

河南省非降水云中液态水的卫星微波反演试验研究^{*1}

彭 亮 姚展予

(中国气象科学研究院中国气象局云雾物理重点开放实验室,北京 100081)

摘 要

云中液态水分布对全球气候和局地天气变化有重要影响,是判别人工影响天气作业潜力区的重要依据。利用 TRMM 卫星微波成像仪(TMI)85.5 GHz 通道垂直极化亮温资料与 NCEP 再分析资料,结合 VDISORT 模式采用逐步逼近方法反演了河南地区地表比辐射率;再利用 TRMM/TMI 85.5 GHz 通道垂直极化亮温资料、TRMM/VIRS 红外辐射资料及 NCEP 再分析资料,结合 VDISORT 模式采用迭代的方法反演了河南地区云中液态水的垂直积分总含量。与红外卫星云图、TRMM 卫星 2A12 产品及 NCEP 资料对比分析表明:该研究提出的反演陆地上空非降水云中液态水方法是可行的,且对云中液态水垂直积分总含量水平分布的反演结果较对比产品结果更好。

关键词: 云中液态水;卫星微波;反演试验;河南地区

引 言

云中液态水的探测在当前气象业务与研究工作中非常重要。云中液态水与大气中水汽及冰相粒子的相互转化直接影响云的降水过程,与太阳短波辐射及地球长波辐射之间的相互作用影响着全球辐射能量平衡,其分布对全球气候和局地天气变化都有重要影响^[1-2]。云中液态水探测可为云中人工增雨潜力区的判断提供依据,提高人工影响天气业务的效率^[3],还可为数值预报模式提供更为可靠的初始场,为模式的开发研究进行验证^[4-5]。

一般常规探空资料中缺乏云中液态水资料,目前国内外主要利用遥感手段探测云中液态水。飞机探测范围有限,成本较高,主要用于云微物理特征的研究工作,或者用于验证其他探测云中液态水的手段^[6]。利用地基雷达和微波辐射计^[7-9]探测云中液态水可避开地面背景辐射的影响,但也难以对云中液态水做大范围全过程监测。虽然目前卫星的时空分辨率及探测技术尚不能完全满足各种业务与研究工作的需求,但是随着卫星探测技术的发展,其应用前景相当乐观。

利用星载辐射计反演云中液态水一般是选择合适的波段直接反演云中液态水的垂直积分总含量。

有云时,卫星红外探测器探测到的是云顶及以上大气发射的辐射,基本上不包括云中及其下的大气与地表辐射(薄卷云例外),可见光波长较短,基本上只能探测云顶信息,而微波则可以穿透厚云甚至降水,因此要探测整层云的云中液态水的垂直积分总含量,微波遥感是较为可行的手段。

由于海表物理状况比较单一,因此星载微波辐射计反演云中液态水研究大多局限在海洋上空,且已有业务化产品。陆面的辐射特征相对海面较为复杂,首先,陆地表面微波比辐射率较海面大,构成了更为强烈的辐射背景;其次,陆地表面微波辐射特性复杂多变,比辐射率随地表面物质成分结构、热力学温度、表面几何形状、内部颗粒结构、地表粗糙度以及植被等地表物理特征和状态的变化而变化,变化范围可从干沙地表的几乎为 1 到湿土壤的 0.7 以下。陆地表面复杂的辐射特性大大增加了星载微波辐射计遥感陆地上空云中液态水的难度。

Grody^[10]假设陆地表面辐射率从 0.9 到 1.0 均匀分布,模拟出不同大气状况的卫星接收亮温,建立反演陆地上空云中液态水和水汽垂直积分总含量的线性回归方程。结果表明:云中液态水的反演误差过大,使反演结果基本上失去了意义。为了削弱地表的影响,Jones 等^[11]提出用 SSM/I 对云中液态水更加敏感的 85.5 GHz 通道,结合辐射传输模式

* 国家自然科学基金项目(40375001)和国家科技支撑计划课题(2006BAC12B02)共同资助。

2007-07-02 收到,2008-03-26 收到再改稿。

采用迭代方法反演云中液态水。Greenwald 等^[12]和 Combs 等^[13]利用 85.5 GHz 通道亮温极化差反演云中液态水,减少了 Jones 等的方法对低云液态水反演精度较差以及反演精度受云中液态水垂直分布影响较大等局限性,缺点是只能用于极化的地表,且仪器误差会导致更大的随机误差。Deeter 等^[14]提出了利用极化亮温差的参数化方法(PDP)。

卫星微波反演陆地上空云中液态水的难点在于地表比辐射率的处理,陆地表面微波比辐射率的时空不均匀分布增加了地表向上发射辐射的计算难度。国内外早期的科学家如 Grody 等^[10], Feddes 等^[15], Liou 等^[16]事先根据经验和地表状况确定出地表比辐射率,精度难以保证。后期如 Jones 等^[11]结合红外通道运用模式计算地表微波比辐射率,方法比较繁琐,假设较多,精度也难以保证。赵高祥等^[17]利用两个或三个通道分别假设比辐射率不随时间变化或比辐射率相同时间内在各通道变化一致计算了地表比辐射率和地表温度,但资料时间匹配比较困难,且具体应用到业务上也有相当难度。Deeter 等^[14]提到的参数化双通道反演方法中可以避免单独计算地表比辐射率,但事先假设了地表比辐射率极化差不随频率变化。

本文利用 TRMM/TMI 分辨率为 5.1 km 的 85.5 GHz 通道垂直极化亮温资料,结合 VDISORT 模式采用逐步逼近方法^[18]估算地表比辐射率,该方法简单易行又能保证精度;再结合 VDISORT 模式采用迭代的方法反演了云中液态水,并给出了试验区云中液态水的分布。

1 原理和方法

结合 VDISORT 模式,选取晴空 TRMM/TMI 85.5 GHz 通道垂直极化亮温资料及探空资料,采用逐步逼近方法反演试验区地表比辐射率;假设试验区地表比辐射率在短时间内不发生变化,利用计算得到的地表比辐射率、云天的 TRMM/TMI 85.5 GHz 通道垂直极化亮温资料、TRMM/VIRS 波长为 12.0 μm 的红外辐射资料及探空资料,结合 VDISORT 模式采用迭代方法反演出试验区上空云中液态水垂直积分总含量。由于探空资料空间密度有限,在河南省仅有郑州、南阳两站,为反演较大范围的云中液态水,拟取 NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 每天 4 次再分析资料给出的温度、气压及湿度值代替常规探空资料运用到反演研究中,计算

每个扫描点的地表比辐射率或云中液态水垂直积分总量时选择最近格点的 NCEP 再分析资料。

VDISORT 是一个计算矢量辐射传输 (Vector DIScrete Ordiation Radiative Transfer) 的 FORTRAN 程序^[19],计算时假设地表为理想的朗伯体,在计算单个点的地表比辐射率或云中液态水时假设大气水平均匀。逐步逼近^[18]计算地表比辐射率即不断调整地表比辐射率的值,结合晴空大气廓线资料代入 VDISORT 模式中模拟卫星接收亮温值,与 TRMM 卫星探测值进行对比,取模拟亮温值与卫星探测值最接近时的预设地表比辐射率值为该点的地表比辐射率值。Jones 等^[11]利用辐射传输方程,结合探空资料直接算出地表比辐射率,由于利用了与计算云中液态水不同的辐射传输模式,理论上会导致更大的系统误差。相比而言,逐步逼近法计算地表比辐射率的步骤比较简洁。由于地表比辐射率实测资料很难获取,难以直接验证地表比辐射率计算值,因此,主要通过对云中液态水反演值的分析,间接讨论逐步逼近方法计算地表比辐射率的合理性。

设云中液态水垂直积分总含量初始值 $W_{\text{CL}0} = 0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, $W_{\text{CL}1} = 0.005 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。利用 TRMM/VIRS 红外辐射资料,得到云顶亮温,再结合探空资料可以得到云顶近似高度。根据式(1)利用地表温度和露点温度可估算该地的抬升凝结高度^[20]

$$z_c \approx 123(T_0 - T_{d0}) \quad (1)$$

假设该地抬升凝结高度即为云底高度。再假设云上下均一,即令云中 q_c 为一常值,则有

$$q_c \int_{z_b}^{z_t} \rho(z) dz = W_{\text{CL}} \quad (2)$$

式(2)中, Z_t, Z_b 分别为云顶、云底高度, q_c 表示云中单位体积内云中液态水与空气质量的比值, ρ 为空气的密度。在模式中假设大气水平均匀,垂直分为多层,则有

$$q_c \sum_{i=i_b}^{i_t} \Delta h_i \rho_i = W_{\text{CL}} \quad (3)$$

式(3)中, i_t, i_b 分别表示云顶和云底在 VDISORT 模式中所在的层数,则在云内即有

$$q_c = \frac{W_{\text{CL}}}{\sum_{i=i_b}^{i_t} \Delta h_i \rho_i} \quad (4)$$

结合 NCEP 再分析资料、计算得到的地表比辐射率代入 VDISORT 模式可模拟卫星接收 85.5 GHz 垂

直极化亮温 T_{BC_i} , 令 $\Delta T_{B_i} = |T_{BC_i} - T_{BM}|$, 其中 T_{BM} 是卫星实际探测的 85.5 GHz 垂直极化亮温, 然后判断 ΔT_{B_i} 是否小于允许的最大误差。若达到允许的误差范围之内, 表明已达到反演所需的精度, 即跳出循环。如果 ΔT_{B_i} 尚未达到允许的误差范围, 则将 ΔT_{B_i} 代入下式求得 $W_{CL_{i+1}}$ ^[11]

$$W_{CL_{i+1}} = W_{CL_i} - \frac{\Delta T_{B_i} (W_{CL_i} - W_{CL_{i-1}})}{\Delta T_{B_i} - \Delta T_{B_{i-1}}} \quad (5)$$

循环上述步骤, 直到 ΔT_{B_i} 达到规定的误差范围之内, 即可跳出循环, 确定出 W_{CL} 。用迭代法可迅速确定出误差范围内的值, 大大节省计算时间。

2 地表比辐射率计算结果及对比分析

选取河南省 2005 年 3 月 6 日晴空的 TRMM/TMI 85.5 GHz 通道垂直极化亮温资料, 结合 NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料给出的大气温度、压强及湿度值, 利用 VDISORT 模式采取逐步逼近的方法估算河南地区的地表比辐射率。图 1 给出的是利用 2005 年 3 月 6 日 12:09:22—12:11:16(北京时, 下同) 时段的 TRMM/TMI 85.5 GHz 亮温资料计算得到的河南地区地表比辐射率。

表 1 所示为几种有代表性的地表类型的微波比辐射率。自然地表是空间大气的强烈辐射背景, 因

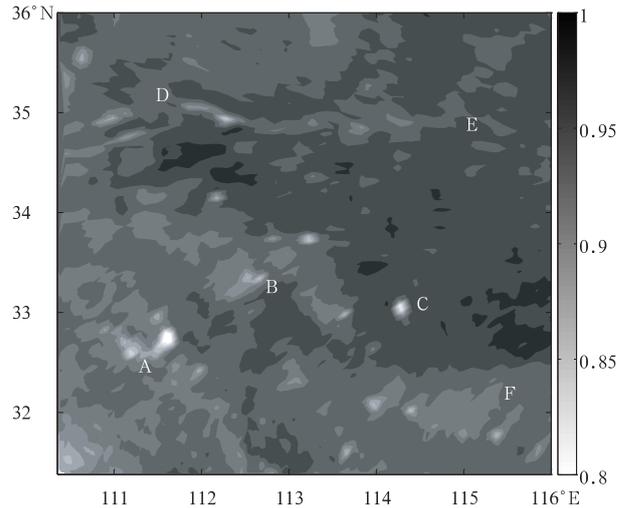


图 1 地表比辐射率计算结果

Fig. 1 The calculated emissivity

而自然地表微波辐射特性的复杂多变增加了空间大气遥感问题的复杂性。地表比辐射率随地表层物质成分结构、热力学温度、表面几何形状、内部颗粒结构等地表物理特征和状态的变化而变化。大陆地表最为复杂, 微波辐射特性差别比较大, 一般干土壤的比辐射率比湿土壤大, 粗糙地表的比辐射率比平坦地表大。植被的存在也会影响地表的比辐射率, 影响植被辐射特性的因素有植物的几何形状、含水量和植物的体积比等^[21]。

表 1 地表微波比辐射率($\theta=0^\circ$)^[21-22]

Table 1 Microwave surface emissivity ($\theta=0^\circ$)^[21-22]

地表类型	平静水面	湿土壤	干土壤	湿沙	干沙	湿水泥板	干水泥板	草地	冰
比辐射率	0.41	0.7	0.8	0.76	0.93	0.69	0.87	0.94	0.97

图 1 中 A 处有低值区, 对应河南省西南边界处的丹江口水库; 图 1 中 B 处的低值点对应南阳市北部的鸭河口水库; C 处的低值点对应驻马店市东侧的宿鸭湖; 图 1 中 D—E 有一条细的低值带, 对应的是黄河; F 处的低值亮带对应河南省东南水域较多比较湿润的地区; 图 1 中右侧中部的高值区可能植被覆盖较好, 草地较多, 使得地表的微波比辐射率值较大。

由于研究的区域比较广泛, 地表比辐射率的空间分布较为复杂, 难以用辐射仪器取得试验区实测地表比辐射率资料与反演结果做定量的对比分析, 因此主要通过对云中液态水反演结果的分析间接说明逐步逼近方法反演地表比辐射率的合理性。

3 云中液态水的反演结果及对比分析

选取相同区域 2005 年 3 月 21 日 TRMM/TMI 85.5 GHz 通道垂直极化亮温资料。TRMM 卫星运行当日共有 4 次经过河南上空, 利用 03:06:33—03:08:11 时段的亮温资料进行云中液态水的反演试验。试验区该时段云的分布特征比较鲜明, 便于分析, 且有时间比较接近的对比资料。将估算得到的 3 月 6 日晴空地表比辐射率曲面拟合到 3 月 21 日云顶亮温资料所在经纬度上, 利用 VDISORT 模式, 结合 NCEP 再分析资料及 TRMM/VIRS 波长为 $12.0 \mu\text{m}$ 的红外辐射资料, 运用迭代方法反演试验

区的云中液态水垂直积分总含量。

图 2a 为反演得到的云中液态水垂直积分总含量;图 2b 为 TRMM/VIRS 红外云图,图中所示的亮温越低,反映云顶高度越高。可以看出图 2b 右侧和左侧的云区,右下方的无云区,左下方的云带都和图 2a 所示相应位置的云中液态水垂直积分总含量的高、低值区比较一致。

图 2c 所示为 TRMM 卫星 2A12 产品给出的云中液态水垂直积分总含量。TRMM 卫星产品给出的云中液态水的水平分布、范围和图 2a 反演计算的云中液态水的水平分布、范围趋势一致,但覆盖范围比反演计算的小,TRMM 卫星 2A12 产品给出的有效云中液态水含量值较少,而且给出的云中液态水垂直积

分总含量也比反演计算值小一半左右。究其原因,可能是 TRMM 卫星主要用于探测降水云系,而关于非降水云的水凝物资料偏少,因此云中液态水反演计算结果与 2A12 产品存在比较明显的差别。

图 2d 所示为 2005 年 3 月 21 日 02:00 NCEP 再分析资料给出的试验区云中液态水垂直积分总含量。对比图 2a,2c,且结合红外云图(图 2b)可以看出,NCEP 再分析资料给出的云中液态水的水平分布范围与反演计算的结果及风云卫星云图给出的云的水平分布相比均有较大的出入。而上述研究分析表明,反演计算的云中液态水的水平分布范围比较合理,因此反演计算的云中液态水垂直积分总含量相对 NCEP 资料中给出的值应更为合理。

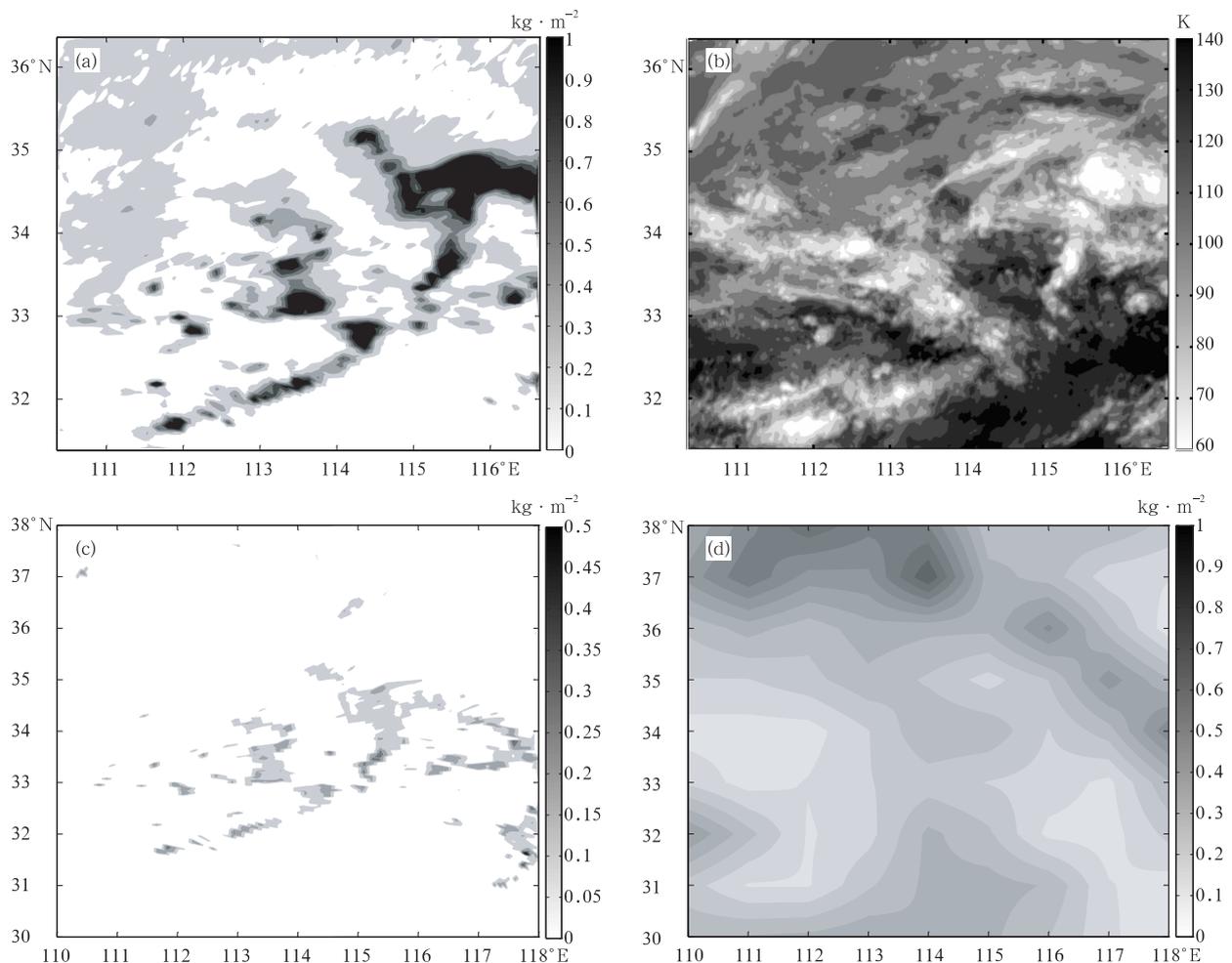


图 2 2005 年 3 月 21 日云中液态水反演结果与其他资料对比分析图

(a) 03:00 云中液态水垂直积分总含量水平分布,(b) 03:00 TRMM/VIRS 红外云图,(c) 03:00 TRMM 2A12 产品中液态水垂直积分总含量,(d) 02:00 NCEP 再分析资料云中液态水垂直积分总含量

Fig. 2 Comparative analysis between retrieved cloud liquid water content and other data on March 21, 2005

(a) the retrieved cloud liquid water at 03:00, (b) infrared cloud picture at 03:00, (c) the cloud liquid water content of TRMM 2A12 at 03:00, (d) the cloud liquid water content of NCEP reanalysis at 02:00

4 误差分析

4.1 云中液态水垂直分布对反演精度的影响

云中液态水实测资料较少,误差分析比较困难,主要结合数值模拟的方法探讨上述反演结果的误差。利用 VDISORT 模式,选取一定探空资料,在模式中假设一上下均匀 2×10^3 m 厚的云,并假设不同的云底高度,模拟得到的卫星接收 85.5 GHz 垂直极化亮温随云中液态水垂直积分总含量的变化(如图 3 所示)。

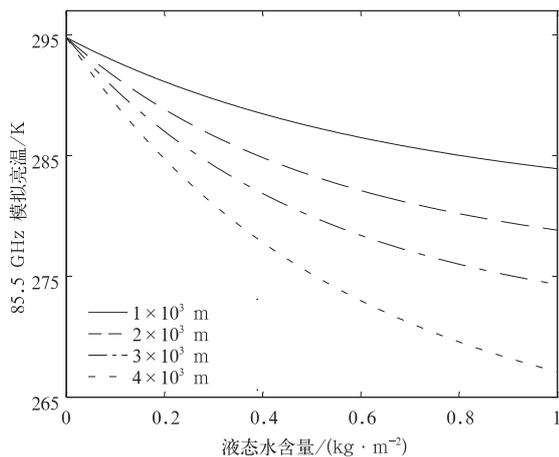


图 3 模拟不同云底高度卫星接收 85.5 GHz 亮温随云中液态水垂直积分总含量

Fig. 3 Changes of bright temperature of 85.5 GHz from different cloud bottom height with cloud liquid water content

可以看出,随着云底高度的增大,VDISORT 模式模拟所得卫星接收 85.5 GHz 垂直极化亮温随云中液态水垂直积分总含量的增加而变化的范围也增大,因此中高云含水量的变化对卫星接收 85.5 GHz 垂直极化亮温的影响显然较低云大,所以利用 85.5 GHz 单个通道垂直极化亮温资料反演中高云液态水含量显然要比反演低云的精度高。

本文利用 TRMM/VIRS 红外辐射资料计算云顶亮温,结合 NCEP 再分析资料确定云顶的近似高度。由于比较厚的层状云和积状云的发射率接近于 1,但是薄云的发射率可低至 0.5 左右,因此采用该方法推算云顶高度是有误差的;而利用地表温度和露点温度估算抬升凝结高度得到的云底高度通常和实际大气状况有差别,因此都会给云中液态水垂直

积分总含量的反演带来误差。

4.2 利用 NCEP 再分析资料代替探空资料对反演精度的影响

图 4a,4c 分别表示 2005 年 3 月 6 日和 3 月 21 日探空资料与 NCEP 再分析资料温度随气压变化对比图;图 4b,4d 分别表示 3 月 6 日和 3 月 21 日探空资料与 NCEP 再分析资料比湿随气压变化对比图,其中还包含根据温度和气压计算出来的饱和比湿随气压的变化曲线。从图 4a 可见,3 月 6 日 08:00 NCEP 再分析资料的温度值随气压的变化较为平滑,无逆温层结,而探空资料给出的温度值随气压的变化分别在 1000 hPa 左右和 200 hPa 左右存在逆温层结,相对 NCEP 再分析资料起伏较大,NCEP 再分析资料给出的温度与探空资料相比在低层较低,高层较高。从图 4b 可见 3 月 6 日 NCEP 再分析资料包含湿度值随高度的分布较探空资料大,且相当一部分都达到或接近饱和;探空资料给出的比湿较小,绝大部分远未达到饱和。从图 4c 可见 3 月 21 日 NCEP 再分析资料给出的温度随气压变化与探空资料对比比较一致,两条温度随气压的变化曲线在多处重合,而探空资料的温度廓线在 700 hPa 左右存在逆温层结。从图 4d 可见 3 月 21 日 NCEP 再分析资料给出的湿度随气压的变化与探空资料在数值上无较大差别,最大区别在 700 hPa 左右,即探空资料所示逆温层附近,也可能是探空仪器测量误差。两种资料所示的大气状况都达到了较高的饱和度,比较符合云天的天气情况。

分别将 2005 年 3 月 6 日的探空资料和 NCEP 再分析资料代入 VDISORT 模式中,计算得到的亮温相差大约 5 K 左右,模式模拟表明,地表比辐射率值 0.01 的变化会造成卫星接收亮温 2 K 的变化,因此 5 K 的亮温误差会对地表比辐射率的反演带来约 0.03 的误差,地表辐射率的反演误差会对随后云中液态水的反演带来影响。结合图 3 可以看出,若反演云底高度较高的云中液态水含量,5 K 的误差会给云中液态水垂直积分总含量的反演带来大约 $0.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 的误差。其中还没有考虑云天 NCEP 再分析资料与探空资料的偏差,但利用地基微波辐射计探测云中液态水垂直积分总含量也会有 15% 的误差,因此 $0.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 的误差对于卫星遥感尚可接受。

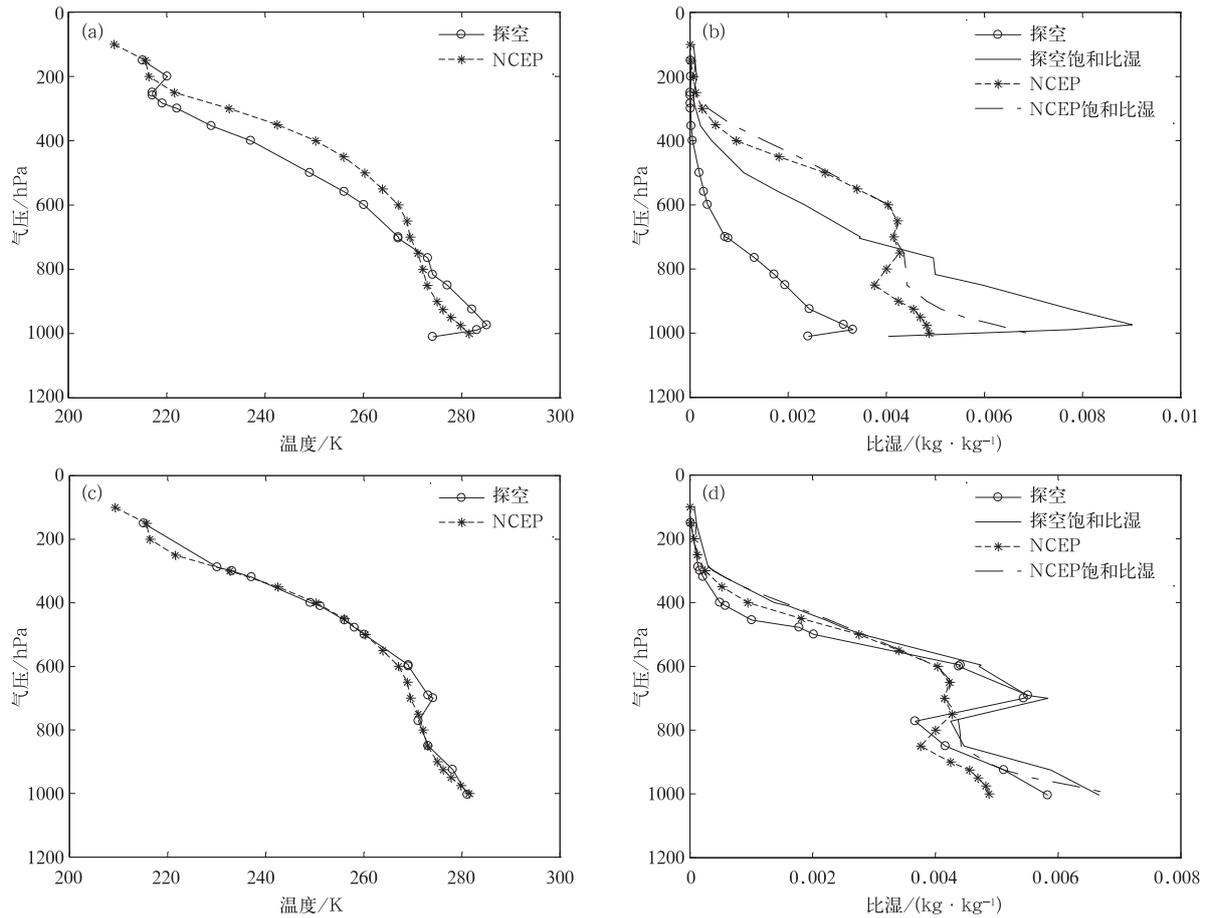


图4 NCEP再分析资料与探空资料对比图

(a) 2005年3月6日温度对比, (b) 2005年3月6日湿度对比,
(c) 2005年3月21日温度对比, (d) 2005年3月21日湿度对比

Fig. 4 Comparative analysis between NCEP reanalysis and sounding data

(a) temperature on March 6, 2005, (b) humidity on March 6, 2005

(c) temperature on March 21, 2005, (d) humidity on March 21, 2005

5 结论与讨论

利用 TRMM/TMI 亮温资料结合 NCEP 再分析资料采取逐步逼近的方法估算试验区晴空下地表比辐射率, 然后利用云天的 TRMM/TMI 亮温资料及 TRMM/VRIS 红外辐射资料, 结合 NCEP 再分析资料反演试验区上空非降水云中液态水的垂直积分总含量, 并与其他资料进行了对比分析, 得出以下结论:

1) 相比 NCEP 再分析资料、TRMM 卫星产品给出的云中液态水含量值, 本算法对云中液态水垂直积分总含量的水平分布范围反演较好。NCEP 资料给出的云中液态水分布范围与风云卫星云图所示云的分布范围对应较差, TRMM 卫星产品给出的云

中液态水垂直积分总含量水平分布较好, 但是可能其产品主要用于降水云, 所以产品中包含的云中液态水有效值偏少。

2) 模式模拟表明: 高云的含水量对卫星接收亮温的影响较低云大, 因此本文提出的反演中高云中液态水的精度较低云高。

利用 NCEP 再分析资料代替探空资料对反演精度有一定影响, 在以后的工作中应尽可能利用加密探空资料进行反演试验。为简化运算步骤, 估算地表比辐射率时选用了整个试验区天气都比较晴朗、且扫描范围涵盖试验区的亮温资料, 由于适用条件受限, 云中液态水的实测资料较少, 对云中液态水反演研究的验证主要是定性的, 定量的对比工作目前尚难进行, 今后还需努力做些定量的对比工作。

参 考 文 献

- [1] Paltridge G W. Cloud-radiation feedback to climate. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1980, 106: 895-899.
- [2] Stephens G L, Greenwald T J. The Earth's radiation budget and its relation to atmospheric hydrology. Part II: Observation of cloud effects. *J Geophys Res*, 1991, 96: 15325-15340.
- [3] 姚展予, 王广河, 游来光, 等. 寿县地区云中液态水含量的微波遥感. *应用气象学报*, 2001, 12(增刊): 88-95.
- [4] Fowler L D, Randall D A, Rutledge S A. Liquid and ice cloud microphysics in the CSU general circulation model. Part I: Model description and simulated microphysical processes. *J Climate*, 1996, 9: 489-529.
- [5] Kristjánsson J E. Initialization of Cloud Water in a Weather Prediction Model. Preprints of the Ninth Conference on Numerical Prediction. Boston, Mass, Amer Meteor Soc, 1991: 823-824.
- [6] Rosenkranz P W, Barath F T, Blinn J C, et al. Microwave radiometric measurements of atmospheric temperature and water from an aircraft. *J Geophys Res*, 1972, 30: 5833-5844.
- [7] Snider J B. Ground-based sensing of temperature profiles from angular and multi-spectral microwave emission measurements. *J Appl Meteor*, 1972, 11: 958-967.
- [8] Decker M T, Dutton E J. Radiometric observations of liquid water in thunderstorm cells. *J Atmos Sci*, 1970, 27: 785-790.
- [9] 黄润恒, 邹寿祥. 两波段微波辐射计遥感云天大气的可降水 and 液态水. *大气科学*, 1987, 11(4): 397-403.
- [10] Grody N C. Remote sensing of atmospheric water content from satellites using microwave radiometry. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 1976, AP-24: 155-162.
- [11] Jones A S, Vonder Haar T H. Passive microwave remote sensing of cloud liquid water over and regions. *J Geophys Res*, 1990, 95: 16673-16683.
- [12] Greenwald T J, Combs C L, Jones A S, et al. Further development in estimation cloud liquid water over land using microwave and infrared satellite measurements. *J Appl Meteor*, 1997, 36: 389-405.
- [13] Combs C L, Greenwald T J, Jones A S, et al. Satellite detection of cloud liquid water over land using polarization differences at 85.5 GHz. *Geophys Res Lett*, 1998, 25: 75-78.
- [14] Deeter M N, Vivekanandan J. New Technique for Retrieving Liquid Water Path over Land Using Satellite Microwave Observations. Fifteenth ARM Science Team Meeting Proceedings, Daytona Beach, Florida, Mar 14-18, 2005.
- [15] Feddes R G, Liou K N. Atmospheric ice and water content derived from parameterization of Nimbus 6 high-resolution infrared sounder data. *J Appl Meteor*, 1978, 17: 536-551.
- [16] Liou K N, Duff A D. Atmospheric liquid water content derived from parameterization of Nimbus-6 scanning microwave spectrometer data. *J Appl Meteor*, 1979, 18: 99-103.
- [17] 赵高祥, 汪宏七. 由卫星测量确定地面温度和比辐射率的算法. *科学通报*, 1997, 42(18): 1957-1960.
- [18] 姚展予, 李万彪, 朱元竞, 等. 用 TRMM 卫星微波成像仪遥感云中液态水. *应用气象学报*, 2003, 14(增刊): 19-26.
- [19] Weng F. A multi-layer discrete-ordinate method for vector radiative transfer in a vertically-inhomogeneous, emitting and scattering atmosphere-I: Theory. *J Quant Radiat Transfer*, 1992, 47: 19-34.
- [20] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国. 大气物理学. 北京: 北京大学出版社, 2005.
- [21] 张培昌, 王振会. 大气微波遥感基础. 北京: 气象出版社, 1995.
- [22] 周秀骥, 吕达仁, 黄润恒, 等. 大气微波辐射及遥感原理. 北京: 科学出版社, 1982.

Satellite Microwave Retrieval Test for Non-precipitating Cloud Liquid Water in Henan Area

Peng Liang Yao Zhanyu

(Key Laboratory for Cloud Physics and Weather Modification of CMA, Chinese Academy
of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

The detection of cloud liquid water (CLW) is very important in current meteorological service and research. The precipitation process is influenced by the interaction between CLW, vapor and ice phase particles, so the changes of global climate and local weather are influenced by the distribution of CLW. The detection of CLW can be used to identify the artificial precipitation enhancement potential regions, so the efficiency of weather modification can be improved. The liable data needed in numerical weather prediction can be obtained by the detection of CLW, and the study of numerical prediction model can be validated by the observational results of CLW. Now, the application of satellite detection can be used for monitoring the large scale and whole process of the CLW.

The TRMM Microwave Imager (TMI) 85.5 GHz channel vertical polarization brightness temperature and the vertical atmospheric properties (including temperature, pressure and humidity) contained in 4 times daily $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ NCEP data are used to calculate the surface emissivity in Henan Province ($31.4^{\circ} - 36.0^{\circ}\text{N}$, $110.4^{\circ} - 116.0^{\circ}\text{E}$) on March 6, 2005, by means of a numerical step-by-step method with VDISORT. The surface emissivity is supposed to be unaltered in short time. The emissivity of test area on March 21 is considered to be the same with the emissivity on March 21. The cloud top height is calculated with the TRMM/VIRS $12.0 \mu\text{m}$ channel infrared radiation data, and the cloud bottom height is supposed to be the local lifting condensation level calculated with the temperature and dew point temperature. The retrieved cloud is supposed to be vertically uniform distribution, then the CLW is retrieved by means of iteration method with TRMM Microwave Imager (TMI) 85.5 GHz channel vertical polarization brightness temperature and NCEP data.

The calculated surface emissivity is evaluated with the Henan map, and the retrieved CLW is compared with the CLW data from TRMM 2A12 products in the same time and the CLW data from NCEP data, infrared cloud picture in the same period. The retrieved CLW is coincident with the distribution of cloud in infrared cloud picture, and shows improvements comparing with the CLW data from TRMM 2A12 products, from which the data are probably related to the precipitation, so the range of CLW is more smaller than retrieved CLW and the valid data of CLW are too few. The CLW data from NCEP are not corresponding to either the retrieved CLW or the distribution of cloud in infrared cloud picture. The model simulation results show that the method is more accurate in retrieving high cloud CLW than low cloud. The error is increased by the use of NCEP data instead of sounding data in the CLW retrieving. So in the future the condensed sounding data should be used in CLW retrieval test. The comparative analysis is mostly qualitative for the lack of measurements, so the quantitative comparative analysis should be done more in the future study.

Key words: cloud liquid water; satellite microwave; retrieval test; Henan area