

黄煌,李琼,唐林,等.长沙冬季降水过程的微波辐射计反演参量特征分析[J].气象研究与应用,2022,43(1):14-19.

Huang Huang,Li Qiong,Tang Lin,et al. Characteristic analysis of microwave radiometer inversion parameters of winter precipitation process in Changsha[J].Journal of Meteorological Research and Application,2022,43(1):14-19.

长沙冬季降水过程的微波辐射计反演参量特征分析

黄 煌¹, 李 琼^{2*}, 唐 林², 黄宇霆¹, 徐冬英²

(1.长沙市气象局,长沙 410205; 2.湖南省人工影响天气领导小组办公室,长沙 410118)

摘要:利用微波辐射计、探空气球、天气雷达和地面雨量等资料,对 2020 年 1—3 月长沙国家站 5 次降水过程的微波辐射计和探空温度廓线、水汽密度进行检验的基础上,分析了 5 次降水过程中微波辐射计反演的水汽含量、液态水含量与雷达资料、降水量的变化特征。结果表明,微波辐射计反演的大气温度、水汽密度廓线精度较高,其反演的大气水汽资料可以作为降水临近预报的参考;水汽含量与液态水含量在降水开始前均有明显上升,在降水结束前回落的趋势,两者与降水量呈正相关,水汽含量接近 3.5cm 且液态水含量超过 0.15mm 可作为判断长沙地区冬春季降水开始的参考阈值;同一时段雷达回波与水汽含量也存在正相关关系,前者峰值出现时间略早于后者。

关键词:微波辐射计;水汽含量;液态水含量;降水量

中图分类号: P407

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2022.1.03

水汽既是大气主要成分之一,也是大气能量的主要载体,直接驱动影响着各种时空尺度下的天气变化。而大气中水汽含量的时空变化极为活跃,因此及时准确地获取大气水汽变化资料对提高降水预报精度、精准指导人工影响天气作业和生态环境监测等方面具有重要意义。

地基微波辐射计能接收大气中水汽分子发出的微波辐射信号,通过仪器自身神经网络算法反演出单位面积内地面至 10km 高度大气温度、湿度、水汽含量和液态水含量。其优点是高度自动化、时间分辨率高,能全天候不间断工作,非常适合作为除常规探空外大气水汽观测的补充手段。一般来说降水过程前空气中水汽含量与液态水含量会出现一定波动,可以看作降水临近预报的一项重要参考指标。目前已有不少利用微波辐射计分析降水前大气水汽变化特征的研究。张文刚等^[1]对比分析了武汉站微波辐射计与探空资料,发现两者所测得的温度和水汽密度有很好的相关性。雷恒池^[2]等利用微波辐射计探测西安降水云系水汽含量与液态水含量,发现降水前云中水汽含量与液态水含量存在显著升高现象,对人工

降雨预测有一定指导意义。姚展予等^[3]分析安徽寿县云中液态水含量,发现当其达到 0.4mm 阈值,则一般会出现降水;王健等^[4]分析乌鲁木齐两次降水过程,发现降水前大气水汽和液态水会分别增至 40mm 和 7mm 左右;何生存^[5]等反演了黄河上游云中液态水含量,认为该地区秋季云中液态水含量降水阈值为 0.31kg·m⁻²;敖雪等^[6]对 36 个降水个例和 38 个非降水个例进行分析,把当大气液态水大于 1mm 时,水汽含量达到 6.5cm、6cm、5~6cm 分别作为武汉大雨、中雨、小雨参考指标。高金辉^[7]等认为云中水汽含量和液态水含量分别超过 20mm 和 0.2mm 是河南新乡锋面云系增雨作业重要参考指标,而两者分别大于 25mm 和 0.3mm 时是对流云增雨作业最佳时机。白婷等^[8]利用微波辐射计对南阳地区降水过程中水汽含量和液态水含量进行了统计分析,认为微波辐射计数据较准确可靠,水汽含量与液态水含量在降水开始前明显增加,可应用于日常业务和人工影响天气作业时机判别。

地基微波辐射计作为一种新型大气水汽探测装备,由于自身优势特点,在气象探测业务方面应用潜

收稿日期: 2021-08-20

基金项目: 湖南省业务能力建设项目(NLJS14)

作者简介: 黄煌(1989—),男,工程师,主要从事大气探测与人工影响天气研究。E-mail:342085208@qq.com。

* 通讯作者: 李琼(1985—),女,高级工程师,主要从事大气物理、人工影响天气技术与开发。E-mail:251155174@qq.com

力巨大,但国产微波辐射计总体仍处于开发试验阶段,应用的成果不多。国内利用其观测大气水汽变化的相关研究多集中在夏季,在湖南利用其观测分析冬春季大气水汽变化尚属首次。本文选取了长沙2020年1—3月中5次降水时段作为个例,统计分析微波辐射计反演的大气水汽含量和液态水含量在降水过程前后变化特征,尝试为短临预报和地面人工增雨作业提供参考。

1 资料与方法

文中采用的微波辐射计位于长沙国家综合气象观测试验基地(28°07'N、112°47'E),海拔119m。由中国兵器二〇六研究所与兰州大学大气科学学院联合研制,型号为MWP967KV。该设备经被动接收大气微波辐射,再通过内置神经网络算法每3min实时自动反演地面至10km共58层大气温度、相对湿度、水汽密度、液态水廓线等数据。垂直分辨率在0~500m之间为50m,500m~2km为100m,2km~10km为250m。选取2020年1—3月期间5次降水过程作对比分析:具体时段为1月7日00—09时、1月14日19时—15日17时、2月21日08—18时、3月7日2—23时、3月11日17时—12日01时,下文中对应简称A、B、C、D、E时段。

由于长沙雷达站冬季停机造成资料缺失,文中采用了临近的岳阳雷达站资料。对比所用的L波段探空资料来自长沙探空站,其中L波段探空数据来

自每次降水时段临近的08时(07:15~08:00)或20时(19:15~20:00)对应微波辐射计相同高度的观测数据。利用以下公式计算出探空水汽密度^[8]:

$$e=6.11 \times 10^{7.45 \times t_d / (235 + t_d)} \quad (1)$$

$$\rho_v = 216.7 \times e / T \quad (2)$$

其中, t_d 为露点温度,单位℃; e 为水汽压,单位hPa; T 为绝对温度,单位K; ρ_v 为水汽密度,单位 $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

微波辐射计反演的水汽含量 V 指从地面到大气上界的水汽密度 ρ_v 垂直积分,定义如下:

$$V = \int_0^{\infty} \rho_v dz \quad (3)$$

单位为mm,本文因直接取仪器数据记cm。

液态水含量 L 即云底至云顶垂直方向上液态水积分,定义如下:

$$L = \int_{z_1}^{z_2} \rho_v dz \quad (4)$$

单位为mm。

2 结果与分析

2.1 微波辐射计与L波段探空资料对比

选取2020年1—3月长沙国家站5次降水过程前后微波辐射计与L波段探空资料,对比0~10km高度上温度、水汽密度和对应差值变化。可以看出微波辐射计反演数据与L波段探空数据变化趋势相近,温度与水汽密度相关系数分别为0.995和0.994,两者均通过了置信度0.01的显著性检验。同一高度温度数值微波辐射计总体上大于L波段探空(图1),另

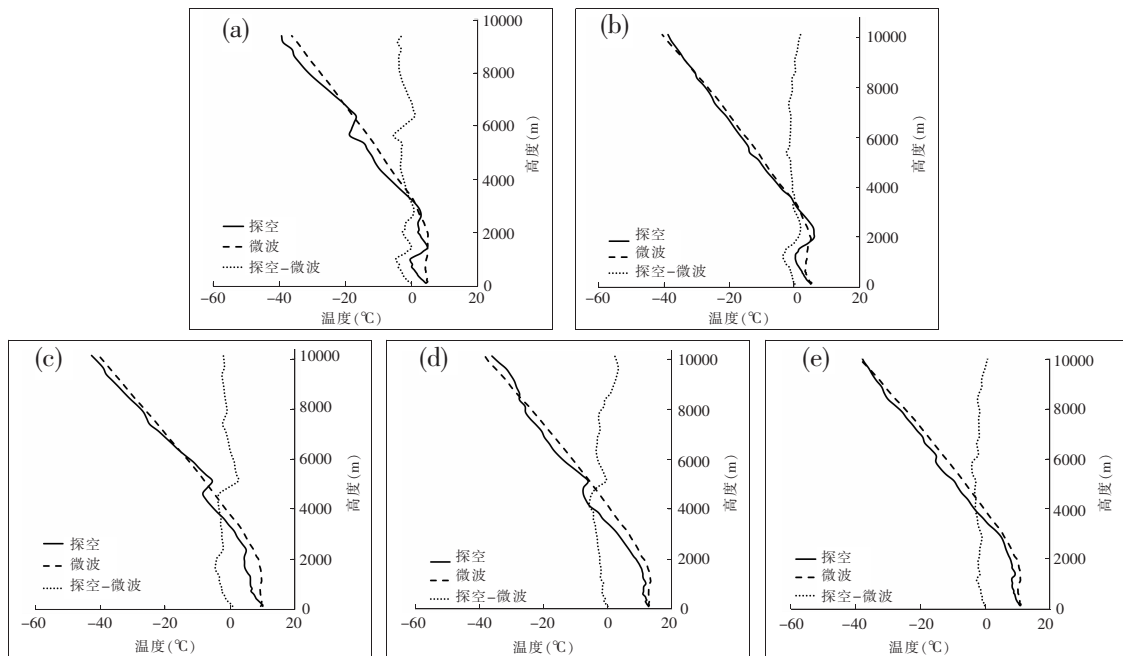


图1 2020年1—3月5次降水过程探空温度、微波辐射计温度及两者差值对比

(a)1月7日20:00;(b)1月15日08:00;(c)2月21日20:00;(d)3月7日20:00;(e)3月12日08:00

外微波辐射计温度廓线较探空平滑,对一些大气的扰动和近地面逆温未能很好反映;水汽密度数值从地面至 4km 高度范围内微波辐射计总体接近或大于 L 波段探空(图 2),在两千米以下的水汽聚集的低空区,L 波段探空对水汽变化更敏感,更能体现大

气低空扰动的特征,但在高空两者趋于一致。

总体上微波辐射计温度、水汽密度数值与探空略有差异,但垂直高度变化趋势一致,相关性较强,与其他学者相关研究结果一致,在日常业务观测中具备一定的参考意义。

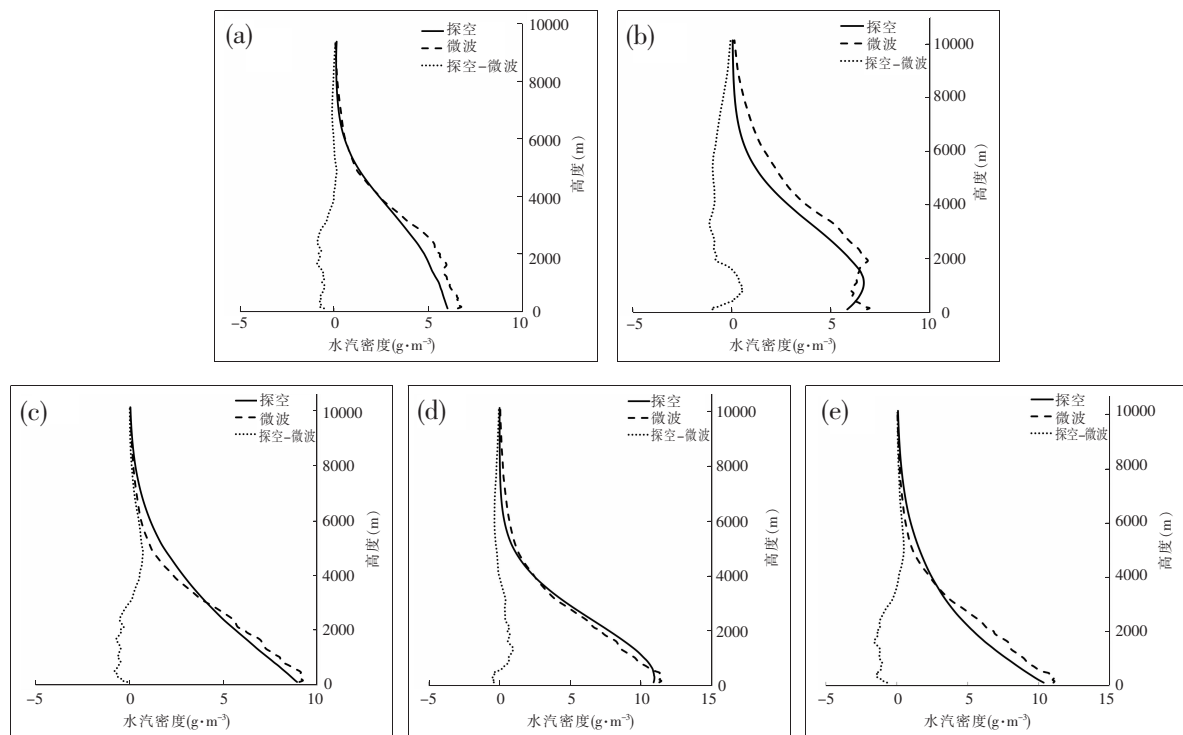


图 2 2020 年 1—3 月 5 次降水过程探空水汽密度、微波辐射计水汽密度和两者差值对比

(a)1月7日20:00;(b)1月15日08:00;(c)2月21日20:00;(d)3月7日20:00;(e)3月12日08:00

2.2 水汽含量、液态水含量与降水量的变化特征

利用 2020 年 1—3 月长沙国家站微波辐射计观测资料并结合长沙国家站地面降水观测资料,选取了 2020 年 1—3 月期间 5 次降水过程(A、B、C、D、E 时段)前后的大气水汽含量数据与大气液态水含量数据,并分析同时段地面观测的降水情况,了解大气水汽和液态水在降水过程前后的变化特征。其中降雨持续时间最长为 B 时段,达到 22h,累计降水量也最大,达到 19.6mm;D 时段过程最短,为 3h。

A 时段累积降雨量为 15.4mm,分析降水开始前两小时至降水结束后两小时可以看到,微波辐射计的大气水汽数据和液态水含量在降水前均有明显的上升,在降水结束后迅速回落,水汽含量从降水前两小时的 2.4cm 陡升至降水开始时的 3.15cm,并在降水持续过程中基本保持在 3cm 左右;液态水含量从不到 0.13mm 快速升至 0.17mm,降水过程中维持在 0.175mm 左右。降水结束前约 1h 水汽含量与液态水

含量开始持续回落并降至降水开始前的低值范围。

B 时段累积降雨量为 19.6mm。降水开始前两小时内大气水汽含量与液态水含量均出现一个小峰值,降水开始前约 30min 两者开始快速上升,分别超过 2.9cm 和 0.15mm。15 日 2:00—3:00、5:00—6:00、7:00—9:00 三个时段降水相对较强,对应水汽含量与液态水含量均出现了三个波峰,峰值均超过 3cm 和 0.16mm。4:00—5:00、6:00—7:00、9:00—10:00 三个降水间歇时段同样对应了水汽含量与液态水含量的三个明显波谷。降水减弱后水汽含量与液态水含量均出现回落。

C 时段 08:00—18:00 降水量为 1.0mm,此次过程降水总量不多且持续时间较长,但微波辐射计数据仍很好地反映出大气水汽含量与液态水含量变化过程。降水出现前两者数值同样均出现快速上升并形成一个小高峰,分别达到约 3.5cm 和 1.4mm。在降水过程中分别稳定保持在约 3.5cm 和 0.14mm 左

右。但两者开始回落时间较降水结束时间提早约两个小时。

D 时段 21:00—22:00 降水量为 1.3mm,水汽含量与液态水含量在 20:00 后就开始明显上升,40min 内两者分别增加了约 1cm 和 0.02mm,22:00 降水结束后两者分别回落到 3.0cm 和 0.12mm 附近,并且回落速度逐渐降低,变化曲线趋于平缓,至 23:00 两者均已经低于 20:00 初始值。

E 时段降水量为 1.2mm,其中 0.9mm 降水集中在 22:00—24:00 时段,对应水汽含量与液态水含量为最高区间,两者分别超过 3.2cm 和 0.13mm。12 日 00:00 以后随着降水结束两者均降至 3.0cm 和 0.12mm 以下。5 次过程降水前一小时内水汽含量与液态水含量均有明显上升,前者分别上升了 0.508cm、0.26cm、0.38cm、0.74cm、0.79cm;后者分别上升了 0.03mm、0.017mm、0.023mm、0.016mm、0.027mm。两者时间变化基本同步,综合 5 次降水过程可看到:当水汽含量高于或者接近 3cm 且液态水含量接近 0.15mm 后一小时内有较明显降水发生。两者降水阈值与高金辉^[7]等研究的河南新乡锋面雨降水参考阈值较为接近;而低于国内其他地区相关研究得出的夏季降水参考阈值。5 次过程中水汽含量与液态水含量变化特征较为一致,两者在降水开始前均有明显增加,降水结束前明显回落,与降水量呈明显正相

关关系。水汽含量与液态水含量的变化要略提前与于降水量变化,可为高效地指导人工增雨作业提供参考。

2.3 水汽含量与雷达反射率变化对比

多普勒天气雷达作为一种主动遥感大气探测设备,是降水短时预报业务中跟踪大气云水生成发展最主要的工具之一,由于雷达资料中垂直累计液态水数据和 A 时段数据缺失,本文选取了 5 次降水过程中的 B、C、D、E 四个时段对应的站点上空雷达反射率与微波辐射计水汽含量作对比。雷达数据采样间隔为 5—6min,因此为便于对比以雷达采样时间为基准,选取对应时间或相邻时间微波辐射计水汽含量数据作对比(图 3)。1 月 15 日 3:03—5:31 存在一次雷达反射率组合反射率明显增强再减弱的过程,3:03—3:43 之间无较明显回波,水汽含量此时先有小幅下降并维持在相对低值。3:48 开始站点雷达回波生成并开始发展,此时水汽含量也开始上升;4:11 雷达反射率达到最大 30dBz,紧接着 4:17 水汽含量也达到时段峰值,之后回波逐渐减弱至消失,水汽含量亦在此阶段逐渐减小至最低。2 月 21 日 8:48—9:30 雷达回波生成之前水汽含量已开始明显上升,9:48 水汽含量与雷达反射率均达到最大,随后两者逐渐下降。3 月 7 日与 3 月 11 日两次过程雷达反射率与水汽含量数值变化与前两例类似,但雷达反

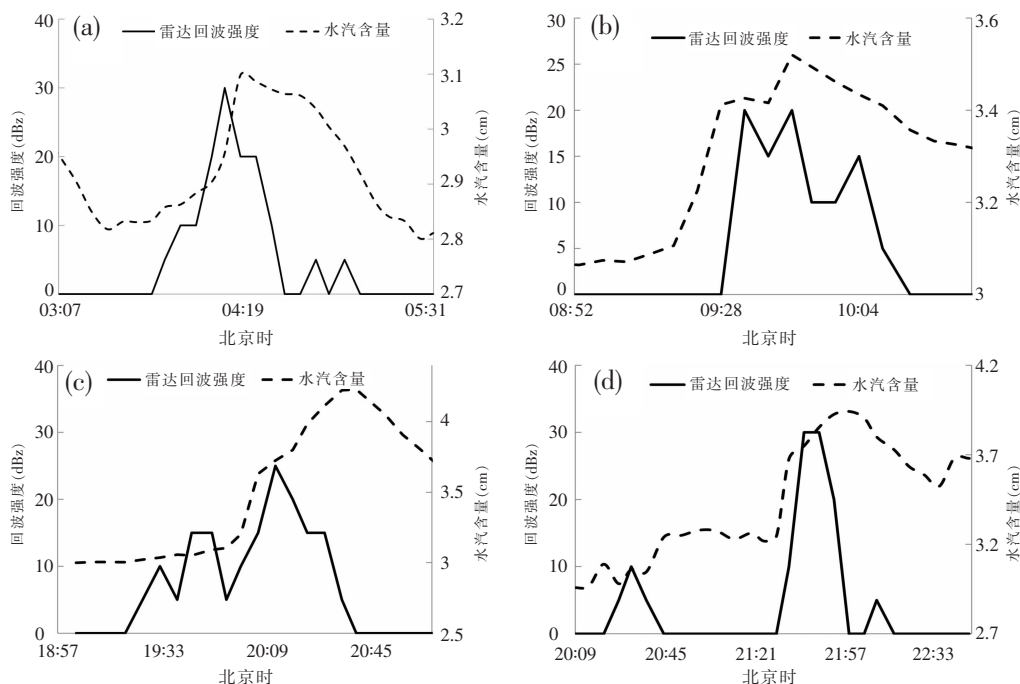


图 3 2020 年 1—3 月四次降水过程雷达反射率与水汽含量时间变化

(a)B 时段;(b)C 时段;(c)D 时段;(d)E 时段

射率先于水汽含量达到峰值,两者相差大约 10min。总体来说四次变化过程水汽含量与雷达回波强度随时间变化基本同步。

5 结论

利用长沙国家站微波辐射计资料,结合长沙站地面降水量、L 波段探空、岳阳多普勒雷达等数据资料,比较了微波辐射计反演的大气温度、水汽密度与 L 波段探空资料的一致性;分析了 2020 年 1—3 月期间 5 次降水过程微波辐射计反演的水汽含量、液态水含量随降水量的变化特征,并初步比较了降水期间微波辐射计反演的水汽含量与雷达反射率之间的变化,得出以下结论:

(1)微波辐射计反演的温度和大气水汽密度与 L 波段探空数据相关性较好,两者随高度变化趋势近似。总体上说明微波辐射计数据精度较高,在日常观测业务或科研中有很大参考价值和应用潜力,其高分时间分辨率优势可作为高空大气探测的补充手段。

(2)大气水汽含量与液态水含量在降水开始前明显增加,随着降水减弱停止而同步减少,降水总体上两者增减时间略早于降水量增减时间,两者峰值也对应着降水量时段峰值。水汽含量接近 3.5cm 且液态水含量达到 0.15mm 可作为判断冬春季长沙降水开始的参考阈值。利用微波辐射计大气水汽和液态水数据可作为一种降水临近预报手段和指导人工增雨作业的辅助判断方法。

(3)雷达反射率与水汽含量变化存在较好正相关关系,最强雷达回波出现时间略早于水汽含量峰值时间。同样也证明了微波辐射计资料在临近降水预测和指导人工增雨作业方面具有较好的参考价值。

参考文献:

- [1] 张文刚,徐桂荣,万荣,等.基于地基微波辐射计的大气液态水及水汽特征分析[J].暴雨灾害,2015,34(4):367-374.
- [2] 雷恒池,魏重,沈志来,等.微波辐射计探测降雨前水汽和云液水[J].应用气象学报,2001,12(S1):73-79.
- [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[J].应用气象学报,2001,12(S1):88-95.
- [4] 王健,吕新生,赵克明,等.地基微波辐射计对乌鲁木齐暴雨天气过程的观测分析[J].沙漠与绿洲气象,2012,6(3):45-49.
- [5] 何生存,郭三刚,王治邦,等.黄河上游地区秋季云中液态水含量的微波遥感[J].青海气象,2005(3):54-56.
- [6] 敖雪,王振会,徐桂荣,等.地基微波辐射计在降水分析中的应用[J].暴雨灾害,2011,30(4):358-365.
- [7] 高金辉,贾利锋,顾学俊.基于微波辐射计降雨前后 V、L 值与人工增雨的研究[J].通信技术,2009,42(12):173-175.
- [8] 白婷,刘艳华,杨敏.微波辐射计观测同降水相关性的研究[J].气象与环境科学,2019,42(4):111-118.
- [9] 党张利,张京朋,曲宗希,等.微波辐射计观测数据在降水预报中的应用[J].干旱气象,2015,33(2):340-343.
- [10] 朱元竞,胡成达,甄进明,等.微波辐射计在人工影响天气研究中的应用[J].北京大学学报(自然科学版),1994,30(5):597-606.
- [11] 李军霞,李培仁,晋立君,等.地基微波辐射计在遥测大气水汽特征及降水分析中的应用[J].干旱气象,2017,35(5):767-775.
- [12] 张文刚,徐桂荣,颜国跑,等.微波辐射计与探空仪测值对比分析[J].气象科技,2014,42(5):737-741.
- [13] 刘晓璐,刘东升,郭丽君,等.国产 MWP967KV 型地基微波辐射计探测精度[J].应用气象学报,2019,30(6):731-744.
- [14] 黄兴友,张帅,李盈盈,等.云参数的两种地基雷达反演方法对比研究[J].气象科学,2019,39(5):608-616.
- [15] 张秋晨,王俊,李雪.地基微波辐射计资料在对流云降水前的变化特征初探[J].高原气象,2018,37(6):1578-1589.
- [16] 汤强,曾振文,谢建群.探空资料在汕头强降水预报中的应用[J].气象研究与应用,2011,32(S2):80,85.
- [17] 苏春芹.冬季层状云实施人工增雨作业可行性探讨[J].气象研究与应用,2008,29(4):45-47.
- [18] 蔡奕萍,袁志扬,李婵珠,等.微波辐射计在对流天气预报中的应用[J].广东气象,2021,43(1):37-41.
- [19] 陈秋壮.海南乐东降水特征与干旱及人工增雨潜力分析[J].气象研究与应用,2008(2):52-54,47.
- [20] 林辉,黄奕丹,许军辉,等.非常规探测资料在一次非典型暴雨过程中的应用[J].气象研究与应用,2021,42(1):68-73.
- [21] 郝巨飞,高俊喜,杨允凌,等.邢台市大气水汽及云水变化的降水前兆分析[J].气象研究与应用,2021,42(1):13-19.
- [22] 冼星河,张玮,陈楚梦.新型观测数据在东莞一次大暴雨过程中的综合应用[J].气象研究与应用,2021,42(2):63-67.
- [23] 王婉,雷恒池,聂皓浩,等.基于机载微波辐射计探测大气水汽通道饱和问题研究[J].气象学报,2021,79(3):509-520.
- [24] 邹荣士,何文英,王普才,等.辐射传输模式对地基微波辐射计观测亮温的模拟能力分析[J].大气科学,2021,45(3):605-616.
- [25] 许皓琳,郑佳锋,姜涛,等.乌鲁木齐和成都两地机场雷暴降水水汽条件的分析研究[J].气象,2020,46(11):1440-1449.

Characteristic analysis of microwave radiometer inversion parameters of winter precipitation process in Changsha

Huang Huang¹, Li Qiong², Tang Lin², Huang Yuting¹, Xu Dong ying²

(1. Changsha Meteorological Bureau, Changsha 410205, China;

2. Hunan Weather Modification Leading Group Office, Changsha 410118, China)

Abstract: Using the data of microwave radiometer, balloon sounding, weather radar and ground rainfall, the microwave radiometer, sounding temperature profile and water vapor density of five precipitation processes at Changsha national station from January to March 2020 were tested. The variation characteristics of water vapor content and liquid water content reflected by microwave radiometer, radar data and precipitation during the five precipitation processes were analyzed. The results show that the atmospheric temperature and water vapor concentration profiles retrieved by microwave radiometer have high accuracy, and the retrieved atmospheric water vapor data can be used as a reference for precipitation prediction. Water vapor content and liquid water content increase significantly before the beginning of precipitation, and decrease before the end of precipitation. They are positively correlated with precipitation. The reference threshold to judge the beginning of winter and spring precipitation in Changsha is that the water vapor content is close to 3.5cm and the liquid water content is more than 0.15mm. There is also a positive correlation between radar echo and water vapor content in the same period, and the peak time of the former is slightly earlier than that of the latter.

Key words: microwave radiometer; water vapor content; liquid water content; amount of precipitation