偏差(s)等统计量来分析算式反演结果,其中 R 表示反演降水, O 表示观测降水, N 表示样本数,这里 N 为不同降水等级的样本数。

$$B = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (R_j - O_j)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (R_j - O_j)^2}$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N ((R_j - O_j) - B)^2}$$

根据上面方程,有 $\sigma^2 = B^2 + s^2$,即反演误差包含系统性和非系统性误差,平均误差表示反演算法中的系统性误差,标准偏差表示反演算法中的非系统性误差。

从表 2 可以看出,新建立的反演算式对雨强在 0.1~3 mm/h、3~6 mm/h 的降水,反演效果较好,与实际雨强的相关系数较高,平均误差和标准偏差

表 2 不同雨强式(1)计算值和 PR 的相关系数及误差

雨强/(mm·h ⁻¹)	相关系数	平均误差	均方根误差	标准偏差
0.1~3	0.522	0.529	1.183	1.058
3~6	0.277	-0.300	1.771	1.745
6~10	0.092	-2.332	3.333	2.380
>10	0.374	-7.193	8.887	5.218
总	0.725	-0.009	2.146	2.146

都较小;对雨强在 6~10 mm/h 的降水,反演算式效果较差,与实际雨强的相关系数较低,平均误差和标准偏差都较大。这可能因为雨强在 6~10 mm/h 时,既有层状云降水也包含有对流云降水,这两种降水所对应的亮温值的分布范围比较大,雨强与亮温的相关性较差,导致反演结果与实况相差较大;对于大于 10 mm/h 的降水,反演结果与实际降水有较好的相关性,对比 3~6 mm/h、6~10 mm/h 的降水有非常明显的提高,但均方根误差比较大,这说明用这种方法反演降水,对于强降水中心的确定还是有很好的参考价值,但是会以牺牲强度为代价,考察其原因,可能在于本文所建立算式的样本数大多分布于 0.1~10 mm/h 之间,大于 10 mm/h 的样本只占很少的一部分,而且又没有根据降水的大小进行分类建立反演算式,所以导致对大于 10 mm/h 的降水反演偏小,这也向我们提出一个问题,就是在进行样本选取

时要考虑不同等级降水的合理分布,然后进行反演。

从不同等级降水的平均误差可以看出,新算式反演降水强度除 0.1~3 mm/h 偏高外,其余都偏低,尤其是对大于 10 mm/h 的降水偏低 7.2 mm/h 左右,即反演值小于观测值,对于这种以平均误差为主的系统性误差,在实际反演降水时可以考虑对反演值加上平均误差进行订正。

4 个例分析

2004 年 7 月 17~18 日,湖南北部至湖北中部普降暴雨,TRMM 卫星监测到这一过程。TRMM 卫星过境时间为 7 月 18 日 03:37~03:42(世界时),根据 TRMM 卫星监测到的亮温数据来反演降水,并与 TRMM 卫星上的测雨雷达 PR 以及武汉、合肥、长沙 3 地雷达反演的降水进行比较,来验证算式的反演结果。

图 1a、b、c 分别为算式(1)反演降水、TRMM 卫星上 PR 雷达反演降水以及地面雷达反演降水结果。由于观测范围的不一致,导致这 3 张图得到的降水范围也不一致,但是通过这 3 张图可以看出,图 1b 和图 1c 两者联合起来和图 1a 的降水的走向、强降水中心是基本一致的,这说明用所得到的反演算式来反演降水是可行的。

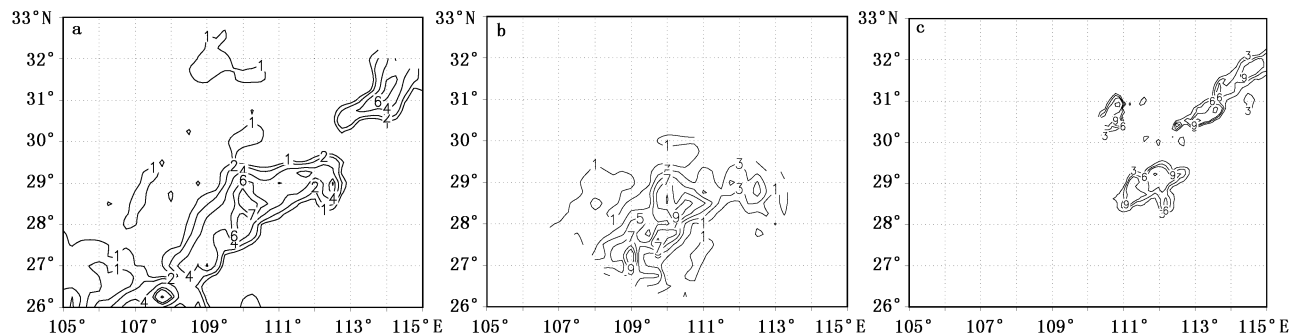


图 1 (a)算式(1)反演降水结果;(b)PR 雷达反演降水结果;(c)地面雷达反演降水结果(单位:mm)

由图 1a 和图 1b 可以看出,TRMM 卫星微波辐射计扫描范围远远大于 TRMM 卫星上携带的雷达所观测的范围,这也是为什么要利用微波资料反演降水的原因之一,从两者共同的扫描范围可以看出,反演算式估算降水的强度、雨区与 TRMM 卫星携带 PR 雷达估测降水是非常接近的。

由图 1a 与图 1c 可以看出,算式(1)反演降水与地面雷达估算降水的雨带走向、强降水中心等基本

一致,但是由于地面雷达观测和 TRMM 卫星在时间和空间上不匹配,导致反演降水在强度、位置上存在一定的偏差。

5 结论与讨论

本文在 TRMM 卫星上搭载的测雨雷达 PR 及微波成像仪 TMI 产品的基础上,建立统计反演降水的新算式,并对所建立的算式进行验证以及个例分析。

结果表明:新建立的反演算式估算降水与 TRMM 卫星携带 PR 雷达估测降水以及地面雷达估算降水在雨带、降水中心以及强度等方面是基本一致的,这说明所得到的反演算式是可行的,但仔细分析验证结果,还存在很多不足之处。例如对雨强在 6~10 mm/h 的降水,反演效果较差,与实际雨强的相关系数较低,平均误差和标准偏差都较大,其原因可能在于在这个雨强范围内,既有层状云降水也包含有对流云降水,这两种降水所对应的亮温值的分布范围比较大,雨强与亮温的相关性较差,所以反演结果与实际相差较大。当务之急是建立对流性降水与非对流性降水判断算式,然后分别进行反演;对于大于 10 mm/h 的降水,反演结果与实际降水有较好的相关性,对比 3~6 mm/h、6~10 mm/h 的降水有明显的提高,但均方根误差比较大,这说明用这种方法反演降水,对于强降水中心的确定还是有很好的参考价值,但是会以牺牲强度为代价。考察其原因,可能在于本文所建立算式的样本数大多分布于 0.1~10 mm/h 之间,大于 10 mm/h 的样本只占很少的一部分,而且又没有根据降水的大小进行分类建立反演算式,所以导致对大于 10 mm/h 的降水反演偏小。这也向我们提出一个问题,就是在进行样本选取时要考虑不同等级降水的合理分布,然后进行反演。因此如何提高降水反演的精度,仍然是值得我们进一步研究的问题。

参考文献

- [1] Spencer R W, Hinton B B, Olson W S. Nimbus-7 37GHz radiances correlated with radar rain rates over the Gulf of Mexico [J]. *J. Climate Appl. Meteor.*, 1983, 22(12):2095-2099.
- [2] Spencer R W, Martin D W, Hinton B B, et al. Satellite microwave radiances correlated with radar rain rates over land [J]. *Nature*, 1983, 304:141-143.
- [3] Ferraro R R, Marks G F. The development of SSM/I rain rate retrieval algorithms using ground based radar measurements [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1995, 12(8):755-770.
- [4] Grody N C. Classification of snow cover and precipitation using the Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) [J]. *J. Geophys. Res.*, 1991, 96:7423-7425.
- [5] Hong Y, Kummerow C D, Olson W S. Separation of convective and stratiform precipitation using microwave brightness temperature [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1999, 38(8):1195-1213.
- [6] 何文英, 陈洪滨, 周毓莹, 等. 微波被动遥感陆面降水统计反演算式的比较[J]. *遥感技术与应用*, 2005, 20(2):221-227.
- [7] 李莉, 朱元竞, 赵柏林, 等. 卫星微波(SSM/I) 遥感陆地降雨[J]. *科学通报*, 1998, 43(17):1877-1881.
- [8] 李万彪, 陈勇, 朱元竞, 等. 利用热带降雨测量卫星的微波成像仪观测资料反演陆地降水[J]. *气象学报*, 2001, 59(5):591-600.
- [9] 何会中, 崔哲虎, 程明虎, 等. TRMM 卫星及其数据产品应用[J]. *气象科技*, 2004, 32(1):13-18.
- [10] 邓伟, 何会中, 程明虎, 等. TRMM 卫星微波成像仪分级产品及其反演降水算法[J]. *气象科技*, 2004, 32(4):206-212.

Retrieval of Precipitation over Land Using Microwave Imagers

Min Airong¹ Zhang Cuirong² Wang Xiaofang¹

(1 Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430074; 2 Wuhan Meteorological Bureau, Wuhan 430040)

Abstract: In order to study the connection of microwave brightness temperature and precipitation, a new statistical retrieval algorithm is built by the stepwise regression method with well-matched precipitation radar (PR) data and TMI brightness temperatures data. The results show that for the precipitation of 0.1 to 3 mm/h and 3 to 6 mm/h, the retrieved results correlate well with the retrieved precipitation from PR radar; for precipitation of 6 to 10 mm/h, the correlation is poor; and for precipitation over 10 mm/h, the correlation is well, but the root-mean-square error is big, which means that the method can be used to predict strong rainfall centers with smaller retrieved values. With the method, the heavy rainfall process happened on 18 July 2004 is successfully retrieved. The results show that the spatial distribution of the rain belt and the location of the strong rainfall center are consistent with the retrieved precipitation from PR radar and Doppler radar.

Key words: TRMM satellite, precipitation radar, data matching, precipitation retrieval