

赣南秋冬季降水云系特征综合探测试验

陈添宇^{1,2} 宾振³ 周盛⁴

(1 中国气象局人工影响天气中心, 北京 100081; 2 中国气象局云雾物理重点开放实验室, 北京 100081;
3 江西省人工影响天气中心, 南昌 330096; 4 湖南省人工影响天气领导小组办公室, 长沙 410118)

摘要: 2015年10—12月对赣南地区降水云特征进行了综合试验, 对观测数据集进行了对比, 对降水云的分布特征进行了初步分析。观测资料对比结果表明: 微波辐射计反演的温度和绝对湿度, 可作为高时间分辨资料使用; 雷达回波可用来反演雨粒子有效直径, 在尚无更好资料的时候, 也可作为参考用来反演云粒子有效直径。降水云特征初步分析表明: ①赣南秋冬季(10—12月), 降水云系云顶较高平均高度达8000 m, 云层较厚平均厚度达5000 m以上; ②雷达反演的云有效粒子直径的大小和垂直分布, 可在一定程度上反映云系分布特征, 平均云有效粒子直径大于30 μm, 厚度达3000 m, 对产生降水有指示意义。

关键词: 赣南, 降水云特征, 综合探测试验

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2022.02.005

An Integrated Experiment of Precipitation Cloud Characteristic During Autumn-Winter in Southern Jiangxi

Chen Tianyu^{1,2}, Bin Zhen³, Zhou Sheng⁴

(1 Weather Modification Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081 2 Key Laboratory of Cloud Physics, China Meteorological Administration, Beijing 100081 3 Jiangxi Weather Modification Centre, Nanchang 330096
4 Hunan Provincial Weather Modification Centre, Changsha 410118)

Abstract: An integrated experiment of precipitation cloud characteristic in Southern Jiangxi from October to December 2015 carried out the comparison of observation data set and the distribution characteristic analysis for precipitation clouds. The comparison analysis of observation data set shows that: the temperature and absolute humidity retrieved by microwave radiometer can be used as high time resolution data set, the radar echoes can be used to retrieve the effective diameter of rain particles, and can also be used as a reference to retrieve the effective diameter of cloud particles when no better data set is available. The preliminary analysis of precipitation cloud characteristic shows that: (1) During October—December 2015 in southern Jiangxi, the precipitation clouds has a higher cloud top with an average height of 8000 m and a thicker cloud with an average thickness of more than 5000 m. (2) The size and vertical distribution of cloud effective particle diameters retrieved by radar, can reflect the distribution of the cloud characteristics to a certain extent. When the average effective particles diameter of cloud is greater than 30 μm and the thickness is up to 3000 m, which has indicative significance to produce precipitation.

Keywords: Southern Jiangxi, precipitation cloud characteristic, integrated experiment

0 引言

云特征分析对研究降水云系结构、演变和产生降水机理十分重要, 而降水云系的综合探测试验分析无疑是最基础和最直接的方法, 其中地面雷达结合其他仪器的综合探测试验较为常用。早期利用研制的双波长雷达和微波辐射计结合数值试验进行的原理和仪器性能试验表明, 雷达和微波辐射计联合观测不仅能测

出云雨参数的三维空间分布, 而且能连续监测云雨生消移动的演变过程, 并提高了云雨测量精度^[1]。在业务应用方面, 云特征的探测分析也取得进展, 其中, 用探空和雷达回波的探测资料对关中层状云降雨进行分类, 得到了层状云回波最大强度、云顶高度、零度层高度、暖云厚度等的特征^[2]; 用雷达、加密梯度气象站、雨滴谱仪、微波辐射计等对祁连山夏季地形云的探测试验, 得到祁连山区夏季云、降水滴谱等特征, 即祁连山区云量在6成以上, 西南气流天气背景下总云量多达8成, 西南气流背景下受山谷风的共同作用, 水汽条件充足时极易形成产生降水的地形云,

收稿日期: 2021年7月8日; 修回日期: 2022年3月12日

第一作者: 陈添宇, Email: chenty@cma.gov.cn

资助信息: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406032)

祁连山降水主要由小于1 mm 的雨滴组成^[3]；基于动态Z-I关系雷达回波定量估测降水方法研究认为其反演降水的平均误差较小，为-0.6 mm/h，能较好地表现出降水的时空分布特征^[4]。以地面雷达为主的综合探测试验，虽然可得到回波最大强度分布、云顶高度、零度层高度分布、累计液水含量、温湿度廓线等云特征分析所需的参量，但云微物理参的特征分析还是由飞机进行云降水粒子探测更直接。西北地区春季云系的垂直结构特征的探测分析利用了飞机探测、地面观测和卫星资料，分析得到了云含水量、云有效半径等的垂直分布，即西北地区春季降水性层状云厚平均约2000 m，低云含水量垂直方向上平均为 $0.07 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，中云含水量垂直方向上平均为 $0.03 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，降水性层状云有效半径达到 $10\sim 16 \mu\text{m}$ ，与非降水云系的微物理特征量存在显著的差异^[5]。太行山东麓人工增雨防雹作业技术试验利用飞机和地面雷达观测分析了一次典型稳定性积层混合云对流泡和融化层的结构特征，尤其是对镶嵌在层状云中的对流泡结构进行了分析，得出其温度、最大上升气流、平均液态水含量、小云粒子平均浓度等的分布特征^[6]。我国南方开展的综合探测试验相对北方而言显得较少，但也取得一些进展。江西开展了局地强对流天气的雷达产品特征分析，得到雷达最大反射率因子和垂直积分液态含水量密度可以作为局地强对流天气和冰雹预警的临界指标，并提出临界指标阈值^[7]；福建针对闽西北地区天气系统的分析，提出了适合人工增雨作业天气系统一些雷达回波和云参数指标，即积状云和积层混合云的回波强度分别大于30 dBz和25 dBz，回波顶高应分别达5500 m和5000 m，负温区厚度大于1500 m和2000 m，回波面积大于 1000 km^2 和 2500 km^2 ，垂直积分液态水含量大于 $1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ，云系云顶温度介于 $-28\sim -12 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[8]。目前，我国南方利用多种探测设备开展人影综合探测试验较少，尤其是空地联合的人影综合试验更少，探测资料的缺乏使得难以深入分析降水云系结构特征，尤其是降水云系的微物理特征，以研究降水形成机理和确定人影作业判识指标等。本文依托近年在我国南方综合利用雷达、机载粒子探测、微波辐射计和探空等开展的外场综合探测试验，通过2015年在试验区赣南开展的试验，对相关探测资料进行了比对并提出了其适用性的意见，同时通过初步分析，提出了赣南秋冬季降水云系的分布特征，为赣南秋冬季人影作业条件判识提供参考。

1 试验概况

2015年10—12月在江西南部区域开展降水云系的

综合探测试验，试验仪器主要有：机载DMT（运12飞机）、微波辐射计、业务雷达（SC）、业务探空等（图1）。

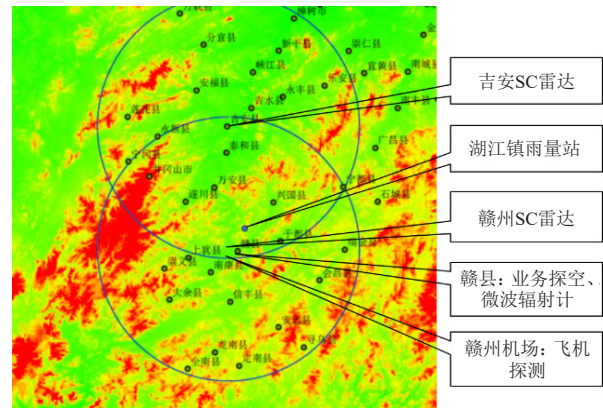


图1 外场探测试验布局

Fig. 1 Layout of integrated experiment

2 资料处理

2.1 降水过程的确定

降水过程主要由赣州市的赣县、信丰县、大余县、上犹县、崇义县、安远县、龙南县、定南县、全南县、宁都县、于都县、兴国县、会昌县、寻乌县、石城县、瑞金市、南康市等17个县级气象观测站降水观测来确定。2015年10—12月试验期间，按17个站均出现降水（08时至次日08时）作为雨日计，共26次，17个站均无降水的无雨日共20次。

2.2 探测资料及处理

2.2.1 机载粒子探测资料

试验期间，共取得同时有飞机探测和雷达探测的10次资料，其中17个站均有降水的共6次，17个站均无降水的共1次。

由于部分机载仪器故障，本文主要用云和气溶胶探头CAS（Cloud and Aerosol Spectrometer）前后向散射探测和降水粒子图像探头PIP（Precipitation Imaging Probe）资料进行分析。前向测量范围为 $0.6\sim 50 \mu\text{m}$ ，分30档，后向范围为 $1.03\sim 100 \mu\text{m}$ ，分30档；降水粒子图像探头探测范围为 $100\sim 6200 \mu\text{m}$ ，分62档，每档间隔 $100 \mu\text{m}$ 。温度、气压、湿度、风速、风向、经纬度和高度等资料由飞机综合气象要素测量系统AIMMS-20获得。

按粒子有效直径定义：

$$D_e = \frac{\int_0^\infty D^3 N(D) dD}{\int_0^\infty D^2 N(D) dD}, \quad (1)$$

式中： D 是粒子直径， $N(D)$ 为粒子谱函数，是单位直径间隔单位体积内的粒子数。将式(1)化为差分方式：

$$D_e = \frac{\sum_{i=1}^n D_i^3 N(D_i) \Delta D_i}{\sum_{i=1}^n D_i^2 N(D_i) \Delta D_i}, \quad (2)$$

式中： D_i 为第*i*档的粒子直径， $N(D_i)$ 为第*i*档单位直径间隔单位体积内的粒子数， ΔD_i 为第*i*档的直径间隔。

液水含量的定义为：

$$LWC = \frac{\pi}{6} \int_0^\infty \rho D^3 N(D) dD, \quad (3)$$

ρ 为粒子密度，将式(3)化为差分方式：

$$LWC = \frac{\pi}{6} \sum_{i=1}^n \rho D_i^3 N(D_i) \Delta D_i. \quad (4)$$

2.2.2 雷达资料

使用江西赣州和吉安业务雷达(CINRAD/SC型)，波长10.3~11.1 cm，水平距离精度150 m，高度精度200~300 m，方位和仰角精度0.2°，回波强度测量范围-10~70 dBZ，每6 min体扫探测一次。

2.2.3 微波辐射资料

在赣县气象局布设了1台微波辐射计，便于与同位置的L波段气球探空资料进行比对。2015年观测自10月19日至12月25日，期间17个站均出现降水共20次，17个站均无降水的共13次。

微波辐射计主要利用22 GHz水汽吸收峰及其右边(22~30 GHz)的谱型反演大气中水汽廓线，利用60 GHz氧吸收峰及其左边(51~59 GHz)的谱型反演大气温度廓线。

2.2.4 探空资料

赣县L波段业务探空秒数据资料，每天07:15和19:15开始探测。

3 微波辐射资料与探空资料的比对

微波辐射计探测高度为10000 m，探空数据到达10000 m高度的时间大概为25 min，故对探空放球后25 min内微波辐射计资料进行了平均，同时将探空秒数据资料，按微波辐射计设计的58层探测高度进行内插处理，以便进行对应比对。

2015年10月19日至12月25日，07时和19时探空高度达到10000 m，并且有微波辐射计资料的时次共133次(58层高度共7714样本)，温度和绝对湿度间的相关系数分别为0.987 ($R^2=0.974$)和0.977 ($R^2=0.954$) (图2)，与华北的分析结果相当^[9-10]。因此，微波辐射与探空探测的温度和绝对湿度的垂直廓线分布趋势基本一致，但相对湿度的廓线分布有一定的差距(图3)。

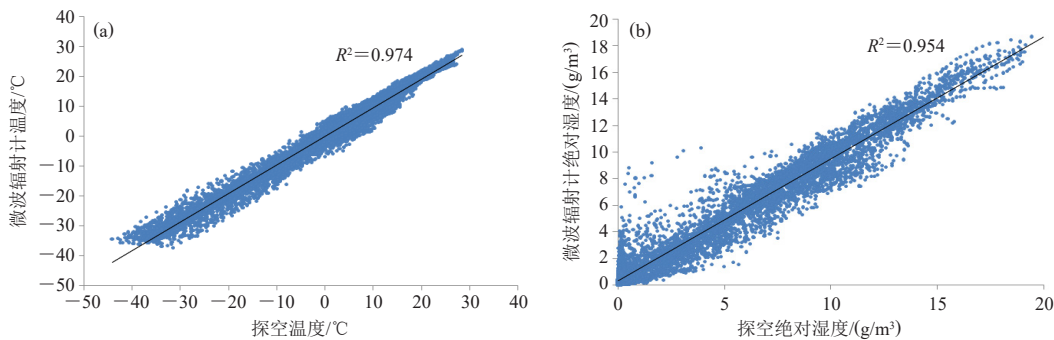


图2 微波辐射计与探空探测的温度相关关系(a)和绝对湿度的相关关系(b)

Fig. 2 Temperature correlation (a) and absolute humidity correlation (b) between microwave radiometer and sonding detection

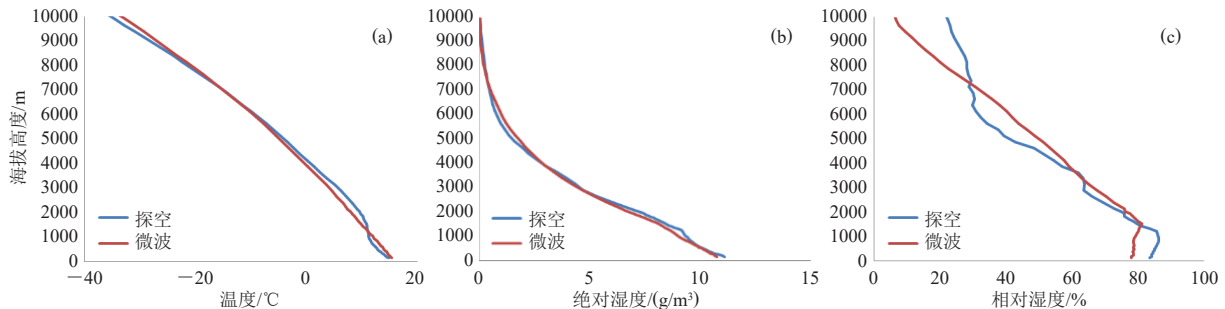


图3 微波辐射计与探空温度(a)、绝对湿度(b)、相对湿度(c)的比对

Fig. 3 Comparison of temperature (a), absolute humidity (b) and relative humidity (c) between microwave radiometer and sonding detection

4 机载探测和其他探测资料的比对

4.1 与探空温湿度的比对

2015年试验期间的10次飞机探测大多在上午，仅

1次飞行探测为在15:00结束。故均与早上07:15施放的探空资料对比，结果表明，无论降水与否，飞机探测的温度与探空温度的分布趋势基本一致，只是由于

飞机探测时间更接近中午，探测的温度比探空温度稍高些(图4)。

飞机探测与探空探测的湿度廓线则差异很大，显然是由于相对湿度分布不均匀，而飞机探测与探空

探测采样点、采样时间又无法对应所造成。但在大气湿度状况较均匀的情况下，如无降水的10月13日，飞机探测与07时探空探测的相对湿度廓线基本一致(图5)。

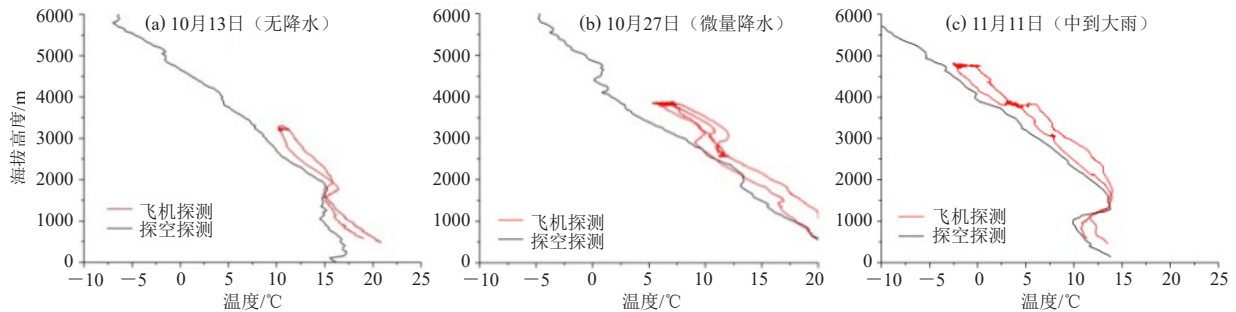


图4 2015年10月13日(a)、10月27日(b)和11月11日(c)飞机探测和07时探空探测的温度廓线对比

Fig. 4 Comparison of temperature profiles between aircraft detection and 7 o'clock sounding detection on 13 October (a), 27 October (b), 11 November (c) 2015

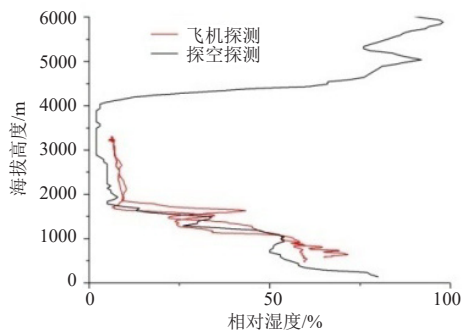


图5 2015年10月13日飞机探测与07时探空探测的相对湿度廓线对比

Fig. 5 Comparison of relative humidity profiles between aircraft detection and 7 o'clock sounding detection on 13 October 2015

4.2 与微波辐射计探测温度的比对

由于微波辐射计为每3 min进行一次探测，考虑到3 min飞机已飞行较远的距离，为此用1 min飞机观测(飞行距离22.4 km)平均资料与微波辐射计同步探测的资料进行比对，结果表明飞机探测的温度与微波观测的温度相关性非常一致，相关系数达0.932(图6)，说明可用微波辐射计反演大气温度。

同样，由于湿度、液水含量分布不均匀，飞机探测与探空探测采样点、采样时间不对应，造成微波辐射计相对湿度和液水含量与飞机探测的相对湿度和液水含量差异很大。

4.3 机载粒子与雷达回波的相关分析

S波段雷达的波长较长，可以用来反演雨粒子的有效直径，而云粒子的反演应通过W或K波段云雷达来反演，但鉴于目前云雷达鲜有在业务上使用，故本文用机载雨粒子、云粒子资料和S波段雷达回波进行

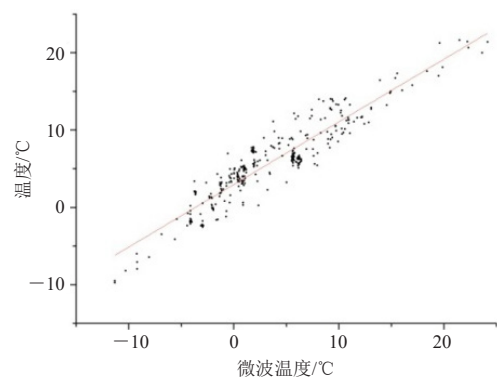


图6 飞机探测与微波辐射计探测的温度相关关系

Fig. 6 Temperature correlation between aircraft detection and microwave radiometer detection

了相关分析。雷达资料选择飞机探测时间6 min内(业务雷达每6 min体扫1次)的飞机所在经度、纬度和高度的资料。雷达回波(dBz)与雨粒子(以机载PIP的滴谱表示)和云粒子(以机载CAS前向散射的滴谱表示)有效粒子直径的相关系数分别为0.65131和0.47635，两者检验值 F 分别为47521和18933，均远大于 $F_{\alpha=0.00001}(1, 64505)=19.515$ ，可通过显著性 $\alpha=0.00001$ 的检验。相关分析结果表明，雷达回波与雨粒子有效直径的相关性更好，可用来反演(图7)。雷达回波与云粒子有效粒子直径的相关虽差些，但在尚无更好资料的时候，也作为参考而用来反演(图8)。另外，若将冷($t \leq 0^\circ\text{C}$)暖层($t > 0^\circ\text{C}$)分开(表1)，雷达回波能更好反演暖层雨粒子和冷层云粒子的有效粒子直径。

5 垂直分布特征

5.1 温度的垂直分布特征

如图9所示，秋、冬季雨日的整层大气的

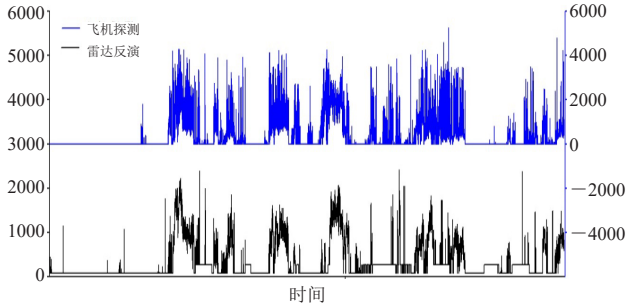


图7 雷达反演和飞机探测的雨有效粒子直径 (单位: μm)
Fig. 7 Rain effective particle diameters of radar retrieved and aircraft detection (unit: μm)

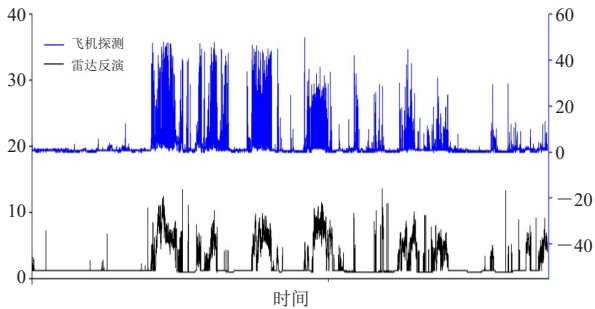


图8 雷达反演和飞机探测的云有效粒子直径 (单位: μm)
Fig. 8 Cloud effective particle diameters of radar retrieved and aircraft detection (unit: μm)

表1 雷达回波与冷暖层云、雨粒子有效粒子直径的相关系数
Table 1 Correlation coefficient between radar echo to effective particle diameters of cloud and rain in the cold and warm stratus clouds

| 云 | 雨粒子 | 云粒子 |
|---------------------------------|---------|---------|
| 暖层 ($t > 0^\circ\text{C}$) | 0.70518 | 0.47606 |
| 冷层 ($t \leq 0^\circ\text{C}$) | 0.55757 | 0.50743 |

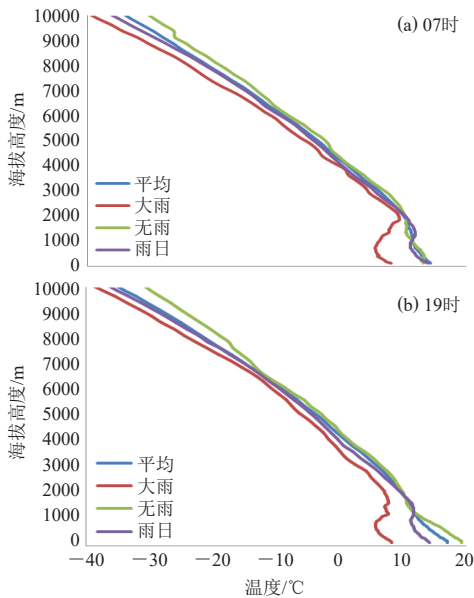


图9 07时 (a) 和19时 (b) 温度的垂直分布
Fig. 9 The vertical distribution of temperature at 07:00 (a) and 19:00 (b)

温度较无雨日的温度低, 另外, 雨日大气低层存在500~1200 m厚的逆温层, 一般出现在海拔700~1800 m, 降水量越大, 逆温层越厚越强。午后的增温会逐渐削弱逆温的强度和厚度。

5.2 湿度的垂直分布特征

秋、冬季降水日, 早晨 $> 80\%$ 相对湿度从地面一直维持到3300 m, 傍晚更高达到4300 m, 若按相对湿度 $> 80\%$ 的作为云的判断标准, 则赣州秋冬季降水日云厚约为3000~4000 m, 大雨日的云厚约达5500~7000 m。实际上以平均相对湿度判断云厚会由于平滑作用降低云高度和厚度的判断。另外, 由于午后升温, 海拔1200~1300 m以下大气相对湿度会逐渐变低 (图10)。

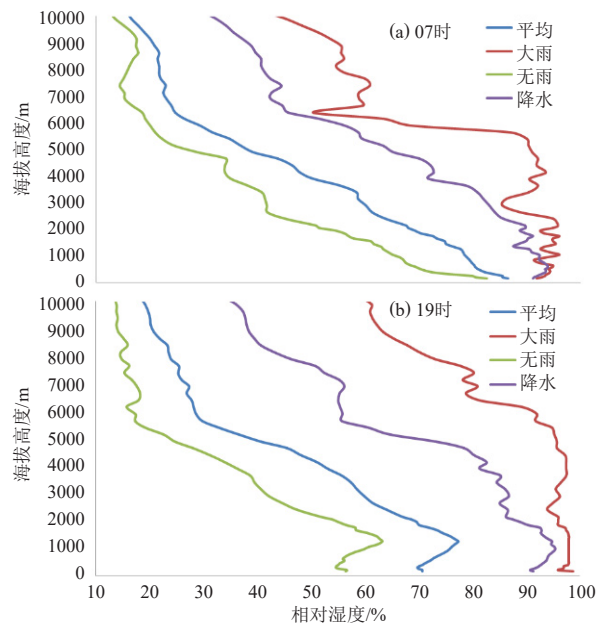


图10 相对湿度的垂直分布
Fig. 10 The vertical distribution of relative humidity

5.3 雷达反演云参量的分布特征

为避开雷达天顶盲区, 选择赣州以北25 km的湖江镇 ($114^\circ 58' 15''\text{E}$, $26^\circ 05' 48''\text{N}$, 海拔100.7 m), 对2015年试验期间17次 (10月30、31日, 11月 8、10、11、12、13、16、21、29日, 12月2、5、8、21、22、23、24日) 有资料的雨日, 赣州、吉安雷达叠加资料和微波辐射资料反演的云参量, 分析湖江镇降水的云参量的分布特征。

5.3.1 平均云参量的分布特征

从表2看出, 湖江镇秋冬季平均云顶高、云厚、累计液水含量和云有效粒子直径以及 $> 40 \mu\text{m}$ 的厚度均与降水量成正比分布, 无降水时, 最大回波在9 dBz左右, 云顶高度较低位于3400 m左右, 累计液水含

表2 湖江镇5min降水量与雷达反演的平均云雨参量的关系
Table 2 Relation between 5 min precipitation in Hujiang Town and mean cloud and rain parameters retrieved by radar

| 降水量/(mm/5min) | 最大回波/dBz | 云顶高/m | 云厚/m | 累计液水含量/(kg/m ²) | 云有效粒子直径/ μm | $\geq 40 \mu\text{m}$ 厚度/m |
|---------------|----------|-------|------|-----------------------------|------------------------|----------------------------|
| 无降水 | 9 | 3409 | 2556 | 0.6 | 22 | 918 |
| ≤ 0.5 | 24 | 7689 | 6803 | 2.3 | 55 | 3638 |
| > 0.5 | 28 | 8032 | 7452 | 3.2 | 65 | 5201 |

量和最大云有效粒子直径都较小在 0.6 kg/m^2 和 $22 \mu\text{m}$ 左右;发生降水时,云参量明显增大,最大回波和云顶高、云厚、累计液水含量、最大云有效粒子直径和 $> 40 \mu\text{m}$ 的厚度分别达到 24 dBz 、 7689 m 、 6803 m 、 2.3 kg/m^2 、 $55 \mu\text{m}$ 和 3500 m ;出现 0.5 mm/5 min 以上的超强降水时,这些云参量随之增加但较缓和,最大回波达 28 dBz ,云顶高 8000 m 左右,云厚 7500 m 左右,累计液水含量达 3.2 kg/m^2 ,最大云有效粒子直径达 $65 \mu\text{m}$, $> 40 \mu\text{m}$ 的厚度达 5200 m 。雷达反演的云厚与相对湿度估测的云厚大致一致。湖江镇雷达回波强度与降水的关系分布与江西人工增雨作业条件的雷达回

波参数指标分析^[11]的相关结论相似。

5.3.2 云有效粒子直径垂直分布的日变化特征

试验期间的17次雨日,湖江镇平均云有效粒子大值出现在午后到上半夜时段的 $3700 \sim 6700 \text{ m}$ 高度,平均云有效粒子直径大值的时间分布与出现的降水频次和降水量时间基本一致。湖江镇在无降水时段,平均云有效粒子直径较小,一般 $< 25 \mu\text{m}$;有降水时,平均云有效粒子直径均 $> 30 \mu\text{m}$,降水强度 $\leq 0.5 \text{ mm/5min}$ 时,最大平均云有效粒子直径 $35 \sim 60 \mu\text{m}$,降水强度 $> 0.5 \text{ mm/5min}$ 时,最大平均云有效粒子直径 $50 \sim 90 \mu\text{m}$ (图11和图12)。

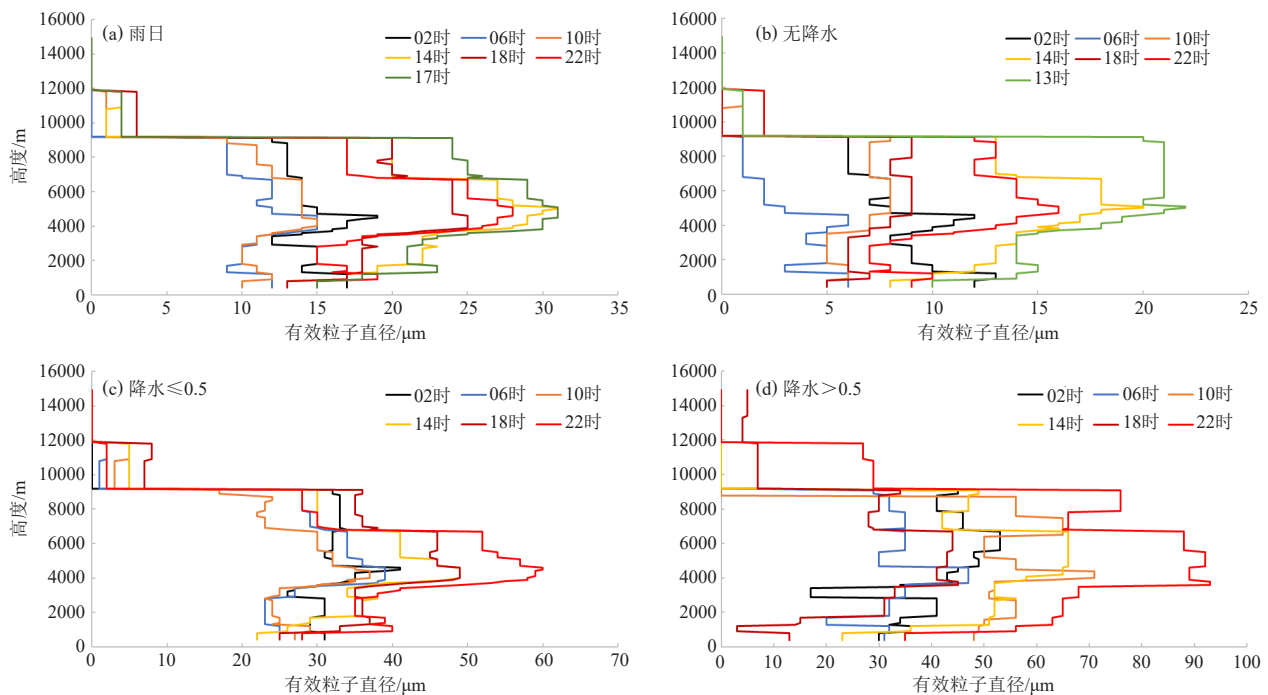


图11 湖江镇云有效粒子直径垂直分布的平均日变化

Fig. 11 The mean diurnal variation of the vertical distribution of cloud effective particle diameters in Hujiang Town

6 结论与讨论

我国南、北方降水云结构特征虽然不尽相同,我国北方已开展较多的综合探测试验,如华北层状云、西北地形云等的外场试验,这些试验虽对南方的探测试验具有相当的借鉴作用,但由于我国南方云系如积云和暖云降水,其云系结构与北方降水云系有一定的差别,因此应针对南方降水云系的特点开展针对性的

空地联合外场探测试验。可喜的是,目前我国已逐渐开展相关试验工作。

本文是近期在江西赣南开展的综合探测试验的一部分,其中2015年秋冬季的综合探测资料较全,因此仅用该段资料进行分析。由于资料样本所限,其结论有一定的局限性,需用更多的试验进行验证。同时,若有足够的资料,按天气类型对降水过程分类进行分

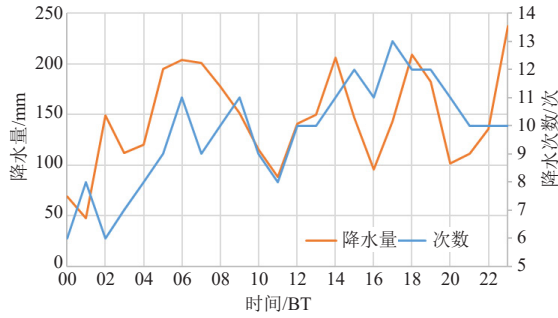


图12 湖江镇降水次数和降水量的平均日变化

Fig. 12 The mean diurnal variation of rain frequency and precipitation in Hujiang town

析，云分布特征的结论可能会更有针对性^[12]。因此，本文结论仅供参考。

1) 微波辐射计反演的温度与探空探测、飞机探测的值相关性均很好，微波辐射计反演的绝对湿度与探空探测的值相关性很好，因此，3 min探测一次的微波辐射反演的温度和绝对湿度，可作为高时间分辨资料使用。

2) 相关分析结果表明，雷达回波可用来反演雨粒子有效直径，在尚无更好资料的时候，也可作为参考用来反演云粒子有效直径。雷达反演的云有效粒子直径的大小和垂直分布，在一定程度上可反映云系的结构分布，当平均云有效粒子直径 $>30\ \mu\text{m}$ ，厚度达3000 m，对产生降水有指示意义。

3) 赣南秋冬季(10—12月)，降水云系云顶较高，

平均高度达8000 m；云层较厚，平均厚度达5000 m以上；午后到上半夜云系发展更旺盛，降水概率更高。

4) 相对于北方，我国南方云系云水含量可能更高、冰晶数浓度更少，暖性云层更厚，更多的降水可能是由云水碰并产生。因此，在开展南方降水云系外场试验时应更加关注这些要素的探测和研究。

参考文献

- [1] 林海, 忻妙新, 魏重, 等. 雷达和微波辐射计联合系统探测云中含水量和雨强分布的研究. 大气科学, 1984, 8(3): 332-340.
- [2] 李金辉, 陈保国, 罗俊颖. 陕北关中中层状云降雨雷达回波特征. 气象, 2004, 30(12): 53-56.
- [3] 郑国光, 陈跃, 陈添宇, 等. 祁连山夏季地形云综合探测试验. 地球科学进展, 2011, 26(10): 1057-1070.
- [4] 陈静, 铃伟妙, 韩军彩, 等. 基于动态Z-I关系雷达回波定量估测降水方法研究. 气象, 2015, 41(3): 296-303.
- [5] 赵增亮, 毛节泰, 魏强, 等. 西北地区春季云系的垂直结构特征飞机观测统计分析. 气象, 2010, 36(5): 71-77.
- [6] 亓鹏, 郭学良, 卢广献, 等. 华北太行山东麓一次稳定性积层混合云飞机观测研究: 对流云/对流泡和融化层结构特征. 大气科学, 2019, 43(6): 1365-1384.
- [7] 郭艳, 彭义峰. 江西局地强对流天气的多普勒天气雷达产品特征. 气象与减灾研究, 2008, 31(2): 48-52.
- [8] 林长城, 陈彬彬, 隋平, 等. 闽西北地区降水回波特征和人工增雨作业条件分析. 气象科技, 2011, 39(6): 697-702.
- [9] 郭丽君, 郭学良. 利用地基多通道微波辐射计遥感反演华北持续性大雾天气温、湿度廓线的检验研究. 气象学报, 2015, 73(2): 368-381.
- [10] 张雪芬, 王志诚, 郭佳佳, 等. 微波辐射计温湿廓线反演方法改进试验. 应用气象学报, 2020, 31(4): 385-396.
- [11] 郭艳, 蔡哲, 杨建超, 等. 江西人工增雨作业条件的雷达回波参数指标分析. 气象与减灾研究, 2010, 33(4): 67-71.
- [12] 魏鸣, 宋羽轩, 张蕾. 定量测量降水量的回波结构自适应算法研究. 大气科学学报, 2018, 41(5): 676-683.