

文章编号: 2096-1618(2016)02-0130-06

基于云雷达和微波辐射计反演混合云液态水含量的算法

谢晓林^{1,2,3,4}, 刘黎平¹

(1. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081; 2. 四川省气象探测数据中心, 四川 成都 610225; 3. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225; 4. 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 四川 成都 610072)

摘要:液态水含量(LWC)是重要的云微物理参数,为反演得到混合云的LWC廓线,分析和总结Z-LWC经验关系,根据冰相粒子与温度的分布模型,剔除冰相粒子对Z的贡献,提出联合反演混合云LWC垂直廓线的方法。利用2013年4~8月,在广东三水和四川理塘外场试验数据,分析雷达反演的液态水总量与微波辐射计LWP数据的相关性,确定数据的可用性,并利用联合反演算法进行混合云的LWC的反演试验,结论如下:反演算法由于引入微波辐射计LWP数据,减小由于Z-LWC关系的实际变化而带来的误差。

关键词:气象雷达;云雷达;微波辐射计;液态水含量

中图分类号: TN959.4

文献标志码: A

0 引言

液态水含量(LWC)是重要的云微物理参数,对气候变化、天气变化、人工影响天气和飞机安全等很多方面都有着重要的影响。对液态水路径(LWP)的反演算法已比较成熟,然而,对LWC垂直廓线的研究,现有的探测和反演方法十分有限^[1]。1954年,David Atlas^[2]首先提出单独用雷达对LWC进行反演时,采用Z-LWC经验关系 $LWC = a(Z)^b$ 进行,并利用雷达联合飞机对较弱层云进行观测,得出Z-LWC的经验关系 $LWC = 0.048 \times (Z)^2$ 。Sauvageot等^[3]于1987年利用云雷达和机载微波辐射计,进行大量层积云数据的统计拟合得出Z-LWC经验关系 $LWC = 14.540 \times (Z)^{0.76}$ 。1997年,Fox等^[4]用地基雷达联合飞机观测,挑选出独立11天的北大西洋层积云数据对LWC进行反演,得出经验关系 $LWC = 45.277 \times (Z)^{0.86}$ 。Mile等^[5]将层云分为海洋性层云和大陆性层云并分别做研究,并得到海洋层云的Z-LWC关系: $LWC = 2.4 \times (Z)^{0.5}$ 和大陆性层云的Z-LWC关系: $LWC = 4.6 \times (Z)^{0.5}$ 。可以看出针对不同的云类,Z-LWC关系差别很大。

以上Z-LWC经验关系都是针对非降水云得到,而当反演降水云的LWC时,利用上述公式使反演结果偏大^[6]。Baedi等^[7]在CLARE98(激光雷达与天气雷达联合观测实验)实验中,利用地基雷达、激光雷达与飞机观测,得出云中存在少量毛毛雨情况下的Z-LWC经验关系 $LWC = 0.457 \times (Z)^{0.19}$ 。Krasnov等^[8]在第3次

对流降雨云外场实验中,结合CLARE98等实验的结果,得到了云中存在明显降雨情况下的Z-LWC经验关系 $LWC = 0.258 \times (Z)^{0.633}$ 。由于各经验关系都是在假设 a, b 系数不随高度变化的情况下而得到,在粗糙的LWC反演中应用广泛。

中国气象科学研究院与吉林人工影响天气办公室合作,于2010年在吉林开展了飞机和地基毫米波雷达的云联合观测试验,在忽略空气上升速度和大气湍流影响条件下,结合一次层状云降水过程得到了 $LWC = 0.01289 \times (Z)^{0.559}$ 的Z-LWC关系^[9-10]。

从20世纪70年代开始,地基微波辐射计就被利用到水汽和云水的研究上,利用双(多)通道微波辐射计反演LWP的算法已经发展成为比较精确的反演方法,反演精度较高。Löhnert等^[11]和Crewell等^[12]研究了利用多通道微波辐射计的统计回归算法反演的LWP的精确度,得出在仪器正确定标且云模式选择正确的情况下,微波辐射计LWP受降水粒子影响产生的误差低于3%。

为减小Z-LWC关系对反演结果的影响,Frisch等^[13-14]在ASTEX(大西洋层积云演变试验)中利用毫米波雷达和微波辐射计联合反演了暖云的LWC垂直廓线,分别假设云滴谱满足对数正态分布和GAMMA分布,利用统计方法得到Z与LWC之间的关系,利用微波辐射计得到的LWP作为拟合条件,得到各个高度上的LWC值,Frisch等^[15]把用此方法反演出的LWC廓线和飞机数据作对比,结果十分理想。

然而Frisch的联合反演算法仅被应用于反演弱强度的暖云中,并未考虑该算法在混合云中的使用问题。

收稿日期:2015-07-23

基金项目:973资助项目(2012CB417202)、气象行业专项资助项目(GYHY201306004、GYHY201406001)

2013 年 4 ~ 8 月,云雷达外场试验在广东省佛山市三水区 and 四川省甘孜州理塘县进行,观测到很多混合云数据。根据 Dunn 等^[16]于 2011 年提出的方法,建立冰相粒子随温度(°C,下同)的分布模型,剔除冰相粒子在回波强度中的贡献,建立云雷达与微波辐射计联合反演混合云的 LWC 垂直廓线的方法。

1 观测设备与数据

2013 年 4 ~ 8 月,中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室在广东佛山三水和四川甘孜理塘开展了毫米波雷达外场观测试验。毫米波雷达和微波辐射计等气象仪器同时同地观测,试验中,毫米波雷达采用仰角 90°的垂直观测方式,当有天气过程时,雷达开机观测,微波辐射计全天 24 h 不间断观测。

毫米波雷达为 2008 年由气科院灾害天气国家重点实验室与中国航天科工集团公司第 23 所合作自主研发的中国第一部 Ka 波段地基多普勒/双偏振毫米波雷达系统^[17]。微波辐射计为美国 Radiometrics 公司生产的 MP-3000A 型地基微波辐射计^[18]。

毫米波雷达回波强度等数据保存在 REC 文件中,每个文件有 500 个径向数据,时间分辨率为 0.852 s,距离分辨率为 30 m。微波辐射计数据文件格式为 CSV 文件,数据的时间分辨率为 2 min,和毫米波雷达强度数据对比,一般雷达数据取 2 min 的时间平均。距离分辨率为从 0 ~ 500 m 高度上每隔 50 m 一个数据,500 ~ 2 km 高度上每 100 m 一个数据,2 ~ 10 km 每 250 m 一个数据。

在外场试验中,毫米波雷达和微波辐射计的数据大多为强度较强,云高较高的混合云数据。广东三水的海拔为 30 m,观测数据中混合云较多,四川理塘海拔为 3960 m,观测数据中的冷云较多。由于毫米波雷达在观测较强降水过程时,回波强度衰减严重,所以该 HMBQ 毫米波雷达主要被应用于研究弱降水云的物理特性,而文中将挑选一些毫米波雷达观测时间长且强度低于 20 dBz 的混合云数据进行分析。

2 反演算法

反演算法的基本思路是,在认为微波辐射计能输出准确 LWP 的前提下,根据云雷达得到的反射率因子 Z 的垂直分布,将液态水总量分配到各个高度上得到 LWC 廓线。然而微波辐射计得到的 LWP 是垂直高度上的液态水总量,雷达测得的反射率 Z 包含着液态粒子与冰相粒子的贡献,所以建立冰相粒子的分布模型,

剔除冰相粒子在反射率 Z 中的信息。

反演公式如下:

$$LWC_i = \frac{Q}{\sum_{i=1}^M Z_i^b \Delta z} Z_i^b \quad (1)$$

其中, LWC_i 表示第 i 个雷达距离库上的液态水含量(g/m^3), Q 表示微波辐射计中的 $LWP/(g/m^2)$, b 为选择的 Z-LWC 经验关系中的系数 b ,Frisch 选择 $b = 0.5$, M 表示云内雷达距离库数, Δz 表示雷达距离库长(m)。该方法的实质是利用微波辐射计观测的 LWP 数据作为一个约束,减小 Z-LWC 经验关系中 a 系数的变化和雷达回波强度误差等对反演结果的影响。

利用微波辐射计和云雷达联合反演混合云 LWC 廓线的关键问题和难点是如何确定液态和冰相粒子的分布及其在回波强度中所占比例,温度是粒子呈现为不同相态的决定性因素之一,为利用毫米波雷达和微波辐射计联合反演混合相云的 LWC 廓线,需要从零度层以上的回波强度中,提取云水对应的强度信息,剔除云冰的回波强度信息。为此根据 Dunn 等^[16]在 2011 年提出的云水和云冰含量与温度的关系,得到冰相粒子随温度的分布模型(表 1),建立混合云的 LWC 反演方法。

表 1 冰相粒子随温度分布模型

液态粒子	混合相	冰相粒子
$T > 0^\circ$	$0^\circ > T > -16^\circ$	$T < -16^\circ$

由此可以得到中液态粒子的贡献比例 $Fliq$:

$$Fliq = \begin{cases} 1, & T > 0^\circ \\ 1 + T/16, & 0^\circ > T > -16^\circ \\ 0, & T < -16^\circ \end{cases} \quad (2)$$

则反演混合云 LWC 的公式为

$$LWC_i = \frac{LWP}{\sum_{i=1}^M (Z_i \times Fliq)^b \times \Delta z} (Z_i \times Fliq)^b \quad (3)$$

3 微波辐射计和雷达数据的相关性分析

在综合利用毫米波雷达和微波辐射计数据反演 LWC 时,首先要分析两者的相关性。具体方法是:首先获得微波辐射计的 LWP 数据 Q_1 ,然后选取对应时间的雷达强度数据,根据回波强度大小,选择合适的 Z-LWC 关系,利用公式(4)得到反演的液态水总量(Q_2),对比 Q_1 与 Q_2 的关系。数据和相关信息见表 2。

$$Q_2 = a \sum_{i=1}^M Z_i^b \times \Delta z \quad (4)$$

表 2 雷达与微波辐射计对比数据的信息

个例	时间(北京时,下同)	地点	相关系数	Z-LWC 关系
1	2013 年 5 月 14 日 16 时 53 分 ~ 17 时 43 分	三水	0.96	Baedi
2	2013 年 5 月 15 日 17 时 07 分 ~ 19 时 57 分	三水	0.91	刘黎平
3	2013 年 5 月 16 日 13 时 02 分 ~ 14 时 06 分	三水	0.94	Baedi
4	2013 年 5 月 16 日 18 时 09 分 ~ 19 时 21 分	三水	0.60	Baedi
5	2013 年 6 月 05 日 10 时 00 分 ~ 10 时 22 分	三水	0.98	Baedi
6	2013 年 7 月 28 日 11 时 37 分 ~ 11 时 56 分	理塘	-0.60	Baedi

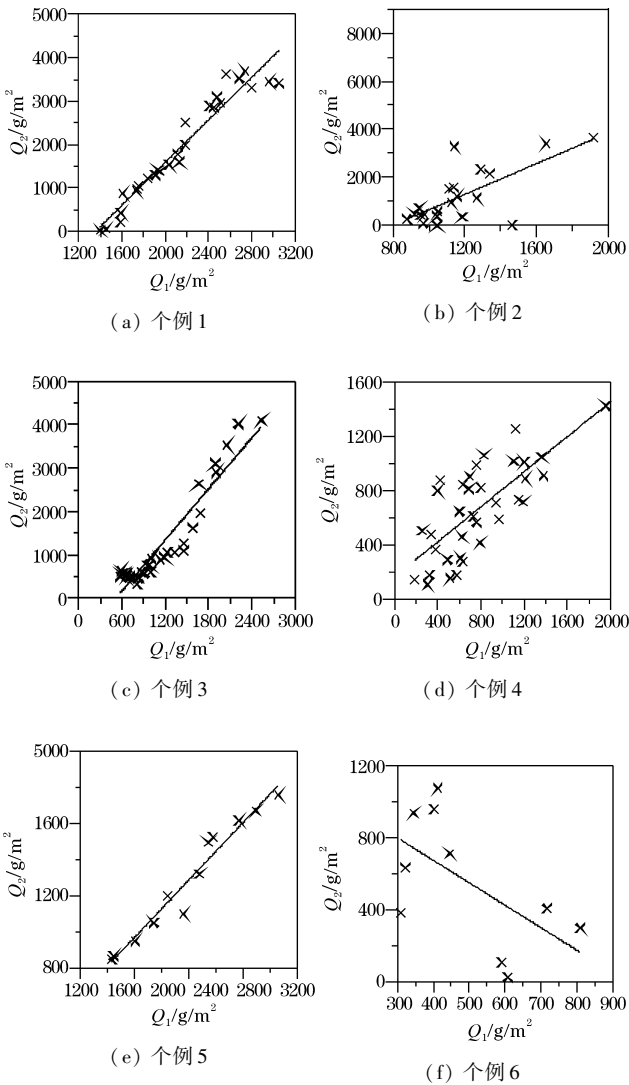


图 1 Q_1 和 Q_2 对比散点图

图 1 给出个例 1~6 的微波辐射计 LWP 数据 Q_1 和用雷达强度数据反演的液态水总量 Q_2 的对比散点图。同时图 2 给出个例 1~6 的 Q_1 和 Q_2 随时间变化的趋势。对比图 1 和图 2 可以看出个例 1~5 微波辐射计数据与雷达数据的相关性较好。个例 6 的 Q_1 和

Q_2 变化趋势有明显差异,相关系数为-0.597,分析原因应该有以下 3 种可能:微波辐射计中的神经网络算法与高原上的环境信息不匹配;毫米波雷达得到的零度层高度以上的强度信息,大部分都来自于云冰,过冷水含量很少;由于毫米波雷达最小可探测回波功率的原因,雷达能反演的 LWC 有最小值,那么利用经验关系计算液态水总量时就会缺失这部分数据。

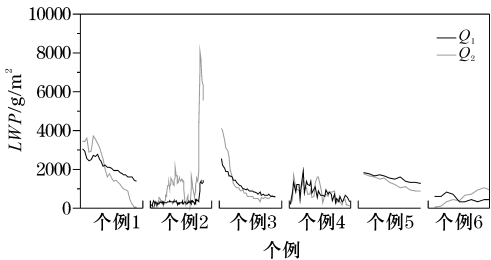


图 2 各个例 LWP 变化趋势对比图

(黑线:微波辐射计 LWP 数据 Q_1 ,灰线:雷法反演的液态水总量结果 Q_2)

对比在低海拔地区和高海拔地区,毫米波雷达强度数据反演的液态水总量与微波辐射计 LWP 数据随时间的变化趋势,发现低海拔地区的数据,雷达得到的云液态水总量与微波辐射计 LWP 数据相关性远好于高海拔地区。原因可能是,四川理塘的数据由于海拔较高,云中通常含有大量云冰粒子,液态水含量少。

4 LWC 反演结果的分析

4.1 Z-LWC 经验关系之间的对比分析

首先分析引言中提到的各 Z-LWC 经验关系,在不同回波范围内的差异。表 3 为各个经验关系的 a 、 b 系数和对应使用的回波强度范围的对比。

表 3 各 Z-LWC 经验关系对比

	回波强度 范围/dBz	a	b	
Atlas	(-40,-18)	4.564	0.5	非降水云
Sauvageot	(-40,-18)	14.54	0.76	非降水云
Fox	(-40,-18)	9.27	0.641	非降水云
Baedi	(-40,20)	0.457	0.19	毛毛雨
Krasnov	(-22,20)	0.258	0.633	小雨
刘黎平	(-18,30)	0.01289	0.559	小雨

图 3(a) 给出前 3 个经验关系 Z 与 LWC 关系对比,可见曲线趋势十分接近,所以反演非降水云的 LWC 时,选择以上 3 种经验关系对反演结果影响不大。图 3(b)给出后 3 个针对降水云的经验关系的对比图,可以看出,由于降水强度的不同,粒子大小不同等因素,得到的反演结果也有明显差异。这是因为降水粒子对 Z 的影响很大,避免选择发生明显降水的数据,暂不分析存在雨水的情况。

在反演降水云时,经验关系的不同对反演结果影

响较大,所以在反演降水云的 LWC 廓线时,对经验关系的选择非常重要。

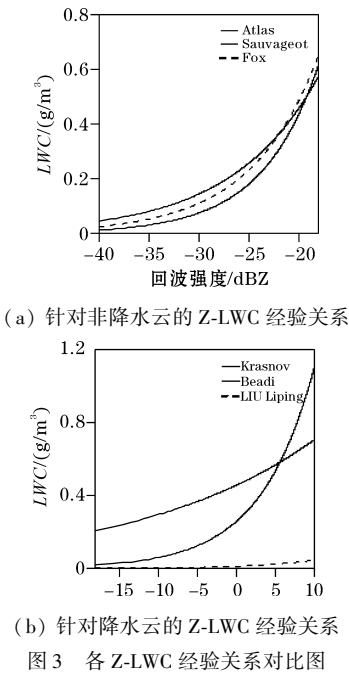


图 3 各 Z-LWC 经验关系对比图

4.2 反演试验

由于经验关系的不同,单独利用雷达反射率因子 Z 反演 LWC 的结果存在差异,联合 LWP 数据反演的 LWC 结果也存在差异,为分析这些差异的大小与联合反演前后的变化,设计 4 个试验(表 4)。

表 4 LWC 反演试验

试验	反演方法	反演数据
1	Beadl 经验关系	个例 5,个例 6
2	Krasnov 经验关系	个例 5,个例 6
3	Beadl 经验关系+微波辐射计	个例 5
4	Krasnov 经验关系+微波辐射计	个例 5

图 4 给出个例 5 与个例 6 的雷达回波强度信息,图 4(a)为 2013 年 6 月 5 日,广东省佛山市三水区的层积云数据,最大回波强度是 5.8 dBZ,零度层高度为 5.25 km。图 4(b)为 2013 年 7 月 28 日,四川省甘孜州理塘县的积云数据,最大回波强度为 5.9 dBZ,零度层在 2.25 km。

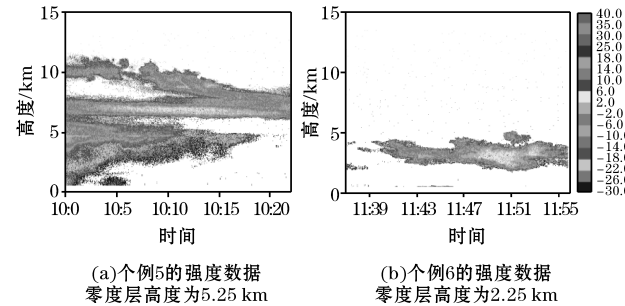


图 4 HMBQ 毫米波雷达回波强度图

4.2.1 单独利用 Z 反演 LWC 结果对比(试验 1 与试验 2 对比)

图 5(a)给出试验 1 和试验 2 反演个例 5 于 10 时 8 分 20 秒时刻的 LWC 廓线结果对比。可以看出试验 2 的结果明显小于试验 1 的,试验 1 由式(4)计算得到的液态水总量为 1551 g/m²,而试验 2 得到的液态水总量为 329 g/m²,两者相对于微波辐射计的 LWP 值(1690 g/m²)的相对误差为 8.2 % 与 80.5 %,认为利用 Beadi 经验关系反演得到 LWC 误差较小,试验 1 与试验 2 结果偏差达到了 86.3 %。图 5(b)给出试验 1 和试验 2 反演个例 6 于 11 时 45 分 17 秒时刻的 LWC 廓线对比。可以看出试验 2 的 LWC 结果依然小于试验 1。试验 1 得到的液态水总量为 383 g/m²,而试验 2 为 77 g/m²,两者相对于微波辐射计的 LWP 值(310 g/m²)的相对误差为 23.5 % 与 75.2 %。由于 Z-LWC 实际关系与经验关系存在差异,单独利用 Z-LWC 关系反演会存在较大误差,而联合微波辐射计反演 LWC 后,由于微波辐射计校准了反演的液态水总量,就减小了由于 Z-LWC 的 a, b 系数差异而带来的误差。

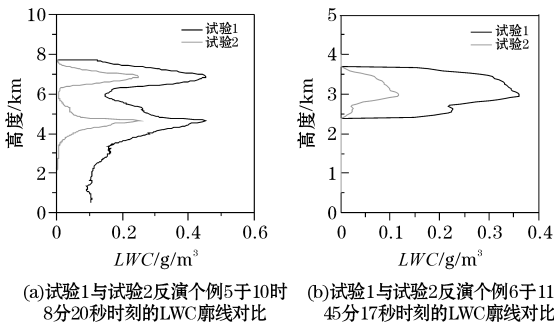


图 5 单独利用经验关系反演的 LWC 廓线图

对比试验 1 与试验 2,单独利用雷达反射率 Z 反演时,不同经验关系对反演结果的影响相当大,加入 LWP 数据进行联合反演前,应根据回波强度范围等因素,区分降水云与非降水云,并选择针对该降水云或非降水云的经验关系中,利用公式(4)反演得到的液态水总量与微波辐射计的 LWP 数据相对误差较小的,作为最优的 Z-LWC 经验关系,确定反演公式中的系数 b ,最后得到的反演结果才更为精确。

4.2.2 利用不同经验关系联合反演的结果对比(试验 3 与试验 4 对比)

试验 3 和试验 4 分别为利用 Beadi 经验关系的系数 $b=0.19$ 和利用 Krasnov 经验关系的 $b=0.633$ 反演个例 5 的 LWC。图 6 给出了根据不同 Z-LWC 经验关系,联合反演混合云的 LWC 廓线对比,可以看出,在 4.5 km 处, $b=0.19$ 的联合反演得到的 LWC 为 0.5 g/m³,而 $b=0.633$ 的 LWC 为 1.3 g/m³,对比试验 1

的结果,该层云在4.5 km处联合反演前后的结果, $b = 0.19$ 时 LWC 从 0.45 g/m^3 增大为 0.5 g/m^3 ,增幅为 11.1%, $b = 0.633$ 时 LWC 从 0.25 g/m^3 增大为 1.3 g/m^3 ,增幅为 420%,差异十分明显。7 km 高度处, $b = 0.19$ 时的联合反演得到的 LWC 为 0.5 g/m^3 ,而 $b = 0.633$ 的 LWC 为 1.3 g/m^3 。

利用不同经验关系的不同系数 b ,联合微波辐射计 LWP 数据反演了广东三水 2013 年 6 月 5 日 10 时 8 分 20 秒时刻的 LWC 廓线。由于系数 b 的不同,反演结果也有明显差异,前文得到当 $b = 0.19$ 时,雷达与微波辐射计数据相关性好,更适合联合反演个例 5 的 LWC 廓线,而当 $b = 0.633$ 时,反演算法得到的 LWC 与 $b = 0.19$ 时反演的 LWC 偏差为 48.5%,小于单独反演时的 86.3%,说明联合反演能减小因为 b 的变化而带来的反演误差。

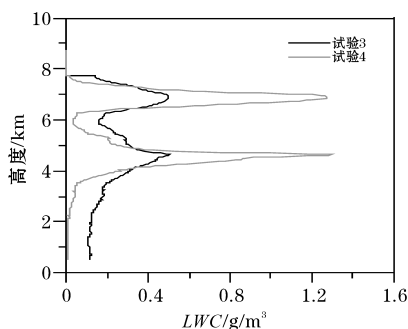


图6 系数 b 不同的联合反演结果对比图

4.2.3 联合反演结果与微波辐射计的 LWC 廓线对比

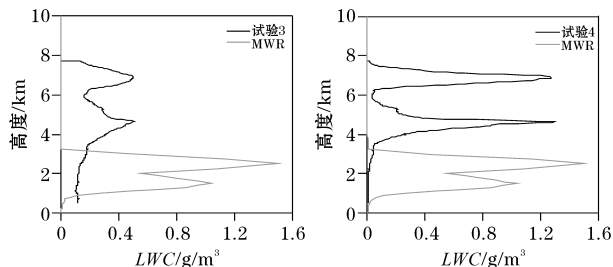


图7 试验3与试验4反演结果与微波辐射计的 LWC 廓线结果对比图

图7 给出试验3(图7a)与试验4(图7b)反演的个例5于10时8分20秒时刻的LWC廓线结果与同时刻微波辐射计输出的LWC廓线结果对比,从图7可以看出,联合反演结果与微波辐射计的结果的变化趋势是相同的,都为双峰结构,而LWC分布的高度范围差异很大,微波辐射计得到的LWC廓线都集中在3 km以下。这是由于微波辐射计虽然能得到较为准确的垂直液态水总量,然而它不能准确地确定出各个高度上的LWC分布,云雷达则具备探测云的高精度垂直分布信息的能力。

6 结束语

对比云雷达和微波辐射计数据的一致性,总结 Z-LWC 经验关系和 Frisch 的反演算法,并根据 Dunn 建立的冰相粒子与温度的分布模型,剔除冰相粒子对 Z 的贡献,提出联合反演混合云 LWC 垂直廓线的方法,并分析其合理性与优越性。实际的 Z 与 LWC 的对应关系往往与经验关系有一定出入,而联合反演算法中的 LWP 数据能有效减小由于 Z-LWC 关系的实际变化而带来的误差。

由于条件有限,反演结果无法利用飞机数据进行验证,但是由各试验的对比结果可以看出,联合反演算法优于单独利用云雷达的反演方法,文章检验了联合反演算法的可行性。然而,该方法仍然存在许多缺陷,如微波辐射计 LWP 的准确性,联合反演算法的假设条件,冰相粒子分布模型,反演结果的准确性等,这些都对联合反演算法造成影响。由于云的复杂多变,联合反演算法还有很多改进与上升空间,将根据此文得到的一些结论,继续改进联合反演算法,以期能应用于更加复杂的情况。

参考文献:

- [1] 程周杰,王洪芳,白洁. 云微物理参数的地基探测反演研究综述[J]. 气象科技, 2007, 35(1): 9-14.
- [2] Atlas D. The estimation of cloud parameters by radar[J]. J Meteor, 1954, 11(4): 309-317.
- [3] Sauvageot H, Omar J. Radar reflectivity of cumulus clouds[J]. Atmos Ocean Technol, 1987, 4(2): 264-272.
- [4] Fox N I, Illingworth A J. The retrieval of stratocumulus cloud properties by ground-based cloud radar[J]. Appl Meteor, 1997, 36(5): 485-492.
- [5] Miles N L, Verlinde J, Clothiaux E E. Cloud droplet size distributions in low-level stratiform clouds[J]. Atmos Sci, 2000, 57(2): 295-311.
- [6] 仲凌志,刘黎平. 毫米波测云雷达系统的定标和探测能力分析及其在反演云微物理参数中的初步研究[D]. 北京:中国气象科学研究院, 2009.
- [7] Baedi R J P, de Wit J J M, Russchenberg H W J, et al. Estimating effective radius and liquid water content from radar and lidar based on the

- CLARE98 data-set [J]. Phys Chem Earth B, Oceans and Atmosphere, 2000, 25 (10): 1057–1062.
- [8] Krasnov O A, Russchenberg H W J. Retrieval of water cloud microphysical parameters from simultaneous RADAR and LIDAR measurements[J]. International Union of Radio Science, 2002, 20 (3): 101–115.
- [9] 刘黎平, 宗蓉, 齐彦斌, 等. 云雷达反演层状云微物理参数及其与飞机观测数据的对比. 中国工程科学, 2012, 14(9): 64–71.
- [10] 谢晓林, 刘黎平. 云雷达联合微波辐射计反演混合性降水层云液态水含量的方法研究[J]. 暴雨灾害, 2016(1): 1–9.
- [11] Löhnert U, Crewell S. Accuracy of cloud liquid water path from ground-based microwave radiometry[J]. Dependency on cloud model statistics. Radio Science, 2003, 38(3): 565–565.
- [12] Crewell S, Löhnert U. Accuracy of cloud liquid water path from ground-based microwave radiometry[J]. Sensor accuracy and synergy. Radio Science, 2003, 38(3): 7–11.
- [13] Frisch A S, Fairall C W, Snider J B. Measurement of stratus cloud and drizzle parameters in ASTEX with a K α -band Doppler radar and a microwave radiometer [J]. Atmos Sci, 1995, 52 (16): 2788–2799.
- [14] Frisch A S, Feingold G, Fairall C W, et al. On cloud radar and microwave radiometer measurements of stratus cloud liquid water profiles [J]. Geophys Res: Atmospheres (1984–2012), 1998, 103(D18): 23195–23197.
- [15] Frisch A S, Martner B E, Djalalova I, et al. Comparison of radar/radiometer retrievals of stratus cloud liquid-water content profiles with in situ measurements by aircraft [J]. Geophys Res: Atmospheres (1984–2012), 2000, 105 (D12): 15361–15364.
- [16] Dunn M, Johnson K L, Jensen M P. The Microbase value-added product: A baseline retrieval of cloud microphysical properties. Atmospheric Radiation Measurement [J]. US Department of Energy, Office of Science, 2011.
- [17] 刘黎平, 仲凌志, 江源, 等. 毫米波测云雷达系统及其外场试验结果初步分析[J]. 气象科技, 2009, 37(5): 567–571.
- [18] 赵玲, 马玉芬, 张广兴, 等. MP-3000A 微波辐射计的探测原理及误差分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2009, 3(5): 54–57.

An Algorithm to Retrieve Liquid Water Content Profiles of Mixed Cloud based on Cloud Radar and Microwave Radiometer

XIE Xiao-lin¹⁻³, LIU Li-ping¹

(1. State Key Lab of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 2. Meteorological Sounding Data Centre of Sichuan, Chengdu 610072, China; 3. College of Electronic Engineering Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 4. Heavy Rains and Drought-Flood Disaster in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072, China)

Abstract: Liquid water content (LWC) is an important parameter of cloud micro physics. In order to estimate the LWC of water-ice mixed cloud, some Z-LWC relationships are summarized and analyzed. The ice contribution to radar reflectivity factor is subtracted according to the environmental temperature. An algorithm to retrieve LWC of mix-phase cloud is proposed based on the synergetic measurements of cloud radar and microwave radiometer. According to the field experimental data collected in Sanshui in Guangdong province and Litang in Sichuan province from April to August 2013, the correlation between the total liquid water amount retrieved by radar reflectivity factor and the LWP data from the microwave radiometer is analyzed. The analytical result shows that the retrieved LWC is acceptable, and experiments to retrieve LWC based on cloud radar and radiometer are carried out for the cases of mix-phased cloud. By using the extra data of radiometer's LWP, the reliability of retrieved LWC based on reflectivity is improved.

Key words: radar meteorology; cloud radar; microwave radiometer; liquid water content