

文章编号: 2096-1618(2016)02-0156-12

# 北京地区 HTG-3 型微波辐射计资料的定量分析

范 艺<sup>1</sup>, 张 杰<sup>1,2</sup>, 朱克云<sup>1</sup>, 何 毅<sup>1,3</sup>, 许五保<sup>4</sup>

(1. 成都信息工程大学大气科学学院 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225; 2. 成都军区空军气象中心, 四川 成都 610041; 3. 中国人民解放军 96211 部队, 四川 成都 610225; 4. 北京爱尔达电子设备有限公司, 北京 100000)

**摘要:**微波辐射计资料具有高时空密度优势,但受辐射原理限制,使用地域不同,厂家工艺及型号差异影响,导致数据质量存疑,使其在气象业务工作中的应用受到限制。对辐射计数据的可靠性和可用性进行全面研究,充分发挥其应用优势,服务于气象业务和研究,具有重要的现实意义。利用 2014 年 7、8 月爱尔达 HTG-3 型微波辐射计探测数据,参考北京南郊观象台气球探空资料,采用时间同步和高度同步方法,进行辐射计资料的定量分析。结果表明:(1)温湿基础数据的相关性整体表现为低层优于高层,温度在 300 hPa 以下各标准层的相关系数均 $>0.80$ , 500 hPa 以下各标准层露点和水汽密度的相关系数均 $>0.75$ ;(2)700 hPa 以下各标准层温度、1000 hPa 露点和水汽密度与探空值基本相当,可直接定量使用,其余数据则需进行订正后使用;(3)除雷暴天外 700 hPa 以下各标准层温度、1000 hPa 的露点以及晴、阴、雨天 1000 hPa 的水汽密度与探空值基本一致,可替代使用,其余数据需进行订正后使用;(4)温度廓线和水汽密度廓线的一致性较好,露点廓线较差,温度廓线按优排序为晴、雾、阴、雨、雷暴天,露点廓线按优排序则正好相反;(5)辐射计探测得到的各气象要素随高度演变的廓线存在平滑现象;(6)除 EL 外的重要层结高度,VT、TT 及 SI 等的相对误差在 $\pm 10\%$ 左右,基本可以定量使用外,其余参数均需视情况进行订正或根据辐射计自身特点重新推导对应参量的计算公式。

**关键词:**大气探测;地基遥感;微波辐射计;气球探空;物理量参数;定量分析

**中图分类号:**TP372

**文献标志码:**A

## 0 引言

目前中国探空站的布局无法达到监测中小尺度天气系统的空间要求,每日早 7 时和晚 19 时的探测,也不能满足短临预报的时间要求。微波辐射计作为被动式气象遥感设备,可以提供由地面至 10 km 高度上连续的大气温湿信息<sup>[1]</sup>,增加空中探测的时空密度,特别是极大地加密了时间密度,这正是精细天气预报迫切需要的。

Bevis 等<sup>[2]</sup>提出应用地基微波辐射计获取高时空分辨率的大气温度和水汽分布信息的全新方法;Vladislav Klaus 等<sup>[3]</sup>利用超高频风廓线雷达和辐射计组合的地基综合探测系统对大气湿度廓线的变化进行了讨论,指出在一定探测范围内由辐射计处理得到湿度资料可靠性略差;N Sengupta 等<sup>[4]</sup>利用风廓线雷达和辐射计协同探测低对流层大气的资料进行了湿度廓线的分析和讨论,并与常规探空资料比对发现具有很好的相关性;K. Knupp 等<sup>[5]</sup>研究发现,与无线电探空仪相比,辐射计可提供更高分辨率的热力学资料,且随着高度的增加数据可靠性将降低,并通过讨论其采集

的数据说明辐射计的实用价值。

中国关于辐射计的研究始于 20 世纪 70 年代初,现已取得一系列有价值的成果<sup>[6-14]</sup>,但至今仍还处于研究或试用阶段。作为高空温湿要素的新型探测设备,辐射计资料具有高时空分辨率的优势,但其气象业务应用尚需进行大量的分析论证。

将 2014 年 7、8 月北京南郊观象台(站号:54511)气球探空资料作为标准值,选取对应时间的 HTG-3 型辐射计资料,进行定量对比分析,对于评估该型辐射计的数据质量,论证其资料定量应用的可靠性,具有重要的现实意义和参考价值。

## 1 资料与方法

### 1.1 使用资料

使用 2014 年 7、8 月北京南郊观象台气球探空资料共计 109 组,包含标准层和特性层数据,其中 08 时资料 54 组,20 时资料 55 组,使用资料的时制均为北京时间。

选取与上述探空对应时间的 HTG-3 型微波辐射计温湿数据,并通过使用 Micaps 气象业务系统中常用

的物理量参数公式,计算了对应的辐射计物理量参数。该型辐射计由北京爱尔达公司(Airda)生产,空间垂直分辨率在50 m以下为20 m;50 ~ 375 m为25 m;325 ~ 700 m为75 m;700 ~ 1000 m为100 m;1000 ~ 1600 m为150 m;1600 ~ 2200 m为200 m;2200 ~ 3100 m为300 m;3100 ~ 3900 m为400 m;3900 ~ 4400 m为500 m;4400 ~ 6200 m为600 m;6200 ~ 7000 m为800 m;7000 ~ 10000 m为1000 m。其他参数见表1。

表1 HTG-3 型微波辐射计的主要参数

参数	指标
采样速率	1 s
天线波束分辨率	3.5°(湿度廓线探测)、1.8°(温度廓线探测)
全天空测绘能力	5 min
边界层温度精度	0.25K RMS
液态水廓线技术	PARCWAPT 专家系统
季节性检索/反演支持	√
绝对定标时间	2 min
绝对定标间隔	6 months
长期亮温(TB)漂移	0.2 K/year
反演技术	DDFA
通道	14、固定、并行扫描
廓线通道	7(湿度)、7(温度)
产品类型	温度、湿度、水汽总含量、云垂直液态水含量等

1.2 分析方法

开展辐射计和气球探空资料的比对,应在两种资料时空一致的前提下进行,所以对这些资料先进行时间和空间的相应处理,然后再对数据进行对比分析。

1.2.1 时间同步

根据探空球施放时间为早 07:15 时和晚 19:15 时,按400 m/min的上升速度计算,可得到达各标准气压层的耗时。例如,从早上 07:15 时放球起计算,到达700 hPa的耗时约为8 min,故选取 07:23 时的辐射计700 hPa资料与之进行对比,保证比对数据的时间一致(图1)。

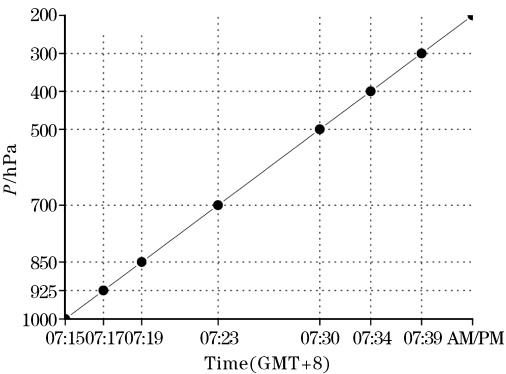


图1 探空气球到达各标准层的时间示意图

1.2.2 高度同步

HTG-3 型辐射计温湿数据从地面到高空10000 m(对应气压为1013.25 ~ 264.43 hPa)共计39层,并没有直接给出各标准层的数据,需要进行插值才能得到。目前常用的数学软件主要提供4种一维插值方法:最邻近插值(nearest)、线性插值(linear)、三次样条插值(spline)和立方插值(cubic)。考虑不同插值方法的准确度,选用三次样条插值方法进行处理,保证比对数据的高度一致。

1.2.3 比对要素

比对要素包括:1000 ~ 300 hPa的温度、露点、水汽密度及各类物理量参数。其中,由于气球探空无法直接获取水汽密度资料,采用公式(1)<sup>[15]</sup>进行计算

$$\rho_v = \frac{\varepsilon e}{R_d T}$$
 (1)

式中 $\rho_v$ 是水汽密度,单位为g/m<sup>3</sup>;  $\varepsilon$ 为0.622;  $e$ 为水汽压,单位为hPa;  $R_d$ 为干空气的比气体常数,值为0.287 J/kg;  $T$ 为绝对温度,单位为K。

1.2.4 分类方法

考虑到探测时间和天空状况的不同对辐射计数据质量产生影响,下面分2类进行对比分析,第一类不考虑天空状况,只考虑时间,将探测资料按08时、20时分别进行比对;第二类不考虑时间,只考虑天空状况,根据08时、20时不同的天空状况和天气现象观测记录,按照有、无对流天气过程作为标准,选取晴(总云量≤3成)、雾(水平能见度<10 km)、阴(中低云量≥8成)作为无对流天气背景;有对流天气过程又按其强弱程度,分雨和雷暴进行分析。最后,按重要层结高度、能量及雷暴指数、稳定度指数等进行物理量参数<sup>[16]</sup>的定量分析。

1.2.5 误差标准

为准确评估辐射计资料质量,通过引入衡量两随机变量之间线性相关程度的相关系数CC、体现设备由于结构不完善或未经标校等原因而产生的系统误差SE、反映测量值准确度的平均偏差AD以及说明偏差占比的相对误差RE进行分析,公式如下:

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$
 (2)

$$SE = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)}{n}$$
 (3)

$$AD = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|}{n}$$
 (4)

$$RE = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|x_i - y_i|}{y_i}}{n} \tag{5}$$

其中,  $x_i$  为辐射计测量值、 $\bar{x}$  为辐射计测量平均值;  $y_i$  为气球探空值、 $\bar{y}$  为气球探空平均值;  $n$  为探测次数。

2 基础数据分析

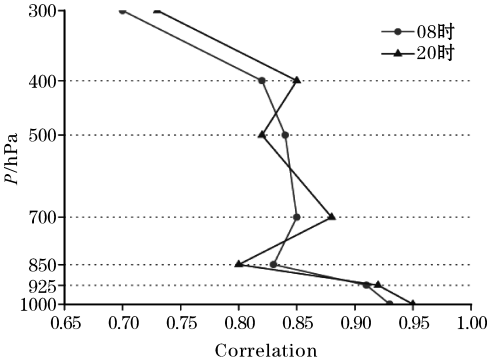
为更好地找出 HTG-3 型辐射计与气球探空的资料异同,探究其定量应用的价值,下面针对温湿基础数据中的温度、露点和水汽密度进行比对研究。

2.1 相关性分析

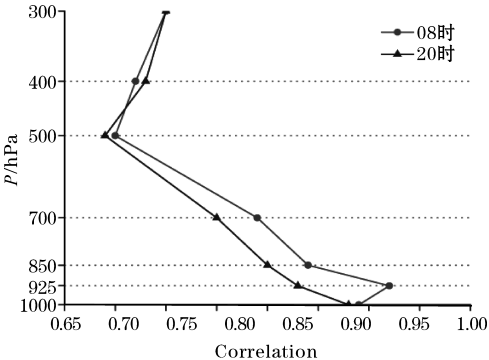
为验证两型数据的相关性,同时消除日变化影响,将 08 时、20 时的辐射计与气球探空各标准层的温度、露点及水汽密度分别求相关系数,如图 2 所示。从图 2(a)看,辐射计测得的各标准层温度与气球探空值有很好的一致性,低层更为明显,除300 hPa外其余各标准层的  $CC>0.80$ ,其中925 hPa及以下近地层的  $CC>0.90$ ,08 时和 20 时的温度在不同标准层上的  $CC$  互有高低。各标准层露点  $CC$  (图 2b) 在 0.65 ~ 0.95,整体表现为随高度增加  $CC$  减小的趋势,其中 08 时的相关性较好,20 时的相关性略差,这是因为相较于傍晚 20 时,因受夜间地面辐射降温影响,早上 08 时温度更低,温度露点差也越小,反映此时空气的饱和程度更高,相对湿度值越大,且辐射计的露点值是通过相对湿度直接计算得到,说明相对湿度越高可能对于精确计算露点越有利。水汽密度的  $CC$  (图 2c) 范围为 0.58 ~ 0.95,相关性低层明显优于高层,08 时要好于 20 时,与露点整体表现基本一致。综合来看,温度的相关性较好,露点和水汽密度的相关性略差。

2.2 误差分析

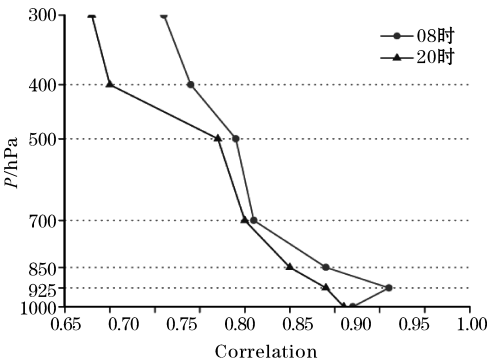
08 时和 20 时的温度、露点以及水汽密度相对误



(a) 温度



(b) 露点



(c) 水汽密度

图 2 各气象要素相关系数

差见表 2,系统误差和平均偏差如图 3 所示。通过分析,资料对比均以  $|RE| \leq 10\%$ ,判定辐射计与气球探空数据基本一致,可直接定量使用。

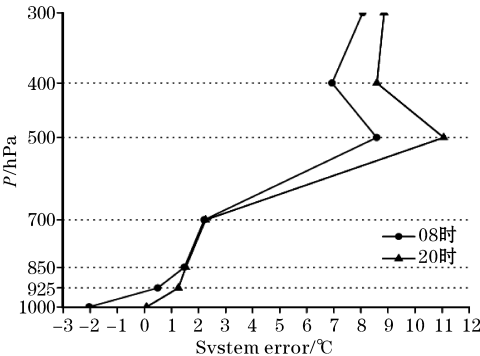
表 2 温度、露点以及水汽密度的相对误差/%

$P/hPa$	08 时			20 时		
	$T$	$Td$	$\rho_v$	$T$	$Td$	$\rho_v$
1000	5.45	11.71	11.88	4.40	8.66	8.70
925	6.76	14.00	15.73	3.91	16.70	14.32
850	7.72	17.84	18.41	6.80	19.43	19.28
700	16.15	-33.66	19.93	14.75	-29.00	17.40
500	-19.44	-35.74	153.99	-19.98	-36.58	181.48
400	-11.88	-25.51	173.92	-12.44	-22.99	199.01
300	-11.31	-18.83	181.37	-11.22	-20.21	220.34

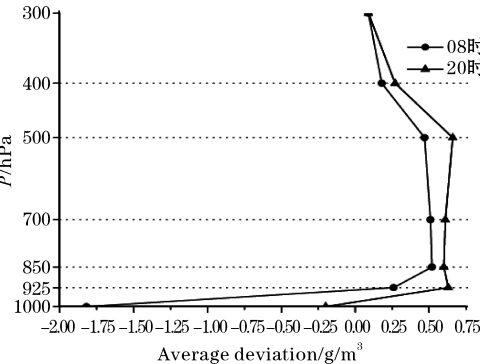
由表 2 知,08 时和 20 时的温度  $RE$  变化规律基本一致,温度在 850 hPa 及以下各标准层的  $RE < 10\%$ ,可认为辐射计与气球探空温度值基本相当,至 700 hPa 起, $RE$  明显增大,其中在 500 hPa 上最大,为  $-19.44\%$  ( $-19.98\%$ , 括号内为 20 时数据,下同)。结合图 3(a) 可见,温度在 850 hPa 及以下标准层  $SE$  为  $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,说明对应该段辐射计测值普遍偏小,700 hPa 以上  $SE$  为正,表明此段辐射计测值普遍更大,至 300 hPa, $SE$  达到最大为  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ )。从图 4(a) 可见,500 hPa 及以下各标准层  $AD$  随高度升高无明显变化,基本保持在  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  以内,300 hPa 处  $AD$  最大为  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

08 时和 20 时各标准层露点的  $RE$  变化规律相似,1000 hPa 的露点  $RE$  为  $11.71\%$  ( $8.66\%$ ),在  $10\%$  左右,大致与探空值相当,随着高度升高  $RE$  呈增大趋势,至 500 hPa 达到最大为  $-33.66\%$  ( $-29.00\%$ ),往上  $RE$  随高度呈递减变化。结合图 3(b),露点除在 08 时 1000 hPa 的  $SE$  为负外,其余  $SE$  均为正,可见辐射计露点值普遍较探空值更大;在 1000 ~ 700 hPa,露点  $SE$  均在  $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内,往上增大明显,至 500 hPa 达到最大,为  $9\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ )。从图 4(b) 可见,700 hPa 及以下各标准层露点的  $AD$  均保持在  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  以内,随高度增加无明显增长;至 500 hPa 显著增大,接近  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ )。

08 时和 20 时各标准层水汽密度的  $RE$  整体表现为随高度增加而增大的趋势,其中 700 hPa 及以下各层的  $RE$  均在  $20\%$  以内,至 500 hPa 及以上各标准层差异明显, $RE$  均超过  $150\%$ ,说明与大气中水汽的垂直分布特征有关。结合图 3(c) 可见,水汽密度除 08 时 1000 hPa 的  $SE$  稍大为  $-1.82\text{ g/m}^3$  外,其余  $SE$  均在  $0 \sim 0.75\text{ g/m}^3$ 。结合图 4(c),由于水汽在垂直向的分布不均匀,08 时和 20 时的  $AD$  由低层到高层整体呈减小趋势,700 hPa 及以下各标准层的平均偏差为  $1 \sim 2.25\text{ g/m}^3$ 。

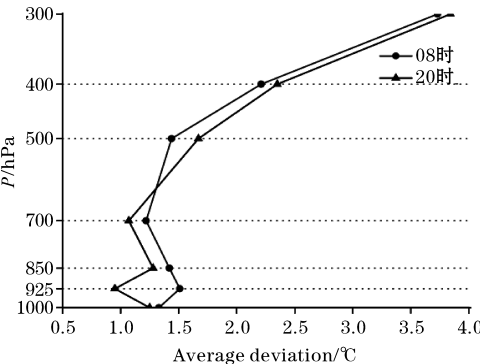


(b) 露点

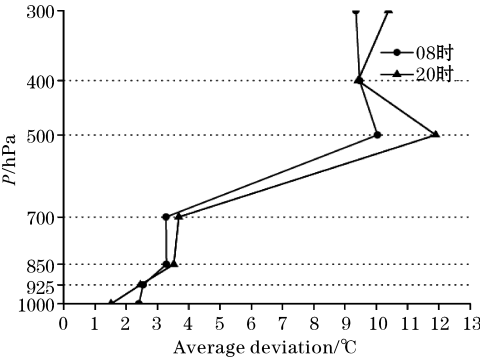


(c) 水汽密度

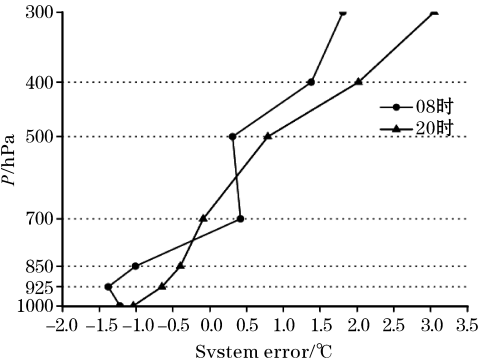
图 3 系统误差



(a) 温度

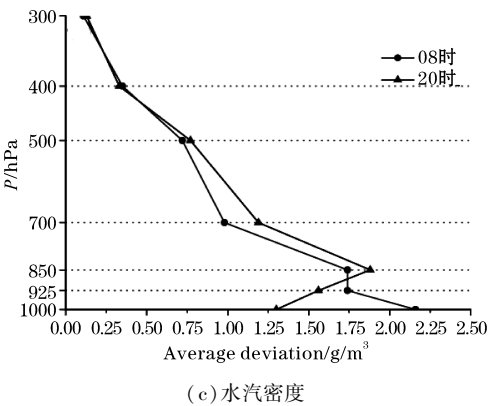


(b) 露点



(a) 温度





(c) 水汽密度

图 4 平均偏差

综上所述,辐射计700 hPa以下各标准层的温度、1000 hPa的露点和水汽密度与探空值基本相当,可直

表 3 不同天气背景下温度、露点以及水汽密度的相对误差/%

P/hPa	晴			雾			阴			雨			雷暴		
	T	Td	$\rho_e$	T	Td	$\rho_e$	T	Td	$\rho_e$	T	Td	$\rho_e$	T	Td	$\rho_e$
1000	3.38	8.73	8.79	7.32	11.47	15.92	4.73	11.77	11.35	4.70	9.36	8.42	3.45	11.19	13.89
925	4.50	22.65	17.87	5.85	7.36	8.03	6.13	17.25	16.18	7.71	14.37	15.37	6.79	17.65	17.58
850	7.15	29.08	22.04	6.59	15.78	13.53	7.78	20.39	19.03	9.85	18.22	19.43	14.24	30.03	36.92
700	15.50	-30.14	16.48	16.77	34.96	13.04	22.72	29.03	16.38	26.27	36.19	19.70	23.70	34.53	15.75
500	-14.15	-38.52	211.67	-18.78	-35.39	131.50	-23.72	-33.32	34.63	-23.35	-35.73	31.41	-29.26	-35.06	58.59
400	-7.99	-30.77	288.16	-8.70	-26.93	173.00	-14.27	-20.78	34.51	-17.88	-11.93	19.13	-23.95	-13.68	34.86
300	-9.98	-22.94	281.53	-7.76	-19.75	165.22	-12.20	-17.55	96.94	-16.39	-15.88	93.52	-17.71	-11.99	73.32

由表 3 知,在 5 种天气背景下,除雷暴天外,温度在700 hPa以下各标准层的  $RE < 10\%$ ,与探空值基本一致;其中,晴天的温度整体误差最小,1000~300 hPa的  $RE$  均在 $\pm 15\%$ 以内,阴、雨、雷暴天的误差较显著,在700 hPa和500 hPa的  $RE$  最大接近30%,说明空中云量的多少对于辐射计温度资料的准确探测有直接影响。结合图 5(a)可见,晴、雾天温度的  $SE$  整体较小,在 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内;阴天  $SE$  在500 hPa以上高度略有增大,整体表现为 $-2\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化;有对流活动的雨、雷暴天,从500 hPa开始  $SE$  增大明显,至300 hPa分别达到 $5.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $6.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。结合图 6(a)可知,晴、雾、阴天温度的  $AD$  由低层到高层整体表现为 $1\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化;雨、雷暴天除925 hPa以下近地层的  $AD$  与上述天气接近外,自850 hPa起偏差随高度的升高增大明显,至300 hPa雨天和雷暴天的温度  $AD$  分别达 $5.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $6.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。

与温度相比,不同天气各标准层露点的  $RE$  整体较大,晴天的露点误差较显著,除1000 hPa外,各标准层  $RE$  在 $20\% \sim 39\%$ ;除晴天外,露点在近地层的  $RE < 20\%$ ,其中,雾天由于近地面空气达到饱和,925 hPa及以下层的  $RE$  在 $12\%$ 以内;不同天气700 hPa和500 hPa的露点差异均较显著,说明冷暖空气交互作用

接进行定量使用,其余数据则需进行适当订正后使用。

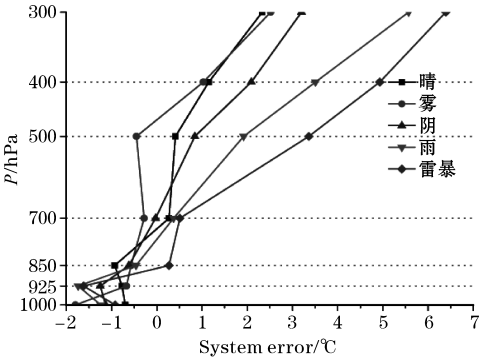
2.3 不同天气背景下的数据分析

7、8月时值夏季,是对流性天气监测的重点时段,为准确了解不同天气背景下辐射计与气球探空数据的差异,现根据08时和20时共计109个时次的天空状况和天气现象的实时纪要,按照晴、雾、阴、雨、雷暴5种天气背景分类进行差异对比;并通过选取上述对应天气个例进行廓线对比。

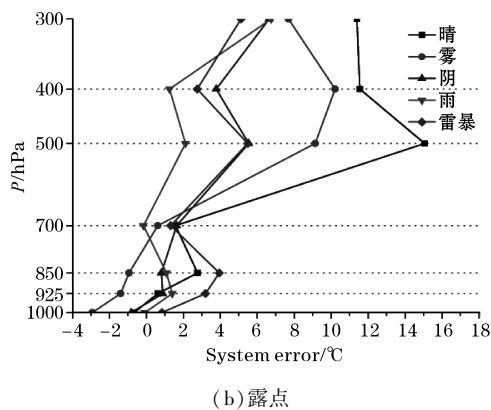
2.3.1 差异对比

与前面相仿,下面也采用相对误差、系统误差和平均偏差对辐射计和探空温湿基础数据进行差异对比。

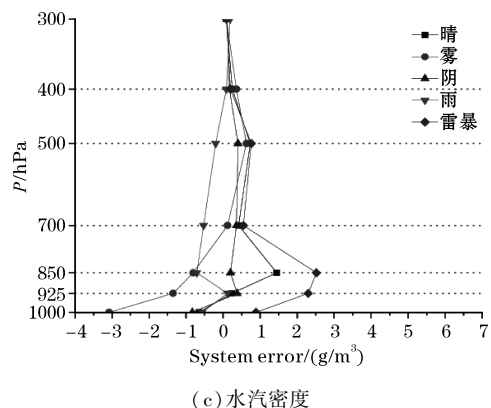
常出现在对流层中层;雨天和雷暴天在400 hPa及以上标准层的  $RE$  明显更小,保持在 $15\%$ 以内,可见空气的饱和程度与辐射计露点资料反演的准确性有关。结合图 5(b)可见,700 hPa及以下各标准层露点的  $SE$  均在 $\pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,往上则存在不同程度的变化,阴、雨、雷暴天  $SE$  为 $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化,而晴、雾天的  $SE$  增长显著,最大分别达到了 $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。结合图 6(b)可知,700 hPa及以下各天气露点的  $AD$  整体差异不大,保持在 $1\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化;至500 hPa往上偏差明显增大,雨、雷暴天变化基本相近为 $4\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;阴天次之,为 $6\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;晴、雾天偏差增大最显著,晴天为 $13\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 16\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,雾天为 $10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。



(a) 温度

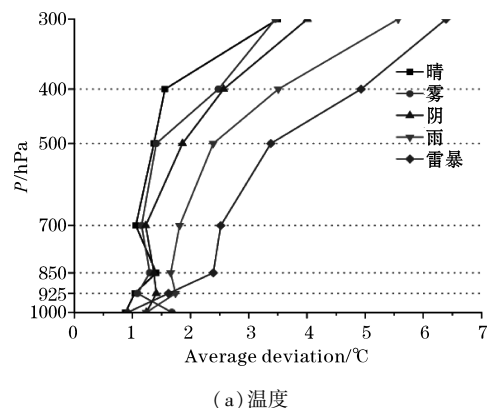


(b) 露点

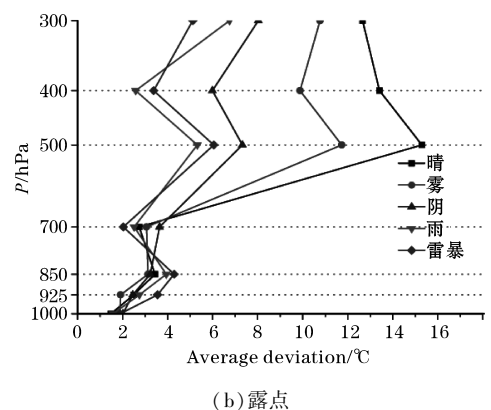


(c) 水汽密度

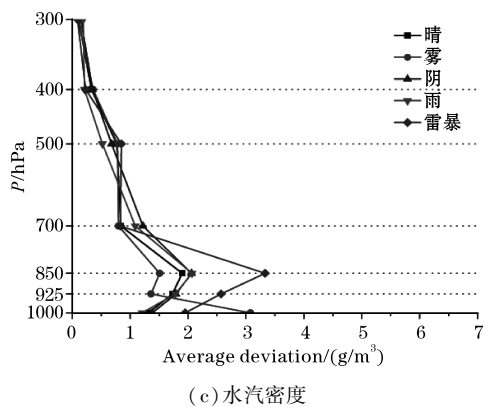
图 5 不同天气背景下各要素的系统误差



(a) 温度



(b) 露点



(c) 水汽密度

图 6 不同天气背景下各要素的平均偏差

仅有晴、阴、雨天1000 hPa水汽密度的  $RE$  在10 % 左右,其余均存在不同程度的差异。其中,除晴、雷暴天外,700 hPa及以下各标准层水汽密度的 $RE \leq 22\%$ ;晴、雾天500 hPa及以上各标准层的  $RE$  尤为突出,分别都超过200 %和100 %;阴、雨天300 hPa以下各标准层的  $RE < 35\%$ ;结合图 5(c) 可见,阴、雨天水汽密度的  $SE$  整体较小,仅为 $\pm 1\text{ g/m}^3$ ;晴、雾、雷暴天700 hPa及以上各标准层水汽密度的  $SE$  基本一致,为 $0 \sim 1\text{ g/m}^3$ ,而低层差异则较为明显,晴天为 $-1 \sim 1.5\text{ g/m}^3$ ,雾天为 $-3 \sim -0.5\text{ g/m}^3$ ,雷暴天为 $1 \sim 2.5\text{ g/m}^3$ 。结合图 6(c) 可见,不同天气700 hPa及以上各标准层的水汽密度  $AD$  大致相近为 $0 \sim 1.5\text{ g/m}^3$ ;低层存在明显差异,晴、阴、雨天随高度升高走势基本一致, $AD$  为 $1 \sim 2\text{ g/m}^3$ ,雾、雷暴天各标准层  $AD$  波动显著,分别为 $1 \sim 3\text{ g/m}^3$ 和 $2 \sim 3.5\text{ g/m}^3$ 。

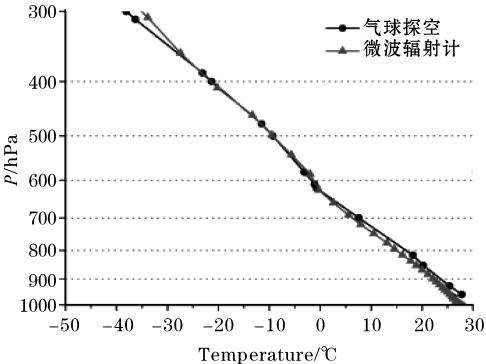
综上所述,除雷暴天外,辐射计测得的700 hPa以下各标准层温度与探空温度值基本相当,其中,晴天整层大气温度的  $RE < 15\%$ ,具有很高的准确性;辐射计测得的1000 hPa的露点与探空露点值基本相当,其中,雾天850 hPa及以下各标准层露点的  $RE < 16\%$ ,雨、雷暴天在400 hPa及以上高度的  $RE$  都在15 % 以内,具有较高准确性;晴、阴、雨天1000 hPa的水汽密度与探空值基本一致,其中,除雷暴天外,700 hPa及以下各标准层水汽密度的  $RE$  都在22 % 以内,具有较高的准确性。所以,对应不同天气的温、湿资料可视情况直接定量应用或进行订正使用。

### 2.3.2 廓线对比

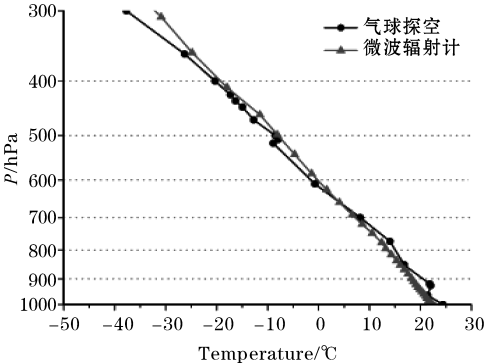
为充分了解辐射计和气球探空在对各气象要素探测上存在的细节差异,现选取以晴、雾、阴、雨、雷暴5种天气为背景的个例,进行1000 ~ 300 hPa温、湿廓线的对比分析。

由图 7 可见,二者温度在不同天气背景下,均随高

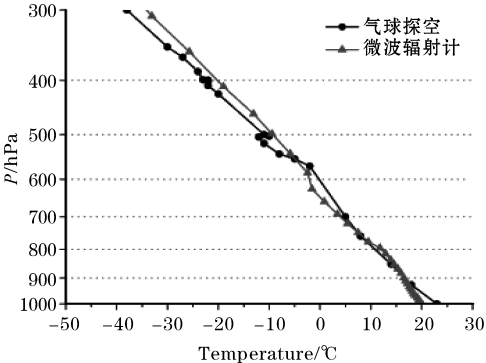
度同时增大或减小,整体趋势大致相同,但一致性存在差异。晴天由低层到高层温度廓线基本吻合,雷暴天则从低层开始就存在一定差异,至700 hPa以上随高度增加差异增大更明显。气球探空可测得不同程度的逆温存在,对应高度上,辐射计资料却很少能看到逆温。二者温度廓线的一致性按优排序为晴、雾、阴、雨、雷暴,这是因为对流活动的强弱以及空中云量的多少对于温度的探测有直接影响,晴朗无云,大气层结稳定,温度的一致性最好;云量较多,对流活动旺盛,出现雷、雨过程,温度廓线则存在明显差异。



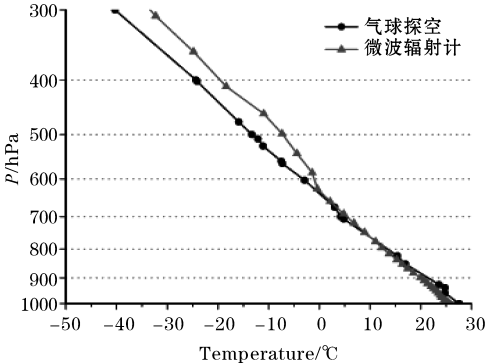
(a) 晴



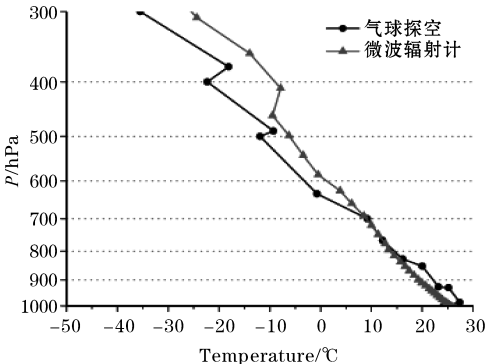
(b) 雾



(c) 阴



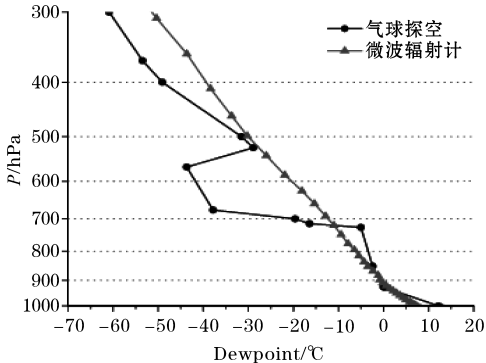
(d) 雨



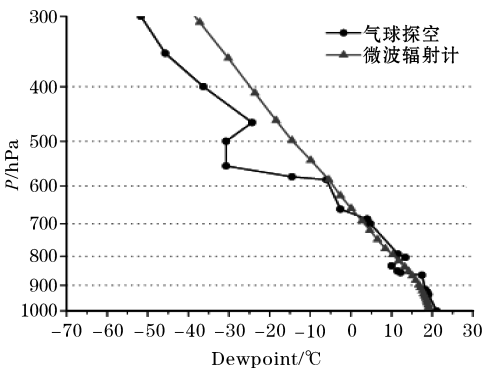
(e) 雷暴

图 7 不同天气背景下温度随气压的分布

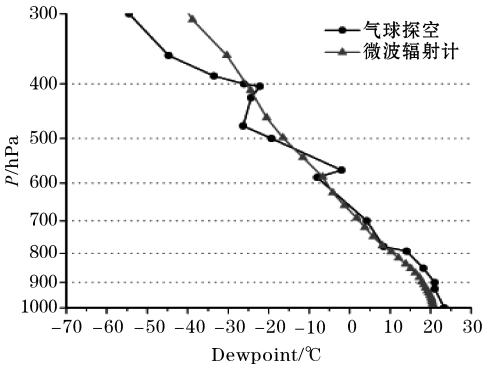
由图 8 可以看出,与温度廓线相比,2 种探空的露点廓线差异显著。出现对流活动的雷、雨天气过程的露点廓线一致性稍好,晴天最差。同时,气球探空露点廓线随高度存在明显的曲折变化,辐射计的露点廓线则略显平直,仅在雷暴天有明显曲折存在。露点廓线一致性按优排序正好与温度相反,为雷雨、阴、雾、晴,这可能与辐射计是通过探测大气相对湿度计算露点有关,空气的饱和程度越高,对于计算露点的精确度越有利。



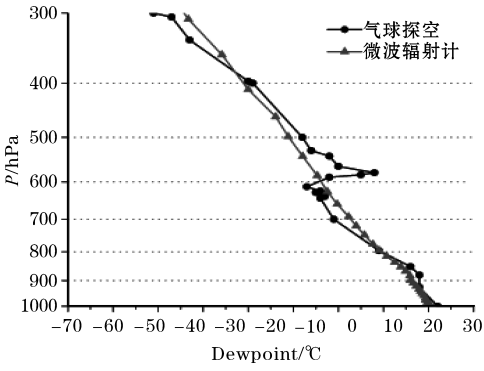
(a) 晴



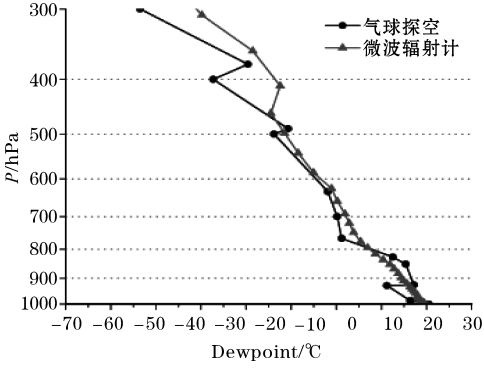
(b)雾



(c)阴



(d)雨

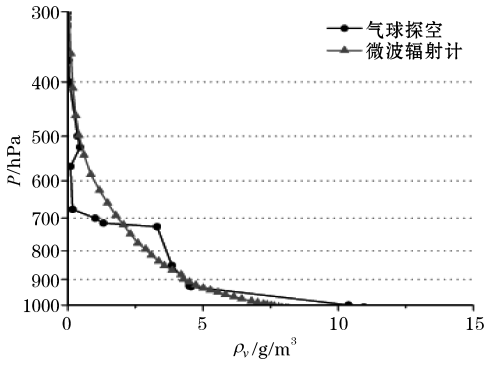


(e)雷暴

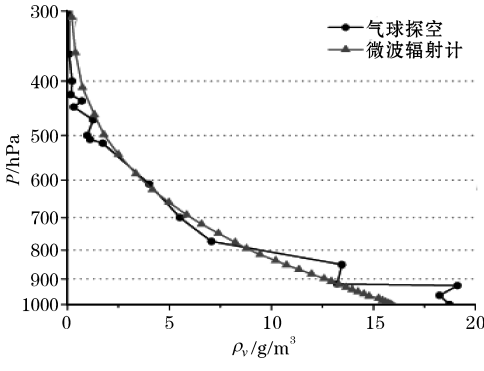
图 8 不同天气背景下露点随气压的分布

由图 9 可以看出,二者水汽密度的变化趋势整体上看基本一致。其中,晴天 2 条水汽密度廓线的一致性最差,阴、雨天的一致性稍好。同样,在不同天气背景下,

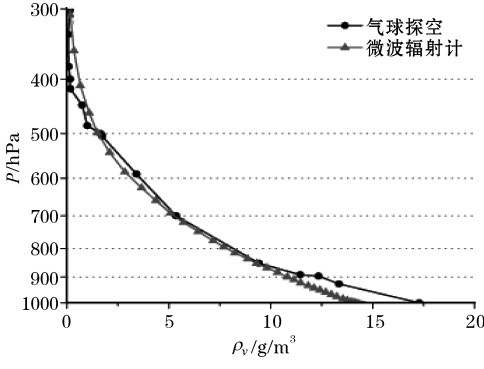
气球探空水汽密度廓线随高度存在一定的曲折变化,而辐射计水汽密度廓线则基本近似为一条平滑的曲线。这表示辐射计的局部湿度特性敏感性不如气球探空,或许是因为辐射计探测的是区间辐射量的累积,不如气球探空在各气层中进行的接触性测量反应敏感。



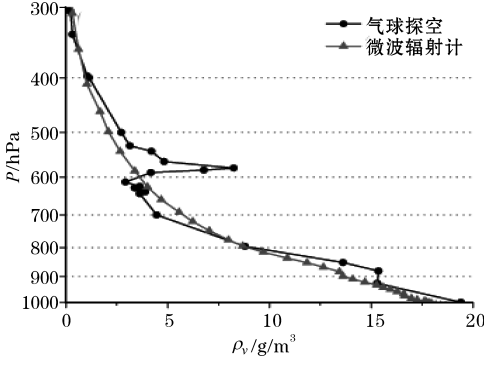
(a)晴



(b)雾



(c)阴



(d)雨



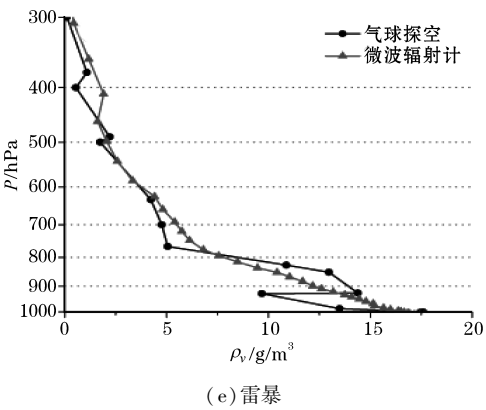


图9 不同天气背景下水汽密度随气压的分布

综上所述,在 5 种天气背景下,温度和水汽密度廓线的一致性较好,露点廓线稍差;晴天的温度廓线,雷、雨天的露点廓线以及阴、雨天的水汽密度廓线一致性较好;辐射计探测的温度、露点和水汽密度廓线均存在一定程度的平滑现象。

表 4 重要层结高度的系统误差、平均偏差及相对误差

	08 时			20 时			所有		
	SE	AD	RE/%	SE	AD	RE/%	SE	AD	RE/%
LCL/hPa	-10.01	22.72	2.48	9.98	27.70	3.36	6.38	25.07	2.90
CCL/hPa	-37.17	56.14	6.76	8.18	37.28	4.95	-15.26	47.18	5.89
LFC/hPa	-54.79	154.34	19.25	3.70	73.57	10.38	-0.43	86.62	11.85
EL/hPa	215.60	215.60	82.34	107.1	129.3	53.15	121.65	140.81	56.16
ZLH/m	-97.42	216.51	4.99	-133.14	190.41	4.26	-115.78	203.16	4.62

由表 4 可以看出,08 时的上述重要层结高度除 EL 外,其余 SE 均为负值,表明辐射计计算得到的 EL 值较气球探空大,而其余高度值则普遍偏小,由 EL 的 SE 和 AD 值一致,说明 08 时的 EL 值平均比气球探空大 215.60 hPa;而 20 时的上述重要层结高度除 ZLH 外,其余 SE 均为正值,表明辐射计计算得到的 ZLH 值普遍较气球探空偏小,而其余高度值则更大。除 LCL 外,其余层结高度 08 时的 AD 均较 20 时更大,EL 的误差最大,RE 平均达到 56.16 %,LCL 误差则相对最小,RE 平均仅为 2.90 %。

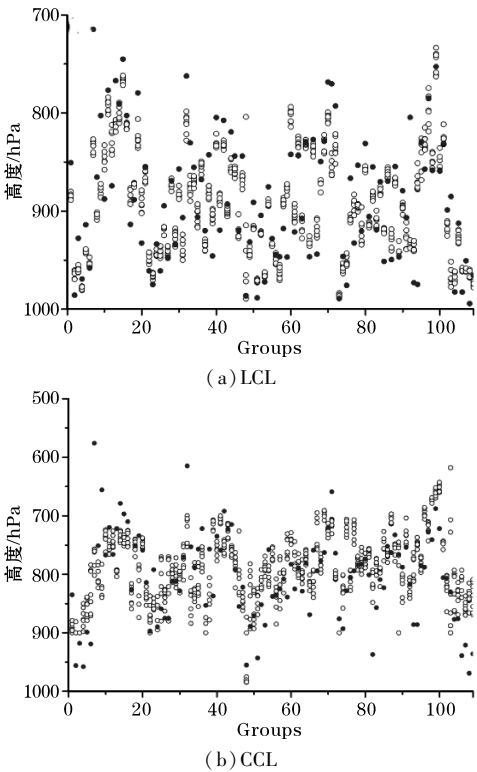
结合图 10 可见,辐射计资料计算得到的各组次 LCL、CCL 以及 ZLH 空心点分布较为紧密,表明对于该值的计算比较稳定;而 EL 的散点分布相对分散,表明该值计算存在明显的波动。同时,可见表征气球探空 LCL、CCL 以及 ZLH 的实心点普遍都处在对应组次的辐射计散点范围内,说明二者吻合度很好;而 EL 实心点基本游离于辐射计散点以外,说明二者一致性较差。

3 物理量参数对比

每日 08 时和 20 时的气球探空物理量参数是短临预报业务工作中的重要工具,而辐射计可全天候采集数据,通过使用与 Micaps 系统中一致的物理参量计算公式,在放球作业始、末时段内,可得到多组次辐射计物理量参数,为更好地进行比较,现以气球探空物理量参数作为标准值,通过计算辐射计各物理量参数的均值进行对比分析。

3.1 重要层结高度

大气层结高度在气象业务和研究中得到广泛使用,下面就抬升凝结高度(LCL)、对流凝结高度(CCL)、自由对流高度(LFC)、平衡高度(EL)和零度层高度(ZLH)进行对比分析。



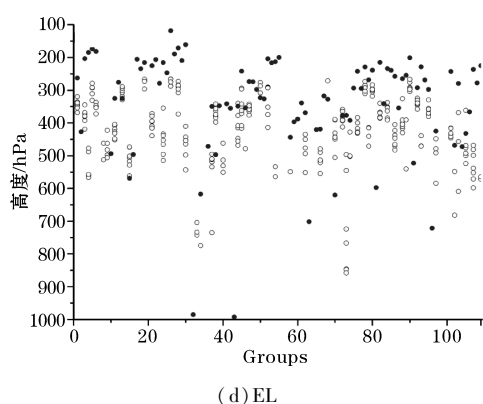
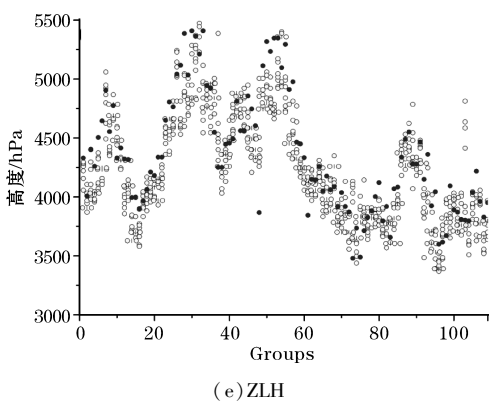
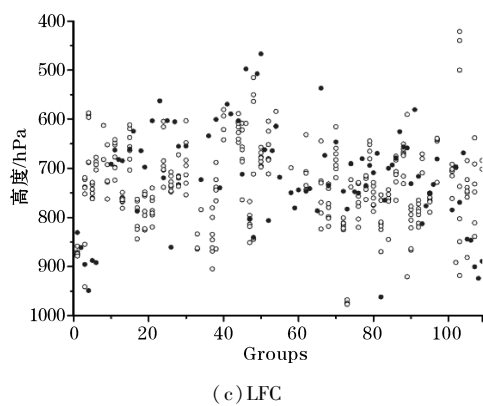


图 10 辐射计(空心)和气球探空(实心)重要层结高度的散点分布

综合来看,由于 EL 的高度较高,通常对应400 hPa 及以上高度,辐射计测量数据精度明显降低,同时还受到 EL 比对样本数的影响,所以导致误差更大,而其余层结高度基本处在对流层的中低层,辐射计测量数据准确度更高,所以误差更小。

3.2 能量及雷暴指数

能量及雷暴指数对于强对流天气的预报有着有显著的指示作用,下面对常用的对流有效位能(CAPE)、对流抑制能量(CIN)、K 指数(K)、S 指数(S)、交叉总指数(CT)、垂直总指数(VT)、全总指数(TT)进行对比。

表 5 能量及雷暴指数的系统误差、平均偏差及相对误差

	08 时			20 时			所有		
	SE	AD	RE/%	SE	AD	RE/%	SE	AD	RE/%
CAPE/J/kg	-444.51	445.47	98.05	-391.01	496.26	71.97	-420.72	477.10	84.57
CIN/J/kg	-190.88	205.16	102.56	-109.57	167.86	88.99	-148.53	185.73	95.19
K/℃	1.45	4.33	16.72	1.95	4.18	17.36	1.67	4.25	17.05
S/℃	3.35	6.31	22.45	4.69	5.85	21.84	4.03	5.96	22.14
CT/℃	0.89	3.10	21.44	0.68	3.10	21.14	0.79	3.10	21.28
VT/℃	-1.48	2.29	8.47	-1.06	2.14	7.79	-1.27	2.21	8.13
TT/℃	-0.85	4.13	9.34	-0.64	3.24	7.47	-0.74	3.68	8.73

由表 5 可以看出,08 时和 20 时能量指数以及雷暴预报指数中的 VT、TT 的 SE 均为负值,表明辐射计计算值普遍较气球探空偏小,而其余 SE 均为正值,则表明对应计算值普遍更大。08 时和 20 时 CAPE 和 CIN 的 AD 分别>400 J/kg、>150 J/kg,RE 平均分别为 84.57 % 和 95.19 %,表明能量指数差异显著。20 时雷暴指数的 AD 均较 08 时更小,说明指数的演变与基础数据的日变化相关,其中 VT 的 AD 最小,平均为 2.21 ℃,RE 仅为 8.13 %;S 的 AD 最大为 5.96 ℃,RE 平均为 22.14 %。

综合来看,CAPE 和 CIN 的平均 RE 均在 80 % 以上,且普遍较气球探空值更低;雷暴指数的 RE 则明显更小,<23 %,其中 VT、TT 的 RE<10 %,可直接使用。

3.3 稳定度指数

下面对常用的表征大气层结稳定度的沙氏指数(SI)、抬升指数(LI)、KO 指数(KO)以及假相当位温差( $\Delta\Theta_{s_{1000\sim850}}$ 、 $\Delta\Theta_{s_{850\sim700}}$ 、 $\Theta_{s_{850\sim500}}$ )进行对比。

表 6 稳定度指数的系统误差、平均偏差及相对误差

	08 时			20 时			所有		
	SE	AD	RE/%	SE	AD	RE/%	SE	AD	RE/%
SI/℃	0.30	2.57	-7.65	0.04	2.12	-13.28	0.17	2.35	-10.91
LI/℃	3.67	4.07	-44.16	0.78	1.77	-23.19	2.21	2.91	-31.45
KO/K	2.87	3.89	-33.79	-0.62	3.39	-25.19	1.11	3.63	-29.37
$\Delta\Theta_{s_{1000\sim850}}/K$	-6.39	7.77	96.17	-4.61	6.86	73.18	-5.49	7.31	85.02
$\Delta\Theta_{s_{850\sim700}}/K$	-2.84	5.04	41.2	-0.01	6.92	40.03	-1.41	6.00	40.60
$\Delta\Theta_{s_{850\sim500}}/K$	-4.04	6.79	52.58	-2.62	7.27	43.04	-3.32	7.03	47.81

由表 6 可以看出,除 20 时 KO 的 SE 为负外,SI、LI、KO 的其余 SE 均为正值,表明上述值普遍较气球探空更大,而假相当位温差的 SE 均为负值,则表明对应值普遍偏小。08 时 SI、LI、KO 的 AD 均较 20 时略大,说明指数的演变与基础数据的日变化相关,其中 SI 的误差最小,AD 平均为 2.35℃,RE 为 -10.91%;LI 和 KO 的误差略大。假相当位温差的整体差异则更为显著,误差最小的  $\Delta\Theta_{s_{1000\sim850}}$  的 AD 平均都为 6 K,RE 为 40.60%。

综合来看,稳定度指数中除 SI 基本可直接进行定量使用外,其余参数都需要根据误差进行适当订正后才能定量使用。

上述利用辐射计资料直接使用气球探空物理量参数计算公式得到参量中,除 EL 外的重要层结高度、雷暴指数中的 VT、TT 以及稳定度指数中的 SI 的 RE 在  $\pm 10\%$  左右,基本可以定量使用外;其余物理量参数 RE 均超过 10%,CIN 值的 RE 最大接近 100%,都需要视情况进行订正或根据辐射计自身特点重新设定对应参量的计算公式。

4 结论

(1) 辐射计和气球探空温湿数据的相关性整体为低层优于高层,其中温度相关性较好,除 300 hPa 外其余各标准层相关系数均  $>0.80$ ;500 hPa 以下各标准层露点和水汽密度的相关系数均  $>0.75$ 。

(2) 辐射计探测得到的 700 hPa 以下各标准层的温度、1000 hPa 的露点和水汽密度与探空值基本相当,可在气象业务或研究中直接使用;其余误差较大的温湿资料需要进行订正后使用。

(3) 除雷暴天外,辐射计测得的 700 hPa 以下及晴、雾天 500 hPa 以上各标准层的温度与气球探空值基本相当;1000 hPa 的露点与探空值均基本一致;晴、阴、雨天 1000 hPa 水汽密度也与探空值大致相同,上述资料可直接进行定量使用,其余数据需视情况订正使用。

(4) 二者温度及水汽密度廓线的一致性较好,露

点廓线的差异较大,晴天温度廓线最接近,雷雨天的露点廓线差异很小,阴雨天的水汽密度廓线则最为一致;温度廓线的一致性按优排序为晴、雾、阴、雨、雷暴,露点廓线按优排序则正好相反。

(5) 辐射计探测的温度、露点和水汽密度廓线往往不能如气球探空完整地反映出相应气象要素随高度的曲折变化特征,即各气象要素廓线存在平滑和模型化的现象,说明反演算法尚需改进。

(6) 除 EL 外的重要层结高度、雷暴指数中 VT、TT 以及稳定度指数中 SI 等的相对误差在  $\pm 10\%$  左右,按照气球探空的物理量参数标准,基本可以定量使用外,其余参数均需视情况进行订正或根据辐射计自身特点重新推导对应参量的计算公式。

参考文献:

[1] 李耀东,刘健文,高守亭. 动力和能量参数在强对流天气预报中的应用研究[J]. 气象学报, 2004,62(4):401-406.

[2] Bevis M, Businger S, Hecrring T A. Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system[J]. GPS meteorology, 1992,97(14): 15787-15801.

[3] Vladislav Klaus, Laura Bianco, Catherine Gaffard, et al. Combining UHF radar wind profiler and microwave radiometer for the estimation of atmospheric humidity profiles[J]. Meteorologische Zeitschrift, 2006,15(1):87-97.

[4] N Sengupta, I A Glover. Refractivity and Humidity Profiling using Wind Profiler and Microwave Radiometer Observations for the Inference of Radio Ducts[Z]. The 28th General Assembly of the International Union of Radio Science, 2005.

[5] K Knupp, R Ware, D Cimini, et al. Ground-Based Passive Microwave Profiling during Dynamic Weather Conditions[J]. J. Atmos. Oceanic Tech-

- nol,2009,26:1057-1073.
- [6] 朱元竞,胡成达,甄进明,等.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):597-602.
- [7] 姚志刚,陈洪滨.七通道辐射计遥感大气温度廓线的性能分析[J].气象科学,2005,25(2):133-141.
- [8] 刘红燕,王迎春,王京丽,等.由地基辐射计测量得到的北京地区水汽特性的初步分析[J].大气科学,2009,33(2):389-395.
- [9] 赵玲,马玉芬,张广兴,等. MP-3000A 辐射计的探测原理及误差分析[J].沙漠与绿洲气象,2009,3(5):54-47.
- [10] 刘建中,张菁.辐射计反演产品评价[J].气象科技,2010,38(3):325-330.
- [11] 魏东,孙继松,雷蕾,等.用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[J].气候与环境研究,2011,16(6):697-706.
- [12] 卢会国,李国平,蒋娟萍.阳江国际探空试验的GPS,探空,辐射计水汽资料对比分析[J].气象科技,2014,42(1):158-163.
- [13] 张文刚,徐佳荣,颜国跑,等.辐射计与探空仪测值对比分析[J].气象科技,2014,42(5):737-741.
- [14] 李娜,张武,陈艳,等.基于辐射计的大气温湿廓线遥感探测[J].兰州大学学报:自然科学版,2015,51(1):61-71.
- [15] 盛裴轩,毛节泰,李建国,等.大气物理学[M].北京:北京大学出版社,2003.
- [16] 刘建文,郭虎,李耀东,等.天气分析预报物理量计算基础[M].北京:气象出版社,2005.

## The Quantitative Analysis of HTG-3 Microwave Radiometer Data in the Beijing Area

FAN Yi<sup>1</sup>, ZHANG Jie<sup>1,2</sup>, ZHU Ke-yun<sup>1</sup>, HE Yi<sup>1,3</sup>, XU Wu-bao<sup>4</sup>

(1. Plateau Atmospheric and Environmental Laboratory, College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. The Meteorological Center of Air Force, Chengdu Military Region, Chengdu 610041, China; 3. The 96211 Troop of PLA, Chengdu 610225, China; 4. Beijing Airda Electronic Equipment Co. LTD, Beijing 100000, China)

**Abstract:** Microwave radiometer data has advantage of high temporal density, however, because the restriction of radiation principle, use of different areas, the differences in the process of factories and models, leading to some questions about data quality, the data is restricted in the application of meteorological services. In order to give full play to the advantages of microwave radiometer data, servicing for the meteorological service and research, it is of great importance to study the microwave radiometer data roundly. In this paper, using the HTG-3 microwave radiometer detecting data and conventional sounding data at Beijing meteorological station (ID:54511) during July to August in 2014, adopting the method of time synchronization and height synchronization, making the quantitative analysis of microwave radiometer data. The result shows that firstly the correlation of temperature and humidity data between microwave radiometer and balloon sounding is better in low altitude than high altitude. Under 300 hPa height, the correlation coefficient of temperature is greater than 0.8. Under 700 hPa height, the correlation coefficient of dew-point temperature and water vapor density is more than 0.75. Secondly, the temperature under 700 hPa, the dew point and the water vapor density of 1000 hPa is almost the same with balloon sounding, it can be used directly, the rest of radiometer data need to be used after correction. Thirdly, the temperature under 700 hPa in addition to the thunderstorm day, the dew point of 1000 hPa and the water vapor density of 1000 hPa in addition to the fog and thunderstorm day is almost the same with balloon sounding, it can be used directly, the rest of radiometer data need to be used after correction. The following, the consistency of temperature profile and water vapor density profile is better, but the consistency of dew point profile is slightly worse. From good to bad sort, the correlation of temperature is sunny day, fog, cloudy day, rainy day and thunderstorm day. For dew-point data, the sequence is opposite. Moreover, these meteorological element profiles which detected by microwave radiometer have the phenomenon of smooth and model. Finally, in these physical parameters of microwave radiometer which calculated by formulas of conventional sounding, the relative error of LCL, CCL, LFC, ZLH, VT, TT and SI is less than 10%, the above parameters can be used quantitatively, the others need to be revised or resetting the corresponding formula according to the characteristics of microwave radiometer.

**Key words:** atmospheric sounding; ground-based remote sensing; microwave radiometer; conventional sounding; the physical parameters; quantitative analysis