

韩珏靖,陈飞,张臻,等. 2015. MP-3000A 型地基微波辐射计的资料质量评估和探测特征分析. 气象, 41(2):226-233.

MP-3000A 型地基微波辐射计的资料 质量评估和探测特征分析^{* 1}

韩珏靖¹ 陈 飞¹ 张 臻² 赵云武¹

1 苏州市气象局, 苏州 215131
2 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730060

提 要: 应用常规探空、MP-3000A 型地基微波辐射计和自动气象站数据, 比较了微波辐射计与探空的差异, 温度和相对湿度的平均观测偏差分别为 3.2℃和 29%, 相关系数分别为 0.98 以上和 0.5 左右。分析了不同天气下微波辐射计的探测特征, 发现相对湿度和液态水含量的垂直变化与降水、强对流和大雾的发生有良好对应; 降水和强对流过程中, 6 km 以下的相对湿度提前增大(湿度增大的提前时间在降水中较长, 在强对流中较短), 3.5 km 以下液态水含量增加, 尤其在 2.25~3.25 km 处有明显的激增; 大雾伴随 3~3.5 km 以下相对湿度增大和 1.5 km 以下液态水含量激增。A 指数和对流性稳定指数(I_{conve})指数在出现明显降水后可能失去指示意义, 在刚开始降水(尤其是明显降水)阶段及大雾中表现良好。

关键词: 地基微波辐射计, 探空观测, 均方根偏差, 液态水含量

中图分类号: P407 **文献标志码:** A **doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.02.011

Assessment and Characteristics of MP-3000A Ground-Based Microwave Radiometer

HAN Juejing¹ CHEN Fei¹ ZHANG Zhen² ZHAO Yunwu¹

1 Suzhou Meteorological Office of Jiangsu, Suzhou 215131
2 Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730060

Abstract: The difference and correlation between microwave radiometer and radiosonde are presented in this paper, based on conventional sounding, MP-3000A ground-based microwave radiometer and automatic station data. Result shows temperature and relative humidity differences from Suzhou ground-based microwave radiometer are 3.2℃ and 29% respectively, while correlation coefficients are above 0.98 and around 0.5 accordingly. Analysis of signature for microwave radiometer observations in different weather conditions illustrates that there is a good correspondence between the vertical variations of relative humidity, liquid water content and the rainfall, severe weather, and fog. In precipitation and strong convection cases, relative humidity below 6 km increases ahead of the weather process (lead time of increase in relative humidity in rainfall case is longer than that in severe convection case), liquid water content below 3.5 km rises rapidly, especially in the height from 2.25 to 3.25 km. However, in fog cases, increase of relative humidity is below 3—3.5 km and liquid water content is below 1.5 km. A index and convective stability index may lost their indicative significance after obvious precipitation appears, but they perform well at the beginning of rainfall (especially remarkable rains) and in the fog case.

^{*} 国家自然科学基金项目(411391001)、江苏省气象科研基金项目(KM201408)、苏州市 2011 年度科技发展计划项目(ss201119)和苏州市气象局自立科研课题项目(sz201202 和 sz201301)共同资助
2013 年 10 月 19 日收稿; 2014 年 9 月 13 日收修定稿
第一作者: 韩珏靖, 主要从事短期天气、气象新资料等研究. Email: jjhan_sz@163.com

Key words: ground-based microwave radiometer, sounding observation, root mean square deviation, liquid water content

引言

探空是测量大气中各种气象要素廓线的基本方法(周秀骥,1983;廖国男,2004),传统定点、定时的氢气球探空观测具有较高的代表性和可信度(伊里哈木等,2009),然而有限的站点分布和无法连续观测,使得探空的时空密度达不到气象事业发展的要求(赵伯林等,1980;Hogg et al,1983)。为弥补常规探空的不足,飞机、GPSmet和遥感技术等探测手段被广泛用于气象领域,其中被动地基遥感的仪器结构相对简单,能在无人看守情况下进行连续观测。微波辐射计作为被动微波遥感的唯一传感器(赵雅静等,2010),已发展了地基、空基、星基等基于各种平台的产品,其中地基和空基微波辐射计发展迅猛(Wilso et al,1986;Gailiano,1990;Chen,1998;肖志辉等,2000;王黎俊等,2007;黄治勇等,2014),尤其是地基微波辐射计可以连续进行气象观测,包括温度、水汽等气象要素的廓线以及环境温度等,时间分辨率精确到分钟(Westwater et al,2005),已经成为常规探空的重要补充。国外有大量关于地基微波辐射计的研究(Hill,1991;Liu et al,2001;Ivanova et al,2002),国内对其探测原理(赵玲等,2009)、数据反演(黄建平等,2010)、资料同化(王叶红等,2010)、误差比较(徐桂荣等,2010;赵玲等,2010;姚作新等,2011)、个例分析(周嵬等,2011)等方面均进行了研究和探讨。刘红燕等(2009)比较了地基微波辐射计与探空和GPSmet之间的差异、高金辉等(2009)比较了地基微波辐射计和地面翻斗式雨量计的结果、刘建中等(2010)对地基微波辐射计和探空进行了定量误差分析,结果均证明了地基微波辐射计探测的可靠性。同时,大气中的水汽密度、液态水含量等要素与降水联系紧密,利用地基微波辐射计进行这方面的研究已经开展(段英等,1999;郭伟等,2010;敖雪等,2011;廖晓农等,2013),张志红等(2010)用雷达回波垂直分布趋势与地基微波辐射计液态水的垂直分布趋势进行了对比,证明两者有较好的对应,并且低层液态水的分布与降雨有直接关系。

以往的工作多着眼于地基微波辐射计探测、反演原理和产品使用的定性分析,以及反演数据误差

的定量研究,而对地基微波辐射计在不同天气过程中的表现没有系统的分析和比较,缺乏其产品对天气指示意义的研究。本文使用苏州MP-3000A型地基微波辐射计数据,首先分析其性能和质量情况,然后选取不同的天气过程,对探测数据的特征进行研究和比较,尤其关注液态水含量在不同天气过程中的垂直分布,为揭示大气中水汽相态发生变化(即凝结)的高度,以及为降水和大雾的机理研究提供一定参考,以期对天气分析和预报、天气过程研究做出一定的帮助,并为构建新型探空数据、弥补本地无线电探空缺乏提供可能。

1 资料说明与计算方法

1.1 资料说明

苏州站(120.38°N、31.19°E)2011年1月1日至12月28日MP-3000A型地基微波辐射计资料,探测高度为0~10 km,垂直58层,时间间隔约3 min,输出的观测要素有温度、相对湿度和液态水含量。南京(118.8°N、32°E)、上海(121.46°N、31.41°E)和杭州(120.17°N、30.23°E)2011年1月1日至12月28日的探空资料,每天00和12UTC两次观测,输出的要素有温度和露点温度。苏州自动气象站逐小时能见度和降水量观测。

1.2 计算方法

利用马格努斯经验公式对探空的温度和露点温度进行计算,得到相对湿度。不同观测资料的差异使用均方根偏差(Wang et al,2008)计算,公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$

式中, x_i 和 y_i 分别为两种不同的观测数据。

个例比较中用A指数和对流性稳定度指数(I_{conve} 指数)进行分析。A指数计算方法如下:

$$A = T_{950} - T_{520} - [(T - T_d)_{850} + (T - T_d)_{700} + (T - T_d)_{500}]$$

式中, T 为温度, T_d 为露点温度,A指数不仅包含了温度递减率,还包含了各层的温湿度条件,因此数值

越大,大气越潮湿(不稳定)。

对流性稳定度指数计算方法如下:

$$I_{\text{conve}} = \theta_{\text{se}500} - \theta_{\text{se}850}$$

式中, θ_{se} 为假相当位温, $I_{\text{conve}} > 0$,为对流性稳定, $I_{\text{conve}} < 0$,为对流性不稳定。

2 偏差分析

选取距离苏州站最近的三个常规探空站点:南京、上海和杭州,筛选出以上四站在同一天气系统影响下的资料,用同一时刻相对探空高度±100 m 范围内的微波辐射计观测与探空观测进行均方根偏差计算(表 1),温度和相对湿度均找到约 12000 对数据。

苏州站微波辐射计和南京、上海探空的温度偏差约为 2.9℃,和杭州探空的温度偏差约为 3.8℃;相对湿度的偏差在 28%~30%。温度的相关系数均在 0.98 以上,相对湿度的相关系数则在 0.5 左右,魏东等(2011a)的研究指出,由于微波辐射计的相对湿度偏差较大,与常规探空的一致性上温度更高。

表 1 2011 年苏州站微波辐射计与探空观测的均方根偏差
Table 1 Root mean square deviation between Suzhou microwave radiometer and sounding data in 2011

要素	苏州与南京	苏州与上海	苏州与杭州
温度的均方根偏差/℃	2.93	2.94	3.83
相对湿度的均方根偏差/%	29.82	29.11	28.20

同一天气系统影响下的三站探空间的比较显示(表 2),温度和相对湿度的均方根偏差大约分别为 2℃和 25%,相关系数分别在 0.99 以上和 0.6 左右,这与表 1 的结果相差不大,说明苏州微波辐射计的探测性能可能略低于常规探空,但仍能近似代替常规探空进行本地气象监测,Ware 等(1997)的研究指出,微波辐射计资料和探空资料具有同等的准确性。

表 2 2011 年苏州邻近三站探空观测
的均方根偏差和相关系数

Table 2 Root mean square deviation and correlation coefficient between 3 sounding observations near Suzhou Station in 2011

相互比较的 探空站点	温度		相对湿度	
	偏差/℃	相关系数	偏差/%	相关系数
南京-上海	1.73	0.998	24.37	0.658
南京-杭州	2.44	0.997	26.66	0.574
上海-杭州	1.89	0.998	23.90	0.669

温度偏差随高度的递增而增大,这与刘红燕(2011)的研究结果一致,苏州站微波辐射计与杭州探空的温度偏差始终较大(图 1a)。1.6 km 以下与上海探空的比较偏差最小为 2℃左右,与南京和杭州的偏差在 2~3℃;1.6~7 km 与上海和南京的比较结果差别不大,在 3℃附近波动,与杭州探空比较的偏差较大,在 4℃上下;7 km 以上偏差随高度逐渐增大到 6~7℃,与南京探空的偏差最小。

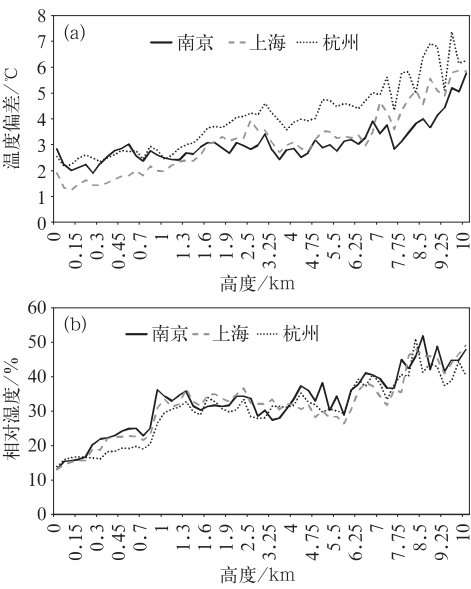


图 1 2011 年苏州站微波辐射计均方根
偏差随高度的分布
(a)温度,(b)相对湿度

Fig. 1 Vertical distribution of root mean square deviation of Suzhou microwave radiometer in 2011
(a) temperature, (b) relative humidity

相对湿度偏差在 1 km 以下变化较大,偏差随高度的递增而显著增大,1~6 km 变化平缓,在 30%~40%波动,6 km 以上再次出现偏差随高度递增的现象(图 1b)。

3 个例比较

3.1 降水过程

2011 年 6 月 17 日受梅雨锋影响,苏州出现了区域性暴雨、局部大暴雨。从微波辐射计观测来看,6 月 16 日 20 时至 17 日 01 时苏州站上空 1.5 km 以下的相对湿度有所变化,1.5~2.5 km 的相对湿度稳定在 90%以上,并向 4~5 km 高度发展(图 2a),这时

苏州站未出现降水。17 日 01—15 时 5 km 以下均维持 90% 以上的相对湿度;15—20 时大湿区顶降低到 3.5 km,并在大湿区顶上出现 10%~20% 的显著干区(图 2a)。17 日 06 时、11—12 时、15—21 时

2~3.5 km 的液态水含量出现激增,16—19 时 3~3.5 km 处出现 $6.5\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上的高值中心(图 2b)。17 日 04 时起苏州站出现弱降水,而明显的降水分别在 06—07 时(7 mm)、11—12 时(1.6 mm)、15—22 时(2.3~19.6 mm),其中 16—17 时和 18—19 时分别对应 16.1 和 19.6 mm 的降水(图 2b)。17 日 20 时后大湿区顶抬高,显著干区消失,降水也逐渐减小。

A 指数从 16 日 19 时开始增大,17 日 00 时后增大到 0°C 以上,05 时前后刚开始出现弱降水时(小时雨强 0.2 mm 以下)增大到 15°C ,06—07 时出现明显降水时,激增到 52°C 附近,07 时后一直稳定在 10°C 左右; I_{conve} 指数在 17 日 05 时前后小幅下降到 37°C ,06—07 时骤减到 -10°C ,其余时间基本稳定在 $45\sim 50^{\circ}\text{C}$ (图 2c)。

6 月 17 日的降水中,6 km 以下的相对湿度在降水开始前约 6 h 出现明显增大;出现明显降水时 3 km 上下的液态水含量激增,较强降水时相对湿度大值区项略有降低并在上面出现显著干区(这可能与较强降水伴随低层辐合上升、高层辐散下沉增强,高层增强的下沉气流将上层水汽带下来,同时抬升气流中的水汽凝结成雨滴降落有关)。对明显降水前出现的弱降水,A 指数和 I_{conve} 指数在变化趋势上有所体现,刚开始出现明显降水时也有较好的对应,但与明显降水后的降水实况对应较差,这应该和微波辐射计的探测原理有关(Ware et al,1997;赵玲等,2009),降水干扰会导致测量的亮温出现偏差,虽然包括防水罩和鼓风机在内的液体隔离缓解系统能减少降雨时天线罩上的液态水,但当出现明显降水后,降水干扰仍可能对温湿要素的反演结果产生影响,由温湿要素定量计算得到的天气指数也随之出现偏差。

3.2 强对流过程

2011 年 8 月 10 日受午后热力抬升影响,苏州出现局地强对流天气,以短时集中降水和雷雨大风为主。8 月 10 日 09:00—12:40 的 0.5~1.5 km 相对湿度增大到 90% 以上(图 3a),此时苏州站并无降水。12:40—14:00 90% 以上的湿区迅速向上下层发展,4 km 以下基本均为高湿区,2~3.5 km 处的液态水含量同时激增,并在 3~3.5 km 处出现 $6.5\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上的高值中心(图 3b),12:55 和 13:13 苏州站先后出现 16.2 和 $14.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的 7 级大风,

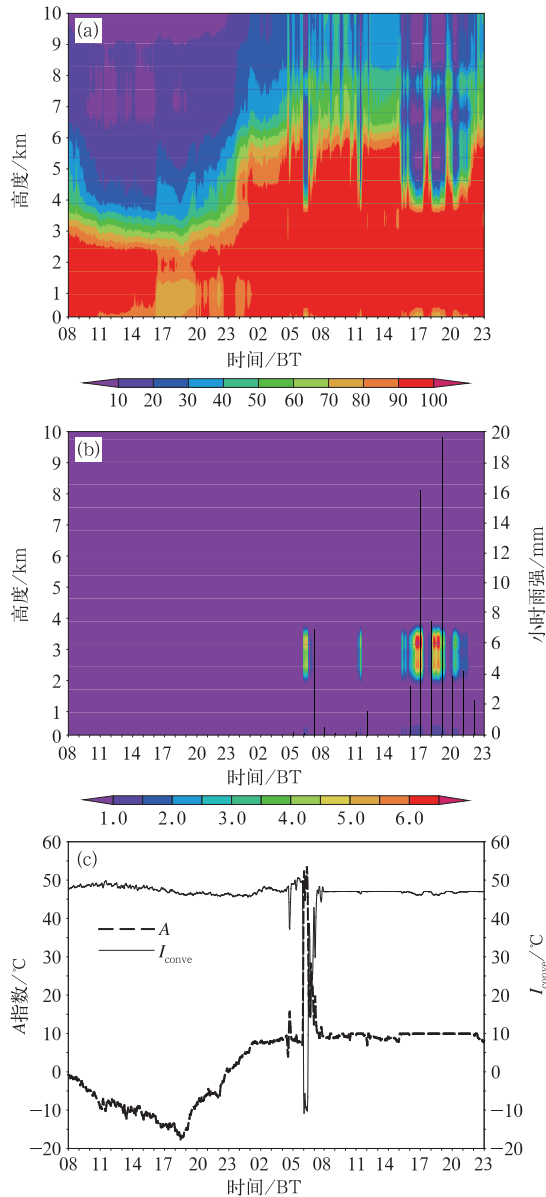


图 2 2011 年 6 月 16 日 08 时至 17 日 23 时苏州站观测
(a)相对湿度(单位:%)垂直剖面,
(b)液态水含量(单位: $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)垂直剖面 and 1 h
降水量(黑色柱状线,单位:mm),(c)A 指数
Fig. 2 The observation of Suzhou Station from 08 BT
on 16 June to 23 BT on 17 June 2011
(a) vertical profile of relative humidity (unit: %),
(b) vertical profile of liquid water content (unit: $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)
and hourly precipitation (black bar, unit: mm),
(c) A index and convective stability index

13—14 时出现 7.1 mm 的降水。14—15 时 0.2~4 km 的湿度逐渐从 90% 以上减小到 80%~90%，降水减弱；15—16 时 4 km 以下恢复 90% 以上的大湿区，对应 0.6 mm 的降水。16 时后 90% 以上的大湿区迅速消失，降水停止。

10 日 13 时前 A 指数在 -1~5℃， I_{conve} 指数在

35~40℃；接近 13 时 A 指数增大到 27℃， I_{conve} 指数减小到 11℃（此时出现大风）；13—14 时 A 指数激增到 40~50℃， I_{conve} 指数骤降到 -10~-8℃（对应大风和明显降水）；14—15 时降水减弱，A 指数回落至 4~11℃， I_{conve} 指数回升到 34~37℃；15—16 时 A 指数再次增大到 25℃左右， I_{conve} 指数减小到 18℃附近，此时出现弱降水；16 时后 A 指数和 I_{conve} 指数分别稳定在 0℃和 34℃附近（图 3c）。

此次强对流过程中，6 km 以下的水汽累积距离强天气（ $16.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 大风）出现的时间较短，时间差在半小时之内；而高空 3 km 上的水汽激增和站点上的明显降水仍然有很好的对应关系；A 指数和 I_{conve} 指数的变化趋势与强对流天气对应较好，尤其出现明显降水时，趋势和数值均有良好反映，对明显降水后的弱降水，A 指数和 I_{conve} 指数从变化趋势上也有所体现。

3.3 大雾过程

2011 年 11 月 27 日 20:00 后 0.5 km 下的相对湿度逐渐增大，尤其在 28 日 02 时后近地层湿度达到 90% 以上，并向 0.5 km 高度扩展（图 4a）。28 日 04—10 时 1.5 km 以下液态水含量出现增大趋势，主要集中在 0.2~1 km（图 4b）。27 日 20 时后能见度持续下降，尤其 28 日 04 时能见度从 1304 m 迅速下降到 05 时的 234 m，28 日 05—09 时能见度维持在 500 m 以下。28 日 10 时后低层大湿区消失，同时能见度也恢复到 2424 m 以上。

A 指数在出现能见度 < 1000 m 的大雾时（28 日 05—09 时）数值增大，说明湿度条件变好； I_{conve} 指数均在 0℃ 以上，即大气始终保持对流性稳定（图 4c）。

在大雾过程中，低空 0.5 km 以下相对湿度的增加和实况中能见度下降几乎同时发生，1.5 km 以下液态水含量的激增对应出现能见度 < 500 m 的大雾，垂直高湿层的消失也与能见度提高同时变化；指数分析表明大气始终保持对流性稳定且能见度降低时湿度增大。

4 特征分析

选取 2011 年夏季 21 个过程（5 例强对流和 16 例降水），分析每个过程对应的液态水含量垂直剖面

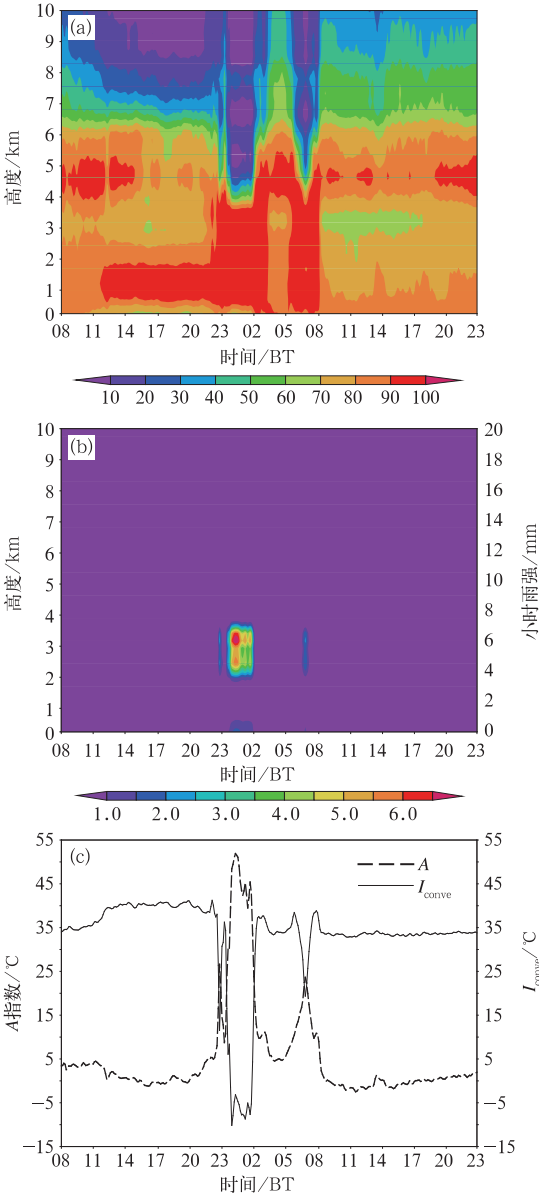


图 3 2011 年 8 月 10 日 08—21 时苏州站观测 (a) 相对湿度 (单位: %) 垂直剖面, (b) 液态水含量 (单位: $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 垂直剖面, (c) A 指数

Fig. 3 The observation of Suzhou Station from 08 BT to 21 BT on 10 August 2011 (a) vertical profile of relative humidity (unit: %), (b) vertical profile of liquid water content (unit: $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), (c) A index and convective stability index

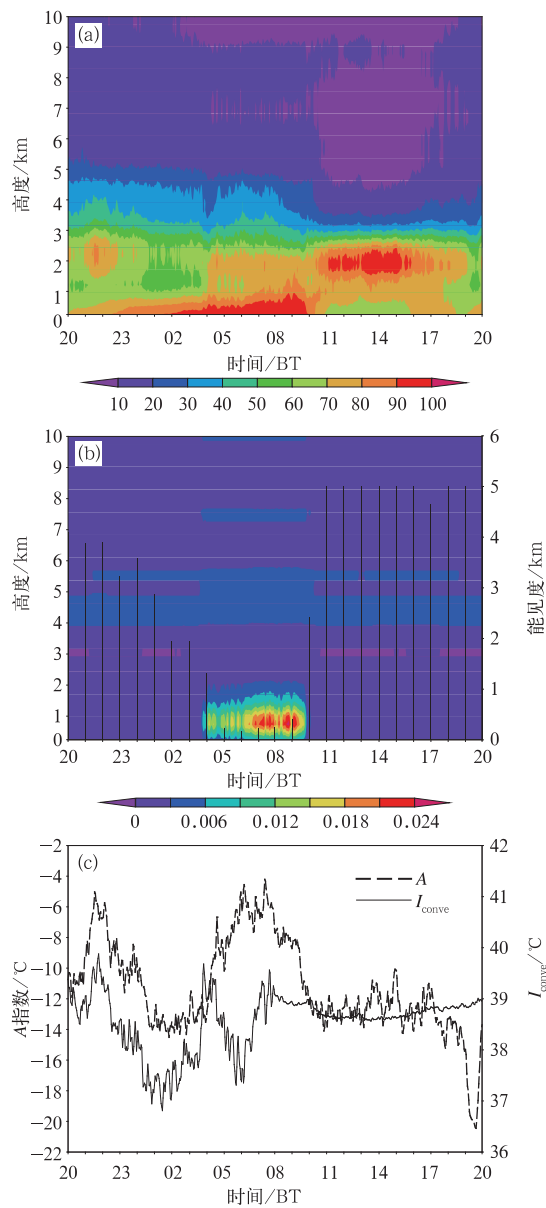


图 4 2011 年 11 月 27 日 20 时至 28 日 20 时苏州站观测

(a) 相对湿度(单位:%)垂直剖面,

(b) 液态水含量(单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)

垂直剖面 and 1 h 能见度(黑色柱状线,

单位:km), (c) A 指数(黑色虚线,单位: $^{\circ}\text{C}$)

和 I_{conve} (灰色实线,单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 4 Observation of Suzhou station from 20 BT on 27 November to 20 bT on 28 November 2011

(a) vertical profile of relative humidity (unit: %),

(b) vertical profile of liquid water content (unit: $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) and hourly visibility (black solid line, unit: km), (c) A index and I_{conve}

(图略),发现 2.25~3.25 km 的液态水含量变化最显著。比较 21 例过程与 2011 年全年的平均液态水

含量垂直分布(图 5a)发现,两者在 2 km 以上的变化趋势一致(均在 2.25 和 3.25 km 处明显增大,2.5 km 处为两显著峰值间的低谷,3.25 km 以上迅速减小),2 km 以下则几乎呈反相位变化;与年平均液态水含量相比,21 例过程平均液态水含量在 2.25~3.25 km 处激增的现象十分显著;21 例过程平均液态水含量的量级明显大于年平均液态水含量。21 例过程平均液态水含量(图 5a)和年最大液态水含量(图 5b)的垂直变化趋势十分接近,两者都体现了 3.25 km 以上液态水含量急剧减小、2.25 和 3.25 km 处存在显著峰值的特征,虽然在 2.5 km 处均出现了两显著峰值间的低谷,但对整体而言,两者在 2.25~3.25 km 都明显增大;年最大液态水含量几乎是 21 例过程平均液态水含量的 5 倍。

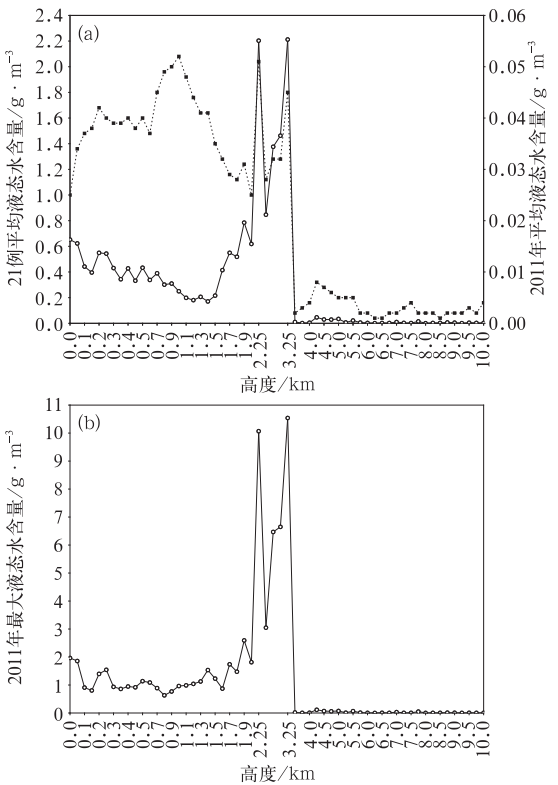


图 5 (a)苏州站 2011 年夏季 21 例过程的平均液态水含量(实线)和 2011 年平均液态水含量(点线)的垂直分布;(b)2011 年苏州站最大液态水含量的垂直分布

Fig. 5 (a) Vertical distribution of 21 summer cases (solid line) and annual (dotted line) average liquid water content of Suzhou Station in 2011; (b) vertical distribution of maximum liquid water content of Suzhou Station in 2011

21 例过程的相对湿度垂直剖面分析(图略)表明,相对湿度在强对流过程中有 30 分钟以内的提前量,降水过程中相对湿度的变化集中在 6 km 以下,大多数个例中相对湿度对于降水过程的提前响应时间为 0.5~1 h。

对 2011 年秋季 4 次大雾天气的分析(图略)表明,相对湿度均在 3~3.5 km 以下变化,相对于能见度持续降低的提前时间并不明显。

5 结 论

(1) 苏州地基微波辐射计与邻近三站探空的比较表明,温度和相对湿度的均方根偏差大约分别为 3.2℃和 29%,相关系数分别在 0.98 以上和 0.5 左右,苏州微波辐射计的探测性能可能略低于常规探空,但仍能近似代替常规探空进行本地气象监测。

(2) 偏差随高度的递增而增大,地基微波辐射计在低空的反演结果优于高空(周玉驰,2003),这是导致偏差随高度递增而增大的原因之一。此外,水汽主要集中在大气低层,中高层大气的水汽含量逐渐减少,但相对湿度偏差在高层仍然较大,表明微波辐射计高层的相对湿度资料在使用时需仔细分析。

(3) 在降水和强对流过程中,6 km 以下的相对湿度有提前增大的现象,湿度增大的提前时间(即湿度增大相比于天气过程发生的提前时间,下同)在降水过程中较长、在强对流过程中较短(30 min 以内),这和强对流能量积蓄时间较短、突发性强有关。大雾过程伴随 3~3.5 km 以下相对湿度增大,但这一现象与能见度降低的时间差并不明显。

(4) 在不同天气过程中,液态水含量的变化与天气现象有良好对应关系(李铁林等,2007):降水和强对流对应 3.5 km 以下的液态水含量增大,且 2.25~3.25 km 处激增明显,与年平均状态相比,降水和强对流过程中 2.25~3.25 km 处液态水含量显著激增的现象十分明显;大雾对应 1.5 km 以下的液态水含量激增。相对湿度和液态水含量的显著变化在大雾过程中出现在较低层,这和雾是由一种悬浮于近地面层大量水滴或冰晶造成且发生在边界层内的天气现象有关(Leipper,1994;陆春松等,2011;蔡子颖等,2012)。

(5) 物理量分析表明,在出现明显降水后, A 指数和 I_{conve} 指数可能失去指示意义;从变化趋势上看对弱降水有所体现,在明显降水以及大雾过程中,数

值和变化趋势均与实况对应较好。

微波辐射计和风廓线雷达等新型气象探测,为不具备无线电探空的台站提供了构建探空数据的条件(魏东等,2011b),基于微波辐射计观测建立本地探空数据集将是本研究的下一步工作。

参考文献

- 敖雪,王振会,徐桂荣,等.2011.地基微波辐射计资料在降水分析中的应用.暴雨灾害,30(4):358-365.
- 蔡子颖,韩素芹,吴彬贵,等.2012.天津一次雾过程的边界层特征研究.气象,38(9):1103-1109.
- 段英,吴志会.1999.利用地基遥感方法监测大气中汽态、液态水含量分布特征的分析.应用气象学报,10(1):34-40.
- 高金辉,贾利锋,顾学俊.2009.利用地基微波辐射计探测降雨强度的方法研究.河南师范大学学报(自然科学版),37(5):47-50.
- 郭伟,王振会,孙安平,等.2010.地基微波辐射计网络资料处理系统设计及实现.气象,36(4):120-125.
- 黄建平,何敏,阎虹如,等.2010.利用地基微波辐射计反演兰州地区液态云水路径和可降水量的初步研究.大气科学,34(3):548-558.
- 黄治勇,徐桂荣,王晓芳,等.2014.基于地基微波辐射计资料对咸宁两次冰雹天气的观测分析.气象,40(2):216-222.
- 李铁林,刘金华,刘艳华,等.2007.利用双频微波辐射计测空中水汽和云液水含量的个例分析.气象,33(12):62-68.
- 廖国男.2004.大气辐射导论.北京:气象出版社,614.
- 廖晓农,张琳娜,何娜,等.2013.2012 年 3 月 17 日北京降水相态转变的机制讨论.气象,39(1):28-38.
- 刘红燕.2011.三年地基微波辐射计观测温度廓线的精度分析.气象学报,69(4):719-728.
- 刘红燕,王迎春,王京丽,等.2009.由地基微波辐射计测量得到的北京地区水汽特性的初步分析.大气科学,33(2):388-396.
- 刘建中,张蔷.2010.微波辐射计反演产品评价.气象科技,38(3):325-331.
- 陆春松,牛生杰,岳平,等.2011.南京冬季雾多发期边界层结构观测分析.大气科学学报,34(1):58-65.
- 魏东,孙继松,雷蕾,等.2011a.三种探空资料在各类强对流天气中的应用对比分析.气象,37(4):412-422.
- 魏东,孙继松,雷蕾,等.2011b.用微波辐射计和风廓线资料构建探空资料的定量应用可靠性分析.气候与环境研究,16(6):697-706.
- 王黎俊,孙安平,刘彩红,等.2007.地基微波辐射计探测在黄河上游人工增雨中的应用.气象,33(11):28-33.
- 王叶红,赖安伟,赵玉春.2010.地基微波辐射计资料同化对一次特大暴雨过程影响的数值试验研究.暴雨灾害,29(3):201-207.
- 肖志辉,张祖荫,郭伟.2000.地基、空基、星基微波辐射计定标技术概览.遥感技术与应用,15(2):113-120.
- 徐桂荣,孙振添,李武阶,等.2010.地基微波辐射计与 GPS 无线电探空和 GPS/MET 的观测对比分析.暴雨灾害,29(4):315-321.
- 姚作新,吕鸣,贺晓东,等.2011.MP-3000A 型地基微波辐射计在乌鲁木齐探空站的辅助性探测研究.沙漠与绿洲气象,5(1):38-

- 43.
- 伊里哈木,王秋香,贺晓东,等. 2009. L 波段与 59-701 系统高空对比观测资料特征分析. *沙漠与绿洲气象*,3(5):50-53.
- 赵伯林,尹宏,李慧心,等. 1980. 微波遥感大气层结的原理和实验. *中国科学(A 辑)*, (9):874-882.
- 赵玲,马玉芬,张广兴,等. 2009. MP-3000A 微波辐射计的探测原理及误差分析. *沙漠与绿洲气象*,3(5):54-57.
- 赵玲,马玉芬,张广兴,等. 2010. 地基 35 通道微波辐射计观测资料的初步分析. *沙漠与绿洲气象*,4(1):56-58.
- 赵雅静,齐麟,王能根. 2010. 微波辐射计对强对流天气的指示性研究. 第 27 届中国气象学会年会灾害性天气研究与预报分会场论文集.
- 张志红,周毓荃. 2010. 一次降水过程云液态水和降水演变特征的综合观测分析. *气象*,36(3):83-89.
- 周嵬,吴宏议,田海军. 2011. 基于微波辐射计资料浅析对流降水云内与环境温差. *干旱气象*,29(1):10-16.
- 周秀骥. 1983. 大气微波辐射及遥感原理. 北京:科学出版社,178.
- 周玉驰. 2003. 地基多通道微波辐射计反演大气温湿廓线的研究. 北京:中国气象科学研究院,27-38.
- Chen H B. 1998. A method for calibration the ground-based triple-channel radiometer. *ICMMT'98*,1045-1048.
- Gailiano J A. 1990. A downward looking advanced microwave precipitation radiometer (AMPR) for high altitude airborne measurements. *Proc of 1990 Southeastcon*,899-902.
- Hill G E. 1991. Measurement of atmospheric liquid water by a ground-based single-frequency microwave radiometer. *J Atmos Oceanic Technol*,8(5):685-690.
- Hogg D C,Decker M T,Guiraud F O,et al. 1983. An automatic profiler of the temperature,wind and humidity in the troposphere. *J Appl Meteor*,22(5):807-831.
- Ivanova K,Clothiaux E E,Shirer H N,et al. 2002. Evaluating the quality of ground-based microwave radiometer measurements and retrievals using detrended fluctuation and spectral analysis methods. *J Appl Meteor*,41(1):56-68.
- Leipper D F. 1994. Fog on the U. S. West Coast. *Bulletin of AMS*,75(2):229-240.
- Liu G R,Liu C C,Kuo T H. 2001. Rainfall intensity estimation by ground-based dual-frequency microwave radiometers. *J Appl Meteor*,40(6):1035-1041.
- Wang Y,Qian H,Song J J,et al. 2008. Verification of the T213 global spectral model of China National Meteorology Center over the East-Asia area. *J Geophys Res*,113, D10110, doi: 10. 1029/2007JD008750.
- Ware R,Alber C,Rocken C,et al. 1997. Sensing integrated water vapor along GPS ray paths. *Geophys Res Lett*,24:417-420.
- Westwater E,Crewell S,Mätzler C,et al. 2005. Principles of surface-based microwave and millimeter wave radiometric remote sensing of the troposphere. *Quaderni Della Societa Italiana Elettromagnetismo*.
- Wilso W J,Howard R J,Ibbott A C,et al. 1986. Millimeter-wave imaging sensor. *IEEE Trans MTT*,34(10):1026-1035.